

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

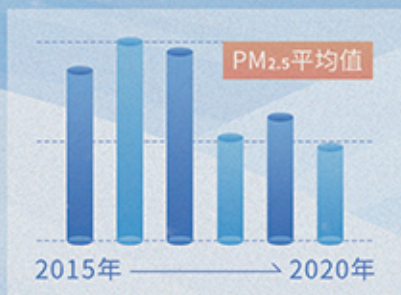
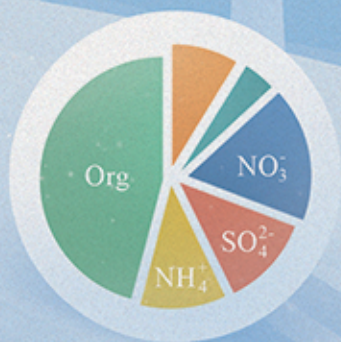
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

北京冬季奥运会历史同期大气PM_{2.5}污染特征分析

刘玥晨, 满睿琪, 裴彦挺, 杨佳炜, 王均睿, 谭瑞, 汤丽姿, 俞颖, 宋锴, 郭松, 陈仕意,
曾立民, 吴志军, 胡敏



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年8月

第43卷 第8期
Vol.43 No.8

目次

北京冬季奥运会历史同期大气 PM _{2.5} 污染特征分析·····	刘玥晨, 满睿琪, 袁彦挺, 杨佳炜, 王均睿, 谭瑞, 汤丽姿, 俞颖, 宋锴, 郭松, 陈仕意, 曾立民, 吴志军, 胡敏 (3895)
天津城区 2019 年 2~3 月气溶胶粒径分布特征观测分析·····	郝团, 蔡子颖, 刘敬乐, 王晓佳, 姚青 (3903)
长江中游地区 PM _{2.5} 重污染过程的典型天气环流分型及区域传输影响·····	王莹, 智协飞, 白永清, 董甫, 张玲 (3913)
滇中典型工矿城市大气干湿沉降重金属等元素特征及健康风险评价·····	范晨子, 刘永兵, 袁继海, 郭威, 孙冬阳, 刘成海 (3923)
典型工业城市夏季 VOCs 污染特征及反应活性·····	秦涛, 李丽明, 王信梧, 杨文, 王晓丽, 徐勃, 耿春梅 (3934)
大连市夏季 VOCs 化学反应活性及来源·····	朱轲欣, 刘立忠, 刘焕武, 罗静期, 高冉冉 (3944)
河南省 18 个城市大气污染物分布特征、区域来源和传输路径·····	刘光瑾, 苏方成, 徐起翔, 张瑞芹, 王克 (3953)
京津冀臭氧污染特征、气象影响及基于神经网络的预报效果评估·····	朱媛媛, 刘冰, 桂海林, 李健军, 汪巍 (3966)
2006~2020 年中国大气本底站 BC 气溶胶的时空分布特征·····	王红磊, 颜雪, 沈利娟, 柳竞先, 赵天良, 管小彬, 赵德龙 (3977)
钢铁生产行业二噁英污染特征变化及其排放因子·····	杨艳艳, 谢丹平, 付建平, 陈晓燕, 尹文华, 韩静磊, 张素坤, 张璐, 肖滔 (3990)
长江流域着生藻类群落结构的格局及其生态评价·····	胡愈忻, 曹亮, 屈仁超, 黄杰, 胡圣, 周正, 王英才, 张静 (3998)
基于蒙特卡罗模拟与 PMF 模型的黄河流域沉积物重金属污染评价及源解析·····	庞阔, 李敏, 刘璐, 杨璐, 赵洪军 (4008)
梯级拦河堰对典型山地城市河流重金属元素的滞留效应: 以重庆市梁滩河为例·····	王超, 贾伯阳, 潘成勇, 何文战, 叶秋, 罗杉山, 张夏武 (4018)
基于土壤流失的农业面源 TN 和 TP 排海系数估算·····	王有霄, 黄翀, 刘高焕, 赵忠贺, 李贺, 刘庆生 (4032)
河湟谷地不同时空尺度下土地利用及空间格局对水质的影响·····	李好好, 黄懿梅, 郭威, 侯宏洋, 范梦苑, 齐照平, 贾鹏辉, 郭庆波 (4042)
联合 PMF 模型与稳定同位素的地下水污染溯源·····	张涵, 杜昕宇, 高菲, 曾卓, 程思茜, 许懿 (4054)
江西锦江流域抗生素污染特征与生态风险评价·····	李佳乐, 王萌, 胡发旺, 董一慧, 孙占学, 王瑶, 卫承芳, 燕雯 (4064)
天津市地表水中新型优先污染物筛选与管控对策·····	吴颜岐, 宋帅, 史雅娟, 刘莹, 杨胜杰 (4074)
宁夏第三排水沟中药物和个人护理品 (PPCPs) 的污染特征与生态风险评估·····	李富娟, 高礼, 李凌云, 郑兰香, 马兰, 杨桂钦 (4087)
再生水河道浮游微生物多样性季节变化分析: 以北运河为例·····	袁训超, 王敏, 郭道宇, 吴东丽 (4097)
太湖草、藻湖区沉积物 WSOM 组成和分子结构分析·····	杜瑛珣, 戴家如, 张巧颖, 刘静静, 黄秀琳, 安世林, 文帅龙 (4108)
太湖氧化亚氮 (N ₂ O) 排放特征及潜在驱动因素·····	刘朝荣, 朱俊羽, 李宇阳, 俞晓琴, 陈慧敏, 杨艳, 周永强 (4118)
海绵城市生物滞留带重金属污染特征及风险评价·····	雷晓玲, 邱丽娜, 魏泽军, 杨程, 何博 (4127)
玉米芯和稻草秸秆强化潜流人工湿地对低 C/N 污水的处理效果·····	胡曼利, 郝庆菊, 马容真, 陈柯沁, 罗师旭, 江长胜 (4136)
环境 pH 条件下 Fe ²⁺ 活化过二硫酸盐降解有机污染物的效能与影响因素·····	刘颖, 郭依玮, 乔俊莲, 孙远奎 (4146)
新疆沙雅县不同植物类型农田环境中典型农药残留及其风险评价·····	谢宣宣, 艾力江·努尔拉, 买合木提·巴拉提, 仲乃福, 李南鑫 (4154)
宁夏养鸡场粪污和周边土壤中抗生素及抗生素抗性基因分布特征·····	沈聪, 张俊华, 刘吉利, 韩新宁, 尚天浩, 代金霞 (4166)
宁夏石嘴山市农用地土壤硒的富集因素·····	王莹, 刘海燕, 王泽晶, 张晓东, 王登红 (4179)
地块尺度重金属污染风险耕地安全利用区划方法·····	王锐, 余京, 李瑜, 周蛟, 贾中民, 余飞, 张云逸, 蒋玉莲 (4190)
姜湖贡米产地土壤重金属空间分布、源解析及生态风险评价·····	于林松, 万方, 范海印, 康桂玲, 刘辉, 王东平, 徐佳 (4199)
基于特定源风险评估模型的小麦籽粒铅超标风险预测·····	杨阳, 李艳玲, 牛硕, 陈卫平, 王天齐, 王美娥 (4212)
柳州地源性镉异常区稻米重金属累积效应与健康风险·····	朱亮亮, 王佛鹏, 唐乐斌, 肖乃川, 董心月, 韦美溜, 宋波 (4219)
不同玉米品种 Cd、Pb、Zn 和 As 积累与转运特性·····	任超, 肖建辉, 李竞天, 杜倩倩, 朱利文, 王浩, 朱瑞颖, 赵海洋 (4232)
橡胶草 (TKS) 对铅镉污染农田土壤的修复潜力·····	张恒, 熊明彪, 王乾鑫, 孙博文, 饶逸驰, 程章, 徐小逊, 杨占彪, 鲜骏仁, 朱雪梅, 杨绍平, 杨远祥 (4253)
3 种地被竹对重金属复合污染农田土壤的修复潜力·····	张颖, 赵欣, 张圣虎, 漆丹, 王博, 陈引, 陆建刚 (4262)
连续施肥对双季稻镉硅累积效应的影响·····	彭华, 邓凯, 石宇, 魏维, 柳赛花, 纪雄辉 (4271)
改性壳聚糖负载氧化硅调控水稻对砷吸收与转运的影响·····	杨嘉仪, 孙梦强, 肖羽堂, 韦行, 张建强, 陈志良 (4282)
不同螯合剂和有机酸对苍耳修复镉复合污染土壤的影响·····	张雅睿, 黄益宗, 保琼莉, 魏祥东, 铁柏清, 张盛楠, 韩甘, 黄永春 (4292)
水分管理对稻田土壤铁氧化物形态转化的影响及其与酶活性变化的耦合关系·····	李明远, 张小婷, 刘汉斌, 魏世强 (4301)
外源 Fe 调控根系微生物群落结构和功能对水稻 Cd 积累的影响·····	郑沈, 黄道友, 李波, 马天池, 许超, 朱奇宏, 朱捍华, 张泉 (4313)
不同降水下覆盖与缓释肥减量对油菜土壤微生物群落结构的影响·····	冯军, 石超, Hafiz Athar Hussain, 刘永波, 刘天朋, 李永洪, 刘俊峰, 王龙昌 (4322)
基于高通量测序和代谢组学解析重金属污染对农田微生物群落组成和功能的影响·····	庞发虎, 李晓琦, 段莉阳, 陈彦, 姬明飞, 张浩, 韩辉, 陈兆进 (4333)
汞矿区周边农田土壤微生物群落结构特征及其环境驱动因子·····	陈芬, 余高, 孙约兵, 张红丽, 田霞, 夏蓓 (4342)
岩溶湿地与稻田土壤团聚体细菌群落结构的比较·····	冷蒙, 靳振江, 肖筱怡, 熊丽媛, 李雪松 (4353)
戴云山土壤微生物碳源利用效率的海拔变异规律及影响因素·····	吕坤, 王晶晶, 吴国朋, 林思诺, 苏延桂, 黄刚 (4364)
长期秸秆还田对水稻根系碳矿化与激发效应的影响·····	刘峰, 王云秋, 张昀, 祝贞科, 吴金水, 葛体达, 李宇虹 (4372)
秸秆还田配施生物炭对关中平原夏玉米产量和土壤 N ₂ O 排放的影响·····	白金泽, 刘镇远, 宋佳杰, 李娜, 于琦, 郝嘉琪, 许宏伟, 程博豪, 王兴, 冯永忠 (4379)
聚苯乙烯纳米塑料对大蒜生长生理的影响·····	邱陈陈, 李国新, 李青松, 颜昌宙 (4387)
微塑料对土壤水分入渗和蒸发的影响·····	王志超, 张博文, 倪嘉轩, 杨文焕, 李卫平 (4394)
氢燃料电池汽车动力系统生命周期评价及关键参数对比·····	陈轶嵩, 兰利波, 郝卓, 付佩 (4402)
《环境科学》征订启事 (4211) 《环境科学》征稿简则 (4312) 信息 (3922, 4031, 4107)	

联合 PMF 模型与稳定同位素的地下水污染溯源

张涵¹, 杜昕宇¹, 高菲², 曾卓¹, 程思茜¹, 许懿¹

(1. 西南交通大学环境科学与工程系, 成都 610031; 2. 成都市规划设计研究院, 成都 610041)

摘要: 基于传统水质监测与污染排放的污染源识别方法, 存在监测频率与识别结果模糊等限制, 难以实现污染源及迁移转化的准确量化。联合多元统计分析方法与稳定同位素技术, 以成都平原典型混合用地地下水污染为研究对象, 提出利用正定矩阵因子分析 (PMF) 模型识别污染主控因子, 减小环境因素对污染源判别的干扰, 并基于水化学分析与土地利用构建贝叶斯稳定同位素混合模型, 进一步量化不同污染源对地下水典型污染物硝酸盐氮 (NO_3^-) 的贡献率。结果表明, 研究区地下水 NO_3^- 、 NO_2^- 、 NH_4^+ 、 Mn 、 Fe 、 SO_4^{2-} 和 Cl^- 均存在不同程度超标, 且具有空间异质性。地下水中“三氮”主要以 NO_3^- 为主, NO_3^- 浓度在菜地的地下水中普遍偏高 (平均值为 $9.29 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 其次是在养殖场 (平均值为 $7.66 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 和耕地 (平均值为 $7.09 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 在工业区最低 (平均值为 $2.20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)。研究区地下水水质受原生地质作用、农业活动、水文地球化学演化、生活污染和工业污染的复合影响, 且农业活动是研究区地下水 NO_3^- 增长的主要原因。研究区内农业区地下水 NO_3^- 的主要来源贡献为化肥 (32%) 和土壤氮 (25%); 工业区地下水 NO_3^- 的主要来源贡献为污水排放 (28%) 和大气降雨 (27%)。通过多元统计与稳定同位素技术的有机结合, 有效识别了地下水污染来源及其贡献率, 可为地下水污染源头防控提供科学依据。

关键词: 地下水污染; 源解析; PMF 模型; 稳定同位素; 土地利用

中图分类号: X523 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)08-4054-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202110174

Groundwater Pollution Source Identification by Combination of PMF Model and Stable Isotope Technology

ZHANG Han¹, DU Xin-yu¹, GAO Fei², ZENG Zhuo¹, CHENG Si-qian¹, XU Yi¹

(1. Department of Environmental Science and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. Chengdu Institute of Planning & Design, Chengdu 610041, China)

Abstract: The pollution source identification methods based on traditional water quality monitoring and pollutant discharge loading typically require a high frequency of monitoring and generate a level of uncertainty in the identification results, owing to their limitations on the accurate and quantitative assessment of pollution source identification, migration, and transformation. This study combined multivariate statistical analysis and stable isotope technology to identify groundwater pollution sources in a typical multiple land-use area of the Chengdu Plain. A positive matrix factorization (PMF) model was adopted to reduce the interference of mass environmental factors on source identification and to determine the main factors influencing groundwater quality. Subsequently, a Bayesian stable isotope mixing model was developed to quantify the apportionment of each pollution source to groundwater nitrate (NO_3^-) with the consideration of hydro-chemical and land-use information. The results showed that the concentrations of NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ , Mn , Fe , SO_4^{2-} , and Cl^- in groundwater of the study area exceeded the standard to different extents, presenting spatial variation. The main form of inorganic nitrogen in groundwater was NO_3^- . In general, concentrations of groundwater NO_3^- were the highest in vegetable fields ($9.29 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ on average), followed by livestock and poultry breeding farms ($7.66 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) and arable land ($7.09 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), whereas concentrations of groundwater NO_3^- in industrial areas were the lowest ($2.20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$). Groundwater quality in the study area was affected by geological processes, agricultural activities, hydrogeochemical evolution, and domestic and industrial discharges. Agricultural activities were the main contributor to the increase in groundwater NO_3^- in the study area. Chemical fertilizer (32%) and soil nitrogen (25%) contributed greatly to groundwater NO_3^- in agricultural areas, whereas sewage (28%) and atmospheric precipitation (27%) contributed most groundwater NO_3^- in industrial areas. Thus, the combination of multivariate statistical analysis and stable isotope technology could identify groundwater pollution sources and their apportionment effectively, providing scientific support for the prevention and control of groundwater pollution.

Key words: groundwater pollution; source apportionment; PMF model; stable isotope; land use

地下水常被视为一种安全清洁的淡水资源, 我国 600 多个城市中, 有 400 多个城市以地下水为饮用水源。然而, 由于生活生产污、废水以及化肥农药等的渗漏渗透, 一些地区的地下水品质已经恶化。据文献[1], 国家级地下水水质检测点中 IV 类和 V 类水质占比超过 80%, 绝大多数地下水不适合直接饮用。地下水一旦被污染, 难以短时间内恢复到原始清洁状态^[2]。因此, 从源头控制和消减污染源对于地下水污染防控具有重要意义, 污染源精准解析则是地下水污染源头控制与综合管理的重要基础^[3-5]。

目前, 地下水环境污染源识别方法可分为清单分析、扩散模型和受体模型。其中, 清单分析法和扩散模型法存在工作量大、参数多、数据量和数据精度要求高等实际应用中的限制。相比而言, 受体模型法无需考虑污染物输出及迁移转化过程, 通过构建受体检测样品与污染源物化性质的内在联系, 实现污染源定性和定量识别, 在实际中应用广泛。常用的

收稿日期: 2021-10-23; 修订日期: 2021-12-18

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51979237, 52170104)

作者简介: 张涵 (1980 ~), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为水体污染溯源方法技术, E-mail: zhanghan@home.swjtu.edu.cn

受体模型有化学质量平衡、多元统计分析和稳定同位素等。化学质量平衡法原理简单,但需要完整的指纹图谱,污染来源需具有可解释性和明确差异性。多元统计分析包括因子分析(FA)、主成分分析(PCA)、绝对主成分得分-多元线性回归(APCS-MLR)、非负约束因子分析(FA-NNC)、正定矩阵因子分析(PMF)模型和 UNMIX 模型等^[6,7]。近年来,环境监测网络的日益完善也为多元统计模型开展污染源解析的定量研究提供了有利条件,但由于多元统计分析无法从机制上表达污染物的生物化学转化过程,从而使识别结果带有一定主观性。稳定同位素识别借助各污染源同位素特征值的差异,通过低频采样实现污染源解析,构建稳定同位素模型量化污染源贡献率^[8-14],但在实际使用中还存在不同污染源同位素特征值重叠和同位素分馏等引起的识别误差和不确定性等问题。

鉴于以上地下水污染的复杂性、随机性和传统识别结果模糊等问题,单一的源解析方法已经难以满足地下水污染来源及转化识别的准确性与精度要求,从而限制了污染源解析结果对地下水防治工作的实际指导。因此,本文以成都平原某典型混合用地区地下水污染为研究对象,提出将多元统计与稳定同位素相结合,首先通过多元统计识别污染主控因子和潜在污染源,减小环境因素对污染源判别的干扰,在此基础上再利用稳定同位素技术进一步识别污染来源及贡献率,实现污染源精准解析与量化,以期对地下水污染有效防治提供科学依据与技术支持。

1 研究区概况

研究区位于成都平原东北部,北纬 $31^{\circ}00' \sim 31^{\circ}21'$,东经 $104^{\circ}14' \sim 104^{\circ}25'$ (图 1),总面积 385 km^2 ,属中亚热带湿润季风气候,降雨量充足,年均降水量 1388 mm ,降雨主要分布在 $5 \sim 9$ 月。研究区土壤肥沃,水系发达,自然灌溉条件好,是成都平原重要的粮食生产基地。区内地下水类型主要为第四系松散岩类孔隙水,含水层组从总体上划分为全新统砾石含水层和上更新统砾石含水层两类,渗透性和储水性均较好,水位埋深 $0.5 \sim 8 \text{ m}$,地下水等水位线呈南西-北东走向,地下水补给以降雨为主。区内地下水开发利用历史悠久,近十几年随着城镇化推进,该区已发展成为农业、工业和城市建设的复合用地区,其中农业用地 64% ,工业用地 26% ,城镇用地 8% 。同时,快速的城市化、高密度的人口、工业、养殖业和传统种植业也对地下水水质构成潜在威胁,研究区地下水质量逐渐下降,复合型污染问题日益突出^[15]。

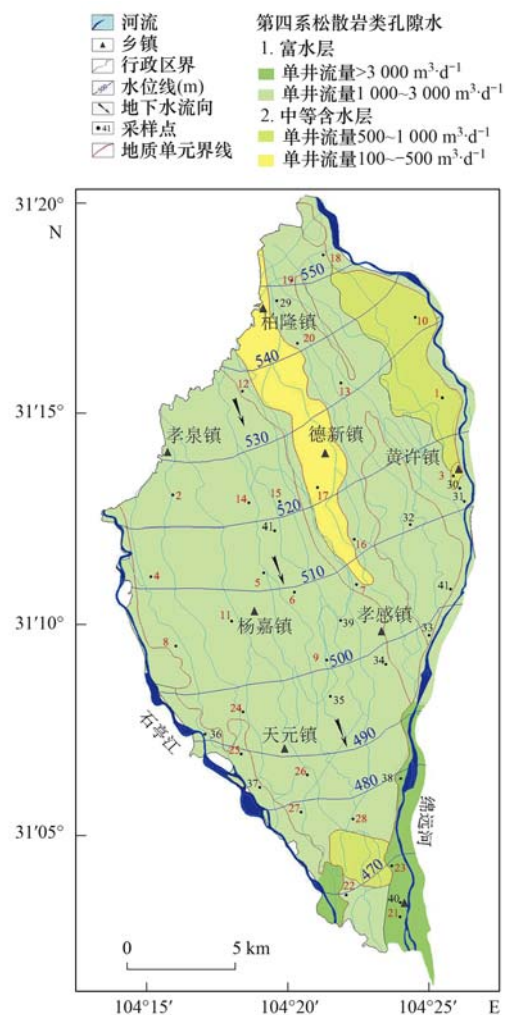


图 1 研究区水文地质平面示意

Fig. 1 Hydrogeological map of the study area

2 材料与方法

2.1 数据来源

本研究根据土地利用类型以及空间分布均匀性要求,选取研究区地下水采样点共 41 处,于 2019 年的 3、6、9 和 12 月进行地下水采样检测,有效样本个数 164 个。温度(T)、酸碱度(pH)值、总溶解性固体(TDS)、电导率(EC)、溶解氧(DO)和氧化还原电位(Eh)采用便携式仪器(DDS-308A)现场测定;钙(Ca^{2+})及镁(Mg^{2+})(GB 11905-89)、钠(Na^{+})(GB 11904-89)和铁(Fe)及锰(Mn)(GB 11911-89)采用原子吸收分光光度计测定;氯离子(Cl^{-})、硫酸盐(SO_4^{2-})、硝酸盐(NO_3^{-})和亚硝酸盐(NO_2^{-})采用离子色谱法(HJ 84-2016)测定;氨氮(NH_4^{+})采用纳氏试剂法(HJ 535-2009)在 420 nm 波长处用紫外分光光度计测定。水样在 24 h 内进行检测,分析一式三份确保结果准确性。硝酸盐稳定同位素 $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^{-}$ 和 $\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3^{-}$ 送至中国农业科学院环境稳定同位素实验室检测, $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^{-}$ 和 $\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3^{-}$

使用镉还原法测定^[16],通过海绵状镉将 NO_3^- 还原为 NO_2^- ,在乙酸缓冲液中使用叠氮化钠将 NO_2^- 进一步还原成 N_2O ,接着使用 Pre-Con (Thermo Scientific) 与 Finnigan MAT253-稳定同位素质谱仪 (IRMS, Thermo Scientific) 对 N_2O 中的 $\delta^{15}\text{N}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 同时进行测定。

2.2 分析方法

2.2.1 数据分析与空间插值

对测定的地下水水质指标进行分析,借助统计学和 ArcGIS 插值法揭示指标的变异性和时空分布特征。数据分析采用 SPSS 26.0 统计学软件,地下水 NO_3^- 浓度、稳定同位素 $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ 和 $\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3^-$ 的空间分布采用 ArcGIS 反距离权重 (IDW) 插值法,以插值点与样本点间的距离为权重进行加权平均,离插值点越近的样本点赋予的权重越大。为缩短计算时间,通过指定搜索邻域来限制测量值数量,本研究设置搜索邻域为 6 进行反距离权重插值计算。

2.2.2 正定矩阵因子分析 (PMF) 模型

PMF 模型由 Paatero 等于 1994 初次提出,模型中样本浓度由因子贡献、因子分布和残差表示^[17]。PMF 模型的数学原理为:

$$\mathbf{X}_{(n \times m)} = \mathbf{G}_{(n \times p)} \mathbf{F}_{(p \times m)} + \mathbf{E}_{(n \times m)} \quad (1)$$

式中, $\mathbf{X}$ 为样本浓度矩阵; $\mathbf{G}$ 为因子贡献矩阵; $\mathbf{F}$ 为因子浓度矩阵; $\mathbf{E}$ 为残差矩阵; n 为样本数量; m 为化学物质数量; p 为因子个数。

水质指标实测值、预测值与残差之间的关系如下:

$$e_{ij} = x_{ij} - \sum_{k=1}^p g_{ik} f_{kj} \quad (2)$$

式中, $i=1, 2, \dots, n$, $j=1, 2, \dots, m$, $k=1, 2, \dots, p$; e_{ij} 为矩阵 $\mathbf{E}_{(n \times m)}$ 的元素,表示第 i 个样本,第 j 个水质指标的残差,这些残差在模型中未能直观展现; x_{ij} 为第 i 个样本,第 j 个水质指标的观测浓度; g_{ik} 为样本 i 的第 k 个因子的贡献; f_{kj} 为因子 k 的第 j 个水质指标的物种浓度。

$\mathbf{G}_{(n \times p)}$ 和 $\mathbf{F}_{(p \times m)}$ 由最小化目标函数 Q 得到, Q 是 PMF 中另一个重要参数,可以作为模型误差的度量,被定义为:

$$Q = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (e_{ij}/u_{ij})^2 \quad (3)$$

$$Q_{\text{robust}} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left(\frac{e_{ij}}{h_{ij} u_{ij}} \right)^2 \quad (4)$$

式中,当 $|e_{ij}/u_{ij}| \leq \alpha$ 时, $h_{ij} = 1$; 当 $|e_{ij}/u_{ij}| \geq \alpha$ 时, $h_{ij} = |e_{ij}/u_{ij}| \cdot \alpha^{-1}$; u_{ij} 为观测指标的不确定度。

近年来,有研究利用 PMF 模型对地下水污染源进行识别,取得了较好效果^[18~21],在与 APCA-MLR

等其他多元统计模型比较中发现,PMF 模型结果常具有更优的拟合度和更小的不确定性^[22]。因此,本研究选用 PMF 模型首先对研究区不同污染来源的特性和贡献率进行初步识别。

2.2.3 贝叶斯同位素混合模型

在 PMF 模型识别潜在污染源的基础上,本研究使用稳定同位素混合模型 (SIAR) 进一步量化各潜在污染源对地下水 NO_3^- 污染的具体贡献率。Parnell 等^[23] 基于 R 统计软件开发了稳定同位素混合模型 SIAR。该模型使用贝叶斯框架基于 Dirchlet 分布建立逻辑先验分布^[24],其原理为, N 种不同的同位素可以用 $N+1$ 种不同污染来源的贡献率来确定,并且可以准确获得每个源的贡献率,模型公式详见式 (5) ~ (8)。

$$X_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^K p_k q_{jk} (S_{jk} + C_{jk})}{\sum_{k=1}^K p_k q_{jk}} + \varepsilon_{ij} \quad (5)$$

$$S_{jk} \sim N(\mu_{jk}, \omega_{jk}^2) \quad (6)$$

$$C_{jk} \sim N(\varphi_{jk}, \tau_{jk}^2) \quad (7)$$

$$\varepsilon_{jk} \sim N(0, \sigma_j^2) \quad (8)$$

式中, X_{ij} 为第 i 个样品中第 j 种同位素的值 ($i=1, 2, 3, \dots, N$; $j=1, 2, 3, \dots, J$); S_{jk} 为第 k 个源中第 j 种同位素的值 ($k=1, 2, 3, \dots, K$), μ_{jk} 为平均值, ω_{jk}^2 为正态分布的方差; C_{jk} 第 j 种同位素在第 k 个源上的分馏系数, φ_{jk} 为平均值, τ_{jk}^2 为正态分布的方差; p_k 为第 k 个源的贡献率,它由模型计算得到; q_{jk} 是同位素 j 在第 k 种源中的浓度; ε_{jk} 为残差,表示各混合物间剩下的未量化的变异,平均值为 0, σ_j^2 为正态分布的方差。

3 结果与讨论

3.1 研究区地下水水质分析

基于 41 口采样井水质检测结果,研究区地下水理化指标见表 1 所示。总体上,研究区地下水呈弱碱性和氧化性, pH 平均值为 7.32。Eh 平均值为 196 mV, TDS 介于 $100 \sim 563 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,主要受矿物溶解、雨水渗透、土壤盐分渗滤和人为活动影响。根据表 1 中变异系数可知,研究区地下水中各水质指标均表现出一定的时空异质性,其中 Mn、Fe、 Na^+ 和 NO_3^- 的变化范围尤为明显。离子浓度差异性大,局部富集程度高。此外,研究区地下水 NO_3^- 、 NO_2^- 、 NH_4^+ 、Mn、Fe、 SO_4^{2-} 和 Cl^- 均存在不同程度的超标。

3.2 研究区地下水污染源解析

PMF 模型计算时要求参数单位为浓度,故本研究 PMF 模型使用了除 pH 和 Eh 以外的 11 项指标。

表 1 研究区地下水水质指标统计¹⁾
Table 1 Statistics of groundwater quality indexes in the study area

水质指标	最小值	最大值	平均值	标准差	变异系数/%	Ⅲ类水体标准	超标率 ³⁾ /%
T	13. 8	28. 5	21. 3	4. 7	22	/	/
DO	2. 5	9. 2	5. 43	1. 79	33	/	/
TDS	100	563	348. 75	62. 01	18	1 000	0
pH	7. 02	7. 90	7. 32	0. 18	2	6. 5 ~ 8. 5	0
Ec	746	1 083	845. 93	103. 61	12	/	/
Eh	11	373	3. 23	62. 36	32	/	/
NH ₄ ⁺	0. 19	3. 23	0. 88	0. 49	55	0. 5	83. 21
Cl ⁻	1. 34	210. 40	46. 54	18. 78	40	250	3. 70
NO ₂ ⁻	0. 002	1. 90	0. 65	0. 23	36	1. 0	8. 59
NO ₃ ⁻	0. 02	22. 35	7. 22	5. 14	70	20	3. 08
SO ₄ ²⁻	60. 48	486. 48	162. 52	66. 38	41	250	8. 64
Na ⁺	2. 56	124. 55	38. 59	30. 64	79	200	0
Ca ²⁺	4. 30	69. 90	42. 13	18. 23	43	75 ²⁾	0
Mg ²⁺	0. 09	4. 89	2. 52	1. 36	54	150 ²⁾	7. 41
Fe	0. 000 3	1. 88	0. 10	0. 19	188	0. 3	7. 41
Mn	0. 000 1	1. 16	0. 07	0. 15	217	0. 1	27. 16

1) pH 无量纲, Eh 单位为 mV, T 单位为℃, 其余单位为mg·L⁻¹; 2) 数值来自 WHO 地下水质量标准(2017); 3) 超标率 = 超标样本个数/总样本个数 × 100%

在随机种子模式下运行模型 100 次,为确定最优因子数量,分别检测了 3、4、5、6 和 7 个污染因子的模拟效果,并确保得到 Q 的全局最小值. 根据 Huston 等^[25]和 Leong 等^[26]的判定原则最终确定 5 个污染因子. 在此模型下 $Q_{\text{robust}}/Q_{\text{true}}$ 为 0.95,预测浓度与观测浓度之间具有良好相关性,模型在稳健条件下运行. 表 2 为 PMF 模型计算输出的源成分谱和源贡献率. 源成分谱即为式(1)中的 F 矩阵. 源成分谱中浓度较高的指标对因子贡献率较大,根据源成分谱中浓度值,按比例计算出每个污染源贡献率,源贡献率总结了指标对各因子的贡献率.

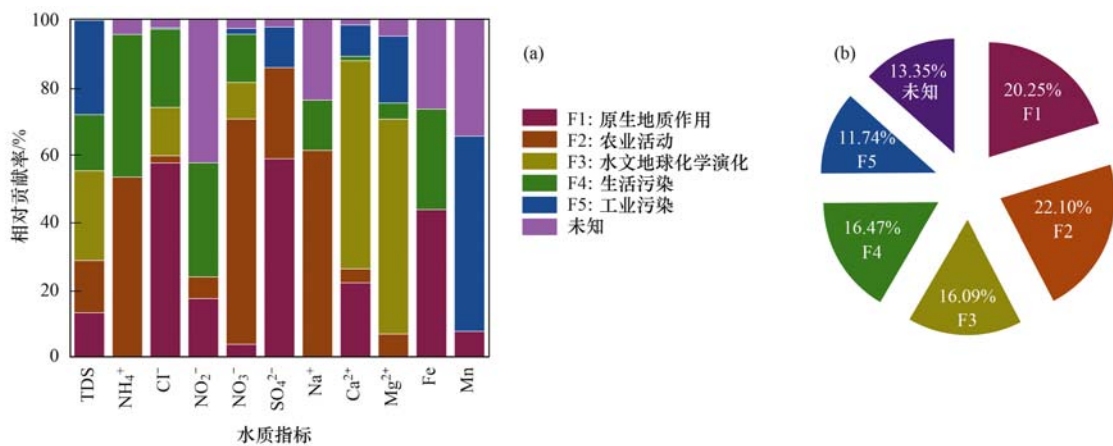
PMF 模型解析出的 F1 中, SO_4^{2-} 、Fe 和 Cl^- 贡献最高,其次为 Mn. 地下水中 SO_4^{2-} 和 Cl^- 主要与硫化矿物的自然溶解和含氯岩石的风化有关^[27]. 此外研究区含水层富含铁锰结核,可视为潜在的铁锰来源^[28~30],故 F1 可解释为原生地质条件造成的影响. F2 中贡献最高为 NO_3^- 、 NH_4^+ 和 Na^+ . NO_3^- 通常来源于土壤有机氮的转化和化肥,考虑到研究区农业耕种历史悠久和农业用地占比较高因素,初步判断地下水中 NO_3^- 可能与过度使用化肥有关. 地下水中 NH_4^+ 和 Na^+ 的升高可归因于生活污水和畜禽粪便渗透渗漏^[31,32]. 据实地调查可知,研究区农村生活污水收集系统尚不完善,家畜养殖场的畜禽粪便管理较为粗放, NH_4^+ 和 Na^+ 易通过化粪池泄漏进入地下水,故 F2 可认为是农业非点源污染. F3 以 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 为主,研究区地下水主要化学类型为 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 型^[33],由水岩相互作用和地下水运动驱动控制,故 F3 主要受水文地球化学演变影响. F4

由 NH_4^+ 和 NO_2^- 表征,有研究表明人工铺设的沥青路面和多孔性差的细粘土覆盖,均会引起地下水含氧量下降,含水层呈还原条件,从而阻止 NH_4^+ 转化(如硝化作用),导致地下水中 NH_4^+ 和 NO_2^- 积累^[34]. 从空间分布来看,研究区内 NH_4^+ 和 NO_2^- 在城区的平均浓度均高于非城区,也体现了城区地下水 NH_4^+ 和 NO_2^- 积累的可能性. 此外,在 F2 中 NH_4^+ 被解析为与生活污水排放相关,故 F4 代表了市政生活污水影响. F5 以 Mn 为主,其次为 TDS. 除了 F1 中解释的当地原生地质条件造成的污染外,工业废水中也含有 Mn^[35],前期调研发现,研究区南部 Mn 浓度较高,与工业企业的空间分布一致,故 F5 可以被解释为工业来源.

根据表 2 中 PMF 模型输出的源贡献率,将 5 个因子的源贡献率转换为相对贡献率^[21],结果如图 2(a)所示. 同时计算各污染源对地下水质量指标的平均贡献率,如图 2(b)所示. 从中可知,5 个自然和人为潜在污染源的贡献率依次为: 农业活动(22.10%) > 原生地质作用(20.25%) > 生活污染(16.47%) > 水文地球化学演化(16.09%) > 工业污染(11.74%). 图 2(a) 显示各源对研究区不同水质指标的贡献率,其中对地下水 NO_3^- 的贡献由大到小依次为: 农业活动(人为) > 生活污染(人为) > 水文地球化学演化(自然) > 原生地质作用(自然) > 工业污染(人为). 由此可见,研究区地下水污染主要受到农业活动和生活污染的复合影响,其中农业活动(F2)是地下水 NO_3^- (66.76%) 的主要污染源[图 2(a)].

表 2 PMF 模型源成分谱和源贡献率

水质指标	源成分谱					源贡献率/%				
	F1	F 2	F3	F4	F5	F1	F2	F3	F4	F5
TDS	42.29	50.14	85.57	54.02	90.68	13.11	15.54	26.52	16.74	28.10
NH ₄ ⁺	0	0.50	0	0.40	0	0	55.68	0	44.32	0
Cl ⁻	24.89	0.93	6.22	10.10	0.16	58.83	2.20	14.71	23.88	0.38
NO ₂ ⁻	0.18	0.07	0	0.37	0	29.99	11.25	0	58.76	0
NO ₃ ⁻	0.33	6.10	0.99	1.31	0.16	3.73	68.59	11.19	14.69	1.80
SO ₄ ²⁻	92.72	42.92	0	0	19.09	59.93	27.74	0	0	12.34
Na ⁺	0	32.82	0	8.01	0	0	80.38	0	19.62	0
Ca ²⁺	13.62	2.58	38.27	0.805	5.79	22.30	4.22	62.68	1.31	9.48
Mg ²⁺	0	0.20	1.90	0.14	0.59	0	7.09	66.99	5.02	20.90
Fe	0.045 27	0	0	0.031 06	0	59.31	0	0	40.69	0
Mn	0.002 09	0	0	0	0.016 10	11.50	0	0	0	88.50



(a) 因子相对贡献率及未知变量贡献; (b) 因子平均贡献率及未知变量贡献

图 2 PMF 模型的因子相对贡献率和平均贡献率

Fig. 2 Factor relative contribution rate and average contribution rate in PMF

3.3 硝酸盐氮氧稳定同位素空间分析

为了进一步揭示人为活动,尤其是农业活动和生活污染源对地下水 NO₃⁻ 的贡献大小,采用稳定同位素技术将这两类主要污染源进行细分,包含土壤氮、化肥施加、畜禽养殖、大气沉降和污水排放.结合土地利用类型和污染源分布,在之前 41 口地下水采样井中筛选出 28 口井进行 NH₄⁺、NO₂⁻、NO₃⁻ 浓度和稳定同位素丰度测定,结果详见表 3.

由表 3 可知,研究区地下水“三氮”主要以 NO₃⁻ 为主,其中 ρ(NO₃⁻) 在菜地的地下水中最高,平均值为 9.29 mg·L⁻¹,其次是在养殖场和耕地,平均值分别为 7.66 mg·L⁻¹和 7.09 mg·L⁻¹,在工业区地下水中最低,平均值为 2.20 mg·L⁻¹. 研究区地下水稳定同位素 δ¹⁵N-NO₃⁻ 为 4.06‰~33.02‰,平均值为 10.65‰,其中 96% 的样品 δ¹⁵N-NO₃⁻ 分布在 4‰~16‰之间;研究区地下水 δ¹⁸O-NO₃⁻ 为 -2.68‰~19.41‰,平均值为 3.66‰,78% 的样品 δ¹⁸O-NO₃⁻ 分布在 -2‰~6‰之间. 其中,工业用地区地下水 δ¹⁵N-NO₃⁻ 和 δ¹⁸O-NO₃⁻ 值均高于其他用地类型,平

均值分别为 13.95‰和 8.74‰;而耕地、菜地和养殖场用地类型对应的地下水 δ¹⁵N-NO₃⁻ 和 δ¹⁸O-NO₃⁻ 值相对较低,平均值分别为 9.64‰和 2.56‰.

运用 ArcGIS 反距离加权插值生成研究区氮氧稳定同位素 NO₃⁻ 浓度、δ¹⁵N-NO₃⁻ 和 δ¹⁸O-NO₃⁻ 空间分布图 3. 空间分布显示,较高的 δ¹⁵N-NO₃⁻ 值区域基本对应较低的 NO₃⁻ 浓度区,大部分具有较高 δ¹⁵N-NO₃⁻ 值(大于 20‰)的样品都位于工业区附近,最高为 33‰;其他地区 δ¹⁵N-NO₃⁻ 较低(9‰~14‰). 同时,工业区中检测到的 δ¹⁸O-NO₃⁻ 值相对其他用地类型也较高. Matiatos^[36] 和 Li 等^[37] 的研究中也发现了类似现象,工业区地下水中 δ¹⁵N-NO₃⁻ 和 δ¹⁸O-NO₃⁻ 均高于其他用地,这可能是由于工业废水的排放引起同位素 δ¹⁵N-NO₃⁻ 和 δ¹⁸O-NO₃⁻ 富集所致. 反之,土地利用类型为农业用地的区域,地下水中 NO₃⁻ 浓度较高,而 δ¹⁵N-NO₃⁻ 值相对较低. 从表 3 中还发现,与 δ¹⁵N-NO₃⁻ 值不同的是,δ¹⁸O-NO₃⁻ 值有部分出现负值,原因可能为以下两方面:一方面是由于降雨过程中,

表 3 地下水主要物理化学指标¹⁾

Table 3 Main physical and chemical indexes of groundwater

编号	$\rho(\text{NH}_4^+)/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$\rho(\text{NO}_2^-)/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$\rho(\text{NO}_3^-)/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$\delta^{18}\text{O}\text{-NO}_3^-/\text{‰}$	$\delta^{15}\text{N}\text{-NO}_3^-/\text{‰}$	用地类型
1	1.25	0.47	7.01	2.426	11.146	耕地
2	1.54	0.63	8.77	-2.689	9.105	耕地
3	1.35	0.55	4.47	5.359	14.261	耕地
4	0.65	0.52	9.67	4.251	8.364	耕地
5	0.58	0.61	1.52	3.629	10.508	耕地
6	1.46	0.21	9.02	5.141	7.769	耕地
7	0.71	0.7	0.2	3.999	12.528	耕地
8	0.27	0.55	12.56	4.121	8.39	耕地
9	0.92	0.63	10.56	-0.458	10.365	耕地
10	0.26	0.47	16.77	-0.596	6.392	养殖场
11	0.73	0.44	8.46	-1.954	7.75	养殖场
12	0.95	0.57	9.85	3.395	7.346	养殖场
13	0.64	0.79	7.64	-1.777	8.81	养殖场
14	0.38	0.52	6.44	2.379	8.666	养殖场
15	0.97	0.51	3.12	1.647	10.663	养殖场
16	1.02	0.73	4.29	10.957	16.517	养殖场
17	1.06	0.54	4.7	-1.323	9.57	养殖场
18	0.35	0.8	11.96	4.913	15.73	菜地
19	1.32	0.65	10.14	-2.182	14.002	菜地
20	0.39	0.56	11.29	3.917	9.368	菜地
21	0.76	0.93	3.66	5.83	9.263	菜地
22	0.69	0.73	8.32	3.11	4.06	菜地
23	0.8	0.58	10.38	4.778	8.157	菜地
24	1.7	0.74	0.02	19.419	6.665	工业区
25	0.28	0.49	5.12	-1.289	9.413	工业区
26	0.92	0.85	0.14	16.019	10.154	工业区
27	0.97	0.62	5.01	3.985	10.468	工业区
28	0.85	0.66	0.72	5.593	33.025	工业区
指标限值	≤ 0.5	≤ 1.0	≤ 20	/	/	
平均值	0.85	0.61	6.85	3.66	10.66	

1) “指标限值”为《地下水质量标准》(GB/T 14848-2017)中 III 类水体指标限值; “/”表示无指标限值

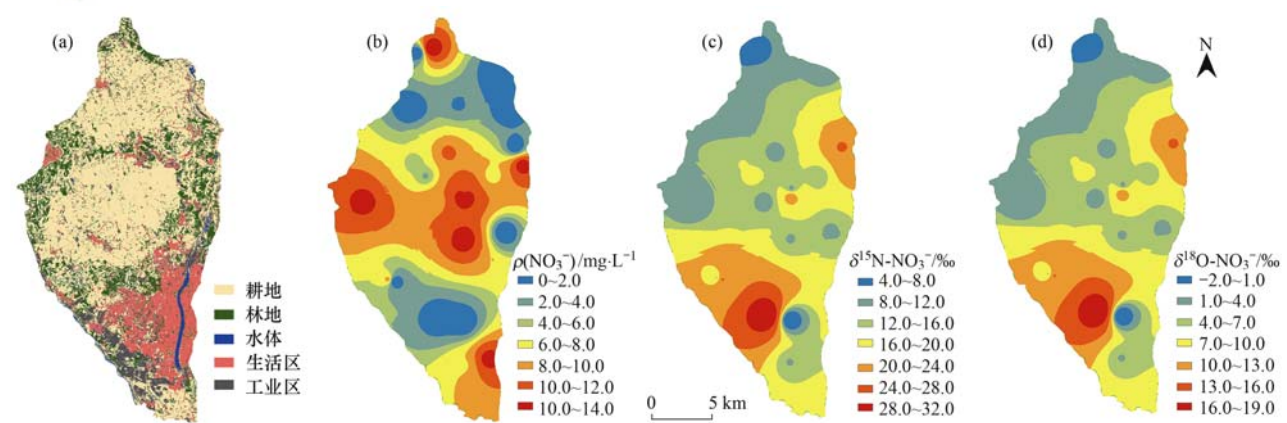


图 3 研究区土地类型、地下水 NO₃⁻ 浓度、δ¹⁵N-NO₃⁻ 和空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of land use type, groundwater NO₃⁻ concentration, δ¹⁵N-NO₃⁻, and δ¹⁸O-NO₃⁻ in the study area

雨水的再蒸发引起重同位素浓缩作用,而地面上蒸发的水汽又会混入大气中增加降水量从而出现负相关现象^[38];另一方面可能是氧的 δ 值随季节变化大,相对氮而言氧的同位素丰度值误差较大。

3.4 地下水稳定同位素特征及硝酸盐污染源贡献

结合 PMF 模型污染源识别结果,确定出研究区

地下水 NO₃⁻ 潜在污染源为: 大气降雨、硝态氮肥、土壤有机氮、畜禽粪便和污水。图 4 显示了研究区地下水 NO₃⁻ 各潜在污染源 δ¹⁵N-NO₃⁻ 和 δ¹⁸O-NO₃⁻ 的典型范围。从中可知,研究区内大部分水样的 δ¹⁵N-NO₃⁻ 值和 δ¹⁸O-NO₃⁻ 值并未落在单一污染源特征值范围内,而是在土壤氮、污水和畜禽粪便同

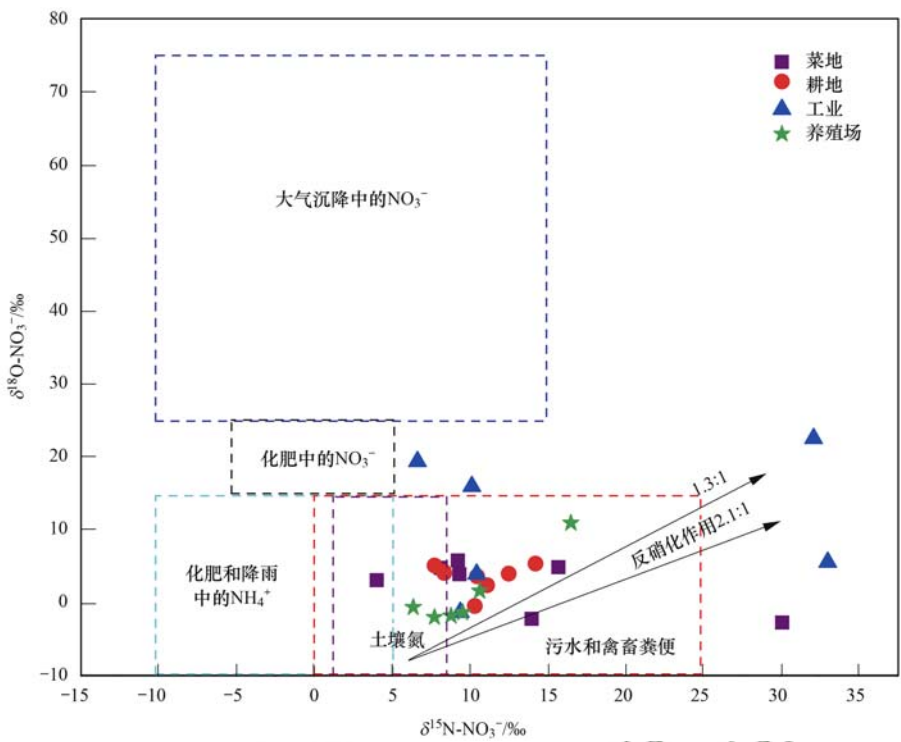


图4 研究区地下水样的 $\delta^{15}\text{N}\text{-NO}_3^-$ 和 $\delta^{18}\text{O}\text{-NO}_3^-$ 值

Fig. 4 The $\delta^{15}\text{N}\text{-NO}_3^-$ and $\delta^{18}\text{O}\text{-NO}_3^-$ values of groundwater samples in the study area

位素特征值范围的重叠区,说明研究区地下水 NO_3^- 来源可能是污水和畜禽粪便以及土壤氮的复合来源. 但这一识别结果与研究区较高的农业耕作土地利用占比(64%),以及多元统计 PMF 模型污染源解析结果存在一定差别,即水样氮氧同位素特征图显示地下水中 NO_3^- 来自污水和畜禽粪便的可能性最大,其次是土壤氮和化肥;而土地利用和 PMF 模型得出农业活动对地下水 NO_3^- 贡献较大. 前人关于稳定同位素的研究中也有类似差异,化肥中 NO_3^- 的同位素特征值会受硝化和反硝化等生物过程影响,同时氮挥发也会导致 $\delta^{15}\text{N}\text{-NO}_3^-$ 值升高 4.2‰,使实测 $\delta^{15}\text{N}\text{-NO}_3^-$ 值比理论值偏大^[39-41],从而低估了化肥对地下水 NO_3^- 的贡献.

为了更加准确地计算各污染源对地下水 NO_3^- 的贡献率,建立 SIAR 模型分析研究区内 5 种潜在污染源对地下水 NO_3^- 的贡献率. 有反硝化发生时, $\delta^{15}\text{N}\text{-NO}_3^-$ 与 $\delta^{18}\text{O}\text{-NO}_3^-$ 的比值一般在 1.3:1~2.1:1 之间^[42,43],根据本研究的结果,两者比值未在该区间内(如图 4). 另外,地下水溶解氧(DO)也是判断地下水反硝化作用的重要指标,虽然 DO 在 2~6 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间可以发生一定程度的反硝化,但其反应速率极低^[44,45]. 本研究区地下水 DO 实测值为 2.5~9.2 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,相对充足的溶解氧抑制了反硝化的发生以及该过程中同位素的分馏现象. 因此 SIAR 模型的分馏因子设为零,模型其他参数详见表 4.

表 4 地下水潜在污染源 $\delta^{15}\text{N}\text{-NO}_3^-$ 和 $\delta^{18}\text{O}\text{-NO}_3^-$ 特征值
Table 4 Groundwater $\delta^{15}\text{N}\text{-NO}_3^-$ and $\delta^{18}\text{O}\text{-NO}_3^-$ eigenvalues of pollution sources

污染源	$\delta^{15}\text{N}\text{-NO}_3^-$		$\delta^{18}\text{O}\text{-NO}_3^-$	
	均值/‰	标准偏差值	均值/‰	标准偏差值
化肥 ^[46]	-2.1	0.7	-4.1	2.7
污水 ^[47]	17.4	3.9	6.1	1.6
大气降雨 ^[48]	0.6	1.5	57.2	6.9
土壤有机氮 ^[49]	3.8	1.8	-2.7	4.4
畜禽粪便 ^[50]	9.3	4.4	7.4	7.2

针对本研究区和不同用地类型分别采用 SIAR 模型计算地下水 NO_3^- 污染源贡献率,结果如图 5 所示. 对本研究区而言,化肥对地下水 NO_3^- 的贡献率最大,为 32%;其次是土壤氮,为 25%;大气降雨贡献率稍低,为 18%;畜禽粪便和污水的贡献率最低,分别为 15% 和 10%. 基于不同土地利用类型的 SIAR 模型地下水 NO_3^- 污染源分析得到,耕地、菜地和养殖场这 3 种土地利用类型水样,污染源类型和贡献率均较接近,耕地和菜地水样中化肥对 NO_3^- 贡献率为 30%,而在养殖场稍高,为 32%;贡献第二位是土壤氮,贡献率分别为 24%~25%;污水贡献率最小,其中养殖场水样中仅为 9%,耕地和菜地稍高,为 10%. 根据研究区 2018 年农业普查报告:该地区平均施肥量从 1995 年的 $6.4\times 10^6\text{ kg}$ 增加至 2018 年的 $1.2\times 10^7\text{ kg}$,符合污染源识别结果中化肥贡献率较大的计算结果. 与耕地、菜地和养殖场水样相比,工业用地水样中地下水 NO_3^- 主要来源是污

水和大气降雨,其贡献率分别为 28% 和 27%,土壤有机氮贡献率稍低,为 19%,化肥和畜禽粪便贡献率分别为 16% 和 10%。导致这一现象的原因一方面是由于当地尚未完善的生活污水收集系统和工业废水渗漏影响,另一方面是由于工业区排放的氮氧化物转化后通过沉降,降雨补给地下水,从而影响工业地区地下水 NO_3^- 含量^[51]。

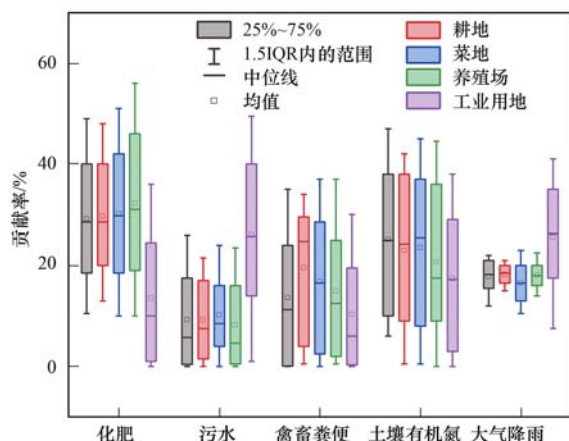


图5 地下水中 5 种潜在 NO_3^- 污染源贡献率分析

Fig. 5 Proportional contribution of five potential NO_3^- sources estimated in groundwater

4 结论

(1)通过对研究区地下水水质的检测发现,地下水中 NO_3^- 、 NO_2^- 、 NH_4^+ 、 Mn 、 Fe 、 SO_4^{2-} 和 Cl^- 均存在不同程度的超标,且具有空间异质性。地下水中“三氮”主要以 NO_3^- 为主, $\rho(\text{NO}_3^-)$ 最高为 $22.35 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。 $\rho(\text{NO}_3^-)$ 在菜地的地下水中普遍偏高,平均值为 $9.29 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$;其次是在养殖场和耕地,平均值分别为 $7.66 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $7.09 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,主要分布在研究区中部;在工业区地下水中最低,平均值为 $2.20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,主要分布在研究区西南和东北。

(2)PMF 模型初步揭示了研究区地下水水质影响因素的贡献率,从大到小依次为:农业活动 (22.10%) > 原生地质作用 (20.25%) > 生活污染 (16.47%) > 水文地球化学演化 (16.09%) > 工业污染 (11.74%)。研究区地下水污染主要受到农业活动、生活污染和工业污染的复合影响,其中农业活动是研究区地下水 NO_3^- 污染的主要贡献因素,贡献率为 66.76%。

(3)从地下水硝酸盐氮氧稳定同位素检测结果分析,研究区农业地区 $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ 值相对较低, NO_3^- 浓度相对较高;而工业区 $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ 和 $\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3^-$ 值均较高。大多数地下水采样点受到两个主要 NO_3^- 来源的影响:化肥和土壤有机氮,进一步表明了地下水中 NO_3^- 污染是由研究区的农业活动驱动的。

SIAR 模型计算发现,对本研究区而言,化肥对地下水 NO_3^- 贡献率最大。对于非工业地区而言,地下水 NO_3^- 主要污染来源是化肥和土壤有机氮;而对工业地区则是污水和大气降雨。尽管近年来部分农业耕作土地已经转变为其他土地利用类型,但是历史上长期农业耕作施用的化肥仍将持续影响含水层地下水质量。

参考文献:

- [1] 2018年《中国生态环境状况公报》(摘录二)[J]. 环境保护, 2019, 47(12): 50-55.
China ecological environment status bulletin in 2018 (excerpt 2) [J]. Environmental Protection, 2019, 47(12): 50-55.
- [2] Shrestha S, Semkuyu D J, Pandey V P. Assessment of groundwater vulnerability and risk to pollution in Kathmandu Valley, Nepal [J]. Science of the Total Environment, 2016, 556: 23-35.
- [3] 何小艳. 浅谈地下水环境保护与防治对策[J]. 资源节约与环保, 2020, (10): 31-32.
- [4] 李志涛, 刘伟江, 陈盛, 等. 关于“十四五”土壤、地下水与农业农村生态环境保护的思考[J]. 中国环境管理, 2020, 12(4): 45-50.
Li Z T, Liu W J, Chen S, et al. Prospects for soil, groundwater, agricultural and rural eco-environment protection during the 14th five-year plan period [J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2020, 12(4): 45-50.
- [5] 王会霞, 史浙明, 姜永海, 等. 地下水污染识别与溯源指示因子研究进展[J]. 环境科学研究, 2021, 34(8): 1886-1898.
Wang H X, Shi Z M, Jiang Y H, et al. Research progress on indicator of groundwater pollution identification and traceability [J]. Research of Environmental Sciences, 2021, 34(8): 1886-1898.
- [6] 陈锋, 孟凡生, 王业耀, 等. 多元统计模型在水环境污染源解析中的应用[J]. 人民黄河, 2016, 38(1): 79-84.
Chen F, Meng F S, Wang Y Y, et al. Application of multivariate statistical analysis in the source apportionment of surface water [J]. Yellow River, 2016, 38(1): 79-84.
- [7] Zhang H, Li H F, Yu H R, et al. Water quality assessment and pollution source apportionment using multi-statistic and APCS-MLR modeling techniques in Min river basin, China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27(33): 41987-42000.
- [8] 孟志龙, 杨永刚, 秦作栋, 等. 汾河下游流域水体硝酸盐污染过程同位素示踪[J]. 中国环境科学, 2017, 37(3): 1066-1072.
Meng Z L, Yang Y G, Qin Z D, et al. Isotopic tracing for nitrate pollution process of water body in the lower reaches of Fenhe River [J]. China Environmental Science, 2017, 37(3): 1066-1072.
- [9] Meghdadi A, Javar N. Quantification of spatial and seasonal variations in the proportional contribution of nitrate sources using a multi-isotope approach and Bayesian isotope mixing model [J]. Environmental Pollution, 2018, 235: 207-222.
- [10] Romanelli A, Soto X D, Matiatos I, et al. A biological and nitrate isotopic assessment framework to understand eutrophication in aquatic ecosystems [J]. Science of the Total Environment, 2020, 715, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.136909.
- [11] Shang X, Huang H, Mei K, et al. Riverine nitrate source

- apportionment using dual stable isotopes in a drinking water source watershed of southeast China[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **724**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137975.
- [12] Zhang H, Xu Y, Cheng S Q, *et al.* Application of the dual-isotope approach and Bayesian isotope mixing model to identify nitrate in groundwater of a multiple land-use area in Chengdu Plain, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **717**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137134.
- [13] 金赞芳, 张文辽, 郑奇, 等. 氮氧同位素联合稳定同位素模型解析水源地氮源[J]. *环境科学*, 2018, **39**(5): 2039-2047.
- Jin Z F, Zhang W L, Zheng Q, *et al.* Contribution of nitrogen sources in water sources by combining nitrogen and oxygen Isotopes and SIAR[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(5): 2039-2047.
- [14] 寇馨月, 丁军军, 李玉中, 等. 青岛市农区地下水硝态氮污染来源解析[J]. *环境科学*, 2021, **42**(7): 3232-3241.
- Kou X Y, Ding J J, Li Y Z, *et al.* Identifying the sources of groundwater NO_3^- -N in Agricultural Region of Qingdao [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(7): 3232-3241.
- [15] Li Q L, Zhang H, Guo S S, *et al.* Groundwater pollution source apportionment using principal component analysis in a multiple land-use area in southwestern China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, **27**(9): 9000-9011.
- [16] Mcilvin M R, Altabet M A. Chemical conversion of nitrate and nitrite to nitrous oxide for nitrogen and oxygen isotopic analysis in freshwater and seawater[J]. *Analytical Chemistry*, 2007, **77**(17): 5589-5595.
- [17] Paatero P, Tapper U. Positive matrix factorization: a non-negative factor model with optimal utilization of error estimates of data values[J]. *Environmetrics*, 1994, **5**(2): 111-126.
- [18] Haghazadeh H, Johannesson K H, Gonzalez-Pinzon R, *et al.* Groundwater geochemistry, quality, and pollution of the largest lake basin in the Middle East: Comparison of PMF and PCA-MLR receptor models and application of the source-oriented HHRA approach [J]. *Chemosphere*, 2022, **288**(1), doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.132489.
- [19] 孟瑞芳, 孟舒然. 基于正定矩阵因子分析模型的滹沱河冲洪积扇地下水污染源解析[J]. *环境污染与防治*, 2021, **43**(5): 586-591.
- Meng R F, Meng S R. Source analysis of groundwater pollution in Hutuo River alluvial-pluvial fan based on positive matrix factorization model [J]. *Environmental Pollution and Control*, 2021, **43**(5): 586-591.
- [20] Chen R H, Teng Y G, Chen H Y, *et al.* Groundwater pollution and risk assessment based on source apportionment in a typical cold agricultural region in Northeastern China[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **696**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.133972.
- [21] 马小雪, 龚畅, 郭加汛, 等. 长江下游快速城市化地区水污染特征及源解析: 以秦淮河流域为例[J]. *环境科学*, 2021, **42**(7): 3291-3303.
- Ma X X, Gong C, Guo J X, *et al.* Water pollution characteristics and source apportionment in rapid urbanization region of the lower Yangtze River: considering the Qinhuai River catchment [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(7): 3291-3303.
- [22] Zhang H, Cheng S Q, Li H F, *et al.* Groundwater pollution source identification and apportionment using PMF and PCA-APCA-MLR receptor models in a typical mixed land-use area in Southwestern China [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **741**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140383.
- [23] Parnell A, Jackson A. SIAR: Stable isotope analysis in R [EB/OL]. <https://cran.r-project.org/web/packages/siar/>, 2013-04-23.
- [24] Forbes C, Evans M, Hastings N, *et al.* Statistical distributions (4th ed.) [M]. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2011.
- [25] Huston R, Chan Y C, Chapman H, *et al.* Source apportionment of heavy metals and ionic contaminants in rainwater tanks in a subtropical urban area in Australia[J]. *Water Research*, 2012, **46**(4): 1121-1132.
- [26] Leong J Y C, Chong M N, Poh P E, *et al.* Longitudinal assessment of rainwater quality under tropical climatic conditions in enabling effective rainwater harvesting and reuse schemes[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, **143**: 64-75.
- [27] Mullaney J R, Lorenz D L, Arntson A D. Chloride in groundwater and surface water in areas underlain by the glacial aquifer system, Northern United States [R]. Reston: US Geological Survey, 2009.
- [28] 丁爱中, 郝娜, 程莉蓉, 等. 四川德阳浅层地下水高含铁成因分析[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2009, **39**(5): 868-873.
- Ding A Z, Hao N, Cheng L R, *et al.* Formation origin of high concentration-Fe in shallow groundwater in Deyang, Sichuan province [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2009, **39**(5): 868-873.
- [29] Bhutiani R, Kulkarni D B, Khanna D R, *et al.* Water quality, pollution source apportionment and health risk assessment of heavy metals in groundwater of an industrial area in north India [J]. *Exposure and Health*, 2016, **8**(1): 3-18.
- [30] Ghahremanzadeh H, Noori R, Baghvand A, *et al.* Evaluating the main sources of groundwater pollution in the southern Tehran aquifer using principal component factor analysis [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2018, **40**(4): 1317-1328.
- [31] Cao X X, Yang S D, Wu P, *et al.* Coupling stable isotopes to evaluate sources and transformations of nitrate in groundwater and inflowing rivers around the Caohai karst wetland, Southwest China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, **28**(33): 45826-45839.
- [32] Zanotti C, Rotiroli M, Fumagalli L, *et al.* Groundwater and surface water quality characterization through positive matrix factorization combined with GIS approach[J]. *Water Research*, 2019, **159**: 122-134.
- [33] Li C, Li S L, Yue F J, *et al.* Identification of sources and transformations of nitrate in the Xijiang River using nitrate isotopes and Bayesian model [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **646**: 801-810.
- [34] Taufiq A, Effendi A J, Iskandar I, *et al.* Controlling factors and driving mechanisms of nitrate contamination in groundwater system of Bandung basin, Indonesia, deduced by combined use of stable isotope ratios, CFC age dating, and socioeconomic parameters[J]. *Water Research*, 2019, **148**: 292-305.
- [35] 孙雪菲, 张丽霞, 董玉龙, 等. 典型石化工业城市土壤重金属源解析及空间分布模拟[J]. *环境科学*, 2021, **42**(3): 1093-1104.
- Sun X F, Zhang L X, Dong Y L, *et al.* Source apportionment and spatial distribution simulation of heavy metals in a typical petrochemical industrial city[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(3): 1093-1104.
- [36] Matiatos I. Nitrate source identification in groundwater of multiple land-use areas by combining isotopes and multivariate statistical

- analysis: A case study of Asopos basin (Central Greece) [J]. Science of the Total Environment, 2016, **541**: 802-814.
- [37] Li X D, Masuda H, Koba K, *et al.* Nitrogen isotope study on nitrate-contaminated groundwater in the Sichuan Basin, China [J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2007, **178**(1-4): 145-156.
- [38] Li S L, Liu C Q, Li J, *et al.* Assessment of the sources of nitrate in the Changjiang River, China using a nitrogen and oxygen isotopic approach [J]. Environmental Science & Technology, 2010, **44**(5): 1573-1578.
- [39] Zhen S C, Zhu W. Analysis of isotope tracing of domestic sewage sources in Taihu Lake—a case study of Meiliang Bay and Gonghu Bay[J]. Ecological Indicators, 2016, **66**: 113-120.
- [40] Ji X L, Xie R T, Hao Y, *et al.* Quantitative identification of nitrate pollution sources and uncertainty analysis based on dual isotope approach in an agricultural watershed[J]. Environmental Pollution, 2017, **229**: 586-594.
- [41] Wu Y, Luo Z H, Luo W, *et al.* Multiple isotope geochemistry and hydrochemical monitoring of karst water in a rapidly urbanized region[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2018, **218**: 44-58.
- [42] Nikolenko O, Jurado A, Borges A V, *et al.* Isotopic composition of nitrogen species in groundwater under agricultural areas: a review[J]. Science of the Total Environment, 2018, **621**: 1415-1432.
- [43] Augeraud-Véron E, Choquet C, Comte É. Optimal buffer zone for the control of groundwater pollution from agricultural activities [J]. Applied Mathematics & Optimization, 2021, **84**(1): 51-83.
- [44] 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.
- [45] Chai H X, Xiang Y, Chen R, *et al.* 2019. Enhanced simultaneous nitrification and denitrification in treating low carbon-to-nitrogen ratio wastewater: treatment performance and nitrogen removal pathway [J]. Bioresource Technology, 2019, **280**: 51-58.
- [46] Xue D M, Botte J, De Baets B, *et al.* Present limitations and future prospects of stable isotope methods for nitrate source identification in surface- and groundwater[J]. Water Research, 2009, **43**(5): 1159-1170.
- [47] Yang L P, Han J P, Xue J L, *et al.* Nitrate source apportionment in a subtropical watershed using Bayesian model[J]. Science of the Total Environment, 2013, **463-464**: 340-347.
- [48] Jin Z F, Zheng Q, Zhu C Y, *et al.* Contribution of nitrate sources in surface water in multiple land use areas by combining isotopes and a Bayesian isotope mixing model [J]. Applied Geochemistry, 2018, **93**: 10-19.
- [49] Rock L, Ellert B H. Nitrogen- 15 and oxygen- 18 natural abundance of potassium chloride extractable soil nitrate using the denitrifier method[J]. Soil Science Society of America Journal, 2007, **71**(2): 355-361.
- [50] 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.
- [51] Fan M Y, Zhang Y L, Lin Y C, *et al.* Isotope-based source apportionment of nitrogen-containing aerosols: a case study in an industrial city in China [J]. Atmospheric Environment, 2019, **212**: 96-105.

CONTENTS

Characteristics of PM _{2.5} Pollution in Beijing During the Historical Period of the 2022 Olympic Winter Games	LIU Yue-chen, MAN Rui-qi, QIU Yan-ting, <i>et al.</i>	(3895)
Observation Analyses of Aerosol Size Distribution Properties from February to March, 2019 in Tianjin Urban Area	HAO Jian, CAI Zi-ying, LIU Jing-le, <i>et al.</i>	(3903)
Analysis of Typical Weather Circulation Patterns of Heavy PM _{2.5} Pollution and the Transport Pattern in the Yangtze River Middle Basin	WANG Ying, ZHI Xie-fei, BAI Yong-qing, <i>et al.</i>	(3913)
Characteristics of Heavy Metals and Other Elements in Atmospheric Dry and Wet Deposition and Health Risk Assessment of a Typical Industrial and Mining City in Central Yunnan	FAN Chen-zi, LIU Yong-bing, YUAN Ji-hai, <i>et al.</i>	(3923)
Characteristics and Reactivity of VOCs in a Typical Industrial City in Summer	QIN Tao, LI Li-ming, WANG Xin-wu, <i>et al.</i>	(3934)
Chemical Reaction Activity and Source Apportionment of Atmospheric VOCs in Summer in Dalian	ZHU Ke-xin, LIU Li-zhong, LIU Huan-wu, <i>et al.</i>	(3944)
One-year Simulation of Air Pollution in Central China, Characteristics, Distribution, Inner Region Cross-transmission, and Pathway Research in 18 Cities	LIU Guang-jin, SU Fang-cheng, XU Qi-xiang, <i>et al.</i>	(3953)
Characteristics of Ozone Pollution, Meteorological Impact, and Evaluation of Forecasting Results Based on a Neural Network Model in Beijing-Tianjin-Hebei Region	ZHU Yuan-yuan, LIU Bing, GUI Hai-lin, <i>et al.</i>	(3966)
Temporal and Spatial Variations in Black Carbon Aerosol in Different Atmospheric Background Stations in China from 2006 to 2020	WANG Hong-lei, YAN Xue, SHEN Li-juan, <i>et al.</i>	(3977)
Pollution Characteristics and Emission Factors of PCDD/Fs from Iron and Steel Industry	YANG Yan-yan, XIE Dan-ping, FU Jian-ping, <i>et al.</i>	(3990)
Community Composition and Assessment of the Aquatic Ecosystem of Periphytic Algae in the Yangtze River Basin	HU Yu-xin, CAO Liang, QU Ren-chao, <i>et al.</i>	(3998)
Evaluation and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Sediments of the Yellow River Basin Based on Monte Carlo Simulation and PMF Model	PANG Kuo, LI Min, LIU Lu, <i>et al.</i>	(4008)
Retention Effect of Heavy Metals in Rivers of a Typical Mountainous City by Cascade Weirs; A Case Study of Liangtan River in Chongqing	WANG Chao, JIA Bo-yang, PAN Cheng-yong, <i>et al.</i>	(4018)
Estimation of Agricultural Non-point Source TN and TP Export Coefficients Based on Soil Loss	WANG You-xiao, HUANG Chong, LIU Gao-huan, <i>et al.</i>	(4032)
Influence of Land Use and Land Cover Patterns on Water Quality at Different Spatio-temporal Scales in Hehuang Valley	LI Hao-hao, HUANG Yi-mei, GUO Wei, <i>et al.</i>	(4042)
Groundwater Pollution Source Identification by Combination of PMF Model and Stable Isotope Technology	ZHANG Han, DU Xin-yu, GAO Fei, <i>et al.</i>	(4054)
Antibiotic Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment in Jinjiang River Basin, Jiangxi Province	LI Jia-le, WANG Meng, HU Fa-wang, <i>et al.</i>	(4064)
Screening and Control Measures for New Priority Pollutants in Surface Water of Tianjin	WU Yan-qi, SONG Shuai, SHI Ya-juan, <i>et al.</i>	(4074)
Contamination Characteristics and Ecological Risk Assessment of Pharmaceuticals and Personal Care Products (PPCPs) in the Third Drain of Ningxia	LI Fu-juan, GAO Li, LI Ling-yun, <i>et al.</i>	(4087)
Analysis of the Seasonal Changes in Planktonic Microbial Diversity in Urban River Supplied with Reclaimed Water: A Case Study of the North Canal River	YUAN Xun-chao, WANG Min, GUO Xiao-yu, <i>et al.</i>	(4097)
Spectroscopic and Molecular Characterization of Water Soluble Organic Matter from Sediments in the Macrophyte-dominated and Algae-dominated Zones of Taihu Lake	DU Ying-xun, DAI Jia-ru, ZHANG Qiao-ying, <i>et al.</i>	(4108)
Emission of Nitrous Oxide (N ₂ O) from Lake Taihu and the Corresponding Potential Driving Factors	LIU Chao-rong, ZHU Jun-yu, LI Yu-yang, <i>et al.</i>	(4118)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in the Bioretention Systems of Sponge Cities	LEI Xiao-ling, QIU Li-na, WEI Ze-jun, <i>et al.</i>	(4127)
Treatment Effect of Corncob and Rice Straw Enhanced Subsurface Flow Constructed Wetland on Low C/N Ratio Wastewater	HU Man-li, HAO Qing-ju, MA Rong-zhen, <i>et al.</i>	(4136)
Investigation of the Performance of Organic Contaminant Degradation by Fe ²⁺ /PDS Under Environmentally Relevant pH Conditions	LIU Ying, GUO Yi-wei, QIAO Jun-lian, <i>et al.</i>	(4146)
Typical Pesticide Residues and Their Risk Assessment in Farmland Environment of Different Plant Types in Shayu County, Xinjiang	XIE Xuan-xuan, NUERLA Ailijiang, BALATI Maihemuti, <i>et al.</i>	(4154)
Distribution Characteristics of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Manure and Surrounding Soil of Poultry Farm in Ningxia	SHEN Cong, ZHANG Jun-hua, LIU Ji-li, <i>et al.</i>	(4166)
Enrichment Factors of Soil-Se in the Farmland in Shizuishan City, Ningxia	WANG Ying, LIU Hai-yan, WANG Ze-jing, <i>et al.</i>	(4179)
Zoning and Safe Utilization Method of Heavy Metal Contaminated Cultivated Land at Block Scale	WANG Rui, YU Jing, LI Yu, <i>et al.</i>	(4190)
Spatial Distribution, Source Apportionment, and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Jiangshugongmi Producing Area, Shandong Province	YU Lin-song, WAN Fang, FAN Hai-yin, <i>et al.</i>	(4199)
Assessing the Lead Accumulation Risks of Wheat Grain by Developing a Source-Specific Accumulation Risk Assessment Model	YANG Yang, LI Yan-ling, NIU Shuo, <i>et al.</i>	(4212)
Accumulation Effects and Health Risks of Heavy Metals in Rice in Location-based Cadmium Anomaly Area in Liuzhou	ZHU Liang-liang, WANG Fu-peng, TANG Le-bin, <i>et al.</i>	(4219)
Accumulation and Transport Characteristics of Cd, Pb, Zn, and As in Different Maize Varieties	REN Chao, XIAO Jian-hui, LI Jing-tian, <i>et al.</i>	(4232)
Remediation Potential of <i>Taraxacum kok-saghyz</i> Rodin on Lead and Cadmium Contaminated Farmland Soil	ZHANG Heng, XIONG Ming-biao, WANG Qian-xin, <i>et al.</i>	(4253)
Remediation Potential of Three Dwarf Bamboos on Farmland Soils Contaminated with Mixed Heavy Metals	ZHANG Ying, ZHAO Xin, ZHANG Sheng-hu, <i>et al.</i>	(4262)
Impacts of Uptake and Accumulation of Cd on Double Rice-Paddy Soil by Silicon Fertilizer Continuous Application	PENG Hua, DENG Kai, SHI Yu, <i>et al.</i>	(4271)
Effect of Modified Chitosan Loaded with Silica on Arsenic Uptake and Transport in Rice	YANG Jia-yi, SUN Meng-qiang, XIAO Yu-tang, <i>et al.</i>	(4282)
Effect of Chelating Agents and Organic Acids on Remediation of Cadmium and Arsenic Complex Contaminated Soil Using <i>Xanthium sibiricum</i>	ZHANG Ya-rui, HUANG Yi-zong, BAO Qiong-li, <i>et al.</i>	(4292)
Effects of Water Management on the Transformation of Iron Oxide Forms in Paddy Soils and Its Coupling with Changes in Cadmium Activity	LI Ming-yuan, ZHANG Xiao-ting, LIU Han-yi, <i>et al.</i>	(4301)
Effects of Iron Intensity-regulated Root Microbial Community Structure and Function on Cadmium Accumulation in Rice	ZHENG Shen, HUANG Dao-you, LI Bo, <i>et al.</i>	(4313)
Effects of Mulching and Slow-release Fertilizer Application Reduction on Soil Microbial Community Structure in Rapeseed Field Under Two Different Rainfall Conditions	FENG Jun, SHI Chao, Hafiz Athar Hussain, <i>et al.</i>	(4322)
High-Throughput Sequencing Combined with Metabonomics to Analyze the Effect of Heavy Metal Contamination on Farmland Soil Microbial Community and Function	PANG Fa-hu, LI Xiao-qi, DUAN Li-yang, <i>et al.</i>	(4333)
Characteristics of Microbial Community Structure in the Surrounding Farmlands of a Mercury Mining Area and Its Environmental Driving Factors	CHEN Fen, YU Gao, SUN Yue-bing, <i>et al.</i>	(4342)
Comparison of Bacterial Community Structure in Soil Aggregates Between Natural Karst Wetland and Paddy Field	LENG Meng, JIN Zhen-jiang, XIAO Xiao-yi, <i>et al.</i>	(4353)
Elevational Pattern and Control Factors of Soil Microbial Carbon Use Efficiency in the Daiyun Mountain	LÜ Kun, WANG Jing-jing, WU Guo-peng, <i>et al.</i>	(4364)
Effect of Long-term Straw Returning on the Mineralization and Priming Effect of Rice Root-carbon	LIU Feng, WANG Yun-qiu, ZHANG Yun, <i>et al.</i>	(4372)
Effects of Straw Returning and Biochar Application on Summer Maize Yield and Soil N ₂ O Emission in Guanzhong Plain	BAI Jin-ze, LIU Zhen-yuan, SONG Jia-jie, <i>et al.</i>	(4379)
Effects of Polystyrene Nanoplastics (PS-NPs) on the Physiology of <i>Allium sativum</i> L.	QIU Chen-chen, LI Guo-xin, LI Qing-song, <i>et al.</i>	(4387)
Effect of Microplastics on Soil Water Infiltration and Evaporation	WANG Zhi-chao, ZHANG Bo-wen, NI Jia-xuan, <i>et al.</i>	(4394)
Life Cycle Assessment and Key Parameter Comparison of Hydrogen Fuel Cell Vehicles Power Systems	CHEN Yi-song, LAN Li-bo, HAO Zhuo, <i>et al.</i>	(4402)