

引用格式:JIANG Jie, YU Quanzhou, NIU Zhenguo, *et al.* Remote sensing extraction of *Potamogeton crispus* L. in Nansi Lake based on Sentinel-2[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2023, 38(5): 1192–1202. [姜杰, 于泉洲, 牛振国, 等. 基于 Sentinel-2 影像的南四湖菹草群落遥感提取研究[J]. 遥感技术与应用, 2023, 38(5): 1192–1202.]

DOI:10.11873/j.issn.1004-0323.2023.5.1192

基于 Sentinel-2 影像的南四湖菹草群落遥感提取研究

姜 杰^{1,2}, 于泉洲¹, 牛振国³, 梁春玲⁴, 高玉国⁵, 张 玲⁶, 张宏立¹

- (1.聊城大学 地理与环境学院, 山东 聊城 252059;
- 2.河南大学 地理与环境学院, 河南 开封 475004;
- 3.中国科学院空天信息创新研究院 遥感科学国家重点实验室, 北京 100094;
- 4.商丘师范学院 测绘与规划学院, 河南 商丘 476000;
- 5.济宁市南四湖自然保护区服务中心, 山东 济宁 272019;
- 6.济宁市港航事业发展中心任城港航服务站, 山东 济宁 272072)

摘要: 基于 Sentinel-2 遥感数据, 选用最大似然监督分类法、随机森林机器学习分类法和基于时序 NDVI 的物候特征分类法等 3 种方法, 对 2021 年 5 月初南四湖沉水植被(菹草群落)进行提取研究, 利用同期实测的南四湖菹草群落面积和分布数据对 3 种方法的提取精度进行分析, 结合菹草植被覆盖度分析 3 种方法对菹草的提取能力。结果表明:①不同方法提取的南四湖菹草群落总面积存在明显差异。监督分类和随机森林方法提取的 2021 年南四湖菹草群落面积均在 100 km² 以下, 分别为 98.97 km² 和 75.92 km², 基于时序 NDVI 的方法提取面积为 207.44 km², 最接近实地调查的菹草面积。②无论是全湖还是核心区, 监督分类和随机森林法的提取精度均 75% 左右, 平均相对误差(MRE)在 0.5 左右, 平均误差在 20~30 km² 左右, 而基于时序 NDVI 的方法精度在 90% 以上, MRE 和 ME_{area} 也最低。③对比植被覆盖度发现, 监督分类和随机森林方法只能提取到近湖岸的植被覆盖度较高的菹草, 对湖心区覆盖度较低的菹草提取效果差, 而时序 NDVI 的方法对低植被覆盖度菹草群落更敏感, 是菹草遥感提取的有效方法。本研究对于创新沉水植被遥感提取方法和指导湖泊生态环境遥感监测具有一定的参考价值。

关 键 词: 南四湖; 植被覆盖度; 遥感提取; 菹草群落; Sentinel-2

中图分类号: Q941; TP75 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2023)05-1192-11

1 引 言

湖泊是人类重要的淡水资源库、洪水调蓄库和物种基因库, 然而湖泊富营养化普遍威胁着饮用水安全和水产养殖业的发展^[1-3]。菹草(*Potamogeton*

crispus L.) 是一种常见耐污性沉水植物, 大规模的菹草衰亡时将体内大量的营养盐返还给水体, 同时消耗水中大量溶解氧, 导致严重的水体富营养化和生态环境风险^[4]。近年来连通南水北调东线的南四湖、骆马湖、东平湖内菹草大量繁殖, 爆发性疯长和

收稿日期: 2022-05-15; 修订日期: 2023-08-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(31800367), 山东省自然科学基金项目(ZR2023MD129), 河南省高等学校青年骨干教师培养计划资助项目(2021GGJS134)。

作者简介: 姜 杰(1998—), 女, 山东武城人, 博士研究生, 主要从事湿地遥感研究。E-mail: jiangjie1592020@163.com

通讯作者: 于泉洲(1983—), 男, 山东济南人, 博士, 硕士生导师, 主要从事湿地遥感研究。E-mail: yuquanzhou2008@126.com

快速腐烂衰败,造成湖泊河道阻塞、鱼类死亡、水质污染等问题^[5-7],严重威胁湖泊生态环境和南水北调水质安全,亟待解决。

菹草时空特征监测是进行治理的关键一步,对于摸清湖区菹草总量和时空分布规律具有重要作用,对于整个湖泊环境保护和南水北调输水安全也具有重要意义。水生植被的传统监测手段主要依赖实地调查,但这种方法费时费力,且对于可达性差的湖泊湿地区域不易开展。当前,遥感技术已经成为生态环境监测的有力手段并得到广泛应用^[8],其中利用遥感技术监测水生植物的研究已有很多,如 Armstrong^[9]利用地面光谱观测结合 Landsat TM 可见光波段,监测了巴哈马地区近海海草(*Thalassia testudinum*)的地上生物量。Santos 等^[10]通过多期遥感数据对美国圣华金河河口三角洲入侵沉水植物群落进行空间识别。Yuan 等^[11]研究了上海苏州河沉水植物旋叶苦草(*Vallisneria spiralis*)群落光谱对生物量变化的响应特征,并指出利用多光谱遥感数据对苦草群落进行区域反演的可行性。侍昊等^[12]以 Landsat 8 遥感数据为基础,利用光谱指数及图像变换方法构建特征变量,采用随机森林分类模型提取了太湖沉水植被的空间分布信息。但由于沉水植物的光谱受水体影响较大^[13],而且沉水植物往往具有相似生活型,常见的遥感分类方法往往难以有效加以区分。

同时,传统的监督分类方法,机器学习方法(如随机森林)及基于 NDVI 时序的物候分类方法在菹草遥感提取中效果的差异还不清楚。且由于 Sentinel-2 数据出现较晚,目前基于 Sentinel-2 数据开展的湿地植被遥感分类还较少, Sentinel-2 数据相比 Landsat 数据具有空间分辨率高、波段相对多等新特征,对于识别植物更有优势,其对于菹草遥感的表现也需要予以揭示。

因此,为明确不同遥感分类方法在沉水植被中提取结果的差异,以南水北调调蓄湖泊的南四湖为研究试验区,基于 Sentinel-2 数据源,采用传统遥感监督分类方法、随机森林机器学习方法和基于时序 NDVI 的物候分类方法,分别提取 2021 年 5 月初南四湖的菹草群落,并利用实地调查数据验证,分析各种方法的提取精度和特点,以揭示不同分类方法在菹草群落遥感监测方面的优劣,并明确 Sentinel-2 遥感数据在提取沉水植被中的效果,为湖泊水环境遥感监测提供一定的科学和技术支撑。

2 数据与研究方法

2.1 研究区概况

南四湖,是微山湖、昭阳湖、独山湖、南阳湖等 4 个相连湖的总称,湖区整体位于山东省西南部济宁市微山县。南四湖面积约 1 266 km²,是华北第一大湖,也是中国十大淡水湖泊之一。该湖属富营养型湖泊,自然资源丰富,盛产鱼、虾、苇、莲等多种水生动植物,是山东省最重要的淡水渔业基地。沿湖工农业发达,工业以煤炭、电力为主;农业以种植小麦、玉米、水稻、大豆、棉花等粮油经济作物为主,是鲁西南的鱼米之乡。

南四湖属河迹洼地型湖泊,湖底浅平,平均水深 1.5 m^[14],水质肥沃,水草繁茂,分布着大量的芦苇荡和荷田^[15],是典型的浅水草型湖泊。近年来,南四湖污染性水草——菹草爆发性生长,在每年 5 月中上旬泛滥湖区。尤其在近两年来实施了压缩湖区网箱养殖政策及限制渔业政策之后,敞水面的释放及以菹草为食物来源之一的养殖鱼虾蟹类减少更为菹草泛滥提供了良好的水域环境,使得菹草在每年 5 月初成为南四湖沉水植物区的唯一优势种。菹草在 6 月中旬迅速腐烂导致水质污染严重,对湖泊湿地水环境和南水北调东线输水水质安全造成较大的威胁^[16]。

2.2 研究数据

2.2.1 Sentinel-2 数据

Sentinel-2 卫星是欧空局(ESA)哥白尼计划中发射的一组极轨多光谱高分辨率成像卫星,其搭载的 MSI 传感器延续并扩展了 Landsat 系列卫星和 SPOT 系列卫星的对地观测任务^[17]。卫星 2015 年和 2017 年发射以来,在诸如植被监测、水体污染监测、土地覆被变化遥感和自然灾害监测等领域得到了广泛的应用。Sentinel-2 数据来源包括 Sentinel-2A 和 Sentinel-2B 卫星,其空间分辨率在不同波段为 10 m、20 m 和 60 m,时间分辨率为 5 d。各波段信息如表 1 所示。

以覆盖南四湖地区的 2021 年 5 月 9 日和 6 月 23 日的 Sentinel-2 数据开展研究,一方面检测 Sentinel-2 数据在湖泊湿地沉水植被遥感提取中的表现,另一方面对比不同遥感分类方法应用于 Sentinel-2 数据进行沉水植被提取的效果。

2.2.2 实地菹草调查数据

南四湖自然保护区在 2021 年 5 月初对菹草分布进行实地调查,上级湖菹草面积调查结果

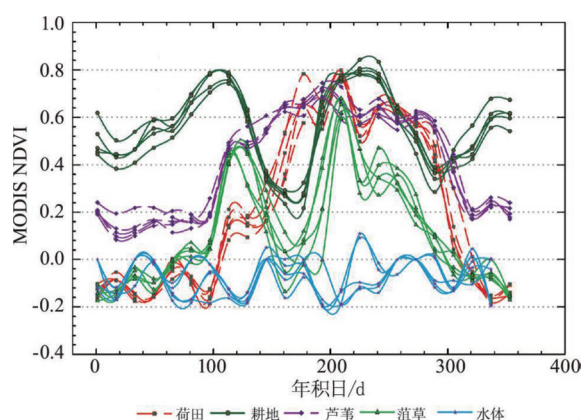
图2 南四湖主要地物类型的NDVI时序特征^[24]

Fig.2 NDVI time-series curves of typical objects in Nansi Lake

2.3.4 精度评价方法

选取分类生产者精度、区域提取面积与实测面积的相关系数、以及平均误差(ME_{area})和平均相对误差(MRE)等参数作为评价菹草遥感提取方法的指标。

$$\text{生产者精度} = A/D \quad (4)$$

其中: A 为影像正确分为菹草类的像元数; D 为菹草

真实参考总数(混淆矩阵中菹草列的总和)。

$$ME_{area} = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n |Y_i - y_i| \quad (4)$$

$$MRE = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n \frac{|Y_i - y_i|}{Y_i} \times 100\% \quad (4)$$

其中: n 为实测样本区域个数; Y_i 为第*i*块调查区域的菹草实测面积; y_i 为某遥感分类方法提取的第*i*块调查区域内的菹草面积。

2.3.5 植被覆盖度计算方法

植被覆盖度(FVC)是表征地表植被覆盖程度的重要指标^[26]。研究采用像元二分模型^[27-28]计算FVC。基于像元二分模型,可在NDVI数据基础上,通过反演模型计算得到FVC^[29],计算公式为:

$$FVC = (NDVI - NDVI_{soil}) / (NDVI_{veg} - NDVI_{soil}) \quad (4)$$

式中:FVC为植被覆盖度;NDVI为某像元NDVI值; $NDVI_{soil}$ 为完全是裸土或无植被覆盖区域的NDVI值; $NDVI_{veg}$ 为完全被植被所覆盖的像元的NDVI值。首先计算研究区整幅影像的NDVI值及频率累积值,根据频率累积表确定 $NDVI_{soil}$ 和 $NDVI_{veg}$ 。根据相关文献^[30]及研究区具体情况,本文取菹草分布

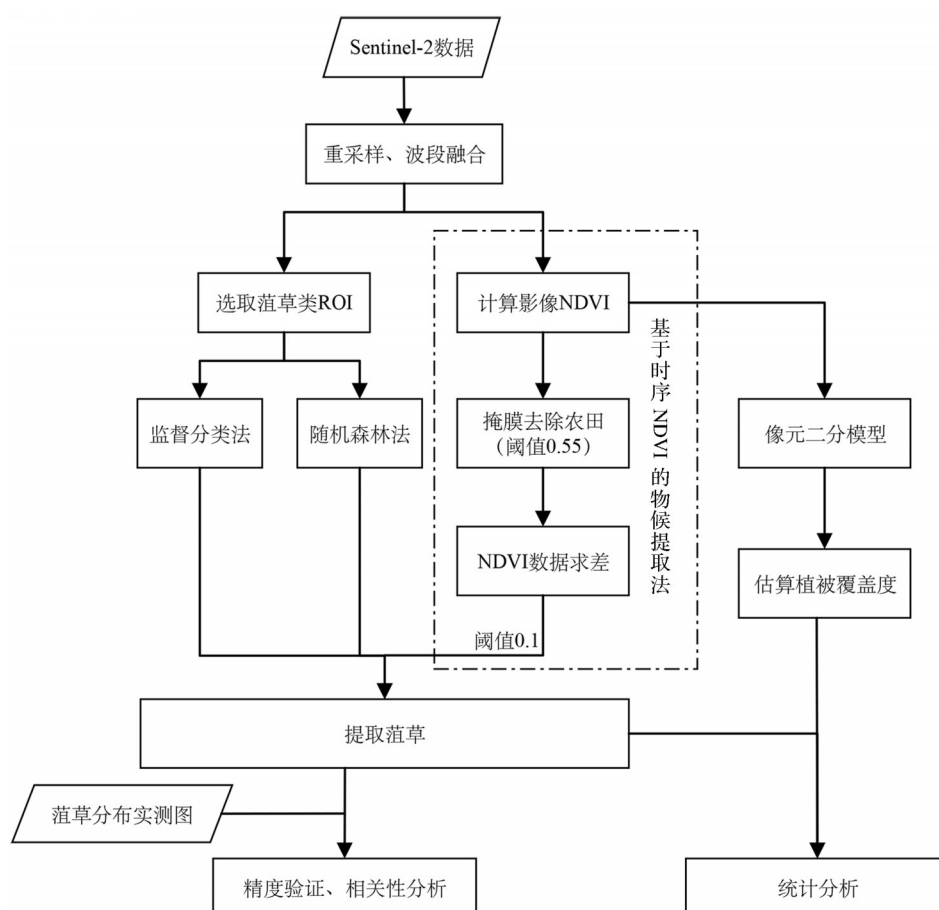


图3 研究技术路线

Fig.3 Study flowchart

的核心区域频率为 5% 的 NDVI 值为 $NDVI_{soil}$; 频率为 90% 的 NDVI 值为 $NDVI_{veg}$ 。

3 结果与分析

3.1 不同方法对菹草的提取结果

不同方法对菹草群落提取结果有所不同, 其中监督分类法和随机森林法的提取结果较相似, 且与时序 NDVI 方法的提取结果差别较大。3 种遥感提取方法对南四湖菹草群落提取的面积如表 2 所示, 提取的菹草空间分布如图 4 所示。

利用目视解译加判读的方法, 选取研究区中菹草分布的训练样本 264 个, 基于最大似然分类器对 5

月 9 日遥感影像进行监督分类, 得到全湖区域菹草面积为 98.97 km^2 , 其中核心区域面积有 78.59 km^2 , 主要分布在下级湖, 尤其是微山岛以南的近湖岸区域(图 4(a), 图 4(b))。利用随机森林分类方法结合以上菹草的训练样本进行分类提取, 得到的结果如图 4(c), 图 4(d) 所示, 全湖区域菹草面积为 75.92 km^2 , 其中核心区域面积只有 61.57 km^2 , 较监督分类方法提取的面积偏少。时序 NDVI 方法提取的菹草面积达 207.44 km^2 , 其中核心区域面积有 145.64 km^2 (图 4(e), 图 4(f)), 是其他提取方法的两倍以上, 差异显著。同时, 时序 NDVI 方法提取的全湖菹草群落面积更接近同期实地调查的面积 (254.39 km^2)。

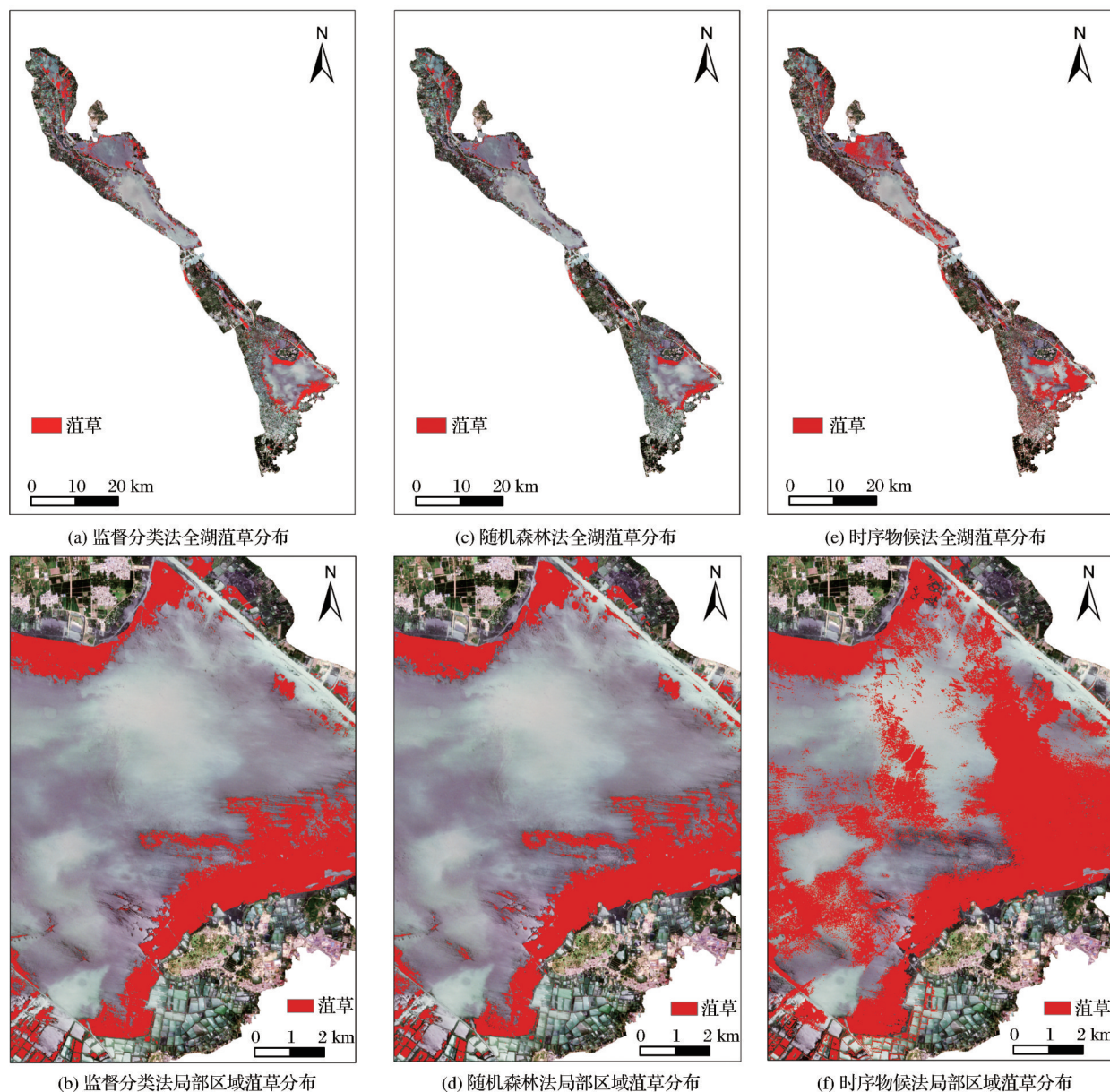


图 4 不同方法在全湖和微山湖局部的提取结果

Fig.4 Extraction results in whole lake and part of Weishan Lake using different methods

表2 不同方法的菹草面积提取结果

Table 2 Extraction results of *Potamogeton crispus* L. area by different methods

分类方法	全湖区域/km ²	核心区域/km ²
监督分类	98.97	78.59
随机森林	75.92	61.57
时序 NDVI	207.44	145.64
实测面积	254.39	236.44

时序 NDVI 方法提取结果显示,在独山湖南部、昭阳湖南部和微山湖南部的湖心区域内有明显的菹草分布,这说明此方法在菹草与水体混合的区域有更好的提取效果。

3.2 不同方法的精度评价

结合实测调查数据,采用生产者精度、调查区域的平均误差(ME_{area})和平均相对误差(MRE)3个指标分析3种方法在提取南四湖菹草群落方面的精度和效果。

由于本研究只提取一种地物,因此仅采用生产者精度进行评价,即将整个影像正确分为菹草的像元数与菹草真实参考总数(混淆矩阵中菹草列的总和)相除。从生产者精度而言,时序 NDVI 方法的精度最高,全湖区域提取精度为 94.85%,核心区域为 94.19%,差别不大;监督分类法和随机森林分类法的精度相近,不同区域的提取精度都在 75% 左右,明显低于时序 NDVI 方法。

从 ME_{area} 和 MRE 看,对比 27 个调查区域的菹草面积,时序 NDVI 方法的提取全湖结果的 MRE 为 0.328,显著低于监督分类方法的 0.446 和随机森林方法的 0.458。同时,时序方法提取结果的 ME_{area} 在全湖只有 11.02 km²,在湖泊核心区为 25.45 km²,其分类误差均显著低于其他两种分类方法的结果。

另外,将提取出的面积与 27 个区域的实测面积数据进行相关分析(图 5)。分析结果显示,各种方法提取面积与实测面积相关性均较高,可决系数(R^2)均在 0.9 左右。3 种分类方法在南四湖核心区的提取结果的 R^2 值均高于其在全湖提取的 R^2 值,

而且时序 NDVI 方法结果的 R^2 值要高于其他两种方法, R^2 达到 0.991。但值得注意的是,从图 5 中各拟合方程的斜率看,全部遥感方法提取的结果普遍低估了菹草实际的面积。

综合分析 3 种遥感分类方法,效果最优的为基于时序 NDVI 的物候提取法,而监督分类法和随机森林法效果一般。而且相对于传统监督分类方法,随机森林方法对菹草提取精度并没有明显提升。

3.3 精度差异的原因分析

对比发现,3 种方法都能提取到近湖岸区域的菹草群落,即在近湖岸区域提取效果较一致;但 3 种方法在靠近湖心的区域提取存在明显差异,时序 NDVI 方法能够提取到湖心区大面积的菹草群落,而监督分类法和随机森林法很难提取到湖心区域的菹草群落。另外,监督分类法和随机森林法提取的部分菹草为其他水生植物的误分类结果。

考虑到水体对菹草提取的影响,研究计算了 5 月 9 日全湖的植被覆盖度,并按照植被覆盖的不同程度,将 FVC 进行分级显示,3 种遥感分类方法提取的菹草区域植被覆盖度如图 6 所示。在图中可以看出,时序物候提取法对菹草在湖面的植被覆盖度变化敏感,更易识别沉水区域的菹草,而监督分类法和随机森林提取法很难识别植被覆盖度较低的菹草,在离岸边较近的地区提取效果也相似。

同时对 3 种方法提取的菹草区域的植被覆盖度进行了统计分析,得到各方法提取的菹草的 FVC 均值及标准差(图 7)。就全湖区域而言,随机森林法提取的菹草 FVC 均值最高(0.27)且标准差最小(0.18),而监督分类法和时序 NDVI 方法提取的菹草 FVC 均值略低且相当(约为 0.23),并且时序 NDVI 法提取的 FVC 标准差最大(0.22)。对于核心区域而言,更能体现上述特征,尤其是时序 NDVI 法提取的菹草区域 FVC 的均值最低(0.18),标准差最大(0.21)。这有力地说明,3 种方法在提取菹草时,对于菹草识别的敏感度是不同的。在较低植被覆盖即混合较大比例水体的区域,时序 NDVI 法对于菹草群落的提取效果最好,而其他两种方法在低植被覆盖区域很难提取到菹草,且存在明显的误分类现象。

精度差异的原因可能是,时序 NDVI 方法通过设定菹草的关键物候期 NDVI 差值的阈限,可以有效调节不同植被覆盖度水平的菹草群落提取效果,而随机森林和监督分类方法只能通过训练样本的选择进行分类,而沉水植物的水—草混合现象很普遍也很严重,因此训练样本本身很难区分水域中低植被覆盖度的菹草群落和敞水面,训练样本的选取不当或会造成水域被大量误分为菹草群落,或会造成低植被覆盖度的菹草群落被误分成水体。同时,由于训练样本对菹草的可分度较低,导致与菹草具有相近光谱特征的沉水植被也被误分为菹草群落,也导致了分类精度的下降。

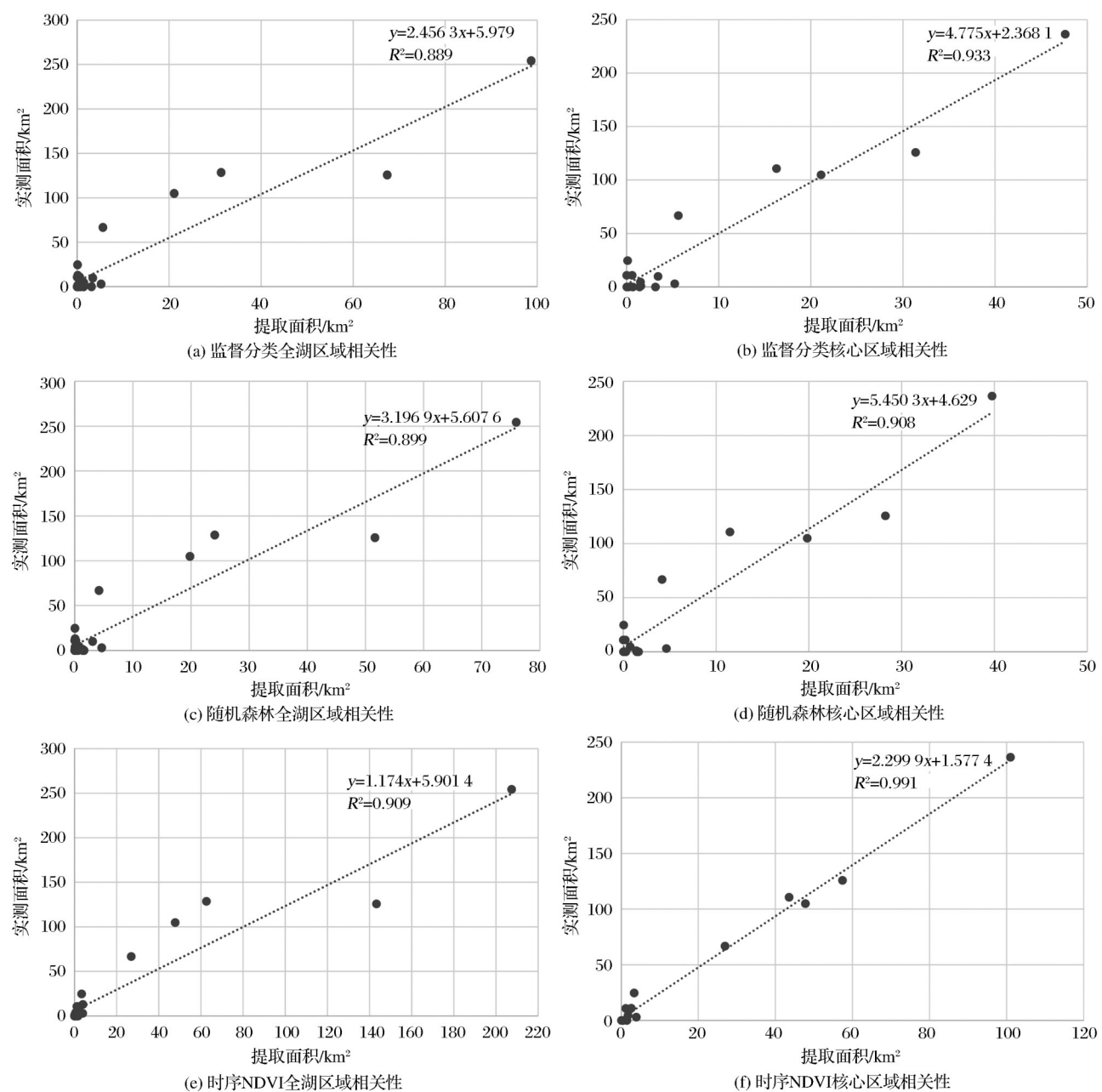


图 5 不同方法的提取面积与实测面积的对比

Fig.5 Comparison between measurements and extraction values of *Potamogeton crispus* L. area

表 3 不同提取方法的精度对比

Table 3 Comparison of the accuracy of different extraction methods

分类方法	区域/km ²	生产者精度	MRE	ME _{area} /km ²
监督分类	全湖	75.78%	0.446 0	19.99
	核心	73.46%	0.547 8	34.56
随机森林	全湖	74.82%	0.458 4	21.74
	核心	72.67%	0.535 0	37.21
时序 NDVI	全湖	94.85%	0.328 1	11.02
	核心	94.19%	0.425 3	25.46

4 结 语

(1)对于湿地沉水植被菹草的遥感提取方法，以基于物候特征的时序 NDVI 提取方法效果最优，机器学习(随机森林)和监督分类的方法效果一般，且机器学习的方法相比普通监督分类在菹草群落提取精度方面没有明显的提升。对于南四湖实验区而言，时序 NDVI 方法提取菹草面积为 207.44 km²，最接近实测数据，其生产者精度为 94.85%，平均相对误差为 0.33，均高于随机森林方法和普通监督分类方法，对菹草的提取效果最好。

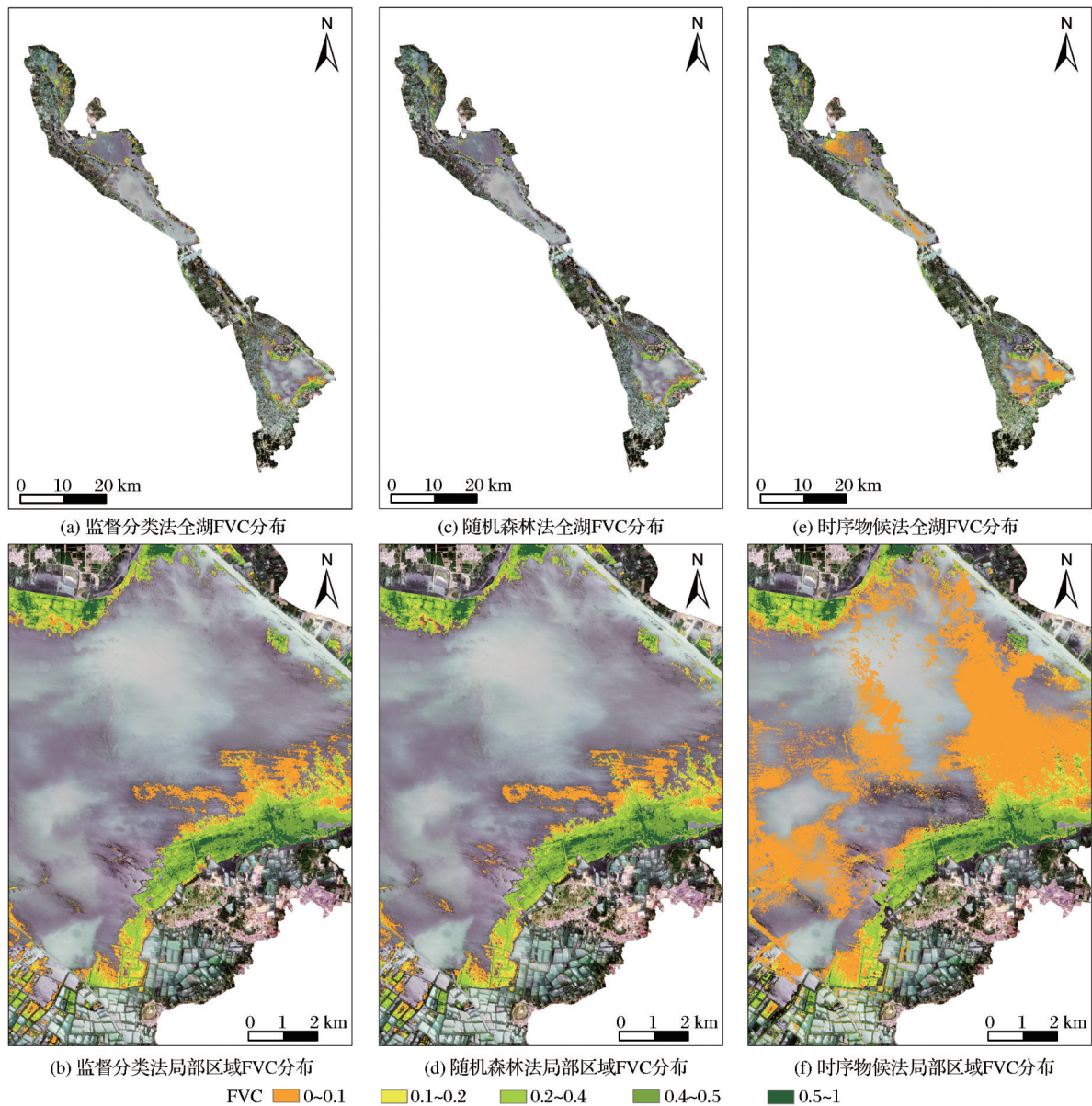


图 6 不同方法提取的菹草区域的 FVC 分布

Fig.6 FVC distribution in the *Potamogeton crispus* L. region extracted by different methods

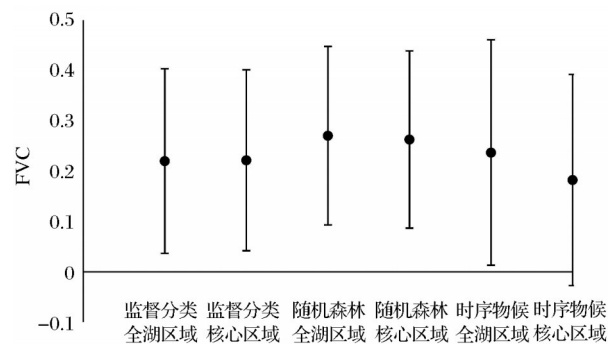


图 7 不同方法提取的不同区域菹草群落 FVC 统计

Fig.7 FVC statistics of *Potamogeton crispus* in different regions extracted by different methods

(2)不同方法提取的菹草植被覆盖度不相同。随机森林和监督分类方法提取的菹草 FVC 均值较高,标准差较小,时序 NDVI 方法提取的菹草 FVC 均值较低,标准差较大。这说明随机森林和监督分类的方法仅能够提取靠近湖岸区域高植被覆盖度(一般大于 40%)的菹草群落,无法有效提取湖心区域的低植被覆盖度(小于 20%)的菹草群落,而时序 NDVI 方法能够提取的菹草 FVC 具有更宽幅度,可以有效提取全湖的菹草。

(3)从精度误差及实测数据相关性来看,利用不同时相的 Sentinel-2 遥感数据光谱反射率差异可以较准确提取菹草面积,更加明确了 Sentinel-2 数

据在提取沉水植被中的效果。

总体而言,在菹草群落遥感识别方面,基于时序NDVI的物候方法的表现明显优于监督分类法和随机森林法。时序NDVI方法提取的关键在于确定物候关键期的NDVI差值的阈值,一般取0.1,这个阈值具有通用性和鲁棒性;而其他两种方法提取的关键在于选取合适的训练样本,但对于沉水植物而言,水体的影响导致典型的训练样本难以准确确定,而且不同类型的遥感数据或不同时相的遥感数据训练样本选择会有所不同,这都增加了菹草提取的难度。随着多源遥感数据的日益广泛应用,高密度时间序列遥感数据将变得更易获取,这给基于物候的时序NDVI菹草提取方法提供了更广阔的应用空间。

致谢:感谢欧洲空间局提供了Sentinel-2A/B遥感数据;感谢南四湖自然保护区提供了菹草群落实地调查数据!

参考文献(References):

- [1] SMITH V H, DAVID W S. Eutrophication science: Where do we go from here? [J]. Trends in Ecology and Evolution, 2009, 24(4): 201-207. DOI: 10.1016/j.tree.2008.11.009
- [2] YANG Guishan, MA Ronghua, ZHANG Lu, *et al.* Lake status, major problems and protection strategy in China[J]. Journal of Lake Science, 2010, 22(6): 799-810.[杨桂山, 马荣华, 张路, 等. 中国湖泊现状及面临的重大问题与保护策略[J]. 湖泊科学, 2010, 22(6): 799-810.]
- [3] GU Xiaohong, MAO Zhigang, DING Huiping, *et al.* Progress and prospect of lake fishery in China [J]. Journal of Lake Science, 2018, 30(1): 1-14.[谷孝鸿, 毛志刚, 丁慧萍, 等. 湖泊渔业研究: 进展与展望[J]. 湖泊科学, 2018, 30(1): 1-14.]
- [4] REN Jiuchang, QIAO Jianrong, DONG Wei, *et al.* Study on ecological habits of *Potamogeton crispus* and its growth in Jing-Mi canal, Beijing [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 1997, 33(6): 72-78.[任久长, 乔建荣, 董巍, 等. 菹草(*Potamogeton crispus*)的生态习性和在京密引水渠的发生规律研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 1997, 33(6): 72-78.]
- [5] ZHANG Jinlu, DUAN Dengxuan X, WANG Zhizhong, *et al.* The hazard of *Potamogeton crispus* decline in Dongping Lake and its control measures [J]. Environmental Study and Monitoring, 2009(2): 31-33.[张金路, 段登选, 王志忠. 东平湖菹草大面积衰亡的危害及防治对策[J]. 环境研究与监测, 2009(2): 31-33.]
- [6] ZHANG Ju, DENG Huanguang, WU Aiqin, *et al.* Decomposition of *Potamogeton crispus* and its effect on the aquatic environment of Dongping Lake [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, 33(9): 2590-2596.[张菊, 邓焕广, 吴爱琴, 等. 东平湖菹草腐烂分解及其对水环境的影响[J]. 环境科学学报, 2013, 33(9): 2590-2596.]
- [7] HUA Zulin, ZHU Xiang, SHEN Jian, *et al.* Response of water quality to different growth periods of *Potamogeton crispus* in Luoma Lake [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(2): 25-31.[华祖林, 朱翔, 沈健, 等. 骆马湖水质对菹草不同生长期的响应研究[J]. 水资源保护, 2019, 35(2): 25-31.]
- [8] GAO Jixi, ZHAO Shaohua, HOU Peng. Advances of remote sensing on ecology and environment in China [J]. Journal of Geo-Information Science, 2020, 22(4): 705-719.[高吉喜, 赵少华, 侯鹏. 中国生态环境遥感四十年[J]. 地球信息科学学报, 2020, 22(4): 705-719.]
- [9] ARMSTRONG R A. Remote sensing of submerged vegetation canopies for biomass estimation [J]. International Journal of Remote Sensing, 1993, 14(3): 621-628. DOI: 10.1080/01431169308904363
- [10] SANTOS M J, KHANNA S, Hestir E L, *et al.* Measuring landscape-scale spread and persistence of an invaded submerged plant community from airborne remote sensing [J]. Ecological Applications, 2016, 26(6): 1733-1744. DOI: 10.1890/15-0615
- [11] YUAN L, ZHANG L Q. The spectral responses of a submerged plant *Vallisneria spiralis* with varying biomass using spectroradiometer [J]. Hydrobiologia, 2007, 579(1): 291-299. DOI:10.1007/s10750-006-0444-1
- [12] SHI Hao, LI Xuwen, NIU Zhichun, *et al.* Remote sensing information extraction of aquatic vegetation in Lake Taihu based on Random Forest Model [J]. Journal of Lake Science, 2016, 28(3): 635-644.[侍昊, 李旭文, 牛志春, 等. 基于随机森林模型的太湖水生植被遥感信息提取[J]. 湖泊科学, 2016, 28(3): 635-644.]
- [13] JAKUBAUSKAS M, KINDSCHER K, Fraser A, *et al.* Close-range remote sensing of aquatic macrophyte vegetation cover [J]. International Journal of Remote Sensing, 2000, 21(18): 3533-3538.
- [14] YU Quanzhou, ZHANG Zulu, GAO Bin, *et al.* Study on the changes of landscape pattern in Nansihu wetland based on RS and FRAGSTATS [J]. Forest Resources Management, 2013(1): 108-115.[于泉洲, 张祖陆, 高宾, 等. 基于RS和FRAGSTATS的南四湖湿地景观格局演变研究[J]. 林业资源管理, 2013(1): 108-115.]
- [15] YU Quanzhou, ZHANG Zulu, YUAN Yi. Preliminary study in wetland vegetation and its carbon storage of Nansihu lake in Shandong Province [J]. Yunnan Geographic Environment Research, 2010, 27(5): 88-93.[于泉洲, 张祖陆, 袁怡. 山东省

- 南四湖湿地植被碳储量初步研究[J]. 云南地理环境研究, 2010, 27(5):88-93.]
- [16] LIANG Lili, YU Quanzhou, DENG Huanguang, *et al.* Spatio-temporal pattern of *Potamogeton crispus* L. in Lake Dongping based on NDVI time series [J]. Journal of Lake Science, 2019, 31(2):529-538.[梁莉莉, 于泉洲, 邓焕广, 等. 基于时序 NDVI 的东平湖菹草(*Potamogeton crispus* L.)遥感提取及时空格局[J]. 湖泊科学, 2019, 31(2):529-538.]
- [17] TIAN Yin, CHEN Zhuoqi, HUI Fengming, *et al.* ESA Sentinel-2A/B satellite: Characteristics and applications[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science Edition), 2019, 55(1):57-65.[田颖, 陈卓奇, 惠凤鸣, 等. 欧空局哨兵卫星 Sentinel-2A/B 数据特征及应用前景分析[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2019, 55(1):57-65.]
- [18] European Space Agency. Sentinel-2 user handbook [EB/OL]. (2015-07-24) [2018-03-02]. https://sentinel.esa.int/documents/247904/685211/Sentinel-2_User_Handbook.
- [19] LI Xiaohui, WANG Hong, LI Xiaobing, *et al.* Study on crops remote sensing classification based on multi-temporal Landsat-8 OLI images [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2019, 34(2):389-397.[李晓慧, 王宏, 李晓兵, 等. 基于多时相 Landsat-8 OLI 影像的农作物遥感分类研究[J]. 遥感技术与应用, 2019, 34(2):389-397.]
- [20] LI Henkai, WANG Lijuan, XIAO Songsong. Random forest classification of land use in hilly and mountainous areas of southern China using multi-source remote sensing data [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(7):244-251.[李恒凯, 王利娟, 肖松松. 基于多源数据的南方丘陵山地土地利用随机森林分类[J]. 农业工程学报, 2021, 37(7):244-251.]
- [21] HOU Mengjing, YIN Jianpeng, GE Jing, *et al.* Land cover remote sensing classification method of alpine wetland region based on random forest algorithm [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(7):220-227.[侯蒙京, 殷建鹏, 葛静, 等. 基于随机森林的高寒湿地地区土地覆盖遥感分类方法[J]. 农业机械学报, 2020, 51(7):220-227.]
- [22] LIU Mingxing, LIU Jianhong, MA Minfei, *et al.* Monitoring of *Zanthoxylum bungeanum* Maxim planting using GF-2 PMS images and the random forest algorithm: A case study of Linxia, Gansu Province [J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2022, 34(1):218-229.[柳明星, 刘建红, 马敏飞, 等. 基于 GF-2 PMS 影像和随机森林的甘肃临夏花椒种植监测[J]. 自然资源遥感, 2022, 34(1):218-229.]
- [23] GUO Yushan, LIU Qingsheng, LIU Gaohuan, *et al.* Extraction of main crops in Yellow River delta based on MODIS NDVI time series [J]. Journal of Natural Resources, 2017, 32(10):1808-1818.[郭昱杉, 刘庆生, 刘高焕, 等. 基于 MODIS 时序 NDVI 主要农作物种植信息提取研究[J]. 自然资源学报, 2017, 32(10):1808-1818.]
- [24] JIAO Yinhe, YU Quanzhou, LIU Enfeng, *et al.* The characteristics of and causes to spatiotemporal evolution *Potamogeton crispus* L. community in Nansi Lake based on remote sensing data [J]. Forest Resources Management, 2020(1):70-78, 91.[焦银合, 于泉洲, 刘恩峰, 等. 基于遥感的南四湖菹草群落时空演变特征及其原因分析[J]. 林业资源管理, 2020(1):70-78, 91.]
- [25] KE Han. Research on relationship among submerged, floating plant community structure and water environmental factors [D]. Ji'nan: Shandong University, 2014.[客涵. 南四湖沉水、浮叶植物群落结构与水环境因子相关研究[D]. 济南: 山东大学, 2014.]
- [26] GAO Yonggang, XU Hanqiu. Estimation of multi-scale urban vegetation coverage based on multi-source remote sensing images [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2017, 36(2):225-234.[高永刚, 徐涵秋. 基于多源遥感影像的多尺度城市植被覆盖度估算[J]. 红外与毫米波学报, 2017, 36(2):225-234.]
- [27] PI Xinyu, ZENG Yongnian, HE Chengqiang. High-resolution urban vegetation coverage estimation based on multi-source remote sensing data fusion [J]. National Remote Sensing Bulletin, 2021, 25(6):1216-1226.[皮新宇, 曾永年, 贺城墙. 融合多源遥感数据的高分辨率城市植被覆盖度估算[J]. 遥感学报, 2021, 25(6):1216-1226.]
- [28] GAO L, WANG X F, JOHNSON B A, *et al.* Remote sensing algorithms for estimation of fractional vegetation cover using pure vegetation index values: A review[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2020, 159:364-377. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2019.11.018
- [29] YI S H, ZHOU Z Y, REN S L, *et al.* Effects of permafrost degradation on alpine grassland in a semi-arid basin on the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Environmental Research Letters, 2011, 6(4):045403. DOI: 10.1088/1748-9326/6/4/045403
- [30] SONG W J, MU X H, RUAN G Y, *et al.* Estimating fractional vegetation cover and the vegetation index of bare soil and highly dense vegetation with a physically based method[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2017, 58:168-176. DOI: 10.1016/j.jag.2017.01.015

Remote Sensing Extraction of *Potamogeton crispus* L. in Nansi Lake based on Sentinel-2

JIANG Jie^{1,2}, YU Quanzhou¹, NIU Zhenguo³, LIANG Chunling⁴,
GAO Yuguo⁵, ZHANG Ling⁶, ZHANG Hongli¹

(1.School of Geography and Environment, Liaocheng University, Liaocheng 252059, China;

2.College of Geography and Environmental Science, Henan University, Kaifeng 475004, China;

3.Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

4.Department of Surveying and Planning, Shangqiu Normal University, Shangqiu, 476000, China;

5.Nansi Lake Nature Reserve Service Center, Jining 272019, China;

6.Jining Port and Navigation Development Center, Rencheng Port and Navigation Service Station, Jining 272072, China)

Abstract: Based on Sentinel-2 remote sensing data, we selected three methods, including Supervised Classification (Maximum Likelihood Classification), Machine Learning Classification (Random Forest Classification) and Phenological Feature Classification based on time-series NDVI, to extract *Potamogeton crispus* L. community in Nansi Lake in early May 2021. By using the measured area and distribution data of the *Potamogeton crispus* L. community in Nansi Lake, we analyzed the classification accuracy of the three methods during the same period, and analyzed the extraction effects of the three methods for *Potamogeton crispus* L. in combination with the Fractional Vegetation Cover (FVC). The results showed that (1) there was a significant difference in the total area of the *Potamogeton crispus* L. extracted by three methods. The areas of the *Potamogeton crispus* L. community extracted by both Supervised Classification and Random Forest Classification were less than 100 km², which were 98.97 km² and 75.92 km² respectively. While the area extracted by the time-series NDVI method was 207.44 km², which was closest to the measured area of *Potamogeton crispus* L. (2) Both the whole lake and the core area, the extraction accuracy of Supervised Classification and Random Forest Classification was just about 75%, the Mean Relative Error (MRE) was about 0.5, and Mean Error (ME_{area}) was about 20~30 km², while the accuracy of the time-series NDVI method was above 90% and the MRE and ME_{area} were also the lowest. (3) Comparing the fractional vegetation cover, we found that Supervised Classification and Random Forest Classification could only extract the *Potamogeton crispus* L. with high fractional vegetation cover near the lake shore and poorly with low cover in the lake core area, while the time-series NDVI method was more sensitive to the low fractional vegetation cover *Potamogeton crispus* L. community and could extract it well in different areas of the whole lake, which is a potential method for *Potamogeton crispus* L. remote sensing extraction. This study has some theoretical value for innovative remote sensing extraction methods of submerged vegetation and guiding remote sensing monitoring of lake ecological environment.

Key words: Nansi Lake; Fractional vegetation cover; Remote sensing extraction; *Potamogeton crispus* L. community; Sentinel-2