

目次

基于时间序列分解的京津冀区域PM _{2.5} 和O ₃ 空间分布特征	姚青, 丁净, 杨旭, 蔡子颖, 韩素芹 (2487)
基于随机森林的北京城区臭氧敏感性分析	周红, 王鸣, 柴文轩, 赵昕 (2497)
基于随机森林模型的四川盆地臭氧污染预测	杨晓彤, 康平, 王安怡, 臧增亮, 刘浪 (2507)
海口市臭氧浓度统计预报模型的构建与效果评估	符传博, 林建兴, 唐家翔, 丹利 (2516)
京津冀地区2015~2020年臭氧浓度时空分布特征及其健康效益评估	高冉, 李琴, 车飞, 张艳平, 祖永刚, 刘芬 (2525)
2022年北京市城区PM _{2.5} 水溶性离子含量及其变化特征	陈圆圆, 崔迪, 赵泽熙, 常森, 景宽, 沈秀娥, 刘保献 (2537)
郑州市冬春季PM _{2.5} 中金属元素污染特征、来源及健康风险评估	陶杰, 闫慧姣, 徐艺斐, 荆海涛 (2548)
淄博市供暖前后PM _{2.5} 中多环芳烃及其衍生物污染特征、来源及健康风险	孙港立, 吴丽萍, 徐勃, 高玉宗, 赵雪艳, 姬亚芹, 杨文 (2558)
西安市采暖季过渡期高时间分辨率细颗粒物组分特征及来源解析	李萌津, 张勇, 张倩, 田杰, 李丽, 刘卉昆, 冉伟康, 王启元 (2571)
天津冬季两个典型污染过程高浓度无机气溶胶成因及来源分析	卢苗苗, 韩素芹, 刘可欣, 唐晓, 孔磊, 丁净, 樊文雁, 王自发 (2581)
基于空间尺度效应的山东省PM _{2.5} 浓度时空变化及空间分异地理探测	徐勇, 韦梦新, 邹滨, 郭振东, 李沈鑫 (2596)
我国典型化工行业VOCs排放特征及其对臭氧生成潜势	武婷, 崔焱文, 肖威德, 翟增秀, 韩萌 (2613)
廊坊秋季大气污染过程中VOCs二次气溶胶生成潜势及来源分析	张敬巧, 刘铮, 丁文文, 朱瑶, 曹婷, 凌德印, 王淑兰, 王宏亮 (2622)
景观格局对河流水质影响的尺度效应Meta分析	王玉仓, 杜晶晶, 张禹, 吴昊, 胡敏敏, 陈丁江 (2631)
白洋淀夏季汛期入淀河流水体溶解性有机物的光谱特征及来源	孟佳靖, 宴红, 陈哲, 周石磊, 底怡玲, 武辰彬, 王晨光, 张家丰, 崔建升 (2640)
北京市丰台区永定河以东浅层地下水水化学演变规律及成因分析	胡昱欣, 周瑞静, 宋炜, 杨全合, 王鑫茹 (2651)
庐庐断裂带(安徽段)浅层地下水水化学特征、控制因素及水质评价	刘海, 魏伟, 宋阳, 徐洁, 管政亭, 黄健敏, 赵国红 (2665)
农药施用对兴凯湖水中农药残留的影响及其风险评价	王蔚青, 徐雄, 刘权震, 林利华, 吕婧, 王东红 (2678)
黄河兰州段河岸带土壤中微生物与耐药基因的赋存特征	韦程宸, 魏枫沂, 夏慧, 黄魁 (2686)
基于多源数据的巢湖蓝藻水华时空分布及驱动因素分析	金晓龙, 邓学良, 戴睿, 徐倩倩, 吴月, 范裕祥 (2694)
再生水构建水环境中沉水植物附着细菌群落特征	贺赞, 李雪梅, 李宏权, 魏琳琳, 姜春晖, 姜大伟, 李魁晚 (2707)
水位波动和植被恢复对三峡水库消落带土壤原核微生物群落结构的交互影响	梅渝, 黄平, 王鹏, 朱凯 (2715)
银川市典型湖泊沉积物细菌群落结构及其对重金属的响应关系	蒙俊杰, 刘双羽, 邱小琼, 周娟娟 (2727)
热水解时间对污泥厌氧消化系统微生物群落结构影响分析	张含, 张涵, 王佳伟, 高金华, 文洋, 李相昆, 任征然 (2741)
市政污水中吗啡来源辨析	邵雪婷, 赵悦彤, 蒋冰, 裴伟, 李彦莹, 谭冬芹, 王德高 (2748)
滦河流域生态环境动态遥感评价	李艳翠, 袁金国, 刘博涵, 郭豪 (2757)
黄河流域生态系统服务价值时空演化及影响因素	王奕洪, 孙学堂 (2767)
基于贝叶斯网络的生态系统服务权衡协同关系强度及其空间格局优化:以汾河流域为例	蔡进, 危小建, 江平, 梁玉琦 (2780)
贵州高原典型喀斯特县域生境质量时空演变及定量归因	李月, 冯霞, 吴路华, 罗光杰, 罗红芬 (2793)
2000~2021年黄土高原生态分区NEP时空变化及其驱动因子	周怡婷, 严俊霞, 刘菊, 王瑛 (2806)
基于SSP-RCP情景的黄土高原土地变化模拟及草原碳储量	崔伟, 董燕, 张露尹, 王荣臻 (2817)
京津冀城市群建设用地扩张多情景模拟及其对生态系统碳储量的影响	武爱彬, 陈辅国, 赵艳霞, 秦彦杰, 刘欣, 郭小平 (2828)
西南岩溶区土地利用变化对团聚体稳定性及其有机碳的影响	江可, 贾亚男, 杨琰, 陈坚淇, 禹朴家 (2840)
不同土地利用方式下土壤有机质分子组成变化的整合分析	黄世威, 赵一锴, 朱馨雨, 刘贺雷, 刘姣姣, 陈稍, 陈佳永, 张阿凤 (2848)
基于改进麻雀搜索算法优化BP神经网络的土壤有机质空间分布预测	胡志瑞, 赵万伏, 宋根先, 王芳, 林妍敏 (2859)
不同有机物料施用对菜地磷累积和转化的影响	孙凯, 崔玉涛, 李顺晋, 魏冰丽, 王媛, 杨宏博, 王孝忠, 张伟 (2871)
集约化柑橘种植抑制土壤磷循环微生物活性	周连吴, 曾全超, 梅唐英泽, 汪明霞, 谭文峰 (2881)
控释掺混肥对麦玉米轮作体系作物产量和温室气体排放的影响	高玮, 王学霞, 谢建治, 陈延华, 倪小会, 王甲辰, 董艳芳, 李子双, 曹兵 (2891)
生物炭对黄绵土中NO ₃ -N运移过程影响及模拟	白一茹, 刘旭, 张钰涵, 张睿媛, 马艳, 王幼奇 (2905)
中国农田土壤重金属污染分析与评价	杨雳, 白宗旭, 薄文浩, 林静, 杨俱佳, 陈涛 (2913)
城市土壤和地表灰尘重金属污染研究进展与展望	王晓雨, 刘恩峰, 杨祥梦, 王碧莲, 林锦阔, 颜梦霞, 毕世杰 (2926)
场地重金属污染土壤固化及MICP技术研究进展	陈玥如, 高文艳, 陈虹任, 薛生国, 吴川 (2939)
黄河流域山东段近河道煤矿区土壤重金属污染特征及源解析	戴文婷, 张晖, 吴霞, 钟鸣, 段桂兰, 董霁红, 张培培, 樊洪明 (2952)
拒马河流域河流沉积物与土壤重金属含量及风险评价	韩双宝, 袁磊, 张秋霞, 郑焰, 李甫成 (2962)
银川市黄河滩区土壤重金属污染特征、生态风险评估及来源解析	于路加, 马海军, 王翠平 (2971)
基于源导向和蒙特卡罗模型的广东省某城市土壤重金属健康风险评估	陈莲, 邹子航, 张培珍, 王雨菡, 王振江, 林森, 唐翠明, 罗国庆, 钟建武, 李智毅, 王圆 (2983)
西南典型碳酸盐岩高地背景区农田重金属化学形态、影响因素及回归模型	唐瑞玲, 徐进力, 刘彬, 杜雪苗, 顾雪, 于林松, 毕婧 (2995)
贵州省水田土壤-水稻Hg含量特征与安全种植区划	韦美溜, 周浪, 黄燕玲, 庞瑞, 王佛鹏, 宋波 (3005)
柠檬酸辅助甜高粱对南方典型母质土壤的镉修复效应	刘梦宇, 罗绪锋, 辜娇峰, 易轩韬, 周航, 曾鹏, 廖柏寒 (3016)
改性酒糟生物炭对紫色土壤镉形态及水稻吸收镉的影响	肖乃川, 王子芳, 杨文娜, 谢永红, 代文才, 高明 (3027)
生物炭对四环素和铜复合污染土壤生菜生长及污染物累积的影响	郑晨格, 裴欢欢, 张亚珊, 李嘉欣, 刘奋武, 乔星星, 秦俊梅 (3037)
基于Meta分析的蚯蚓堆肥对堆肥质量和重金属的影响效应	姜继韶, 侯睿, 崔慧林, 闫广轩, 刘栋 (3047)
微塑料对土壤N ₂ O排放及氮素转化的影响研究进展	刘一戈, 杨安琪, 陈舒欣, 牛英奕, 卢瑛, 李博 (3059)
土地利用对洱海罗时江小流域土壤微塑料污染的影响	戴柳云, 侯磊, 王化, 符立松, 王艳霞, 李晓琳, 王万宾, 梁启斌 (3069)
养殖海湾淤泥质海岸沉积物微塑料污染特征	宋可心, 贺金成, 李昌文, 解思琦, 刘宝堃, 黄伟, 冯志华 (3078)
聚乙烷微塑料对盐渍化土壤微生物群落的影响	李志超, 李哲, 李嘉晨, 屈忠义, 杨文煊, 李卫平 (3088)
鄱阳湖候鸟栖息地微塑料表面细菌群落结构特征与生态风险预测	俞锦丽, 赵俊凯, 罗思琦, 朱颖婷, 张文慧, 胡启武, 刘淑丽 (3098)
粤闽浙沿海重点城市道路交通节能减排路径	徐艺诺, 翁大维, 王硕, 胡喜生, 王占永, 张园园, 张兰怡 (3107)
电动重卡替代柴油重卡的全生命周期碳减排效益分析	徐圆圆, 龚德鸿, 黄正光, 杨浪 (3119)

北京市丰台区永定河以东浅层地下水水化学演变规律及成因分析

胡昱欣, 周瑞静, 宋炜, 杨全合, 王鑫茹

(北京市工程地质研究所, 北京 100048)

摘要: 为更好支撑北京市丰台区地下水资源开发利用、污染管控与防治工作, 以丰台区永定河以东区域枯水期浅层地下水长序列监测数据为基础, 综合运用数理统计、Gibbs图和离子比例分析等方法探究了丰台区地下水水化学演变规律、形成机制及污染来源, 结果表明: ①研究区现状地下水质量整体较差, 地下水中各指标平均浓度自1976年至今呈先升高后降低趋势, Cl^- 、 SO_4^{2-} 和总硬度(TH)污染范围总体呈扩大趋势, 溶解性总固体(TDS)和硝酸盐氮(NO_3^-)污染范围以2005年为拐点呈先扩大后缩小趋势; ②各年份地下水中优势阴、阳离子均为 HCO_3^- 和 Ca^{2+} , 1976年和2021年地下水水化学类型数依次为8和17种, 其主要水型依次为 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\cdot\text{Ca}\cdot\text{Mg}\cdot\text{Na}$ (40%)和 $\text{HCO}_3\cdot\text{Cl}\cdot\text{SO}_4\cdot\text{Ca}\cdot\text{Na}\cdot\text{Mg}$ (23.88%), 各年份区域范围内与沿地下水流程上地下水水化学类型均呈现复杂化趋势, 地下水水文地球化学演变过程中水化学组分受人为活动影响显著; ③地下水受岩石风化和蒸发结晶双重作用, 且以蒸发作用为主, 地下水阳离子交替作用较弱, 碳酸盐矿物的溶解为 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的主要来源; ④离子比例分析得出, 外源输入的 NO_3^- 和 Cl^- 主要来源于农业活动、城市污水, 且2005年前农业活动污染影响较大, 与研究区历史上大量渗坑、渗井、工业和生活污水灌溉直排关系密切。

关键词: 丰台区; 浅层地下水; 水化学; 演变; 离子比例分析; 成因分析

中图分类号: X523 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)05-2651-14 DOI: 10.13227/j.hjks.202305033

Analysis on Hydrochemical Evolution of Shallow Groundwater East of Yongding River in Fengtai District, Beijing

HU Yu-xin, ZHOU Rui-jing, SONG Wei, YANG Quan-he, WANG Xin-ru

(Beijing Institute of Engineering Geology, Beijing 100048, China)

Abstract: In order to enhance the support for groundwater development and utilization, as well as pollution control and prevention in Fengtai District, Beijing, a comprehensive study was conducted based on long-term monitoring data of shallow groundwater in the eastern area of Yongding River during the dry season. The mathematical statistics, Piper diagram, Gibbs diagram, and ion ratio analysis and other methods were employed to explore the pattern of groundwater hydrochemical evolution, the formation mechanism, and sources of pollution in Fengtai District. The findings were as follows: ① Overall, the current groundwater quality in the study area was poor. The average concentration of each index in groundwater increased and then decreased from 1976 to the present. The pollution range of Cl^- , SO_4^{2-} , and TH generally expanded, whereas the pollution range of TDS and NO_3^- expanded before 2005 and then decreased with 2005 as the turning point. ② The hydrochemical types of groundwater samples displayed a complex regional variation each year, as well as along the groundwater direction. The dominant anion in groundwater was HCO_3^- , and the dominant cation was Ca^{2+} each year. The number of groundwater hydrochemical types in 1976 was 8, in which the predominant type was $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\cdot\text{Ca}\cdot\text{Mg}\cdot\text{Na}$, accounting for 40%. However, the number of groundwater hydrochemical types in 2021 was 17, in which the predominant type was $\text{HCO}_3\cdot\text{Cl}\cdot\text{SO}_4\cdot\text{Ca}\cdot\text{Na}\cdot\text{Mg}$, accounting for 23.88%. The groundwater hydrochemical type showed a complex trend within the region and upstream along the flow direction each year, whereas the migration characteristics of groundwater samples, as depicted on the Piper diagram, indicated that the hydrochemical components of groundwater were significantly affected by human activities during its evolution. ③ The groundwater chemistry in the study area was influenced by both rock weathering and evaporative crystallization processes, with evaporation playing a major role. The alternation of groundwater cations was relatively weak, and the dissolution of carbonate minerals served as the primary source of Ca^{2+} and Mg^{2+} . ④ The ion ratio analysis suggested that exogenous sources, mainly agricultural activities and urban sewage, contributed to the input of NO_3^- and Cl^- . The pollution impact from agricultural activities was significant before 2005, which aligned with the historical presence of numerous seepage pits, seepage wells, and direct discharge of industrial and domestic sewage for irrigation purposes in the study area. These activities were closely associated with the high levels of pollution. However, pollution input from agricultural activities notably decreased in 2021, likely due to the effective implementation of water environmental protection programs and action plans in recent years.

Key words: Fengtai District; shallow groundwater; hydrochemical; evolution; ion ratio analysis; cause analysis

北京市是国内以地下水作为主要供水水源的超大城市之一, 历史上曾占全市供水总量的60%~80%^[1-3]. 2014年底, 南水进京后对自来水厂、水库、城市河湖及地下水进行持续补给, 调整与重塑了北京市水资源供水格局; 加之近几年北京市降雨量较大, 双重影响下使得北京市地下水位连续抬升, 达到20年历史新高^[4,5]. 尽管如此, 地下水源仍为首都

重要供水水源和储备水源之一^[6]. 地下水化学是地下水循环过程中与周围圈层进行复杂的物质、能量和信息交换的过程^[7], 受气候条件、水文地质条件和水岩相互作用等自然过程影响^[8-10], 地下水水化学

收稿日期: 2023-05-05; 修订日期: 2023-07-28

作者简介: 胡昱欣(1989~), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为水文地质、环境地质及生态地质, E-mail: huyuxin1989@163.com

组分变化亦是地下水环境问题的集中反映^[11], 对于揭示人为影响下地下水化学特征、形成演化机制及指导水资源开发利用具有重要意义^[12-14]. 丰台区为北京市典型的城乡结合区, 地下水环境问题自20世纪80年代显现, 而后迅速凸显, 目前地下水环境问题仍较为突出, 并于2021年底成为北京市唯一入选全国21个地下水污染防治试验区的行政区^[15]. 以往关于丰台区水文地质与水循环条件、水环境与水生态等方面研究较多^[1,3,16-18], 且揭示了地下水中总硬度(TH)、溶解性总固体(TDS)和硝酸盐氮(NO_3^-)普遍存在污染^[19-22], 但对丰台区长序列地下水水化学演变规律、成因和污染源分析方面的研究尚显不足, 尤以人为活动频繁的永定河以东区域. 本文综合运用统计分析、Piper图、Gibbs图、氯碱指数和离子比例分析等方法揭示了自1976年至今丰台区地下水水化学特征和演变规律, 并对演变成因和污染源进行分析, 以期研究区未来进行地下水资源管理与开发利用、污染管控与精细化防治等工作提供可靠支撑, 具有重要的借鉴意义.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

丰台区位于北京市南部, 东北与主要城区接壤, 西面、南面与门头沟、房山和大兴等三大郊区接壤, 位于 $E 116^{\circ}04' \sim 116^{\circ}28'$ 、 $N 39^{\circ}46' \sim 39^{\circ}54'$ 之

间, 总面积约 306 km^2 . 永定河由北至南贯穿该区, 将丰台区划分为永定河以西和永定河以东两个区域. 丰台区属于典型的暖温带半湿润大陆性季风气候, 丰水期主要集中于6~9月, 多年平均降水量 520 mm ; 地势上呈西北高、东南低的特征, 最大高差为 591 m ^[23]. 区内由老到新沉积的地层依次为蓟县系(Jx)、青白口系(Qb)、寒武系(C)、奥陶系(O)、侏罗系(J)、古近系(E)、新近系(N)和第四系(Q), 第四系沉积物主要为永定河冲洪积物沉积而成, 自西北向东南沉积厚度逐渐增大; 岩性由单层过渡到含有多层砂黏和粉砂的砾石层. 除西南地区王佐镇部分区域地下水富水性较差外, 丰台区其他区域地下水富水性总体较强, 且以第四系潜水为主. 地下水以大气降水入渗为主要补给来源, 以人工开采、潜水蒸发、地下水侧向流出、部分区域与下伏基岩地下水越流作为主要排泄方式, 水力坡度为 $1\text{‰} \sim 5\text{‰}$, 研究区地理位置、地下水富水性与水文地质剖面如图1.

1.2 数据来源与分析

本研究系统收集了丰台区自1976年至今主要监测井地下水监测数据, 并以1976年(20个)、1995年(31个)、2005年(26个)和2021年(67个)地下水监测井中 pH 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、 NO_3^- 、TH和TDS监测数据为代表, 各年份采样点位置分布如图2. 其中, 历史监测数据取自北京

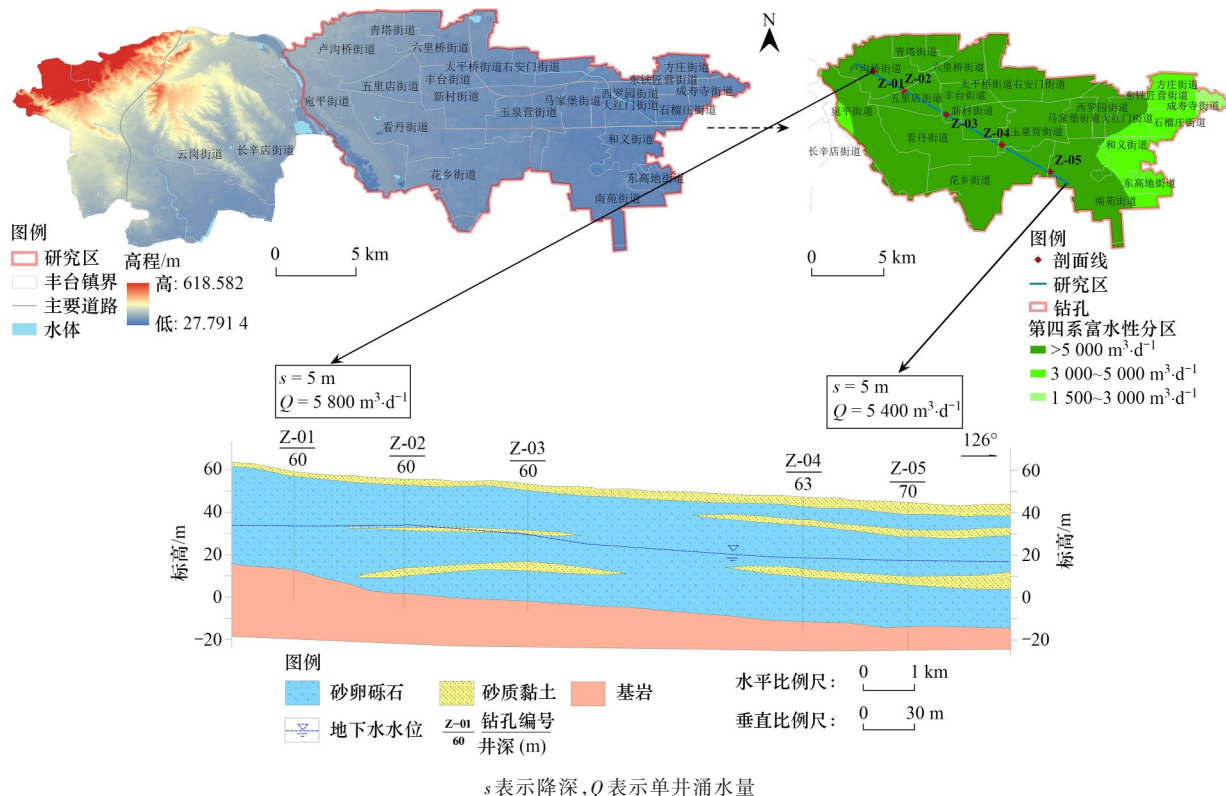


图1 研究区地理位置、富水性及水文地质剖面

Fig. 1 Geographical location, water richness, and hydrogeological profile maps of the study area

市地下水监测井历年水质监测数据资料, 2021 年地下水监测数据依托于丰台区地下水污染调查监测数据. 2021 年地下水 pH、TH、TDS 和 HCO_3^- 依次采用玻璃电极法(GB/T 6920-1986)、EDTA 滴定法(GB/T 7477-1987)、感官性状和物理指标中称量法(GB/T 5750.4-2006 8.1)以及滴定法(DZ/T 0064.49-1993)测定, Cl^- 、 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 采用离子色谱法(HJ 84-2016)测定, K^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 采用电感耦合等离子体发射光谱法(HJ 776-2015)测定. 2021 年所有地下水样品均按照《水质采样技术规范样品保存和处理(2019)》中相应方法采集和储存. 1976、1995 和 2005 年地下水中前述指标亦按照相应标准规定的测试方法进行测试, 采集和储存亦满足相应要求.

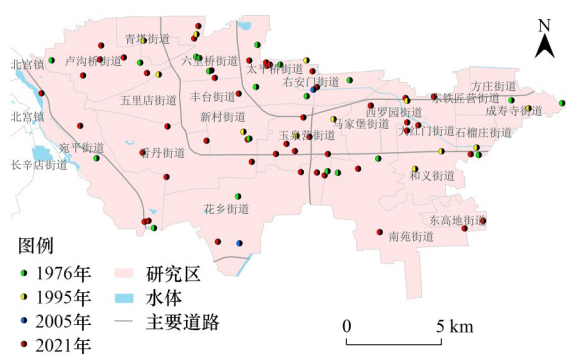


图2 研究区采样点位置分布
Fig. 2 Location distribution of sampling sites in the study area

1.3 研究方法

数理统计旨在通过各统计参数反映数据的特征, 为地下水水文地球化学演变提供支撑^[24]. Piper 图和 Gibbs 图为广泛用于水文地球化学研究的传统方法^[25,26], Piper 图由两个三角形与一个菱形组成, 以菱形和三角形的每一边为轴, 代表水样中所有溶解离子的毫克当量百分比, 直观展示各种离子的相对含量, 具有不受人为影响和通过样点标记区域来分析地下水化学特征及演变规律等优势^[27]. 传统的 Gibbs 图以 TDS 浓度值为对数纵坐标, 阳离子质量浓度比值为横坐标, 反映地下水水化学形成的主要天然影响因素^[28]. 氯碱指数由舍勒提出^[29], 主要用于判断水岩相互作用过程中阳离子交替吸附的方向与程度^[30], 通过计算各采样点 CAI-I 和 CAI-II 值, 并与 0 进行比较后得出反应的主方向和程度, 当地下水样品 CAI-I 和 CAI-II 值均小于 0 时, 表明地下水中存在阳离子交替吸附的正反应, 即地下水中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 与含水介质中 Na^+ 、 K^+ 发生交换, 反之则没有发生阳离子交替吸附反应; 若正、负反应同时存在, 则以两种反应中主反应代表主方向与强度^[31]. 离子比例法在地下水中主要离子来源、地下水污染来源及成因分析等方面具有较好的应用^[32,33].

本次数理统计分析采用 SPSS 25.0 软件, Piper 图、Gibbs 图、岩石风化贡献率图、阳离子交替吸附和离子比例分析等图采用 Origin 2020 绘制, 主要指标质量浓度空间分布图采用 ArcGIS 10.8 软件中插值功能绘制.

2 结果与分析

2.1 数理统计及空间分布

本次对丰台河东区 1976、1995、2005 和 2021 年枯水期浅层地下水中 pH、TH、TDS、 HCO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、(Na^+ + K^+) 和 NO_3^- 共计 10 项指标进行统计分析, 结果如表 1, 箱线图如图 3. 此外, 利用 ArcGIS 10.8 软件, 采用反距离权重插值法(IDW)绘制了 1976、1995、2005 和 2021 年丰台河东区枯水期浅层地下水中 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、TH、TDS 和 NO_3^- 质量浓度空间分布插值图, 如图 4~8.

结合表 1 和图 3~8 可知, 地下水 pH 均值在 7.20~7.70 之间, 1976~2021 年地下水中各项指标浓度平均值总体呈上升趋势. 从地下水中各指标超标情况看, 根据《地下水质量标准》(GB/T 14848-2017), 地下水中 TH、TDS 和 NO_3^- 指标 III 类质量标准值依次为 450、1 000 和 20 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 则 1976、1995、2005 和 2021 年各监测点位地下水中 TH 超标率依次为 40.00%、90.32%、84.62% 和 92.54%, TDS 超标率依次为 5.00%、51.61%、80.77% 和 26.87%, NO_3^- 超标率依次为 50.00%、96.77%、92.31% 和 46.27%. 地下水中其他指标如 SO_4^{2-} 仅在 2021 年存在超标(大于 250 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 超标率为 19.40%; Cl^- 在 1976 年和 1995 年仅 1 个监测井存在超标(大于 250 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$). 可见, TH、TDS 和 NO_3^- 仍是研究区目前地下水中主要超标指标. 从地下水中 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、TH、TDS 和 NO_3^- 质量浓度多年空间分布特征看, 研究区地下水中 Cl^- 、 SO_4^{2-} 和 TH 质量浓度在 1976~2021 年总体呈上升趋势, 而地下水中 TDS 和 NO_3^- 质量浓度总体呈先升高后降低趋势. 其中, 地下水中 $\rho(\text{Cl}^-)$ 和 $\rho(\text{SO}_4^{2-})$ 介于 150~250 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间区域面积在 1976~2021 年总体呈上升趋势; 地下水中 TH 污染范围总体呈扩大趋势, 至 2021 年除个别地下水点位外, 其他点位地下水中 $\rho(\text{TH})$ 均大于 450 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 地下水中 TH 污染总体相对较重; 而地下水中 TDS 和 NO_3^- 超标区域范围在 1976~2005 年呈快速增大趋势, 2005~2021 年间呈减小趋势. 可见, 随着地下水环境管理措施和力度的加强, 近些年研究区地下水中 TDS 和 NO_3^- 质量浓度明显呈下降趋势, 地下水环境质量有所改善, 2021 年研究区地下水中 TDS 和 NO_3^- 质量浓度平均值低于或接近于地下水 III 类质量标准值, 但地下水中

表1 地下水主要指标统计分析/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
Table 1 Statistical analysis of main indexes of groundwater/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

年份	指标	均值	标准差	偏度	峰度	极小值	极大值	百分位数			
								25%	50%	75%	95%
1976	pH(无量纲)	7.72	0.21	0.17	0.63	7.30	8.20	7.60	7.70	7.80	8.19
	TH	438.45	141.20	0.83	0.87	246.50	801.90	326.83	433.35	527.78	794.48
	TDS	596.35	174.24	0.93	0.67	387.04	1 024.80	449.97	577.02	667.32	1 018.91
	HCO_3^-	368.01	81.11	0.82	0.94	229.43	549.20	316.08	360.02	393.88	548.95
	Cl^-	75.45	68.77	3.52	13.95	26.59	346.40	41.13	56.91	82.15	335.25
	SO_4^{2-}	113.57	34.23	0.21	1.25	36.02	187.81	97.27	113.59	124.06	187.06
	Ca^{2+}	104.75	37.38	0.74	0.81	50.50	201.80	70.94	101.70	129.99	199.07
	Mg^{2+}	42.88	13.05	1.15	1.34	25.54	74.18	33.47	40.82	49.19	74.09
	($\text{Na}^+ + \text{K}^+$)	50.69	17.04	0.12	0.18	18.85	85.60	41.23	50.11	61.81	85.36
1995	NO_3^-	27.30	24.24	1.43	1.98	5.60	96.00	7.25	22.00	43.00	94.40
	pH(无量纲)	7.58	0.17	-0.14	-0.28	7.23	7.96	7.44	7.61	7.70	7.87
	TH	601.53	130.55	-0.60	0.17	283.20	831.20	529.40	623.50	692.10	806.24
	TDS	940.20	208.52	-0.84	0.67	365.00	1 288.50	821.70	931.00	1 099.90	1 249.74
	HCO_3^-	444.22	85.10	0.19	0.46	238.00	644.40	400.30	428.40	508.90	609.24
	Cl^-	149.82	53.01	-0.05	-0.32	32.26	257.70	108.10	145.30	190.70	239.82
	SO_4^{2-}	153.17	38.45	-0.95	0.72	45.48	213.70	129.70	171.00	177.30	208.84
	Ca^{2+}	144.45	30.84	-0.52	-0.03	73.70	202.60	119.60	150.30	166.30	192.16
	Mg^{2+}	58.52	14.08	-0.52	0.04	24.02	80.60	51.10	57.20	70.85	79.64
2005	($\text{Na}^+ + \text{K}^+$)	102.57	30.92	-0.12	0.89	22.90	177.30	82.60	103.00	119.80	161.58
	NO_3^-	105.14	59.27	0.77	-0.09	19.20	230.00	56.00	100.00	128.00	226.40
	pH(无量纲)	7.39	0.21	0.98	0.89	7.08	7.94	7.24	7.36	7.49	7.89
	TH	595.50	155.34	-1.15	1.56	185.00	827.00	532.50	621.00	711.50	813.35
	TDS	1 107.15	272.34	-1.69	2.99	327.00	1 417.00	1 041.00	1 175.00	1 292.75	1 416.65
	HCO_3^-	456.68	92.25	-1.45	2.06	198.00	549.20	404.23	485.70	526.33	549.20
	Cl^-	126.61	48.44	-0.58	0.34	17.00	208.10	101.83	132.95	159.13	206.60
	SO_4^{2-}	139.56	42.44	-1.31	1.82	29.00	196.00	121.13	148.65	169.20	192.78
	Ca^{2+}	145.05	38.76	-1.12	1.20	44.10	195.00	123.53	150.00	176.90	194.09
2021	Mg^{2+}	56.65	14.87	-1.02	1.50	18.20	82.60	51.53	58.80	65.60	80.47
	($\text{Na}^+ + \text{K}^+$)	83.63	25.10	-1.41	3.10	13.11	123.80	79.43	88.25	93.33	122.40
	NO_3^-	99.07	52.40	0.19	-0.59	8.04	200.00	51.75	100.00	141.00	200.00
	pH(无量纲)	7.25	0.17	1.03	0.46	6.99	7.72	7.13	7.20	7.34	7.65
	TH	615.10	138.93	-1.84	5.83	8.80	895.00	568.00	640.00	700.00	782.00
	TDS	990.51	198.71	-2.12	9.39	41.00	1 350.00	933.00	988.00	1 110.00	1 300.00
	HCO_3^-	442.43	100.24	-1.35	4.54	13.00	627.00	400.00	439.00	506.00	600.00
	Cl^-	154.53	42.71	-0.75	2.60	5.14	241.00	131.00	149.00	185.00	232.40
	SO_4^{2-}	193.09	61.55	-0.13	0.81	2.20	340.00	153.00	183.00	235.00	295.00
	Ca^{2+}	152.41	34.99	-1.72	5.40	2.20	229.00	141.00	159.00	173.00	194.60
	Mg^{2+}	53.52	13.35	-1.09	3.17	0.78	78.10	46.80	53.00	62.80	72.84
	($\text{Na}^+ + \text{K}^+$)	110.18	25.35	-1.27	6.99	7.52	189.52	99.03	109.53	123.85	146.53
	NO_3^-	20.80	11.80	0.27	-0.32	0.13	47.90	14.70	19.70	27.50	43.82

TH超标率仍较高,且中心区域及南部为污染相对较重区域,污染形势不容乐观.

2.2 水化学演变规律

地下水在含水层中流动时,一般伴随着水岩作用和溶滤等天然作用发生;而对于城市化进程较快、人口较密集和流动人口较多的城市,人为源输入使得地下水存在一定污染时,地下水样点在Piper图上标记位置亦会发生变化.以丰台河东区1976、

1995、2005和2021年枯水期浅层地下水中 HCO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 Na^+ 监测数据为基础绘制Piper图,以分析地下水区域水化学演变规律,如图9(a).同时,在永定河以东区域沿地下水大致流向上选取张仪村(上游)、巴庄子(中游)和潘家庙(中下游)这3个监测井,分析沿地下水流向上水化学演变规律,结果如图9(b)~9(d).

天然地下水一般以 $\text{HCO}_3\cdot\text{Ca-Mg}$ 型水为主,地

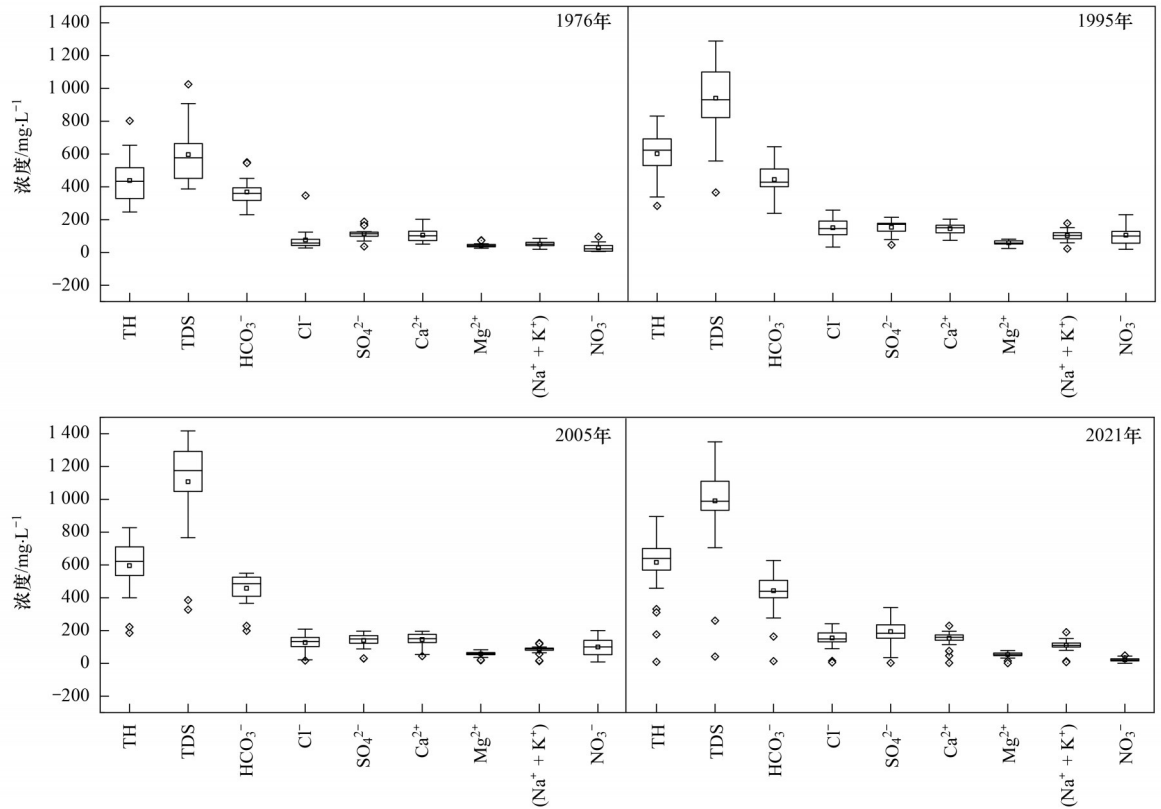
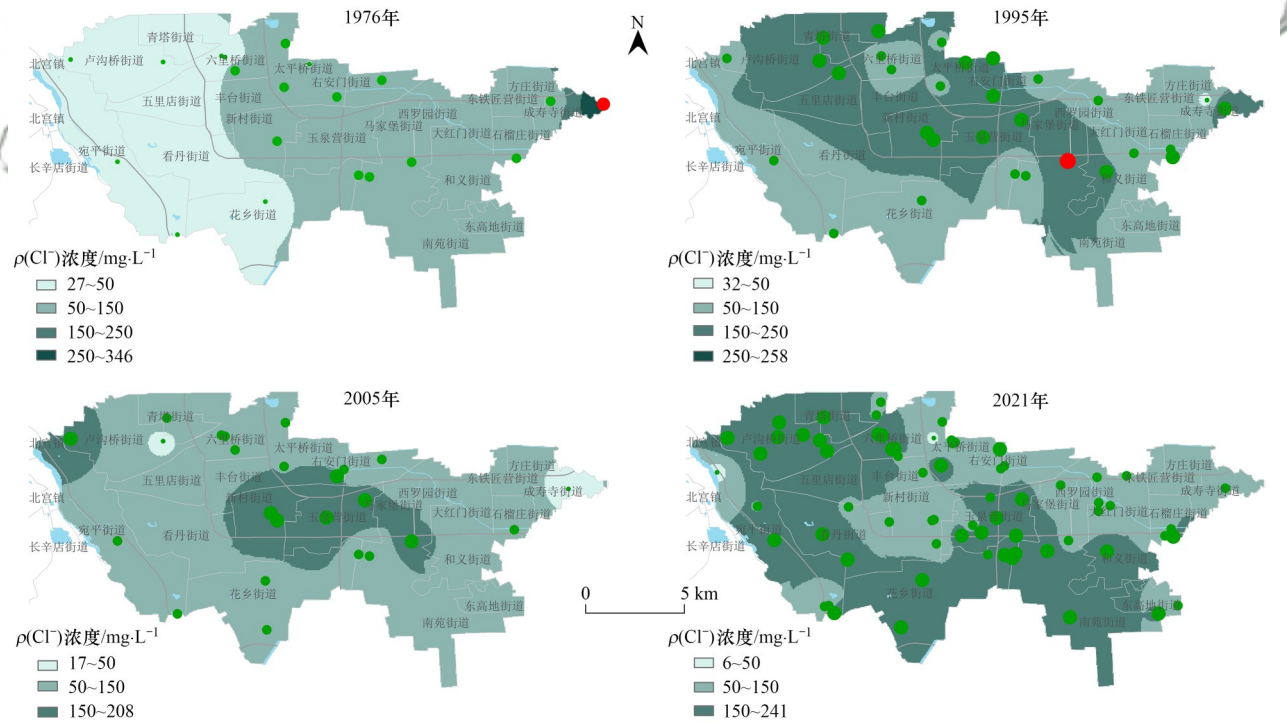


图3 地下水主要指标统计箱线图
Fig. 3 Box chart of main groundwater indicators



红、绿色圆点为各年份地下水监测井的位置,红色圆点表示该年份该指标在地下水中质量浓度存在超标,绿色圆点表示该年份该指标在地下水中质量浓度未超标;且圆点半径越大、颜色越深,代表该年份该指标在地下水中质量浓度越高;本文以《地下水质量标准》(GB T 14848-2017)中相应指标的Ⅲ类值为标准值;数值区间为各年份该指标在地下水中质量浓度范围区间,下同

图4 地下水中Cl⁻多年空间分布特征

Fig. 4 Spatial distribution characteristics of Cl⁻ in groundwater over the years

下水体中Na⁺、Cl⁻和SO₄²⁻是人类活动影响的主要表征离子^[34],即受人为影响越大,地下水体中Na⁺、Cl⁻和SO₄²⁻含量占比越高.一般当人类活动的影响很小或不利影响降低时,地下水样点主要标记于I区

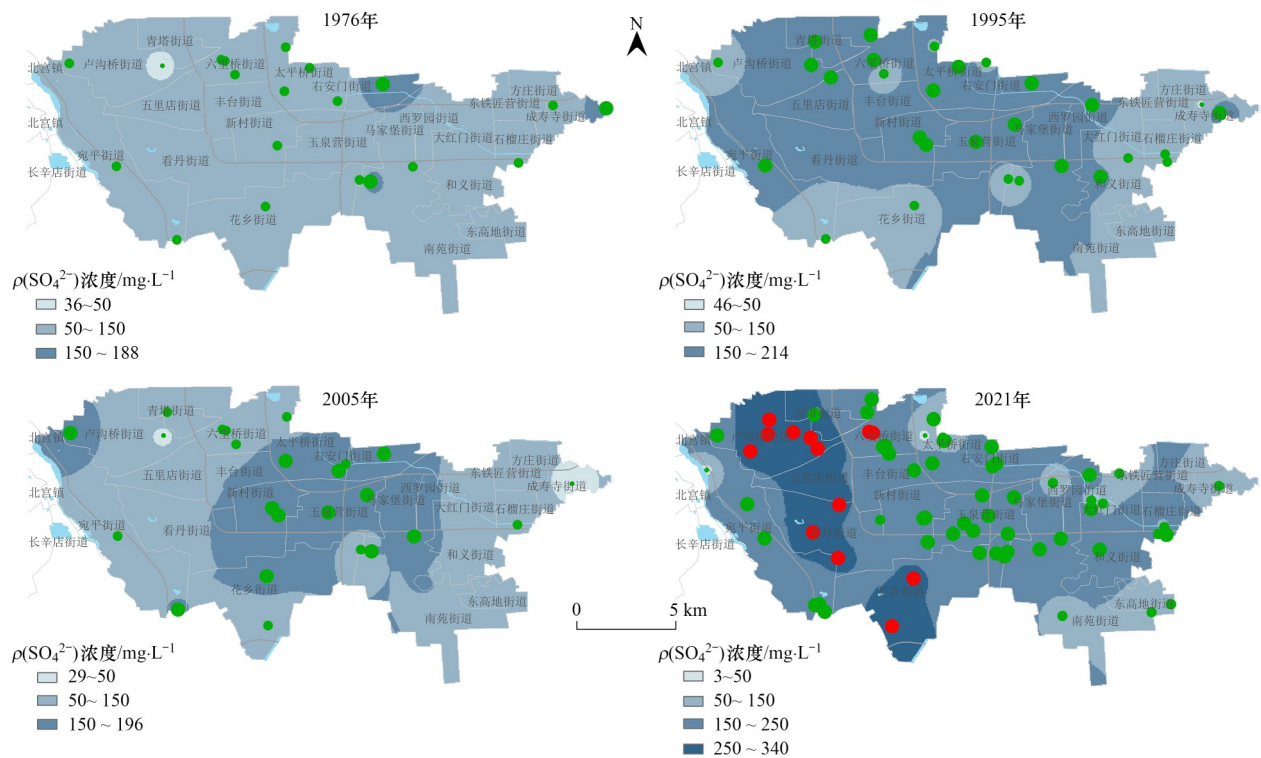
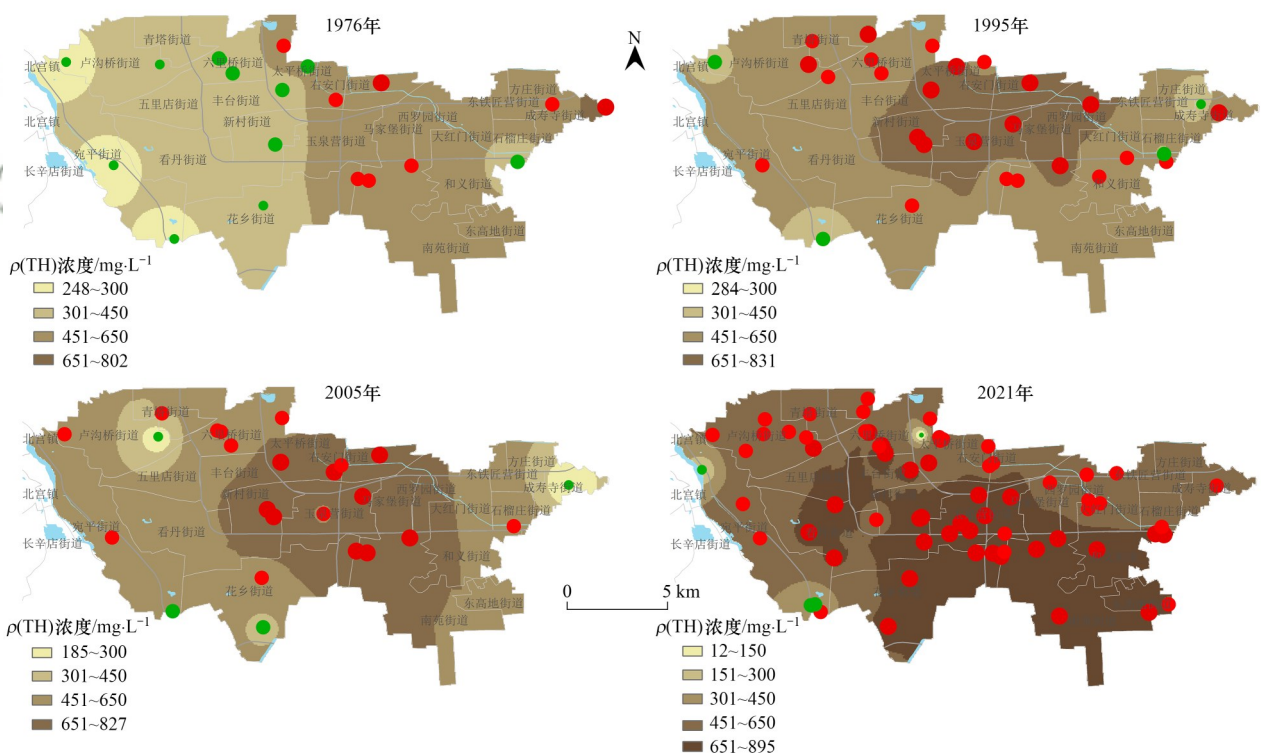
图5 地下水中 SO_4^{2-} 多年空间分布特征Fig. 5 Spatial distribution characteristics of SO_4^{2-} in groundwater over the years

图6 地下水中 TH 多年空间分布特征

Fig. 6 Spatial distribution characteristics of TH in groundwater over the years

或向 I 区方向演变, 反之则标记于 II 区或向 II 区方向演变^[35]. 从地下水样点在 Piper 图上迁移特征看, 图 9(a) 中地下水样点较为集中标记于 I 区和 II 区, 1976、1995、2005 和 2021 年地下水样点主要标记区

域依次为 I 区、II-1 区、I 区和 II-1 区, 即 1976~2021 年区域范围内地下水样点在 Piper 图标记位置由 I 区向 II 区迁移特征明显. 从地下水水化学特征看, 研究区各年份地下水中阳离子均以 Ca^{2+} 为主, 阴离

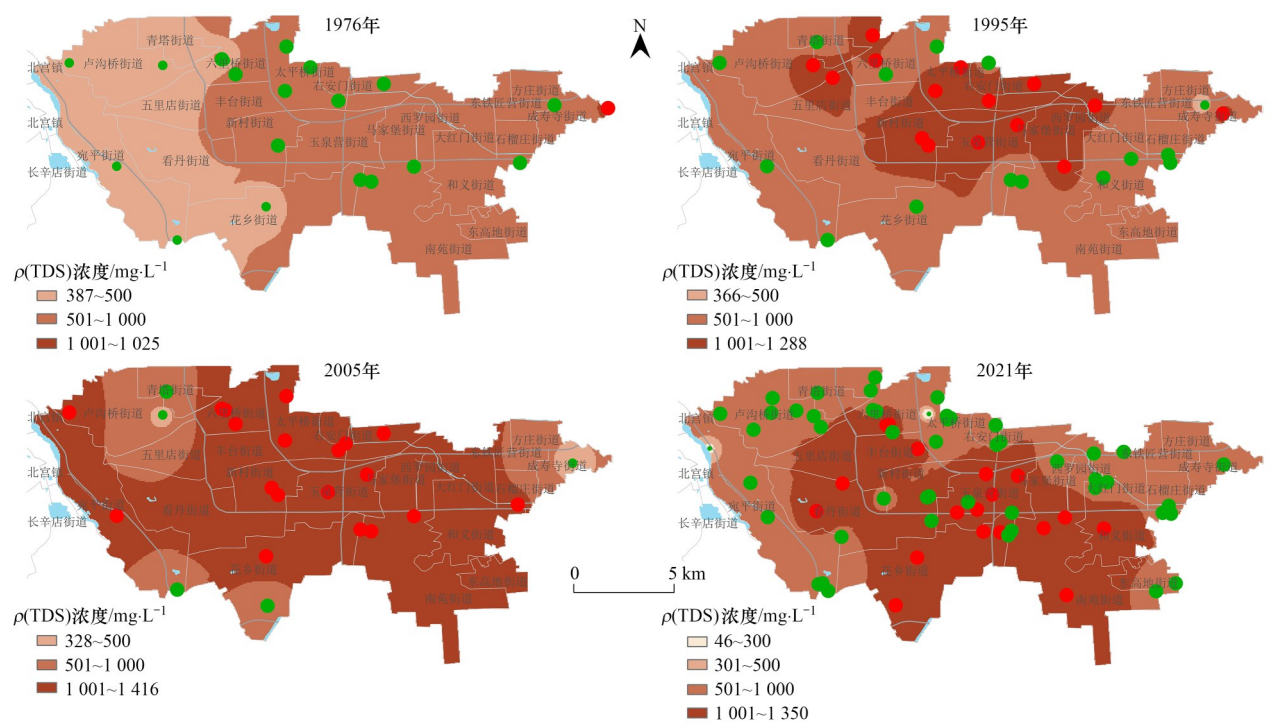


图 7 地下水中 TDS 多年空间分布特征
Fig. 7 Spatial distribution characteristics of TDS in groundwater over the years

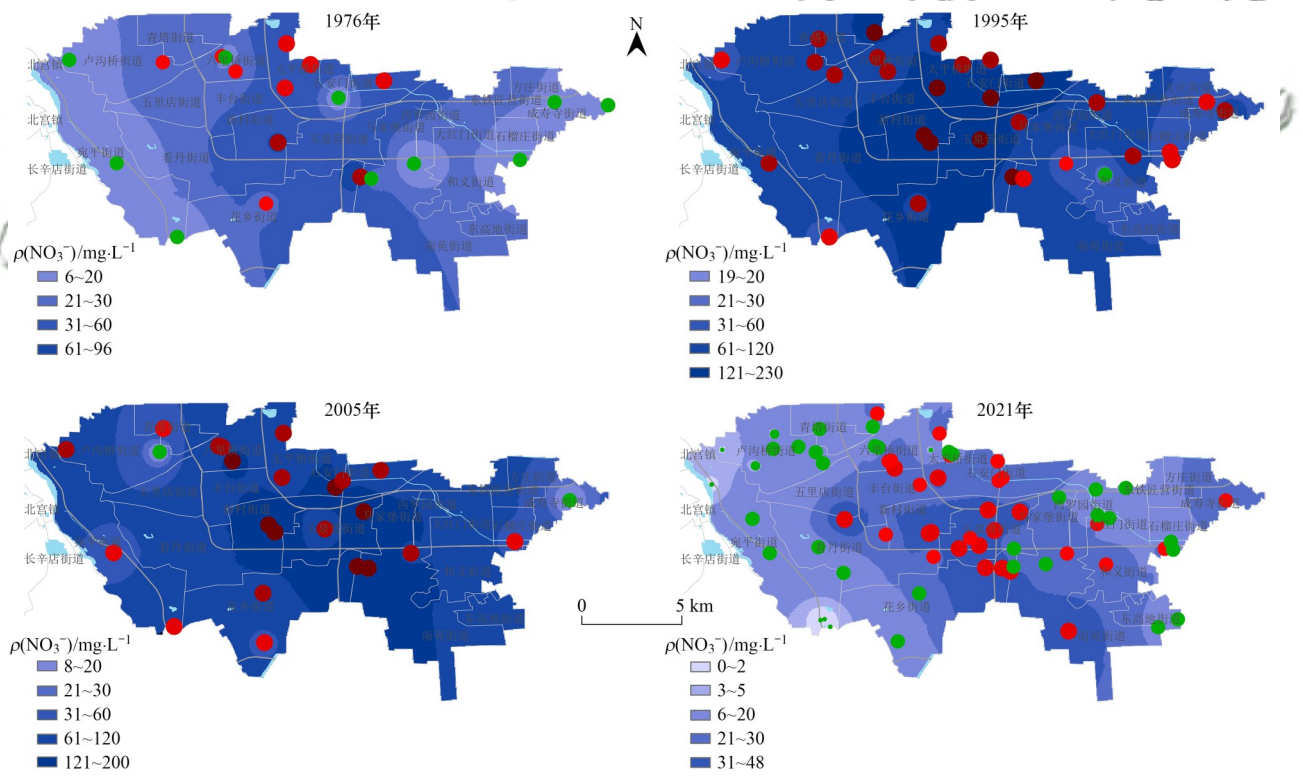
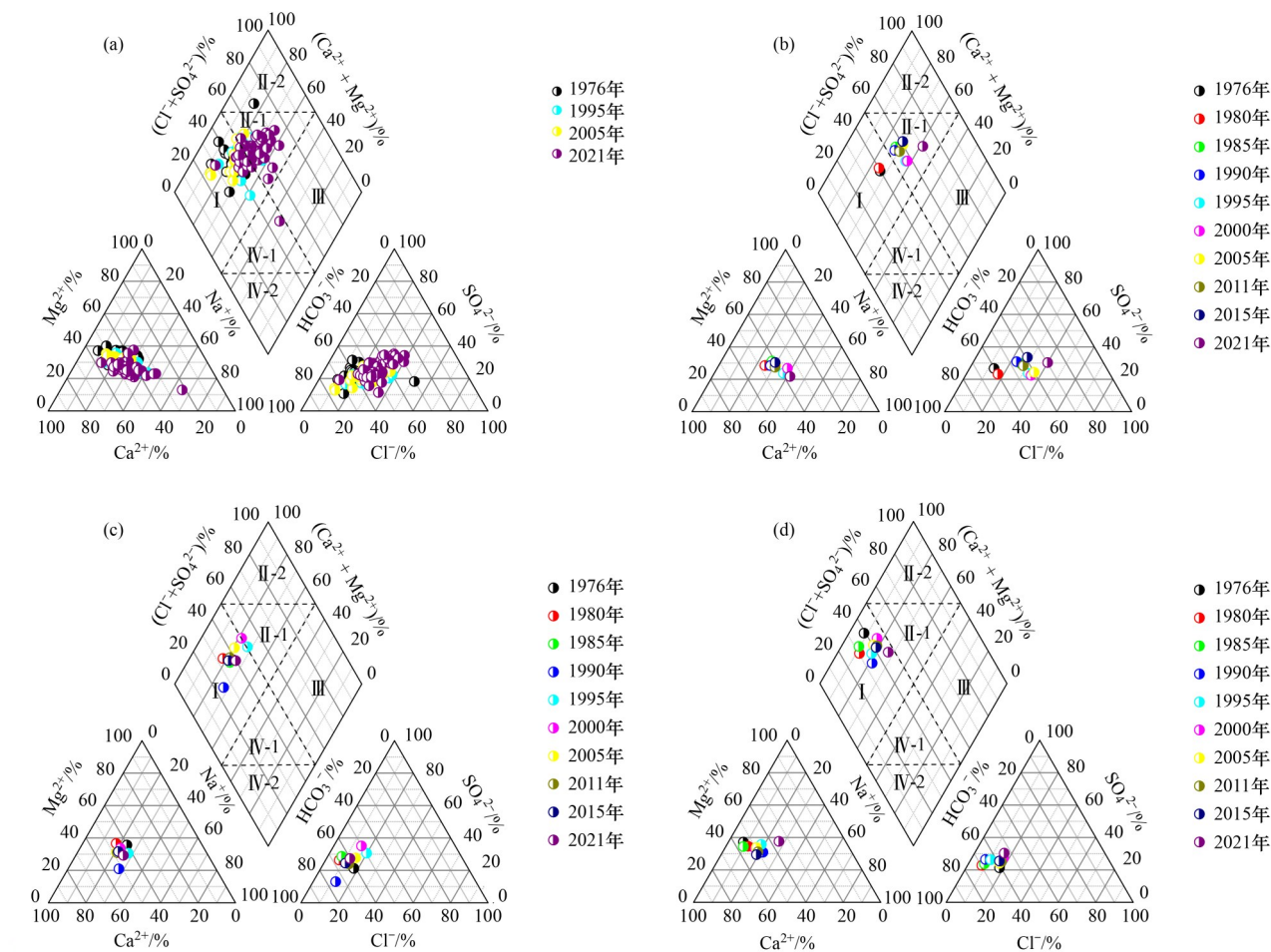


图 8 地下水中 NO₃ 多年空间分布特征
Fig. 8 Spatial distribution characteristics of nitrate nitrogen in groundwater over the years

子均以 HCO_3^- 为主；根据苏卡列夫分类法，1976 年研究区地下水以 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{--Ca}\cdot\text{Mg}\cdot\text{Na}$ 型水占比最高，为 40.00%；2021 年地下水以 $\text{HCO}_3\cdot\text{Cl}\cdot\text{SO}_4\text{--Ca}\cdot\text{Na}\cdot\text{Mg}$ 型水占比最高，为 23.88%；1976~2021 年地下水中 Na^+ 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 质量浓度呈升高趋势。分析

地下水水化学组分异常点位发现，2021 年地下水样品中阳离子以 Na^+ 质量浓度最高的监测井占比仅 7.46%，主要位于北天堂村、羊坊村、张仪村和北京华源清泉水厂附近；地下水中阴离子以 Cl^- 质量浓度最高的监测井主要位于新丰驾校、张仪村和热力



(a)区域所有监测井, (b)张仪村监测井, (c)巴庄子监测井, (d)潘家庙监测井; I: $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$, II-1: $\text{Cl}\cdot\text{SO}_4\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$, II-2: $\text{SO}_4\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$, III: Cl-Na , IV-1: $\text{HCO}_3\cdot\text{Cl-Na}$, IV-2: $\text{HCO}_3\text{-Na}$

图9 研究区地下水水化学演变Piper图

Fig. 9 Piper chart of groundwater hydrochemical evolution in the study area

集团东巴厘岛会馆; 地下水中 Na^+ 和 Cl^- 质量浓度均最高的仅为张仪村监测井; 地下水中 SO_4^{2-} 质量浓度最高监测井位于小屯村和小瓦窑井, 小瓦窑井地下水为 $\text{SO}_4\cdot\text{Cl}\cdot\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Na}\cdot\text{Mg}$ 型水, 分析该监测井处地下水可能受到点源污染影响. 此外, 1976~2021 年地下水化学类型由 8 种增至 17 种, 地下水水化学组分及演变呈现复杂化趋势.

由图 9(b)~9(d) 可知, 1976 年和 2021 年张仪村和潘家庙监测井地下水样点标记位置由 I 区向 II 区迁移特征较明显, 尤以张仪村监测井; 而 1976~2021 年巴庄子监测井地下水样点主要标记于 I 区. 分析发现, 1976~2021 年张仪村监测井处地下水由 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Ca}\cdot\text{Mg}\cdot\text{Na}$ 型水演变为 $\text{Cl}\cdot\text{SO}_4\cdot\text{HCO}_3\text{-Na}\cdot\text{Ca}\cdot\text{Mg}$ 型水; 1990~2000 年地下水中 Na^+ 和 Cl^- 质量浓度明显升高, 至 2000 年地下水中阳离子以 Na^+ 质量浓度最高, 2021 年张仪村地下水中阳离子仍以 Na^+ 质量浓度最高, 阴离子以 Cl^- 质量浓度最高. 可见, 张仪村监测井处地下水环境受人为影响显著. 位于中游的巴庄子监测井处地下水 1976

年至 2021 年由 $\text{HCO}_3\cdot\text{Cl}\cdot\text{SO}_4\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 型水演变为 $\text{HCO}_3\cdot\text{Cl}\cdot\text{SO}_4\text{-Ca}\cdot\text{Mg}\cdot\text{Na}$ 型水, 地下水化学组分总体较稳定. 位于中下游的潘家庙监测井处地下水 1976 年至 2021 年由 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 型水演变为 $\text{HCO}_3\cdot\text{Cl}\cdot\text{SO}_4\text{-Mg}\cdot\text{Ca}\cdot\text{Na}$ 型水, 1995 年前地下水中 SO_4^{2-} 质量浓度呈升高趋势, 2005 年后地下水中 Na^+ 质量浓度呈升高趋势, 2007~2021 年地下水水化学成分较稳定.

综上, 1976~2021 年各监测井地下水中 Na^+ 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 质量浓度总体呈升高趋势, 地下水水化学成分多样性和复杂性反映出地下水环境受人为影响程度较高, 尤以 1976~1995 年受人为影响程度更显著, 分析此阶段外来污染源输入量较大; 2005~2021 年部分区域地下水环境趋于稳定, 但仍有部分区域地下水受影响程度持续增大.

2.3 水化学成因分析

2.3.1 Gibbs 分析

传统 Gibbs 图以 TDS 质量浓度值为对数纵坐标, 以 $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 和 $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 为横坐标, 如图

10(a)和10(b),反映大气降水、岩石风化、蒸发结晶和海水入侵等水化学形成天然影响因素^[36,37]。由图10(a)和图10(b)可知,研究区多数样点分布于岩石风化和蒸发结晶端元之间,说明受岩石风化和蒸发结晶双重影响;且1976年样点更靠近岩石风化端,1995、2005和2021年多数地下水样点更靠近蒸发结晶端,说明地下水水文地球化学演变过程中受蒸发作用影响增强,受岩石风化作用影响减弱。此外,地下水中 NO_3^- 和 SO_4^{2-} 质量浓度增大是人为影响的重要表征,同样以TDS质量浓度值为对数纵坐标,以 $(\text{Cl}^- + \text{NO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})/(\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^- + \text{NO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$ 为横坐标绘制图10(c),当样点标记位置较图10(b)整体右移

时,表明地下水环境已经受到人为活动影响,且右移距离越大受影响程度越高。对比图10(c)与图10(b)可知,各年份地下水样点向右迁移距离较大,说明河东区大部分区域已受人为影响,该结果与水化学分析结果较一致。

2.3.2 岩石风化贡献率分析

Gibbs图解法初步得出丰台区浅层地下水水化学形成受岩石风化和蒸发结晶双重影响,利用端元法可以进一步探究岩石风化作用影响大小,根据 $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 与 $\text{HCO}_3^-/\text{Na}^+$ 值将地下水离子主要风化物来源分为碳酸盐岩、硅酸盐岩和蒸发盐岩这3种^[38],如图11。

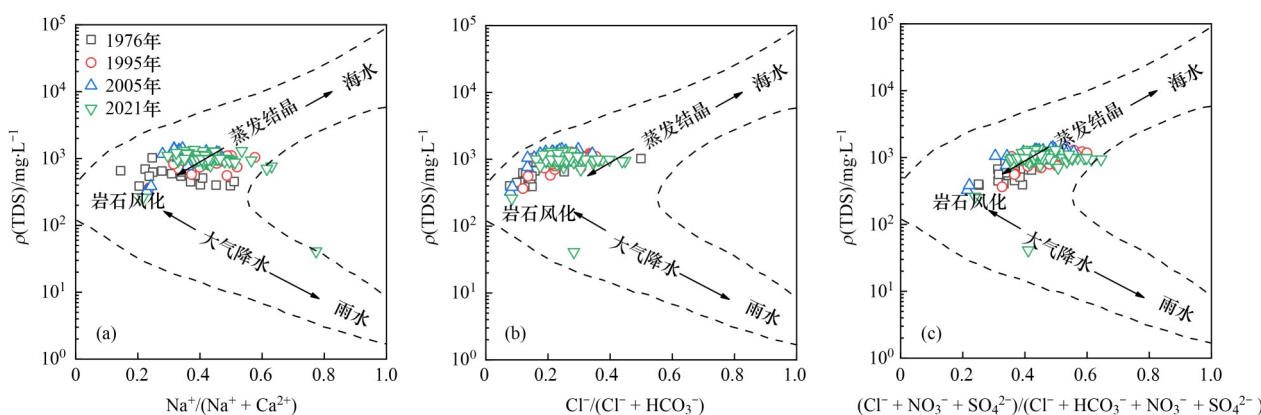


图10 研究区多年地下水Gibbs图

Fig. 10 Gibbs chart evolution of groundwater in the study area

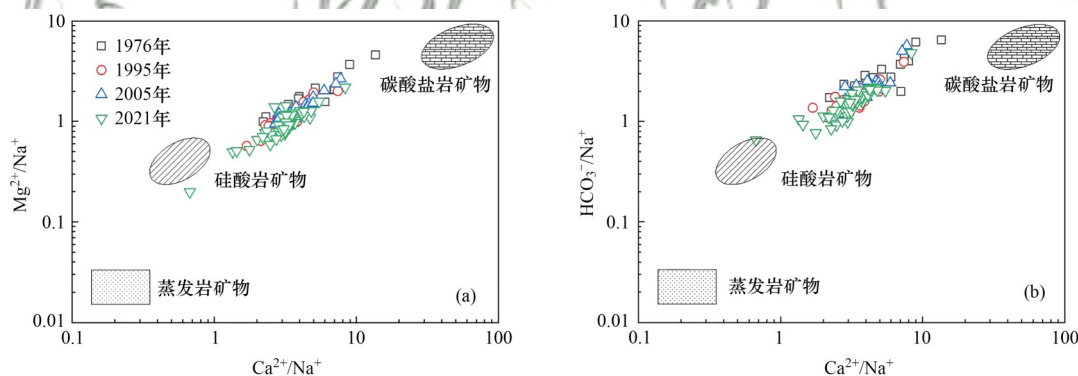


图11 研究区岩石风化溶解相对贡献

Fig. 11 Relative contribution of weathering dissolution of rocks in the study area

由图11可知,研究区地下水样点主要标记于硅酸盐岩矿物和碳酸盐岩矿物风化端元之间,表明研究区地下水主要受硅酸盐矿物、碳酸盐矿物溶解作用影响,蒸发岩矿物溶解作用贡献可忽略。对比分析发现,1976~2021年地下水样点总体向硅酸盐矿物端元移动。其中,1976年部分样点更靠近碳酸盐矿物,说明碳酸盐矿物溶解占主要优势;1995年丰台河东区各样点标记位置较1976年相比向硅酸盐矿物端元迁移距离较大,说明受硅酸盐矿物溶解影响作用增强;2005年地下水样点相较于1995年呈现向碳酸盐

矿物端元迁移趋势,而2021年地下水样点主要标记于硅酸盐矿物与碳酸盐矿物端元连线的中点及左侧区域。总体上,丰台河东区地下水受硅酸盐矿物溶解作用的影响逐渐增强,受碳酸盐矿物溶解作用的影响逐渐减弱,而硅酸盐矿物溶解作用影响增强是人为影响的主要表征,这与前人研究的结果一致^[39]。

2.3.3 阳离子交替吸附

氯碱指数在分析水岩作用过程中阳离子交替吸附的方向与程度具有较好的应用,CAI-I和CAI-II计算如公式(1)和公式(2),研究区地下水样品中

CO_3^{2-} 浓度均小于检测限,各年份地下水样品氯碱指数如图 12.将地下水样点 CAI- I 和 CAI- II 值与 0 对比,以多数样点氯碱指数值代表反应主方向与强度^[40].

$$\text{CAI-I} = \frac{\text{Cl}^- - (\text{Na}^+ + \text{K}^+)}{\text{Cl}^-} \quad (1)$$

$$\text{CAI-II} = \frac{\text{Cl}^- - (\text{Na}^+ + \text{K}^+)}{\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-} + \text{CO}_3^{2-} + \text{NO}_3^-} \quad (2)$$

分析图 12 可知,丰台河东区浅层地下水各年 CAI- I 和 CAI- II 值范围依次为 $-0.94 \sim 0.81$ 和 $-0.14 \sim 0.54$. 1976、1995、2005 和 2021 年丰台河东区浅层地下水 CAI- I 和 CAI- II 值均小于 0 的样品数依次为 7、2、2 和 7 个,占比依次为 35.00%、6.45%、7.69% 和 10.45%. 总体上研究区地下水阳离子交替吸附作用较弱,仅在卢沟桥和北天堂监测井附近地下水阳离子交替吸附正反应较强,其他监测井以阳离子交替吸附反应为主,即地下水中发生 Na^+ 和 K^+ 与含水介质中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 交换为主.

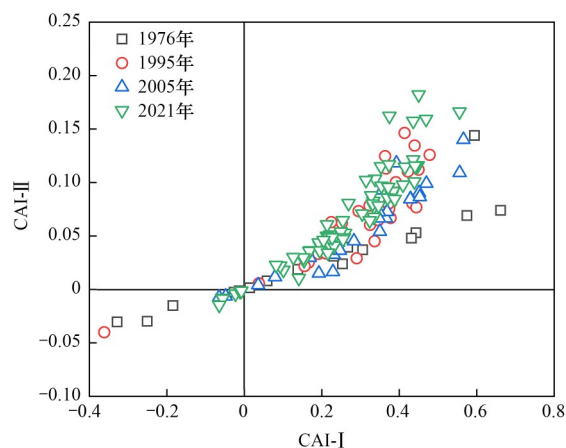


图 12 丰台区地下水氯碱指数

Fig. 12 Groundwater Chlor-alkali index in Fengtai District

2.3.4 离子比例分析

2.3.4.1 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 来源分析

离子比例分析可一定程度上反映离子来源,揭示地下水中水化学组分的影响因素,研究区地下水中 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 等离子比例关系如图 13.

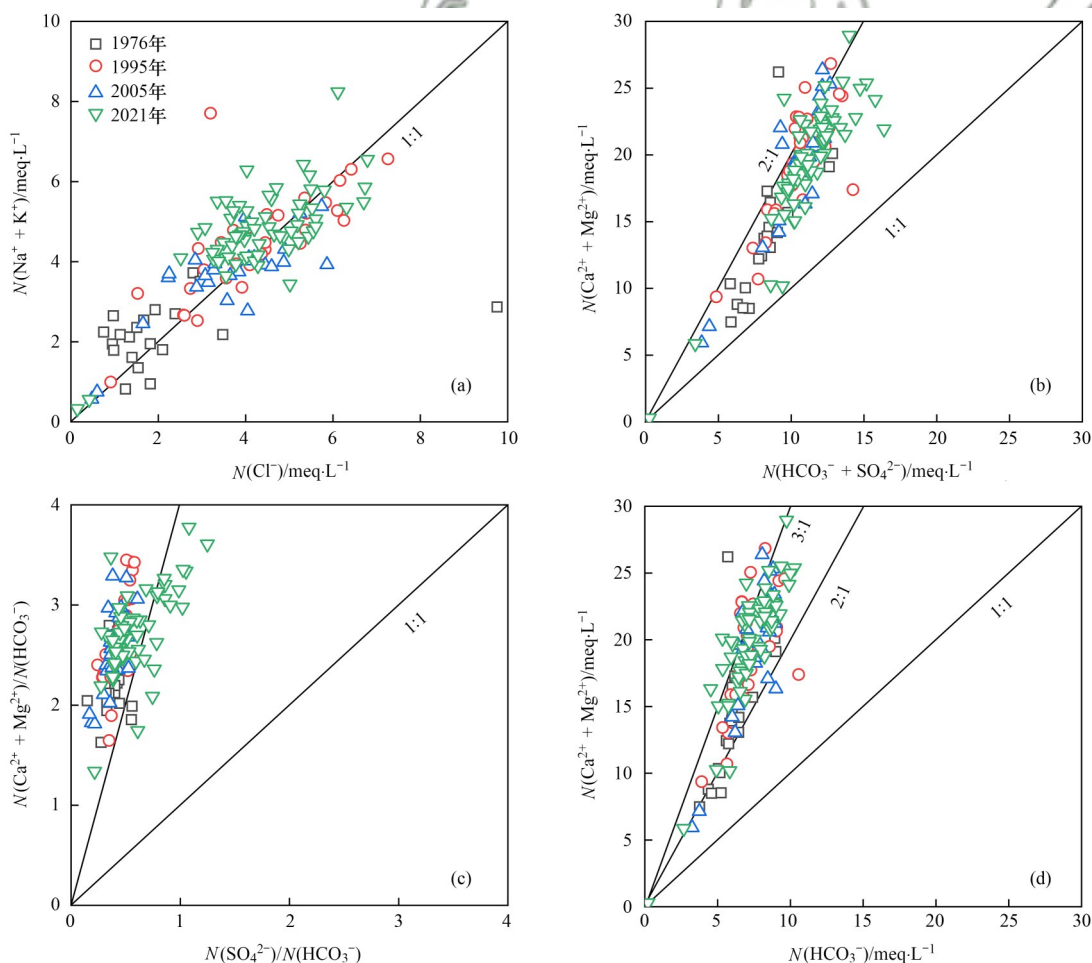


图 13 丰台区地下水主要离子比例

Fig. 13 Main ion proportion map of groundwater in Fengtai District

据研究,当地下水环境受人为影响较小时,地下水样点主要分布于 $N(\text{Na}^+ + \text{K}^+)/N(\text{Cl}^-) = 1$ 线附近,

相关性较高^[41].从图 13(a)可以看出,研究区地下水样点主要分布于 1:1 线附近,且 1976 年地下水中

($\text{Na}^+ + \text{K}^+$)和 Cl^- 毫克当量浓度明显小于其他年份,仅北天堂监测井处地下水中 $N(\text{Na}^+ + \text{K}^+)/N(\text{Cl}^-) = 2.99$,比值相对最高;1995年地下水中($\text{Na}^+ + \text{K}^+$)和 Cl^- 毫克当量浓度明显较1976年升高,而后呈较稳定趋势.1976、1995、2005和2021年丰台河东区浅层地下水中($\text{Na}^+ + \text{K}^+$)和 Cl^- 相关系数 R^2 依次为0.13、0.54、0.65和0.53,相关性总体呈上升趋势. $N(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/N(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$ 值常用来分析地下水中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 和 SO_4^{2-} 来源,当地下水样点沿着1:1线分布时,说明地下水中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 全部来源于碳酸盐风化和蒸发岩矿物溶解作用^[42].图13(b)中丰台区地下水样点主要分布于直线 $N(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/N(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$ 为1:1线左侧、2:1线右侧区域,表明碳酸盐、蒸发岩和硅酸盐均是 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的来源,且以碳酸盐风化和蒸发岩结晶作用为主^[43]. $[N(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/N(\text{HCO}_3^-)]/[N(\text{SO}_4^{2-})/N(\text{HCO}_3^-)]$ 可用来分析碳酸和硫酸参与碳酸盐溶解情况,当 $N(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/N(\text{HCO}_3^-) = 1$, $N(\text{SO}_4^{2-})/N(\text{HCO}_3^-) = 0$ 时,说明仅有碳酸参与碳酸盐溶解;当 $N(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/N(\text{HCO}_3^-) = 2$, $N(\text{SO}_4^{2-})/N(\text{HCO}_3^-) = 1$ 时,说明仅有硫酸参与碳酸盐溶解^[44];图13(c)中丰台区地下水样点均分布于直线 $[N(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/N(\text{HCO}_3^-)]/[N(\text{SO}_4^{2-})/N(\text{HCO}_3^-)] = 2$ 左侧,且以 $[N(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/N(\text{HCO}_3^-)]/[N(\text{SO}_4^{2-})/N(\text{HCO}_3^-)] = 4$ 线附近及左侧区域为主,表明碳酸和硫酸均参与碳酸盐矿物的溶解过程,且以碳酸为主. $N(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/N(\text{HCO}_3^-)$ 可以用来确定 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的来源,当比值为1时,表明地下水中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 主要来源于方解石、白云石和石膏的溶解,当比值大于1时,主要来源于碳酸盐溶解,当比值小于1时,主要来源于硅酸盐和蒸发岩的溶解^[45,46];图13(d)中丰台区地下水样点均分布于直线 $N(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/N(\text{HCO}_3^-) = 1$ 左侧,各年河东区地下水中 $N(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/N(\text{HCO}_3^-)$ 值在1.34~4.60区间,表明研究区各年份地下水中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 主要来源于碳酸盐溶解.尤其1976年,该年份地下水各样品 $N(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/N(\text{HCO}_3^-)$ 值在1.63~4.60,中位数为2.16.

综上,各年份地下水中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 主要来源于碳酸盐矿物溶解,1976年研究区地下水水体受人为影响程度较小,1995年地下水环境明显受人为影响,该结果与前述岩石风化贡献率分析结果一致.

2.3.4.2 NO_3^- 和 Cl^- 来源分析

根据以往研究,地下水环境受人为活动影响(如农业活动、城市污水等)时,水体中 Na^+ 和 Cl^- 质量浓度随之升高,且 $\text{NO}_3^-/\text{Na}^+$ 、 Cl^-/Na^+ 值越高,影响越大^[47],研究区各年份地下水样品 $\text{NO}_3^-/\text{Na}^+$ 、 Cl^-/Na^+ 值如图14.

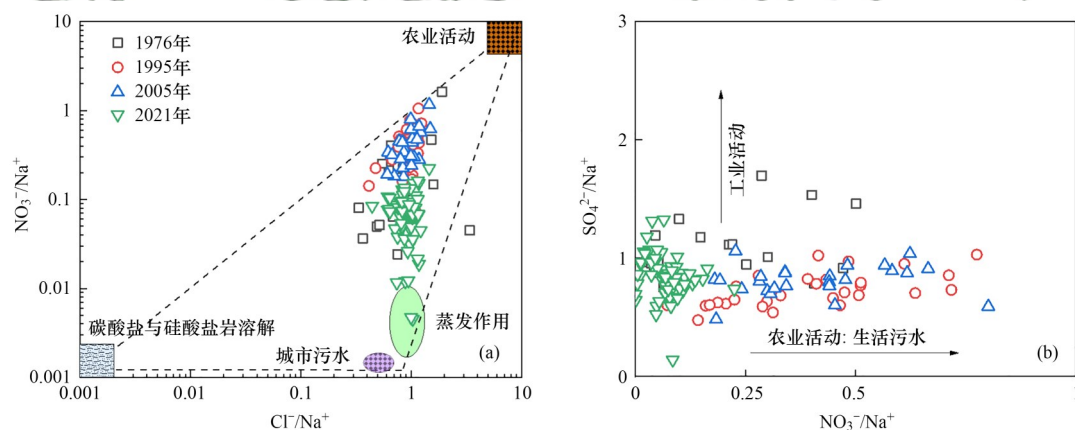


图14 地下水 $\text{NO}_3^-/\text{Na}^+$ 与 Cl^-/Na^+ 和 $\text{SO}_4^{2-}/\text{Na}^+$ 值

Fig. 14 Ratio of $\text{NO}_3^-/\text{Na}^+$ to Cl^-/Na^+ and $\text{SO}_4^{2-}/\text{Na}^+$ in groundwater

由图14(a)可知,各年份地下水样点均标记于1:1线右侧、城市污水与农业活动端元之间,距离盐岩溶解端元较远,说明农业活动、城市污水是地下水体中 NO_3^- 和 Cl^- 主要来源.对比分析发现,1976年地下水样点较均匀标记于城市污水与农业活动端元之间,而1995年和2005年地下水样点标记位置明显靠近农业活动端元,说明此阶段农业活动对地下水环境的影响更突出;2021年地下水样点相较于1995年和2005年标记特征表现为远离农业活动端元、靠近城市污水端元.对比图14(a)

和图14(b)可知,相较于1995年和2005年,2021年研究区地下水环境受农业活动的影响作用减弱、城市污水的影响作用增强,亦受到工业活动部分影响,这与近些年我国出台针对性的水环境保护相关法律、法规、方案和实施计划等关系密切.

3 讨论

3.1 地下水水化学演变

1976、1995、2005和2021年研究区地下水主要水化学类型依次为: $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4 - \text{Ca} \cdot \text{Mg}$ 、 $\text{Cl} \cdot \text{SO}_4 -$

$\text{Ca}\cdot\text{Mg}$ 、 $\text{HCO}_3\cdot\text{Cl}\cdot\text{Ca}\cdot\text{Mg}\cdot\text{Na}$ 和 $\text{HCO}_3\cdot\text{Cl}\cdot\text{SO}_4\cdot\text{Ca}\cdot\text{Na}\cdot\text{Mg}$. 从地下水样点在 Piper 图上标记位置和迁移趋势看, 1976 年地下水样点主要标记于 I 区, 1995、2005 和 2021 年地下水样点主要标记于 I 区与 II 区. 其中, 1976~1995 年、2005~2021 年地下水样点标记位置均呈现由 I 区→II-2 区迁移特征, 即 1976~2021 年区域范围内地下水样点在 Piper 图标记位置由 I 区向 II 区迁移趋势明显. 1976~2021 年研究区地下水中主要阴阳离子依次为 HCO_3^- 和 Ca^{2+} , 地下水中 Na^+ 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 质量浓度随时间的推移呈升高趋势; 1976、1995、2005 和 2021 年研究区地下水化学类型依次为 8、10、9 和 17 种. 与 1976 年相比, 2021 年地下水化学类型种类明显增多, 空间分布差异性较强, 且地下水化学组分异常点数量明显增多.

沿地下水流向上, 1976 年和 2021 年位于上游的张仪村监测井、中游的巴庄子监测井和中下游的潘家庙监测井处地下水化学演变特征依次为: $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\cdot\text{Ca}\cdot\text{Mg}\cdot\text{Na} \longrightarrow \text{Cl}\cdot\text{SO}_4\cdot\text{HCO}_3\cdot\text{Na}\cdot\text{Ca}\cdot\text{Mg}$ 、 $\text{HCO}_3\cdot\text{Cl}\cdot\text{SO}_4\cdot\text{Ca}\cdot\text{Mg} \longrightarrow \text{HCO}_3\cdot\text{Cl}\cdot\text{SO}_4\cdot\text{Ca}\cdot\text{Mg}\cdot\text{Na}$ 、 $\text{HCO}_3\cdot\text{Ca}\cdot\text{Mg} \longrightarrow \text{HCO}_3\cdot\text{Cl}\cdot\text{SO}_4\cdot\text{Mg}\cdot\text{Ca}\cdot\text{Na}$. 1976~2021 年张仪村和潘家庙监测井处地下水水化学组分演变特征较明显, 地下水中 Na^+ 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 质量浓度呈波动增大趋势, 其浓度和波动性明显高于巴庄子监测井处地下水.

总体上, 地下水水化学成分在区域范围内和沿地下水流向上均呈现多样性与复杂性, 客观反映人为活动下对地下水环境污染影响较大, 推测可能受点源和面源污染叠加作用, 影响和改变着研究区地下水水文地球化学演变过程, 且现状地下水水化学组分受人为污染源输入影响仍显著.

3.2 地下水资源管理与污染防控

丰台区地下水污染源主要有工业废水、生活污水和农药化肥施用等, 农业活动和城市污水是地下水体中 NO_3^- 和 Cl^- 主要来源, 农业活动污染与该区历史上存在污灌、渗坑和渗井关系密切; 加之河东区北、东面和主城区接壤, 早期工业企业生产活动频繁, 存在生产废水偷排漏排、污染防治措施缺失和监管不到位等问题, 故研究区地下水历史污染较重. 结合现阶段水资源管理技术与手段、区域潜在污染源分布情况, 可从以下 4 个方面重点提高地下水资源管理和污染防控水平: 第一, 加强污染源头控制, 结合研究区地下水污染防治重点区划定成果, 重点建立研究区管控区范围内重点排污企业动态清单, 严格落实排污许可, 杜绝偷排和漏排现象; 第二, 建立在线取水计量设备安装制度, 推动

全区地下水开发利用动态监测与云监管; 第三, 调整和优化地下水饮用水水源开发利用方案, 从居民饮用水安全角度建议对区内已有的饮用水水源并采取地下水置换或降低开采量等方法, 严控地下水饮用水水源供水质量; 第四, 持续开展南水北调水源对永定河涵养补给、永定河定量回补对地下水环境质量改善和地下水位大幅抬升对其他已有建构筑物的次生影响等研究, 严格管控和持续监测南水北调回补水质量.

4 结论

(1) TH、TDS 和 NO_3^- 仍是研究区地下水主要超标指标, 地下水中 TDS 和 HCO_3^- 质量浓度平均值在 2005 年达到峰值后呈下降趋势; TH、 NO_3^- 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 质量浓度平均值在 1995 年达到峰值后呈下降趋势. 从污染范围变化看, 各年地下水中 Cl^- 、 SO_4^{2-} 和 TH 污染范围总体呈扩大趋势, TDS 和 NO_3^- 污染范围呈先扩大后缩小趋势, 2021 年研究区地下水中 TDS 和 NO_3^- 质量浓度平均值低于或接近于地下水 III 类标准值, 存在向好趋势.

(2) Piper 图显示各年地下水样点主要标记于 I 区和 II 区, 阳离子均以 Ca^{2+} 为主, 阴离子均以 HCO_3^- 为主. 区域范围内, 各年份所有监测井处地下水水化学类型空间分布差异逐渐增大. 沿地下水流向上, 张仪村和潘家庙 2 个监测井处地下水类型变化均较大, 尤以位于上游的张仪村监测井. 自 1976 年至今, 研究区地下水水化学组分在区域范围内和沿地下水流向上均呈现多样化与复杂化趋势, 地下水环境受人为活动影响显著.

(3) 从水化学天然成因分析, Gibbs 图反映出 1976 年地下水受岩石风化作用为主, 其他年份地下水受岩石风化和蒸发结晶双重作用, 且以蒸发作用为主; 端元法得出水岩作用中受硅酸盐矿物溶解作用影响逐渐增强, 受碳酸盐矿物溶解作用的影响逐渐减弱; 氯碱指数结果得出研究区地下水阳离子交替作用较弱; 离子比例分析反映出地下水中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 主要来源于碳酸盐矿物溶解.

(4) 地下水中外源输入的 NO_3^- 和 Cl^- 主要来源于农业活动和城市污水. 2005 年前农业活动影响更显著, 受 20 世纪 80 年代大量渗坑、渗井、工业和生活污水灌溉直排影响, 加之污染影响存在滞后性和持久性; 2021 年地下水环境受农业活动、生活污水影响明显降低, 城市污水影响占比升高, 与近些年我国出台水环境保护相关法律法规、方案和实施计划等密切相关.

参考文献:

- [1] 蒙媛. 丰台区地下水模拟研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2007.
Meng Y. Study on the simulation of groundwater in Fengtai [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2007.
- [2] 贺国平, 郝晨东, 慕星, 等. 北京城市化进程中地下水水化学特征识别[J]. 人民黄河, 2015, 37(11): 73-76.
He G P, Hao C D, Mu X, *et al.* Identification of hydrochemistry characteristic of groundwater in the typical region during urbanization[J]. Yellow River, 2015, 37(11): 73-76.
- [3] 翟远征, 王金生, 滕彦国, 等. 北京平原区永定河地下水系统地下水化学和同位素特征[J]. 地球学报, 2011, 32(1): 101-106.
Zhai Y Z, Wang J S, Teng Y G, *et al.* Chemical and isotopic characteristics of groundwater in the Yongding River groundwater system of Beijing plain [J]. Acta Geoscientia Sinica, 2011, 32(1): 101-106.
- [4] 贺勇. 北京地下水水位回升至20年来最高[N]. 人民日报, 2022-04-08(007).
- [5] 刘久荣, 孙颖, 李志萍, 等. 北京平原区地下水位上升对地质环境影响及应对措施研究[R]. 北京: 北京市水文地质工程地质大队, 2020.
- [6] 郭高轩, 侯泉林, 许亮, 等. 北京潮白河冲洪积扇地下水水化学的分层分带特征[J]. 地球学报, 2014, 35(2): 204-210.
Guo G X, Hou Q L, Xu L, *et al.* Delamination and zoning characteristics of quaternary groundwater in Chaobai alluvial-proluvial fan, Beijing, Based on hydrochemical analysis [J]. Acta Geoscientia Sinica, 2014, 35(2): 204-210.
- [7] 艳艳, 高瑞忠, 刘廷玺, 等. 西北盐湖流域地下水水化学特征及控制因素[J]. 环境科学, 2023, 44(12): 6767-6777.
Yan Y, Gao R Z, Liu T X, *et al.* Hydrochemical characteristics and control factors of groundwater in the northwest salt lake basin [J]. Environmental Science, 2023, 44(12): 6767-6777.
- [8] Lin C Y, Abdullah M H, Praveena S M, *et al.* Delineation of temporal variability and governing factors influencing the spatial variability of shallow groundwater chemistry in a tropical sedimentary island [J]. Journal of Hydrology, 2012, 432-433: 26-42.
- [9] 李华, 文章, 谢先军, 等. 贵阳市三桥地区岩溶地下水水化学特征及其演化规律[J]. 地球科学, 2017, 42(5): 804-812.
Li H, Wen Z, Xie X J, *et al.* Hydrochemical characteristics and evolution of karst groundwater in Sanqiao District of Guiyang City [J]. Earth Science, 2017, 42(5): 804-812.
- [10] 唐金平, 张强, 胡漾, 等. 漓江冲洪积扇地下水水化学特征及控制因素分析[J]. 环境科学, 2019, 40(7): 3089-3098.
Tang J P, Zhang Q, Hu Y, *et al.* Groundwater chemical characteristics and analysis of their controlling factors in an alluvial fan of Jianjiang River [J]. Environmental Science, 2019, 40(7): 3089-3098.
- [11] 崔佳琪, 李仙岳, 史海滨, 等. 河套灌区地下水水化学演变特征及形成机制[J]. 环境科学, 2020, 41(9): 4011-4020.
Cui J Q, Li X Y, Shi H B, *et al.* Chemical evolution and formation mechanism of groundwater in Hetao Irrigation Area [J]. Environmental Science, 2020, 41(9): 4011-4020.
- [12] 郑涛, 焦团理, 胡波, 等. 渭河流域中部地区地下水水化学特征及其成因分析[J]. 环境科学, 2021, 42(2): 766-775.
Zheng T, Jiao T L, Hu B, *et al.* Hydrochemical characteristics and origin of groundwater in the central Guohe River Basin [J]. Environmental Science, 2021, 42(2): 766-775.
- [13] Huang G X, Liu C Y, Sun J C, *et al.* A regional scale investigation on factors controlling the groundwater chemistry of various aquifers in a rapidly urbanized area: a case study of the Pearl River delta [J]. Science of the Total Environment, 2018, 625: 510-518.
- [14] Gibrilla A, Fianko J R, Ganyaglo S, *et al.* Nitrate contamination and source apportionment in surface and groundwater in Ghana using dual isotopes (^{15}N and $^{18}\text{O}-\text{NO}_3$) and a Bayesian isotope mixing model [J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2020, 233, doi: 10.1016/j.jconhyd.2020.103658.
- [15] 丰台成为全市首家开展地下水污染防治试验区建设的行政区 [EB/OL]. <http://www.bjft.gov.cn/ftq/bmdt/202201/2fdff5cde9e847c78a1491d565f16b7e.shtml>, 2022-01-05.
- [16] 肖勇, 莫培, 尹世洋, 等. 北京南郊平原地下水水化学特征及成因分析[J]. 环境工程, 2021, 39(8): 99-107.
Xiao Y, Mo P, Yin S Y, *et al.* Hydrochemical characteristics and genesis of groundwater in southern suburb of Beijing plain [J]. Environmental Engineering, 2021, 39(8): 99-107.
- [17] Luo Z R, Zhao S Q, Wu J, *et al.* The influence of ecological restoration projects on groundwater in Yongding River basin in Beijing, China [J]. Water Supply, 2019, 19(8): 2391-2399.
- [18] 李海京. 北京市丰台区东高地岩溶裂隙水与第四系地下水的水力联系[J]. 城市地质, 2008, 3(4): 16-18.
Li H J. The connection between the karst fissure water in the Donggaodi area and the quaternary water [J]. Urban Geology, 2008, 3(4): 16-18.
- [19] 秦景, 牛文龙. 北京西南部山前平原区地下水水质评价及其影响因素[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2020, 18(3): 161-169.
Qin J, Niu W L. Water quality assessment and influencing factors of groundwater in the piedmont plain area in southwest Beijing [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2020, 18(3): 161-169.
- [20] 刘宏斌, 李志宏, 张云贵, 等. 北京平原农区地下水硝态氮污染状况及其影响因素研究[J]. 土壤学报, 2006, 43(3): 405-413.
Liu H B, Li Z H, Zhang Y G, *et al.* Nitrate contamination of groundwater and its affecting factors in rural areas of Beijing plain [J]. Acta Pedologica Sinica, 2006, 43(3): 405-413.
- [21] 李文娟. 北京市集约化农区地下水硝酸盐时空分布特征及脆弱性评价研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2013.
Li W J. Spatial distribution and vulnerability assessment of groundwater nitrate under intensive agricultural regions of Beijing [D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2013.
- [22] 孔晓乐, 杨永辉, 曹博, 等. 永定河上游地表水-地下水水化学特征及其成因分析[J]. 环境科学, 2021, 42(9): 4202-4210.
Kong X L, Yang Y H, Cao B, *et al.* Hydrochemical characteristics and factors of surface water and groundwater in the upper Yongding River basin [J]. Environmental Science, 2021, 42(9): 4202-4210.
- [23] 徐庆勇, 武晓梅, 马宏, 等. 丰台区地下水硝酸盐氮分布特征及生态风险评价[J]. 环境科学与技术, 2018, 41(10): 219-225.
Xu Q Y, Wu X M, Ma H, *et al.* Distribution characteristics and ecological risk assessment of nitrate nitrogen in groundwater of Fengtai plain area [J]. Environmental Science & Technology, 2018, 41(10): 219-225.
- [24] Zhou P P, Wang Z M, Zhang J Y, *et al.* Study on the hydrochemical characteristics of groundwater along the Taklimakan Desert Highway [J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(20), doi: 10.1007/s12665-016-6204-2.
- [25] Piper A M. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses [J]. Eos, Transactions American Geophysical

- Union, 1944, **25**(6): 914-928.
- [26] Gibbs R J. Mechanisms controlling world water chemistry [J]. Science, 1970, **170**(3962): 1088-1090.
- [27] Wang K R, Chen H W, Li F L, *et al.* Spatial distribution characteristics of nitrogen pollution in a typical karst groundwater system evaluating spatiotemporal variations of groundwater quality in northeast Beijing by self-organizing map [J]. Water, 2020, **12**, doi:10.1007/s12517-020-05401-y.
- [28] 金爱芳, 殷秀兰, 李长青, 等. 张家口地区枯水期地下水水化学特征及其成因机制分析 [J]. 环境科学, 2024, **45**(2): 826-836.
- Jin A F, Yin X L, Li C Q, *et al.* Hydrochemical characteristics and genesis mechanism of groundwater in the dry period in Zhangjiakou area [J]. Environmental Science, 2024, **45**(2): 826-836.
- [29] Schoeller H. Qualitative evaluation of groundwater resources [A]. Methods and technics of groundwater investigation and development [C]. Paris: UNESCO, 1967. 44-52.
- [30] Alam M F, Akhter M, Mazumder B, *et al.* Assessment of some heavy metals in selected cosmetics commonly used in Bangladesh and human health risk [J]. Journal of Analytical Science and Technology, 2019, **10**(1), doi: 10.1186/s40543-018-0162-0.
- [31] 田大永, 张娅, 霍光杰, 等. 郑州市不同埋藏深度地下水水化学特征及成因分析 [J]. 科学技术与工程, 2023, **23**(7): 2776-2786.
- Tian D Y, Zhang Y, Huo G J, *et al.* Analysis of the hydrochemical characteristics of groundwater in Zhengzhou City with different depths and the formation mechanism [J]. Science Technology and Engineering, 2023, **23**(7): 2776-2786.
- [32] Li J L, Wang W, Wang D H, *et al.* Hydrochemical and stable isotope characteristics of lake water and groundwater in the Beiluhe basin, Qinghai-Tibet Plateau [J]. Water, 2020, **12**(8), doi: 10.3390/w12082269.
- [33] Guo Y L, Zhang C, Xiao Q, *et al.* Hydrogeochemical characteristics of a closed karst groundwater basin in north China [J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2020, **325**(2): 365-379.
- [34] 张志雄, 王仕琴, 张依章, 等. 雄安新区唐河水库残留污染物对地下水水化学动态的作用机制 [J]. 环境科学, 2021, **42**(11): 5312-5321.
- Zhang Z X, Wang S Q, Zhang Y Z, *et al.* Dynamic mechanisms of groundwater quality by residual contaminants of the Tanghe wastewater reservoir in Xiong'an New Area [J]. Environmental Science, 2021, **42**(11): 5312-5321.
- [35] 赵解春, 李玉中, Ichiji Y, 等. 地下水硝酸盐污染来源的推断与溯源方法概述 [J]. 中国农学通报, 2010, **26**(18): 374-378.
- Zhao J C, Li Y Z, Ichiji Y, *et al.* Summary on deduction and trace the source methods for ground water nitrate contamination [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, **26**(18): 374-378.
- [36] 郑涛, 秦先燕, 吴剑雄. 店埠河流域地表水-地下水水化学特征及其成因分析 [J]. 环境科学, 2024, **45**(2): 813-825.
- Zheng T, Qin X Y, Wu J X. Hydrochemical characteristics and its origin of surface water and groundwater in Dianbu River basin [J]. Environmental Science, 2024, **45**(2): 813-825.
- [37] 郭高轩, 代垠东, 许亮, 等. 北京西山岩溶地下水化学特征及成因分析 [J]. 环境科学, 2024, **45**(2): 802-812.
- Guo G X, Dai Y D, Xu L, *et al.* Chemical characteristics and genetic analysis of karst groundwater in Beijing Xishan Area [J]. Environmental Science, 2024, **45**(2): 802-812.
- [38] Xing L N, Guo H M, Zhan Y H. Groundwater hydrochemical characteristics and processes along flow paths in the north China plain [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2013, **70-71**: 250-264.
- [39] 北京市地下水资源调查评价 [R]. 北京市: 北京市水文地质工程地质大队, 2017.
- [40] Kumar S, Venkatesh A S, Singh R, *et al.* Geochemical signatures and isotopic systematics constraining dynamics of fluoride contamination in groundwater across Jamui district, Indo-Gangetic alluvial plains, India [J]. Chemosphere, 2018, **205**: 493-505.
- [41] 王攀, 靳孟贵, 路东臣. 河南省永城市浅层地下水化学特征及形成机制 [J]. 地球科学, 2020, **45**(6): 2232-2244.
- Wang P, Jin M G, Lu D C. Hydrogeochemistry characteristics and formation mechanism of shallow groundwater in Yongcheng City, Henan Province [J]. Earth Science, 2020, **45**(6): 2232-2244.
- [42] Ma R, Wang Y X, Sun Z Y, *et al.* Geochemical evolution of groundwater in carbonate aquifers in Taiyuan, northern China [J]. Applied Geochemistry, 2011, **26**(5): 884-897.
- [43] 唐春雷, 申豪勇, 赵春红, 等. 古堆泉域岩溶地下水水化学特征及成因 [J]. 环境科学, 2023, **44**(9): 4874-4883.
- Tang C L, Shen H Y, Zhao C H, *et al.* Hydrochemical characteristics and formation causes of ground karst water systems in Gudui spring catchment [J]. Environmental Science, 2023, **44**(9): 4874-4883.
- [44] 刘元晴, 周乐, 吕琳, 等. 河北省顺平县地下水化学特征及其成因分析 [J]. 环境科学, 2023, **44**(5): 2601-2612.
- Liu Y Q, Zhou L, Lv L, *et al.* Hydrochemical characteristics and control factors of groundwater in Shunping County, Hebei Province [J]. Environmental Science, 2023, **44**(5): 2601-2612.
- [45] 黄望望, 姜春露, 陈星, 等. 淮南新集矿区主要充水含水层水化学特征及成因 [J]. 地球与环境, 2020, **48**(4): 432-442.
- Huang W W, Jiang C L, Chen X, *et al.* Chemical characteristics and genesis of deep groundwater in the Xinji mining area [J]. Earth and Environment, 2020, **48**(4): 432-442.
- [46] 崔玉环, 王杰, 刘友存, 等. 升金湖湖交汇区地表-地下水水化学特征及成因分析 [J]. 环境科学, 2021, **42**(7): 3223-3231.
- Cui Y H, Wang J, Liu Y C, *et al.* Hydro-chemical characteristics and ion origin analysis of surface groundwater at the Shengjin Lake and Yangtze River interface [J]. Environmental Science, 2021, **42**(7): 3223-3231.
- [47] 彭红霞, 侯清芹, 曾敏, 等. 雷州半岛地下水化学特征及控制因素分析 [J]. 环境科学, 2021, **42**(11): 5375-5383.
- Peng H X, Hou Q Q, Zeng M, *et al.* Hydrochemical characteristics and controlling factors of groundwater in the Leizhou Peninsula [J]. Environmental Science, 2021, **42**(11): 5375-5383.

CONTENTS

Spatial Distribution Characteristics of PM _{2.5} and O ₃ in Beijing-Tianjin-Hebei Region Based on Time Series Decomposition	YAO Qing, DING Jing, YANG Xu, <i>et al.</i>	(2487)
Ozone Sensitivity Analysis in Urban Beijing Based on Random Forest	ZHOU Hong, WANG Ming, CHAI Wen-xuan, <i>et al.</i>	(2497)
Prediction of Ozone Pollution in Sichuan Basin Based on Random Forest Model	YANG Xiao-tong, KANG Ping, WANG An-yi, <i>et al.</i>	(2507)
Establishment and Effective Evaluation of Haikou Ozone Concentration Statistical Prediction Model	FU Chuan-bo, LIN Jian-xing, TANG Jia-xiang, <i>et al.</i>	(2516)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Ozone Concentration and Health Benefit Assessment in the Beijing-Tianjin-Hebei Region from 2015 to 2020	GAO Ran, LI Qin, CHE Fei, <i>et al.</i>	(2525)
Water-soluble Inorganic Ion Content of PM _{2.5} and Its Change Characteristics in Urban Area of Beijing in 2022	CHEN Yuan-yuan, CUI Di, ZHAO Ze-xi, <i>et al.</i>	(2537)
Pollution Characteristics, Source, and Health Risk Assessment of Metal Elements in PM _{2.5} Between Winter and Spring in Zhengzhou	TAO Jie, YAN Hui-jiao, XU Yi-fei, <i>et al.</i>	(2548)
Characteristics, Sources Apportionment, and Health Risks of PM _{2.5} -bound PAHs and Their Derivatives Before and After Heating in Zibo City	SUN Gang-li, WU Li-ping, XU Bo, <i>et al.</i>	(2558)
Components Characteristic and Source Apportionment of Fine Particulate Matter in Transition Period of Heating Season in Xi'an with High Time Resolution	LI Meng-jin, ZHANG Yong, ZHANG Qian, <i>et al.</i>	(2571)
Source and Cause Analysis of High Concentration of Inorganic Aerosol During Two Typical Pollution Processes in Winter over Tianjin	LU Miao-miao, HAN Su-qin, LIU Ke-xin, <i>et al.</i>	(2581)
Spatial-temporal Variation and Spatial Differentiation Geographic Detection of PM _{2.5} Concentration in the Shandong Province Based on Spatial Scale Effect	XU Yong, WEI Meng-xin, ZOU Bin, <i>et al.</i>	(2596)
Characteristics of VOCs Emissions and Ozone Formation Potential for Typical Chemicals Industry Sources in China	WU Ting, CUI Huan-wen, XIAO Xian-de, <i>et al.</i>	(2613)
Formation Potential of Secondary Organic Aerosols and Sources of Volatile Organic Compounds During an Air Pollution Episode in Autumn, Langfang	ZHANG Jing-qiao, LIU Zheng, DING Wen-wen, <i>et al.</i>	(2622)
Scale Effects of Landscape Pattern on Impacts of River Water Quality: A Meta-analysis	WANG Yu-cang, DU Jing-jing, ZHANG Yu, <i>et al.</i>	(2631)
Spectral Characteristics and Sources of Dissolved Organic Matter in Inflow Rivers of Baiyangdian Lake Water in Summer Flood Season	MENG Jia-jing, DOU Hong, CHEN Zhe, <i>et al.</i>	(2640)
Analysis on Hydrochemical Evolution of Shallow Groundwater East of Yongding River in Fengtai District, Beijing	HU Yu-xin, ZHOU Rui-jing, SONG Wei, <i>et al.</i>	(2651)
Hydrochemical Characteristics, Controlling Factors and Water Quality Evaluation of Shallow Groundwater in Tan-Lu Fault Zone (Anhui Section)	LIU Hai, WEI Wei, SONG Yang, <i>et al.</i>	(2665)
Effects of Pesticides Use on Pesticides Residues and Its Environmental Risk Assessment in Xingkai Lake (China)	WANG Wei-qing, XU Xiong, LIU Quan-zhen, <i>et al.</i>	(2678)
Characteristics of Microorganisms and Antibiotic Resistance Genes of the Riparian Soil in the Lanzhou Section of the Yellow River	WEI Cheng-chen, WEI Feng-yi, XIA Hui, <i>et al.</i>	(2686)
Analysis of the Spatiotemporal Distribution of Algal Blooms and Its Driving Factors in Chaohu Lake Based on Multi-source Datasets	JIN Xiao-long, DENG Xue-liang, DAI Rui, <i>et al.</i>	(2694)
Characteristics of Epiphytic Bacterial Community on Submerged Macrophytes in Water Environment Supplemented with Reclaimed Water	HE Yun, LI Xue-mei, LI Hong-quan, <i>et al.</i>	(2707)
Effects of Water Level Fluctuations and Vegetation Restoration on Soil Prokaryotic Microbial Community Structure in the Riparian Zone of the Three Gorges Reservoir	MEI Yu, HUANG Ping, WANG Peng, <i>et al.</i>	(2715)
Bacterial Community Structure of Typical Lake Sediments in Yinchuan City and Its Response to Heavy Metals	MENG Jun-jie, LIU Shuang-yu, QIU Xiao-cong, <i>et al.</i>	(2727)
Effect of Thermal Hydrolysis Pretreatment Time on Microbial Community Structure in Sludge Anaerobic Digestion System	ZHANG Han, ZHANG Han, WANG Jia-wei, <i>et al.</i>	(2741)
Source Apportionment of Morphine in Wastewater	SHAO Xue-ting, ZHAO Yue-tong, JIANG Bing, <i>et al.</i>	(2748)
Ecological Environment Dynamical Evaluation of Hutuo River Basin Using Remote Sensing	LI Yan-cui, YUAN Jin-guo, LIU Bo-han, <i>et al.</i>	(2757)
Spatiotemporal Evolution and Influencing Factors of Ecosystem Service Value in the Yellow River Basin	WANG Yi-qi, SUN Xue-ying	(2767)
Ecosystem Service Trade-off Synergy Strength and Spatial Pattern Optimization Based on Bayesian Network: A Case Study of the Fenhe River Basin	CAI Jin, WEI Xiao-jian, JIANG Ping, <i>et al.</i>	(2780)
Spatial-temporal Evolution and Quantitative Attribution of Habitat Quality in Typical Karst Counties of Guizhou Plateau	LI Yue, FENG Xia, WU Lu-hua, <i>et al.</i>	(2793)
Spatio-temporal Variation in NEP in Ecological Zoning on the Loess Plateau and Its Driving Factors from 2000 to 2021	ZHOU Yi-ting, YAN Jun-xia, LIU Ju, <i>et al.</i>	(2806)
Land Change Simulation and Grassland Carbon Storage in the Loess Plateau Based on SSP-RCP Scenarios	CUI Xie, DONG Yan, ZHANG Lu-yin, <i>et al.</i>	(2817)
Multi-scenario Simulation of Construction Land Expansion and Its Impact on Ecosystem Carbon Storage in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration	WU Ai-bin, CHEN Fu-guo, ZHAO Yan-xia, <i>et al.</i>	(2828)
Effects of Land Use Change on Soil Aggregate Stability and Soil Aggregate Organic Carbon in Karst Area of Southwest China	JIANG Ke, JIA Ya-nan, YANG Yan, <i>et al.</i>	(2840)
Integrated Analysis of Soil Organic Matter Molecular Composition Changes Under Different Land Uses	HUANG Shi-wei, ZHAO Yi-kai, ZHU Xin-yu, <i>et al.</i>	(2848)
Prediction Spatial Distribution of Soil Organic Matter Based on Improved BP Neural Network with Optimized Sparrow Search Algorithm	HU Zhi-rui, ZHAO Wan-fu, SONG Yin-xian, <i>et al.</i>	(2859)
Effects of Application of Different Organic Materials on Phosphorus Accumulation and Transformation in Vegetable Fields	SUN Kai, CUI Yu-tao, LI Shun-jin, <i>et al.</i>	(2871)
Intensive Citrus Cultivation Suppresses Soil Phosphorus Cycling Microbial Activity	ZHOU Lian-hao, ZENG Quan-chao, MEI Tang-ying-ze, <i>et al.</i>	(2881)
Effects of Controlled-release Blended Fertilizer on Crop Yield and Greenhouse Gas Emissions in Wheat-maize Rotation System	GAO Wei, WANG Xue-xia, XIE Jian-zhi, <i>et al.</i>	(2891)
Effect of Biochar on NO ₃ ⁻ -N Transport in Loessial Soil and Its Simulation	BAI Yi-ru, LIU Xu, ZHANG Yu-han, <i>et al.</i>	(2905)
Analysis and Evaluation of Heavy Metal Pollution in Farmland Soil in China: A Meta-analysis	YANG Li, BAI Zong-xu, BO Wen-hao, <i>et al.</i>	(2913)
Critical Review on Heavy Metal Contamination in Urban Soil and Surface Dust	WANG Xiao-yu, LIU En-feng, YANG Xiang-meng, <i>et al.</i>	(2926)
Research Progress on Solidification and MICP Remediation of Soils in Heavy Metal Contaminated Site	CHEN Yue-ru, GAO Wen-yan, CHEN Hong-ren, <i>et al.</i>	(2939)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Soil Heavy Metal in Coal Mine Area near the Yellow River in Shandong	DAI Wen-ting, ZHANG Hui, WU Xia, <i>et al.</i>	(2952)
Heavy Metal Content and Risk Assessment of Sediments and Soils in the Juma River Basin	HAN Shuang-bao, YUAN Lei, ZHANG Qiu-xia, <i>et al.</i>	(2962)
Characteristics, Ecological Risk Assessment, and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in the Yellow River Floodplain of Yinchuan City	YU Lu-jia, MA Hai-jun, WANG Cui-ping	(2971)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Soils of a City in Guangdong Province Based on Source Oriented and Monte Carlo Models	CHEN Lian, ZOU Zi-hang, ZHANG Pei-zhen, <i>et al.</i>	(2983)
Chemical Speciation, Influencing Factors, and Regression Model of Heavy Metals in Farmland of Typical Carbonate Area with High Geological Background, Southwest China	TANG Rui-ling, XU Jin-li, LIU Bin, <i>et al.</i>	(2995)
Hg Content Characteristics and Safe Planting Zoning of Paddy Soil and Rice in Guizhou Province	WEI Mei-liu, ZHOU Lang, HUANG Yan-ling, <i>et al.</i>	(3005)
Cadmium Phytoremediation Effect of Sweet Sorghum Assisted with Citric Acid on Typical Parent Soil in Southern China	LIU Meng-yu, LUO Xu-feng, GU Jiao-feng, <i>et al.</i>	(3016)
Effects of Modified Distillers' Grains Biochar on Cadmium Forms in Purple Soil and Cadmium Uptake by Rice	XIAO Nai-chuan, WANG Zi-fang, YANG Wen-na, <i>et al.</i>	(3027)
Effects of Biochar on Growth and Pollutant Accumulation of Lettuce in Soil Co-contaminated with Tetracycline and Copper	ZHENG Chen-ge, PEI Huan-huan, ZHANG Ya-shan, <i>et al.</i>	(3037)
Effects of Vermicomposting on Compost Quality and Heavy Metals: A Meta-analysis	JIANG Ji-shao, HOU Rui, CUI Hui-lin, <i>et al.</i>	(3047)
Advances in the Effects of Microplastics on Soil N ₂ O Emissions and Nitrogen Transformation	LIU Yi-ge, YANG An-qi, CHEN Shu-xin, <i>et al.</i>	(3059)
Effects of Land Use Patterns on Soil Microplastic Pollution in the Luoshijiang Sub-watershed of Erhai Lake Basin	DAI Liu-yun, HOU Lei, WANG Hua, <i>et al.</i>	(3069)
Characteristics of Microplastic Pollution in Sediment of Silty Coast in Culture Bay	SONG Ke-xin, HE Jin-cheng, LI Chang-wen, <i>et al.</i>	(3078)
Effect of Polyethylene Microplastics on the Microbial Community of Saline Soils	WANG Zhi-chao, LI Zhe, LI Jia-chen, <i>et al.</i>	(3088)
Characterization of Microplastic Surface Bacterial Community Structure and Prediction of Ecological Risk in Poyang Lake, China	YU Jin-li, ZHAO Jun-kai, LUO Si-qi, <i>et al.</i>	(3098)
Energy-saving and Emission Reduction Path for Road Traffic in Key Coastal Cities of Guangdong, Fujian and Zhejiang	XU Yi-nuo, WENG Da-wei, WANG Shuo, <i>et al.</i>	(3107)
Life Cycle Carbon Reduction Benefits of Electric Heavy-duty Truck to Replace Diesel Heavy-duty Truck	XU Yuan-yuan, GONG De-hong, HUANG Zheng-guang, <i>et al.</i>	(3119)