

基于GEE的中国西南地区水体变化分析

刘 缘

云南师范大学地理学部, 云南 昆明

收稿日期: 2025年2月10日; 录用日期: 2025年3月24日; 发布日期: 2025年4月2日

摘 要

湖泊河流等水体是区域气候和环境变化的敏感指示器, 其面积变化能客观反映内陆流域内的水量平衡过程, 基于遥感大数据平台, 快速提取水体变化信息, 分析影响因素分析, 具有较重要的研究意义。研究以Landsat数据与MODIS数据为数据源, 通过水体指数模型与随机森林分类法进行西南地区的水体提取与分析, 结果表明: (1) Landsat数据水体提取的效果好于MODIS数据, 误提率与过提率均低于MODIS数据, Landsat数据水体指数模型方法提取水体的总体精度为86.1%, 误提率为16.8%, 过提率为11.0%, 而MODIS数据水体提取模型的总体精度为81.9%, 误提率为21.8%, 过提率为14.4%; (2) 水体指数模型法所提取水体效果较随机森林分类法精度更高, 随机森林方法在Landsat数据下总体精度为85.7%, 误提率与19.2%, 高于水体提取模型法的16.8%, 但过提率为9.4%, 较水体指数模型法低; (3) 基于Landsat数据通过M-K趋势检验法得出了西南地区2000~2020年水体面积呈现显著增加的趋势, 总面积从2000年的28963.14平方公里增长到2020年的33859.17平方公里, 水体主要分布于青藏高原地区与云贵高原地区湖泊与其发育的众多河流的中上游流域范围内。

关键词

Google Earth Engine, 水体提取, 水体指数, 随机森林, 趋势检验

Analysis of Water Body Change in Southwest China Based on Google Earth Engine

Yuan Liu

Faculty of Geography, Yunnan Normal University, Kunming Yunnan

Received: Feb. 10th, 2025; accepted: Mar. 24th, 2025; published: Apr. 2nd, 2025

Abstract

Lakes, rivers, and other water bodies are sensitive indicators of regional climate and environmental

change. Their area variations can objectively reflect the water balance processes within inland basins. Based on a big data platform for remote sensing, rapidly extracting information on water body changes and analyzing the influencing factors holds significant research importance. Taking Landsat data and MODIS data as data sources, the water body in Southwest China is extracted and analyzed using the water body index model and random forest classification. The results show that: (1) the effect of water body extraction from Landsat data is better than MODIS data, and the false extraction rate and over extraction rate are lower than MODIS data. The overall accuracy of water body extraction from Landsat data is 86.1%, the false extraction rate is 16.8%, and the over extraction rate is 11.0%. The overall accuracy of MODIS data water extraction model is 81.9%, the false extraction rate is 21.8%, and the over extraction rate is 14.4%; (2) The effect of water body extracted by water body index model method is higher than that of random forest classification method. Under Landsat data, the overall accuracy of the random forest method is 85.7%, and the false extraction rate is 19.2%, which is higher than 16.8% of water body extraction model method, but the over extraction rate is 9.4%, which is lower than that of water body index model method; (3) The M-K trend test method shows that the water area in Southwest China shows a significant increase trend based on Landsat data from 2000 to 2020, with the total area increasing from 28963.14 km² in 2000 to 33859.17 km² in 2020. The water body is mainly distributed in the lakes in the Qinghai-Xizang Plateau and the Yunnan-Kweichow Plateau and lots of middle and upper reaches of the river basin.

Keywords

Google Earth Engine, Water Body Extraction, Water Body Index, Random Forest, Trend Test

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

水资源是人类生活环境中必不可少的组成部分, 精确地得到地表水资源和时空变化在人类生产生活中具有重要的意义。水体长时间持续监测是环境遥感研究的一个重点。及时、准确地获得水体变化信息是对水资源保护、利用和可持续发展的有力支持, 而遥感技术的快速、周期性等特点为水体变化监测提供了技术手段[1]。水体信息获取中的一个重要内容就是水体面积信息的监测, 因此利用遥感技术识别水体的光谱特征并在影像上识别获取水体信息, 是十分有意义且必要的工作。

近年来, 随着传感器、计算机等科技不断进步, 遥感技术迅速发展, 在地表水体动态监测方面得到了广泛应用[2]。近年来, 新开发的地理空间数据分析云平台 Google Earth Engine 改变了传统的遥感处理方法, 其庞大的遥感影像数据集和高性能的计算能力, 为长时期、大规模的遥感分析提供了一种新途径[3]。综合分析河流流域和地表水体变化与气候因素和人类活动的相关性, 为生态环境安全和社会的可持续发展提供良好的参考依据。

随着可获取的卫星遥感数据量和种类的增加, 遥感技术被广泛用于水体识别和监测研究[4]。以下为当前主流的基于遥感数据的地表水体提取方法介绍。

(1) 单波段阈值法

首先是单波段阈值法。单波段阈值法是根据影像的某一个波段, 通过固定或变化的阈值将影像划分为目标地物和非目标地物两种类别[5]。如 1976 年, Work E.A 等[6]仅使用了 Landsat 遥感影像中的近红外波段, 对其进行阈值分割来提取的水体; Klein 等[7]分别针对 MODIS 数据 8 天合成的 250 m 分辨率的

近红外波段影像和 AVHRR 数据的 1.1 km 分辨率的近红外波段影像,通过单波段阈值法提取了哈萨克斯坦北部地区的湖库水体信息。

(2) 多波段谱间关系法

多波段谱间关系法是对水体的具有不同光谱反射信息的各个波段进行波段运算,从而进行水体提取[8]。周成虎[9]等研究 TM 影像发现看一种波段组合算法($TM2 + TM3 > (TM4 + TM5)$),这种算法在影像的山区水体获取上具有优势;张明华等[10]对水体进行提取采用的是构建多条件谱间关系模型的方法,该模型结合了蓝、绿、红、近红外与短波红外波段。

(3) 水体指数法

与其他方法相比,水体指数法应用更加普遍,并且该算法也一直在不断地改进和创新。Mcfeeters 等[11]对遥感影像的绿光波段与近红外波段进行归一化运算,提出了归一化水体指数,该指数可以提取出大部分的水体,但也包括一些人造地表阴影与水体被混提的问题;徐涵秋[12]提出了改进归一化水体指数,即对绿光波段与中红外波段作归一化运算,该指数有利于筛选获取城市水体信息时受到的阴影干扰。

(4) 机器学习法

近年来,机器学习方法在遥感影像自动识别和分类应用方面被广泛应用,并被大量的研究证明该方法可以获得很好的影像分类。张德军等[13]基于 GF-1 卫星数据利用支持向量机的方法,对三峡水库和重庆市的水体信息进行了提取,且精度较高。Hu 等[14]针对 Sentinel-1 影像通过随机森林法来识别和分类湿地和水体,结果分析表明分类精度较高。

综上所述,已经有许多学者开展水体信息提取研究工作,形成了丰硕的成果。目前存在的主要问题是:(1) 年际内气温降水波动性影响,且基于不连续时间片段对地表水体进行研究,部分持续性影响时间的变化结点信息会有所缺失,有限时间范围内的几景影像对反映水面轮廓特征不准确;(2) 在以前的影像储存能力下,水体轮廓提取多以单景影像或多景影像拼接为基础,对大范围的水体面积提取能力有限;(3) 利用水体指数法进行水体提取时,仅利用了单一的水体指数进行阈值的水体提取。

有鉴于此,研究在 GEE 平台支持下,以 Landsat 数据与 MODIS 数据为数据源,通过水体指数模型与随机森林分类法进行西南地区的水体提取研究,获取多年水体时空分布数据,以为该地区生态建设和可持续发展提供参考。

2. 研究区概况与数据源

2.1. 研究区概况

中国西南地区,包括我国云南省、贵州省、四川省、重庆市和西藏自治区。区域内有许多大型的河流与湖泊,并且发育了许多河流,因此水能资源丰富。据 2019 年度发布的《中国水资源公报》[15]的信息表明,2019 年我国西南地区水资源总量达到 10394.7 亿 m^3 ,占全国水资源总量的 35.79%;地表水资源量约为 10393.5 亿 m^3 ,约占全国地表水资源量的 37.13%。另一方面,西南地区地形以山地丘陵为主,且喀斯特地貌广泛分布,局部地区气候类型多样且变化大,多发干旱洪涝等自然灾害。因此,对西南地区进行及时且精确的水体提取与变化监测是非常有必要且重要的。研究区位图如图 1 所示。

2.2. 数据来源

2.2.1. Landsat 系列数据

研究所用数据之一为 Landsat 系列卫星遥感影像。Landsat 系列卫星数据具有较高的开放性,能够很好地适应大范围、大规模地解决地学问题的需求,是目前最方便、最有效的遥感资料之一。

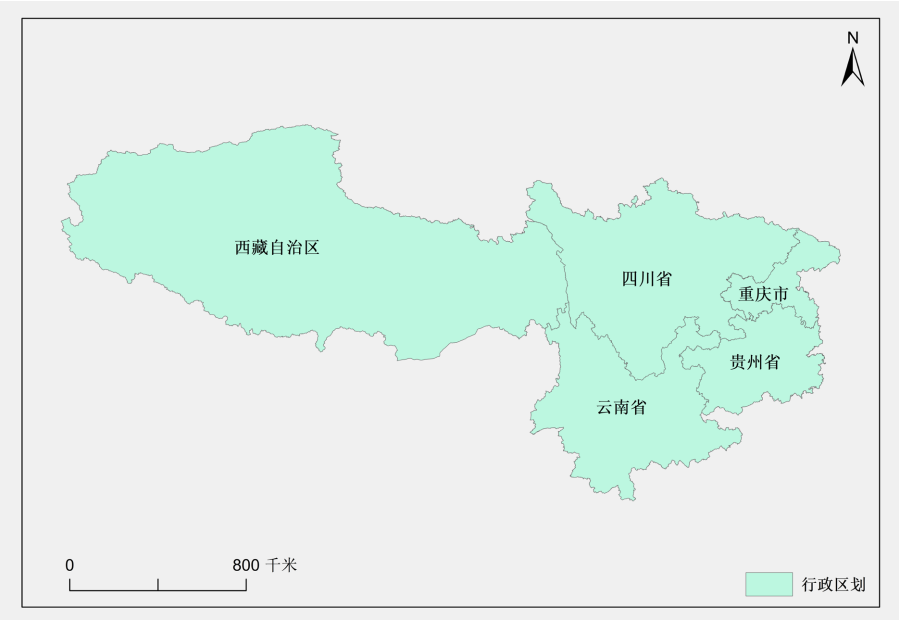


Figure 1. Location map of the research area
图 1. 研究区位置图

研究所使用的该类型数据产品包括 Landsat5/7/8 数据的年际影像，通过中位数函数将像素合成研究区域逐年影像。其中所用 Landsat5 数据为 GEE 平台提供的 LANDSAT/LT05/C01/T1，获取时间范围为 2000 年~2010 年；Landsat7 数据为 GEE 平台提供的 LANDSAT/LE07/C02/T1，获取时间范围为 2011 年和 2012 年；Landsat8 数据为 GEE 平台提供的 LANDSAT/LC08/C02/T1_RT_TOA 数据集，获取时间范围为 2013 年~2020 年。西南地区在 Landsat 系列卫星 WRS-2 卫星编号系统中的轨道号范围 Path 为 P125-P146，Row 为 R35-R45。本文所使用的 Landsat 系列数据的波段波长范围信息与空间分辨率信息如表 1。

Table 1. Using Landsat data band information
表 1. 研究使用 Landsat 数据波段信息表

传感器	波段名称及描述	空间分辨率/m	波长/ μm
Landsat 5 TM	B2-Green	30	0.52~0.60
	B3-Red	30	0.63~0.69
	B4-NIR	30	0.76~0.90
	B5-SWIR1	30	1.55~1.75
	B7-SWIR2	30	2.08~2.35
Landsat 7 ETM+	B2-Green	30	0.52~0.60
	B3-Red	30	0.63~0.69
	B4-NIR	30	0.726~0.90
	B5-SWIR1	30	1.55~1.75
	B7-SWIR2	30	2.08~2.35
Landsat 8 TOA	B3-Green	30	0.53~0.59
	B4-Red	30	0.64~0.67
	B5-NIR	30	0.85~0.88
	B6-SWIR1	30	1.57~1.65
	B7-SWIR2	30	2.11~2.29

2.2.2. MODIS 数据

2000 年至 2020 年所用 MODIS 数据影像为 MOD09A1.006,此数据集提供的产品波长范围为 0.54~2.15 μm , 涵盖了可见光、红外等波段, 同时还有质量评价数据。所使用的图幅编号为 h24v05、h25v05、h26v05、h27v05、h25v06、h26v06 和 h27v06, 幅宽 2330 km。研究所用 MODIS 数据波段信息如表 2。

Table 2. Using MODIS data band information
表 2. 研究使用 MODIS 数据波段信息

波段名称	空间分辨率/m	波长范围/nm
sur_refl_b01	500	620~670
sur_refl_b02	500	841~876
sur_refl_b04	500	545~565
sur_refl_b05	500	1230~1250
sur_refl_b06	500	1628~1652
sur_refl_b07	500	2105~2155

2.2.3. JRC 数据集

在水体提取对照与精度验证中所采用了 GEE 平台所提供的 Joint Research Centre of European Commission Monthly Water History (下称 JRC 数据集)数据集, 该数据集为全球 30 米分辨率的包含 1984 年 3 月 16 日至 2020 年 12 月每个月份的水体信息。

2.3. Google Earth Engine 平台

谷歌地球引擎(Google Earth Engine)是谷歌提供的一个云平台, 可以实时显示和分析海量的全球范围内的地球科技资料。本系统以卫星图像及其它地球观测数据为核心, 并具备充分的计算功能来实现对所存数据的调用与加工。谷歌地球引擎已经储存了 200 多份资料, 每日新增 4000 多份的遥感图像资料, 总计有 500,000 多份图片, 其储存能力已经超过 5 PB。与 ENVI、Eardas 等图像处理系统不同, Google Earth Engine 的图像处理平台能够快速、批量地处理图像, 无需再进行图像的下载, 而且能够提供各种形式的图像输出。谷歌地球引擎云平台可以在线使用 JavaScript API 和 Python API, 用户可以利用 API 迅速建立一个 Web 终端, 该服务是建立在谷歌地球引擎和谷歌云的基础之上。

研究中使用的卫星影像数据均来自谷歌地球引擎云平台, 在平台中通过编写 JavaScript 语言进行卫星影像信息的选择、镶嵌、裁剪等处理。

2.4. 技术路线

首先在 GEE 平台上获取 Landsat5/7/8 反射率数据集、MODIS 地表反射率数据集并对其进行研究区裁剪、时间序列选取, 然后对反射率数据集进行云及阴影掩膜。在水体提取模型法内对 Landsat 反射率数据集进行多波段运算得到植被指数 NDVI、水体指数 MNDWI、AWEI、积雪指数 NDSI 和干燥裸土指数 DBSI, 然后通过标准正态分布进行阈值确定获得水体, 并筛除植被、裸地与建筑等; 在随机森林分类方法中先进行分类特征选择, 然后进行样本点选择, 从而利用随机森林法进行监督分类以提取水体。为了对两种方法进行精度评价, 以研究区水体目视解译结果, 选取足量、均匀的验证样本点, 且水体与非水体数量相同, 计算混淆矩阵, 从总体精度、kappa 系数、误提率和漏提率方面分别进行精度评价。

获得水体后通过水体面积变化序列信息, 来对水体表面时空变化特征规律进行研究, 进行多源遥感数据提取水体的过程及结果对比与不同水提取方法的对比与分析, 通过 Sen + Mann-Kendall 趋势检测法

对水体的变趋势征进行研究，并对水体变化影响因素进行分析。技术路线图如图 2 所示。

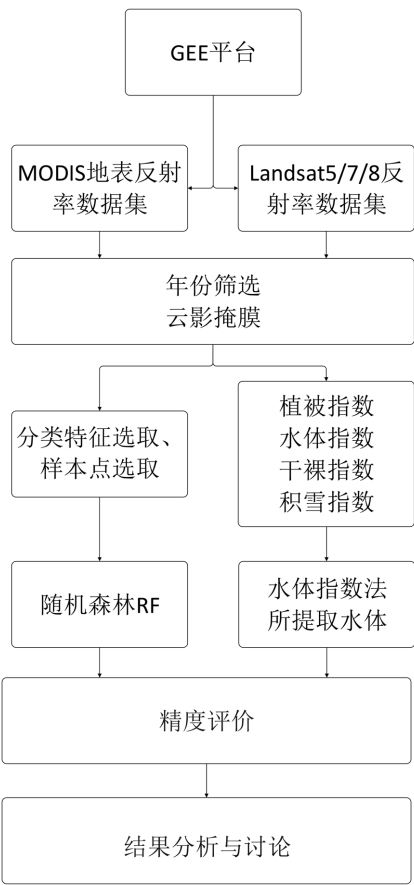


Figure 2. Technology roadmap
图 2. 技术路线

3. 研究方法

3.1. 数据预处理

GEE 云平台中提供了经过辐射定标后的 Landsat 大气表观反射率数据与 MODIS 地表反射数据集，所以只需要对其进行云影掩膜、裁剪等工作。由于研究区属于亚热带季风气候，其中部分 Landsat 影像容易受云或云阴影的影响，造成长时序的 Landsat 数据存在缺失值或异常值，影响水体指数计算。因此，本研究分别利用 Landsat 遥感影像中的 QA_Pixel 波段与 MODIS 遥感影像中的 QA 波段进行掩膜；然后使用 GEE 平台的 CFMask (C Function of Mask)算法得到的影像质量波段(QA)的数值，建立规则识别并去除云及云阴影，消除 Landsat 影像中云的影响；最后对其按研究区矢量文件进行裁剪。

3.2. 水体提取方法

3.2.1. 水体指数模型法

在 GEE 平台内获取西南地区 2000~2020 年际的 Landsat 数据集和 2000~2020 年际的 MODIS 数据集，利用多种水体指数与其他指数进行组合来确定水体提取模型。水体模型法下提取 MNDWI 与 AWEI 指数并设置阈值，最后结合归一化植被指数 NDVI、干裸指数 DBSI、归一化积雪指数 NDSI 等将植被、积雪、

裸地和人造地表等噪声剔除，提取出完整水体。

以 Landsat 8 影像数据波段信息为例，上述指数的公式如下：

$$\text{MNDWI} = (b3 - b5) / (b3 + b5) \quad (1)$$

$$\text{AWEI}_{\text{msh}} = 4 \times (b3 - b6) - (0.25 \times b5 + 2.75 \times b7) \quad (2)$$

$$\text{NDVI} = (b5 - b4) / (b5 + b4) \quad (3)$$

$$\text{DBSI} = (b6 - b3) / (b6 + b3) - \text{NDVI} \quad (4)$$

$$\text{NDSI} = (b3 - b6) / (b3 + b6) \quad (5)$$

具体波段信息见表 1。

根据上述公式，分别计算各指数并通过 GEE 平台的 updateMask 函数进行水体提取模型的建立。上述指数计算完成后，利用其正态分布进行阈值的确定，最后确定 MNDWI 阈值为 0.1，AWEI 阈值为 -0.05，归一化植被指数阈值为 0.5，干裸指数阈值为 0，归一化积雪指数阈值为 0.3，最终进行水体的提取。Landsat 影像水体指数提取模型的提取结果如图 3 所示，MODIS 影像水体指数提取模型的提取结果如图 4 所示。在提取结果中发现，在研究区的高原地区冰川及积雪有少量误提现象，NDSI 能过滤绝大部分积雪但季节性冻融会影响年度合成影像的像元质量。高原湖泊水体的提取效果较好，河流的提取存在漏提现象，所提取河流不完整。在研究区域内的大部分地区，AWEI 和 MNDWI 模型提取表现较好，能较为精确地获取出水域轮廓；MODIS 影像受制于空间分辨率，河流的提取效果不理想，另外研究区四川盆地部分云层去除效果不理想，少部分云被误分类为水体；高原地区部分湖泊由于云层倒影明显导致边界提取效果不理想。

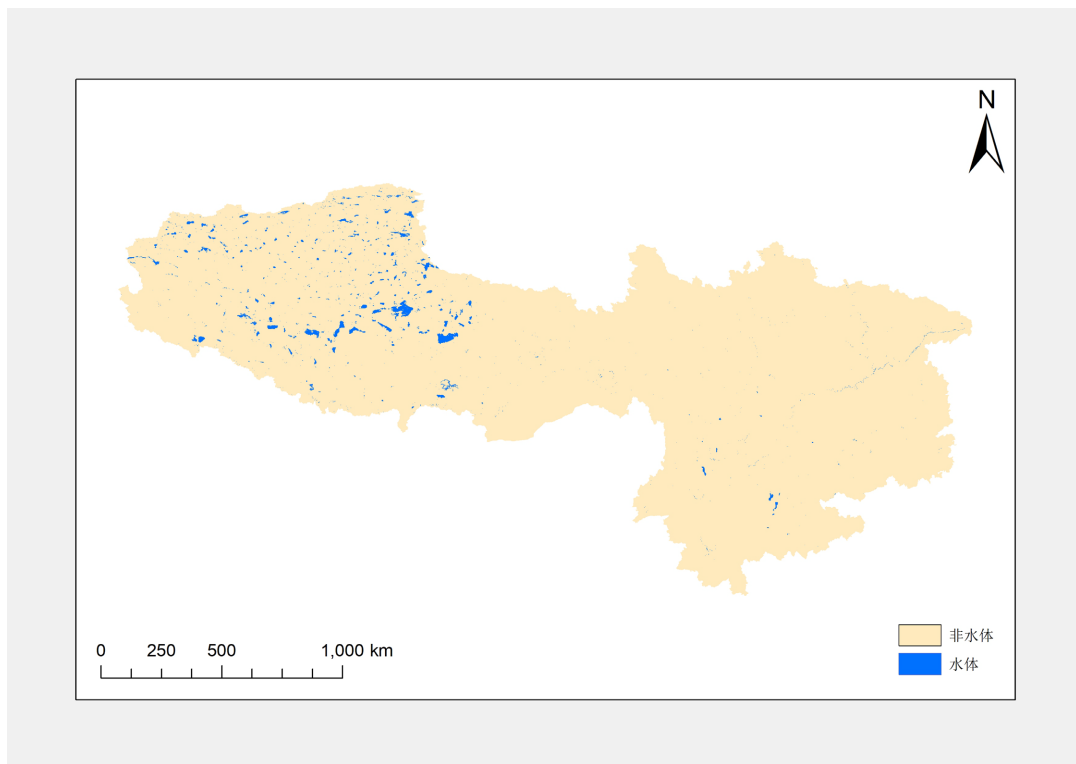


Figure 3. Water bodies extracted from the 2020 Landsat image by water index model

图 3. 2020 年 Landsat 影像水体指数模型所提取水体

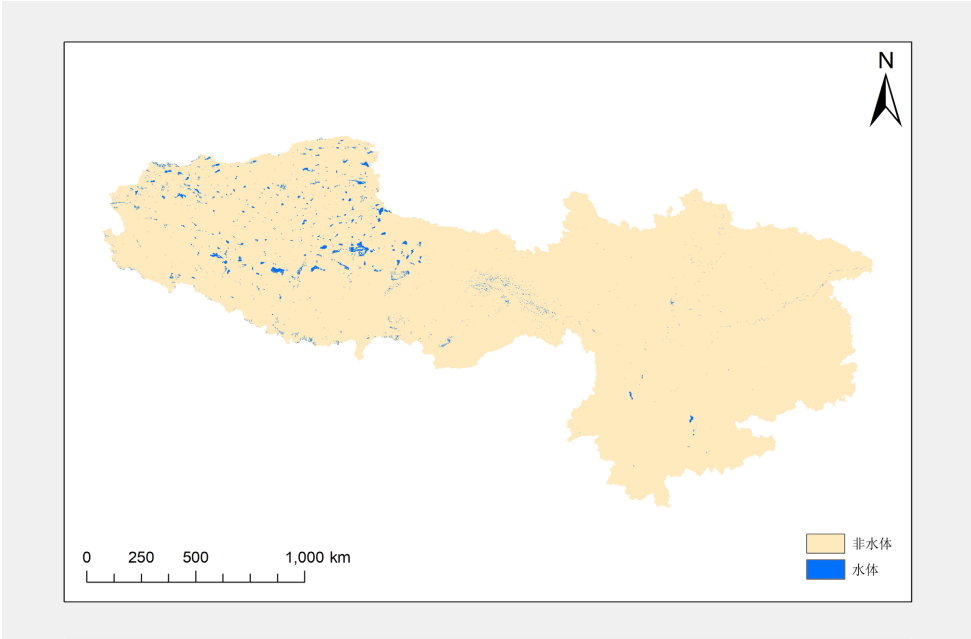


Figure 4. Water bodies extracted from the 2020 MODIS image by water index model
图 4. 2020 年 MODIS 影像水体指数模型提取水体

3.2.2. 基于分类器的提取方法

研究采用的随机森林模型方法。首先在将待分类的样本录入后，通过对各个决策树上的输出进行表决。该方法能有效地解决决策树的过度拟合问题，对噪音、离群量等问题都能很好地容忍，并且在高维度的数据分类问题上表现出很强的可扩展能力和并行能力。另外，随机树是一种基于数据的非参量分类算法，它不需任何的分类前知，仅对已有的样品进行学习从而分类。

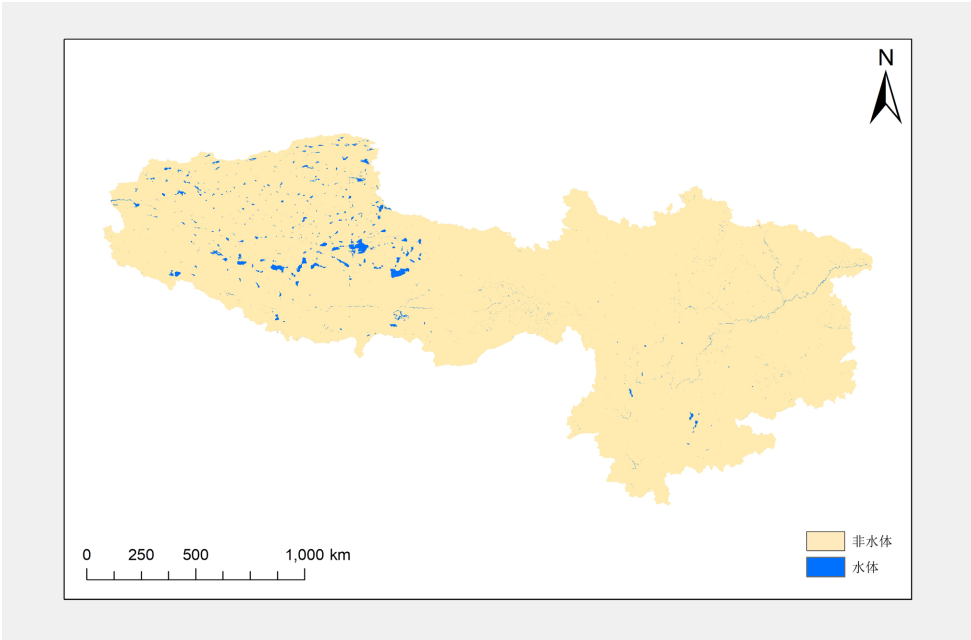


Figure 5. Water bodies extracted from the 2020 Landsat image by random forest
图 5. 2020 年 Landsat 影像随机森林分类提取水体

在 GEE 平台上, 通过对照研究区真彩色影像与 Google 提供的高分辨率卫星影像, 确定分类的土地覆被包括人造地表、水体、植被、裸地以及冰川积雪, 然后进行训练样本的选取, 每类地物选取足量的样本, 以获取充足的地物光谱信息, 削弱噪声影响。样本类型包括点、线与面, 以样本面为主, 且需要均匀分布于影像当中。水体样本必须包含湖泊、水库、河流等多种类型的水体类型。样本选取完成后, 利用 GEE 平台的 smileRandomForest 算法进行 Landsat 影像分类, 最终只保留水体的提取结果, 结果如图 5 所示。从图中可以看出, 与其它水体提取模型相比, 随机森林提取的结果较差。总体上提取水体边界完整性少于水体模型提取方法; 在研究区的东北部分, 有少量的云及阴影被误分为水体, 同时发现随机森林方法不能准确地提取出水体的边界, 但是随机森林分类方法对部分小面积水体提取效果较好, 河流的完整性好于水体指数模型方法, 且对雪地和水的区分效果较好。

3.3. Sent Trend + Mann-Kendall 趋势检验法

对于水体提取结果采用 Sent trend + Mann-Kendall 检验法进行变化趋势分析。

Sen 趋势度是经过计算序列的中值, 它可以很好地减少噪声的干扰, 但其本身不能实现序列趋势显著性判断, 而 Mann-Kendall 方法本身对序列分布无要求且对异常值不敏感, 因此采用上述两种方法结合可以增强方法的抗噪性, 并在一定程度上提高检验结果的准确性[16]。

Sen 趋势度计算公式为:

$$\beta = \text{Median} \left[(x_j - x_i) / (j - i) \right] \quad (10)$$

趋势度 β 的正负即可判断其为上升或下降趋势, 当 β 为正时, 该组数据就随时间增加则呈上升的趋势, 若为负则呈下降趋势。

Mann-Kendall 检验不需要样本遵从一定的分布, 也不受少数异常值的干扰, 适用水文、气象等非正态分布的数据, 计算简便[17]。在 Mann-Kendall 检验中, 原假设 H_0 : 时间序列数据 $(x_1, \dots, x_n)$ 是 n 个独立的、随机变量同分布的样本; 备择假设 H_1 是双边检验: 对于所有的 $k, j \leq n$ 且 $k \neq j$, x_k 和 x_j 的分布是不相同的, 检验的统计变量 S 计算如下式:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k) \quad (11)$$

$$\text{sgn}(x_j - x_k) = \begin{cases} +1, & (x_j - x_k) > 0 \\ 0, & (x_j - x_k) = 0 \\ -1, & (x_j - x_k) < 0 \end{cases} \quad (12)$$

式中: S 为正态分布, 其均值为 0。

其中, S 的方差可由下式计算:

$$\text{Var}(S) = \left[n(n-1)(2n+5) - \sum_t t(t-1)(2t+5) \right] / 18 \quad (13)$$

式中: t 为任意给定结点的范围; $\sum t$ 是所有结点的和。

当 $n > 10$ 时, 标准的正态统计变量 Z 通过下式计算:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & S > 0 \\ 0, & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & S < 0 \end{cases} \quad (14)$$

这样，在双边的趋势检验中，在给定的 α 置信水平上，如果 $|z| \geq z_{\frac{\alpha}{2}}$ ，则原假设是不可接受的。因此 α 的置信水平中，时间顺序的数据存在明显的上升或下降趋势。对于 $Z < 0$ 时，是下降趋势，反之就是上升趋势。

4. 结果与分析

4.1. 精度评价

4.1.1. 随机森林分类器精度评价方法

对西南地区随机森林分类器进行监督分类的结果，通过建立混淆矩阵并计算总体精度与 Kappa 系数来进行精度评价。基于 2020 年 Landsat 影像随机森林分类结果精度验证结果见表 3。

Table 3. Confusion matrix and accuracy evaluation of RF method for Landsat images in 2020
表 3. 2020 年 Landsat 影像 RF 法混淆矩阵及精度评价

土地类型	人造地表	水体	植被	雪地	裸地	总计
人造地表	168	19	4	0	32	223
水体	14	3351	3	55	1	3424
植被	0	0	2418	0	179	2597
雪地	0	41	0	1195	3	1239
裸地	61	0	220	2	2790	3073
总计	243	3411	2645	1252	3005	10,556
总体精度						93.99%
Kappa 系数						0.9184

从混淆矩阵中可以发现，水体信息被错分为其他地类的样本较少，且总体精度与 Kappa 系数较好，均超过 90%，因此可以反映分类效果较好。

4.1.2. 随机样本点精度评价方法

基于 JRC Monthly Water History 数据集，在西南地区水体和非水体中分别生成 500 个点，共计 1000 个点，然后计算混淆矩阵，从误选率、过选率和总体精度三个方面来对水体提取精度进行评价。最终评价结果如表 4 所示。

Table 4. Comparison of precision evaluation of random sample points
表 4. 随机样本点精度评价对比

水体提取方法	漏提率	过提率	总体精度
Landsat 数据水体提取模型	16.8%	11.0%	86.1%
MODIS 数据水体提取模型	21.8%	14.4%	81.9%
Landsat 数据随机森林分类	19.2%	9.4%	85.7%

由上表可知，尽管随机森林方法分类效果较好，但是水体提取漏提率还是较高，利用水体提取模型进行水体提取的两种数据下，Landsat 数据的漏提率与过提率均低于 MODIS 数据，精度较 MODIS 数据高。不同方法下不同数据提取水体的漏提率均较高。

4.2. 西南地区水体面积变化

对 2000~2020 年的多源数据、不同方法所提取的水体计算面积如图 6。由图可知，以上方法所提取西南地区水体面积在 23,000 km²~39,000 km² 之间，而 JRC 月度水体数据集中水体数据集中在 40,000 km²~53,000 km² 之间，仍有部分水体未被提取，与之前漏提率较高相符。

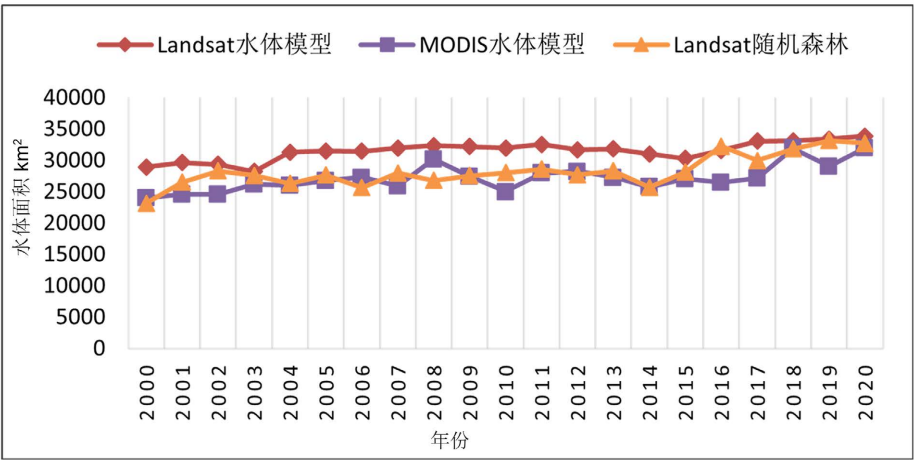


Figure 6. Multiple sources of data and different methods for extracting changes in water body area
图 6. 多源数据不同方法水体提取面积变化

4.3. 西南地区水体面积变化趋势检验

西南地区 2000~2020 年多源数据不同法计算所得 Sen 趋势度与 M-K 检验如表 5。

Table 5. M-K test table for trend of water area change in Southwest China
表 5. 西南地区水体面积变化趋势 M-K 检验表

水体提取方法	Z 值	β 值
Landsat 数据水体提取模型	3.53	165.869
MODIS 数据水体提取模型	3.23	234.239
Landsat 数据随机森林分类	3.65	303.827

研究的时间范围为 2000~2020 年，因此时间长度为 21。取显著性水平 $\alpha = 0.05$ ，则 Mann-Kendal 检验通过与否的判断阈值为 ± 1.960 ，从表 4 中可以看出，近 20 年来，在显著性水平 $\alpha = 0.05$ 上，由于 β 值大于 0 且 Z 值超过阈值 1.960，因此可以判断西南地区水体面积变化表现出显著的增加趋势。

5. 讨论与结论

5.1. 讨论

西南地区水体面积变化呈现显著增加趋势，推测与高海拔地区部分冰川融化加快、水体结冰期缩短和西南地区水库、水电站等的修建有关。

杨春艳等[18]经过研究发现，青藏高原温度不断升高，尤其是 20 世纪 90 年代以来，升温速率更快，温度分布呈现东南高、西北低的态势，温度的高值区呈现不同程度的北扩、西伸趋势。Sun 等[19]对雅鲁藏布江流域冰川湖泊进行研究，得出了雅鲁藏布江流域冰川湖泊面积从 2000 年的 206.8 平方千米增加到

了 2020 年的 245.9 平方千米, Zhang 等[20]通过研究发现, 青藏高原地区面积大于 1 平方千米的湖泊数量从 1970 年的 1080 个增加到 2018 年的 1424 个, 同时其总面积也从 40,000 平方千米增长到 50,000 平方千米。气温的升高使高原地区冰雪融化加速, 水体结冰期缩短, 越来越多的像元在遥感全年影像中被分为水体。

水库与水电站等的修建会使陆地被淹没, 形成大片的水体。而西南地区为许多河流的中上游流域, 地势差异大, 水能资源丰富。我国从 2000 年开始全面启动西电东送工程, 西电东送工程的三条大通道中有两条都与西南地区关系密切, 大量的水库与水电站修建势必会使水体增多。

5.2. 结论

本文基于 GEE 平台利用 Landsat 系列影像与 MODIS 系列影像, 分别使用水体指数、植被指数、干裸指数和积雪指数相结合组成水体提取模型的方法和随机森林进行监督分类提取水体的方法对西南地区的水体进行提取, 并利用 Sent trend + Mann-Kendall 趋势检验法, 探究水体随时间序列的变化趋势。得到以下结论:

(1) 基于 GEE 平台利用的 Landsat 系列数据和 MODIS 系列影像, 对我国西南地区分别构建水体提取模型的方法和随机森林进行监督分类提取水体的方法提取水体, 实验结果表明以上方法可以实现连续动态且较为精确地监测西南地区水体的时空变化;

(2) Landsat 影像数据相较于 MODIS 影像数据, 由于空间分辨率较高, 因此对河流等细小水体的提取好于 MODIS 数据, MODIS 数据较 Landsat 数据受云及阴影的影响更大;

(3) 在同一种数据类型下, 水体提取模型方法的总体精度比随机森林方法更高, 漏提率与过体率略低, 但随机森林分类方法对提取小面积水体整体性方面效果优于水体提取模型法;

(4) 基于西南地区提取水体面积变化并进行 Sent trend + Mann-Kendall 趋势检验法结果可知, 西南地区 2000~2020 年水体年际面积有所增加, 且呈现显著上升的趋势。

参考文献

- [1] 马艳敏, 郭春明, 王颖, 等. 吉林省西部主要水体面积动态变化遥感监测[J]. 水土保持通报, 2018, 38(5): 249-255.
- [2] Chen, Q.L., Zhang, Y.Z., Ekroos, A. and Hallikainen, M. (2004) The Role of Remote Sensing Technology in the EU Water Framework Directive (WFD). *Environmental Science & Policy*, 7, 267-276. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2004.05.002>
- [3] 刘清, 吴君峰, 王浩, 等. 基于 Google Earth Engine 云平台的黑龙江流域长时序常年和季节性水面提取及变化分析[J]. 环境工程, 2021, 39(1): 80-88.
- [4] 刘垚燚, 田恬, 曾鹏, 等. 基于 Google Earth Engine 平台的 1984-2018 年太湖水域变化特征[J]. 应用生态学报, 2020, 31(9): 3163-3172.
- [5] 唐海龙. 中亚地区湖泊水体变化遥感监测及影响因素分析[D]: [硕士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2020.
- [6] Work, JR., E.A. and Gilmer, D.S. (1976) Utilization of Satellite Data for Inventorying Prairie Ponds and Lakes. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 42, 685-694.
- [7] Klein, I., Dietz, A.J., Gessner, U., Galayeva, A., Myrzakhmetov, A. and Kuenzer, C. (2014) Evaluation of Seasonal Water Body Extents in Central Asia over the Past 27 Years Derived from Medium-Resolution Remote Sensing Data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 26, 335-349. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2013.08.004>
- [8] 赵金玉. 近三十年淮河流域地表水时空演变遥感监测研究[D]: [硕士学位论文]. 开封: 河南大学, 2020.
- [9] 周成虎, 骆剑承, 杨晓梅, 等. 遥感影像地理解析与分析[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [10] 张明华. 用改进的谱间关系模型提取极高山地区水体信息[J]. 地理与地理信息科学, 2008, 24(2): 14-16+22.
- [11] Mcfeeters, S.K. (1996) The Use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the Delineation of Open Water Features. *International Journal of Remote Sensing*, 17, 1425-1432. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>

-
- [12] 徐涵秋. 利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究[J]. 遥感学报, 2005, 9(5): 589-595.
- [13] 张德军, 杨世琦, 王永前, 郑伟. 基于 GF-1 数据的三峡库区水体信息精细化提取[J]. 人民长江, 2019, 50(9): 233-239.
- [14] Hu, W.J., Liu, H.L., Bao, A.M. and El-Tantawi, A.M. (2018) Influences of Environmental Changes on Water Storage Variations in Central Asia. *Journal of Geographical Sciences*, **28**, 985-1000. <https://doi.org/10.1007/s11442-018-1517-6>
- [15] 中华人民共和国水利部. 2019 年中国水资源公报[R]. 北京: 中华人民共和国水利资源部, 2019.
- [16] 王佃来, 刘文萍, 黄心渊. 基于 Sen + Mann-Kendall 的北京植被变化趋势分析[J]. 计算机工程与应用, 2013, 49(5): 13-17.
- [17] 张东艳, 吴运卿, 李妮. 基于 Mann-Kendall 检验的尼洋河流域水文变量演变趋势分析[J]. 中国农村水利水电, 2017(12): 86-89.
- [18] 杨春艳, 沈渭寿, 林乃峰. 青藏高原近 50 年气温和降水时空变化特征研究[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(12): 167-172.
- [19] Zhang, G.Q., Luo, W., Chen, W.F. and Zheng, G.X. (2019) A Robust but Variable Lake Expansion on the Tibetan Plateau. *Science Bulletin*, **64**, 1306-1309. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2019.07.018>
- [20] Sun, X.D., Cao, B., Pan, B.T., Li, K.J., Zhao, X.R. and Guan, W.J. (2022) Identification of Hazardous Glacial Lakes in the Yarlung Zangbo River Basin Based on Lakes Changes Determined Using Google Earth Engine. *Frontiers in Earth Science*, **10**, Article 825482. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.825482>.