

基于NDWI及扩展指数的地表水分变化监测——以宿鸭湖水库为例

刘苏宜, 黄对, 王建军, 余钟波

Monitoring surface moisture changes using NDWI and extended indices: a case study of Suyahu Reservoir

LIU Suyi, HUANG Dui, WANG Jianjun, YU Zhongbo

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12170/20240922001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于卫星遥感图像的丰满水库冰情演变规律研究

Research on ice regime evolution of the Fengman Reservoir based on satellite remote sensing images

水利水运工程学报. 2020(3): 19 <https://doi.org/10.12170/20200227004>

山东省极端气候指数变化特征研究

Study on the characteristics of extreme climate indices in Shandong Province

水利水运工程学报. 2022(2): 40 <https://doi.org/10.12170/20210722001>

长江南京段河床与洲滩平面演变特征遥感分析

Morphological evolution of river and sandbars based on satellite remote sensing images of the Nanjing reach of the Yangtze River

水利水运工程学报. 2023(4): 34 <https://doi.org/10.12170/20221130006>

基于Landsat时序影像和非线性边界监测土壤干旱研究

Soil drought monitoring based on Landsat time-series images and nonlinear edges: A case study of the growing season in Inner Mongolia section of the Yellow River from 1986 to 2020

水利水运工程学报. 2022(2): 126 <https://doi.org/10.12170/20210411001>

基于Sentinel-3A SRAL 2级产品的鄱阳湖水位评估与校准

Evaluation and calibration of Sentinel-3A SRAL Level 2 product over Poyang Lake

水利水运工程学报. 2022(4): 1 <https://doi.org/10.12170/20210616005>

基于MLP方法的长江-洞庭湖江湖水沙交换演变规律研究

Preliminary study on evolutions of Yangtze River and Dongting Lake water and sediment fluxes exchanges based on MLP method

水利水运工程学报. 2020(5): 24 <https://doi.org/10.12170/20190627001>



扫码进入官网，阅读更多精彩文章



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI:10.12170/20240922001

刘苏宜, 黄对, 王建军, 等. 基于 NDWI 及扩展指数的地表水分变化监测——以宿鸭湖水库为例 [J]. 水利水运工程学报, 2024(6): 103-114. (LIU Suyi, HUANG Dui, WANG Jianjun, et al. Monitoring surface moisture changes using NDWI and extended indices: a case study of Suyahu Reservoir[J]. Hydro-Science and Engineering, 2024(6): 103-114. (in Chinese))

基于 NDWI 及扩展指数的地表水分变化监测 ——以宿鸭湖水库为例

刘苏宜¹, 黄对², 王建军³, 余钟波¹

(1. 河海大学 水灾害防御全国重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 南京水利科学研究院 水灾害防御全国重点实验室, 江苏 南京 210029; 3. 驻马店市宿鸭湖水库运行中心, 河南 驻马店 463000)

摘要: 基于遥感绿光波段和近红外波段对地表水分反射率的差异, 探索使用归一化水体指数(NDWI)及扩展指数监测地表水分变化。利用 2018—2022 年的多时相 Sentinel-2 光学影像, 比较 NDWI 固定阈值为 0 和 OTSU 自适应阈值法(Otsu's thresholding method)在水体提取中的效果, 进一步提出时序二值化 NDWI 差值指数($NDWI_{b-del}$)、归一化 NDWI 差值指数($NNDWI_{del}$)用于识别水体动态转换与地表水分动态变化, 并以宿鸭湖大型水库为例进行分析。结果表明: NDWI 阈值为 0 的提取效果优于 OTSU 阈值, 后者有效期不足 50%。水体分布与清淤扩容动态密切相关, 2018 年主要是西北部和西岸水体的自然变化; 施工后, 2019 年库西水体减少, 2020—2021 年深水带与一号人工岛附近及坝后排泥区水体面积增加, 2022 年二号至三号人工岛附近水体持续增加。 $NDWI_{b-del}$ 方法的监测结果显示, 2019—2022 年, 施工填筑区、深水带区与坝后堆泥区有明显的水体转换。 $NNDWI_{del}$ 的监测表明, 2019—2022 年指数值的极端变化对应水体与非水体的转换, 指数值的适中变干和适中变湿对应极端变化的前序阶段, 包括土方填筑导致的水体减少和淤泥堆放导致的水体聚积等不明显转换区。本研究基于 NDWI 指数扩展两种遥感监测指数, 为地表水分和环境变化的自动高效监测提供了新方法。

关键词: 光学遥感; 归一化水体指数; 时序二值化 NDWI 差值指数; 归一化 NDWI 差值指数; 地表水分; 宿鸭湖水库

中图分类号: TV213.4; TP79

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2024)06-0103-12

遥感水体指数法因其高效易用、低成本特点, 被广泛应用于水体监测^[1-5]。常用的方法包括归一化差异水体指数(Normalized Difference Water Index, NDWI)^[6]和改进的归一化差异水体指数(Modified Normalized Difference Water Index, MNDWI)^[7], 适用于多种不同场景^[8-9]。然而, 目前在细小水体和浑浊水体提取方面仍有不足^[10-11], 在浅水与陆地交界区存在错分和漏分问题^[12]。阈值设定是水体提取的关键问题之一^[13], 传统方法常将阈值设为 0^[14], 然而, 一些研究表明阈值 0 不一定适用, 因此引入手动设定阈值的方法, 虽然该方法效果较好, 但处理多时相影像时效率较低。日本学者 Nobuyuki Otsu 提出 OTSU 算法的自动阈值化方法^[15], 以消除手动调整阈值的缺陷^[16], 但该方法在地物类型复杂^[17]、高泥沙含量与富营养化水体^[9]、灰度直方图双峰不明显^[18]、存在噪声等情况下仍难以获得准确阈值^[19]。因此, 方法的适用性需要结合具体数据源和应用场景来综合判断。

最初设立的 NDWI 用于识别开放水体, 但由于绿光、近红外波段对水含量敏感^[6-7,20], 该指数应用逐渐扩

收稿日期: 2024-09-22

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(52109026); 国家重点研发计划课题(2021YFB3900603); 国家联合基金项目(U2240217); 水灾害防御全国重点实验室自主研究项目(5240152N2)

作者简介: 刘苏宜(1996—), 女, 广东饶平人, 硕士研究生, 主要从事水水文水资源方面研究。

E-mail: 609721781@qq.com 通信作者: 黄对(E-mail: huangdui2004520@163.com)

展到水体浑浊、水质、植被水含量、干旱、土壤水分和有机质等领域。例如,基于 NDWI 的水质经验反演方法^[20-21],成果应用于恒河滑坡和冰湖溃决后的水质变化评估^[22],以及纽约 Fingerlake 湖泊水质季节变化特征分析^[23]。研究表明,NDWI 与不同类型植被含水量呈正相关^[24-26],对大气影响不敏感^[25],并能敏感地指示植被的水分胁迫^[27]。此外,NDWI 还被用于指示不同地物土壤含水量水平^[28]。目前研究主要集中在利用传统 NDWI 指数进行与水分变化相关的定性分析,以及结合实测数据进行定量监测。

NDWI 作为一种简单高效的水体指数,能够敏感地反映水分信息的差异,为了增强其在复杂环境下的水域识别和地表水分变化监测中的能力,有必要探索和建立基于光学遥感的 NDWI 扩展指数,以实现更精确的自动化监测,满足现代水利监管需求。以宿鸭湖水库为例,近年来的清淤扩容工程导致库区地貌发生显著变化。由于工程施工范围广、影响因素复杂,传统监测手段效果有限。利用改进的 NDWI 指数进行遥感动态监测,不仅可提升监测精度和效率,还可为其他工程区域的遥感监测提供参考依据。

本文基于 2018—2022 年的多时相 Sentinel-2 光学影像,对比分析 NDWI 固定阈值法和 OTSU 自适应阈值法的监测效果以降低阈值对监测结果的影响。提出时序二值化 NDWI 差值法和归一化 NDWI 差值指数方法,实现水库水体分布动态监测、水体与非水体动态转换过程识别、定量表征地表水分时空变化特征。结合施工前后的监测资料对比,分析所指示区域动态变化的有效性。

1 研究区概况

宿鸭湖水库南邻淮河干流上游,东部为汝河下游平原区,是以防洪为主,综合灌溉、发电、养殖、旅游的大(I)型水利工程,地理位置为 $113^{\circ}19' \sim 114^{\circ}19' E$, $32^{\circ}34' \sim 33^{\circ}11' N$ 。库区分南库与北库,主要库容在北库,承蓄汝河及练江河等支流来水并经刘大桥引洪道下泄至南库。水库控制流域面积 $4\,498\text{ km}^2$,属大陆性温带气候,多年平均降水量为 962 mm ,6—8 月降雨占全年降水量的 60%,暴雨集中在几天或几个小时内。水库库床比降缓,库面面积大,蓄水下泄缓慢且下泄通道长,大量泥沙沉入库区,导致库床淤积壅高,库容逐年减少,水深逐渐变浅,水质总体为 V 类。水库运行超 60 年,为了改善库区库周及下游的生态环境,满足灌溉用水的水质要求和增强调节功能,于 2019 年开始清淤,旨在清除大部分淤积物,通过深挖方式扩容。对北库大坝坝前 200 m 外的库区进行清淤扩容,在 50.34 m 高程以下清淤,在 50.34 m 高程处修围堰挡水,采用绞吸式挖泥船施工,50.34~51.84 m 高程的扩容工程则采用陆地法施工,挖掘的淤土运输至规划堆土位置堆放。此外,在库区堆筑 3 座人工岛^[29],建设湿地巡护设施和防汛道路,在坝后区合理堆填淤泥。清淤子项目多且施工内容交叉重合,施工干扰因素多增加遥感监测难度^[30]。研究区域为宿鸭湖水库北库管理范围区。研究区概况详见图 1。

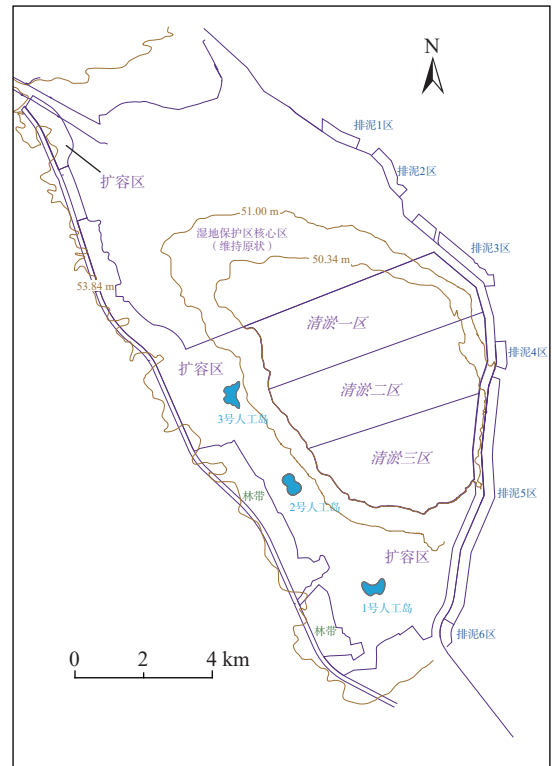


图 1 宿鸭湖水库清淤扩容工程概略

Fig. 1 Overview of dredging and expansion works at Suyahu Reservoir

2 数据与方法

2.1 Sentinel-2 数据及预处理

Sentinel-2 由 Sentinel-2A 和 Sentinel-2B 两颗太阳同步极轨卫星组成,分别发射于 2015 年 6 月和 2017 年 3 月,具有 290 km 覆盖宽幅、组合星座高达 5 d 的重访时间,提供 10~60 m 的空间分辨率、13 个光谱波段数据,由欧洲航天局通过平台免费提供(<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>)。由于光学数据易受云雨天气影响,考虑每月覆盖筛选研究区水库主水体区无云遮挡影像,共 50 期,除 2018 年缺 1、7、8 月,2019 年缺 2 月,2020 年缺 8、12 月,2021 年缺 8 月,2022 年缺 1、8 月,其余每月覆盖 1 幅(表 1)。研究采用 Sentinel-2A/B 的 L1C 和 L2A 产品,Level-1C 为经正射校正和亚像素多光谱配准的大气层顶反射率数据产品,Level-2A 则进一步进行大气校正,实现了亚像素多光谱和多时相配准。选取 10 m 分辨率的蓝(B2)、绿(B3)、红(B4)和近红外(B8)中心波段,通过叠加、融合、重投影、裁剪等预处理后获得四波段影像用于进一步分析。

表 1 研究所用 Sentinel-2 影像数据
Tab. 1 Sentinel-2 imagery data used in the study

年份/期数	数据时间
2018年/9期	20180212, 20180309, 20180428, 20180523, 20180612, 20180930, 20181010, 20181104, 20181214
2019年/11期	20190123, 20190319, 20190418, 20190523, 20190607, 20190707, 20190816, 20190930, 20191015, 20191114, 20191209
2020年/10期	20200128, 20200222, 20200318, 20200412, 20200512, 20200601, 20200706, 20200924, 20201029, 20201113
2021年/10期	20210112, 20210221, 20210328, 20210412, 20210522, 20210611, 20210731, 20210929, 20211123, 20211228
2022年/10期	20220201, 20220308, 20220407, 20220517, 20220616, 20220721, 20220904, 20221019, 20221123, 20221218

2.2 基于随机森林方法的地物判别

随机森林方法是一种广泛应用于分类和回归的机器学习方法^[31],该方法使用多个决策树构成的分类器,其中每棵树都是相互独立的。通过抽取多个不同的训练样本集及随机选择节点的分类特征,随机森林能够增加分类模型之间的多样性,从而提升模型的泛化能力和预测准确性^[32]。本研究中,根据工程区的地物特点,选择代表性的建设用地、草地、耕地、林地和水体等 5 种地物建立样本集,基于随机森林方法获取关于施工前工程区地物的分布情况,详见图 2。

2.3 基于 NDWI 固定阈值和 OTSU 阈值的水体信息提取

NDWI 基于水体在可见光波段的低反射率和近红外波段的高反射率的特性差异对水体信息进行判断^[6],公式如下:

$$I_{NDWI} = (R_{GREEN} - R_{NIR}) / (R_{GREEN} + R_{NIR}) \quad (1)$$

式中: R_{GREEN} 、 R_{NIR} 分别表示绿光波段和近红外波段的反射率。 I_{NDWI} 值位于 $[-1, 1]$, 通常水体区域的为正值,非水体区域为负值,通过设置阈值实现水体与其他区域分割。最大类间方差法(Otsu's thresholding

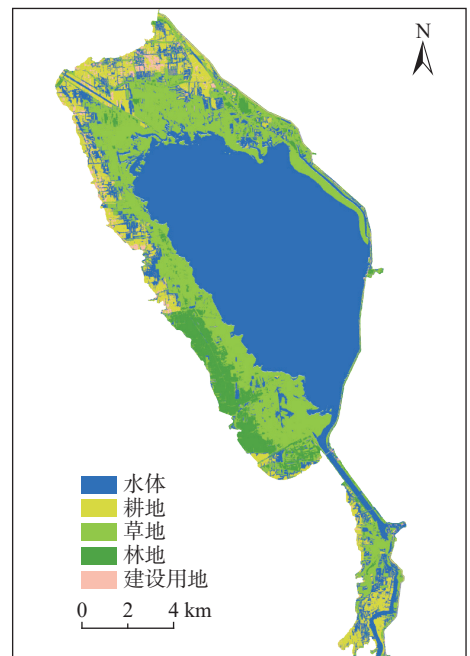


图 2 施工前主要地物分布

Fig. 2 Distribution of major land features prior to construction

method, OTSU)为自适应阈值图像分割方法^[15],通过寻找到 1 个阈值将影像分成目标和背景两个类别,并使两个类别之间的方差最大化。

利用固定阈值 0 和 OTSU 自适应阈值(分别记为 $NDWI_{T0}$ 和 $NDWI_{OTSU}$),对比同期影像 OTSU 阈值与 0 值差异,以及在水体提取中的差异与有效性,确定适宜的水体提取方法,获得不同时期的水体分布与水体面积变化。

2.4 基于时序二值化 NDWI 差值指数 ($NDWI_{b-del}$) 的水体与非水体转换判别

为了分析水体变化,结合阈值对所有期 NDWI 影像进行水体、非水体二值化处理(公式(2))。以 2019 年为例,将 1 月影像设为施工前初始影像,计算其他时序与该年初始影像之间的差异,两个不同时相的 NDWI 二值化影像差值公式见式(3)。通过计算二值化差值影像(the Binary Image of NDWI Difference Index,公式中记为 $I_{NDWI_{b-del}}$),获取不同时期的水体变化分布,包括两个时相的不变区域、水体变为非水体区域、非水体变水体区域。

$$I_{NDWI(m,n)} = \begin{cases} 1, & I_{NDWI(m,n)} \geq T \\ 0, & I_{NDWI(m,n)} < T \end{cases} \quad (2)$$

$$I_{NDWI_{b-del}(m,n)} = I_{NDWI_i(m,n)} - I_{NDWI_j(m,n)} \quad (3)$$

式中: (m,n) 表示影像的第 m 行第 n 列; T 为阈值; i 和 j 分别表示两个时相的 NDWI 二值化影像。

2.5 基于时序归一化 NDWI 差值指数 ($NNDWI_{del}$) 的地表水分信息变化判别

根据 NDWI 对含水量敏感特性,进一步提出归一化 NDWI 差值指数(Normalized NDWI Difference Index,公式中记为 $I_{NNDWI_{del}}$)计算方法:通过计算任意两个时相 NDWI 影像的差值,结合差值影像的最大最小值进行归一化处理,获得归一化 NDWI 差值影像。具体公式为:

$$I_{NDWI_{del}} = I_{NDWI_i} - I_{NDWI_j} \quad (4)$$

$$I_{NNDWI_{del}} = (I_{NDWI_{del}} - I_{NDWI_{del-min}}) / (I_{NDWI_{del-max}} - I_{NDWI_{del-min}}) \quad (5)$$

式中: i 和 j 分别表示两个时相的 NDWI 影像; $I_{NDWI_{del-min}}$ 、 $I_{NDWI_{del-max}}$ 分别表示差值影像的最小值和最大值。归一化后的 $I_{NNDWI_{del}}$ 值在 0 到 1 之间。 $I_{NNDWI_{del}}$ 越接近 0.5,表示两期影像地物含水信息变化越小, $I_{NNDWI_{del}}$ 值越接近 0 或者越接近 1 表示地物含水信息变化越明显,接近 0 表示含水信息明显减少,接近 1 表示含水信息明显增加。

2.6 自动化处理程序的开发与实现

基于 Python 开发了自动化处理程序,实现了 Sentinel-2 卫星影像的批量下载、预处理和指数计算的全流程自动化。该程序采用模块化设计,主要包括数据获取模块、预处理模块和指数计算分析模块核心部分。其中,数据获取模块通过调用 Copernicus 开放数据接口,实现卫星影像的自动检索与下载;预处理模块集成了图像裁剪、波段叠加、融合功能;指数计算分析模块则支持三种指数的自动计算与分析。在处理效率方面,针对研究区 300 km^2 范围的单景影像,从原始数据下载到生成结果的全过程小于 8 min,具体为数据下载约需 2 min,预处理环节 2~3 min,指数计算与结果生成约 2 min。程序还实现了多时相数据的自动化对比分析功能,以及不同指数的可视化图,可快速生成水体面积变化统计图表,便于获取直观的分析结果。

3 结果与分析

3.1 NDWI 阈值 0 与 OTSU 阈值及生成的水体对比

对 2018—2022 年共 50 幅影像进行分析,对比 OTSU 自适应阈值 T 与固定阈值 0 的水体识别效果。在典型施工区和入库河流区域,将基于不同阈值提取的水体(蓝色)与 843 波段的假彩色影像进行叠加对比

(图 3)。可见, 阈值 0 能完整识别水库水体边界, 但对于细小河流的提取不完整, 在 2019 年 3 月、6 月的两期水面识别存在缺失; 在 2019 年 6 月、2020 年 7 月、2021 年 6 月和 2022 年 9 月, 对细长入库河流的识别不完整, 可能是由于水面浑浊或植被覆盖导致的假彩色影像中水体的颜色差异。基于 OTSU 阈值能完整识别水库边界和细小水体, 然而存在过提取或误提取, 例如将施工区的围堰和浑浊泥地识别为水体, 以及在 2020 年 7 月和 2022 年 11 月将明显云区识别为水体。

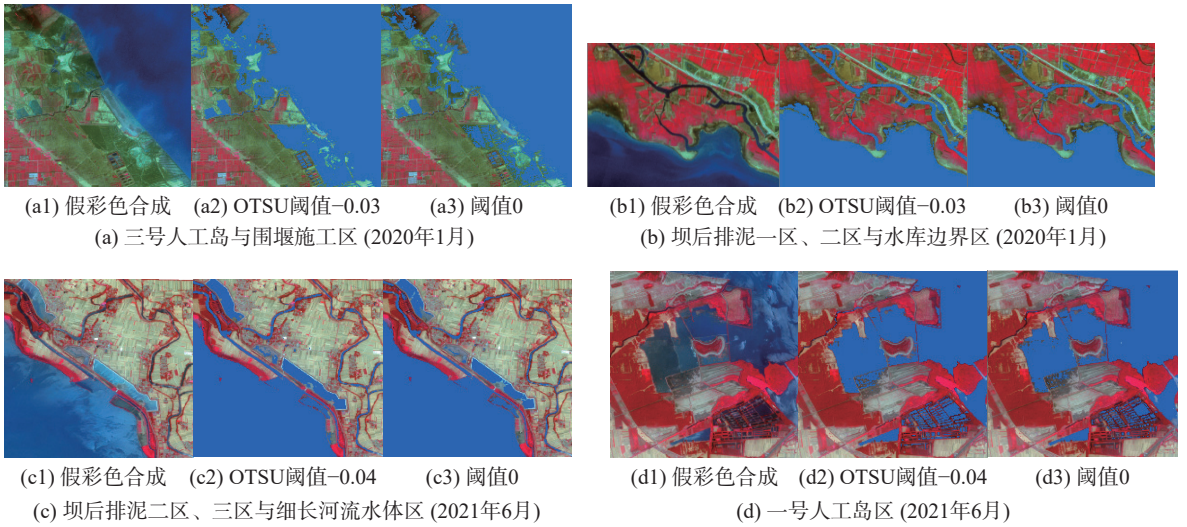


图 3 基于 $NDWI_{T0}$ 和 $NDWI_{OTSU}$ 阈值的局部水体提取结果对比

Fig. 3 Comparison of local water body extraction results based on $NDWI_{T0}$ and $NDWI_{OTSU}$ thresholds

进一步分析表明, 当 OTSU 阈值在 $[-0.10, 0.05]$ 时, 水体提取效果较好。在剔除明显误差的时期后, 利用 OTSU 阈值和阈值 0 对余下 23 期提取的水体面积进行统计, 计算两者的水体面积差异, 将面积差异除以使用固定阈值 0 提取的水体面积, 得到差异比值。除个别时期外, 大多数时期的差异比值在 3% 之内, 施工前阈值有效期数明显高于施工后, 详见表 2。

表 2 各时期的 OTSU 阈值及与固定阈值 0 提取的水体面积差异

Tab. 2 Differences in water body area extraction between OTSU thresholds and the fixed threshold ($I_{NDWI=0}$) at various periods

月份	2018年		2019年		2020年		2021年		2022年	
	阈值	差异比值/%	阈值	差异比值/%	阈值	差异比值/%	阈值	差异比值/%	阈值	差异比值/%
1			-0.009	0.17	-0.03	6.73	-0.03	1.31		
2	0.03	-0.88					-0.07	3.25	-0.05	1.02
3	-0.02	2.46								
4										
5	-0.09	6.09								
6							-0.04	3.60		
7										
8										
9	-0.08	2.91	-0.07	1.62	0.03	-2.19	0.03	-0.92		
10	-0.06	1.69	-0.06	1.44	0.05	-2.75			-0.07	1.75
11	0.01	-0.51			0.04	-1.62	-0.04	-1.64		
12	-0.02	0.61	-0.05	1.90			0.07	-2.65		

3.2 基于 NDWI 的水库扩容工程前后的水体面积动态变化分析

结合 $NDWI_{T0}$ 阈值方法和面积差异不超过 5% 的 $NDWI_{OTSU}$ 提取结果, 生成 2018—2020 年逐月水体分布(图 4)。以 2018 年各月水体数据为基准, 计算其他年份各月与基准月份的面积差异(图 5)。

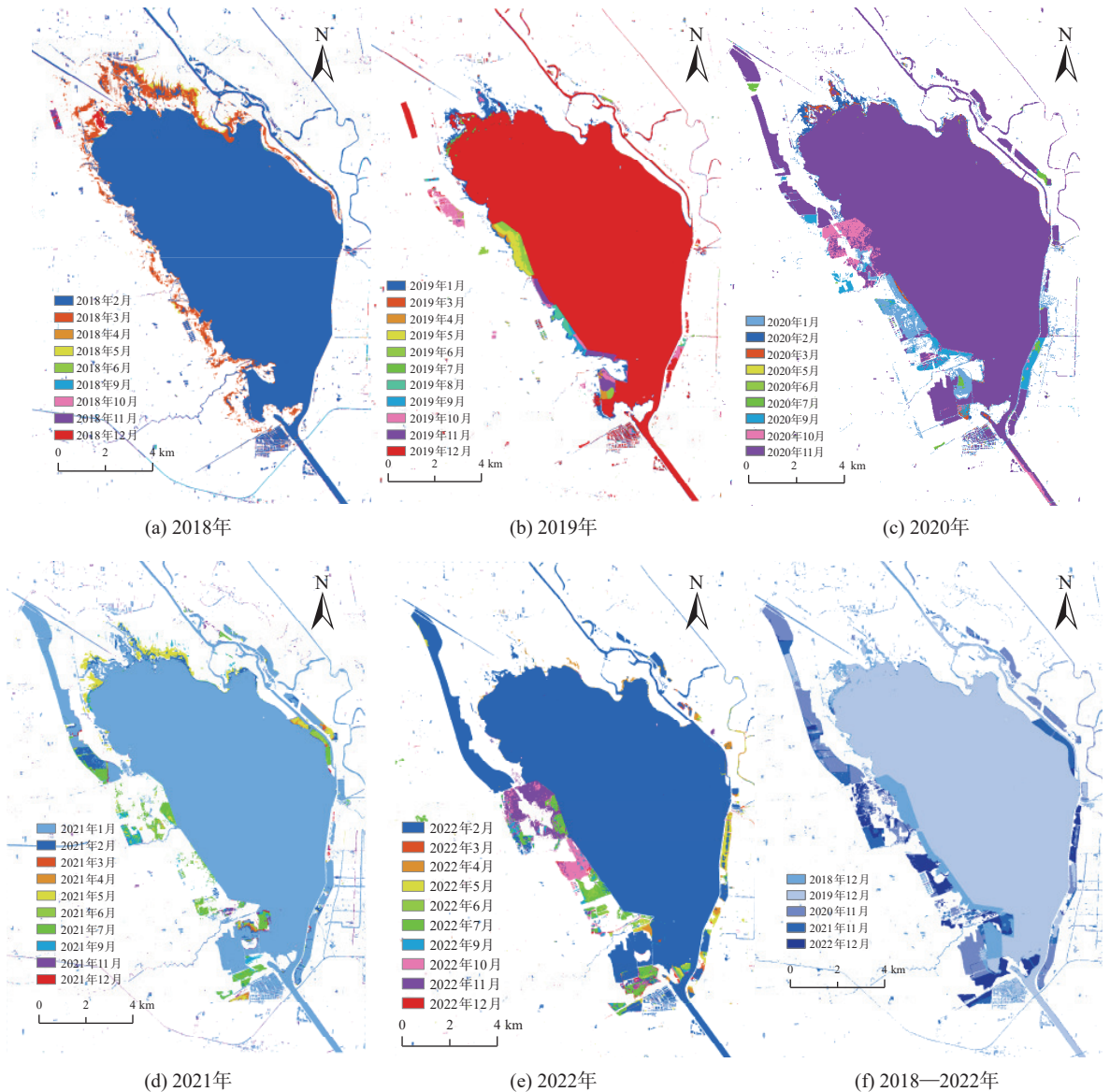


图 4 2018—2022 年逐月水体提取结果

Fig. 4 Monthly water body extraction results from 2018 to 2022

在施工前的 2018 年, 水体变化主要表现为西北部、西岸的不规则变化, 其中 3 月份水体面积最大, 6 月份最小, 最大差异 14.31 km^2 。施工后, 2019 年各月水体面积相比 2018 年均不同程度减少, 减少 $2\sim 5 \text{ km}^2$, 主要由于扩容区的土方填筑。2020 年和 2021 年, 水体面积较 2018 年显著增加, 增加 $4\sim 23 \text{ km}^2$, 主要为深水带、1 号人工岛附近以及坝后排泥区水体扩张。2022 年, 水体面积继续增加, 增加为 $9\sim 31 \text{ km}^2$ 。尤其在深水带、3 个人工岛和坝后排泥区表现出显著的水体扩张。

从 2019 年至 2022 年, 水体分布与施工活动密切相关。2019 年水体在扩容区从北向南呈规则减少, 5 月份时三号人工岛附近水库因围堰设置出现分割线; 7 月份时土方填筑使部分水体变成非水体, 二号人工岛附近水库出现分割线; 8 月份时分割线延至一号人工岛; 12 月份时一号人工岛附近水体为非水体。2020 年, 水体变化不明显, 1 月份时深水带水体增加; 2 至 6 月无变化; 7 月份时一号和三号人工岛及深水带

区水体增加; 9 月和 10 月继续增加, 11 月减少。2021 年, 变化集中在一号和三号人工岛及坝后排泥区, 1 月至 6 月无明显变化; 7 月和 9 月水体增加, 12 月减少。2022 年, 扩容区和坝后排泥区水体增加, 深水带水体持续存在, 表明年初深水带建设基本完成, 7 月至 12 月, 二号至三号人工岛附近水体增加, 坝后排泥区全年变化, 表明清淤持续。疫情影响下, 2020 年和 2021 年工程进度滞后, 部分月份水体无变化, 且非水体变化难以通过水体识别准确反映。

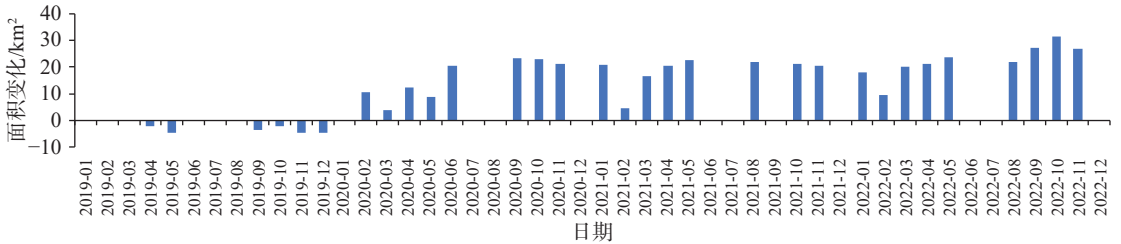


图 5 2019—2022 年逐月水体面积变化

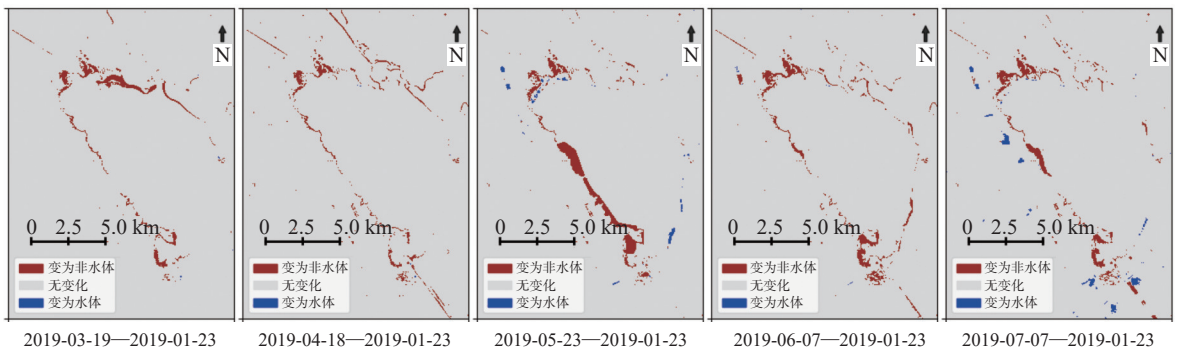
Fig. 5 Monthly variations in water body area from 2019 to 2022

3.3 基于 $NDWI_{b-del}$ 指数的水体与非水体转换特征分析

以 2019 年为例, 时序 $NDWI_{b-del}$ 显示水体动态变化具有高度一致性, 主要表现为水体转变为非水体。从 6 月 7 日至 12 月 9 日, 水体区域明显转变为非水体, 并沿水库西岸逐渐南移, 到 12 月 9 日, 这些非水体区域呈长条状分布。在 8 月 16 日后, 非水体转变为水体的区域主要出现在扩容区的深水带和坝后排泥 5 区。结合 2018 年的水体自然变化来看, 这些区域的变化主要由自然因素引起。与施工动态的水体识别相比, 基于 $NDWI_{b-del}$ 的方法能够明确识别水体和非水体类型转换区域, 但对于地物类型未变化或变化不明显的区域则无法准确反映。

3.4 基于 $NNDWI_{del}$ 指数的地表水分信息变化与施工动态分析

以 2019 年为例, 基于时序 $NNDWI_{del}$ 的影像分析显示, 地表水分信息变化具有明显的阶段一致性(见图 6 和图 7)。根据区域特征分为水库水体区、清淤扩容施工区和其他区域进行分析。水库水体区, $I_{NNDWI_{del}}$ 变化显著, 在 3 月和 6 月, $I_{NNDWI_{del}}$ 值小于 0.3 的区域增加, 可能由于水体中悬浮颗粒和泥沙增加导致水含量减少。9 月和 11 月, $I_{NNDWI_{del}}$ 在 (0.3, 0.4] 值的区域明显增加, 也与水体悬浮物增多有关。施工区, 西岸从 7 月至 12 月, $I_{NNDWI_{del}}$ 在 [0, 0.2] 的区域与土方填筑导致的水体减少区域一致, 在扩容区北端, $I_{NNDWI_{del}}$ 值在 (0.6, 0.7] 的长条状区域与深水带建设一致, 表明水含量增加。在东岸, 自 3 月起呈规则的长条状区域, $I_{NNDWI_{del}}$ 值在 (0.6, 0.8], 由北向南延伸, 与坝后排泥区分布一致, 显示淤泥堆积增加了水含量。其他区域, $I_{NNDWI_{del}}$ 值主要在 (0.4, 0.6] 之间, 水含量变化不明显, 仅在 6 月 $I_{NNDWI_{del}}$ 达到 (0.7, 0.8], 这可能与 6 月初流域明显降雨影响有关, 增加了地表水含量。



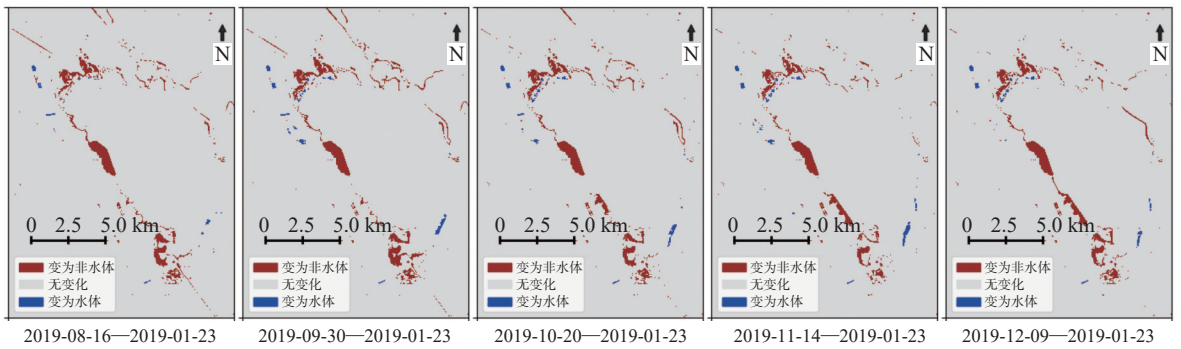
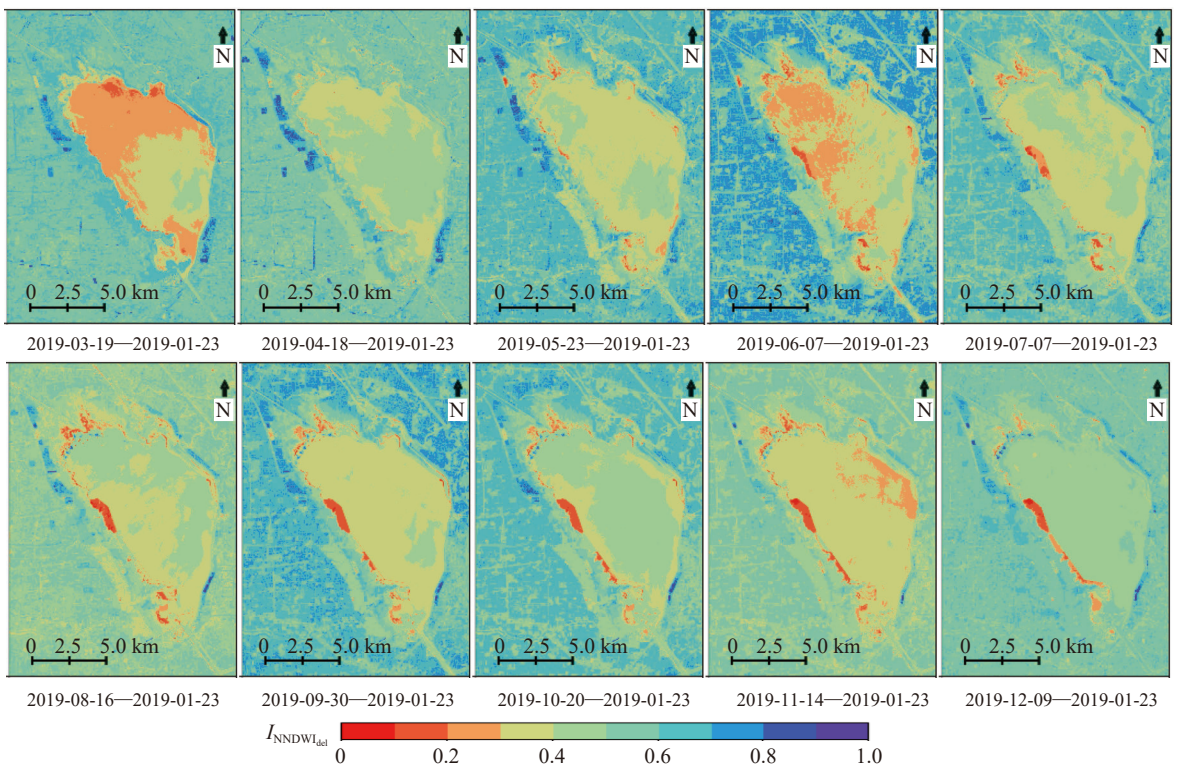
2019-03-19—2019-01-23

2019-04-18—2019-01-23

2019-05-23—2019-01-23

2019-06-07—2019-01-23

2019-07-07—2019-01-23

图 6 基于 $NDWI_{b-del}$ 不同时序水体与非水体转换分布Fig. 6 Temporal distribution of water-to-non-water transitions based on $NDWI_{b-del}$ 图 7 基于 $NNDWI_{del}$ 不同时序含水信息变化分布Fig. 7 Temporal distribution of surface moisture changes based on $NNDWI_{del}$

结合施工后逐年年初与年末假彩色影像和 $NDWI_{b-del}$ 影像分析可知, $NNDWI_{del}$ 灰度影像显示出施工区与 $NDWI_{del}$ 的低值区和高值区域相对应的特点(图 8)。各年 $I_{NNDWI_{del}}$ 的 $[0, 0.2]$ 值区、 $(0.8, 1.0]$ 值区分别对应于 $NDWI_{b-del}$ 中水体转变成非水体和非水体转换成水体的区域, 显示出显著的地表水分变化。此外, 图像也反映了一些没有发生类型转换但地表水分明显变化的区域(比如 2020 年和 2021 年图中标红区域), 这些主要在 $(0, 0.4]$ 和 $(0.6, 1.0]$ 值区。水库水体区从 2019 至 2021 年, $I_{NNDWI_{del}}$ 值主要保持在 $[0.5, 0.6]$ 之间, 而 2022 年降至约 0.4, 表明水体浑浊度增加。

综上, 当 $I_{NNDWI_{del}}$ 值为 0.5 时, 表示两期影像地物水分状况无变化。 $I_{NNDWI_{del}}$ 值越小(接近 0)或越大(接近 1)则表示水分变化越明显, 值接近 0 表示显著变干, 接近 1 表示显著变湿, 结合考虑地物水分的增加与减

少, 可将 $I_{NNDWI_{del}}$ 初步划为 5 个等级: 极端变干 ($0 \leq I_{NNDWI_{del}} \leq 0.2$), 适中变干 ($0.2 < I_{NNDWI_{del}} \leq 0.4$), 无变化 ($0.4 < I_{NNDWI_{del}} \leq 0.6$), 适中变湿 ($0.6 < I_{NNDWI_{del}} \leq 0.8$), 极端变湿 ($0.8 < I_{NNDWI_{del}} \leq 1$)。这种划分方法能够实现同一区域不同时期的纵向对比, 以及同一时期不同区域的横向对比, 有效捕捉地物水分信息的时空变化。通过 $NNDWI_{del}$ 的分类, 可以更直观地捕捉任何区域内的水分变化情况, 尤其在施工环境下的变化。

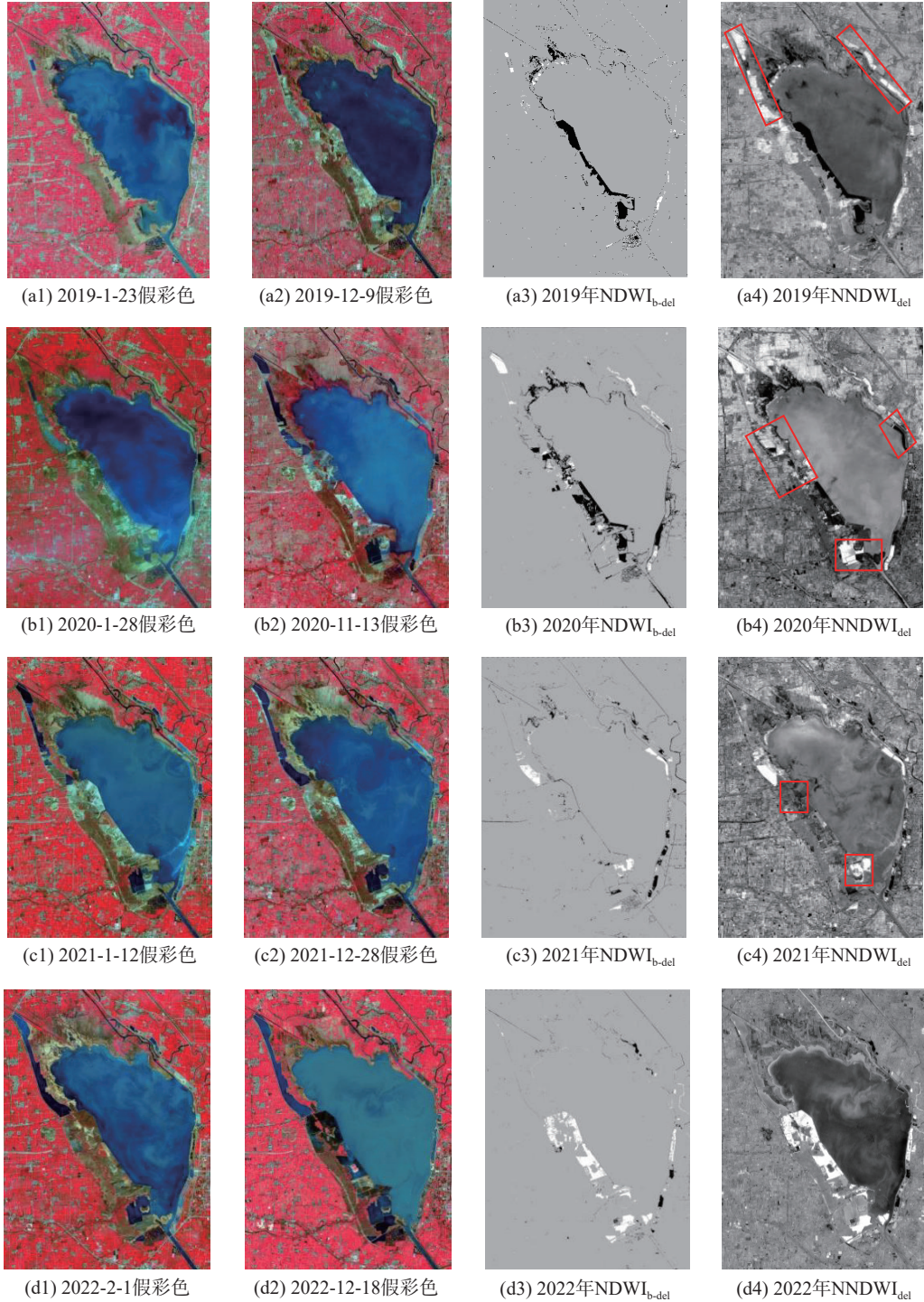


图 8 基于各年年末与年初时相假彩色影像计算的 $NDWI_{b-del}$ 、 $NNDWI_{del}$ 灰度影像示意

Fig. 8 Grayscale images of $NDWI_{b-del}$ and $NNDWI_{del}$ calculated from false-color imagery at the end and beginning of each year

4 结 语

本文提出了一种基于多时相光学影像的 NDWI 及扩展指数的地表水分信息变化监测方法, 研究对比 NDWI 固定阈值 0 与 OTSU 阈值的有效性, 开发建立时序二值化 NDWI 差值指数与归一化 NDWI 差值指数法, 实现自动、快速的地表水分变化检测, 并验证其在水库工程动态变化跟踪中的有效性, 主要结论如下:

(1) 阈值效果比较: NDWI 阈值为 0 和 OTSU 阈值均可识别水库水体边界, 但阈值 0 在识别浑浊水体和细小河流时不完整, OTSU 阈值容易将施工区和淤泥识别为水体, 受云影响大。50 期影像中, 只有 21 期可采用 OTSU 阈值, 有效性较低。

(2) 水体变化分析: 2018 年, 水体变化主要在西北部和西岸, 2019 至 2022 年, 变化集中在施工区。其中, 2019 年因库西土方填筑导致水体减少。2020 和 2021 年, 深水带和一号人工岛附近与坝后排泥区的水体显著增加。2022 年, 新增人工岛和坝后排泥区的水体继续增加。2020 与 2021 年部分月份施工滞后, 未反映水体变化。

(3) NNDWI_{del} 指数的有效性: NNDWI_{del} 能有效监测库区水分变化, 通过分级指标判断地表状况和反映施工情况, 补充和扩展了水体识别及转换区识别。通过 NDWI、NDWI_{b-del} 和 NNDWI_{del} 三种指数, 实现水域、水体动态转换过程与地表水分信息变化全景监测。

本文探讨了一种基于多水体指数快速辨识水域变化与地表水分变化的方法。虽然卫星数据有瞬时性, 且可用时相受传感器和天气影响, 本研究仍按月度进行观察, 部分月份数据可用达 3 期。该方法为多时相卫星影像的应用提供了新思路, 并为其他水体指数的应用和验证指出了方向。由于 NNDWI_{del} 对地表水分变化具有高敏感性, 该方法也可用于快速鉴别水体侵占、洪旱变化、水质与浊度变化, 还可结合地面实测数据进行定量分析, 具有广泛的应用前景。

参 考 文 献:

- [1] ZHANG G Q, LI J L, ZHENG G X. Lake-area mapping in the Tibetan Plateau: an evaluation of data and methods[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2017, 38(3): 742-772.
- [2] 李丹, 吴保生, 陈博伟, 等. 基于卫星遥感的水体信息提取研究进展与展望[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2020, 60(2): 147-161. (LI Dan, WU Baosheng, CHEN Bowei, et al. Review of water body information extraction based on satellite remote sensing[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2020, 60(2): 147-161. (in Chinese))
- [3] LIU S, WU Y F, ZHANG G X, et al. Comparing water indices for landsat data for automated surface water body extraction under complex ground background: a case study in Jilin Province[J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(6): 1678.
- [4] 肖茜, 杨昆, 洪亮. 近 30 a 云贵高原湖泊表面水体面积变化遥感监测与时空分析[J]. *湖泊科学*, 2018, 30(4): 1083-1096. (XIAO Qian, YANG Kun, HONG Liang. Remote sensing monitoring and temporal-spatial analysis of surface water body area changes of lakes on the Yunnan-Guizhou Plateau over the past 30 years[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2018, 30(4): 1083-1096. (in Chinese))
- [5] SAJJAD A, LU J Z, CHEN X L, et al. Rapid assessment of riverine flood inundation in Chenab floodplain using remote sensing techniques[J]. *Geoenvironmental Disasters*, 2023, 10(1): 9.
- [6] MCFEETERS S K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1996, 17(7): 1425-1432.
- [7] 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. (XU Hanqiu. A study on information extraction of water body with the modified normalized difference water index (MNDWI)[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2005, 9(5): 589-595. (in Chinese))
- [8] 张磊, 韩秀珍, 翁富忠, 等. 基于 Sentinel-2A MSI 数据的水体信息提取算法对比研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(12): 1228007. (ZHANG Lei, HAN Xiuzhen, WENG Fuzhong, et al. Comparison of water information extraction algorithms

- based on Sentinel-2A MSI Data[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(12): 1228007. (in Chinese))
- [9] 刘宏洁, 宋文龙, 刘昌军, 等. 基于归一化水体指数及其阈值自适应算法的水体遥感反演效果分析[J]. *中国水利水电科学研究院学报(中英文)*, 2022, 20(3): 251-261. (LIU Hongjie, SONG Wenlong, LIU Changjun, et al. Analysis of water remote sensing inversion effect of Normalized Difference Water Index and its adaptive threshold correction algorithm[J]. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2022, 20(3): 251-261. (in Chinese))
- [10] SUBEDI A, ACHARYA T D. Small water bodies detection and evaluation using Normalized Difference Water Index (NDWI) from Landsat image in Western Terai, Nepal[J]. *Bulletin of Nepal Hydrogeological Association*, 2021, 6: 89-95.
- [11] LAONAMSAI J, JULPHUNTHONG P, SAPRATHET T, et al. Utilizing NDWI, MNDWI, SAVI, WRI, and AWEI for estimating erosion and deposition in Ping River in Thailand[J]. *Hydrology*, 2023, 10(3): 70.
- [12] OUMA Y, TATEISHI R. A water index for rapid mapping of shoreline changes of five East African Rift Valley Lakes: an empirical analysis using Landsat TM and ETM+ data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, 27(15): 3153-3181.
- [13] JI L, ZHANG L, WYLIE B. Analysis of dynamic thresholds for the normalized difference water index[J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2009, 75(11): 1307-1317.
- [14] XU H Q. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, 27(14): 3025-3033.
- [15] OTSU N. A threshold selection method from gray-level histograms[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1979, 9(1): 62-66.
- [16] 李健锋, 叶虎平, 张宗科, 等. 基于 Landsat 影像的斯里兰卡内陆湖库水体时空变化分析[J]. *地球信息科学学报*, 2019, 21(5): 781-788. (LI Jianfeng, YE Huping, ZHANG Zongke, et al. Spatiotemporal change analysis of Sri Lanka inland water based on landsat imagery[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2019, 21(5): 781-788. (in Chinese))
- [17] GUO Q D, PU R L, LI J L, et al. A weighted normalized difference water index for water extraction using Landsat imagery[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2017, 38(19): 5430-5445.
- [18] CORDEIRO M C R, MARTINEZ J M, PEA-LUQUE S. Automatic water detection from multidimensional hierarchical clustering for Sentinel-2 images and a comparison with Level 2A processors[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2021, 253: 112209.
- [19] 徐蓉, 张增祥, 赵春哲. 湖泊水体遥感提取方法比较研究[J]. *遥感信息*, 2015, 30(1): 111-118. (XU Rong, ZHANG Zengxiang, ZHAO Chunzhe. Different models used in extraction of lake water body based on MODIS data[J]. *Remote Sensing Information*, 2015, 30(1): 111-118. (in Chinese))
- [20] YIGIT AVDAN Z, KAPLAN G, GONCU S, et al. Monitoring the water quality of small water bodies using high-resolution remote sensing data[J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2019, 8(12): 553.
- [21] 刘宇, 李旭龙. 基于水体指数的镜泊湖叶绿素 a 质量浓度反演研究[J]. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2019, 45(2): 172-178. (LIU Yu, LI Xulong. The inversion study of chlorophyll a concentration in Jinpo Lake based on water body index[J]. *Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences)*, 2019, 45(2): 172-178. (in Chinese))
- [22] MEENA S R, CHAUHAN A, BHUYAN K, et al. Chamoli disaster: pronounced changes in water quality and flood Plains using Sentinel data[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2021, 80(17): 601.
- [23] KHAN R M, SALEHI B, MAHDIANPARI M, et al. Water quality monitoring over finger lakes region using sentinel-2 imagery on google earth engine cloud computing platform[J]. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2021: 279-283.
- [24] DENNISON P E, ROBERTS D A, PETERSON S H, et al. Use of Normalized Difference Water Index for monitoring live fuel moisture[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2005, 26(5): 1035-1042.
- [25] GAO B C. NDWI: a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1996, 58(3): 257-266.
- [26] ZHANG C, PATTEY E, LIU J G, et al. Retrieving leaf and canopy water content of winter wheat using vegetation water indices[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2018, 11(1): 112-126.
- [27] 谷佳贺, 薛华柱, 董国涛, 等. 归一化水体指数用于河南省干旱监测适用性分析[J]. *干旱地区农业研究*, 2020, 38(6): 209-217. (GU Jiahe, XUE Huazhu, DONG Guotao, et al. Applicability analysis of NDWI for drought monitoring in Henan

- Province[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2020, 38(6): 209-217. (in Chinese))
- [28] 毛海颖, 冯仲科, 巩垠熙, 等. 多光谱遥感技术结合遗传算法对永定河土壤归一化水体指数的研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2014, 34(6): 1649-1655. (MAO Haiying, FENG Zhongke, GONG Yinxi, et al. Researches of soil normalized difference water index (NDWI) of Yongding River Based on multispectral remote sensing technology combined with genetic algorithm[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, 34(6): 1649-1655. (in Chinese))
- [29] 赖新河. 宿鸭湖人工岛设计及施工[J]. *河南水利与南水北调*, 2022, 51(4): 46-48. (LAI Xinhe. Design and construction of Suyu Lake artificial island[J]. *Henan Water Resources and South-to-North Water Diversion*, 2022, 51(4): 46-48. (in Chinese))
- [30] 王刘鹏. 水库清淤扩容工程项目进度管理研究: 以河南省宿鸭湖水库为例[D]. 贵阳: 贵州大学, 2022. (WANG Liupeng. Study on schedule management of reservoir dredging and expansion project: taking Suyahu Reservoir in Henan Province as an example[D]. Guiyang: Guizhou University, 2022. (in Chinese))
- [31] BREIMAN L. Random forests[J]. *Machine Learning*, 2001, 45: 5-32.
- [32] 方秀琴, 郭晓萌, 袁玲, 等. 随机森林算法在全球干旱评估中的应用[J]. *地球信息科学学报*, 2021, 23(6): 1040-1049. (FANG Xiuqin, GUO Xiaomeng, YUAN Ling, et al. Application of random forest algorithm in global drought assessment[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2021, 23(6): 1040-1049. (in Chinese))

Monitoring surface moisture changes using NDWI and extended indices: a case study of Suyahu Reservoir

LIU Suyi¹, HUANG Dui², WANG Jianjun³, YU Zhongbo¹

(1. *The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University, Nanjing 210098, China*; 2. *The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*; 3. *Zhumadian City Suyahu Reservoir Operation Center, Zhumadian 46300, China*)

Abstract: Based on the differential reflectance of surface moisture in the green and near-infrared bands observed via remote sensing, this study explores the use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) and its extended indices to monitor surface moisture changes. Multi-temporal Sentinel-2 optical imagery from 2018 to 2022 was utilized to compare the performance of water body extraction methods using a fixed NDWI threshold of 0 and Otsu's adaptive thresholding method. Furthermore, two novel indices—the Binary NDWI Difference Index (NDWI_{b-del}) and the Normalized NDWI Difference Index (NNDWI_{del})—were proposed for identifying dynamic water transitions and surface moisture changes. The study analyzed these indices using Suyahu Reservoir as a case study. Results indicate that the fixed NDWI threshold of 0 outperformed Otsu's thresholding method, which had an effective period of less than 50%. Water distribution closely aligned with dredging and expansion activities. In 2018, natural changes in water bodies were mainly observed in the northwest and western areas. Post-construction, the water area in the western reservoir decreased in 2019, while increases in the deep-water zones, areas near Artificial Island No. 1, and post-dam dredging zones were observed in 2020–2021. By 2022, water bodies around Artificial Islands No. 2 and No. 3 continued to expand. The NDWI_{b-del} index identified significant water transitions in construction fill zones, deep-water zones, and post-dam dredging zones from 2019 to 2022. The NNDWI_{del} index revealed extreme changes corresponding to transitions between water and non-water states, while moderate drying and wetting changes corresponded to precursor phases of extreme changes, including water body reductions due to earthworks and water accumulation from silt deposition in less apparent transition zones. This study extends the NDWI framework by proposing two remote sensing indices, providing a novel and efficient method for automated monitoring of surface moisture and environmental changes.

Key words: optical remote sensing; NDWI; NDWI_{b-del}; NNDWI_{del}; surface moisture; Suyahu Reservoir