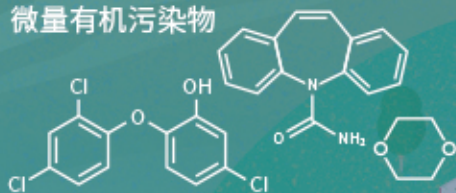


城市污水再生处理中微量有机污染物控制的关键难题与解决思路

王文龙, 吴乾元, 杜烨, 黄南, 陆韻, 魏东斌, 胡洪营

微量有机污染物



深度处理

- 污染物非靶向筛查
- 新型处理技术开发
- 处理效率替代性指标
- 工艺运行指南与排放标准

污水处理厂

深度处理

污水再生利用

湖泊湿地等

景观娱乐用水

下游城市河湖

污水达标排放

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年6月

第42卷 第6期
Vol.42 No.6

目次

综述与专论

- 城市环境生物安全研究的进展与挑战 苏建强, 安新丽, 胡安谊, 朱永官 (2565)
城市污水再生处理中微量有机污染物控制的关键难题与解决思路 王文龙, 吴乾元, 杜焯, 黄南, 陆韻, 魏东斌, 胡洪莹 (2573)
污泥 EPS 作为阻燃剂的机制归纳与潜力分析 郝晓地, 赵梓丞, 李季, 时琛, 吴远远 (2583)

研究报告

- 北京大气 PM_{2.5} 载带金属浓度、来源及健康风险的城郊差异 周安琪, 刘建伟, 周旭, 毕思琪, 张博哈, 高越, 曹红斌 (2595)
京津冀及周边 MAIAC AOD 和 PM_{2.5} 质量浓度特征及相关性分析 金国因, 杨兴川, 晏星, 赵文吉 (2604)
天津市 PM_{2.5} 中二次硝酸盐形成及防控 肖致美, 武婷, 卫昱婷, 徐虹, 李立伟, 李鹏, 陈魁, 邓小文 (2616)
南京市大气细颗粒物(PM_{2.5})中硝基多环芳烃污染特征与风险评估 傅银银, 文浩哲, 王向华, 于南洋, 李冰, 韦斯 (2626)
汾渭平原吸收性气溶胶时空演化及潜在源区分析 刘旻霞, 李亮, 于瑞新, 宋佳颖, 张国娟, 穆若兰, 徐璐 (2634)
西南典型区域夏季大气含氧挥发性有机化合物来源解析
... 陈木兰, 王赛男, 陈天舒, 朱波, 彭超, 周佳维, 车汉雄, 黄汝辉, 杨复沐, 刘合凡, 谭钦文, 韩丽, 陈军辉, 陆克定, 陈阳 (2648)
气溶胶中溶解性有机质(DOM)液相氧化 陶冶, 陈彦彤, 李楠旺, 张敬宇, 叶招莲, 盖鑫磊 (2659)
基于 MERRA-2 再分析资料的上海市近 40 年大气黑碳浓度变化及潜在来源解析
曹闪闪, 段玉森, 高婵婵, 苏玲, 杨怡萱, 张洋, 蔡超琳, 刘敏 (2668)
石家庄市臭氧和二氧化氮的时空演替特征及来源解析 王帅, 聂赛赛, 冯亚平, 崔建升, 陈静, 刘大喜, 石文雅 (2679)
基于光化学指标法的邯郸市臭氧生成敏感性 牛元, 程水源, 欧盛菊, 姚诗音, 沈泽亚, 关攀博 (2691)
基于 Landsat 数据的关中盆地腹地 AOD 时空格局及城市化对其影响 郑玉蓉, 王旭红, 张秀, 胡贵贵, 梁秀娟, 牛林芝, 韩海青 (2699)
基于卫星遥感和地面观测的人为源 VOCs 区域清单多维校验 王玥, 魏巍, 任云婷, 王晓琦, 陈赛赛, 程水源 (2713)
中原城市群国家干线公路 SOA 生成潜势估算 王娜萍, 李海萍, 张帆 (2721)
北京市“大气十条”实施的空气质量改善效益 卢亚灵, 范朝阳, 蒋洪强, 牛传真, 李勃 (2730)
工业大气污染源排放绩效定量评价及应用 李廷昆, 冯银厂, 吴建会, 毕晓辉, 张裕芬 (2740)
基于生态风险的我国水环境高风险抗生素筛选排序 周力, 刘珊, 郭家骅, 李琦 (2748)
基于 RDA-REM 模型的我国再生水开发利用潜力 郑锦涛, 马涛, 刘九夫, 彭安帮, 邓晰元, 郑皓 (2758)
基于模型研究质量评价的 SWAT 模型参数取值特征分析 荣易, 秦成新, 杜鹏飞, 孙博 (2769)
大型浅水湖泊水质模型边界负荷敏感性分析 王亚宁, 李一平, 程月, 唐春燕, 陈刚 (2778)
不同流域水陆过渡带氮磷有效态的特征对比及环境意义 朱海, 袁旭音, 叶宏萌, 成瑾, 毛志强, 韩年, 周慧华 (2787)
基于不同赋权方法的北运河上游潜在非点源污染风险时空变化特征分析
李华林, 张建军, 张耀方, 常国梁, 时迪迪, 徐文静, 宋卓远, 于佩丹, 张守红 (2796)
长期施肥和耕作下紫色土坡耕地径流 TN 和 TP 流失特征 吴小雨, 李天阳, 何丙辉 (2810)
渭河和泾河流域浅层地下水水化学特征和控制因素 刘鑫, 向伟, 司炳成 (2817)
太湖流域上游南苕溪水系夏秋季水体溶存二氧化碳和甲烷浓度特征及影响因素
梁佳辉, 田琳琳, 周钟昱, 张海阔, 张方方, 何圣嘉, 蔡延江 (2826)
低温期浅水湖泊氮的分布及无机氮扩散通量:以白洋淀为例 文艳, 单保庆, 张文强 (2839)
覆盖条件下底泥微环境对内源磷释放的影响 陈姝彤, 李大鹏, 徐楚天, 张帅, 丁玉琴, 孙培荣, 黄勇 (2848)
圩区河道底泥腐殖酸对重金属和抗生素的共吸附 薛向东, 杨宸豪, 于荐麟, 庄海峰, 方程冉 (2856)
两种 PPCPs 对雅鲁藏布江沉积物硝化作用的影响 凌欣, 徐慧平, 陆光华 (2868)
铁碳微电解及沸石组合人工湿地的废水处理效果 赵仲婧, 郝庆菊, 张尧钰, 熊维霞, 曾唯, 陈俊江, 江长胜 (2875)
CDs-BOC 复合催化剂可见光下活化过硫酸盐降解典型 PPCPs 雷倩, 许路, 艾伟, 李志敏, 杨磊 (2885)
pg-C₃N₄/BiOBr/Ag 复合材料的制备及其光催化降解磺胺甲噁唑 杨利伟, 刘丽君, 夏训峰, 朱建超, 高生旺, 王洪良, 王书平 (2896)
海藻酸钠负载硫化零价铁对水体中 Cr(VI)的还原去除 王旭, 杨欣楠, 黄币娟, 刘壮, 李诗萌, 程敏, 谢燕华 (2908)
超顺磁性纳米 Fe₃O₄@SiO₂ 功能化材料对镉的吸附机制 张立志, 易平, 方丹丹, 王强 (2917)
典型药物在医院废水和城市污水处理厂中的污染特征及去除情况 叶璞, 游文丹, 杨滨, 陈阳, 汪立高, 赵建亮, 应光国 (2928)
印染废水循环利用抗生素抗性基因丰度变化特性 徐瑶瑶, 王锐, 金鑫, 石炬, 王岩, 金鹏康 (2937)
短程硝化反硝化除磷颗粒污泥的同步驯化 王文琪, 李冬, 高鑫, 刘博, 张杰 (2946)
厌氧氨氧化颗粒污泥的长期保藏及快速活性恢复 李冬, 刘名扬, 张杰, 曾辉平 (2957)
市政污泥热解过程中重金属迁移特性及环境效应评估 姜媛媛, 王彦, 段文焱, 左宁, 陈芳媛 (2966)
不同作物农田土壤抗生素抗性基因多样性 黄福义, 周曙仡, 王佳妮, 苏建强, 李虎 (2975)
宁夏养牛场粪污和周边土壤中抗生素及抗生素抗性基因分布特征 张俊华, 陈睿华, 刘吉利, 尚天浩, 沈聪 (2981)
温度和搅拌对牛粪厌氧消化系统抗生素抗性基因变化和微生物群落的影响
许继飞, 张秋萍, 朱天骄, 秦帅, 朱文博, 庞小可, 赵吉 (2992)
小麦秸秆生物质炭施用对不同耕作措施土壤碳含量变化的影响 刘振杰, 李鹏飞, 黄世威, 金相乐, 张阿凤 (3000)
农牧交错带典型区土壤氮磷空间分布特征及其影响因素 张燕江, 王俊鹏, 王瑜, 张兴昌, 甄庆, 李鹏飞 (3010)
汞矿区周边土壤重金属空间分布特征、污染与生态风险评价 王锐, 邓海, 贾中民, 王佳彬, 余飞, 曾琴琴 (3018)
调理剂对磷富集土壤中两种元素交互作用的影响 黄洋, 胡学玉, 曹坤坤, 张敏, 胡晓晓, 王子劲 (3028)
S-烯丙基-L-半胱氨酸缓解水稻种子幼根和幼芽镉胁迫机制 程六龙, 黄永春, 王常荣, 刘仲齐, 黄益宗, 张长波, 王晓丽 (3037)
连续 4 个生长季大气 CO₂ 升高与土壤铅(Pb)污染耦合下刺槐幼苗根际土壤微生物特征
贾夏, Lkhagvajargal Khadkhurel, 赵永华, 张春燕, 张宁静, 高云峰, 王子威 (3046)
嗜热脂肪地芽孢杆菌对聚苯乙烯的降解性能 邢睿智, 赵子强, 赵文琪, 陈志, 陈金凤, 周顺桂 (3056)
冬青和女贞叶表面颗粒物微形态及叶际细菌群落结构 李慧娟, 徐爱玲, 乔凤禄, 蒋敏, 宋琪 (3063)
罗红霉素对大型溞生殖生长及抗氧化系统的影响 张凌玉, 刘建超, 冷阳, 陆光华 (3074)
中国粮食作物产量和木本植物生物量与地表臭氧污染的响应关系 冯兆忠, 彭金龙 (3084)
《环境科学》征订启事(2698) 《环境科学》征稿简则(2712) 信息(3027, 3055, 3073)

不同流域水陆过渡带氮磷有效态的特征对比及环境意义

朱海¹, 袁旭音^{1*}, 叶宏萌², 成瑾¹, 毛志强¹, 韩年¹, 周慧华¹

(1. 河海大学环境学院, 南京 210098; 2. 武夷学院生态与资源工程学院, 武夷山 354300)

摘要: 为了解不同流域水陆过渡带氮磷的分布特征及其环境意义, 对闽江上游、太湖西部和洪泽湖西部这3个研究区土壤及沉积物氮磷的总量和有效态特征进行了研究, 分析了自然环境与人类活动方式对区域环境差异的影响。结果表明, 太湖西部研究区土壤氮磷总量均高于其他两个流域, 洪泽湖西部研究区沉积物氮磷含量均高于土壤。研究区有效态氮磷的分布趋势整体与总氮总磷分布趋势一致, 太湖西部与洪泽湖西部的有效态氮磷占比高于闽江上游流域, 沉积物有效态氮磷占比高于土壤。土壤及沉积物理化性质如pH值、有机质及铁铝氧化物对氮磷元素及其有效态的影响较大, 但不同流域的影响程度存在差异。不同流域的自然环境及人类活动方式明显影响了滨岸带氮磷的分布, 人类活动方式对氮磷形态的影响更为显著。

关键词: 氮磷有效态; 水陆过渡带; 土壤; 沉积物; 流域

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)06-2787-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202009183

Comparison of Available Nitrogen and Phosphorus Characteristics in the Land-Water Transition Zone of Different Watersheds and Their Environmental Significance

ZHU Hai¹, YUAN Xu-yin^{1*}, YE Hong-meng², CHENG Jin¹, MAO Zhi-qiang¹, HAN Nian¹, ZHOU Hui-hua¹

(1. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Ecology and Resource Engineering, Wuyi University, Wuyishan 354300, China)

Abstract: In order to explore the characteristics and environmental significance of available nitrogen and phosphorus in different land-water transition zones, soil and sediment samples from three study areas, including the upstream watershed of Minjiang River (MJU), western watershed of Hongze Lake (HZW), and western watershed of Taihu Lake (THW), were collected and analyzed. The results showed that the contents of total nitrogen and phosphorus in THW were higher than those of other two study areas. The contents of nitrogen and phosphorus in sediments were higher than those in soils of HZW. The distribution trend of available nitrogen and available phosphorus was generally consistent with the distribution trend of total nitrogen and phosphorus. The proportions of available nitrogen and phosphorus in THW and HZW were much higher than those in MJU, and the proportions of available nitrogen and phosphorus in sediments were higher than those in soils. The physiochemical properties such as pH value, organic matter, and iron and aluminum oxides were related to the available nitrogen and phosphorus in the soil and sediment, but correlations between them were complex. The distribution patterns of available nitrogen and phosphorus in the soil and sediments of the land-water transition zone reflect the impacts of the natural environment and human activities, particularly those of the latter.

Key words: available nitrogen and phosphorus; land-water transition zone; soil; sediment; watershed

氮、磷既是土壤中的养分元素, 又是水体中的限制性营养元素, 土壤和沉积物氮磷的分布调节着流域的生产力和生态系统功能^[1]。土壤和沉积物中的氮磷有效态是指能够进入环境并被吸收利用的氮磷, 直接影响植物和微生物的生长状态^[2]。土壤和沉积物有效态氮磷的分布不仅受制于流域氮磷的输入, 还受到它们理化性质的影响。因此, 研究不同流域水陆过渡带土壤和沉积物的有效态氮磷分布是评估流域环境现状的重要内容。

土壤和沉积物有效态氮磷可反映自然因素和人类活动方式对流域环境的影响。Huang等^[3]的研究表明, 有效态氮磷含量及其分布与气候特征和植被覆盖等自然因素存在相关性, 但由于植被生长/凋落对土壤养分需求/供给的不确定性, 土壤有效态氮磷与生源要素的相关性较为复杂。Li等^[4]的研究表

明, 土壤性质、地形条件和植被分布等对区域氮磷分布均有显著贡献, 其中土壤变量贡献值最高。Zhao等^[5]的研究表明, 洱海沉积物表层氮磷主要受人类活动和湖泊生态系统的双重影响, 表层沉积物磷氮的形态组成特征与当地人为活动的输入有关, 内源输入增加有利于有效态氮磷沉积。水陆过渡带(滨岸带)氮磷形态的转化及迁移程度均强于一般的陆地环境, 因此研究水陆过渡带氮磷分布及其环境效应还应考虑流域环境条件。有研究发现水陆间生源要素关系密切, 土壤磷增加将会导致沉积物磷含量升高^[6], 上游滨岸带土壤有效态氮磷的陆源输入是

收稿日期: 2020-09-18; 修订日期: 2020-12-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(41372354, 41601540); 福建省教育厅科技项目(JAT170591)

作者简介: 朱海(1996~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水资源保护, E-mail: Zhuhai1310@163.com

* 通信作者, E-mail: yxy_hjy@hhu.edu.cn

沉积物氮磷的重要来源^[7],可以调节下游的养分输出^[8];土壤有效态氮磷含量与地表径流氮磷形态存在一定的相关性^[9],干湿交替下的流域沉积物氮磷释放与其形态组成有关^[10].

由此可知,流域水陆过渡带的土壤和沉积物的氮磷有密切的联系,然而以往对它们有效态分布和对比的研究较少,二者在流域水陆过渡带的迁移变化及相关关系尚待深入分析,且缺乏大流域尺度氮磷有效态对环境因素的响应研究^[11].因此,本文选定土壤性质和人类扰动有明显差异的闽江上游、太湖西部和洪泽湖西部这3个研究区的水陆过渡带,对土壤和沉积物氮磷的有效态分布进行分析,并探索其相互关系和影响因素,考察流域环境对土壤和沉积物营养元素可利用性的影响,以期对不同流域土壤养分管理和水生态环境保护提供依据.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究区域包括闽江上游流域(东经 118.035° ~ 118.192°,北纬 25.795° ~ 27.929°),太湖西部流域(东经 119.361° ~ 120.130°,北纬 30.276° ~ 31.546°),洪泽湖西部流域(东经 117.689° ~ 118.464°,北纬 33.386° ~ 33.716°),采样点均分布在河流水陆交互带.

本研究3个区域的自然环境及社会经济活动有明显差异.就自然环境而言,闽江上游水系含建溪、富屯溪、沙溪三大支流,年平均气温为 18.5℃,年降水量约 1 700 ~ 1 900 mm,全年无霜期约为 305 d^[12];这一区域多为低山丘陵地貌,山地丘陵占比高于 90%;森林覆盖率达 75%,土壤类型包括红壤、黄红壤和水稻土等,以红壤居多,土壤结构疏松,多成碎屑状^[13].太湖西部研究区主要涵盖溧宜河、合溪和东西苕溪等水系,年平均降水量为 1 100 ~ 1 400 mm,降雨的季节性明显;土壤类型以水稻土为主,成土母质为黄土、冲积土和湖泊沉积物等^[14].洪泽湖研究区年平均降水量约为 927 mm^[15],土壤类型为褐土,土壤母质以石灰岩为主,土壤粘化作用明显,洪泽湖西部的样点主要沿安河、濉河和淮河这3条河流分布,地势平坦且主要为农业区.

闽江上游主要流经南平市和三明市的 21 县区,经济作物如茶园和烟草等分布较广,经济上主要为农业和旅游产业,工矿企业受到限制^[16].太湖西部研究区工农业发达,人口较稠密,农业主要种植方式为水稻和冬小麦轮作,肥料的施用量较大^[14].洪泽湖支流流经泗县、泗洪县和盱眙县等地,以农业为

主要产业,耕地面积广,粮食作物种植比重高,经济作物比重低;洪泽湖西部地区如泗洪县和泗阳县禽畜养殖比重较高^[17].

1.2 样品采集与预处理

本研究工作自 2015 年 4 月至 2017 年 10 月分别于 3 个研究区的河流滨岸带和邻近河流同步采集土壤样品及沉积物样品.采样点根据卫星地图初步布设样点后,现场根据实际交通及地理位置确定.闽江上游共设置了 55 个采样点,分别为建溪 18 个点、富屯溪 20 个点、沙溪 17 个点;太湖西部共设置 102 个采样点,其中东苕溪 26 个点、西苕溪 25 个点、合溪 24 个点和溧宜河 27 个点;洪泽湖西部共设置了 36 个采样点,分别为安河 11 个点、濉河 12 个点和淮河 13 个点(见图 1).

在清除凋落物后,用铲子挖掘 0 ~ 20 cm 表层土壤,每一采样点在 30 m² 内采集 3 处样品组成一个混合样品.在土壤采样点邻近的河流中,以抓斗式采样器采集沉积物,采样深度为 0 ~ 10 cm,同样采集 3 处沉积物组成混合样.采集的样品剔除碎石及植物根块,放置在低温冷藏柜及时运到实验室,部分土样自然风干后过 2 mm 筛用于 pH 值测定,其余样品自然风干后磨碎,过 100 目筛,在纸质样品袋中低温下保存待测.

1.3 样品测定指标与测定方法

土壤及沉积物样品测定指标包括 pH 值、有机质、常量元素(Fe、Al、Ca)、总氮(TN)、总磷(TP)、有效氮和有效磷.有机质采用烧失量法测定^[18],pH 值采用电极法测定(1:5,质量体积比)测定,常量元素采用 PW2424 型 X 射线荧光仪(荷兰 PANalytical 公司)测定,总氮采用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法测定,总磷采用钼锑抗比色法测定^[19],有效氮采用碱解扩散法测定,有效磷采用 Bray I 法测定^[20].

1.4 数据统计及分析方法

利用 Excel 2016 对实验数据进行统计,利用 Origin2017 制图和数据拟合分析,利用 SPSS 24 进行单因素方差分析,利用 Canoco 5.0 进行冗余分析.

2 结果与分析

2.1 不同研究区滨岸带土壤和邻近沉积物的理化性质

滨岸带土壤理化性质测定结果如表 1 所示,闽江上游、太湖西部和洪泽湖西部样品的 pH 值分别为 5.67 ~ 6.10、6.13 ~ 6.40 和 8.04 ~ 8.09.3 个研究区土壤有机质含量大小为太湖西部 > 洪泽湖西部 > 闽江上游. Al₂O₃ 占比大小为太湖西部 > 洪泽湖

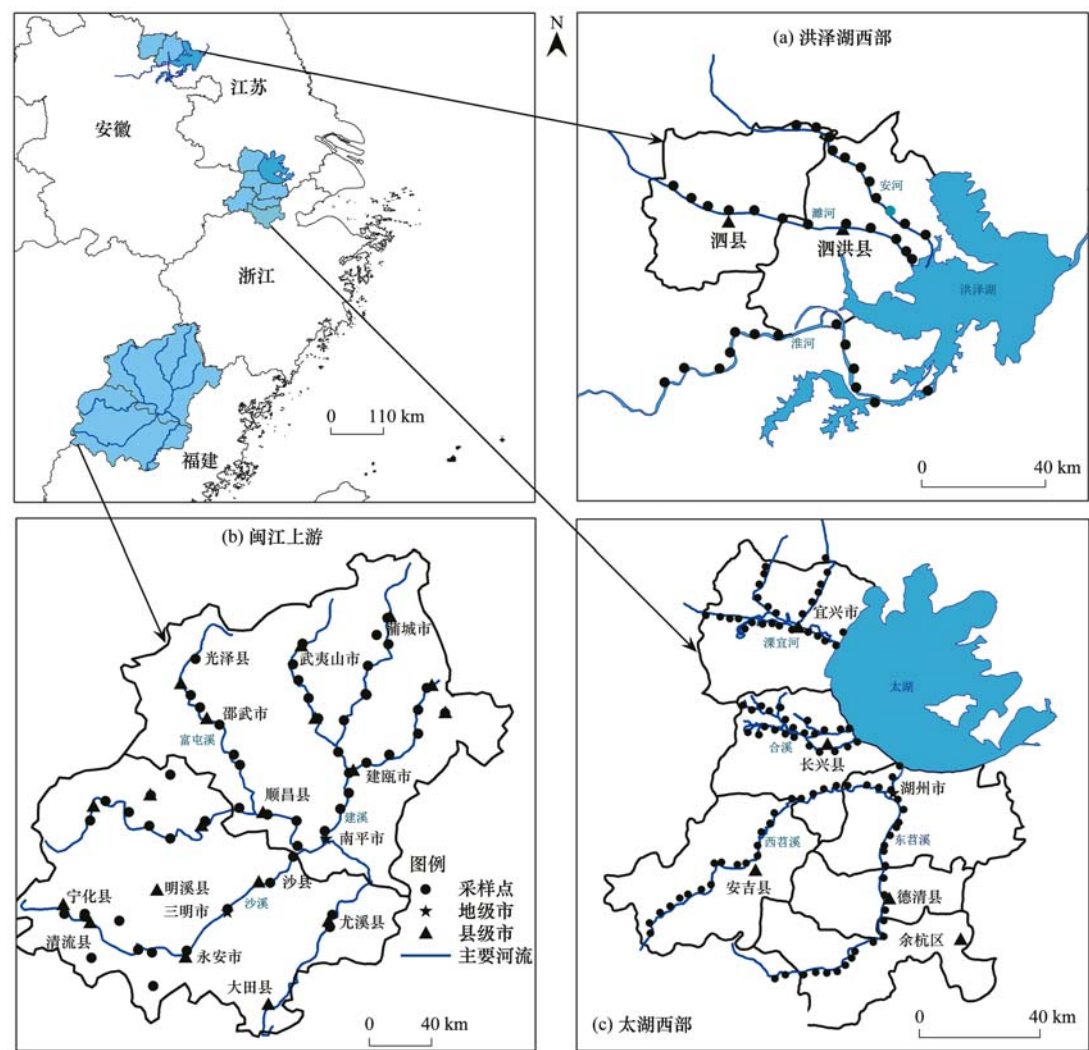


图1 研究区位置及样品分布示意
Fig. 1 Study area and sampling site distribution

表1 闽江上游、太湖西部和洪泽湖西部研究区的土壤及沉积物理化性质¹⁾
Table 1 Physicochemical properties of soil and sediment in MJU, THW, and HZW

项目	研究区域	Al ₂ O ₃ /%	Fe ₂ O ₃ /%	CaO/%	有机质/%	pH
土壤	闽江上游	20.3 ± 2.31b	6.68 ± 1.50a	0.41 ± 0.10c	1.13 ± 0.44b	5.83 ± 0.62c
	太湖西部	23.0 ± 2.21a	5.28 ± 1.58b	1.30 ± 1.42b	2.38 ± 1.09a	6.29 ± 0.96b
	洪泽湖西部	20.5 ± 3.57b	5.78 ± 0.92b	7.68 ± 1.86a	1.44 ± 0.61b	8.06 ± 0.14a
沉积物	闽江上游	24.1 ± 1.60a	5.77 ± 1.30b	0.50 ± 0.50c	0.92 ± 0.37c	5.73 ± 0.51c
	太湖西部	23.8 ± 1.51a	6.72 ± 0.87a	2.53 ± 2.66b	2.19 ± 0.65a	6.98 ± 0.61b
	洪泽湖西部	18.5 ± 3.24b	5.90 ± 0.86b	8.29 ± 1.99a	1.41 ± 0.68b	8.08 ± 0.22a

1) 不同小写字母表示显著性差异(显著性差异水平为0.05)

西部>闽江上游,闽江上游和太湖西部流域土壤 Al₂O₃ 占比均低于对应的沉积物,洪泽湖则相反. Fe₂O₃ 含量为闽江上游>洪泽湖西部>太湖西部. 洪泽湖西部土壤 CaO 含量显著高于闽江上游及太湖西部土壤.

3 个研究区沉积物 pH 值分别为 5.56~5.98、6.97~7.00 和 8.00~8.14,其 pH 值及有机质的大小关系与土壤相似. 沉积物 Al₂O₃ 占比为闽江上游>太湖西部>洪泽湖西部. 洪泽湖西部研究区

Al₂O₃ 占比低于太湖及闽江流域,且差异性较显著. 沉积物 Fe₂O₃ 含量为太湖西部>洪泽湖西部>闽江上游,这与土壤稍有不同. 洪泽湖西部 CaO 含量显著高于太湖西部及闽江上游流域,其大小顺序与土壤相似.

2.2 不同研究区土壤和沉积物中总氮与总磷含量分布

3 个研究区土壤和沉积物中总氮与总磷含量如图 2 所示. 闽江上游、太湖西部和洪泽湖西部土壤

的总氮含量均值分别为 1 048、1 410 和 1 092 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,土壤的总磷含量依次为 736、1 002 和 655 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,土壤总氮和总磷含量均为太湖西部流域最高,3 个流域整体总氮总磷含量均属于中等程度空间变异^[21].

闽江上游、太湖西部及洪泽湖西部沉积物总氮含量分别为 779、1 075 和 1 132 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,闽江、太湖

和洪泽湖沉积物总磷含量分别为 524、792 和 687 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.洪泽湖沉积物总氮含量较高,太湖沉积物总磷含量较高.太湖西部和闽江上游均为土壤氮磷含量高于沉积物氮磷,而洪泽湖西部则为沉积物氮磷含量高于土壤氮磷,表明洪泽湖西部沉积物中外源输入和细粒氮磷含量显著高于太湖和闽江研究区^[22].

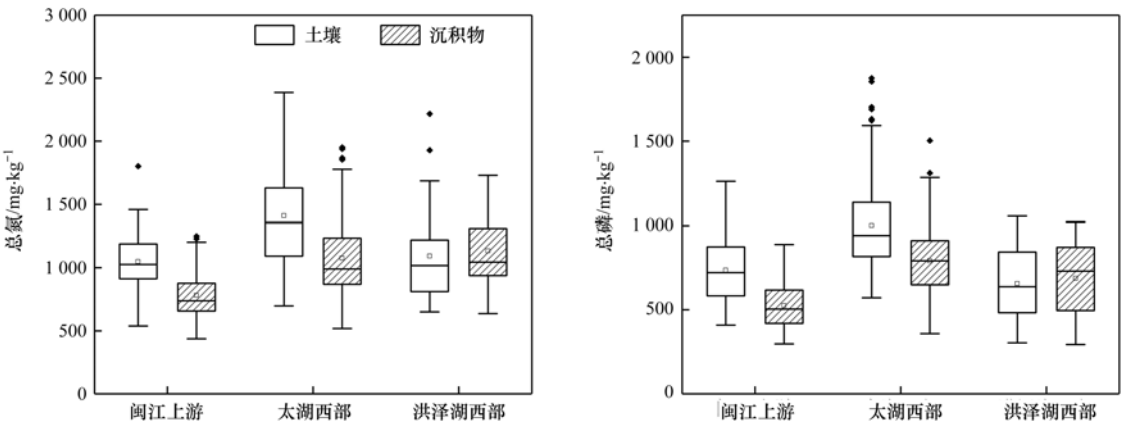


图 2 闽江上游、太湖西部和洪泽湖西部研究区土壤及沉积物总氮和总磷含量

Fig. 2 Total nitrogen and total phosphorus content in soil and sediment samples from MJU, THW, and HZW

2.3 不同研究区土壤和沉积物中有效氮与有效磷含量

3 个研究区土壤和沉积物中有效氮与有效磷含量如图 3 所示.从中可知,这些土壤和沉积物有效氮和有效磷含量的变化范围及差异明显大于总氮和总磷.

闽江上游、太湖西部和洪泽湖西部土壤有效氮含量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)分别为:13.0(6.21~24.9)、71.1(34.9~142)和 37.6(18.8~58.2);土壤有效磷含量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)分别为:2.63(1.08~5.75)、23.8(12.5~46.9)和 15.7(5.85~19.5).土壤有效氮和有效磷均值大小均为太湖研究区>洪泽湖研究区>

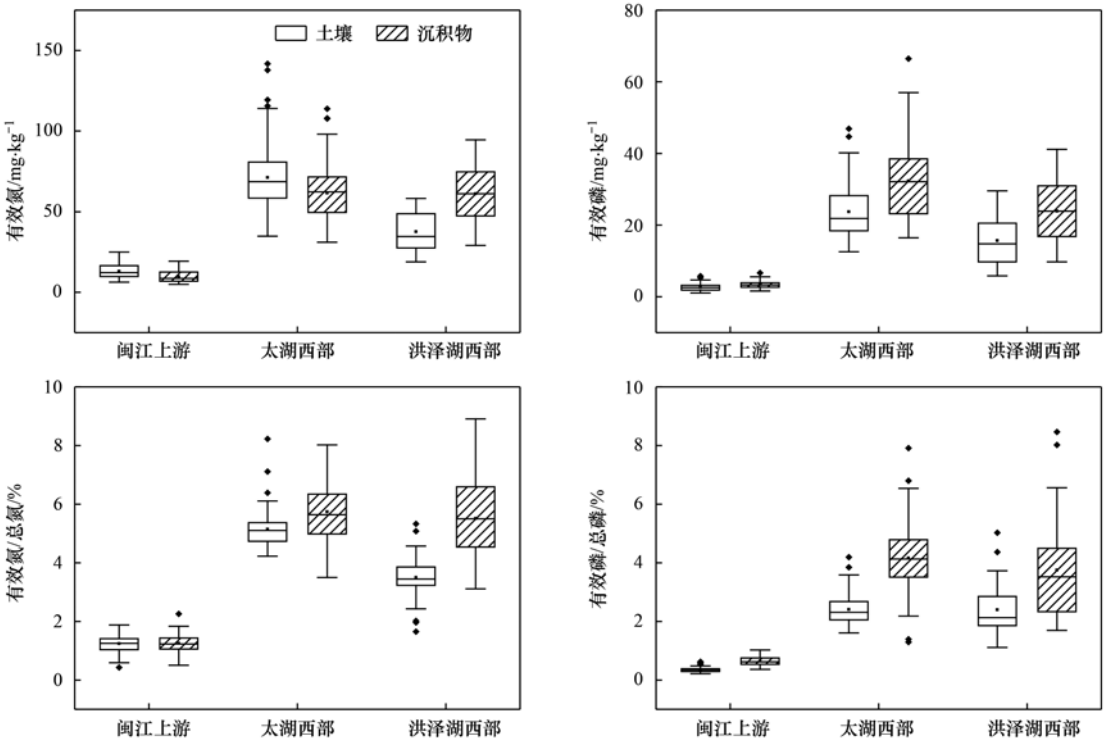


图 3 研究区土壤及沉积物有效氮、有效磷含量分布及占比

Fig. 3 Distribution and proportions of available nitrogen and phosphorus in soils and sediments in the study area

闽江研究区. 单因素方差分析结果表明, 闽江上游流域土壤有效氮和有效磷与太湖西部和洪泽湖西部样品的差异显著 ($P < 0.05$), 太湖与洪泽湖样品的差异性相对较小.

闽江上游、太湖西部和洪泽湖西部沉积物有效氮含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 为: 9.68 (4.81 ~ 19.2)、61.5 (31.09 ~ 114) 和 61.2 (29.04 ~ 94.58); 有效磷含量为: 3.35 (1.60 ~ 6.66)、32.28 (16.5 ~ 66.5) 和 23.90 (9.77 ~ 41.1). 闽江上游流域和太湖西部流域土壤有效氮高于沉积物有效氮, 而洪泽湖与之相反, 洪泽湖西部沉积物有效磷含量均高于土壤有效磷.

闽江上游、太湖西部和洪泽湖西部研究区土壤和沉积物有效态氮磷占比不同. 闽江上游、太湖西部和洪泽湖西部研究区土壤有效氮占比分别为: 1.24% (0.426 ~ 1.88%)、5.14% (4.24 ~ 8.23%) 和 3.50% (1.65 ~ 5.33%); 沉积物有效氮占比分别为: 1.25% (0.501 ~ 2.25%)、5.74% (3.49 ~ 8.02%) 和 5.52% (3.11 ~ 8.90%). 闽江上游、太湖西部和洪泽湖西部研究区土壤有效磷占比分别为: 0.355% (0.213 ~ 0.626%)、2.41% (1.60 ~ 4.20%) 和 2.40% (1.11 ~ 5.02%); 沉积物有效磷占比分别为: 0.648% (0.365 ~ 1.02%)、4.16% (1.29 ~ 7.91%) 和 3.75% (1.69 ~ 8.47%). 土壤和沉积物有效态氮磷占比均为太湖研究区 > 洪泽湖研究区 > 闽江上游研究区, 有效氮占比高于有效磷占比. 太湖西部和洪泽湖西部流域沉积物有效态氮磷占比均高于土壤占比, 表明沉积物中氮磷生物有效性高于土壤.

3 讨论

3.1 不同流域土壤与沉积物性质对氮磷及其有效态分布的影响

为探究 3 个研究区土壤和沉积物性质对总氮、总磷、有效氮和有效磷的影响, 对这些参数进行冗余分析, 结果如图 4 所示.

土壤样品冗余分析表明, 3 个研究区 pH 值与有效态氮磷的相关性存在差异, pH 值对闽江研究区氮磷影响较大, 与太湖和洪泽湖研究区氮磷相关性较小, 而闽江土壤整体呈酸性, 太湖和洪泽湖地区土壤中性偏碱性, 这表明在酸性条件下土壤有效态氮磷对酸碱度变化更为敏感. 土壤有机质总量为太湖研究区最高, 但洪泽湖研究区有机质与有效态氮磷相关性明显更高, 这可能与洪泽湖研究区内滨岸带水产养殖分布密集有关, 水产养殖会促进土壤有机质和无机盐间的转化^[23], 并通过改变浮游生物量影

响有效态氮磷的产生和吸收^[24]. 闽江研究区土壤有机质总量偏低且与氮磷有效态相关性较小. 闽江研究区植被以杉木林和毛竹林为主, 而杉木林凋落物有机质难于分解, 毛竹林凋落物虽易分解但对有效磷存在抑制作用^[25].

与铁铝氧化物等金属氧化物结合转化为难溶性磷酸盐是有效磷固存的重要方式, 冗余分析表明, 3 个研究区土壤有效磷与铁铝氧化物均为正相关, 但是影响程度存在差异. 其中铁铝氧化物与闽江有效态磷相关性最强, 这表明温暖潮湿地区铁、铝原子更易形成对磷吸附性很强的铁铝氧化物晶体^[26], 因为闽江研究区气候相对温暖潮湿且阔叶林植被提高了土壤水源涵养能力. 太湖研究区金属氧化物对有效态氮磷的影响程度高于洪泽湖, 采样时发现洪泽湖研究区除刺槐、泡桐和白杨等零星树木外, 耕地作物分布广泛, 且施肥量偏大, 农业活动周期性氮磷养分输入影响氮磷与金属矿物的相关性^[27]. 洪泽湖研究区土壤氧化钙含量很高且与有效磷含量呈现正相关, 而氧化钙与太湖和闽江有效磷呈负相关, 这应当与洪泽湖地区碱性土壤母质有关. 除闽江研究区外, 金属氧化物对土壤有效氮的影响程度均较低, 一方面氮素相对于磷素稳定性较差, 另一方面反映了人类活动强度对有效氮的干扰, 除农业面源输入氮素外, 太湖研究区城市扩张导致水陆交互带植被覆盖显著降低, 一定程度上亦会影响氮素周转^[28].

各流域沉积物冗余分析表明, 金属氧化物对沉积物氮磷及其有效态影响程度小于对土壤氮磷的影响. 有研究表明, 若沉积物富含铁铝氧化物, 有效态养分释放可能会因吸附和絮凝作用而受到抑制, 铁氧化物颗粒可以吸收可溶性磷并沉淀至沉积物中^[29], 但本研究中铁铝氧化物与沉积物有效态氮磷为正相关或相关性较弱, 表明铁铝氧化物对有效态氮磷的影响受到其他因素干扰. 一方面水-沉积物界面氧化还原电位、pH 值、盐度和金属离子影响氮磷沉降^[30], NO_3^- 还原会引起 Fe^{2+} 氧化, 从而增加沉积物中 PO_4^{3-} 的固定, SO_4^{2-} 浓度过高会增加水体中的 PO_4^{3-} 及 NH_4^+ ^[31]. 另一方面太湖及洪泽湖流域大量船只通行造成水流扰动及不同种类经济作物生长也会影响有效态氮磷的吸附及释放.

由图 4 中箭头方向可知, 太湖及洪泽湖沉积物中有机质与有效态氮磷均为正相关, 而在闽江沉积物中为负相关. 闽江沉积物中总有机质含量较低, 分解低碳养分残留物可持续供应无机磷, 而大分子养分残留与矿化释放磷较少^[32], 沉积物中有机质可与无机质形成复合胶体, 并与腐殖质结合, 为磷酸盐提供吸附点位, 并且有机质释放的氢离子促使铁和铝矿物表面

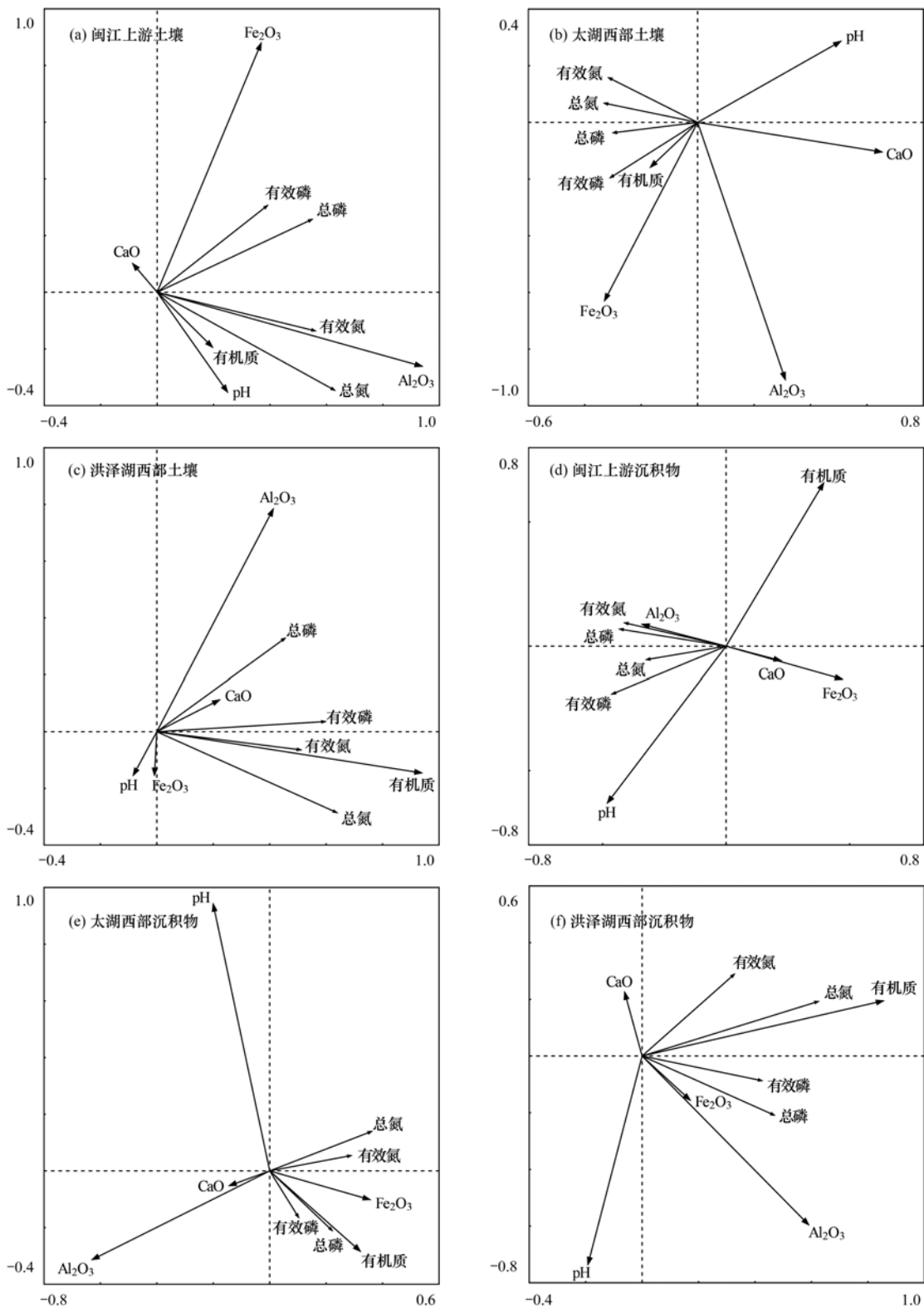


图 4 研究区氮磷元素与理化性质的冗余分析

Fig. 4 Redundant analysis of nitrogen and phosphorus and physicochemical properties in the study area

质子化,可提高金属矿物对磷酸盐的吸附性^[33].

3.2 土壤氮磷有效态与沉积物氮磷有效态的关联性分析

为探究滨岸带土壤中有效态氮磷对沉积物中有效态氮磷的影响,分别对闽江上游、太湖西部和洪泽湖西部流域土壤有效态氮磷及对应的沉积物指标

进行线性拟合分析,结果如图 5 所示.

结果表明,不同流域土壤有效态氮磷与沉积物氮磷含量均具有较强的正相关性.有效氮拟合直线斜率为:洪泽湖西部(1.23) > 太湖西部(0.79) > 闽江上游流域(0.75);有效磷拟合直线斜率为:洪泽湖西部(1.23) > 太湖西部(1.22) > 闽江上游流域

(0.76). 同一流域沉积物有效氮磷含量随土壤有效氮、磷增长而增加的趋势近似, 增长趋势为洪泽湖 > 太湖 > 闽江. 洪泽湖西部和太湖西部水陆交互带存在大量农田, 土壤有效氮磷含量较高, 从而增加了沉积物有效氮磷富集风险^[34]. 闽江上游流域土壤有效磷对沉积物有效磷和有效氮相关性效果较差, 闽江上游林地植被凋落物分解速率相对较低, 导致有效磷浓度整体较低, 且闽江上游流速较快, 沉积物氮

磷易受水力扰动再悬浮^[11]. 闽江和太湖流域土壤有效氮含量均高于沉积物含量, 沉积物有效态氮磷与土壤有效态氮磷相关性极强, 表明沉积物中有效态氮磷主要来源于土壤输入, 有效态氮磷在土壤和沉积物介质间发生了迁移作用. 而洪泽湖研究区土壤有效态含量低于沉积物含量, 由于近岸农作物和水生植物吸收了更多的有效态氮磷, 且有机质转化速率较高.

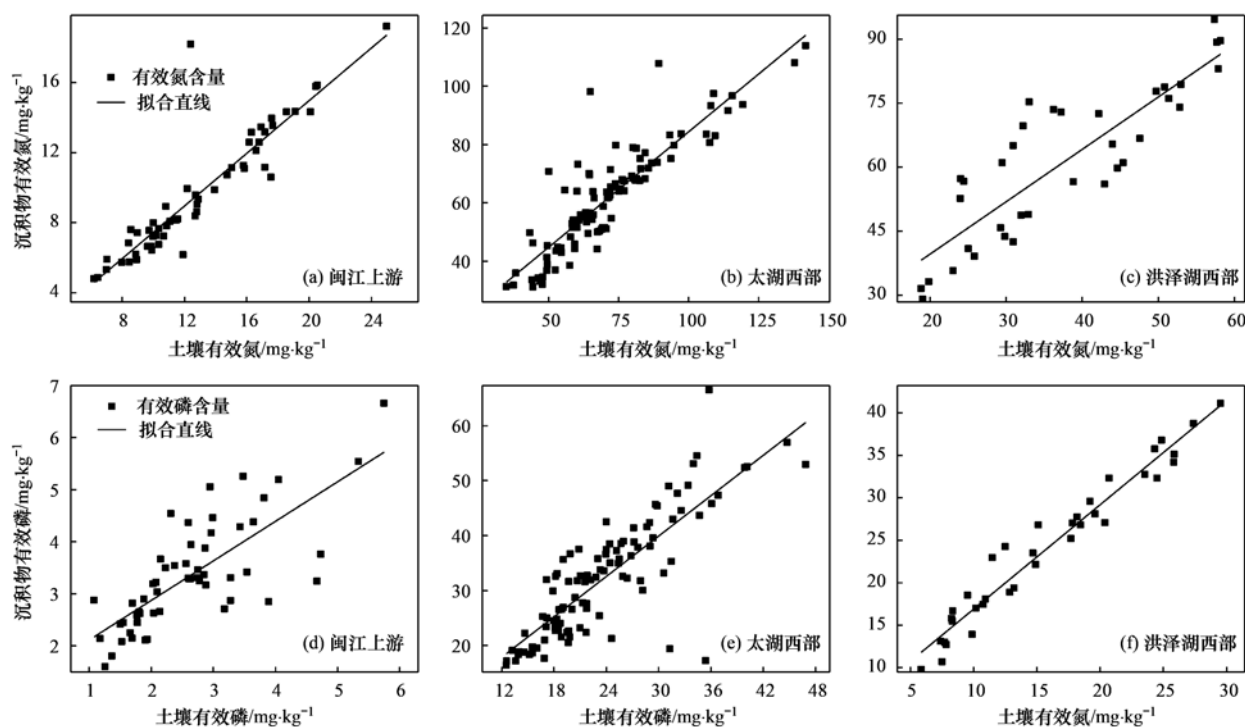


图5 研究区土壤及沉积物有效氮和有效磷的关联性分析

Fig. 5 Correlation analysis of available nitrogen and phosphorus in soil and sediments in the study area

3.3 流域环境对水陆过渡带氮磷有效态的影响分析

3 个研究区水陆过渡带有效态氮磷总量均为太湖西部 > 洪泽湖西部 > 闽江上游, 其中闽江流域有效态氮磷总量显著较低, 这应当是流域自然环境和社会环境共同作用的结果. 3 个研究区气候条件、水文条件、植被种类等自然环境存在较大差异. 3 个研究区中, 闽江研究区水陆过渡带土壤质地疏松, 砂粒含量较高, 因而受到的水力侵蚀程度最大, 有效态氮磷易溶于水而流失^[35], 此外, 闽江研究区主要植被毛竹林和杉木林产生的凋落物返回土壤的有效态养分含量较耕地作物偏低. 本研究表明, 土壤和沉积物性质对氮磷有效态的影响程度以及土壤和沉积物有效态氮磷间的关联性存在较大差异, 即在不同的自然条件下, 环境因子对人类活动的响应及其对氮磷有效态的影响不尽相同.

太湖西部氮磷和有效态氮磷含量均高于其他两个流域. 太湖西部流域人口密度高、经济较为发达.

水陆过渡带生产生活累积排放的氮磷总量相对较高, 土壤和沉积物性质与有效态氮磷的相关性偏低. 闽江上游研究区植被茂密, 居民住宅距离河岸较远, 且较为分散, 相应的有效态氮磷占比均较低. 这表明水陆过渡带氮磷有效态分布与人类活动强度变化趋于一致^[36]. 闽江上游研究区土壤有效态氮磷与土壤性质的相关性相对较高, 反映了水陆过渡带在人为干扰较小的情况下土壤性质显著影响有效态氮磷分布.

洪泽湖西部流域水陆过渡带多有芦苇和水花生等植物, 河岸带宽窄不一, 以农田及草地为主, 林地较少, 多处存在鱼类和螃蟹等水产养殖以及禽畜养殖, 施肥等人类活动直接影响水陆过渡带生态环境, 促进表层沉积物中氮磷的富集^[37], 同时降低了有效态氮磷与土壤性质的相关性, 增强了土壤有效态氮磷与沉积物间的关联性, 反映出近岸农业生产对水陆过渡带氮磷周转影响极大.

太湖流域苕溪支流作为水源保护地区, 近年来加大了水土保持和水污染治理的力度, 水质整体较

好^[38],对应于其上游沉积物氮磷含量未见显著提高. 闽江上游主要流经地区均为人类活动强度较弱的地区^[39],闽江上游流域水陆过渡带的有效氮、磷含量均显著低于其他两个流域,这表明整体生态环境特点与水陆过渡带有效态氮磷含量有关联.

此外,3个研究区滨岸带沉积物有效态氮磷占比均高于邻近土壤,这体现了水陆过渡带土壤养分向水体及沉积物中的迁移,有效态氮磷稳定性相对较低,因而与土壤相比,沉积物中富集氮磷物质更易成为水体的潜在污染源^[40].

4 结论

(1)太湖西部研究区土壤氮磷总量均高于其他两个流域. 洪泽湖土壤总氮总磷分布与闽江上游差异性较小,洪泽湖西部沉积物氮磷含量均高于土壤. 水陆过渡带物质有效态氮磷分布趋势整体与总氮总磷分布趋势一致. 太湖西部和洪泽湖西部有效态氮磷占比远高于闽江上游流域,沉积物有效态氮磷占比高于土壤.

(2)3个研究区土壤理化性质如pH值、有机质及金属氧化物等对土壤氮磷元素及其有效态均有重要影响,但影响程度不尽相同. 闽江土壤中铁铝氧化物与氮磷元素相关性更强,而洪泽湖和太湖研究区有效态氮磷与土壤性质相关性较低.

(3)沉积物有效态氮磷含量和水陆过渡带土壤密切相关,二者的分布趋势大体一致,可见滨岸带中土壤有效态氮磷含量分布将对附近水体水质产生显著影响.

(4)流域环境条件对水陆过渡带氮磷分布具有较大的影响,氮磷分布与人类活动方式密切相关,外源物质输入会导致水陆过渡带氮磷总量及其有效态的大量增加,在不同的自然条件下,环境因子对人类活动的响应及其对氮磷有效态的影响差异较大.

参考文献:

- [1] Peñuelas J, Poulter B, Sardans J, *et al.* Human-induced nitrogen-phosphorus imbalances alter natural and managed ecosystems across the globe[J]. *Nature Communications*, 2013, **4**, doi: 10.1038/ncomms3934.
- [2] Vicca S, Stocker B D, Reed S, *et al.* Using research networks to create the comprehensive datasets needed to assess nutrient availability as a key determinant of terrestrial carbon cycling[J]. *Environmental Research Letters*, 2018, **13**(12), doi: 10.1088/1748-9326/aaeae7.
- [3] Huang C B, Zeng Y X, Wang L C, *et al.* Responses of soil nutrients to vegetation restoration in China [J]. *Regional Environmental Change*, 2020, **20**(3), doi: 10.1007/s10113-020-01679-6.
- [4] Li Q X, Wang X G, Jiang M X, *et al.* How environmental and vegetation factors affect spatial patterns of soil carbon and nitrogen in a subtropical mixed forest in Central China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2017, **17**(9): 2296-2304.
- [5] Zhao H C, Zhao H X, Wang S R, *et al.* Coupling characteristics and environmental significance of nitrogen, phosphorus and organic carbon in the sediments of Erhai Lake[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, **27**(16): 19901-19914.
- [6] Owens P N. Soil erosion and sediment dynamics in the Anthropocene: a review of human impacts during a period of rapid global environmental change [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2020, **20**(12): 4115-4143.
- [7] 孙婷婷, 唐涛, 申恒伦, 等. 香溪河流域不同介质中碳、氮、磷的分布特征及相关性研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2015, **24**(5): 853-859.
- [8] Williams M R, Livingston S J, Penn C J, *et al.* Controls of event-based nutrient transport within nested headwater agricultural watersheds of the western Lake Erie basin [J]. *Journal of Hydrology*, 2018, **559**: 749-761.
- [9] 韩宁, 郝卓, 徐亚娟, 等. 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[J]. *环境科学*, 2016, **37**(2): 534-541.
- [10] 陈成龙, 高明, 木志坚, 等. 三峡库区小流域不同土地利用类型“土壤-水体”氮磷含量特征及其相互关系[J]. *环境科学*, 2017, **38**(8): 3254-3263.
- [11] 刘伟, 周斌, 王丕波, 等. 沉积物再悬浮氮磷释放的机制与影响因素[J]. *科学技术与工程*, 2020, **20**(4): 1311-1318.
- [12] 郝振帮, 林丽丽, 刘健, 等. 南方典型毛竹经营区土壤肥力及其空间特征——以福建省顺昌县毛竹林经营区为例[J]. *东北林业大学学报*, 2020, **48**(3): 79-83, 115.
- [13] 徐健, 袁旭音, 叶宏萌, 等. 闽江上游溪流沉积物有机磷空间分布及其环境意义分析[J]. *环境科学*, 2019, **40**(5): 2186-2193.
- [14] 袁平, 张黎明, 乔婷, 等. 基于1:5万土壤数据库的太湖地区水稻土全氮含量动态变化研究[J]. *土壤学报*, 2019, **56**(6): 1515-1525.

- [15] 季淮, 韩建刚, 李萍萍, 等. 洪泽湖湿地植被类型对土壤有机碳粒径分布及微生物群落结构特征的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2021, **45**(1): 141-150.
Ji H, Han J G, Li P P, *et al.* Effects of different vegetation types on soil organic carbon particle size distribution and microbial community structure in Hungze Lake Wetland [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2021, **45**(1): 141-150.
- [16] 林文俊, 刘沁月, 张俊炎, 等. 闽北山地丘陵针阔混交林持水效果研究[J]. 安徽农学通报, 2015, **21**(23): 73-74, 89.
Lin W J, Liu Q Y, Zhang J Y, *et al.* Study on the effect of water retention in mixed forest of mountain and hill regions in northern Fujian [J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2015, **21**(23): 73-74, 89.
- [17] 徐勇峰, 陈子鹏, 吴翼, 等. 环洪泽湖区域农业面源污染特征及控制对策[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2016, **40**(2): 1-8.
Xu Y F, Chen Z P, Wu Y, *et al.* Advances on agricultural non-point source pollution and the control in regions around Hung-tse Lake [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2016, **40**(2): 1-8.
- [18] Heiri O, Lotter A F, Lemcke G. Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: reproducibility and comparability of results [J]. Journal of Paleolimnology, 2001, **25**(1): 101-110.
- [19] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [20] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [21] 贾振宇. 黄泛区土壤氮磷空间变异特征及影响因素分析——以周口为例[D]. 郑州: 河南大学, 2016.
Jia Z Y. Spatial variation characteristics of soil N, P and the impact factors in flooded area of the Yellow River: a case study in Zhoukou City [D]. Zhengzhou: Henan University, 2016.
- [22] Némery J, Gratiot N, Doan P T K, *et al.* Carbon, nitrogen, phosphorus, and sediment sources and retention in a small eutrophic tropical reservoir [J]. Aquatic Sciences, 2016, **78**(1): 171-189.
- [23] Guong V T, Hoa N M. Aquaculture and agricultural production in the Mekong delta and its effects on nutrient pollution of soil and water [A]. In: Renaud F G, Kuenzer C (Eds.). The Mekong Delta System: Interdisciplinary Analyses of a River Delta [M]. Dordrecht: Springer, 2012. 363-393.
- [24] Yang P, Yang H, Lai D Y F, *et al.* Production and uptake of dissolved carbon, nitrogen, and phosphorus in overlying water of aquaculture shrimp ponds in subtropical estuaries, China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, **26**(21): 21565-21578.
- [25] 孙浩, 刘晓勇, 何齐发, 等. 修河上游流域4种森林类型的水源涵养功能评价[J]. 水土保持研究, 2017, **24**(4): 337-341, 348.
Sun H, Liu X Y, He Q F, *et al.* Assessments of four types of forests on soil water conservation functions in the upper reaches of Xiu River [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017, **24**(4): 337-341, 348.
- [26] Harris M A. Quenching of phosphorus-fixation in a disturbed Caribbean bauxite mine overburden using root exudates: implications for acidic tropical soils [A]. In: Harris M A (Ed.). Geobiotechnological Solutions to Anthropogenic Disturbances: A Caribbean Perspective [M]. Cham: Springer, 2016. 369-392.
- [27] 付为国, 吴翼, 李萍萍, 等. 洪泽湖入湖河口滩涂植被分异特征[J]. 湿地科学, 2015, **13**(5): 569-576.
Fu W G, Wu Y, Li P P, *et al.* Different characteristics of vegetation in estuary beaches of Hongze Lake [J]. Wetland Science, 2015, **13**(5): 569-576.
- [28] 仇宽彪, 张玉刚, 王同顺. 基于NDVI的太湖流域片植被覆盖变化及其驱动力分析[J]. 中国水土保持科学, 2019, **17**(6): 119-125.
Chou K B, Zhang Y G, Wang T S. Analysis on the dynamics of the vegetation coverage and the drivers in Taihu Basin via NDVI [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2019, **17**(6): 119-125.
- [29] 郝文超, 王从锋, 杨正健, 等. 氧化还原循环过程中沉积物磷的形态及迁移转化规律[J]. 环境科学, 2019, **40**(2): 640-648.
Hao W C, Wang C F, Yang Z J, *et al.* Speciation and transformation of phosphorus in sediments during the redox cycle [J]. Environmental Science, 2019, **40**(2): 640-648.
- [30] Laakso J, Uusitalo R, Yli-Halla M. Phosphorus speciation in agricultural catchment soils and in fresh and dried sediments of five constructed wetlands [J]. Geoderma, 2016, **271**: 18-26.
- [31] Yang Y G, He Z L, Lin Y, *et al.* Phosphorus availability in sediments from a tidal river receiving runoff water from agricultural fields [J]. Agricultural Water Management, 2010, **97**(11): 1722-1730.
- [32] Marschner P, Hatam Z, Cavagnaro T R. Soil respiration, microbial biomass and nutrient availability after the second amendment are influenced by legacy effects of prior residue addition [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2015, **88**: 169-177.
- [33] 龚佳健, 倪兆奎, 肖尚斌, 等. 覆盖材料对洱海不同湖区沉积物溶解态有机磷和无机磷释放影响及差异[J]. 环境科学, 2019, **40**(4): 1826-1833.
Gong J J, Ni Z K, Xiao S B, *et al.* Effects and differences of the release of dissolved organic and inorganic phosphorus in different sediments covered by different materials of Erhai Lake [J]. Environmental Science, 2019, **40**(4): 1826-1833.
- [34] Li W J, Lin S, Wang W C, *et al.* Assessment of nutrient and heavy metal contamination in surface sediments of the Xiashan stream, eastern Guangdong Province, China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, **27**(21): 25908-25924.
- [35] Wang L Y, Yu X F, Xue Z S, *et al.* Distribution characteristics of iron, carbon, nitrogen and phosphorus in the surface soils of different land use types near Xingkai Lake [J]. Journal of Soils and Sediments, 2019, **19**(1): 275-285.
- [36] Goyette J O, Bennett E M, Maranger R. Differential influence of landscape features and climate on nitrogen and phosphorus transport throughout the watershed [J]. Biogeochemistry, 2019, **142**(1): 155-174.
- [37] Zhao H C, Zhang L, Wang S R, *et al.* Features and influencing factors of nitrogen and phosphorus diffusive fluxes at the sediment-water interface of Erhai Lake [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, **25**(2): 1933-1942.
- [38] 陈晓燕. 主体功能区视角下苕溪流域生态保护与补偿研究 [D]. 杭州: 浙江农林大学, 2015.
Chen X Y. Based on the perspective of development priority zones Tiaoxi River basin ecological compensation mechanism research [D]. Hangzhou: Zhejiang A&F University, 2015.
- [39] 李琪, 邓家耀. 浅析闽北山区综合开发存在的问题与对策 [J]. 武夷学院学报, 2018, **37**(2): 51-54.
Li Q, Deng J Y. Problems and countermeasures of comprehensive development of north Fujian mountainous area [J]. Journal of Wuyi University, 2018, **37**(2): 51-54.
- [40] Meng X, Zhang W Q, Shan B Q. Distribution of nitrogen and phosphorus and estimation of nutrient fluxes in the water and sediments of Liangzi Lake, China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, **27**(7): 7096-7104.

CONTENTS

Advances and Challenges in Biosafety Research for Urban Environments	SU Jian-qiang, AN Xin-li, HU An-yi, <i>et al.</i> (2565)
Key Problems and Novel Strategy of Controlling Emerging Trace Organic Contaminants During Municipal Wastewater Reclamation	WANG Wen-long, WU Qian-yuan, DU Ye, <i>et al.</i> (2573)
Mechanisms Summary and Potential Analysis of EPS as a Flame Retardant	HAO Xiao-di, ZHAO Zi-cheng, LI Ji, <i>et al.</i> (2583)
Concentrations, Sources, and Health Risks of PM _{2.5} Carrier Metals in the Beijing Urban Area and Suburbs	ZHOU An-qi, LIU Jian-wei, ZHOU Xu, <i>et al.</i> (2595)
MAIAC AOD and PM _{2.5} Mass Concentrations Characteristics and Correlation Analysis in Beijing-Tianjin-Hebei and Surrounding Areas	JIN Jian-nan, YANG Xing-chuan, YAN Xing, <i>et al.</i> (2604)
Formation and Prevention of Secondary Nitrate in PM _{2.5} in Tianjin	XIAO Zhi-mei, WU Ting, WEI Yu-ting, <i>et al.</i> (2616)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Nitro Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in PM _{2.5} of Nanjing, China	FU Yin-yin, WEN Hao-zhe, WANG Xiang-hua, <i>et al.</i> (2626)
Spatio-temporal Patterns and Potential Sources of Absorbing Aerosols in the Fenwei Plain	LIU Min-xia, LI Liang, YU Rui-xin, <i>et al.</i> (2634)
Sources Apportionment of Oxygenated Volatile Organic Compounds (OVOCs) in a Typical Southwestern Region in China During Summer	CHEN Mu-lan, WANG Sai-nan, CHEN Tian-shu, <i>et al.</i> (2648)
Aqueous-phase Oxidation of Dissolved Organic Matter (DOM) from Extracts of Ambient Aerosols	TAO Ye, CHEN Yan-tong, LI Nan-wang, <i>et al.</i> (2659)
Changes and Potential Sources of Atmospheric Black Carbon Concentration in Shanghai over the Past 40 Years Based on MERRA-2 Reanalysis Data	CAO Shan-shan, DUAN Yu-sen, GAO Chan-chan, <i>et al.</i> (2668)
Spatio-Temporal Evolution Characteristics and Source Apportionment of O ₃ and NO ₂ in Shijiazhuang	WANG Shuai, NIE Sai-sai, FENG Ya-ping, <i>et al.</i> (2679)
Applying Photochemical Indicators to Analyze Ozone Sensitivity in Handan	NIU Yuan, CHENG Shui-yuan, OU Sheng-ju, <i>et al.</i> (2691)
Spatiotemporal Distribution of Aerosol Optical Depth Based on Landsat Data in the Hinterland of the Guanzhong Basin and Its Relationship with Urbanization	ZHENG Yu-rong, WANG Xu-hong, ZHANG Xiu, <i>et al.</i> (2699)
Multidimensional Verification of Anthropogenic VOCs Emissions Inventory Through Satellite Retrievals and Ground Observations	WANG Yue, WEI Wei, REN Yun-ting, <i>et al.</i> (2713)
Estimation of the SOA Formation Potential of the National Trunk Highway in Central Plains Urban Agglomeration	WANG Na-ping, LI Hai-ping, ZHANG Fan (2721)
Economic Benefit of Air Quality Improvement During Implementation of the Air Pollution Prevention and Control Action Plan in Beijing	LU Ya-ling, FAN Zhao-yang, JIANG Hong-qiang, <i>et al.</i> (2730)
Emission Performance Quantitative Evaluation and Application of Industrial Air Pollution Sources	LI Ting-kun, FENG Yin-chang, WU Jian-hui, <i>et al.</i> (2740)
Screening and Sequencing High-risk Antibiotics in China's Water Environment Based on Ecological Risks	ZHOU Li, LIU Shan, GUO Jia-hua, <i>et al.</i> (2748)
China's Reuse Water Development and Utilization Potential Based on the RDA-REM Model	ZHENG Jin-tao, MA Tao, LIU Jiu-fu, <i>et al.</i> (2758)
Characteristic Analysis of SWAT Model Parameter Values Based on Assessment of Model Research Quality	RONG Yi, QIN Cheng-xin, DU Peng-fei, <i>et al.</i> (2769)
Sensitivity Analysis of Boundary Load Reduction in a Large Shallow Lake Water Quality Model	WANG Ya-ning, LI Yi-ping, CHENG Yue, <i>et al.</i> (2778)
Comparison of Available Nitrogen and Phosphorus Characteristics in the Land-Water Transition Zone of Different Watersheds and Their Environmental Significance	ZHU Hai, YUAN Xu-yin, YE Hong-meng, <i>et al.</i> (2787)
Analysis of Spatial-Temporal Variation Characteristics of Potential Non-point Source Pollution Risks in the Upper Beiyun River Basin Using Different Weighting Methods	LI Hua-lin, ZHANG Jian-jun, ZHANG Yao-fang, <i>et al.</i> (2796)
Characteristics of Runoff-related Total Nitrogen and Phosphorus Losses Under Long-term Fertilization and Cultivation on Purple Soil Sloping Croplands	WU Xiao-yu, LI Tian-yang, HE Bing-hui (2810)
Hydrochemistry and Its Controlling Factors and Water Quality Assessment of Shallow Groundwater in the Weihe and Jinghe River Catchments	LIU Xin, XIANG Wei, SI Bing-cheng (2817)
Characteristics and Drivers of Dissolved Carbon Dioxide and Methane Concentrations in the Nantaoxi River System in the Upper Reaches of the Taihu Lake Basin During Summer-Autumn	LIANG Jia-hui, TIAN Lin-lin, ZHOU Zhong-yu, <i>et al.</i> (2826)
Nitrogen Distribution and Inorganic Nitrogen Diffusion Flux in a Shallow Lake During the Low Temperature Period: A Case Study of the Baiyangdian Lake	WEN Yan, SHAN Bao-qing, ZHANG Wen-qiang (2839)
Effects of Sediment Microenvironment on Sedimentary Phosphorus Release Under Capping	CHEN Shu-tong, LI Da-peng, XU Chu-tian, <i>et al.</i> (2848)
Coadsorption of Heavy Metal and Antibiotic onto Humic Acid from Polder River Sediment	XUE Xiang-dong, YANG Chen-hao, YU Jian-lin, <i>et al.</i> (2856)
Effects of Two PPCPs on Nitrification in Sediments in the Yarlung Zangbo River	LING Xin, XU Hui-ping, LU Guang-hua (2868)
Wastewater Treatment Effects of Ferric-carbon Micro-electrolysis and Zeolite in Constructed Wetlands	ZHAO Zhong-jing, HAO Qing-ju, ZHANG Yao-yu, <i>et al.</i> (2875)
CDs-BOC Nanophotocatalyst Activating Persulfate Under Visible Light for the Efficient Degradation of Typical PPCPs	LEI Qian, XU Lu, AI Wei, <i>et al.</i> (2885)
Preparation of pg-C ₃ N ₄ /BiOBr/Ag Composite and Photocatalytic Degradation of Sulfamethoxazole	YANG Li-wei, LIU Li-jun, XIA Xun-feng, <i>et al.</i> (2896)
Sodium Alginate Loading of Zero-Valent Iron Sulfide for the Reduction of Cr(VI) in Water	WANG Xu, YANG Xin-nan, HUANG Bi-juan, <i>et al.</i> (2908)
Adsorption Mechanism of Cadmium by Superparamagnetic Nano-Fe ₃ O ₄ @SiO ₂ Functionalized Materials	ZHANG Li-zhi, YI Ping, FANG Dan-dan, <i>et al.</i> (2917)
Pollution Characteristics and Removal of Typical Pharmaceuticals in Hospital Wastewater and Municipal Wastewater Treatment Plants	YE Pu, YOU Wen-dan, YANG Bin, <i>et al.</i> (2928)
Abundance Change of Antibiotic Resistance Genes During PDWW Recycling and Correlations with Environmental Factors	XU Yao-yao, WANG Rui, JIN Xin, <i>et al.</i> (2937)
Simultaneous Domestication of Short-cut Nitrification Denitrifying Phosphorus Removal Granules	WANG Wen-qi, LI Dong, GAO Xin, <i>et al.</i> (2946)
Long-term Storage and Rapid Activity Recovery of ANAMMOX Granular Sludge	LI Dong, LIU Ming-yang, ZHANG Jie, <i>et al.</i> (2957)
Migration and Environmental Effects of Heavy Metals in the Pyrolysis of Municipal Sludge	JIANG Yuan-yuan, WANG Yan, DUAN Wen-yan, <i>et al.</i> (2966)
Profiling of Antibiotic Resistance Genes in Different Croplands	HUANG Fu-yi, ZHOU Shu-yi-dan, WANG Jia-ni, <i>et al.</i> (2975)
Distribution Characteristics of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Manure and Surrounding Soil of Cattle Farms in Ningxia	ZHANG Jun-hua, CHEN Rui-hua, LIU Ji-li, <i>et al.</i> (2981)
Effects of Temperature and Stirring on the Changes of Antibiotic Resistance Genes and Microbial Communities in Anaerobic Digestion of Dairy Manure	XU Ji-fei, ZHANG Qiu-ping, ZHU Tian-jiao, <i>et al.</i> (2992)
Effects of Wheat Straw-derived Biochar Application on Soil Carbon Content Under Different Tillage Practices	LIU Zhen-jie, LI Peng-fei, HUANG Shi-wei, <i>et al.</i> (3000)
Spatial Patterns of Nitrogen and Phosphorus in Soil and Their Influencing Factors in a Typical Agro-pastoral Ecotone	ZHANG Yan-jiang, WANG Jun-peng, WANG Yu, <i>et al.</i> (3010)
Spatial Distribution Characteristics, Pollution, and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals Around Mercury Mining Areas	WANG Rui, DENG Hai, JIA Zhong-min, <i>et al.</i> (3018)
Interaction and Mechanism Between Conditioning Agents and Two Elements in the Soil Enriched with Phosphorus and Cadmium	HUANG Yang, HU Xue-yu, CAO Kun-kun, <i>et al.</i> (3028)
Mechanism of S-allyl-L-cysteine Alleviating Cadmium Stress in Seedling Roots and Buds of Rice Seedlings	CHENG Liu-long, HUANG Yong-chun, WANG Chang-rong, <i>et al.</i> (3037)
Consecutive 4-year Elevated Atmospheric CO ₂ on Shaped Microbial Communities in the Rhizosphere Soil of <i>Robinia pseudoacacia</i> L. Seedlings Grown in Pb-contaminated Soils	JIA Xia, Lkhagvajargal Khadkhurel, ZHAO Yong-hua, <i>et al.</i> (3046)
Biodegradation of Polystyrene by <i>Geobacillus stearothermophilus</i>	XING Rui-zhi, ZHAO Zi-qiang, ZHAO Wen-qi, <i>et al.</i> (3056)
Micro-morphological Characteristics of Particles on Holly and Ligustrum Leaf Surfaces and Seasonal Changes in Bacterial Communities	LI Hui-juan, XU Ai-ling, QIAO Feng-lu, <i>et al.</i> (3063)
Effects of Roxithromycin on Reproduction, Growth, and Anti-oxidation System of <i>Daphnia magna</i>	ZHANG Ling-yu, LIU Jian-chao, LENG Yang, <i>et al.</i> (3074)
Relationship Between Relative Crop Yield/Woody Plant Biomass and Ground-level Ozone Pollution in China	FENG Zhao-zhong, PENG Jin-long (3084)