

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第2期

Vol.37 No.2

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

编者按	(403)
我国化学品的风险评价及风险管理	王铁宇,周云桥,李奇峰,吕永龙 (404)
土地利用回归模型在大气污染时空分异研究中的应用	吴健生,谢舞丹,李嘉诚 (413)
中国 2000~2010 年生态足迹变化特征及影响因素	黄宝荣,崔书红,李颖明 (420)
关中地区冬季 PM _{2.5} 中碳气溶胶的污染特征及来源解析	田鹏山,曹军骥,韩永明,张宁宁,张蓉,刘随心 (427)
利用 SPAMS 研究南宁市冬季单颗粒气溶胶化学成分	刘慧琳,宋红军,陈志明,黄炯丽,杨俊超,毛敬英,李宏姣,梁桂云,莫招育 (434)
南京夏季市区 VOCs 特征及 O ₃ 生成潜势的相关性分析	杨笑笑,汤莉莉,张运江,母应峰,王鸣,陈文泰,周宏仓,花艳,江蓉馨 (443)
北京城区气传花粉季节特征及与气象条件关系	孟龄,王效科,欧阳志云,任玉芬,王巧环 (452)
重庆市垃圾焚烧厂汞的分布特征与大气汞排放因子研究	段振亚,苏海涛,王凤阳,张磊,王书肖,余斌 (459)
三峡库区腹地大气微量金属干湿沉降特征	张六一,刘源,乔保清,付川,王欢博,黄怡民,杨复沫 (466)
长沙近地面水汽中稳定同位素的监测与分析	谢宇龙,章新平,姚天次,黄煌 (475)
青藏高原内陆典型冰川区“冰川-径流”汞传输过程	孙学军,王康,郭军明,康世昌,张国帅,黄杰,丛志远,张强弓 (482)
西藏湖泊沉积物重金属元素特征及生态风险评估	郭泌汐,刘勇勤,张凡,侯居峙,张宏波 (490)
坦噶尼喀湖东北部入湖河流沉积物重金属分布特征与生态风险评价	余成,陈爽,张路 (499)
近百年来新疆博斯腾湖多环芳烃的组成及变化特征	沈贝贝,吴敬禄,赵中华,曾海鳌,金苗 (507)
舟山青浜岛不同环境介质中 PAHs 的分布特征	郑煌,邢新丽,顾延生,桂福坤,祁士华,黄焕芳 (513)
模拟排水沟渠非点源溶质氮迁移实验研究	李强坤,宋常吉,胡亚伟,彭聪,马强,姜正曦,琚艺萌 (520)
中田河流域景观异质性对水体总氮浓度影响研究	王晶萍,李兆富,刘红玉,王刚,辛强 (527)
江西香溪流域干湿季交替下底泥氮释放机制及其对流域氮输出的贡献	韩宁,郝卓,徐亚娟,高扬,于贵瑞 (534)
巢湖水体氮磷营养盐时空分布特征	奚姗姗,周春财,刘桂建,吴蕾,王培华 (542)
合肥城郊典型农田溪流生态系统沉积物磷形态及释放风险分析	裴婷婷,李如忠,高苏蒂,罗月颖 (548)
桑沟湾表层沉积物性质及对磷的吸附特征	朱佳美,曹晓燕,刘素美,王丽莎,杨桂朋,葛成凤,路敏 (558)
苏州市古城区降雨径流颗粒物粒径分布及污染物赋存形态	李淮,吴玮,田永静,黄天寅 (565)
洪泽湖有毒和无毒微囊藻丰度及其与环境因子之间的相关分析	李大命,张彤晴,唐晟凯,段翠兰,杨俊虎,穆欢,刘小维 (573)
三峡库区消落带水体 CDOM 中电荷转移配合物对其紫外-可见吸收光谱的影响	江韬,梁俭,张慕雪,王定勇,魏世强,卢松 (580)
pH 对高锰酸钾氧化降解苯胺类化合物动力学的影响	王辉,孙波,关小红 (588)
EDTA 对 Pd/Fe 体系还原脱氯 2,4-D 的影响	周红艺,聂亚中,陈勇,雷双健 (595)
镍铝层状氧化物薄膜电极的制备及其除盐性能	王婷,朱春山,胡承志 (602)
微生物对砷的氧化还原竞争	杨婷婷,柏耀辉,梁金松,霍旻,王明星,袁林江 (609)
处理水产养殖污水潜流湿地中的厌氧氨氧化菌群特征	曾宪磊,刘兴国,吴宗凡,时旭,陆诗敏 (615)
污水回用中主要病原菌解析及其紫外消毒效应	景明,王磊 (622)
异养硝化-好氧反硝化菌 <i>Burkholderia</i> sp. YX02 强化连续流反应器中微生物群落结构解析	邵基伦,曹刚,李紫惠,黄郑郑,罗恺,莫测辉 (630)
基于新一代测序技术的 A ² O 与 BIOLAK 活性污泥宏基因组比较分析	田美,刘汉湖,申欣 (638)
1 株海洋异养硝化-好氧反硝化菌的分离鉴定及其脱氮特性	孙庆花,于德爽,张培玉,林学政,李津 (647)
纳米 Ni/Fe 用于去除染料生产废水二级生物处理出水中 AOX 和色度的研究	舒小铭,徐灿灿,刘锐,赵远,陈吕军 (655)
3BER-S 工艺用于再生水深度脱氮同步去除 PAEs 的可行性	徐鹏程,郝瑞霞,张娅,王冬月,钟丽燕,徐浩丹 (662)
合成时间对钛酸盐纳米材料的影响及其吸附水中铅的性能研究	范功端,陈丽茹,林茹晶,林茜,苏昭越,林修咏 (668)
芦苇秸秆生物炭对水中菲和 1,1-二氯乙烯的吸附特性	吴晴雯,孟梁,张志豪,罗启仕,杨洁 (680)
芦苇基和污泥基生物炭对水体中诺氟沙星的吸附性能	张涵瑜,王兆炜,高俊红,朱俊民,谢超然,谢晓芸 (689)
季节性温度升高对落干期消落带土壤氮矿化影响	林俊杰,张帅,刘丹,周斌,肖晓君,马慧燕,于志国 (697)
增温及秸秆施用对冬小麦田土壤呼吸和酶活性的影响	陈书涛,桑琳,张旭,胡正华 (703)
基于 GIS 的银川市不同功能区土壤重金属污染评价及分布特征	王幼奇,白一茹,王建军 (710)
不同产地硅藻土原位控制土壤镉污染差异效应与机制	朱健,王平,林艳,雷明婧,陈仰 (717)
紫色土对邻苯二甲酸二甲酯的淋溶吸持特征及影响因素	王强,宋娇艳,曾微,王法 (726)
几种修复措施对 Cd 淋失及土壤剖面运移影响	刘孝利,曾昭霞,铁柏清,陈求稳,魏祥东 (734)
河北邯郸钢铁冶炼区周边麦田土和小麦籽粒的多环芳烃含量及其组分谱特征	吴迪,汪宜龙,刘伟健,陈源琛,付晓芳,陶谢,刘文新 (740)
湿生环境中丛枝菌根 (AM) 对香蒲耐 Cd 胁迫的影响	罗鹏程,李航,王曙光 (750)
溴酸盐对水生生物的急性毒性效应	王执伟,刘冬梅,张文娟,崔福义 (756)
自组装哑铃状 Fe ₃ O ₄ 微/纳米材料对十溴联苯的热催化降解	黄鑫辰,宗刚,刘烨煌,芦会杰,李倩倩,李宾克,赵彦辉,苏贵金 (765)
盐度对准好氧矿化垃圾生物反应器渗滤液处理及 N ₂ O 产生的影响	李卫华,孙英杰,刘子梁,马强,杨强 (775)
污泥直接干化尾气中恶臭污染物质重要性评价:以指标权重评分法为例	丁文杰,陈文和,邓明佳,罗辉,李琳,刘俊新 (782)
《环境科学》征订启事 (557) 《环境科学》征稿简则 (594) 信息 (419,442,781)	

水的拦蓄和城市化导致汇水区域的地表硬化,降雨后的蓄水能力下降,这些河流已演变为典型的缺乏生态基流的重负荷河流。由于缺乏清洁水源,以污水处理厂尾水为主的再生水已成为南淝河的重要补给水源,占南淝河水量的 32.9%,尤其在合肥市城区段污水处理厂尾水已成为主要的补给水源的,占比达 69.7%^[1,7,8]。同时,随着裕溪闸的建立,巢湖水体环境相对封闭,更新周期长,水体流速滞缓,也导致了氮磷营养盐在巢湖西部湖区的富集。巢湖西部湖区入湖河流营养盐输入量巨大,远远超出了巢湖的自净能力,从而为蓝藻的暴发提供了营养物质。因此,为有效地削减和控制巢湖氮磷营养盐,减少南淝河和十五里河等河流污染的输入、补给生态基流是关键。

3 结论

(1)入湖河流中 TP、TN 和 NO_3^- -N 指标均超过了 V 类水标准。季节性水量变化对其浓度变化有重要影响,由于雨水稀释,夏季南淝河和十五里河中 TP、TN 和 NO_3^- -N 含量低于秋季和冬季。夏季杭埠河、白石天河、兆河和柘皋河中 TP、TN 和 NO_3^- -N 含量较高可能是由于农耕地区化肥流失造成。

(2)巢湖湖体中 TN 超过 V 类水标准, NH_4^+ -N 超过 III 标准,污染问题依然严峻。由于受到城市活动的强烈影响,西部湖区中氮磷营养盐的含量远远高于东部湖区。

(3)巢湖水体的主要污染因子是 TP、TN 和 NH_4^+ -N 等,尤其是 TN 和 NH_4^+ -N。这些物质从西部湖区往东部湖区含量不断减少,南淝河和十五里河污染最为严重, TN、TP 和 NH_4^+ -N 随季节的变化明显,其变化特征受雨水补给、城市活动、农业生产和微生物作用等影响。

参考文献:

- [1] 屠清瑛,顾丁锡,尹澄清,等. 巢湖富营养化研究[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,1990.
- [2] 殷福才,张之源. 巢湖富营养化研究进展[J]. 湖泊科学,2003,15(4): 377-384.
- [3] 张之源,王培华,张崇岱. 巢湖营养化状况评价及水质恢复探讨[J]. 环境科学研究,1999,12(5): 45-48.
- [4] 刘恩峰,杜臣昌,羊向东,等. 巢湖沉积物中磷蓄积时空变化及人为污染定量评价[J]. 环境科学,2012,33(9): 3024-3030.
- [5] 尚广萍,徐振宇,李玉成,等. 巢湖西半湖富营养化时空变化趋势与成因分析[J]. 生物学杂志,2010,27(5): 56-59.
- [6] 赵海泉,胡子全. 巢湖东半湖水体富营养化评价及其防治对策[J]. 水生态学杂志,2009,2(5): 119-122.
- [7] 李国莲,刘桂建,姜萌萌,等. 巢湖表层沉积物与上覆水体中重金属分配特征及其相关性研究[J]. 中国科学技术大学学报,2011,41(1): 9-15.
- [8] 叶琳琳,吴晓东,刘波,等. 巢湖溶解性有机物时空分布规律及其影响因素[J]. 环境科学,2015,36(9): 3186-3193.
- [9] Zhang Y C, Ma R H, Zhang M, et al. Fourteen-year record (2000-2013) of the spatial and temporal dynamics of floating algae blooms in Lake Chaohu, observed from time series of Modis images[J]. Remote Sensing, 2015, 7(8): 10523-10542.
- [10] Yu L, Kong F X, Zhang M, et al. The dynamics of microcystis genotypes and microcystin production and associations with environmental factors during blooms in Lake Chaohu, China[J]. Toxins, 2014, 6(12): 3238-3257.
- [11] Xi S S, Liu G J, Zhou C C, et al. Assessment of the sources of nitrate in the Chaohu Lake, China, using a nitrogen and oxygen isotopic approach[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 74(2): 1647-1655.
- [12] 李如忠,李峰,周爱佳,等. 巢湖十五里河沉积物氮磷形态分布及生物有效性[J]. 环境科学,2012,33(5): 1503-1510.
- [13] 潘延安,雷沛,张洪,等. 重庆园博园龙景湖新建初期内源氮磷分布特征及扩散通量估算[J]. 环境科学,2014,35(5): 1727-1734.
- [14] 李超,王丹,杨金燕,等. 巢湖沉积物有效磷的原位高分辨分析研究[J]. 环境科学,2015,36(6): 2077-2084.
- [15] Li G L, Liu G J, Zhou C C, et al. Mobility, binding behavior and potential risks of trace metals in the sediments of the fifth largest freshwater lake, China[J]. Water Science & Technology, 2013, 67(11): 2503-2510.
- [16] Li G L, Liu G J, Zhou C C, et al. Spatial distribution and multiple sources of heavy metals in the water of Chaohu Lake, Anhui, China[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2012, 184(5): 2763-2773.
- [17] 王岩,姜霞,李永峰,等. 洞庭湖氮磷时空分布与水体营养状态特征[J]. 环境科学研究,2014,27(5): 484-491.
- [18] 秦伯强,杨柳燕,陈非洲,等. 湖泊富营养化发生机制与控制技术及其应用[J]. 科学通报,2006,51(16): 1857-1866.
- [19] Taylor G D, Fletcher T D, Wong T H F, et al. Nitrogen composition in urban runoff-implications for stormwater management[J]. Water Research, 2005, 39(10): 1982-1989.
- [20] 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.
- [21] 邓建才,陈桥,翟水晶,等. 太湖水体中氮、磷空间分布特征及环境效应[J]. 环境科学,2008,29(12): 3382-3386.
- [22] 包静玥,鲍建国,李立青. 山地城市新建湖库氮磷营养盐时空特征研究[J]. 环境科学,2014,35(10): 3709-3715.
- [23] 李如忠,杨继伟,钱靖,等. 合肥城郊典型源头溪流不同渠道形态的氮磷滞留特征[J]. 环境科学,2014,35(9): 3365-3372.
- [24] 李如忠,刘科峰,钱靖,等. 合肥市区典型景观水体氮磷污染特征及富营养化评价[J]. 环境科学,2014,35(5): 1718-1726.
- [25] 温胜芳,单保庆,张洪. 巢湖表层沉积物磷的空间分布差异性研究[J]. 环境科学,2012,33(7): 2322-2329.
- [26] 刁晓君,李一崑,王曙光. 水华生消过程对巢湖沉积物微生物群落结构的影响[J]. 环境科学,2015,36(1): 107-113.
- [27] 马孟泉,张玉超,钱新,等. 巢湖水体组分垂向分布特征及其对水下光场的影响[J]. 环境科学,2014,35(5): 1698-1707.

合肥城郊典型农田溪流水系统沉积物磷形态及释放风险分析

裴婷婷¹, 李如忠^{1*}, 高苏蒂², 罗月颖²

(1. 合肥工业大学资源与环境工程学院, 合肥 230009; 2. 安徽新华学院土木与环境工程学院, 合肥 230088)

摘要: 2014 年 10 月 (秋季) 和 2015 年 4 月 (春季), 针对巢湖二十埠河流域某一典型农业源头溪流水系统, 就水塘、支流、干流和深潭等 4 种溪流构成模式, 分别采集 17、16、14 和 13 份表层沉积物样。在分析测试的基础上, 解析沉积物的磷形态及其季节性变化特征; 并以多元统计分析技术, 对 4 种构成模式开展聚类分析和差异性分析; 通过对沉积物磷吸附指数 PSI 的计算和相关性分析, 定量评估磷素释放风险, 识别主要影响因素。结果表明: ① 溪流水系统沉积物 TP 含量变化范围为 137.517 ~ 1709.229 mg·kg⁻¹, 均值为 532.245 mg·kg⁻¹, 各形态磷的平均含量高低排序为: IP (350.347 mg·kg⁻¹) > OP (167.333 mg·kg⁻¹) > Fe/Al-P (78.869 mg·kg⁻¹) > Ca-P (56.343 mg·kg⁻¹) > Ex-P (6.609 mg·kg⁻¹); ② 4 种构成模式中, 各形态磷含量均表现出相同的变化趋势, 即深潭 > 干流 > 支流 > 水塘; ③ 秋季时干流和深潭聚为一类、支流和水塘为另一类, 春季时则干流、支流和深潭归为同一类; ④ 方差分析表明, 秋季时溪流不同构成模式之间的差异性指标更多; ⑤ 沉积物 PSI 变化范围为 24.49 ~ 69.94 (mg·L⁻¹) · (100 g·μmol)⁻¹, 且春季低于秋季, 说明春季的磷素释放风险更高一些; ⑥ PSI 与 Ex-P、IP 和 pH 呈显著或极显著负相关性。

关键词: 农田源头溪流; 磷形态; 沉积物; 磷吸附指数; 水塘; 深潭

中图分类号: X522; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)02-0548-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.02.020

Phosphorus Fractions and Release Risk in Surface Sediments of an Agricultural Headwater Stream System in Hefei Suburban, China

PEI Ting-ting¹, LI Ru-zhong^{1*}, GAO Su-di², LUO Yue-ying²

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. College of Civil and Environmental Engineering, Anhui Xinhua University, Hefei 230088, China)

Abstract: A typical water system of agricultural headwater stream in Chaohu Lake basin was selected as the study area, and 17, 16, 14 and 13 surface sediments were collected from the four styles of stream, respectively, including ponds, branches, main channel and mainstream deep pools, in October 2014 (in autumn) and April 2015 (in spring). The forms and space-time variations of phosphorus in the sediments were analyzed. Clustering and variance analysis were conducted on the phosphorus forms data from the four styles of stream by means of multivariate statistical analyses. We quantified the phosphorus release risk (PSI) and identified the main impact factors of PSI via calculating the phosphorus sorption index (PSI) and the correlation analysis. The results showed that: ① The contents of TP in the surface sediments ranged from 137.517 to 1709.229 mg·kg⁻¹ with an average value of 532.245 mg·kg⁻¹, and the order of the average contents of phosphorus forms was IP (350.347 mg·kg⁻¹) > OP (167.333 mg·kg⁻¹) > Fe/Al-P (78.869 mg·kg⁻¹) > Ca-P (56.343 mg·kg⁻¹) > Ex-P (6.609 mg·kg⁻¹); ② The contents of phosphorus forms had the same trend in all the four stream styles, which was deep pool > main channel > branch > pond; ③ In autumn, the deep pool and main channel were clustered into one class, while the pond and branch were clustered into the other class. In spring, branch, main channel and deep pool were clustered into the same class; ④ Variance analysis showed that the differences among the four stream styles were larger in autumn than in spring; ⑤ The PSI of the surface sediments ranged between 24.49 and 69.94 (mg·L⁻¹) · (100 g·μmol)⁻¹. The PSI in spring was lower than that in autumn, indicating that phosphorus release risk of surface sediment was higher in spring than in autumn. ⑥ PSI had a significant negative correlation with Ex-P, IP and pH.

Key words: agricultural headwater stream; phosphorus fractions; surface sediment; phosphorus sorption index; pond; deep pool

农业汇流区输出的氮磷是造成河、湖、库、海湾水体发生富营养化的主要因素^[1,2]。农业源头溪流是一类特殊的生态系统, 不仅具有河流和湿地的双重特征, 同时也具有排涝泄洪的水利工程作用。作为连接农田与下游水体的重要通道, 农田溪流水体沉积物起着氮磷等生源要素源、汇的功能, 特别

是其具有的较浅水深和较高面积/体积比, 控制着流域非点源污染物向受纳水体的输出负荷^[3,4], 从而

收稿日期: 2015-08-06; 修订日期: 2015-09-07

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51179042, 51579061)

作者简介: 裴婷婷 (1990 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水环境保护, E-mail: 564430106@qq.com

* 通讯联系人, E-mail: lrz1970@163.com

对农业非点源氮磷污染影响起到一定的调控作用。近年来,有关源头溪流、农业排水沟渠等小型河流水环境和水生态问题,已成为环境科学、环境水文地质学等学科领域研究的热点^[5~8]。目前,围绕农田溪流、排水沟渠等开展的农业非点源氮磷污染调控和管理研究,主要集中在非点源氮磷污染特征、氮磷截留净化的基本机制、环境效应和生态功能等方面^[9~13],虽然也有学者探讨了源头农业区不同类型水塘沉积物的磷形态及其吸附特征^[14~16],但从整个溪流水系统层面分析沉积物的磷形态及其时空变化性,进而评估沉积物磷释放风险,则还显得较为不足。

巢湖是水体富营养化严重的大型淡水湖泊。随着汇水区点源污染控制的逐步加强,周边农业区域非点源氮磷污染负荷成为影响巢湖水环境改善和水体富营养化控制的重要因素。巢湖流域河流水系较为发达,各等级农业源头溪流的数量更是数不胜数。毫无疑问,为数众多的溪流水系统沉积物的源或汇作用,对于处在最下游的巢湖水体生态环境质量有着极为重要的影响。本研究拟以巢湖主要入湖河流南淝河的最大支流——二十埠河汇流区内的某一典型农业源头溪流系统为对象,从水塘、支流、干流及干流中深潭等溪流的几种主要构成模式角度,解析沉积物的磷形态及其释放风险,以为巢湖流域农业汇流区溪流水系统磷素污染控制提供参考。

1 研究区概况

1.1 土地利用特征

合肥市位于巢湖西半湖北侧,江淮分水岭南部,属于亚热带季风性湿润气候区。年平均气温 15.7°C ,降水量近 $1\,000\text{ mm}$ 。南淝河是巢湖的主要入湖河流之一,全长约 70 km ,流域总面积约 $1\,464\text{ km}^2$,河流的中、上游位于合肥市城区内。作为南淝河主要支流的二十埠河,发源于长丰县三十头乡南部,全长 27.0 km ,流域面积 136 km^2 ,汇水区主要位于合肥市北部至东部方向的郊外及城郊结合部。本研究在二十埠河位于合肥东北部城郊的磨店乡境内,筛选一个具有明显多水塘-支渠系统特征的农田溪流为对象,开展溪流水系统沉积物的磷形态分析及释放风险评估。溪流水系统的大致构成情况,见图1。

所选溪流干流总长约 7.0 km ,流域中、上游主要用地类型为耕地和林地,且在汇水区两侧边缘岗坡上分布多个小村庄及2所高校;下游地区,特别

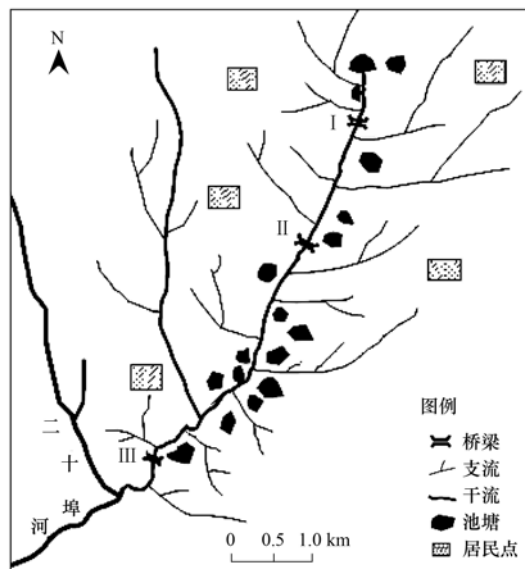


图1 研究区农田溪流水系统示意

Fig. 1 Sketch map of agricultural headwater stream system in the study area

是靠近与二十埠河交汇处附近地区,已为合肥市城市建设用地。根据溪流水系统的基本构造形态和河床结构特征,笼统地将溪流水系统划分为水塘、支流、干流等3个类型。鉴于干流上分布大量深潭,且深潭水动力学特性与一般渠段存在较大的差异,为此考虑将干流进一步区分为一般干流渠段和深潭两种模式,即按照水塘、支流、干流和深潭等4种典型溪流构成模式,解析溪流水系统沉积物磷形态及污染特征。

1.2 溪流水质状况

实地调查发现,在桥梁II下方约 10 m 处,有较为明显的高校生活污水和少量食品加工业废水排入,导致溪流水质在感官上明显较桥梁II上方水体差些。鉴于桥梁II上、下方溪流水质差异明显,为便于表述,不妨以桥梁II为界,将整个溪流水系统简单地划分为上、下游。2015年3~6月在干流上安排19个水质采样点(其中上游7个、下游12个),逐月采集水样,得到水质指标的统计结果,见表1。

2 材料与方法

2.1 采样点布设与样品采集

根据农田溪流水系统的基本形态和构造特征,考虑在汇区内水塘、支流、干流及干流深潭等4种溪流基本构成模式上,分别筛选出17、16、14和13个采样点位,并以GPS定位,分别于2014年10月和2015年4月,分两次在相同坐标点周边 1 m^2 范围内采集表层沉积物样。实验室自然风干后,剔

表 1 溪流水质理化指标

Table 1 Physicochemical index for surface water quality of the studied headwater stream

河段	统计参数	TDS × 10 ⁻⁶	pH	EC /μS·cm ⁻¹	ORP /mV	NH ₄ ⁺ /mg·L ⁻¹	PO ₄ ³⁻ /mg·L ⁻¹
上游	最大值	246	7.98	490	183	0.807	0.080
	最小值	180	7.53	361	71	0.421	0.013
	平均值	200	7.73	405	133	0.519	0.049
	标准差	20	0.14	44	34	0.123	0.023
	变异系数/%	10	1.75	10.77	25.50	23.77	45.81
下游	最大值	499	8.34	1 028	138	10.216	0.814
	最小值	222	7.50	460	103	3.333	0.152
	平均值	338	7.75	680	122	6.576	0.413
	标准差	105	0.17	213	12	2.051	0.196
	变异系数/%	31.13	2.13	31.27	9.8	31.18	47.44

除枯枝碎叶,研磨后过 100 目尼龙筛,装入贴有标签的自封袋备用.

2.2 样品的分析测定

总磷(TP)和无机磷(IP)采用欧洲标准测试委员会框架下发展的 SMT 法测定. 易交换态磷(Ex-P)、铁铝结合态磷(Fe/Al-P)及碎屑磷(Ca-P)采用三步连续提取方法^[17]分析测定. 每提取一次,将离心管放入离心机中以4 000 r·min⁻¹的转速离心 20 min,取上清液,采用钼锑抗分光光度法测定磷含量. 除最后一步提取外,前两步提取所得残渣均使用去离子水清洗两次,再进行下一步的提取. 沉积物中有机质(OM)含量采用灼烧法测定,pH 值采用笔式 pH 计测定(水土比 5:1).

2.3 沉积物磷吸附指数的确定

对于每个沉积物样,分别称取 4 份 1.000 g 干样于 50 mL 聚乙烯离心管中,其中 1 个离心管加入 20 mL 0.01 mol·L⁻¹ CaCl₂ 溶液,作为 1 个空白,其余 3 个离心管分别加入 20 mL 75 mg·L⁻¹ 的 KH₂PO₄ 溶液(配制在 0.01 mol·L⁻¹ CaCl₂ 中)作为 3 个平行试验,并分别加入 2 滴氯仿以抑制微生物活动. 20℃下振荡 24 h 后,放入4 000 r·min⁻¹转速的离心机离心 20 min,再以 0.45 μm 孔径的滤膜进行过滤. 滤液中磷浓度以钼锑抗比色法测定,由初始浓度与滤液中磷浓度的差值,计算 1.000 g 沉积物吸附磷的量^[18]. 然后,再按下式计算吸附指数 PSI:

$$PSI = X/\lg c$$

式中, X 表示 100 g 沉积物吸附磷的量, mg·(100 g)⁻¹; c 表示滤液中溶解磷浓度, μmol·L⁻¹; PSI 的单位通常表示为 (mg·L⁻¹)·(100 g·μmol)⁻¹.

2.4 数据处理

采样 SPSS 18.0 和 Excel 统计软件,开展数据分

析和相应图形的绘制.

3 结果与分析

3.1 沉积物磷形态及其变化特征

3.1.1 沉积物磷形态含量

整个溪流水系统沉积物的 pH 值变化范围为 6.27~8.53,平均值为 7.44; OM 变化为 1.83%~8.99%,平均值为 4.79%. 沉积物中各形态磷含量的统计结果见表 2. 总的来看,支流和干流沉积物 TP 及各形态磷含量的时空变化性相对较小一些. 流域水系沉积物的 TP 含量变化范围为 137.517~1 709.229 mg·kg⁻¹,均值为 532.245 mg·kg⁻¹,这与国内一些农业源头区情况很相似. 如卫新锋等^[19]在对河套灌区各级沟渠表层沉积物的调查中,得到绝大部分沟渠表层沉积物 TP 含量在 600 mg·kg⁻¹左右,明显高于本研究的水塘和支流,而与干流和深潭含量大体相当. 李红芳等^[15]在对农业小流域源头区 12 个池塘底泥磷含量的研究中,得到由农田改建的人工塘、人为影响大的山边塘和人为影响小的山边塘 TP 含量平均值分别为 700、610 和 350 mg·kg⁻¹. 显然,本研究中水塘 TP 含量与人为影响小的山边塘相近,干流与人为影响大的山边塘相当,深潭则与农田改建的人工塘相同.

由表 2 可见,4 种溪流构成模式中沉积物的 TP 含量由小到大的排序为:水塘<支流<干流<深潭. 这里,位于溪流干流的深潭 TP 相对较高,可能与深潭水面相对较宽、水深相对较浅,使得溪流挟带泥沙容易沉降下来有很大的关系. 汇水区水内水塘共计数十个,但大部分为近年新开挖的人工养鱼塘,水底沉积物较少. 从外观上看,有些水塘底泥甚至与当地土壤母质相差无几,这可能正是表 2 中水塘沉积物磷含量偏低的主要原因. 为了解该流域土壤磷素

含量背景水平,笔者曾在距离溪流较远的两处陆域岗坡上,各挖掘了1个直径约40 cm、深度为60 cm的深坑,并在坑底3个不同方向各采集1份土样(共计6份),分析测得相应的TP、Ex-P、Fe/Al-P、Ca-P和OP平均含量,分别为128.763、6.324、34.020、10.034和48.038 mg·kg⁻¹.表2中水塘底部沉积物TP含量最低值为137.517 mg·kg⁻¹,与上述背景值十分接近.显然,与一般河流、湖泊相比,研究区的Ca-P含量处于相对较低水平,这可能与当地土壤母质构

成有一定的关系.事实上,刘洋等^[20]在距离本研究区不远的巢湖北岸六叉河农业小流域多个水塘沉积物磷形态分析中,也得到了较低水平的Ca-P含量,相应的田塘、旱塘、山塘、村塘和河塘的钙镁结合态磷(Ca/Mg-P)平均含量分别为8.6、9.1、35.7、39.5和70.1 mg·kg⁻¹,水塘沉积物TP含量介于286.3~651.3 mg·kg⁻¹之间.刘成等^[21]在靠近合肥方向的巢湖西半湖北侧重污染汇流湾区沉积物磷形态分析中,得到Ca-P含量为8.2~65.8 mg·kg⁻¹.

表2 溪流水系统沉积物各形态磷含量

Table 2 Statistical results of phosphorus fractions contents in the sediments

类型	统计值	Ex-P	Fe/Al-P	Ca-P	IP	OP	TP
水塘	最大值/mg·kg ⁻¹	9.944	158.683	178.106	518.014	399.219	917.233
	最小值/mg·kg ⁻¹	0.990	15.217	3.968	81.550	26.665	137.517
	平均值/mg·kg ⁻¹	2.732	46.954	30.530	237.273	95.172	332.446
	变异系数/%	80.38	61.92	162.15	43.40	77.53	48.16
支流	最大值/mg·kg ⁻¹	25.943	211.523	134.288	754.942	215.035	852.768
	最小值/mg·kg ⁻¹	1.291	18.033	10.666	144.898	84.432	241.888
	平均值/mg·kg ⁻¹	8.183	59.304	49.591	347.511	132.282	479.794
	变异系数/%	88.85	63.26	55.20	45.08	41.92	36.60
干流	最大值/mg·kg ⁻¹	21.116	291.517	141.939	802.644	507.614	1 030.814
	最小值/mg·kg ⁻¹	2.978	32.227	13.838	140.093	71.098	162.075
	平均值/mg·kg ⁻¹	7.253	104.090	69.119	402.151	212.712	614.863
	变异系数/%	61.68	70.30	68.01	49.83	49.23	39.28
深潭	最大值/mg·kg ⁻¹	52.561	279.240	211.259	1 150.365	337.266	1 709.229
	最小值/mg·kg ⁻¹	1.391	44.489	29.929	116.992	93.854	235.749
	平均值/mg·kg ⁻¹	9.049	121.354	84.649	445.912	255.966	701.878
	变异系数/%	144.52	50.43	64.76	56.57	44.42	47.53

Ex-P是可以被水生植物直接利用的磷形态,是造成水体富营养化的重要磷素.总体上,深潭Ex-P含量较高,水塘最低.整个溪流水系统中Ex-P变异系数明显偏大,表明Ex-P有着较显著的时空差异性.由表2可见,Fe/Al-P含量高低排序为:深潭>干流>支流>水塘.4种溪流构成模式的Fe/Al-P含量都高于Ex-P、Ca-P,其变异系数相对稳定.

总体上,溪流沉积物中的磷素以无机磷IP为主,平均占TP含量的63.53%~72.43%.各形态磷含量高低排序为:IP>OP>Fe/Al-P>Ca-P>Ex-P,且在空间分布上,各种磷形态含量基本都表现出相似的变化特征,即深潭>干流>支流>水塘.这里,水塘与支流的OP含量明显低于深潭和干流.整个溪流水系统沉积物的OP含量平均值仅为95.172~255.966 mg·kg⁻¹,显著低于巢湖周围池塘的平均水平(414.480 mg·kg⁻¹)^[22].根据实地调查,OP含量最低点出现在上游源头人为活动影响较小的新开挖水塘,最大值则出现在溪流与二十埠河交汇处上游

不远处的深潭中.调查发现,该深潭靠近合肥城区,且在深潭上方不远处有一处较为明显的生活污水和类似生活污水的食品加工废水排放口存在,时常有污水汇入,这可能正是该点位包括OP在内的各形态磷含量明显偏高的主要原因.

3.1.2 磷形态空间分布特征

总体上,不同水塘沉积物磷含量差异较大,其中Ex-P、Fe/Al-P、OP和TP都表现出下游平均含量高于上游,而Ca-P则为上游偏高.TP最高含量(917.233 mg·kg⁻¹)出现在下游一个底泥发黑发臭的废弃小型水塘中,相应的Ex-P、Fe/Al-P、Ca-P和OP含量分别为9.529、158.683、178.106和399.219 mg·kg⁻¹;TP含量最低值(137.517 mg·kg⁻¹)出现在上游新开挖水塘,其Ex-P、Fe/Al-P、Ca-P和OP含量分别为1.090、19.708、4.964和26.665 mg·kg⁻¹.

支流中,上、下游的Ex-P和OP含量相当,Fe/Al-P和TP含量则是下游高于上游,而Ca-P含量则

表现为下游低于上游. TP 最高含量 ($852.768 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 出现在下游左侧一个较大支流上, 相应的 Ex-P、Fe/Al-P、Ca-P 和 OP 含量分别为 2.095 、 18.033 、 30.759 和 $97.827 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. TP 含量最低的采样点位于上游源头处左侧小支流上, 该支流虽然两侧都是农田、菜地, 但由于地形坡度稍大, 使得农田、菜地径流携带的磷素直接进入干流, 而在支流中沉积较少. 该采样点 Ex-P、Fe/Al-P、Ca-P、OP 和 TP 含量分别为 2.296 、 28.080 、 46.498 、 96.990 和 $241.888 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$.

干流沉积物中, 除 Ca-P 以外, 其余各形态磷都表现为上游平均含量低于下游, 这与表 1 的溪流水质状况相一致. 可能是受到生活污水的影响, TP 含量最大值 ($1030.814 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 出现在上游河段一个离村落较近的采样点, 其 Ex-P、Fe/Al-P、Ca-P 和 OP 含量分别为 11.461 、 53.835 、 117.278 和 $260.738 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$.

相比较而言, 在干流大小不一的深潭中, 各形态磷含量在上、下游空间分布的差异性最大, 上、下游 TP 平均值分别为 $618.590 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $826.931 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, TP 含量最大值 ($1709.229 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 出现在下游与二十埠河交汇处上方的深潭中, 这也是整个溪流水系统中 TP 含量最高的点位.

3.1.3 不同季节磷形态变化特征

由于 Ex-P、Fe/Al-P 和 OP 可以直接或间接地被水生植物吸收利用, 因此往往成为水环境保护和水污染控制中颇受关注的磷素指标. 图 2 展示了 2014 年秋季和 2015 年春季, 4 种溪流构成模式中 Ex-P、Fe/Al-P、OP 和 TP 含量变化情况. 可以看出, Ex-P 和 TP 的春季含量都较对应的秋季高些, Fe/Al-P 和 OP 都仅在支流中出现春季高于秋季.

深潭中, 无论是春季还是秋季, 13 个采样点位之间 Ex-P 含量差异均最为显著. 这除了与溪流上、下游氮磷污染来源不同有关外, 深潭中水生植物生长情况的差异性可能也是不容忽视的因素. Fe/Al-P 常作为指示沉积物质量的重要指标之一. 活泼的铁氧化物对磷的快速吸附和释放控制着孔隙水中 PO_4^{3-} 的浓度, 从而直接影响沉积物-水界面磷的交换. 总体上, 干流和深潭的沉积物 Fe/Al-P 含量表现为秋季高于春季, 水塘则是秋季略高于春季, 这除了与水生植物的吸收利用影响有关外, 还可能缘于春季时水温相对较高, 沉积物中微生物活性相对较强, 促进了生物扰动和矿化作用, 导致水体耗氧增多, 从而促使沉积物中 Fe/Al-P 的释放^[23].

加拿大安大略省环境和能源部根据沉积物中污染物对于底栖生物的生态毒性效应, 制定了环境质

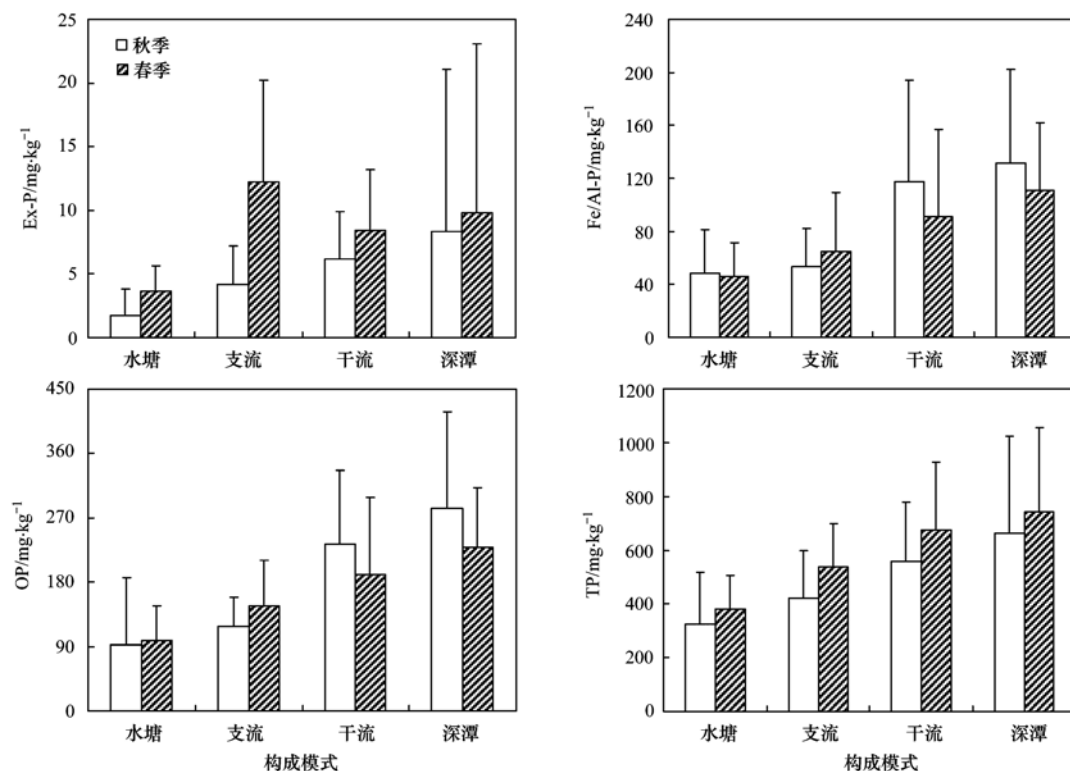


图 2 Ex-P、Fe/Al-P、OP 和 TP 的季节变化

Fig. 2 Seasonal variations of Ex-P, Fe/Al-P, OP and TP contents in sediments

量评价标准,即将 $TP = 600 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 作为沉积物已受污染,但多数底栖生物可以承受的最低等级阈值;将 $TP = 2\,000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 作为底栖生物群落遭受明显损害的严重级别标准^[24]. 根据该标准可以判定,深潭在春季和秋季、干流仅在春季达到最低污染等级,水塘和支流沉积物则均没有达到污染程度. 而根据文献^[25]的沉积物污染等级划分标准,即 $TP > 1\,300 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,重污染水平; $500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} < TP < 1\,300 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,中等污染水平; $TP < 500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,轻污染水平. 由图 2 可以判定,水塘沉积物处于轻度污染,支流、干流和深潭在春季时均处于中等污染水平,而秋季时则仅有干流和深潭达到中等污染程度.

当然,这里有关沉积物的磷形态及其变化性,还

仅是基于 2014 年秋季和 2015 年春季两次采样获得的分析结果,由于采样次数不多,加之未能考虑其他季节的影响,因此可能还不足以真实反映溪流水系统沉积物的磷素变化规律.

3.2 生物有效性磷的变化特征

底泥的生物有效性磷主要指底泥中可释放并能在一定条件下被水生植物吸收利用的潜在活性磷,一般包括 Ex-P 和 Fe/Al-P. 实际上,有机磷可以经过磷酸酶水解、细菌降解或光解等作用后转化成生物有效性磷,从而维持浮游生物的生长^[26]. 因此,往往将 Ex-P、Fe/Al-P 和 OP 称为广义生物有效性磷. 不同季节下,水塘、支流、干流及干流深潭中沉积物的生物有效性磷及其占 TP 百分比情况,见表 3.

表 3 生物有效性磷含量及占 TP 百分比

Table 3 Bio-available phosphorus contents and its proportion in TP						
类型	季节	TP / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	生物有效性磷 / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	生物有效性磷/TP /%	广义有效性磷 / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	广义有效性磷/TP /%
水塘	春季	341.384	49.465	14.49	147.619	43.24
	秋季	323.507	49.909	15.43	80.439	34.60
支流	春季	536.968	77.335	14.40	224.033	41.72
	秋季	422.620	57.639	13.64	175.506	41.53
干流	春季	673.626	99.352	14.75	290.785	43.17
	秋季	556.099	123.333	22.18	357.325	64.26
深潭	春季	740.604	120.648	16.29	349.345	47.17
	秋季	663.152	140.159	21.14	415.701	62.69

可以看出,溪流水系统沉积物的生物有效性磷占 TP 比重约 13.64% ~ 22.18%,明显高于乌梁素海(2% ~ 7%)^[27],但低于湖北喻家湖(29.77% ~ 35.06%)^[28],显著低于重污染的巢湖十五里河表层沉积物(50.18%)^[29]. 溪流水系统沉积物的广义有效磷占 TP 比重 41.72% ~ 64.26%,高于南四湖(19.91% ~ 60.35%)^[30]和黄河口临近海域表层沉积物(9.10% ~ 17.51%)^[31],表明该溪流沉积物中潜在的磷可释放性较大. 总的来看,秋季时干流和深潭的生物有效性磷、广义有效性磷占 TP 比重高

于春季,而支流和水塘沉积物则春、秋季基本相当. 无论是生物有效性磷,还是广义生物有效性磷,在含量大小方面都表现出如下特点,即深潭 > 干流 > 支流 > 水塘.

3.3 溪流水系统的聚类与方差分析

3.3.1 聚类分析

根据春、秋两季沉积物各形态磷含量数据信息,对水塘、支流、干流和深潭等 4 种溪流主要构成模式,开展相似程度的聚类分析(CA),结果见图 3. 可以看出,2014 年秋季和 2015 年春季,4 种溪流构

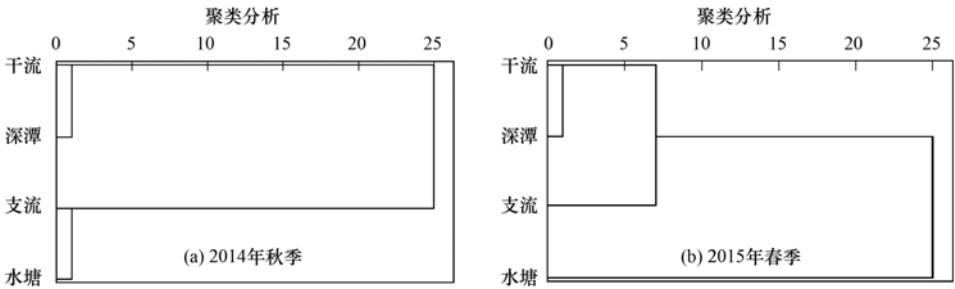


图 3 溪流水系统聚类结果

Fig. 3 Results of clustering among different stream styles

成形式产生了两种明显不同的聚类结果. 即, 2014 年秋季各形态磷含量相对较高的干流和深潭归为了一类, 含量相对较低的支流和水塘归为另一类, 而且两类之间界线清晰; 2015 年春季, 可能由于农业活动的增强, 特别是作物施肥, 以及降雨量增多, 使得田间支流沉积物中各形态磷含量增加, 于是出现水塘单独归为一类, 而干流、深潭和支流归为另一类的结果. 尽管如此, 2015 年春季各形态磷含量相对较高的干流和深潭依旧明显归属于同一个子类.

上述聚类结果表明, 作为直接接纳汇流区非点源污染负荷的代表性田间水系统, 毛沟、农沟等支流沉积物的磷形态及其含量的季节动态变化性明显强于水塘、干流和深潭. 据调查, 由于汇流区中下游大部分水塘都为近两年新开挖的养鱼塘, 水体相对较为封闭, 一般不直接接纳周边非点源径流的汇入. 虽然有时需要利用溪水的补给, 但为防止鱼群脱逃, 补水工作一般都安排在非降雨期间, 这就使得水塘沉积物磷形态及其含量未出现明显的季节性波动.

3.3.2 方差分析

虽然聚类分析从综合分析层面获得了水塘、支流、干流和深潭等的聚簇集合, 但无法揭示不同溪流构成形式之间差异明显的具体指标. 方差分析 (ANOVA) 是用于两个及两个以上样本均数差别的显著性检验. 不妨选择 Ex-P、Fe/Al-P、Ca-P、OP、IP、TP、pH 和 OM 作为因素变量, 并以各指标均值作为水平, 利用最小显著性差异法 (LSD 法) 对溪流水系统开展差异性分析, 从而识别不同溪流形态之间差异性较为明显的指标类型, 结果见表 4.

由表 4 可见, 2014 年秋季和 2015 年春季, 4 种溪流构成形式之间差异性指标大不相同. 2014 年秋季, 干流与水塘、支流之间, 以及深潭与水塘、支流之间差异性指标偏多, 而干流与深潭之间仅在 OM 方面有所不同. 2015 年春季, 深潭与水塘之间差异明显的指标有 5 个, 与支流仅在 OP 方面存在明显差异性; 干流、支流与水塘之间都是在少部分指标上差异明显, 支流与干流则仅在 pH 方面存在明显的差异性. 显然, 上述结果与聚类分析结论是一致的.

表 4 溪流水系统 4 种构成模式的方差分析

Table 4 Results of the ANOVA analysis on the 4 stream styles

季节	水系统	水塘	支流	干流	深潭
秋季	水塘	—			
	支流	pH	—		
	干流	Fe/Al-P、Ca-P、OP、TP、OM	Fe/Al-P、OP、OM	—	
	深潭	Fe/Al-P、Ca-P、OP、TP	Ca-P、OP、TP、OM	OM	—
春季	水塘	—			
	支流	Ex-P、pH	—		
	干流	OP、IP、TP	pH	—	
	深潭	Fe/Al-P、Ca-P、TP、IP、pH	OP	无	—

3.4 沉积物磷的释放风险评估

3.4.1 磷吸附指数 PSI 的计算

目前, 磷吸附指数 PSI 常用于描述沉积物对于磷的固定或吸附能力. 其中, PSI 值越小, 表示沉积物对磷的固定能力越弱, 即磷素向上覆水释放的风险程度越高; PSI 值越大, 则表示沉积物对磷的固定能力越强, 磷素向上覆水释放的风险越低. 本研究区溪流水系统不同构成形式的沉积物 PSI 及其变化情况见图 4.

从图 4 可知, 水塘、支流、干流和深潭在相同季节下的 PSI 值颇为接近, 意味着溪流水系统沉积物的磷释放风险相差不大. 由秋季时溪流水系统沉积物的 PSI 显著高于春季, 表明 2015 年春季沉积物对于磷的固定能力相对弱一些, 也就是沉积物磷素向上覆水释放的风险程度更高. 究其原因, 笔者以为

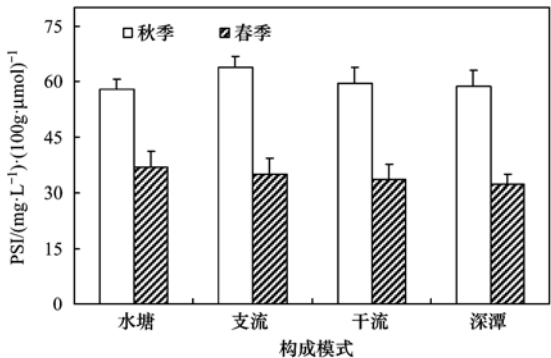


图 4 各采样点 PSI 变化特征

Fig. 4 Changes of PSI corresponding to each stream style

这可能是因为春季 (4 月) 水温较秋季 (10 月) 稍高, 水底微生物活性较强, 生物化学反应相对较为活跃, 使得沉积物中磷素经由间隙水向上覆水体释放的可能性增大, 导致春季磷释放风险提高.

溪流水系统 PSI 的变化范围为 26.47 ~ 69.88 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) $\cdot$ ($100\text{ g}\cdot\mu\text{mol})^{-1}$, 其中 2014 年秋季和 2015 年春季 PSI 平均值分别为 59.98 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) $\cdot$ ($100\text{ g}\cdot\mu\text{mol})^{-1}$ 和 34.56 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) $\cdot$ ($100\text{ g}\cdot\mu\text{mol})^{-1}$, 甚至低于部分湖泊水体. 如黄清辉等^[32]得到太湖沉积物 PSI 平均值为 54.7($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) $\cdot$ ($100\text{ g}\cdot\mu\text{mol})^{-1}$; 卢少勇等^[18]在对北京市 6 个城市湖泊表层沉积物的研究中, 得到 PSI 变化范围及其平均值, 分别为 14.9 ~ 83.3 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) $\cdot$ ($100\text{ g}\cdot\mu\text{mol})^{-1}$ 、34.5($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) $\cdot$ ($100\text{ g}\cdot\mu\text{mol})^{-1}$; 于淑玲等^[33]得到的小兴凯湖表层沉积物 PSI 变化范围为 9.78 ~ 197.53 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) $\cdot$ ($100\text{ g}\cdot\mu\text{mol})^{-1}$, 平均值高达 59.77($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) $\cdot$ ($100\text{ g}\cdot\mu\text{mol})^{-1}$. 换言之, 2015 年春季该溪流水系统沉积物的磷释放风险较高, 甚至高于一些富营养化湖泊水体. 水体沉积物磷的潜在释放风险往往取决于两个方面, 一是沉积物本身的吸附能力强, 含有较高的可释放磷素; 二是沉积物本身的磷吸附能力不强, 不利于吸附, 因而释放风险较大. 本研究中溪流水系统沉积物的磷素含量普遍不高, 计算得到的沉积物 PSI 值也略偏低,

意味着沉积物对磷的缓冲能力不强, 也就是沉积物的磷吸附能力偏弱, 磷素易释放进入水体. 毫无疑问, 对于河流水系较为发达, 并且农业生产用地占绝大多数的巢湖流域而言, 这种相对较低的沉积物磷吸附能力对于地处下游的巢湖水环境保护和富营养化控制, 显然是不利的.

3.4.2 磷吸附指数 PSI 的影响因素

表 5 展示了 PSI 与各形态磷及 OM、pH 的相关关系. 不难看出, PSI 与 Ex-P、pH 均呈极显著负相关关系, 而与 IP 呈显著负相关性. 也就是, Ex-P、IP 含量越高或 pH 越大, PSI 越小, 即沉积物向上覆水释放磷的风险越高. 众所周知, 沉积物中较高的 Ex-P、IP 含量, 将会增大沉积物与上覆水的浓度梯度, 从而促使沉积物中相关磷的释放, Ex-P、IP 与 PSI 表现出的负相关性, 正好反映这种潜在的相互作用关系. 而就 pH 的影响来看, 碱性环境条件下沉积物对于 PO_4^{3-} 的可吸附点位数目减少, 从而导致磷素由沉积物向上覆水释放的可能性增大. 故此, Ex-P、IP、pH 是溪流水系统沉积物吸附磷的主要影响因素.

表 5 沉积物各指标的相关性分析¹⁾
Table 5 Correlation analysis among the indexes of the sediments

	PSI	Ex-P	Fe/Al-P	Ca-P	OP	IP	TP	OM	pH
PSI	1								
Ex-P	-0.247 **	1							
Fe/Al-P	0.042	0.238 **	1						
Ca-P	0.014	0.445 **	0.263 **	1					
OP	0.040	0.567 **	0.738 **	0.745 **	1				
IP	-0.209 *	0.541 **	0.309 **	0.398 **	0.523 **	1			
TP	-0.136	0.622 **	0.521 **	0.590 **	0.783 **	0.940 **	1		
OM	0.145	-0.138	0.001	-0.105	-0.186	0.009	-0.028	1	
pH	-0.317 **	0.271 **	-0.252 **	0.030	-0.118	0.019	-0.033	-0.155	1

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

这里, pH 与 Ex-P 呈极显著正相关, 而与 Fe/Al-P 呈现极显著负相关, 表明 pH 对 Ex-P、Fe/Al-P 存在截然相反的作用关系, 从而增强了 PSI 变化的复杂性. 有研究表明, 有机质分解过程中形成的有机胶体(即腐殖质)可以形成一种胶膜, 覆盖在黏粒矿物、氧化铁、铝以及碳酸钙等无机物的表面, 从而减弱无机物对于磷的固定^[34], 而且有机质中富里酸聚阴离子与磷酸盐阴离子还可能产生吸附竞争, 促进磷的释放^[35]. 不仅如此, 腐殖质还可能和铁、铝等形成有机无机复合体, 进而为无机磷提供吸附位点, 从而增强对磷的吸附^[36]. 但也有研究表明, 沉积物中有机质的分解将会消耗大量的溶解氧, 这一

过程将促使沉积物中 Fe/Al-P 向孔隙水释放 PO_4^{3-} ^[37]. 这种看似截然相反的作用效果, 无疑增大了 OM 与 PSI 相互关系的复杂性.

4 结论

(1) 整个溪流水系统沉积物的 TP 含量变化范围为 137.517 ~ 1 709.229 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均值为 532.245 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 其中, 4 种构成模式中的 IP 平均含量为 237.273 ~ 445.912 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 约占 TP 的 63.53% ~ 72.43%, 整个溪流沉积物的各形态磷含量高低排序为: IP > OP > Fe/Al-P > Ca-P > Ex-P.

(2) 溪流水系统沉积物的各形态磷含量表现出

相同的变化趋势,即深潭 > 干流 > 支流 > 水塘。在溪流的 4 种构成模式中,Ex-P 和 TP 的春季含量都高于秋季,而 Fe/Al-P 和 OP 都仅在支流中出现春季高于秋季。

(3) 溪流水系统沉积物的生物有效性磷占 TP 比重约 13.64% ~ 22.18%,在含量大小方面都表现出相同的变化特征,即深潭 > 干流 > 支流 > 水塘。

(4) 统计分析表明,2014 年秋季和 2015 年春季,溪流水系统的 4 种构成模式表现出两种明显不同的聚类结果,而且彼此之间差异性指标也大不相同。

(5) 水塘、支流、干流和深潭在相同季节下的 PSI 值颇为接近,且都表现出春季明显低于秋季的变化特征,表明春季沉积物中磷素向上覆水释放的风险程度更高;根据相关分析,得出 Ex-P、IP、pH 是溪流水系统沉积物吸附磷的主要影响因素。

参考文献:

- [1] 马健荣,邓建明,秦伯强,等. 湖泊蓝藻水华发生机理研究进展[J]. 生态学报, 2013, **33**(10): 3020-3030.
- [2] 郭茹,杨京平,梁新强,等. 太湖苕溪流域氮磷的生物学阈值评估[J]. 环境科学学报, 2013, **33**(10): 2756-2765.
- [3] Alexander R B, Smith R A, Schwarz G E. Effect of stream channel size on the delivery of nitrogen to the Gulf of Mexico[J]. *Nature*, 2000, **403**: 758-761.
- [4] Peterson B J, Wollheim W M, Mulholland P J, *et al.* Control of nitrogen export from watershed by headwater streams[J]. *Science*, 2001, **292**(5514): 86-90.
- [5] Sugiyama S, Hama T. Effects of water temperature on phosphate adsorption onto sediments in an agricultural drainage canal in a paddy-field district[J]. *Ecological Engineering*, 2013, **61**: 94-99.
- [6] Madison A M, Ruark M D, Stuntebeck T D, *et al.* Characterizing phosphorus dynamics in tile-drained agricultural fields of eastern Wisconsin[J]. *Journal of Hydrology*, 2014, **519**: 892-901.
- [7] 李如忠,杨继伟,钱靖,等. 合肥城郊典型源头溪流不同渠道形态的氮磷滞留特征[J]. 环境科学, 2014, **35**(9): 3365-3372.
- [8] Cooper R J, Rawlins B G, Krueger T, *et al.* Contrasting controls on the phosphorus concentration of suspended particulate matter under baseflow and storm event conditions in agricultural headwater streams[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **533**: 49-59.
- [9] Baken S, Verbeek M, Verheyen D, *et al.* Phosphorus losses from agricultural land to natural waters are reduced by immobilization in iron-rich sediments of drainage ditches[J]. *Water Research*, 2015, **71**: 160-170.
- [10] Kröger R, Moore M T. Phosphorus dynamics within agricultural drainage ditches in the lower Mississippi Alluvial Valley[J]. *Ecological Engineering*, 2011, **37**(11): 1905-1909.
- [11] 毛战坡,王世岩,周晓玲,等. 六岔河流域多水塘-沟渠系统中土壤养分空间变异特征研究[J]. 水利学报, 2011, **42**(4): 425-430.
- [12] 单保庆,李楠,唐文忠. 江淮农村生态型排水系统构建及截污作用研究[J]. 环境科学, 2012, **33**(11): 3797-3803.
- [13] 李如忠,董玉红,钱靖. 基于 TASC 的典型农田溪流氮氮滞留及吸收动力学模拟[J]. 中国环境科学, 2015, **35**(5): 1502-1510.
- [14] 付强,尹澄清,马允. 源头农业区不同类型水塘中水体沉积物磷吸附容量[J]. 环境科学, 2005, **26**(4): 70-76.
- [15] 李红芳,刘锋,杨凤飞,等. 农业小流域源头区池塘底泥磷形态和吸附特征[J]. 生态与农村环境学报, 2014, **30**(5): 634-639.
- [16] Nguyen L, Sukias J. Phosphorus fractions and retention in drainage ditch sediments receiving surface runoff and subsurface drainage from agricultural catchments in the North Island, New Zealand[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2002, **92**(1): 49-69.
- [17] 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.
- [18] 卢少勇,王佩,王殿武,等. 北京六湖泊表层底泥磷吸附容量及潜在释放风险[J]. 中国环境科学, 2011, **31**(11): 1836-1841.
- [19] 卫新锋,欧阳威,郝芳华,等. 河套灌区沟渠表层沉积物对磷的吸附[J]. 农业工程学报, 2010, **26**(9): 94-100.
- [20] 刘洋,付强,陆海明,等. 农业流域中不同类型水塘沉积物磷素状态及其环境意义[J]. 环境化学, 2013, **32**(12): 2307-2314.
- [21] 刘成,邵世光,范成新,等. 巢湖重污染汇流湾区沉积物营养盐分布与释放风险[J]. 环境科学研究, 2014, **27**(11): 1258-1264.
- [22] 马秀玲,孙庆业,伍红琳,等. 巢湖周围池塘沉积物中磷的赋存形态及空间差异[J]. 安徽农业科学, 2010, **38**(2): 1075-1078.
- [23] 苏玉萍,林佳,林婉珍,等. 亚热带深水库沉积物-水界面磷释放受控因子的研究[J]. 农业环境科学学报, 2008, **27**(4): 1465-1470.
- [24] 李任伟. 沉积物污染和环境沉积学[J]. 地球科学进展, 1998, **13**(4): 398-402.
- [25] Wang S R, Jin X C, Zhao H C, *et al.* Phosphorus fractions and its release in the sediments from the shallow lakes in the middle and lower reaches of Yangtze River area in China[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2006, **273**(1-3): 109-116.
- [26] Baldwin D S, Beattie J K, Coleman L M, *et al.* Hydrolysis of an organophosphate ester by manganese dioxide[J]. *Environmental Science & Technology*, 2001, **35**(4): 713-716.
- [27] 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.
- [28] 鲁群,李秀,李湘梅. 湖泊底泥中磷形态及分布特征研究[J]. 环境工程, 2014, **32**(4): 135-139.

- [29] 李如忠, 李峰, 周爱佳, 等. 巢湖十五里河沉积物氮磷形态分布及生物有效性[J]. 环境科学, 2012, **33**(5): 1503-1510.
- [30] An W C, Li X M. Phosphate adsorption characteristics at the sediment-water interface and phosphorus fractions in Nansi Lake, China, and its main inflow rivers[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2009, **148**(1-4): 173-184.
- [31] 李悦, 乌大年, 薛永先. 沉积物中不同形态磷提取方法的改进及其环境地球化学意义[J]. 海洋环境科学, 1998, **17**(1): 15-20.
- [32] 黄清辉, 王子健, 王东红, 等. 太湖表层沉积物磷的吸附容量及其释放风险评估[J]. 湖泊科学, 2004, **16**(2): 97-104.
- [33] 于淑玲, 李晓宇, 张继涛, 等. 小兴凯湖表层底泥磷吸附容量及潜在释放风险[J]. 中国环境科学, 2014, **34**(8): 2078-2085.
- [34] 赵海超, 王圣瑞, 张莉, 等. 有机质含量及其组分对洱海沉积物磷吸附-释放影响[J]. 环境科学学报, 2014, **34**(9): 2346-2354.
- [35] Kastelan-Macan M, Petrovic M. The role of fulvic acids in phosphorus sorption and release from mineral particles[J]. Water Science and Technology, 1996, **34**(7-8): 259-265.
- [36] Gerke J, Hermann R. Adsorption of orthophosphate to humic-Fe-complexes and to amorphous Fe-oxide [J]. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde, 1992, **155**(3): 233-236.
- [37] 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.

欢迎订阅 2016 年《环境科学》

《环境科学》创刊于 1976 年,由中国科学院主管,中国科学院生态环境研究中心主办,是我国环境科学学科中最早创刊的学术性期刊。

《环境科学》自创刊以来,始终坚持“防治污染,改善生态,促进发展,造福人民”的宗旨,报道我国环境科学领域内具有创新性高水平,有重要意义的基础研究和应用研究成果,以及反映控制污染,清洁生产和生态环境建设等可持续发展的战略思想、理论和实用技术等。

《环境科学》在国内外公开发行,并在国内外科技界有较大影响,被国内外一些重要检索系统收录,如美国医学索引 MEDLINE;美国化学文摘 CA;俄罗斯文摘杂志 AJ;美国生物学文摘预评 BP;美国医学索引 IM;日本科学技术情报中心数据库 JICST;英国动物学记录 ZR;剑桥科学文摘(CSA):Environmental Sciences;剑桥科学文摘(CSA):Pollution Abstracts;剑桥科学文摘(CAS):Life Sciences Abstracts 等;国内的检索系统有中国科技论文统计与引文数据库(CSTPCD);中文科技期刊数据库(维普);中国期刊全文数据库(CNKI);数字化期刊全文数据库(万方);中国科学引文数据库(CSCD);中国生物学文摘等。

全国各地邮局均可订阅,如有漏订的读者可直接与编辑部联系,办理补订手续。

《环境科学》2016 年为大 16 开本,120 元/册,全年 12 期。

国内统一刊号:CN11-1895/X 国际标准刊号:ISSN 0250-3301

国外发行代号:M 205 国内邮发代号:2-821

编辑部地址:北京市海淀区双清路 18 号(2871 信箱) 邮编:100085

电话:010-62941102;传真:010-62849343;E-mail:hjlx@rcees.ac.cn;网址:www.hjlx.ac.cn

CONTENTS

Editor's comment	(403)
Risk Assessment and Risk Management of Chemicals in China	WANG Tie-yu, ZHOU Yun-qiao, LI Qi-feng, <i>et al.</i> (404)
Application of Land-use Regression Models in Spatial-temporal Differentiation of Air Pollution	WU Jian-sheng, XIE Wu-dan, LI Jia-cheng (413)
Ecological Footprint Evolution Characteristics and Its Influencing Factors in China from 2000 to 2010	HUANG Bao-rong, CUI Shu-hong, LI Ying-ming (420)
Pollution Characteristics and Sources of Carbonaceous Aerosol in PM _{2.5} During Winter in Guanzhong Area	TIAN Peng-shan, CAO Jun-ji, HAN Yong-ming, <i>et al.</i> (427)
Chemical Composition of the Single Particle Aerosol in Winter in Nanning Using SPAMS	LIU Hui-lin, SONG Hong-jun, CHEN Zhi-ming, <i>et al.</i> (434)
Correlation Analysis Between Characteristics of VOCs and Ozone Formation Potential in Summer in Nanjing Urban District	YANG Xiao-xiao, TANG Li-li, ZHANG Yun-jiang, <i>et al.</i> (443)
Seasonal Dynamics of Airborne Pollens and Its Relationship with Meteorological Factors in Beijing Urban Area	MENG Ling, WANG Xiao-ke, OUYANG Zhi-yun, <i>et al.</i> (452)
Mercury Distribution Characteristics and Atmospheric Mercury Emission Factors of Typical Waste Incineration Plants in Chongqing	DUAN Zhen-ya, SU Hai-tao, WANG Feng-yang, <i>et al.</i> (459)
Characteristics of Atmospheric Dry and Wet Deposition of Trace Metals in the Hinterland of the Three Gorges Reservoir, China	ZHANG Liu-yi, LIU Yuan, QIAO Bao-qing, <i>et al.</i> (466)
Monitoring and Analysis of Stable Isotopes of the Near Surface Water Vapor in Changsha	XIE Yu-long, ZHANG Xin-ping, YAO Tian-ci, <i>et al.</i> (475)
Mercury Transport from Glacier to Runoff in Typical Inland Glacial Area in the Tibetan Plateau	SUN Xue-jun, WANG Kang, GUO Jun-ming, <i>et al.</i> (482)
Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Core Sediments from Lakes of Tibet	GUO Bi-xi, LIU Yong-qin, ZHANG Fan, <i>et al.</i> (490)
Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of Inflow Rivers to Northeastern Lake Tanganyika	YU Cheng, CHEN Shuang, ZHANG Lu (499)
Over One Hundred Year Sediment Record of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Lake Bosten, Xinjiang	SHEN Bei-bei, WU Jing-lu, ZHAO Zhong-hua, <i>et al.</i> (507)
Distribution Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Different Environmental Media from Qinghai Island, Zhoushan, China	ZHENG Huang, XING Xin-li, GU Yan-sheng, <i>et al.</i> (513)
Transformation of Non-point Source Soluble Nitrogen in Simulated Drainage Ditch	LI Qiang-kun, SONG Chang-ji, HU Ya-wei, <i>et al.</i> (520)
Influence of Landscape Heterogeneity on Total Nitrogen Concentration in Zhongtian River Watershed	WANG Jing-ping, LI Zhao-fu, LIU Hong-yu, <i>et al.</i> (527)
Nitrogen Release from Sediment Under Dry and Rainy Season Alternation and Its Contribution to N Export from Xiangxi Watershed in Jiangxi Province	HAN Ning, HAO Zhuo, XU Ya-juan, <i>et al.</i> (534)
Spatial and Temporal Distributions of Nitrogen and Phosphate in the Chaohu Lake	XI Shan-shan, ZHOU Chun-cai, LIU Gui-jian, <i>et al.</i> (542)
Phosphorus Fractions and Release Risk in Surface Sediments of an Agricultural Headwater Stream System in Hefei Suburban, China	PEI Ting-ting, LI Ru-zhong, GAO Su-di, <i>et al.</i> (548)
Surface Property and Sorption Characteristics of Phosphorus onto Surface Sediments in Sanggou Bay	ZHU Jia-mei, CAO Xiao-yan, LIU Su-mei, <i>et al.</i> (558)
Particle Size Distribution and Pollutant Speciation Analyses of Stormwater Runoff in the Ancient Town of Suzhou	LI Huai, WU Wei, TIAN Yong-jing, <i>et al.</i> (565)
Abundance of Toxic and Non-toxic <i>Microcystis</i> sp. in Lake Hongze and Its Correlation with Environmental Factors	LI Da-ming, ZHANG Tong-qing, TANG Sheng-kai, <i>et al.</i> (573)
Effect of Charge-Transfer Complex on Ultraviolet-Visible (UV-Vis) Absorption Property of Chromophoric Dissolved Organic Matter (CDOM) in Waters of Typical Water-Level Fluctuation Zones of the Three Gorges Reservoir Areas	JIANG Tao, LIANG Jian, ZHANG Mu-xue, <i>et al.</i> (580)
Influence of pH on Kinetics of Anilines Oxidation by Permanganate	WANG Hui, SUN Bo, GUAN Xiao-hong (588)
Effects of EDTA on the Reductive Dechlorination of 2,4-D by Pd/Fe	ZHOU Hong-yi, NIE Ya-zhong, CHEN Yong, <i>et al.</i> (595)
Preparation of NiAl-MMO Films Electrode and Its Capacitive Deionization Property	WANG Ting, ZHU Chun-shan, HU Cheng-zhi (602)
Competitive Microbial Oxidation and Reduction of Arsenic	YANG Ting-ting, BAI Yao-hui, LIANG Jin-song, <i>et al.</i> (609)
Community Characteristics of ANAMMOX Bacteria in Subsurface Flow Constructed Wetland(SSFCW) for Processing of Aquaculture Waster Water	ZENG Xian-lei, LIU Xing-guo, WU Zong-fan, <i>et al.</i> (615)
Analysis of Pathogenic Bacteria in Reclaimed Water and Impact of UV Disinfection on the Removal of Pathogenic Bacteria	JING Ming, WANG Lei (622)
Analysis of the Microbial Community Structure in Continuous Flow Reactor Enhanced by Heterotrophic Nitrification and Aerobic Denitrification Bacterium <i>Burkholderia</i> sp. YX02	SHAO Ji-lun, CAO Gang, LI Zi-hui, <i>et al.</i> (630)
Comparative Metagenomics of BIOLAK and A ² O Activated Sludge Based on Next-generation Sequencing Technology	TIAN Mei, LIU Han-hu, SHEN Xin (638)
Identification and Nitrogen Removal Characteristics of a Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Strain Isolated from Marine Environment	SUN Qing-hua, YU De-shuang, ZHANG Pei-yu, <i>et al.</i> (647)
Removal of AOX and Chroma in Biologically Treated Effluent of Chemical Dyestuff Wastewater with Nanoscale Ni/Fe	SHU Xiao-ming, XU Can-can, LIU Rui, <i>et al.</i> (655)
Feasibility of 3BER-S Process for the Deep Denitrification in Synch with the Removal of PAEs from Reclaimed Water	XU Peng-cheng, HAO Rui-xia, ZHANG Ya, <i>et al.</i> (662)
Influence of Reaction Time on Titanate Nanomaterials and Its Adsorption Capability for Lead in Aqueous Solutions	FAN Gong-duan, CHEN Li-ru, LIN Ru-jing, <i>et al.</i> (668)
Sorption Characteristics of Phenanthrene and 1,1-Dichloroethene onto Reed Straw Biochar in Aquatic Solutions	WU Qing-wen, MENG Liang, ZHANG Zhi-hao, <i>et al.</i> (680)
Adsorption Characteristics of Norfloxacin by Biochars Derived from Reed Straw and Municipal Sludge	ZHANG Han-yu, WANG Zhao-wei, GAO Jun-hong, <i>et al.</i> (689)
Effect of Seasonal Temperature Increasing on Nitrogen Mineralization in Soil of the Water Level Fluctuating Zone of Three Gorge Tributary During the Dry Period	LIN Jun-jie, ZHANG Shuai, LIU Dan, <i>et al.</i> (697)
Effects of Warming and Straw Application on Soil Respiration and Enzyme Activity in a Winter Wheat Cropland	CHEN Shu-tao, SANG Lin, ZHANG Xu, <i>et al.</i> (703)
Distribution of Urban Soil Heavy Metal and Pollution Evaluation in Different Functional Zones of Yinchuan City	WANG You-qi, BAI Yi-ru, WANG Jian-yu (710)
Differential Effect and Mechanism of <i>in situ</i> Immobilization of Cadmium Contamination in Soil Using Diatomite Produced from Different Areas	ZHU Jian, WANG Ping, LIN Yan, <i>et al.</i> (717)
Characteristics of Adsorption Leaching and Influencing Factors of Dimethyl Phthalate in Purple Soil	WANG Qiang, SONG Jiao-yan, ZENG Wei, <i>et al.</i> (726)
Cd Runoff Load and Soil Profile Movement After Implementation of Some Typical Contaminated Agricultural Soil Remediation Strategies	LIU Xiao-li, ZENG Zhao-xia, TIE Bai-qing, <i>et al.</i> (734)
Concentrations and Component Profiles PAHs in Surface Soils and Wheat Grains from the Cornfields Close to the Steel Smelting Industry in Handan, Hebei Province	WU Di, WANG Yi-long, LIU Wei-jian, <i>et al.</i> (740)
Effect of Arbuscular Mycorrhiza (AM) on Tolerance of Cattail to Cd Stress in Aquatic Environment	LUO Peng-cheng, LI Hang, WANG Shu-guang (750)
Acute Toxic Effects of Bromate on Aquatic Organisms	WANG Zhi-wei, LIU Dong-mei, ZHANG Wen-juan, <i>et al.</i> (756)
Development of Self-assembled Dumbbell-like Fe ₃ O ₄ Micro/nanomaterial for Application in Thermocatalytic Degradation of Polybrominated Biphenyls	HUANG Xin-chen, ZONG Gang, LIU Ye-xuan, <i>et al.</i> (765)
Impact of Salinity on Leachate Treatment and N ₂ O Releases from Semi-aerobic Aged-refuse Bioreactor	LI Wei-hua, SUN Ying-jie, LIU Zi-liang, <i>et al.</i> (775)
Evaluating the Significance of Odor Gas Released During the Directly Drying Process of Sludge: Based on the Multi-index Integrated Assessment Method	DING Wen-jie, CHEN Wen-he, DENG Ming-jia, <i>et al.</i> (782)

《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 刘 毅 汤鸿霄 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)

2016年2月15日 第37卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 2 Feb. 15, 2016

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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行