

基于地物时空关系的水浮莲遥感监测方法*

郑泳¹, 冯明薇², 蔡季宏¹, 罗澍然¹, 秦雁¹, 陈逸敏²

- 广东省水利水电科学研究院 / 广东省水动力学应用研究重点实验室, 广东广州 510635
- 中山大学地理科学与规划学院, 广东广州 510275

摘要: 水浮莲泛滥会对区域水安全和水生态造成严重危害, 及时、精准地监测水浮莲分布状况是水浮莲治理的基础。为提升水浮莲遥感监测的效率、精度和适用性, 本研究提出了一种基于地物时空关系的水浮莲遥感监测方法。该方法在提取植被范围的基础上, 通过计算并比较长时序光学遥感影像中植被和水体光谱指数的关系变化排除陆生植被影响, 从而实现水浮莲像元的快速提取。本研究以广东省鉴江流域为研究区验证该方法的有效性, 并分析了2022年流域片区的水浮莲分布特征。结果表明, 该方法对水浮莲识别效果较好, 准确率和召回率分别达到92.9%和86.7%。2022年3~5月期间鉴江流域主要河道存在多处水浮莲高密度聚集区, 水浮莲面积总体呈先增大后减小的趋势。本方法可为大面积水浮莲的准确监测和精准防治提供技术支撑。

关键词: 水浮莲; 遥感监测; 光谱指数; Sentinel

中图分类号: P237 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-0137(2025)03-0074-09

The remote sensing monitoring method of water hyacinth based on geographical spatiotemporal relationship

ZHENG Yong¹, FENG Mingwei², CAI Jihong¹, LUO Shuran¹, QIN Yan¹, CHEN Yimin²

- Guangdong Research Institute of Water Resources and Hydropower /
Guangdong Key Laboratory of Hydrodynamic Research, Guangzhou 510635, China
- School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China

Abstract: The proliferation of water hyacinth poses serious threats to regional water security and ecological balance. Timely and accurate monitoring of the distribution of water hyacinth is fundamental to its management. To enhance the efficiency, accuracy, and applicability of remote sensing monitoring for water hyacinth, this study proposes a remote sensing monitoring method based on the spatiotemporal relationships of land cover. This method extracts the vegetation range and eliminates the influence of terrestrial vegetation by calculating and comparing the changes in the spectral index relationships of vegetation and water bodies in long-term optical remote sensing images, thereby enabling the rapid extraction of water hyacinth pixels. The effectiveness of this method is validated in the Jianjiang River Basin, and the distribution characteristics of water hyacinth in the basin for the year 2022 are analyzed. The results indicate that this method performs well in identifying water hyacinth, achieving an accuracy of 92.9% and a recall rate of 86.7%. From March to May in 2022, several high-

* 收稿日期: 2024-10-29 录用日期: 2025-01-20 网络首发日期: 2025-04-02

基金项目: 广东省科技创新战略专项(gdsky2023-04)

作者简介: 郑泳(1985年生), 女; 研究方向: 水利大数据分析与应用;

E-mail: ce04zhy@163.com

通信作者: 陈逸敏(1985年生), 男; 研究方向: 遥感与地理信息建模;

E-mail: chenym49@mail.sysu.edu.cn

全文阅读



ZR20240313

density aggregation areas of water hyacinth were observed in the main rivers of the Jianjiang River Basin, with the overall area of water hyacinth showing a trend of initial increasing and then decreasing. This method provides valuable technical support for the accurate monitoring and precise control of large-scale water hyacinth.

Key words: water hyacinth; remote sensing; spectral index; Sentinel

水浮莲, 又称凤眼莲、凤眼兰、水葫芦, 原产于南美, 属于我国广泛分布的外来入侵物种。水浮莲对多种无机元素和有机污染物具有较强的吸收和分解能力, 在特定情况下可用于水体污染治理(王云等, 2011)。然而, 因其繁殖迅速, 能在短时间内大面积侵占水域, 常常对水安全和水生生态产生不利影响(Gaurav et al., 2020)。具体而言, 水浮莲的密集覆盖会减少河道过流面积, 增加河道阻力, 进而影响航运和行洪安全(黄本胜等, 2007); 还会降低水体溶解氧含量, 危及其他动植物生存, 并在腐烂后加剧水体污染, 影响供水安全和生态环境(王智等, 2012)。及时精准地监测水浮莲分布状况是水浮莲治理的基础(张红艳等, 2024), 对于水资源安全及生态环境保护具有重要意义。由于华南地区水热条件良好, 且水浮莲缺乏有效天敌, 容易泛滥成灾, 通常在水质肥沃、静水或活水缓流的水面大量生长繁殖, 引发严重的生态灾害。全面推行河湖长制以来, 广东省以流域为单元每年开展2次集中“清漂”工作, 利用冬春时节打捞水浮莲残根菱叶, 全面抑制夏秋季水浮莲的过度生长。根据2024年《广东省河长办关于进一步加强河湖保洁工作的通知》, 全省年平均清理水面漂浮物413万t, 保洁河道长度6.5万km、水域面积8253km², 基本实现江河湖库无成片漂浮垃圾的目标。然而, 广东省河道纵横、水网密布, 河道环境复杂, 现有的河湖监测手段难以快速、准确地提供水浮莲等河湖漂浮物监测结果, 从而影响了河湖保洁工作的效率和成本。

由于水浮莲分布广、暴发迅速, 常规的人工巡视监测需要耗费大量人力和时间, 且难以满足水浮莲日常监测的频率及范围需求, 易产生监测盲区。而针对个别河段布设的漂浮物识别监测系统(许毅超, 2023)不利于大范围水浮莲监测, 成本相对较高。卫星遥感技术以其观测范围广、信息丰富和周期覆盖的优势为长时序监测提供强有力的条件支持, 已广泛应用于水浮莲等水生植物监测(Datta et al., 2021; Ghoussein et al., 2019; Mukarugwiro et al., 2021; Pádua et al., 2022; Singh et

al., 2020; 何诗瑜等, 2019; 彭力恒等, 2022; 秦雁等, 2020; 孙玲等, 2011; 王冬梅等, 2023; 王智等, 2012; 杨静学等, 2019)。水浮莲遥感监测方法主要分为目视解译法、光谱指数法和机器学习法。目视解译法仅依靠人工提取识别水浮莲, 耗时费力, 易造成水浮莲漏选, 现阶段研究已不常见。光谱指数法基于水浮莲影像光谱特征, 通过构建一类或多类遥感指数来区分水浮莲和其他地物。如杨静学等(2019)通过对多源遥感影像的NDVI值设定一定阈值以获取水浮莲分布区。秦雁等(2020)利用多景影像的NDWI指数构建水域模板, 再结合NDVI和近红外波段阈值提取模板中的水浮莲覆盖范围。彭力恒等(2022)计算Sentinel-2影像MNDWI和NDVI指数, 采用大津法确定指数分割阈值, 实现对水浮莲的识别和动态分析。Pádua et al.(2022)提出一种自定义和自适应NDVI阈值提取河道矢量范围内水浮莲的方法, 并据此开发了一套半自动GIS应用工具。然而, 现阶段的光谱指数法仍无法有效分离水生植物和陆生植物, 容易造成水浮莲识别结果冗余。

机器学习方法通过遥感影像特征和水浮莲样本构建机器学习模型, 以达到对水浮莲分类的效果。蒋明等(2019)采用监督分类方法实现滇池水浮莲面积解译提取以及蔓延区域的长时序空间分布确定。Thamaga et al.(2019)基于旱季和雨季的实地调查成果获取包含水浮莲在内的多类地物在Sentinel-2影像中的光谱特征和植被指数特征, 通过线性判别分析法建立目标区域影像分类模型, 实现对水浮莲的分类和季节性分析。Singh et al.(2020)在用水体指数获取水面范围的基础上, 结合阈值分割法和语义分割模型提取水生植物, 再基于多种遥感光谱指数和随机森林算法区分其中的水浮莲像元。Mukarugwiro et al.(2021)根据样本的Landsat影像特征构建随机森林地物分类模型, 用以识别卢旺达1989年、2002年和2017年的水浮莲分布和变化。王冬梅等(2023)采用Sentinel-2影像数据对比分析支持向量机、神经网络和随机森林3种机器学习算法的水浮莲分类精度, 利用最佳

方法提取 2017—2021 年江苏里下河地区多期影像中的水浮莲, 以分析其年际变化和扩散特征, 对比结果表明支持向量机分类效果最优。为支撑模型训练, 以上机器学习方法需要大量的高质量人工标注样本和较复杂的影像特征筛选步骤, 耗费时间较长, 在不同传感器影像上的适用性不佳。而深度学习方法的应用前提同样需要积累充足的水浮莲样本来进行模型训练和验证。

为克服以上方法的局限性, 本文基于有限的样本数量, 提出一种非监督的水浮莲提取方法, 即基于地物时空关系的水浮莲遥感监测方法。该方法基于时间序列光学遥感影像, 采用 MNDWI 和 NDVI 两种多光谱指数构建水浮莲提取指数, 同时结合监测日期的当期影像提取植被覆盖信息, 通过阈值分割快速识别影像范围内的水浮莲像元, 并以粤西地区的鉴江流域为例, 分析流域内水浮莲分布特征。

1 研究区及数据

1.1 研究区概况

研究区为粤西地区的鉴江流域(图 1)。鉴江是广东省第 3 大独立水系、粤西地区最大的河流, 是茂名、湛江两市 1 000 多万人口的母亲河。鉴江干流发源于茂名市信宜, 流经茂名市高州、化州、电白和茂南, 在湛江市吴川沙角旋出海。流域北部和东部为高山地区, 东部鹅凰嶂为全流域最高峰, 西部中部为丘陵台地, 中下游沿岸为广阔的鉴江平原。主干流全长 232 km, 流域面积 9 464 km²。干流上游河道比降较大, 水流湍急; 与大井河汇合后, 比降逐渐平缓, 至高州市区河道逐渐开阔, 进入平原区河段。途中有多条支流汇入, 构成树枝状水系, 主要支流包括罗江、袂花江、小东江、曹江、塘缀河等。罗江是鉴江最大的一级支流, 发源于茂名市信宜, 至化州汇入



图 1 广东省鉴江流域范围

Fig. 1 The sketch map of Jianjiang River Basin, Guangdong

鉴江, 河长 142 km, 流域面积 2 629 km²。袂花江是鉴江第二大一级支流, 发源于茂名市电白, 至湛江市吴川汇合小东江后, 到梅菪汇入鉴江, 河长 108 km, 流域面积约 2 500 km²。小东江是鉴江最大的二级支流, 是袂花江最大的一级支流, 发源于茂名市高州, 至湛江市吴川汇入袂花江, 河长 75 km, 流域面积 1 118 km²。流域内大型水闸 27 座, 主要分布在鉴江、罗江、袂花江和小东江干流。大型水库 2 宗, 分别为高州水库和罗坑水库。

粤西地区地处亚热带季风区, 夏长冬短, 温暖湿润, 为水浮莲生长提供了适宜的气候条件。随着鉴江流域社会经济的发展, 流域内河流水质出现了不同程度的污染。污水排放促使水体形成有利于水浮莲繁殖的富营养化条件, 农业面源污染也为水浮莲生长提供丰富养料。依据高分辨率卫星遥感调查结果, 鉴江干流自 2014 年开始, 拦河闸坝前常发现水浮莲聚集的情况, 呈现多河段聚集、频繁快速生长现象。因此, 本文选择鉴江流域开展水浮莲遥感监测方法研究, 具有较好的代表性和现实意义。

1.2 数据来源

本文影像数据为 Sentinel-2 地表反射率产品。Sentinel-2 卫星包括 A、B 两颗卫星, 由欧洲航天局

分别于 2015 年和 2017 年发射。卫星携带多光谱成像仪, 成像范围包括可见光和近红外中的 13 个波段, 空间分辨率 10 m, 成像幅宽达 290 km。Sentinel-2 地表反射率产品经过了辐射定标、几何校正和大气校正处理, 提供 13 个波段的地表反射率。单幅影像产品大小为 100 km², 投影系统为 UTM/WGS84。本文以云层像元的比例小于 20% 为筛选条件, 得到 2022 年 3 月 8 日、4 月 7 日、5 月 17 日覆盖鉴江流域的多光谱影像, 用于进行水浮莲遥感监测分析; 同步收集了 2016 年 3 月至 2022 年 3 月共 80 期的影像用于遥感指数序列计算, 指数计算结果将用于研究区水浮莲分布的提取。

2 研究方法

为有效区分水体、陆地植被和水浮莲之间的差异, 减少单期影像云层及水浮莲影像时空变化特征的干扰, 本文基于水浮莲的光谱特性和水体植被的时空关系, 在使用监测时间的单期遥感影像的基础上, 综合考虑时间序列影像数据构建提取指数, 以实现对新增长水浮莲的快速监测。具体技术框架如图 2 所示, 主要包括单期植被覆盖平地识别、提取指数计算、水浮莲识别 3 个步骤。

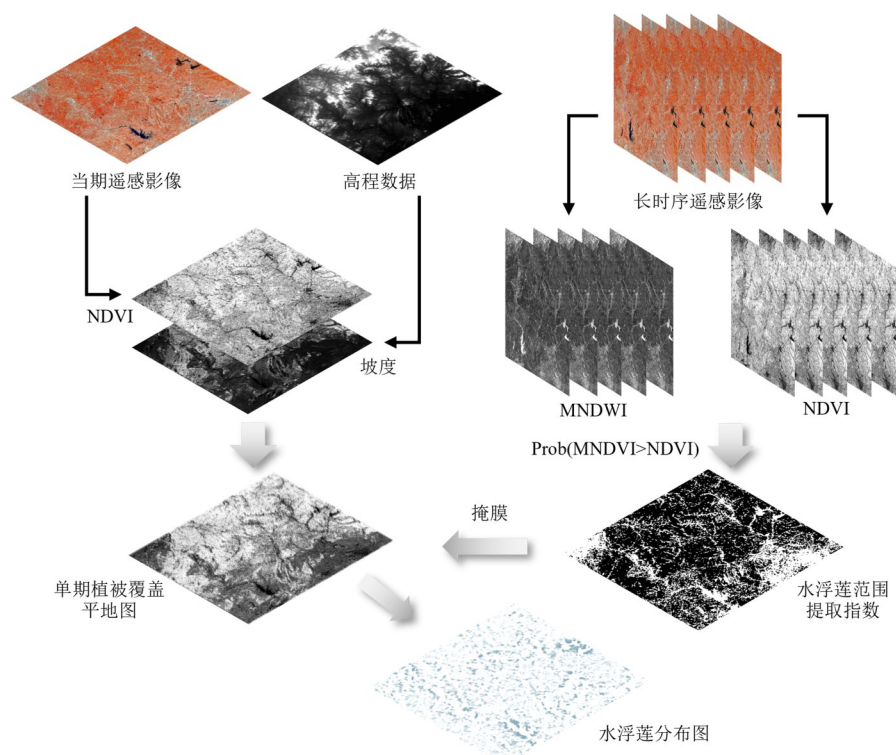


图 2 基于地物时空关系的水浮莲遥感监测技术框架

Fig. 2 The remote sensing monitoring technical framework for water hyacinth based on the spatio-temporal relationship of ground objects

2.1 单期植被覆盖平地区域识别

对于高分辨率光学遥感影像,采用归一化植被指数(NDVI)结合自动阈值法,提取单期影像的植被区域。NDVI是反映植被长势和营养信息的重要参数之一,

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{Red}}{\rho_{NIR} + \rho_{Red}},$$

其中 ρ_{NIR} 为近红外波段地表反射率, ρ_{Red} 为红光波段地表反射率。由于植被的光谱特性是在红光波段强吸收、在近红外波段强反射,因此其具有较低的 ρ_{Red} 值和较高的 ρ_{NIR} 值,故植被的NDVI值通常较高。像元NDVI值高于阈值的被认定为植被,以此提取影像中的植被范围。本研究结合粤西地区植被特点和人工判定,经多次人工尝试、对比后,选取经验阈值为0.4。对监测日期当天的光学影像进行逐像元NDVI计算,提取NDVI值大于0.4的区域,由此得到监测日期的植被覆盖图。

为了减少地形起伏对指数计算的影响,对坡度较高的区域进行了掩膜处理,根据高程数据计算坡度

$$Slope_i = \tan^{-1} \frac{Rise_i}{Run_i},$$

其中, $Rise_i$ 为栅格点*i*与周围4个相邻栅格的高度差最大值,高度差由高程数据计算得到, Run_i 为栅格点*i*与最近邻栅格的水平距离。参考常用的坡度分级,将坡度大于 10° 的地区划分为陡坡,去除陡坡以获取研究区域的平地图。在平地图上叠加进一步得到的植被覆盖图,取二者交集,得到单期植被覆盖平地图。

2.2 构建提取指数

水浮莲提取指数基于改进归一化水体指数(MNDWI)(徐涵秋,2005)和NDVI进行构建。传统的归一化水体指数(NDWI)使用绿光波段和近红外波段进行计算,利用水体在近红外波段强吸收、植被在近红外波段强反射的原理,通过突出水体抑制植被来提取影像中的水体信息。但该方法忽略了建筑物和土壤等背景信息,易造成水体提取范围偏大。MNDWI利用中,红外波段替代NDWI中的近红外波段,能够有效降低建筑物及阴影的影响,并且更能揭示水体微细特征,已广泛应用于遥感影像的分析中。

$$MNDWI = \frac{\rho_{Green} - \rho_{MIR}}{\rho_{Green} + \rho_{MIR}},$$

其中 ρ_{Green} 为绿光波段地表反射率, ρ_{MIR} 为中红外波段地表反射率。由于水体的光谱特性是在蓝绿光

波段强反射、在中红外波段强吸收,其 ρ_{Green} 值较高, ρ_{MIR} 值较低,故水体的MNDWI值通常较高。

水浮莲通常覆盖在水面上并能够随水流移动位置,其生长区域表现出较高的NDVI值,但该生长区域在水浮莲出现前一般为水体,彼时应具有较高的MNDWI值。基于此时序特征,可以通过统计每个栅格点近年来MNDWI值大于NDVI值的出现频率,初步识别水浮莲。一般而言,陆生植被的MNDWI值小于其NDVI值,普通水体的MNDWI值大于其NDVI值。若某个栅格点在一段时间内MNDWI值更高,而另一段时间内NDVI值更高,则该点极有可能出现了水浮莲。2018—2023年期间陆生植被和水浮莲在Sentinel-2影像各波段反射率、MNDWI和NDVI指数变化趋势见图3。

本文采用监测日期前长时序的高分辨率光学遥感影像集,对每张影像进行逐像素指数计算,构建NDVI和MNDWI的时间序列曲线,以此计算提取指数

$$R_i = N_{(i, MNDWI > NDVI)} / N_i,$$

其中 R_i 为栅格点*i*的提取指数值,其值范围为 $[0, 1]$, $N_{(i, MNDWI > NDVI)}$ 为栅格点*i*在时序影像中MNDWI值大于NDVI值的频次, N_i 为栅格点*i*所有可用的时序影像数量。由此可知, R_i 值越接近1,说明栅格点*i*表现为水体的时间更长,表现为植被的时间更短;若 $R_i=1$,说明该栅格点*i*为水体,且未曾出现过水浮莲。基于MNDWI和NDVI的逐栅格时间序列值,计算每个栅格点的 R_i ,由此得到提取指数结果图。

2.3 水浮莲识别

采用阈值法提取的单期植被覆盖范围中,不仅包含了目标水浮莲区域,还存在着来自陆生植被等噪声信息的干扰,因此为了精确识别研究区内的水浮莲分布,需要结合提取指数 R_i 去除陆生植被信息。陆生植被通常具有较高的NDVI值和较低的MNDWI值,在时间序列影像中,其MNDWI值大于NDVI值的出现概率极小。因此,陆生植被的 R_i 通常较小。通过人工经验判读,水浮莲分布区特征为 $0.5 \leq R_i \leq 1$ 。依据该数值区间区域划分为水浮莲可能存在的范围,并将该结果与植被覆盖平地图进行叠加运算,取二者交集,得到水浮莲空间分布结果。最后,将提取结果进行矢量化并进行后续的面积统计分析。

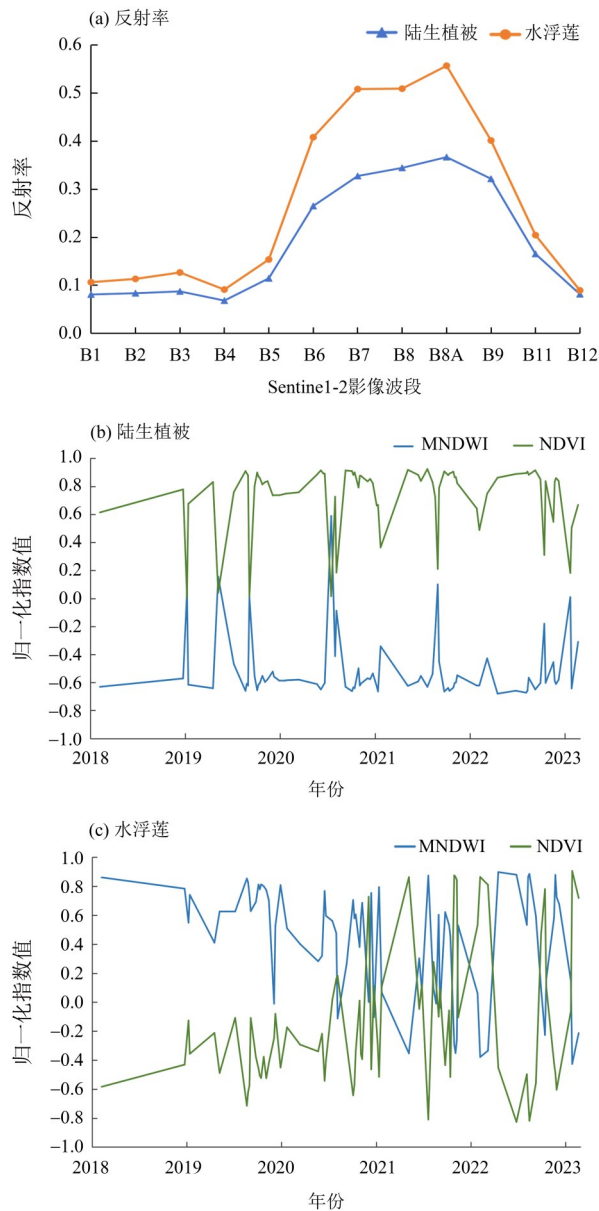


图3 陆生植被和水浮莲反射率和指数变化趋势示例
Fig. 3 Terrestrial vegetation and water hyacinth index change trend

3 结果与讨论

3.1 水浮莲提取精度验证

在研究河道中随机采样 200 个点, 经人工判别, 包含 45 个水浮莲样本点和 155 个水体样本点。结合以上方法预测这 200 个样本点的结果, 并采用正确率 A , 准确率 P 和召回率 R 进行精度监测,

$$A = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN},$$

$$P = \frac{TP}{TP + FP},$$

$$R = \frac{TP}{TP + FN},$$

其中 TP 为真正类, 即正确判别为水浮莲的样本数量; FP 为假正类, 即将水体错判为水浮莲的样本数量; FN 为假负类, 即将水浮莲错判为水体的样本数量; TN 为真负类, 即正确判别为水体的样本数量。通过混淆矩阵精度计算, 本研究提出的方法对水体和水浮莲监测的正确率 $A=0.955$ 。对于水浮莲的监测, 45 个水浮莲样本点中, 有 39 个样本点预测正确, 有 6 个样本点被误分为水体, 准确率 $P=0.929$, 召回率 $R=0.867$; 对于水体, 155 个水体样本中, 有 152 个样本点预测正确, 有 3 个水体样本点被误分为水浮莲, $P=0.962$, $R=0.981$ 。

3.2 水浮莲监测结果分析

利用本文方法对 2022 年 3~5 月鉴江流域水浮莲进行遥感监测, 水浮莲面积分别为 571 万、653 万和 348 万 m^2 , 见图 4。

由监测结果可见, 本方法对于大块成片水浮莲的识别结果较好, 对部分狭窄河道和宽阔河道边缘的小片水浮莲均能有效识别。从空间分布上看, 水浮莲主要集中在鉴江干流、袂花江、曹江干流以及水流缓滞的下游河道、沟渠、田间渠道等区域, 尤其在拦河闸坝前、河湾、水库库湾处聚集明显。从时间变化上看, 3~4 月华南地区雨量和温度增加, 水浮莲进入生长繁殖期, 4 月水浮莲分布面积较 3 月有所增长, 流域内水浮莲分布广泛, 常在大型水闸前聚集成片。4 月底至 5 月初在鉴江流域开展了河道“清漂”工作后, 5 月监测结果显示水浮莲分布面积大幅减少, 仅为 4 月的 53%。

进一步分析 2022 年 3~5 月鉴江流域主要河流水浮莲分布及变化见图 5。2022 年 3~5 月鉴江干流水浮莲面积分别为 185 万、266 万和 49 万 m^2 , 与流域整体变化趋势一致, 呈现 4 月增加、5 月急剧减少的趋势。4 月为水浮莲高发期, 鉴江干流水浮莲面积约占全流域水浮莲面积的 41%, 中下游的化州和吴川河段水浮莲最为密集。化州段水浮莲面积为 102.5 万 m^2 , 每公里水浮莲面积(即密度)为 2.5 万 m^2/km ; 吴川段水浮莲面积为 112 万 m^2 , 密度为 2.7 万 m^2/km ; 而上游信宜水浮莲面积同时期仅有 0.1 万 m^2 , 密度为 1 379 m^2/km 。5 月河道内水浮莲显著减少, 化州段密度降至 0.2 万 m^2/km , 吴川段密度降至 0.7 万 m^2/km , 可见“清漂”行动在鉴江干流上成效显著。

罗江水浮莲面积分别为 14.7 万、12.1 万和 2.2 万 m^2 , 同样在 5 月面积急剧减少。水浮莲面积和密度都较同时期鉴江干流小, 绝大多数分布于

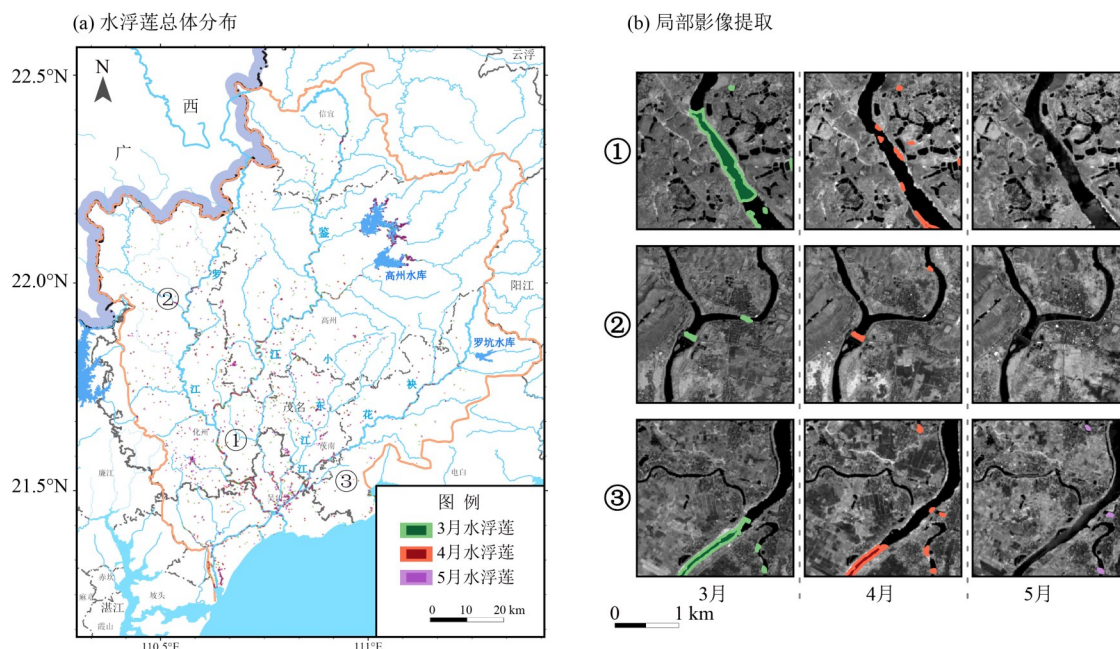


图4 2022年3~5月鉴江流域水浮莲分布及影像提取结果示例

Fig. 4 Distribution and image extraction results of water hyacinth in Jianjiang Basin during March to May, 2022

化州段, 4月罗江化州段水浮莲面积为 11.9万 m^2 , 密度为 $0.1 \text{万 m}^2/\text{km}$ 。

袂花江水浮莲面积分别为 26.2万 、 54.8万 和 6.4万 m^2 , 4月水浮莲面积较3月增长超1倍, 5月又大幅减少约88%。袂花江茂南段水浮莲呈高密度聚集, 2022年4月该段河道水浮莲面积为 23.4万 m^2 , 密度为 $1.4 \text{万 m}^2/\text{km}$ 。同时期吴川段水浮莲面积为 12.6万 m^2 , 密度为 $0.7 \text{万 m}^2/\text{km}$ 。

小东江水浮莲面积分别为 0.2万 m^2 、 0.9万 m^2 和 0.2万 m^2 , 相对其他河水浮莲分布较少。4月小东江水浮莲主要聚集于吴川段末段, 为汇入袂花江河口处(图5)。

本方法利用遥感技术开展水浮莲动态监测及时空分布规律分析, 可为流域水浮莲“清漂”工作提供全面、及时、动态的信息支持, 并为建立区域水浮莲系统治理、联合防控、长效科学的信息化管理机制奠定技术基础。基于本次监测成果, 建议对水浮莲聚集的鉴江、袂花江、罗江干流拦河闸坝前、河湾, 及高州水库库湾处等重点区域进行动态监测及定期清理。

3.3 讨论

以往的研究多采用机器学习分类器构建水浮莲遥感识别模型, 需要大量的水浮莲样本和背景样本对机器学习算法进行训练、验证。本研究基于有限样本数据, 提出一种非监督监测方法。该方法依据像元在过去一段时间内影像特征表现为

水体和植被的时长来判别水浮莲。非水浮莲的水生植被像元往往在特征上与水浮莲像元有较大差别, 即影像特征表现为水体特征的时间相对较短、表现为植被的时间相对较长。本方法虽难以完全避免其他水生植被的干扰, 但将其误判为水浮莲的可能性较低。后续研究将进一步考虑水浮莲物候规律、增加样本数据以支撑方法对比实验, 以提高监测精度。

目前国内还没有根治水浮莲的有效方法, 基本采用人工打捞或打捞船作业, 及时、精准地监测水浮莲分布状况是水浮莲治理的基础。本研究揭示了水浮莲在河道上下游随时间变化的分布特征。将2022年3和4月的水浮莲提取结果转化为点矢量, 并根据面积进行核密度分析, 将高密度区视为水浮莲聚集区。分析结果得出水浮莲在干流聚集区上游的支流、渠道等水体分布, 4月水浮莲分布较3月更为集中, 且聚集区域有较多重合, 鉴江、袂花江干流水浮莲聚集区有随时间扩散至下游区域的趋势。未来可以本方法的监测结果为基础, 在流域范围内构建数字水网模型, 对水浮莲聚集点进行溯源分析, 识别污染源头, 为制定针对性的清漂计划与防治措施提供依据。此外, 控制水浮莲增量, 还是要从排查、管控生活污水排放和农业面源污染治理做起。通过可持续开展鉴江流域乃至华南地区多时相水浮莲及水质遥感监测, 全面掌握水浮莲空间分布特征, 识别污染源头, 实现动

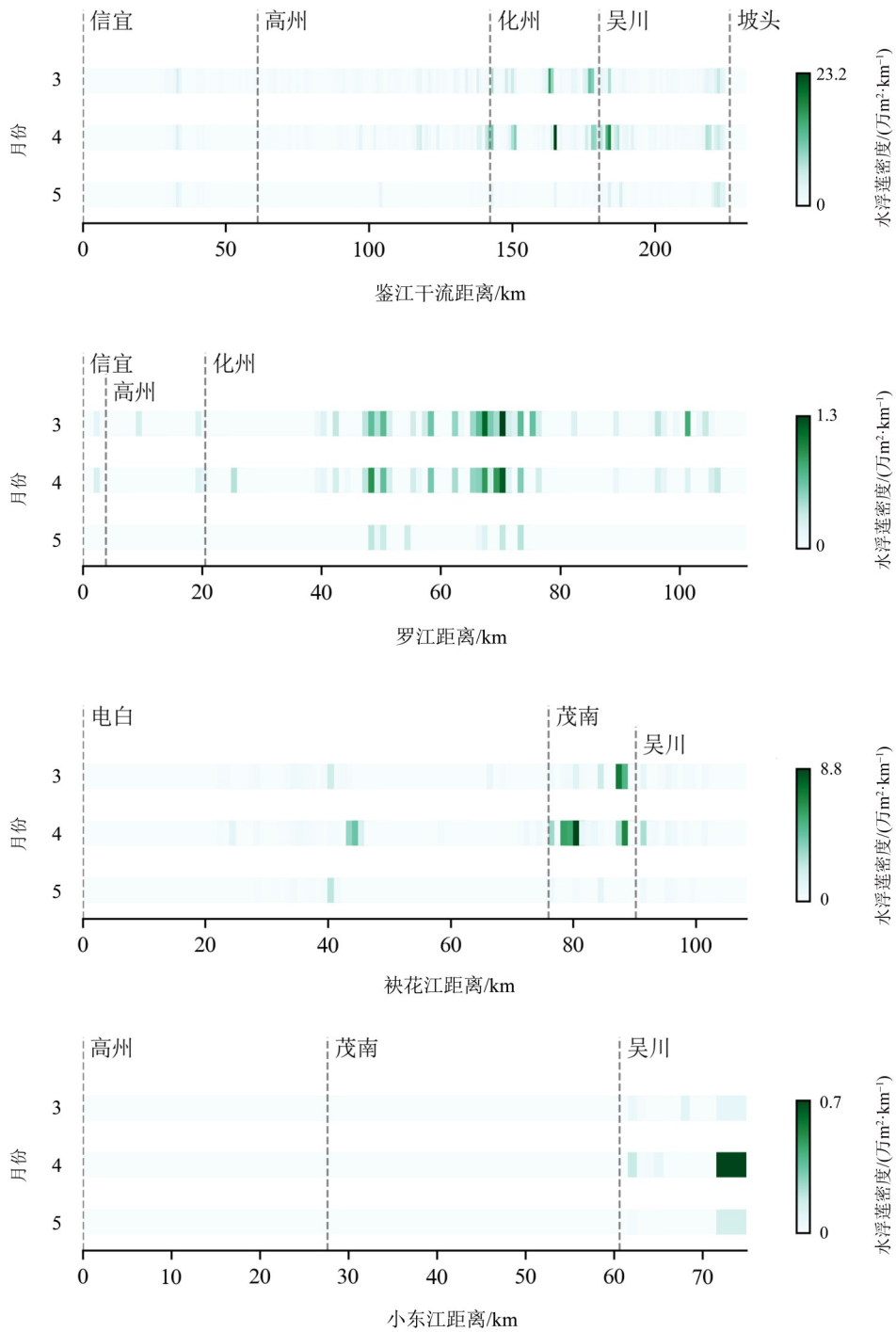


图5 鉴江流域主要河水浮莲密度分布及变化

Fig. 5 Distribution and changes of water hyacinth density in main rivers of Jianjiang Basin

态监管, 从根本上改善水质, 减少水浮莲灾害。

4 结论

开展水浮莲调查、遥感监测和系统治理具有重要的现实意义。本文提出了一种基于地物时空关系的水浮莲遥感监测方法, 在提取植被范围的基础上, 通过计算并比较长时序光学遥感影像中

植被和水体光谱指数的关系变化排除陆生植被影响, 实现水浮莲像元的快速提取, 并以鉴江流域为研究区分析该方法的有效性和区域水浮莲分布特征, 得出以下结论:

- 1) 本方法避免常规方法在单景影像上人工确定NDVI及NDWI阈值的不确定性, 适用于多种常用光学影像, 且无须常规机器学习方法所需的特

征提取、筛选以及监督学习训练等步骤,有效节省计算成本,有助于实现快速、大范围水浮莲监测。与目视解译方法相比,该方法节省了大量的人力和时间成本,不易产生监测盲区。方法验证结果显示,在200个样本点中,本方法的总体精度达95.5%,水浮莲识别的准确率达92.9%,召回率达86.7%,可有效应用于华南地区水浮莲实际监测工作。

2)根据2022年3~5月鉴江流域的水浮莲遥感监测结果,本方法对于大块成片和小块水浮莲的识别效果均良好,满足大范围、精细化水浮莲动态监测和定位的实际应用需求。3~5月鉴江流域主要河流干流水浮莲面积总体先增后减,河道“清

漂”行动显著减少了水浮莲聚集情况。

3)鉴江流域内水浮莲分布广泛,常在主要河流的拦河闸坝前、河湾,水库库湾以及水流缓滞的支流、沟渠等区域聚集,尤其是鉴江和袂花江干流存在多处水浮莲高密度聚集区,在水浮莲治理工作中应重点关注。通过扩大遥感监测范围、缩短监测周期,可减少监管盲区,为水行政主管部门提供高效的监测和管理手段。同时,将遥感监测与人工巡查打捞相结合,进行常态化流域协同清漂治理,可提升水浮莲灾害治理与评估决策的科技水平,形成闭环管理,为河湖长制工作提供有力的科学支撑。

参考文献:

- 何诗瑜,马晓双,吴艳兰,2019.联合多源光学和雷达遥感的巢湖水华长时序时空变化分析[J].环境监测管理与技术,31(5):10-15.
- 黄本胜,陈秋月,邱静,等,2007.有水葫芦的河道水力特性试验研究[C]//第20届全国水动力学研讨会,北京.
- 蒋明,郭云开,朱佳明,等,2019.时序遥感影像滇池凤眼莲时空动态变化分析[J].遥感信息,34(3):43-47.
- 彭力恒,秦雁,黄本胜,等,2022.基于GEE平台的水葫芦灾害监测研究与应用[J].广东水利水电,(5):77-82.
- 秦雁,陈亮雄,杨静学,等,2020.东莞市水葫芦分布遥感动态监测分析[J].广东水利水电,(7):11-15.
- 孙玲,朱泽生,王晶晶,等,2011.基于遥感技术的太湖放养凤眼莲的生长模型[J].生态环境学报,20(4):623-628.
- 王冬梅,吴勇锋,石一凡,等,2023.利用Sentinel-2遥感影像分析水葫芦时空分布规律[J].测绘通报,(6):44-49.
- 王云,龙凤玲,丁艳梅,等,2011.水葫芦生长对水质的影响规律研究[J].安徽农业科学,39(34):21228-21230.
- 王智,张志勇,韩亚平等,2012.滇池湖湾大水域种养水葫芦对水质的影响分析[J].环境工程学报,6(11):3827-3832.
- 徐涵秋,2005.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,(5):589-595.
- 许毅超,2023.基于人工智能算法的河道智能监控预警系统研究及应用[J].水利科技,(4):29-31.
- 杨静学,陈亮雄,李伟添,等,2019.多源卫星遥感数据和水色遥感技术在水库水葫芦覆盖监测中的应用[J].农业与技术,39(3):5-7.
- 张红艳,刘建龙,闵克祥,等,2024.水葫芦的防控现状与对策建议[J/OL].水利发展研究,http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4655.TV.20241022.1050.002.
- DATTA A, MAHARAJ S, PRABHU G N, et al, 2021. Monitoring the spread of water hyacinth (*Pontederia crassipes*): Challenges and future developments [J]. Front Ecol Evol,9: 631338.
- GAURAV G K, MEHMOOD T, CHENG L, et al, 2020. Water hyacinth as a biomass: A review [J]. J Clean Prod, 277: 122214.
- GHOUSSEIN Y, NICOLAS H, HAURY J, et al, 2019. Multitemporal remote sensing based on an FVC reference period using Sentinel-2 for monitoring *Eichhornia crassipes* on a Mediterranean river [J]. Remote Sens, 11(16): 1856.
- MUKARUGWIRO J A, NEWETE S W, ADAM E, et al, 2021. Mapping spatio-temporal variations in water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) coverage on Rwandan water bodies using multispectral imageries [J]. Int J Environ Sci Technol, 18(2): 275-286.
- PÁDUA L, DUARTE L, ANTÃO-GERALDES A M, et al, 2022. Spatio-temporal water hyacinth monitoring in the lower Mondego (Portugal) using remote sensing data [J]. Plants, 11(24): 3465.
- SINGH G, REYNOLDS C, BYRNE M, et al, 2020. A remote sensing method to monitor water, aquatic vegetation, and invasive water hyacinth at national extents [J]. Remote Sens, 12(24): 4021.
- THAMAGA K H, DUBE T, 2019. Understanding seasonal dynamics of invasive water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) in the Greater Letaba river system using Sentinel-2 satellite data [J]. GISci Remote Sens, 56(8): 1355-1377.

(责任编辑 秦社彩)