

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

南京北郊大气降水中水溶性无机氮和有机氮沉降特征

张佳颖, 于兴娜, 张毓秀, 丁铎, 侯思宇



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年7月

第43卷 第7期
Vol.43 No.7

目次

两种模式下中国未来发电行业发展情景及其环境效益分析	刘春景, 吕建毅, 赵汶畅, 徐卿, 金玉佳 (3375)
基于 LEAP 模型的兰州市道路交通温室气体与污染物协同减排情景模拟	庞可, 张芊, 马彩云, 祝禄祺, 陈恒葵, 孔祥如, 潘峰, 杨宏 (3386)
基于半级别的城市空气质量预报评估方法探讨	王晓彦, 朱莉莉, 许荣, 高愈霄, 朱媛媛, 汪巍, 刘冰 (3396)
厦门港大气 PM _{2.5} 中重金属污染特征及健康风险评价	肖思晗, 蔡美君, 李香, 黄屋, 王坚, 朱清墩, 吴水平 (3404)
南京北郊大气降水中水溶性无机氮和有机氮沉降特征	张佳颖, 于兴娜, 张毓秀, 丁铖, 侯思宇 (3416)
晋中盆地主要城市冬季 PM _{2.5} 传输特征分析	王小兰, 王雁, 闫世明, 岳江, 郭伟, 郝振荣 (3423)
鄂尔多斯市夏秋季黑碳气溶胶时间演变特征及其来源解析	孔祥晨, 张连霞, 张彩云, 王红磊, 许晶, 郑佳峰 (3439)
济源冬季 VOCs 污染特征、来源和 SOAP	王芳, 李利霞, 王红果, 赵宗生, 张建平, 张栋 (3451)
长株潭城区 8 月 VOCs 污染特征及来源分析	罗达通, 张青梅, 刘湛, 尤翔宇, 黄杰, 宋云飞, 张敬巧 (3463)
2019 年 7 月石家庄市 O ₃ 生成敏感性控制策略解析	朱家贤, 王晓琦, 欧盛菊, 张新宇 (3473)
华北平原 AOD 时空演化与影响因素	郭霖, 孟飞, 马明亮 (3483)
基于地基太阳光度计观测的长安区气溶胶光学特性变化及其与颗粒物浓度的关系	郑玉蓉, 王旭红, 崔思颖, 冯子豪, 张秀, 刘康 (3494)
基于长时序“地-星”数据的京津冀大气污染时空分布及演变特征	王耀庭, 殷振平, 郑祚芳, 李炬, 李青春, 孟春雷, 李威 (3508)
近十年洪泽湖富营养化状态变化趋势及原因分析	陈天宇, 刘常清, 史小丽, 李云, 范子武, 贾本有, 廖轶鹏 (3523)
高原湖泊周边浅层地下水: 磷素时空分布及驱动因素	杨恒, 李桂芳, 叶远行, 陈清飞, 崔荣阳, 张丹, 陈安强 (3532)
三峡水库不同支流库湾蓄水期溶解氧分层特性及差异性	纪道斌, 方娇, 龙良红, 杨正健, 赵星星, 杨霞, 郭亚丽 (3543)
典型喀斯特城市湖泊溶解性有机质成分特征及来源解析	倪茂飞, 周慧, 马永梅, 苏印, 王晓丹, 王志康 (3552)
骆马湖表层水和沉积物中全氟化合物赋存特征、来源及健康风险评估	黄家浩, 吴玮, 黄天寅, 陈书琴, 项颂, 庞燕 (3562)
千岛湖浮游植物群落结构的垂向分布特征及其影响因素	王吉毅, 霍翟, 国超旋, 朱广伟, 龚志军, 范亚文, 王建军 (3575)
泗河水系沉积物磷的存在形态及其空间分布特征	张子涵, 张鑫茹, 贾传兴, 甘延东, 王世亮 (3587)
降雨径流过程中土地利用优化配置对磷流失的影响	周豪, 陈方鑫, 罗义峰, 龙翼, 周继, 王小燕, 李丹丹, 陈晓燕 (3597)
典型生物滞留设施重金属累积分布特征与风险评价	储杨阳, 杨龙, 周媛, 王喜龙, 王嗣禹, 张敏 (3608)
筑坝蓄水对不同水深浮游微生物群落结构和种间互作模式的影响	王洵, 张佳佳, 袁秋生, 胡斌, 刘胜 (3623)
天津独流减河流域不同等级河流沉积物细菌区系及功能辨识	刘嘉元, 丰玥, 杨雪纯, 张彦, 李德生, 刘福德 (3635)
地表水悬浮态多环芳烃时空变化特征及主要输入源响应机制	彭珂醒, 李瑞飞, 周亦辰, 卓泽铭, 张晋, 李梅, 李雪 (3645)
北京市通州区河流中微塑料组成的空间分布及潜在来源解析	门聪, 李頔, 左剑恶, 邢薇, 刘梦瑶, 魏凡钦, 胡嘉敏, 谢珍雯, 邢鑫, 沈杨贵 (3656)
微塑料对鲫鱼生长、肝脏损伤和肠道微生物组成的影响	胡嘉敏, 左剑恶, 李金波, 张艳艳, 艾翔, 龚大惠, 张继文, 孙丁明 (3664)
不同类型脱水药剂对底泥固化效果和理化性质的影响	任俊, 殷鹏, 王威振, 唐婉莹, 尹洪斌, 朱丽娟 (3672)
微纳米粒径生物炭的结构特征及其对 Cd ²⁺ 吸附机制	马文艳, 裴鹏刚, 高歌, 孙约兵 (3682)
不同生物炭对磷的吸附特征及其影响因素	连宁海, 张树楠, 刘锋, 邢宏霖, 吴金水 (3692)
Mg-La-Fe/沸石复合材料的制备及其处理低浓度含磷废水的性能	印学杰, 宋小宝, 丁陈蔓, 冯彦房, 杨根, 何世颖, 薛利红 (3699)
一体式部分亚硝化-厌氧氨氧化工艺污泥膨胀发生和恢复过程中微生物群落演替及 PICRUS2 功能预测分析	李亚男, 闫冰, 郑蕊, 姚丽, 隋倩雯, 魏源送 (3708)
丝状菌膨胀污泥好氧颗粒化稳定性及微生物多样性	高春娣, 杨箫阳, 欧家丽, 韩颖璐, 程阳阳, 彭永臻 (3718)
2000~2020 年长江流域植被 NDVI 动态变化及影响因素探测	徐勇, 郑志威, 郭振东, 宴世卿, 黄雯婷 (3730)
近 40 年来福建省水稻土有效磷富集效应及潜在生态风险评估	陈中星, 邱龙霞, 陈瀚闾, 范协裕, 毋亭, 沈金泉, 邢世和, 张黎明 (3741)
土地利用变化对西南喀斯特土壤团聚体组成、稳定性以及 C、N、P 化学计量特征的影响	何宇, 盛茂根, 王轲, 王霖娇 (3752)
长江经济带矿山土壤重金属污染及健康风险评价	张浙, 卢然, 伍思扬, 贾智彬, 王宁 (3763)
煤矸石堆积区周边土壤重金属污染特征与植物毒性	尚誉, 桑楠 (3773)
燃煤工业区不同土地利用类型土壤汞含量污染评价	李强, 姚万程, 赵龙, 张朝, 张恩月, 苏迎庆, 刘庚 (3781)
广州市南沙区第四系剖面镉富集特征及生物有效性	王芳婷, 包科, 黄长生, 赵信文, 顾涛, 曾敏 (3789)
黔西北山区耕地重金属健康风险评价及环境基准	徐梦琪, 杨文毅, 杨利玉, 陈勇林, 景灏楠, 吴攀 (3799)
土壤重金属生物可利用性影响因素及模型预测	张加文, 田彪, 罗晶晶, 吴凡, 张聪, 刘征涛, 王晓南 (3811)
添加有机物料对豫中烟田土壤呼吸的影响	鲁琪飞, 叶协锋, 韩金, 潘昊东, 张明杰, 王晶, 杨佳豪, 姚鹏伟, 李雪利 (3825)
不同稻作系统土壤的 CH ₄ 产生潜力与产生途径	沈皖豫, 黄琼, 马静, 张广斌, 徐华 (3835)
东部平原矿区复垦土壤微生物群落特征及其组装过程	马静, 董文雪, 朱燕峰, 肖栋, 陈浮 (3844)
同质环境下不同锦鸡儿属植物根际土壤细菌群落结构差异及其影响因素	李媛媛, 徐婷婷, 艾喆, 魏庐潞, 马飞 (3854)
岩溶与非岩溶区水稻土团聚体细菌群落结构和功能类群比较	肖筱怡, 靳振江, 冷蒙, 李雪松, 熊丽媛 (3865)
紫色土中微生物群落结构及功能特征对土壤 pH 的差异响应	王智慧, 蒋先军 (3876)
有机物料还田对稻田土壤 DOM 碳源代谢能力的影响	肖怡, 李峥, 黄容, 汤奥涵, 李冰, 王昌全 (3884)
《环境科学》征订启事 (3403) 《环境科学》征稿简则 (3462) 信息 (3493, 3655, 3834)	

高原湖泊周边浅层地下水:磷素时空分布及驱动因素

杨恒¹, 李桂芳¹, 叶远行¹, 陈清飞¹, 崔荣阳², 张丹^{1*}, 陈安强^{3*}

(1. 云南农业大学资源与环境学院, 昆明 650201; 2. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所山地表生过程与生态调控重点实验室, 成都 610041; 3. 云南省农业科学院农业环境资源研究所, 昆明 650201)

摘要: 高原湖泊周边农田磷肥的大量施用和城镇村落的聚集造成了土壤剖面磷素不断累积和含磷污染物的大量排放, 加剧了湖泊周边浅层地下水的磷污染, 磷随湖泊周边区域浅层地下径流入湖也影响着高原湖泊的水质安全. 2019~2021年雨季和旱季, 通过对云南8个湖泊周边农田和居民区水井进行监测, 分析了452个浅层地下水样中磷浓度的时空差异及驱动因素. 结果表明, 季节变化和土地利用影响了浅层地下水中磷浓度及其组成, 表现为雨季浅层地下水中磷浓度大于旱季, 农田大于居民区; 溶解性总磷(DTP)是总磷(TP)的主要形态, 占75%~81%, 溶解性无机磷(DIP)是DTP的主要形态, 占74%~80%. 8个湖泊周边近30%的样本TP浓度已超过地表水Ⅲ类水标准(GB 3838), 其中, 洱海(52%)、杞麓湖(45%)、星云湖(42%)和滇池(29%)湖泊周边地下水磷的超标率远高于阳宗海(16%)、抚仙湖(13%)、程海(6%)和异龙湖(5%). 影响浅层地下水磷浓度的关键因子是土壤剖面中水溶性磷(WEP)、含水率(MWC)、土壤有机质(SOM)、总氮(TN)、pH和浅层地下水中pH、水位($P < 0.05$). 土壤WEP、SOM、TN、MWC和地下水中pH的增加显著增加了浅层地下水中DIP和DTP浓度, 而地下水位的降低显著减少了地下水中DTP和DIP的浓度.

关键词: 浅层地下水; 磷(P); 时空分布; 高原湖泊; 驱动因素

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)07-3532-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202109197

Shallow Groundwater Around Plateau Lakes: Spatiotemporal Distribution of Phosphorus and Its Driving Factors

YANG Heng¹, LI Gui-fang¹, YE Yuan-hang¹, CHEN Qing-fei¹, CUI Rong-yang², ZHANG Dan^{1*}, CHEN An-qiang^{3*}

(1. College of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China; 2. Key Laboratory of Mountain Surface Processes and Ecological Regulation, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Conservancy, Chengdu 610041, China; 3. Agricultural Environment Resources Institute, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Kunming 650201, China)

Abstract: The extensive application of phosphorus fertilizers to croplands and the aggregation of towns and villages around plateau lakes has resulted in the continuous accumulation of phosphorus in the soil profile and the discharge of phosphorus pollutants, which causes phosphorus pollution in shallow groundwater around the lakes. The phosphorus entering the lake with shallow underground runoff in the region around the lake also affects the water quality safety of plateau lakes. The spatiotemporal differences in phosphorus concentrations in 452 shallow groundwater samples and the driving factors were analyzed by monitoring wells in croplands and residential areas around the eight lakes in Yunnan province during the rainy and dry seasons from 2019 to 2021. The results showed that seasonal changes and land use influenced phosphorus concentrations and their composition in shallow groundwater. The concentration of phosphorus in shallow groundwater in the rainy season was higher than that in the dry season, and it was also greater in cropland than that in residential areas. DTP was the dominant form of TP, accounting for 75%-81%, and DIP was the dominant form of DTP, accounting for 74%-80%. Nearly 30% of the samples around the eight lakes had TP concentrations exceeding the surface water Class III standard (GB 3838); the exceeded rates of phosphorus in groundwater around the Erhai Lake (52%), Qiluhu Lake (45%), Xingyun Lake (42%), and Dianchi Lake (29%) were far higher than those of Yangzonghai Lake (16%), Fuxianhu Lake (13%), Chenghai Lake (6%), and Yilonghu Lake (5%). The key driving factors of phosphorus concentrations in shallow groundwater were water-soluble phosphorus (WEP), water content (MWC), soil organic matter (SOM), total nitrogen (TN), pH in the soil profile, and pH and groundwater level in the shallow groundwater ($P < 0.05$). The increases in WEP, SOM, TN, and MWC in the soil and pH in groundwater significantly increased the concentrations of DIP and DTP in shallow groundwater, whereas the decrease in groundwater level significantly reduced the concentrations of DTP and DIP in the groundwater.

Key words: shallow groundwater; phosphorus (P); spatiotemporal distribution; plateau lakes; driving factor

地下水是水文循环、可利用水资源的重要组成部分^[1,2], 是干旱、半干旱地区及一些农村的灌溉和生活饮用水的主要来源^[3]. 近几十年来, 随集约化农业的发展和化肥、农药的大量施用, 地下水中磷(P)污染日益加剧, 地下水污染造成的水资源紧缺日益严重, 已成为世界性关注的问题^[4,5]. 特别是在水资源紧缺且极度分布不均的中国, 约20%的水资源供应来自地下水^[6], 而地下水污染的加剧, 进一步给人们的生产和生活及身体健康安全带来一定的风险, 如饮用含一定量有机磷的水, 会导致机体神经功

能紊乱, 产生中毒症状^[7]. 因此, 研究地下水P污染状况, 对防治地下水污染、保护人们生产生活安全等具有重要意义.

P是植物生长发育的必须营养元素, 是地表水体富营养化的重要指标^[8~10]. 磷肥过量施用是造成农业面源污染的主要来源之一, 以往研究普遍认为,

收稿日期: 2021-09-23; 修订日期: 2021-11-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(42067052, 41977319)

作者简介: 杨恒(1998~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤磷的迁移转化, E-mail: hengy111@163.com

* 通信作者, E-mail: yidan33@163.com; chaq163@163.com

磷肥主要施于耕层,且易与土壤发生吸附和固定,下层土壤又是吸持 P 素的巨大容量库,P 在土壤剖面中向下淋溶的几率小,从而对地下水中 P 污染重视少^[11~13],在《地下水环境质量标准》(GB/T 14848)中也未将 P 纳入评价指标。然而,由于长期大量施用磷肥,土壤中 P 库常处于盈余状态^[14,15],在水力驱动下 P 素在土壤剖面中发生了不同程度的淋失,累积深度增加,如英国洛桑试验站发现地下 65 cm 的淋溶水中 $\rho(\text{P})$ 达 $2.35 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[16],尤其在质地较粗、孔隙大、对 P 吸附量小的土壤中,会加速 P 在土壤中的流失,从而对地下水造成潜在威胁^[17,18]。据估计,每年全世界约有 300~400 万 t P_2O_5 从土壤迁移到水体^[19]。因此,地下水 P 污染也引起了国内外诸多学者的关注。在我国,许多区域地下水 P 浓度已超过《地表水环境质量标准》(GB 3838)的Ⅲ类水,如徐州铜山^[20]、巢湖北岸^[21]、上海都市农业区^[22]和德州地区^[23]等。地下水中 P 浓度具有一定的时空差异,李汝君等^[20]对徐州铜山地下水的研究表明,雨季地下水中 P 浓度是旱季的 1~2 倍左右,而 Liu 等^[5]对江汉平原四湖流域地下水的研究结论却相反,可能是由于研究区域及土地利用的差异所致。马玉萍^[21]对巢湖北岸地下水研究表明,总磷的空间分布从西向东递减,差异性较大。地下水中 P 浓度与土壤理化性质、P 素形态、土地利用、生化环境和水位等密切相关^[24~27],P 从表层土壤到地下水的迁移与转化是复杂的物理生物化学过程,如部分有机磷在微生物的作用下可转化为无机态磷,还原条件下会增强 P 转化能力^[28],从而影响 P 的迁移。

目前,P 的研究主要集中于地表水、湖泊及土壤 P 素循环等领域,地下水 P 污染在区域尺度下更多的研究集中在华北平原和长江中下游平原等地下水位较深的区域,而对高原湖泊流域浅层地下水 P 污染研究仍然缺乏。云南高原湖泊流域因独特的气候特征和地理位置使得这些区域降水充沛,干湿季分明,使得地下水水位浅且波动大,同时,也是云南省村落城镇分布最密集、人口居住最稠密、人为活动最频繁、土壤最肥沃和水资源最丰富的区域^[29]。以上因素造成了该区域农业集约化程度高和农田复种指数大,肥料和农药投入强度高,严重影响着浅层地下水 P 的污染。更重要的是,高原湖泊水体富营养化对 P 更敏感。因此,本研究选取了云南 8 大高原湖泊(滇池、洱海、抚仙湖、星云湖、杞麓湖、异龙湖、阳宗海和程海)周边区域浅层地下水作为研究对象,分析了 8 个湖泊周边浅层地下水 P 污染的时空分布特征,探明

了土壤、地下水环境因素对浅层地下水 P 浓度的影响,以期评价云南高原湖泊周边区域浅层地下水 P 污染现状,合理施磷肥,保护高原湖泊水质安全提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于云南省的 8 个高原湖泊(滇池、洱海、抚仙湖、星云湖、杞麓湖、异龙湖、阳宗海和程海)周边区域($97^{\circ}31'E \sim 106^{\circ}11'E$, $21^{\circ}08'N \sim 29^{\circ}15'N$,图 1),该区域属于低纬高原区。8 个高原湖泊分布在滇中、滇南、滇西和滇西北,分属不同的水系,其中,滇池和程海属长江水系,抚仙湖、杞麓湖、异龙湖、星云湖和阳宗海属珠江水系,洱海属澜沧江水系。气候类型为亚热带低纬高原季风气候,立体气候特点显著,年温差小,日温差大,年均温 16.7°C ;降水充沛且分布不均,干湿季分明,年均降雨量 932 mm,降水量集中于 6~10 月,约占全年降水量的 80% 以上。8 个高原湖泊周边坝区主要是农田、村落和城镇分布,坝区土壤类型主要是水稻土、红壤和黄壤,成土母质多为河湖相沉积物和第四纪风化物。种植作物种类繁多,主要包括水稻、玉米和薯类等粮食作物,烤烟、油菜、蔬菜和花卉等经济作物,其中蔬菜和花卉等高耗型作物在高原湖泊流域坝区种植面积大,复种指数高,特别是滇池、杞麓湖、星云湖、异龙湖和洱海等都有大面积的蔬菜种植,造成了坝区作物化肥和农药施用强度高,农田土壤 P 流失对地下水中 P 污染影响大。表 1 为云南 8 个高原湖泊流域区位特征。

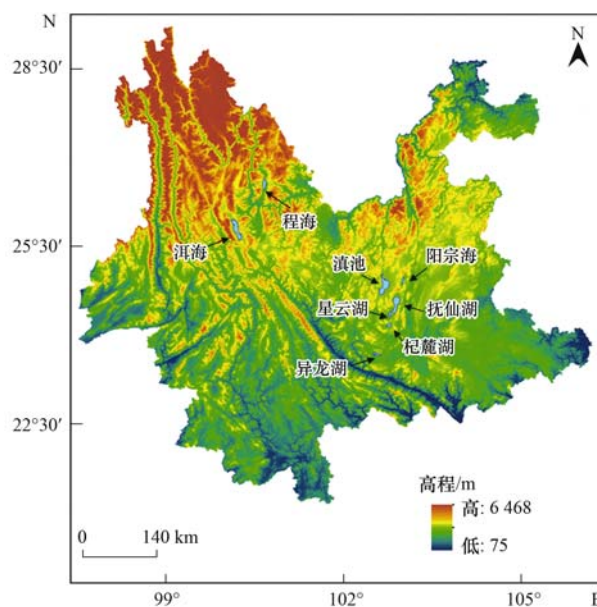


图 1 研究区域概况示意

Fig. 1 Location of the study area

表 1 云南 8 个高原湖泊流域区位特征

Table 1 Location characteristics of eight plateau lake watersheds in Yunnan

湖泊	所属位置	流域面积/km ²	湖泊面积/km ²	海拔/m	年均温度/℃	年降雨量/mm
滇池	昆明	2 920	298	1 886	14.9	991
洱海	大理	2 565	249	1 972	15.7	1 100
阳宗海	昆明	192	32	1 770	16.3	964
杞麓湖	通海	341	37	2 000	15.6	899
星云湖	江川	371	35	1 720	16.0	879
抚仙湖	澄江	1 084	211	1 721	19.2	951
异龙湖	石屏	360	38	1 414	18.0	920
程海	永胜	424	77	1 503	17.8	756

湖泊	土壤类型	取样区种植的主要作物	每季施肥强度 ^[30] /kg·hm ⁻²		
			N	P ₂ O ₅	有机肥
滇池	红壤、水稻土和紫色土	露天或设施蔬菜和花卉	285	135	12 555
洱海	水稻土和红壤	水稻、烤烟、玉米、蚕豆和蔬菜	165	60	18 270
阳宗海	红壤和水稻土	蔬菜、花卉和水稻	345	90	720
杞麓湖	水稻土和红壤	蔬菜、水稻、玉米和烤烟	405	105	1 440
星云湖	红壤、紫色土和水稻土	蔬菜、玉米和烤烟	240	75	675
抚仙湖	红壤和水稻土	水稻、烟草和蚕豆	330	75	150
异龙湖	红壤、黄壤和水稻土	水稻、蔬菜和玉米	240	135	1 290
程海	红壤和水稻土	水稻、烟草、玉米和蔬菜	255	105	8 355

1.2 样品采集与测定

2019 ~ 2020 年对 8 个高原湖泊(洱海、滇池、抚仙湖、星云湖、杞麓湖、异龙湖、阳宗海和程海)周边区域浅层地下水及土壤进行监测和采样. 其中,洱海周边浅层地下水监测和样品的采集时间为 2019 年 4 月(旱季)和 2019 年 8 月(雨季);其他 7 个湖泊周边浅层地下水监测和样品的采集时间为 2020 年 8、9 月(雨季)和 2021 年 4、5 月(旱季). 用专用水样采集器在距水面 50 cm 左右深度采集水样,主要来自高原湖泊周边的居民区饮用井和农田灌溉井. 共采集浅层地下水水样 452 个(雨季 226 个,旱季 216 个),其中,滇池 73 个、抚仙湖 54 个、星云湖 52 个、杞麓湖 51 个、异龙湖 43 个、阳宗海 44 个、程海 35 个和洱海 100 个(图 2). 水样被收集在 100 mL 聚乙烯瓶中,并放在有冰袋的保温箱中带回实验室,并储存在 4℃ 的冰箱中,每个湖泊样品在 1 周内完成水样分析测试.

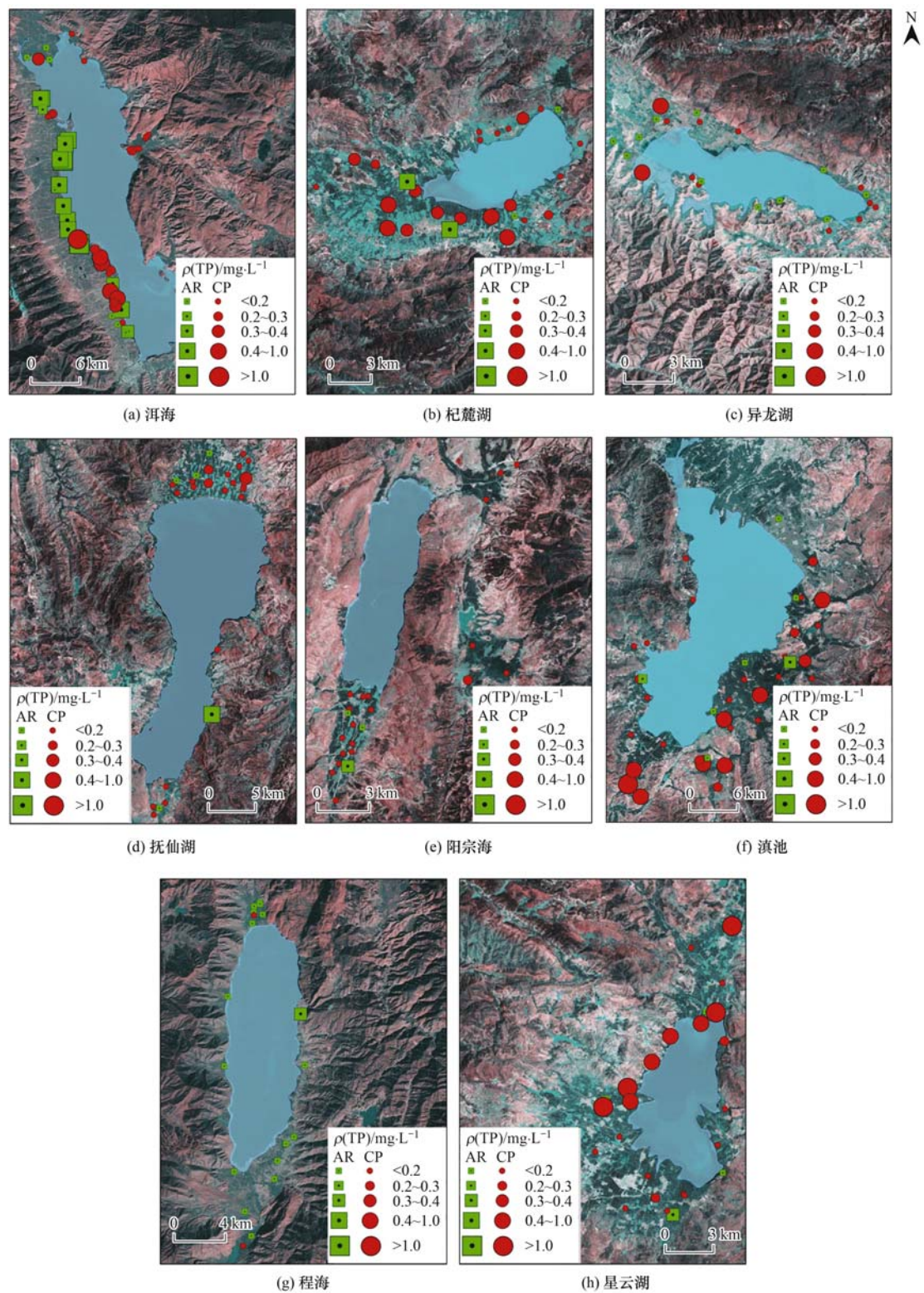
采集浅层地下水样附近的农田,选择典型的土壤类型和作物种植类型,用 100 cm 高的螺旋土钻采集土壤剖面,取 0 ~ 90 cm 剖面样,分 0 ~ 30、30 ~ 60 和 60 ~ 90 cm 分层取样,共采集 87 个土壤剖面,共 261 个土壤样,其中,滇池 51 个、抚仙湖 36 个、星云湖 33 个、杞麓湖 27 个、异龙湖 30 个、阳宗海 27 个、程海 18 个和洱海 39 个. 采集的土样装入聚乙烯密封袋中,放在有冰袋的保温箱中带回实验室,并储存在 4℃ 的冰箱中,用于测定土壤 P 含量、pH、含

水率和有机质等指标.

浅层地下水中温度(*T*)、电导率(EC)、pH、氧化还原电位(ORP)和溶解氧(DO)使用手持式多参数测量仪 YSI(YSI Incorporated, USA)现场测定;水位深度(SGL)(浅层地下水面至地表的距离)采用测量绳和钢尺进行测量. 水样中的总磷(TP)、溶解性总磷(DTP)(水样过 0.45 μm 滤膜)用酸性过硫酸钾-钼锑抗分光光度法测定;溶解性无机磷(DIP)(水样过 0.45 μm 滤膜)用钼锑抗分光光度法测定;溶解性有机磷(DOP)是 DTP 和 DIP 的差值,颗粒态磷(PP)是 TP 与 DTP 的差值. 土样指标测定参照土壤农化化学分析方法^[31],土壤含水率(WCS)用烘干法测定;pH 用便携式 pH 电位计测定,土壤全氮(TN)用凯氏定氮仪测定,土壤有机质(SOM)用碳氮分析仪测定的土壤有机碳乘以转化系数 1.724,土壤 Olsen-P 用 NaHCO₃(0.05 mol·L⁻¹)溶液提取,土壤可溶性磷(CaCl₂-P)用 CaCl₂(0.01 mol·L⁻¹)溶液提取、土壤水溶性总磷(WEP)用 H₂O 提取,采用钼锑抗比色法测定.

1.3 数据处理

利用 Spss23.0 进行 One-Way ANOVA 单因素方差分析比较湖泊周边浅层地下水中 P 浓度差异;用 R 程序包“corrplot”、“vegan”绘制相关性热图和冗余度分析(RDA)图,筛选影响浅层地下水中 P 浓度的关键土壤和水环境因子;利用 ArcGIS 绘制采样点及 TP 浓度分布;其余图形采用 Origin 2019 和 Excel 2016 绘制.



AR 为居民区, CP 为农田

图2 浅层地下水采样点及 TP 浓度分布

Fig. 2 Sampling points of shallow groundwater and TP concentration distribution

2 结果与分析

2.1 浅层地下水中 P 的时空分布

高原湖泊周边浅层地下水中 $\rho(\text{TP})$ 、 $\rho(\text{DTP})$ 、 $\rho(\text{DIP})$ 、 $\rho(\text{PP})$ 和 $\rho(\text{DOP})$ 变化范围分别为

($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$): 0.05 ~ 5.69 (0.29 ± 0.26 , 平均值, 下同)、0.01 ~ 5.23 (0.22 ± 0.22)、0.005 ~ 4.88 (0.18 ± 0.17)、0.01 ~ 4.15 (0.06 ± 0.01) 和 0.002 ~ 4.23 (0.05 ± 0.01) [图 3(a)]. 在 452 个调查的水样中近 30%、25% 和 20% 的地下水样 TP 超过

《地表水环境质量标准》(GB 3838)的Ⅲ类($0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)、Ⅳ类($0.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)和Ⅴ类($0.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)标准,表明云南高原湖泊周边浅层地下水受到一定的P污染.

浅层地下水中各形态P浓度受季节变化和土地利用的影响,雨季: $\rho(\text{TP})$ 、 $\rho(\text{DTP})$ 、 $\rho(\text{DIP})$ 、 $\rho(\text{PP})$ 和 $\rho(\text{DOP})$ 平均值分别为: (0.33 ± 0.04) 、 (0.26 ± 0.03) 、 (0.21 ± 0.03) 、 (0.07 ± 0.02) 和 $(0.05 \pm 0.01) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ [图3(b)]. 除雨季和旱季DOP浓度相近外,其余各形态P浓度雨季高于旱

季,雨季TP、DTP、DIP和PP浓度分别高出旱季的32%、36.8%、50%和16.6%,其中,雨季和旱季DIP浓度差异显著($P < 0.05$). 农田浅层地下水中 $\rho(\text{TP})$ 、 $\rho(\text{DTP})$ 、 $\rho(\text{DIP})$ 、 $\rho(\text{PP})$ 和 $\rho(\text{DOP})$ 平均值分别为: (0.30 ± 0.04) 、 (0.23 ± 0.03) 、 (0.17 ± 0.02) 、 (0.07 ± 0.02) 和 $(0.05 \pm 0.01) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ [图3(c)]. 相比居民区,农田浅层地下水具有较高的TP、DIP、PP和DOP浓度,分别高于居民区26.9%、9.5%、75%和66.7%,而居民区浅层地下水DIP浓度高于农田5.9%.

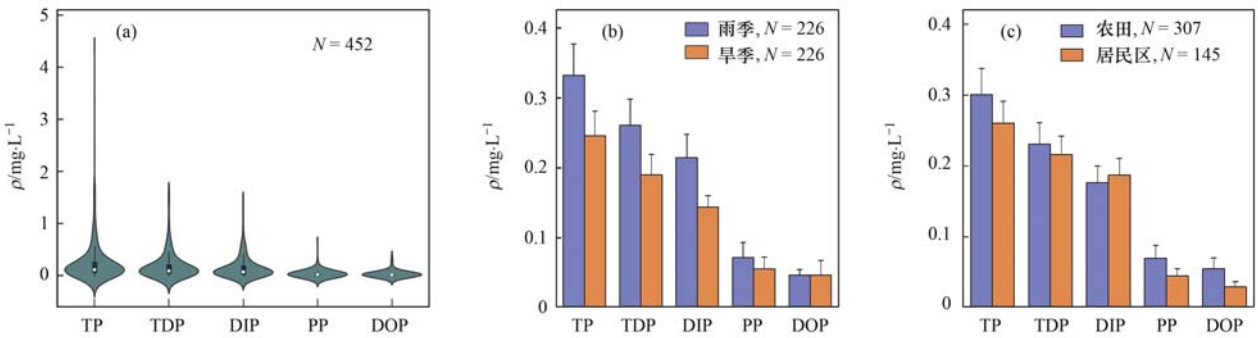
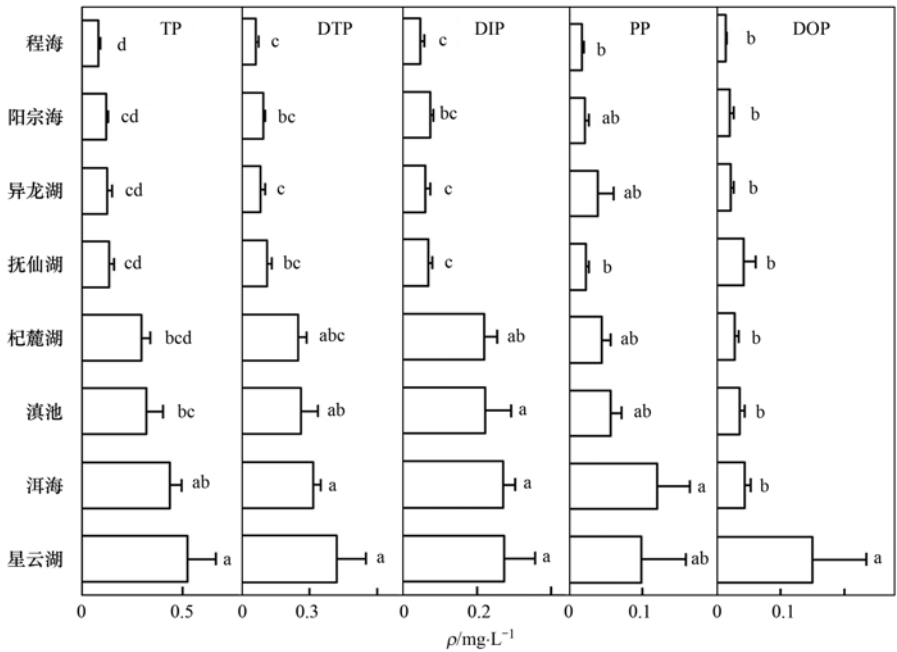


图3 浅层地下水中各形态磷浓度时空分布

Fig. 3 Spatiotemporal distribution of various forms of phosphorus concentration in shallow groundwater

星云湖、洱海、滇池和杞麓湖周边浅层地下水P浓度远高于其它湖泊,从大到小依次为($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$): 星云湖 [$\rho(\text{TP}) 0.52$, $\rho(\text{DTP}) 0.42$, $\rho(\text{DIP}) 0.273$]、洱海 [$\rho(\text{TP}) 0.43$, $\rho(\text{DTP}) 0.31$, $\rho(\text{DIP}) 0.27$]、滇池 [$\rho(\text{TP}) 0.31$, $\rho(\text{DTP}) 0.26$, $\rho(\text{DIP}) 0.223$]和杞麓湖 [$\rho(\text{TP}) 0.29$, $\rho(\text{DTP})$

0.24 , $\rho(\text{DIP}) 0.219$],除星云湖与滇池和杞麓湖TP浓度具有显著差异($P < 0.05$),其余湖泊差异较小(图4). 洱海周边浅层地下水 $\rho(\text{PP})$ ($0.12 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)显著高于程海和抚仙湖($P < 0.05$),其余湖泊PP差异较小. 星云湖周边浅层地下水 $\rho(\text{DOP})$ ($0.15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)显著高于其他湖区($P <$



不同小写字母表示差异显著($\text{LSD}_{0.05}$)

图4 不同湖泊周边浅层地下水中各形态磷的分布

Fig. 4 Distribution of various forms of phosphorus in shallow groundwater around different lakes

0.05), 其余湖泊间 DOP 无显著差异. 8 个湖泊中, 程海湖泊各形态 P 浓度 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 最小: [$\rho(\text{TP})$ 0.079, $\rho(\text{DTP})$ 0.061, $\rho(\text{DIP})$ 0.048, $\rho(\text{PP})$ 0.018, $\rho(\text{DOP})$ 0.014], 主要是因为程海样点多 为居民饮用井, 水位较深, 受污染程度较小, 与抚 仙湖、异龙湖和阳宗海之间无显著差异 ($P > 0.05$). 8 个湖泊周边浅层地下水 TP 浓度空间分布 表明(图 2), 滇池东南部较高, 星云湖西北部较 高, 洱海海西较高, 杞麓湖西南部较高, 阳宗海、抚 仙湖和程海 TP 浓度分布较为均匀, 异龙湖西部两 点位浓度较高, 其余点位浓度分布较为均匀, 这与 蔬菜种植、土壤质地密切相关. 对 8 个湖泊周边浅 层地下水 TP 浓度超过地表水Ⅲ类标准的样点统 计发现, 超标率从大到小依次为: 洱海(52%)、杞 麓湖(45%)、星云湖(42%)、滇池(29%)、阳宗

海(16%)、抚仙湖(13%)、程海(6%)和异龙湖 (5%). 可见, 洱海、星云湖、杞麓湖和滇池周边浅 层地下水 P 污染较为严重.

2.2 浅层地下水中 P 素组成

土地利用和季节变化不仅影响着浅层地下水 P 浓度, 还影响着 P 素的组成比例. 农田和居民区浅 层地下水主要是以 DTP 形态存在, 占 TP 的质量分 数约为 77% (图 5), 而 DIP 是 DTP 的主要形态, 占 DTP 质量分数的 78%. 浅层地下水中 P 素在季节 上仍以 DTP 为主, 占 TP 质量分数的 74%~80%, DIP 是 DTP 的主要组成部分, 约占 DTP 质量分数的 75%~81%. 而 PP 占 TP 和 DOP 占 DTP 的质量 分数较低, 分别仅为 20%~26% 和 19%~25%. 可见, DTP 和 DIP 是浅层地下水中 P 素的主要存在 形态.

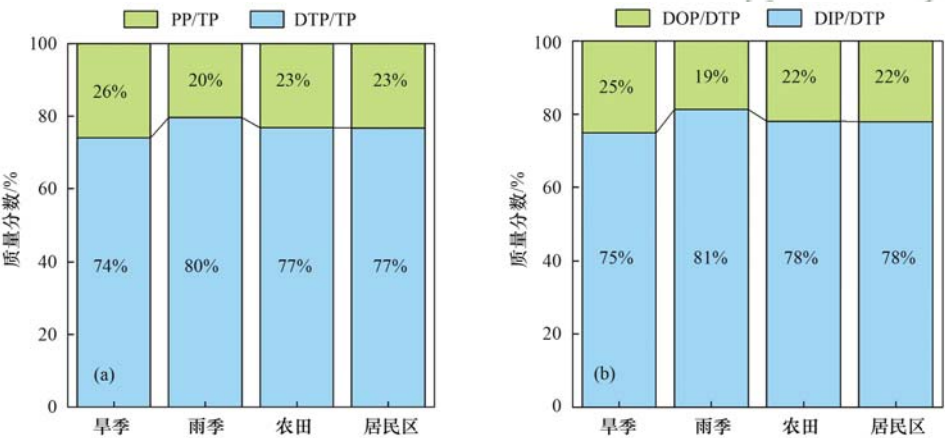
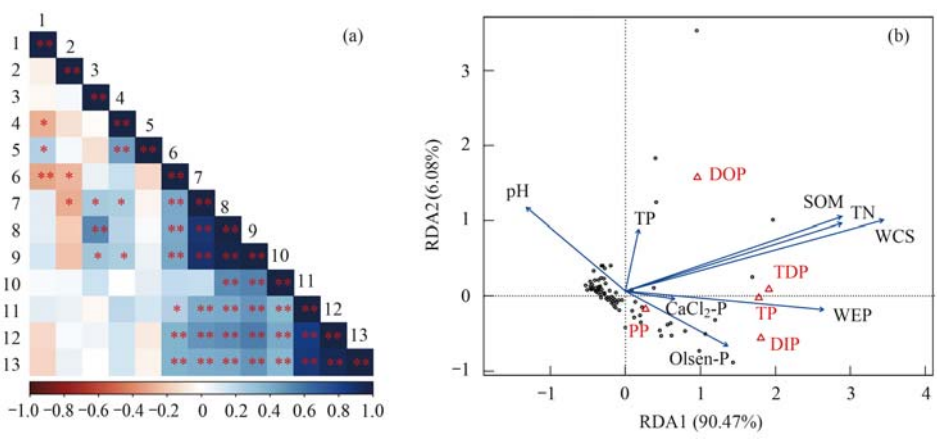


图 5 各形态磷的组成
Fig. 5 Composition of various forms of phosphorus

2.3 浅层地下水中 P 浓度的影响因素

浅层地下水中 P 浓度受土壤剖面性质的影响, 采 用相关分析和 RDA 分析了土壤因子对浅层地下水 中

P 浓度的影响(图 6). 结果表明, RDA 排序结果前两 轴解释率分别为 90.47% 和 6.08%, WCS、SOM、WEP 和 TN 是影响浅层地下水中 P 浓度的关键土壤因子.



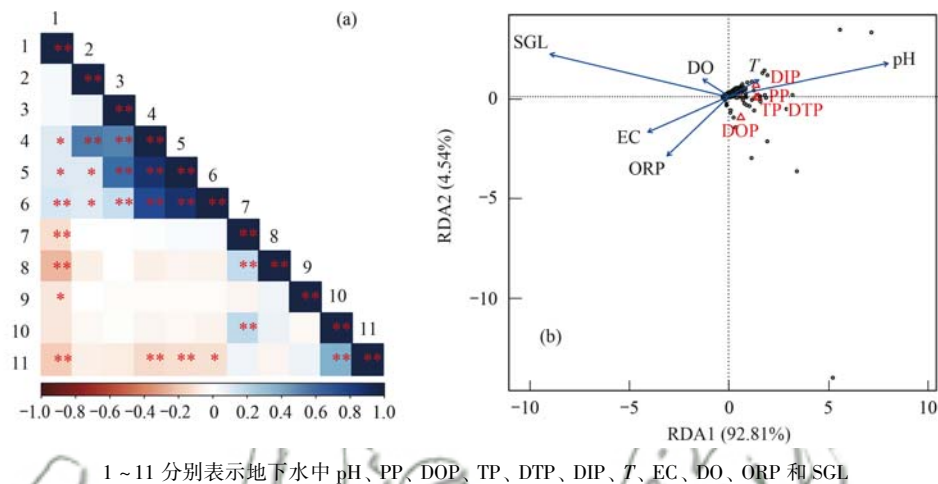
1、2、4、5、6、11、12 和 13 分别表示 30~90 cm 土壤中 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 、pH、Olsen-P、TP、WEP、TN、WCS 和 SOM, 3、7、8、9 和 10 分别 表示地下水中 PP、DIP、TP、DTP 和 DOP; * 表示在 0.05 水平差异显著, ** 表示在 0.01 水平差异极显著, 下同

图 6 浅层地下水中磷浓度与土壤因子的关系

Fig. 6 Relationships between the phosphorus concentration in shallow groundwater and soil factors

土壤 WCS、SOM 和 TN 与浅层地下水 TP、DTP、DIP 和 DOP 呈极显著正相关($P < 0.01$), 土壤 WEP 与浅层地下水 TP、DIP 和 DTP 呈极显著正相关($P < 0.01$). 土壤 pH 与浅层地下水 DIP 呈显著负相关($P < 0.05$), 土壤 Olsen-P 与浅层地下水 TP 极显著正相关, 与 DTP 和 DIP 呈显著正相关($P < 0.05$).

图 7 显示了地下水环境因子对水中 P 浓度的影响, RDA 排序结果图表明, 前两轴的解釋率分别为



1 ~ 11 分别表示地下水中 pH、PP、DOP、TP、DTP、DIP、T、EC、DO、ORP 和 SGL

图 7 浅层地下水中磷浓度与水环境因子的关系

Fig. 7 Relationships between the phosphorus concentration and water environmental factors in shallow groundwater

3 讨论

3.1 浅层地下水中 P 浓度时空分布差异明显

季节变化、土地利用和土壤剖面性质等是影响浅层地下水中 P 浓度的重要因素. 季节变化影响了降雨和灌溉量^[32], 本研究中季节变化导致了雨季浅层地下水中 P 浓度高于旱季, 这与李汝君等^[20]的研究结果一致. 夏季是云南高原湖泊流域集中降雨期, 也是农作物生长旺盛期, 高强度的施肥和降雨增加了表层土壤 P 向下层淋失风险, 土壤对 P 的截留速率低于淋溶水携带 P 向下层土壤的渗流速率^[20]; 此外, 季节变化导致地下水位波动, 雨季地下水位上升, 从而缩短了 P 向地下水中的迁移距离^[32,33], 当水位升至富 P 土层时, 土壤在缺氧条件下 Fe^{3+} 被还原成 Fe^{2+} , 会释放铁铝结合态磷酸盐, 加速了土壤 P 向地下水中迁移^[34]. 土地利用也影响着地表 P 的投入负荷, 从而影响浅层地下水中 P 浓度, 本研究中农田浅层地下水中 P 浓度普遍高于居民区, 随居民区不透水地面和生活污水收集管网建设面积的增加, 抑制了居民区含 P 地表水向地下水的迁移^[5]. 土壤剖面性质也导致浅层地下水 P 污染具有一定的空间差异, 尤其在洱海东西两岸浅层地下水 TP 浓度空间差异更为明显(图 2), 呈西岸高, 东岸低, 主要与东西两岸土壤剖面性质有关, 西岸以河湖相

92.18% 和 4.54%, 水体 pH 和 SGL 是影响地下水中 P 浓度的关键因子. pH 与浅层地下水 TP 和 DTP 呈显著正相关($P < 0.05$), 与 DIP 呈极显著正相关($P < 0.01$). SGL 与浅层地下水 DIP 呈显著负相关($P < 0.05$), 与 TP 和 DTP 呈极显著负相关($P < 0.01$). 水体 ORP、DO、T 和 EC 对浅层地下水中 P 浓度影响不显著($P > 0.05$), 表明水体 ORP、DO、T 和 EC 对浅层地下水中 P 浓度的影响较小.

沉积物发育的水稻土为主, 土壤质地松软且透水性好, 有利于土壤 P 淋溶, 而东岸以红壤为主, 土壤黏重紧实且透水性差, 加之 P 的移动性差, 不利于土壤 P 淋溶.

云南 8 个湖泊周边浅层地下水近 30% 的水样 TP 浓度已超过地表水Ⅲ类水标准, 其中, 超标率较高的是洱海(52%)、杞麓湖(45%)、星云湖(42%)和滇池(29%), 这与洱海、杞麓湖、星云湖和滇池大面积种植水肥投入量大且复种指数高的作物密切相关. 长期施用磷肥和有机肥会增加下层土壤中 P 积累, 增加 P 流失风险, 是直接导致地下水 P 污染的重要原因之一. 2017 年洱海流域蔬菜种植面积占总播种面积近 1/5, 蔬菜 P_2O_5 施肥量达 $188 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 农家肥施用量为 $38 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$. 谭海燕等^[35]的研究表明, 2017 年滇池流域蔬菜和花卉播种面积占总流域播种面积的 52% 以上, 其中花卉和蔬菜的施肥量高达 $876 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $651 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 已超出粮食作物施肥量的 227% 和 128%. 杞麓湖流域作为通海县蔬菜种植的主要区域, 通海蔬菜种植面积达 2.67 万 hm^2 , 复种指数高达 300%, 磷肥施用量大, 土壤有效磷含量已高达 $110.63 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[36]. 菜地磷肥投入量和盈余量分别是粮田的 7.6 倍和 12 倍, 导致菜地土壤具有较高的 P 流失风险^[37]. 可见, 菜地磷肥或有机肥过量

投入造成的土壤剖面 P 累积,增加了土壤 P 流失风险,尤其在地下水位较浅的云南高原湖泊周边,是直接导致高原湖泊周边地下水 P 污染的重要因素之一.因此,通过调整种植结构,减少蔬菜种植面积等措施,减少 P 投入负荷,是降低土壤 P 累积和地下水 P 污染的重要措施.此外,星云湖和滇池流域富集大量磷矿、磷化工及磷肥基地,使含 P 污染物也会渗入地下水中,也是滇池和星云湖地下水 P 污染的因素之一.

3.2 浅层地下水 P 污染的主要驱动因素

土壤有机质和 pH 影响着土壤 P 的固定与释放^[34,38],图 8 表明随土壤有机质的增加,浅层地下水 DTP 和 DIP 浓度呈极显著线性增加($P < 0.01$),说明土壤有机质含量的增加,增加了土壤 P 向地下水中迁移,主要是因为有机质含量高的土壤往往对 P 的吸附能力差,这与 Kang 等^[39]的研究结果类似.铁铝氧化物是磷酸盐的吸附剂^[26],有机质对铁铝氧化物的结晶过程具有一定的抑制作用,而一些特定有机质会形成有机质金属络合物^[26,40],从而促进了 P 的解吸.王子琬等^[41]的研究也认为有机质在分解过程中会释放一些阴离子与磷酸根离子形成了竞争吸附,降低了土壤对 P 的吸附能力,促进了 P 释放.土壤 pH 与浅层地下水 DIP 呈显著负相关($P < 0.05$),表明土壤 pH 对浅层地下水中 DIP 影响较为显著,高原湖泊周边农田土壤 pH 变化范围为 6.74 ~ 8.25,一般 pH 在 6.5 ~ 7.0 时,土壤 P 的有效性

最大,随土壤 pH 增加,碱性土壤中碳酸盐和钙对 P 具有强烈的固定作用,使土壤中 P 主要以磷酸钙等形态存在,减少了土壤 P 流失,导致随土壤 pH 的上升而地下水中 P 浓度减小.浅层地下水 DTP 和 DIP 与土壤 Olsen-P 和 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 的相关性弱于 WEP($P < 0.01$),表明土壤 P 向地下水中迁移主要是以水溶态为主. Sharpley 等^[42]的研究结果表明水溶性磷与淋溶液中 P 含量密切相关,也有学者用水溶性磷表征土壤 P 素流失潜力评价指标,美国宾夕法尼亚州将 WEP 作为评价点位 P 流失差异的一个重要指标^[43,44].土壤含水率是影响地下水 P 浓度的关键因子,本研究中随土壤含水率的增加,浅层地下水中 DTP 和 DIP 浓度呈显著性线性增加($P < 0.01$),表明土壤含水率越高, P 的淋失风险越大,这与时新玲等^[45]的研究结果一致.土壤含水率与土壤水溶性总磷之间具有极显著正相关($P < 0.01$),表明土壤含水率越高, P 的淋失风险越大.随土壤 TN 含量增加,浅层地下水 DTP 和 DIP 浓度呈极显著线性增加($P < 0.01$),表明土壤 TN 对浅层地下水 DIP 浓度的影响更为显著. Bryant 等^[46]认为地下水中 P 浓度的增加伴随着硝酸盐浓度的增加,是与硝化作用引起的钙镁的移动可能导致了富钙镁土壤层 P 的共释放有关.而 Tao 等^[47]的研究发现长江中游地下水中 DTP 浓度与铵态氮相关性显著,认为地下水中 P 的富集与含水层沉积物中富含易降解的有机质和埋藏的泥炭层有关.

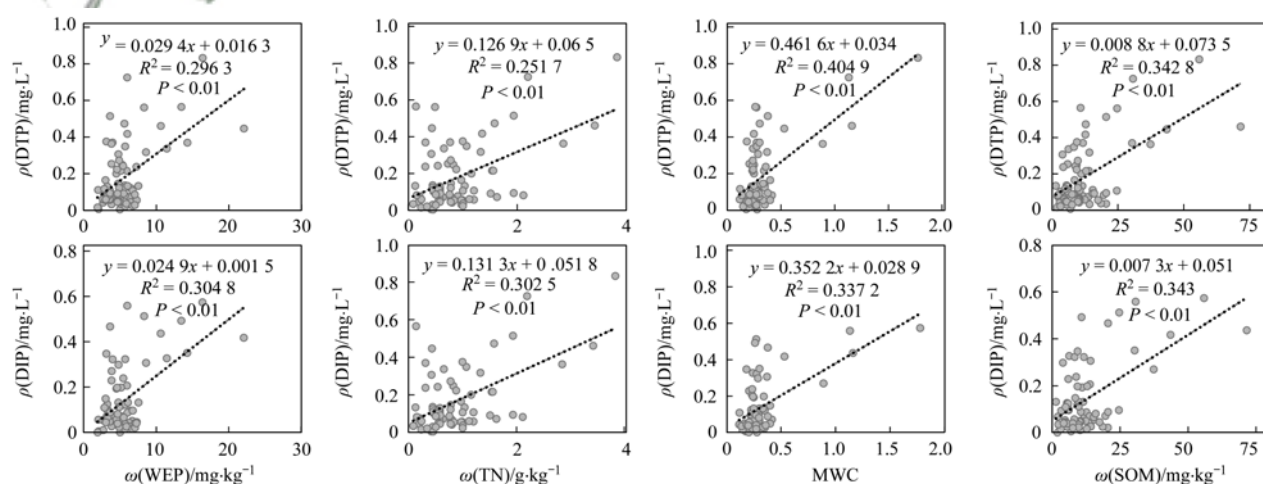


图 8 浅层地下水 DIP 和 DTP 与土壤因子的线性关系

Fig. 8 Linear relationships of DIP and DTP in shallow groundwater with soil factors

浅层地下水中 pH 变化范围为 4.78 ~ 8.12,随水中 pH 的增加浅层地下水 DTP 和 DIP 浓度呈显著线性增加($P < 0.05$,图 9),表明 pH 对 DIP 的影响更为显著,这是由于随 pH 的增加土壤对 P 的吸附降低所致^[26],一方面,水体 pH 上升,增加了水体中的氢氧根离子(OH^-),使被铁铝化合物吸附的 P 被

OH^- 所代替,从而促进了 P 的释放;另一方面,水体 pH 上升,铁氢氧化物形成过程中的可结合态磷,可通过表面络合将 P 吸附在矿物表面,然而在地下水还原状态下,微生物呼吸利用铁作为电子受体,导致铁矿物发生还原溶解,从而释放 P 向地下水中迁移^[47].随地下水水位埋深降低,浅层地下水 DTP 和

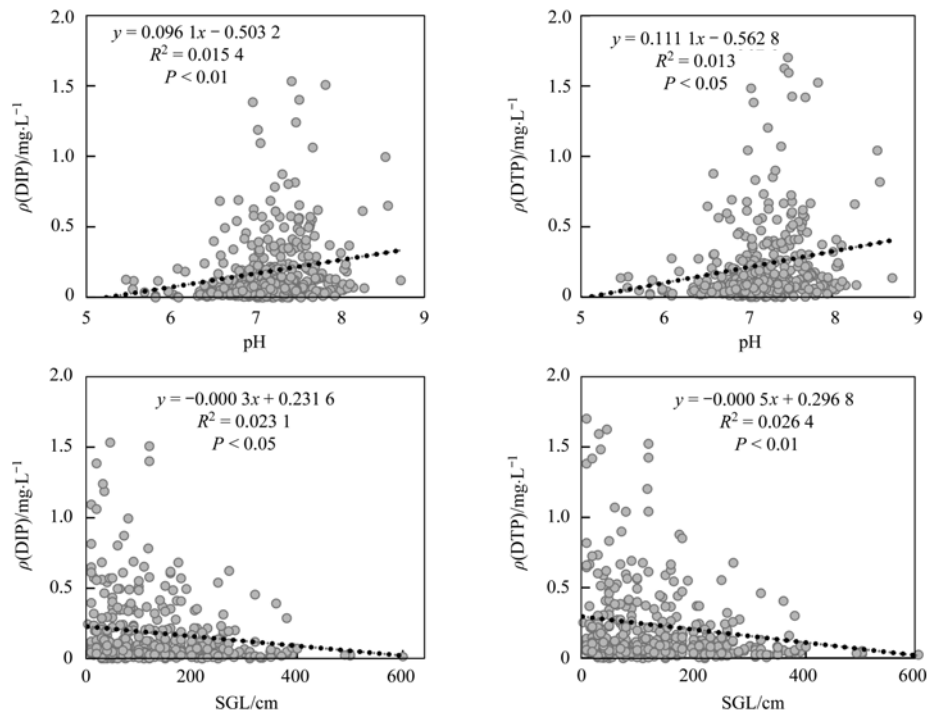


图9 浅层地下水中 DIP 和 DTP 与 pH 和地下水位的线性关系

Fig. 9 Linear relationships of DIP and DTP with pH and SGL in shallow groundwater

DIP 浓度呈显著线性增加 ($P_{DTP} < 0.01$ 和 $P_{DIP} < 0.05$), 表明水位对 DTP 浓度的影响更为显著. 地下水位的上升, 缩短了土壤 P 向地下水中的迁移距离, 从而造成水位越浅的地下水中 P 浓度越高^[34]; 此外, 地下水位上升使土壤氧化还原条件改变, 从而加速土壤 P 的流失, 已有研究表明还原条件下更有利于土壤 P 释放^[48], 本研究中 ORP 与地下水 P 浓度呈弱的负相关(图 7), 也表明在还原条件下, 更有利于 P 释放, 从而导致地下水 P 浓度升高.

4 结论

8 个高原湖泊周边 452 个浅层地下水样中, 近 30% 的样本中 TP 浓度超过《地表水环境质量标准》(GB 3838) 中Ⅲ类水标准, 其中, 洱海、杞麓湖、星云湖和滇池周边浅层地下水中 P 污染较为严重, TP 超标率分别为 52%、45%、42% 和 29%, 且主要污染区域集中在洱海西岸、杞麓湖西南部、星云湖西北部和滇池东南部. 雨季浅层地下水 P 浓度大于旱季, 农田浅层地下水中 P 浓度大于居民区. DTP 占 TP 的质量分数为 75%~81%, DIP 占 DTP 的质量分数为 74%~80%. 土壤中 WEP、MWC、SOM、TN 和地下水中 pH、地下水位是影响浅层地下水 DIP 和 DTP 浓度的关键因子 ($P < 0.05$). 浅层地下水中 DIP 和 DTP 浓度随土壤 WEP、SOM、TN 和 MWC 的增加呈显著线性增加, 地下水中 pH 与 DIP 呈显著正相关, 地下水位与 DTP 呈显著负相关. 因此, 减少

地下水中 P 污染的关键是通过合理施用磷肥, 减少土壤 P 素累积, 阻控 P 向浅层地下水中迁移.

参考文献:

- [1] 夏晶, 刘宁, 高贺文, 等. 商丘市浅层地下水位下降对区域气候的影响[J]. 生态学报, 2010, **30**(16): 4408-4415.
Xia J, Liu N, Gao H W, *et al.* The analysis on impact of shallow groundwater recession to regional climate of Shangqiu City [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, **30**(16): 4408-4415.
- [2] Sophocleous M. Interactions between groundwater and surface water: the state of the science[J]. *Hydrogeology Journal*, 2002, **10**(2), doi: 10.1007/s10040-002-0204-x.
- [3] Aeschbach-Hertig W, Gleeson T. Regional strategies for the accelerating global problem of groundwater depletion[J]. *Nature Geoscience*, 2012, **5**(12): 853-861.
- [4] Zhang Y L, Ma R, Li Z H. Human health risk assessment of groundwater in Hetao Plain (Inner Mongolia Autonomous Region, China)[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2014, **186**(8): 4669-4684.
- [5] Liu X, Wang X L, Zhang L, *et al.* Impact of land use on shallow groundwater quality characteristics associated with human health risks in a typical agricultural area in Central China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, **28**(2): 1712-1724.
- [6] Ma T, Sun S, Fu G T, *et al.* Pollution exacerbates China's water scarcity and its regional inequality[J]. *Nature Communications*, 2020, **11**, doi: 10.1038/s41467-020-14532-5.
- [7] Fosu-Mensah B Y, Okoffo E D, Darko G, *et al.* Organophosphorus pesticide residues in soils and drinking water sources from cocoa producing areas in Ghana[J]. *Environmental Systems Research*, 2016, **5**(1), doi: 10.1186/s40068-016-0063-4.
- [8] Sharpley A N, Robinson J S, Smith S J. Bioavailable phosphorus dynamics in agricultural soils and effects on water quality[J]. *Geoderma*, 1995, **67**(1-2): 1-15.

- [9] Bowes M J, Smith J T, Neal C, *et al.* Changes in water quality of the River Frome (UK) from 1965 to 2009: is phosphorus mitigation finally working? [J]. *Science of the Total Environment*, 2011, **409**(18): 3418-3430.
- [10] Bechmann M E, Berge D, Eggstad H O, *et al.* Phosphorus transfer from agricultural areas and its impact on the eutrophication of lakes-two long-term integrated studies from Norway [J]. *Journal of Hydrology*, 2005, **304**(1-4): 238-250.
- [11] Holman I P, Whelan M J, Howden N J K, *et al.* Phosphorus in groundwater-an overlooked contributor to eutrophication? [J]. *Hydrological Processes*, 2008, **22**(26): 5121-5127.
- [12] Heiberg L, Pedersen T V, Jensen H S, *et al.* A comparative study of phosphate sorption in lowland soils under oxic and anoxic conditions [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2010, **39**(2): 734-743.
- [13] Prem M, Hansen H C B, Wenzel W, *et al.* High spatial and fast changes of iron redox state and phosphorus solubility in a seasonally flooded temperate wetland soil [J]. *Wetlands*, 2015, **35**(2): 237-246.
- [14] 巫顺金. 福建省耕地土壤磷素富集及其生态风险评价 [D]. 福州: 福建农林大学, 2014.
- [15] 杨振兴, 周怀平, 解文艳, 等. 长期施肥褐土不同磷组分对磷素盈余的响应 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, **26**(5): 942-933.
Yang Z X, Zhou H P, Xie W Y, *et al.* Response of phosphorus components to phosphate surplus in cinnamon soil under long-term fertilization [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, **26**(5): 942-933.
- [16] Lü J L, Fortune S, Brookes P. P fractions in drainage waters from the broadbalk continuous wheat experiment at Rothamsted [J]. *Pedosphere*, 2004, **14**(2): 235-240.
- [17] Tian J H, Boitt G, Black A, *et al.* Accumulation and distribution of phosphorus in the soil profile under fertilized grazed pasture [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2017, **239**: 228-235.
- [18] Sharma R, Bell R W, Wong M T F. Dissolved reactive phosphorus played a limited role in phosphorus transport via runoff, throughflow and leaching on contrasting cropping soils from southwest Australia [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **577**: 33-43.
- [19] 李可芳, 黄霞. 磷肥的使用与农业面源污染 [J]. *环境科学与技术*, 2004, **27**(S1): 189-190.
Li K F, Huang X. Use of phosphorus fertilizer and agricultural pollution [J]. *Environmental Science & Technology*, 2004, **27**(S1): 189-190.
- [20] 李汝君, 杨凤根. 徐州铜山地区浅层地下水中磷污染时空分布特征 [J]. *勘察科学技术*, 2014, (3): 6-10, 24.
Li R J, Yang F G. Temporal and spatial distribution characteristics of phosphorus pollution in shallow groundwater in Tongshan Area, Xuzhou City [J]. *Site Investigation Science and Technology*, 2014, (3): 6-10, 24.
- [21] 马玉萍. 巢湖北岸浅层地下水水化学特征及磷素分布研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2011.
- [22] 黄红艳, 高扬, 曹杰君, 等. 上海市都市农业区域地下水磷素非点源污染特征研究 [J]. *水土保持学报*, 2010, **24**(1): 101-104, 113.
Huang H Y, Gao Y, Cao J J, *et al.* Characteristics of phosphorus non-point source pollution on groundwater in urban agricultural region of Shanghai [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, **24**(1): 101-104, 113.
- [23] 蔡文静, 常春平, 宋帅, 等. 德州地区地下水中磷的空间分布特征及来源分析 [J]. *中国生态农业学报*, 2013, **21**(4): 456-464.
Cai W J, Chang C P, Song S, *et al.* Spatial distribution and sources of groundwater phosphorus in Dezhou Region [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, **21**(4): 456-464.
- [24] Liu J, Aronsson H, Bergström L, *et al.* Phosphorus leaching from loamy sand and clay loam topsoils after application of pig slurry [J]. *SpringerPlus*, 2012, **1**(1), doi: 10.1186/2193-1801-1-53.
- [25] Andersson H, Bergström L, Djodjic F, *et al.* Topsoil and subsoil properties influence phosphorus leaching from four agricultural soils [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2013, **42**(2): 455-463.
- [26] Mabilde L, De Neve S, Sleutel S. Regional analysis of groundwater phosphate concentrations under acidic sandy soils: edaphic factors and water table strongly mediate the soil P-groundwater P relation [J]. *Journal of Environmental Management*, 2017, **203**: 429-438.
- [27] Qu F Z, Shao H B, Meng L, *et al.* Forms and vertical distributions of soil phosphorus in newly formed coastal wetlands in the Yellow River Delta estuary [J]. *Land Degradation & Development*, 2018, **29**(11): 4219-4226.
- [28] 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.
- [29] 张召文. 云南九大高原湖泊治理的复杂性、艰巨性和长期性 [J]. *环境科学导刊*, 2012, **31**(1): 19-20.
Zhang Z W. Complexity, hardness and chronicity of treatment of the nine plateau lakes in Yunnan [J]. *Environmental Science Survey*, 2012, **31**(1): 19-20.
- [30] 王金林, 武广云, 刘友林, 等. 云南省化肥施用现状及减量增效的途径研究 [J]. *中国农学通报*, 2018, **34**(3): 26-36.
Wang J L, Wu G Y, Liu Y L, *et al.* The fertilizer application status and the approach of fertilizer-reduce and efficiency-increase in Yunnan Province [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2018, **34**(3): 26-36.
- [31] 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.
- [32] Chen A Q, Lei B K, Hu W L, *et al.* Temporal-spatial variations and influencing factors of nitrogen in the shallow groundwater of the nearshore vegetable field of Erhai Lake, China [J]. *Environmental science and Pollution Research*, 2018, **25**(5): 4858-4870.
- [33] Zhao S, Zhou N Q, Liu X Q. Occurrence and controls on transport and transformation of nitrogen in riparian zones of Dongting Lake, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, **23**(7): 6483-6496.
- [34] Holford I C R, Patrick W H. Effects of duration of anaerobiosis and reoxidation on phosphate sorption characteristics of an acid soil [J]. *Australian Journal of Soil Research*, 1981, **19**(1): 69-78.
- [35] 谭海燕, 钱玲, 张少敏, 等. 滇池流域农业种植结构及农户施肥调查研究 [J]. *云南农业科技*, 2020, (3): 8-10.
Tan H Y, Qian L, Zhang S M, *et al.* Investigation on cropping structure and fertilizer amount in Dian lake watershed [J]. *Yunnan Agricultural Science and Technology*, 2020, (3): 8-10.

- [36] 汪泰, 王慧姣, 包立, 等. 通海县菜地土壤养分状况分析与评价[J]. 中国农学通报, 2016, **32**(24): 162-167.
Wang T, Wang H J, Bao L, *et al.* Analysis and evaluation of vegetable soil nutrient status in Tonghai[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2016, **32**(24): 162-167.
- [37] 柏兆海, 万其宇, 李海港, 等. 县域农田土壤磷素积累及淋失风险分析—以北京市平谷区为例[J]. 农业环境科学学报, 2011, **30**(9): 1853-1860.
Bai Z H, Wan Q Y, Li H G, *et al.* Evaluation of soil phosphorus accumulation and loss risk on arable land at county level: the example of Pinggu District, Beijing City, China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2011, **30**(9): 1853-1860.
- [38] 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.
- [39] Kang J, Hesterberg D, Osmond D L. Soil organic matter effects on phosphorus sorption: a path analysis[J]. Soil Science Society of America Journal, 2009, **73**(2): 360-366.
- [40] Guppy C N, Menzies N W, Moody P W, *et al.* Competitive sorption reactions between phosphorus and organic matter in soil: a review[J]. Australian Journal of Soil Research, 2005, **43**(2): 189-202.
- [41] 王子琬, 梁新强. 土壤干湿交替对磷素释放的影响机制[J]. 环境生态学, 2020, **2**(5): 54-58.
Wang Z W, Liang X Q. Effects of alternate drying-rewetting process on migration and transformation of soil phosphorus[J]. Environmental Ecology, 2020, **2**(5): 54-58.
- [42] Sharpley A, Moyer B. Phosphorus forms in manure and compost and their release during simulated rainfall [J]. Journal of Environmental Quality, 2000, **29**(5): 1462-1469.
- [43] 龚文. 滇池流域有机肥水溶性磷组分及其氮磷流失原位模拟研究[D]. 昆明: 云南农业大学, 2009.
- [44] 陆杰, 魏晓平, 张怀志. 面源污染中畜禽有机肥磷的流失形态及其环境效应[J]. 中国人口·资源与环境, 2006, **16**(5): 130-134.
Lu J, Wei X P, Zhang H Z. Phosphorus forms in livestock or poultry manure and environment affection[J]. China Population, Resources and Environment, 2006, **16**(5): 130-134.
- [45] 时新玲, 李志军, 王锐. 土壤磷扩散的影响因素研究[J]. 水土保持通报, 2003, **23**(5): 15-18.
Shi X L, Li Z J, Wang R. Research on impact factors of phosphorus diffusion in soil [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2003, **23**(5): 15-18.
- [46] Bryant B A, Kraft G J, Bowling J M, *et al.* Collateral geochemical impacts of agricultural nitrogen enrichment from 1963 to 1985: a southern Wisconsin ground water depth profile [J]. Journal of Environmental Quality, 2008, **37**(4): 1456-1467.
- [47] Tao Y Q, Deng Y M, Du Y, *et al.* Sources and enrichment of phosphorus in groundwater of the Central Yangtze River Basin [J]. Science of the Total Environment, 2020, **737**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.139837.
- [48] Wu Y H, Wen Y J, Zhou J X, *et al.* Phosphorus release from lake sediments: effects of pH, temperature and dissolved oxygen [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2014, **18**(1): 323-329.

CONTENTS

Development Scenarios and Environmental Benefits Analysis of Future Power Generation Industry Under Two Modes in China	LIU Chun-jing, LÜ Jian-yi, ZHAO Wen-chang, <i>et al.</i>	(3375)
Forecasting of Emission Co-reduction of Greenhouse Gases and Pollutants for the Road Transport Sector in Lanzhou Based on the LEAP Model	PANG Ke, ZHANG Qian, MA Cai-yun, <i>et al.</i>	(3386)
Discussion of Air Quality Forecasting Evaluation for Cities Based on Half-level Method	WANG Xiao-yan, ZHU Li-li, XU Rong, <i>et al.</i>	(3396)
Characterization and Health Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} in Xiamen Port	XIAO Si-han, CAI Mei-jun, LI Xiang, <i>et al.</i>	(3404)
Deposition Characteristics of Water-soluble Inorganic Nitrogen and Organic Nitrogen in Atmospheric Precipitation in the Northern Suburbs of Nanjing	ZHANG Jia-ying, YU Xing-na, ZHANG Yu-xiu, <i>et al.</i>	(3416)
Analysis of PM _{2.5} Transmission Characteristics in Main Cities of Jinzhong Basin in Winter	WANG Xiao-lan, WANG Yan, YAN Shi-ming, <i>et al.</i>	(3423)
Temporal Evolution and Source Apportionment of Black Carbon Aerosol in Ordos During Summer and Autumn 2019	KONG Xiang-chen, ZHANG Lian-xia, ZHANG Cai-yun, <i>et al.</i>	(3439)
Characteristics, Sources, and SOAP of VOCs During Winter in Jiyuan	WANG Fang, LI Li-xia, WANG Hong-guo, <i>et al.</i>	(3451)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in August in the Chang-Zhu-Tan Urban Area	LUO Da-tong, ZHANG Qing-mei, LIU Zhan, <i>et al.</i>	(3463)
Ozone Sensitivity Analysis and Control Strategy in Shijiazhuang City in July 2019	ZHU Jia-xian, WANG Xiao-qi, OU Sheng-ju, <i>et al.</i>	(3473)
Spatiotemporal Variation and Influencing Factors of AOD in the North China Plain	GUO Lin, MENG Fei, MA Ming-liang	(3483)
Aerosol Optical Characteristics with Ground-based Measurements via Sun Photometer and Its Relationship with PM Particle Concentration in Chang'an	ZHENG Yu-rong, WANG Xu-hong, CUI Si-ying, <i>et al.</i>	(3494)
Spatial-temporal Distribution and Evolution Characteristics of Air Pollution in Beijing-Tianjin-Hebei Region Based on Long-term "Ground-Satellite" Data	WANG Yao-ting, YIN Zhen-ping, ZHENG Zuo-fang, <i>et al.</i>	(3508)
Ten-year Trend Analysis of Eutrophication Status and the Related Causes in Lake Hongze	CHEN Tian-yu, LIU Chang-qing, SHI Xiao-li, <i>et al.</i>	(3523)
Shallow Groundwater Around Plateau Lakes: Spatiotemporal Distribution of Phosphorus and Its Driving Factors	YANG Heng, LI Gui-fang, YE Yuan-hang, <i>et al.</i>	(3532)
Characteristics and Differences of Dissolved Oxygen Stratification in Different Tributaries of Three Gorges Reservoir During Impoundment Period	Ji Dao-bin, FANG Jiao, LONG Liang-hong, <i>et al.</i>	(3543)
Dissolved Organic Matter Component and Source Characteristics of the Metropolitan Lakes and Reservoirs in a Typical Karst Region	NI Mao-fei, ZHOU Hui, MA Yong-mei, <i>et al.</i>	(3552)
Characteristics, Sources, and Risk Assessment of Perfluoroalkyl Substances in Surface Water and Sediment of Luoma Lake	HUANG Jia-hao, WU Wei, HUANG Tian-yin, <i>et al.</i>	(3562)
Vertical Distribution Characteristics and Influencing Factors of Phytoplankton Community Structure in Qiandao Lake	WANG Ji-yi, HUO Di, GUO Chao-xuan, <i>et al.</i>	(3575)
Chemical Forms and Spatial Distribution of Phosphorus in the Sediment of Sihe River	ZHANG Zi-han, ZHANG Xin-ru, JIA Chuan-xing, <i>et al.</i>	(3587)
Influence of Optimal Land Use Allocation on Phosphorus Loss in the Process of Rainfall and Runoff	ZHOU Hao, CHEN Fang-xin, LUO Yi-feng, <i>et al.</i>	(3597)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Accumulated Heavy Metals in Bioretention Systems	CHU Yang-yang, YANG Long, ZHOU Yuan, <i>et al.</i>	(3608)
Effects of Damming and Impoundment on Planktonic Microbial Community Structure and Interspecific Interaction Patterns in Different Water Depths	WANG Xun, ZHANG Jia-jia, YUAN Qiu-sheng, <i>et al.</i>	(3623)
Identification of Bacterial Flora and Metabolic Function of Sediments in Different Channels of Duliujian River Basin, Tianjin	LIU Jia-yuan, FENG Yue, YANG Xue-chun, <i>et al.</i>	(3635)
Spatiotemporal Distribution and Source Apportionment of Suspended Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Water	PENG Ke-xing, LI Rui-fei, ZHOU Yi-chen, <i>et al.</i>	(3645)
Spatial Variation and Potential Sources of Microplastics in Rivers in Tongzhou District, Beijing	MEN Cong, LI Di, ZUO Jian-e, <i>et al.</i>	(3656)
Effects of Microplastic Exposure on Crucian Growth, Liver Damage, and Gut Microbiome Composition	HU Jia-min, ZUO Jian-e, LI Jin-bo, <i>et al.</i>	(3664)
Influence of Different Types of Dewatering Agents on the Solidification Effect and Physical and Chemical Properties of Sediment	REN Jun, YIN Peng, WANG Wei-zhen, <i>et al.</i>	(3672)
Structural Characteristics of Micro-nano Particle Size Biochar and Its Adsorption Mechanism for Cd ²⁺	MA Wen-yan, PEI Peng-gang, GAO Ge, <i>et al.</i>	(3682)
Phosphorus Adsorption Characteristics of Different Biochar Types and Its Influencing Factors	LIAN Shen-hai, ZHANG Shu-nan, LIU Feng, <i>et al.</i>	(3692)
Development of Zeolite Loaded Mg-La-Fe Ternary (hydr)oxides for Treatment of Low Concentration Phosphate Wastewater	YIN Xue-jie, SONG Xiao-bao, DING Chen-man, <i>et al.</i>	(3699)
Succession and PICRUS2-based Predicted Functional Analysis of Microbial Communities During the Sludge Bulking Occurrence and Restoration in One-stage Combined Partial Nitrification and ANAMMOX Process	LI Ya-nan, YAN Bing, ZHENG Rui, <i>et al.</i>	(3708)
Aerobic Granulation Stability and Microbial Diversity of Filamentous Bulking Sludge	GAO Chun-di, YANG Xiao-yang, OU Jia-li, <i>et al.</i>	(3718)
Dynamic Variation in Vegetation Cover and Its Influencing Factor Detection in the Yangtze River Basin from 2000 to 2020	XU Yong, ZHENG Zhi-wei, GUO Zhen-dong, <i>et al.</i>	(3730)
Enrichment and Ecological Risk Assessment of Available Phosphorus in Paddy Soil of Fujian Province Over Past 40 years	CHEN Zhong-xing, QIU Long-xia, CHEN Han-yue, <i>et al.</i>	(3741)
Effects of Land Use Change on Constitution, Stability, and C, N, P Stoichiometric Characteristics of Soil Aggregates in Southwest China Karst	HE Yu, SHENG Mao-yin, WANG Ke, <i>et al.</i>	(3752)
Heavy Metal Pollution and Health Risk Assessment of Mine Soil in Yangtze River Economic Belt	ZHANG Zhe, LU Ran, WU Si-yang, <i>et al.</i>	(3763)
Pollution Characteristics and Phytotoxicity of Heavy Metals in the Soil Around Coal Gangue Accumulation Area	SHANG Yu, SANG Nan	(3773)
Evaluation of Mercury Pollution in Soil of Different Land Use Types in Coal-fired Industrial Area	LI Qiang, YAO Wan-cheng, ZHAO Long, <i>et al.</i>	(3781)
Cadmium Enrichment and Bioavailability of Quaternary Profiles in Nansha District, Guangzhou, China	WANG Fang-ting, BAO Ke, HUANG Chang-sheng, <i>et al.</i>	(3789)
Health Risk Assessment and Environmental Benchmark of Heavy Metals in Cultivated Land in Mountainous Area of Northwest Guizhou Province	XU Meng-qi, YANG Wen-tao, YANG Li-yu, <i>et al.</i>	(3799)
Effect Factors and Model Prediction of Soil Heavy Metal Bioaccessibility	ZHANG Jia-wen, TIAN Biao, LUO Jing-jing, <i>et al.</i>	(3811)
Effect of Organic Material Amendments on Soil Respiration in Tobacco Fields of Central Henan	LU Qi-fei, YE Xie-feng, HAN Jin, <i>et al.</i>	(3825)
Methane Production Potential and Methanogenic Pathways in Paddy Soils Under Different Rice-based Cropping Systems	SHEN Wan-yu, HUANG Qiong, MA Jing, <i>et al.</i>	(3835)
Characteristics and Assembly Process of Reclaimed Soil Microbial Communities in Eastern Plain Mining Areas	MA Jing, DONG Wen-xue, ZHU Yan-feng, <i>et al.</i>	(3844)
Differences in Bacterial Community Structure in Rhizosphere Soil of Three <i>Caragana</i> Species and Its Driving Factors in a Common Garden Experiment	LI Yuan-yuan, XU Ting-ting, AI Zhe, <i>et al.</i>	(3854)
Comparison of Bacterial Community Structure and Functional Groups of Paddy Soil Aggregates Between Karst and Non-karst Areas	XIAO Xiao-yi, JIN Zhen-jiang, LENG Meng, <i>et al.</i>	(3865)
Contrasting Responses of the Microbial Community Structure and Functional Traits to Soil pH in Purple Soils	WANG Zhi-hui, JIANG Xian-jun	(3876)
Effects of Agricultural Organic Waste Incorporation on the Metabolic Capacity of Microbial Carbon Sources of Dissolved Organic Matter in Paddy Soil	XIAO Yi, LI Zheng, HUANG Rong, <i>et al.</i>	(3884)