

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第4期

Vol.35 No.4

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2008 ~2012 年上海黑碳浓度变化特征分析	王洪强, 贺千山, 陈勇航, 亢燕铭 (1215)
乌鲁木齐市东南郊一次降雪过程的化学组成及其悬浮态颗粒形态特征	陆辉, 魏文寿, 崔彩霞, 何清, 王瑶 (1223)
典型地区大气中多溴联苯醚和新型溴代阻燃剂的水平及组成分布	吴辉, 金军, 王英, 李明圆, 何松洁, 徐萌, 孙一鸣 (1230)
某焦化厂周边大气 PM ₁₀ 重金属来源及健康风险评价	董婷, 李天昕, 赵秀阁, 曹素珍, 王贝贝, 马瑾, 段小丽 (1238)
基于车流和大气污染物浓度同步增量的机动车平均排放因子估算方法	李润奎, 赵彤, 李志鹏, 丁文军, 崔晓勇, 许群, 宋现锋 (1245)
珠江三角洲地区硫和氮沉降临界负荷研究	孙成玲, 谢绍东 (1250)
低温等离子体-生物法处理硫化氢气体研究	李华琴, 何觉聪, 陈洲洋, 黎宝仁, 黄倩茹, 张再利, 魏在山 (1256)
太子河流域莠去津的空间分布及风险评价	郑磊, 张依章, 张远, 朱鲁生, 王志强 (1263)
一种大批量测定沉积物微量间隙水样品中溶解态磷和铁含量的方法	王燕, 朱春刚, 许笛, 丁士明 (1271)
外源营养盐输入后水体中营养盐浓度的时空变化	傅玲, 赵凯, 王国祥, 欧媛, 范娟, 毛丽娜, 张佳, 韩睿明 (1278)
基于物理过程的矿区地下水污染风险评价	孙法圣, 程品, 张博 (1285)
重庆典型岩溶地下水系统水文地球化学特征研究	杨平恒, 卢丙清, 贺秋芳, 陈雪彬 (1290)
重庆老龙洞地下河流域氮、磷及微生物污染调查研究	蓝家程, 杨平恒, 任坤, 陈雪彬, 徐昕, 胡宁 (1297)
苦草 (<i>Vallisneria spiralis</i>) 根系对沉积物中各形态磷的影响	李振国, 王国祥, 张佳, 马久远, 魏宏农, 俞振飞 (1304)
循环廊道湿地中氮归趋过程模拟研究	彭剑峰, 宋永会, 袁鹏, 张雪妍, 胡小明 (1311)
不同环境因素下太湖中四环素的自然消减	段伦超, 王凤贺, 纪莹雪, 张帆, 赵斌, 王国祥 (1318)
再生水中 5 种抗生素抗性菌的紫外线灭活及复活特性研究	黄晶晶, 汤芳, 席劲璇, 庞宇辰, 胡洪营 (1326)
二级处理出水的 UV-TiO ₂ 消毒及大肠杆菌和粪肠球菌光复活试验	王西峰, 龚昕, 胡晓莲, 任伯帆 (1332)
水中 C ₆₀ 纳米颗粒的稳定性研究	方华, 沈冰冰, 荆洁, 陆继来, 王媛 (1337)
XDLVO 理论解析不同离子条件下海藻酸钠微滤膜污染	赵应许, 纵瑞强, 高欣玉, 谢慧君, 殷永泉, 梁爽 (1343)
纳米零价铁催化过氧化氢强化修复 4-氯硝基苯污染地下水的研究	付融冰 (1351)
共存氯苯类同系物对六氯苯厌氧降解活性的影响	王琪, 刘辉, 姜林, 唐军 (1358)
硫酸盐还原生物滤池对含镉废水去除效果试验研究	吴宣, 谭科艳, 胡希佳, 顾远, 杨宏 (1366)
基于氮平衡原理对南方污水处理厂中试脱氮工艺调控策略研究	姜应和, 刘佩炬, 王磊, 田中凯, 刘小英 (1372)
模拟电镀污泥阴离子浸出液对氧化亚铁硫杆菌活性的影响	陈燕, 黄芳, 谢鑫源 (1377)
电活性生物膜介导 Cu ²⁺ 生物还原的试验研究	刘毅, 周顺桂, 袁勇, 刘志 (1384)
模拟废旧线路板生物浸出液中铜的回收	程丹, 朱能武, 吴平霄, 邹定辉, 邢翊佳 (1391)
填埋垃圾浸提液与地下水污染物组成差异及成因	何小松, 余红, 席北斗, 崔东宇, 潘红卫, 李丹 (1399)
化学合成施氏矿物与 H ₂ O ₂ 共存体系下光化学处理垃圾渗滤液的研究	王鹤茹, 宋永伟, 徐峙辉, 崔春红, 周立祥 (1407)
处理 BPA 模拟废水的 SBR 工况参数对污泥有机毒性的影响研究	杨娜, 陈秀荣, 林逢凯, 黄华, 章斐, 赵骏, 丁毅 (1414)
剩余污泥厌氧消化甲烷生成势与产甲烷菌多样性的比较研究	董慧岭, 季民 (1421)
锰氧化菌 <i>Aminobacter</i> sp. H1 的分离鉴定及其锰氧化机制研究	晏平, 姜理英, 陈建孟, 何智敏, 肖少丹, 蒋铁锋 (1428)
1 株铁基质自养反硝化菌的脱氮特性	王弘宇, 杨开, 张倩, 季斌, 陈丹, 孙宇翀, 田俊 (1437)
碘普罗胺降解菌 <i>Pseudomonas</i> sp. I-24 共代谢降解性能研究	徐冰洁, 高品, 薛翌, 何梦琦, 吴凡 (1443)
利用流式细胞术研究鞘氨醇单胞菌 GY2B 降解非过程中细菌表面特性的变化	张梦露, 党志, 伍凤姬, 梁旭军, 郭楚玲, 卢桂宁, 杨琛 (1449)
毒性有机物 BPA 与普通小球藻的相互影响特性研究	陈善佳, 陈秀荣, 闫龙, 赵建国, 章斐, 江子建 (1457)
缺镁胁迫对普通小球藻光合生理及油脂积累的影响	王珊, 赵树欣, 魏长龙, 于水燕, 史吉平, 张保国 (1462)
微囊藻毒素对水稻根系生长和抗氧化系统的影响	王妮敏, 邓琦, 邹华, 梁婢娟 (1468)
东北春大豆品种东生 1 号对臭氧胁迫的响应	张巍巍, 王光华, 王美玉, 刘晚冰, 冯兆忠 (1473)
生物结皮的发育演替与微生物生物量变化	吴丽, 张高科, 陈晓国, 兰书斌, 张德禄, 胡春香 (1479)
老化土壤中铅对赤子爱胜蚓生长及繁殖的影响	陈丽红, 刘征涛, 方征, 王晓南, 王婉华 (1486)
土壤重金属镉标准值差异比较研究与建议	赵晓军, 陆泗进, 许人骥, 李伯苓, 吴国平, 魏复盛 (1491)
藏北可可西里地区土壤元素背景值研究	柏建坤, 王建力, 李潮流, 康世昌, 陈鹏飞 (1498)
三峡库区香溪河消落带及库岸土壤重金属迁移特征及来源分析	胥焘, 王飞, 郭强, 聂小倩, 黄应平, 陈俊 (1502)
浙江海宁电镀工业园区周边土壤重金属污染特征及生态风险分析	厉炯慧, 翁珊, 方婧, 黄佳蕾, 陆芳华, 卢宇浩, 张洪铭 (1509)
西湖景区土壤典型重金属污染物的来源及空间分布特征	张海珍, 唐宇力, 陆骏, 周虹, 徐芸茜, 陈川, 赵赞, 王美娥 (1516)
生活垃圾焚烧厂周边土壤汞污染特征及评价	解惠婷, 张承中, 徐峰, 李海凤, 田振宇, 唐琛, 刘文彬 (1523)
上海滴水湖周边土壤和沉积物对磷的吸附特征	诸葛祥真, 毕春娟, 陈振楼, 张焕焕, 倪玮怡 (1531)
SDBS/Na ⁺ 对红壤胶体悬液稳定性的影响	唐颖, 李航, 朱华玲, 田锐, 高晓丹 (1540)
稳定化处理对矿渣中重金属迁移转化的影响研究	赵述华, 陈志良, 张太平, 潘伟斌, 彭晓春, 车融, 欧英娟, 雷国建, 周鼎 (1548)
藻类水体 Cd ²⁺ 毒性快速监测新方法研究	段静波, 刘文清, 张玉钧, 赵南京, 殷高方, 肖雪, 余晓娅, 方丽 (1555)
用于 1,3-二硝基苯快速检测的免疫传感器研究	龙峰, 施汉昌, 王洪臣, 盛建武 (1561)
Mg/Al 水滑石微波共沉淀法合成及其对 BrO ₃ ⁻ 吸附性能的研究	钟琼, 李欢 (1566)
污染场地修复决策支持系统的几个关键问题探讨	廖晓勇, 陶欢, 阎秀兰, 赵丹, 林龙勇, 李尤 (1576)
城市区域土壤铅含量空间变异的多尺度研究进展	杨孟, 李凤英, 刁一伟, 吴丹 (1586)
水中细菌内毒素污染特性及检测方法研究进展	张灿, 刘文君, 张明露, 田芳, 杨毅, 安代志 (1597)
六价铬细菌还原的分子机制研究进展	李斗, 赵由才, 宋立岩, 尹雅洁, 王洋清, 徐中慧 (1602)
农副食品加工业高浓度废水的厌氧膜生物反应器技术	魏源送, 郁达伟, 曹磊 (1613)
《环境科学》征稿简则 (1427) 《环境科学》征订启事 (1497) 信息 (1383, 1390, 1398, 1560)	

外源营养盐输入后水体中营养盐浓度的时空变化

傅玲¹, 赵凯^{1,2}, 王国祥^{1*}, 欧媛¹, 范嫫¹, 毛丽娜¹, 张佳¹, 韩睿明¹

(1. 南京师范大学地理科学学院, 南京 210046; 2. 安庆师范学院生命科学学院, 安庆 246011)

摘要: 在温室内的水泥沟渠中人工构建 6 种不同的植物镶嵌群落, 通过人工添加营养盐的方式模拟外源营养盐输入, 并持续测量单次营养盐添加后 22 d 内水体表层、中层和底层可溶性总氮 (DTN)、可溶性总磷 (DTP)、氨氮 ($\text{NH}_4^+\text{-N}$)、硝氮 ($\text{NO}_3^-\text{-N}$) 以及亚硝氮 ($\text{NO}_2^-\text{-N}$) 浓度变化情况, 以揭示单次外源营养盐输入后水体营养盐浓度的时空变化过程。结果表明: ①不同水深和测量时间下各形态营养盐浓度有显著差别, 植物群落类型对不同形态营养盐浓度影响不显著; ②外源营养盐进入表层水体后扩散到中层水体的过程较为缓慢, 在本实验条件下需要 6 d; ③实验过程中底层水体 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 以外的其它营养盐浓度均无显著变化, 外源营养盐输入仅影响表层和中层水体营养盐浓度; ④单次外源营养盐输入一定时间后 DTP 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度逐渐下降到输入前水平, 本实验条件下这一过程需要 22 d, DTN 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度则下降非常缓慢; ⑤外源营养盐输入水体后不同深度水体中 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度均呈上升趋势, 一方面说明外源营养盐输入后, 水体 N 循环过程中的硝化作用和反硝化作用加强, 另一方面也说明外源营养盐输入除危害水生生态系统健康以外更会直接危及人类自身的健康。

关键词: 外源营养盐; 富营养化; 氮循环; 水污染; 时空变化

中图分类号: X143; X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)04-1278-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.04.010

Temporal and Spatial Variation of Water Nutrient Level After Exogenous Nutrient Input

FU Ling¹, ZHAO Kai^{1,2}, WANG Guo-xiang¹, OU Yuan¹, FAN Zhou¹, MAO Li-na¹, ZHANG Jia¹, HAN Rui-ming¹

(1. College of Geography Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China; 2. College of Life Science, Anqing Normal University, Anqing 246011, China)

Abstract: In order to study the spatial and temporal variations of nitrogen (N) and phosphorous (P) nutrition in artificial wetlands after a single exogenous nutrient input, 6 mosaic communities of 7 plant species were set up in a cement channel in the greenhouse. After the addition of N and P nutritional solutions, the concentrations of dissolved total nitrogen (DTN), dissolved total phosphorous (DTP), ammonia nitrogen ($\text{NH}_4^+\text{-N}$), nitrate nitrogen ($\text{NO}_3^-\text{-N}$) and nitrite nitrogen ($\text{NO}_2^-\text{-N}$) in the surface, middle, and bottom layers of the bulk water were determined regularly within 22 days. The results show that: ①the water depth and measuring date have significant effects on nutritional contents while the type of plant communities have no such an influence; ②the diffusion of nutrient from surface to the middle water layers is relatively slow, which costs 6 days under the current experimental condition; ③in the bottom water layer, nutritional concentrations had no significant changes except for $\text{NO}_2^-\text{-N}$, thus the exogenous nutrient input mainly affects the nutrient contents of surface and middle-level bulk water; ④DTP and $\text{NH}_4^+\text{-N}$ contents gradually decline to similar levels that before the nutritional input event until the end of experimental period, though DTN and $\text{NO}_3^-\text{-N}$ content decrease much more slowly; ⑤the fact that $\text{NO}_2^-\text{-N}$ contents rise in water layers of all depths demonstrates that nitrification and denitrification in the process of N circulation are enhanced. It is concluded that exogenous nutrient inputs not only harm aquatic ecosystems but also directly threat human health.

Key words: exogenous nutrient; eutrophication; nitrogen circulation; water pollution; spatial and temporal variations

自 20 世纪后 10 年以来, 湖泊富营养化污染已经成为全球范围内广泛存在的环境问题^[1]。这一问题在我国尤为严重, 长江中下游地区集中了我国 60% ~ 70% 的浅水淡水湖泊, 近 20 年来这些湖泊中的大多数已处于富营养化或正在富营养化中^[2,3]。大量研究表明, 地表径流的营养盐输入尤其是农业污染是湖泊富营养化的主要原因^[4,5]。目前针对湖泊富营养化的研究大多集中在湖泊富营养化治理上^[1,6,7], 对于外源营养盐输入后水生植物群落中营养盐的时空变化的研究也仅停留在不同植物

群落对营养盐的去除效果上^[8~11]。

有鉴于此, 本研究通过在人工构建的植物镶嵌群落中添加营养盐并持续测定水体中营养盐的变化情况, 揭示单次外源营养盐输入后水体营养盐浓度的时空变化过程, 进而探讨外源营养盐输入导致的湖

收稿日期: 2013-08-02; 修订日期: 2013-09-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(41173078); 科技部国际合作重大专项(2010DFB33960)

作者简介: 傅玲(1990~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为环境科学, E-mail: fl19900607@126.com

* 通讯联系人, E-mail: wangguoxiang@njnu.edu.cn

泊富营养化机制。

1 材料与方法

1.1 实验材料与地点

本实验在南京师范大学生态修复中试平台的水泥沟渠(长 875 cm、宽 130 cm、高 150 cm)内进行, 水渠位于玻璃温室内, 自然光照充分且不受降雨影响。实验期间表层水温介于 23 ~ 29℃ 之间, 底层水温介于 21 ~ 23℃ 之间。

用于构建水生植物群落的植物包括以下 7 种: 挺水植物芦苇 (*Phragmites australis*)、菖蒲 (*Acorus calamus*); 漂浮植物浮萍 (*Lemna minor*); 浮叶植物四角菱 (*Trapa quadrispinosa*); 沉水植物聚草 (*Myriophyllum spicatum*)、黑藻 (*Hydrilla verticillata*); 丝状藻刚毛藻 (*Cladophora glomerata*)。所有植物从野外采集后在实验水体中预培养至少一周, 再选取长势一致的健康植株做为实验材料。

1.2 实验系统

将水渠清理干净后放入自来水至水深 13 cm 后静置曝气 3 d, 将 7 种不同生态位的水生植物种植在水泥沟渠内构建 6 种水生植物群落系统(图 1)。除漂浮植物和丝状藻之外所有植物均种植在 10 cm 口径, 15 cm 高的花盆中。植物的种植密度根据多次野外观察的植物生长密度设定, 水生植物种植密度为挺水植物 45 棵·m⁻², 浮叶植物 45 棵·m⁻², 沉水植物 100 棵·m⁻², 漂浮植物初始盖度 20%, 丝状藻 500 g·m⁻²。种植挺水植物的花盆通过尼龙绳固定在植物根部距离水面 50 cm 的位置, 沉水植物和浮叶植物群落置于水渠底部, 植物根部距离水面 115 cm。所有植物群落斑块均用尼龙网隔开, 两个不同植物群落之间保留 30 cm 空隙, 以防止不同群落交错生长。底泥取自南京师范大学校园内一个自然水塘中, 底泥中 TN 浓度为 126.7 mg·g⁻¹, TP 浓度为 195.3 μg·g⁻¹。

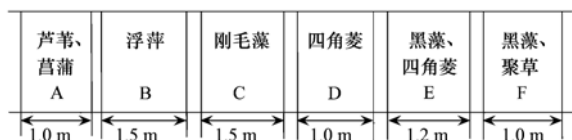


图 1 水生植物镶嵌群落空间搭配

Fig. 1 Spatial pattern of mosaic communities of seven aquatic plants

实验系统的构建时间为 2013 年 3 月 24 日, 实验期间水体呈静置状态。两个月后(5 月 24 日)测定水体中各形态营养盐浓度, 第一次营养盐测定视为实验启动, 记为第 0 d。测量营养盐的次日(第 1d)根据营养盐测定结果用 NH₄Cl、NaNO₃、和

KH₂PO₄ 调节水体营养盐, 营养盐浓度参照太湖富营养化区域营养盐浓度^[11]设定, 分别调节至 NH₄⁺ = 3 mg·L⁻¹, NO₃⁻ = 3 mg·L⁻¹, PO₄³⁻ = 0.3 mg·L⁻¹。

1.3 实验方法

实验启动后, 分别在实验的第 2、4、6、8、15、22 d 分 3 层采集水样, 测定各层营养盐浓度, 水样采集的时间固定为 09:00 ~ 10:00。水样采集方法为: 在各群落的中心位置垂直固定一根直径 0.5 cm 的 PVC 管, 将 3 根乳胶管的一端分别固定在水深 10 cm、70 cm 和 110 cm 位置, 分别代表表层、中层和底层, 乳胶管另一端接蠕动泵, 通过蠕动泵采集水样。

水样测定指标包括可溶性总磷(DTP)、可溶性总氮(DTN)、氨氮(NH₄⁺-N)、硝氮(NO₃⁻-N)和亚硝氮(NO₂⁻-N)。DTP 和 DTN 测定方法参照国家环保总局公布的标准方法^[12], NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、NO₂⁻-N 通过连续流动水质分析仪 (Skalar San⁺⁺ Continuous Flow Analyzer) 测定。

水样采集之后测量植物的株高和基径, 株高用卷尺测量, 游标卡尺测量距离根部 5 cm 处植株的直径记为基径。

1.4 数据分析

多因素方差分析 (Multivariate-ANOVA) 探讨测量时间、水深和植物群落对不同形态营养盐浓度的影响 ($P < 0.05$)。单因素方差分析 (One-way ANOVA) 用于单个因素对观测变量影响的显著性分析 ($P < 0.05$), 两两比较通过 S-N-K 检验获得。

通过 Primer 5.0 软件进行非度量多维度排序 (multi dimensional scaling, MDS) 分析不同深度的水体中营养盐浓度的分布特征, 结果的可信度用胁强系数 (stress) 来衡量 ($0 < \text{stress} < 0.01$, 完全可信; $0.01 < \text{stress} < 0.05$, 可信; $0.05 < \text{stress} < 0.1$, 基本可信; $0.1 < \text{stress} < 0.2$, 仍有参考价值, 但某些细节不可信; $0.2 < \text{stress} < 0.3$, 不可信)。两因子相似性分析 (Two way ANOSIM) 检验不同深度和时间水体营养盐浓度差异的显著性 ($R = 0$ 表示完全相同, $0 < R < 0.5$ 表示差异不明显, $0.75 < R < 0.9$ 表示有重叠但能清楚分开, $0.9 < R < 1$ 表示有显著差异, $R = 1$ 表示完全不同)。相似性百分比 (SIMPER) 分析用于分析各形态的营养盐对深度和测量时间水体营养盐浓度差异的贡献率。

2 结果与分析

2.1 植物生物量变化

实验启动和结束时的植物株高和基径测量结果

表明,实验期间水生植物生长状况基本稳定(表1)。从株高来看,除黑藻株高增加了28%以外,其它水生植物株高没有明显变化,株高增长幅度介于

1.33~9.2%之间;从实验前后植物基径变化情况来看,所有植物的基茎变化幅度不大,增量介于0~9.09%之间。

表1 人工调节营养盐后植物生长状况

Table 1 Growth condition of different plants after nutrient addition

指标	时间	芦苇	菖蒲	四角菱	黑藻	聚草
株高/m	第0 d	1.35 ± 0.01	1.2 ± 0.03	1.74 ± 0.03	1.25 ± 0.02	1.5 ± 0.1
	第22 d	1.40 ± 0.06	1.3 ± 0.02	1.9 ± 0.1	1.6 ± 0.05	1.52 ± 0.02
基径/mm	第0 d	2.80 ± 0.20	/	1.30 ± 0.10	1.10 ± 0	1.2 ± 0
	第22 d	3.00 ± 0.1	/	1.30 ± 0	1.20 ± 0.10	1.2 ± 0.10

2.2 不同形态营养盐变化

调节营养盐前的水体中不同深度的各形态氮浓度底层>中层>表层,总磷浓度中层>底层>表层,但差异不显著($P>0.05$) (表2)。添加营养盐之后不同深度各形态营养盐浓度变化情况见图2。实验的第2~6 d表层的DTN、DTP、 NH_4^+ -N和 NO_3^- -N浓度逐渐下降,同时,中层这几个指标则逐渐上升,至第6 d表层和中层达到一致的水平。第6 d后,这4种营养盐浓度均逐渐下降,其中DTP和

NH_4^+ -N在第22 d均下降到和底层一致的水平,DTN和 NO_3^- -N则下降幅度非常缓慢。底层的DTN和DTP浓度受营养盐添加的影响并不显著($P>0.05$),一直保持在添加营养盐之前的水平; NH_4^+ -N和 NO_3^- -N浓度稍有波动,但总体变化不大。添加营养盐之后,无论是表层、中层还是底层, NO_2^- -N浓度均随实验天数的增加而上升,表层和中层的 NO_2^- -N浓度在第15 d达到最大值后开始下降,底层则一直上升。

表2 调节营养盐前水质初始数据

Table 2 Initial water nutrient level of different depths before nutrient addition

深度	TN/mg·L ⁻¹	TP/μg·L ⁻¹	NH_4^+ -N/μg·L ⁻¹	NO_3^- -N/mg·L ⁻¹	NO_2^- -N/μg·L ⁻¹
表层	0.78 ± 0.10	17.39 ± 10.17	54.63 ± 13.06	0.10 ± 0.01	30.51 ± 14.37
中层	0.82 ± 0.09	22.11 ± 20.89	56.31 ± 12.80	0.10 ± 0.01	31.21 ± 15.84
底层	0.91 ± 0.16	18.33 ± 15.49	57.94 ± 7.48	0.10 ± 0.01	32.11 ± 12.06

2.3 影响营养盐浓度的因素

将不同形态的营养盐浓度与测量时间、深度、及植物群落类型进行多因素方差分析(表3),结果显示水体中不同形态营养盐浓度与时间和深度均呈显著相关(除亚硝氮与时间的相关性在 $P<$

0.05水平,其余各水质指标与时间、深度均在 $P<0.001$ 水平上极显著相关),与植物群落类型相关性不显著($P>0.05$)。此外,时间和深度对不同形态营养盐浓度的影响存在交叉效应($P=0.000$)。

表3 水质指标与时间、深度、群落的多因素方差分析

Table 3 Multivariate-AVOVA of water nutrient level and time, depth and community

项目	时间	深度	群落	时间 × 深度	时间 × 群落	深度 × 群落
DTN	$F=68.86$ $P=0.000^{**}$	$F=108.08$ $P=0.000^{**}$	$F=0.13$ $P=0.992$	$F=184.41$ $P=0.000^{**}$	$F=0.02$ $P=1.000$	$F=0.12$ $P=1.000$
DTP	$F=164.33$ $P=0.000^{**}$	$F=28.43$ $P=0.000^{**}$	$F=0.07$ $P=0.998$	$F=158.75$ $P=0.000^{**}$	$F=0.024$ $P=1.000$	$F=0.05$ $P=1.000$
NH_4^+ -N	$F=34.96$ $P=0.000^{**}$	$F=21.05$ $P=0.000^{**}$	$F=0.47$ $P=0.829$	$F=34.49$ $P=0.000^{**}$	$F=0.21$ $P=1.000$	$F=0.10$ $P=1.000$
NO_3^- -N	$F=2.65$ $P=0.027^*$	$F=184.29$ $P=0.000^{**}$	$F=0.68$ $P=0.668$	$F=61.29$ $P=0.000^{**}$	$F=0.04$ $P=1.000$	$F=0.21$ $P=0.998$
NO_2^- -N	$F=53.77$ $P=0.000^{**}$	$F=12.72$ $P=0.000^{**}$	$F=0.38$ $P=0.89$	$F=10.72$ $P=0.000^{**}$	$F=0.43$ $P=1.000$	$F=0.12$ $P=1.000$

1) *表示 $P<0.05$, **表示 $P<0.001$

2.4 不同形态营养盐浓度与深度的关系

对不同深度的各形态营养盐浓度进行MDS排

序分析(图3),结果显示表层和中层营养盐浓度有交叉,底层营养盐浓度单独聚成一类,与表层和中

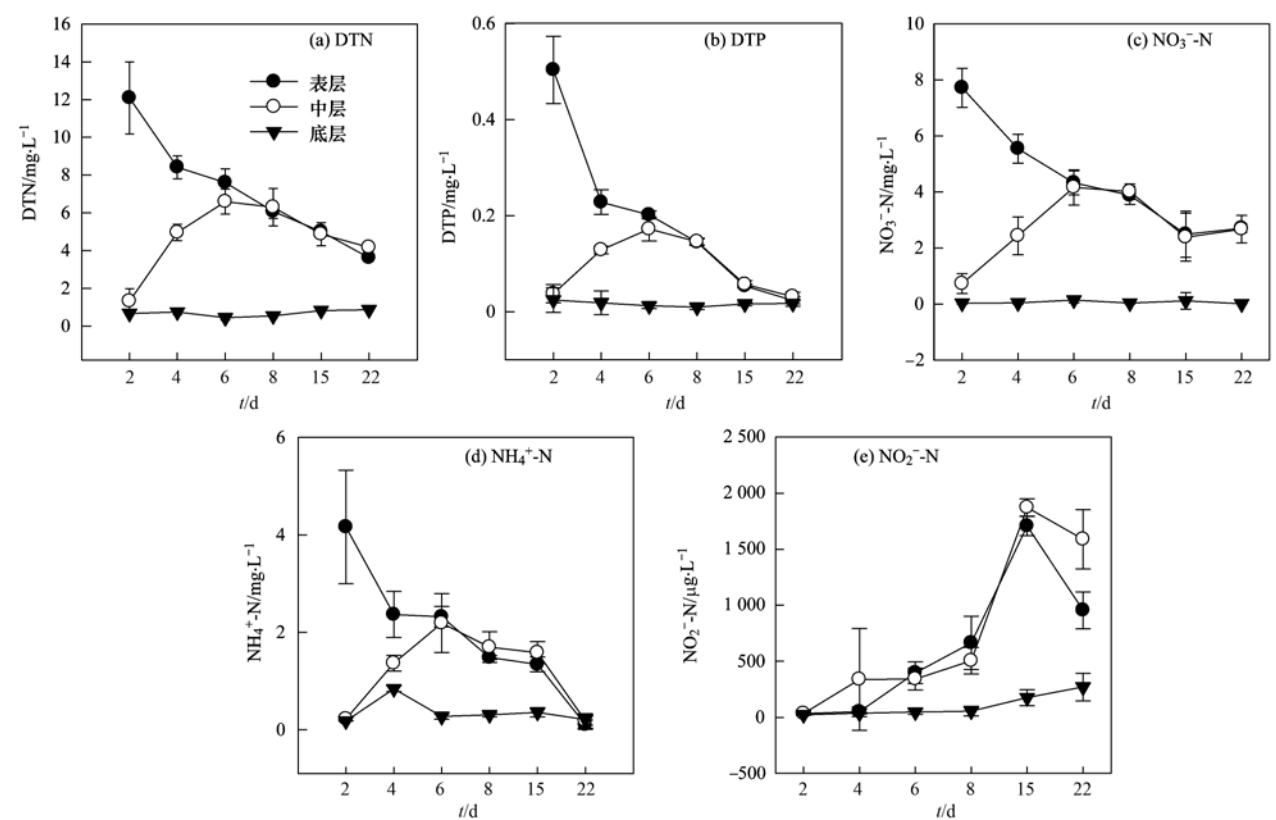


图2 不同深度的各形态营养盐随时间变化情况
Fig. 2 Temporal variation of water nutrient level in three depths

层差异显著, stress = 0.09, MDS 排序结果基本可信. ANOSIM 分析结果表明 R 值为 0.709, 表明不同深度的营养盐浓度有重叠但基本可以区分. 两两分析结果表层和表层、表层和底层、中层和底层 R 值分别为 0.388、0.992 和 0.986, P 值均为 0.001, 表明表层和中层的营养盐浓度差异不明显, 底层营养盐浓度则完全与表层和中层的营养盐浓度区分.

2.5 不同形态营养盐浓度与测量时间的关系
将不同形态营养盐浓度与测量时间进行

ANOSIM 分析(表 4), 结果显示 R 值为 0.794, 处于差异显著水平. 两两比较结果表明: 添加营养盐后第 6 d 和第 8 d 营养盐浓度差异不显著 ($R < 0.5$), 第 4 d 和第 6 d、第 8 d、以及第 15 d 的营养盐浓度虽有重叠但仍能区分 ($0.75 < R < 0.5$), 其余各天数的营养盐浓度均差异显著 ($0.75 < R < 1$).

2.6 各形态营养盐变化的 SIMPER 分析
对不同深度各形态营养盐变化情况进行 SIMPER 分析, 结果显示: DTN 对不同深度营养盐差异的贡献最大, DTP 无贡献; 不同形态 N 中, NO₃⁻-N 对中层和表层营养盐差异的贡献居第 2 位, 底层占第 2 位的是 NH₄⁺-N; NO₂⁻-N 仅对中层营养盐差异有贡献, 且居第 4 位.

对不同测量时间各形态营养盐变化情况进行 SIMPER 分析的结果显示: 对不同测量时间各形态营养盐浓度差异贡献最大的仍然是 DTN, DTP 对不同测量时间营养盐浓度变化无贡献; 在加入营养盐后的前 8 d NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 对营养盐浓度变化的贡献较大, 第 8 d 以后 NO₂⁻-N 对营养盐浓度差异所占贡献上升到第 3 位.

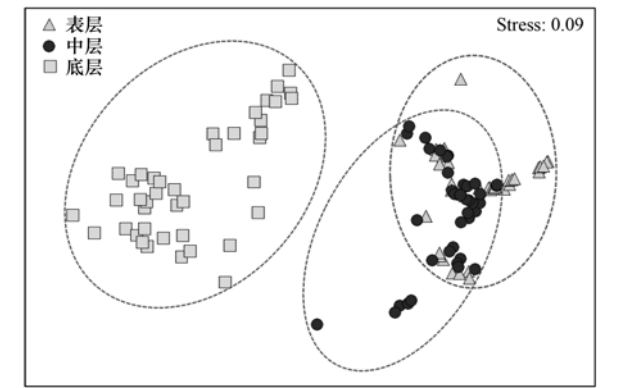


图3 营养盐浓度 MDS 分析
Fig. 3 Multi dimensional scaling of nutrient concentrations

表 4 不同形态营养盐浓度与测量时间的 ANOSIM 分析

Table 4 ANOSIM analysis between nutrient level and measuring times					
	第 2 d	第 4 d	第 6 d	第 8 d	第 15 d
第 2 d	/	/	/	/	/
第 4 d	$R=0.865$ $P=0.001$	/	/	/	/
第 6 d	$R=0.789$ $P=0.001$	$R=0.553$ $P=0.001$	/	/	/
第 8 d	$R=0.891$ $P=0.001$	$R=0.694$ $P=0.001$	$R=0.397$ $P=0.001$	/	/
第 15 d	$R=0.981$ $P=0.001$	$R=0.714$ $P=0.001$	$R=0.981$ $P=0.001$	$R=0.823$ $P=0.001$	/
第 22 d	$R=0.849$ $P=0.001$	$R=0.873$ $P=0.001$	$R=0.845$ $P=0.001$	$R=0.779$ $P=0.001$	$R=0.909$ $P=0.001$

表 5 不同深度营养盐浓度差异的 SIMPER 分析/%

Table 5 SIMPER analysis of the difference of nutrient contents in different water depths/%					
深度	DTN	$\text{NH}_4^+ \text{-N}$	$\text{NO}_3^- \text{-N}$	$\text{NO}_2^- \text{-N}$	总贡献率
表层	47.25	17.78	25.74	/	90.76
中层	46.16	14.63	28.48	8.85	98.12
底层	60.57	30.89	/	/	91.47

表 6 不同测量时间下营养盐浓度差异的 SIMPER 分析/%

Table 6 SIMPER analysis of the difference of nutrient contents between different times/%					
时间	DTN	$\text{NH}_4^+ \text{-N}$	$\text{NO}_3^- \text{-N}$	$\text{NO}_2^- \text{-N}$	总贡献率
第 2 d	61.13	16.50	19.74	/	97.37
第 4 d	48.05	26.78	21.15	/	95.98
第 6 d	55.37	19.00	20.64	/	95.02
第 8 d	62.16	19.66	11.63	/	93.46
第 15 d	46.86	31.37	/	16.58	94.82
第 22 d	55.90	/	22.68	15.82	94.40

3 讨论

在本实验启动之前,所有植物群落均已生长 2 个月,生物量已经达到稳定值,在实验期间株高和基径的变化幅度不大(表 1). 这一方面说明营养盐的增加并未显著促进水生植物的生长,另一方面也说明本次实验过程中植物生长对营养盐变化的影响是很小的. 大量研究表明,不同植物群落对水体营养盐浓度具有显著的影响^[10,13,14],这也是植被修复用于湖泊富营养化治理的理论基础^[15,16],然而本研究结果却表明植物群落对各形态营养盐浓度并无显著影响(表 3). 这可能是由两方面原因导致的,首先在实验期间植物并无显著生长,植物对营养盐的吸收有限,其次可能与本实验中群落斑块的面积较小有关,在这种情况下水体中的物质交换抵消了植物群落对营养盐浓度的影响.

人工营养盐添加后,开始的几天里除 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 之外的营养盐浓度变化情况为:表层营养盐浓度逐渐

下降,中层的营养盐浓度逐渐上升,至实验的第 6 d,表层和中层营养盐浓度基本一致,此后均逐渐下降. 这可能与本研究采用的直接向各群落表层水体中倾倒营养盐的添加营养盐方式有关,说明在本实验的水体(有不同水生植物镶嵌群落生长的静水水渠)中,表层营养盐沉降到水体中层的时间是 6 d. 这一结果可以用于揭示雨水中高浓度 N 进入地表水后的沉降过程^[17~20].

本研究结果表明,人工营养盐添加对底层水体中 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 以外的各形态营养盐浓度并无显著影响,说明单次外源营养盐输入并不会影响底层水环境的 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 以外营养盐浓度, MDS 结果亦表明人工营养盐添加后底层营养盐浓度与表层和中层存在显著区别(图 3). 前人研究结果亦表明,外源营养盐的输入主要对表层和中层有贡献^[21],这主要是由于水流是静止状态,且夏季表层温度高,水体中垂直交换作用较弱,导致上层的营养盐很难向底层输送^[21].

在实验结束时, 即营养盐添加后的第 22 d, 表层和底层水体中的 DTP 和 NH_4^+ -N 浓度均下降到和底层一致的水平, 由于底层营养盐在实验前后并无显著差异, 可以认为人工添加营养盐 22 d 后水体中 DTP 和 NH_4^+ -N 浓度恢复到人工营养盐添加之前的水平, 即单次外源营养盐输入一定时间后水体中的 DTP 和 NH_4^+ -N 浓度是可以自然恢复的. 然而在我国的大部分富营养化湖泊中 DTP 和 NH_4^+ -N 浓度则均处于较高的水平^[22~24], 这可能与这些湖泊面临的外源营养盐持续输入有关, 或者与水体内部污染有关^[25~27]. 这一结果表明消除富营养化湖泊外源营养盐输入之后, 水体中的 DTP 和 NH_4^+ -N 浓度是可以自然下降的. 这一研究结果同时表明, 单次外源营养盐输入对水体中 N 浓度的影响比 P 浓度的影响更显著, 一直到实验结束时, 即营养盐添加后的第 22 d, 水体中的 DTN 和 NO_3^- -N 仍然处于较高的水平, 尽管缓慢下降的趋势依然存在.

从水体中不同形态 N 的变化情况来看, DTN、 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 浓度的变化趋势较为一致, 而 NO_2^- -N 则无论在水体的表层、中层和底层都呈上升趋势. SIMPER 分析结果表明, 在实验的后期水体中 NO_2^- -N 浓度变化对营养盐差异的贡献比实验前期增加(表 6). NO_2^- -N 是水体 N 循环过程中硝化作用和反硝化作用的中间产物^[28~30], 这一结果可以说明, 外源营养盐输入以后水体中 N 循环过程中硝化作用和反硝化作用增强. 同时, 已有大量研究结果表明 NO_2^- -N 对人类健康和环境有很大危害^[31,32], 水体中 NO_2^- -N 浓度的升高更会危害人类饮水安全, 这说明了外源营养盐输入不仅影响湖泊生态系统, 更会直接危及人类自身的健康.

4 结论

(1) 单次外源营养盐输入后, 静止水体中不同形态的营养盐浓度变化情况与时间和水深显著相关, 与植物群落类型无显著相关.

(2) 在静止水体中, 单次外源营养盐进入水体表层后扩散到更深层水体的过程是非常缓慢的, 本研究的实验条件下, 表层水体和底层水体营养盐浓度达到一致的时间是 6 d.

(3) 单次外源营养盐进入水体后 DTP 和 NH_4^+ -N 均可逐渐恢复到营养盐添加前的水平, 本研究的实验条件下这一恢复过程需要 22 d, 而 DTN 和 NO_3^- -N 的下降过程则需要更长的时间.

(4) 外源营养盐输入水体后, 不同深度的 NO_2^- -N 的浓度均呈升高趋势, 提示外源营养盐输入会通过饮水安全直接危及人类健康.

参考文献:

- [1] Scheffer M, Van Nes E H. Shallow lakes theory revisited: various alternative regimes driven by climate, nutrients, depth and lake size[J]. *Hydrobiologia*, 2007, **584**(1): 455-466.
- [2] Qin B Q, Gao G, Zhu G W, *et al.* Lake eutrophication and its ecosystem response[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, **58**(9): 1-10.
- [3] Qin B Q, Yang L Y, Chen F Z, *et al.* Mechanism and control of lake eutrophication[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, **51**(19): 2401-2412.
- [4] Daniel T C, Sharpley A N, Lemunyon J L. Agricultural phosphorus and eutrophication: A symposium overview[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1998, **27**(2): 251-257.
- [5] Rahmani T, Poorbagher H, Javanshir A, *et al.* Effects of agriculture, tourism and the dam on eutrophic status of the Zerebar Lake, Iran[J]. *International Journal of Advanced Biological and Biomedical Research*, 2013, **1**(4): 403-420.
- [6] Fink D F, Mitsch W J. Seasonal and storm event nutrient removal by a created wetland in an agricultural watershed[J]. *Ecological Engineering*, 2004, **23**(4-5): 313-325.
- [7] Wang G X, Zhang L M, Chua H, *et al.* A mosaic community of macrophytes for the ecological remediation of eutrophic shallow lakes[J]. *Ecological Engineering*, 2009, **35**(4): 582-590.
- [8] Gersberg R M, Elkins B V, Lyon S R, *et al.* Role of aquatic plants in wastewater treatment by artificial wetlands[J]. *Water Research*, 1986, **20**(3): 363-368.
- [9] Iamchaturapatr J, Yi S W, Rhee J S. Nutrient removals by 21 aquatic plants for vertical free surface-flow (VFS) constructed wetland[J]. *Ecological Engineering*, 2007, **29**(3): 287-293.
- [10] Reddy K R, De Busk W F. Nutrient removal potential of selected aquatic macrophytes[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1985, **14**(4): 459-462.
- [11] 王国祥, 濮培民, 张圣照, 等. 用镶嵌组合植物群落控制湖泊饮用水源区藻类及氮污染[J]. *植物资源与环境*, 1998, **7**(2): 35-41.
- [12] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 649-671.
- [13] Picard C R, Fraser L H, Steer D. The interacting effects of temperature and plant community type on nutrient removal in wetland microcosms[J]. *Bioresource Technology*, 2005, **96**(9): 1039-1047.
- [14] 刘树元, 阎百兴, 王莉霞. 潜流人工湿地中植物对氮磷净化的影响[J]. *生态学报*, 2011, **31**(6): 1538-1546.
- [15] Vymazal J. Removal of nutrients in various types of constructed wetlands[J]. *Science of the Total Environment*, 2007, **380**(1): 48-65.
- [16] 杨旻, 吴小刚, 张维昊, 等. 富营养化水体生态修复中水生植物的应用研究[J]. *环境科学与技术*, 2007, **30**(7): 98-102.

- [17] Krusche A V, De Camargo P B, Cerri C E, *et al.* Acid rain and nitrogen deposition in a sub-tropical watershed (Piracicaba): ecosystem consequences [J]. Environmental Pollution, 2003, **121**(3): 389-399.
- [18] Lapointe B E, Matzie W R. Effects of stormwater nutrient discharges on eutrophication processes in nearshore waters of the Florida Keys[J]. Estuaries, 1996, **19**(2): 422-435.
- [19] 车伍, 刘燕, 李俊奇. 国内外城市雨水水质及污染控制[J]. 给水排水, 2003, **29**(10): 38-42.
- [20] 张国森, 陈洪涛, 张经, 等. 长江口地区大气湿沉降中营养盐的初步研究[J]. 应用生态学报, 2003, **14**(7): 1107-1111.
- [21] 王芳, 康建成, 周尚哲, 等. 春秋季节长江口及其邻近海域营养盐污染研究[J]. 生态环境, 2006, **15**(2): 276-283.
- [22] 甘义群, 郭永龙. 武汉东湖富营养化现状分析及治理对策[J]. 长江流域资源与环境, 2004, **13**(3): 277-281.
- [23] 杨再福, 施炜刚, 陈立侨, 等. 东太湖生态环境的演变与对策[J]. 中国环境科学, 2003, **23**(1): 64-68.
- [24] 朱广伟. 太湖富营养化现状及原因分析[J]. 湖泊科学, 2008, **20**(1): 21-26.
- [25] Xie L Q, Xie P. Long-term (1956- 1999) dynamics of phosphorus in a shallow, subtropical Chinese lake with the possible effects of cyanobacterial blooms[J]. Water Research, 2002, **36**(1): 343-349.
- [26] 秦伯强. 长江中下游浅水湖泊富营养化发生机制与控制途径初探[J]. 湖泊科学, 2002, **14**(3): 193-202.
- [27] 谢平. 浅水湖泊内源磷负荷季节变化的生物驱动机制[J]. 中国科学(D 辑), 2005, **35**(S2): 11-23.
- [28] 陈建耀, 王亚, 张洪波, 等. 地下水硝酸盐污染研究综述[J]. 地理科学进展, 2006, **25**(1): 34-44.
- [29] 贺锋, 吴振斌, 陶菁, 等. 复合垂直流人工湿地污水处理系统硝化与反硝化作用[J]. 环境科学, 2005, **26**(1): 47-50.
- [30] 卢少勇, 金相灿, 余刚. 人工湿地的氮去除机理[J]. 生态学报, 2006, **26**(8): 2670-2677.
- [31] Bruning-Fann C S, Kaneene J B. The effects of nitrate, nitrite and N-nitroso compounds on human health: a review [J]. Veterinary and Human Toxicology, 1993, **35**(6): 521-538.
- [32] 张庆乐, 王浩, 张丽青, 等. 饮水中硝态氮污染对人体健康的影响[J]. 地下水, 2008, **30**(1): 57-60.

CONTENTS

Analysis of Characteristics of Black Carbon Concentration in Shanghai from 2008 to 2012	WANG Hong-qiang, HE Qian-shan, CHEN Yong-hang, <i>et al.</i> (1215)
Chemical Characteristics and Insoluble Particulates' Surface Morphology of a Snowfall Process in the Southeastern Suburb of Urumqi	LU Hui, WEI Wen-shou, CUI Cai-xia, <i>et al.</i> (1223)
Comparative Study of the Level and Distribution of Polybrominated Diphenyl Ethers and New Brominated Flame Retardants in the Atmosphere of Typical Urban	WU Hui, JIN Jun, WANG Ying, <i>et al.</i> (1230)
Source and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Ambient Air PM ₁₀ from One Coking Plant	DONG Ting, LI Tian-xin, ZHAO Xiu-ge, <i>et al.</i> (1238)
Estimation of Average Traffic Emission Factor Based on Synchronized Incremental Traffic Flow and Air Pollutant Concentration	LI Run-kui, ZHAO Tong, LI Zhi-peng, <i>et al.</i> (1245)
Study on Critical Loads of Sulfur and Nitrogen in the Pearl River Delta	SUN Cheng-ling, XIE Shao-dong (1250)
Hydrogen Sulfide Removal by the Combination of Non-Thermal Plasma and Biological Process	LI Hua-qin, HE Jue-cong, CHEN Zhou-yang, <i>et al.</i> (1256)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Atrazine in Taizi River Basin, China	ZHENG Lei, ZHANG Yi-zhang, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (1263)
Development of a Method for Measuring Dissolved Reactive Phosphorus (DRP) and Dissolved Ferrous Iron in Large Batch in Pore Water Samples of Sediments with Micro-volumes	WANG Yan, ZHU Chun-gang, XU Di, <i>et al.</i> (1271)
Temporal and Spatial Variation of Water Nutrient Level After Exogenous Nutrient Input	FU Ling, ZHAO Kai, WANG Guo-xiang, <i>et al.</i> (1278)
Physical Process Based Risk Assessment of Groundwater Pollution in the Mining Area	SUN Fa-sheng, CHENG Pin, ZHANG Bo (1285)
Hydrogeochemical Characteristics of a Typical Karst Groundwater System in Chongqing	YANG Ping-heng, LU Bing-qing, HE Qiu-fang, <i>et al.</i> (1290)
Investigation of Nitrogen, Phosphorus and Microbial Contamination in Laolongdong Underground River System of Chongqing	LAN Jia-cheng, YANG Ping-heng, REN Kun, <i>et al.</i> (1297)
Effects on Phosphorus Fraction Distribution in Sediment by Roots of <i>Vallisneria natans</i>	LI Zhen-guo, WANG Guo-xiang, ZHANG Jia, <i>et al.</i> (1304)
Modeling Nitrogen Transformation in a Novel Circular-Flow Corridor Wetland	PENG Jian-feng, SONG Yong-hui, YUAN Peng, <i>et al.</i> (1311)
Natural Attenuation of Tetracycline in the Water of Taihu Lake Under Different Environmental Conditions	DUAN Lun-chao, WANG Feng-he, JI Ying-xue, <i>et al.</i> (1318)
Inactivation and Reactivation of Antibiotic-Resistant Bacteria During and After UV Disinfection in Reclaimed Water	HUANG Jing-jing, TANG Fang, XI Jin-ying, <i>et al.</i> (1326)
Photoreactivation of <i>Escherichia coli</i> and <i>Enterococcus faecalis</i> in the Secondary Effluent Disinfected by UV-TiO ₂	WANG Xi-feng, GONG Xin, HU Xiao-lian, <i>et al.</i> (1332)
Stability of C ₆₀ Nanoparticles in Aquatic Systems	FANG Hua, SHEN Bing-bing, JING Jie, <i>et al.</i> (1337)
Fouling Behavior of Sodium Alginate During Microfiltration at Various Ionic Compositions; XDLVO Approach	ZHAO Ying-xu, ZONG Rui-qiang, GAO Xin-yu, <i>et al.</i> (1343)
Enhanced Remediation of 4-Chloronitrobenzene Contaminated Groundwater with Nanoscale Zero-valence Iron (nZVI) Catalyzed Hydrogen Peroxide (H ₂ O ₂)	FU Rong-bing (1351)
Effect of the Coexistence of Chlorobenzene Homologue on Anaerobic Degradation of Hexachlorobenzene	WANG Qi, LIU Hui, JIANG Lin, <i>et al.</i> (1358)
Research on Removal Efficiency of Cd (II) -bearing Wastewater by Sulfate-reducing Biological Filter	WU Xuan, TAN Ke-yan, HU Xi-jia, <i>et al.</i> (1366)
Control Strategies of Nitrogen Removal Process in a Pilot Test of the Southern WWTP Based on the Nitrogen Balance	JIANG Ying-he, LIU Pei-ju, WANG Lei, <i>et al.</i> (1372)
Effect of Simulated Inorganic Anion Leaching Solution of Electroplating Sludge on the Bioactivity of <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	CHEN Yan, HUANG Fang, XIE Xin-yuan (1377)
Microbial Reduction of Cu ²⁺ Mediated by Electroactive Biofilms	LIU Yi, ZHOU Shun-gui, YUAN Yong, <i>et al.</i> (1384)
Copper Recovery from Artificial Bioleaching Lixivium of Waste Printed Circuit Boards	CHENG Dan, ZHU Neng-wu, WU Ping-xiao, <i>et al.</i> (1391)
Difference of Contaminant Composition Between Landfill Leachates and Groundwater and Its Reasons	HE Xiao-song, YU Hong, XI Bei-dou, <i>et al.</i> (1399)
Photochemical Degradation of Landfill Leachate Facilitated by Combined Schwertmannite and H ₂ O ₂	WANG He-ru, SONG Yong-wei, XU Zhi-hui, <i>et al.</i> (1407)
Effects of Operating Parameters on Organic Toxicity of Sludge Treating Synthetic Bisphenol A Wastewater	YANG Na, CHEN Xiu-rong, LIN Feng-kai, <i>et al.</i> (1414)
Comparative Study on Biological Methane Potential and Methanogen Biodiversity in the Anaerobic Digestion of Excess Sludge	DONG Hui-yu, JI Min (1421)
Isolation and Identification of Mn Oxidizing Bacterium <i>Aminobacter</i> sp. H1 and Its Oxidation Mechanism	YAN Ping, JIANG Li-ying, CHEN Jian-meng, <i>et al.</i> (1428)
Nitrate Removal by a Strain of Nitrate-Dependent Fe (II) -Oxidizing Bacteria	WANG Hong-yu, YANG Kai, ZHANG Qian, <i>et al.</i> (1437)
Study on the Iopromide-Degrading Characteristics of Strain <i>Pseudomonas</i> sp. I-24 via Co-Metabolism	XU Bing-jie, GAO Pin, XUE Gang, <i>et al.</i> (1443)
Using Flow Cytometry to Explore the Changes of <i>Sphingomonas</i> sp. GY2B Bacterial Surface Characteristics in the Process of Degrading Phenanthrene	ZHANG Meng-lu, DANG Zhi, WU Feng-ji, <i>et al.</i> (1449)
Research on Characteristic of Interrelationship Between Toxic Organic Compound BPA and <i>Chlorella vulgaris</i>	CHEN Shan-jia, CHEN Xiu-rong, YAN Long, <i>et al.</i> (1457)
Effect of Magnesium Deficiency on Photosynthetic Physiology and Triacylglyceride (TAG) Accumulation of <i>Chlorella vulgaris</i>	WANG Shan, ZHAO Shu-xin, WEI Chang-long, <i>et al.</i> (1462)
Effects of Microcystins on Growth and Antioxidant System of Rice Roots	WANG Wei-min, DENG Yu, ZOU Hua, <i>et al.</i> (1468)
Responses of Soybean Cultivar Dongsheng-1 to Different O ₃ Concentrations in Northeast China	ZHANG Wei-wei, WANG Guang-hua, WANG Mei-yu, <i>et al.</i> (1473)
Development and Succession of Biological Soil Crusts and the Changes of Microbial Biomasses	WU Li, ZHANG Gao-ke, CHEN Xiao-guo, <i>et al.</i> (1479)
Effects of Lead on the Growth and Reproduction of <i>Eisenia fetida</i> with Aged Soils	CHEN Li-hong, LIU Zheng-tao, FANG Zheng, <i>et al.</i> (1486)
Soil Heavy Metal Cadmium Standard Limit and Range of Background Value Research	ZHAO Xiao-jun, LI Si-jin, XU Ren-ji, <i>et al.</i> (1491)
Study on Soil Element Background Values of the Hoh Xil Area in North Tibet	BAI Jian-kun, WANG Jian-li, LI Chao-liu, <i>et al.</i> (1498)
Transfer Characteristic and Source Identification of Soil Heavy Metals from Water-Level-Fluctuating Zone Along Xiangxi River, Three-Gorges Reservoir Area	XU Tao, WANG Fei, GUO Qiang, <i>et al.</i> (1502)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Ecological Risk Analysis for Soil Around Haining Electroplating Industrial Park	LI Jiong-hui, WENG Shan, FANG Jing, <i>et al.</i> (1509)
Sources and Spatial Distribution of Typical Heavy Metal Pollutants in Soils in Xihu Scenic Area	ZHANG Hai-zhen, TANG Yu-li, LU Jun, <i>et al.</i> (1516)
Distribution and Assessment of Mercury in the Ambient Soil of a Municipal Solid Waste Incinerator	XIE Hui-ting, ZHANG Cheng-zhong, XU Feng, <i>et al.</i> (1523)
Phosphorus Adsorption Characteristics of Soils and Sediments Surrounding Dishui Lake in Shanghai	ZHUGE Xiang-zhen, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i> (1531)
Impact of SDBS/Na ⁺ on Red Soil Colloidal Stability	TANG Ying, LI Hang, ZHU Hua-ling, <i>et al.</i> (1540)
Effects of Stabilization Treatment on Migration and Transformation of Heavy Metals in Mineral Waste Residues	ZHAO Shu-hua, CHEN Zhi-liang, ZHANG Tai-ping, <i>et al.</i> (1548)
Study on a New Method of Fast Monitoring Toxicity of Cd ²⁺ by Algal in Water	DUAN Jing-bo, LIU Wen-qing, ZHANG Yu-jun, <i>et al.</i> (1555)
Immunosensor for Rapid Detection of 1,3-Dinitrobenzene	LONG Feng, SHI Han-chang, WANG Hong-chen, <i>et al.</i> (1561)
Mg/Al Layered Double Hydroxides Prepared by Microwave-Assisted Co-Precipitation Method for the Removal of Bromate	ZHONG Qiong, LI Huan (1566)
Discussion on Several Key Points of Decision Support System for Remediation of Contaminated Sites	LIAO Xiao-yong, TAO Huan, YAN Xiu-lan, <i>et al.</i> (1576)
A Review of Multi-Scale Studies on Spatial Variation of the Lead (Pb) Concentration in Urban Soils	YANG Meng, LI Feng-ying, DIAO Yi-wei, <i>et al.</i> (1586)
Review on Characteristics and Detecting Assay of Bacterial Endotoxin Contamination in Water Environment	ZHANG Can, LIU Wen-jun, ZHANG Ming-lu, <i>et al.</i> (1597)
Advances in Molecular Mechanism of Bacterial Reduction of Hexavalent Chromium	LI Dou, ZHAO You-cai, SONG Li-yan, <i>et al.</i> (1602)
Anaerobic Membrane Bioreactors for Treating Agricultural and Food Processing Wastewater at High Strength	WEI Yuan-song, YU Da-wei, CAO Lei (1613)

《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)

2014年4月15日 35卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 4 Apr. 15, 2014

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