

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.10
第41卷 第10期

目次

青岛春节期间大气污染特征及烟花燃放一、二次贡献分析	方天歌, 姚小红, 孟赫, 陈春强 (4345)
基于在线观测的天津市 PM _{2.5} 污染特征及来源解析	肖致美, 徐虹, 李立伟, 李鹏, 元洁, 唐邈, 杨宁, 郑乃源, 陈魁 (4355)
2017~2018年北京大气 PM _{2.5} 中水溶性无机离子特征	李欢, 唐贵谦, 张军科, 刘琴, 闫广轩, 程萌田, 高文康, 王迎红, 王跃思 (4364)
北京南部城区 PM _{2.5} 中碳质组分特征	董贵明, 唐贵谦, 张军科, 刘琴, 闫广轩, 程萌田, 高文康, 王迎红, 王跃思 (4374)
成都市冬季3次灰霾污染过程特征及成因分析	冯小琼, 陈军辉, 尹寒梅, 徐雪梅, 熊文朋, 梅林德, 钱骏, 刘政 (4382)
南京北郊黑碳气溶胶分布特征及来源	谢锋, 林煜棋, 宋文怀, 鲍孟盈, 章炎麟 (4392)
2019年10~12月京津冀及周边“2+26”城市重污染减排效果评估	朱媛媛, 高愈霄, 汪巍, 鲁宁, 许荣, 刘冰, 李健军 (4402)
保定市大气污染变化趋势及特征	苟银寅, 张凯, 李金娟, 吕文丽, 竹双, 黎洁, 何珊珊, 郑悦, 支敏康 (4413)
郑州市 VOCs 组分排放清单及其臭氧生成潜势	卢轩, 张瑞芹, 韩跃钢 (4426)
郑州市少数民族运动会期间 O ₃ 及 VOCs 污染特征的演变和评估	赵金帅, 于世杰, 王楠, 马双良, 王维思, 尹沙沙, 李一丹, 张栋, 张瑞芹 (4436)
我国木器涂料及汽车涂料中挥发性有机物特征	柯云婷, 孙宇航, 成海荣, 刘锐源, 黄皓旻, 范丽雅, 叶代启 (4446)
典型脱硫工艺对燃煤锅炉烟气颗粒物的影响	张进生, 吴建会, 吕瑞鹤, 宋丹林, 黄凤霞, 张裕芬, 冯银厂 (4455)
不同居民燃煤炉具大气污染物排放差异性及减排分析	张熠晨, 薛陈利, 刘杰, 钟连红, 薛亦峰 (4462)
天津市 2017 年移动源高分时空分辨率排放清单	刘庚, 孙世达, 孙露娜, 金嘉欣, 房键旭, 宋鹏飞, 王婷, 吴琳, 毛洪钧 (4470)
四川省基于第二次污染源普查数据的人为源大气污染源排放清单及特征	徐晨曦, 陈军辉, 李媛, 何敏, 冯小琼, 韩丽, 刘政, 钱骏 (4482)
抗大气复合污染的城市森林植物初步筛选	李品, 卫妍妍, 冯兆忠 (4495)
宝鸡市绿植叶片重金属空间分布及污染特征	张军, 梁青芳, 高煜 (4504)
潮汕地区入海河流及水生生物中 PPCPs 分布特征及风险评估	秀措, 王尘辰, 吕永龙, 陆轶峰, 王聪, 张梦, 曹祥会 (4514)
泉州山美水库及入库河流沉积物中多溴二苯醚的时空分异和降解分析	韩文亮, 刘豫, 冯凯文 (4525)
长江上游典型山地农业小流域浅层地下水硝态氮时空变异特征及影响因素	江南, 周明华, 李红, 李子阳, 章熙峰, 朱波 (4539)
沱江流域典型农业小流域氮和磷排放特征	王宏, 徐娅玲, 张奇, 林超文, 翟丽梅, 刘海涛, 蒲波 (4547)
基于 DPeRS 模型的海河流域面源污染潜在风险评估	冯爱萍, 王雪蕾, 徐逸, 黄莉, 吴传庆, 王昌佐, 王洪亮 (4555)
降水空间异质性对非点源关键源区识别面积变化的影响	高晓曦, 左德鹏, 马广文, 徐宗学, 胡小红, 李佩君 (4564)
硅藻群落指示的近 50 年来大理西湖湖泊生态系统演变规律	张晨雪, 徐敏, 董一凡, 王荣, 方凤满 (4572)
海陆交互带土壤及河流沉积物中镉含量及形态分布特征	王芳婷, 陈植华, 包科, 赵信文, 孟宪萌, 黄长生 (4581)
内蒙古河套灌区排水干沟微塑料赋存特征及质量估算	王志超, 杨帆, 杨文焕, 李卫平, 杨建林, 秦一鸣, 李河 (4590)
透水/不透水格局特征对汇水单元径流污染的影响	姜智绘, 廖云杰, 谢文霞, 李佳, 房志达, 赵洪涛, 李叙勇 (4599)
铁铜双金属有机骨架 MIL-101(Fe, Cu) 活化双氧水降解染料性能	梁贺, 刘锐平, 安晓强, 刘会娟 (4607)
纳米 Cu ⁰ @Fe ₃ O ₄ 活化 PMS 降解对-硝基苯酚的协同反应机制	石清清, 蒲生彦, 杨犀 (4615)
紫外活化过硫酸盐降解水中三氯蔗糖动力学和机制	余韵, 陆金鑫, 吕贞, 彭明国, 徐彬焜, 杜尔登, 郑璐 (4626)
污水生物处理工艺低温下微生物种群结构	尚越飞, 王申, 宗倪, 杜海洲, 张鑫, 齐嵘, 杨敏 (4636)
不同 DN 与 PN-ANAMMOX 耦合工艺处理中晚期垃圾渗滤液的微生物群落分析	陆明羽, 李祥, 黄勇, 殷记强, 方文烨 (4644)
全程自养颗粒污泥快速启动及混合营养型脱氮性能分析	齐泽坤, 王建芳, 钱飞跃, 刘雨馨, 乔伟, 李小蝶 (4653)
不同低碳氮比废水中好氧颗粒污泥的长期运行稳定性	袁强军, 张宏星, 陈芳媛 (4661)
潮土细菌及真菌群落对化肥减量配施有机肥和秸秆的响应	吴宪, 王蕊, 胡荷, 修伟明, 李刚, 赵建宁, 杨殿林, 王丽丽, 王欣奕 (4669)
不同轮作模式下作物根际土壤养分及真菌群落组成特征	孙倩, 吴宏亮, 陈阜, 康建宏 (4682)
酒糟生物炭短期施用对贵州黄壤氮素有效性及细菌群落结构多样性的影响	张萌, 刘彦伶, 魏全全, 苟久兰 (4690)
稻油不同轮作模式对农田甲烷和氧化亚氮排放的影响	陈友德, 赵杨, 高杜娟, 罗先富, 崔婷, 童中权, 吴家梅 (4701)
解淀粉芽孢杆菌生物有机肥防控土壤氨挥发	杨亚红, 薛莉霞, 孙波, 张宝, 庄绪亮, 庄国强, 白志辉 (4711)
外源磷对镉胁迫下水稻生长及镉累积转运的影响	霍洋, 仇银燕, 周航, 胡雨丹, 邓鹏辉, 魏宾斌, 辜娇峰, 刘俊, 廖柏寒 (4719)
水稻不同生育期 As 胁迫下 As 累积关键生育期	邓鹏辉, 蔡雅琴, 周航, 刘雅, 杨文俊, 辜娇峰, 廖柏寒 (4726)
铅锌矿区玉米中重金属污染特征及健康风险评价	周艳, 万金忠, 李群, 黄剑波, 张胜田, 龙涛, 邓绍坡 (4733)
浙江省台州市电子垃圾拆解地多溴联苯醚浓度水平分布特征和迁移趋势	魏抱楷, 柳晨, 王英, 金军 (4740)
重庆市酉阳县南部农田土壤重金属污染评估及来源解析	王锐, 邓海, 严明书, 何忠库, 周皎, 梁绍标, 曾琴琴 (4749)
重庆市畜禽粪便及菜田土壤中四环素类抗生素生态风险评价	彭秋, 王卫中, 徐卫红 (4757)
《环境科学》征订启事 (4435) 《环境科学》征稿简则 (4445) 信息 (4606, 4625, 4732)	

长江上游典型山地农业小流域浅层地下水硝态氮时空变异特征及影响因素

江南^{1,2}, 周明华^{1*}, 李红¹, 李子阳^{1,2}, 章熙峰¹, 朱波¹

(1. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041; 2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049)

摘要: 长江上游山区以浅层地下水作为主要供水水源,但其极易受到农业生产等活动所导致的硝态氮(NO_3^- -N)污染. 本文选取长江上游典型山区农业小流域作为研究对象,对土地利用与管理强度和水文地质条件等进行了野外调查,阐明其浅层地下水 NO_3^- -N时空变异特征并分析其影响因素. 结果表明,研究小流域地下水中 NO_3^- -N质量浓度变化范围为0.40~12.51 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,超标率近30%. 受降雨和管理强度影响,丰水期降雨量和施肥量增加,土壤中氮素在降雨驱动下淋溶流失进入浅层地下水,呈现出丰水期 NO_3^- -N质量浓度(6.73 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)高于枯水期 NO_3^- -N质量浓度(6.28 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)的时间变异特征. 在空间上,小流域地下水中 NO_3^- -N质量浓度呈现坡耕地和居民区集中分布的截留和大兴子流域中地下水 NO_3^- -N质量浓度(截留子流域:6.58 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 大兴子流域:6.34 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)高于苏荣子流域(5.20 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)的特征,主要由不同子流域地下水埋深和土地利用类型的空间分异特征导致. 此外,浅层地下水 NO_3^- -N质量浓度与 Cl^- 、 NH_4^+ -N、DOC和 SO_4^{2-} 质量浓度呈正相关,而与pH值呈负相关,表明地下水化学因子亦是其不可忽略的影响因素. 因此,加强山地农业小流域浅层地下水 NO_3^- -N时空变异特征及其影响因素研究对防控山区农村浅层地下水硝态氮污染和保障饮用水安全十分必要.

关键词: 浅层地下水; 硝态氮; 时空变异特征; 影响因素; 农业小流域

中图分类号: X523 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)10-4539-08 DOI: 10.13227/j.hjlx.201912188

Spatial-temporal Variations and the Regulators of Nitrate Status in Shallow Groundwater of the Typical Mountainous Agricultural Watershed in the Upper Reaches of the Yangtze River

JIANG Nan^{1,2}, ZHOU Ming-hua^{1*}, LI Hong¹, LI Zi-yang^{1,2}, ZHANG Xi-feng¹, ZHU Bo¹

(1. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China; 2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Shallow groundwater is the main drinking water supply for the mountainous area in the upper reaches of the Yangtze River, while its quality is often degraded by nitrate (NO_3^- -N) pollution due to intensive agricultural production activities. In the present study, we selected a mountainous agricultural watershed in the upper reaches of the Yangtze River to investigate the land use, management, and hydrogeological conditions, aiming to clarify the spatial-temporal variations in NO_3^- -N concentration of shallow groundwater, thereby exploring the key regulators. The results showed that the NO_3^- -N concentrations of the groundwater ranged from 0.40 to 12.51 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ in the study area, and the exceeding ratio was nearly 30%. On an average, NO_3^- -N concentrations for the wet season were higher than that for the dry season, indicating great variations in NO_3^- -N concentration across different seasons. In addition, the spatial variations of NO_3^- -N concentration in groundwater were also significant among different sub-catchment, which was mainly due to variations in the groundwater table depth and land uses. Furthermore, the significant correlations between the NO_3^- -N concentrations and concentrations of Cl^- , NH_4^+ -N, DOC, and SO_4^{2-} in the shallow groundwater were also explored in this study, suggesting that the NO_3^- -N concentrations were likely to depend on the chemical factors of the shallow groundwater in the study area. Overall, our current study highlights that the characterization of spatial-temporal variations of NO_3^- -N status in shallow groundwater and illustration of key regulators are essential to mitigate NO_3^- -N pollution and prevent quality degradation of shallow groundwater in mountainous rural areas of the upper Yangtze River watershed.

Key words: shallow groundwater; nitrate; temporal and spatial variation characteristic; regulators; small agricultural watershed

近年来地下水中硝态氮污染成为全球性水环境问题^[1,2]. 硝态氮是水中氮的主要化学物质,参与环境中的化学和生物反应. 硝态氮自然存在于环境中,但地下水中的硝态氮质量浓度超过自然水平,可能对人体健康产生潜在的危害,例如先天缺陷,消化道疾病和免疫系统损害等^[3-5]. 含水层的自净能力有限,污染物残留在含水层中容易造成持续化问

题^[6]. 尤其在农业区,由于肥料的过度或不合理使用,盈余的氮素在土壤中积累,通过不同径流途径流

收稿日期: 2019-12-23; 修订日期: 2020-04-07

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFD1100503)

作者简介: 江南(1997~),女,硕士研究生,主要研究方向为流域氮素循环与水环境效应, E-mail: jiangnan19@mails.ucas.ac.cn

* 通信作者, E-mail: mhuazhou@imde.ac.cn

失进入到地表水体和地下水体,导致地表水体富营养化和地下水硝态氮污染等系列水环境问题^[7, 8].

我国许多地区均已发现地下水硝态氮污染问题且呈日益严重趋势.周迅等^[9]对福建省晋江市浅层地下水中的硝态氮质量浓度进行了调查,结果表明硝态氮质量浓度在 $4.43 \sim 216.91 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,平均值高达 $78.91 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,超过地下水质量Ⅲ类标准的样点占 41.51%.北京南部以及河北省 325 个浅层地下水中硝态氮超标率达到 18%^[10].滇池流域由于农业集约化程度高,地下水中硝态氮质量浓度平均值高达 $26.93 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,最高值达到 $326 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,严重超标率高达 34.14%^[11].已有研究表明,导致地下水硝态氮污染因素主要有地形地貌、地下水埋深、土壤结构等自然因素和土地利用及其管理强度等人为因素,而这些因素相互作用、机制复杂^[12~18].

长江上游山地丘陵区主要是以分散小口径浅井开采为主的“庭院式自来水”供水模式,农业集约化程度较高、氮肥施用量大,地表水体富营养化严重^[19],生活饮用水极易遭受污染,而关于该区地下水硝态氮空间分布及其影响因素相关研究较少.因此,本文选取长江上游山地丘陵区典型农业小流域,结合农业小流域的自然地理条件和水文地质背景特征,综合分析浅层地下水中硝态氮质量浓度现状、时空分布特征及其影响因素,以期为评价和分析该区地下水硝态氮污染风险和饮用水安全提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

1.1.1 自然地理位置与气象水文

本研究小流域位于长江上游四川盆地中部偏北的绵阳市盐亭县林山乡,流域面积约为 4 km^2 ,嵌套 3 个子流域,分别为苏荣集水区、截留小流域和大兴小流域.距离成都约 180 km,位于绵阳市东部 70 km 处,西邻三台县,东靠阆中市,北与梓潼县接壤,南与射洪县相连,属典型山地丘陵区农业小流域.

研究区属于亚热带湿润季风气候区,具有日照少,多云雾,霜期短,风速小的特点.年平均降雨量约为 946 mm,最大年降水量达到 1 515 mm,最小年降水量为 494.5 mm,一年降雨中夏季占比最高,为 65.5%,春季占比最低,为 5.9%^[20],丰水期为 5~9 月,枯水期为 11 月~次年 2 月.历年平均气温 16.4°C ,平均蒸发量为 630 mm,年均湿度 78%,无霜期为 293 d,年均日照时长达到 1 104 h.

1.1.2 地质与水文地质条件

研究区北部有较多的深山,南部有较浅的丘陵,

地势北、北东高,南西低,土壤主要是由白垩系和侏罗系紫色砂页岩发育而成的紫色土,是典型的紫色土低山丘陵农耕地.研究区位于一连续式旋扭构造体系上,主要穿过第四系、白垩系和侏罗系的地层,第四系不整合或假整合在白垩系和侏罗系之上,岩层产状平缓,褶皱宽缓无大断裂,地层分布如图 1.

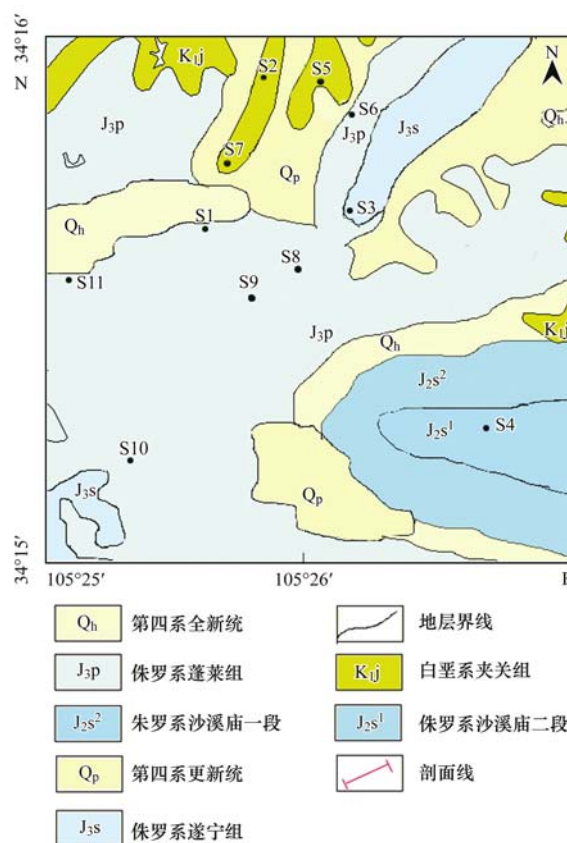


图 1 研究区地质情况

Fig. 1 Geological map of the study area

地下水类型有第四系孔隙潜水、砂-泥岩风化带孔隙-裂隙水和砂-泥岩层间裂隙水,以风化裂隙水为主.补给区为北部低山沟谷区,排泄区为南部浅丘平原地带,地下水流向大致由北向南,地层颗粒由北至南逐渐变细,地下水埋深逐渐变浅.主要补给来源为大气降水、农灌水、河渠水以及部分砂砾岩段的局部补给,地下水的径流途径短,循环交替积极,排泄方式主要为人工抽水、径流排泄及蒸发.

1.2 样品的采集

每个子流域平均布设 4 个浅层地下水取样点,且主要分布在该区域的耕地、林地和居民区这 3 种土地类型上,共设置了 11 处取样点(采样点分布状况见图 2,监测井基本情况见表 1).采样频次为每月 3 次,共进行连续 1 a 的观测研究.每个取样点利用抽水泵外接取样器进行取样,并记录井径埋深等信息,取样深度在 30~50 cm 之间,取样前用去离子水润洗瓶子 3 遍,每次采集 500 mL 水样于聚乙烯塑料

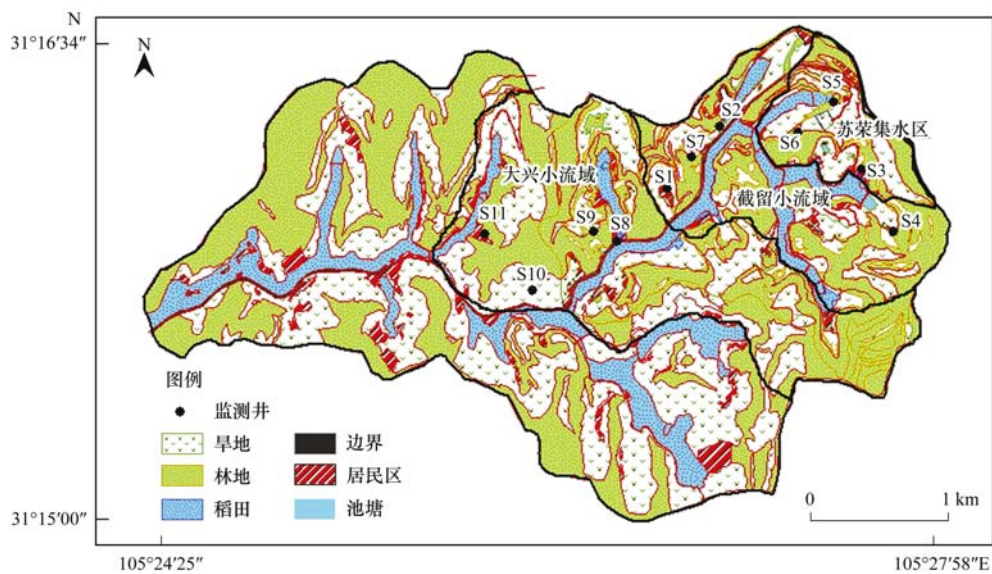


图2 研究区采样点分布示意

Fig. 2 Distribution of sampling points in the study area

瓶中,采集完成后置于4℃恒温箱中保存,并于当天送至实验室进行测试分析。

表1 研究区监测井基本情况表

Table 1 Basic conditions of monitoring wells in the study area

编号	井径/cm	平均埋深/cm	所在土地类型	用途
S1	120	446	居民点	饮用
S2	300	176	居民区	饮用
S3	230	70	居民点	饮用
S4	180	128	居民点	饮用
S5	80	134	林地	饮用
S6	124	35	林地	测量
S7	150	62	农田	饮用
S8	108	23	居民点	饮用
S9	95	36	居民点	饮用
S10	230	142	农田	灌溉
S11	270	257	农田	饮用

1.3 测试方法

浅层地下水 pH 采用 pH 计 (S220-B, 瑞士) 进行现场测试,精度为 ± 0.1。水样中水溶性离子 (Ca²⁺、Mg²⁺、K⁺、Na⁺、CO₃²⁻、HCO₃⁻、Cl⁻、SO₄²⁻、PO₄³⁻ 和 NO₃⁻) 通过 0.45 μm 滤膜过滤,采用美国戴安的离子色谱仪 (ICS900) 测定阴阳离子质量浓度。水样中的 TN、NO₂⁻-N 和 NH₄⁺-N 测定方法根据文献[21]中的规定,用紫外分光光度计 (UV-8500, 日本岛津) 进行测定。利用小流域内自动气象观测站 (MAWA301, 芬兰 Vasaila 公司) 获取降雨等气象数据。

1.4 数据处理与统计分析

采用《地下水质量标准》(GB/T 14848-2017) 和《生活饮用水卫生标准》(GB 5749-2006) 评价地下水质量。运用 SPSS 22.0 软件 (IBM 公司, 美国) 对

NO₃⁻-N 质量浓度与地下水埋深、月平均降雨量进行了二元回归分析,对 NO₃⁻-N 质量浓度和地下水化学因子进行了 Pearson 相关性分析,利用 Aquachem 4.0 (Waterloo Hydrogeologic 公司, 加拿大) 绘制 Piper 三线图,表示区域水化学特征。通过 Origin 9.1 (Origin Lab 公司, 美国) 绘图软件作出各图件。

2 结果与讨论

2.1 地下水化学特征

研究区的地下水化学成分组成如表 2 所示。区域内浅层地下水主要阴离子为 HCO₃⁻ 和 SO₄²⁻, 主要阳离子为 Ca²⁺, 对研究区地下水化学类型按舒卡列夫分类,可以得出水化学类型为 HCO₃·SO₄-Ca, 地下水水化学 Piper 三线图如图 3 所示。研究区地下水主要赋存于孔隙和裂隙中,而裂隙水的主要含水层由钙质砂岩组成,同时在水岩的相互作用下,方解石和

表2 研究区浅层地下水化学统计数据

Table 2 Chemical statistics of shallow groundwater in the study area

项目	最小值 /mg·L ⁻¹	最大值 /mg·L ⁻¹	平均值 /mg·L ⁻¹	变异系数 /%
Ca ²⁺	16.26	104.82	51.57	36.67
Mg ²⁺	2.31	19.55	11.58	35.17
K ⁺	0.08	12.32	1.57	126.69
Na ⁺	5.92	39.49	23.12	36.68
CO ₃ ²⁻	0.00	12.00	0.81	271.86
HCO ₃ ⁻	67.12	268.48	129.85	25.19
Cl ⁻	9.55	45.44	25.50	46.14
SO ₄ ²⁻	21.02	197.08	84.55	44.62
PO ₄ ³⁻	0.00	1.09	0.12	155.36
NO ₃ ⁻ -N	0.03	17.10	6.66	62.56
NO ₂ ⁻ -N	0.00	0.16	0.01	220.28
NH ₄ ⁺ -N	0.00	0.47	0.06	147.74
pH	7.43	8.46	8.08	3.30

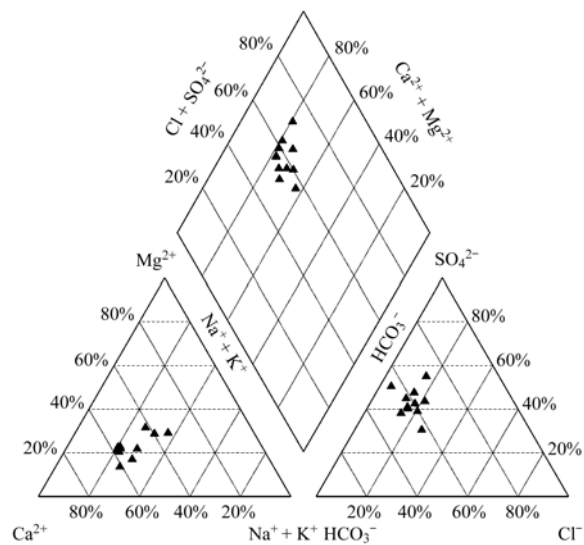


图3 浅层地下水水化学成分 Piper 三线图

Fig. 3 Piper diagram showing hydrochemical composition of shallow groundwater

表3 浅层地下水中主要形态氮年平均质量浓度及其占总氮比例¹⁾

水井编号	水体氮素质量浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$				占总氮质量分数/%		
	TN	$\text{NO}_3^- \text{-N}$	$\text{NH}_4^+ \text{-N}$	$\text{NO}_2^- \text{-N}$	$\text{NO}_3^- \text{-N}$	$\text{NH}_4^+ \text{-N}$	$\text{NO}_2^- \text{-N}$
S1	8.23 ± 0.65	6.75 ± 0.71	0.07 ± 0.03	0.01 ± 0.00	82.07	0.83	0.08
S2	14.28 ± 0.78	12.51 ± 0.25	0.06 ± 0.02	0.01 ± 0.00	87.65	0.38	0.06
S3	10.95 ± 0.58	9.46 ± 0.28	0.06 ± 0.02	0.02 ± 0.01	86.39	0.54	0.14
S4	1.82 ± 0.16	1.38 ± 0.14	0.06 ± 0.03	0.00 ± 0.00	75.52	3.03	0.10
S5	9.11 ± 0.63	7.79 ± 0.32	0.09 ± 0.04	0.00 ± 0.00	85.47	1.02	0.02
S6	5.23 ± 0.39	4.34 ± 0.40	0.07 ± 0.02	0.01 ± 0.00	82.95	1.24	0.12
S7	6.63 ± 0.59	5.67 ± 0.51	0.09 ± 0.03	0.01 ± 0.00	85.51	1.30	0.13
S8	1.65 ± 0.65	0.40 ± 0.10	0.04 ± 0.01	0.01 ± 0.01	24.32	2.65	0.68
S9	10.82 ± 1.01	10.49 ± 0.50	0.03 ± 0.01	0.01 ± 0.00	96.97	0.30	0.07
S10	4.36 ± 0.86	3.67 ± 0.86	0.04 ± 0.02	0.01 ± 0.00	84.04	0.96	0.18
S11	12.05 ± 1.31	10.78 ± 0.84	0.04 ± 0.01	0.02 ± 0.01	89.42	0.31	0.15

1) $\pm$ 后为标准偏差

不同空间位置浅层地下水 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 质量浓度的频率分布如图4所示.研究区的Ⅰ类、Ⅱ类和Ⅲ类水平均占比18.18%、18.18%和63.64%.其中,S2、S3、S5、S9和S11中Ⅲ类水分布频率达到100%.S8和S4中Ⅰ类水占比分别为100%和91.7%,水质较好.S1、S7、S10和S6虽然超标率不高,但Ⅲ类水占比分别达到83.3%、75.0%、33.3%和16.7%.从总体上看,研究区地下水 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 质量浓度处于较低水平,但从Ⅲ类水的分布频率(63.64%)来看,存在向Ⅳ类水发展的潜在风险.

2.3 地下水 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 时空变异特征

2.3.1 时间变异特征

本研究的农业小流域浅层地下水 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 质量浓度年内变化曲线如图5所示.地下水中 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 的平均质量浓度在 $5.37 \sim 7.30 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间变化,年内变化呈现出一定的波动性.丰水期和枯水期 $\text{NO}_3^- \text{-N}$

长石溶解于水,导致地下水中 HCO_3^- 和 Ca^{2+} 质量浓度较高, Mg^{2+} 和 SO_4^{2-} 的来源主要与研究区下伏基岩侏罗系地层中含有石膏薄层有关.

2.2 地下水 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 质量浓度现状

通过对小流域浅层地下水三氮($\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^- \text{-N}$)质量浓度及其占总氮(TN)比例的连续观测研究(表3),发现TN质量浓度变化范围为 $1.65 \sim 14.28 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (均值: $7.74 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$). $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 质量浓度在 $0.40 \sim 12.51 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间变化(均值: $6.66 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),约27%的地下水 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 质量浓度超过国家生活饮用水卫生标准^[22]($10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 质量浓度占TN质量浓度的24.32%~96.97%.地下水的 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 质量浓度和 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 质量浓度范围分别为 $0.03 \sim 0.09 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.00 \sim 0.02 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,均未超标.总体而言该农业小流域浅层地下水氮素以 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 为主, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 次之, $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 最少.

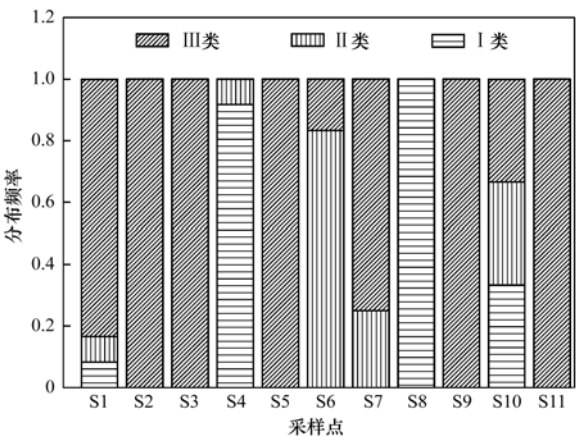


图4 不同地区3类水的分布频率

Fig. 4 Distribution frequencies of three types of water in different regions

平均质量浓度分别为 $6.73 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $6.28 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,浅层地下水 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 质量浓度呈现出丰水期总体高于

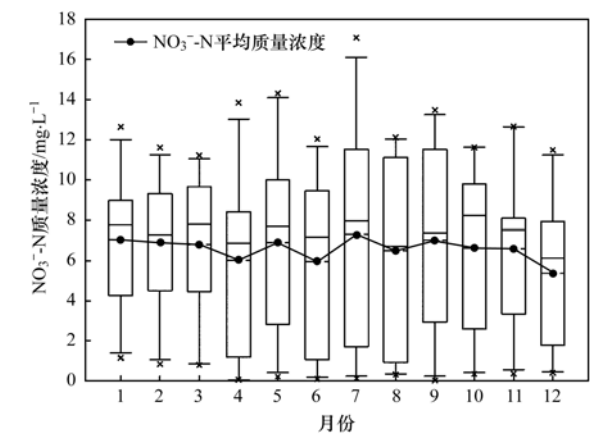


图5 浅层地下水中NO₃⁻-N质量浓度的年内变化曲线

Fig. 5 Annual variation curve of nitrate concentration in shallow groundwater

枯水期的时间变异特征.

2.3.2 空间变异特征

不同子流域间NO₃⁻-N质量浓度如表4所示. 地下水NO₃⁻-N平均质量浓度依次为截留(6.58 mg·L⁻¹) > 大兴(6.34 mg·L⁻¹) > 苏荣(5.20 mg·L⁻¹), 其中, 大兴子流域超标率最高, 达到50%.

表4 不同子流域浅层地下水NO₃⁻-N质量浓度分析

流域	样品数/个	NO ₃ ⁻ -N质量浓度/mg·L ⁻¹			标准差	变异系数	超标率/%
		最大值	最小值	平均值			
苏荣	3	9.46	4.79	5.20	2.61	0.36	0
截留	4	12.51	1.38	6.58	4.58	0.70	25
大兴	4	10.78	0.40	6.34	5.14	0.81	50

2.4 影响因素

2.4.1 地下水埋深

研究区浅层地下水埋深普遍在0~5 m之间, 地下水NO₃⁻-N质量浓度随埋深而逐渐增加, 在2.5 m附近达到峰值后开始降低(图6). 埋深为0~2.5 m的地下水主要分布在第四系松散堆积物和白垩系夹

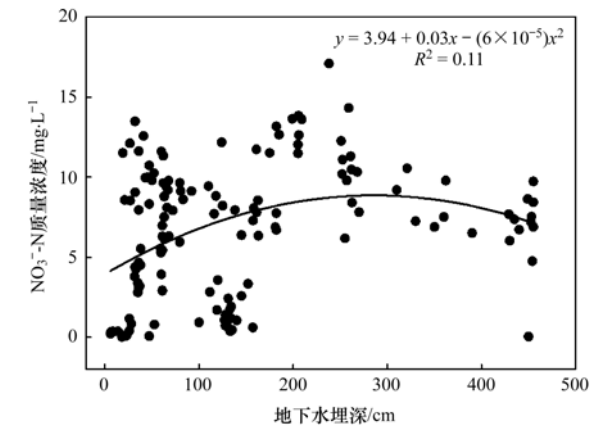


图6 NO₃⁻-N质量浓度与地下水埋深关系

Fig. 6 Relationship between nitrate concentration and groundwater depth

前人研究表明, 水井周围的环境条件、地下水埋深、地层结构和土地利用格局等均会影响地下水中NO₃⁻-N质量浓度^[3,23,24]. 截留子流域农地比重大(55%), 居民点较为密集, 农业活动是导致该地区地下水NO₃⁻-N质量浓度升高的主要因素. 大兴子流域包气带颗粒粗, 含水层透水性强, 所对应的活动区农业生产发达, 氮肥施用量较大, 导致NO₃⁻-N在土壤中的严重积累, 进而淋滤迁移到地下水^[25].

其中, 截留子流域S2中NO₃⁻-N质量浓度最高, 达到12.51 mg·L⁻¹, S2埋深约1.76 m, 附近砂岩构造裂隙发育, 加之距离生活排污口较近, 导致NO₃⁻-N极易通过孔隙裂隙进入地下水, 使井水中NO₃⁻-N质量浓度增加. 大兴子流域中S9和S8位置相近, 埋深分别为0.36 m和0.23 m, 但NO₃⁻-N质量浓度差异明显, 分别为10.49 mg·L⁻¹和0.40 mg·L⁻¹. 可能是由于附近的储水空间由溶孔裂隙、浅层风化裂隙和层面裂隙组成, 富水性极不均匀, S9附近泥岩溶孔裂隙较为发育, 且该井使用年限达到20 a, 距离居民点排污口10 m, 左侧2 m处为碎石堆积而成的机耕道基座, 裂隙空间较大, 容易受到四周污染.

关组地层中, 包气带颗粒粗, 含水层透水性好, 地下径流交替强, 土壤中的NO₃⁻-N不断下渗, 同时周围河流、农田中的NO₃⁻-N通过侧向扩散作用进入地下水, 在2.5 m附近达到最大值^[26,27]. 地下水埋深为2.5~5 m时, 与地下水NO₃⁻-N质量浓度呈反相关, 附近地层岩性主要为泥岩与砂质泥岩互层, 透水性差, 底层含氧量降低易形成还原环境, 导致NO₃⁻-N在厌氧微生物的作用下转换为气态氮化物和氮气^[28~30].

2.4.2 降雨

降雨不仅是影响可溶性氮垂直迁移的主要驱动因素, 也是浅层地下水的主要补给来源^[31,32]. 研究区降雨量与浅层地下水NO₃⁻-N质量浓度呈正相关($P < 0.05$), 如图7所示. 这是由于丰水期间该地区正处于施肥期, 随着降雨量的增加, 土壤肥料中的氮素在降雨驱动下淋溶流失进入浅层地下水^[33,34], 另一方面气温和溶解氧等水体条件在该时段更有利于硝化反应发生, 而在枯水期时, 小流域壤中流和地下径流发生频率低, 流失进入浅层地下水NO₃⁻-N减少^[35], 导致地下水NO₃⁻-N质量浓度对降雨有直接响

应关系. 总体而言,降雨、施肥事件及其相互耦合作用是研究区农业小流域浅层地下水NO₃⁻-N质量浓度时空变异特征的重要驱动因素.

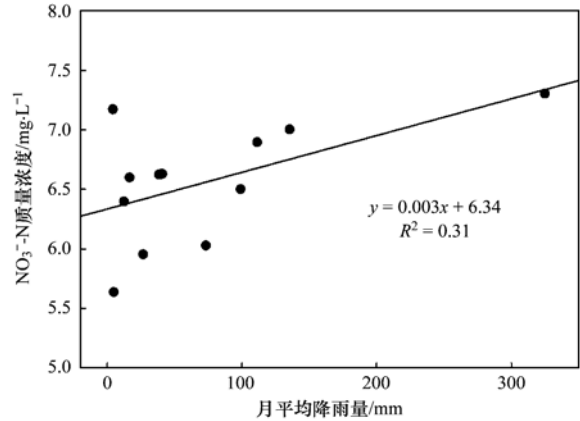


图 7 浅层地下水中NO₃⁻-N质量浓度与月平均降雨量的关系
Fig. 7 Relationships of nitrate concentration in shallow groundwater with the rainfall

2.4.3 地下水其它化学因子

研究农业小流域浅层地下水三氮质量浓度与Cl⁻等其它化学因子相关关系如表5所示.

表 5 “三氮”与地下水化学因子的相关性分析¹⁾
Table 5 Correlation analysis between tri-nitrogen and groundwater chemical factors

	相关系数		
	NO ₃ ⁻ -N	NH ₄ ⁺ -N	NO ₂ ⁻ -N
Cl ⁻	0.59 *	0.32	-0.37
DOC	0.58 *	0.01	-0.47
pH	-0.70 *	0.65 *	-0.79 **
SO ₄ ²⁻	0.71 **	0.56	-0.58 *
PO ₄ ³⁻	0.57	0.31	-0.33
K ⁺	0.38	-0.08	-0.55
NO ₃ ⁻ -N	1.00	0.63 *	-0.66 *
NH ₄ ⁺ -N	0.63 *	1.00	-0.39
NO ₂ ⁻ -N	-0.66 *	-0.39	1.00

1) * 表示在 0.05 级别 (双尾) 相关性显著; ** 表示在 0.01 级别 (双尾) 相关性极显著

浅层地下水NO₃⁻-N质量浓度与NH₄⁺-N、DOC和SO₄²⁻质量浓度呈正相关,与pH值呈负相关. 研究区为农业小流域,农田土壤NH₄⁺-N质量浓度高,极易随地表径流和壤中流等径流途径进入浅层地下水,浅层地下水中NH₄⁺-N在微生物作用下(DOC可为硝化作用提供碳源)发生硝化作用,导致NO₃⁻-N质量浓度的增加.NO₃⁻-N与SO₄²⁻之间显著正相关关系可能是因为施用肥料中含有N和S元素,施肥后土壤中的SO₄²⁻与NO₃⁻-N同步流失进入浅层地下水,这与贾小妨等^[36]的研究结果一致.然而,刘建奎等^[37]和韩宇平等^[38]的研究显示pH值范围为6.40~7.90时,硝化作用最强,但随着pH升高可能抑制

硝化细菌的活性、减缓硝化作用,导致地下水NH₄⁺-N质量浓度升高,NO₃⁻-N质量浓度降低.该研究小流域浅层地下水pH平均值为8.08,超过利于浅层地下水硝化作用发生的pH阈值,这可能是小流域浅层地下水中NO₃⁻-N质量浓度与pH值呈负相关关系的重要原因.

Cl⁻作为保守的阴离子,不与周围地下水发生化学反应,通常认为地下水中的氯离子主要是由人类活动直接或间接输入^[39].研究区农业小流域浅层地下水NO₃⁻-N与Cl⁻质量浓度间正相关关系表明,该地区NO₃⁻-N主要来源于小流域内居民点含氮生活污水排放等人为活动,该结果与万镇嘉^[40]对陕西关中盆地农业区域浅层地下水NO₃⁻-N来源的研究结果一致.

3 结论

(1)长江上游山地农业小流域浅层地下水中NO₃⁻-N是氮素主要形态,其质量浓度变化范围为0.40~12.51 mg·L⁻¹且超标率近30%.以NO₃⁻-N质量浓度为评价因子,Ⅲ类水质占比达63.64%,存在向Ⅳ类水发展的潜在威胁,应通过长期监测系统防止饮用水质的进一步恶化.

(2)NO₃⁻-N质量浓度呈现出时空变异特征,丰水期NO₃⁻-N质量浓度(6.73 mg·L⁻¹)总体高于枯水期(6.28 mg·L⁻¹);坡耕地和居民区集中分布的截留和大兴子流域中地下水NO₃⁻-N质量浓度(截留子流域:6.58 mg·L⁻¹;大兴子流域:6.34 mg·L⁻¹)高于苏荣子流域(5.20 mg·L⁻¹).

(3)研究区地下水中NO₃⁻-N质量浓度变化主要受地下水埋深、降雨、地下水化学因子影响,其次与土地利用格局、管理强度和地层结构有关.在该农业小流域未来的发展建设中,合理地土地利用与管理强度对实现区域内地下水的可持续利用至关重要.

参考文献:

[1] 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.
[2] Ayub R, Messier K P, Serre M L, et al. Non-point source evaluation of groundwater nitrate contamination from agriculture under geologic uncertainty [J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2019, **33**(4-6): 939-956.
[3] Wagh V M, Panaskar D B, Mukate S V, et al. Nitrate associated health risks from groundwater of Kadava River Basin Nashik, Maharashtra, India [J]. Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal, 2020, **26**(3): 654-672.
[4] Li Y Q, Wang F, Yan W J, et al. Enhanced nitrogen imbalances in agroecosystems driven by changing cropping systems in a

- coastal area of eastern China: from field to watershed scale[J]. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 2019, **21**(9): 1532-1548.
- [5] Johnson P T J, Townsend A R, Cleveland C C, *et al.* Linking environmental nutrient enrichment and disease emergence in humans and wildlife[J]. *Ecological Applications*, 2010, **20**(1): 16-29.
- [6] Du Y, Deng Y M, Ma T, *et al.* Spatial variability of nitrate and ammonium in pleistocene aquifer of central Yangtze River basin[J]. *Groundwater*, 2020, **58**(1): 110-118.
- [7] Eickhout B, Bouwman A F, van Zeijts H. The role of nitrogen in world food production and environmental sustainability[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2006, **116**(1-2): 4-14.
- [8] Sabo R D, Clark C M, Bash J, *et al.* Decadal shift in nitrogen inputs and fluxes across the contiguous United States; 2002-2012[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2019, **124**(10): 3104-3124.
- [9] 周迅, 朱春芳. 福建省晋江市浅层地下水硝酸盐含量特征及其水化学指示意义[J]. *地球学报*, 2014, **35**(2): 177-182.
- Zhou X, Zhu C F. The nitrate content characteristics of shallow groundwater in Jinjiang City, Fujian Province, and their hydrochemical indication significance[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2014, **35**(2): 177-182.
- [10] 王仕琴, 郑文波, 孔晓乐. 华北农区浅层地下水硝酸盐分布特征及其空间差异性[J]. *中国生态农业学报*, 2018, **26**(10): 1476-1482.
- Wang S Q, Zheng W B, Kong X L. Spatial distribution characteristics of nitrate in shallow groundwater of the agricultural area of the North China Plain[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, **26**(10): 1476-1482.
- [11] 黄强盛, 李清光, 卢玮琦, 等. 滇池流域地下水、河水硝酸盐污染及来源[J]. *地球与环境*, 2014, **42**(5): 589-596.
- Huang Q S, Ling Q G, Lu W Q, *et al.* Characteristics and potential sources of nitrate pollution in groundwater and river water in the Dianchi Lake basin[J]. *Earth and Environment*, 2014, **42**(5): 589-596.
- [12] 王凌, 张国印, 孙世友, 等. 河北省环渤海地区地下水硝态氮含量现状及其成因分析[J]. *河北农业科学*, 2009, **13**(10): 89-92.
- Wang L, Zhang G Y, Sun S Y, *et al.* Analysis on the current situation of nitrate-N concentration in groundwater and its causes in Bohai rim of Hebei Province[J]. *Journal of Hebei Agricultural Sciences*, 2009, **13**(10): 89-92.
- [13] 赵丽, 张韵, 张丹, 等. 重庆西部红层浅层地下水中“三氮”污染现状及影响因素分析[J]. *环境污染与防治*, 2016, **38**(6): 46-49, 53.
- Zhao L, Zhang Y, Zhang D, *et al.* Pollution situation and influence factors of ammonia nitrogen, nitrite nitrogen and nitrate nitrogen in shallow groundwater of red-bed region in western Chongqing City[J]. *Environmental Pollution and Control*, 2016, **38**(6): 46-49, 53.
- [14] 方晶晶. 河北平原邯郸地区地下水硝酸盐污染源及迁移转化过程的多元素同位素及微生物(*E. coli*)示踪[D]. 武汉: 中国地质大学, 2014.
- Fang J J. Use of multi-isotope and microbial technology (*E. coli*) for evaluating sources and transformation of nitrate in the groundwater in Handan Area in the North China Plain[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2014.
- [15] 杨静, 肖天昀, 李海波, 等. 江汉平原地下水中硝酸盐的分布及影响因素[J]. *中国环境科学*, 2018, **38**(2): 710-718.
- Yang J, Xiao T Y, Li H B, *et al.* Spatial distribution and influencing factors of the NO₃-N concentration in groundwater in Jiangnan Plain[J]. *China Environmental Science*, 2018, **38**(2): 710-718.
- [16] 妙颖. 关中盆地典型土壤中“三氮”迁移转化规律的研究[D]. 西安: 长安大学, 2006.
- Miao Y. Study on the three nitrogen transport and transformation in typical soils of Guanzhong Basin[D]. Xi'an: Chang'an University, 2006.
- [17] 王萍萍, 段英华, 徐明岗, 等. 不同肥力潮土硝化潜势及其影响因素[J]. *土壤学报*, 2019, **56**(1): 124-134.
- Wang P P, Duan Y H, Xu M G, *et al.* Nitrification potential in fluvo-aquic soils different in fertility and its influencing factors[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, **56**(1): 124-134.
- [18] 舒晓晓, 门杰, 马阳, 等. 减氮配施有机物质对土壤氮素淋失的调控作用[J]. *水土保持学报*, 2019, **33**(1): 186-191.
- Shu X X, Men J, Ma Y, *et al.* Regulation of reduced nitrogen and organic matter application on nitrogen leaching[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, **33**(1): 186-191.
- [19] 朱波, 汪涛, 徐泰平, 等. 紫色丘陵区典型小流域氮素迁移及其环境效应[J]. *山地学报*, 2006, **24**(5): 601-606.
- Zhu B, Wang T, Xu T P, *et al.* Non-point-source nitrogen movement and its environmental effects in a small watershed in hilly area of purple soil[J]. *Journal of Mountain Science*, 2006, **24**(5): 601-606.
- [20] Liu J, Zhang C J, Li P, *et al.* Groundwater nitrate contamination and driving forces from intensive cropland in the North China Plain[J]. *Asian Agricultural Research*, 2019, **11**(9): 39-50.
- [21] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 254-284.
- [22] GB 5749-2006, 生活饮用水卫生标准[S].
- [23] 陈建平, 毛宏涛, 丁际豫, 等. 氮肥对地下水中“三氮”响应机理[J]. *辽宁工程技术大学学报*, 2015, **34**(1): 118-123.
- Chen J P, Mao H T, Ding J Y, *et al.* Response mechanism of nitrogen fertilization to ammonia-nitrite-nitrates groundwater[J]. *Journal of Liaoning Technical University (Natural Science)*, 2015, **34**(1): 118-123.
- [24] 陈云飞, 周金龙, 曾妍妍, 等. 新疆石河子地区地下水硝酸盐含量分布及影响因素分析[J]. *地球与环境*, 2017, **45**(3): 298-305.
- Chen Y F, Zhou J L, Zeng Y Y, *et al.* Distribution of nitrate contents in groundwater of Shihezi Area, Xinjiang Autonomous Region, China and its influencing factors[J]. *Earth and Environment*, 2017, **45**(3): 298-305.
- [25] 王芮, 唐家良, 章熙锋, 等. 亚热带农业小流域暴雨过程硝态氮迁移特征及水文示踪研究[J]. *水利学报*, 2016, **47**(8): 996-1004, 1016.
- Wang R, Tang J L, Zhang X F, *et al.* Characteristics of Nitrate-N losses through runoff and hydrological tracing in subtropical agricultural catchments[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2016, **47**(8): 996-1004, 1016.
- [26] 孔晓乐, 王仕琴, 丁飞, 等. 基于水化学和稳定同位素的白洋淀流域地表水和地下水硝酸盐来源[J]. *环境科学*, 2018, **39**(6): 2624-2631.
- Kong X L, Wang S Q, Ding F, *et al.* Source of nitrate in surface water and shallow groundwater around Baiyangdian Lake Area based on hydrochemical and stable isotopes[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(6): 2624-2631.
- [27] Martínez D, Moschione E, Bocanegra E, *et al.* Distribution and origin of nitrate in groundwater in an urban and suburban aquifer

- in Mar del Plata, Argentina[J]. Environmental Earth Sciences, 2014, **72**(6): 1877-1886.
- [28] 赵同科, 张成军, 杜连凤, 等. 环渤海七省(市)地下水硝酸盐含量调查[J]. 农业环境科学学报, 2007, **26**(2): 779-783.
- Zhao T K, Zhang C J, Du L F, *et al.* Investigation on nitrate concentration in groundwater in seven provinces (city) surrounding the Bo-Hai Sea [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2007, **26**(2): 779-783.
- [29] 刘兴权, 许晶玉, 江丽华, 等. 山东省种植区地下水硝酸盐污染空间变异及分布规律研究[J]. 农业环境科学学报, 2010, **29**(6): 1172-1179.
- Liu X Q, Xu J Y, Jiang L H, *et al.* Spatial variability and distribution pattern of groundwater nitrate pollution in farming regions of Shandong Province, China [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2010, **29**(6): 1172-1179.
- [30] 郭宝萍, 唐一清, 方友春, 等. 北京市通州区农村地下水氨氮污染分析[J]. 现代预防医学, 2007, **34**(6): 1088-1089.
- [31] Kessavalou A, Doran J W, Powers W L, *et al.* Bromide and nitrogen-15 tracers of nitrate leaching under irrigated corn in Central Nebraska[J]. Journal of Environmental Quality, 1996, **25**(5): 1008-1014.
- [32] Zhang X H, Liu J, Huang H T, *et al.* Chromium accumulation by the hyperaccumulator plant *Leersia hexandra* Swartz [J]. Chemosphere, 2007, **67**(6): 1138-1143.
- [33] 方敏. 三江平原松花江-挠力河流域浅层地下水“三氮”污染形成过程研究[D]. 长春: 吉林大学, 2019.
- Fang M. Formation process of inorganic nitrogen pollution in shallow groundwater of Songhua and Naoli River Basin, Sanjiang Plain[D]. Changchun: Jilin University, 2019.
- [34] 曹瑞霞, 刘京, 邓开开, 等. 三峡库区典型紫色土小流域径流及氮磷流失特征[J]. 环境科学, 2019, **40**(12): 5330-5339.
- Cao R X, Liu J, Deng K K, *et al.* Characteristics of nitrogen and phosphorus losses and runoff in a typical purple soil watershed in the three gorges reservoir area [J]. Environmental Science, 2019, **40**(12): 5330-5339.
- [35] 陈正维, 朱波, 刘兴年. 自然降雨条件下紫色土坡地氮素随径流迁移特征[J]. 人民长江, 2014, **45**(13): 82-85.
- Chen Z W, Zhu B, Liu X N. Characteristics of nitrogen transfer with runoff on sloping cropland of purple soil under natural rainfall[J]. Yangtze River, 2014, **45**(13): 82-85.
- [36] 贾小妨. 山东省地下水硝酸盐分布规律及溯源研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2010.
- Jia X F. Research on distributed pattern and sources of nitrate in groundwater of Shandong Province [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2010.
- [37] 刘建奎, 杨章贤, 马雷, 等. 阜阳浅层地下水“三氮”污染特征及其影响因素分析[J]. 安徽地质, 2018, **28**(2): 123-126.
- Liu J K, Yang Z X, Ma L, *et al.* Characteristics and influencing factors of “three nitrogen” pollution in the Fuyang shallow groundwater[J]. Geology of Anhui, 2018, **28**(2): 123-126.
- [38] 韩宇平, 柴奕, 刘中培, 等. 人民胜利渠灌区地下水氮含量时空分布特征研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2018, **39**(1): 25-30, 96.
- Han Y P, Chai Y, Liu Z P, *et al.* Temporal and spatial distribution characteristics of nitrogen content in the groundwater of People's Victory Canal irrigation district[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2018, **39**(1): 25-30, 96.
- [39] Liu C Q, Li S L, Lang Y C, *et al.* Using $\delta^{15}\text{N}$ - and $\delta^{18}\text{O}$ -values to identify nitrate sources in karst ground water, Guiyang, Southwest China [J]. Environmental Science & Technology, 2006, **40**(22): 6928-6933.
- [40] 万镇嘉. 陕西关中盆地地下水矿质氮污染时空变化特征[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
- Wan Z J. Temporal and spatial variation of mineral nitrogen pollution in groundwater in Guanzhong Basin, Shanxi Province [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2018.

CONTENTS

Analysis of Pollution Characteristics and Primary, Secondary Contributions of Firework Burnings in Qingdao During the Spring Festival	FANG Tian-ge, YAO Xiao-hong, MENG He, <i>et al.</i> (4345)
Characterization and Source Apportionment of PM _{2.5} Based on the Online Observation in Tianjin	XIAO Zhi-mei, XU Hong, LI Li-wei, <i>et al.</i> (4355)
Characteristics of Water-soluble Inorganic Ions in PM _{2.5} in Beijing During 2017-2018	LI Huan, TANG Gui-qian, ZHANG Jun-ke, <i>et al.</i> (4364)
Characteristics of Carbonaceous Species in PM _{2.5} in Southern Beijing	DONG Gui-ming, TANG Gui-qian, ZHANG Jun-ke, <i>et al.</i> (4374)
Characteristics and Formation Mechanism of Three Haze Pollution Processes in Chengdu in Winter	FENG Xiao-qiong, CHEN Jun-hui, YIN Han-mei, <i>et al.</i> (4382)
Distribution Characteristics and Source of Black Carbon Aerosols in the Northern Suburbs of Nanjing	XIE Feng, LIN Yu-chi, SONG Wen-huai, <i>et al.</i> (4392)
Assessment of Emergency Emission Reduction Effect During the Heavy Air Pollution Episodes in Beijing, Tianjin, Hebei, and Its Surrounding Area ("2+26" Cities) from October to December 2019	ZHU Yuan-yuan, GAO Yu-xiao, WANG Wei, <i>et al.</i> (4402)
Variational Trend and Characteristics of Air Pollution in Baoding City	GOU Yin-yin, ZHANG Kai, LI Jin-juan, <i>et al.</i> (4413)
Emission Inventory of VOCs Components in Zhengzhou and Their Ozone Formation Potential	LU Xuan, ZHANG Rui-qin, HAN Luo-kai (4426)
Evolution and Evaluation of O ₃ and VOCs in Zhengzhou During the National Traditional Games of Ethnic Minorities Period	ZHAO Jin-shuai, YU Shi-jie, WANG Nan, <i>et al.</i> (4436)
Characteristics of Volatile Organic Compounds in Wood Coatings and Automotive Coatings in China	KE Yun-ting, SUN Yu-hang, CHENG Hai-rong, <i>et al.</i> (4446)
Influence of Typical Desulfurization Process on Flue Gas Particulate Matter of Coal-fired Boilers	ZHANG Jin-sheng, WU Jian-hui, LÜ Rui-he, <i>et al.</i> (4455)
Investigation on the Emission Difference of Air Pollutants from Common Residential Coal Stoves and Suggestions for Emission Reduction	ZHANG Yi-chen, XUE Chen-li, LIU Jie, <i>et al.</i> (4462)
Mobile Source Emission Inventory with High Spatiotemporal Resolution in Tianjin in 2017	LIU Geng, SUN Shi-da, SUN Lu-na, <i>et al.</i> (4470)
Emission Inventory and Characteristics of Anthropogenic Air Pollution Sources Based on Second Pollution Source Census Data in Sichuan Province	XU Chen-xi, CHEN Jun-hui, LI Yuan, <i>et al.</i> (4482)
Preliminary Screening for the Urban Forest Against Combined Air Pollution	LI Pin, WEI Yan-yan, FENG Zhao-zhong (4495)
Spatial Distribution and Pollution Characteristics of Heavy Metals in Plant Leaves in Baoji City	ZHANG Jun, LIANG Qing-fang, GAO Yu (4504)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of PPCPs in Surface Water and Aquatic Organisms in Chaoshan Coastal Area along the South China Sea	XIU Cuo, WANG Chen-chen, LÜ Yong-long, <i>et al.</i> (4514)
Spatiotemporal Differentiation and Degradation Analysis of Polybrominated Diphenyl Ethers in Sediments of Shanmei Reservoir and Its Inflowing River, Quanzhou, China	HAN Wen-liang, LIU Yu, FENG Kai-wen (4525)
Spatial-temporal Variations and the Regulators of Nitrate Status in Shallow Groundwater of the Typical Mountainous Agricultural Watershed in the Upper Reaches of the Yangtze River	JIANG Nan, ZHOU Ming-hua, LI Hong, <i>et al.</i> (4539)
Emission Characteristics of Nitrogen and Phosphorus in a Typical Agricultural Small Watershed in Tuojiang River Basin	WANG Hong, XU Ya-ling, ZHANG Qi, <i>et al.</i> (4547)
Assessment of Potential Risk of Diffuse Pollution in Haihe River Basin Based Using DPeRS Model	FENG Ai-ping, WANG Xue-lei, XU Yi, <i>et al.</i> (4555)
Impact of Spatial Heterogeneity of Precipitation on the Area Change in Critical Source Area of Non-point Sources Pollution	GAO Xiao-xi, ZUO De-peng, MA Guang-wen, <i>et al.</i> (4564)
Sedimentary Diatom Records Reveal the Succession of Ecosystem in Lake Xihu, Dali over the Past 50 Years	ZHANG Chen-xue, XU Min, DONG Yi-fan, <i>et al.</i> (4572)
Content and Distribution of Cadmium in Soil and Fluvial Sediments in the Sea-Land Interaction Zone	WANG Fang-ting, CHEN Zhi-hua, BAO Ke, <i>et al.</i> (4581)
Occurrence Characteristics and Quality Estimation of Microplastics in Drainage Ditches in Hetao Irrigation District of Inner Mongolia	WANG Zhi-chao, YANG Fan, YANG Wen-huan, <i>et al.</i> (4590)
Influence of Pervious/Impervious Pattern on Runoff and Pollution in Parcel-based Catchment	JIANG Zhi-hui, LIAO Yun-jie, XIE Wen-xia, <i>et al.</i> (4599)
Activating Efficiency of Iron-copper Bimetallic Organic Framework MIL-101 (Fe, Cu) Toward H ₂ O ₂ for Degradation of Dyes	LIANG He, LIU Rui-ping, AN Xiao-qiang, <i>et al.</i> (4607)
Synergistic Reaction Mechanism of Cu ⁰ @Fe ₃ O ₄ Activated PMS for Degradation of <i>p</i> -nitrophenol	SHI Qing-qing, PU Sheng-yan, YANG Xi (4615)
Kinetics and Mechanism of Sucralose Degradation in Water Using UV-activated Persulfate Process	YU Yun, LU Jin-xin, LÜ Zhen, <i>et al.</i> (4626)
Microbial Community Structure for Sewage Wastewater Treatment Plants in Winter	SHANG Yue-fei, WANG Shen, ZONG Ni, <i>et al.</i> (4636)
Microbial Community Analysis of Different DN and PN-ANAMMOX Coupling Modes for Mature Landfill Leachate Treatment	LU Ming-yu, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (4644)
Analysis of Rapid Start-up and Mixed Nutritional Nitrogen Removal Performance of Complete Autotrophic Granular Sludge	QI Ze-kun, WANG Jian-fang, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> (4653)
Long-term Stability of Aerobic Granular Sludge Under Low Carbon to Nitrogen Ratio	YUAN Qiang-jun, ZHANG Hong-xing, CHEN Fang-yuan (4661)
Response of Bacterial and Fungal Communities to Chemical Fertilizer Reduction Combined with Organic Fertilizer and Straw in Fluvio-aquic Soil	WU Xian, WANG Rui, HU He, <i>et al.</i> (4669)
Characteristics of Soil Nutrients and Fungal Community Composition in Crop Rhizosphere Under Different Rotation Patterns	SUN Qian, WU Hong-liang, CHEN Fu, <i>et al.</i> (4682)
Effects of Short-term Application of Moutai-flavor Vinasse Biochar on Nitrogen Availability and Bacterial Community Structure Diversity in Yellow Soil of Guizhou Province	ZHANG Meng, LIU Yan-ling, WEI Quan-quan, <i>et al.</i> (4690)
Effects of Different Rotation Patterns of Oil-Rice on Methane and Nitrous Oxide Emissions in Rice Fields	CHEN You-de, ZHAO Yang, GAO Du-juan, <i>et al.</i> (4701)
<i>Bacillus amyloliquefaciens</i> Biofertilizer Mitigating Soil Ammonia Volatilization	YANG Ya-hong, XUE Li-xia, SUN Bo, <i>et al.</i> (4711)
Effects of Exogenous Phosphorus on Rice Growth and Cadmium Accumulation and Transportation Under Cadmium Stress	HUO Yang, QIU Yin-yan, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (4719)
Key Stage of As Accumulation in Rice Under As Stress at Different Growth Stages	DENG Peng-hui, CAI Ya-qin, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (4726)
Heavy Metal Contamination and Health Risk Assessment of Corn Grains from a Pb-Zn Mining Area	ZHOU Yan, WAN Jin-zhong, LI Qun, <i>et al.</i> (4733)
Polybrominated Diphenyl Ether in E-waste Dismantling Sites in Taizhou City, Zhejiang Province: Concentration, Distribution, and Migration Trend	WEI Bao-kai, LIU Chen, WANG Ying, <i>et al.</i> (4740)
Assessment and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Farmland Soils in Southern Youyang County, Chongqing	WANG Rui, DENG Hai, YAN Ming-shu, <i>et al.</i> (4749)
Ecological Risk Assessment of Tetracycline Antibiotics in Livestock Manure and Vegetable Soil of Chongqing	PENG Qiu, WANG Wei-zhong, XU Wei-hong (4757)