

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第1期

Vol.36 No.1

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2013年夏季典型光化学污染过程中长三角典型城市O₃来源识别 李浩, 李莉, 黄成, 安静宇, 严茹莎, 黄海英, 王杨君, 卢清, 王倩, 楼晟荣, 王红丽, 周敏, 陶士康, 乔利平, 陈明华(1)

厦门冬春季大气VOCs的污染特征及臭氧生成潜势 徐慧, 张晗, 邢振雨, 邓君俊(11)

近10年海南岛大气NO₂的时空变化及污染物来源解析 符传博, 陈有龙, 丹利, 唐家翔(18)

稻草烟尘中有机碳/元素碳及水溶性离子的组成 洪蕾, 刘刚, 杨孟, 徐慧, 李久海, 陈惠雨, 黄柯, 杨伟宗, 吴丹(25)

气相色谱-脉冲氦离子化检测法(GC-PDHID)分析大气中分子氢(H₂)浓度 栾天, 方双喜, 周凌晔, 王红阳, 张根(34)

小浪底水库影响下的黄河花园口站和小浪底站pCO₂特征及扩散通量 张永领, 杨小林, 张东(40)

夏季中国东海生源有机硫化物的分布及其影响因素研究 李江萍, 张洪海, 杨桂朋(49)

基于Landsat 8影像估算新安江水库总悬浮物浓度 张毅博, 张运林, 查勇, 施坤, 周永强, 王明珠(56)

温瑞塘河流域水体污染时空分异特征及污染源识别 马小雪, 王腊春, 廖玲玲(64)

人类活动影响下水化学特征的影响: 以西江中上游流域为例 于爽, 孙平安, 杜文越, 何师意, 李瑞(72)

太湖梅梁湾不同形态磷周年变化规律及藻类响应研究 汪明, 武晓飞, 李大鹏, 李祥, 黄勇(80)

鄱阳湖沉积物可转化态氮分布特征及其对江湖关系变化的响应 沈洪艳, 张绵绵, 倪兆奎, 王圣瑞(87)

影响浑太河流域大型底栖动物群落结构的环境因子分析 李艳利, 李艳粉, 徐宗学(94)

水华生消过程对巢湖沉积物微生物群落结构的影响 刁晓君, 李一葳, 王曙光(107)

蓝藻水华聚集对水葫芦生理生态的影响 吴婷婷, 刘国锋, 韩士群, 周庆, 唐婉莹(114)

汞在小浪底水库的赋存形态及其时空变化 程柳, 毛宇翔, 麻冰涓, 王梅(121)

三峡库区典型农田小流域土壤汞的空间分布特征 王娅, 赵铮, 木志坚, 王定勇, 余亚伟(130)

三峡库区农林畜复合小流域水体汞的时空变化特征 赵铮, 王娅, 木志坚, 王定勇(136)

环境条件对三峡库区消落带土壤中邻苯二甲酸二丁酯向上覆水静态迁移释放的影响 宋娇艳, 木志坚, 王强, 杨志丹, 王法(143)

三峡库区消落带土壤中溶解性有机质(DOM)吸收及荧光光谱特征 高洁, 江韬, 李璐璐, 陈雪霜, 魏世强, 王定勇, 闫金龙, 赵铮(151)

舟山渔场有色溶解有机物(CDOM)的三维荧光-平行因子分析 周倩倩, 苏荣国, 白莹, 张传松, 石晓勇(163)

太原市小店污灌区地下水中多环芳烃与有机氯农药污染特征及分布规律 李佳乐, 张彩香, 王焰新, 廖小平, 姚林林, 刘敏, 徐亮(172)

厦门杏林湾水系表层沉积物中PAHs分析与风险评估 程启明, 黄青, 廖祯妮, 苏丽, 刘兴强, 唐剑锋(179)

两种不同的地下水污染风险评价体系对比分析: 以北京市平原区为例 王红娜, 何江涛, 马文洁, 许真(186)

大冶湖滨岸带重金属水-土迁移特征与风险评价 张家泉, 李秀, 张全发, 李琼, 肖文胜, 王永奎, 张建春, 盖希光(194)

铁盐絮凝法从阳宗海湖水中除砷研究与现场扩大试验 陈景, 张曙, 杨项军, 黄章杰, 王世雄, 王莞, 韦群燕, 张良林, 肖军(202)

铋银氧化物混合物高效氧化降解四溴双酚A的研究 陈满堂, 宋洲, 王楠, 丁耀彬, 廖海星, 朱丽华(209)

一种纳米级不定形碳对水中四环素的吸附研究 吴亦潇, 李爱民, 汪的华, 张维昊(215)

磁性壳聚糖衍生物对阴离子染料的吸附行为 张聪璐, 胡筱敏, 赵研, 苏雷(221)

腐殖酸-高岭土复合体形成机制及对三氯乙烯的吸附 朱晓婧, 何江涛, 苏思慧(227)

降温过程对ANAMMOX工艺城市污水处理系统中微生物群落的影响 赵志瑞, 苗志加, 李铎, 崔丙健, 万敬敏, 马斌, 白志辉, 张洪勋(237)

FISH-NanoSIMS技术在环境微生物生态学上的应用研究 陈晨, 柏耀辉, 梁金松, 袁林江(244)

微囊藻毒素-LR对恶臭假单胞菌细胞活性和表面特性的影响 邓庭进, 叶锦韶, 彭辉, 刘芷辰, 刘则华, 尹华, 陈烁娜(252)

微生物除臭剂的筛选、复配及其除臭条件的优化 曾苏, 李南华, 盛洪产, 贺琨, 胡子全(259)

舟山青浜岛水体及海产品中有机氯农药的分布和富集特征 张泽洲, 邢新丽, 顾延生, 桂福坤, 祁士华, 黄焕芳, 瞿程凯, 张莉(266)

四川凉山彝青少年头发中多氯联苯污染水平的研究 周莹, 孙一鸣, 金军, 雷建容, 秦贵平, 何雪珠, 林尤静(274)

铜、毒死蜱单一与复合暴露对蚯蚓的毒性作用 徐冬梅, 王彦华, 王楠, 饶桂维(280)

外源硒对黄瓜抗性、镉积累及镉化学形态的影响 熊仕娟, 刘俊, 徐卫红, 谢文文, 陈蓉, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体(286)

厦门市道路灰尘中铂族元素的污染特征 洪振宇, 洪有为, 尹丽倩, 陈进生, 陈衍婷, 徐玲玲(295)

洋河流域不同土地利用类型土壤硒(Se)分布及影响因素 商靖敏, 罗维, 吴光红, 徐兰, 高佳佳, 孔佩儒, 毕翔, 程志刚(301)

不同钝化剂对重金属污染土壤稳定化效应的研究 吴烈善, 曾东梅, 莫小荣, 吕宏虹, 苏翠翠, 孔德超(309)

畜禽粪便有机肥中Cu、Zn在不同农田土壤中的形态归趋和有效性动态变化 商和平, 李洋, 张涛, 苏德纯(314)

华南某市生活垃圾组成特征分析 张海龙, 李祥平, 齐剑英, 陈永亨, 方建德(325)

生物沥浸耦合类Fenton氧化调理城市污泥 刘昌庚, 张盼月, 蒋娇娇, 曾成华, 黄毅, 徐国印(333)

基于平面波导型荧光免疫传感器的双酚A检测适用性研究 徐玮琦, 张永明, 周小红, 施汉昌(338)

一种新型“Turn-on”荧光探针用于硫化氢可视化检测 刘春霞, 马兴, 魏国华, 杜宇国(343)

典型黄土区油松树干液流变化特征分析 张涵丹, 卫伟, 陈利顶, 于洋, 杨磊, 贾福岩(349)

利用巨藻发酵联产氢气与挥发性有机酸的研究 赵晓娟, 范晓蕾, 郭荣波, 薛志欣, 杨智满, 袁宪正, 邱艳玲(357)

人工纳米颗粒在水体中的行为及其对浮游植物的影响 李曼璐, 姜玥璐(365)

《环境科学》征订启事(251) 《环境科学》征稿简则(294) 信息(236,243,273,300)

水华生消过程对巢湖沉积物微生物群落结构的影响

刁晓君¹, 李一葳^{2*}, 王曙光³

(1. 环境保护部环境工程评估中心, 北京 100012; 2. 中国环境科学研究院环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012; 3. 北京化工大学环境科学与工程系, 北京 100029)

摘要: 水华对湖泊水体和沉积物物理和生物学性质的影响已进行了较多研究, 但鲜见水华生消过程对湖泊沉积物微生物群落结构的影响. 本研究以巢湖为对象, 通过 PCR-DGGE 方法分析了水华形成、持续和消亡阶段对沉积物微生物群落结构的影响. 结果表明, 巢湖水华形成期为5月15日~6月20日, 持续期为6月20日~9月5日, 之后进入水华消亡期. PCR-DGGE 分析表明, 非水华区沉积物微生物的种类、Shannon-Wiener 指数、Simpson 指数随时间变化较小, 微生物相似度较高, 温度可能是影响非水华区微生物群落结构波动的主要因子; 在水华区, 沉积物微生物的种类、Shannon-Wiener 指数在水华形成期和消亡期较低, 在水华持续期较高, 而 Simpson 指数则呈相反趋势, 微生物相似度相对较低, 表明水华形成、持续和消亡过程对微生物群落结构、优势种有不同影响, 温度和水华导致的水体性质变化可能是沉积物微生物变化的主要因子. 本研究表明, 水华生消过程对湖泊沉积物微生物有不同的影响, 这对深入评价水华对湖泊水生生态系统的影响和利用微生物防治湖泊水华有重要意义.

关键词: 巢湖; 沉积物; 水华生消过程; 微生物群落结构

中图分类号: X172; X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)01-0107-07 DOI: 10.13227/j.hjkk.2015.01.014

Effects of Outbreak and Extinction of Algal Blooms on the Microbial Community Structure in Sediments of Chaohu Lake

DIAO Xiao-jun¹, LI Yi-wei^{2*}, WANG Shu-guang³

(1. Appraisal Center for Environment and Engineering, Ministry of Environmental Protection, Beijing 100012, China; 2. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 3. Department of Environmental Science and Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: Although impacts of algal bloom on the physicochemical and biological properties of water and sediment in many lakes have been largely studied, less attention is paid to the impact of outbreak and extinction of algal blooms on the microbial community structure in sediment. In this study, outbreak and extinction of algal blooms and their effects on the microbial community structure in sediment of Chaohu Lake were studied by PCR-DGGE method. The results showed that algal blooms formed between May 15 and June 20, sustained from June 20 to September 5, and then went into extinction. In the region without algal blooms, PCR-DGGE analysis showed that microbial species, Shannon-Wiener diversity index and Simpson dominance index changed slightly over time; moreover, the microbial community structure had high similarity during the whole study. Temperature may be the main factor affecting the fluctuation of the microbial community structure in this region. In the region with algal blooms, however, microbial species and Shannon-Wiener diversity index were higher during the formation and extinction of algal blooms and lower in the sustaining blooms stage than those in the region without algal blooms. But the Simpson dominance index showed the opposite trend over time. In addition, the microbial community structure had low similarity during the whole study. The results suggested that outbreak and extinction of algal blooms produced different effects on the microbial community structure and the dominant microbial species, which may be related to the variation of water properties caused by temperature and algal blooms. This study showed that outbreak and extinction of algal blooms caused different effects on microbes in lake sediment, and this is significantly important to deeply evaluate the effects of algal bloom on the aquatic ecosystem of the lake and effectively control algal blooms using sediment microbes.

Key words: Chaohu Lake; sediment; outbreak and extinction of algal blooms; microbial community structure

近年来,湖泊水华因对水生生态系统的极端影响而受到世界各国的高度关注^[1]. 我国是湖泊大国,同样面临着湖泊水华频繁暴发的问題^[2],虽然经过多年研究,在湖泊水华的危害、监测与预警、发生机制、影响因素等方面取得了较大进展^[3,4],但湖泊水华频繁暴发依然严重,湖泊环境治理仍面临巨大压力,所以,非常有必要继续深入研究水华生消过程的机制.

其中,水华生消过程对微生物的影响尤为值得关注,一是因为湖泊沉积物是微生物最为丰富的载体之一^[5],微生物能通过同化作用、异化作用改变环境条

收稿日期: 2014-07-10; 修订日期: 2014-08-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(41201528)

作者简介: 刁晓君(1975~),女,博士,主要研究方向为湖泊富营养化, E-mail: diaoxiaojun2000@126.com

* 通讯联系人, E-mail: xiaotea@163.com

件等影响矿质元素的生物地球化学循环(如碳、氮、磷、硫等)、能量流动、污染物形态(如重金属、有机污染物等)^[6,7],从而对湖泊水生生态系统稳定和恢复产生重大影响,湖泊微生物群落结构也被认为是衡量湖泊生态系统稳定性的重要指标;二是因为目前虽然对富营养化湖泊沉积物微生物研究较多,如对不同富营养程度湖泊沉积物微生物的调查^[8]、对同一湖泊不同富营养区域的沉积物微生物调查^[9],但由于不同湖泊沉积物微生物或同一湖泊不同区域微生物本身可能存在较大差异,这些调查结果并不能如实反映湖泊富营养化对微生物的实际影响;三是因为湖泊富营养化的控制和治理需要微生物的参与,只有了解了湖泊富营养化对微生物的实际影响,才能更好地调控微生物的种群结构与功能,为湖泊富营养化的生物治理和控制提供支持。

湖泊水华存在复杂的生消过程,从水华生物少量出现的水华形成前期到生物日趋丰富的水华形成期、水华持续期、水华消亡期,涉及到不同的物理、化学、生物等过程^[10]。每个阶段又因蓝藻生物量及其生长代谢不同而对水质产生不同的影响。虽然水华主要发生在上覆水,但其影响却波及沉积物^[11,12]。如王钦等^[13]发现太湖梅梁湾水华发生时的沉积物 Eh 明显低于未暴发期,而这可能影响沉积物微生物的群落结构,因为微生物对 Eh、pH 变化较为敏感。所以,水华形成、持续和消亡不同阶段可能对沉积物微生物有不同的影响。然而,现有研究很少从水华生消过程角度研究沉积物微生物的变化,这不但利于深入评价水华对湖泊水生生态系统的影响,而且也有碍于利用沉积物微生物改善湖泊环境。

巢湖是我国污染最重的三大淡水湖泊之一,近年来蓝藻暴发性繁殖引起的大面积水华每年都持续很长时间,处于过度富营养状态,虽然使用多种手段,但巢湖富营养化、水华问题依然严重^[14]。本研究以浅水湖泊巢湖为对象,于2012年5月水华发生前开始取沉积物和上覆水样品,历经水华形成前期、水华形成期、水华持续期和水华消亡期,通过PCR-DGGE方法分析不同水华期沉积物微生物的群落结构差异,判断巢湖水华生消过程对沉积物微生物群落结构的影响。

1 材料与方法

1.1 样品的采集

依据巢湖历史资料确定采样时间和地点,采样

时间要覆盖水华形成前期、形成期、持续期和消亡期,采样地点要分布在水华区(处理)和非水区(对照)。样品采集工作共进行了8次,时间分别为:5月15日(水华前期)、6月20日(水华形成期)、7月10日、7月20日、8月1日、8月22日、9月5日(水华持续期)、9月19日(水华消亡期)。在水华区和非水区均设置5个采样点,但每个区域最终有3个采样点符合实验要求,即持续水华或持续非水华。其中位点1、2、3为水华区域,位点4、5、6为非水华区域,采样点位分布见图1。

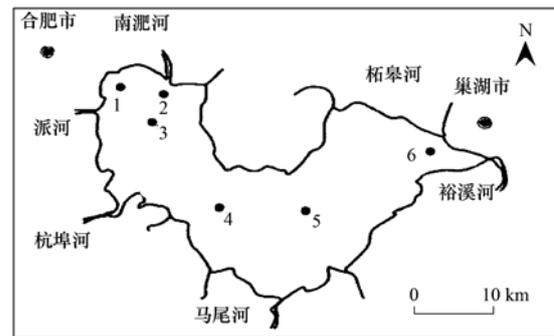


图1 巢湖水华区和非水华区采样点示意

Fig. 1 Sampling sites in the algal bloom region and the non-algal bloom region of Chaohu Lake

利用彼得森采泥器采集表层10 cm沉积物样品,以每个样点为中心采集3个平行样,现场混为一个样品,这样每个采样点只有一个待测样品,本研究中6个采样点共6个样品,水华区和非水区各3个。混合样立即装入密封袋内避光储存,紧急运回实验室把样品分为2份,一份在-20℃冷冻保存,用于微生物PCR-DGGE分析,另一份冷冻干燥,用于测定沉积物的理化性质。同时利用不锈钢采水器采集水面下0.5 m处的水样,每个点位也同样采集3个平行样,现场混匀后收集1 L作为该样点的水样,放入4℃保温箱中保存,并在48 h内测定Chl-a。

1.2 分析方法

1.2.1 叶绿素的测定

Chl-a采用丙酮24 h提取法进行测定^[15]。

1.2.2 微生物PCR-DGGE分析

采用MOBIO Power Soil DNA提取试剂盒提取沉积物样品的基因组DNA。

PCR扩增参见文献^[16]: ①引物:采用对大多数细菌和古生菌的16S rDNA基因V3~V5区具有特异性的引物对357F-GC(5'-GC-clamp-CCTACGGGAGGCAGCAG-3')和517R(5'-ATT ACCGCG GCTGCTGG-3')。GC-clamp序列为5'-

CGCCCGCCGCGCGCGGGCGGGCGGGGCGGGGCAC
GGGG-3'。② PCR 反应体系: 10 × Buffer 5 μL、
200 μmol·L⁻¹的 dNTP 4 μL、1.5 mmol·L⁻¹的 MgCl₂
4 μL、10 μmol·L⁻¹的正反向引物各 1 μL、模板
DNA 40 ~ 50 ng、Ex Tag(Takara,大连)1.5 U、灭菌
超纯水补齐至 50 μL。③ PCR 反应条件: 94℃ 预变
性 5 min; 94℃ 预变性 1 min, 48℃ 退火 1 min, 72℃
延伸 1 min, 30 个循环; 最后 72℃ 延伸 10 min。PCR
反应的产物用 1.5% 的琼脂糖凝胶电泳检测。

变性梯度凝胶电泳(DGGE): 采用 Bio-Rad 公
司 Dcode™ 的基因突变检测系统对 PCR 反应产物进
行分析。使用梯度胶制备装置, 制备变性剂浓度从
50% ~ 70% 的聚丙烯酰胺凝胶。将纯化后的 PCR 产
物与缓冲液按 5:1 混合, 加入到凝胶的加样孔中, 在
100 V 的恒定电压、60℃ 恒温下电泳 10 h。电泳完
毕后, 将凝胶在 EB 中染色 20 ~ 30 min, 使用凝胶成
像分析系统(Bio-Rad)对染色后的凝胶进行观察、
拍照, 采用 Quantity One 分析软件(Bio-Rad)分析沉
积物样品中电泳条带的数目和亮度来评估不同深度
层湖泊沉积物样品的微生物群落的多样性和丰富
度。

1.2.3 Shannon-Wiener 多样性指数(H')

$$H' = - \sum_{i=1}^{i=s} P_i \ln P_i = - \sum_{i=1}^{i=s} (N_i/N) \ln (N_i/N)$$

式中, P_i 是某个样品中单一条带强度在该样品的所
有条带总强度所占的比率, s 是某个样品中所有条
带数目总和, N 为泳道中所有条带的光密度和, N_i 为
第 i 个条带的光密度值。 H' 指数越大, 微生物群落
结构多样性越高。

1.2.4 Simpson 优势度指数(D)

$$D = 1 - \sum_{i=1}^{i=s} P_i^2 = 1 - \sum_{i=1}^{i=s} (N_i/N)^2$$

各字母代表的意义同 1.2.3 节。 D 指数越大,
优势菌群生物量占总生物量比重越小, 反之则优势
菌群生物量占总生物量比重越大。

1.2.5 相似度聚类分析

根据 PCR-DGGE 电泳条带对比的结果, 通过戴
斯系数 C_s (Dice coefficient) 计算出各样品相似性的
数值化矩阵。利用相似性矩阵数据, 通过 UPGMA
(The unweighted pair group method with arithmetic
averages) 算法实现聚类分析, 生成系统树。

1.3 统计分析

数据处理时, 除图 2 选取样点 1 和 6 为代表, 其
他参数均是分别对水华区(样点 1、2、3)和非水华

区(样点 4、5、6)3 个样品的测试值取平均值和标
准偏差。通过 SPSS 13.0 的 Duncan 分析方法进行差
异显著性检验($\alpha = 0.05$)。

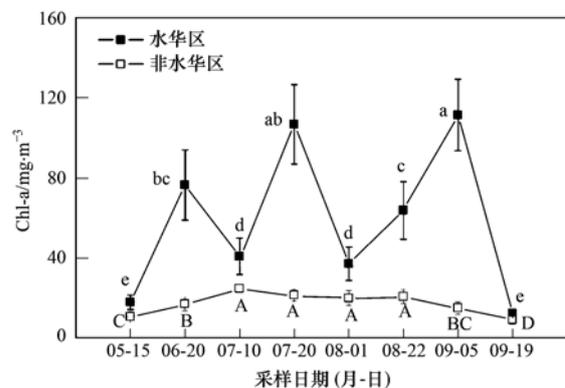
2 结果与分析

2.1 水华生消过程的判断

水华发生的最显著特征是藻类暴发性生长, 本
研究以反映藻类浓度的最常用指标——叶绿素 a
(Chl-a) 含量作为判断水华形成过程的依据。
Nürnberg^[17]认为水体 Chl-a 含量超过 25 mg·m⁻³ 即进
入轻度水华, 而郑建军等^[18]认为水体 Chl-a 含量超过
30 mg·m⁻³ 为轻度水华状态, 本研究以 30 mg·m⁻³ 作
为评判水华是否发生的标准。

从图 2 可以看出, 在整个研究期, 非水华区水体
Chl-a 含量变化不大, 所有水样的 Chl-a 含量都低于
20 mg·m⁻³, 表明非水华区一直没水华发生。而在水
华区, 除 5 月 15 日和 9 月 19 日外其他时段的水样
Chl-a 含量均显著高于 30 mg·m⁻³ 且远高于非水华
区, 表明水华区有明显的、持续性的水华现象。水
华区水体 Chl-a 含量随时间波动较大, 可能与多次水
华的生消叠加、气候条件变化(如风力、风向、降
雨、人为扰动等)有关。藻类生长周期较短, 一般
为 1 ~ 3 周左右, 所以看似周期较长的水华其实是多个
短期水华的生消过程叠加。7 月 10 日和 8 月 1 日水
体 Chl-a 含量骤然降低, 主要是因为 7 月 10 日受大
风和降雨影响较大(当天风力达到了 4 ~ 5 级, 并伴
有雷阵雨), 8 月 1 日受双台风“苏拉”和“达维”影
响较大, Chl-a 被稀释。

从水华生消过程来看, 水华区水体的 Chl-a 含量



不同小写字母表示水华区 Chl-a 浓度在 $P = 0.05$ 水平上差异显著,
不同大写字母表示非水华区 Chl-a 浓度在 $P = 0.05$ 水平上差异显著

图 2 巢湖水华区和非水华区水体 Chl-a 含量随时间的变化

Fig. 2 Changes of water Chl-a concentration over time in the algal
bloom region and the non-algal bloom region of Chaohu Lake

从5月15日低于 $30 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 到6月20日显著高于 $30 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$,表明5月15日前水体处于水华形成前期,5月15日~6月20日处于水华形成期,6月20日~9月5日,Chl-a含量始终处于较高水平,表明水华处于持续期,而9月5日之后水体Chl-a浓度急剧下降到 $30 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 以下,表明水华处于消亡期。

2.2 水华生消过程对沉积物微生物群落结构的影响

2.2.1 沉积物微生物 PCR-DGGE 谱图分析

本研究测试了所有位点样品沉积物的 PCR-DGGE,水华区和非水华区的结果分别具有类似趋势,仅以位点1和位点6的结果为代表进行阐述。

从图3(a)可以看出,在整个研究期间,非水华区沉积物中大致出现了25种优势菌群,不同采样时间 DGGE 谱图的条带数虽有一定差异但并不大,说明沉积物中微生物群落种类和结构随时间发生了一些变化,可能主要与温度变化有关。整体上看,样品中的条带呈现4种变化趋势:①部分条带在整个调查过程中基本都存在,只是丰度(条带亮度)有差异,如7、8、16、17、19、21、22、23、27、31号条带,说明这些条带代表的微生物菌群在整个调查过程中一直为优势菌群;②部分条带随着时间增加逐渐消失,如1、2、3、4、29号条带,表明这些条带指示的微生物数量逐渐下降;③部分条带在取样初期未出现,但在后期样品中明显出现,如5、11、20、

26、28、29、30、32号条带等,说明这些条带指示的微生物随着温度升高,活性增强,开始快速生长繁殖,逐渐成为优势菌群;④还有部分条带,仅仅出现在中间的几次样品中,如12、15、25、29号条带。需要指出的是,风浪的影响导致7月10日一些条带暂时消失,如6、18、28、31号条带等,可能是由于风浪扰动增加了沉积物溶解氧含量,对厌氧微生物产生了一定抑制作用,或者风浪扰动使表层沉积物进入水体,而非表层沉积物微生物种类较少;9月5日和9月19日一些条带消失,如4、9、10、12、24、29号等,可能与温度降低有关,一些适宜在较高温度下生长的微生物逐渐减少,不再成为优势菌群。

从图3(b)可以看出,在整个研究期间,水华区不同时期的样品中条带数量差别较大,说明沉积物微生物群落结构变化较大,优势菌群的更替较频繁,这可能与温度、水华不同阶段导致的环境条件变化等有关。水华区条带数总体呈先增后减的变化趋势。采样初期的5月15日只出现了9个条带,而到6月20日时已经增长到了20个条带,如5、8、9、21、32号等都是新增条带,说明随着温度的升高微生物活性明显增强,开始大量生长繁殖,优势菌群数逐渐增多;7月10日条带数急剧降低,可能是由于当天风浪扰动致使沉积物溶解氧升高,导致厌氧微生物数量骤降所致,或者由于表层沉积物溶入水体,

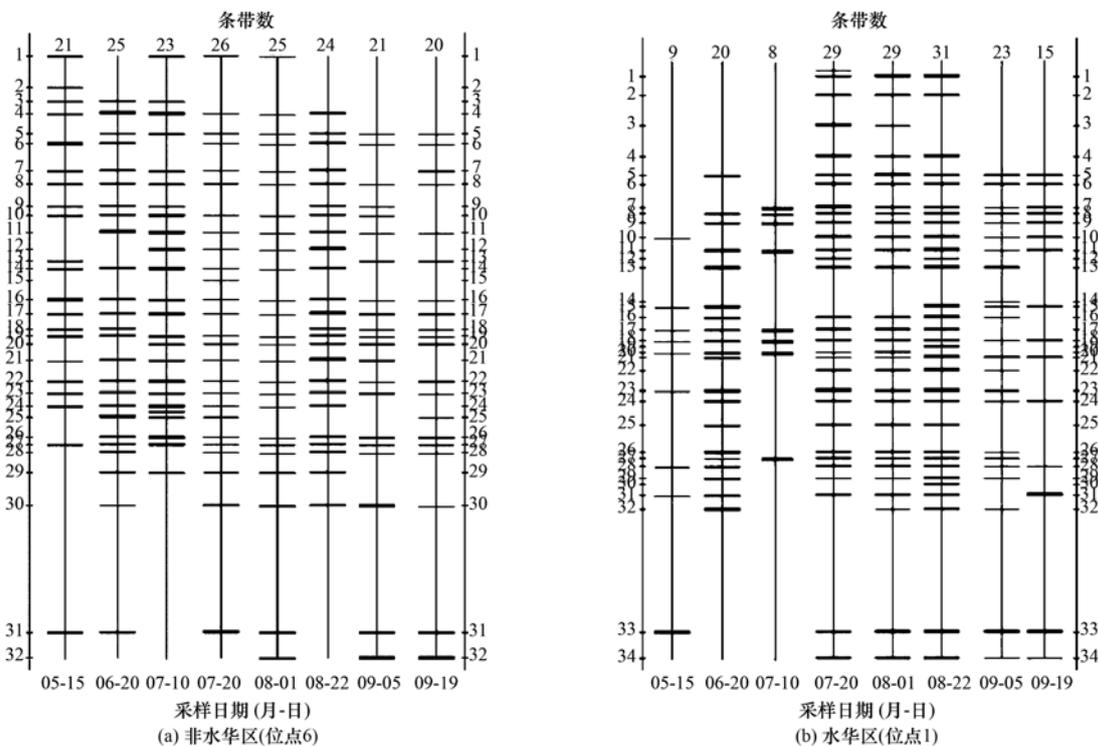


图3 巢湖非水华区和水华区沉积物样品 PCR-DGGE 示意

Fig. 3 PCR-DGGE profiles of the sediment samples taken from the algal bloom region and the non-algal bloom region of Chaohu Lake

次表层沉积物微生物数量较低所致; 7月20日~8月22日是条带数最多的时间段,也是温度较高和藻类生物量较大的阶段,可能由于藻类大量生长产生的极端厌氧环境为厌氧微生物生长繁殖提供了良好的环境,同时死亡藻类的沉降也为各种微生物提供了种类繁多的有机营养物质,为多种菌群的快速生长繁殖提供了适宜的条件;然而随着温度的降低和水华的消亡,9月5日和9月19日优势菌群数明显下降。

根据水华区和非水华区沉积物样品 DGGE 谱图的分析可以看出,水华区沉积物微生物群落结构变化要比非水华区大得多,非水华区有 10 个条带在整个调查过程中一直存在,而水华区只有 1 个条带(18 号条带)一直存在;非水华区最大条带数和最小条带数之间只差 6 个条带,水华区相差高达 22 个条带。这些结果表明,水华对沉积物微生物群落结构有较大影响。

2.2.2 沉积物微生物 Shannon-Wiener 多样性指数分析

Shannon-Wiener 多样性指数反映了基于物种数量的群落种类多样性,指数越大表明群落的复杂程度越高。Shannon-Wiener 多样性指数的大小取决于条带数目、条带信号强度以及分布均匀程度,是反映微生物菌群数及其生物量和分布均匀情况的综合指标^[19]。从图 4 可以看出,非水华区 Shannon-Wiener 指数随时间变化不大,说明沉积物微生物群落结构相对稳定。非水华区微生物群落结构相对波动主要受自然条件变化的影响,如温度、风浪、沉积物 TOC 变化等,但这些变化不大,不能显著改变微生物的群落结构。然而在水华区,除去 7 月 10 日特殊天气影响,Shannon-Wiener 指数呈现先增加(7 月 20 日前)后稳定(7 月 20 日至 8 月 22 日)再下降的趋势(9 月 5 日后)。在水华形成前期,水华区 Shannon-Wiener 指数显著低于非水华区,可能与水华区长期受水华暴发的影响,抑制了部分微生物的生长,从而导致微生物多样性下降;7 月 20 日后,水华的持续、水温的升高使沉积物中更多厌氧微生物得以快速繁殖,Shannon-Wiener 多样性指数升高,而非水华区只受温度变化的影响,多样性指数变化较小;在水华消亡期(9 月 19 日),藻类大量死亡、温度下降,水华区 Shannon-Wiener 多样性指数又低于非水华区。同时,这也意味着,虽然水华区和非水华区在部分时段 Shannon-Wiener 指数相差不大,但微生物多样性构成差别却可能很大。

本研究选取的巢湖水华区连续十余年发生水华,每年蓝藻大量死亡,导致沉积物有机质含量远高于非水华区(数据未列出),但 Shannon-Wiener 指数并没有显著高于非水华区,这似乎有悖于前人“有机质含量越高微生物群落结构多样性越高”的结论^[8,19,20]。这可能与水华暴发胁迫因素的长期存在有关,以前的结果多基于常规条件下有机质与微生物多样性的关系。

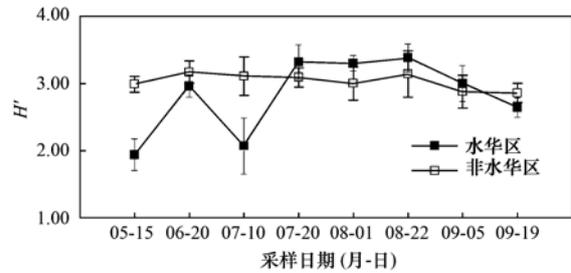


图 4 巢湖水华区和非水华区沉积物微生物 Shannon-Wiener 多样性指数随时间的变化

Fig. 4 Changes of microbial Shannon-Wiener diversity index in sediment over time in the algal bloom region and the non-algal bloom region of Chaohu Lake

2.2.3 沉积物微生物 Simpson 优势度指数分析

Simpson 优势度指数体现了优势物种生物量占群落生物总量的比重,该指数越大表明优势菌群生物量占总生物量比重越大,反之则优势菌群生物量占总生物量比重越小。从图 5 可以看出,非水华区沉积物微生物 Simpson 指数随时间变化不大,处于轻微的波动,表明优势种更替不明显。在水华区,水华形成前期 Simpson 指数较高,这可能是由于多年水华暴发抑制了部分微生物的生长,多样性下降,导致部分微生物成为优势种。但随着水华的形成及暴发,Simpson 指数下降至非水华区水平,表明微生物优势种种类增加,这可能因为随着温度升高,水华暴

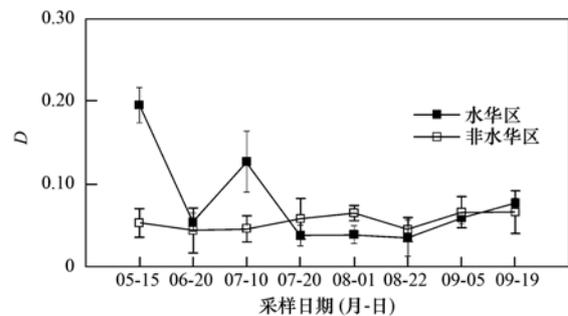


图 5 巢湖水华区和非水华区沉积物微生物 Simpson 优势度指数随时间的变化

Fig. 5 Changes of microbial Simpson dominance index in sediment over time in the algal bloom region and the non-algal bloom region of Chaohu Lake

发,各种微生物活性都增强,总生物量不断增大,优势菌群数也增多,优势菌群生物量占总生物量的比重在下降,Simpson 优势度指数也随之降低. 7月10日 Simpson 指数较高主要是因为特殊天气事件所致.

2.2.4 沉积物微生物群落相似性分析

对 DGGE 谱图每个样品的电泳条带进行微生物群落相似性程度聚类分析,结果见图 6. 可以看出,非水华区相似度最高的是 7月20日和 8月1日,为 85.9%,相似度最低的是 7月10日和 8月1日,为 32.7%. 以 60%的相似度分类,所有微生物可分为 3 个群: 第一个群: 5月15日,第二个群: 6月20日、7月10日和 8月22日,第三个群: 7月20日、8月1日、9月5日和 9月19日. 温度可能是导致微生物分群的主要因素,因为第一个群的微生物以 5月15日样品为主,第二个群的微生物以 6、7月的样品为主,而第三个群的微生物以 8、9月样品

为主,正好与温度变化相一致. 8月22日数据较异常可能与其他因素有关.

水华区微生物群相似度最高的是 7月20日和 8月1日,为 79.8%,相似度最低的是 5月15日和 7月10日,为 13%. 以 60%的相似度分类,所有微生物可分为 4 个群,第一个群: 5月15日,第二个群: 7月10日,第三个群: 6月20日、7月20日、8月1日和 8月22日; 第四个群: 9月5日和 9月19日. 温度和水华发生时期的变化是导致微生物分群的主要原因. 第一个群以 5月15日样品为主,可能主要由最适生长温度为低温的微生物组成; 第二个群以 7月10日样品为主,可能主要以兼氧或好氧微生物为主,沉积物受大风扰动的影响,厌氧程度下降,同时表层沉积物可能溶解进水体,取到的沉积物样品为次表层样; 第三个群以水华持续期样品为主,微生物可能多属于厌氧微生物; 第四类微生物以水华消亡期样品为主.

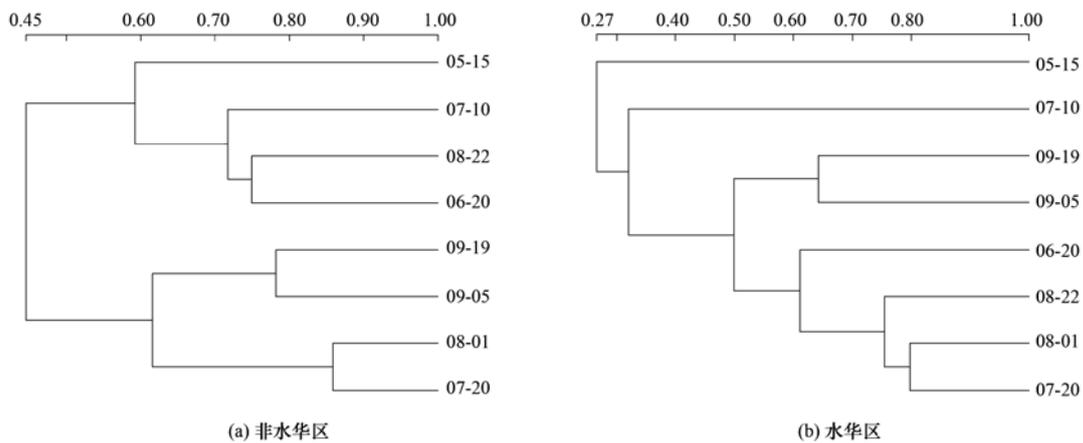


图 6 巢湖非水华区和水华区沉积物微生物相似度分析

Fig. 6 Similarity analysis for sediment microbes in the algal bloom region and the non-algal bloom region of Chaohu Lake

3 结论

(1)从5月中旬开始,水华区藻类开始快速生长,Chl-a浓度增加,6月20日左右水华形成,持续至9月5日后开始消亡,Chl-a浓度出现较大波动,但都高于 $30 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$; 而相同时期非水华区藻类浓度始终低于 $20 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$.

(2)PCR-DGGE 分析显示,非水华区微生物群落结构相对稳定,有 10 个条带在整个调查过程中一直存在,样品间条带数最大相差 6 个; 水华区沉积物微生物群落结构随水华生消过程变化明显,只有 1 个条带(18 号条带)在所有样品中一直存在,样品间条带最大相差 22 个,5 月和 9 月的微生物多样性

远低于 6~8 月,可能与水华暴发和环境温度变化有关.

(3)水华区 Shannon-Wiener 指数在水华形成和持续初期(7月20日前)低于非水华区,在水华持续后期则高于非水华区,而在水华消亡期则呈低于非水华区的趋势; Simpson 指数随水华生消过程呈现出与 Shannon-Wiener 指数相反的变化趋势. 此外,水华区的微生物相似性程度明显低于非水华区,表明水华生消过程显著影响微生物的种群结构和多样性.

参考文献:

- [1] Smith V H, Joye S B, Howarth R W. Eutrophication of freshwater and marine ecosystems [J]. *Limnology and Oceanography*, 2006, 51(1-2): 351-355.

- [2] Sun X X, Han K N, Choi J K, *et al.* Screening of surfactants for harmful algal blooms mitigation [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2004, **48**(9-10): 937-945.
- [3] 孔繁翔, 马荣华, 高俊峰, 等. 太湖蓝藻水华的预防、预测和预警的理论与实践 [J]. *湖泊科学*, 2009, **21**(3): 314-328.
- [4] Liu G F, Fan C X, Zhong J C, *et al.* Using hexadecyl trimethyl ammonium bromide (CTAB) modified clays to clean the *Microcystis aeruginosa* blooms in Lake Taihu, China [J]. *Harmful Algae*, 2010, **9**(4): 413-418.
- [5] Torsvik V, Øvreås L, Thingstad T F. Prokaryotic diversity-magnitude, dynamics, and controlling factors [J]. *Science*, 2002, **296**(5570): 1064-1066.
- [6] Eiler A, Bertilsson S. Composition of freshwater bacterial communities associated with cyanobacterial blooms in four Swedish lakes [J]. *Environmental Microbiology*, 2004, **6**(12): 1228-1243.
- [7] 汪福顺, 刘丛强, 梁小兵, 等. 湖泊沉积物中微量金属二次迁移过程中微生物作用的实验研究 [J]. *湖泊科学*, 2006, **18**(1): 49-56.
- [8] 赵兴青, 杨柳燕, 陈灿, 等. PCR-DGGE 技术用于湖泊沉积物中微生物群落结构多样性研究 [J]. *生态学报*, 2006, **26**(11): 3610-3617.
- [9] 赵兴青, 杨柳燕, 尹大强, 等. 不同空间位点沉积物理化性质与微生物多样性垂向分布规律 [J]. *环境科学*, 2008, **29**(12): 3537-3545.
- [10] 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.
- [11] 刘国锋, 钟继承, 何俊, 等. 太湖竺山湾藻华黑水团区沉积物中 Fe、S、P 的含量及其形态变化 [J]. *环境科学*, 2009, **30**(9): 2520-2526.
- [12] Oliver R L, Ganf G G. Freshwater blooms [A]. In: Whitton B A, Potts M (Eds.). *The Ecology of cyanobacteria* [M]. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2000. 149-194.
- [13] 王钦, 丁明玉, 张志洁, 等. 太湖不同湖区沉积物重金属含量季节变化及其影响因素 [J]. *生态环境*, 2008, **17**(4): 1362-1368.
- [14] Tong Y, Lin G F, Ke X, *et al.* Comparison of microbial community between two shallow freshwater lakes in middle Yangtze basin, East China [J]. *Chemosphere*, 2005, **60**(1): 85-92.
- [15] 翁笑艳, 林美爱, 严颖. 地表水浮游植物叶绿素 a 测定方法比较研究 [J]. *中国环境监测*, 2009, **25**(3): 36-40.
- [16] Muyzer G, de Waal E C, Uitterlinden A G. Profiling of complex microbial populations by denaturing gradient gel electrophoresis analysis of polymerase chain reaction-amplified genes coding for 16S rRNA [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1993, **59**(3): 695-700.
- [17] Nürnberg G K. Trophic state of clear and colored, soft-and hard-water lakes with special consideration of nutrients, anoxia, phytoplankton and fish [J]. *Lakes and Reservoir Management*, 1996, **12**(4): 432-447.
- [18] 郑建军, 钟成华, 邓春光. 试论水华的定义 [J]. *水资源保护*, 2006, **22**(5): 45-47, 80.
- [19] 高慧琴, 刘凌, 方泽建. 夏季湖泊表层沉积物的理化性质与微生物多样性 [J]. *河海大学学报*, 2011, **39**(4): 361-366.
- [20] 冯胜, 李定龙, 秦伯强. 太湖水华过程中微生物群落的动态变化 [J]. *宁波大学学报(理工版)*, 2010, **23**(1): 7-12.

CONTENTS

Ozone Source Apportionment at Urban Area during a Typical Photochemical Pollution Episode in the Summer of 2013 in the Yangtze River Delta	LI Hao, LI Li, HUANG Cheng, <i>et al.</i>	(1)
Pollution Characteristics and Ozone Formation Potential of Ambient VOCs in Winter and Spring in Xiamen	XU Hui, ZHANG Han, XING Zhen-yu, <i>et al.</i>	(11)
Temporal and Spatial Characteristics of Atmospheric NO ₂ over Hainan Island and the Pollutant Sources in Recent 10 Years	FU Chuan-bo, CHEN You-long, DAN Li, <i>et al.</i>	(18)
Composition of Organic Carbon/Elemental Carbon and Water-soluble Ions in Rice Straw Burning	HONG Lei, LIU Gang, YANG Meng, <i>et al.</i>	(25)
Gas Chromatography with a Pulsed Discharge Helium Ionization Detector for Measurement of Molecular Hydrogen(H ₂) in the Atmosphere	LUAN Tian, FANG Shuang-xi, ZHOU Ling-xi, <i>et al.</i>	(34)
Partial Pressure of CO ₂ and CO ₂ Degassing Fluxes of Huayankou and Xiaolangdi Station Affected by Xiaolangdi Reservoir	ZHANG Yong-ling, YANG Xiao-lin, ZHANG Dong	(40)
Distribution of Biogenic Organic Dimethylated Sulfur Compounds and Its Influencing Factors in the East China Sea in Summer	LI Jiang-ping, ZHANG Hong-hai, YANG Gui-peng	(49)
Remote Sensing Estimation of Total Suspended Matter Concentration in Xin'anjiang Reservoir Using Landsat 8 Data	ZHANG Yi-bo, ZHANG Yun-lin, ZHA Yong, <i>et al.</i>	(56)
Spatio-temporal Characteristics and Source Identification of Water Pollutants in Wenritang River Watershed	MA Xiao-xue, WANG La-chun, LIAO Ling-ling	(64)
Effect of Hydrochemistry Characteristics Under Impact of Human Activity: A Case Study in the upper Reaches of the Xijiang River Basin	YU Shi, SUN Ping-an, DU Wen-yue, <i>et al.</i>	(72)
Annual Variation of Different Phosphorus Forms and Response of Algae Growth in Meiliang Bay of Taihu Lake	WANG Ming, WU Xiao-fei, LI Da-peng, <i>et al.</i>	(80)
Distribution of Transferable Nitrogen in Poyang Lake Sediments and Its Response to the Variation of River-Lake Relationship	SHEN Hong-yan, ZHANG Mian-mian, NI Zhao-kui, <i>et al.</i>	(87)
Effect of Environmental Factors on Macroinvertebrate Community Structure in the Huntai River Basin in the Huntai River Basin	LI Yan-li, LI Yan-fen, XU Zong-xue	(94)
Effects of Outbreak and Extinction of Algal Blooms on the Microbial Community Structure in Sediments of Chaohu Lake	DIAO Xiao-jun, LI Yi-wei, WANG Shu-guang	(107)
Impacts of Algal Blooms Accumulation on Physiological Ecology of Water Hyacinth	WU Ting-ting, LIU Guo-feng, HAN Shi-qun, <i>et al.</i>	(114)
Speciation and Spatial-temporal Variation of Mercury in the Xiaolangdi Reservoir	CHENG Liu, MAO Yu-xiang, MA Bing-juan, <i>et al.</i>	(121)
Spatial Distribution of Mercury in Soils of a Typical Small Agricultural Watershed in the Three Gorges Reservoir Region	WANG Ya, ZHAO Zheng, MU Zhi-jian, <i>et al.</i>	(130)
Temporal and Spatial Variation of Mercury in Water of Agro-forestry and Livestock Compound Watershed in the Three Gorges Reservoir Area	ZHAO Zheng, WANG Ya, MU Zhi-jian, <i>et al.</i>	(136)
Effect of External Condition on the Static Migration and Release of Dibutyl-phthalate in the Soil of the Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir to the Overlying Water	SONG Jiao-yan, MU Zhi-jian, WANG Qiang, <i>et al.</i>	(143)
Ultraviolet-Visible(UV-Vis) and Fluorescence Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter(DOM) in Soils of Water-Level Fluctuation Zones of the Three Gorges Reservoir Region	GAO Jie, JIANG Tao, LI Lu-lu, <i>et al.</i>	(151)
Characterization of Chromophoric Dissolved Organic Matter(CDOM) in Zhoushan Fishery Using Excitation-Emission Matrix Spectroscopy(EEMs) and Parallel Factor Analysis(PARAFAC)	ZHOU Qian-qian, SU Rong-guo, BAI Ying, <i>et al.</i>	(163)
Pollution Characteristics and Distribution of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Organochlorine Pesticides in Groundwater at Xiaodian Sewage Irrigation Area, Taiyuan City	LI Jia-le, ZHANG Cai-xiang, WANG Yan-xin, <i>et al.</i>	(172)
Risk Assessment and Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Surface Sediments of Xinglin Bay Suburb Rivers of Xiamen	CHENG Qi-ming, HUANG Qing, LIAO Zhen-ni, <i>et al.</i>	(179)
Comparative Analysis of Two Different Methods for Risk Assessment of Groundwater Pollution: A Case Study in Beijing Plain	WANG Hong-na, HE Jiang-tao, MA Wen-jie, <i>et al.</i>	(186)
Transportation and Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Water-Soil from the Riparian Zone of Daye Lake, China	ZHANG Jia-quan, LI Xiu, ZHANG Quan-fa, <i>et al.</i>	(194)
Arsenic Removal by Coagulation Process and the Field Expanding Experiments for Yangzonghai Lake	CHEN Jing, ZHANG Shu, YANG Xiang-jun, <i>et al.</i>	(202)
Efficient Oxidative Degradation of Tetrabromobisphenol A by Silver Bismuth Oxide	CHEN Man-tang, SONG Zhou, WANG Nan, <i>et al.</i>	(209)
Removal of Tetracycline by a Kind of Nano-Sized Amorphous Carbon	WU Yi-xiao, LI Ai-min, WANG Di-hua, <i>et al.</i>	(215)
Adsorption Behavior of Anionic Dyes onto Magnetic Chitosan Derivatives	ZHANG Cong-lu, HU Xiao-min, ZHAO Yan, <i>et al.</i>	(221)
Forming Mechanism of Humic Acid-Kaolin Complexes and the Adsorption of Trichloroethylene	ZHU Xiao-jing, HE Jiang-tao, SU Si-hui	(227)
Impact on the Microbial Community of Municipal Sewage in the ANAMMOX System During the Cooling Process	ZHAO Zhi-rui, MIAO Zhi-jia, LI Duo, <i>et al.</i>	(237)
Application of FISH-NanoSIMS Technique in Environmental Microbial Ecology Study	CHEN Chen, BAI Yao-hui, LIANG Jin-song, <i>et al.</i>	(244)
Influence of Microcystin-LR on Cell Viability and Surface Characteristics of <i>Pseudomonas putida</i>	DENG Ting-jin, YE Jin-shao, PENG Hui, <i>et al.</i>	(252)
Screening, Combination of Microbial Deodorizer and the Optimization of Its Deodorizing Conditions	ZENG Su, LI Nan-hua, SHENG Hong-chan, <i>et al.</i>	(259)
Distribution and Enrichment Characteristics of Organochlorine Pesticides in Water and Halobios from Qingbang Island in Zhoushan, China	ZHANG Ze-zhou, XING Xin-li, GU Yan-sheng, <i>et al.</i>	(266)
Levels of Polychlorinated Biphenyls in Tibetan and Yi Adolescents' Hair from Liangshan Prefecture, Sichuan Province	ZHOU Ying, SUN Yi-ming, JIN Jun, <i>et al.</i>	(274)
Effects of Single and Co-Exposure of Cu and Chlorpyrifos on the Toxicity of Earthworm	XU Dong-mei, WANG Yan-hua, WANG Nan, <i>et al.</i>	(280)
Effect of Exogenous Selenium on Accumulation and Chemical Forms of Cadmium in Cucumber(<i>Cucumis sativus</i> L.)	XIONG Shi-juan, LIU Jun, XU Wei-hong, <i>et al.</i>	(286)
Pollution Characteristics of Platinum Group Elements in Road Rust in Xiamen	HONG Zhen-yu, HONG You-wei, YIN Li-qian, <i>et al.</i>	(295)
Spatial Distribution of Se in Soils from Different Land Use Types and Its Influencing Factors Within the Yanghe Watershed, China	SHANG Jing-min, LUO Wei, WU Guang-hong, <i>et al.</i>	(301)
Immobilization Impact of Different Fixatives on Heavy Metals Contaminated Soil	WU Lie-shan, ZENG Dong-mei, MO Xiao-rong, <i>et al.</i>	(309)
Form Tendency and Bio-availability Dynamics of Cu and Zn in Different Farm Soils After Application of Organic Fertilizer of Livestock and Poultry Manures	SHANG He-ping, LI Yang, ZHANG Tao, <i>et al.</i>	(314)
Analysis of Composition Characteristics of Municipal Solid Waste in South China	ZHANG Hai-long, LI Xiang-ping, QI Jian-ying, <i>et al.</i>	(325)
Sewage Sludge Conditioning by Bioleaching Combined with Fenton-like Oxidation	LIU Chang-geng, ZHANG Pan-yue, JIANG Jiao-jiao, <i>et al.</i>	(333)
Applicability of Bisphenol A Detection by a Planar Waveguide Fluorescent Biosensor	XU Wei-qi, ZHANG Yong-ming, ZHOU Xiao-hong, <i>et al.</i>	(338)
A New "Turn-on" Fluorescent Probe for Visual Detection of Hydrogen Sulfide	LIU Chun-xia, MA Xing, WEI Guo-hua, <i>et al.</i>	(343)
Analysis of Sap Flow Characteristics of the Chinese Pine in Typical Loess Plateau Region of China	ZHANG Han-dan, WEI Wei, CHEN Li-ding, <i>et al.</i>	(349)
Simultaneous Production of Hydrogen and Volatile Fatty Acid from <i>Macrocystis pyrifera</i>	ZHAO Xiao-xian, FAN Xiao-lei, GUO Rong-bo, <i>et al.</i>	(357)
Behaviors of Engineered Nanoparticles in Aquatic Environments and Impacts on Marine Phytoplankton	LI Man-lu, JIANG Yue-lu	(365)

《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)

2015年1月15日 第36卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 1 Jan. 15, 2015

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