

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第5期

Vol.33 No.5

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

区域空气质量模拟中查表法的应用研究	谢旻,王体健,江飞,李树,蔡彦枫,庄炳亮 (1409)
长江三角洲地区秸秆露天焚烧大气污染物排放清单及其在空气质量模式中的应用	苏继峰,朱彬,康汉青,王红磊,王体健 (1418)
北京及周边城市一元脂肪酸大气颗粒物干沉降通量及来源分析研究	徐小娟,李杏茹,王跃思,刘晨书,潘月鹏,王英锋 (1425)
上海大气超细颗粒物和工业纳米颗粒的表征及细胞毒性的比较研究	张睿,吕森林,尚羽,易飞,任晶晶,郝晓洁,安静,吴明红 (1431)
青岛市大气 PM _{2.5} 元素组成及来源研究	李秀镇,盛立芳,徐华,屈文军 (1438)
冬季天津家庭室内空气颗粒物中邻苯二甲酸酯污染研究	王夫美,陈丽,焦姣,张雷波,姬亚芹,白志鹏,张利文,孙增荣,张星梅 (1446)
再悬浮装置在大气 PM _{2.5} 源谱分析中的应用	段恒轶,钱冉冉,吴水平,印红玲 (1452)
黔西南煤燃烧产物微量元素分布特征及富集规律研究	魏晓飞,张国平,李玲,项萌,蔡永兵 (1457)
三峡水库不同运行状态下支流澎溪河水-气界面温室气体通量特征初探	蒋滔,郭劲松,李哲,方芳,白镭,刘静 (1463)
香溪河库湾夏季温室气体通量及影响因素分析	王亮,肖尚斌,刘德富,陈文重,王雨春,陈小燕,段玉杰 (1471)
臭氧浓度升高与土壤湿度对农田土壤微生物呼吸温度敏感性的影响	陈书涛,张勇,胡正华,史艳妹,沈小帅 (1476)
托木尔峰青冰滩 72 号冰川径流水化学特征初步研究	赵爱芳,张明军,李忠勤,王飞腾,王圣杰 (1484)
五大连池水溶性有机磷矿化特性的研究	张斌,席北斗,赵越,魏自民,白雪,王曼林 (1491)
7 条环太湖河流沉积物氮含量沿程分布规律	卢少勇,远野,金相灿,焦伟,吴瑶洁,任德有,周羽化,陈雷 (1497)
巢湖十五里河沉积物氮磷形态分布及生物有效性	李如忠,李峰,周爱佳,童芳,钱家忠 (1503)
北运河系地表水近 10 年来水质变化及影响因素分析	郭婧,荆红卫,李金香,李令军 (1511)
东莞运河排涝对东江河网水质影响分析	孙磊,毛献忠,黄旻旻 (1519)
北京平原区地下水污染源识别与危害性分级	陆燕,何江涛,王俊杰,刘丽雅,张小亮 (1526)
地下水曝气修复过程的三维数值模拟	李恒震,胡黎明,王建,武晓峰,刘培斌 (1532)
垂向水动力扰动机的蓝藻控制效应数值实验研究	邹锐,周璟,孙永健,嵇晓燕,岳佳,刘永 (1540)
新型生物岛栅中污染物去除的微生物机制研究	高明瑜,谢慧君,王文兴 (1550)
营养盐水平对念珠藻胞外有机物产生的影响	齐飞,刘晓媛,徐冰冰,黄岳,封莉,张立秋 (1556)
水网藻种植水对铜绿微囊藻生长的抑制作用研究	傅海燕,柴天,赵坤,刘智峰,张明真,侯明,许鹏成 (1564)
酞酸酯在模拟海河菹草微宇宙中的消减和分布特征	迟杰,杨青 (1570)
电子束辐射对铜绿微囊藻毒素产生和释放的抑制作用研究	刘书宇,吴明红,姜钦鹏 (1575)
青铜峡灌区典型排水沟水污特征解析	李强坤,胡亚伟,罗良国 (1579)
四溴双酚 A 的辐射降解研究	李杰,徐殿斗,徐刚,马玲玲,吴明红 (1587)
污泥基活性炭催化臭氧氧化降解水中微量布洛芬的效能研究	王红娟,齐飞,封莉,张立秋 (1591)
高水力负荷对人工湿地处理精养虾塘排水效果的影响	李怀正,章星异,陈卫兵,叶剑峰 (1597)
城市污水生物脱氮系统出水经氯胺消毒形成 NDMA 的影响因素研究	尚晓玲,李咏梅 (1604)
利用淀粉基共混物作为反硝化固体碳源的研究	沈志强,吴为中,杨春平,陈佳利,王建龙 (1609)
好氧污泥颗粒化过程中 Zeta 电位与 EPS 的变化特性	王浩宇,苏本生,黄丹,崔晓姣,竺建荣 (1614)
活性污泥对病毒的生物吸附特性	周玉芬,郑祥,雷洋,陈迪 (1621)
阴离子型聚丙烯酰胺在离子交换膜上的吸附规律	邓梦洁,于水利,时文歆,衣雪松 (1625)
两性修饰膨润土对苯酚的吸附及热力学特征	李婷,孟昭福,张斌 (1632)
表面活性剂对苯并[a]芘在黑炭表面吸附解吸的影响	张景环,陈春溶,张玮航,栗桂州 (1639)
南京市 4 个污水处理厂的活性污泥中细菌的分离鉴定和抗生素耐药性分析	葛峰,郭坤,周广灿,张会娟,刘济宁,戴亦军 (1646)
焦化废水中苯酚降解菌筛选及其降解性能	陈春,李文英,吴静文,李静 (1652)
<i>Xanthobacter flavus</i> DT8 降解二噁烷的特性研究	金小君,陈东之,朱润晔,陈静,陈建孟 (1657)
未开发油气田地地表炔氧化菌空间定量分布	满鹏,齐鸿雁,呼庆,马安周,白志辉,庄国强 (1663)
矿化垃圾中氧化甲烷兼性营养菌的筛选与生物特性研究	赵天涛,项锦欣,张丽杰,全学军,赵由才 (1670)
长江中游干流及 22 条支流表层水中多氯联苯的分布特征及其潜在风险	李昆,赵高峰,周怀东,曾敏,廖柏寒,吴正勇,张盼伟,郝红 (1676)
典型血吸虫病区表层水中酚类化合物的污染特征及潜在风险	吴正勇,赵高峰,周怀东,李科林,曾敏,李昆,张盼伟,郝红 (1682)
闽江福州段沉积物中多环芳烃的空间分布异质性研究	陈卫锋,倪进治,杨红玉,魏然,杨玉盛 (1687)
三峡库区蓄水运用期表层沉积物重金属污染及其潜在生态风险评价	王健康,高博,周怀东,陆瑾,王雨春,殷淑华,郝红,袁浩 (1693)
典型电器工业区河涌沉积物中重金属的分布和潜在生态风险	邓代永,孙国萍,郭俊,张宏涛,张琴,许政英 (1700)
密云水库上游金属矿区土壤中重金属形态分布及风险评价	高彦鑫,冯金国,唐磊,朱先芳,刘文清,李宏兵 (1707)
湘西花垣矿区土壤重金属污染及其生物有效性	杨胜香,袁志忠,李朝阳,龙华,唐文杰 (1718)
基于 GIS 的某训练场土壤重金属污染评价	刘玉通,方振东,杨琴,谢朝新,王大勇,毛华军 (1725)
土壤质地和湿度对 SVE 技术修复苯污染土壤的影响	刘少卿,姜林,姚玉君,李艳霞,刘希涛,林春野 (1731)
蒙脱土、高岭土和针铁矿对 DNA 吸附与解吸特征	王慎阳,饶伟,王代长,张亚楠,李腾,唐冰培,杨世杰 (1736)
LNAPL 在砂质含水层中动态迁移的电阻率法监测试验研究	潘玉英,贾永刚,郭磊,李进军,单红仙 (1744)
亚临界水解预处理稻草秸秆制备活性炭及表征	董宇,申哲民,雷阳明,王茜,刘婷婷 (1753)
蓝藻好氧堆肥及其氮素损失控制的研究	任云,崔春红,刘奋武,占新华,周立祥 (1760)
固定化微生物技术修复 PAHs 污染土壤的研究进展	钱林波,元妙新,陈宝梁 (1767)
《环境科学》征订启事 (1483)	《环境科学》征稿简则 (1620)
信息 (1490,1496,1586,1743)	

巢湖十五里河沉积物氮磷形态分布及生物有效性

李如忠, 李峰, 周爱佳, 童芳, 钱家忠

(合肥工业大学资源与环境工程学院, 合肥 230009)

摘要: 为了解巢湖十五里河底泥氮磷形态分布规律及生物有效性, 在河道上采集7个柱状样, 按10 cm厚度分层, 共得样品41个。采用化学提取方法, 获得氨氮(NH_4^+-N)、硝酸盐氮(NO_3^--N)、易交换态磷(Ex-P)、铝结合态磷(Al-P)、铁结合态磷(Fe-P)、闭蓄态磷(Oc-P)、钙结合态磷(Ca-P)、碎屑磷(De-P)和有机磷(Or-P)等各形态氮磷及总氮(TN)和总磷(TP)含量, 进而对各形态氮和磷的空间分布特征及相关性进行分析, 并评估氮磷的生物有效性。结果表明, 十五里河沉积物中各形态氮磷在纵向和垂直方向上表现出一定的规律性, 且主要氮磷形态之间还具有显著的相关性。此外, 在0~10、10~20、20~30、30~40、40~50和50~60 cm等沉积深度, 生物有效性氮(NH_4^+-N 与 NO_3^--N 两者之和)占TN的质量分数分别为8.17%、11.88%、7.99%、8.44%、8.97%和20.06%, 生物有效性磷(Ex-P、Al-P、Fe-P三者之和)占TP的质量分数分别为50.18%、49.12%、42.41%、34.11%、32.71%和39.55%。

关键词: 氮磷形态; 沉积物; 生物有效性; 营养元素; 巢湖

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)05-1503-08

Distribution and Bioavailability of Nitrogen and Phosphorus Species in the Sediments from Shiwuli Stream in Lake Chaohu

LI Ru-zhong, LI Feng, ZHOU Ai-jia, TONG Fang, QIAN Jia-zhong

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

Abstract: In order to learn the distribution and bioavailability of nitrogen (N) and phosphorus (P) species in the sediments of Shiwuli Stream, pouring into Lake Chaohu, seven sediment cores were collected along the stream, and then a total of 41 samples for the sediment cores were sliced in-situ with a thickness of 10 cm. The contents of ammonia nitrogen (NH_4^+-N), nitrate nitrogen (NO_3^--N), exchangeable P (Ex-P), Al-bound P (Al-P), Fe-bound P (Fe-P), occluded P (Oc-P), Ca-bound P (Ca-P), detrital apatite P (De-P), organic P (Or-P) as well as total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) were measured by chemical extraction methods. The researches on spatial distribution, correlation and bioavailability of nitrogen and phosphorus species were conducted according to the analyzed data. The results show that the spatial distribution of nitrogen and phosphorus species contents in the sediments of Shiwuli Stream is characterized by some regularity, and notable correlations between the major nitrogen and phosphorus forms are displayed as well. Generally, in the sediment layers of 0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm, 30-40 cm, 40-50 cm and 50-60 cm, the average ratios of bio-available nitrogen content (the sum of NH_4^+-N and NO_3^--N) to TN are 8.17%, 11.88%, 7.99%, 8.44%, 8.97% and 20.06%, respectively, while the mean ratios of bio-available phosphorus content (the sum of Ex-P, Al-P and Fe-P) to TP are 50.18%, 49.12%, 42.41%, 34.11%, 32.71% and 39.55%, respectively.

Key words: nitrogen and phosphorus species; sediment; bioavailability; nutrient element; Lake Chaohu

沉积物是氮、磷等生源要素的重要储存库。目前, 有关水体沉积物氮、磷形态及其分布特征的研究已有很多, 但大多都集中在湖泊^[1~3]、水库^[4,5]、海湾^[6,7]等相对宽广的水域, 且以总磷和磷形态研究为主, 对河流氮形态等的研究相对不足^[8]。伴随着陆域点源污染治理的不断推进及截污工程措施的实施, 入湖河道外源性污染物相对得到控制, 于是河道沉积物氮磷内源污染影响逐渐凸显了出来。由于不同形态氮磷迁移释放行为、生物有效性等有着明显差异, 因此弄清沉积物氮磷赋存形态特征及其空间变化性, 对于准确评估河道氮磷营养负荷贡献、科学制定河道沉积物生态疏浚和水体修复方案, 都具有重要意义。

巢湖是“九五”至“十一五”期间, 国家重点治理的“三湖”之一。虽经过多年治理, 但湖泊富营养化依旧未能得到有效遏制, 甚至西半湖“水华”还有逐年加重的态势, 特别是在靠近合肥市的南淝河、十五里河、塘西河等入湖河口水域^[9]。十五里河曾是巢湖流域污染最严重的河道, 底泥淤积情况严重, 平均厚度50~60 cm^[10]。截至目前, 已有一些学者^[10~12]开展了十五里河水环境研究, 但对水体沉积物的氮

收稿日期: 2011-05-28; 修订日期: 2011-07-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(51179042); 安徽省科技攻关计划重点项目(07010302165); 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环境风险评估, E-mail: Lrz1970@163.com

磷赋存形态及其生物有效性,还缺乏必要的关注.随着国内湖泊富营养化治理工作的逐步推进,环湖河流沉积物的内源氮磷污染问题,日益引起人们的重视^[13,14].为此,本研究拟对十五里河沉积物的氮磷赋存形态、分布特征及其生物有效性进行分析,以期对十五里河河道整治和巢湖西半湖富营养化控制提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区域

十五里河发源于合肥市西郊大蜀山东南麓,自西北向东南,流经合肥市蜀山区和包河区,最后在包河区的义城镇注入巢湖.该河长约 28.8 km,流域面积 111.25 km²,是合肥市主要城市纳污沟,也是巢湖氮磷营养物的主要来源之一.据估算,从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%^[12].河流上游为工业和城市居住用地,原有的主要工业污染源,如江淮化肥厂和合肥化肥厂(即红四方化工集团)等均已停产或搬迁;中、下游以农业生产(包括畜禽养殖、水产养殖等)用地为主,主要农作物有水稻、油菜和蔬菜等.2008 年,王书航^[12]对十五里河水质进行逐月采样分析,得到 NH₄⁺-N、TN 和 TP 的年均浓度分别为 19.89、22.29 和 1.33 mg·L⁻¹.根据相关调查,十五里河底泥沉积物的氮磷污染严重,TN 平均达 1 670 mg·kg⁻¹、TP 达 630 mg·kg⁻¹^[10].2010 年,合肥市政府在十五里河的城市河段开展了管道截污工程建设,使得河流水质状况得到一定程度的改善,但沉积层氮磷的内源释放成为影响河流水质的重要隐患.

1.2 样品采集及处理

2009 年 4~5 月,利用自制采样器在河道上采集沉积物柱状样(深度 50~60 cm),并按 10 cm 厚度现场分层.选择具有代表性的 7 个采样点,分别表示为 SP1、SP2、…、SP7(见图 1),开展沉积物氮磷赋存形态及其生物可利用性分析.这里,除 SP3 柱状样划分为 5 层外,其它各采样点均为 6 层,共得样品 41 份.

将样品在实验室通风处自然风干,用木棒压散、碾碎,并剔除砾石和植物残体.过 100 目尼龙筛后,装入样品袋封口、备测.

1.3 分析测试方法

1.3.1 沉积物氮形态的测定

水体沉积物的氮形态分为有机态氮和无机态氮两大类.其中,无机氮主要包括氨氮(NH₄⁺-N)和硝

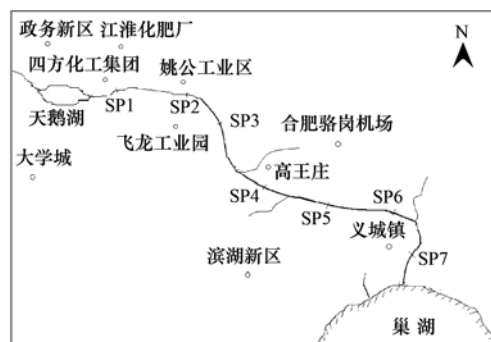


图 1 采样点位示意

Fig. 1 Schematic graph of sampling sites

态氮(NO₃⁻-N).本研究中,采用过硫酸盐消化法^[15]测定沉积物总氮(TN),NH₄⁺-N和NO₃⁻-N则分别采用 KCl 浸提-蒸馏法和酚二磺酸比色法测定^[16].

1.3.2 各形态磷的连续提取

形态磷的分析采用 7 步连续提取方法^[17,18],依次提取易交换态磷(Ex-P)、铝结合态磷(Al-P)、铁结合态磷(Fe-P)、闭蓄态磷(Oc-P)、钙结合态磷(Ca-P)、碎屑磷(De-P)和有机磷(Or-P)等.具体方法和步骤参照文献^[17,18].总磷(TP)的测定采用 SMT 法^[19].

本研究中,测试数据的统计分析采用 SPSS13.0 和 Excel 2003 软件.

2 结果与讨论

2.1 氮和磷形态含量

2.1.1 不同形态氮含量

十五里河底泥不同沉积深度的各形态氮含量及其统计结果见表 1.可以看出,NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 含量均远低于 TN,表明十五里河沉积物氮主要是有机态,这与有机氮常为沉积物中氮的主要存在形态结论一致^[20].而且,在相同沉积深度,NH₄⁺-N 含量也均显著高于 NO₃⁻-N.总体上看,十五里河沉积物中 NH₄⁺-N 呈现出随沉积深度增加“先减小再增大”的变化特点;而 NO₃⁻-N 则表现为稳步的下降态势,但变化梯度并不大.由标准差相对于平均值的变幅不难得出,NO₃⁻-N 的不均匀程度相对最大,其次是 NH₄⁺-N,TN 则相对较为均匀.

2.1.2 不同形态磷含量

十五里河底泥不同沉积深度的各形态磷含量及其统计结果见表 2.可以看出,不同沉积深度 TP 平均含量为 563.23~897.69 mg·kg⁻¹.在磷的各种赋存形态中,Fe-P 和 Ca-P 含量远高于其它各形态,为 TP 的主要组分,与巢湖河口区及湖体内沉积物磷形

态构成情况相同^[2,21]; 而且从平均含量方面看, Ca-P 略微均匀一些. 总体上, Ex-P、Oc-P、De-P 和 Or-P 含量较为接近, Al-P 则明显偏低, 仅为 1.12 ~ 4.47 mg·kg⁻¹. Ex-P 和 Al-P 仅在沉积层上部(0 ~ 20 cm) 含量稍高, 其它各层含量和变幅均不大; 惰性磷 Oc-P、De-P 和 Or-P 含量随沉积深度的变化不显著. 由于 Or-P 仅占 TP 质量分数的 4.23% ~ 6.62%, 表明十五里河沉积物中无机磷占主要成分. 总体上, 各赋存形态磷含量的高低顺序为: Ca-P ≈ Fe-P > Ex-P > De-P ≈ Or-P > Oc-P > Al-P.

表 1 不同形态氮含量及其统计结果

Table 1 Level of nitrogen species contents and its statistics values in the sediments of Shiwuli Stream										
沉积深度 /cm	指标	$\omega(\text{各形态氮})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$							$\omega(\text{统计值})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	
		SP1	SP2	SP3	SP4	SP5	SP6	SP7	平均值	标准差
0 ~ 10	NH ₄ ⁺ -N	48.65	123.44	103.77	203.12	84.59	541.77	41.58	163.85	175.17
	NO ₃ ⁻ -N	19.37	7.37	6.25	5.81	12.56	110.87	22.50	26.39	37.82
	TN	2 587.87	1 963.53	1 915.12	1 893.81	1 364.05	3 049.78	2 445.27	2 174.20	556.43
10 ~ 20	NH ₄ ⁺ -N	48.27	133.30	99.75	363.83	275.67	236.24	26.03	169.01	126.95
	NO ₃ ⁻ -N	14.62	6.75	5.43	4.87	11.25	104.67	18.44	23.72	36.05
	TN	1 808.60	1 924.67	1 574.14	1 897.67	1 065.41	2 036.87	1 712.39	1 717.11	324.42
20 ~ 30	NH ₄ ⁺ -N	68.09	83.93	66.63	76.82	190.54	34.49	112.79	90.47	49.91
	NO ₃ ⁻ -N	13.81	4.87	2.62	5.12	10.69	98.41	11.94	21.07	34.36
	TN	1 667.51	1 866.81	958.10	1 087.23	1 260.3	1 434.64	2 002.94	1 468.22	394.6
30 ~ 40	NH ₄ ⁺ -N	15.49	95.15	113.18	78.27	194.72	45.80	45.10	83.96	59.07
	NO ₃ ⁻ -N	8.44	5.43	3.06	4.43	9.57	99.81	6.93	19.67	35.41
	TN	1 518.44	1 087.23	1 244.89	1 105.22	1 199.70	1 492.33	1 124.81	1 253.23	180.92
40 ~ 50	NH ₄ ⁺ -N	44.05	131.11	135.41	82.55	196.72	55.72	61.37	100.99	55.46
	NO ₃ ⁻ -N	6.99	3.81	2.18	3.56	11.50	83.98	5.12	16.73	29.81
	TN	1 170.73	1 384.86	1 402.26	995.15	1 290.03	1 453.68	1 475.42	1 310.30	173.71
50 ~ 60	NH ₄ ⁺ -N	112.13	151.99	—	218.56	243.31	375.83	253.12	225.82	91.63
	NO ₃ ⁻ -N	3.74	3.18	—	2.56	6.75	77.87	3.93	16.34	30.18
	TN	1 364.05	1 161.33	—	1 237.03	1 158.42	1 136.44	1 345.50	1 233.79	99.87

2.2 沉积物氮磷形态的纵向分布特征

2.2.1 氮形态的纵向分布

可交换态氮(如NH₄⁺-N和NO₃⁻-N)是沉积物-水界面氮迁移释放中最主要、最活跃的氮形态,是参与氮生物地球化学循环的重要组分^[20]. 根据表 1 中 SP1、SP2、…、SP7 等采样点不同沉积深度的氮形态测试结果,对十五里河沉积物氮形态的纵向分布特征,简要分析如下.

(1) 在 0 ~ 10 cm 沉积深度,采样点 SP6 的 NH₄⁺-N 含量最高,SP4 次之,相对最低点出现在 SP1 和 SP7; 在 10 ~ 20 cm,SP4、SP5 和 SP6 含量明显高于其它采样点,且最大值 363.83 mg·kg⁻¹(SP4) 与最小值 26.03 mg·kg⁻¹(SP7) 相差悬殊; 在 20 ~ 30 cm,除 SP5 和 SP7 明显较高外,其它采样点含量较为接近; 在 30 ~ 40 cm,SP3 和 SP5 的 NH₄⁺-N 含量明显偏高,而 SP1 则明显低于其它各采样点位; 在 40 ~ 50 cm,最高值出现在 SP5,其次是 SP3 和 SP2,而其它采样点则大体接近; 在 50 ~ 60 cm,SP6 含量最高,SP4、SP5 和 SP7 相差不大,SP1 和 SP2 也较为接近. 总体上,处于河道中下游的 SP4、SP5 和 SP6 的 NH₄⁺-N 含量相对偏高,特别是在 0 ~ 20 cm 沉积深

度内.

(2) 在 0 ~ 60 cm 各沉积深度,除 SP6 的 NO₃⁻-N 含量显著偏高外,其它采样点大体接近.

至于 TN,采样点 SP6 的表层(0 ~ 10 cm) TN 含量明显偏高,而 SP5 则较其它点位更低一些. 总体上看,在不同沉积深度上,河道中游各采样点的 TN 含量似乎较上、下游河段稍低一些.

2.2.2 磷形态的纵向分布

根据 SP1、SP2、…、SP7 等采样点不同沉积深度磷赋存形态测试数据(表 2),可以对十五里河沉积物磷形态的纵向分布特征,简要分析如下.

(1) Ex-P 上游河段各采样点含量偏低,下游河段则明显偏高. 其中,采样点 SP6 在不同沉积深度的含量都显著高于其它采样点,SP7 也较其它点位略高一些.

(2) Al-P 是 7 种磷形态中含量最低的,虽然各采样点位同一沉积深度的 Al-P 含量存在差异,但数值悬殊并不显著,且规律性也不强.

(3) Fe-P 不同沉积深度 Fe-P 含量较高点主要集中在 SP1、SP4 和 SP6,即在河道的上、中、下游均有较高的 Fe-P 含量出现.

表 2 不同形态磷含量及其统计结果

Table 2 Level of phosphorus species contents and its statistics values in the sediments of Shiwuli Stream

沉积深度 /cm	指标	$\omega(\text{各形态磷})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$							$\omega(\text{统计值})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	
		SP1	SP2	SP3	SP4	SP5	SP6	SP7	平均值	标准差
0 ~ 10	Ex-P	25.59	21.02	36.26	10.30	23.30	306.46	39.30	66.03	106.46
	Al-P	4.94	5.71	3.41	6.48	5.71	3.41	1.65	4.47	1.71
	Fe-P	584.21	178.56	328.02	397.39	357.6	686.02	239.40	395.89	181.40
	Oc-P	25.59	26.37	37.03	37.84	34.77	36.32	29.38	32.47	5.23
	Ca-P	38.65	330.47	362.48	385.31	90.65	327.12	317.30	264.57	139.34
	De-P	77.59	26.37	22.51	39.37	38.59	24.84	33.19	37.49	18.88
	Or-P	87.77	34.79	37.79	63.09	18.71	17.96	40.07	42.88	24.93
	TP	997.15	601.53	890.63	903.54	570.16	1495.34	825.47	897.69	307.51
10 ~ 20	Ex-P	8.01	15.66	26.36	8.01	14.12	254.25	32.43	51.26	96.91
	Al-P	1.88	3.42	1.12	1.12	4.94	1.88	1.89	2.32	1.39
	Fe-P	408.73	198.44	345.07	408.59	297.25	648.09	192.05	356.89	156.06
	Oc-P	18.71	19.48	20.24	31.70	32.47	29.42	21.74	24.82	6.10
	Ca-P	39.36	343.29	244.31	315.47	162.48	360.55	321.12	255.23	117.01
	De-P	81.42	24.07	21.37	40.87	54.65	17.94	53.82	42.02	23.03
	Or-P	77.59	27.90	32.47	54.63	30.94	19.47	39.30	40.33	19.72
	TP	665.83	666.53	715.17	876.05	642.53	1348.57	701.12	802.26	253.07
20 ~ 30	Ex-P	4.95	16.41	35.53	6.47	11.83	112.73	13.34	28.75	38.38
	Al-P	1.12	3.41	1.12	0.35	1.89	0.35	1.12	1.34	1.06
	Fe-P	422.64	119.66	165.54	295.25	258.44	378.01	178.36	259.70	113.21
	Oc-P	17.19	28.65	26.36	22.51	30.96	28.64	9.52	23.40	7.67
	Ca-P	31.72	284.26	402.61	550.50	127.35	482.75	241.01	302.89	188.03
	De-P	56.97	8.01	26.36	50.01	47.02	34.76	13.34	33.78	18.77
	Or-P	34.78	20.24	28.65	51.54	17.95	44.70	11.81	29.95	14.58
	TP	561.56	530.05	706.57	1005.44	515.35	1110.34	500.72	704.29	252.80
30 ~ 40	Ex-P	5.71	11.07	16.41	5.71	13.36	112.01	37.81	28.87	38.25
	Al-P	1.12	1.89	0.35	4.94	2.65	1.12	1.12	1.88	1.53
	Fe-P	152.59	122	57.71	209.83	177.78	376.61	196.83	184.76	98.95
	Oc-P	12.6	15.66	35.53	30.17	17.94	25.59	19.47	22.42	8.30
	Ca-P	30.19	285.98	378.9	334.59	151.01	483.67	316.85	283.03	149.79
	De-P	134.23	7.24	24.06	29.41	42.42	36.30	38.58	44.61	41.21
	Or-P	30.96	46.26	12.59	43.17	22.53	48.53	37.06	34.44	13.25
	TP	351.19	499.46	556.73	696.57	465.04	1084.07	684.17	633.89	271.30
40 ~ 50	Ex-P	2.65	12.6	27.12	4.18	7.24	137.2	30.15	31.59	47.82
	Al-P	2.65	1.12	1.12	4.18	3.42	1.12	0.35	1.99	1.43
	Fe-P	149.53	138.06	58.48	93.65	124.29	384.13	174.54	160.38	105.69
	Oc-P	19.48	17.95	25.60	34.77	27.90	30.17	35.50	27.34	6.87
	Ca-P	29.43	219.94	307.02	220.78	117.4	516.39	302.90	244.84	155.36
	De-P	133.47	18.72	24.83	13.36	41.67	31.70	43.90	43.95	41.04
	Or-P	52.38	56.97	15.65	32.47	24.07	50.50	29.39	37.28	15.85
	TP	364.13	466.85	469.39	406.05	378.65	1195.10	662.42	563.23	295.98
50 ~ 60	Ex-P	3.24	8.01	—	4.95	9.53	152.54	33.97	35.37	58.49
	Al-P	1.88	0.35	—	2.65	1.12	0.35	0.35	1.12	0.97
	Fe-P	563.34	131.90	—	118.20	135.78	363.37	179.90	248.75	179.06
	Oc-P	11.06	8.77	—	29.43	20.24	21.77	24.80	19.35	7.98
	Ca-P	58.48	213.43	—	376.34	111.24	599.15	357.13	285.96	199.43
	De-P	130.36	10.30	—	24.84	37.06	45.47	84.39	55.40	44.41
	Or-P	62.30	41.65	—	34.79	28.65	69.95	27.09	44.07	18.01
	TP	772.82	417.10	—	621.29	366.97	1263.29	736.24	696.29	322.79

(4)Oc-P 很显然,各采样点在同一沉积深度的数值大小相差不大。了 SP1; 而且,除 SP5 稍低外,其余各采样点同一沉积层的 Ca-P 值总体差异不大。

(5)Ca-P 各沉积深度的最小值几乎都出现在了 (6)De-P 不同沉积深度的最大值均出现在了

SP1,且在>30 cm 沉积深度,这种差异更为显著;此外,在>20 cm 深度,SP2 的 De-P 含量明显低于 SP3、SP4、…、SP7 等采样点位。

(7)Or-P 在不同沉积深度,各点位的 Or-P 含量交错变化,但总体上悬殊也不大。

很显然,在每一沉积层内,SP6 的 TP 含量都显著偏高,其它各采样点仅是在个别沉积深度出现稍高的 TP 含量。结合汇流区域土地利用类型及氮磷营养物来源情况,笔者以为,十五里河沉积物中磷形态纵向分布的空间变化性,可能与外源输入特征有关。

2.3 沉积物氮磷形态的垂直分布特征

2.3.1 氮形态的垂直分布

由表 1 可见,虽然不同形态氮含量在垂直方向上呈现出一定的波动性,但总的变化趋势却较为清晰,如大多数采样点的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量在垂直方向上表现出“增大-减小-增大”的变化态势,特别是在 30 ~ 50 cm 的沉积深度范围内。与此同时,各采样点的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量也都表现出了随沉积深度的增大而逐步减少的特点,即具有水体沉积物垂直方向变化的一般共性^[22]。应当说,沉积物中各种形态氮的分布特征是由其氧化还原环境所决定的^[20]。 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 在沉积物中主要为带负电荷物质所吸附,大部分成为可交换性离子,部分进入间隙水中。由于还原条件有利于 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的保蓄,因此有 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量随沉积深度增加而增加的现象发生^[23]。至于 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 随沉积深度增加而表现出的递减趋势,其主要原因可能在于,在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, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 经硝化作用转化为 $\text{NO}_3^-\text{-N}$,形成 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的表层富集。而在较深的沉积层内,由于处于缺氧环境条件下, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 可能因充当厌氧细菌的替代电子受体而被还原,从而使 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 转化为 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ ^[22]。

2.3.2 磷形态的垂直分布

由于各种内外因素的共同影响,磷的垂向分布规律一般都较为复杂。由表 2 可以看出,在各个采样点,Ex-P、Al-P、Fe-P 含量基本都呈现随沉积深度增加而降低的态势,而 Oc-P、Ca-P、De-P、Or-P 尽管在垂向上呈现一定的波动性,但规律性并不强。具体地说:① 在各采样点,表层 Ex-P 含量均较高(特别是 SP6),但随沉积深度的增加,Ex-P 出现降低的趋势。有研究表明,水生植物可以促进表层沉积物活化,从而增加 Ex-P 含量^[24]。现场调查发现,十五里河水生植物(主要是水花生等)生长较为旺盛,这表明十五里河沉积物 Ex-P 的垂向分布特征可能受到了水生植物的影响。② 在各采样点位,Al-P 含量总体上呈现出随沉积深度增加而递减的趋势,这与南四湖沉积物中 Al-P 的变化规律一致^[25]。③ 在各采样点的垂直剖面上,Fe-P 含量也明显表现出随深度加深而降低的变化趋势。究其原因,可能是由于随着沉积深度的增加,有机质降解消耗溶解氧,使得沉积环境趋向于还原状态;而当 Fe^{3+} 被还原为 Fe^{2+} 时,Fe-P 随着二价铁的溶出释放而进入间隙水的缘故^[26]。④ Oc-P 的垂直变化性不显著,这可能与参与磷的生物地球化学循环的能力较弱有关。⑤ 虽然一部分 Ca-P 可由 Or-P 转化而来^[27],但作为一种惰性磷,Ca-P 含量在垂向上变化性也不很明显。⑥ De-P 的垂直变化性很弱,其原因可能在于 De-P 主要是自生成因和生物成因的自生磷,以及与自生碳酸钙共同沉淀的磷,其性质相对比较稳定。⑦ Or-P 含量随沉积深度的增加而逐渐减小,这可能是由于沉积深度的增加导致有机质的矿化程度提高所造成的。

2.4 沉积物氮磷相关性分析

十五里河沉积物中不同形态氮磷的相关系数见表 3。由表 3 可见,TN 与 Ex-P、Fe-P、TP 呈极显著相

表 3 不同形态氮磷的相关系数¹⁾

Table 3 Pearson correlation coefficient matrix for nitrogen and phosphorus species

	TN	$\text{NH}_4^+\text{-N}$	$\text{NO}_3^-\text{-N}$	Ex-P	Al-P	Fe-P	Oc-P	Ca-P	De-P	Or-P	TP
TN	1										
$\text{NH}_4^+\text{-N}$	0.222	1									
$\text{NO}_3^-\text{-N}$	0.338 *	0.286	1								
Ex-P	0.438 **	0.479 **	0.909 **	1							
Al-P	0.255	0.076	-0.152	-0.106	1						
Fe-P	0.566 **	0.309 *	0.607 **	0.617 **	0.150	1					
Oc-P	0.192	0.246	0.202	0.275	0.417 **	0.161	1				
Ca-P	-0.036	0.156	0.438 **	0.430 **	-0.243	0.012	0.335 *	1			
De-P	-0.057	-0.166	-0.122	-0.195	-0.05	0.193	-0.306	-0.491 **	1		
Or-P	0.071	-0.145	0.065	-0.087	0.055	0.374 *	-0.174	0.005	0.371 *	1	
TP	0.471 **	0.354 *	0.798 **	0.814 **	-0.046	0.78 **	0.356 *	0.602 **	-0.105	0.291 *	1

1) * 表示在 0.05 水平上显著相关; ** 表示在 0.01 水平上显著相关

关性, 相关系数分别为 0.438、0.566、0.471; $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 与 Fe-P ($R = 0.309$)、 TP ($R = 0.354$) 显著相关, 还与 Ex-P 呈极显著相关性 ($R = 0.479$); 而 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 与 Ex-P 、 Fe-P 、 Ca-P 和 TP 都表现出了极显著的相关性, 相关系数分别达 0.909、0.607、0.438 和 0.798. 从 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 都与 Fe-P 、 Ex-P 呈显著或极显著相关关系, 可以推断它们具有很好的同源性. 由表 3 不难看出, Al-P 、 Oc-P 、 De-P 、 Or-P 与各形态氮的相关性都不强. 值得注意的是, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 与 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 之间没有呈现明显的相关性, 暗示两者在来源上存在多样性.

沉积物中 Ex-P 与 Fe-P 、 Ca-P 都呈极显著相关性, 相关系数分别为 0.617、0.430, 说明部分 Ex-P 含量可能由 Fe-P 、 Ca-P 转化而来; Al-P 与 Oc-P 的极显著相关系数为 0.417, 表明部分 Al-P 含量的增加可能来自 Oc-P 的转化. Fe-P 与 Or-P 的显著相关性 ($R = 0.374$), 同样也反映了 Or-P 可能向 Fe-P 的转化. 而 Ca-P 与 De-P 呈现的极显著负相关性 ($R = -0.491$), 似乎暗示了两者间“此消彼长”的内在关系. 同样, Oc-P 与 Ca-P ($R = 0.335$)、 De-P 与 Or-P ($R = 0.371$) 的显著相关性, 也都反映了这种具有来源性质的转化关系. 从表 3 还可以看出, 除 Al-P 与 De-P 外, TP 与各形态氮和磷都存在显著或极显著的相关关系.

3 讨论

3.1 不同形态氮磷的作用及来源分析

沉积物中不同形态氮、磷在水环境中的作用是不一样的. 其中, 生物有效性氮 (主要是 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$) 和生物有效性磷 (主要是 Ex-P 、 Al-P 、 Fe-P) 可以直接被生物所利用, 在氮、磷的地球生物化学循环中起着重要作用. 事实上, 即便是那些难以直接被生物利用的氮磷, 也可能通过环境条件的变化而转化为生物有效性氮磷, 从而为氮磷地球化学循环做出贡献. 例如, 有机氮在氮的生物地球化学循环中并不活跃, 但在沉积环境的微生物作用下, 有机氮可以经氨基化作用逐步分解为简单的有机态氨基化合物. 由氨基化作用释放出的氨, 大部分可以与有机或无机酸结合成铵盐, 从而被植物吸收或通过硝化作用进一步氧化为硝酸盐^[20]. 在十五里河, 作为可交换态无机氮的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 分别仅占 TN 的 1.6% ~ 33.1% 和 0.16% ~ 6.9%, 说明有机氮是沉积物的主要污染物质. 而由表 2, 无机磷在总磷中占有绝对优势, 表明 TP 含量由无机磷所控制. 结合流域土

地利用特点和污染源分布及排污情况, 大体判定上游原化肥厂的有机氮废水和城市生活污水排放、中下游农田化肥 (包括氮肥、磷肥) 超量使用以及禽畜和水产养殖排水等, 是十五里河沉积物氮磷污染的主要来源, 这也在一定程度上解释了表 3 不同形态氮磷的复杂关系. 在采样点 SP6, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 Ex-P 和 Fe-P 都比同一沉积深度其它采样点含量高出多倍, 甚至数十倍. 现场调查发现, 在 SP6 上游河道右岸存在着多处面积较大的渔塘及多个露天圈养的养鸡场, 来自渔塘的含氮磷饵料及养鸡场的禽类粪便都随降雨径流直接进入十五里河, 致使 SP6 的生物可利用氮磷含量异常增高. 在 0 ~ 10 cm、10 ~ 20 cm、20 ~ 30 cm 和 30 ~ 40 cm 等沉积深度内, Fe/Al-P 占 TP 的百分比分别达 44.38%、44.29%、38.87% 和 30.57%, 表明 Fe/Al-P 主要来自人为污染^[20]. 一般地, Oc-P 、 Ca-P 、 De-P 和 Or-P 性质较为稳定, 受人为影响较小. 本研究中, 上述 4 种磷形态的实际表现, 印证了它们主要来源于自然成因, 如流域地质特征等.

3.2 氮磷的生物有效性分析

一般来说, 水体沉积物中的生物有效氮主要来自 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$. 在十五里河的 0 ~ 10 cm、10 ~ 20 cm、20 ~ 30 cm、30 ~ 40 cm、40 ~ 50 cm 和 50 ~ 60 cm 等各沉积深度内, 生物有效性氮 (即 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 与 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 两者之和) 占 TN 的质量分数分别为 8.17%、11.88%、7.99%、8.44%、8.97% 和 20.06%, 这一结果与珠江口^[28]、瓦埠湖^[29] 及长江中下游广大浅水湖泊^[30] 较为接近.

沉积物中 Ex-P 、 Al-P 、 Fe-P 由于较易释放于水体中, 供藻类及其它生物利用, 因此常被称为生物有效性磷. 在十五里河的 0 ~ 10 cm、10 ~ 20 cm、20 ~ 30 cm、30 ~ 40 cm、40 ~ 50 cm 和 50 ~ 60 cm 等各沉积深度内, 上述 3 种形态磷之和占 TP 的质量分数为 50.18%、49.12%、42.41%、34.11%、32.71% 和 39.55%. 相关研究显示, 南四湖微山湖区沉积物的生物有效性磷含量仅占总磷的 2.84%^[25], 乌梁素海的表层沉积物中活性磷 (Ex-P 、 Al-P 、 Fe-P 三者之和) 含量仅占总提取磷的 2% ~ 7%^[17], 甚至长江中下游众多湖泊沉积物的 Ex-P 、 Al-P 、 Fe-P 含量也都不足 TP 的 10%^[18], 都远低于十五里河. 由上部沉积物的生物有效性磷含量明显高于下部, 表明近年来的人为污染更为严重. 2008 年, 经由十五里河转输进入巢湖的 TP 达 146 t^[12]. 毫无疑问, 十五里河沉积物超高的生物有效性磷含量, 增大了巢湖西半

湖水体的富营养化风险. 事实上, 近些年来, 巢湖十五里河入湖河口水域频繁出现的严重“水华”现象^[31], 就是很好的证明.

4 结论

(1) 对十五里河水体沉积物的氮磷形态进行分析, 结果表明在同一沉积深度, NH_4^+ -N 含量显著高于 NO_3^- -N, 且在 TN 中有机氮占绝对的优势; 在 7 种磷形态中, Ca-P 和 Fe-P 含量相对最高, Al-P 含量最低, 其它磷形态含量相差不大.

(2) 在垂直方向上, TN 和 NO_3^- -N 总体上均呈现出随深度增加而逐步降低的特点, 而 NH_4^+ -N 则表现出随沉积深度增加先减小再增大的变化特征; Fe-P 含量在垂直方向上变化明显, Ex-P 和 Al-P 仅在沉积层的上部(0~20 cm) 含量稍高, 在其它各层含量相差不大, 而惰性磷 Oc-P、Ca-P、De-P 和 Or-P 的含量在沉积剖面上变化不显著.

(3) 在河流纵向上, SP4、SP5 和 SP6 的 NH_4^+ -N 含量相对最高, 且除 SP6 的 NO_3^- -N 含量明显偏高外, 其它各点位含量差异不明显; 沉积剖面 Fe-P 含量较高点主要集中在 SP1、SP4 和 SP6, 其它各形态磷在考虑垂直方向的因素影响后, 均呈现较为复杂的变化态势.

(4) 沉积物中各氮、磷形态之间存在不同程度的相关性, 表明具有一定的同源性或转化关系, 而 NH_4^+ -N 与 NO_3^- -N 并未呈现明显的相关关系, 暗示两者在来源上存在多样性.

(5) 沉积物中, Fe/Al-P 占 TP 的质量分数明显偏高, 表明 Fe/Al-P 主要来自人为污染; 而且, 底泥生物有效性磷含量占 TP 的质量分数远高于一般湖泊沉积物, 生物有效性氮占 TN 的质量分数则与一些湖泊水体较为接近.

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 孟春红, 赵冰. 东湖沉积物中氮磷形态分布的研究 [J]. *环境科学*, 2008, **29**(7): 1831-1837.
- [3] Anshumali, Ramanathan A L. Phosphorus fractionation in surficial sediments of Pandoh Lake, Lesser Himalaya, Himachal Pradesh, India [J]. *Applied Geochemistry*, 2007, **22** (9): 1860-1871.
- [4] Trojanowska A A, Izydorczyk K. Phosphorus fractions transformation in sediments before and after cyanobacterial bloom: implications for reduction of eutrophication symptoms in dam reservoir [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2010, **211** (1-4): 287-298.
- [5] Wang Y, Shen Z Y, Niu J F, *et al.* Adsorption of phosphorus on sediments from the Three-Gorges Reservoir (China) and the relation with sediment compositions [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **162**(1): 92-98.
- [6] Dai J C, Song J M, Li X G, *et al.* Geochemical records of phosphorus in Jiaozhou Bay sediments-implications for environmental changes in recent hundred years [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2007, **26**(4): 132-147.
- [7] 戴纪翠, 宋金明, 李学刚, 等. 胶州湾不同形态磷的沉积记录及生物可利用性研究 [J]. *环境科学*, 2007, **28**(5): 929-936.
- [8] Sun S J, Huang S L, Sun X M, *et al.* Phosphorus fractions and its release in the sediments of Haihe River, China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, **21**(3): 291-295.
- [9] 罗月颖. 浅水湖泊水体富营养化评价与模拟 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2011.
- [10] 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.
- [11] Li R Z, Shu K, Luo Y Y, *et al.* Assessment of heavy metal pollution in estuarine surface sediments of Tangxi River in Chaohu Lake Basin [J]. *Chinese Geographical Science*, 2010, **20**(1): 9-17.
- [12] 王书航. 巢湖水华时空分布特征及成因初步分析 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2010.
- [13] 袁旭音, 李兵, 许薇薇, 等. 太湖入湖河道沉积物中生物利用磷和营养水平分析 [J]. *地学前缘*, 2008, **15**(5): 212-218.
- [14] 刘恩峰, 沈吉, 杨丽原, 等. 南四湖及主要入湖河流沉积物中磷的赋存形态研究 [J]. *地球化学*, 2008, **37**(3): 290-296.
- [15] Lü X X, Song J M, Li X G, *et al.* Geochemical characteristics of nitrogen in the southern Yellow Sea surface sediments [J]. *Journal of Marine Systems*, 2005, **56**(1-2): 17-27.
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2002. 47-56.
- [17] 吕昌伟, 何江, 孙惠民, 等. 乌梁素海沉积物中磷的形态分布特征 [J]. *农业环境科学学报*, 2007, **26**(3): 878-885.
- [18] 朱广伟, 秦伯强. 沉积物中磷形态的化学连续提取法应用研究 [J]. *农业环境科学学报*, 2003, **22**(3): 349-352.
- [19] Pardo P, Rauret G, López-Sánchez J F. Shortened screening method for phosphorus fractionation in sediments: a complementary approach to the standards, measurements and testing harmonised protocol [J]. *Analytica Chimica Acta*, 2004, **508**(2): 201-206.
- [20] 李辉, 潘学军, 史丽琼, 等. 湖泊内源氮磷污染分析方法及特征研究进展 [J]. *环境化学*, 2011, **30**(1): 281-292.
- [21] 潘成荣, 汪家权, 郑志侠, 等. 巢湖沉积物中氮与磷赋存形态研究 [J]. *生态与农村环境学报*, 2007, **23**(1): 43-47.
- [22] 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.
- [23] Mortimer R J G, Davey J T, Krom M D, *et al.* The effect of

- macrofauna on porewater profile and nutrient fluxes in the intertidal zone of the Humber Estuary[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1999, **48**(6): 683-699.
- [24] 周小宁, 王圣瑞, 金相灿. 沉水植物黑藻对沉积物有机、无机磷形态及潜在可交换性磷的影响[J]. *环境科学*, 2006, **27**(12): 2421-2425.
- [25] 张志斌, 张学杨, 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.
- [26] 王雨春, 马梅, 万国江, 等. 贵州红枫湖沉积物磷赋存形态及沉积历史[J]. *湖泊科学*, 2004, **16**(1): 21-27.
- [27] Cha H J, Lee C B, Kim B S, *et al.* Early diagenetic redistribution and burial of phosphorus in the sediments of the southwestern East Sea (Japan Sea)[J]. *Marine Geology*, 2005, **216**(3): 127-143.
- [28] 岳维忠, 黄小平, 孙翠慈. 珠江口表层沉积物中氮、磷的形态分布特征及污染评价[J]. *海洋与沼泽*, 2007, **38**(2): 231-239.
- [29] 叶琳琳, 潘成荣, 张之源, 等. 瓦埠湖沉积物氮的赋存特征以及环境因子对 NH_4^+ -N释放的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2006, **25**(5): 1333-1336.
- [30] 王圣瑞, 焦立新, 金相灿, 等. 长江中下游浅水湖泊沉积物总氮、可交换态氮与固定态铵的赋存特征[J]. *环境科学学报*, 2008, **28**(1): 37-43.
- [31] 陈林, 许其功, 李铁松, 等. 模糊物元识别模型在巢湖水体富营养化评价中的应用研究[J]. *环境工程学报*, 2010, **4**(4): 729-736.

CONTENTS

Using Look-up Table Method in the Simulation of Regional Atmospheric Environment	XIE Min, WANG Ti-jian, JIANG Fei, <i>et al.</i> (1409)
Applications of Pollutants Released from Crop Residues at Open Burning in Yangtze River Delta Region in Air Quality Model	SU Ji-feng, ZHU Bin, KANG Han-qing, <i>et al.</i> (1418)
Atmospheric Dry Deposition Flux and Sources of Monocarboxylic Acids in Beijing and Surrounding Cities	XU Xiao-juan, LI Xing-ru, WANG Yue-si, <i>et al.</i> (1425)
Comparison of Physicochemical Characterization of Shanghai Ambient Ultrafine Particles and Engineered Nano Particles and Their Cytotoxicity	ZHANG Rui, LÜ Sen-lin, SHANG Yu, <i>et al.</i> (1431)
Element Compositions and Source of PM _{2.5} Aerosols in Qingdao	LI Xiu-zhen, SHENG Li-fang, XU Hua, <i>et al.</i> (1438)
Phthalate Esters Pollution in Household Indoor Air Particles of Tianjin in Winter	WANG Fu-mei, CHEN Li, JIAO Jiao, <i>et al.</i> (1446)
Application of a Resuspension Test Chamber in PM _{2.5} Source Profile Analysis	DUAN Heng-yi, QIAN Ran-ran, WU Shui-ping, <i>et al.</i> (1452)
Distribution and Enrichment of Trace Elements in Coal Combustion Products from Southwestern Guizhou	WEI Xiao-fei, ZHANG Guo-ping, LI Ling, <i>et al.</i> (1457)
Air-Water Surface Greenhouse Gas Flux in Pengxi River at Different Operational Stages of the Three Gorges Reservoir	JIANG Tao, GUO Jing-song, LI Zhe, <i>et al.</i> (1463)
Fluxes of Greenhouse Gases from Xiangxi River in Summer and Their Influencing Factors	WANG Liang, XIAO Shang-bin, LIU De-fu, <i>et al.</i> (1471)
Effects of Elevated Ozone Concentration and Soil Moisture on Temperature Sensitivity of Soil Microbial Respiration in a Cropland	CHEN Shu-tao, ZHANG Yong, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (1476)
Hydrochemical Characteristics in the Glacier No. 72 of Qinghingtian, Tomur Peak	ZHAO Ai-fang, ZHANG Ming-jun, LI Zhong-qin, <i>et al.</i> (1484)
Mineralization Characteristics of Dissolved Organic Phosphorus in Wudalianchi Lake, China	ZHANG Bin, XI Bei-dou, ZHAO Yue, <i>et al.</i> (1491)
Speciation Distribution of Nitrogen in Sediments of 7 Rivers around Taihu Lake	LU Shao-yong, YUAN Ye, JIN Xiang-can, <i>et al.</i> (1497)
Distribution and Bioavailability of Nitrogen and Phosphorus Species in the Sediments from Shiwuli Stream in Lake Chaohu	LI Ru-zhong, LI Feng, ZHOU Ai-jia, <i>et al.</i> (1503)
Surface Water Quality of Beiyun Rivers Basin and the Analysis of Acting Factors for the Recent Ten Years	GUO Jing, JING Hong-wei, LI Jin-xiang, <i>et al.</i> (1511)
Water Quality Impact of Dongjiang River Network Caused by Dongguan Canal Drainage	SUN Lei, MAO Xian-zhong, HUANG Min-min (1519)
Groundwater Pollution Sources Identification and Grading in Beijing Plain	LU Yan, HE Jiang-tao, WANG Jun-jie, <i>et al.</i> (1526)
3D Numerical Simulation of Air Sparging Remediation Process	LI Heng-zhen, HU Li-ming, WANG Jian, <i>et al.</i> (1532)
Numerical Experiment Study on the Algae Suppression Effect of Vertical Hydrodynamic Mixers	ZOU Rui, ZHOU Jing, SUN Yong-jian, <i>et al.</i> (1540)
Microbial Mechanism of Pollutants Removal in New Biological Island Grid	GAO Ming-yu, XIE Hui-jun, WANG Wen-xing (1550)
Effect of Nutrition Level of Phosphorus and Nitrogen on the Metabolism of the Extracellular Organic Matter of <i>Nostoc flagelliforme</i>	QI Fei, LIU Xiao-yuan, XU Bing-bing, <i>et al.</i> (1556)
Inhibitory Effects of Liquor Cultured with <i>Hydrodictyon reticulatum</i> on the Growth of <i>Microcystis aeruginosa</i>	FU Hai-yan, CHAI Tian, ZHAO Kun, <i>et al.</i> (1564)
Removal and Distribution of Phthalate Acid Esters in <i>Potamogeton crispus</i> L. Microcosm of Haihe River	CHI Jie, YANG Qing (1570)
Control and Removal of Microcystin Production of <i>Microcystis aeruginosa</i> by Irradiation of Electron Beam	LIU Shu-yu, WU Ming-hong, JIANG Qin-peng (1575)
Source Characteristics Analysis of Discharge and Pollutants in Typical Drainage Ditch of Qingtongxia Irrigation District	LI Qiang-kun, HU Ya-wei, LUO Liang-guo (1579)
Degradation of TBBPA by Electron Beam Radiolysis	LI Jie, XU Dian-dou, XU Gang, <i>et al.</i> (1587)
Catalytic Ozonation of Ibuprofen in Aqueous Solution by Activated Carbon Made from Sludge and Corn Cob	WANG Hong-juan, QI Fei, FENG Li, <i>et al.</i> (1591)
Effect of High Hydraulic Loading on Intensive Shrimp Aquaculture Wastewater Treatment Performance in Constructed Wetland	LI Huai-zheng, ZHANG Xing-yi, CHEN Wei-bing, <i>et al.</i> (1597)
Factors Influencing the Formation of NDMA During Chloramination Disinfection of Effluent from Biological Nitrogen Removal System for the Treatment of Municipal Sewage	SHANG Xiao-ling, LI Yong-mei (1604)
Denitrification Using Starch/PCL Blends as Solid Carbon Source	SHEN Zhi-qiang, WU Wei-zhong, YANG Chun-ping, <i>et al.</i> (1609)
Profiles of Zeta Potential and EPS in Granulation Process of Aerobic Sludge	WANG Hao-yu, SU Ben-sheng, HUANG Dan, <i>et al.</i> (1614)
Biosorption Characteristics of f2 Bacteriophage onto Activated Sludge	ZHOU Yu-fen, ZHENG Xiang, LEI Yang, <i>et al.</i> (1621)
Adsorption of Anionic Polyacrylamide on the Surface of Ion Exchange Membranes	DENG Meng-jie, YU Shui-li, SHI Wen-xin, <i>et al.</i> (1625)
Adsorption of Amphoteric Modified Bentonites to Phenol and Its Thermodynamics	LI Ting, MENG Zhao-fu, ZHANG Bin (1632)
Effect of Surfactants on Sorption and Desorption of Benzo[a]pyrene onto Black Carbon	ZHANG Jing-huan, CHEN Chun-rong, ZHANG Wei-hang, <i>et al.</i> (1639)
Isolation and Identification of Bacteria in the Activated Sludge from Four Sewage Treatment Plants in Nanjing City and Its Antibiotic Resistance Analysis	GE Feng, GUO Kun, ZHOU Guang-can, <i>et al.</i> (1646)
Screening and Characterization of Phenol Degrading Bacteria for the Coking Wastewater Treatment	CHEN Chun, LI Wen-ying, WU Jing-wen, <i>et al.</i> (1652)
Characteristics of 1,4-Dioxane Degradation by <i>Xanthobacter flavus</i> DT8	JIN Xiao-jun, CHEN Dong-zhi, ZHU Run-ye, <i>et al.</i> (1657)
Spatial Quantitative Distribution of Hydrocarbon-Oxidizing Bacteria of Unexploited Oil and Gas Fields	MAN Peng, QI Hong-yan, HU Qing, <i>et al.</i> (1663)
Screening and Biological Characteristics of Amphitrophic Methane-Oxidizing Bacteria from Aged-Refuse	ZHAO Tian-tao, XIANG Jin-xin, ZHANG Li-jie, <i>et al.</i> (1670)
Distribution Characteristics and Potential Risk of PCBs in Surface Water from 22 Tributaries and Mainstream in Middle Reaches of Yangtze River	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (1676)
Pollution Characteristics and Potential Risks of Phenolic Compounds in Schistosomiasis Epidemic Areas	WU Zheng-yong, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (1682)
Spatial Heterogeneity and Autocorrelation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Sediment of Minjiang River in Fuzhou City	CHEN Wei-feng, NI Jin-zhi, YANG Hong-yu, <i>et al.</i> (1687)
Heavy Metals Pollution and Its Potential Ecological Risk of the Sediments in Three Gorges Reservoir During Its Impounding Period	WANG Jian-kang, GAO Bo, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (1693)
Investigation on the Distribution and Potential Ecological Risk of Heavy Metal in the Sediments from Typical Electrical Industrial Zone	DENG Dai-yong, SUN Guo-ping, GUO Ju, <i>et al.</i> (1700)
Fraction Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Iron and Gold Mine Soil of Miyun Reservoir Upstream	GAO Yan-xin, FENG Jin-guo, TANG Lei, <i>et al.</i> (1707)
Heavy Metal Contamination and Bioavailability in Huayuan Manganese and Lead/Zinc Mineland, Xiangxi	YANG Sheng-xiang, YUAN Zhi-zhong, LI Zhao-yang, <i>et al.</i> (1718)
Evaluation of Heavy Metal Pollution in Soils from a Training Ground Based on GIS	LIU Yu-tong, FANG Zhen-dong, YANG Qin, <i>et al.</i> (1725)
Effects of Soil Texture and Water Content on Remediation of SVE on Soils Contaminated by Benzene	LIU Shao-qing, JIANG Lin, YAO Yu-jun, <i>et al.</i> (1731)
Characteristics of DNA Adsorption and Desorption in Montmorillonite, Kaoline and Goethite	WANG Shen-yang, RAO Wei, WANG Dai-zhang, <i>et al.</i> (1736)
LNAPL Migration Monitoring in Simulated Sand Aquifer Using Resistivity Method	PAN Yu-ying, JIA Yong-gang, GUO Lei, <i>et al.</i> (1744)
Preparation and Characterization of Activated Carbon from Rice Straw Pre-treated by the Subcritical Hydrolysis	DONG Yu, SHEN Zhe-min, LEI Yang-ming, <i>et al.</i> (1753)
Study on Composting of Cyanobacteria Amended with Different N Loss Inhibitor	REN Yun, CUI Chun-hong, LIU Fen-wu, <i>et al.</i> (1760)
Research Progress About Bioremediation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Contaminated Soil with Immobilized Microorganism Technique	QIAN Lin-bo, YUAN Miao-xin, CHEN Bao-liang (1767)

《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5月15日 33卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 5 May 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. 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: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人