

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第9期

Vol.34 No.9

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

利用PUF被动采样技术研究长三角城市群大气中多环芳烃的时空分布及来源 张利飞, 杨文龙, 董亮, 史双昕, 周丽, 张秀蓝, 李玲玲, 钮珊, 黄业茹 (3339)

FTIR对大气颗粒物PM_{2.5}中硝酸盐的定量分析 刘娜, 魏秀丽, 高闽光, 徐亮, 焦洋, 李胜, 童晶晶, 程巴阳 (3347)

福建茫荡山地区春季大气O₃、HONO、HCHO、H₂O₂对·OH的贡献率研究 刘昊, 王会祥 (3352)

水体类固醇雌激素污染现状研究进展 都韶婷, 金崇伟, 刘越 (3358)

嘉兴市地表水中兽用抗生素的污染现状调查 闫幸, 余卫娟, 兰亚琼, 李立, 吕升, 叶朝霞, 张永明, 刘锐, 陈吕军 (3368)

上海食用鱼中短链氯化石蜡的污染特征 姜国, 陈来国, 何秋生, 孟祥周, 封永斌, 黄玉妹, 唐才明 (3374)

水体环境内毒素活性的鲎法定量检测及影响因素研究 张灿, 刘文君, 张明露, 田芳, 孙雯, 钱令嘉, 战锐 (3381)

四环素类抗生素对淡水绿藻的毒性作用 徐冬梅, 王艳花, 饶桂维 (3386)

光照对东海典型赤潮藻生长及硝酸还原酶活性的影响 李鸿妹, 石晓勇, 丁雁雁, 唐洪杰 (3391)

围隔实验中浒苔在不同营养盐条件下的生长比较 庞秋婷, 李凤, 刘湘庆, 王江涛 (3398)

长江口及邻近海域浮游植物色素分布与群落结构特征 赖俊翔, 俞志明, 宋秀贤, 韩笑天, 曹西华, 袁涌铨 (3405)

长江中下游湖泊超微型真核藻类遗传多样性研究 李胜男, 史小丽, 谢薇薇, 龚伊, 孔繁翔 (3416)

峡谷型水源水库的氮、磷季节变化及其来源分析 黄廷林, 秦昌海, 李璇 (3423)

九龙江河流-库区系统沉积物磷特征及其生态学意义 鲁婷, 陈能汪, 陈朱虹, 王龙剑, 吴杰忠 (3430)

氮在高含沙水向人工浅水湖泊补水期间的变化规律 陈友媛, 申宇, 杨世迎 (3437)

石灰石和黄铁矿-石灰石人工湿地净化河水的研究 张菁, 李睿华, 李杰, 胡俊松, 孙茜茜 (3445)

杭州湾潮滩湿地3种优势植物碳氮磷储量特征研究 邵学新, 李文华, 吴明, 杨文英, 蒋科毅, 叶小齐 (3451)

滇池优势挺水植物茭草和芦苇降解过程中DOM释放特征研究 谢理, 杨浩, 渠晓霞, 朱元荣, 鄢元波, 张明礼, 吴丰昌 (3458)

自来水处理工艺对溶解相中全氟化合物残留的影响 张鸿, 陈清武, 王鑫璇, 柴之芳, 沈金灿, 杨波, 刘国卿 (3467)

J市饮用水氯消毒副产物分析及其健康风险评价 李晓玲, 刘锐, 兰亚琼, 余素林, 文晓刚, 陈吕军, 张永明 (3474)

水中硫酸根及溶解氧质量浓度变化对管垢金属元素释放的影响 吴永丽, 石宝友, 孙慧芳, 张枝焕, 顾军农, 王东升 (3480)

重金属捕集剂对水中微量Hg(II)的处理研究 胡运俊, 盛田田, 薛晓芹, 谭丽莎, 徐新华 (3486)

聚合氯化铁-聚(环氧氯丙烷-二甲胺)复合絮凝剂在模拟水处理中的混凝特性研究 刘新新, 杨忠莲, 高宝玉, 王燕, 岳钦艳, 李倩 (3493)

镁铝复合脱色絮凝剂的微观结构形态及絮凝机制 桑义敏, 常雪红, 车越, 谷庆宝 (3502)

钴掺杂铁酸铋活化过硫酸盐降解水中四溴双酚A的研究 欧阳磊, 丁耀彬, 朱丽华, 唐和清, 廖海星 (3507)

以海泡石为载体的双金属多相类芬顿催化剂的制备及表征 宿程远, 李伟光, 刘兴哲, 王恺尧, 王勇 (3513)

氧化还原介体调控亚硝酸盐反硝化特性研究 赵丽君, 马志远, 郭延凯, 席振华, 杜海峰, 刘晓宇, 郭建博 (3520)

缓释碳源滤池用于二级出水的深度脱氮 唐蕾, 李彭, 左剑恶, 袁琳, 李再兴 (3526)

微膨胀对好氧颗粒污泥脱氮过程中N₂O产生量的研究 陈丽丽, 高大文 (3532)

Fenton试剂与CPAM联合调理对污泥脱水效果的影响研究 马俊伟, 刘杰伟, 曹芮, 岳东北, 王洪涛 (3538)

高效厌氧氨氧化颗粒污泥的动力学特性 唐崇俭, 熊蕾, 王云燕, 郑平 (3544)

内蒙古温带草原氮沉降的观测研究 张菊, 康荣华, 赵斌, 黄永梅, 叶芝祥, 段雷 (3552)

湘中矿区不同用地类型面源Cd输出负荷的原位实验研究 刘孝利, 曾昭霞, 陈喆, 铁柏清, 陈永稳, 叶长城 (3557)

蠡湖沉积物重金属形态及稳定性研究 王书航, 王雯雯, 姜霞, 宋倩文 (3562)

密云县境内潮河流域土壤重金属分析评价 于洋, 高宏超, 马俊花, 李迎霞, 莫雁, 孔彦鸿 (3572)

西北干旱区黄河沿岸典型工业带表土磁性特征及其环境意义 许淑婧, 张英, 余晔, 王博, 夏敦胜 (3578)

复合稳定剂对砷污染土壤的稳定研究 王浩, 潘利祥, 张翔宇, 李萌, 宋宝华 (3587)

湖南下水湾铅锌尾矿库优势植物重金属含量及富集特征 何东, 邱波, 彭尽晖, 彭亮, 胡凌霄, 胡瑶 (3595)

安太堡露天矿复垦地不同人工植被恢复下的土壤酶活性和肥力比较 王翔, 李晋川, 岳建英, 周小梅, 郭春燕, 卢宁, 王宇宏, 杨生权 (3601)

三苯基锡的微生物降解及其对降解菌的影响 叶锦韶, 田云, 尹华, 彭辉, 黄捷, 麻榆佳 (3607)

二氯甲烷降解菌 *Methylobacterium rhodesianum* H13 的分离鉴定及降解特性研究 刘洪霞, 朱润晔, 欧阳杜娟, 庄庆丰, 陈东之, 陈建孟 (3613)

引物选择对污泥微生物多样性分析的影响 徐爱玲, 吴等等, 宋志文, 任杰, 夏岩, 董珊珊, 刘梦 (3620)

钙铝类水滑石衍生复合氧化物的SO₂储存性能研究 曹琳, 王海滨, 解强 (3627)

基于转运站满负荷的北京市新东西城区生活垃圾物流优化方案研究 袁京, 李国学, 张红玉, 罗一鸣 (3633)

重金属污染土壤治理与生态修复论坛会议论文

多证据分析技术在场地重金属污染评价中的应用研究 姜林, 钟茂生, 朱笑盈, 姚珏君, 夏天翔, 刘辉 (3641)

我国城市不同功能区地表灰尘重金属分布及来源 李晓燕, 刘艳青 (3648)

黄河下游滩区开封段土壤重金属分布特征及其潜在风险评价 张鹏岩, 秦明周, 闫江虹, 胡长慧, 赵亚平 (3654)

青岛北站规划区原场地表层土壤重金属污染研究 朱磊, 贾永刚, 潘玉英 (3663)

某铅蓄电池厂土壤中铅的含量分布特征及生态风险 郑立保, 陈卫平, 焦文涛, 黄锦楼, 魏福祥 (3669)

某铅冶炼厂对周边土壤质量和人体健康的影响 周小勇, 雷梅, 杨军, 周广东, 郭广慧, 陈同斌, 万小铭, 梁琪, 乔鹏伟 (3675)

某铅蓄电池厂表土不同粒径中铅分布规律研究 岳希, 孙体昌, 黄锦楼 (3679)

原位生物稳定固化技术在铬污染场地治理中的应用研究 张建荣, 李娟, 许伟 (3684)

淋洗剂对多金属污染尾矿土壤的修复效应及技术研究 朱光旭, 郭庆军, 杨俊兴, 张晗芝, 魏荣菲, 王春雨, Marc Peters (3690)

铅蓄电池厂污染土壤中重金属铅的清洗及形态变化分析 任贝, 黄锦楼, 苗明升 (3697)

超声波辅助化学萃取对某工业场地铅污染土壤修复效果研究 王鑫杰, 黄锦楼, 刘志强, 岳希 (3704)

摩擦清洗修复铅污染土壤的参数优化及清洗效率评价 杨雯, 黄锦楼, 彭会清, 李思拓 (3709)

土壤重金属钝化修复剂生物炭对镉的吸附特性研究 郭文娟, 梁学峰, 林大松, 徐应明, 王林, 孙约兵, 秦旭 (3716)

无机稳定剂对重金属污染土壤的化学稳定修复研究 曹梦华, 祝玺, 刘黄诚, 王琳玲, 陈静 (3722)

《环境科学》征稿简则(3404) 《环境科学》征订启事(3444) 信息(3492, 3551, 3696, 3715)

围隔实验中浒苔在不同营养盐条件下的生长比较

庞秋婷¹, 李凤¹, 刘湘庆², 王江涛^{1*}

(1. 中国海洋大学化学化工学院, 青岛 266100; 2. 国家海洋局第一研究所, 青岛 266061)

摘要: 近年来浒苔在我国黄海海区大规模暴发, 给沿海海区造成了严重的环境问题. 为了探究营养盐对浒苔生长的影响, 2012 年 5 月在黄海海区进行了现场船基围隔实验. 实验共设置 12 个围隔装置, 9 种不同的营养盐条件. 实验发现, 浒苔对营养盐有极强的吸收能力, 生长能力很强, 在营养盐适中时, 相对生长率最高可达 82%, 即使在低营养盐条件下也会保持 10% 左右的生长速率. 在磷酸盐含量适中时, 高浓度的硝酸盐更能促进浒苔的生长; 充足、连续的营养盐补充是浒苔绿潮暴发的物质基础. 通过浒苔吸收的营养盐含量估算其光合作用产生有机物的质量, 发现与浒苔湿重增加量有着良好的线性关系.

关键词: 浒苔; 围隔实验; 营养盐; 湿重; 光合作用

中图分类号: X55 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)09-3398-07

Compare the Growth of *Enteromorpha prolifera* Under Different Nutrient Conditions

PANG Qiu-ting¹, LI Feng¹, LIU Xiang-qing², WANG Jiang-tao¹

(1. College of Chemistry and Chemical Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. The First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao 266061, China)

Abstract: *Enteromorpha prolifera* (*E. prolifera*) tides have erupted frequently in the Yellow Sea and brought serious environmental problems to coastal sea since 2007. In order to research the influence of nutrients on *E. prolifera* growth, mesocosm experiments were carried out in the Yellow Sea in May 2012. There were 12 mesocosms, including 9 different experimental conditions. It shows that the uptake ability of nutrients and the growth of *E. prolifera* are strong. The growth rate of *E. prolifera* reaches 82% when the nutrient level is appropriate, while the rate could also keep around 10% even under low nutrient conditions. When phosphate level is appropriate, high dissolved inorganic nitrogen (DIN) concentration could promote the growth of *E. prolifera*. Sufficient and continuous nutrient supplement is the material basis for outbreak of *E. prolifera* green tide. Through analyzing the amount of nutrient uptake by *E. prolifera*, the production of organics by photosynthesis could be estimated, which has a strong linear relationship with the increased of wet weight of *E. prolifera*.

Key words: *Enteromorpha prolifera*; mesocosm experiments; nutrient; wet weight; photosynthesis

浒苔在富营养化的河口、海区会大规模繁殖^[1, 2]. 近年来浒苔大规模的暴发给沿岸海区造成了严重的环境问题, 尤其是黄海海区^[3~6], 自 2007 年中国黄海北部和中部局部海域首次发现了浒苔绿潮以来, 黄海海区每年都会暴发大规模浒苔绿潮, 其中以 2008 年最为严重. 2009 年之后浒苔暴发情况有所改善, 但每年绿潮暴发的最大分布面积仍然高于 25 000 km²^[5].

国内外对绿潮生物大规模增殖的环境机制尚不明确. 当前主要认为是物理-地球生物化学-化学过程引起的^[7]. 一般认为黄海浒苔暴发是由于农业、养殖业造成的江苏近海海水富营养化, 紫菜养殖收获时将浒苔碎片弃入近海, 春夏季水温变化, 合适的光照和增殖海域水动力交换缓慢导致局部种群密度增大等因素^[7~10]引起的. 为了更好地了解浒苔暴发的机制, 于 2012 年 5 月底在黄海海区进行了现场的围隔实验, 定量研究浒苔对营养盐的响应, 了解浒苔

在不同营养盐浓度、比例以及不同补充方式下的生长情况.

1 材料与方法

1.1 围隔装置

实验于 2012 年 5 月 27 日~6 月 6 日在黄海海域进行, 为期 11 d. 围隔装置安装在“润江 1 号”后甲板的左右两侧船舷上. 围隔装置骨架为 3 m × 1.5 m × 1.5 m 的金属架, 外层套有帆布, 内装有现场海水, 并通过水泵与现场海水循环. 每侧围隔装置内设有 6 组实验, 4 组在聚乙烯桶内进行, 剩余 2 组为聚乙烯小筐 (为防止浒苔漂散, 小筐罩有纱

收稿日期: 2012-12-06; 修订日期: 2013-01-09

基金项目: 国家重点基础研究发展规划 (973) 项目 (2010CB428701); 国家自然科学基金项目 (41076065)

作者简介: 庞秋婷 (1988~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为海洋生态化学, E-mail: pangqiating@126.com

* 通讯联系人, E-mail: jtawang@ouc.edu.cn

网),直接放在围隔现场海水中,这样就可以保证整个围隔装置处于与现场温度和光照相同的实验条件下。

1.2 实验藻体来源及预处理

实验所用浒苔藻体和初始培养所用的海水于 2012 年 5 月 27 日取自黄海海域 (120°59.41'E, 34°29.84'N)。现场采样后挑选生长状态良好的藻体,用海水冲洗,剔除杂物,用滤纸吸干表面水分,称重。初始投入浒苔质量为 2.0 g。

1.3 实验设计

表 1 围隔实验设计方案及初始营养盐浓度

Table 1 Design of the concentrations of the added nutrients and the initial concentrations after adding nutrients

围隔号	设计方案	初始实测浓度/ $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	
		$\text{PO}_4\text{-P}$	DIN
左舷聚乙烯桶(一次性添加)	M1 对照组,添加现场海水	0.12	24.78
	M2 向现场海水中添加 P- PO_4 0.5 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$,	0.71	37.57
	M3 DIN 分别添加 M2:10 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$; M3:20 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$;	0.65	47.98
	M4 M4:40 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	0.67	64.70
右舷聚乙烯桶(定时添加)	M5 对照组,添加现场海水	0.16	23.67
	M6 向现场海水中添加 P- PO_4 0.5 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$,	0.67	35.46
	M7 DIN 分别添加 M6: 10 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$; M7: 20 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$;	0.67	47.94
	M8 M8:40 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	0.64	58.51
左舷现场循环海水连续培养	M9 与现场海水循环	0.26	41.10
	M10 与现场海水循环	0.26	41.10
右舷现场循环海水连续培养	M11 与现场海水循环	0.26	29.70
	M12 与现场海水循环	0.26	29.70

1.4 取样

围隔安装完毕后,向其中添加营养盐至设计浓度,并立即测定实际初始营养盐浓度。测定完毕后向其中投入已称重的浒苔。12 组实验营养盐每天 18:30 左右取样。定时添加营养盐组在添加完营养盐后,使用塑料棒将其混匀,20 min 后再次取样,测定添加后的营养盐浓度。营养盐水样现场用 GF/F 玻璃纤维滤膜过滤后,立即进行分样,现场用手工测定,测定方法参照文献[11]。测定项目包括磷酸盐($\text{PO}_4\text{-P}$)、总溶解无机氮(DIN)。

每隔 2 d 于 20:00 左右捞取浒苔藻体,控干表面水分,称其湿重后再放回围隔中。

1.5 实验数据处理

由于本实验生物量采样不是每天进行,故将李瑞香等[12]提出的浒苔相对增长率的公式进行了部分修改,修改后公式如下:

$$K_i = \left(\frac{W_{i+1}}{W_i} - 1 \right) \times 100\%$$

$$\bar{K} = \frac{\sum_{i=1}^n K_i}{N}$$

共进行 12 组围隔实验,如表 1。包括 4 组一次性添加营养盐实验、4 组定时添加营养盐实验和 4 组现场循环海水连续培养实验。

一次性添加营养盐实验组和定时添加营养盐实验组均在 25 L 的聚乙烯桶中进行,培养海水体积约为 20 L。现场循环海水连续培养实验组是将浒苔放入围隔中的小筐内,并用纱网罩住,以防止浒苔漂散。定时添加营养盐实验组,每天取出原海水体积的 3/4,即 15 L 海水,再向其中添加现场海水 15 L,并按照设计方案向其中添加营养盐。

式中, K_i 代表从 i 到 $(i+1)$ 次采样之间增长速率; W_{i+1} 代表第 $i+1$ 次采样的湿生物量; W_i 代表第 i 次采样的湿生物量; N 代表培养天数; \bar{K} 代表浒苔生长期平均每天的相对增长速率。

增重百分比用以下公式计算[13]:

$$w_i = \frac{W_{im} - W_{om}}{W_{om}} \times 100\%$$

式中, w_i 代表 i 组的增重百分比; W_{im} 代表第 i 组的最大湿生物量; W_{om} 代表对照组的最大湿生物量。

2 结果与分析

2.1 浒苔生物量的变化

2.1.1 不同营养盐添加方式对浒苔生长的影响

从浒苔湿重的生长变化曲线(图 1)可以看出,在所有的实验组,前 2 d 浒苔生长不明显,湿重基本没有变化,从第 3 d 开始生长,其湿重一直处于增加状态直至实验结束。从浒苔生物量上看,至实验结束时,一次性添加营养盐组的浒苔湿重重要小于定时添加营养盐组,而定时添加营养盐组又小于现场循环海水组;一次性添加营养盐组(M1~M4)的浒苔湿重从初始的 2.0 g 上升到最后的 5.5 g 左右,定时

添加营养盐组 (M5 ~ M8) 的浒苔湿重到实验结束时平均为 11.5 g, 现场循环海水组则高达 25.5 g.

从前 10 d 日均相对增长率 (图 1) 和相对增长率的最大值 (表 2) 也能看出相同的现象. 一次性添加营养盐组的浒苔日均相对增长率约在 10% 左右; 而定时添加营养盐组的日均相对生长率除对照组 M5 外, 都要高于一次性添加营养盐组; 对于现场循环海水中的实验组, 其日均相对增长率和最大值都要远远高于其他 8 组, 日均相对增长率最高的达到了 42%, 最大相对生长速率高达 82%.

2.1.2 不同 N/P 对浒苔生长的影响

一次性添加营养盐组中, 虽然 N/P 并不相同,

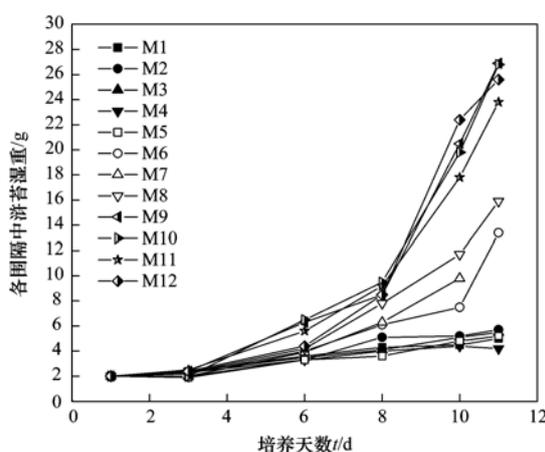


图 1 各围隔中浒苔湿重变化和日均相对增长率

Fig. 1 Wet weight variation and the relative growth rate of *E. phaprolifera* under different nutrient conditions

表 2 各个围隔中日均相对增长率与相对增长率最大值/%

Table 2 Relative growth rate and the maximum growth rate of *E. phaprolifera* under different nutrient condition/%

围隔号	前 10 d 日均相对增长率 (\bar{K})	最大值 (\bar{K}_m)	围隔号	前 10 d 日均平均相对增长率 (\bar{K})	最大值 (\bar{K}_m)
M1	10	17	M7	24	32
M2	13	27	M8	26	43
M3	12	15	M9	40	71
M4	11	22	M10	42	75
M5	12	22	M11	34	47
M6	19	27	M12	40	82

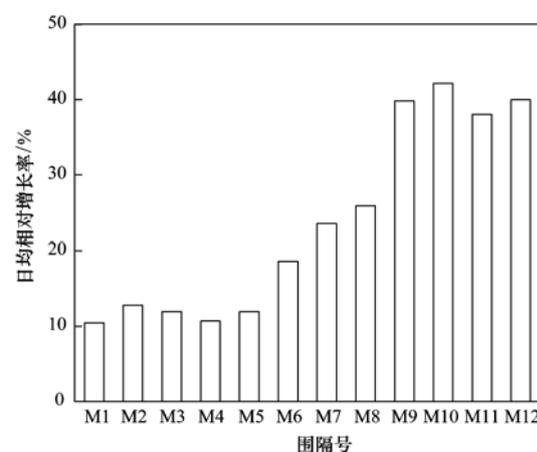
2.2 围隔内营养盐的变化

2.2.1 一次性添加营养盐组

在一次性添加营养盐组中, 4 组围隔中的 DIN 浓度持续下降 (图 2). 而且这种下降速率在第 1 d 最大, 随着时间的推移, 围隔中的 DIN 越来越少, 其下降速率也降低, 到第 7 d 除了 M4, 其余 3 组 DIN 的浓度基本达到了最低. $\text{PO}_4\text{-P}$ 也被浒苔迅速吸收, 在第 3 d 就降到了 $0.05 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$, 由此可以看出浒苔对 $\text{PO}_4\text{-P}$ 具有极强的吸收能力, 同时也说明一次性添加营养盐实验组条件下, 实验设计的 $\text{PO}_4\text{-P}$

但是浒苔的最大生物量大致相同, 在 5.5 g 左右, 没有明显差异. 日均相对增长率 (图 1) 和相对增长率的最大值 (表 2) 也显示出了相同的结果. 这说明在一次性添加营养盐的条件下, 由于磷酸盐含量较低, 磷酸盐限制了浒苔生长, 浒苔生物量取决于磷酸盐总量, 而与 DIN 无关.

定时添加营养盐组中, 第 3 d 后, 浒苔的生物量随着 DIN 的升高而增加. DIN 浓度最高的 M8 围隔中, 浒苔湿重达到了 15.9 g, 增重百分比高达 205.8%. 日均相对增长率 (图 1) 和相对增长率的最大值 (表 2) 也随着 DIN 升高而升高. 这说明在磷酸盐较为充足的情况下, 高 DIN 会促进浒苔的生长.



浓度偏低, 限制了浒苔的生长. 洪刚强等^[14]在室内对浒苔进行培养后发现经过 24 h 之后磷的浓度下降了 90% 多, 可见浒苔对磷的利用效率非常高.

2.2.2 定时添加营养盐组

从图 3 可以看出, 每天添加 DIN 和 $\text{PO}_4\text{-P}$ 后, 营养盐恢复到设计水平左右, 但是经过浒苔 1 d 的吸收后, 浓度明显降低, 尤其是在实验后期, 不管添加 DIN 和 $\text{PO}_4\text{-P}$ 含量为多少, 添加的营养盐在添加后的第 2 d 基本被完全消耗, 说明浒苔对营养盐有很强的吸收能力. 从浒苔的增重来看, 在磷酸盐含量

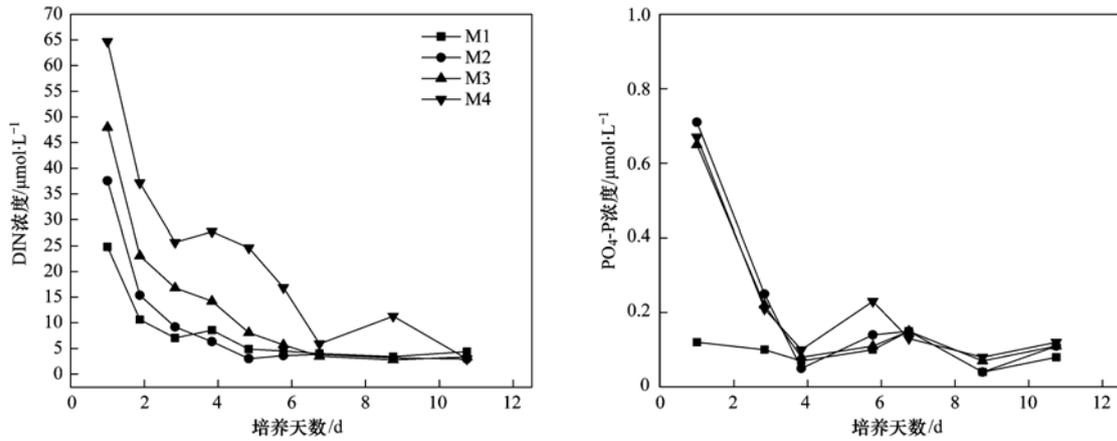


图2 一次性添加营养盐组 DIN 和 PO₄-P 浓度变化

Fig. 2 Variations of DIN and PO₄-P concentration in one-time adding nutrient group

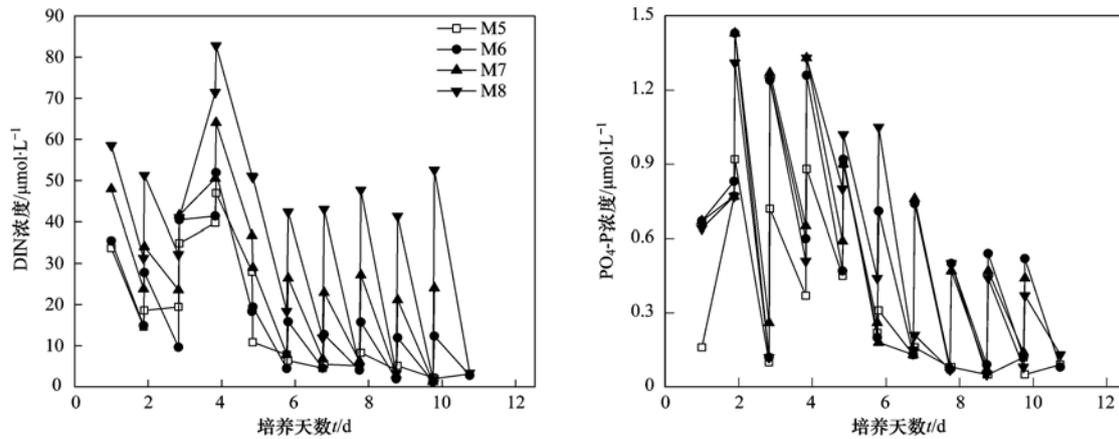


图3 定时添加营养盐组 DIN 和 PO₄-P 浓度变化

Fig. 3 Variations of DIN and PO₄-P concentration in Continuous adding nutrient group

适中时,高浓度的氮更有利于浒苔的生长(图1)。

对于现场循环海水组,由于围隔海水与现场海水循环,随着调查船走航,其浓度也随之变化(图4),但是不管围隔海水是处于何种营养盐条件下,其营养盐一直不会对浒苔的生长产生限制作用。

2.3 定时添加组浒苔生长与 C、N、P 之间的关系

Kim 等^[15]发现,不同时期的浒苔组织内的 C:N 比值是不同的,当浒苔漂浮在黄海外海时,浒苔处于生长晚期,其 C:N 约为17,Choi 等^[16]在实验中也发现浒苔的 C:N 比值在13~19 之间。由于实验所用的浒苔藻体取自黄海外海海区,处于浒苔生长晚期,本研究采用了 Kim 的观点,认为浒苔组织内的 C:N 比值为17,并根据浒苔吸收的营养盐含量计算出光合作用产生的有机碳的含量和增加的有机物的质量,结果如表3。在此近似地用定时添加组的实验来说明现场海水的情况。在定时添加组

实验中,由于磷酸盐含量相对丰富,浒苔湿重的增加与 DIN 的消耗有较好相关性(图5),而与 PO₄-P 的消耗无关,因此在定时添加组中,影响浒苔生物

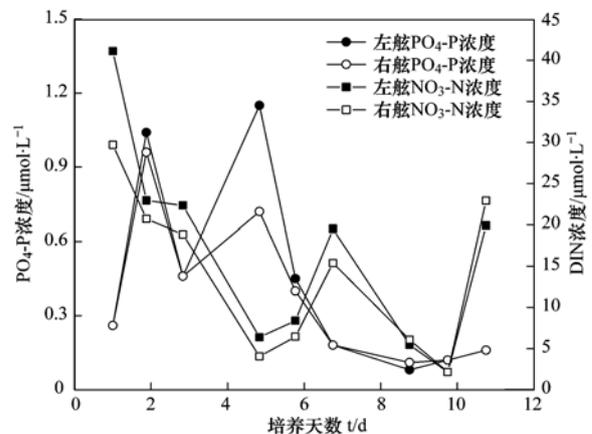


图4 现场循环海水的 DIN 和 PO₄-P 浓度变化

Fig. 4 Variations of DIN and PO₄-P concentration in field circulation water group

量的因素为 DIN,在计算光合作用产生的有机碳的含量时可以通过 DIN 的含量进行估算.通过对各围隔中浒苔实际增加的湿重与估算出来的通过光合作用增加的有机物的质量作图,可以发现两者

有很好的线性关系(图 5),这进一步说明在磷酸盐含量适中的条件下,DIN 可能是决定浒苔生长的关键因素,同时也可以利用这种方法估算出黄海海区浒苔的产量.

表 3 前 10 d 定时添加组浒苔湿重增加量、吸收营养盐的质量及估算光合作用增加有机物的质量

Table 3 Increased wet weight of *E. phaprolifera*, the quality of absorbed nutrient and estimates of the quality of organic matters through photosynthesis in the continuous adding nutrient group during the early 10 days

围隔号	M5	M6	M7	M8
围隔中浒苔实际增加的湿重/g	2.8	5.5	7.8	9.7
围隔中浒苔吸收的 DIN 的质量/mg	15.4	37.1	48.3	82.2
围隔中浒苔吸收的 PO ₄ -P 质量/mg	1.7	3.7	3.2	3.3
估算光合作用产生碳的质量/mg	225	541	704	1 197
估算光合作用增加有机物的质量/mg	242	582	755	1 283

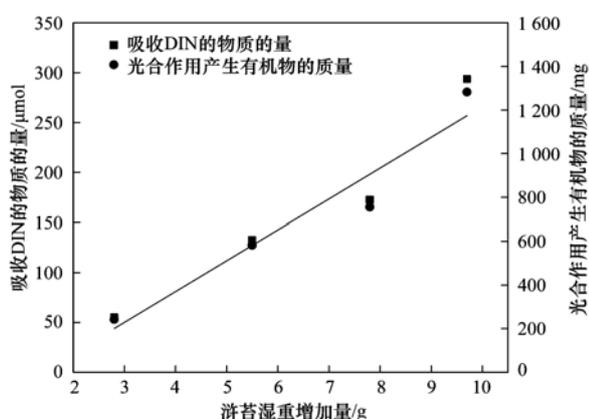


图 5 浒苔实际增加的湿重与估算出来通过光合作用增加的有机物的质量关系

Fig. 5 Relationship between actual increased wet weight of *E. phaprolifera* and the increased quality of organic matters through photosynthesis

3 讨论

通过不同方式添加营养盐对浒苔进行围隔培养可以看出,一次性添加营养盐组的浒苔生长速率要小于定时添加营养盐组,而定时添加营养盐组又小于现场循环海水组.在整个实验过程中,定时添加组中由于每天添加一定量的营养盐,使得浒苔的生长有一定的物质基础,促进了其生长.虽然现场循环海水中的 DIN 和 PO₄-P 浓度要比定时添加组低,但是其浒苔的生物量要远远大于定时添加组,这可能是由于虽然定时添加组每天补充一定量的营养盐,但是由于浒苔对营养盐有很强的吸收能力,基本在加入营养盐后 12 h 内就会完全被吸收,而剩余的 12 h 内浒苔会处于饥饿状态,生长受到限制^[17, 18].现场循环海水组由于海水在时刻更新,营养盐一直在补充,浒苔不会处于营养盐限制的状态,所以其生

长优势要明显高于定时添加组.通过计算发现,定时添加组浒苔一天吸收 DIN 最大量为 983.8 μmol , PO₄-P 为 18 μmol ,而现场循环海水组中,假设海水一直处于最低营养盐浓度,如果将营养盐完全吸收,估算出一天消耗的 DIN 为 1 022.4 μmol , PO₄-P 为 38.4 μmol ,都要高于定时添加组,同样说明了现场循环海水组供给浒苔的营养盐要大于定时添加组.总的来说充足的连续的营养盐补充会促进浒苔的生长,是绿潮暴发的物质基础.

通过对比定时添加组中不同浓度的 DIN 对浒苔的生长影响可以看出,在磷酸盐含量适中时,高浓度的 DIN 更能促进浒苔的生长,这与 Smith^[19]和 Sommer^[20]提出的绿藻更适合高 N/P 的环境是一致的.同时也能看出浒苔的生长更容易受到 N 的限制,而这种观点被国内外许多专家所认可^[13, 21, 22].由于在定时添加营养盐培养中设计的 PO₄-P 的水平和现场海水浓度相差不大,可以推断,黄海海区大规模的浒苔暴发可能是因为 DIN 含量过高.夏斌等^[23]在 2008 年对黄海现场调查中发现苏北沿岸存在 DIN 的高值区,而该区域也正是浒苔大规模暴发的海区.

本实验中浒苔的日均增长率在 10% ~ 43% 之间,与海面聚集漂浮的浒苔日生长速率(10% ~ 37%)相当,梁宗英等^[24]在实验室内条件下进行浒苔培养发现其日生长速率也达到了 23%,由此可以看出浒苔具有较强的增殖能力,即使在低营养盐条件下也能保持 10% 的生长速率,而在营养盐较为充足时,其生长速率高达 42%,是低营养盐时的 4 倍,说明浒苔对营养盐的利用效率极高.

前文提到可以利用 C:N 值和海区营养盐状况估算出浒苔的生物量,在此笔者做如下假设:①浒苔能吸收营养盐的深度为 1 m,能够将 1 m 层内所有

的 DIN 吸收且不考虑营养盐的扩散和迁移; ②根据前文中 M9 ~ M12 实验结果, 以及梁宗英等对现场漂浮浒苔生长率的估算, 假设浒苔的日均生长率 (k) 为 35%, 根据日均生长率及最终的浒苔漂浮面积 (S_f) 可以估算出每天浒苔的漂浮面积 (S_i). 公式如下:

$$S_i = \frac{S_f}{(1+k)^{n-i}}$$

式中, n 为浒苔生长天数, i 为浒苔进入近海后第 i 天; 本研究假设 $n=30$. 根据该公式及海区 DIN 浓度就能估算出浒苔在漂浮期间吸收 DIN 的物质质量, 再通过表 3 及图 5 可以估算出浒苔的产量. 公式如下:

$$N_{\text{DIN}} = w \times \sum S_i \times h$$

式中, N_{DIN} 为浒苔在漂浮期间吸收 DIN 的物质的量, w 为海区表层海水 DIN 的平均浓度, h 为浒苔可吸收营养盐的深度.

在 2008 年黄海海区, 浒苔的漂浮面积约为 $13\ 000\ \text{km}^2$ ^[7], 从 6 月 15 日 ~ 7 月 15 日期间青岛收获的浒苔约为 $80 \times 10^4\ \text{t}$, 根据夏斌等^[23] 在 2008 年 7 月对黄海海区调查发现表层海水 DIN 的浓度平均约为 $9.78\ \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$, 可以估算出浒苔吸收的 DIN 的物质的量约为 $4.91 \times 10^8\ \text{mol}$, 质量约为 $6.9 \times 10^6\ \text{kg}$, 按照表 3 可以计算出光合作用产生的有机物的质量约为 $1.07 \times 10^8\ \text{kg}$, 根据图 5 中的线性关系可以估算出浒苔的产量为 $76 \times 10^4\ \text{t}$, 与 2008 年青岛收获的浒苔约为 $80 \times 10^4\ \text{t}$ 相差不多, 说明笔者的推断基本上是合理的.

4 结论

(1) 在磷酸盐含量适中时, 高浓度的 DIN 更能促进浒苔的生长; 黄海海区大规模的浒苔暴发可能是因为 DIN 含量过高, 但还需进一步实验证明.

(2) 浒苔有极强的生长能力, 在本实验条件下, 浒苔的日均生长率达到了 42%, 即使在营养盐限制条件下仍可以维持 10% 左右的生长速率.

(3) 通过浒苔吸收的营养盐估算其光合作用产生有机物的质量, 发现与浒苔湿重增加量有着良好的线性关系.

参考文献:

- [1] Ho Y B. Inorganic mineral nutrient level studies on *Potamogeton Pectinatus* L. and *Enteromorpha prolifera* in Forfar loch, Scotland [J]. *Hydrobiologia*, 1979, **62**(1): 7-15.
- [2] 王建伟, 阎斌伦, 林阿朋, 等. 浒苔 (*Enteromorpha prolifera*) 生长及孢子释放的生态因子研究 [J]. *海洋通报*, 2007, **26**(2): 60-65.
- [3] 乔方利, 马德毅, 宋明远, 等. 2008 年黄海浒苔暴发的基本状况与科学应对措施 [J]. *海洋科学进展*, 2008, **26**(3): 409-410.
- [4] 王晓坤, 马家海, 叶道才, 等. 浒苔 (*Enteromorpha prolifera*) 生活史的初步研究 [J]. *海洋通报*, 2007, **26**(5): 112-116.
- [5] 国家海洋局. 2011 年中国海洋环境状况公报 [R]. 2012. [2012-06-25].
- [6] 徐兆礼, 叶属峰, 徐韧. 2008 年中国浒苔灾害成因条件和过程推测 [J]. *水产学报*, 2009, **33**(3): 430-437.
- [7] Sun S, Wang F, Li C L, et al. Emerging challenges: Massive green algae blooms in the Yellow Sea [EB/OL]. *Nature Proceedings*, 2008. hdl:10101/npre. 2008. 2266.
- [8] Leskinen E, Alström-Rapaport C, Pamilo P. Phylogeographical structure, distribution and genetic variation of the green algae *Ulva intestinalis* and *U. compressa* (*Chlorophyta*) in the Baltic Sea area [J]. *Molecular Ecology*, 2004, **13**(8): 2257-2265.
- [9] Liu D Y, John K K, Dong Z J, et al. Recurrence of the world's largest green-tide in 2009 in Yellow Sea, China: *Porphyra yezoensis* aquaculture rafts confirmed as nursery for macroalgal blooms [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2010, **60**(9): 1423-1432.
- [10] Ding L P, Fei X G, Lu Q Q, et al. The possibility analysis of habitats, origin and reappearance of bloom green alga (*Enteromorpha prolifera*) on inshore of western Yellow Sea [J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2009, **27**(3): 421-424.
- [11] 祝陈坚. 海水分析化学实验 [M]. 青岛: 中国海洋大学出版社, 2006. 40-69.
- [12] 李瑞香, 吴晓文, 韦钦胜, 等. 不同营养盐条件下浒苔的生长 [J]. *海洋科学进展*, 2009, **29**(2): 211-216.
- [13] 李俭平, 赵卫红, 付敏, 等. 氮磷营养盐对浒苔生长影响的初步探讨 [J]. *海洋科学*, 2010, **34**(4): 45-48.
- [14] 洪刚强, 王萍, 吴常文. 活性磷对浒苔生长和叶绿素含量影响的初步研究 [J]. *河北渔业*, 2011, (5): 15-18.
- [15] Kim J H, Kang E J, Park M G, et al. Effects of temperature and irradiance on photosynthesis and growth of a green-tide-forming species (*Ulva linza*) in the Yellow Sea [J]. *Journal of Applied Phycology*, 2011, **23**(3): 421-432.
- [16] Choi T S, Kang E J, Kim J, et al. Effect of salinity on growth and nutrient uptake of *Ulva pertusa* (*Chlorophyta*) from an eelgrass bed [J]. *Algae*, 2010, **25**(1): 17-26.
- [17] 王阳阳, 霍元子, 田千桃, 等. 浒苔对 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 $\text{PO}_4\text{-P}$ 吸收动力学特征 [J]. *上海海洋大学学报*, 2011, **20**(1): 121-125.
- [18] 吴婷, 田小亭, 刘召辉, 等. 浒苔对不同氮源吸收特性的初步研究 [J]. *海洋科学*, 2011, **35**(4): 51-54.
- [19] Smith V H. Low nitrogen to phosphorus ratios favor dominance by blue-green algae in lake phytoplankton [J]. *Science*, 1983, **221**(4611): 669-671.
- [20] Sommer U. Nutrient competition experiments with periphyton

- from the Baltic Sea[J]. Marine Ecology Progress Series, 1996, 140(1-3): 161-167.
- [21] 吴晓文, 李瑞香, 徐宗军, 等. 营养盐对浒苔生长影响的围隔生态实验[J]. 海洋科学进展, 2010, 28(4): 538-544.
- [22] Patricia A W, Bo R B. Seasonal fluctuations in tissue nitrogen, phosphorus, and N:P for five macroalgal species common to the pacific northwest coast[J]. Journal of Phycology, 1992, 28(1): 1-6.
- [23] 夏斌, 马绍赛, 崔毅, 等. 黄海绿潮(浒苔)暴发区温盐、溶解氧和营养盐的分布特征及其与绿潮发生的关系[J]. 渔业科学进展, 2009, 30(5): 94-100.
- [24] 梁宗英, 林祥志, 牧马, 等. 浒苔漂流聚集绿潮现象的初步分析[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2008, 38(4): 601-604.

《环境科学》征稿简则

1. 来稿报道成果要有创新性,论点明确,文字精炼,数据可靠.全文不超过8 000字(含图、表、中英文摘要及参考文献).国家自然科学基金项目、国家科技攻关项目、国际合作项目或其它项目请在来稿中注明(在首页以脚注表示).作者投稿时请先登陆我刊网站(www.hjxx.ac.cn)进行注册,注册完毕后以作者身份登录,按照页面给出的提示信息投稿即可.

2. 稿件请按 GB 7713-87《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》中学术论文的规范撰写.论文各部分的排列顺序为:题目;作者姓名;作者工作单位、地址、邮政编码;中文摘要;关键词;中图分类号;英文题目;作者姓名及单位的英译名;英文摘要;关键词;正文;致谢;参考文献.

3. 论文题目应简练并准确反映论文内容,一般不超过 20 字,少用副标题.

4. 中文摘要不少于 300 字,以第三人称写.摘要内容包括研究工作的目的、方法、结果(包括主要数据)和结论,重点是结果和结论.英文摘要与中文对应,注意人称、时态和语言习惯,以便准确表达内容.

5. 前言包括国内外前人相关工作(引文即可)和本工作的目的、特点和意义等.科普知识不必赘述.

6. 文中图表应力求精简,同一内容不得用图表重复表达,要有中英文对照题目.图应大小一致,曲线粗于图框,图中所有字母、文字字号大小要统一.表用三线表.图表中术语、符号、单位等应与正文一致.

7. 计量单位使用《中华人民共和国法定计量单位》(SI).论文中物理计量单位用字母符号表示,如 mg(毫克),m(米),h(小时)等.科技名词术语用国内通用写法,作者译的新名词术语,文中第一次出现时需注明原文.

8. 文中各级标题采用 1, 1.1, 1.1.1 的形式,左起顶格书写,3 级以下标题可用(1), (2)……表示,后缩 2 格书写.

9. 文中外文字母、符号应标明其大小写,正斜体.生物的拉丁学名为斜体.缩略语首次出现时应给出中文全称,括号内给出英文全称和缩略语.

10. 未公开发表资料不列入参考文献,可在出现页以脚注表示.文献按文中出现的先后次序编排.常见文献书写格式为:

期刊:作者(外文也要姓列名前).论文名[J].期刊名,年,卷(期):起页-止页.

图书:作者.书名[M].出版地:出版社,年.起页-止页.

会议文集:作者.论文名[A].见(In);编者.文集名[C].出版地:出版社(单位),年.起页-止页.

学位论文:作者.论文名[D].保存地:保存单位,年份.

报告:作者.论文名[R].出版地:出版单位,出版年.

专利:专利所有者.专利题名[P].专利国别:专利号,出版日期.

11. 来稿文责自负,切勿一稿多投.编辑对来稿可作文字上和编辑技术上的修改和删节.在 3 个月内未收到本刊选用通知,可来电询问.

12. 投稿请附作者单位详细地址,邮编,电话号码,电子邮箱等.编辑部邮政地址:北京市 2871 信箱;邮编:100085;电话:010-62941102,010-62849343;传真:010-62849343;E-mail:hjxx@rcees.ac.cn;网址:www.hjxx.ac.cn

CONTENTS

PUF Passive Air Sampling of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmosphere of the Yangtze River Delta, China: Spatio-Temporal Distribution and Potential Sources	ZHANG Li-fei, YANG Wen-long, DONG Liang, <i>et al.</i> (3339)
Quantitative Analysis of Nitrate in Atmospheric Particulates PM _{2.5} with Fourier Transform Infrared Spectroscopy	LIU Na, WEI Xiu-li, GAO Min-guang, <i>et al.</i> (3347)
Study on Contribution Factor to Atmospheric ·OH by O ₃ , HONO, HCHO and H ₂ O ₂ in Spring at Mangdang Mountain, Fujian Province	LIU Hao, WANG Hui-xiang (3352)
A Review on Current Situations of Steroid Estrogen in the Water System	DU Shao-ting, JIN Chong-wei, LIU Yue (3358)
A Study on the Veterinary Antibiotics Contamination in Groundwater of Jiaying	LÜ Xing, YU Wei-juan, LAN Ya-qiong, <i>et al.</i> (3368)
Contamination Characteristics of Short-Chain Chlorinated Paraffins in Edible Fish of Shanghai	JIANG Guo, CHEN Lai-guo, HE Qiu-sheng, <i>et al.</i> (3374)
Detection of Endotoxin Activity in Water Environment and Analysis of Influence Factors for TAL Assay	ZHANG Can, LIU Wen-jun, ZHANG Ming-lu, <i>et al.</i> (3381)
Cellular Response of Freshwater Green Algae to the Toxicity of Tetracycline Antibiotics	XU Dong-mei, WANG Yan-hua, RAO Gui-wei (3386)
Illumination's Effect on the Growth and Nitrate Reductase Activity of Typical Red-Tide Algae in the East China Sea	LI Hong-mei, SHI Xiao-yong, DING Yan-yan, <i>et al.</i> (3391)
Compare the Growth of <i>Enteromorpha prolifera</i> Under Different Nutrient Conditions	PANG Qiu-ting, LI Feng, LIU Xiang-qing, <i>et al.</i> (3398)
Phytoplankton Pigment Patterns and Community Structure in the Yangtze Estuary and Its Adjacent Areas	LAI Jun-xiang, YU Zhi-ming, SONG Xiu-xian, <i>et al.</i> (3405)
Genetic Diversity of Picoeukaryotic Phytoplankton in the Lakes Along the Middle-lower Reaches of the Yangtze River	LI Sheng-nan, SHI Xiao-li, XIE Wei-wei, <i>et al.</i> (3416)
Studies on Seasonal Variation and Sources of Nitrogen and Phosphorus in a Canyon Reservoir Used as Water Source	HUANG Ting-lin, QIN Chang-hai, LI Xuan (3423)
Characteristics of Sediment Phosphorus in the Jiulong River-Reservoir System and Its Ecological Significance	LU Ting, CHEN Neng-wang, CHEN Zhu-hong, <i>et al.</i> (3430)
Variation of Nitrogen During the High Suspended Sediments Concentration Water Supply in an Artificial Shallow Lake	CHEN You-yuan, SHEN Yu, YANG Shi-ying (3437)
Limestone and Pyrite-Limestone Constructed Wetlands for Treating River Water	ZHANG Jing, LI Rui-hua, LI Jie, <i>et al.</i> (3445)
Dynamics of Carbon, Nitrogen and Phosphorus Storage of Three Dominant Marsh Plants in Hangzhou Bay Coastal Wetland	SHAO Xue-xin, LI Wen-hua, WU Ming, <i>et al.</i> (3451)
Dissolved Organic Matter Release of <i>Zizania caduciflora</i> and <i>Phragmites australis</i> from Lake Dianchi	XIE Li, YANG Hao, QU Xiao-xia, <i>et al.</i> (3458)
Influence of Tap Water Treatment on Perfluorinated Compounds Residue in the Dissolved Phase	ZHANG Hong, CHEN Qing-wu, WANG Xin-xuan, <i>et al.</i> (3467)
Study on Chlorinated Disinfection Byproducts and the Relevant Health Risk in Tap Water of J City	LI Xiao-ling, LIU Rui, LAN Ya-qiong, <i>et al.</i> (3474)
Effect of the Change in Sulphate and Dissolved Oxygen Mass Concentration on Metal Release in Old Cast Iron Distribution Pipes	WU Yong-li, SHI Bao-you, SUN Hui-fang, <i>et al.</i> (3480)
Research on Low-level Hg(II) Removal from Water by the Heavy Metal Capturing Agent	HU Yun-jun, SHENG Tian-tian, XUE Xiao-qin, <i>et al.</i> (3486)
Coagulation Characteristics of Polyferric Chloride-Poly (Epiclorohydrin-Dimethylamine) Composite Flocculant for Simulated Water Treatment	LIU Xin-xin, YANG Zhong-lian, GAO Bao-yu, <i>et al.</i> (3493)
Microstructure Morphology and Flocculation Mechanism of the Decolorizing Flocculant Poly-aluminum(III)-magnesium(II)-sulfate	SANG Yi-min, CHANG Xue-hong, CHE Yue, <i>et al.</i> (3502)
Efficient Degradation of Tetrabromobisphenol A in Water by Co-doped BiFeO ₃	OUYANG Lei, DING Yao-bin, ZHU Li-hua, <i>et al.</i> (3507)
Preparation Bimetallic Heterogeneous Fenton-Like Catalyst as Sepiolite Supported and Its Surface Chemical Characterization	SU Cheng-yuan, LI Wei-guang, LIU Xing-zhe, <i>et al.</i> (3513)
Nitrite Denitrification Characteristics with Redox Mediator	ZHAO Li-jun, MA Zhi-yuan, GUO Yan-kai, <i>et al.</i> (3520)
Advanced Nitrogen Removal Using Innovative Denitrification Biofilter with Sustained-Release Carbon Source Material	TANG Lei, LI Peng, ZUO Jian-e, <i>et al.</i> (3526)
N ₂ O Production in Nitrogen Removal by Micro-expansion of Granular Sludge	CHEN Li-li, GAO Da-wen (3532)
Sludge Dewaterability with Combined Conditioning Using Fenton's Reagent and CPAM	MA Jun-wei, LIU Jie-wei, CAO Rui, <i>et al.</i> (3538)
Kinetic Characteristics of High-rate ANAMMOX Granules	TANG Chong-jian, XIONG Lei, WANG Yun-yan, <i>et al.</i> (3544)
Monitoring Nitrogen Deposition on Temperate Grassland in Inner Mongolia	ZHANG Ju, KANG Rong-hua, ZHANG Bin, <i>et al.</i> (3552)
Non-Point Loads of Soluble Cadmium by <i>in situ</i> Field Experiment with Different Landuses, in Central Hunan Province Mining Area	LIU Xiao-li, ZENG Zhao-xia, CHEN Zhe, <i>et al.</i> (3557)
Heavy Metal Speciation and Stability in the Sediment of Lihu Lake	WANG Shu-hang, WANG Wen-wen, JIANG Xia, <i>et al.</i> (3562)
Analysis and Evaluation of Heavy Metals Along the Chaohe River in Miyun County	YU Yang, GAO Hong-chao, MA Jun-hua, <i>et al.</i> (3572)
Magnetic Properties of Topsoils in Typical Industrial Belt Along the Yellow River in Arid Regions in Northwest China and Their Environmental Significance	XU Shu-jing, ZHANG Ying, YU Ye, <i>et al.</i> (3578)
Study on Composite Stabilization of Arsenic (As) Contaminated Soil	WANG Hao, PAN Li-xiang, ZHANG Xiang-yu, <i>et al.</i> (3587)
Heavy Metal Contents and Enrichment Characteristics of Dominant Plants in a Lead-Zinc Tailings in Xiashuiwan of Hunan Province	HE Dong, QIU Bo, PENG Jin-hui, <i>et al.</i> (3595)
Comparison of Soil Fertility Among Open-pit Mine Reclaimed Lands in Antaibao Regenerated with Different Vegetation Types	WANG Xiang, LI Jin-chuan, YUE Jia-wei, <i>et al.</i> (3601)
Biodegradation of Triphenyltin and Its Effect on <i>Klebsiella pneumoniae</i>	YE Jin-shao, TIAN Yun, YIN Hua, <i>et al.</i> (3607)
Isolation and Degradation Characteristics of Dichloromethane-Degradation Bacterial Strain by <i>Methylobacterium rhodesianum</i> H13	LIU Hong-xia, ZHU Run-ye, OUYANG Du-juan, <i>et al.</i> (3613)
Effect of Different Primers on Microbial Community of Activated Sludge	XU Ai-ling, WU Deng-deng, SONG Zhi-wen, <i>et al.</i> (3620)
Reaction of SO ₂ over CaAl Mixed Oxides Derived from Hydrotalcites Samples	CAO Lin, WANG Hai-lin, XIE Qiang (3627)
Optimization for MSW Logistics of New Xicheng and New Dongcheng Districts in Beijing Based on the Maximum Capacity of Transfer Stations	YUAN Jing, LI Guo-xue, ZHANG Hong-yu, LUO Yi-minget <i>al.</i> (3633)
Application of Multiple Lines of Evidence Analysis Technology in the Assessment of Sites Contaminated by Heavy Metals	JIANG Lin, ZHONG Mao-sheng, ZHU Xiao-yong, <i>et al.</i> (3641)
Heavy Metals and Their Sources in Outdoor Settled Dusts in Different Function Areas of Cities	LI Xiao-yan, LIU Yan-qing (3648)
Study on Distribution Characteristics and Potential Ecological Risk of Soil Heavy Metals in the Yellow River Beach Region in Kaifeng City	ZHANG Peng-yang, QIN Ming-zhou, YAN Jiang-hong, <i>et al.</i> (3654)
Study on Pollution Evaluation of Heavy Metal in Surface Soil of the Original Site of Qingdao North Station	ZHU Lei, JIA Yong-gang, PAN Yu-ying (3663)
Distribution Characteristics and Ecological Risk of Pb in Soils at a Lead Battery Plant	ZHENG Li-bao, CHEN Wei-ping, JIAO Wei-tao, <i>et al.</i> (3669)
Effect of Lead on Soil Quality and Human Health Around a Lead Smeltery	ZHOU Xiao-yong, LEI Mei, YANG Jun, <i>et al.</i> (3675)
Distribution Characteristics of Lead in Different Particle Size Fractions of Surface Soil of a Lead-acid Battery Factory Contaminated Site	YUE Xi, SUN Ti-chang, HUANG Jin-lou (3679)
Research on the Application of <i>In-situ</i> Biological Stabilization Solidification Technology in Chromium Contaminated Site Management	ZHANG Jian-rong, LI Juan, XU Wei (3684)
Research on the Effect and Technique of Remediation for Multi-Metal Contaminated Tailing Soils	ZHU Guang-xu, GUO Qing-jun, YANG Jun-xing, <i>et al.</i> (3690)
Analysis of Washing Efficiency and Change in Lead Speciation in Lead-contaminated Soil of a Battery Factory	REN Bei, HUANG Jin-lou, MIAO Ming-sheng (3697)
Remediation Efficiency of Lead-Contaminated Soil at an Industrial Site by Ultrasonic-assisted Chemical Extraction	WANG Xin-jie, HUANG Jin-lou, LIU Zhi-qiang, <i>et al.</i> (3704)
Parameters Optimization and Cleaning Efficiency Evaluation of Attrition Scrubbing Remediation of Pb-Contaminated Soil	YANG Wen, HUANG Jin-lou, PENG Hui-qing, <i>et al.</i> (3709)
Adsorption of Cd ²⁺ on Biochar from Aqueous Solution	GUO Wen-juan, LIANG Xue-feng, LIN Da-song, <i>et al.</i> (3716)
Effect of Inorganic Amendments on the Stabilization of Heavy Metals in Contaminated Soils	CAO Meng-hua, ZHU Xi, LIU Huang-cheng, <i>et al.</i> (3722)

《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9月15日 34卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 9 Sep. 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