

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第9期

Vol.33 No.9

2012

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4个WMO/GAW本底站大气CH₄浓度及变化特征 方双喜,周凌晔,许林,姚波,刘立新,夏玲君,王红阳(2917)

我国东北地区大气降水稳定同位素特征及其水汽来源 李小飞,张明军,马潜,李亚举,王圣杰,汪宝龙(2924)

2010年广州亚运期间空气质量与污染气象条件分析 李婷苑,邓雪娇,范绍佳,吴兑,李菲,邓涛,谭浩波,蒋德海(2932)

厦门市冬春季灰霾期间大气PM₁₀中多环芳烃的污染特征及来源分析 钱冉冉,闫景明,吴水平,王新红(2939)

气溶胶OCEC切割点确定方法改进及应用 王莉华,董华斌,闫才青,曾立民,郑玫,张延君,刘久萌,Weber R J(2946)

松花江上游夹皮沟金矿土壤与大气汞污染特征 张刚,王宁,王媛,刘特,艾建超(2953)

河北农居环境颗粒态汞污染特征及健康评估研究 赵亚娟,龚巍巍,栾胜基(2960)

印刷电路板(PCB)厂挥发性有机物(VOCs)排放指示物筛选 马英歌(2967)

烹调油烟中挥发性有机物的排放初探 何万清,田刚,聂磊,曲松,李靖,王敏燕(2973)

生物滴滤塔降解甲苯废气长期运行生物膜相特性研究 胡俊,郑江玲,吴越新,张丽丽,陈建孟(2979)

分期布液生物滴滤床净化H₂S废气性能研究 刘春敬,李坚,刘佳,彭淑婧,李超,陈英,何洪(2987)

粉煤灰综合利用过程中汞的二次释放规律研究 孟阳,王书肖(2993)

太湖、巢湖水体总悬浮物浓度半分析反演模型构建及其适用性评价 刘忠华,李云梅,檀静,郭宇龙,周莉,刘阁(3000)

巢湖水质与流域农业投入的关联性研究 张燕,高翔,张洪(3009)

巢湖十五里河水花生生长区沉积物及间隙水中营养盐的基本特性 李如忠,李峰,周爱佳(3014)

巢湖沉积物中磷蓄积时空变化及人为污染定量评价 刘恩峰,杜臣昌,羊向东,沈吉(3024)

巢湖周边表土中有机质、全氮和全磷空间分布及其相关性 陈书琴,储昭升,胡社荣,刘俊,王长春,王曼(3031)

丹江口水库典型入库支流氮磷动态特征研究 雷沛,张洪,单保庆(3038)

水温分层对三峡水库香溪河库湾春季水华的影响 刘流,刘德富,肖尚斌,孔松,陈媛媛,方小凤(3046)

平水期和丰水期殷村港污染物浓度时空变异比较研究 杨晓英,罗兴章,郑正,方淑波(3051)

江苏西部湖泊沉积物营养盐赋存形态和释放潜力差异性分析 刘涛,胡志新,杨柳燕,肖琳,席北斗,许其功(3057)

太湖西岸湖滨带沉积物氮磷有机质分布及评价 甘树,卢少勇,秦普丰,金相灿,焦伟,王佩(3064)

南四湖流域种植业面源污染氮磷源解析研究 刘静,路风,杨延钊,徐娜,王田妮(3070)

珠江水体中有机物分布、组成及与消毒副产物生成的关系 何洪威,周达诚,王保强,梁艳红(3076)

东江流域典型乡镇饮用水源地重金属污染健康风险评价 王若师,许秋瑾,张娴,魏群山,颜昌宙(3083)

深圳茅洲河表层沉积物卤代多环芳烃污染研究 孙建林,倪宏刚,丁超,曾辉(3089)

福建罗源湾潮间带沉积物重金属含量空间分布及其环境质量影响 高文华,杜永芬,王丹丹,高抒(3097)

渤海湾大型底栖生物群落结构变化及原因探讨 蔡文倩,刘录三,乔飞,林尚璇,周娟(3104)

地下水污染防治区划体系构建研究 王俊杰,何江涛,陆燕,刘丽雅,张小亮(3110)

北京市平原区地下水污染防治区划不确定性分析 陆燕,何江涛,王俊杰,刘丽雅,张小亮(3117)

川东平行岭谷区典型岩溶含水系统中NO₃⁻的存储和运移 杨平恒,袁道先,任幼蓉,谢世友,贺秋芳,胡晓风(3124)

改性活性炭对水中PFOS的吸附去除研究 董锡臻,石宝友,解岳,王东升(3132)

水溶液中臭氧和溴离子的反应研究 俞潇婷,张家辉,潘循哲,张仁熙,侯惠奇(3139)

HPSEC-UV-TOC联用技术测定有机物相对分子质量分布 张晗,董秉直(3144)

不同有机基质诱发的水体黑臭及主要致臭物(VOSC_s)产生机制研究 卢信,冯紫艳,商景阁,范成新,邓建才(3152)

不同pH下纳米铁镍颗粒对生物降解苯酚的影响 况焯,周琰,王清萍,陈祖亮(3160)

多级微氧生物流化床预处理高浓度丙烯酸废水 李莎,郑盛之,宋玉栋,周岳溪,朱长军,刘淑玲,潘玲,蒲文晶(3167)

三级生物膜深度处理腈纶废水生化出水的脱氮研究 徐少阳,蒋进元,周岳溪,崔俊涛,段妮妮(3172)

改性花生壳对水中镉的动态吸附研究 龙腾,易筱筠,党志(3177)

硫氰酸根在粒状镁铝复合氧化物上的吸附性能 王秀娟,王海增,孙宝维,韩文军(3182)

海水生物滤器氨氮沿程转化规律模型 罗荣强,侯沙沙,沈加正,陈珠,刘鹰(3189)

营养物质缺乏引起的好氧颗粒污泥膨胀及其恢复 张著,高大文,袁向娟,勾倩倩(3197)

生物表面活性剂强化污泥水解的研究 易欣,罗琨,杨麒,李小明,邓伟光,张植平(3202)

厌氧氨氧化菌的富集培养与分子鉴定 刘冬英,邱艳玲,袁宪正,师晓爽,郭荣波(3208)

阿特拉津降解菌株的分离、鉴定及降解特性研究 李绍峰,朱静,李铁晶(3214)

农业废物堆肥中高产漆酶新菌株的分离鉴定及酶学性质研究 任秀娟,范长征,鲁伦慧,王聪,曾光明(3220)

糖蜜酒精废水脱色微生物的筛选及鉴定 李必金,刘幽燕,贺锴,滕芳明,何熙璞,李青云(3228)

餐厨垃圾乳酸发酵过程中的微生物多样性分析 刘建国,汪群慧,王爽,孙晓红,仇天雷,李焕(3236)

共价功能化对单壁碳纳米管产生DNA损伤和活性氧的影响研究 吴仁人,陶雪琴,党志,李开明,蔡美芳(3241)

*Geobacter sulfurreducens*对汞的甲基化及其影响因素研究 邹嫣,司友斌,颜雪,陈艳(3247)

单一与复合胁迫下油菜对镉、铅的吸收效应 武文飞,南忠仁,王胜利,赵转军,周婷(3253)

金铜矿下游农户家养番鸭体内重金属分布特征及其评价 杭小帅,梁斌,王文林,王霞,李维新(3261)

环境激素氧氟菊酯对芫花臂尾轮虫繁殖的影响 董学兴,杨家新,吕林兰,赵卫红,於叶兵(3266)

地聚物固化生活垃圾焚烧飞灰固化体抗氧化硫杆菌腐蚀性能的研究 金漫彤,孙鑫,董海丽,金赞芳(3272)

焚烧飞灰高温过程中重金属的挥发及其氯化物特征 刘敬勇,孙水裕(3279)

城市废弃物处理温室气体排放研究:以厦门市为例 于洋,崔胜辉,林剑艺,李飞(3288)

NPEOs及其代谢产物在城市污水处理厂中的归趋分析 连静,刘俊新(3295)

《环境科学》征订启事(3037) 《环境科学》征稿简则(3151) 信息(2999,3030,3096,3227)

巢湖十五里河水花生生长区沉积物及间隙水中营养盐的基本特性

李如忠, 李峰, 周爱佳

(合肥工业大学资源与环境工程学院, 合肥 230009)

摘要: 为揭示十五里河水生植物(水花生)生长区沉积物及间隙水营养盐的基本特征,在河道上选择 3 个具有代表性的采样点位(SP1、SP2 和 SP3)和 1 个对照点位(SP4),采集 15 根沉积物柱状样,并按 2 cm 厚度现场分层,得到样品 80 个.在对沉积物 TN、TP、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、Fe/Al-P、Ca-P、有机质含量及间隙水 TN、TP、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度分析测试基础上,解析沉积物及间隙水的氮磷垂直剖面分布特征,并进行氮磷相关性分析.由间隙水氮磷剖面分布发现,水花生生长区孔隙水氮磷浓度具有大致相似的垂直变化特性;除 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度存在差异外,不同采样点位表层沉积物-上覆水界面的营养盐源汇关系,也具有很好的一致性.研究表明,在沉积深度 0~18 cm 内,水花生生长区的间隙水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 垂直浓度剖面,基本上都可以由 Origin 软件提供的 Exp2PMod2 或 Exp3P2 指数函数拟合,而 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 则不具备这一特点,暗示着间隙水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 扩散的规律性弱于 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$.

关键词: 水花生; 沉积物; 氮磷营养物; 间隙水; 巢湖

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)09-3014-10

Sediment and Pore Water Nutrient Characteristics in Growing Zones of *Alternanthera philoxeroides* in the Shiwuli River, Chaohu Lake

LI Ru-zhong, LI Feng, ZHOU Ai-jia

(School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: In order to investigate the nitrogen and phosphorus characteristics of sediments and pore water in growing zones of aquatic macrophytes (*Alternanthera philoxeroides*), three classic representative sampling points in the planted *Alternanthera philoxeroides* fields (i. e. SP1, SP2 and SP3) and one reference site in the seldom vegetation (i. e. SP4) were chosen along the Shiwuli River, pouring into Chaohu Lake. Fifteen sediment cores were collected and sliced in-situ with a thickness of 2 cm, and a total of 80 samples were obtained. In the laboratory, both the contents of TN, TP, $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$, Fe/Al-P, Ca-P, organic matter in sediments and the concentrations of TN, TP, $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ and $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ in pore water were measured. And then, the vertical distribution profiles were illustrated and explored, and the correlations were also analyzed for the growing zones of *Alternanthera philoxeroides*. Through the comparison of profiles, it found that both nitrogen and phosphorus concentrations in pore water showed a rough similarity for three vegetation fields. At the surface sediment-overlying water interface, in general, there was a good agreement on the source-sink relationship for nitrogen and phosphorus corresponding to the SP1, SP2 and SP3. Study results showed that the vertical distribution of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$ in pore water within the depth of 0-18 cm could be characterized by using exponential functions such as Exp2PMod2 or Exp3P2 provided by OriginLab software, but $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ hardly ever did, implying that $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ might have a weaker regularity in solute diffusion than that of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$.

Key words: *Alternanthera philoxeroides*; sediment; nitrogen and phosphorus nutrients; pore water; Chaohu Lake

水花生 (*Alternanthera philoxeroides*), 别名空心苋、空心莲子草、喜旱莲子草等,原产于南美洲,为水生或湿生多年生宿根性草本植物,具有生命力强、适应性广、生长繁殖迅速的特点,在我国长江流域各省区的沟渠、水塘、湖泊、水库中分布广泛.虽然水花生对降低水体氮磷营养负荷、减轻水体污染有很好的效果,但秋冬季枯死的植株残体又会带来二次污染问题^[1].而且,河道内水花生的大量繁生,还可能导致水流速度下降,从而改变河道局地水动力学条件,影响水流携带污染负荷的沉降以及沉积

物与孔隙水氮磷营养盐分布.目前,针对水生植物生长区沉积物及间隙水氮磷营养盐特征的研究,还是环境科学领域的一个热点课题^[2-7].与国外相比,国内在该领域的研究主要还是集中在湖泊、水库、滨海湿地等相对较为宽阔的水域^[8-11],对于河流水系(特别是小河流)的研究则显得较为不足.

收稿日期: 2011-11-19; 修订日期: 2012-02-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(51179042); 合肥工业大学创新群体基金项目(2009HGCX0233)

作者简介: 李如忠(1970~),男,博士,教授,主要研究方向为水环境保护与城市环境地球化学, E-mail: Lrz1970@163.com

巢湖是“九五”至“十一五”期间,国家重点治理的“三大”湖泊之一,该湖水体富营养化和水质污染严重,特别是靠近合肥市的西半湖水体^[12,13]。作为汇水区域氮磷营养物进入巢湖的主要通道,目前大多数入湖河流水系都面临水花生生长异常旺盛的问题,尤其是那些流经城市区域的河道,如十五里河、双桥河、派河等。随着巢湖水体污染控制和富营养化治理的深入推进,改善入湖河道水环境质量、控制氮磷营养负荷输出已成为巢湖富营养化治理的一项重要举措。十五里河位于西半湖北侧的合肥市境内,是整个巢湖流域氮磷污染相对最为严重的河流水体,因此十五里河水环境状况一直为相关部门所关注。虽然笔者所在课题组曾就该河沉积物污染开展了一些研究^[14,15],但由于采样点都是布置在河道中央,对水花生生长区沉积物及间隙水的基本特性尚不十分清楚。为此,本研究拟选择滨岸水域水花生生长区为对象,就沉积物及间隙水营养盐的基本特性开展分析,以期对十五里河水环境修复和巢湖西半湖水体富营养化氮磷负荷调控提供依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集与分析

1.1.1 研究区域及采样点的选择

十五里河发源于安徽省合肥市西郊的大蜀山东南麓,自西北流向东南,穿过合肥市政务文化新区和包河区后,在义城镇附近汇入巢湖,流域面积 111.25 km²,全长约 22.54 km。长期以来,由于沿河工业废水和生活污水,特别是上游地区的江淮化肥厂和红四方化工集团(原合肥化肥厂)工业废水排放,导致水体氮磷污染相当严重, NH₄⁺-N、TN 和 TP

平均浓度分别高达 19.89、22.29 和 1.33 mg·L⁻¹^[16],水体沉积物 TN、TP 平均含量 1670、630 mg·kg⁻¹。据估算,经由十五里河进入巢湖的 NH₄⁺-N 和 TN 分别占全流域入湖河流输入总量的 42.92% 和 31.17%^[16]。近年来,随着江淮化肥厂和红四方化工集团的陆续停产、搬迁以及沿河截污工程的实施,十五里河污水来水量和污染负荷得到大幅减少,河流水质黑臭现象初步得到缓解,但河床上长期积累的内源氮、磷污染释放,成为制约河流水质改善的限制性因素,并对西半湖水体富营养化治理带来负面影响。

十五里河水体丰富的氮、磷营养盐及适宜的水文、气候条件,使得河道内水花生生长旺盛,一些河段甚至 2/3 以上的水面都被水花生所覆盖。实际上,十五里河水生植物种类较少,除水花生外,鲜有其它大型水生植物聚集生长。实地调查发现,十五里河水深不大,水花生生长区基本都在 20~50 cm 左右。由于河道两侧堤岸的束缚,河滩出露面积较小,水花生根系基本都是固着在河床沉积物中。鉴于上游河段新生成沉积物受城市河道整治扰动较大,本研究拟在位于耕作区的中、下游河段,针对水花生簇拥生长旺盛的滨岸水域,筛选出 3 个具有代表性的采样点位开展相关研究。其中,中游布置采样点 1 个(SP1),下游布置采样点 2 个(SP2 和 SP3)。作为对比,拟在下游河道中央选择一处没有明显根生水生植物的水域作为对照点(SP4),各采样点情况见表 1。由于河水补给水量明显减少,十五里河水流速度一般不大,特别是下游地区,受巢湖湖水顶托和水花生滞水的共同影响,河水流动颇为缓慢。

表 1 采样点周边及水花生生长状况描述

Table 1 Characteristic description of environment and <i>Alternanthera philoxeroides</i> corresponding to each sampling site		
采样点	位置	情况描述
SP1	中游	采样点上游方向 10 m 处有小支流汇入,该支流接纳附近村落生活污水和非点源污染径流。该点附近河岸坡度较缓,附近有乡村公路直通村庄。该点位水花生生长旺盛,在水面上呈现出了簇拥生长的态势,甚至一些茎蔓还向河岸滩地匍匐生长
SP2	下游	采样点上方 10 m 处有排水口,主要接纳农田排水、畜禽养殖废水和养鱼塘排水等。该点附近河道下切较深、河岸较陡,受人为扰动影响较小。该点位水花生生长颇为旺盛,河道两侧水面簇拥生长的水花生覆盖了大部分河面
SP3	下游	采样点上游 15 m 处存在一个由闸门控制的排水渠,主要接纳附近畜禽养殖场废水和养鱼塘排水。该点附近河道下切较深、河岸较陡,受人为扰动影响较小。该点位水花生生长颇为旺盛,河道两侧水面簇拥生长的水花生几乎覆盖了整个河面
SP4	下游	采样点介于 SP2 和 SP3 之间的河道中央,水面上稀疏地漂浮着些许的浮萍,没有其它明显的大型水生植物存在

1.1.2 沉积物采集与间隙水获取

2011 年 8 月底至 9 月初,利用自制柱状采泥器(直径 $\phi = 8$ cm,有效高度 $h = 80$ cm)分多次采集沉

积物柱状样。考虑到水花生根系生长的可能影响深度,选取柱状样上部的 0~40 cm 厚度范围作为分析对象。为确保间隙水中氮磷浓度分析所需的水量,

在每个采样点均采集 3~4 根平行样(共计 15 根),并按 2 cm 厚度现场分层,装入封口袋内、冷藏。在实验室,将每个点位对应层高的各分层样均匀混合,作为代表该点的样品,共计得到样品 80 个。在每个样品中,一部分泥样用来测试沉积物氮、磷及有机质含量,另一部分用于获取间隙水以便测定氮磷营养盐浓度。沉积物物理指标(如空隙度、湿容重等)由未混合前的各分层泥样进行分别测定,然后再对同一分层取平均值。本研究中,沉积物间隙水由常规的离心法获取。为揭示表层沉积物与上覆水之间的源/汇关系,在每个采样点的水-土界面上方 2 cm 处设法采集上覆水,分析测定相应的氮、磷营养盐浓度。

1.1.3 沉积物与间隙水性质分析

(1) 沉积物湿容重、空隙度的测定

沉积物湿容重采用环刀法测定;空隙度按下式计算^[6]:

$$\text{空隙度}(\%) = \frac{[W_w - W_d]}{[W_w - W_d] + W_d/2.5} \times 100\%$$

式中, W_w 表示沉积物鲜重(g); W_d 表示沉积物干重(g);2.5 为表层沉积物平均密度与水密度的比值。

(2) 有机质(OM)含量的测定

沉积物中有机质采用重铬酸钾容量法-稀释热法(水合热法)测定。

(3) 氨氮(NH_4^+ -N)、硝态氮(NO_3^- -N)、总氮(TN)、总磷(TP)及铁/铝磷(Fe/Al-P)和钙磷(Ca-P)的测定

将沉积物样品在室温下自然阴干,除去植物和贝类等残体,研磨、过 100 目尼龙筛后,装入密封袋,用于测定 TN、TP、 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N、Fe/Al-P 和 Ca-P 等含量。其中, NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 的测定方法如下:称取 4 g 风干的沉积物,分别加入 20 mL 0.2% CaSO_4 溶液和 2 mol·L⁻¹ KCl 溶液,利用 KCl 溶液浸提(液:土=5:1),振荡 30 min,过滤,采用酚二磺酸法测定浸提液中 NO_3^- -N 含量,纳氏比色法测定 NH_4^+ -N 含量。在碱性过硫酸钾消解沉积物样,并经过滤之后,采用紫外分光光度法测定 TN。TP、Fe/Al-P 和 Ca-P 则是在 SMT 法提取后,采用钼锑抗分光光度法测定^[17]。

(4) 间隙水营养盐含量的测定

间隙水在经过滤处理后,采用纳氏试剂比色法测定 NH_4^+ -N,紫外分光光度法测定 NO_3^- -N,钼锑抗分光光度法测定 PO_4^{3-} -P^[17]。

1.2 数据处理与分析方法

利用 Origin 7.5 软件绘制沉积物、间隙水中物理化学指标的垂直剖面变化曲线,间隙水中氮磷营养盐浓度拟合也由 Origin 7.5 软件完成,数据的相关性分析则由 SPSS 13.0 软件实现。

2 结果与讨论

2.1 沉积物垂直剖面的理化特征

十五里河水花生生长区各样点(SP1、SP2 和 SP3)及对照点(SP4)沉积物中,TN、TP、 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N、Fe/Al-P 和 Ca-P 含量的垂直剖面变化见图 1。显然,在深度 0~16 cm,SP1 的 TN 值变化剧烈,含量由 1 029.23 mg·kg⁻¹(2 cm)迅速下降到 304.64 mg·kg⁻¹(10 cm),随后又快速上升到 1 082.15 mg·kg⁻¹(16 cm),然后趋于稳定,并大致维持在 1 000~1 300 mg·kg⁻¹。其它各点位大体呈现 TN 含量随沉积深度增加而下降的特点,且不同层间变化幅度很大。SP2 和 SP4 的 TN 含量相对较高,分别为(1 145.52 ± 312.92) mg·kg⁻¹和(1 187.75 ± 265.76) mg·kg⁻¹;SP1 和 SP3 较为接近,分别为(907.54 ± 344.93) mg·kg⁻¹和(965.62 ± 340.61) mg·kg⁻¹。由图 1 可见,SP1 的 TP 含量随沉积深度变化的剧烈程度远超过其它点位,呈现明显的“S”型分布特征;其次是 SP4 点位,而 SP2 和 SP3 含量则大体处于 800 mg·kg⁻¹左右。

就 NH_4^+ -N 而言,4 个点位均表现出含量随沉积深度增加而增大的变化态势,具有水体沉积物垂直方向变化的一般共性^[6,18,19],这可能因为还原性条件较有利于 NH_4^+ -N 储蓄的缘故。在 8 cm 深度以下,各样点及对照点的 NO_3^- -N 含量均趋于稳定且数值大小相差不大;而在 0~8 cm 沉积深度,4 个点位都表现出 NO_3^- -N 随深度减小而快速增加的特点,尤其是 SP4。出现上述现象的原因,可能是表层氧化层或界面水附近的氨氧化细菌和亚硝态酸盐氧化菌的参与下, NH_4^+ -N 经硝化作用转化为 NO_3^- -N,形成了 NO_3^- -N 的表层富集^[18]。而在较深的沉积层内部,由于处于缺氧环境, NO_3^- -N 因充当厌氧细菌的替代电子受体而被还原,从而使 NO_3^- -N 转化为 NH_4^+ -N、 NO_2^- -N。在 SP4 点位,仅在 0~8 cm 深度, NO_3^- -N 就由 549.46 mg·kg⁻¹快速下降到 40.68 mg·kg⁻¹,处在水花生生长区的 SP1 也由 260.65 mg·kg⁻¹下降到了 53.89 mg·kg⁻¹,而 SP2 和 SP3 虽然也都表现出下降态势,但变化的剧烈程度显著低于没有水花生生长的 SP4。究其原因,可能因为上覆水中溶解氧向下

扩散,特别是通过植物茎的输送使得沉积物中具有了一定的氧含量而存在着微生物硝化作用,致使 NO_3^- -N 随沉积深度增加而含量下降的速度减缓^[19,20]. 对于 Fe/Al-P, 变化较为剧烈的依旧是 SP1, 呈现出明显的“S”形分布特征, 而其它 3 个点

位则大致维持在 $400 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 左右. 此外, SP1 的 Ca-P 含量变化也非常显著, 而且 SP4 也表现出随沉积深度增加, Ca-P 含量下降的特点, 但 SP4 的 Ca-P 含量明显高于水花生生长区的 SP1、SP2 和 SP3 点位.

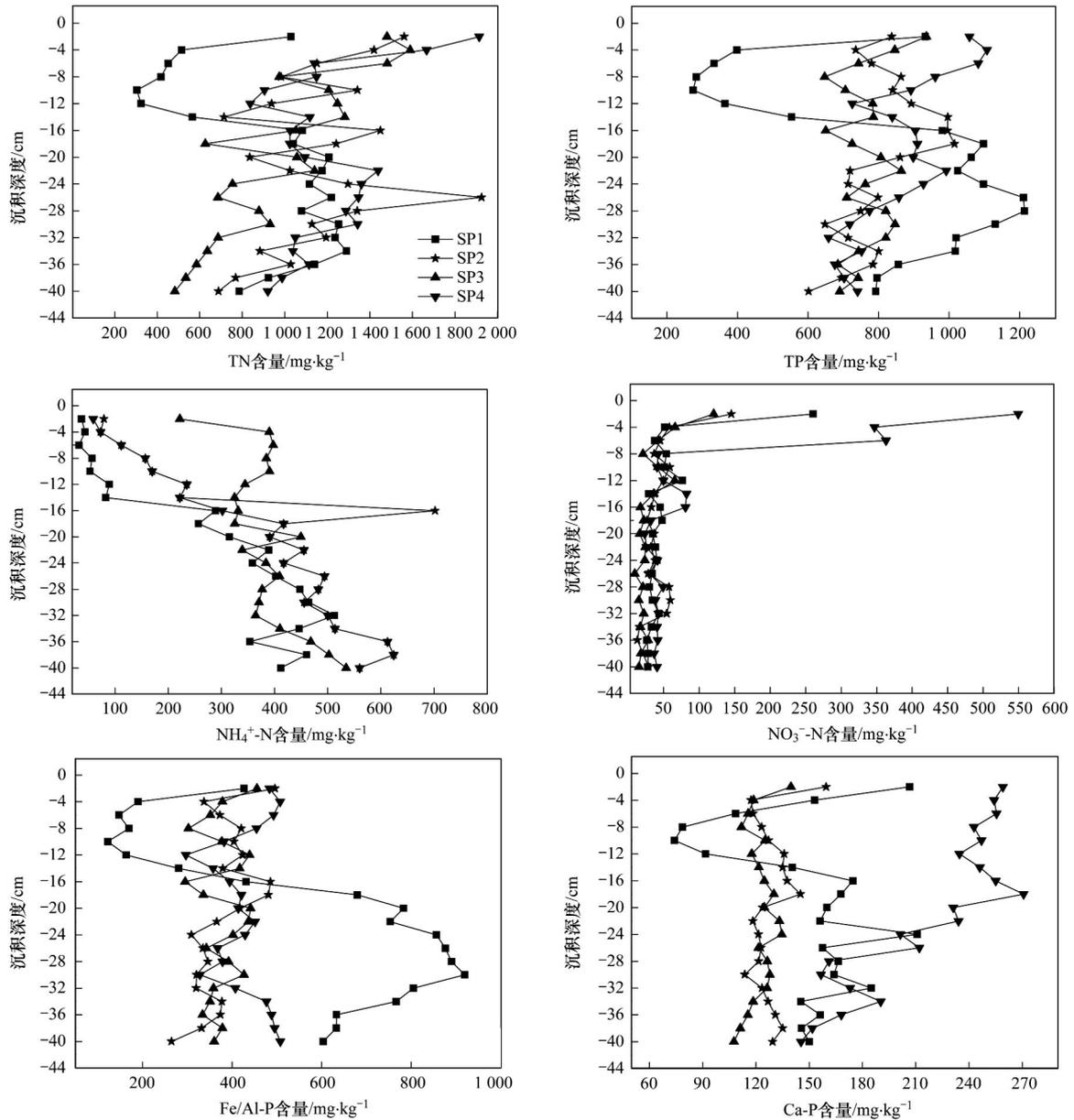


图1 沉积物氮磷含量垂直剖面变化

Fig. 1 Profiles variations of nitrogen and phosphorus in the sediments

沉积物中有机质本身就是磷营养的主要来源, 同时又可以通过吸附作用转而影响沉积物中磷的释放活动^[21], 而且有机质还可以通过自身及其与铁的相互作用, 显著提高沉积物对磷的吸收能力. 十五里河 4 个点位沉积物垂直剖面的有机质含量见图 2. 很显然, SP1 有机质含量明显低于其它各点位,

这可能是 SP1 沉积物剖面 TP、Fe/Al-P 和 Ca-P 含量变化剧烈的一个重要影响因素. 需要提及的是, 尽管 SP1 处水花生生长旺盛, 秋冬季节枯死的水花生残体也通过沉入水底而增加沉积物中氮、磷及有机质含量, 但其有机质含量并不高, 平均仅为 1.98% (质量分数), 甚至低于没有水花生的河道中

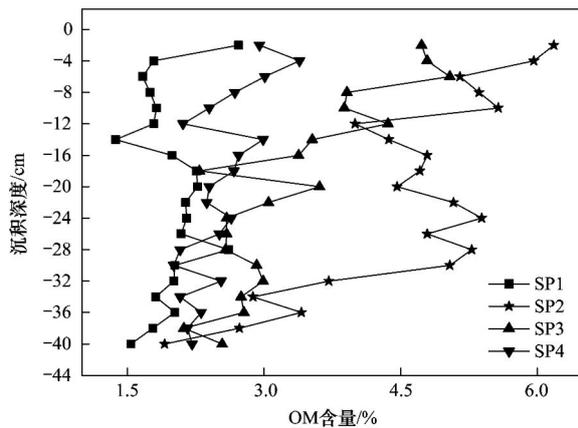


图2 沉积物垂直剖面的有机质分布

Fig. 2 Profiles variations of organic matter in sediments

心(2.51%)。实地调查发现,SP1 两岸河道护坡较为平缓且毗近村庄,经常有村民采割水花生茎蔓用

于鱼塘养鱼和喂养牲畜,从而导致该点位秋冬季沉入水底的水花生生物量偏少。而在河道下切较深、两侧坡岸较陡的 SP2 和 SP3,沉积物有机质含量显然要高得多。其中,SP2 在 0~30 cm 深度的有机质平均含量甚至高达 5.07%,SP3 也达到 3.60%。

4 个点位不同沉积深度沉积物的空隙度、湿密度及 pH 值见表 2。显然,随着深度的增大,沉积物的空隙度均逐步减小,湿密度则逐步增大。在没有水花生生长的 SP4,沉积物的湿密度明显较水花生生长区高一些。SP1 的湿密度稍高于 SP2 和 SP3,这与该点位沉积物中植物残体生物量偏低是一致的。SP1、SP2、SP3 和 SP4 沉积物的 pH 值,分别为 7.33 ± 0.23 、 7.62 ± 0.16 、 7.66 ± 0.23 和 7.55 ± 0.18 。总体上,各点位上部各分层的 pH 值较下部略高一些,但均不足 8.0。

表 2 沉积物不同沉积深度的其它性质

Table 2 Other primary properties of sediments corresponding to different depths

剖面/cm	SP1			SP2			SP3			SP4		
	空隙度/%	湿密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	pH									
0~2	80.43	1.625	7.54	78.06	1.376	7.86	77.36	1.389	7.75	75.43	1.630	7.81
2~4	75.27	1.599	7.90	73.61	1.470	7.90	74.53	1.456	7.85	71.19	1.702	7.65
4~6	68.92	1.690	7.75	79.62	1.533	7.87	75.62	1.543	7.83	71.44	1.737	7.84
6~8	72.88	1.683	7.05	71.98	1.589	7.79	73.57	1.587	7.77	73.21	1.801	7.67
8~10	73.73	1.518	7.03	75.41	1.694	7.65	72.41	1.591	7.75	74.02	1.773	7.57
10~12	74.99	1.627	7.21	74.03	1.585	7.82	73.63	1.569	7.82	74.94	1.789	7.82
12~14	73.81	1.652	7.32	75.28	1.507	7.59	74.35	1.599	7.68	76.61	1.847	7.71
14~16	75.13	1.633	7.56	72.96	1.646	7.79	70.49	1.619	7.79	70.05	1.761	7.49
16~18	76.10	1.652	7.42	72.25	1.583	7.41	68.94	1.606	7.61	69.58	1.839	7.58
18~20	74.09	1.704	7.41	74.66	1.584	7.55	69.45	1.611	7.65	67.85	1.840	7.63
20~22	72.21	1.727	7.25	68.17	1.592	7.55	66.68	1.599	7.63	67.67	1.798	7.55
22~24	70.67	1.747	7.12	62.57	1.657	7.57	67.35	1.642	7.53	65.60	1.801	7.34
24~26	61.97	1.704	7.03	64.21	1.640	7.49	63.19	1.671	7.53	64.50	1.767	7.42
26~28	66.35	1.722	7.24	57.29	1.777	7.51	63.81	1.698	7.57	63.36	1.838	7.46
28~30	66.20	1.737	7.26	57.21	1.731	7.61	66.91	1.677	7.64	60.19	1.846	7.57
30~32	65.39	1.751	7.35	60.49	1.840	7.55	61.41	1.710	7.58	61.59	1.851	7.42
32~34	65.12	1.758	7.45	57.07	1.706	7.51	59.36	1.733	7.61	60.44	1.845	7.25
34~36	60.47	1.805	7.24	51.29	1.891	7.48	55.58	1.781	7.49	59.86	1.861	7.59
36~38	58.95	1.779	7.46	46.58	2.013	7.48	54.56	1.837	7.52	55.46	1.894	7.26
38~40	58.44	1.774	7.16	47.59	1.833	7.47	52.17	1.882	7.53	54.38	1.847	7.36
均值	69.56	1.694	7.33	66.02	1.662	7.62	67.07	1.640	7.66	66.87	1.803	7.55

2.2 间隙水氮磷的垂直变化特征

由于沉积物的含水率随沉积深度增大而逐步降低,使得相同分层厚度通过离心获得的间隙水量越来越少。为保证间隙水指标在化学分析测试时所需水量,结合上部沉积物 NH_4^+-N 、 $\text{NO}_3^- -\text{N}$ 和 $\text{PO}_4^{3-} -\text{P}$ 生物可利用性高的特点,本研究仅对前 10 层(0~20 cm)间隙水测试 TN 和 TP 浓度,而对 NH_4^+-N 、 $\text{NO}_3^- -\text{N}$ 和 $\text{PO}_4^{3-} -\text{P}$ 则完成整个柱样(0~40 cm)的分

析测试,得到间隙水氮磷浓度垂直剖面分布特征曲线(见图 3)。

不难看出,就 TN 而言,SP1 基本表现出随沉积深度增大而增大的变化态势,而 SP2、SP3 和 SP4 则均呈现先逐步增大而后逐步减小的变化特点,但 SP4 变化的剧烈程度明显超出 SP2 和 SP3。就 TP 而言,各点位垂直剖面的 TP 浓度均表现出显著的波动变化,其中 SP2、SP3 和 SP4 还表现出下降的趋

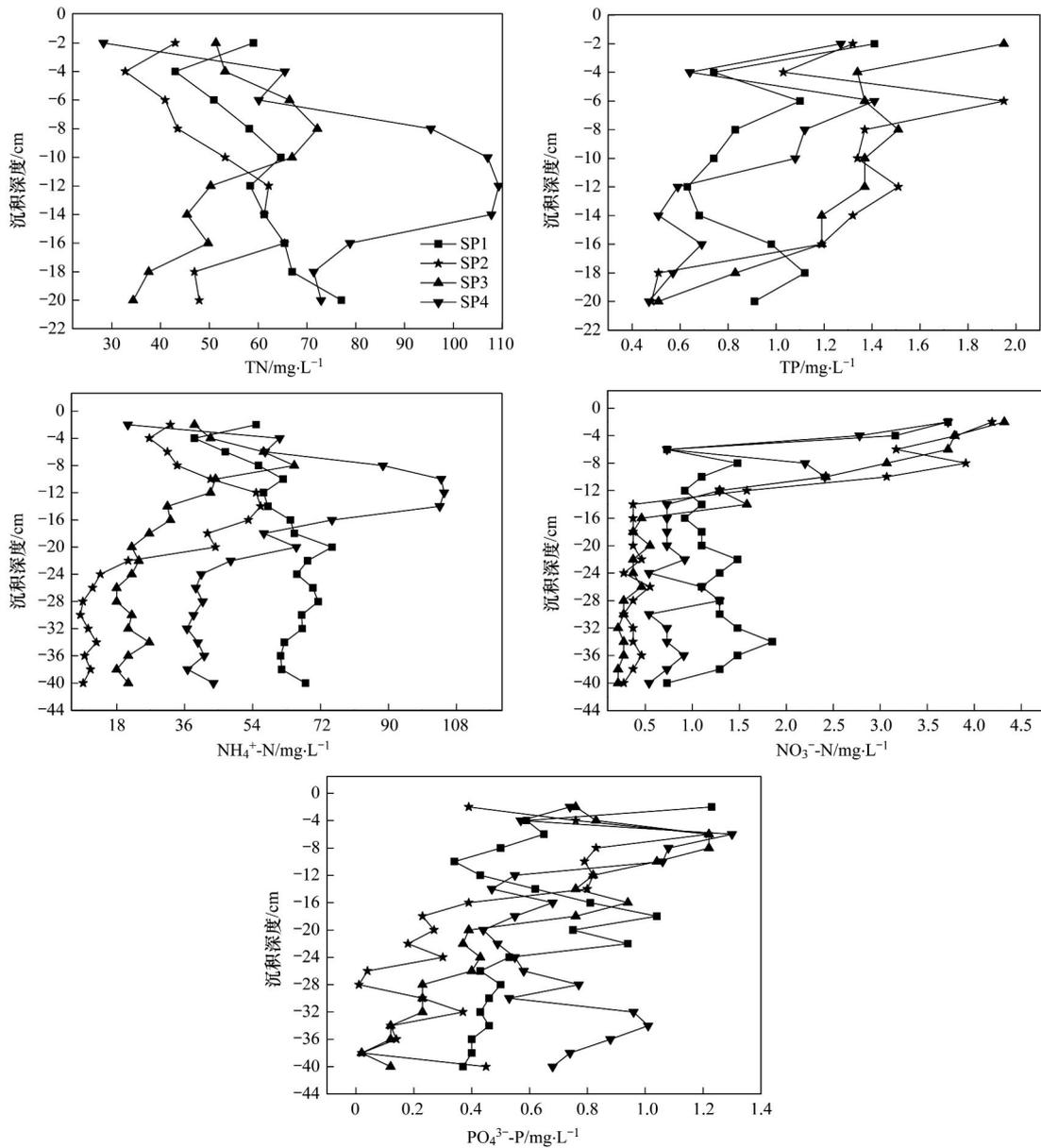


图3 沉积物间隙水氮磷浓度垂直剖面变化

Fig. 3 Profile variations of nitrogen and phosphorus in pore water of sediments

势。有研究表明,水生植物根际聚集的氨氧化细菌(ammonia-oxidizing bacteria, AOB)可以将氨氧化为亚硝酸盐^[22],而植物根际的氧化环境有利于促进氨氧化作用的发生^[23,24],从而导致间隙水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度的降低。王伟伟等^[25]在长江口盐沼植物对沉积物间隙水营养盐分布影响的研究中发现,大型植物生长带间隙水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度明显较光滩低。本研究中,水花生在8~14 cm沉积深度内根系非常发达。由图2可以看出,在6~18 cm深度内,各点位间隙水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度都在经历着一个由增到减的剧烈变化过程,这或许与水花生根系氨氧化细菌作

用以及植物根系对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的直接吸收有着密切关系。当然,导致孔隙水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度变化的因素还有很多,正是这些因素的共同影响才使得孔隙水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度表现出一定的复杂性和不确定性。大体上,SP1在2~20 cm深度内 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度有较为明显的增加,随后趋于稳定;SP2在4~12 cm沉积深度内含量增加较快,但随即迅速下降,并在28 cm深度基本趋于稳定;SP3在2~8 cm深度含量增加很快而后迅速减小,直到20 cm处趋于稳定;而SP4在0~10 cm范围内浓度由 $20.93 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 迅速增大到 $104.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,但从14 cm深度开始又迅速由

103.61 mg·L⁻¹下降到 40.4 mg·L⁻¹ (24 cm 处), 随后基本稳定. 总体上看, 虽然 4 个点位 NH₄⁺-N 含量均表现出相似的变化特征, 但 SP4 变化的剧烈程度明显较大, 而且在 24 cm 深度处, 4 个点位 NH₄⁺-N 含量均大体趋于稳定.

在 0~14 cm 深度, 水花生生长区各点位 NO₃⁻-N 浓度下降非常剧烈, 在 14 cm 以下则呈现出大致稳定的变化态势; 而对照点 SP4 的 NO₃⁻-N 浓度在由 3.72 mg·L⁻¹ (0~2 cm) 快速下降到 0.73 mg·L⁻¹ (4~6 cm) 之后又迅速上升, 最后也在 14 cm 以下趋于稳定. 十五里河的表层沉积物有机质含量很高, 夏季末沉积物因有机质分解而经常处于缺氧状态^[14,16]. 水花生生长区和对照点 NO₃⁻-N 浓度快速下降的原因, 可能就与夏季水体沉积物氧含量不足而进入缺氧环境有关. 此外, 夏季水花生生长速度较快, 对于氮磷营养物的需求旺盛, 由于 0~14 cm 沉积深度恰好处在水花生根系生长范围, 植物根系可以直接从间隙水中摄取 NO₃⁻-N, 从而可能导致水花生生长区间隙水 NO₃⁻-N 浓度的迅速降低. 由图 3 可以看出, 相对于 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N, 间隙水 PO₄³⁻-P 浓度变化显得更为复杂. 究其原因, 笔者以为可能与以下几方面因素有关: ① 十五里河沉积物中有机质含量较高, 在微生物作用下分解将大量消耗水-沉积物界面的溶解氧, 从而促使沉积物铁/铝结合态磷、活性有机磷转化和向孔隙水释放活性磷^[26,27]. 在 0~12 cm 深度内, SP2 和 SP3 的 PO₄³⁻-P 浓度基本上都显著高于 SP1, 可能与 SP2 和 SP3 有机质含量高有一定关系. ② 水生植物具有根际磷素耗竭效应^[28], 一方面, 它可以通过吸收、吸附和富集等作用直接从沉积物中移出磷素; 另一方面, 水生植物的光和作用泌氧及根系通过吸收养分、分泌有机物和输送氧气等过程改变根际土壤 pH 和 Eh 等化学特性, 进而影响沉积物对可溶性磷的吸附、沉淀和蓄积稳定^[29,30]. 王震宇等^[28]研究发现, 虽然水花生根系较小, 但其耗竭根际磷素的能力却明显高于慈姑 (*Sagittaria sagittifolia*) 和芦苇 (*Phragmites communis*) 等常见水生植物. 本研究中, SP2 和 SP3

在 6~20 cm 深度 PO₄³⁻-P 含量的下降较快, 可能与水花生的根际效应有一定关系. ③ 水生植物可以通过“泵吸”作用由根系从间隙水获得植株生长必需的 PO₄³⁻-P, 呼吸作用导致的能量代谢是推动水生植物吸收磷酸盐的动力^[31]. 概括地说, 水花生生长区 PO₄³⁻-P 浓度呈现的剧烈变化态势, 可能是上述诸因素共同作用的结果.

2.3 沉积物-上覆水界面营养盐源/汇态势分析

同菹草等水生植物一样, 水花生也通过与沉积物的相互作用实现作为氮磷库或源的功能^[32]. 水生植物的生长可以改变根际底泥的生物地球化学性质, 如黏土比例、Eh、pH、有机质含量、金属离子的数量和形式及磷的吸附能力等, 由此影响氮磷在底泥和上覆水之间的流动过程^[33,34]. 在水生植物生长较为密集的水域, 由于水流速度较低, 经由沉积物-上覆水界面浓度梯度引起的迁移扩散往往成为营养盐主要的迁移过程. 十五里河污染主要是由上游化肥生产企业废水、城市生活污水和中下游农业非点源流失造成的氮磷污染类型, 污染物的化学性质、成分构成等都较为简单. 随着化肥生产企业的停产、搬迁和沿河城市污水管网截污的实施, 主要污染源已基本消除. 事实上, 十五里河水动力条件较弱, 且研究区受人为活动干扰的影响较小, 虽然沉积物中的营养盐可能是以多种方式 (如扩散、吸附、沉淀等) 实现迁移和转化, 但从十五里河自身环境条件来看, 分子扩散可能依旧是营养盐迁移的最主要途径. 表 3 反映了各采样点表层 (0~2 cm) 沉积物新生界面间隙水与上覆水氮磷的浓度梯度. 显然, 水花生生长区间隙水 NH₄⁺-N 浓度均高于上覆水, 表明沉积物扮演源的角色; 由 SP4 的间隙水 NH₄⁺-N 浓度明显低于上覆水, 表明该点位沉积物是 NH₄⁺-N 的汇. 由于 4 个点位间隙水 NO₃⁻-N 浓度均较上覆水低, 可以认为沉积物是河水 NO₃⁻-N 的汇. 这里, SP1 和 SP2 的间隙水 PO₄³⁻-P 浓度低于上覆水, 而 SP3 和 SP4 则高于上覆水. 除 PO₄³⁻-P 存在差异外, 水花生生长区各点位在表层沉积物-上覆水界面营养盐源/汇关系方面, 具有很好的一致性.

表 3 表层沉积物-上覆水界面营养盐源/汇关系

项目	NH ₄ ⁺ -N/mg·L ⁻¹				NO ₃ ⁻ -N/mg·L ⁻¹				PO ₄ ³⁻ -P/mg·L ⁻¹			
	SP1	SP2	SP3	SP4	SP1	SP2	SP3	SP4	SP1	SP2	SP3	SP4
上覆水	29.10	28.47	10.37	31.7	3.84	4.76	4.45	4.21	1.42	1.11	0.37	0.37
扩散方向 ¹⁾	↑	↑	↑	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↑	↑
表层间隙水	54.93	32.22	38.58	20.93	3.72	4.19	4.32	3.72	1.23	0.39	0.76	0.74

1) “↓”、“↑”表示水-土界面营养盐的可能扩散方向

2.4 沉积物间隙水中氮磷营养盐浓度拟合

根据沉积物间隙水中 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N和 PO_4^{3-} -P浓度的垂直剖面分布情况(图3),选择合适的数学模型对间隙水营养盐浓度和剖面深度进行曲线拟合. 这里,考虑对0~18 cm沉积深度间隙水开展定量化模拟,所得结果见表4. 总的来看,水花生生长区3个点位的 NH_4^+ -N和 NO_3^- -N基本上都可以由OriginLab软件提供的Exp2PMod2指数函数 $y = \exp(a + bx)$ 或Exp3P2指数函数 $y = \exp(a + bx + cx^2)$ 模拟,而对照点SP4的 NO_3^- -N则由Log3P1对数函数 $y = a - b \ln(x + c)$ 拟合. 但除了SP2点的 PO_4^{3-} -P可以由 $y = \exp(a + bx + cx^2)$ 拟合外,其它3个点位似乎很难找到一个较为简单的数学模型来拟合,表明间隙水 PO_4^{3-} -P扩散的规律性可能低于 NH_4^+ -N和 NO_3^- -N. 需要特别指出的是,尽管表4中各采样点位模拟值与实测值的平均值大体接近,平均相对误差也仅为-7.39%~10.06%,但在少数分层样品中,相对误差还是很大的,最高可达40%. 一些

学者在对湖泊、海湾等宽阔水域的研究中发现,沉积物-水界面营养盐的扩散过程可以采用简单的指数函数 $y = a \times \exp(bx)$ 模拟,而且模型的决定系数 R^2 也都在0.90以上^[6,35,36]. 虽然本研究中间隙水营养盐 NH_4^+ -N和 NO_3^- -N浓度的垂直变化性也由指数函数来拟合,但其数学模型则明显要更为复杂一些. 由拟合方程的决定系数 R^2 0.702~0.909,可以认为十五里河间隙水的营养盐扩散规律性较湖泊水体弱,但这是否具有普遍意义,还需要进一步研究和论证. 众所周知,不规则的河道形态与河床形状(如弯道、浅滩、分叉、支流、水生植物等)可以增大河床局部梯度,从而促进河水-地下水潜流交换作用的发生和沉积物及间隙水营养盐含量分布的空间异质性^[37]. 十五里河下游河道下切较深,而且由于靠近湖盆,地下水-地表水交互作用相对较为活跃,由潜流沉积带内河水-地下水交换导致的紊流扰动^[38],或许也是影响间隙水营养盐垂直剖面规律性的重要因素.

表4 间隙水中营养盐 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N和 PO_4^{3-} -P浓度拟合情况¹⁾

Table 4 Data-fitting of NH_4^+ -N, NO_3^- -N and PO_4^{3-} -P nutrients in pore water of sediments

点位	营养盐	拟合曲线	模拟值 /mg·L ⁻¹	实测值 /mg·L ⁻¹	相对误差 /%
SP1	NH_4^+ -N	$y = \exp(3.777 + 0.024x)$	57.43	57.70	0.61
	NO_3^- -N	$y = \exp(1.869 - 0.281x + 0.010x^2)$	1.55	1.53	9.91
	PO_4^{3-} -P	—	—	0.69	—
SP2	NH_4^+ -N	$y = \exp(2.869 + 0.145x - 0.005x^2)$	41.34	41.73	0.24
	NO_3^- -N	$y = \exp(1.776 - 0.106x)$	2.20	2.12	8.30
	PO_4^{3-} -P	$y = \exp(-0.996 + 0.228x - 0.013x^2)$	0.68	0.65	10.06
SP3	NH_4^+ -N	$y = \exp(3.52 + 0.115x - 0.008x^2)$	37.64	40.27	-7.39
	NO_3^- -N	$y = \exp(1.774 - 0.105x)$	2.21	2.16	2.76
	PO_4^{3-} -P	—	—	0.93	—
SP4	NH_4^+ -N	$y = \exp(2.926 + 0.286x - 0.012x^2)$	72.69	73.79	2.81
	NO_3^- -N	$y = 3.398 - 0.915 \ln(x - 1.294)$	1.60	1.61	-5.64
	PO_4^{3-} -P	—	—	0.78	—

1) y 表示间隙水营养盐浓度, x 表示沉积深度;模拟值、实测值和相对误差均为0~18 cm沉积深度营养盐的平均值;“—”表示没有相关数据或表达式

2.5 沉积物与间隙水营养物的相关性

十五里河水花生生长区沉积物与间隙水中氮、磷和有机质的Pearson相关系数($n=60$)见表5. 李如忠等^[15]对十五里河过水断面中央表层沉积物氮磷营养物的相关性进行了分析,指出TN与TP不存在明显的相关关系($R=0.260$),这与本研究得到的水花生生长区沉积物中TN与TP存在着极显著的正相关性($R=0.566, P<0.01$)结论明显不同,意味着冬季枯死的水花生残体可能是SP1~SP3沉积物氮磷营养物的重要来源. 这里,沉积物中TP与 NH_4^+ -N、TN与Fe/Al-P也都存在极显著的相关性,Fe/Al-P与

NH_4^+ -N则显著相关,这在一定程度上支持了水花生生长区沉积物氮磷的同源性. 沉积物中 NO_3^- -N与 NH_4^+ -N存在极显著的负相关性($R=-0.489$),体现了两者互为转化的关系. 由沉积物中TN与OM、OM与间隙水TP呈极显著正相关性,说明有机物分解可能是沉积物中氮和间隙水中磷的重要来源. 间隙水内TN与 NH_4^+ -N、TP与 NO_3^- -N之间存在极显著的相关性,相关系数分别为0.930、0.607($P<0.01$),这有别于沉积物内TN与 NH_4^+ -N、TP与 NO_3^- -N之间的关系. 此外,在间隙水内 PO_4^{3-} -P与TP、 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N之间也都表现出了极显著的正相关关系.

表 5 水花生生长区沉积物及间隙水中氮磷的相关关系¹⁾

Table 5 Correlations between nitrogen and phosphorus forms in pore water and sediments of vegetation fields

	TN	TP	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	Fe/Al-P	Ca-P	OM	TN _k	TP _k	NH ₄ ⁺ -N _k	NO ₃ ⁻ -N _k	PO ₄ ³⁻ -P _k
TN	1											
TP	0.566 **	1										
NH ₄ ⁺ -N	0.227	0.349 **	1									
NO ₃ ⁻ -N	0.218	0.039	-0.489 **	1								
Fe/Al-P	0.410 **	0.858 **	0.290 *	-0.031	1							
Ca-P	0.328 *	0.719 **	0.062	0.318 *	0.732 **	1						
OM	0.614 **	0.107	0.000	0.212	-0.205	-0.217	1					
TN _k	-0.080	0.095	0.185	-0.005	0.185	0.101	-0.335	1				
TP _k	0.500 **	0.296	-0.020	0.313	0.184	0.126	0.488 **	0.111	1			
NH ₄ ⁺ -N _k	0.030	0.331 **	-0.306 *	0.162	0.551 **	0.433 **	-0.366 **	0.930 **	-0.064	1		
NO ₃ ⁻ -N _k	0.392 **	0.056	-0.532 **	0.576 **	0.051	0.160	0.370 **	-0.154	0.607 **	0.308 *	1	
PO ₄ ³⁻ -P _k	0.204	0.113	-0.479 **	0.364 **	0.064	0.199	0.124	0.264	0.704 **	0.499 **	0.650 **	1

1) 下角标 k 代表间隙水; * 显著水平 P 为 0.05, ** 显著水平 P 为 0.01; $n=60$

3 结论

(1) 在巢湖十五里河水花生生长区选择 3 个具有代表性的采样点位 (SP1、SP2 和 SP3), 并在河道中央选择 1 个对照点 (SP4), 采集沉积物柱状样. 根据分析测试数据, 对水花生生长区沉积物的 TN、TP、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、Fe/Al-P、Ca-P 及有机质含量垂直剖面变化进行分析, 得到不同点位各指标的垂直变化特征. 其中, SP1 的 TN、TP、Fe/Al-P、Ca-P 变化剧烈程度明显超过其它各点位, 而在 NH₄⁺-N 和 Ca-P 上, 对照点明显有别于水花生生长区. 在坡岸较陡、人为干扰相对较少的 SP2 和 SP3, 沉积物的有机质含量显著高于对照点.

(2) 在对各点位间隙水 TN、TP、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 和 PO₄³⁻-P 分析测试的基础上, 得到了水花生生长区及对照点间隙水氮磷浓度的垂直剖面分布图. 与水花生生长区相比, 对照点 SP4 各项指标的变化似乎更强一些. 总体上, 水花生生长区间隙水氮磷浓度具有大致相似的垂直变化特征, 特别是对人为干扰影响相对较小的 SP2 和 SP3.

(3) 由土-水界面营养盐源/汇关系可以看出, 除了 PO₄³⁻-P 存在差异外, 水花生生长区各点位表层沉积物-上覆水界面营养盐源、汇关系具有很好的一致性.

(4) 水花生生长区 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 浓度的垂直变化性, 基本上都可以利用 OriginLab 软件提供的指数函数或模拟; 但对 PO₄³⁻-P, 除 SP2 可以由拟合外, 其它点位都很难找到简单的数学模拟模型, 表明间隙水中 PO₄³⁻-P 扩散的规律性较 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 差一些.

参考文献:

- [1] 华建峰, 胡李娟, 张垂胜, 等. 3 种水生植物对锰污染水体修复作用的研究[J]. 生态环境学报, 2010, 19(9): 2160-2165.
- [2] Spears B M, Carvalho L, Perkins R, *et al.* Effects of light on sediment nutrient flux and water column nutrient stoichiometry in a shallow lake[J]. Water Research, 2008, 42(4-5): 977-986.
- [3] Clarke S J, Wharton G. Sediment nutrient characteristics and aquatic macrophytes in lowland English rivers[J]. Science of the Total Environment, 2001, 266(1-3): 103-112.
- [4] Madsen T V, Cedergreen N. Sources of nutrients to rooted submerged macrophytes growing in a nutrient-rich stream[J]. Freshwater Biology, 2002, 47(2): 283-291.
- [5] Schulz M, Kozerski H P, Pluntke T, *et al.* The influence of macrophytes on sedimentation and nutrient retention in the lower River Spree (Germany)[J]. Water Research, 2003, 37(3): 569-578.
- [6] 古小治, 张雷, 柏祥, 等. 南四湖湿地沉积物及孔隙水基本特性研究[J]. 环境科学, 2010, 31(4): 939-945.
- [7] 潘慧云, 徐小花, 高士祥. 沉水植物衰亡过程中营养盐的释放过程及规律[J]. 环境科学研究, 2008, 21(1): 64-68.
- [8] 张志斌, 张学扬, 张波, 等. 南四湖微山湖区沉积物磷形态分布特征[J]. 环境科学, 2009, 30(5): 1345-1350.
- [9] 朱元荣, 张润宇, 吴丰昌. 滇池沉积物中氮的地球化学特征及其对水环境的影响[J]. 中国环境科学, 2011, 31(6): 978-983.
- [10] 欧冬妮, 刘敏, 侯立军, 等. 长江口滩涂植物根际沉积物磷的累积及其生物有效性[J]. 土壤通报, 2004, 35(3): 290-294.
- [11] 张耀鸿, 张富存, 周晓冬, 等. 互花米草对苏北滨海湿地表土有机碳更新的影响[J]. 中国环境科学, 2011, 31(2): 271-276.
- [12] Shang G P, Shang J C. Spatial and temporal variations of eutrophication in Western Chaohu Lake, China [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2007, 130(1-3): 99-109.

- [13] Zhang M, Xu J, Xie P. Nitrogen dynamics in large shallow eutrophic Lake Chaohu, China [J]. *Environmental Geology*, 2008, **55**(1): 1-8.
- [14] 李如忠, 洪齐齐, 罗月颖. 巢湖十五里河沉积物污染特征及来源分析[J]. *环境科学研究*, 2010, **23**(2): 144-151.
- [15] 李如忠, 李峰. 巢湖十五里河沉积物生物有效性氮磷分布及相关性[J]. *环境科学研究*, 2011, **24**(8): 873-881.
- [16] 王书航, 姜霞, 金相灿. 巢湖入湖河流分类及污染特征分析[J]. *环境科学*, 2011, **32**(10): 2834-2839.
- [17] 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. 248-370.
- [18] 熊汉峰, 谭启玲, 王运华. 梁子湖沉积物中氮磷分布特征研究[J]. *华中农业大学学报*, 2008, **27**(2): 235-238.
- [19] Mortimer R J G, Davey J T, Krom M D, *et al.* The effect of macrofauna on porewater profiles and nutrient fluxes in the intertidal zone of the Humber Estuary [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1999, **48**(6): 683-699.
- [20] 张荣社, 李广贺, 周琪, 等. 潜流湿地中植物对脱氮除磷效果的影响中试研究[J]. *环境科学*, 2005, **26**(4): 83-86.
- [21] 吴文颖, 袁龙义, 厉恩华, 等. 富营养化湖泊沉积物磷释放特点及水生植物对其的影响[J]. *湖北农业科学*, 2007, **46**(6): 1031-1034.
- [22] 白洁, 董晓, 赵阳国. 辽河口芦苇湿地土壤氨氧化菌的时空变化[J]. *中国环境科学*, 2011, **31**(11): 1870-1874.
- [23] 邢鹏, 孔繁翔, 陈开宁, 等. 生态修复水生植物根际氨氧化细菌的研究[J]. *环境科学*, 2008, **29**(8): 2154-2159.
- [24] Bothe H, Jost G, Schloter M, *et al.* Molecular analysis of ammonia oxidation and denitrification in natural environments [J]. *FEMS Microbiology Reviews*, 2000, **24**(5): 673-690.
- [25] 王伟伟, 李道季, 高磊. 盐沼植物对沉积物间隙水营养盐分布的影响[J]. *环境科学*, 2009, **30**(11): 3209-3217.
- [26] Burdige D J. The kinetics of organic matter mineralization in anoxic marine sediments [J]. *Journal of Marine Research*, 1991, **49**(4): 727-761.
- [27] Spears B M, Carvalho L, Perkins R, *et al.* Sediment phosphorus cycling in a large shallow lake: Spatio-temporal variation in phosphorus pools and release [J]. *Hydrobiologia*, 2007, **584**(1): 37-48.
- [28] 王震宇, 温胜芳, 邢宝山, 等. 4 种水生植物根际磷素耗竭效应的比较[J]. *环境科学*, 2008, **29**(9): 2476-2480.
- [29] Begg C B M, Kirk G J D, Mackenzie A F, *et al.* Root-induced iron oxidation and pH changes in the lowland rice rhizosphere [J]. *New Phytologist*, 1994, **128**(3): 469-477.
- [30] Fraser L H, Carty S M, Steer D. A test of four plant species to reduce total nitrogen and total phosphorus from soil leachate in subsurface wetland microcosms [J]. *Bioresource Technology*, 2004, **94**(2): 185-192.
- [31] 黄建国. 植物营养学[M]. 北京: 中国林业出版社, 2004. 85-117.
- [32] 刘兵钦, 王万贤, 宋春雷, 等. 菹草对湖泊沉积物磷状态的影响[J]. *武汉植物学研究*, 2004, **22**(5): 394-399.
- [33] Viaroli P, Naldi M, Bondavalli C, *et al.* Growth of the seaweed *Ulva rigida* C. Agardh in relation to biomass densities, internal nutrient pools and external nutrient supply in the Sacca di Goro lagoon (Northern Italy) [J]. *Hydrobiologia*, 1996, **329**(1-3): 93-103.
- [34] Flindt M R, Pardal M Â, Lillebø A I, *et al.* Nutrient cycling and plant dynamics in estuaries: a brief review [J]. *Acta Oecologica*, 1999, **20**(4): 237-248.
- [35] Cermelj B, Bertuzzi A, Faganeli J. Modelling of pore water nutrient distribution and benthic fluxes in shallow coastal waters (gulf of Trieste, Northern Adriatic) [J]. *Water, Air and Soil Pollution*, 1997, **99**(1-4): 435-444.
- [36] 李宝, 丁士明, 范成新, 等. 滇池福保湾底泥内源氮磷营养盐释放通量估算[J]. *环境科学*, 2008, **29**(1): 114-120.
- [37] Hancock P J, Boulton A J, Humphreys W F. Aquifers and hyporheic zones: towards an ecological understanding of groundwater [J]. *Hydrogeology Journal*, 2005, **13**(1): 98-111.
- [38] Hester E T, Gooseff M N. Moving beyond the banks: hyporheic restoration is fundamental to restoring ecological services and functions of streams [J]. *Environmental Science and Technology*, 2010, **44**(5): 1521-1525.

CONTENTS

CH ₄ Concentrations and the Variation Characteristics at the Four WMO/GAW Background Stations in China	FANG Shuang-xi, ZHOU Ling-xi, XU Lin, <i>et al.</i> (2917)
Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation over Northeast China and Its Water Vapor Sources	LI Xiao-fei, ZHANG Ming-jun, MA Qian, <i>et al.</i> (2924)
Study on Air Quality and Pollution Meteorology Conditions of Guangzhou During the 2010 Asian Games	LI Ting-yuan, DENG Xue-jiao, FAN Shao-jia, <i>et al.</i> (2932)
Characteristics and Sources of PM ₁₀ -bound PAHs During Haze Period in Winter-Spring of Xiamen	QIAN Ran-ran, YAN Jing-ming, WU Shui-ping, <i>et al.</i> (2939)
Improvement and Application of the Method for Determination of OCEC Split	WANG Li-hua, DONG Hua-bin, YAN Cai-qing, <i>et al.</i> (2946)
Characteristics of Mercury Pollution in Soil and Atmosphere in Songhua River Upstream Jia-pi-gou Gold Mining Area	ZHANG Gang, WANG Ning, WANG Yuan, <i>et al.</i> (2953)
Pollution Characteristics and Health Assessment of Particulate Mercury in Hebei Rural Households	ZHAO Ya-juan, GONG Wei-wei, LUAN Sheng-ji (2960)
Composition and Characteristics of Volatile Organic Chemicals Emission from Printed Circuit Board Factories	MA Ying-ge (2967)
Preliminary Study Concerning Emissions of the Volatile Organic Compounds from Cooking Oils	HE Wan-qing, TIAN Gang, NIE Lei, <i>et al.</i> (2973)
Characteristics of Biofilm Phase During the Long-term Degradation of a Toluene-contaminated Gas Stream Using BTF	HU Jun, ZHENG Jiang-ling, WU Yue-xin, <i>et al.</i> (2979)
Performance of Cross Flow Trickling Filter for H ₂ S Gas Treatment	LIU Chun-jing, LI Jian, LIU Jia, <i>et al.</i> (2987)
Study on Mercury Re-emissions During Fly Ash Utilization	MENG Yang, WANG Shu-xiao (2993)
Construction of Semi-analytical Model for Inversing Total Suspended Matter in Lake Taihu and Chaohu and Assessment of Its Applicability	LIU Zhong-hua, LI Yun-mei, TAN Jing, <i>et al.</i> (3000)
Association Study Between Water Quality of Chaohu Lake and Resources Input in Agriculture of Basin	ZHANG Yan, GAO Xiang, ZHANG Hong (3009)
Sediment and Pore Water Nutrient Characteristics in Growing Zones of <i>Alternanthera philoxeroides</i> in the Shiwuli River, Chaohu Lake	LI Ru-zhong, LI Feng, ZHOU Ai-jia (3014)
Enrichment Characteristic of Phosphorus in Surface and Core Sediments of Chaohu Lake and the Pollution Quantification	LIU En-feng, DU Chen-chang, YANG Xiang-dong, <i>et al.</i> (3024)
Spatial Distribution Characteristics and Correlation Analysis of Organic Matter, Total Nitrogen and Total Phosphorus in Topsoil Around Chaohu Lake	CHEN Shu-qin, CHU Zhao-sheng, HU She-rong, <i>et al.</i> (3031)
Dynamic Characteristics of Nitrogen and Phosphorus in the Representative Input Tributaries of Danjiangkou Reservoir	LEI Pei, ZHANG Hong, SHAN Bao-qing (3038)
Effects of Thermal Stratification on Spring Blooms in Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir	LIU Liu, LIU De-fu, XIAO Shang-bin, <i>et al.</i> (3046)
Explore the Spatial and Temporal Patterns of Water Pollution in the Yincungang Canal of the Lake Taihu Basin, China	YANG Xiao-ying, LUO Xing-zhang, ZHENG Zheng, <i>et al.</i> (3051)
Analysis on the Forms and Release Potential of Nutrients in Sediments from Lakes in the West Jiangsu Province	LIU Tao, HU Zhi-xin, YANG Liu-yan, <i>et al.</i> (3057)
Spatial Distribution and Evaluation of Nitrogen, Phosphorus and Organic Matter in Surface Sediments from Western Lakeside Belt of Lake Taihu	GAN Shu, LU Shao-yong, QIN Pu-feng, <i>et al.</i> (3064)
Source Apportionment of Nitrogen and Phosphorus from Cropping Non-point Source Pollution in Nansi Lake Basin	LIU Jing, LU Feng, YANG Yan-zhao, <i>et al.</i> (3070)
Relationship Between Dissolved Organic Carbon and DBP in the Pearl River Water	HE Hong-wei, ZHOU Da-cheng, WANG Bao-qiang, <i>et al.</i> (3076)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Typical Township Water Sources in Dongjiang River Basin	WANG Ruo-shi, XU Qiu-jin, ZHANG Xian, <i>et al.</i> (3083)
Halogenated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Sediments of Maozhou River, Shenzhen	SUN Jian-lin, NI Hong-gang, DING Chao, <i>et al.</i> (3089)
Distribution Patterns of Heavy Metals in Surficial Sediment and Their Influence on the Environment Quality of the Intertidal Flat of Luoyuan Bay, Fujian Coast	GAO Wen-hua, DU Yong-fen, WANG Dan-dan, <i>et al.</i> (3097)
Study on the Changes of Macrobenthos Communities and Their Causes in Bohai Bay	CAI Wen-qian, LIU Lu-san, QIAO Fei, <i>et al.</i> (3104)
Construction of Groundwater Contamination Prevention Mapping System	WANG Jun-jie, HE Jiang-tao, LU Yan, <i>et al.</i> (3110)
Uncertainty Analysis of Groundwater Protection and Control Zoning in Beijing Plain	LU Yan, HE Jiang-tao, WANG Jun-jie, <i>et al.</i> (3117)
Nitrate Storage and Transport Within a Typical Karst Aquifer System in the Paralleled Ridge-valley of East Sichuan	YANG Ping-heng, YUAN Dao-xian, REN You-rong, <i>et al.</i> (3124)
Adsorption of Perfluorooctanesulfonate (PFOS) onto Modified Activated Carbons	TONG Xi-zhen, SHI Bao-you, XIE Yue, <i>et al.</i> (3132)
Investigation of the Oxidation Reaction of O ₃ with Bromide Ion in Aqueous Solution	YU Xiao-ting, ZHANG Jia-hui, PAN Xun-xi, <i>et al.</i> (3139)
Determination of the Distribution of Relative Molecular Mass of Organic Matter by High Pressure Size Exclusion Chromatography with UV and TOC Detectors	ZHANG Han, DONG Bing-zhi (3144)
Black Water Bloom Induced by Different Types of Organic Matters and Forming Mechanisms of Major Odorous Compounds	LU Xin, FENG Zi-yan, SHANG Jing-ge, <i>et al.</i> (3152)
Effect of Fe and Fe/Ni Nanoparticles on the Biodegradation of Phenol by BFN at Different pH Values	KUANG Ye, ZHOU Yan, WANG Qing-ping, <i>et al.</i> (3160)
Pretreatment of High-Concentration Acrylic Acid Wastewater by the Multi-Stage Microaerobic Biological Fluidized Bed Reactor	LI Sha, ZHENG Sheng-zhi, SONG Yu-dong, <i>et al.</i> (3167)
Denitrification on Secondary Effluent of Acrylic Fiber Wastewater by Tri-Stage Biofilm Advanced Reactor	XU Shao-yang, JIANG Jin-yuan, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (3172)
Dynamic Adsorption of Cadmium (II) in Water on Modified Peanut Shells	LONG Teng, YI Xiao-yun, DANG Zhi (3177)
Adsorption Properties of Thiocyanate Anion on Granular Mg/Al Mixed Oxides	WANG Xiu-juan, WANG Hai-zeng, SUN Bao-wei, <i>et al.</i> (3182)
Model of Regularity of Ammonia Transformation Along Marine Biological Aerated Filter	LUO Rong-qiang, HOU Sha-sha, SHEN Jia-zheng, <i>et al.</i> (3189)
Aerobic Granular Sludge Bulking Due to the Lack of Nutrient and Its Recovery	ZHANG Zhu, GAO Da-wen, YUAN Xiang-juan, <i>et al.</i> (3197)
Enhanced Hydrolysis of Waste Activated Sludge by Biosurfactant	YI Xin, LUO Kun, YANG Qi, <i>et al.</i> (3202)
Enrichment and Identification of Anaerobic Ammonium Oxidation Bacteria	LIU Dong-ying, QIU Yan-ling, YUAN Xian-zheng, <i>et al.</i> (3208)
Isolation, Identification and Characterization of an Atrazine Degrading Bacterium	LI Shao-feng, ZHU Jing, LI Tie-jing (3214)
Isolation, Identification and Enzymological Characterization of a New Fungal with High Laccase Production from Agricultural Waste Composting	REN Xiu-juan, FAN Chang-zheng, LU Lun-hui, <i>et al.</i> (3220)
Screening and Identification of Microorganisms for Decolorization of Molasses Spent Wash	LI Bi-jin, LIU You-yan, HE Kai, <i>et al.</i> (3228)
Analysis of Microbial Community Structure in Lactic Acid Fermentation from Kitchen Waste	LIU Jian-guo, WANG Qun-hui, WANG Shuang, <i>et al.</i> (3236)
Effect of Covalent Functionalization on DNA Cleavage Activity and ROS Formation of Single-Walled Carbon Nanotubes	WU Ren-ren, TAO Xue-Qin, DANG Zhi, <i>et al.</i> (3241)
Research on Mercury Methylation by <i>Geobacter sulfurreducens</i> and Its Influencing Factors	ZOU Yan, SI You-bin, YAN Xue, <i>et al.</i> (3247)
Uptake Effect of Cd and Pb by Rape Under Single Cd/Pb and Cd-Pb Combined Stress	WU Wen-fei, NAN Zhong-ren, WANG Sheng-li, <i>et al.</i> (3253)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Farming Domestic Muscovy Duck Originated from Au/Cu Mining and Smelting Activities	HANG Xiao-shuai, LIANG Bin, WANG Wen-lin, <i>et al.</i> (3261)
Effects of the Environmental Hormone Cypermethrin on the Reproduction of <i>Brachionus calyciflorus</i>	DONG Xue-xing, YANG Jia-xin, LÜ Lin-lan, <i>et al.</i> (3266)
Research on Anti-Corrosion of <i>Thiobacillus</i> for the Geopolymer Solidification MSWI Fly Ash	JIN Man-tong, SUN Xin, DONG Hai-li, <i>et al.</i> (3272)
Chlorination Transformation and Volatilization of Heavy Metals in Fly Ash from the Incineration During the Disposal Process with Higher Temperature	LIU Jing-yong, SUN Shui-yu (3279)
Study on Greenhouse Gas Emissions from Urban Waste Disposal System; A Case Study in Xiamen	YU Yang, CUI Sheng-hui, LIN Jian-yi, <i>et al.</i> (3288)
Fate Analysis of NPEOs and Their Metabolites in Municipal Wastewater Plants	LIAN Jing, LIU Jun-xin (3295)

《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)

2012年9月15日 33卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 9 Sep. 15, 2012

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. sciencecp. com	Distributed	by	Science Press Tel: 010-64017032 E-mail: journal@mail. sciencecp. com
订 购 处	全国各地邮局	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: 70.00 元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人