

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第7期

Vol.34 No.7

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版



目次

唐山市大气颗粒物 OC/EC 浓度谱分布观测研究	郭育红, 辛金元, 王跃思, 温天雪, 李杏茹, 封孝信 (2497)
北京东灵山地区主要大气污染物浓度变化特征	于阳春, 胡波, 王跃思 (2505)
奥运前期与奥运期间北京市大气细颗粒物特征比较分析	张菊, 欧阳志云, 苗鸿, 王效科, 任玉芬, 宋文质 (2512)
华东森林及高山背景区域臭氧变化特征及影响因素	苏彬彬 (2519)
北京市居家空气微生物粒径及分布特征研究	方治国, 孙平, 欧阳志云, 刘芄, 孙力, 王小勇 (2526)
民用燃煤源中多环芳烃排放因子实测及其影响因素研究	海婷婷, 陈颖军, 王艳, 田崇国, 林田 (2533)
醇类汽油车醇醛酮、芳香烃和烯烃类排放的试验研究	张凡, 王建海, 王小臣, 王建昕 (2539)
微波解吸-催化燃烧净化甲苯研究	曹晓强, 张浩, 黄学敏 (2546)
生物滴滤池对 BTEX 的去除及相应细菌群落分析	李建军, 廖东奇, 许玫英, 孙国萍 (2552)
炼油厂废水处理站挥发性羰基化合物成分谱研究	周博宇, 刘旺, 王伯光, 周咪, 黄青, 周磊 (2560)
春季东、黄海溶解甲烷的分布和海气交换通量	曹兴朋, 张桂玲, 马啸, 张国玲, 刘素美 (2565)
千岛湖湖泊区水体季节性分层特征研究	董春颖, 虞左明, 吴志旭, 吴春金 (2574)
新安江流域土地利用结构对水质的影响	曹芳芳, 李雪, 王东, 赵越, 王玉秋 (2582)
长江中下游草型湖泊浮游植物群落及其与环境因子的典范对应分析	孟睿, 何连生, 过龙根, 席北斗, 李中强, 舒俭民, 刁晓君, 李必才 (2588)
河口盐度梯度下溶解态核酸的微生物可利用性	杨青青, 李朋辉, 黄清辉 (2597)
水藻暴发的影响因素定量化研究初步	张卓, 宋志尧, 黄昌春, 俞肇元 (2603)
深水型水库藻类功能组时空演替及生境变化的影响	卢金锁, 胡亚潘 (2611)
结合水体光学分类反演太湖总悬浮物浓度	周晓宇, 孙德勇, 李云梅, 李俊生, 龚绍琦 (2618)
Subwet 模型在人工湿地设计中的应用	李慧峰, 黄津辉, 林超 (2628)
白洋淀荷茎叶提取液对铜绿微囊藻及四尾栅藻化感效应	何连生, 孟繁丽, 刁晓君, 李一葳, 孟睿, 席北斗, 舒俭民 (2637)
苦草 (<i>Vallisneria spiralis</i>) 对城市缓流河道黑臭底泥理化性质的影响	许宽, 刘波, 王国祥, 马久远, 曹勋, 周峰 (2642)
铁屑-微生物协同还原去除水体中 Cr(VI) 研究	汤洁, 王卓行, 徐新华 (2650)
铁铜催化剂非均相 Fenton 降解苯酚及机制研究	杨岳主, 李玉平, 杨道武, 段锋, 曹宏斌 (2658)
不同形态无机氮对水中微量药物安替比林光降解效能影响	赵倩, 陈超, 封莉, 张立秋 (2665)
邻苯二甲酸二甲酯的紫外光-H ₂ O ₂ 降解机制研究	刘青, 陈成, 陈泓哲, 杨绍贵, 何欢, 孙成 (2670)
二胺基改性有序多孔 SBA-15 对溶液中 Cd ²⁺ 离子的吸附研究	张萌, 杨亚提, 秦睿, 王力, 张增强, 李忠宏, 李荣华, 孟昭福 (2677)
酸化蛭石的表面有机修饰及其对疏水性微污染物的吸附	蒋争明, 于旭彪, 胡芸, 任源, 李雪辉, 韦朝海 (2686)
基于废陶瓷的多孔陶瓷研制及其对 Ni ²⁺ 的吸附性能	张永利, 王承智, 史册, 尚玲玲, 马瑞, 董婉莉 (2694)
树皮支持的厌氧生物法去除地下水中的高氯酸盐	王蕊, 刘菲, 陈楠, 陈鸿汉 (2704)
Cr(VI) 污染地下水修复的 PRB 填料实验研究	朱文会, 董良飞, 王兴润, 翟亚丽 (2711)
化学沉淀法去除稀土湿法冶炼废水中钙与高浓度氨氮研究	王浩, 成官文, 宋晓薇, 徐子涵, 蒙金结, 董传强 (2718)
镍铁尾矿硫酸浸出动力学研究	陈安安, 周少奇, 黄鹏飞 (2729)
HRT 对 A ² O 工艺中典型多环麝香迁移转化的影响	刘鹏程, 黄满红, 陈东辉, 陈亮 (2735)
发酵液作为 EBPR 碳源的动力学模拟	张超, 陈银广 (2741)
强化污泥利用水解反应器改善碳源与污泥减量作用研究	熊娅, 王强, 宋英豪, 朱民, 林秀军 (2748)
污泥胞外聚合物的提取方法及其对污泥脱水性能的影响	周俊, 周立祥, 黄焕忠 (2752)
不同粒径铁铝泥对砷(Ⅲ)的吸附效果	林璐, 胥嘉瑞, 吴昊, 王昌辉, 裴元生 (2758)
我国畜禽粪便污染的区域差异与发展趋势分析	仇焕广, 廖绍攀, 井月, 栾江 (2766)
浙北平原富硒土壤资源区硒来源的定量分离	徐明星, 潘卫丰, 岑静, 马学文 (2775)
三江平原土地利用方式变化对土壤锰形态影响	张仲胜, 吕宪国, 宋晓林 (2782)
吉林前郭水田土壤有机碳垂直分布规律和储量研究	汤洁, 张雯辉, 李昭阳, 张楠, 胡猛 (2788)
关中地区农田土壤有机碳固存速率及影响因素: 以陕西武功县为例	张晓伟, 许明祥 (2793)
三峡库区不同林草措施土壤活性有机碳及抗蚀性研究	黄茹, 黄林, 何丙辉, 周立江, 于传, 王峰 (2800)
土壤自养微生物同化碳向土壤有机碳库输入的定量研究: ¹⁴ C 连续标记法	史然, 陈晓娟, 吴小红, 简燕, 袁红朝, 葛体达, 隋方功, 童成立, 吴金水 (2809)
西南丘陵区保护性耕作下小麦农田土壤呼吸及影响因素分析	张赛, 张晓雨, 王龙昌, 罗海秀, 周航飞, 马仲炼, 张翠微 (2815)
丹江口水库迁建区土壤有机氯农药的分布特征及风险评价	李子成, 秦延文, 郑丙辉, 张雷, 赵艳民, 时瑶 (2821)
农药企业场地苯系物污染风险及调控对策	庞博, 王铁宇, 杜立宇, 谭冰, 朱朝云, 吕永龙 (2829)
水分管理对硫铁镉在水稻根区变化规律及其在水稻中积累的影响	张雪霞, 张晓霞, 郑煜基, 王荣萍, 陈能场, 卢普相 (2837)
硝酸盐对沉积物中有机物氧化减量及微生物群落结构的影响	刘近, 邓代永, 孙国萍, 刘永定, 许玫英 (2847)
零价铁对脱色希瓦氏菌 S12 偶氮还原的促进作用	周庆, 陈杏娟, 郭俊, 孙国萍, 许玫英 (2855)
2 株好氧反硝化菌的筛选及其强化贫营养生物膜脱氮效果	全向春, 岑艳, 钱殷 (2862)
反硝化聚磷菌快速富集、培养及其荧光原位杂交技术鉴别	刘立, 汤兵, 黄绍松, 付丰连, 张启泰, 黎健彬, 罗建中 (2869)
1 株反硝化除磷菌的鉴定及其反硝化功能基因研究	张倩, 王弘宇, 桑穗姣, 李孟, 杨开, 马放 (2876)
1 株高效 BBP 降解菌的分离与特性研究	陈湖星, 杨雪, 张凯, 钟秋, 郭佳, 王攀, 熊丽, 刘德立 (2882)
微生物-化学水解联合作用下烟嘧磺隆的降解	张小林, 李咏梅, 袁志文 (2889)
扑草净降解菌的分离、筛选与鉴定及降解特性初步研究	周际海, 孙向武, 胡锋, 李辉信 (2894)
固定化 <i>Lysinibacillus cresolovorans</i> 的 PVA-SA-PHB-AC 复合载体制备及间甲酚的降解	李婷, 任源, 韦朝海 (2899)
生物破乳菌 <i>Alcaligenes</i> sp. S-XJ-1 表面活性物质提取与其破乳特性分析	黄翔峰, 张树聪, 彭开彰, 陆丽君, 刘佳 (2906)
A ² O 工艺活性污泥中可培养丝状细菌的多样性	高莎, 金德才, 赵志瑞, 齐嵘, 彭霞薇, 白志辉 (2912)
生活垃圾堆肥渗滤液污染物组成与演化规律研究	李丹, 何小松, 席北斗, 魏自民, 潘红卫, 赵国鹏, 崔东宇 (2918)
专辑征稿通知 (2551) 《环境科学》征稿简则 (2685) 《环境科学》征订启事 (2868) 信息 (2875)	

深水型水库藻类功能组时空演替及生境变化的影响

卢金锁, 胡亚潘

(西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西安 710055)

摘要: 藻类功能分组是近年来生态学藻类研究的重要理论和方法. 为了探明西安某深水型水源水库藻类功能组时空演替及生境变化的影响, 于2011年8月起开展实验研究. 研究采用现场在线监测和实验室分析相结合的方法. 结果表明, 水库藻类可分为10个功能组类别: B、D、P、X₁、X₃、F、G、J、L_M、MP. 其中, 功能组B、P、F、X₁、MP、D、J在水库中较为常见, X₃、G、L_M出现几率较低, 功能组B、D、P、X₁、X₃的藻类数量占优. 通过分析环境因子的变化对功能组时空演替的影响, 发现水温为最主要的影响因子. 水库藻类生长策略为: 春季R/CR策略藻种→春末夏初CR/C策略藻种→夏末秋初C/CR/R/CS/S策略藻种→秋末及冬季CR/R策略藻种. 此研究可为深水型水库安全取水提供理论支持.

关键词: 时空演替; 藻类功能组; 藻类生境变化; 水体分层机制; 深水型水库

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)07-2611-07

Spatiotemporal Succession of Algae Functional Groups and the Influence of Environment Change in a Deep-water Reservoir

LU Jin-suo, HU Ya-pan

(School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: Algae functional group has become an important theory and method of algae research in recent years. In order to explore the spatiotemporal succession of algae functional groups and the influence of environment change, water samples were collected in August, 2011 from a deep-water reservoir in Northwest China. The research combined the methods of on-line monitoring and laboratory analysis. The results showed that there were 10 functional groups of algae in the reservoir. They were designated as B, D, P, X₁, X₃, F, G, J, L_M and MP. Wherein, the groups B, P, F, X₁, MP, D and J were comparatively common functional groups, and the groups X₃, G and L_M were less common. The populations of groups B, D, P, X₁ and X₃ were larger than those of the others. Besides, the analysis of changes in the environment factors suggested that temperature was the most important factor influencing the spatiotemporal succession of algae functional groups. The strategy of algal growth followed the law: R/CR in spring → CR/C in late spring and early summer → C/CR/R/CS/S in late summer and early autumn → CR/R in late autumn and winter. The purpose of this article is to provide theoretical support for water withdrawal safety in deep-water reservoirs.

Key words: spatiotemporal succession; phytoplankton functional classification; environment change; water stratification; deep-water reservoir

近年来, 浮游植物功能分组成为国内外生态学藻类研究的主要理论及方法. 该理论是 Reynolds 等^[1] 2002 年提出, 后经 Padisák 等^[2] 补充完善而形成的关于藻类生理生态研究的理论成果. 这一理论的提出对于建立生境变化同浮游植物群落演替之间的科学关系具有重大的实际意义. 国外已有许多学者采用该分类方法研究水库富营养化状态和浮游植物群落动态^[3-8], 而国内相关研究尚不多见, 仅见李哲等^[9] 对三峡小江(澎溪河)中藻类季节演替特点进行过研究, Wang 等^[10] 研究三峡水库水位波动对浮游植物功能类群动态的影响, Xiao 等^[11] 采用功能类群分组方法研究广州流溪河水库浮游植物群落动态, Hu 等^[12] 尝试将文献已报道的广东 20 座水库浮游植物类群进行功能分组, 还未发现有人将此理论应用到深水型水源水库的研究中来.

水面宽、水深大、流速缓等是深水型水源水库有别于天然河流湖泊的主要特点. 因水体流速变缓, 入库水体携带的各种营养物质会在库区中富集, 易造成水体的富营养化, 进而导致藻类的季节性高发^[13]. 水库大水深的特点导致夏秋季节纵向水体出现明显的水体热分层现象, 这种纵向上的热分层能显著抑制动量、热量、营养盐以及水生生物的纵向输移, 从而作用于水库水动力特征以及生化过程, 并带来一系列的水质及生态问题^[14].

为探明藻类功能组时空演替规律及生境变化对其的影响, 以西安某深水型水源水库藻类群落一年的监测结果为基础, 根据 Reynolds 等^[1] 的藻类功能

收稿日期: 2012-09-22; 修订日期: 2013-03-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(51008242)

作者简介: 卢金锁(1977~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为供水系统安全理论与技术, E-mail: lujinsuo@163.com

分组及 Padisák 等^[2]的后续补充完善的研究成果,对水库藻类群落进行功能分类,探究深水型水源水库在营养分布差异、水体分层等条件下藻类群落分组的时空演替特点,以期以降低原水中藻类含量保证水库水源的水质安全提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 研究区域和取样方法

西安某深水型水库是西安最主要的地表饮用水供水水源,为典型河道型水库,如图 1 所示,水库主库区最大水深可达 90~105 m,平均水深 60~95 m。水库设计正常高水位 594.0 m,正常低水位为 570.0 m,总库容为 2.0 亿 m³,日平均供水量为 76.0 万 m³。在水库右岸布设 $D=3.5$ m 压力引水洞,取水塔取水分三层,取水高程分别为 512.43、554.0、571.0 m。高水位时开启上层取水口取水,低水位时开启中层取水口取水。

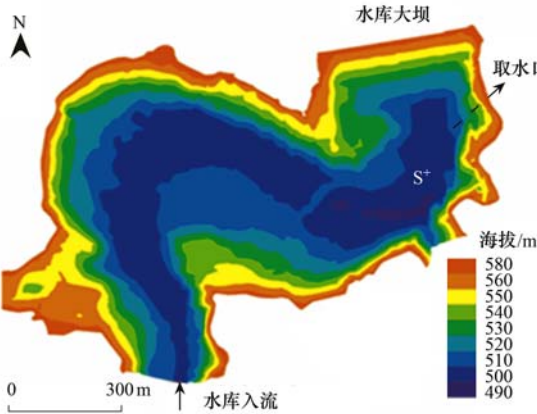


图 1 深水型水源水库存及取样点示意
Fig. 1 Map of the deep-water reservoir and sampling site

选取水库主库区的某一点 S 为取样点,沿纵向每月进行 2 次采样,采样水深为 0、5、10、20、30、40、50、60 m,采样时间控制在当日 11:00~15:00。采用美国哈希公司产品 Hydrolab 多参数水质分析仪 DS5 进行现场水温等指标测定。现场取 1 000 mL 水样加 10 mL 鲁哥试剂固定,用于实验室藻细胞密度计数及藻种鉴定,剩余水样完成所有化学指标的分析测定。

1.2 藻类监测及分析方法

将加有鲁哥试剂的水样静置 48 h 后浓缩至 50 mL,在普通光照显微镜下进行藻类鉴定、计数^[15]。藻类鉴定及计数方法参照文献[16]。根据 Reynolds 等^[1]、Padisák 等^[2]相关文献的研究成果对所检出

的藻种进行功能组分类,对个别生理生态特征缺失的藻种,则结合前人研究结果、栖息生境特征和形态特征^[17,18],确定其 C-R-S 生长策略,并粗判其功能组别。研究时期从 2011 年 8 月开始至 2012 年 7 月结束,期间所有数据采用 MATLAB 7.8 软件绘制等值线图进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 水库藻类功能组类别

研究期间深水型水库的水体中共发现藻类 4 门 27 属,包括绿藻门 14 属、硅藻门 10 属、蓝藻门 2 属、金藻门 1 属。将研究期间监测到的藻种(属)进行功能分组,可分为 10 个功能组: B、D、P、X₁、X₃、F、G、J、L_M、MP。频率分析发现(图 2),功能组 B、P、F、X₁、MP、D、J 在深水型水库中较为常见,而 X₃、G、L_M 出现几率较低。各功能分组的代表藻种(属)及其 C-R-S 生长策略见表 1。

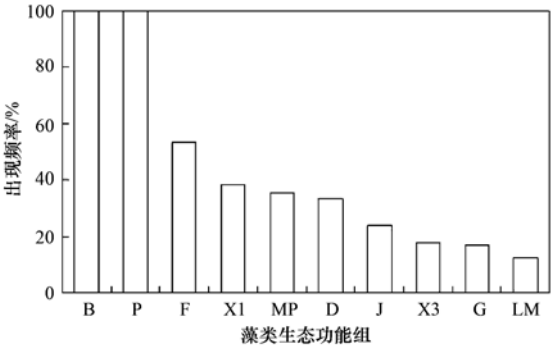


图 2 藻类生态功能组频率分布
Fig. 2 Frequency distribution of functional groups

表 1 研究期间该深水型水库中藻类生态功能分组的代表藻种、C-R-S 生长策略
Table 1 Representative species of phytoplankton functional groups and their growth strategies

功能组别	代表藻种(属)	生长策略
B	小环藻、冠盘藻	CR
D	针杆藻	R
P	脆杆藻、直链藻、角星鼓藻	R
X ₁	小球藻、弓形藻、蹄形藻	C
X ₃	金杯藻	C
F	卵囊藻、浮球藻、肾形藻	CS
G	实球藻、空球藻、浮球藻	CS
J	栅藻、盘星藻	CR
L _M	微囊藻	S
MP	舟形藻、布纹藻	CR

2.2 藻类功能组别演替特征

研究期间,水库主要藻类功能组结构季节及纵向演替特征如表 2 所示。从季节演替方面看,夏秋季

多种藻类功能组共存,而冬春季功能组结构组成比较单一.从纵向演替方面看,除了数量较小的功能组(如 J、F、G、L_M 等)纵向分布存在一定差异外,功能组结构的差异并不明显.从最优功能组方面分析,除了功能组 X₁ 在 9 月、X₃ 在 5 月成为最优功能组外,D、P、B 这 3 种功能组交替成为水库优势最优的功能组;8 月以 B/D 共存的状态,20 m 以上功能组 D 为主,20 m 以下则以功能组 B 为主.从 10 月~

次年 3 月,P 功能组藻类逐渐成为优势藻种,功能组 B 次之,而功能组 D 消失.4 月及 6 月,气温回暖,呈现以 B 为主导、P 次之的功能组状态.7 月功能组 D 再次出现,并成为优势功能组.根据藻类生长策略划分,水库藻类生长策略季节演替规律为:春季 R/CR 策略藻种→春末夏初 CR/C 策略藻种→夏末秋初 C/CR/R/CS/S 策略藻种→秋末及冬季 CR/R 策略藻种.

表 2 主要藻类功能组结构的时空演替特征¹⁾

Table 2 Spatiotemporal succession of the representative algal groups								
时间	表层	5 m	10 m	20 m	30 m	40 m	50 m	60 m
2011 年 8 月	D/B/P/F/L _M /X ₁	D/B/P/G/L _M	D/B/P/F	D/B/P/MP	B/D/P	B/D/P/F	B/D/P/MP	D/B/P
2011 年 9 月	P/X ₁ /B/D/G/L _M	X ₁ /B/P/D/L _M	X ₁ /B/P/D/L _M	X ₁ /P/B	X ₁ /P/B/MP	X ₁ /P/B/D	B/P/X ₁ /D	B/P/X ₁ /D
2011 年 10 月	P/B/X ₁	P/B	P/B	P/B	P/B	P/B/G	P/B	P/B
2011 年 11 月	P/B/MP	P/B/D/MP	P/B	P/B	P/B/MP	P/B/MP	P/B/MP	P/B
2011 年 12 月	P/B/MP	P/B	P/B /MP	P/B	P/B/MP	P/B	P/B/MP	P/B
2012 年 1 月	P/B	P/B/D	P/B/MP	P/B	P/B/MP	P/B	P/B	P/B/MP
2012 年 2 月	P/B	P/B/MP	P/B/MP	P/B	P/B	P/B	P/B	P/B
2012 年 3 月	P/B/D	P/B	P/B	P/B	P/B	P/B	P/B	P/B
2012 年 4 月	B/P/G/J	B/P/G/J	P/B/G/MP	P/B/G	B/P/G/MP/J	P/B/J	B/P/J	P/B/F
2012 年 5 月	X ₃ /X ₁ /B/P	X ₃ /B/X ₁	X ₃ /B/X ₁	P/X ₃ /X ₁ /B	X ₃ /B/P/X ₁	B/P/X ₃ /X ₁	B/P/X ₃ /X ₁ /F	B/P/X ₃
2012 年 6 月	P/B/X ₁ /X ₃ /F/G	B/P/G	P/B/F/J/X ₁	B/P/X ₁ /F/J	B/P/X ₁ /J	B/P	P/B	P/B
2012 年 7 月	B/D/P/G/L _M	B/D/P/J/L _M /MP	B/D/P/G/L _M	B/D/P/F/G	B/D/P/L _M	B/D/P/F/G/J/MP	P/B/D	P/B/D

1) 功能组序列按照各功能组藻类数量所占比例降序排列

2.3 优势功能组藻类数量分布

由图 1 可知,功能组 B、P 水库常年优势功能组,其藻类数量变化如图 3~4 所示.功能组 B 在稳定分层期 1 的 10 m 以上水体数量较大,能达到 80 万个·L⁻¹,在稳定分层期 1 的 50 m 以下水体以及分层重建期藻类数量也较高.功能组 P 在分层失稳期的底部水体以及完全混合期数量较大,尤其在分层失稳期水深 50 m 以下水体中,藻类数量高达 200 万个·L⁻¹以上.其他功能组藻类在适宜环境条件下会

大量繁殖成为优势功能组,如功能组 D 在 3 月及 8~9 月成为优势藻类功能组,X₁ 在 5~6 月及 8~9 月成为藻类优势功能组,X₃ 在 5 月出现水华现象,数量远远高于其他功能组,成为该时期的藻类优势功能组,此处不再一一述说.

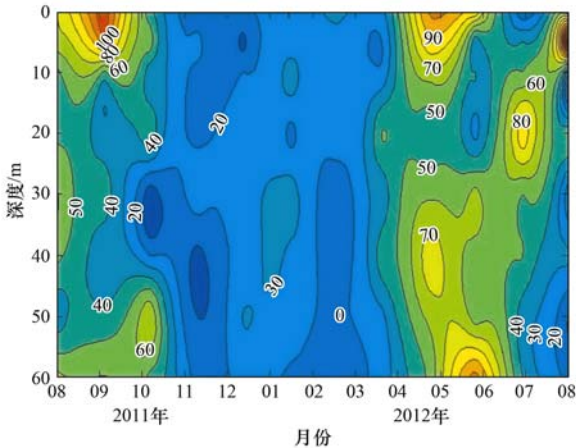


图 3 功能组 B 藻类数量时空分布特征
Fig. 3 Distribution characteristics of group B

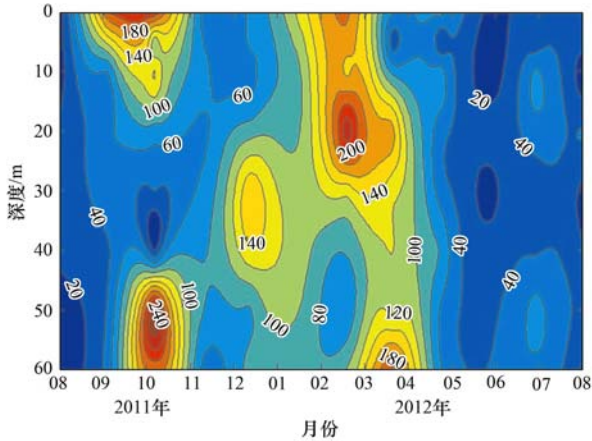


图 4 功能组 P 藻类数量时空分布特征
Fig. 4 Distribution characteristics of group P

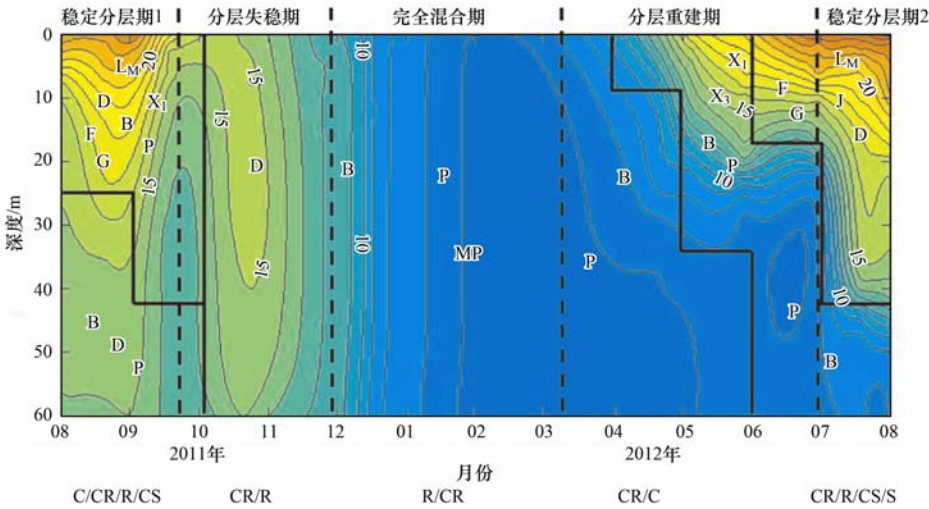
2.4 生境条件及藻类功能组演替特性

2.4.1 水温

研究期间水库水温及主要功能组结构分布如图 5 所示.根据水库水温分层状态,将水库水体分为五

个时期进行研究(稳定分层期1、分层失稳期、完全混合期、分层重建期及稳定分层期2),用虚线分隔.根据表2藻类功能组藻类演替特征,将功能组结构分为若干个区,用实线分隔.由图5可知,功能组 L_M 、G、J、 X_3 、 X_1 藻类适宜在温度 15°C 以上的水体中生长,为C/CS/S型生长策略藻类,由于 X_1 上下水体对流掺混明显,所以上下水体间温度相差不大,且在下层水体中也能检测到功能组 X_1 的存在.功能

组D藻类适宜在温度 $10\sim 15^{\circ}\text{C}$ 的环境中生长,为R型生长策略藻类.功能组MP藻类适宜在温度 10°C 以下的环境中生长,为CR型生长策略藻类.功能组B、P在高低温水体中都会存在,但从藻类数量上看,其最适宜的生长环境为温度 10°C 以下水体,为CR/R型生长策略藻类.由以上分析可以看出,功能组的演替特征与水温存在明显的相关性,不同功能组藻类具有不同的适宜温度.



实线为功能组分区线,虚线为水温分区线,下同

图5 水库水温分布及变化等值线

Fig. 5 Contour map of temperature distribution in reservoir water

2.4.2 氮磷

研究期间 TN 、 TP 、 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 的含量及功能组分布如图6~9所示.由图6可知,在稳定混合期1的 TN 含量较高,为 $1.0\sim 2.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,而分

层失稳期水深 30 m 以下水体中 TN 含量出现急剧下降,完全混合期及分层重建期 TN 含量基本维持在 $0.6\sim 1.4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,在稳定分层期2, TN 含量有所增加,但增幅不大.由图7可知, TP 含量只

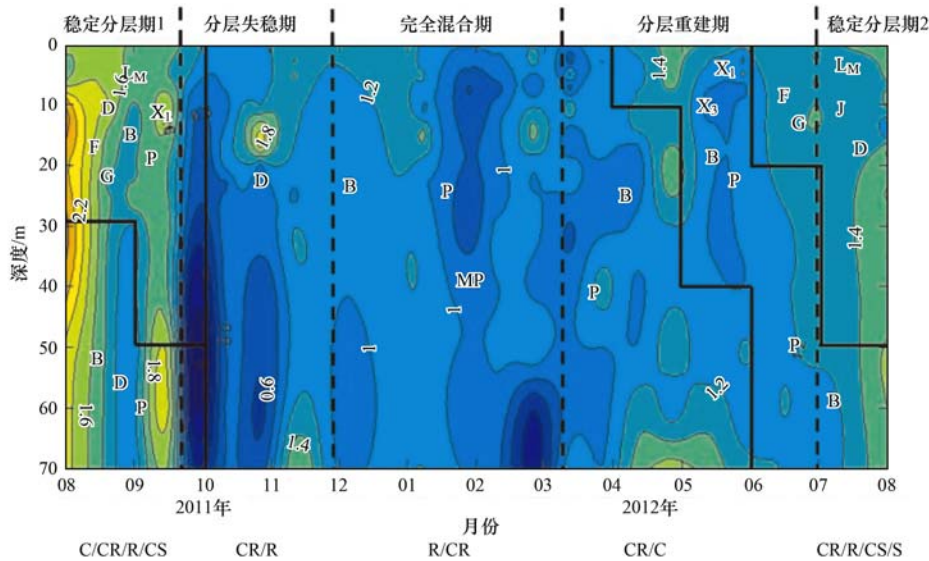


图6 水库TN分布及变化等值线

Fig. 6 Contour map of TN distribution

有在稳定分层期 1 及分层失稳期的前期出现较大值,最大值为 $0.24\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,而其他时期 TP 含量基本在 $0.04\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下. 由图 8 可知, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量在稳定分层期 1 及分层失稳期出现较大值,且主要分布于水深 40 m 以下水体. 藻类功能组 B、D、P 等在底部无光条件下生长,很可能与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的含量有关. 由图 9 可知, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的含量纵向差异较小,只有在分层失稳期水深 30 m 以下水体中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量急剧下降,这与 TN 的分布规律类似,出现这一现象可能与当时洪水潜流及山体塌方等

因素有关.

从图 6 ~ 9 中藻类功能组结构分布上看,功能组结构分布的时空分布与氮磷含量并不存在明显的相关性,仅于 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量近似相关,但还需进一步定量分析. 根据 OECD(经济合作与发展组织)的营养状态分类,该水库水体已经为中-富营养化状态. 在此营养状态下,功能组 B、P、G、J、 X_1 、 X_3 、 L_M 等藻类大量繁殖生长,这与 Reynolds 等^[1]的研究结果相同,但藻类功能分组与氮磷的弱相关性可能与水体营养状态相近有关.

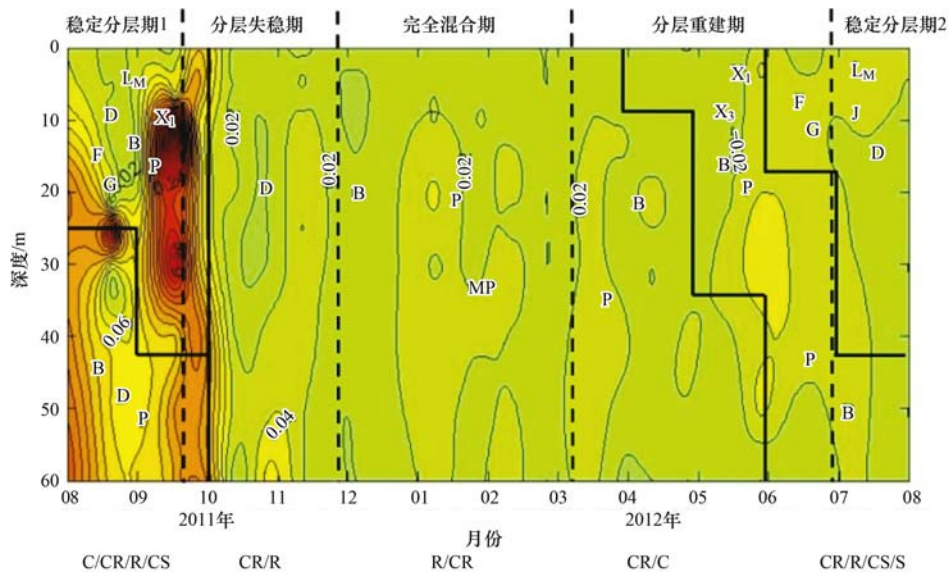


图 7 水库 TP 分布及变化等值线

Fig. 7 Contour map of TP distribution

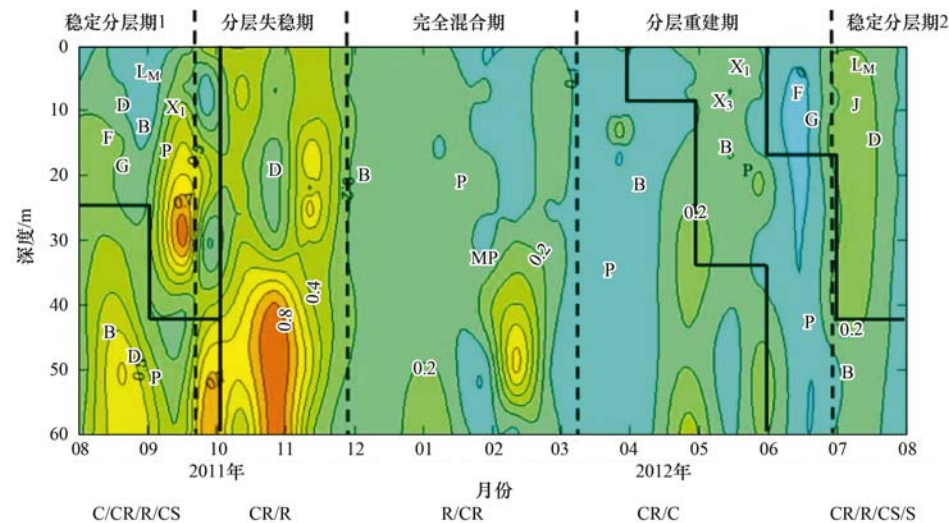
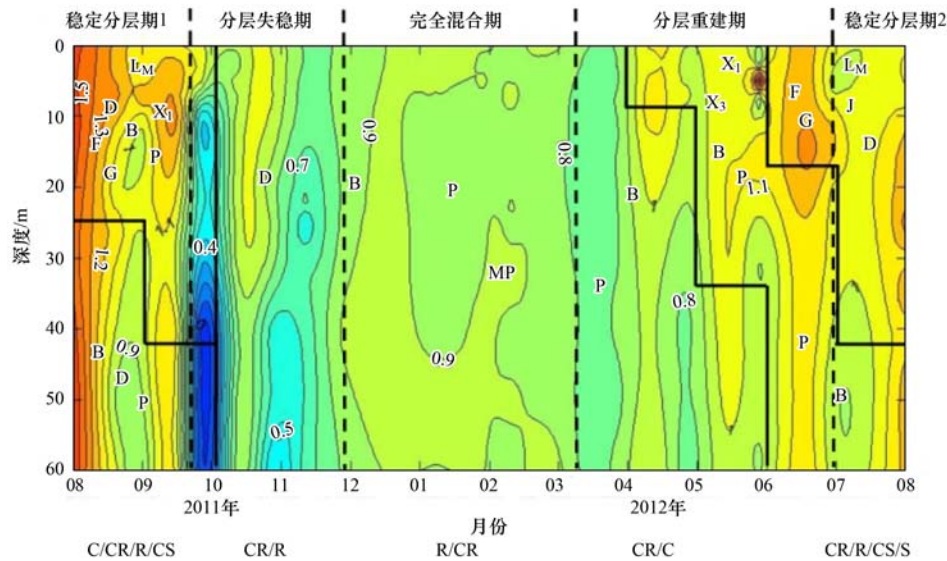


图 8 水库 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 分布及变化等值线

Fig. 8 Contour map of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ distribution

图9 水库 NO_3^- -N 分布及变化等值线Fig. 9 Contour map of NO_3^- -N distribution

3 讨论

特定的藻类功能组结构对应于特定的生境条件^[19]. 同其他水库湖泊相比,深水型水库具有明显的水体分层特征及水体水质时空差异性,这一特性必会对藻类功能组结构产生影响. 针对功能组生境条件,Reynolds^[20]提出,营养物含量对藻类生长影响主要表现为绝对限制性,大部分淡水藻类氮、磷的绝对限制阈值范围约为 $\text{DIN} < 11 \sim 14 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{SRP} < 3 \sim 4 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$. 氮、磷等营养物浓度超过绝对限制的阈值范围,藻种对胞外可用营养物的竞争不再显著. 本研究中可以看出,温度是藻类功能组结构演替的最主要因素. 由于水库水体的营养状态都已经超过了限制阈值,因此表现出氮、磷等对于藻类功能组结构的影响并不明显.

功能组藻类生物量取决于藻类生长率和消亡率之间的平衡. 营养盐、光照可利用量和水温是影响藻类生长的主要因素,水体流动、生物间捕食关系及自身沉降是影响藻类消亡的主要因素^[17]. 藻类自身的生理特性也对藻类生物量有一定影响. 本研究中,功能组 L_M 、 G 、 J 、 X_3 、 X_1 藻类在 15°C 以上生长迅速,而功能组 B 、 P 则在低温环境中生长率最高,这一方面与水体环境有关,更主要的还在于功能组藻类自身的生理特性. 邱昌恩等^[21]就对绿球藻的生长及生理特性进行过研究,也可得出类似的结论.

稳定的湖泊系统中,藻类群落在光热传递季节变化与营养物输入的交叠影响下将沿着一定的群落

演替路径发生结构变化^[17],以欧洲和北美的富营养深水分层湖泊为例,其演替模式为:冬季 R 策略藻种(星杆藻 C 组)→冬末初春 C 策略衣藻、小球藻等或群体生长型 CS 策略的团藻→春季 S 策略藻种(鱼腥藻)→ RS 策略的鼓藻/ R 策略脆杆藻、直链藻等^[17]. 同湖泊系统完善的 C-R-S 季节演替模式相比,本研究的藻类功能组演替模式中,缺失了 RS 型、 S 型策略的藻类占优势的时段,而在相当长的时期内都是以 R/CR 策略藻类为主的藻类群落格局. 在藻类生境改变驱动群落演替的基本假设下,此现象说明,该深水型水库藻类功能组演替不仅与水库藻类生境条件有关,也可能与水库取水抽吸作用、水库水位变化等因素有关. 关于水库取水及水位变化对于藻类功能组结构演替的影响将在以后的研究中展开.

4 结论

(1) 该深水型水库水体中共检出 10 个藻类功能组类别: B 、 D 、 P 、 X_1 、 X_3 、 F 、 G 、 J 、 L_M 、 MP . 其中,功能组 B 、 P 、 F 、 X_1 、 MP 、 D 、 J 在深水型水库中较为常见,功能组 B 、 P 、 D 、 X_1 、 X_3 藻类占较大比重.

(2) 藻类功能组结构演替特征表现为夏秋季多种藻类功能组共存,而冬春季功能组结构组成比较单一.

(3) 水库藻类生长策略为:春季 R/CR 策略藻种→春末夏初 CR/C 策略藻种→夏末秋初 C/CR/

R/CS/S 策略藻种→秋末及冬季 CR/R 策略藻种。

(4) 功能组时空演替特征与环境变化密切相关,水温是功能组演替的最主要的影响因素。

参考文献:

- [1] Reynolds C S, Huszar V, Kruk C, *et al.* Towards a functional classification of the freshwater phytoplankton [J]. *Journal of Plankton Research*, 2002, **24**(5): 417-428.
- [2] Padisák J, Crossetti L O, Naselli-Flores L. Use and misuse in the application of the phytoplankton functional classification: a critical review with updates[J]. *Hydrobiologia*, 2009, **621**(1): 1-19.
- [3] Crossetti L O, De Bicudo C E M. Phytoplankton as a monitoring tool in a tropical urban shallow reservoir (Garças Pond): the assemblage index application [J]. *Hydrobiologia*, 2008, **610**(1): 161-173.
- [4] Padisák J, Borics G, Fehér G, *et al.* Dominant species, functional assemblages and frequency of equilibrium phases in late summer phytoplankton assemblages in Hungarian small shallow lakes[J]. *Hydrobiologia*, 2003, **502**(1-3): 157-168.
- [5] Devercelli M. Phytoplankton of the Middle Paraná River during an anomalous hydrological period: a morphological and functional approach[J]. *Hydrobiologia*, 2006, **563**(1): 465-478.
- [6] Becker V, Caputo L, Ordóñez J, *et al.* Driving factors of the phytoplankton functional groups in a deep Mediterranean reservoir [J]. *Water Research*, 2010, **44**(11): 3345-3354.
- [7] Becker V, Huszar V, Crossetti L O. Responses of phytoplankton functional groups to the mixing regime in a deep subtropical reservoir[J]. *Hydrobiologia*, 2009, **628**(1): 137-151.
- [8] Ferragut C, De Bicudo D C. Periphytic algal community adaptive strategies in N and P enriched experiments in a tropical oligotrophic reservoir[J]. *Hydrobiologia*, 2010, **646**(1): 295-309.
- [9] 李哲, 方芳, 郭劲松, 等. 三峡小江(澎溪河)藻类功能分组及其季节演替特点[J]. *环境科学*, 2011, **32**(2): 392-400.
- [10] Wang L, Cai Q H, Xu Y Y, *et al.* Weekly dynamics of phytoplankton functional groups under high water level fluctuations in a subtropical reservoir-bay[J]. *Aquatic Ecology*, 2011, **45**(2): 197-212.
- [11] Xiao L J, Wang T, Hu R, *et al.* Succession of phytoplankton functional groups regulated by monsoonal hydrology in a large canyon-shaped reservoir[J]. *Water Research*, 2011, **45**(16): 5099-5109.
- [12] Hu R, Xiao L J. Functional classification of phytoplankton assemblages in reservoirs of Guangdong province, south China [A]. In: Han B, Liu Z, (eds.). *Tropical and Sub-Tropical Reservoir Limnology in China*[C]. UK: Springer Press, 2012. 59-70.
- [13] 刘信安, 湛敏, 马艳娥. 三峡库区流域藻类生长与营养盐吸收关系[J]. *环境科学*, 2005, **26**(4): 95-99.
- [14] 马越. 北方河道型深水水库季节性分层的水质响应特征及其水质污染原位控制研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2012. 1-4.
- [15] 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. 649-654.
- [16] 胡鸿钧, 魏印心. 中国淡水藻类——系统分类及生态[M]. 北京: 科学出版社, 2006. 23-91.
- [17] Reynolds C S. The ecology of phytoplankton[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2006. 1-436.
- [18] Litchman E, Klausmeier C A. Trait-based community ecology of phytoplankton[J]. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2008, **39**(1): 615-639.
- [19] Reynolds C S. What factors influence the species composition of phytoplankton in lakes of different trophic status? [J]. *Hydrobiologia*, 1998, **369-370**: 11-26.
- [20] Reynolds C S. Experimental manipulations of the phytoplankton periodicity in large limnetic enclosures in Blelham Tam, English Lake District[J]. *Hydrobiologia*, 1986, **138**(1): 43-64.
- [21] 邱昌恩, 况琪军, 刘国祥, 等. 不同氮浓度对绿球藻生长及生理特性的影响[J]. *中国环境科学*, 2005, **25**(4): 408-411.

CONTENTS

Observation of Size Distribution of Atmospheric OC/EC in Tangshan, China	GUO Yu-hong, XIN Jin-yuan, WANG Yue-si, <i>et al.</i> (2497)
Changing Characteristics of the Main Air Pollutants of the Dongling Mountain in Beijing	YU Yang-chun, HU Bo, WANG Yue-si (2505)
Characteristic Comparative Study of Particulate Matters in Beijing Before and During the Olympics	ZHANG Ju, OUYANG Zhi-yun, MIAO Hong, <i>et al.</i> (2512)
Characteristics and Impact Factors of O ₃ Concentrations in Mountain Background Region of East China	SU Bin-bin (2519)
Studies on the Size Distribution of Airborne Microbes at Home in Beijing	FANG Zhi-guo, SUN Ping, OUYANG Zhi-yun, <i>et al.</i> (2526)
Emission Factors of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Residential Coal Combustion and Its Influence Factors	HAI Ting-ting, CHEN Ying-jun, WANG Yan, <i>et al.</i> (2533)
Experimental Research on Alcohols, Aldehydes, Aromatic Hydrocarbons and Olefins Emissions from Alcohols Fuelled Vehicles	ZHANG Fan, WANG Jian-hai, WANG Xiao-cheng, <i>et al.</i> (2539)
Combination Process of Microwave Desorption-Catalytic Combustion for Toluene Treatment	CAO Xiao-qiang, ZHANG Hao, HUANG Xue-min (2546)
Removal of BTEX by a Biotrickling Filter and Analysis of Corresponding Bacterial Communities	LI Jian-jun, LIAO Dong-qi, XU Mei-ying, <i>et al.</i> (2552)
Source Profile of Volatile Carbonyl Compounds in Wastewater Treatment Plant of an Oil Refinery	ZHOU Bo-yu, LIU Wang, WANG Bo-guang, <i>et al.</i> (2560)
Distribution and Air-Sea Fluxes of Methane in the Yellow Sea and the East China Sea in the Spring	CAO Xing-peng, ZHANG Gui-ling, MA Xiao, <i>et al.</i> (2565)
Study on Seasonal Characteristics of Thermal Stratification in Lacustrine Zone of Lake Qiandao	DONG Chun-ying, YU Zuo-ming, WU Zhi-xu, <i>et al.</i> (2574)
Effects of Land Use Structure on Water Quality in Xin'anjiang River	CAO Fang-fang, LI Xue, WANG Dong, <i>et al.</i> (2582)
Canonical Correspondence Analysis Between Phytoplankton Community and Environmental Factors in Macrophtic Lakes of the Middle and Lower Reaches of Yangtze River	MENG Rui, HE Lian-sheng, GUO Long-gen, <i>et al.</i> (2588)
Microbial Bioavailability of Dissolved Nucleic Acids Across the Estuarine Salinity Gradient	YANG Qing-qing, LI Peng-hui, HUANG Qing-hui (2597)
Elementary Quantitative Study on Factors of Phytoplankton Bloom	ZHANG Zhuo, SONG Zhi-yao, HUANG Chang-chun, <i>et al.</i> (2603)
Spatiotemporal Succession of Algae Functional Groups and the Influence of Environment Change in a Deep-water Reservoir	LU Jin-suo, HU Ya-pan (2611)
Hyperspectral Remote Sensing of Total Suspended Matter Concentrations in Lake Taihu Based on Water Optical Classification	ZHOU Xiao-yu, SUN De-yong, LI Yun-mei, <i>et al.</i> (2618)
Application of Subwet Model in the Design of Constructed Wetland	LI Hui-feng, HUANG Jin-hui, LIN Chao (2628)
Allelopathic Effect of <i>Nelumbo nucifera</i> Stem and Leaf Tissue Extract on the Growth of <i>Microcystis aeruginosa</i> and <i>Scenedesmus quadricauda</i>	HE Lian-sheng, MENG Fan-li, DIAO Xiao-jun, <i>et al.</i> (2637)
Influence of <i>Vallisneria spiralis</i> on the Physicochemical Properties of Black-odor Sediment in Urban Sluggish River	XU Kuan, LIU Bo, WANG Guo-xiang, <i>et al.</i> (2642)
Removal of Cr(VI) by Iron Filings with Microorganisms to Recover Iron Reactivity	TANG Jie, WANG Zhuo-xing, XU Xin-hua (2650)
Degradation of Phenol with a Fe/Cu-Catalytic Heterogeneous-Fenton Process	YANG Yue-zhu, LI Yu-ping, YANG Dao-wu, <i>et al.</i> (2658)
Effect of Different Forms of Inorganic Nitrogen on the Photodegradation of Antipyrine in Water	ZHAO Qian, CHEN Chao, FENG Li, <i>et al.</i> (2665)
Degradation Mechanisms of Dimethyl Phthalate in the UV-H ₂ O ₂ System	LIU Qing, CHEN Cheng, CHEN Hong-zhe, <i>et al.</i> (2670)
Adsorption of Cd ²⁺ Ions in Aqueous by Diamine-Modified Ordered Mesoporous SBA-15 Particles	ZHANG Meng, YANG Ya-ti, QIN Rui, <i>et al.</i> (2677)
Surface Organic Modification of Acid Vermiculite and Its Adsorption of Hydrophobic Micro Pollutants in Aqueous Solutions	JIANG Zheng-ming, YU Xu-biao, HU Yun, <i>et al.</i> (2686)
Preparation of Porous Ceramics Based on Waste Ceramics and Its Ni ²⁺ Adsorption Characteristics	ZHANG Yong-li, WANG Cheng-zhi, SHI Ce, <i>et al.</i> (2694)
Perchlorate Removal from Underground Water by Anaerobic Biological Reduction with Bark	WANG Rui, LIU Fei, CHEN Nan, <i>et al.</i> (2704)
Experimental Study on the Remediation of Chromium Contaminated Groundwater with PRB Media	ZHU Wen-hui, DONG Liang-fei, WANG Xing-run, <i>et al.</i> (2711)
Removal of Calcium and High-strength Ammonia Nitrogen from the Wastewater of Rare-earth Elements Hydrometallurgical Process by Chemical Precipitation	WANG Hao, CHENG Guan-wen, SONG Xiao-wei, <i>et al.</i> (2718)
Leaching Kinetics of Josephinite Tailings with Sulfuric Acid	CHEN An-an, ZHOU Shao-qi, HUANG Peng-fei (2729)
Effects of HRT on Fate of Typical Polycyclic Musk by A ² O Process	LIU Peng-cheng, HUANG Man-hong, CHEN Dong-hui, <i>et al.</i> (2735)
Kinetic Simulation of Enhanced Biological Phosphorus Removal with Fermentation Broth as Carbon Source	ZHANG Chao, CHEN Yin-guang (2741)
Effluent Carbon Source Improvement and Sludge Reduction by Hydrolysis Reactor with Enhanced Sludge Utilization	XIONG Ya, WANG Qiang, SONG Ying-hao, <i>et al.</i> (2748)
Optimization of Extracellular Polymeric Substance Extraction Method and Its Role in the Dewaterability of Sludge	ZHOU Jun, ZHOU Li-xiang, WONG Woo-chung (2752)
Effectiveness of Arsenite Adsorption by Ferric and Alum Water Treatment Residuals with Different Grain Sizes	LIN Lu, XU Jia-rui, WU Hao, <i>et al.</i> (2758)
Regional Differences and Development Tendency of Livestock Manure Pollution in China	QIU Huan-guang, LIAO Shao-pan, JING Yue, <i>et al.</i> (2766)
Quantitative Partitioning of Soil Selenium in the Selenium-Rich Area of Northern Zhejiang Plain	XU Ming-xing, PAN Wei-feng, CENG Jing, <i>et al.</i> (2775)
Effects of Land Use on Manganese Distribution and Fractions in Wetland Soil of Sanjiang Plain, Northeast China	ZHANG Zhong-sheng, LU Xian-guo, SONG Xiao-lin (2782)
Research on Vertical Distribution Pattern and Reserve of Organic Carbon in Paddy Field Soil of Qianguo, Jilin	TANG Jie, ZHANG Wen-hui, LI Zhao-yang, <i>et al.</i> (2788)
Soil Organic Carbon Sequestration Rate and Its Influencing Factors in Farmland of Guanzhong Plain; A Case Study in Wugong County, Shanxi Province	ZHANG Xiao-wei, XU Ming-xiang (2793)
Effects of Biological Regulated Measures on Active Organic Carbon and Erosion-Resistance in the Three Gorges Reservoir Region Soil	HUANG Ru, HUANG Lin, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (2800)
Quantifying Soil Autotrophic Microbes-Assimilated Carbon Input into Soil Organic Carbon Pools Following Continuous ¹⁴ C Labeling	SHI Ran, CHEN Xiao-juan, WU Xiao-hong, <i>et al.</i> (2809)
Analysis of Soil Respiration and Influence Factors in Wheat Farmland Under Conservation Tillage in Southwest Hilly Region	ZHANG Sai, ZHANG Xiao-yu, WANG Long-chang, <i>et al.</i> (2815)
Distribution Characteristics and Risk Evaluation of Organochlorine Pesticides in Soil from Relocation Areas of the Danjiangkou Reservoir	LI Zi-cheng, QIN Yan-wen, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (2821)
Risk Assessment and Countermeasure of BTEX in Pesticide Factory	PANG Bo, WANG Tie-yu, DU Li-yu, <i>et al.</i> (2829)
Accumulation of S, Fe and Cd in Rhizosphere of Rice and Their Uptake in Rice with Different Water Managements	ZHANG Xue-xia, ZHANG Xiao-xia, ZHENG Yu-ji, <i>et al.</i> (2837)
Effects of Nitrate on Organic Removal and Microbial Community Structure in the Sediments	LIU Jin, DENG Dai-yong, SUN Guo-ping, <i>et al.</i> (2847)
Zero-Valent Iron-Enhanced Azoreduction by the <i>Shewanella decolorationis</i> S12	ZHOU Qing, CHEN Xing-juan, GUO Jun, <i>et al.</i> (2855)
Isolation, Identification of Two Aerobic Denitrifiers and Bioaugmentation for Enhancing Denitrification of Biofilm Under Oligotrophic Conditions	QUAN Xiang-chun, CEN Yan, QIAN Yin (2862)
Rapid Enrichment and Cultivation of Denitrifying Phosphate-Removal Bacteria and Its Identification by Fluorescence <i>in situ</i> Hybridization Technology	LIU Li, TANG Bing, HUANG Shao-song, <i>et al.</i> (2869)
Identification of a Denitrifying Polyphosphate-accumulating Organism (DPAO) and Study on Its Denitrifying Functional Genes	ZHANG Qian, WANG Hong-yu, SANG Wen-jiao, <i>et al.</i> (2876)
Isolation and Characterization of a Highly Efficient BBP-degrading Bacterium	CHEN Hu-xing, YANG Xue, ZHANG Kai, <i>et al.</i> (2882)
Degradation of Nicosulfuron by Combination Effects of Microorganisms and Chemical Hydrolysis	ZHANG Xiao-lin, LI Yong-mei, YUAN Zhi-wen (2889)
Isolation, Screening and Identification of Prometryne-Degrading Bacteria and Their Degrading Characteristics	ZHOU Ji-hai, SUN Xiang-wu, HU Feng, <i>et al.</i> (2894)
Preparation of PVA-SA-PHB-AC Composite Carrier and <i>m</i> -Cresol Biodegradation by Immobilized <i>Lysinibacillus cresolivorans</i>	LI Ting, REN Yuan, WEI Chao-hai (2899)
Extraction of Surface Active Substance and Analysis of Demulsifying Characteristics for the Demulsifying Strain <i>Alcaligenes</i> sp. S-XJ-1	HUANG Xiang-feng, ZHANG Shu-cong, PENG Kai-ming, <i>et al.</i> (2906)
Diversity of Culturable Filamentous Bacteria in the Activated Sludge from A ² O Wastewater Treatment Process	GAO Sha, JIN De-cai, ZHAO Zhi-rui, <i>et al.</i> (2912)
Composition and Transformation of Leachates During Municipal Solid Waste Composting	LI Dan, HE Xiao-song, XI Bei-dou, <i>et al.</i> (2918)

《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)

2013年7月15日 34卷 第7期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 7 Jul. 15, 2013

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