

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第2期

Vol.35 No.2

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

我国环境空气中颗粒物达标统计要求研究	王帅,丁俊男,王瑞斌,李健军,孟晓艳,杨彬,林宏 (401)
北京城区 PM _{2.5} 中致癌重金属季节变化特征及其来源分析	陶俊,张仁健,段菁春,荆俊山,朱李华,陈忠明,赵岳,曹军骥 (411)
北京地区冬春 PM _{2.5} 和 PM ₁₀ 污染水平时空分布及其与气象条件的关系	赵晨曦,王云琦,王玉杰,张会兰,赵冰清 (418)
北京市 PM _{2.5} 可吸入颗粒物反演及其时空分布分析	王艳慧,肖瑶 (428)
杭州市春季大气超细颗粒物粒径谱分布特征	谢小芳,孙在,杨文俊 (436)
春节期间南京市大气气溶胶粒径分布特征	王红磊,朱彬,沈利娟,刘晓慧,张泽峰,杨洋 (442)
南京市大气颗粒物中有机碳和元素碳粒径分布特征	吴梦龙,郭照冰,刘凤玲,刘杰,卢霞,姜琳娟 (451)
忻州市环境空气 PM ₁₀ 中有机碳和元素碳污染特征分析	史美鲜,彭林,刘效峰,牟玲,白慧玲,刘凤娟,杨花 (458)
广州某工业区大气中 PCDD/Fs 含量水平及其季节性变化特征	青亮,苏原,苏青,张素坤,任明忠 (464)
燃煤电厂锅炉 PM _{2.5} 排放危害度评价模型建立及案例分析	史妍婷,杜谦,高建民,边昕,王知涛,董鹤鸣,韩强,曹阳 (470)
中国南海大气降水化学特征	肖红伟,龙爱民,谢露华,肖化云,刘丛强 (475)
临安本底站酸雨长期观测特征分析	李正泉,马浩,毛裕定,冯涛 (481)
北京城区大气氮湿沉降特征研究	贺成武,任玉芬,王效科,毛宇翔 (490)
烟雾箱与数值模拟研究苯和乙苯的臭氧生成潜势	贾龙,徐永福 (495)
祁连山老虎沟 12 号冰川积雪中飞灰颗粒物的特征	董志文,秦大河,秦翔,杜志恒,陈记祖,任贾文 (504)
生活垃圾填埋场作业面恶臭散发率研究	羌宁,王红玉,赵爱华,袁文祥,邵俊,陈檬 (513)
生物滴滤塔处理苯酚气体研究	何觉聪,黄倩茹,陈洲洋,叶纪宏,罗雨薇,魏在山 (520)
国 V 柴油机燃用丁醇-柴油混合燃料颗粒粒径分布特性试验研究	楼狄明,徐宁,范文佳,张涛 (526)
翻堆频率对猪粪条堆肥过程温室气体和氨气排放的影响	赵晨阳,李洪枚,魏源送,钟佳,郑嘉嘉,韩圣慧,万合峰 (533)
CuBr ₂ 分解缓释-膜催化对零价汞的氧化性能研究	胡林刚,瞿赞,晏乃强,郭永福,谢江坤,贾金平 (541)
浙闽沿海岸域总溶解态无机锡的分布及影响因素研究	张许州,任景玲,刘宗广,樊孝鹏,刘诚刚,吴莹 (547)
基于双向算法的湖库允许纳污负荷量计算及案例	贾海峰,郭羽 (555)
北京平原区第四系地下水污染风险评价	郭高轩,李宇,许亮,李志萍,杨庆,许苗娟 (562)
不同季节辽河口营养盐的河口混合行为	张晋华,于立霞,姚庆祯,田琳 (569)
太湖南运河入湖河口沉积物氮素分布特征	马久远,王国祥,李振国,张佳,周锋,魏宏农,欧媛 (577)
亚热带地区潜流人工湿地木本植物筛选与净化潜力评价	陈永华,吴晓芙,郝君,陈明利,朱光玉 (585)
潜流人工湿地基质结构与水力特性相关性研究	白少元,宋志鑫,丁彦礼,游少鸿,何珊 (592)
凤眼莲对铜绿微囊藻生长及藻毒素与营养盐释放的影响	周庆,韩士群,严少华,宋伟,刘国峰 (597)
不同预氧化剂对长江原水氯(胺)化 DBPs 生成潜能的影响	田富箱,徐斌,荣蓉,陈英英,张天阳,朱贺振 (605)
溴化十六烷基吡啶改性沸石对水中菲的吸附作用	李佳,林建伟,詹艳慧,陈祖梅,王鹏钧 (611)
四环素光催化降解特性与选择性研究	宋晨怡,尹大强 (619)
微生物电解系统生物阴极的硫酸盐还原特性研究	符诗雨,刘广立,骆海萍,张仁铎,章莹颖 (626)
市政污水 A/DAT-IAT 系统中溶解性有机物表征与生态安全	杨赛,周启星,华涛 (633)
膜-生物反应器处理高盐废水膜面污染物特性研究	李彬,王志伟,安莹,吴志超 (643)
臭氧-曝气生物滤池组合工艺处理石化二级出水的试验研究	刘明国,吴昌永,周岳溪,高祯,王佩超,杨琦,董德 (651)
厌氧生物法处理果胶废水的研究	陈兵兵,杨春平,黎想,代传花,彭蓝艳 (657)
氧氟沙星在碳纳米管上的吸附机制研究	赵兴兴,于水利,王哲 (663)
平菇菌糠对废水中铜离子的生物吸附性能	胡晓婧,戴婷婷,顾海东,金羽,曲娟娟 (669)
基于流态化作用的吸附反应动力学和穿透特征	王君,王瑶,黄星,袁益龙,陈瑞晖,周航,周丹丹 (678)
广州城市污泥中重金属形态特征及其生态风险评价	郭鹏然,雷永乾,蔡大川,张涛,吴锐,潘佳钊 (684)
中国农田土壤重金属富集状况及其空间分布研究	张小敏,张秀英,钟大洋,江洪 (692)
废旧电容器封存点土壤中的 PCBs 污染特征和健康风险评价	周玲莉,吴广龙,薛南冬,杨兵,李发生,丁琼,周丹丹,燕云仲,刘博,韩宝禄 (704)
深圳市表层土壤多环芳烃污染及空间分异研究	章迪,曹善平,孙建林,曾辉 (711)
洋河流域万全段重金属污染风险及控制对策	谭冰,王铁宇,朱朝云,李奇峰,徐笠,吕永龙 (719)
施用组配固化剂对盆栽土壤重金属交换态含量及在水稻中累积分布的影响	曾卉,周航,邱琼瑶,廖柏寒 (727)
螯合剂复配对实际重金属污染土壤洗脱效率影响及形态变化特征	尹雪,陈家军,吕策 (733)
<i>Pseudomonas</i> sp. QJX-1 的锰氧化特性研究	周娜娜,柏耀辉,梁金松,罗金明,刘锐平,胡承志,袁林江 (740)
$n(\text{NO}_3^- - \text{N})/n(\text{NO}_2^- - \text{N})$ 对混培养菌与纯培养菌同步脱氮除硫的影响	陈子爱,陈会娟,魏本平,刘刚金,邓良伟,吴力斌 (746)
杭州市空气微生物群落碳代谢特征研究	龚婵娟,许晶,方治国,楼秀芹,欧阳志云 (753)
鼠李糖脂逆胶束体系中纤维素酶的后萃研究	赵艳鸽,袁兴中,黄华军,崔凯龙,彭馨,彭子原,曾光明 (759)
黄海常见鱼类体内汞含量的种内和种间差异研究	朱艾嘉,许战洲,柳圭泽,邓丽杰,方宏达,黄良民 (764)
3 种 PAEs 对蚯蚓的毒性作用和组织酶活性影响的研究	王艳,马泽民,吴石金 (770)
新型保水剂应用于土壤-小白菜系统的环境安全评价	李希,贺纪正,郑袁明,郑明兰 (780)
黄河三角洲翅碱蓬湿地硫化氢和羧基硫排放动态研究	李新华,郭洪海,杨丽萍,朱振林,孙晓青 (786)
农田土壤 N ₂ O 产生的关键微生物过程及减排措施	朱永官,王晓辉,杨小茹,徐会娟,贾炎 (792)
《环境科学》征订启事 (691) 《环境科学》征稿简则 (800) 信息 (489,519,591,791)	

太滬南运河入湖河口沉积物氮素分布特征

马久远¹, 王国祥^{1*}, 李振国^{1,2}, 张佳¹, 周锋¹, 魏宏农¹, 欧媛¹

(1. 南京师范大学地理科学学院, 南京 210023; 2. 湖南科技大学地理系, 湘潭 411201)

摘要: 为研究入湖河口沉积物中氮素的存在形态和空间分布状况, 于 2012 年 4 月在太滬南运河入湖河口区采集沉积物柱状样品并对沉积物中的氮素进行了测定分析. 结果表明, NH_4^+ -N、TN 和 Org-N 在表层沉积物中的沉积具有一定的同步性. NH_4^+ -N 与 Org-N、TN 均呈显著正相关 ($P < 0.05$), Org-N 和 TN 呈极显著正相关 ($P < 0.01$); Org-N 是入湖河口表层沉积物氮素的主要成分, 平均值为 $2\,843.77\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 占 TN 的质量分数为 93.38%; 氮素的水平分布存在差异: TN 和 Org-N 的含量在入湖河干流延伸方向上, 随距离的增加而逐渐降低, 在偏离干流延伸方向上, 呈“W”型波动变化. NH_4^+ -N 含量在距河口 100 m 内迅速下降, 100 m 后在波动中保持低水平. NO_3^- -N 含量在 0~800 m 内保持平衡, 800 m 后迅速升高; 氮素的垂直分布存在差异: 在入湖河干流延伸方向, NH_4^+ -N 含量随沉积物深度的增加而升高, NO_3^- -N 呈现出底层富集向表层富集转变的趋势, TN 和 Org-N 的含量自表层向底层富集.

关键词: 氮; 分布特征; 沉积物; 入湖河口; 太滬南运河

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)02-0577-08

Distribution of Nitrogen in the Sediment of Taige South River Estuary

MA Jiu-yuan¹, WANG Guo-xiang¹, LI Zhen-guo^{1,2}, ZHANG Jia¹, ZHOU Feng¹, WEI Hong-nong¹, OU Yuan¹

(1. School of Geographical Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China; 2. Department of Geography, Science and Technology of Hunan University, Xiangtan 411201, China)

Abstract: To characterize the distribution of nitrogen in the sediment of Taige south river estuary, column samples of sediments were collected and analyzed in April, 2012. Our results revealed that a synchronized trend existed among the levels of ammonium nitrogen (NH_4^+ -N), organic nitrogen (Org-N) and total nitrogen (TN) in the surface layer of sediment. The NH_4^+ -N positively correlated with TN and Org-N significantly ($P < 0.05$) while TN highly significantly correlated with Org-N ($P < 0.01$). Org-N was the major form of nitrogen, comprising 93.38% of total nitrogen (TN) averagely. Both horizontal and vertical distribution of nitrogen in sediments apparently changed along the distance to stream outlet. In the horizontal dimension in sediments, Org-N and TN decreased progressively as forwarding into the lake in the extending direction of the main stream, while showed a “W”-type fluctuation in the diverged direction away from the main stream. The level of NH_4^+ -N decreased rapidly within 100 m to the stream outlet and remained constantly at a lower level beyond 100 m. However, the level of nitrate nitrogen (NO_3^- -N) stabilized within 0-800 m and increased greatly beyond 800 m. In the vertical dimension in sediments, the level of NH_4^+ -N increased with increasing depth. As the distance to the stream outlet increasing, the enrichment of NO_3^- -N was enhanced in surface layers rather than in lower subsurface layers. Alternatively, the enrichment of Org-N and TN were reduced in surface layers but enhanced in subsurface layers.

Key words: nitrogen; distribution characteristics; sediments; estuary; Taige South River

沉积物中氮素的释放对河流水质的影响是一个国际研究热点^[1,2], 研究表明 NH_4^+ -N 的扩散通量较大, 扩散方向主要是从沉积物到上覆水, 最终导致水体大部分 TN 再生^[3]. 目前对太湖湖体及环太湖河流沉积物中氮含量空间分布的研究较多^[4~6], 但对入湖河口沉积物的空间分布的研究较少.

太滬南运河是太湖重污染区, 对水体富营养化影响最大的 12 条入湖河道之一^[7], 是太湖重污染湖区竺山湾氮磷营养负荷的重要外部来源^[7,8]. 太滬南运河总体水质以 V 类和劣 V 类为主, 呈现以氮磷污染为主的特征^[9,10]. 该流域内水体污染主要来源于沿岸的生活、农业和工业污染源的排放及受上游客水的影响, 水体中 TN、 NH_4^+ -N 等指标从上游向下

游呈现明显的恶化趋势^[11]. 其入湖河口区域经过长年的积累, 大量氮素在湖底沉积物中聚积, 成为难削减的内源污染负荷^[12].

因此, 本实验选取太滬南运河入湖河口作为研究区域, 分析了入湖河口沉积物中氮素的形态构成特征和空间分布情况, 以为太湖富营养化防治及入湖河口健康水生态系统的恢复提供基础数据.

收稿日期: 2013-04-21; 修订日期: 2013-07-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(41173078); 江苏省太湖水环境治理专项(TH2011207); 江苏省科技厅科技支撑计划项目(BE2011690)

作者简介: 马久远(1988~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水环境生态修复, E-mail: majiuyuan@126.com

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

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

太溇南运河全长 20.3 km, 是连接溇湖与太湖的主要通道, 流经宜兴市内, 经桥镇、万石镇、周铁镇, 至殷村港入太湖^[9], 河口呈直角形向竺山湖延伸. 太溇南运河流域有耕地 0.68 万 hm^2 , 主导产业是纺织、电镀、医药、粮食加工、化工等. 人口密集, 工、农业发达导致该区域内生活、农业和工业污染负荷高, 水污染非常严重^[2, 8].

1.2 采样点布设及样品采集

本次采样由河口向湖区布设 2 条剖面, 一条沿太溇南运河干流延伸方向, 另外一条为干流延伸方向偏北 35° (图 1). 每条剖面布设 9 个采样点, 每个点位距河口距离分别为: 0 (河口)、50、100、200、400、600、800、1 000 和 1 500 m. 使用柱状取样器 (HYDRO-BIOS, 德国) 采集沉积物样品, 现场分层成

4 层, 包括表层 (0 ~ 5 cm), 上层 (5 ~ 10 cm), 中层 (10 ~ 20 cm) 和底层 (20 ~ 30 cm), 装入聚乙烯自封袋中, 放入冷藏箱 4°C 保存.

1.3 分析测定方法

烧失率测定采用国家标准 GB 7876-87; 含水率通过测定 105°C 烘干至恒重时的失重获得 (GB 7172-87); 沉积物样品经 60°C 烘干后, 充分研磨, 过 100 目筛, 备用. TN 采用过硫酸钾消煮法^[13] 测定, NH_4^+-N , NO_3^--N 经 $1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 KCl (液土比为 100:1) 浸提后^[14, 15], 采用水质流动分析仪进行测定 (Skalar San +, 荷兰). Org-N 采用差减法求得. 每个样品做 3 个平行, 文中数据均采用平均值. 数据采用 SPSS 18.0 等软件处理. 氮素在垂直方向上的增长率表示为:

$$\text{增长率} = \frac{(\text{底层氮素的含量} - \text{表层氮素的含量})}{\text{表层氮素的含量}}$$

2 结果与分析

2.1 氮素的表层分布

2.1.1 无机氮

由图 2 可知, 在河口处 NH_4^+-N 含量最高, 达到 $279.76 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 剖面 1 显示, NH_4^+-N 的变幅为 $179.07 \sim 279.76 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 最高值为最低值的 1.6 倍. NH_4^+-N 的含量在 0 ~ 100 m 之间迅速下降, 100 m 后在波动中稳定, 其中 NH_4^+-N 在 50 m 处降幅最大, 平均降低 $77.56 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 50 m 后下降趋势放缓. 另外, NH_4^+-N 的含量在 200 m 和 1 000 m 处有略微的升高; 剖面 2 显示, NH_4^+-N 呈“W”型变化, 变幅较大 ($101.26 \sim 279.76 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), 在 1 000 m 处含量最低, 其中 NH_4^+-N 在 0 ~ 100 m 迅速下降, 平均降低 $173.19 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 在 100 ~ 800 m 呈上升趋势, 达到 $216.60 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 800 ~ 1 000 m 处迅速下降达到最低值 $101.26 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 后, 又缓慢上升.

NO_3^--N 的变化趋势 (图 2) 与 NH_4^+-N 不同, 其含

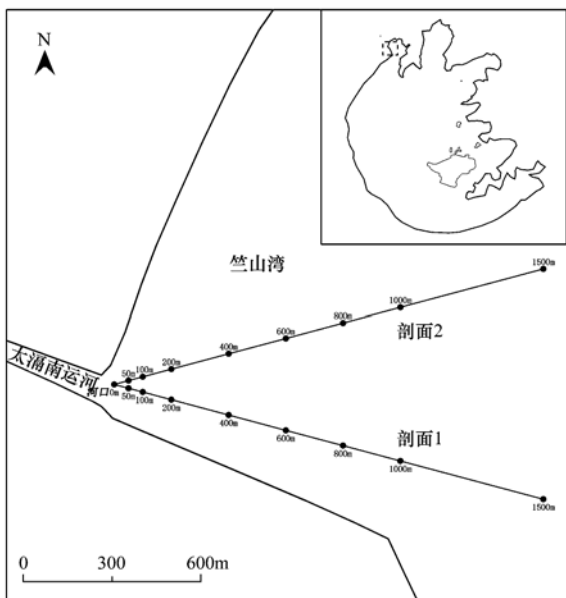


图 1 采样点示意

Fig. 1 Schematic graph of sampling sites

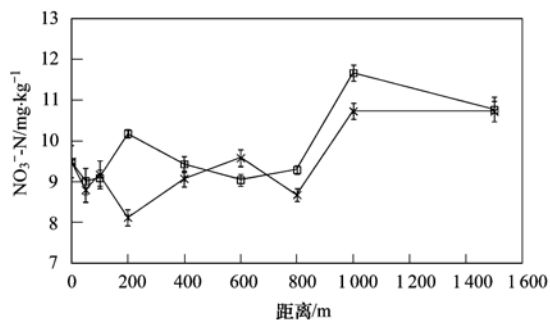
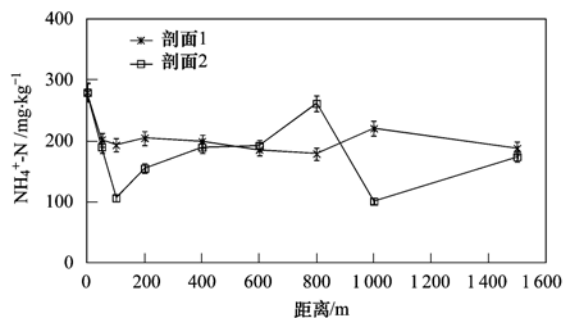


图 2 表层沉积物无机氮含量分布

Fig. 2 Distribution of inorganic nitrogen in surface sediments

量在 0~800 m 范围内处于波动中稳定状态, 800 m 后迅速上升. 剖面 1 中 NO_3^- -N 的变幅为 8.12~10.74 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 最高值是最低值的 1.32 倍, 呈“W”型上升趋势, 平均整体升高 12.93%, 其中在 0~200 m 迅速下降, 达到最低值 8.12 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 200~600 m 呈缓慢上升趋势, 800 m 处出现一个波谷后迅速上升, 在 1000 m 处达到最高值 11.67 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 最后又缓缓降低到 10.77 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 剖面 2 的变幅为 9.02~11.67 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 最高值是最低值的 1.29 倍, 整体呈上升趋势, 平均升高 13.39%, 其中 0~200 m 呈上升趋势, 平均上升了 0.69 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 200~800 m 缓慢降低, 800~1500 m 的变化趋势和剖面 1 相同.

2.1.2 有机氮(Org-N)和总氮(TN)

图 3 显示, 表层沉积物中 TN 在两条剖面上的分布呈现一定的差异性, 出现两种分布趋势: 随距离逐渐减小型(剖面 1)和两端、中间较高型即“W”型(剖面 2). 沿河口向竺山湾的推进过程中, 剖面 1 的 TN 总体呈下降趋势, 河口区有最高值, 达到 3856.25 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 随后逐渐降低, 在 1500 m 处达到

最低值 2430.53 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. Org-N 也呈下降趋势, 河口区总氮含量明显高于湖心区, 最高值在河口区为 3566.98 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 随后逐渐降低, 在 1500 m 处达到最低值 2231.63 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 河口区 Org-N 和 TN 含量明显都高于湖心区; 剖面 2 中 TN 呈“W”型变化, 最高值为 4185.76 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (800 m 处), 最低值为 2394.87 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (50 m 处), 最高值是最低值的 1.75 倍. Org-N 最高值出现在 800 m 处, 达到 3914.86 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 最低值出现在 50 m 处为 2195.67 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 最高值是最低值的 1.78 倍. 200 m 前剖面 1 中 TN 和 Org-N 的含量高于剖面 2, 但在 400 m 后剖面 2 高于剖面 1, 其中在 800 m 和 1500 m 处出现峰值.

2.1.3 氮素的形态分布

表层沉积物中 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N 和 Org-N 的构成见图 4. 发现 Org-N 占 TN 的质量分数最大, 平均值为 93.38%, 其次是 NH_4^+ -N 占 6.29%, NO_3^- -N 占 TN 的质量分数最小为 0.33%. 可见有机氮是太滬南运河入湖河口沉积物中氮素的主要赋存形态, 无机氮中氮素主要是以 NH_4^+ -N 的形式存在.

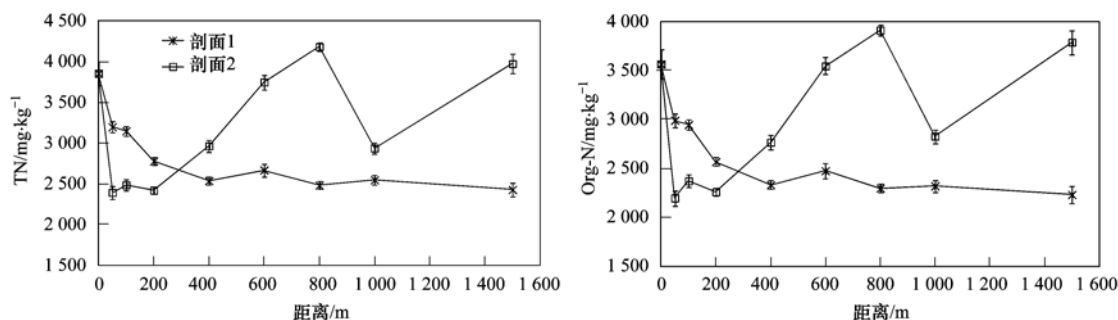


图 3 表层沉积物 TN 和 Org-N 含量分布

Fig. 3 Distribution of TN and Org-N in surface sediments

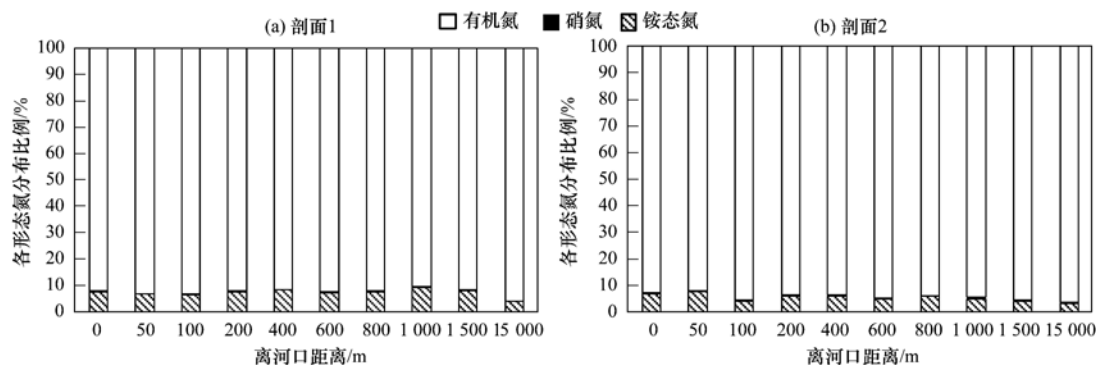


图 4 表层沉积物各形态氮的分布比例

Fig. 4 Distribution percentage of nitrogen in surface sediments

2.2 氮素的垂直分布

2.2.1 无机氮

在垂直距离上, 大部分采样点(剖面 1, 下同)的

沉积物中 NH_4^+ -N 的含量都随深度的增加而升高, 仅在 200 m 处有略微的下降(图 5). NH_4^+ -N 上升的幅度在 4.27%~90.14% 之间, 其中在 100 m 处增幅

最小, 800 m 处增幅最大, 底层是表层的 1.90 倍, 河口(0 m) 增幅也较大, 底层为表层的 1.82 倍. NO_3^- -N 的垂直分布趋势不明显. 随深度增加, 只有部分样点 NO_3^- -N 的含量有升高现象, 即在 0、50、

200 和 800 m 处有升高趋势, 其中, 河口处 NO_3^- -N 的含量随深度的增加增幅最大, 为 34.78%; 而在 100、600 和 1 000 m 处 NO_3^- -N 的含量随深度增加反而呈下降趋势.

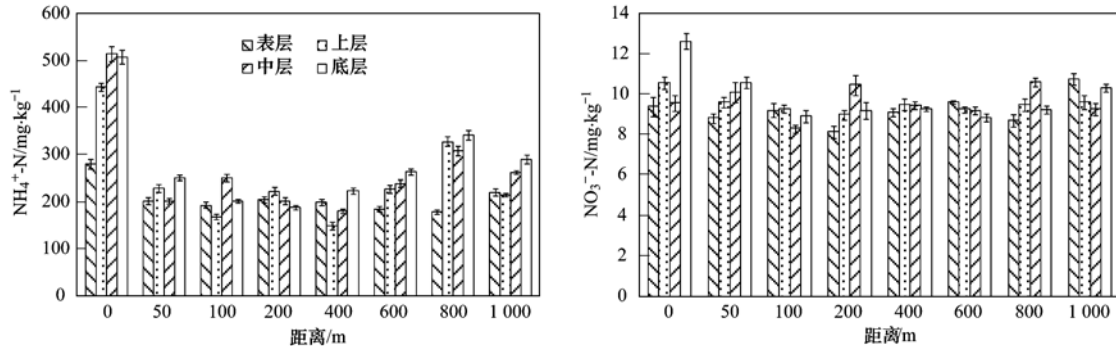


图 5 无机氮的垂直分布特征

Fig. 5 Vertical distribution characteristics of inorganic nitrogen

图 6 是无机氮在垂直距离上的分布情况, 可用增长率表示. 正值表示氮素含量随深度的增加而增加, 值越大, 氮素增加的幅度越高; 负值表示氮素含量随深度的增加而减少, 值越小, 氮素含量减少的幅度越大. 图中虚线和实线是氮素增长率的趋势线.

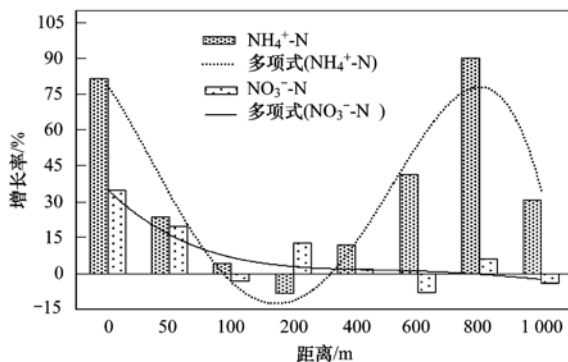


图 6 无机氮在垂直距离上的增长率

Fig. 6 Vertical incremental rate characteristics of inorganic nitrogen

NH_4^+ -N 的增长率除了 200 m 的点外, 都是正值, 说明除了 200 m 外, NH_4^+ -N 的含量普遍呈随深度的

增加而增加的现象. 增长率呈“横 S”型的变化趋势, 即在 0 ~ 200 m 内增长率降低, 在 200 ~ 800 m 内增长率迅速增大, 800 m 后又降低. NO_3^- -N 的增长率随离岸距离的增加逐渐降低, 最后出现负增长, 即在垂直距离上, NO_3^- -N 的含量呈现出从底层富集向表层富集转变的趋势. 在 0 ~ 1 000 m 的距离内, 除 100、600 和 100 m 以外, 沉积物表层硝态氮的增长率都为正值, 即表层 NO_3^- -N 的含量小于底层.

2.2.2 有机氮 (Org-N) 和总氮 (TN)

图 7 是 Org-N 和 TN 的垂直分布图. 在 200 m 和 800 m, 上层沉积物 (5 ~ 10 cm) 中 TN 和 Org-N 含量高于其他层次的含量, 而 50、100 和 400 m 处的中层沉积物中 (10 ~ 20 cm) TN 和 Org-N 含量高于其他层次的含量, 1 000 m 处的沉积物中 TN 和 Org-N 含量随深度的增加而增加, 而河口 (0 m) 处表层沉积物中 Org-N 含量最高, 中层沉积物中 TN 含量最高.

TN 的增长率几乎都是正值, 且随距离的增加而

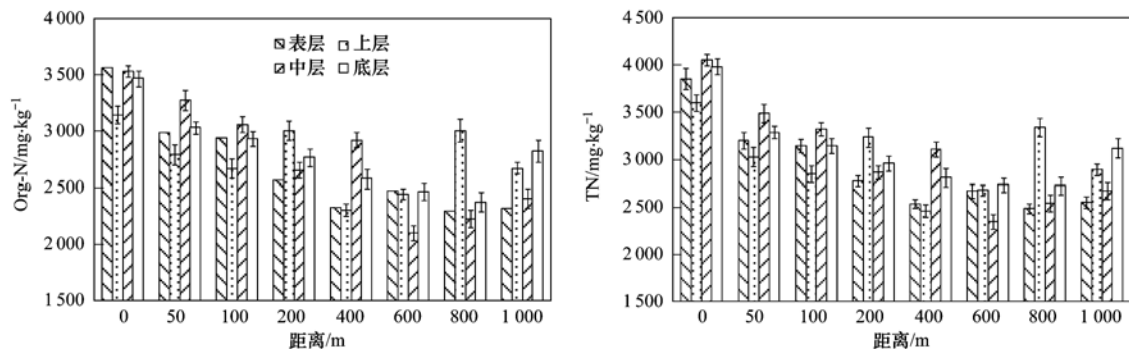


图 7 有机氮和总氮的垂直分布特征

Fig. 7 Vertical distribution characteristics of TN and Org-N

增加(图 8),表明在垂直距离上 TN 的含量为底层大于表层,且随着离河口距离的增加,增幅越来越大. Org-N 的增长率随着距离的增加呈现“躺 S”型的增长趋势,即在 0~100 m 的距离内,Org-N 的增长率迅速增加,在 200~600 m 增长率缓缓降低,而后再大幅升高. 表明在垂直距离上 Org-N 的含量首

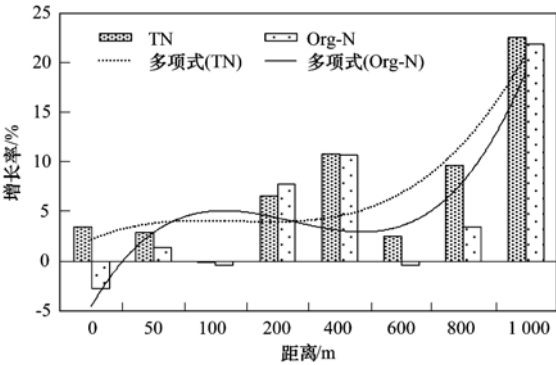


图 8 有机氮和总氮在垂直方向上的增长率
Fig. 8 Vertical incremental rate characteristics of TN and Org-N

先为表层大于底层, 200 m 以后,表层沉积物中 Org-N 的含量小于底层,且随距离增加,增幅越来越大,底层沉积物的增加量越来越大. 综上,随离岸距离的增加,垂直距离上 TN 和 Org-N 表现出从表层向底层富集的现象.

2.3 各形态氮素的同步沉积研究

为了更加充分地了解河口处氮素在表层沉积物中的分布规律及氮素各形态之间的相互关系,弄清楚氮素在表层沉积物中的补充来源,相互转化是否具有同步现象,对河口所有表层沉积物样品中 TN、Org-N、 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 含量进行了相关性分析(表 1). 发现 NH_4^+ -N 与 Org-N 和 TN 都呈显著正相关($P < 0.05$), Org-N 和 TN 呈极显著相关($P < 0.01$),说明 NH_4^+ -N、TN 以及 Org-N 在表层沉积物中的沉积具有一定的同步性. NO_3^- -N 与 TN、Org-N 及 NH_4^+ -N 相关性不强,说明 NO_3^- -N 和其他形式的氮素在沉积方式上存在一定的差异性.

表 1 表层沉积物氮素相关性系数¹⁾

Table 1 Correlation coefficient of several nitrogen forms in surface sediment layer								
	剖面 1				剖面 2			
	NH_4^+ -N	NO_3^- -N	Org-N	TN	NH_4^+ -N	NO_3^- -N	Org-N	TN
NH_4^+ -N	1				1			
NO_3^- -N	0.128	1			-0.457	1		
Org-N	0.744 *	-0.238	1		0.738 *	-0.278	1	
TN	0.773 *	-0.217	0.999 **	1	0.769 *	-0.294	0.999 **	1

1) 剖面 1, $n=9$; 剖面 2, $n=7$; * 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关; ** 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关

3 讨论

3.1 河口表层沉积物中氮素的空间分布特征

表层沉积物中,两条剖面上氮素的分布呈现一定的差异性(图 2),沿河口向竺山湾的推进过程中,剖面 1 的 TN 和 Org-N 总体呈下降趋势,河口区含量明显高于湖心区,而剖面 2 呈“W”型波动趋势,说明在太滬南运河干流延伸方向上,TN 含量随距离增加而降低,但是偏离干流延伸方向后,TN 的沉积可能受到其他因素的影响,从而出现波动. 有研究表明河口形状、河流的径流作用、水产养殖等都是影响污染物迁移扩散的主要因素^[16, 17]. 竺山湖沿岸历史曾有岸边浅水围网养殖区域,在养殖过程中会产生高氮废水及鱼类残体,这些物质会导致水体氮素分布的差异,沉积后也会使局部地区沉积物中的氮素组成变化及含量升高^[18~20]. 河口的形状会影响河口环流,影响河口的浑浊带^[21, 22],从而影响河口营养盐的迁移扩散. 太滬南运河河口呈直角形向竺山湖延伸,河口南岸与河口径流方向几乎平行,北

岸与径流方向垂直,这种特殊的河口形状可能会对河口区形成特殊的河口环流,从而影响太滬南运河河口水体中氮素的沉积与扩散作用,进而影响河口区表层沉积物中氮素分布的差异性.

NH_4^+ -N 的含量在距河口 100 m 的范围内迅速下降,100 m 后在波动中持平,说明上游的 NH_4^+ -N 主要积累在距河口 0~100 m 内的表层沉积物中,而在 100 m 处达到扩散平衡. 分析剖面 1 和剖面 2 中 NO_3^- -N 的变化趋势得知,800 m 前, NO_3^- -N 在波动中稳定,但在 800 m 后就迅速升高. 一是由于表层沉积物中 NO_3^- -N 的积累受上游水体的影响较小,影响其含量的主要受底栖生物扰动和微生物作用影响. 河口近岸区一般由于有机质大量积累,有机质分解消耗大量氧气,导致水体处于缺氧状态^[23]. 所以在 800 m 内水体溶解氧含量较低,有机质分解产生 NH_4^+ -N,难以转化为 NO_3^- -N,而 800 m 后由于水体复氧, NH_4^+ -N 可以被转化为 NO_3^- -N,而被保存下来. 二是可能在竺山湖历史的围网养殖过程中投加大量

含有硝态氮的饵料^[24, 25],大量 NO_3^- -N被释放并沉积到底泥中。

3.2 表层沉积物中各形态氮的构成特征

Org-N 是太滬南运河河口地区沉积物中氮素的主要形态,所占比例高达 93.38%, NH_4^+ -N是无机氮的主要存在形式,占 TN 的 6.29%,根据美国 EPA 中沉积物 TN 污染评价标准^[26],该地区沉积物已达中度污染水平。本研究沉积物中氮素构成与太湖东部的吴淞河河口相似,吴淞河河口是典型的有机污染型河口,Org-N 占总氮的 95.12%,而 NH_4^+ -N仅占 TN 的 5.21%左右^[7, 27]。而太湖西部殷村港的沉积物中氮素构成与本研究不同,Org-N 含量较低,仅占 TN 的 61.96%左右,但铵态氮比例较高,高达 36.34%^[27],可以看出殷村港的沉积物中 NH_4^+ -N污染较重。造成太滬南运河河口区沉积物中 Org-N 比例高的原因可能为该地区多年来种植业发达、强度高以及不合理施肥等原因^[28],使得大量氮素随河流进入湖体,并沉积在底泥中。另外竺山湾一直是蓝藻高发地区^[29],大量的氮素在蓝藻死亡后被释放出来,通过水-沉积物界面沉积到沉积物中。同时,在该地区有围网养殖区域,不合理地投放饵料可能也是沉积物中氮素富集的原因之一。

沉积物释放是湖泊水体溶解 Org-N 的重要来源^[30, 31],有研究表明沉积物间隙水中的氮素含量远远高于上覆水,为沉积物中氮素的释放提供客观条件^[32],太滬南运河河口地区有机氮污染较重,一旦环境因素发生改变,沉积物受底栖生物扰动和微生物的分解作用加强,沉积物中的内源污染极有可能大幅向上覆水释放,引起新一轮的水体富营养化。所以加强太滬南运河河口地区沉积物内源污染的治理对太湖竺山湖水体富营养化的治理有重要的意义。

3.3 各形态氮素的垂直分布特征

在垂直距离上, NH_4^+ -N的含量随深度的增加而增加。但随离岸距离的增加, NH_4^+ -N在垂直距离上表现出先减少,再增加,随后又减少的现象(图6)。一般情况下, NH_4^+ -N的含量与有机物含量、水动力情况及沉积环境有关^[33, 34]。而太滬南运河河口的沉积环境比较复杂,主要有两个原因,一是河口有大量蓝藻聚集;二是该地区水温相对较高^[35]。孙英等^[36]研究发现,厌氧条件下,温度升高有利于 NH_4^+ -N从沉积物中释放。而太滬南运河河口地区由于上游有机质大量积累并分解,蓝藻水华的衰亡,消耗了大量氧气,水体处于缺氧状态^[23],同时温度也

较高,促进了表层沉积物中 NH_4^+ -N的释放。浅水湖泊中蓝藻水华堆积衰亡也会引发沉积物中营养盐的释放^[37]。太滬南运河河口位于竺山湾,会有大量蓝藻堆积衰亡现象发生,因此会引起沉积物中 NH_4^+ -N的释放。所以这两个原因共同导致该地区沉积物中 NH_4^+ -N含量在底层高,表层低。但是随着离岸距离的增加, NH_4^+ -N在垂直距离上的变化规律还没有完全弄清,可能与湖盆形态、风浪的扰动以及生物扰动等因素有关,有待进一步研究。

NO_3^- -N的含量在垂直距离上呈从底层富集向表层富集转变的趋势,这可能与太滬南运河河口水体氧气含量有关。太滬南运河河口近岸区(0~50 m)水体处于缺氧状态,上覆水中的硝化作用减弱,导致表层沉积物中 NO_3^- -N的来源减少,同时反硝化作用加强,导致表层沉积物中 NO_3^- -N的汇增加,另外,蓝藻的衰亡会导致表层沉积物中 NO_3^- -N的释放^[37],以上共同造成沉积物表层 NO_3^- -N的含量比底层低的现象,即增长率为正值;而在远岸区,包括100、600和1000 m,由于水体复氧增加,反硝化作用减弱,硝化作用加强,表层沉积物中 NO_3^- -N的汇减少,源增加,随距离增加逐渐转变为表层沉积物中 NO_3^- -N的含量比底层高的现象,即增长率为负。另外,竺山湾沉积物中 AOB (ammonia-oxidizing bacteria) 和 AOA (ammonia-oxidizing archaea) 种群结构在沉积物的垂直距离上有明显的变化,这两种古菌的种群及数量变化可以改变 NO_3^- -N的利用情况^[38],所以 NO_3^- -N的分布还可能与河口微生物的种类及数量的分布有关。综上,水体氧气含量的分布和沉积物中微生物种群和数量的变化,导致 NO_3^- -N的含量在垂直距离上呈从底层富集向表层富集转变的趋势。

随离岸距离的增加,在垂直距离上 TN 和 Org-N 表现出至表层向底层沉积的现象,且随离岸距离的增加,向底层富集的程度越大。一般情况下沉积物中溶解氧的渗透深度一般仅限于表层几 cm^[39],随着沉积深度的增加,沉积环境因 O_2 被耗尽而变得相对还原,导致微生物的分解作用减弱。另外,分解有机质的微生物大多生存于沉积物表层,随着深度增加微生物的丰度和数量会发生变化,甚至逐渐减少^[3, 38],所以表层沉积物中 Org-N 和 TN 含量较低,随深度增加,含量又逐渐地增加。生活污染和农业污染是太滬南运河流域的主要污染源,TN 占入河总污染物的比例高达 80.1%^[40]。这些污染物沉积在河口近岸区的沉积物中,使得近岸区表层沉积物中 TN 和 Org-N 的含量比其它层的含量高,形成在表层

富集的现象.随着离岸距离的增加,由于缺少高氮污染物在表层沉积物中沉积,沉积物中 TN 和 Org-N 的垂直分布渐渐变为向底层富集的现象.

4 结论

(1)太滬南运河入湖河口沉积物中 Org-N 污染较重,污染已达中度污染水平. Org-N 平均占 TN 的 93.38%,铵态氮占 6.29%,硝态氮所占比例最小仅 0.33%,所以加强该地区沉积物内源污染的治理对太湖竺山湖水体富营养化的防治有重要的意义.

(2)TN、Org-N 以及 NH_4^+ -N 在表层沉积物中的沉积具有同步性. NH_4^+ -N 与 Org-N、TN 都呈显著正相关 ($P < 0.05$), Org-N 和 TN 呈极显著相关 ($P < 0.01$).

(3)沉积物中氮素的水平分布存在差异性. TN 和 Org-N 的含量在入湖河干流延伸方向上,随距离的增加而逐渐降低,在偏离干流延伸方向上,由于受到河口形状、径流作用、水产养殖等因素的影响呈“W”型波动变化. NH_4^+ -N 含量在距河口 100 m 内迅速下降,100 m 后在波动中保持低水平. NO_3^- -N 含量在 0~800 m 内保持平衡,800 m 后迅速升高,水体氧气含量的变化及围网养殖氮素输入是主要原因.

(4)随离岸距离的增加,氮素在垂直距离上的分布各具特征.随着距离的增加, NH_4^+ -N 保持随深度的增加而增加的现象, NO_3^- -N 呈现出底层富集向表层富集转变的趋势,TN 和 Org-N 的含量自表层向底层沉积,且随着离河口距离的增加,向底层沉积的幅度越大.

参考文献:

- [1] Poulenard J, Dorioz J M, Elsass F. Analytical electron-microscopy fractionation of fine and colloidal particulate-phosphorus in riverbed and suspended sediments[J]. Aquatic Geochemistry, 2008, 14(3): 193-210.
- [2] 卢少勇,远野,金相灿,等. 7 条环太湖河流沉积物氮含量沿程分布规律[J]. 环境科学, 2012, 33(5): 1497-1502.
- [3] 岳维忠,黄小平. 珠江口柱状沉积物中氮的形态分布特征及来源探讨[J]. 环境科学, 2005, 26(2): 195-199.
- [4] 范成新 杨龙元,张路. 太湖底泥及其间隙水中氮磷垂直分布及相互关系分析[J]. 湖泊科学, 2000, 12(4): 359-366.
- [5] 倪兆奎,李跃进,王圣瑞,等. 太湖沉积物有机碳与氮的来源[J]. 生态学报, 2011, 31(16): 4661-4670.
- [6] 王佩,卢少勇,王殿武,等. 太湖湖滨带底泥氮、磷、有机质分布与污染评价[J]. 中国环境科学, 2012, 32(4): 703-709.
- [7] 陈雷,远野,卢少勇,等. 环太湖主要河流入湖口表层沉积物污染特征研究[J]. 中国农学通报, 2011, 27(1): 294-299.
- [8] 黄娟,王惠中,吴云波,等. 区域协同机制在太湖主要入湖河流污染控制中的应用——以太滬南运河为例[J]. 环境科技, 2010, 23(2): 44-47.
- [9] 黄娟,王惠中,吴云波,等. 太滬南运河入湖污染物控制对策研究[J]. 环境科学与管理, 2010, 35(7): 1-13.
- [10] 翟淑华,张红举. 环太湖河流进出湖水量及污染负荷(2000-2002 年)[J]. 湖泊科学, 2006, 18(3): 225-230.
- [11] 中国科学院南京地理与湖泊研究所. 太湖流域水污染控制与生态修复的研究与战略思考[J]. 湖泊科学, 2006, 18(3): 193-198.
- [12] 卢少勇,蔡珉敏,金相灿,等. 滇池湖滨带沉积物氮形态的空间分布[J]. 生态学报, 2009, 18(4): 1351-1357.
- [13] Smart M M, Rada R G, Donnermeyer G N. Determination of total nitrogen in sediments and plants using persulfate digestion. An evaluation and comparison with the Kjeldahl procedure[J]. Water Research, 1983, 17(9): 1207-1211.
- [14] 刘波,周锋,王国祥,等. 沉积物氮形态与测定方法研究进展[J]. 生态学报, 2011, 31(22): 6947-6958.
- [15] 许宽,刘波,王国祥,等. 城市污染河道沉积物可提取态氮的提取方式比较[J]. 湖泊科学, 2012, 24(4): 541-545.
- [16] 李瑞环,刘素美,张桂玲,等. 万泉河口冬、夏季营养盐分布与变化特征[J]. 海洋科学进展, 2011, 29(2): 205-214.
- [17] 刘成,李行伟,韦鹤平,等. 长江口水动力及污水稀释扩散模拟[J]. 海洋与湖沼, 2003, 34(5): 474-483.
- [18] Gross A, Boyd C E, Wood C W. Nitrogen transformations and balance in channel catfish ponds[J]. Aquacultural Engineering, 2000, 24(1): 1-14.
- [19] Lin Y F, Jing S R, Lee D Y, et al. Nutrient removal from aquaculture wastewater using a constructed wetlands system[J]. Aquaculture, 2002, 209(1-4): 169-184.
- [20] 黄晓婷,张再利,刘伟,等. 生物活性炭处理循环水产养殖废水及其影响因子研究[J]. 环境科学学报, 2011, 31(11): 2380-2386.
- [21] 傅德健,朱建荣,沈焕庭. 河口形状对最大浑浊带形成的影响[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2004, (4): 72-78.
- [22] 朱建荣,胡松. 河口形状对河口环流和盐水入侵的影响[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2003, (2): 68-73.
- [23] 陈春辉,王春生,许学伟,等. 河口缺氧生物效应研究进展[J]. 生态学报, 2009, 29(5): 2595-2602.
- [24] 沈春宁,蒋增杰,崔毅,等. 唐岛湾网箱养殖区水体氮、磷含量特征及潜在性富营养化评价[J]. 海洋水产研究, 2007, 28(3): 98-104.
- [25] 周露洪,谷孝鸿,曾庆飞,等. 不同密度螺-草结构对养殖尾水净化效果的比较研究[J]. 长江流域资源与环境, 2011, 20(2): 173-178.
- [26] MacDonald D D, Ingersoll C G. A guidance manual to support the assessment of contaminated sediments in freshwater ecosystems[P]. US EPA, 2002.
- [27] 许梦爽,卢少勇,黄国忠,等. 28 条环太湖河流沉积物氮的

- 分布特征[J]. 农业环境科学学报, 2012, **31**(7): 1381-1386.
- [28] 金苗, 任泽, 史建鹏, 等. 太湖水体富营养化中农业面污染源的影响研究[J]. 环境科学与技术, 2010, **33**(10): 106-109, 119.
- [29] 马荣华, 孔繁翔, 段洪涛, 等. 基于卫星遥感的太湖蓝藻水华时空分布规律认识[J]. 湖泊科学, 2008, **20**(6): 687-694.
- [30] Nixdorf B, Deneke R. Why 'very shallow' lakes are more successful opposing reduced nutrient loads[J]. *Hydrobiologia*, 1997, **342-343**: 269-284.
- [31] Zehr J P, Paulsen S G, Axler R P, *et al.* Dynamics of dissolved organic nitrogen in subalpine Castle Lake, California [J]. *Hydrobiologia*, 1988, **157**(1): 33-45.
- [32] 秦伯强, 胡维平, 高光, 等. 太湖沉积物悬浮的动力机制及内源释放的概念性模式[J]. 科学通报, 2003, **48**(17): 1822-1831.
- [33] Lehmann M F, Bernasconi S M, Barbieri A, *et al.* Preservation of organic matter and alteration of its carbon and nitrogen isotope composition during simulated and in situ early sedimentary diagenesis[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2002, **66**(20): 3573-3584.
- [34] 孙小静, 秦伯强, 朱广伟, 等. 持续水动力作用下湖泊底泥胶体态氮、磷的释放[J]. 环境科学, 2007, **28**(6): 1223-1229.
- [35] 王得玉, 冯学智, 周立国, 等. 太湖蓝藻爆发与水温的关系的 MODIS 遥感[J]. 湖泊科学, 2008, **20**(2): 173-178.
- [36] 孙英, 何江, 吕昌伟, 等. 岱海表层沉积物中影响氨氮释放的模拟研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, **28**(7): 1464-1468.
- [37] 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.
- [38] 向燕, 吴宇澄, 刘国锋, 等. 太湖竺山湾沉积物中氨氧化原核生物的垂直分布与多样性[J]. 生态学报, 2010, **36**(6): 1423-1430.
- [39] 王雨春, 万国江, 黄荣贵, 等. 红枫湖、百花湖沉积物全氮、可交换态氮和固定铵的赋存特征[J]. 湖泊科学, 2002, **14**(4): 301-309.
- [40] 张文艺, 韩有法, 陆丽巧, 等. 太漏运河流域水环境污染解析[J]. 中国农村水利水电, 2012, (9): 47-50.

CONTENTS

Form of the Particulate Matter Ambient Air Standards in China	WANG Shuai, DING Jun-nan, WANG Rui-bin, <i>et al.</i> (401)
Seasonal Variation of Carcinogenic Heavy Metals in PM _{2.5} and Source Analysis in Beijing	TAO Jun, ZHANG Ren-jian, DUAN Jing-chun, <i>et al.</i> (411)
Temporal and Spatial Distribution of PM _{2.5} and PM ₁₀ Pollution Status and the Correlation of Particulate Matters and Meteorological Factors During Winter and Spring in Beijing	ZHAO Chen-xi, WANG Yun-qi, WANG Yu-jie, <i>et al.</i> (418)
Inversion and Spatial-Temporal Distribution Analysis on PM _{5.0} Inhalable Particulate in Beijing	WANG Yan-hui, XIAO Yao (428)
Characterization of Ultrafine Particle Size Distribution in the Urban Atmosphere of Hangzhou in Spring	XIE Xiao-fang, SUN Zai, YANG Wen-jun (436)
Size Distributions of Aerosol During the Spring Festival in Nanjing	WANG Hong-lei, ZHU Bin, SHEN Li-juan, <i>et al.</i> (442)
Size Distributions of Organic Carbon and Elemental Carbon in Nanjing Aerosol Particles	WU Meng-long, GUO Zhao-bing, LIU Feng-ling, <i>et al.</i> (451)
Characterization of Organic and Elemental Carbon in PM ₁₀ in Xinzhou City	SHI Mei-xian, PENG Lin, LIU Xiao-feng, <i>et al.</i> (458)
Seasonal Variation of Concentrations and Distribution Characteristics of PCDD/Fs in Atmosphere of an Industrial Area, Guangzhou	QING Xian, SU Yuan, SU Qing, <i>et al.</i> (464)
Hazard Evaluation Modeling of Particulate Matters Emitted by Coal-Fired Boilers and Case Analysis	SHI Yan-ting, DU Qian, GAO Jian-min, <i>et al.</i> (470)
Chemical Characteristics of Precipitation in South China Sea	XIAO Hong-wei, LONG Ai-min, XIE Lu-hua, <i>et al.</i> (475)
Analysis of Acid Rain Characteristics of Lin'an Regional Background Station Using Long-term Observation Data	LI Zheng-quan, MA Hao, MAO Yu-ding, <i>et al.</i> (481)
Characteristics of Atmospheric Nitrogen Wet Deposition in Beijing Urban Area	HE Cheng-wu, REN Yu-fen, WANG Xiao-ke, <i>et al.</i> (490)
Studies of Ozone Formation Potentials for Benzene and Ethylbenzene Using a Smog Chamber and Model Simulation	JIA Long, XU Yong-fu (495)
Characteristics of Fly Ash Particles Deposition in the Snowpack of Laohugou Glacier No. 12 in Western Qilian Mountains, China	DONG Zhi-wen, QIN Da-he, QIN Xiang, <i>et al.</i> (504)
Odor Emission Rate of Municipal Solid Waste from Landfill Working Area	QIANG Ning, WANG Hong-yu, ZHAO Ai-hua, <i>et al.</i> (513)
Gaseous Phenol Removal in a Bio-Trickling Filter	HE Jue-cong, HUANG Qian-ru, CHEN Zhou-yang, <i>et al.</i> (520)
Particulate Distribution Characteristics of Chinese Phrase V Diesel Engine Based on Butanol-Diesel Blends	LOU Di-ming, XU Ning, FAN Wen-jia, <i>et al.</i> (526)
Effects of Turning Frequency on Emission of Greenhouse Gas and Ammonia During Swine Manure Windrow Composting	ZHAO Chen-yang, LI Hong-mei, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (533)
Oxidation of Mercury by CuBr ₂ Decomposition Under Controlled-Release Membrane Catalysis Condition	HU Lin-gang, QU Zan, YAN Nai-qiang, <i>et al.</i> (541)
Distributions and Influencing Factors of Total Dissolved Inorganic Antimony in the Coastal Area of Zhejiang and Fujian	ZHANG Xu-zhou, REN Jing-ling, LIU Zong-guang, <i>et al.</i> (547)
Calculation of Allowable Pollution Loads for Lake and Reservoir Based on Bi-direction Algorithm and Its Case Study	JIA Hai-feng, GUO Yu (555)
Risk Assessment of Quaternary Groundwater Contamination in Beijing Plain	GUO Gao-xuan, LI Yu, XU Liang, <i>et al.</i> (562)
Mixing Behavior of Nutrients in Different Seasons at Liaohe Estuary	ZHANG Jin-hua, YU Li-xia, YAO Qing-zhen, <i>et al.</i> (569)
Distribution of Nitrogen in the Sediment of Taige South River Estuary	MA Jiu-yuan, WANG Guo-xiang, LI Zhen-guo, <i>et al.</i> (577)
Selection and Purification Potential Evaluation of Woody Plant in Vertical Flow Constructed Wetlands in the Subtropical Area	CHEN Yong-hua, WU Xiao-fu, HAO Jun, <i>et al.</i> (585)
Correlation of Substrate Structure and Hydraulic Characteristics in Subsurface Flow Constructed Wetlands	BAI Shao-yuan, SONG Zhi-xin, DING Yan-li, <i>et al.</i> (592)
Impacts of <i>Eichhornia crassipes</i> (Mart.) Solms Stress on the Growth Characteristics, Microcystins and Nutrients Release of <i>Microcystis aeruginosa</i>	ZHOU Qing, HAN Shi-qun, YAN Shao-hua, <i>et al.</i> (597)
Effects of Different Pre-oxidants on DBPs Formation Potential by Chlorination and Chloramination of Yangtze River Raw Water	TIAN Fu-xiang, XU Bin, RONG Rong, <i>et al.</i> (605)
Adsorption of Phenanthrene from Aqueous Solution on Cetylpyridinium Bromide (CPB)-Modified Zeolite	LI Jia, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (611)
Characteristics and Selectivity of Photocatalytic-Degradation of Tetracycline Hydrochloride	SONG Chen-yi, YIN Da-qiang (619)
Characterization of Biocatalysed Sulfate Reduction in a Cathode of Microbial Electrolysis System	FU Shi-yu, LIU Guang-li, LUO Hai-ping, <i>et al.</i> (626)
Characteristics of Dissolved Organic Matter in A/DAT-IAT System for Municipal Wastewater Treatment Based on Ecological Safety	YANG Sai, ZHOU Qi-xing, HUA Tao (633)
Membrane Surface Fouling Properties in MBRs for High-Salinity Wastewater Treatment	LI Bin, WANG Zhi-wei, AN Ying, <i>et al.</i> (643)
Treatment of Petrochemical Secondary Effluent by Ozone-biological Aerated Filter	LIU Ming-guo, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (651)
Treatment of Pectin Wastewater by Anaerobic Biological Process	CHEN Bing-bing, YANG Chun-ping, LI Xiang, <i>et al.</i> (657)
Sorption Mechanism of Ofloxacin by Carbon Nanotubes	ZHAO Xing-xing, YU Shui-li, WANG Zhe (663)
Biosorption Characteristics of Cu ²⁺ by Spent Substrate of <i>Pleurotus</i> Oyster	HU Xiao-jing, ZANG Ting-ting, GU Hai-dong, <i>et al.</i> (669)
Adsorption Dynamics and Breakthrough Characteristics Based on the Fluidization Condition	WANG Jun, WANG Yao, HUANG Xing, <i>et al.</i> (678)
Characteristics of Speciation and Evaluation of Ecological Risk of Heavy Metals in Sewage Sludge of Guangzhou	GUO Peng-ran, LEI Yong-qian, CAI Da-chuan, <i>et al.</i> (684)
Spatial Distribution and Accumulation of Heavy Metal in Arable Land Soil of China	ZHANG Xiao-min, ZHANG Xiu-ying, ZHONG Tai-yang, <i>et al.</i> (692)
Pollution Patterns and Health Risk Assessment for Polychlorinated Biphenyls in Soils from a Capacitor Storage Site	ZHOU Ling-li, WU Guang-long, XUE Nan-dong, <i>et al.</i> (704)
Occurrence and Spatial Differentiation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soils from Shenzhen, China	ZHANG Di, CAO Shan-ping, SUN Jian-lin, <i>et al.</i> (711)
Risk Assessment and Countermeasures of Heavy Metals Pollution in Wanquan Segment of Yanghe River	TAN Bing, WANG Tie-yu, ZHU Zhao-yun, <i>et al.</i> (719)
Effects of Group Matching Curing Agent on Exchangeable Pb, Cd, Zn Contents in the Potted Soils and their Accumulation in Rice Plants	ZENG Hui, ZHOU Hang, QIU Qiong-yao, <i>et al.</i> (727)
Impact of Compound Chelants on Removal of Heavy Metals and Characteristics of Morphologic Change in Soil from Heavy Metals Contaminated Sites	YIN Xue, CHEN Jia-jun, LÜ Ce (733)
Characterization of Manganese Oxidation by <i>Pseudomonas</i> sp. QJX-1	ZHOU Na-na, BAI Yao-hui, LIANG Jin-song, <i>et al.</i> (740)
Effects of the Ratio of NO ₃ ⁻ -N to NO ₂ ⁻ -N on the Removal of Sulfide and Nitrogen by Mixed Culture and Pure Culture	CHEN Zi-ai, CHEN Hui-juan, WEI Ben-ping, <i>et al.</i> (746)
Carbon Metabolic Characteristics of Airborne Microbes in Hangzhou	GONG Chan-juan, XU Jing, FANG Zhi-guo, <i>et al.</i> (753)
Study on the Backward Extraction of Cellulase in Rhammolid Reverse Micelles	ZHAO Yan-ge, YUAN Xing-zhong, HUANG Hua-jun, <i>et al.</i> (759)
Inner- and Inter-Species Differences of Mercury Concentration in Common Fishes from the Yellow Sea	ZHU Ai-jia, XU Zhan-zhou, LIU Gui-ze, <i>et al.</i> (764)
Study on the Effect of Enzymatic Activity and Acute Toxicity of Three PAEs on <i>Eisenia foetida</i>	WANG Yan, MA Ze-min, WU Shi-jin (770)
Environmental Safety Assessment on the New Super Absorbent Polymers Applied into a Soil-Chinese Cabbage System	LI Xi, HE Ji-zheng, ZHENG Yuan-ming, <i>et al.</i> (780)
Study on Dynamics of Hydrogen Sulfide and Carbonyl Sulfide Emission Fluxes from <i>Suaeda salsa</i> Marsh in the Yellow River Estuary	LI Xin-hua, GUO Hong-hai, YANG Li-ping, <i>et al.</i> (786)
Key Microbial Processes in Nitrous Oxide Emissions of Agricultural Soil and Mitigation Strategies	ZHU Yong-guan, WANG Xiao-hui, YANG Xiao-ru, <i>et al.</i> (792)

《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2月15日 35卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 2 Feb. 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