

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.10

第40卷 第10期

目次

京津冀区域重污染期间 PM _{2.5} 垂直分布及输送·····	肖致美, 徐虹, 李鹏, 唐遵, 陈魁, 杨宁, 郑乃源, 杨文, 邓小文 (4303)
肇庆市一次典型污染天气的污染物来源解析·····	常树诚, 廖程浩, 曾武涛, 杨柳林, 俞绍才, 陈雪, 郑剑平 (4310)
聊城市冬季 PM _{2.5} 中水溶性化合物的昼夜变化特征及来源解析·····	衣雅男, 侯战方, 孟静静, 燕丽, 王心培, 刘晓迪, 伏梦璇, 魏本杰 (4319)
沈阳市国三和国四排放标准不同车型柴油车 PM _{2.5} 和 PM ₁₀ 排放因子及碳组分源谱·····	赵雪艳, 王静, 祝胜男, 卞思思, 张宇, 王歆华, 殷宝辉, 杨文, 白志鹏 (4330)
城市生活垃圾露天焚烧排放 PM _{2.5} 中重金属污染特征及其暴露健康风险·····	程轲, 季婉婉, 郝炜伟, 王艳, 易鹏, 支国瑞, 张佳羽, 张洋, 张诗澜 (4337)
某工业城市大气颗粒物中 PAHs 的粒径分布及人体呼吸系统暴露评估·····	王娟, 郭观林, 秦宁, 侯荣, 杨敏, 康艺瑾, 段小丽 (4345)
南京城市大气氨-铵的高频演化及其气粒转化机制·····	邵生成, 常运华, 曹芳, 林煜棋, 范美益, 谢锋, 洪一航, 章炎麟 (4355)
广州地区大气棕色碳气溶胶吸收特性·····	李铸杰, 谭浩波, 郑军 (4364)
郑州市春季大气挥发性有机物污染特征及源解析·····	张翼翔, 尹沙沙, 袁明浩, 张瑞芹, 张猛, 于世杰, 李一丹 (4372)
基于原料类型及末端治理的典型溶剂使用源 VOCs 排放系数·····	梁小明, 陈来国, 孙西勃, 赵伟, 卢清, 孙家仁, 陈朋龙, 叶代启 (4382)
北京市典型溶剂使用行业 VOCs 成分谱·····	方莉, 刘明文, 陈丹妮, 李国昊, 王迪, 邵霞, 聂磊 (4395)
民用固体燃料源的 IVOCs 排放特征及燃烧温度的影响·····	卢雅静, 冯艳丽, 钱哲, 韩勇, 陈颖军 (4404)
利用地面观测资料和 AIRS 卫星资料评估 MACC 再分析臭氧数据中国地区的适用性·····	王闰芳, 马晓丹, 赵天良, 王红磊, 丁涵, 郑小波 (4412)
镁铝水滑石衍生复合氧化物的 COS 水解性能·····	魏征, 张鑫, 张凤莲, 蒋国霞, 张雨萌, 周化兵, 郝郑平, 解强 (4423)
长江源区大气降水化学特征及离子来源·····	汪少勇, 何晓波, 吴锦奎, 丁永建, 胡召富, 王利辉, 杨贵森 (4431)
连续极端降雨对东江流域水质影响分析·····	车蕊, 林澍, 范中亚, 李文静, 曾凡棠, 毛本健, 石雷, 黄志伟 (4440)
基于湖泊与出入湖水水质关联性研究:以鄱阳湖为例·····	黄冬凌, 倪兆奎, 赵爽, 张波涛, 冯明雷, 陈宏文, 李晓秀, 王圣瑞 (4450)
金泽水库上游来水及库区水质变化时空分布特征·····	刘明坤, 童俊, 胡波, 朱慧峰, 白晓慧 (4461)
太湖不同介质电导率时空变化特征·····	王瑞, 代丹, 张弛, 邓义祥, 何成达, 于涛 (4469)
大型浅水湖泊磷模型参数不确定性及敏感性分析·····	施媛媛, 李一平, 程月, 程一鑫 (4478)
基于 MODIS 影像的洪泽湖水生植被覆盖时空变化特征及影响因素分析·····	李娜, 施坤, 张运林, 龚志军, 查勇, 张毅博 (4487)
草型湖区沉积物营养盐分布与污染评价·····	张杰, 汪院生, 郭西亚, 朱金格, 邓建才 (4497)
太湖草型湖区沉积物中生物易降解物质组成与分布规律·····	祁闯, 方家琪, 张利民, 司泽君, 黄和笑, 王卓森, 李翔, 王磊, 王国祥 (4505)
淀山湖浮游动物群落时空分布特征及其与环境因子的关系·····	杜彩丽, 杨丽, 赵诣, 吴晓敏, 徐慕, 王丽卿, 张玮 (4513)
岩溶区不同土地利用下地下水碳同位素地球化学特征及生态意义·····	任坤, 潘晓东, 曾洁, 焦友军, 彭聪, 梁嘉鹏 (4523)
岩溶地下水化学对城镇化进程的时序响应·····	杨应增, 何守阳, 吴攀, 吴起鑫, 韩志伟, 罗维 (4532)
巴中北部岩溶山区地下水化学特征及演化分析·····	唐金平, 张强, 胡漾, 邵江, 何文君, 张宇 (4543)
δ-MnO ₂ /沸石纳米复合材料同时去除地下水中的铁锰氨氮·····	马文婕, 陈天虎, 陈冬, 刘海波, 程鹏, 张泽鑫, 陶琼, 张玉珠 (4553)
不同香蒲预处理方式对水平潜流人工湿地脱氮的强化效果·····	熊家晴, 卢学斌, 郑于聪, 王晓昌 (4562)
不同控制策略下短程硝化启动及运行工况优化·····	刘安迪, 赵凯亮, 刘宏, 黄利, 倪蓉, 陈永志 (4569)
启动三级 PN/A 颗粒污泥反应器处理高浓度氨氮废水·····	吉晓庆, 齐泽坤, 钱飞跃, 沈耀良, 王建芳 (4578)
聚丙烯环生物滴滤塔去除实际市政污水厂硫化氢性能及微生物群落分析·····	孙事昊, 贾沛沛, 陈凯琦, 彭永臻, 张亮 (4585)
典型工业区土壤多环芳烃污染特征及影响因素·····	冉宗信, 陈靖宇, 王亚婷, 邢智, 魏威, 余江 (4594)
5 种典型有机磷酸酯在水-土壤界面吸附特征及影响因素·····	何明靖, 杨志豪, 魏世强 (4604)
Cu ²⁺ 和 Pb ²⁺ 在 BS-12 两性修饰膨润土上的吸附及其交互作用·····	卜帅宾, 孟昭福, Sambath Yek, 张梦飞, 王腾, 任爽, 张凌恺 (4611)
滇东南峰丛洼地土壤重金属含量、来源及潜在生态风险评价·····	洪涛, 孔祥胜, 岳祥飞 (4620)
贵州罗甸北部喀斯特地区耕地土壤镉含量特征与风险评价·····	唐启琳, 刘秀明, 刘方, 汪花, 王世杰 (4628)
渝西地区镉轻度污染稻田安全利用技术·····	李娜, 贺红周, 冯爱煊, 李伟, 蒋珍茂, 魏世强 (4637)
不同作物对土壤中 Cd 的富集特征及低累积品种筛选·····	陈小华, 沈根祥, 白玉杰, 郭春霞, 钱晓雍, 顾海蓉, 胡双庆, 赵庆节, 王振旗, 付侃 (4647)
小麦和水稻对纳米硒的吸收和转运·····	王雅琦, 朱丽娜, 李奎, 王琪, 王康, 郭岩彬, 李花粉 (4654)
微塑料对小麦生长及生理生化特性的影响·····	廖苑辰, 娜孜依古丽·加合甫别克, 李梅, 王晓琳, 蒋丽娟 (4661)
药渣生物炭基质联合麦饭石对土壤-黑麦草体系的调控与机制·····	肖亮亮, 丁园 (4668)
磺胺甲噁唑污染土壤中微生物群落结构与抗生素抗性基因的分布特征·····	张海丰, 史明明, 孙艳梅, 程首涛, 高浩泽, 王旭明 (4678)
生活垃圾渗滤液处理过程中抗生素抗性基因的变化特征·····	黄福义, 周曙仡聃, 颜一军, 苏建强, 朱永官, 张炯 (4685)
有机肥施用对土壤有机碳组分和团聚体稳定性的影响·····	邵慧芸, 李紫玥, 刘丹, 李熠凡, 鲁璐, 王旭东, 张阿凤, 王彦丽 (4691)
灌水和生物炭施用对水稻土呼吸温度敏感性的影响·····	周鹏, 祁乐, 牛海东, 王子芳, 高明 (4700)
柑橘/大蒜套作下土壤 CO ₂ 排放及其效率对秸秆还田量的响应·····	游璟, 倪九派, 黄容, 张洋, 谢德体 (4708)
增温及秸秆施用对豆-麦轮作土壤微生物量碳氮及细菌群落结构的影响·····	张婷婷, 陈书涛, 王君, 王朝辉, 胡正华 (4718)
O ₃ 胁迫下冬小麦总初级生产力的损耗模拟·····	徐静馨, 郑有飞, 王圣, 王立稳, 赵秀勇, 麦博儒 (4725)
2000~2015 年中国地级市化肥使用量的时空变化特征·····	潘晓东, 李品, 冯兆忠, 段昌群 (4733)
《环境科学》征订启事 (4394) 《环境科学》征稿简则 (4449) 信息 (4584, 4593, 4653)	

基于 MODIS 影像的洪泽湖水生植被覆盖时空变化特征及影响因素分析

李娜^{1,2,3}, 施坤^{1*}, 张运林¹, 龚志军¹, 查勇^{2,3}, 张毅博¹

(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008; 2. 南京师范大学虚拟地理环境教育部重点实验室, 南京 210023; 3. 南京师范大学地理科学学院, 南京 210023)

摘要: 水生植被是湖泊生态系统的重要组成部分, 在改善湖泊水质、维护生物多样性方面起到重要的作用。当前我国湖泊普遍面临富营养化和水生植被退化等问题, 监测水生植被时空变化特征、探究主要影响因子, 对于保护水生植被和修复富营养化湖泊生态系统具有重要意义。因此, 本文选用 2007~2017 年中等分辨率卫星 MODIS 数据, 引入植被频次法 (vegetation present frequency, VPF) 提取水生植被信息, 结合气象因子和人类活动分析了洪泽湖近 11 a 水生植被的时空变化特征及潜在影响因素。结果表明, 洪泽湖水生植被 VPF 存在着明显的季节和年际变化, VPF 春夏显著高于秋冬 ($P < 0.05$, one way-ANOVA), 最大值 0.43 出现在 6 月, 最小值 0.21 出现在 1 月, 4~10 月生长期显著高于其他月份。年际上, 洪泽湖北部湖区 (Z1) VPF 呈现显著降低的趋势 ($R^2 = 0.56$, $P < 0.01$), 由 2008 年的最高值 0.50 下降到 2016 年最低值 0.27, 下降了 45.8%, 表明水生植被在该地区呈现快速退化趋势。空间上, 洪泽湖水生植被 VPF 整体上由沿岸带向开敞水域递减, 其中北部 (Z1) 和西部湖区 (Z2) 高于其他湖区 (Z3~Z5)。洪泽湖全湖 VPF 年际变化受年均气温、年降水量、年平均风速和年日照时数影响不显著 ($P > 0.05$), 表明气候要素对洪泽湖水生植被年际变化影响较小。在采砂活动和水生植被共同存在的北部湖区, 总悬浮物浓度与 VPF 存在显著负相关 ($R^2 = 0.48$, $P < 0.01$), 表明采砂导致的总悬浮物浓度增加是影响 Z1 区域水生植被退化的重要原因, 又以采砂区附近表现尤为明显。

关键词: MODIS 影像; 洪泽湖; 水生植被; 气象因子; 采砂活动

中图分类号: X524; X87 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)10-4487-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.201903017

Spatio-temporal Variations in Aquatic Vegetation Cover and the Potential Influencing Factors in Lake Hongze Based on MODIS Images

LI Na^{1,2,3}, SHI Kun^{1*}, ZHANG Yun-lin¹, GONG Zhi-jun¹, ZHA Yong^{2,3}, ZHANG Yi-bo¹

(1. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. Key Laboratory of Virtual Geographic Environment of Education Ministry, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China; 3. School of Geography, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

Abstract: Aquatic vegetation is an important part of lake ecosystems and plays a vital role in improving water quality and maintaining biodiversity. At present, China's lakes are facing eutrophication and the degradation of aquatic vegetation. The monitoring of temporal and spatial variations in aquatic vegetation and elucidating the main influencing factors are of great significance for protecting aquatic vegetation and restoring eutrophic lake ecosystems. Therefore, we introduced the Vegetation Present Frequency (VPF) method to extract data on aquatic vegetation and combined this with meteorological factors and human activities to analyze the temporal and spatial in Lake Hongze based on MODIS data from 2007 to 2017. The VPF of aquatic vegetation in Lake Hongze showed clear seasonal and interannual variations. The VPF was significantly higher in spring and summer than in autumn and winter ($P < 0.05$, one way-ANOVA). The maximum VPF of 0.43 occurred in June but the minimum VPF of 0.21 was recorded in January. The VPF from April to October, during the growing season of aquatic vegetation, was significantly higher than in other months. The annual mean VPF of the northern lake area (Z1) decreased significantly ($R^2 = 0.56$, $P < 0.01$), ranging from the highest value of 0.50 in 2008 to the lowest value of 0.27 in 2016 (a decrease of 45.8%), indicating a significant loss of aquatic vegetation. Spatially, the VPF of Lake Hongze decreases from the coastal zone to the open water, and the VPF values of the northern (Z1) and western sub-lakes (Z2) are higher than that of other lakes segments (Z3-Z5). The interannual variation in VPF for the entire lake was not significantly affected by annual mean temperature, annual precipitation, annual mean wind speed, or annual sunshine duration ($P > 0.05$), indicating that meteorological factors have little influence on interannual variation of aquatic vegetation in this lake. However, total suspended matter concentration was significantly negatively correlated with VPF in Z1 area ($R^2 = 0.48$, $P < 0.01$), with strong sand-mining activities occurring in this area. These results indicate that the increase of total suspended matter concentrations caused by sand mining is an important driving factor in the decline of aquatic vegetation in the Z1 segment.

Key words: MODIS images; Lake Hongze; aquatic vegetation; meteorological factors; sand mining activity

收稿日期: 2019-03-03; 修订日期: 2019-05-03

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41771472, 41621002); 中国科学院重点部署项目 (ZDRW-ZS-2017-3-4); 中国科学院青年创新促进会项目 (2017365)

作者简介: 李娜 (1994~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向水色遥感, E-mail: nli2018@163.com

* 通信作者, E-mail: kshi@niglas.ac.cn

水生植被作为湖泊生态系统的重要组成部分,在改善水质和维护生物多样性方面具有重要作用^[1].水生植被不仅能削减风浪、固定底泥减少沉积物再悬浮和营养盐释放,还可以为动物提供食物和栖息地,是湖泊中的主要初级生产者.当前,国际及我国湖泊均面临富营养化和水生植被退化等问题^[2~6].水生植被作为评价和恢复湖泊生态系统健康的重要指标和手段受到广泛关注^[7,8].因此,湖泊水生植被的时空分布、变化特征及其影响因素对于湖泊管理和恢复生态系统健康具有重要的意义.

定点采样与分析等水生植被传统调查方法,虽然能够准确、详细获取水生植被的种类和生物量,但是费时费力,可重复性差,制图周期长,难以满足对水生植被大尺度和长期动态监测的需求^[9~11].尤其对于像鄱阳湖、太湖和洪泽湖等大型湖泊水生植被时空分布的获取,传统方法显得力不从心.遥感技术为解决大尺度、动态监测等问题提供了一个有效手段^[12],并成功应用于湖泊水生植被的监测^[13~17].于泉洲等^[18]利用 16d MODIS 合成的植被指数数据,揭示了南四湖 2000~2015 年植被覆盖在空间上由湖岸向湖心减小的带状分布;年际变化具有阶段性和年内变化双峰型的特征,并揭示了植被覆盖度与湖泊水位密切相关.张寿选等^[19]利用 Landsat 数据反演透明度并与植被指数(NDVI 和 EVI)建立分类决策树,得到 2002 年 7 月 15 号太湖水生植被面积约 407 km².

洪泽湖是我国南水北调东线的重要调蓄湖泊,影响着周围城市和下游的饮用水安全,随着洪泽湖富营养化发展,局部水域发生小范围蓝藻水华现象,水质受到广泛关注^[20].与此同时,相关研究表明洪泽湖的水生植被自 20 世纪 50 年代以来发生了显著地退化^[21,22],但 2008 年后关于洪泽湖水生植被的研究相对较少.陶婷等^[23]利用 Landsat 数据基于 NDVI 和 MNDWI 指数建立决策树将洪泽湖湿地分为养殖场、敞水区、裸地、沉水植物、挺水植物和浮水植物,但该研究缺少对于水生植被长时间变化的分析.Yu 等^[24]基于 MODIS 数据比较了 3 种植被指数(FAI、EVI 和 NDVI)对于 2000~2009 年洪泽湖国家湿地自然保护区湿地覆盖变化的有效性,结果表明 FAI 能够准确估算湿地植被覆盖,且植被覆盖的变化与洪水和日照时数有关.虽然该文章分析了洪泽湖的湿地植被长时间序列的变化,但是研究区仅聚焦国家湿地自然保护区,难以反映洪泽湖全湖水生植被的长期动态变化趋势.

因此,本文选用 2007~2017 年 MODIS 数据,利用植被频次法(vegetation present frequency, VPF)

提取水生植被信息,探究洪泽湖近 11a 水生植被的时空分布及变化特征,深入分析其长期变化的潜在影响因素.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

洪泽湖(33°06'~33°40'N, 118°10'~118°52'E)是我国第四大淡水湖泊,位于淮河流域中游,是一个典型的吞吐性浅水湖泊(图 1),平均水位 12.5 m,水域面积为 1 597 km²,平均水深 1.90 m^[25].洪泽湖位于中国南北气候过渡带,属于暖温带半湿润季风气候区,降水年内分布极不均匀,冬春干旱少雨,夏秋闷热多雨.洪泽湖有 7 条河流注入,其中淮河径流的贡献最大,占入湖径流量 70% 以上;主要的出水口包括长江淮河水道、北部的灌溉水渠和淮沭河,大约有 60%~70% 的湖水由通江水道入海.同时,洪泽湖还为周边超过 800 km² (120 万亩)耕地提供水源灌溉,是粮食生产安全的重要保障.另外,洪泽湖也具有重要的生态功能,为淡水生物提供了食物和栖息地.近年来由于自然环境的演变、环境污染以及人类不合理的开发活动,致使洪泽湖水质恶化^[26],植被退化^[27],湿地生态功能下降^[23],生态环境呈现退化趋势,严重制约着洪泽湖水资源的可持续利用和社会经济的可持续发展.自 2007 年发现优质黄沙资源以来,受高额利润的驱动,洪泽湖非法采砂船由原来的几十艘发展到 2016 年的 600 多艘^[28].根据水利部门的统计每天洪泽湖被采的黄沙资源高达 30 万 t.剧烈的采砂活动不仅破坏了湖泊底质结构和底栖动物产卵场所,还通过扰动沉积物

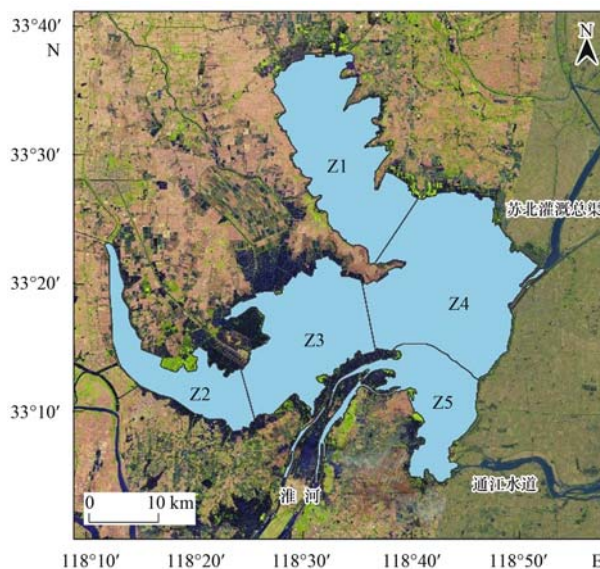


图 1 洪泽湖及其 5 个分区示意

Fig. 1 Map of Lake Hongze and its five sub-regions

造成悬浮物浓度增加和内源营养盐释放, 降低了水体透明度, 改变了湖泊的物理和化学环境, 进而影响到湖泊生态系统结构和功能. 为了更好地分析洪泽湖水生植被的时空变化, 将洪泽湖分为 5 个湖区 (Z1、Z2、Z3、Z4 和 Z5, 见图 1).

1.2 MODIS 影像及预处理

为了高频动态的监测洪泽湖水生植被覆盖的多年变化, 本研究选用重访周期为 1 d 的 MODIS 卫星数据, 从 NASA Ocean color 网站 ([https://](https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/)

oceancolor.gsfc.nasa.gov/) 下载得到 2007 ~ 2017 年 4 158 景 MODIS-Aqua L0 数据, 利用 Seadas 7.4 软件进行辐射定标、几何校正、重采样和大气校正获得经瑞利散射校正后、空间分辨率为 250 m 的地表反射率产品. 经过人工目视鉴别, 去除受云、太阳耀斑和气溶胶影响超过研究区面积 1/3 的影像, 得到 1 284 幅高质量影像用于提取水生植被 (图 2). 大气校正采用 Liu 等^[29] 提出的基于陆地植被像元的大气校正法.

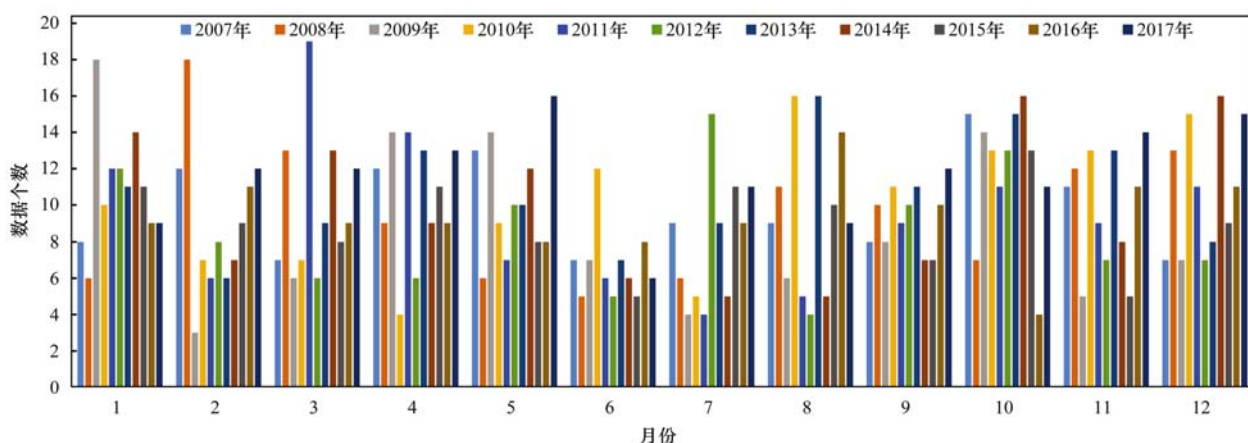


图 2 2007 ~ 2017 年洪泽湖 MODIS-Aqua 数据的时间分布

Fig. 2 Temporal distributions of the MODIS-Aqua data covering Lake Hongze during the period 2007-2017

1.3 水生植被提取方法

目前国内外利用遥感影像提取水生植被的方法众多, 如决策树、监督分类、非监督分类、随机森林^[30]和面向对象等. 考虑到洪泽湖部分水域已出现蓝藻水华, 而蓝藻水华和水生植被具有相似的光谱特征, 利用遥感影像提取水生植被时容易造成误差^[31]. 因此, 本研究选择 Liu 等^[32] 针对浅水富营养化湖泊提出的植被频次法以提取洪泽湖 2007 ~ 2017 年的水生植被. 首先, 计算漂浮藻类指数 (floating algal index, FAI) 利用太湖水生植被阈值 -0.025 将植被信号 (蓝藻水华和水生植物) 从开敞水域中提取出来, 并重新赋值为 1, 水域为 0. 由于蓝藻水华受温度、营养盐和风速等影响, 出现位置飘忽不定并且存在时间短, 而水生植被的生长周期比较长, 出现位置固定, 因此通过计算每个像元植被信号出现的频次, 并根据频次区分蓝藻水华和 水生植被, 进而提取获得水生植被覆盖信息. 由于 VPF 仅能反映水生植被的覆盖程度, 而无法揭示水生植被类型, 因此当区域中水生植被信号出现的频率减小时, 表明水生植被覆盖减少, 水生植被发生退化.

$$VPF_j = \frac{\sum_{i=1}^n FAI_{i,j}}{n} \quad (1)$$

$$FAI = R_{rc}(859) - R'_{rc}(859) \quad (2)$$

$$R'_{rc}(859) = R_{rc}(645) + [R_{rc}(1240) - R_{rc}(645)] \times \frac{859 - 645}{1240 - 645} \quad (3)$$

式中, n 为总的影像数; VPF_j 为像元 j 在 n 幅影像中植被信号出现的频率; $R_{rc}(\lambda)$ 为 MODIS 经瑞利散射校正后的遥感反射率, λ 为波长 (nm).

1.4 气象数据

本研究所使用的气象数据取自临近洪泽湖的盱眙气象站, 从中国气象数据网 (<http://data.cma.cn/>) 下载得到 2007 ~ 2017 年的数据, 其中包括逐日气温、风速、降雨量和日照时数等.

1.5 统计分析

运用 SPSS 22.0 软件对于数据进行统计分析, 包括平均值、最大值、最小值和标准差, 计算参数间皮尔逊相关系数 (r) 和进行线性回归分析, 定义 $P \leq 0.05$ 为统计学意义上显著, 否则不显著. 另外, 单因素方差分析 (one way-ANOVA) 和非参数检验 (Mann-Whitney U test) 被用于检验季节和年际间的差异. 同时, 引入变异系数 (coefficient of variation, C. V.) 来检测洪泽湖水生植被的变化及其稳定性.

$$C. V. = \frac{SD}{Mean} \quad (4)$$

式中, SD 为标准差, Mean 为平均值.

2 结果与分析

2.1 VPF 季节变化

将经过预处理的1 284幅高质量影像应用到模型上[公式(1)],得到2007~2017年洪泽湖季节平均VPF的空间分布(图3)。总体上,洪泽湖VPF存在明显的季节和空间差异,春夏高、秋冬低($P<0.05$, one-way ANOVA),其中春、夏、秋、冬的VPF平均值分别为 0.41 ± 0.04 、 0.50 ± 0.09 、 0.42 ± 0.09 和 0.36 ± 0.08 ,与水生植被的生长节律一致。从月份上看,VPF月均取值为0.21~0.43,最

高值出现在6月,最低值出现在1月,与VPF季节变化一致。这种季节性差异主要是由水生植被季节性的生长引起。另外,通过单因素方差分析发现洪泽湖4~10月VPF显著高于其他月份($P<0.05$),表明4~10月是洪泽湖植被的生长季。对于全湖和不同湖区季节VPF进行时间序列统计,只有在Z2区域夏季VPF发生显著增加($R^2=0.53$, $P<0.05$, $N=11$)。相反,Z1湖区近11a的季节时间序列VPF显著减小($r=-0.309$, $P<0.05$, $N=44$),最大值0.76出现在2014年夏季,最小值0.29出现在2017年冬季。

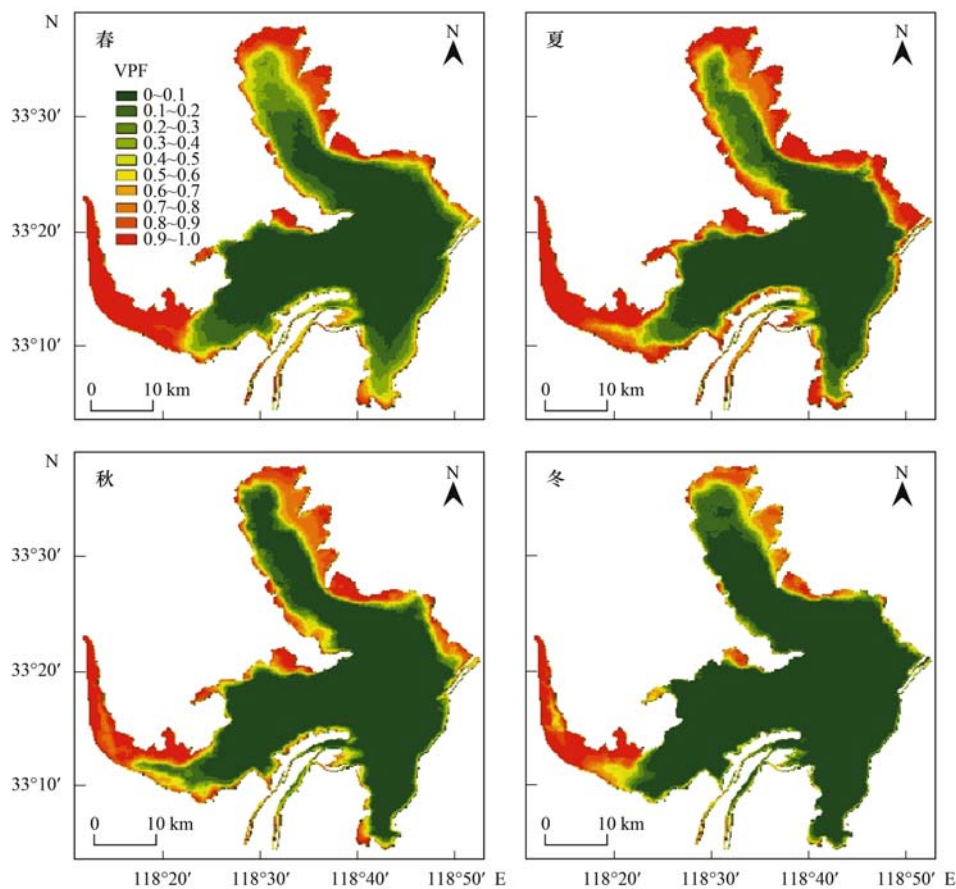


图3 2007~2017年洪泽湖季节VPF空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of seasonal VPF values in Lake Hongze from 2007 to 2017

由图3可知,洪泽湖季节VPF呈现出显著空间异质性。总体上,VPF在空间上沿岸带大于开敞水域,高值出现在洪泽湖西部和北部湖区,说明洪泽湖水生植被整体分布格局沿岸带高于开敞水域,西

部和北部湖区高于中部、东部和南部湖区。对全湖和不同湖区VPF进行统计分析(表1),Z2湖区VPF值全年显著高于其他湖区($P<0.05$, Mann-Whitney U test),并维持在0.67~0.83高值范围,

表1 2007~2017年洪泽湖全湖及5个湖区多年不同季节VPF均值及标准差

Table 1 Mean VPF values and standard deviation in the entire lake and its five sub-lake regions during the period 2007-2017

季节	全湖	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5
春(3~5月)	0.31 ± 0.34	0.45 ± 0.31	0.83 ± 0.27	0.15 ± 0.23	0.12 ± 0.21	0.32 ± 0.27
夏(6~8月)	0.38 ± 0.37	0.54 ± 0.32	0.83 ± 0.23	0.24 ± 0.32	0.19 ± 0.31	0.32 ± 0.32
秋(9~11月)	0.27 ± 0.33	0.4 ± 0.34	0.69 ± 0.3	0.17 ± 0.27	0.12 ± 0.23	0.19 ± 0.25
冬(12~次年2月)	0.19 ± 0.29	0.27 ± 0.29	0.67 ± 0.34	0.09 ± 0.19	0.05 ± 0.12	0.12 ± 0.18

表明在 Z2 区域水生植被有较高分布. Z3 和 Z4 区域大部分维持在 0 ~ 0.1 低值范围, 表明水生植被在开敞水域 (Z3 和 Z4) 出现频次较小. 水生植被上述空间分布与野外采样调查结果一致.

2.2 VPF 年际变化

全湖 VPF 年际变化范围是 0.24 ~ 0.37, 最高值出现在 2014 年, 最低值出现在 2016 年 (图 4), 整体上全湖呈现出微弱的下降趋势但在统计上不显著 ($P > 0.05$). 由于洪泽湖水生植被分布具有显著的空间差异 (图 3), 因此根据该结果得出洪泽湖水生植被覆盖在近 11 a 没有显著变化的结论是草率的. 由图 3 可知, 洪泽湖的水生植被出现频次高的

地方主要位于 Z1 和 Z2 湖区. 因此对水生植被的主要分布区和时间做线性分析发现在 Z1 湖区年 VPF 呈显著下降的趋势 ($R^2 = 0.56$, $P < 0.01$, $N = 11$), 从 2008 年的最高值 0.50 下降到 2016 年最低值 0.27, 下降 45.8%, 反映了 Z1 湖区水生植被覆盖减小. 其中在 Z2 湖区整体有上升的趋势但并不显著 ($P > 0.05$), 表现出阶段性 2007 ~ 2014 年 VPF 显著地上升 ($R^2 = 0.82$, $P < 0.01$) 而后下降的变化趋势. 另外, 年 VPF 大于 0.30 的区域主要位于 Z1 和 Z2 湖区, 其他湖区大部分水域年 VPF 小于 0.30, 指示了 2007 ~ 2017 年洪泽湖水生植被覆盖空间分布格局变化不大.

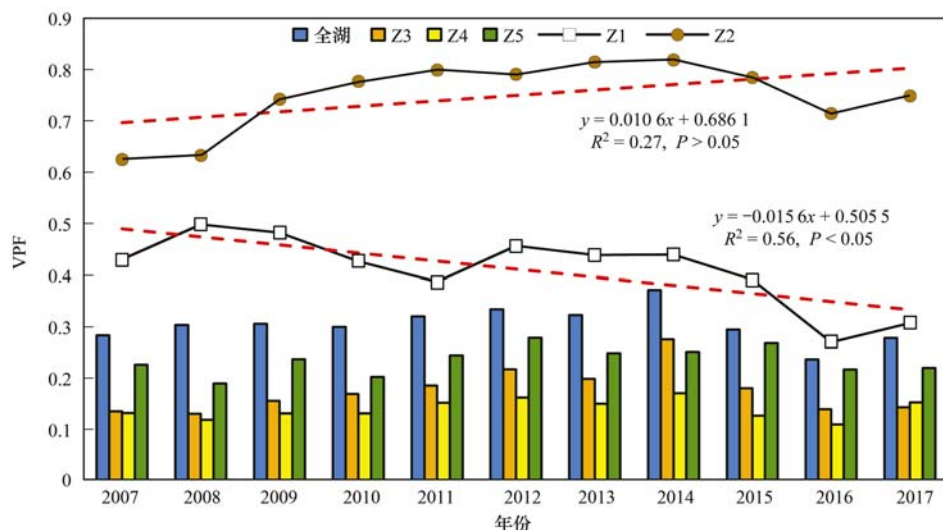


图 4 2007 ~ 2017 年洪泽湖不同湖区 VPF 时间序列

Fig. 4 Time series data of annual VPF in different regions during the period 2007-2017

2.3 VPF 空间分布

图 5 给出 2007 ~ 2017 年洪泽湖逐年和多年平均 VPF 空间分布. 从中可以看出, 洪泽湖 VPF 具有显著的空间异质性, 反映水生植被空间分布具有较大差异. 全湖 VPF 值的变化范围介于 0 ~ 1, 平均值为 0.28 ± 0.32 , 呈现出由沿岸带向开敞水域带状递减的规律, 表明洪泽湖水生植被空间分布由湖岸向湖心呈带状分布. 为进一步定量直观地获取洪泽湖水生植被分布, 对于 5 个湖区做空间上平均统计, 其中 VPF 最高值出现在 Z2 湖区为 0.75 ± 0.27 , 其次是 Z1 湖区为 0.41 ± 0.30 , Z4 区域的 VPF 值最低为 0.11 ± 0.20 , 表明了水生植被的主要分布区为 Z1 和 Z2, 与以往的研究结果相同^[27]. 其中, Z5 区域为通江水道, 湖流扰动剧烈和换水周期快不利于水生植被的生长^[1], 水生植被仅在该区域西南侧浅水区少量分布.

3 讨论

3.1 气象因子对洪泽湖水生植被 VPF 变化的影响

湖泊中水生植被受多种环境因子的影响, 如营

养盐、透明度、温度和日照时数等^[33]. 2007 ~ 2017 年洪泽湖年平均风速呈现显著下降趋势 ($R^2 = 0.74$, $P < 0.01$), 而年降水量、平均温度和年日照时数没有明显变化趋势 ($P > 0.05$), 见图 6. 降水的年际变化范围为 0.74 ~ 1.38 m, 气温、日照时数和风速的多年均值分别为 $(15.64 \pm 0.37) ^\circ\text{C}$ 、 $(1847.47 \pm 192.82) \text{ h}$ 和 $(1.99 \pm 0.13) \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. 为了进一步探索气象因子对于洪泽湖水生植被覆盖的影响, 对全湖及主要植被分布区域 (Z1 和 Z2) VPF 与气温、日照时数、降水量和风速进行相关性分析, 结果发现 (图 7) Z2 湖区年 VPF 仅与年日照时数具有显著正相关 ($R^2 = 0.66$, $P < 0.01$), 但与其它因素无显著相关 ($P > 0.05$), 说明 Z2 湖区水生植被覆盖的年际变化受日照时间和光照影响显著, 其他因素影响不显著, 与 Yu 等^[24] 在洪泽湖国家湿地公园的研究结果一致. 另外, Z1 湖区的年 VPF 仅与年平均风速之间表现出显著正相关 ($R^2 = 0.51$, $P < 0.05$), 而全湖年 VPF 与气温、降水量、日照时数和风速无显著相关 ($P > 0.05$).

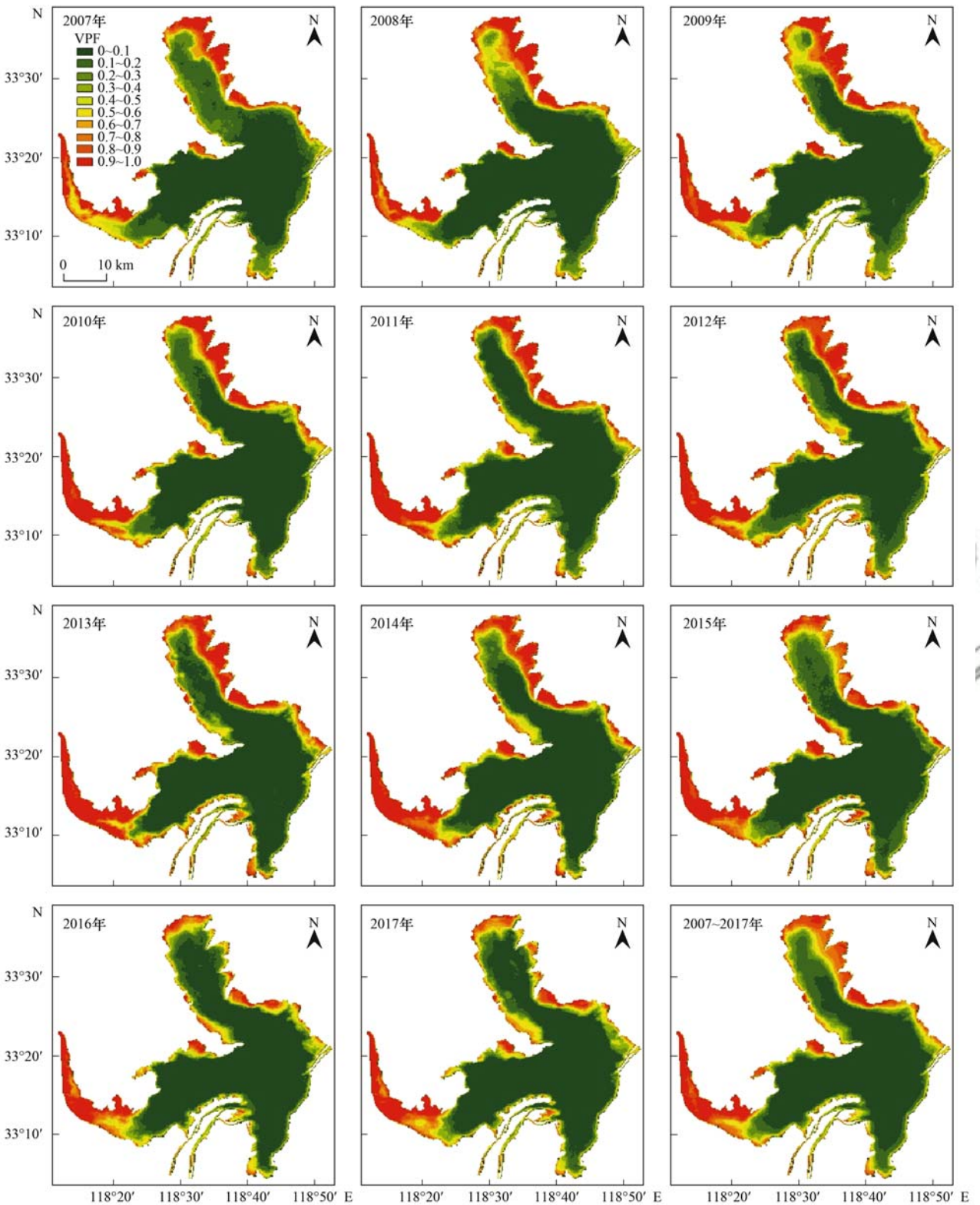


图 5 2007 ~ 2017 年洪泽湖逐年和多年平均 VPF 空间分布

Fig. 5 Spatial patterns of annual and multi-year mean VPF values in Lake Hongze during the period 2007-2017

上述结果表明,气温、降水量和日照时数均对洪泽湖全湖和 Z1 区域水生植被年变化影响不显著.对于大型浅水湖泊而言,风速是扰动湖泊水体的重要因素,造成沉积物再悬浮和总悬浮物浓度增加,降低水体透明度和真光层深度^[34, 35],不利于水生植被的萌发和生长^[27, 33].此外,风浪扰动还

会增加对水生植物的拖拽力,进而对水生植物造成物理伤害并限制其空间分布^[1],因此理论上风速与水生植被应该表现为负相关. Z1 区域年 VPF 与年均风速间显著正相关但与理论相悖,不能据此得出 Z1 区域年 VPF 的变化主要受风速的影响这一结论.

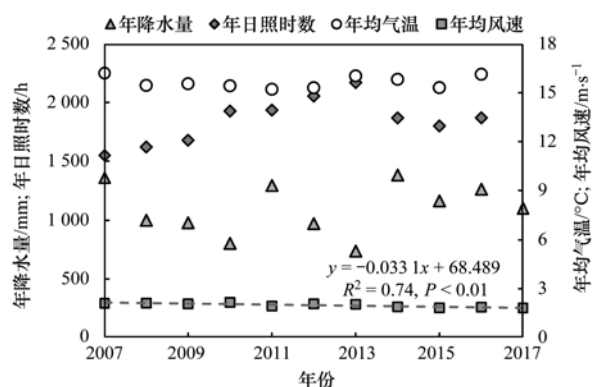


图6 2007~2017年洪泽湖年均气温、日照时数、年降水量及年均风速

Fig. 6 Variation of annual mean climate variables in Lake Hongze from 2007 to 2017

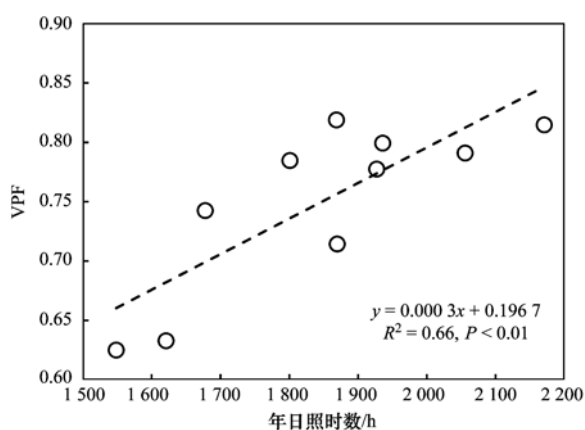


图7 2007~2017年Z2区域年日照时数与VPF线性回归

Fig. 7 Linear regression between annual mean sunshine duration and VPF estimated from MODIS data from 2007 to 2017 in the Z2 region

3.2 人为采砂对洪泽湖植被指数 VPF 变化的影响

人类活动被认为是影响湖泊水质和生态的重要因素,如围垦养殖导致1978~2006年洪泽湖西岸挺水植被的退化,并逐步被沉水植被取代^[36]。另外,随着中国城市化进程的加快,对于建筑用沙的需求日益增加,在高额利润的驱动下,采砂活动常见于我国长江中下游流域和淮河流域的湖泊中,如鄱阳湖^[37]和骆马湖^[38]。自2007年以后洪泽湖发现大量优质黄沙资源,采砂船由原来的几十艘增加到2016年的600多艘^[39]。Duan等^[40]利用Landsat数据定量计算了采砂船的数量与总悬浮物浓度增加量之间具有显著正相关,表明洪泽湖总悬浮物浓度的增加主要由采砂活动引起。为了进一步探究采砂活动对于水生植被的影响,本文引入曹志刚等^[41]基于MODIS红光波段(645 nm)和近红外波段(1240 nm)去瑞利散射校正后的遥感反射率建立的总悬浮物浓度(total suspended matter, TSM)经验估算模

型,得出洪泽湖近11 a季节总悬浮物浓度介于 $17.49 \sim 35.10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,平均值为 $(23.40 \pm 4.67) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,2016年年平均浓度比2007年增加了27.7%。洪泽湖2007~2017年采砂活动造成的总悬浮物浓度增加导致Z1区域透明度的显著降低,由2007年0.71 m下降到2016年0.53 m,下降了25.4%,指示了洪泽湖水下光环境变暗^[42]。剧烈的采砂活动显著增加了水体中总悬浮物浓度^[41, 43],进而增加光在水中的漫射衰减,降低透明度和真光层深度^[35, 44],将会对沉水植物的萌发和生长产生影响,限制水生植被的分布。根据2013年洪泽湖全湖水生生物调查结果显示,洪泽湖水生植被类型以沉水植物为主,且集中于成子湖区(Z1)。因此对于采砂区域和水生植被共同存在的Z1区域VPF与总悬浮物浓度做线性回归(图8),结果显示两者存在显著负相关($R^2 = 0.48$, $P < 0.01$),表明Z1区域VPF的减少与人为采砂活动引起的总悬浮物浓度增加密切相关。

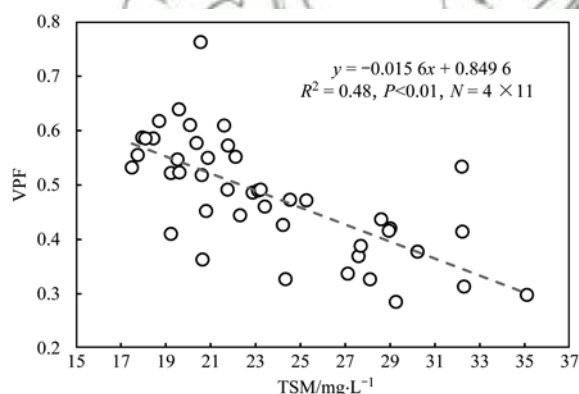
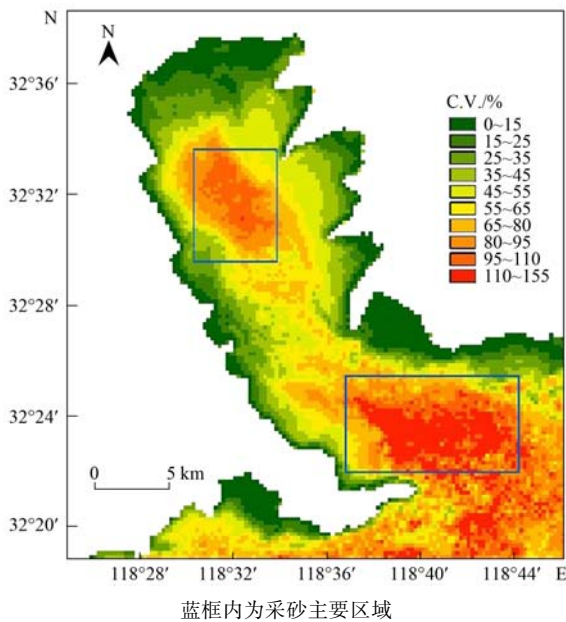


图8 2007~2017年Z1区域季平均总悬浮颗粒物浓度与VPF的线性回归

Fig. 8 Correlations between seasonal mean TSM concentrations and VPF in the Z1 region during the period 2007-2017

为了进一步衡量采砂活动对于水生植被空间上的影响,基于像元计算Z1区域年VPF变异系数来表征洪泽湖水生植被空间上的变化(图9)。从图9中可知,开敞水域VPF变异系数明显高于沿岸地区,表明水生植被的稳定性由开敞水域向湖岸逐渐增加。就Z1区域而言,变异系数在湖心及南部区域存在显著地高值区($C.V. > 95\%$),空间上与Duan等^[40]研究的采砂主要集中区分布一致。进而在空间上证明了采砂活动是Z1区域水生植被减少的重要原因,尤其对靠近采砂区域的水生植被影响最为显著。

尽管2017年3月以来洪泽湖的疯狂采砂活动已被禁止,但过去10 a采砂活动对水生植被和湖泊生态系统的破坏和影响将持续相当长时间。采砂活



蓝框内为采砂主要区域

图9 2007~2017年Z1区域年VPF变异系数空间分布

Fig. 9 Coefficient of variation of annual VPF in the Z1 region during the period 2007-2017

动被禁止后,水体扰动减少,总悬浮物浓度会有所降低,而透明度和水下光环境会有所改善,形成有利于水生植被生长的光学环境,但由于采砂造成的湖泊底质破坏和部分水域水深加深,水生植被在短期内可能很难恢复到以前的水平.伴随着水生植被退化和底泥营养盐释放增加,甚至有可能出现从原来以水生植被为主的草型生态系统向以蓝藻水华为主的藻型生态系统突变.因此未来需要继续加强洪泽湖水环境和水生植被的遥感动态监测,服务于湖泊生态系统的恢复和管理.

4 结论

(1)2007~2017年洪泽湖水生植被VPF呈现显著的时空特征,春夏显著高于秋冬,体现明显季节变化,全湖平均没有发生显著年变化,但水生植被分布广泛、人为采砂活动强烈的Z1湖区VPF呈显著降低的趋势,指示水生植被在该地区出现退化;空间上,洪泽湖VPF整体上由沿岸带向开敞水域递减,其中Z1和Z2湖区的VPF高于其他湖区,Z1区域的水生植被稳定性由开敞水域向沿岸带增加.

(2)因子分析显示,洪泽湖Z2区VPF仅与年日照时数呈显著正相关,表明光照对VPF有显著影响,而温度和降水等影响不明显;在采砂活动强烈的Z1湖区,总悬浮物浓度与VPF呈显著负相关,表明采砂导致的总悬浮物浓度增加是影响Z1区域水生植被退化的重要原因.尽管人为采砂活动已得到有效禁止,但采砂活动对水生植被和湖泊生态系

统的破坏和影响还将持续相当长时间.

致谢:感谢彭凯和邹伟在洪泽湖水质数据采集上提供的帮助、徐轩和曹志刚等在MODIS批处理代码上提供的帮助!

参考文献:

- [1] 朱金格, 胡维平, 刘鑫, 等. 湖泊水动力对水生植物分布的影响[J]. 生态学报, 2019, **39**(2): 454-459.
Zhu J G, Hu W P, Liu X, *et al.* A review of the studies on the response of aquatic vegetation to hydrodynamic stress in lakes [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, **39**(2): 454-459.
- [2] Zhang Y L, Jeppesen E, Liu X H, *et al.* Global loss of aquatic vegetation in lakes [J]. *Earth-science Reviews*, 2017, **173**: 259-265.
- [3] 许秋瑾, 金相灿, 颜昌宙. 中国湖泊水生植被退化现状与对策[J]. 生态环境, 2006, **15**(5): 1126-1130.
Xu Q J, Jin X C, Yan C Z. Macrophyte degradation status and countermeasures in China [J]. *Ecology and Environment*, 2006, **15**(5): 1126-1130.
- [4] Liu J G, Yang W. Water sustainability for China and beyond [J]. *Science*, 2012, **337**(6095): 649-650.
- [5] Hou X J, Feng L, Chen X L, *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.
- [6] 胡旻琪, 张玉超, 马荣华, 等. 巢湖2016年蓝藻水华时空分布及环境驱动力分析[J]. 环境科学, 2018, **39**(11): 4925-4937.
Hu M Q, Zhang Y C, Ma R H, *et al.* Spatial and temporal dynamics of floating algal blooms in Lake Chaohu in 2016 and their environmental drivers [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(11): 4925-4937.
- [7] Qin B Q, Yang L Y, Chen F Z, *et al.* Mechanism and control of lake eutrophication [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, **51**(19): 2401-2412.
- [8] 李洁, 蒋丽娟, 王晓琳, 等. 凤眼莲对富营养化水体中氨氧化和反硝化微生物的影响[J]. 环境科学, 2017, **38**(10): 4253-4261.
Li J, Jiang L J, Wang X L, *et al.* Effect of *Eichhornia crassipes* on ammonification and denitrification microorganisms in eutrophic freshwaters [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(10): 4253-4261.
- [9] 崔心红, 陈家宽, 李伟. 长江中下游湖泊水生植被调查方法[J]. 武汉植物学研究, 1999, **17**(4): 357-361.
Cui X H, Chen J K, Li W. Survey methods on aquatic macrophyte vegetation in lakes in the middle and lower reaches of Changjiang River [J]. *Journal of Wuhan Botanical Research*, 1999, **17**(4): 357-361.
- [10] Wang S S, Gao Y N, Li Q, *et al.* Long-term and inter-monthly dynamics of aquatic vegetation and its relation with environmental factors in Taihu Lake, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **651**: 367-380.
- [11] 张圳, 张弥, 肖薇, 等. 太湖水生植被NDVI的时空变化特征分析[J]. 遥感学报, 2018, **22**(2): 324-334.
Zhang Z, Zhang M, Xiao W, *et al.* Analysis of temporal and spatial variations in NDVI of aquatic vegetation in Lake Taihu [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2018, **22**(2): 324-334.
- [12] 李渊, 李云梅, 郭宇龙, 等. 基于稀疏表达的水体遥感反射率高光谱重构及其应用[J]. 环境科学, 2019, **40**(1): 200-210.

- Li Y, Li Y M, Guo Y L, *et al.* Reconstruction of water hyperspectral remote sensing reflectance based on sparse representation and its application [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(1): 200-210.
- [13] 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, **8**(1): 13-18.
- Shi H, Zhang T, Li X W, *et al.* Dynamic monitoring of distribution of submerged vegetation in the north of Taihu Lake in spring based on multi-source remote sensing images [J]. *Environmental Monitoring and Forewarning*, 2016, **8**(1): 13-18.
- [14] Shi K, Zhang Y L, Zhu G W, *et al.* Deteriorating water clarity in shallow waters: evidence from long term MODIS and in-situ observations [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2018, **68**: 287-297.
- [15] Shi K, Zhang Y L, Zhou Y Q, *et al.* Long-term MODIS observations of cyanobacterial dynamics in Lake Taihu: responses to nutrient enrichment and meteorological factors[J]. *Scientific Reports*, 2017, **7**: 40326.
- [16] 刘阁, 李云梅, 吕恒, 等. 基于 MERIS 影像的洪泽湖叶绿素 a 浓度时空变化规律分析[J]. *环境科学*, 2017, **38**(9): 3645-3656.
- Liu G, Li Y M, Lü H, *et al.* Remote sensing of Chlorophyll-a concentrations in Lake Hongze using long time series MERIS observations[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(9): 3645-3656.
- [17] 郭宇龙, 李云梅, 朱利, 等. 基于 HJ1A-CCD 数据的高光谱影像重构研究[J]. *环境科学*, 2013, **34**(1): 69-76.
- Guo Y L, Li Y M, Zhu L, *et al.* Research of hyperspectral reconstruction based on HJ1A-CCD data [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(1): 69-76.
- [18] 于泉洲, 董杰, 刘恩峰, 等. 基于 MODIS 的南四湖植被覆盖变化的时空特征研究[J]. *林业资源管理*, 2017, (1): 144-152.
- Yu Q Z, Dong J, Liu E F, *et al.* Analysis on vegetation spatio-temporal variation of Nansi Lake based on MODIS [J]. *Forest Resources Management*, 2017, (1): 144-152.
- [19] 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.
- Zhang S X, Duan H T, Gu X H, *et al.* Remote sensing information extraction of hydrophytes based on the retrieval of water transparency in Lake Taihu, China [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2008, **20**(2): 184-190.
- [20] 刘远书, 曹鹏飞. 论南水北调东线洪泽湖蓝藻暴发的可能性[J]. *水利规划与设计*, 2014, (1): 9-12.
- [21] Ruan R Z, Zhang L. Changes of Hongze Lake wetlands in the past three decades [A]. In: *Proceedings of 2010 International Conference on Wireless Communications Networking and Mobile Computing* [C]. Chengdu: IEEE, 2010. 1-4.
- [22] 刘伟龙, 邓伟, 王根绪, 等. 洪泽湖水生植被现状及过去 50 多年的变化特征研究[J]. *水生态学杂志*, 2009, **2**(6): 1-8.
- Liu W L, Deng W, Wang G X, *et al.* Aquatic macrophyte status and variation characteristics in the past 50 years in Hongze Lake [J]. *Journal of Hydroecology*, 2009, **2**(6): 1-8.
- [23] 陶婷, 阮仁宗, 张楼香, 等. 洪泽湖湿地植被信息提取方法研究[J]. *地理空间信息*, 2017, **15**(3): 93-96, 99.
- Tao T, Ruan R Z, Zhang L X, *et al.* Extraction method of wetland vegetation information in Hongze Lake [J]. *Geospatial Information*, 2017, **15**(3): 93-96, 99.
- [24] Yu K, Hu C M. Changes in vegetative coverage of the Hongze Lake national wetland nature reserve: a decade-long assessment using MODIS medium-resolution data [J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2013, **7**(1): 073589.
- [25] Lei S H, Wu D, Li Y M, *et al.* Remote sensing monitoring of the suspended particle size in Hongze Lake based on GF-1 data [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2019, **40**(8): 3179-3203.
- [26] Wu Y, Dai R, Xu Y F, *et al.* Statistical assessment of water quality issues in Hongze Lake, China, related to the operation of a water diversion project [J]. *Sustainability*, 2018, **10**(6): 1885.
- [27] 张圣照. 洪泽湖水生植被[J]. *湖泊科学*, 1992, **4**(1): 63-70.
- Zhang S Z. Aquatic vegetation in Hongze Lake [J]. *Journal of Lake Sciences*, 1992, **4**(1): 63-70.
- [28] 严登余. 洪泽湖采砂管理分析[J]. *江苏科技信息*, 2015, (31): 49-50.
- Yan D Y. Analysis on sand mining management in Hongze Lake [J]. *Jiangsu Science & Technology Information*, 2015, (31): 49-50.
- [29] Liu G, Li Y M, Lyu H, *et al.* An improved land target-based atmospheric correction method for Lake Taihu [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2016, **9**(2): 793-803.
- [30] 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.
- Shi H, Li X W, Niu Z C, *et al.* Remote sensing information extraction of aquatic vegetation in Lake Taihu based on Random Forest Model [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2016, **28**(3): 635-644.
- [31] 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.
- Li J S, Wu D, Wu Y F, *et al.* Identification of algae-bloom and aquatic macrophytes in Lake Taihu from in-situ measured spectra data [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2009, **21**(2): 215-222.
- [32] Liu X H, Zhang Y L, 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.
- [33] 秦伯强, 张运林, 高光, 等. 湖泊生态恢复的关键因子分析 [J]. *地理科学进展*, 2014, **33**(7): 918-924.
- Qin B Q, Zhang Y L, Gao G, *et al.* Key factors affecting lake ecological restoration [J]. *Progress in Geography*, 2014, **33**(7): 918-924.
- [34] Zhang Y L, Liu X H, Qin B Q, *et al.* Aquatic vegetation in response to increased eutrophication and degraded light climate in Eastern Lake Taihu: Implications for lake ecological restoration [J]. *Scientific Report*, 2016, **6**: 23867.
- [35] Zhang Y L, Qin B Q, Zhu G W, *et al.* Effect of sediment resuspension on underwater light field in shallow lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River: a case study in Longgan Lake and Taihu Lake [J]. *Science in China Series D*, 2006, **49**(S1): 114-125.
- [36] 阮仁宗, 夏双, 陈远, 等. 1979~2006 年洪泽湖西岸临淮镇附近湖泊变化研究[J]. *湿地科学*, 2012, **10**(3): 344-349.
- Ruan R Z, Xia S, Chen Y, *et al.* Change of lake nearby Linhuai Town in west bank of Hongze Lake during 1979-2006 [J]. *Wetland Science*, 2012, **10**(3): 344-349.
- [37] Li J, Tian L Q, Chen X L, *et al.* Remote-sensing monitoring for spatio-temporal dynamics of sand dredging activities at Poyang

- Lake in China [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2014, **35**(16): 6004-6022.
- [38] 王飞, 叶慎忠, 朱泉. 骆马湖采砂作业对水体影响分析及对策思考[J]. *江苏水利*, 2015, (7): 36-37.
- [39] 韩东良. 洪泽湖全面禁止采砂[N]. *中国环境报*, 2016-09-12(06).
- [40] Duan H T, Cao Z G, Shen M, *et al.* Detection of illicit sand mining and the associated environmental effects in China's fourth largest freshwater lake using daytime and nighttime satellite images[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **647**: 606-618.
- [41] Cao Z G, Duan H T, Feng L, *et al.* Climate- and human-induced changes in suspended particulate matter over Lake Hongze on short and long timescales [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, **192**: 98-113.
- [42] Li N, Shi K, Zhang Y L, *et al.* Decline in transparency of Lake Hongze from long-term MODIS observations: possible causes and potential significance [J]. *Remote Sensing*, 2019, **11**(2): 177.
- [43] Feng L, Hu C M, Chen X L, *et al.* Human induced turbidity changes in Poyang Lake between 2000 and 2010: observations from MODIS [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2012, **117**(C7): C07006.
- [44] 刘笑菡, 冯龙庆, 张运林, 等. 浅水湖泊水动力过程对藻型湖区水体生物光学特性的影响[J]. *环境科学*, 2012, **33**(2): 421-420.
- Liu X H, Feng L Q, Zhang Y L, *et al.* Effects of hydrodynamic process on bio-optical properties in algal-dominated lake region of shallow lake [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(2): 421-420.

环境科学

CONTENTS

Vertical Distribution and Transport of PM _{2.5} During Heavy Pollution Events in the Jing-Jin-Ji Region	XIAO Zhi-mei, XU Hong, LI Peng, <i>et al.</i> (4303)
Source Apportionment of Air Pollutants for a Typical Pollution Event in Zhaoqing	CHANG Shu-cheng, LIAO Cheng-hao, ZENG Wu-tao, <i>et al.</i> (4310)
Diurnal Variations and Source Analysis of Water-soluble Compounds in PM _{2.5} During the Winter in Liaocheng City	YI Ya-nan, HOU Zhan-fang, MENG Jing-jing, <i>et al.</i> (4319)
Emission Characteristics of Exhaust PM and Its Carbonaceous Components from China III to China IV Diesel Vehicles in Shenyang ...	ZHAO Xue-yan, WANG Jing, ZHU Sheng-nan, <i>et al.</i> (4330)
Characteristics of Heavy Metal Pollutants of PM _{2.5} from Open Burning of Municipal Solid Waste (MSW) and the Associated Exposure Health Risks	CHENG Ke, JI Wan-wan, HAO Wei-wei, <i>et al.</i> (4337)
Size Distribution Characteristics and Inhalation Exposure of Particle-Bound PAHs in an Industrial City	WANG Juan, GUO Guan-lin, QIN Ning, <i>et al.</i> (4345)
High-frequency Evolution of Urban Atmospheric Ammonia and Ammonium and Its Gas-to-Particle Conversion Mechanism in Nanjing City	SHAO Sheng-cheng, CHANG Yun-hua, CAO Fang, <i>et al.</i> (4355)
Optical Absorption Properties of Brown Carbon Aerosols in Guangzhou	LI Zhu-jie, TAN Hao-bo, ZHENG Jun (4364)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient VOCs in Spring in Zhengzhou	ZHANG Yi-xiang, YIN Sha-sha, YUAN Ming-hao, <i>et al.</i> (4372)
Raw Materials and End Treatment-based Emission Factors for Volatile Organic Compounds (VOCs) from Typical Solvent Use Sources	LIANG Xiao-ming, CHEN Lai-guo, SUN Xi-bo, <i>et al.</i> (4382)
Source Profiles of Volatile Organic Compounds (VOCs) from Typical Solvent-based Industries in Beijing	FANG Li, LIU Wen-wen, CHEN Dan-ni, <i>et al.</i> (4395)
Emission Characteristics of IVOCs from the Combustion of Residential Solid Fuels and the Impact of Burning Temperature	LU Ya-jing, FENG Yan-li, QIAN Zhe, <i>et al.</i> (4404)
Evaluation of MACC Reanalysis Ozone Data over China Using Ground-based and AIRS Satellite Observations	WANG Run-fang, MA Xiao-dan, ZHAO Tian-liang, <i>et al.</i> (4412)
Hydrolysis of COS over MgAl Mixed Oxides Derived from Hydrotalcites	WEI Zheng, ZHANG Xin, ZHANG Feng-lian, <i>et al.</i> (4423)
Chemical Characteristics and Ionic Sources of Precipitation in the Source Region of the Yangtze River	WANG Shao-yong, HE Xiao-bo, WU Jing-kui, <i>et al.</i> (4431)
Effects of Continuous Extreme Rainfall on Water Quality of the Dongjiang River Basin	CHE Rui, LIN Shu, FAN Zhong-ya, <i>et al.</i> (4440)
Correlation Analysis of Water Quality Between Lake Inflow and Outflow: A Case Study of Poyang Lake	HUANG Dong-ling, NI Zhao-kui, ZHAO Shuang, <i>et al.</i> (4450)
Spatio-temporal Distribution Characteristics of the Water Quality in the Jinze Reservoir and Its Inflow	LIU Ming-kun, TONG Jun, HU Bo, <i>et al.</i> (4461)
Temporal and Spatial Variations in the Conductivity in Different Media in Taihu Lake, China	WANG Rui, DAI Dan, ZHANG Chi, <i>et al.</i> (4469)
Uncertainty and Sensitivity Analysis of Phosphorus Model Parameters in Large Shallow Lakes	SHI Yuan-yuan, LI Yi-ping, CHENG Yue, <i>et al.</i> (4478)
Spatio-temporal Variations in Aquatic Vegetation Cover and the Potential Influencing Factors in Lake Hongze Based on MODIS Images	LI Na, SHI Kun, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (4487)
Distribution and Pollution Assessment of Nutrients in the Surface Sediments of a Macrophyte-Dominated Zone in Lake Taihu	ZHANG Jie, WANG Yuan-sheng, GUO Xi-ya, <i>et al.</i> (4497)
Composition and Distribution of Biodegradable Compounds in the Macrophyte Dominated Zone of Lake Taihu	QI Chuang, FANG Jia-qi, ZHANG Li-min, <i>et al.</i> (4505)
Temporal and Spatial Variation of Zooplankton Community Structure and Its Relationship with Environmental Factors in Dianshan Lake, Shanghai ...	DU Cai-li, YANG Li, ZHAO Yi, <i>et al.</i> (4513)
Geochemical Characteristics and Ecological Significance of Carbon Isotopes in Groundwater Under the Influence of Different Land Use Types in Karst Areas	REN Kun, PAN Xiao-dong, ZENG Jie, <i>et al.</i> (4523)
Temporal Response of Subterranean Karst Stream Hydrochemistry to Urbanization	YANG Ying-zeng, HE Shou-yang, WU Pan, <i>et al.</i> (4532)
Hydrochemical Characteristics of Karst Groundwater in the Mountains of Northern Bazhong City, China	TANG Jin-ping, ZHANG Qiang, HU Yang, <i>et al.</i> (4543)
Removal of Fe(II), Mn(II), and NH ₄ ⁺ -N by Using δ-MnO ₂ Coated Zeolite	MA Wen-jie, CHEN Tian-hu, CHEN Dong, <i>et al.</i> (4553)
Strengthening Effect of Different Cattail Pretreatment Methods on the Denitrification of Horizontal Subsurface Flow in a Constructed Wetland	XIONG Jia-qing, LU Xue-bin, ZHENG Yu-cong, <i>et al.</i> (4562)
Short-cut Nitrification Start-up and Optimization of Operating Conditions Under Different Control Strategies	LIU An-di, ZHAO Kai-liang, LIU Hong, <i>et al.</i> (4569)
Start-up of a Three-stage PN/A Granular Sludge Reactor for Treating Wastewater with High Concentrations of Ammonia	JI Xiao-qing, QI Ze-kun, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> (4578)
Removal of Hydrogen Sulfide Produced in a Municipal WWTP Using a Biotrickling Filter with Polypropylene Rings as the Packing Material and Microbial Community Analysis	SUN Shi-hao, JIA Ti-pei, CHEN Kai-qi, <i>et al.</i> (4585)
Characteristics and Influencing Factors of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soils from Typical Industrial Areas of Chengdu	RAN Zong-xin, CHEN Jin-yu, WANG Ya-ting, <i>et al.</i> (4594)
Absorption Characterization and the Identification of Factors Influencing Five Organophosphate Esters in Water-Soil System	HE Ming-jing, YANG Zhi-hao, WEI Shi-qiang (4604)
Adsorption and Interaction of Cu ²⁺ and Pb ²⁺ on BS-12 Amphoteric Modified Bentonites	BU Shuai-bin, MENG Zhao-fu, Sambath Yek, <i>et al.</i> (4611)
Concentration Characteristics, Source Analysis, and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in a Peak-cluster Depression Area, Southeast of Yunnan Province	HONG Tao, KONG Xiang-sheng, YUE Xiang-fei (4620)
Cd Accumulation and Risk Assessment for Arable Soils in the Karst Region of Northern Luodian, Guizhou	TANG Qi-lin, LIU Xiu-ming, LIU Fang, <i>et al.</i> (4628)
Safe Utilization of Paddy Soils Lightly Polluted with Cadmium in Western Chongqing	LI Na, HE Hong-zhou, FENG Ai-xuan, <i>et al.</i> (4637)
Accumulation of Cd in Different Crops and Screening of Low-Cd Accumulation Cultivars	CHEN Xiao-hua, SHEN Gen-xiang, BAI Yu-jie, <i>et al.</i> (4647)
Absorption and Transportation of Selenium Nanoparticles in Wheat and Rice	WANG Ya-qi, ZHU Li-na, LI Kui, <i>et al.</i> (4654)
Effects of Microplastics on the Growth, Physiology, and Biochemical Characteristics of Wheat (<i>Triticum aestivum</i>)	LIAO Yuan-chen, Nazgul-Jahitbek, LI Mei, <i>et al.</i> (4661)
Regulation and Mechanism of a Dregs Biochar Matrix Combined with Maifanite on a Soil-Ryegrass System	XIAO Liang-liang, DING Yuan (4668)
Microbial Community Structure and the Distribution of Antibiotic Resistance Genes in Soil Contaminated by Sulfamethoxazole	ZHANG Hai-feng, SHI Ming-ming, SUN Yan-mei, <i>et al.</i> (4678)
Dynamics of Antibiotic Resistance Genes During the Municipal Solid Waste Leachate Treatment	HUANG Fu-yi, ZHOU Shu-yi-dan, YAN Yi-jun, <i>et al.</i> (4685)
Effects of Manure Application Rates on the Soil Carbon Fractions and Aggregate Stability	SHAO Hui-yun, LI Zi-yue, LIU Dan, <i>et al.</i> (4691)
Effects of Irrigation and Biochar Application on the Respiratory Temperature Sensitivity of Paddy Soil	ZHOU Peng, QI Le, NIU Hai-dong, <i>et al.</i> (4700)
Response of Soil CO ₂ Emissions to Straw-returning in Citrus/Mushroom Intercropping Systems	YOU Jing, NI Jiu-pai, HUANG Rong, <i>et al.</i> (4708)
Effects of Warming and Straw Application on Soil Microbial Biomass Carbon and Nitrogen and Bacterial Community Structure	ZHANG Ting-ting, CHEN Shu-tao, WANG Jun, <i>et al.</i> (4718)
Simulated Ozone Damage on Gross Primary Productivity (GPP) in a Winter Wheat Field	XU Jing-xin, ZHENG You-fei, WANG Sheng, <i>et al.</i> (4725)
Spatial and Temporal Variations in Fertilizer Use Across Prefecture-level Cities in China from 2000 to 2015	PAN Xiao-dong, LI Pin, FENG Zhao-zhong, <i>et al.</i> (4733)