

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第5期

Vol.34 No.5

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

基于过氧化物的消毒技术研究进展	习海玲, 赵三平, 周文 (1645)
环境损害评估: 国际制度及对中国的启示	张红振, 曹东, 於方, 王金南, 齐霖, 贾倩, 张天柱, 骆永明 (1653)
不同国家基于健康风险的土壤环境基准比较研究与启示	徐猛, 颜增光, 贺萌萌, 张超艳, 侯红, 李发生 (1667)
蚯蚓堆肥及蝇蛆生物转化技术在有机废弃物处理应用中的研究进展	张志剑, 刘萌, 朱军 (1679)
基于生态分区的我国湖泊营养盐控制目标研究	刁晓君, 席北斗, 何连生, 邓祥征, 吴锋, 王鹏腾 (1687)
我国东北地区地表水酸化现状	徐光仪, 康荣华, 罗遥, 段雷 (1695)
西安市对渭河水质的影响分析	于婕, 李怀恩 (1700)
极端干旱水文年(2011年)夏季珠江口溶解氧的分布特征及影响因素研究	叶丰, 黄小平, 施震, 刘庆霞 (1707)
应用相平衡分配法建立湘江衡阳段沉积物重金属质量基准	韩超南, 秦延文, 郑丙辉, 张雷, 曹伟 (1715)
长江口海域底栖生态环境质量评价——AMBI 和M-AMBI 法	蔡文倩, 孟伟, 刘录三, 朱延忠, 周娟 (1725)
温州城市降雨径流中 BOD ₅ 和 COD 污染特征及其初始冲刷效应	王骏, 毕春娟, 陈振楼, 周栋 (1735)
影响悬浮颗粒物吸收系数测量的相关因素研究	余小龙, 沈芳, 张晋芳 (1745)
香溪河库湾春季 pCO ₂ 与浮游植物生物量的关系	袁希功, 黄文敏, 毕永红, 胡征宇, 赵玮, 朱孔贤 (1754)
紊流脉动强度对藻类生长及水环境的影响研究	雷雨, 龙天渝, 伞磊, 安强, 朱芳 (1761)
高铁酸钾对水中藻类及其次生臭味污染物二甲基三硫醚同步去除研究	马晓雁, 张泽华, 王红宇, 胡仕斐, 李青松 (1767)
纳米 Fe ₃ O ₄ -H ₂ O ₂ 非均相 Fenton 反应催化氧化邻苯二酚	何洁, 杨晓芳, 张伟军, 王东升 (1773)
水中茶普生的紫外光降解机制及其产物毒性研究	马杜娟, 刘国光, 吕文英, 姚锐, 周丽华, 谢成屏 (1782)
酸活化赤泥催化臭氧氧化降解水中硝基苯的效能研究	康雅凝, 李华楠, 徐冰冰, 齐飞, 赵伦 (1790)
镉污染应急处置含镉絮体稳定性实验研究	柳王荣, 魏清伟, 杨仁斌, 许振成, 曾东 (1797)
基于光学在线监测及形态学研究的絮凝体强度分析方法	金鹏康, 冯永宁, 王宝宝, 王晓昌 (1802)
不同电子供体下三氯苯酚的还原脱氯机制研究	万金泉, 胡梦蝶, 马邕文, 黄明智 (1808)
壳聚糖季铵盐磁性颗粒的制备及其对甲基橙的吸附效果	张聪璐, 胡筱敏, 英诗颖, 王芳 (1815)
城市污水二级出水超滤膜污染与膜特性的研究	孟晓荣, 张海珍, 王磊, 王旭东, 赵亮 (1822)
倒置 A ² /O-MBR 处理城市污水的中试研究	张健君, 邹高龙, 杨淑芳, 丁星, 王莉, 毛乾庄, 杨丹 (1828)
不同电子供体的硫自养反硝化脱氮实验研究	袁莹, 周伟丽, 王晖, 何圣兵 (1835)
短程同步硝化反硝化过程的脱氮与 N ₂ O 释放特性	梁小玲, 李平, 吴锦华, 王向德 (1845)
基于固相萃取的水中多种有毒有害有机污染物富集方法优化	张明全, 李锋民, 吴乾元, 胡洪营 (1851)
多环麝香污染胁迫对蚯蚓特异性蛋白基因表达的影响	陈春, 刘潇威, 郑顺安, 周启星, 李松 (1857)
浙江省制药行业典型挥发性有机物臭氧产生潜力分析及健康风险评价	徐志荣, 王浙明, 许明珠, 何华飞 (1864)
苯系物光催化开环降解产物低级醛类的健康效应	赵伟荣, 廖求文, 杨亚楠, 戴九松 (1871)
四川妇女血清中多溴联苯醚的浓度水平与组成特征	邵敏, 陈永亨, 李晓宇 (1877)
咪唑类离子液体毒性的 QSAR/QSPR 研究	赵继红, 赵永升, 张宏忠, 张香平 (1882)
宁夏石嘴山河滨工业园区表层土壤重金属污染的时空特征	樊新刚, 米文宝, 马振宁, 王婷玉 (1887)
内蒙古包头白云鄂博矿区及尾矿区周围土壤稀土污染现状和分布特征	郭伟, 付瑞英, 赵仁鑫, 赵文静, 郭江源, 张君 (1895)
福建省重点城市路面尘负荷及化学组成研究	郑桢, 杨冰玉, 吴水平, 王新红, 陈晓秋 (1901)
重金属污染场地电阻率法探测数值模拟及应用研究	王玉玲, 能昌信, 王彦文, 董路 (1908)
丛枝菌根真菌对稀土尾矿中大豆生长和稀土元素吸收的影响	郭伟, 赵仁鑫, 赵文静, 付瑞英, 郭江源, 张君 (1915)
海洋细菌 N3 对几种赤潮藻的溶藻效应	史荣君, 黄洪辉, 齐占会, 胡维安, 田梓杨, 戴明 (1922)
1 株分离自煤矿废水的铁硫氧化细菌 LY01 的鉴定及其氧化特性研究	刘玉娇, 杨新萍, 王世梅, 梁银 (1930)
1 株苯并[a]芘高效降解菌的筛选与降解特性	蔡瀚, 尹华, 叶锦韶, 常晶晶, 彭辉, 张娜, 何宝燕 (1937)
2,2',4,4'-四溴联苯醚的好氧微生物降解	张姝, Giulio Franco, 李晓豹, 卢晓霞, 侯珍, 杨君君 (1945)
养猪废水培养微生物絮凝剂产生菌群 B-737 及发酵特性	裴瑞林, 信欣, 张雪乔, 周迎芹, 姚力, 羊依金 (1951)
1997~2011 年北京市空气中酸性物质与降水组分变化趋势的相关性分析	陈圆圆, 田贺忠, 杨懂艳, 邹本东, 鹿海峰, 林安国 (1958)
黄山降水酸度及电导率特征分析	石春娥, 邓学良, 吴必文, 洪杰, 张苏, 杨元建 (1964)
夏季黄山不同高度大气气溶胶水溶性离子特征分析	文彬, 银燕, 秦彦硕, 陈魁 (1973)
广州秋季灰霾污染过程大气颗粒物有机酸的污染特征	谭吉华, 赵金平, 段菁春, 马永亮, 贺克斌, 杨复沫 (1982)
福建省三大城市冬季 PM _{2.5} 中有机碳和元素碳的污染特征	陈衍婷, 陈进生, 胡恭任, 徐玲玲, 尹丽倩, 张福旺 (1988)
上海市含碳大气颗粒物的粒径分布	袁宁, 刘卫, 赵修良, 王广华, 姚剑, 曾友石, 刘遂庆 (1995)
上海市浦东城区二次气溶胶生成的估算	崔虎雄, 吴迺名, 段玉森, 伏晴艳, 张懿华, 王东方, 王茜 (2003)
沙尘暴期间上海市大气颗粒物元素地球化学特征及其物源示踪意义	钱鹏, 郑祥民, 周立旻 (2010)
厦门秋季近郊地面 CO ₂ 浓度变化特征研究	李燕丽, 穆超, 邓君俊, 赵淑惠, 杜可 (2018)
GC-MS 和 GC-ECD 同时在线观测本底大气中的 HCFC-142b	郭立峰, 姚波, 周凌晔, 李培昌, 许林 (2025)
城市居家环境空气真菌群落结构特征研究	方治国, 欧阳志云, 刘芃, 孙力, 王小勇 (2031)
城市污水处理厂挥发性芳香烃的气味指纹及定量评价研究	郭薇, 王伯光, 唐小东, 刘舒乐, 何洁, 张春林 (2038)
内河多点分散码头大气污染叠加影响特征	刘建昌, 李兴华, 徐洪磊, 程金香, 王忠岱, 肖杨 (2044)
义马煤中铅的热稳定性及转化行为研究	刘瑞卿, 王钧伟 (2051)
基于能源消费情景模拟的北京市主要大气污染物和温室气体协同减排研究	谢元博, 李巍 (2057)
《环境科学》征订启事(1652) 《环境科学》征稿简则(1789) 信息(1807, 1821, 1881, 1987) 专辑征稿通知(1863)	

紊流脉动强度对藻类生长及水环境的影响研究

雷雨, 龙天渝*, 伞磊, 安强, 黄宁秋

(重庆大学三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045)

摘要: 为探讨紊流脉动强度对藻类生长繁殖以及水环境的影响, 采用自行设计的垂直振动格栅紊流装置, 在一定的光照和水温条件下, 通过改变各组实验装置中格栅的振动频率, 在营养盐充足的封闭水体中开展了实验研究. 结果表明, 在实验设定的紊动范围内, 紊流脉动强度对藻类的生长以及水环境的变化有明显的影响, 较微弱的紊流脉动能促进水体中藻类的生长, 而较强的紊流脉动则会抑制藻类的生长; 随着紊流脉动强度的增加, 藻类生物量峰值的出现时间逐渐推迟; 不同水力条件下, 5组实验过程中氮磷含量的变化情况具有显著的差异, 当格栅振动频率达到 2.0 Hz 时, 较之振动频率为 0.5 Hz 的实验, 水体中 TN 和 TP 的最大消减量分别降低了 55.2% 和 69.0%, 与藻类生长情况关系密切; 随着紊流脉动强度的增加, 藻类生物量的峰值所对应的氮磷比先增后减; 不同强度的紊流脉动均能促进水体的 pH 值和溶解氧迅速调节至藻类生长所需的最佳水平, 且最佳值不变.

关键词: 紊流; 脉动强度; 藻类生长; 振动格栅; 氮磷比

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)05-1761-06

Effects of Turbulent Fluctuation Intensity on the Growth of Algae and Water Environment

LEI Yu, LONG Tian-yu, SAN Lei, AN Qiang, HUANG Ning-qiu

(Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: Through a self-designed vertically oscillating grid experiment device, the experiment was carried out to research the effects of the turbulence fluctuation intensity on the growth of algae and water environment in the water with adequate nutrients by changing the vibration frequency under a certain light and temperature conditions. The results showed that: the turbulent fluctuation has significant effects on algae growing that weak turbulence fluctuation can promote the growth of algae and strong turbulence fluctuation will inhibit the growth of algae in the range of experimental level. With the increase of the turbulent fluctuation intensity, the peak of algal biomass gradually delayed. Changes of nitrogen and phosphorus in the experimental process have significant differences, when the vibration frequency was up to 2.0 Hz, the maximum reduction of TN and TP were 55.2% and 69.0% lower compared with 0.5 Hz, which was closely associated with the growth of algae. With the intensity of turbulent fluctuation increases, nitrogen-phosphorus ratio first increases and then decreases corresponding to the peak of the algal biomass. Turbulent fluctuation can promote the pH and dissolved oxygen quickly adjusted to the level of algae growing required, and the most appropriate value remains unchanged.

Key words: turbulent; fluctuation intensity; algae growth; oscillating grid; nitrogen-phosphorus ratio

在营养盐充足和气候条件适宜的情况下, 水动力条件是影响藻类生长繁殖和种族演替的主要因素^[1-3]. 在自然界中的许多水体中, 尽管水流速度很低, 其流态仍为紊流, 例如三峡水库蓄水后的次级河流回水段, 即使在流速极低的蓄水期, 由于其水力半径较大, 流动仍处于紊流状态^[4]. 在紊流水体中, 紊流平均速度、剪应力和紊流脉动强度是表征紊流特性的主要参数^[5]. 随着对富营养化认识的不断加深, 不少学者开始关注紊流条件下藻类生长与种族演替的规律. 钟成华^[6]在研究长江天然紊流流态下流速与藻类生长的关系中发现, 藻类只是在某一特定的流速下有显著的生长. Hondzo 等^[7]采用旋转的同轴圆柱体, 在光照、温度等条件适合的前提下,

研究了不同雷诺数下的剪切流对四角栅藻生长的影响, 结果发现较高雷诺数(紊流状态)对聚集的藻类细胞生长具有明显影响, 由于剪切流的作用, 细胞组织结构受到了明显的破坏, 死亡现象显著. 邹锐等^[8]采用水动力垂向扰动机开展了对特定水体蓝藻控制效应的数值实验, 结果发现随着扰动机数量的增加, 水体紊流脉动逐渐增强, Chl-a 浓度峰值和 TP、TN 均呈减少趋势, 其中 Chl-a 减少最为明显. 此外, Hondzo 等^[9]的研究表明紊流产生的紊流脉动

收稿日期: 2012-07-13; 修订日期: 2012-10-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(51209240)

作者简介: 雷雨(1988~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为环境流体力学, E-mail: hbkldleiyu@sina.com

* 通讯联系人, E-mail: longty128@cqu.edu.cn

也会对藻类所受的浮力产生影响,从而影响藻类的生长与聚集.

在通常的紊流中,紊流平均速度、剪应力和紊流脉动强度三者同时存在,并且相互耦合,难以区分它们各自对藻类生长的作用. 目前有关紊流对藻类生长作用的研究,虽然在表面上针对的是紊流平均速度、或剪应力、或紊流脉动强度,但实质上都是三者的共同作用的结果,有关紊流脉动强度的研究不能完全反映紊流脉动强度的独立作用^[10],基于此,为研究紊流脉动强度对藻类生长的作用,在参考有关研究的基础上^[11~13],笔者研制了振动格栅紊流装置(图1).

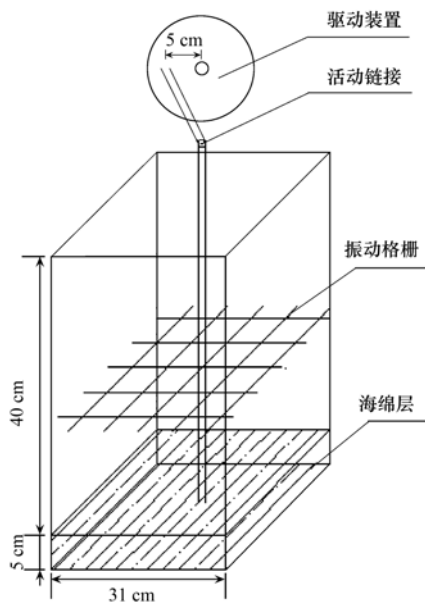


图1 振动格栅装置示意

Fig. 1 Figure of oscillating grid experiment

如图1,在水箱中装有由电机驱动、垂直往复运动的格栅,随着格栅的往复运动,在格栅开口处形成射流,格栅条上下方形成尾流,射流与尾流相互作用,在距格栅一定范围内生成无平均速度和剪切力、近似各向同性的紊流^[14],这使紊流脉动强度成为实验模拟流场中唯一存在的水动力因子,为研究紊流脉动强度对藻类生长的作用提供了条件. 采用该实验装置,笔者研究了不同紊流脉动强度对藻类生长及水环境的影响.

1 材料与方法

1.1 实验装置

实验装置为自行设计的振动格栅装置(图1). 水箱尺寸31.00 cm×31.00 cm×45.00 cm,格栅栅条宽度为1.00 cm,相邻两个栅孔的中心距离为

6.00 cm,孔隙率为0.69,格栅在水中沿垂向往复运动,产生稳定的无平均速度和剪切力的振动格栅紊流^[15]. 格栅边缘与水箱内壁的距离为0.50 cm,距离较小,可以有效减小格栅边缘与水箱内壁的边界影响;为防止水波传到水箱底部后反射叠加,在水箱底部布置5.00 cm厚的海绵层进行消波处理.

1.2 实验用水

实验用水取自嘉陵江磁器口段,藻种是原水中的混合藻,多种藻类共生于一个水环境中,微生态系统比较平稳. 实验开始时,测定水样的各项水质指标,原水水质参数见表1. 原水中氮磷营养盐水平较高,处于富营养状态,满足藻类生长所需,因此实验过程中不再额外添加氮磷等营养盐物质.

表1 嘉陵江磁器口段原水水质参数
Table 1 Water quality parameters of natural water in the Ciqikou of Jialing River

测定指标	TN /mg·L ⁻¹	TP /mg·L ⁻¹	Chl-a /mg·L ⁻¹	优势藻及 所占比例/%
参数值	4.215	0.222	0.019	硅藻(47.32)

1.3 实验方案

实验于2012年5月在室内进行,设置4组动态对比实验,4组实验装置中格栅的振动频率分别设定为0.5、1.0、1.5和2.0 Hz,另增加1个静置水箱作为空白对照. 5组实验均采用同一批次采集的水样同时进行实验,并保持5组实验水体的温度、光照强度等环境条件相同. 依据三峡水库水华高发时段的气候状况设置水体的光照强度和水温条件,其中水温用可调式绝缘电热棒控制,设置为20℃;光源为日光灯冷光源,液面光照强度为5 000 lx,光暗时间比为10 h:14 h^[16].

1.4 分析测定方法

实验主要检测指标包括 Chl-a 浓度、总氮(TN)、总磷(TP)、pH 值和溶解氧(DO)等. 实验用水取回后先在实验室内静置2 d,然后分配到各组实验装置中. 每2 d 定时取50 mL 水样测定 TN(用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法测定)、TP(用钼酸铵分光光度法测定)、氮磷比(TN/TP)、Chl-a(用丙酮提取分光光度法测定),pH 值和 DO 直接在容器中测定;每次取样后记录容器内液面高度,用去离子水补充容器内蒸发损失的水分. 每组实验的测量指标均做3次重复,结果取3次重复的平均值.

2 结果与分析

在振动格栅装置中,紊流脉动速度的均方根计

算式为^[17]:

$$\begin{aligned} u' &= v' = \sqrt{u^2} = C_1 M^{0.5} S^{1.5} f Z^{-n} \\ w' &= \sqrt{w^2} = C_2 M^{0.5} S^{1.5} f Z^{-n} \end{aligned} \quad (1)$$

式中, u' 、 v' 、 w' 是均方根速度的 3 个分量, M 是网格中心间距, c_1 、 c_2 是常数, n 是衰减指数, 从式(1)可以看出, 紊流脉动强度与振动频率 f 成正比关系。由于 c_1 、 c_2 和 n 均与实验格栅尺寸及边壁条件有关, 现阶段尚无法推算其精确值, 另外, 直接测量紊流脉动强度也十分困难, 鉴于格栅的振动频率易于测量, 本实验过程中用格栅的振动频率间接表征紊流脉动强度的大小。

2.1 不同紊动强度对藻类生长的影响

不同振动频率下, 各组实验过程中 Chl-a 浓度变化情况见图 2。从中可以看出, 不同紊动条件下 Chl-a 浓度变化过程大致相同, 都是先增加后减小, 符合浮游生物生长的一般规律。在实验所模拟的紊动强度范围内, 较微弱的脉动强度促进实验水体中藻类生物的生长, 维持其较高的生物量, 在振动频率为 0.5 Hz 时达到最大值。但随着振动频率的逐渐加大, 高强度的脉动强度对藻类生长起到了明显的抑制作用, 其最大生物量甚至显著低于静置实验中的水平。

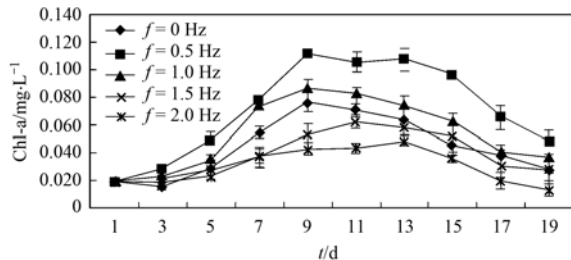


图2 不同振动频率下 Chl-a 浓度变化曲线

Fig. 2 Chl-a concentration under different vibration frequencies

静置条件下, 水体中 Chl-a 浓度峰值为 $0.077 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 振动频率为 0.5 Hz 时, Chl-a 浓度峰值明显增加, 达到 $0.112 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 相比静置实验, 其峰值增加了 45.5%; 当振动频率从 0.5 Hz 增加大 1.0 Hz 时, 峰值又下降至 $0.087 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 随着振动频率进一步加大, Chl-a 浓度峰值逐步下滑, 当振动频率达到实验模拟最大值 2.0 Hz 时, 其值降低至 $0.049 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 相比静置水体中的峰值降低了 36.4%, 削峰效果十分显著。

在不同的紊动强度下, Chl-a 浓度峰值到达的时间也出现了明显的变化, 在振动频率为 0、0.5 和 1.0 Hz 实验组中, Chl-a 浓度都在实验开始后第 9 d

达到峰值, 而振动频率为 1.5 Hz 和 2.0 Hz 的实验条件下, 峰值分别在第 11 d 和第 13 d 达到, 这说明在实验所模拟的振动频率范围内, 随着振动频率的增大, 水体的紊动对藻类生长的暴发起到了明显的延迟作用。

紊流脉动对藻类生长的影响应该是多方面的叠加效应, 必须从多方面进行综合分析。在水温及营养盐浓度等均较适宜的条件下, 水体中微弱的紊动能促进水体中藻类的生长繁殖, 因为其能减少水体垂直方向上的光强差异, 并减少藻类细胞周围静止的水体, 增加藻类细胞膜营养盐的扩散和细胞对营养盐的吸收, 使藻细胞不断得到新的营养物质供应, 并加速代谢产物的排放, 从而增加了光合作用效率和初级生产力, 促使藻类生物量显著增加。但是随着紊动强度的不断加大, 高强度紊动使藻细胞因受到机械损伤而遭到破坏, 并且紊动引起表层沉积物的再悬浮, 这些悬浮物在沉降中对藻类有卷带和掩埋作用, 各种藻类生物被胶体沉降物裹挟时便丧失浮力而沉降^[18], 因而加快了藻类的衰亡, 导致藻类的生长受到抑制。

2.2 不同紊动强度下 TN、TP 浓度变化

不同振动频率下 TN、TP 浓度变化曲线见图 3。氮、磷浓度的变化都和藻类生长密切相关, 藻类开始大量繁殖时, 不断从水体中吸收氮、磷等营养元素转化为细胞组成成分, 水体中的 TN、TP 浓度则会相应减少。随着藻类代谢产生的毒素的积累, 再加上其它营养因子的消耗, 藻类死亡速率逐渐大于繁殖速率, 死亡的藻细胞中的氮磷营养盐又会释放到水中, 致使其浓度又出现不同幅度的升高。在不同紊动强度下, 由于各组实验水体中藻类生长状况不同, 氮磷营养盐的损耗程度也随之出现了明显的差异。当格栅的振动频率为 0.5 Hz 时, 藻类生长状况最好, 对氮磷的需求量也最大, 水体中氮磷的浓度被降至最低; 随着紊动强度的不断增大, 藻细胞受到损伤和破坏, 藻类的生长受到抑制, 虽然水体中的氮磷含量仍在降低, 但降低的幅度却出现了不同程度的变化, 当振动频率达到实验设定的最大值 2.0 Hz 时, 较之振动频率为 0.5 Hz 时, TN 和 TP 的最大消减量分别降低了 55.2% 和 69.0%。这说明在封闭的实验水体中, 不同强度的紊流脉动对藻类生长的影响直接导致了各组实验中氮磷浓度变化的差异, 其中磷的变化比氮更为迅速和明显。紊流脉动对水中氮磷增减的影响应该是多方面的共同作用, 紊流脉动不仅使水体中

本身的营养物质充分被藻类吸收利用,还可以使悬浮质中的一些氮磷营养元素释放到水体中,保持水体中 TN、TP 浓度的平衡.

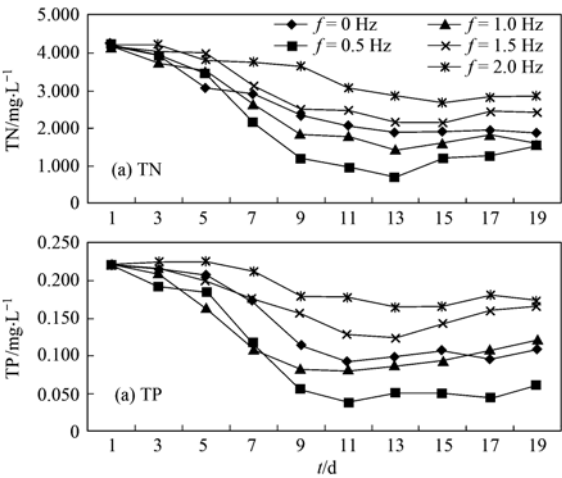


图3 不同振动频率下 TN 和 TP 浓度变化曲线
Fig. 3 TN and TP concentration under different vibration frequencies

2.3 不同紊动强度下藻类生物量峰值所对应的氮磷比的变化

水体中浮游植物的生长与其周围环境因子的变化密切相关^[19,20],通常情况下,大量营养元素可以

促进浮游藻类生物的剧增,氮和磷是主要限制因子,在水生生态系统中,氮磷比作为关键因子,常被用来预测藻细胞密度的变化和藻种演替^[21,22].不同振动频率下,藻类生长状况与氮磷比的变化关系见表2和图4.

由表2中数据可以看出,当藻类数量达到最大时,各组水体中 TN/TP 值均发生了变化.前4组实验中, TN/TP 值分别上升了 10.2%、15.6%、18.7%和 2.3%,上升幅度先增大后减小;当振动频率为最大 2.0 Hz 实验中, TN/TP 值却比实验初始下降了 7.9%.分析这一系列变化情况,可以发现随着实验组中振动频率的不断变大, TN/TP 值的变化趋势是先逐渐变大,达到最大值后开始下降,最大频率组降至低于实验初始原水中的 TN/TP 值.

图4中各组实验 Chl-a 峰值与其对应的 TN/TP 值关系对比也表现出了一定的规律性,随着 TN/TP 值的上升,各组实验中藻类最大生物量表现为先上升后下降,这与上面分析中 TN/TP 值随格栅振动频率的变化而产生的变化趋势十分相似.可以认为,在紊动实验条件下,不断上升的 TN/TP 值对藻类生物量的增长起到了有效的促进作用,达到最佳值后,继续增大则可能对藻类的增殖产生抑制.

表2 各组实验中 TN/TP 值变化

Table 2 Changes of TN/TP value in each experiment

实验组别	$f=0\text{ Hz}$	$f=0.5\text{ Hz}$	$f=1.0\text{ Hz}$	$f=1.5\text{ Hz}$	$f=2.0\text{ Hz}$
初始 TN/TP 值	18.986	18.986	18.986	18.986	18.986
藻类峰值时 TN/TP 值	20.930	21.944	22.537	19.414	17.479

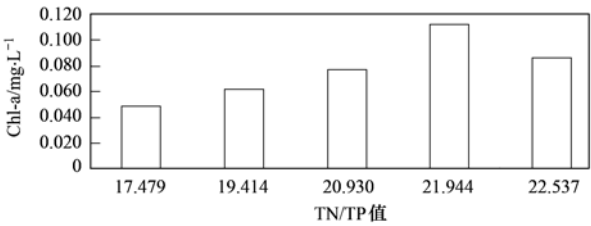


图4 各组实验中 Chl-a 峰值及其 TN/TP 值对比
Fig. 4 Contradistinction of the maximum Chl-a and TN/TP value in each experiment

目前有关氮磷比与藻类生长关系的研究主要是针对它对富营养化水体中营养限制类型以及藻类种类变化的影响^[23~25]. Redfield 定律认为,藻体内的氮磷原子个数比 16:1,推论出水中氮磷浓度比为 7:1 时最适于藻类的吸收利用^[26],但由于不同优势藻种对氮磷吸收率的不同,在不同的水环境中,氮磷比对藻类生长的影响并不表现在一个确定值上.在整个实验过程中,各组水体氮磷比都远远大于理论

最佳值,根据实验结果可以看出,在不同紊动强度水体环境下,藻类生长的最佳氮磷比约为 22:1,不同的藻种在不同的水环境下,该值可能会发生变化.通过比较还发现,在实验范围内,藻类生物量的峰值会随着氮磷比值的增大先升高后下降.

2.4 不同紊动强度下水体 pH 和 DO 的变化

不同振动频率下藻类生长过程中 pH 值、DO 的变化情况见图 5.

据研究,大多数藻类适宜在中性或弱碱性水环境中生长^[27],由图 5(a)可以看出,整个实验过程中 5 组实验水体均处于弱碱性环境,利于藻类的生长.不同之处在于,在 4 组设有不同振动频率格栅的实验中, pH 值均在实验前 3 d 就迅速上升至稳定值 8.40 左右,而静置实验直到实验结束才缓慢上升至同一水平值,这说明紊流脉动可以迅速让水体 pH 值变化至藻类生长所需最适宜的环境条件,但是在实验设定的振动频率范围内,紊动强度大小的改变

不会影响藻类生长最适宜的 pH 值水平. 在富营养化的水体中, pH 值变化主要与水体中的 CO_2 含量有关, 振动格栅的垂向运动, 加强了水体中 CO_2 与外界的交流, 利于水体保持在较稳定的 pH 值. 同时, 由于藻类生长利用了水体中的无机碳, 影响了水体中的 CO_2 缓冲体系, 进而也会对水体的 pH 值产生影响^[28].

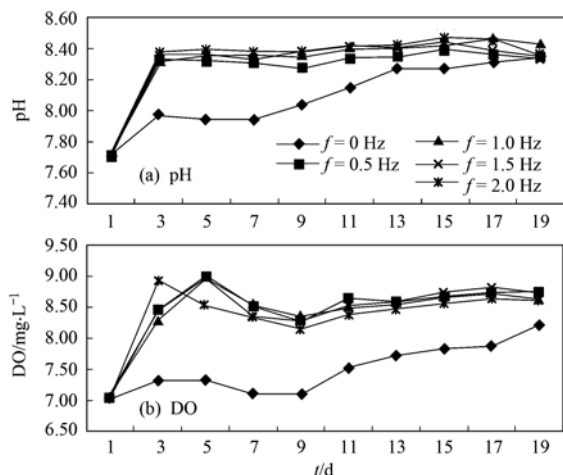


图 5 不同振动频率下 pH 和 DO 变化曲线

Fig. 5 The pH and DO concentration under different vibration frequencies

从图 5(b) 各组 DO 变化曲线可以看出, 紊流脉动对水中 DO 的变化有显著影响, 但 4 组设有不同振动频率格栅的实验之间 DO 变化情况差别不大. 水中的 DO 受到水面复氧、藻类光合作用以及水生生物呼吸作用等的综合影响, 实验初始, 由于振动格栅加强了水体与空气的接触, 溶解氧迅速增加; 随着藻类对数生长期到来, 水中溶解氧被藻类大量繁殖所消耗; 之后藻类生长减缓并开始逐渐衰亡, 水中 DO 含量又逐步回升, 整体变化过程表现为上升-下降-上升, 符合藻类的生长变化规律. 在不同的振动频率下, DO 的变化范围及变化趋势差异不大, 紊动强度越大, 水体复氧速度越快.

3 结论

(1) 较微弱的紊流脉动能促进水中藻类的生长, 维持其较高的生物量; 高强度的紊流脉动对藻类生长起到了明显的抑制作用, 其生物量甚至低于静置实验中的水平.

(2) 紊流脉动会对藻类的生长产生明显影响, 在实验所模拟的振动频率范围内, 随着紊流脉动强度的增大, 藻类生物量峰值的出现有明显的延迟作用.

(3) 在封闭水体中, 不同紊流脉动强度条件下, 藻类生长过程中氮磷含量的变化有显著的差异, 当振动频率达到 2.0 Hz 时, 较之振动频率为 0.5 Hz 的实验水体, TN 和 TP 的最大降幅分别降低了 55.2% 和 69.0%, 与藻类生长情况关系密切.

(4) 水体中氮磷含量均较高时, 随着紊流脉动强度的增加, 适宜藻类生长的最佳氮磷比会发生改变, 藻类生物量的峰值所对应的氮磷比先增后减.

(5) 紊流脉动可以快速地调节水体的 pH 值至藻类生长最适宜的水平, 但紊流脉动强度的变化不会改变其最佳值的大小; 紊流脉动能加快水体的复氧, 使水体中的溶解氧快速上升至较高水平.

(6) 紊流脉动对藻类生长以及对水环境的影响应该是多方面的叠加效应, 既有直接作用也有间接作用(直接作用是指通过流动剪切的作用, 间接作用是指通过耗散涡等对水体的混合和物质输送), 将直接作用与间接作用分开研究, 将是今后的重要研究内容.

参考文献:

- [1] Escartín H J, Aubrey D G. Flow structure and dispersion within algal mats[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1995, 40(4): 451-472.
- [2] Steinman A D, McIntire C D. Effects of current velocity and light energy on the structure of periphyton assemblage in laboratory streams[J]. Journal of Phycology, 1986, 22(3): 352-361.
- [3] 吴晓辉, 李其军. 水动力条件对藻类影响的研究进展[J]. 生态环境学报, 2010, 19(7): 1732-1738.
- [4] 张晟, 李崇明, 郑坚, 等. 三峡水库支流回水区营养状态季节变化[J]. 环境科学, 2009, 30(1): 64-69.
- [5] 龙天渝, 蔡增基. 流体力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004. 99-102.
- [6] 钟成华. 三峡库区水体富营养化研究[D]. 成都: 四川大学, 2004.
- [7] Hondzo M, Al-Homoud A. Model development and verification for mass transport to *Escherichia coli* cells in a turbulent flow[J]. Water Resources Research, 2007, 43(8): W08413.
- [8] 邹锐, 周璟, 孙永健, 等. 垂向水动力扰动机的蓝藻控制效应数值实验研究[J]. 环境科学, 2012, 33(5): 1540-1549.
- [9] Hondzo M, Lyn D. Quantified small-scale turbulence inhibits the growth of a green alga[J]. Freshwater Biology, 1999, 41(1): 51-61.
- [10] 刘信安, 张密芳. 三峡库区优势藻类聚集参数与水华状态函数[J]. 环境科学学报, 2008, 28(9): 1916-1922.
- [11] 王得祥, 王得军, 李艳. 水槽中振动格栅紊流特性实验研究[J]. 华北水利水电学院学报, 2007, 28(2): 19-21.
- [12] Shy S S, Tang C Y, Fann S Y. A nearly isotropic turbulence generated by a pair of vibrating grid[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 1997, 14(3): 251-262.
- [13] Cheng N S, Law A W K. Measurements of turbulence generated

- by oscillating grid[J]. *Journal of Hydraulic*, 2001, **127**(3): 201-208.
- [14] 闫静, 唐洪武, 程年生, 等. 振动格栅紊流及其应用综述[J]. *水利学报*, 2005, **36**(12): 1503-1509, 1516.
- [15] Orlins J J, Gulliver J S. Turbulence quantification and sediment resuspension in an oscillating grid chamber[J]. *Experiments in Fluids*, 2003, **34**(6): 662-677.
- [16] 丁玲, 逢勇, 李凌, 等. 水动力条件下藻类动态模拟[J]. *生态学报*, 2005, **25**(8): 1863-1868.
- [17] Hopfinger E J, Toly J A. Spatially decaying turbulence and its relation to mixing across density interfaces[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1976, **78**(1): 155-175.
- [18] 李哲, 郭劲松, 方芳, 等. 三峡小江回水区蓝藻季节变化及其与主要环境因素的相互关系[J]. *环境科学*, 2010, **31**(2): 301-309.
- [19] Rier S T, Stevenson R J. Effects of light, dissolved organic carbon, and inorganic nutrients on the relationship between algae and heterotrophic bacteria in stream periphyton [J]. *Hydrobiologia*, 2002, **489**(1-3): 179-184.
- [20] 罗冬莲. 深沪湾溶解氧的分布及其与浮游植物悬浮物的相关性研究[J]. *海洋通报*, 2002, **21**(1): 31-36.
- [21] Tilman D. Resource competition and community Structure[M]. New Jersey: Princeton University Press, 1982. 98-99.
- [22] Kim H B, Hwang S J, Shin J K, *et al.* Effects of limiting nutrients and N: P ratios on the phytoplankton growth in a shallow hypertrophic reservoir [J]. *Hydrobiologia*, 2007, **581**(1): 255-267.
- [23] Neill M. A method to determine which nutrient is limiting for plant growth in estuarine waters-at any salinity [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2005, **50**(9): 945-955.
- [24] Piehler M F, Dyble J, Moisander P H, *et al.* Effects of modified nutrient concentrations and ratios on the structure and function of the native phytoplankton community in the Neuse River Estuary, North Carolina, USA[J]. *Aquatic Ecology*, 2002, **36**(3): 371-385.
- [25] Hodgkiss I J, Lu S H. The effects of nutrients and their ratios on phytoplankton abundance in Junk Bay, Hong Kong [J]. *Hydrobiologia*, 2004, **512**(1-3): 215-229.
- [26] Li R X, Zhu M Y, Chen S, *et al.* Responses of phytoplankton on phosphate enrichment in mesocosms[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, **21**(4): 603-607.
- [27] 龙天渝, 周鹏瑞, 吴磊. 环境因子对香溪河春季藻类生长影响的模拟实验[J]. *中国环境科学*, 2011, **31**(2): 327-331.
- [28] 刘春光, 金相灿, 孙凌, 等. pH 值对淡水藻类生长和种类变化的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2005, **24**(2): 294-298.

CONTENTS

Advances in Peroxide-Based Decontaminating Technologies	XI Hai-ling, ZHAO San-ping, ZHOU Wen (1645)
Environmental Damage Assessment; International Regulations and Revelation to China	ZHANG Hong-zhen, CAO Dong, YU Fang, <i>et al.</i> (1653)
Human Health Risk-Based Environmental Criteria for Soil: A Comparative Study Between Countries and Implication for China	XU Meng, YAN Zeng-guang, HE Meng-meng, <i>et al.</i> (1667)
Organic Waste Treatment by Earthworm Vermicomposting and Larvae Bioconversion: Review and Perspective	ZHANG Zhi-jian, LIU Meng, ZHU Jun (1679)
Strategies of Nutrients Control in Lakes Based on Ecoregions of Lakes in China	DIAO Xiao-jun, XI Bei-dou, HE Lian-sheng, <i>et al.</i> (1687)
Current Status of Surface Water Acidification in Northeast China	XU Guang-yi, KANG Rong-hua, LUO Yao, <i>et al.</i> (1695)
Impact Analysis of Xi'an to the Water Quality of Weihe River	YU Jie, LI Huai-en (1700)
Distribution Characteristics of Dissolved Oxygen and Its Affecting Factors in the Pearl River Estuary During the Summer of the Extremely Drought Hydrological Year 2011	YE Feng, HUANG Xiao-ping, SHI Zhen, <i>et al.</i> (1707)
Application of Equilibrium Partitioning Approach to Establish Sediment Quality Criteria for Heavy Metals in Hengyang Section of Xiangjiang River	HAN Chao-nan, QIN Yan-wen, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (1715)
Assessing the Benthic Ecological Status in Yangtze River Estuary Using AMBI and M-AMBI	CAI Wen-qian, MENG Wei, LIU Lu-san, <i>et al.</i> (1725)
Pollution Load and the First Flush Effect of BOD ₅ and COD in Urban Runoff of Wenzhou City	WANG Jun, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i> (1735)
Influencing Factors in Measuring Absorption Coefficient of Suspended Particulate Matters	YU Xiao-long, SHEN Fang, ZHANG Jin-fang (1745)
Relationship Between pCO ₂ and Algal Biomass in Xiangxi Bay in Spring	YUAN Xi-gong, HUANG Wen-min, BI Yong-hong, <i>et al.</i> (1754)
Effects of Turbulent Fluctuation Intensity on the Growth of Algae and Water Environment	LEI Yu, LONG Tian-yu, SAN Lei, <i>et al.</i> (1761)
Simultaneous Removal of Algae and Its Odorous Metabolite Dimethyl Trisulfide in Water by Potassium Ferrate	MA Xiao-yan, ZHANG Ze-hua, WANG Hong-yu, <i>et al.</i> (1767)
Catalyzed Oxidation of Catechol by the Heterogeneous Fenton-like Reaction of Nano-Fe ₃ O ₄ -H ₂ O ₂ System	HE Jie, YANG Xiao-fang, ZHANG Wei-jun, <i>et al.</i> (1773)
Photodegradation of Naproxen in Aqueous Systems by UV Irradiation: Mechanism and Toxicity of Photolysis Products	MA Du-juan, LIU Guo-guang, LÜ Wen-ying, <i>et al.</i> (1782)
Catalytic Ozonation of Nitrobenzene in Water by Acidification-activated Red Mud	KANG Ya-ning, LI Hua-nan, XU Bing-bing, <i>et al.</i> (1790)
Experimental Studies on Stability of Floes from Cadmium Pollution Emergency Treatment	LIU Wang-rong, GUO Qing-wei, YANG Ren-bin, <i>et al.</i> (1797)
Evaluation of Floc Strength Based on Morphological Analysis and Optical Online Monitoring	JIN Peng-kang, FENG Yong-ning, WANG Bao-bao, <i>et al.</i> (1802)
Mechanism of Reductive Dechlorination of Trichlorophenol with Different Electron Donors	WAN Jin-quan, HU Meng-die, MA Yong-wen, <i>et al.</i> (1808)
Preparation of Magnetic Quaternary Chitosan Salt and Its Adsorption of Methyl Orange from Water	ZHANG Cong-lu, HU Xiao-min, YING Shi-ying, <i>et al.</i> (1815)
Membrane Fouling by Secondary Effluent of Urban Sewage and the Membrane Properties	MENG Xiao-rong, ZHANG Hai-zhen, WANG Lei, <i>et al.</i> (1822)
Treatment of Municipal Wastewater Using the Combined Reversed A ² /O-MBR Process	ZHANG Jian-jun, ZOU Gao-long, YANG Shu-fang, <i>et al.</i> (1828)
Study on Sulfur-based Autotrophic Denitrification with Different Electron Donors	YUAN Ying, ZHOU Wei-li, WANG Hui, <i>et al.</i> (1835)
Nitrogen Removal and N ₂ O Emission Characteristics During the Shortcut Simultaneous Nitrification and Denitrification Process	LIANG Xiao-ling, LI Ping, WU Jin-hua, <i>et al.</i> (1845)
Optimization of Solid-Phase Extraction for Enrichment of Toxic Organic Compounds in Water Samples	ZHANG Ming-quan, LI Feng-min, WU Qian-yuan, <i>et al.</i> (1851)
Polycyclic Musks Exposure Affects Gene Expression of Specific Proteins in Earthworm <i>Eisenia fetida</i>	CHEN Chun, LIU Xiao-wei, ZHENG Shun-an, <i>et al.</i> (1857)
Health Risk Assessment and Ozone Formation Potentials of Volatile Organic Compounds from Pharmaceutical Industry in Zhejiang Province	XU Zhi-rong, WANG Zhe-ming, XU Ming-zhu, <i>et al.</i> (1864)
Health Effect of Volatile Aldehyde Compounds in Photocatalytic Oxidation of Aromatics Compounds	ZHAO Wei-rong, LIAO Qiu-wen, YANG Ya-nan, <i>et al.</i> (1871)
Compositions and Distribution Characteristics of Polybrominated Diphenyl Ethers in Serum of Women from Sichuan Province	SHAO Min, CHEN Yong-heng, LI Xiao-yu (1877)
QSAR/QSPR for Predicting the Toxicity of Imidazolium Ionic Liquids	ZHAO Ji-hong, ZHAO Yong-sheng, ZHANG Hong-zhong, <i>et al.</i> (1882)
Spatial and Temporal Characteristics of Heavy Metal Concentration of Surface Soil in Hebin Industrial Park in Shizuishan Northwest China	FAN Xin-gang, MI Wen-bao, MA Zhen-ning, <i>et al.</i> (1887)
Distribution Characteristic and Current Situation of Soil Rare Earth Contamination in the Bayan Obo Mining Area and Baotou Tailing Reservoir in Inner Mongolia	GUO Wei, FU Rui-ying, ZHAO Ren-xin, <i>et al.</i> (1895)
Road Dust Loading and Chemical Composition at Major Cities in Fujian Province	ZHENG An, YANG Bing-yu, WU Shui-ping, <i>et al.</i> (1901)
Numerical Simulation and Application of Electrical Resistivity Survey in Heavy Metal Contaminated Sites	WANG Yu-ling, NAI Chang-xin, WANG Yan-wen, <i>et al.</i> (1908)
Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth and Rare Earth Elements Uptake of Soybean Grown in Rare Earth Mine Tailings	GUO Wei, ZHAO Ren-xin, ZHAO Wen-jing, <i>et al.</i> (1915)
Algicidal Activity Against Red-tide Algae by Marine Bacterial Strain N3 Isolated from a HABs Area, Southern China	SHI Rong-jun, HUANG Hong-hui, QI Zhan-hui, <i>et al.</i> (1922)
Isolation, Identification and Oxidizing Characterization of an Iron-Sulfur Oxidizing Bacterium LY01 from Acid Mine Drainage	LIU Yu-jiao, YANG Xin-ping, WANG Shi-mei, <i>et al.</i> (1930)
Isolation of an Effective Benzo[a]pyrene Degrading Strain and Its Degradation Characteristics	CAI Han, YIN Hua, YE Jin-shao, <i>et al.</i> (1937)
Aerobic Microbial Degradation of 2,2',4,4'-Tetrabrominated Diphenyl Ether	ZHANG Shu, Franco Giulio, LI Xiao-bao, <i>et al.</i> (1945)
Piggery Wastewater Cultivating Biofloculant-Producing Flora B-737 and the Fermentation Characteristics	PEI Rui-lin, XIN Xin, ZHANG Xue-qiao, <i>et al.</i> (1951)
Correlation Between Acidic Materials and Acid Deposition in Beijing During 1997-2011	CHEN Yuan-yuan, TIAN He-zhong, YANG Dong-yan, <i>et al.</i> (1958)
Characteristics of Precipitation pH and Conductivity at Mt. Huang	SHI Chun-e, DENG Xue-liang, WU Bi-wen, <i>et al.</i> (1964)
Chemical Characteristics of Water-Soluble Components of Aerosol Particles at Different Altitudes of the Mount Huang in the Summer	WEN Bin, YIN Yan, QING Yan-shuo, <i>et al.</i> (1973)
Pollution Characteristics of Organic Acids in Atmospheric Particles During Haze Periods in Autumn in Guangzhou	TAN Ji-hua, ZHAO Jing-ping, DUAN Jing-chun, <i>et al.</i> (1982)
Characterization of Organic Carbon (OC) and Elemental Carbon (EC) in PM _{2.5} During the Winter in Three Major Cities in Fujian Province, China	CHEN Yan-ting, CHEN Jin-sheng, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (1988)
Size Distribution of Carbonaceous Particulate Matter in Atmosphere of Shanghai, China	YUAN Ning, LIU Wei, ZHAO Xiu-liang, <i>et al.</i> (1995)
Secondary Aerosol Formation Through Photochemical Reactions Estimated by Using Air Quality Monitoring Data in the Downtown of Pudong, Shanghai	CUI Hu-xiong, WU Ya-ming, DUAN Yu-sen, <i>et al.</i> (2003)
Geochemical Characteristics and Sources of Atmospheric Particulates in Shanghai During Dust Storm Event	QIAN Peng, ZHENG Xiang-min, ZHOU Li-min (2010)
Near Surface Atmospheric CO ₂ Variations in Autumn at Suburban Xiamen, China	LI Yan-li, MU Chao, DENG Jun-jun, <i>et al.</i> (2018)
<i>In-situ</i> Measurement of Background Atmospheric HCFC-142b Using GC-MS and GC-ECD Method	GUO Li-feng, YAO Bo, ZHOU Ling-xi, <i>et al.</i> (2025)
Airborne Fungal Community Composition in Indoor Environments in Beijing	FANG Zhi-guo, OUYANG Zhi-yun, LIU Peng, <i>et al.</i> (2031)
Study on Quantification Assessment and Odor Fingerprint of Volatile Aromatic Hydrocarbons from Sewage Treatment Plant	GUO Wei, WANG Bo-guang, TANG Xiao-dong, <i>et al.</i> (2038)
Superposition Impact Character of Air Pollution from Decentralization Docks in a Freshwater Port	LIU Jian-chang, LI Xing-hua, XU Hong-lei, <i>et al.</i> (2044)
Thermal Stability and Transformation Behaviors of Pb in Yima Coal	LIU Rui-qing, WANG Jun-wei (2051)
Synergistic Emission Reduction of Chief Air Pollutants and Greenhouse Gases Based on Scenario Simulations of Energy Consumptions in Beijing	XIE Yuan-bo, LI Wei (2057)

《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5月15日 34卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 5 May 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