

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第9期

Vol.33 No.9

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

我国4个WMO/GAW本底站大气CH ₄ 浓度及变化特征	方双喜,周凌晔,许林,姚波,刘立新,夏玲君,王红阳	(2917)
我国东北地区大气降水稳定同位素特征及其水汽来源	李小飞,张明军,马潜,李亚举,王圣杰,汪宝龙	(2924)
2010年广州亚运期间空气质量与污染气象条件分析	李婷苑,邓雪娇,范绍佳,吴兑,李菲,邓涛,谭浩波,蒋德海	(2932)
厦门市冬春季灰霾期间大气PM ₁₀ 中多环芳烃的污染特征及来源分析	钱冉冉,闫景明,吴水平,王新红	(2939)
气溶胶OCEC切割点确定方法改进及应用	王莉华,董华斌,闫才青,曾立民,郑玫,张延君,刘久萌,Weber R J	(2946)
松花江上游夹皮沟金矿土壤与大气汞污染特征	张刚,王宁,王媛,刘特,艾建超	(2953)
河北农居环境颗粒态汞污染特征及健康评估研究	赵亚娟,龚巍巍,栾胜基	(2960)
印刷电路板(PCB)厂挥发性有机物(VOCs)排放指示物筛选	马英歌	(2967)
烹调油烟中挥发性有机物的排放初探	何万清,田刚,聂磊,曲松,李靖,王敏燕	(2973)
生物滴滤塔降解甲苯废气长期运行生物膜相特性研究	胡俊,郑江玲,吴越新,张丽丽,陈建孟	(2979)
分期布液生物滴滤床净化H ₂ S废气性能研究	刘春敬,李坚,刘佳,彭淑婧,李超,陈英,何洪	(2987)
粉煤灰综合利用过程中汞的二次释放规律研究	孟阳,王书肖	(2993)
太湖、巢湖水体总悬浮物浓度半分析反演模型构建及其适用性评价	刘忠华,李云梅,檀静,郭宇龙,周莉,刘阁	(3000)
巢湖水质与流域农业投入的关联性研究	张燕,高翔,张洪	(3009)
巢湖十五里河水花生生长区沉积物及间隙水中营养盐的基本特性	李如忠,李峰,周爱佳	(3014)
巢湖沉积物中磷蓄积时空变化及人为污染定量评价	刘恩峰,杜巨昌,羊向东,沈吉	(3024)
巢湖周边表土中有机质、全氮和全磷空间分布及其相关性	陈书琴,储昭升,胡社荣,刘俊,王长春,王曼	(3031)
丹江口水库典型入库支流氮磷动态特征研究	雷沛,张洪,单保庆	(3038)
水温分层对三峡水库香溪河库湾春季水华的影响	刘流,刘德富,肖尚斌,孔松,陈媛媛,方小凤	(3046)
平水期和丰水期殷村港污染物浓度时空变异比较研究	杨晓英,罗兴章,郑正,方淑波	(3051)
江苏西部湖泊沉积物营养盐赋存形态和释放潜力差异性分析	刘涛,胡志新,杨柳燕,肖琳,席北斗,许其功	(3057)
太湖西岸湖滨带沉积物氮磷有机质分布及评价	甘树,卢少勇,秦普丰,金相灿,焦伟,王佩	(3064)
南四湖流域种植业面源污染氮磷源解析研究	刘静,路风,杨廷钊,徐娜,王田妮	(3070)
珠江水体中有机物分布、组成及与消毒副产物生成的关系	何洪威,周达诚,王保强,梁艳红	(3076)
东江流域典型乡镇饮用水源地重金属污染健康风险评价	王若师,许秋瑾,张炯,魏群山,颜昌宙	(3083)
深圳茅洲河表层沉积物卤代多环芳烃污染研究	孙建林,倪宏刚,丁超,曾辉	(3089)
福建罗源湾潮间带沉积物重金属含量空间分布及其环境质量影响	高文华,杜永芬,王丹丹,高抒	(3097)
渤海湾大型底栖生物群落结构变化及原因探讨	蔡文倩,刘录三,乔飞,林岍璇,周娟	(3104)
地下水污染防治区划体系构建研究	王俊杰,何江涛,陆燕,刘丽雅,张小亮	(3110)
北京市平原区地下水污染防治区划不确定性分析	陆燕,何江涛,王俊杰,刘丽雅,张小亮	(3117)
川东平行岭谷区典型岩溶含水系统中NO ₃ ⁻ 的存储和运移	杨平恒,袁道先,任幼蓉,谢世友,贺秋芳,胡晓风	(3124)
改性活性炭对水中PFOS的吸附去除研究	董锡臻,石宝友,解岳,王东升	(3132)
水溶液中臭氧和溴离子的反应研究	俞潇婷,张家辉,潘循哲,张仁熙,侯惠奇	(3139)
HPSEC-UV-TOC联用技术测定有机物相对分子质量分布	张晗,董秉直	(3144)
不同有机基质诱发的水体黑臭及主要致臭物(VOSC _s)产生机制研究	卢信,冯紫艳,商景阁,范成新,邓建才	(3152)
不同pH下纳米铁镍颗粒对生物降解苯酚的影响	况烨,周琰,王清萍,陈祖亮	(3160)
多级微氧生物流化床预处理高浓度丙烯酸废水	李莎,郑盛之,宋玉栋,周岳溪,朱长军,刘淑玲,潘玲,蒲文晶	(3167)
三级生物膜深度处理腈纶废水生化出水的脱氮研究	徐少阳,蒋进元,周岳溪,崔俊涛,段妮妮	(3172)
改性花生壳对水中镉的动态吸附研究	龙腾,易筱筠,党志	(3177)
硫氰酸根在粒状镁铝复合氧化物上的吸附性能	王秀娟,王海增,孙宝维,韩文军	(3182)
海水生物滤器氨氮沿程转化规律模型	罗荣强,侯沙沙,沈加正,陈珠,刘鹰	(3189)
营养物质缺乏引起的好氧颗粒污泥膨胀及其恢复	张著,高大文,袁向娟,勾倩倩	(3197)
生物表面活性剂强化污泥水解的研究	易欣,罗琨,杨麒,李小明,邓伟光,张植平	(3202)
厌氧氨氧化菌的富集培养与分子鉴定	刘冬英,邱艳玲,袁宪正,师晓爽,郭荣波	(3208)
阿特拉津降解菌株的分离、鉴定及降解特性研究	李绍峰,朱静,李铁晶	(3214)
农业废物堆肥中高产漆酶新菌株的分离鉴定及酶学性质研究	任秀娟,范长征,鲁伦慧,王聪,曾光明	(3220)
糖蜜酒精废水脱色微生物的筛选及鉴定	李必金,刘幽燕,贺锴,滕芳明,何熙璞,李青云	(3228)
餐厨垃圾乳酸发酵过程中的微生物多样性分析	刘建国,汪群慧,王爽,孙晓红,仇天雷,李焕	(3236)
共价功能化对单壁碳纳米管产生DNA损伤和活性氧的影响研究	吴仁人,陶雪琴,党志,李开明,蔡美芳	(3241)
<i>Geobacter sulfurreducens</i> 对汞的甲基化及其影响因素研究	邹嫣,司友斌,颜雪,陈艳	(3247)
单一与复合胁迫下油菜对镉、铅的吸收效应	武文飞,南忠仁,王胜利,赵转军,周婷	(3253)
金铜矿下游农户家养番鸭体内重金属分布特征及其评价	杭小帅,梁斌,王文林,王霞,李维新	(3261)
环境激素氯菊酯对萼花臂尾轮虫繁殖的影响	董学兴,杨家新,吕林兰,赵卫红,於叶兵	(3266)
地聚物固化生活垃圾焚烧飞灰固化体抗氧化硫杆菌腐蚀性能的研究	金漫彤,孙鑫,董海丽,金赞芳	(3272)
焚烧飞灰高温过程中重金属的挥发及其氯转化特征	刘敬勇,孙水裕	(3279)
城市废弃物处理温室气体排放研究:以厦门市为例	于洋,崔胜辉,林剑艺,李飞	(3288)
NPEOs及其代谢产物在城市污水处理厂中的归趋分析	连静,刘俊新	(3295)
《环境科学》征订启事(3037)	《环境科学》征稿简则(3151)	信息(2999,3030,3096,3227)

水温分层对三峡水库香溪河库湾春季水华的影响

刘流, 刘德富*, 肖尚斌, 孔松, 陈媛媛, 方小凤

(三峡大学水利与环境学院, 三峡库区生态环境教育部工程中心, 宜昌 443002)

摘要: 三峡水库蓄水以来, 其支流库湾年复一年暴发严重的春季水华。为找出支流库湾春季水华的关键影响因子, 2010 年春季对三峡水库库首最大的支流香溪河库湾进行了原位定点连续监测, 主要监测指标包括水温、水体透明度、水下光照及营养盐浓度等环境因子。结果表明, 春季水温分层发育导致水体混合层深度突然减小是春季水华暴发的直接诱因, 真光层与水体混合层之比 (Z_{eu}/Z_{mix}) 与叶绿素 a (Chl-a) 的皮尔逊相关系数达 0.934 ($P < 0.01$)。表明 Critical Depth 模型可用于解释三峡水库典型支流库湾水华生消机制。本研究将为三峡水库支流库湾水华预报及防治提供重要参考。

关键词: 三峡水库; 水体富营养化; 春季水华; 水温分层; 水体混合层深度

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)09-3046-05

Effects of Thermal Stratification on Spring Blooms in Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir

LIU Liu, LIU De-fu, XIAO Shang-bin, KONG Song, CHEN Yuan-yuan, FANG Xiao-feng

(Engineering Research Center of Eco-Environment in TGR Region, Ministry of Education, College of Hydraulic & Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: Frequent spring blooms have been observed in tributary bays of the Three Gorges Reservoir (TGR) since its initial filling. In order to identify the primary factor controlling spring blooms, a field monitoring plan was carried out in Xiangxi Bay, the largest tributary of TGR head area in spring 2010. The environmental factors such as water temperature, Secchi depth, underwater illumination and nutrients were monitored. The results showed that the sudden decrease of mixing depth resulting from the development of thermal stratification was the direct and primary contributor to the onset of spring blooms (Pearson correlation coefficient of the ratio of euphotic depth to mixing depth (Z_{eu}/Z_{mix}) and chlorophyll-a (Chl-a) is 0.934, $P < 0.01$). The significant response of spring blooms to thermal stratification indicates that Critical Depth model can be applied to tributary bays of TGR, which will provide important references for the investigators and managers who are working on the prediction and control of algal blooms in the bays.

Key words: Three Gorges Reservoir; eutrophication; spring blooms; thermal stratification; mixing depth

三峡水库自 2003 年 6 月蓄水后, 水库干流水质一直较好, 但部分支流库湾每年春季均暴发不同程度的水华^[1]。水华的暴发与水温、光照、营养盐及水文水动力等条件有关。对照分析水库干、支流条件的差距以及支流蓄水前、后的条件变化可以看出, 干、支流营养盐浓度远高于水华暴发所需的浓度值^[2], 蓄水后营养盐浓度变化不大, 因而营养盐只是三峡水库支流库湾水华暴发的物质基础, 但不是水华发生的诱因^[3]; 干支流差距最显著、蓄水前后变化最大的是水温分层结构及水动力条件。Xu 等^[4]报道水温是香溪河库湾春季水华的主要诱发因子, 易仲强等^[5]报道香溪河库湾春夏季存在显著的水温分层, 但香溪河库湾水华与水温的关系、特别是与水温分层结构的关系并不十分清楚, 有待进一步的研究。

Sverdrup^[6]认为水温分层导致水体混合层深度 (Z_{mix}) 小于临界层深度是海洋春季水华暴发的根本原因, 为此建立了海洋春季水华暴发的临界层理论

(Critical Depth Theory)。这一理论也被用来解释淡水湖泊水华的季节性暴发和演替的规律^[7, 8]。本研究正是以该理论为指导, 选择水华暴发区域进行定点原位连续观测, 其目的在于探明三峡水库支流库湾水华暴发的机制, 以期对三峡水库支流水华的预测预报及防治提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域及观测方法

香溪河是三峡水库库首区域最大的一条支流, 流域面积 3 095 km², 长 94 km, 多年平均流量为 47.4

收稿日期: 2011-11-02; 修订日期: 2011-12-14

基金项目: 国家杰出青年科学基金项目 (50925932); 国家自然科学基金项目 (51179095); 国家自然科学基金青年基金项目 (51009080, 51009081); 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2009ZX07104-001, 2008ZX07104-004, 2008ZX07104-003-03); “十一五”国家科技支撑计划项目 (2008BAB29B09); 湖北省环保科技项目 (2008HB08)

作者简介: 刘流 (1987 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为生态水工学、湖泊水体富营养化机制, E-mail: lll199464@163.com

* 通讯联系人, E-mail: dfliu@ctgu.edu.cn

$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1[9]}$. 发源于位于湖北省西北部的神农架国家森林公园, 向南流经兴山县和秭归县, 在香溪镇(距三峡大坝 32 km)注入长江^[9]. 2003 年 6 月三峡水库初次蓄水至 135 m, 香溪河库湾回水淹没范围达 26 km; 当蓄水至 175 m 时回水范围达 40 km. 自蓄水以来香溪河库湾(XXB)每年春季均暴发不同程度的水华. 本研究定点原位观测站选在 XXB 的中游、距香溪河口 19 km 的峡口镇(图 1). 该站水深随三峡水库水位涨落在 19~49 m 之间变动, 水流条件相对稳定, 受三峡水库干流和香溪河上游来流影响相对较小, 是水华暴发相对严重的区域. 观测期间为 2010 年的 1 月 16 日~5 月 2 日, 观测频率为每天一次.

观测指标及方法为: 水体透明度(SD)采用萨氏透明度板测量; 光合作用有效辐射(400~700 nm)强度采用 IL1400A 水下光量子仪测量; 水深、水温、浊度、电导率、溶解氧(DO)和 pH 沿水深的分布水质多参数仪(Hydrolab, 美国 HACH 公司)测量. 另现场取 350 mL 水样 2 瓶带回实验室, 用紫外分光光度计(TU-1810, 北京普析通用)参照文献[10]介绍的方法测定水体溶解性总氮(DTN)、总磷(DTP)和叶绿素 a(Chl-a)浓度, 参照文献[11]测定溶解性硅酸盐(DSi).

1.2 数据分析方法

真光层深度(Z_{eu})是植物光合作用能有效发生的水体深度, 一般取为水下光合作用有效辐射为水面 1% 处对应的深度^[12]. 2010 年全年观测数据表明, Z_{eu} 与 SD 有如下的近似关系, 在水下光合作用有效辐射沿水深变化数据缺失的情况下可用水体透明度(SD)近似计算.

$$Z_{\text{eu}} = 1.8021 \text{ SD} + 1.8182 \quad (R^2 = 0.8404) \quad (1)$$

表 1 简化计算方法与分层聚类法计算结果 Z_{mix} (Clu) 的相关性分析¹⁾

Table 1 Correlation analysis between the results of simplified methods and the standard method

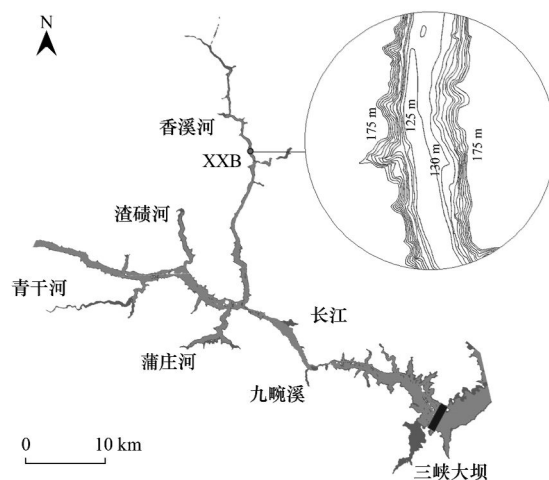
相关性分析方法	Z_{mix} (TG0.2)	Z_{mix} (TD0.5)	Z_{mix} (TD1)	Z_{mix} (DG0.02)	Z_{mix} (DG0.03)
皮尔逊相关	0.980 **	0.899 **	0.979 **	0.965 **	0.952 **
秩相关	0.942 **	0.863 **	0.943 **	0.919 **	0.921 **

1) ** 为 $P < 0.01$; Z_{mix} (TG0.2) 表示水温垂向梯度 $\leq 0.2^\circ\text{C} \cdot \text{m}^{-1}$ 时对应的水深^[14]; Z_{mix} (TD0.5)、 Z_{mix} (TD1) 分别表示与表层水温差 ≤ 0.5 、 1°C 处对应的水深^[15, 16]; Z_{mix} (DG0.02)、 Z_{mix} (DG0.03) 分别表示采用表层水体密度梯度 ≤ 0.02 、 $0.03 (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}) \cdot \text{m}^{-1}$ 处对应的水深^[17]; Z_{mix} (Clu) 表示采用分层聚类法计算混合层深度

2 结果与分析

2.1 春季水温及水温分层动态

图 2 给出了 2010 年春季 XXB 水温分层发育动态过程. 图 2(a) 显示, XXB 在 1~2 月表层 30 m 以内水温近似均匀分布, 表层出现局部逆温层, 水温分



浅蓝色表示三峡水库 145 m 水位淹没范围,
深绿色表示 175 m 水位淹没范围

图 1 香溪河库湾采样点布置示意

Fig. 1 Map of study area and sampling site

水体表面混合层深度 Z_{mix} 是指垂向混合充分的表层水体的深度. 根据 Z_{mix} 的定义, 混合层内水体理化指标的差别应很小, Z_{mix} 以下这些参数将发生急剧变化. 基于这一思想, 本文采用分层聚类法^[13]统计多种理化指标沿深度方向的相似性来确定 Z_{mix} , 并将该方法作为确定 Z_{mix} 的标准方法, 选取的指标有水温、pH、电导率、DO 和浊度共 5 个理化指标, 聚类分析采用 SPSS 13.0 软件进行. 同时为筛选出适用于三峡水库支流库湾 Z_{mix} 更简便的计算方法, 本文另采用 5 种不同的方法进行了 Z_{mix} 计算, 计算结果与标准方法计算结果的相关性如表 1 所示. 由表 1 可见, 采用 Z_{mix} (TG0.2)、 Z_{mix} (TD1) 这 2 种方法计算结果与标准方法相关性最好, 均可作为三峡水库支流库湾水体混合层深度计算的近似方法.

层微弱(水温垂向梯度范围为 $-0.19 \sim 0.07^\circ\text{C} \cdot \text{m}^{-1}$); 自 3 月开始, 3~5 月 XXB 出现明显的水温分层(各月最大水温垂向梯度分别为 0.66 、 0.44 、 $0.95^\circ\text{C} \cdot \text{m}^{-1}$). 但由于缺少温跃层, 水温均未呈现典型的三层式垂向分布.

图 2(b) 显示, 1~2 月表、底层水温随时间均呈

下降趋势,2月中旬降至最低;自2月下旬开始表、底层水温均开始波动性回升,但底层水温回升滞后于表层. 因此,库湾表底水温差随时间呈先小幅减小后波动持续上升趋势. 2月表底水温差最小(0.86°C),分层最微弱;5月最大(7.01°C),分层最为显著.

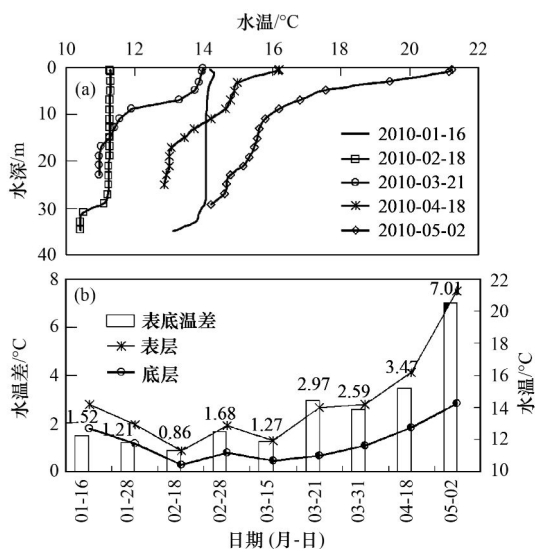


图2 XXB 春季水温分层动态过程

Fig. 2 Dynamic process of thermal stratification of XXB in spring

2.2 春季营养盐动态

可溶性营养盐可供浮游植物直接吸收利用,其浓度是判别浮游植物生长是否受营养盐限制的重要指标. 图3给出了2010年春季XXB表层DTN、DTP和DSi动态过程. XXB春季DTN在3月份出现小

幅上升(平均值为 $1.50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),但整体呈下降趋势,5月份降至最低值($0.33\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$);春季DTP除1月底和3月底出现2次峰值($0.14\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $0.17\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)外,其它时段均相对较低,1月出现最小值为 $0.06\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$;氮磷比是衡量浮游植物是否受到氮或磷相对限制的一个重要指标,DTN/DTP = 16时浮游植物生长不受氮或磷的相对限制^[18],图3(c)显示,除1月16日、2月28日和3月14日DTN/DTP > 16外,其余时段均小于16,3月底出现最小值为3.54,说明春季水华消耗了大量氮,导致浮游植物生长受氮相对限制;春季DSi在 $0.21 \sim 16.88\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 波动,除2月中旬至3月中旬期间出现2个极大值外,整体呈下降趋势.

可以看出,XXB春季DTN和DTP都大于富营养化阈值($0.2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.02\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)^[19],对浮游植物生长均不存在绝对限制,而更多的是对其生长的潜在氮相对限制;DSi被春季硅藻水华大量消耗,4月中旬至5月初几乎消耗殆尽,对硅藻水华存在硅限制.

2.3 春季Chl-a及 $Z_{\text{eu}}/Z_{\text{mix}}$ 动态

图4(a)显示,XXB在2010年3月15日之前表层Chl-a均小于 $10\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$;3月21日以后,Chl-a均远大于 $10\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ (水体富营养化阈值^[20]),暴发了一定程度的水华.

图4(b)给出了春季 Z_{eu} 、 Z_{mix} 及 $Z_{\text{eu}}/Z_{\text{mix}}$ 随时间的动态变化过程,可以看出,春季 Z_{eu} 随时间呈逐渐减小趋势,由1月的 7.22 m 减小至5月的 3.26 m ;

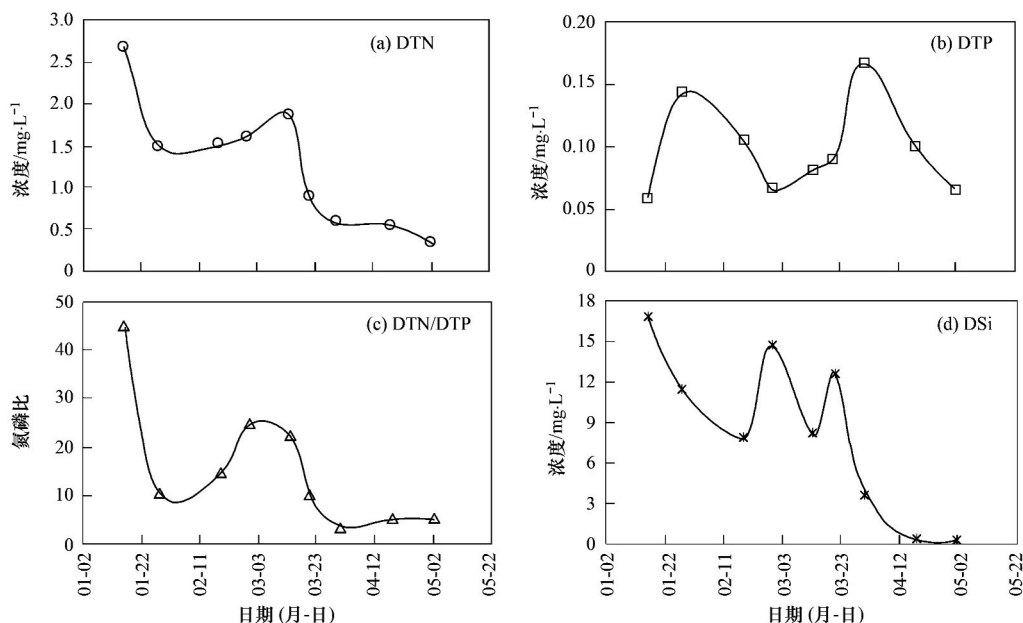


图3 2010年春季XXB表层水体主要营养盐浓度动态过程

Fig. 3 Dynamic process of major nutrients in the surface-layer water of XXB in spring, 2010

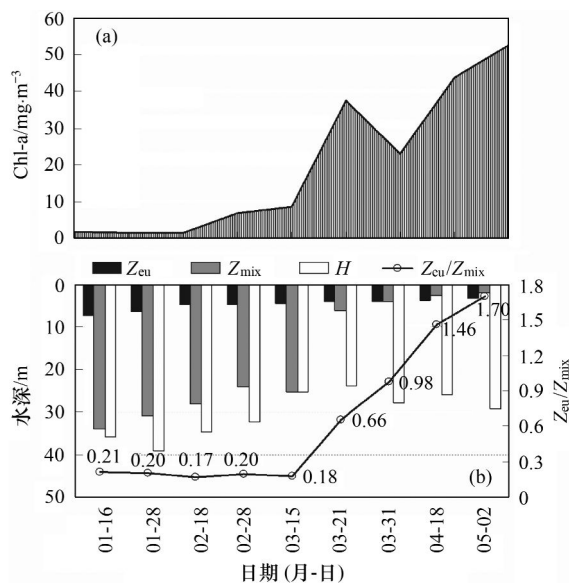
图4 Chl-a、 Z_{eu} 、 Z_{mix} 和 Z_{eu}/Z_{mix} 随时间变化的过程Fig. 4 Dynamics of Chl-a, Z_{eu} , Z_{mix} and Z_{eu}/Z_{mix} 表2 不同理化指标与 Chl-a 的相关性分析¹⁾

Table 2 Correlation analysis between different physico-chemical indicators and Chl-a

相关性分析方法	水温	Z_{eu}/Z_{mix}	DTN	DTP	DSi
皮尔逊相关	0.821 **	0.934 **	-0.837 **	-0.100	-0.693 **
秩相关	0.667 *	0.812 **	-0.700 *	-0.176	-0.583

1) ** 为 $P < 0.01$, * 为 $P < 0.05$

是极不均匀的. 光照在水体垂向上的分布, 一个最基本的共识就是光沿垂向上遵从 Beer Lambert's Law、沿深度按对数曲线衰减, 占绝大部分的短波段光都在表层很浅部分水体中被吸收, 只有少部分长波段光可以穿透较深的水体^[22]. 在水温、营养盐满足生长的条件下, 浮游植物的生长主要受垂向可获得光照的影响^[14]. 若水体出现较强温度分层, $Z_{mix} \leq Z_{eu}$, 则浮游植物生长不受光照限制, 这时候就会暴发高强度水华; 反之, 若 $Z_{mix} > Z_{eu}$, 即在水温分层不显著的情况下, 浮游植物颗粒容易被掺混至真光层以下, 其接受光照的机会大大减小, 生长就受到光限制.

与 Sverdrup^[6] 提出的临界层深度对应, Z_{eu}/Z_{mix} 值也存在一个临界值, 低于临界值浮游植物生长会受光限制而不易暴发水华^[23, 24]. Oliver 等^[25] 考虑日照时间长短的季节性变化, 将 Z_{eu}/Z_{mix} 临界值定为一个范围: 0.2 ~ 0.35. XXB 地处亚热带, 日照时间长短存在显著季节性差异, 因此春、秋、冬季取 0.35, 夏季取 0.2. 图 4 中 Z_{eu}/Z_{mix} 值与 Chl-a 的结果验证了临界值的存在: 3 月 21 日之前 Z_{eu}/Z_{mix} 值在 0.17 ~ 0.21 之间, Chl-a 均极小; 3 月 21 日之后 Z_{eu}/Z_{mix} 值都大于 0.35, 均暴发了水华.

同样地, Z_{mix} 由 1 月的 30.97 m 减小至 5 月的 1.92 m, 其中 Z_{mix} 突然由 3 月 15 日的 25.27 m 减小至 3 月 21 日的 6.10 m; 3 月 21 日前 Z_{eu}/Z_{mix} 一直很小 (0.17 ~ 0.21), 而自 3 月 21 日开始, Z_{eu}/Z_{mix} 持续上升 (0.66 ~ 1.70). Z_{mix} 骤降是 Z_{eu}/Z_{mix} 突增的直接原因.

3 讨论

一般认为, 淡水湖库春季水华的暴发是多因子共同作用的结果, 为找出控制水华暴发的关键因子, 采用不同理化指标与 Chl-a 进行相关性分析, 其结果如表 2. 从大到小对相关系数绝对值进行排序, 依次为: Z_{eu}/Z_{mix} 、DTN、水温、DSi、DTP. 可见, Z_{eu}/Z_{mix} 是控制春季水华暴发的关键性指标.

真光层深度和混合层深度之比 Z_{eu}/Z_{mix} 常被用来判别光照在垂向的分布和水体在垂向上的掺混对藻类生长的影响^[21]. 光照在水体中沿空间的分布

海洋和湖泊的 Z_{mix} 一般取决于水温分层及风的季节性变化^[26, 27]. 卢晨晨^[28] 对三峡库区河陆风规律的研究发现, 三峡库区地面平均风速 $< 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; 且 XXB 地形狭窄, 风的最大传播距离不超过 2 km. 因此, 风对 XXB 的 Z_{mix} 影响不显著, XXB 春季 Z_{mix} 的变化主要取决于水温分层的发育; 而受春季水华藻类颗粒吸收影响^[29], Z_{eu} 却呈现递减趋势. 因此, Z_{mix} 决定了 XXB 春季水华的暴发, 也即, 水温分层是春季水华暴发的关键诱发因子. 这也验证了 Sverdrup 的临界层模型在三峡水库支流库湾的适用性.

三峡水库蓄水后, 水库干流及其支流流速急剧下降, 香溪河库湾的平均流速降至 0.001 2 ~ 0.003 7 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ^[30], 导致水体滞留时间大幅延长, 有助于水温分层的发育^[31]. 春季气温和太阳辐射强度急剧上升, 导致表层水体快速升温而底部相对滞后, 从而导致水温出现分层^[32], 是三峡水库支流库湾春季水华暴发的根本原因. 因此, 有必要对支流库湾的气象条件和水温等水环境因子进行连续实时监测, 以建立准确的水华预报模型.

4 结论

(1) 三峡水库支流库湾春季水华的暴发不存在

营养盐绝对限制,但多数时段浮游植物生长均存在潜在氮相对限制。

(2) 春季 Z_{eu} 持续减小、 Z_{mix} 出现骤降,是 Z_{eu}/Z_{mix} 突然增大的直接因素,水温分层的发育是春季 Z_{mix} 骤降的主要原因。

(3) Z_{mix} 的骤降,即春季水温分层的发育是春季水华的主要诱因,Sverdrup 的 Critical Depth 模型也能够解释三峡水库支流库湾春季水华的暴发。

致谢:现场监测过程中得到张宇、胡念三、陈洋的大力协助,实验室样品分析得到李媛、姚绪姣、崔玉洁的支持,在此一并致谢。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国环保部. 长江三峡工程生态与环境监测公报 (1997-2009) [EB/OL]. <http://jcs.mep.gov.cn/hjzl/sxgb/>, 2010-02-24.
- [2] 郑丙辉, 王丽婧, 龚斌. 三峡水库上游河入库面源污染负荷研究[J]. 环境科学研究, 2009, **22**(2): 125-131.
- [3] Xu Y Y, Cai Q H, Han X Q, *et al.* Factors regulating trophic status in a large subtropical reservoir, China[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2010, **169**(1-4): 237-248.
- [4] Xu Y Y, Cai Q H, Ye L, *et al.* Asynchrony of spring phytoplankton response to temperature driver within a spatial heterogeneity bay of Three-Gorges Reservoir, China [J]. Limnologica-Ecology and Management of Inland Waters, 2011, **41**(3): 174-180.
- [5] 易仲强, 刘德富, 杨正健, 等. 三峡水库香溪河库湾水温结构及其对春季水华的影响[J]. 水生态学杂志, 2009, **2**(5): 6-11.
- [6] Sverdrup H U. On conditions for the vernal blooming of phytoplankton[J]. ICES Journal of Marine Science, 1953, **18**(3): 287-295.
- [7] Berger S A, Diehl S, Stibor H, *et al.* Water temperature and mixing depth affect timing and magnitude of events during spring succession of the plankton[J]. Oecologia, 2007, **150**(4): 643-654.
- [8] Fonseca B M, Bicudo C E M. Phytoplankton seasonal variation in a shallow stratified eutrophic reservoir (Gar as Pond, Brazil) [J]. Hydrobiologia, 2008, **600**(1): 267-282.
- [9] 黄真理, 李玉梁. 三峡水库水质预测和环境容量计算[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006. 15-18.
- [10] 王心芳, 魏复盛, 齐文启, 等. 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. 243-670.
- [11] SL 91.1-1994, 二氧化硅(可溶性)的测定(硅钼黄分光光度法)[S].
- [12] Kirk J T O. Light and photosynthesis in aquatic ecosystems[M]. England: Cambridge University Press, 1994.
- [13] Smolinski A, Walczak B, Einax J W. Hierarchical clustering extended with visual complements of environmental data set[J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 2002, **64**(1): 45-54.
- [14] Lawrence I, Bormans M, Oliver R, *et al.* Physical and nutrient factors controlling algal succession and biomass in Burrinjuck Reservoir[R]. Land and Water Resources Australia, 2000. 119-120.
- [15] Price J F, Weller R A, Pinkel R. Diurnal cycling: observations and models of the upper ocean response to diurnal heating, cooling, and wind mixing[J]. Journal of Geophysical Research, 1986, **91**(C7): 8411-8427.
- [16] Kunz T J, Diehl S. Phytoplankton, light and nutrients along a gradient of mixing depth: a field test of producer-resource theory [J]. Freshwater Biology, 2003, **48**(6): 1050-1063.
- [17] Noh Y, Lee W S. Mixed and mixing layer depths simulated by an OGCM[J]. Journal of Oceanography, 2008, **64**(2): 217-225.
- [18] Goldman J C, McCarthy J J, Peavey D G. Growth rate influence on the chemical composition of phytoplankton in oceanic waters [J]. Nature, 1979, **279**(5710): 210-215.
- [19] Thomann R V, Mueller J A. Principles of surface water quality modeling and control[M]. New York: Harper and Row, 1987.
- [20] Labaugh J W. Relation of algal biovolume to chlorophyll a in selected lakes and wetlands in north-central United States[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1995, **52**(2): 416-424.
- [21] Jensen J P, Jeppesen E, Olrik K, *et al.* Impact of nutrients and physical factors on the shift from cyanobacterial to chlorophyte dominance in shallow Danish lakes [J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1994, **51**(8): 1692-1699.
- [22] Wetzel R G. Limnology-lake and river ecosystems[M]. (3rd ed.). San Diego, CA: Academic Press, 2001.
- [23] Harris G P. Photosynthesis, productivity and growth: the physiological ecology of phytoplankton[J]. Archiv für Hydrobiologie-Beiheft Ergebnisse der Limnologie, 1978, **10**: 1-171.
- [24] Scheffer M, Rinaldi S, Gragnani A, *et al.* On the dominance of filamentous cyanobacteria in shallow, turbid lakes[J]. Ecology, 1997, **78**(1): 272-282.
- [25] Oliver R L, Hart B T, Olley J, *et al.* The Darling River: Algal growth and the cycling and sources of nutrients[R]. Murray-Darling Basin Commission Project M386 1999, 2000. 55-57.
- [26] Kling G W. Comparative transparency, depth of mixing, and stability of stratification in lakes of Cameroon, West Africa[J]. Limnology and Oceanography, 1988, **33**(1): 27-40.
- [27] Farmer D M, Carmack E. Wind mixing and restratification in a lake near the temperature of maximum density[J]. Journal of Physical Oceanography, 1981, **11**(11): 1516-1533.
- [28] 卢晨晨. 三峡坝区河陆风的理论与观测研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2009. 36-52.
- [29] Scheffer M. Ecology of shallow lakes[M]. New York: Springer-Verlag, 2004. 25-31.
- [30] 雒文生, 谈戈. 三峡水库香溪河库湾水质预测[J]. 水电能源科学, 2000, **18**(4): 46-48.
- [31] Sullivan B E, Prafl F G, Small L F, *et al.* Seasonality of phytoplankton production in the Columbia River: A natural or anthropogenic pattern? [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2001, **65**(7): 1125-1139.
- [32] 朱伯芳. 库水温度估算[J]. 水利学报, 1985, **16**(2): 12-21.

CONTENTS

CH ₄ Concentrations and the Variation Characteristics at the Four WMO/GAW Background Stations in China	FANG Shuang-xi, ZHOU Ling-xi, XU Lin, <i>et al.</i> (2917)
Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation over Northeast China and Its Water Vapor Sources	LI Xiao-fei, ZHANG Ming-jun, MA Qian, <i>et al.</i> (2924)
Study on Air Quality and Pollution Meteorology Conditions of Guangzhou During the 2010 Asian Games	LI Ting-yuan, DENG Xue-jiao, FAN Shao-jia, <i>et al.</i> (2932)
Characteristics and Sources of PM ₁₀ -bound PAHs During Haze Period in Winter-Spring of Xiamen	QIAN Ran-ran, YAN Jing-ming, WU Shui-ping, <i>et al.</i> (2939)
Improvement and Application of the Method for Determination of OCEC Split	WANG Li-hua, DONG Hua-bin, YAN Cai-qing, <i>et al.</i> (2946)
Characteristics of Mercury Pollution in Soil and Atmosphere in Songhua River Upstream Jia-pi-gou Gold Mining Area	ZHANG Gang, WANG Ning, WANG Yuan, <i>et al.</i> (2953)
Pollution Characteristics and Health Assessment of Particulate Mercury in Hebei Rural Households	ZHAO Ya-juan, GONG Wei-wei, LUAN Sheng-ji (2960)
Composition and Characteristics of Volatile Organic Chemicals Emission from Printed Circuit Board Factories	MA Ying-ge (2967)
Preliminary Study Concerning Emissions of the Volatile Organic Compounds from Cooking Oils	HE Wan-qing, TIAN Gang, NIE Lei, <i>et al.</i> (2973)
Characteristics of Biofilm Phase During the Long-term Degradation of a Toluene-contaminated Gas Stream Using BTF	HU Jun, ZHENG Jiang-ling, WU Yue-xin, <i>et al.</i> (2979)
Performance of Cross Flow Trickling Filter for H ₂ S Gas Treatment	LIU Chun-jing, LI Jian, LIU Jia, <i>et al.</i> (2987)
Study on Mercury Re-emissions During Fly Ash Utilization	MENG Yang, WANG Shu-xiao (2993)
Construction of Semi-analytical Model for Inversing Total Suspended Matter in Lake Taihu and Assessment of Its Applicability	LIU Zhong-hua, LI Yun-mei, TAN Jing, <i>et al.</i> (3000)
Association Study Between Water Quality of Chaohu Lake and Resources Input in Agriculture of Basin	ZHANG Yan, GAO Xiang, ZHANG Hong (3009)
Sediment and Pore Water Nutrient Characteristics in Growing Zones of <i>Alternanthera philoxeroides</i> in the Shiwuli River, Chaohu Lake	LI Ru-zhong, LI Feng, ZHOU Ai-jia (3014)
Enrichment Characteristic of Phosphorus in Surface and Core Sediments of Chaohu Lake and the Pollution Quantification	LIU En-feng, DU Chen-chang, YANG Xiang-dong, <i>et al.</i> (3024)
Spatial Distribution Characteristics and Correlation Analysis of Organic Matter, Total Nitrogen and Total Phosphorus in Topsoil Around Chaohu Lake	CHEN Shu-qin, CHU Zhao-sheng, HU She-rong, <i>et al.</i> (3031)
Dynamic Characteristics of Nitrogen and Phosphorus in the Representative Input Tributaries of Danjiangkou Reservoir	LEI Pei, ZHANG Hong, SHAN Bao-qing (3038)
Effects of Thermal Stratification on Spring Blooms in Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir	LIU Liu, LIU De-fu, XIAO Shang-bin, <i>et al.</i> (3046)
Explore the Spatial and Temporal Patterns of Water Pollution in the Yincungang Canal of the Lake Taihu Basin, China	YANG Xiao-ying, LUO Xing-zhang, ZHENG Zheng, <i>et al.</i> (3051)
Analysis on the Forms and Release Potential of Nutrients in Sediments from Lakes in the West Jiangsu Province	LIU Tao, HU Zhi-xin, YANG Liu-yan, <i>et al.</i> (3057)
Spatial Distribution and Evaluation of Nitrogen, Phosphorus and Organic Matter in Surface Sediments from Western Lakeside Belt of Lake Taihu	GAN Shu, LU Shao-yong, QIN Pu-feng, <i>et al.</i> (3064)
Source Apportionment of Nitrogen and Phosphorus from Cropping Non-point Source Pollution in Nansi Lake Basin	LIU Jing, LU Feng, YANG Yan-zhao, <i>et al.</i> (3070)
Relationship Between Dissolved Organic Carbon and DBP in the Pearl River Water	HE Hong-wei, ZHOU Da-cheng, WANG Bao-qiang, <i>et al.</i> (3076)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Typical Township Water Sources in Dongjiang River Basin	WANG Ruo-shi, XU Qiu-jin, ZHANG Xian, <i>et al.</i> (3083)
Halogenated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Sediments of Maozhou River, Shenzhen	SUN Jian-lin, NI Hong-gang, DING Chao, <i>et al.</i> (3089)
Distribution Patterns of Heavy Metals in Surficial Sediment and Their Influence on the Environment Quality of the Intertidal Flat of Luoyuan Bay, Fujian Coast	GAO Wen-hua, DU Yong-fen, WANG Dan-dan, <i>et al.</i> (3097)
Study on the Changes of Macrobenthos Communities and Their Causes in Bohai Bay	CAI Wen-qian, LIU Lu-san, QIAO Fei, <i>et al.</i> (3104)
Construction of Groundwater Contamination Prevention Mapping System	WANG Jun-jie, HE Jiang-tao, LU Yan, <i>et al.</i> (3110)
Uncertainty Analysis of Groundwater Protection and Control Zoning in Beijing Plain	LU Yan, HE Jiang-tao, WANG Jun-jie, <i>et al.</i> (3117)
Nitrate Storage and Transport Within a Typical Karst Aquifer System in the Paralleled Ridge-valley of East Sichuan	YANG Ping-heng, YUAN Dao-xian, REN You-rong, <i>et al.</i> (3124)
Adsorption of Perfluorooctanesulfonate (PFOS) onto Modified Activated Carbons	TONG Xi-zhen, SHI Bao-you, XIE Yue, <i>et al.</i> (3132)
Investigation of the Oxidation Reaction of O ₃ with Bromide Ion in Aqueous Solution	YU Xiao-ting, ZHANG Jia-hui, PAN Xun-xi, <i>et al.</i> (3139)
Determination of the Distribution of Relative Molecular Mass of Organic Matter by High Pressure Size Exclusion Chromatography with UV and TOC Detectors	ZHANG Han, DONG Bing-zhi (3144)
Black Water Bloom Induced by Different Types of Organic Matters and Forming Mechanisms of Major Odorous Compounds	LU Xin, FENG Zi-yan, SHANG Jing-ge, <i>et al.</i> (3152)
Effect of Fe and Fe/Ni Nanoparticles on the Biodegradation of Phenol by BFN at Different pH Values	KUANG Ye, ZHOU Yan, WANG Qing-ping, <i>et al.</i> (3160)
Pretreatment of High-Concentration Acrylic Acid Wastewater by the Multi-Stage Microaerobic Biological Fluidized Bed Reactor	LI Sha, ZHENG Sheng-zhi, SONG Yu-dong, <i>et al.</i> (3167)
Denitrification on Secondary Effluent of Acrylic Fiber Wastewater by Tri-Stage Biofilm Advanced Reactor	XU Shao-yang, JIANG Jin-yuan, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (3172)
Dynamic Adsorption of Cadmium (II) in Water on Modified Peanut Shells	LONG Teng, YI Xiao-yun, DANG Zhi (3177)
Adsorption Properties of Thiocyanate Anion on Granular Mg/Al Mixed Oxides	WANG Xiu-juan, WANG Hai-zeng, SUN Bao-wei, <i>et al.</i> (3182)
Model of Regularity of Ammonia Transformation Along Marine Biological Aerated Filter	LUO Rong-qiang, HOU Sha-sha, SHEN Jia-zheng, <i>et al.</i> (3189)
Aerobic Granular Sludge Bulking Due to the Lack of Nutrient and Its Recovery	ZHANG Zhu, GAO Da-wen, YUAN Xiang-juan, <i>et al.</i> (3197)
Enhanced Hydrolysis of Waste Activated Sludge by Biosurfactant	YI Xin, LUO Kun, YANG Qi, <i>et al.</i> (3202)
Enrichment and Identification of Anaerobic Ammonium Oxidation Bacteria	LIU Dong-ying, QIU Yan-ling, YUAN Xian-zheng, <i>et al.</i> (3208)
Isolation, Identification and Characterization of an Atrazine Degrading Bacterium	LI Shao-feng, ZHU Jing, LI Tie-jing (3214)
Isolation, Identification and Enzymological Characterization of a New Fungal with High Laccase Production from Agricultural Waste Composting	REN Xiu-juan, FAN Chang-zheng, LU Lun-hui, <i>et al.</i> (3220)
Screening and Identification of Microorganisms for Decolorization of Molasses Spent Wash	LI Bi-jin, LIU You-yan, HE Kai, <i>et al.</i> (3228)
Analysis of Microbial Community Structure in Lactic Acid Fermentation from Kitchen Waste	LIU Jian-guo, WANG Qun-hui, WANG Shuang, <i>et al.</i> (3236)
Effect of Covalent Functionalization on DNA Cleavage Activity and ROS Formation of Single-Walled Carbon Nanotubes	WU Ren-ren, TAO Xue-Qin, DANG Zhi, <i>et al.</i> (3241)
Research on Mercury Methylation by <i>Geobacter sulfurreducens</i> and Its Influencing Factors	ZOU Yan, SI You-bin, YAN Xue, <i>et al.</i> (3247)
Uptake Effect of Cd and Pb by Rape Under Single Cd/Pb and Cd-Pb Combined Stress	WU Wen-fei, NAN Zhong-ren, WANG Sheng-li, <i>et al.</i> (3253)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Farming Domestic Muscovy Duck Originated from Au/Cu Mining and Smelting Activities	HANG Xiao-shuai, LIANG Bin, WANG Wen-lin, <i>et al.</i> (3261)
Effects of the Environmental Hormone Cypermethrin on the Reproduction of <i>Brachionus calyciflorus</i>	DONG Xue-xing, YANG Jia-xin, LÜ Lin-lan, <i>et al.</i> (3266)
Research on Anti-Corrosion of <i>Thiobacillus</i> for the Geopolymer Solidification MSWI Fly Ash	JIN Man-tong, SUN Xin, DONG Hai-li, <i>et al.</i> (3272)
Chlorination Transformation and Volatilization of Heavy Metals in Fly Ash from the Incineration During the Disposal Process with Higher Temperature	LIU Jing-yong, SUN Shui-yu (3279)
Study on Greenhouse Gas Emissions from Urban Waste Disposal System; A Case Study in Xiamen	YU Yang, CUI Sheng-hui, LIN Jian-yi, <i>et al.</i> (3288)
Fate Analysis of NPEOs and Their Metabolites in Municipal Wastewater Plants	LIAN Jing, LIU Jun-xin (3295)

《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)

2012年9月15日 33卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 9 Sep. 15, 2012

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. sciencecp. com	Distributed	by	Science Press Tel: 010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. 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: 70.00 元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行