

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第8期

Vol.34 No.8

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

2006 ~ 2009 年我国超大城市霾天气特征及影响因子分析	戴永立, 陶俊, 林泽健, 谢绍东, 曹军骥, 张仁健 (2925)
南京北郊秋季 VOCs 及其光化学特征观测研究	李用宇, 朱彬, 安俊琳, 高晋微, 夏丽, 张祥志, 秦玮, 汤莉莉 (2933)
大气 PM _{2.5} 中水溶性离子在线观测技术的应用研究	程萌田, 潘月鹏, 王辉, 刘全, 王跃思 (2943)
一种纳米气溶胶发生系统的设计及性能测试	麦华俊, 蒋靖坤, 何正旭, 郝吉明 (2950)
焦炉顶和厂区环境中有机碳和元素碳的粒径分布	刘效峰, 彭林, 白慧玲, 牟玲, 宋耕芳 (2955)
昼夜增温对大豆田土壤 N ₂ O 排放的影响	胡正华, 周迎平, 崔海玲, 陈书涛, 肖启涛, 刘艳 (2961)
不同土地利用方式下冬季 N ₂ O 排放及其影响因素	伍延正, 张苗苗, 秦红灵, 侯海军, 陈春兰, 魏文学 (2968)
基于支持向量回归模型的水稻田甲烷排放通量预测研究	陈强, 蒋卫国, 陈曦, 袁丽华, 王文杰, 潘英姿, 王维, 刘孝富, 刘海江 (2975)
夏季黄海和渤海微表层和次表层海水中营养盐的分布特征	王文涛, 杨桂朋, 于娟, 吴冠伟 (2983)
氮磷浓度对东海原甲藻优势种群吸附 BDE28 和 BDE47 的影响	汪芳, 葛蔚, 柴超, 孟祥霞 (2992)
基于光学分类的太湖水体叶绿素 a 浓度高光谱遥感	孙德勇, 周晓宇, 李云梅, 陈晓玲, 黄昌春, 龚绍琦 (3002)
基于浮游细菌生物完整性指数的河流生态系统健康评价——以滇池流域为例	黄艺, 舒中亚 (3010)
珠江三角洲城市非点源 COD 影响因素分析及其负荷估算	廖义善, 卓慕宁, 李定强, 郭太龙 (3019)
珠江流域河流碳输出通量及变化特征	张连凯, 覃小群, 杨慧, 黄奇波, 刘朋雨 (3025)
三峡库区兰陵溪小流域养分流失特征	曾立雄, 肖文发, 黄志霖, 王佐庆 (3035)
三峡库区消落带典型草本植物淹水浸泡后可溶性有机碳的释放特征	谭秋霞, 朱波, 花可可 (3043)
混合层深度对藻类生长的影响研究	陈洋, 杨正健, 黄钰铃, 张平, 刘德富 (3049)
伊乐藻-氮循环菌联用对太湖梅梁湾水体脱氮的研究	赵琳, 李正魁, 周涛, 吴宁梅, 叶忠香, 刘丹丹 (3057)
组合型生态浮床对上覆水和沉积物之间氮磷的影响	郑立国, 杨仁斌, 王海萍, 宋建军 (3064)
生物炭覆盖对底泥污染物释放的影响	李扬, 李锋民, 张修稳, 吴召富, 于辉 (3071)
东莞石马河流域重金属污染及生态毒性的时空差异	高磊, 陈建耀, 柯志庭, 王江, 杨雪韵, 清水裕太 (3079)
连环湖牙门气泡沉积物重金属演化 and 污染研究	肖海丰, 臧淑英, 关莹, 刘少军, 徐海凤, 孙清展, 王京京, 李苗 (3088)
人工湿地净化工业区含非污染降雨径流的效果研究	敬丹丹, 王金泉, 马邕文, 李东亚, 王艳, 黄明智 (3095)
四环素抗性基因在人工湿地中的去除及累积	郑加玉, 刘琳, 高大文, 刘超翔 (3102)
不确定节点水量下水质监测点优化选址方法	刘书明, 吴雪, 欧阳乐岩 (3108)
饮用水中含氮消毒副产物三氯硝基甲烷的形成过程和影响因素	丁春生, 邹邦文, 缪佳, 傅洋平, 沈嘉辰 (3113)
漆酶催化氧化水中雌激素的研究	夏青, 谢卫平, 刘国强, 廖云燕, 王斌楠, 孔德洋, 陆隼鹤 (3119)
碳纳米管电极电还原降解水中头孢他啶	朱宏, 胡翔, 李俊峰 (3125)
UV-vis 光照下喹类抗菌药氟康唑的光化学反应类型	葛林科, 李凯, 杨凯, 邢广水, 于春艳, 张蓬, 姚子伟 (3132)
氙灯/TiO ₂ 体系下敌草隆光催化降解动力学研究	阳海, 曾健, 黎源, 阳立平, 易兵 (3137)
羟基磷灰石对水中刚果红的吸附作用研究	詹艳慧, 林建伟 (3143)
乙醇处理对树脂基纳米水合氧化铁结构及其除砷性能的影响	万琪, 李旭春, 潘丙才 (3151)
污水中溶解性有机氮类化合物的氯化反应特性及其消毒副产物生成潜能	刘冰, 于鑫, 余国忠, 古励, 赵承美, 翟慧敏, 李清飞 (3156)
短程深度脱氮中试工艺的低温启动和维持	顾升波, 王淑莹, 彭永臻 (3164)
生物活性炭厌氧氨氧化反应器启动过程研究	赖玮毅, 周伟丽, 何圣兵 (3171)
东北三省畜禽养殖粪固氮激素排放及其潜在污染风险	刘妹芳, 李艳霞, 张雪莲, 冯成洪, 鲁肖飞, 杨明, 李帷, 朱铁群, 黄泽春 (3180)
淮河流域土壤中全氟化合物的空间分布及组成特征	孟晶, 王铁宇, 王佩, 吕永龙 (3188)
华北平原典型区土壤氟的形态及其分布特征	易春瑶, 汪丙国, 靳孟贵 (3195)
长期施磷的产量效应及其环境风险评价	颜晓, 王德建, 张刚, 冉景, 郑继成 (3205)
污灌渠中有机氯农药对沿岸土壤的影响	徐亮, 张彩香, 刘敏, 廖小平, 姚林林, 李佳乐, 向青清 (3211)
表面活性剂及其组合洗脱污染土壤中的硫丹	熊佰炼, 郑国灿, 张进忠, 邢贻, 徐卫红 (3216)
黄土丘陵区不同坡向对土壤微生物生物量和可溶性有机碳的影响	赵彤, 蒋跃利, 闫浩, 黄懿梅, 安韶山 (3223)
氮素添加对樟树林红壤微生物的影响	郁培义, 朱凡, 宿少锋, 王志勇, 闫文德 (3231)
医疗废物焚烧炉周边环境介质中二噁英的浓度、同系物分布与来源分析	黄文, 张素坤, 杜国勇, 张漫雯, 冯桂贤, 任明忠 (3238)
固相微萃取和固相萃取评价多环芳烃降解过程中的生物有效性变化	郭美霞, 巩宗强, 李晓明, 刘丹, 王悦 (3244)
改良型固定化 <i>Pseudomonas oleovorans</i> DT4 降解四氢呋喃的研究	邵钱, 叶杰旭, 欧阳杜娟, 陈建孟, 陈东之 (3251)
PCR-DGGE 技术解析固体碳源表面生物膜的微生物群落结构	徐影, 仇天雷, 韩梅琳, 李军, 王旭明 (3257)
温度对嗜酸性硫杆菌活性和生物成因次生铁矿物形成的影响	宋永伟, 赵博文, 霍敏波, 崔春红, 周立祥 (3264)
小白菜对外源硝酸盐和亚硝酸盐动态吸收的差异及其机制研究	郭璐, 满楠, 梁东丽, 谢钧宇, 刘娟娟 (3272)
预处理对打捆麦秸贮存和厌氧生物产沼气的的影响	马慧娟, 陈广银, 杜静, 常志州, 叶小梅 (3280)
硝酸盐对淡水水生生物毒性及水质基准推导	张铃松, 王业耀, 孟凡生, 周岳溪, 于海斌 (3286)
生物毒性测试微孔板 MTOXPlate 的分析性能研究	林奕云, 张国霞, 贺丽苹, 孙国萍, 许玫英 (3294)
两种实验设计研究 DES 和 EV 对 MCF-7 细胞增殖的联合作用	刘倩, 雷炳莉, 安静, 尚羽, 钟玉芳, 康佳, 文育 (3303)
中国近海海洋环境多氯联苯 (PCBs) 污染现状及影响因素	刘敏霞, 杨玉玉, 李庆孝, 王俊 (3309)
城市污水处理厂出水中的药品和个人护理品	郑少奎, 李晓峰 (3316)
生物炭封存技术研究进展	姜志翔, 郑浩, 李锋民, 王震宇 (3327)
饮用水水源地严格管理水质的对策分析——对实行严格水资源管理问题上的看法和建议	傅国伟 (3334)
《环境科学》征稿简则 (2967) 《环境科学》征订启事 (3034) 信息 (3063, 3136, 3194, 3302)	

混合层深度对藻类生长的影响研究

陈洋¹, 杨正健³, 黄钰铃¹, 张平¹, 刘德富^{1,2*}

(1. 三峡大学水利与环境学院, 宜昌 443002; 2. 湖北工业大学资源与环境学院, 武汉 430072; 3. 武汉大学水利水电学院, 武汉 430000)

摘要: 三峡水库蓄水后, 支流库湾频繁暴发水华。为研究水华暴发关键因子, 以临界层理论为指导, 于2012年初冬季, 在香溪河野外观测站建立围隔实验系统, 研究水体混合对藻类生长的影响机制。围隔水下深度按梯度布设, 基底掺混均匀, 并注入由浮游动物网过滤的低Chl-a浓度的香溪河河水。结果表明, Z_{eu}/Z_{mix} (真光层深度与混合层深度之比) > 1 的围隔藻类生长迅速并暴发水华, Chl-a浓度最高达到 $90 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 反之生长缓慢。临界层理论适用于本实验, Z_{eu}/Z_{mix} 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; 在临界层理论的基础上, 分析得藻类净初级生产力与 Z_{mix} 存在负相关关系, 即 Z_{mix} 越小藻类净初级生产力越大。

关键词: 混合层; 水华; 真光层/混合层; 藻类; 光照

中图分类号: X52; X832 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)08-3049-08

Research on the Influence of Mixing Layer Depth on Algal Growth

CHEN Yang¹, YANG Zheng-jian³, HUANG Yu-ling¹, ZHANG Ping¹, LIU De-fu^{1,2}

(1. College of Hydraulic and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. College of Resources and Environment Sciences, Hubei University of Technology, Wuhan 430072, China; 3. School of Water Resources & Hydropower Engineering, Wuhan University, Wuhan 430000, China)

Abstract: Frequent blooms have been observed in tributary bays of the Three Gorges Reservoir since its initial filling. In order to identify the primary factor controlling water blooms, some experiments were conducted based on the critical depth theory. In the winter of early 2012, the enclosures on Xiangxi River were built to investigate the mechanism of mixing layer depth (Z_{mix}) on algal growth. The length of the enclosures under water was changed in gradient, and the water of each enclosures was injected from Xiangxi River, in which the algal concentration was low and the zooplanktons were filtered out, and then the water was mixed evenly. The results showed that the algae grew quickly in the enclosures with Z_{eu}/Z_{mix} (the favorable ratio of euphotic depth to mixing depth) > 1 , and the maximum density of chlorophyll-a (Chl-a) reached $90 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, otherwise the algae grew slowly. The critical depth theory was appropriate for the experiment, and there was a critical value of Z_{eu}/Z_{mix} . Water bloom will not break out if the Z_{eu}/Z_{mix} is below the critical value. Based on the critical depth theory, it was found that there was a negative correlation between algal net primary productivity and Z_{mix} , the lower the Z_{mix} , the greater the net primary productivity.

Key words: mixing layer; water bloom; euphotic layer/mixing layer; algae; light

自2003年三峡水库蓄水后, 水库支流库湾暴发多次水华^[1], 对水库生态系统造成极大危害^[2]。香溪河是三峡水库典型支流之一, 受上游高污染负荷和长江营养盐逆向补给^[3]的影响, 支流库湾营养盐浓度维持在高水平, 因而营养盐不是三峡水库支流库湾水华的主要诱因。香溪河四季水温、光照差异较大, 然据报道香溪河四季均有暴发水华^[4, 5]。水华的发生是多种环境因子相互作用的结果, 已有不少国内学者从光照、水温等环境条件, 氮、磷等营养条件以及水动力条件(流速、异重流)^[6~11]对支流水环境问题展开研究。本研究从水体分层角度展开, 不同藻类生理结构差异较大, 部分藻类如甲藻具有垂直迁移特性, 可以自主地垂向运动。而如硅藻不具备这些特性, 只能随水流运动。不同水体分层导致藻类垂向位置的差异, 对藻类生长影响也不同,

因此研究水体分层对研究水华暴发机理有着重要意义。

Sverdrup^[12]1953年建立了海洋春季水华暴发的临界层理论(critical depth theory), 他认为水体分层下的水体混合层深度(Z_{mix})小于临界层深度是海洋春季水华暴发的根本原因, 该理论也被文献[13, 14]用于较好地解释淡水湖泊水华的季节性暴发和演替的规律。易仲强等^[15]监测发现香溪河库湾春夏季存在显著的水体分层, 本研究通过建立原位围隔实验系统, 建立不同的 Z_{mix} 模式, 探讨混合层深度

收稿日期: 2012-11-20; 修订日期: 2013-02-15

基金项目: 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, 51209123)

作者简介: 陈洋(1988~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为生态水工, E-mail: 819528514@qq.com

* 通讯联系人, E-mail: dfliu@189.cn

对藻类生长的影响,分析临界层理论在三峡水库的适用性,以期为提出有效的水华防控措施提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 实验方案

在香溪河库湾(XXB)建立围隔实验系统. 围隔由透光性较好的聚乙烯薄膜制成,底端封闭,上端开口,并注入由浮游动物网(孔径 0.064 mm)过滤的香溪河库湾河水. 围隔分为 6 组,深度分别为 2、5、10、15、20 和 30 m,每组两个平行,分别记为 Z1、Z2、Z3、Z4、Z5、Z6. 围隔附近表层河水记为 H. 实验地理位置及围隔设计分别见图 1、图 2.

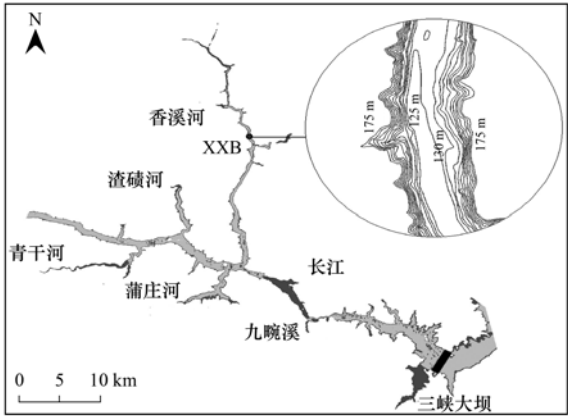


图 1 研究区域

Fig. 1 Map of the study area

1.2 取样分析及测试方法

采用塞氏透明度板测量水体透明度(SD), IL1400A 水下光量子仪测量光合作用有效辐射(400~700 nm). 用紫外分光光度计(TU-1810, 北京普析通用)参考文献[16]测定水体溶解性总氮(DTN)、溶解性总磷(DTP)和叶绿素a(Chl-a)浓

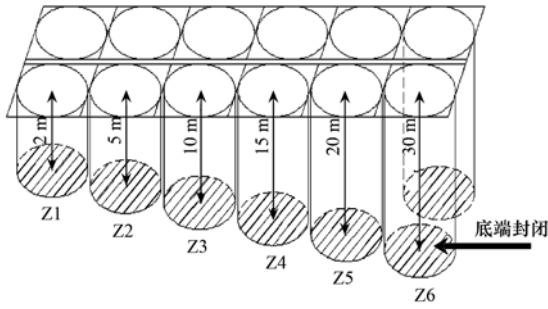


图 2 围隔设计示意

Fig. 2 Design of enclosures

度,参考文献[17]测定溶解性硅酸盐(DSi)浓度. 水质多参数仪(Hydrolab, 美国 HACH 公司)测量水深、水温、浊度、电导率、溶解氧(DO)和 pH.

1.3 数据处理

大多数研究采用 1% 表面光强深度^[18]来代替真光层深度(Z_{eu}),也有人将水下光强 $14 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ 对应深度^[19]称为真光层深度. 不同水体真光层深度差异显著,针对三峡水库水体,在已有研究基础上,本研究采用透明度的 2.7 倍^[20]作为真光层深度,即:

$$Z_{eu} = 2.7 \times \text{SD} \quad (1)$$

混合层深度定义为水体上层垂直混合充分的水层,水体密度或温度沿深度变化很小. 不同的混合层深度,藻类生物量、光照和营养物质的分布有较大的差别^[21]. 不少学者从水温或水体密度角度^[22]对 Z_{mix} 计算进行研究,针对三峡水库水体,在已有的研究基础上,采取水温垂向梯度 $\leq 0.2^\circ\text{C} \cdot \text{m}^{-1}$ ^[20] 对应的水深计算混合层深度,可得各围隔内水体垂向最大水温梯度低于 $0.2^\circ\text{C} \cdot \text{m}^{-1}$,即各围隔内水体自表层到底层混合充分, Z1~Z6 混合层深度计算如表 1 所示.

表 1 各围隔内水温垂向梯度最大值/ $^\circ\text{C} \cdot \text{m}^{-1}$

Table 1 Maximum vertical temperature gradient in each enclosure/ $^\circ\text{C} \cdot \text{m}^{-1}$

位置	日期(月-日)										混合层深度/m
	02-06	02-08	02-11	02-13	02-15	02-17	02-19	02-21	02-25	02-27	
Z1	0.05	0.01	0.17	0.02	0.1	0.17	0.06	0.13	0.2	0.15	2
Z2	0.04	0.18	0.16	0.17	0.19	0.02	0.01	0.05	0.14	0.05	5
Z3	0.19	0.12	0.01	0.13	0.18	0.02	0.01	0.19	0.02	0.06	10
Z4	0.04	0.01	0.18	0.01	0.01	0.07	0.08	0.14	0.1	0.11	15
Z5	0.06	0.1	0.01	0.01	0.02	0.19	0.02	0.17	0.09	0.14	20
Z6	0.08	0.08	0.02	0.01	0.11	0.02	0.07	0.15	0.15	0.08	30

藻类比增长率的计算^[23]:

$$\mu = \frac{\ln B_t - \ln B_0}{t} \quad (2)$$

式中, μ 为藻类比增长率(d^{-1}); B_t 为对数期结束时藻类的现存量; B_0 为对数期开始时藻类现存量; t 为时间间隔(d); 本实验中以藻类 Chl-a 浓度表示

藻类现存量.

2 结果与分析

2.1 理化因子特性

水温是影响藻类生长的重要因素之一,水温对藻生物酶的生化特征、传输及结构有着显著影响^[24],从而间接影响藻类的光合作用和呼吸作用速率^[25].在适宜范围内,随水温升高,藻类胞内酶活性增加,藻类代谢速率加快,其生长迟缓期减短^[26],更易暴发水华.硅藻适宜水温为 13 ~ 25℃^[27],实验中各围隔水温基本低于 13℃,然而在 2 月 19 日(图 3)左右 Z1 仍暴发硅藻水华,可见水温并不是影响水华暴发的关键因子.电导率直接反映水中离子浓度,观测期内 Z1 ~ Z6 电导率变化趋势类似,在 390 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 左右波动,2 月 16 日各围隔电导率达到最小值 375 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$,后逐渐

回增.

pH、DO 可反映藻类代谢的强弱.藻类大量繁殖时,pH 可迅速升至 9 ~ 10^[28].各围隔 pH 变化如图 3 所示.实验期间,受藻类代谢影响,水体 pH 值整体呈增大趋势.Z1 增幅最大,2 月 21 日 pH 高达 10,之后略有降低,但仍高于 9.6.对照图 8 的 Chl-a 变化可知,该时段 Z1 围隔暴发了强烈的水华,藻细胞光合作用旺盛,水体 pH 显著升高.Z2 ~ Z6 围隔的 pH 值在 2 月 15 日最大,随后降低,2 月 18 日之后继续上升.总体来看,水体 pH 值变化呼应藻类代谢强弱,水华暴发对水体 pH 值影响显著.实验中 DO 变化也与 Chl-a 变化呼应,Z1 围隔暴发水华时,其中 DO 陡增,高达 37 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,超出水体饱和溶解氧浓度.可见水华暴发时,藻类光合代谢过程下产氧显著.相对来看,其他围隔的 DO 降低,同水体 pH 值变化相似.

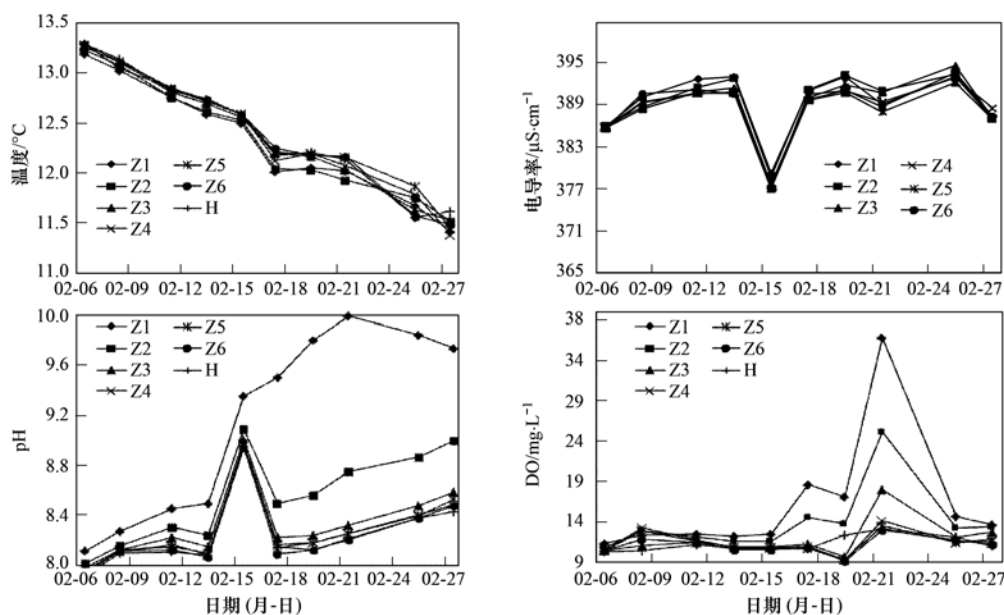


图 3 不同 Z_{mix} 理化因子日变化

Fig. 3 Diurnal variation of the physical and chemical factors under different Z_{mix}

2.2 光学参数特性

2.2.1 水下光强及光衰减特性

各围隔内水下光分布如图 4 所示,其中 Z1、Z2 围隔测量至底部,Z3 ~ Z6 围隔测量至各围隔水下 9 m(光照强度接近 0 处).从中可见,实验期间各围隔水下光强随水深衰减符合式(3)所述的指数分布.各围隔真光层以内光强衰减剧烈,在真光层底部 7 m 深度时接近于 0.

据式(3)计算实验期间各围隔水下 2 m 内光衰减系数,如图 5 所示.各围隔水下光衰减系数初始

值均较小,为 0.92 m^{-1} .自 2 月 6 ~ 21 日,Z1、Z2 光衰减系数持续增大,分别由 0.92 m^{-1} 增至 1.2 m^{-1} 、1.1 m^{-1} .Z3 ~ Z6 围隔光衰减系数变化不大, K_{sd} 值基本在 1 m^{-1} 以下.

2.2.2 真光层特性

真光层深度(Z_{eu})指开放水体中阳光照射所达、光合作用得以发生的水体深度,为水柱中支持净初级生产力的部分,其底部为临界深度,海洋、湖泊、河流等水域生态系统中浮游植物基本分布在这一层.各围隔的 Z_{eu} 如图 6 所示.真光层是根据水体透

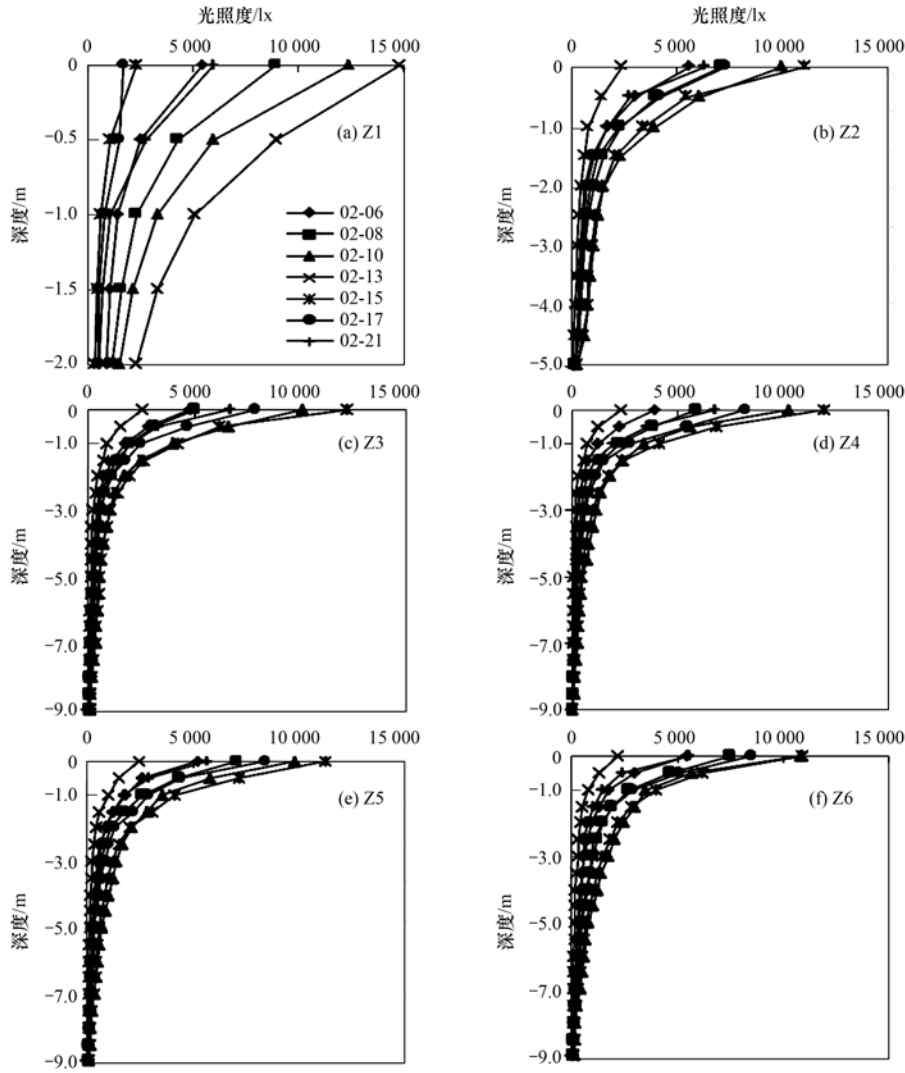


图 4 不同 Z_{mix} 水下光分布

Fig. 4 Underwater light distribution under different Z_{mix}

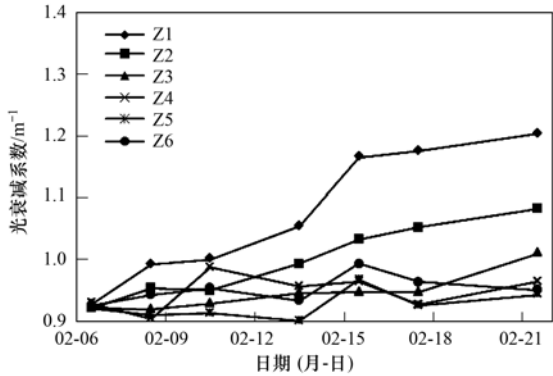


图 5 不同 Z_{mix} 下 2 m 内光衰减系数日变化

Fig. 5 Diurnal variation of K_{sd} within 2 meters under different Z_{mix}

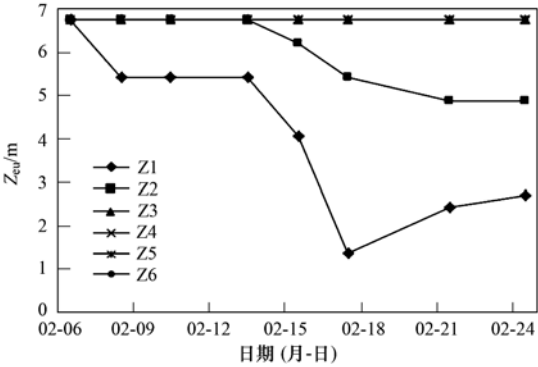


图 6 不同 Z_{mix} 下真光层深度日变化

Fig. 6 Diurnal variation of Z_{eu} under different Z_{mix}

明度计算而来,而水体透明度与水中悬浮粒子、藻细胞颗粒对光的散射和吸收直接相关. 本实验中由于围隔内水体悬浮粒子较少,主要考虑水中藻细胞

颗粒. 故真光层的变化与水体 Chl-a 密切相关. 对照图 8 可知,随时间推进,Z1 围隔内 Chl-a 变化显著,呈先增大后减小的趋势,符合藻类生长的二次曲

线,即经迟滞期、对数期,到稳定期,最后藻细胞衰亡,进入衰退期,其峰值在 2 月 17 日出现,约为 $90\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$; Z2 围隔在实验期间 Chl-a 有一定变化,但幅度较小,在 $10\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 以内,而其他围隔的 Chl-a 极低,且基本无变化. 由此可知,Z1 和 Z2 围隔内真光层发生变化,逐渐降低,且 Z1 降低非常明显,至 2 月 17 日降至最低值 1 m; 真光层降低后,水体光通透性进一步降低,使得藻细胞生长减弱,Chl-a 降低,而藻细胞生长减弱导致水体光通透性上升,此时真光层开始增大; Z2 也有相似变化,而其他围隔则无变化. 就变幅而言,Z1 和 Z2 变幅分别为 1~7 m、5~7 m,其他围隔 Z_{eu} 基本维持在 7 m 左右. 由此可见,水体真光层与水中的 Chl-a 关系是负反馈循环. 对照图 5 可知真光层与水下光衰减系数变化趋势相反.

2.2.3 $Z_{\text{eu}}/Z_{\text{mix}}$

各围隔内 $Z_{\text{eu}}/Z_{\text{mix}}$ 变化如图 7 所示. 由图 7 可知观测期内,Z1、Z2 围隔 $Z_{\text{eu}}/Z_{\text{mix}}$ 值波动相对较大,变动范围分别为 $1/2\sim7/2$ 、 $1\sim7/5$,其他围隔无明显变化. 下文分析中 $Z_{\text{eu}}/Z_{\text{mix}}$ 采用控制初始值,即 Z1~Z6 的 $Z_{\text{eu}}/Z_{\text{mix}}$ 值分别为 $7/2$ 、 $7/5$ 、 $7/10$ 、 $7/15$ 、 $7/20$ 、 $7/30$.

2.3 浮游植物变化规律

2.3.1 不同混合层深度下的藻种演替

各围隔藻细胞密度如图 8 所示. 整个观测期内 Z1、Z2 围隔藻细胞密度增大较快,Z3~Z6 围隔则变化缓慢. Z1、Z2 围隔藻细胞密度在 2 月 13 日开始迅速增大,Z1 围隔在 19 日达到峰值,约 $40\times10^6\text{ cell}\cdot\text{L}^{-1}$,此后开始降低; Z2 围隔在 21 日达到峰值,约 $9\times10^6\text{ cell}\cdot\text{L}^{-1}$,此后降低. 其他围隔以及河水藻细胞密度则持续偏低. 各围隔藻细胞密度与图 8 中 Chl-a 变化较为类似.

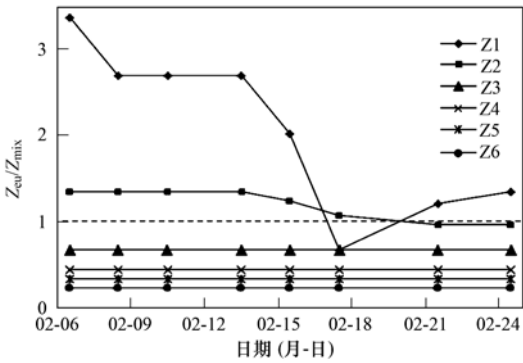


图 7 不同 Z_{mix} 下光混比日变化

Fig. 7 Diurnal variation of $Z_{\text{eu}}/Z_{\text{mix}}$ under different Z_{mix}

各围隔 Chl-a 如图 8 所示. 从中可知混合层深度较浅的 Z1、Z2 围隔 Chl-a 浓度显著高于其他围隔,Z3~Z6 围隔以及河水在观测期内 Chl-a 浓度持续偏低,在 $1\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 左右波动. Z1 围隔 Chl-a 浓度自 2 月 6~19 日持续增加,在 2 月 19 日达到峰值 $90\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$,此后开始降低. Z2 围隔 Chl-a 浓度自 2 月 6~11 日缓慢增长,在 2 月 21 日达到峰值 $9\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$,此后也逐渐降低.

观测期内各围隔内优势藻种如图 9 所示,共观测藻类 3 门,分别为硅藻门、绿藻门及隐藻门. 其中 Z1、Z2 围隔在实验初期及中期主要优势藻种为硅藻,在末期主要优势藻种则变为绿藻. Z3~Z6 围隔及河水在观测期内主要优势藻种为硅藻.

2.3.2 不同混合层深度下藻类生长速率

根据实验测得的 Chl-a 浓度,计算不同混合层深度下藻类的比增长率 μ ,结果如表 2.

如表 2 所示,2 m 混合的围隔内藻类生长最快,比增长率为 0.374,随着 Z_{mix} 增加,藻类比增长率呈递减趋势,30 m 混合的围隔藻类生长最慢,比增长率为 0.046.

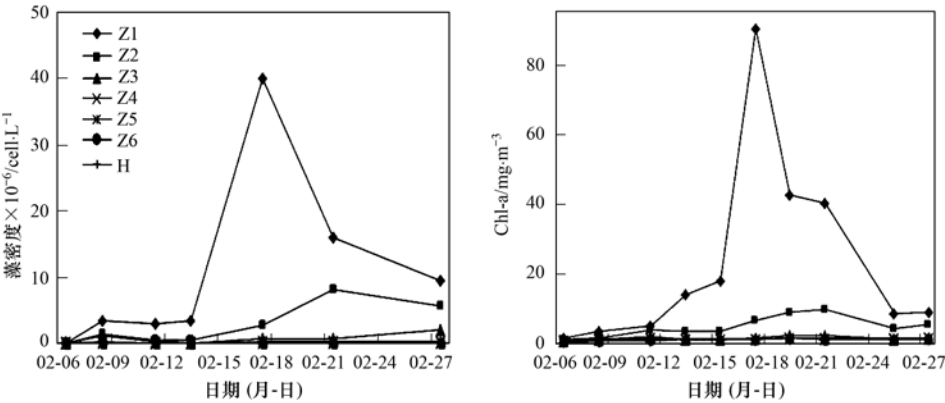


图 8 不同 Z_{mix} 下的藻密度及 Chl-a 变化

Fig. 8 Variation of algal density and Chl-a under different Z_{mix}

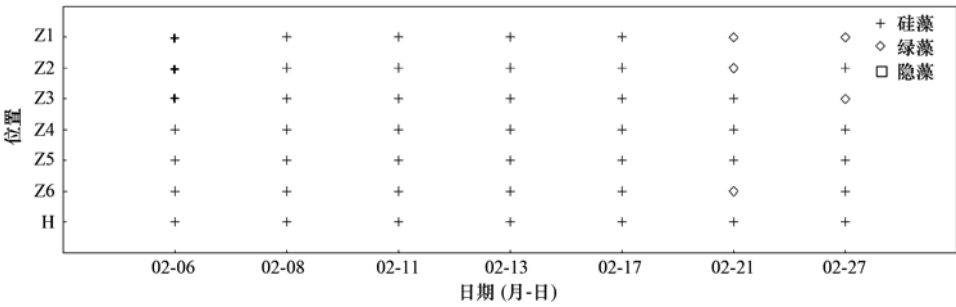


图 9 不同 Z_{mix} 下的优势藻种

Fig. 9 Predominant algae species under different Z_{mix}

表 2 不同 Z_{mix} 下藻类比增长率

Table 2 Algal special growth rate under different Z_{mix}

编号	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6
Z_{mix}/m	2	5	10	15	20	30
比增长率 μ	0.374	0.186	0.090	0.077	0.075	0.046

3 讨论

3.1 临界层理论对藻类生长的作用机制

Sverdrup^[12]在 Gran 等^[29]于 1935 年提出的水体混合影响浮游植物生物量观点的基础上建立了经典的临界层理论,该理论揭示了海洋浮游植物初级生产力与水体垂向层化稳定度的关系;当混合层深度浅于临界层深度时,有助于浮游植物迅速生长,反之则抑制其生长. 该理论同样解释了淡水湖泊水华的季节性暴发和演替,在很多研究区域得到广泛的应用^[30~33]. 本研究在比较 $Z_{\text{eu}}/Z_{\text{mix}}$ 与 Chl-a 的关系时,将各围隔的真光层均设为初始值 7 m (即为本实验的初始控制条件),结果如图 10 所示.

Z1、Z2 围隔 $Z_{\text{eu}}/Z_{\text{mix}}$ 值均大于 1,其 Chl-a 浓度显著偏高,水体可见度降低,致使 Z1、Z2 围隔 2 m 内光衰减系数高于其他围隔(图 5); Z3 ~ Z6 围隔 $Z_{\text{eu}}/Z_{\text{mix}}$ 值均小于 1,其 Chl-a 浓度相应较小. 在表 3 中 $Z_{\text{eu}}/Z_{\text{mix}}$ 值与 Chl-a 的相关性为 0.936,呈正显著相关,可见 $Z_{\text{eu}}/Z_{\text{mix}}$ 是控制此次围隔藻类生长的关键性指标. 这与刘流等^[34]对香溪河 2010 年春季水华影响因子研究所得结论相符, Sverdrup^[12]的临界层理论适用三峡水库水体.

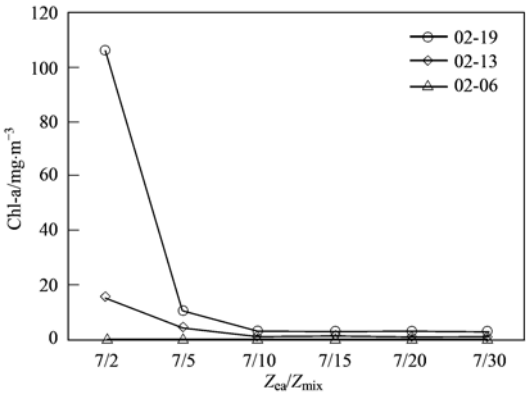


图 10 不同 $Z_{\text{eu}}/Z_{\text{mix}}$ 值下 Chl-a 变化

Fig. 10 Variation of Chl-a under different $Z_{\text{eu}}/Z_{\text{mix}}$

Sverdrup^[12]同时指出 $Z_{\text{eu}}/Z_{\text{mix}}$ 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^[35, 36], Oliver 等^[37]考虑昼日长短的季节性变化,将临界值界定为 0.2 ~ 0.35,图 10 中 $Z_{\text{eu}}/Z_{\text{mix}}$ 值与 Chl-a 的结果验证了临界值的存在,实验中 Z1 ~ Z5 围隔 $Z_{\text{eu}}/Z_{\text{mix}}$ 值均高于 0.35,但只有 Z1、Z2 暴发水华. 可见实验中 $Z_{\text{eu}}/Z_{\text{mix}}$ 临界值高于 0.35, $Z_{\text{eu}}/Z_{\text{mix}}$ 临界值的差异说明其受多方面因素的影响.

3.2 水体垂向混合对水华的影响

以上分析可知临界层理论在本实验中具有一定

表 3 不同理化指标与 $Z_{\text{eu}}/Z_{\text{mix}}$ 、Chl-a 的相关分析¹⁾

Table 3 Correlation analysis between different physico-chemical indicators and $Z_{\text{eu}}/Z_{\text{mix}}$

	Chl-a	μ	K_{sd}	DO	电导率	pH	温度
$Z_{\text{eu}}/Z_{\text{mix}}$	0.936(**)	0.943(**)	0.899(*)	0.943(**)	0.714	0.943(**)	-0.543
Chl-a		1.00(**)	0.986(**)	0.886(*)	0.645	0.886(*)	-0.6

1) ** 表示双尾 t 检验显著性水平 $P < 0.01$, * 表示双尾 t 检验显著性水平 $P < 0.05$

的适用性,在这里引用 Sverdrup^[12] 临界层理论中提出的重要假设包括:在 Z 深度的水体垂向剖面内有有机物分布均匀,混合层内水下光衰减系数 k 为常量,故得水下光衰减表达式为:

$$I_z = I_e \times e^{-kz} \quad (3)$$

式中, I_z 为水下 Z 深度的光能量, $\text{g} \cdot \text{cal}$; I_e 为水体表层入射光能量, $\text{g} \cdot \text{cal} \cdot (\text{cm}^2 \cdot \text{h})^{-1}$.

假设单位时间内藻类光合作用有机物产量正比于其所受的水下光照强度,得:

$$P = mI_z \quad (4)$$

式中, P 为藻类光合作用有机物产量, $\text{g} \cdot \text{cal}$; m 为系数.

藻类呼吸作用单位时间内消耗有机物的量与深度无关,可记为:

$$R = n \quad (5)$$

式中, R 为呼吸作用单位时间内有机物消耗量, $\text{g} \cdot \text{cal}$; n 为系数.

式(4)和(5)中的 m 和 n 主要受水温影响,而本实验中各围隔内水温差异较小,故可将其视为常量.忽略水下浮游动物捕食、藻类自身死亡沉降等过程的影响,可得 t 时间内藻类光合作用有机物产量及呼吸作用有机物消耗量积分表达式为:

$$P = m \int_0^t dt \int_{-Z}^0 (-I_e \times e^{-kz}) dZ \quad (6)$$

$$R = n \int_0^t dt \int_{-Z}^0 dZ \quad (7)$$

Sverdrup^[12] 通过式(6)、(7)计算得出临界层深度,指明在临界层深度以内, $P > R$, 水华可能暴发.本实验在临界层理论的基础上,假设 Z 深度内水体平均光照强度为 $\bar{I}_z$, 显然 Z 越大, $\bar{I}_z$ 越小,联合式(4)、(5)可得,混合层 Z 内水体藻类有机物的净初级生产力表达式为:

$$G = P - R = m \bar{I}_z - n \quad (8)$$

式中, G 为藻类有机物的净初级生产力, $\text{g} \cdot \text{cal}$.

由式(8)知 Z 越大, G 越小. 即 Z_{mix} 越大, 混合层内藻类净初级生产力越小, 藻类生长速率越慢.对照实验中各围隔内水体 Chl-a 的变化过程(图 8)及藻细胞比增长率(表 2)可知, $Z1$ 、 $Z2$ 围隔 Chl-a 要显著高于其他围隔,其藻细胞比增长率分别为 0.374、0.186,远大于其他围隔,而 $Z3 \sim Z6$ 围隔内水体藻类生长缓慢,生物量几乎没有变动.因此 Z_{mix} 直接决定着藻类净初级生产力.

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.而入射光绝

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^[38].因此真光层以内,越接近表层,藻类可接受光照越充分,越有利于藻类生长.混合层以内水体垂向紊动混合使藻类发生垂向位移而改变接受有效光强的几率,而混合层深度越浅,藻类接受的有效光强的几率越大,其生长越快,这与以上推理所得结论相符.

4 结论

(1)临界层理论适用于本实验,基于临界层理论下水体 $Z_{\text{eu}}/Z_{\text{mix}}$ 是水华暴发的关键因子.上层水体是藻类生长的主要贡献来源,较浅的混合层使藻类接受光照更充分,其生长越旺盛.

(2) $Z_{\text{eu}}/Z_{\text{mix}}$ 值是影响藻类水华暴发的关键因子, $Z_{\text{eu}}/Z_{\text{mix}}$ 值高于临界值是水华暴发的主要原因.

(3) Z_{mix} 越小,混合层内平均光强 $\bar{I}_z$ 越大,即藻类接受的光照藻越充分,其净初级生产力越大,反之越小.

致谢:现场监测过程中得到阮腾腾、谢涛、朱冠霖的大力协助,实验样品分析中得到姚绪姣、方丽娟的大力支持,在此一并致谢.

参考文献:

- [1] 中华人民共和国环境保护总局. 长江三峡工程生态与环境监测公报 1997[R]. 北京: 国家环境保护总局, 1997.
- [2] 黄钰铃, 刘德富, 陈明曦. 不同流速下水华生消的模拟[J]. 应用生态学报, 2008, 19(10): 2293-2298.
- [3] 李重荣, 王祥三, 窦明. 三峡库区香溪河流域污染负荷研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2003, 36(2): 29-32.
- [4] 姚绪姣, 刘德富, 杨正健, 等. 三峡水库香溪河库湾冬季甲藻水华生消机理初探[J]. 环境科学研究, 2012, 25(6): 645-651.
- [5] 中华人民共和国环境保护总局. 长江三峡工程生态与环境监测公报 2006[R]. 北京: 国家环境保护总局, 2006.
- [6] 纪道斌, 刘德富, 杨正健, 等. 汛末蓄水期香溪河库湾倒灌异重流现象及其对水华的影响[J]. 水利学报, 2010, 41(6): 691-696.
- [7] 廖平安, 胡秀琳. 流速对藻类生长影响的试验研究[J]. 北京水利, 2005, (2): 12-14.
- [8] 李锦秀, 杜斌, 孙以三. 水动力条件对富营养化影响规律探讨[J]. 水利水电技术, 2005, 36(5): 15-18.
- [9] 刘东艳, 孙军, 张利永. 胶州湾浮游植物水华期群落结构特征[J]. 应用生态学报, 2003, 14(11): 1963-1966.
- [10] 朱根海, 许卫忆, 朱德第, 等. 长江口赤潮高发区浮游植物与水动力环境因子的分布特征[J]. 应用生态学报, 2003, 14(7): 1135-1139.
- [11] 张毅敏, 张永春, 张龙江, 等. 湖泊水动力对蓝藻生长的影响[J]. 中国环境科学, 2007, 27(5): 707-711.
- [12] Sverdrup H U. On conditions for the vernal blooming of

- phytoplankton[J]. ICES Journal of Marine Science, 1953, **18**(3): 287-295.
- [13] 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.
- [14] Fonseca B M, Bicudo C E M. Phytoplankton seasonal variation in a shallow stratified eutrophic reservoir (Garças Pond, Brazil) [J]. Hydrobiologia, 2008, **600**(1): 267-282.
- [15] 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.
- [16] 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. 243-670.
- [17] SL 91.1-1994, 二氧化硅(可溶性)的测定(硅钼黄分光光度法)[S].
- [18] Kirk J T O. Light and photosynthesis in aquatic ecosystems[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1994.
- [19] Reinart A, Arst H, Erm A, *et al.* Optical and biological properties of Lake Ülemiste, a water reservoir of the city of Tallinn II: Light climate in Lake Ülemiste[J]. Lakes & Reservoirs: Research & Management, 2001, **6**(1): 75-84.
- [20] Lawrence I, Bormans M, Oliver R, *et al.* Physical and nutrient factors controlling algal succession and biomass in Burrinjuck Reservoir[R]. Canberra: Land and Water Resources Australia, 2000. 119-120.
- [21] Chen X C, Wang X D, Wu D Y, *et al.* Seasonal variation of mixing depth and its influence on phytoplankton dynamics in the Zeya reservoir, China[J]. Limnology, 2009, **10**(3): 159-165.
- [22] Rochford P A, Hurlburt H E. An optimal definition for ocean mixed layer depth[J]. Journal of Geophysical Research, 2000, **105**(C7): 16803-16821.
- [23] Hecky R E, Kilham P. Nutrient limitation of phytoplankton in freshwater and marine environments: a review of recent evidence on the effects of enrichment[J]. Limnology and Oceanography, 1988, **33**(4_part_2): 796-822.
- [24] Raven J A, Geider R J. Temperature and algal growth[J]. New Phytologist, 2006, **110**(4): 441-461.
- [25] Eppley R W. Temperature and phytoplankton growth in the sea [J]. Fishery Bulletin, 1972, **70**(4): 1063-1085.
- [26] Oliver R, Ganf G. Freshwater blooms[A]. In: Whitton B A, Potts M (Eds.). The Ecology of Cyanobacteria [M]. Netherlands: Academic Publishers, 2002. 149-194.
- [27] 代玲玲. 三峡水库富营养化藻类特征及环境因素影响研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2007.
- [28] 任南琪, 马放, 杨基先. 污染控制微生物学[M]. (第三版). 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2002.
- [29] Gran H H, Braarud T. A quantitative study of the phytoplankton in the Bay of Fundy and the Gulf of Maine (including observations on hydrography, chemistry and turbidity) [J]. Journal of the Biological Board of Canada, 1935, **1**(5): 279-467.
- [30] Nelson D M, Smith W O Jr. Sverdrup revisited: critical depths, maximum chlorophyll levels, and the control of Southern Ocean productivity by the irradiance-mixing regime[J]. Limnology and Oceanography, 1991, **36**(8): 1650-1661.
- [31] Platt T, Bird D F, Sathyendranath S. Critical depth and marine primary production [J]. Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences, 1991, **246**(1317): 205-217.
- [32] Tirok K, Gaedke U. The effect of irradiance, vertical mixing and temperature on spring phytoplankton dynamics under climate change: long-term observations and model analysis [J]. Oecologia, 2007, **150**(4): 625-642.
- [33] Townsend D W, Keller M D, Sieracki M E, *et al.* Spring phytoplankton blooms in the absence of vertical water column stratification[J]. Nature, 1992, **360**(6399): 59-62.
- [34] 刘流, 刘德富, 肖尚斌, 等. 水温分层对三峡水库香溪河库湾春季水华的影响[J]. 环境科学, 2012, **33**(9): 3046-3050.
- [35] Harris G P. Photosynthesis, productivity and growth, the physiological ecology of phytoplankton [J]. Archiv für Hydrobiologie Beiheft Ergebnisse der Limnologie, 1978, **10**: 1-171.
- [36] Scheffer M, Rinaldi S, Gagnani A, *et al.* On the dominance of filamentous cyanobacteria in shallow, turbid lakes[J]. Ecology, 1997, **78**(1): 272-282.
- [37] 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.
- [38] Lembi C A. Limnology, Lake and river ecosystems[J]. Journal of Phycology, 2001, **37**(6): 1146-1147.

CONTENTS

Characteristics of Haze and Its Impact Factors in Four Megacities in China During 2006-2009	DAI Yong-li, TAO Jun, LIN Ze-jian, <i>et al.</i> (2925)
Characteristics of VOCs and Their Photochemical Reactivity in Autumn in Nanjing Northern Suburb	LI Yong-yu, ZHU Bin, AN Jun-lin, <i>et al.</i> (2933)
On-Line Measurement of Water-Soluble Composition of Particulate Matter in Beijing	CHENG Meng-tian, PAN Yue-peng, WANG Hui, <i>et al.</i> (2943)
Design and Evaluation of an Aerosol Nanoparticle Generation System	MAI Hua-jun, JIANG Jing-kun, HE Zheng-xu, <i>et al.</i> (2950)
Aerosol Size Distribution of Organic Carbon and Elemental Carbon on the Top of Coke Oven and in the Plant Area	LIU Xiao-feng, PENG Lin, BAI Hui-ling, <i>et al.</i> (2955)
Effects of Diurnal Warming on Soil N ₂ O Emission in Soybean Field	HU Zheng-hua, ZHOU Ying-ping, CUI Hai-ling, <i>et al.</i> (2961)
N ₂ O Flux in Winter and Its Affecting Factors Under Different Land Use Patterns	WU Yan-zheng, ZHANG Miao-miao, QIN Hong-ling, <i>et al.</i> (2968)
Prediction of Methane Emission of Paddy Field Based on the Support Vector Regression Model	CHEN Qiang, JIANG Wei-guo, CHEN Xi, <i>et al.</i> (2975)
Distributional Characteristics of Nutrients in the Sea-surface Microlayer and Subsurface Water of the Bohai and Yellow Sea in Summer	WANG Wen-tao, YANG Gui-peng, YU Juan, <i>et al.</i> (2983)
Effect of Nitrogen and Phosphorus Concentrations on the Adsorption of BDE28 and BDE47 by <i>Prorocentrum donghaiense</i> Dominant Population	WANG Fang, GE Wei, CHAI Chao, <i>et al.</i> (2992)
Hyperspectral Remote Sensing of Chlorophyll a Concentrations in the Lake Taihu, Based on Water Optical Classification	SUN De-yong, ZHOU Xiao-yu, LI Yun-mei, <i>et al.</i> (3002)
Bacterioplankton Index of Biotic Integrity (BP-IBI): An Approach for Assessing River Ecosystem Health in Dianchi Watershed	HUANG Yi, SHU Zhong-ya (3010)
Estimation of Urban Non-Point Source Pollution Loading and Its Factor Analysis in the Pearl River Delta	LIAO Yi-shan, ZHUO Mu-ning, LI Ding-qiang, <i>et al.</i> (3019)
Transported Fluxes of the Riverine Carbon and Seasonal Variation in Pearl River Basin	ZHANG Lian-kai, QIN Xiao-qun, YANG Hui, <i>et al.</i> (3025)
Characteristics of Nutrient Loss of Lanlingxi Watershed in the Three Gorges Reservoir Area	ZENG Li-xiong, XIAO Wen-fa, HUANG Zhi-lin, <i>et al.</i> (3035)
Characteristics of Dissolved Organic Carbon Release Under Inundation from Typical Grass Plants in the Water-Level Fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Area	TAN Qiu-xia, ZHU Bo, HUA Ke-ke (3043)
Research on the Influence of Mixing Layer Depth on Algal Growth	CHEN Yang, YANG Zheng-jian, HUANG Yu-ling, <i>et al.</i> (3049)
Denitrification Study of <i>Elodea nuttallii</i> -Nitrogen Cycling Bacteria Restoration in Meiliang Bay, Taihu Lake	ZHAO Lin, LI Zheng-kui, ZHOU Tao, <i>et al.</i> (3057)
Influence of Combined Ecological Floating Bed on Nitrogen and Phosphorus Between Overlying Water and Sediment	ZHENG Li-guo, YANG Ren-bin, WANG Hai-ping, <i>et al.</i> (3064)
Effects of Biochar Covering on the Release of Pollutants from Sediment	LI Yang, LI Feng-min, ZHANG Xiu-wen, <i>et al.</i> (3071)
Temporal-spatial Difference of Ecotoxicity and Heavy Metals Pollution in Shima Catchment, Dongguan	GAO Lei, CHEN Jian-yao, KE Zhi-ting, <i>et al.</i> (3079)
Evolution and Pollution of Heavy Metals in Core Sediments from Yamenqi Lake in Lianhuan Lake, China	XIAO Hai-feng, ZANG Shu-ying, GUAN Ying, <i>et al.</i> (3088)
Effect of Constructed Wetland on the Purification of Industrial Zone Rainfall Runoff Contaminated with Phenanthrene	JING Dan-dan, WAN Jin-quan, MA Yong-wen, <i>et al.</i> (3095)
Removal and Accumulation of the Tetracycline Resistance Gene in Vertical Flow Constructed Wetland	ZHENG Jia-yu, LIU Lin, GAO Da-wen, <i>et al.</i> (3102)
Method for Optimal Sensor Placement in Water Distribution Systems with Nodal Demand Uncertainties	LIU Shu-ming, WU Xue, OUYANG Le-yan (3108)
Formation Process of Nitrogenous Disinfection Byproduct Trichloronitromethane in Drinking Water and Its Influencing Factors	DING Chun-sheng, ZOU Bang-wen, MIAO Jia, <i>et al.</i> (3113)
Removal of Estrogens in Laccase Catalyzed Oxidative Processes	XIA Qing, XIE Wei-ping, LIU Guo-qiang, <i>et al.</i> (3119)
Study on Electrochemical Degradation of Cefazidime by Carbon Nanotubes Electrode	ZHU Hong, HU Xiang, LI Jun-feng (3125)
Photochemical Reaction Types of the Azole Fungicide Fluconazole Under UV-vis Irradiation	GE Lin-ke, LI Kai, YANG Kai, <i>et al.</i> (3132)
Photocatalytic Degradation Kinetics of Diuron by TiO ₂ and Simulated Sunlight	YANG Hai, ZENG Jian, LI Yuan, <i>et al.</i> (3137)
Adsorption of Congo Red from Aqueous Solution on Hydroxyapatite	ZHAN Yan-hui, LIN Jian-wei (3143)
Ethanol-Induced Influence on the Structure and Arsenate Adsorption of Resin-based Nano-hydrated Ferric Oxide	WAN Qi, LI Xu-chun, PAN Bing-cai (3151)
Chlorination Characteristic and Disinfection By-product Formation Potential of Dissolved Organic Nitrogen Compounds in Municipal Wastewater	LIU Bing, YU Xin, YU Guo-zhong, <i>et al.</i> (3156)
Start-up and Maintenance Method for Short-Cut Advanced Nitrogen Removal Process in a Pilot-Scale Reactor at Low Temperature	GU Sheng-bo, WANG Shu-ying, PENG Yong-zhen (3164)
Study on the Start-Up of Anaerobic Ammonium Oxidation Process in Biological Activated Carbon Reactor	LAI Wei-yi, ZHOU Wei-li, HE Sheng-bing (3171)
Excretion of Manure-Borne Steroid Hormones and Their Potential Risk in the Three Northeast Provinces of China	LIU Shu-fang, LI Yan-xia, ZHANG Xue-lian, <i>et al.</i> (3180)
Spatial Distribution and Composition of Perfluorinated Compounds in Soils Around the Huaihe River	MENG Jing, WANG Tie-yu, WANG Pei, <i>et al.</i> (3188)
Fluorine Speciation and Its Distribution Characteristics in Selected Agricultural Soils of North China Plain	YI Chun-yao, WANG Bing-guo, JIN Meng-gui (3195)
Effects of Long-Term Manure and Crop Residues Incorporation on Yield and Phosphorus Saturation in a Paddy Soil	YAN Xiao, WANG De-jian, ZHANG Gang, <i>et al.</i> (3205)
Influence of Organochlorine Pesticides in Wastewater on the Soil Along the Channel	XU Liang, ZHANG Cai-xiang, LIU Min, <i>et al.</i> (3211)
Elution of Endosulfan from Contaminated Soil by Surfactants and Their Combination	XIONG Bai-lian, ZHENG Guo-can, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (3216)
Effects of Different Aspects on Soil Microbial Biomass and Dissolved Organic Carbon of the Loess Hilly Area	ZHAO Tong, JIANG Yue-li, YAN Hao, <i>et al.</i> (3223)
Effects of Nitrogen Addition on Red Soil Microbes in the <i>Cinnamomum camphora</i> Plantation	YU Pei-yi, ZHU Fan, SU Shao-feng, <i>et al.</i> (3231)
Concentration, Profile Distribution and Source Identification of PCDD/Fs in Environmental Medium Around a HSWI	HUANG Wen, ZHANG Su-kun, DU Guo-yong, <i>et al.</i> (3238)
Assessment of Bioaccessibility of PAHs in Microbial Degradation Process Using Solid Phase Micro Extraction and Solid Phase Extraction	GUO Mei-xia, GONG Zong-qiang, LI Xiao-jun, <i>et al.</i> (3244)
Biodegradation of Tetrahydrofuran by Combined Immobilized of <i>Pseudomonas oleovorans</i> DT4	SHAO Qian, YE Jie-xu, OUYANG Du-juan, <i>et al.</i> (3251)
Analysis on Microbial Community in Biofilm Coating onto Solid Carbon Source Using the PCR-DGGE Technique	XU Ying, QIU Tian-lei, HAN Mei-lin, <i>et al.</i> (3257)
Effect of Temperature on Activity of <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i> and Formation of Biogenic Secondary Iron Minerals	SONG Yong-wei, ZHAO Bo-wen, HUO Min-bo, <i>et al.</i> (3264)
Differences of Selenium Uptake Pattern of Pakchoi and the Possible Mechanism When Amended with Selenate and Selenite	GUO Lu, MAN Nan, LIANG Dong-li, <i>et al.</i> (3272)
Effect of Pretreatment on Storage and Biogas Production of Baling Wheat Straw	MA Hui-juan, CHEN Guang-yin, DU Jing, <i>et al.</i> (3280)
Toxicity of Nitrate-N to Freshwater Aquatic Life and Its Water Quality Criteria	ZHANG Ling-song, WANG Ye-yao, MENG Fan-sheng, <i>et al.</i> (3286)
Analysis Performance of Biological Toxicity Testing MTOXPlate Using Microplate	LIN Yi-yun, ZHANG Guo-xia, HE Li-ping, <i>et al.</i> (3294)
Study of Combined Effects of DES and EV on the Proliferation of MCF-7 Cells by Two Experimental Designs	LIU Qian, LEI Bing-li, AN Jing, <i>et al.</i> (3303)
Status and Influencing Factors of Polychlorinated Biphenyls (PCBs) Pollution in the Coastal Areas in China	LIU Min-xia, YANG Yu-yi, LI Qing-xiao, <i>et al.</i> (3309)
Pharmaceuticals and Personal Care Products (PPCPs) in the Effluent of Sewage Treatment Plants	ZHENG Shao-kui, LI Xiao-feng (3316)
Research Progress on Biochar Carbon Sequestration Technology	JIANG Zhi-xiang, ZHENG Hao, LI Feng-min, <i>et al.</i> (3327)
Countermeasures for Strict Water Quality Management of Drinking Water Sources: Some Thoughts and Suggestions on Implementing Strict Water Resources Management	FU Guo-wei (3334)

《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8月15日 34卷 第8期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 8 Aug. 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

国内外公开发行人