

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第12期

Vol.35 No.12

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次(卷终)

北京雾霾天气生物气溶胶浓度和粒径特征 高敏,仇天雷,贾瑞志,韩梅琳,宋渊,王旭明(4415)

杭州大气颗粒物散射消光特性及霾天气污染特征 徐昶,叶辉,沈建东,孙鸿良,洪盛茂,焦荔,黄侃(4422)

太原市采暖季 PM_{2.5} 中元素特征及重金属健康风险评价 李丽娟,温彦平,彭林,白慧玲,刘凤娴,史美鲜(4431)

成都市城区 PM_{2.5} 中二次水溶性无机离子污染特征 李友平,周洪,张智胜,王启元,罗磊(4439)

北京市臭氧的时空分布特征 王占山,李云婷,陈添,张大伟,孙峰,孙瑞雯,董欣,孙乃迪,潘丽波(4446)

南京北郊大气 VOCs 变化特征及来源解析 安俊琳,朱彬,王红磊,杨辉(4454)

祁连山中段降水化学的环境意义研究 李宗杰,李宗省,田青,宋玲玲,贾冰,郭瑞,宋耀选,苏索南,韩春坛(4465)

中亚热带典型林分不同层次氮硫湿沉降动态变化 孙涛,马明,王定勇,黄礼昕(4475)

本底大气 CO₂ 观测分析过程中 QA/QC 方法的建立与评估 刘立新,周凌晔,夏玲君,王红阳,方双喜(4482)

轻型汽油车 CH₄ 和 N₂O 排放因子研究 何立强,宋敬浩,胡京南,解淑霞,祖雷(4489)

煤燃烧超细微粒粒径谱演变及排放因子的实验研究 孙在,杨文俊,谢小芳,陈秋方,蔡志良(4495)

春、夏季长江口及其邻近海域溶解 N₂O 的分布和海-气交换通量 王岚,张桂玲,孙明爽,任景玲(4502)

珠江口水体组分的吸收特性分析 王珊珊,王永波,扶卿华,尹斌,李云梅(4511)

河流汇合处水体磷素形态特征及紫外光照的影响:以渠江-嘉陵江、涪江-嘉陵江交汇为例 闫金龙,江韬,魏世强,李玲,郭念,李璐璐,刘江(4522)

基于太湖微囊藻毒素的叶绿素 a 阈值研究 魏代春,苏婧,纪丹凤,伏小勇,王骥,霍守亮,崔驰飞,唐军,席北斗(4530)

百花湖周边城市近郊小流域氮、磷输出时空特征 冯源嵩,林陶,杨庆媛(4537)

自然光照对淹水条件下三峡库区消落带典型土壤磷释放影响 郭念,江韬,魏世强,闫金龙,梁俭,卢松,高洁(4544)

垂直流人工湿地 LDHs 覆膜改性沸石基质强化除磷效果及其机制 张翔凌,陈俊杰,郭露,陈巧珍,王晓晓(4553)

三峡库区消落带 3 种植物淹水后汞的动态变化及其对水体的影响 张翔,张成,孙荣国,王定勇(4560)

纳米 TiO₂ 对底泥中汞释放及活化的影响 张金洋,李楚娴,王定勇,周雄,孙荣国,张成,梁丽(4567)

首都水源地——洋河流域人为源多环芳烃(PAHs)排放清单估算及其影响分析 高佳佳,罗维,奚晓霞(4573)

石化工业园区有毒废水来源识别研究 杨茜,于茵,周岳溪,陈学民,伏小勇,王淼(4582)

污水处理厂中红霉素抗药性基因的污染特征及选择性因子 李侃竹,吴立乐,黄圣琳,何势,刘振鸿,薛罡,高品(4589)

2 种填料 BAF 深度处理印染废水沿程污染物变化规律研究 刘俊峰,范举红,刘锐,陈吕军,张永明(4596)

硫酸盐还原型甲烷厌氧氧化菌群驯化及其群落特征 席婧茹,刘素琴,李琳,刘俊新(4602)

MBR 处理腈纶废水的效能及微生物群落结构分析 魏健,宋永会,赵乐(4610)

制革废水的厌氧氨氧化 ABR 脱氮工艺研究 曾国驱,贾晓珊(4618)

生物滤池工艺的数值模拟与运行优化 邹宗森,施汉昌,陈向强,谢小青(4627)

气升装置对厌氧氨氧化污泥形态及性能的影响 李祥,黄勇,袁怡,周呈,陈宗短,张大林(4636)

给水厂污泥改良生物滞留填料除磷效果的研究 王建军,李田,张颖(4642)

北京地区不同城镇污水处理厂堆肥污泥的营养含量和重金属污染 白莉萍,齐洪涛,伏亚萍,李萍(4648)

电子垃圾拆解区污染池塘中鱼类多氯联苯及其代谢产物的组织分配及暴露风险 唐斌,罗孝俊,曾艳红,麦碧娴(4655)

广东罗非鱼养殖区水体和鱼体中重金属、HCHs、DDTs 含量及风险评价 谢文平,朱新平,郑光明,马丽莎(4663)

崇明典型水生生物中雌激素含量和分布特征 耿婧婧,叶爱丽,杨毅,刘敏,张婧,周俊良(4671)

啮虫脒光催化降解动力学的优化及其降解产物的分析 周文常,阳海,胡志斌,兰世林(4678)

氮添加对生长季寒温带针叶林土壤有效氮和酸化的影响 陈高起,傅瓦利,罗亚晨,高文龙,李胜功,杨浩(4686)

土地利用方式对缙云山土壤团聚体稳定性及其有机碳的影响 李鉴霖,江长胜,郝庆菊(4695)

上海市郊设施大棚次生盐渍化土壤盐分含量调查及典型对应分析 唐冬,毛亮,支月娥,张进忠,周培,柴晓彤(4705)

某铅酸蓄电池污染场地表层土壤重金属 Pb 空间分布预测研究 刘庚,牛俊杰,张朝,赵鑫,郭观林(4712)

海泡石对镉-铅复合污染钝化修复效应及其土壤环境质量影响研究 孙约兵,王朋超,徐应明,孙扬,秦旭,赵立杰,王林,梁学峰(4720)

盐碱区不同开发年限水田温室气体排放规律及影响因素 汤洁,方天儒,侯克怡,赵仁竹,梁爽(4727)

不同热解温度生物炭对 Cd(II) 的吸附特性 王震宇,刘国成,Monica Xing,李锋民,郑浩(4735)

碱土金属钙沉积对 Mn-Ce/TiO₂ 低温 SCR 催化剂脱硝性能的影响 周爱奕,毛华峰,盛重义,谭月,杨柳(4745)

国内外水泥工业大气污染物排放标准比较研究 江梅,李晓倩,纪亮,邹兰,魏玉霞,赵国华,车飞,李刚,张国宁(4752)

我国水泥工业大气污染物排放标准的修订历程与思考 江梅,李晓倩,纪亮,邹兰,魏玉霞,赵国华,车飞,李刚,张国宁(4759)

《环境科学》第35卷(2014年)总目录 (4767)

《环境科学》征订启事(4617) 《环境科学》征稿简则(4654) 信息(4474, 4529, 4536, 4744)

基于太湖微囊藻毒素的叶绿素 a 阈值研究

魏代春^{1,2}, 苏婧^{1,3*}, 纪丹凤¹, 伏小勇², 王骥¹, 霍守亮¹, 崔驰飞¹, 唐军¹, 席北斗¹

(1. 中国环境科学研究院地下水与环境系统工程创新基地, 北京 100012; 2. 兰州交通大学环境与市政工程学院, 兰州 730070; 3. 广东省浩蓝环保水污染治理院士工作站, 广州 510630)

摘要: 以探讨叶绿素 a (Chl-a) 阈值为主要目的于 2013 年 6 ~ 10 月间每月在太湖采样, 通过固相萃取超高效液相色谱串联质谱法对水体中 3 种微囊藻毒素 (MC-LR、MC-RR、MC-YR) 进行检测. 利用 SPSS 软件分析各种形态的微囊藻毒素 (MCs) 与总氮 (TN)、总磷 (TP)、Chl-a、高锰酸盐指数等富营养指标的相关性, 分析了 MC-LR、MCs 与 Chl-a 的关系. 结果表明, 太湖 MCs 污染较严重, 其浓度的空间分布特征为: 梅梁湾 > 贡湖、西部沿岸区 > 湖心区 > 胥湖区、南部湖区, 并以 MC-LR 浓度最高; 相关性分析表明 MC-LR、MC-RR、MC-YR 及 MCs 均与高锰酸盐指数、TN、TP、Chl-a 呈极显著正相关 ($P < 0.01$). 结合饮用水中 MC-LR 和 MCs 的标准限值分析得出, 太湖 Chl-a 的阈值是 $12.26 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 与美国北卡罗莱纳州湖泊的 Chl-a 标准值比较属于安全阈值, 具有一定的科学性.

关键词: 太湖; 微囊藻毒素; 叶绿素 a; 富营养指标; 阈值

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)12-4530-07 DOI: 10.13227/j.hjks.2014.12.015

Research on the Threshold of Chl-a in Lake Taihu Based on Microcystins

WEI Dai-chun^{1,2}, SU Jing^{1,3}, JI Dan-feng¹, FU Xiao-yong², WANG Ji¹, HUO Shou-liang¹, CUI Chi-fei¹, TANG Jun¹, XI Bei-dou¹

(1. Innovation Base of Ground Water and Environmental System Engineering, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. School of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 3. CNHOMELAND Environmental Protection Water Pollution Governance Academician Workstation, Guangzhou 510630, China)

Abstract: Water samples were collected in Lake Taihu from June to October in 2013 in order to investigate the threshold of chlorophyll a (Chl-a). The concentrations of three microcystins isomers (MC-LR, MC-RR, MC-YR) were detected by means of solid phase extraction and high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry. The correlations between various MCs and eutrophication factors, for instance of total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), chlorophyll a, permanganate index etc were analyzed. The threshold of Chl-a was studied based on the relationships between MC-LR, MCs and Chl-a. The results showed that Lake Taihu was severely polluted by MCs and its spatial distribution could be described as follows: the concentration in Meiliang Bay was the highest, followed by Gonghu Bay and Western Lake, and Lake Center; the least polluted areas were in Lake Xuhu and Southern Lake. The concentration of MC-LR was the highest among the 3 MCs. The correlation analysis indicated that MC-LR, MC-RR, MC-YR and MCs had very positive correlation with permanganate index, TN, TP and Chl-a ($P < 0.01$). The threshold value of Chl-a was $12.26 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ according to the standard thresholds of MC-LR and MCs in drinking water. The threshold value of Chl-a in Lake Taihu was very close to the standard in the State of North Carolina, which demonstrated that the threshold value provided in this study was reasonable.

Key words: Lake Taihu; microcystins; chlorophyll a; eutrophication factors; threshold

随着经济的快速发展,水体的富营养化现象日益严重,导致蓝藻大量繁殖,从而产生藻毒素,严重威胁人体健康^[1]. 其中微囊藻毒素 (microcystins, MCs) 属于出现频率最高、造成危害最严重的蓝藻毒素, MCs 中最常见的是 MC-LR、MC-RR 和 MC-YR, 三者中以 MC-LR 的急性毒性最强^[2]. 因此, WHO 和我国卫生部分别于 1998 年《饮用水卫生基准》(增补版) 和 2006 年《生活饮用水卫生标准》规定了饮用水中 MC-LR 的浓度限值为 $1 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[3,4]. 水体中的氮、磷是蓝藻大量繁殖的诱导因素, 目前我国《地表水环境质量标准》(3838-2002) 中确定了

湖泊、水库中 TN、TP 的标准限值, 未提及 Chl-a^[5]. 但 Chl-a 是水体中浮游植物生物量的一个综合指标, 不仅可以从一定程度上反映水体的富营养情况, 而且能够动态反映藻类的生长情况^[6]. 因此, Chl-a 阈值的研究与确定对保护水体健康和饮用水安全有非常重要的作用.

目前, 关于 Chl-a 限定值的研究较少, 且主要集

收稿日期: 2014-05-15; 修订日期: 2014-06-26

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2012ZX07101-002); 国家自然科学基金项目 (71103166)

作者简介: 魏代春 (1987 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为湖泊富营养化控制标准技术, E-mail: weidaichun00@126.com

* 通讯联系人, E-mail: sujing169@163.com

中在 Chl-a 参照状态值中,如郑丙辉等^[7]利用频率分析法得出太湖 Chl-a 参照状态值;Huo 等^[8]利用频率分析法、多元线性回归法及经验模型估算法确定了东部浅水湖泊 Chl-a 参照状态值的范围. 张家瑞等^[9]利用主成分聚类分析和多元线性回归方法得出白洋淀水域水华暴发的 Chl-a 临界值. 前人研究表明,Chl-a 与 MCs 之间有良好的相关性^[10-12]. 鉴于此,通过分析 MCs 与 Chl-a 的关系来研究 Chl-a 阈值具有一定的可行性.

太湖是我国第三大淡水湖泊,是无锡、苏州及上海等地的重要饮用水源地^[13]. 但自 2007 年以来,太湖蓝藻大量繁殖,其作为饮用水源地的功能受到威胁^[14]. 以往研究表明,太湖富营养化指标的阈值对于保护太湖水体健康和水源地水体安全具有极其重要的作用^[15]. 因此,本研究通过系统调查太湖水体中 3 种常见 MCs (MC-LR、MC-RR 和 MC-YR)

的浓度分布,分析 MCs 与富营养指标的相关性,通过分析 MCs 的标准限值及其与 Chl-a 的关系进一步研究确定 Chl-a 的阈值,以期太湖饮用水源地富营养化管理和防治提供理论基础,保障其水体安全.

1 材料与方法

1.1 采样点和水样采集

根据太湖水功能分区及水质情况将太湖分为 6 个区域,共布设具有代表性的 22 个点位,分别为 M: 梅梁湖(1, 2, 3),G: 贡湖(4, 5, 6),X: 西湖区(7, 8, 9)、N: 南湖区(10, 11, 12)、U: 胥湖区(14, 15, 17)、H: 湖心区(13, 16, 18, 19, 20, 21, 22),采样点分布如图 1 所示. 2013 年 5~10 月每月采用湖中地物结合 GPS 定位法进行样品采集,每次采集距水面下 0.5 m 处水样,样品采集完毕后立即送回实验室,待测.

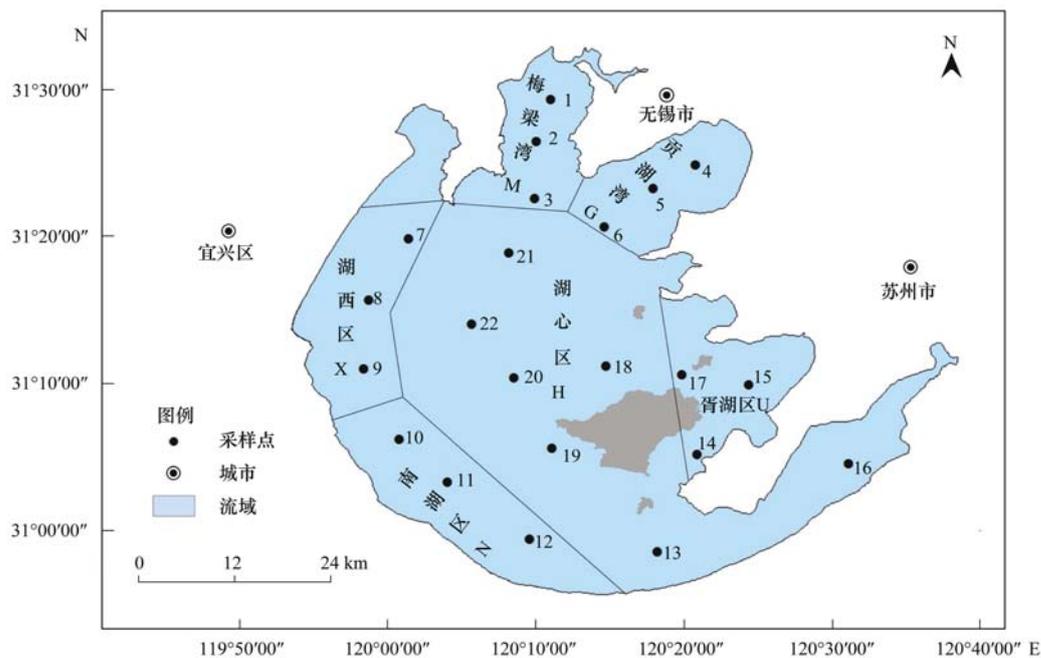


图 1 太湖湖区类型与监测点分布示意

Fig. 1 Distribution of Taihu Lake regions and monitoring sites

1.2 微囊藻毒素的测定方法

1.2.1 仪器与试剂

仪器: 0.45 μm GF/C 滤膜; 溶剂抽滤装置 (1000 mL, 天津津腾); 超声细胞粉碎机 (SCIENTZ, JY 92-11); 固相萃取装置 (SUPELCO VisiprepTM) 带真空泵; 涡旋混合仪 (XW-80A); 冷冻离心机 (湘仪 H1850R); 固相萃取柱 (Waters Oasis[®] HLB DCHP, 20 μm , 2.1 mm \times 30 mm); 针头过滤器 (25 mm Acrodisc GHP 0.2 μm , Pull, USA); HLB 固相萃取柱 (Waters, 500 mg, 6 mL); 氮气吹

干仪 (N-EVAPTM 112); 色谱柱 (ACQUITY UPLC[®] BEH C₁₈, 1.7 μm , 2.1 mm \times 50 mm); 固相萃取/超高效液相色谱/串联四极杆质谱系统 (美国 Waters[®] 公司); MasslynxTM 4.1 工作站.

试剂: MC-RR、MC-YR、MC-LR ($\geq 95\%$, ALEXIS); 乙酸 (分析纯), 屈臣氏蒸馏水; 甲醇 (色谱纯, TEDIA); 三氟乙酸 (TFA, 色谱纯, Dikmapure); 丙酮和正己烷 (J. T. Baker, USA); 乙腈和甲醇 (MREDA, USA); 氨水 (北京北化精细化学品有限公司); 甲酸 (Dikma, USA).

1.2.2 胞外微囊藻毒素的测定方法

参照文献[16]的在线固相萃取超高效液相色谱串联质谱法进行胞外微囊藻毒素的测定,流动相

条件如表1所示,其中A、B、C分别为2%的氨水,0.5%的甲酸溶液和乙腈,D为甲醇:丙酮:正己烷=1:1:1的溶液.A1为0.1%的甲酸溶液,B1为乙腈.

表1 测定3种胞外溶解性MCs的色谱条件

Table 1 Chromatography condition of measuring three extracellular MCs

四元泵(quaternary pump)						二元泵(binary pump)			
时间 /min	流速 /mL·min ⁻¹	A /%	B /%	C /%	D /%	时间 /min	流速 /mL·min ⁻¹	A1 /%	B1 /%
0	2	100	0	0	0	0	0.25	95	5
0.5	2	0	95	5	0	3.8	0.01	95	5
3.8	0.01	0	95	5	0	4.1	0.25	95	5
4.1	2	0	0	0	100	7.0	0.25	5	95
7.0	2	100	0	0	0	9.0	0.25	5	95
						9.5	0.25	95	5
						11.0	0.25	95	5

1.2.3 胞内微囊藻毒素的测定方法

取0.5~2 L的水样通过0.45 μm GF/C滤膜过滤,取出过滤后的滤膜在-20℃下冷冻24 h,解冻后加5%的乙酸溶液超声破碎,在8000 r·min⁻¹下离心3~5次,将收集的上清液通过活化的HLB小柱富集,用20 mL 10%和10 mL 20%的甲醇溶液淋洗,再用10 mL含有0.1% TFA的90%甲醇洗脱,氮吹至干后用50%的甲醇定容至1 mL,最后用超高效液相色谱/串联四极杆质谱系统分析.进样量为10 μL,流速:0.25 mL·min⁻¹.色谱检测为梯度洗脱,流动相A和B分别为0.1%甲酸水溶液和乙腈,其洗脱条件为0 min:80% A + 20% B, 3 min:40% A + 60% B, 3.5 min:10% A + 90% B, 4 min:80% A + 20% B.

1.3 其它指标的测定方法

透明度(SD)采用赛氏盘法测定;高锰酸盐指数采用酸性高锰酸钾滴定法;TN采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法,NH₄⁺-N采用纳氏试剂分光光度法,NO₃⁻-N采用紫外分光光度法;TP过硫酸钾消解分光光度法,PO₄³⁻-P采用分光光度法;Chl-a浓度采用丙酮萃取分光光度法,测定均按照文献[17]进行.

1.4 统计方法

所有数据在Excel中进行计算并建立数据库,采用SPSS 16.0对水质数据进行Spearman相关性分析,采用Origin对数据进行绘图分析.

2 结果与讨论

2.1 太湖水体中不同形态MCs的分布

太湖不同区域MC-LR、MC-RR和MC-YR的浓

度分布见图2.从中可以看出,太湖水体中不同形态的MCs分布不一致.MC-LR、MC-RR和MCs平均浓度的空间分布特征表现为:梅梁湾>贡湖湾、西部沿岸区>湖心区>胥湖区、南部湖区.而MC-YR平均浓度的空间分布特征表现为梅梁湾>西部沿岸区、贡湖>湖心区、胥湖区、南部湖区.整个太湖以MC-LR浓度最高,以MC-YR的浓度最低.

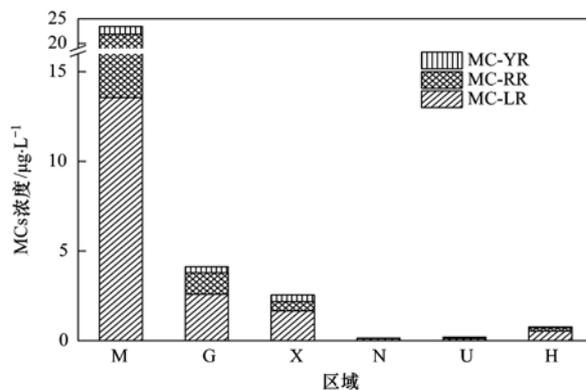


图2 太湖不同区域MC-LR、MC-RR和MC-YR的浓度分布

Fig. 2 Concentration distribution of MC-LR, MC-RR and MC-YR in different regions of Lake Taihu

太湖梅梁湾的MCs浓度高,3种MCs的异构体浓度都超出WHO的标准值(1 μg·L⁻¹),其中10月的3种MCs异构体的浓度总和最高达到了264.55 μg·L⁻¹.究其原因:梅梁湾靠近经济发达的无锡市,污水排放量较大,营养盐浓度较高,导致藻类大量繁殖;此外,太湖常年以东南风为主,梅梁湾位于太湖西北区,藻类和MCs容易受风向、风浪的影响^[18,19],从而使藻类在梅梁湾聚集,造成该区域MCs浓度较大.东北区的贡湖是无锡市主要饮用水

源地,其 MC-LR、MC-RR 的浓度超出了 $1 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,尤其是夏秋季受蓝藻影响较大 MCs 的浓度增高,给当地居民带来很大危害. 湖西区的 MCs 危害较轻,但急性毒性最强的 MC-LR 平均浓度为 $1.66 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. 作为饮用水源地的南湖区、胥湖的 MCs 浓度较小,其水体从 MCs 的角度来看是相对安全的. 结合历年研究可知,太湖湖心区水质较好^[20],但其 MCs 浓度相对南湖和胥湖区较高. 究其原因:首先,藻细胞暴露于高光照条件下可促进 MCs 的合成^[21, 22],而湖心区风浪较大,藻细胞在水表面的位置经常变化,致使藻细胞各个方位都可暴露于高辐射强度的照射下,有利于微囊藻毒素合成;其次,湖心区北部靠近 MCs 浓度高的梅梁湾及贡湖区域,这也是造成湖心区 MCs 浓度较高的原因之一.

2.2 MCs 与富营养指标的关系

氮、磷是藻类生长的必需营养元素,也是造成湖泊富营养化的关键因素^[23, 24]. 氮、磷浓度的过度增高会导致浮游藻类大量生长,从而增加水体中

MCs 的含量,SD 和 Chl-a 是水体富营养化的响应变量^[6],高锰酸盐指数表征了水体的有机污染程度,因此本研究分析了太湖水体中 MCs 与以上富营养指标的相关性.

太湖水体中各种 MCs 与富营养指标的相关性分析结果如表 2 所示:MC-LR、MC-RR、MC-YR 及 MCs 均与高锰酸盐指数、TN、TP、Chl-a 呈极显著正相关性($P < 0.01$). 其中与 TP 的相关性系数较高,这主要是由于整个太湖近年来处于磷限制状态^[25],磷是限制藻类生长以及 MCs 浓度的主控因子所引起的. 与 Chl-a 的相关性系数也很高($R > 0.85$),这与 Sakai 等^[26]在太湖的研究结果相符合. 此外,从表 2 还可以看出,Chl-a 与高锰酸盐指数、TN、TP 也呈极显著正相关性($P < 0.01$). 因此,在太湖中 Chl-a 起到一个纽带性作用,不仅能反映水体的富营养状态,还能从一定程度上综合表征太湖水体中 MCs 的多少,可以在太湖建立 MCs 与 Chl-a 的关系.

表 2 MCs 与富营养指标的相关性分析¹⁾

Table 2 Correlation analysis between microcystins and eutrophication factors

	SD	高锰酸盐指数	TN	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	TP	PO ₄ ³⁻ -P	Chl-a	MC-LR	MC-RR	MC-YR	MCs
SD	1											
高锰酸盐指数	-0.293 **	1										
TN	0.222 *	-0.06	1									
NH ₄ ⁺ -N	0.038	0.133	0.196	1								
NO ₃ ⁻ -N	0.136	-0.531 **	0.583 **	-0.107	1							
TP	-0.165	0.687 **	0.384 **	0.096	-0.203	1						
PO ₄ ³⁻ -P	-0.261 *	0.497 **	0.020 **	0.254 *	-0.110	0.340 **	1					
Chl-a	0.132	0.704 **	0.380 **	0.166	-0.194	0.948 **	0.365 **	1				
MC-LR	-0.062	0.541 **	0.422 **	-0.045	-0.103	0.951 **	0.090	0.868 **	1			
MC-RR	-0.059	0.531 **	0.427 **	-0.051	-0.093	0.941 **	0.071	0.856 **	0.998 **	1		
MC-YR	-0.078	0.580 **	0.423 **	0.034	-0.126	0.973 **	0.173	0.910 **	0.990 **	0.983 **	1	
MCs	-0.062	0.540 **	0.424 **	-0.043	-0.101	0.950 **	0.088	0.867 **	1.000 **	0.999 **	0.989 **	1

1) * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$, MCs 为 MC-LR、MC-RR 及 MC-YR 的总和

2.3 基于 MCs 的 Chl-a 阈值分析

MCs 具有强烈的促肝癌、皮肤癌和大肠癌作用,危害人体健康^[1]. 因此,在 WHO 对 MC-LR 浓度进行限定的基础上,不同国家及国际组织指出了饮用水中针对不同人群的 MC-LR 和 MCs 的浓度限值:其中对成人的标准限值分别为 $0.32 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.88 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,对儿童分别是 $0.11 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.29 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[27]. 由于水体中的 MCs 很难用传统的方法有效去除^[28, 29],因此,本研究通过饮用水中对成人和儿童 MC-LR 和 MCs 的标准限值分析太湖的 Chl-a 阈值,从而保障水源地水体安全和人体健康.

2.3.1 基于 MC-LR 的 Chl-a 阈值分析

从上述分析可知,太湖水体中 MC-LR 与 Chl-a 呈极显著正相关性,相关性系数 R 为 0.868. 而且在太湖中,Chl-a 能从一定程度上反映水体的营养盐浓度及有机污染程度. 因此通过 MC-LR 的限值及其与 Chl-a 的关系来研究太湖水体中 Chl-a 的阈值具有一定的科学性和可行性.

太湖水体不同月份不同点位 MC-LR 的浓度差异大,因此,对 MC-LR 与 Chl-a 的浓度进行对数线性回归(图 3),方程为 $\lg(\text{MC-LR}) = 1.618 \lg(\text{Chl-a}) - 2.74$. 以饮用水中 MC-LR 对成人和儿

童的最高允许含量 $0.32 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.11 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 进行分析, 其对应的 Chl-a 浓度限值分别为 $24.41 \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $12.26 \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$.

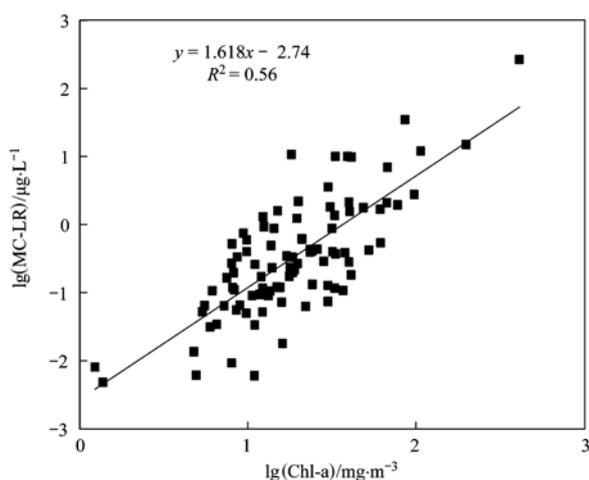


图3 MC-LR 与 Chl-a 的关系

Fig. 3 Relationship between MC-LR and Chl-a

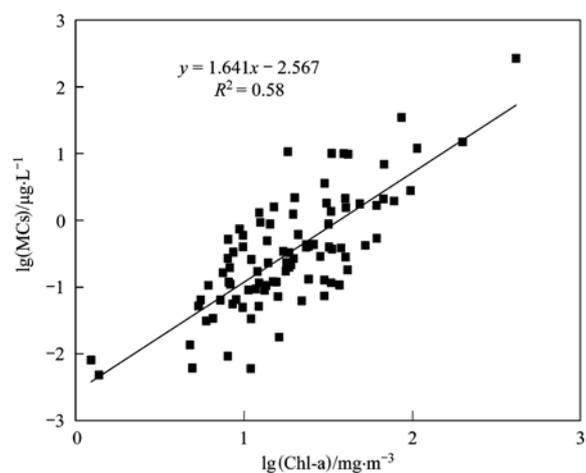


图4 MCs 与 Chl-a 的关系

Fig. 4 Relationship between MCs and Chl-a

2.3.2 基于 MCs 的 Chl-a 阈值分析

不同国家及国际组织规定了饮用水体中 MC-LR 和 MCs 浓度的相关标准限值, 但是针对太湖水体中其它常见的异构体 MC-RR 和 MC-YR 的限值没有相关规定. 然而 MC-RR 和 MC-YR 的毒性和浓度也不容忽略, 而且相关性分析表明它们与 Chl-a 呈极显著正相关性 ($P < 0.01$). 因此, 本研究通过分析太湖水体中 MC-LR、MC-RR 和 MC-YR 的总和 MCs 与 Chl-a 的关系, 探讨了 Chl-a 的阈值.

对 MCs 与 Chl-a 的浓度进行对数线性回归 (图 4), 方程为 $\lg(\text{MCs}) = 1.641\lg(\text{Chl-a}) - 2.567$. 然而 Otten 等^[20] 对太湖 2009 ~ 2010 年夏季 MCs 与 Chl-a 之间关系的研究得出: $\text{MCs} = 0.01021 + 0.07965(\text{Chl-a})$, 与本研究结果所得结果 $\lg(\text{MCs})$

$= 1.641\lg(\text{Chl-a}) - 2.567$ 有所差异. 其主要原因是 Otten 等的研究集中在 6、7 月, 而本研究还包括秋季的数据, 相对夏季来说, 秋季随着藻类的衰老死亡, 大量胞内藻毒素释放进入水体, 使得水体中的胞外 MCs 浓度增大, 但胞外 MCs 会被微生物降解, 在光照、腐殖质或色素存在的情况下会产生光降解, 因此, 本研所得 MCs 与 Chl-a 的相关性表达式的斜率相对较低.

将饮用水中 MCs 对成人和儿童的最高允许含量 $0.88 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $0.29 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 代入方程 $\lg(\text{MCs}) = 1.641\lg(\text{Chl-a}) - 2.567$ 进行分析, 对应的 Chl-a 浓度分别为 $33.92 \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $17.25 \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$.

因此, 通过基于太湖水体中 MC-LR 和 MCs 的 Chl-a 水平分析得出, 太湖水体安全控制标准中 Chl-a 的阈值范围为 $12.26 \sim 17.25 \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$. Chl-a 的阈值属于轻富营养状态, 从湖泊水体的安全性来分析, 太湖处于“一般安全”水平, 虽然能保障太湖的生态环境, 但要预防其水质恶化. 从作为饮用水源的可用性来分析, 基于风险最小化原则, 太湖饮用水源地安全控制标准中 Chl-a 的阈值应为 $12.26 \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 不仅起到一个标准限定的作用, 而且通过 Chl-a 阈值的控制可以减轻饮用水源地的水进入水厂的后处理压力.

2.3.3 太湖与美国湖泊 Chl-a 阈值的比较分析

我国缺乏对湖泊水体 Chl-a 标准阈值的研究, 但美国 EPA 对湖泊、水库水体营养物标准的研究较为成熟, 而且部分州还明确规定了 Chl-a 的标准限值^[30]. 在美国明确规定 Chl-a 标准限值的各个州中北卡罗来纳州与中国太湖流域的气候、地形特征较为相似, 因此, 将太湖与美国北卡罗来纳州湖泊的 Chl-a 阈值进行比较.

如表 3 所示, 本研究得出的太湖 Chl-a 阈值与北卡罗来纳州湖泊相比较为严格. 主要由于本研究分析的是胞内和胞外 MCs 之和与 Chl-a 的关系, 是考虑胞内 MCs 释放以后对水体危害最大情况下的 Chl-a 阈值; 此外, 太湖是一个以饮用水为主的湖泊, 相对北卡罗来纳州的湖泊来说, 其 Chl-a 阈值较为严格是合理的.

表3 太湖与北卡罗来纳州湖泊的 Chl-a 阈值比较

Table 3 Comparison of the thresholds of Chl-a between Lake Taihu and the Lake in the State of North Carolina

湖泊	湖泊面积/ km^2	Chl-a 阈值/ $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$
中国太湖	2 338	< 12.26
北卡罗来纳州湖泊	≥ 0.04	< 15

3 结论

(1) 太湖水体中 MCs 的污染较为严重, 并以 MC-LR 浓度最高, 以 MC-YR 的浓度最低. 对于 MC-LR、MC-RR、MC-YR 和 MCs, 其空间分布特征基本表现为: 梅梁湾 > 贡湖、西部沿岸区 > 湖心区 > 胥湖区、南部湖区.

(2) 太湖水体中 MC-LR、MC-RR、MC-YR 及 MCs 均与高锰酸盐指数、TN、TP、Chl-a 呈极显著正相关 ($P < 0.01$), Chl-a 与高锰酸盐指数、TN、TP 也呈极显著正相关性 ($P < 0.01$).

(3) 对 MC-LR、MCs 与 Chl-a 进行线性回归, 方程分别为: $\lg(\text{MC-LR}) = 1.618\lg(\text{Chl-a}) - 2.74$ 和 $\lg(\text{MCs}) = 1.641\lg(\text{Chl-a}) - 2.567$, 以饮用水中 MC-LR 和 MCs 的标准值为依据, 得出太湖饮用水源地安全控制标准中 Chl-a 的阈值为 $12.26 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$.

(4) 太湖 Chl-a 阈值与美国北卡罗来纳州湖泊的 Chl-a 标准值相比, 是属于考虑最大风险的安全限值, 能为太湖饮用水源地中 MCs 的控制提供依据, 保障太湖水体安全, 并对太湖流域其它湖泊的水体安全同样有借鉴意义.

参考文献:

- [1] van Apeldoorn M E, van Egmond H P, Speijers G J A, *et al.* Toxins of cyanobacteria [J]. *Molecular Nutrition and Food Research*, 2007, **51**(1): 7-60.
- [2] Svrcek C, Smith D W. Cyanobacteria toxins and the current state of knowledge on water treatment options: A review [J]. *Journal of Environmental Engineering and Science*, 2004, **3**(3): 155-185.
- [3] GB 5749-2006, 生活饮用水卫生标准[S].
- [4] 王菲凤, 全川, 杨芳, 等. 福州山仔水库水华微囊藻毒素时空分布特征[J]. *环境科学学报*, 2011, **31**(3): 533-546.
- [5] GB 3838-2002, 地表水环境质量标准[S].
- [6] 席北斗, 陈艳卿, 苏婧, 等. 湖泊营养物标准方法学及案例研究[M]. 北京: 科学出版社, 2013. 71-98.
- [7] 郑丙辉, 许秋瑾, 周保华, 等. 水体营养物及其响应指标标准制定过程中建立参照状态的方法——以典型浅水湖泊太湖为例[J]. *湖泊科学*, 2009, **21**(1): 21-26.
- [8] Huo S L, Xi B D, Su J, *et al.* Determining reference conditions for TN, TP, SD and Chl-a in eastern plain ecoregion lakes, China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2013, **25**(5): 1001-1006.
- [9] 张家瑞, 曾勇, 赵彦伟. 白洋淀湿地水华暴发阈值分析[J]. *生态学杂志*, 2011, **30**(8): 1744-1750.
- [10] 王经结, 杨佳, 鲜敏鸣, 等. 太湖微囊藻毒素时空分布特征及与环境因子的关系[J]. *湖泊科学*, 2011, **23**(4): 513-519.
- [11] 杨华. 巢湖和太湖微囊藻毒素的生态学研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2006.
- [12] Graham J L, Jones J R, Jones S B, *et al.* Environmental factors influencing microcystin distribution and concentration in the Midwestern United States[J]. *Water Research*, 2004, **38**(20): 4395-4404.
- [13] 郭广慧, 吴丰昌, 何宏平, 等. 太湖梅梁湾、贡湖湾和胥口湾水体 PAHs 的生态风险评估[J]. *环境科学学报*, 2011, **31**(12): 2804-2813.
- [14] Li Y P, Tang C Y, Yu Z B, *et al.* Correlations between algae and water quality: factors driving eutrophication in Lake Taihu, China[J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2014, **11**(1): 169-182.
- [15] 连民, 陈传炜, 俞顺章, 等. 淀山湖夏季微囊藻毒素分布状况及其影响因素[J]. *中国环境科学*, 2000, **20**(4): 323-327.
- [16] 张春燕, 赵欣茹, 郑学忠. 在线固相萃取超高效液相色谱串联质谱法测定水中微囊藻毒素[J]. *环境化学*, 2012, **31**(10): 1663-1664.
- [17] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [18] Han X Z, Cong P F, Qin Y C, *et al.* Retrieval of cyanobacteria in Taihu based on MODIS data[A]. In: *Remote Sensing of the Environment: 16th National Symposium on Remote Sensing of China* [C]. Beijing: International Society for Optics and Photonics, 2008. 71230Y1-71230Y7.
- [19] 唐承佳. 太湖贡湖湾水源地微囊藻毒素和含硫衍生污染物研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2010.
- [20] Otten T G, Xu H, Qin B, *et al.* Spatiotemporal patterns and ecophysiology of toxigenic Microcystis blooms in Lake Taihu, China: implications for Water quality management [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **46**(6): 3480-3488.
- [21] Kaebernick M, Neilan B A, Börner T, *et al.* Light and the transcriptional response of the microcystin biosynthesis gene cluster[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2000, **66**(8): 3387-3392.
- [22] Tonk L, Visser P M, Christiansen G, *et al.* The microcystin composition of the cyanobacterium Planktothrix agardhii changes toward a more toxic variant with increasing light intensity [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2005, **71**(9): 5177-5181.
- [23] Yang L, Lei K, Yan W, *et al.* Internal loads of nutrients in Lake Chaohu of China: implications for lake eutrophication [J]. *International Journal of Environmental Research*, 2013, **7**(4): 1021-1028.
- [24] 刁晓君, 席北斗, 何连生, 等. 基于生态分区的我国湖泊营养盐控制目标研究[J]. *环境科学*, 2013, **34**(5): 1687-1694.
- [25] 熊文, 钱新, 叶瑞, 等. 基于生态模型的太湖蓝藻生长因子解析[J]. *湖泊科学*, 2012, **24**(5): 698-704.
- [26] Sakai H, Hao A M, Iseri Y, *et al.* Occurrence and distribution

- of microcystins in Lake Taihu, China[J]. *The Scientific World Journal*, 2013, **2013**: Article ID 838176.
- [27] Whitacre D M. *Reviews of environmental contamination and toxicology*[M]. New York: Springer, 2008.
- [28] 闫海, 王华生, 刘晓璐, 等. 微囊藻毒素微生物降解途径与分子机制研究进展[J]. *环境科学*, 2014, **35**(3): 1205-1214.
- [29] Zhang H J, Zhu G Y, Jia X Y, *et al.* Removal of microcystin-LR from drinking water using a bamboo-based charcoal adsorbent modified with chitosan[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2011, **23**(12): 1983-1988.
- [30] USEPA. Survey of states, tribes and territories nutrient standards [EB/OL]. <http://www.epa.gov/waterscience/standards/wqslibrary/tribes.html>, 2003.

关于反对个别作者一稿两投行为的联合声明

为保证所发表论文的首创性和学术严谨性,《环境科学》、《中国环境科学》、《环境科学学报》编辑部和《Journal of Environmental Sciences》编辑部特发表如下联合声明。

我们明确反对个别作者的一稿两投或变相一稿两投行为。自即日起,我们各刊在接受作者投稿时,要求论文全体作者就所投稿件作出以下承诺(附在投稿上):

1) 来稿所报道的研究成果均系全体作者的原创性研究成果,文中报道的研究成果(含图、表中数据的全部或部分)未曾发表亦未曾投其它科技期刊。

2) 在接到所投期刊编辑部关于稿件处理结果之前,所投稿件的全部或部分内容不再投其它科技期刊。

我们将认真对待作者所作的上述承诺,并建立信息共享机制,对违背上述承诺的作者(包括在文中署名的全体作者)采取联合行动。

净化学术环境、促进学术繁荣是学术期刊作者和编者的共同责任。我们诚恳地希望广大作者能够了解我们的上述立场和做法,并积极宣传和配合。

《环境科学》编辑部

《中国环境科学》编辑部

《环境科学学报》编辑部

《Journal of Environmental Sciences》编辑部

CONTENTS

Concentration and Size Distribution of Bioaerosols at Non-haze and Haze Days in Beijing	GAO Min, QIU Tian-lei, JIA Rui-zhi, <i>et al.</i> (4415)
Light Scattering Extinction Properties of Atmospheric Particle and Pollution Characteristics in Hazy Weather in Hangzhou	XU Chang, YE Hui, SHEN Jian-dong, <i>et al.</i> (4422)
Characteristic of Elements in PM _{2.5} and Health Risk Assessment of Heavy Metals During Heating Season in Taiyuan	LI Li-juan, WEN Yan-ping, PENG Lin, <i>et al.</i> (4431)
Pollution Characteristics of Secondary Water-soluble Inorganic Ions of PM _{2.5} in Urban Chengdu, China	LI You-ping, ZHOU Hong, ZHANG Zhi-sheng, <i>et al.</i> (4439)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Ozone in Beijing	WANG Zhan-shan, LI Yun-ting, CHEN Tian, <i>et al.</i> (4446)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds (VOCs) in the Northern Suburb of Nanjing	AN Jun-lin, ZHU Bin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (4454)
Environmental Significance of Wet Deposition Composition in the Central Qilian Mountains, China	LI Zong-jie, LI Zong-xing, TIAN Qing, <i>et al.</i> (4465)
Dynamics of Nitrogen and Sulfur Wet Deposition in Typical Forest Stand at Different Spatial Levels in Simian Mountain, Mid-subtropical Region	SUN Tao, MA Ming, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (4475)
Establishment and Assessment of QA/QC Method for Sampling and Analysis of Atmosphere Background CO ₂	LIU Li-xin, ZHOU Ling-xi, XIA Ling-jun, <i>et al.</i> (4482)
An Investigation of the CH ₄ and N ₂ O Emission Factors of Light-duty Gasoline Vehicles	HE Li-qiang, SONG Jing-hao, HU Jing-nan, <i>et al.</i> (4489)
Experimental Study on the Size Spectra and Emission Factor of Ultrafine Particle from Coal Combustion	SUN Zai, YANG Wen-jun, XIE Xiao-fang, <i>et al.</i> (4495)
Distributions and Air-Sea Fluxes of Dissolved Nitrous Oxide in the Yangtze River Estuary and Its Adjacent Marine Area in Spring and Summer	WANG Lan, ZHANG Gui-ling, SUN Ming-shuang, <i>et al.</i> (4502)
Spectral Absorption Properties of the Water Constituents in the Estuary of Zhujiang River	WANG Shan-shan, WANG Yong-bo, FU Qing-hua, <i>et al.</i> (4511)
Characteristics of Phosphorus Forms and the Effects of UV Light in the Confluences Water of Qujiang-Jialing River and Fujiang-Jialing River	YAN Jin-long, JIANG Tao, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i> (4522)
Research on the Threshold of Chl-a in Lake Taihu Based on Microcystins	WEI Dai-chun, SU Jing, JI Dan-feng, <i>et al.</i> (4530)
Temporal and Spatial Characteristic of Nitrogen and Phosphorus Output in the Suburb Watershed Around the Baihua Lake	FENG Yuan-song, LIN Tao, YANG Qing-yuan (4537)
Effects of Light Irradiation on Phosphorous Releases from Typical Submerged Soils of Water-Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoirs Areas	GUO Nian, JIANG Tao, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i> (4544)
Analysis on the Removal Efficiency and Mechanisms of Phosphorus by Modified Zeolites Substrates Coated with LDHs Reacted by Different Metal Compounds in Laboratory-Scale Vertical-Flow Constructed Wetlands	ZHANG Xiang-ling, CHEN Jun-jie, GUO Lu, <i>et al.</i> (4553)
Mercury Dynamics of Several Plants Collected from the Water-Level Fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Area During Flooding and Its Impact on Water Body	ZHANG Xiang, ZHANG Cheng, SUN Rong-guo, <i>et al.</i> (4560)
Effect of Nano-TiO ₂ on the Release and Activation of Mercury in Sediment	ZHANG Jin-yang, LI Chu-xian, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (4567)
Estimation Inventory of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) from Anthropogenic Sources and Its Impacts within the Yanghe Watershed, an Important Water-Source Site of Beijing, China	GAO Jia-jia, LUO Wei, XI Xiao-xia (4573)
Source Identification of Toxic Wastewaters in a Petrochemical Industrial Park	YANG Qian, YU Yin, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (4582)
Investigation of Pollution Characteristics of Erythromycin Resistance Genes in a Sewage Treatment Plant and the Relevant Selective Factors	LI Kan-zhu, WU Li-le, HUANG Sheng-lin, <i>et al.</i> (4589)
Variation of Pollutants Along the Height of Two Media BAF During Advanced Treatment of Dyeing Wastewater	LIU Jun-feng, FAN Ju-hong, LIU Rui, <i>et al.</i> (4596)
Acclimatization and Characteristics of Microbial Community in Sulphate-Dependent Anaerobic Methane Oxidation	XI Jing-ru, LIU Su-qin, LI Lin, <i>et al.</i> (4602)
Capability and Microbial Community Analysis of a Membrane Bioreactor for Acrylic Fiber Wastewater Treatment	WEI Jian, SONG Yong-hui, ZHAO Le (4610)
Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX ABR Process in Tannery Wastewater Treatment	ZENG Guo-qu, JIA Xiao-shan (4618)
Numerical Simulation and Operation Optimization of Biological Filter	ZOU Zong-sen, SHI Han-chang, CHEN Xiang-qiang, <i>et al.</i> (4627)
Effect of Gas-lift Device on the Morphology and Performance of ANAMMOX Sludge	LI Xiang, HUANG Yong, YUAN Yi, <i>et al.</i> (4636)
Water Treatment Residual as a Bioretention Media Amendment for Phosphorus Removal	WANG Jian-jun, LI Tian, ZHANG Ying (4642)
Nutrient Contents and Heavy Metal Pollutions in Composted Sewage Sludge from Different Municipal Wastewater Treatment Plants in Beijing Region	BAI Li-ping, QI Hong-tao, FU Ya-ping, <i>et al.</i> (4648)
Polychlorinated Biphenyls and Their Methylsulfonyl Metabolites in Fish from an Electronic Waste Recycling Site in South China: Tissue Distribution and Human Dietary Exposure	TANG Bin, LUO Xiao-jun, ZENG Yan-hong, <i>et al.</i> (4655)
Residues and Health Risk Assessment of HCHs, DDTs and Heavy Metals in Water and <i>Tilapia</i> s from Fish Ponds of Guangdong	XIE Wen-ping, ZHU Xin-ping, ZHENG Guang-ming, <i>et al.</i> (4663)
Concentration and Distribution Characteristics of Estrogen in Aquatic Organism from Chongming Island	GENG Jing-jing, YE Ai-li, YANG Yi, <i>et al.</i> (4671)
Photocatalytic Degradation of Acetamiprid by TiO ₂ and Xe Lamp: Kinetics and Degradation Intermediates	ZHOU Wen-chang, YANG Hai, HU Zhi-bin, <i>et al.</i> (4678)
Effects of Nitrogen Addition on Available Nitrogen Content and Acidification in Cold-temperate Coniferous Forest Soil in the Growing Season	CHEN Gao-qi, FU Wa-li, LUO Ya-chen, <i>et al.</i> (4686)
Impact of Land Use Type on Stability and Organic Carbon of Soil Aggregates in Jinyun Mountain	LI Jian-lin, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (4695)
Investigation and Canonical Correspondence Analysis of Salinity Contents in Secondary Salinization Greenhouse Soils in Shanghai Suburb	TANG Dong, MAO Liang, ZHI Yue-e, <i>et al.</i> (4705)
Spatial Distribution Prediction of Surface Soil Pb in a Battery Contaminated Site	LIU Geng, NIU Jun-jie, ZHANG Chao, <i>et al.</i> (4712)
Immobilization Remediation of Cd and Pb Contaminated Soil: Remediation Potential and Soil Environmental Quality	SUN Yue-bing, WANG Peng-chao, XU Ying-ming, <i>et al.</i> (4720)
Rules and Impact Factors of Greenhouse Gases Emission in the Saline-Alkali Paddy Fields in Different Years	TANG Jie, FANG Tian-ru, HOU Ke-yi, <i>et al.</i> (4727)
Adsorption of Cd(II) Varies with Biochars Derived at Different Pyrolysis Temperatures	WANG Zhen-yu, LIU Guo-cheng, Monica Xing, <i>et al.</i> (4735)
Poisoning Effect of Ca Depositing Over Mn-Ce/TiO ₂ Catalyst for Low-temperature Selective Catalytic Reduction of NO by NH ₃	ZHOU Ai-yi, MAO Hua-feng, SHENG Zhong-yi, <i>et al.</i> (4745)
A Comparative Study on Domestic and Foreign Emission Standards of Air Pollutants for Cement Industry	JIANG Mei, LI Xiao-qian, JI Liang, <i>et al.</i> (4752)
Revision Process and Thinking of Emission Standard of Air Pollutants for Cement Industry	JIANG Mei, LI Xiao-qian, JI Liang, <i>et al.</i> (4759)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2014年12月15日 第35卷 第12期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 12 Dec. 15, 2014

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行