

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第1期

Vol.38 No.1

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

南京北郊冬季挥发性有机物来源解析及苯系物健康评估	张玉欣, 安俊琳, 林旭, 王俊秀, 师远哲, 刘静达 (1)
南京冬季重污染过程中黑碳气溶胶的混合态及粒径分布	蒋磊, 汤莉莉, 潘良宝, 刘丹彤, 花艳, 张运江, 周宏仓, 崔玉航 (13)
基于 GAM 模型分析影响因素交互作用对 PM _{2.5} 浓度变化的影响	贺祥, 林振山 (22)
模拟烹饪油烟的粒径分布与扩散	李双德, 徐俊波, 莫胜鹏, 李文辉, 高佳佳, 曹亚裙, 陈运法 (33)
基于光谱分析仪的通量-梯度法测量小型池塘水-气界面温室气体交换通量	赵佳玉, 张弥, 肖薇, 王伟, 吴红艳, 张圳, 肖启涛, 胡诚, 于洲, 曹正达, 徐敬争, 刘寿东, 李旭辉 (41)
闽江口短叶茳茅 + 芦苇沼泽湿地大、小潮日土壤间隙水溶解性 CH ₄ 与 CO ₂ 浓度日动态	谭立山, 杨平, 何露露, 黄佳芳, 胡智强, 全川 (52)
河南鸡冠洞 CO ₂ 季节和昼夜变化特征及影响因子比较	张萍, 杨琰, 孙喆, 梁沙, 张娜, 田宁, 李建仓, 凌新有, 张志钦 (60)
蠡湖表层沉积物荧光溶解性有机质 (FDOM) 荧光光谱特征	陈俊伊, 王书航, 姜霞, 黄晓峰, 赵丽 (70)
滇池沉积物有机质沉积特征与来源解析	韩秀秀, 黄晓虎, 余丽燕, 杨浩, 黄昌春, 黄涛, 余艳红, 罗玉 (78)
紫色土小流域浅层井水中胶体颗粒的季节变化	张维, 唐翔宇, 鲜青松 (87)
太湖湖滨带春季悬浮物沉降特征与水体营养盐响应	祁闯, 王国祥, 吴馨婷, 许晓光, 韩睿明, 吴松峻 (95)
基于 LDI 的土地利用类型与湿地水质的相关性: 以苏州太湖三山岛国家湿地公园为例	杨朝辉, 苏群, 陈志辉, 白俊武, 钱新强, 张志敏 (104)
基于分位数回归的洱海藻类对氮、磷及水温的响应特征	陈小华, 李小平, 钱晓雍, 胡双庆 (113)
深水型水库藻形态功能组 (MBFG) 的季节演替特征	杨毓, 卢金锁, 张颖 (121)
三峡库区水体中可溶性 C、N 变化及影响因素	范志伟, 郝庆菊, 黄哲, 柴雪思, 江长胜 (129)
三峡库区古夫河小流域氮磷排放特征	华玲玲, 李文超, 翟丽梅, 崔超, 刘宏斌, 任天志, 张富林, 雷秋良 (138)
黄土高原坝系流域干湿季交替下氮输出特征及其源解析: 以羊圈沟为例	贾璐杰, 高扬, 陈维梁, 郝卓, 汪亚峰, 陈利顶 (147)
5 种沉水植物的氮、磷吸收和水质净化能力比较	金树权, 周金波, 包薇红, 陈君, 李丹丹, 李洋 (156)
骆马湖表层水体中 32 种 PPCPs 类物质的污染水平、分布特征及风险评估	张芹, 张圣虎, 汪贞, 郭敏, 刘济宁, 石利利, 古文 (162)
大冶湖表层沉积物-水中多环芳烃的分布、来源及风险评价	张家泉, 胡天鹏, 邢新丽, 郑煌, 张丽, 占长林, 刘红霞, 肖文胜, 祁士华 (170)
pH 和络合剂对五价锑在水钠锰矿和水铁矿表面吸附行为的影响	王华伟, 李晓月, 李卫华, 孙英杰 (180)
紫外辐射对高岭土混凝过程的影响机制	王文东, 王昌鑫, 刘荟, 韩雨 (188)
水环境中溶解态腐殖酸对锌抗甲状腺激素干扰效应的影响	艾扬, 孔东东, 于畅, 沈扬, 李剑 (195)
污水中常见违禁药物分析方法优化及验证	高婷婷, 杜鹏, 徐泽琼, 杨军, 张华方, 李喜青 (201)
阴极电场增强活性炭纤维-臭氧体系去除水中硝基苯	赵纯, 张帅, 周宇, 李琨, 周炜, 黎鹏宇, 杨广, 孙志华, 郑怀礼 (212)
碳纳米管改性 PVDF 中空纤维超滤膜处理二级出水抗污染性能研究	王利颖, 石洁, 王凯伦, 关羽琪, 郭瑾 (220)
曝气生物滤池 (Fe ²⁺) -臭氧组合工艺强化处理石化二级出水	徐敏, 吴昌永, 周岳溪, 郭明昆, 王翼 (229)
4 种反应器中厌氧氨氧化菌完整梯烷脂的特异性	王晗, 方芳, 李凯, 邢晖, 郭劲松, 陈猷鹏, 曾前松 (238)
疏自养填充床反应器降解水中高浓度高氯酸盐的特性及菌群分析	张超, 陶华强, 宋圆圆, 逯彩彩, 郭延凯, 廉静, 郭建博 (247)
CANON 在 SBAF 中的快速启动及其微生物特征	刘竹寒, 岳秀, 于广平, 金腊华, 唐嘉丽, 吉世明 (253)
高浓度游离氨冲击负荷对生物硝化的影响机制	季民, 刘灵婕, 翟洪艳, 刘京, 苏晓 (260)
有机物对亚硝化颗粒污泥中功能菌活性的影响	王书永, 钱飞跃, 王建芳, 沈耀良 (269)
一种新型生物膜法除磷工艺中聚磷菌的富集培养过程	郑莹, 潘杨, 周晓华, 廖炬弘, 孟璇, 夏健伟 (276)
应用于矿山修复的高效菌株鉴定与溶岩机制: 基于增强回归树分析	吴雁雯, 张金池, 郭晓平, 刘鑫 (283)
镉对铜绿假单胞菌降解水体中壬基酚的影响	史广宇, 程媛媛, 施维林 (294)
华北平原不同农田管理措施对于土壤碳库的影响	石小霞, 赵诣, 张琳, 吴文良, 孟凡乔 (301)
缙云山柑橘林土壤微生物磷脂脂肪酸 (PLFAs) 及酶活性的季节变化特征	李南洁, 曾清苹, 何丙辉, 周飞 (309)
中条山十八河铜尾矿库微生物群落组成与环境适应性	刘晋仙, 李鑫, 景炬辉, 贾彤, 刘兴港, 王小云, 柴宝峰 (318)
安徽省部分城市土壤中全氯化物空间分布及来源解析	李法松, 倪卉, 黄涵宇, 徐志兵, 张倩, 李长霞, 黄文秀, 金陶胜 (327)
不同温度制备的生物质炭对土壤有机碳及其组分的影响: 对土壤活性有机碳的影响	赵世翔, 于小玲, 李忠徽, 杨艳, 刘丹, 王旭东, 张阿凤 (333)
水分管理模式与土壤 Eh 值对水稻 Cd 迁移与累积的影响	田桃, 曾敏, 周航, 徐璐, 杨文强, 辜娇峰, 邹佳玲, 张平, 彭佩钦, 廖柏寒 (343)
砒、镉单一及复合污染胁迫下土壤生态功能稳定性的影响机制	陈欣瑶, 杨惠子, 李敏, 牛晓丛, 苏雨轩, 张园 (352)
生物炭、蒙脱石及其混合添加对复合污染土壤中重金属形态的影响	高瑞丽, 唐茂, 付庆灵, 郭光光, 李晚, 胡红青 (361)
某电镀厂六价铬污染土壤还原稳定化试剂筛选与过程监测	李培中, 吕晓健, 王海见, 杨苏才, 魏文侠, 宋云 (368)
多孔 SBA-15 颗粒对 Cd(II) 的吸附缝合及其对土壤 Cd(II) 的修复潜力	黄辉, 宁西翠, 郭瞻宇, 郭堤, 张增强, 李荣华, 王力, Ali Amjad (374)
卤系阻燃剂在东江鱼体中的生物富集	何明靖, 杨婷, 李琦, 王登祥, 赵佳渊 (382)
广州市蔬菜中重金属污染特征研究与评价	陈志良, 黄玲, 周存宇, 钟松雄, 王欣, 戴玉, 蒋晓璐 (389)
蔬菜镉 (Cd) 富集因子变化特征及其影响因素	杨阳, 李艳玲, 陈卫平, 王美娥, 彭驰 (399)
施用污泥堆肥品对土壤和植物总汞及甲基汞的影响	余亚伟, 杨雨洽, 张成, 易建婷, 安思危, 王定勇 (405)
大气臭氧污染对冬小麦气孔吸收通量的影响机制及其时空格局	赵辉, 郑有飞, 曹嘉晨, 徐静馨, 黄积庆, 袁月 (412)
《环境科学》征稿简则 (12) 《环境科学》征订启事 (194) 信息 (21, 51)	

太湖湖滨带春季悬浮物沉降特征与水体营养盐响应

祁闯¹, 王国祥^{2,3*}, 吴馨婷², 许晓光^{2,3}, 韩睿明^{2,3}, 吴松峻²

(1. 南京师范大学地理科学学院, 南京 210097; 2. 南京师范大学环境学院, 南京 210097; 3. 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 江苏省环境演变与生态建设重点实验室, 江苏省水土环境生态修复工程实验室, 南京 210023)

摘要: 为研究湖滨带悬浮物沉降过程中水体营养盐时空分布状况, 在太湖西岸湖滨带典型区域进行原位沉降实验, 计算了沉降量和沉降通量, 并对沉降过程中 TP、TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 测定分析。结果表明, 太湖西岸湖滨带沉降通量表现为人工芦苇区 > 近岸无植被区 > 自然芦苇区 > 远岸无植被区, 平均沉降通量分别为 $(1\,383.40 \pm 925.60)$ 、 $(1\,208.67 \pm 743.50)$ 、 (278.72 ± 142.53) 、 $(245.58 \pm 154.25) \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, 沉降第 6 d 以后沉降量稳定上升, 沉降速率大于分解速率; 经过持续 15 d 野外沉降实验观测, 沉降过程中近岸带的 TP 含量是远岸带的 2~3 倍, 且沉积物捕获器内 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量出现显著的差异 ($P < 0.01$); 沉降量与水体 TN 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量呈显著相关 ($P < 0.01$, $n = 42$), 表明沉降量的增加会导致上覆水体 TN 与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量增加; TN 与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 相关系数为 0.84, 显示沉降量的增加可能加速氮素不同形态间相互转化, 这一现象在当前太湖湖泛治理中应当予以重视。

关键词: 太湖; 湖滨带; 沉降通量; 沉积物捕获器; 营养盐

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)01-0095-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201607102

Deposition Characteristics of Suspended Solids and the Response of Dissolved Nutrients in Spring in the Western Lakeside of Taihu Lake

QI Chuang¹, WANG Guo-xiang^{2,3*}, WU Xin-ting², XU Xiao-guang^{2,3}, HAN Rui-ming^{2,3}, WU Song-jun²

(1. School of Geography Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210097, China; 2. School of Environment, Nanjing Normal University, Nanjing 210097, China; 3. Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Jiangsu Key Laboratory of Environmental Change and Ecological Construction, Institute of Water Environmental Eco-remediation, Nanjing 210023, China)

Abstract: To reveal the spatiotemporal characteristics of nutrients in the deposition process of suspended solids in lakeside zone, *in situ* deposition tests were performed in the western lakeside of Taihu Lake, and the contents of TP, TN, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$ were measured and analyzed. The results showed that the deposition fluxes in the western lakeside of Taihu Lake ranked as follows: artificial reed areas > non-vegetation nearshore areas > natural reed areas > non-vegetation offshore areas, with their average values of $(1\,383.40 \pm 925.60)$, $(1\,208.67 \pm 743.50)$, (278.72 ± 142.53) , $(245.58 \pm 154.25) \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, respectively. From the 6th day, the deposition volume steadily increased, with the deposition rate larger than the decomposition rate. Through the 15-day continuous *in situ* observation, the content of TP in nearshore zone was 2-3 folds larger than that of offshore zone, and the content of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ was significantly different from that of $\text{NO}_3^-\text{-N}$ in the settlement bottle ($P < 0.01$). The deposition volume was significantly and positively correlated to both TN and $\text{NH}_4^+\text{-N}$ contents in the water column ($P < 0.01$, $n = 42$), suggesting that the TN and $\text{NH}_4^+\text{-N}$ contents in the overlying water increased with the deposition fluxes. The correlation coefficient between TN and $\text{NH}_4^+\text{-N}$ was 0.84, implicating that the increase of deposition flux may accelerate the mutual transformation between different forms of nitrogen. These findings should be taken into account in the current control of black blooms and nutrient management in Taihu Lake.

Key words: Taihu Lake; lakeside; deposition flux; settling bottle; nutrient

湖泊底泥是湖泊生态系统的重要组成部分, 在以沉降和沉积为主的情况下, 它是湖泊营养盐及污染物的“汇”, 吸纳湖水中的物质; 在以再悬浮和释放为主的情况下, 它是湖水营养盐及污染物的“源”, “源-汇”动态变化及其生态意义使湖泊底泥的研究成为热点。

底泥再悬浮过程是营养盐在沉积物和上覆水体的再分配的过程^[1], 自 20 世纪 80 年代起, 国内外学者就开始对沉降再悬浮这一现象的发生机制进行了

关注^[2-5]。黄宇波等^[6]通过模拟东湖通道施工导致的底泥再悬浮过程, 发现在一定范围内的底泥再悬浮通过增加水体营养盐含量的方式提高水体初级生产力, 较大含量的再悬浮底泥则通过影响水体光强

收稿日期: 2016-07-16; 修订日期: 2016-08-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(41173078); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07101-008-02); 江苏省太湖水环境综合治理科研项目(JSZC-G2014-212)

作者简介: 祁闯(1991~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水环境生态修复, E-mail: qichuangnjnu@163.com

* 通信作者, E-mail: wangguoxiang@njnu.edu.cn

降低初级生产力. 张庆强等^[7]对引滦输水过程中悬浮物的沉降迁移特征进行了研究,发现影响水体中悬浮物沉降速率的主要因素为悬浮颗粒粒径,影响悬浮物迁移量的主要因素为悬浮物的初始浓度. 钱嫦萍等^[8]运用模拟实验研究沉积物再悬浮作用对沉积物水界面三态氮和可溶性磷交换行为的影响,结果表明在沉积物不断发生再悬浮的过程中,水体中三态氮的含量明显增加. 文献^[9~11]利用波浪水槽和再悬浮发生装置模拟再悬浮和沉降过程及其对水质的影响,发现再悬浮促进了沉积物营养盐的释放,使上覆水体中 N、P 含量升高. Gons 等^[12]通过对 Loosdrecht 湖调查发现,再悬浮过程中向上覆水体中释放的颗粒有机碳是浮游植物白天固定碳的 12~15 倍. Søndergaard 等^[13]通过对丹麦的阿勒湖调查发现,动力作用引起底泥再悬浮使水体营养盐浓度增加,可以达到扰动前的 20~30 倍数量级. 在已有的研究中,人们往往关注于再悬浮过程对营养盐释放规律^[14]和营养盐控制^[15]的研究,而忽视了风浪过后沉降过程所产生的环境效应,显然缺乏研究过程的完整性,一定程度上影响了人们对界面物质动态交换规律的认识^[16],而且多集中在室内模拟实验,无法保持模拟实验所用的沉积物的现场原状,且对风浪的扰动模拟与野外实际情况相差甚远. 因此,本实验选取太湖西岸符渚港至毛渚港湖滨带为研究区域,分析了自然芦苇、人工芦苇和无水生植被分布区域悬浮物沉降特征和空间分布情况,以及沉降过程中水体营养盐的变化特征,以期对太湖湖泛防治及湖泊治理和管理提供更好的支持.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究区位于太湖西岸符渚港至毛渚港段(如图1),多存在堤下“漕沟”(修建太湖大堤时取土而成的深槽). 欧渚港往南沿岸区域内存在部分原位芦苇群丛(自然芦苇区),但由于底质较薄以芦苇为主的植被覆盖率较低,部分区域芦苇已经开始消亡. 2010 年该区域进行了基底修复、树立消浪桩和水生植被修复^[17]. 将其基底深挖,补植芦苇,丛间距 1 m,植物补种区宽约 17 m(人工芦苇区). 然而,近年来受主导风向东南风的影响,符渚港至毛渚港湖滨带区域水华藻类和水生高等植物残体大量堆积,淤积厚度有时达 1 m 左右,黑色有机质和水分含量高,有时甚至散发着刺激性气味,直接影响湖区居民生存和生产活动.

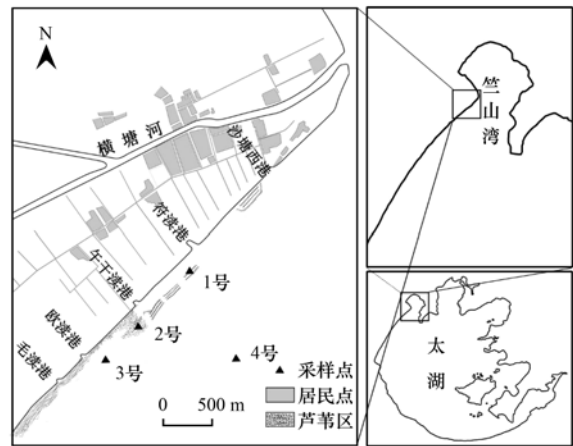


图1 采样点位示意

Fig. 1 Schematic of sampling sites

1.2 点位布设与样品采集

在符渚港至毛渚港沿岸选取 4 类区域:人工芦苇区(1号)、自然芦苇区(2号)、近岸无植被区(3号)、远岸无植被区(4号),每个点位各安装 12 组沉积物捕获器,采样点概况如表 1 所示. 在每个点位固定 3 根木桩(d 为 10~15 cm, h = 4 m),相互间隔 150 cm. 按照沉积物捕获器设计要求^[18],沉积物捕获器选用高径比为 5:1(d = 10 cm, h = 50 cm)的有机玻璃管(底部封闭,上部开口),并将其用铁架固定在木桩上. 每个铁架安装 4 组沉积物捕获器,并置于湖底(如图 2).

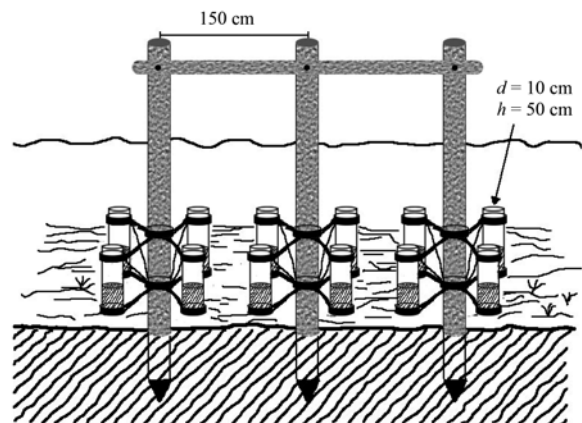


图2 实验装置示意

Fig. 2 Schematic diagram of experimental set-up

2016 年 4 月 6 日 13:30 将所有沉积物捕获器同时置于湖底进行野外沉降实验直至 4 月 21 日. 沉积物捕获器分 12 次收回,时间间隔为 24 h,其中因有两次大风浪未进行采样,另外,2 号点的沉积物捕获器丢失 3 组,因而只有 9 d 的数据. 实验采集沉积物捕获器内外的水样,并将沉积物捕获器放入冷藏箱中 4℃ 保存,运回实验室处理. 用彼得森采泥器

抓取样点附近的表层泥,除去植物残体和贝类等物质,部分用于测定有机质含量,剩余部分冷冻干燥后,使用玛瑙研磨充分研磨后过 100 目筛,放置于阴凉干燥处备用.

表 1 采样点位概况

Table 1 Rough guide to positions of sampling sites

编号	经度	纬度	离岸距离/m	面积/hm ²	平均水深/m	生境描述
1	120°00'45.65"	31°24'47.93"	100	0.8	0.8~1	有漕沟分布,外围有消浪桩,人工芦苇群丛呈条带状分布
2	120°00'28.09"	31°24'30.81"	100	1.2	0.8~1	无漕沟分布,外围有消浪桩,自然芦苇群丛芦苇杂乱分布
3	120°00'20.56"	31°24'24.47"	100	2.0	0.8~1.2	无漕沟分布,外围无消浪桩,无水生植被分布
4	120°01'02.22"	31°24'14.44"	1500	15	2.1~2.4	无漕沟分布,外围无消浪桩,无水生植被分布

1.3 测试项目与分析方法

沉积物捕获器内外水样测定的项目有 TP、TN、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N,取样时同时测定现场的风速、风向、浊度、DO、Eh 和 EC 等. 沉积物捕获器内的沉积物测定的项目有含水量、有机质含量. 总氮用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定 (GB 11894-89); 总磷用钼酸铵分光光度法测定 (GB 11893-89); 氨氮和硝态氮用 Auto Analyzer 3 连续流动分析仪 (德国 Bran Luebbe 公司) 测定.

1.3.1 沉降量

沉降量计算参见文献[19],将沉积物捕获器内样品装入 100 mL 离心管,以 3 000 r·min⁻¹ 离心 10 min,然后轻轻倒掉上部的澄清液,用 10 mL 去离子水清洗原样瓶,然后再以 3 000 r·min⁻¹ 的速度离心 10 min,尽可能把沉积物集中到离心管底部,在 105~110℃ 干燥至恒重,然后放在干燥器中冷却并称重记为 A,按式(1)计算沉降量(g).

沉降量 = A - B (1)

式中,A 为离心管重量加沉降物重量(g); B 为离心管重量(g).

1.3.2 沉降通量

沉积物捕获器的半径 r 为 0.05 m,底部面积 S 为 $\pi r^2 = 7.85 \times 10^{-3} \text{ m}^2$,沉降通量 [$\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$] 的计算见式(2).

沉降通量 = $W_{\mp} / (S \times d)$ (2)

式中, $W_{\mp}$ 为沉降量(g); S 为沉积物捕获器的底面积(m^2); d 为沉积物捕获器放置的时间(d).

1.4 数据分析

每个样品设置 3 个重复,利用 Excel 和 Origin 9.0 对实验各类数据及资料进行汇总整理,把获取的信息分类统计;运用 ArcGIS 10.2 软件,参照谷歌卫星图像数字化研究区示意与调查点分布;采用 SPSS 19.0 软件进行单因素方差分析 (one way ANOVA) 和相关性分析. 其中 $P < 0.05$ 设定为显著性水平, $P < 0.01$ 设定为极显著性水平.

2 结果与讨论

2.1 沉降通量的时空变化

由图 3 可以看出,沉积物收集器放置时间越长,沉降量具有显著增加的趋势 ($P < 0.05$),不同点位的沉降量大小分别是人工芦苇区(1 号) > 近岸无植被区(3 号) > 自然芦苇区(2 号) > 远岸无植被区(4 号). 由于太湖风向和风速等气象条件逐日变化较大,实验期间风速范围在 $0.6 \sim 4.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,各点位的沉降通量差异也较大,1~4 号点平均沉降通量分别为 $(1\,383.40 \pm 925.60)$ 、 $(1\,208.67 \pm 743.50)$ 、 (278.72 ± 142.53) 、 $(245.58 \pm 154.25) \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$,与李一平^[20]的研究结果相近,呈现出由近岸向远岸下降的趋势. 同样是芦苇分布区,人工芦苇区的沉降通量是自然芦苇区的 5 倍,近岸无植被区的沉降通量是远岸区的 5 倍. 由于太湖现代的泥沙沉积作用主要是沿着湖岸地带及湖湾地区,主要有以下几种类型:吞吐流沉积、风生流及风暴流沉积和湖湾沉积^[21]. 太湖西岸毛茆港沿岸,属于典型的风生沿岸流沉积,它是风生沿岸流与波浪交积作用的结果. 受芦苇群丛的阻隔,蓝藻水华及水草残体从湖区随风生流进入芦苇群丛内,难以回到湖区,而堆积在芦苇群丛内^[17,22]. 此外挺水植物芦苇的根系具有固着作用,其出水部分对风浪有削弱作用^[23],且人工芦苇群丛呈现条带状分布,空间又较为封闭,而自然芦苇群丛分布较零散,芦苇群丛密度低于人工芦苇群丛,所以蓝藻水华及水草残体在人工芦苇区的沉降淤积量较大. 因此可以说芦苇群丛是湖滨带“储污纳垢”的主要场所,很可能是湖泛的主要源头. 在常年主导风向东南风的影响下,近岸带的风驱长度大于湖心区,此外近岸无植被区由于地形条件的限制,反射流作用较强,促进了悬浮物的起悬和沉降^[24],故导致近岸无植被区的沉降通量远高于远岸区.

此外,在实验的第 7 d 近岸带的 3 个点位(1、

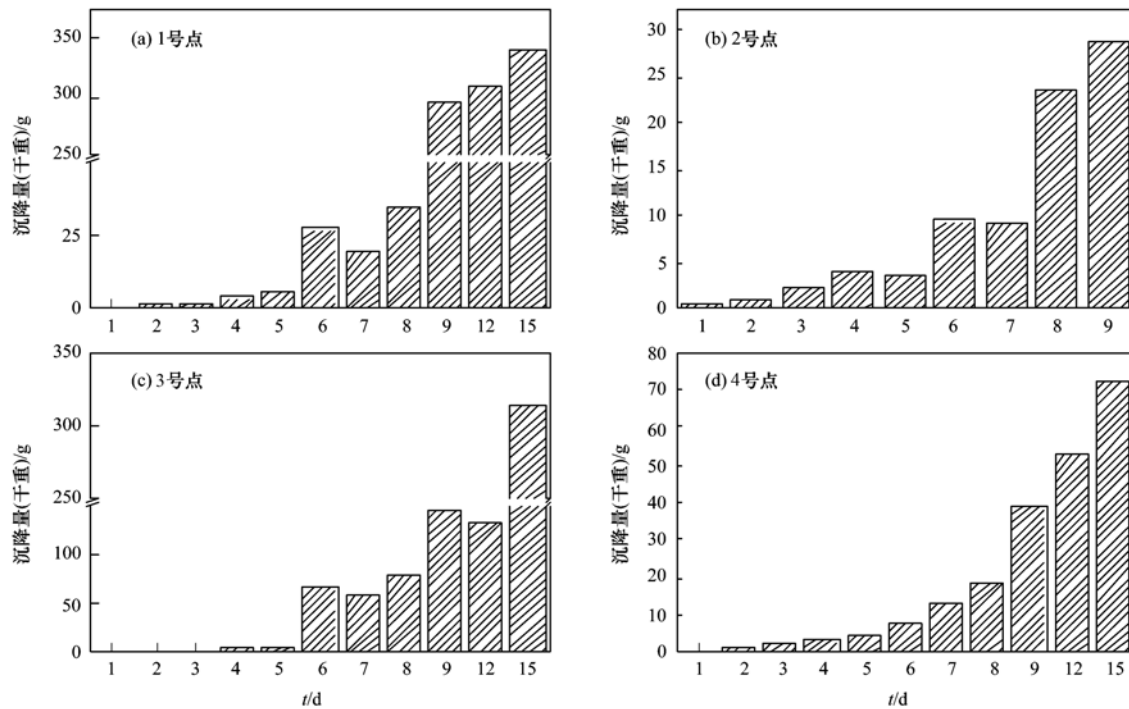


图3 不同点位沉降量

Fig. 3 Settlement of different sample sites

2、3号)沉降量出现轻微的下降. 这种差异主要是由于近岸带在受主导风向东南风的影响下堆积了大量的蓝藻和其他浮游植物,死亡沉降到沉积物收集器内发生分解,已有研究表明蓝藻碎屑分解随时间变化显著,一般在第3~7 d蓝藻碎屑剩余物质干重逐渐趋于稳定^[25, 26]. 因此,这可能与瓶内沉降物质分解有关,由于实验后期沉降速率大于其分解速率,所以呈现出沉降量增大的趋势,故太湖野外沉降实验观测周期至少为一周.

2.2 沉降过程中水体营养盐的变化特征

2.2.1 TP和TN的变化特征

从沉降过程中TP和TN的变化情况看(图4和图5),太湖春季水体氮磷含量日变化幅度较大,1~4号点TP含量变化范围分别是0.18~0.76、0.21~0.82、0.15~1.13和0.11~0.63 mg·L⁻¹,TN含量变化范围分别为4.18~5.78、3.41~8.10、3.24~9.74和2.82~6.26 mg·L⁻¹,这与朱琳^[27]和吴筱清^[28]的研究结果较为一致(TP平均浓度0.36 mg·L⁻¹,TN平均浓度3.33 mg·L⁻¹). 近岸带的TP含量是远岸带的2~3倍,而且近岸带沉积物捕获器内外TP含量的差异远高于远岸带捕获器内外TP含量差异. 由于太湖全年以E和ESE向为主导风向,当风向为偏东风时,对太湖西岸的影响最大,此段区域由于其特殊的地理位置,正是受风力影响最

大的区域^[27],常年的盛行风带来了较多污染物,导致该区域水质处于重度污染状态. 此外,该区域居住有大量居民,人类活动较为频繁,城镇生活污染增加N、P等营养元素输入,胡开明等^[29]研究结果表明西太湖区域城镇生活污染物入河量所占的比例最大,各类污染物均在35%~50%之间. 在浅水湖泊中,湖泊沉积物容易受到波浪、湖流、疏浚以及船只航行等外力共同作用,从而反复地发生再悬浮过程,造成营养盐在沉积物和水体之间发生迁移,最终导致水体中营养盐浓度骤然上升^[30~32].

人工芦苇区(1号)沉积物捕获器内外的氮磷含量差异远高于其他点位. 究其原因可能有两方面:其一沉积物质差异,导致降解释放量的差异;其二是外部水体中氮磷含量本身差异大,从而引起捕获器内外氮磷含量差异较大. 由于该区域近岸带的沉降物质主要以蓝藻水华和水草残体为主,有机质含量在8.30%~12.65%,而远岸带的沉降物质主要以悬浮泥沙为主,有机质含量在1.60%~4.87%. 此外实验期间沉积物捕获器外水体中TP含量变化幅度为0.5 mg·L⁻¹,TN含量变化幅度为3.5 mg·L⁻¹. 已有研究表明水华衰亡分解会促进沉积物TN和TP的释放^[33~35]. 朱梦圆等^[36]研究结果表明,水华衰亡分解引起藻型区沉积物TN和TP平均释放改变量分别为31.10 g·(m²·d)⁻¹和0.75

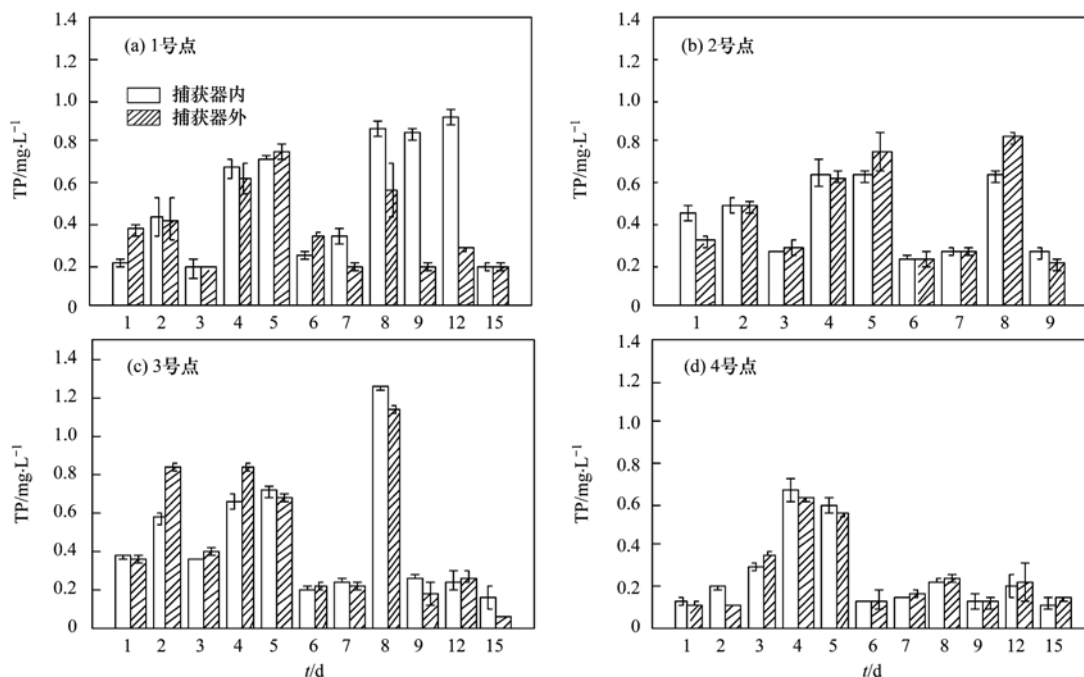


图4 不同点位 TP 分布特征

Fig. 4 TP distribution characteristics at different sampling sites

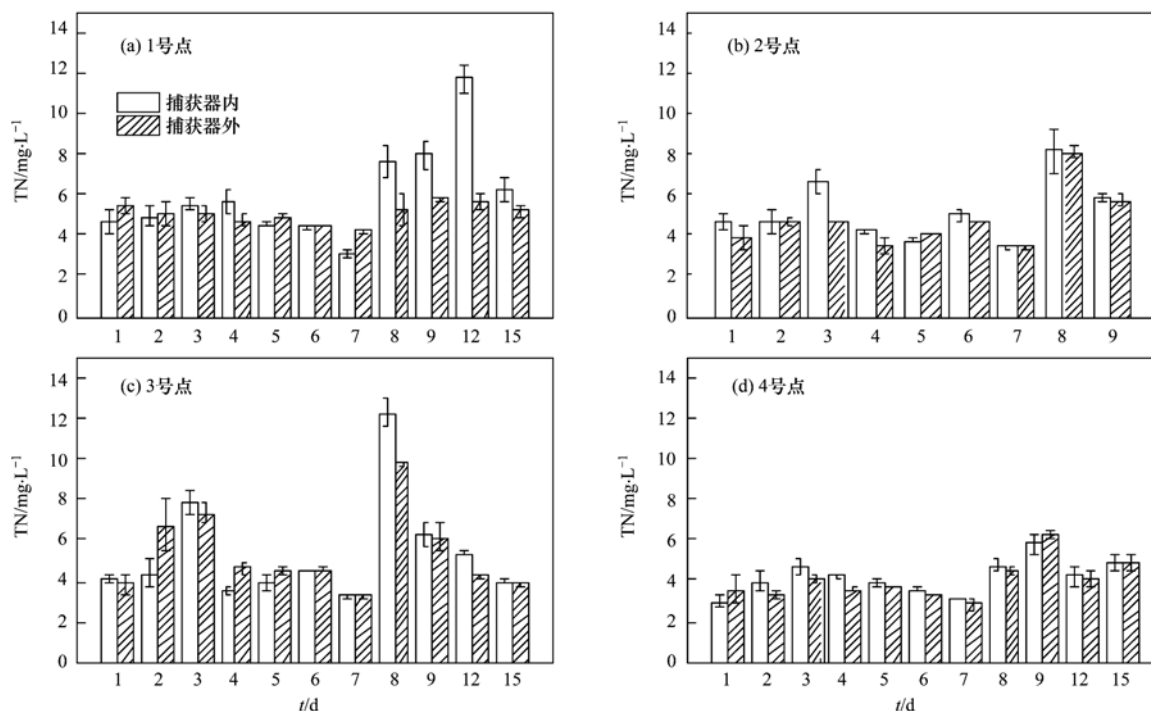


图5 不同点位 TN 分布特征

Fig. 5 TN distribution characteristics at different sampling sites

$\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, 故沉降物质的差异是导致沉积物捕获器内外氮磷含量差异的主要原因。

2.2.2 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 的时空变化

由图6和图7可以看出,沉降过程中1~4号点沉积物捕获器内水体 NH_4^+ -N的平均含量分别为

1.52、0.70、1.05 和 0.42 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, NO_3^- -N的平均含量分别为 2.01、2.19、1.97 和 3.45 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 而沉积物捕获器外水体 NH_4^+ -N的平均含量分别为 1.23、0.70、0.83 和 0.32 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, NO_3^- -N的平均含量分别为 2.69、1.98、1.87 和 3.41 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 除人工芦

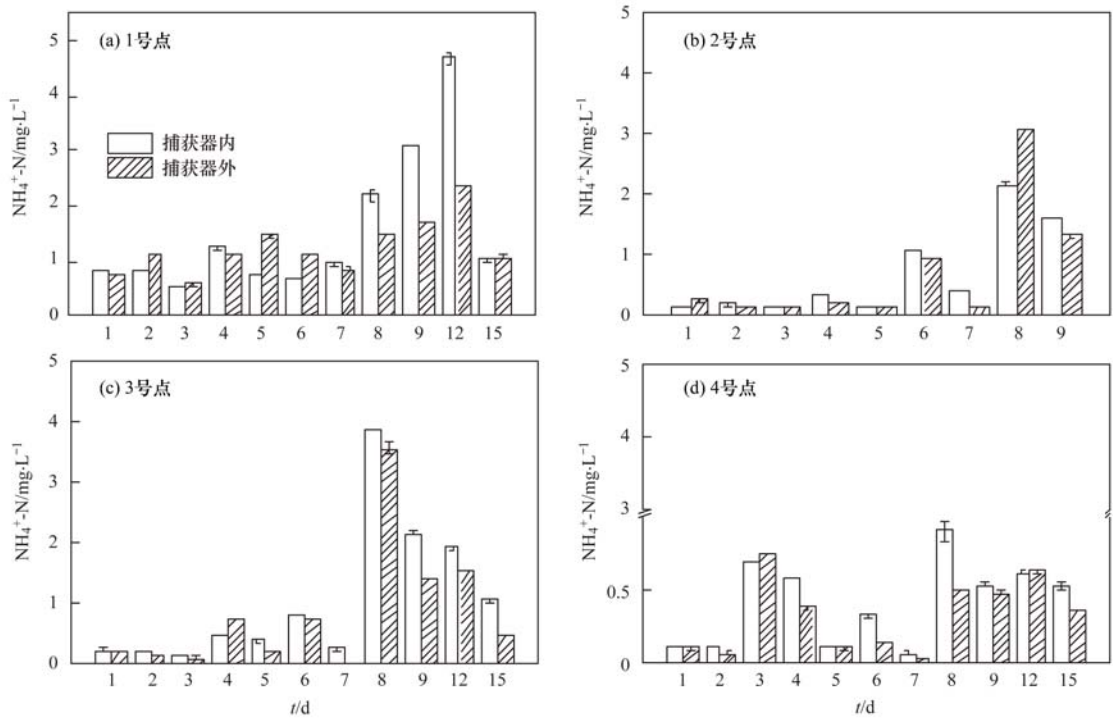


图 6 不同点位氨氮分布特征

Fig. 6 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ distribution characteristics at different sampling sites

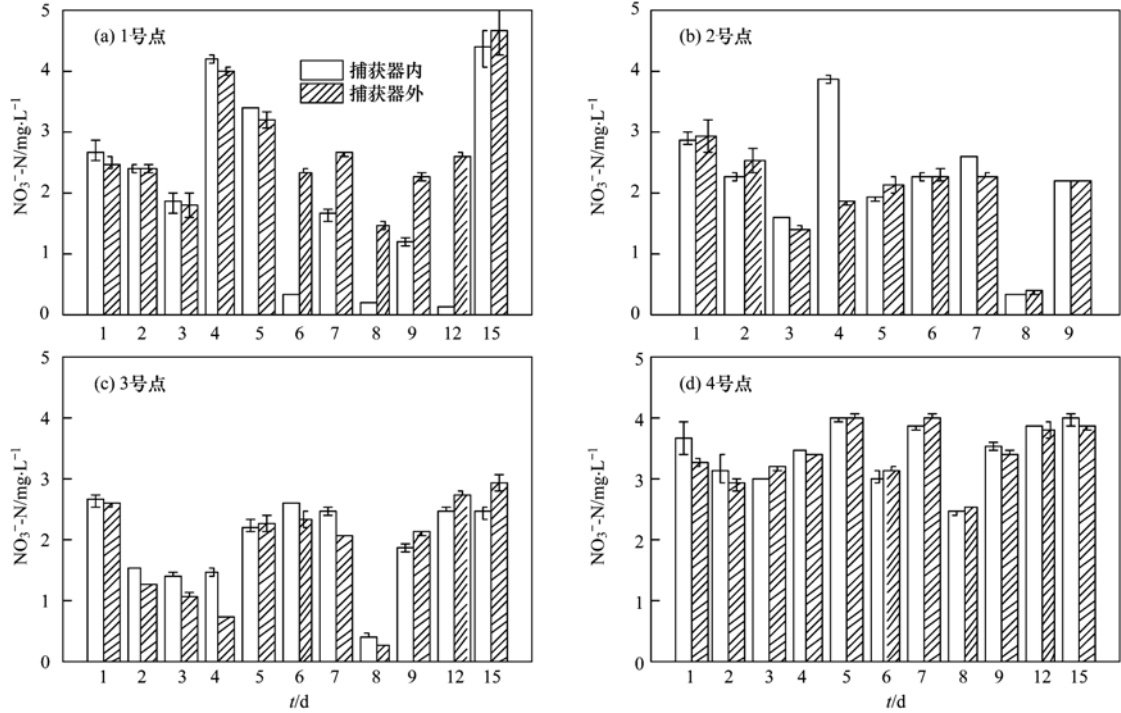


图 7 不同点位硝氮分布特征

Fig. 7 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ distribution characteristics at different sampling sites

苇区内氮磷含量偏高,结果与卢少勇等^[37]、王秋娟^[38]的研究结果基本一致 ($\text{NH}_4^+\text{-N}$ 均值 $1.26 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量在 $0.11 \sim 1.69 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)。各点位氨氮含量基本上都低于 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量,这可能是由

于实验期间正是藻类开始暴发时期,而水华微囊藻优先吸收 $\text{NH}_4^+\text{-N}$,只有在 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 被消耗殆尽的情况下, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 才会被利用进行生长^[39],所以各点位均表现出 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量高于 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量。

氨氮和硝氮能够通过分子扩散迅速在溶液介质中迁移,是沉积物和上覆水体之间氮素交换的主要方式,对湖泊环境和生态具有重要的意义^[40, 41]. 太湖中的氮以无机氮为主, NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 在无机氮中占了主要部分,其中又以 NO_3^- -N 居多^[42]. 调查发现随着沉降时间的增加,沉积物捕获器内外 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 含量在 5% 的显著性水平下表现出显著的差异,沉积物捕获器内水体中 NH_4^+ -N 含量逐渐高于捕获器外水体,而 NO_3^- -N 含量却表现出捕获器外水体低于捕获器内水体. 这是由于沉积物捕获器内的沉积物主要以藻类和水草残体为主,有机质大量积累并分解,使得 DO 含量大幅降低,瓶内的沉积物在缺氧或厌氧的环境中进行的,有机质含量由 12.30% 降低至 8.75%,含水率由 71.76% 降低至 56.43%,因而受到沉积物含水率和通气状况的制约,反硝化作用占主导作用,这与已有的研究结果一致^[43~45],因此到了实验后期沉积物捕获器内 NH_4^+ -N 含量逐渐升高,而 NO_3^- -N 含量呈现出下降的趋势.

2.3 沉降量与营养盐的相关关系

通过对沉降量与水体营养盐含量之间的相关关系分析,能够深刻认识沉降量对上覆水体营养盐再分配过程的影响. 由表 2 可以看出,沉降量与沉积物捕获器内水体中 TN 和 NH_4^+ -N 含量呈显著相关 ($P < 0.01, n = 42$),相关系数分别为 0.43 和 0.60,但与 TP 和 NO_3^- -N 的相关性较低. 表明沉降量的增加,会导致上覆水体的 TN 和 NH_4^+ -N 含量增加,究其原因主要是由于大量的蓝藻和其他浮游植物,死亡沉降到沉积物捕获器内发生降解,沉积物与间隙水中浓度差引起的污染物向上复水体的释放过程,从而使上覆水中主要污染物浓度增加,与史绮等^[46]的研究结果一致.

表 2 沉降量与水体营养盐含量之间的相关关系¹⁾

Table 2 Correlation between sedimentation rate and nutrient content in water body

	沉降量	TN	TP	NH_4^+ -N	NO_3^- -N
沉降量	1				
TN	0.43 **	1			
TP	0.08	0.57 **	1		
NH_4^+ -N	0.60 **	0.84 **	0.56 **	1	
NO_3^- -N	-0.13	-0.57 **	-0.45 **	-0.56 **	1

1) * 表示在 0.01 水平 (双侧) 上显著相关, * 表示在 0.05 水平 (双侧) 上显著相关, $n = 42$

此外, TN 和 TP、 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N 含量相关性也很显著 ($P < 0.01, n = 42$), 其中与 NH_4^+ -N 相关系数

最大,从而揭示了不同氮形态间可能相互转化. 由此推断,外源氮素进入湖泊生态系统经矿化或氨化转变为 NH_4^+ ^[47],初始阶段在好氧条件下将 NH_4^+ 经 NO_2^- 氧化为 NO_3^- ,最后在厌氧条件下由厌氧氨氧化菌利用亚硝酸盐为电子受体,将氨氮氧化为氮气逸出湖泊系统. 因此 NH_4^+ -N 与 NO_3^- -N 之间呈现显著的负相关,符合氮循环中硝化和反硝化的基本过程,与何岩等^[48]、范成新等^[49]的研究结果一致.

3 结论

(1) 太湖西岸湖滨带沉降通量表现为人工芦苇区 > 近岸无植被区 > 自然芦苇区 > 远岸无植被区,其每天平均沉降通量分别为 ($1\,383.40 \pm 925.60$)、($1\,208.67 \pm 743.50$)、(278.72 ± 142.53)、(245.58 ± 154.25) $\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$.

(2) 太湖西岸湖滨带水体氮磷含量日变化幅度较大, TN 含量在 $2.82 \sim 9.74 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, TP 含量在 $0.11 \sim 0.82 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 含量分别为 $0.12 \sim 3.57 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.27 \sim 4.60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

(3) 沉降过程中近岸带的 TP 含量是远岸带的 2 ~ 3 倍,沉降第 6 d 以后沉降量稳定上升,沉降速率大于分解速率,且沉积物捕获器内 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 含量出现显著的差异 ($P < 0.01$),野外沉降实验观测周期至少为一周.

(4) 沉降量与水体中 TN 和 NH_4^+ -N 含量呈显著相关 ($P < 0.01, n = 42$),表明沉降量的增加,会导致上覆水体的 TN 和 NH_4^+ -N 含量增加, TN 与 NH_4^+ -N 相关系数最大,为 0.84,从而揭示了沉降量的增加可能加速不同氮形态间相互转化.

参考文献:

- [1] 郑超海. 湖泊水体营养物含量对沉积物再悬浮及沉降过程的响应[D]. 南京: 河海大学, 2005.
Zheng C H. The content of nutriment in the overlying water in lakes responds with the processes of sediment resuspension and settlement[D]. Nanjing: Hohai University, 2005.
- [2] Bloesch J, Uehlinger U. Horizontal sedimentation differences in a eutrophic Swiss lake[J]. Limnology and Oceanography, 1986, 31(5): 1094-1109.
- [3] Almasi M N, Hoskin C M, Reed J K, et al. Effects of natural and artificial Thalassia on rates of sedimentation[J]. Journal of Sedimentary Research, 1987, 57(5): 901-906.
- [4] Lavelle J W, Ozturgut E, Baker E T, et al. Settling speeds of sewage sludge in seawater[J]. Environmental Science & Technology, 1988, 22(10): 1201-1207.
- [5] Walsh I, Fischer K, Murray D, et al. Evidence for resuspension of rebound particles from near-bottom sediment traps[J]. Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers, 1988, 35(1): 59-70.

- [6] 黄宇波, 罗浩, 陈隽, 等. 底泥再悬浮对东湖水体初级生产力的影响[J]. 水生生物学报, 2016, **40**(3): 574-579.
Huang Y B, Luo H, Chen J, *et al.* Effects of re-suspended sediment on the primary production in the Donghu lake[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2016, **40**(3): 574-579.
- [7] 张庆强, 周潮晖, 傅建文, 等. 引滦输水过程中悬浮物的沉降迁移特征[J]. 水资源与水工程学报, 2016, **27**(3): 91-94.
Zhang Q Q, Zhou C H, Fu J W, *et al.* Settlement and transport characteristics of suspended solids in process of Luanhe-Tianjin water diversion [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2016, **27**(3): 91-94.
- [8] 钱娣萍, 陈振楼, 胡玲珍, 等. 崇明东滩沉积物再悬浮对沉积物-水界面氮、磷交换行为的影响[J]. 环境科学, 2003, **24**(5): 114-119.
Qian C P, Chen Z L, Hu L Z, *et al.* Effects of sediment resuspension on nitrogen and phosphate exchange at the sediment-water interface in east Chongming tidal flat[J]. *Environmental Science*, 2003, **24**(5): 114-119.
- [9] 朱广伟, 秦伯强, 张路, 等. 太湖底泥悬浮中营养盐释放的波浪水槽试验[J]. 湖泊科学, 2005, **17**(1): 61-68.
Zhu G W, Qin B Q, Zhang L, *et al.* Wave effects on nutrient release of sediments from Lake Taihu by flume experiments[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2005, **17**(1): 61-68.
- [10] Zhu M Y, Zhu G W, Nurminen L, *et al.* The influence of macrophytes on sediment resuspension and the effect of associated nutrients in a shallow and large lake (Lake Taihu, China) [J]. *PLoS One*, 2015, **10**(6): e0127915.
- [11] 张洪梅, 刘鑫, 邓建才, 等. 太湖沉积物再悬浮对水体中磷形态和浓度时空差异性影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, **32**(11): 2251-2257.
Zhang H M, Liu X, Deng J C, *et al.* Tempo-spatial discrepancies in phosphorus species and concentrations in Lake Taihu water influenced by sediment resuspension from wind[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, **32**(11): 2251-2257.
- [12] Gons H J, Veening R, Van Keulen R. Effects of wind on a shallow lake ecosystem: resuspension of particles in the Loosdrecht Lakes [J]. *Hydrobiological Bulletin*, 1986, **20**(1-2): 109-120.
- [13] Søndergaard M, Kristensen P, Jeppesen E. Phosphorus release from resuspended sediment in the shallow and wind-exposed Lake Arresø, Denmark [J]. *Hydrobiologia*, 1992, **228**(1): 91-99.
- [14] 王付, 王超. 湖流作用下太湖底泥再悬浮和 $\text{NH}_4\text{-N}$ 释放规律研究[J]. 环境保护科学, 2011, **37**(2): 7-9, 13.
Wang C, Wang C. Study on resuspension and $\text{NH}_4\text{-N}$ release of Taihu Lake sediment under current flow [J]. *Environmental Protection Science*, 2011, **37**(2): 7-9, 13.
- [15] 胡小贞, 刘倩, 李英杰. 滇池福保湾植被重建对底泥再悬浮及营养盐释放的控制[J]. 中国环境科学, 2012, **32**(7): 1288-1292.
Hu X Z, Liu Q, Li Y J. The controlling of plants rebuild engineering on sediment resuspension and nutrient salts release in Fubao Bay of the Dianchi Lake [J]. *China Environmental Science*, 2012, **32**(7): 1288-1292.
- [16] 尤本胜, 王同成, 范成新, 等. 太湖草型湖区沉积物再悬浮对水体营养盐的影响[J]. 环境科学, 2008, **29**(1): 26-31.
You B S, Wang T C, Fan C X, *et al.* Effects of sediment resuspension on aqueous nutrient loading in grass type zone of Lake Taihu [J]. *Environmental Science*, 2008, **29**(1): 26-31.
- [17] 甘树. 太湖内湖滨带沉积物氮分布及转化[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2012.
Gan S. Distribution and transformation of nitrogen in sediment of inner lakeside belt of Taihu Lake [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2012.
- [18] Bloesch J, Burns N M. A critical review of sedimentation trap technique[J]. *Schweizerische Zeitschrift Für Hydrologie*, 1980, **42**(1): 15-55.
- [19] 金相灿. 湖泊富营养化调查规范[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1987.
Jin X C. Survey standards of lake eutrophication [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1987.
- [20] 李一平. 太湖水体透明度影响因子实验及模型研究[D]. 南京: 河海大学, 2006.
Li Y P. Study on the influence factors of transparency by experiment and numerical model in Lake Taihu [D]. Nanjing: Hohai University, 2006.
- [21] 孙顺才, 伍貽范. 太湖形成演变与现代沉积作用[J]. 中国科学 B 辑, 1987, **17**(12): 1329-1339.
Sun S C, Wu Y F. The Taihu Lake formation evolution and modern sedimentation [J]. *Science in China Series B*, 1987, **17**(12): 1329-1339.
- [22] 王佩. 太湖湖滨带底泥氮磷富集特征及释放控制研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2012.
Wang P. Study on the accumulation characteristics and release-control of nitrogen and phosphorus in the sediments of aquatic-terrestrial ecotones of Taihu Lake [D]. Baoding: Agricultural University of Hebei, 2012.
- [23] 杜广龙. 太湖沉积物再悬浮及营养盐释放规律机制研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2013.
Du G L. Study on sediment resuspension and the mechanism of nutrient release of Taihu Lake [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2013.
- [24] 曹祖德, 孔令双, 焦桂英. 往复流作用下粉砂的起悬和沉降过程[J]. 水道港口, 2005, **26**(1): 6-11.
Cao Z D, Kong L S, Jiao G Y. Sediment movement under the effect of periodic reciprocating current [J]. *Journal of Waterway and Harbor*, 2005, **26**(1): 6-11.
- [25] 胡春华, 濮培民. 太湖五里湖沉降通量及其有机质分解率研究[J]. 海洋与湖沼, 2000, **31**(3): 327-333.
Hu C H, Pu P M. Downward flux of suspended substance and organic decomposition rate in Wulihu bay, Taihu lake [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2000, **31**(3): 327-333.
- [26] 李柯, 关保华, 刘正文. 蓝藻碎屑分解速率及氮磷释放形态的实验分析[J]. 湖泊科学, 2011, **23**(6): 919-925.
Li K, Guan B H, Liu Z W. Experiments on decomposition rate and release forms of nitrogen and phosphorus from the decomposing cyanobacterial detritus [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2011, **23**(6): 919-925.
- [27] 朱琳. 西太湖宜兴段近岸水质分析与现状评价[D]. 南京: 南京林业大学, 2013.
Zhu L. Water quality analysis and evaluation of current situation in the Riparian of west Lake Taihu in Yixing [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2013.

- [28] 吴筱清. 太湖水环境特征及沉积物有机质来源识别[D]. 南京: 南京大学, 2015.
Wu X Q. Water environmental characters and sediment organic matter source identification of Lake Taihu[D]. Nanjing: Nanjing University, 2015.
- [29] 胡开明, 范恩卓. 西太湖区域水环境容量分配及水质可控目标研究[J]. 长江流域资源与环境, 2015, **24**(8): 1373-1380.
Hu K M, Fan E Z. Study on allocation of water environmental capacities and water quality controllable target in western Taihu basin[J]. Resources and Environment in The Yangtze Basin, 2015, **24**(8): 1373-1380.
- [30] Achman D R, Brownawell B J, Zhang L C. Exchange of polychlorinated biphenyls between sediment and water in the Hudson River estuary[J]. Estuaries, 1996, **19**(4): 950-965.
- [31] Domagalski J L, Kuivila K M. Distributions of pesticides and organic contaminants between water and suspended sediment, San Francisco Bay, California[J]. Estuaries, 1993, **16**(3): 416-426.
- [32] Schneider A R, Porter E T, Baker J E. Polychlorinated biphenyl release from resuspended hudson river sediment [J]. Environmental Science & Technology, 2007, **41**(4): 1097-1103.
- [33] 尚丽霞, 柯凡, 李文朝, 等. 高密度蓝藻厌氧分解过程与污染物释放实验研究[J]. 湖泊科学, 2013, **25**(1): 47-54.
Shang L X, Ke F, Li W C, *et al.* Laboratory research on the contaminants release during the anaerobic decomposition of high-density cyanobacteria[J]. Journal of Lake Sciences, 2013, **25**(1): 47-54.
- [34] 沈爱春, 徐兆安, 吴东浩. 蓝藻大量堆积、死亡与黑水团形成的关系[J]. 水生态学杂志, 2012, **33**(3): 68-72.
Shen A C, Xu Z A, Wu D H. Relationships between accumulation and dying of cyanobacteria and black spot [J]. Journal of Hydroecology, 2012, **33**(3): 68-72.
- [35] 孙小静, 秦伯强, 朱广伟. 蓝藻死亡分解过程中胶体态磷、氮、有机碳的释放[J]. 中国环境科学, 2007, **27**(3): 341-345.
Sun X J, Qin B Q, Zhu G W. Release of colloidal phosphorus, nitrogen and organic carbon in the course of dying and decomposing of cyanobacteria[J]. China Environmental Science, 2007, **27**(3): 341-345.
- [36] 朱梦圆, 朱广伟, 王永平. 太湖蓝藻水华衰亡对沉积物氮、磷释放的影响[J]. 环境科学, 2011, **32**(2): 409-415.
Zhu M P, Zhu G W, Wang Y P. Influence of scum of algal bloom on the release of N and P from sediments of Lake Taihu [J]. Environmental Science, 2011, **32**(2): 409-415.
- [37] 卢少勇, 焦伟, 王强, 等. 环太湖河流水质时空分布特征[J]. 环境科学研究, 2011, **24**(11): 1220-1225.
Lu S Y, Jiao W, Wang Q, *et al.* Spatial-temporal distribution characteristics of water quality of rivers around Taihu Lake[J]. Research of Environmental Sciences, 2011, **24**(11): 1220-1225.
- [38] 王秋娟. 太湖北部三个湖区氮污染状况及其底泥疏浚量的确定[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2012.
Wang Q J. Analysis of nitrogen pollution condition and sediment dredging volume of sediment in three lake regions of north of Taihu Lake[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2012.
- [39] 周涛, 李正魁, 冯露露. 氨氮和硝氮在太湖水华自维持中的不同作用[J]. 中国环境科学, 2013, **33**(2): 305-311.
Zhou T, Li Z K, Feng L L. The different roles of ammonium and nitrate in the bloom self-maintenance of Lake Taihu[J]. China Environmental Science, 2013, **33**(2): 305-311.
- [40] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 1999.
Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis (3rd ed.) [M]. Beijing: Agricultural Press of China, 1999.
- [41] 古宾河. 美国 Apopka 湖的富营养化及其生态恢复[J]. 湖泊科学, 2005, **17**(1): 1-8.
Gu B H. Eutrophication and restoration of Lake Apopka, USA [J]. Journal of Lake Sciences, 2005, **17**(1): 1-8.
- [42] Xu H, Paerl H W, Qin B Q, *et al.* Nitrogen and phosphorus inputs control phytoplankton growth in eutrophic Lake Taihu, China[J]. Limnology and Oceanography, 2010, **55**(1): 420-432.
- [43] Hu W F, Lo W, Chua H, *et al.* Nutrient release and sediment oxygen demand in a eutrophic land-locked embayment in Hong Kong[J]. Environment International, 2001, **26**(5-6): 369-375.
- [44] 李文红, 陈英旭, 孙建平. 不同溶氧水平对控制底泥向上覆水体释放污染物的影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2003, **22**(2): 170-173.
Li W H, Chen Y X, Sun J P. Influence of different dissolved oxygen (DO) amounts on released pollutants from sediment to overlying water[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2003, **22**(2): 170-173.
- [45] 袁文权, 张锡辉, 张丽萍. 不同供氧方式对水库底泥氮磷释放的影响[J]. 湖泊科学, 2004, **16**(1): 28-34.
Yuan W Q, Zhang X H, Zhang L P. Effects of different oxygenation treatments on the release of nitrogen and phosphorus from reservoir sediments[J]. Journal of Lake Sciences, 2004, **16**(1): 28-34.
- [46] 史绮, 焦锋, 陈莹, 等. 杭州西湖北里湖荷叶枯落物分解及其对水环境的影响[J]. 生态学报, 2011, **31**(18): 5171-5179.
Shi Q, Jiao F, Chen Y, *et al.* Decomposition of lotus leaf litter and its effect on the aquatic environment of the Beili Lake in the Hangzhou West Lake [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, **31**(18): 5171-5179.
- [47] 范俊楠, 赵建伟, 朱端卫. 湖泊氮素氧化及脱氮过程研究进展[J]. 生态学报, 2012, **32**(15): 4924-4931.
Fan J N, Zhao J W, Zhu D W. The research progresses on biological oxidation and removal of nitrogen in lakes[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, **32**(15): 4924-4931.
- [48] 何岩, 沈叔云, 黄民生, 等. 城市黑臭河道底泥内源氮硝化-反硝化作用研究[J]. 生态环境学报, 2012, **21**(6): 1166-1170.
He Y, Shen S Y, Huang M S, *et al.* Research of nitrification-denitrification regarding endogenous nitrogen from urban malodorous river sediments: a review [J]. Ecology and Environment, 2012, **21**(6): 1166-1170.
- [49] 范成新, 周易勇, 吴庆龙. 湖泊沉积物界面过程与效应[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
Fan C X, Zhou Y Y, Wu Q L. Sediment-water interface of lakes: processes and effects[M]. Beijing: Science Press, 2013.

CONTENTS

Source Apportionment of Volatile Organic Compounds and Health Assessment of Benzene Series in Northern Suburb of Nanjing in Winter	ZHANG Yu-xin, AN Jun-lin, LIN Xu, <i>et al.</i> (1)
Size Distribution and Mixing State of Black Carbon Aerosol in Nanjing During a Heavy Winter Pollution Event	JIANG Lei, TANG Li-li, PAN Liang-bao, <i>et al.</i> (13)
Interactive Effects of the Influencing Factors on the Changes of PM _{2.5} Concentration Based on GAM Model	HE Xiang, LIN Zhen-shan (22)
Particle Size Distribution and Diffusion for Simulated Cooking Fume	LI Shuang-de, XU Jun-bo, MO Sheng-peng, <i>et al.</i> (33)
Greenhouse Gas Fluxes at Water-Air Interface in Small Pond Using Flux-Gradient Method Based on Spectrum Analyzer	ZHAO Jia-yu, ZHANG Mi, XIAO Wei, <i>et al.</i> (41)
Diurnal Variations of Concentration of Porewater Dissolved CH ₄ and CO ₂ in a Brackish Marsh Dominated by <i>Cyperus malaccensis</i> and <i>Phragmites australis</i> During Neap and Spring Tidal Days in the Minjiang River Estuary	TAN Li-shan, YANG Ping, HE Lu-lu, <i>et al.</i> (52)
Comparisons Between Seasonal and Diurnal Patterns of Cave Air CO ₂ and Control Factors in Jiguan Cave, Henan Province, China	ZHANG Ping, YANG Yan, SUN Zhe, <i>et al.</i> (60)
Fluorescence Spectral Characteristics of Fluorescent Dissolved Organic Matter (FDOM) in the Surface Sediments from Lihu Lake	CHEN Jun-yi, WANG Shu-hang, JIANG Xia, <i>et al.</i> (70)
Sedimentary Characteristics and Sources of Organic Matter in Sediments of Dianchi Lake	HAN Xiu-xiu, HUANG Xiao-hu, YU Li-yan, <i>et al.</i> (78)
Seasonal Variation of Colloid Particles in the Shallow Well Water of a Small Watershed of Purple Soil	ZHANG Wei, TANG Xiang-yu, XIAN Qing-song (87)
Deposition Characteristics of Suspended Solids and the Response of Dissolved Nutrients in Spring in the Western Lakeside of Taihu Lake	QI Chuang, WANG Guo-xiang, WU Xin-ting, <i>et al.</i> (95)
Correlation Between LDI-based Land Use Types and Water Quality in Sanshan Island of Taihu Lake National Wetland Park, Suzhou	YANG Zhao-hui, SU Qun, CHEN Zhi-hui, <i>et al.</i> (104)
Response Characteristics of Algal Chlorophyll-a to Nitrogen, Phosphorus and Water Temperature in Lake Erhai Based on Quantile Regression	CHEN Xiao-hua, LI Xiao-ping, QIAN Xiao-yong, <i>et al.</i> (113)
Seasonal Succession Characteristics of the Morphologically-based Functional Groups (MBFG) in Deep-water Reservoir	YANG Yu, LU Jin-suo, ZHANG Ying (121)
Change and Influencing Factors of Dissolved Carbon and Dissolved Nitrogen in Water of the Three Gorges Reservoir	FAN Zhi-wei, HAO Qing-ju, HUANG Zhe, <i>et al.</i> (129)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Emissions in the Gufu River Small Watershed of the Three Georges Reservoir Area	HUA Ling-ling, LI Wen-chao, ZHAI Li-mei, <i>et al.</i> (138)
Characteristics of Nitrogen Transport and Its Source Trace in Loess Plateau's Dam Watershed in Alternating Wet and Dry Seasons: A Case Study of Yangjuangou Watershed	JIA Jun-jie, GAO Yang, CHEN Wei-liang, <i>et al.</i> (147)
Comparison of Nitrogen and Phosphorus Uptake and Water Purification Ability of Five Submerged Macrophytes	JIN Shu-quan, ZHOU Jin-bo, BAO Wei-hong, <i>et al.</i> (156)
Pollution Level, Distribution Characteristics and Risk Assessment of 32 PPCPs in Surface Water of Luomahu Lake	ZHANG Qin, ZHANG Sheng-hu, WANG Zhen, <i>et al.</i> (162)
Distribution, Sources and Risk Assessment of the PAHs in the Surface Sediments and Water from the Daye Lake	ZHANG Jia-quan, HU Tian-peng, XING Xin-li, <i>et al.</i> (170)
Effects of pH and Complexing Agents on Sb(V) Adsorption onto Birnessite and Ferrihydrite Surface	WANG Hua-wei, LI Xiao-yue, LI Wei-hua, <i>et al.</i> (180)
Effects of UV Radiation on the Coagulation Process of Kaolin and Involved Mechanisms	WANG Wen-dong, WANG Chang-xin, LIU Hui, <i>et al.</i> (188)
Effect of Dissolved Humic Acid on Thyroid Receptor Antagonistic Activity of Zinc in Aquatic Environment	AI Yang, KONG Dong-dong, YU Chang, <i>et al.</i> (195)
Optimization and Validation of the Analytical Method to Detect Common Illicit Drugs in Wastewater	GAO Ting-ting, DU Peng, XU Ze-qiong, <i>et al.</i> (201)
Cathode Electric Field Enhanced Removal of Nitrobenzene from Aqueous Solution Based on Activated Carbon Fibers (ACF)-Ozone Technique	ZHAO Chun, ZHANG Shuai, ZHOU Yu, <i>et al.</i> (212)
Effect of PVDF Hollow Fiber Ultrafiltration Membranes Modification with Carbonnanotube on Membrane Fouling Control During Ultrafiltration of Sewage Effluent	WANG Li-ying, SHI Jie, WANG Kai-lun, <i>et al.</i> (220)
Enhanced Treatment of Petrochemical Secondary Effluent by Biological Aerated Filter (Fe ²⁺)-Ozonation Process	XU Min, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (229)
Specificity of Intact Ladderane Lipids in Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria from Four Reactors	WANG Han, FANG Fang, LI Kai, <i>et al.</i> (238)
Characteristics of Perchlorate Reduction and Analysis of Consortium Structure in a Sulfur-Based Reactor at a High Perchlorate Concentration	ZHANG Chao, TAO Hua-qiang, SONG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (247)
Fast Start-up of SBAF System Assisted CANON Process and the Microbial Analysis	LIU Zhu-han, YUE Xiu, YU Guang-ping, <i>et al.</i> (253)
Mechanism for Effects of High Free Ammonia Loadings on Biological Nitrification	JI Min, LIU Ling-jie, ZHAI Hong-yan, <i>et al.</i> (260)
Impact of Biodegradable Organic Matter on the Functional Microbe Activities in Partial Nitrification Granules	WANG Shu-yong, QIAN Fei-yue, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (269)
Process of Enrichment and Culture of PAOs on a Novel Biofilm Process of Dephosphorization	ZHENG Ying, PAN Yang, ZHOU Xiao-hua, <i>et al.</i> (276)
Identification of Efficient Strain Applied to Mining Rehabilitation and Its Rock Corrosion Mechanism: Based on Boosted Regression Tree Analysis	WU Yan-wen, ZHANG Jin-chi, GUO Xiao-ping, <i>et al.</i> (283)
Effect of Cadmium on Biodegradation of Nonylphenol by <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	SHI Guang-yu, CHENG Yuan-yuan, SHI Wei-lin (294)
Effects of Different Agricultural Practices on Soil Carbon Pool in North China Plain	SHI Xiao-xia, ZHAO Yi, ZHANG Lin, <i>et al.</i> (301)
Seasonal Variations of Soil Microbial PLFAs and Soil Enzyme Activity Under the Citrus Plantation in Mt. Jinyun, Chongqing	LI Nan-jie, ZENG Qing-ping, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (309)
Composition and Environmental Adaptation of Microbial Community in Shibaohe Copper Tailing in Zhongtiao Mountain in Shanxi	LIU Jin-xian, LI Cui, JING Jun-hui, <i>et al.</i> (318)
Spatial Distribution and Source of Perfluorinated Compounds in Urban Soil from Part of Cities in Anhui Province, China	LI Fa-song, NI Hui, HUANG Han-yu, <i>et al.</i> (327)
Effects of Biochar Pyrolyzed at Varying Temperatures on Soil Organic Carbon and Its Components; Influence on the Soil Active Organic Carbon	ZHAO Shi-xiang, YU Xiao-ling, LI Zhong-hui, <i>et al.</i> (333)
Effects of Different Water Managements and Soil Eh on Migration and Accumulation of Cd in Rice	TIAN Tao, ZENG Min, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (343)
Mechanism of Soil Eco-Functional Stability Under Pyrene/Cadmium Simplex and Combined Pollution Stress	CHEN Xin-yao, YANG Hui-zi, LI Min, <i>et al.</i> (352)
Fractions Transformation of Heavy Metals in Compound Contaminated Soil Treated with Biochar, Montmorillonite and Mixed Addition	GAO Rui-li, TANG Mao, FU Qing-ling, <i>et al.</i> (361)
Screening of the Reduction/Stabilization Reagent for Cr(VI) Contaminated Soil in a Planting Site and Reaction Process Monitoring	LI Pei-zhong, LÜ Xiao-jian, WANG Hai-jian, <i>et al.</i> (368)
Cd(II) Ion Adsorption and Sealing onto SBA-15 Mesoporous Particles and the Related Potential on Cd(II) Polluted Soil Remediation	HUANG Hui, NING Xi-cui, GUO Zhan-yu, <i>et al.</i> (374)
Bioaccumulation of Halogenated Flame Retardants in Fish of Dongjiang River	HE Ming-jing, YANG Ting, LI Qi, <i>et al.</i> (382)
Characteristics and Evaluation of Heavy Metal Pollution in Vegetables in Guangzhou	CHEN Zhi-liang, HUANG Ling, ZHOU Cun-yu, <i>et al.</i> (389)
Variation Characteristics of Vegetables Cadmium Uptake Factors and Its Relations to Environmental Factors	YANG Yang, LI Yan-ling, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (399)
Effect of Sewage Sludge Compost Products Application on Total Mercury and Methylmercury in Soil and Plants	YU Ya-wei, YANG Yu-han, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (405)
Influencing Mechanism and Spatio-temporal Pattern of Stomatal Ozone Flux of Winter Wheat Under Ozone Pollution	ZHAO Hui, ZHENG You-fei, CAO Jia-chen, <i>et al.</i> (412)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

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 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
赵进才 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)

2017年1月15日 第38卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 38 No. 1 Jan. 15, 2017

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	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
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	北京宝昌彩色印刷有限公司	Printed	by	Beijing Baochang Color Printing Co., Ltd.
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	中国国际图书贸易集团有限公司 (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: 140.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人

ISSN 0250-3301

