

分类号：
学号：20232010020

密级：
单位代码：10759

石河子大学

硕士学位论文



夹河子水库库区淤沙分布与淤积特征研究

学位申请人	李俊
指导教师	刘贞姬
申请学位门类级别	工学硕士
学科、专业名称	水利工程
研究方向	水力学及河流动力学
所在学院	水利建筑工程学院

中国·新疆·石河子
2026年5月

分类号：
学号：20232010020

密级：
单位代码：10759

石河子大学

硕士学位论文



夹河子水库库区淤沙分布与淤积特征研究

学位申请人	李俊
指导教师	刘贞姬
申请学位门类级别	工学硕士
学科、专业名称	水利工程
研究方向	水力学及河流动力学
所在学院	水利建筑工程学院

中国·新疆·石河子
2026年5月

**Study on sedimentation distribution and characteristics in Jiahezi
reservoir areas**

A Dissertation Submitted to

Shihezi University

In Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master of Engineering

By

Jun Li

(Hydraulic Engineering)

Dissertation Supervisor: Prof. Liu Zhen-ji

May, 2026

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

本人所提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：李俊

时间：2026年5月20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：李俊

时间：2026年5月20日

导师签名：刘世厚

时间：2026年5月20日

摘要

目的:为解决新疆多沙山溪性河流下游平原水库库区内实际存在的淤积物分布不清、冲淤规律趋势不明的问题。本文以夹河子水库为研究对象,针对其库区不同粒径泥沙分布及其冲淤变化开展研究,探究库区水沙运动特性,为清淤区域选取提供参考。

方法:本文以夹河子水库为研究对象,结合实地测绘、采样及现有水文资料,构建了水库水沙模型,并以此为基础,采用数值模拟技术,开展了不同水沙入库条件下库区冲淤过程的动态研究,分析了库区内泥沙分布与淤积特征,并初步探讨了不同清淤区域对库区淤积趋势。

结果:(1)库区内泥沙粒径组成研究表明,泥沙颗粒粒径沿河道流向和纵向取样点垂向均减小。泥沙主要由细颗粒组成,颗粒中位数(d_{50})为0.027 mm。直径从0.005 mm到0.25 mm占总体泥沙粒径的76.48%,此粒径范围内的颗粒构成水库泥沙淤积物的主要组分。(2)对泥沙颗粒分布分析结果表明,在洪水期,粒径1-3 mm的颗粒均在漫滩最远处达到峰值;丰水期,泥沙浓度峰值出现在东泄水闸;枯水期,泥沙峰值则分布于泄洪闸前,而东泄水闸前近乎无分布。在仅改变流量条件且模拟时长相同的情况下,丰水期库区尾部回水区的含沙量约为枯水期的3~4倍。库区内的冲淤模式在不同运行工况下基本一致,可大致划分为四类区域:冲刷-淤积过渡区、冲淤平衡区、冲刷区及淤积区。枯水期的冲刷和沉积强度约为丰水期0.3到0.5倍。与进水闸附近相比,库区尾部的淤积厚度显著减少3倍以上。枯水期工况下,进水闸与泄洪闸连接处的河道中存在冲刷-淤积平衡区。(3)库区河床变化是冲淤变化的重要影响因素之一,相较于未清淤工况,三种工况在清淤区域前于洪水期均未出现明显的“漫滩现象”,洪水期三种清淤工况下的清淤区域前部均未出现明显的“漫滩现象”,并且在相同工况下,清淤方案二在相同清淤位置的淤积厚度分别为方案一和方案三的1.2倍以上。方案一库区面积相较于方案三更小,两者淤积厚度差异较小,故选取方案进行清淤指导。

结论:在库区水沙特性中,水动力学与地形条件不仅通过控制泥沙输移与冲淤模式决定了水沙分布的基本格局,其产生的流体动力分选效应也进一步使细颗粒泥沙呈现出更为广泛的空间分布规律。本文以新疆多沙山溪性河流下的夹河子水库为例,研究成果可为同类水库提供理论依据与技术支撑,对延长水库使用寿命、保障寒旱区水安全具有重要的现实意义。

关键词:泥沙粒径分布;泥沙输移;库区冲淤;水库淤积

Abstract

Objective: In order to solve the problems of unclear distribution of silt and unclear trend of erosion and siltation in the reservoir area of the lower plain reservoir of a sediment-laden river in the mountainous river in Xinjiang. In this thesis, the distribution of sediment of different particle sizes and their erosion and siltation changes in the reservoir area were studied, and the water and sediment movement characteristics of the reservoir area were explored, which provided a reference for the selection of dredging areas.

Methods: This thesis takes Jiahezi reservoir in Xinjiang as the research object, the dynamic study of the erosion and siltation process in the reservoir area under different water and sediment storage conditions is carried out by numerical simulation technology, and the sediment distribution and siltation characteristics in the reservoir area are analyzed, and the siltation trend of different dredging areas is preliminarily discussed.

Results: (1) The study of sediment particle size composition in the reservoir area shows that the sediment particle size decreases along the river flow direction and the vertical direction of the longitudinal sampling point. The sediment was mainly composed of fine particle size, and the median particle size (d_{50}) was 0.027 mm. The diameter from 0.005 mm to 0.25 mm accounted for 76.48% of the total sediment size, and the particles within this particle size range constituted the main components of reservoir sediment. (2) The analysis of sediment particle distribution showed that particles with a particle size of 1-3 mm reached their peak at the farthest part of the floodplain during the flood period. In the wet season, the peak sediment concentration occurred at the east drainage gate. During the dry season, the peak is distributed in front of the flood discharge gate, but not in front of the east discharge gate. At the same time, the overall suspended sediment concentration in the tailback water area of the reservoir during the wet season is about 3-4 times that of the dry season. The erosion mode in the reservoir area is basically the same under different operating conditions, and can be roughly divided into four types of areas: erosion-siltation transition area, erosion balance area, scouring area, and siltation area. The erosion and sedimentation intensity during the dry season is about 0.3 to 0.5 times that of the wet season. Compared with the vicinity of the inlet gate, the siltation thickness at the end of the reservoir area is significantly reduced by more than 3 times. During the dry season, there is a scouring-siltation balance zone in the river channel at the connection between the inlet gate and the flood discharge gate. (3) The change of riverbed in the reservoir area is one of the important influencing factors of the change of erosion, compared with the undesilted working conditions. There is no obvious "floodplain phenomenon" in the three working conditions before the dredging area in the flood period, and there is no obvious "floodplain phenomenon" in the front position of the dredging area under the three dredging conditions during the flood period, and under the same working conditions, the siltation thickness of the dredging scheme 2, scheme 1 and scheme 3 is more than 1.2 times that of the latter two, respectively. The area of the reservoir area of scheme 1 is smaller than that of scheme 3, and the difference in siltation thickness between the two is small, so the scheme is selected for dredging guidance.

Conclusion: In the characteristics of water and sediment in the reservoir area, the hydrodynamics and

topographic conditions not only determine the basic pattern of water and sediment distribution by controlling the sediment transport and erosion mode, but also further make the fine sediment show a wider spatial distribution law. Taking the Jiahezi Reservoir under the sediment-laden river in the mountainous region of Xinjiang as an example, the research results can provide theoretical basis and technical support for similar reservoirs, which is of great practical significance for extending the service life of the reservoir and ensuring water security in cold and arid areas.

Key words: Sediment particle size distribution; Sediment transport; Reservoir area erosion and siltation; Reservoir siltation

目录

摘要.....	I
Abstract.....	II
第1章 绪论.....	1
1.1 研究背景与意义.....	1
1.2 国内外研究现状分析.....	2
1.2.1 国内研究现状.....	2
1.2.2 国外研究现状.....	5
1.2.3 研究评述.....	7
1.3 研究内容.....	7
1.3.1 构建夹河子水库数据.....	7
1.3.2 建立水库水沙模型并验证.....	7
1.3.3 夹河子水库水沙冲淤模拟预测、分析.....	8
1.4 技术路线.....	8
第2章 研究区域概况与基础资料.....	9
2.1 库区自然地理与工程概况.....	9
2.1.1 流域河流介绍.....	9
2.1.2 研究库区基本信息.....	9
2.2 夹河子水库库区测绘概述.....	11
2.3 入库水沙条件.....	11
2.3.1 入库流量.....	11
2.3.2 泥沙取样点布设.....	12
2.3.3 取、测样及含沙量测定方法.....	13
2.4 取样泥沙分析.....	15
2.4.1 粒径纵向分布规律研究.....	15
2.4.2 水库整体粒径规律研究.....	17
2.5 本章小结.....	18
第3章 模型的构建与验证.....	19
3.1 模型基本原理与控制方程.....	19
3.1.1 水动力模块.....	19
3.1.2 冲淤模块.....	20
3.2 模型的构建.....	21

3.2.1	计算网格的建立	21
3.2.2	关键参数设置	21
3.3	模型结果的验证与分析	22
3.3.1	水位验证法	22
3.3.2	典型断面淤积厚度验证法	24
3.4	本章小结	25
第 4 章	库区水沙运动特征模拟研究	26
4.1	洪水期工况	26
4.1.1	洪水期库区水流速度变化特征研究	26
4.1.2	洪水期基于不同粒径分布规律研究	28
4.1.3	洪水期库区冲淤特征研究	30
4.2	丰水期工况	31
4.2.1	丰水期库区水流速变化特征研究	31
4.2.2	丰水期不同粒径分布规律研究	33
4.2.3	丰水期库区冲淤特征研究	34
4.3	枯水期工况	36
4.3.1	枯水期库区流速变化特征研究	36
4.3.2	枯水期不同粒径分布规律研究	37
4.3.3	枯水期库区冲淤积特征研究	38
4.4	本章小结	39
第 5 章	清淤方案实施后库区内水沙特征模拟分析	41
5.1	洪水期工况	42
5.1.1	洪水期清淤后库区流速变化分析	42
5.1.2	洪水期清淤后库区冲淤特征分析	46
5.2	丰水期工况	52
5.2.1	丰水期清淤后库区流速变化分析	52
5.2.2	丰水期清淤后库区冲淤特征分析	57
5.3	枯水期工况	62
5.3.1	枯水期清淤后库区流速变化分析	62
5.3.2	枯水期清淤后库区内冲淤特征分析	65
5.4	本章小结	69
第 6 章	结论与展望	71
6.1	结论	71
6.2	展望	72

6.2.1 水库调度优化层面	72
6.2.2 河道工程治理层面	72
6.2.3 综合展望	72
参考文献	73
致谢	79
作者简介	80

论文主要符号表

η	— 水位, m
d	— 静态水深, m
h	— 垂向总水深, m
u	— 深度平均速度分量在 x 方向, m/s
v	— 深度平均速度分量在 y 方向, m/s
f	— 科里奥利力系数, 无量纲
ω	— 地球的角速度, rad/s
φ	— 当地纬度, rad
g	— 重力加速度, m/s^2
ρ	— 浑水的密度, kg/m^3
ρ_0	— 水的密度, kg/m^3
Pa	— 局部大气压力, Pa
S_{xx} 、 S_{xy} 、 S_{yx}	— 辐射应力分量, Pa
τ_{sx} 、 τ_{sy}	— 水面风应力张量, Pa
τ_{bx} 、 τ_{by}	— 河床床面应力张量, Pa
T_{xx} 、 T_{xy} 、 T_{yy}	— 水平粘滞应力项, Pa
S	— 源项, $kg/(m^3 \cdot s)$
us	— 源项在 x 方向的水流流速, m/s
vs	— 源项在 y 方向的水流流速, m/s
c	— 垂向平均含沙量, kg/m^3
u 、 v	— x 、 y 方向的垂向平均流速, m/s
D_x 、 D_y	— 分别为 x 、 y 方向的泥沙紊动扩散系数, m^2/s
S	— 冲淤项, $kg/(m^3 \cdot s)$
F_e 、 F_d	— 侵蚀项, $kg/(m^3 \cdot s)$
ω	— 泥沙的沉速, m/s
c_b	— 河床附近的泥沙浓度, kg/m^3
D_{sg}	— 悬浮混合物的几何平均尺寸, m
d	— 沉积泥沙直径, m
C	— 体积含沙量, kg/m^3
E_s	— 泥沙夹带系数, 无量纲
P	— 代表河床底部沉积物的体积分数, %
R_j	— 沙粒为雷诺数, 无量纲
α_1 、 α_2	— 为系数, 无量纲

u^* — 河床剪切速度, m/s

μ_f — 曼宁系数, $s/m^{1/3}$

r_w — 上界面与床层阻力比值, 无量纲

第1章 绪论

1.1 研究背景与意义

水库通过拦蓄洪水、调节径流、集中落差等方式，在航运、农业灌溉、城乡供水、旅游、养鱼、改善环境、防洪和水力发电等诸多方面发挥重要作用，为人民带来巨大的社会经济和环境效益^[1]。

然而，水库会改变天然河流的水沙输移过程，进而造成泥沙沉积于库区内。并且，这种淤积现象逐年持续，造成有效库容不断缩减，直接影响水库的设计寿命与径流调节能力。同时，泥沙的堆积还会削弱部分水工建筑物的原有功能，威胁水库的整体运行安全，例如引发两岸地下水位的抬升，或对兼具通航功能的水库造成局部河势不稳等问题^[2,3]。水库需经常清淤疏浚以保证其功能发挥，这增加了维护难度及费用支出。因此，水库淤积是世界性长期未能彻底解决的重大水利问题之一^[4]。

截止 2023 年，我国已经修建水库 94877 座，总库容达到 9999 亿立方米。但因对建库后水库淤积认识不足，中华人民共和国成立初期修建的水库大多具有较高的淤损率。我国水库的年库容淤损率比全世界的水平高出 2 倍以上。据统计，我国平均每年的库容淤损率为 2.3%，是世界的 2.3~4.6 倍。淤积损量约 $117 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，相当于世界总淤损的 19%~37%。据 2001 年统计，全世界水库多年平均库容损失量约占剩余库容的 0.5%~1%。按目前淤损率估算，未来半个世纪到一个甲首期内，全国大部分水库都将接近淤满报废。

在新疆维吾尔自治区，许多河道含沙量较高，修建在这类多泥沙河流上的水库普遍面临淤积难题，并由此在多个方面造成不利影响^[5]。兵团水库大多始建于上世纪 90 年代，经过几十年不间断运行，水库库容淤损严重。兵团所辖 145 座水库，大都为引洪灌注式平原水库^[6]。兵团水库担负着保障防洪、供水和生态安全的重要任务，在兵团经济社会发展中发挥了重要作用^[7]。而兵团水库所在河流泥沙含量较高，大量泥沙随洪水入库，造成大多数平原水库出现了严峻的淤积问题。兵团所辖 145 座水库中，69 座淤积严重，影响功能发挥。兵团水库的淤积问题尤为突出，年均淤损率约为 2%。兵团水库总库容约 34.88 亿立方米，按照目前新建水库投资单价每立方米 40 元计算，每年损失约 27.9 亿元。因此，平原水库淤积严重影响水库的使用寿命^[8]，是制约水库发挥作用的“卡脖子”问题，该问题已经成为制约兵团经济发展的重要因素之一。目前，兵团平原水库普遍存在淤积严重、淤积发展态势及淤积物构成不明等问题。2023 年 11 月，水利部要求“科学推进水库减淤和清淤^[9]工作，维护水库库容安全任何时候都不能放松”。全国政

协委员霍卫平提出要推动水库清淤，缓解水资源危机。

目前，新疆平原水库淤积问题日益突出，且淤积物组成、时空分异特征及发展趋势尚不明晰。明晰上述关键参数、探求冲淤特性、优化清淤策略，对保障水库农业灌溉、防洪等效益具有重要意义。

1.2 国内外研究现状分析

水库能够优化水资源配置，对洪水防治、城市生活生产用水、农田灌溉、水电站发电运行和生态环境保护具有基础性的保障作用^[10,11]。因此，该类工程成为国内外学者关注的重点课题之一，已取得了大量的研究成果；库区内泥沙淤积主要依托三种技术路径：物理模型试验^[12]、缩比水工模型建立^[13]以及基于实际边界条件的数值仿真模拟^[14]进行研究。物理实验通过采用原型沙或者模型沙进行沉积模拟，能够直接观察到泥沙的运动以及淤积情况；利用几何相似律将库区按照比例缩小制作成水工模型，在这个模型上可以人为地控制来流、含沙量以及边界条件，便于进行机理性的研究；采用数值方法求解水沙运动的基本控制方程，并引入实测的地形以及水文信息，达到能进行库区长系列、多种工况下泥沙输移及淤积演变过程仿真模拟的目的^[15]。

1.2.1 国内研究现状

1.2.1.1 水库泥沙淤积理论发展

随着社会经济和计算机学科的迅速发展，水沙理论、计算机模拟等得到了长足的发展与进步^[16]。

1963年我国泥沙及河流动力学专家窦国仁在苏联早期研究成果的基础上，相较于平衡输沙理论，为构建泥沙冲淤数学模型提供了理论基础^[17]。泥沙与河床演变专家韩其为对不平衡输沙理论进一步完善，深入开展了非均质悬移质不平衡输沙研究^[4]。沙玉清给定了恒定条件下一维非均匀流含沙量沿程变化的解析解和显著冲刷与淤积情况下悬移质级配与床沙级配的变化方程^[18]。何明民等引入了有效床沙级配及挟沙能力级配两个重要概念，总结出了几种限定条件下挟沙能力级配及有效床沙级配的计算公式，进一步揭示非均匀悬移质不平衡输沙的机理，拓宽了研究领域^[19]。

现对于不平衡输沙理论研究来说，如何求得恢复饱和系数是目前研究的主要方向。韩其为（1979）根据大量的试验和测算成果认为，对于河道型水库和湖泊型水库来说，淤积—冲刷过程的饱和系数可近似地取1，而恢复饱和系数分别为约0.25和0.5^[20]。此外，王新宏等采用统计的方法，推导出分组沙恢复饱和系数与混合沙平均恢复饱和系数的关系，并提出分组沙恢复饱和系数与混合沙平均沉速成正比、与其自身沉速成反比^[21]。

但随着研究的不断深入,依靠一维水流挟沙力的研究成果已较难满足模型结果的精度,二维模型发展迅速且逐渐成为水沙模拟主流方法。如李义天公式在二维水流挟沙力^[22]的运动规律方面最有代表性。

此外,动床阻力问题是河流动力学以及工程泥沙学科领域中一个最为基本的问题之一,它与河道和水库的泄洪能力和输沙能力密切相关,高度概括了挟沙水流的主要运动规律,在实际工程中具有较高的价值。为此,国内外学者对此进行了大量的研究工作。

根据形成的机理将动床阻力分为局部阻力和沿程阻力;又可根据河床表面、岸壁情况将沿程阻力分成床面、岸壁阻力。在天然河道及水库的可动床阻力问题中,床面摩阻在总的阻力中占到很大的一部分。

1.2.1.2 水库泥沙数值仿真研究

随着建模能力的不断提升与流动场可视化手段的持续演进,近年来,以水沙动力信息仿真结果为核心的数值模拟方法,已逐步发展为支撑水沙运移研究的重要工具,得到广泛推广与应用。

1956年,西德汉森(W. Hansen)出版了《有关河口水流及海岸水流泥沙运动的二维数学模型》一书。由于当时数值计算条件限制,在计算中对有关理论和公式做了较多的简化。在20世纪60年代中期,为了求解实际工程设计及规划中的有关问题,工程技术人员编制了相应的计算程序并建立了一些专门的数学模型。到20世纪70年代圣维南提出非恒定水流方程,这为数学模拟方法的发展提供了理论依据。

在我国,泥沙数学模型的研究和应用大概追溯到世纪50年代初期,运用一维数学模型进行水库淤积及河流裁弯取直的河床变形计算,相较于泥沙数学模型发展早的国家要略晚^[23]。但限于当时的计算条件,不得不对模型进行大量简化,并且计算效率低下,容易出错,应用受到限制。

直到上世纪70年代中期,各种功能相对齐全的系统化数学模型相继出现,并能基于此对全流域乃至洪泛平原及已有或拟建工程进行系统的分析预测。之后,将研究应用于三峡工程的二维水沙数学模型列入了“七五”国家重点项目。与此同时,国家“八五”重点科技攻关项目“黄河治理及水资源利用”的开展以及计算机技术的飞速发展,促使大量设计和科研单位投入力量加强数值模拟研究和软件研发工作。

由此,泥沙数学模型得以迅速发展,类型日益丰富,在生产工程中的适应性和精度均较高,数值模拟技术也正逐步成为研究河流泥沙问题的重要工具。目前,国内各种类型的泥沙数学模型数量很多。杨国录对上世纪90年代以前国内外典型一维和二维水沙数学模型进行了回顾和总结,国内的一维泥沙数学模型大体上可分为各有特点的三类:一是以水沙运动的基础理论为指导的水文学模型^[24],主要特点是基于大量实测资料,对其进行整理分析,探求水库泥沙冲淤演变及水沙运动规律,从而建立具有一定物理意义