

目次

持久性、迁移性和潜在毒性化学品环境健康风险与控制研究现状及趋势分析	张少轩, 陈安娜, 陈成康, 景侨楠, 刘建国 (3017)
我国厨余垃圾资源化技术的多维绩效评价	杨光, 史波芬, 周传斌 (3024)
基于 MSPA 和电路理论的京津冀城市群热环境空间网络	乔治, 陈嘉悦, 王楠, 卢应爽, 贺瞳, 孙宗耀, 徐新良, 杨浩, 李莹, 王方 (3034)
城市空间格局与热环境响应关系:以合肥市为例	陈媛媛, 姚侠妹, 偶春, 张清怡, 姚晓洁 (3043)
天津市“十三五”期间 PM _{2.5} 减排效果评估	肖致美, 徐虹, 蔡子颖, 张裕芬, 刘茂辉, 孙猛, 李鹏, 杨宁, 戴运峰 (3054)
清洁取暖对保定市采暖期 PM _{2.5} 中碳质气溶胶的影响	罗宇睿, 张凯, 赵好希, 任家豪, 段菁春, 李欢欢, 关键, 郭志强, 李博文 (3063)
南京地区细颗粒物污染输送影响及潜在源区	谢放尖, 郑新梅, 窦焱焱, 杨峰, 刘春蕾, 李洁, 谢轶嵩, 王艳, 胡建林, 陈长虹 (3071)
大气环流型对珠三角 2015~2020 年臭氧变化的影响	汪瑶, 刘润, 辛繁 (3080)
热带气旋对海南岛臭氧污染的影响分析	符传博, 丹利, 佟金鹤, 徐文师 (3089)
基于 CMAQ 和 HYSPLIT 模式的日照市夏季臭氧污染成因和来源分析	林鑫, 全纪龙, 王伊凡, 陈羽翔, 刘永乐, 张鑫, 敖丛杰, 刘浩天 (3098)
2016~2020 年成都市控制 PM _{2.5} 和 O ₃ _{8h} 污染的健康效益评价	张莹, 田琪琪, 魏晓钰, 张少波, 胡文东, 李明刚 (3108)
深圳市 2022 年春季新冠疫情管控期间空气质量分析	刘婵芳, 张傲星, 房庆, 叶毓婧, 杨红龙, 陈炯恺, 吴雯潞, 侯岳, 莫佳佳, 傅宗玖 (3117)
贵州省生物质燃烧源大气污染物排放清单	王艳妮, 杨敬婷, 黄贤峰, 程燕, 陆标, 顾兆林 (3130)
西安市大气降水的主要化学组分及其来源	周东, 黄智浦, 李思敏, 王森, 牛振川, 熊晓虎, 冯雪 (3142)
宜昌市大气微塑料的分布、呼吸暴露及溯源	刘立明, 王超, 巩文雯, 陆安祥, 任东, 涂清, 贾漫珂 (3152)
雅鲁藏布江水化学演变规律	江平, 张全发, 李思悦 (3165)
无定河流域地表水硝酸盐浓度的时空分布特征及来源解析	徐奇峰, 夏云, 李书鉴, 王万洲, 李志 (3174)
太浦河水体与沉积物中重金属的季节变化特征与污染评价	罗鹏程, 涂耀仁, 孙婷婷, 刘生辉, 高佳欣, 寇佳怡, 顾心彤, 段艳平 (3184)
北京市北运河水体中抗生素污染特征及风险评估	蒋宝, 隋珊珊, 孙成一, 王亚玲, 荆降龙, 凌文翠, 李珊珊, 李国傲 (3198)
氮和氧同位素示踪伊洛河河水硝酸盐来源及转化过程	郭文静, 张东, 蒋浩, 吴洋洋, 张郭妙, 段慧真, 许梦军, 麻冰涓, 陈昊, 黄兴宇 (3206)
淮河下游湖泊表层水和沉积物中 PPCPs 分布特征及风险评估	武宇圣, 黄天寅, 张家根, 田永静, 庞燕, 许秋瑾 (3217)
西宁市浅层地下水化学特征及形成机制	刘春燕, 于开宁, 张英, 荆继红, 刘景涛 (3228)
叶尔羌河流域平原区地下水污染风险评价	闫志云, 曾妍妍, 周金龙, 孙英, 马常莲 (3237)
密云水库细菌群落组成结构及影响因素	陈颖, 王佳文, 梁思航, 陈倩 (3247)
可见光激发下模拟海水中四环素光降解的机制和路径	许恒韬, 付小航, 丰卫华, 王挺 (3260)
纳米零价铁改性生物炭对水中氨氮的吸附特性及机制	陈文静, 石峻岭, 李雪婷, 张李金, 刘富强, 陈正祝, 庞维海, 杨殿海 (3270)
高锰酸钾改性椰壳生物炭对水中 Cd(II) 和 Ni(II) 的去除性能及机制	张凤智, 王敦球, 曹星洋, 刘桥京, 岳甜甜, 刘立恒 (3278)
铜改性净水污泥水热炭对水体中磷的吸附特性及底泥内源磷的固定	何李文泽, 陈钰, 孙飞, 李艳君, 杨顺生, 张志鹏 (3288)
城镇生活污水处理厂出水硝酸盐浓度及同位素组成的影响因素	张东, 葛文彪, 赵爱萍, 高振朋, 陈昊, 张琮, 蒋浩, 吴文阳, 廖琪, 李成杰, 黄兴宇, 麻冰涓 (3301)
基于 Meta 分析的污水处理工艺对微塑料去除效果影响	符立松, 侯磊, 王艳霞, 李晓琳, 王万宾, 梁启斌 (3309)
我国自然生态系统氮沉降临界负荷评估	黄静文, 刘磊, 颜晓元, 迺超普 (3321)
气候变化和人类活动对东部沿海地区 NDVI 变化的影响分析	金岩松, 金凯, 王飞, 刘春霞, 秦鹏, 宗全利, 刘佩娟, 陈明利 (3329)
基于 InVEST 模型和 PLUS 模型的环杭州湾生态系统碳储量	丁岳, 王柳柱, 桂峰, 赵晨, 朱望远 (3343)
河西走廊中段荒漠绿洲土壤生态化学计量特征	孙雪, 龙永丽, 刘乐, 刘继亮, 金丽琼, 杜海峰, 陈凌云 (3353)
乌梁素海东部流域非生季草地土壤细菌群落结构的垂向差异	李文宝, 张博尧, 史玉娇, 郭鑫, 李兴月 (3364)
芦芽山华北落叶松林土壤剖面细菌群落分布格局	毛晓雅, 刘晋仙, 贾彤, 吴铁航, 柴宝峰 (3376)
植被类型对黄土高原露天矿山复垦土壤碳循环功能基因的影响	赵姣, 马静, 朱燕峰, 于昊辰, 张琦, 陈浮 (3386)
施用生物炭对麦田土壤细菌群落多样性和冬小麦生长的影响	姚丽茹, 李伟, 朱良正, 曹布仓, 韩娟 (3396)
甜龙竹不同种植年限对土壤真菌群落的影响	朱书红, 辉朝茂, 赵秀婷, 刘蔚漪, 张仲富, 刘会会, 张文君, 朱礼月, 涂丹丹 (3408)
生物炭对热带地区辣椒种植土壤 N ₂ O 排放及其功能基因的影响	陈琦琦, 王紫君, 陈云忠, 王誉琴, 朱启林, 胡天怡, 胡煜杰, 伍延正, 孟磊, 汤水荣 (3418)
覆膜和有机无机配施对夏玉米农田温室气体排放及水氮利用的影响	蒋洪利, 雷琪, 张彪, 吴淑芳 (3426)
不同类型地膜覆盖对土壤质量、根系生长和产量的影响	穆晓国, 高虎, 李梅花, 赵欣茹, 郭宁, 靳磊, 李建设, 叶林 (3439)
基于 PMF 模型的某铅锌冶炼城市降尘重金属污染评价及来源解析	陈明, 王琳玲, 曹柳, 李名闯, 申哲民 (3450)
云南 5 城市道路扬尘 PM _{2.5} 中重金属含量表征及健康风险	韩新宇, 郭晋源, 史建武, 李定霜, 王怡明, 宁平 (3463)
兰州市黄河风情线地表积尘及周边绿地土壤重金属污染特征及风险评价	李军, 李开明, 王晓槐, 焦亮, 臧飞, 毛潇萱, 杨云钦, 台喜生 (3475)
PMF 和 RF 模型联用的土壤重金属污染来源解析与污染评价:以西北某典型工业园区为例	高越, 吕童, 张鑫凯, 张博哈, 毕思琪, 周旭, 张炜, 曹红斌, 韩增玉 (3488)
基于 APCS-MLR 受体模型和地统计法的矿区周边农用地土壤重金属来源解析	张传华, 王钟书, 刘力, 刘燕 (3500)
PCA-APCS-MLR 和地统计学的典型农田土壤重金属来源解析	王美华 (3509)
三峡库区稻田土壤重金属污染特征及风险评价	刘娅君, 李彩霞, 梅楠, 张美平, 张成, 王定勇 (3520)
皖江经济带耕地重金属健康风险评价及环境基准	刘海, 魏伟, 宋阳, 潘杨, 黄健敏 (3531)
张家口市万全区某种植区土壤重金属污染评价与来源分析	安永龙, 殷秀兰, 李文娟, 金爱芳, 鲁青原 (3544)
滁州市表层土壤重金属含量特征、源解析及污染评价	汤金来, 赵宽, 胡睿鑫, 徐涛, 王宜萱, 杨扬, 周葆华 (3562)
矿业废弃地重金属形态分布特征与迁移转化影响机制分析	魏洪斌, 罗明, 向奎, 查理思, 杨慧丽 (3573)
基于成土母质的矿产资源基地土壤重金属生态风险评价与来源解析	卫晓峰, 孙紫坚, 陈自然, 魏浩, 孙厚云, 刘卫, 傅大庆 (3585)
不同种类蔬菜重金属富集特征及健康风险	祁浩, 庄坚, 庄重, 王琪, 万亚男, 李花粉 (3600)
山东省典型灌溉区土壤-小麦重金属健康风险评估	王菲, 费敏, 韩冬锐, 李春芳, 曹文涛, 姚磊, 曹见飞, 吴泉源 (3609)
基于机器学习方法的小麦镉富集因子预测	牛硕, 李艳玲, 杨阳, 商艳萍, 王天齐, 陈卫平 (3619)
《环境科学》征订启事(3062)	
《环境科学》征稿简则(3116)	
信息(3164, 3259, 3572)	

无定河流域地表水硝酸盐浓度的时空分布特征及来源解析

徐奇峰, 夏云, 李书鉴, 王万洲, 李志*

(西北农林科技大学资源环境学院, 杨凌 712100)

摘要: 无定河流域作为黄河的一级支流, 其水生态环境质量深刻影响着黄河流域生态保护与高质量发展。为识别无定河流域硝酸盐污染来源, 对 2019~2021 年期间无定河的地表水样品进行了采集, 探究了流域地表水体硝酸盐浓度的时空分布特征及影响因素, 借助水化学方法、氮氧同位素示踪技术以及 MixSIAR 模型定性和定量地确定了地表水硝酸盐各来源及其贡献率。结果表明, 无定河流域硝酸盐浓度存在显著时空差异。时间上, 丰水期地表水 NO_3^- -N 浓度均值高于平水期; 空间上, 下游地表水 NO_3^- -N 浓度均值高于上游。地表水硝酸盐浓度的时空差异主要受降雨径流、土壤类型以及土地利用类型的影响。无定河流域地表水丰水期硝酸盐的主要来源是生活污水及粪肥、化学肥料和土壤有机氮, 其贡献率分别为 43.3%、27.6% 和 22.1%, 降水的贡献率仅占 7.0%。不同河段地表水硝酸盐污染源贡献率存在差异, 上游土壤氮贡献率明显高于下游, 为 26.5%; 而下游生活污水及粪肥的贡献率明显高于上游, 为 48.9%。可为无定河乃至干旱及半干旱地区的河流硝酸盐来源解析和污染治理提供依据。

关键词: 无定河流域; 硝酸盐; 来源; 贝叶斯混合模型; 氮氧双同位素

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)06-3174-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202207291

Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Nitrate in Surface Water of Wuding River Basin

XU Qi-feng, XIA Yun, LI Shu-jian, WANG Wan-zhou, LI Zhi*

(College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: The Wuding River Basin is a first-class tributary of the Yellow River, and the quality of its water ecological environment has a profound impact on the ecological protection and high-quality development of the Yellow River Basin. In order to identify the source of nitrate pollution in the Wuding River Basin, surface water samples of the Wuding River were collected from 2019 to 2021, and the temporal and spatial distribution characteristics and influencing factors of nitrate concentration in surface water in the basin were explored. Nitrogen and oxygen isotope tracer technology and the MixSIAR model were used to qualitatively and quantitatively determine the sources of surface water nitrate and their contribution rates. The results showed that there were significant spatial and temporal differences in nitrate concentrations in the Wuding River Basin. In terms of time, the mean concentration of NO_3^- -N in surface water in the wet season was higher than that in the flat-water period; spatially, the mean concentration of NO_3^- -N in the downstream surface water was higher than that in the upstream. The spatial and temporal differences in surface water nitrate concentrations were mainly affected by rainfall runoff, soil types, and land use types. The main sources of nitrates in the surface water of the Wuding River Basin during the wet season were domestic sewage, manure, chemical fertilizers, and soil organic nitrogen, whose contribution rates were 43.3%, 27.6%, and 22.1%, respectively, and the contribution rate of precipitation was only 7.0%. There were differences in the contribution rate of nitrate pollution sources in surface water of different river sections. The contribution rate of soil nitrogen in the upstream was significantly higher than that in the downstream, which was 26.5%. The contribution rate of domestic sewage and manure in the downstream was significantly higher than that in the upstream, which was 48.9%. To provide a basis for the analysis of nitrate sources and pollution control in Wuding River and even rivers in arid and semi-arid regions.

Key words: Wuding River Basin; nitrate; source; Bayesian mixture model; nitrogen and oxygen isotopes

河流作为物质和能量输送的主要通道, 为流域内的经济和社会发展提供了强有力的支撑^[1]。全球变化背景下, 河流水环境面临人口快速增长、土地利用变化以及农业集约化生产等多重压力, 复合污染排放增加, 河水中氮素负荷进一步提高^[1~3]。硝酸盐是氮素的主要组成成分^[3], 水体硝酸盐浓度过高会导致富营养化^[4]等负面生态效应并增加人类患胃癌和蓝婴病等疾病的风险^[4~7]。因此, 识别水体硝酸盐污染来源及其迁移转化过程对实现流域水环境的可持续利用、更好地规划和管理水环境具有现实意义。

以往研究中, 多种方法被应用于硝酸盐污染源识别, 包括统计学方法、水质指标方法^[8]和稳定同位素示踪法^[2,7,9,10]等。将水体水质指标与土地利用类型相结合能够定性识别污染来源^[11,12]; 收集人口、化肥使用和牲畜数量等统计数据, 借助输出系数模型等方法能够对硝酸盐污染源进行定量估算^[13]。然而, 统计数据仅能对总氮输出负荷进行核

收稿日期: 2022-07-31; 修订日期: 2022-09-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(42002265, 42071043)

作者简介: 徐奇峰(1997~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为流域氮循环和面源污染, E-mail: 2020055663@nwfau.edu.cn

* 通信作者, E-mail: lizhibox@nwfau.edu.cn

算,且定性分析过程难以反映硝酸盐迁移过程中的生物地球作用. 硝酸盐双稳定同位素($\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ 和 $\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3^-$)技术的出现克服了上述困难,被广泛应用于硝酸盐污染源[即生活污水及粪肥(M&S)、硝态氮肥(NF)、铵态氮肥(AF)、土壤氮(SN)和降水(AP)]^[10,14]研究. 如 Zhao 等^[15]借助氮氧双同位素技术确定了汾河流域地表水硝酸盐主要来源于生活污水及粪肥、无机肥和土壤氮,Bratek 等^[16]运用氮氧同位素确定了 Rhône 河下游水体的硝酸盐来源主要为农业活动和生活污水及粪肥. 将氮氧双同位素与模型结合能够量化地表水中硝酸盐各污染源的贡献率^[9,17]. 目前,已有几种污染源量化模型被开发并应用,包括 IsoSource、SIAR 和 MixSIAR 等^[1,9,18,19]. 其中, MixSIAR 模型考虑了源值、分类和连续变量(随机、固定、分类和嵌套效应)、先验信息的不确定性,融合了贝叶斯混合模型的最新成果^[20~22],定量结果更为准确. 此外,硝酸盐双同位素与水化学等水质指标^[8]的联合使用将有助于更加准确地识别水体硝酸盐的污染来源^[23~25].

无定河是黄河一级支流,位于黄土高原腹地,是黄河中游水土流失最严重的区域^[26]. 以往研究表明,无定河流域部分河段面临水质污染问题,且流域地表水 $\rho(\text{NO}_3^-)$ 均值呈上升趋势,从 2013 年的 $2.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 增长到 2019 年 $7.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,涨幅为 231%^[26~29]. 目前,量化无定河流域水体硝酸盐污染来源的研究较少,且对流域地表水硝酸盐浓度时空变化特征的影响机制解释不充分. 本文选择无定河流域为研究对象,采集多个时期的河水样品,综合运用水化学和同位素方法,识别水体硝酸盐浓度的时空分布特征及其影响因素,并借助 MixSIAR 模型对其来源进行量化,以期在无定河流域地表水硝酸盐

来源防控和污染治理提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

无定河($108^\circ 27' 39'' \sim 110^\circ 34' 22''\text{E}$, $37^\circ 02' 31'' \sim 38^\circ 55' 52''\text{N}$)发源于陕西省靖边县白于山北麓^[30],干流全长 491 km,流域面积约 $3.0 \times 10^4 \text{ km}^2$ [图 1(a)]. 无定河流域属于干旱半干旱季风气候,流域风沙较大,气温较低,年平均温度 9.5°C ,无霜期 194 d^[30]. 多年平均降水量为 409.1 mm^[31],由于受温带季风的影响,雨季(6~9月)降水量占全年的 74%^[32],且多为暴雨,水力侵蚀严重. 无定河多年平均径流量为 $1.5 \times 10^9 \text{ m}^3$,黄土丘陵沟壑区的径流年内分配存在差异,夏季径流约占年径流的 50%,冬季径流只占 9%,春秋径流相对接近;多年平均输沙量为 $3.2 \times 10^8 \text{ t}$,雨季的输沙量约占全年的 95%^[33]. 无定河干流河道按其自然特点可分为上游和下游^[34],从河源至鱼河堡为上游,河道长 291 km,支流较多,水量丰富,泥沙较少;鱼河堡至清涧县河口为下游,河道长 200 km,支流有淮宁河等,人口密集,工农业发达. 研究区海拔介于 574~1 837 m 之间,地势西北高,东南低,平均比降为 1.8%. 研究区地貌可划分为 3 种类型:研究区东南部为以林地为主的黄土丘陵沟壑区;西南部为河源梁塬区,是无定河干流和多条支流的发源地;流域西北部位于黄土高原和毛乌素沙漠交界的过渡区^[35]. 研究区土地利用类型主要包括耕地、林地、草地、水域、建筑用地和未利用地(土地利用数据根据 2015 年的 Landsat-8 遥感影像解译获得,分辨率为 $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$). 上游土地利用类型以林地和耕地为主,流域水域占比较小,城镇用地和耕地多沿河道分布;下游

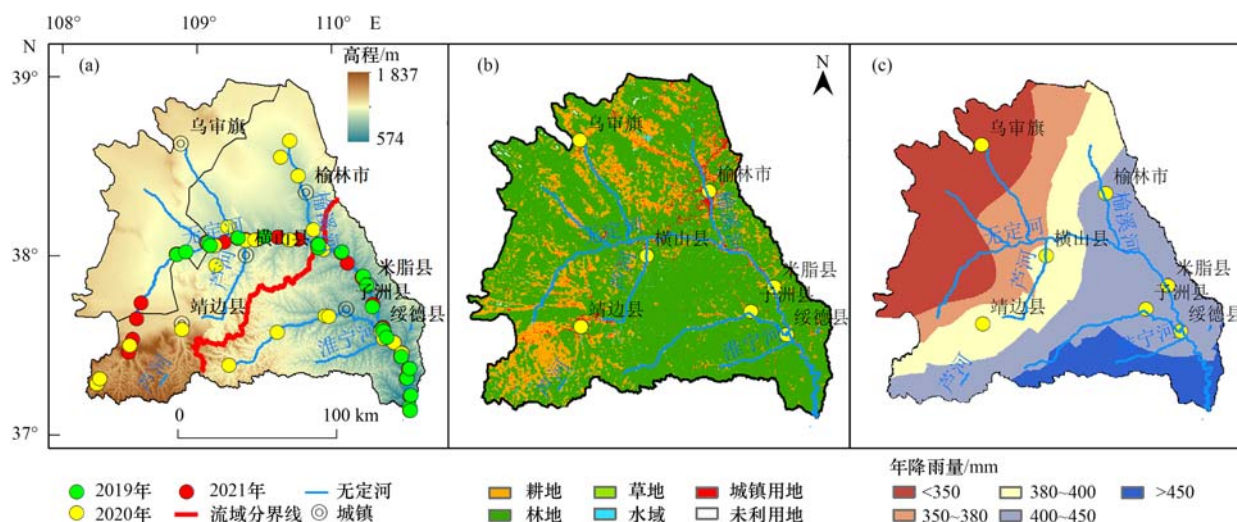


图1 研究区概况和采样点分布示意

Fig. 1 Overview of the study area and schematic diagram of the distribution of sampling sites

土地利用类型以林地为主,城镇和耕地多分布在水源丰富的区域。

1.2 样品采集与分析

本研究分别在 2019 年 8 月(丰水期)、2020 年 10 月(平水期)和 2021 年 8 月(丰水期)进行了 3 次野外采样工作,各个时期河水采样点数量分别为 21、24 和 32 个,共采集到 77 个河水样品,采样点位置如图 1(a)所示。

所有采样点均用 GPS 定位,在河道有明显水流处采集水面以下约 0.5 m 处的河水 500 mL。水样经过 0.22 μm 的滤膜过滤后装入 250 mL 聚乙烯瓶中,放置在 4℃ 保温箱中保存,及时带回实验室进行后续分析测定。 NO_3^- 采用流动分析仪(AA3, Seal, 德国)测定,检测下限为 0.003 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,测定误差低于 0.1%;氯离子(Cl^-)采用离子色谱仪(ICS-1100, Thermo Fisher Scientific, 美国)测定,检测下限为 1 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,测样精度大于 99%。所有样品均进行两次平行测定,以减少测定过程中的误差。

由于研究区表现为黄土松散、植被贫瘠和夏季降雨强度高,以往研究发现枯水期河流中的硝酸盐含量低,丰水期河流中的硝酸盐含量较高^[36]。因此,氮氧同位素的测样点选择了丰水期硝酸盐浓度较高,污染较为严重的样点,能够很好地代表流域高硝酸盐地区的主要污染来源。氮氧同位素采用细菌反硝化法^[37]测定,其值在中国农业科学院稳定同位素实验室使用同位素质谱仪(IRMS, Isoprime, 英国)测定,测定精度均为 $\pm 0.5\text{‰}$ 。水中氧同位素($\delta^{18}\text{O}-\text{H}_2\text{O}$)在西北农林科技大学资源环境学院旱区水循环实验室采用水同位素分析仪(IWA-45PE, LGR, 美国)测定,测定精度为 0.03%。硝酸盐中氮、氧同位素和水中氧同位素的相对比值用 δ 来表示^[37],其公式如下:

$$\delta(\text{‰}) = \frac{R_{\text{样品}} - R_{\text{标准}}}{R_{\text{标准}}} \times 1000 \quad (1)$$

式中, δ 分别为硝酸盐中 $\delta^{15}\text{N}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 和水中 $\delta^{18}\text{O}$; R 为同位素比值, $R_{\text{样品}}$ 和 $R_{\text{标准}}$ 分别为重同位素和轻同位素比值,即样品和标准的 $\delta^{15}\text{N}/\delta^{14}\text{N}$ 或 $\delta^{18}\text{O}/\delta^{16}\text{O}$; N 同位素参照标准是标准大气中的 N_2 , 氧同位素参照标准为维也纳标准平均海水(vienna standard mean oceanic water, V-SMOW)。

1.3 贝叶斯混合模型(MixSIAR)

贝叶斯混合模型可用于量化自然水域中硝酸盐污染源的贡献率,这在国内外研究中已有广泛的应用^[38]。本研究借助 MixSIAR 模型对无定河流域地表水硝酸盐污染源的贡献率进行量化。MixSIAR 模型

表达式如下^[37]:

$$X_{ij} = \sum_{k=1}^K P_k (S_{jk} + c_{jk}) + \varepsilon_{ij} \quad (2)$$

$$S_{jk} \sim N(\mu_{jk}, \omega_{jk}^2) \quad (3)$$

$$c_{jk} \sim N(\lambda_{jk}, \tau_{jk}^2) \quad (4)$$

$$\varepsilon_{ij} \sim N(0, \sigma_j^2) \quad (5)$$

式中, X_{ij} 为混合物 i 的 j 同位素值($\delta^{15}\text{N}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$) ($i = 1, 2, \dots, N$; $j = 1, 2, \dots, J$); S_{jk} 为源 k 的 j 同位素值 ($k = 1, 2, \dots, K$) 与均值 μ_{jk} 和方差 ω_{jk}^2 呈正态分布; P_k 为 MixSIAR 模型计算 k 源的贡献率; c_{jk} 为 k 源的 j 同位素分馏因子,本研究中假设 $c_{jk} = 0$, λ_{jk} 为平均值; τ_{jk}^2 为方差; ε_{ij} 为残留误差。

在模型输入端元中,各污染源的氮氧同位素特征值范围主要参考渭河及周边流域的污染源范围值,以保证污染来源及其氮氧同位素特征值范围的一致性,不同硝酸盐来源的氮、氧同位素值范围如表 1 所示。

表 1 各污染源的 $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ 和 $\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3^-$ 范围

Table 1 The $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ range and $\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3^-$ range of each source

类型	$\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3^-/\text{‰}$	文献
生活污水及粪肥	4 ~ 25	-10 ~ 15	[3, 36, 39]
硝态氮肥	-6 ~ 6	17 ~ 25	[18, 36]
铵态氮肥	-10 ~ 5	-10 ~ 15	[18, 36, 39]
土壤氮	0 ~ 8	-10 ~ 15	[18, 39]
降水	-13 ~ 13	27 ~ 78	[18, 36]

1.4 研究方法

首先采用 Excel 2016 对不同时期地表水的硝酸盐浓度数据进行标准化处理和数据分析。然后,应用 Kruskal-Wallis 检验法^[40]对地表水水质数据进行差异性分析($P < 0.05$),以识别河流不同监测断面硝酸盐浓度的时空差异。采用 R 语言程序包(MixSIAR 3.6.3)来量化 5 种硝酸盐污染源对河水硝酸盐的贡献率。本研究采用 ArcGIS 10.5 和 Origin 2021 等软件进行图表绘制。

2 结果与分析

2.1 地表水硝酸盐的时空分布特征

表 2 展示了不同时期无定河流域硝态氮浓度及氮氧同位素值的季节特征。可以看出,2019 年 8 月、2020 年 10 月和 2021 年 8 月无定河流域地表水的 $\rho(\text{NO}_3^--\text{N})$ 范围分别为 1.3 ~ 4.6、0 ~ 3.3 和 0.2 ~ 6.2 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\rho(\text{NO}_3^--\text{N})$ 均值分别为 (2.7 ± 1.2) 、 (0.6 ± 0.7) 和 (2.6 ± 1.8) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。2019 年 8 月和 2021 年 8 月无定河流域地表水硝酸盐浓度均值较为一致,差异性不显著($n = 53$, $P < 0.05$),表明无定河流域地表水硝酸盐浓度年际变异较小,因此后

续将这两个时期合并分析,代表丰水期的硝酸盐浓度特征. 丰水期地表水硝态氮浓度均值显著高于平水期($n = 77, P < 0.05$),约 55% 的样品硝态氮浓度超过了我国《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)中 V 类水总氮标准限制($2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)^[41],而平水期无定河流域地表水仅有 4% 的样品硝态氮浓度超过了我国《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)中 V 类水总氮标准限制.

表 2 不同时期河流水化学参数和同位素组成¹⁾

Table 2 Statistics of river water quality parameters in different periods						
日期(年-月)	项目	NO ₃ ⁻ -N	Cl ⁻	δ ¹⁵ N-NO ₃ ⁻	δ ¹⁸ O-NO ₃ ⁻	δ ¹⁸ O-H ₂ O
2019-08	最大值	4.6	297.1	11	13.7	-6.4
	最小值	1.3	12	8.9	7.9	-11.0
	平均值	2.7	79.7	9.7	10.3	-7.8
	标准差	1.2	60	0.9	2.2	1.0
	变异系数	43.2	75.3	9.1	20.9	-12.5
2020-10	最大值	3.3	1 329.9	—	—	0.3
	最小值	0.0	7.5	—	—	-9.9
	平均值	0.6	283.5	—	—	-7.3
	标准差	0.7	383.5	—	—	2.3
	变异系数	117.4	135.3	—	—	30.9
2021-08	最大值	6.2	3 034.6	11.4	15.7	2.8
	最小值	0.2	18.6	0	0.5	-11.0
	平均值	2.6	264.4	7.3	5.1	-6.7
	标准差	1.8	612	3.7	4.5	2.6
	变异系数	67.8	231.5	50.4	88.7	38.2

1) NO₃⁻-N 和 Cl⁻ 浓度单位为 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; δ¹⁵N-NO₃⁻、δ¹⁸O-NO₃⁻ 和 δ¹⁸O-H₂O 单位为 ‰; 变异系数单位为 %; “—” 表示没有相关数据

图 2 为无定河流域地表水硝态氮浓度的时空分布特征. 总体上,无定河流域地表水的 NO₃⁻-N 浓度表现出从上游到下游不断升高的趋势,不同时期硝酸盐浓度均呈现出显著的空间差异(丰水期, $n = 53, P < 0.05$; 平水期, $n = 24, P < 0.05$). 丰水期上游和下游的 $\rho(\text{NO}_3^- \text{-N})$ 范围分别为 $0.2 \sim 6.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.3 \sim 5.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均值分别为 $(1.8 \pm 1.5) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $(3.2 \pm 1.3) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 平水期上游和下游的 $\rho(\text{NO}_3^- \text{-N})$ 范围分别为 $0 \sim 3.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.2 \sim 1.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 浓度平均值分别为 $(0.5 \pm 0.8) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $(0.7 \pm 0.3) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 丰水期和平水期地表水下游硝酸盐浓度均值均显著高于上游($n = 77, P < 0.05$). 纳林河汇入口附近 $\rho(\text{NO}_3^- \text{-N})$ 具有最大值(W8 采样点, $6.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),沿河分布大面积耕地且土壤类型以风沙土为主,水土流失严重,大量的化学氮肥和土壤有机氮经冲刷作用进入河流导致河水硝态氮浓度急剧升高.

2.2 硝酸盐的氮氧同位素分布特征

图 3 为无定河流域地表水 δ¹⁵N-NO₃⁻ 值和 δ¹⁸O-NO₃⁻ 值的空间分布特征. 可以看出,无定河流域上游地表水的 δ¹⁵N-NO₃⁻ 值和 δ¹⁸O-NO₃⁻ 值范围分别为 $0 \sim 11.4\text{‰}$ 和 $0.5\text{‰} \sim 15.7\text{‰}$, 均值分别是 7.3‰ 和 5.1‰ ; 下游地表水的 δ¹⁵N-NO₃⁻ 值和 δ¹⁸O-NO₃⁻ 值范围分别为 $8.9\text{‰} \sim 11.0\text{‰}$ 和 $7.9\text{‰} \sim 13.7\text{‰}$, 均值分别是 9.7‰ 和 10.3‰ . 不同河段 δ¹⁵N-NO₃⁻ 值和 δ¹⁸O-NO₃⁻ 值均呈现出显著的空间差异(δ¹⁵N-NO₃⁻ 值, n

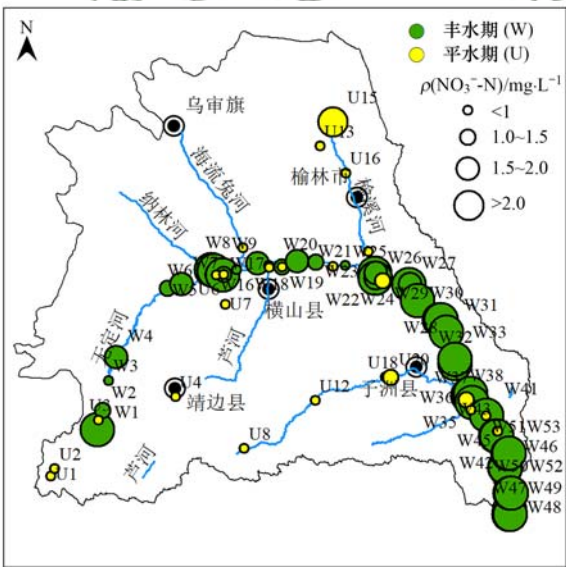


图 2 地表水硝态氮浓度分布示意

Fig. 2 Schematic diagram of the mass concentration distribution of nitrate nitrogen in surface water

$= 11, P < 0.05$; δ¹⁸O-NO₃⁻ 值, $n = 11, P < 0.05$). 总体上,无定河流域地表水的 δ¹⁵N-NO₃⁻ 值表现出从上游到下游不断升高的趋势,表明无定河流域地表水硝酸盐由上游的化肥和土壤有机质贡献为主逐渐转变为污水和粪肥的贡献. δ¹⁵N-NO₃⁻ 最小值位于 T1 (0‰),导致这种现象的原因可能是因为 T1 测样点位于无定河上游的耕地区域,受生活污水的影响较小,受化学氮肥的影响较大. δ¹⁸O-NO₃⁻ 值空间变异较大,T1 和下游样点 δ¹⁸O-NO₃⁻ 值较高,可能受到硝

态氮肥或降水的影响. 上游的 T3 ~ T6 段 $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ 值和 $\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3^-$ 值呈现出相同的变化趋势, 沿河流向逐渐升高, 表明该段硝酸盐污染来源较为单一.

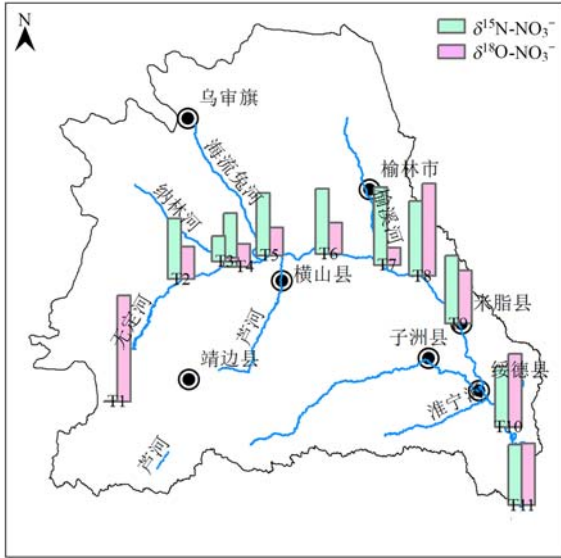


图3 硝酸盐氮氧同位素浓度的空间变化

Fig. 3 Spatial variation in nitrate nitrogen and oxygen isotope concentrations

3 讨论

3.1 河流硝酸盐浓度时空变化的影响因素

无定河流域地表水的硝酸盐浓度存在季节差异, 这与降雨量、下垫面特征(地形、土壤、土地利用类型)和污染源的分布等有关. 无定河流域土壤类型除西北部的毛乌素沙漠为风沙土外, 大部分面积位于黄土区^[42]. 采样点较为集中的黄土丘陵沟壑区和河源梁峁区土壤质地均为黄土, 土层具有松软深厚、质地疏松、通透性强、易崩塌、易遭受水蚀和风蚀等特点. 无定河流域的降水量主要集中在丰水期, 约占全年总量的74%^[32], 强降水产生的快速地表径流冲刷裹挟沿岸土壤, 造成严重的土壤侵蚀. 且黄土为适耕性土壤, 河流沿岸耕地密布. 为提高农作物产量, 大量氮肥的施加增加了土壤中的氮负荷. 根据陕西省统计年鉴, 无定河流域氮肥施用量约为 $17.5 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, 黄绵土的全氮含量范围为 $0.54 \sim 1.74 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$. 因而, 丰水期降水冲刷土壤产生的地表径流溶解大量氮素并带入河流, 导致丰水期河水硝酸盐相比于枯水期更为富集. 以往研究表明, 无定河流域丰水期输沙量占全年总量95%^[32,33]. 虽然降水硝酸盐浓度远低于河水硝酸盐浓度^[43], 进入河流会稀释河水硝酸盐浓度, 然而降水的稀释作用远弱于其引起的水土流失作用. 综上, 黄土的易侵蚀性以及夏季集中的高强度降水是无定河流域丰水期硝酸盐浓度高的主要原因.

空间上, 无定河流域地表水硝酸盐浓度总体上由上游至下游呈现逐渐升高趋势. 这主要是由于城镇及耕地多沿河流排布, 降雨淋溶及径流冲刷沿岸土壤产生的面源污染以及人类活动排放的污水和粪便不断汇入河流, 造成河流氮素负荷逐渐累积, 硝酸盐浓度逐渐升高. 地表水硝酸盐浓度较高的样点主要分布在无定河源头(W1和W8)和无定河下游(W33和W42). W1位于无定河干流的源头, 受到水源地的保护政策, 人类活动影响较小, 但其周围土地利用类型以耕地为主[图1(b)], 农业生产活动对土壤中施加大量氮肥, 大量面源污染源受径流侵蚀作用增加了无定河源头硝酸盐浓度; 且源头的降雨量低于下游[图1(c)], 蒸发作用强, 进一步加剧了无定河源头河水硝酸盐负荷. W8采样点位于纳林河入无定河河口处, 纳林河沿岸分布大面积的耕地, 植被地带属于草地向林地的过渡, 土壤类型以风沙土为主, 农业活动施加的化学氮肥、大量村落城镇以及工厂企业排放的生活污水及粪肥和水土流失产生的非点源氮素, 以直接或间接的方式排入河流增加了纳林河河水的硝酸盐浓度. 无定河下游地表水硝酸盐浓度较高主要是生活污水及粪肥和工业废水排放以及不断累积作用造成的, W33和W42位于城镇的下游, 城镇和耕地沿河分布, 居民区产生的生活污水、养殖场产生的牲畜粪肥、工厂企业排放的工业废水和农业氮肥的流失汇入河流, 从而导致河流地表水硝酸盐浓度上升. 并且下游区域的降雨量和土壤侵蚀程度都高于上游区域[图1(c)], 造成氮素向河水迁移, 从而加速了地表水中氮素的富集^[44].

3.2 硝酸盐来源的定性分析

Cl^- 在生物、物理和化学意义上具有惰性, 不会受到物理、化学和微生物过程的影响, 只有在与其他水源混合时才会发生改变^[45]. 因此, $n(\text{NO}_3^-)$ 、 $n(\text{NO}_3^-)/n(\text{Cl}^-)$ 和 $n(\text{Cl}^-)$ 之间的关系被广泛用于判断流域中硝酸盐的混合过程或生物过程^[46,47]. $n(\text{NO}_3^-)/n(\text{Cl}^-)$ 高, $n(\text{Cl}^-)$ 低, 表明 NO_3^- 主要由农业活动贡献; $n(\text{NO}_3^-)/n(\text{Cl}^-)$ 低, $n(\text{Cl}^-)$ 高, 则表明 NO_3^- 主要受生活污水及粪肥的影响; $n(\text{NO}_3^-)$ 与 $n(\text{Cl}^-)$ 均较低, 表明 NO_3^- 主要来源于土壤氮.

图4为 $n(\text{NO}_3^-)$ 与 $n(\text{Cl}^-)$ 之间的关系和 $n(\text{NO}_3^-)/n(\text{Cl}^-)$ 与 $n(\text{Cl}^-)$ 之间的关系. 不同时期无定河流域污染来源存在空间差异. 丰水期, 无定河流域上游地表水样点主要分布在 $n(\text{Cl}^-)$ 低、 $n(\text{NO}_3^-)$ 以及 $n(\text{NO}_3^-)/n(\text{Cl}^-)$ 高的区域, 表明该时期上游河水样点硝酸盐主要来源为农业面源污染,

如农业化肥施用、农村生活污水排放以及土壤有机氮;部分丰水期上游样点(如 W1 和 W2)分布在 $n(\text{Cl}^-)$ 较高、 $n(\text{NO}_3^-)/n(\text{Cl}^-)$ 低的区域, W1 和 W2 样点位于无定河的源头,受到强烈蒸发作用的影响, $n(\text{Cl}^-)$ 分别为 $85.6 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $57.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, 因而分布区域与其他丰水期样点有所差异. 相比于上游, 下游地表水样点 $n(\text{Cl}^-)$ 较高、 $n(\text{NO}_3^-)$ 和 $n(\text{NO}_3^-)/n(\text{Cl}^-)$ 较低, 表明下游河水样点硝酸盐来源在农业面源污染的基础上, 点源污染占比增加, 如工厂企业废水以及城市生活污水. 平水期无定河流域上游和下游水体样点分布区域较为一致, 硝酸盐污染来源空间差异不明显; 且样点分布范围较广, 表明平水期无定河地表水受到农业面源及城镇生活污水等点源混合作用的影响.

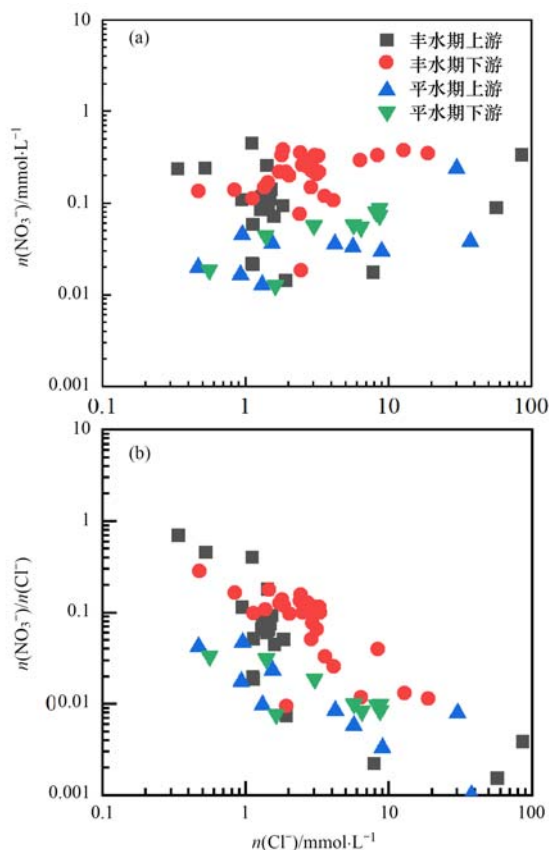


图4 NO_3^- 和 Cl^- 摩尔浓度的关系

Fig. 4 Relationship between NO_3^- and Cl^- molar concentration

进一步借助硝酸盐氮氧双同位素图识别丰水期无定河流域地表水硝酸盐来源(图5). 无定河上游样点的硝酸盐氮氧同位素值分布范围较广, 包括污水和粪肥、土壤氮以及化肥区域, 表明上游河水硝酸盐浓度受到城镇和农村生活污水以及农业面源的共同影响. 其中, 源头的 T1 分布在铵态氮肥和硝态氮肥中间区域, 受到化肥来源影响较大; T3 样点位于化肥和土壤有机氮分布区域内, 相较于 T1 样点其 $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ 值较高, 可能受到土壤有机氮和污水粪肥

的影响; 其余样点主要分布在污水和粪便区域, 其硝酸盐主要以生活污水为主. 总体来看, 无定河上游到下游化学肥料对河水硝酸盐浓度的贡献逐渐降低而污水和粪便对河水硝酸盐浓度的贡献逐渐升高. 无定河下游样点主要分布在生活污水及粪肥区域, 表明无定河下游地表水硝酸盐污染来源主要为城镇生活污水及工厂企业废水.

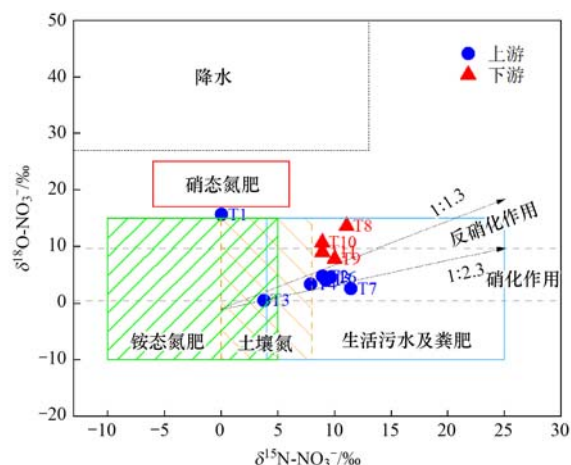


图5 研究区硝酸盐氮氧同位素特征值

Fig. 5 Characteristic values of nitrogen and oxygen isotopes of nitrate in the study area

3.3 硝酸盐的迁移转化

硝化和反硝化之间的同位素分馏会改变 $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ 和 $\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3^-$ 的原始同位素值^[48], 导致硝酸盐氮氧同位素值识别硝酸盐污染来源过程更为复杂. 一般来说, 在硝化作用过程中, 生成 NO_3^- 的氧原子一个来自于大气中的 O_2 , 两个来自于环境水中的氧原子^[9]. 根据大气 O_2 的 $\delta^{18}\text{O}$ 值 (23.5‰) 以及采集水样的 $\delta^{18}\text{O}$ 值范围 ($-11.0\text{‰} \sim 2.8\text{‰}$), 无定河流域发生硝化作用的 $\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3^-$ 值范围为 $0.5 \sim 9.7\text{‰}$. 在图5中, 除了 T1、T8 和 T10 外, 所有水样的 $\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3^-$ 值都在理论硝化的 $\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3^-$ 值范围内, 表明研究区存在明显的硝化作用过程. 水体反硝化作用的发生会导致残余反应底物中 NO_3^- 的 $\delta^{15}\text{N}$ 值随着 NO_3^- 浓度的增加而降低, 使硝酸盐的 $\delta^{15}\text{N}:\delta^{18}\text{O}$ 值介于 $1.3 \sim 2.1$ 之间^[49]. 在本研究中, 仅有无定河上游的部分检测样点 (T2、T4 ~ T6) 的 $\delta^{15}\text{N}:\delta^{18}\text{O}$ 值在 $1.3 \sim 2.1$ 之间. 为进一步识别硝酸盐的转化过程, 绘制了无定河流域 $\ln(\text{NO}_3^- - \text{N})$ 与硝酸盐同位素特征的关系(图6). 若存在反硝化作用过程, $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ 和 $\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3^-$ 值与 $\ln(\text{NO}_3^- - \text{N})$ 应呈显著性负相关关系^[50]. 可以看出, 无定河流域地表水 $\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3^-$ 与 $\ln(\text{NO}_3^- - \text{N})$ 不存在负相关关系; 虽然 $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ 与 $\ln(\text{NO}_3^- - \text{N})$ 存在负相关关系, 但相关性较低 ($R^2 = 0.104$), 因此, 无定河流域地表水反硝化作用过程

并不明显. 综上, 硝化作用是无定河流域地表水体硝酸盐迁移转化的主要生物过程. 因而, MixSIAR

模型输入中不考虑 $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ 和 $\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3^-$ 的分馏系数.

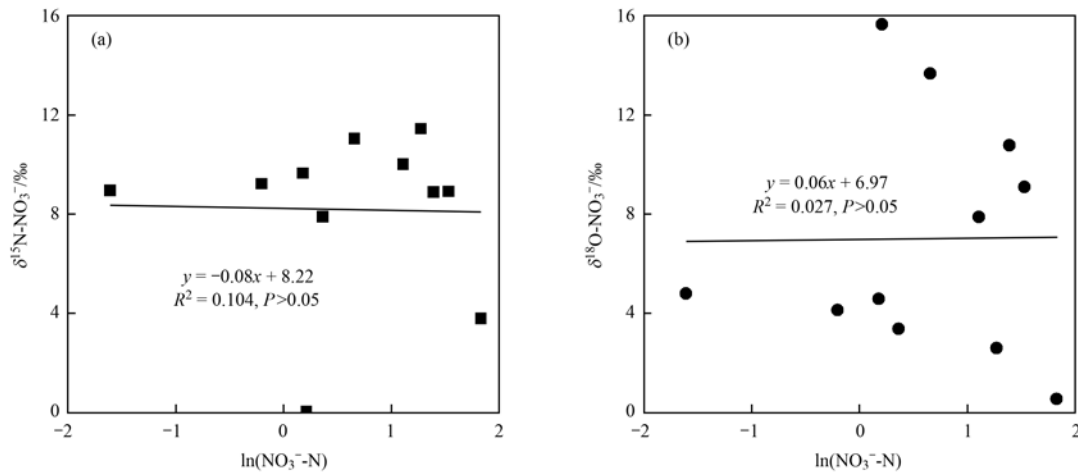


图6 $\ln(\text{NO}_3^- - \text{N})$ 与硝酸盐同位素值关系

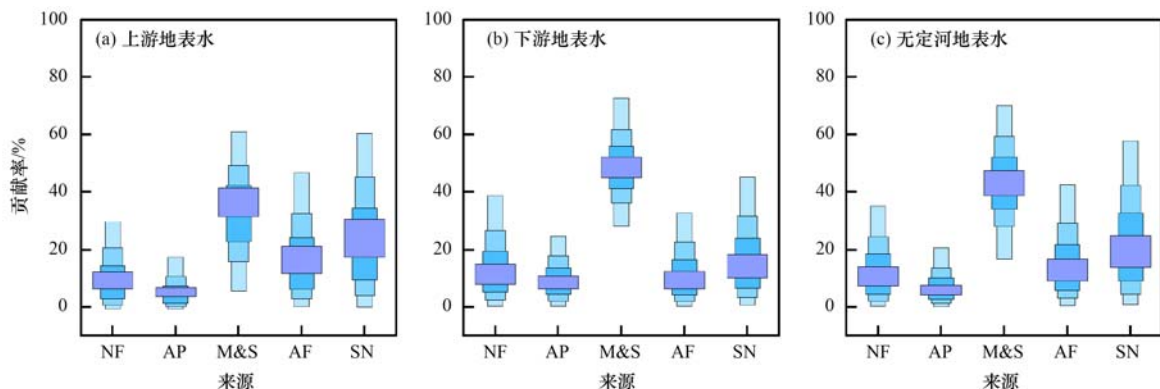
Fig. 6 Relationship between $\ln(\text{NO}_3^- - \text{N})$ and nitrate isotope values

3.4 硝酸盐来源的定量分析

图7为MixSIAR模型无定河流域丰水期地表水硝酸盐污染源贡献率的定量结果. 无定河流域地表水硝酸盐污染源贡献率由大到小依次为: 生活污水及粪肥(43.3%) > 土壤有机氮(22.1%) > 铵态氮肥(15.1%) > 硝态氮肥(12.5%) > 降水(7.0%), 生活污水及粪肥对无定河流域地表水硝酸盐污染贡献最高. 然而, 农业面源中, 化学肥料以及土壤有机氮贡献率之和(49.7%)超过了生活污水及粪肥, 表明无定河流域地表水 NO_3^- 浓度主要受农业面源污染的影响. 这也可以解释, 无定河流域丰水期受到强降水的冲刷和土壤侵蚀作用导致水体硝酸盐浓度高于平水期和枯水期^[18,36,51]. 这与中国部分农业流域具有明显区别, 如长江中下游^[4]、四川盆地^[19]和黄淮海平原^[52]等主要农业区域的河流硝酸盐来源主要受到人类活动的影响, 生活污水及粪肥在硝酸盐

污染源中所占比例超过64%. 相比之下, 无定河流域硝酸盐污染主要受到自然因素如降水及其引发的水土流失作用的影响.

无定河上游地表水硝酸盐污染来源的贡献率由大到小依次为: 生活污水及粪肥(36.7%) > 土壤有机氮(26.5%) > 铵态氮肥(19.0%) > 硝态氮肥(11.5%) > 降水(6.4%), 下游地表水硝酸盐污染来源的贡献率由大到小依次为: 生活污水及粪肥(48.9%) > 土壤有机氮(16.5%) > 硝态氮肥(13.6%) > 铵态氮肥(11.4%) > 降水(9.7%). 化学肥料和土壤有机氮对上游地表水硝酸盐的贡献率更高, 而生活污水及粪肥对下游地表水硝酸盐污染贡献率更高, 表明从上游至下游沿岸人类活动排放的污水和粪便不断汇入河流, 增加了生活污水及粪肥对无定河水体硝酸盐污染的贡献. 这与前面的定性分析结果相互印证. 但总的来看, 化肥和土壤有机氮等农业



由深到浅的箱型图表示25%、50%、75%和95%的置信区间

图7 硝酸盐污染源贡献率

Fig. 7 Contribution rate of nitrate pollution source

面源对无定河流域地表水硝酸盐污染来源影响更大。因而,无定河流域水土流失问题依然严峻,在退耕还林还草等工程措施基础上,积极开展淤地坝工程建设,合理运用荒地及河滩,优化和改善土壤土质,不断提升土地利用效果是减少无定河流域氮素污染来源的重要举措。此外,大力推广测土配方施肥技术,减少化学肥料的施用量,鼓励农民施用有机肥,支持发展高效缓释肥等新型肥料,推广秸秆机械化还田、青黄贮饲料化、微生物腐化、固化炭化和农村沼气池升级等农业农村废弃物的资源化等举措,也能够一定程度上减缓无定河地表水硝酸盐污染。

4 结论

(1)2019年8月、2020年10月和2021年8月无定河流域地表水的 $\rho(\text{NO}_3^- - \text{N})$ 均值分别为 (2.7 ± 1.2) 、 (0.6 ± 0.7) 和 $(2.6 \pm 1.8) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,呈现出显著的时空变异特征。时间上,丰水期地表水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度显著高于平水期;空间上,地表水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度由上游到下游逐渐呈升高趋势,下游地表水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度显著高于上游水体 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度。

(2)降雨径流的冲刷作用是影响无定河流域地表水 NO_3^- 浓度季节变化的主要影响因素,而 NO_3^- 浓度的空间变异受到地形、土壤和土地利用类型等多种因素的共同作用。氮氧同位素以及 $n(\text{NO}_3^-)/n(\text{Cl}^-)$ 与 $n(\text{Cl}^-)$ 关系定性指示硝酸盐来源,结果表明,平水期无定河流域硝酸盐污染来源空间差异不明显,受到农业面源及城镇生活污水等点源混合作用的共同影响;丰水期无定河流域硝酸盐主要污染来源从上游到下游由农业面源污染向点源污染转变,上游地表水硝酸盐污染来源为生活污水和粪肥、化学肥料和土壤有机氮,下游地表水硝酸盐污染来源以城镇生活污水及粪肥为主。

(3)MixSIAR模型对丰水期地表水硝酸盐污染来源的定量计算结果表明,无定河流域地表水硝酸盐污染源贡献率由大到小依次为:生活污水及粪肥(43.3%)>土壤有机氮(22.1%)>铵态氮肥(15.1%)>硝态氮肥(12.5%)>降水(7.0%),水体硝酸盐浓度主要受城镇污水及农业面源污染的影响。不同河段地表水硝酸盐污染源贡献率存在差异,无定河上游化学肥料和土壤有机氮的贡献率高于下游,而无定河下游生活污水及粪肥的贡献率高于上游。因此,减少生活污水和工业废水、加强水土保持以控制农业面源污染是无定河流域水质防控的重点。

参考文献:

[1] Liu X L, Han G L, Zeng J, *et al.* The effects of clean energy production and urbanization on sources and transformation

processes of nitrate in a subtropical river system: insights from the dual isotopes of nitrate and Bayesian model [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, **325**, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.129317.

[2] Shi W M, Zhang Y, Zhang C Q, *et al.* Sources and health risks of nitrate pollution in surface water in the Weihe River watershed, China [J]. *Journal of Mountain Science*, 2022, **19** (8): 2226-2240.

[3] 汪银龙, 冯民权, 董向前. 汾河下游雨季硝酸盐污染源解析 [J]. *环境科学*, 2019, **40** (9): 4033-4041.
Wang Y L, Feng M Q, Dong X Q. Analysis of nitrate pollution sources in the rainy season of the lower Fenhe River [J]. *Environmental Science*, 2019, **40** (9): 4033-4041.

[4] Cao M X, Hu A Y, Gad M, *et al.* Domestic wastewater causes nitrate pollution in an agricultural watershed, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, **823**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.153680.

[5] 李艳利, 孙伟, 杨梓睿. 太子河流域中游地区河流硝酸盐来源及迁移转化过程 [J]. *环境科学*, 2017, **38** (12): 5039-5046.

Li Y L, Sun W, Yang Z R. Identification of nitrate sources and transformation processes in midstream areas: a case in the Taizi River Basin [J]. *Environmental Science*, 2017, **38** (12): 5039-5046.

[6] 赵然, 韩志伟, 申春华, 等. 典型岩溶地下河流域水体中硝酸盐源解析 [J]. *环境科学*, 2020, **41** (6): 2664-2670.

Zhao R, Han Z W, Shen C H, *et al.* Identifying nitrate sources in a typical karst underground river basin [J]. *Environmental Science*, 2020, **41** (6): 2664-2670.

[7] Ji X L, Shu L L, Li J, *et al.* Tracing nitrate sources and transformations using $\Delta^{17}\text{O}$, $\delta^{15}\text{N}$, and $\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3^-$ in a coastal plain river network of eastern China [J]. *Journal of Hydrology*, 2022, **610**, doi: 10.1016/j.jhydrol.2022.127829.

[8] 夏云, 张波涛, 姜德娟. 大沽河溶解态无机氮时空分布特征及来源探讨 [J]. *农业环境科学学报*, 2020, **39** (1): 182-190.

Xia Y, Zhang B T, Jiang D J. Spatiotemporal characteristics and sources of dissolved inorganic nitrogen in the Dagou River, Jiaodong Peninsula, China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, **39** (1): 182-190.

[9] Liu X L, Han G L, Zeng J, *et al.* Identifying the sources of nitrate contamination using a combined dual isotope, chemical and Bayesian model approach in a tropical agricultural river: case study in the Mun River, Thailand [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **760**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.143938.

[10] Ren L S, Cheng L R, Zhang S R, *et al.* Quantifying nitrate pollution sources of the drinking water source area using a Bayesian isotope mixing model in the northeastern suburbs of Beijing, China [J]. *Isotopes in Environmental and Health Studies*, 2021, **57** (4): 350-367.

[11] Zhang X, Zhang Y, Shi P, *et al.* The deep challenge of nitrate pollution in river water of China [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **770**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.144674.

[12] 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.

[13] 张鑫, 张妍, 毕直磊, 等. 中国地表水硝酸盐分布及其来源

- 分析[J]. 环境科学, 2020, **41**(4): 1594-1606.
- Zhang X, Zhang Y, Bi Z L, *et al.* Distribution and source analysis of nitrate in surface waters of China[J]. Environmental Science, 2020, **41**(4): 1594-1606.
- [14] Xuan Y X, Liu G L, Zhang Y Z, *et al.* Factor affecting nitrate in a mixed land-use watershed of southern China based on dual nitrate isotopes, sources or transformations? [J]. Journal of Hydrology, 2022, **604**, doi: 10.1016/j.jhydrol.2021.127220.
- [15] Zhao Y, Dang J H, Wang F. Sources of nitrogen pollution in upstream of Fenhe River reservoir based on the nitrogen and oxygen stable isotope[J]. Journal of Chemistry, 2020, doi:10.1155/2020/6574210.
- [16] Bratek A, Emeis K C, Sanders T, *et al.* Nitrate sources and the effect of land cover on the isotopic composition of nitrate in the catchment of the Rhône River[J]. Isotopes in Environmental and Health Studies, 2020, **56**(1): 14-35.
- [17] Sui Y Y, Ou Y, Yan B X, *et al.* A dual isotopic framework for identifying nitrate sources in surface runoff in a small agricultural watershed, Northeast China[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, **246**, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.119074.
- [18] 李欢玮, 赵广举, 李明, 等. 黄土高原沟壑区典型城郊流域地表水硝酸盐来源示踪[J]. 环境科学, 2023, **44**(2): 761-769.
- Li H W, Zhao G J, Li M, *et al.* Identification of nitrate source of surface water in a typical peri-urban watershed in the tableland of the Loess Plateau, China[J]. Environmental Science, 2023, **44**(2): 761-769.
- [19] 王雨畅, 杨平恒, 张洁茹. 重庆市老龙洞地下河流域硝酸盐来源和生物地球化学过程的识别[J]. 环境科学, 2022, **43**(10): 4470-4479.
- Wang Y Y, Yang P H, Zhang J R. Sources and biogeochemical processes of nitrate in the Laolongdong Karst Underground River Basin, Chongqing[J]. Environmental Science, 2022, **43**(10): 4470-4479.
- [20] Zhang Y, Zhang M J, Qu D Y, *et al.* Water use strategies of dominant species (*Caragana korshinskii* and *Reaumuria soongorica*) in natural shrubs based on stable isotopes in the Loess Hill, China[J]. Water, 2020, **12**(7), doi: 10.3390/w12071923.
- [21] Wu H W, Zhao G Q, Li X Y, *et al.* Identifying water sources used by alpine riparian plants in a restoration zone on the Qinghai-Tibet Plateau: Evidence from stable isotopes [J]. Science of the Total Environment, 2019, **697**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134092.
- [22] Su P Y, Zhang M J, Qu D Y, *et al.* Contrasting water use strategies of *Tamarix ramosissima* in different habitats in the Northwest of Loess Plateau, China[J]. Water, 2020, **12**(10), doi: 10.3390/w12102791.
- [23] Guo Z F, Yan C Z, Wang Z S, *et al.* Quantitative identification of nitrate sources in a coastal peri-urban watershed using hydrogeochemical indicators and dual isotopes together with the statistical approaches[J]. Chemosphere, 2019, **243**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.125364.
- [24] Egbi C D, Anornu G K, Ganyaglo S Y, *et al.* Nitrate contamination of groundwater in the Lower Volta River Basin of Ghana: sources and related human health risks [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2020, **191**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2020.110227.
- [25] 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.
- [26] 张艳玲, 席志军. 榆林市境内无定河流域水质现状评价[J]. 农业工程, 2019, **9**(2): 31-33.
- Zhang Y L, Xi Z J. Assessment of water quality of Wuding River Basin in Yulin city[J]. Agricultural Engineering, 2019, **9**(2): 31-33.
- [27] 李书鉴, 韩晓, 王文辉, 等. 无定河流域地表水地下水的水化学特征及控制因素[J]. 环境科学, 2022, **43**(1): 220-229.
- Li S J, Han X, Wang W H, *et al.* Hydrochemical characteristics and controlling factors of surface water and groundwater in Wuding River Basin[J]. Environmental Science, 2022, **43**(1): 220-229.
- [28] 徐春燕, 张琳琳, 詹牧. 陕西省无定河干流水质现状评价[J]. 陕西水利, 2020, (11): 110-111.
- [29] 杨飞, 易文利, 董奇, 等. 榆林市黄河水系主要河流水质现状评价与分析[J]. 宝鸡文理学院学报(自然科学版), 2018, **38**(1): 71-76.
- Yang F, Yi W L, Dong Q, *et al.* Evaluation and analysis of the water quality of the main rivers in the drainage system of the Yellow River within the territory of Yulin City[J]. Journal of Baoji University of Arts and Sciences (Natural Science), 2018, **38**(1): 71-76.
- [30] 王涛, 徐澜, 胡阳, 等. 陕北无定河流域土壤侵蚀时空演变[J]. 环境科学研究, 2017, **30**(9): 1355-1364.
- Wang T, Xu L, Hu Y, *et al.* Spatial and temporal changes of soil erosion in Wuding River Basin, Shaanxi Province, China [J]. Research of Environmental Sciences, 2017, **30**(9): 1355-1364.
- [31] 李夏隆. 无定河流域稻蟹生态共养技术创新性研究[J]. 现代农业研究, 2020, **26**(3): 114-115.
- Li X L. Innovative research on ecological co-culture technology of rice and crab in Wuding River Basin[J]. Modern Agriculture Research, 2020, **26**(3): 114-115.
- [32] 张萍, 郑明国, 蔡强国, 等. 无定河黄土区降水和产沙的相关性及其时空变异[J]. 水土保持学报, 2020, **34**(1): 8-16.
- Zhang P, Zheng M G, Cai Q G, *et al.* Correlation and spatial-temporal variation of precipitation and sediment production in Wuding River Loess Area [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, **34**(1): 8-16.
- [33] 张译心, 徐国策, 李占斌, 等. 不同时间尺度下流域径流侵蚀功率输沙模型模拟精度[J]. 水土保持研究, 2020, **27**(3): 1-7, 22.
- Zhang Y X, Xu G C, Li Z B, *et al.* Simulation accuracy of runoff erosion power-sediment transfer model at different time scales[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, **27**(3): 1-7, 22.
- [34] 张荷惠子. 基于 Copula 函数的无定河流域输沙量模拟研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2021.
- Zhang H H Z. Study on simulation of sediment load in Wuding River Basin based on copula function [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2021.
- [35] 余欣, 侯素珍, 李勇, 等. 黄河无定河流域“2017.7.26”洪水泥沙来源辨析[J]. 水利水运工程学报, 2019, (6): 31-37.
- Yu X, Hou S Z, Li Y, *et al.* Identifying sediment sources in Wudinghe River during “7.26” flood in 2017[J]. Hydro-Science and Engineering, 2019, (6): 31-37.
- [36] Ji W J, Xiao J, Toor G S, *et al.* Nitrate-nitrogen transport in streamwater and groundwater in a loess covered region: Sources, drivers, and spatiotemporal variation[J]. Science of the Total Environment, 2021, **761**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.

- 143278.
- [37] 夏云. 基于稳定同位素的海岸带典型河流硝酸盐污染来源解析[D]. 青岛: 青岛大学, 2020.
- [38] 霍伟杰. 基于氢氧稳定同位素的西南岩溶断陷盆地石漠化地区苹果树水分来源及时空变化特征[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020.
- Huo W J. Using hydrogen and oxygen isotope to reveal water sources and spatio-temporal variations of apple tree in rocky desertification mountainous area in Karst Graben Basin, Southwest China[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2020.
- [39] 裴东艳, 谢磊, 徐斌, 等. 基于氮氧同位素技术的黄河上游清水河硝酸盐来源解析[J]. 中国环境科学, 2022, doi: 10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20220507.016.
- Pei D Y, Xie L, Xu B, *et al.* Analysis of nitrate sources in the Qingshui River of the Yellow River based on nitrogen and oxygen isotope technique[J]. China Environmental Science, 2022, doi: 10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20220507.016.
- [40] 高彦伟, 陈殿友. 基于Kruskal-Wallis检验的地下水污染质分布的研究——以长春地区为例[J]. 地球物理学进展, 2011, 26(6): 2249-2254.
- Gao Y W, Chen D Y. Study on the distribution of groundwater contamination based on Kruskal-Wallis Test Method: taking Changchun area as an example[J]. Progress in Geophysics, 2011, 26(6): 2249-2254.
- [41] GB 3838-2002, 地表水环境质量标准[S].
- [42] 孙倩. 无定河流域水沙变化归因分析[D]. 西安: 西安理工大学, 2018.
- Sun Q. The attribution analysis of water and sediment change in the Wudinghe River Basin [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2018.
- [43] 侯思宇, 邱晨晨, 丁铖, 等. 西安市降水化学组成及来源解析[J]. 环境化学, 2020, 39(9): 2384-2394.
- Hou S Y, Qiu C C, Ding C, *et al.* Analysis on chemical composition of precipitation and its source apportionment in Xi'an City [J]. Environmental Chemistry, 2020, 39(9): 2384-2394.
- [44] Tian H Q, Lu C Q, Melillo J, *et al.* Food benefit and climate warming potential of nitrogen fertilizer uses in China [J]. Environmental Research Letters, 2012, 7(4), doi: 10.1088/1748-9326/7/4/044020.
- [45] 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.
- [46] 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.
- [47] Yue F J, Li S L, Liu C Q, *et al.* Using dual isotopes to evaluate sources and transformation of nitrogen in the Liao River, Northeast China[J]. Applied Geochemistry, 2013, 36: 1-9.
- [48] 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.
- [49] Jin Z X, Wang J F, Chen J G, *et al.* Identifying the sources of nitrate in a small watershed using $\delta^{15}\text{N}$ - $\delta^{18}\text{O}$ isotopes of nitrate in the Kelan Reservoir, Guangxi, China [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2020, 297, doi: 10.1016/j.agee.2020.106936.
- [50] Chen J Y, Tang C Y, Yu J J. Use of ^{18}O , ^2H and ^{15}N to identify nitrate contamination of groundwater in a wastewater irrigated field near the city of Shijiazhuang, China[J]. Journal of Hydrology, 2006, 326(1-4): 367-378.
- [51] 任奕蒙, 岳甫均, 徐森, 等. 利用氮氧同位素解析赤水河流域水体硝酸盐来源及其时空变化特征[J]. 地球与环境, 2019, 47(6): 820-828.
- Ren Y M, Yue F J, Xu S, *et al.* Temporal and spatial variation of nitrate sources in the Chishui River watershed based on isotope approach[J]. Earth and Environment, 2019, 47(6): 820-828.
- [52] Kang X Q, Niu Y, Yu H, *et al.* Effect of rainfall-runoff process on sources and transformations of nitrate using a combined approach of dual isotopes, hydrochemical and Bayesian model in the Dagang River basin[J]. Science of the Total Environment, 2022, 837, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.155674.

CONTENTS

Research Status and Trend Analysis of Environmental and Health Risk and Control of Persistent, Mobile, and Toxic Chemicals	ZHANG Shao-xuan, CHEN An-na, CHEN Cheng-kang, <i>et al.</i> (3017)
Assessment of the Multidimensional Performances of Food Waste Utilization Technologies in China	YANG Guang, SHI Bo-fen, ZHOU Chuan-bin (3024)
Spatial Network of Urban Heat Environment in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration Based on MSPA and Circuit Theory	QIAO Zhi, CHEN Jia-yue, WANG Nan, <i>et al.</i> (3034)
Relationship Between Urban Spatial Pattern and Thermal Environment Response in Summer: A Case Study of Hefei City	CHEN Yuan-yuan, YAO Xia-mei, OU Chun, <i>et al.</i> (3043)
Assessment of Emission Reduction Effect of Major Air Pollution Control Measures on PM _{2.5} Concentrations During 13th Five-Year Period in Tianjin	XIAO Zhi-mei, XU Hong, CAI Zi-ying, <i>et al.</i> (3054)
Effect of Clean Heating on Carbonaceous Aerosols in PM _{2.5} During the Heating Period in Baoding	LUO Yu-qian, ZHANG Kai, ZHAO Yu-xi, <i>et al.</i> (3063)
Transport Influence and Potential Sources of PM _{2.5} Pollution for Nanjing	XIE Fang-jian, ZHENG Xin-mei, DOU Tao-tao, <i>et al.</i> (3071)
Impact of Atmospheric Circulation Patterns on Ozone Changes in the Pearl River Delta from 2015 to 2020	WANG Yao, LIU Run, XIN Fan (3080)
Effects of Tropical Cyclones on Ozone Pollution in Hainan Island	FU Chuan-bo, DAN Li, TONG Jin-he, <i>et al.</i> (3089)
Analysis of Causes and Sources of Summer Ozone Pollution in Rizhao Based on CMAQ and HYSPLIT Models	LIN Xin, TONG Ji-long, WANG Yi-fan, <i>et al.</i> (3098)
Health Benefit Evaluation for PM _{2.5} as Well as O ₃ - _{8h} Pollution Control in Chengdu, China from 2016 to 2020	ZHANG Ying, TIAN Qi-qi, WEI Xiao-yu, <i>et al.</i> (3108)
Impacts of COVID-19 Lockdown on Air Quality in Shenzhen in Spring 2022	LIU Chan-fang, ZHANG Ao-xing, FANG Qing, <i>et al.</i> (3117)
Emission Inventory of Airborne Pollutants from Biomass Combustion in Guizhou Province	WANG Yan-ni, YANG Jing-ting, HUANG Xian-feng, <i>et al.</i> (3130)
Main Chemical Components in Atmospheric Precipitation and Their Sources in Xi'an	ZHOU Dong, HUANG Zhi-pu, LI Si-min, <i>et al.</i> (3142)
Distribution, Respiratory Exposure, and Traceability of Atmospheric Microplastics in Yichang City	LIU Li-ming, WANG Chao, GONG Wen-wen, <i>et al.</i> (3152)
Hydrochemical Evolution in the Yarlung Zangbo River Basin	JIANG Ping, ZHANG Quan-fa, LI Si-yue (3165)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Nitrate in Surface Water of Wuding River Basin	XU Qi-feng, XIA Yun, LI Shu-jian, <i>et al.</i> (3174)
Seasonal Variation Characteristics and Pollution Assessment of Heavy Metals in Water and Sediment of Taipu River	LUO Peng-cheng, TU Yao-jen, SUN Ting-ting, <i>et al.</i> (3184)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics in Beiyun River Basin in Beijing	JIANG Bao, SUI Shan-shan, SUN Cheng-yi, <i>et al.</i> (3198)
Tracking Riverine Nitrate Sources and Transformations in the Yiluo River Basin by Nitrogen and Oxygen Isotopes	GUO Wen-jing, ZHANG Dong, JIANG Hao, <i>et al.</i> (3206)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of PPCPs in Surface Water and Sediments of Lakes in the Lower Reaches of the Huaihe River	WU Yu-sheng, HUANG Tian-yin, ZHANG Jia-gen, <i>et al.</i> (3217)
Characteristics and Driving Mechanisms of Shallow Groundwater Chemistry in Xining City	LIU Chun-yan, YU Kai-ning, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (3228)
Groundwater Pollution Risk Assessment in Plain Area of the Yarkant River Basin	YAN Zhi-yun, ZENG Yan-yan, ZHOU Jin-long, <i>et al.</i> (3237)
Composition Structure and Influence Factors of Bacterial Communities in the Miyun Reservoir	CHEN Ying, WANG Jia-wen, LIANG En-hang, <i>et al.</i> (3247)
Photo-Degradation Mechanism and Pathway for Tetracycline in Simulated Seawater Under Irradiation of Visible Light	XU Heng-tao, FU Xiao-hang, FENG Wei-hua, <i>et al.</i> (3260)
Adsorption Characteristics and Mechanism of Ammonia Nitrogen in Water by Nano Zero-valent Iron-modified Biochar	CHEN Wen-jing, SHI Jun-ling, LI Xue-ting, <i>et al.</i> (3270)
Removal Performance and Mechanism of Potassium Permanganate Modified Coconut Shell Biochar for Cd(II) and Ni(II) in Aquatic Environment	ZHANG Feng-zhi, WANG Dun-qiu, CAO Xing-feng, <i>et al.</i> (3278)
Phosphorus Adsorption in Water and Immobilization in Sediments by Lanthanum-modified Water Treatment Sludge Hydrochar	HE Li-wen, CHEN Yu, SUN Fei, <i>et al.</i> (3288)
Factors Affecting Nitrate Concentrations and Nitrogen and Oxygen Isotope Values of Effluents from Waste Water Treatment Plant	ZHANG Dong, GE Wen-biao, ZHAO Ai-ping, <i>et al.</i> (3301)
Effects of Wastewater Treatment Processes on the Removal Efficiency of Microplastics Based on Meta-analysis	FU Li-song, HOU Lei, WANG Yan-xia, <i>et al.</i> (3309)
Assessment of Critical Loads of Nitrogen Deposition in Natural Ecosystems of China	HUANG Jing-wen, LIU Lei, YAN Xiao-yuan, <i>et al.</i> (3321)
Impacts of Climate Change and Human Activities on NDVI Change in Eastern Coastal Areas of China	JIN Yan-song, JIN Kai, WANG Fei, <i>et al.</i> (3329)
Ecosystem Carbon Storage in Hangzhou Bay Area Based on InVEST and PLUS Models	DING Xue, WANG Liu-zhu, GUI Feng, <i>et al.</i> (3343)
Soil Stoichiometry Characterization in the Oasis-desert Transition Zone of Linze, Zhangye	SUN Xue, LONG Yong-li, LIU Le, <i>et al.</i> (3353)
Vertical Differences in Grassland Bacterial Community Structure During Non-Growing Season in Eastern Ulansuhai Basin	LI Wen-bao, ZHANG Bo-yao, SHI Yu-jiao, <i>et al.</i> (3364)
Distribution Pattern of Bacterial Community in Soil Profile of <i>Larix principis-rupprechtii</i> Forest in Luya Mountain	MAO Xiao-ya, LIU Jin-xian, JIA Tong, <i>et al.</i> (3376)
Effects of Vegetation Types on Carbon Cycle Functional Genes in Reclaimed Soil from Open Pit Mines in the Loess Plateau	ZHAO Jiao, MA Jing, ZHU Yan-feng, <i>et al.</i> (3386)
Effects of Biochar Application on Soil Bacterial Community Diversity and Winter Wheat Growth in Wheat Fields	YAO Li-ru, LI Wei, ZHU Yuan-zheng, <i>et al.</i> (3396)
Effects of Different Planting Years of <i>Dendrocalamus brandisii</i> on Soil Fungal Community	ZHU Shu-hong, HUI Chao-mao, ZHAO Xiu-ting, <i>et al.</i> (3408)
Effects of Biochar Amendment on N ₂ O Emission and Its Functional Genes in Pepper Growing Soil in Tropical Areas	CHEN Qi-qi, WANG Zi-jun, CHEN Yun-zhong, <i>et al.</i> (3418)
Effects of Mulching and Application of Organic and Chemical Fertilizer on Greenhouse Gas Emission and Water and Nitrogen Use in Summer Maize Farmland	JIANG Hong-li, LEI Qi, ZHANG Biao, <i>et al.</i> (3426)
Effects of Different Types of Plastic Film Mulching on Soil Quality, Root Growth, and Yield	MU Xiao-guo, GAO Hu, LI Mei-hua, <i>et al.</i> (3439)
Pollution Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in Atmospheric Deposition in a Lead-zinc Smelting City Based on PMF Model	CHEN Ming, WANG Lin-ling, CAO Liu, <i>et al.</i> (3450)
Characterization and Health Risk of Heavy Metals in PM _{2.5} from Road Fugitive Dust in Five Cities of Yunnan Province	HAN Xin-yu, GUO Jin-yuan, SHI Jian-wu, <i>et al.</i> (3463)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Dusts and Surrounding Green Land Soils from Yellow River Custom Tourist Line in Lanzhou	LI Jun, LI Kai-ming, WANG Xiao-huai, <i>et al.</i> (3475)
Source Apportionment and Pollution Assessment of Soil Heavy Metal Pollution Using PMF and RF Model: A Case Study of a Typical Industrial Park in Northwest China	GAO Yue, LÜ Tong, ZHANG Yun-kai, <i>et al.</i> (3488)
Source Analysis of Soil Heavy Metals in Agricultural Land Around the Mining Area Based on APCS-MLR Receptor Model and Geostatistical Method	ZHANG Chuan-hua, WANG Zhong-shu, LIU Li, <i>et al.</i> (3500)
Source Analysis of Heavy Metals in Typical Farmland Soils Based on PCA-APCS-MLR and Geostatistics	WANG Mei-hua (3509)
Characteristics and Risk Evaluation of Heavy Metal Contamination in Paddy Soils in the Three Gorges Reservoir Area	LIU Ya-jun, LI Cai-xia, MEI Nan, <i>et al.</i> (3520)
Health Risk Assessment and Environmental Benchmark of Heavy Metals in Cultivated Land in Wanjiang Economic Zone	LIU Hai, WEI Wei, SONG Yang, <i>et al.</i> (3531)
Evaluation and Source Analysis of Soil Heavy Metal Pollution in a Planting Area in Wanquan District, Zhangjiakou City	AN Yong-long, YIN Xiu-lan, LI Wen-juan, <i>et al.</i> (3544)
Heavy Metal Concentration, Source, and Pollution Assessment in Topsoil of Chuzhou City	TANG Jin-lai, ZHAO Kuan, HU Rui-xin, <i>et al.</i> (3562)
Analysis on the Distribution Characteristics and Influence Mechanism of Migration and Transformation of Heavy Metals in Mining Wasteland	WEI Hong-bin, LUO Ming, XIANG Lei, <i>et al.</i> (3573)
Ecological Risk Assessment and Source Apportionment of Heavy Metals in Mineral Resource Base Based on Soil Parent Materials	WEI Xiao-feng, SUN Zi-jian, CHEN Zi-ran, <i>et al.</i> (3585)
Enrichment Characteristics of Heavy Metals and Health Risk in Different Vegetables	QI Hao, ZHUANG Jian, ZHUANG Zhong, <i>et al.</i> (3600)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Soil and Wheat Grain in the Typical Sewage Irrigated Area of Shandong Province	WANG Fei, FEI Min, HAN Dong-nui, <i>et al.</i> (3609)
Prediction of Cadmium Uptake Factor in Wheat Based on Machine Learning	NIU Shuo, LI Yan-ling, YANG Yang, <i>et al.</i> (3619)