

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第1期

Vol.39 No.1

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2006~2015年北京市不同地区 O ₃ 浓度变化	王占山, 李云婷, 安欣欣, 李倩, 孙乃迪, 王步英, 潘锦秀 (1)
南京北郊黑碳气溶胶的来源解析	肖思略, 于兴娜, 朱彬, 何稼祺, 吕睿, 沙丹丹 (9)
电镀厂周边大气 PM ₁₀ 中重金属季节性分布特征及生态风险评价	赵珍丽, 赵委托, 黄庭, 程胜高, 余葱葱, 尹伊梦 (18)
广西玉林市大气 PM ₁₀ 和 PM _{2.5} 中有机碳和元素碳污染特征分析	黄炯丽, 陈志明, 莫招育, 李宏姣, 杨俊超, 刘慧琳, 毛敬英, 梁桂云, 张达标, 吴熊平, 郝爽 (27)
青岛近海及黄渤海大气气溶胶中不同形态氮磷质量浓度及组成特征	张瑞峰, 祁建华, 丁雪, 谢丹丹 (38)
大气环境分区管理: 以广东省为例	杨柳林, 李敏辉, 廖程浩, 曾武涛, 张晖, 张永波 (49)
基于高分影像的城市黑臭水体遥感识别: 以南京为例	温爽, 王桥, 李云梅, 朱利, 吕恒, 雷少华, 丁萧蕾, 苗松 (57)
基于 SWAT 模型的流域河道硝酸盐 δ ¹⁵ N 和 δ ¹⁸ O 模拟	王康, 冉宁, 林忠兵, 周祖昊 (68)
程海流域非点源污染负荷估算及其控制对策	陈学凯, 刘晓波, 彭文启, 董飞, 黄智华, 冯顺新, 王若男 (77)
陆浑水库饮用水源地水体中金属元素分布特征及健康风险评价	余葱葱, 赵委托, 高小峰, 程胜高, 谢地, 马鹏途 (89)
天津供水系统中抗生素分布变化特征与健康风险评价	张新波, 宋姿, 张丹, 刘楠楠, 李楠, 温海涛 (99)
西南丘陵区村镇典型供水水源有机物分布特征及对饮水水质的影响	王琼, 李乃稳, 李磊, 李龙国, 苟思, 杨凌肖 (109)
北京市地下水有机氯和有机磷农药健康风险评价	陈卫平, 彭程伟, 杨阳, 吴玉梅 (117)
黄河岸边土壤中类二噁英类多氯联苯污染现状及风险	姚宏, 卢双, 张旭, 裴晋, 鲁垠涛 (123)
淹水落干下三峡水库消落带土壤无机磷形态转化特征	周健, 李春辉, 张志永, 胡红青, 万成炎, 胡莲, 潘晓洁 (130)
磷酸盐对铁锰复合氧化膜去除地表水中氨氮的影响	卓瑞双, 黄廷林, 张瑞峰, 文刚 (137)
K ₂ S ₂ O ₈ 强化 g-C ₃ N ₄ 薄膜电极光电催化降解 Cu(CN) ₂ ⁻ 并同步回收 Cu	党聪哲, 李一兵, 王彦斌, 赵旭 (145)
以 HKUST-1 为模板制备铜氧化物活化过一硫酸氢钾降解罗丹明 B	蒲嘉懿, 万金泉, 王艳, 马邕文, 武书彬 (152)
氨化松香基交联聚合树脂对水中诺氟沙星的吸附性能	马亚红, 黄婉婷, 刁开盛, 李鹏飞, 谭学才, 董慧岭, 覃方夸, 雷福厚, 刘绍刚 (161)
铁锰泥除砷颗粒吸附剂对 As(V) 的吸附去除	曾辉平, 吕赛赛, 杨航, 尹灿, 曹瑞华, 王艳菊, 李冬, 张杰 (170)
水铁矿及其胶体对砷的吸附与吸附形态	马玉玲, 马杰, 陈雅丽, 雷梅, 郭华明, 翁莉萍, 李永涛 (179)
阳(阴)离子复配修饰两性磁性膨润土的表面特征差异及对苯酚吸附的影响	任爽, 孟昭福, 王腾, 张洋, 田凯, 刘伟, 闫东旭 (187)
典型城市污水中对羟基苯甲酸酯的污染特征	赵雪, 张子峰, 祝富杰, 李一凡, 马万里 (195)
水力停留时间对活性炭生物转盘处理污水的影响	许雯佳, 成小英 (202)
环丙沙星对膜生物反应器运行效能的影响及其去除特性	戴琦, 刘锐, 舒小铭, 张永明, 陈吕军 (212)
AAO 工艺低氧条件下的运行及其模拟	曹特特, 王林, 李咏梅 (219)
磷酸盐对亚硝化系统的抑制及恢复	顾澄伟, 陈方敏, 李祥, 张程锦 (227)
碳源对污水处理厂 SAD 工艺小试的影响	李冬, 赵世勋, 王俊安, 朱金凤, 关宏伟, 张杰 (232)
容积负荷对 ABR-MBR 工艺反硝化除磷性能的影响	吕亮, 尤雯, 韦佳敏, 吴鹏, 沈耀良 (239)
DNBF-O ₃ -GAC 组合工艺深度脱除氮磷及代谢产物	钟丽燕, 郝瑞霞, 王卫东, 万京京, 朱晓霞 (247)
交替好氧/缺氧运行模式对生物脱氮效能及活性污泥胞外聚合物的影响	孙洪伟, 陈翠忠, 吴长峰, 赵华南, 于雪, 方晓航 (256)
纳米零价铁对升流式颗粒污泥床反硝化性能的影响	周丰, 王翻翻, 钱飞跃, 黄慧敏, 沈耀良, 周建民 (263)
高含固污泥厌氧消化中 Fe/S 及 pH 对原位抑硫效率影响及其交互作用	韩芸, 曹玉芹, 卓杨, 王晓飞, 韩雅婷, 彭党聪 (269)
浑河流域贮存污泥成分特征及演变规律分析	刘甜甜, 崔崇威, 赫俊国, 唐建 (276)
去除城市生活污泥中有机络合态金属强化其厌氧生物制气	卢怡清, 许颖, 董滨, 戴晓虎 (284)
污泥飞灰中重金属不同浸出方法比较及综合毒性评价	王丰, 李润东, 李彦龙, 赵云斌, 杨天华 (292)
初冬时期闽江河口区养殖塘排水后的 CH ₄ 和 N ₂ O 通量日变化特征	杨平, 谭立山, 黄佳芳, 何清华, 全川 (300)
3 种土壤改良剂对河套灌区玉米田温室气体排放的影响	武岩, 红梅, 林立龙, 刘梅, 刘宇杰 (310)
有机氮替代比例对冬小麦/夏玉米轮作体系作物产量及 N ₂ O 排放的影响	侯苗苗, 吕凤莲, 张弘毅, 周应田, 路国艳, Ayaz Muhammad, 黎青慧, 杨学云, 张树兰 (321)
拔节期水稻光合碳输入的动态变化及其对施氮的响应: ¹³ C-CO ₂ 脉冲标记	陈珊, 祝贞科, 袁红朝, 王久荣, 彭佩钦, 葛体达, 吴金水 (331)
陕北黄土丘陵区不同土地利用方式下土壤碳剖面分布特征	兰志龙, 赵英, 张建国, 李会杰, 司炳成, 焦瑞, Muhammad Numan Khan, Tanveer Ali Sial (339)
不同地表条件下生物炭对土壤氮挥发的影响	邹娟, 胡学玉, 张阳阳, 陈窃君, 王向前, 刘扬 (348)
秸秆与生物炭还田对土壤团聚体及固碳特征的影响	徐国鑫, 王子芳, 高明, 田冬, 黄容, 刘江, 黎嘉成 (355)
县域尺度土壤铜的有效性及相关影响因素评估	李锦芬, 瞿明凯, 刘刚, 黄标 (363)
基于改进 LUR 模型的区域土壤重金属空间分布预测	曾菁菁, 沈春竹, 周生路, 陆春峰, 金志丰, 朱雁 (371)
沈北新区土壤中多环芳烃污染特征及源解析	李嘉康, 宋雪英, 魏建兵, 王颖怡, 李玉双, 郑学昊 (379)
磷酸盐、腐殖酸与粉煤灰联合钝化处理模拟铅镉污染土壤	赵庆圆, 李小明, 杨麒, 陈灿, 钟振宇, 钟宇, 陈飞, 陈寻峰, 王祥 (389)
控源及改良措施对稻田土壤和水稻镉累积的影响	封文利, 郭朝晖, 史磊, 肖细元, 韩晓晴, 冉洪珍, 薛清华 (399)
典型土壤双季稻对 Cd 吸收累积差异	李欣阳, 龙坚, 王树兵, 陈齐, 董霞, 蒋凯, 侯红波, 彭佩钦, 廖柏寒 (406)
松花江上游夹皮沟金矿开采区芦苇叶片汞分布特征	张曼胤, 李梦洁, 崔丽娟, 王贺年, 郭子良, 徐卫刚, 魏圆云, 杨思, 肖红叶 (415)
硝酸盐对土壤反硝化活性及厌氧降解的影响	代军帅, 左小虎, 王明霞, 姚炎红, 周志峰 (422)
长期施肥对稻田土壤微生物量、群落结构和活性的影响	王伟华, 刘毅, 唐海明, 孙志龙, 李宝珍, 葛体达, 吴金水 (430)
海洋沉积物中硫酸盐还原菌和硫酸化菌群落分析方法的比较	张玉, 米铁柱, 甄毓, 陈烨, 付璐璐, 王勋功 (438)
鄱阳湖微囊藻毒素时空分布格局及其与理化及生物因子的关系	袁丽娟, 廖旦根, 张莉, 张大文, 罗林广, 刘聚涛 (450)
畜禽粪便中多重耐药细菌及耐药基因分布特征	张昊, 王盼亮, 杨清香, 俞宁 (460)
烟气净化工艺和焚烧炉类型对生活垃圾焚烧灰性质的影响	章骅, 于思源, 邵立明, 何晶晶 (467)
《环境科学》征稿简则(17)	
《环境科学》征订启事(26)	
信息(160, 255, 338)	

鄱阳湖微囊藻毒素时空分布格局及其与理化和生物因子的关系

袁丽娟¹, 廖且根¹, 张莉¹, 张大文^{1*}, 罗林广¹, 刘聚涛²

(1. 江西省农业科学院农产品质量安全与标准研究所, 南昌 330200; 2. 江西省水利科学研究院, 南昌 330029)

摘要: 本文分别于2012年4月(春季)、8月(夏季)、10月(秋季)和2013年1月(冬季)在鄱阳湖进行了4次野外调查和样品采集, 采用超高效液相色谱-串联质谱仪(UPLC-MS/MS)对鄱阳湖水柱中常见的3种微囊藻毒素(MC-RR、MC-YR和MC-LR)的质量浓度进行定量分析, 探寻了微囊藻毒素(microcystins, MCs)质量浓度的时空变化规律及其与湖泊环境理化因子和生物因子之间的关系。结果表明, MC-RR是鄱阳湖MCs的主要毒素种类。胞内微囊藻毒素(intracellular MCs, IMCs)与微囊藻生物量($r=0.47$, $P<0.01$)、颤藻生物量($r=0.68$, $P<0.01$)、蓝藻生物量($r=0.56$, $P<0.01$)、Chl-a($r=0.28$, $P<0.01$)之间均具有显著的正相关关系, 但与鱼腥藻生物量之间没有明显的相关关系($P>0.05$), 这说明微囊藻和颤藻是鄱阳湖微囊藻毒素的主要产毒藻类。IMCs与水温($r=0.51$, $P<0.01$)、透明度($r=0.69$, $P<0.01$)、Fe($r=0.43$, $P<0.01$)和Zn($r=0.43$, $P<0.01$)之间均呈现显著的正相关关系, 与TN($r=-0.44$, $P<0.01$)、TP($r=-0.29$, $P<0.01$)、 NO_3^- -N($r=-0.28$, $P<0.05$)、 NH_4^+ -N($r=-0.33$, $P<0.05$)、Ca($r=-0.34$, $P<0.01$)和Mg($r=-0.35$, $P<0.05$)均呈现显著的负相关关系, 但与pH、 PO_4^{3-} -P、 NO_3^- -N、电导率、高锰酸盐指数、Cu离子之间的相关关系不显著($P>0.05$), 这说明光照强度(透明度反映)、氮、磷、水温是控制鄱阳湖微囊藻毒素产生的重要因子, 金属离子Ca、Mg、Fe、Zn在一定程度上能影响微囊藻毒素的产生。鄱阳湖IMCs和胞外微囊藻毒素(extracellular MCs, EMCs)呈现相似的季节变化趋势, 即夏季最高, 其次为秋季, 冬季和春季较低。鄱阳湖IMCs的空间分布整体上呈现东部湖汉群、松门山周围以及蚌湖和蚌湖进入鄱阳湖的入湖口较高, 其它区域较低的趋势, 而EMCs的高值区位于松门山周围和蚌湖及其入湖口。

关键词: 微囊藻毒素; 胞内微囊藻毒素; 胞外微囊藻毒素; 鄱阳湖; 季节变化; 空间分布

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)01-0450-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.201708227

Seasonal and Spatial Variations of Microcystins and Their Relationships with Physiochemical and Biological Factors in Poyang Lake

YUAN Li-juan¹, LIAO Qie-gen¹, ZHANG Li¹, ZHANG Da-wen^{1*}, LUO Lin-guang¹, LIU Ju-tao²

(1. Institute for Quality & Safety and Standards of Agricultural Products Research, Jiangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanchang 330200, China; 2. Jiangxi Provincial Institute of Water Sciences, Nanchang 330029, China)

Abstract: Poyang Lake is the largest freshwater lake in China and an important drinking water source for Jiangxi Province. Since the year 2000, toxic cyanobacteria have been observed frequently in Poyang Lake. In this study, water samples were collected in the lake quarterly (April 2012, August 2012, October 2012, and January 2013) to examine the spatial and seasonal variations in the concentrations of microcystins (MCs; MC-RR, -YR, and -LR) and their relationships with physiochemical and biological factors. MCs were determined by ultra-high-performance liquid chromatography-electrospray ionization tandem triple quadrupole/mass spectrometry (UPLC-MS/MS). MC-RR (accounting for 75.01% and 71.34% of intracellular MC (IMC) and extracellular MC (EMC) concentrations, respectively) was the most dominant variant in Poyang Lake, followed by MC-LR (accounting for 21.95% and 24.97% of IMC and EMC concentrations, respectively), while MC-YR was detected in low concentrations (accounting for 3.01% and 3.69% of IMC and EMC concentrations, respectively). Total MC concentrations (IMC + EMC, TMC) ranged from 0.49 to 3 517.85 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$, with an average of 337.43 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ and only 2.53% (2 out of 79 water samples) of the water samples contained MCs concentrations exceeding the drinking water guideline level of 1 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ for MC-LR proposed by World Health Organization (WHO). IMC concentrations showed significant relationships with *Microcystis* biomass ($r=0.47$, $P<0.01$), *Oscillatoria* biomass ($r=0.68$, $P<0.01$), *Cyanobacteria* biomass ($r=0.56$, $P<0.01$), and Chl-a ($r=0.28$, $P<0.01$), but no significant correlation was found between intracellular MC concentration and *Anabena* biomass ($P>0.05$), suggesting that *Microcystis* and *Oscillatoria* might be the main MCs-producing cyanobacteria in Poyang Lake. In addition, IMC concentrations were positively correlated with water temperature ($r=0.51$, $P<0.01$), transparency ($r=0.69$, $P<0.01$), Fe ($r=0.43$, $P<0.01$), and Zn contents ($r=0.43$, $P<0.01$), and

收稿日期: 2017-08-28; 修订日期: 2017-10-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(31360133)

作者简介: 袁丽娟(1988~), 女, 硕士研究生, 助理研究员, 主要研究方向为水环境安全, E-mail: ylj198820062467@163.com

* 通信作者, E-mail: zdw3296@163.com

negatively correlated with TN ($r = -0.44$, $P < 0.01$), TP ($r = -0.29$, $P < 0.01$), $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ ($r = -0.33$, $P < 0.05$), $\text{NO}_2^- - \text{N}$ ($r = -0.28$, $P < 0.05$), Ca ($r = -0.34$, $P < 0.01$), and Mg ($r = -0.35$, $P < 0.05$), while no significant correlations were observed between IMC concentrations and pH, $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$, $\text{NO}_3^- - \text{N}$, electrical conductivity, permanganate index, and Cu content ($P > 0.05$). These results indicated that light intensity (represented by transparency), nitrogen, phosphorus, and water temperature might be the regulating factors of MCs production in Poyang Lake and trace elements (Fe, Zn, Ca, and Mg) can influence the MC production to a certain extent. IMCs and EMCs exhibited similar seasonal variations in Poyang Lake. The highest values of IMCs ($531.87 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$) and EMCs ($232.44 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$) were observed in summer. The concentrations of IMCs and EMCs in autumn were $31.97 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ and $6.49 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, respectively. Low concentrations were observed in spring ($0.55 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ and $0.88 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ of IMCs and EMCs, respectively) and winter ($0.69 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ and $4.14 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ of IMCs and EMCs, respectively). The highest IMCs and EMCs values of Poyang Lake in summer were $2298.08 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ and $1219.77 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, respectively, and the lowest values were $92.53 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ and $38.80 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, respectively. Overall, the concentrations of IMCs in eastern bays, the vicinity of Songmen Mountain, Banghu Lake, and its outlet were higher than those in other regions. However, the spatial distributions of EMCs in Poyang Lake were different from those of IMCs. EMCs concentrations in the vicinity of Songmen Mountain, Banghu Lake, and its outlet were higher than those in other regions.

Key words: microcystins; intracellular microcystins; extracellular microcystins; Poyang Lake; seasonal variations; spatial distributions

近年来,由于湖泊富营养化引起的有毒蓝藻“水华”问题越来越严重,引起了世界各国的广泛关注^[1].其中,由于有毒蓝藻产生的微囊藻毒素(microcystins, MCs)对水环境和人类健康的影响成为关注的焦点和热点^[2].

MCs是一类环状七肽肝毒素,相对分子质量在1 000左右^[3],迄今为止,已经发现了100余种微囊藻毒素^[4].已有研究表明,MCs能诱导肝癌的发生^[5],而流行病学调查结果显示,我国南方原发性肝癌的高发病率被认为与其饮用水受到MCs的污染有关^[6].因此,为了降低MCs对人类健康危害的风险,世界卫生组织提出了饮用水中微囊藻毒素MC-LR的安全限量为 $1 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,同时,根据这个限量标准,提出成人的每日允许摄入MCs的安全限量值(以BW计)为 $0.04 \mu\text{g} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$ ^[7].

已有研究表明,不同时间和不同区域的水环境中MCs的质量浓度存在巨大差异,最大可达5个数量级^[1].水环境中MCs产生主要受蓝藻生物量和环境因子共同作用,但是不同水环境中MCs产生与环境因子和蓝藻生物量之间的关系并不完全一致^[1].譬如,有些研究发现,MCs与温度、营养盐和蓝藻生物量之间存在正相关关系^[8,9],但是在另外一些研究中却是负相关或者没有明显的相关性^[10~12].此外,不同湖泊具有其独特的水文水环境特征.因此,水环境中MCs的产生与环境因子之间的关系还需要大量的研究,识别影响MCs产生的关键控制因子,为水环境中MCs的防控提供科学依据.

鄱阳湖是我国的第一大淡水湖,也是仅有的两个通江湖泊之一.近年来,随着江西省经济的快速发展和周边人类活动的加剧,鄱阳湖水污染日趋严

重,湖泊已经达到了富营养化的水平^[13].而且,鄱阳湖水体中已经检出了不同质量浓度MCs的污染^[9,14,15].但是,关于鄱阳湖MCs的研究比较少,本研究团队对鄱阳湖夏季MCs的空间分布格局进行了探讨^[15],Wu等^[9]和隋海霞等^[14]对鄱阳湖局部区域夏秋季的MCs变化情况进行初步的研究,而关于整个鄱阳湖MCs季节变化的研究还未见报道.鉴于鄱阳湖与太湖、巢湖等封闭湖泊的水动力特点不同,因此,开展鄱阳湖MCs时空分布特征及影响因素研究非常必要,以期对鄱阳湖饮用水源地的选择和探索MCs的产生规律提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究地点

鄱阳湖($28^{\circ}04' \sim 29^{\circ}46' \text{N}$, $115^{\circ}49' \sim 116^{\circ}46' \text{E}$)位于江西省北部、长江中下游南岸,是我国最大的通江湖泊^[16].鄱阳湖多年平均水域面积 $3\,900 \text{ km}^2$,但其一年内的水域面积变化较大,星子站水位在 $7.12 \sim 22.50 \text{ m}$ 之间波动时,水域面积也在 $140 \sim 4\,500 \text{ km}^2$ 之间变化,呈现“洪水一片,枯水一线”的奇特景观^[16].鄱阳湖在长江流域中发挥着巨大的调蓄洪水和保护生物多样性等特殊生态功能,对维系区域和国家生态安全具有重要作用^[17].

1.2 主要试剂和仪器

1.2.1 试剂

实验用水为Milli-Q超纯水系统处理后的超纯水;甲醇、甲酸、乙酸铵均为色谱纯,其它化学试剂为分析纯;其中色谱纯甲醇购于美国Tedia公司,甲酸购于上海阿拉丁生化科技股份有限公司,乙酸铵购于美国的Alfa Aesar化学有限公司;标准品MC-RR和MC-YR购于中国台湾藻研有限公司,

MC-LR 购于瑞士的 Alexis 生物化学公司. $0.45\ \mu\text{m}$ 的醋酸纤维滤膜, 采用 1:1 的盐酸浸泡 12 h, 并用 Milli-Q 超纯水反复清洗至中性, 干燥后密封备用. 玻璃纤维 GF/C 滤膜为 Whatman 公司产品 (孔径: $1.2\ \mu\text{m}$; 布伦特福德, 英国), HLB 小柱为 Waters 公司的产品 (Oasis HLB, 3 cc, 60 mg, $30\ \mu\text{m}$; 马萨诸塞州, 美国).

1.2.2 仪器

Milli-Q 超纯水系统为 Millipore 公司产品 (MA, 美国), 超声波数字测深仪 (蒙德塞, 奥地利), YSI 手持式野外水质分析测量仪 (科罗拉多州, 美国). 超高效液相色谱-三重四极杆质谱/质谱联用仪 (UPLC-MS/MS) (型号 Agilent 6460) (加利福尼亚州, 美国). 电感耦合等离子体质谱仪 (ICP-MS; 型号 Perkinelmer Sciex Elan 9000, 马萨诸塞州, 美国)

1.3 样品采集

根据鄱阳湖面积、地形地貌以及水体水质的变化规律等, 在鄱阳湖一共设置了 34 个采样点 (图 1). 采样时间为 2012 年的 4 月、8 月、10 月和 2013 年 1 月. 根据鄱阳湖不同季节水位的变动情况, 夏季 (2012 年 8 月) 在设定的 34 个采样点进行样品的采集, 而其它 3 次采样均在其中的 15 个采样点 (1~8、10~12、17、19、20、34) 采集. 用 5 L 玻璃采水器采集表层 (离表面 0.5 m) 和底层 (离湖底 0.5 m) 的水样, 混合后取 500 mL 用于测定微囊藻毒素, 另取 1 L 水样用于测定叶绿素 a (Chl-a)、营养盐、重金属和高锰酸盐指数. 取 1 L 混合水样, 现场加入约为水样 1% 的鲁哥试剂进行固定, 用于浮游植物的分析鉴定.

1.4 水质指标分析

现场采用超声波数字测深仪测定采样点水深, 采用 YSI 水质分析测量仪测定水温、电导率和 pH, 塞式透明度盘测定水体透明度. 叶绿素 a (Chl-a) 采用热乙醇法进行测定^[18], 高锰酸盐指数、总氮 (TN)、总磷 (TP)、磷酸盐 ($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$)、亚硝酸盐 ($\text{NO}_2^-\text{-N}$)、硝酸盐 ($\text{NO}_3^-\text{-N}$) 和铵盐 ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) 按照美国公共卫生协会的标准方法进行测定^[19].

1.5 金属分析

重金属样品的前处理参照张大文等^[20]的方法: 取 100 mL 水样过用硝酸处理后的醋酸纤维滤膜, 收集滤液用于测定水体中溶解性的 Ca、Mg、Fe、Cu 和 Zn. 滤液装入 50 mL 的塑料方瓶中, 加入浓硝酸固定至 pH 值小于 2, 密封后避光保存, 带回实验室

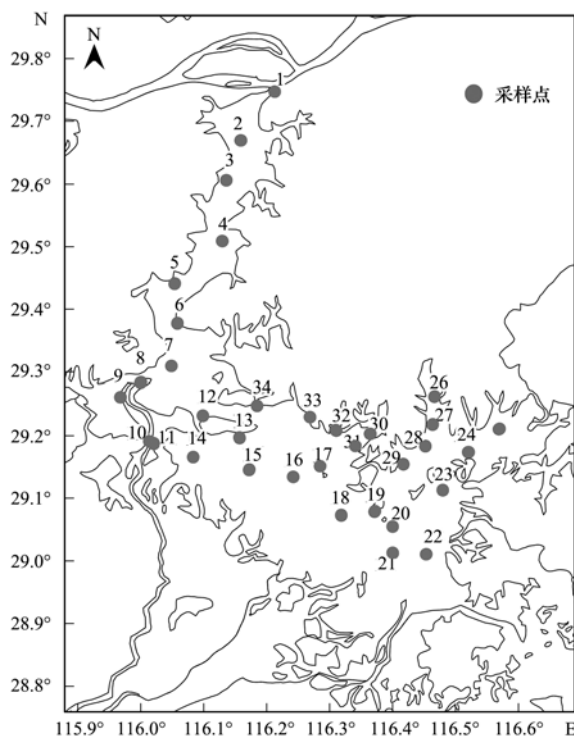


图 1 鄱阳湖采样点示意

Fig. 1 Location of sampling sites in Poyang Lake

后放入 4°C 的冰箱中保存. 水中溶解性 Ca、Mg、Fe、Cu 和 Zn 采用 ICP-MS 进行测定.

1.6 浮游植物的分析鉴定

现场鲁哥试剂固定后的样品带回实验室后, 通过静置沉淀 48 h 后去除上清液, 浓缩至 30 mL 后滴加福尔马林保存, 显微镜镜检, 对其中的浮游植物进行定性和定量分析.

1.7 水柱中微囊藻毒素的前处理与测定

MCs 的前处理和分析测定方法参照 Zhang 等^[15]的方法进行: 量取 500 mL 混合水样经 GF/C 滤膜过滤, 收集滤液和滤膜分别用于胞外 MCs (extracellular MCs, EMCs 为胞外的 MC-RR、MC-YR 和 MC-LR 质量浓度的总和) 和胞内 MCs (intracellular MCs, IMCs 为胞内的 MC-RR、MC-YR 和 MC-LR 质量浓度的总和) 的测定. 滤液带回实验室之后, 采用 HLB 柱富集其中的 MCs. HLB 使用前先用 10 mL 甲醇和 10 mL 水进行预处理, 富集完成后采用 10 mL 20% 的甲醇淋洗, 最后用 10 mL 甲醇将富集柱上的 MCs 洗脱, 收集后氮气吹干待测. 滤膜带回实验室后放入 -20°C 的冰箱中冷冻 48 h 以上, 采用冷冻干燥机冻干, 干燥后的滤膜放入锥形瓶中, 加入 15 mL 75% 的甲醇, 放在摇床上振荡 3 h ($220\ \text{r}\cdot\text{min}^{-1}$), 用 $18\ 000\ \text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的超速离心机在 4°C 下离心 10 min, 取出上清液, 按照上述的步骤再

重复两次, 合并 3 次的上清液, 用去离子水按照 1:5 (提取液: 去离子水) 的比例稀释后, 按照滤液的处理方法富集滤膜中的 MCs。

氮吹后的样品用 1 mL 流动相定容后, 采用 Agilent 超高效液相色谱-串联质谱仪进行定量分析。液相色谱和质谱的条件参照 Zhang 等^[15] 的方法进行。

1.8 质量控制与数据分析

以过 GF/C 滤膜后的去离子水作为流程空白对照, 在 500 mL 的空白水样中添加 5 ng 的 MC-RR、MC-YR 和 MC-LR 标准品, 按照样品的处理过程和仪器分析条件进行回收率检测。

本文采用 SPSS 13.0 对数据进行统计分析, 采用 Surfer 8.0 和 Origin 8.0 制图。

2 结果与讨论

2.1 微囊藻毒素回收率

水样 MC-RR、MC-YR 和 MC-LR 加标回收率分别为 75.88%、89.65% 和 94.28% ($n=3$), 相对标准偏差分别为 6.33%、5.67% 和 6.10%。

2.2 水体理化和生物因子

研究期间鄱阳湖各种理化和生物指标如表 1 所示。鄱阳湖水体理化指标 (pH、透明度、水温、电导率、高锰酸盐指数、TN、TP、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$) 均值分别为 8.32、0.53 m、21.55℃、126.63 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 、2.61 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、1.30 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、0.08 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、0.03 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、0.02 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、0.69 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 0.24 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 其值范围分别为 7.45~8.99、0.10~1.80 m、3.37~31.67℃、74.00~242.10 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 、1.43~6.06 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、0.48~3.02 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、0.02~0.48 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、0.01~0.08 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、0.0~0.14 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、0.22~1.28 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 0.00~2.15 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。研究期间生物学指标 Chl-a、微囊藻生物量、鱼腥藻生物量、颤藻生物量和蓝藻生物量的均值分别是 6.31 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、0.79 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、0.55 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、0.35 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 1.85 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 其值范围分别是 0.69~20.89 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、0.00~4.40 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、0.00~3.51 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、0.00~3.57 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 0.00~6.53 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。研究期间 Ca、Cu、Fe、Mg 和 Zn 离子均值分别为 9.30 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、2.17 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、141.33 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、1.72 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 22.56 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 其值范围分别为 2.57~29.18 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、0.38~4.89 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、34.19~294.13 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、0.55~4.47 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 1.14~77.99

表 1 研究期间鄱阳湖各种理化和生物指标

Table 1 Physico-chemical and biological parameters in Poyang Lake during the study period

参数	最小值	最大值	平均值
pH	7.45	8.99	8.32
透明度/m	0.10	1.80	0.53
水温/℃	3.37	31.67	21.55
电导率/ $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$	74.00	242.10	126.63
高锰酸盐指数/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	1.43	6.06	2.61
TN/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.48	3.02	1.30
TP/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.02	0.48	0.08
$\text{PO}_4^{3-}\text{-P}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.01	0.08	0.03
$\text{NO}_2^-\text{-N}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.00	0.14	0.02
$\text{NO}_3^-\text{-N}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.22	1.28	0.69
$\text{NH}_4^+\text{-N}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.00	2.15	0.24
Chl-a/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	0.69	20.89	6.31
微囊藻生物量/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.00	4.40	0.79
鱼腥藻生物量/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.00	3.51	0.55
颤藻生物量/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.00	3.57	0.35
蓝藻生物量/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.00	6.53	1.85
Ca/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	2.57	29.18	9.30
Cu/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	0.38	4.89	2.17
Fe/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	34.19	294.13	141.33
Mg/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.55	4.47	1.72
Zn/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	1.14	77.99	22.56

$\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

2.3 鄱阳湖微囊藻毒素的组成及污染水平

迄今为止, 已经发现了 100 余种微囊藻毒素^[4], 其中, MC-RR、MC-YR 和 MC-LR 是自然水体中最常见的 3 种^[21]。已有的研究表明, 天然水体中 MCs 的种类及组成比例与蓝藻的种类及群落结构有关, 同时不同地域水体中 MCs 的种类组成也存在差异^[10]。在本研究中, 无论是胞内还是胞外毒素, MC-RR 所占比例均最高 (IMC-RR 占 75.04%, EMC-RR 占 71.34%), 其次是 MC-LR (IMC-LR 占 21.95%, EMC-LR 占 24.97%), MC-YR 所占比例最低 (IMC-YR 和 EMC-YR 分别为 3.01% 和 3.69%) (图 2), 这与我国的洋河水库^[8]、南非的 Hartbeespoort Dam 水库^[22]、太湖^[23]、Oneida 湖泊^[24] 和官厅水库^[25] 的研究结果一致, 但与南非的 Swartspruit 河流^[26]、巢湖^[12] 和 Mozambican 湖^[27] 中的结果存在差异, 在这些水体中, MC-LR 是最主要的毒素种类。

鄱阳湖水柱中 MCs 的质量浓度水平见表 2。从中可知, 鄱阳湖 4 个季度 IMCs 的均值为 235.21 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$, EMCs 的均值为 103.53 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 其质量浓度范围分别为 0.00~2 298.08 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 0.00~1 219.77 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 而水柱中微囊藻毒素总量 (IMCs

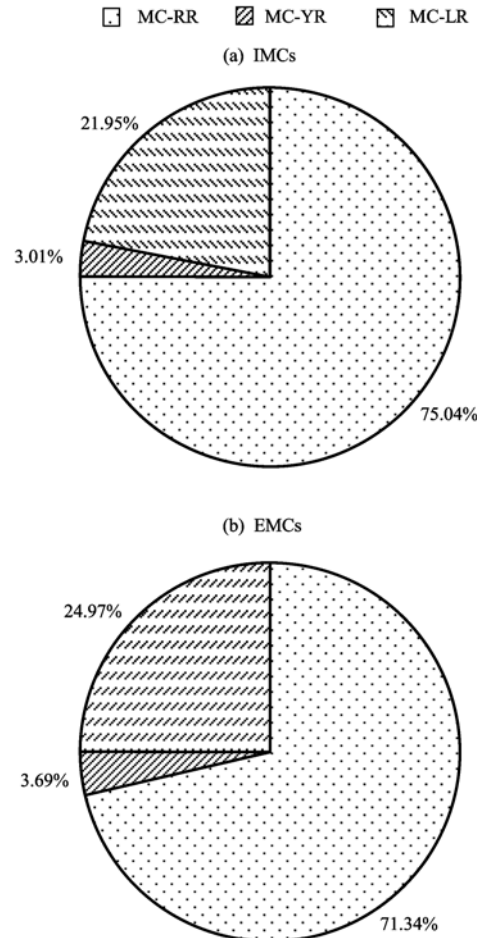


图2 鄱阳湖水体中不同类型微囊藻毒素的组成
Fig. 2 Percentage that each variant contributed to the total microcystins concentration in water column of Poyang Lake

+ EMCs; TMCs) 均值为 337.43 ng·L⁻¹, 范围为 0.49 ~ 3 517.85 ng·L⁻¹. 与国内外其它水体中微囊藻毒素污染水平相比, 鄱阳湖微囊藻毒素的污染处于较低的水平. 鄱阳湖微囊藻毒素的污染水平高于北极的 18 个湖泊(5 ~ 400 ng·L⁻¹)和北美洲的 Erie 湖泊(ND ~ 1 900 ng·L⁻¹), 但低于美国内布拉斯加州湖泊群(ND ~ 44 500 ng·L⁻¹)、阿根廷的 Los Padres 湖泊(220 ~ 14 960 ng·L⁻¹)、巢湖(280 ~ 8 860 ng·L⁻¹)、土耳其的 Egirdir 湖(2 900 ~ 13 500 ng·L⁻¹)^[21]和太湖(147 ~ 30 992 ng·L⁻¹)^[23].

为了降低 MCs 对人类健康的潜在威胁, 世界卫生组织(WHO)提出饮用水中 MC-LR 的安全限量为 1 μg·L⁻¹^[7]. 在本研究中, 根据已有研究中关于小鼠中 MC-RR、MC-YR 和 MC-LR 的半致死剂量^[28], 将 MC-RR 和 MC-YR 的质量浓度转换为等量的 MC-LR(MC-LReq). 在所有分析的 79 个水样品中, 有 2 个水样品中 TMC-LReq 质量浓度超过 WHO 规定的安全限量值, 所占比例为 2.53%.

表2 鄱阳湖水柱中微囊藻毒素水平¹⁾/ng·L⁻¹

Table 2 Microcystins levels in water column of Poyang Lake/ng·L ⁻¹				
项目	指标	最小值	最大值	平均值
胞内毒素	IMC-RR	0.00	1 789.70	176.50
	IMC-YR	0.00	74.57	7.08
	IMC-LR	0.00	455.66	51.63
	IMCs	0.00	2 298.08	235.21
胞外毒素	EMC-RR	0.00	816.90	73.86
	EMC-YR	0.00	44.35	3.82
	EMC-LR	0.00	358.52	25.85
	EMCs	0.00	1 219.77	103.53
胞内 + 胞外毒素	TMCs	0.49	3 517.85	337.43

1) IMCs 胞内毒素; EMCs 胞外毒素; TMCs 胞内毒素 + 胞外毒素

2.4 微囊藻毒素与生物和环境理化因子之间的关系

已有的研究表明, 自然水体中潜在产生 MCs 的蓝藻种类有微囊藻、颤藻、鱼腥藻、项圈藻等^[6]. 在本研究中, 研究小组在鄱阳湖发现了微囊藻、颤藻和鱼腥藻这 3 种潜在的产毒蓝藻, 且 IMCs 和 EMCs 与微囊藻生物量(IMCs 为 $r=0.47$, $P<0.01$; EMCs 为 $r=0.35$, $P<0.01$)、蓝藻生物量(IMCs 为 $r=0.56$, $P<0.01$; EMCs 为 $r=0.46$, $P<0.01$)、颤藻生物量(IMCs 为 $r=0.68$, $P<0.01$; EMCs 为 $r=0.64$, $P<0.01$)和 Chl-a(IMCs 为 $r=0.28$, $P<0.01$; EMCs 为 $r=0.23$, $P<0.01$)之间具有显著的正相关关系, 但与鱼腥藻生物量之间没有明显的相关关系($P>0.05$), 见表 3, 这说明微囊藻和颤藻是鄱阳湖 MCs 的主要产毒藻类, 而鱼腥藻对鄱阳湖 MCs 的贡献较少, 这可能是由于鄱阳湖鱼腥藻主要以无毒的藻种为主.

众所周知, 微囊藻毒素的产量受一系列环境理化因子的共同作用, 譬如, 营养盐、水文因子(水流、扰动等)、水温、电导率、pH 等^[1, 29]. 在本研究中, 微囊藻毒素与各种环境理化指标之间的相关关系分析如表 4 所示, IMCs 和 EMCs 均与水温(IMCs 为 $r=0.51$, $P<0.01$; EMCs 为 $r=0.48$, $P<0.01$)和透明度(IMCs 为 $r=0.69$, $P<0.01$; EMCs 为 $r=0.62$, $P<0.01$)之间呈现显著的正相关关系, 与 TN(IMCs 为 $r=-0.44$, $P<0.01$; EMCs 为 $r=-0.35$, $P<0.01$)、TP(IMCs 为 $r=-0.29$, $P<0.01$; EMCs 为 $r=-0.29$, $P<0.01$)、NO₂⁻-N(IMCs 为 $r=-0.28$, $P<0.05$; EMCs 为 $r=-0.22$, $P<0.05$)、NH₄⁺-N(IMCs 为 $r=-0.33$, $P<0.05$; EMCs 为 $r=-0.29$, $P<0.05$)呈现显著的负相关关系, 但与 pH、PO₄³⁻-P、NO₃⁻-N、电导率、

高锰酸盐指数之间没有显著的相关关系 ($P > 0.05$)。上述结果表明,光照强度(透明度反映)、氮、磷、水温是控制鄱阳湖微囊藻毒素产生的重要因子,这与滇池^[30]、洋河水库^[8]和太湖^[31]的研究结果一致。这些研究中均发现氮、磷和水温对微囊藻毒素的产生起着非常重要的作用。而本研究中鄱

阳湖微囊藻毒素与氮和磷的负相关关系可能是由于产毒蓝藻生长和产毒消耗^[1]所致,因为鄱阳湖丰水期水量远远大于枯水期(2012 年 8 月鄱阳湖星子站平均水位是 18.36 m,而 1 月的平均水位是 8.93 m,数据来源于中国科学院鄱阳湖湖泊湿地观测研究站)。

表 3 鄱阳湖微囊藻毒素与生物因子之间相关关系¹⁾ ($n = 79$)

Table 3 Correlation analysis between MCs concentrations and biological parameters in Poyang Lake ($n = 79$)

指标	IMC-RR	IMC-YR	IMC-LR	IMCs	EMC-RR	EMC-YR	EMC-LR	EMCs	TMCs
微囊藻	0.45 *	0.48 *	0.48 *	0.47 *	0.35 **	0.36 **	0.32 **	0.35 **	0.44 *
鱼腥藻	0.03	0.02	0.05	0.03	-0.04	-0.04	-0.01	-0.03	0.02
颤藻	0.68 *	0.53 *	0.64 *	0.68 *	0.61 *	0.65 *	0.70 *	0.64 *	0.68 *
蓝藻	0.55 *	0.51 *	0.56 *	0.56 *	0.44 *	0.46 *	0.46 *	0.46 *	0.54 *
Chl-a	0.26 **	0.28 **	0.35 *	0.28 *	0.18	0.23 **	0.23 **	0.23 **	0.27 **

1) * 表示 $P < 0.01$; ** 表示 $P < 0.05$, 下同

表 4 鄱阳湖微囊藻毒素与环境理化之间相关关系 ($n = 79$)

Table 4 Correlation analysis between MCs concentrations and physicochemical parameters in Poyang Lake ($n = 79$)

指标	IMC-RR	IMC-YR	IMC-LR	IMCs	EMC-RR	EMC-YR	EMC-LR	EMCs	TMCs
pH	-0.04	-0.09	-0.05	-0.05	0.21	0.17	0.21	0.22	0.04
透明度	0.69 *	0.65 *	0.66 *	0.69 *	0.63 *	0.59 *	0.56 *	0.62 *	0.68 *
水温	0.50 *	0.48 *	0.49 *	0.51 *	0.49 *	0.48 *	0.43 *	0.48 *	0.51 *
电导率	-0.17	-0.19	-0.17	-0.17	-0.07	-0.11	-0.11	-0.09	-0.15
TN	-0.43 *	-0.45 *	-0.44 *	-0.44 *	-0.36 *	-0.37 *	-0.35 *	-0.36 *	-0.43 *
TP	-0.29 *	-0.28 *	-0.27 *	-0.29 *	-0.28 *	-0.27 *	-0.25 *	-0.29 *	-0.29 *
高锰酸盐指数	-0.14	-0.12	-0.09	-0.13	-0.27 **	-0.14	-0.11	-0.23	-0.17
PO ₄ ³⁻ -P	-0.22	-0.20	-0.21	-0.22	-0.21	-0.20	-0.18	-0.20	-0.22
NO ₂ ⁻ -N	-0.29 **	-0.25 **	-0.25 **	-0.28 **	-0.21	-0.19	-0.23 **	-0.22 **	-0.27 **
NO ₃ ⁻ -N	0.18	0.13	0.11	0.17	0.24 **	0.19	0.10	0.21	0.18
NH ₄ ⁺ -N	-0.33 *	-0.31 *	-0.33 *	-0.33 *	-0.29 *	-0.28 *	-0.26 **	-0.29 *	-0.33 *

微量元素 Ca、Fe、Mg、Cu、Zn 是藻类生长和代谢所必需的微量元素^[1,32],且已有的研究证实,这几种微量元素也能影响微囊藻毒素的产生^[1,33,34]。在本研究中,IMCs 和 EMCs 均与 Fe(IMCs 为 $r = 0.43$, $P < 0.01$; EMCs 为 $r = 0.47$, $P < 0.01$)和 Zn(IMCs 为 $r = 0.43$, $P < 0.01$; EMCs 为 $r = 0.50$, $P < 0.01$)之间存在显著的正相关关系(表 5),与 Ca(IMCs 为 $r = -0.34$, $P < 0.01$; EMCs 为 $r = -0.25$, $P < 0.01$)和 Mg(IMCs 为 $r = -0.35$, $P < 0.05$; EMCs 为 $r = -0.32$, $P < 0.05$)之间存在显著的负相关关系,但与 Cu 之间无显著的相关关系($P > 0.05$),这

表明金属离子 Ca、Mg、Fe、Zn 在一定程度上能影响微囊藻毒素的产生。微囊藻毒素与 Ca 和 Mg 离子之间的负相关关系可能是由微囊藻毒素合成中的消耗以及夏季大量地表径流的稀释所致,这与 Graham 等^[34]在 Missouri 水库的结果一致,他们在研究中发现, Missouri 水库中微囊藻毒素与 Ca 和 Mg 离子之间呈现显著的负相关关系。同时,室内研究结果显示,微囊藻密度随钙、镁离子质量浓度的增加而增加^[32]。此外,已有的研究表明,Fe 可以促进微囊藻毒素的合成,而 Cu 和 Zn 主要通过影响产毒藻类的生长繁殖从而间接影响微囊藻毒素的产生^[1,33,35]。

表 5 鄱阳湖微囊藻毒素与金属离子之间相关关系 ($n = 79$)

Table 5 Correlation analysis between MCs concentrations and metal elements concentrations in Poyang Lake ($n = 79$)

指标	IMC-RR	IMC-YR	IMC-LR	IMCs	EMC-RR	EMC-YR	EMC-LR	EMCs	TMCs
Ca	-0.34 *	-0.33 *	-0.33 *	-0.34 *	-0.24	-0.28 **	-0.26 **	-0.25 **	-0.32 *
Cu	0.17	0.19	0.15	0.17	0.19	0.15	0.16	0.18	0.18
Fe	0.43 *	0.43 *	0.39 *	0.43 *	0.49 *	0.46 *	0.39 *	0.47 *	0.46 *
Mg	-0.35 *	-0.32 **	-0.32 **	-0.35 *	-0.31 **	-0.34 *	-0.32 **	-0.32 **	-0.35 *
Zn	0.42 *	0.45 *	0.42 *	0.43 *	0.49 *	0.52 *	0.47 *	0.50 *	0.46 *

2.5 鄱阳湖微囊藻毒素时空分布

总体而言,水华中有毒蓝藻比例和生物量的变动是导致 MCs 在时间和空间上产生变化的主要原因^[36],而且,MCs 在时间和空间上的变化非常巨大,可以相差数个数量级^[34, 37]. 在本研究中,鄱阳湖胞内和胞外毒素呈现相似的季节变化规律,即夏季最高(IMCs 为 $531.87 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, EMCs 为 $232.44 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$),其次为秋季(IMCs 为 $31.97 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, EMCs 为 $6.49 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$),冬季(IMCs 为 $0.69 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, EMCs 为 $4.14 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$)和春季(IMCs 为 $0.55 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, EMCs 为 $0.88 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$)较低(图3),这与鄱阳湖主要的产毒蓝藻(微囊藻和颤藻)的季节变化是一致的(图4). 鄱阳湖微囊藻和颤藻的峰值均出现在夏季(微囊藻为 $1.55 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 颤藻为 $0.67 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),其次为秋季(微囊藻为 $0.54 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 颤藻为 $0.23 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),冬季(微囊藻为 $0.08 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 颤藻为 $0.13 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)和春季(微囊藻为 $0.10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 颤藻为 $0.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)较低. 与太湖^[31]和巢湖^[12]相比,鄱阳湖 MCs 的季节变化尤为明显,其水位的剧烈变动(采样期间的1月鄱阳湖星子站水位平均值为 8.94 m 、4月 12.42 m 、8月 18.36 m 、10月 12.73 m)和水交换频繁是其主要原因.

本文以鄱阳湖丰水期 MCs 为对象探索其空间分布规律. 研究结果显示,鄱阳湖夏季 IMCs 和 EMCs 的最大值分别为 $2298.08 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $1219.77 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, 均出现在8号点(蚌湖进入鄱阳湖的入口);最小值分别为 $92.53 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $38.80 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, 分别位于21号点(南矶乡和莲湖乡之间)和19号点(主航道). IMCs 和 EMCs 的最大值和最小值分别相差了25和34倍,这说明鄱阳湖微囊藻毒素具有明显的空间分布. 鄱阳湖微囊藻毒素的空间分布特征如图5所示. 鄱阳湖 IMCs 的空间分布整体上呈现东部湖汉群、松门山周围以及蚌湖和蚌湖口较高,其它区域较低的趋势,这是由鄱阳湖水文水动力特点和营养盐的分布共同作用的结果. 鄱阳湖水由南向北流动,其主要入湖河流均分布湖泊的西南部,水流进入之后向东北部和北部流动,从而致使东部湖汉群的水流较缓,此外,东部湖汉群是鄱阳湖水产的重要养殖区,污染相对较严重^[38]. 鄱阳湖水和高营养水平共同导致了东部湖汉群高水平的 MCs. 松门山周边水域 MCs 质量浓度较高可能是由鄱阳湖水体流动和鄱阳湖的地形特点共同导致的,因为鄱阳湖南部的水流均需要经过松门山和都

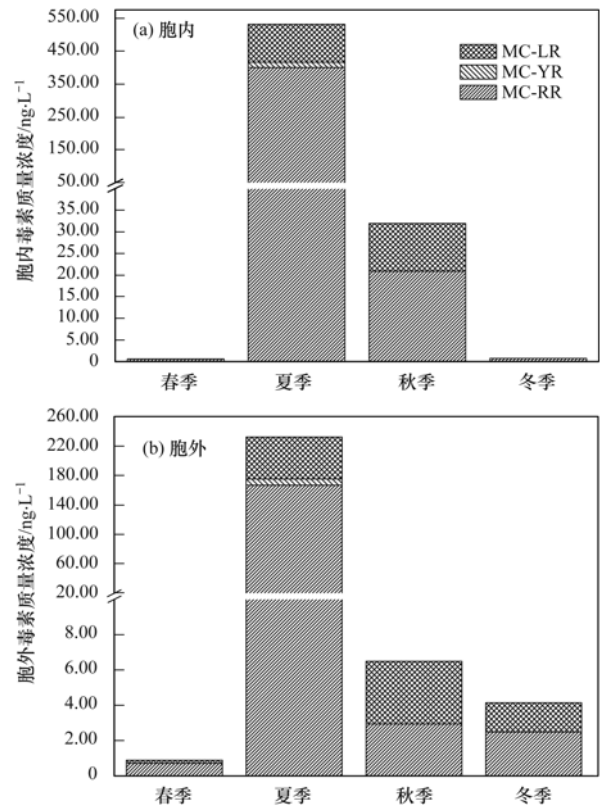


图3 鄱阳湖胞内与胞外微囊藻毒素季节变化特征

Fig. 3 Seasonal variations of intracellular and extracellular MCs in Poyang Lake

昌县之间的一条狭长水道,最终注入长江.南部区域形成的蓝藻通过该水道的时候,由于松门山的阻挡作用而在其周边聚集,从而形成了 MCs 这一高污染区域.蚌湖是位于鄱阳湖中西部的一个小湖汉,仅有一个小口与鄱阳湖相连,因此,蚌湖相对封闭,水体流动相对缓慢,在夏季容易形成蓝藻水华,致使该湖泊及与鄱阳湖相连的区域 MCs 质量浓度较高.

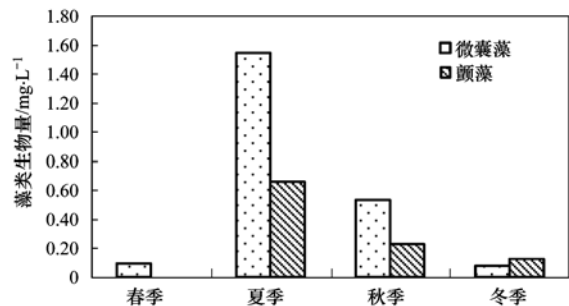


图4 鄱阳湖微囊藻和颤藻生物量的季节变化特征

Fig. 4 Seasonal variations of *Microcystis* and *Oscillatoria* biomass in Poyang Lake

鄱阳湖 EMCs 的空间分布格局与 IMCs 之间存在一些差异,其空间分布呈现松门山周围和蚌湖及附近区域较高,其它区域较低的趋势(图5),这可

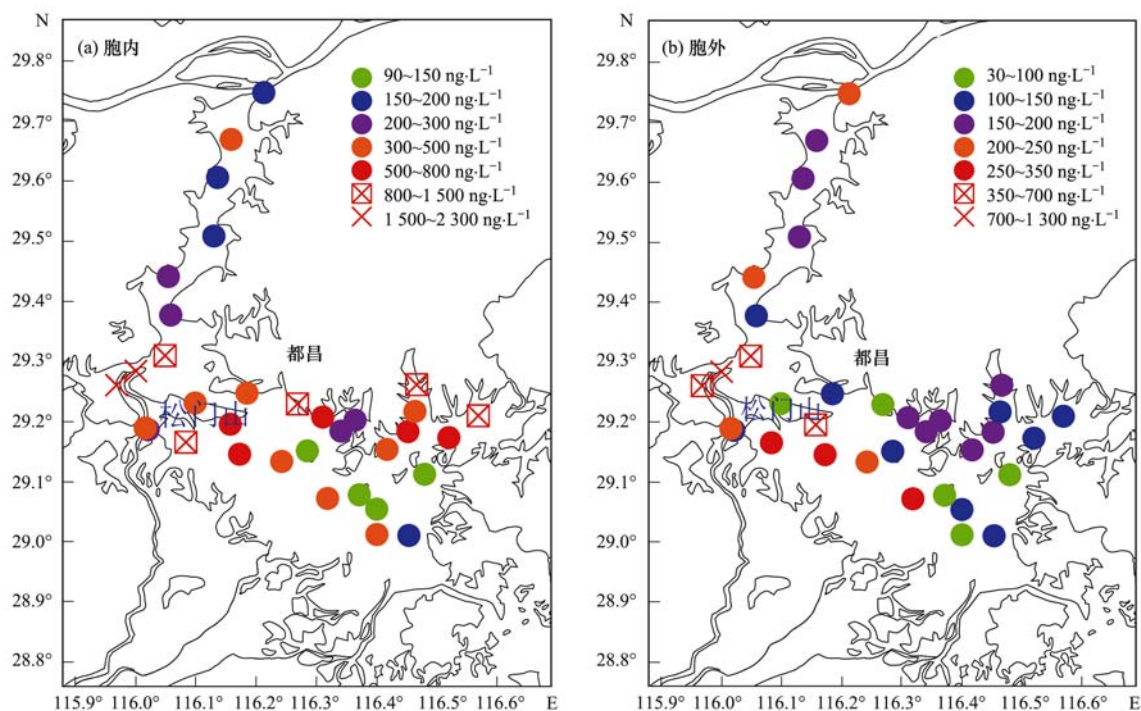


图5 鄱阳湖夏季胞内和胞外微囊藻毒素空间分布特征

Fig. 5 Spatial distributions of intracellular and extracellular MCs of Poyang Lake in summer

能是由鄱阳湖退水和 EMCs 的产生特点共同导致的。众所周知,微囊藻毒素是胞内毒素,EMCs 是由有毒蓝藻细胞死亡破裂之后释放进入水体形成。同时,8 月的取样期间正处于鄱阳湖的退水时期。本研究采样时间为 2012 年 8 月 14~18 日,而鄱阳湖从 2012 年 8 月 13 日后处于持续退水时期。8 月 13 日鄱阳湖星子站水位为 19.44 m,到此次采样结束的 8 月 18 日,该点水位降低至 18.54 m。

3 结论

(1) 鄱阳湖微囊藻毒素的污染整体上处于较低的水平,但是局部区域污染严重,超过了 WHO 规定的饮用水安全限量标准。

(2) 微囊藻和颤藻是鄱阳湖微囊藻毒素的主要产毒种类。

(3) 鄱阳湖微囊藻毒素具有明显的季节变化,呈现夏季最高,秋季次之,冬季和春季较低的趋势。

(4) 鄱阳湖 IMCs 的空间分布在整体上呈现东部湖汉群、松门山周围以及蚌湖和蚌湖口较高,其它区域较低的趋势,而 EMCs 呈现松门山周围和蚌湖及附近区域较高,其它区域较低的趋势。

(5) 鄱阳湖 IMCs 与微囊藻生物量、颤藻生物量、蓝藻生物量、Chl-a、水温、透明度、Fe 和 Zn 之

间均具有显著的正相关关系,与 TN、TP、 NO_2^- -N、 NH_4^+ -N、Ca 和 Mg 均呈现显著的负相关关系,这说明微囊藻和颤藻是鄱阳湖微囊藻毒素的主要产毒藻类,而光照强度(透明度反映)、氮、磷、水温是控制鄱阳湖微囊藻毒素产生的重要因子,金属离子 Ca、Mg、Fe、Zn 在一定程度上能影响微囊藻毒素的产生。

致谢:感谢中国科学院鄱阳湖湖泊湿地综合研究站提供鄱阳湖水位数据以及在样品采集、处理、分析给予的大力支持和帮助。

参考文献:

- [1] Dai R H, Wang P F, Jia P L, *et al.* A review on factors affecting microcystins production by algae in aquatic environments[J]. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 2016, **32**(3): 51.
- [2] Brookes J D, Carey C C. Resilience to blooms[J]. Science, 2011, **334**(6052): 46-47.
- [3] 谢平. 水生动物体内的微囊藻毒素及其对人类健康的潜在威胁[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
Xie P. Microcystins in aquatic animals with potential risk to human health[M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [4] Bouhaddada R, Nélieu S, Nasri H, *et al.* High diversity of microcystins in a *Microcystis* bloom from an algerian lake[J]. Environmental Pollution, 2016, **216**: 836-844.
- [5] Fujiki H, Suganuma M. Tumor promoters-microcystin-LR, nodularin and TNF- α and human cancer development[J]. Anti-Cancer Agents in Medicinal Chemistry, 2011, **11**(1): 4-18.
- [6] 谢平. 微囊藻毒素对人类健康影响相关研究的回顾[J]. 湖

- 泊科学, 2009, **21**(5): 603-613.
- Xie P. A review on the studies related to the effects of microcystins on human health [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2009, **21**(5): 603-613.
- [7] Falconer I, Bartram J, Chorus I, *et al.* Safe levels and safe practice [A]. In: Chorus I, Bartram J (Eds.). *Toxic Cyanobacteria in Water: A Guide to Their Public Health Consequences, Monitoring and Management* [C]. London: Spon Press, 1999. 155-178.
- [8] 王敏, 刘祥, 陈求稳, 等. 洋河水库微囊藻毒素及产毒株种群丰度的时空分布特征[J]. *环境科学学报*, 2017, **37**(4): 1307-1315.
- Wang M, Liu X, Chen Q W, *et al.* Spatio-temporal distribution of microcystins and microcystin-producing cells in the Yanghe Reservoir [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, **37**(4): 1307-1315.
- [9] Wu S K, Xie P, Liang G D, *et al.* Relationships between microcystins and environmental parameters in 30 subtropical shallow lakes along the Yangtze River, China [J]. *Freshwater Biology*, 2006, **51**(12): 2309-2319.
- [10] Jurczak T, Tarczyńska M, Karlsson K, *et al.* Characterization and diversity of cyano-bacterial hepatotoxins (microcystins) in blooms from polish freshwaters identified by liquid chromatography-electrospray ionisation mass spectrometry [J]. *Chromatographia*, 2004, **59**(9-10): 571-578.
- [11] Duong T T, Le T P Q, Dao T S, *et al.* Seasonal variation of cyanobacteria and microcystins in the Nui Coc Reservoir, Northern Vietnam [J]. *Journal of Applied Phycology*, 2013, **25**(4): 1065-1075.
- [12] Yang H, Xie P, Xu J, *et al.* Seasonal variation of microcystin concentration in Lake Chaohu, a shallow subtropical lake in the People's Republic of China [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2006, **77**(3): 367-374.
- [13] Liao M N, Yu G, Guo Y. Eutrophication in Poyang Lake (Eastern China) over the last 300 years in response to changes in climate and Lake Biomass [J]. *PLoS One*, 2017, **12**(1): e0169319.
- [14] 隋海霞, 徐海滨, 严卫星, 等. 淀山湖及鄱阳湖水体中微囊藻毒素的污染[J]. *环境与健康杂志*, 2007, **24**(3): 136-138.
- Sui H X, Xu H B, Yan W X, *et al.* Pollution status of microcystin in Dianshan Lake and Poyang Lake in China [J]. *Journal of Environment and Health*, 2007, **24**(3): 136-138.
- [15] Zhang D W, Liao Q G, Zhang L, *et al.* Occurrence and spatial distributions of microcystins in Poyang Lake, the largest freshwater lake in China [J]. *Ecotoxicology*, 2015, **24**(1): 19-28.
- [16] 许继军, 陈进. 鄱阳湖口生态水利工程方案探讨[J]. *人民长江*, 2009, **40**(3): 17-19.
- Xu J J, Chen J. Discussion on the scheme of eco-hydraulic project on the estuary of Poyang Lake [J]. *Yangtze River*, 2009, **40**(3): 17-19, 24.
- [17] 李芬, 甄霖, 黄河清, 等. 土地利用功能变化与利益相关者受偿意愿及经济补偿研究[J]. *资源科学*, 2009, **31**(4): 580-589.
- Li F, Zhen L, Huang H Q, *et al.* Impacts of land use functional change on WTA and economic compensation for core stakeholders [J]. *Resources Science*, 2009, **31**(4): 580-589.
- [18] 陈宇炜, 高锡云. 浮游植物叶绿素 a 含量测定方法的比较测定[J]. *湖泊科学*, 2000, **12**(2): 185-188.
- Chen Y W, Gao X Y. Comparison of two methods for phytoplankton chlorophyll-a concentration measurement [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2000, **12**(2): 185-188.
- [19] American Public Health Association (APHA). *Standard methods for the examination of water and wastewater*, (20th ed.) [M]. Washington: American Public Health Association, 1998.
- [20] 张大文, 张莉, 何俊海, 等. 鄱阳湖溶解态重金属空间分布格局及风险评估[J]. *生态学报*, 2015, **35**(24): 8028-8035.
- Zhang D W, Zhang L, He J H, *et al.* Spatial distributions and risk assessment of dissolved heavy metals in Poyang Lake [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35**(24): 8028-8035.
- [21] Buratti F M, Manganelli M, Vichi S, *et al.* Cyanotoxins: producing organisms, occurrence, toxicity, mechanism of action and human health toxicological risk evaluation [J]. *Archives of Toxicology*, 2017, **91**(3): 1049-1130.
- [22] Mbukwa E A, Msagati T A M, Mamba B B. Quantitative variations of intracellular microcystin-LR, -RR and -YR in samples collected from four locations in Hartbeespoort Dam in North West Province (South Africa) during the 2010/2011 summer season [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2012, **9**(10): 3484-3505.
- [23] Wang X Y, Sun M J, Wang J M, *et al.* *Microcystis* genotype succession and related environmental factors in Lake Taihu during cyanobacterial blooms [J]. *Microbial Ecology*, 2012, **64**(4): 986-999.
- [24] Hotto A M, Satchwell M F, Berry D L, *et al.* Spatial and temporal diversity of microcystins and microcystin-producing genotypes in Oneida Lake, NY [J]. *Harmful Algae*, 2008, **7**(5): 671-681.
- [25] Dai R H, Liu H J, Qu J H, *et al.* Cyanobacteria and their toxins in Guanting Reservoir of Beijing, China [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, **153**(1-2): 470-477.
- [26] Eguzozie K, Mavumengwana V, Nkosi D, *et al.* Bioaccumulation and quantitative variations of Microcystins in the Swartspruit River, South Africa [J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2016, **71**(2): 286-296.
- [27] Pedro O, Correia D, Lie E, *et al.* Polymerase chain reaction (PCR) detection of the predominant microcystin-producing genotype of cyanobacteria in Mozambican lakes [J]. *African Journal of Biotechnology*, 2011, **10**(83): 19299-19308.
- [28] Gupta N, Pant S C, Vijayaraghavan R, *et al.* Comparative toxicity evaluation of cyanobacterial cyclic peptide toxin microcystin variants (LR, RR, YR) in mice [J]. *Toxicology*, 2003, **188**(2-3): 285-296.
- [29] 魏代春, 苏婧, 王骥, 等. 微囊藻毒素分布及与理化因子关系的研究进展[J]. *环境科学与技术*, 2013, **36**(S2): 127-132, 156.
- Wei D C, Su J, Wang J, *et al.* The research on the distribution of microcystin and its relationship with physicochemical factors [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **36**(S2): 127-132, 156.
- [30] 潘晓洁, 常锋毅, 沈银武, 等. 滇池水体中微囊藻毒素含量变化与环境因子的相关性研究[J]. *湖泊科学*, 2006, **18**(6): 572-578.

- Pan X J, Chang F Y, Shen Y W, *et al.* The correlation between the variation of microcystin content and environment factors in Dianchi Lake [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2006, **18**(6): 572-578.
- [31] 王靖国, 邹华, 张强, 等. 太湖微囊藻毒素的时空分布特征 [J]. *环境科学研究*, 2014, **27**(7): 696-703.
- Wang J G, Zou H, Zhang Q, *et al.* Spatial and temporal distribution of microcystin in Taihu Lake [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2014, **27**(7): 696-703.
- [32] 李林, 朱伟, 罗永刚. 钙、镁离子在水流作用下对铜绿微囊藻生长的影响 [J]. *环境科学与技术*, 2012, **35**(5): 9-13.
- Li L, Zhu W, Luo Y G. Effects of calcium/magnesium ions on growth of *Microcystis aeruginosa* under water flow [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **35**(5): 9-13.
- [33] Boopathi T, Ki J S. Impact of environmental factors on the regulation of cyanotoxin production [J]. *Toxins*, 2014, **6**(7): 1951-1978.
- [34] Graham J L, Jones J R, Jones S B, *et al.* Spatial and temporal dynamics of microcystin in a Missouri reservoir [J]. *Lake and Reservoir Management*, 2006, **22**(1): 59-68.
- [35] 李威, 杨健, 刘洪波, 等. 微量元素对水华发生、发展的影响 [J]. *淡水渔业*, 2008, **38**(5): 74-79.
- Li W, Yang J, Liu H B, *et al.* Effects of trace elements on the occurrence and development of water-blooms [J]. *Freshwater Fisheries*, 2008, **38**(5): 74-79.
- [36] Chorus I. Cyanotoxins-occurrence, causes, consequences [M]. Berlin: Springer, 2001.
- [37] Welker M, Von Döhren H, Täuscher H, *et al.* Toxic Microcystis in shallow lake Müggelsee (Germany)-dynamics, distribution, diversity [J]. *Archiv für Hydrobiologie*, 2003, **157**(2): 227-248.
- [38] 郭春晶, 周文斌. 鄱阳湖周边几种养殖水体的富营养化现状及对水环境影响 [J]. *南昌大学学报(理科版)*, 2012, **36**(4): 380-384.
- Guo C J, Zhou W B. Eutrophic status in the aquaculture water around Poyang Lake and its effects on the water environment [J]. *Journal of Nanchang University (Natural Science)*, 2012, **36**(4): 380-384.



CONTENTS

Variation of O ₃ Concentration in Different Regions of Beijing from 2006-2015	WANG Zhan-shan, LI Yun-ting, AN Xin-xin, <i>et al.</i> (1)
Source Apportionment of Black Carbon Aerosol in the North Suburb of Nanjing	XIAO Si-han, YU Xing-na, ZHU Bin, <i>et al.</i> (9)
Seasonal Characteristics and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in PM ₁₀ Around Electroplating Plants	ZHAO Zhen-li, ZHAO Wei-tuo, HUANG Ting, <i>et al.</i> (18)
Characteristics of Organic and Elemental Carbon in PM ₁₀ and PM _{2.5} in Yulin City, Guangxi	HUANG Jiong-li, CHEN Zhi-ming, MO Zhao-yu, <i>et al.</i> (27)
Concentrations and Compositions of Different Forms of Nitrogen and Phosphorus in Atmospheric Aerosols in the Qingdao Coastal Region and over the Yellow and Bohai Sea	ZHANG Rui-feng, QI Jian-hua, DING Xue, <i>et al.</i> (38)
Air Quality Subarea Management: A case study of Guangdong Province	YANG Liu-lin, LI Min-hui, LIAO Cheng-hao, <i>et al.</i> (49)
Remote Sensing Identification of Urban Black-Odor Water Bodies Based on High-Resolution Images; A Case Study in Nanjing	WEN Shuang, WANG Qiao, LI Yun-mei, <i>et al.</i> (57)
Simulation of Nitrate Isotopic ($\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{18}\text{O}$) by Coupling the Hydrology and Transport Processes Described by the SWAT Model	WANG Kang, RAN Ning, LIN Zhong-bing, <i>et al.</i> (68)
Estimation of and Control Strategies for Pollution Loads from Non-point Sources in the Chenghai Watershed	CHEN Xue-kai, LIU Xiao-bo, PENG Wen-qi, <i>et al.</i> (77)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Metals in Drinking Water Sources from the Luhun Reservoir	YU Cong-cong, ZHAO Wei-tuo, GAO Xiao-feng, <i>et al.</i> (89)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Antibiotics in the Water Supply System in Tianjin	ZHANG Xin-bo, SONG Zi, ZHANG Dan, <i>et al.</i> (99)
Organic Distribution Characteristics and Influence on Drinking Water Quality in the Typical Water Sources for Towns in the Southwest Hilly Area of China	WANG Qiong, LI Nai-wen, LI Lei, <i>et al.</i> (109)
Health Risk Evaluation of Organochlorine and Organophosphorous Pesticides in Groundwater in Beijing	CHEN Wei-ping, PENG Cheng-wei, YANG Yang, <i>et al.</i> (117)
Pollution Status and Risks of Dioxin-like Polychlorinated Biphenyls in the Soil of the Yellow River	YAO Hong, LU Shuang, ZHANG Xu, <i>et al.</i> (123)
Effects of Flooding and Drying on the Transformation of Soil Inorganic Phosphorus in the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir, China	ZHOU Jian, LI Chun-hui, ZHANG Zhi-yong, <i>et al.</i> (130)
Effect of Phosphate on the Ammonium Removal Performance of Iron-Manganese Co-oxide Film in Surface Water Treatment	ZHUO Rui-shuang, HUANG Ting-lin, ZHANG Rui-feng, <i>et al.</i> (137)
Enhanced Photoelectrocatalytic Oxidation of Cu(CN) ₃ ²⁻ and Synchronous Cathodic Deposition of Cu by Peroxydisulfate	DANG Cong-zhe, LI Yi-bing, WANG Yan-bin, <i>et al.</i> (145)
Using HKUST-1 as a Template for Copper Oxides Preparation to Activate Peroxymonosulfate for RhB Degradation	PU Jia-yi, WAN Jin-quan, WANG Yan, <i>et al.</i> (152)
Evaluation of Performance of an Aminated Rosin-based Resin for Adsorption of Norfloxacin from Aqueous Solutions	MA Ya-hong, HUANG Wan-ting, DIAO Kai-sheng, <i>et al.</i> (161)
Arsenic(V) Removal by Granular Adsorbents Made from Backwashing Residuals from Biofilters for Iron and Manganese Removal	ZENG Hui-ping, LÜ Sai-sai, YANG Hang, <i>et al.</i> (170)
Arsenic Adsorption and Its Species on Ferrihydrite and Ferrihydrite Colloid	MA Yu-ling, MA Jie, CHEN Ya-li, <i>et al.</i> (179)
Comparison of Amphoteric-Cationic and Amphoteric-Anionic Modified Magnetic Bentonites: Characterization and Sorption Capacity of Phenol	REN Shuang, MENG Zhao-fu, WANG Teng, <i>et al.</i> (187)
Pollution Characteristics of Parabens in Typical Sewage Wastewater	ZHAO Xue, ZHANG Zi-feng, ZHU Fu-jie, <i>et al.</i> (195)
Influence of Hydraulic Retention Time on the Treatment of Polluted River Water by an Activated Carbon Rotating Biological Contactor	XU Wen-jia, CHENG Xiao-ying, <i>et al.</i> (202)
Removal and Influence of Ciprofloxacin in a Membrane Bioreactor	DAI Qi, LIU Rui, SHU Xiao-ming, <i>et al.</i> (212)
Operation of the AAO Process Under Low Dissolved Oxygen Conditions and Its Simulation	CAO Te-te, WANG Lin, LI Yong-mei, <i>et al.</i> (219)
Inhibitory Effects of Phosphate and Recovery on a Nitrification System	GU Cheng-wei, CHEN Fang-min, LI Xiang, <i>et al.</i> (227)
Effect of Carbon Source on Lab-scale SAD Process in a Wastewater Treatment Plant	LI Dong, ZHAO Shi-xun, WANG Jun-an, <i>et al.</i> (232)
Effect of Volume Loading Rate (VLR) on Denitrifying Phosphorus Removal by the ABR-MBR Process	LÜ Liang, YOU Wen, WEI Jia-min, <i>et al.</i> (239)
Combined Process of DNB-F-O ₃ -GAC for Nitrogen and Phosphorus and Metabolite Advanced Removal	ZHONG Li-yan, HAO Rui-xia, WANG Wei-dong, <i>et al.</i> (247)
Influence of Operating Modes for the Alternating Anoxic/Oxic Process on Biological Nitrogen Removal and Extracellular Polymeric Substances of Activated Sludge	SUN Hong-wei, CHEN Cui-zhong, WU Chang-feng, <i>et al.</i> (256)
Effects of Nanoscale Zero-valent Iron (nZVI) on Denitrifying Performance of an Upflow Granular Sludge Bed Reactor	ZHOU Feng, WANG Fan-fan, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> (263)
Influence on Desulfurization Efficiency and Interactions of Fe/S and pH During H ₂ S in situ Depression of High Solid Anaerobic Digestion	HAN Yun, CAO Yu-qin, ZHUO Yang, <i>et al.</i> (269)
Analysis of Storage Sludge Composition Characteristics and Evolutionary Regularity in the Hunhe River Basin	LIU Tian-tian, CUI Chong-wei, HE Jun-guo, <i>et al.</i> (276)
Enhancement of Anaerobic Methane Production by Removal of Organic-bonding Metals from Sewage Sludge	LU Yi-qing, XU Ying, DONG Bin, <i>et al.</i> (284)
Comparison of Different Leaching Methods for Heavy Metals in Sludge Fly Ash and Comprehensive Toxicity Evaluation	WANG Feng, LI Run-dong, LI Yan-long, <i>et al.</i> (292)
Diurnal Variations of CH ₄ and N ₂ O Fluxes from the Drained Aquaculture Pond in the Minjiang River Estuary During Early Winter	YANG Ping, TAN Li-shan, HUANG Jia-fang, <i>et al.</i> (300)
Effects of Three Soil Amendments on Greenhouse Gas Emissions From Corn Fields in the Hetao Irrigation District	WU Yan, HONG Mei, LIN Li-long, <i>et al.</i> (310)
Effect of Organic Manure Substitution of Synthetic Nitrogen on Crop Yield and N ₂ O Emission in the Winter Wheat-Summer Maize Rotation System	HOU Miao-miao, LÜ Feng-lian, ZHANG Hong-tao, <i>et al.</i> (321)
Dynamics of Rice Photosynthesized Carbon Input and Its Response to Nitrogen Fertilization at the Jointing Stage: ¹³ C-CO ₂ Pulse-labeling	CHEN Shan, ZHU Zhen-ke, YUAN Hong-zhao, <i>et al.</i> (331)
Profile Distribution of Soil Organic and Inorganic Carbon Under Different Land Use Types in the Loess Plateau of Northern Shaanxi	LAN Zhi-long, ZHAO Ying, ZHANG Jian-guo, <i>et al.</i> (339)
Effect of Biochar on Ammonia Volatilization from Soils of Different Surface Conditions	ZOU Juan, HU Xue-yu, ZHANG Yang-yang, <i>et al.</i> (348)
Effects of Straw and Biochar Return in Soil on Soil Aggregate and Carbon Sequestration	XU Guo-xin, WANG Zi-fang, GAO Ming, <i>et al.</i> (355)
Assessment of the Availability of Soil Copper and Related Influencing Factors at a County Scale	LI Jin-fen, QU Ming-kai, LIU Gang, <i>et al.</i> (363)
Application of the LUR Model in the Prediction of Spatial Distributions of Soil Heavy Metals	ZENG Jing-jing, SHEN Chun-zhu, ZHOU Sheng-lu, <i>et al.</i> (371)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soils of Shenyang North New Area	LI Jia-kang, SONG Xue-ying, WEI Jian-bing, <i>et al.</i> (379)
Passivation of Simulated Pb- and Cd-Contaminated Soil by Applying Combined Treatment of Phosphate, Humic Acid, and Fly Ash	ZHAO Qing-yuan, LI Xiao-ming, YANG Qi, <i>et al.</i> (389)
Distribution and Accumulation of Cadmium in Paddy Soil and Rice Affected by Pollutant Sources Control and Improvement Measures	FENG Wen-li, GUO Zhao-hui, SHI Lei, <i>et al.</i> (399)
Differences in Cd Accumulation in Typical Soils Under the Double Rice System	LI Xin-yang, LONG Jian, WANG Shu-bing, <i>et al.</i> (406)
Distribution Characteristics of Mercury in Reed Leaves from the Jiapiougou Gold Mine in the Songhua River Upstream	ZHANG Man-yin, LI Meng-jie, CUI Li-juan, <i>et al.</i> (415)
Effect of Nitrate Amendment on Soil Denitrification Activity and Anthracene Anaerobic Degradation	DAI Jun-shuai, ZUO Xiao-hu, WANG Ming-xia, <i>et al.</i> (422)
Effects of Long-term Fertilization Regimes on Microbial Biomass, Community Structure and Activity in a Paddy Soil	WANG Wei-hua, LIU Yi, TANG Hai-ming, <i>et al.</i> (430)
Analysis of Sulfate-Reducing and Sulfur-Oxidizing Prokaryote Community Structures in Marine Sediments with Different Sequencing Technologies	ZHANG Yu, MI Tie-zhu, ZHEN Yu, <i>et al.</i> (438)
Seasonal and Spatial Variations of Microcystins and Their Relationships with Physicochemical and Biological Factors in Poyang Lake	YUAN Li-juan, LIAO Qie-gen, ZHANG Li, <i>et al.</i> (450)
Distribution of Multidrug-Resistant Bacteria and Antibiotic-Resistant Genes in Livestock Manures	ZHANG Hao, WANG Pan-liang, YANG Qing-xiang, <i>et al.</i> (460)
Influence of Air Pollution Control (APC) Systems and Furnace Type on the Characteristics of APC Residues from Municipal Solid Waste Incinerators	ZHANG Hua, YU Si-yuan, SHAO Li-ming, <i>et al.</i> (467)