E方知库
Eco-Environmental Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社

中国期刊方阵
双奖期刊
中华人民共和国新闻出版总署

2020
Vol.41 No.9
第41卷 第9期

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第41卷 第9期
2020年9月15日

目 次

2020年天津市两次重污染天气污染特征分析 …… 肖致美, 徐虹, 蔡子颖, 李鹏, 刘彬, 元洁, 郑乃源, 唐邈, 陈魁, 邓小文(3879)
基于高分辨率MARGA分析成都市$PM_{2.5}$中水溶性离子污染特征 …… 尹寒梅, 陈军辉, 冯小琼, 姜涛, 钱骏, 刘政(3889)
宿迁市$PM_{2.5}$中水溶性无机离子的季节特征和来源分析 …… 马红璐, 赵欣, 陆建刚, 王辉, 许纯领, 欧阳琰, 朱新胜, 殷堂兵, 漆丹, 陆亚秋, 汪玖阳, 陆声兴(3899)
鼎湖山大气颗粒物中OC与EC的浓度特征及粒径分布 …… 李安娜, 温天雪, 华维, 杨员, 孟泽, 胡波, 辛金元(3908)
鞍山市道路扬尘碳组分特征及来源解析 …… 林孜, 姬亚芹, 林宇, 国纪良, 马妍, 赵静琦(3918)
西安市冬季$PM_{2.5}$中WSOC的光谱特性和来源解析 …… 杨毅, 张亚楠, 刘焕武, 田萍萍, 李亚飞, 雷颖, 王一博(3924)
长三角地区气溶胶光学性质与新粒子生成观测 …… 杜盈盈, 陈军, 张家洛, 甘桂城, 刘瑜存, 苏明旭, 楼晟荣, 周敏, 陶士康, 乔利平(3932)
连云港市挥发性有机化合物的组分特征及来源解析 …… 崔金梦, 王体健, 李秋潼, 董立文, 黄丛吾, 曹云擎(3941)
成都市城区大气VOCs季节污染特征及来源解析 …… 王成辉, 陈军辉, 韩丽, 徐晨曦, 王波, 李英杰, 刘政, 钱骏(3951)
德州市夏季臭氧敏感性特征及减排方案 …… 严茹莎(3961)
超低改造下中国火电排放清单及分布特征 …… 屈加豹, 王鹏, 伯鑫, 薛晓达, 董广霞, 崔磊, 康明雄, 王彤, 汤铃, 朱法华, 李时蓓(3969)
浙江省人为源氨排放清单建立及分布特征 …… 赵睿东, 于兴娜, 侯新红, 沈丽(3976)
垃圾焚烧烟气中二噁英控制技术的评估与筛选 …… 赵思岚, 奚鹏飞, 郭凤艳, 邓双, 贾建丽(3985)
兰州市两场典型降水事件稳定同位素特征及其水汽来源 …… 韩婷婷, 张明军, 王圣杰, 杜勤勤, 马转转, 郭蓉, 曹晏风(3993)
然乌湖流域地表水水化学特征及控制因素 …… 张涛, 王明国, 张智印, 刘廷, 何锦(4003)
河套灌区地下水化学演变特征及形成机制 …… 崔佳琪, 李仙岳, 史海滨, 孙亚楠, 安海军, 邢进平(4011)
石期河流域地下水化学特征及物质来源分析 …… 李笑, 于爽, 李亮, 郭永丽(4021)
长江中下游湖泊水体氮磷比时空变化特征及其影响因素 …… 季鹏飞, 许海, 詹旭, 朱广伟, 邹伟, 朱梦圆, 康丽娟(4030)
2016~2017年长荡湖流域河湖系统营养盐时空分布机制分析 … 李新艳, 李恒鹏, 姜三元, 马培, 赖锡军, 邓建才, 陈东强, 耿建伟(4042)
菹草对湖泊水质及浮游植物群落结构的影响 …… 康丽娟, 许海, 邹伟, 朱广伟, 朱梦圆, 季鹏飞, 陈洁(4053)
金泽水库库区细菌群落构建过程与关键驱动因子分析 …… 刘明坤, 童俊, 朱慧峰, 白晓慧(4062)
典型氟工业园周边河流沉积物中全(多)氟化合物的分布特征 …… 孙琳婷, 赵祯, 唐建辉(4069)
微塑料对河水抗生素抗性基因的影响 …… 周昕原, 王言仔, 苏建强, 黄福义(4076)
莲花水库水体中抗生素污染特征及生态风险评价 …… 廖杰, 魏晓琴, 肖燕琴, 李青松, 范洪勇, 刘学军, 庄马展, 刘超翔(4081)
拟柱孢藻生长及碱性磷酸酶活性对不同磷浓度和磷形态响应的株系间差异 …… 叶金梅, 赵莉, 罗旭, 彭亮, 雷腊梅(4088)
妫水河湿地植物作用及调水水质响应模拟 …… 李亚娟, 杜彦良, 毕二平, 王亮, 陈翠柏(4095)
浅基质层干植草沟运行效果的现场实验 …… 张佳炜, 李田, 张庭秀(4105)
海绵城市地块汇水区颗粒污染物的传输 …… 李佳, 谢文霞, 姜智绘, 单溪环, 廖云杰, 赵洪涛, 李叙勇(4113)
天然黄铁矿吸附去除水中Sb(Ⅴ):性能与机制 …… 石松, 吴乾元, 李新正, 黄满红(4124)
过硫酸盐氧化处理含萘磺酸废水 …… 章晋门, 卢钧, 刘晓琛, 陈泉源(4133)
温度对城市污水厌氧生物滤池运行效果与菌群结构的影响 …… 刘智斌, 刘秀红, 周桐, 章世勇, 李健敏, 杨庆(4141)
ABR-MBR耦合工艺启动及优化反硝化除磷性能 …… 缪新年, 汪倩, 郭凯成, 刘文如, 沈耀良(4150)
低温下全自养脱氮颗粒污泥适应低基质效能 …… 刘雨馨, 王建芳, 钱飞跃, 陈倩苗, 乔伟, 沈聪(4161)
雄安新区土壤重金属地球化学监测关键问题探讨 …… 郭志娟, 周亚龙, 杨峥, 赵传冬, 成杭新, 孔牧, 彭敏(4169)
基于土壤重金属及PAHs来源的人体健康风险定量评价:以北京某工业污染场地为例 …… 吴志远, 张丽娜, 夏天翔, 贾晓洋, 李慧颖, 王世杰(4180)
基于乡镇尺度的西南重金属高背景区土壤重金属生态风险评价 …… 张富贵, 彭敏, 王惠艳, 马宏宏, 徐仁廷, 成晓梦, 侯召雷, 陈子万, 李括, 成杭新(4197)
云南兰坪铅锌矿区优势植物重金属富集特性及应用潜力 …… 张龙, 张云霞, 宋波, 吴勇, 周子阳(4210)
水培试验下水稻Pb吸收累积关键生育期 …… 胡雨丹, 周航, 辜娇峰, 霍洋, 邓鹏辉, 魏宾纭, 刘俊, 廖柏寒(4218)
田间条件下养分调控八宝景天Cd修复效率 …… 郭俊姆, 杨俊兴, 杨军, 郑国砥, 周小勇, 陈同斌, 卞建林, 孟晓飞, 李玉峰(4226)
桉树枝条生物炭输入对桂北桉树人工林酸化土壤的作用效果 …… 段春燕, 沈育伊, 徐广平, 滕秋梅, 张德楠, 何成新, 张中峰, 周龙武, 孙英杰(4234)
秸秆直接还田和炭化还田对红壤酸度、养分和交换性能的动态影响 …… 杨彩迪, 卢升高(4246)
土壤微生物群落结构对生活源和工业源再生水灌溉的差异化响应 …… 王燕, 程东会, 檀文炳, 余红, 席北斗, 姜永海, 党秋玲(4253)
粪肥和有机肥施用对稻田土壤微生物群落多样性影响 …… 理鹏, 吴建强, 沙晨燕, 叶春梅, 黄沈发(4262)
松花江下游沿江湿地土地利用变化对土壤细菌群落多样性的影响 …… 张拓, 徐飞, 怀宝东, 杨雪, 隋文志(4273)
黄土高原草地土壤细菌群落结构对于降水变化的响应 …… 李娜, 王宝荣, 安韶山, 焦峰, 黄倩(4284)
土地利用方式对会仙岩溶湿地土壤真菌群落和功能类群的影响 …… 程跃扬, 靳振江, 王晓彤, 贾远航, 袁武, 周军波(4294)
黑土真菌群落互作及其与梯度有机质碳分子结构的关系 …… 尚秋彤, 黄瑞林, 倪浩为, 隋跃宇, 孙波, 梁玉婷(4305)
贵州茂兰喀斯特森林不同演替下土壤真核微生物多样性 …… 王显, 龙健, 李娟, 刘灵飞, 廖洪凯, 李宜蓉, 杨睿(4314)
玉米秸秆生物炭固化细菌对镉砷吸附 …… 刘玉玲, 朱虎成, 彭鸥, 李丹阳, 杨蕊嘉, 彭晶, 铁柏清(4322)
无机态氮素转化机制及水土体氮源识别方法 …… 梁杏, 孙立群, 张鑫, 张洁, 付鹏宇(4333)
《环境科学》征订启事(4061) 《环境科学》征稿简则(4132) 信息(4233, 4293, 4304)

Eco-Environmental Knowledge Web
环 境 科 学
Environmental Science
第41卷第9期 2020年9月
Vol.41, No.9 Sep., 2020

河套灌区地下水化学演变特征及形成机制

崔佳琪[1], 李仙岳[1*], 史海滨[1], 孙亚楠[1], 安海军[2], 邢进平[2]
(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. 河套灌区永济灌域管理局, 巴彦淖尔 015000)

摘要: 地下水资源是我国西北干旱区的重要资源,但不合理的开发利用导致系列生态环境问题,深入探究地下水化学演变特征及形成机制,对于地下水资源的合理利用具有重要意义. 以河套灌区永济灌域为研究区,综合运用聚类分析和因子分析等统计学方法,研究了该区域地下水化学演化特征并阐明了地下水化学的形成机制,说明不同因子的影响程度. 结果表明,研究区地下水阳离子以 $Na^+ + K^+$ 为主,阴离子分别以 Cl^- 和 HCO_3^- 为主,且 $Na^+ + K^+$ 和 Cl^- 离子具有较高的空间变异性,是决定地下水盐化的主要因子,地下水化学类型以 Cl-Na、$HCO_3 \cdot Cl \cdot SO_4$-Na 和 HCO_3-Na 型为主; 通过聚类分析,研究区地下水可分为 4 类(A_1、A_2 和 B_1、B_2 类),其中 A_1 类地下水为高矿化度 Cl-Na 型水,A_2、B_1 和 B_2 类地下水主要为 $HCO_3 \cdot Cl \cdot SO_4$-Na 和 HCO_3-Na 型水,结合因子分析,该区域地下水化学主要受“盐化”作用、碳酸盐岩溶解作用和人类活动影响,影响程度分别占了 45.976%、23.853% 和 16.678%. 蒸发盐岩溶解和阳离子交换作用是研究区 Na^+ 和 Cl^- 积聚的重要来源,农业灌溉(对土壤盐分的淋洗)和干旱(蒸腾蒸发强烈)是地下水盐化的关键驱动因素.

关键词:河套灌区; 地下水; 水化学特征; 盐化作用; 形成机制
中图分类号: X143 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2020)09-4011-10 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.202003150

Chemical Evolution and Formation Mechanism of Groundwater in Hetao Irrigation Area

CUI Jia-qi[1], LI Xian-yue[1*], SHI Hai-bin[1], SUN Ya-nan[1], AN Hai-jun[2], XING Jin-ping[2]
(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China; 2. Administration of Yongji Irrigation Area of Hetao Irrigation District, Bayannur 015000, China)

Abstract: Groundwater resources are important sources of water in the arid region of northwestern China, but their overexploitation and utilization has led to a series of ecological and environmental problems. Exploring the characteristics and mechanism of groundwater chemical evolution is important for the rational use of groundwater resources. The characteristics of groundwater chemical evolution were studied in the Yongji Irrigation Area of Hetao Irrigation District and the formation mechanism of the chemical compounds in groundwater were investigated using cluster analysis, factor analysis, and other statistical methods. The influence degree of different factors was calculated. The results showed that the major cations in groundwater in the study area were Na^+ and K^+, and the major anions were Cl^- and HCO_3^-. Moreover, Na^+, K^+, and Cl^- showed high spatial variability and were the main factors contributing to groundwater salinization. The major chemical compounds in the groundwater in the study area were Cl-Na, $HCO_3 \cdot Cl \cdot SO_4$-Na, and HCO_3-Na. Based on the cluster analysis results, the groundwater was divided into four categories (A_1, A_2, B_1, and B_2), of which A_1 was highly mineralized by Cl-Na type water, while A_2, B_1, and B_2 were mainly $HCO_3 \cdot Cl \cdot SO_4$-Na and HCO_3-Na type water. Principal component analysis results suggest that groundwater chemistry was mainly affected by salinization, carbonate karstification, and human activities with the influence degrees of 45.976%, 23.853% and 16.678%, respectively. Evaporation, salt rock dissolution, and cation exchange were important sources of Na^+ and Cl^- accumulation in the irrigation area. Agricultural irrigation (leaching of soil salts) and drought (intense transpiration) were the key drivers of groundwater salinization in the irrigation area.

Key words: Hetao irrigation area; groundwater; hydrochemical characteristics; salinization; formation mechanism

我国西北干旱区水资源短缺,地下水资源是维持当地社会经济可持续发展和保持生态环境健康的重要因素,而不合理的开发利用已引起了一系列生态环境问题,故摸清地下水环境变化规律对干旱区社会、经济、农业和生态健康发展具有重要作用[1, 2]. 地下水化学演变特征是地下水环境变化的集中反映,同时明确其形成机制也是地下水资源与农田水环境质量评价的重要内容[3]. 地下水化学特征的演变很大程度上取决于自然过程[4](水文地质条件、岩性、水岩相互作用和海水入侵等),如岩溶地下水[5, 6]主要受白云石、岩盐和石膏溶解等水岩相互作用的影响; 冲洪积扇浅层地下水化学[7]主要与岩体溶滤作用有关,而受蒸发浓缩、大气降雨及阳离子交换吸附影响不明显; 影响黄河三角洲浅层地下水化学[8]的关键因素是黄河入海流路和海水入侵. 然而随着人类活动(农业、工业和城市发展等)的加剧,对地下水的影响已不可忽视,如珠江三角洲地区[9]经过几十年的城市化和工业化发展,地下水化学类型增加到 89 种,城市化发展成为珠江三角洲

收稿日期: 2020-03-13; **修订日期**: 2020-04-02
基金项目: 国家自然科学基金项目(51539005, 51969024, 51669020); 内蒙古水利厅重大项目(NSK2017-M1); 内蒙古科技厅重大专项(zdzx2018059)
作者简介: 崔佳琪(1996~),女,硕士研究生,主要研究方向为干旱区农业水资源利用与水环境,E-mail:897237672@qq.com
* 通信作者,E-mail:lixianyue80@126.com

地下水环境变化的强大驱动力；东莞地区[10]农业肥料的过度使用、生活污水的不适当排放，造成地下水中 NO_3^-、SO_4^{2-} 和 Mg^{2+} 增多；阿尔及利亚东部 Tébessa 地区[11]由于农业使用大量的合成氮肥，硝酸盐污染成为影响地下水环境的一个严重问题.

近年来，地下水化学的研究一直是水文地质及水文地球化学领域研究的热点[12~14]. 由于人类活动的影响，具有自然属性的地下水也被赋予了社会属性[15~17]，所以探索地下水化学特征及影响因素的难度也在加大. 仅采用常规统计分析方法研究地下水和多变量的相互关系十分困难，目前大多研究均采用多元统计理论[18,19]，通过提取隐藏在原始数据群体中的重要信息，揭示水化学样品或指标之间复杂的内在联系，能更容易从众多的因子指标中归纳出影响水化学特征的主要因素，定量解释各主要因素对地下水化学特征的影响程度，同时结合 Piper 三线图和相关性分析等方法可进一步揭示地下水水化学的具体成因，从而做到定性定量分析地下水化学组分的形成机制.

河套灌区属于平原灌区，地形平缓，水力坡度小，地下径流条件较差，降水稀少，蒸发强烈，引黄水量大. 灌区主要特点是盐渍化严重，轻度、中度和重度盐渍化耕地分别占总面积的 29.8%、17.2% 和 9.2%[20]，地下水以微咸水为主，同时自 1998 年以来河套灌区实施了大规模续建配套与节水改造工程，推广节水灌溉，年均引水量由 52 亿 m^3 减少到 47 亿 m^3[21]，使得灌区地下水环境发生巨大变化，所以灌区地下水环境的演化除了受自身地质条件和气候因素等自然因素影响，同时农业活动和节水灌溉等人为影响势必会对地下水环境产生强烈的作用. 尽管杜军等[22]基于地学统计等方法对河套灌区年内地下水埋深和矿化度进行了时空上的演变分析，但没有对地下水化学特征进行详细分析. 李彬等[23]基于相关性分析和图解法等研究了节水改造前后河套灌区地下水化学特征，但并没有对地下水化学的形成机制和影响因素进行定性定量分析. 故针对这种盐渍化严重，同时节水改造等人为影响强烈的区域，探索其地下水化学特征及形成机制，对于当地地下水开采利用和农业可持续发展都具有重要意义. 本文以河套灌区永济灌域为研究区，利用聚类分析和因子分析等方法定性定量研究地下水化学特征及其形成机制，以区分自然过程和人为活动对地下水环境的影响，以期为盐渍化灌区地下水资源可持续发展提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本文选择河套灌区中游具有代表性的永济灌域(107°13′~107°42′E，40°36′~41°13′N)为研究区(图 1). 灌域总土地面积 18.36 万 hm^2，属温带大陆性干旱气候，干燥多风，日照时间长，年均气温 7.5~8.9℃，年均降雨量 100~280 mm，年均蒸发量为 2 327 mm. 该地区以农业为主，主要种植小麦、葵花和玉米，属于典型的盐渍化灌域. 灌域地势呈西南向东北倾斜，海拔在 979~1 077 m之间. 地下水流向与地面坡降基本一致，但土壤颗粒细、渗透性能差，地下水流速缓慢. 地下水总的流向自西向东，但大部分浅层地下水靠灌域内数条自南而北的排水干渠汇入

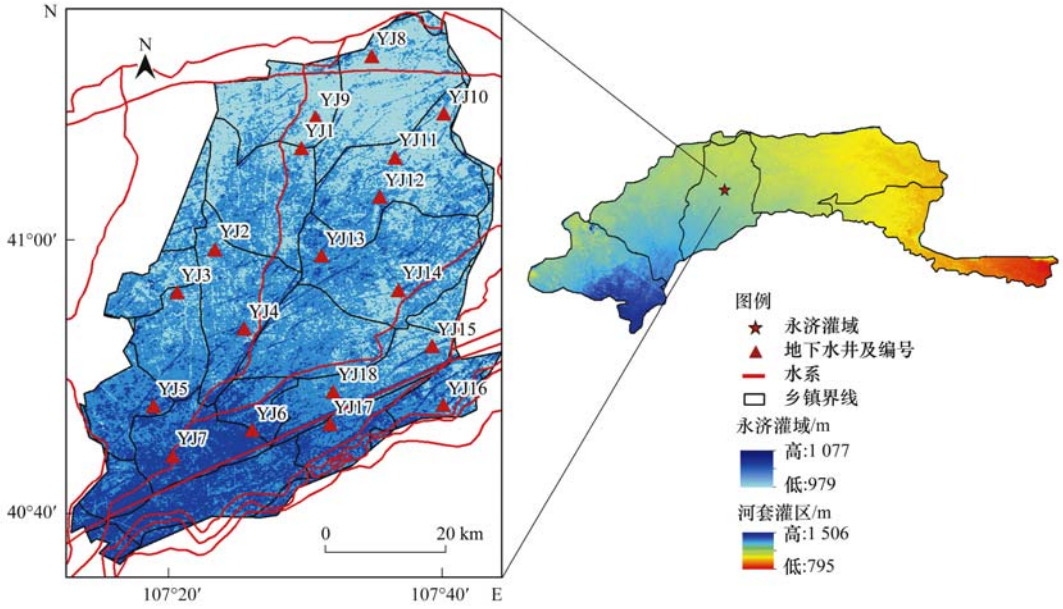

图 1 研究区采样点示意

Fig. 1 Diagram of sampling points in the study area

北部由西向东的总排水干渠,然后再经总排水干渠流入东部的乌梁素海. 灌域地下水化学受地理环境、地质构造和水文地质条件的影响,在水平及垂直方向上均具有明显的水化学分带性,表现为干旱气候带的沉降盆地灌溉型水化学特征,地下水以小于 3 $g\cdot L^{-1}$ 的微咸水为主,少部分地区为大于 3 $g\cdot L^{-1}$ 的咸水. 降水与蒸发是影响该区域地下水补给和排泄最主要的气象因素. 地下水主要由引黄灌溉补给,其次为降水入渗补给,引黄灌溉以夏灌(4 ~ 9 月)和秋浇(10 ~ 11 月)为主,灌域多年(1999 ~ 2017 年)地下水埋深和地下水矿化度分别为 2. 16 m 和 3. 42 $g\cdot L^{-1}$,引水量从 1999 年的 10. 22 亿 m^3 减少到 2017 年的 9. 21 亿 m^3,地下水循环属于典型的入渗-蒸发类型.

1. 2　样品采集与处理

根据灌域行水特点,在不同时期进行样品采集,分别于 2017 年的 3 月 6 日(夏灌前)、7 月 16 日(生育期)和 11 月 11 日(秋浇期)进行 3 次野外水样的采集与测定. 地下水埋深采用人工法测量,水样在取样后 24 h 内进行水质测定,包括 pH、八大离子(Ca^{2+}、Mg^{2+}、$Na^+ + K^+$、CO_3^-、HCO_3^-、Cl^- 和 SO_4^{2-})含量等,其中 Cl^- 用硝酸银滴定法测定,Ca^{2+}、Mg^{2+} 和 SO_4^{2-} 采用 EDTA 滴定法测定,CO_3^- 和 HCO_3^- 采用酸碱滴定法测定,Na^+ 和 K^+ 采用火焰原子吸收分光光度法,pH 值采用电位法测定; 并用八大离子的质量浓度总和来代表 TDS[24, 25],气象数据来源于中国气象科学数据共享网(http://data. cma. cn/),包括 2017 年逐月累计降雨量和逐月累计蒸发量,引排水数据来源于河套灌区永济灌域管理局.

数据可靠性用式(1)检验[26]:

$$E = \frac{\sum m_c - \sum m_a}{\sum m_c + \sum m_a} \times 100\% \qquad (1)$$

式中,E 表示相对误差,m_a 和 m_c 为阴阳离子的毫克当量浓度($meq\cdot L^{-1}$). 经计算,所有样品离子平衡误差在 ±5% 以内.

1. 3　数据分析

采用 Microsoft Excel 2013 软件进行数据处理,Stiff 图和 Piper 三线图应用 AqQA 软件绘制,Gibbs 图和离子相关性分析应用 origin 2018 软件绘制. 应用 R 语言的 pheatmap 包对研究区地下水理化指标进行聚类和热点分析,同一类(簇)中的对象具有很强的相似性,不同类(簇)间的对象有很大的相异性,从而可以对地下水进行定性分类. 应用 SPSS 22. 0 软件的主成分提取和方差最大正交旋转因子法对各理化指标进行因子分析,从而提取出多变量中具有代表性的因子组分.

2　结果与分析

2. 1　地下水理化性质及空间演变特征

研究区 TDS 变化范围为 0. 878 ~ 25. 117 $g\cdot L^{-1}$,其中小于 3 $g\cdot L^{-1}$ 的微咸水井数占 77. 78%(表 1). pH 在 7. 200 ~ 8. 700 之间,均值为 7. 757,为中性水或弱碱性水. 从离子组分的变异系数来看,地下水阴离子大小顺序为 $Cl^- > SO_4^{2-} > HCO_3^-$,阳离子大小顺序为 $Na^+ + K^+ > Mg^{2+} > Ca^{2+}$,即阴离子中 Cl^- 变异系数最大,阳离子中 $Na^+ + K^+$ 变异系数最大,变异系数范围为 1. 985 ~ 2. 137 和 1. 695 ~ 1. 857,说明 Cl^- 和 $Na^+ + K^+$ 是随环境因素变化的敏感因子,是决定地下水盐化的主要变量. 而 HCO_3^-、SO_4^{2-} 和 Ca^{2+} 变异系数相对较小,表明在研究区内分布较稳定,主要受地质背景条件控制. Na^+ 和 Cl^- 本身较高的空间变异性导致 TDS 质量浓度空间变异性较高.

表 1　研究区地下水理化指标特征

Table 1　Characteristics of physical and chemical indexes of groundwater in the study area

月份	项目	pH	埋深/m	TDS /$g\cdot L^{-1}$	($Na^+ + K^+$) /$g\cdot L^{-1}$	Ca^{2+} /$g\cdot L^{-1}$	Mg^{2+} /$g\cdot L^{-1}$	Cl^- /$g\cdot L^{-1}$	HCO_3^- /$g\cdot L^{-1}$	SO_4^{2-} /$g\cdot L^{-1}$
3	平均值	7. 922	3. 173	3. 989	0. 995	0. 126	0. 195	1. 462	0. 621	0. 590
	标准差	0. 378	1. 243	6. 018	1. 849	0. 065	0. 313	3. 123	0. 423	0. 726
	变异系数	0. 048	0. 392	1. 509	1. 859	0. 526	1. 608	2. 137	0. 681	1. 230
	最大值	8. 700	7. 120	23. 760	7. 056	0. 311	1. 270	12. 699	1. 970	2. 550
	最小值	7. 300	1. 600	0. 992	0. 081	0. 055	0. 030	0. 121	0. 282	0. 144
7	平均值	7. 767	2. 729	4. 553	1. 128	0. 135	0. 226	1. 638	0. 699	0. 727
	标准差	0. 357	1. 340	6. 478	2. 022	0. 069	0. 319	3. 330	0. 418	0. 892
	变异系数	0. 046	0. 491	1. 423	1. 792	0. 508	1. 411	2. 033	0. 599	1. 226
	最大值	8. 500	7. 110	25. 117	7. 485	0. 321	1. 320	13. 298	1. 980	3. 000
	最小值	7. 300	0. 950	0. 878	0. 112	0. 040	0. 030	0. 106	0. 269	0. 096
11	平均值	7. 583	2. 243	4. 517	1. 089	0. 129	0. 236	1. 613	0. 711	0. 739
	标准差	0. 324	1. 433	6. 199	1. 847	0. 073	0. 305	3. 200	0. 394	0. 889
	变异系数	0. 043	0. 639	1. 372	1. 695	0. 569	1. 290	1. 985	0. 554	1. 203
	最大值	8. 100	6. 980	24. 015	6. 559	0. 320	1. 295	12. 901	1. 850	3. 030
	最小值	7. 200	0. 350	0. 965	0. 084	0. 045	0. 058	0. 115	0. 259	0. 048

不同月份主要离子质量浓度大小顺序为 7 月 > 11 月 > 3 月；阳离子中，$Na^+ + K^+$ 质量浓度介于 0.081 ~ 7.485 $g \cdot L^{-1}$ 之间，占阳离子的 29% ~ 93%，为最大阳离子. 阴离子中，Cl^- 质量浓度介于 0.106 ~ 13.298 $g \cdot L^{-1}$ 之间，HCO_3^- 质量浓度介于 0.259 ~ 1.980 $g \cdot L^{-1}$ 之间，分别占阴离子的 10% ~ 84% 和 4% ~ 75%，且各井中的 TDS 变化同 $Na^+ + K^+$ 和 Cl^- 变化趋势较为一致，从而验证了 $Na^+ + K^+$ 和 Cl^- 是决定地下水盐化的主要变量（图 2）. 对比不同月份 TDS 质量浓度和地下水埋深变化可知，当大部分井的埋深较深时，TDS 质量浓度较小；而埋深较浅时，TDS 质量浓度较大，说明地下水埋深的变化可以反映水化学参数的变化，当埋深较浅时，蒸发作用强烈，TDS 质量浓度大.

地下水化学类型对于揭示水文地球化学成分起着重要的作用，利用 Piper 三线图可以了解水体的主要离子组成及演化特征. 由图 3 可知，阳离子主要集中在 Na^+ 端元，阴离子分布较为分散，多集中在 $HCO_3 \cdot Cl \cdot SO_4$ 区域，部分点位趋于 Cl^- 端元. 研究区水化学类型主要由 HCO_3-Na、$HCO_3 \cdot Cl \cdot SO_4$-Na 和 Cl-Na 型组成. 虽然研究区水化学类型构成多样，但各月份之间没有明显的差异.

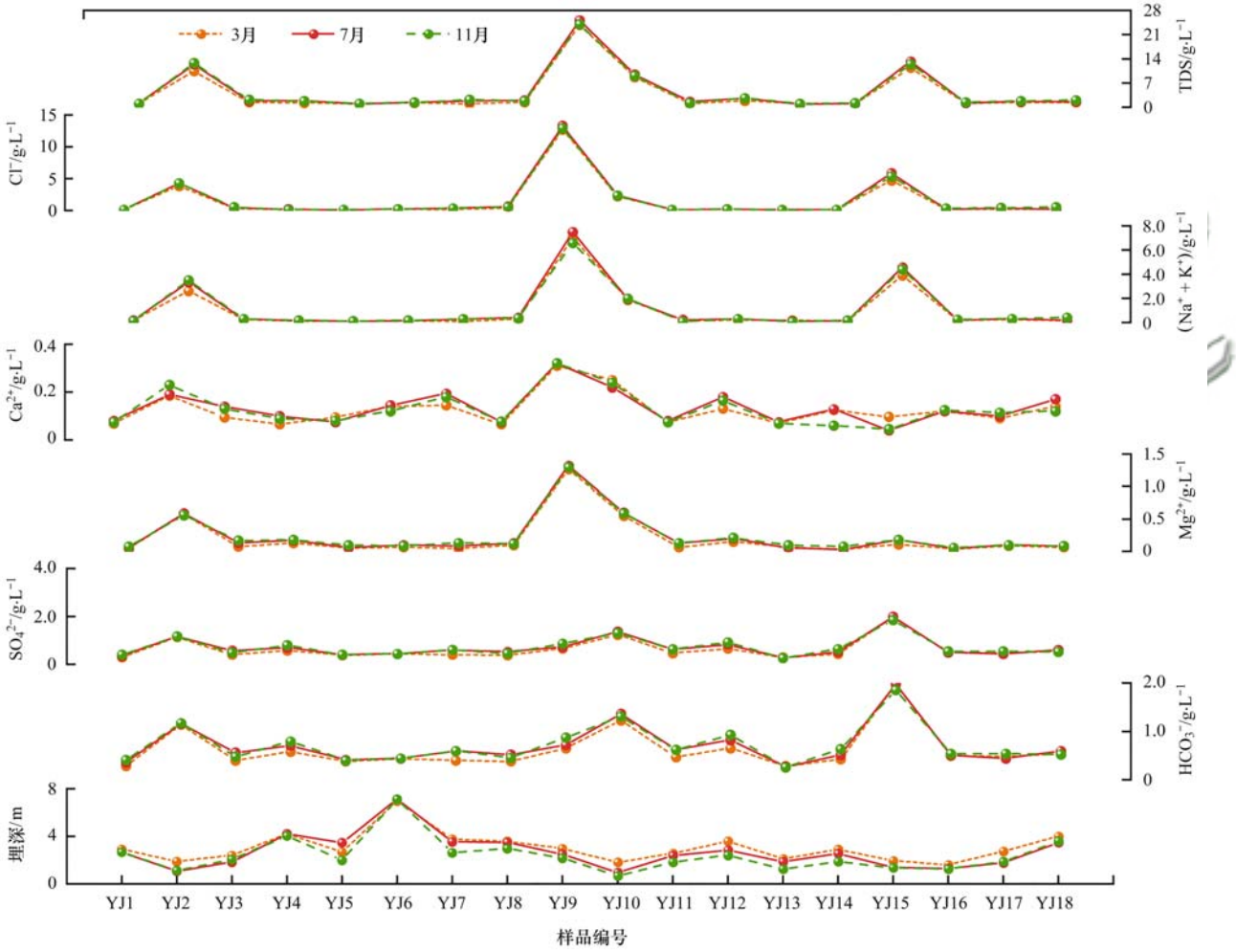

图 2 研究区地下水典型理化指标空间变化特征

Fig. 2 Spatial variations in classic physicochemical indexes in the study area

2.2 地下水化学演变主要成因分析

在每年 3 月（春灌前），河套灌区未受引黄灌溉和降雨的影响，针对该时期地下水环境，选取了地下水样中的 pH、$Na^+ + K^+$、Mg^{2+}、Ca^{2+}、SO_4^{2-}、HCO_3^-、Cl^-、TDS 和埋深共 9 项指标，将有很强的相似性的数据分到同一类或簇，把地下水定性分成几类. 利用聚类热点图（图 4）和各类地下水物理化学参数平均值（表 2），将 18 组样品分为两大类（A 和 B），4 个子集（A_1 和 A_2，B_1 和 B_2），A_1 类地下水各离子组分变化要远复杂于 A_2 类地下水，水化学类型为高矿化度的 Cl-Na 型水. 其中 YJ15 所在地区，地下为一潜伏的乌拉山隆起带，断裂极其发育，该区地下水的化学成分主要受构造活动的影响，即地下水的盐分等含量主要由沿断裂构造涌出的深层盐卤水侵染所造成. Y9 和 Y10 分布在研究区的地下水富集带[27]，即地下水径流的聚集区，该地带含水层

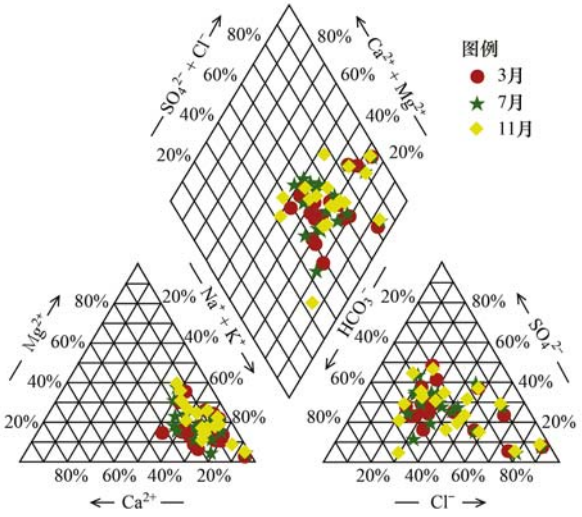

图 3　地下水化学 Piper 三线图

Fig. 3　Piper diagram of groundwater chemistry

沉积颗粒变细，主要为冲积湖积作用形成的中细砂、粉细砂和黏土夹层，透水性较差，地下水径流受阻，流速较慢，南、北双向的水流在此汇合聚集. 在干旱的气候条件下，蒸发作用强烈，地下水水质较差. A_2 类地下水埋深较大，主要位于市区周边，地下水开采程度大，水化学类型主要为 HCO_3-Na 型，与 B 类地下水相比，各离子浓度具有相同的规律. B 类地下水主要分布在灌域的径流区，农业化程度高，B_1 和 B_2 类地下水的 $Na^+ + K^+$、Mg^{2+}、Ca^{2+}、SO_4^{2-}、HCO_3^- 和 Cl^- 具有相似的离子浓度，说明其具有相似的来源，B_1 类地下水离子组分质量浓度变幅不大，水化学类型主要为 $HCO_3 \cdot Cl \cdot SO_4$-Na 型. B_2 类地下水 pH 较大，水化学类型与 B_1 相同. 因此，研究区地下水化学组分与地形地貌，地层岩性及农业活动等人类活动密切相关.

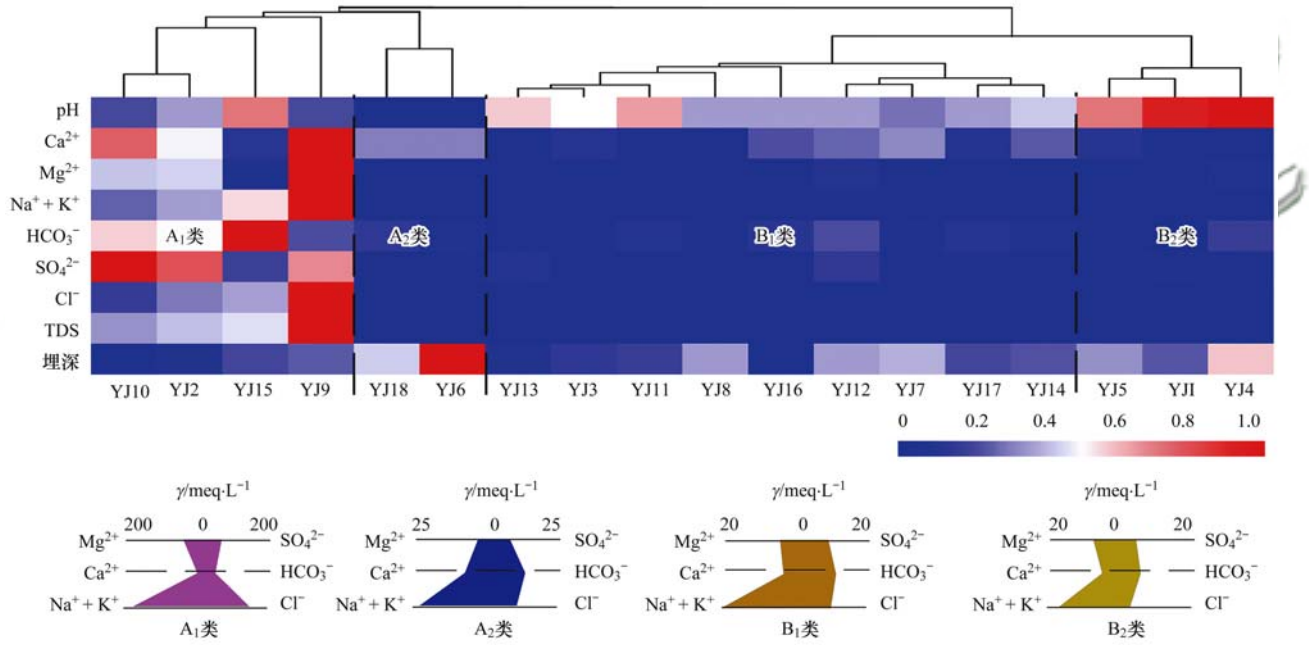

图 4　地下水环境聚类热点

Fig. 4　Heat map of groundwater environment

表 2　不同类别典型地下水理化指标统计(平均值)

Table 2　Statistical results of physical and chemical indexes of different types of typical groundwater (average value)

指标	A_1	A_2	B_1	B_2
$Ca^{2+}/g\cdot L^{-1}$	0.211	0.140	0.102	0.077
$Mg^{2+}/g\cdot L^{-1}$	0.627	0.061	0.072	0.077
$Na^+ + K^+/g\cdot L^{-1}$	3.868	0.166	0.185	0.144
$HCO_3^-/g\cdot L^{-1}$	1.248	0.484	0.442	0.416
$SO_4^{2-}/g\cdot L^{-1}$	1.740	0.262	0.260	0.267
$Cl^-/g\cdot L^{-1}$	5.887	0.217	0.213	0.137
$TDS/g\cdot L^{-1}$	13.580	1.330	1.274	1.116
pH	7.825	7.300	7.900	8.533
埋深/m	2.403	5.560	2.800	3.730

通过主成分提取和最大方差正交旋转因子分析法，完成对研究区地下水各指标参数的因子分析，从而找到变量中隐藏的具有代表性的因子[28]. 考虑到地层岩性的复杂性，应用软件 PHREEQC 程序计算了所取水样中方解石(SIC)、白云石(SID)、石膏(SIG)和岩盐(SIH)饱和指数，结合其它参数，获得了研究区 18 组水样的理化指标特征值，经 KMO 及 Bartlett 球型度检验后，得到了 3 个主因子 F_1、F_2 和 F_3，累计方差贡献率为 86.506%(表 3). 主因子 1(F_1)的综合贡献率为 45.976%，$Na^+ + K^+$、Mg^{2+}、Cl^-、Ca^{2+}、TDS 和岩盐的因子载荷较大，说明主因子 1(F_1)

主要代表“盐化”或“矿化”作用. 主因子 2(F_2)的贡献率为 23.853%,其中 HCO_3^-、方解石饱和指数、白云石饱和指数和 pH 因子载荷较大,说明主因子 2(F_2)主要受弱碱性环境下的碳酸盐岩矿物溶解对地下水化学组分的影响. 主因子 3(F_3)的贡献率为 16.678%,其中 SO_4^{2-} 和地下水埋深因子载荷值较大,有研究表明 SO_4^{2-} 与污水排放有很大关系[10],说明主因子 3(F_3)主要受人类活动(地下水开采和污水排放)的影响. 结合聚类热点图(图 4),绘制 3 个主因子得分关系图(图 5),A_1 类地下水 F_1 得分值最大,即受“高盐化”作用影响; A_2、B_1 和 B_2 类地下水的 3 个主因子得分值相差不多,说明其与主因子 F_1、F_2 和 F_3 均有很大关系,即受“高盐化”作用、碳酸盐岩溶解作用和人类活动(地下水开采和人类活动)影响.

表 3 研究区地下水各指标旋转因子载荷矩阵[1)]

Table 3 Rotation factor loading matrix of groundwater indicators in the study area

变量	因子载荷			公共性方差
	F_1	F_2	F_3	
pH	-0.232	0.876*	-0.246	0.881
Ca^{2+}	0.755*	-0.340	0.477	0.913
Mg^{2+}	0.892*	-0.086	0.306	0.897
$Na^+ + K^+$	0.974*	0.133	0.105	0.977
HCO_3^-	0.484*	0.471*	0.341	0.572
SO_4^{2-}	0.627	0.026	0.732*	0.930
Cl^-	0.980*	0.043	0.053	0.964
TDS	0.972*	0.091	0.193	0.990
埋深	-0.003	-0.373	-0.604*	0.504
SIC	0.029	0.953*	0.075	0.915
SID	0.320	0.890*	0.179	0.927
SIG	0.453	-0.304	0.754*	0.867
SIH	0.877*	0.167	0.335	0.910
贡献率/%	45.976	23.853	16.678	
累计贡献率/%	45.976	69.828	86.506	

1)* 表示较高的因子荷载; SIC、SID、SIG 和 SIH 分别为研究区地下水样品中方解石、白云石、石膏和岩盐矿物的饱和指数

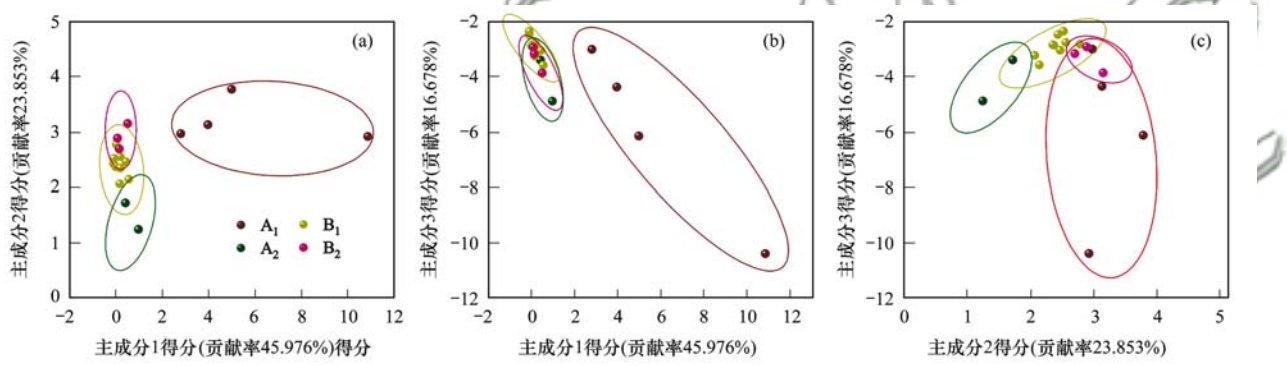

图 5 主因子得分相关关系

Fig. 5 Relationship between the three factor scores of principal component analysis

3 讨论

3.1 地下水离子组分的自然来源

由于地下水与含水层矿物之间发生反应,探讨含水层矿物水岩作用,对了解地下水化学的形成机制有着重要作用. Gibbs 图[29]通过对地下水化学组分分析,利用 TDS 与阳离子质量浓度比值 $Na^+/(Na^+ + Ca^{2+})$、阴离子质量浓度比值 $Cl^-/(Cl^- + HCO_3^-)$的关系,宏观反映地下水中主要离子的控制因素:大气降水、岩石溶滤和蒸发结晶. 将水化学数据绘于 Gibbs 图中,阳离子质量浓度比值范围为 0.358 ~ 0.991,阴离子质量浓度比值范围为 0.177 ~ 0.951. 由图 6 可知,地下水样分布在“岩石溶滤作用”与“蒸发结晶作用”区间,不同月份间差异不大,其中 A_1 类地下水样主要分布在图像的右上部,TDS 质量浓度较高,水化学离子组成主要受蒸发结晶作用,其它类地下水样主要分布在图像中偏右部,受岩石溶滤和蒸发结晶的综合作用. 说明研究区地下水化学特征主要受岩石溶滤和蒸发结晶作用.

地下水的化学成分在自然条件下,发生水岩反应产生各主要离子,各离子组分间的比例系数常被用来研究某些水文地球化学问题,通过计算水体中阴阳离子间的比值关系,指示水体溶滤作用,反映水化学形成及演变特征[30]. $\gamma(Na^+ + K^+)/\gamma(Cl^-)$(毫克当量比值关系)可以反映 $Na^+ + K^+$ 和 Cl^- 的来源[31]. 由图 7(a)可知,研究区地下水样基本位于 1∶1 当量线附近,证实蒸发盐岩和硅酸盐岩对地下水中 $Na^+ + K^+$ 和 Cl^- 的重要贡献. 除 A_1 区部分样点位于 1∶1 的线下方,Cl^- 相对于 Na^+ 过量外,大部分样点位于 1∶1 的线上方,说明水化学组分除了受蒸发盐岩与硅酸盐岩的溶解作用外,还受到阳离子交换作用等其它因素的影响,从而使 $Na^+ + K^+$ 浓度大于 Cl^- 浓度. 可能存在的风化过程有:

$$NaCl \longrightarrow Na^+ + Cl^-;\ KCl \longrightarrow K^+ + Cl^- \quad (2)$$

$$2NaAlSi_3O_8(\text{钠长石}) + 2CO_2 + 11H_2O \longrightarrow Al_2Si_2O_5(OH)_4 + 2Na^+ + 4H_4SiO_4 + 2HCO_3^- \quad (3)$$

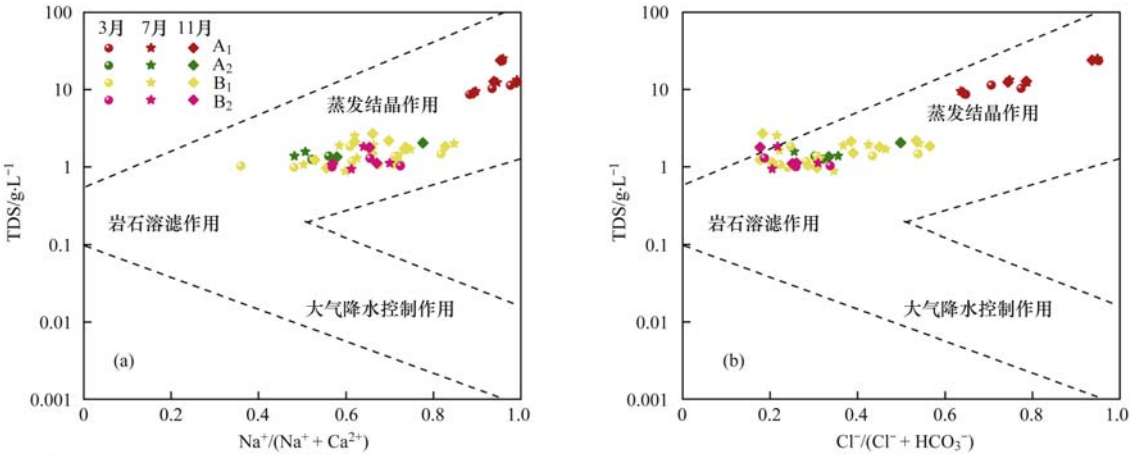

图 6　研究区地下水 Gibbs 图

Fig. 6　Gibbs diagram of groundwater in the study area

$$2KAlSi_3O_8(\text{钾长石}) + 2CO_2 + 11H_2O \longrightarrow Al_2Si_2O_5(OH)_4 + 2K^+ + 4H_4SiO_4 + 2HCO_3^- \quad (4)$$

阳离子交换作用是指在一定条件下,岩石或土壤颗粒吸附地下水中某些阳离子,从而将其原来的部分阳离子转化为地下水中的组分[32]. $\gamma(Na^+ - K^+)/\gamma[(Ca^{2+} + Mg^{2+}) - (SO_4^{2-} + HCO_3^-)]$可以反映阳离子交换作用强度. 由图 7(d)可知,地下水样品 $\gamma(Na^+ + K^+ - Cl^-)/\gamma[(Ca^{2+} + Mg^{2+}) - (SO_4^{2-} + HCO_3^-)]$表现出明显的负相关性,较为集中分布在 −1.007 的直线周围,表明地下水中发生了阳离子交换作用. 阳离子交换作用是 Na^+ 的来源之一,最常见的阳离子交换是 Ca^{2+}、Mg^{2+} 和 Na^+ 交换,化学方程式如下:

$$2Na^+ + Ca^{2+} \rightleftharpoons Ca^{2+} + 2Na^+ \quad (5)$$

$$2Na^+ + Mg^{2+} \rightleftharpoons Mg^{2+} + 2Na^+ \quad (6)$$

研究区大量 Ca^{2+}、Mg^{2+} 交换吸附固体颗粒表面的 Na^+,导致大部分水样点 Na^+ 相对 Cl^- 过量. 而 A_1 类地下水部分取样点 Cl^- 相对于 Na^+ 过量,可能是由于水样点 Na^+ 过高(3 个月平均为 7.033 $g\cdot L^{-1}$),发生 Na^+ 交换吸附 Ca^{2+} 和 Mg^{2+},消耗了部分 Na^+. 综上所述,说明蒸发盐岩作用和阳离子交换作用是灌域 Na^+ 和 Cl^- 积聚的重要来源.

有研究表明[33],地下水中的 Ca^{2+}、Mg^{2+} 可能来源于碳酸岩盐和蒸发岩盐,SO_4^{2-} 可能来源于蒸发岩盐的溶解,HCO_3^- 主要来源于碳酸盐岩溶解. 因此可用 $\gamma(Ca^{2+} + Mg^{2+})/\gamma(HCO_3^- + SO_4^{2-})$来判断 4 种离子的主要来源[34],由图 7(b)可知研究区大多数取样点位于 1∶1 等当量线上,说明其主要来源于蒸发盐岩(岩盐、石膏等)和碳酸盐岩(白云石和方解石等),其中 A_1 类地下水取样点位于等当量线下方,Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的质量浓度和不足以平衡 HCO_3^- 和 SO_4^{2-} 质量浓度和,可能是由于当 pH 值 > 7.4 和 TDS 大于 0.60 $g\cdot L^{-1}$ 时[35],Ca^{2+} 与 HCO_3^- 生成 $CaCO_3$ 沉淀. 随着碱度升高,促进白云石 $CaMg(CO_3)_2$ 沉淀的生成. 由于 Ca^{2+} 被除去,Mg^{2+}/Ca^{2+} 比率升高,当其达到 6 以上时,碳酸钙转化成白云石,当缺少过量的碱度时,就会发生白云石化作用,钙被释放出来,以石膏的形式沉淀下来,导致 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的质量浓度和小于 HCO_3^- 和 SO_4^{2-} 质量浓度和,同时阳离子交换也是 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 减少的原因之一,相关化学方程式如下:

$$Ca^{2+} + 2HCO_3^- \longrightarrow CaCO_3 + CO_2 + H_2O \quad (7)$$

$$Mg^{2+} + 2HCO_3^- + CaCO_3 \longrightarrow CaMg(CO_3)_2 + CO_2 + H_2O \quad (8)$$

$$2CaCO_3 + Mg^{2+} \longrightarrow CaMg(CO_3)_2 + Ca^{2+} \quad (9)$$

$$Ca^{2+} + 2H_2O + SO_4^{2-} \longrightarrow CaSO_4\cdot 2H_2O \quad (10)$$

由图 7(c)可知研究区水样点多位于等量线上方,暗示蒸发盐岩(岩盐、石膏和芒硝等)来源大于碳酸盐岩来源.

3.2　农业活动和气候因素对水环境的影响

研究区属无灌溉即无农业地区,主要补给因素为引黄灌溉补给和降雨入渗补给,补给期为 4 月中下旬至 10 月底整个灌溉期,其中降雨入渗补给量很少,对研究区地下水环境影响较小. 由于地下水径流条件较差,研究区主要排泄途径是蒸发消耗. 由不同月份地下水化学参数值可知[图 8(a)],7 月和 11 月各参数较 3 月均有不同程度的增大,其中 TDS、$Na^+ + K^+$、Cl^- 和 SO_4^{2-} 质量浓度增加幅度明显,其主要由于进入作物生育期后,研究区多次灌水,引水多排水少且蒸腾蒸发强烈[图 8(b)],研究区土壤水分处于灌溉-补给-蒸发的循环过程,导致大量盐分聚集在浅层地下水中,11 月经秋浇后,聚集在土壤中的大量盐分被淋洗到浅层地下水中,使得地下水盐分较高. 说明农业灌溉在满足农业生产需求的

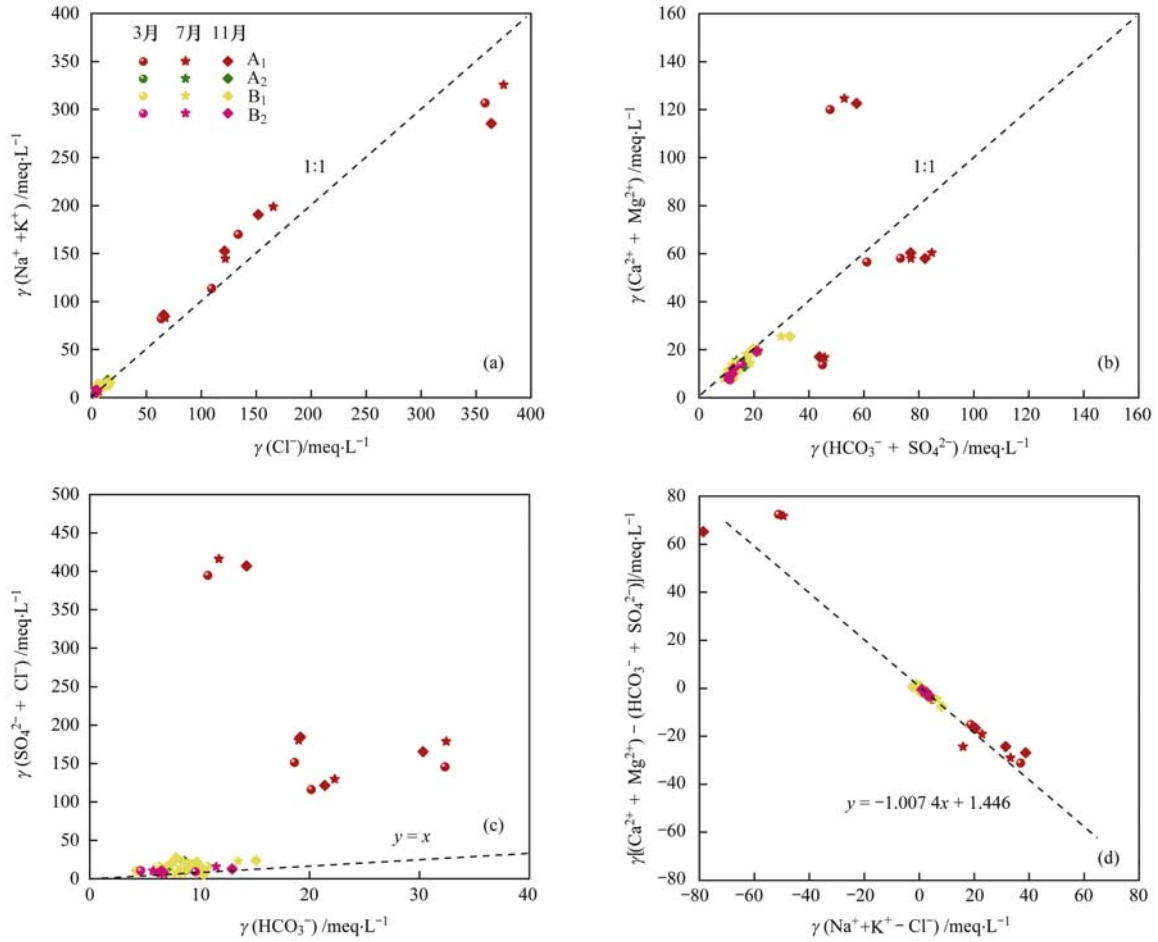

图 7 研究区地下水离子关系

Fig. 7 Ionic relationships in groundwater in the study area

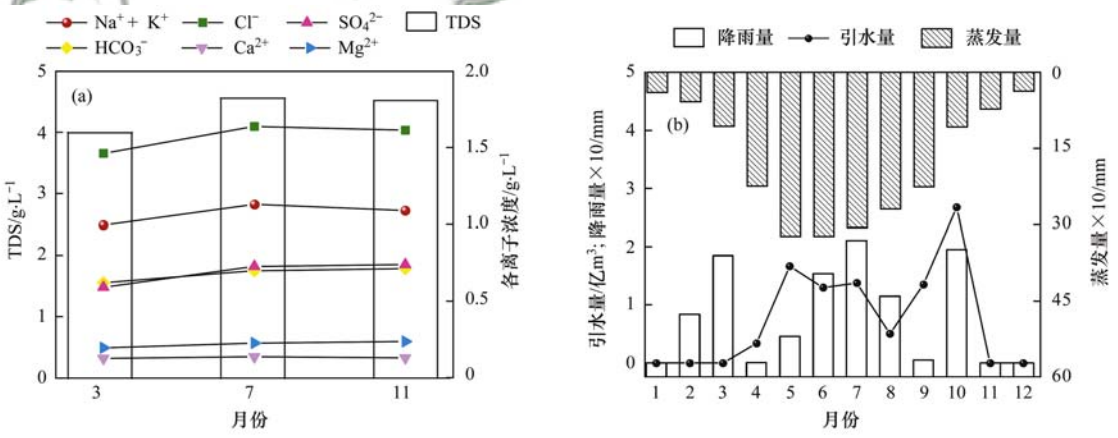

图 8 不同月份地下水化学参数和影响因素

Fig. 8 Water chemistry parameters and influencing factors in different months

同时,也带来了大量的盐类离子,同时,强烈的蒸腾蒸发使各组分含量浓缩,溶质浓度增大,导致 TDS 的大幅度增加,研究区地下水环境趋于盐化. 由图 2 可知,研究区灌溉期(7 月和 11 月)各水化学参数较未灌溉期(3 月)整体均有不同程度的增加,且 7 月由于蒸发强烈,增加幅度更大,说明农业灌溉(对土壤盐分的淋洗作用)和干旱(蒸腾蒸发强烈)作用于整个研究区,是地下水盐化的重要来源.

3.3 引排水量变化对地下水环境的影响

由 1999 ~ 2017 年 TDS 年际变化粗略反映引排水量的减少对地下水环境的影响. 由图 9 可知,引水量由 1999 年的 10.22 亿 m^3 减少到 2017 年的 9.21 亿 m^3,TDS 的年际变化反映了地下水环境呈逐年盐化趋势,其主要由于引水量的减少,不足以淡化地下水,且排水量呈逐年减少趋势,有研究表明,累积排水量与浸出盐之间存在显著的线性相关性,排出的

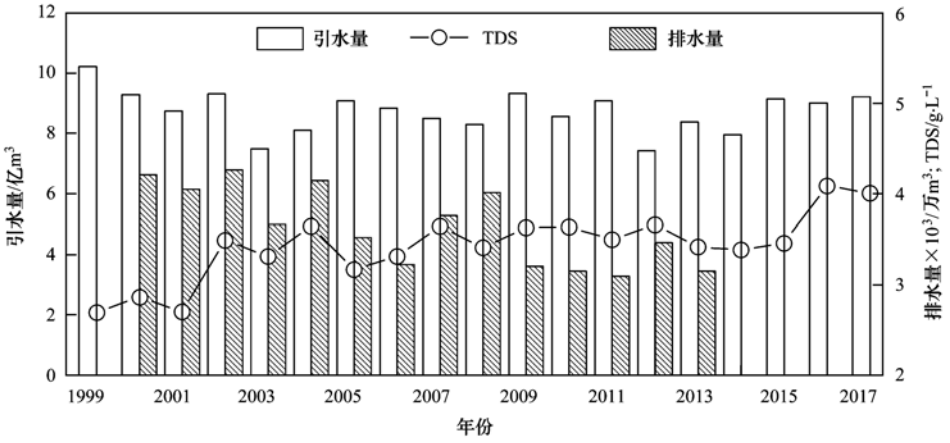

图 9　1999～2017 年研究区引排水量与地下水 TDS 变化

Fig. 9　Changes in diversion and drainage and TDS of groundwater in the study area from 1999 to 2017

盐负荷随排水量的减少而减少[36]，加之土壤中被灌溉淋洗的盐分溶解在地下水中，导致地下水环境逐年盐化. 目前引排水量条件下不能改善地下水环境，需完善排水系统并合理控制灌水量.

4　结论

(1)永济灌域地下水中 $Na^+ + K^+$ 和 Cl^- 具有较高空间变异性，是随环境因素变化的敏感因子，也是决定地下水盐化的主要变量. 地下水水化学类型以 Cl-Na、HCO_3-Na 和 $HCO_3 \cdot Cl \cdot SO_4$-Na 型为主.

(2)通过聚类热点分析，该区域地下水分为 4 类(A_1、A_2、B_1 和 B_2)：A_1 类地下水主要分布在研究区北部地下水径流的聚集带，为高矿化度 Cl-Na 型水；A_2 类分布在市区，地下水开采程度大；B 类地下水主要分布在灌域的径流区，农业化程度高. A_2、B_1 和 B_2 类地下水离子浓度变化相似，具有相似的离子来源，水化学类型主要为 $HCO_3 \cdot Cl \cdot SO_4$-Na、$HCO_3$-Na 型水.

(3)采用因子分析，识别出地下水化学受到“盐化”作用(方差贡献率为 45.976%)、碳酸盐岩溶解作用(方差贡献率为 23.853%)和人类活动(地下水开采和污水排放，方差贡献率为 16.678%)等因素的影响. 其中 A_1 类地下水主要受“盐化”作用影响，A_2、B_1 和 B_2 类地下水受混合作用的影响.

(4)自然条件下，研究区地下水主要控制因素为蒸发结晶作用和岩石溶滤作用，其中蒸发盐岩溶解和阳离子交换作用是研究区 Na^+ 和 Cl^- 积聚的重要来源. 农业灌溉(对土壤盐分的淋洗)和干旱(蒸腾蒸发强烈)是水环境趋于盐化的重要原因.

参考文献：

[1] 於昊天，马腾，邓娅敏，等. 江汉平原东部地区浅层地下水水化学特征[J]. 地球科学，2017，**42**(5)：685-692.
Yu H T, Ma T, Deng Y M, *et al*. Hydrochemical characteristics of shallow groundwater in eastern Jianghan plain [J]. Earth Science, 2017, **42**(5): 685-692.

[2] 孙厚云，毛启贵，卫晓锋，等. 哈密盆地地下水系统水化学特征及形成演化[J]. 中国地质，2018，**45**(6)：1128-1141.
Sun H Y, Mao Q G, Wei X F, *et al*. Hydrogeochemical characteristics and formation evolutionary mechanism of the groundwater system in the Hami basin[J]. Geology in China, 2018, **45**(6): 1128-1141.

[3] 刘文杰，苏永中，杨荣，等. 民勤地下水水化学特征和矿化度的时空变化[J]. 环境科学，2009，**30**(10)：2911-2917.
Liu W J, Su Y Z, Yang R, *et al*. Hydrochemical characteristics and spatial-temporal variation of mineralization for the groundwater in Minqin oasis[J]. Environmental Science, 2009, **30**(10): 2911-2917.

[4] 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.

[5] 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.

[6] 王珺瑜，王家乐，靳孟贵. 济南泉域岩溶水水化学特征及其成因[J]. 地球科学，2017，**42**(5)：821-831.
Wang J Y, Wang J L, Jin M G. Hydrochemical characteristics and formation causes of karst water in Jinan spring catchment [J]. Earth Science, 2017, **42**(5): 821-831.

[7] 唐金平，张强，胡漾，等. 湔江冲洪积扇地下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.

[8] 安乐生，赵全升，叶思源，等. 黄河三角洲浅层地下水化学特征及形成作用[J]. 环境科学，2012，**33**(2)：370-378.
An L S, Zhao Q S, Ye S Y, *et al*. Hydrochemical characteristics and formation mechanism of shallow groundwater in the Yellow River delta[J]. Environmental Science, 2012, **33**(2): 370-378.

[9] 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.

[10] Huang G X, Sun J C, Zhang Y, *et al*. Impact of anthropogenic and natural processes on the evolution of groundwater chemistry in a rapidly urbanized coastal area, South China[J]. Science of the Total Environment, 2013, **463-464**: 209-221.

[11] Rouabhia A, Baali F, Fehdi C. Impact of agricultural activity and lithology on groundwater quality in the Merdja area, Tébessa, Algeria[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2010, **3**(3): 307-318.

[12] Stollenwerk K G. Geochemical interactions between constituents in acidic groundwater and alluvium in an aquifer near Globe, Arizona[J]. Applied Geochemistry, 1994, **9**(4): 353-369.

[13] Szabó N P. Hydraulic conductivity explored by factor analysis of borehole geophysical data[J]. Hydrogeology Journal, 2015, **23**(5): 869-882.

[14] Boukhemacha M A, Gogu C R, Serpescu I, *et al*. A hydrogeological conceptual approach to study urban groundwater flow in Bucharest City, Romania[J]. Hydrogeology Journal, 2015, **23**(3): 437-450.

[15] Kundu N, Panigrahi M, Tripathy S, *et al*. Geochemical appraisal of fluoride contamination of groundwater in the Nayagarh district of Orissa, India[J]. Environmental Geology, 2001, **41**(3-4): 451-460.

[16] Noori R, Sabahi M S, Karbassi A R, *et al*. Multivariate statistical analysis of surface water quality based on correlations and variations in the data set[J]. Desalination, 2010, **260**(1-3): 129-136.

[17] Sunkari E D, Abu M, Bayowobie P S, *et al*. Hydrogeochemical appraisal of groundwater quality in the Ga west municipality, Ghana: implication for domestic and irrigation purposes[J]. Groundwater for Sustainable Development, 2019, **8**: 501-511.

[18] Zhu B Q, Wang X M, Rioual P. Multivariate indications between environment and ground water recharge in a sedimentary drainage basin in northwestern China[J]. Journal of Hydrology, 2017, **549**: 92-113.

[19] 张勇, 郭纯青, 朱彦光, 等. 云南荞麦地流域地下水水化学特征及物质来源分析[J]. 环境科学, 2019, **40**(6): 2686-2695.
Zhang Y, Guo C Q, Zhu Y G, *et al*. Chemical characteristics of groundwater and material sources analysis in Buckwheat field, Yunnan Province[J]. Environmental Science, 2019, **40**(6): 2686-2695.

[20] 郭姝姝. 基于遥感及 CLUE-S 模型的内蒙古河套灌区土壤盐渍化时空演变与调控研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2018.
Guo S S. Study on spatiotemporal evolution and regulation of soil salinization in Hetao irrigation district, Inner Mongolia, China using remote sensing and CLUE-S model[D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2018.

[21] 史海滨, 吴迪, 闫建文, 等. 盐渍化灌区节水改造后土壤盐分时空变化规律研究[J]. 农业机械学报, 2020, **51**(2): 318-331.
Shi H B, Wu D, Yan J W, *et al*. Spatial temporal variation of soil salinity after water saving transformation in salinized irrigation district[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, **51**(2): 318-331.

[22] 杜军, 杨培岭, 李云开, 等. 河套灌区年内地下水埋深与矿化度的时空变化[J]. 农业工程学报, 2010, **26**(7): 26-31.
Du J, Yang P L, Li Y K, *et al*. Analysis of spatial and temporal variations of groundwater level and its salinity in Hetao irrigation district[J]. Transactions of the CSAE, 2010, **26**(7): 26-31.

[23] 李彬, 史海滨, 张建国, 等. 节水改造前后内蒙古河套灌区地下水水化学特征[J]. 农业工程学报, 2014, **30**(21): 99-110.
Li B, Shi H B, Zhang J G, *et al*. Hydrochemical characteristics of groundwater before and after water-saving reform in Hetao irrigation district, Inner Mongolia[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, **30**(21): 99-110.

[24] 章光新, 邓伟, 何岩, 等. 中国东北松嫩平原地下水水化学特征与演变规律[J]. 水科学进展, 2006, **17**(1): 20-28.
Zhang G X, Deng W, He Y, *et al*. Hydrochemical characteristics and evolution laws of groundwater in Songnen plain, Northeast China[J]. Advances in Water Science, 2006, **17**(1): 20-28.

[25] Hu Q L, Yang Y H, Han S M, *et al*. Degradation of agricultural drainage water quantity and quality due to farmland expansion and water-saving operations in arid basins[J]. Agricultural Water Management, 2019, **213**: 185-192.

[26] 武亚遵, 潘春芳, 林云, 等. 典型华北型煤矿区主要充水含水层水文地球化学特征及控制因素[J]. 地质科技情报, 2018, **37**(5): 191-199.
Wu Y Z, Pan C F, Lin Y, *et al*. Hydrogeochemical characteristics and controlling factors of main water filled aquifers in the typical north China coalfield[J]. Geological Science and Technology Information, 2018, **37**(5): 191-199.

[27] 刘文波, 冯翠娥, 高存荣. 河套平原地下水环境背景值[J]. 地学前缘, 2014, **21**(4): 147-157.
Liu W B, Feng C E, Gao C R, *et al*. Background value of groundwater environment in Hetao plain[J]. Earth Science Frontiers, 2014, **21**(4): 147-157.

[28] Pazand K, Khosravi D, Ghaderi M R, *et al*. Identification of the hydrogeochemical processes and assessment of groundwater in a semi-arid region using major ion chemistry: a case study of Ardestan basin in central Iran[J]. Groundwater for Sustainable Development, 2018, **6**: 245-254.

[29] Marandi A, Shand P. Groundwater chemistry and the Gibbs diagram[J]. Applied Geochemistry, 2018, **97**: 209-212.

[30] Mukherjee A, Fryar A E. Deeper groundwater chemistry and geochemical modeling of the arsenic affected western Bengal basin, west Bengal, India[J]. Applied Geochemistry, 2008, **23**(4): 863-894.

[31] 栾风娇, 周金龙, 贾瑞亮, 等. 新疆巴里坤-伊吾盆地地下水水化学特征及成因[J]. 环境化学, 2017, **36**(2): 380-389.
Luan F J, Zhou J L, Jia R L, *et al*. Hydrochemical characteristics and formation mechanism of groundwater in plain areas of Barkol-Yiwu basin, Xinjiang[J]. Environmental Chemistry, 2017, **36**(2): 380-389.

[32] Xiao J, Jin Z D, Ding H, *et al*. Geochemistry and solute sources of surface waters of the Tarim river basin in the extreme arid region, NW Tibetan plateau[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2012, **54-55**: 162-173.

[33] 黄奇波, 覃小群, 刘朋雨. 柳林泉域岩溶地下水区域演化规律及控制因素[J]. 环境科学, 2019, **40**(5): 2132-2142.
Hang Q B, Qin X Q, Liu P Y, *et al*. Regional evolution and control factors of karst groundwater in Liulin spring catchment[J]. Environmental Science, 2019, **40**(5): 2132-2142.

[34] Li C C, Gao X B, Wang Y X. Hydrogeochemistry of high-fluoride groundwater at Yuncheng basin, northern China[J]. Science of the Total Environment, 2015, **508**: 155-165.

[35] 李彬. 节水改造后盐渍化灌区农田水盐环境变化与预测研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2012.
Li B. Change and forecast of farmland water-salt environment after water saving reform implemented for salinity region[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2012.

[36] Bahçeci I, Nacar A S. Subsurface drainage and salt leaching in irrigated land in South-East Turkey[J]. Irrigation and Drainage, 2009, **58**(3): 346-356.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 41 No. 9

Sep. 15, 2020

CONTENTS

Characterization of Two Heavy Pollution Episodes in Tianjin in 2020 ····· XIAO Zhi-mei, XU Hong, CAI Zi-ying, *et al.* (3879)

Analysis of Characteristics of Water-soluble Ions in $PM_{2.5}$ in Chengdu Based on the MARGA ····· YIN Han-mei, CHEN Jun-hui, FENG Xiao-qiong, *et al.* (3889)

Seasonal Characteristics and Source Analysis of Water-soluble Inorganic Ions in $PM_{2.5}$ in Suqian City ····· MA Hong-lu, ZHAO Xin, LU Jian-gang, *et al.* (3899)

Characterization and Size Distribution of Carbonaceous Aerosols at Mountain Dinghu ····· LI An-na, WEN Tian-xue, HUA Wei, *et al.* (3908)

Characteristics and Source Apportionment of Carbon Components in Road Dust in Anshan ····· LIN Zi, JI Ya-qin, LIN Yu, *et al.* (3918)

Spectral Characteristics and Source Analysis of WSOC of $PM_{2.5}$ in Winter of Xi'an ····· YANG Yi, ZHANG Ya-nan, LIU Huan-wu, *et al.* (3924)

Observation of Aerosol Optical Properties and New Particle Formation in the Yangtze River Delta ····· DU Ying-ying, CHEN Jun, ZHANG Jia-luo, *et al.* (3932)

Component Characteristics and Source Appointment of Volatile Organic Compounds in Lianyungang City ····· CUI Jin-meng, WANG Ti-jian, LI Qiu-tong, *et al.* (3941)

Seasonal Pollution Characteristics and Analysis of the Sources of Atmospheric VOCs in Chengdu Urban Area ····· WANG Cheng-hui, CHEN Jun-hui, HAN Li, *et al.* (3951)

Ozone Sensitivity Analysis and Emission Controls in Dezhou in Summer ····· YAN Ru-sha (3961)

Inventory and Distribution Characteristics of China's Thermal Power Emissions Under Ultra-Low Reconstruction ····· QU Jia-bao, WANG Peng, BO Xin, *et al.* (3969)

Establishment and Spatial Distribution of Anthropogenic Ammonia Emission Inventory in Zhejiang Province ····· ZHAO Rui-dong, YU Xing-na, HOU Xin-hong, *et al.* (3976)

Evaluation and Screening of Dioxin Control Technology in Waste Incineration Flue Gas ····· ZHAO Si-lan, XI Peng-fei, GUO Feng-yan, *et al.* (3985)

Characteristics of Stable Isotopes and Moisture Sources of Two Typical Precipitation Events in Lanzhou City ····· HAN Ting-ting, ZHANG Ming-jun, WANG Sheng-jie, *et al.* (3993)

Hydrochemical Characteristics and Possible Controls of the Surface Water in Ranwu Lake Basin ····· ZHANG Tao, WANG Ming-guo, ZHANG Zhi-yin, *et al.* (4003)

Chemical Evolution and Formation Mechanism of Groundwater in Hetao Irrigation Area ····· CUI Jia-qi, LI Xian-yue, SHI Hai-bin, *et al.* (4011)

Chemical Characteristics of Groundwater and Material Sources Analysis in Shiqi River Basin ····· LI Xiao, YU Shi, LI Liang, *et al.* (4021)

Spatial-temporal Variations and Driving of Nitrogen and Phosphorus Ratios in Lakes in the Middle and Lower Reaches of Yangtze River ····· JI Peng-fei, XU Hai, ZHAN Xu, *et al.* (4030)

Spatiotemporal Variations in Nutrient Loads in River-lake System of Changdang Lake Catchment in 2016-2017 ····· LI Xin-yan, LI Heng-peng, JIANG San-yuan, *et al.* (4042)

Influence of *Potamogeton crispus* on Lake Water Environment and Phytoplankton Community Structure ····· KANG Li-juan, XU Hai, ZOU Wei, *et al.* (4053)

Phylogenetic Processes and Key Driving Factors of Bacterial Communities in Jinze Reservoir ····· LIU Ming-kun, TONG Jun, ZHU Hui-feng, *et al.* (4062)

Distribution Characteristics of Per-/polyflouralkyl Substances in River Sediments Around Typical Fluorine Industrial Parks ····· SUN Lin-ting, ZHAO Zhen, TANG Jian-hui (4069)

Microplastics-Induced Shifts of Diversity and Abundance of Antibiotic Resistance Genes in River Water ····· ZHOU Xin-yuan, WANG Yan-zi, SU Jian-qiang, *et al.* (4076)

Pollution Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics in Lianhua Reservoir ····· LIAO Jie, WEI Xiao-qin, XIAO Yan-qin, *et al.* (4081)

Intraspecific Variation in Growth and Alkaline Phosphatase Activity of *Cylindrospermopsis raciborskii* Strains in Response to Different Phosphorus Concentrations and Sources ····· YE Jin-mei, ZHAO Li, LUO Xu, *et al.* (4088)

Simulation of Water Quality Response of Guishui River Wetland Plants and Water Diversion ····· LI Ya-juan, DU Yan-liang, BI Er-ping, *et al.* (4095)

Performance Assessment of Field-scale Dry Grass Swale with Shallow Substrate Layer ····· ZHANG Jia-wei, LI Tian, ZHANG Ting-xiu (4105)

Transition of Particulate Pollutant in the Parcel-based Catchment of Sponge City ····· LI Jia, XIE Wen-xia, JIANG Zhi-hui, *et al.* (4113)

Adsorption of Sb(Ⅴ) in Water by Natural Pyrite: Performance and Mechanism ····· SHI Song, WU Qian-yuan, LI Xin-zheng, *et al.* (4124)

Treatment of Wastewater Containing Naphthalene Sulfonic Acid by Persulfate Oxidation ····· ZHANG Jin-men, LU Jun, LIU Xiao-chen, *et al.* (4133)

Effect of Temperature on Performance and Microbial Community Structure of Anaerobic Biofilter-Treated Domestic Wastewater ····· LIU Zhi-bin, LIU Xiu-hong, ZHOU Tong, *et al.* (4141)

Start-up and Optimization of Denitrifying Phosphorus Removal in ABR-MBR Coupling Process ····· MIAO Xin-nian, WANG Qian, GUO Kai-cheng, *et al.* (4150)

Adaptability of Completely Autotrophic Nitrogen Removal over Granular Sludge to Low-Strength at Low Temperature ····· LIU Yu-xin, WANG Jian-fang, QIAN Fei-yue, *et al.* (4161)

Discussion on Key Issues of Geochemical Monitoring of Soil Heavy Metal in Xiong'an New District ····· GUO Zhi-juan, ZHOU Ya-long, YANG Zheng, *et al.* (4169)

Quantitative Assessment of Human Health Risks Based on Soil Heavy Metals and PAHs Sources: Take a Polluted Industrial Site of Beijing As an Example ····· WU Zhi-yuan, ZHANG Li-na, XIA Tian-xiang, *et al.* (4180)

Ecological Risk Assessment of Heavy Metals at Township Scale in the High Background of Heavy Metals, Southwestern, China ····· ZHANG Fu-gui, PENG Min, WANG Hui-yan, *et al.* (4197)

Potential of Accumulation and Application of Dominant Plants in Lanping Lead-zinc Mine, Yunnan Province ····· ZHANG Long, ZHANG Yun-xia, SONG Bo, *et al.* (4210)

Key Growth Stage of Pb Accumulation in Rice Through a Hydroponic Experiment with Pb Stress ····· HU Yu-dan, ZHOU Hang, GU Jiao-feng, *et al.* (4218)

Effect of Nutrient Regulation and Control on Cd Accumulation Efficiency of *Hylotelephium spectabile* Under Field Conditions ····· GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, YANG Jun, *et al.* (4226)

Effects of *Eucalyptus* Branches Biochar Application on Soil Physicochemical Properties of Acidified Soil in a *Eucalyptus* plantation in Northern Guangxi ····· DAUN Chun-yan, SHEN Yu-yi, XU Guang-ping, *et al.* (4234)

Dynamic Effects of Direct Returning of Straw and Corresponding Biochar on Acidity, Nutrients, and Exchangeable Properties of Red Soil ····· YANG Cai-di, LU Sheng-gao (4246)

Different Responses of Soil Microbial Community Structure to Irrigation with Treated Wastewater from Domestic and Industrial Sources ····· WANG Yan, CHENG Dong-hui, TAN Wen-bing, *et al.* (4253)

Effects of Manure and Organic Fertilizer Application on Soil Microbial Community Diversity in Paddy Fields ····· LI Peng, WU Jian-qiang, SHA Chen-yan, *et al.* (4262)

Effects of Land Use Changes on Soil Bacterial Community Diversity in the Riparian Wetland Along the Downstream of Songhua River ····· ZHANG Tuo, XU Fei, HUAI Bao-dong, *et al.* (4273)

Response of Soil Bacterial Community Structure to Precipitation Change in Grassland of Loess Plateau ····· LI Na, WANG Bao-rong, AN Shao-shan, *et al.* (4284)

Effect of Land-use on Soil Fungal Community Structure and Associated Functional Group in Huixian Karst Wetland ····· CHENG Yue-yang, JIN Zhen-jiang, WANG Xiao-tong, *et al.* (4294)

Interactions of Fungi Community and Relationship with the Carbon Structure in Arable Mollisols with Gradient Organic Matter Content ····· SHANG Qiu-tong, HUANG Rui-lin, NI Hao-wei, *et al.* (4305)

Diversity of Soil Eukaryotic Microbes in Different Succession Stages in Maolan Karst Forest of Guizhou ····· WANG Xian, LONG Jian, LI Juan, *et al.* (4314)

Adsorption of Cadmium and Arsenic by Corn Stalk Biochar Solidified Microorganism ····· LIU Yu-ling, ZHU Hu-cheng, PENG Ou, *et al.* (4322)

Mechanism of Inorganic Nitrogen Transformation and Identification of Nitrogen Sources in Water and Soil ····· LIANG Xing, SUN Li-qun, ZHANG Xin, *et al.* (4333)