

doi: 10.12029/gc20230112

魏世博, 王哲, 李飞, 吴玺, 徐蓉桢. 2023. 内蒙古额济纳平原地下水氢氧稳定同位素和水化学特征及其演化规律[J]. 中国地质, 50(1): 159–169.
Wei Shibo, Wang Zhe, Li Fei, Wu Xi, Xu Rongzhen. 2023. Characteristics of hydrogen and oxygen stable isotopes and hydrochemistry in the groundwater of Ejina plain, Inner Mongolia and its hydrochemical evolution[J]. Geology in China, 50(1):159–169(in Chinese with English abstract).

内蒙古额济纳平原地下水氢氧稳定同位素和水化学特征及其演化规律

魏世博¹, 王哲², 李飞³, 吴玺¹, 徐蓉桢¹

(1. 中国地质调查局水文地质环境地质调查中心, 河北 保定 071051; 2. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北 石家庄 050061; 3. 内蒙古第八地质矿产勘查开发有限责任公司, 内蒙古 乌海 016000)

摘要:【研究目的】为研究内蒙古额济纳平原地下水水化学特征及其演化规律, 于 2020 年 8 月采集水样 87 组, 氢氧同位素样品 69 组。【研究方法】综合运用数理统计、离子比例分析、水文地球化学模拟等方法, 分析额济纳平原第四系地下水及北部白垩系地下水水文地球化学特征, 探讨水文地球化学演化规律。【研究结果】结果表明: (1) 该区地下水水化学类型以 $\text{SO}_4\text{-Na}$ 型为主。地下水中阴离子以 SO_4^{2-} 为主, 其次为 Cl^- ; 阳离子以 Na^+ 为主, Ca^{2+} 与 Mg^{2+} 浓度差异不大。(2) 研究区地下水 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、TDS、总硬度、 Na^+ 和 Mg^{2+} 浓度具有第四系承压水 > 第四系潜水 > 白垩系承压水的特点。(3) 第四系潜水离子组分主要受溶滤作用、混合作用控制, 局部地区受蒸发作用影响显著; 第四系承压水离子组分主要受溶滤作用和阳离子交换作用控制; 平原北部白垩系承压水离子组分受溶滤作用及阳离子交换作用控制。研究区地下水中主要离子来自岩盐、碳酸岩盐和石膏的溶解。【结论】沿地下水流向, 第四系潜水离子浓度组分呈增加趋势, 在额济纳平原内部第四系潜水和承压水中主要发生岩盐、白云石和石膏溶解、方解石沉淀以及正向阳离子交换作用; 研究区东南部沙漠与平原交错带主要发生岩盐、白云石和石膏溶解、方解石沉淀以及反向阳离子交换; 平原区北部白垩系承压水中主要发生岩盐、白云石和石膏溶解、方解石沉淀以及正向阳离子交换。

关键词: 地下水; 氢氧稳定同位素; 水化学; 演化规律; 水文地球化学模拟; 水文地质调查工程; 额济纳平原; 内蒙古
创新点: (1) 系统分析额济纳平原地下水水化学组分特征及控制因素; (2) 基于离子比例分析和反向水文地球化学模拟, 揭示了区域地下水水化学形成机制及演化规律。

中图分类号: P641 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2023)01-0159-11

Characteristics of hydrogen and oxygen stable isotopes and hydrochemistry in the groundwater of Ejina plain, Inner Mongolia and its hydrochemical evolution

WEI Shibo¹, WANG Zhe², LI Fei³, WU Xi¹, XU Rongzhen¹

(1. Center for Hydrogeology and Environmental Geology Survey, China Geological Survey, Baoding 071051, Hebei, China;
2. Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Science, Shijiazhuang 050061, Hebei,

收稿日期: 2021-02-09; 改回日期: 2021-04-18

基金项目: 国家重点研发计划课题(2017YFC0403502)资助。

作者简介: 魏世博, 男, 1992 年生, 硕士, 工程师, 主要从事水文地质与水资源调查评价; E-mail: 1013233143@qq.com。

通讯作者: 王哲, 男, 1982 年生, 硕士, 高级工程师, 主要从事地下水资源与环境研究; E-mail: 972636980@qq.com。

China; 3. Inner Mongolia No.8 Geological and Mineral Exploration and Development Co., Ltd, Wuhai 016000, Inner Mongolia, China)

Abstract: This paper is the result of hydrogeological geological survey engineering.

[Objective] In order to study the hydrochemical characteristics and evolution of groundwater in the Ejina plain, Inner Mongolia, 87 water quality samples and 69 hydrogen and oxygen isotope samples were collected in August 2020. **[Methods]** Based on the methods of mathematical statistics, ion ratio, and hydrogeochemical simulation, the hydrogeochemical characteristics and the hydrochemical evolution rule of groundwater stored in Quaternary aquifer and Cretaceous aquifer were analyzed. **[Results]** The results showed that: (1) The groundwater was mainly $\text{SO}_4\text{-Na}$ type. SO_4^{2-} was the main anion, followed by Cl^- . Na^+ was the main cation, followed by Ca^{2+} and Mg^{2+} , there was little difference between Ca^{2+} and Mg^{2+} concentrations. (2) The concentrations of SO_4^{2-} , Cl^- , TDS, total hardness, Na^+ and Mg^{2+} decreased in the order of Quaternary confined water > Quaternary phreatic water > Cretaceous confined water. (3) Quaternary phreatic ions were mainly controlled by leaching and mixing process, and some areas were significantly affected by evaporation. The ions of Quaternary confined water were mainly controlled by leaching and cation exchange. The ions of the Cretaceous confined water in the northern part of the plain were controlled by leaching and cation exchange. The main ions of groundwater in the study area came from the dissolution of halite, carbonates and gypsum. **[Conclusions]** Along the direction of groundwater flow, the concentration of ion components in Quaternary phreatic showed an increasing trend. In the Quaternary phreatic and confined water in the Ejina plain, the main water-rock interaction processes were dissolution of halite, dolomite and gypsum, precipitation of calcite, and positive cation exchange. In the interlaced zone between the desert and the plain in the southeast of the study area, the dissolution of halite, dolomite and gypsum, the precipitation of calcite, and reverse cation exchange mainly occurred. Halite, dolomite and gypsum dissolution, calcite precipitation, and positive cation exchange mainly occurred in the Cretaceous confined water in the northern plain.

Key words: groundwater; hydrogen and oxygen stable isotopes; hydrochemical characteristics; evolution rule; hydrogeochemical simulation; hydrogeological geological survey engineering; Ejina Plain; Inner Mongolia

Highlights: (1) The characteristics of major ionic and their possible controls in the groundwater of the Ejina plain were systematically analyzed; (2) The hydrochemical evolution rule of regional groundwater was revealed by the methods of ion ratio, and hydrogeochemical simulation.

About the first author: WEI Shibo, male, born in 1992, master, engineer, mainly engaged in hydrogeology and water resources investigation and evaluation; E-mail: 1013233143@qq.com.

About the corresponding author: WANG Zhe, male, born in 1982, master, senior engineer, mainly engaged in groundwater resources and environment research; E-mail: 972636980@qq.com.

Fund support: Supported by the project of National Key Research and Development Program (No.2017YFC0403502).

1 引 言

额济纳平原地处内蒙古自治区西北部,黑河流域下游,是典型内陆干旱盆地,生态环境脆弱。长期以来,缺水问题严重制约着当地生态环境保护修复与经济社会发展。地下水在维持当地生态系统平衡与支撑经济社会发展方面起着重要作用。地下水在与周围环境的相互作用过程中形成其独特的水化学特征(张涛等,2017;周巾枚等,2019;魏兴等,2019),这些特征中蕴含着水化学演化的规律。地下水氢氧稳定同位素记录着其补给来源和循环信息(王振等,2021)。近年来,许多学者在额济纳

平原开展大量有关地下水方面研究工作,主要包括地下水动态对生态输水的响应(张震域等,2019)、黑河与地下水关系(仵彦卿等,2010;席海洋等,2012;王平,2018)、地下水补给来源(陈建生等,2004;张应华等,2006;张光辉,2017)、地下水水化学及同位素特征(温小虎等,2006;Gates et al.,2008;苏永红等,2009;商玮麟和马文学,2012;赵良菊等,2014;阮云峰等,2016)、地下水循环模式(钱云平和王玲,2008)等。而关于整个平原尺度不同深度含水层中地下水水化学演化过程与控制因素的综合研究少见报道。本文以额济纳平原为研究区(图1),在充分收集、分析近年来额济纳平原水文地质

勘探资料的基础上,对第四系潜水和承压水、研究区北部白垩系承压水进行取样,运用数理统计、离子比例分析、稳定同位素分析及水文地球化学模拟等方法分析额济纳平原第四系及北部白垩系含水层中地下水水化学特征及控制因素,揭示区域地下水水化学形成机制及演化规律,以期为地下水合理开发利用及生态环境保护与修复提供科学依据。

2 研究区概况

研究区属温带大陆性干旱气候,多年平均降水量为36 mm,多年平均蒸发量为1883 mm。黑河自研究区中部由南而北穿流而过,最终注入尾间湖居延海(Wang et al., 2014);天鹅湖位于研究区东北部,由生态补水维持;古日乃湖区位于研究区东部,为湖盆沼泽地。研究区地貌可划分为构造剥蚀低山丘陵、斜坡冲洪积砾质平原、冲湖积平原和风积沙漠四类。研究区主要出露第四系冲洪积砂卵石、湖积粉细砂,北部局部出露白垩系红色泥岩、砂岩,东南部与巴丹吉林沙漠相接,地表为风积粉细砂。研究区地下水可划分为第四系松散岩类孔隙水及白垩系碎屑岩类孔隙裂隙水两类。受河流沉积规律控制,由平原中南部向两侧及北部,弱透水的黏性土层逐渐增多,单一结构第四系潜水含水层渐变为多层结构的第四系潜水-承压水含水层(图2)。研究区北部为白垩系承压含水层。根据钻孔资料,研究区第四系潜水含水层埋藏深度30 m以浅;第四系承压含水层埋藏深度30~200 m;白垩系承压含水层埋藏深度大于30 m。

研究区地下水接受河道渗漏、雨洪入渗、降雨入渗、侧向径流补给。其中位于额济纳平原中部的黑河是本区地下水主要补给来源(武选民等,2004)。第四系含水层中地下水总体以平原中部河道带为轴呈放射状向两侧径流,地下水排泄方式主要为蒸发蒸腾,其次为人工开采。白垩系承压含水层中地下水主要接受侧向径流补给,自北向南径流。

3 材料与方法

2020年8月在额济纳地区采集水样87组,其中第四系潜水51组,第四系承压水样品20组,白垩系承压水13组,地表水3组;D、 ^{18}O 同位素样品69组,其中第四系潜水26组,第四系承压水17组,白垩系

承压水11组,地表水8组,大气降水样品7组。取样点位置见图1。先抽水至现场测试地下水各项参数读数稳定,再进行取样,取样瓶为500 mL聚乙烯塑料瓶,取样时用所取水样润洗3次。测试阳离子的水样加硝酸酸化至pH值小于2,测试阴离子的水样不加任何保护剂。水样密封后7 d内送至实验室进行测试,以确保水质检测数据真实可靠。地下水水化学样品由中国科学院遗传发育所农业资源研究中心测试。溶解性总固体(TDS)用重量法(105℃烘干)测定,检出限为4.0 mg/L;总硬度用乙二胺四乙酸二钠滴定法,检出限为5.0 mg/L;Na⁺、K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺采用电感耦合等离子体发射光谱法测定,检出限为0.02 mg/L;SO₄²⁻、Cl⁻、NO₃⁻采用离子色谱法测定,检出限为0.1 mg/L;采用滴定法测定CO₃²⁻和HCO₃⁻含量,检出限为6.0 mg/L。所有样品阴阳离子平衡误差均小于5%。D、 ^{18}O 同位素样品由南京水利科学研究院滁州实验基地测试,采用液态水同位素分析仪测试, δD 值测试误差为 $\pm 1\%$, $\delta^{18}\text{O}$ 值测试误差为 $\pm 0.2\%$,标样为VSMOW。

4 结果与分析

4.1 地下水水化学特征

研究区地下水水化学参数统计结果见表1,额济纳平原地下水pH值范围在7.28~8.61,平均值为8.01,呈弱碱性。地下水硫酸盐含量、氯化物含量、TDS和总硬度变化范围较大,分别为44.10~13136.20 mg/L、27.70~11698.50 mg/L、255.21~36811.05 mg/L和51.30~13840.08 mg/L。整体上,第四系承压水硫酸盐含量、氯化物含量、TDS和总硬度较大,第四系潜其次之,白垩系承压水较小。第四系潜水中硫酸盐含量、氯化物含量、TDS和总硬度高值区呈条带状展布于古日乃湖区至天鹅湖及东西居延海一带;硫酸盐含量、氯化物含量、TDS和总硬度低值区位于额济纳平原中南部及东南部的沙漠边缘地带。第四系承压水中硫酸盐含量、氯化物含量、TDS和总硬度分布与第四系潜水一致。古日乃湖区至天鹅湖一带及东西居延海一带,第四系地下水TDS值具有随深度增加而逐渐减小的规律。白垩系承压水中硫酸盐含量、氯化物含量、TDS和总硬度最大值出现在东西居延海之间;硫酸盐含量、氯化物含量、TDS和总硬度最小值出现研究区

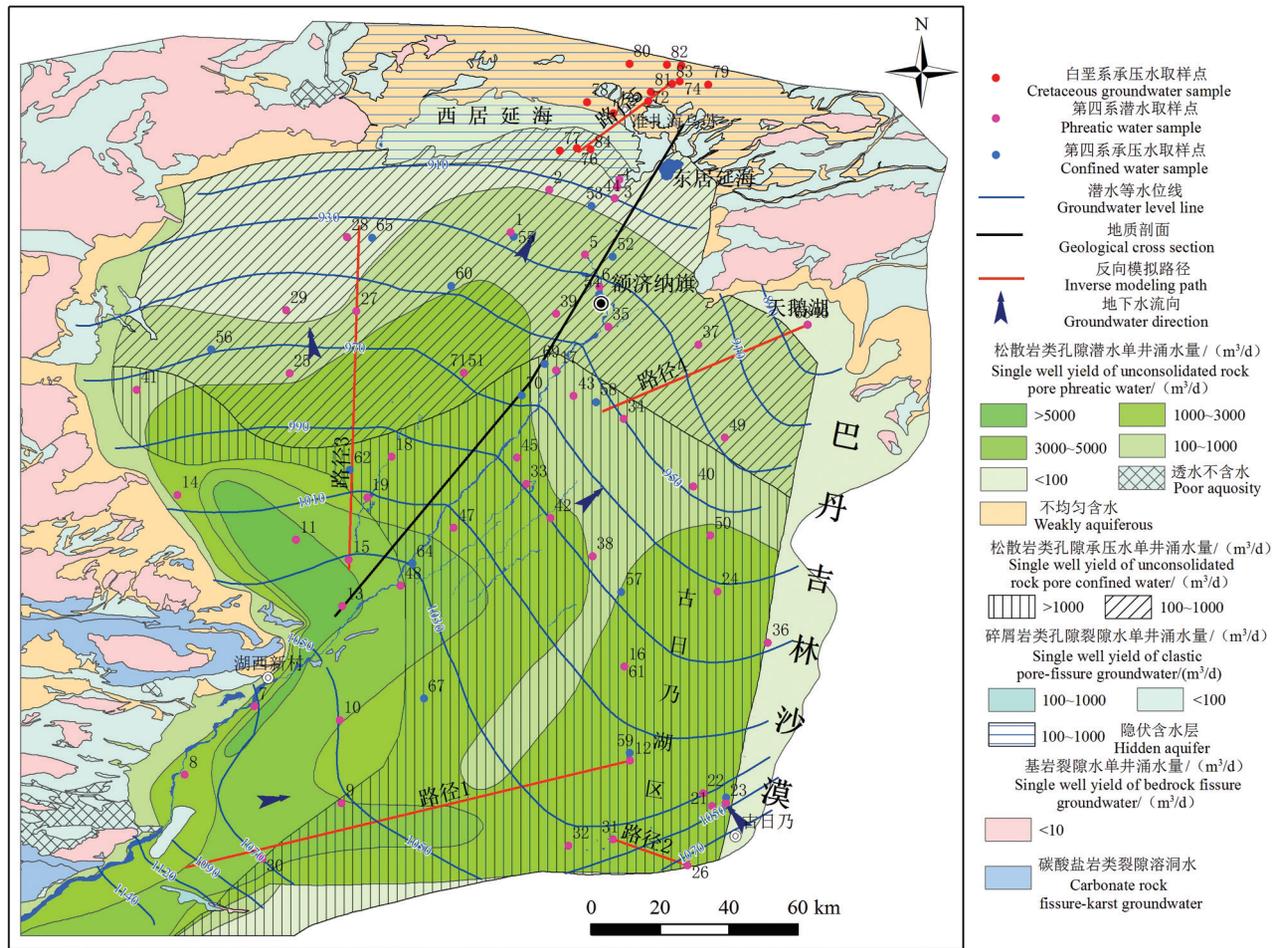


图1 研究区地下水取样点分布图

Fig.1 Distribution of groundwater sampling locations in the study area

北部国境线附近。

研究区地下水水化学类型以SO₄-Na型为主(图3)。地下水中阴离子以SO₄²⁻为主,其次为Cl⁻;阳离子以Na⁺为主,Ca²⁺与Mg²⁺浓度差异不大。研究区地下水SO₄²⁻、Cl⁻、TDS、总硬度、Na⁺和Mg²⁺浓度具有第

四系承压水>第四系潜水>白垩系承压水的特点。

4.2 区域地下水氢氧稳定同位素组成特征

从图4可以看出,额济纳平原地下水氢氧稳定同位素组成分布在4个区域,古日乃及巴丹吉林沙漠边缘第四系潜水与承压水(A域);额济纳平原中

表1 地下水水化学指标统计结果(mg/L, pH除外)

Table 1 Statistical results of hydrochemical parameters of groundwater (mg/L, except pH)

指标	第四系潜水(n=51)			第四系承压水(n=20)			白垩系承压水(n=13)		
	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值
pH	8.61	7.28	8.03	8.54	7.30	8.02	8.20	7.88	8.04
TDS	36811.05	255.21	2617.36	23896.55	378.05	2929.38	1697.25	923.75	1355.92
总硬度	13840.08	51.30	800.74	8853.08	76.98	886.59	522.24	256.50	376.50
Na ⁺	7636.00	60.60	593.59	6000.90	46.90	706.85	440.00	232.00	322.67
K ⁺	399.00	4.10	21.79	123.20	2.73	17.35	9.93	0.62	2.78
Ca ²⁺	611.20	9.01	92.02	490.98	3.51	91.68	159.39	70.10	104.86
Mg ²⁺	2954.90	6.90	136.97	1842.20	9.41	157.77	36.70	19.50	27.45
Cl ⁻	11698.50	51.41	732.50	8614.35	27.70	911.67	687.90	182.60	307.48
HCO ₃ ⁻	750.50	62.83	253.23	768.90	97.63	221.49	131.20	100.53	117.83
SO ₄ ²⁻	13136.20	44.10	913.87	8525.30	46.15	935.92	794.88	355.40	531.77

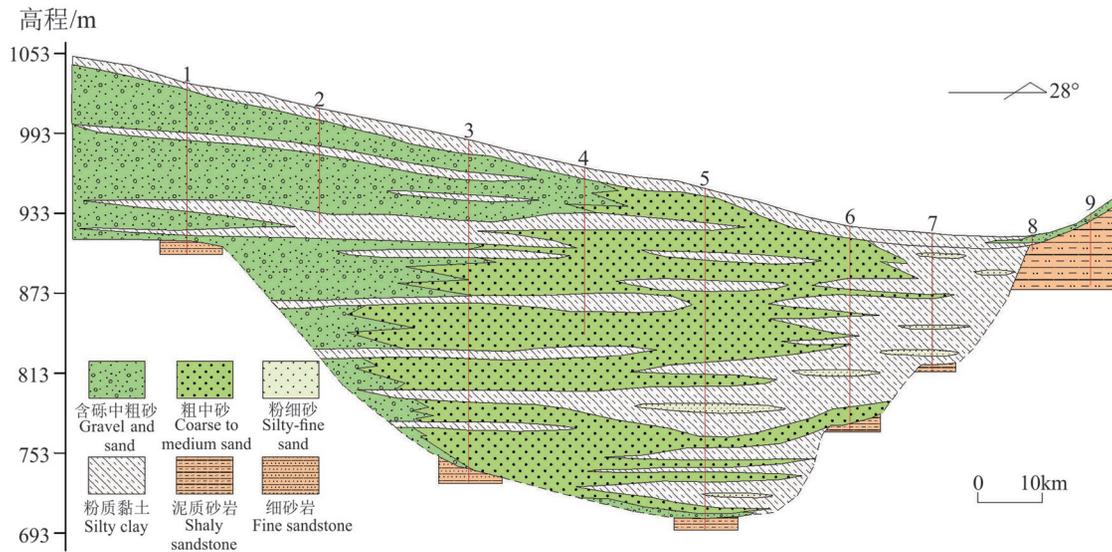


图2 研究区第四系地质剖面图
Fig.2 Quaternary geological profile of the study area

西部第四系承压水(B域);额济纳平原中西部第四系潜水(C域);额济纳平原北部白垩系承压水(D域)。这种空间分布特征表明不同区域地下水的补给来源、年龄及循环规律存在明显差异。

额济纳平原中西部第四系潜水除黑河两岸氢氧稳定同位素组成与黑河地表水相似外,其余地区氢氧稳定同位素组成不同程度地偏离当地大气降水线(LMWL),且重同位素富集,受蒸发影响。

额济纳平原中部第四系承压水氢氧稳定同位素

组成总体上分布在当地大气降水线上左下侧,个别样点偏离当地大气降水线。如果浅层地下水的稳定同位素值证实为当地降水入渗,深层地下水比浅层地下水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值低2‰以上,可以证明深层地下水为古水(周仰效和李文鹏,2011)。本区第四系承压水氢氧稳定同位素较第四系潜水显著贫化,说明第四系承压水为比现代气候更为湿冷的条件下补给。武选民等(2004)对额济纳旗县城周边第四系承压水年龄的研究结果也表明,承压水年龄近万年。

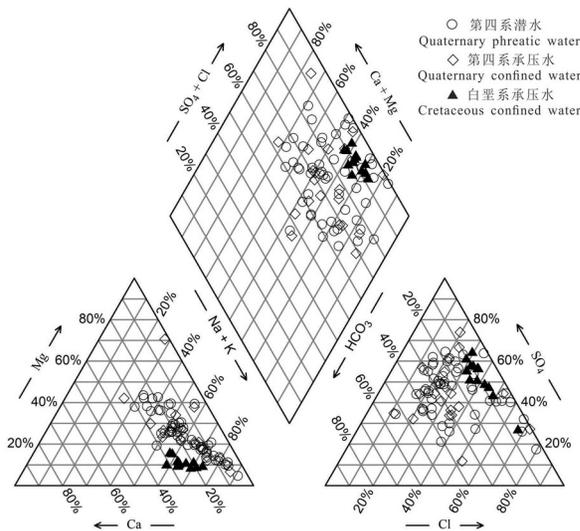


图3 研究区地下水水化学Piper三线图
Fig.3 Piper three-line diagram of groundwater hydrochemistry in the study area

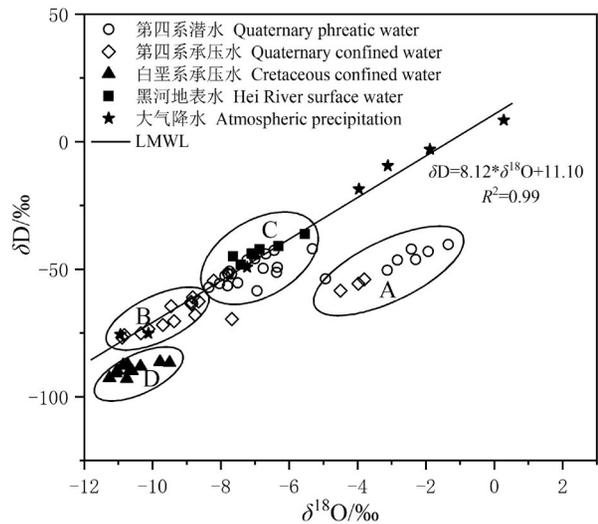


图4 研究区地下水、地表水 δD 与 $\delta^{18}\text{O}$ 关系
Fig.4 Relationship between δD and $\delta^{18}\text{O}$ of groundwater and surface water in the study area

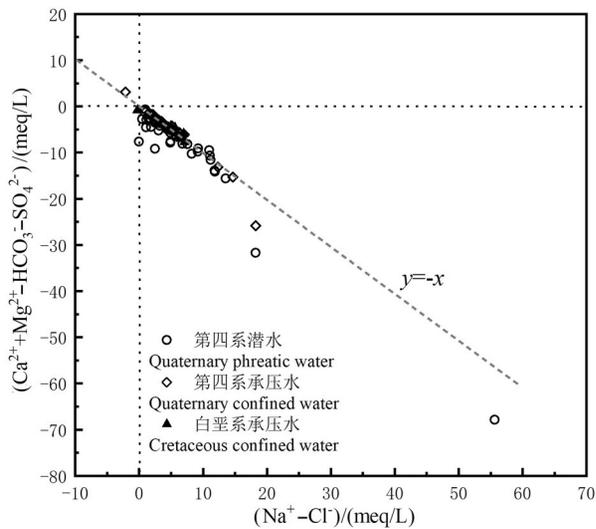


图5 研究区地下水中 $(Ca^{2+}+Mg^{2+}-HCO_3^- - SO_4^{2-})$ 与 (Na^+-Cl^-) 相关性

Fig.5 Relationship between $(Ca^{2+}+Mg^{2+}-HCO_3^- - SO_4^{2-})$ and (Na^+-Cl^-) of groundwater in the study area

古日乃地区及巴丹吉林沙漠边缘第四系潜水及承压水氢氧稳定同位素组成特征相似,均表现出明显偏离当地大气降水线的趋势,且重同位素富集,氡盈余值的范围 $-25.3 \sim -22.4$ 。

额济纳平原北部白垩系承压水显著偏离当地大气降水线。沿地下水流向 $\delta^{18}O$ 值变化不明显,表明未发生明显氧漂移。由于白垩系承压水呈“封存”状态,所以白垩系承压水在接受补给之前受过蒸发影响。

4.3 地下水化学组分控制因素及其来源

4.3.1 阳离子交换作用

阳离子交换在地下水化学组分形成和演变过程

中起着重要作用(沈照理等,1990), $(Ca^{2+}+Mg^{2+}-HCO_3^- - SO_4^{2-})$ 与 (Na^+-Cl^-) 的相关性可用于评估含水层中发生的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 与 Na^+ 之间的阳离子交换作用。图5可以看出研究区地下水 $(Ca^{2+}+Mg^{2+}-HCO_3^- - SO_4^{2-})$ 与 (Na^+-Cl^-) 存在显著的负相关关系,且散点大部分落到 $y=-x$ 线上,说明阳离子交换是控制研究区地下水水化学组分形成的重要水文地球化学过程。

4.3.2 溶滤作用

因水体化学组分受到蒸发、溶滤等多种作用的共同影响,分析单一离子浓度无法判别其物质来源,而可溶矿物组分的离子组合比值,能消除上述影响,可揭示含水层中发生的溶滤作用(Zheng et al.,2017)。

如图6a所示,研究区大部分地下水点 $(HCO_3^-+SO_4^{2-})/(Ca^{2+}+Mg^{2+})$ 比值接近于1,且绝大部分取样点落在 $(HCO_3^-+SO_4^{2-})/(Ca^{2+}+Mg^{2+})=1$ 的上方,表明地下水中毫克当量百分比占比较高的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 和 SO_4^{2-} 离子主要来源于白云石、方解石和石膏的溶解,同时研究区地下水中可能发生了正向阳离子交换作用。

从地下水 $(Ca^{2+}+Mg^{2+})$ 与 HCO_3^- 相关性(图6b)进一步可知,80%的地下水点分布在碳酸盐溶解线(1:1线)之下,表明地下水中除发生碳酸盐矿物溶解外普遍存在石膏溶解。近20%的第四系潜水样点落在1:1线上方,由于长石类矿物的不全等溶解也会产生 HCO_3^- (沈照理等,1990),推测第四系潜水含水层中局部存在钠(钾)长石溶解,对 HCO_3^- 的富

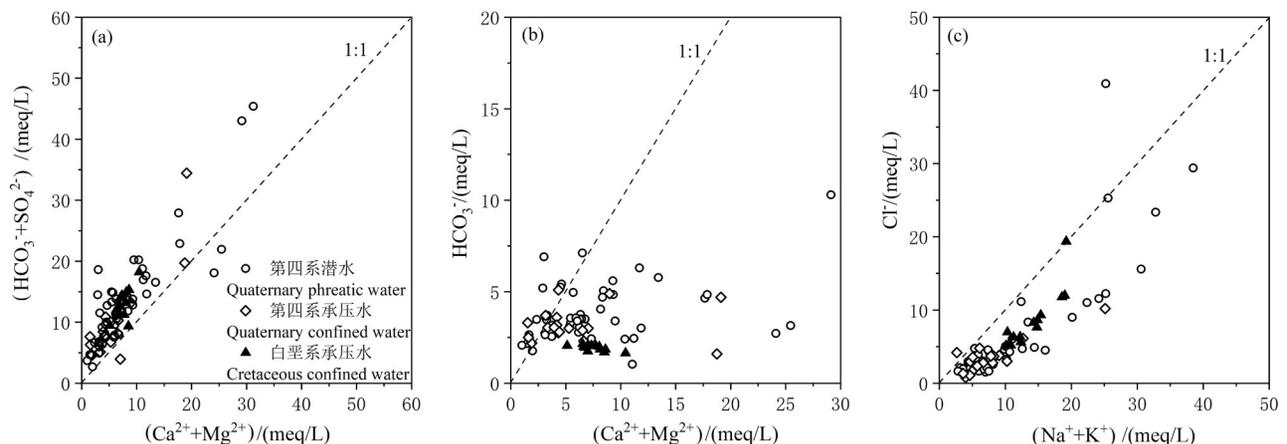


图6 研究区地下水离子间关系

Fig.6 Ionic relationships of groundwater in the study area

集有一定影响。此外,前段分析指出研究区地下水可能普遍发生正阳离子交换作用,但从图6b可知,绝大多数第四系及白垩系承压水点落在1:1线以下,表明离子交换作用对地下水中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的影响不及溶滤作用。

($\text{Na}^{+}+\text{K}^{+}$)与 Cl^{-} 的相关关系可反映含水层中盐岩、长石类矿物的溶解,以及外源氯离子的输入(Khairi and Janardhana, 2014; Liu et al., 2016)。从地下水($\text{Na}^{+}+\text{K}^{+}$)与 Cl^{-} 的相关性(图6c)可知,研究区几乎所有地下水点在盐岩溶解线(1:1线)以下,额外的 Na^{+} 和 K^{+} 可能来源于长石类硅酸盐矿物的溶解或阳离子交换作用(Barzegar et al., 2017),结合上述内容可知长石类矿物溶解使 Na^{+} 、 K^{+} 富集的情况仅可能出现在局部潜水含水层中,在研究区绝大多数地下水中长石类矿物溶解有限,表明主要是正阳离子交换作用导致 Na^{+} 、 K^{+} 的相对富集。

4.3.3 混合作用

黑河自狼心山分成东西两河,河道附近地下水与地表水联系密切,混合作用可能是影响这一区域地下水水化学成分的重要因素之一。应用Schoeller图可以清晰对比不同区域地下水水化学成分变化,受到稀释的混合水会具有垂向移动曲线且形状变动不大的特点(李潇瀚等, 2018)。本次研究沿黑河两岸由南向北取不同深度地下水样分析地表水对地下水水化学成分的影响,从图7可以看出,河水与其附近第四系潜水水化学组分相差不大,说明潜水受河水渗漏补给后与河水发生混合作用;随着深度减小,第四系承压水水化学组分逐渐与潜水水化学组分趋于一致,且南部较北部显著,表明平原中南部埋深较小的第四系承压水也受到上覆潜水混合作用影响。

4.4 典型剖面水文地球化学模拟及区域水文地球化学演化过程分析

4.4.1 典型剖面地下水水化学模拟

水文地球化学模型是再现和预测水文地球化学过程的有效工具(Soumya et al., 2011; Barzegar et al., 2018),本文利用PHREEQC软件定量反向模拟水-岩相互作用。本区地下水水化学特征复杂,因此以区域地下水流场为基础,考虑不同地貌交界、尾间湖分布、地下水主要补给源及地下水强径流区等因素,选取5条水文地球化学模拟路径(图1),从区域尺度定量分析不同深度地下水水化学演化规律。其中

路径1、路径3、路径4为研究区内部第四系潜水及承压水水化学模拟路径,路径2为研究区东南缘巴丹吉林沙漠第四系潜水向平原区径流的水化学模拟路径,路径5为研究区北部边缘地带白垩系承压水向平原区深部径流的水化学模拟路径。

依据研究区的水文地质条件、第四系及白垩系含水层岩性特征及地下水水质分析结果,选取方解石、白云石、岩盐、钾盐、石膏、阳离子交换作为参与水岩作用的“主要矿物相”。考虑潜水处于开放状态,在潜水路径中将 CO_2 也作为模型输入相;承压水埋深相对较大,处于半封闭状态,实际 CO_2 不参与水文地球化学作用。

饱和指数(SI)是确定水与矿物处于何种状态的参数(沈照理等, 1990)。当 $\text{SI} > 0$ 时,表示该矿物相对水溶液处于饱和状态;当 $\text{SI} = 0$ 时,表示该矿物相对水溶液处于平衡状态;当 $\text{SI} < 0$ 时,表示该矿物相对水溶液处于不饱和状态。但是由于SI计算结果的不确定性,因此在实际过程中当SI在 $-0.5 \sim 0.5$ 时,认为水与矿物达到准平衡状态(Acheampong and Hess, 1998)。利用Phreeqc计算得到模拟路径上各水样主要矿物SI值(表2)。从表2可以看出,相较于其他矿物,方解石SI值最接近于 $-0.5 \sim 0.5$,处于临界饱和状态,最可能发生沉淀;总体上岩盐、钾盐、 CO_2 、石膏以及绝大多数白云石未达到饱和状态。如果含水层中存在这些矿物,这些矿物会继续溶解至地下水中,逐渐达到饱和。

表3中列出了5条模拟路径的“可能矿物相”的摩尔转移量,其中正值表示矿物溶解进入水溶液,负值表示矿物沉淀,从水溶液中析出。

路径1与路径4第四系潜水和承压水均发生岩盐、钾盐、白云石和石膏的溶解及正阳离子交换;随着石膏的溶解,地下水中 Ca^{2+} 浓度增加,使方解石沉淀,且随着石膏溶解量的增大,方解石的沉淀量也随之增大。路径3第四系潜水演化模式与路径1、4相同,第四系承压水路径模拟结果稍有不同,即发生了反阳离子交换作用。路径2上发生白云石、岩盐、钾盐、石膏溶解,方解石沉淀,以及反阳离子交换作用,表现为 Na^{+} 吸附, Ca^{2+} 进入液相,钻孔资料及地球物理探测结果也表明古日乃一带第四系中钙质胶结细砂夹层较多。路径5上发生岩盐、钾盐、石膏、白云石的溶解和方解石的沉淀以及正阳离子

表2 各路径起点和终点水样的饱和指数

路径	地下水类型	路径起点/终点	方解石	CO ₂ (g)	白云石	石膏	岩盐	钾盐
1	潜水	起点	-0.87	-1.81	-1.47	-1.97	-6.97	-7.68
		终点	-0.24	-1.86	0.00	-0.19	-2.95	-4.61
	承压水	起点	-0.74	-1.75	-1.28	-1.96	-6.99	-7.72
		终点	-0.25	-2.00	-0.14	-0.18	-3.08	-4.70
2	潜水	起点	-1.18	-1.97	-2.10	-2.48	-7.00	-7.47
		终点	-1.12	-1.80	-1.99	-2.27	-6.57	-7.10
3	潜水	起点	-0.61	-1.71	-0.90	-1.46	-6.39	-7.42
		终点	-0.39	-1.87	-0.88	-0.78	-5.90	-7.04
	承压水	起点	-0.80	-1.79	-1.34	-1.51	-6.34	-7.39
		终点	-0.84	-1.75	-1.34	-1.68	-6.22	-7.60
4	潜水	起点	-0.38	-1.78	-0.56	-0.96	-6.31	-7.23
		终点	0.37	-1.38	1.77	0.07	-2.87	-3.77
	承压水	起点	-1.70	-1.76	-1.68	-3.32	-6.74	-6.59
		终点	0.34	-1.32	1.62	-0.08	-3.23	-4.45
5	承压水	起点	-0.57	-1.92	-1.37	-1.06	-5.95	-7.83
		终点	-0.59	-1.95	-1.43	-0.96	-5.39	-6.58

交换作用,由于白垩系富含岩盐和石膏矿物,导致该路径上含水介质中的Na⁺与地下水中的Ca²⁺发生交换。根据反向水文地球化学模拟结果,研究区地下水演化过程以岩盐、石膏、白云石等矿物溶解、方解石沉淀以及阳离子交换作用为主。

4.4.2 区域地下水水文地球化学演化过程分析

在对额济纳平原地下水水文地球化学演化过程进行定性和定量分析的基础上,进一步对典型剖面上的水文地球化学演化过程细化模拟,对其演化过程进行概化,如图8所示。

额济纳平原中部潜水受河流补给后呈放射状径流,第四系承压水流向与潜水流向一致,二者水文地球化学演化规律相似。平原中部河道带为潜水及承压水补给区,潜水水化学组分受混合作用影响显著,水化学特征与地表水相似;第四系承压水受上覆潜水混合作用影响,水化学特征与潜水相似。河道带两侧为潜水径流区,沿地下水流向潜水水化学类型由SO₄-Na型变为Cl-Na型,离子浓度逐渐增加,主要

受溶滤作用控制;在古日乃至天鹅湖一带及东西居延海一带由于埋深变小,受蒸发影响显著,TDS值显著升高。沿地下水流向第四系承压水水化学组分主要受溶滤作用控制,在古日乃至天鹅湖一带及东西居延海一带TDS值显著升高,阳离子交换作用明显。在古日乃至天鹅湖一带及东西居延海一带,第四系地下水TDS值具有随深度增加而逐渐减小的规律。

巴丹吉林沙漠第四系潜水在向古日乃地区径流过程中主要受溶滤作用与反向阳离子交换作用影响。白垩系承压水由北向南径流,地下水水化学特征主要受溶滤作用与正向阳离子交换作用控制;地下水水化学类型以SO₄·Cl-Na型为主。

5 结论

本文基于水文地球化学基本理论和同位素水文学原理,对额济纳平原地下水水化学与氢氧稳定同位素特征及水化学演化规律进行了系统分析,主要结论如下:

表3 矿物在各路径上的溶解/沉淀量(mmol/L)

路径	1		2		3		4		5
	潜水	承压水	潜水	承压水	潜水	承压水	潜水	承压水	承压水
CaX ₂	-34.10	-11.59	0.09	-0.05	1.45	-6.05	-8.49	-0.40	
NaX	68.20	23.19	-0.18	0.11	-2.89	12.09	16.98	0.81	
方解石(CaCO ₃)	-42.93	-43.34	-0.38	-2.16	-3.00	-240.80	-144.50	-1.07	
白云石(CaMg(CO ₃) ₂)	21.66	21.03	0.03	0.29	0.93	122.30	74.25	0.10	
CO ₂	-1.60	-	-0.33	-1.61	-	3.55	-	-	
岩盐(NaCl)	274.20	245.30	0.58	2.98	2.72	327.50	208.40	6.37	
钾盐(KCl)	1.58	1.34	0.13	0.04	0.03	10.46	2.612	0.22	
石膏(CaSO ₄ ·2H ₂ O)	64.97	45.65	0.28	4.200	1.159	137.40	90.72	1.67	

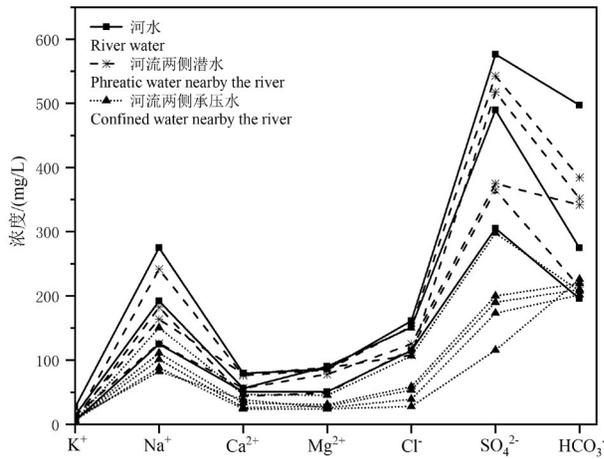


图7 典型剖面水样点 Schoeller 图

Fig.7 Schoeller diagram of groundwater samples at typical sections

(1)研究区第四系潜水和第四系承压水水化学类型以 SO_4 -Na 型为主。古日乃湖区至天鹅湖一带

及东西居延海一带是研究区内各项离子浓度高值区,这一地区第四系地下水 TDS 值具有随深度增加而逐渐减小的规律。研究区中部黑河两侧及东南部沙漠边缘是各项离子浓度低值区。研究区北部白垩系承压水水化学类型以 $SO_4 \cdot Cl-Na$ 型为主。由北往南,白垩系承压水中硫酸盐含量、氯化物含量、TDS 和总硬度浓度逐渐增大。

(2)地下水氢氧稳定同位素组成特征表明,研究区中部黑河两侧潜水与黑河地表水水力联系密切;研究区东部、西部潜水稳定同位素组成偏离当地大气降水线,受蒸发影响显著。研究区东部古日乃地区及沙漠边缘地带潜水与承压水氢氧稳定同位素组成相似,重同位素富集。研究区第四系承压水与白垩系承压水稳定同位素组成具有古水的特征,白垩系承压水在接受补给之前曾受过蒸发影响。

(3)研究区第四系潜水离子组分主要受溶滤作

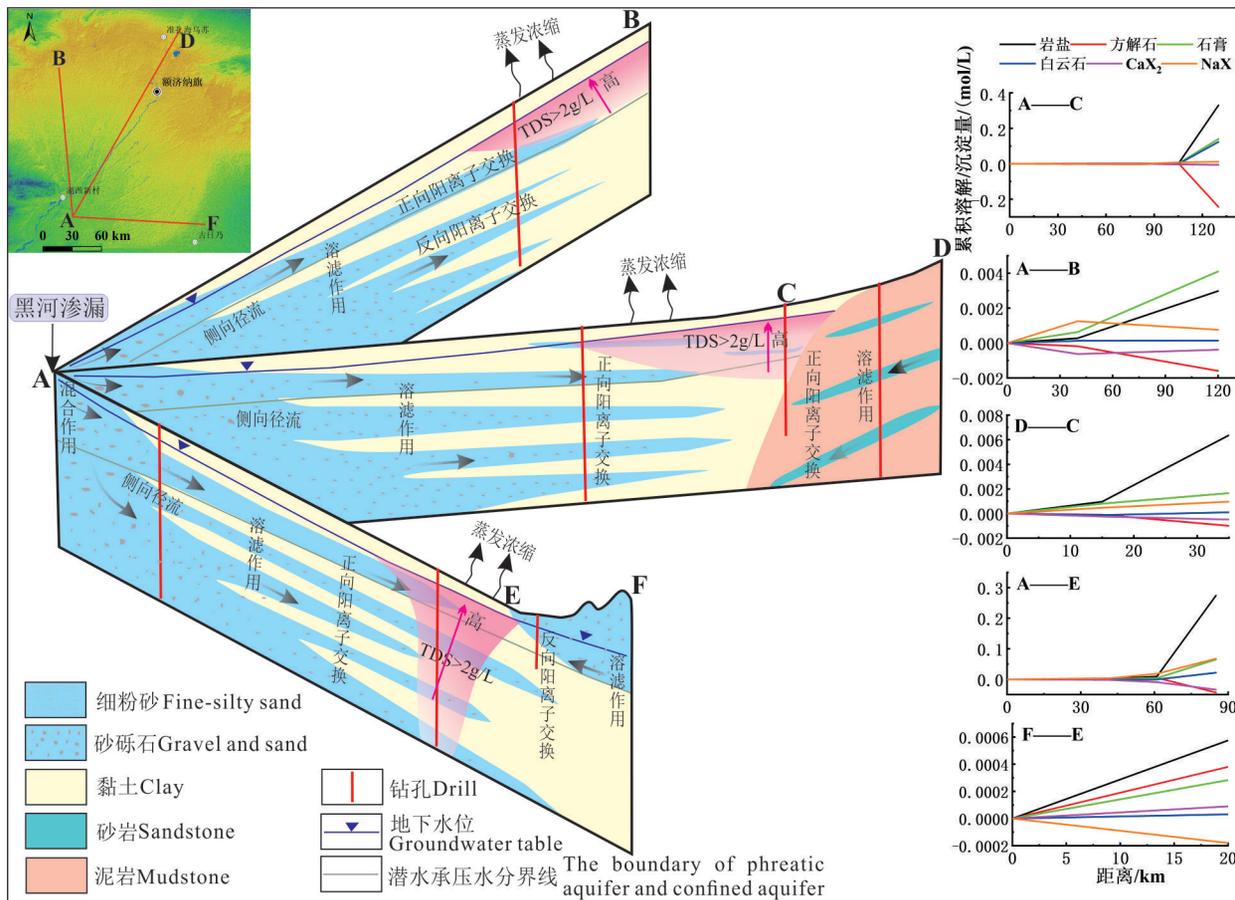


图8 额济纳平原地下水水文地球化学演化过程概化图

Fig.8 Generalized graph of hydrogeochemistry evolution process of Ejina plain

用、混合作用控制,局部地区受蒸发作用影响显著。第四系承压水离子组分主要受溶滤作用和阳离子交换作用控制。北部白垩系承压水离子组分受溶滤作用及阳离子交换作用控制。研究区地下水中主要离子来自岩盐、碳酸岩盐和石膏的溶解。

(4)地下水水文地球化学模拟结果表明,研究区内部第四系潜水和承压水中主要发生岩盐、白云石和石膏溶解、方解石沉淀以及正向阳离子交换作用;研究区东南部第四系潜水中主要发生岩盐、白云石和石膏溶解,方解石沉淀以及反向阳离子交换作用;研究区北部白垩系承压水中主要发生岩盐、白云石和石膏溶解,方解石沉淀以及正向阳离子交换作用。

References

- Acheampong S Y, Hess J W. 1998. Hydrogeologic and hydrochemical framework of the shallow groundwater system in the southern Voltaian sedimentary basin[J]. *Hydrogeology Journal*, (6): 527–537.
- Barzegar R, Moghaddam A A, Nazemi A H, Adamowski J. 2018. Evidence for the occurrence of hydrogeochemical processes in the groundwater of Khoy plain, northwestern Iran, using ionic ratios and geochemical modeling[J]. *Environment Earth Sciences*, 77(16): 597.
- Barzegar R, Moghaddam A A, Tziritis E, Fakhri M S, Soltani S. 2017. Identification of hydrogeochemical processes and pollution sources of groundwater resources in the Marand plain, northwest of Iran[J]. *Environmental Earth Sciences*, 76(7): 1–16.
- Chen Jiansheng, Wang Jiyang, Zhao Xia, Sheng Xuefen, Gu Weizu, Chen Liang, Su Zhiguo. 2004. Study of groundwater supply of the confined aquifers in the Ejin Basin based on isotopic methods[J]. *Geological Review*, 50(6): 649–658(in Chinese with English abstract).
- Gates J B, Edmunds W M, Darling W G, Ma J Z, Pang Z H, Young A A. 2008. Conceptual model of recharge to southeastern Badain Jaran Desert groundwater and lakes from environmental tracers[J]. *Applied Geochemistry*, 23: 3519–3534.
- Khairy H S, Janardhana M R. 2014. Hydrogeochemistry and quality of groundwater of coastal unconfined aquifer in Amol–Ghaemshahr Plain, Mazandaran Province, northern Iran[J]. *Environmental Earth Sciences*, 71(11): 4767–4782.
- Li Xiaohan, Zhang Yilong, Wang Rui, Li Zhenghong. 2018. Hydrochemical characteristics and formation mechanism of groundwater in Hohhot basin[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 16(4): 136–145 (in Chinese with English abstract).
- Liu Jun, Chen Zongyu, Wang Lijuan, Zhang Yilong, Li Zhenghong, Xu Jiaming, Peng Yurong. 2016. Chemical and isotopic constraints on the origin of brine and saline groundwater in Hetao plain, Inner Mongolia[J]. *Environmental Science Pollution Research*, 23: 15003–15014.
- Qian Yunping, Wang ling. 2008. Application of Isotope Hydrological Technology in the Study of Water Cycle in the Heihe River Basin[M]. Zhengzhou: The Yellow River Water Conservancy Press, 117–138(in Chinese).
- Ruan Yunfeng, Zhao Liangju, Yao Zhijun, Xiao Honglang, Cheng Guodong. 2016. Spatial differentiation characteristics and impact factors of groundwater conductance in the Heihe River basin[J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 52(3): 289–296(in Chinese with English abstract).
- Shang Weilin, Ma Wenxue. 2012. Hydrogeochemical characteristics analysis of Ceke port[J]. *China Mine Engineering*, 41(4): 56–61 (in Chinese with English abstract).
- Shen Zhaoli, Zhu Wanhua, Zhong Zoushen. 1990. Fundamentals of Hydrogeochemistry[M]. Beijing: Geological Publishing House, 53 (in Chinese).
- Soumya B S, Sekhar M, Riotte J, Audry S, Lagane C, Braun J. 2011. Inverse models to analyze the spatiotemporal variations of chemical weathering fluxes in a granito–gneissic watershed: Mule Hole, South India[J]. *Geoderma*, 165(1): 12–24.
- Su Yonghong, Zhu Gaofeng, Feng Qi, Chang Zongqiang, Si Jianhua, Xi Haiyang, Cao Shengkui. 2009. Chemical evolution of shallow groundwater and the residence time in the Ejin Basin[J]. *Arid Land Geography*, 32(4): 544–551(in Chinese with English abstract).
- Wang Ping, Yu Jingjie, Pozdniakov S P, Grinevsky S O, Liu Changming. 2014. Shallow groundwater dynamics and its driving forces in extremely arid areas: A case study of the lower Heihe River in northwestern China[J]. *Hydrological Processes*, 28(3): 1539–1553.
- Wang Ping. 2018. Progress and prospect of research on water exchange between intermittent rivers and aquifers in arid regions of northwestern China[J]. *Progress in Geography*, 37(2): 183–197(in Chinese with English abstract).
- Wang Zhen, Guo Huaming, Liu Haiyan, Zhao Weiguang, Liu Shuai, Wang Jiao, Shen Mengmeng. 2021. Hydrochemical and hydrogen and oxygen isotope characteristics of subsurface water in the Maqu Plateau[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 48(1): 18–26(in Chinese with English abstract).
- Wei Xing, Zhou Jinlong, Nai Weihua, Zeng Yanyan, Fan Wei, Li Bin. 2019. Hydrochemical characteristics and evolution of groundwater in the Kashgar delta area in Xinjiang[J]. *Environmental Science*, 40(9): 4042–4051(in Chinese with English abstract).
- Wen Xiaohu, Wu Yanqing, Su Jianping, Zhang Yinghua, Liu Famin. 2006. Groundwater salinization characteristics and mechanism in Ejin Basin[J]. *Journal of Desert Research*, 26(5): 836–841 (in Chinese with English abstract).

- Wu Xuanmin, Shi Shengsheng, Li Zhiheng. 2004. Research on Groundwater Utilization and Ecological Environment Protection in Ejina Basin of Heihe River in Northwest China[M]. Hohhot: Inner Mongolia People's Publishing House, 49–54(in Chinese).
- Wu Yanqing, Zhang Yinghua, Wen Xiaohu, Su Jianping. 2010. Hydrological Cycle and Water Resources Simulation in the Heihe River Basin, Northwest China[M]. Beijing: Science Press, 56–63 (in Chinese).
- Xi Haiyang, Feng Qi, Si Jianhua, Chang Zongqiang, Su Yonghong. 2012. A review of river course leakage in the Ejina Delta in the lower reaches of Heihe River[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 41(7): 33–37(in Chinese with English abstract).
- Zhang Guanghui. 2017. The Groundwater Source Discussion of Gurinai Lake Area of Alxa in Inner Mongolia[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 1–64 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Tao, Cai Wutian, Li Yingzhi, Zhang Zhiyin, Geng Tingting, Bian Chao, Zhao Miao, Cai Yuemei. 2017. Major ionic features and their possible controls in the water of the Niyang River basin[J]. Environmental Science, 38(11): 4537–4545(in Chinese with English abstract).
- Zhang Yinghua, Wu Yanqing, Su Jianping, Wen Xiaohu. 2006. Mechanism of groundwater replenishment in Ejin Basin[J]. Journal of Desert Research, 26(1): 96–102(in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhenyu, Zhao Pei, Chang Xiangsheng, Wang Yunze, Dong Guotao. 2019. Analysis of groundwater depth change in Ejina Oasis from 1992 to 2015[J]. Yellow River, 41(7): 33–37(in Chinese with English abstract).
- Zhao Liangju, Ruan Yunfeng, Xiao Honglang, Zhou Maoxian, Cheng Guodong. 2014. Application of radioactive tritium isotope in studying water cycle of the Heihe River Basin[J]. Quaternary Sciences, 34(5): 959–972 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Zhaoxian, Zhang Hongda, Chen Zongyu, Li Xufeng, Zhu Pucheng, Cui Xiaoshun. 2017. Hydrogeochemical and isotopic indicators of hydraulic fracturing flow back fluids in shallow groundwater and stream water, derived from Dameigou shale gas extraction in the northern Qaidam Basin[J]. Environmental Science & Technology, 51: 5889–5898.
- Zhou Jinmei, Jiang Zhongcheng, Xu Guangli, Qin Xiaoqun, Huang Qibo, Zhang Liankai. 2019. Major ionic characteristics and controlling factors of karst groundwater at Xiangshui, Chongzuo[J]. Environmental Science, 40(5): 2143–2151(in Chinese with English abstract).
- Zhou Yangxiao, Li Wenpeng. 2011. Groundwater Monitoring Information System Model and Sustainable Development[M]. Beijing: Science Press, 45–48(in Chinese).
- 素方法研究额济纳盆地承压含水层地下水的补给[J]. 地质论评, 50(6): 649–658.
- 李潇瀚, 张翼龙, 王瑞, 李政红. 2018. 呼和浩特盆地地下水化学特征及成因[J]. 南水北调与水利科技, 16(4): 136–145.
- 钱云平, 王玲. 2008. 同位素水文技术在黑河流域水循环研究中的应用[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 117–138.
- 阮云峰, 赵良菊, 姚治君, 肖洪浪, 程国栋. 2016. 黑河流域地下水电导率空间分异特征及影响因素研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 52(3): 289–296.
- 商玮麟, 马文学. 2012. 策克口岸水文地球化学特征分析[J]. 中国矿山工程, 41(4): 56–61.
- 沈照理, 朱宛华, 钟左桑. 1990. 水文地球化学基础[M]. 北京: 地质出版社, 53.
- 苏永红, 朱高峰, 冯起, 常宗强, 司建华, 席海洋, 曹生奎. 2009. 额济纳盆地浅层地下水演化特征与滞留时间研究[J]. 干旱区地理, 32(4): 544–551.
- 王平. 2018. 西北干旱区间歇性河流与含水层水量交换研究进展与展望[J]. 地理科学进展, 37(2): 183–197.
- 王振, 郭华明, 刘海燕, 赵威光, 刘帅, 王娇, 沈萌萌. 2021. 玛曲高原区潜水水化学和氢氧同位素特征[J]. 水文地质工程地质, 48(1): 18–26.
- 魏兴, 周金龙, 乃尉华, 曾妍妍, 范薇, 李斌. 2019. 新疆喀什三角洲地下水化学特征及演化规律[J]. 环境科学, 40(9): 4042–4051.
- 温小虎, 仵彦卿, 苏建平, 张应华, 刘发民. 2006. 额济纳盆地地下水盐化特征及机理分析[J]. 中国沙漠, 26(5): 836–841.
- 武选民, 史生胜, 黎志恒. 2004. 西北黑河额济纳盆地地下水利用与生态环境保护研究[M]. 呼和浩特: 内蒙古人民出版社, 49–54.
- 仵彦卿, 张应华, 温小虎, 苏建平. 2010. 中国西北黑河流域水文循环与水资源模拟[M]. 北京: 科学出版社, 56–63.
- 席海洋, 冯起, 司建华, 常宗强, 苏永红. 2012. 黑河下游额济纳三角洲河道渗漏对地下水补给研究综述[J]. 冰川冻土, 34(5): 1241–1247.
- 张光辉. 2017. 内蒙古阿拉善古日乃湖地区地下水来源探讨[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 1–64.
- 张涛, 蔡五田, 李颖智, 张智印, 耿婷婷, 边超, 赵森, 蔡月梅. 2017. 尼洋河流域水化学特征及其控制因素[J]. 环境科学, 38(11): 4537–4545.
- 张应华, 仵彦卿, 苏建平, 温小虎. 2006. 额济纳盆地地下水补给机理研究[J]. 中国沙漠, 26(1): 96–102.
- 张震域, 赵沛, 畅祥生, 王云泽, 董国涛. 2019. 额济纳绿洲1992–2015年地下水埋深变化分析[J]. 人民黄河, 41(7): 33–37.
- 赵良菊, 阮云峰, 肖洪浪, 周茅先, 程国栋. 2014. 氡同位素在黑河流域水循环研究中的应用[J]. 第四纪研究, 34(5): 959–972.
- 周巾枚, 蒋忠诚, 徐光黎, 覃小群, 黄奇波, 张连凯. 2019. 崇左响水区岩溶地下水主要离子特征及控制因素[J]. 环境科学, 40(5): 2143–2151.
- 周仰效, 李文鹏. 2011. 地下水监测信息系统模型及可持续发展[M]. 北京: 科学出版社, 45–48.

附中文参考文献

陈建生, 汪集旻, 赵霞, 盛雪芬, 顾慰祖, 陈亮, 苏治国. 2004. 用同位