

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第45卷 第5期 2024年5月15日

目 次

基于时间序列分解的京津冀区域 PM, 和 0, 空间分布特征	(2487)
其干随机查林的北方城区自氨敏咸性分析	(2407)
	(2777)
基于随机林林侯望的四川盆地吴氧乃采顶测	(2507)
海口市臭氧浓度统计预报模型的构建与效果评估	(2516)
京津冀地区 2015~2020 年臭氧浓度时空分布特征及其健康效益评估高冉, 李琴, 车飞, 张艳平, 祖永刚, 刘芬	(2525)
2022年北方市城区PM 水溶性离子会量及其变化特征	(2537)
$2022 + 40\pi \mu_{MC} m_{25} \pi \mu_{MC} = 40\pi \gamma_{5} \pi \mu_{MC}$	(2557)
本州市冬春辛PM2.5中金属九条伤架存低、米源及健康风险拧怕	(2548)
淄博市供暖前后PM2,5中多坏芳烃及其衍生物污染特征、来源及健康风险 孙港立, 吴丽萍, 徐勃, 高玉宗, 赵雪艳, 姬亚芹, 杨文	(2558)
西安市采暖季过渡期高时间分辨率细颗粒物组分特征及来源解析李萌津,张勇,张倩,田杰,李丽,刘卉昆,冉伟康,王启元	(2571)
天津冬季两个曲刑污染计积高浓度于机气溶胶成因及来源分析	(2581)
八下、于曰「八王」八王」八王」(山山)(山山)(山山)(山山)(山山)(山山)(山山)(山山)(山山)(山山)((2501)
举于空间八度双应的田求有 $\Gamma_{M_2,5}$ 涨度的空变化及空间分开地理抹侧 "你为,节岁制,事误,帮振乐,学沉鑫	(2390)
我国典型化工行业VOCs排放特征及其对臭氧生成潜势····································	(2613)
廊坊秋季大气污染过程中VOCs二次气溶胶生成潜势及来源分析张敬巧,刘铮,丁文文,朱瑶,曹婷,凌德印,王淑兰,王宏亮	(2622)
暑观格局对河流水质影响的尺度效应 Meta分析 ····································	(2631)
示,你们所不过10.5次处于10.7人发从点,你们了U 上上。它,在面面,你问,八天,别表示,你不在	(2051)
日洋诞夏李爪朔入灰河流水怦洛胜住有机物的尤诣苻低及未源	
	(2640)
北京市丰台区永定河以东浅层地下水水化学演变规律及成因分析胡昱欣,周瑞静,宋炜,杨全合,王鑫茹	(2651)
你店断裂带(安徽段)沿层地下水水化学特征 控制因素及水质评价 ····································	(2665)
为广创农币(人)购收入因达起一小小口下问证。江间回水众小灰竹川	(2005)
农约爬用对杀凯朝办中农约残留的影响及共风险件们 ************************************	(26/8)
黄河兰州段河岸带土壤中微生物与耐约基因的赋存特征	(2686)
基于多源数据的巢湖蓝藻水华时空分布及驱动因素分析金晓龙,邓学良,戴睿,徐倩倩,吴月,范裕祥	(2694)
再生水构建水环谙中沉水植物附着细菌群痰特征	(2707)
日上水日这次日光中的水田区的阳省中国时间围西。	(2707)
小世议幼稚植饭医发利二呋小作用洛市上来原饮饭注初柏洛和鸭的义互影响 一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一	(2/13)
银川巾典型湖汨仉积初细菌群落结构及具对里金属的响应大系	(2727)
热水解时间对污泥厌氧消化系统微生物群落结构影响分析张含,张涵,王佳伟,高金华,文洋,李相昆,任征然	(2741)
市政污水中吗啡来源辨析	(2748)
滤沱河流域生态环境动态谣感评价	(2757)
黄河湾城上太系统服务价值时公演化及影响因素	(2767)
$\chi(r)_{M,M,L} = 0.5.7.7.7.7.7.7.7.7.7.7.7.7.7.7.7.7.7.7.$	(2707)
基于贝叶朔网络的生态系统服务仪偶协问关系强度及其全间恰同优化:以衍河流域为例	(2780)
黄州局原典型咯斯特县域生境质重时至演变及定重归因	(2793)
2000~2021年黄土高原生态分区 NEP 时空变化及其驱动因子 ····································	(2806)
基于 SSP-RCP 情景的黄土高原土地变化模拟及草原碳储量	(2817)
京津冀城市群建设用地扩张多情景模拟及其对生态系统碳储量的影响武爱彬、陈辅国、赵艳霞、奏彦杰、刘欣、郭小平	(2828)
而南岩溶区十种利用变化对闭聚体趋定性及其有机能的影响	(2840)
口用有用已上地有用文化为国家任论是任众不自动感用赵雪	(2040)
个问工地利用力入下工場有优质分子组成受化的整合力剂 """" 及此成为是一般,这一语,不够的,对负围,对效数,除相,除住外,张門风	(2848)
基于改进床雀搜索算法优化 BP 神经网络的土壤有机质空间分布顶测	(2859)
不同有机物料施用对菜地磷累积和转化的影响	(2871)
集约化柑橘种植抑制土壤磷循环微生物活性」周连吴,曾全超,梅唐英泽,汪明霞,谭文峰	(2881)
^按 释掺混肥对麦玉轮作体系作物产量和温室气体排放的影响	
高玮,王学霞,谢建治,陈延华,倪小会,王甲辰,董艳芳,李子双,曹兵	(2891)
牛物岩对黄疸十山 NOT-N 运移过积影响及横扣	(2005)
工切が刈買却上下103 12 使过往影响及快场 ロークパーパー・加速の 水香葱、ラモ、上羽可 市局か用し 摘要人同時流行が住住認識	(2903)
中国农田工壤里金属药深分价与许价	(2913)
城巾土壤和地表伙尘重金属污染研究进展与展望	(2926)
场地重金属污染土壤固化及 MICP技术研究进展····································	(2939)
黄河流域山东段近河道煤矿区土壤重金属污染特征及源解析戴文婷,张晖,吴霞,钟鸣,段桂兰,董霁红,张培培,樊洪明	(2952)
拍马河流城河海沉和物与十壤重全属全景及团险评价	(2962)
出口古装词通忆几场了工程主体自己是众不能定力的一种优化。如果在这个人的一个人们的一个人们的一个人们的一个人们的一个人们的一个人们的一个人们的一个	(2071)
取用申與門碑区上環里並属行来特征、江海バ险に用うれば解析研 サインの目の自己の告述にと渡る知道にたいないない。 サインの日本の時代の	(29/1)
基丁源寺问和家符下洛侯型的)东有未城巾工壤里金禹健康风应评伯	
	(2983)
西南典型碳酸盐岩高地质背景区农田重金属化学形态、影响因素及回归模型 …唐瑞玲,徐进力,刘彬,杜雪苗,顾雪,于林松,毕婧	(2995)
贵州省水田十壤-水稻Hg含量特征与安全种植区划	(3005)
柠檬酸辅助甜富烫对南方曲刑丹后十幢的锡修复效应	(3016)
计体积值切加间不利用力完全与灰土家印刷修交从应	(2027)
仪拦挡帽 生物灰对条色工集 開於恋女 水相吸收 输的影响 ————————————————————————————————————	(3027)
生物炭灯四环系和铜复合污染土壤生来生长及污染物系积的影响	(3037)
基于 Meta 分析的蚯蚓堆肥对堆肥质量和重金属的影响效应姜继韶, 侯睿, 崔慧林, 闫广轩, 刘栋	(3047)
微塑料对土壤N,O排放及氮素转化的影响研究进展	(3059)
十批利用对洱海罗时江小流域十壤微塑料污染的影响	(3069)
美菇海湾淤泥后海岸沿和物徵朝料污染炸征	(3078)
アルロウロッルの次日ナル4人物の発生作17本11世に、「「「「」」」、「「」」、「」」、「」」、「」」、「」」、「」」、「」」、「	(3010)
聚乙烯碱塑料对盐钡化工爆碱生物群落的影响 如四期含量的合体的和此,在他们都是在100万期。———————————————————————————————————	(3088)
鄱阳湖陕乌栖息地 履塑料表面细困群洛结构特征与生态风险顶测俞锦丽,赵俊凯,罗忠琦,朱颖婷,张文慧,胡启武,刘淑丽	(3098)
粤闽浙沿海重点城市道路交通节能减排路径徐艺诺,翁大维,王硕,胡喜生,王占永,张园园,张兰怡	(3107)
电动重卡替代柴油重卡的全生命周期碳减排效益分析徐圆圆,龚德鸿,黄正光,杨浪	(3119)

基于多源数据的巢湖蓝藻水华时空分布及驱动因素分析

金晓龙,邓学良*,戴睿,徐倩倩,吴月,范裕祥

(合肥市气象局, 合肥 230041)

摘要:富营养化和有害藻类水华暴发是全世界淡水湖泊共同面临的生态环境问题之一.巢湖作为典型的内陆淡水湖泊,其富营养化水平和蓝藻水华暴发面积常年居高不下,且在各湖区表现为一定的时空分布差异.为认识和了解不同阶段巢湖蓝藻水华发生和发展基本规律,利用巢湖水上综合观测平台和卫星遥感等多源数据,获得2015~2020年水体中藻密度和水华面积的时空分布信息,并采用基于增强回归树的机器学习算法,定量评估不同阶段各环境因子对蓝藻水华影响的重要程度及相互作用关系.结果表明:①巢湖蓝藻水华表现出较大的季节变化特征,蓝藻细胞在春季开始复苏,主要在巢湖西半湖和沿岸地区形成轻度水华,水体藻密度在夏、秋季达到最大,该季节发生中等程度以上的水华频率较高.②非暴发期间,巢湖藻密度变化受物理和化学因素影响较大,二者对解释藻密度方差变化的贡献率可达80.3%,水体中高浓度溶解氧、弱碱性 pH值(7.2~7.6)和适宜水温(3℃)是藻类细胞生长繁殖的有利环境条件,巢湖蓝藻水华首次暴发一般在气温稳定通过7℃初日11 d前后出现. ③暴发期内,巢湖蓝藻水华发生主要受藻类生物量和气象条件的综合影响,气温、藻密度、日照时数和风速的累计贡献率为95%,各因子均存在一个有利于蓝藻水华发生的最适区间.多因子交互作用分析结果显示,在水体藻密度大、气温适宜和微风的综合作用下,巢湖蓝藻水华发生概率较高.上述研究成果分析和揭示了不同阶段巢湖蓝藻水华的时空分布特征及其主导影响因子,可为巢湖蓝藻水华防控和预测、预警提供科学依据.

关键词:蓝藻水华;时空变化;巢湖;影响因素;驱动分析

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)05-2694-13 DOI: 10.13227/j. hjkx. 202306047

Analysis of the Spatiotemporal Distribution of Algal Blooms and Its Driving Factors in Chaohu Lake Based on Multi-source Datasets

JIN Xiao-long, DENG Xue-liang*, DAI Rui, XU Qian-qian, WU Yue, FAN Yu-xiang

(Hefei Meteorological Bureau, Hefei 230041, China)

Abstract: Eutrophication and harmful algae blooms are one of the common ecological and environmental problems faced by freshwater lakes all over the world. As a typical inland freshwater lake, Chaohu Lake exhibits a high level of eutrophication and algae blooms year-round and shows a spatiotemporal difference in different regions of the lake. In order to understand the basic regularity of the development and outbreak of algal blooms in Chaohu Lake, the data from the comprehensive water observation platform and remote sensing were integrated to obtain the spatiotemporal distribution of algal blooms from 2015 to 2020. Then, an evaluation model based on Boosted Regression Trees (BRT) was constructed to quantitatively assess the importance and interactions of various environmental factors on algal blooms at different stages. The results indicated that: ① The occurrence of algal blooms in Chaobu Lake exhibited significant seasonal variations, with the cyanobacteria beginning to recover in spring and bring about a light degree of algal blooms in the western and coastal areas of Chaohu Lake. The density of cyanobacteria reached its maximum in summer and autumn, accompanied by moderate and severe degrees of algal bloom outbreaks. 2 During the non-outbreak period, the variation in the cyanobacteria density was greatly affected by physical and chemical factors, which explained 80.3% of the variance in the change in cyanobacteria density. The high concentrations of dissolved oxygen content in the water column and the weak alkalinity (7.2-7.6) and appropriate water temperature (about 3 °C) provided a favorable environmental condition for the breeding and growth of cyanobacteria. In addition, the onset of algal blooms was closely related to the air temperature steadily passing through the threshold. According to the statistics, the date of first outbreak of algal blooms in Chaohu Lake was 11 days or so after the air temperature steadily remained above 7 °C. ③ During the outbreak period, the occurrence of algal blooms was influenced by the combination of cyanobacterial biomass and meteorological conditions such as temperature, wind speed, and sunshine duration. The cumulative contribution ratio of the four factors was as high as 95%, and each factor had an optimal interval conductive to the outbreak of algal blooms. Furthermore, the results of multi-factor interaction analysis indicated a larger probability of the outbreak of algal blooms in Chaohu Lake under the combined effect of high cyanobacteria density, suitable temperature, and the breeze. This study analyzed and revealed the spatiotemporal characteristics and the dominant influencing factors of algal blooms in Chaohu Lake at different stages, which could provide the scientific basis for the prediction, early warning, and disposal of algal blooms under the context of climate change. Key words: algal blooms; spatiotemporal variation; Chaohu Lake; influencing factors; drive analysis

巢湖地处长江中下游,是我国五大淡水湖之 一.作为安徽省重要淡水湖泊,巢湖具有调节径 流、供水灌溉和维持生态系统多样性等多种功能, 在区域社会、经济发展以及自然生态系统保护中 发挥着重要作用^[1,2].然而,随着人类活动的加剧 以及城市空间的扩张,巢湖水体营养盐浓度不断 攀升,水体富营养化及由此引发的蓝藻水华已成 为威胁人类健康、破坏水域生态系统平衡的重要 因素,是全世界淡水湖泊面临的主要环境问题之 一^[3,4].自20世纪80年代巢湖蓝藻水华开始暴发以 来,至今湖泊水华问题依然严峻,巢湖生态治理

- 收稿日期: 2023-06-06;修订日期: 2023-08-03
- **基金项目:**安徽省气象局创新发展专项(CXB202202);安徽省自然 科学基金江淮气象联合基金项目(2208085UQ03)
- 作者简介:金晓龙(1991~),男,博士,工程师,主要研究方向为湖泊 生态学和环境遥感应用,E-mail:jinxiaolong_ah@163.com
 - * 通信作者,E-mail: dengxueliang9989@aliyun.com

面临着巨大压力^[5].因此,综合运用多种技术手段 开展对蓝藻水华的日常监测,探究蓝藻水华的环 境影响因素,是认识蓝藻水华形成和发展规律的 基础,对于提升巢湖蓝藻水华预报预警能力、推 动区域水资源保护及可持续利用具有重要意义.

针对蓝藻水华监测,目前主要形成了基于站点 的水质采样和基于卫星影像的遥感监测两种技术手 段.实地采样是蓝藻水华最常用且最直接的监测方 法,具有试验简捷和易操作实施等优点,但该方法 成本高和耗时长,且监测结果仅代表局部水域的蓝 藻水华特征,无法反映长时序、大范围湖泊蓝藻水 华的动态变化[6.7]. 卫星遥测则为弥补这一缺陷提供了 新的技术手段,国内外学者针对湖泊蓝藻水华的识 别与提取,开发了指数阈值、监督分类以及基于机 器学习的自动识别等提取算法^[8,9],该方法可及时、 准确地提供蓝藻水华暴发面积和时空分布等信息.两 种方法在蓝藻水华的动态监测以及长时序分析研究 中均发挥了积极作用.然而,或受限于实地采样和遥 感数据的可获取性,已有研究较少对两种监测方式 进行有效整合,一定程度上阻碍了对巢湖蓝藻水华 形成和发展规律的认知.因此,充分发挥不同观测手 段的技术优势,实现对巢湖蓝藻水华的立体和综合 监测,是现阶段学者们广泛关注的焦点问题[10.11].

有关蓝藻水华的成因,已有研究普遍认为,在 富营养化水体中,营养盐浓度已不再是影响蓝藻生 长的限制因子,其他环境条件如气象要素可能是诱 发蓝藻水华暴发的主要因子[12,13].因此,现有研究多 聚焦气温[14]、降水[15]、风速风向[16]和日照时数[17]对 蓝藻水华的影响,偏向气象条件不同取值对蓝藻水 华发生的定性描述,而有关各因子的重要性度量以 及交互作用对蓝藻水华的影响则较少涉及.此外, 由于受到蓝藻本身生理特性、水体营养盐浓度以及 气象条件等诸多环境因素的影响, 蓝藻水华形成机 制较为复杂^[8],各因子对蓝藻水华的影响通常表现 为非线性的变化模式,继续沿用传统的统计方法定 量分析不同阶段蓝藻水华成因存在一定局限.机器 学习和人工智能技术的兴起则为处理高维数据和非 线性问题提供了新的解决方案[13,18],目前已被广泛 应用于生态与环境等复杂问题的求解过程中.基于 机器学习算法在特征重要性评估和预测等方面的优 势,理论上可为评估巢湖蓝藻水华影响因子贡献 率、理解环境因子综合作用对蓝藻水华生消机制的 影响提供新的研究思路,值得进行探寻和深入研究.

为此,本文拟充分利用巢湖水上综合观测平台 和卫星遥感等多源数据,探索不同阶段巢湖蓝藻水 华发生和发展的基本规律;在此基础上,选取同期 温、压、湿、风等多种气象要素,并结合巢湖水环 境监测数据,尝试采用增强回归树的机器学习算 法,评估和分析各因子对巢湖蓝藻水华影响的重要 性及相互作用关系,识别诱发蓝藻水华暴发的主导 驱动因子,以期为巢湖蓝藻水华预测、预警和防治 提供决策参考.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

巢湖地处长江、淮河两大水系中间,是我国第 五大淡水湖,属合肥市内湖(图1).巢湖东西长54.5 km,南北宽21 km,水域面积约770 km²,平均水深 2.89 m,以忠庙-姥山-齐头嘴为界分为东、西两大湖 区^[19].巢湖流域水系发达,四周河渠广布,共有大小 33条河流通过地表径流补给汇入巢湖,通过裕溪河 与长江连通^[20].巢湖属北亚热带温润性季风气候,气 候温和,雨量适中,年平均气温在15℃左右,降水 量可达1000 mm^[2].近年来,随着城市化进程的不断 推进以及巢湖航运、水产养殖等产业的快速发展, 巢湖水体富营养化日趋严重,蓝藻水华频发,给流 域水生环境和人类生产、生活造成了严重威胁^[5].

1.2 数据介绍

本研究主要使用3类数据开展巢湖蓝藻水华时 空分布及驱动因素分析,分别是卫星遥感数据、水 上综合观测平台数据和气象数据.卫星遥感数据来源 于美国国家宇航局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)提供的 MODIS 数据, 该数据 具有波段信息丰富、时间分辨率高、数据易处理、 免费开源等优点,已被广泛应用于生态环境变化监 测的研究中^[22,23].本文使用的MOD09GQ地表反射率 产品,涵盖可见光到近红外波段范围的多波段信息, 空间分辨率为250m,重访周期为1d.水上综合观测 平台位于巢湖北岸南淝河入河口处(31.69°N, 117.40°E),该平台配备有WIZ原位营养盐观测以及 水质多参数监测仪等设备,可实现对水体生物(藻密 度、叶绿素a浓度)、水质(电导、盐度、水温、浊 度)和化学(总氮、总磷、硝酸盐、磷酸盐)等要素的 综合监测.为了与水上综合观测平台数据相匹配,气 象数据采用距离观测平台最近的巢湖国家气象基本 观测站,包含温、压、湿、风和降雨等多个要素.有 关各数据集的观测指标及详细信息参见表1.

1.3 水上综合观测平台数据质控

为充分利用巢湖水上综合观测平台数据,提高 数据质量,本研究首先对监测数据进行质量控制. 具体包括:异常值检测和时间一致性分析两个步 骤.异常值检测即根据仪器提供的各参数监测范围,



Fig. 1 Geographic location of Chaohu Lake

表1	本研究使用的数据简介	

Table 1 Dataset used in this study

数据类型	时间(空间)分辨率	因子	指标
卫星遥感数据	1 d(250 m)	MODIS	地表反射率
	5	水质	电导率、水温、浊度、水深和溶解氧
水上综合观测平台数据	4 h(站点)	产 生物	藻密度和叶绿素a浓度
	0 0	化学	pH、总氮、总磷、硝酸盐、磷酸盐、氨氨和盐度
\cap	18 52	温度	日平均气温、日最高气温和日最低气温
0 /1	(11)0	湿度	日均相对湿度
左 如 测 粉 提	11 (201-12)	降雨	日降水量、白天降水和夜间降水
气家观测数据	I NUA R	✓ 戸 凤	平均风速、最大风速和风向
JUME	1// 0	日照	日照时数
GAVE		气压	日平均气压、日最高气压和日最低气压
RUINA	1		9

对不在正常值区间内的记录予以剔除.然后,针对 每一个观测要素进行时间一致性分析,将偏离该要 素均值(MEAN)3个标准差(SD)以外的记录判定为离 群值.此外,当日数据缺测率超过20%以上的日期 也不予考虑.最后,共筛选从2015年3月至2020年3 月2122条记录用于下文的分析.考虑到水上综合观 测平台位置特殊,其观测结果可能受南淝河入湖河 流的影响较大.本研究根据Yang等^[24]推荐的方法, 以研究期内观测值与平均值的差值偏离标准差的大 小为判定依据,将观测记录分为区域背景值和非背 景值.为增强观测数据的区域代表性,本研究选取 区域背景值作为输入数据用于下文蓝藻水华驱动因 素建模.

1.4 巢湖蓝藻水华反演

1.4.1 蓝藻水华覆盖度计算

鉴于水体表面悬浮藻类在近红外波段的高反射 率以及水体在红光-近红外波段的强吸收特征,基于 可见光、近红外波段的卫星遥感资料为蓝藻监测提 供了一种新方法^[25].国内外学者针对从水体中提取 藻类分布信息开展了大量研究,同时也形成了较为 成熟的湖泊蓝藻水华卫星遥感监测技术.本研究依 据中国气象局制定的《湖泊蓝藻水华卫星遥感监测 技术导则》^[26],进行巢湖蓝藻水华信息的提取与分 析.该方法以归一化植被指数(NDVI)为输入参数, 通过计算水体蓝藻水华覆盖度指数(FCI),实现像 元尺度蓝藻水华的动态监测,具体计算公式如下:

$$FCI = \frac{NDVI - NDVI_{w}}{NDVI_{c} - NDVI_{w}} \times 100\%$$
(1)

式中,FCI为某一像元的蓝藻水华覆盖度,NDVI。和NDVI。分别为清洁水体和蓝藻水华的NDVI值,根据 《湖泊蓝藻水华卫星遥感监测技术导则》,其值一般 取-0.2和0.81.NDVI为可见光与近红外波段反射率 差值与二者之和的比值,计算公式如下:

$$NDVI = \frac{R_{NIR} - R_{RED}}{R_{NIR} + R_{RED}}$$
(2)

式中, *R*_{NIR}为近红外波段反射率, *R*_{RED}为红光波段反射率; 二者分别对应 MODIS 数据的第2和第1波段, 中心波长分别为 859 nm 和 645 nm.

1.4.2 蓝藻水华覆盖面积与暴发频率

根据单像元蓝藻水华覆盖度(FCI),本研究以 FCI指数不等于0为判定标准,统计覆盖度不为0的 蓝藻水华像元个数,并结合单像元的实际面积,计 算整个湖区蓝藻水华发生面积S.

$$S = \sum_{i=1}^{n} S_i \times \text{FCI}$$
(3)

式中, i为蓝藻水华影响的像元序号, n为蓝藻水华 影响的像元总数, S_i 为第i个像元的面积,FCI为像 元i的蓝藻水华覆盖度.

为对比分析蓝藻水华在不同等级和不同季节 的暴发频率,本研究依据《湖泊蓝藻水华卫星遥 感监测技术导则》,将蓝藻水华发生分为4个等 级:无蓝藻水华覆盖(FCI=0),轻度水华覆盖 (0 < FCI ≤ 30%)、中度水华覆盖(30% < FCI ≤ 60%)和重度水华覆盖(60% < FCI ≤ 100%),然后 分别在季节和年尺度上,统计蓝藻水华的暴发频 率. 蓝藻水华暴发频率定义为单像元在卫星遥感 有效监测时段内, 蓝藻水华发生的相对频率[公式 (4)]. 该指数的取值范围为 0~100%, 数值越大, 说明该像元发生蓝藻水华的概率越高,是蓝藻水 华发生的热点区域.

 $F_{i,j} = \frac{1}{\mathrm{TC}_j}$ 式中, F_{ii}为像元i在i时段内的蓝藻水华暴发频率。 Ci,j为研究时段内单像元蓝藻水华发生不为0的次数 TC,为i时段内卫星遥感监测的影像总数. 1.4.3 蓝藻水华物候信息提取

 $C_{i,j}$

(4)

蓝藻水华物候是藻类生物长期适应节候所表现 出的周期性变化规律,本研究中特指蓝藻水华暴发 开始时间与结束时间.然而,目前对蓝藻水华物候 的定义尚未形成统一标准.一般认为, 蓝藻水华暴 发开始于每年的春季,持续到第2年冬季结束.本研 究参照袁俊等^[23]对巢湖蓝藻水华物候的定义, 洗取 自3月开始蓝藻水华面积首次超过全湖面积5%的日 期为暴发开始时间,最后一次藻华面积大于全湖 5%的日期为结束时间.本研究将上一年藻华暴发的 结束时间到当年藻华首次暴发时间定义为非暴发 期,而暴发期则是当年蓝藻水华首次暴发到最后一 次规模暴发的持续时间.

1.5 增强回归树模型

1.5.1 增强回归树简介

增强回归树(BRT)是机器学习算法在统计学领 域中的应用,它由两种方法组合而成,即回归树算 法和增强技术,二者的结合使其能准确描述自变量 与因变量之间的相关关系,量化各因子对因变量总

体方差的解释能力,探测多因子之间的交互作用[27]. BRT作为一种非参数的机器学习模型,对数据分布 形态无额外要求,可适用于有序、离散、连续和分 类的多种数据类型;同时,该模型根据增强取样算 法,自动检测最佳拟合方案,能有效减少缺失值和 异常值对模型结果的影响.根据BRT模型的运行结 果,自变量对因变量的作用关系以影响载荷的方式 表达,可轻松实现各指标因子对因变量解释能力相 对贡献的量化,并提供因子间的交互作用强度.BRT 模型以其稳定和高效等优势,已在自然地理区划^[28]、 物种分布预测^[29]和生态变化驱动分析^[30]等研究领域, 都取得了较为理想的结果.有关BRT模型的基本原 理、运行机制与应用领域详见Elith等^[27]的研究.

1.5.2 模型参数设置及敏感性分析

在应用BRT技术进行建模之前,需要根据研究 对象特征,针对性设置适合该样本的相关模型参 数.总的来说,BRT共有5个关键参数需要用户预先 定义,即采样率、回归树复杂度、学习率、回归树 数量和损失函数分布.根据前人的研究经验,本研 究使用的损失函数分布类型为 gaussian 分布,并设 置模型的采样率为50%.本研究未对回归树数量进行 具体设置,因为该参数是在模型运行过程中根据回 归树复杂度和学习率自动确定的.针对BRT模型中 回归树复杂度和学习率两个参数,本研究拟开展多 组参数敏感性分析试验,以探求实现最佳预测结果 的参数配置.在相关研究的基础上,本文分别设置 学习率为0.1、0.05和0.01,树复杂度为2、4、6、8 和10,并采用交叉验证的方法对比任意参数组合下 观测与拟合数据的平均绝对误差(MAE)和R²,从而 决定模型的最佳参数组合.

1.5.3 驱动力模型构建

本研究中, 有关输入数据准备、BRT模型构建 与结果后处理等操作均在R语言环境下进行,主要 用到了 dismo、raster 和 sp 等软件包.为了研究不同时 期蓝藻水华暴发的驱动因素,本研究针对蓝藻水华 暴发期和非暴发期,构建2组BRT模型,分别为: ①暴发期内, 蓝藻细胞已大量生长并形成优势种群, 在适宜气象条件驱使下,藻类优势种群上浮、聚集 在水体表面,形成水华.由此可见,气象因素是暴发 期蓝藻水华形成的诱导因素.因此,本研究以卫星遥 感监测的水华面积为因变量,综合选取影响蓝藻水 华发生的内因(藻密度)和外因(气象要素)构建BRT 模型,探索暴发期影响巢湖蓝藻水华面积变化的驱 动因素.②非暴发期间,在适宜生态环境条件下,冬 季下沉到湖泊底泥的蓝藻细胞开始生长、繁殖并逐 渐进入到水柱中.该阶段,蓝藻细胞密度的变化与水

质、营养盐和藻细胞的生理活性都有一定联系.为 此,本研究基于水上综合观测平台数据,以水体藻 密度为因变量,以涵盖物理、化学和气象等要素的 综合监测数据为自变量构建BRT模型,从而探索非 暴发期驱动水体藻密度变化的主控因子.

根据BRT模型的运行结果,本研究以各因子贡 献率作为衡量解释变量重要性的评价指标,对暴发 期和非暴发期各影响因子重要性进行排序,识别影 响巢湖蓝藻水华发生的主控因子.同时绘制因变量 随主导影响因子变化的偏依赖度分布,分析蓝藻水 华随主控因子取值变化的响应模式,确定诱发蓝藻 水华暴发的因子取值区间.此外,本研究依据BRT 模型交互作用探测结果,评价因子间交互作用强 度,并结合R语言的effects软件包,进一步分析各 因子的不同取值水平对蓝藻水华发生的综合影响.

2 结果与分析

2.1 巢湖蓝藻水华时空变化分析

基于质控后的巢湖水上综合观测平台数据和卫 星遥感蓝藻水华反演结果,本研究首先分析了水体 中藻密度与水华面积随时间的变化规律.由图2可 知,水体中藻密度表现出明显的季节变化,藻密度 在冬、春季普遍较低(<3000万个·L⁻¹),而在夏、 秋季达到较高水平,水体中平均藻密度在5000万 个·L⁻¹以上.根据水体藻密度变化,孔繁翔等^[31]将蓝 藻水华的形成划分为4个阶段,本文的研究结果也 表现出类似的阶段变化.即蓝藻细胞在春季开始复 苏,藻密度在3月以后缓慢上升;进入到6月,蓝 藻细胞开始大量积聚形成水华;而随着冬季气温的 不断降低,水体中藻密度急剧下降,蓝藻开始进入 休眠期.

依据卫星遥感监测结果(图2),巢湖蓝藻水华 在春季和冬季暴发规模较小,水华发生面积在100 km²以下,夏、秋季是蓝藻水华的高发季节,平均 水华面积为165 km².2015年9月蓝藻水华面积高达 386 km²,为2015~2020年藻华面积峰值(最大值), 2016年以来,巢湖蓝藻水华暴发面积峰值基本稳定 在250 km²上下.根据相关性分析结果,巢湖蓝藻水 华面积与蓝藻密度显著相关(*R*=06),二者表现为 较一致的变化趋势,表明蓝藻细胞是水华暴发的生 物基础,水体中蓝藻密度越大,当年发生大规模水 华暴发的概率也越高.但在个别年份,蓝藻密度与 藻华面积偏离较大,这同时也说明蓝藻水华发生还 可能受到气象等其他环境因子的影响.





结合卫星遥感影像,本研究进一步分析了不同 程度蓝藻水华在不同季节的空间分布特征(图3).监 测结果表明,巢湖蓝藻水华以轻度暴发为主,约占 全年暴发频率的30%以上,其次是重度暴发,暴发 频率在10%左右,中度暴发占比最小.具体到各季 节,轻度暴发的蓝藻水华在春季发生频率较高,主 要发生在巢湖西半湖和沿岸地区;而在秋季发生频 率最小,尤其是巢湖的中、东半湖区,轻度水华发 生的频率低于40%.中度暴发的蓝藻水华在夏、秋季 最为严重,整个湖区约有60%以上的水域水华暴发 程度较高,表明夏、秋季是蓝藻水华规模暴发的主 要季节; 重度暴发的蓝藻水华主要发生在夏季, 整 个湖区的暴发频率在20%以上, 秋季重度蓝藻水华 发生的频率稍低(约在10%左右), 冬季虽然气温较 低, 但依然有相当面积湖区发生重度水华, 表明巢 湖蓝藻水华暴发持续时间较长, 冬季仍有可能发生 大面积的蓝藻水华.

2.2 因子共线性检测与模型参数敏感性分析

为探究气象条件对巢湖蓝藻水华发生的影响, 本研究全面选取包含温、压、湿、风等14个气象因 子作为解释变量进行BRT建模.由于解释变量之间 天然存在某种联系,各因子间可能存在一定的多重

ŀ



Fig. 3 Spatial distribution of the frequency of different degrees of algal blooms in Chaohu Lake

共线性.为了消除这种影响,本研究首先对各因子进行相关分析,形成解释变量相关矩阵分布.然后,以相关系数>0.7为原则,剔除因子间相关性较大的解释变量,同时对剩余的变量进行多重共线性检测,结果表明经筛选后的各因子间不存在或存在较弱的共线关系,可用于下文BRT模型的构建.最终筛选的气象因子包括:平均气温、相对湿度、日降水量、夜间降水量、平均风速、风向和日照时数.

针对 BRT模型中回归树复杂度和学习率两个参数,本文在总结现有研究的基础上,设计了两参数 不同取值组合下的15组参数敏感性试验,并计算该 参数设置下 BRT模型的 MAE 平均值和 R²值.根据图 4的参数敏感性分析结果,本研究以 MAE 最小、R² 最大为判定依据,识别不同时期巢湖蓝藻水华驱动 因素分析模型的最佳参数组合.最终得到非暴发期 BRT模型的最佳参数组合为学习率0.1、回归树复杂 度8,暴发期实现BRT模型最优拟合的两参数分别 为0.1和10.

2.3 非暴发期巢湖蓝藻水华驱动因素分析

根据藻密度与叶绿素 a 的定义, 二者均为反映 水体中藻类数量和浓度的生物监测指标^[32].为此, 本研究首先分析了水体中藻密度与叶绿素 a 浓度的 相关关系.结果表明, 巢湖水体中藻密度与叶绿素 a 浓度显著相关(*R* = 0.75), 二者表现出较一致的变化 趋势.因此, 在分析非暴发期蓝藻水华驱动因素时, 本文选取直接反映水体藻类生物浓度的藻密度作为 因变量, 建立同水体中物理、化学和气象等要素的 驱动分析模型.根据观测数据对模型结果的交叉验



Fig. 4 Sensitivity evaluation of BRT model parameters for algal blooms at different stages

证,本文构建的BRT模型可解释水体藻密度变异程 度的80%,表明该模型能较好地预测非暴发期水体 藻类密度变化,本研究以影响因子贡献率作为衡量 解释变量重要性的评价指标,各因子的贡献率如图 5所示.就单个因子而言,非暴发期内藻密度受水体 溶解氧(27.22%)、pH(11.86%)和水温(10.88%)的影 响较大,而降水、日照和风速风向等气象因子对非 暴发期藻类密度变化影响较小(<3%).本文同时根 据各因子的属性特征,将17个解释变量 划分为物 化学和气象因素这3大类.总体而言,非暴发期 理、 内水体藻密度受物理因素影响最大,因子贡献率总 和可达48.59%,其次是化学因素(贡献率之和为 31.71%),虽然气象要素对水体中藻密度的影响最 小,但在单个因子中,气温对藻密度变化的贡献较 大(7.43%).综上,非暴发期内,巢湖藻类密度变化 主要受物理和化学因素的影响,针对非暴发期蓝藻 水华的防治应着重从改善水体的理化环境入手.

驱动因子贡献率分析从整体上量化了各因子对 水体藻密度变化的解释能力,但无法反映因变量随 自变量取值变化的响应模式.为此,本研究基于



density during the non-outbreak period

密度随解释变量的变化趋势,可将其分为逐渐增 加、先增后减、逐渐减小和非线性变化这4种模式. 藻密度随水体溶解氧的变化表现为逐渐增加的模式, 当水体溶解氧较低时, 藻密度较小, 而随着溶解氧 的升高,水体藻密度不断增加,表明水体中充足的 氧气是非暴发期藻类细胞生长、繁殖的有利条件.就 pH和水温因子而言, 藻密度变化表现出随二者先增 后减的变化模式,即水体藻密度先随着 pH 和水温的 增加而逐渐增大,分别在pH值为7.5和水温3°C处达 到最大,随着pH和水温的继续增加,藻密度开始呈 现下降的变化趋势,这一变化模式表明,pH和水温 对水体藻密度的影响均存在一个最适区间,超出这 个区间外的取值均不利于蓝藻细胞的生长繁殖.相对 湿度对藻密度的影响表现为逐渐减小的变化模式, 即相对湿度较小时,水体中藻密度大,而高湿天气 则不利于藻类细胞的繁殖.其他因素对水体藻密度的 影响表现为非线性变化模式,即藻密度在解释变量 取值范围内无明显变化规律,表明这些因素对非暴 发期藻类细胞的生长、繁殖影响较小.

BRT模型的运行结果,重点分析了非暴发期巢湖水

体藻密度随主控影响因子的变化趋势(图6).依据藻

2.4 蓝藻复苏与稳定通过界限温度的关系

根据非暴发期巢湖蓝藻驱动因素分析模型,气 温对藻类细胞的生长、繁殖起着关键作用.为此, 本文通过引入农业气象上稳定通过界限温度的概念 分析气温对藻类生物复苏的影响.本研究分别计算 了2015~2020年稳定通过3~15℃的初日,并与蓝藻 水华首次暴发日期对比,旨在摸清非暴发期巢湖藻 华首次发生与稳定通过界限温度的关系(表2).结果 发现,稳定通过7℃初日与蓝藻水华首次暴发日期 变化趋势较为一致,二者相关系数为0.46,平均相



備大奴为11.0 d. 即当果砌气益达到7 C后, 澡尖升 始大量生长、繁殖, 在适宜的气象和水文条件驱使

下聚集形成水华,巢湖蓝藻水华在气温稳定通过 7℃初日11d前后首次出现.

	₹2	蓝藻水华	首次暴发	与稳定通过	界限温度日	期的关系
--	----	------	------	-------	-------	------

Table 2 Relationsh	up between the firs	t outbreak date of	algal blooms and t	he time of tempera	ature steadily rem	aining above limite	ed threshold
项目	2015年	2016年	2017年	2018年	2019年	2020年	相关系数
稳定通过3℃初日	3月1日	2月16日	2月23日	2月9日	2月24日	2月17日	0.19
稳定通过4℃初日	3月1日	3月1日	2月24日	2月13日	2月24日	2月18日	0.29
稳定通过5℃初日	3月7日	3月11日	2月24日	2月22日	2月25日	2月18日	0.41
稳定通过6℃初日	3月11日	3月11日	2月25日	3月8日	2月28日	2月19日	0.38
稳定通过7℃初日	4月8日	3月12日	3月14日	3月21日	3月4日	3月30日	0.46
稳定通过8℃初日	4月9日	3月12日	3月14日	4月6日	3月8日	3月30日	0.38
稳定通过9℃初日	4月9日	3月15日	4月11日	4月6日	3月9日	3月31日	-0.33
稳定通过10℃初日	4月9日	3月27日	4月11日	4月6日	4月11日	4月12日	-0.18
稳定通过11℃初日	4月14日	3月28日	4月11日	4月8日	4月11日	4月12日	0.01
稳定通过12℃初日	4月14日	4月4日	4月12日	4月15日	4月11日	4月12日	-0.08
稳定通过13℃初日	4月14日	4月5日	4月12日	4月15日	4月27日	4月12日	0.08
藻华首次暴发日期	3月21日	3月15日	3月1日	3月11日	3月15日	3月15日	1)

1)"一"表示该行数据不参与相关性分析

2.5 暴发期巢湖蓝藻水华驱动因素分析

根据目前学者们广为接受的蓝藻水华形成理论, 当水体中蓝藻细胞达到一定密度时,在适宜的气象 条件驱动下上浮积聚形成水华, 蓝藻水华暴发是内因和外因综合作用的结果^[8,31].由非暴发期蓝藻水华影响驱动分析, 物理和化学等因素对水体藻密度变

化的解释能力较强(方差解释率>80%),为降低模型 复杂度同时消除数据冗余,本研究选取藻密度作为 水华暴发的内因,并全面选取包含温、压、湿、风 和降水等14个气象因子作为藻华暴发的外力因子进 行BRT建模.在多因子共线性检测及变量筛选的基础 上,本文以遥感反演的蓝藻水华面积为因变量,选 取包含藻密度的内因以及气温、相对湿度、日降水 量、夜间降水量、平均风速、风向和日照时数的外 因作为解释变量构建暴发期藻华面积变化驱动模型.

根据暴发期蓝藻水华驱动分析模型,研究发现,气温对蓝藻水华暴发的影响最大,占各要素总体贡献率的48%,藻密度和日照时数的影响次之, 贡献率分别为22%和19%,气温、藻密度、日照时数和风速这4个因子的累计贡献率高达95%,表明 暴发期蓝藻水华的发生主要与这4个因素密切相关 (图7).为此,本研究进一步分析了暴发期藻华面积 对气温、藻密度、日照时数和风速的偏依赖度.由 图8(a),当气温在7℃以下,偏依赖度为负且变化 幅度较小,表明低温对蓝藻水华发生具有一定抑制 作用,这种抑制作用随着气温的升高而逐渐减小,



Fig. 7 Contribution rate of factors affecting algal blooms during the outbreak period

偏依赖度在温度为15℃时开始转为正向促进,并在 18℃达到最大,随后均保持在0以上,表明高温是 诱导蓝藻水华发生的有利因素.就偏依赖度随藻密 度变化趋势而言,4600万个·L⁻¹以下藻密度均不利 于蓝藻水华的发生,高密度的藻类对藻华发生有促 进作用,但当水体藻密度超过一定阈值后,该促进 作用趋于平稳,此时藻密度已不再是影响水华发生



Fig. 8 Partial dependence plots for dominant driving factors during the outbreak period

3

讨论

的主要因素[图 8(b)]. 风速对蓝藻水华的影响表现出 逐渐减小的变化趋势, 2.8 m·s⁻¹以下风速对蓝藻水 华发生有促进作用,风速过大则不利于蓝藻的上浮 与积聚[图 8(d)]. 蓝藻水华随日照时数表现为先增后 减的变化模式,在自变量取值范围内,偏依赖度首 先缓慢增加,在 9.5 h 日照处达到峰值后迅速减小, 当日照时数超过 10.5 h,则对蓝藻水华的发生有抑 制作用[图 8(c)]. 以上结果表明,巢湖蓝藻水华发生 受藻类生物量和气象条件的综合影响,各因子对蓝 藻水华的影响均存在一个最适区间,超出或低于这 个区间的因子取值均不利于巢湖蓝藻水华的发生.

蓝藻水华暴发是多种因素共同作用的结果,各 驱动因子间相互制约和相互影响产生的综合效应可 能会加强或削弱单个因子的作用模式,即存在一定 的交互作用.为此,本文根据BRT模型交互作用探 测结果,进一步分析了暴发期各因子交互作用对蓝 藻水华的影响.结果表明,气温和风速、气温和藻密 度之间存在较强的交互作用.就气温和风速的交互作 用而言,蓝藻水华在10~20°C及2.6 m·s⁻¹以下风速发 生面积较大,表明适温、小风的气象条件最有利于 巢湖蓝藻水华发生[图9(a)].在气温稳定条件下,风 速增大一定程度上能抑制藻华暴发.此外,本研究还 分析了不同藻密度条件下,藻华面积对气温的线性 响应关系.由图9(b),水华面积对气温的回归系数随 藻密度的增加不断增大,表明气温一定时,水体藻 密度越大,越有利于巢湖蓝藻水华的暴发.



3.1 卫星遥感反演蓝藻水华精度与BRT模型适用性 利用遥感影像准确提取蓝藻水华面积,是监测 蓝藻水华时空动态及驱动分析的前提.基于藻类生物 在不同光谱波段的变化特征,浮游藻类指数(FAI)与 蓝藻水华覆盖度(FCI)被广泛应用于水体蓝藻水华的 识别与提取[2.5].为评价不同指数对巢湖蓝藻水华反 演的不确定性,本研究进一步对比分析了基于 FAI 与FCI指数反演蓝藻水华的面积(图10).结果表明, 基于FAI和FCI指数提取的藻华面积一致性较高,相 关系数可达0.75. 二者表现为相同的时间变化趋势, 尤其是对大面积暴发的蓝藻水华,二者监测结果较 为一致.然而,基于FAI指数提取的藻华面积总体上 大于 FCI 指数提取的藻华面积,约平均偏大 28 km². 究其原因,可能是两种指数所采用光谱波段的差异, 导致对"异物同谱"像元误分产生的偏差.根据袁俊 等^[23]的研究,由于水陆边界的临近效应,FAI指数可

能会将靠近陆地的像元判定为蓝藻水华,从而导致 对藻华面积的高估^[9].虽然两种方法对巢湖蓝藻水华 的反演存在一定差异,但二者总体变化趋势较为一 致,对下文蓝藻水华的驱动因素分析影响较小.即便 如此,加强人工智能和深度学习等新方法在蓝藻水 华提取中的应用,减小蓝藻水华的提取误差,实现 蓝藻水华的智能化和自动化提取,仍然是当前亟需 开展深入研究的关键技术问题之一^[10,25].

BRT模型作为一种非参数的机器学习算法,能 有效度量各影响因子的重要性及其对因变量的变化 响应规律,尤为适用于非线性变化和发生机制复杂 的蓝藻水华驱动因素分析^[27].基于机器学习算法的 特征重要性评估和预测在相关领域中显示出广阔的 应用前景.然而,作为一个数据驱动型算法,BRT 模型的输出结果可能会受到输入数据微小变化的影 响而发生显著改变,即模型表现出对输入数据较强 的敏感性,从而导致模型出现过拟合或欠拟合等问 题,影响对观测现象的解释和预测^[29,30].为提高模型



图 10 基于 FCI和 FAI 指数提取的藻华面积对比 Fig. 10 Comparison of algal bloom area extracted from FCI and FAI index

对输入数据的鲁棒性和稳定性,本文通过开展多组参数敏感性分析试验,探求实现最佳预测结果的模型参数配置,从而确保模型能够正确处理不同类型和大小的输入数据,提取有价值的特征变量和属性信息.尽管本文的研究结果可能受到蓝藻水华监测样本数量的影响,但BRT模型仍显示出对因子重要性评估和交互作用探测的有效性,模型结果对于识别诱导蓝藻水华发生的主控因子以及预测蓝藻水华暴发风险具有重要的现实意义. 3.2 巢湖蓝藻水华驱动因素

科学评估蓝藻水华驱动因素是蓝藻水华预测、 预警和防治工作的基础,本研究根据国内外流行的 蓝藻水华形成四阶段理论,重点探讨了暴发期和非 暴发期影响巢湖蓝藻水华发生的驱动因素,部分成 果证实了前人的假设,同时也得出了针对巢湖蓝藻 水华驱动因素的独有结论.本研究认为,非暴发期 蓝藻细胞密度变化主要与水体溶解氧和水温等物理 因素有关,化学因素对蓝藻的影响较小.水体中氮、 磷等营养盐为蓝藻复苏提供了充足的物质来源,富 营养化是蓝藻水华暴发的先决条件[1,7].近年来,围 绕巢湖水环境治理开展了大量工作,巢湖水质有一 定程度改善^[20],但2021年巢湖湖区水质仍为Ⅳ类, 呈中度富营养状态.已有研究普遍认为,在高浓度 富营养化水体中,营养盐浓度长期维持较高水平, 已不再是影响蓝藻生长的限制因子[12, 33].本文的研 究结果也证实了这一结论,水体藻密度表现出对总 氮、总磷非线性的变化模式,水体中氮、磷等营养 盐浓度对非暴发期蓝藻变化的解释程度仅占总体贡 献率的15.69%.因此,继续推进巢湖生态治理、改 善巢湖水质环境,仍然是当前巢湖蓝藻水华防治的 根本工作.此外,本研究还发现,气温是影响非暴 发期蓝藻密度变化的主要气象因子,这一结论与罗 晓春等[13]和吴晓东等[34]的研究结果较为一致,他们 认为气温是影响复苏期蓝藻细胞生长的关键因素, 谢小萍等^[14]进一步分析了太湖蓝藻复苏与稳定通过 界限温度的关系,发现蓝藻水华首次暴发一般在气 温稳定通过9℃后1个月出现,略高于本文稳定通 过7℃初日的研究结果.综上,气温是影响淡水湖泊 藻类复苏的关键气象因子.

根据前人的研究成果,气象条件是蓝藻水华暴 发的充分而非必要条件,是推动蓝藻水华形成的外 力因子[12,31],本研究结果发现,巢湖蓝藻水华暴发主 要受气温、日照时数和风速的影响.其中,气温对蓝 藻水华发生起主导作用, 占各要素总体贡献率的 48%. 罗晓春等[13]的研究同时也证实了气温对蓝藻水 华的重要影响,在其构建的多组随机森林驱动分析 模型中,气温作为首要影响因子的频次高达80%, 在蓝藻生长和水华形成的不同阶段均起着关键作用. 随着气候变暖的不断加剧,气温攀升将会导致蓝藻 水华物候和暴发强度的改变,进一步增大蓝藻水华 防治难度[3,25].因此,未来需重点关注气候变化对巢 湖蓝藻水华的影响.日照是藻类进行光合作用的必要 条件,是蓝藻细胞通过伪空胞调节自身浮力的催化 剂[31]. 李阔宇等[35]的研究表明,日照条件能影响蓝藻 细胞光系统Ⅱ的活性,是影响蓝藻细胞生长、繁殖 的主要限制因子.杭鑫等[36]的研究结果也表明,充足 的日照是蓝藻水华形成的必要条件之一,而日照时 数过长能在一定程度上降低蓝藻细胞活性, 抑制蓝 藻水华发生.这与本研究的结论较一致,即日照对蓝 藻水华的影响存在一个最适区间,超出或低于这个 区间均不利于蓝藻水华的形成.有关风速对蓝藻水华 的影响,已有研究的结论趋于一致,一般认为,3~ 4 m·s⁻¹或更小的风速最有利于蓝藻水华的形成,风 速过大则会导致蓝藻细胞在水柱中充分混合,不利 于蓝藻的上浮积聚^[16,25].风向对蓝藻水华的影响主要 体现在其能使湖泊水体发生流动,从而带动蓝藻集

聚形成水华.然而,由于巢湖湖区风向高度不稳定且 复杂多变,针对风向对巢湖蓝藻水华影响的研究, 结论分歧较大^[8].如胡旻琪等^[5]认为巢湖北岸蓝藻堆 积是春夏季南风持续作用的结果,而南岸蓝藻水华 发生频率较高则与冬季盛行的西北风有关^[2].总之, 风速和风向作为蓝藻水华暴发的动力因子,共同决 定蓝藻水华的聚集程度和分布位置.

3.3 不确定性分析及对未来研究的启示

虽然本研究系统分析了暴发期和非暴发期巢湖 蓝藻水华形成的驱动因素,但由于受到多源数据时 空不匹配和统计分析手段的限制,本文还存在较大 的不确定性.首先,基于卫星遥感的蓝藻水华监测大 都发生在无云、晴朗的天气,这在一定程度上掩盖 了降水对蓝藻水华生消的影响.根据 Haakonsson 等[37] 和 Zhou 等^[38]的研究,由大规模降水导致的湖泊水位 上升,一方面能够稀释水体中营养盐物质浓度,另 一方面降水带来的水体扰动能够抑制藻类的上浮聚 集,从而不利于蓝藻水华的大面积暴发.降水被认为 是影响巢湖蓝藻水华面积月际变化的主要驱动因素 之一[39,40]. 然而,本研究结果表明,降水对解释暴发 期蓝藻水华发生的贡献率仅占气象因子的1%,严重 低估了降水对巢湖蓝藻水华的影响.因此,在实地蓝 藻水华监测数据可获取的情况下,着重分析不同强 度和持续时长雨量等级对巢湖蓝藻水华的影响,将 是下一步研究的重点.其次,在暴发期巢湖蓝藻水华 驱动分析建模时,本研究使用的气象资料为巢湖国 家一般气象站点监测数据,该站点仅代表观测位置 10 km 范围内气象要素的平均状态. 而因地形差异, 整个湖区气象要素变化较大,表现为典型的局地气 候特征[8].未来研究有必要结合中尺度气象模式,融 合精细化气象要素场,实现气象要素对不同湖区蓝 藻水华暴发影响的精准分析.最后,蓝藻水华变化具 有高时空动态性,湖区藻华发生面积和位置可在一 天内发生多次变化[23.25]. 受限于遥感数据的时间分辨 率,基于Landsat和MODIS数据难以实现对藻华日内 变化的动态分析,因此,尝试利用雷达和高分遥感数 据(如GOCI和高分三号)进行多源数据的联合反演, 可进一步提升蓝藻水华的动态监测能力.

4 结论

(1)巢湖水体藻密度表现出较大的季节变化特征,蓝藻细胞在春季开始复苏,藻密度在夏、秋季达到最大,冬季藻密度最低.卫星遥感监测结果表明,蓝藻水华轻度暴发在春季发生频率较高,且主要发生在巢湖西半湖和沿岸地区,中等程度以上的蓝藻水华暴发在夏、秋季较为严重.

(2)非暴发期间,巢湖藻密度变化受物理和化 学因素影响较大,二者对解释藻密度方差变化的贡 献率可达 80.3%.根据藻密度对各因子取值的变化响 应图,水体中高浓度的溶解氧为藻类复苏提供了有 利条件,pH和水温对藻密度的影响均存在一个最适 区间,弱碱性水体和3℃水温最有利于藻类细胞的 生长繁殖.蓝藻水华首次暴发日期与稳定通过7℃初 日密切相关,一般在气温稳定通过7℃初日11 d前 后首次出现.

(3)暴发期内,巢湖蓝藻水华发生主要受藻类生物量和气象条件的综合影响,气温、藻密度、日照时数和风速的累计贡献率高达95%,且各因子均存在一个有利于蓝藻水华发生的最适区间.根据多因子交互作用分析结果,巢湖蓝藻水华在水体藻密度较大、气温适宜和微风等环境条件下发生概率最大.

致谢:感谢中国科学院南京地理与湖泊研究所 段洪涛研究员及其团队成员提供的遥感影像数据 支持.

参考文献:

- 朱广伟,许海,朱梦圆,等.三十年来长江中下游湖泊富营养 化状况变迁及其影响因素[J].湖泊科学,2019,31(6):1510-1524.
 Zhu G W, Xu H, Zhu M Y, *et al.* Changing characteristics and driving factors of trophic state of lakes in the middle and lower reaches of Yangtze River in the past 30 years[J]. Journal of Lake Sciences, 2019, 31(6): 1510-1524.
- [2] 祁国华,马晓双,何诗瑜,等.基于多源遥感数据的巢湖水华 长时序时空变化(2009-2018年)分析与发生概率预测[J].湖 泊科学,2021,33(2):414-427.

Qi G H, Ma X S, He S Y, et al. Long-term spatiotemporal variation analysis and probability prediction of algal blooms in Lake Chaohu (2009-2018) based on multi-source remote sensing data [J]. Journal of Lake Sciences, 2021, 33(2): 414-427.

- [3] Yan X C, Xu X G, Wang M Y, et al. Climate warming and cyanobacteria blooms: Looks at their relationships from a new perspective[J]. Water Research, 2017, 125: 449-457.
- Liu J G, Yang W. Water sustainability for China and beyond [J]. Science, 2012, 337(6095): 649-650.
- [5] 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.
- [6] 欧阳添,赵璐,纪璐璐,等.蓝藻水华过程中优势种群演替模式、效应及驱动因子分析[J].环境科学,2022,43(10):4480-4488.
 Ouyang T, Zhao L, Ji L L, *et al.* Succession pattern and consequences of the dominant species during cyanobacterial bloom and its influencing factors [J]. Environmental Science, 2022, 43 (10):4480-4488.
- [7] 温成成,黄廷林,孔昌昊,等.北方富营养分层型水库藻类季 节性暴发机制及其阈值分析[J].环境科学,2023,44(3): 1452-1464.
 Wen C C, Huang T L, Kong C H, et al. Analysis of mechanism
 - and start-up thresholds of seasonal algal blooms in a northern eutrophic stratified reservoir [J]. Environmental Science, 2023, 44 (3): 1452-1464.
- [8] 秦伯强,杨桂军,马健荣,等.太湖蓝藻水华"暴发"的动态特 征及其机制[J].科学通报,2016,61(7):759-770.
 Qin B Q, Yang G J, Ma J R, et al. Dynamics of variability and mechanism of harmful cyanobacteria bloom in Lake Taihu, China

[J]. Chinese Science Bulletin, 2016, **61**(7): 759-770.

- [9] Hu C M. A novel ocean color index to detect floating algae in the global oceans [J]. Remote Sensing of Environment, 2009, 113 (10): 2118-2129.
- [10] Ma J Y, Jin S G, Li J, et al. Spatio-temporal variations and driving forces of harmful algal blooms in Chaohu Lake: a multi-source remote sensing approach[J]. Remote Sensing, 2021, 13(3), doi: 10.3390/rs13030427.
- [11] 唐晓先, 沈明, 段洪涛. 巢湖蓝藻水华时空分布(2000-2015)
 [J]. 湖泊科学, 2017, 29(2): 276-284.
 Tang X X, Shen M, Duan H T. Temporal and spatial distribution of algal blooms in Lake Chaohu, 2000-2015 [J]. Journal of Lake Sciences, 2017, 29(2): 276-284.
- [12] Zhang M, Duan H T, Shi X L, et al. Contributions of meteorology to the phenology of cyanobacterial blooms: implications for future climate change[J]. Water Research, 2012, 46(2): 442-452.
- [13] 罗晓春,杭鑫,曹云,等.太湖富营养化条件下影响蓝藻 水华的主导气象因子[J].湖泊科学,2019,31(5):1248-1258.
 Luo X C, Hang X, Cao Y, *et al.* Dominant meteorological factors

affecting cyanobacterial blooms under eutrophication in Lake Taihu [J]. Journal of Lake Sciences, 2019, **31**(5): 1248-1258.

- [14] 谢小萍,李亚春,杭鑫,等.气温对太湖蓝藻复苏和休眠进程的影响[J].湖泊科学,2016,28(4):818-824.
 Xie X P, Li Y C, Hang X, et al. The effect of air temperature on the process of cyanobacteria recruitment and dormancy in Lake Taihu[J]. Journal of Lake Sciences, 2016, 28(4):818-824.
- [15] 刘心愿, 宋林旭, 纪道斌, 等. 降雨对蓝藻水华消退影响及其机制分析[J]. 环境科学, 2018, 39(2): 774-782.
 Liu X Y, Song L X, Ji D B, et al. Effect of the rainfall on extinction of cyanobacteria bloom and its mechanism analysis [J]. Environmental Science, 2018, 39(2): 774-782.
- [16] 李亚春,谢小萍,杭鑫,等.结合卫星遥感技术的太湖蓝藻水 华形成风场特征[J].中国环境科学,2016,36(2):525-533.
 Li Y C, Xie X P, Hang X, et al. Analysis of wind field features causing cyanobacteria bloom in Taihu Lake combined with remote sensing methods[J]. China Environmental Science, 2016,36(2): 525-533.
- [17] 鲁韦坤, 余凌翔, 欧晓昆, 等. 滇池蓝藻水华发生频率与气象 因子的关系[J]. 湖泊科学, 2017, **29**(3): **534-545**. LuWK, YuLX, OuXK, *et al.* Relationship between occurrence
- frequency of cyanobacteria bloom and meteorological factors in Lake Dianchi [J]. Journal of Lake Sciences, 2017, **29** (3) : 534-545.
- [18] Yn P X, Gao R, Zhang D Z, et al. Predicting coastal algal blooms with environmental factors by machine learning methods [J]. Ecological Indicators, 2021, 123, doi: 10.1016/j.ecolind.2020. 107334.
- [19] 王苏民,窦鸿身.中国湖泊志[M].北京:科学出版社,1998.
- [20] 张民,孔繁翔.巢湖富营养化的历程、空间分布与治理策略 (1984-2013)[J].湖泊科学,2015,27(5):791-798.
 Zhang M, Kong F X. The process, spatial and temporal distributions and mitigation strategies of the eutrophication of Lake Chaohu (1984-2013)[J]. Journal of Lake Sciences, 2015, 27 (5):791-798.
- [21] 邓莎,周键.蓝藻水华的危害及主要控制技术研究进展[J].安徽农学通报,2020,26(18):150-151,198.
 Deng S, Zhou J. Research advances in the harm of cyanobacteria bloom and its main control technology [J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2020, 26(18): 150-151, 198.
- [22] 曹畅,王胜蕾,李俊生,等.基于 MODIS 数据的全国 144 个重 点湖库营养状态监测:以 2018 年夏季为例[J].湖泊科学, 2021, 33(2):405-413.
 Cao C, Wang S L, Li J S, *et al.* MODIS-based monitoring of spatial distribution of trophic status in 144 key lakes and reservoirs of China in summer of 2018[J]. Journal of Lake Sciences, 2021, 33 (2):405-413.
- [23] 袁俊,曹志刚,马金戈,等.1980s以来巢湖藻华物候时空变化 遥感分析[J].湖泊科学,2023,35(1):57-72. Yuan J, Cao Z G, Ma J G, et al. Remote sensed analysis of spatial and temporal variation in phenology of algal blooms in Lake Chaohu since 1980s[J]. Journal of Lake Sciences, 2023, 35(1):57-72.
- [24] Yang Y, Wang T, Wang PC, et al. In-situ measurement of CO_2 at

the Xinglong regional background station over North China [J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 2019, **12**(6): 385-391.

- [25] Le C F, Hu C M, English D, et al. Climate-driven chlorophyll-a changes in a turbid estuary: Observations from satellites and implications for management[J]. Remote Sensing of Environment, 2013, 130: 11-24.
- [26] QX/T 207-2013, 湖泊蓝藻水华卫星遥感监测技术导则[S].
- [27] Elith J, Leathwick J R, Hastie T. A working guide to boosted regression trees [J]. Journal of Animal Ecology, 2008, 77 (4): 802-813.
- [28] Martin V, Pfeiffer D U, Zhou X Y, et al. Spatial distribution and risk factors of highly pathogenic avian influenza (HPAI) H5N1 in China [J]. PLoS pathogens, 2011, 7(3), doi: 10.1371/journal. ppat.1001308.
- [29] Gu H L, Wang J, Ma L J, et al. Insights into the BRT (boosted regression trees) method in the study of the climate-growth relationship of Masson pine in subtropical China [J]. Forests, 2019, 10(3), doi: 10.3390/f10030228.
- [30] Lamb S E, Haacker E M K, Smidt S J. Influence of irrigation drivers using boosted regression trees: Kansas high plains [J]. Water Resources Research, 2021, 57 (5), doi: 10.1029/ 2020WR028867.
- [31] 孔繁翔, 马荣华, 高俊峰, 等. 太湖蓝藻水华的预防、预测和预警的理论与实践[J]. 湖泊科学, 2009, 21(3): 314-328.
 Kong F X, Ma R H, Gao J F, et al. The theory and practice of prevention, forecast and warning on cyanobacteria bloom in Lake Taihu[J]. Journal of Lake Sciences, 2009, 21(3): 314-328.
- [32] 荀尚培,杨元建,何彬方,等.春季巢湖水温和水体叶绿素a 浓度的变化关系[J].湖泊科学,2011,23(5):767-772.
 Xun S P, Yang Y J, He B F, et al. Analysis of relationship between spring water temperature and chlorophyll-a in Lake Chaohu
 [J]. Journal of Lake Sciences, 2011, 23(5):767-772.
- [33] 荣洁, 王腊春, 指数平滑法-马尔科夫模型在巢湖水质预测中的应用[J]. 水资源与水工程学报, 2013, 24(4): 98-102.
 Rong H, Wang L C. Application of the exponential smoothing law-Markov model in prediction of water quality of Chaohu lake [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2013, 24(4): 98-102.
- 98-102.
 [34] 吴晓东、孔繁翔,张晓峰,等.太湖与巢湖水华蓝藻越冬和春季复苏的比较研究[J].环境科学,2008,29(5):1313-1318.
 Wu X D, Kong F X, Zhang X F, et al. Comparison of overwintering and recruitment of cyanobacteria in Taihu Lake and Chaohu Lake [J]. Environmental Science, 2008, 29(5):1313-1318.
- [35] 李阔宇,宋立荣,万能.底泥中微囊藻复苏和生长特性的研究
 [J].水生生物学报,2004,28(2):113-118.
 Li K Y, Song L R, Wan N. Studies on recruitment and growth characteristic of microcystis in sediment [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2004, 28(2):113-118.
 [36] 杭鑫,罗晓春,谢小萍,等.太湖蓝藻水华形成的适宜气象指
- [30] 机量, 90, 47, 37, 47, 9, X(6) 血液水平力及的近日 (家市标[J]. 气象科技, 2019, 47(1): 171-178. Hang X, Luo X C, Xie X P, et al. Suitable meteorological indicators for formation of cyanobacteria blooms in Taihu Lake [J]. Meteorological Science and Technology, 2019, 47(1): 171-178.
- [37] Haakonsson S, Rodríguez-Gallego L, Somma A, et al. Temperature and precipitation shape the distribution of harmful cyanobacteria in subtropical lotic and lentic ecosystems[J]. Science of the Total Environment, 2017, 609: 1132-1139.
- [38] Zhou Y T, Yan W J, Wei W Y. Effect of sea surface temperature and precipitation on annual frequency of harmful algal blooms in the East China Sea over the past decades [J]. Environmental Pollution, 2021, 270, doi: 10.1016/j.envpol.2020.116224.
- [39] 范裕祥,金社军,周培,等.巢湖蓝藻水华暴发与气象条件的 关系[A].见:第四届中国湖泊论坛论文集[C].合肥:中国科 学技术协会,2014.492-496.
- [40] 李晟铭,刘吉平,宋开山,等.基于Landsat影像巢湖蓝藻水华 暴发时空变化特征及其驱动因素分析[J].长江流域资源与环 境,2019,28(5):1205-1213.
 Li S M, Liu J P, Song K S, *et al.* Analysis on spatial and temporal character of algae bloom in Lake Chaohu and its driving factors based on Landsat imagery [J]. Resources and Environment in the

Yangtze Basin, 2019, 28(5): 1205-1213.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

CONTENTS

Spatial Distribution Characteristics of PM2.5 and O3 in Beijing-Tianjin-Hebei Region Based on Time Series Decomposition	(2487)
Ozone Sensitivity Analysis in Urban Beijing Based on Random Forest	(2497)
Prediction of Ozone Pollution in Sichuan Basin Based on Random Forest Model	(2507)
Establishment and Effective Evaluation of Haikou Ozone Concentration Statistical Prediction ModelFU Chuan-bo, LIN Jian-xing, TANG Jia-xiang, et al.	(2516)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Ozone Concentration and Health Benefit Assessment in the Beijing-Tianjin-Hebei Region from 2015 to 2020	
GAO Ran, LI Qin, CHE Fei, et al.	(2525)
Water-soluble Inorganic Ion Content of PM2.5 and Its Change Characteristics in Urban Area of Beijing in 2022CHEN Yuan-yuan, CUI Di, ZHAO Ze-xi, et al.	(2537)
Pollution Characteristics, Source, and Health Risk Assessment of Metal Elements in PM2.5 Between Winter and Spring in ZhengzhouTAO Jie, YAN Hui-jiao, XU Yi-fei, et al.	(2548)
Characteristics, Sources Apportionment, and Health Risks of PM2.5-bound PAHs and Their Derivatives Before and After Heating in Zibo CitySUN Gang-li, WU Li-ping, XU Bo, et al.	(2558)
Components Characteristic and Source Apportionment of Fine Particulate Matter in Transition Period of Heating Season in Xi'an with High Time Resolution	
LI Meng-jin, ZHANG Yong, ZHANG Qian, et al.	(2571)
Source and Cause Analysis of High Concentration of Inorganic Aerosol During Two Typical Pollution Processes in Winter over TianjinLU Miao-miao, HAN Su-qin, LIU Ke-xin, et al.	(2581)
Spatial-temporal Variation and Spatial Differentiation Geographic Detection of PM2.5 Concentration in the Shandong Province Based on Spatial Scale Effect	
XU Yong, WEI Meng-xin, ZOU Bin, et al.	(2596)
Characteristics of VOCs Emissions and Ozone Formation Potential for Typical Chemicals Industry Sources in China	(2613)
Formation Potential of Secondary Organic Aerosols and Sources of Volatile Organic Compounds During an Air Pollution Episode in Autumn , Langfang	()
ZHANC Jing-qiao, LIU Zheng, DINC Wen-wen, et al.	(2622)
Scale Effects of Landscape Pattern on Impacts of River Water Quality : A Meta-analysis WANG Yu-cang, DU Jing-jing, ZHANG Yu, et al.	(2631)
Spectral Characteristics and Sources of Dissolved Organic Matter in Inflow Rivers of Baiyangdian Lake Water in Summer Flood SeasonMENG Jia-jing, DOU Hong, CHEN Zhe, et al.	(2640)
Analysis on Hydrochemical Evolution of Shallow Groundwater East of Yongding River in Fengtai District, Beijing	(2651)
Hydrochemical Characteristics, Controlling Factors and Water Quality Evaluation of Shallow Groundwater in Tan-Lu Fault Zone (Anhui Section)LIU Hai, WEI Wei, SONG Yang, et al.	(2665)
Effects of Pesticides Use on Pesticides Residues and Its Environmental Risk Assessment in Xingkai Lake(China)	(2678)
Characteristics of Microorganisms and Antibiotic Resistance Genes of the Riparian Soil in the Lanzhou Section of the Yellow RiverWEI Cheng-chen, WEI Feng-yi, XIA Hui, et al.	(2686)
Analysis of the Spatiotemporal Distribution of Algal Blooms and Its Driving Factors in Chaohu Lake Based on Multi-source DatasetsJIN Xiao-long, DENG Xue-liang, DAI Rui, et al.	(2694)
Characteristics of Epiphytic Bacterial Community on Submerged Macrophytes in Water Environment Supplemented with Reclaimed Water	(2707)
Effects of Water Level Fluctuations and Vegetation Restoration on Soil Prokaryotic Microbial Community Structure in the Riparian Zone of the Three Gorges Reservoir	
MEI Yu, HUANG Ping, WANG Peng, et al.	(2715)
Bacterial Community Structure of Typical Lake Sediments in Yinchuan City and Its Response to Heavy MetalsMENG Jun-jie, LIU Shuang-yu, QIU Xiao-cong, et al.	(2727)
Effect of Thermal Hydrolysis Pretreatment Time on Microbial Community Structure in Sludge Anaerobic Digestion SystemZHANG Han, ZHANG Han, WANG Jia-wei, et al.	(2741)
Source Apportionment of Morphine in Wastewater	(2748)
Ecological Environment Dynamical Evaluation of Hutuo River Basin Using Remote Sensing	(2757)
Spatiotemporal Evolution and Influencing Factors of Ecosystem Service Value in the Yellow River Basin WANG Yi-qi, SUN Xue-ying	(2767)
Ecosystem Service Trade-off Synergy Strength and Spatial Pattern Optimization Based on Bayesian Network : A Case Study of the Fenhe River Basin	
······································	
CAI Jin, WEI Xiao-jian, JIANG Ping, et al.	(2780)
Spatial-temporal Evolution and Quantitative Attribution of Habitat Quality in Typical Karst Counties of Guizhou PlateauCAI Jin, WEI Xiao-jian, JIANG Ping, et al.	(2780) (2793)
Spatial-temporal Evolution and Quantitative Attribution of Habitat Quality in Typical Karst Counties of Guizhou Plateau ······CAI Jin, WEI Xiao-jian, JIANG Ping, et al. Spatial-temporal Evolution and Quantitative Attribution of Habitat Quality in Typical Karst Counties of Guizhou Plateau ······CAI Jin, WEI Xiao-jian, JIANG Ping, et al. Spatio-temporal Variation in NEP in Ecological Zoning on the Loess Plateau and Its Driving Factors from 2000 to 2021 ··································	(2780) (2793) (2806)
CAI Jin, WEI Xiao-jian, JIANG Ping, et al. Spatial-temporal Evolution and Quantitative Attribution of Habitat Quality in Typical Karst Counties of Guizhou PlateauCAI Jin, WEI Xiao-jian, JIANG Ping, et al. Spatio-temporal Variation in NEP in Ecological Zoning on the Loess Plateau and Its Driving Factors from 2000 to 2021ZHOU Yi-ting, YAN Jun-xia, LIU Ju, et al. Land Change Simulation and Grassland Carbon Storage in the Loess Plateau Based on SSP-RCP ScenariosCUI Xie, DONG Yan, ZHANG Lu-yin, et al.	(2780) (2793) (2806) (2817)
CAI Jin, WEI Xiao-jian, JIANG Ping, et al. Spatial-temporal Evolution and Quantitative Attribution of Habitat Quality in Typical Karst Counties of Guizhou Plateau	(2780) (2793) (2806) (2817)
CAI Jin, WEI Xiao-jian, JIANG Ping, et al. Spatial-temporal Evolution and Quantitative Attribution of Habitat Quality in Typical Karst Counties of Guizhou PlateauLI Yue, FENG Xia, WU Lu-hua, et al. Spatio-temporal Variation in NEP in Ecological Zoning on the Loess Plateau and Its Driving Factors from 2000 to 2021ZHOU Yi-ting, YAN Jun-xia, LIU Ju, et al. Land Change Simulation and Grassland Carbon Storage in the Loess Plateau Based on SSP-RCP ScenariosCUI Xie, DONG Yan, ZHANG Lu-yin, et al. Multi-scenario Simulation of Construction Land Expansion and Its Impact on Ecosystem Carbon Storage in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration	(2780) (2793) (2806) (2817) (2828)
CAI Jin, WEI Xiao-jian, JIANG Ping, et al. Spatial-temporal Evolution and Quantitative Attribution of Habitat Quality in Typical Karst Counties of Guizhou PlateauLI Yue, FENG Xia, WU Lu-hua, et al. Spatio-temporal Variation in NEP in Ecological Zoning on the Loess Plateau and Its Driving Factors from 2000 to 2021	(2780) (2793) (2806) (2817) (2828) (2828) (2840)
CAI Jin, WEI Xiao-jian, JIANG Ping, et al. Spatial-temporal Evolution and Quantitative Attribution of Habitat Quality in Typical Karst Counties of Guizhou PlateauLI Yue, FENG Xia, WU Lu-hua, et al. Spatio-temporal Variation in NEP in Ecological Zoning on the Loess Plateau and Its Driving Factors from 2000 to 2021	(2780) (2793) (2806) (2817) (2828) (2840) (2840) (2848)
CAI Jin, WEI Xiao-jian, JIANG Ping, et al. Spatial-temporal Evolution and Quantitative Attribution of Habitat Quality in Typical Karst Counties of Guizhou Plateau Spatio-temporal Variation in NEP in Ecological Zoning on the Loess Plateau and Its Driving Factors from 2000 to 2021 Land Change Simulation and Grassland Carbon Storage in the Loess Plateau Based on SSP-RCP Scenarios Multi-scenario Simulation of Construction Land Expansion and Its Impact on Ecosystem Carbon Storage in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration WU Ai-bin, CHEN Fu-guo, ZHAO Yan-xia, et al. Effects of Land Use Change on Soil Aggregate Stability and Soil Aggregate Organic Carbon in Karst Area of Southwest China Integrated Analysis of Soil Organic Matter Molecular Composition Changes Under Different Land Uses Prediction Spatial Distribution of Soil Organic Matter Based on Improved BP Neural Network with Optimized Sparrow Search Algorithm WI Ai-bin, CHEN Fu-guo, SONG Yin-xian, et al. Prediction Spatial Distribution of Soil Organic Matter Based on Improved BP Neural Network with Optimized Sparrow Search Algorithm WI Ai-bin, CHEN Fu-guo, SONG Yin-xian, et al. Prediction Spatial Distribution of Soil Organic Matter Based on Improved BP Neural Network with Optimized Sparrow Search Algorithm WI Ai-bin, CHEN Fu-guo, SONG Yin-xian, et al. Prediction Spatial Distribution of Soil Organic Matter Based on Improved BP Neural Network with Optimized Sparrow Search Algorithm WI Ai-bin, CHEN Fu-guo, SONG Yin-xian, et al. Prediction Spatial Distribution of Soil Organic Matter Based on Improved BP Neural Network with Optimized Sparrow Search Algorithm WI Ai-bin Agglomeration Soil Aggregate Organic Carbon in Karst Area of Southwest Ching WI Ai-bin Agglomeration Agglorithm HI Zhoru Agglorithm HI	(2780) (2793) (2806) (2817) (2828) (2840) (2840) (2848) (2859)
CAI Jin, WEI Xiao-jian, JIANG Ping, et al. Spatial-temporal Evolution and Quantitative Attribution of Habitat Quality in Typical Karst Counties of Guizhou Plateau Spatio-temporal Variation in NEP in Ecological Zoning on the Loess Plateau and Its Driving Factors from 2000 to 2021 Land Change Simulation and Grassland Carbon Storage in the Loess Plateau Based on SSP-RCP Scenarios Multi-scenario Simulation of Construction Land Expansion and Its Impact on Ecosystem Carbon Storage in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration WU Ai-bin, CHEN Fu-guo, ZHAO Yan-xia, et al. Effects of Land Use Change on Soil Aggregate Stability and Soil Aggregate Organic Carbon in Karst Area of Southwest China Integrated Analysis of Soil Organic Matter Molecular Composition Changes Under Different Land Uses Prediction Spatial Distribution of Soil Organic Matter Based on Improved BP Neural Network with Optimized Sparrow Search Algorithm Effects of Application of Different Organic Matterials on Phosphorus Accumulation and Transformation in Vegetable Fields State State Sta	(2780) (2793) (2806) (2817) (2828) (2840) (2848) (2848) (2859) (2871)
CAI Jin, WEI Xiao-jian, JIANG Ping, et al. Spatial-temporal Evolution and Quantitative Attribution of Habitat Quality in Typical Karst Counties of Guizhou Plateau Spatio-temporal Variation in NEP in Ecological Zoning on the Loess Plateau and Its Driving Factors from 2000 to 2021 Land Change Simulation and Grassland Carbon Storage in the Loess Plateau Based on SSP-RCP Scenarios Multi-scenario Simulation of Construction Land Expansion and Its Impact on Ecosystem Carbon Storage in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration WU Ai-bin, CHEN Fu-guo, ZHAO Yan-xia, et al. Effects of Land Use Change on Soil Aggregate Stability and Soil Aggregate Organic Carbon in Karst Area of Southwest China Integrated Analysis of Soil Organic Matter Molecular Composition Changes Under Different Land Uses Prediction Spatial Distribution of Soil Organic Matter Based on Improved BP Neural Network with Optimized Sparrow Search Algorithm Effects of Application of Different Organic Matterials on Phosphorus Accumulation and Transformation in Vegetable Fields Intensive Citrus Cultivation Suppresses Soil Phosphorus Cycling Microbial Activity Multi-scenario Curtus Cultivation Suppresses Soil Phosphorus Cycling Microbial Activity Multi-scenario Sinulation of Different Organic Matter Jang-ying-ze, et al. Intensive Citrus Cultivation Suppresses Soil Phosphorus Cycling Microbial Activity Multi-scenario Activity Multi-scenario Sinulation of Different Organic Mater Jang-ying-ze, et al. Intensive Citrus Cultivation Suppresses Soil Phosphorus Cycling Microbial Activity Multi-scenario Activity M	(2780) (2793) (2806) (2817) (2817) (2828) (2840) (2848) (2848) (2859) (2871) (2881)
CAI Jin, WEI Xiao-jian, JIANG Ping, et al. Spatial-temporal Evolution and Quantitative Attribution of Habitat Quality in Typical Karst Counties of Guizhou Plateau Spatio-temporal Variation in NEP in Ecological Zoning on the Loess Plateau and Its Driving Factors from 2000 to 2021 LI Yue, FENG Xia, WU Lu-hua, et al. Spatio-temporal Variation and Grassland Carbon Storage in the Loess Plateau Based on SSP-RCP Scenarios CUI Xie, DONG Yan, ZHANG Lu-yin, et al. Multi-scenario Simulation of Construction Land Expansion and Its Impact on Ecosystem Carbon Storage in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration WU Ai-bin, CHEN Fu-guo, ZHAO Yan-xia, et al. Effects of Land Use Change on Soil Aggregate Stability and Soil Aggregate Organic Carbon in Karst Area of Southwest China Integrated Analysis of Soil Organic Matter Molecular Composition Changes Under Different Land Uses HUANG Shi-wei, ZHAO Yi-kai, ZHU Xin-yu, et al. Prediction Spatial Distribution of Soil Organic Matter Based on Improved BP Neural Network with Optimized Sparrow Search Algorithm HU Zhi-rui, ZHAO Wan-fu, SONG Yin-xian, et al. Effects of Application of Different Organic Matterials on Phosphorus Accumulation and Transformation in Vegetable Fields Intensive Citrus Cultivation Suppresses Soil Phosphorus Cycling Microbial Activity Effects of Controlled-release Blended Fertilizer on Crop Yield and Greenhouse Gas Emissions in Wheat-maize Rotation System CAO Wei, WANG Xue-xia, XIE Jian-zhi, et al. Effects of Controlled-release Blended Fertilizer on Crop Yield and Greenhouse Gas Emissions in Wheat-maize Rotation System CAO Wei, WANG Xue-xia, XIE Jian-zhi, et al. Effects of Controlled-release Blended Fertilizer on Crop Yield and Greenhouse Gas Emissions in Wheat-maize Rotation System CAO Wei, WANG Xue-xia, XIE Jian-zhi, et al.	(2780) (2793) (2806) (2817) (2817) (2828) (2840) (2848) (2848) (2859) (2871) (2881) (2891)
CAI Jin, WEI Xiao-jian, JIANG Ping, et al. Spatial-temporal Evolution and Quantitative Attribution of Habitat Quality in Typical Karst Counties of Guizhou Plateau Spatio-temporal Variation in NEP in Ecological Zoning on the Loess Plateau and Its Driving Factors from 2000 to 2021 ZHOU Yi-ting, YAN Jun-xia, LIU Ju, et al. Land Change Simulation and Grassland Carbon Storage in the Loess Plateau Based on SSP-RCP Scenarios CUI Xie, DONG Yan, ZHANG Lu-yin, et al. Multi-scenario Simulation of Construction Land Expansion and Its Impact on Ecosystem Carbon Storage in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration WU Ai-bin, CHEN Fu-guo, ZHAO Yan-xia, et al. Effects of Land Use Change on Soil Aggregate Stability and Soil Aggregate Organic Carbon in Karst Area of Southwest China Integrated Analysis of Soil Organic Matter Molecular Composition Changes Under Different Land Uses Prediction Spatial Distribution of Soil Organic Matter Based on Improved BP Neural Network with Optimized Sparrow Search Algorithm Effects of Application of Different Organic Materials on Phosphorus Accumulation and Transformation in Vegetable Fields Intensive Citrus Cultivation Suppresses Soil Phosphorus Cycling Microbial Activity Effects of Controlled-release Blended Fertilizer on Crop Yield and Greenhouse Gas Emissions in Wheat-maize Rotation System BAI Yi-ru, LIU Xu, ZHANG Yu-han, et al. Effect of Biochar on NO ₃ ⁻ N Transport in Loessial Soil and Its Simulation BAI Yi-ru, LIU Xu, ZHANG Yu-han, et al.	(2780) (2793) (2806) (2817) (2817) (2848) (2848) (2848) (2859) (2871) (2881) (2891) (2905)
CAI Jin, WEI Xiao-jian, JIANG Ping, et al. Spatial-temporal Evolution and Quantitative Attribution of Habitat Quality in Typical Karst Counties of Guizhou Plateau LI Yue, FENG Xia, WU Lu-hua, et al. Spatio-temporal Variation in NEP in Ecological Zoning on the Loess Plateau and Its Driving Factors from 2000 to 2021 ZHOU Yi-ting, YAN Jun-xia, LIU Ju, et al. Land Change Simulation and Grassland Carbon Storage in the Loess Plateau Based on SSP-RCP Scenarios CUI Xie, DONG Yan, ZHANG Lu-yin, et al. Multi-scenario Simulation of Construction Land Expansion and Its Impact on Ecosystem Carbon Storage in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration WU Ai-bin, CHEN Fu-guo, ZHAO Yan-xia, et al. Effects of Land Use Change on Soil Aggregate Stability and Soil Aggregate Organic Carbon in Karst Area of Southwest China Integrated Analysis of Soil Organic Matter Molecular Composition Changes Under Different Land Uses HUANG Shi-wei, ZHAO Yi-kai, ZHU Xin-yu, et al. Prediction Spatial Distribution of Soil Organic Matter Based on Improved BP Neural Network with Optimized Sparrow Search Algorithm HU Zhi-rui, ZHAO Wan-fu, SONG Yin-xian, et al. Effects of Controlled-release Blended Fertilizer on Crop Yield and Greenhouse Gas Emissions in Wheat-maize Rotation System GAO Wei, WANG Xue-xia, XIE Jian-zhi, et al. Effect of Biochar on N0 ₃ ⁻ -N Transport in Loessial Soil and Its Simulation BAI Yi-ru, LIU Xu, ZHANG Yu-han, et al. Analysis and Evaluation of Heavy Metal Pollution in Farmland Soil in China : A Meta-analysis YANG Li, BAI Zong-xu, BO Wen-hao, et al. Analysis and Evaluation of Heavy Metal Pollution in Farmland Soil in China : A Meta-analysis	(2780) (2793) (2806) (2817) (2828) (2840) (2848) (2859) (2871) (2881) (2881) (2891) (2905) (2913)
CAI Jin, WEI Xiao-jian, JIANG Ping, et al. Spatial-temporal Evolution and Quantitative Attribution of Habitat Quality in Typical Karst Counties of Guizhou Plateau	(2780) (2793) (2806) (2817) (2828) (2840) (2848) (2859) (2871) (2881) (2891) (2905) (2913) (2926)
CAI Jin, WEI Xiao-jian, JIANG Ping, et al. Spatial-temporal Evolution and Quantitative Attribution of Habitat Quality in Typical Karst Counties of Guizhou Plateau	(2780) (2793) (2806) (2817) (2828) (2840) (2848) (2848) (2848) (2859) (2871) (2881) (2891) (2905) (2913) (2926) (2939)
CAI Jin, WEI Xiao-jian, JIANG Ping, et al. Spatial-temporal Evolution and Quantitative Attribution of Habitat Quality in Typical Karst Counties of Guizhou Plateau	(2780) (2793) (2806) (2817) (2828) (2848) (2848) (2848) (2848) (2859) (2871) (2881) (2891) (2905) (2913) (2926) (2939) (2952)
CAI Jin, WEI Xiao-jian, JIANG Ping, et al. Spatial-temporal Evolution and Quantitative Attribution of Habitat Quality in Typical Karst Counties of Guizhou Plateau	(2780) (2793) (2806) (2817) (2828) (2840) (2848) (2848) (2848) (2859) (2871) (2881) (2891) (2905) (2913) (2926) (2952) (2962)
CAI Jin, WEI Xiao-jian, JIANG Ping, et al. Spatial-temporal Evolution and Quantitative Attribution of Habitat Quality in Typical Karst Counties of Guizhou Plateau Spatio-temporal Variation in NEP in Ecological Zoning on the Loess Plateau and Its Driving Factors from 2000 to 2021 Land Change Simulation and Grassland Carbon Storage in the Loess Plateau Based on SSP-RCP Seenarios CUI Xie, DONG Yan, ZHANG Lu-yin, et al. Multi-scenario Simulation of Construction Land Expansion and Its Impact on Ecosystem Carbon Storage in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration WU Ai-bin, CHEN Fu-guo, ZHAO Yan-xia, et al. Effects of Land Use Change on Soil Aggregate Stability and Soil Aggregate Organic Carbon in Karst Area of Southwest China Integrated Analysis of Soil Organic Matter Molecular Composition Changes Under Different Land Uses Prediction Spatial Distribution of Soil Organic Matter Based on Improved BP Neural Network with Optimized Sparrow Search Algorithm HUANG Shi-wei, ZHAO Yin-xia, LI Xhun Yin, et al. Effects of Application of Different Organic Matter Based on Improved BP Neural Network with Optimized Sparrow Search Algorithm HUANG Shi-wei, ZHAO Yan-xia, KIE Jian-zhi, et al. Effects of Controlled-release Blended Fertilizer on Crop Yield and Greenhouse Gas Emissions in Wheat-maize Rotation System Mathysis and Evaluation of Heavy Metal Pollution in Farmland Soil in China: A Meta-analysis Critical Review on Heavy Metal Contamination in Urban Soil and Surface Dust Research Progress on Solidification and MICP Remediation Solis in Heavy Metal Contaminated Site Pollution Characteristics and Source Analysis of Soil Heavy Metal in Coal Mine Area near the Yellow River in Shandong Heavy Metal Content and Risk Assessment, and Source Apportionment of Soil the Juma River Basin Heavy Metal Content and Risk Assessment, and Source Apportionment of Soil theavy Metals in the Yellow River Floodplain of Yinchuan City Heavy Metal Content and Risk Assessment, and Source Apportionment of Soil theavy Metals in the Yellow	(2780) (2793) (2806) (2817) (2828) (2840) (2848) (2848) (2848) (2859) (2871) (2881) (2891) (2905) (2913) (2926) (2939) (2952) (2952) (2971)
CAI Jin, WEI Xiao-jian, JIANC Ping, et al. Spatial-temporal Evolution and Quantitative Attribution of Habitat Quality in Typical Karst Counties of Guizhou PlateauCAI Jin, WEI Xiao-jian, JIANC Ping, et al. Spatio-temporal Variation in NEP in Ecological Zoning on the Loess Plateau and Its Driving Factors from 2000 to 2021	(2780) (2793) (2806) (2817) (2828) (2840) (2848) (2848) (2848) (2859) (2871) (2881) (2905) (2913) (2926) (2939) (2952) (2952) (2971) (2983)
CAI Jin, WEI Xiao-jian, JIANG Ping, et al. Spatial-temporal Evolution and Quantitative Attribution of Habitat Quality in Typical Karst Counties of Guizhou Plateau	(2780) (2793) (2806) (2817) (2828) (2840) (2848) (2848) (2848) (2859) (2871) (2881) (2891) (2905) (2913) (2926) (2939) (2952) (2952) (2962) (2971) (2983)
CAI Jin, WEI Xiao-jian, JIANG Ping, et al. Spatial-temporal Evolution and Quantitative Attribution of Habitat Quality in Typical Karst Counties of Guizhou Plateau Spatio-temporal Variation in NEP in Ecological Zoning on the Loess Plateau and Its Driving Factors from 2000 to 2021 Land Change Simulation and Grassland Carbon Storage in the Loess Plateau Based on SSP-RCP Scenarios Multi-scenario Simulation of Construction Land Expansion and Its Impact on Ecosystem Carbon Storage in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration 	(2780) (2793) (2793) (2806) (2817) (2818) (2848) (2848) (2859) (2871) (2881) (2891) (2905) (2913) (2905) (2913) (2926) (2939) (2952) (2971) (2983)
CAI Jin, WEI Xiao-jian, JIANG Ping, et al. Spatial-temporal Evolution and Quantitative Attribution of Habitat Quality in Typical Karst Counties of Guizhou Plateau Spatio-temporal Variation in NEP in Ecological Zoning on the Loess Plateau and Its Driving Factors from 2000 to 2021 Land Charage Simulation and Grassland Carbon Storage in the Loess Plateau Based on SSP-RCP Scenarios Multi-scenario Simulation of Construction Land Expansion and Its Impact on Ecosystem Carbon Storage in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration 	(2780) (2793) (2793) (2806) (2817) (2818) (2848) (2848) (2859) (2871) (2881) (2891) (2905) (2913) (2905) (2913) (2926) (2939) (2952) (2995) (3005) (3005)
CAI Jin, WEI Xiao-jian, JIANG Ping, et al. Spatial-temporal Evolution and Quantitative Attribution of Habitat Quality in Typical Karst Counties of Guizhou Plateau	(2780) (2793) (2793) (2806) (2817) (2814) (2848) (2848) (2859) (2871) (2881) (2891) (2905) (2913) (2926) (2939) (2952) (2962) (2971) (2983) (2995) (3005) (3016)
CAI Jin, WEI Xiao-jian, JIANG Ping, et al. Spatia-temporal Evolution and Quantitative Attribution of Habitat Quality in Typical Karst Counties of Guizhou Plateau	(2780) (2793) (2793) (2806) (2817) (2814) (2848) (2848) (2859) (2871) (2881) (2891) (2905) (2913) (2926) (2939) (2952) (2962) (2971) (2983) (2995) (3005) (3016) (3027)
CAI Jin, WEI Xiao-jian, JIANG Ping, et al. Spatial-temporal Evolution and Quantitative Attribution of Habitat Quality in Typical Karst Counties of Guizhou Plateau Spatia-temporal Evolution and Grassland Carbon Storage in the Loses Plateau and Its Driving Factors from 2000 to 2021 LI Yue, FERNC Xia, WU Lu-hua, et al. Spatia-temporal Variation in NEP in Ecological Zoning on the Loses Plateau Based on SSP-RCP Scenarios CUI Xie, DONC Yan, ZHANG Lu-yin, et al. Multi-scenario Simulation and Crassland Carbon Storage in the Loses Plateau Based on SSP-RCP Scenarios CUI Xie, DONC Yan, ZHANG Lu-yin, et al. Multi-scenario Simulation of Construction Land Expansion and Its Impact on Ecosystem Carbon Storage in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration UI Xie, DANC Shi veiz, ZHAO Yikai, ZHAO Yikai, et al. Effects of Land Use Change on Soil Aggregate Stability and Soil Aggregate Organic Carbon in Karst Area of Southwest China Integrated Analysis of Soil Organic Matter Blaeed an Improved BP Neural Network with Optimized Sparrow Search Algorithm UI Yi-rui, ZHAO Wan-fu, SONC Yin Xian, et al. Effects of Application of Different Organic Matter Blaeed on Improved BP Neural Network with Optimized Sparrow Search Algorithm UI Yu-rao, I Shwin-jin, et al. Intensive Citrus Cultivation Suppresses Soil Phosphorus Accumulation and Transformation in Vegetable Fields Intensive Citrus Cultivation Suppresses Soil Phosphorus Accumulation and Transformation in Vegetable Fields Effects of Controlled-release Blended Pertilizer on Crop Yield and Greenhouse Cas Emissions in Wheat-maize Rolation System BA1 Yi-ru. IU Xu, ZHANG Yu-rua, et al. Analysis and Evaluation of Heavy Metal Pollution in Farmland Soil in China; A Meta-analysis Critical Review on Heavy Metal Contamination in Urban Soil and Sufface Dust. Research Progesson Solidification and MICP Remediation of Soils in Heavy Metal Contaminated Stie CHEN Yue-ru, CAO Wei, YANG Li, ZHANG Yu-rua, et al. Pollution Characteristics and Source Analysis of Soil Heavy Metal in Coal Mine	(2780) (2793) (2793) (2806) (2817) (2848) (2848) (2848) (2859) (2871) (2881) (2891) (2905) (2913) (2905) (2913) (2926) (2971) (2933) (2995) (3005) (3016) (3027) (3037)
CAI jin, WEI Xiao-jian, JIANG Ping, et al. Spatial-temporal Evolution and Quantitative Attribution of Habitat Quality in Typical Karst Counties of Guizhou Plateau Spatial-temporal Evolution and Grassland Carbon Storage in the Loess Plateau and Its Driving Factors from 2000 to 2021	(2780) (2793) (2793) (2806) (2817) (2814) (2848) (2848) (2859) (2871) (2881) (2905) (2913) (2905) (2913) (2926) (2939) (2952) (2962) (2971) (2983) (2995) (3005) (3016) (3027) (3037) (3047)
CA1 Jin, WEI Xiao-jian, JIANG Ping, et al. Spatial-temporal Evolution and Quantitative Attribution of Habitat Quality in Typical Karst Counties of Guizhou Plateau	(2780) (2793) (2793) (2806) (2817) (2814) (2848) (2848) (2859) (2871) (2881) (2891) (2905) (2913) (2926) (2939) (2952) (2962) (2971) (2983) (2995) (3005) (3016) (3027) (3037) (3047) (3054)
CAI Jin, WEI Xiao-jian, JIANG Ping, et al. Spatia-temporal Variation in NEP in Ecological Zoning on the Loess Plateau and lis Driving Factors from 2000 to 2021	(2780) (2793) (2793) (2806) (2817) (2814) (2848) (2848) (2859) (2871) (2881) (2905) (2913) (2926) (2939) (2952) (2962) (2971) (2983) (2995) (3005) (3016) (3027) (3037) (3047) (3059) (3069)
CAI Jin, WEI Xiao-jian, JJANG Ping, et al. Spatia-temporal Evolution and Quantitative Attribution of Habital Quality in Typical Karst Counties of Guizbou Plateau Spatia-temporal Variation in NEP in Ecological Zoning on the Loses Plateau and Its Driving Factors from 2000 to 2021 LI Yue, FENG Xia, WU Lu-hua, et al. Spatia-temporal Variation in NEP in Ecological Zoning on the Loses Plateau Based on SSP-ReC Scenarios WU Ai-hin, CHEN Fu-guo, ZHAO Yan-xia, et al. Multi-scenario Simulation and Grasshand Carbon Storage in the Loses Plateau Based on SSP-ReC Scenarios WU Ai-hin, CHEN Fu-guo, ZHAO Yan-xia, et al. Multi-scenario Simulation of Construction Land Expansion and Its Impact on Ecosystem Carbon in Karst Area of Southwest China Integrated Analysis of Soil Organic Matter Molecular Composition Changes Under Different Land Uses HU ANG Kei, IJ Xara, ann, XANG Yan, et al. Integrated Analysis of Soil Organic Matter Based on Improved BP Neural Network with Optimized Sparrow Search Algorithm 	(2780) (2793) (2793) (2806) (2817) (2814) (2848) (2848) (2859) (2871) (2881) (2905) (2913) (2905) (2913) (2926) (2939) (2952) (2962) (2971) (2983) (2995) (3005) (3016) (3027) (3047) (3059) (3078)
CAI Jin, WEI Xiao-jian, JIANG Ping, et al. Spatia-temporal Variation in MEP in Ecological Zoning on the Loses Plateau and Its Driving Factors from 2000 to 2021 	(2780) (2793) (2793) (2806) (2817) (2814) (2848) (2848) (2859) (2871) (2881) (2905) (2913) (2926) (2939) (2952) (2962) (2971) (2983) (2995) (3005) (3016) (3027) (3037) (3047) (3059) (3078) (3078)
CAI Jin, WEI Xiao-jian, JIANG Ping, et al. Spatial-temporal Evolution and Quanititative Attribution of Habitat Quality in Typical Karst Counties of Guizhou Platean	(2780) (2793) (2793) (2806) (2817) (2814) (2848) (2848) (2859) (2871) (2881) (2905) (2913) (2926) (2939) (2952) (2962) (2971) (2983) (2995) (3005) (3016) (3027) (3037) (3047) (3059) (3078) (3088) (3088)
CAI Jin, WEI Xiao-jian, JIANG Ping, et al. Spatial-temporal Evolution and Quanitative Attribution of Habitat Quality in Typical Karst Counties of Guizhou Platean	(2780) (2793) (2793) (2806) (2817) (2814) (2848) (2848) (2859) (2871) (2881) (2905) (2913) (2926) (2939) (2952) (2962) (2971) (2983) (2995) (3005) (3016) (3027) (3037) (3047) (3059) (3078) (3078) (3078) (3078) (3078)