

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

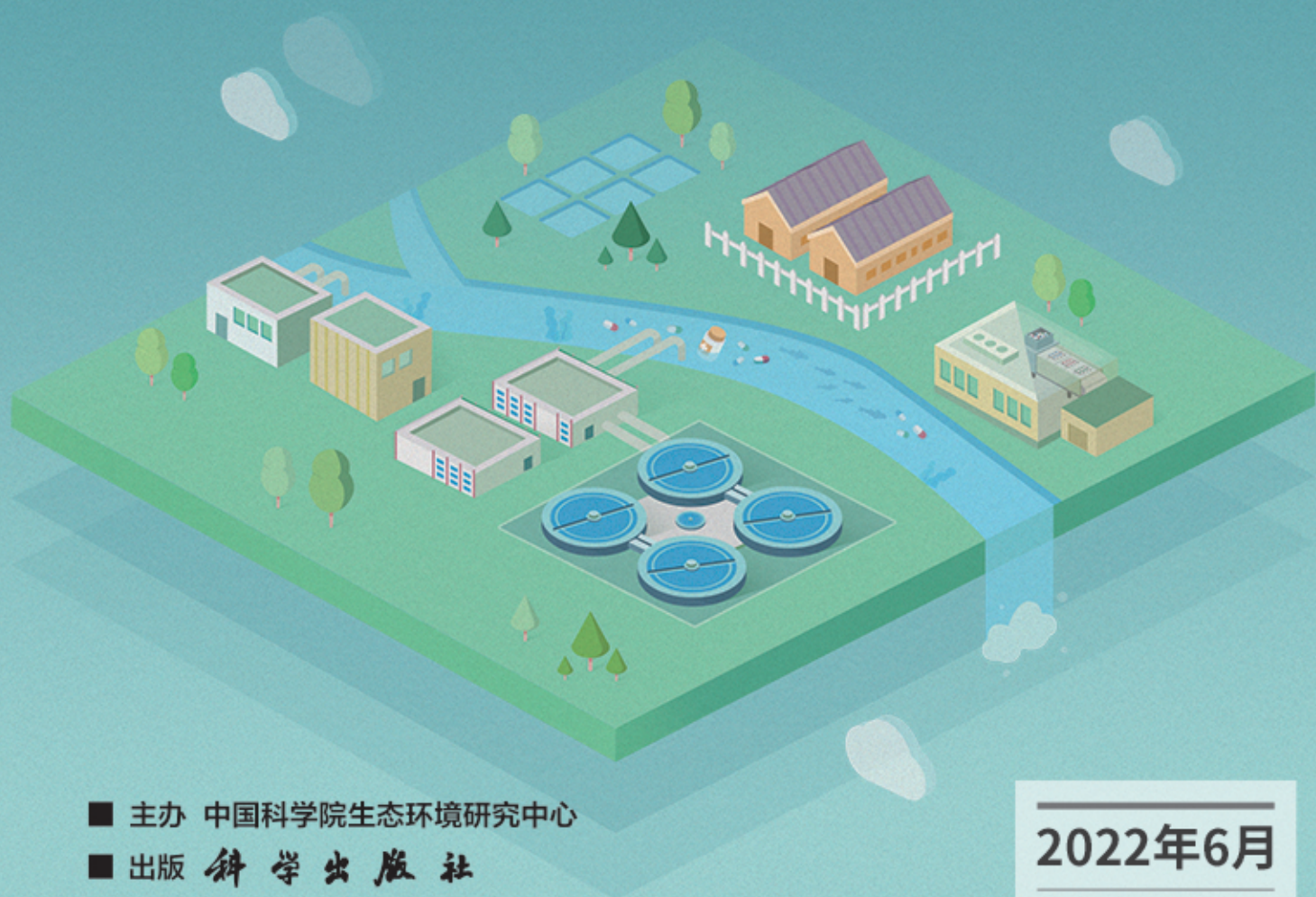
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

长江中游典型饮用水水源中药物的时空分布及风险评价

武俊梅, 魏琳, 彭晶倩, 何鹏, 施鸿媛, 汤冬梅, 吴振斌



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年6月

第43卷 第6期
Vol.43 No.6

目次

COVID-19 管控期间气象条件变化对京津冀 PM _{2.5} 浓度影响	邱雨露, 陈磊, 朱佳, 马志强, 李梓铭, 郭恒, 唐颖潇 (2831)
新冠疫情管控措施对郑州市 PM _{2.5} 浓度、粒径分布、组分和来源的影响	黄兵役, 王申博, 和兵, 薛若雨, 高更宇, 张瑞芹 (2840)
COVID-19 管控期间苏州市 PM _{2.5} 中金属元素浓度变化及来源解析	缪青, 杨倩, 吴也正, 魏恒, 周民锋, 张晓华, 邹强 (2851)
2015 ~ 2019 年南京北郊碳质气溶胶组成变化	谢添, 曹芳, 章炎麟, 林煜棋, 范美益, 宋文怀, 鲍孟盈, 项妍琨, 赵祝钰, 杨笑影, 谢锋, 张煜炯, 俞浩然, 张子金, 邢佳莉 (2858)
基于受体和化学传输的综合模型解析重庆 PM _{2.5} 来源	彭超, 李振亮, 曹云攀, 蒲茜, 方维凯, 王晓宸, 汪凌韬 (2867)
保定市冬季 PM _{2.5} 的氧化潜势特征及其影响来源分析	吴继炎, 杨池, 张春燕, 范美益, 吴爱坪, 章炎麟 (2878)
南京江北新区 PM _{2.5} 中水溶性有机氮的污染特征及其来源	关璐, 丁铖, 张毓秀, 胡建林, 于兴娜 (2888)
广西十万大山背景点 PM _{2.5} 中非极性有机气溶胶组成及来源解析	邢佳莉, 曹芳, 王谦, 张煜炯, 章炎麟 (2895)
大气多环芳烃区域迁移转化模型比较与关键影响因素: 以京津冀地区为例	张馨露, 刘世杰, 韩美丽, 苏超, 张志鹏, 马琳琳, 李洋, 程苗苗 (2906)
基于过程分析的京津冀区域典型城市臭氧成因	唐颖潇, 姚青, 蔡子颖, 丁净, 樊文雁, 杨旭, 韩素芹 (2917)
天津市 PM _{2.5} -O ₃ 复合污染特征及气象影响分析	肖致美, 李源, 孔君, 李鹏, 蔡子颖, 高璟, 徐虹, 戴运峰, 邓小文 (2928)
2016 ~ 2020 年山东省空气质量时空分布特征及影响因素分析	周梦鸽, 杨依, 孙媛, 张凤英, 李永华 (2937)
河南省臭氧污染趋势特征及敏感性变化	晏洋洋, 尹沙沙, 何秦, 秦凯, 张瑞芹 (2947)
热带气旋对珠三角秋季臭氧污染的影响	赵伟, 吕梦瑶, 卢清, 高博, 梁小明, 刘明, 孙家仁, 陈来国, 范绍佳 (2957)
武汉市夏季大气挥发性有机物实时组成及来源	苏维峰, 孔少飞, 郑煌, 陈楠, 祝波, 全继宏, 祁士华 (2966)
运城市夏季大气挥发性有机物污染特征及来源解析	温肖宇, 赵文婷, 罗淑贞, 张强, 王姝涛, 马俊杰, 刘新罡 (2979)
我国地表水新烟碱类杀虫剂对水生生物安全的威胁	范丹丹, 刘红玲, 杨柳燕 (2987)
长江中游典型饮用水水源中药物的时空分布及风险评价	武俊梅, 魏琳, 彭晶倩, 何鹏, 施鸿媛, 汤冬梅, 吴振斌 (2996)
内蒙古东北部地区地下-地表饮用水源多环芳烃污染特征与风险	张坤峰, 昌盛, 付青, 樊月婷, 王思瑞, 孙兴滨, 王山军 (3005)
不同尺度土地利用方式对地表水环境质量的影响及驱动机制	宋静雯, 张学霞, 姜东旸, 赵丞豪, 李鹏飞 (3016)
高原湖泊周边浅层地下水: 氮素时空分布及驱动因素	李桂芳, 杨恒, 叶远行, 陈清飞, 崔荣阳, 陈安强, 张丹 (3027)
青海湖沉积物重金属分布及其潜在生态风险分析	张雅然, 车霏霏, 付正辉, 许野, 李薇 (3037)
东江湖表层沉积物重金属污染特征与潜在生态风险评价	赵晓亮, 李响, 卢洪斌, 卢少勇, 王涛, 张森霖, 国晓春, 张静, 弥启欣, 刘晓贺, 宋书峰 (3048)
湖泊沉积物有机磷释放动力学特征及水质风险	刘哲哲, 倪兆奎, 刘思儒, 李晓秀, 王圣瑞 (3058)
长三角一体化示范区青浦区水体表层沉积物有机质分布特征、来源解析及污染评价	张智博, 段艳平, 涂耀仁, 罗鹏程, 高峻 (3066)
香溪河流域微塑料的分布特征及其迁移规律分析	陈圣盛, 李卫明, 张坤, 熊伟唯, 张续同, 刘子健 (3077)
城市水体微塑料垂向分布下附着细菌群落结构和功能响应	陈玉芳, 闫振华, 张燕, 赵海洲 (3088)
2015 ~ 2020 年洪泽湖浮游植物群落结构及其环境影响因子	屈宁, 邓建明, 张祯, 蔡永久, 龚志军, 李明 (3097)
嘉兴南湖不同湖区浮游植物群落结构特征与环境因子关系	王雅雯, 李迎鹤, 张博, 郭云艳, 陈俊伊, 韩松 (3106)
近 20 年来广东省农业面源污染负荷时空变化与来源分析	葛小君, 黄斌, 袁再健, 王栋栋, 王泉泉, 陈佳村, 谢真越 (3118)
长江上游平原丘陵区农业非点源污染输出特征和驱动机制	谭少军, 刘洋, 朱小婕, 刘荷, 邵景安, 邓华 (3128)
高分辨率数据驱动的流域非点源污染输出风险评估方法	顾晶晶, 冶涛涛, 董甲平, 蒋云钟, 曹引, 赵红莉 (3140)
不同面源强度影响下城市河流溶解性有机质光谱特征变化	陈旭东, 高良敏 (3149)
生态沟渠-生物滞留池组合控制农村径流污染	石雷, 杨小丽, 吴青宇, 王亦铭, 徐佳莹 (3160)
不同水力扰动强度对老化 PSMPs 在泥水两相间迁移的影响	吴香香, 艾萍, 李大鹏 (3168)
北京市中心城区屋面径流污染特征及来源分析	席玥, 郭婧, 陶蕾, 田颖, 陈吉吉, 吴悦, 徐蘇士, 荆红卫, 刘保献 (3177)
不同植被绿色屋顶径流水质年际变化特征	章孙逊, 张守红, 葛德, 闫婧, 杨航, 王任重远, 魏良怡, 张成玉 (3187)
可见光促有机物诱导铁还原的多相类芬顿体系强化效能与机制	曹丝雨, 许路, 付权超, 金鑫, 石炬, 金鹏康 (3195)
4 种典型抗生素在反硝化体系中的去除特性	唐佳, 陈茜, 覃牧川, 唐溪, 唐崇俭 (3204)
农业废弃物基生物炭对水溶液中镉的吸附效果与机制	龚沛云, 孙丽娟, 宋科, 孙雅菲, 秦秦, 周斌, 薛永 (3211)
腐殖酸-重金属对 ANAMMOX 菌脱氮性能的影响及其动力学分析	李芸, 崔楠, 熊星星, 黄志远, 李泽兵, 王东亮, 李朝明, 许丹, 李军 (3221)
2000 ~ 2020 年西南地区植被 NDVI 对气候变化和人类活动响应特征	徐勇, 黄雯婷, 窦世卿, 郭振东, 李欣怡, 郑志威, 靖娟利 (3230)
黄河三角洲湿地不同植被类型下土壤营养元素空间分布及其生态化学计量学特征	孙德斌, 栗云召, 于君宝, 杨继松, 杜朝红, 孙丹丹, 凌越, 马元庆, 周迪, 王雪宏, 赵佳怡 (3241)
青藏高原东北部地区表层土壤中全氟化合物的分布特征及来源解析	温祥洁, 陈朝辉, 徐维新, 吴小娟, 郝云庆, 刘伟, 印红玲, 方淑红 (3253)
西南典型“退耕还林”区土地利用/覆被变化对土壤中硒及重金属含量的影响	刘永林, 刘属灵, 吴梅, 田兴磊, 刘双燕 (3262)
贵州普定喀斯特关键带土壤重金属形态特征及风险评价	张倩, 韩贵琳 (3269)
南丹盆地东部山区土壤锆分布特征及其影响因素分析	董秋瑶, 赖书雅, 宋超, 温皓天, 严明疆, 杨振京 (3278)
神农架川金丝猴栖息地重金属污染特征及风险评价	严佳莉, 于紫玲, 余辉亮, 向明灯, 王传华 (3288)
石灰泡石钝化后两种轮作模式对重度镉污染农田土壤的利用及修复	许璐, 周春海, 刘梅, 孔辉, 李元, 黄志红 (3299)
水稻磷盈亏对镉吸收转运的影响	谭文韬, 霍洋, 周航, 仇银燕, 曾鹏, 辜娇峰, 廖柏寒 (3308)
改良剂调控下水稻镉累积和土壤溶解性有机质光谱特征的响应	罗会龙, 陈娟, 张云慧, 袁贝, 杨宾, 张昊, 杜平 (3315)
土壤真菌群落对五台山亚高山草甸退化的响应	罗正明, 赫磊, 刘晋仙, 胡砚秋, 周妍英, 郑庆荣, 柴宝峰 (3328)
小麦与不同作物多样化轮作对土壤真菌群落的影响	靳海洋, 岳俊芹, 闫雅倩, 张德奇, 杨程, 张素瑜, 李向东, 邵运辉, 方保停, 王汉芳, 秦峰 (3338)
重庆农田土壤有机碳稳定性同位素空间分布特征	廖宇琴, 龙娟, 木志坚, 文首鑫, 李翠莲, 杨志敏, 赵秀兰 (3348)
长江三角洲 2018 年土壤 NO 排放特征	廖加强, 薛金, 王文锦, 朱永慧, 朱安生, 黄凌, 王杨君, 李莉 (3357)
基于多源数据的城市扩张中热环境演变及响应	梁建设, 白永平, 杨雪蕊, 高祖桥, 李玲蔚, 张春悦, 王倩 (3365)
《环境科学》征订启事 (3004) 《环境科学》征稿简则 (3047) 信息 (3252, 3298, 3327)	

高原湖泊周边浅层地下水:氮素时空分布及驱动因素

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

(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: 高原湖泊周边浅层地下水作为当地重要的生产和生活水源之一, 由于受到地表氮素投入负荷、降雨和灌溉等因素驱动下, 浅层地下水 NO_3^- -N污染较为严重, 威胁着高原湖泊水质安全。2020~2021年雨季和旱季从云南8个高原湖泊周边农田和居民区的水井中采集了463个浅层地下水样, 分析了地下水中氮的污染特征及驱动因素。结果表明, 浅层地下水中 $\rho(\text{TN})$ 、 $\rho(\text{NO}_3^- \text{-N})$ 、 $\rho(\text{ON})$ 和 $\rho(\text{NH}_4^+ \text{-N})$ 平均值分别为24.35、15.15、8.41和0.79 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 8个湖泊周边近32%的浅层地下水样 NO_3^- -N浓度超过地下水Ⅲ类水质要求(GB/T 14848), 其中, 洱海、杞麓湖和滇池湖泊周边地下水 NO_3^- -N浓度超标率最高, 其次是星云湖、阳宗海和异龙湖, 最小为抚仙湖和程海。土地利用和季节变化影响着浅层地下水中各形态N浓度及其组成, 农田区浅层地下水中各形态N浓度高于居民区, 除 NH_4^+ -N外, 雨季浅层地下水中各形态N浓度高于旱季。 NO_3^- -N是TN的主要形态, 占TN的质量分数为57%~68%, ON占TN的质量分数为27%~38%。浅层地下水中EC、DO、ORP和T是反映或影响浅层地下水中各形态N浓度的关键因子, 而土壤因子对浅层地下水中各形态N浓度影响较弱。

关键词: 浅层地下水; 氮(N); 时空分布; 驱动因素; 高原湖泊

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)06-3027-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202109195

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

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

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

Abstract: Shallow groundwater around plateau lakes is one of the important sources of production and potable water. Shallow groundwater NO_3^- -N pollution driven by factors such as surface nitrogen input load, rainfall, and irrigation is serious and threatens the water quality of plateau lakes. In order to identify the characteristics of nitrogen pollution and its driving factors in shallow groundwater, 463 shallow groundwater samples were collected from wells in farmland and residential areas around eight plateau lakes of Yunnan in the rainy and dry seasons in 2020 and 2021. The results showed that the average values of $\rho(\text{TN})$, $\rho(\text{NO}_3^- \text{-N})$, $\rho(\text{ON})$, and $\rho(\text{NH}_4^+ \text{-N})$ in shallow groundwater were 24.35, 15.15, 8.41, and 0.79 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively. Nearly 32% of the shallow groundwater samples around the eight lakes failed to meet the groundwater Class Ⅲ water quality requirements (GB/T 14848) of 20 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ for NO_3^- -N. Among them, the NO_3^- -N concentration in the shallow groundwater around Erhai Lake, Qiluhu Lake, and Dianchi Lake had the highest rate of exceeding the standard, followed by that around Xingyunhu Lake, Yangzonghai Lake, Yilonghu Lake, Fuxianhu Lake, and Chenghai Lake as the smallest. Land use and seasonal changes affected the concentration and composition of various forms of nitrogen in shallow groundwater. The concentration of various forms of nitrogen in shallow groundwater in the farmland area was higher than that in the residential area. The nitrogen concentration in shallow groundwater in farmland was higher than that in residential areas. Except for NH_4^+ -N, the concentration of various forms of nitrogen in shallow groundwater in the rainy season was higher than that in the dry season. NO_3^- -N was the main nitrogen form in shallow groundwater; the fraction of TN was 57%-68%, and the fraction of ON was 27%-38%. The EC, DO, ORP, and T in shallow groundwater were the key factors reflecting or affecting the concentration of various forms of nitrogen in shallow groundwater, whereas soil factors had a weak impact on the concentration of various forms of nitrogen in shallow groundwater.

Key words: shallow groundwater; nitrogen(N); spatiotemporal distribution; driving factor; plateau lake

近几十年来,地下水硝酸盐污染已成为世界性问题,不仅威胁着饮用水安全、农田灌溉和工矿用水^[1,2],还加剧了以浅层地下水为补给的河流和湖泊等地表水的富营养化进程^[3],造成了区域性水资源短缺。特别是,高度集约化农区土壤氮(N)素流失造成的地下水氮污染日益严重,全国大部分区域的地下水 NO_3^- -N浓度已超过《地下水质量标准》(GB/T 14848)Ⅲ类水质要求,其中,约50%的浅层地下水监测点 NO_3^- -N浓度超过饮用水标准(20 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$),约40%左右的深层地下水监测点 NO_3^- -N

浓度超过饮用水标准^[4]。而且地下水是干旱半干旱区域饮用水重要的来源之一,作为饮用水 NO_3^- -N的最高可接受浓度:中国为20 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,欧盟为11.3 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,美国为10 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,地下水 NO_3^- -N污染不仅影响地下水生态环境安全,还危害人畜生命健康^[5~7],造成了高铁血红蛋白血症^[8]、人类胃癌^[9]

收稿日期: 2021-09-23; 修订日期: 2021-10-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(41977319, 42067052)

作者简介: 李桂芳(1997~),女,硕士研究生,主要研究方向为土壤氮的迁移转化, E-mail: 592195013@qq.com

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

和动物硝酸盐中毒^[10]等健康问题.因此,了解浅层地下水中氮素时空分布及影响因素是保护地下水水质安全和可持续利用地下水资源的前提.

国内外学者对地下水中氮素时空分布及驱动因素进行了研究,不同时空监测尺度下浅层地下水中氮浓度具有显著的时空变异,且相关性良好^[11],一般来说,农田区域浅层地下水中 NO_3^- -N浓度远高于居民区;雨季浅层地下水中 NO_3^- -N浓度高于旱季,而 NH_4^+ -N浓度小于旱季^[12].浅层地下水中氮的时空分布受土地利用类型、施肥情况、水文过程、含水层特性和季节变化(降水或灌溉)等因素的影响^[13].土地利用类型影响着地表氮的投入负荷,进而影响着地下水氮浓度^[14],当土地利用类型相同时,地下水中氮浓度与氮肥用量呈显著正相关^[15].水文过程,如:土壤水渗流、地下水迁移和地表水及地下水补排等也会导致浅层地下水中氮呈现复杂的可变性^[16],还会改变浅层地下水化学环境,进而影响氮浓度的变化^[12].包气带土壤水文特征控制了表层土壤氮素淋溶到地下水中的负荷^[17],含水层特性也影响着浅层地下水中不同形态氮浓度的迁移转化^[18,19].季节变化引起降雨量的改变,从而改变了地下水埋深,随着地下水埋深的增加,地下水 NO_3^- -N浓度呈下降趋势^[20],而水位上升时,地表水中的氮不仅可以迅速渗入浅层地下水中^[21],而且地下水与高累积氮素土层的相互作用,也会增加累积在土壤中氮素的溶出,增加地下水氮浓度^[22].高的降雨、灌溉和施氮量的叠加效应也增加了土壤氮淋溶至浅层地下水中,增加地下水的氮污染风险^[23].可见,区域尺度下自然条件和人为活动等因素的复杂性和变异性,也造成地下水中氮素的时空差异较大.

目前,我国关于地下水中氮污染时空分布及影响因素的研究主要集中在华北平原、东北平原和宁夏平原黄灌区,特别是华北平原地下水水位深,季节性波动较小,同时波动幅度受当地气象、水文及地质条件、生态补水和人工开采的影响^[24],但很少有研究关注高原湖泊周围区域浅层地下水氮污染的时空分布及驱动因素.由于各地区气候类型和水文地质环境的巨大差异,使得高原湖泊流域地下水表现出水位浅和波动大等独特的水文特征^[25].特别是高原湖泊周围盆地因地形平坦、交通便利,是湖泊流域城镇和村落聚集区;土壤肥沃,水源充足,是重要的种植业生产基地;农业集约化程度高,复种指数大,是云南省高强度施肥、灌溉集中分布区,地表氮投入负荷和水文条件等因素的叠加效应显著影响着高原湖泊周围浅层地下水质量,使得高原湖泊流域浅层地下水氮污染最为严重.因此,本研究通过对云

南8个高原湖泊(滇池、洱海、抚仙湖、杞麓湖、异龙湖、星云湖、阳宗海和程海)周围区域在雨季(8、9月)和旱季(4、5月)进行浅层地下水和土壤剖面调查取样,分析云南高原湖泊周围区域浅层地下水中各形态N浓度、组成比例和时空分布特征,探讨影响高原湖泊周围区域浅层地下水中氮污染的主要驱动因素,以期为评价云南高原湖泊周围区域浅层地下水中氮污染现状和防控浅层地下水氮污染提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

选取的滇池、洱海、抚仙湖、杞麓湖、异龙湖、星云湖、阳宗海和程海这8个高原湖泊分布在云南省的滇中、滇南、滇西和滇西北(图1),位于 $97^{\circ}31' \sim 106^{\circ}11'E$, $21^{\circ}08' \sim 29^{\circ}15'N$,该区属低纬高原区域.8个高原湖泊中的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-湄公河水系.8个高原湖泊流域气候类型为亚热带低纬高原季风气候,立体气候特点显著,年温差小且日温差大,年均温 16.7°C ;降水充沛、分布不均且干湿季节分明,年均降雨量为 932 mm (表1),降水量最多的月份集中在6~10月,约占全年降水量的80%以上.8个高原湖泊周围盆地主要是农田、村落和城镇分布,社会经济发达,人口稠密,高原湖盆区域人口占流域总人口的80%以上.盆地土壤类型主要是水稻土、红壤、黄壤和紫色土,成土母质多为河湖相沉积物和第四纪风化物.河湖相沉积物形成的土层结构因细砂、砾石的分布

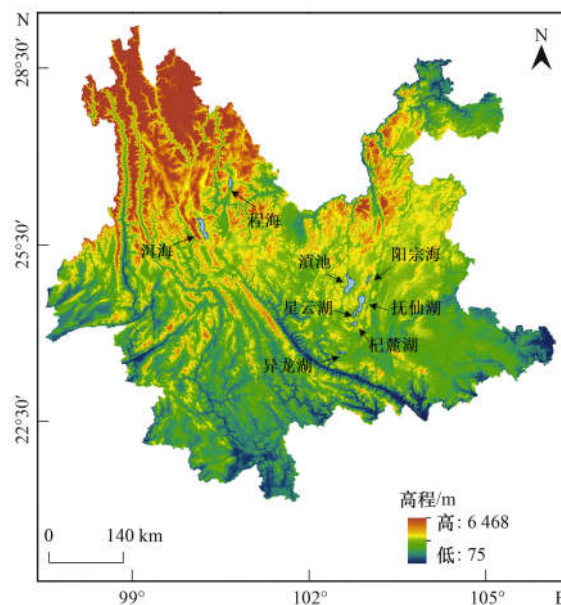


图1 研究区位置示意

Fig. 1 Location of the study area

孔隙性大,透水性强,第四纪风化物形成的土层结构土壤黏重紧实,透水性弱。盆地农田种植作物种类繁多,主要包括水稻、玉米、豆类、薯类、烤烟、油菜、蔬菜和花卉等作物,其中蔬菜和花卉等高耗型作物在高原湖泊流域盆地种植面积大,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集约化蔬菜和花卉种植,其播种面积占流域总播种面积的 40% 以上,造成了高原湖泊流域作物化肥施用量高。2017 年,高原湖泊流域化肥氮施用量为

165 ~ 405 kg·hm⁻²,平均施用量为 283 kg·hm⁻²,化肥 P₂O₅ 施用量为 60 ~ 135 kg·hm⁻²,平均施用量为 96 kg·hm⁻²,有机肥施用量为 150 ~ 18 270 kg·hm⁻²,平均施用量为 5 432 kg·hm⁻²,高原湖泊流域的施肥量远高于云南省其它区域,是云南省其它区域施肥量的 1.5 倍左右^[26]。高强度的施肥和灌溉,造成了农田土壤氮含量高,土壤剖面中氮素累积量大,在集中降雨和地下水位浅且波幅大等水文过程驱动下土壤氮素淋失对地下水中氮污染风险增加。

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 province								
项目	滇池	洱海	阳宗海	杞麓湖	星云湖	抚仙湖	异龙湖	程海
所属位置	昆明	大理	昆明	通海	江川	澄江	石屏	永胜
流域面积/km ²	2 920	2 565	192	341	371	1 084	360	424
湖泊面积/km ²	298	249	32	37	35	211	38	77
海拔/m	1 886	1 972	1 770	2 000	1 720	1 721	1 414	1 503
年均温度/℃	14.9	15.7	16.3	15.6	16.0	19.2	18.0	17.8
年降雨量/mm	991	1 100	964	899	879	951	920	756
土壤类型	红壤、水稻土和紫色土	水稻土和红壤	红壤和水稻土	水稻土和红壤	红壤、紫色土和水稻土	红壤、水稻土	红壤、黄壤和水稻土	红壤和水稻土
取样区种植的主要作物	露天或设施蔬菜和花卉	水稻、烤烟、玉米、蚕豆和蔬菜	蔬菜、花卉和水稻	蔬菜、水稻、玉米和烤烟	蔬菜、玉米和烤烟	水稻、烟草和蚕豆	水稻、蔬菜和玉米	水稻、烟草、玉米和蔬菜
每季施肥 N	285	165	345	405	240	330	240	255
强度 ^[26] P ₂ O ₅	135	60	90	105	75	75	135	105
/kg·hm ⁻² 有机肥	12 555	18 270	720	1 440	675	150	1 290	8 355

1.2 样品采集与分析

2020 ~ 2021 年的旱季(4、5 月)和雨季(8、9 月),对云南 8 个高原湖泊周围区域浅层地下水及土壤剖面进行监测和取样,分别于雨季和旱季从 8 个高原湖泊周围居民区的饮用井和农田的灌溉井共采集浅层地下水水样 463 个,其中,异龙湖 46 个、程海 38 个、星云湖 52 个、抚仙湖 54 个、阳宗海 46 个、杞麓湖 52 个、滇池 76 个和洱海 99 个。用专用的水样采集器在距水面 50 cm 左右的深度采集水样,样品被收集在聚乙烯瓶中,放在有冰袋的保温箱中带回实验室,并储存在 4℃ 的冰箱中,每个湖泊的水样在 1 周内完成分析测试。现场使用手持式多参数水质测量仪 YSI(YSI Incorporated, USA)测量温度(*T*)、电导率(*EC*)、酸碱度(*pH*)、氧化还原电位(*ORP*)和溶解氧(*DO*)。浅层地下水深(*SWL*,水面至地表的高度)采用一根测量绳和钢卷尺进行测量。用 Bran + Luebbe AA3 型连续流动分析仪分析水样中 NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N 浓度。用碱性过硫酸钾-紫外分光光度法测定总氮(*TN*)浓度。有机氮(*ON*)为 *TN* 减去 NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N。

每个高原湖泊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,土壤取 0 ~ 90 cm 剖面样,以 0 ~ 30、30 ~ 60 和 60 ~ 90

cm 分层取样,共采集 87 个土壤剖面点位的 261 个样品,其中,滇池 51 个、抚仙湖 36 个、星云湖 33 个、杞麓湖 27 个、艺龙湖 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,用于测定土壤全氮(*TN*)、NO₃⁻-N、NH₄⁺-N、*pH*、含水率(*MWC_s*)和土壤有机碳(*OC_s*)等指标。土壤 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 用 0.01 mol·L⁻¹氯化钙(CaCl₂)溶液提取后用连续流动分析仪测量,土壤 *TN* 用碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法测定,土壤有机碳(*OC_s*)用碳氮分析仪(Multi N/C 3100)测定,土壤 *pH* 使用电位计测定,土壤含水率用烘干法测定。

1.3 数据处理

利用 SPSS 23.0 中的 ANOVA(LSD_{0.05})进行氮的时空差异性检验,利用 ArcGIS 10.3 地统模块进行 NO₃⁻-N 浓度的空间分析,利用 *R* 的“corrplot”和“vegan”程序包进行相关性分析和冗余度分析(*RDA*),利用 Origin 2021 进行作图和回归分析。

2 结果与分析

2.1 浅层地下水中氮素时空分布特征

8 个高原湖泊周围 463 个浅层地下水样中各形

态 N 浓度,如图 2(a)所示. $\rho(\text{TN})$ 、 $\rho(\text{NO}_3^- \text{-N})$ 、 $\rho(\text{ON})$ 和 $\rho(\text{NH}_4^+ \text{-N})$ 平均值 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 分别为: 24.35 (0.16 ~ 165.25, 最小值 ~ 最大值,下同)、15.15 (0.009 ~ 107.02)、8.41 (0.04 ~ 103.62) 和 0.79 (0.007 ~ 19.53). 近 49% 的采样点 $\rho(\text{NO}_3^- \text{-N})$ 超过 WHO 规定的 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 近 32% 的采样点 $\rho(\text{NO}_3^- \text{-N})$ 超出《地下水质量标准》(GB/T 14848) 中 III 类水质要求规定的 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 可见, 8 个云南高原湖泊周围浅层地下水中氮污染较为严重.

雨旱季交替改变了浅层地下水中各形态 N 浓度,如图 2(b)所示. 旱季浅层地下水中 $\rho(\text{TN})$ 、 $\rho(\text{NO}_3^- \text{-N})$ 、 $\rho(\text{ON})$ 和 $\rho(\text{NH}_4^+ \text{-N})$ 平均值分别为 22.08、12.67、8.33 和 $0.91 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 近 42% 和 26% 的采样点 $\rho(\text{NO}_3^- \text{-N})$ 分别超过 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 雨季浅层地下水中 $\rho(\text{TN})$ 、 $\rho(\text{NO}_3^- \text{-N})$ 、 $\rho(\text{ON})$ 和 $\rho(\text{NH}_4^+ \text{-N})$ 平均值分别为 26.55、17.55、8.50 和 $0.67 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 近 56% 和 39% 的采样点 $\rho(\text{NO}_3^- \text{-N})$ 分别超过 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 其中,雨季和旱季的 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 存在显著性差异 ($P < 0.001$), 且雨季 TN、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 和 ON 浓度均大于旱季 ($P > 0.05$), 而旱季 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 浓度高于雨季 ($P > 0.05$).

农田和居民区的浅层地下水各形态 N 浓度差异也较大,如图 2(c)所示. 农田浅层地下水中 $\rho(\text{TN})$ 、 $\rho(\text{NO}_3^- \text{-N})$ 、 $\rho(\text{ON})$ 和 $\rho(\text{NH}_4^+ \text{-N})$ 平均值分别为 29.38、17.90、10.64 和 $0.84 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 近 57% 和 40% 的采样点 $\rho(\text{NO}_3^- \text{-N})$ 分别超过 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 居民区浅层地下水中 $\rho(\text{TN})$ 、 $\rho(\text{NO}_3^- \text{-N})$ 、 $\rho(\text{ON})$ 和 $\rho(\text{NH}_4^+ \text{-N})$ 平均值为 13.54、9.23、3.61 和 $0.69 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 近 33% 和 17% 的采样点 $\rho(\text{NO}_3^- \text{-N})$ 分别超过 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 除 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 外 ($P > 0.05$), 农田浅层地下水中的各形态 N 浓度显著大于居民区 ($P < 0.001$).

8 个高原湖泊周围浅层地下水中 TN、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、ON 和 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 浓度的平均值远大于中位数,如表 2 所示,浅层地下水中 TN、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、ON 和 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 变异系数范围分别为 0.808 ~ 1.592、0.715 ~ 1.667、1.104 ~ 2.268 和 0.656 ~ 2.433,属于中、高度变异强度^[27],变异性大,变异系数差异大也能反映各形态 N 浓度在时空上分布的不均匀性. 湖泊周围浅层地下水中 $\rho(\text{TN})$ 、 $\rho(\text{NO}_3^- \text{-N})$ 和 $\rho(\text{ON})$ 平均值 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 较高的是杞麓湖(38.09、21.20、14.95)、滇池(35.18、24.09、10.36)和洱海(32.66、19.36、12.82),中等的湖泊是异龙湖(16.73、7.74、7.77)、星云湖(19.25、13.02、4.89)和阳宗海

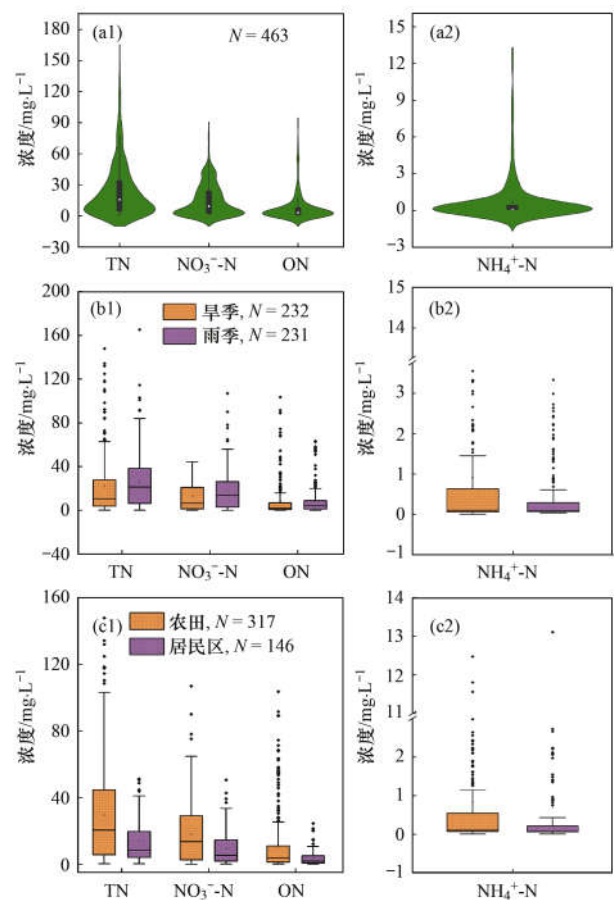


图 2 浅层地下水中各形态 N 浓度

Fig. 2 Concentration of various forms of N in shallow groundwater

(16.89、12.31、4.16), 较低的湖泊是程海(8.55、6.41、2.06)和抚仙湖(6.96、4.60、2.03). 杞麓湖、滇池和洱海周围浅层地下水 TN 和 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度显著高于抚仙湖和程海 ($P < 0.05$), 其余湖泊间差异较小. 杞麓湖周围浅层地下水 ON 浓度显著高于抚仙湖、程海和阳宗海 ($P < 0.05$), 滇池和洱海、星云湖和异龙湖无显著差异. $\rho(\text{NH}_4^+ \text{-N})$ 平均值较高的湖泊是杞麓湖、星云湖和异龙湖, 分别为 1.95、1.34 和 $1.23 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 中等浓度的湖泊是滇池、洱海和阳宗海, 分别为 0.73、0.47 和 $0.42 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 浓度较低的湖泊是程海、抚仙湖, 分别为 $1.34 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.32 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 星云湖、异龙湖和杞麓湖周围浅层地下水 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 浓度显著高于程海和抚仙湖 ($P < 0.05$), 其余湖泊间差异较小.

8 个湖泊周围浅层地下水中 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 空间分布呈现明显的区域异质性,如图 3 所示. 滇池和阳宗海周围浅层地下水 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 污染主要分布在东、南部, 抚仙湖主要分布在北部, 洱海主要分布在西南部和东岸的挖色镇, 杞麓湖、星云湖、程海和异龙湖周围浅层地下水 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 污染分布较为均匀, 浅层地下水中高浓度的 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 分布区与水肥投入高的蔬菜和花卉等种植区吻合度高. 对 8 个湖泊周围浅层地下水

表 2 高原湖泊浅层地下水各形态 N 浓度的变化特征/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 2 Variation characteristics of N concentration in shallow groundwater of plateau lakes/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$									
项目	数值	杞麓湖($N=52$)	异龙湖($N=46$)	滇池($N=76$)	洱海($N=99$)	星云湖($N=52$)	阳宗海($N=46$)	程海($N=38$)	抚仙湖($N=54$)
TN	最小值~最大值	2.36~118.54	0.26~132.06	1.93~165.25	1.14~134.35	2.60~58.61	0.34~71.54	0.16~35.50	0.21~76.32
	平均值 $\pm$ 标准差	38.09 $\pm$ 31.18a	16.73 $\pm$ 26.64bc	35.18 $\pm$ 33.80a	32.66 $\pm$ 27.33a	19.25 $\pm$ 15.55b	16.89 $\pm$ 19.06bc	8.55 $\pm$ 8.14c	6.96 $\pm$ 12.08c
	中位数	28.06	7.23	25.12	27.44	14.41	10.31	6.79	2.41
	变异系数	0.82	1.59	0.96	0.84	0.81	1.13	0.95	1.74
ON	最小值~最大值	0.69~74.53	0.13~89.33	0.23~103.62	0.13~91.61	0.10~27.69	0.18~22.30	0.04~20.03	0.06~32.09
	平均值 $\pm$ 标准差	14.95 $\pm$ 18.12a	7.77 $\pm$ 16.73bcd	10.36 $\pm$ 15.09abc	12.82 $\pm$ 19.83ab	4.89 $\pm$ 5.40cd	4.16 $\pm$ 4.96d	2.06 $\pm$ 3.10d	2.03 $\pm$ 4.60d
	中位数	7	2.94	6.09	4.52	3.02	2.18	0.8	0.6
	变异系数	1.21	2.15	1.46	1.55	1.1	1.19	1.95	2.27
$\text{NO}_3^- \text{-N}$	最小值~最大值	0.15~48.75	0.02~42.69	0.11~107.02	0.03~50.77	0.33~44.39	0.01~55.82	0.04~20.83	0.02~40.90
	平均值 $\pm$ 标准差	21.20 $\pm$ 15.66a	7.74 $\pm$ 11.56bcd	24.09 $\pm$ 22.82a	19.36 $\pm$ 13.84a	13.02 $\pm$ 12.38b	12.31 $\pm$ 15.00bc	6.41 $\pm$ 6.11cd	4.60 $\pm$ 7.72d
	中位数	17.72	2.82	16.83	20.8	7.03	7.88	4.01	0.8
	变异系数	0.74	1.49	0.95	0.72	0.95	1.22	0.95	1.67
$\text{NH}_4^+ \text{-N}$	最小值~最大值	0.05~12.47	0.03~9.69	0.01~7.56	0.01~13.11	0.01~19.53	0.06~5.08	0.01~0.34	0.05~4.28
	平均值 $\pm$ 标准差	1.95 $\pm$ 3.29a	1.23 $\pm$ 2.41ab	0.73 $\pm$ 1.37bc	0.47 $\pm$ 1.58bc	1.34 $\pm$ 3.01ab	0.42 $\pm$ 1.02bc	0.08 $\pm$ 0.05c	0.32 $\pm$ 0.78bc
	中位数	0.25	0.12	0.12	0.09	0.37	0.12	0.07	0.07
	变异系数	1.69	1.96	1.89	3.33	2.24	2.43	0.65	2.39

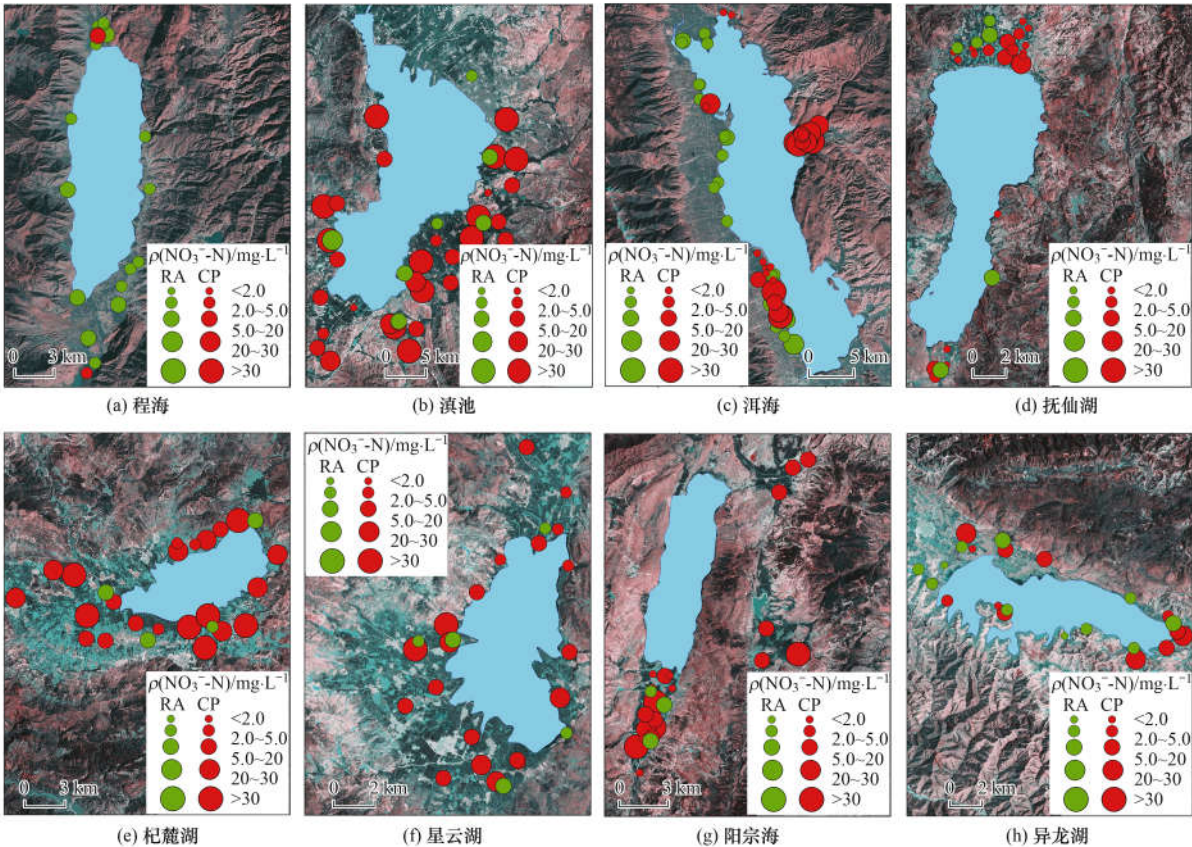
1) 同一行中不同的小写字母表示有显著差异($P<0.05$)

中 $\rho(\text{NO}_3^- \text{-N})$ 超过 $20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的样点统计发现, 8 个湖泊周围浅层地下水的超标率从大到小依次为: 洱海(61%)、杞麓湖(48%)、滇池(45%)、星云湖(25%)、阳宗海(17%)、异龙湖(13%)、抚仙湖(6%)和程海(3%)。可见, 洱海、杞麓湖和滇池周

边浅层地下水受 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 污染较为严重, 这与种植的蔬菜等高施肥作物密切相关。

2.2 浅层地下水中氮素组成

土地利用和季节变化不仅影响着地下水中各形态 N 浓度, 还影响着各形态 N 的组成比例。 $\text{NO}_3^- \text{-N}$



CP 和 RA 分别表示农田和居民区

图 3 高原湖泊周围浅层地下水中 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of $\text{NO}_3^- \text{-N}$ concentration in shallow groundwater around plateau lakes

是浅层地下水中主要的氮形态,如图4所示, NO_3^- -N占TN的质量分数在雨季和旱季分别为66%和57%,在农田和居民区分别为61%和68%.其次是ON,其占TN的质量分数在雨季和旱季分别为31%和36%,在农田和居民区分别为36%和27%.土地利用和季节变化对 NH_4^+ -N占TN的质量分数影响不大,仅为3%~5%.可见,由于 NO_3^- -N强的移动性使得表层土壤中大量的 NO_3^- -N随降雨或灌溉经包气带进入浅层地下水,并赋存于地下水中^[28]. ON在旱

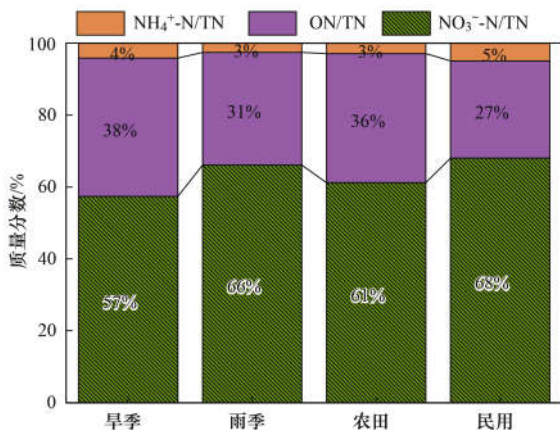


图4 各形态N的组成

Fig. 4 Composition of various forms of N

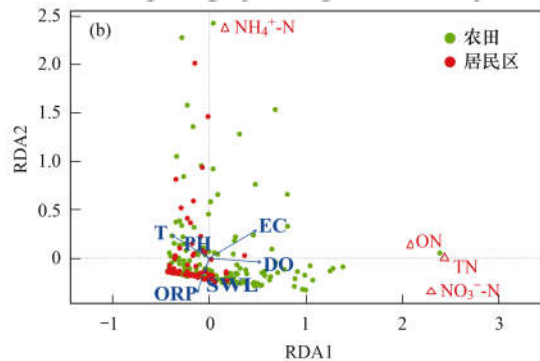
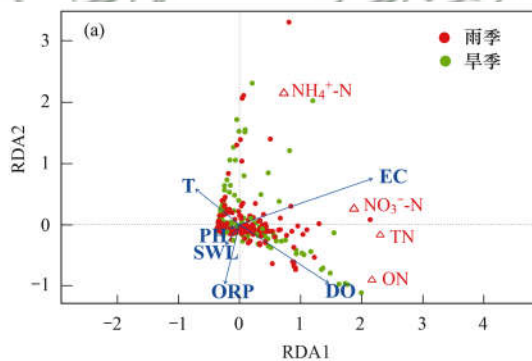


图5 季节变化和土地利用下浅层地下水中各形态N浓度与影响因子的冗余分析

Fig. 5 Redundancy analysis of various forms of N concentration and influencing factors in shallow groundwater under seasonal variation and land use

农田土壤剖面性质和氮素累积影响着浅层地下水中各形态N浓度,对土壤因子与地下水中各形态N浓度的相关分析,如图6所示.浅层地下水中 ON_w 、 NO_3^- - N_w 和 TN_w 间呈显著正相关($P < 0.01$),土壤剖面中 NO_3^- - N_s 与 pH_s 呈显著负相关($P < 0.01$),与土壤含水率(MWC_s)呈显著正相关($P < 0.05$). NH_4^+ - N_s 与 OC_s 、 MWC_s 与 TN_s 和 NH_4^+ - N_s 、土壤有机碳(OC_s)和 TN_s 与 NH_4^+ - N_s 和 OC_s 间呈显著正相关($P < 0.05$),可见,土壤因子间和地下水各形态N间具有强烈的自相关性,但土壤剖面与浅层地下水中各形态N浓度相关较弱,可见,土壤因子并不是影响浅层地下水各形态N浓度变化的关键

原湖泊周围浅层地下水中占TN的质量分数较高,由于有机氮物理化学性质的多样性,有机氮在氮循环中角色复杂,进一步影响着地下水中 NO_3^- -N污染和氮的去除.

2.3 浅层地下水中氮时空分布的驱动因素

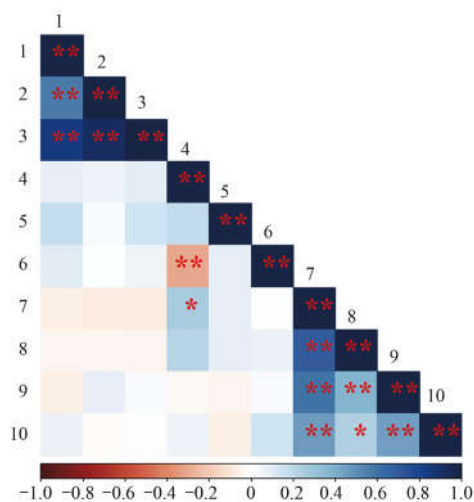
采用RDA分析了季节变化、土地利用对浅层地下水各形态N浓度的影响,如图5所示.季节变化引起地下水各形态N浓度与水环境因子排序结果前两轴解释量分别为83.23%和13.93%,土地利用变化引起地下水中各形态N浓度与水环境因子排序结果前两轴解释率分别为85.28%和12.93%,土地利用类型引起的水环境因子对浅层地下水中各形态N浓度变化较为明显,浅层地下水中各形态N浓度很大程度上受土地利用变化的影响.雨季浅层地下水各形态N浓度集中在第一排序轴附近,而旱季取样点比较分散[图5(a)],居民区浅层地下水各形态N浓度主要集中在第三象限,而农田浅层地下水各形态N浓度在各象限均有分布[图5(b)].浅层地下水中EC、DO、ORP和T是反映和影响浅层地下水中各形态N浓度的关键性因子,而pH和SWL对浅层地下水各形态N浓度影响较小.

因子.

3 讨论

3.1 浅层地下水中氮素分布具有明显的时空差异

季节变化和土地利用等外部因素引起了浅层地下水中各形态N浓度和组分的时空差异.雨季TN、 NO_3^- -N和ON浓度大于旱季,而 NH_4^+ -N浓度则呈相反变化^[12],这主要是因为雨、旱季降雨量的差异,影响着地下水位的波动,水位上升缩短了地表氮素进入地下水中的距离,也改变了土壤剖面-浅层地下水界面生化环境和氮循环过程,造成了土壤剖面的氮素流失和浅层地下水各形态N浓度升高.旱季浅



1. ON_w , 2. $\text{NO}_3^- - \text{N}_w$, 3. TN_w , 4. $\text{NO}_3^- - \text{N}_s$, 5. $\text{NH}_4^+ - \text{N}_w$, 6. pH_s , 7. MWC_s , 8. TN_s , 9. $\text{NH}_4^+ - \text{N}_s$, 10. OC_s , s 和 w 分别代表土壤和浅层地下水, 土壤指标均为 0~90 cm 土层的平均值; * 表示在 0.05 水平显著差异, ** 表示在 0.01 水平显著差异

图 6 土壤因子与各形态 N 浓度的相关性
Fig. 6 Correlation between soil factors and concentration of various forms of N

层地下水位较深,由于硝化作用的限制, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 很容易在较深的地下水中积累^[21],Chen 等^[29]的研究结果也表明了 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 在更深的地下水中占主导地位.雨季 $\text{NO}_3^- - \text{N}/\text{TN}$ 大于旱季^[30], $\text{NO}_3^- - \text{N}/\text{TN}$ 和 ON/TN 在雨季差异大,但旱季差异小,这可能与水位下降^[31]、农田施用有机肥和居民区畜禽养殖导致的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度下降有关.土地利用类型改变着表层水和氮负荷的投入,一方面影响着肥料投入和植物残体向土壤的输入强度,另一方面通过土壤水分管理和耕作方式等影响土壤养分的矿化、利用和流失,造成土壤养分累积的空间异质性^[32],这些空间异质性变化最终影响到地下水各形态 N 浓度的空间差异.农田 TN 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 ON 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的平均值分别超居民区的 53.91%、48.44%、66.07% 和 17.86%,主要是由于高原湖泊流域农田施肥量高和复种指数大,肥料投入总量较大,农田区域氮素进入浅层地下水中负荷较高;而居民区由于城镇和村落污水收集管网覆盖增加、地面硬化面积增大、农村生活垃圾的集中清运和畜禽养殖量的下降且粪污集中处理,这些措施减少了居民区地表氮素流失负荷,进而降低了居民区地下水氮质量浓度^[33~35].农田浅层地下水中 ON/TN 的比例高于居民区,这是由于农作物种植过程中大量施用有机肥有关,而浅层地下水 ON 浓度高与地下水埋深浅、有机肥施用量大和土壤通透性强有关. $\text{NH}_4^+ - \text{N}/\text{TN}$ 的比例居民区高于农田,这可能与农村生活污水、畜禽养殖和垃圾渗滤液有

关^[29].氮素组成比表明, ON 显著影响浅层地下水中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的变化^[36].

影响浅层地下水中氮素空间差异的主要因素可分为两类,一类是氮的来源决定着氮污染的发生位置,另一类是氮素所处的周围环境决定着土壤和地下水中氮的迁移转化及其富集能力^[37].滇池和阳宗海周围浅层地下水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 污染主要分布在东部和南部,洱海主要分布在西南部 and 东部挖色镇,杞麓湖、星云湖和异龙湖周围地下水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 污染分布较为均匀,主要是由于这些区域农田面积较大,蔬菜、花卉等高耗型作物大面积种植,复种指数高,导致盆地作物氮肥施用量高,当大量氮肥被施入土壤后,仅约 35% 的氮肥被作物所吸收,大部分残留在土壤中,由于 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 不易被土壤颗粒吸附,易随水流下渗至含水层,成为地下水中主要的氮污染物^[38].McLay^[39]的研究也指出,较严重的地下水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 污染主要与化肥施用量较高的蔬菜种植有关,蔬菜种植区的地下水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量明显高于粮食作物种植区或城市区域.Zhang 等^[23]的研究表明土壤剖面结构的不同,造成了洱海东(第四纪风化物发育的红壤)和西(河湖相沉积发育的水稻土)两岸同为蔬菜种植区浅层地下水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度的差异,洱海东岸农田区域($26.39 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)浅层地下水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度平均值显著高于西岸的($9.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$).抚仙湖周围浅层地下水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度低,主要是因为湖泊周围农田从 2017 年开始休耕,休耕 3 a 后才逐步恢复种植蚕豆、烤烟和水稻等低需肥作物,对浅层地下水氮污染较小.程海周边由于地下水位深,且取样点多农村饮水井,所以浅层地下水中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度低.

3.2 浅层地下水水环境指标是影响氮素时空分布差异的主要驱动因素

土地利用影响着地表氮负荷,而季节变化通过驱动氮素迁移和改变地下水中的水文地球化学环境指标,进而影响着氮的矿化、硝化、反硝化和厌氧氨氧化等转化过程,最终反映在浅层地下水中各形态 N 浓度水平上.相关分析表明(图 5 和 6),浅层地下水中的水环境指标是影响地下水各形态 N 浓度的主要因素,而土壤剖面性质对地下水中各形态 N 浓度影响较小.根据 RDA 分析得出反映或影响云南高原湖泊周围浅层地下水各形态 N 浓度的关键因子是 EC 、 DO 、 ORP 和 T .线性回归方程解释了这些关键环境因子与浅层地下水中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的关系(图 7), ORP ($P < 0.05$)、 DO 和 EC ($P < 0.01$)与 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 成显著正相关. EC 与 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 变化有较强的一致性.

地下水中 ORP 和 DO 的增大,会促使地下水处于氧化环境,发生硝化反应,使地下水中 NO_3^- -N 的浓度升高^[40],相反,当 DO 和 ORP 降到一定水平以下且有足够的有效碳源时,会出现显著的反硝化作用,导致浅层地下水中 NO_3^- -N 的衰减^[41]. 地下水温度 T 与 NO_3^- -N 成显著负相关($P < 0.05$),随着温度的升高,饱和土水界面的微生物活性增加,土壤和地下水中的

氮素转化增强,从而影响地下水中的各形态 N 浓度,研究区浅层地下水温度在 $15 \sim 25.5^\circ\text{C}$ 之间,平均值为 19.44°C ,在反硝化反应中,温度通常为 $2 \sim 50^\circ\text{C}$,一般假设反应速率每增加 10°C ,反应速率就会翻一倍^[42-45],随着温度的升高或降低,氮的反应速率将受到限制,从而影响浅层地下水中各形态 N 浓度.

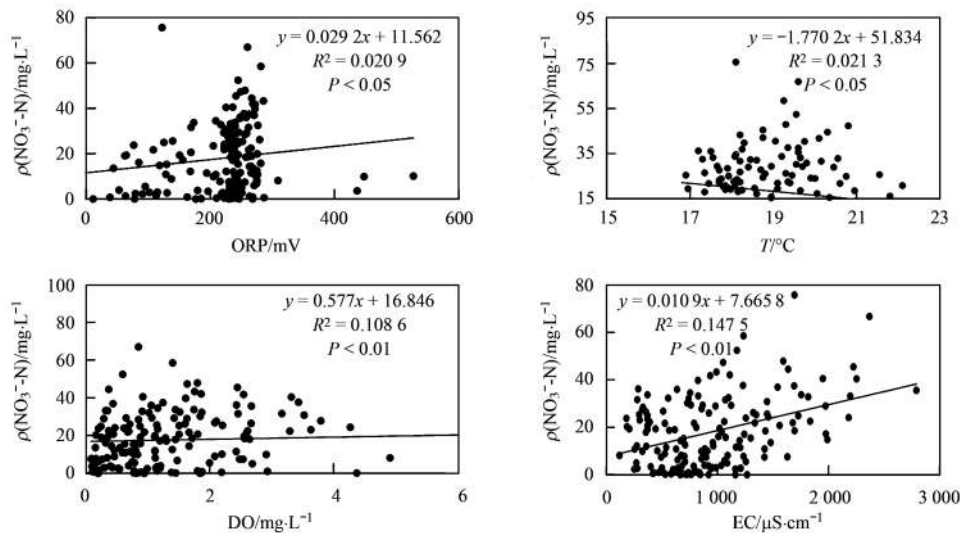


图7 浅层地下水中 NO_3^- -N浓度与关键因子的线性关系

Fig. 7 Linear relationships between NO_3^- -N and key factors in shallow groundwater

4 结论

(1) 云南 8 个高原湖泊周围浅层地下水中 $\rho(\text{TN})$ 、 $\rho(\text{NO}_3^-$ -N)、 $\rho(\text{ON})$ 和 $\rho(\text{NH}_4^+$ -N) 平均值分别为 24.35 、 15.15 、 8.41 和 $0.79 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, NO_3^- -N 是浅层地下水中主要的氮形态,占 TN 的质量分数为 $57\% \sim 68\%$,其次是 ON,占 TN 的质量分数为 $27\% \sim 38\%$. 8 个湖泊 463 个采样点中有 32% 的采样点 $\rho(\text{NO}_3^-$ -N) 超过 $20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,其中,洱海(61%)、杞麓湖(48%)和滇池(45%)的超标率最高,其次是星云湖(25%)、阳宗海(17%)、异龙湖(13%),最小为抚仙湖(6%)和程海(3%).

(2) 土地利用和季节变化影响着浅层地下水中各形态 N 浓度及其组成,土地利用引起的浅层地下水各形态 N 浓度变化差异更显著,地下水中的 DO、EC、ORP 和 T 显著反映或影响着浅层地下水中各形态 N 浓度的变化,而土壤因子对浅层地下水中各形态 N 浓度影响较小.

(3) 为防止高原湖泊周围浅层地下水氮素污染进一步恶化,应调整种植结构,种植低耗高效作物;合理施肥,降低施肥强度,提高氮肥利用效率;禁止大水漫灌,避开降雨施肥,减少表层土壤氮素淋溶至地下水.

参考文献:

- [1] 齐冉,徐菲菲,杨帆,等. 木沥河流域氮素污染及其污染源解析[J]. 环境科学, 2020, **41**(7): 3165-3174.
Qi R, Xu F F, Yang F, et al. Analysis of nitrogen pollution and its pollution sources in the Muli River Basin[J]. Environmental Science, 2020, **41**(7): 3165-3174.
- [2] 王仕琴,檀康达,郑文波,等. 白洋淀流域浅层地下水硝酸盐分布及来源的区域分异特征[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, **29**(1): 230-240.
Wang S Q, Tan K D, Zhang W B, et al. Regional characteristics of nitrate sources and distributions in the shallow groundwater of the Lake Baiyangdian watershed[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, **29**(1): 230-240.
- [3] 王庆锁,顾颖,孙东宝. 巢湖流域地下水硝态氮含量空间分布和季节变化格局[J]. 生态学报, 2014, **34**(15): 4372-4379.
Wang Q S, Gu Y, Sun D B. Spatial and seasonal variations of nitrate-N concentration in groundwater within Chao Lake watershed[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, **34**(15): 4372-4379.
- [4] Han D M, Currell M J, Cao G L. Deep challenges for China's war on water pollution[J]. Environmental Pollution, 2016, **218**: 1222-1233.
- [5] Dich J, Järvinen R, Knekt P, et al. Dietary intakes of nitrate, nitrite and NDMA in the finnish mobile clinic health examination survey[J]. Food Additives & Contaminants, 1996, **13**(5): 541-552.
- [6] 吴娟娟,卞建民,万罕立,等. 松嫩平原地下水氮污染健康风险评估[J]. 中国环境科学, 2019, **39**(8): 3493-3500.
Wu J J, Bian J M, Wan H L, et al. Health risk assessment of

- groundwater nitrogen pollution in Songnen Plain [J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(8): 3493-3500.
- [7] Wu J J, Bian J M, Wan H L, *et al.* Health risk assessment of groundwater nitrogen pollution in Songnen Plain [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, **207**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2020.111245.
- [8] Manassaram D M, Backer L C, Messing R, *et al.* Nitrates in drinking water and methemoglobin levels in pregnancy: a longitudinal study [J]. *Environmental Health*, 2010, **9**, doi: 10.1186/1476-069X-9-60.
- [9] Bryan N S, Alexander D D, Coughlin J R, *et al.* Ingested nitrate and nitrite and stomach cancer risk: an updated review [J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2012, **50**(10): 3646-3665.
- [10] Stadler S, Talma A S, Tredoux G, *et al.* Identification of sources and infiltration regimes of nitrate in the semi-arid kalahari: regional differences and implications for groundwater management [J]. *Water SA*, 2012, **38**(2): 213-224.
- [11] Schot P P, Pieber S M. Spatial and temporal variations in shallow wetland groundwater quality [J]. *Journal of Hydrology*, 2012, **422-423**: 43-52.
- [12] 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.
- [13] Cui R Y, Fu B, Mao K M, *et al.* Identification of the sources and fate of NO_3^- -N in shallow groundwater around a plateau lake in southwest China using NO_3^- isotopes ($\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{18}\text{O}$) and a Bayesian model [J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, **270**, doi: 10.1016/j.jenvman.2020.110897.
- [14] He B N, He J T, Wang L, *et al.* Effect of hydrogeological conditions and surface loads on shallow groundwater nitrate pollution in the Shaying River Basin: Based on least squares surface fitting model [J]. *Water Research*, 2019, **163**, doi: 10.1016/j.watres.2019.114880.
- [15] 耿玉栋, 张千千, 孙继朝, 等. 不同土地利用方式和地下水埋深对水中硝态氮浓度分布的影响 [J]. *环境污染与防治*, 2016, **38**(6): 63-68.
- Geng Y D, Zhang Q Q, Sun J C, *et al.* Impact of land use types and groundwater depth on the distribution of nitrate nitrogen in groundwater [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2016, **38**(6): 63-68.
- [16] Benson V S, Vanleeuwen J A, Sanchez J, *et al.* Spatial analysis of land use impact on ground water nitrate concentrations [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2006, **35**(2): 421-432.
- [17] Lasagna M, De Luca D A, Franchino E. Nitrate contamination of groundwater in the western Po Plain (Italy): the effects of groundwater and surface water interactions [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, **75**(3), doi: 10.1007/s12665-015-5039-6.
- [18] Chen S F, Wu W L, Hu K L, *et al.* The effects of land use change and irrigation water resource on nitrate contamination in shallow groundwater at county scale [J]. *Ecological Complexity*, 2010, **7**(2): 131-138.
- [19] Guzman C D, Tilahun S A, Dagnew D C, *et al.* Spatio-temporal patterns of groundwater depths and soil nutrients in a small watershed in the Ethiopian highlands: topographic and land-use controls [J]. *Journal of Hydrology*, 2017, **555**: 420-434.
- [20] Almasri M N, Kaluarachchi J J. Assessment and management of long-term nitrate pollution of ground water in agriculture-dominated watersheds [J]. *Journal of Hydrology*, 2004, **295**(1-4): 225-245.
- [21] 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.
- [22] Zhang D, Fan M P, Liu H B, *et al.* Effects of shallow groundwater table fluctuations on nitrogen in the groundwater and soil profile in the nearshore vegetable fields of Erhai Lake, southwest China [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2020, **20**(1): 42-51.
- [23] Zhang D, Wang P L, Cui R Y, *et al.* Electrical conductivity and dissolved oxygen as predictors of nitrate concentrations in shallow groundwater in Erhai Lake region [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, **802**, doi: 10.1016/J.scitotenv.2021.149879.
- [24] Wang S Q, Zheng W B, Currell M, *et al.* Relationship between land-use and sources and fate of nitrate in groundwater in a typical recharge area of the North China Plain [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **609**: 607-620.
- [25] Zhang M, Zhi Y Y, Shi J C, *et al.* Apportionment and uncertainty analysis of nitrate sources based on the dual isotope approach and a Bayesian isotope mixing model at the watershed scale [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **639**: 1175-1187.
- [26] 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.
- [27] Liu X H, Xu X Z, Zhao J X. A new generalized p -value approach for testing equality of coefficients of variation in k normal populations [J]. *Journal of Statistical Computation and Simulation*, 2011, **81**(9): 1121-1130.
- [28] 潘田, 张幼宽. 太湖流域长兴县浅层地下水氮污染特征及影响因素研究 [J]. *水文地质工程地质*, 2013, **40**(4): 7-12.
- Pan T, Zhang Y K. A study of nitrogen pollution in shallow groundwater and its affecting factors in Changxing county in the Taihu Basin [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2013, **40**(4): 7-12.
- [29] Chen J, Qian H, Wu H. Nitrogen contamination in groundwater in an agricultural region along the new silk road, Northwest China: distribution and factors controlling its fate [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, **24**(15): 13154-13167.
- [30] Zhang X Y, Xu Z W, Sun X M, *et al.* Nitrate in shallow groundwater in typical agricultural and forest ecosystems in China, 2004-2010 [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2013, **25**(5): 1007-1014.
- [31] Portela S I, Andriulo A E, Jobbágy E G, *et al.* Water and nitrate exchange between cultivated ecosystems and groundwater in the Rolling Pampas [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2009, **134**(3-4): 277-286.
- [32] 白莹, 薛山, 鲁善海, 等. 沙颍河流域平原区土壤氮空间分布特征及影响因素研究 [J]. *南京大学学报(自然科学)*, 2016, **52**(1): 65-76.
- Bai Y, Xue S, Lu S H, *et al.* Study on spatial distribution characteristics of soil nitrogen and their influencing factors in Shaying River Basin [J]. *Journal of Nanjing University (Natural Science)*, 2016, **52**(1): 65-76.

- [33] 张婷, 陈世俭, 傅娇凤. 四湖地区地下水“三氮”含量及时空分布特征分析[J]. 长江流域资源与环境, 2014, **23**(9): 1295-1300.
- Zhang T, Chen S J, Fu J F. Analysis of three-nitrogen concentration and spatial-temporal distribution of groundwater in Sihu Region[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2014, **23**(9): 1295-1300.
- [34] Gu B J, Ge Y, Chang S X, *et al.* Nitrate in groundwater of China: sources and driving forces[J]. Global Environmental Change, 2013, **23**(5): 1112-1121.
- [35] Wang Y J, Peng J F, Cao X F, *et al.* Isotopic and chemical evidence for nitrate sources and transformation processes in a plateau lake basin in Southwest China[J]. Science of the Total Environment, 2020, **711**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134856.
- [36] Xin J, Liu Y, Chen F, *et al.* The missing nitrogen pieces: a critical review on the distribution, transformation, and budget of nitrogen in the vadose zone-groundwater system[J]. Water Research, 2019, **165**, doi: 10.1016/j.watres.2019.114977.
- [37] 王佳音, 张世涛, 王明玉, 等. 滇池流域大河周边地下水氮污染的时空分布特征及影响因素分析[J]. 中国科学院研究生院学报, 2013, **30**(3): 339-346.
- Wang J Y, Zhang S T, Wang M Y, *et al.* Temporal and spatial distribution of groundwater nitrogen pollution and influence factors in Dahe river catchment in Dianchi watershed[J]. Journal of Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2013, **30**(3): 339-346.
- [38] Pastén-Zapata E, Ledesma-Ruiz R, Harter T, *et al.* Assessment of sources and fate of nitrate in shallow groundwater of an agricultural area by using a multi-tracer approach[J]. Science of the Total Environment, 2014, **470-471**: 855-864.
- [39] McLay C D A, Dragten R, Sparling G, *et al.* Predicting groundwater nitrate concentrations in a region of mixed agricultural land use: a comparison of three approaches[J]. Environmental Pollution, 2001, **115**(2): 191-204.
- [40] Mayer P M, Groffman P M, Striz E A, *et al.* Nitrogen dynamics at the groundwater-surface water interface of a degraded urban stream[J]. Journal of Environmental Quality, 2010, **39**(3): 810-823.
- [41] Rivett M O, Buss S R, Morgan P, *et al.* Nitrate attenuation in groundwater: a review of biogeochemical controlling processes[J]. Water Research, 2008, **42**(16): 4215-4232.
- [42] Sierra J. Nitrogen mineralization and nitrification in a tropical soil: effects of fluctuating temperature conditions[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2002, **34**(9): 1219-1226.
- [43] Yoshikawa S, Takahashi H, Sasada Y, *et al.* Impact of land use on nitrogen concentration in groundwater and river water[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2015, **61**(6): 898-909.
- [44] Olshansky Y, Knowles J F, Barron-Gafford G A, *et al.* Soil fluid biogeochemical response to climatic events[J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2019, **124**(9): 2866-2882.
- [45] Yan D, Li J Q, Pei J M, *et al.* The temperature sensitivity of soil organic carbon decomposition is greater in subsoil than in topsoil during laboratory incubation[J]. Scientific Reports, 2017, **7**(1), doi: 10.1038/s41598-017-05293-1.

CONTENTS

Impacts of Changes in Meteorological Conditions During COVID-19 Lockdown on PM _{2.5} Concentrations over the Jing-Jin-Ji Region	QIU Yu-lu, CHEN Lei, ZHU Jia, <i>et al.</i> (2831)
Influence of COVID-19 Prevention and Control Measures on PM _{2.5} Concentration, Particle Size Distribution, Chemical Composition, and Source in Zhengzhou, China	 HUANG Bing-yi, WANG Shen-bo, HE Bing, <i>et al.</i> (2840)
Concentration Variation and Source Analysis of Metal Elements in PM _{2.5} During COVID-19 Control in Suzhou	MIAO Qing, YANG Qian, WU Ye-zheng, <i>et al.</i> (2851)
Changes in Carbonaceous Aerosol in the Northern Suburbs of Nanjing from 2015 to 2019	XIE Tian, CAO Fang, ZHANG Yan-lin, <i>et al.</i> (2858)
Source Apportionment of PM _{2.5} Based on Hybrid Chemical Transport and Receptor Model in Chongqing	PENG Chao, LI Zhen-liang, CAO Yun-qing, <i>et al.</i> (2867)
Analysis on the Characteristics of Oxidation Potential and Influence Sources of PM _{2.5} in Baoding City in Winter	WU Ji-yan, YANG Chi, ZAHNG Chun-yan, <i>et al.</i> (2878)
Pollution Characteristics and Sources of Water-soluble Organic Nitrogen in PM _{2.5} in Jiangbei New Area, Nanjing	GUAN Lu, DING Cheng, ZHANG Yu-xiu, <i>et al.</i> (2888)
Organic Aerosols and Source Analysis of Fine Particles in the Background of Shiwanda Mountain, Guangxi	XING Jia-li, CAO Fang, WANG Qian, <i>et al.</i> (2895)
Comparison of Regional Transportation and Transformation Models of Atmospheric Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Research on Key Influencing Factors: Take the Beijing-Tianjin-Hebei Region as Example	ZHANG Xin-lu, LIU Shi-jie, HAN Mei-li, <i>et al.</i> (2906)
Exploring Formation of Ozone in Typical Cities in Beijing-Tianjin-Hebei Region Using Process Analysis	TANG Ying-xiao, YAO Qing, CAI Zi-ying, <i>et al.</i> (2917)
Characteristics and Meteorological Factors of PM _{2.5} -O ₃ Compound Pollution in Tianjin	XIAO Zhi-mei, LI Yuan, KONG Jun, <i>et al.</i> (2928)
Spatio-temporal Characteristics of Air Quality and Influencing Factors in Shandong Province from 2016 to 2020	ZHOU Meng-ge, YANG Yi, SUN Yuan, <i>et al.</i> (2937)
Trend Changes in Ozone Pollution and Sensitivity Analysis of Ozone in Henan Province	YAN Yang-yang, YIN Sha-sha, HE Qin, <i>et al.</i> (2947)
Effects of Tropical Cyclones on Ozone Pollution in the Pearl River Delta in Autumn	ZHAO Wei, LÜ Meng-yao, LU Qing, <i>et al.</i> (2957)
Real-time Composition and Sources of VOCs in Summer in Wuhan	SU Wei-feng, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, <i>et al.</i> (2966)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Volatile Organic Compounds in Summer in Yuncheng City	WEN Xiao-yu, ZHAO Wen-ting, LUO Shu-zhen, <i>et al.</i> (2979)
Neonicotinoid Insecticides Threaten Surface Waters at the National Scale in China	FAN Dan-dan, LIU Hong-ling, YANG Liu-yan (2987)
Spatiotemporal Distribution and Risk Assessment of Pharmaceuticals in Typical Drinking Water Sources in the Middle Reaches of the Yangtze River	 WU Jun-mei, WEI Lin, PENG Jing-qian, <i>et al.</i> (2996)
Pollution Characteristics and Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Underground and Surface Drinking Water Sources in Northeast Inner Mongolia	 ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, FU Qing, <i>et al.</i> (3005)
Impact of Land Use Types at Different Scales on Surface Water Environment Quality and Its Driving Mechanism	SONG Jing-wen, ZHANG Xue-xia, JIANG Dong-yang, <i>et al.</i> (3016)
Shallow Groundwater Around Plateau Lakes: Spatiotemporal Distribution of Nitrogen and Its Driving Factors	LI Gui-fang, YANG Heng, YE Yuan-hang, <i>et al.</i> (3027)
Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Lake Qinghai	ZHANG Ya-ran, CHE Fei-fei, FU Zheng-hui, <i>et al.</i> (3037)
Analysis of Heavy Metal Pollution Characteristics and Potential Ecological Risks of Surface Sediments in Dongjiang Lake	ZHAO Xiao-liang, LI Xiang, LU Hong-bin, <i>et al.</i> (3048)
Kinetic Release Characteristics of Organic Phosphorus of Sediment-water and Water Quality Risks	LIU Zhe-zhe, NI Zhao-kui, LIU Si-ru, <i>et al.</i> (3058)
Distribution Characteristics, Source Analysis, and Pollution Evaluation of Organic Matter in Surface Sediments of Qingpu District, Yangtze River Delta Integration Demonstration Area	 ZHANG Zhi-bo, DUAN Yan-ping, TU Yao-jen, <i>et al.</i> (3066)
Distribution Characteristics of Microplastics and Their Migration Patterns in Xiangxi River Basin	CHEN Sheng-sheng, LI Wei-ming, ZHANG Kun, <i>et al.</i> (3077)
Community Structure and Microbial Function Responses of Biofilms Colonizing on Microplastics with Vertical Distribution in Urban Water	 CHEN Yu-fang, YAN Zhen-hua, ZHANG Yan, <i>et al.</i> (3088)
Community Structure of Phytoplankton and Environmental Impact Factors in Lake Hongze from 2015 to 2020	QU Ning, DENG Jian-ming, ZHANG Zhen, <i>et al.</i> (3097)
Structural Characteristics of Zooplankton and Phytoplankton Communities and Its Relationship with Environmental Factors in Different Regions of Nanhu Lake in Jiaxing City	 WANG Ya-wen, LI Ying-he, ZHANG Bo, <i>et al.</i> (3106)
Temporal and Spatial Variation Characteristics and Source Analysis of Agricultural Non-point Source Pollution Load in Guangdong During the Past 20 Years	 GE Xiao-jun, HUANG Bin, YUAN Zai-jian, <i>et al.</i> (3118)
Output Characteristics and Driving Mechanism of Agricultural Non-point Source (AGNPS) Pollutant in Plain and Valley Region of Upper Yangtze River, China	 TAN Shao-jun, LIU Yang, ZHU Xiao-jie, <i>et al.</i> (3128)
Risk Assessment Method of Non-point Source Pollution Output for Watershed Using High Resolution Data	GU Jing-jing, YE Yun-tao, DONG Jia-ping, <i>et al.</i> (3140)
Spectral Characteristics Change in Dissolved Organic Matter in Urban River Under the Influences of Different Intensities of Non-point Source Pollution	CHEN Xu-dong, GAO Liang-min (3149)
Combination of Ecological Ditch and Bioretention Pond to Control Rural Runoff Pollution	SHI Lei, YANG Xiao-li, WU Qing-yu, <i>et al.</i> (3160)
Influence of Different Hydraulic Disturbance Intensities on the Migration of Aged PSMPs Between Sediment and Water	WU Xiang-xiang, AI Ping, LI Da-peng (3168)
Analysis of Pollution Characteristics and Sources of Rainfall Runoff from Roofs in the Central District of Beijing	XI Yue, GUO Jing, TAO Lei, TIAN Ying, <i>et al.</i> (3177)
Inter-annual Changes in Runoff Quality from Green Roofs with Different Vegetation	ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, GE De, <i>et al.</i> (3187)
Effectivity of Multiphase Fenton-like System of Iron Reduction Induced by Bisphenol A Authigenic Photoelectron	CAO Si-yu, XU Lu, FU Quan-chao, <i>et al.</i> (3195)
Removal Characteristics of Four Typical Antibiotics in Denitrification System	TANG Jia, CHEN Xi, QIN Mu-chuan, <i>et al.</i> (3204)
Adsorption Capacity and Mechanism of Biochar Derived from Typical Agricultural Wastes for Cadmium in Aqueous Solutions	GONG Pei-yun, SUN Li-juan, GONG Ke, <i>et al.</i> (3211)
Effect of Humic Acid-Heavy Metals on the Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX Bacteria and Its Kinetic Analysis	LI Yun, CUI Nan, XIONG Xing-xing, <i>et al.</i> (3221)
Responding Mechanism of Vegetation Cover to Climate Change and Human Activities in Southwest China from 2000 to 2020	XU Yong, HUANG Wen-ting, DOU Shi-qing, <i>et al.</i> (3230)
Spatial Distribution and Eco-stoichiometric Characteristics of Soil Nutrient Elements Under Different Vegetation Types in the Yellow River Delta Wetland	 SUN De-bin, LI Yun-zhao, YU Jun-bao, <i>et al.</i> (3241)
Distribution Characteristics and Source Apportionment of Perfluoroalkyl Substances in Surface Soils of the Northeast Tibetan Plateau	 WEN Xiang-jie, CHEN Zhao-hui, XU Wei-xin, <i>et al.</i> (3253)
Effect of Land Use/Land Cover Change on the Concentration of Se and Heavy Metals in Soils from a "Return Cropland to Forest" Area, Southwest China	 LIU Yong-lin, LIU Shu-ling, WU Mei, <i>et al.</i> (3262)
Speciation Characteristics and Risk Assessment of Soil Heavy Metals from Puding Karst Critical Zone, Guizhou Province	 ZHANG Qian, HAH Gui-lin (3269)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Germanium in Soil in the Eastern Mountainous Area of the Nanyang Basin	DONG Qiu-yao, LAI Shu-ya, SONG Chao, <i>et al.</i> (3278)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Risk Assessment of Golden Snub-nosed Monkey (<i>Rhinopithecus roxellana</i>) Habitat in Shennongjia Mountains	 YAN Jia-li, YU Zi-ling, YU Hui-liang, <i>et al.</i> (3288)
Utilization and Remediation of Heavily Cadmium-Contaminated Agricultural Soils by Two Crop Rotation Patterns After Lime and Sepiolite Passivation	 XU Lu, ZHOU Chun-hai, LIU Mei, <i>et al.</i> (3299)
Effects of Phosphorus Sufficiency and Deficiency on Cadmium Uptake and Transportation by Rice	TAN Wen-tao, HUO Yang, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (3308)
Responses of Cd Accumulation in Rice and Spectral Characteristics of Soil Dissolved Organic Matter Regulated by Soil Amendments	LUO Hui-long, CHEN Juan, ZHANG Yun-hui, <i>et al.</i> (3315)
Responses of Soil Fungal Communities to Subalpine Meadow Degradation in Mount Wutai	LUO Zheng-ming, HE Lei, LIU Jin-xian, <i>et al.</i> (3328)
Response of Soil Fungal Communities in Diversified Rotations of Wheat and Different Crops	JIN Hai-yang, YUE Jun-qin, YAN Ya-qian, <i>et al.</i> (3338)
Spatial Characterization of Stable Isotope Composition of Organic Carbon from Farmland Soils in Chongqing	LIAO Yu-qin, LONG Juan, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (3348)
Characteristics of Soil NO Emissions in the Yangtze River Delta Region for Year 2018	LIAO Jia-qiang, XUE Jin, WANG Wen-jin, <i>et al.</i> (3357)
Thermal Environment Evolution and Response Mechanism of Urban Sprawl Based on Multi-source Data	LIANG Jian-she, BAI Yong-ping, YANG Xue-di, <i>et al.</i> (3365)