

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第9期

Vol.37 No.9

**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

1960~2013年我国霾污染的时空变化 ..... 符传博, 唐家翔, 丹利, 何媛 (3237)

太原大气颗粒物中水溶性无机离子质量浓度及粒径分布特征 ..... 王璐, 温天雪, 苗红妍, 高文康, 王跃思 (3249)

石家庄秋季一次典型霾污染过程水溶性离子粒径分布特征 ..... 刘景云, 刘子锐, 温天雪, 魏俊龙, 黄小娟, 乔宝文, 王莉莉, 杨洋, 徐仲均, 王跃思 (3258)

南京北郊大气颗粒物的粒径分布及其影响因素分析 ..... 吴丹, 曹双, 汤莉莉, 夏俊荣, 陆建刚, 刘刚, 杨孟, 李凤英, 盖鑫磊 (3268)

南京北郊黑碳气溶胶污染特征及影响因素分析 ..... 肖思晗, 于兴娜, 朱彬, 何稼祺 (3280)

上海崇明地区大气分形态汞污染特征 ..... 李舒, 高伟, 王书肖, 张磊, 李智坚, 王龙, 郝吉明 (3290)

三峡库区典型农田系统大气汞浓度及不同自然界面释汞通量 ..... 王永敏, 赵铮, 孙涛, 王娅, 薛金平, 张成, 王定勇 (3300)

长白山背景站大气 VOCs 浓度变化特征及来源分析 ..... 吴方堃, 孙杰, 余晔, 唐贵谦, 王跃思 (3308)

铅冶炼厂无组织排放源不同颗粒物中铅含量特征 ..... 刘大钧, 汪家权 (3315)

祁连山东段降水的水化学特征及离子来源研究 ..... 贾文雄, 李宗省 (3322)

三峡库区(重庆—宜昌段)沉积物中钒的污染特征及生态风险评价 ..... 郭威, 殷淑华, 徐建新, 徐东昱, 高丽, 郝红, 高博 (3333)

太湖不同富营养化水域磷的分布特征及其环境影响因素 ..... 车霏霏, 王大鹏, 甄卓, 颜昌宙, 王灶生 (3340)

太湖表层沉积物中 PPCPs 的时空分布特征及潜在风险 ..... 张盼伟, 周怀东, 赵高峰, 李昆, 刘巧娜, 任敏, 赵丹丹, 李东佼 (3348)

岩溶地下河系统中有机氯的分布特征与来源分析 ..... 张媚, 孙玉川, 谢正兰, 余琴, 徐昕 (3356)

西南典型岩溶地下河系统水文地球化学特征对比:以重庆市青木关、老龙洞为例 ..... 詹兆君, 陈峰, 杨平恒, 任娟, 张海月, 刘黛薇, 蓝家程, 张宇 (3365)

不同水源补给情形的溪流沟渠沉积物磷形态及释放风险分析 ..... 李如忠, 秦如彬, 黄青飞, 耿若楠 (3375)

滇池柱状沉积物磷形态垂向变化及对释放的贡献 ..... 李乐, 王圣瑞, 焦立新, 余佑金, 丁帅, 王跃杰 (3384)

荧光光谱结合平行因子分析研究夏季周村水库溶解性有机物的分布与来源 ..... 黄廷林, 方开凯, 张春华, 周石磊, 曾明正, 刘飞, 夏超, 丛海兵 (3394)

富营养化水体中黑水团的吸收及反射特性分析 ..... 张思敏, 李云梅, 王桥, 朱利, 王旭东, 温爽 (3402)

基于微生物生物完整性指数的地下水生态系统健康评价:以包钢稀土尾矿库周边地下水生态系统为例 ..... 安新丽, 陈廷廷, 赵晗, 张又弛, 侯艳伟, 蔡超 (3413)

于桥水库水源地水体沉积物重金属空间分异与景观格局的关系 ..... 王祖伟, 王玮玮, 侯迎迎, 包姗姗, 王子璐, 王倩倩 (3423)

人工湿地构型对水产养殖废水含氮污染物和抗生素去除影响 ..... 刘佳, 易乃康, 熊永娇, 黄翔峰 (3430)

共生细菌对盐生小球藻富集和转化硝酸盐的影响 ..... 许平平, 刘聪, 王亚, 郑燕恒, 张春华, 葛滢 (3438)

模拟水体硝态氮对黄菖蒲生长及其氮吸收的影响 ..... 王兵, 温春翔, 肖波 (3447)

对羟基联苯在黄河兰州段底泥上的吸附行为 ..... 周琦, 蒋煜峰, 孙航, 慕仲锋, 张振国, 展惠英 (3453)

多级 A/O 工艺强化处理城市污水的效果研究 ..... 尹子华, 盛晓琳, 刘锐, 陈吕军, 张永明 (3460)

某微污染源自来水厂的纳滤深度处理效果研究 ..... 吴玉超, 陈吕军, 兰亚琼, 刘锐 (3466)

Fe<sup>0</sup>-PRB 去除Cr(VI)反应动力学及影响机制 ..... 卢欣, 李森, 唐翠梅, 辛佳, 林朋飞, 刘翔 (3473)

EDTA-nSiO<sub>2</sub> 纳米颗粒对 Cd<sup>2+</sup> 的吸附 ..... 蒋顺成, 秦睿, 李满林, 李荣华, 张增强, Amjad Ali, 梁文 (3480)

硝酸-PPy/AQDS 联合处理改善阳极性能的分析表征 ..... 沈伟航, 朱能武, 尹富华, 吴平霄, 张彦鸿 (3488)

人工合成水铁矿对含磷废水的吸附性能 ..... 崔蒙蒙, 王殿升, 黄天寅, 刘锋 (3498)

生物沸石人工湿地处理分散养猪冲洗水性能 ..... 牟锐, 沈志强, 周岳溪, 陈学民, 伏小勇, 谭蕾蕾, 瞿畏 (3508)

甘油基混合培养物合成 PHA 及其与 OUR 的关系 ..... 刘东, 张小婷, 张代钧, 曾善文, 卢培利 (3518)

光催化体系中噻虫胺降解动力学及机制 ..... 胡倩, 阳海, 石妮, 胡乐天, 易兵 (3524)

宁夏干旱地区工业区对农田土壤重金属累积的影响 ..... 王美娥, 彭驰, 陈卫平 (3532)

北方某大型钢铁企业表层土壤中多环芳烃污染特征与健康风险评价 ..... 董捷, 黄莹, 李永霞, 张厚勇, 高甫威 (3540)

红壤剖面重金属分布特征及对有机碳响应 ..... 贾广梅, 马玲玲, 徐殿斗, 成杭新, 周国华, 杨国胜, 罗敏, 路雨楠, 刘志明 (3547)

外源锌刺激水稻对土壤镉的累积效应 ..... 辜娇峰, 杨文骏, 周航, 张平, 彭佩钦, 廖柏寒 (3554)

改性生物炭材料对稻田原状和外源镉污染土钝化效应 ..... 杨兰, 李冰, 王昌全, 刘倾城, 张庆沛, 肖瑞, 李一丁 (3562)

生物淋滤联合类 Fenton 反应去除污染土壤中重金属的效果 ..... 周普雄, 严颀, 余震, 王跃强, 朱艺, 周顺桂 (3575)

长期石油污染对盐碱化土壤中微生物群落分子生态网络的影响 ..... 赵慧慧, 肖娴, 裴孟, 赵远, 梁玉婷 (3582)

应用 PLFA 法分析氮沉降对缙云山马尾松林土壤微生物群落结构的影响 ..... 曾清苹, 何丙辉 (3590)

三江平原不同退化阶段小叶章湿地土壤真菌群落结构组成变化 ..... 隋心, 张荣涛, 许楠, 刘赢男, 柴春荣, 王继丰, 付晓玲, 钟海秀, 倪红伟 (3598)

外源氮、硫添加对闽江河口湿地 CH<sub>4</sub>、CO<sub>2</sub> 排放的短期影响 ..... 胡敏杰, 任鹏, 黄佳芳, 仝川 (3606)

模拟条件下侵蚀-沉积部位土壤 CO<sub>2</sub> 通量变化及其影响因素 ..... 杜兰兰, 王志齐, 王蕊, 李如剑, 吴得峰, 赵慢, 孙棋棋, 高鑫, 郭胜利 (3616)

太原晋祠地区果园土壤呼吸的年际变化及其温度敏感性 ..... 严俊霞, 郝忠, 荆雪雷, 李洪建 (3625)

生物炭对壤土土壤温室气体及土壤理化性质的影响 ..... 王月玲, 耿增超, 王强, 尚杰, 曹胜磊, 周凤, 李鑫, 刘福义, 张萍 (3634)

氮沉降对臭氧胁迫下青杨光合特性和生物量的影响 ..... 辛月, 尚博, 陈兴玲, 冯兆忠 (3642)

冠层辐射温度对冬小麦生态系统碳通量的影响 ..... 李洪建, 杨艳, 严俊霞 (3650)

堆肥过程水溶性有机物组成和结构演化研究 ..... 李丹, 何小松, 席北斗, 高如泰, 张慧, 黄彩红, 党秋玲 (3660)

酸碱改性活性炭及其对甲苯吸附的影响 ..... 刘寒冰, 杨兵, 薛南冬 (3670)

《环境科学》征订启事 (3517)      《环境科学》征稿简则 (3561)      信息 (3289, 3321, 3422)

# 不同水源补给情形的溪流沟渠沉积物磷形态及释放风险分析

李如忠, 秦如彬, 黄青飞, 耿若楠

(合肥工业大学资源与环境工程学院, 合肥 230009)

**摘要:** 2015 年 5 ~ 12 月, 在合肥地区 3 条分别以城市污水厂尾水、食品加工废水和农业排水-地下水渗流为主要补给水源的溪流沟渠上, 按季节采集表层沉积物样, 分析沉积物磷赋存形态; 通过磷吸附指数 (PSI)、磷吸附饱和度 (DPS) 和磷释放风险指数 (ERI) 计算, 评估溪流沟渠沉积物的磷潜在释放风险, 并以非参数检验方法, 对 3 条溪流沟渠开展差异性分析. 结果表明: ① 关镇河支渠和陶冲小溪流水体磷素污染严重, 3 条溪流沟渠磷污染程度排序为: 关镇河支渠 > 陶冲小溪流 > 磨店小溪流, 其中关镇河支渠沉积物 TP 平均含量为  $1\,376.95\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 分别是磨店小溪流和陶冲小溪流的 2.94 和 1.91 倍; ② 3 条溪流沟渠沉积物中各形态磷含量差异显著, 且在含量高低排序方面存在一定差异性; ③ 3 条溪流沉积物的 PSI 值季节性变化特征明显, 而且每条溪流沟渠所有采样点变化规律基本一致, 即总体上都表现出秋季最高, 冬季次之, 春、夏季基本相当且相对最低的变化特征; ④ 由 PSI、DPS 及 ERI 评估得到的磷释放风险特征基本一致, 相应的磷释放风险高低排序为: 关镇河支渠 > 陶冲小溪流 > 磨店小溪流; ⑤ 差异性分析表明, 3 条溪流沟渠几乎在所有指标上存在显著的差异性.

**关键词:** 源头溪流; 沉积物; 磷形态; 磷吸附指数 (PSI); 磷吸附饱和度 (DPS)

中图分类号: X522; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)09-3375-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.09.016

## Fractions and Release Risk of Phosphorus in Surface Sediments of Three Headwater Streams with Different Styles of Water Supply

LI Ru-zhong, QIN Ru-bin, HUANG Qing-fei, GENG Ruo-nan

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

**Abstract:** From May to September 2015, seasonal sediment samples were collected from three headwater streams and ditches which were discharged from sewage plant tail water, food processing wastewater and agricultural drainage-groundwater seepage, respectively, in Hefei, Chaohu Lake basin. The stream-bed sediments were analyzed for phosphorus fractions. The risk assessment on phosphorus release from sediments was conducted using the phosphorus sorption index (PSI), degree of phosphorus saturation (DPS) and the phosphorus release risk index (ERI). Moreover, nonparametric tests method was used to explore the difference among the three studied streams and ditches. Study results showed that: ① Guanzhenhe Distributary and Taochong Stream were seriously damaged by phosphorus pollution both in waters and stream-bed sediment, and the phosphorus pollution levels could be arranged in the order of Guanzhenhe Distributary > Taochong Stream > Modian Stream. The mean content of total phosphorus (TP) in sediments in Guanzhenhe Distributary was  $1\,376.95\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , which was 2.94 and 1.91 times as high as those of Modian Stream and Taochong Stream, respectively. ② Significant differences and different sort orders in contents of phosphorus fractions were found for each of the three streams. ③ Obvious seasonal variations existed in PSI for the three streams, and all the sampling points in the same stream had similar changing law, namely, the maximum content emerged in autumn, followed by winter, and the minimum occurred in spring or summer. ④ The same conclusions were drawn in phosphorus release risk according to the PSI, DPS and ERI, and the risk ranked as follows: Guanzhenhe Distributary > Taochong Stream > Modian Stream. ⑤ According to the difference analysis, significant differences existed in almost all of the indexes among the three streams.

**Key words:** headwater stream; sediments; phosphorus fractions; phosphorus sorption index (PSI); degree of phosphorus saturation (DPS)

源头溪流、排水沟渠是河流系统的重要组成部分, 同时也是汇流区流失氮磷负荷汇集、传输和转化的重要场所和通道, 具有极为重要的生态环境功能<sup>[1, 2]</sup>. 作为特殊的生态系统, 溪流沟渠沉积物的性质在一定程度上反映了该区域土地的利用状况<sup>[3]</sup>. Zhu 等<sup>[4]</sup>在对嘉陵江流域某一代表性源头溪流沉积物磷形态和释放风险的研究中发现, 沉积物

的磷释放风险大小与土地利用方式密切相关, 其中受居住区影响的溪流沉积物磷吸附饱和度 (DPS) 高达 40%, 远高于周边稻田 (11%) 和林业区 (12%).

收稿日期: 2016-03-24; 修订日期: 2016-04-15

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51179042, 51579061)

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、非点源污染过程阻断与调控技术, E-mail: Lrz1970@163.com

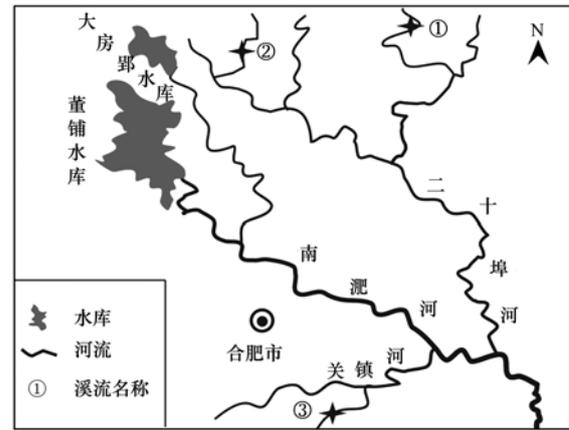
钱靖等<sup>[5]</sup>在对合肥城郊接纳小作坊食品加工废水和生活污水补给的排水沟渠氮磷滞留特征的模拟研究中发现,沉积物磷素处于较为明显的释放状态.由于溪流沟渠水系统沉积的氮、磷等营养负荷可以通过水-沉积物界面交换途径进入上覆水,加之这类小流水体数目庞大、蓄积的氮磷营养盐数量可观,因而成为影响溪流水体以及下游河、湖、库水质改善不容忽视的内源因素.目前,有关农业和农村地区的排水沟渠,以及城市地区小流水体沉积物磷形态及释放风险问题,引起了人们的关注<sup>[6-9]</sup>,但与湖泊、水库等大型水体相比,相关研究还显得颇为不足,特别是针对不同类型水源补给情形下溪流沟渠沉积物磷赋存形态及其释放风险动态变化性的研究则更少.

巢湖是水体富营养化严重的大型淡水湖泊<sup>[10]</sup>.目前,有效削减和调控汇流区域氮磷营养负荷输入成为摆在巢湖水环境保护和水体富营养化治理面前的重要难题.巢湖流域河流水系较为发达,汇流区污染源结构复杂,各等级源头溪流、排水沟渠接纳污水的性质和组成存在差异,特别是城郊结合部地区.合肥市是巢湖流域最大污染点源和巢湖水体氮、磷负荷的最主要供应者,该区域的污染负荷主要通过南淝河传输进入巢湖.由于靠近城区,南淝河流域各等级溪流水体不同程度受到生活污水或类似生活污水的工业废水的影响.本研究拟以南淝河流域分别以城市污水厂尾水、食品加工废水和农业排水-地下水渗流联合补水为主要补给来源的3条溪流沟渠为对象,探究不同类型水源补给情形的溪流沟渠沉积物磷赋存形态、释放风险水平及其季节变化性,以期为南淝河流域水环境治理和磷负荷调控提供依据.

## 1 研究区概况

南淝河位于巢湖西半湖北侧,是合肥地区最大河流,也是巢湖主要入湖河流之一.二十埠河是南淝河重要支流之一,主要位于合肥市区北部至东部范围,上游源头位于城郊结合部,干流则位于城区内.关镇河也是南淝河支流之一,主要位于合肥市城区东南部,基本都为城郊结合部地带.本研究选定的3条源头溪流沟渠的大致位置见图1.

二十埠河流域的磨店小溪流为自然冲刷形成的排水沟渠,长约2.5 km,水面宽约0.5~2.0 m,流速0.085~0.30 m·s<sup>-1</sup>,流量约0.01~0.76 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>,汇流区原本主要为农业和林地用地,但由于城市建设



①为磨店小溪流;②为陶冲小溪流;③为关镇河支渠

图1 3条溪流沟渠大致位置示意

Fig. 1 Sketch-map of the three studied streams

征地,导致农业用地大多处于抛荒状态,还有一部分被开挖为养鱼塘,溪流上游补给源主要为农田排水和地下水,中下游则主要为两侧水塘和岗坡汇集的地下水.二十埠河流域的陶冲小溪流位于新蚌埠路桥附近,长约2 km,水面宽约0.7~3.0 m,流速0.1~0.5 m·s<sup>-1</sup>,流量0.030~0.055 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>,该溪流主要靠上游的陶冲湖污水处理厂尾水补给,溪流两侧原本主要为蔬菜地和少量民居,现也面临因城市建设征地而导致的大面积抛荒.关镇河支渠位于城郊结合部,是关镇河支流之一,水面宽约1.5~3.0 m,水深约0.15~0.40 m,流量约0.032~0.150 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>,是一条以防洪排涝为主要功能的城郊排水沟渠<sup>[11]</sup>,主要靠上游多个小型食品加工作坊废水和居民区化粪池溢流污水补给.2015年5月(春末)、7月(夏季)、10月(秋季)和12月(冬季),在3条溪流上各选择6个代表性采样点位(与后续的沉积物采样点位相一致)采集水样(每份500 mL),结果见表1.其中,pH、EC、水温、ORP为现场测定.由表1不难看出,3条溪流水体都遭受不同程度的污染,特别是关镇河支渠和陶冲小溪流,氮磷水质指标几乎全部达到《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)中的劣V类水标准,即便水质稍好的磨店小溪流,至多也仅是勉强达到IV类水质标准.

## 2 材料与方法

### 2.1 采样点布设与样品采集

在3条溪流上各布设6个采样点位,采样点位1~6号对应于上游至下游方向.2015年5、7、10和12月,采集表层沉积物样,每份约300 g.在实验室内,将沉积物置于通风阴凉处晾干,去除贝壳、杂

草等杂物,经研磨、过 100 目筛后,保存于自封袋中 备用。

表 1 3 条溪流沟渠的水质基本情况

Table 1 Physicochemical parameters of water quality of the three studied streams

采样点	磨店小溪流				陶冲小溪流				关镇河支渠			
	春	夏	秋	冬	春	夏	秋	冬	春	夏	秋	冬
pH	7.16	7.34	7.84	8.12	7.92	7.65	8.08	8.12	8.09	8.03	8.02	8.33
EC/ $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$	437	451	406	486	642	578	405	568	909	842	820	812
水温/ $^{\circ}\text{C}$	24.2	31.3	21.8	9.3	26.3	27.2	21.3	13.0	26.6	31.9	20.2	10.5
ORP/mV	—	134	210	157	—	136	187	163	—	58	138	102
TP/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.21	0.13	0.72	0.54	0.91	0.76	0.41	1.57	4.36	1.76	3.33	3.47
$\text{PO}_4^{3-}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.10	0.09	0.56	0.41	0.72	0.46	0.23	1.26	3.97	1.53	2.72	3.13
TN/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	1.24	1.97	1.33	2.25	4.29	5.51	2.94	3.83	32.16	24.71	35.22	35.45
$\text{NH}_4^+/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.89	1.54	0.98	1.52	3.17	4.06	1.54	3.03	31.23	18.84	28.42	22.44

## 2.2 分析测试方法

(1) 磷形态的测定 采用七步连续提取法<sup>[12]</sup>分析磷赋存形态,即易交换态磷(Ex-P)、铝磷(Al-P)、铁磷(Fe-P)、闭蓄态磷(Oc-P)、自生磷(Ca-P)、碎屑磷(De-P)和有机磷(OP)。每步提取后按 4 000  $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$  离心 20 min 提取上清液,采用钼锑抗分光光度法测定磷含量,残渣进入下一步提取。TP 由七步连续提取获得的磷,经累加计算得到。

(2) 其他指标的测定 沉积物样品中有机质含量利用烧失量(LOI)估算,pH 值采用 pH 计测定(水土比 = 5:1),TN 采用紫外分光光度法测定。

## 2.3 磷吸附指数

分别称取 4 份 1.000 g 沉积物样于 50 mL 聚乙烯离心管中,其中 1 个离心管中加入 20 mL 0.01  $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$   $\text{CaCl}_2$  溶液作为 1 个空白组,其余 3 个离心管中加入 20 mL 75  $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$   $\text{KH}_2\text{PO}_4$  溶液(配制在 0.01  $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$   $\text{CaCl}_2$  中)作为 3 个平行试验,滴加 2 滴氯仿以抑制微生物活动,25 $^{\circ}\text{C}$  下振荡 24 h 后以 3 500  $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$  离心 10 min,再以 0.45  $\mu\text{m}$  孔径滤膜过滤。取适量滤液并以钼锑抗比色法测定,由反应磷初始浓度与反应后滤液中磷浓度的差值计算 100 g 沉积物吸附的磷量  $X(\text{mg}\cdot 100\text{g}^{-1})$ ,进而计算 PSI,数学表达式为<sup>[13]</sup>:

$$\text{PSI} = X/lgc \quad (1)$$

式中,PSI 为磷素吸附指数,  $(\text{mg}\cdot\text{L})\cdot(100\text{g}\cdot\mu\text{mol})^{-1}$ ;  $c$  为滤液中溶解磷浓度,  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

## 2.4 磷吸附饱和度

对各沉积物样,分别称取 3 份 2.500 g 于 50 mL 聚乙烯管中,加 20 mL 草酸提取剂(0.1  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  草酸 + 0.175  $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  草酸铵,  $\text{pH} = 3.0$ ),在 200  $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 、25 $^{\circ}\text{C}$  下振荡 2 h 后离心;然后,分别取适量上清液,利用邻菲罗啉分光光度法测定草酸提取

态铁( $\text{Fe}_{\text{ox}}$ )、邻苯二酚紫分光光度法草酸提取态铝( $\text{Al}_{\text{ox}}$ )、钼锑抗比色法的含量草酸提取态磷( $\text{P}_{\text{ox}}$ ),并据此计算沉积物 DPS(%),即<sup>[13]</sup>:

$$\text{DPS} = \frac{\text{P}_{\text{ox}}}{0.5 \times (\text{Al}_{\text{ox}} + \text{Fe}_{\text{ox}})} \times 100\% \quad (2)$$

## 2.5 磷释放风险评估方法

采用以 PSI 和 DPS 指标构成的磷释放风险指数 ERI(%),评估沉积物的磷释放风险,表达式为<sup>[14]</sup>:

$$\text{ERI} = \frac{\text{PSI}}{\text{DPS}} \times 100\% \quad (3)$$

## 2.6 数据处理

采用 SPSS 17.0 和 Excel 10.0 软件完成数据处理、差异性分析及相关图件的绘制。

## 3 结果与分析

### 3.1 沉积物的基本理化特性

3 条溪流沟渠表层沉积物的部分理化指标见表 2。可以看出,接纳生活污水或类似生活污水的关镇河支渠和承纳城市污水处理厂尾水排入的陶冲小溪流沉积物的 pH 值基本都稍高于磨店小溪流。在有机质含量方面,关镇河支渠最高,陶冲小溪流最低;且基本上都表现出夏季含量较低,冬季含量相对较高的特点。特别是,3 条溪流沉积物中 TN 含量差异明显,关镇河支渠明显高于陶冲小溪流,更远高于磨店小溪流,而且均超过了加拿大安大略省环境和能源部发布指南中能引起最低级别生物毒性效应的 TN 浓度(550  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ),关镇河支渠平均值接近于严重级别(4 800  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )<sup>[15]</sup>,该河 4 号采样点冬季时甚至高达 5 419.87  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,秋季时达 5 117.32  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

### 3.2 沉积物的磷赋存形态及其变化特征

#### 3.2.1 沉积物各形态磷含量

3 条溪流沟渠沉积物中各形态磷含量的统计结

表 2 3 条溪流表层沉积物理化特性

Table 2 Physical and chemical properties of surface sediments for the studied streams

季节	磨店小溪流			陶冲小溪流			关镇河支渠		
	pH	OM/%	TN/mg·kg <sup>-1</sup>	pH	OM/%	TN/mg·kg <sup>-1</sup>	pH	OM/%	TN/mg·kg <sup>-1</sup>
春	6.65	8.92	2 464.50	7.53	8.06	3 491.13	7.77	11.90	4 567.60
夏	7.25	7.69	2 282.16	7.57	6.12	3 409.20	8.01	9.15	4 278.72
秋	6.45	9.38	2 405.38	7.44	6.96	3 486.40	7.78	14.52	4 539.50
冬	6.98	8.90	2 580.35	7.98	6.71	3 441.41	7.93	10.33	4 679.76

果,见表3.总的来看,各溪流沟渠沉积物的TP和各形态磷含量差异十分明显,相应的磷素污染程度排序为:关镇河支渠>陶冲小溪流>磨店小溪流.其中,磨店小溪流沉积物的TP含量变化范围为347.06~685.90 mg·kg<sup>-1</sup>,均值为468.28 mg·kg<sup>-1</sup>,该值与巢湖汇流区的六叉河小流域中水塘沉积物TP含量(286.3~651.3 mg·kg<sup>-1</sup>)<sup>[16]</sup>、金井河流域农用排水沟渠底泥TP含量(299~580 mg·kg<sup>-1</sup>)<sup>[17]</sup>颇为相近.由于受陶冲湖城市污水处理厂尾水排放的影响,陶冲小溪流水体污染较为严重(表1),沉积物TP平均值为721.55 mg·kg<sup>-1</sup>,最大值为875.27 mg·kg<sup>-1</sup>,与刘越等<sup>[18]</sup>对污染较为严重的晋江感潮河段表层沉积物TP含量测定范围459.6~986.2 mg·kg<sup>-1</sup>相近.相比而言,接纳大量未经处理的豆制品、米制品小作坊食品加工废水和部分生活污水的关镇河支渠,水底沉积物氮、磷污染相当严重,TP最大值高达1 781.24 mg·kg<sup>-1</sup>,平均值也达到1 376.95 mg·kg<sup>-1</sup>,显著高于巢湖流域污染最严重的十五里河表层沉积物TP平均含量897.69 mg·kg<sup>-1</sup><sup>[9]</sup>,分别为磨店小溪流和陶冲小溪流沉积物的2.94、1.91倍.显然,关镇河支渠和陶冲小溪流沉积物TP含量,不同程度超过了加拿大安大略省环境和能源部发布指南中能引起最低级别生物毒性效应的TP浓度(600 mg·kg<sup>-1</sup>)<sup>[15]</sup>.

从感官性状上看,关镇河支渠沉积物均呈深黑色且伴有明显的腐臭味,陶冲小溪流除个别沉积物呈灰黑色、有臭味外,其它基本均呈黄褐色、无臭味.磨店小溪流除下游6号采样点为黑色且有臭味外,其它也均为黄色、无臭味.调查发现,该采样点毗邻磨店镇城市污水处理厂排污口,受污染河水可能因上溯而影响6号采样点的水质和沉积物状况.显然,3条溪流沟渠沉积物的不同性状与补给水源关系密切.3条溪流沉积物磷素均以无机磷IP为主,磨店小溪流沉积物各形态磷含量由高到低为Fe-P>Ca-P>OP>De-P>Al-P>Ex-P>Oc-P,陶冲小溪流沉积物各形态磷含量由高到低为Fe-P>De-P≈Ca-P>OP>Al-P>Ex-P>Oc-P,关镇溪流沉积

物各形态磷含量由高到低为OP>Fe-P>Ca-P>De-P>Al-P>Oc-P>Ex-P.尽管3条溪流沟渠中Fe-P含量基本都较为突出,但相对于OP、Ca-P含量,该优势并不十分显著,这与接纳了大量化肥厂(红四方化工集团、江淮化肥厂)废水的十五里河沉积物中Fe-P含量一枝独秀格局明显不同<sup>[9]</sup>.

生物可利用磷(BAP)可通过化学和生物作用转化为溶解态活性磷进入水体而被水生生物利用,并影响磷酸盐在上覆水-沉积物界面的释放,对预测潜在生态环境风险具有十分重要的意义.一般地,将Ex-P、Fe-P、Al-P以及部分OP(约占60%)作为估算生物可利用磷含量的依据<sup>[18,19]</sup>.关镇河支渠6个采样点位Ex-P含量变化范围为39.25~81.14 mg·kg<sup>-1</sup>,均值为58.60 mg·kg<sup>-1</sup>.陶冲小溪流次之,变化范围为11.86~32.85 mg·kg<sup>-1</sup>,均值为21.31 mg·kg<sup>-1</sup>,总体表现为下游高于上游.磨店小溪流Ex-P含量范围为6.20~20.53 mg·kg<sup>-1</sup>,均值为12.99 mg·kg<sup>-1</sup>,占TP含量的1.62%~3.96%.由于Al-P可以在一定条件下与Fe-P相互转化,往往是沉积物与上覆水之间磷交换的重要形态.关镇河支渠Al-P、Fe-P平均含量明显最高,均值为67.95 mg·kg<sup>-1</sup>和349.36 mg·kg<sup>-1</sup>,分别为磨店小溪流Al-P、Fe-P含量的3.63和2.62倍,为陶冲小溪流的3.13和1.69倍.经粗略估算,磨店小溪流表层沉积物的生物可利用磷含量均值为220.44 mg·kg<sup>-1</sup>,占TP的47.07%;陶冲小溪流均值为328.38 mg·kg<sup>-1</sup>,占TP的45.51%;关镇河支渠均值为698.19 mg·kg<sup>-1</sup>,占TP的50.71%.

关镇河溪流OP含量在所有磷形态中比重最高,占TP的24.64~30.215%,分别为磨店小溪流和陶冲小溪流的4.01倍和2.89倍.有研究表明,Al-P、Fe-P和OP含量与人类活动密切相关,主要来源于生活污水和工业废水<sup>[20]</sup>.因此,Fe/Al-P常用作污染指标指示人为污染情况.毫无疑问,关镇河支渠大量类似生活污水的豆制品、米制品等食品加工废水的排入,很好地解释了溪流沉积物Al-P、Fe-P和OP偏高的原因所在.De-P、Ca-P和Oc-P属于

表 3 3 条溪流沟渠沉积物各形态磷含量

Table 3 Contents of phosphorus fractions in the surface sediments of the studied streams

溪流	季节	统计参数	$w(\text{磷形态})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$							
			Ex-P	Al-P	Fe-P	Oc-P	Ca-P	De-P	OP	TP
磨店小溪流	春	最大值	20.53	18.15	150.45	12.01	120.15	97.26	115.08	533.63
		最小值	11.80	11.15	110.70	7.04	90.72	67.43	58.43	357.27
		平均值	15.66	14.19	132.72	10.06	106.62	92.02	90.90	462.17
	夏	最大值	19.54	22.43	125.32	11.01	114.79	97.26	107.52	497.87
		最小值	9.57	12.45	104.98	12.58	105.47	45.03	56.98	347.06
		平均值	13.53	17.23	112.63	9.19	91.73	88.04	82.61	414.96
	秋	最大值	13.74	26.65	177.43	12.83	127.64	93.74	120.36	572.39
		最小值	6.20	17.01	104.93	7.27	93.17	86.79	66.39	381.76
		平均值	10.58	21.30	136.98	10.30	106.49	90.52	90.42	466.59
	冬	最大值	16.52	25.04	201.68	16.39	144.72	122.08	159.47	685.90
		最小值	9.57	19.41	115.83	8.38	102.37	92.40	75.22	423.18
		平均值	12.22	22.08	150.18	13.34	118.76	105.91	106.91	529.40
陶冲小溪流	春	最大值	32.85	29.69	228.45	24.86	202.72	195.17	161.53	875.27
		最小值	20.31	16.47	106.24	14.38	89.73	92.17	94.54	433.84
		平均值	26.51	21.90	204.41	17.90	153.25	161.16	134.63	719.76
	夏	最大值	24.95	25.42	211.36	20.26	172.76	196.64	147.61	799.01
		最小值	17.04	11.98	98.68	12.13	64.71	78.50	101.29	384.33
		平均值	21.49	16.79	185.72	15.23	153.54	155.68	115.44	663.89
	秋	最大值	21.41	25.53	219.74	21.78	173.65	221.74	146.83	830.68
		最小值	11.86	19.64	105.83	12.87	92.86	87.68	102.74	433.49
		平均值	17.55	21.59	221.19	18.76	159.72	169.72	127.33	735.86
	冬	最大值	28.04	35.67	236.96	26.48	213.74	176.47	155.79	873.16
		最小值	14.77	19.86	124.84	15.83	88.71	97.74	117.58	479.33
		平均值	19.70	26.44	222.38	24.73	167.59	170.15	135.70	766.70
关镇河支渠	春	最大值	63.27	101.95	368.54	88.25	457.44	243.70	458.07	1781.24
		最小值	48.64	52.73	264.15	36.43	213.60	175.20	354.49	1145.24
		平均值	57.05	63.43	326.31	61.91	285.59	198.27	375.14	1367.69
	夏	最大值	64.38	103.81	391.47	78.61	390.27	222.95	463.07	1714.56
		最小值	39.25	42.52	302.97	46.13	198.70	140.23	278.07	1048.78
		平均值	49.64	63.78	339.87	57.88	260.63	185.03	349.11	1305.95
	秋	最大值	73.74	88.45	397.18	86.02	402.23	218.36	502.26	1768.24
		最小值	61.69	43.32	306.49	53.73	173.02	165.09	337.45	1140.79
		平均值	66.22	63.23	352.41	63.69	261.28	186.46	382.31	1375.61
	冬	最大值	81.14	118.14	383.56	97.49	378.94	229.42	438.43	1727.12
		最小值	53.22	52.43	337.42	54.18	209.83	173.03	325.94	1206.05
		平均值	61.49	81.36	378.86	72.68	291.41	197.40	375.34	1458.54

相对稳定性磷,较难被分解而参与短时的磷循环,在 3 个溪流中变化幅度均很小,变异系数在 11.19% ~ 28.23% 之间。

### 3.2.2 生物可利用磷的季节性变化

鉴于 Ex-P、Al-P、Fe-P 和 OP 是生物直接或间接利用的磷形态,也是影响上覆水中磷含量的主要因素,因此这里仅就该 4 种磷形态,开展季节性变化分析。在季节更替中,磨店小溪流和陶冲小溪流 Ex-P 含量表现为春、夏季稍高于秋、冬季,而关镇河支渠则刚好相反。Ex-P 的季节性变化特点,可能与秋、

冬季温度低,生物活性差,而春、夏季水生生物和水生植物活性增强,对 Ex-P 的生物吸收和新陈代谢利用强度增大,导致沉积物中 Ex-P 向间隙水、上覆水的扩散增强有很大关系。就 Al-P、Fe-P 含量而言,3 条溪流几乎都表现为秋、冬季稍高于春、夏季。至于 Fe-P,可能因为夏季温度较高,微生物作用加快了溶解氧的消耗,使得沉积物的氧化还原环境发生改变,Fe/Al-P 转化成可溶性磷酸盐而进入上覆水体<sup>[21]</sup>。由表 1 可见,3 条溪流沟渠水体夏季 ORP 都较秋、冬季低,关镇河支渠甚至仅为 58 mV,基本

处于还原条件,有利于促进底泥中 Fe/Al-P 分解转化为  $\text{Fe}^{2+}$ 、 $\text{PO}_4^{3-}$  进入上覆水。

3 条溪流 OP 含量的季节性变幅较小,且绝大多数采样点都表现出冬季最高、夏季最低的变化规律。究其原因,可能由于活性有机磷受微生物影响很大,在一定环境条件下可以水解或矿化分解为溶解性的小分子有机磷或磷酸根,进而迁移扩散至间隙水或上覆水体<sup>[21]</sup>。

### 3.3 磷吸附指数及其变化特征

磷吸附指数 PSI 可以反映沉积物对磷的缓冲效果,即 PSI 值小,意味着沉积物对磷的缓冲能力弱,磷释放进入水体的风险也就高;反之,沉积物对磷的缓冲能力强,引起水体富营养化的风险也就低。3 条溪流沟渠沉积物的磷吸附指数及其季节性变化情况见图 2。

由图 2 可知,磨店小溪流沉积物的 PSI 值相对最高,其次是陶冲小溪流,关镇河支渠最小,相应的沉积物 PSI 均值分别为 40.36、37.32 和 33.85  $(\text{mg}\cdot\text{L})\cdot(100\text{g}\cdot\mu\text{mol})^{-1}$ 。因此,关镇河支渠沉积物作为内源向上覆水体释放磷的可能性最大,磨店小溪流相对最小。众所周知,厌氧或缺氧环境条件有利于沉积物中磷的释放<sup>[21]</sup>。关镇河支渠接纳污水的性质和规模,使得沟渠水体常年处于氮、磷污染严重状态,绝大部分渠段出现黑臭现象,水底处于缺氧或厌氧状态。陶冲小溪流由于城市污水处理厂尾水补给的影响,水体氮、磷污染也相当严重。相

比较而言,磨店小溪流由于主要靠农田汇水和地下水渗流补给,水质状况稍好,水体处于好氧水平,但在溪流下游存在一个高校园区排污口,偶尔的污水上溯也给 6 号采样点的水质和底泥带来不利影响。总的来看,3 条溪流沟渠沉积物 PSI 值与彼此水环境状况相吻合。

裴婷婷等<sup>[22]</sup>对磨店小溪流中水塘、深潭、支流和干流沉积物的磷吸附指数进行了定量化分析,得到 PSI 变化范围为 26.47 ~ 69.88  $(\text{mg}\cdot\text{L})\cdot(100\text{g}\cdot\mu\text{mol})^{-1}$ ,其中 2014 年秋季和 2015 年春季 PSI 均值分别为 59.98、34.56  $(\text{mg}\cdot\text{L})\cdot(100\text{g}\cdot\mu\text{mol})^{-1}$ ,该结果与本研究得到的磨店小溪流相应季节的 PSI 计算值接近。路丁等<sup>[13]</sup>对福建省山美水库入库河道沉积物磷释放风险的调查中发现,PSI 值变化范围为 51.58 ~ 77.03  $(\text{mg}\cdot\text{L})\cdot(100\text{g}\cdot\mu\text{mol})^{-1}$ ,均值为 58.01  $(\text{mg}\cdot\text{L})\cdot(100\text{g}\cdot\mu\text{mol})^{-1}$ ;于淑玲等<sup>[23]</sup>在对小兴凯湖表层沉积物的调查研究中,得到沉积物 PSI 值变化范围为 9.78 ~ 197.53  $(\text{mg}\cdot\text{L})\cdot(100\text{g}\cdot\mu\text{mol})^{-1}$ ,均值为 59.77  $(\text{mg}\cdot\text{L})\cdot(100\text{g}\cdot\mu\text{mol})^{-1}$ 。相比而言,关镇河支渠和陶冲小溪流沉积物磷的释放风险都相当高。

从图 2 可见,3 条溪流沉积物的 PSI 值季节性变化规律明显,而且每条溪流沟渠几乎所有采样点的变化规律也都基本一致,即表现出秋季最高,冬季次之,春、夏季相对较低且大小相当的变化特征。众所周知,春、夏季水温相对较高,沉积物中微生物活性

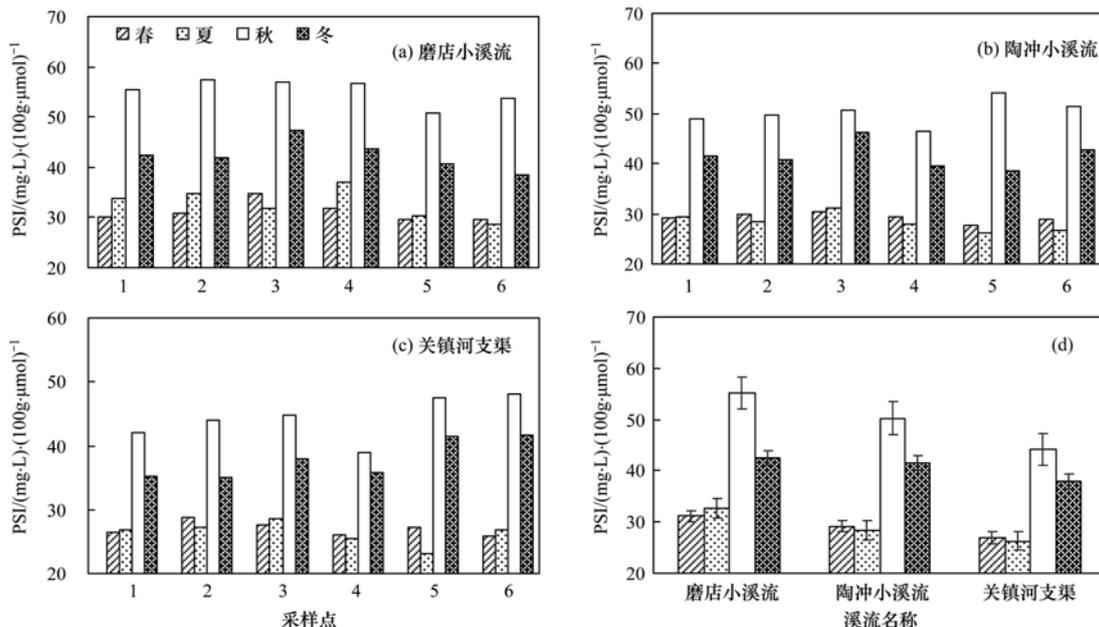


图 2 3 条溪流 PSI 季节变化特征

Fig. 2 Seasonal variation characteristics of PSI corresponding to the studied streams

和水化学作用相对增强,从而促进生物扰动、矿化作用和厌氧转化,致使沉积物的氧化还原电位降低,甚至进入缺氧或厌氧状态,加大了底泥中磷的释放与迁移<sup>[21]</sup>.至于为何出现冬季 PSI 全部低于秋季,则还有待进一步的探究.此外,2015 年春末至夏初,合肥地区的气温、光照条件等总体上都较常年同期水平略偏低一些.这里,每条溪流相应的春、夏两季 PSI 值均颇为接近,可能与上述因素以及两次采

样时间相距较近有很大的关系.

### 3.4 磷吸附饱和度及其变化特征

3 条溪流沉积物的草酸提取态铝、铁、磷的平均含量,见表 4.不难看出,Al<sub>ox</sub>、Fe<sub>ox</sub> 和 P<sub>ox</sub> 均明显表现出如下变化规律,即关镇河支渠 > 陶冲小溪流 > 磨店小溪流.除了磨店小溪流夏季时 Al<sub>ox</sub>、Fe<sub>ox</sub> 含量稍高外,3 条溪流 Al<sub>ox</sub>、Fe<sub>ox</sub> 和 P<sub>ox</sub> 含量的季节变化总体不显著.

表 4 3 条溪流沟渠草酸提取态铝、铁、磷的平均含量

Table 4 Average concentrations of Fe<sub>ox</sub>, Al<sub>ox</sub> and P<sub>ox</sub> in the sediments of the studied stream

季节	磨店小溪流			陶冲小溪流			关镇河支渠		
	Al <sub>ox</sub>	Fe <sub>ox</sub>	P <sub>ox</sub>	Al <sub>ox</sub>	Fe <sub>ox</sub>	P <sub>ox</sub>	Al <sub>ox</sub>	Fe <sub>ox</sub>	P <sub>ox</sub>
春	54.40	21.29	3.28	74.56	31.28	5.49	144.24	56.58	13.46
夏	76.48	35.26	2.72	72.12	32.36	5.32	130.41	63.58	11.22
秋	56.72	18.60	2.25	73.22	33.16	3.27	116.53	58.56	10.29
冬	49.64	19.73	2.42	74.15	37.19	6.19	134.87	71.56	12.52

磷吸附饱和度 DPS 是一个表示土壤固磷和供磷能力的综合指标<sup>[24]</sup>,DPS 越高,磷素越容易从沉积物表面迁移到水体,也就是磷释放到上覆水体的风险越大;反之,磷释放风险也就越小.3 条溪流沉积物 DPS 值的相对大小及其季节变化情况,见图 3.不难看出,关镇河支渠 DPS 值略高于陶冲小溪流,明显超过磨店小溪流.根据 DPS 含义,可知关镇河支渠的磷释放风险最高,磨店小溪流最低.显然,由 DPS 和 PSI 两个指标得到的磷释放风险评估结论相同.

从数值大小来看,陶冲小溪流沉积物的 DPS 全年平均值为 9.55%,关镇河支渠为 11.95%,磨店小溪流仅为 6.65%,但均超过 5.0%,说明沉积物磷素存在向水体释放的风险<sup>[25]</sup>.Vaughan 等<sup>[26]</sup>在对多条农田排水沟渠表层沉积物 126 个样本的研究中得到 DPS 变化范围为 2% ~ 36%,平均值为 15%;路丁等<sup>[13]</sup>得到福建省山美水库入库河道沉积物磷吸附饱和度的变化范围为 7.00% ~ 25.29%,平均值为 14.79%;于淑玲等<sup>[23]</sup>在对黑龙江流域小兴凯湖表层沉积物磷的潜在释放风险研究中,得到 DPS 变化范围为 9.95% ~ 24.47%,平均值 15.41%;卢少勇等<sup>[27]</sup>在对北京市 6 个湖泊表层沉积物的研究中,得到 DPS 变化范围为 7.97% ~ 50.50%,平均值为 28.90%.显然,与上述排水沟渠、河道、湖泊相比,尽管本研究的 3 条溪流沟渠沉积物磷含量并不低,但所表现出的磷释放风险相对并不高.

关镇河支渠沉积物 DPS 均值的季节变化性相对较小,变异系数为 16.32%.由图 3,磨店小溪流

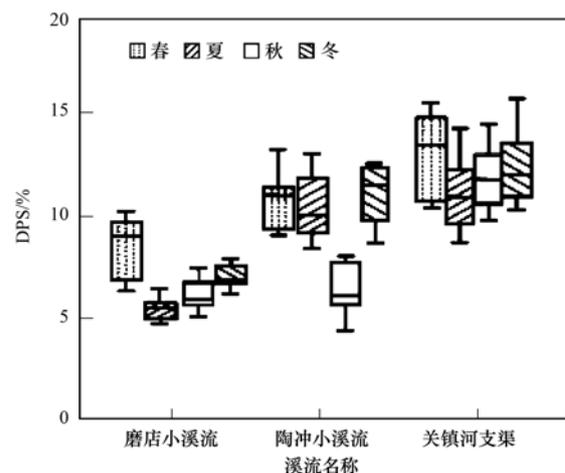


图 3 3 条溪流 DPS 季节变化特征

Fig. 3 Seasonal variation characteristics of DPS corresponding to the studied streams

的春季 DPS、陶冲小溪流的秋季 DPS 均明显有别于其它季节,意味着沉积物的固磷和供磷能力存在较大的动态变化性.Chrysotome 等<sup>[28]</sup>提出,可以将 15% 作为土壤 DPS 磷素流失的临界值;但鲁如坤等<sup>[29]</sup>的研究则发现,当土壤 DPS < 25% 时,土壤向水体的磷释放速度较为缓慢,而当土壤 DPS > 25% 时,水体含磷量随土壤 DPS 上升而迅速增加.事实上,北欧一些国家甚至直接将 25% 作为判定土壤磷流失风险的阈值<sup>[30]</sup>.目前,有关沉积物 DPS 与磷释放风险的判断,仍还缺乏权威的阈值标准,因此无法给出以 DPS 表示的沉积物磷释放风险的绝对结论.

### 3.5 磷释放风险评估

磷释放风险指数 ERI 可以用于评估溪流沟渠

表层沉积物中磷的释放风险,但到目前为止,关于该指标仍还没有权威、公认的风险等级划分标准. 为此,本研究考虑借用黄清辉等<sup>[14]</sup>提出的 ERI 风险等级划分标准:ERI < 10%, 低释放风险; 10% < ERI < 20%, 中等释放风险; 20% < ERI < 25%, 较高释放风险; ERI > 25%, 高释放风险. 3 条溪流沉积物的磷释放风险评价结果见图 4. 可以看出,3 条溪流沉积物的磷释放风险水平存在较为显著的差异性. 事实上,即便是同一溪流沟渠,也存在显著的季节性差异. 关镇河支渠 ERI 变化范围为 20.23% ~ 59.81%,均值为 37.32% ( $n = 24$ ); 陶冲小溪流的变化范围为 9.18% ~ 49.02%,均值为 28.18% ( $n = 24$ ); 磨店小溪流的变化范围为 8.20% ~ 34.56%,均值为 17.51% ( $n = 24$ ). 根据 ERI 的数值大小,可以得到 3 条溪流磷释放风险的排序结果,即关镇河支渠 > 陶冲小溪流 > 磨店小溪流. 由图 4,关镇河支渠 4 个季节全部处于磷释放的高风险状态,陶冲小溪流仅在秋季处于中等释放风险水平,其它季节也

均处于高风险状态,磨店小溪流除春季属于高风险状态外,其它季节则都为中等风险水平.

在磨店小溪流的 6 个采样点中,位于最下方的 6 号采样点的水体和沉积物氮、磷污染程度明显高于其它 5 个点位,这可能与该点位下方 50m 处存在城市排污口以及污水上溯影响有一定的关系. 6 号采样点相应的 ERI 全年变化范围为 10.64% ~ 34.56% (平均值为 22.20%),属于较高风险等级;其它 5 个采样点 ERI 变化范围为 8.20% ~ 27.62% (平均值为 16.32%),属于中等风险水平. 2015 年春季,6 号采样点的 ERI 值为 34.56%,远超出高风险阈值(即 25%),而其它 5 个采样点的 ERI 平均值仅为 25.90%,勉强达到高风险水平,表明磨店小溪流沉积物磷释放风险水平差异较大,特别是来自 6 号采样点位的贡献,抬高了磨店小溪流沉积物磷释放风险等级. 相比较而言,其他两条溪流沟渠内部则差异性不大.

3.6 差异性分析

Mann-Whitney *U* 检验法是检验两个独立样本是否存在显著性差异的一种常用的非参数检验方法. 不妨假设  $H_0$ : 两溪流沟渠相关指标无差异;  $H_1$ : 两溪流沟渠相关指标有差异. 选择 Ex-P、Fe-P、Al-P、OP、PSI、DPS、pH、OM、Fe<sub>ox</sub>、Al<sub>ox</sub> 和 P<sub>ox</sub> 等 11 个指标作为因素变量,利用 Mann-Whitney *U* 检验技术,筛选出每两个溪流之间差异性相对较大的指标. 鉴于独立样本容量为小样本 ( $n = 24$ ),不妨采用 *U* 统计量的精确概率 *P* 进行假设检验,结果见表 5. 这里,除陶冲小溪流与关镇河支渠之间 PSI 精确概率  $P = 0.078$  外,其他指标概率值均满足  $P < 0.05$ ,即拒绝零假设  $H_0$ . 可以看出,3 条溪流沟渠的绝大部分指标存在显著的差异性.

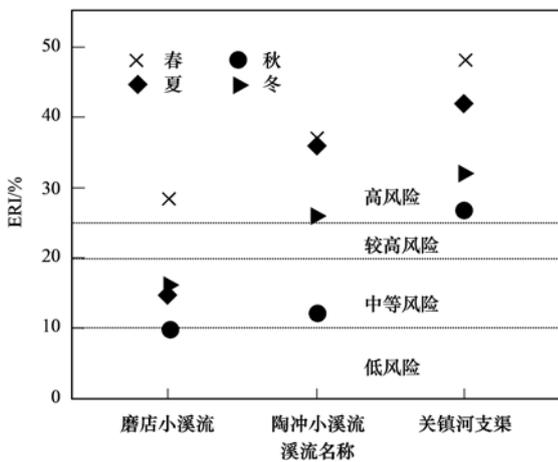


图 4 3 条溪流释放风险评价结果

Fig. 4 Phosphorus release risk for the studied streams

表 5 3 条溪流之间差异性比较

Table 5 Comparisons of difference among the studied streams

	磨店小溪流	陶冲小溪流	关镇河支渠
磨店小溪流	—		
陶冲小溪流	pH、OM、Ex-P、Al-P、Fe-P、OP、PSI、DPS、Al <sub>ox</sub> 、Fe <sub>ox</sub> 、P <sub>ox</sub>	—	
关镇河支渠	pH、OM、Ex-P、Al-P、Fe-P、OP、PSI、DPS、Al <sub>ox</sub> 、Fe <sub>ox</sub> 、P <sub>ox</sub>	pH、OM、Ex-P、Al-P、Fe-P、OP、DPS、Al <sub>ox</sub> 、Fe <sub>ox</sub> 、P <sub>ox</sub>	—

4 结论

(1) 3 条溪流沟渠沉积物各形态磷含量差异显著,均以无机磷为主,且 Al-P、Fe-P 和 OP 含量几乎都表现为秋、冬季稍高于春、夏季,相应的沉积物

的磷污染程度排序为:关镇河支渠 > 陶冲小溪流 > 磨店小溪流.

(2) 磨店小溪流沉积物的 PSI 值相对最高,其次是陶冲小溪流,关镇河支渠最小,相应的 PSI 均值分别为 40.36、37.32 和 33.85 (mg · L) · (100

$\text{g} \cdot \mu\text{mol}^{-1}$ , 意味着关镇河支渠沉积物作为内源向上覆水体释放磷的可能性最大, 磨店小溪流相对最小。而且, 3 条溪流 PSI 几乎都表现为秋季最高, 冬季次之, 春、夏季基本相当。

(3) 3 条溪流沟渠的磷吸附饱和度 DPS 大小排序为: 关镇河支渠 (11.95%) > 陶冲小溪流 (9.55%) > 磨店小溪流 (6.65%), 这也代表了沉积物磷释放风险大小排序结果。

(4) 关镇河支渠在 4 个季节全部处于磷释放的高风险状态, 陶冲小溪流仅在秋季处于中等释放风险水平, 其它季节也均处于高风险状态, 磨店小溪流除春季属于高风险状态外, 其它季节则都为中等风险水平; 差异性分析表明, 3 条溪流的绝大部分指标存在显著的差异性。

#### 参考文献:

- [ 1 ] Alexander R B, Boyer E W, Smith R A, *et al.* The role of headwater streams in downstream water quality [J]. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 2007, **43** (1): 41-59.
- [ 2 ] Dollinger J, Dagès C, Bailly J S, *et al.* Managing ditches for agroecological engineering of landscape. A review [J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2015, **35** (3): 999-1020.
- [ 3 ] Wang Z H, He M, Wang T, *et al.* Phosphorus sorption-desorption characteristics of ditch sediments from different land uses in a small headwater catchment in the central Sichuan basin of China [J]. *Journal of Mountain Science*, 2012, **9** (3): 441-450.
- [ 4 ] Zhu B, Wang Z H, Zhang X B. Phosphorus fractions and release potential of ditch sediments from different land uses in a small catchment of the upper Yangtze River [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2012, **12** (2): 278-290.
- [ 5 ] 钱靖, 李如忠, 唐文坤, 等. 生活污水为主要补给源的城郊排水沟渠氮磷滞留特征 [J]. *环境科学研究*, 2015, **28** (2): 205-212.
- [ 6 ] Smith D R, Haggard B E, Warnemuende E A, *et al.* Sediment phosphorus dynamics for three tile fed drainage ditches in Northeast Indiana [J]. *Agricultural Water Management*, 2005, **71** (1): 19-32.
- [ 7 ] Palmer-Felgate E J, Jarvie H P, Withers P J A, *et al.* Stream-bed phosphorus in paired catchments with different agricultural land use intensity [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2009, **134** (1-2): 53-66.
- [ 8 ] 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.
- [ 9 ] 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): 1053-1510.
- [ 10 ] 刘成, 邵世光, 范成新, 等. 巢湖重污染汇流湾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.
- [ 11 ] 李如忠, 钱靖, 董玉红, 等. 城郊排水沟渠溶质传输的暂态存储影响及参数敏感性 [J]. *环境科学*, 2015, **36** (2): 481-489.
- [ 12 ] 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.
- [ 13 ] 路丁, 郭冲涌, 沈芳芳, 等. 福建省山美水库入库河道沉积物磷释放风险 [J]. *环境化学*, 2015, **34** (8): 1498-1505.
- [ 14 ] 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.
- [ 15 ] 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.
- [ 16 ] 甘树, 卢少勇, 秦普丰, 等. 太湖西岸湖滨带沉积物氮磷有机质分布及评价 [J]. *环境科学*, 2012, **33** (9): 3064-3069.
- [ 17 ] 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.
- [ 18 ] 刘越, 胡恭任, 袁栋林, 等. 晋江感潮河段表层沉积物中磷的分布、赋存形态及环境意义 [J]. *环境化学*, 2011, **30** (7): 1361-1367.
- [ 19 ] 宋祖光, 高效江, 张弛. 杭州湾潮滩表层沉积物中磷的分布、赋存形态及生态意义 [J]. *生态学杂志*, 2007, **26** (6): 853-858.
- [ 20 ] 张树楠, 贾兆月, 肖润林, 等. 生态沟渠底泥属性与磷吸附特性研究 [J]. *环境科学*, 2013, **34** (3): 1101-1106.
- [ 21 ] 黄廷林, 周瑞媛, 夏超, 等. 氧化还原电位及微生物对水库底泥释磷的影响 [J]. *环境化学*, 2014, **33** (6): 930-936.
- [ 22 ] 裴婷婷, 李如忠, 高苏蒂, 等. 合肥城郊典型农田溪流水系沉积物磷形态及释放风险分析 [J]. *环境科学*, 2016, **37** (2): 548-557.
- [ 23 ] 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.
- [ 24 ] Alleoni L R F, Fernandes A R, de Campos M. Degree of phosphorus saturation of an Oxisol amended with biosolids in a long-term field experiment [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, **21** (8): 5511-5520.
- [ 25 ] Nair V D, Portier K M, Graetz D A, *et al.* An environmental threshold for degree of phosphorus saturation in sandy soils [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2004, **33** (1): 107-113.
- [ 26 ] Vaughan R E, Needelman B A, Kleinman P J A, *et al.* Vertical distribution of phosphorus in agricultural drainage ditch soils [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2007, **36** (6): 1895-1903.
- [ 27 ] 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.
- [ 28 ] Chrysostome M, Nair V D, Harris W G, *et al.* Laboratory validation of soil phosphorus storage capacity predictions for use in risk assessment [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2007, **71** (5): 1564-1569.
- [ 29 ] 鲁如坤, 时正元, 施建平. 我国南方 6 省农田养分平衡现状评价和动态变化研究 [J]. *中国农业科学*, 2000, **33** (2): 63-67.
- [ 30 ] 张璇, 郝芳华, 王晓, 等. 河套灌区不同耕作方式下土壤磷素的流失评价 [J]. *农业工程学报*, 2011, **27** (6): 59-65.

## CONTENTS

Temporal and Spatial Variation of Haze Pollution over China from 1960 to 2013 .....	FU Chuan-bo, TANG Jia-xiang, DAN Li, <i>et al.</i> (3237)
Concentrations and Size Distributions of Water-soluble Inorganic Ions in Aerosol Particles in Taiyuan, Shanxi .....	WANG Lu, WEN Tian-xue, MIAO Hong-yan, <i>et al.</i> (3249)
Characteristics of the Size Distribution of Water Soluble Inorganic Ions During a Typical Haze Pollution in the Autumn in Shijiazhuang .....	LIU Jing-yun, LIU Zi-rui, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (3258)
Variation of Size Distribution and the Influencing Factors of Aerosol in Northern Suburbs of Nanjing .....	WU Dan, CAO Shuang, TANG Li-li, <i>et al.</i> (3268)
Characteristics of Black Carbon Aerosol and Influencing Factors in Northern Suburbs of Nanjing .....	XIAO Si-han, YU Xing-na, ZHU Bin, <i>et al.</i> (3280)
Characteristics of Speciated Atmospheric Mercury in Chongming Island, Shanghai .....	LI Shu, GAO Wei, WANG Shu-xiao, <i>et al.</i> (3290)
Total Gaseous Mercury and Mercury Emission from Natural Surface at One Typical Agricultural Region in Three Gorges Reservoir .....	WANG Yong-min, ZHAO Zheng, SUN Tao, <i>et al.</i> (3300)
Variation Characteristics and Sources Analysis of Atmospheric Volatile Organic Compounds in Changbai Mountain Station .....	WU Fang-kun, SUN Jie, YU Ye, <i>et al.</i> (3308)
Characterization of Particle Size Distributions of the No-organized Lead Emission for a Lead and Zinc Smelter .....	LIU Da-jun, WANG Jia-quan (3315)
Hydrochemical Characteristics and Sources of Ions in Precipitation at the East Qilian Mountains .....	JIA Wen-xiong, LI Zong-xing (3322)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Vanadium in Sediments of the Three Gorges Reservoir (Chongqing-Yichang Section) .....	GUO Wei, YIN Shu-hua, XU Jian-xin, <i>et al.</i> (3333)
Distributions of Arsenic Species in Different Eutrophic Waters of Lake Taihu and Their Relations to Environmental Factors .....	CHE Fei-fei, WANG Da-peng, ZHEN Zhuo, <i>et al.</i> (3340)
Spatial, Temporal Distribution Characteristics and Potential Risk of PPCPs in Surface Sediments from Taihu Lake .....	ZHANG Pan-wei, ZHOU Huai-dong, ZHAO Gao-feng, <i>et al.</i> (3348)
Distribution Characteristics and Source Identification of Organochlorine Pesticides in the Karst Groundwater System .....	ZHANG Mei, SUN Yu-chuan, XIE Zheng-lan, <i>et al.</i> (3356)
Comparison on the Hydrogeochemical Characteristics of Typical Karst Groundwater System in Southwest China, a Case of Qingmuguan and Laolongdong in Chongqing .....	ZHAN Zhao-jun, CHEN Feng, YANG Ping-heng, <i>et al.</i> (3365)
Fractions and Release Risk of Phosphorus in Surface Sediments of Three Headwater Streams with Different Styles of Water Supply .....	LI Ru-zhong, QIN Ru-bin, HUANG Qing-fei, <i>et al.</i> (3375)
Vertical Variation of Phosphorus Forms in Lake Dianchi and Contribution to Release .....	LI Le, WANG Sheng-rui, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (3384)
Analysis of Distribution Characteristics and Source of Dissolved Organic Matter from Zhoucun Reservoir in Summer Based on Fluorescence Spectroscopy and PARAFAC .....	HUANG Ting-lin, FANG Kai-kai, ZHANG Chun-hua, <i>et al.</i> (3394)
Absorption and Reflection Characteristics of Black Water Blooms in the Eutrophic Water .....	ZHANG Si-min, LI Yun-mei, WANG Qiao, <i>et al.</i> (3402)
Assessment of Ecosystem Health of Baogang Tailings Groundwater Based on Microbiome Index of Biotic Integrity (M-IBI) .....	AN Xin-li, CHEN Ting-ting, ZHAO Han, <i>et al.</i> (3413)
Relationship Between Landscape Pattern and Spatial Variation of Heavy Metals in Aquatic Sediments in Headwaters Area of Yuqiao Reservoir .....	WANG Zu-wei, WANG Yi-wei, HOU Ying-ying, <i>et al.</i> (3423)
Effect of Constructed Wetland Configuration on the Removal of Nitrogen Pollutants and Antibiotics in Aquaculture Wastewater .....	LIU Jia, YI Nai-kang, XIONG Yong-jiao, <i>et al.</i> (3430)
Effects of a Symbiotic Bacterium on the Accumulation and Transformation of Arsenate by <i>Chlorella salina</i> .....	XU Ping-ping, LIU Cong, WANG Ya, <i>et al.</i> (3438)
Effects of Nitrate in Water on the Growth of <i>Iris pseudacorus</i> L. and Its Adsorption Capacity of Nitrogen in a Simulated Experiment .....	WANG Bing, WEN Fen-xiang, XIAO Bo (3447)
Adsorption Behavior of <i>p</i> -hydroxy Biphenyl onto Sediment of the Yellow River in Lanzhou .....	ZHOU Qi, JIANG Yu-feng, SUN Hang, <i>et al.</i> (3453)
Enhanced Pollutants Removal in a Municipal Wastewater Treatment Plant with Multistage A/O Process .....	YIN Zi-hua, SHENG Xiao-lin, LIU Rui, <i>et al.</i> (3460)
Performance of Nanofiltration for Improving the Drinking Water Quality in a Water Supply Plant with Micropolluted Water Resource .....	WU Yu-chao, CHEN Li-jun, LAN Ya-qiong, <i>et al.</i> (3466)
Reaction Kinetics and Impacting Mechanism of Cr(VI) Removal in Fe <sup>0</sup> -PRB Systems .....	LU Xin, LI Miao, TANG Cui-mei, <i>et al.</i> (3473)
Adsorption Cd <sup>2+</sup> from Solution by EDTA-modified Silicate Nanoparticles .....	JIANG Shun-cheng, QIN Rui, LI Man-lin, <i>et al.</i> (3480)
Analysis and Characterization of Multi-modified Anodes via Nitric Acid and PPy/AQDS in Microbial Fuel Cells .....	SHEN Wei-hang, ZHU Neng-wu, YIN Fu-hua, <i>et al.</i> (3488)
Adsorption Characteristics of Phosphorus Wastewater on the Synthetic Ferrihydrate .....	CUI Meng-meng, WANG Dian-sheng, HUANG Tian-yin, <i>et al.</i> (3498)
Performance of Bio-zeolite Constructed Wetland in Dispersed Swine Wastewater Treatment .....	MOU Rui, SHEN Zhi-qiang, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (3508)
Polyhydroxyalkanoate (PHA) Synthesis by Glycerol-based Mixed Culture and Its Relation with Oxygen Uptake Rate (OUR) .....	LIU Dong, ZHANG Xiao-ting, ZHANG Dai-jun, <i>et al.</i> (3518)
Kinetics and Mechanistic Investigation of the Photocatalytic Degradation of Clothianidin .....	HU Qian, YANG Hai, SHI Ni, <i>et al.</i> (3524)
Impacts of Industrial Zone in Arid Area in Ningxia Province on the Accumulation of Heavy Metals in Agricultural Soils .....	WANG Mei-e, PENG Chi, CHEN Wei-ping (3532)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Surface Soils of a Large Steel enterprise in the North of China .....	DONG Jie, HUANG Ying, LI Yong-xia, <i>et al.</i> (3540)
Vertical Distribution of Heavy Metals and Its Response to Organic Carbon in Red Soil Profile .....	JIA Guang-mei, MA Ling-ling, XU Dian-dou, <i>et al.</i> (3547)
Provoking Effects of Exogenous Zn on Cadmium Accumulation in Rice .....	GU Jiao-feng, YANG Wen-tao, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (3554)
Effect of Modified Biochars on Soil Cadmium Stabilization in Paddy Soil Suffered from Original or Exogenous Contamination .....	YANG Lan, LI Bing, WANG Chang-quan, <i>et al.</i> (3562)
Performance of Bioleaching Combined with Fenton-like Reaction in Heavy Metals Removal from Contaminated Soil .....	ZHOU Pu-xiong, YAN Xie, YU Zhen, <i>et al.</i> (3575)
Effect of Long-term Oil Contamination on the Microbial Molecular Ecological Networks in Saline-alkali soils .....	ZHAO Hui-hui, XIAO Xian, PEI Meng, <i>et al.</i> (3582)
Effect of Nitrogen Deposition on Soil Microbial Community Structure Determined with the PLFA Method Under the Masson Pine Forest from Mt. Jinyun, Chongqing .....	ZENG Qing-ping, HE Bing-hui (3590)
Fungal Community Structure of Different Degeneration <i>Deyeuxia angustifolia</i> Wetlands in Sanjiang Plain .....	SUI Xin, ZHANG Rong-tao, XU Nan, <i>et al.</i> (3598)
Short-term Effects of Nitrogen and Sulfate Addition on CH <sub>4</sub> and CO <sub>2</sub> Emissions in the Tidal Marsh of Min River Estuary .....	HU Min-jie, REN Peng, HUANG Jia-fang, <i>et al.</i> (3606)
Variation of Soil CO <sub>2</sub> Flux and Environmental Factors Across Erosion-Deposition Sites Under Simulation Experiment .....	DU Lan-lan, WANG Zhi-qi, WANG Rui, <i>et al.</i> (3616)
Interannual Variations of Soil Respiration and Its Temperature Sensitivity in an Orchard in Jimci Region of Taiyuan City .....	YAN Jun-xia, HAO Zhong, JING Xue-kai, <i>et al.</i> (3625)
Influence of Biochar on Greenhouse Gases Emissions and Physico-chemical Properties of Loess Soil .....	WANG Yue-ling, GENG Zeng-chao, WANG Qiang, <i>et al.</i> (3634)
Effects of Elevated Ozone and Nitrogen Deposition on Photosynthetic Characteristics and biomass of <i>Populus cathayana</i> .....	XIN Yue, SHANG Bo, CHEN Xing-ling, <i>et al.</i> (3642)
Effects of Canopy Temperature on Carbon Dioxide Exchange of Winter Wheat in Taiyuan Basin .....	LI Hong-juan, YANG Yan, YAN Jun-xia (3650)
Composition and Evolution Characteristics of Dissolved Organic Matter During Composting Process .....	LI Dan, HE Xiao-song, XI Bei-dou, <i>et al.</i> (3660)
Effects of Acidic and Basic Modification on Activated Carbon for Adsorption of Toluene .....	LIU Han-bing, YANG Bing, XUE Nan-dong (3670)

# 《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军  
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明  
赵进才 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞  
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年9月15日 第37卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 9 Sep. 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	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science ( HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	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	中国国际图书贸易集团有限公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301  
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行