

基于多指数融合的遥感水体提取方法研究

李 壮^{1,2}, 张璇璞^{1,2*}, 张 洪^{1,2}, 姜 楠^{1,2}, 高若珩^{1,2}, 岳 湃^{1,2}

(1. 中国地质调查局哈尔滨自然资源综合调查中心, 哈尔滨 150000;
2. 自然资源部哈尔滨黑土地地球关键带野外科学观测研究站, 哈尔滨 150000)

摘 要: 水体提取作为遥感技术在水资源管理、环境监测和灾害预警领域的重要应用方向, 其方法选择直接影响实际应用效果。本研究选取归一化差异水体指数 (NDWI)、改进型归一化差异水体指数 (MNDWI)、陆地表面水体指数 (LSWI) 及自动水体提取指数 (AWEI) 四种典型方法进行对比分析。基于 Landsat8 卫星影像数据, 在完成辐射校正与大气校正预处理基础上, 选择典型地貌特征区域作为实验区, 采用定量精度评估与目视判读相结合的方法, 系统考察不同指数在各类地表环境中的适用性。通过构建混淆矩阵结果显示: NDWI 方法在开阔水域提取中总体精度达 94.52%, Kappa 系数为 0.87, 综合性能最优, 适合大范围水体快速识别; MNDWI 在混合光谱干扰场景下表现出更强抗干扰能力; LSWI 在植被覆盖区域可有效区分植被与水体, 漏提率较低; AWEI 在建筑密集区和山体阴影区域提取完整度提升显著。最后通过对四种水体提取方法, 认为 NDWI 水体提取方法适用于该研究区。

关键词: 水体提取; 归一化差异水体指数; 改进型归一化差异水体指数; 陆地表面水体指数; 自动水体提取指数; 光谱指数

中图分类号: P237 文献标志码: B 文章编号: 1672-2736(2025)08-0130-7

0 引言

随着全球气候变化和人类活动加剧, 水资源的监测和管理变得愈发重要^[1]。准确、高效的水体提取方法对于水资源评估、洪水监测、湿地保护等应用至关重要^[2]。遥感技术因其覆盖范围广、更新周期短等优势, 已成为水体提取的主要手段之一^[3]。在众多水体提取方法中, 基于多光谱指数的技术因其简单、高效而得到广泛应用^[4]。国外在数据源上以 Landsat、Sentinel 系列为主, 国内相比国外更侧重国产卫星 (如高分系列、资源系列) 与 Landsat/Sentinel 结合, 方法上, 近年来, 学者们提出了多种水体指数方法, 其中归一化差异水体指数 (NDWI)、改进型归一化差异水体指数 (MNDWI)、陆地表面水体指数 (LSWI) 和自动水体提取指数 (AWEI) 是最具代表性的四种方法。NDWI 利用绿光和近红外波

段的反射率差异来识别水体, 能够很好的抑制植被, 但容易受到土壤及建筑的影响。MNDWI 是 NDWI 的改进版本^[5], 用中红外波段替代近红外波段, 减少建筑物阴影的干扰^[6], 能够很好的将水体从建筑阴影中区分开来。LSWI 利用短波红外和近红外波段, 对植被覆盖区域的水体提取具有优势^[7], 但在开阔水域提取不如 NDWI。AWEI 通过结合多个波段信息, 提高复杂地形和城市区域的水体提取精度, 能够很好过滤非水体低反射率地表物体信息。为选择最优提取方法。通过选取典型研究区域, 利用 Landsat8 卫星影像数据^[8], 分析 NDWI、MNDWI、LSWI、AWEI 四种不同波段组合的性能^[9]。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

研究区为大庆市连环湖及附近湖泊 (46°25'5"-

基金项目: 中国地质调查局项目《小兴安岭黑河地区自然资源综合调查》(DD20230504)。

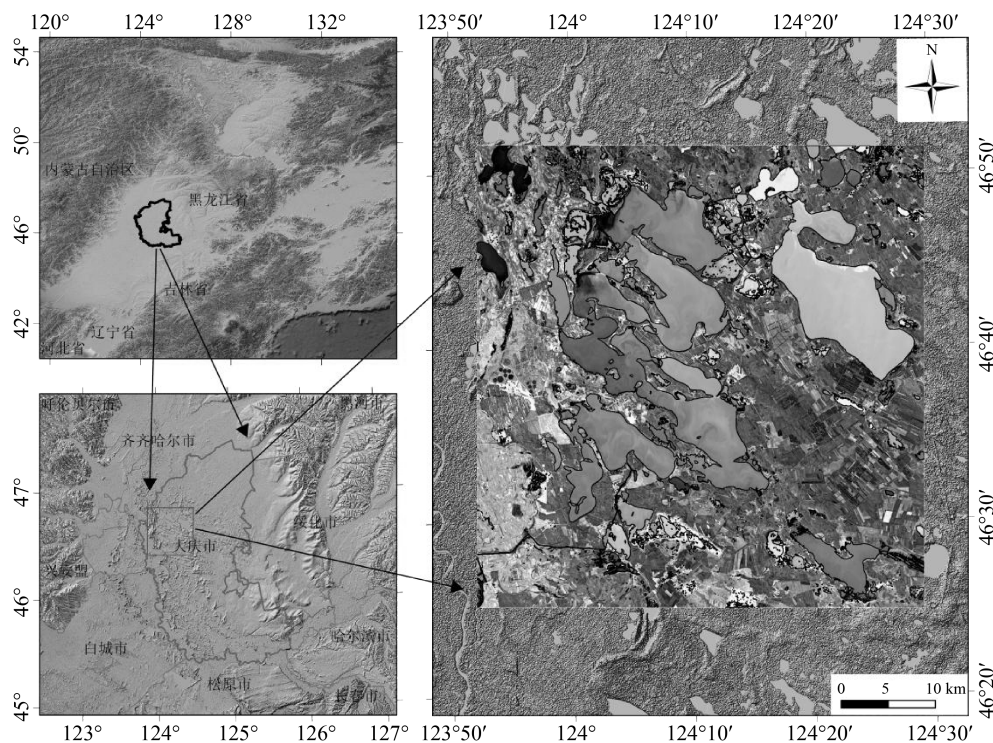


图 1 研究区地理位置图

表 1 Landsat 8 卫星参数表

卫星名称	时间	传感器类型	轨道号	空间分辨率(m ²)	重访周期(天)
Landsat8	2023-09-25	OLI	119/28	30×30	16

46°51'33"N, 123°52'10"-124°29'25"E), 地处松嫩平原腹地^[10], 地势北高南低, 其中连环湖由 18 个星罗棋布的浅水湖泊串联而成, 状如散落的翡翠项链, 总面积逾 580km²。研究区海拔介于 135m 至 144m 之间, 地势平缓如毯, 百里坡降仅 1m, 形成了独特的湖沼湿地景观。受北温带大陆性季风气候影响, 研究区四季分明: 冬季寒冷漫长, 湖面冰封达数月, 最低温常至 -20℃ 以下; 夏季温和短暂, 平均气温约 20℃, 偶有雷暴带来清凉。年平均气温约 3.6-4.4℃, 无霜期约 148 天, 年降水量约 400mm, 集中于 6-8 月, 夏季多短时强降雨, 偶现暴雨如注, 冬季则以零星降雪为主。年均水位变幅达 9.79m, 形成独特的“洪水一片、枯水一线”景观特征(图 1)。

1.2 数据来源

研究使用的数据为 Landsat8 卫星的 OLI 传感器获取的多光谱影像(表 1)。Landsat8 提供

11 个光谱波段, 空间分辨率为 30m(热红外波段为 100m)。本研究主要使用了可见光、近红外和短波红外波段。影像获取时间为 2023 年 9 月 25 日, 云量低于 10%, 确保了数据质量。为了验证水体提取结果, 通过目视解译和实地验证, 建立 30 个湖泊参考数据集。

2 研究方法

2.1 数据预处理流程

获取 Landsat8 数据, 首先进行辐射定标, 借助卫星自带定标参数与辅助定标数据, 精准换算原始 DN 值, 将其转化为具有实际物理意义的辐射亮度值, 以此还原传感器接收到的真实辐射能量。第二步进行大气校正, 综合考量观测时的大气成分、气溶胶特性以及地形因素, 有效去除大气散射、吸收对光谱信息的干扰, 使数据最大程度反映地表真实反射特性^[11]。随后依据研究区

表 2 常用水体指数及其优缺点

名称	计算公式	优点	缺点
NDWI	$NDWI = \frac{G-NIR}{G+NIR}$	能够有效增强水体光谱特征	容易混淆水体与城镇建筑信息
MNDWI	$MNDWI = \frac{G-MIR}{G+MIR}$	加强了水体与建筑物等噪声的反差	容易混淆水体和阴影
LSWI	$LSWI = \frac{NIR-SWIR}{NIR+SWIR}$	可有效地区分植被区水体	不适用于大面积开阔水域
AWEI	$AWEI = B + 2.5G - 1.5(NIR + SWIR1) - 0.25SWIR2$	能够有效区分低反射率地物	不适用于如冰雪、白色建筑物等高反射率的地物

域边界矢量文件,利用空间分析工具执行裁剪操作,将研究无关区域的数据剔除,只保留目标区域影像,既大幅缩减数据存储空间,又能让后续分析聚焦在关键区域,提升分析效率与准确性,最终获得满足研究需求的高质量 Landsat8 数据。

2.2 提取方法

根据研究区地形复杂,选取四种指数进行比较,其中每种指数各有优劣,详见(表 2),下面分别介绍四种指数:

2.2.1 归一化差异水体指数(NDWI)

NDWI(式 1)是最早提出的水体指数之一,其中, P_{green} 代表绿光波段(高反射)的反射率, P_{nir} 代表近红外波段(低反射)的反射率。该公式通过计算绿光波段与近红外波段反射率的差值与和值的比值,能够突出水体与其他地物之间的差异,从而实现水体信息的提取。NDWI 通过利用水体在绿光波段的高反射率和在近红外波段的强吸收特性来识别水体,能够很好的抑制植被干扰^[12]。该方法简单易行,在开阔水域且水体静止和浅层水域提取中表现良好,但容易受到建筑物阴影、山区阴影和植被的影响。

$$NDWI = \frac{\rho_{green} - \rho_{nir}}{\rho_{green} + \rho_{nir}} \quad (1)$$

2.2.2 改进型归一化水体指数(MNDWI)

MNDWI(式 2)是对 NDWI 的改进,该指数提出以来已在世界范围内得到广泛应用,在我国更是被应用于几乎所有的大江湖海。其中, P_{green} 是绿光波段的反射率, P_{swir} 是短波红外波段的反

射率。该公式通过计算绿光波段与短波红外波段反射率的差值与和值的比值,能够突出水体与其他地物的差异^[13],从而有效地将水体从背景地物中分离出来。这种改进有效减少了建筑物阴影的干扰,提高了城市区域的水体提取精度^[14]。

$$MNDWI = \frac{\rho_{green} - \rho_{swir}}{\rho_{green} + \rho_{swir}} \quad (2)$$

2.2.3 陆地表面水体指数(LSWI)

LSWI(式 3)是水体提取和湿度检测的重要工具,主要利用短波红外和近红外波段,其中, P_{nir} 表示近红外波段处的地表反射率, P_{swir} 表示短波红外波段处的地表反射率。水体在近红外波段的反射率较低,而在短波红外波段的反射率相对较高。该公式通过计算近红外与短波红外波段反射率的差值与和值的比值,来突出水体与其他地物的差异^[15]。该方法对植被覆盖区域的水体提取具有独特优势,因为植被在短波红外波段有较强的吸收特性。LSWI 在湿地监测和植被覆盖区域的水体提取中表现出色,但在开阔水域的提取精度相对较低。

$$LSWI = \frac{\rho_{nir} - \rho_{swir}}{\rho_{nir} + \rho_{swir}} \quad (3)$$

2.2.4 自动水体提取指数(AWEI)

AWEI(式 4)是一种较为复杂的水体指数方法,其中, P_{blue} 为蓝光波段反射率, P_{green} 为绿光波段反射率, P_{nir} 为近红外波段反射率, P_{swir1} 为短波红外 1 波段反射率, P_{swir2} 为短波红外 2 波段反射率。该公式中,蓝光和绿光波段对水体有

较好的穿透性,且水体在这两个波段的反射率相对较高,所以用蓝光波段反射率加上 2.5 倍的绿光波段反射率来增强水体信号^[16-18]。水体的反射率很低,而植被、土壤等在这些波段有较高的反射率,所以减去 1.5 倍的近红外与短波红外 1 波段反射率之和,以及 0.25 倍的短波红外 2 波段反射率,以抑制非水体地物的信号,突出水体信息。通过这样的组合运算,可以有效地将水体从其他地物中分离出来,以便于水体的自动提取和监测。AWEI 旨在解决阴影(低反射率)和建筑物对水体提取的干扰问题,在复杂地形(如山区)和城市区域的水体提取中表现出明显优势。

$$AWEI = \rho_{blue} + 2.5 \times \rho_{green} - 1.5 \times (\rho_{nir} + \rho_{swir1}) - 0.25 \times \rho_{swir2} \quad (4)$$

2.3 精度评价

利用 30 个参考数据集对自动提取的结果进行混淆矩阵,以 Kappa 系数作为评价精度的指标,他是衡量分类数据一致性的指标,评价分类结果与真实情况的吻合程度。同时会分别计算出总体精度(它是指结果中正确分类的样本数量占总样本数量的比例)、用户精度(指预测为某一类别的样本中实际属于这一类别的占比)、生产者精度(指的是实际属于这一类的样本中,能被正确的分类到该类样本的比例)以供参考。

3 结果与分析

3.1 提取结果

本研究聚焦于大庆市连环湖及附近湖泊,该区域地类复杂,耕地、草地、水体、建设用地交错分布^[19],为实现精准的水体提取,研究运用了 NDWI、MNDWI、LSWI 和 AWEI 四种指数,并通过对不同阈值组合选取最优阈值。过程中,针对每种指数分别设置了多个阈值梯度,从理论阈值出发,结合研究区域的地物光谱特征^[20,21],逐步调整并形成阈值集合。利用专业遥感处理软件,经过严谨的数据处理和分析,最终确定了适用于本研究区域的最佳阈值。使用 NDWI、MNDWI、LSWI 和 AWEI 提取水体时的最佳阈值分别为-

0.25、-0.15、0.5 和 0.35。在这些阈值下,能够较好地满足本研究对水体信息准确提取的需求(图 2)。

3.2 数据分析

研究结果显示,NDWI 水体指数法的 Kappa 系数为 0.87,总体精度 94.52%,在四项指标中均领先。可准确快速识别出大部分水体。用户精度 90.74%和生产者精度 90.92%也都保持在较高水平,既保证了对真实水体有较高的识别能力,又能维持较低的误判情况,在各类场景中都能有较稳定表现。MNDWI 水体指数法的 Kappa 系数为 0.86,总体精度 94.26%,与 NDWI 极为接近。在整体表现上也比较出色。生产者精度为 92.35%,略高于 NDWI,在识别真实水体能力上稍强;用户精度 88.85%,略低于 NDWI,存在一定误判。LSWI 水体指数法的 Kappa 系数为 0.83,总体精度 93.18%,在抑制植被覆盖干扰方面优势明显,在植被茂密区域能有较好的水体识别效果,用户精度为 91.88%,在四种方法里最高,识别结果可靠性最强;生产者精度仅 84.64%,意味着在识别过程中,可能遗漏部分真实水体,尤其在水体分布较为破碎的区域,容易出现漏判。AWEI 水体指数法的 Kappa 系数为 0.81,总体精度 91.59%,多波段组合有效抑制非水体低反射率背景干扰,在识别水体方面能力突出;生产者精度最高,达到 96.04%,表明对真实水体的漏检率最低,但用户精度仅 79.68%,因过度强调水体识别,导致误将一些非水体区域识别为水体,虚警率较高。

4 结论

研究结果表明,NDWI 方法在总体精度、Kappa 系数方面均表现最佳,尤其在在开阔水域和浅层水域提取中具有明显优势,MNDWI 方法在水域提取中表现稍逊于 NDWI,但对建筑物阴影的干扰具有较强的抵抗能力。LSWI 方法在植被覆盖区域的水体提取中具有独特优势,但在其他场景下的表现相对较差。AWEI 方法能够有效抑制非水体低反射率背景干扰,结合四种提取

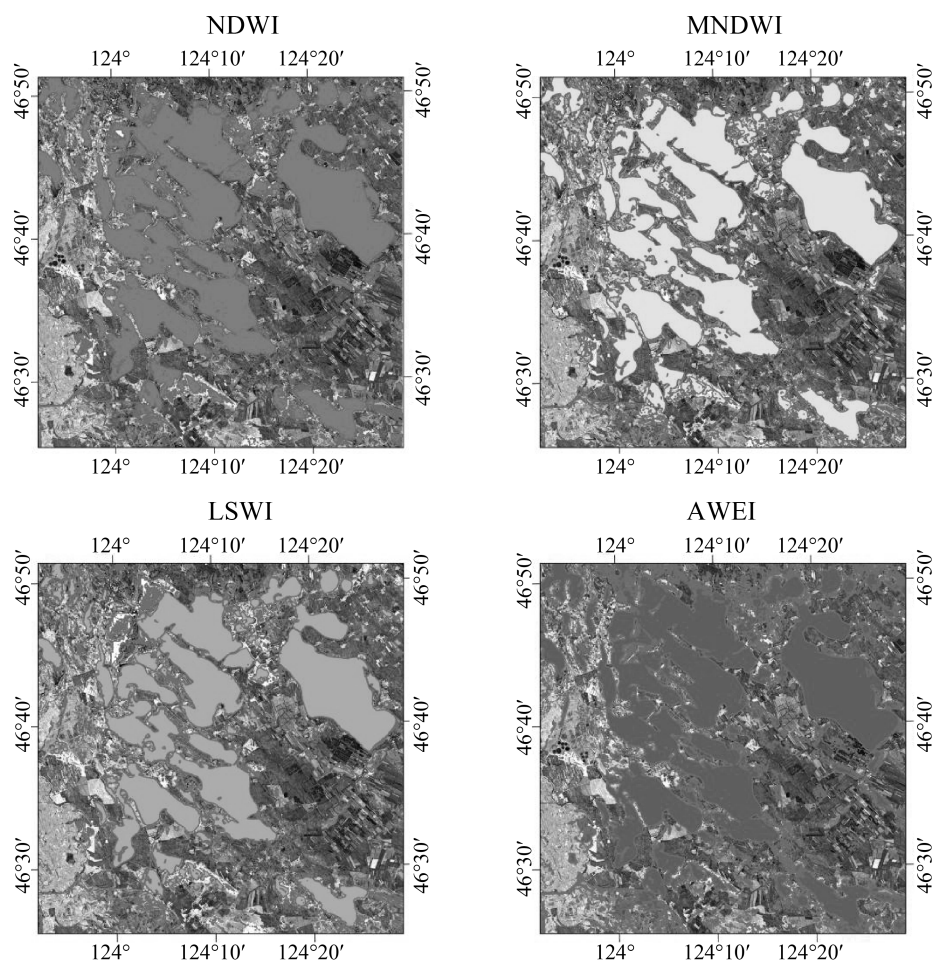


图 2 研究区水体提取结果

表 3 混淆矩阵验证结果

水体指数	Kappa 系数	总体精度	生产者精度	用户精度
NDWI	0.87	94.52%	90.92%	90.74%
MNDWI	0.86	94.26%	92.35%	88.85%
LSWI	0.83	93.18%	84.64%	91.88%
AWEI	0.81	91.59%	96.04%	79.86%

水体方法对比,本研究区地域开阔,NDWI 相对于其他三种方法更为适合,如在城市建筑区 MNDWI 应表现最佳,植被密集区则 LSWI 应最佳,如果背景信息混乱则用 AWEI,所以最后确定 NDWI 方法适用于该研究区的水体提取,目前此方法虽然为最优方法,但仍有错提、漏提现象出现,今后应研究如何让精度继续提高,以更好服务事业。

参考文献 (References):

- [1] 严登华,王坤,李相南,等. 全球陆地地表水资源演变特征[J]. 水科学进展, 2020, 31(05): 703-712.
- [2] 马青山,邓志辉,葛伟亚,等. 无锡市区水资源与水环境承载力动态特征研究[J]. 华东地质, 2024, 45(02): 240-253.
- [3] 何智勇,章孝灿,黄智才,等. 一种高分辨率遥感影像水体提取技术[J]. 浙江大学学报(理学版), 2004, 31(06): 701-707.
- [4] 吴志杰,黄绍霖,傅娇凤. 多源遥感影像水体指数

- 的交互对比[J]. 测绘科学, 2016, 41(11): 194-199.
- [5] McFeeters S K. The use of Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features[J]. International Journal of Remote Sensing, 1996, 17(07): 1425-1432.
- [6] 肖艳芳, 赵文吉, 朱琳. 利用 TM 影像 BAND1 与 BAND7 提取水体信息[J]. 测绘科学, 2010, 35(05): 226-227.
- [7] 王尚晓, 牛晓楠, 张洁, 等. 新安江流域 2000—2021 年 NDVI 时空变化特征及其影响因素分析[J]. 华东地质, 2023, 44(03): 273-281.
- [8] 刘浩, 周万蓬, 张宇佳, 等. 基于 LANDSAT 影像的 1999-2019 年鄱阳湖面积动态监测[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 2023, 46(01): 68-76.
- [9] 张超, 彭道黎. 基于遥感的水体信息提取技术研究进展[J]. 河南农业科学, 2013, 42(06): 16-20.
- [10] 崔景轩, 李秀芬, 郑海峰, 等. 典型气候条件下东北地区生态系统水源涵养功能特征[J]. 生态学报, 2019, 39(09): 3026-3038.
- [11] Bumairiyemu M, Ding J L, Zibibula S, et al. Characterizing urban expansion of Korla City and its spatial-temporal patterns using remote sensing and GIS methods[J]. Journal of Arid Land, 2017(03): 458-470.
- [12] 熊珂, 常云鹏, 关键. 基于归一化差异水体指数的水体面积变化监测[J]. 中南林业调查规划, 2024, 43(02): 54-57.
- [13] 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, 20(05): 589-595.
- [14] 邓启睿, 张英, 刘佳, 等. 基于 SENTINEL-1/2 数据的洪水淹没范围提取模型[J]. 人民长江, 2024, 55(09): 71-77.
- [15] 黄玉芳, 娄广艳, 葛雷, 等. 基于时间序列遥感的 2020 年黄河三角洲湿地补水效果监测[J]. 人民黄河, 2021, 43(07): 89-93.
- [16] 吴庆双, 汪明秀, 申茜, 等. Sentinel-2 遥感图像的细小水体提取[J]. 遥感学报, 2022, 26(04): 781-794.
- [17] 张翔, 段政, 董颖, 等. 中国东部中生代火山岩区地质文化村建设实践与思考——以福建柘溪为例[J]. 华东地质, 2022, 43(04): 474-489.
- [18] 倪斌, 黄照强, 郭健, 等. 基于机载和星载高光谱遥感的武夷山成矿带蚀变矿物信息识别研究[J]. 华东地质, 2023, 44(01): 67-81.
- [19] 代建军. 基于 Landsat 卫星的沈阳市土地覆盖变化研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2019(05): 176-182.
- [20] 唐志敏, 白晓, 湛龙, 等. 福建省长汀县重点水土流失区土壤元素地球化学特征及其指示意义[J]. 华东地质, 2022, 43(03): 324-335.
- [21] 李沛权. GF-1B、C、D 卫星数据在国土资源调查监测领域应用研究[J]. 黑龙江国土资源, 2024, 22(10): 55-63.

作者简介:

第一作者:李壮,1997年生,男,黑龙江绥化人,中国地质调查局哈尔滨自然资源综合调查中心,助理工程师,主要研究方向为遥感技术。Email:1031985612@qq.com;
通讯作者:张璇璞,1997年生,男,辽宁营口人,中国地质调查局哈尔滨自然资源综合调查中心,助理工程师,主要研究方向为生态地质、水文地质。Email:1987784979@qq.com

Extraction Methods of Remote Sensing Water Body based on Multi-Index Fusion

LI Zhuang^{1,2*}, ZHANG Xuanpu^{1,2}, ZHANG Qi^{1,2}, JIANG Nan^{1,2}, GAO Ruoheng^{1,2}, YUE Pai^{1,2}

(1. Harbin Natural Resources Comprehensive Survey Center, China Geological Survey, Harbin 150000, China;

2. Harbin Black Soil Earth Critical Zone Field Scientific Observation and Research Station,

Ministry of Natural Resources, Harbin 150000, China)

Abstract: Water body extraction, as a key application of remote sensing technology in water resource management, environmental monitoring, and disaster early warning, significantly relies on method selection to determine its practical effectiveness. This study conducted a comparative analysis of four typical methods: the Normalized Difference Water Index (NDWI), Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI), Land Surface Water Index (LSWI), and Automated Water Extraction Index (AWEI). Based on Landsat 8 satellite imagery data, the typical geomorphic regions were selected as experimental areas after pre-processing involving radiometric and atmospheric corrections. A combination of quantitative accuracy assessment and visual interpretation was employed to systematically examine the applicability of these indices across diverse surface environments. Results indicated from confusion matrix analysis revealed that the NDWI method achieved an overall accuracy of 94.52% and a Kappa coefficient of 0.87 in open water extraction, demonstrating superior comprehensive performance and suitability for large-scale rapid water identification. MNDWI exhibited stronger anti-interference capabilities in scenarios with mixed spectral noise. LSWI effectively distinguished vegetation from water in densely vegetated areas with lower omission rates. AWEI significantly improved extraction completeness in urban built-up areas and mountainous shadow regions. Through comparative analysis of the four methods, NDWI was identified as the most suitable water extraction approach for the study area.

Key words: water body extraction; NDWI; MNDWI; LSWI; AWEI; spectral index