

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

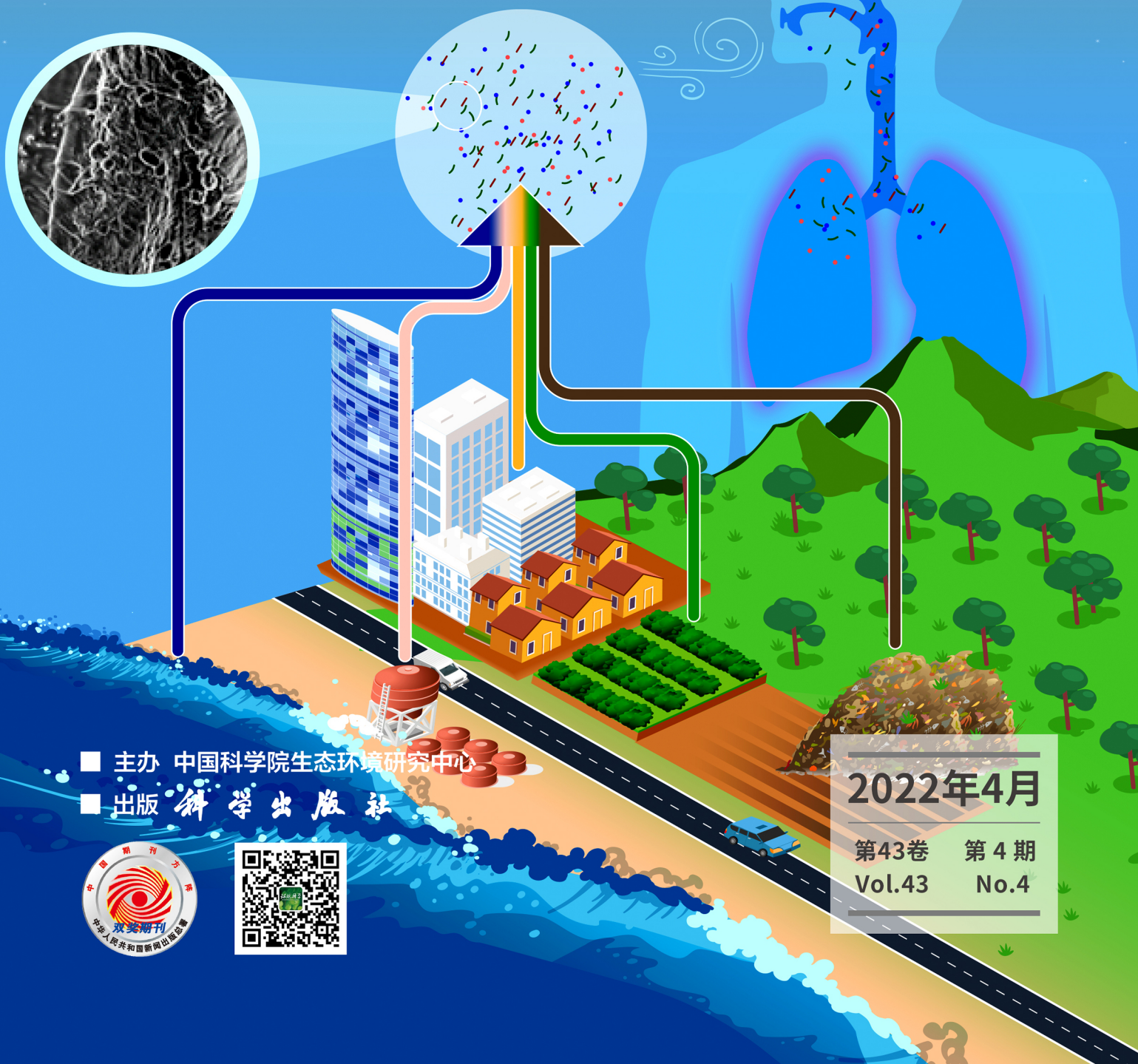
ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

大连海岸带夏、秋季大气沉降(微)塑料的赋存特征及其表面生物膜特性

涂晨, 田媛, 刘颖, 张馨宁, 骆永明



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年4月

第43卷 第4期
Vol.43 No.4

目次

2015~2019年河南省PM _{2.5} 时空特征与驱动因素分析	葛昱序, 刘岩, 杨洪, 郭恒亮 (1697)
郑州市大气PM _{2.5} 中重金属的污染特征、来源及健康风险评估: 基于高分辨数据	曲光辉, 孙俊苹, 王申博, 姜楠, 李利萍, 刘洋, 陈红阳, 马双良 (1706)
宁波市春节期间水溶性离子污染来源和特征分析	杨梦蓉, 潘勇, 黄仲文, 张晶晶, 黄显军, 何萌萌, 肖航 (1716)
上海城区PM _{2.5} 中有机组分及硝基芳香化合物分布特征	庄旻, 马英歌, 程玉璜, 周敏, 戴海夏, 黄成, 郁建珍, 朱书慧, 乔利平, 童张法 (1725)
南京北郊大气细粒子硝基苯酚类化合物污染特征与来源	陈美娟, 钱姿合, 顾陈娟, 张书萌, 刘智艺, 王新峰, 盖鑫磊 (1738)
春节与疫情管控期间珠三角VOCs的组成和来源变化	江明, 袁鸾, 温丽容, 张莹, 方洪波, 杨满芽, 李成柳 (1747)
重庆市主要工业源VOCs组分排放清单及其臭氧生成潜势	李陵, 李振亮, 方维凯, 王晓宸, 蒲茜, 汪凌韬, 袁睿, 张卫东, 翟崇治 (1756)
珠三角石化园区VOCs排放特征及影响评价	张雪驰, 沙青娥, 陆梦华, 王毓铮, 饶思杰, 明桂英, 李勤勤, 吴淑珠, 郑君瑜 (1766)
基于隧道测试的机动车VOCs排放特征及源解析	刘鑫会, 朱仁成, 金博强, 梅慧, 祖雷, 尹沙沙, 张瑞芹, 胡京南 (1777)
基于多通道分布式VOCs在线监测质谱系统精准识别企业污染源	韦啸, 张永杰, 王沛涛, 洪燕, 夏瑞, 高伟 (1788)
基于SOA和O ₃ 生成潜势的杭州市PM _{2.5} 和O ₃ 协同控制	林旭, 严仁婧, 金嘉佳, 许凯儿 (1799)
超低排放燃煤电厂中湿式电除尘器对可凝结颗粒物排放特性的影响	王鹏程, 袁畅, 梁胜文, 蒋鹭翔, 成海容, 许睿光, 虞晓晗, 王祖武 (1808)
西安市住宅室内空气污染物实测分析与叠加效应	王秀茹, 樊灏, 范洁, 沈振兴 (1814)
大连海岸带夏、秋季大气沉降(微)塑料的赋存特征及其表面生物膜特性	涂晨, 田媛, 刘颖, 张馨宁, 骆永明 (1821)
基于在线观测本地因子的长三角家禽养殖氨排放时空分布特征	高宗源, 徐昶, 倪远之, 沈根祥, 苗文亮, 王振旗, 付侃, 钱晓雍, 曹国民 (1829)
西宁市农牧源氨排放清单及其分布特征	杨益, 姬亚芹, 高玉宗, 林孜, 林宇, 马妍 (1844)
“三水”统筹视角下京津冀地区城市水生态环境保护策略分析	廖雅, 侯晓妹, 任晓红 (1853)
中国居民饮用水镉暴露非致癌风险的年龄分层权重	秦宁, 阿依博塔·吐尔逊别克, 刘运炜, 侯荣, 徐翔宇, 官家丞, 段小丽 (1863)
新疆博尔塔拉河流域平原区地表水与地下水水化学特征及转化关系	雷米, 周金龙, 张杰, 陈亚鹏, 滕杰, 吴彤, 徐东升, 孙英, 纪媛媛 (1873)
珠江源区小黄泥河流域地表水水化学组成特征及控制因素	涂春霖, 尹林虎, 和成忠, 寸得欣, 马一奇, 令狐昌卫 (1885)
河套灌区浅层地下水NO ₃ ⁻ -N时空变化及驱动因素	袁宏颖, 杨树青, 张万峰, 王波, 韩天凯, 丁雪华 (1898)
盐城地区地下水溶质来源及其成因分析	王建, 张华兵, 许君利, 李永山 (1908)
白洋淀不同水体氢氧同位素特征及其指示意义	王雨山, 尹德超, 祁晓凡, 徐蓉桢 (1920)
东部地区大型湖库有色可溶性有机物来源组成及潜在驱动因素	陈丽丽, 肖启涛, 俞晓琴, 陈慧敏, 周蕾, 周永强, 韩龙飞 (1930)
松花湖沉积物溶解性有机质荧光光谱特性	程云轩, 赵可, 张越, 张渝婷, 焦立新 (1941)
区域土地利用类型对水源水中溶解性有机物丰度和荧光组分的影响	高静, 蒲晓, 张玉虎, 程红光, 张瑞宁, 刘训良, 董雪, 许新瑶 (1950)
南北水调东线枢纽湖泊表层水体甲烷释放特征及潜在影响因素	朱俊羽, 彭凯, 李宇阳, 俞晓琴, 陈慧敏, 周蕾, 周永强, 丁艳青 (1958)
千岛湖水体中邻苯二甲酸酯(PAEs)的分布特征及健康风险评价	弥启欣, 国晓春, 卢少勇, 邓义祥, 卢洪斌, 李响, 刘晓贺, 陈金明 (1966)
蓝藻越冬期湖湾沉积物磷吸附特征和释放风险	靳郑海, 涂成琪, 王书航, 陈俊伊, 卢昶雨, 黄威 (1976)
基于植物多样性的北京市湿地生态质量评价	李果, 孙光, 赵梓伊, 刘冬梅, 肖能文, 赵志平, 罗遵兰 (1988)
小清河专项治理对莱州湾环境和浮游植物的影响	张晶晶, 王玉珏, 李凡, 刘珂, 王英, 于洋, 高彦洁, 肖晓彤, 吕振波 (1997)
不同曝气方式对人工湿地细菌多样性、代谢活性及功能的影响	王飞鹏, 黄亚玲, 张瑞瑞, 岳琛, 李飞翔, 张超月, 穆景利 (2007)
南宁市老城区降雨径流溯源及污染特征分析	岳桢桢, 李一平, 周玉璇, 郑可, 于珊, 伍彬 (2018)
老化作用对微塑料吸附镉的影响及其机制	王俊杰, 陈晓晨, 李权达, 金成俊, 黄艺佳, 范露健, 张剑宇, 刘宪华, 徐开钦 (2030)
碳化泡沫负载Co ₃ O ₄ 活化过硫酸盐降解罗丹明B	王渊源, 阎鑫, 艾涛, 李卓, 牛艳辉 (2039)
低总氮浓度下Fe ²⁺ 促进ANAMMOX生物膜反应器脱氮	郑旭文, 秦嘉富, 汪晓军, 陈浩川, 朱梓静, 陈振国 (2047)
污水管道增强通风作用下臭气气液传质特性	杨洲, 张志强, 杨静, 卢金锁 (2055)
长江经济带工业区土壤重金属污染特征与评价	张义, 周心功, 曾晓敏, 冯娇, 刘玉荣 (2062)
中国北方典型设施菜地土壤稀土元素分布特征及环境意义	王祖伟, 刘雅明, 王子璐, 苗钰婷 (2071)
贵州省典型铅锌矿区潜在有毒元素(PTEs)物源甄别、生态风险评价及控制因素	张富贵, 彭敏, 贺灵, 马宏宏 (2081)
地质高背景与污染叠加区不同土地利用方式下土壤重金属分布特征	王雪雯, 刘鸿雁, 顾小凤, 涂宇, 于恩江, 吴攀 (2094)
矿区周边农田土壤重金属分布特征及污染评价	王海洋, 韩玲, 谢丹妮, 胡慧娟, 刘志恒, 王祯 (2104)
农田-泥炭藓系统重金属富集特征与生态风险评价	朱迪, 张朝晖, 王智慧 (2115)
安顺市土壤pH空间变异及影响因素分析	陈清霞, 陆晓辉, 涂成龙 (2124)
方解石基组配钝化剂与低积累玉米协同修复效果	任超, 任或仲, 李竞天, 王浩, 朱利文, 肖建辉, 赵瑞, 杜倩倩 (2133)
伯克氏菌Y4对水稻幼苗损伤和镉吸收的影响	张雅荟, 刘月敏, 王常荣, 刘雅萍, 庞杰, 黄永春, 刘仲齐, 张长波 (2142)
我国长江中下游平原典型稻田含碳温室气体通量变化特性	刘硕, 甄晓杰, 刘钢, 冯兆忠 (2151)
地膜覆盖和生物炭添加对菜地N ₂ O排放的影响	胡剑, 江长胜, 陈鑫童, 熊艳芳, 郝庆菊 (2163)
氮肥运筹对稻田CH ₄ 和N ₂ O排放的影响	郑梅群, 刘娟, 姜培坤, 吴家森, 李永夫, 李松果 (2171)
松花江下游滨岸带典型植被根际土壤细菌群落结构与功能多样性	王露莹, 孙慧珍, 杨雪 (2182)
棉秆还田对咸水滴灌棉田土壤酶活性和细菌群落结构多样性的影响	周永学, 陈静, 李远, 侯振安, 闫伟 (2192)
pH对水稻土全程氨氧化细菌丰度和群落结构组成影响	马瑞, 赵永鹏, 王智慧, 蒋先军 (2204)
生物炭对紫色土坡耕地侵蚀性耕层土壤有机碳的影响	张健乐, 曾小英, 史东梅, 倪书辉, 夏蕊, 王荣浩 (2209)
有机肥替代化肥对旱地黄壤有机碳矿化及活性有机碳的影响	林仕芳, 王小利, 段建军, 皮义均, 郭琴波, 龙大勇, 徐彬, 杨宏伟 (2219)
九龙江河口潮滩湿地土壤有机碳储量、活性组分及稳定性沿淹水梯度的分布特征	黄小清, 全川, 罗敏, 杨洋, 谭凤凤, 潘哲妍, 刘娜, 陈欣, 黄佳芳 (2226)
碳中和战略下煤矿区生态碳汇体系构建及功能提升展望	刘祥宏, 阎永军, 刘伟, 黄占斌 (2237)
《环境科学》征订启事(1929)	《环境科学》征稿简则(1975)
信息(1996, 2029, 2080)	

河套灌区浅层地下水 NO_3^- -N时空变化及驱动因素

袁宏颖¹, 杨树青^{1*}, 张万锋¹, 王波¹, 韩天凯², 丁雪华¹

(1. 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018; 2. 巴彦淖尔市水利科学研究所, 巴彦淖尔市 015000)

摘要: 为探明河套灌区地下水硝酸盐污染现状、时空演变特征和主要影响因素, 选择乌拉特灌域为研究区, 采用统计分析、Piper 三线图、相关分析和离子比值等方法, 探究了该地区地下水硝酸盐质量浓度时空变化格局和主要驱动因素。结果表明, 乌拉特灌域地下水氮素主要以 NO_3^- -N为主, $\rho(\text{NO}_3^-$ -N)存在极高值($60.00 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 超标率达 10.50%; 时间分布: 8 月地下水 $\rho(\text{NO}_3^-$ -N)最高(平均值为 $6.61 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 10 月($6.22 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)和 11 月($6.25 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)次之, 3 月(平均值为 $1.77 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)最小, 土壤中 NO_3^- -N在降雨和灌溉驱动作用影响下, 下渗至地下水, 呈现出丰水期和灌溉集中期高于其它时期的特征; 空间分布: 灌域西南部($8.87 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) > 西北部($4.25 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) > 东部($0.89 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 主要原因是不同地区地质条件、土地利用和生活垃圾堆放等因素导致; 另外, 研究区地下水 NO_3^- -N浓度与地下水埋深和氧化还原条件密切相关, 受水化学离子浓度的影响相对较小。因此, 摸清地下水氮素污染时空分布特征和主要来源, 可为科学施肥和地下水硝酸盐污染控制, 及用水安全提供科学依据。

关键词: 浅层地下水; 硝酸盐; 水化学; 时空变化; 影响因素

中图分类号: X143 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)04-1898-10 DOI: 10.13227/j.hjkk.202107187

Temporal and Spatial Variation Characteristics and Driving Factors of Nitrogen of Shallow Groundwater in Hetao Irrigation District

YUAN Hong-ying¹, YANG Shu-qing^{1*}, ZHANG Wan-feng¹, WANG Bo¹, HAN Tian-kai², DING Xue-hua¹

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China; 2. Institute of Water Resources of Bayannur, Bayannur 015000, China)

Abstract: As an important food production area in the north of China, the Hetao plain is extremely vulnerable to nitrate pollution caused by agricultural production activities and additional factors. Thus, it is of great significance for the environmental protection and rational use of groundwater to detect the current situation of groundwater nitrate pollution, temporal and spatial evolution characteristics, and main influencing factors in the Hetao irrigation district. We selected the Wulate irrigation area as the study area, and the characteristics of temporal and spatial changes in groundwater nitrate concentration and the main influencing factors in this area were explored. We used statistical analysis to analyze the nitrogen content of groundwater in the study area, and the Piper three-line diagram was used to explore the characteristics of chemical composition and evolution; furthermore, we used ion ratio and correlation analysis methods to explore the source of NO_3^- -N in groundwater. The results showed that NO_3^- -N was the main existing form of nitrogen in the Wulate irrigation area, and its concentration varied from 0.01 to $60.00 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, with an exceeding standard rate of 10.50%. In terms of time, the characteristic of time change was that the NO_3^- -N concentration in August of groundwater was the highest (average $6.61 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), followed by that in October ($6.22 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) and November ($6.25 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), and that in March (average value of $1.77 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) was the lowest. With the influence of rainfall and irrigation, the NO_3^- -N in the soil was infiltrated into the groundwater, showing the characteristic that wet season and concentrated irrigation periods were higher than those in other periods. Spatially, it appeared as southwest ($8.87 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) > northwest ($4.25 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) > east ($0.89 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), mainly due to the original geological conditions, land use, and domestic waste stacking. In addition, the concentration of NO_3^- -N of groundwater in the study area was closely related to the depth of groundwater and redox conditions but was relatively less affected by the concentration of water chemical ions. Therefore, identifying the temporal and spatial distribution characteristics and main sources of groundwater nitrate pollution can provide a scientific basis for scientific fertilization, groundwater nitrate pollution control, and water safety.

Key words: shallow groundwater; nitrate; water chemistry; temporal and spatial changes; influencing factors

近年来,地下水硝酸盐污染已成为环境热点问题^[1,2]。氮肥作为植物生长的重要保证,农业生产中为实现作物高产而大量施氮^[3],但过量氮肥未被作物全部吸收,反而在土壤不同土层中产生盈余,随土壤水下渗到地下水^[4],或随地表水流入河流湖泊,导致地下水硝态氮污染或地表水富营养化^[5]。饮用水中过量硝酸盐会对人体机能产生损伤,甚至提高癌症的发病率^[6],地表水中过量氮会导致鱼类死亡率较高^[7]。据统计,我国北方农业集中地区,每年氮肥施用量已超过 $500 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ^[8]。吕晓立等^[9]的研究分析珠江三角洲地区地下水硝酸盐污染现状和主

要影响因素发现,该地区地下水硝酸盐超标率为 5.7%,且在城镇化发展进程中,人类活动是地下水硝酸盐污染的主要来源。青岛市农区,地下水 $\rho(\text{NO}_3^-$ -N)在 2019 年($22.37 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)较 2009 年($38.49 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)明显降低,但仍高于世界卫生组织(WHO)制定饮用水卫生标准中规定的饮用水中硝

收稿日期: 2021-07-22; 修订日期: 2021-09-23

基金项目: 内蒙古科技重大专项(zdxz2018059); 内蒙古自治区科技计划项目(201802084); 北方农牧交错区农田保育与地力提升关键技术研究示范项目(201802065)

作者简介: 袁宏颖(1994~),女,博士研究生,主要研究方向为农业水土资源利用与水土环境调控, E-mail: y15754880179@163.com

* 通信作者, E-mail: nmndysq@126.com

态氮的最大允许浓度($10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)^[10]; 雷州半岛约 50.85% 的 NO_3^- 型地下水具有污染趋势^[11]. 此外, 松嫩平原、陕西交口灌区和长江上游等地区^[12~14] 均出现不同程度的硝酸盐污染现象. 自然因素和人为因素均会导致地下水硝酸盐污染^[15, 16], 生活污水、工业废水的不适当排放、农业含氮肥料和农药的大量使用, 化石燃料的泄漏等均为导致地下水硝酸盐污染的重要原因^[17~19].

河套平原农业发达, 是我国重要的商品粮、油生产基地, 农田氮肥施用量大, 且地下水埋深浅, 水力坡度小导致地下水交换十分困难, 使该地区地下水极易受到硝酸盐污染. 多年来该地区研究重点集中在盐碱地改良和节水增产等方面, 而关于地下水硝酸盐时空分布和影响因素的相关研究相对有限. 据此, 本文选择河套平原下游地区乌拉特灌域为研究区, 综合分析地下水 NO_3^- -N浓度的时空演变规律及其主要影响因素, 以期为河套灌区地下水硝酸盐污染控制提供理论依据和思路.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

1.1.1 自然地理与气候条件

乌拉特灌域位于黄河上游河套平原最下游, 是河套灌区主要排水控制区, 东经 $108^\circ 06' 12'' \sim 109^\circ 39'$, 北纬 $40^\circ 27' \sim 41^\circ 10'$, 总面积为 $2\,047 \text{ km}^2$. 年平均降水量约 270 mm , 年平均蒸发量约 $2\,380 \text{ mm}$, 年均气温 7.9°C , 属于典型的中温带半干旱大陆性气候. 地表无天然河流, 地表水流是由农业灌溉所用沟渠组成的季节性河流, 地下水埋深受灌溉影响, 表现为年内季节性波动.

灌域以耕地为主, 主要作物有玉米、葵花和西葫芦等, 灌域采用引黄灌溉, 局部地区采用地下水按作物需水情况补充灌溉, 主要引水时期有春灌(3~4月)、夏灌(6~7月)和秋浇(10~11月), 其中, 秋浇面积最大, 范围最广. 灌域多年平均引水 4.38 亿 m^3 , 排水 0.87 亿 m^3 (2009~2018 年).

1.1.2 水文地质条件

河套平原为一自中生代晚期以来持续沉降的近封闭的内陆断陷盆地, 由于其特有的沉积构造条件, 形成了以细粒相为主的湖积含水层系统. 乌拉特灌域地理位置特殊, 地质条件复杂多样(图 1), 西部地下水含水层主要由粉细砂、黏土和淤泥质构成的冲湖积沉积物组成, 颗粒透水性差, 加之灌域水力坡度小, 河套盆地相对封闭等因素, 地下水基本属于停滞状态, 排泄方式主要以蒸发为主, 补给方式主要是灌溉和降雨入渗. 另外, 西南部地区地下为一潜伏的乌

拉山隆起带, 受断裂和发育等因素影响, 下部承压水头较高, 在漫长的地质时期中, 沿断裂溶滤侵染, 导致浅层地下水矿化度较高, 形成带状分布的咸卤水带. 灌域东部为乌拉山山前冲积平原, 其含水层以黏土和粉细砂等组成的冲积湖积层为主, 地下水补给主要来自于灌溉、降水入渗和乌拉山冲积扇的侧向补给.

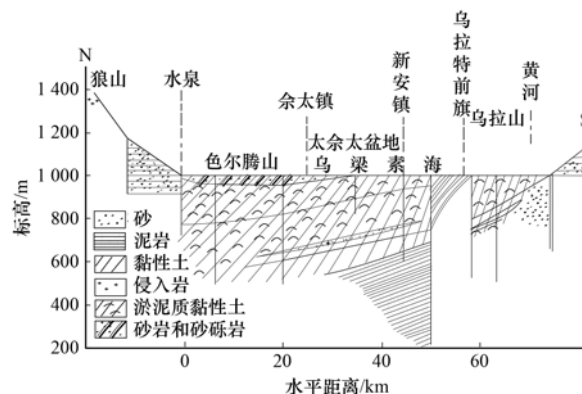


图 1 河套灌区东部水文地质剖面示意图

Fig. 1 Hydrogeological profile map of the eastern part of Hetao irrigation district

研究区基本水流方向为由西向东、由北向南方向, 但地下水流动滞缓, 水平方向基本属于停滞状态. 该地区地下水埋深浅, 受灌溉和降水影响, 年内呈周期性波动, 表现为灌溉集中期埋深浅, 非灌溉期埋深大, 地下水埋深年内变化情况如图 2 所示.

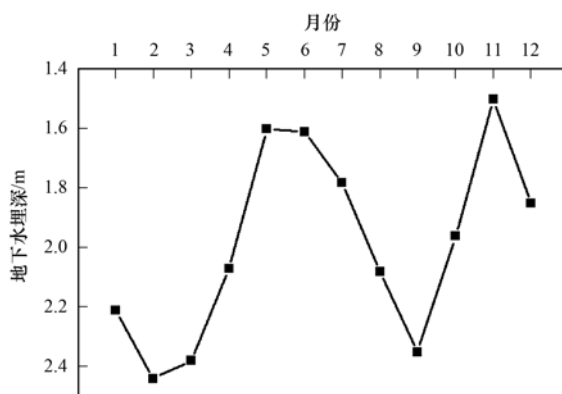


图 2 乌拉特灌域 1998~2019 年年内地下水埋深变化情况

Fig. 2 Map of groundwater depth changes in Wulate irrigation area annually from 1998 to 2019

1.2 样品采集和测定

灌域内较均匀地布设 33 个浅层地下水采样点 (S1~S33), 主要分布在农田、荒地和村庄等 3 种土地利用类型上, 采样点位置如图 3 所示, 采样井主要为自用水井和观测用地下水井, 井深均在 30 m 以内, 采样时间为 2019 年 3~11 月, 共收集地下水样品 231 组. 采样前用蒸馏水反复冲洗 500 mL 取样瓶, 干燥后备用, 分装样品前用地下水样品冲洗取

瓶防止其它杂质影响,水样于 24 h 内送往巴彦淖尔市水利科学研究所进行测定,严格遵循中华人民共和国卫生部提出的标准测定方法(GB/T 5750-2006)^[20],pH 用玻璃电极法测定, K^+ 和 Na^+ 采用火焰原子吸收分光光度法测定, Cl^- 、 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 Mg^{2+} 和 HCO_3^- 采用传统滴定法测定。

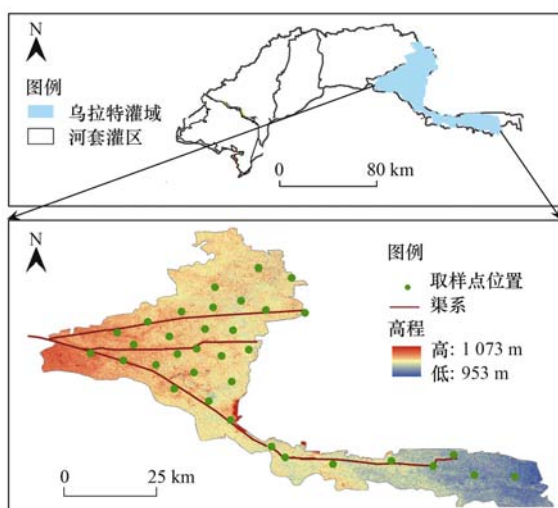


图3 乌拉特灌域地下水采样点布设

Fig. 3 Layout of groundwater sampling points in Wulate irrigation area

1.3 数据分析与处理

运用 Microsoft Excel 2016 软件对数据进行预处理,剔除可靠性较低数据;应用 AqQA 软件绘制 Piper 三线图,对研究区地下水水化学组成类型进行分析确定;采用 SPSS 软件对地下水“三氮”与其它水化学离子进行相关性分析,其它图件均采用 Origin 2018 软件绘制.同时,将研究区地下水化学氮素浓度与《生活饮用水卫生标准》(GB 5749-2006)和《地下水质量标准》(GB/T 14848-2007)对比,以

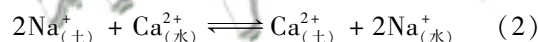
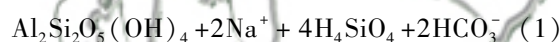
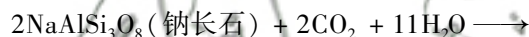
地下水 NO_3^- -N 浓度为主要评价指标,对地下水环境质量进行评价并分类。

2 结果与分析

2.1 地下水水化学特征

研究区地下水理化性质如图 4 所示,区内地下水总溶解性固体(total dissolved solids, TDS)变异程度较高,变化范围在 $286.35 \sim 38\,847 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,平均值为 $4\,841.15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 高值点主要出现在灌域西南部,该地区受乌拉山潜伏隆起影响,富盐的淤泥层浅埋且下部承压水头较高,沿断裂溶滤侵染,导致浅层水土层咸化^[21]。

水化学 Piper 三线图如图 5 所示,阳离子中, Na^+ 优势明显,阴离子分布较为分散,极个别观测点位于 HCO_3^- 优势区,少部分集中在 Cl^- 优势区,其余落在 $HCO_3^- \cdot Cl^- \cdot SO_4^{2-}$ 区域,根据舒卡列夫分类,水化学类型主要为 $Cl-Na$ 型和 $Cl \cdot SO-Ca \cdot Mg$ 型,虽年内不同月份离子浓度出现波动,但水化学类型组成无明显差异.地下水不断水解岩石矿物,使长石中的 Na^+ 释放出来,同时发生置换反应,增大了地下水中 Na^+ 浓度,反应方程式如下。



2.2 地下水 NO_3^- -N 浓度变化特征

2.2.1 时间变化特征

研究区地下水不同时期 3 种形态的氮及其占总氮(TN)的比值的统计结果如表 1 所示.年内 7 次采样过程中, $\rho(TN)$ 范围为 $0.09 \sim 73.94 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均值为 $6.68 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\rho(NO_3^- \cdot N)$ 范围为 $0.01 \sim$

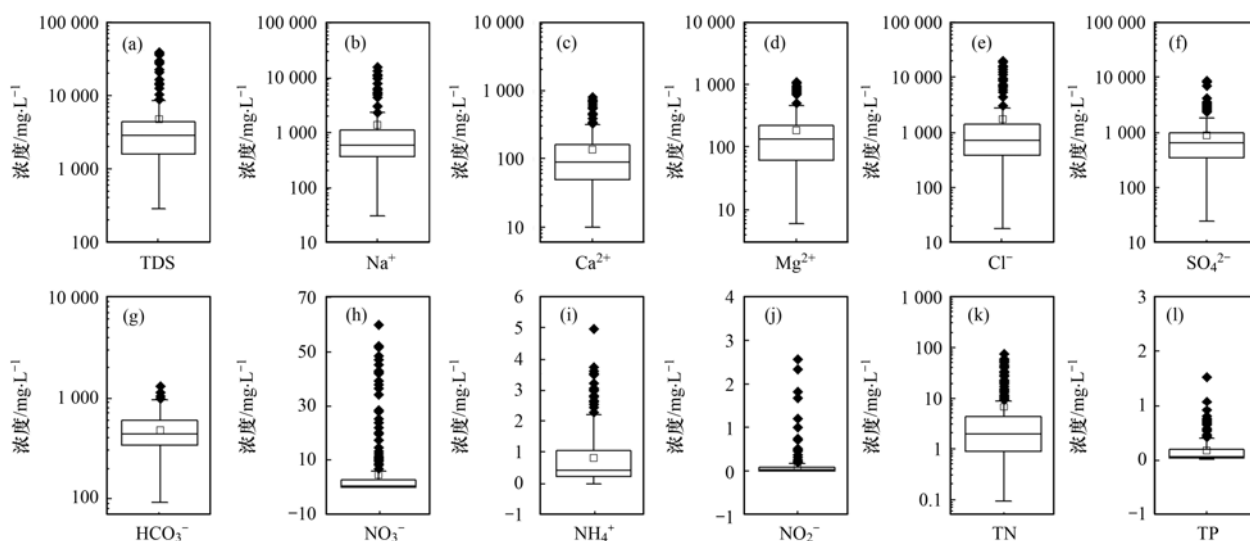


图4 乌拉特灌域地下水化学指标浓度箱线图

Fig. 4 Box plots of the concentration distributions of groundwater chemical indicators in the Wulate irrigation area

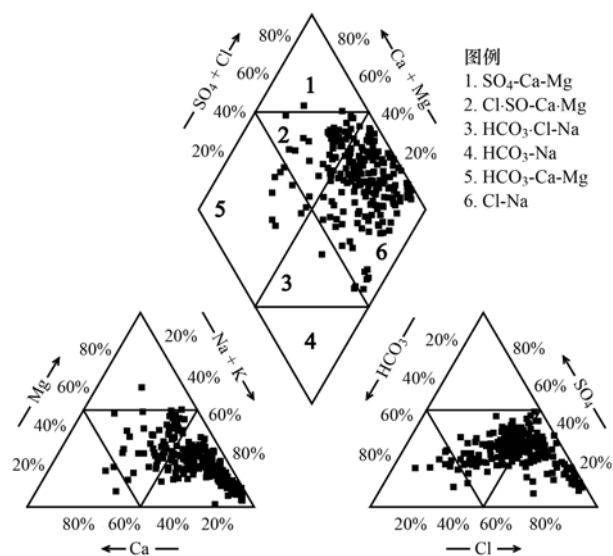


图5 乌拉特灌域浅层地下水化学 Piper 三线图

Fig. 5 Piper diagram for the chemical composition of shallow groundwater in Wulate irrigation area

60.00 mg·L⁻¹, 平均值为 4.85 mg·L⁻¹, 占 TN 的质量分数为 72.68%, 是地下水中氮素的主要存在形式, 约 10.50% 的地下水 NO₃⁻-N 超过国家《生活饮用水卫生标准》(GB5749-2006) 限值 (10 mg·L⁻¹)。

NH₄⁺-N 也是地下水中氮素存在重要形态, ρ(NH₄⁺-N) 范围为 0.02 ~ 4.99 mg·L⁻¹, 平均值为 0.81 mg·L⁻¹, 与标准值 (0.5 mg·L⁻¹)^[22] 相比, 超标率达 42.86%, 最高浓度出现在 10 月和 11 月, 平均值分别为 1.37 mg·L⁻¹ 和 1.17 mg·L⁻¹, 在 5、10 和 11 月 NH₄⁺-N 占 TN 的质量分数分别为 49.23%、49.35% 和 44.13%, 均高于 NO₃⁻-N, 这些时段内, 研究区对农田集中进行春灌和秋浇活动, 灌水量大且分布面积广, 因此, 地下水不同形态氮素浓度改变可能是由于受到农田灌溉的影响。ρ(NO₂⁻-N) 的范围为未检出 ~ 2.57 mg·L⁻¹, 平均值为 0.11 mg·L⁻¹, 占 TN 的质量分数为 1.69%。综上所述, 研究区地下水主要以 NO₃⁻-N 为主, NH₄⁺-N 次之, NO₂⁻-N 最少, 灌溉集中期 NH₄⁺-N 占比高于 NO₃⁻-N, 地下水 3 种形态氮浓度随着时间变化而波动, 主要受到人类活动等因素的影响, 在农业活动频繁和降雨集中时期, 地下水中 NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N 浓度大, 主要是由于农田中含氮化肥和农药的大量使用伴随降雨和灌溉水下渗进入地下水, 不同形态氮素在迁移过程中与土壤接触可能发生转换^[23]。

表1 地下水中不同形态氮浓度及占总氮质量分数

Table 1 Concentration of different morphological nitrogen and its mass fraction in total nitrogen of groundwater								
项目		3 月	5 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月
不同形态氮素浓度 ¹⁾ /mg·L ⁻¹	TN	2.29 ± 3.13	4.44 ± 11.52	7.75 ± 15.36	8.71 ± 14.47	5.88 ± 9.21	8.93 ± 13.82	8.73 ± 16.50
	NO ₃ ⁻	1.77 ± 3.14	3.40 ± 10.04	5.95 ± 13.06	6.61 ± 12.31	3.76 ± 7.51	6.22 ± 11.20	6.25 ± 13.88
	NH ₄ ⁺	0.50 ± 0.61	0.43 ± 0.49	0.63 ± 0.80	0.64 ± 0.80	0.94 ± 0.90	1.37 ± 0.79	1.17 ± 1.19
	NO ₂ ⁻	0.02 ± 0.02	0.03 ± 0.03	0.14 ± 0.35	0.26 ± 0.54	0.23 ± 0.50	0.07 ± 0.12	0.04 ± 0.07
质量分数/%	NO ₃ ⁻	61.43	39.22	51.25	46.21	43.68	32.66	36.08
	NH ₄ ⁺	36.09	49.23	31.97	31.13	30.38	49.35	44.13
	NO ₂ ⁻	2.48	3.25	5.23	6.70	5.75	1.10	1.36

1) 浓度表示为平均值 ± 标准差

另外, 受气候因素和人类活动等影响, 不同时期 NO₃⁻-N 浓度表现出明显的波动, 最大值出现在 8 月, 平均值为 6.61 mg·L⁻¹。受集中灌水影响, ρ(NO₃⁻-N) 在 10 月 (6.22 mg·L⁻¹) 和 11 月 (6.25 mg·L⁻¹) 也较高, 3 月 ρ(NO₃⁻-N) 最低, 平均值仅为 1.77 mg·L⁻¹。研究区不同时期 ρ(NO₃⁻-N) 平均值介于 1.77 ~ 6.61 mg·L⁻¹ 之间, 总体表现为丰水期高于枯水期的时间变化特征 (图 6)。丰水期农田施肥量大, 肥料易随降水入渗等进入地下水, 且丰水期温度和湿度等条件适宜, 有利于硝化反应发生, 产生 NO₃⁻ 离子增大了地下水中 NO₃⁻-N 浓度^[24]。

2.2.2 空间变异特征

根据《地下水质量标准》(GB/T 14848-2017) 中规定的 NO₃⁻-N 浓度限值, 对地下水 NO₃⁻-N 进行评价分类, 研究区地下水 NO₃⁻-N 质量评价结果和地下水

TDS、NO₃⁻-N 空间分布情况如图 7 所示。根据地质条件和影响因素等差异, 可将研究区大体分为 3 个部分, NO₃⁻-N 浓度和 TDS 值分布情况总体上均表现为: 西南部 > 西北部 > 东部。S25 ~ S33 观测井主要位于研究区东部的乌拉山山前冲积平原, 该区地下水 NO₃⁻-N 浓度和 TDS 值较低, 均值为 0.82 mg·L⁻¹, I、II 和 III 类水占比分别为 88.89%、9.52% 和 1.59%, 根据生活饮用水卫生标准规定的限值 (10 mg·L⁻¹), 其超标率仅为 1.59%; S14 ~ S24 观测井主要位于研究区西南部, 地下水 NO₃⁻-N 浓度和 TDS 值相对于灌域西北部和东部较高, 其 ρ(NO₃⁻-N) 范围为 0.01 ~ 60.00 mg·L⁻¹, 平均值为 8.87 mg·L⁻¹, 超标率高达 19.48%, 该区 III 类及以下水占比 29.87%, 存在向 IV 类和 V 类水转化的风险。其中, S19 和 S20 观测井 NO₃⁻-N 浓度出现极高

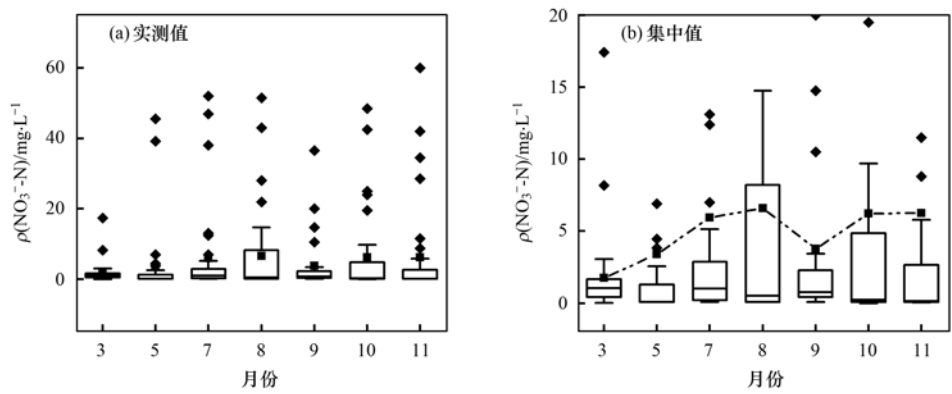


图 6 不同时期NO₃⁻-N浓度变化情况

Fig. 6 Changes in NO₃⁻-N content in different periods

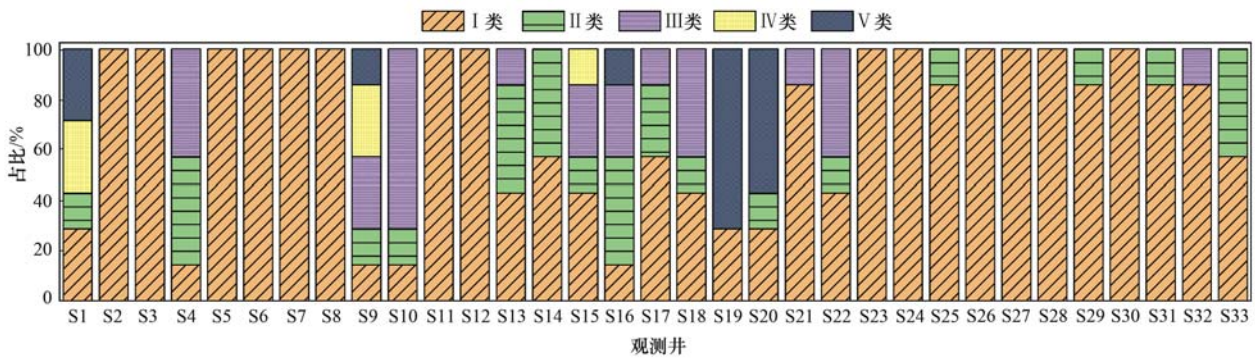


图 7 不同地区NO₃⁻-N水质分布直方图

Fig. 7 NO₃⁻-N of histogram of groundwater quality distribution in different regions

值,年内不同时期观测数据中,两观测井分别有 5 个和 4 个时期地下水 NO₃⁻-N 浓度属于 V 类水质,有研究表明,地下水埋深、土地利用类型和不同地区环境因素等均会对地下水 NO₃⁻-N 浓度产生影响^[14],两观测井地下水含盐量高(图 8)且井口附近居民点和耕地密集,距离垃圾堆放点距离较近,

井口周围地势低洼,易受周围各类环境因素影响; S1 ~ S13 位于研究区西北部,地下水 ρ(NO₃⁻-N) 介于西南部和东部之间,范围为 0 ~ 52 mg·L⁻¹,平均值 4.25 mg·L⁻¹,超标率为 10.99%,该地区 I 类水占比 70.33%,区域地下水污染风险相对于西南部较小。

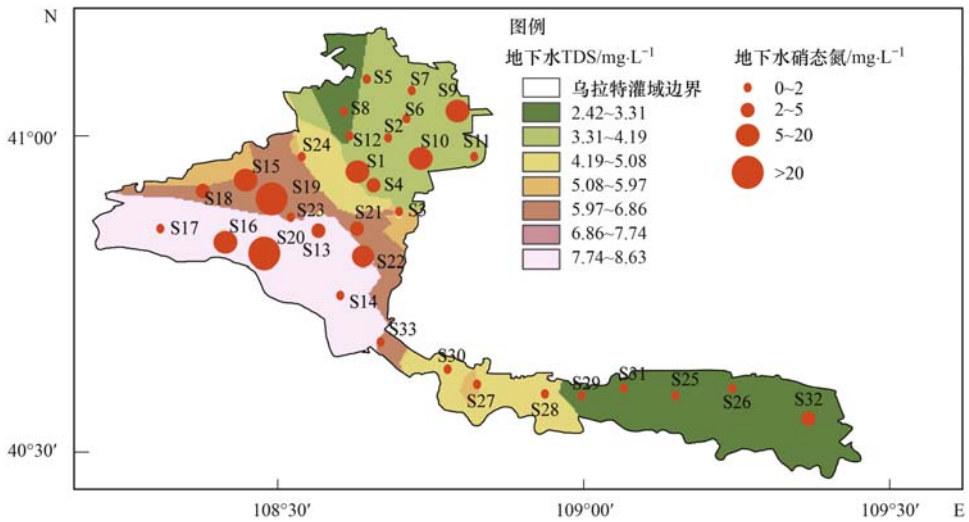


图 8 乌拉特灌域地下水 TDS 和硝态氮空间分布

Fig. 8 Spatial distribution map of groundwater TDS and NO₃⁻-N in Wulate irrigation area

2.3 驱动因素

2.3.1 月平均降雨量

研究区月平均降水量与NO₃⁻-N浓度关系如图9所示,除灌溉密集期外,研究区多数时期地下水NO₃⁻-N浓度随降水量增大而增大,总体表现为丰水期高于枯水期的特点,8月的月平均降水量大(339 mm),且夏季气温高,地下水ρ(NO₃⁻-N)出现年内最高值(6.61 mg·L⁻¹),3月的月平均降水量仅为103 mm,气温相对较低,ρ(NO₃⁻-N)也较小(1.77 mg·L⁻¹),可见地下水NO₃⁻-N浓度随降水量增大而增大,且可能与气温存在一定的相关关系.然而,5、10和11月的降水量小,但地下水中NO₃⁻-N浓度相对较高,主要是由于该时期为当地灌溉期,秋收后集中灌水称为秋浇,灌水量大且范围广,5月为夏灌期,此次灌水为局部灌水,灌水规模远小于秋浇时期,这是5月地下水NO₃⁻-N浓度远小于10月和11月的主要因素.降雨同灌溉相似,均为土壤中可溶物质向下运移的主要驱动力,同时也是地下水的重要补给来源^[25].枯水期壤中流动性相对较差且施肥量少,与地下水接触概率低,NO₃⁻-N浓度减小^[26].研究区地下水NO₃⁻-N与降雨、灌溉和施肥等因素具有直接响应关系,以上因素均为研究区地下水NO₃⁻-N浓度时空变异的重要驱动因子.此外,当研究区未发生大规模灌溉事件时,地下水NO₃⁻-N浓度表现为夏季高于春季和秋季,气温也可能是地下水中NO₃⁻-N浓度的影响因素之一,有研究表明,温度可直接或间接影响微生物生长和酶活性,低氧或厌氧条件下伴随

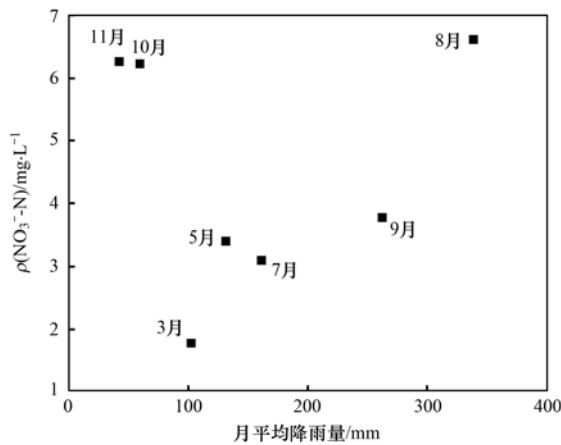


图9 NO₃⁻-N浓度与降雨量的关系

Fig. 9 Relationship between NO₃⁻-N concentration and rainfall

适宜的温度有利于硝化反应发生^[27].

2.3.2 地下水埋深

研究区土层透水性差,加之多年来引黄河水灌溉等,导致地下水埋深浅,多集中在0~500 cm之间.图10显示,埋深在100~300 cm范围内时,地下水NO₃⁻-N浓度最高,且在250 cm左右处达到最高值,这与江南等^[14]的研究结果一致,在高于或低于该区间时,NO₃⁻-N浓度均较低.灌溉集中期地下水受到大量灌溉水的补给,稀释了地下水中NO₃⁻-N浓度;而埋深在100~300 cm时,土壤中NO₃⁻-N极易随灌溉水或地下水发生垂直或水平移动进入地下水^[28],导致地下水NO₃⁻-N浓度增加;当埋深大于400 cm时,地层透水性差^[10],加之灌水量限制,土层中NO₃⁻-N很难随灌溉水向下移动,另外,有研究表明^[26],该埋深条件下含氧量降低而形成的还原环境,NO₃⁻-N在该条件下可能转化为氮气等气态物质而使地下水中NO₃⁻-N浓度降低.

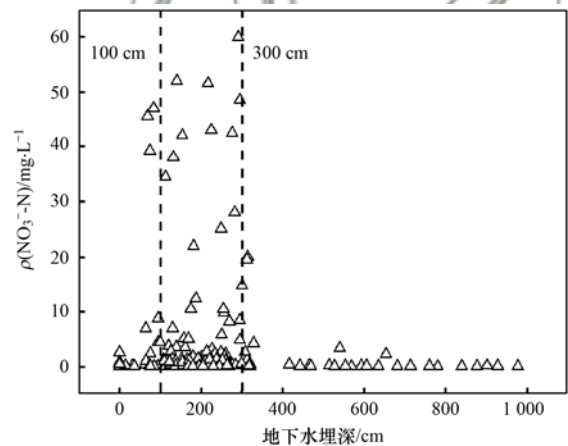


图10 NO₃⁻-N浓度与埋深关系

Fig. 10 Relationship between NO₃⁻-N concentration and groundwater table depth

2.3.3 地下水化学因素

研究区地下水NH₄⁺-N、NO₃⁻-N和NO₂⁻-N与其它水化学离子组分的相关分析结果如表2所示,结果显示,研究区地下水NO₃⁻-N浓度与各离子浓度相关性较弱,各离子浓度对地下水中三氮浓度影响较小.其中,NO₃⁻-N与pH呈弱负相关,相关系数-0.19,pH升高会抑制硝化细菌活性,导致NH₄⁺-N浓度增加而NO₃⁻-N浓度降低^[14],这可能是导致其呈负相关的原因之一,与Cl⁻(相关系数0.16)、Ca²⁺(相关系

表2 地下水不同化学离子相关分析结果

Table 2 Correlation analysis results of different chemical ions in groundwater										
	pH	TDS	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺ + Na ⁺	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N
NH ₄ ⁺ -N	0.121 2	0.041 6	-0.030 1	0.038 1	0.024 6	0.093 7	0.086 1	0.022 6	1	
NO ₃ ⁻ -N	-0.185 5	0.206 4	-0.057 6	0.163 1	0.218 7	0.354 4	0.277 7	0.137 7	0.120 9	1
NO ₂ ⁻ -N	-0.044 0	0.040 2	-0.177 9	0.038 0	0.069 4	0.104 0	0.080 3	0.025 6	0.240 8	0.297 4

数 0.35) 和 Mg^{2+} (相关系数 0.28) 均呈正相关关系, 可见其浓度可能受到人类活动输入和肥料施用等因素影响, 但相关性较弱。

对 NO_3^- -N 的毫克当量浓度与 NH_4^+ -N 的毫克当量浓度、TDS 值和 pH 值的相关关系进行分析, 结果如图 11 所示。 NO_3^- -N 与 NH_4^+ -N 未表现出显著相关性, 但多数地下水样本表现为 NO_3^- -N 浓度升高, NH_4^+ -N 浓度降低, 反之亦然, 可见这两者一方浓度升高与另一方浓度降低有关, 随着环境条件的改变, 地下水 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N 在微生物的作用下发生硝化和反硝化作用, 使地下水中氮素存在形态发生变化。当 $2\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} < \text{TDS} < 5\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, NO_3^- -N 与之相关性较好, 超出此区间相关性不明显, 这与 NH_4^+ -N 关系相同, 高的 NO_3^- -N 浓度往往对应低的 TDS 值, 该结果与吕晓立等^[9]对珠江三角洲地区硝酸型地下水赋存特征的研究结果一致。当 $7.75 < \text{pH} < 9$ 时, 二者之间存在一定负相关关系, 但相关性较弱, 与相关系数体现的结果一致, 这表明这 3 个指标与 NO_3^- -N 间仅为近似线性关系, 并不是影响 NO_3^- -N 浓度的主要因素。

2.3.4 人类活动等因素

根据 $\text{NO}_3^-/\text{Na}^+$ 和 $\text{SO}_4^{2-}/\text{Na}^+$ 关系可反映农业活动、工业活动对地下水的影响, $\text{NO}_3^-/\text{Na}^+$ 与 Cl^-/Na^+ 的关系可反映人类活动输入对水体硝酸盐的影响^[12]。图 12(a) 显示, 研究区地下水 NO_3^- 与 Na^+ 的比值小于 0.04, SO_4^{2-} 与 Na^+ 的比值小于 1.65, 部分地区 $\text{NO}_3^-/\text{Na}^+$ 比值偏高, 说明研究区地下水一定程度上受到农业活动的影响。 $\text{NO}_3^-/\text{Na}^+$ 与 Cl^-/Na^+ 可用于指示人类活动对地下水体中硝酸盐浓度的影响^[29]。图 12(b) 显示, 研究区地下水 NO_3^- 与 Na^+ 的比值均小于 0.04, 多数地下水 Cl^- 与 Na^+ 的比值小于 1, 研究区地下水受岩石风化作用影响, 部分地下水 Cl^-/Na^+ 比值大于等于 1, 受到蒸发盐岩溶解和

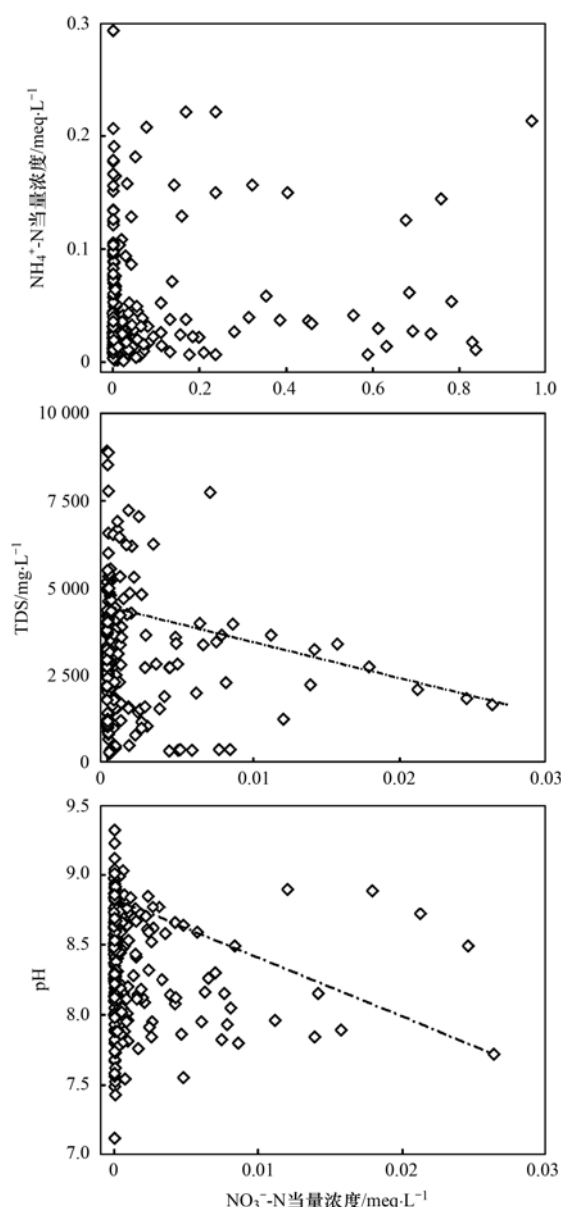


图 11 地下水 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 浓度关系

Fig. 11 Relationship between NO_3^- -N and NH_4^+ -N concentrations of groundwater

工业废水输入等因素影响。经实地调查发现, 研究区

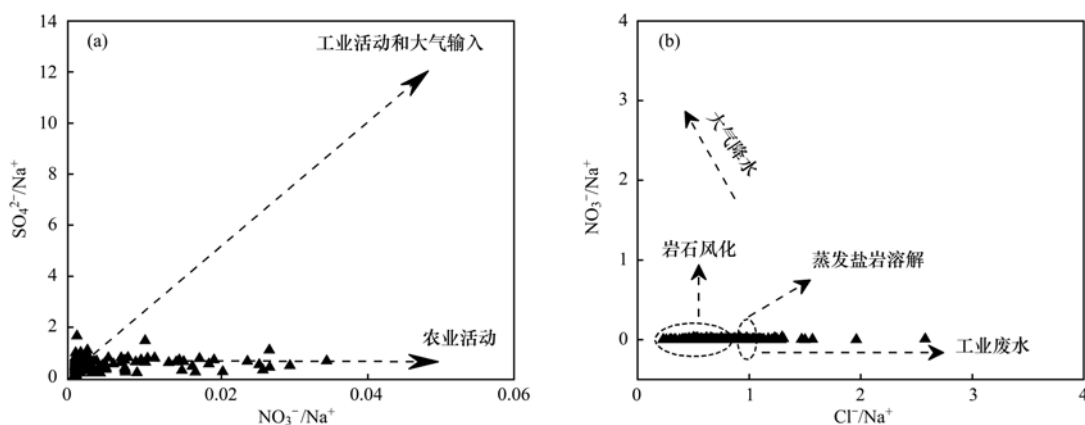


图 12 $\text{NO}_3^-/\text{Na}^+$ 与 $\text{SO}_4^{2-}/\text{Na}^+$ 和 Cl^-/Na^+ 与 $\text{NO}_3^-/\text{Na}^+$ 关系

Fig. 12 Plots of $\text{NO}_3^-/\text{Na}^+$ and $\text{SO}_4^{2-}/\text{Na}^+$, Cl^-/Na^+ and $\text{NO}_3^-/\text{Na}^+$

农耕区分布面积大、范围广,且存在番茄、化肥等加工厂,农田施用化肥、农药和工厂排放的废水随降水和灌溉水等进入地下水的可能性极大,对地下水水体造成污染。然而,要明确不同过程对地下水的影响过程,还需要利用同位素等手段对其进行精准识别。

3 讨论

利用 SPSS 20 软件对研究区地下水 TN 和 NO_3^- -N 浓度进行相关分析,其结果如图 13 所示, TN 与 NO_3^- -N 呈极显著正相关 ($P < 0.001$), 研究区地下水 NO_3^- -N 是氮素的主要存在形态, 占 TN 的质量分数为 72.68%, 其超标率达 10.50%, 河套灌区地下水可能面临着越来越严重的硝酸盐污染问题。

河套灌区是我国北方重要的粮食生产基地, 农田施用含氮肥料在土壤微生物的作用下转化为 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 被作物吸收利用^[30], 然而, 我国氮肥当年利用率不足 35%^[31], 未被利用的氮肥极易随灌溉水和降雨下渗, 剩余肥料多以 NO_3^- -N 形式赋存于土壤中^[32], 极易随土壤水分向下运动, 而 NH_4^+ -N 极易被土壤吸附, 很难发生淋溶流失^[33], 这是导致 NO_3^- -N 在地下水中优势明显的重要原因。此外, 研究区为集约式农业带, 灌溉集中且灌水量大, 灌溉期大量水分入渗淋洗土壤中 NH_4^+ -N 向下移动, 且灌溉水入渗后可能导致水埋深升高而形成氧化环境, 使部分 NO_3^- -N 转化为 NH_4^+ -N, 因此出现了高的 NO_3^- -N 浓度对应低的 NH_4^+ -N 浓度的情况。

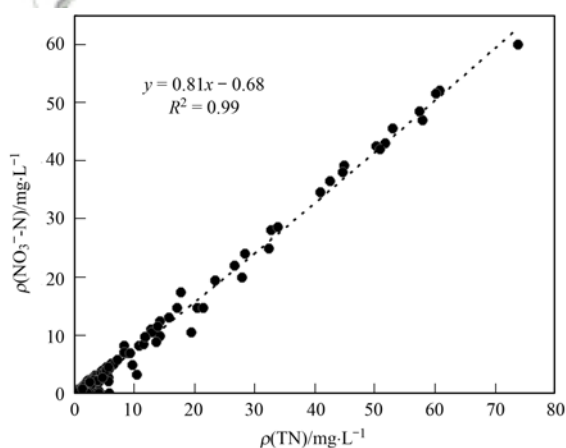


图 13 研究区地下水 TN 与 NO_3^- -N 浓度关系

Fig. 13 Relationship between TN and NO_3^- -N concentration of groundwater in study area

研究区地下水 NO_3^- -N 浓度受降水、地下水埋深、农业灌溉、气温和水化学因子等因素影响。pH 是影响微生物活性的重要因素之一, 低 pH 环境有利于硝化、反硝化作用的进行^[34], 当 pH 值范围在 6.4~7.9 时, 硝化作用最强, 研究区地下水 NO_3^- -N

浓度与 pH 呈弱负相关, 高于或者低于硝化细菌最适 pH 范围时, 均会对其活性产生一定抑制作用, 乌拉特灌域地下水 pH 均值 8.34, 超出硝化细菌最适 pH 阈值范围可能是导致地下水 NO_3^- -N 浓度与 pH 呈弱负相关的重要原因。此外, 有学者提出利用 NO_3^- -N 与 Cl^- 的关系可用于识别 NO_3^- -N 的来源, 通常, 低 $\text{NO}_3^-/\text{Cl}^-$ 值或高 Cl^- 浓度表明 NO_3^- 主要来源于工业和生活污水/粪肥^[35], 反之则来源于农用化肥, 本研究中, Cl^- 远大于 NO_3^- 浓度, 但研究发现工业和生活污水并非 NO_3^- 的主要来源, 其主要原因可能是河套灌区盐渍化土壤含盐量高, 地下水埋深较浅, Cl^- 主要由于原生地质条件和土壤中可溶盐淋溶下渗, 地下水咸化问题凸显, 由此推断该判别方法不适用于河套灌区盐渍化地区地下水 NO_3^- -N 来源识别。

氮污染是我国农业面源污染中面临的主要问题。本研究结果表明, 乌拉特灌域在降雨量大的 8 月和灌溉集中的 10 月和 11 月是该地区地下水硝酸盐污染最严重时期, 其主要是由于大量水分垂直入渗使土体中的硝酸盐随之向下迁移。有学者针对农业生产中面临的氮肥利用率低, 氮素流失严重等问题提出秸秆覆盖和减氮配施等方法取得了较好的效果, 不仅可以提高氮肥的利用效率, 还能有效减少氮素下移, 这是因为秸秆深埋可以提高土壤的田间持水能力, 减少土壤水分下渗量, 同时减少氮素流失^[3]。另外, 深埋的玉米秸秆可作为缓释有机肥缓慢向作物释放肥料^[36], 不仅可以保证作物正常生长的氮素需求, 还能有效减少氮素流失, 有效提高农田氮肥的利用效率^[37], 该方法用于研究区西南部地下水硝酸盐污染严重地区农田中, 可有效缓解该地区地下水污染问题。

4 结论

(1) 乌拉特灌域地下水水化学类型主要为 Cl-Na 型和 Cl·SO-Ca·Mg 型, NO_3^- -N 是地下水氮素主要存在形式, 占 TN 的质量分数为 72.68%, $\rho(\text{NO}_3^-)$ -N 范围为 0.01~60.00 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 超标率达 10.50%, 农田灌溉集中期, NH_4^+ -N 浓度高于 NO_3^- -N, NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 浓度均存在潜在威胁, 需要定期监测并及时采取治理措施。

(2) NO_3^- -N 浓度呈现出一定时空变化格局。时间上, 存在降水或灌溉驱动的 8 月 (6.61 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)、10 月 (6.22 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 和 11 月 (6.25 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 最高, 3 月降水少且气温低, $\rho(\text{NO}_3^-)$ -N 最低 (平均值为 1.77 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)。空间上, 研究区总体 $\rho(\text{NO}_3^-)$ -N 表现为: 西南部 (8.87 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) > 西北部 (4.25 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)

> 东部 ($0.89 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 东部乌拉山冲积平原水质较好, I 类水占比 88.89%, 西北部 I 类水占比 70.33%, 西南部受地质条件等因素影响水质最差, III 类及以下水平占比 29.87%, 该地区地下水面临较严重的 NO_3^- -N 污染问题, 需加强土地管理和地下水环境监测。

(3) 人类活动(氮肥施用、农业灌溉、生活污水和工业废水)、降水和地下水埋深等因素是研究区地下水 NO_3^- -N 浓度的主要驱动因素, 而水化学离子浓度对其影响较小, 且高 NO_3^- -N 浓度往往对应着低 NH_4^+ -N 浓度和 TDS、pH 值, 此外, NO_3^- -N 浓度还与氧化还原条件、地质因素和土壤利用类型等因素密切相关。合理控制施肥、灌溉和土地利用情况, 是研究区地下水 NO_3^- -N 的重要途径。

参考文献:

- [1] Xin J, Wang Y, Shen Z L, *et al.* Critical review of measures and decision support tools for groundwater nitrate management: a surface-to-groundwater profile perspective [J]. *Journal of Hydrology*, 2021, **598**, doi: 10.1016/J.JHYDROL. 2021.126386.
- [2] Mukherjee I, Singh U K. Characterization of groundwater nitrate exposure using Monte Carlo and Sobol sensitivity approaches in the diverse aquifer systems of an agricultural semiarid region of lower Ganga basin, India[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **787**, doi: 10.1016/J.SCITOTENV. 2021.147657.
- [3] 张万锋, 杨树青, 孙多强, 等. 秸秆覆盖与氮减施对土壤氮分布及地下水氮污染影响[J]. *环境科学*, 2021, **42**(2): 786-795.
Zhang W F, Yang S Q, Sun D Q, *et al.* Effects of straw mulching and nitrogen reduction on the distribution of soil nitrogen and groundwater nitrogen pollution[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(2): 786-795.
- [4] 朱兆良. 中国土壤氮素研究[J]. *土壤学报*, 2008, **45**(5): 778-783.
Zhu Z L. Research on soil nitrogen in China [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, **45**(5): 778-783.
- [5] 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.
- [6] Li S X, Chen Y F, Lu Y, *et al.* Synthesis, fluorescence, and anticancer activity of silver (I) complex based on 2-hydroxyquinoxaline ligand [J]. *Inorganic and Nano-Metal Chemistry*, 2020, **50**(4): 315-320.
- [7] 张嘉雯, 魏健, 刘利, 等. 衡水湖沉积物营养盐形态分布特征及污染评价[J]. *环境科学*, 2020, **41**(12): 5389-5399.
Zhang J W, Wei J, Liu L, *et al.* Distribution characteristics and pollution assessment of nutrients in Hengshui Lake sediments [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(12): 5389-5399.
- [8] Karunarathne S D, Han Y, Zhang X Q, *et al.* Advances in understanding the molecular mechanisms and potential genetic improvement for nitrogen use efficiency in Barley[J]. *Agronomy*, 2020, **10**(5), doi: 10.3390/agronomy10050662.
- [9] 吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 等. 快速城镇化进程中珠江三角洲硝酸型地下水赋存特征及驱动因素[J]. *环境科学*, 2021, **42**(10): 4761-4771.
Lv X L, Liu J T, Han Z T, *et al.* Geochemical characteristics and driving factors of NO_3^- -type groundwater in the rapidly urbanizing pearl river delta [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(10): 4761-4771.
- [10] 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.
- [11] 张宏鑫, 吴亚, 罗伟宇, 等. 雷州半岛岭北地区地下水水文地球化学特征[J]. *环境科学*, 2020, **41**(11): 4924-4935.
Zhang H X, Wu Y, Luo W Y, *et al.* Hydrogeochemical investigations of groundwater in the Lingbei area, Leizhou peninsula [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(11): 4924-4935.
- [12] Zhang Q Y, Qian H, Xu P P, *et al.* Effect of hydrogeological conditions on groundwater nitrate pollution and human health risk assessment of nitrate in Jiaokou irrigation district [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, **298**, doi: 10.1016/J.JCLEPRO. 2021.126783.
- [13] 吴娟娟, 卞建民, 万罕立, 等. 松嫩平原地下水氮污染健康风险评估[J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(8): 3493-3500.
Wu J J, Bian J M, Wan H L, *et al.* Health risk assessment of groundwater nitrogen pollution in Songnen plain [J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(8): 3493-3500.
- [14] 江南, 周明华, 李红, 等. 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[J]. *环境科学*, 2020, **41**(10): 4539-4546.
Jiang N, Zhou M H, Li H, *et al.* 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 [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(10): 4539-4546.
- [15] Xu X Y, Xiong G Y, Chen G Q, *et al.* Characteristics of coastal aquifer contamination by seawater intrusion and anthropogenic activities in the coastal areas of the Bohai Sea, eastern China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2021, **217**, doi: 10.1016/J.JSEAES. 2021.104830.
- [16] Liu J T, Peng Y M, Li C S, *et al.* Characterization of the hydrochemistry of water resources of the Weibei plain, northern China, as well as an assessment of the risk of high groundwater nitrate levels to human health [J]. *Environmental Pollution*, 2021, **268**, doi: 10.1016/J.ENVPOL. 2020.115947.
- [17] 殷超, 杨海全, 陈敬安, 等. 基于水化学和氮氧同位素的贵州草海丰水期水体硝酸盐来源解析[J]. *湖泊科学*, 2020, **32**(4): 989-998.
Yin C, Yang H Q, Chen J A, *et al.* Tracing nitrate sources with dual isotopes and hydrochemical characteristics during wet season in lake Caohai, Guizhou Province [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2020, **32**(4): 989-998.
- [18] 李霄, 王晓光, 柴璐, 等. 沉积盆地地下水无机氮来源示踪及其演化模式[J]. *中国环境科学*, 2021, **41**(4): 1856-1867.
Li X, Wang X G, Chai L, *et al.* Sources tracing and evolution model of inorganic nitrogen of groundwater in sedimentary basin [J]. *China Environmental Science*, 2021, **41**(4): 1856-1867.
- [19] 任坤, 潘晓东, 梁嘉鹏, 等. 碳氮氧同位素解析典型岩溶流域地下水中硝酸盐来源与归趋[J]. *环境科学*, 2021, **42**(5): 2268-2275.
Ren K, Pan X D, Liang J P, *et al.* Sources and fate of nitrate in groundwater in a typical Karst basin: insights from carbon, nitrogen, and oxygen isotopes [J]. *Environmental Science*,

- 2021, **42**(5): 2268-2275.
- [20] GB/T 5750-2006, 生活饮用水标准检验方法[S].
- [21] 孙文承. 河套平原咸水分布特征及其成因分析[J]. 水文地质工程地质, 1987, (6): 1-5.
- Sun W C. An analysis of the distribution of saline water and its origin in the great rend plain of the Huanghe River [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 1987, (6): 1-5.
- [22] GB 5749-2006, 生活饮用水卫生标准[S].
- [23] 傅雪梅, 孙源媛, 苏婧, 等. 基于水化学和氮氧双同位素的地下水硝酸盐源解析[J]. 中国环境科学, 2019, **39**(9): 3951-3958.
- Fu X M, Sun Y Y, Su J, *et al.* Source of nitrate in groundwater based on hydrochemical and dual stable isotopes [J]. China Environmental Science, 2019, **39**(9): 3951-3958.
- [24] 李学先, 吴攀, 查学芳, 等. 基于水化学及稳定同位素的岩溶山区城镇水体硝酸盐来源示踪[J]. 环境科学学报, 2021, **41**(4): 1428-1439.
- Li X X, Wu P, Zha X F, *et al.* Tracing nitrate sources in urban waters of Karst mountainous area using hydrochemistry and stable isotope [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, **41**(4): 1428-1439.
- [25] 曹文超, 宋贺, 王娅静, 等. 农田土壤 N_2O 排放的关键过程及影响因素[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, **25**(10): 1781-1798.
- Cao W C, Song H, Wang Y J, *et al.* Key production processes and influencing factors of nitrous oxide emissions from agricultural soils[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2019, **25**(10): 1781-1798.
- [26] He Y P, Zhang J Y, Yang S H, *et al.* Effect of controlled drainage on nitrogen losses from controlled irrigation paddy fields through subsurface drainage and ammonia volatilization after fertilization[J]. Agricultural Water Management, 2019, **221**: 231-237.
- [27] Maag M, Vinther F P. Nitrous oxide emission by nitrification and denitrification in different soil types and at different soil moisture contents and temperatures[J]. Applied Soil Ecology, 1996, **4**(1): 5-14.
- [28] 何明霞, 张兵, 夏文雪, 等. 天津七里海湿地水化学组成及主要离子来源分析[J]. 环境科学, 2021, **42**(2): 776-785.
- He M X, Zhang B, Xia W X, *et al.* Hydrochemical characteristics and analysis of the Qilihai wetland, Tianjin [J]. Environmental Science, 2021, **42**(2): 776-785.
- [29] 于亚泽, 焦燕, 杨文柱, 等. 不同灌溉方式旱田土壤 N_2O 排放和氮素淋溶特征[J]. 中国环境科学, 2021, **41**(2): 813-825.
- Yu Y Z, Jiao Y, Yang W Z, *et al.* Characteristics of N_2O emissions and nitrogen leaching from upland soils under drip or furrow irrigation [J]. China Environmental Science, 2021, **41**(2): 813-825.
- [30] 郭媛, 李宜联, 郭策, 等. 不同氮素添加对不同土地利用方式黑土氮素转化特征的影响[J]. 水土保持学报, 2021, **35**(1): 236-243.
- Guo Y, Li Y L, Guo C, *et al.* Effects of different nitrogen additions on nitrogen conversion characteristics of black soil with different land use patterns [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, **35**(1): 236-243.
- [31] 张福锁. 我国肥料产业与科学施肥战略研究报告[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2008.
- [32] 徐昭, 史海滨, 李仙岳, 等. 水氮限量供给对盐渍化农田玉米光能利用与产量的影响[J]. 农业机械学报, 2018, **49**(12): 281-291.
- Xu Z, Shi H B, Li X Y, *et al.* Effect of limited irrigation and nitrogen rate on radiation utilization efficiency and yield of maize in salinization farmland [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, **49**(12): 281-291.
- [33] Zhou N, Zhao Z R, Wang H H, *et al.* The effects of graphene oxide on nitrification and N_2O emission: dose and exposure time dependent [J]. Environmental Pollution, 2019, **252**: 960-966.
- [34] 安桐彤, 许潇方, 高强, 等. 我国养殖水体 N_2O 排放特征及其影响因素研究进展[J]. 生态学杂志, 2021, **40**(1): 266-277.
- An T T, Xu X F, Gao Q, *et al.* Spatiotemporal distribution and the influencing factors of nitrous oxide emissions from aquaculture water in China: a review [J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, **40**(1): 266-277.
- [35] 金赞芳, 胡晶, 吴爱静, 等. 基于多同位素的不同土地利用区域水体硝酸盐源解析[J]. 环境科学, 2021, **42**(4): 1696-1705.
- Jin Z F, Hu J, Wu A J, *et al.* Identify the nitrate sources in different land use areas based on multiple isotopes [J]. Environmental Science, 2021, **42**(4): 1696-1705.
- [36] 齐江涛, 田辛亮, 刘凯, 等. 黑土区覆混耕作中玉米秸秆还田对土壤水分入渗性能的影响[J]. 农业工程学报, 2021, **37**(1): 141-147.
- Qi J T, Tian X L, Liu K, *et al.* Soil water infiltration under mulch tillage affected by maize stovers returning in black soil areas [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, **37**(1): 141-147.
- [37] 张忠学, 刘明, 齐智娟. 不同水氮管理模式对玉米地土壤氮素和肥料氮素的影响[J]. 农业机械学报, 2020, **51**(2): 284-291.
- Zhang Z X, Liu M, Qi Z J. Effects of different water and nitrogen managements on soil nitrogen and fertilizer nitrogen in maize field [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, **51**(2): 284-291.

CONTENTS

Analysis on Spatial-temporal Characteristics and Driving Factors of PM _{2.5} in Henan Province from 2015 to 2019	GE Qi-xu, LIU Yan, YANG Hong, <i>et al.</i>	(1697)
Pollution Characterization, Source Identification, and Health Risks of Atmospheric Particle-Bound Heavy Metals in PM _{2.5} in Zhengzhou City: Based on High-resolution Data	QU Guang-hui, SUN Jun-ping, WANG Shen-bo, <i>et al.</i>	(1706)
Source Analysis and Composition Characteristics of Water-soluble Ions During Spring Festival in Ningbo	YANG Meng-rong, PAN Yong, HUANG Zhong-wen, <i>et al.</i>	(1716)
Characteristics of Nitroaromatic Compounds in PM _{2.5} in Urban Area of Shanghai	ZHUANG Min, MA Ying-ge, CHENG Yu-huang, <i>et al.</i>	(1725)
Characteristics and Sources of Nitrated Phenols in Atmospheric Fine Particles of Northern Suburban Nanjing	CHEN Mei-juan, QIAN Zi-he, GU Chen-juan, <i>et al.</i>	(1738)
Variety of the Composition and Sources of VOCs During the Spring Festival and Epidemic Prevention in the Pearl River Delta	JIANG Ming, YUAN Luan, WEN Li-rong, <i>et al.</i>	(1747)
Speciated Emission Inventory of VOCs from Industrial Sources and Their Ozone Formation Potential in Chongqing	LI Ling, LI Zhen-liang, FANG Wei-kai, <i>et al.</i>	(1756)
Volatile Organic Compound Emission Characteristics and Influences Assessment of a Petrochemical Industrial Park in the Pearl River Delta Region	ZHANG Xue-chi, SHA Qing-e, LU Meng-hua, <i>et al.</i>	(1766)
Characteristics and Source Apportionment of Vehicular VOCs Emissions in a Tunnel Study	LIU Xin-hui, ZHU Ren-cheng, JIN Bo-qiang, <i>et al.</i>	(1777)
Accurate Identification of Pollution Sources in a Chemical Enterprise Based on a Distributed Multi-channel VOCs Online Monitoring Mass Spectrometry System	WEI Xiao, ZHANG Yong-jie, WANG Pei-tao, <i>et al.</i>	(1788)
Coordinated Control of PM _{2.5} and O ₃ in Hangzhou Based on SOA and O ₃ Formation Potential	LIN Xu, YAN Ren-chang, JIN Jia-jia, <i>et al.</i>	(1799)
Effect of WESP on Emission Characteristics of Condensable Particulate Matter from Ultra-low Emission Coal-fired Power Plants	WANG Peng-cheng, YUAN Chang, LIANG Sheng-wen, <i>et al.</i>	(1808)
Measurement Analysis and Superposed Effect of Residential Indoor Air Pollutants in Xi'an	WANG Xiu-ru, FAN Hao, FAN Jie, <i>et al.</i>	(1814)
Occurrence of Atmospheric (Micro)plastics and the Characteristics of the Plastic Associated Biofilms in the Coastal Zone of Dalian in Summer and Autumn	TU Chen, TIAN Yuan, LIU Ying, <i>et al.</i>	(1821)
Spatiotemporal Distribution of Ammonia Emissions from Poultry Farming in the Yangtze River Delta Based on Online Monitoring Derived Local Emission Factors	GAO Zong-yuan, XU Chang, NI Yuan-zhi, <i>et al.</i>	(1829)
Agricultural Ammonia Emission Inventory and Its Distribution in Xining City	YANG Yi, JI Ya-qin, GAO Yu-zong, <i>et al.</i>	(1844)
Analysis of the Urban Water Eco-environment Protection Strategy in the Beijing-Tianjin-Hebei Region from "Three Waters" Overall Planning	LIAO Ya, HOU Xiao-shu, REN Xiao-hong	(1853)
Non-carcinogenic Risk Assessment of Cadmium Exposure Through Drinking Water in Chinese Residents Based on Age-stratification Weight	QIN Ning, Ayibota Tuexunbieke, LIU Yun-wei, <i>et al.</i>	(1863)
Hydrochemical Characteristics and Transformation Relationship of Surface Water and Groundwater in the Plain Area of Bortala River Basin, Xinjiang	LEI Mi, ZHOU Jin-long, ZHANG Jie, <i>et al.</i>	(1873)
Hydrochemical Composition Characteristics and Control Factors of Xiaohuangni River Basin in the Upper Pearl River	TU Chun-lin, YIN Lin-hu, HE Cheng-zhong, <i>et al.</i>	(1885)
Temporal and Spatial Variation Characteristics and Driving Factors of Nitrogen of Shallow Groundwater in Hetao Irrigation District	YUAN Hong-ying, YANG Shu-qing, ZHANG Wan-feng, <i>et al.</i>	(1898)
Provenance of Groundwater Solute and Its Controlling Factors in Yancheng Area	WANG Jian, ZHANG Hua-bing, XU Jun-li, <i>et al.</i>	(1908)
Hydrogen and Oxygen Isotopic Characteristics of Different Water and Indicative Significance in Baiyangdian Lake	WANG Yu-shan, YIN De-chao, QI Xiao-fan, <i>et al.</i>	(1920)
Optical Composition and Potential Driving Factors of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Large Lakes and Reservoirs in the Eastern Region of China	CHEN Li-li, XIAO Qi-tao, YU Xiao-qin, <i>et al.</i>	(1930)
Fluorescence Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter in Songhua Lake Sediment	CHENG Yun-xuan, ZHAO Ke, ZHANG Yue, <i>et al.</i>	(1941)
Abundance and Fluorescent Components of Dissolved Organic Matter Affected by Land Use in a Drinking Water Source	GAO Jing, PU Xiao, ZHANG Yu-hu, <i>et al.</i>	(1950)
Emission of Methane from a Key Lake in the Eastern Route of the South-to-North Water Transfer Project and the Corresponding Driving Factors	ZHU Jun-yu, PENG Kai, LI Yu-yang, <i>et al.</i>	(1958)
Distribution Characteristics and Ecological and Health Risk Assessment of Phthalic Acid Esters in Surface Water of Qiandao Lake, China	MI Qi-xin, GUO Xiao-chun, LU Shao-yong, <i>et al.</i>	(1966)
Phosphorus Adsorption Characteristics and Loss Risk in Sediments of Lake Bay During the Overwinter Period of Cyanobacteria	JIN Zheng-hai, TU Cheng-qi, WANG Shu-hang, <i>et al.</i>	(1976)
Ecological Quality Assessment of the Wetlands in Beijing: Based on Plant Diversity	LI Guo, SUN Guang, ZHAO Zi-yi, <i>et al.</i>	(1988)
Effects of Pollution Control of Xiaqing River on Environment Factors and Phytoplankton Community in the Laizhou Bay	ZHANG Jing-jing, WANG Yu-jue, LI Fan, <i>et al.</i>	(1997)
Effects of Different Aeration Treatments on Bacterial Diversity, Metabolic Activity, and Function in Constructed Wetlands	WANG Fei-peng, HUANG Ya-ling, ZHANG Rui-rui, <i>et al.</i>	(2007)
Analysis on the Source Tracing and Pollution Characteristics of Rainfall Runoff in the Old Urban Area of Nanning City	YUE Zhen-wu, LI Yi-ping, ZHOU Yu-xuan, <i>et al.</i>	(2018)
Effects of Aging on the Cd Adsorption by Microplastics and the Relevant Mechanisms	WANG Jun-jie, CHEN Xiao-chen, LI Qian-da, <i>et al.</i>	(2030)
Carbonized Foam Supported Co ₃ O ₄ Activated Peroxymonosulfate Towards Rhodamine B Degradation	WANG Yuan-yuan, YAN Xin, AI Tao, <i>et al.</i>	(2039)
Promoting Nitrogen Removal in ANAMMOX Biofilm Reactor by Fe ²⁺ Under Low Nitrogen Concentration	ZHENG Xu-wen, QIN Jia-fu, WANG Xiao-jun, <i>et al.</i>	(2047)
Investigation on Oxygen Gas-liquid Mass Transfer in Sewage Pipelines Under Enhanced Ventilation	YANG Zhou, ZHANG Zhi-qiang, YANG Jing, <i>et al.</i>	(2055)
Characteristics and Assessment of Heavy Metal Contamination in Soils of Industrial Regions in the Yangtze River Economic Belt	ZHANG Yi, ZHOU Xin-quan, ZENG Xian-min, <i>et al.</i>	(2062)
Distribution and Environmental Significance of Rare Earth Elements in Typical Protected Vegetable Soil, Northern China	WANG Zu-wei, LIU Ya-ming, WANG Zi-lu, <i>et al.</i>	(2071)
Sources Identification, Ecological Risk Assessment, and Controlling Factors of Potentially Toxic Elements in Typical Lead-Zinc Mine Area, Guizhou Province, Southwest China	ZHANG Fu-gui, PENG Min, HE Ling, <i>et al.</i>	(2081)
Distribution Characteristics of Heavy Metals in Soils Affected by Different Land Use Types in a Superimposed Pollution Area with High Geological Background	WANG Xue-wen, LIU Hong-yan, GU Xiao-feng, <i>et al.</i>	(2094)
Distribution Characteristics of Heavy Metals in Farmland Soils Around Mining Areas and Pollution Assessment	WANG Hai-yang, HAN Ling, XIE Dan-ni, <i>et al.</i>	(2104)
Concentration Characteristics of Heavy Metals in Farmland-Sphagnum System and Ecological Risk Assessment	ZHU Di, ZHANG Zhao-hui, WANG Zhi-hui	(2115)
Spatial Variation and Influencing Factors of Soil pH in Anshun City	CHEN Qing-xia, LU Xiao-hui, TU Cheng-long	(2124)
Synergistic Repair Effect of Calcite-Based Passivator and Low-Accumulation Maize	REN Chao, REN Yu-zhong, LI Jing-tian, <i>et al.</i>	(2133)
Effects of <i>Burkholderia</i> sp. Y4 on Cadmium Damage and Uptake in Rice Seedlings	ZHANG Ya-hui, LIU Yue-min, WANG Chang-rong, <i>et al.</i>	(2142)
Changing Characteristics of Carbon-Based Greenhouse Gas Fluxes in Paddy Field in the Middle-Lower Yangtze Plain in China	LIU Shuo, ZHEN Xiao-jie, LIU Gang, <i>et al.</i>	(2151)
Effects of Plastic Film Mulching and Biochar Application on N ₂ O Emission from a Vegetable Field	HU Jian, JIANG Chang-sheng, CHEN Xin-tong, <i>et al.</i>	(2163)
Effects of Nitrogen Fertilizer Management on CH ₄ and N ₂ O Emissions in Paddy Field	ZHENG Mei-qun, LIU Juan, JIANG Pei-kun, <i>et al.</i>	(2171)
Structure and Functional Diversity of Bacterial Community in Rhizosphere Soil of Typical Vegetation in the Riparian Zone Along the Downstream of Songhua River	WANG Lu-ying, SUN Hui-zhen, YANG Xue	(2182)
Effects of Cotton Stalk Returning on Soil Enzyme Activity and Bacterial Community Structure Diversity in Cotton Field with Long-term Saline Water Irrigation	ZHOU Yong-xue, CHEN Jing, LI Yuan, <i>et al.</i>	(2192)
Effect of pH on the Abundance and Community Structure of Comammox <i>Nitrospira</i> in Paddy Soils	MA Rui, ZHAO Yong-peng, WANG Zhi-hui, <i>et al.</i>	(2204)
Effects of Biochar on Soil Organic Carbon of Eroded Cultivated Layer of Slope Farmland in Purple Hilly Area	ZHANG Jian-le, ZENG Xiao-ying, SHI Dong-mei, <i>et al.</i>	(2209)
Effects of Organic Fertilizer Replacing Chemical Fertilizer on Organic Carbon Mineralization and Active Organic Carbon in Dryland Yellow Soil	LIN Shi-fang, WANG Xiao-li, DUAN Jian-jun, <i>et al.</i>	(2219)
Soil Organic Carbon Storage, Active Component Contents, and Stability Along a Flooding Gradient in the Tidal Wetland of the Jiulong River Estuary	HUANG Xiao-qing, TONG Chuan, LUO Min, <i>et al.</i>	(2226)
System Construction and the Function Improvement of Ecological Carbon Sink in Coal Mining Areas Under the Carbon Neutral Strategy	LIU Xiang-hong, YAN Yong-jun, LIU Wei, <i>et al.</i>	(2237)