

湖库水生植被光学遥感监测研究进展和展望

谢娅^{1,2}, 李俊生^{1*}, 李景宜², 张方方¹, 申茜¹, 吴艳红¹, 张兵¹, 任冲²

(1. 中国科学院遥感与数字地球研究所, 数字地球重点实验室, 北京 100094; 2. 宝鸡文理学院, 陕西宝鸡 721013)

摘要: 水生植被在湖库生态系统中发挥稳定沉积物、净化水质、平衡水生生态系统等作用, 监测水生植被变化对湖库生态环境的监测具有重要意义。梳理了国内外利用高光谱、多光谱光学卫星遥感数据提取湖库水生植被的方法, 尤其是针对其中涉及的阈值确定问题进行总结分析, 介绍了典型研究区水生植被时空分布和变化以及与水质的关系, 最后给出一些水生植被遥感监测的展望。

关键词: 水生植被; 遥感; 分类; 阈值

中图分类号: X87

文献标志码: A

文章编号: 1674-6732(2019)05-0052-07

Progress and Prospect of Optical Remote Sensing Monitoring of Aquatic Vegetation in Lakes and Reservoirs

XIE Ya^{1,2}, LI Jun-sheng^{1*}, LI Jing-yi², ZHANG Fang-fang¹, SHEN Qian¹, WU Yan-hong¹, ZHANG Bing¹, Ren Chong²

(1. State Key Laboratory of Digital Earth Science, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China; 2. Baoji University of Arts and Sciences, Baoji, Shanxi 721013, China)

Abstract: Aquatic vegetation plays an important role in stabilizing sediment, purifying water quality and balancing aquatic ecosystem in lake and reservoir ecosystem. Monitoring the change of aquatic vegetation is of great significance to the monitoring of lake and reservoir ecosystem. In this paper, the methods of extracting aquatic vegetation from hyperspectral and multispectral optical satellite remote sensing data at home and abroad are summarized and analyzed, especially for the determination of threshold involved. The spatial and temporal distribution and change of aquatic vegetation in typical research areas and their relationship with water quality are introduced. Finally, some prospects for remote sensing monitoring of aquatic vegetation are given.

Key words: Aquatic vegetation; Remote sensing; Classification; Threshold

0 引言

水生植被又称水草, 根据其生长特性可分为挺水植被、漂叶植被和沉水植被 3 类, 沉水植被整个生长周期处于水面以下, 主要分布在水深 2 m 到水面之间的范围内, 漂叶植被的叶子漂浮在水面上, 而挺水植被则生长在水面以上^[1-4]。水生植被在湖泊的生态系统中具有重要作用, 是生态系统的重要组成部分。一方面, 水生植被能够吸收二氧化碳释放氧气, 对水体中的物理和化学环境具有不同程度的改善作用^[5-7], 在湖泊的初级生产力的组成部分中, 水生植被是不可或缺的一部分, 能保持水生生态系统平衡, 在湖库生态系统中扮演了重要的角色^[8-11]。其中, 湖库水体的营养状态, 主要是通过

各项水质参数如叶绿素 a、透明度、悬浮物以及水中营养盐浓度等指标进行评价的, 而水生植被的覆盖度以及生长频率会引起水质参数的变化^[12-13]。沉水植被的存在, 不仅能改善水体透明度^[14], 还与氮浓度、营养盐物质紧密相关^[15]。研究表明, 沉水植物的大量死亡会导致水生生态系统从一个以植物为主的清水状态转变为一个以藻类为主的浑浊状态^[16-17], 根据水生植被对水质的影响过程, 可以

收稿日期: 2019-08-26; 修订日期: 2019-08-31

基金项目: 国家重点研发计划基金资助项目(2017YFC0405804)

作者简介: 谢娅(1991—), 女, 硕士, 主要从事水环境遥感研究。

* 通讯作者: 李俊生 E-mail: lij@radi.ac.cn

重建水生植被,特别是沉水植被的种植可以更好地改善湖库富营养化状态,对湖库的生态系统进行修复^[18],在水生植被的衰败消亡阶段及时对水生植被进行适当的收割,避免水生植被腐败,影响水生生态系统^[19-20]。另一方面,当漂叶植被的覆盖范围太广时,会遮蔽水面,影响光线入射到水面以下,进而影响水质^[21-23]。

常规监测方法大多采用实地调查、实验室培养、相关资料查询和生态建模等方式来监测湖泊中水生植被的时空分布变化^[18,24-25],监测过程受水域环境影响通常较大,难以实现对于大范围湖库水生植被分布的长时序监测。遥感技术具有时效性强、成本低以及无损获取地物和数据综合可比性等优势,成为水生植被监测的重要手段。目前,主要通过航空摄影、多光谱系统、高光谱系统、微波传感器等影像来分析水生植被。此前,有学者曾针对各个不同类型遥感手段对水生植被的应用做过综述^[26-27],但对各种水生植被提取方法进行系统性整理的文章很少。近年来还有许多新数据和新方法被利用于水生植被的研究中,现梳理水生植被遥感监测的国内外研究现状,分析和总结研究存在的主要问题,对水生植被遥感监测的应用与发展进行综合分析。

1 水生植被遥感监测

1.1 水生植被光谱特征

挺水植被含有叶绿素色素,光谱表现出典型的

陆地植被反射特征,由于色素的吸收,可见光谱中蓝色和红色区域的反射率较低,光谱中绿色部分的反射率较高^[26],其反射率特征有两个明显的特点,近 675 nm 的反射谷和近红外(715 ~ 820 nm)的高反射平台;根据水面叶片密度,漂叶的光谱通常在近红外波段和短波红外波段中呈现出介于挺水植被和沉水植被之间的特征。

沉水植被生长在水面以下,由于水对光的吸收,光在水中的穿透性和近红外波段反射率较低^[28-29],且容易受到环境因素的影响。如 Liew 等^[30]证明了沉水植被的光谱曲线可以随水浊度和水深的变化而变化,在浊度为 0.5 NTU、水深为 1 m 时,无法检测到植被光谱的典型近红外峰,在浊度为 50 NTU、水深为 0.5 m 时,也无法检测到植被光谱的典型近红外峰。此外,Cho 等^[31]使用多个传感器证明了在水面一定深度下的沉水植被,其近红外反射率完全减弱为红光反射率。除此之外,沉水植被的光谱信号,容易受到水体浑浊度、透明度、温度、溶解氧、植被覆盖度、植被冠层与水面的距离等因素的影响^[32]。大多数卫星数据都包含红光和近红外波段,因此可以利用多源卫星影像建立植被指数提取水生植被^[31,33-34]。

1.2 水生植被遥感监测方法

遥感技术监测水生植被主要有非监督分类、监督分类、决策树等方法,除此之外还有面向对象以及线性光谱混合分析等,见表 1。

表 1 水生植被识别的方法及卫星数据源

方法	卫星	研究区	参考文献
非监督分类	Quickbird	Lake Mogan	[35-38]
	Landsat MSS/TM	Guinea Marsh	
	Quickbird	Great Lakes	
	Landsat TM/ETM +	Lake Sharpe	
监督分类	MERIS	Lake Victoria	[39-41]
	Sentinel-3	Nova Avandava reservoir	
	CASI-2	Upper Thurne region lake	
决策树	GF-1	乌梁素海	[33,42-45]
	Sentinel-1/2	鄱阳湖	
	Landsat ETM +	太湖	
	Landsat TM/ETM +	日本湖泊	
主成分分析	Landsat ETM + /OLI, HJ-1, GF-1	太湖	[46]
	Landsat TM	洪湖	
面向对象	Landsat TM, SPOT-5	北京汉石桥湿地	[47]
线性光谱混合分析	MIVIS	Lake Trasimeno	[48-49]
	Landsat-8 OLI	Lake Biwa	

1.2.1 非监督分类

早期的研究中多使用非监督分类的方法, Ozge^[35] 结合实测采集的样点数据, 利用高空间分辨率的 Quickbird 卫星数据, 使用非监督分类识别和绘制水生植物物种的分布和覆盖范围。Ackleson^[36] 选取 Landsat MSS/TM 影像, 使用非监督方法进行沉水植被的监测, 最后用彩色航空影像对分类的结果进行验证。可以发现, 使用非监督分类对水生植被的分类, 需要结合其他的辅助数据对提取的结果进行确认, 因此, 非监督分类方法适用于有资料对分类的结果进行辅助判断时使用。

1.2.2 监督分类

监督分类需要事先选择训练样本, 即感兴趣区域 (ROI), 根据 ROI 对各种分类器进行训练、分类的过程。通常将现场采集的样点或是基于专家知识选择样点分为两部分, 一部分用于训练分类器, 一部分用于精度检验。如 Elijah^[39] 利用 MERIS 影像, 使用最大似然法将水体与水生植被进行分类, 其中, 对于样本的选择基于经验确定的, 因为水体与水生植被在影像上纹理、色彩、光谱等特征差异比较大, 容易区分。Hunter^[41] 利用欧氏最小距离法、高斯最大似然法和支撑向量机 3 种方法, 利用实地采集的样点作为 ROI 训练各分类方法, 进行水生植被的分类, 最后得出结论, 高斯最大似然法和支撑向量机分类精度较高。

1.2.3 决策树分类

决策树模型是水生植被分类过程中常用的模型, 对水生植被的提取或分类通常是分析水生植被的反射光谱特性, 建立相应的光谱指数, 再建立相应的决策树模型^[50]。目前, 决策树的分量中应用最多的光谱指数主要包括归一化植被指数 (NDVI)^[51]、浮藻指数 (FAI)^[52]、归一化水体指数 (NDWI)^[53]、增强植被指数 (EVI)^[54]。

决策树模型, 多数是基于实测数据建立的, 将该模型应用于其他时间无实测样点对应的影像时, 会降低水生植被分类的精度, 因此需要对模型中涉及的阈值进行变动, 以适应不同的影像之间的差异。多数情况下, 涉及阈值问题, 可以利用多景影像的均值作为全局阈值, 但是会降低水生植被的分类精度^[55]。也有结合高斯拟合, 对分类的特征阈值进行判断, 建立适应性较强的决策树模型, 实现水生植被分类的自动化过程^[56]。Oyama^[44] 在进行水体与水生植被的分离过程中, 使用的浮藻指数

(FAI) 将水体与水生植被进行区分, 设计 FAI 的阈值为 0~0.1, 间隔为 0.01, 分析 FAI 阈值为 0~0.1 水生植被的变化情况, 最终人为选取最佳阈值。文献^[43, 50] 根据实地采集的水生植被的样点, 建立了 2 个决策树模型, 将 2 个决策树模型进行对比, 考虑不同时期影像之间的外部因素和内部因素的影响程度不同, 建立 2 个决策树之间的阈值的关系, 以便推广决策树的应用范围。Luo^[57] 通过建立决策树模型进行水生植被的提取, 其中对决策树模型的适用性同样进行了强化, 将 2 个时间影像某类像元的光谱特征值 (SF_n) 进行升序或者降序排列, 发现特征值之间存在较好的线性关系, 根据线性关系式, 已知的某类在影像上的阈值, 推算出另一景影像上某类的相对应阈值, 该方法的关键点在于选择 ROI 区域的时候需要对两景影像之间某一类别像元进行选择, 最佳 ROI 区域是某类的纯像元, 避免不同类别边界混合像元的影响。目前该方法只是一种假设, 假设不同时间段的影像之间存在良好的线性关系, 但因水生植被的“萌—生—兴—旺—衰”年内不一样, 年间也不同, 该方法推广应用难度较大。

1.2.4 其他分类方法

除了上述的分类方法之外, 还有一些分类方法应用于水生植被中。如龙娟^[47] 基于光谱特征分析, 采用面向对象分类方法, 对水生植被进行分类。Shweta^[49] 为了将沉水植被与水体区分, 使用线性光谱混合分析的方法, 逐像元分析, 将像元归入不同的端元, 其中端元由实测光谱组成。

对于各种分类方法的应用分析, 其中, 挺水植被的分类精度较高, 因为挺水植被在近红外反射率较高且处于水面以上, 与陆地植被光谱极为相似, 容易提取, 漂叶植被处于水面, 受水体的影响, 一般是混合光谱, 但是漂叶植被主要是生长在水体表面, 其植被特征是主导, 因此可以将漂叶植被与挺水植被归为一类进行研究^[58-59], 沉水植被位于水面以下, 受水体光学特性的影响最大, 有研究者直接将水体影响去掉, 得到水底反射, 直接提取沉水植被^[60], 也有根据实测沉水植被的光谱, 等效对应的卫星影像, 精确识别沉水植被种类^[61-62]。

水生生态系统中除了水生植被之外还有蓝藻水华, 根据蓝藻因含藻青蛋白在 625 nm 波长^[63] 附近存在一个反射率谷值这一特征, 可以利用高光谱遥感数据, 精确区分水华与水生植被^[28, 64-65]。多

光谱遥感影像上水华与水生植被的光谱极其相似,难以精确区分两者,但是,学者对多光谱数据不断进行研究,利用短波红外波段、蓝藻和大型植被指数(CMI)、植被存在频率(VPF)与FAI相结合^[44,66-67]来区分水华和水生植被。

2 水生植被时空分布分析

通过对长时序遥感数据的分析,探索湖库水生植被的时空变化,研究涉及范围广,区域可以是单独的一个湖泊水库^[68],可以是一个流域^[55]甚至是全世界范围^[69],通过对多源数据的整合,有效地监测水生植被的物候信息、年际及季节变化等。

水生植被时空变化监测中最直观反映就是水生植被空间分布情况,通过建立时间序列对水生植被进行分析,能反映湖泊生态变化情况。各种社会因素的影响导致的湖泊生态环境改变,主要体现在水生植被面积的变化方面。Fernande^[70]利用MODIS数据的NDVI产品,对Doñana国家公园的水生植被进行了长达16年的监测,分析该区域降水量与水生植被的季节性变化情况之间的关系。Ma等^[71]分析了2001—2007年太湖水生植被总覆盖面积在这7年中是呈现下降趋势。Zhao^[54]利用Landsat系列影像,利用决策树模型,分析了1981—2010年共计30年间太湖的水生植被变化情况。Luo^[57,62]基于Landsat TM,运用KT缨帽变换的结果作为决策树模型的分量,最后进行太湖水生植被年际变化和季节变化的分析,随后对水生植被的年际和季节变化进行深入研究,探索气温对水生植被的影响过程。Liu等^[67]利用MODIS数据,根据植被存在频率,对太湖2003—2013年的水生植被进行分析,并根据水生植被存在频率,对水华与水生植被进行区分。Hou等^[55]利用250 m中等分辨率成像光谱仪(MODIS)数据的时间序列,建立基于物候的分类方法,监测2000—2014年长江平原25个大湖水生植被的时空变异性,分析了水生植被变化的情况。

值得注意的是,不同的水生植被季节性生长状态不一样,可以根据这一特点反过来辅助遥感影像进行水生植被的分类。例如,沉水植物菹草,在冬末早春萌芽生长,在4、5月份生物量达到最大,之后开始衰败消亡,在1年之中的NDVI植被指数则是体现为上升平稳下降,而挺水植物诸如芦苇,属于多年生植物,NDVI值保持一个高值状态,因

此可以通过这一特点进行水生植被的分类,如曹引^[72]以南四湖为研究区,利用支持向量机(SVM)分类方法,提取了南四湖2008—2014年的水生植被,李瑶^[73]利用NDVI时谱曲线,对太湖2001—2013年的蓝藻和水生植被进行区分。

3 展望

综合遥感技术监测水生植被的国内外研究现状及发展趋势,对今后水生植被的遥感监测方法及应用有如下展望:

(1)将多源遥感数据结合,综合利用多光谱、高光谱、SAR、激光雷达等遥感数据的优势提高水生植被监测精度。

(2)目前尚未有全球水生植被的遥感监测研究,在遥感数据不断增加和处理技术不断发展的情况下,有必要开展全球范围水生植被遥感监测,可以为全球环境变化研究提供重要支持。

[参考文献]

- [1] 秦伯强,胡维平,陈伟民.太湖水环境演化过程与机理[M].北京:科学出版社,2004:1-296.
- [2] COOK C D K. Aquatic plant book[M]. The Hague:SPB Academic Publishing,1990.
- [3] MALTHUS T J,GEORGE D G. Airborne remote sensing of macrophytes in Cefni Reservoir, Anglesey, UK[J]. Aquatic Botany, 1997,58(3-4):317-332.
- [4] LI F, XIAO B. Aquatic vegetation mapping based on remote sensing imagery: An application to Honghu Lake[C]. International Conference on Remote Sensing, 2011:4832-4836.
- [5] 种云霄,胡洪营,钱易.大型水生植物在水污染治理中的应用研究进展[J].环境污染治理技术与设备,2003,4(2):36-40.
- [6] 鲜敏鸣,陈海东,邹惠仙,等.四种沉水植物的克藻效应[J].湖泊科学,2005,17(1):75-80.
- [7] 刘伟龙.太湖水生植物时空变化特征及优势种马来眼子菜的生态响应[D].北京:中国科学院研究生院,2007.
- [8] BARKO J W, GUNNISON D, CARPENTER S R. Sediment interactions with submersed macrophyte growth and community dynamics[J]. Aquatic Botany, 1991,41(1-3):41-65.
- [9] CARPENTER S R, LODGE D M. Effects of submersed macrophytes on ecosystem processes[J]. Aquatic Botany, 1986,26:341-370.
- [10] GUMBRICHT T. Nutrient removal processes in freshwater submersed macrophyte systems[J]. Ecological Engineering, 1993,2(1):1-30.
- [11] HU L, HU W, DENG J, et al. Nutrient removal in wetlands with

- different macrophyte structures in eastern Lake Taihu, China[J]. *Ecological Engineering*, 2010, 36(12): 1725 - 1732.
- [12] 谢杰, 吴德意, 陈雪初, 等. 滇池和洱海湖滨带水生植被状况与水质的关系研究[J]. *环境科学与技术*, 2013, 36(2): 55 - 59.
- [13] ZHANG Y, LIU X, QIN B, et al. Aquatic vegetation in response to increased eutrophication and degraded light climate in Eastern Lake Taihu: Implications for lake ecological restoration[J]. *Scientific Reports*, 2016(6): 23867.
- [14] ROTTA L H S, MISHRA D R, WATANABE F S Y, et al. Analyzing the feasibility of a space - borne sensor (SPOT - 6) to estimate the height of submerged aquatic vegetation (SAV) in inland waters[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2018, 144: 341 - 356.
- [15] ORTH R J, WILLIAMS M R, MARION S R, et al. Long - term trends in submersed aquatic vegetation (SAV) in Chesapeake bay, USA, related to water quality[J]. *Estuaries and Coasts*, 2010, 33(5): 1144 - 1163.
- [16] FOLKE C, CARPENTER S, WALKER B, et al. Regime shifts, resilience, and biodiversity in ecosystem management [J]. *Annual Review of Ecology Evolution and Systematics*, 2004, 35(1): 557 - 581.
- [17] SOANA E, NALDI M, BARTOLI M. Effects of increasing organic matter loads on pore water features of vegetated (*Vallisneria spiralis* L.) and plant - free sediments[J]. *Ecological Engineering*, 2012, 47: 141 - 145.
- [18] DONG B L, QIN B Q, GAO G, et al. Submerged macrophyte communities and the controlling factors in large, shallow Lake Taihu (China): Sediment distribution and water depth [J]. *Journal of Great Lakes Research*, 2014, 40(3): 646 - 655.
- [19] XU W, HU W, DENG J, et al. Effects of harvest management of *Trapa bispinosa* on an aquatic macrophyte community and water quality in a eutrophic lake[J]. *Ecological Engineering*, 2014, 64: 120 - 129.
- [20] SCHEFFER M, SZABO S, GRAGNANI A, et al. Floating plant dominance as a stable state[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2003, 100(7): 4040 - 4045.
- [21] MITCHELL S F. Primary production in a shallow eutrophic lake dominated alternately by phytoplankton and by submerged macrophytes[J]. *Aquatic Botany*, 1989, 33(1 - 2): 101 - 110.
- [22] 戴玉女, 吴鹏举, 杨扬, 等. 水生植被恢复对东莞生态工业园区水质改善的影响研究[J]. *生态环境学报*, 2014(9): 1463 - 1471.
- [23] SANTOS M J, KHANNA S, HESTIR E L, et al. Use of hyperspectral remote sensing to evaluate efficacy of aquatic plant management[J]. *Invasive Plant Science and Management*, 2009, 2(3): 216 - 229.
- [24] HUTOROWICZ A, BIALOWAS M, DLUGOZEWSKI B, et al. An attempt to assess the ecological status of a lake based on historical and current maps of submerged vegetation[J]. *Archives of Polish Fisheries*, 2017, 25(1): 33 - 42.
- [25] CHEN Z, GAO X, WANG L, et al. Modelling the role of epiphyton and water level for submerged macrophyte development with a modified submerged aquatic vegetation model in a shallow reservoir in China[J]. *Ecological Engineering*, 2015, 81: 123 - 132.
- [26] SILVA T S F, COSTA M P F, MELACK J M, et al. Remote sensing of aquatic vegetation: theory and applications[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2008, 140(1 - 3): 131 - 145.
- [27] KLEMAS V. Remote sensing of emergent and submerged wetlands: an overview[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2013, 34(18): 35.
- [28] ZHU Q, LI J, ZHANG F, et al. Distinguishing cyanobacterial bloom from floating leaf vegetation in Lake Taihu based on medium - resolution imaging spectrometer (MERIS) data[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2017: 1 - 11.
- [29] BEGET M E, BELLA C M D. Flooding: The effect of water depth on the spectral response of grass canopies[J]. *Journal of Hydrology (Amsterdam)*, 2007, 335(3 - 4): 285 - 294.
- [30] LIEW S C, CHANG C W. Detecting submerged aquatic vegetation with 8 - band WorldView - 2 satellite images[C]// *Geoscience & Remote Sensing Symposium. IEEE*, 2012.
- [31] CHO H J, KIRUI P, NATARAJAN H. Test of multi - spectral vegetation index for floating and canopy - forming submerged vegetation[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2008, 5(5): 477 - 483.
- [32] PEARSALL W H. The Aquatic Vegetation of the English Lakes [J]. *Journal of Ecology*, 1920, 8(3): 163 - 201.
- [33] CHEN Q, YU R, HAO Y, et al. A new method for mapping aquatic vegetation especially underwater vegetation in Lake Ulan - suhai using GF - 1 satellite data[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(8): 1279.
- [34] 李旭文, 侍昊, 张悦, 等. 基于欧洲航天局“哨兵 - 2A”卫星的太湖蓝藻遥感监测[J]. *中国环境监测*, 2018, 34(4): 174 - 181.
- [35] DOGAN O K, AKYUREK Z, BEKLIOLU M. Identification and mapping of submerged plants in a shallow lake using Quickbird satellite data[J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, 90(7): 2138 - 2143.
- [36] ACKLESON S G, KLEMAS V. Remote sensing of submerged aquatic vegetation in lower Chesapeake bay: A comparison of Landsat MSS to TM imagery[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1987, 22(2): 235 - 248.
- [37] WOLTER P, JOHNSTON C, NIEMI G. Mapping submergent aquatic vegetation in the US Great Lakes using Quickbird satellite data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2005, 26(23): 20.
- [38] ALBRIGHT T P, ODE D J. Monitoring the dynamics of an invasive emergent macrophyte community using operational remote sensing data[J]. *Hydrobiologia*, 2011, 661(1): 469 - 474.
- [39] ELIJAH C, COLLINS M, MASSIMO M, et al. Evaluating MERIS

- based aquatic vegetation mapping in Lake Victoria [J]. *Remote Sensing*, 2014, 6(8): 7762 - 7782.
- [40] YOSHINO W F S, IMAI N N, ALCANTARA E H, et al. Identification of submerged aquatic vegetation using simulated data from Sentinel - 3 [C] // *Esa Living Planet Symposium. ESA Living Planet Symposium*, 2013.
- [41] HUNTER P D, GILVEAR D J, TYLER A N. Mapping macrophytic vegetation in shallow lakes using the Compact Airborne Spectrographic Imager (CASI) [J]. *Aquatic Conservation Marine & Freshwater Ecosystems*, 2010, 20(7): 717 - 727.
- [42] HERVÉ Y, ERIC P, GREGOIRE M, et al. Synergy of Sentinel - 1 and Sentinel - 2 imagery for wetland monitoring information extraction from continuous flow of sentinel images applied to water bodies and vegetation mapping and monitoring [C] // *IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium. IEEE*, 2016.
- [43] ZHAO D, JIANG H, YANG T, et al. Remote sensing of aquatic vegetation distribution in Taihu lake using an improved classification tree with modified thresholds [J]. *Journal of Environmental Management*, 2012, 95(1): 98 - 107.
- [44] OYAMA Y, MATSUSHITA B, FUKUSHIMA T. Distinguishing surface cyanobacterial scums and aquatic macrophytes using Landsat/TM and ETM + shortwave infrared bands [J]. *Remote Sensing Environment*, 2015, 157: 35 - 47.
- [45] 侍昊, 张婷, 李旭文, 等. 基于多星遥感影像的太湖北部湖湾春季沉水植被分布动态监测 [J]. *环境监测与预警*, 2016(1): 13 - 18.
- [46] ZHANG X. On the estimation of biomass of submerged vegetation using Landsat thematic mapper (TM) imagery: A case study of the Honghu Lake, PR China [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1998, 19(1): 11 - 20.
- [47] 龙娟, 郭道宇, 宫兆宇, 等. 基于光谱特征的湿地水生植被信息提取研究 [C] // *中国地理学会百年庆典礼论文集摘要集*, 2009.
- [48] WHITESIDE T G, BARTOLO R E. Mapping aquatic vegetation in a tropical wetland using high spatial resolution multispectral satellite imagery [J]. *Remote Sensing*, 2015, 7(9): 11664 - 11694.
- [49] SHWETA Y, MINORU Y, JUNICHI S, et al. A satellite - based assessment of the distribution and biomass of submerged aquatic vegetation in the optically shallow basin of Lake Biwa [J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(9): 966.
- [50] JIANG H, ZHAO D, CAI Y, et al. A method for application of classification tree models to map aquatic vegetation using remotely sensed images from different sensors and dates [J]. *Sensors*, 2012, 12(12): 12437 - 12454.
- [51] TUCKER C J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation [J]. *Remote Sensing and Environment*, 1979, 8(2): 127 - 150.
- [52] HU C. A novel ocean color index to detect floating algae in the global oceans [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(10): 2118 - 2129.
- [53] HUETE A. A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS - MODIS [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1997, 59(3): 440 - 451.
- [54] ZHAO D, LV M, JIANG H, et al. Spatio - temporal variability of aquatic vegetation in Taihu Lake over the past 30 years [J]. *Plos One*, 2013, 8(6): 10454 - 10461.
- [55] HOU X, FENG L, CHEN X, et al. Dynamics of the wetland vegetation in large lakes of the Yangtze Plain in response to both fertilizer consumption and climatic changes [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2018, 141: 148 - 160.
- [56] 闫大鹏, 周兴东, 刘伟, 等. 一种基于高斯拟合的水生植被遥感分类阈值确定方法 [J]. *西安科技大学学报*, 2018(5): 776 - 782.
- [57] LUO J, MA R, DUAN H, et al. A new method for modifying thresholds in the classification, of tree models for mapping aquatic vegetation in Taihu Lake with satellite images [J]. *Remote Sensing*, 2014, 6(8): 7442 - 7462.
- [58] LUO J, LI X, MA R, et al. Applying remote sensing techniques to monitoring seasonal and interannual changes of aquatic vegetation in Taihu Lake, China [J]. *Ecological Indicators*, 2016, 60: 503 - 513.
- [59] 张寿选, 段洪涛, 谷孝鸿. 基于水体透明度反演的太湖水生植被遥感信息提取 [J]. *湖泊科学*, 2008, 20(2): 184 - 190.
- [60] ZHANG Y, DUAN H, XI H, et al. Evaluation of the influence of aquatic plants and lake bottom on the remote - sensing reflectance of optically shallow waters [J]. *Atmosphere - Ocean*, 2018, 56(4): 1 - 12.
- [61] 邹维娜. 上海地区典型沉水植物光谱特征研究及其应用 [D]. 上海: 华东师范大学, 2014.
- [62] LUO J, DUAN H, MA R, et al. Mapping species of submerged aquatic vegetation with multi - seasonal satellite images and considering life history information [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2017, 57: 154 - 165.
- [63] 李素菊, 王学军. 内陆水体水质参数光谱特征与定量遥感 [J]. *地理与地理信息科学*, 2002, 18(2): 26 - 30.
- [64] 朱庆, 李俊生, 张方方, 等. 基于海岸带高光谱成像仪影像的太湖蓝藻水华和水草识别 [J]. *遥感技术与应用*, 2016, 31(5): 879 - 885.
- [65] 李俊生, 吴迪, 吴远峰, 等. 基于实测光谱数据的太湖水华和 水生高等植物识别 [J]. *湖泊科学*, 2009, 21(2): 215 - 222.
- [66] LIANG Q, ZHANG Y, MA R, et al. A MODIS - based novel method to distinguish surface cyanobacterial scums and aquatic macrophytes in Lake Taihu [J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(2): 133.
- [67] LIU X, ZHANG Y, SHI K, et al. Mapping aquatic vegetation in a large, shallow eutrophic lake: a frequency - based approach using multiple years of MODIS data [J]. *Remote Sensing*, 2015, 7(8): 10295 - 10320.
- [68] KRISTIN D M, BRADY C, STUART B, et al. Submerged aquatic

- vegetation mapping in coastal Louisiana through development of a spatial likelihood occurrence (SLOO) model[J]. *Aquatic Botany*, 2018, 151: 87 – 97.
- [69] MALTHUS T J. Chapter 9 – Bio – optical modeling and remote sensing of aquatic macrophytes[M]//MISHRA D R. *Bio – optical Modeling and Remote Sensing of Inland Waters*. Elsevier, 2017: 263 – 308.
- [70] FERNANDEZCARRILLO A, RODRIGUEZGALIANO V F, SANCHEZRODRIGUEZ E. Characterisation of macrophyte phenology in the Doñana marshland using MODIS NDVI time series from 2000 to 2015[C]// *Society of Photo – optical Instrumentation Engineers. Society of Photo – Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, 2017.
- [71] MA R, DUAN H, GU X, et al. Detecting aquatic vegetation changes in Taihu Lake, China using multi – temporal satellite imagery [J]. *Sensors*, 2008, 8(6): 3988 – 4005.
- [72] 曹引. 草型湖泊水质遥感监测技术及应用研究[D]. 上海: 东华大学, 2016.
- [73] 李瑶. 内陆水体水色参数遥感反演及水华监测研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2017.
- 栏目编辑 谭 艳 李文峻 王 湜