农业遥感

外来入侵植物凤眼蓝遥感监测研究进展*

李淑贞¹, 张宏斌², 王旭^{1*}, 徐大伟¹, 陈宝瑞¹, 赵越¹

(1. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081; 2. 农业农村部农业生态与资源保护总站, 北京 100125)

摘要:【目的】外来物种入侵给生态、经济、社会带来严重负面影响, 已成为各国政府、国际社会的共同关注的焦点问题。凤眼蓝作为我国危害最严重的外来入侵物种之一, 给我国南方地区生态系统以及农林牧渔业生产造成巨大损失, 对于凤眼蓝的精准监测和防控已刻不容缓。【方法】文章综述了近年来国内外有关凤眼蓝遥感监测的研究进展, 传统可见光遥感、高光谱遥感与雷达遥感等数据源投入使用, 光谱特征、纹理特征、动态特征、物候特征等图像特征应用使监测精度进一步改善, 机器学习等多种方法融合应用。【结果/结论】该文总结了凤眼蓝入侵发生扩散规律及预警技术, 在监测预警技术方法上, 以凤眼蓝的生理、生态特征为基础, 运用生态学理论, 结合3S技术, 不再局限于单一模型方法上开展, 天-空-地一体化多模型综合监测已成为趋势, 外来入侵凤眼蓝规模化、业务化监测预警能力进一步提升。围绕外来入侵物种“源头防控、末端治理”的理念, 探讨基于遥感监测技术的精准、高效防控途径。

关键词: 凤眼蓝; 遥感监测; 预警; 入侵机理; 源头防控

DOI: 10.12105/j.issn.1672-0423.20220401

0 引言

外来入侵物种指由原生地经过自然或人为途径入侵到另一个生态系统中, 导致被入侵生态系统的生物多样性、农林牧渔业生产以及人类健康遭受严重负面影响的外来种^[1]。近年来, 全球每年遭受外来入侵的损失高达1.4万亿美元, 我国每年因外来入侵造成的直接经济损失也高达2000亿元^[2-3], 2021年4月15日《中华人民共和国生物安全法》开始颁布实施, 以推动我国外来入侵防控工作有序开展, 保护生物多样性。凤眼蓝(学名: *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms) (俗称水葫芦) 是早期传入我国的恶性入侵杂草之一, 原产于南美洲, 为多年生漂浮恶性杂草, 环境适宜时暴发迅速, 直接损害当地生态系统生物多样性, 对区域生物安全构成严重威胁^[4-5]; 同时, 严重影响当地农林牧渔生产, 增加经济成本, 并为细菌疟疾等病菌提供滋生环境, 威胁人畜生命健康^[6-7]。因此, 及时准确获取凤眼蓝入侵发生、分布和预警信息, 对于全面开展凤眼蓝入侵的防控治理至关

收稿日期: 2022-04-07

第一作者简介: 李淑贞(1996—), 硕士研究生。研究方向: 农业资源与环境遥感研究。Email: 82101202278@caas.cn

* 通信作者简介: 王旭(1978—), 博士、副研究员。研究方向: 草地生态遥感。Email: wangxu01@caas.cn

* 基金项目: 国家自然科学基金(32171567)

重要。

传统意义上,凤眼蓝监测方法以人工地面调查为主,其耗时耗力、经济成本高、空间限制性强、时效性差,难以满足当前大范围、高精度、高时效性的监测需求^[8-9]。自20世纪70年代以来,随着遥感技术快速发展,特别是各种高分辨率传感器不断涌现,具备监测精度高、尺度大、周期短和成本低等优势,成为快速获取大范围植被信息的重要手段,外来入侵物种遥感监测技术已成为当前研究的新热点^[10-11]。目前,凤眼蓝遥感监测方法大多以凤眼蓝与背景地物光谱差异性为基础,进行目视解译、监督分类、决策树分类等简单分类,在某一湖泊、水库等较小区域尺度上基本实现凤眼蓝的监测^[12-14]。鉴于此,文章对国内外学者关于凤眼蓝生理生态特性、入侵扩散机理以及遥感监测研究进行总结,了解和掌握凤眼蓝遥感监测技术最新进展,为外来入侵植物高精度监测和精准防控提供理论和技术参考。

1 生物学特性与分布

凤眼蓝源于南美洲亚马逊河流域,是雨久花科、凤眼蓝属多年生漂浮性宿根大型水生草本植物,其叶柄膨大呈葫芦状,俗称水葫芦,由于其观赏价值和饲用价值,被广泛引种至其他热带及亚热带地区^[15-16]。凤眼蓝环境适应性广泛,全球适宜分布区为40°N~45°S之间,主要生长在浅水淤泥区,可随水力或风力漂流,最适宜生长温度在25~30℃,最低耐受气温在0~5℃,遇到霜冻或者0℃以下可导致植株死亡,花期为8—10月,也有部分地区4—10月开花^[17]。凤眼蓝是世界上繁殖速度最快的植物之一,兼有有性繁殖与无性繁殖,适宜环境下一株凤眼蓝90 d能繁殖出25万左右新株^[18-19]。因此,伴随着人类活动加剧河湖富营养化,加速其对水生生境的入侵和暴发^[20]。20世纪30年代作为饲料在我国推广种植,后逃逸为野生^[21],由于缺少天敌,在我国南方大部分水体广泛分布,对当地生态系统造成严重危害。截至目前,凤眼蓝已入侵东南亚、美国东南部、非洲中西部、美洲中部、欧洲西南部伊比利亚半岛等地区^[22]。

2 入侵发生与扩散规律

凤眼蓝的入侵具有以下几方面的特点:①入侵范围广泛,这不仅与其自身生物学特性密切相关,与被入侵生态系统和群落也有着密切关系^[23]。凤眼蓝的入侵途径为淡水生态系统,河流、人工水道等内陆水域具有高的水文连通性,成为凤眼蓝的理想传播媒介^[24];从河流上游或支流随水流大规模漂移,受到挺水植物、闸口以及岸边其他设施拦截后聚集,形成新的定居地点,因而淡水网络中的水动力成为其扩散的主要驱动力;我国长江以南地区河网密集且最冷月平均气温在0℃以上,因此成为凤眼蓝主要集中分布区,其中长江中下游流域、珠江流域、东南沿海河道等最为严重^[25]。②大面积暴发的凤眼蓝夺取其他物种生存空间,并快速繁殖生长,形成更大面积的垫状单优势种群落^[26]。雨季依靠无性繁殖快速生长,旱季转为依靠有性繁殖;爆发初期岸边挺水植物为其生长

2022年8月

定居提供了条件^[27]；漂浮于河流、湖泊、水塘等淡水生态系统。③耐受力强，在水质差的环境（如工业废水）下可以正常生长，由于生产生活污水排放，水体富营养化加剧，为凤眼蓝提供了充足的营养供给，使得凤眼蓝在大小水域暴发，并且其在污水中的生长速度为天然水体中是2倍^[28]。

3 凤眼蓝遥感监测方法

3.1 基于凤眼莲光谱与非光谱特征的遥感分类方法

近年来，遥感技术在凤眼蓝监测方面展现出传统调查方法不可比拟的优势，可以及时、准确、有效地捕捉凤眼蓝的时空分布信息^[29]。基于光谱特征的分类方法是早期凤眼蓝遥感监测的最常见方法，蒋明等利用连续长时间序列 Landsat 影像通过监督分类监测了云南滇池凤眼蓝 18 年间的动态变化^[30]；秦雁等利用光谱指数方法监测了东莞市凤眼蓝分布^[31]，而且由于数据量冗余，分类器受干扰较大难以实现高精度分类，从影像的波段中选取对绿色植被、凤眼蓝的光谱敏感度高的波段实现光谱分离。Dube 等对比 Landsat8 OLI 和 Landsat7 ETM 遥感数据，确定了凤眼蓝与其他土地覆盖类型的光谱可分性窗口，较准确地检测和绘制了津巴布韦境内两个淡水湖内水葫芦的空间分布和配置^[13]。基于光谱特征分类方法是传统光学遥感的重要手段，主要依据植被群落冠层在不同光谱波段的反射特征差异进行信息提取，但由于凤眼蓝与其他植被的光谱特征相近，仅依据光谱特征分类易造成错分、漏分等，分类精度较低^[32-34]。地物的物候特征、纹理特征以及动态特征、物候特征等也是凤眼蓝遥感监测的重要依据，Youssra 基于植被覆盖度参考期的 Sentinel-2 时间序列监测确定黎巴嫩北部边界地中海沿岸地区河流走廊植被发育状态的年际变化^[35]，然而这种方法仅适用于冬枯夏盛的凤眼蓝，热带地区凤眼蓝终年常绿且伴生水生漂浮性植被，物候特征并不适用。另外，高光谱遥感技术也得到越来越多的应用，Hestir 等基于航空高光谱数据对美国加州三角洲凤眼蓝进行分类方法研究^[12]；John 等使用手持光谱辐射计测定的高光谱数据，结合 Worldview-2 多光谱遥感数据比较准确地监测了印度半岛西海岸 Vembanad 河口的凤眼蓝等水生植被^[9]。尽管高光谱数据分类精度高，但是该数据集获取成本较高，且受到硬件设备限制，高光谱数据时间分辨率低、成像幅宽窄、数据分类难度大等，对凤眼蓝等水生植被进行全国乃至全球的大范围面积监测并不现实。

3.2 基于机器学习的凤眼蓝分类方法

机器学习的应用也是植被遥感的重要识别手段，国外学者将机器学习数学方法应用到凤眼蓝遥感监测中，得到了比较高的分类精度，Mukarugwiro 等使用 1989—2017 年间多光谱时间序列遥感影像采用随机森林算法进行监督分类，得出卢旺达水体中凤眼蓝的年增长率及空间分布，随机森林算法对于区分凤眼蓝和河岸植被具有明显优势^[36]；Peter 等比较不同光谱波长、不同日期高分辨率影像（包含近红外波段的影像/仅 RGB 的影像）单独进行随机森林建模，并与不同日期进行图像集组合，实现基于物种物候差异随机森林分类，这一方法在综合考虑物候特征与光谱特征的同时，通过长时间序列遥感影像完

成分类^[37]；Li等提出一种基于其方向特征的变换监测方法，该方法通过RFLICM算法将差异图像像素值进行相交来识别入侵植物，该方法对于凤眼蓝这一暴发迅速且动态特征显著的入侵植物具有较高的识别精度^[38]。卫星遥感影像混合像元的存在，限制了植被分类精度，而通过超像素分割生成高度均匀紧凑的图像超像素，在此基础上采用机器学习可以得到较高分类精度，Feng等基于融合视觉显著性和随机森林（RF）发展了适于高分辨率遥感图像变化检测方法，在Quickbird、资源3号（ZY3）和高分2号（GF2）多光谱图像上的实验结果表明，该方法在变化检测精度上优于其他方法，也验证了该方法的可行性和有效性^[39]。

3.3 基于机载遥感影像的分类方法

与卫星遥感相比，微小无人机遥感云下成像、空间分辨率高，是目前获取小区域范围内高精度正射影像最及时、高效的技术之一。Fu^[40]等应用无人机影像的数字正射影像图（DOM）和数字地表模型（DSM）对桂林喀斯特地貌植被群落分类获得较高分类精度，并发现凤眼蓝对光谱特征中的绿色波段和几何特征中的长度比较敏感，提出了一种基于无人机影像的植被群落分类新方法，在未来的研究中，将结合多时相无人机影像、多光谱影像（吉林101影像）、高光谱影像（珠海1号OHS影像）和全极化雷达影像（Radarsat-2和高分3号SAR影像）对植被群落进行分类，采用多种浅层机器学习算法（XGBoost和LightGBM算法）和多种卷积神经网络算法（CA-Net、ESSNet和RAUNet算法）提取植被群落信息。机载高光谱影像在凤眼莲监测应用中往往结合水质等环境条件监测，杨静学等使用无人机影像通过水色遥感分析了鹤地水库凤眼蓝时空变化^[41]；Thamaga等通过利用无人机监测萨克拉门托-圣华金三角洲的入侵水生植物^[42]。机载高光谱影像包含地物丰富的光谱信息，充分利用植被光谱间的差异，Khanna等采用机载HyMap高光谱数据利用光谱角映射（SAM）、线性光谱分解（LSU）、连续光谱去除和决策树格式的几个指标等一系列高光谱方法来绘制这些漂浮水生植被的综合方法，将研究区内影像的直方图/方差分析结果进行决策树分类^[43]。然而由于无人机续航能力、天气条件、传感器载荷等因素限制，该方法仅适用于较小空间尺度上的低空遥感监测。

3.4 基于LiDAR的凤眼蓝分类方法

尽管传统光学遥感在凤眼蓝监测研究已得到广泛应用，然而云层覆盖使得可用影像数据难以获取，近几年全天候全天时的雷达遥感技术开始应用于外来入侵监测中，Simpson等利用Sentinel-1 SAR数据监测印度库塔纳德水库的凤眼蓝^[44]。利用雷达技术监测凤眼蓝，但其空间分辨率不足，因此，雷达遥感在监测中往往作为补充数据，配合其他数据源使用。

4 凤眼蓝预警方法

预测凤眼蓝的潜在分布区和扩散趋势，需要以其生理、生态特点、分布特点为依据，辅助空间分析方法，通过模型对入侵暴发提前预警。最常用的是生态机理模型^[48]，李宏群等利用Maxent模型进行凤眼蓝适生区预测，得出我国凤眼蓝适生区与易受入侵区

2022年8月

域^[4]；陈璐分别利用GARP和ENFA模型预测凤眼蓝在我国的潜在分布并将结果划分风险等级^[45]；孙玲等凤眼蓝面积变化数据，建立了放养凤眼蓝生长的Logistic动力学模型模拟了凤眼蓝生长的动力学特征^[46]；其次，经验模型也被用于凤眼蓝的监测预警工作中，叶森基于新闻报道、气象和遥感影像数据，分析了凤眼蓝的发生规律及凤眼蓝暴发的气象规律绘制凤眼蓝发生风险图^[47]。遥感数据具备大尺度、高空间和时相分辨率的特点，可以为发生、扩散预测模型提供模型参数输入和数据验证。目前，凤眼蓝的遥感监测预警技术尚处于起步阶段，在数据源方面，多光谱卫星遥感数据应用广泛，但随着各种新型传感器的出现，多源遥感数据的集成与融合也更为多见，进一步拓宽数据获取的渠道，提升模型预警时效性和精度。

5 结论与展望

在凤眼蓝遥感监测预警方面，利用遥感技术监测凤眼蓝的研究越来越多，新理论、新方法、新模型不断出现。在监测方法上，基于光谱特征的分类方法是传统光学遥感的重要手段，主要依据植被群落冠层在不同光谱波段的反射特征差异进行信息提取，仅依据光谱特征分类易造成错分、漏分等，分类精度较低，在考虑地物的物候特征、纹理特征以及动态特征等的同时，改进凤眼蓝分类算法，应用数学机理模型进一步提高大范围监测精度，探索更加快速有效的凤眼蓝遥感监测技术，为精准防控提供基础数据和技术支撑，无人机的应用提高小区域范围监测能力；在凤眼蓝预警方面，凤眼蓝生态生理学特征结合现有模型，改进和发展遥感预警模型，监测预警不再局限于单一的模型方法上开展，传统可见光、高光谱分辨率传感器、高空间分辨率传感器、无人机遥感与雷达遥感等数据源投入使用，提高凤眼蓝发生的空间预警能力，增强时效性，天一空一地一体化综合监测已成为趋势。

凤眼蓝往往发源于上游支流、源头溪流等，通过汛期洪水下泄在中下游或者湖泊水库迅速聚集，造成大规模暴发，需要对河湖等水体的全流域溯源监测。现有研究中研究区大多集中于某一大型的湖泊或水库，以面状水体居多，受遥感数据分辨率限制，对流域内河流监测研究较少。

对于凤眼蓝的防控，不只针对已发生入侵的区域，同时更要加强凤眼蓝暴发预警能力，这也是当前外来入侵监测预警工作的重要途径之一，以凤眼蓝的生理、生态特征为基础，运用生态学理论，结合3S技术，“防患于未然”。为凤眼蓝的预警工作提供可靠技术支持，卫星遥感可以持续定点观测入侵风险区域。

参考文献

- [1] 万方浩,郭建英,王德辉. 中国外来入侵生物的危害与管理对策. 生物多样性,2002,10(1):119-125.
- [2] 吴金泉,SMITH M T. 发达国家应战外来入侵生物的成功方法. 江西农业大学学报,2010,32(5):1040-1055.
- [3] 陈宝雄,孙玉芳,韩智华,等. 我国外来入侵生物防控现状、问题和对策. 生物安全学报,2020,29(3):157-163.
- [4] 李宏群,李宇轩,刘晓莉,等. 基于Maxent生态位模型的水葫芦在中国的适生区预测. 生态科学,2018,37(3):143-147.
- [5] 高雷,李博. 入侵植物凤眼莲研究现状及存在的问题. 植物生态学报,2004,28(6):735-752.

- [6] Firehun Y, Struik P C, Lantinga E A, et al. Water hyacinth in the Rift Valley water bodies of Ethiopia: its distribution, socioeconomic importance and management. *International Journal of Current Agricultural Research*, 2014, 3(2): 67–75.
- [7] Dersseh M G, Kibret A A, Tilahun S A, et al. Potential of water hyacinth infestation on lake Tana, Ethiopia: a prediction using a GIS-Based Multi-Criteria technique. *Water*, 2019.
- [8] 金樑, 王晓娟, 高雷, 等. 上海市凤眼莲种群的时空分布及控制对策. *生态学杂志*, 2005, 24(12): 1454–1459.
- [9] John C M, Kavya N. Integration of multispectral satellite and hyperspectral field data for aquatic macrophyte studies. *Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2014, XL-8(1): 581–588.
- [10] Ahmed N, Atzberger C, Zewdie W. Integration of remote sensing and bioclimatic data for prediction of invasive species distribution in data-poor regions: a review on challenges and opportunities. *Environmental Systems Research*, 2020.
- [11] 章莹, 卢剑波. 外来入侵物种互花米草 (*Spartina alterniflora*) 及凤眼莲 (*Eichhornia crassipes*) 的遥感监测研究进展. *科技通报*. 2010, 26(1): 130–137.
- [12] Hestir E L, Khanna S, Andrew M E, et al. Identification of invasive vegetation using hyperspectral remote sensing in the California Delta ecosystem. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(11): 4034–4047.
- [13] Dube T, Mutanga O, Sibanda M, et al. Evaluating the performance of the newly-launched Landsat 8 sensor in detecting and mapping the spatial configuration of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) in inland lakes, Zimbabwe. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2016, 100: 101–111.
- [14] Asmare T, Demissie B, Nigussie A G, et al. Detecting spatiotemporal expansion of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) in Lake Tana, Northern Ethiopia. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 2020, 48(4): 751–764.
- [15] 李礼, 林艺滨, 刘灿. 入侵植物凤眼莲的生物学特性及生态管理对策. *安徽农业科学*, 2018, 46(3): 60–62, 67.
- [16] 李博, 廖成章, 高雷, 等. 入侵植物凤眼莲管理中的若干生态学问题. *复旦学报(自然科学版)*, 2004, 43(2): 267–274.
- [17] 蔡竞芳, 孙凯, 张羽, 等. 凤眼莲入侵强度和水深对沉水植物生长及种间关系的影响. *环境科学学报*, 2021, 42(1): 1–11.
- [18] Lu J B, Wu J G, Fu Z H, et al. Water hyacinth in China: a sustainability Science-Based management framework. *Environmental Management*, 2007, 40(6): 823–830.
- [19] 张迎颖, 吴富勤, 张志勇, 等. 凤眼莲有性繁殖与种子结构及其活力研究. *南京农业大学学报*, 2012, 9(1): 137–144.
- [20] 严国安, 任南, 李益健. 环境因素对凤眼莲生长及净化作用的影响. *环境科学与技术*, 1994, 64(1): 2–5, 27.
- [21] 王国欢, 白帆, 桑卫国. 中国外来入侵生物的空间分布格局及其影响因素. *植物科学学报*, 2017, 35(4): 513–524.
- [22] Chen J M, Zhang F Z, Wang Y J, et al. Spatial distribution patterns of invasive alien species in China. *Global Ecology and Conservation*, 2021(26): 01432.
- [23] Parolin P, Bartel S, Bresch C, et al. Worldwide invasion pathways of the South American *Eichhornia crassipes*. *XXVIII International Horticultural Congress on Science & Horticulture for People*, 2012.
- [24] Brundu G, Azzella M M, Blasi C, et al. The silent invasion of *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms, in Italy. *Giornale Botanico Italiano*, 2013, 147(4): 1120–1127.
- [25] 丛伟. 环境因子对凤眼莲生长的影响及其生理机制. 南京: 南京农业大学, 2012.
- [26] 赵月琴, 卢剑波, 朱磊, 等. 不同营养水平对外来物种凤眼莲生长特征及其竞争力的影响. *生物多样性*, 2006, 14(2): 159–164.
- [27] Hussner A, Stiers I, Verhofstad M, et al. Management and control methods of invasive alien freshwater aquatic plants: a review. *Aquatic Botany*, 2017, 136: 112–137.
- [28] Labajos B R, Binimelis R, Monterroso I. Multi-level driving forces of biological invasions. *Ecological Economics*, 2009, 69(1): 63–75.
- [29] Hill J M, Hutton B, Steffins K, et al. Floating along marsh edges: the impact of invasive water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) on estuarine species assemblages and predation risk. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2021, 544(5): 151618.
- [30] 蒋明, 郭云开, 朱佳明, 等. 时序遥感影像滇池凤眼莲时空动态变化分析. *遥感信息*, 2019, 34(3): 43–47.
- [31] 秦雁, 陈亮雄, 杨静学, 等. 东莞市水葫芦分布遥感动态监测分析. *广东水利水电*, 2020(7): 11–15.
- [32] 骆丽莎, 廖桂平, 刘凡, 等. 基于冠层光谱特征参数的油菜品种识别. *中国农业科技导报*, 2021, 23(7): 93–106.
- [33] 高莎, 袁希平, 甘淑, 等. 基于无人机成像点云的禄丰恐龙谷南缘环状地貌空间特征探测实验分析. *地质科技通报*, 2021, 40(6): 283–292.
- [34] 赵英时. 遥感应用分析原理与方法. 北京: 科学出版社, 2003.
- [35] Ghoussein Y, Nicolas H, Haury J, et al. Multitemporal remote sensing based on an FVC reference period using

2022年8月

- Sentinel-2 for monitoring *Eichhornia crassipes* on a Mediterranean River. *Remote Sensing*, 2019, 11(16):1856.
- [36] Mukarugwiro J A , Newete S W , Adam E , et al. Mapping spatio-temporal variations in water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) coverage on Rwandan water bodies using multispectral imageries. *International journal of Environmental Science and Technology*, 2020, (3):275-286.
- [37] Weisberg P J, Dilts T E, Greenberg J A, et al. Phenology-based classification of invasive annual grasses to the species level. *Remote Sensing of Environment*, 2021, 263:112568.
- [38] Li Q, Qin X, Jia Z, et al. A novel change detection method based on direction feature and fuzzy clustering for remote sensing images and its application in biological invasions. *Springer Berlin Heidelberg*, 2013, 398:498-509.
- [39] Feng W, Sui H, Tu J, et al. A novel change detection approach based on visual saliency and random forest from multi-temporal high-resolution remote-sensing images. *International Journal of Remote Sensing*, 2018, 39(21-22):1-24.
- [40] Bf A, Man L A , Hh A , et al. Comparison of optimized object-based RF-DT algorithm and SegNet algorithm for classifying Karst wetland vegetation communities using ultra-high spatial resolution UAV data-ScienceDirect. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2021, 104:102553.
- [41] 杨静学,陈亮雄,李伟添,等. 多源卫星遥感数据和水色遥感技术在水库水葫芦覆盖监察中的应用. 农业与技术, 2019, 39(3):5-7.
- [42] Thamaga K H, Dube T. Remote sensing of invasive water hyacinth (*Eichhornia crassipes*): a review on applications and challenges. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 2018, 10:36-46.
- [43] Khanna S, Santos M J, Ustin S L, et al. An integrated approach to a biophysically based classification of floating aquatic macrophytes. *International Journal of Remote Sensing*, 2011, 32(4):1067-1094.
- [44] Simpson M, Marino A, Prabhu G N, et al. Monitoring water hyacinth in Kuttanad, India using Sentinel-1 Sar Data. *IEEE International India Geoscience and Remote Sensing Symposium 2020 (InGARSS)*, 2020.
- [45] 陈璐. 基于生态位模型的风眼莲分布区预测分析. 济南: 山东师范大学, 2015.
- [46] 孙玲, 朱泽生, 王晶晶, 等. 基于遥感技术的太湖放养风眼莲的生长模型. 生态环境学报, 2011, 20(4):623-628.
- [47] 叶森. 水生外来入侵植物遥感识别与预警研究. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2020.
- [48] 陈豪杰, 聂艳, 刘新华, 等. 基于MaxEnt模型的胡杨潜在适生区预测研究. 中国农业信息, 2021, 33(1):46-55.

Advances in remote sensing monitoring of invasive alien plant *Eichhornia crassipes*

Li Shuzhen¹, Zhang Hongbin², Wang Xu^{1*}, Xu Dawei¹, Chen Baorui¹, Zhao Yue¹

(1. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 2. Rural Energy and Environment Agency, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100125, China)

Abstract: [Purpose] Invasive alien species bring serious negative impact on ecology, economy and society, which has become the focus of attention of governments, international community and academia. As one of the most serious invasive alien species in China, the *Eichhornia crassipes* has caused great losses to the ecosystem and agriculture, forestry, animal husbandry and fishery production in southern China. It is urgent to monitor and control *Eichhornia crassipes* accurately. [Method] At home and abroad in recent years was reviewed in this article the research progress of remote sensing monitoring *Eichhornia crassipes*, traditional optical remote sensing, hyperspectral remote sensing data sources, such as radar remote sensing, spectral characteristics, texture characteristics, dynamic characteristics, phonological features such as

image applied to further improve the monitoring precision, machine learning methods such as fusion applications. **[Result/Conclusion]** In terms of monitoring and early warning technology, based on the physiological and ecological characteristics of *Eichhornia crassipes*, ecological theory and 3S technology, the monitoring and early warning technology is no longer limited to a single model method. Space-space-earth integrated multi-model comprehensive monitoring has become a trend. The scale and operational monitoring and early warning capabilities of external invasion have been further improved. Based on the concept of "prevention and control at the source and treatment at the end", the precise and efficient prevention and control approach based on remote sensing monitoring technology was explored.

Key words: *Eichhornia crassipes*; remote sensing monitoring; early warning; invasion mechanism; source control

欢迎订阅《中国农业信息》

《中国农业信息》(双月刊)由农业农村部主管,中国农学会农业信息分会、中国农业科学院农业资源与农业区划研究所共同主办,是我国目前全方位传播和刊载国内外农业遥感/农业信息科学领域的信息获取、处理、分析和应用服务的理论、技术、系统集成、标准规范等方面最新进展和成果,促进学术交流以及农业信息学科关键技术与产品的创新研发、集成推广和应用示范的综合性科学技术期刊。

主要刊登农业遥感、农业传感器、农业信息智能处理、精准农业/智慧农业、农业监测预警与信息服务系统、农业物联网、智能装备与控制、虚拟农业、人工智能、信息技术标准等方向学科热点领域的最新、最重要的理论研究和应用成果。主要栏目有:农业遥感、智慧农业、综合研究、农业信息技术、农业物联网、专题报道等。目前被中国知网(CNKI)、万方数据、中文科技期刊数据库、中国核心期刊(遴选)数据库等多家数据库收录。

《中国农业信息》为国内外公开发行的刊物,开本为 16 开,彩色四封,读者范围广,影响面大,全国各地邮局均有订阅。每双月 25 号出版,定价为 25.00 元/册,150 元/年。

邮局汇款

收 款 人:《中国农业信息》编辑部

地 址:北京市海淀区中关村南大街 12 号中国农科院资源所区划楼 319

邮 编:100081

银行汇款

开 户 行:农行北京北下关支行

行 号:103100005063

账 号:11050601040011896

单位名称:中国农业科学院农业资源与农业区划研究所

电 话:(010)82109632

传 真:(010)82109632

E m a i l : nyxxbjb@caas.cn

邮发代号:2-733

投稿网址:www.cjarrp.com