分类号：　　密　　级：

学　号：2012104011　　单位代码：10759

石河子大学

硕士学位论文



伊犁黄土滑坡特征、成因及稳定性分析

学位申请人　刘　毅

指导教师　程建军教授

申请学位门类级别　工学硕士

学科、专业名称　水利水电工程

研究方向　水利水电施工与管理

所在学院　水利建筑工程学院

中国·新疆·石河子

2015 年 5 月

分类号：　　密　　级：

学　号：2012104011　　单位代码：10759

石河子大学

硕 士 学 位 论 文

伊犁黄土滑坡特征、成因及稳定性分析

学 位 申 请 人　刘　毅

指 导 教 师　程建军教授

申请学位门类级别　工学硕士

学科、专业名称　水 利 水 电 工 程

研 究 方 向　水利水电施工与管理

所 在 学 院　水利建筑工程学院

中国·新疆·石河子

2015 年 5 月

Analysis of geological features, cause and stability of the loess landslide in Ili

A Dissertation Submitted to

Shihezi University

In Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master of Engineering

By

Liu Yi

(Hydropower engineering)

Dissertation Supervisor: Prof. Cheng Jian-jun

May, 2015

石河子大学学位论文独创性声明及使用授权声明

学位论文独创性声明

本人所呈交的学位论文是在我导师的指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含其他个人已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中作了明确的说明并表示谢意。

研究生签名：刘毅　　时间：2015 年 6 月 7 日

使用授权声明

本人完全了解石河子大学有关保留、使用学位论文的规定，学校有权保留学位论文并向国家主管部门或指定机构送交论文的电子版和纸质版。有权将学位论文在学校图书馆保存并允许被查阅。有权自行或许可他人将学位论文编入有关数据库提供检索服务。有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

研究生签名：刘毅　　时间：2015 年 6 月 7 日

导师签名：程王芳　　时间：2015 年 6 月 7 日

摘　要

伊犁位于新疆维吾尔自治区西部，是我国西北黄土滑坡分布广泛的地区之一。长期以来，黄土滑坡的发生，掩埋村庄、中断交通、造成人员伤亡，给该地区的经济发展和人民生命财产造成了重大损失，因此对该地区黄土滑坡的特征和形成原因进行研究，并对典型滑坡进行稳定性分析，对于该地区黄土滑坡的防治具有重要意义。

本文以伊犁地区为研究区，在野外调查、资料整理以及现场和室内试验的基础上，首先研究了该地区的地质环境条件、黄土的分布、分区、地层和基本性质；其次对黄土滑坡的分布、类型、形态等特征进行了研究，并从多个方面分析了伊犁黄土滑坡形成的原因；最后选取加郎普特滑坡为典型例子，运用极限平衡法和强度折减有限元法对其进行了稳定性计算分析，并提出了相应的治理措施。取得的研究成果如下：

（1）在伊犁境内的加郎普特、则克台和阔勒德能等地采集土样进行土力学试验，并结合已有的研究成果，从物质组成、物理性质、水理性质和力学性对伊犁黄土的基本性质进行了研究。结果表明：伊犁黄土的粒度以粉粒为主，矿物成分以石英、长石以及碳酸盐类矿物为主，呈碱性；天然含水量和天然重度偏大，孔隙比在 0.686～0.957 之间；渗透系数在 10^{-4}～10^{-6}cm/s 之间，总体呈弱透水性；具有较强的湿陷性，内聚力在 7.2～26.2kPa 之间，内摩擦角在 15.5～32.0°之间，遇水时，内聚力和内摩擦角下降明显。

（2）通过野外实地调查，分析了伊犁黄土滑坡在分布、形态方面的特点。在空间上，伊犁黄土滑坡主要分布于中低山区、中低-低山丘陵区及河流两岸的黄土斜坡地带，其中，中东部地区为滑坡最为发育的地区；在时间上，滑坡多发生于 4～6 月。滑坡类型主要为黄土层内滑坡和黄土基岩接触面滑坡，滑坡规模以小型浅层为主，但也不乏大型滑坡。滑坡平面形态以簸箕形、长椅形、复合形、扇形为主，纵断面形态以圆弧形滑面为主。

（3）在土工试验和野外调查的基础上，从多个方面分析了伊犁黄土滑坡形成的原因。分析认为，在各种因素中，伊犁地区广泛分布的黄土为滑坡形成提供了物质基础，区域内多山的地形地貌、黄土层与下伏基岩呈不整合接触关系的地层结构为黄土滑坡提供了边界条件，而暴雨则是滑坡形成的主要诱因。在此基础上，分析了该地区降雨诱发黄土滑坡的机理。

（4）选取伊犁境内的加郎普特黄土滑坡为典型例子，分析了该滑坡的特征和形成机制，利用二维极限平衡法对该滑坡进行了稳定性分析，从渗透稳定性、抗冲刷稳定性和抗滑稳定性三个方面对滑坡所致的堰塞湖进行稳定性分析。在二维计算的基础上，利用 GOCAD、CATIA 和 Hypermesh 对典型滑坡建立三维计算模型，利用强度折减有限元法对其作进一步分析，并根据计算结果提出了相应的治理措施，可为该滑坡及伊犁地区类似黄土滑坡的稳定性分析提供参考。

关键词：伊犁；黄土滑坡；特征；成因；稳定性分析

Abstract

Ili Kazak Autonomous Prefecture is located in the west of the Xinjiang Uygur Autonomous Region, and the loess landslides are widely distributed in this area. For a long time, the loess landslides have brought great loss to the economic development and people's lives and property of this area, such as buried villages, interrupted traffic and caused casualties. Therefore, to study the characteristics, cause and stability of the loess landslides is of great importance to the prevention and treatment of the loess landslides in this area.

This paper takes the Ili as the research area. First of all, the geological environmental background, the loess distribution, the loess zoning, the loess strata and the basic properties of the loess are analyzed, based on the field geological investigation, data compilation, spot and laboratory test. Secondly, the distribution, types and morphological characteristics of the loess landslides in this area are studied, and the forming reason of the loess landslides are researched in many respects. Finally, take the Jialangpute landslide as a typical example, and the stability of this loess landslide is analyzed by using limit equilibrium method and strength reduction finite element method, then, some treatment measures are put forward. The main research conclusions are as follows:

(1)The soil samples which are collected at Jialangpute, Zeketai and Kuoledeneng are tested by soil mechanics experimental. Then, the basic properties include material composition, physical properties, water physical properties and mechanical properties are analyzed. The results show that the loess in Ili is mainly composed of silt particle, the mineral components of loess in this region are dominated by quartz, feldspar and carbonate minerals, and is alkaline. The natural water content and natural weight are large, and void ratio is 0.686～0.957, going with considerable collapsible. The permeability coefficient is 10^{-4}～10^{-6}cm/s, and the loess presents weak permeability.The cohesion is 7.2～26.2kPa, and the angle of internal friction is 15.5～32.0°, and they reduced with the increase of the water content.

(2)The distribution and form of the loess landslides in Ili are analyzed by field investigation.The loess landslides in Ili are mainly distributed in the lower and middle mountain area, the low hill area, and the loess slope along the river bank, by the influence of engineering geological condition and the loess distribution. The mid-eastern Ili is the area where the landslides develop most seriously. The landslides mainly occurred in April, May and June in time domain. The loess landslides and loess-bedrock interface landslides are main types of landslides in Ili, and they are mainly small scale and shallow，certainly, there are still some large-scale landslides. Four kinds of cross-sectional shape types are main plane shape of the landslides, include dust pan shape, bench shape, complex shape and fan shape, while the circular slip surface is the main longitudinal shape type.

(3)The cause of the loess landslides in Ili is studied based on the field investigation. Analysis suggests that, the loess which is widely distributed in Ili provides material base for the loess landslides. The topography and geomorphology, and the stratum structure which is unconformable contact between loess stratum and bedrock provide boundary conditions, and the rainstorm is the immediate cause. On this basiss,

the mechanism of the loess landslide which is induced by rainfall is analyzed.

(4)Take the Jialangpute landslide which occurred in Ili as a typical example, the characteristics and genetic mechanism of this landslide are analyzed by using 2D limit equilibrium method, and the stability of the dammed lake is analyzed from three aspects which include seepage stability, anti-erosion stability and anti-slide stability. Then, Based on the two-dimensional analysis, 3D visualization and numerical model of one typical landslide are built by using three kinds of software which include GOCAD, CATIA and Hypermesh, and the further study on the stability of this typical landslide is made by 3D strength reduction finite element method. At last, some treatment measures are put forward , according to the calculation results. This may provide reference for the stability analysis of other loess landslides in Ili.

Keywords: Ili; loess landslide; characteristics; cause; stability analysis

目 录

第一章 绪论 1
1.1 研究背景及意义 1
1.2 国内外研究现状 2
1.2.1 黄土滑坡分类研究 2
1.2.2 黄土滑坡成因机制研究 2
1.2.3 滑坡稳定性分析方法研究 3
1.3 研究内容及技术路线 5
1.3.1 研究内容 5
1.3.2 技术路线 6
第二章 研究区地质环境条件 8
2.1 地理位置 8
2.2 地形地貌 9
2.3 地质构造 9
2.4 地层岩性 11
2.5 气象水文 11
2.5.1 气象条件 12
2.5.2 水文条件 13
2.6 水文地质 13
2.7 新构造运动及地震 14
2.7.1 新构造运动 14
2.7.2 地震 14
2.8 人类工程活动 15
2.9 本章小结 15
第三章 伊犁黄土基本性质研究 16
3.1 黄土的分布分区及地层 16
3.1.1 黄土分布 16
3.1.2 黄土分区 18

3.1.3 黄土地层 18
3.2 黄土基本性质分析 19
3.2.1 物质组成 19
3.2.2 物理性质 22
3.2.3 水理性质 23
3.2.4 力学特征 25
3.3 本章小结 27
第四章 伊犁黄土滑坡特征及成因分析 29
4.1 伊犁黄土滑坡特征分析 29
4.1.1 滑坡分布特征 29
4.1.2 滑坡类型特征 32
4.1.3 滑坡形态特征 33
4.2 伊犁黄土滑坡成因分析 36
4.2.1 滑坡形成的内部原因 37
4.2.2 滑坡形成的外部原因 39
4.2.3 研究区降雨诱发黄土滑坡的机理 41
4.3 研究区典型黄土滑坡分析 43
4.3.1 加郎普特滑坡概况 43
4.3.2 滑坡区工程地质条件 43
4.3.3 加郎普特滑坡特征 45
4.3.4 滑坡及堰塞湖成因机制分析 48
4.4 本章小结 49
第五章 伊犁典型黄土滑坡稳定性分析 51
5.1 稳定性分析方法 51
5.1.1 极限平衡法 51
5.1.2 有限元强度折减法 56
5.2 二维稳定性分析 56
5.2.1 计算剖面选择 56
5.2.2 计算模型建立 61

5.2.3 计算参数确定 65
5.2.4 滑坡计算结果及分析 65
5.2.5 滑坡堰塞湖稳定性分析 67
5.3 三维稳定性分析 68
5.3.1 计算模型构建 69
5.3.2 计算结果与评价 71
5.4 加郎普特滑坡治理建议 73
5.4.1 监测工作建议 73
5.4.2 滑坡治理建议 73
5.5 本章小结 74
第六章 结论与展望 75
6.1 结论 75
6.2 展望 75
参考文献 77
致谢 81
作者简介 82
导师评阅表 83

第一章　绪论

1.1 研究背景及意义

滑坡地质灾害是一种常见的自然灾害，主要发生在山地丘陵地区，具有突发性强、易损度高的特点，其危害性不亚于地震、火山、泥石流等地质灾害，为目前全球主要的地质灾害之一[1]。我国是一个多山的国家，每年都有数十起滑坡灾害发生，造成不同程度的经济和人员伤亡，如：2009 年 6 月 5 日，重庆境内发生山体滑坡，造成该市武隆县 59 人死亡；2010 年 10 月 21 日陕西省延炼发生山体滑坡，给当地造成了数亿元的经济损失；2012 年 10 月 4 日，云南彝良龙海乡镇河村油房村民小组发生山体滑坡，将 18 名小学生和 1 户农户掩埋[2]；2013 年 1 月 11 日，云南省镇雄发生滑坡，60 多间房屋被毁，46 人遇难[3]。滑坡地质灾害已经严重影响了人类正常的生活生产。

滑坡灾害危害巨大，又以黄土滑坡尤为突出。黄土滑坡是发生在黄土地区的一种典型的滑坡地质灾害，一旦发生，可能会造成交通中断、河流阻塞、房屋厂矿被毁等严重后果，与崩塌、泥石流等其它地质灾害共同威胁着黄土地区的经济发展和人民的安居乐业。我国是世界上黄土分布极其广泛的国家之一，由于黄土的广泛分布，加之黄土的大孔隙性、湿陷性及垂直节理发育等特性，使得黄土地区滑坡地质灾害频发。资料显示：从 20 世纪 50 年代末到 1992 年，甘肃省的东西部一共发生了 14109 处黄土滑坡[4]；陕西省仅 2010 年 3 月 10 日的榆林市子洲县黄土滑坡，就造成了 19 人死亡；从 1960 年到 2005 年，新疆伊犁州仅尼勒克县境内黄土滑坡数量就达 197 个。黄土滑坡地质灾害给黄土地区人类的正常经济生活造成了重大威胁，因此对其进行相关研究具有重要意义。

伊犁是我国西北地区黄土广泛分布的区域之一[5]，也是我国西北地区黄土滑坡多发区之一。该地区位于欧亚大陆腹地，境内 8 县 1 市（本文指伊宁市、伊宁县、霍城县、察布查尔县、新源县、巩留县、尼勒克县、特克斯县、昭苏县），总面积约 57344km^2。伊犁地区物产丰富，有丰富的水土光热、矿产、畜产、林果、旅游等资源，并且有国道 217、218 和省道 316 公路等交通要道通过，为该地区的经济发展和人民生活便利提供了有力保障。但长期以来，由于该地区黄土分布广泛，加之自身的地质气候等因素的影响，黄土滑坡时有发生。黄土滑坡的发生，不但可能掩埋房屋建筑、阻断道路交通、摧毁水利设施，还可能引发泥石流、堰塞湖等次生地质灾害，给伊犁的经济发展和人民的生活生产造成损失。如：2003 年 5 月 31 日伊犁新源县吐尔根乡发生黄土滑坡，造成 1 人死亡，4 人受伤；2004 年 4 月 9 日伊犁巩留县莫乎尔乡发生黄土滑坡，造成 8 人失踪和 24 万元的经济损失；2005 年 5 月 4 日伊犁别斯托别乡发生黄土滑坡，并引发泥石流，造成 3 人死亡，302 只羊被掩埋。目前，随着伊犁地区经济的不断发展，黄土滑坡地质灾害所带来的不利影响愈发明显，因此对该地区黄土滑坡进行相关研究具有重要现实意义。

基于此，本文以伊犁地区为研究区，首先研究该地区的地质环境条件、黄土的分布分区地层，并采集土样进行土力学试验，对黄土基本性质进行研究。在此基础上，通过野外调查，对黄土滑坡的分布、类型和形态等特征以及滑坡形成的原因进行研究。针对

该地区黄土滑坡的特点，选取了加郎普特滑坡为典型实例，研究该滑坡的特征和形成机制，利用二维极限平衡法对其进行稳定性分析，根据计算结果，对特定滑坡建立三维模型，利用强度折减有限元法对其作进一步分析，并提出防治措施。其研究成果可以为研究区以及其他地区类似的黄土滑坡地质灾害的研究与防治提供借鉴和参考，具有一定的理论意义和实用价值。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 黄土滑坡分类研究

对黄土滑坡进行类型划分是研究黄土滑坡的基础性工作之一，国内许多学者在这方面进行了相关研究[6]，并从不同的目标出发，按照不同的标准对黄土滑坡进行了分类。铁道科学研究院西北分院[7]根据滑体组成物质和成因的不同，将黄土滑坡分为：洪积老黄土滑坡，洪积、风积黄土滑坡以及风积、坡积黄土滑坡；根据厚度分为：极深层黄土滑坡、中层黄土滑坡和浅层黄土滑坡。乔平定[8]从多个方面对黄土滑坡进行了分类，其中根据滑坡体的厚度不同分为：巨厚层滑坡、厚层滑坡、中层滑坡和浅层滑坡；根据滑坡发生时间分为：古滑坡、老滑坡、新滑坡和新生滑坡；按力源分为：推动式滑坡和牵引式滑坡；按照滑坡剪出口与坡脚的位置关系分为：坡基滑坡和坡体滑坡；按照滑坡的诱发原因分为：自然因素滑坡和人为因素滑坡。这几位学者所提出的滑坡分类方案，将黄土滑坡的类型进行了较为详细的划分，但这些分类未考虑滑坡发生时滑动面的位置情况。随后，吴玮江等[9]根据滑坡物质组成情况，将黄土滑坡分为黄土型滑坡和混合型滑坡两大类，并在考虑滑坡主滑动面发育位置后，将这两大类滑坡进行了细分，其中黄土型滑坡细分为黄土层内滑坡和黄土接触面滑坡，混合型滑坡分为黄土-基岩顺层滑坡和黄土-基岩切层滑坡。该分类方案既考虑了滑坡的物质组成，又考虑了滑动面的位置情况，反映了我国黄土滑坡的主要控制因素。

1.2.2 黄土滑坡成因机制研究

水的作用是滑坡最为重要的诱发因素之一。长期以来，国内外学者对水在黄土滑坡形成过程中所起作用进行了不断的研究。

在国外，著名学者太沙基从滑带土孔隙水压力的变化角度来研究滑坡机理，在对大量降雨滑坡进行研究后发现，孔隙水压力及土体遇水时强度的弱化是引起滑坡的重要原因。Tiedemann 在其研究中定量地分析了土体强度在孔隙水压力影响下的变化情况。Poulos、Hutchinson、Sassa 等学者借鉴砂土液化滑坡的研究成果，通过试验从液化的角度对黄土滑坡成因进行研究。Poulos[10]利用大量的室内试验，研究了砂土静态液化的条件，并对砂土静态液化对滑坡的意义进行了分析。Lade 通过研究提出了静态液化滑坡稳定性分析方法。上述学者从液化角度所进行的研究对于研究黄土滑坡成因机制具有重要启发意义。随后，Hutchinson 和 Sassa 在现场滑坡模拟试验以及室内试验结果的基础之上，提出了一种土质滑坡发生机理，概括表述为：结构破坏-孔压上升-液化。Sassa 通过后续的研究指出，在土体饱和度超过 85%的情况下，可能产生超孔压，从而导致滑坡的发生。

在国内，由于受黄土所具有的大孔隙、弱胶结等结构特征和强烈的水敏性等特殊性质的影响，在对黄土滑坡形成机制进行研究时，早期主要是从水对黄土强度的弱化角度进行研究的。吴玮江[11]在对黄土滑坡发育时间进行大量调查统计后，提出了“季节冻结滞水促滑效应”。雷祥义[12]、范立民[13]、宁社教[14]认为诱发黄土滑坡的根本原因是黄土的抗剪强度在地下水的作用下减小，这种观点缺乏定量的试验分析，主要是从野外现象和黄土的自身特性的角度来进行解释的。徐峻龄[15]在上世纪 90 年代提出了“闸门效应说”试图解释高速远程黄土滑坡的启动机制，“闸门效应说”是一种理论模型，还需进行足够的室内室外试验进行深化和完善。随后，国内部分学者也从液化的角度对黄土滑坡成因进行研究。王家鼎[16]基于室内室外试验，提出了“饱和黄土蠕（滑）动液化”的概念，并利用饱和黄土的蠕动液化机理解释灌溉作用下黄土滑坡的发生机理。同时，王家鼎[17]认为地脉动是蠕动液化发生的主要诱发因素。然而，对于饱和黄土的蠕动形式和轻微液化的条件，目前没有进行进一步研究。

1.2.3 滑坡稳定性分析方法研究

对滑坡进行稳定性分析一直是岩土工程领域的重要研究内容之一，已有一百多年的研究历史[18]。各国学者从不同的角度对滑坡稳定性分析进行了大量研究，目前，提出和发展的稳定性分析方法已多达数十种，总的来讲可以分为：定性分析和定量分析。

定性分析是一种在分析边坡以及所在区域工程地质条件的基础上，考虑影响边坡稳定的各种因素的作用，对边坡的稳定情况进行估计和预测的方法。国内外学者已提出多种定性分析方法，常见的有自然地质历史分析法、工程地质类比法、图解法和模型试验法[19,20]。

自然地质历史分析法为前苏联学者提出的一种主要针对岩质边坡的分析方法。通过分析边坡破坏的形成和发展来判断其原因，进而判断当前边坡的稳定状态，并预测其未来发展趋势。20 世纪 50 年代，我国学者在岩体结构控制论的理论基础上，结合地质力学原理和赤平极射投影理论，对该方法进行了发展，并在滑坡的分析研究中应用该方法。

工程地质类比法是目前工程界使用较多的一种定性分析方法。该方法主要是工程技术人员通过对比分析，将已有的滑坡分析和治理经验应用于类似的滑坡问题中的一种方法，其实质为一种经验方法。在使用该方法进行滑坡稳定性分析时，首先需要详细分析滑坡区域的地形地貌条件、坡体结构特征、岩土力学性质、岩体质量指标、风化破碎程度、构造裂面发育状态以及地下水活动状况和外部环境条件等工程地质条件，在此基础上，参考具有类似条件的既有滑坡工程或其它相关成功分析案例，借鉴其方法对滑坡稳定性进行评价以及坡体开挖和防护加固工程进行设计。

图解法可分为两种方法：诺模图法和投影图法。其中，诺模图法是通过诺谟图或曲线来表示内摩擦角、内聚力等与边坡稳定情况密切相关的参数之间的关系，并由此分析边坡的稳定状态的一种方法，使用该方法亦可利用已有的参数来反算得到其他参数。投影图法是基于赤平极射投影原理，利用作图将所收集的地质数据等资料表示出来，在对结构面的空间组合关系进行分析的基础上，分析岩质边坡坡体的稳定性。根据使用投影

图法时投影的不同，可分为赤平极射投影图法和实体比例投影图法。

模型试验法一直以来都受到各国学者的重视，在这方面的研究一直未中断，该法主要通过相关试验来分析边坡岩土体的应力分布情况、变性规律以及稳定状态。在试验方面，早期主要以光弹性模型以及室内相似模型试验为主，在近期则主要以基于重力模拟原理的离心模型、底摩擦模型以及大容重模型等试验为主，例如：廖小平等[21]采用“坡面分条逐级加载大容重法”模拟室内边坡模型的滑动面生成过程，冯君等[22]采用离心模型模拟顺层边坡的松动变形和破坏。但总体来讲，由于经费限制等多方面的原因，该领域的研究成果并不多。

定量分析主要包括以极限平衡理论为基础的极限平衡法和以有限元计算为代表的数值分析法。

20 世纪早期，基于将边坡潜在滑体划分为土条的思想，著名学者 Fellenius 于 1936 年在假定边坡潜在滑动面为圆弧滑动面的基础上，提出了对圆弧分法，又称瑞典条分法。随后一些学者做了进一步研究，Bishop 于 1954 年对条分法进行了发展，Janbu 于 1956 年提出了比瑞典条分法相更为精细的条分法[23]，之后 Lowe 等学者和美国军方工程师联合会合作研究，提出了一种满足力平衡的条分法[24]。由于采用简化的假定条件以方便手工计算边坡的安全系数，以上几种条分方法均无法同时满足力平衡和力矩平衡。20 世纪 60 年代以后，随着电子计算机的出现，分析过程中的迭代计算变得更为容易处理，一些学者提出了数学意义更为严格的计算方法。Morgenstern 和 Prince 于 1965 年在假定土条之间的法向力与剪切力满足某种函数关系的基础上，提出了既满足力平衡又满足力矩平衡的严格条分法，Spencer 于 1967 年假定土条间的法向力和剪切力之间的函数关系为常量，提出了两个安全系数计算方程，随后其他学者又相继提出了通用极限平衡法、Sarma 法等方法。

上述方法均是将边坡稳定性分析简化为二维平面应变问题来计算的，通常一般情况下这种简化处理能够满足工程要求，但在实际工程中，边坡发生滑动变形时具有典型的空间三维特征，考虑到滑坡的空间特性，一些学者在二维条分方法的基础上提出了三维分析方法。

1977 年，Hovland[25]在二维普通条分法[26]的基础上，提出了三维条分法，该方法假定土条之间的相互作用力为零，可以对滑动面为任意形状的边坡进行计算。Cheng 和 Chameau（1982）[27]提出了适用于具有对称破坏面的边坡三维条分法。著名学者 Morgenstern（1983）[28]在这方面也提出了自己的三维模型。Hunger（1987，1989）[29,30] 发展了 Bishop 简化法，利用绕圆心转动的力矩平衡得到安全系数，适用于对称球型滑裂面。Zhang（1988）[31]在将条块间的作用力进行简化的基础上，利用一个作用于条块底面的力来反映三维效应，从而提出了简单的三维斯宾塞法。随后，Lam 和 Fredlund 基于二维 Spencer 法，提出了适用于对称旋转破坏的计算方法。Huang 和 Tsai 在 2000 年将简化 Bishop 进行发展，提出了适用于非对称破坏的计算方法。上述三维方法均是基于将三维滑体划分为微小柱体的思想，通过一些假定条件来进行计算的，这些方法都

是基于二维极限平衡法，并对其进行了发展，但结果的准确性，很少能得到独立的理论验证。随着理论分析方法的发展，满足更多平衡条件的方法将不断被学者研究出来，其计算结果的合理性也将更高。

强度折减有限元法是数值计算分析法中十分典型的代表，用该方法进行计算时，不需要对土体进行条分和对滑动面做相关假设，物理意义明确并且计算结果能够反映土坡的渐进破坏过程，因而受到学者的广泛关注。Zienkiewicz（1975）[32]首次提出了强度折减有限元法并利用该方法进行边坡稳定性分析，但该方法由于受计算条件的影响而在实际应用中受到限制。Wong（1984）[33]分析了在使用有限元方法进行边坡稳定性计算时形成误差的原因。Duncan（1996）[34]将安全系数定义为边坡土体的实际剪切强度与达到临界破坏时折减后的剪切强度的比值。而后，随着个人计算机技术的发展，各国学者在边坡有限元计算方面不断研究，强度折减有限元法开始得到新的发展。Matsui 和 San（1992）[35]，Ugai 和 Lenshchinsky（1995）[36]，以及国内的宋二祥（1997）[37]等先后做了相关研究工作后发现，利用强度折减有限元法在对边坡进行稳定性计算时，能得到与极限平衡法十分相近的安全系数和滑动面，这极大的发展了该方法在边坡稳定性分析中的应用。然而，在利用强度折减有限元法进行计算时出现了诸多问题，如单元形状与阶次、网格大小、边界范围等对计算精度的影响，临界条件判据的一致性，边坡土体的内聚力与内摩擦角对滑动面位置的影响等。为此，一些学者进行了相关研究。张鲁渝等几位学者[38]对四边形一阶单元网格密度进行了研究，并给出了参考指标；王栋等[39]在给定网格密度条件下，在单元阶次对安全系数的影响方面进行了研究，发现四边形一阶单元所得结果差于二阶单元。Dawson 等[40]提出细网格下所获得的解与极限分析的上限解更为相近，杨有成等[41]也得出了类似的结论。史恒通等[42]通过研究发现有限元网格并非越密越好。

1.3研究内容及技术路线

1.3.1研究内容

本论文以伊犁地区为研究区，在野外调查、资料整理的基础上，首先通过采集土样进行土力学试验对研究区黄土的基本性质进行研究，进而对区域内黄土滑坡的分布、类型和形态特征以及形成原因进行分析研究，再以该地区典型黄土滑坡为研究对象进行稳定性分析并提出治理措施。主要内容如下：

（1）在野外调查和资料整理的基础上，从地理位置、地形地貌、地质构造、地层岩性、水文气象以及人类工程活动等方面分析研究区地质环境条件。

（2）在伊犁境内采集土样进行土力学试验，并结合已有研究成果，从物质组成、物理性质、水理性质和力学性质几个方面对研究区黄土的基本性质进行研究，并分析区内黄土的分布、分区和地层情况。

（3）通过野外实地调查，结合已有资料，对研究区黄土滑坡的分布、类型、形态进行研究，从多个方面对滑坡形成的原因进行分析，并分析研究区降雨诱发黄土滑坡的机理。选取加郎普特黄土滑坡为典型例子，详细分析该滑坡的特征和形成机制。

（4）在 SLOPE/W 程序中建立二维计算模型，利用 Morgenstern-Price 法对加郎普特滑坡进行稳定性计算分析，并从渗透稳定性、抗冲刷稳定性和抗滑稳定性三个方面对滑坡所致的堰塞湖进行稳定性分析。在此基础上，利用 GOCAD、CATIA 和 Hypermesh 对特定滑坡建立三维实体模型和数值模型，利用强度折减有限元法对其作进一步分析，并根据分析结果提出相应的治理措施。

1.3.2 技术路线

本论文技术路线见图 1-1：

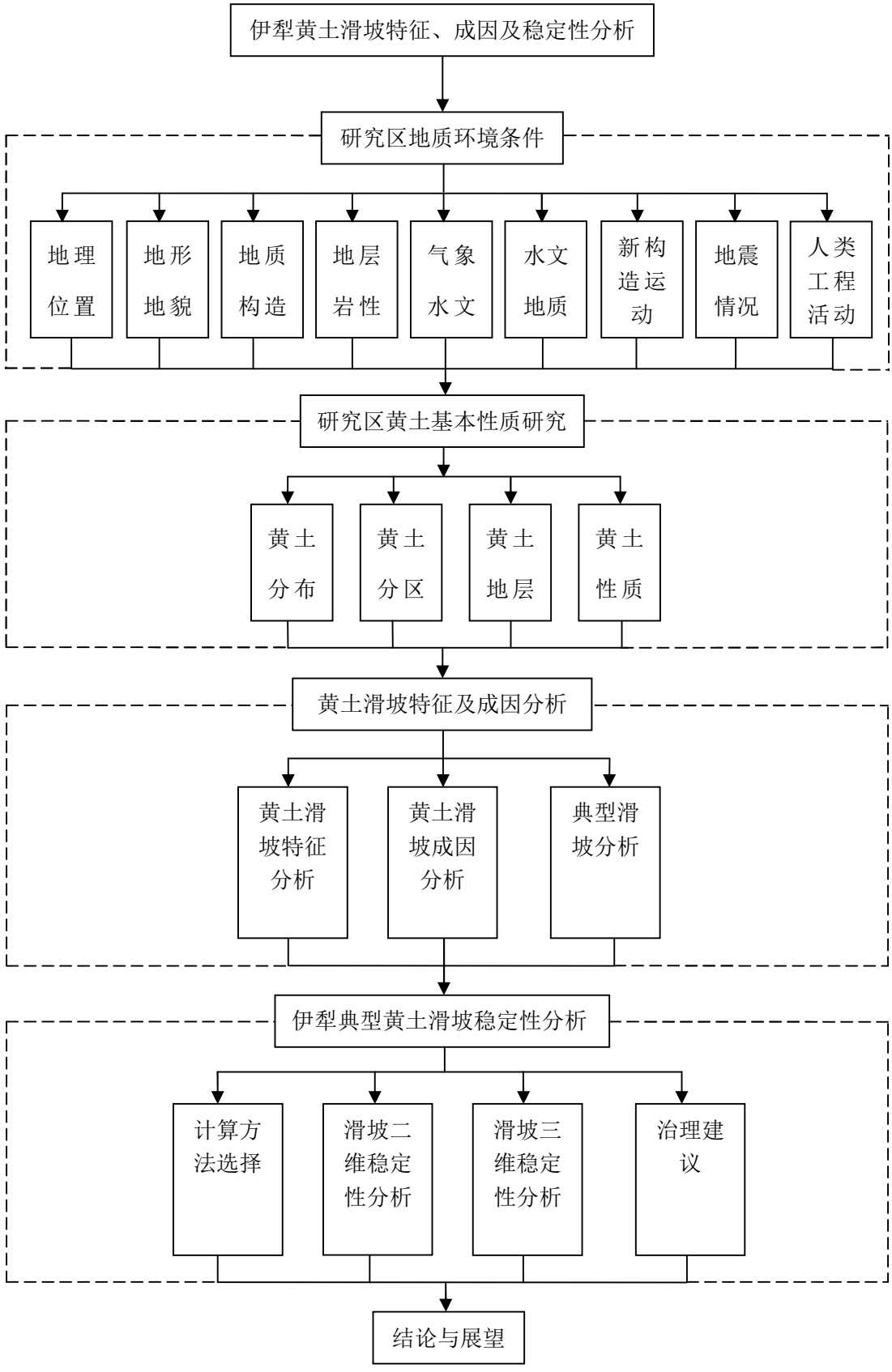


图 1-1 技术路线图

Fig.1-1 Study technical route of this paper

第二章　研究区地质环境条件

黄土滑坡地质灾害的发生与所处的环境关系紧密，伊犁地区自身的地质环境条件决定并影响着该地区黄土滑坡的发育和分布，对其进行研究分析是对该地区黄土滑坡进行研究的基础。本章从地理位置、地形地貌和地质构造等多个方面对该地区的地质环境条件进行分析。

2.1 地理位置

伊犁全称伊犁哈萨克自治州，位于新疆维吾尔自治区西部的伊犁盆地，境内共8县1市，总面积约57344km^2[43]，地理坐标东经80°10′～84°58′，北纬42°20′～44°49′。伊犁北与博尔塔拉相连，东与塔城、巴音郭楞两地接壤，南与阿克苏毗邻，西与哈萨克斯坦国为邻，境内物产丰富，有丰富的水土光热、矿产、畜产、林果、旅游等资源，有G218、G217、S315、S316等公路通过，亦有铁路与奎屯、乌鲁木齐等其他重要城市相连，交通十分便利。

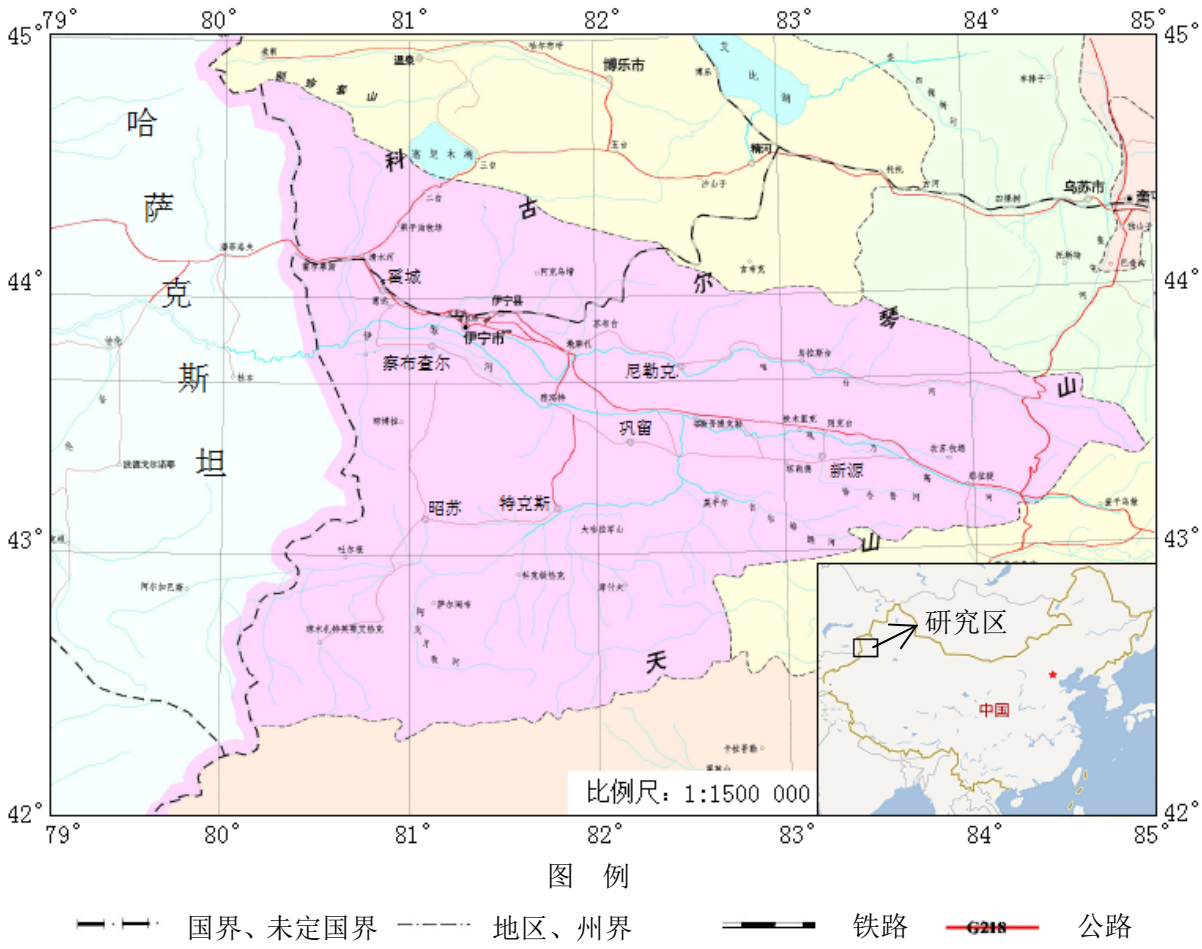


图 2-1 研究区地理位置图

Fig.2-1 Study area location

2.2 地形地貌

伊犁位于伊犁盆地西部（东部为哈萨克斯坦），新疆天山山脉西段，区域内地形地貌形态比较复杂，总体呈“三山夹两谷地一盆地”的格局[5]（见图 2-2）。

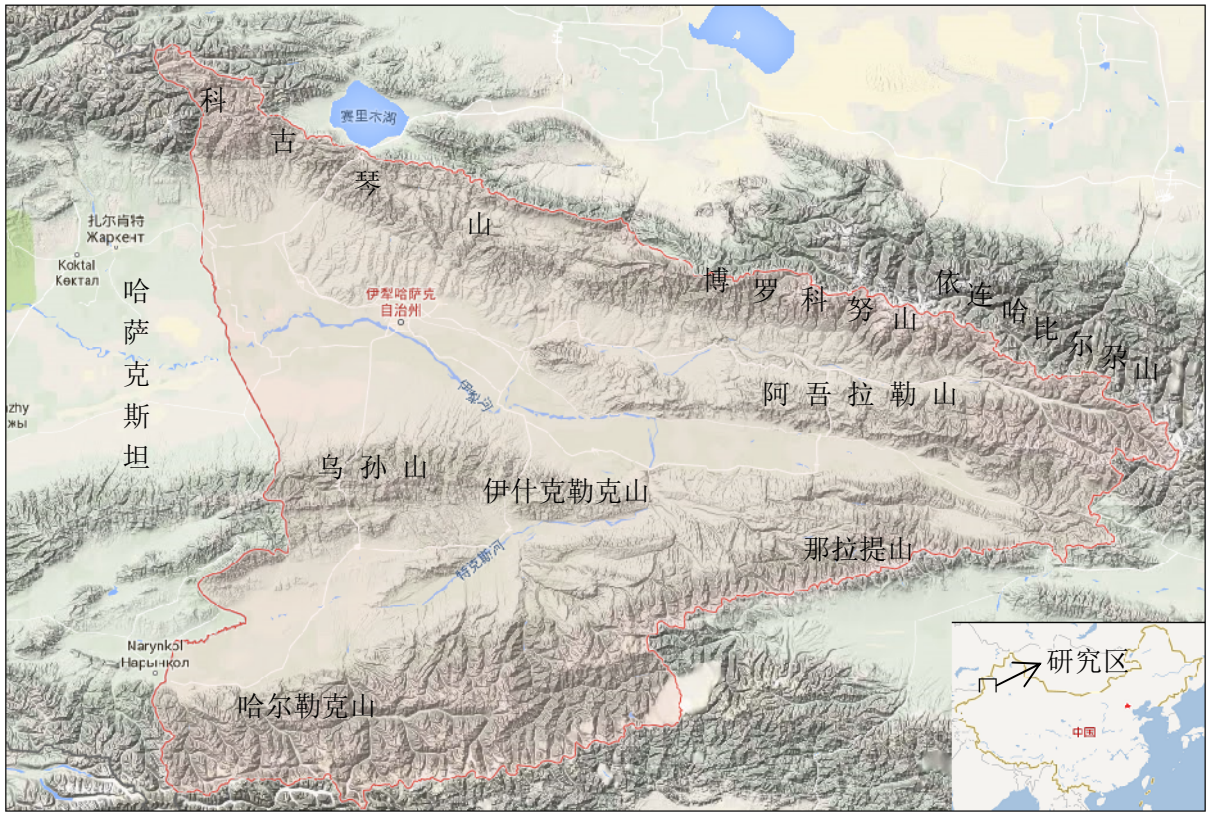


图 2-2 伊犁地形地貌图

Fig.2-2 Topography and geomorphology of Ili

伊犁地区北东南三面环山，地貌轮廓为向西开口的喇叭形，整体地势东高西低。区域北部从西向东分布着科古琴山、博罗科努山、依连哈比尔尕山等北天山支脉，走向为 NW-SE。其中博罗科努山海拔 4000～4500m 之间，依连哈比尔尕山平均海拔高度 3600m 以上，最高峰海拔 5500m。中部自西向东分布着乌孙山、伊什克勒克山、阿吾拉勒山脉等。南部自西向东分布着哈尔勒克山、那拉提山等南天山支脉，走向为 NEE-SWW。这一山脉平均海拔比北部山脉略低，在 3500～4000m 之间，但昭苏西南的汗腾格里山最高海拔在 6000m 以上。该地区“北中南”三列山系向东复合于依连哈比尔尕山东端，并形成依连哈比尔尕山山结。三列山系之间为喀什河谷地、伊犁-巩乃斯谷地、特克斯-昭苏盆地。山区为伊犁最主要地形，占区域总面积的 70%以上[43]。根据内外营力作用及地貌特征、地形的绝对和相对高度等，将伊犁的地貌类型划分为侵蚀褶皱断块山、剥蚀堆积块状隆起山和堆积平原 3 个一级地貌单元和 11 个二级地貌单元[44]。

2.3 地质构造

伊犁地区地处伊犁盆地西段，该盆地是一个造山带中稳定地块上的裂陷拗陷复合型盆地[45]，是在伊犁-中天山微板块的基底地块基础上发展起来的，在大地构造上归属于

天山造山带中的伊犁-中天山微地块。区域内地质构造较为复杂，北为科古琴-博罗科努隆起（科古琴-博罗科努早中古生代陆内造山带），南为哈尔克-那拉提隆起（哈尔克-那拉提早中古生代活动陆缘碰撞造山带）。南北两构造单元之间分别为：伊宁凹陷（Ⅱ1）、尼勒克凹陷（Ⅱ2）、巩乃斯凹陷（Ⅱ3）、阿吾拉勒凸起（Ⅱ4）以及昭苏凹陷（Ⅱ5）等（详见图 2-3 所示）。

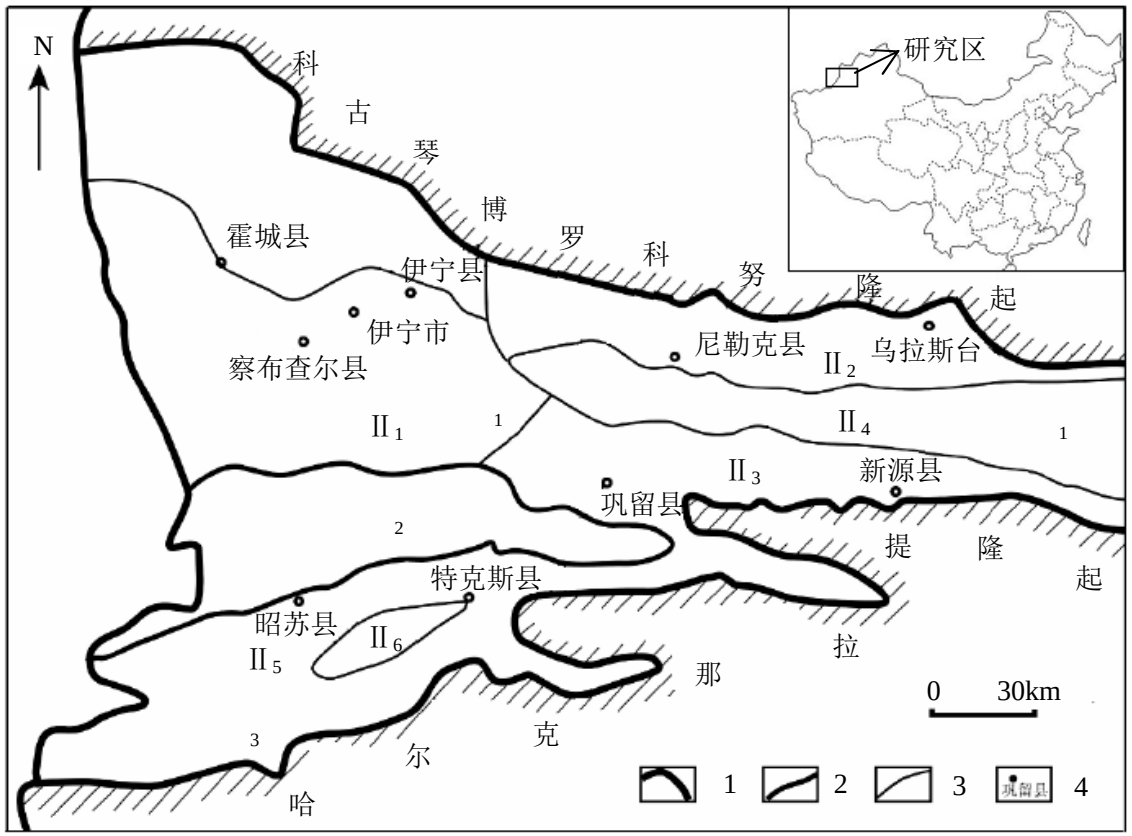


图　　例

1—北部坳陷带；　2—中央隆起带；　3—南部坳陷带；Ⅱ1—伊宁凹陷；Ⅱ2—尼勒克凹陷；Ⅱ3—巩乃斯凹陷；Ⅱ4—阿吾拉勒凸起；Ⅱ5—昭苏凹陷；Ⅱ6—阿登套-大哈拉军凸起

1—盆地边界；2—坳陷边界；3—凹陷边界；4—城镇名

图 2-3 伊犁构造单元划分图（据文献[46]修编）

Fig.2-3 Division of the structural units of Ili[46]

该地区主要受4组断裂系影响和控制，分别为：科古琴-博罗科努早中古生代陆内造山带断裂系（简称科-博带断裂系）、哈尔克-那拉提早中古生代活动陆缘碰撞造山带断裂系（简称哈尔克-那拉提山北缘断裂系）、近东西向断裂系、X型剪切断裂带。其中科-博断裂系走向为NWW向，其南缘边界断裂直接控制了伊犁盆地北界；哈尔克-那拉提山北缘断裂系为伊犁地块碰撞那拉提地块所形成，走向为NEE向，伊犁境内的昭苏盆内断裂等均属于该断裂系；近东西断裂系主要为伊宁凹陷内部和阿吾勒拉山南北侧、巩乃斯凹陷南缘及新源林场一带的断裂等，这些断裂多数是张性正断层，但部分后期表现了高角度逆冲；X型剪切断裂主要呈NE和NW走向，其中NW向尤为发育。

2.4 地层岩性

伊犁地区主要地层如下：

志留系（S）：为一套夹有酸性喷发物质的沉积，主要为浅海相和滨海相沉积，大多分布在伊犁北部的科古琴山南坡和东部的喀什河南北两岸。

泥盆系（D）：中上泥盆统坎苏组（$D_{2\text{-}3k}$）分布于伊犁东南部地区，岩性为灰绿色安山玢岩、钠长斑岩、凝灰岩、钙质粉砂岩、火山凝灰岩夹火山角砾岩及灰岩透镜体。受花岗岩侵入体的影响，部分地区岩层存在一定程度的变质。

石炭系（C）：主要分布于南阿吾拉勒山的北部山区，东喀什河南岸和尼勒克以北的山前地带，为一套滨海-浅海相沉积，分为下石炭统、中石炭统和上石炭统。下石炭统岩性为一套火山岩-火山碎屑岩；中石炭统岩性为一套基性火山熔岩及火山碎屑岩组成，上石炭统岩性为一套酸性喷发岩。

二叠系（P）：主要为下二叠统乌郎组（P_{1w}）和上二叠统铁木里克组（P_{2ti}）。其中，下二叠统乌郎组可分为下、中、上三个亚组，下亚组和中亚组分布在巩乃斯种羊场至则克台以北阿吾拉勒山山脊地带，下亚组岩性为火山角砾岩、凝灰砂岩、玄武岩、安山玢岩、英安岩；中亚组从下到上依次为杏仁状安山玢岩、杏仁状玄武岩；上亚组为杂色凝灰砂岩、凝灰岩、凝灰熔岩、安山玢岩、英安岩。该组与泥盆系中上泥盆统坎苏组呈断层接触。上二叠统铁木里克组主要分布于伊犁东部的北阿吾拉勒山分水岭附近及以北地区，岩性为紫灰色钙质长石石英屑细砂岩、中粒砂岩及粉砂岩夹粗砂岩、砾岩及灰岩透镜体，该组可分为下、中、上三个亚组，下亚组与下二叠统乌郎组呈角度不整合或断层接触。

侏罗系（J）：分布于阿吾拉勒山北麓沿喀什河南岸地段和博罗科努山南麓的吾拉斯台以东地段及吉林台牧场以西地段，包括中-下侏罗统、上侏罗统。其中，中-下侏罗统岩性为灰色、灰绿色、黄灰色砂岩和砾岩，并含有厚度不一的煤层。上侏罗统其上下部岩性不同，上部为灰色中-粗粒砂岩、砂砾岩、暗灰色页岩及煤层；下部为灰黄色砂岩、砂砾岩以及厚层状砂岩。

第四系（Q）：包括中更新统冲积层（Q_2^{al}）、上更新统风积层（Q_3^{eol}）和全新统冲积层（Q_4^{al+pl}）。其中，中更新统冲积层在伊犁广泛分布，岩性为离石黄土，大部分被上更新统马兰黄土覆盖，与其呈整合接触，少数在黄土滑坡侵蚀沟内零星出露。上更新统风积层（Q_3^{eol}）广泛分布在伊犁东部的新源县、尼勒克县及附近地区，不整合覆盖在泥盆系和二叠系等老地层之上，岩性为马兰黄土，大孔隙、垂直节理发育，湿陷性强，厚度大多在 10～30m 之间或大于 30m，山顶较厚处可达 70m 以上。黄土与下伏基岩的不整合接触面与地表形态相类似，阿吾拉勒山等地的黄土滑坡大多都受这个结构面或黄土层内地下水位处形成的软弱结构面所控制。区域内黄土的分布和发育，为该地区黄土滑坡和泥石流灾害的形成提供了最基本的地质条件。

2.5 气象水文

2.5.1 气象条件

伊犁位于亚欧大陆腹地，远离海洋，属大陆性气候。由于受到谷地北、东、南三面环山向西开口的喇叭状地形的影响，从北冰洋和大西洋来的潮湿气流可以从西面直接进入伊犁谷地，再加之三面环山的阻挡，使得该地区形成了比较丰沛的降水。区内气候具有大陆性中温带湿润气候特征，一年之中冬夏两季较长，春秋两季较短，多年平均气温8.3℃左右（2001～2007 年平均气温为 9.9 ），多年平均降水量 200～550mm 之间，多年平均蒸发量约为 1467.67mm。

伊犁是新疆降水最为丰沛的地区之一，但区域内降水分布并不均匀（见表 2-1）。年降水量在空间上具有明显的特征：东部、西南、西北几个地区总体来说降水量较大，西部及中部较小；山区降水较多、平原地区较少。调查发现，东部的新源县、尼勒克县、昭苏县降水量最大，年降水量在 492～554mm 之间；霍城县和特克斯县次之，年降水量在 391～451mm 之间；伊宁市境内年降水量最少，约为 269mm 左右。

在年内分配方面，伊犁地区降水量总体来说也不均匀（见表 2-1），东部与西部、山区与平原地区差距较大。区域内多数地方降水主要集中于 4～10 月份，占全年降水量的60～90%。伊犁河谷平原区及西北部地区降水量在年内分配相对均匀；东部降雨量较大的山区，降水量的年内分配则相对集中一些。其中西南的特克斯县、昭苏县主要集中在5～8 月；东部的新源县、尼勒克县主要集中在 4～9 月，8～9 月份之后开始减少，降水以春季和春末夏初占优势，冬季降水比例约在 20%左右或以上。

表 2-1 伊犁代表站降水量年内分配统计表[47]（单位：mm）

Table 2-1 Annual distribution of precipitation at the representative station of Ili region[47]（unit: mm）

站名 月 份	昭苏	特克斯	乌拉斯台	恰甫	伊宁	切德克
1 月	6.2	6.2	12.2	15.2	18.2	27.1
2 月	6.7	6.0	13.4	17.3	18.5	28.5
3 月	15.1	15.0	29.3	37.6	23.1	35.0
4 月	45.3	42.2	61.7	68.2	28.8	46.6
5 月	82.7	64.6	80.4	68.7	28.0	48.4
6 月	93.6	70.1	92.9	61.2	26.7	53.2
7 月	92.5	55.8	80.2	53.1	24.1	49.2
8 月	66.6	42.3	50.8	38.1	14.9	24.7
9 月	48.1	38.3	40.9	34.3	13.2	21.2
10 月	27.2	26.5	41.9	41.7	24.0	38.5
11 月	14.5	14.6	30.3	33.8	27.1	45.6
12 月	8.3	9.3	19.9	22.4	22.4	33.2
全年	506.9	391.0	553.8	491.5	269.0	451.1

2.5.2 水文条件

伊犁地区由于受自身独特的三面环山、向西开口的喇叭形地形的影响，降水较为丰沛，境内水系密度较高，居新疆之首。地表水系主要为伊犁河、特克斯河、巩乃斯河、喀什河及其各大支流。地表水系的主要补给形式为高山冰雪消融水、大气降水、山区地下水等。

伊犁河是伊犁境内最大的河流，该河自东向西横贯伊犁盆地，并最终流入哈萨克斯坦，在我国境内全长大约 476km。伊犁河为一条内陆河，同时也是一条国际河，主要由特克斯河、巩乃斯河和喀什河三大支流[48]以及众多其他支流组成，年径流量约为 $180\times10^8m^3$，约占新疆河流径流量的 1/5[49]。

特克斯河为伊犁河的主源，最大的支流，年均径流量约 $80\times10^8m^3$，发源于哈尔克山西段的汗腾格里山北侧的冰川区，由西向东，在巩乃斯种羊场附近与巩乃斯河汇合成伊犁河，全长约 345km。主要支流有萨依卡勒河、夏塔河、阿克牙孜河、科克苏河、大小吉尔格郎河等。

喀什河为伊犁河的第二大支流，该河发源于依连哈比尔尕山冰川地带，由东向西流动，在托海村附近转向南至雅马渡汇流进入伊犁河[50]。喀什河全长 297km，流域内海拔高程在 690～5000m 之间，多年平均径流量约 $39.5\times10^8m^3$。

巩乃斯河为伊犁河流域内仅次于特克斯河和喀什河之后的第三大支流，为季节性融雪型河流[51]，该河发源于依连哈比尔尕山西南侧的冰川区，河源区海拔平均 3500m 以上[52]。巩乃斯河由东向西径流，最终在巩乃斯种羊场附近与特克斯河汇合成伊犁河，全长 258km，多年平均径流量约为 $15.89\times10^8m^3$。

2.6 水文地质

伊犁地区地形地貌、地层岩性、气象水文条件较为独特，该地区地下水的形成、运移以及赋存受这些条件的影响和制约，使得伊犁地区平原地带与山区水文地质条件差异较大，区内地下水总体来说主要包括基岩裂隙水、松散岩类孔隙水以及冻结层水。

（1）基岩裂隙水

基岩裂隙水包括层状岩类裂隙水和块状岩类裂隙水这两类，主要分布于伊犁境内的基岩山区。其中前者主要分布在博罗科努山和东部伊连哈比尕山，以及阿吾拉勒山南坡一带地区，单泉流量一般在 0.1～1.0L/s 之间；后者分布较少，仅在阿吾拉勒山西南部等地区呈小面积零星分布，单泉流量一般小于 3.0L/s。

（2）第四系松散岩类孔隙水

第四系松散岩类孔隙水主要分布于伊犁区域内地势相对较低的平原地带，该类地下水主要以地表河流流出山口后的渗漏、大气降水、渠系的渗入为主要补给方式，基岩裂隙水亦可为其提供侧向补给。

（3）冻结层水

冻结层水可分为松散岩类冻结层水和层状岩类冻结层水两种形式。其中，前者主要分布于伊犁北部科古琴山多年冻结区，该区域一般单泉流量为 2.0L/s，最大 7.0L/s，为

水量中等区。后者主要分布在科古琴山多年冻结层界线附近，该区域单泉流量通常在0.1～1.0L/s之间，为水量中等贫乏区。

2.7 新构造运动及地震

2.7.1 新构造运动

伊犁地区新构造运动比较强烈，主要表现为间歇性升降运动，其次数较为频繁，同时与之相伴的有断裂活动和褶皱现象的发生。新构造运动在早更新世末期表现更为强烈明显，这使得西域组地层和第三系普遍隆起，并产生了一些平缓褶皱和断裂，使以后的中更新统冰水沉积普遍呈角度不整合的覆盖在西域组和第三系以及其他古老地层之上。

由于受构造运动的影响，伊犁地区断裂活动较为活跃。其中部分地区老断层复活，如尼勒克东部的吉仁台附近的隐伏断裂将中更新统的冰水砾石层切断，形成了高达100～120m左右的平直陡坎。同时，另一些地区也出现了许多新断裂，如伊犁中部的喀拉苏乡以西附近出现了一处新断层，其断层面平直，走向在 15°～20°之间，倾向大约105°～110°，倾角70°，断距大于5m，是形成于晚更新世末期的正断层；在阿吾拉勒山西部的一处新断层，其倾向约216°，倾角81°，断距大于4m，是高角度逆断层。

伊犁新构造运动使得新生代半成岩地层与第四纪松散堆积物抬升，使其具有较高的势能，山体进一步隆起，河流侵蚀切割愈加强烈，峡谷发育，地形陡峻，使地质灾害形成条件更加充足。

2.7.2 地震

伊犁地区地震活动较为频繁，尤其是东部地区。伊犁东部属于北天山褶皱带的一部分，为地震多发区，历史上曾发生过多次地震。其中影响最大的两次地震分别是：1812年在尼勒克东部发生的8.0级地震和1944年在新源县东北部发生的7.25级地震。

根据《地震动峰值加速度区划图》，伊犁地震动峰值加速度为0.15～0.20g，相对应的地震烈度为Ⅶ-Ⅷ度，属区域地壳次不稳定区（见图2-4）。

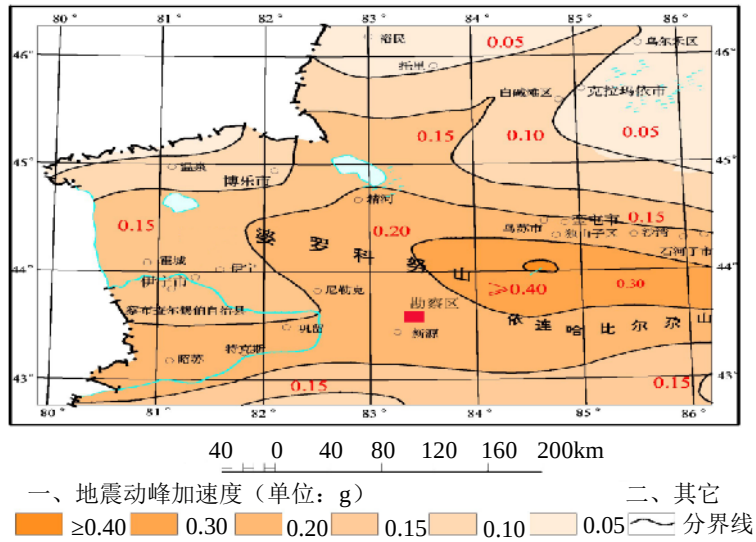


图 2-4 地震动峰加速度图

Fig.2-4 Map of earthquake acceleration

2.8 人类工程活动

伊犁境内影响黄土斜坡稳定性的人类工程活动主要有三类：一是修路、采矿和沿区内各公路的交通运输活动；二是开挖中草药；三是牧民放牧。

（1）修路、采矿和交通运输活动

近年来随着伊犁地区经济的发展，境内部分工程企业生产规模不断扩大，重型车辆车次不断增加，部分地区矿业开采、修建公路开挖坡脚（见图 2-5），这些人类工程活动不同程度地降低了黄土斜坡的稳定性。例如由于伊犁钢铁厂等区内工厂企业生产规模的扩大，途经则克台沟的大吨位车辆数日益增加，修复 316 省道开挖边坡，使斜坡坡脚抗剪强度明显降低，加上大吨位车辆的振动，对斜坡稳定性也将产生明显影响，已成为则克台山区的一个比较突出的环境地质问题。



图 2-5 人类工程活动

Fig.2-5 Human engineering activities

（2）开挖中草药

由于降水较为丰沛等原因，伊犁境内部分山区甘草、党参等植被生长茂盛，使得每年都有为数众多的群众进行开挖中草药的活动。例如此次调查发现，仅在则克台沟，每年就有近千人在沟谷斜坡地带开挖中草药。

（3）牧民放牧

随着伊犁地区经济的发展，牧业规模开始不断扩大。虽然伊犁境内草场广阔，但依然出现了较为明显的问题，这集中表现在牲畜存栏数超出草场的承载能力，尤其是春秋草场已明显不能满足目前牲畜的需求。每年春末至夏秋两季，牧业活动几乎全部集中于山区，过度放牧使得坡体表面植被遭受破坏，推动了滑坡和泥石流等地质灾害的发生。

2.9 本章小结

通过野外调查和相关资料整理，本章从地理位置、地形地貌、地质构造、地层岩性、气象水文等多个方面分析了伊犁地区的地质环境条件。

第三章　伊犁黄土基本性质研究

黄土滑坡是一种发生在黄土地区的常见地质灾害，黄土滑坡的分布、形成原因和稳定性都与区域内黄土所具有的性质关系密切，因此对其进行研究具有重要意义。本章首先对研究区黄土的分布分区地层进行分析，在此基础上，从物质组成、物理性质、水理性质和力学性质几个方面对黄土基本性质进行研究。

3.1 黄土的分布分区及地层

3.1.1 黄土分布

在世界范围内，黄土主要分布于北半球的中纬度干旱和半干旱地区[53]。在南半球，除南美洲和新西兰外，其他地方黄土分布很少。在亚洲范围内，黄土广泛分布，最北抵达北纬 74°，最南到北纬 32°。目前，全球各大洲黄土和黄土状土的分布面积达 1300 万 km^2，占地球陆地面积的 9.3%之多[54]。

在我国境内，黄土分布极为广泛，并且地层全，厚度大[55]。在我国黄土地区，黄土厚度，薄者几米、十几米、几十米不等，厚者可达几百米，如甘肃省兰州市西津村，境内黄土厚达 400m 左右，黄土在我国境内的分布情况见图 3-1。

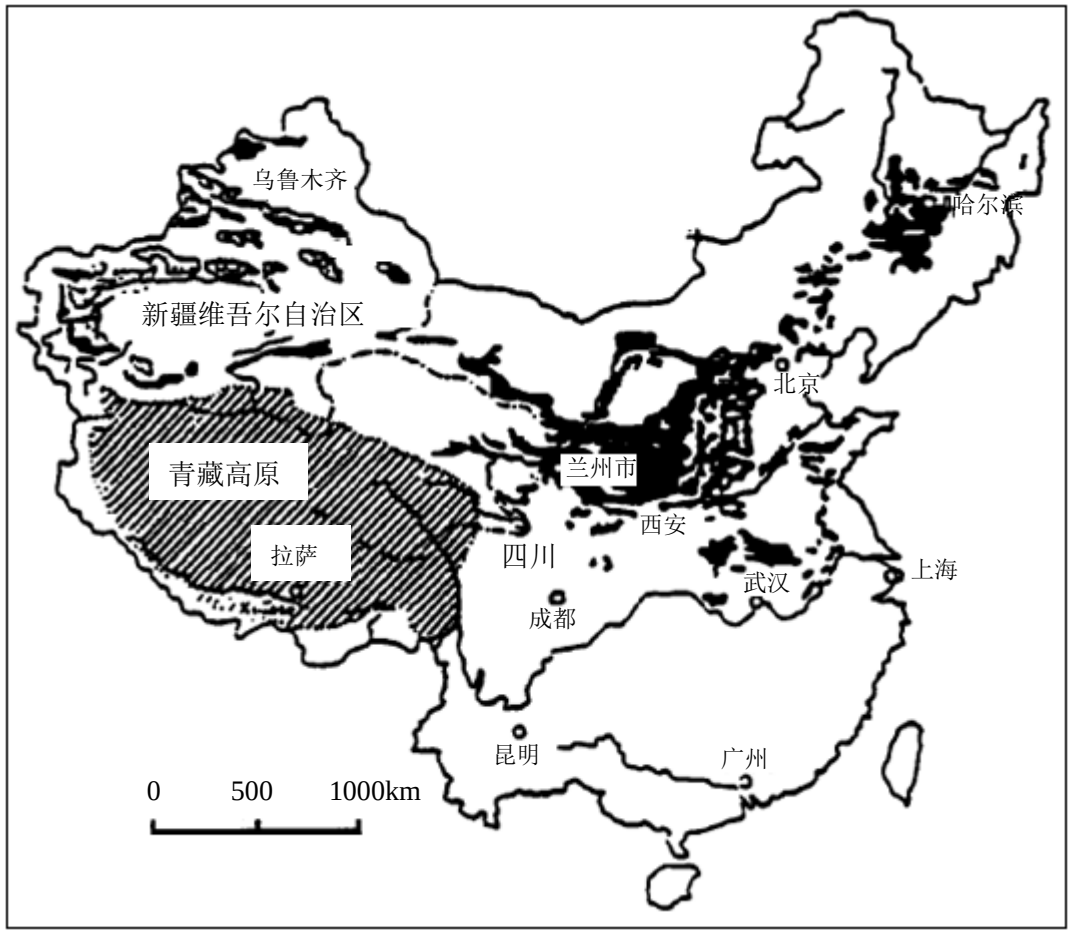


图 3-1 中国黄土分布图（据文献[56]修编）

Fig.3-1 China loess distribution map[56]

由图 3-1 可以看到，西起新疆西部的伊犁，东至胶东，北起吉林、内蒙，南至云南、西藏，黄土覆盖着我国甘肃、青海等省区，跨越青藏高原东部、黄土高原和中原部分省市，覆盖面积高达 63 万 km^2，约占我国领土 6.6%，占世界黄土覆盖面积的 4.9%[57]。虽然黄土在我国广泛分布，但区域分布存在较大差异。例如黄土高原[58]为我国黄土的最主要分布地区，该地区黄土呈连续分布，由青海东部、甘肃东部中部、宁夏南部、陕西北部中部、山西、河南西部组成，面积达 44 万 km^2，占我国领土面积的 4.6%。而在我国其他地区则少有如此集中连续的分布。

伊犁位于我国新疆西部，欧亚大陆腹地，是我国西北黄土主要分布地区之一。在该地区，黄土的分布与其所在的伊犁盆地地质条件密切相关，根据文献资料[5,59,60]，该区域的黄土分布情况见图 3-2。

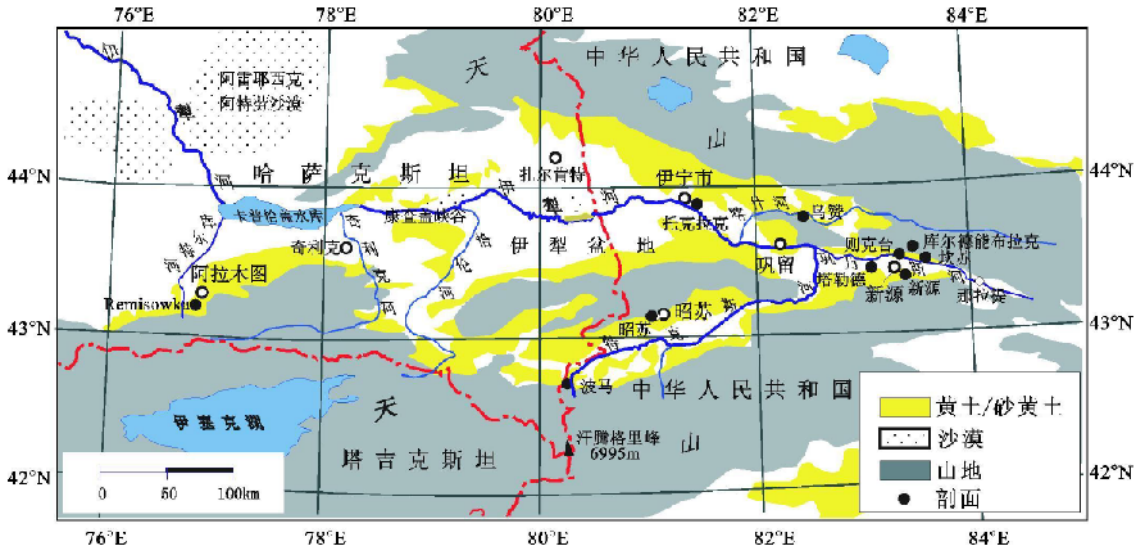


图 3-2 伊犁地区黄土分布情况[60]

Fig.3-2 The distribution of loess in Ili[60]

在伊犁地区，黄土分布广泛，但与黄土高原的黄土分布情况不同，该地区黄土为条带状分布，主要分布于伊犁河及巩乃斯河、特克斯河、喀什河这三大支流以及各次级支流的河流阶地、盆地内几大山系的低山丘陵区和山麓斜坡以及沙漠边缘地带，各地带所分布的黄土厚度不一，较薄地带黄土仅有数米厚、而较厚地带则可达到几百米。总体来说，在纵向上，黄土分布厚度由西向东从伊宁市到新源县不断增加，在新源县境内达到最厚，再往东黄土层开始逐渐减小、变薄，直至消失。其中伊宁境内的黄土较薄，平均厚度小于 10m，巩留县境内黄土厚度略有增加，但依然较小，平均厚度小于 20m，而新源县境内黄土厚度则较大，该县北部的则克台镇附近黄土厚度超过 80m，西部的塔勒德厚达 96m，东部的坎苏附近黄土约 40m，而最东段的那拉提附近则几乎无黄土[61]。在横向上，从平原到山地，黄土主要分布于山前迎风坡，这一地带黄土分布集中且分布厚度大，而林线以上分布则很少。

伊犁“三山两谷一盆”中，不同的盆地和谷地内，黄土的分布高度和厚度存在一定差异。在伊犁谷地北侧，黄土分布上限从西到东逐渐变高，西部分布上限在1200～1600m

之间，东部在1800～2000m之间，分布高度主要在700～2100m范围内；在南侧天山北麓区域，黄土主要分布于低山和丘陵区地带，分布上限为1700～1800m左右[62]。在昭苏盆地和特克斯谷地，黄土主要分布于低山、丘陵和高阶地上，分布上限在1900～2100m之间，厚度一般为5～20m。在巩乃斯谷地，黄土较为集中地分布于这一区域的低山、丘陵和高阶地上，分布上限为850～1500m。在喀什河谷地，黄土主要分布在二级以上的高阶地上，厚度几米至几十米不等。

3.1.2 黄土分区

根据中国黄土的沉积特点，可将其分布由西向东划分为三个大区[53]：西北干燥内陆盆地区、中部黄土高原区和东部山前丘陵及平原区。各区在地理分布和时间演化上具有各自的特点。

（1）西北干燥内陆盆地区

该区包括新疆的准噶尔盆地、塔里木盆地、青海的柴达木盆地和甘肃的河西走廊。自然环境特点是高山终年积雪，盆地中心是无垠沙漠，黄土覆于山前地带，气候异常干燥、雨量稀少、冰川再搬运的作用很大，形成各种类型的黄土状土，原生黄土很少见。

（2）中部黄土高原区

指青海龙羊峡至河南三门峡的黄河中游区，这是中国黄土分布的中心。区域四周山脉环绕，西有贺兰山，北有阴山，东有太行山，南有秦岭。该区黄土厚度大、地层完整，除少数山口高出黄土线外，黄土基本上是连续覆盖于第三系或其它古老地层之上，形成源、梁、峁特殊的黄土地貌，境内若干近南北走向的山脉，把黄土高原分割成东、中、西三个亚区。各亚区的自然景观各具特色，但黄土层结构却十分相似，它们都保留有从早更新世到晚更新世的黄土堆积，部分地区在晚更新世上还覆有薄层的全新世黄土。

（3）东部山前丘陵及平原区

区域范围系由大兴安岭、燕山山脉、太行山、东秦岭和大别山所围成的山前丘陵及平原，包括渤海中的庙岛群岛、鲁东和鲁中南低山丘陵与南京附近的丘陵。该区平原占主要面积，我国最大的华北平原和松辽平原都分布于该区。自第四纪以来，平原区经受了很厚的黄土状土堆积，并于河湖相砂砾石和粘土构成间互层，典型黄土仅分布于该区边缘山前和丘陵地带等。

上述三大区划分，概括了中国黄土、黄土状土（次生黄土）的分布。第一、三两大区黄土分布零星，且多属次生；第二大区黄土典型，分布面积大，地层完整[55]。

伊犁位于新疆西部，地处中国黄土第二大区黄土高原区以西，毗邻世界黄土主要分布区之一的中亚。受常年西风环流控制和区域地形的影响，该地区黄土广泛分布。在黄土分区方面，伊犁地区属于西北干燥内陆盆地区。

3.1.3 黄土地层

黄土形成于整个第四纪时代，在该世纪不同时期形成的黄土具有不同的工程性质。在进行工程地质调查时，应该对研究区的黄土地层进行划分。根据黄土的形成年代可以将其分为老黄土和新黄土，其中老黄土包括午城黄土和离石黄土，新黄土包括马兰黄土

和新近堆积黄土，具体划分和特性见表 3-1[56]。

表 3-1 黄土划分和地层特性[56]

Table 3-1 Loess stratum and characteristics[56]

年 代		黄土名称			成因	备注
全新世	近期	新黄土	新近堆积	次生黄土	水成为主	具不均匀性、高压缩性、强湿陷性
	早期		一般湿陷性黄土		风成为主	浅黄，一般具湿陷性
晚更新世 Q_3	马兰黄土					
中新世 Q_2	离石黄土	老黄土	非湿陷性黄土	原生黄土		一般不具有湿陷性
早更新世 Q_1	午城黄土					

全新世黄土状土（Q_4）：为新近堆积黄土，在伊犁境内分布广泛，该类黄土由于受各种自然营力的影响，其物理、力学性质的差异较大。但总体来说，大多呈现出质地较疏松，成岩性差，湿陷性，甚至是强湿陷性等性质。

晚更新世马兰黄土（Q_3）：在伊犁地区该类黄土大多呈不整合形式覆盖于泥盆系和二叠系等老地层之上，厚度一般在 10～30m 之间或大于 30m，山顶较厚处可达 70m 以上，颜色一般为浅灰黄色，质地疏松，无层理，大孔结构发育，有垂直节理，有较强的湿陷性或自重湿陷性。

中更新世离石黄土（Q_2）：为马兰黄土下部的埋藏黄土层，在伊犁地区大部分被上更新统马兰黄土覆盖，与其呈整合接触，少数在黄土滑坡侵蚀沟内零星出露。该类黄土质地一般比较密实，无湿陷性，但在高压等特殊情况下具一定的湿陷性。

早更新世午城黄土（Q_1）：该类黄土为老黄土的下部，在伊犁地区基本无午城黄土分布，在我国其他黄土地区如六盘山等地有分布。

3.2 黄土基本性质分析

黄土是一种不同于一般岩土体的特殊土体，是黄土滑坡地质灾害的主体，其基本性质与黄土滑坡的形成密切相关。因此，在研究伊犁黄土滑坡时，有必要对滑坡区域内黄土的基本性质进行研究。本文主要通过在伊犁境内采集土样进行试验，并结合已有研究成果，从物质组成、物理性质、水理性质、力学性质几个方面对伊犁黄土的基本性质进行研究分析。

3.2.1 物质组成

1.粒度

黄土颗粒组主要包括：砂土粒组、粉土粒组以及粘土粒组。其中，砂土粒组主要为细砂土，粒径大于 0.05mm，含量一般介于 10～25%；粉土粒组粒径在 0.05～0.005mm 之间，含量一般较高，约 40～65%；粘土粒组粒径小于 0.005mm，该粒组在黄土中含量

变化较大，通常在 5～30%之间。

在伊犁地区，由于受地形地貌等因素的影响，不同地带黄土的粒度呈现出较为明显的差异性。在盆地边缘的天山地带，黄土主要以粉粒为主，粒径在 0.004～0.065mm 之间，含量在 55.53～85.47%之间。相比之下，粘土粒和砂粘含量较小，其中粘土粒组粒径小于 0.004mm，含量约 6.88～24.88%，砂粒组粒径大于 0.063mm，含量在 10～15%之间[60]。在新源县境内采集的土样所进行的试验（具体见表 3-2）也显示该地区黄土以粉粒组为主，含量超过 60%。在伊犁河谷地带，黄土的粒度变化范围较大，其中沿着伊犁河谷由西向东，黄土颗粒越来越细，这主要是由该区域黄土的风成特征和区域内粉尘的源区位置造成的。在伊犁南北向的横向上，从河谷到平原到山麓，随着地势海拔的变高，黄土中粘土粒含量不断增加，砂粒含量减少，如海拔较高的昭苏地带其黄土的粒度比海拔较低的塔勒德要细[8]。

表 3-2 伊犁黄土颗粒组成

Table 3-2 The particle composition of loess in Ili

编号	取样深度	粒 径 含 量(%)			
	(m)	0.25-0.075mm	0.075-0.05mm	0.05-0.005mm	＜0.005mm
1	1.6-2.1	6.0	14.4	58.8	20.8
2	9.0-9.4	11.3	12.0	52.7	24
3	50.0	0.7	12.3	80.0	7.0
4	7.2-7.5	2.0	12.0	69.5	16.5
5	10.2-10.6	1.0	16.5	67.5	15.0
6	5.0	0.7	11.8	74.7	12.8

受黄土形成年代不同的影响，伊犁地区各时代黄土之间，其粒度成分具有明显的区别：老黄土中砂土含量明显较低，而新黄土中则较高；老黄土中粘粒含量明显高于新黄土，而两种黄土中粉土含量却比较接近。

2.矿物成分

目前，通过国内外学者的研究，在黄土中已发现多达60多种矿物。其中以石英、长石、云母为主，这几类矿物约占黄土中碎屑矿物总量的80～90%。黄土的粘粒部分，即粒径小于0.005mm的部分基本上是由伊利石、蒙脱石以及水云母等粘土矿物组成。按黄土中粘土矿物含量的不同，可以将其分为多种类型，如蒙脱石黄土、蒙脱石-高岭石黄土和蒙脱石-水云母黄土等；重矿物主要分布在0.1～0.05mm的粒级中，含量可达90%左右，其余少部分则分布在0.25～0.lmm粒级内。

伊犁黄土中矿物主要为石英，其次为方解石和长石，这三种矿物的含量可达85%左右，此外还有少量云母、绿泥石。在整个伊犁区域内，黄土的矿物组成差别不大。重矿物分析[62]表明：伊犁黄土中重矿物含量较低，基本小于5%，成分主要为角闪石、黑云母、帘石，大多为棱角状和次棱角状，表面较为干净，圆形颗粒较少。这与黄土高原黄土以角闪石、绿帘石为主[63]，矿物磨圆度高、表面侵蚀严重较为不同[64]。

3.化学成分

伊犁盆地黄土的地球化学成分主要由SiO_2、Al_2O_3、CaO、Fe_2O_3、MgO、K_2O、Na_2O等组成[60]，其中SiO_2、Al_2O_3、CaO为最主要的化学成分（具体见表3-3所示），其含量分别为45.78～53.77%、10.49～11.99%、6.85～13.40%，其次是Fe_2O_3、MgO、K_2O和Na_2O，含量分别为4.38～5.03%、2.41～3.00%、1.89～2.43%和1.38～3.05%。通过与黄土高原黄土对比分析发现，伊犁黄土中Na_2O和CaO含量相对较高，而黄土高原黄土中Al_2O_3含量较高。Na是化学性质比较活泼的元素，在相对干冷的气候环境下容易富集，因此说明伊犁黄土形成于比较干冷的环境。

表3-3 伊犁黄土主要元素氧化物组成[60]

Table 3-3 Oxide of major elements of loess in Ili[60]

样品编号	SiO_2(%)	Al_2O_3(%)	Fe_2O_3(%)	MgO(%)	CaO(%)	Na_2O(%)	K_2O(%)
TLD-1135	51.62	11.06	4.54	2.55	9.43	2.72	2.28
TLD-1305	47.69	11.36	4.83	3.00	11.69	2.36	2.33
TLD-3270	51.13	10.70	4.87	2.56	10.28	2.66	1.94
TLD-3300	51.21	11.10	4.48	2.59	9.94	2.49	2.19
TLD-5735	51.86	10.91	4.38	2.50	9.68	2.38	2.16
TLD-6095	51.68	11.07	4.46	2.59	9.98	2.41	2.19
TLD-8200	49.69	11.54	4.72	2.73	10.36	2.18	2.32
TLD-9425	50.48	11.09	4.67	2.70	10.58	2.36	2.06
XY-04	51.13	10.94	4.57	2.59	9.43	3.05	2.23
XY-12	45.78	10.49	4.65	2.61	13.40	1.59	1.89
XY-25	55.45	14.63	6.78	2.55	1.41	0.97	2.91
XY-33	49.69	10.94	4.68	2.54	10.38	1.87	2.06
XY-40	51.22	11.12	4.67	2.45	9.80	1.85	2.07
XY-48	50.30	10.94	4.51	2.66	10.19	1.93	2.10
XY-55	47.59	11.26	5.01	2.52	9.87	1.39	2.43
YN-03	51.12	10.92	4.42	2.60	9.57	2.08	2.23
YN-10	51.70	10.90	4.58	2.43	9.58	2.16	2.12
YN-16	53.77	10.95	4.47	2.52	6.85	1.79	2.34
ZS-10	46.76	11.42	4.96	2.72	11.31	1.50	2.18
ZSP-025	46.10	10.80	5.03	2.41	10.59	1.38	2.29
ZSP-125	50.80	11.83	4.85	2.75	9.90	1.74	2.27
ZSP-225	50.69	11.89	4.87	2.83	9.85	1.68	2.30
ZSP-435	50.27	11.99	5.00	2.97	9.58	2.04	2.41
ZSP-575	50.29	11.52	4.77	2.75	9.37	2.31	2.35
ZSP-665	50.76	11.62	4.84	2.70	9.24	2.52	2.38

根据试验结果，结合已有研究资料，发现伊犁境内黄土在化学成分方面具有以下特点：（1）伊犁境内各地黄土化学成分存在一定不同，但相差不大；（2）各地黄土均以SiO_2和Al_2O_3等为主要成分；（3）不同时代黄上所含化学成分较为相近。

4.可溶盐与酸碱度

黄土中的可溶盐主要包括易溶盐、中溶盐以及难溶盐。其中易溶盐主要指氯化物的盐类和易溶的硫酸盐、碳酸盐，中溶盐主要指石膏$CaSO_4$，难溶盐主要指石灰质$CaCO_3$。

伊犁黄土中的易溶盐主要以重碳酸盐和硫酸盐为主，此外氯化物盐类的含量也比较高。表3-4所示为在新源县境内的几处典型滑坡区域所取土样所做易溶盐试验报告，可以看到易溶盐阴离子以SO_4^{2-}、HCO_3^-、CL^-为主，CO_3^{2-}含量较低，阳离子以K^+、Na^+为主，其次是Ca^{2+}，而Mg^{2+}含量较少。

表3-4 易溶盐实验成果报告

Table 3-4 Test report of soluble salt

编　号			1	2	3	4	5	6
阴离子	CL^-	mmol/kg土	2.030	4.060	3.248	2.030	3.248	3.248
		mg/kg土	72.1	144.1	115.3	72.1	115.3	115.3
	HCO_3^-	mmol/kg土	1.990	2.786	2.786	3.582	3.582	1.990
		mg/kg土	121.4	169.9	169.9	218.5	218.5	121.4
	CO_3^{2-}	mmol/kg土	0.398	0.398	0.398	0.398	0.398	0.398
		mg/kg土	23.9	23.9	23.9	23.9	23.9	23.9
	SO_4^{2-}	mmol/kg土	1.375	3.575	2.750	8.250	8.250	6.875
		mg/kg土	132.0	343.2	264.0	792.0	475.2	660.0
	统计	mg/kg土	349.4	681.1	573.1	1106.5	823.9	920.6
阳离子	Ca^{2+}	mmol/kg土	1.150	1.150	1.150	1.840	1.840	1.150
		mg/kg土	46.0	46.0	46.0	73.6	73.6	46.0
	Mg^{2+}	mmol/kg土	0.690	0.690	0.690	1.150	0.460	0.690
		mg/kg土	16.6	16.6	16.6	27.6	11.0	16.6
	K^++Na^+	mmol/kg土	3.886	11.112	8.650	16.928	12.926	16.104
		mg/kg土	89.4	255.6	199.0	389.3	297.3	370.4
	统计	mg/kg土	152.0	318.2	261.6	490.5	381.9	433.0
易溶盐总量(%)			0.065	0.116	0.098	0.175	0.135	0.145
PH值			8.6	8.6	8.6	8.7	8.6	8.6
取样地区			加郎普特			则克台		

在酸碱性方面，伊犁地区黄土与国内其他黄土地区黄土一样，通常为碱性或弱碱性，鲜有酸性。此次在加郎普特和则克台取样试验所得结果也显示成碱性。

3.2.2 物理性质

黄土的物理性质与黄土滑坡有着较为密切的关系，该性质主要包括含水量、重度、

比重、孔隙比等指标。在伊犁地区黄土分布较厚的新源境内采集土样，进行土力学试验后得到各物理性质指标见表 3-5。

表 3-5 伊犁黄土物理指标

Table 3-5 The physical index of loess in Ili

野外取样编号	含水量 W %	比重 G	密度 ρ g/cm^3	干密度 ρ_d g/cm^3	孔隙比 *e*	饱和度 S_r %	取样地
YZZK3-1-1	24.3	2.72	1.99	1.60	0.699	95.0	
YZZK3-2-2	22.3	2.73	2.04	1.67	0.637	96.0	
YZZK3-3-1	27.6	2.72	1.89	1.48	0.836	90.0	
YZZK8-1-2	23.2	2.72	2.04	1.66	0.643	98.0	加
YZZK8-2-1	24.2	2.73	1.99	1.60	0.704	94.0	郎
YZZK8-2-2	21.9	2.72	2.03	1.67	0.633	94.0	普
YZZK9-5-2	25.9	2.72	2.02	1.60	0.695	100	特
YZZK10-5-1	27.0	2.72	1.94	1.53	0.781	94.0	
YZZK14-1-1	21.7	2.73	–	–	–	–	
YZZK29-1	19.9	2.71	2.10	1.75	0.547	99.0	
YZTJ1-1-3	14.1	2.70	1.63	1.43	0.890	43.0	阔
YZTJ1-1-4	15.6	2.70	1.58	1.37	0.975	43.0	勒
YZTJ1-2-3	10.0	2.70	1.50	1.36	0.980	28.0	德
YZTJ3-2-1	17.7	2.70	1.60	1.36	0.986	48.0	能
TZTJ1-1-1	22.2	2.70	1.86	1.52	0.774	77.0	
TZTJ1-1-2	30.8	2.73	1.85	1.41	0.930	90.0	则
TZTJ1-3-2	23.6	2.70	1.55	1.25	1.153	55.0	克
TZTJ3-1-1	9.8	2.71	1.43	1.30	1.081	25.0	台
TZTJ3-2-1	14.4	2.70	1.66	1.45	0.861	45.0	
TZTJ3-3-1	14.2	2.70	1.67	1.46	0.846	45.0	

试验结果显示，由于取样地点不同，各土样所测得的物理性质指标存在一定差异，其中天然含水量在 14.2～23.8%之间，天然密度在 1.58～1.80g/cm^3 之间，孔隙比在 0.686～0.957 之间，总体来说含水量和天然密度偏大，分析认为是受伊犁地区降水丰沛影响所致。

3.2.3 水理性质

1.黄土的塑性

黄土受自身多孔性、易溶盐含量高等自身特殊性质的影响，形成了较为独特的水理性质。黄土在一定含水量下所具有的状态叫做黄土的稠度状态，该状态受其含水量多少所影响。当土中的含水量变化时，黄土中的矿物颗粒与水发生复杂的物理化学作用，从

而形成塑性等特殊性质，液限、塑限、塑性指数和液性指数即是表征这种特殊性质的指标。在伊犁地区新源境内所取土样测得各稠度指标数据见表 3-6。

表 3-6 伊犁黄土的稠度指标

Table 3-6 The consistency of loess in Ili

野外取样编号	液限	塑限	塑性指数	液性指数	取样地
YZZK3-1-1	33.5	19.4	14.1	0.35	
YZZK3-2-2	40.0	24.8	15.2	＜0	
YZZK3-3-1	34.7	20.7	14.0	0.49	
YZZK8-1-2	32.6	18.8	13.8	0.32	加
YZZK8-2-1	38.1	22.5	15.6	0.11	郎
YZZK8-2-2	33.0	19.0	14.0	0.21	普
YZZK9-5-2	33.1	19.7	13.4	0.46	特
YZZK10-5-1	33.7	19.3	14.4	0.53	
YZZK14-1-1	42.8	26.8	16.0	＜0	
YZZK29-1	28.2	16.3	11.9	0.30	
YZTJ1-1-3	26.4	15.6	10.8	＜0	阔
YZTJ1-1-4	27.4	15.7	11.7	＜0	勒
YZTJ1-2-3	27.1	16.3	10.8	＜0	德
YZTJ3-2-1	26.2	15.1	11.1	0.23	能
TZTJ1-1-1	26.5	15.8	10.7	0.60	
TZTJ1-1-2	38.3	23.1	15.2	0.51	则
TZTJ1-3-2	32.7	21.3	11.4	0.20	克
TZTJ3-1-1	29.4	17.0	12.4	＜0	台
TZTJ3-2-1	27.4	16.0	11.4	＜0	
TZTJ3-3-1	26.1	15.3	10.8	＜0	

2.黄土的渗透性

黄土的渗透性是黄土的一项重要水理性质，该性质受黄土的土粒形状、级配等多方面因素影响，在伊犁地区未沉降地区获取土样，试验得到渗透系数见表 3-7。可以看到不同的取样地点黄土的渗透性有明显差别，但总体来说呈弱透水性。

表 3-7 伊犁黄土渗透性试验结果

Table 3-7 The test results of permeability of loess in Ili

编号	1	2	3	4	5	6
渗透系数 cm/s	7.7×10^{-4}	1.7×10^{-4}	1.9×10^{-6}	2.7×10^{-4}	1.9×10^{-3}	5.1×10^{-6}
取样地	则克台			阔勒德能		

3.2.4 力学特征

黄土不仅有着特殊的物理、水理性质，其力学性质也与一般岩土体不同，主要表现在压缩性、湿陷性和抗剪性等几个方面。

1.湿陷性

黄土的湿陷性是指在水的作用下，黄土所呈现出来的土体收缩、结构变密实的性质，该性质是黄土的一种特殊性质。黄土的湿陷性由湿陷系数 δ_s 表征，其大小反映了黄土对水的敏感程度，工程上根据 δ_s 判断黄土的湿陷性强弱。由《湿陷性黄土地区建筑规范》判定：$\delta_s<0.015$ 时，为非湿陷性黄土；$\delta_s\geq0.015$ 时，为湿陷性黄土。目前工程界一般认为：$0.015<\delta_s\leq0.02$，为轻微湿陷性；$0.02<\delta_s\leq0.07$，为中等湿陷性；$0.07<\delta_s\leq0.10$，为强湿陷性；$\delta_s>0.1$，为很强湿陷性[65]。

伊犁黄土由于其所处环境因素影响，与我国其他地区黄土相比，干密度相对较高，然而其孔隙比较大，因此具有较强的湿陷性特征。尹光华等人[66]研究发现，伊犁黄土在含水量低于 20%时，依然存在湿陷情况。

2.压缩性

黄土的压缩性是指黄土在压力荷载（主要为静荷载）作用下体积压缩变小的性质，该性质主要由压缩系数 a 来表征。对黄土的压缩性进行研究，对黄土地区的工程建设具有重要意义。

工程上，通常使用 P_1=0.1MPa 到 P_2=0.2MPa 的压缩系数 $a_{0.1\text{-}0.2}$ 作为判断黄土压缩性强弱的标准。在伊犁境内取土样做压缩试验，结果见表 3-8。

表 3-8 伊犁黄土压缩性质

Table 3-8 The squeezing property of loess in Ili

编号	天然含水量	重度	干重度	孔隙比	压缩系数 $a_{0.1\text{-}0.2}$（MPa^{-1}）
YZZK3-1-1	24.3	19.9	16.0	0.699	0.35
YZZK3-3-1	27.6	18.9	14.8	0.836	0.49
YZZK8-2-1	24.2	19.9	16.0	0.704	0.30
YZZK9-5-2	25.9	20.2	16.0	0.695	0.37
YZZK10-5-1	27.0	19.4	15.3	0.781	0.39
YZZK29-1	19.9	21.0	17.5	0.547	0.22
TZTJ1-1-1	22.2	18.6	15.2	0.774	0.35
TZTJ3-2-1	14.4	16.6	14.5	0.861	0.37
TZTK3-3-1	14.4	16.7	14.6	0.846	0.38

通过对试验结果和已有资料进行分析，发现伊犁不同地区黄土压缩性差距不大，但不同时期黄土的该项性质相差则较大，其中马兰黄土明显大于离石黄土。同时，伊犁黄土的压缩性与其孔隙比 *e*、重度 γ 等存在着一定联系。图 3-3 和图 3-4 为伊犁境内所取黄土土样试验所得压缩系数与孔隙比、重度的相关图。可以看到压缩性与孔隙比呈正相

关，与重度呈负相关。

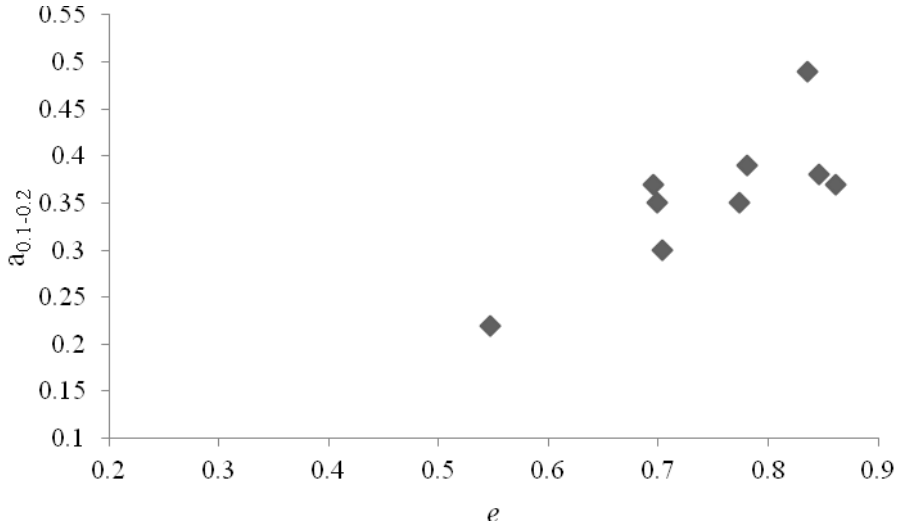


图 3-3 压缩系数与孔隙比的关系

Fig.3-3 Relationship between compressibility and void ratio

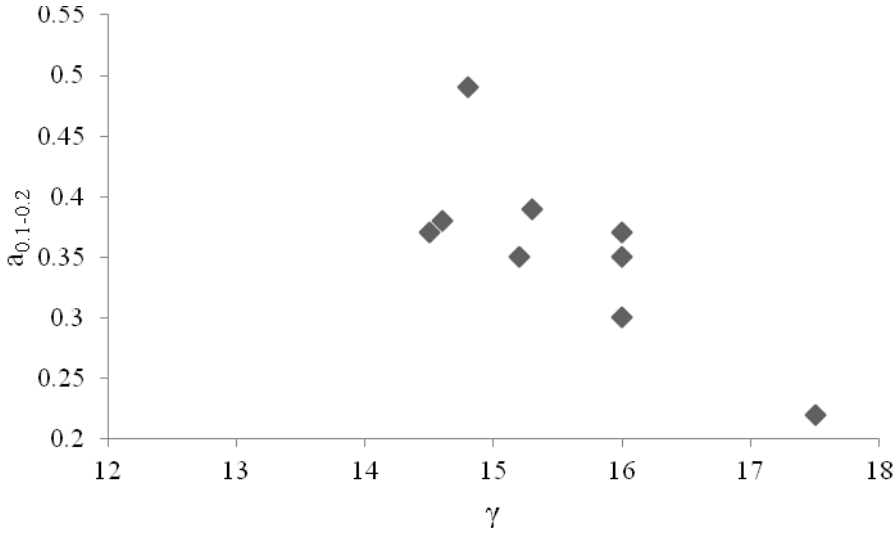


图 3-4 压缩系数与重度的关系

Fig.3-4 Relationship between compressibility and bulk density

3.抗剪性

黄土的抗剪强度是黄土强度的重要标志[55]，反映了黄土抵抗剪切破坏的极限能力。内聚力 c 和内摩擦角 φ 是表征黄土抗剪性的两个重要指标。黄土的抗剪强度受应力状态、含水情况、土体结构以及边界条件等因素的影响，具有明显的特殊性。

伊犁地区地处伊犁盆地东部，有着与黄土高原等黄土地区不同的工程地质条件，如该地区地形总体上为三面环山向西开口，降水较为充沛。独特的地质条件使得伊犁地区黄土的含水量、孔隙比等物理性质与其他地区黄土存在一定差异，受此影响，伊犁黄土的抗剪性也与其他地区黄土存在一定不同。通过对伊犁地区黄土土样进行直剪试验，得

到内聚力范围在 7.2～26.2kPa 之间，内摩擦角在 15.5～32.0°之间。同时通过对内聚力、内摩擦角与含水量的分析（见图 3-5 和图 3-6）发现：黄土的内聚力与含水量，内摩擦角与含水量均呈负相关，当含水量较低时，内聚力和内摩擦角较大，当含水量增大时，两项指标迅速变小。

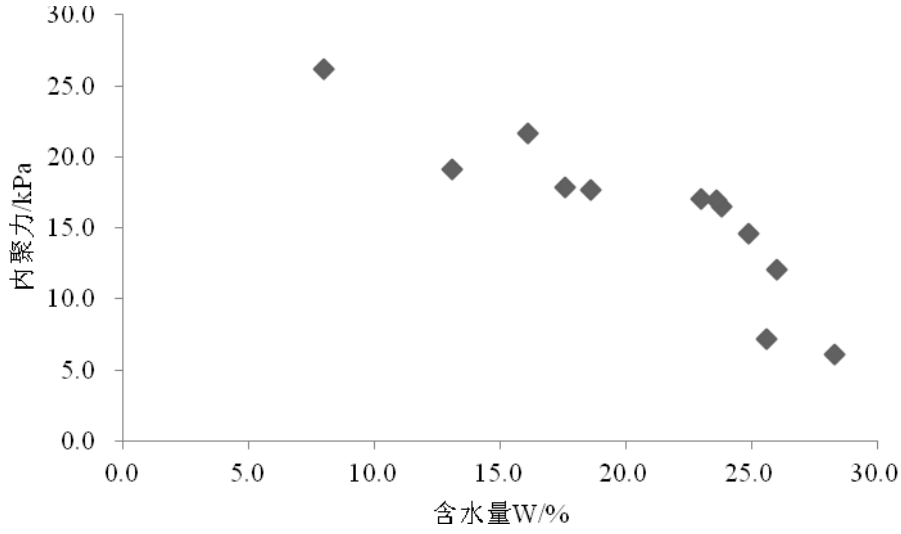


图 3-5 黄土内聚力与含水量相关图

Fig.3-5 Relationship between cohesion and water content

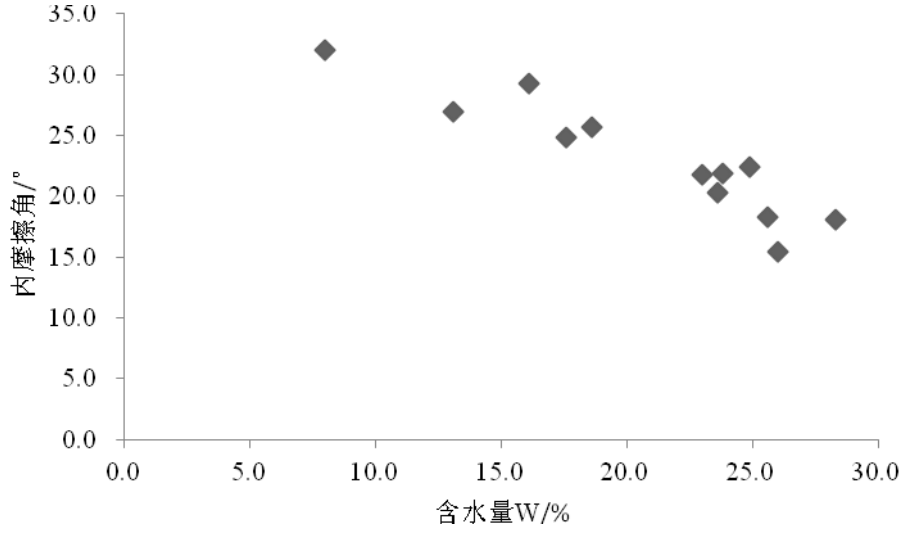


图 3-6 黄土内摩擦角与含水量相关图

Fig.3-6 Relationship between internal friction angle and water content

3.3 本章小结

本章以伊犁境内黄土为研究对象，从黄土分布、分区、黄土地层以及黄土基本性质等方面进行了研究分析。总结如下：

（1）该地区黄土为条带状分布，主要分布于伊犁河及巩乃斯河、特克斯河、喀什

河这三大支流以及各次级支流的河流阶地、盆地内几大山系的低山丘陵区和山麓斜坡以及沙漠边缘地带，各地带所分布的黄土厚度不一，较薄地带黄土仅数米厚、而较厚地带则可达到几百米。

（2）伊犁地区位于新疆西部，地处中国黄土第二大区黄土高原区以西，毗邻世界黄土主要分布区之一的中亚。受常年西风环流控制和区域地形的影响，该地区黄土广泛分布。在黄土分区方面，伊犁地区属于西北干燥内陆盆地区。

（3）伊犁地区广泛分布的黄土主要为马兰黄土、新近堆积黄土以及离石黄土，无午城黄土分布。伊犁地区黄土广泛分布，为黄土滑坡的发生提供了物源条件。

（4）在加郎普特、则克台和阔勒德能采集土样进行土力学试验，结果显示：物质组成方面，伊犁黄土粒度以粉粒为主，含量在 52.7～80.0%之间，矿物成分以石英、长石以及碳酸盐类矿物为主，呈碱性；物理性质方面，天然含水量和天然重度偏高，孔隙比在 0.686～0.957 之间；水理性质方面，渗透系数在 10^{-4}～10^{-6}cm/s 之间，总体呈现弱透水性；力学性质方面，呈现较强湿陷性，内聚力在 7.2～26.2kPa 之间，内摩擦角在 15.5～32.0°之间，且内聚力和内摩擦角随着含水量的增大呈明显减小趋势。

第四章　伊犁黄土滑坡特征及成因分析

在伊犁地区，滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害时有发生，其中又以黄土滑坡尤为严重。黄土滑坡地质灾害的发生，给滑坡灾区造成了不同程度的影响，制约了当地的经济发展和人民生活生产。伊犁地区由于受自身的地质、气象水文、地震以及黄土分布等条件的影响，黄土滑坡具有自身的特点。本章主要从该地区黄土滑坡的分布、类型、形态等方面分析黄土滑坡的特征，并分析滑坡形成的原因，以期为该地区黄土滑坡的防治提供理论参考。

4.1 伊犁黄土滑坡特征分析

4.1.1 滑坡分布特征

黄土滑坡的分布主要包括空间分布和时间分布两个方面。空间分布是指滑坡发生或可能发生的地区和位置；时间分布是指滑坡发生或可能发生的时间。伊犁黄土滑坡无论在空间或是时间上，都具有自身的特点。对伊犁黄土滑坡的分布情况进行分析，对于该地区黄土滑坡地质灾害的监测预报、防灾、减灾都具有重要意义。

1.空间分布

伊犁黄土滑坡在空间上的分布具有自身的特点，这主要是受该地区黄土的分布所控制，并且还受到该地区地形地貌、地层岩性、地质构造以及气候等诸多因素的影响。

由于伊犁地区黄土的分布总体为由西向东逐渐变厚，在新源县境内达到最厚后向东又开始变薄直至消失，受此影响，该地区黄土滑坡在空间上的分布总体表现为在西部黄土层较薄的地区黄土滑坡规模小数量少，而在中东部山区黄土层较厚的尼勒克县、巩留县和新源县境内，黄土滑坡数量最多，最为发育。

在伊犁地区西部，由于所分布的黄土层较薄，该地区黄土滑坡数量相对较小，滑坡规模通常为中小型，如伊犁西部察布查尔县境内所发现的 48 处滑坡，有 39 处为小型滑坡，中型滑坡仅 5 处，无大型滑坡。通过调查发现，伊犁西部地区黄土滑坡主要分布于中低山区、中低–低山丘陵区及河流两岸的黄土地带，平原地带基本没有滑坡发生。图 4-1 为在伊犁西部地区调查发现的滑坡地质灾害分布情况。其中伊宁县共滑坡 78 处，滑坡总面积达 $125.4\times10^4 m^2$，滑坡总方量约 $284.2\times10^4 m^3$，有 46 处发生在中低山区的山前黄土带，32 处滑坡发生在河流两岸；察布查尔县境内滑坡 48 处，有 44 处位于该县南部的中低山区，有 4 处位于中低–低山丘陵区，平原地带暂未发现滑坡。

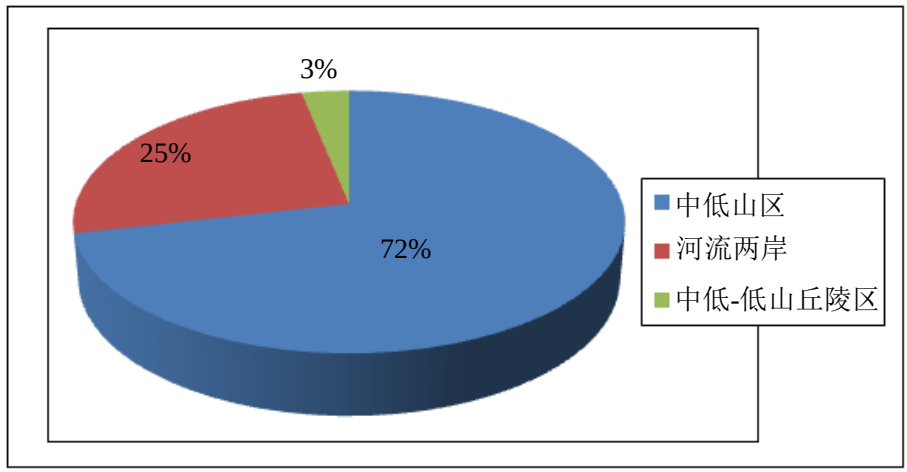


图 4-1 伊犁西部黄土滑坡分布情况

Fig.4-1 Distribution of loess landslide in west of Ili

在伊犁地区中东部，由于黄土分布广泛且地层较厚，该地区各类地质灾害频发，其中黄土滑坡发育尤为突出。该地区的新源、尼勒克、巩留三县为伊犁地区黄土滑坡主要分布区域，这三县境内黄土滑坡主要分布于中低山区，具体情况如下：

（1）新源县

新源县位于伊犁谷地的东端，因其特殊的地理位置和地质条件，滑坡、崩塌和泥石流等地质灾害十分发育，其中黄土滑坡最为发育，是伊犁地区滑坡地质灾害危害最严重的区域之一。总体来说，新源地区黄土滑坡主要分布于林带以下的中低山区，尤其是海拔 1100～2000m 的中山带最为发育，根据在该县境内的调查，新源地区约 87%的滑坡分布于这一地带，而海拔小于 1100m 的中低山区和海拔大于 2000m 的中高山区滑坡分布则相对较少，分别占 2.5%和 10.5%。由于在新源县境内，黄土的分布由西向东由薄变厚，再由厚变薄，而黄土的厚度对黄土滑坡的规模大小等有直接影响，因此在该县境内的南山塔勒德以东到那拉提区域以及阿吾拉勒山则克台以东到坎苏沟地段黄土滑坡分布较为密集，且滑坡规模较大。那拉提和坎苏沟以东区域，受黄土地层变薄影响，这一地带黄土滑坡分布较少。

（2）尼勒克县

尼勒克县位于伊犁地区东部，新源县以北，为伊犁地区黄土滑坡主要的分布区域之一。该县境内的黄土滑坡主要集中在中低山区及其附近黄土堆积区域，如东部的博尔博松沟到西部的唐布拉以及喀什河南北两侧的黄土分布地带。这些地带地层通常呈基岩上覆黄土状，地形坡陡谷深，为黄土滑坡的发生提供了有利条件。通过对尼勒克境内滑坡调查发现，滑坡总计 157 处，主要分布于省道 315 公路的临坡地段，博尔博松沟、吉林台水电站建设区和喀什河北侧沟谷的中下段。滑坡规模主要为小型和中型，很少有大型滑坡发生，滑坡体积基本小于 $1.04\times10^{2}m^{3}$，最大达 $9.98\times10^{4}m^{3}$。

（3）巩留县

巩留县位于伊犁中部，尼勒克县以南，新源县以西，为伊犁中部黄土滑坡主要的分

布区域，该县境内黄土滑坡在分布上具有较为明显的特征。根据调查资料，巩留县境内黄土滑坡主要分布于该县东部中低山区的黄土斜坡地带，如该县东南地区莫乎尔以南的大小莫乎尔沟、小库勒萨依以及大莫乎尔沟以东的尼亚孜卓勒萨依沟-卓勒萨依沟地区，达根别里山以东的恰西峡谷地带，恰西林场西部的库勒萨依、喀腊尕依布拉克以及喀英布拉克地区。由于地层等因素的影响，该县西部一些地区滑坡分布也较多，如伊什基里克山中段的伊里给代沟地带，这些地区海拔基本在 1300～1800m 之间，为中低山与高山交汇处，黄土地层较厚，沟谷切割相对较深。

2.时间分布

黄土滑坡何时发生，是至今仍然没有很好解决的问题，回答一个黄土斜坡何时会发生滑坡非常困难，但国内外学者一直没有停止在这方面的研究。伊犁地区为黄土滑坡多发区，受气象水文等条件的影响，该地区黄土滑坡在时间上的分布具有自身特点。

在年际分布上，伊犁黄土滑坡的分布规律与影响滑坡发育的某些因素有关，而这些因素通常也呈现年际性的变化。在诸多因素中，降水即是一个典型因素，在降水较少的贫水年份，滑坡较少；在降水丰沛的 1998、2001、2002、2003 和 2004 年等丰水年份，黄土滑坡发生则较多，其中 2002～2004 年为近期滑坡发生较为频繁的年份，加郎普特滑坡、别斯托别乡滑坡、莫乎尔乡滑坡等黄土滑坡均发生在这几年。

在月际规律上，伊犁黄土滑坡的分布亦呈现出较为明显的规律性。经调查发现，伊犁地区黄土滑坡多发生在春夏之交和夏季，主要集中在 4～9 月份。图 4-2 为伊犁地区黄土滑坡多发区之一的巩留县 45 年（1960～2005 年）来的滑坡统计数据，可以看到滑坡主要发生在 3～7 月，其中以 4 月和 5 月这两月滑坡数量最多。伊犁其他地区近年来典型滑坡亦主要发生在这两个月份，例如：2002 年 5 月 10 日的加郎普特滑坡、2003 年 5 月 31 日的吐尔根乡滑坡、2004 年 4 月 9 日莫乎尔乡滑坡、2005 年 5 月 4 日的别斯托别乡滑坡、2004 年 5 月 18 日的尼勒克 G315 公路滑坡等均发生在这几个月份。

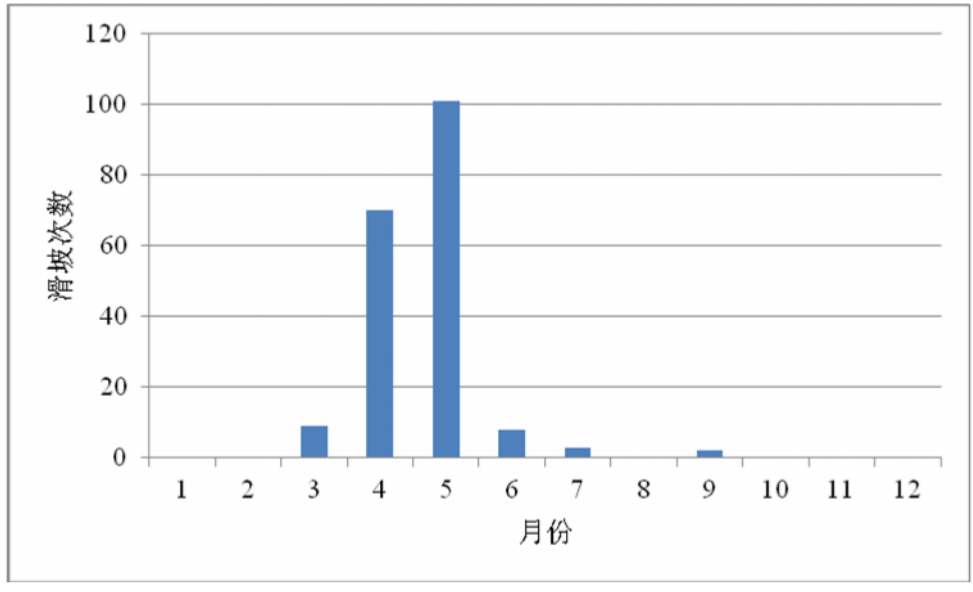


图 4-2 巩留县历年滑坡发生月份统计

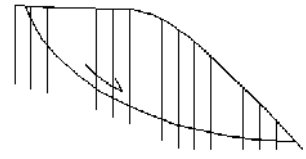
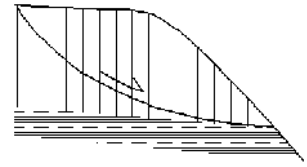
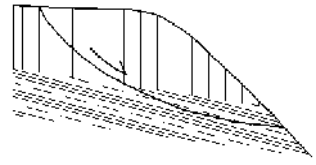
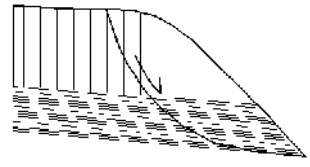
Fig.4-2 Months statistics of many previous years the happened loess landslide

4.1.2 滑坡类型特征

对黄土滑坡进行分类是对伊犁黄土滑坡进行研究的基础之一。根据前人的研究和实地调查，将伊犁地区滑坡分为两大类型，即黄土型滑坡和混合型滑坡，其中黄土型滑坡为该地区主要滑坡类型。两类滑坡中，前者可细分为黄土层内滑坡和黄土基岩接触面滑坡，后者可细分为黄土顺层滑坡和黄土切层滑坡，具体分类情况见表 4-1。

表 4-1 伊犁黄土滑坡类型

Table 4-1 Types of loess landslide in Ili

滑坡类型		滑动带（面）位置	说　明	剖面示意图
黄土型滑坡	黄土层内滑坡	沿黄土内部软弱带滑动	黄土内部具有隔水意义的古土壤层、陡倾的破裂面、振动作用下易液化的层。	
	黄土基岩接触面面滑坡	沿黄土下伏基岩顶面滑动	下伏基岩顶层常常是风化壳，遇水易被软化形成软弱带（面），当岩层倾角与坡向一致时，滑坡常沿此面滑动。	
混合型滑坡	黄土顺层滑坡	沿下伏基岩层间软弱带（面）滑动	黄土斜坡下伏基岩内部如其层间软弱夹层，易于形成连同上部黄土一起滑动的滑坡。	
	黄土切层滑坡	沿下伏基岩软弱构造面（节理面、裂隙面、断裂面等）滑动	如果下伏基岩结构脆弱，构造面发育，上覆黄土常因自重作用切断基岩，形成切层滑坡。	

（1）黄土层内滑坡

黄土层内滑坡是黄土滑坡的一种典型滑坡类型。该类滑坡的滑动带（面）位于黄土层内部，多为黄土层内的软弱带，滑面一般呈圆弧形，且滑面较光滑，滑坡后壁一般比较陡峭。滑坡体基本为不同时期的黄土或黄土状土。黄土层内滑坡发生时，一般容易形成高速滑坡，如若滑动方向前方地势较为开阔，则滑动距离会相对较远，形成高速远程滑坡。黄土层内滑坡在伊犁地区分布广泛，数量多，面积大，基本为浅层小型滑坡，但也有大型滑坡分布。研究区典型的黄土层内滑坡如图 4-3 所示。



图 4-3 黄土层内滑坡

Fig.4-3 Loess landslides

（2）黄土基岩接触面滑坡

与黄土层内滑坡相似，黄土基岩接触面滑坡（见图 4-4）也是一种纯黄土滑坡，该类滑坡多分布于伊犁境内丘陵地区的黄土斜坡地带。黄土基岩接触面滑坡与黄土层内滑坡的不同之处为：该类滑坡沿黄土层下伏基岩的顶层滑动，滑动面一般比较平直。由于发生此类滑坡的黄土斜坡其下伏基岩顶层一般为风化壳，在与水接触的情况下容易发生软化，从而形成软弱带（面），当岩层倾角与坡向一致时，滑坡便沿该软弱带滑动。



图 4-4 黄土基岩接触面滑坡

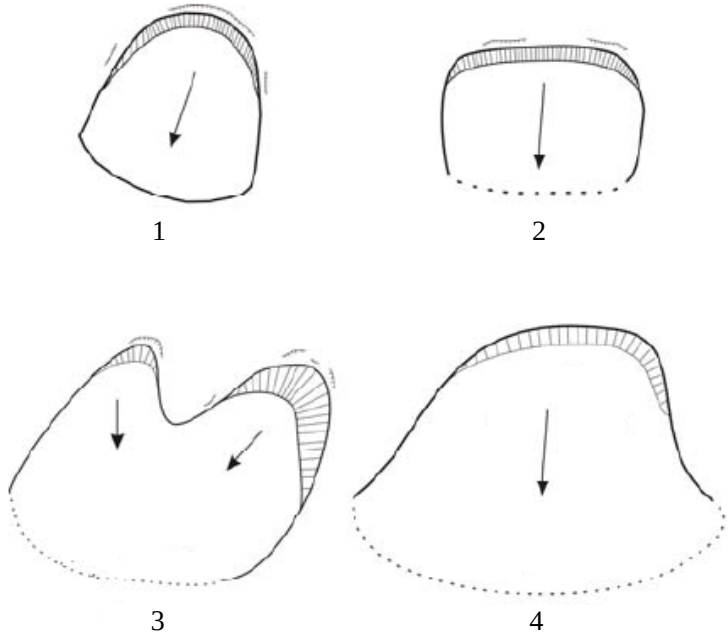
Fig.4-4 Loess interface landslides

4.1.3 滑坡形态特征

1.平面形态特征

伊犁地区黄土滑坡分布广泛，由于受区域内地形地貌、地质构造、气象水文以及人

类工程活动等各方面因素的影响，平面形态多样。根据国内学者提出的黄土滑坡平面形态特征及野外调查，将伊犁黄土滑坡在平面形态上分为：簸箕形、长椅形、复合形和扇形四种形态（见图 4-5）。



1. 簸箕形　2. 长椅形　3. 复合形　4. 扇形

图 4-5 滑坡平面形态示意图

Fig.4-5 The schematic diagram plane shape of the landslide

（1）簸箕形

簸箕形滑坡的滑坡后壁为圈椅状或马蹄形，滑坡前缘为簸箕状，是黄土滑坡常见的形态，也是伊犁地区黄土滑坡最主要的平面形态，该地区发生的黄土滑坡多数在平面形态特征上呈簸箕形。图 4-6 为伊犁地区典型簸箕形滑坡。



图 4-6 簸箕形

Fig.4-6 Dust pan shape

（2）长椅形

长椅形滑坡的滑坡后壁比较平直，滑坡宽度大于滑坡顺滑动方向的长度，外形似长椅状，是伊犁地区黄土滑坡较为常见的形态。图 4-7 为伊犁地区典型长椅形滑坡。



图 4-7 长椅形

Fig.4-7 Bench shape

（3）复合形

复合形滑坡多为复杂滑坡区的多个滑坡并列或是多条、多级、多层滑坡的组合。如一个大型滑坡体的多层滑面滑动，大滑坡体内的次级小滑坡等。图 4-8 为常见复合形滑坡。



图 4-8 复合形

Fig.4-8 Complex shape

（4）扇形

扇形滑坡的滑坡前缘范围较大，成开阔的扇形，一般有泉水出露，也是伊犁地区黄土滑坡比较常见的形态（见图 4-9）。



图 4-9 扇形

Fig.4-9 Fan shape

2.纵断面特征

黄土滑坡在纵断面所呈现的形态特征主要是由滑动面（带）所控制的，不同类型的黄土滑坡具有不同的纵断面特征。由于伊犁黄土滑坡的主要类型为黄土层内滑坡和黄土基岩接触面滑坡两类，其中黄土层内滑坡又为最主要类型，受此影响，伊犁滑坡的纵断面在形态上总体以圆弧形为主，此外还有部分滑坡呈现圆弧-直线、折线形等形态。

图 4-10 所示为新源县境内的加郎普特黄土纵剖面示意图，该滑坡发生于 2002 年 5 月 10 日，滑坡发生后，滑体掩埋 S316 公路，阻塞则克台沟形成堰塞湖，所幸未造成人员伤亡。

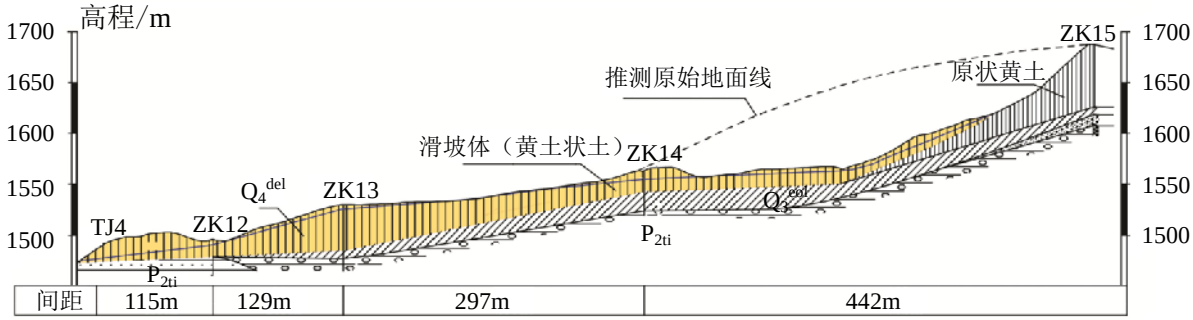


图 4-10 加郎普特黄土滑坡纵断面图

Fig.4-10 The vertical section of loess landslide of Jialangpute

根据野外调查，加郎普特滑坡是由多处滑坡构成的特大型滑坡，该纵剖面为东滑坡主断面，可以看到由于该滑坡高速滑动，滑体已经脱离坡体，使得滑坡的纵断面形态十分清楚，可以清晰的看见该滑坡的滑面形态特征。

4.2 伊犁黄土滑坡成因分析

影响滑坡形成的原因很多，根据实际情况，将伊犁黄土滑坡形成的原因分为内因和外因，具体见图 4-11。

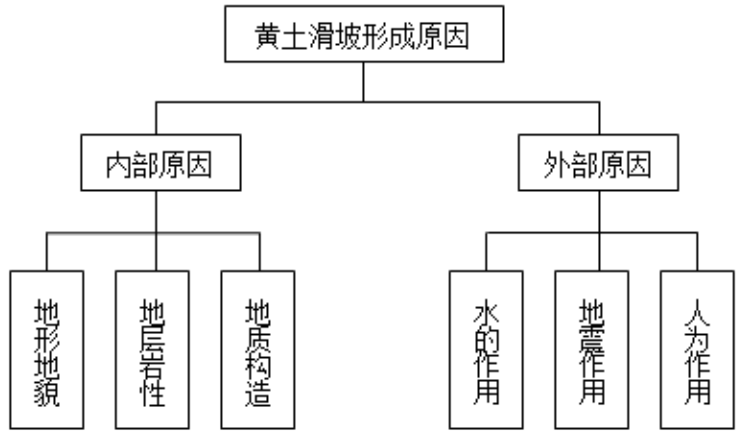


图 4-11 伊犁黄土滑坡形成原因

Fig.4-11 The forming reason of loess landslides in Ili

4. 2. 1 滑坡形成的内部原因

1.地形地貌

黄土滑坡的产生与地形地貌有着较大的关系。一般来说，起伏不大，坡度较小的山坡，大多数都是比较稳定的，发生滑坡的可能性较小，例如伊犁西部地区，这一地区地势总体较为平坦，多为平原和河谷，黄土滑坡灾害发生较少。而当斜坡高度大、坡度陡时，斜坡内部的软弱结构面通常处于临空状态，这使得软弱面之上的岩土体在自然状态下或其他因素的影响下容易发生滑动。因此，在坡陡谷深的地形条件下，黄土滑坡相对容易发生，如伊犁的中东部地区，地形起伏较大，群山环绕（见图 4-12 所示），坡大谷深，是黄土滑坡的多发地区。



图 4-12 伊犁中低山区地貌

Fig.4-12 The landform of lower and middle mountain areas of Ili

同时，坡大谷深的地貌条件可以给黄土滑坡的发育提供重力条件。斜坡越高陡，使得覆盖于斜坡之上的黄土在自重力和其他因素的共同作用下，越容易发生向下运移、蠕变，从而形成滑坡。在伊犁地区东部的滑坡高发区新源县，通过对各类黄土滑坡进行分

析发现，发生于斜坡高度小于 20m 的滑坡仅占黄土滑坡总数的 10.7%，发生于斜坡高度在 20～40m 之间的占黄土滑坡总数的 12%，发生于斜坡高度在 40～60m 之间的占黄土滑坡总数的 20.9%，发生于斜坡高度在 60～100m 之间的占黄土滑坡总数的 24.2%，发生于斜坡高度大于 100m 的占黄土滑坡总数的 32.2%。

2.地层岩性

地层岩性是影响滑坡等斜坡变形的重要因素。伊犁地区黄土斜坡一般包括黄土层和基岩层这两类地层，各地层的性质、特点与黄土滑坡的发生关系密切。不同的地层具有不同物理、水理和力学等性质，岩土体强度也不相同，这决定并影响着黄土斜坡的稳定程度，从而影响着黄土滑坡的形成。

伊犁地区广泛分布着马兰黄土、离石黄土等第四系黄土，该类黄土广泛的分布于境内的平原、河谷和中低山区，且黄土层大多与下伏基岩呈不整合接触，这为黄土滑坡的发育提供了有利条件。同时，研究区黄土的矿物组成多以石英、长石为主，并且含有大量易溶盐，结构疏松，具有大孔性结构，垂直节理发育（见图 4-13 所示），湿陷性明显等性质，当遭遇雨水或其他外界水体时，其抗剪强度迅速降低，极易引起斜坡变形从而形成黄土滑坡等地质灾害。

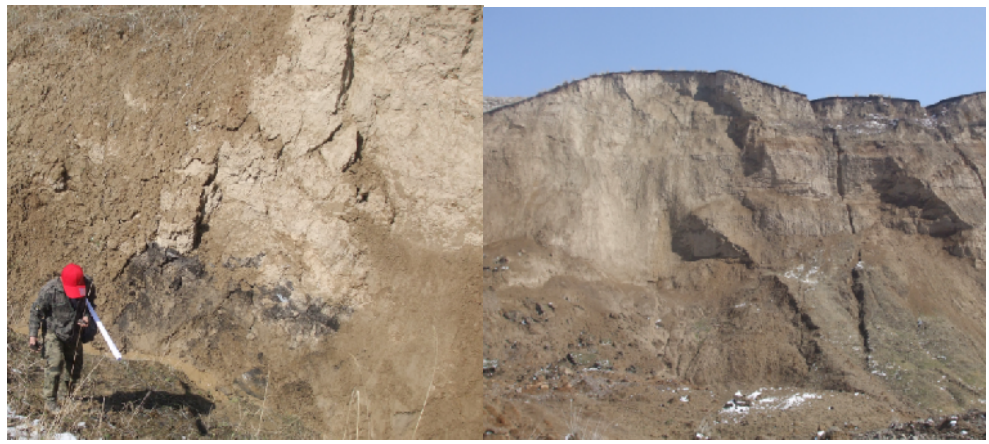


图 4-13 黄土垂直节理

Fig 4-13 The vertical joints of loess

黄土层下伏基岩对黄土滑坡的影响主要在于其顶部风化剥蚀带或内部软弱夹层。在外部水的作用下，这些软弱带的抗剪强度降低，当抗滑力小于下滑力时，坡体便失稳滑动，从而形成黄土滑坡。

3.地质构造

除地形地貌和地层岩性外，地质构造也是影响黄土滑坡形成的一个重要条件。伊犁位于伊犁盆地东端，地质构造较为复杂，新构造运动较为活跃。从大的方面看，在断层通过的地带，滑坡通常十分发育；从小的方面看，构造运动使得岩体结构破碎、节理和裂隙发育，再加之局部地区的小断层活动等因素的作用，为黄土滑坡的发育提供了有利条件。伊犁地区构造运动对于黄土滑坡的影响体现在以下几个方面：

（1）构造运动形成了高山、低谷，从而间接为黄土滑坡的形成提供了临空条件；

（2）构造运动在地质体中造成了断裂、节理、不整合面等软弱结构面；

（3）地质构造通常影响着区域地下水的类型和分布，从而间接影响着黄土滑坡的发育。

4.2.2 滑坡形成的外部原因

1.水的作用

水是伊犁地区黄土滑坡形成的重要诱发原因之一，其对黄土斜坡的不利作用主要包括地表水下渗、地下水位上升、河流侧蚀、降雨（融雪）下渗等。

伊犁地区水系密度较高，境内分布着伊犁河、特克斯河、巩乃斯河和喀什河及其各大支流。各大河流以及地面径流的地表水与该地区黄土滑坡的发育关系密切，境内多处黄土滑坡均发生于河流岸坡处。其中地面径流对黄土滑坡所起的作用主要表现在冲刷黄土斜坡坡面、坡脚等，并且水从坡面渗入坡体，会使得斜坡的岩土体重度增加、强度降低，当渗入节理和裂隙中时将产生水压力，促进冲沟与落水洞的发育，从而降低斜坡的稳定性。河流的作用表现在河流中水体的流动对岸坡的侧蚀和改变地下水的排泄补给条件两个方面：由于河流的侧蚀作用，河流两侧的岸坡不断变高变陡，并且坡脚出现临空面；河流水位的变化，使得河流周边地带地下水的排泄和补给条件发生变化，从而使得岸坡内的水力梯度改变，形成不同程度的动水压力，增加了斜坡的不稳定性。

地下水对黄土滑坡的发生也起到了重要作用。一般来说，黄土地区的地下水基本分布于黄土层及其底部卵砾石层以及下伏岩层之中[55]。在通常情况下，当地下水路畅通时，斜坡的稳定性受其影响较小，然而当遭遇降水或其他特殊情况时，地下水水位等将发生改变，可能给斜坡的稳定性造成不利影响。地下水在影响滑坡发生方面的作用主要表现为：

（1）浸润斜坡内的软弱结构带，使得该软弱带内的岩土体抗剪强度明显降低；

（2）在斜坡内的隔水层富集，对隔水层之上的岩土体形成浮托力；

（3）溶解斜坡土体中的易溶物质，使得岩土体的结构强度减小；

（4）赋存在斜坡内部的节理、裂隙和隔水层处，形成静、动水压力。

伊犁地区受三面环山向西开口的“喇叭”地形的影响，降水较为丰沛，降水的作用是该地区黄土滑坡形成的主要诱发原因。此次野外调查发现的加郎普特滑坡、吐尔根乡滑坡、莫乎尔乡滑坡、别斯托别乡滑坡、尼勒克 G315 公路滑坡等均为降水所致。降水对黄土斜坡稳定性的影响主要表现在：

（1）由于黄土的垂直节理和裂隙发育，为降水的下渗创造了有利条件，当遭遇持续降水时，降水沿节理和裂隙下渗，增加坡体内的静、动水压力；

（2）降水下渗至黄土层与基岩相接面时，由于基岩层的渗透率较之黄土层小，因而在此形成一个相对隔水层，降水于此富集，产生浮托力，形成软弱结构带；

（3）降水停留于黄土孔隙中，产生孔隙水压力，同时软化土体，使其强度减小；

（4）降水渗入土体，使其自重增加，从而使得坡体下滑分力变大。

伊犁地区降水较为丰沛，多年平均降水量在 200～550mm 之间。但与此同时，该地

区多年平均蒸发量 1467.67mm，为降水量的数倍，因此正常的降水对黄土斜坡的影响并不大，而集中持续的降水则影响很大。其中融雪季节和降水集中期重叠更加剧了黄土滑坡灾害的发生，如 2002 年 5 月 10 日，伊犁新源县境内所发生的加朗普特黄土滑坡即是持续降水所诱发的。据当地气象资料显示，2002 年 4 月以来，该地区降水明显增多，仅 4 月降水总量就达 150.9mm，与历年同期平均值相比，多了近 182%。而 5 月 10 日前后，当地又出现连续多日的降水，降水量的异常增大，加之该地区地形地貌等条件，促使了该滑坡的发生。

2.地震

地震作用为除水的作用之外，黄土滑坡的另一个重要外部原因，其对黄土滑坡的作用主要表现在三个方面：

（1）直接破坏黄土斜坡的岩土结构，减小岩土体内颗粒之间的固有联结力；

（2）使得坡体中粉细砂层与饱和黄土层发生液化；

（3）增加坡体下滑动力。

伊犁地区地震活动较为频繁，尤其是东部地区，该地区属于北天山褶皱带的一部分，新构造运动相当强烈，为地震多发区。北天山地震带在历史上曾发生过多次地震，7 级以上的强震多发生在具有控制意义和继承性活动的深大断裂带上。其中影响最大的两次地震是，1812 年在尼勒克东部发生的 8.0 级地震和 1944 年在新源县东北部发生的 7.25 级地震。

3.人为作用

伊犁地区人为作用主要包括切坡、加载、机械振动和植被破坏等。

（1）切坡、加载和机械振动

在一般情况下，黄土斜坡通常处于稳定或基本稳定状态，不会发生变性破坏。人类由于自身需要，常需在黄土斜坡等各类自然斜坡上进行切坡和加载等工程活动。这打破了坡体原有的应力平衡，加之缺少相关的稳定措施，使得坡体发生失稳滑动。切坡和加载对黄土斜坡稳定性的影响主要为：在斜坡前缘进行的开挖等切坡作用，使得斜坡的阻滑力减小，在斜坡后缘加载增大了坡体滑动力。机械振动对斜坡稳定性的影响与地震作用类似。

近年来随着伊犁地区经济的发展，境内部分工厂企业生产规模开始不断扩大，重型车辆车次不断增加，部分地区修建公路开挖坡脚（见图 4-14 所示），这些人类工程活动不同程度地降低了黄土斜坡的稳定性。例如由于伊犁钢铁厂等工厂企业生产规模的不断扩大，途经则克台沟的大吨位车辆数量日益增加，大吨位车辆产生的振动，加之修复 316 省道而对坡脚进行的开挖，使斜坡坡脚抗剪强度明显降低，已成为则克台山区的一个比较突出的环境地质问题。



图 4-14 人类工程活动

Fig.4-14 Human engineering activities

（2）植被破坏

植被是土壤的保护层，能起到保护斜坡表面、避免坡面剥落、减少坡脚所受冲刷、增加坡体强度以及提高斜坡稳定性的作用。斜坡表面植被覆盖，可增加坡体稳定性，降低发生滑坡的可能性；破坏植被，降低黄土斜坡表面植被覆盖率，则将有利于地表水冲蚀坡体表面，掏蚀坡脚，从而增加发生滑坡的可能。

伊犁地区人类对植被的破坏主要为开挖中草药和过度放牧等活动。例如据调查，在阿吾拉勒山区，由于开挖中草药屡禁不止，每年都有为数众多的群众进行开挖中草药的活动。在坡体表面进行的开挖，使得这一地区原本稳定的山坡和植被遭到比较严重的破坏，从而给降水入渗创造了有利条件，加剧了滑坡和泥石流等地质灾害的发生。

同时由于伊犁地区经济的发展，牧业规模开始不断扩大。虽然伊犁境内草场面积广阔，但依然出现了较为明显的问题。这集中表现在牲畜存栏数超出草场的承载能力，尤其是春秋草场已明显不能满足目前牲畜的需求。每年春末至夏秋两季，牧业活动几乎全部集中于山区，过度放牧使得坡体表面植被遭受破坏，推动了滑坡和泥石流等地质灾害的发生。

4.2.3 研究区降雨诱发黄土滑坡的机理

由于伊犁多山的地形地貌、特殊的地层岩性以及丰沛的降水，区域内黄土滑坡多发生在暴雨或持续降雨之后，如此次野外调查发现的加郎普特滑坡、吐尔根乡滑坡、莫乎尔乡滑坡、别斯托别乡滑坡、尼勒克 G315 公路滑坡等均为降雨所致。因此，深入研究降雨诱发黄土滑坡的机理对于伊犁黄土滑坡的防治具有重要意义。

1.饱和黄土层的形成

伊犁境内大部分地区被 Q_4、Q_3 黄土覆盖，该类黄土大多具有垂直节理发育和大孔隙性等性质。当遭遇持续降雨时，雨水顺着孔隙下渗进入土体，当下渗至基岩或密实的粘土层时，由于基岩或粘土层的渗透性相比黄土层较差，雨水在此汇集，形成隔水层。随着降水时间的持续，隔水层以上的黄土层逐渐变成饱和黄土层。同时，由于长时间的降水，地下水的补给排泄动态平衡被打破，补给量大于排泄量，使得地下水位上升，尤

其在遭遇长历时的暴雨条件下，地下水位上升速度很快，潜水面几乎就是地表面。此时，黄土含水量增高、饱和度增大，形成饱和黄土层。

2.降雨对黄土斜坡稳定性的影响

中小型降雨对黄土斜坡的稳定性威胁较小，而暴雨或持续降雨则会产生较大影响，主要表现在以下几个方面：

（1）降雨沿节理和裂隙下渗，增加坡体内的静、动水压力；

（2）雨水下渗至黄土层与基岩相接面时，由于基岩层的渗透率较之黄土层小，因而在此形成一个相对隔水层，雨水于此富集，产生浮托力，形成软弱结构带；

（3）降雨停留于黄土孔隙中，产生孔隙水压力，同时软化土体，使其强度减小；

（4）降雨渗入土体，使其自重增加，从而使得坡体下滑分力变大。

3.饱和黄土的液化机理

饱和黄土的液化是指饱和黄土在动荷载下，所表现出的动变形。当黄土层中的含水量高于塑限含水量时，由于伊犁黄土的塑性指数一般在 9～15 之间，在动应力和水的作用下，孔隙水压力就可能上升，有效应力降低，抗剪强度降低，地基失稳而沉陷或滑动。

在持续的降水条件下，黄土斜坡中形成饱和黄土层，该黄土层中的黄土其饱和度通常达到 80%～90%，一般低于砂土的饱和度。此时，黄土土体内的中、小孔隙中已经充满了水，大孔隙中部分充水，而微孔隙中则基本没有水，黄土颗粒连接点之间的结合力被削弱，在一定强度的荷载作用下，开始表现为弹性孔压。随着支架空隙结构的崩溃和粉粒物质散离，进入这些空隙中，在此过程中，一方面孔隙体积减少，孔隙水来不及排出使得孔压增大，作用于土体骨架上的有效应力迅速减小，土体的强度大幅度降低。另一方面，因为在孔压增大的过程中，微孔隙和部分大孔隙也会充水，这使得中、小孔隙中的水压力在一定程度上被消散，这表现为传递孔压，从而使得孔压上升受到一定的制约而不能达到有效围压。然而由于多孔隙结构的破坏和有效应力的重新分布，黄土中仍存在较大的残余应变和孔压。黄土表现出低抗剪性和高流动性，从而导致大面积的下沉或流动。

4.黄土液化引起黄土斜坡滑动的作用过程

降雨诱发黄土滑坡时，从开始降雨到滑坡发生，为一动态过程，可总结如图 4-15 所示。

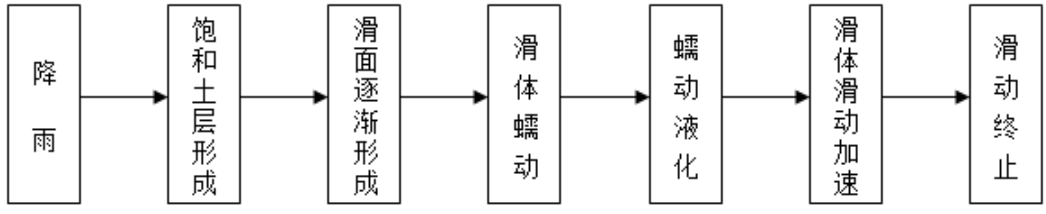


图 4-15 黄土液化引起滑坡的过程

Fig.4-15 Process of landslide caused by loess liquefaction

在遭遇暴雨或持续降雨时，雨水沿着黄土的垂直节理下渗，当下渗至基岩或密实的

粘土层时，由于基岩或密实粘土层的渗透性相比黄土层较差，雨水在此汇集，形成隔水层。随着降水时间的持续，隔水层以上的黄土层逐渐变成饱和黄土层。在地下水及外动力作用下，滑动面逐渐形成。由于滑面的形成和保水层的长时间滞留，使得黄土的内聚力 c 和内摩擦角 φ 降低，从而也降低了土体的抗剪强度 τ，在此情况下，斜坡在重力作用下开始产生蠕动变形。饱和土层在外动力作用之前，土骨架未发生滑移，外界重力全部由土骨架承受，但当斜坡发生蠕动后，蠕动产生的剪切力作用使得土颗粒产生滑移，改变排列状态，产生孔隙水压力，使得有效应力降低，产生轻微液化，这使得滑坡体滑坡加速，最后滑坡终止。

4.3 研究区典型黄土滑坡分析

在野外调查的基础上，针对伊犁黄土滑坡的特征，选取区内的加郎普特滑坡为典型例子，从滑坡工程地质条件、滑坡特征、成因机理等方面对其进行分析。

4.3.1 加郎普特滑坡概况

加郎普特黄土滑坡（见图 4-16 所示）发生于 2002 年 5 月 10 日，滑体总方量初步估算在 2275.5 万 m^3 左右，属特大型滑坡，为近十多年来伊犁地区规模最大的黄土滑坡之一。该滑坡地处阿吾拉勒山中山地段，海拔 1300～1800m，位于新源县则克台镇以北 15～16km 的则克台沟东侧。滑坡发生后，滑坡体向西滑动，形成 4 个台坎，摧毁了原坡体下的 S316 公路，并且大量土体进入则克台沟将其阻塞，形成了湖面面积约为 10 万 m^2，蓄水量 46 万 m^3 的堰塞湖，严重的威胁着则克台镇人民的生命财产安全。



图 4-16 加郎普特黄土滑坡全貌

Fig.4-16 Panorama of Jialangpute loess landslides

4.3.2 滑坡区工程地质条件

（1）地形地貌

加郎普特滑坡群地处新疆阿吾拉勒山区，海拔 1300～1800m，周围群山环绕，沟壑纵横，沟谷山坡表面草本植被发育，矮小灌木稀疏生长。山体坡度大多在 25～40°左右，

部分大于 40°，总体地势北高南低。滑坡山体西侧地势较为开阔，沟谷底部为汇集泉水的常年性河流—则克台沟以及滑坡灾害引起的堰塞湖，S316 公路沿着则克台沟和山体之间开阔处呈南北向延伸。

（2）地质构造与地层岩性

加郎普特滑坡所在地区位于西天山优地槽褶皱带的中部，北以尼勒克深断裂为界与博罗科努复背斜相接，南以那拉提深断裂为界与哈尔克山复背斜为邻。尼勒克深断裂走向近东西，横贯全县延伸数百公里，为压性断裂。区内主要分布阿吾拉勒断褶带和博罗科努复背斜二个次级构造单元。

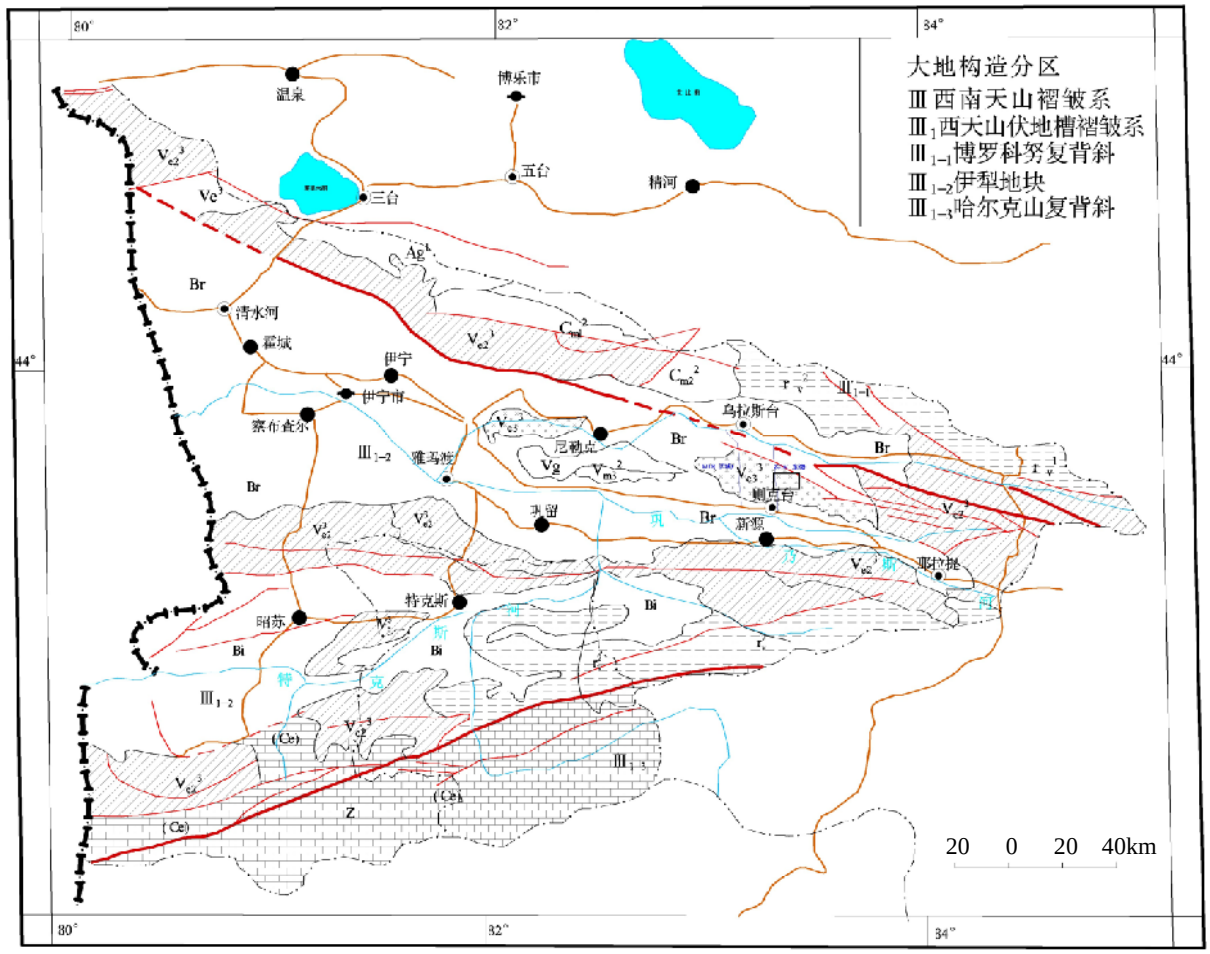


图 例

Z 中条褶皱中条构造层	Vg 后华力西盖层	中性（安山岩类为主）
U 武陵褶皱武陵构造层	前期旋回褶皱	地槽造山阶段火山岩
Ag1,2,3 后扬子盖层	华力西旋回	超岩石圈断裂及推测超岩石圈断裂
Cm2/Ce2 晚加里东褶皱早加里东构造层	次级断裂及推测次级断裂	岩石圈断裂及推测岩石圈断裂
Ve3 晚华力西褶皱早华力西构造层	拟建道路	

图 4-17 加郎普特地质构造图

Fig.4-17 Geological structure map of Jialangpute

区域内山体主要由古生界火山碎屑岩、砂岩及少量花岗岩组成，其上为第四系松散物覆盖。根据现场调查和钻探成果，出露地层主要为古生界泥盆系中上泥盆统坎苏组和二叠系下二叠统乌郎组的凝灰岩、砂岩、砾岩以及第四系中更新统风积层、上更新统风积层和全新统冲积层。

（3）水文气象特征

加郎普特滑坡所在地区位于伊犁东部，属大陆性气候，具有大陆性中温带湿润气候的典型特征。该地区雨水比较丰沛，是新疆伊犁地区降水最丰富的区域之一，多年平均气温 8.3℃左右，多年平均降水量 480～600mm，降水集中于 4～6 月份。

（4）地震

滑坡区位于伊犁地区东部，属北天山地震带的一部分，为地震多发区，根据《地震动峰值加速度区划图》，该地区地震动峰值加速度为 0.20g，相对应的地震烈度为Ⅷ度，属区域地壳次不稳定区。

4.3.3 加郎普特滑坡特征

（1）空间形态特征

加郎普特滑坡是由北滑坡、东滑坡、东南滑坡三个大型滑坡以及其他次级滑坡组成的特大型滑坡（见图 4-18）。主滑坡为东滑坡，其滑坡后壁呈圈椅状，位于东侧，也是该特大型滑坡后壁最高处，北滑坡后壁与东南滑坡后壁稍矮。其中北滑坡后壁高 100m，东滑坡后壁高 110m，东南滑坡后壁高 60m。主滑坡后壁位置切割已越过分水岭，后壁呈近直立状，易于发生崩塌，在三个滑坡后壁下方可见大量崩积物。东滑坡后壁下方的滑体上可见滑坡湖，积水较浅，且湖内可见大量碎石堆积。三个滑坡体交汇于一体，主滑动方向为近 285°方向。由于滑坡中下部基岩埋藏较浅，受其阻挡，滑坡体被分为南北两支，导致滑坡坡体中部较高。南侧与北侧由于滑坡土体滑至则克台沟，加之后期水流切割侵蚀，因而滑坡体厚度较薄。

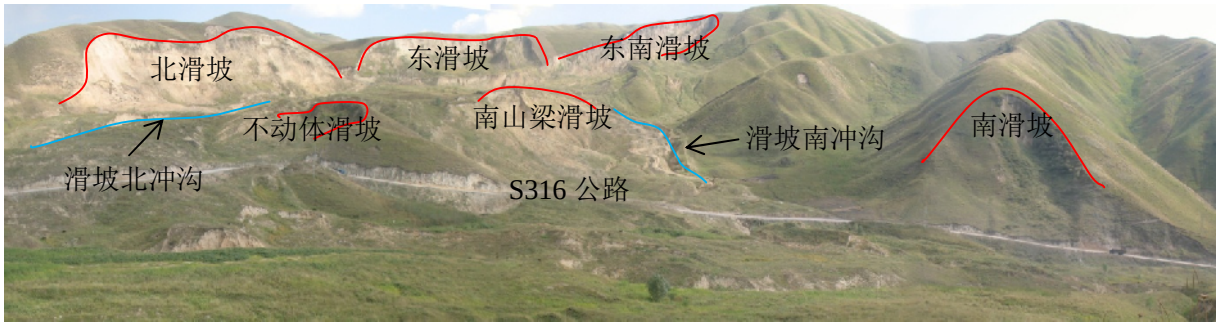


图 4-18 加郎普特滑坡空间分布

Fig.4-18 Spatial distribution map of Jialangpute landslide

滑坡南北两侧滑体上发育有两条滑坡侵蚀沟，分别为南沟与北沟，两条滑坡侵蚀沟切割较深，最深处大于 20m。滑坡北沟长度大于南沟，北沟延伸至滑坡后缘，汇集了北滑坡与东滑坡以及部分东南滑坡后壁出露的泉水，因此水量较大。而南沟主要汇集了部分东南滑坡泉水，水量稍小。这两条滑坡侵蚀沟为该特大型滑坡地表水及地下水的主要排泄通道。

目前滑坡所形成的堰塞湖（见图 4-19）面积约为 10 万 m^2，水位标高 1450.1m，湖水最深约 12m，蓄水量为 46.4 万 m^3。堰塞体顺河方向长 500m，横河宽约 400m，最小厚度 22m 左右。东侧有一人工开挖的泄水沟渠，坝体表面起伏不平，并发育有多条与则克台沟延伸方向相垂直的拉张地裂缝，延伸长度 10～100m，宽度 0.1～2m，深度 0.1～1m 左右。堰塞体组成物质主要为黄土状土，局部夹杂有角砾层。黄土状土层下为厚度不一的粉质粘土，局部为角砾夹粉质粘土。



图 4-19 堰塞湖

Fig.4-19 Barrier lake

（2）滑体

根据地面工程地质测绘、钻孔、浅井和槽探揭示，加郎普特滑坡尽管由三个不同滑体组成，但由于成因和影响因素相似，滑体组成也非常相近。

加郎普特滑坡滑体物质组成以表层黄土状粉土为主，呈棕黄～灰黄色，局部地段夹杂碎石，个别地段为碎石土，呈透镜体状分布，规律性较差。碎石土多分布在滑坡体中下部，碎石含量在 20～50%之间，块径基本在 2～8cm 左右，呈棱角～次棱角状，岩性以砂岩、凝灰岩、火山角砾岩为主，强风化状态。滑体上布置的 ZK8、ZK16 钻孔揭露滑体中含块石、漂石，块径最大达数十厘米。地表常可见巨大漂石、块石，母岩成分为凝灰岩、砂岩、火山砾岩。根据钻探揭露情况分析，滑坡体厚度平均为 25.39m，其中北侧厚度较大，大于 30m，滑坡后缘厚度稍薄，约 20m 左右。

由滑体阻塞则克台沟所形成的滑坡堰塞坝，其厚度大部分小于 30m，坝体土体以黄土状粉土为主，其间杂乱无序地夹杂有腐植土。在滑体与原始沟谷地层分界面附近出现有不同的土体，部分钻孔揭露为碎石土，部分则为扰动黄土状粉土（见图 4-20），分析为河流沟谷原始堆积碎石与滑体土翻滚、揉搓形成。



图 4-20 坝体钻孔揭露的滑体土

Fig.4-20 The soil of sliding mass exposed by drilling hole

（3）滑带

根据钻孔揭露和滑坡前缘剪出口的露头，加郎普特滑坡的滑带呈黄褐色～灰黄色，物质组成以粉土、粉质粘土为主，呈稍密～中密状，可见扰动，部分地段含少量（少于10%）的碎石，可见明显的擦痕。在滑体的南北两条滑坡侵蚀沟中也均可见到滑带土及其上面留下的滑坡滑动的痕迹（擦痕）。

（4）滑床

滑体下伏地层为第四系中更新统离石黄土，土体呈棕黄色，硬塑～坚硬状，断口有光泽，且发育有不同程度的裂隙，断面可见油脂光泽。靠近滑坡后缘滑床土体含少量粉粒，切面光泽不很明显，越靠近前缘，滑床土体粘性越大，可塑性也越强（分别见图 4-21 和图 4-22 所示）。据在滑坡体上两条滑坡侵蚀沟切割的剖面观察，滑床面呈现由东向西缓倾斜状，倾角一般在 2～3°左右，与滑体面的坡度较近似，但远小于滑坡滑动前的原始地形坡度。正因如此，滑坡滑动之后的很长时间内一直处于相对稳定状态。



图 4-21 加郎普特滑坡前缘沟底滑床土体出露

Fig.4-21 The soil of landslide bed exposed at front of Jialangpute landslide



图 4-22 钻孔揭露滑床土体

Fig.4-22 The soil of landslide bed exposed by drilling hole

4.3.4 滑坡及堰塞湖成因机制分析

滑坡区表面大部分被第四系黄土所覆盖，黄土与下伏基岩呈不整合接触。该类黄土具有大孔隙、垂直节理发育等性质，这给雨水下渗提供了有利条件。而较之黄土层，下伏基岩透水性则要差很多，因而当雨水入渗时，会在一定程度上起到隔水作用。当遭遇持续降雨时，雨水下渗后常沿着不整合接触面形成一定厚度的饱水带，带内岩土体抗剪强度明显降低，从而形成软弱结构面，这为滑坡的形成提供了基本的地质条件。

雨水是滑坡形成的直接诱发因素。该地区虽然年平均降雨量不高，但是降雨较为集中（集中于 4～6 月份）。当遭遇降雨时，雨水的渗入，降低了岩土体的抗剪强度，并且使得孔缝水压力增加，坡体上部荷载增大，从而加速了滑坡的发育。

当遭遇持续降雨时，不动体首先发生滑坡，其中北部不动体滑坡所产生的部分滑坡土体进入原北侧山沟，并将其堵塞。随着降雨的增强及地表水在北沟的汇集，北部坡体开始发生大规模的滑动，所产生的滑坡物质冲向南侧山梁，局部甚至翻越山梁。随着降雨的持续，东部坡体也发生了滑坡，由于该滑坡势能较大，滑坡体冲毁了东南山体坡脚，引发了东南滑坡。

在各坡体发生滑动的过程中，大量土体急速冲向地势较低的则克台沟，并在沿途形成四个台坎。土体进入则克台沟后，一部分与沟内水流混合形成泥石流向下游推动，最长移动距离达 5.7km，剩下土体在沟中大量堆积，造成了则克台沟的堵塞，从而形成堰塞体，上游水流在堰塞体上方汇聚，形成则克台堰塞湖（见图 4-23）。

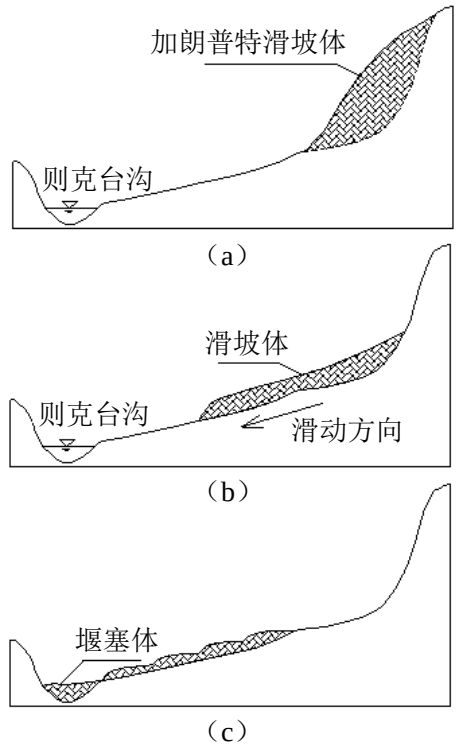


图 4-23 堰塞湖形成机制

Fig.4-23 Genetic mechanism of the barrier lake

4.4 本章小结

在对伊犁境内黄土进行研究的基础上，本章分析了黄土滑坡的分布、类型和形态特征，并详细分析了滑坡形成的原因。具体总结如下：

（1）根据野外调查和资料整理发现，研究黄土滑坡具有明显的分布特征。在空间分布上，伊犁黄土滑坡主要分布于中低山区、中低-低山丘陵区及河流两岸的黄土地带，平原地带基本没有滑坡发生。其中，西部黄土层较薄的山区，黄土滑坡数量少，而在中东部山区黄土层较厚的尼勒克县、巩留县、新源县境内，黄土滑坡数量则较多。在时间分布上，伊犁地区黄土滑坡多发生在春夏之交和夏季，主要集中在 4～9 月份，其中又以 4 月和 5 月这两个月最为集中。

（2）伊犁境内黄土滑坡主要为黄土层内滑坡和黄土基岩接触面滑坡，其中黄土层内滑坡数量最多，此次野外调查所发现的滑坡大部分为此类滑坡，该类滑坡大部分为小型浅层滑坡，但也不乏大型滑坡。由于伊犁境内黄土滑坡数量多，分布广，因而呈现出多样的形态上特征。在平面形态上，伊犁黄土滑坡主要为簸箕形、长椅形、复合形、扇形，其中簸箕形为最主要类型；纵断面形态上，伊犁黄土滑坡主要为圆弧滑动面。

（3）从多个方面对伊犁黄土滑坡形成的原因进行了分析，认为在各种因素中，伊犁地区广泛分布的黄土为滑坡形成提供了物质基础，区域内多山的地形地貌、黄土层与下伏基岩呈不整合接触的地层结构为黄土滑坡提供了边界条件，而暴雨则是滑坡形成的直接诱因。并在此基础上，分析了伊犁地区降雨诱发黄土滑坡的机理。

（4）加郎普特黄土滑坡总方量在 2275.5 万 m^3 左右，属特大型滑坡。该滑坡由多处

滑坡构成，滑坡发生后，滑体掩埋 S316 公路，并阻塞则克台沟形成了堰塞湖，形成了严重的安全隐患。根据现场勘察情况，分析认为滑坡区黄土与下伏基岩的不整合接触结构为滑坡形成的基本原因，而当地 2002 年 5 月 10 日之前连续数日的降水是滑坡形成的直接诱因。

第五章　伊犁典型黄土滑坡稳定性分析

伊犁境内黄土滑坡十分发育，其中东部的新源县、尼勒克县和巩留县是黄土滑坡最严重的地区。本章选取新源县境内的加郎普特黄土滑坡为典型例子，对其进行稳定性分析，以期为该滑坡及伊犁境内其他黄土滑坡的稳定性评价和治理提供参考。

5.1 稳定性分析方法

对滑坡进行稳定性分析一直是岩土工程领域的重要研究内容之一，各国学者从不同的角度对滑坡稳定性分析做了大量研究。目前，提出和发展的稳定性分析方法已多达数十种，总的来讲可以分为：定性分析法和定量分析法。其中定量分析方法又包括极限平衡法[67,69]和数值分析法[67,70,71]，这两种方法各有优缺点。本章在对伊犁典型黄土滑坡进行稳定性分析时主要使用极限平衡法和有限元数值法。

5.1.1 极限平衡法

以刚体极限平衡为理论基础的极限平衡法广泛的应用于各类边坡的稳定性分析，具有悠久的历史。极限平衡法种类众多，比较常见的有瑞典条分法，Bishop 法、Janbu 法、Morgenstern-Price 法等，这些方法根据文献[72]可以分为：只满足力平衡或力矩平衡的简化方法以及同时满足力平衡和力矩平衡的严格条分法。在计算滑坡稳定性时，极限平衡法主要通过对滑坡体进行条分，根据条块间的关系建立方程组来进行求解。但是利用极限平衡法所建立的方程组是非静定的，因而需要针对多余的未知量作相关假设，将非静定不可解问题转化为静定可解问题。使用该方法进行边坡稳定性计算时，需要先假定滑动面的位置和形状，然后不断的试算，直至找到最小安全系数和最危险滑动面。极限平衡法中各方法的比较见表 5-1。

表 5-1 常用的极限平衡法

Table 5-1 Commonly used limit equilibrium methods

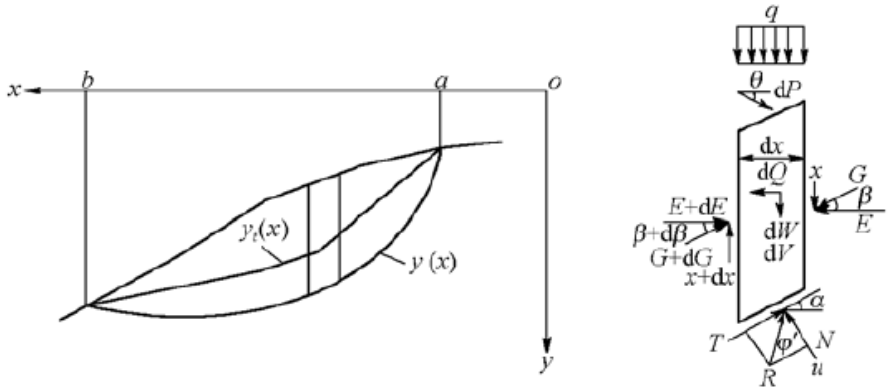
方法	假定条件	严格/非严格
瑞典条分法	假定条块间无任何作用力	非严格
简化 Bishop	假定条块间只有水平力	非严格
简化 Janbu 法	假定条块间只有水平力	非严格
传递系数法	假定了条间力的方向	非严格
Sarma 法	条块间满足极限平衡	非严格
Spencer 法	假定土条间存在着相互作用力，且水平与垂直作用力之比为常数。	严格
Morgenstern-Price 法	假定土条间存在着相互作用力，且水平与垂直作用力之比为一函数，各土条均满足力和力矩平衡。	严格

根据对比极限平衡理论体系中各方法的优缺点，本文选择 Morgenstern-Price 法（以

下简称 M-P 法）进行边坡稳定性分析计算。M-P 方法由 Morgenstern 和 Price[73]首先提出，该方法同时满足力平衡和力矩平衡，适用于各类土质边坡的稳定性计算。M-P 法在滑动面的形状、静力平衡、多余未知量的求解方面不做简化，为严格条分法。传统 M-P 法的计算公式基本上以微分形式表达并求解的，计算十分复杂，一般工程技术人员较难掌握，使得在工程界的推广受到限制。为此，国内外学者为之进行了相关研究，并提出了不同的改进公式。

（1）改进公式

如图 5-1（a）所示边坡，从中取出土条见图 5-1（b）所示。



（a）滑体　　（b）典型条块

图 5-1 滑体与典型条块

Fig.5-1 Sliding body and a typical slice

根据受力情况，对该条块建立静力平衡方程和力矩平衡方程，具体表达式见公式（5-1）和公式（5-2）所示。

$$\int_a^b p(x)s(x)dx=0 \tag{5-1}$$

$$\int_a^b p(x)s(x)t(x)dx-M_e+M_p=0 \tag{5-2}$$

其中，$p(x)=\left[\frac{dW}{dx}+\frac{dV}{dx}+q+\frac{dP}{dx}\sin\theta\right]\sin(\varphi'-\alpha)-u\sec\alpha\sin\overline{\varphi'}$

$$+\overline{c'}\sec\alpha\cos\overline{\varphi'}-\left[\frac{dQ}{dx}-\frac{dP}{dx}\cos\theta\right]\cos(\overline{\varphi'}-\alpha) \tag{5-3}$$

$$s(x)=\sec(\overline{\varphi'}-\alpha+\beta)\exp\left[-\int_a^x\tan(\overline{\varphi'}-\alpha+\beta)\frac{d\beta}{d\zeta}d\zeta\right] \tag{5-4}$$

$$t(x)=\int_a^x(\sin\beta-\cos\beta\tan\alpha)\exp\left[\int_a^\zeta\tan(\overline{\varphi'}-\alpha+\beta)\frac{d\beta}{d\zeta}d\zeta\right]d\zeta \tag{5-5}$$

$$M_e=\int_a^b\frac{dQ}{dx}h_e dx \tag{5-6}$$

$$M_p=\int_a^b\frac{dP}{dx}l_p\cos\theta dx \tag{5-7}$$

$$\overline{c'}=\frac{c'}{F_s} \tag{5-8}$$

$$\tan\overline{\varphi'}=\frac{\tan\varphi'}{F_s} \tag{5-9}$$

$$\tan\beta=\lambda f(x) \tag{5-10}$$

式中：

dx为条块宽度，单位 m；

c'、φ'为条块底面上的有效内聚力（kPa）和内摩擦角（°）；

$\overline{c'}$、$\overline{\varphi'}$为条块底面上折减后的有效内聚力（kPa）和内摩擦角（°）；

dW为条块重量（kN）；

q为条块顶部的垂直均布荷载（kN/m）；

M_e为各条块水平地震惯性力对条块底部的中点力矩之和（kN•m）；

M_p为各条块加固力的水平分力对条块底部中点力矩之和（kN•m）；

dQ、dV为条块的水平向和垂直向地震惯性力（dQ方向与边坡滑动方向一致时取“+”，反之取“－”；dV向上取“－”，向下取“＋”）（kN）；

dP为作用于条块的外力（不含坡外水压力）（kN）；

u为作用于条块底面的单位孔隙压力（kN/m）；

α为条块底面与水平面的夹角（以水平线为起始线，逆时针为正角，顺时针为负角）（°）；

$d\beta$相当于上一条块的条块侧面合力与水平方向的夹角增量（°）；

λ为$\tan\beta$值的待定系数；

$f(x)$为$\tan\beta$值在x方向上的分布形状，可取$\tan\beta=1$；

θ为外力与水平方向的夹角；

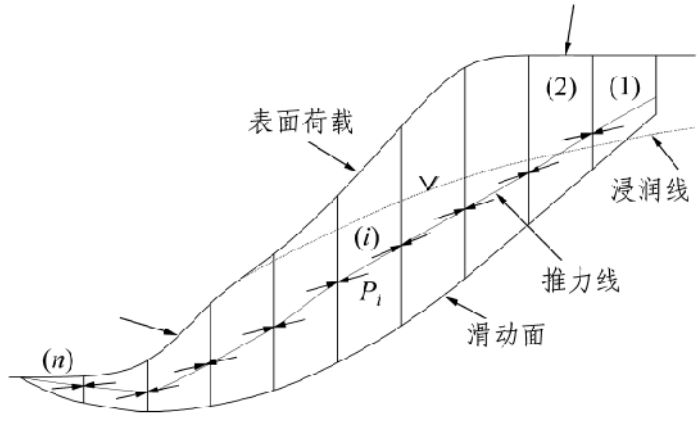
h_e为水平地震惯性力到条块底面中点的垂直距离（m）；

l_p为外力的水平分力到条块底面中点的垂直距离（m）。

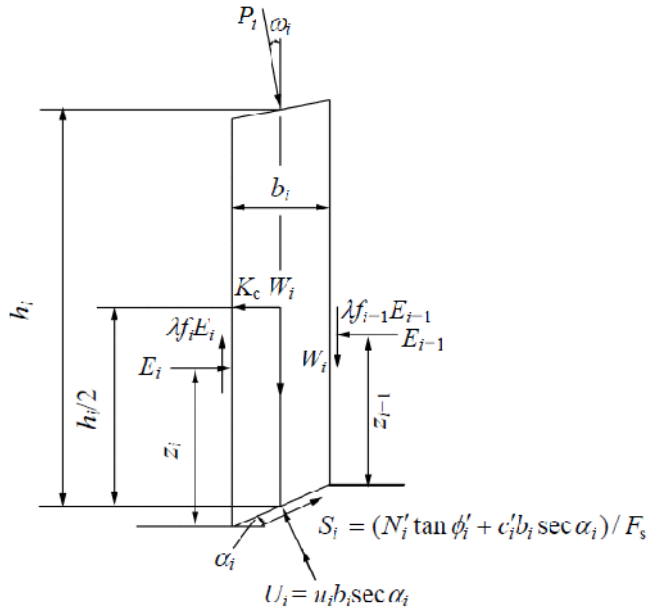
在使用改进公式Ⅰ进行计算时，将公式（5-3）至（5-10）代入公式（5-1）和（5-2）后进行化简，得到包含安全系数F_s和条块倾向力倾角$\beta(x)$两个未知量的方程，而λ为待定值，$\tan\beta=\lambda f(x)$。假定$f(x)$的函数形式，则利用 *Newton-Raphson* 迭代法即可求出安全系数F_s和待定系数λ。

（2）改进公式Ⅱ

如图 5-2（a）所示的一个具有任意形状滑动面的边坡，作用在该滑体之上的力有：自重、地震力、水压力以及表面荷载。从该滑体上取典型条块见图 5-2（b）所示，该条块高度为h_i、宽度为b_i、底面倾角为α_i。



（a）滑体



（b）典型条块

图 5-2 滑体与典型条块

Fig.5-2 Sliding body and a typical slice

考虑第 i 个条块的受力平衡，分别沿垂直与沿滑动面方向将力进行分解，得

$$N_i' = (W_i + \lambda f_i E_i + Q_i \cos\omega_i)\cos\alpha_i + (-K_c W_i + E_i - E_{i-1} + Q_i \sin\omega_i)\sin\alpha_i - U_i \quad (5\text{-}11)$$

沿平行与滑动面方向将力进行分解，得

$$(N_i' \tan\varphi_i' + c_i' b_i \sec\alpha_i)/F_s = (W_i + \lambda f_{i-1}E_{i-1} - \lambda f_i E_i + Q_i \cos\omega_i)\sin\alpha_i - (-K_c W_i + E_i - E_{i-1} + Q_i \sin\omega_i)\cos\alpha \quad (5\text{-}12)$$

将式（5-11）代入式（5-12）中得

$$E_i\left[(\sin\alpha_i - \lambda f_i \cos\alpha_i)\tan\varphi_i' + (\cos\alpha_i + \lambda f_i \sin\alpha_i)F_s\right] = E_{i-1}\left[(\sin\alpha_i - \lambda f_{i-1}\cos\alpha_i)\tan\varphi_i' + (\cos\alpha_i + \lambda f_{i-1}\sin\alpha_i)F_s\right] + F_s T_i - R_i \quad (5\text{-}13)$$

其中，

$$R_i=\left[W_i\cos\alpha_i-K_cW_i\sin\alpha_i+P_i\cos(\omega_i-\alpha_i)-U_i\right]\tan\varphi_i'+c_i'b_i\sec\alpha_i \quad (5\text{-}14)$$

$$T_i=W_i\sin\alpha_i+K_cW_i\cos\alpha_i-P_i\sin(\omega_i-\alpha_i) \quad (5\text{-}15)$$

公式（5-13）可变为

$$E_i\Phi_i=\psi_{i-1}E_{i-1}\Phi_{i-1}+F_sT_i-R_i \quad (5\text{-}16)$$

其中，

$$\Phi_i=(\sin\alpha_i-\lambda f_i\cos\alpha_i)\tan\varphi_i'+(\cos\alpha_i+\lambda f_i\sin\alpha_i)F_s \quad (5\text{-}17)$$

$$\Phi_{i-1}=(\sin\alpha_{i-1}-\lambda f_{i-1}\cos\alpha_{i-1})\tan\varphi_{i-1}'+(\cos\alpha_{i-1}+\lambda f_{i-1}\sin\alpha_{i-1})F_s \quad (5\text{-}18)$$

$$\psi_{i-1}=\frac{(\sin a_i-\lambda f_{i-1}\cos\alpha_i)\tan\varphi_i'+(\cos\alpha_i+\lambda f_{i-1}\sin\alpha_i)F_s}{\Phi_{i-1}} \quad (5\text{-}19)$$

根据端部条件：$E_0=0$、$E_n=0$，再由公式（5-16）推导安全系数F_s的表达式为

$$F_s=\frac{\sum_{i=1}^{n-1}(R_i\prod_{j=1}^{n-1}\psi_j)+R_n}{\sum_{i=1}^{n-1}(T_i\prod_{j=1}^{n-1}\psi_j)+T_n} \quad (5\text{-}20)$$

该表达式为隐式方程，因为变量F_s在方程的左右两边都出现，因此需要利用迭代方法求解。考虑第i个条块的力矩平衡，对条块基底中心取力矩为

$$E_i\left(z_i-\frac{b_i}{2}\tan\alpha_i\right)=E_{i-1}\left(z_{i-1}+\frac{b_i}{2}\tan\alpha_i\right)-\lambda\frac{b_i}{2}(f_iE_i+f_{i-1}E_{i-1})+K_cW_i\frac{h_i}{2}-Q_i\sin\omega_ih_i \quad (5\text{-}21)$$

设

$$M_i=E_iz_i,\quad M_{i-1}=E_{i-1}z_{i-1} \quad (5\text{-}22)$$

将公式（5-22）代入（5-21）得

$$M_i=M_{i-1}-\lambda\frac{b_i}{2}(f_iE_i+f_{i-1}E_{i-1})+\frac{b_i}{2}(E_i+E_{i-1})\tan\alpha_i+K_cW_i\frac{h_i}{2}-Q_i\sin\alpha_ih_i \quad (5\text{-}23)$$

由于$M_0=0$，$M_n=0$，由此根据力矩平衡方程可以解出比例系数λ：

$$\lambda=\frac{\sum_{i=1}^{n}\left[b_i(E_i+E_{i-1})\tan\alpha_i+K_c\omega_ih_i-2P_i\sin\omega_ih_i\right]}{\sum_{i=1}^{n}\left[b_i(f_iE_i+f_{i-1}E_{i-1})\right]} \quad (5\text{-}24)$$

式中：

K_c为水平地震惯性力影响系数；

ω_i为第i条块外力P_i与竖直方向的夹角（°）；

M_i为第i条块和第$i+1$条块间的条间力矩（kN•m）；

z_i为第i条块和第$i+1$条块间的条间力E_i至条块侧面底的距离（m）；

U_i为第i条块底面水压力的合力（kN）；

φ_{i-1}'为第$i-1$滑动条块底面的有效内摩擦角（°）；

E_i、E_{i-1}为作用于第i条块的左右两边条块间的法向力（kN）；

$\lambda f_i E_i$为第i条块与第$i+1$条块间的剪切力（kN），λf_i为条块间法向力与剪切力的比值函数$\lambda f(x)$在该分条位置的数值；

$\lambda f_{i-1} E_{i-1}$为第i条块与第$i-1$条块间的剪切力（kN），λf_{i-1}为条块间法向力与剪切力的比值函数$\lambda f(x)$在该分条位置的数值；

λ为条块间法向力与剪切力比值函数$f(x)$的比例系数；

R_i、R_n为第i条块和第n条块底面抗滑力的合力（kN）；

T_i、T_n为第i条块和第n条块底面滑动力的合力（kN）。

5.1.2 有限元强度折减法

1975 年，Zienkiewicz[32]提出了强度折减有限元法，并在随后的研究中将其应用于边坡稳定性分析中。与极限平衡法相比，强度折减有限元法不需要进行相关假设和预先假定滑动面的位置与形状，通过反复的折算即能求出安全系数，并能够反应出土体的渐进式破坏过程[74]。折算的要点是将土体的抗剪强度参数 c 和 φ 按公式（5-25）进行调整。

$$c' = c / F, \quad \varphi' = \arctan(\tan\varphi / F) \tag{5-25}$$

式中：c'、φ'为土体实际发挥的抗剪强度，F为强度折减系数。进行折减时，不断调整强度折减系数F，反复分析坡体，直至达到临界破坏，此时的强度折减系数F即为安全系数F_s。对于临界状态，目前主要有四种判断依据[71]：（1）塑性区贯通；（2）等效塑性应变带贯通；（3）边坡坡面特征点位移陡增；（4）有限元数值计算不收敛。本文主要以有限元计算不收敛作为临界状态的判据。

5.2 二维稳定性分析

加郎普特滑坡（见图 5-3）于 2002 年 5 月 10 日发生在伊犁东部的新源县境内，为伊犁地区典型的黄土滑坡。加郎普特滑坡发生时，滑体滑动过程中掩埋摧毁了 S316 公路部分路段，阻断了其正常通车，并且大量滑体冲入 S316 公路以西的则克台沟并将其堵塞形成堰塞湖坝体，形成重大安全隐患。



图 5-3 加郎普特黄土滑坡全貌

Fig.5-3 Panorama of Jialangpute loess landslides

5.2.1 计算剖面选择

通过所收集到的原始地形图、1:1000 地形图等资料以及现场踏勘、钻探等工作，将

滑坡区域内的主要滑坡分为六个部分，分别是北滑坡、东滑坡、东南滑坡、南山梁滑坡、不动体局部滑坡以及西南滑坡（滑坡范围及分区如图 5-4 所示）。

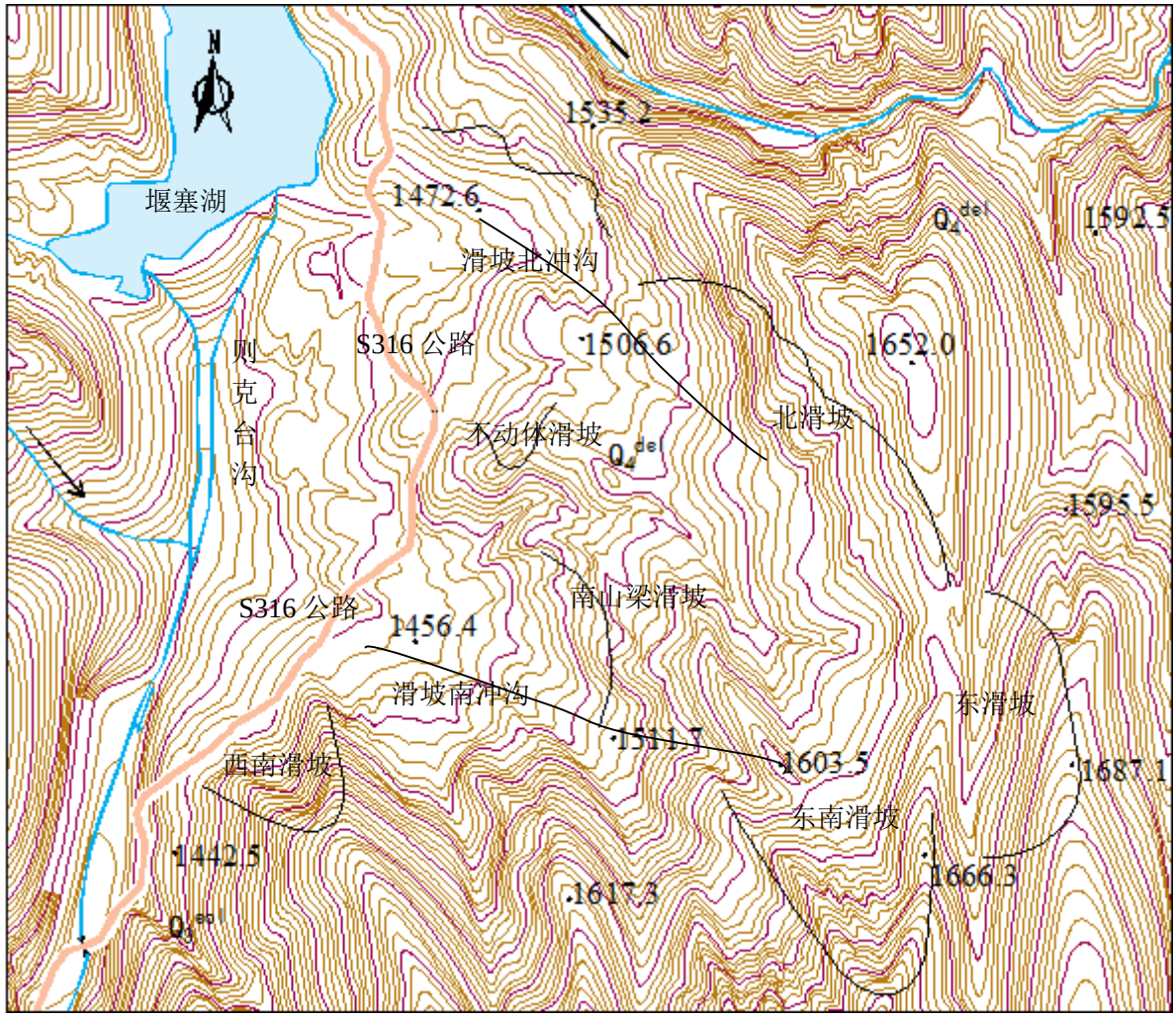


图 5-4 加朗普特滑坡平面分区示意图

Fig.5-4 Schematic diagram of planar partition on Jialangpute landslide

根据现场勘察发现，北滑坡、东滑坡、东南滑坡三处滑坡再次发生大规模滑动的可能性较小，且三处滑坡距离 S316 线路较远，其中距离 S316 公路最近的北滑坡其中心距线路中心也达 600m，因此对线路稳定基本没有影响。

而对于南山梁滑坡，该滑坡虽然规模较小，且从最近一次滑动的情况来看，其滑舌前缘距线路仍有约 200m 左右的距离，但该滑坡距离滑坡南冲沟较近，倘若再次发生滑动，滑体进入南冲沟并将其堵塞，将给泥石流的产生提供物源，从而威胁 S316 公路的安全。

对于不动体局部滑坡，该滑坡邻近 S316 公路，若发生滑动对线路稳定影响较大。

对于滑坡所致的则克台堰塞湖，该堰塞湖与大部分堰塞湖[75]不同，在形成之后并未在短时间内溃决消亡。该堰塞湖形成以后，当地政府第一时间在堰塞体上开挖了泄水沟渠，有效阻止了上游水位的上涨，避免了漫顶溃坝的发生，使其在一段时期内保持了相

对稳定的状态。由于该湖紧邻 S316 公路，并且距离下游则克台镇仅 15km，而海拔相差却达 400 多米，堰塞湖一旦溃决，将严重威胁 S316 公路以及下游则克台镇人民的生命财产安全。然而则克台堰塞湖从形成到现在已经经历了数年时间，是否依然稳定，会以何种方式溃决已成了亟需研究的重要问题。

因此，根据现场勘察情况，选择距离 S316 公路较近的 6 个区域进行计算分析，分别是滑坡Ⅰ区、Ⅱ区、Ⅲ区、Ⅳ区、Ⅴ区和堰塞湖坝体区，其中堰塞湖坝体的稳定性从整体、渗流和抗滑几个方面进行单独分析。计算分区的具体情况如图 5-5 所示。

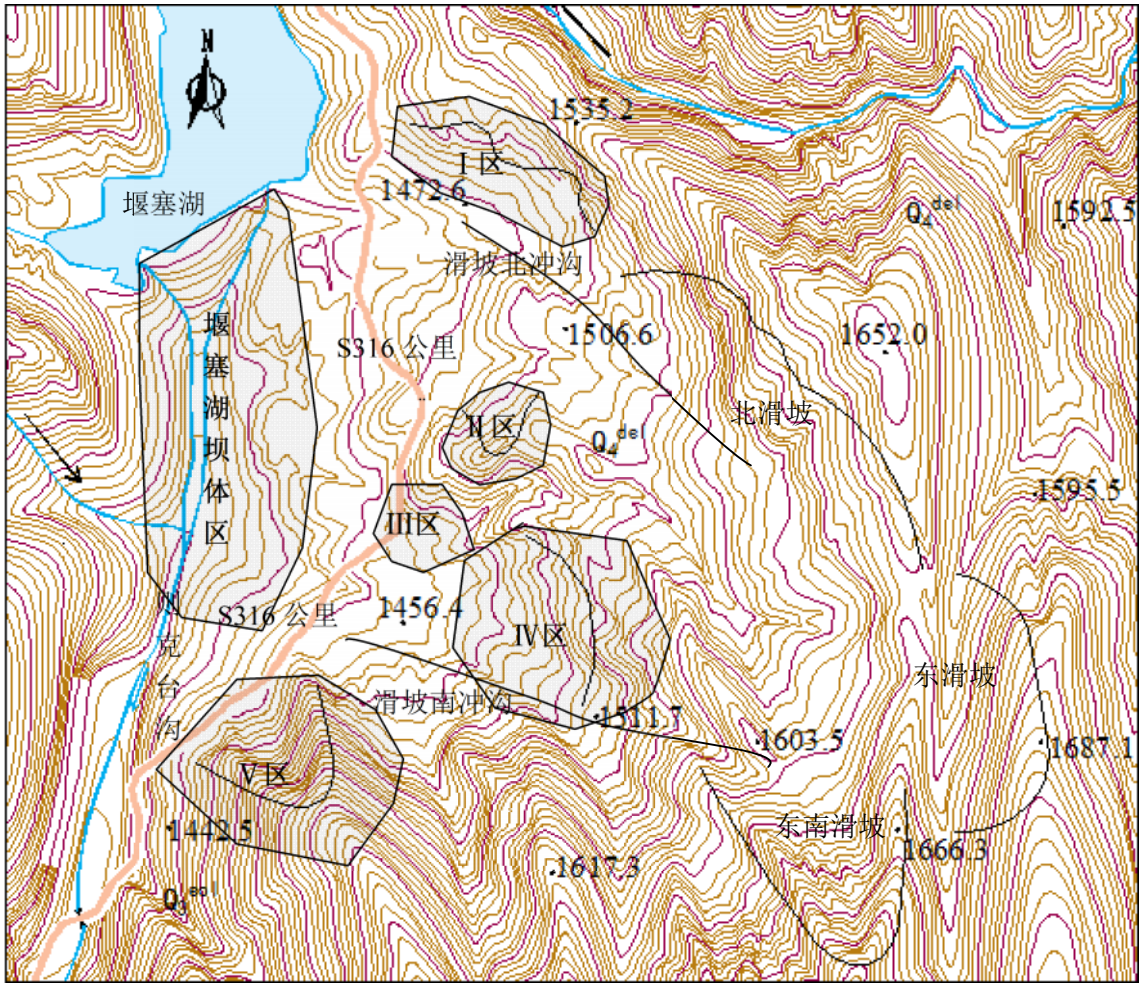


图 5-5 加朗普特滑坡局部稳定性计算范围

Fig.5-5 Stability calculation range of Jialangpute landslide

（1）Ⅰ区：该区位于加郎普特滑坡区北侧，区内共两处滑坡（见图 5-6），由于距离 S316 公路和滑坡北冲沟均较近，其稳定性较为重要。根据现场调查情况，选择 1-1’、2-2’两个剖面进行计算。

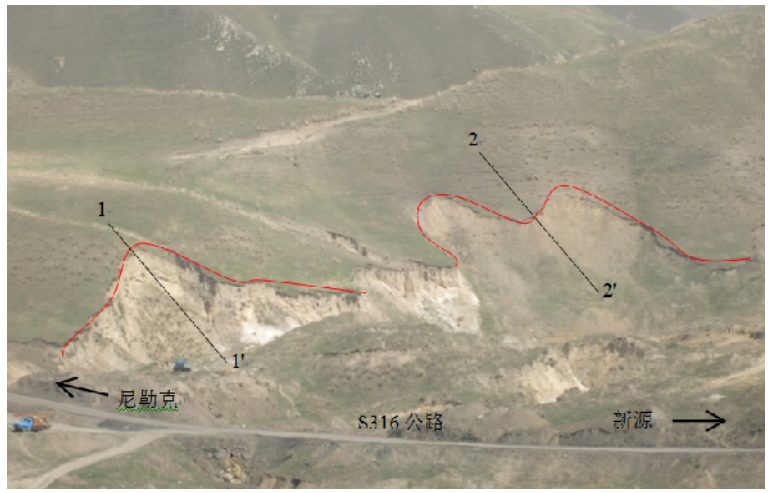


图 5-6 滑坡Ⅰ区

Fig.5-6 Landslide area I

（2）Ⅱ区：该滑坡区主要为不动体局部滑坡，位于 S316 公路东侧，加郎普特滑坡北冲沟以南。由于距北冲沟较近，如若发生失稳滑坡，滑体冲入北冲沟，将给泥石流的形成提供充足物源，该滑坡区共 6-6’、7-7’两个计算剖面。



图 5-7 滑坡Ⅱ区

Fig.5-7 Landslide area Ⅱ

（3）Ⅲ区：该区为不动体局部滑坡西侧坡体，紧靠 S316 公路，共 4-4’、5-5’两个剖面。



图 5-8 滑坡Ⅲ区

Fig.5-8 Landslide area Ⅲ

（4）Ⅳ区：该区为南山梁滑坡区，位于 S316 公路以东，加郎普特滑坡南冲沟以北。距离 S316 较远，但距离南冲沟较近。该区计算剖面包括 8-8’、9-9’、10-10’三个剖面。

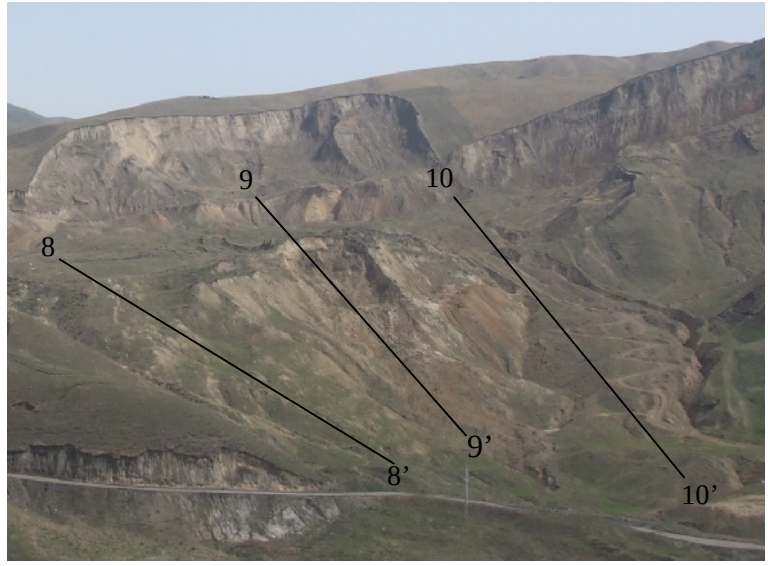


图 5-9 滑坡Ⅳ区

Fig.5-9 Landslide area Ⅳ

（5）Ⅴ区：该滑坡区位于 S316 公路东侧，加朗普特滑坡南冲沟南侧。紧靠 S316 公路和滑坡南冲沟，计算剖面为 14-14’剖面。



图 5-10 滑坡Ⅴ区

Fig.5-10 Landslide area Ⅴ

（6）堰塞湖坝体区：该区为堰塞湖坝体部分（见图 5-11 所示）。加郎普特滑坡发生时，大量滑体冲入则克台沟将其阻塞，形成该滑坡堰塞体，上游水流在堰塞体上方汇集，形成则克台堰塞湖。堰塞坝体区稳定性单独进行分析。



图 5-11 堰塞坝体区

Fig.5-11 Area of barrier dam

5. 2. 2 计算模型建立

根据各剖面的地层情况，在 SLOPE/W 程序中分别对各滑坡区所选择的计算剖面建立二维计算模型见图 5-12 至 5-21 所示。

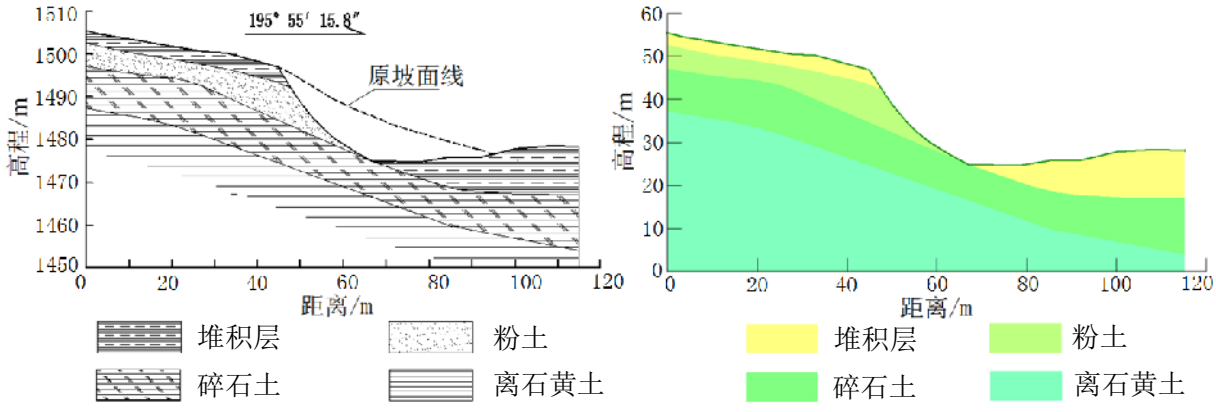


图 5-12 1-1′剖面及计算模型示意图

Fig.5-12 Profile map and calculating model of cross-section 1-1’

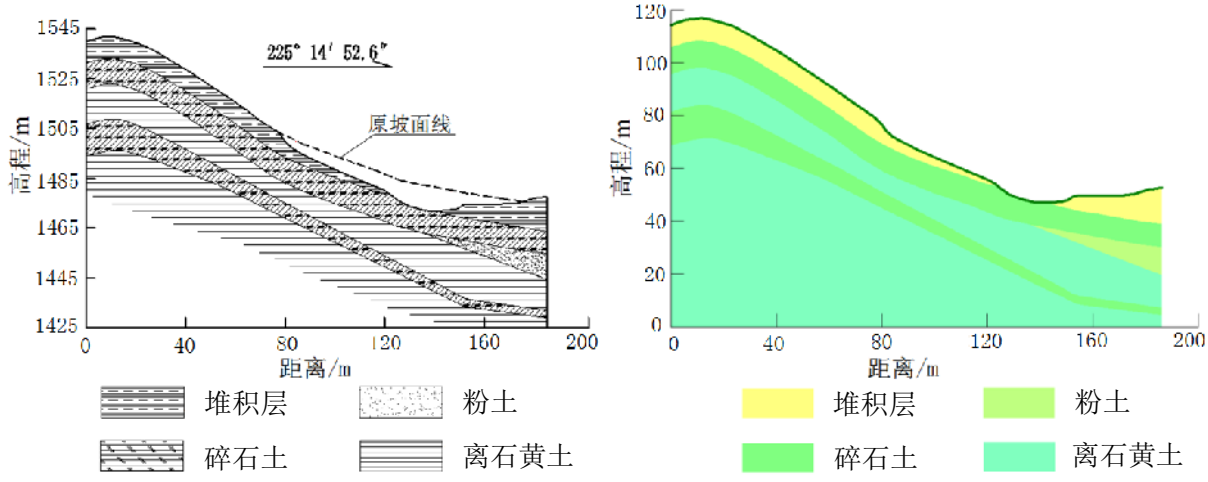


图 5-13 2-2′剖面及计算模型

Fig.5-13 Profile map and calculating model of cross-section 2-2’

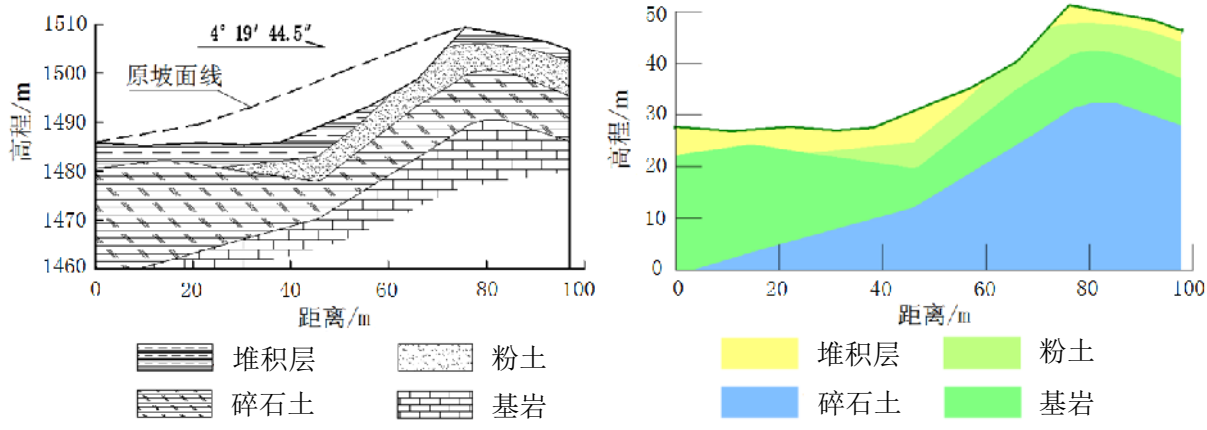


图 5-14 6-6′剖面地层情况及计算模型

Fig.5-14 Profile map and calculating model of cross-section 6-6’

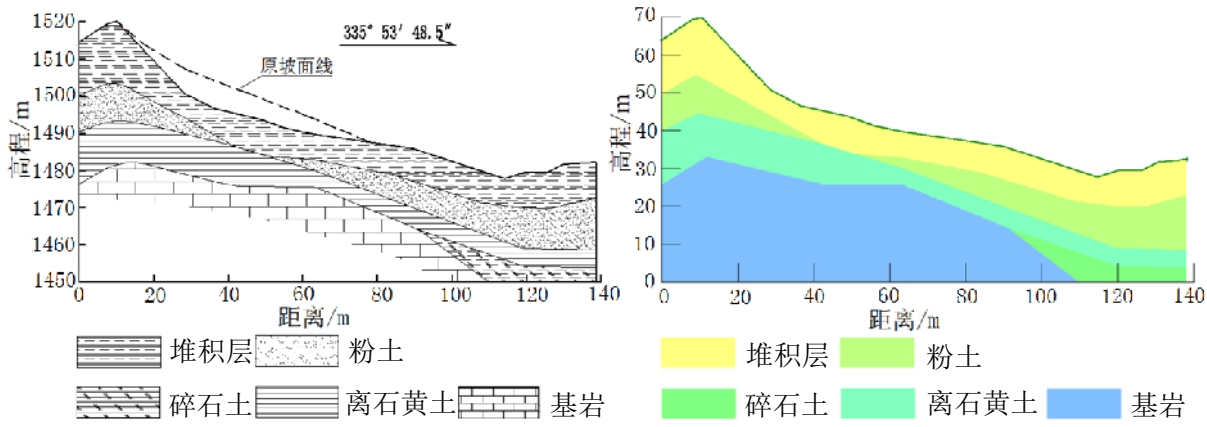


图 5-15 7-7' 剖面地层情况及计算模型

Fig.5-15 Profile map and calculating model of cross-section 7-7’

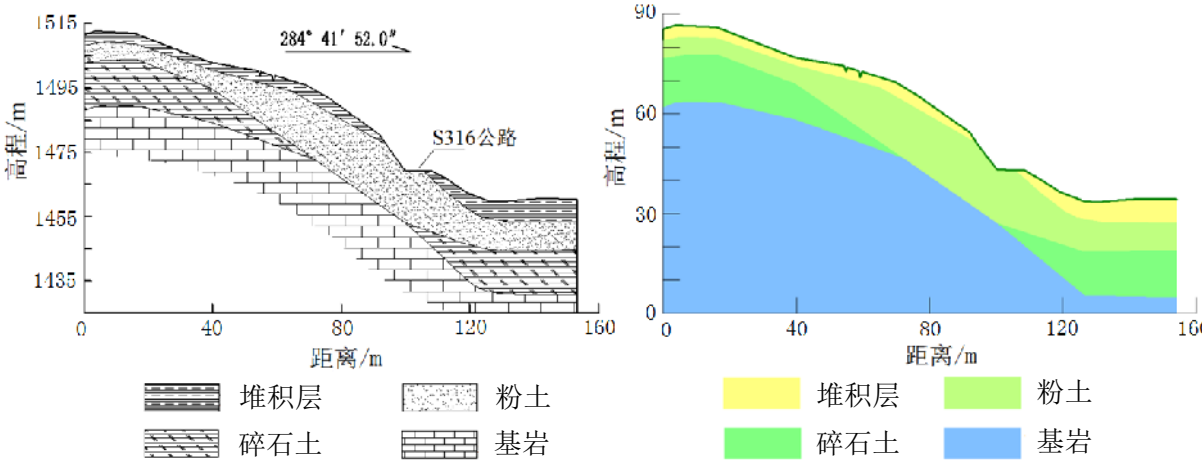


图 5-16 4-4' 剖面地层情况及计算模型

Fig.5-16 Profile map and calculating model of cross-section 4-4’

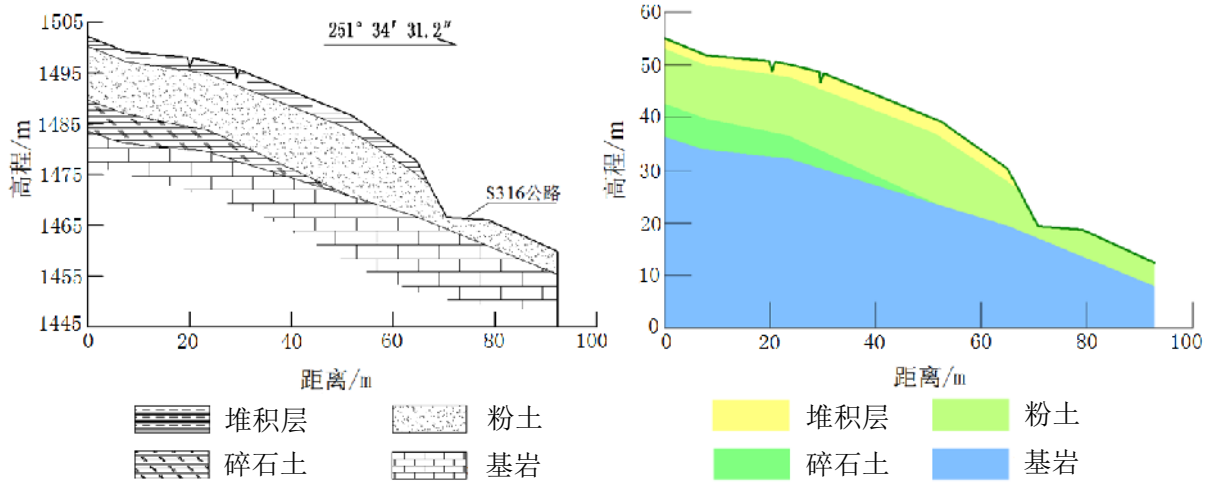


图 5-17 5-5' 剖面地层情况及计算模型面

Fig.5-17 Profile map and calculating model of cross-section 5-5’

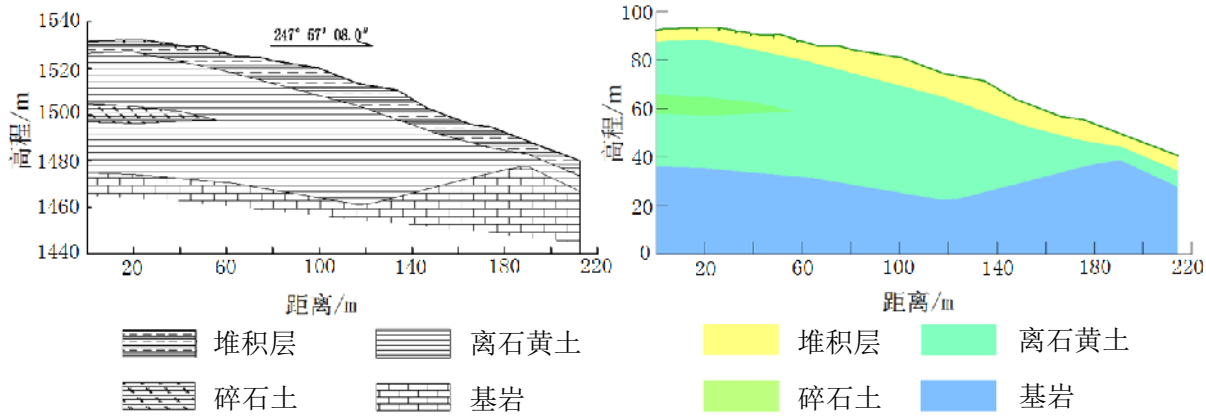


图 5-18 8-8'剖面地层情况及计算模型

Fig.5-18 Profile map and calculating model of cross-section 8-8’

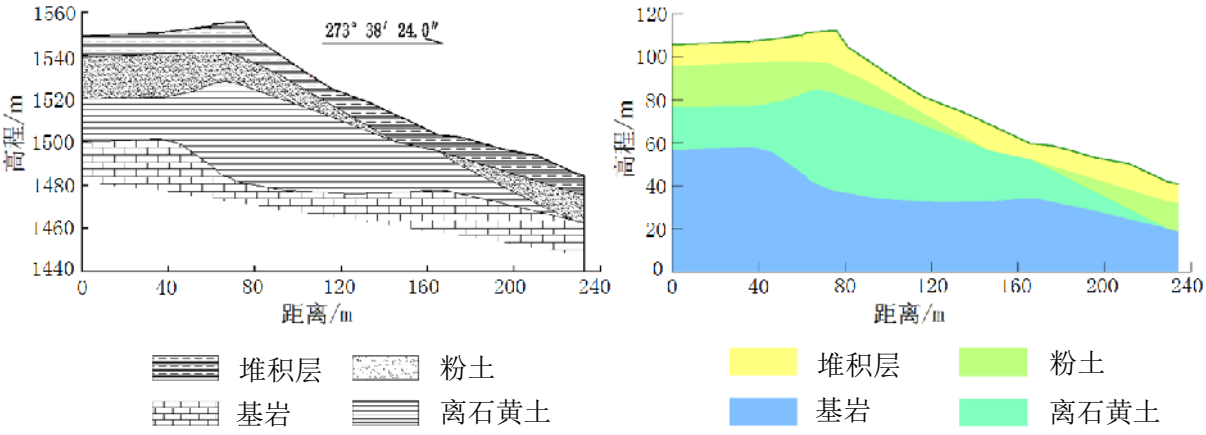


图 5-19 9-9'剖面地层情况及计算模型

Fig.5-19 Profile map and calculating model of cross-section 9-9’

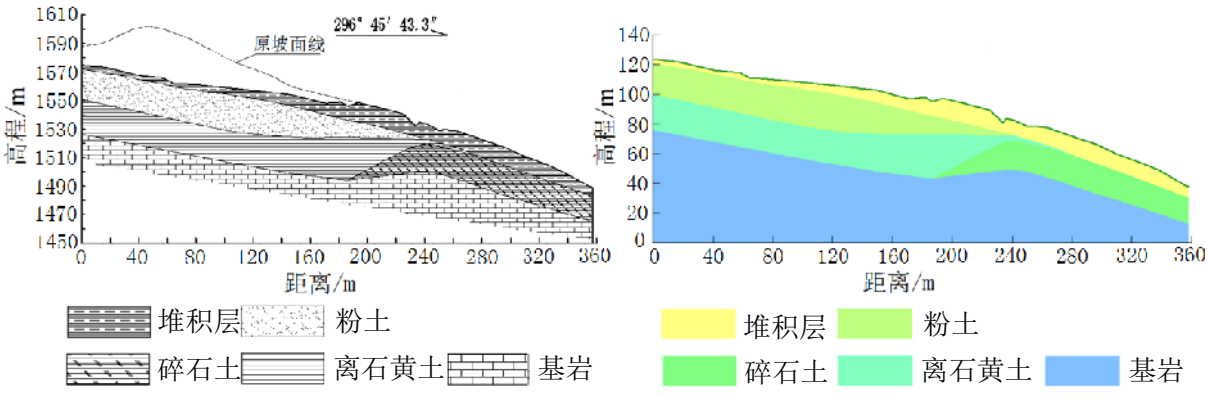


图 5-20 10-10'剖面地层情况及计算模型

Fig.5-20 Profile map and calculating model of cross-section 10-10’

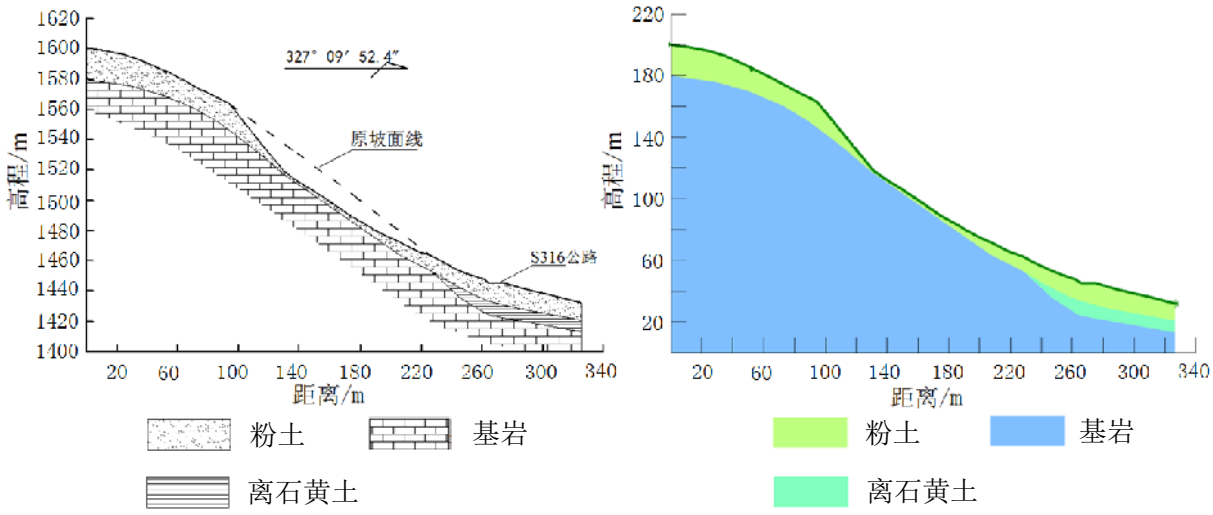


图 5-21 14-14' 剖面地层情况及计算模型

Fig.5-21 Profile map and calculating model of cross-section 14-14'

5.2.3 计算参数确定

此次稳定性计算所需的各岩土体强度参数主要有容重、内聚力、内摩擦角等，各参数主要来自反演推算和钻孔所取土样的现场及室内试验。计算取值情况见表 5-2。

表 5-2 加郎普特滑坡岩土体计算参数表

Table 5-2 Rock-soil calculating parameters in Jialangpute loess landslide

岩土类别	容重 γ kN/m^3	内聚力 c kPa	内摩擦角 φ °	饱和渗透系数 K_s cm/s
堆积层	19	22	20	6×10^{-5}
粉土	18.1	29	21	6.1×10^{-4}
离石黄土	21	21.7	22	8.8×10^{-6}
碎石土	22	30	26	5.16×10^{-4}

对于地震系数，根据第二章研究结论，本地区地震动峰值加速度 a=0.20g。相对应的地震基本烈度为Ⅷ度，地震动反应谱特征周期为 0.4～0.45s，根据《水工建筑物抗震设计规范》[SL2003-97]和勘查技术要求，应考虑地震荷载，取地震系数 k=0.2。

5.2.4 滑坡计算结果及分析

根据对各计算剖面所建立的计算模型，利用计算机程序进行求解。计算主要考虑天然、暴雨和地震三种工况，计算时，设定条块间的条间力比值函数 $f(x)$ 为半正弦函数，得到各工况下各断面的计算结果见表 5-3 所示。

表 5-3 稳定性计算结果

Table 5-3 Stability calculating results

序号	计算剖面	天然工况	暴雨工况	地震工况
1	1-1’	1.052	0.949	0.893
2	2-2’	1.056	0.930	0.913
3	4-4’	1.061	0.956	0.901
4	5-5’	1.084	0.949	0.891
5	6-6’	1.211	1.121	1.062
6	7-7’	1.024	0.941	0.897
7	8-8’	1.799	1.687	1.539
8	9-9’	1.152	1.031	0.947
9	10-10’	1.483	1.360	1.315
10	14-14’	1.030	0.956	0.922

根据《滑坡防治工程勘查规范》（DZ/T 0218-2006），滑坡稳定状态可划分为四个级别（见表 5-4）。

表 5-4 滑坡稳定状态划分表

Table 5-4 The division table of the state of landslide stability

滑坡稳定系数 F_s	F_s<1.00	1.00≤F_s＜1.05	1.05≤F_s＜1.15	F_s≥1.15
稳定状态	不稳定	欠稳定	基本稳定	稳定

由计算结果可以看到：

Ⅰ区：滑坡区域北部靠近线路的两处滑坡，在天然自重状态下，稳定系数介于 1.05～1.10 之间，处于基本稳定状态，但在极端情况下，安全系数小于 1.0，已处于不稳定状态，易发生失稳。

Ⅱ区：不动体局部滑坡，在天然和暴雨工况下，6-6’剖面安全系数分别为 1.211 和 1.121，处于稳定状态，在地震情况下，安全系数为 1.062，处于基本稳定状态；而对于 7-7’剖面，在天然工况下，安全系数为 1.024，处于欠稳定状态，在暴雨和地震工况下，安全系数小于 1.0，已处于不稳定状态。

Ⅲ区：不动体边坡，在天然自重状态下，安全系数介于 1.05～1.10 之间，处于基本稳定状态，当遭遇暴雨或地震时，安全系数小于 1.0，已处于不稳定状态。

Ⅳ区：南山梁滑坡区，在天然自重状态下，滑坡堆积体 8-8’、9-9’、10-10’剖面均处于稳定状态；但在地震条件下，9-9’剖面安全系数只有 0.947，处于不稳定状态，存在发生滑动的可能性。

Ⅴ区：滑坡区域南部靠近线路的一处滑坡，现场调查发现该滑坡后壁上缘已出现多条贯通裂缝，本次计算的该区的 14-14’剖面结果也表明该滑坡处于欠稳定状态，在极端条件下易发生进一步的滑动。由于该处滑坡紧邻 S316 公路和南冲沟，如若再次发生滑

动，土体将有可能下滑掩埋 S316 公路，该滑坡是否有向南冲沟滑动的可能性需作进一步分析。

5.2.5 滑坡堰塞湖稳定性分析

1.堰塞体稳定性整体分析

堰塞体顺河长约 500m，横河宽约 400m，最低高度 22m，北高南低，整个坝体比较雄厚，有利于堰塞体的稳定。坝体下部基岩出露，收口形成石门，对堰塞体的整体滑动起到抑制作用。堰塞体东侧人工开挖的泄水沟渠使得堰塞湖水位得到了有效控制，在未遭遇洪水的情况下，水位稳中有降，变幅基本在 1～3cm 范围内波动，并且堰塞体上的变形监测数据也未见有异常变化。因此，堰塞体目前仍然处于相对稳定状态，出现整体失稳的可能性很小。

但是通过此次调查，在则克台堰塞湖上游发现两处滑坡隐患。首先，堰塞湖上游西侧滑坡后壁上方发育有拉张地裂缝，形成新的滑坡隐患。湖水对岸坡坡脚的浸泡使其强度降低，加上其它因素影响，有可能再次发生小型滑坡。其次，加朗普特东南支沟上游存在一处隐患滑坡，该滑坡将会为泥石流的发生提供近 200 万 m^3 物源。一旦遭遇地震强降雨等不利工况，发生山体滑坡或形成泥石流，大量土体冲入堰塞湖，将对其稳定性造成影响。

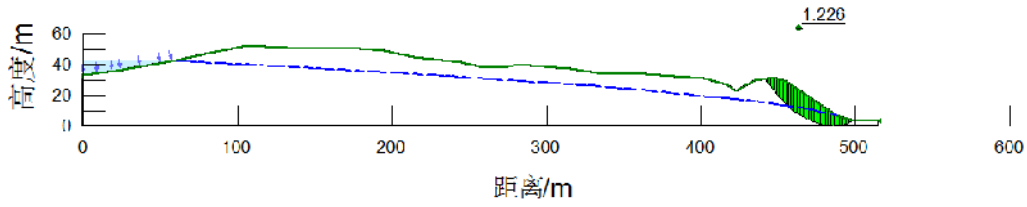
2.渗透失稳可能性及抗冲刷稳定性分析

堰塞体组成物质主要为黄土状土，颗粒较小，性状与加郎普特滑坡体相似，试验发现，该土已经失去了滑坡前原生黄土的特性。钻孔所取土样显示，该土含水微弱，渗透性不强，渗透系数在 3.30×10^{-4}～1.96×10^{-3}cm/s 之间。水文钻孔成井后，进行抽水试验，一抽即干，且水位恢复极慢。现场调查时，在堰塞体下部发现几处出逸口，且水流十分清澈。因此，发生管涌引发坝体失稳的可能性很小。

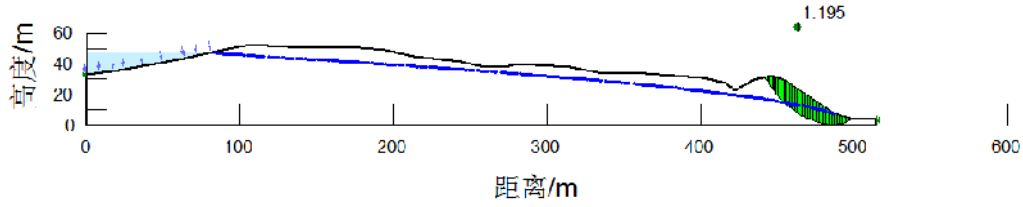
一般来说，坝体组成颗粒越细，其抗冲刷能力越低，危险性越高。则克台堰塞湖坝体最主要的组成物质为黄土状土，虽然该土失去了天然黄土的特性，但是颗粒较细，其抗冲刷能力依然较差，这在大坝东侧的泄水沟渠处表现的很明显。此次调查发现，该泄水沟渠由于受冲刷侵蚀切割的影响，其深度由北部的 3～5m，向南逐渐加深到 15～20m，沟宽也由北部的 5～30m，向南逐渐拓宽到 40～50m。由于抗冲刷能力差，当遭遇洪水或上游隐患边坡发生滑坡泥石流地质灾害而使得堰塞湖库容损失，蓄满溢流时，坝体有可能因漫顶冲刷而导致破坏。

3.抗滑稳定性分析

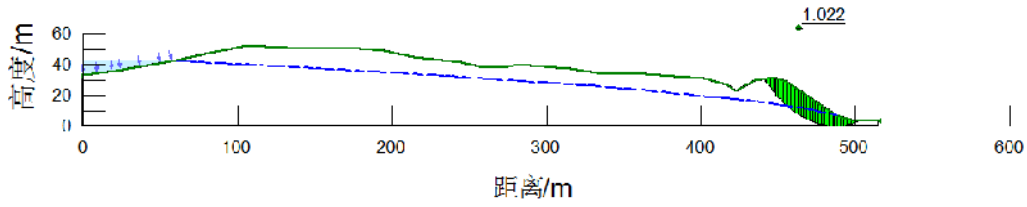
根据现场情况，选取堰塞体中部最有代表性的断面为计算断面，利用渗流计算结果作为稳定性计算的水力输入条件，分别计算堰塞体在当前水位和历史最高水位时，在天然和地震工况下的稳定性（见图 5-22）。



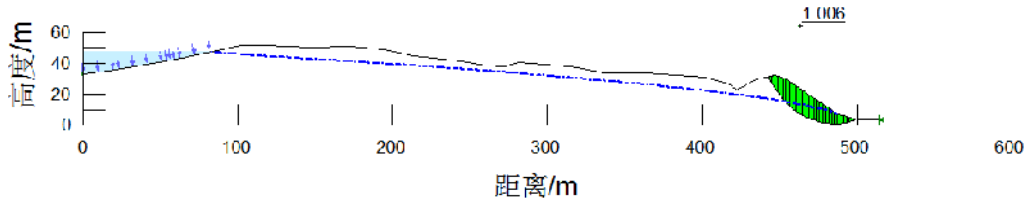
（a）当前水位天然工况



（b）最高水位天然工况



（c）当前水位地震工况



（d）最高水位地震工况

图 5-22 各工况下稳定性计算结果

Fig.5-22 Stability calculating results under different condition

从抗滑稳定性计算结果可以看到，各工况下，最危险滑动面均位于下游坝坡较为陡峭段。在高水位且遭遇地震时，坝坡安全系数仅有 1.006，发生局部滑动失稳的可能性较大。但由于堰塞体顺河方向长达 500m 左右，坝体宽高比与一般土石坝相比要大，局部塌滑只会削弱下游坝坡部分岩土体，使坡度变缓，引起坝体整体失稳的可能性很小。

因此，综合三方面分析结果可以得出结论：堰塞湖目前仍然处于相对稳定状态，堰塞体发生整体滑动和管涌潜蚀失稳的可能性很小，可能的失稳模式为漫顶冲刷破坏；在地震工况下，堰塞湖下游坝坡发生塌滑的可能性较大，但由于坝体顺河方向长 500m 左右，且宽高比比较大，局部的塌滑不会引起整体的失稳；堰塞湖上游西侧和加郎普特东南支沟的两处隐患滑坡需采取相应措施，否则一旦遭遇暴雨地震等不利工况而引发山体滑坡和泥石流进入堰塞湖，其造成的浪压力将对堰塞坝体造成强烈冲击，可能使湖水溢流，严重影响堰塞体的稳定。

5.3 三维稳定性分析

二维方法由于计算简单，能够快捷的得到工程上所关心的安全系数等数据信息，因而被广泛的应用于各类边坡的稳定性分析中[68-70]。然而，工程边坡发生滑坡时具有明显的三维特征，二维分析仅能反映边坡特定断面的情况，并不能反映边坡的实际受力状态和失稳破坏模式，在某些情况下需做进一步分析。

三维分析方法较好的克服了二维方法的不足，计算结果能更真实地反映边坡的实际状态，因此在条件允许的情况下，利用三维方法进行边坡稳定性分析显得更为合理。根据本章 5.2 节所进行的加郎普特二维稳定性分析计算结果，本小节以Ⅴ区紧靠 S316 公路和南冲沟的滑坡为研究对象，利用三维强度折减有限元法对其作进一步的分析计算。

5.3.1 计算模型构建

1.建模思路

目前，市场上用于建模的软件种类很多，包括 GOCAD、MapGIS、ArcInfo，CATIA、PRO/E 等。其中，GOCAD 是法国 Nancy 大学开发的主要应用于地质领域的三维可视化建模软件，能够建立高质量的三维地质模型，但是需要编写接口程序才能将所建模型导入数值计算软件中。CATIA 为法国达索公司旗下的 CAD/CAE/CAM 一体化软件，具有非常强大的曲面和实体生成能力，并且与主流数值分析软件有直接接口程序，但使用该软件独立建立三维地质模型时，需要编写接口程序或开发地质插件。而如果将边坡地质体看作是三维实体被不同的面进行分割后所形成的实体集，则可以将 GOCAD 和 CATIA 相结合，利用各软件的优势功能来实现建模。基于此思路，利用 GOCAD 建立边坡地质体的地表面和地层分界面，在 CATIA 中利用地表面建立实体，并利用地层分界面对实体进行分割操作，形成具有不同岩土层的三维地质模型，再利用 Hypermesh 进行网格划分后导入数值分析软件中进行相关计算。整个建模过程操作简单且无需编写接口程序，大大提高了建模效率。

2.关键技术

该建模方法主要通过合理利用 GOCAD、CATIA 和 Hypermesh 来实现边坡地质体三维模型和数值模型的构建，建模过程需要处理两个关键问题：一是建模过程中各软件的数据交流和共享；二是复杂三维地形面的构建。多软件的结合使用恰好为解决这些问题提供了关键技术。

（1）齐全的数据接口。GOCAD 具有通用的数据接口，能导入文本数据，方便钻孔等信息的录入，并且可以直接和 AutoCAD 进行数据共享，利用其生成的*.dxf 文件形式的等高线图等信息进行面的建立。GOCAD 中建立面模型后，可以通过*.ts 格式直接导入 CATIA 进行构建实体和分割操作。CATIA 与 Hypermesh 有直接数据接口，并且构建的三维模型和网格模型也可以直接导入主流数值分析软件中进行分析计算。

（2）强大的面、体生成技术。GOCAD 依托其离散平滑插值技术，能够利用地表面及地层分界面三维信息数据（等高线地形图、钻孔数据等）建立地表面和地层分界面。CATIA 提供齐全的建模模块，其中零件设计模块可以根据 GOCAD 所建立的地表面进行凸台操作形成实体，而布尔操作则可以利用地层分界面来切割实体，从而实现三维实体

模型的建立。

3.建模流程

利用 GOCAD、CATIA 和 Hypermesh 进行建模时主要按以下流程进行（见图 5-23）：

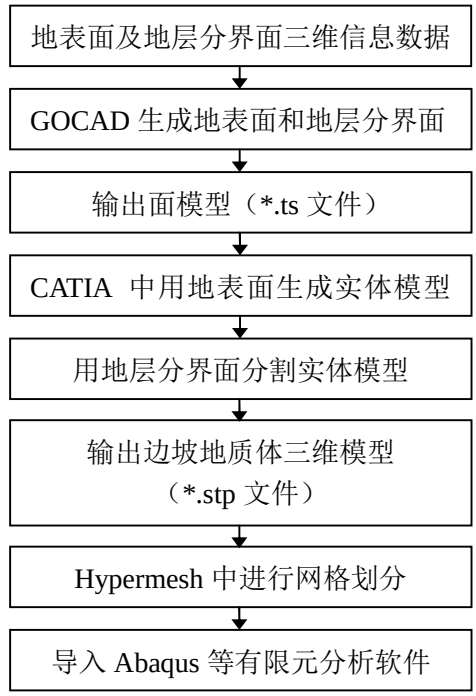


图 5-23 建模流程

Fig.5-23 Modeling process

（1）建模数据预处理

首先在 AutoCAD 中对地表等高线地形图进行处理，删除无用图层，截取建模区域并提取出等高线，保存为*.dxf 文件。整理建模区域的钻孔数据，主要包括钻孔的位置坐标（x、y、z）、补心海拔、孔深等，将其以文本文档形式保存。

（2）生成地表面和地层分界面

在 GOCAD 软件中导入以*.dxf 文件形式保存的地表面等高线地形图，利用 wizard 功能建立地表面。导入钻孔数据，建立 well 对象，结合工程地质断面图等资料建立地层分界面。

（3）输出面模型

在 GOCAD 中，通过“File→Save Object As”将地表面和地层分界面另存为*.ts 文件，实现面模型的输出。

（4）生成实体模型

在 CATIA 中导入 GOCAD 生成的地表面和地层分界面并加以处理，利用零件设计模块对地表面进行凸台操作，形成实体模型。执行布尔操作，利用地层分界面对实体模型进行分割操作，形成具有不同岩土层的三维地质模型。

（5）生成数值模型

在 CATIA 中将边坡地质体三维模型另存为*.stp 或*.igs 文件，这两种格式的文件可

以直接导入 Hypermesh 中进行网格划分，然后再导入数值计算软件，从而实现了数值模型的构建。

4.建模结果

建立该边坡三维地质模型所用到的数据主要为前期地质勘查所得，包括 1：10000 等高线地形图、勘察布孔图、地质钻孔柱状图、工程地质断面图等。利用这些数据信息，按图 5-23 所示建模流程建立该边坡的三维实体模型和网格模型。其中，三维模型共分 3 个岩土层，从上至下依次是粉土、离石黄土和凝灰岩。网格模型采用 4 面体单元，单元数量总共 19882 个。所得三维实体模型和网格模型见图 5-24 和图 5-25 所示。

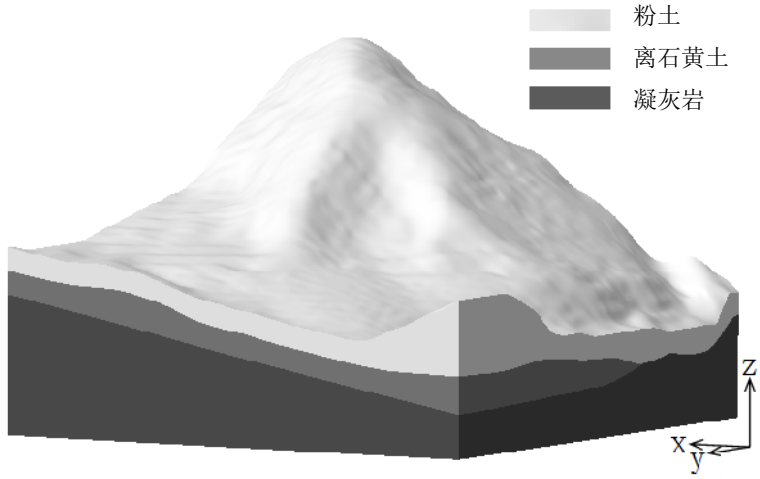


图 5-24 三维实体模型

Fig.5-24 3D solid model

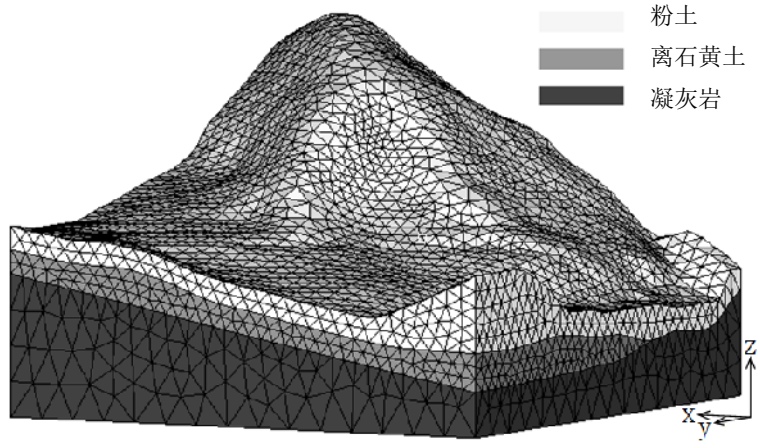


图 5-25 三维网格模型

Fig.5-25 3D mesh model

5. 3. 2 计算结果与评价

将建立的计算模型导入有限元计算软件 Abaqus 中进行计算，计算时模型侧面采用法向位移约束，底面采用全约束，坡体表面无约束，强度准则采用 Mohr-Coulomb 破坏准则。

经计算得到该滑坡在天然工况下的安全系数为 1.017，此时边坡处于欠稳定状态，

图 5-26 为剪应变增量云图，图 5-27 为位移云图。

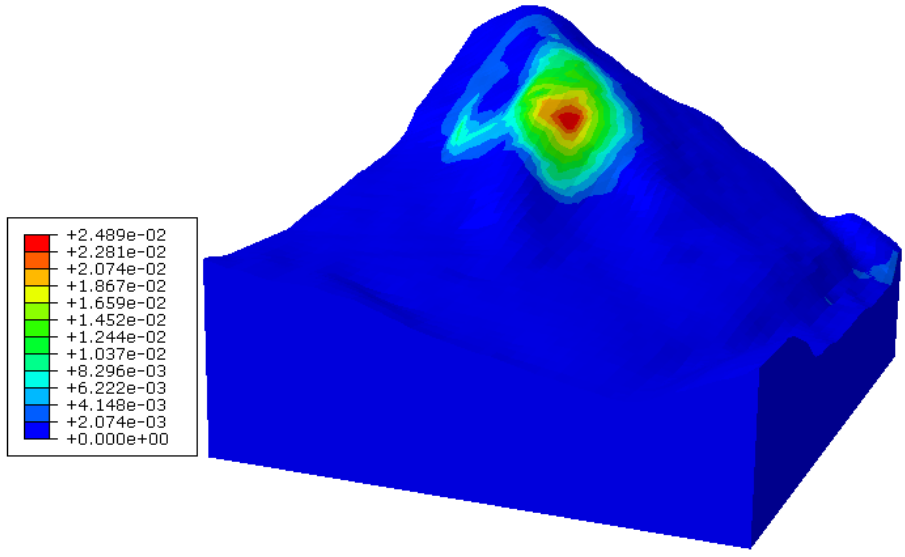


图 5-26 剪应变增量云图

Fig.5-26 Nephogram of shear strain increments

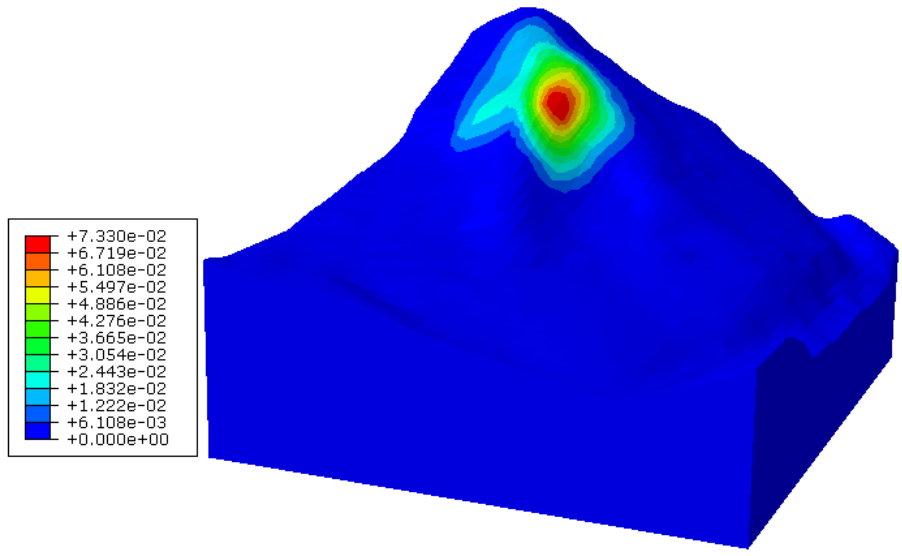


图 5-27 位移云图

Fig.5-27 Nephogram of displacements

从剪应变增量云图可以看到该边坡潜在危险区域位于以滑坡后壁附近的局部区域内，面积较大。位移云图显示，潜在危险区域内坡体位移量较大，而其余区域位移量则较小，位移量最大出现在以滑坡后壁最高处为中心的局部区域，当坡体失稳发生滑坡时，在大部分土体沿着该滑坡原主滑动方向向 S316 公路滑动的情况下，东北侧坡面土体存在向南冲沟滑动的可能性。在暴雨和地震工况下，由于受雨水和地震力的影响，坡体安全系数大大降低，分别只有 0.983 和 0.962，此时边坡已处于不稳定状态，有发生滑坡的可能性。

5.4 加郎普特滑坡治理建议

5.4.1 监测工作建议

根据计算结果，由于各滑坡在天然状态下基本处于稳定或欠稳定状态，在暴雨或地震等特殊情况下处于不稳定状态，有发生滑坡的可能性，因此建议首先对加郎普特滑坡建立全面的滑坡监测体系，包括位移长期观测和滑坡体地下水动态观测两个方面。

（1）立体式变形监测

采用深部位移和表面位移监测相结合的方法，建立以深孔测斜及地表水平变形为主的监测系统；定期观测，以分析滑坡的发展趋势及范围等。

根据对线路危害程度选择不同的监测手段，对北滑坡、东滑坡、东南滑坡等对线路危害性较小的滑坡，建议每个滑坡按一个剖面设置地面变形监测点。对邻近线路的滑坡区域，比如不动体局部滑坡、不动体滑坡、南山梁滑坡等，建议每个滑坡按一到两个剖面（或按本次勘察的剖面布置）设置深部位移监测及地表变形监测。

地面变形监测每个剖面宜布置 5～10 个观测点，每月观测 1 次，暴雨等特殊情况每月 2 次。深部位移监测每个断面宜布置 2～3 个观测点，每月观测 1 次，暴雨等特殊情况每月 2 次。

（2）地下水监测

对滑坡区域地下水的水位、水温及水量进行观测，对具有代表性的区域应通过钻孔对地下水进行长期动态观测，分析研究地下水与滑坡稳定性的关系。建议对滑坡区域内所有泉眼及利用深部位移监测孔进行监测，每个剖面布置 2～3 个观测点；每月观测 1 次，暴雨等特殊情况每月 2 次。

5.4.2 滑坡治理建议

针对加朗普特滑坡的特点，建议可采取建立排水系统为主、局部削方放坡为辅的综合整治工程方案。在滑坡区域内根据泉眼及冲沟位置设置排水盲沟，将滑坡区域内的水引导排出。对滑坡区内较小规模的滑坡采用放坡、坡面护坡和挡土墙等工程措施进行治理。其中对不动体边坡建议采用刷方与坡面防护相结合的治理措施。

（1）Ⅰ区：对以 1-1’剖面、2-2’剖面控制的两个小型滑坡，建议采用上部刷方、下部反压、坡面绿化的治理措施。

（2）Ⅱ区：对以 6-6’剖面、7-7’剖面控制的不动体滑坡，建议对滑坡后壁采取刷方放缓、坡脚设置矮挡墙、坡面绿化的治理措施。

（3）Ⅲ区：对以 4-4’剖面、5-5’剖面控制的不动体边坡，建议对线路上边坡按两级边坡刷方放缓边坡，每级边坡控制 8～10m，并采用锚固工程加固；对线路下路堤边坡进行反压护脚、坡面进行绿化。

（4）Ⅳ区：对以 8-8’剖面、9-9’剖面、10-10’剖面控制的南山梁滑坡，建议对其进行刷方放缓、坡面进行绿化。

（5）Ⅴ区：对该区的西南滑坡，建议对该坡体的西侧和靠近滑坡南冲沟的北侧进行刷方放缓，坡面进行绿化。

（6）堰塞湖：建议疏干堰塞湖或人工排水放至设计稳定水位线以内，为消除东侧人工开挖的疏导渠临空面对加朗普特滑坡整体稳定性造成的不利影响，建议回填东侧人工开挖的疏导渠或将其改为排洪明渠，并在堰塞湖西侧设置钢筋混凝土暗涵。

5.5 本章小结

本章选取伊犁境内的加郎普特黄土滑坡为典型例子，对其进行稳定性计算分析，并提出了相应治理措施，以期为该滑坡及伊犁地区其他黄土滑坡的稳定分析和治理提供参考，具体总结如下：

（1）根据现场勘察情况，选取对 S316 威胁较大的滑坡为对象，在 SLOPE/W 中根据各滑坡的相应剖面建立二维计算模型，利用 Morgenstern-Price 法计算得到天然、暴雨和地震工况下各剖面的安全系数。结果显示：天然工况下各滑坡基本处于稳定状态，在遭遇暴雨或地震时，安全系数大大降低，已处于不稳定状态，存在发生滑坡失稳的可能性。

（2）对于Ⅴ区的西南滑坡，在现场勘察时发现该滑坡后壁上缘已出现多条贯通裂缝，对该滑坡 14-14'剖面的二维计算结果表明该滑坡在天然状态下 F_s=1.030，处于欠稳定状态，在暴雨和地震等极端条件下 F_s＜1.0，处于不稳定状态，存在发生进一步的滑动的可能性。对其所进行的三维稳定性计算结果显示该滑坡有向南冲沟滑动的可能性，需引起重视。

（3）对于滑坡引起的堰塞湖，从渗透稳定性、抗冲刷稳定性和抗滑稳定性三个方面的分析结果得出结论：堰塞湖目前仍然处于相对稳定状态，堰塞体发生整体滑动和管涌潜蚀失稳的可能性很小，可能的失稳模式为漫顶冲刷破坏；在地震工况下，堰塞湖下游坝坡发生局部塌滑的可能性较大，但由于堰塞坝顺河方向较长，因此发生整体失稳的可能性较小。

（4）在对西南滑坡进行三维稳定性分析时，提出了利用 GOCAD、CATIA 和 Hypermesh 进行地质建模的方法。该方法充分利用各软件在构建模型时的优势功能，以实现边坡地质体三维模型和数值模型的构建，建模过程中也无需针对建模软件进行二次开发或编写接口程序，降低了建模难度，为数值分析人员节省了时间，提高了建模效率。

（5）根据计算结果，对加郎普特滑坡提出了相应的监测工作和治理措施建议。首先建立全面的滑坡监测体系，包括位移长期观测和滑坡体地下水动态观测两个方面。其次对滑坡采取建立排水系统为主、局部削方放坡为辅的综合整治工程方案。在滑坡区域内根据泉眼及冲沟位置设置排水盲沟，将滑坡区域内的水引导排出。对滑坡区内较小规模的滑坡采用放坡、坡面护坡和挡土墙等工程措施进行治理。其中对不动体边坡建议采用刷方与坡面防护相结合的治理措施。

第六章　结论与展望

6.1 结论

本文以伊犁地区为研究区，在野外调查、资料整理以及现场和室内试验的基础上，首先研究了该地区的地质环境条件、黄土的分布、分区、地层和基本性质；其次对黄土滑坡的分布、类型、形态等特征进行了研究，并从多个方面分析了伊犁黄土滑坡形成的原因；最后选取加郎普特滑坡为典型例子，运用极限平衡法和强度折减有限元法对其进行了稳定性计算分析，并提出了相应的治理措施。取得的研究成果如下：

（1）在伊犁境内的加郎普特、则克台和阔勒德能等地采集土样进行土力学试验，并结合已有的研究成果，从物质组成、物理性质、水理性质和力学性质对伊犁黄土的基本性质进行了分析。结果表明：伊犁黄土的粒度以粉粒为主，矿物成分以石英、长石以及碳酸盐类矿物为主，呈碱性；天然含水量和天然重度偏大，孔隙比在 0.686～0.957 之间；渗透系数在 10^{-4}～10^{-6}cm/s 之间，总体呈弱透水性；具有较强的湿陷性，内聚力在 7.2～26.2kPa 之间，内摩擦角在 15.5～32.0°之间，遇水时，内聚力和内摩擦角下降明显。

（2）通过大量野外实地调查，分析了伊犁黄土滑坡在分布、形态方面的特点。在空间上，伊犁黄土滑坡主要分布于中低山区、中低-低山丘陵区及河流两岸的黄土斜坡地带，其中，中东部地区为滑坡最为发育的地区；在时间上，区域内滑坡多发生于 4 月 5 月和 6 月。滑坡类型主要为黄土层内滑坡和黄土基岩接触面滑坡，滑坡规模以小型浅层为主，但也不乏大型滑坡。滑坡平面形态上以簸箕形、长椅形、复合形、扇形为主，纵断面形态上以圆弧形滑面为主。

（3）在土力学试验和野外调查的基础上，从多个方面分析了伊犁黄土滑坡形成的原因。分析认为，在各种因素中，伊犁地区广泛分布的黄土为滑坡的形成提供了物质基础，区域内多山的地形地貌、黄土层与下伏基岩呈不整合接触关系的地层结构为黄土滑坡提供了边界条件，而暴雨则是滑坡形成的直接诱因。在此基础上，分析了该地区降雨诱发黄土滑坡的机理。

（4）选取伊犁境内的加郎普特黄土滑坡为典型例子，分析了该滑坡的特征和形成机制，利用二维极限平衡法对该滑坡进行了稳定性分析，从渗透稳定性、抗冲刷稳定性和抗滑稳定性三个方面对滑坡所致的堰塞湖进行稳定性分析，在二维计算结果的基础上，利用 GOCAD、CATIA 和 Hypermesh 对典型滑坡建立三维数值模型，利用强度折减有限元法对其进行进一步分析，最终根据计算结果提出了相应的治理措施，可为该滑坡及伊犁其他地区黄土滑坡的稳定性分析提供参考。

6.2 展望

黄土滑坡是黄土地区危害巨大，至今未能有效根治的典型地质灾害。本论文主要以伊犁黄土滑坡为研究对象，分析研究其特征、成因及稳定性，以期为该地区黄土滑坡的防治提供参考。由于时间和作者水平有限，仍有一些问题需要进一步研究：

（1）在对黄土基本性质进行研究时，仅从物质组成、物理性质、水理性质和力学性质进行了分析，未对其微结构进行研究，而黄土的微结构与其湿陷性、渗透性等性质关系密切，因此，在今后的研究工作中，应当对这方面进行相应研究。

（2）在对滑坡进行野外调查时，受时间经费等限制，调查范围主要集中在伊犁地区黄土滑坡较为发育的地区，伊犁西部滑坡分布较少的部分地区未能进行相关调查。

（3）在对加朗普特滑坡进行稳定性分析时，由于受多方面因素影响，稳定性计算主要使用二维极限平衡法，仅对特定的滑坡进行了三维稳定性计算。

参考文献

[1] DAI F C, LEE C F, NGAI Y Y. Landslide risk assessment and management: An overview[J]. Engineering Geology, 2002, 64(1): 65-87.

[2] 王东坡,何思明,葛胜锦,等. “9·07”彝良地震诱发次生山地灾害调查及减灾建议[J].山地学报,2013, 31(1):101-107.

[3] 殷跃平,刘传正,陈红旗,等.2013年1月11日云南镇雄赵家沟特大滑坡灾害研究[J].山地学报,2013,21(1):6-15.

[4] 雷祥义.黄土高原地质灾害与人类活动[M].北京:地质出版社,2001.

[5] 安海堂,刘平.新疆伊犁地区黄土滑坡成因及影响因素分析[J].地质灾害与环境保护,2010, 21(3):22-25.

[6] 王家鼎,白铭学,肖树芳. 强震作用下低角度黄土斜坡滑移的复合机理研究[J].岩土工程学报, 2001, 23(4):445-449.

[7] 铁道部科学研究院西北分院. 滑坡防治[M].北京:人民铁道出版社,1977.

[8] 乔平定,李增均.黄土地区工程地质[M].北京:水利电力出版社,1990:1-50.

[9] 吴玮江,王念秦.黄土滑坡的基本类型与活动特征[J].中国地质灾害与防治学报,2002,13(2):36-40.

[10] Poulos S J, Castro G, France JW. Liquefaction evaluation procedure[J].Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1985,11(6):772-791.

[11] 吴玮江.季节性冻融作用与斜坡整体变形破坏[J].中国地质灾害与防治学报,1996,7(4):59-64.

[12] 雷祥义.泾阳南塬黄土滑坡与引水灌溉的关系[J].工程地质学报,1994,3(1):56-64.

[13] 范立民,岳明,冉广庆.泾河南岸崩岸型滑坡的发育规律[J].中国煤田地质,2004,16(5):33-35.

[14] 宁社教,康金栓,陶虹,等.黄土塬边大型滑坡成功预报的基本做法[J].水文地质工程地质,2006, 6:110-112.

[15] 徐峻龄.再论高速滑坡的闸门效应及其运动特征[J].中国地质灾害防治学报,1997,8(4): 23-27.

[16] 王家鼎.高速黄土滑坡的一种机理–饱和黄土蠕动液化[J].地质论评,1992,38(6):532-539.

[17] 王家鼎,刘悦.高速黄土滑坡、蠕滑动液化机理的进一步研究[J].西北大学学报:自然科学版, 1999, 29(1):79-82.

[18] Abramson LW, Lee TS. Slope stability and stabilization methods[M].New York: Wiley,1996.

[19] E. Hoek and E. T. Brown. Underground Excavation in Rock[M].London: Institution of Mining and Metallurgy, 1980.

[20] 陈祖煜.岩质边坡稳定分析-原理.方法.程序[M].北京:中国水利水电出版社,2005.

[21] 廖小平.一种新的边坡模拟技术[J].路基工程,1993(1):43-47.

[22] 冯君,周德培,李安洪.顺层岩质边坡开挖松弛区试验研究[J].岩石力学与工程学报,2005, 24(5): 840-845.

[23] Janbu N. Earth pressure and bearing capacity calculations by generalized procedure of slices[J] Proceedings of the international conference on soil mechanics and foundation engineering, 1957, (2):108-111.

[24] Lowe J and Karafiath L. Stability of earth dams upon draw down[J].Pan-Am conf on Soil Mech and Engrg,1960,537-552.

[25] Hovland H J. Three-dimensional method of stability analysis[J].Journal of Geotechnical Engineering, ASCE,1977,103:971-986.

[26] Duncan J M. State of the art: limit equilibrium and finite element analysis of slopes[J].Journal of Geotechnical engineering,1996,122(7):577-596.

[27] Chen R H and Chameau J L. Three-dimensional limit equilibrium analysis of slopes [J].Geotechnique, 1983,33:31-40.

[28] Chen Z, Morgenstern N R. Extension to the generalized method of slices for stability analysis[J]. Canadian Geotechnical Journal,1983,20(1):104-119.

[29] Hunger O. An extension of Bishop's simplified method of slope stability Analysis to three dimension [J].Geotechnique,1987,37:113-117.

[30] Hunger O, Salgado F M, Byme P M. Evaluation of a three-dimensional method of slope stability analysis[J].Canadian Geotechnical Journal,1989,26:679-686.

[31] Zhang X. Three-dimensional stability analysis of concave slopes in plane view[J].Journal of Geotechnical Engineering,1988,114(6):658-671.

[32] ZIENKIEWICZ O C, HUMPHESON C, LEWIS R W. Associated and non-associated visco-plasticity and plasticity in soil mechanics[J].Geotechnique,1975,25(4):671-689.

[33] Wong F S. Uncertainties in FE modeling of slope stability[J].Computer & Structures,1984,19: 777-791.

[34] Duncan J M. State of the art: Limit equilibrium and finite element analysis of slopes [J].Journal of Geotechnical Engineering, AS2CE,1996,122(7):577-596.

[35] Matsui T, San K C. Finite element slope stability analysis by shear strength reduction technique[J]. Soils and Foundations,1992,32(1):59-70.

[36] Ugai K, Leshchinsky D. Three-dimensional limit equilibrium and finite element analysis:a comparison of results[J].Soils and Foundations,1995,35(4):1-7.

[37] 宋二祥.土工结构安全系数的有限元计算[J].岩土工程学报,1997,19(2):1-7.

[38] 张鲁渝,郑颖人,赵尚毅,等.有限元强度折减系数法计算土坡稳定安全系数的精确研究[J].水利学报,2003,(1):21-27.

[39] 王栋,年廷凯,陈煜淼.边坡稳定有限元分析中的三个问题[J].岩土力学,2007,28(1):2309-2313.

[40] DAWSON E M, ROTH W H, DRESCHER A. Slope stability analysis by strength reduction[J]. Geotechnique,1999,49(6):835-840.

[41] 杨有成,李群,陈新泽,等.对强度折减法若干问题的讨论[J].岩土力学,2008,29(4):1103-1106.

[42] 史恒通,王成华.土坡有限元稳定分析若干问题探讨[J].岩土力学,2000,21(2):152-155.

[43] 杨奉广,木合塔尔•扎日,封丽华.新疆伊犁地区地质灾害的形成与防治对策[J].新疆师范大学学报(自然科学版),2005,24(3):117-120.

[44] 王小丽.RS 与 GIS 支持下的伊犁谷地地质灾害风险评价——以尼勒克县滑坡为例[D].西安:长安大学,2013.

[45] 张国伟,李三忠,刘俊霞,等.新疆伊犁盆地的构造特征与形成演化[J].地学前缘,1999,6(4):203-214.

[46] 陶国强,冯建辉,熊介凡,等.遥感油气勘探对伊犁盆地的评价[J].现代地质,1997,11(4):529-535.

[47] 肖德顺,赵义峰,安志清.伊犁地区降水特征及变化趋势分析[J].干旱区资源与环境,2006,20(4):47-50.

[48] 张鑫,王纪科,周建召.关中平原地下水资源承载力现状及提高承载力的途径[J].地下水,2001,23(2):65-66.

[49] 魏世民.初论伊犁河流域水资源的开发利用[J].国土与自然资源研究,1997(4):53-57.

[50] 周健勤,朱金兆,武红旗. 伊犁喀什河流域生态景观格局分析[J].南水北调与水利科技,2010,8(1):113-115.

[51] 王云才.巩乃斯河流域游憩景观生态评价及持续利用[J].地理学报,2005,60(4):645-655.

[52] 刘志兴,徐俊荣,李梅英,等.新疆巩乃斯河水化学分析[J].干旱区地理,2010,33(1):23-28.

[53] 王景明等.黄土构造节理的理论及其应用[M].北京:中国水利水电出版社,1996.

[54] 刘祖典.黄土力学与工程[M].西安:陕西科学技术出版社,1997.

[55] 王念秦.黄土滑坡发育规律及其防治措施研究[D].成都:成都理工大学,2004.

[56] 刘东生等.黄土的物质成分和结构[M].北京:科学出版社,1985.

[57] 王永焱等.黄土与第四纪地质[M].西安:陕西人民出版社,1982.

[58] 张宗祜,张之一.中国黄土[M].北京:地质出版社,1989.

[59] 李传想,宋友桂,王乐民.伊犁盆地黄土分布、年代及粉尘来源分析[J].地球与环境,2012,40(3):314-320.

[60] 宋友桂,史正涛.伊犁盆地黄土分布与组成特征[J].地理科学,2010,30(2):267-272.

[61] 史正涛.天山黄土与西北内陆干旱化[D].兰州:兰州大学博士论文,2002.

[62] 叶玮.新疆西风区黄土沉积特征与古气候[M].北京:海洋出版社,2001.

[63] 贺秀斌,雷祥义.黄土高原全新世黄土重矿物研究及其土壤发生学意义[J].地理科学,1996,16(2):159-63.

[64] 庞奖励,黄春长,查小春,等.郑州全新世黄土的颗粒形态特征及其环境意义[J].地理科学,2008,28(5):683-87.

[65] 王峻.黄土易损性与地震黄土滑坡关系探讨[J].甘肃科学学报,2008,20(2):36-40.

[66] 尹光华,王兰民,袁中夏,等.新疆伊犁黄土的物性指标、动力学特性与滑坡[J].干旱区地理,2009,32(6):899-905.

[67] 曾亚武,田伟明.边坡稳定性分析的有限元法与极限平衡法的结合[J].岩石力学与工程学报,2005,24(增2):5355-5359.

[68] 李世海,刘天苹,刘晓宇.论滑坡稳定性分析方法[J].岩石力学与工程学报,2009,28(增 2):3309-3324.

[69] 黄梦宏,丁桦.边坡稳定性分析极限平衡法的简化条件[J].岩石力学与工程学报,2006,25(12):2529-2535.

[70] 张季如.边坡开挖的有限元模拟和稳定性评价[J].岩石力学与工程学报,2002,21(6):843-847.

[71] 万少石,年廷凯,蒋景彩,等.边坡稳定强度折减有限元分析中的若干问题讨论[J].岩土力学,2010,31(7):2283-2288.

[72] 张鲁渝,郑颖人,时卫民.边坡稳定分析中关于不平衡推力法的讨论[J].岩石力学与工程学报,2005,24(1):177-182.

[73] MORGENSTERN N R,PRICE V E. The analysis of the stability of general slip surfaces[J]. Geotechnique,1965,15(1):79-93.

[74] 连镇营,韩国城,孔宪京.强度折减有限元法研究开挖边坡的稳定性[J].岩土工程学报,2001,23(4):407-411.

[75] 黄润秋.20 世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制[J].岩石力学与工程学报,2007,26(3):433-454.

致　谢

一转眼，时光飞逝如电，三年的研究生生活就要结束了。回首往昔，学习与生活中点点滴滴的往事，仿佛就发生在昨日一般。还记得辞去工作考研时的情景，还记得辞别父母只身一人到来大西北的情景，还记得研一时和同学们一起上课的情景，还记得向导师汇报学习情况的情景，还记得和同学朋友们在学习之余参加各种活动的情景……太多的回忆，有对往昔的不舍，也有着对未来的向往。

三年的研究生学习中，我的导师程建军教授给予了我许多的指导。从进入学校到现在，程老师一直教导我们要珍惜时光、认真踏实学习，在三年的学习中，他高尚的人格魅力、渊博的学术知识、严谨求实的治学态度和忘我的工作精神，使我受益终身。从本论文的选题、资料整理，到论文撰写和修改，整个过程都是在程老师的指导之下完成的。程老师不仅在学业上给予我指导和支持，在生活上也给予我无微不至的关怀，值此毕业之际，向老师表达衷心的感谢，祝福老师身体健康，事业更上一层楼。

同时，在研究生阶段的学习中，得到了新疆生产建设兵团勘测规划设计研究院地质勘察分院和新疆西北岩土工程咨询有限公司的帮助，在这里向苟忠民高工等表达真挚的感谢。

感谢我的研究生同学朱文智硕士、张云鹏硕士、赵宇龙硕士、陈绍民硕士、汤伟忠硕士、董江伟硕士，以及我的师弟马恩帅、景文宏等，三年的学习生活，得到了他们许多的帮助，和他们在一起的日子让我永远难忘，祝福他们在今后的人生旅途上一切顺利。

感谢我的室友郭涛硕士、李亚飞硕士和王邦权硕士，很高兴能和他们相识，和他们一起朝夕相处三年，这段经历是我人生中宝贵的财富，感谢他们！祝福他们！

感谢父母对我的养育之恩，是他们给了我生活与学习的条件，没有他们对我的无私奉献和默默支持，我就没有机会能够回到学校进行研究生阶段的学习，在这里向他们表达衷心的感谢。同时，也衷心感谢我的女友唐雪芹三年来对我的鼓励和支持。

刘毅

2015 年 3 月 30 日于石大

作 者 简 介

刘毅，男，生于 1986 年 4 月，籍贯四川省绵阳市。2009 年毕业于华中科技大学水电与数字化工程学院水利水电工程专业，获工学学士学位，同年 7 月进入湖南省建筑工程集团总公司水利水电工程公司工作，2012 年进入石河子大学水利建筑工程学院，学习水利水电工程专业，主要从事水利水电工程施工与管理以及边坡工程方面的研究。

在读期间主要参与的研究项目

1.参加了《农九师 166 团小锡伯提水库右岸趾板及塌滑体工程地质勘察》项目的部分工作。

2.参加了《新疆 S316 线尼勒克～新源公路滑坡稳定性专项评价》项目的部分工作。

在读期间发表的文章

1.刘毅,程建军,刘永明,吴君祥.小锡伯提水库滑坡体稳定性分析[J].水力发电,2013,39(12):21-24.

2.刘毅,程建军,苟忠民,马恩帅.新疆则克台堰塞湖稳定性分析[J].水利水电技术,2015,46(1):126-129.

3.刘毅,程建军,马恩帅,辛国伟.边坡地质体三维模型及数值模型构建方法研究[J].公路,2015,60(4):63-66.

4.杨海亮,程建军,刘毅.石河子山前平原区工程地质特征及勘察要点探析[J].土工基础,2013,27(3):86-88.

5.马恩帅,程建军,刘毅,陈银磊.基于 Quake/W 和 Slope/W 耦合方法的水库边坡稳定性分析-以小锡伯提水库为例[J].石河子大学学报(自然科学版).(待刊)

获奖情况

获得 2014 年“硕士研究生国家奖学金”。

石河子大学硕士研究生学位论文

导师评阅表

研究生姓名	刘毅	学制	三年
专业	水利水电工程	研究方向	水利水电施工与管理

学术评语：

新疆伊犁地区为地质灾害多发区，长期以来，黄土滑坡的发生，掩埋房屋建筑、阻断道路交通、摧毁水利设施，严重影响了该地区的经济发展和人民的生活生产。因此，对该地区黄土滑坡进行相关研究具有重要现实意义。该文以伊犁为研究区，在野外实地调查和资料整理以及土力学试验的基础上，对研究区内黄土滑坡的分布、类型和形态等特征以及滑坡形成的原因进行了相关研究，并选取了典型滑坡为对象，对其进行稳定性分析计算。其研究成果可以为研究区以及其他地区类似的黄土滑坡地质灾害的研究与防治提供借鉴和参考，具有一定的理论意义和实用价值。

研究中，作者首先从地理位置、地形地貌、地层岩性、地质构造、气象水文、水文地质等方面对研究区的工程地质条件进行了较为详细的分析。在此基础上，分析研究了伊犁地区黄土的分布、分区和地层情况，并在研究区内采集黄土土样进行了土力学试验，研究分析了伊犁境内黄土的物质组成、物理性质、水理性质和力学性质。其次，在对工程地质条件和黄土性质进行分析的基础上，对伊犁境内黄土滑坡的特征和形成原因进行了研究。其中，对伊犁黄土滑坡特征的分析主要从滑坡的分布、类型以及形态三个方面进行；对滑坡形成原因主要从内部原因和外部原因两个大的方面进行，并根据研究区黄土滑坡的实际情况，重点分析了降雨诱发黄土滑坡的机理。最后选取研究区内一处典型滑坡为例子，利用极限平衡法和强度折减有限元法对其进行了较为详细的稳定性计算，并根据计算结果提出了相应了滑坡防治措施，可为该滑坡和其它相似滑坡的稳定性分析和治理提供参考。

该论文对伊犁地区黄土滑坡的特点和影响黄土滑坡形成的主要因素进行的分析较为全面，具有普遍性和适宜性，对典型滑坡进行稳定性分析时所提出的三维建模方法具有较强的实用性和创新性，稳定性分析结果较为合理，提出的建议具有较强的可操作性。论文结构合理、层次清晰、具有较强的实际意义，已经达到硕士学位论文水平，同意进行论文答辩。

指导教师签字：

2015 年 6 月 7 日