

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第2期

Vol.37 No.2

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

编者按	(403)
我国化学品的风险评价及风险管理	王铁宇,周云桥,李奇峰,吕永龙 (404)
土地利用回归模型在大气污染时空分异研究中的应用	吴健生,谢舞丹,李嘉诚 (413)
中国 2000 ~ 2010 年生态足迹变化特征及影响因素	黄宝荣,崔书红,李颖明 (420)
关中地区冬季 PM _{2.5} 中碳气溶胶的污染特征及来源解析	田鹏山,曹军骥,韩永明,张宁宁,张蓉,刘随心 (427)
利用 SPAMS 研究南宁市冬季单颗粒气溶胶化学成分	刘慧琳,宋红军,陈志明,黄炯丽,杨俊超,毛敬英,李宏姣,梁桂云,莫招育 (434)
南京夏季市区 VOCs 特征及 O ₃ 生成潜势的相关性分析	杨笑笑,汤莉莉,张运江,母应峰,王鸣,陈文泰,周宏仓,花艳,江蓉馨 (443)
北京城区气传花粉季节特征及与气象条件关系	孟龄,王效科,欧阳志云,任玉芬,王巧环 (452)
重庆市垃圾焚烧厂汞的分布特征与大气汞排放因子研究	段振亚,苏海涛,王凤阳,张磊,王书肖,余斌 (459)
三峡库区腹地大气微量金属干湿沉降特征	张六一,刘源,乔保清,付川,王欢博,黄怡民,杨复沫 (466)
长沙近地面水汽中稳定同位素的监测与分析	谢宇龙,章新平,姚天次,黄煌 (475)
青藏高原内陆典型冰川区“冰川-径流”汞传输过程	孙学军,王康,郭军明,康世昌,张国帅,黄杰,丛志远,张强弓 (482)
西藏湖泊沉积物重金属元素特征及生态风险评估	郭泌汐,刘勇勤,张凡,侯居峙,张宏波 (490)
坦噶尼喀湖东北部入湖河流沉积物重金属分布特征与生态风险评价	余成,陈爽,张路 (499)
近百年来新疆博斯腾湖多环芳烃的组成及变化特征	沈贝贝,吴敬禄,赵中华,曾海鳌,金苗 (507)
舟山青浜岛不同环境介质中 PAHs 的分布特征	郑煌,邢新丽,顾延生,桂福坤,祁士华,黄焕芳 (513)
模拟排水沟渠非点源溶质氮迁移实验研究	李强坤,宋常吉,胡亚伟,彭聪,马强,姜正曦,琚艺萌 (520)
中田河流域景观异质性对水体总氮浓度影响研究	王晶萍,李兆富,刘红玉,王刚,辛强 (527)
江西香溪流域干湿季交替下底泥氮释放机制及其对流域氮输出的贡献	韩宁,郝卓,徐亚娟,高扬,于贵瑞 (534)
巢湖水体氮磷营养盐时空分布特征	奚姗姗,周春财,刘桂建,吴蕾,王培华 (542)
合肥城郊典型农田溪流生态系统沉积物磷形态及释放风险分析	裴婷婷,李如忠,高苏蒂,罗月颖 (548)
桑沟湾表层沉积物性质及对磷的吸附特征	朱佳美,曹晓燕,刘素美,王丽莎,杨桂朋,葛成凤,路敏 (558)
苏州市古城区降雨径流颗粒物粒径分布及污染物赋存形态	李淮,吴玮,田永静,黄天寅 (565)
洪泽湖有毒和无毒微囊藻丰度及其与环境因子之间的相关分析	李大命,张彤晴,唐晟凯,段翠兰,杨俊虎,穆欢,刘小维 (573)
三峡库区消落带水体 CDOM 中电荷转移配合物对其紫外-可见吸收光谱的影响	江韬,梁俭,张慕雪,王定勇,魏世强,卢松 (580)
pH 对高锰酸钾氧化降解苯胺类化合物动力学的影响	王辉,孙波,关小红 (588)
EDTA 对 Pd/Fe 体系还原脱氯 2,4-D 的影响	周红艺,聂亚中,陈勇,雷双健 (595)
镍铝层状氧化物薄膜电极的制备及其除盐性能	王婷,朱春山,胡承志 (602)
微生物对砷的氧化还原竞争	杨婷婷,柏耀辉,梁金松,霍旻,王明星,袁林江 (609)
处理水产养殖污水潜流湿地中的厌氧氨氧化菌群特征	曾宪磊,刘兴国,吴宗凡,时旭,陆诗敏 (615)
污水回用中主要病原菌解析及其紫外消毒效应	景明,王磊 (622)
异养硝化-好氧反硝化菌 <i>Burkholderia</i> sp. YX02 强化连续流反应器中微生物群落结构解析	邵基伦,曹刚,李紫惠,黄郑郑,罗恺,莫测辉 (630)
基于新一代测序技术的 A ² O 与 BIOLAK 活性污泥宏基因组比较分析	田美,刘汉湖,申欣 (638)
1 株海洋异养硝化-好氧反硝化菌的分离鉴定及其脱氮特性	孙庆花,于德爽,张培玉,林学政,李津 (647)
纳米 Ni/Fe 用于去除染料生产废水二级生物处理出水中 AOX 和色度的研究	舒小铭,徐灿灿,刘锐,赵远,陈吕军 (655)
3BER-S 工艺用于再生水深度脱氮同步去除 PAEs 的可行性	徐鹏程,郝瑞霞,张娅,王冬月,钟丽燕,徐浩丹 (662)
合成时间对钛酸盐纳米材料的影响及其吸附水中铅的性能研究	范功端,陈丽茹,林茹晶,林茜,苏昭越,林修咏 (668)
芦苇秸秆生物炭对水中菲和 1,1-二氯乙烯的吸附特性	吴晴雯,孟梁,张志豪,罗启仕,杨洁 (680)
芦苇基和污泥基生物炭对水体中诺氟沙星的吸附性能	张涵瑜,王兆炜,高俊红,朱俊民,谢超然,谢晓芸 (689)
季节性温度升高对落干期消落带土壤氮矿化影响	林俊杰,张帅,刘丹,周斌,肖晓君,马慧燕,于志国 (697)
增温及秸秆施用对冬小麦田土壤呼吸和酶活性的影响	陈书涛,桑琳,张旭,胡正华 (703)
基于 GIS 的银川市不同功能区土壤重金属污染评价及分布特征	王幼奇,白一茹,王建军 (710)
不同产地硅藻土原位控制土壤镉污染差异效应与机制	朱健,王平,林艳,雷明婧,陈仰 (717)
紫色土对邻苯二甲酸二甲酯的淋溶吸持特征及影响因素	王强,宋娇艳,曾微,王法 (726)
几种修复措施对 Cd 淋失及土壤剖面运移影响	刘孝利,曾昭霞,铁柏清,陈求稳,魏祥东 (734)
河北邯郸钢铁冶炼区周边麦田土和小麦籽粒的多环芳烃含量及其组分谱特征	吴迪,汪宜龙,刘伟健,陈源琛,付晓芳,陶谢,刘文新 (740)
湿生环境中丛枝菌根 (AM) 对香蒲耐 Cd 胁迫的影响	罗鹏程,李航,王曙光 (750)
溴酸盐对水生生物的急性毒性效应	王执伟,刘冬梅,张文娟,崔福义 (756)
自组装哑铃状 Fe ₃ O ₄ 微/纳米材料对十溴联苯的热催化降解	黄鑫辰,宗刚,刘烨煌,芦会杰,李倩倩,李宾克,赵彦辉,苏贵金 (765)
盐度对准好氧矿化垃圾生物反应器渗滤液处理及 N ₂ O 产生的影响	李卫华,孙英杰,刘子梁,马强,杨强 (775)
污泥直接干化尾气中恶臭污染物质重要性评价:以指标权重评分法为例	丁文杰,陈文和,邓明佳,罗辉,李琳,刘俊新 (782)
《环境科学》征订启事 (557) 《环境科学》征稿简则 (594) 信息 (419,442,781)	

洪泽湖有毒和无毒微囊藻丰度及其与环境因子之间的相关分析

李大命¹, 张彤晴¹, 唐晟凯¹, 段翠兰², 杨俊虎³, 穆欢³, 刘小维¹

(1. 江苏省淡水水产研究所, 南京 210017; 2. 江苏省渔业技术推广中心, 南京 210036; 3. 江苏省洪泽湖渔业管理委员会办公室, 淮安 223300)

摘要: 为了解洪泽湖有毒和无毒微囊藻丰度及其空间分布, 于 2014 年 8 月对洪泽湖 30 个采样点水体的营养盐浓度和 Calson 富营养化指数 (trophic state index, TSI) 进行研究, 同时采用实时荧光定量 PCR 技术测定了有毒和无毒微囊藻丰度。结果表明, 洪泽湖水体的总氮和总磷浓度平均值分别为 $1.63 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.11 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 富营养化指数在 58.1 ~ 73.6 之间, 洪泽湖水质呈富营养化状态; 有毒微囊藻在洪泽湖广泛分布, 其丰度在 $1.13 \times 10^4 \sim 3.51 \times 10^6 \text{ copies} \cdot \text{mL}^{-1}$ 之间, 总微囊藻丰度在 $1.06 \times 10^5 \sim 1.10 \times 10^7 \text{ copies} \cdot \text{mL}^{-1}$ 之间, 有毒微囊藻占总微囊藻的比例在 8.5% ~ 38.5% 之间, 平均值为 23.6%, 有毒微囊藻丰度及其比例均呈现出明显的空间差异性; 相关分析结果显示, 总微囊藻、有毒微囊藻和有毒微囊藻所占比例三者之间呈极显著正相关性 ($P < 0.01$), 总微囊藻和有毒微囊藻丰度与叶绿素 a 浓度和 TSI 有极显著正相关性 ($P < 0.01$), 与透明度有极显著负相关性 ($P < 0.01$), 有毒微囊藻所占比例与叶绿素 a、总氮、总磷和 TSI 有极显著正相关性 ($P < 0.01$), 与 TN/TP 和透明度有极显著负相关 ($P < 0.01$)。因此, 削减洪泽湖总氮、总磷浓度一方面可以降低水体富营养化水平, 另一方面有利于抑制有毒微囊藻对无毒微囊藻的竞争优势。

关键词: 湖泊富营养化; 蓝藻水华; 微囊藻; 荧光定量 PCR; 洪泽湖

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)02-0573-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.02.023

Abundance of Toxic and Non-toxic *Microcystis* sp. in Lake Hongze and Its Correlation with Environmental Factors

LI Da-ming¹, ZHANG Tong-qing¹, TANG Sheng-kai¹, DUAN Cui-lan², YANG Jun-hu³, MU Huan³, LIU Xiao-wei¹

(1. Freshwater Fisheries Research Institute of Jiangsu Province, Nanjing 210017, China; 2. Jiangsu Provincial Fishery Technical Extending Center, Nanjing 210036, China; 3. Hongze Lake Fisheries Administration Committee Office of Jiangsu Province, Huai'an 223300, China)

Abstract: In the present study, the eutrophic level of 30 water samples collected from Lake Hongze in August 2014 were analyzed, and the abundance of toxic and non-toxic *Microcystis* sp., together with their spatial distribution, was investigated by quantitative real-time PCR techniques. The results showed that the average concentrations of total nitrogen and total phosphorus were 1.63 and $0.11 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, respectively. The trophic state index (TSI) ranged from 58.1 to 73.6, and the water quality was in the state of eutrophication based on TSI. Toxic *Microcystis* was widely distributed in Lake Hongze, and its abundance varied sharply, from 1.13×10^4 to $3.51 \times 10^6 \text{ copies} \cdot \text{mL}^{-1}$, and the abundance of total *Microcystis* ranged from 1.06×10^5 to $1.10 \times 10^7 \text{ copies} \cdot \text{mL}^{-1}$, meanwhile, the proportion of toxic *Microcystis* in the total *Microcystis* ranged from 8.5% to 38.5%, with the average value of 23.6%. Correlation analysis indicated that there was a significant positive correlation among total *Microcystis*, toxic *Microcystis* and the toxic proportion ($P < 0.01$). The abundance of total and toxic *Microcystis* was significantly positively correlated to chlorophyll a (Chl-a) concentrations and TSI ($P < 0.01$), but was negatively correlated to transparency (SD) ($P < 0.01$). The ratio of toxic *Microcystis* to total *Microcystis* was significantly positively correlated to Chl-a, TN, TP and TSI ($P < 0.01$), but significantly negatively correlated to the ratio of TN to TP and SD ($P < 0.01$). Therefore, reducing total nitrogen and phosphorus concentrations could not only lower the eutrophication level of Lake Hongze, but also inhibit the competition advantage of the toxic *Microcystis* over non-toxic *Microcystis*.

Key words: lake eutrophication; cyanobacterial bloom; *Microcystis*; quantitative real-time PCR; Lake Hongze

近几十年来,随着水体富营养化加剧,蓝藻水华在淡水生态系统中频繁发生,给水生态系统安全和人类健康产生了严重危害,已成为全球关注的重大水环境问题^[1,2]。微囊藻 (*Microcystis*) 是形成蓝藻水华最常见的优势种类,微囊藻水华分布广泛,发生面

收稿日期: 2015-08-11; 修订日期: 2015-09-20

基金项目: 江苏省青年科学基金项目 (BK2012488); 江苏省海洋与渔业局三新工程项目 (Y2015-18); 江苏省 333 工程科研项目 (BRA2014319)

作者简介: 李大命 (1981 ~), 男, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为湖泊生态学, E-mail: ldm8212@126.com

积大,持续时间长,且能产生多种具有肝毒性效应的微囊藻毒素(microcystin, MC)。因此,加强有毒微囊藻水华毒素检测及其预警具有重要意义。

许多研究表明,微囊藻水华中有毒微囊藻和无毒微囊藻细胞共同存在,有毒微囊藻丰度及其所占比决定了微囊藻水华毒性大小,阐明有毒和无毒微囊藻丰度及其与环境因子之间的关系对于认识微囊藻水华毒性及其防控具有重要意义^[3,4]。有毒微囊藻和无毒微囊藻细胞形态特征一致,利用显微镜检测无法将两者鉴别开来。有毒微囊藻基因组 DNA 中含有微囊藻毒素合成酶基因家族(microcystin synthetase gene, *mcy*)^[5],对微囊藻毒素产生进行调控,而无毒微囊藻细胞则不含有 *mcy* 基因^[6]。因此,针对 *mcy* 基因,采用荧光定量 PCR 技术能快速、准确鉴别有毒和无毒微囊藻细胞,并进行定量化研究^[6]。

洪泽湖是中国第四大淡水湖,近 20 多年来,洪泽湖水质进入富营养化状态,并呈逐渐加重趋势^[7,8],蓝藻水华在洪泽湖频繁出现,微囊藻是蓝藻水华的优势种群^[9]。李大命等^[10]采用 PCR 扩增技术在洪泽湖水体中检测出有毒微囊藻,但没有对其丰度进行定量化研究。为此,本研究采用荧光定量 PCR 分析技术,测定洪泽湖有毒和无毒微囊藻丰度及空间分布,并分析与环境因子之间的关系,以期为洪泽湖微囊藻水华危害评价及其防控提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 水样采集

如图 1 所示,本研究在洪泽湖设置 30 个采样点(H1~H30),基本覆盖了洪泽湖大部分湖区。采样时间为 2014 年 8 月 19~20 日,采用有机玻璃采水器采集表层水样(0.5 m),将水样混合均匀,装入塑料桶中,带回实验室进行处理。

1.2 理化因子测定

采用 YSI 6600 原位测定水温(Water temperature, WT)。赛氏透明度盘测定透明度(SD)。水体的总氮(total nitrogen, TN)和总磷(total phosphorus, TP)浓度采用文献^[11]中方法。溶解性氮磷硝态氮(NO_3^-)、铵态氮(NH_4^+)、亚硝态氮(NO_2^-)和正磷酸盐(PO_4^{3-})浓度采用 Skalar 流动分析仪测定。叶绿素 a(Chl-a)采用 90% 的乙醇萃取,分光光度法测定。根据文献^[12]计算 Chl-a、TP、SD 的 Carlson 富营养化指数(TSI),分别用 TSI(Chl-

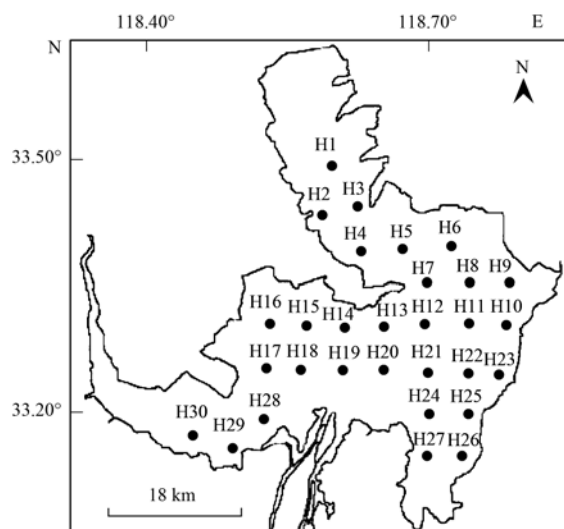


图 1 采样点在洪泽湖的分布示意

Fig. 1 Distribution of sampling locations in the Lake Hongze

a)、TSI(TP)和 TSI(SD)表示,取三者平均值表示水体的综合富营养化指数。

1.3 藻类基因组 DNA 提取

采用 GF/F 滤膜(Whatman)过滤收集水样中的藻细胞,藻类基因 DNA 的提取方法参照文献^[13]进行。DNA 溶于 TE 溶液, -20°C 保存备用。

1.4 实时荧光定量 PCR

利用实时荧光定量 PCR 技术测定有毒微囊藻和总微囊藻丰度。分别采用 *mcyD* 和 *PC-IGS* 基因表示有毒微囊藻和总微囊藻。PCR 引物如表 1 所示。以室内纯培养的铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa* 7806)基因组 DNA 作为定量 PCR 反应的标准物,设置 6 个梯度浓度($8.27 \times 10^6 \sim 8.27 \times 10^1 \text{ copies} \cdot \mu\text{L}^{-1}$),建立基因组拷贝数的对数值与循环阈值之间的标准曲线。定量 PCR 反应体系为 $25 \mu\text{L}$, SYBR green I 作为荧光探针,其中有 $12.5 \mu\text{L}$ $2 \times \text{SYBR Green I}$ 定量 PCR 混合液(Takara), $0.5 \mu\text{L}$ 正向、反向引物($10 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$), $1 \mu\text{L}$ 标准 DNA 或 $2 \mu\text{L}$ 样品 DNA,其余体系用超纯水补足。定量 PCR 反应在四通道荧光定量 PCR 仪器(Mastecycler ep realplex4, Eppendorf, Germany)上进行,反应程序与文献^[14]一致。定量 PCR 反应结束后进行 PCR 产物溶解曲线分析,并通过系统自带软件分析获得 *mcyD* 和 *PC-IGS* 基因定量 PCR 扩增效率(amplification efficiency, e)和标准曲线方程。

1.5 数据分析

采用 SPSS 16.0 软件对变量分布进行正态性检

验,对不满足正态分布的变量进行转化. 将总微囊藻、有毒微囊藻及有毒微囊藻比例与环境因子进行 Pearson 相关性分析及显著性检验. 采用 Origin 8. 5 软件对数据进行作图.

表 1 定量 PCR 反应引物

Table 1 Quantitative PCR primers used in this study		
基因	引物	序列
<i>mcyD</i> ^[15]	mcyD-F	5'- GGTTGCGCTGGTCAAAGTAA -3'
	mcyD-R	5'-CCTCGCTAAAGAAGGGTTGA -3'
<i>PC-IGS</i> ^[3]	188F	5'-GCTACTTCGACCGCGCC-3'
	254R	5'- TCCTACGGTTTAATTGAGACTAGCC-3'

2 结果与分析

2.1 洪泽湖水体理化因子特征

洪泽湖水体的理化因子如图 2 ~ 5 所示. 从中

可见,采样点叶绿素 a 浓度范围为 3. 45 ~ 35. 71 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,平均值为 13. 53 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$;透明度在 20 ~ 45 cm 之间波动,平均值为 30. 9 cm;水温变化幅度较小,平均值为 27. 4 $^{\circ}\text{C}$;总氮和总磷浓度范围分别为 0. 85 ~ 3. 59 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 0. 035 ~ 0. 27 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,平均值分别为 1. 63 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 0. 11 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$;铵态氮、硝态氮、亚硝态氮和正磷酸盐浓度范围分别为 0. 016 ~ 0. 091 1 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、0. 12 ~ 1. 41 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、7. 10 ~ 25. 12 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 1. 20 ~ 109. 75 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,平均值分别为 0. 052 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、0. 74 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、11. 50 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 43. 01 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$;采样点水体的富营养化指数在 58. 1 ~ 73. 6 之间波动,平均值为 67. 3.

2.2 微囊藻种群丰度变化

图 6 是铜绿微囊藻 *PC-IGS* 和 *mcyD* 基因的定

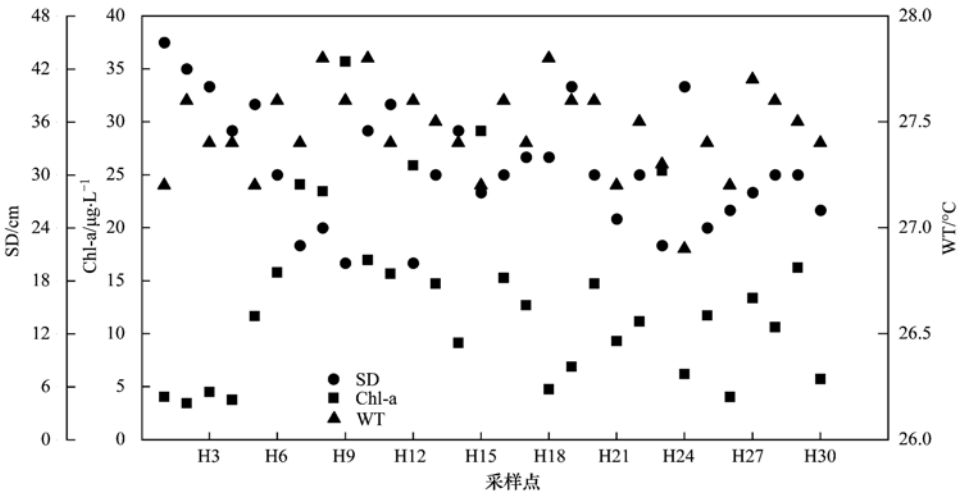


图 2 洪泽湖水体的叶绿素 a 浓度、透明度和水温

Fig. 2 Chlorophylla concentrations, transparency and water temperature of water body of Lake Hongze

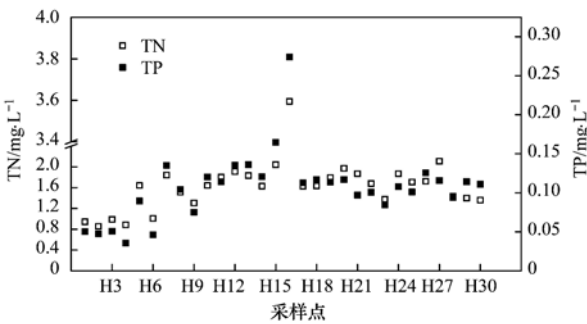


图 3 洪泽湖水体的总氮和总磷浓度

Fig. 3 Total nitrogen and total phosphorus concentrations in water body of Lake Hongze

量 PCR 反应标准曲线. 从中可见,基因型丰度的对数值与定量 PCR 反应循环阈值之间呈显著线性相关,并建立了两者的回归方程. 两标准曲线的决定系数 R^2 都大于 0. 99,说明标准曲线线性较好,结果可信度

较高. 其中 *PC-IGS* 基因定量 PCR 反应的扩增效率 (e) 为 0. 92, *mcyD* 基因的扩增效率为 0. 89,均满足定量 PCR 反应实验要求. 溶解曲线分析结果显示,PCR 产物为目的基因产物,无非特异性产物产生.

如图 7 所示,洪泽湖水体中总微囊藻和有毒微囊藻丰度及有毒微囊藻所占比例变化. 从中可见,总微囊藻丰度在 $1. 06 \times 10^5 \sim 1. 10 \times 10^7 \text{ copies}\cdot\text{mL}^{-1}$ 之间,平均值为 $2. 55 \times 10^6 \text{ copies}\cdot\text{mL}^{-1}$;有毒微囊藻丰度在 $1. 13 \times 10^4 \sim 3. 51 \times 10^6 \text{ copies}\cdot\text{mL}^{-1}$ 之间,平均值为 $7. 73 \times 10^5 \text{ copies}\cdot\text{mL}^{-1}$,总微囊藻和有毒微囊藻丰度呈现出较大的空间变化. 有毒微囊藻所占比例在 8. 5% ~ 38. 5% 之间变化,平均值为 23. 6%.

2.3 相关分析

表 2 所示为总微囊藻和有毒微囊藻丰度与环境

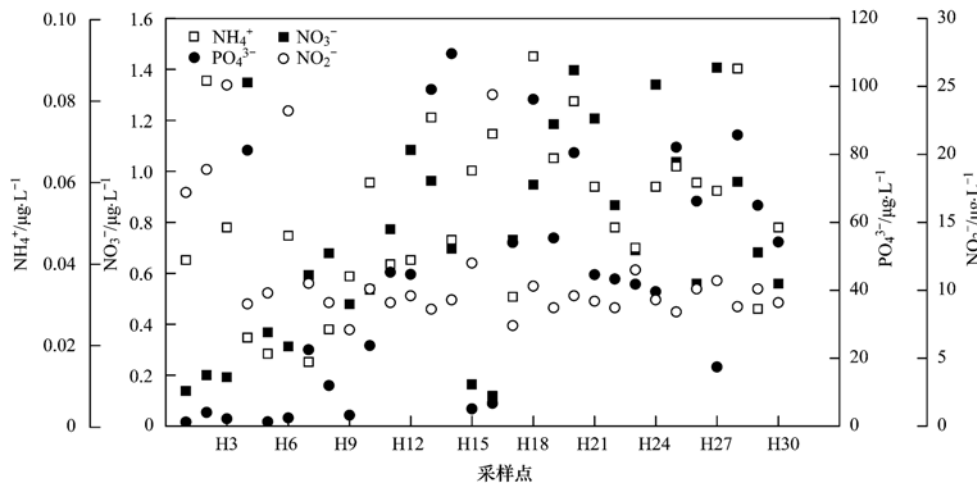


图 4 洪泽湖水体的溶解性无机氮磷浓度

Fig. 4 Dissolved inorganic nitrogen and phosphorus concentrations in water body of Lake Hongze

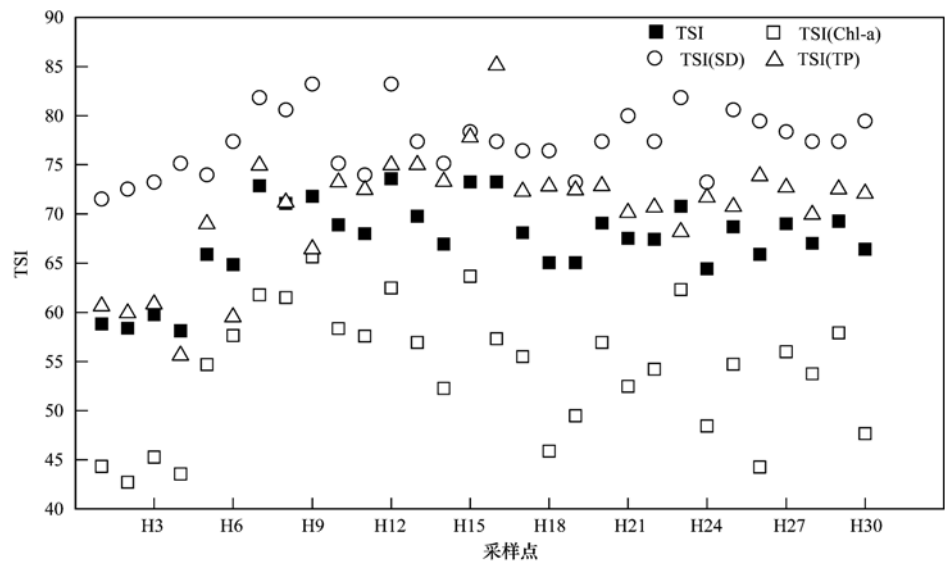


图 5 洪泽湖水体的富营养化指数

Fig. 5 Trophic state index of water body in Lake Hongze

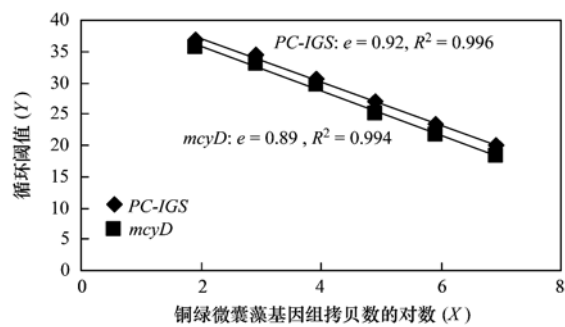


图 6 *PC-IGS* 和 *mcyD* 基因定量 PCR 反应标准曲线

Fig. 6 Standard curves obtained by the real-time PCR assays of *PC-IGS* and *mcyD* genes

因子之间的相关系数及其显著性检验结果. 从中可见,总微囊藻、有毒微囊藻和有毒微囊藻比例之间

呈极显著正相关($P < 0.01$). 总微囊藻和有毒微囊藻丰度与叶绿素 a 浓度和 TSI 呈极显著正相关($P < 0.01$),与透明度呈极显著负相关($P < 0.01$). 有毒微囊藻比例与叶绿素 a、总氮、总磷和 TSI 呈极显著正相关($P < 0.01$),与 TN/TP 和 SD 呈极显著负相关($P < 0.01$).

3 讨论

湖泊富营养化的评价有多种方法,主要有特征法、参数法、生物指数评价法、磷收支模型法、营养状态指数法和数学分析法等六大类型^[16]. 其中营养状态指数法是淡水环境质量评价中的主要方法之一,该方法综合多项富营养化指标,包括湖水透明度、藻类叶绿素 a 浓度以及湖水总磷浓度并将其转

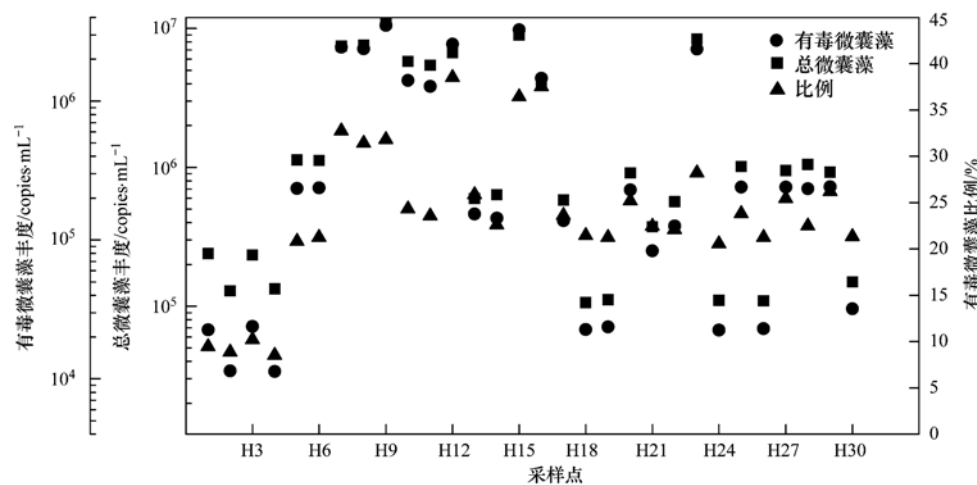


图7 微囊藻和产毒微囊藻种群丰度及产毒微囊藻所占比例

Fig. 7 Abundance of total and toxic *Microcystis* populations and the proportion of toxic *Microcystis* in Lake Hongze water body

表2 微囊藻丰度与环境因子之间的相关系数 (n = 14)

	Total <i>M</i>	Toxic <i>M</i>	Ratio	Chl-a	TN	TP	TN/TP	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	NO ₂ ⁻	PO ₄ ³⁻	WT	SD	TSI
Total <i>M</i>	1.00													
Toxic <i>M</i>	0.89 **	1.00												
Ratio	0.69 **	0.74 **	1.00											
Chl-a	0.82 **	0.82 **	0.81 **	1.00										
TN	0.17	0.22	0.68 **	0.23	1.00									
TP	0.24	0.30	0.73 **	0.27	0.94 **	1.00								
TN/TP	-0.27	-0.30	-0.61 **	-0.29	-0.47 **	-0.69 **	1.00							
NO ₃ ⁻	-0.27	-0.27	0.01	-0.14	0.11	-0.06	0.18	1.00						
NH ₄ ⁺	-0.31	-0.29	-0.07	-0.30	0.24	0.23	-0.19	0.15	1.00					
NO ₂ ⁻	-0.12	-0.09	-0.22	-0.19	0.00	0.01	0.26	-0.62 **	0.15	1.00				
PO ₄ ³⁻	-0.40	-0.40	-0.07	-0.31	0.02	0.07	-0.23	0.60 **	0.31	-0.54 **	1.00			
WT	0.16	0.14	0.21	0.20	0.05	0.10	-0.15	0.05	0.24	0.06	0.05	1.00		
SD	-0.54 **	-0.57 **	-0.72 **	-0.66 **	-0.26	-0.29	0.30	-0.16	0.14	0.33	-0.10	-0.20	1.00	
TSI	0.67 **	0.69 **	0.88 **	0.80 **	0.65 **	0.69 **	-0.63 **	0.06	-0.08	-0.31	0.00	0.20	-0.75 **	1.00

1) * 为 $P < 0.05$, ** 为 $P < 0.01$

化为营养状态指数(TSI)。该方法可对湖泊营养状态进行连续的数值化分级,有利于湖泊营养状态的定量研究提供了坚实的基础。从本研究结果可以得出,洪泽湖采样点水体的 TSI 在 58.1 ~ 73.6 之间,平均值为 67.3,这表明洪泽湖全湖水质呈富营养化状态。李为等^[8]采用修正的 TSI_m 法在 2010 年对洪泽湖四季的水体营养状况进行了综合评价,结果表明洪泽湖的 TSI_m 值均大于 70,其中夏季的 TSI_m 值最高,达 78.5,该研究结果表明洪泽湖 4 个季节的水质均呈富营养化状态。尽管采用了不同的富营养化指数评价方法,但得出的结论是一致的。一般认为,当水体中 TN、TP 含量分别达到 0.20 mg·L⁻¹和 0.02 mg·L⁻¹以上时,水体发生富营养化的风险较高。本研究中洪泽湖水体的 TN (1.63

mg·L⁻¹)、TP (0.11 mg·L⁻¹) 浓度平均值远高于限制值,均达到富营养化水平。另外,Chl-a 浓度在 3.45 ~ 35.71 μg·L⁻¹之间,平均值为 13.53 μg·L⁻¹,在部分湖区出现了较大面积的微囊藻水华,均是洪泽湖水水质富营养化状态的特征表现。

近年来,实时荧光定量 PCR 技术被广泛用于有毒蓝藻水华的动态监测,与传统的显微镜检测方法相比,该技术具有灵敏度高、特异性高、重复性好、定量准确等优点^[17,18]。在实际应用中,荧光定量 PCR 反应的扩增效率在 80% ~ 115% 之间、标准曲线方程的决定系数(R^2)大于 0.95,才能满足实验要求^[18]。本研究中建立了基于 SYBR Green I 荧光燃料的 *PC-IGS* 和 *mcyD* 基因的实时荧光定量 PCR 检测方法(图 6),用于测定洪泽湖水体中总微囊藻及

有毒囊藻丰度. 从图 6 可以得出, $PC-IGS$ ($Y = -3.48X + 44.11$), 式中, X 表示基因拷贝数的对数值, Y 表示循环阈值, 下同) 和 $mcyD$ ($Y = -3.58X + 43.01$) 基因定量 PCR 反应的扩增效率分别为 89% 和 92%, 标准曲线方程的决定系数 R^2 分别为 0.994 和 0.996, 溶解曲线分析结果显示 PCR 产物均为目的基因, 表明了荧光定量 PCR 实验结果具有准确性和可信性.

基于实时荧光定量 PCR 分析结果得出, 所有采样点水体中均检测出微囊藻及有毒微囊藻, 其丰度分别在 $1.06 \times 10^5 \sim 1.10 \times 10^7$ copies·mL⁻¹ 和 $1.13 \times 10^4 \sim 3.51 \times 10^6$ copies·mL⁻¹ 之间, 这说明微囊藻及有毒微囊藻在洪泽湖有分布广泛, 且其丰度在空间分布上有较大的差异性. 相关分析结果表明, 微囊藻、有毒微囊藻和叶绿素 a 三者之间有显著正相关性, 且均与 TSI 有极显著正相关性 ($P < 0.01$), 说明洪泽湖水体中总微囊藻与有毒微囊藻丰度变化趋势一致, 两者受相同的环境因子控制. 在美国 Erie 湖和韩国 Daechung 水库总微囊藻与有毒微囊藻丰度密切相关, 且均与总磷浓度有极显著正相关性 ($P < 0.01$)^[19,20]. 在新加坡热带水库 Kranji 中, 总氮和总磷与微囊藻和有毒微囊藻丰度有显著正相关性^[21]. 在本研究中, 总微囊藻和有毒微囊藻丰度与总氮和总磷浓度呈正相关性, 但均不显著 ($P > 0.05$), 这表明洪泽湖水体中氮、磷不是微囊藻及有毒微囊藻的限制因子. 尽管透明度 SD 与微囊藻及有毒微囊藻丰度呈极显著负相关性 ($P < 0.01$), 这仅反映了微囊藻水华的结果, 而非微囊藻水华发生的原因^[20]. 除营养盐因素外, 湖泊水文水动力和气象条件也是影响微囊藻生长和丰度的重要因素^[22]. 因此, 微囊藻及有毒微囊藻丰度及其分布是多种因素共同作用的结果.

总体来说, 自然水体中有毒和无毒微囊藻共存是普遍存在的现象, 但是决定其丰度及有毒微囊藻比例的环境因子具有多样性. 研究发现, 日本的 Mikata 湖有毒微囊藻比例与硝态氮浓度有显著正相关性, 而与温度和磷酸盐浓度无显著相关性^[23]; 在韩国 Daechung 水库, 总磷是影响总微囊藻和有毒微囊藻丰度最重要的环境因子, 但与有毒微囊藻比例无显著相关性, 水温是决定有毒微囊藻比例的关键因子^[20]. 在美国 Erie 湖, 相关分析显示总磷浓度与总微囊藻及有毒微囊藻丰度有极显著正相关性, 有毒微囊藻比例随富营养化水平升高而增加^[19]. 在太湖, 有毒微囊藻比例与总磷和磷酸盐浓度有显著

正相关性, 与温度有极显著正相关性^[24]. 除理化因子外, 一些生物因子(浮游动物、病毒)也能对有毒微囊藻丰度及其比例产生显著影响^[25,26]. 另外, 微囊藻属的不同微囊藻种类, 其有毒微囊藻比例也各不相同, 比如, 铜绿微囊藻种群中的有毒微囊藻比例最高, 而惠氏微囊藻则为无毒株^[27]. 因此, 水体中微囊藻群落的基因型组成及其丰度动态变化由环境因子和微囊藻群落特征共同决定^[20].

在本研究中, 洪泽湖水体中有毒微囊藻占总微囊藻的比例在 8.5% ~ 38.5% 之间, 平均值为 23.6%, 这表明无毒微囊藻相对有毒微囊藻而言占有优势, 与已有报道的结果具有一致性. 例如, 日本 Mikata 湖, 有毒微囊藻所占比例在 0.5% ~ 3.5% 之间^[23]; 德国 Wannsee 湖, 有毒微囊藻与总微囊藻的比值在 1% ~ 38% 之间, 平均值为 11.4%^[3]; 中国太湖, 有毒微囊藻比例在 4.4% ~ 64.3% 之间^[24]; 美国 Erie 湖, 有毒微囊藻比例在 0 ~ 48% 之间^[19]; 韩国 Daechung 水库, 有毒微囊藻比例在 7.6% ~ 56.6% 之间, 平均值为 33.0%^[20]; 而新加坡 Daechung 水库, 有毒微囊藻比例平均值为 55.92%, 在微囊藻群落中占有优势^[21]. 有研究者提出, 在正常条件下无毒微囊藻具有某些生态优势, 在与有毒微囊藻竞争中占有竞争优势^[20]. 相关分析结果表明, 有毒微囊藻比例与总氮、总磷、叶绿素 a 和 TSI 呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 而与 TN/TP 和 SD 呈极显著负相关 ($P < 0.01$), 这说明总氮、总磷、叶绿素 a 浓度及水体富营养化水平对有毒微囊藻和无毒微囊藻竞争有重要影响, 随氮、磷浓度增加, 有毒微囊藻竞争优势增强. 室内和野外实验结果表明, 随氮磷浓度增加, 有毒微囊藻生长速率超过无毒微囊藻, 提高了有毒微囊藻对无毒微囊藻的竞争力, 有毒微囊藻占总微囊藻的比例也随之增加^[28,29]. 因此, 削减洪泽湖氮、磷浓度一方面有利于降低水体富营养化水平, 另一方面有利于降低有毒微囊藻对无毒微囊藻的竞争力, 对控制洪泽湖富营养化和降低微囊藻水华毒性具有重要意义.

4 结论

(1) 基于 Chl-a、TP 和 SD 的洪泽湖 Carlson 富营养化指数 TSI 在 58.1 ~ 73.6 之间, 平均值为 67.3, 表明洪泽湖水质处于富营养化状态.

(2) 微囊藻及有毒微囊藻在洪泽湖广泛分布, 其丰度分别在 $1.06 \times 10^5 \sim 1.10 \times 10^7$ copies·mL⁻¹ 和 $1.13 \times 10^4 \sim 3.51 \times 10^6$ copies·mL⁻¹ 之间. 有毒

微囊藻比例在产毒微囊藻种群所占比例在 8.5% ~ 38.5% 之间, 平均值为 23.6%, 呈现出较大的空间差异性。

(3) 洪泽湖水体中总微囊藻、有毒微囊藻和叶绿素 a 有极显著正相关性, 且均与 TSI 呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 与透明度呈极显著负相关 ($P < 0.01$)。总氮和总磷是决定有毒微囊藻比例的关键环境因子, 削减氮、磷对于降低洪泽湖富营养化水平, 控制微囊藻水华具有重要作用。

参考文献:

- [1] Sivonen K, Jones G. Cyanobacterial toxins [A]. In: Bartram J, Chorus I (Eds.). Toxic Cyanobacteria in Water: A Guide to their Public Health Consequences, Monitoring and Management [M]. UK: Spon Press, 1999. 41-111.
- [2] 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.
- [3] Kurmayer R, Kutzenberger T. Application of real-time PCR for quantification of microcystin genotypes in a population of the toxic cyanobacterium *Microcystis* sp. [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2003, **69**(11): 6723-6730.
- [4] 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.
- [5] Pearson L A, Neilan B A. The molecular genetics of cyanobacterial toxicity as a basis for monitoring water quality and public health risk [J]. Current Opinion in Biotechnology, 2008, **19**(3): 281-288.
- [6] Martins A, Vasconcelos V. Use of qPCR for the study of hepatotoxic cyanobacteria population dynamics [J]. Archives of Microbiology, 2011, **193**(9): 615-627.
- [7] 王兆群, 张宇红, 张咏, 等. 洪泽湖水质富营养化评价 [J]. 环境监控与预警, 2010, **2**(6): 31-35.
- [8] 李为, 都雪, 林明利, 等. 基于 PCA 和 SOM 网络的洪泽湖水质时空变化特征分析 [J]. 长江流域资源与环境, 2013, **22**(12): 1593-1601.
- [9] 杨广利, 韩爱民, 刘铁琨, 等. 洪泽湖富营养化与环境理化因子间的关系 [J]. 环境监测管理与技术, 2003, **15**(2): 17-20.
- [10] 李大命, 阳振, 于洋, 等. PCR 扩增法检测江苏省 5 大淡水湖泊产毒微囊藻的空间分布 [J]. 农业环境科学学报, 2012, **31**(11): 2215-2222.
- [11] 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. 88-285.
- [12] Carlson R E. A trophic state index for lakes [J]. Limnology and Oceanography, 1977, **22**(2): 361-369.
- [13] 李大命, 孔繁翔, 于洋, 等. 太湖蓝藻水华期间水体和底泥中产毒微囊藻与非产毒微囊藻种群丰度研究 [J]. 环境科学学报, 2011, **31**(2): 292-298.
- [14] Li D M, Yu Y, Yang Z, et al. The dynamics of toxic and nontoxic *Microcystis* during bloom in the large shallow lake, Lake Taihu, China [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2014, **186**(5): 3053-3062.
- [15] Rinta-Kanto J M, Ouellette A J A, Boyer G L, et al. Quantification of toxic *Microcystis* spp. during the 2003 and 2004 blooms in western Lake Erie using quantitative real-time PCR [J]. Environmental Science & Technology, 2005, **39**(11): 4198-4205.
- [16] 蔡庆华. 湖泊富营养化综合评价方法 [J]. 湖泊科学, 1997, **9**(1): 89-94.
- [17] 彭宇科, 岳冬梅, 武俊, 等. 应用 RT-qPCR 技术定量检测湖泊水体中蓝藻方法的比较 [J]. 微生物学通报, 2011, **38**(4): 460-467.
- [18] Zhang T, Fang H H P. Applications of real-time polymerase chain reaction for quantification of microorganisms in environmental samples [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2006, **70**(3): 281-289.
- [19] Rinta-Kanto J M, Konopko E A, Debruyne J M, et al. Lake Erie *Microcystis*: relationship between microcystin production, dynamics of genotypes and environmental parameters in a large lake [J]. Harmful Algae, 2009, **8**(5): 665-673.
- [20] Joung S H, Oh H M, Ko S R, et al. Correlations between environmental factors and toxic and non-toxic *Microcystis* dynamics during bloom in Daechung Reservoir, Korea [J]. Harmful Algae, 2011, **10**(2): 188-193.
- [21] Te S H, Gin K Y H. The dynamics of cyanobacteria and microcystin production in a tropical reservoir of Singapore [J]. Harmful Algae, 2011, **10**(3): 319-329.
- [22] 李芸, 吴祥云, 储昭升, 等. 洋河水库微囊藻空间分布特征及其影响因素分析 [J]. 环境科学研究, 2012, **25**(5): 501-505.
- [23] Yoshida M, Yoshida T, Takashima Y, et al. Dynamics of microcystin-producing and non-microcystin-producing *Microcystis* populations is correlated with nitrate concentration in a Japanese lake [J]. FEMS Microbiology Letters, 2007, **266**(1): 49-53.
- [24] 李大命, 叶琳琳, 于洋, 等. 太湖水华期间有毒和无毒微囊藻种群丰度的动态变化 [J]. 生态学报, 2012, **32**(22): 7109-7116.
- [25] Gobler C J, Davis T W, Coyne K J, et al. Interactive influences of nutrient loading, zooplankton grazing, and microcystin synthetase gene expression on cyanobacterial bloom dynamics in a eutrophic New York lake [J]. Harmful Algae, 2007, **6**(1): 119-133.
- [26] Yoshida M, Yoshida T, Kashima A, et al. Ecological dynamics of the Toxic Bloom-Forming Cyanobacterium *Microcystis aeruginosa* and its Cyanophages in Freshwater [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2008, **74**(10): 3269-3273.
- [27] Via-Ordorika L, Fastner J, Kurmayer R, et al. Distribution of microcystin-producing and non-microcystin-producing *Microcystis* sp. in European freshwater bodies: detection of microcystins and microcystin genes in individual colonies [J]. Systematic and Applied Microbiology, 2004, **27**(5): 592-602.
- [28] Vézic C, Rapala J, Vaitomaa J, et al. Effect of nitrogen and phosphorus on growth of toxic and nontoxic *Microcystis* strains and on intracellular microcystin concentration [J]. Microbial Ecology, 2002, **43**(4): 443-454.
- [29] Davis T W, Berry D L, Boyer G L, et al. The effects of temperature and nutrients on the growth and dynamics of toxic and non-toxic strains of *Microcystis* during cyanobacteria blooms [J]. Harmful Algae, 2009, **8**(5): 715-725.

CONTENTS

Editor's comment	(403)
Risk Assessment and Risk Management of Chemicals in China	WANG Tie-yu, ZHOU Yun-qiao, LI Qi-feng, <i>et al.</i> (404)
Application of Land-use Regression Models in Spatial-temporal Differentiation of Air Pollution	WU Jian-sheng, XIE Wu-dan, LI Jia-cheng (413)
Ecological Footprint Evolution Characteristics and Its Influencing Factors in China from 2000 to 2010	HUANG Bao-rong, CUI Shu-hong, LI Ying-ming (420)
Pollution Characteristics and Sources of Carbonaceous Aerosol in PM _{2.5} During Winter in Guanzhong Area	TIAN Peng-shan, CAO Jun-ji, HAN Yong-ming, <i>et al.</i> (427)
Chemical Composition of the Single Particle Aerosol in Winter in Nanning Using SPAMS	LIU Hui-lin, SONG Hong-jun, CHEN Zhi-ming, <i>et al.</i> (434)
Correlation Analysis Between Characteristics of VOCs and Ozone Formation Potential in Summer in Nanjing Urban District	YANG Xiao-xiao, TANG Li-li, ZHANG Yun-jiang, <i>et al.</i> (443)
Seasonal Dynamics of Airborne Pollens and Its Relationship with Meteorological Factors in Beijing Urban Area	MENG Ling, WANG Xiao-ke, OUYANG Zhi-yun, <i>et al.</i> (452)
Mercury Distribution Characteristics and Atmospheric Mercury Emission Factors of Typical Waste Incineration Plants in Chongqing	DUAN Zhen-ya, SU Hai-tao, WANG Feng-yang, <i>et al.</i> (459)
Characteristics of Atmospheric Dry and Wet Deposition of Trace Metals in the Hinterland of the Three Gorges Reservoir, China	ZHANG Liu-yi, LIU Yuan, QIAO Bao-qing, <i>et al.</i> (466)
Monitoring and Analysis of Stable Isotopes of the Near Surface Water Vapor in Changsha	XIE Yu-long, ZHANG Xin-ping, YAO Tian-ci, <i>et al.</i> (475)
Mercury Transport from Glacier to Runoff in Typical Inland Glacial Area in the Tibetan Plateau	SUN Xue-jun, WANG Kang, GUO Jun-ming, <i>et al.</i> (482)
Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Core Sediments from Lakes of Tibet	GUO Bi-xi, LIU Yong-qin, ZHANG Fan, <i>et al.</i> (490)
Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of Inflow Rivers to Northeastern Lake Tanganyika	YU Cheng, CHEN Shuang, ZHANG Lu (499)
Over One Hundred Year Sediment Record of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Lake Bosten, Xinjiang	SHEN Bei-bei, WU Jing-lu, ZHAO Zhong-hua, <i>et al.</i> (507)
Distribution Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Different Environmental Media from Qinghai Island, Zhoushan, China	ZHENG Huang, XING Xin-li, GU Yan-sheng, <i>et al.</i> (513)
Transformation of Non-point Source Soluble Nitrogen in Simulated Drainage Ditch	LI Qiang-kun, SONG Chang-ji, HU Ya-wei, <i>et al.</i> (520)
Influence of Landscape Heterogeneity on Total Nitrogen Concentration in Zhongtian River Watershed	WANG Jing-ping, LI Zhao-fu, LIU Hong-yu, <i>et al.</i> (527)
Nitrogen Release from Sediment Under Dry and Rainy Season Alternation and Its Contribution to N Export from Xiangxi Watershed in Jiangxi Province	HAN Ning, HAO Zhuo, XU Ya-juan, <i>et al.</i> (534)
Spatial and Temporal Distributions of Nitrogen and Phosphate in the Chaohu Lake	XI Shan-shan, ZHOU Chun-cai, LIU Gui-jian, <i>et al.</i> (542)
Phosphorus Fractions and Release Risk in Surface Sediments of an Agricultural Headwater Stream System in Hefei Suburban, China	PEI Ting-ting, LI Ru-zhong, GAO Su-di, <i>et al.</i> (548)
Surface Property and Sorption Characteristics of Phosphorus onto Surface Sediments in Sanggou Bay	ZHU Jia-mei, CAO Xiao-yan, LIU Su-mei, <i>et al.</i> (558)
Particle Size Distribution and Pollutant Speciation Analyses of Stormwater Runoff in the Ancient Town of Suzhou	LI Huai, WU Wei, TIAN Yong-jing, <i>et al.</i> (565)
Abundance of Toxic and Non-toxic <i>Microcystis</i> sp. in Lake Hongze and Its Correlation with Environmental Factors	LI Da-ming, ZHANG Tong-qing, TANG Sheng-kai, <i>et al.</i> (573)
Effect of Charge-Transfer Complex on Ultraviolet-Visible (UV-Vis) Absorption Property of Chromophoric Dissolved Organic Matter (CDOM) in Waters of Typical Water-Level Fluctuation Zones of the Three Gorges Reservoir Areas	JIANG Tao, LIANG Jian, ZHANG Mu-xue, <i>et al.</i> (580)
Influence of pH on Kinetics of Anilines Oxidation by Permanganate	WANG Hui, SUN Bo, GUAN Xiao-hong (588)
Effects of EDTA on the Reductive Dechlorination of 2,4-D by Pd/Fe	ZHOU Hong-yi, NIE Ya-zhong, CHEN Yong, <i>et al.</i> (595)
Preparation of NiAl-MMO Films Electrode and Its Capacitive Deionization Property	WANG Ting, ZHU Chun-shan, HU Cheng-zhi (602)
Competitive Microbial Oxidation and Reduction of Arsenic	YANG Ting-ting, BAI Yao-hui, LIANG Jin-song, <i>et al.</i> (609)
Community Characteristics of ANAMMOX Bacteria in Subsurface Flow Constructed Wetland(SSFCW) for Processing of Aquaculture Waster Water	ZENG Xian-lei, LIU Xing-guo, WU Zong-fan, <i>et al.</i> (615)
Analysis of Pathogenic Bacteria in Reclaimed Water and Impact of UV Disinfection on the Removal of Pathogenic Bacteria	JING Ming, WANG Lei (622)
Analysis of the Microbial Community Structure in Continuous Flow Reactor Enhanced by Heterotrophic Nitrification and Aerobic Denitrification Bacterium <i>Burkholderia</i> sp. YX02	SHAO Ji-lun, CAO Gang, LI Zi-hui, <i>et al.</i> (630)
Comparative Metagenomics of BIOLAK and A ² O Activated Sludge Based on Next-generation Sequencing Technology	TIAN Mei, LIU Han-hu, SHEN Xin (638)
Identification and Nitrogen Removal Characteristics of a Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Strain Isolated from Marine Environment	SUN Qing-hua, YU De-shuang, ZHANG Pei-yu, <i>et al.</i> (647)
Removal of AOX and Chroma in Biologically Treated Effluent of Chemical Dyestuff Wastewater with Nanoscale Ni/Fe	SHU Xiao-ming, XU Can-can, LIU Rui, <i>et al.</i> (655)
Feasibility of 3BER-S Process for the Deep Denitrification in Synch with the Removal of PAEs from Reclaimed Water	XU Peng-cheng, HAO Rui-xia, ZHANG Ya, <i>et al.</i> (662)
Influence of Reaction Time on Titanate Nanomaterials and Its Adsorption Capability for Lead in Aqueous Solutions	FAN Gong-duan, CHEN Li-ru, LIN Ru-jing, <i>et al.</i> (668)
Sorption Characteristics of Phenanthrene and 1,1-Dichloroethene onto Reed Straw Biochar in Aquatic Solutions	WU Qing-wen, MENG Liang, ZHANG Zhi-hao, <i>et al.</i> (680)
Adsorption Characteristics of Norfloxacin by Biochars Derived from Reed Straw and Municipal Sludge	ZHANG Han-yu, WANG Zhao-wei, GAO Jun-hong, <i>et al.</i> (689)
Effect of Seasonal Temperature Increasing on Nitrogen Mineralization in Soil of the Water Level Fluctuating Zone of Three Gorge Tributary During the Dry Period	LIN Jun-jie, ZHANG Shuai, LIU Dan, <i>et al.</i> (697)
Effects of Warming and Straw Application on Soil Respiration and Enzyme Activity in a Winter Wheat Cropland	CHEN Shu-tao, SANG Lin, ZHANG Xu, <i>et al.</i> (703)
Distribution of Urban Soil Heavy Metal and Pollution Evaluation in Different Functional Zones of Yinchuan City	WANG You-qi, BAI Yi-ru, WANG Jian-yu (710)
Differential Effect and Mechanism of <i>in situ</i> Immobilization of Cadmium Contamination in Soil Using Diatomite Produced from Different Areas	ZHU Jian, WANG Ping, LIN Yan, <i>et al.</i> (717)
Characteristics of Adsorption Leaching and Influencing Factors of Dimethyl Phthalate in Purple Soil	WANG Qiang, SONG Jiao-yan, ZENG Wei, <i>et al.</i> (726)
Cd Runoff Load and Soil Profile Movement After Implementation of Some Typical Contaminated Agricultural Soil Remediation Strategies	LIU Xiao-li, ZENG Zhao-xia, TIE Bai-qing, <i>et al.</i> (734)
Concentrations and Component Profiles PAHs in Surface Soils and Wheat Grains from the Cornfields Close to the Steel Smelting Industry in Handan, Hebei Province	WU Di, WANG Yi-long, LIU Wei-jian, <i>et al.</i> (740)
Effect of Arbuscular Mycorrhiza (AM) on Tolerance of Cattail to Cd Stress in Aquatic Environment	LUO Peng-cheng, LI Hang, WANG Shu-guang (750)
Acute Toxic Effects of Bromate on Aquatic Organisms	WANG Zhi-wei, LIU Dong-mei, ZHANG Wen-juan, <i>et al.</i> (756)
Development of Self-assembled Dumbbell-like Fe ₃ O ₄ Micro/nanomaterial for Application in Thermocatalytic Degradation of Polybrominated Biphenyls	HUANG Xin-chen, ZONG Gang, LIU Ye-xuan, <i>et al.</i> (765)
Impact of Salinity on Leachate Treatment and N ₂ O Releases from Semi-aerobic Aged-refuse Bioreactor	LI Wei-hua, SUN Ying-jie, LIU Zi-liang, <i>et al.</i> (775)
Evaluating the Significance of Odor Gas Released During the Directly Drying Process of Sludge: Based on the Multi-index Integrated Assessment Method	DING Wen-jie, CHEN Wen-he, DENG Ming-jia, <i>et al.</i> (782)

《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 刘 毅 汤鸿霄 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)

2016年2月15日 第37卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 2 Feb. 15, 2016

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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行