

分类号：
学号：20222110038

密级：公开
单位代码：10759

石河子大学

硕士学位论文



基于 GEE 云平台的天山北坡蓄水工程格局演变 及驱动力分析

学位申请人	孙莹琳
指导教师	刘兵 副教授 汪再光 高级工程师
申请学位类别	专业硕士
专业名称	土木水利
研究领域	水利工程
所在学院	水利建筑工程学院

中国·新疆·石河子
2025年5月

分类号：
学号：20222110038

密级：公开
单位代码：10759

石河子大学

硕士学位论文



基于 GEE 云平台的天山北坡蓄水工程格局演变 及驱动力分析

学位申请人	孙莹琳
指导教师	刘兵 副教授 汪再光 高级工程师
申请学位类别	专业硕士
专业名称	土木水利
研究领域	水利工程
所在学院	水利建筑工程学院

中国·新疆·石河子
2025年5月

**Analysis of the Evolution and Driving Forces of Water Storage
Engineering Patterns on the Northern Slope of the Tianshan
Mountains Based on the GEE Cloud Platform**

A Dissertation Submitted to

Shihezi University

In Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master of Engineering

By

Sun Ying-lin

(Hydraulic Engineering)

Dissertation Supervisor: Prof. Liu bing

SN ENGR. Wang Zai-guang

May,2025

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：孙莹琳

时间：2025年5月16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：孙莹琳

时间：2025年5月16日

导师签名：[Signature]

时间：2025年5月16日

摘要

目的：蓄水工程是维系绿洲农业、城镇供水的关键基础设施。研究蓄水工程格局演变，能够更好地掌握水资源的可利用量和变化趋势，为合理的水资源分配方案提供科学依据，同时弥补传统蓄水工程研究在长时间序列动态监测与多维度驱动力耦合解析方面的不足，验证 Google Earth Engine (GEE)云平台在大尺度蓄水工程智能监测中的应用效能。

方法：本文以新疆天山北坡为研究区，基于 GEE 云平台中的 Landsat 影像数据，分别利用 NDWI、MNDWI 和 MBWI 指数法结合大津算法和多种因子去除非蓄水工程地物的方法建立了天山北坡蓄水工程自动化提取模型并进行了精度验证，运用蓄水工程变化动态度分析 30 年来蓄水工程数量、库容和面积要素的时间演变特征，运用网格单元、核密度分析等方法分析天山北坡蓄水工程的空间演变特征，并利用基于最优参数的地理探测器分析了地形条件、气候条件和社会经济发展对天山北坡蓄水工程格局演变的影响机制。

结果：(1) 通过定性和定量评估三种指数方法提取蓄水工程水体的完整性以及提取精度发现，MNDWI 指数法取得的结果较优，总体提取精度超过 90%，Kappa 系数大于 0.82，整体表现优于其他水体指数模型。引入多因子方法以去除非目标地物，可以进一步提升目标提取的准确性。

(2) 1990—2020 年，天山北坡蓄水工程数量增长 88.31%，推动总库容增长 85%。蓄水工程面积从 259.32 km² 增至 370.23 km²，增长 42.77%。1990—2000 年，面积增长区集中在天山北坡中段；2000—2010 年扩展至西段和东段西部；2010—2020 年各段增长区减少，空间分布趋向分散化。天山北坡西、中、东段的典型蓄水工程年内面积变化情况各不相同，西段的五一水库面积从 3 月至 11 月呈现“N”字变化；中段的大海子水库则呈现“V”字变化；东段的二渠水库面积呈现“倒 V”变化。

(3) 地形因素是影响天山北坡蓄水工程格局分布的主要驱动因素，其中平均坡向解释力最高，q 值范围为 0.659 ~ 0.842；平均坡度解释力第二，q 值范围为 0.482 ~ 0.624；平均高程解释力第三，q 值范围为 0.128 ~ 0.146。研究中期和后期，地形因素解释力逐渐下降，社会经济因素解释力上升。此外，蓄水工程格局分布是复杂的因子交互作用过程，主要表现为双因子非线性增强，少数为双因子增强。在交互作用中，GDP 始终是主要交互因子中的其中一个，说明 GDP 对于天山北坡蓄水工程格局分布具有重要作用。

结论：基于 GEE 云平台的蓄水工程自动提取模型实现了长时间序列蓄水工程格局演变与多维度驱动力耦合分析，验证了云端技术在大尺度水资源监测中的高效性与可靠性，可为天山北坡及同类地区水体提取提供方法参考，对天山北坡制定水利工程规划和水资源管理提供一定理论依据和决策参考。

关键词：遥感影像；水体提取方法；蓄水工程；格局演变；影响因素

Abstract

Object: Water storage projects are critical infrastructure for sustaining oasis agriculture and urban water supply. Research on the evolution of water storage project patterns enables better understanding of available water resources and their variation trends, providing scientific basis for formulating rational water allocation schemes. This approach simultaneously addresses the limitations of traditional reservoir studies in long-term dynamic monitoring and multi-dimensional driving force coupling analysis, while validating the application effectiveness of Google Earth Engine (GEE) cloud platform in large-scale intelligent monitoring of water storage infrastructure.

Methods: Focused on the northern slope of the Tianshan Mountains in Xinjiang as the study area, this research developed an automated extraction model for water storage projects by employing NDWI, MNDWI, and MBWI index methods combined with the Otsu algorithm and multi-factor elimination of non-water-storage features, based on Landsat imagery from the GEE platform. Accuracy validation was conducted for the model. The temporal evolution characteristics (1990—2020) of water storage projects were analyzed through change dynamics metrics quantifying quantity, storage capacity, and areal dimensions. Spatial evolution patterns were investigated using grid-based analysis and kernel density estimation. Furthermore, the geodetector method with optimized parameters was applied to reveal the influence mechanisms of topographic conditions, climatic factors, and socio-economic development on the spatiotemporal evolution of water storage project patterns in the region.

Results: (1) Through qualitative and quantitative evaluations of water body integrity and extraction accuracy using three index methods, it was found that the MNDWI index method demonstrated superior performance, achieving an overall extraction accuracy exceeding 90% and a Kappa coefficient greater than 0.82. This approach outperformed other water index models in comprehensive performance. The integration of a multi-factor methodology to eliminate non-target features further enhanced the accuracy of target extraction.

(2) From 1990 to 2020, the number of water storage projects on the northern slope of the Tianshan Mountains increased by 88.31%, driving an 85% growth in total storage capacity, while their total surface area expanded from 259.32 km² to 370.23 km², representing a 42.77% increase. Spatial-temporal analysis revealed phased expansion patterns: growth areas were predominantly concentrated in the central section from 1990 to 2000, subsequently extending to the western section and the western part of the eastern section during 2000–2010, before transitioning to diminished growth zones and increasingly dispersed spatial distribution across all sections from 2010 to 2020. Furthermore, distinct intra-annual area variations were identified in representative reservoirs: the Wuyi Reservoir in the western section exhibited an "N-shaped" fluctuation from March to November, contrasting with the "V-shaped" seasonal pattern of the Dahaizi

Reservoir in the central section and the "inverted V-shaped" trajectory observed at the Erqu Reservoir in the eastern section.

(3) The topographic factor was the primary driver influencing the distribution pattern of water storage projects on the northern slope of the Tianshan Mountains, with the mean aspect exhibiting the highest explanatory power, as indicated by q-values ranging from 0.659 to 0.842. The mean slope ranks second in explanatory power, with q-values ranging from 0.482 to 0.624, while the mean elevation shows the third highest explanatory power, with q-values ranging from 0.128 to 0.146. During the middle and late stages of the study, the explanatory power of topographic factors gradually declined, while that of socioeconomic factors increased. Furthermore, the distribution pattern of water storage projects involves a complex process of factor interaction, primarily characterized by nonlinear enhancement between two factors, with a minority showing simple bivariate enhancement. Among the interactive factors, GDP consistently serves as one of the dominant variables, underscoring its critical role in shaping the distribution pattern of water storage projects on the northern slope of the Tianshan Mountains.

Conclusion: The automated extraction model for water storage projects based on the GEE cloud platform has enabled the analysis of long-term spatiotemporal evolution patterns and multi-dimensional driving force coupling of water infrastructure. This validates the efficiency and reliability of cloud-based technologies in large-scale water resource monitoring. The methodology provides a reference framework for water body extraction in the northern slope of the Tianshan Mountains and similar regions, while offering theoretical foundations and decision-making support for hydraulic engineering planning and water resource management strategies in the study area.

Key words: Remote sensing imagery; Water extraction methods; Water storage engineering; Pattern evolution; Influencing factor

目录

摘要.....	I
Abstract.....	II
第 1 章 绪论.....	1
1.1 研究背景和意义.....	1
1.2 国内外研究进展.....	2
1.2.1 水体动态变化遥感研究现状.....	2
1.2.2 水体信息遥感提取研究现状.....	3
1.2.3 基于 GEE 云平台的应用研究现状.....	4
1.2.4 水体变化驱动力分析研究现状.....	5
1.3 研究目标及内容.....	7
1.3.1 研究目标.....	7
1.3.2 研究内容.....	7
1.4 技术路线.....	8
第 2 章 研究区概况和数据源.....	9
2.1 研究区概况.....	9
2.1.1 地理位置及分区.....	9
2.1.2 地形地貌.....	10
2.1.3 气候特征.....	10
2.1.4 水资源.....	10
2.1.5 社会经济.....	11
2.2 GEE 云平台.....	11
2.3 数据来源.....	12
2.3.1 卫星遥感数据.....	12
2.3.2 地形数据.....	14
2.3.3 气象数据.....	14
2.3.4 社会经济数据.....	14
2.3.5 库容数据.....	15
2.4 遥感数据预处理.....	15
2.4.1 去云处理.....	15

2.4.2 Landsat 7 影像去“条带”处理	16
2.4.3 影像合成	17
2.5 本章小结	18
第 3 章 蓄水工程水体精度分析与多因子去除	19
3.1 水体提取	19
3.2 精度验证	20
3.3 使用多种因子去除非蓄水工程水体	25
3.4 本章小结	28
第 4 章 天山北坡蓄水工程格局演变分析	29
4.1 蓄水工程演变研究方法	29
4.1.1 蓄水工程水体变化动态度	29
4.1.2 网格单元模型	29
4.1.3 核密度模型	30
4.2 天山北坡蓄水工程时间变化	30
4.2.1 天山北坡蓄水工程库容时间变化	30
4.2.2 天山北坡蓄水工程水体面积时间变化	33
4.3 天山北坡蓄水工程空间变化	34
4.3.1 天山北坡蓄水工程库容空间变化	34
4.3.2 天山北坡蓄水工程水体面积空间变化	35
4.4 天山北坡典型蓄水工程年内变化	38
4.5 本章小结	40
第 5 章 天山北坡蓄水工程格局分布驱动力分析	41
5.1 驱动因子选取及预处理	41
5.2 研究方法	42
5.3 驱动力分析	43
5.4 建议	49
5.5 本章小结	49
第 6 章 结论与展望	50
6.1 结论	50
6.2 展望	51
参考文献	52
致谢	58
作者简介	59

第 1 章 绪论

1.1 研究背景和意义

蓄水工程功能多样，在调蓄洪水、储蓄水源、保持水土、净化环境以及保护物种多样性等方面均发挥重要作用，特别是在优化水资源的时空分布、化解水资源短缺难题上意义重大。蓄水工程是一个广义概念，涵盖水库、塘坝、水窖等多种类型，但由于不同工程类型的时空演变特征存在显著差异，且水库作为蓄水工程中规模最大、功能最复杂、社会影响最深远的核心类型，本研究以水库为典型对象进行深入分析，更能集中反映蓄水工程发展的关键规律。蓄水工程在自然与人类的共同影响下在不断发生演变，如气候变化会导致蓄水工程水域发生不同程度的萎缩或扩张，蓄水工程水体萎缩可能引发水质变差、旱涝灾害更为严重等一连串生态环境问题^[1,2]，影响区域生产、生活用水安全；人类建设蓄水工程的行为会直接影响蓄水工程的数量，导致蓄水工程面积扩大，蓄水工程建设过量会使河流的天然径流过程发生改变，增加断流或洪水风险，对社会经济的发展造成不良影响。因此，需要对蓄水工程格局演变进行分析，从而优化区域水利工程规划和水资源管理，维持社会经济的可持续发展。

天山北坡城镇化水平在新疆居首，是新型城镇化的关键区域以及经济发展的核心战略地带^[3]。在新时代，其肩负着“十四五”规划与 2035 年远景目标里新型城镇化战略于新疆落地的重大使命，但该区域同时存在着生态环境脆弱，水资源短缺，地表水资源时空分布不均衡等问题，这严重制约着天山北坡社会经济的可持续发展。由此天山北坡修建了众多不同类型的蓄水工程，据统计，截止至 2020 年，天山北坡区域范围内，已建成蓄水工程达 304 座，其中小（II）型水库有 65 座、小（I）型水库 161 座、中型水库 71 座、大（II）型水库 7 座。随着天山北坡蓄水工程建设数量的增加，该地区的自然水系逐渐演变为由蓄水工程组成的人工径流调节系统。该系统使得天山北坡的经济得到快速发展，同时也使得天山北坡的水文情势发生巨大变化^[4,5]，如中小河流地表水的引用率超过 90%，湖泊面积迅速缩减等。怎样保障天山北坡自然生态与社会经济实现可持续发展，已然成为当下一项关键议题，其中剖析这一系列蓄水工程的建设过程、建设的合理性以及驱动蓄水工程建设的原因是解决这一问题的关键，因此本研究旨在厘清蓄水工程的时空演变过程及其驱动力，从而为未来蓄水工程的建设规划提供部分参考。

特别在当下的“十四五”阶段，我国正积极推进国家水网重大工程建设，在此进

程中, 要求不断加速水利基础设施体系的完备工作, 致力于增强国家水安全的保障水平, 确保水资源的合理调配与高效利用^[6]。国家水网工程若持续释放积极效能, 重现蓄水工程的时空演变历程不可或缺。这一重现能够精准定位水利工程建设与运行里的薄弱之处, 进而拟定相应策略予以完善, 有力推动水利工程由传统模式迈向智慧水利阶段, 使蓄水工程在防洪减灾领域、水资源供给方面以及生态文明构建等多重维度的综合功能得以更优彰显。因此, 分析天山北坡 1990—2020 年蓄水工程的时空演变过程及驱动力, 对于优化水利工程规划和水资源管理, 促进水利工程现代化具有重要的实践意义, 同时也对维持天山北坡在经济、社会和生态环境等方面均衡发展具有一定意义。

1.2 国内外研究进展

1.2.1 水体动态变化遥感研究现状

蓄水工程作为地表水资源关键的承载实体以及陆地水圈不可或缺的构成部分, 于淡水供应与调配、水资源统筹管理等工作流程中, 占据着无法替代的关键地位, 有着极为重要的价值与意义。伴随遥感技术的持续进步, 地表水体信息数据的获取成本持续降低, 所需时间不断减少, 数据精度愈发提升。在此背景下, 地表水体时空变化特征的研究得以迅速推进并取得显著进展。国外学者 Pekel^[7]等依托 GEE 云平台, 采用多幅 Landsat 影像, 计算水体频率, 对不同类别水体予以区分, 成功研制出全球首套 30 米分辨率的大范围地表水体变化遥感成果, 定量剖析了 1984—2015 年间全球地表水体的动态变迁过程。Olthof^[8]等使用 Landsat 亚像素制图技术, 绘制了 1985—2021 年加拿大哈德逊湾地表水图, 并计算了其时序水体面积变化趋势。Donchyts^[9]等通过卫星影像重建了全球地表水的面积变化数据集, 发现小型水库的年际和年内变异性远高于中型水库。Li^[10]等分析了斯里兰卡水库和内陆湖泊的时空变化, 发现自动水体提取指数 (AWEIsh) 能够准确识别水体边界, 总体准确率为 99.14%, 适用于斯里兰卡地表水提取, 在研究期内水库的面积在小幅波动的基础上呈现出总体增加的趋势。在国内相关研究方面, 胡昊^[11]等针对开封市 2016—2023 年时段的地表水体进行了提取分析。研究发现, 该市地表水体整体呈增长态势, 其中, 永久水体面积达 38.08 km², 占比 32.3%, 季节性水体面积为 79.87 km², 所占比例为 67.7%。张国庆^[12]等人系统梳理了 1976—2018 年近 50 年间青藏高原面积大于 1 km² 的湖泊在面积、水位与水量变化方面的情况, 发现湖泊总数量从 20 世纪 70 年代的 1080 个升至 2018 年的 1424 个, 增幅达 32%; 湖泊总面积由 4×10⁴ km² 扩展至 5×10⁴ km², 增长 25%。Wu^[13]等基于长时序卫星数据, 识

别出全球河流水域的形态变化特征，并指出亚洲高山河流（如雅鲁藏布江）和亚马逊河流域是形态演变热点区域。Lai^[14,15]提取了1979—2018年密云水库水体面积，研究其近40年的变化，还通过相关分析和突变分析研究了水库水体面积变化的内外驱动力，还基于卫星影像对水库进行分区分析，以确定水库良好稳定运行的最佳状态。张兆鹏^[16]等提取红崖山水库近30年水域动态信息后，察觉该水库水域面积变化呈现显著季节性，总体呈波动上升态势，年际变化呈“W”型。郝小翠^[17]等监测甘肃四大水库（双塔、昌马、红崖山和刘家峡）水体面积，发现近10余年其年内分布特征为春季或秋季较大、夏季最小。马振刚^[18]等评估官厅水库与密云水库自1980年起的水域面积变化，结果显示两水库水域面积持续增至历史最高水平，水源涵养成效显著。

1.2.2 水体信息遥感提取研究现状

在水体提取研究起始阶段，因各类监测仪器与技术尚欠发达，故而大部分仅能凭借人工实地测量来采集水体信息，此方式既耗费时间与精力，又极易受地面环境状况左右。随着遥感技术的发展与传感器性能的显著提升，基于影像判读的目视解译技术成为水体信息提取的基础方法。虽然该方法具有较高的分类精度，但在大范围水体识别应用中存在作业效率受限的问题。随着光谱特征研究的深入，学者系统解析水体在近红外波段的低反射率特性，据此建立了基于光谱响应机理的单波段阈值分割模型。1976年，Work团队首次运用该方法对Landsat TM影像实施固定阈值分割，成功实现湖泊边界的精确提取。Shih^[19]等通过Landsat MSS传感器的近红外波段构建光谱阈值函数，验证了该方法的普适性。都金康^[20]创新性地将决策树算法与单波段阈值法相结合，在SPOT高分辨率遥感影像处理中实现了水体要素的自动化识别。单波段阈值法仅仅凭借水体于单一波段呈现出的光谱特性展开运用，所涵盖的信息量相对匮乏，多波段阈值法整合遥感影像里的多个波段各自具有的光谱特点，因此对水体识别精度更高，该方法体系主要包含谱间关系法与水体指数法两类技术路径^[21]。谱间关系法的理论依据在于：地物在多光谱传感器原生波段及其经正交变换生成的特征变换空间中，其光谱响应模式呈现显著差异化的反射特征轨迹。基于多光谱成像物理机理，不同地物类型在特征空间维度中表现出具有可分性的光谱梯度变化规律^[22]。研究人员依据这一特性，构建起用于区分水体与非水体的逻辑判断规则。这些规则涵盖了多个方面，诸如波段之间的比值运算、差值计算，或是其他形式的数学运算关系，以此精准甄别水体。王国华^[23]等通过系统解析多光谱影像的光谱响应特征，构建多波段比值运算模型，有效增强水体与背景地物的光谱可分性。在遥感影像的不同波段之中，水体呈现出独有的光谱反射特征，以近红外波段与短波红外波段为例，水体的反射率相较于植被、建筑物等其他地物显著偏低，水体指数法正是依据这些光谱上的差异构建起相应的数学表

达式，借助对多个波段实施运算处理，达成强化水体信息，弱化非水体信息的效果，进而实现更为精准高效地提取水体的目标^[24]。Mcfeeters^[25]于 1996 年基于水体在多光谱波段的反射率响应机理，构建了归一化水体指数（NDWI）模型，该模型通过近红外与绿光波段的差异化比值运算，有效抑制植被像元的反射干扰，实现湖泊与水库等开阔水域的精准识别。2005 年，徐涵秋^[26]针对城市水体提取的复杂性，创新性地引入中红外波段构建改进型水体指数（MNDWI），其多维特征空间解译能力可显著降低建筑物与水体光谱混淆误差，提高城市边缘水域提取精度。Ouma^[27]等学者在 2006 年开发了 WI 水体指数，该算法通过优化波段组合，建立了适用于大面积水体快速提取的遥感解译方式，在流域尺度河流系统动态监测中展现出显著优势。闫霏^[28]等人针对干旱-半干旱过渡带水陆光谱混合效应，创新性构建增强型水体指数（EWI）模型，通过融合可见光绿波段、近红外及短波红外多维光谱特征，建立多维度光谱特征融合机制。实验表明该模型水体识别精度较传统方法更高。莫伟华^[29]开发水体指数 CIWI，集成 NDVI 植被指数与近红外波段反射率梯度特征，提出多光谱协同解译算法，在地形复杂区域仍保持较高的水体识别精度。Feyisa^[1]等基于 Landsat TM 影像构建水体指数 AWEI，采用分场景参数化建模策略，建立阴影区（AWEI_sh）与非阴影区（AWEI_nsh）双模型架构，使阴影干扰抑制率显著提高，有效提升河网边缘破碎水体的提取可靠性。王小标^[30]等在 2018 年提出 MBWI 水体指数法，该方法面对山区阴影、城市建筑暗像元，能削减其干扰，精准提取水体信息，还可应对太阳条件季节性变化，确保不同时段水体信息提取稳定可靠。此外，还有诸如 SWI^[31]、NWI^[32]、NDMBWI^[33]、RWI^[34]、CWI^[35]等水体指数。伴随机器学习技术的持续进步，研究者逐步摸索并设计出诸多机器学习分类器，这些分类器在水体提取领域得到了广泛运用。分类器法本质上属于基于统计学习理论构建的分类途径，它借助一组已有明确类别归属的样本数据，对分类器展开针对性训练，促使其掌握不同类别间的内在联系与特征表现，进而将之应用于对未知数据的分类工作，助力水体提取流程高效推进^[36]。分类器法分为两类，分别是基于光谱特征的分类器法和基于特征融合的分类器法^[37]。前者中最大似然^[38]、最小距离^[39]、马氏距离分类法^[40]等，因精准把握光谱特征较为常用；后者里支持向量机（SVM）^[41]、决策树^[42]、随机森林（RF）^[43]能整合多元特征，在实际应用中广受青睐。上述这些方法在水体信息提取领域均收获了优良效果，为借助遥感技术提取水体信息做出了显著贡献。

1.2.3 基于 GEE 云平台的应用研究现状

Google Earth Engine（GEE）是由 Google 公司基于云端分布式计算架构构建的地理空间分析平台，专注于海量遥感数据处理与智能解译研究。该平台通过整合 NASA、

ESA 以及 NOAA 等国际科研机构的多源遥感数据集, 构建了全球领先的地理信息数据库系统。其核心技术依托 Google 云服务的计算资源与并行处理能力, 实现了 PB 级空间数据的实时运算与可视化分析功能。自 2015 年启动公测并正式上线以来, 凭借着强大的数据整合能力与持续的运行积累, GEE 云平台逐渐汇聚起海量且极具价值的的数据资源, 这些资源在遥感分析、科研探索、环境监测等诸多领域发挥着不可忽视的作用^[44], 其中包含长达超半个世纪的 Landsat 系列卫星影像, Sentinel 多个系列卫星的遥感数据, 以及 MODIS 的中分辨率遥感影像资料, 这些数据为相关研究与应用提供了坚实支撑。此外, 该平台集成基础地理要素矢量数据、土地覆被分类产品、全球耕地资源专题数据集和归一化植被指数 (NDVI)、增强型植被指数 (EVI) 等时序遥感产品。目前已构建包含 213 个标准化空间数据集, 其中遥感影像突破 560 万景, 这些数据为生态、水资源以及气候变化等领域的研究带来了极大便利。Liu^[45]等人提出了一种基于 GEE 平台生成高分辨率 GPC 地图检测城市发展模式的新方法, 为识别城市萎缩扩张提供了一个新的视角。Chen^[46]等人开发了一种基于长期遥感数据集和 GEE 平台的多特征决策方法, 用于确定滩涂的空间范围、分类类型和绘制滩涂的时空分布图, 该方法能够自动、快速、准确地提取滩涂信息。Geng^[47]等人开展了关于 GEE 数据应用于欧洲大陆土壤 pH 数字制图的研究, 确定了适配的雷达传感器参数, 成功开发出用于土壤 pH 数字制图的预测模型。张祯祺团队^[48]基于 GEE 云平台, 集成 MODIS 遥感数据产品与多源气象观测数据集, 揭示了三江源生态区净初级生产力 (NEP) 的时空分异规律, 阐明其与温度-降水协同效应的耦合机制。李微^[49]等人借助 GEE 平台选择了三期 Landsat 多光谱影像数据 (2005、2010、2017), 采用随机森林分类算法构建地物分类决策树模型, 实现云南省土地利用/覆被动态监测, 证实森林覆盖率呈增长趋势。史宜梦^[50]等人依托 GEE 平台, 融合 Sentinel-2 多光谱数据与数字高程模型, 开展唐乃亥控制断面水文参数反演研究, 构建河道断面几何形态参数化模型, 量化河段长度与径流反演精度的非线性关系, 通过构建河宽-流量响应函数扩展了监测时间序列。GEE 云平台凭借其卓越的遥感数据整合及运算实力, 开辟了开展大规模、长时段遥感分析处理的崭新道路。

1.2.4 水体变化驱动力分析研究现状

近年来, 在自然环境变化与人类活动等因素影响下, 水体动态变化显著。剖析水体变化驱动力, 是探究生态系统演变机制、制定水资源管理策略的关键。目前, 该领域已成为全球环境科学研究热点, 多学科交叉研究持续开展, 致力于揭示水体变化的复杂成因。Du^[51]等人采用结构方程模型得出年平均降水、年平均气温和农业用水为嫩

江流域湖泊面积变化的主导因子。Cao^[52]等人通过分析得出红碱淖日益萎缩的原因在于气候变化（高蒸发、低降水）和人类活动（上游水利工程建设、煤矿开采、灌溉用水等）。Wang^[53]等利用陆地卫星影像，采用改进的归一化差分水体指数在 GEE 云平台上绘制了 1999—2019 年小浪底水库的地表水地图，分析了其面积变化的时空特征，并得出小浪底水库水体面积的变化与降水、温度、人口等自然因素呈弱负相关，与径流和 GDP 等指标呈正相关。Fu^[54]等对 2005—2020 年太湖水域面积变化成因进行了系统分析，结果表明径流、沉积物和降水与其呈正相关，而与人口密度则呈负相关。此外，该研究强调了高程、坡度和坡向对塑造湖泊面积变化方面的关键作用。罗玲^[55]等通过多变量回归模型量化评估发现，区域水体的空间分布格局受气候要素（年均温、降水变率）与农业集约化程度的协同调控。吴宇凡^[56]揭示粤港澳大湾区近 35 年地表水体时空分异驱动力存在显著阶段异质性：在城市化初期，自然因素主导水体变化；城市化后期，建设用地扩张与水资源管理政策成为主要驱动因素。范兰馨^[57]基于 ERA5 再分析数据集证实西北干旱区水体面积与气温、降水呈显著正相关。邹彬^[58]对 1990—2023 年新疆地表水体面积进行计算，并分析其空间格局及变化特征，发现山地水体的变化主要受到气候因素的影响，而人类活动对绿洲-荒漠水体的影响则更大。综上所述，水体变化驱动力分析研究已在多领域取得丰硕成果，明确了气候变化、人类活动等主要因素的作用机制。但面对复杂多变的生态环境，仍存在多因素耦合定量分析不足等问题，还需进一步融合多学科技术，开展长期、精细化研究，以更精准地揭示水体变化驱动力，为水资源可持续利用与生态保护提供坚实支撑。

经由对国内外相关文献的阅读、梳理与总结可知，GEE 云平台优势显著、特点突出，在长时间序列、大尺度地物信息提取研究方面潜力巨大，满足本研究的应用需求，而基于自动提取水体的研究在特定的区域或影像条件下都获得了比较理想的提取结果，但要实现大尺度范围内理想的水体提取结果还需要特定区域采取对应方法，以达到最好的效果。虽然国内外围绕蓄水工程的时空演变进行了大量研究，但从已有研究进展来看，仍存在以下不足：（1）多数研究时间跨度不长，仅数年或十余年，难以呈现区域蓄水工程面积的长期变化情形，存在局限性；（2）多数研究区域范围偏小，多聚焦河流沿线、县域或单一地区，以整个流域或流域局部为对象的相对较少；（3）各地区蓄水工程面积变化的原因不尽相同，以往的研究无法全面反映天山北坡蓄水工程面积变化的原因。因此，本研究针对天山北坡这一大尺度地区从 1990—2020 年 30 年间的蓄水工程时空演变过程及其驱动力进行研究，对该地区生态及社会经济的可持续性发展意义重大。

1.3 研究目标及内容

1.3.1 研究目标

针对天山北坡地区蓄水工程时空演变的变化规律及其影响机制不明晰的问题,本研究基于遥感影像数据,在 GEE 云平台建立自动化提取蓄水工程水体模型并提取蓄水工程水体,生成 1990—2020 年天山北坡地区蓄水工程空间分布数据集,揭示其时空变化特征,定量计算自然因素以及人为因素对蓄水工程演变趋势的影响作用,以期为天山北坡地表水资源管理与优化配置,维持生态系统和经济社会用水可持续发展提供技术支撑。

1.3.2 研究内容

(1) 基于 GEE 云平台的天山北坡蓄水工程水体自动化提取模型建立。

基于 GEE 平台所拥有的海量 Landsat 存档资料,其中以 1990—2020 年的 Landsat 5、Landsat 7 和 Landsat 8 数据为主,借助线上平台的编程接入口展开编程作业,调取必要的数据库,对遥感影像进行预处理;运用多种水体指数并选择不同场景的研究区,进行比较研究,验证水体提取的可行性与精度情况;随后,结合多种因子去除非蓄水工程水体,最终实现天山北坡蓄水工程水体自动化提取模型的建立。

(2) 天山北坡蓄水工程时空演变规律。

基于 GEE 云平台和年鉴资料,核算天山北坡蓄水工程的数量、库容和面积等参数,分析其年内以及年际的变化规律;应用 GIS 分析技术,采用网格单元法和核密度估计等方法探索蓄水工程的空间分布规律。

(3) 天山北坡蓄水工程时空演变的驱动力分析。

选取地形、气候、社会经济等多个因子,基于最优参数的地理探测器进行天山北坡蓄水工程时空演变的驱动因素分析,探究不同驱动因子对天山北坡蓄水工程空间分异的解释力,并揭示各因子交互作用对其演变的影响。