

doi: 10.12029/gc20220323007

夏雨波, 王冰, 李海涛, 马震, 郭旭, 赵凯, 赵长荣, 张曦, 王晓旭. 2025. 雄安新区浅层地下水化学成因及健康地质区划研究[J]. 中国地质, 52(1): 331-346.

Xia Yubo, Wang Bing, Li Haitao, Ma Zhen, Guo Xu, Zhao Kai, Zhao Changrong, Zhang Xi, Wang Xiaoxu. 2025. Study on hydrochemical origins and health geology regionalization of shallow groundwater in Xiong'an New Area[J]. Geology in China, 52(1): 331-346(in Chinese with English abstract).

雄安新区浅层地下水化学成因及健康地质区划研究

夏雨波^{1,2,3}, 王冰⁴, 李海涛⁵, 马震^{1,2,3}, 郭旭^{1,2,3}, 赵凯⁵, 赵长荣^{1,2,3}, 张曦⁶,
王晓旭⁷

(1. 中国地质调查局天津地质调查中心(华北地质科技创新中心), 天津 300170; 2. 天津市海岸带地质过程与环境安全重点实验室, 天津 300170; 3. 中国地质调查局雄安新区城市地质研究中心, 天津 300170; 4. 天津地热勘查开发设计院, 天津 300250; 5. 中国地质环境监测院, 北京 100081; 6. 北京市勘察设计院有限公司, 北京 100038; 7. 雄安新区规划建设局, 河北 雄安 071799)

摘要:【研究目的】在水文地质实体内,生物生长和人群健康与周围环境、水土中的元素含量密切相关,研究地下水中与健康相关的宏微量元素形成演化条件、建立健康地质区划,有利于推动健康中国战略的实施。【研究方法】本文选取雄安新区作为典型研究区,运用多元统计分析、Piper 图和 Chadha 图等方法,分析浅层地下水水文地球化学特征及其物质成分来源,开展典型剖面上浅层地下水水质物源恢复,划定水化学类型分区,以环境和元素丰缺状况划分生物必须宏、微量元素分异区,建立雄安新区健康地质分区划。【研究结果】研究区地下水各参数表现出高度变异性;水岩作用显示,钠长石的溶解为地下水贡献了 Na^+ , 萤石和石膏的溶解为地下水贡献了 F^- 和 SO_4^{2-} , 消耗 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 HCO_3^- 析出了方解石、白云石,并发生了反向离子交换;研究区北部水化学类型以 HCO_3^- -Ca、 HCO_3^- -Ca-Mg 型为主,过渡为中部 HCO_3^- - SO_4^{2-} -Na-Mg-Ca、 HCO_3^- -Cl-Na-Ca-Mg、 HCO_3^- - SO_4^{2-} -Cl-Na-Mg 型,递变为白洋淀及大清河下游的 SO_4^{2-} - HCO_3^- -Na-Mg 型;雄安新区可分为北部冲洪积平原的元素缺乏健康地质分区、冲洪积平原与冲湖积平原交互地带的元素适中健康地质分区、冲湖积平原区的元素过剩健康地质分区 3 个分区,长时间饮用缺乏区和过剩区地下水会引起健康问题。【结论】需关注雄安新区由 F^- 、 SO_4^{2-} 、总硬度、 I^- 等浓度局部余缺引起或诱发的地方性疾病,需寻找替代水源或补充人体所需元素,为健康中国战略提供支撑。

关键词: 水化学形成演化;地下水矿物分析;水文地球化学;雄安新区;健康地质;水文地质调查工程

创新点: 多元统计分析、热力学计算识别并恢复了地下水中主要矿物成分及来源;建立了以元素中毒阈限理论为基础的雄安新区健康地质分区划。

中图分类号: P641.12 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2025)01-0331-16

Study on hydrochemical origins and health geology regionalization of shallow groundwater in Xiong'an New Area

XIA Yubo^{1,2,3}, WANG Bing⁴, LI Haitao⁵, MA Zhen^{1,2,3}, GUO Xu^{1,2,3}, ZHAO Kai⁵,
ZHAO Changrong^{1,2,3}, ZHANG Xi⁶, WANG Xiaoxu⁷

收稿日期: 2022-03-23; 改回日期: 2022-05-19

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20189122、DD20189142、DD20190338、DD20221759)联合资助。

作者简介: 夏雨波,男,1982年生,正高级工程师,主要从事城市地质调查评价、水工环地质调查评价;E-mail: sosodragon@163.com。

通信作者: 李海涛,男,1979年生,正高级工程师,主要从事水文地质、环境地质调查监测评价及综合研究;E-mail: lihaitao@mail.cgs.gov.cn。

(1. Tianjin Center (North China Center for Geoscience Innovation), China Geological Survey, Tianjin 300170, China; 2. Tianjin Key Laboratory of Coast Geological Processes and Environmental Safety, Tianjin 300170, China; 3. Xiong'an Urban Geological Research Center, China Geological Survey, Tianjin 300170, China; 4. Tianjin Geothermal Exploration and Development-Designing Institute, Tianjin 300250, China; 5. China Institute of Geo-Environment Monitoring, Beijing 100081, China; 6. BGI Engineering Consultants Ltd., Beijing 100038, China; 7. Planning and Construction Bureau of Xiong'an New Area, Xiong'an 071799, Hebei, China)

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

[Objective] In hydrogeological contexts, biological growth and human health are closely linked to the concentrations of elements present in the surrounding environment, including water and soil. Investigating the formation and evolutionary conditions of both macro and trace elements associated with health in groundwater, as well as establishing regional health geology, is beneficial for advancing the implementation of the Healthy China strategy. **[Methods]** Xiong'an New Area was chosen as the primary research site. The hydrogeochemical characteristics and sources of mineral composition in shallow groundwater were analyzed using multivariate statistical analysis, as well as the Piper and Chadha diagrams. This study restored the water quality by identifying the material element sources of shallow groundwater along a typical profile, delineated hydrochemical types, and classified the differentiation areas of macro and trace elements based on biological necessity, environmental factors, and element abundance or deficiency. Furthermore, it established a health geology regionalization for Xiong'an New Area. **[Results]** The parameters of groundwater exhibited significant variability. The water-rock interactions indicate that the dissolution of albite contributes sodium ions (Na^+), while the dissolution of fluorite and gypsum contributes fluoride ions (F^-) and sulfate ions (SO_4^{2-}), consuming calcium ions (Ca^{2+}), magnesium ions (Mg^{2+}), and bicarbonate ions (HCO_3^-), alongside the precipitation of calcite and dolomite, with reverse ion exchange also occurring. In the northern part of the study area, the predominant hydrochemical types were $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ and $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$. This composition transitioned to $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Na}\cdot\text{Mg}\cdot\text{Ca}$, $\text{HCO}_3\cdot\text{Cl}\text{-Na}\cdot\text{Ca}\cdot\text{Mg}$, and $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\cdot\text{Cl}\text{-Na}\cdot\text{Mg}$ in the middle section, ultimately evolving into $\text{SO}_4\cdot\text{HCO}_3\text{-Na}\cdot\text{Mg}$ in Baiyangdian and downstream of the Daqing River. Xiong'an New Area can be categorized into three regions: A health geology regionalization characterized by a deficiency of elements in the northern alluvial-proluvial plain; A health geology regionalization with moderate element levels in the interaction zone between the alluvial-proluvial plain and the alluvial-lacustrine plain; And a health geology regionalization with an excess of elements in the alluvial-lacustrine plain. Prolonged consumption of groundwater from both the deficient and excess areas may lead to health issues. **[Conclusions]** It is essential to examine the endemic diseases associated with the local surplus and deficiency of fluoride (F^-), sulfate (SO_4^{2-}), total hardness, and iodide (I^-) in Xiong'an New Area. Additionally, identifying alternative water sources or supplementing the necessary elements for human health is crucial to support the Healthy China strategy.

Key words: hydrochemical formation and evolution; groundwater mineral analysis; hydrogeochemistry; Xiong'an New Area; health geology; hydrogeological survey engineering

Highlights: Multivariate statistical analysis and thermodynamic calculation to identify and recover the main mineral components and sources of groundwater were used. Healthy geological zoning of Xiong'an New Area was established based on the theory of element poisoning threshold.

About the first author: XIA Yubo, male, born in 1982, professor level senior engineer, engaged in the survey and evaluation of urban geological, hydrogeology, engineering geology and environmental geology; E-mail: sosodragon@163.com.

About the corresponding author: LI Haitao, male, born in 1979, professor level senior engineer, engaged in hydrogeological and environmental geological survey, monitoring, evaluation and comprehensive research; E-mail: lihaitao@mail.cgs.gov.cn.

Fund support: Supported by the projects of China Geological Survey (No.DD20189122, No.DD20189142, No.DD20190338 and No.DD20221759).

1 引 言

水是一种矿物,更确切地说,是许多矿物的组

合(Vernadsky, 2003)。水文地球化学是研究地下水化学成分的形成和各种元素在水中迁移的学科,地下水化学成分的形成是水文地球化学研究的关键

问题之一,还能为解决许多地质问题及生物问题提供新的理论依据(Chudaev et al., 2013)。

地下水是重要的资源之一,在当前各种社会经济活动中具有重要的战略地位(Mattos et al., 2018; Bodrud-Doza et al., 2020)。华北地区地下水资源量减少需持续关注(郭海朋等, 2017; Chen et al., 2021; 刘宏伟等, 2023; 孟瑞芳等, 2024)。雄安新区设立前,容城县、安新县、雄县三县全域主要为农耕区,部分城镇存在工业及制造业,在生产和生活中开采了大量浅层地下水,地下水水位持续下降;雄安新区设立之后地质调查逐步推进,形成了系列的地质资料成果(Wang et al., 2019; 韩博等, 2023),对地下水含水系统有了进一步的认识(Zhao et al., 2021)。影响地下水质量的因素包括自然过程(含水层岩性、地下水补给源和含水层相互作用)和人为活动(城市化、农业、工业)等。地下水中溶解的无机物,是由矿物的溶解与沉淀、氧化与还原、吸附与交替、成络与配位等作用形成的(曹玉清和胡宽璐, 2009)。当地下水通过不同的地质单元时,以及当人为干扰改变其水文地球化学时,地下水中溶质总量往往会增加(Mattos et al., 2018),其浓度取决于水与含水沉积物相互作用的时间,地下水中的成分与城市、工业和农业活动密切相关(Daniele et al., 2013; Xia et al., 2024)。了解控制地下水质量的不同过程是实现水质控制的先决条件(Redwan and Moneim, 2016)。作为拟建城市,摸清雄安新区地下水中主要化学成分的形成与迁移规律,有助于城市建成后控制地下水质量,为合理利用和评价地下水资源提供依据,对保障用水安全与人体健康起到了关键作用。

国外在水文地球化学方面最通用的方法是分析地下水中各离子之间的关系(Gabriela et al., 2001; Daniele et al., 2013; Yang et al., 2016; Lakhvinder et al., 2019),地下水中的离子源于其流经的地层矿物,结合地质条件能够恢复地下水的来源和形成演化机制(Gallardo and Tase, 2007)。同位素也被用于研究地下水成因及地下水循环(Edmunds et al., 2002; Takeshi et al., 2020),该方法能够直接获取地下水中特定组分的来源,是研究地下水形成与演化的重要方法之一。对地下水中矿物饱和指数进行研究,能

够通过模拟分析大气降水和地下水的相关性及水岩反应(Uliana and Sharp, 2001; Aris et al., 2009),达到恢复地下水化学场的目的。为了促进水文地球化学研究,国外学者采用计算机手段对地下水化学场进行了模拟(Ronaldo and Antonio, 2007; Daniele et al., 2013),或采用多元统计等数学方法进行研究(Esmaili-Vardanjani et al., 2016),恢复了地下水组分形成与演化过程。

国内学者也开展了一系列地下水水文地球化学特征及演化的研究,并且以孔隙型地下水的研究为主,如巴中市凤凰庙红层区浅层地下水水文地球化学特征研究(田梦莎, 2016),白洋淀流域平原区地下水-孔隙水的水化学特征和水文地球化学过程研究(陈毅, 2018),北京平谷平原区浅层地下水化学特征演化研究(王金金, 2020)等。在基岩裂隙水研究方面,窦妍(2010)研究了鄂尔多斯盆地北部白垩系地下水的成因机制,分析了水文地球化学演化及循环规律。华北平原是中国水文地球化学研究的热点,学者们在典型剖面(邢丽娜, 2012)、地下水系统(张宗祜等, 1997)、地下水环境演化(张宗祜等, 2000)、地下水历史演化(张宗祜, 2005)等方面都开展了相关的研究工作,采用的研究方法与国外学者基本一致。

研究地下水水文地球化学过程,旨在揭示地下水中元素赋存和演化规律。生物和人类生存在地球自然环境中,大气、水、土及健康地质的质量决定了人体健康,各元素中毒阈限理论决定了最适营养,影响人体健康的正负效应(陶甄和刘淑均, 1984; 刘丙国, 2013)。饮水中的元素虽然相对较少,但较食物更易于被人体吸收,饮水安全对人体健康仍然是很重要的(林年丰, 1991)。地下水中某些元素的丰缺会对人体的健康产生影响(邢丽娜等, 2012; 孔晓乐等, 2015; 李勇等, 2017; 李英等, 2020; 袁翰卿等, 2020; 张卓等, 2023),而地质条件对地下水组分的形成起到了关键性的作用。

为避免或减少环境负效应对人类健康的影响,本研究利用水化学测试成果,结合雄安新区及白洋淀流域地质、水文地质条件,阐述了雄安新区地下水中主要离子的分布特征,统计了地下水水质的主要离子的关系,分析离子的主要来源,通过化学热力学理论构成化学元素平衡模式,建立化学指标表达式,恢复了研究区内典型剖面地下水物质成分

的来源,划定了水化学分区,确定相关的水-沉积物相互作用,刻画地下水中水化学元素的丰缺状况,以元素中毒阈限理论为基础,将水文地质实体划分为3个健康地质分区,研究水环境和元素丰缺与人体健康的关系,提出健康对策建议,支撑健康中国战略。

2 研究区背景条件

雄安新区位于太行山以东平原区,地势由西北向东南逐渐降低,地面高程多在5~26 m,地面坡度小于2‰。研究区位于太行山东麓冲洪积平原前缘地带,属堆积平原地貌,根据成因类型及地表形态,可进一步划分为冲洪积平原亚区、冲湖积平原亚区、冲积平原亚区,冲积平原亚区仅分布于研究区南部边界很小的范围。

冲洪积平原亚区位于研究区北部,主要分布在雄县乐善庄村—雄县县城—容城县小里镇一线以北。上部为近代河流冲积层或扇前洼地堆积物,下伏冲洪积层。冲湖积平原亚区位于工作区中南部地区,分布于雄县乐善庄村—雄县县城—容城县小里镇一线以南,由近代河流冲积和湖沼沉积形成。

雄安新区地表出露地层为第四系松散层(郭淑君等, 2021)。根据项目勘查初步成果,典型钻孔第四系厚度为135 m(刘开明等, 2020),预估雄安新区全区范围内第四系沉积物厚度一般约不超过190 m,成因类型以冲积、洪积、湖积为主,此次将第四系含水层作为研究对象。

浅层地下水主要接受大气降水补给,同时接受农业灌溉、地表水入渗补给及侧向径流补给。地下水主要排泄方式为人工开采,其次为径流和蒸发排泄。现状条件下,浅层地下水总体由西北向东南方向流动。在白洋淀附近形成局部水丘,地下水向周边径流。

浅层地下水含水层大部分地区单井涌水量在1000~3000 m³/d,属于中等富水区;在安新县西北角、容城县西南角及雄县东部等局部地区,单井涌水量在300~1000 m³/d,属于弱富水区。浅层地下水水位埋深一般在5~20 m,白洋淀周边区域地下水埋深较浅,一般小于5 m。

3 方法体系

2017年,从研究区297口井中获得了用于化学

分析的水样(图1)。取样井的深度为50~140 m,从埋藏角度来讲,该层段的地下水为浅层水(微承压水—承压水),在浅部含水层主要以古河道的形式存在(图2),取水井均为居民井,为多层混合水。在野外现场采用HACH SL1000测定钻孔中地下水电导率、pH值、气温、水温、硬度、溶解氧。用滴定法测定碱度和二氧化碳含量。

实验室分析了样品中的主要离子(Na⁺、K⁺、Ca²⁺和Mg²⁺、SO₄²⁻和Cl⁻)、硝酸盐、亚硝酸盐、磷酸盐、二氧化硅、溶解有机物、总挥发性化合物和悬浮固体。在采集后48 h内进行测定,滴定法测定钙、镁、氯化物和溶解氧,用火焰光度法测定钠和钾,用分光光度比浊法测定硫酸盐。

4 结果与讨论

4.1 主要离子空间分布特征

地下水地球化学受多种因素的影响,如岩石类型、岩土体中的渗流时间、地下水的原始成分以及水流路径的其他特征(Abdalla and Al-Abri, 2014)。297个地下水样品中监测的9个物理化学参数的描述性统计见表1。雄安新区地下水各参数的标准差(SD)和变异系数(CV)均表现出高度的变异性,说明在该地区水化学特征、地下水运移规律发生了明显的变化。SO₄²⁻的变异值最高,其次是Cl⁻、Na⁺和Mg²⁺,反映该区地下水水质空间变异的所有元素的变异系数均大于1.0。

研究区地下水pH值为6.65~8.87,属中性—微碱性水。地下水中的主要离子呈现一定的空间变化趋势,在白洋淀及周围地区、雄县东部等地区离子浓度较高,浓度最高点主要分布在安新—高阳、雄县与霸州交界地区。阴离子中重碳酸盐浓度为2.43~15.54 mmol/L,氯化物浓度为0.04~55.78 mmol/L,硫酸盐浓度为0.08~93.91 mmol/L。阳离子中Ca²⁺和Mg²⁺的浓度分别为0.02~22.91 mmol/L和0.02~51.21 mmol/L,Na⁺的浓度为0.26~62.08 mmol/L,K⁺的浓度为0.01~0.16 mmol/L。

4.2 水中物质成分的来源

4.2.1 主要离子相关性

岩石矿物的风化作用和人为活动是地下水中离子的主要来源,地下水化学组分可以用来反演岩石与水的相互作用或化学过程。

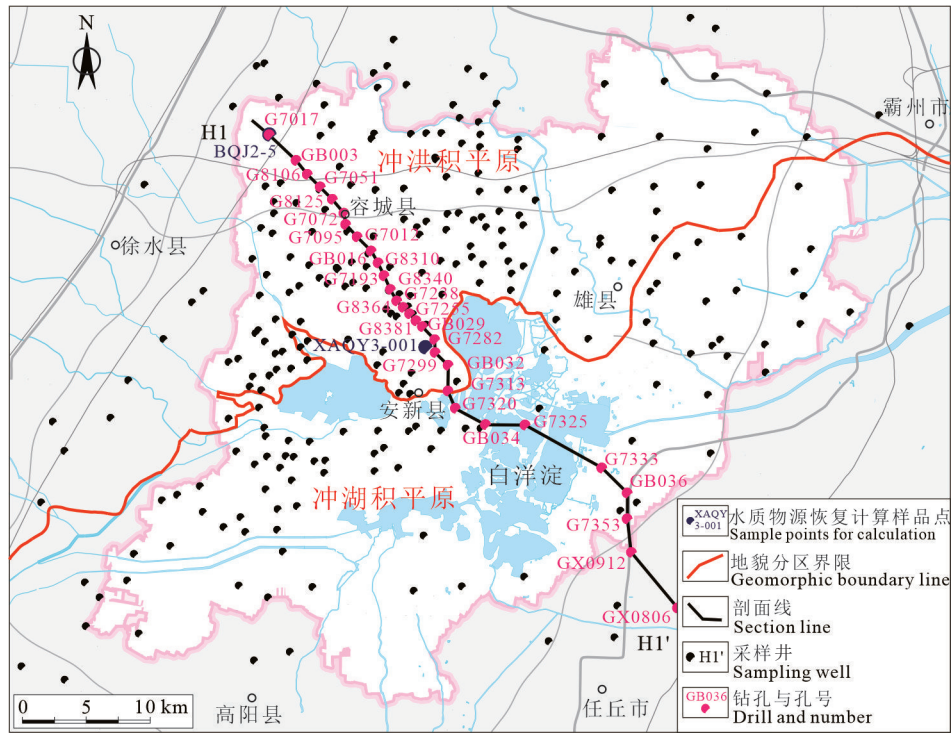


图 1 雄安新区地质调查工作程度图
Fig.1 Geological survey map of Xiong'an New Area

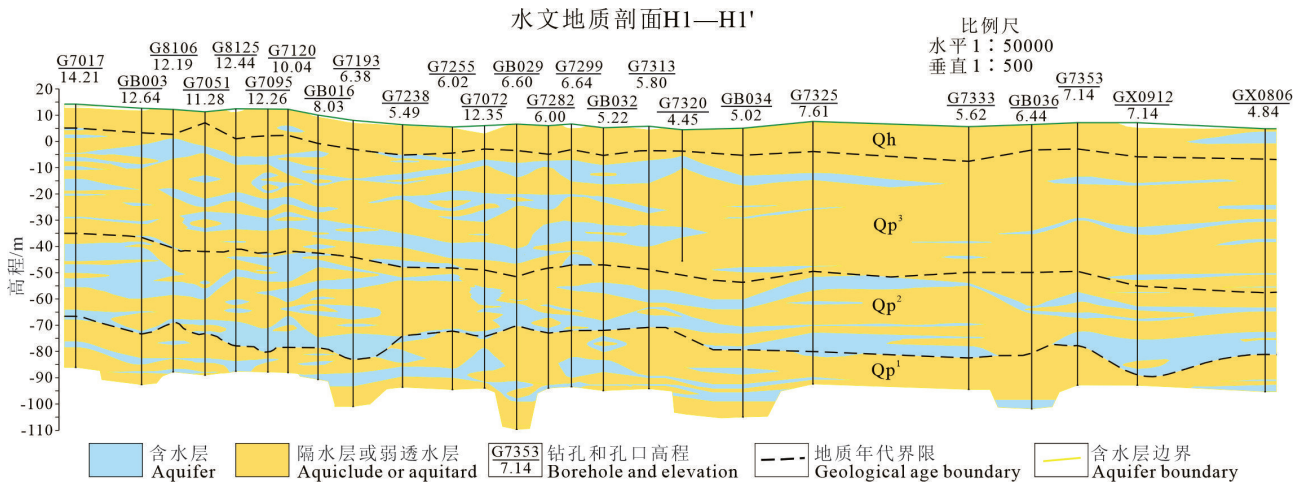


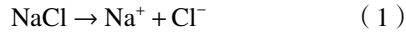
图 2 100 m 以浅典型水文地质剖面图
Fig.2 Typical hydrogeological profile of the depth in less than 100 m

如果蒸发浓缩作用是地下水化学的关键过程,那么 Na^+/Cl^- 比值将保持不变;如果盐类矿物溶解是钠的主要来源,则 Na^+/Cl^- 毫摩当量比应近似等于 1 (公式 1); 大于 1 的值通常表示 Na^+ 是从硅酸盐类矿物溶解反应中释放出来的 (Edmunds et al., 2002; Senthilkumar and Elango, 2013) (公式 2)。研究区地下水样本中观察到的平均 Na^+/Cl^- 毫摩当量比为

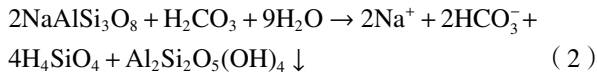
4.49 (图 3a), 大于标准海洋/海水平均值 0.85, 表明与大气降水相比, 岩石风化或人为活动可能会增加高浓度的 Na^+ (Aghazadeh et al., 2017); 地下水样品的 Na^+/Cl^- 毫摩当量比大于 1 的比率为 90.7%, 表明硅酸盐类矿物溶解是导致地下水中 Na^+ 的主要过程。 Na^+/Cl^- 比小于 1 的样品, 在现行降水条件下, 不可能在土壤区溶解游离石盐, 灌溉可能增加了地

地下水中 Cl⁻ 的浓度, 不排除融雪剂的溶解下渗对地下水中 Cl⁻ 的影响。

如发生盐类矿物溶解:



如发生硅酸盐类矿物溶解:



Ca²⁺/Mg²⁺毫摩当量比值等于 1 表示地下水 Ca²⁺、Mg²⁺ 的来源主要贡献是白云石溶解(公式 3), 而比

值 >1 表示方解石参加了溶解 (Mayo and Loucks, 1995)(公式 4)。当 Ca²⁺/Mg²⁺毫摩当量比 >2, 表明硅酸盐类矿物也参加了溶解 (Weaver et al., 1995)(公式 5), 当发生明显的 Ca²⁺、Mg²⁺离子交换吸附作用时, Ca²⁺/Mg²⁺会小于 1(公式 6)。研究区约 72% 的地下水样品的 Ca²⁺/Mg²⁺毫摩当量比小于 1, 普遍分布于研究区内, 表明这些地区发生了 Ca²⁺和 Mg²⁺的交换吸附作用, 约 87% 的水样方解石的饱和指数大于 0, 说明已经发生了方解石的沉淀; 研究区约 24% 的地下水样品的 Ca²⁺/Mg²⁺毫摩当量比介于

表 1 雄安新区地下水理化性质的描述性统计

指标	算术平均值	最小值	最大值	标准差SD	变异系数CV	偏度
pH	7.72	6.65	8.87	0.35	0.0458	-0.91
TDS/(mg/L)	905.3	167.32	8361.76	884.13	0.9766	4.75
Ca ²⁺ /(mmol/L)	3.02	0.20	22.91	2.44	0.8073	4.08
Mg ²⁺ /(mmol/L)	4.62	0.02	51.21	5.24	1.1339	5.50
Na ⁺ /(mmol/L)	6.05	0.26	62.08	7.55	1.2482	3.84
K ⁺ /(mmol/L)	0.02	0.01	0.16	0.01	0.7193	5.72
HCO ₃ ⁻ /(mmol/L)	6.71	2.43	15.54	2.51	0.3745	0.90
Cl ⁻ /(mmol/L)	2.66	0.04	55.78	4.35	1.6336	7.43
SO ₄ ²⁻ /(mmol/L)	4.09	0.08	93.91	9.14	2.2360	6.00

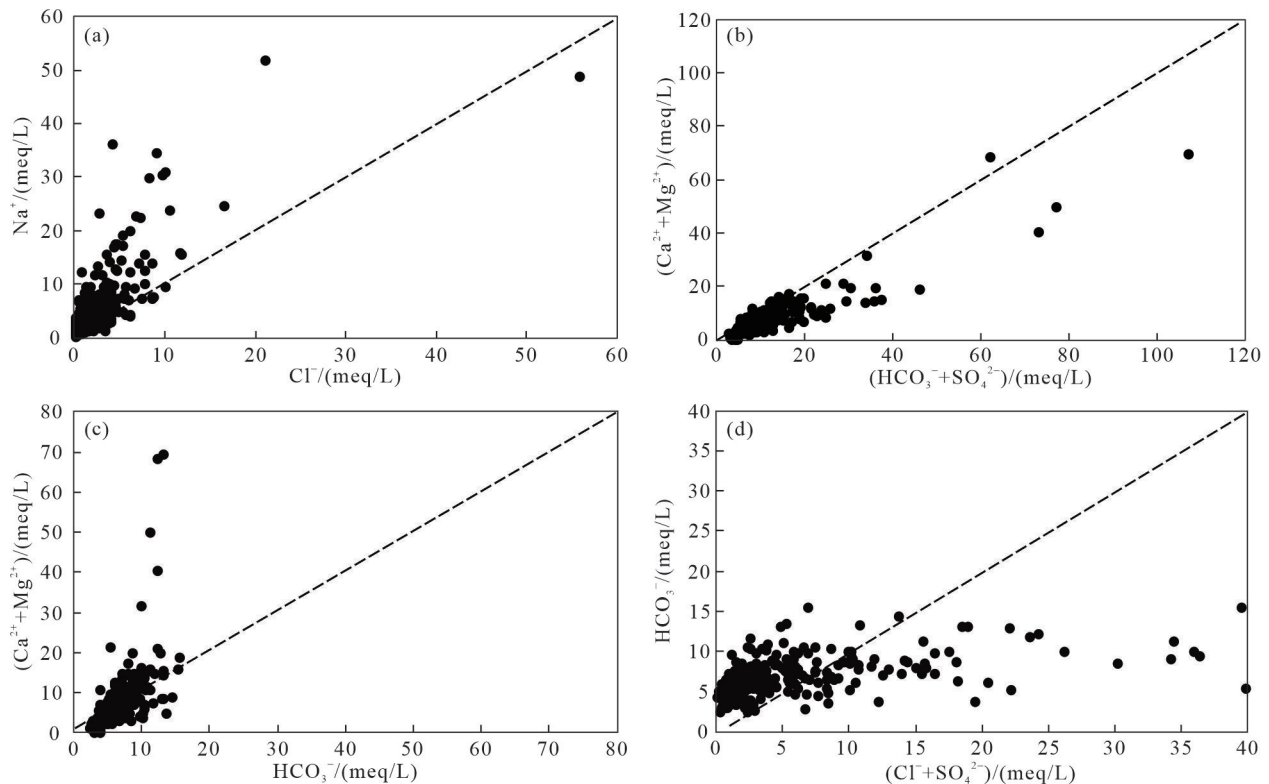
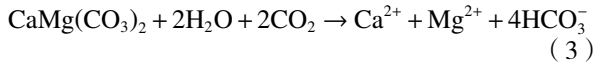


图 3 雄安新区及周边地区地下水中主要离子相关性图

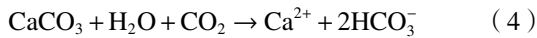
Fig.3 Correlation diagram of main ions in groundwater in Xiong'an New Area and surrounding areas

1~2; 4% 的样品显示 $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ 毫摩当量比大于 2。这表明碳酸盐类矿物的溶解是 Ca^{2+} 主要来源。

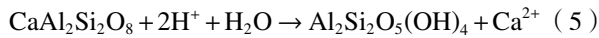
如发生白云石溶解:



如发生方解石溶解:



如发生硅酸盐类矿物溶解:



如发生交换吸附作用:



$(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$ 与 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ 相关性 (图 3b) 表明, 如果方解石、白云石和石膏的溶解反应占主导地位, 则 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 与 $\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$ 毫摩当量的曲线将下降收敛于 1 : 1 等值线, 在等值线以上为碳酸盐类矿物风化溶解, 在等值线以下为硅酸盐类矿物风化 (Dehnavi et al., 2011)。结果显示水样有 88% 位于 1 : 1 等值线以下, 这表明硅酸盐类矿物是贡献水中物质成分的主要矿物。

约 44% 的样品, $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 浓度高于 HCO_3^- (图 3c), 表明碳酸盐风化占主导地位, 为地下水提供 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} (Li et al., 2018), 地下水样品中多余的 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 由 $\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-}$ 离子平衡 (图 3d)。约 56% 的样品, 表现出 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 浓度低于 HCO_3^- , HCO_3^- 的剩余负电荷必须由碱金属 (Na^+ 和 K^+) 平衡 (Tiwari and Singh, 2014), 发生了硅酸盐矿物的溶解, HCO_3^-

浓度不随 $\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-}$ 浓度上升而上升 (图 3d)。

$(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) - (\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$ 与 $\text{Na}^+ - \text{Cl}^-$ 的关系曲线 (图 4) 显示其斜率为 -0.9821, 在没有硅酸盐类矿物风化或/和阳离子交换吸附的作用下, 所有数据应在接近原点的位置。数据基本上分布于斜率为 -1 的直线附近, 表明 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 Na^+ 通过反向离子交换反应相互关联。

4.2.2 Piper 图

Piper 三线图显示了地下水样品中不同阳离子 (Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 $\text{K}^+ + \text{Na}^+$) 和阴离子 (HCO_3^- 、 Cl^- 和 SO_4^{2-}) 的分散情况, 表明了地下水的来源和溶解盐的来源, 并解释了影响地下水特征的不同过程 (Piper, 1944)。研究区地下水样品在 Piper 图分布区域 (图 5) 表明, 该地区大部分水化学相属于 $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}$ 、 $\text{HCO}_3^- - \text{Ca} \cdot \text{Mg}$ 型 (64%, 图例为 \circ), 少量 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4 - \text{Na} \cdot \text{Mg} \cdot \text{Ca}$ 、 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{Cl} - \text{Na} \cdot \text{Ca} \cdot \text{Mg}$ 、 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4 \cdot \text{Cl} - \text{Na} \cdot \text{Mg}$ 型 (25%, 图例为 Δ) 和 $\text{SO}_4 \cdot \text{HCO}_3^- - \text{Na} \cdot \text{Mg}$ 型 (11%, 图例为 $+$)。

4.2.3 Chadha 图

为确定研究区的各种水文地球化学过程, 根据 Chadha (1999) 提出的方法进行评, X 轴为阳离子的碱土金属 ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$) 和碱金属 ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$) 的毫摩当量的差异, Y 轴为弱酸性阴离子 ($\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-$) 和强酸性阴离子 ($\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-}$) 之间的差异, 如图 6 所示, 图中每个象限都显示了一个特定的水文地球化学过程, 大致分为补给水 ($\text{HCO}_3^- - \text{Ca} \cdot \text{Mg}$ 型)、反向离子交换 ($\text{Cl}^- - \text{Ca} \cdot \text{Mg}$ 型)、海水 ($\text{Cl}^- - \text{Na}$ 型) 和碱性离子交换水 ($\text{HCO}_3^- - \text{Na}$)。结果表明, 大多数地下

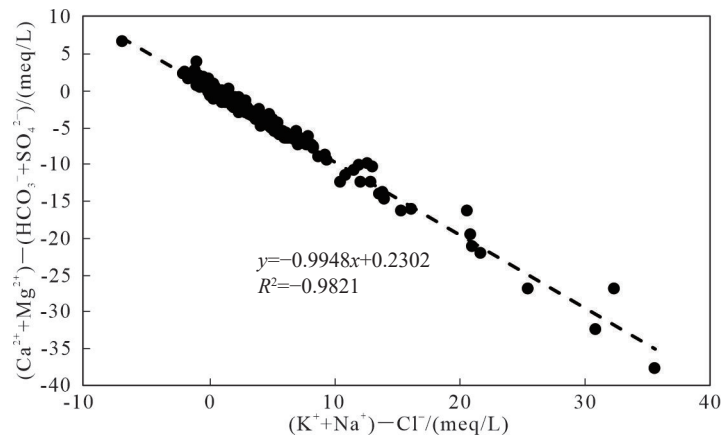


图 4 雄安新区地下水反离子交换化学图

Fig.4 Chemical diagram of groundwater counter ion exchange in Xiong'an New Area

水样品表现出补给水或离子交换水(67%),这意味着 $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$ 比 $\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-}$ 丰富,这是由于暴露的含水层岩石风化(如碳酸盐岩)释放 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} , 或可能是碱金属的反向离子交换过程造成的土壤中的金属离子溶于地下水中,随后 Na^+ 吸附在裸露的岩石矿物表面。15%的样品属于7号区域(图6),此类点主要位于白洋淀周边及雄县东部,属于C区

和部分B区内样品,为碱超过碱土,强酸性阴离子超过弱酸性阴离子,可能会导致盐度问题,因此较不适合用于饮用和灌溉。53个样品属于8号区域(图6),主要位于B区内,表明碱含量高于碱土,弱酸性阴离子超过强酸性阴离子。落在5号区内的地下水样品最多,占总样本的58%,主要位于A区内,该类型代表补给型,当水从地表灌溉渗入含水

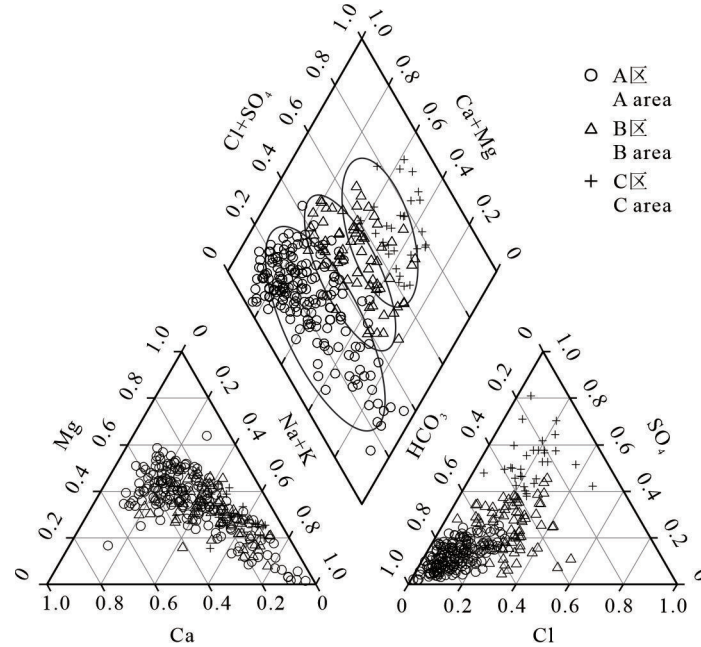


图5 雄安新区及周边地区 Piper 图(○为A区, △为B区, +为C区,具体分区见图7)

Fig.5 Piper map of Xiong'an new area and its surrounding areas (○ area A, △ area B, + area C, and the zoning shown in Fig.7)

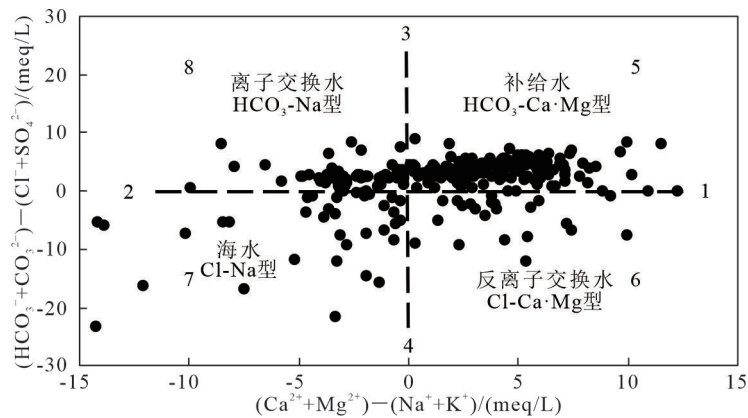


图6 地下水水化学过程的 Chadha 图

1—碱土超过碱金属; 2—碱金属超过碱土; 3—弱酸性阴离子超过强酸性阴离子; 4—强酸性阴离子大于弱酸性阴离子; 5—补给水 ($\text{HCO}_3-\text{Ca}\cdot\text{Mg}$ 型); 6—反离子交换水 ($\text{Cl}-\text{Ca}\cdot\text{Mg}$ 型); 7—海水 ($\text{Cl}-\text{Na}$ 型); 8—离子交换水 (HCO_3-Na 型)

Fig.6 Chadha diagram of groundwater hydrochemical process

1—Alkaline earth exceeds alkali metal; 2—Alkali metal exceeds alkaline earth; 3—Weak acidic anions exceed strong acidic anions; 4—Strong acidic anions are greater than weak acidic anions; 5—Make up water ($\text{HCO}_3-\text{Ca}\cdot\text{Mg}$ type); 6—Counter ion exchange water ($\text{Cl}-\text{Ca}\cdot\text{Mg}$ type); 7—Seawater ($\text{Cl}-\text{Na}$ type); 8—Ion exchange water (HCO_3-Na type)

层并携带溶解的 HCO_3^- 和地球化学上可运输/可移动的 Ca^{2+} 时演变而来。6 号区内地下水样品占比最小(图 6), 仅占 9%, 主要位于 B 区内, 地下水具有永久硬度。Piper 图和 Chadha 图的结果均表明, 地下水样品中碱土和弱酸性阴离子的含量分别高于碱和强酸性阴离子, 表明地下水具有暂时硬度。

本文未选择双曲线 Gibbs 图作为研究的方法, 因为有研究显示此图在描述地下水形成过程中存在一定争议(Andres and Paul, 2018)。

4.3 水质物源恢复

研究区内古元古界—太古宇地层岩性以片麻岩和斜长角闪岩为主, 中元古界长城系和蓟县系发育石英砂岩、白云质砂岩和白云岩, 古近系岩性以湖相和河流相的砂岩、泥岩为主, 局部发育砾岩和页岩(何登发等, 2018)。河流发育于雄安新区西部太行山地区, 流域内主要涉及蓟县系高于庄组、雾迷山组、洪庄子组及铁岭组, 岩石以白云岩为主(刘志远等, 2021)。

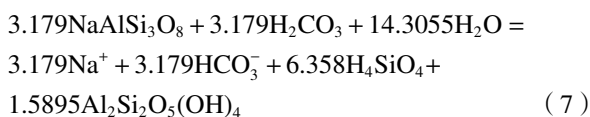
本研究水质物源恢复采用 PHREEQC(Version 2) 进行模拟。模拟路径为 BQJ2-5 至 XAQY3-001(位置见图 1)。根据水质物源依据上游出露地层情况及水中物质成分来源的分析结果进行恢复, 参与此次水质物源恢复的主要矿物为石盐、石膏、钠长石、高岭石、二氧化碳(g)、方解石、白云石、萤石、玉髓、石英、斜长石、钾长石。其中硅酸盐类矿物为强制溶解, 黏土矿物为强制沉淀; 考虑到反向离子交换, 设定 NaX 为强制沉淀、 CaX_2 和 MgX_2 为强制溶解。

由于水质物源恢复具有多解性, 本文仅对一类具有相同特点的恢复结果进行总结(表 2), 分析此类结果的相似的、均一的趋势。

4.3.1 硅酸盐类矿物的恢复

硅酸盐类矿物主要是钠长石的恢复, 由于 K^+ 的浓度变化量低, 因此在模拟中未表现出钾长石对水质的贡献, 在模拟中也未表现出斜长石的贡献。

钠长石溶解为高岭石:

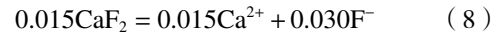


可见硅酸盐类矿物风化溶蚀最多的是钠长石, 钠长石为地下水贡献了 Na^+ 和 HCO_3^- 。

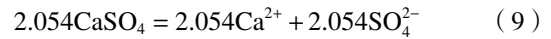
4.3.2 盐类矿物的恢复

水质物源恢复主要涉及的是萤石和石膏, 模拟中未表现出 NaCl 的贡献。

① 萤石的溶解



② 石膏的溶解

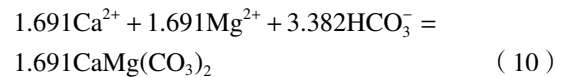


可见盐类矿物中萤石主要贡献了 F^- 和 Ca^{2+} , 石膏贡献了 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 。

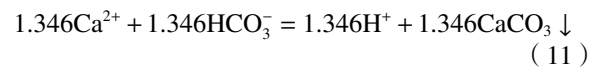
4.3.3 碳酸盐类矿物的恢复

碳酸盐类矿物主要涉及的是白云岩和方解石, 在模拟路径中, 这两项矿物均为沉淀。

① 白云岩的沉淀

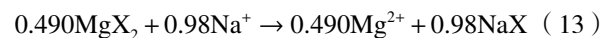
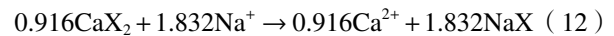


② 方解石的沉淀



4.3.4 阳离子的反向交换

在模拟中显示出 CaX_2 和 MgX_2 为溶解, NaX 为沉淀。



在矿物-水-气体系统中, 水中的 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 等物质, 由矿物恢复结果看, 既可来自等溶型矿物(不产生中间产物)溶解, 也可来自非等溶型矿物(产生中间产物, 如高岭石)的风化。但矿物的溶解和析出是同时存在的, 地下水失去了溶解方解石和白云石的能力, XAQY3-001 点方解石和白云石饱和指数分别为 0.38、0.58, 矿物恢复量分别为 -134.60 mg、-311.14 mg, 因而也是符合理论计算的。

4.4 浅层水水化学分布特点

由于地下水的地质作用, 本文考虑了地质和水文地质特征以及人类影响。水化学类型按照舒卡列夫分类进行评价, 主要离子的空间分布, 取样地下水的主要化学特征, 以及与水接触的沉积物的矿物组成和粒度, 确定了 3 个水化学区(图 7): 远离白

洋淀的地区主要受到上游来水的影响,水化学类型主要以 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 、 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 型为主,矿化度通常小于 1 mg/L ;白洋淀地区受到白洋淀底质对地下水的影 响,雄县东部地区受到局部径流场变化的影响,地下水化学类型以 $\text{SO}_4\cdot\text{HCO}_3\text{-Na}\cdot\text{Mg}$ 为主,矿化度通常大于 2 mg/L ;其间为过渡区,水化学类型为 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Na}\cdot\text{Mg}\cdot\text{Ca}$ 、 $\text{HCO}_3\cdot\text{Cl}\text{-Na}\cdot\text{Ca}\cdot\text{Mg}$ 、 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\cdot\text{Cl}\text{-Na}\cdot\text{Mg}$,矿化度通常介于 $1\sim 2\text{ mg/L}$ 。

水中物质成分来源可以是等溶型和非等溶型矿物,物质进入水中之后则受矿物溶度积规则、同离子效应、盐效应的控制; Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 等 离子构成的某些矿物达到和超过具体条件的饱和值 而沉淀, Na^+ 、 K^+ 仍在继续溶解和积累,因此便产生 水化学类型的水平分带现象,与矿物恢复的结果形 成了很好的验证。

4.5 健康地质分区划研究

研究区地下水的大量调查资料显示,包括金属 元素(邢怡等, 2019; 郭志娟等, 2021)、有机污染物 (Zhu et al., 2018)在本区受到工业污染多呈点状分 布,总体上对本区影响范围有限,故仅以 F^- 及一些 宏量元素的变化引起的某些健康地质问题为例,现 将雄安新区 3 个水质方面影响范围较大的独立又 相互联系的健康地质问题叙述如下:

4.5.1 研究区地下水 F^- 分布特征和健康地质问题

F^- 是人类所必须的元素,过多或不足对健康 均有影响。一般来说人对 F^- 浓度适应区间大致在 $0.5\sim 1.0\text{ mg/L}$,高 F^- 则出现斑釉齿或氟骨病,低则出 现龋齿。

(1)研究区浅层水中 F^- 分布特点

根据资料,研究区浅层地下水中 F^- 含量分布可

表 2 地下水水质模拟

Table 2 Simulation of groundwater quality

项目	pH值	阳离子/(mg/L)				阴离子/(mg/L)			
		K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-	F^-
BQJ2-5	7.44	1.10	38.90	87.64	67.30	92.27	33.60	450.22	0.267
XAQY3-001	7.84	0.60	215.30	137.76	94.77	351.69	282.20	490.67	0.85

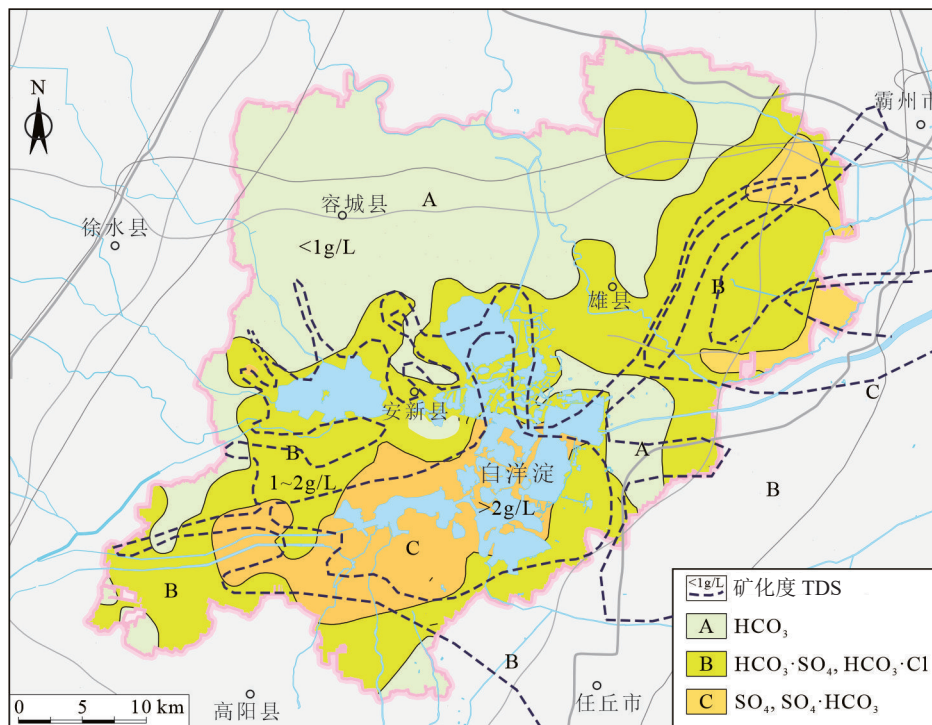


图 7 雄安新区浅层地下水水化学类型及矿化度分区图

Fig.7 Hydrochemical types and TDS of shallow groundwater in Xiong'an New Area

以分成小于 0.3 mg/L, 0.3~0.5 mg/L, 0.5~1.0 mg/L, 大于 1.0 mg/L 四个区(图 8)。总体上越靠近白洋淀, F 浓度越高, 在河道(及古河道)发育的地区 F 浓度相对较低。白洋淀及周边部分地区、部分古河道间地带, 地下水中 F 含量大于 1.0 mg/L, 北部及西部地区 F 含量小于 0.3 mg/L。

(2)F 的健康地质问题

F 在研究区的健康地质问题依然是高 F 区的氟斑牙病和低 F 区的龋齿病, 本地治理地方病采用深层水集中供水的方式解决, 因此无法从病理上统计本区的氟斑牙和龋齿病, 但需要注意避免打穿隔水层, 使高 F 水越留补给低 F 水。在调查过程中, 淀边生活的老人存在氟斑牙病历。

I 区为白洋淀下游地区, 地势平坦、水流汇集, 元素相对富集区, 矿化度高, 蒸发浓缩作用强烈, 因此 F 含量最高, 通常大于 1 mg/L; 在 F 为 0.5~1.0 mg/L 的 II 区, 该区处在矿物存在交换吸附作用和淋滤作用交替进行, 部分地区离白洋淀较近, 为弱—中等径流强度, 因此该地区 F 含量适中; III 区 F 含量为 0.3~0.5 mg/L, 该区处在矿物遭受淋滤作用, 使 Ca²⁺、Mg²⁺、SO₄²⁻、PO₄³⁻和 F 析出, 由于存在古

河道作为径流通道, 为中—弱等径流强度, 因此该地区 F 含量相对较低; IV 区是由古河道区、地下水迅速搬运或迁移的水文地球化学环境, 故该区 F 低属原生环境(图 8)。

4.5.2 地下水中高 SO₄²⁻、高 Mg²⁺引起的健康地质问题

研究区在白洋淀周边及东部地区, SO₄²⁻含量较高, 用 SO₄²⁻含量等于 500 mg/L 的等值线圈出 SO₄²⁻>500 mg/L 的高 SO₄²⁻区(图 8)。该区形成高矿化的 SO₄-HCO₃-Na·Mg 型水。这种类型水往往导致病因复杂的地方性疾病, 其主要表现为稀便、腹鸣、腹胀、慢性腹泻, 还可进一步引起疲乏、头昏、恶心、食欲不振等症状, 以及造成肝肿大(林年丰, 1991)。

4.5.3 以浅层地下水为主的健康地质分区划

从雄安新区元素丰缺的环境特征分析入手, 结合蓄水构造区水文地质、水文地球化学模型及其他地区的资料论述雄安新区元素丰缺与人群健康有关的健康地质分区的分布特征。

雄安新区健康地质分区划主要考虑 F⁻、SO₄²⁻、Cl⁻、矿化度、白云石和方解石饱和度等因素。元素缺乏区考虑以 F 和 I 与人类健康的关系, 过剩区考

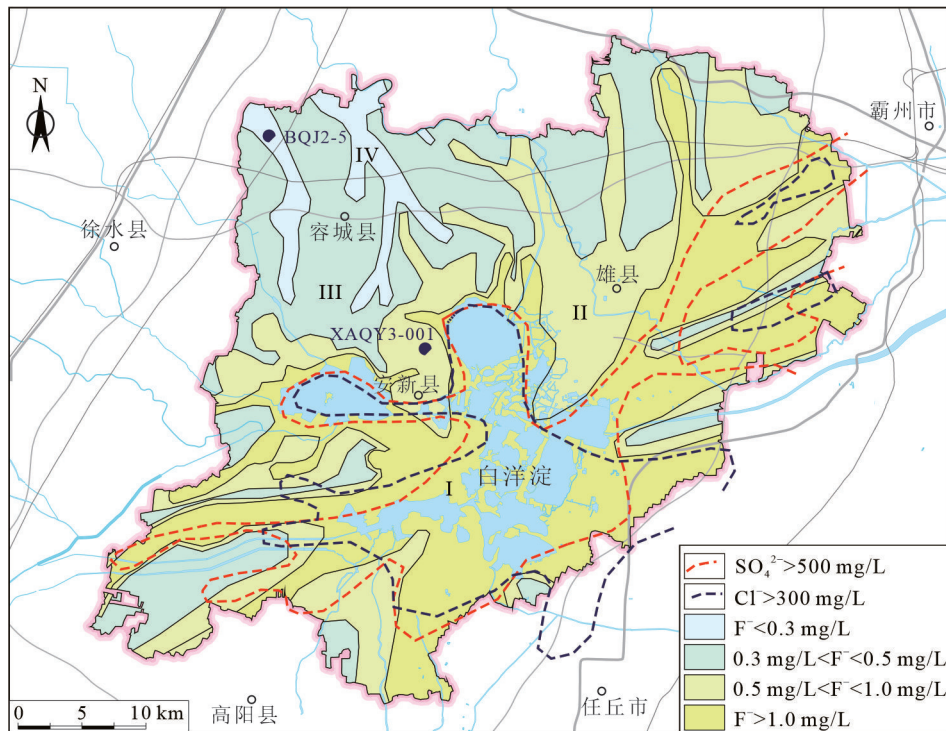


图 8 雄安新区 F⁻、SO₄²⁻、Cl⁻等离子含量分区图
Fig.8 Isoline map of F⁻, SO₄²⁻, Cl⁻ in Xiongan New Area

考虑 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、矿化度等与人类健康的关系,适中区考虑白云石和方解石饱和度值。

(1)元素缺乏的健康地质分区

雄安新区位于白洋淀流域的下游,北部地区为冲洪积平原(马岩等, 2020),本区古河道相对发育,为本区主要的含水层,地层颗粒相对较粗,方解石饱和度指数小于等于 1,该区为地表和地下水的补给、径流区,见图 9 绿色区。该区段的特点如下:①按蓄水构造分级属于富(透)水性中径流带。②地表、地下水流动相对较快,水-岩接触相互作用时间短,溶于水中的宏、微量元素少并随水迁移,使水中物质含量低,以致生物必需的某些宏、微量元素缺乏。③水化学类型为 HCO_3^- 型,矿化度小于 0.5 g/L, F 含量小于 0.5 mg/L。

(2)元素适中的健康地质分区

冲洪积平原大部及与冲湖积平原交互地带,方解石饱和度指数小于 1 和白云石饱和度指数大于等于 1,见图 9 黄色区。该区段的特点为:①按蓄水构造分级属于中—弱径流带。②地表水、地下水流动一般,水-岩接触相互作用时间中等,水中的宏、微量元素溶解与析出平衡,水中物质含量较为均衡,水

中生物必需的宏、微量元素能满足生物生理平衡之需。③水化学类型为 HCO_3^- - SO_4^{2-} 、 HCO_3^- - Cl^- 型,矿化度 0.5~2.0 g/L, F 含量 0.5~1.0 mg/L。

(3)元素过剩的健康地质分区

冲湖积平原区,方解石饱和度指数、白云石饱和度指数均大于 1,见图 9 深黄色区。该区段的特点为:①按蓄水构造分级属于极弱径流带。②地表、地下水流动慢,水-岩接触相互作用时间长,宏、微量元素以析出为主,水中生物必需的宏、微量元素过量。③水化学类型为 SO_4^{2-} - HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 型,矿化度大于 2 g/L, F 含量大于 1.0 mg/L, SO_4^{2-} >500 mg/L, Cl^- >300 mg/L。

4.5.4 健康地质分区划支撑健康中国战略的意义

(1)地质条件决定了地方病的发育情况

在地貌与健康方面,地貌类型与人体某些疾病的分布存在一定关系(罗卫和黄满湘, 2004; 贾红霞等, 2010)。雄安新区位于白洋淀流域的下游,其中白洋淀冲湖积平原区,地下水径流速度慢的闭流区,存在发生克山病、大骨节病、地氟病、食管癌、肝癌、胃癌等疾病的风险。

在水质与健康方面,天然水中溶解了各种有益于人体健康的矿物质和某些生命必须的微量元素,

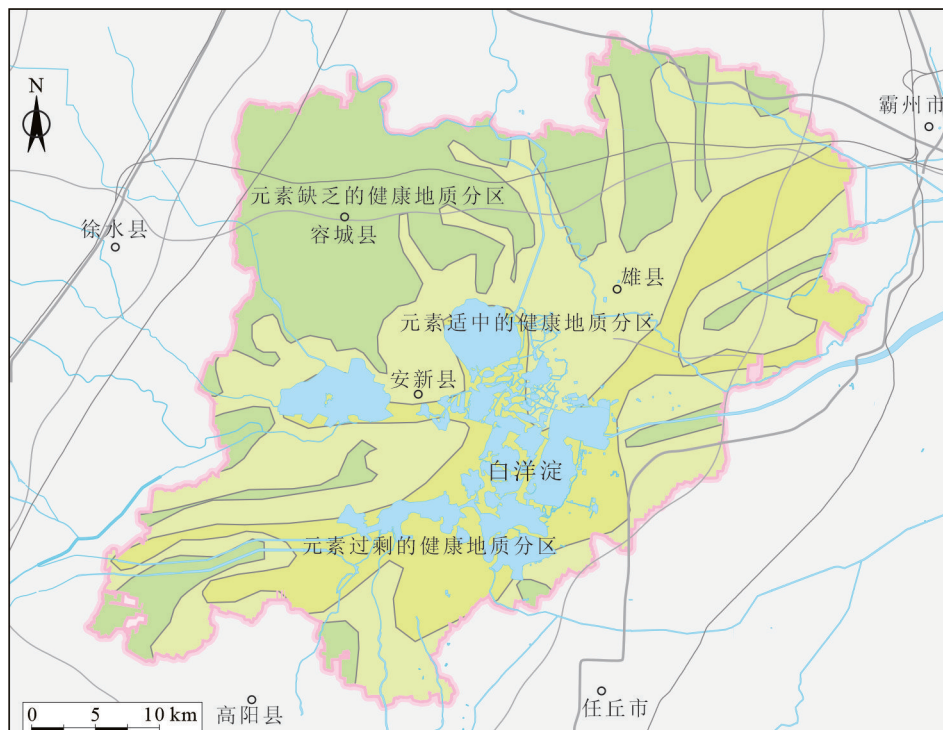


图 9 雄安新区健康地质区划图

Fig.9 Health geology regionalization of Xiong'an New Area

如 Zn、Fe、Mn、Co、Li、Se、Mo, 雄安新区西北部发育有富锶的地下水, 需要进行保护、合理开发, 但同时也需要注意部分元素对健康的限制因素。如元素过剩的健康地质分区内, F^- 含量高的地区(白洋淀周边地区, 图 8), 容易患氟中毒; SO_4^{2-} 、 SiO_2 高、pH 低的地区(图 8 红色虚线区为 SO_4^{2-} 高值区)容易诱发脑淤血。元素缺乏的健康地质分区内, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、总硬度过低的地区(零星分布, 规律暂不明)容易诱发心血管疾病或猝死, 需要饮用离子浓度适中的饮用水; I^- 低、 Ca^{2+} 高的地区(I 含量 $< 10 \mu g/L$ 的地区, 广泛分布于冲洪积平原区)容易引起地方性甲状腺肿, 需要食用含碘食盐。

(2) 健康地质调查工作以地质客观规律服务健康中国战略

人体健康与环境中的水、土、气、生等因素的地质赋存规律, 以及在自然条件和人类活动作用下的变化规律, 水是关键纽带的纽带。植物缺少水中某种必须元素便不能成活; 当元素含量适量时, 植物便能茁壮成长; 元素过量时植物便显示中毒甚至死亡。人也是如此, 人群的健康不仅与水中组分含量密切相关, 还与元素在水中存在形态及水文地质、水文地球化学环境有关。

健康地质工作, 探讨元素与人体健康之间的关系, 重视对其地球化学环境的考察, 综合考虑各元素存在的各种形态的作用, 还原其赋存条件和形成规律, 提出基于地质要素的人类健康建议, 为支撑健康中国战略提供支撑。

5 结 论

基于雄安新区地下水样品测试结果, 运用水文地球化学理论, 恢复水质的物源, 对比不同离子之间的浓度关系, 探讨雄安新区浅层地下水的水文地球化学本底特征, 进行健康地质分区划研究, 获得了以下结论:

(1) 地下水各参数的标准差和变异系数均表现出高等的变异性, 说明在该地区水化学特征、地下水运移规律发生了明显的变化。

(2) 雄安新区浅层地下水在迁移过程中, 水岩作用比较明显: Na^+ 来源于硅酸盐类矿物溶解; Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 来源于方解石、白云岩和硅酸盐等多种矿物的溶解; K^+ 的来源是硅酸盐类矿物的化学风化和溶

解; HCO_3^- 来源于碳酸盐岩类矿物的溶解; Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 Na^+ 的浓度通过反向离子交换反应相互关联, 地下水具有暂时硬度。

(3) 区内钠长石的溶解为地下水贡献了 Na^+ , 萤石和石膏的溶解为地下水贡献了 F^- 和 SO_4^{2-} , 消耗 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 HCO_3^- 析出了方解石、白云石, 同时发生了 Na^+ 与 CaX_2 、 MgX_2 的反向离子交换。

(4) 研究区水化学类型北部以 HCO_3^-Ca 、 HCO_3^-Ca-Mg 型为主, 中部过渡为 $HCO_3^-SO_4^-Na-Mg-Ca$ 、 $HCO_3^-Cl-Na-Ca-Mg$ 、 $HCO_3^-SO_4^-Cl-Na-Mg$ 型, 白洋淀及大清河下游递变为 $SO_4^-HCO_3^-Na-Mg$ 型。

(5) 雄安新区北部冲洪积平原为元素缺乏的健康地质分区, 属于中径流带, 水-岩接触相互作用时间短, 生物必需的某些宏、微量元素缺乏; 冲洪积平原与冲湖积平原交互地带为元素适中的健康地质分区, 属于中-弱径流带, 水-岩接触相互作用时间中等, 生物必需的某些宏、微量元素适中; 冲湖积平原区为元素过量的健康地质分区, 属于弱径流带, 水-岩接触相互作用时间长, 水中生物必需的宏、微量元素过量。

(6) 雄安新区需关注由 F^- 、 SO_4^{2-} 、总硬度、 I^- 等浓度局部余缺引起或诱发的氟中毒、脑淤血、心血管疾病、猝死和地方性甲状腺肿, 需寻找替代水源或补充人体所需元素。

References

- Abdalla O, Al-Abri R Y. 2014. Factors affecting groundwater chemistry in regional arid basins of variable lithology: Example of Wadi Umairy, Oman[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 7: 2861-2870.
- Aghazadeh N, Chitsazan M, Golestan Y. 2017. Hydrochemistry and quality assessment of groundwater in the Ardabil area, Iran[J]. *Applied Water Science*, 7(7): 3599-3616.
- Andres M, Paul S. 2018. Groundwater chemistry and the Gibbs diagram[J]. *Applied Geochemistry*, 97: 209-212.
- Aris A Z, Abdullah M H, Praveena S M. 2009. Evolution of groundwater chemistry in the shallow aquifer of a small tropical Island in Sabah, Malaysia[J]. *Sains Malaysiana*, 38(6): 805-812.
- Bodrud-Doza M, Islam D U, Rume T, Quraishi S B, Bhuiyan M A H. 2020. Groundwater quality and human health risk assessment for safe and sustainable water supply of Dhaka city dwellers in Bangladesh[J]. *Groundwater for Sustainable Development*, 10: 100374.
- Cao Yuqing, Hu Kuanrong. 2009. Chemical Kinetics of Groundwater

- and Division of Ecological Environment Area[M]. Beijing: Science Press (in Chinese).
- Chadha, D K. 1999. A proposed new diagram for geochemical classification of natural waters and interpretation of chemical data[J]. *Hydrogeology Journal*, 7(5): 431–439.
- Chen S M, Liu F T, Zhang Z, Zhang Q, Wang W. 2021. Changes of groundwater flow field of Luanhe River Delta under the human activities and its impact on the ecological environment in the past 30 years[J]. *China Geology*, 4(3): 455–462.
- Chen Yi. 2018. Pore–water and Groundwater Hydrochemical Characteristics and Hydrogeochemical Processes in Baiyangdian Lake Basin[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 1–91 (in Chinese with English abstract).
- Chudaev O, Schvartsev S, Ryzenko B. 2013. Vernadsky and main research avenues in modern hydrogeochemistry[J]. *Procedia Earth and Planetary Science*, 7: 163–166.
- Daniele L, Vallejo Á, Corbella M, Molina L, Pulido–Bosch A. 2013. Hydrogeochemistry and geochemical simulations to assess water–rock interactions in complex carbonate aquifers: The case of Aguadulce (SE Spain)[J]. *Applied Geochemistry*, 29: 43–54.
- Dehnavi A G, Sarikhani R, Nagaraju D. 2011. Hydro geochemical and rock water interaction studies in east of Kurdistan, N–W of Iran[J]. *International Journal of Environmental Sciences and Research*, 1(1): 16–22.
- Dou Yan. 2010. Study on Hydrogeochemical Evolution and Circulation in North of Ordos Cretaceous Groundwater Basin[D]. Xi’an: Chang’an University 1–160 (in Chinese with English abstract).
- Edmunds W M, Carrillo–Rivera J J, Cardona A. 2002. Geochemical evolution of groundwater beneath Mexico City[J]. *Journal of Hydrology*, 258: 1–24.
- Esmaceli–Vardanjani M, Rasa I, Yazdi M, Pazand K. 2016. The hydrochemical assessment of groundwater resources in the Kadkan basin, Northeast of Iran[J]. *Carbonates and Evaporites*, 31(2): 129–138.
- Gabriela M G, Hidalgo M D V, Blesa M A. 2001. Geochemistry of groundwater in the alluvial plain of Tucuman Province, Argentina[J]. *Hydrogeology Journal*, 9(6): 597–610.
- Gallardo A H, Tase N. 2007. Hydrogeology and geochemical characterization of groundwater in a typical small–scale agricultural area of Japan[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 29(1): 18–28.
- Guo Haipeng, Bai Jinbin, Zhang Youquan, Wang liya, Shi Jusong, Li Wenpeng, Zhang Zuochen, Wang Yunlong, Zhu Juyan, Wang Haigang. 2017. The evolution characteristics and mechanism of the land subsidence in typical areas of the North China Plain[J]. *Geology in China*, 44(6): 1115–1127 (in Chinese with English abstract).
- Guo Shujun, Yu Lei, Ren Zhengwei, Wang Chunhui, Ming Yuanyuan. 2021. Application of high–density resistivity method in fine division of Quaternary geological structure in the starting area of Xiong’an New Area[J]. *North China Geology*, 44(1): 45–51 (in Chinese with English abstract).
- Guo Zhijuan, Zhou Yalong, Wang Qiaolin, Wang Chengwen, Song Yuntao, Liu Fei, Yang Zheng, Kong Mu. 2021. Characteristics of soil heavy metal pollution and health risk in Xiong’an New Area[J]. *China Environmental Science*, 41(1): 431–441 (in Chinese with English abstract).
- Han Bo, Xia Yubo, Ma Zhen, Wang Xiaodan, Guo Xu, Lin Liangjun, Pei Yandong. 2023. Division of engineering geological strata, building of 3D geological structure and its application in urban planning and construction in Xiong’an New Area[J]. *Geology in China*, 50(6): 1903–1918 (in Chinese with English abstract).
- He Dengfa, Shan Shuaiqiang, Zhang Yuying, Lu Renqi, Zhang Ruifeng, Cui Yongqian. 2018. 3–D geologic architecture of Xiong’an New Area: Constraints from seismic reflection data[J]. *Science China Earth Sciences*, 48(9): 1207–1222 (in Chinese with English abstract).
- Jia Hongxia, Xiao Xin, Zhang Shuang, Bai Xinlei, Sun Zonglian. 2010. Geochemical environment and common endemic diseases[J]. *Energy and Environment*, (2): 46–48 (in Chinese).
- Kong Xiaole, Wang Shiqin, Zhao Huan, Yuan Ruiqiang. 2015. Distribution characteristics and source of fluoride in groundwater in lower plain area of North China Plain: A case study in Nanpi County[J]. *Environmental Science*, 36(11): 4051–4059 (in Chinese with English abstract)
- Lakhvinder K, Madhuri S, Sakshi S, Bhavika S, Renu L, Gagandeep S. 2019. Hydrogeochemical characterization of groundwater in alluvial plains of river Yamuna in northern India: An insight of controlling processes[J]. *Journal of King Saud University–Science*, 31(4): 1245–1253.
- Li P, Wu J, Tian R, He S, He X, Xue C, Zhang K. 2018. Geochemistry, hydraulic connectivity and quality appraisal of multilayered groundwater in the Hongdunzi coal mine, Northwest China[J]. *Mine Water and the Environment*, 37(2): 222–237.
- Li Ying, Wu Ping, Zhang Bo, Han Qiangqiang, Li Yang, Xu Zhaoxiang, Yu Kun. 2020. Discussion characteristics and formation factors of high fluoride groundwater in the north of Lingwu City[J]. *Environmental Chemistry*, 39(9): 2520–2528 (in Chinese with English abstract).
- Li Yong, Gao Xubo, Zhang Xin, Luo Wenting, Hu Qinrong. 2017. Geochemistry of arsenic in sediments and groundwater in areas with arsenic polluted groundwater in Yuncheng Basin[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 24(5): 68–74 (in Chinese with English abstract).
- Lin Nianfeng. 1991. *Medical Environmental Geochemistry*[M]. Changchun: Jilin Science and Technology Press (in Chinese).
- Liu Bingguo. 2013. Study on Investigation, Evaluation and Application of Population Environmental Health[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 1–105 (in Chinese with English abstract).
- Liu Hongwei, Wang Guoming, Gao Mingda. 2023. Shallow groundwater ages and implication to the intrinsic vulnerability of aquifers in piedmont plain of Taihang Mountain[J]. *North China Geology*, 46(2): 63–68 (in Chinese with English abstract).
- Liu Kaiming, Xu Qinmian, Duan Lianfeng, Niu Wenchao, Teng Fei, Wang Xiaodan, Zhang Wei, Dong Jie. 2020. Quaternary stratigraphic architecture and sedimentary evolution from borehole

- GB014 in the western Xiong'an New Area[J]. *Chinese Science Bulletin*, 65(20): 2145–2160 (in Chinese with English abstract).
- Liu Zhiyuan, Li Xiao, Zhang Yunpeng, Ji Yunping, Yang Jinsong, Wang Keping. 2021. Research on characteristics of shallow groundwater and Jiehe alluvial fan in piedmont plain of Taihang Mountain in Shunping County, Hebei Province[J]. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 18(6): 930–937 (in Chinese with English abstract).
- Luo Wei, Huang Manxiang. 2004. Geological environment and endemic diseases[J]. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 15(4): 1–4,14 (in Chinese with English abstract).
- Ma Yan, Li Hongqiang, Sun Jie, Sun Sheng, Xia Yubo, Feng Jie, Long Hui, Zhang Jingmao. 2020. Geophysical technology for underground space exploration in Xiong'an New Area[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 41(4): 535–542 (in Chinese with English abstract).
- Mattos J B, Moreira Cruz M J, De Paula F C F, Sales E F. 2018. Spatio-seasonal changes in the hydrogeochemistry of groundwaters in a highland tropical zone[J]. *Journal of South American Earth Sciences*, 88: 275–286.
- Mayo A L, Loucks M D. 1995. Solute and isotopic geo-chemistry and groundwater flow in the Central Wasatch Range, Utah[J]. *Journal of Hydrology*, 172: 31–59.
- Meng Ruifang, Yang Huifeng, Bao Xilin, Xu Buyun, Li Lei, Li Jincheng. 2024. Prospect analysis of unconventional water resources utilization and eco-environmental effects in Beijing–Tianjin–Hebei Plain[J]. *Geology in China*, 51(1): 221–233 (in Chinese with English abstract).
- Piper A M. 1944. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses[J]. *Transactions, American Geophysical Union*, 25: 914–928.
- Redwan M, Moneim A A A. 2016. Factors controlling groundwater hydrogeochemistry in the area west of Tahta, Sohag, Upper Egypt[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 118: 328–338.
- Ronaldo H, Antonio P V. 2007. Hydrogeochemistry of the Coxilha das Lombas Aquifer, Brazil[J]. *Environmental Chemistry Letters*, 5(2): 91–94.
- Senthilkumar M, Elango L. 2013. Geochemical processes controlling the groundwater quality in lower Palar river basin, southern India[J]. *Journal of Earth System Science*, 122: 419–432.
- Sun Xiaole, Wang Shiqin, Zhao Huan, Yuan Ruiqiang. 2015. Distribution characteristics and source of fluoride in groundwater in Lower Plain Area of North China Plain: A case study in Nanpi County[J]. *Environmental Science*, 36(11): 4051–4059 (in Chinese with English abstract).
- Takeshi S, Lorenzo S, Hirotsuka S, Jean M M, Laurent O, Takato T, Shoichiro H, Per M, Ken K, Toshiko K. 2020. Characterization and comparison of groundwater quality and redox conditions in the Arakawa Lowland and Musashino Upland, southern Kanto Plain of the Tokyo Metropolitan area, Japan[J]. *Science of The Total Environment*, 722: 137783.
- Tao Zhen, Liu Shujun. 1984. Health effects of environmental pollutants–threshold limit values of human exposure to several pollutants[J]. *Environmental Science Trends*, (2): 31–32 (in Chinese).
- Tian Mengsha. 2016. Red Layer of Shallow Groundwater Hydrogeochemical Characteristics of FengHuang Temple in Enyang District of Bazhong[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 1–80 (in Chinese with English abstract).
- Tiwari A K, Singh A K. 2014. Hydrogeochemical investigation and groundwater quality assessment of Pratapgarh district, Uttar Pradesh[J]. *Journal of the Geological Society of India*, 83(3): 329–343.
- Uliana M M, Sharp J M. 2001. Tracing regional flow paths to major springs in Trans–Pecos Texas using geochemical data and geochemical models[J]. *Chemical Geology*, 179: 53–72.
- Vernadsky V I. 2003. History of Natural Waters[M]. Moscow: Nauka.
- Wang Jinjin. 2020. Study on Chemical Characteristics and Evolution of Shallow Groundwater in Pinggu Plain of Beijing[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 1–80 (in Chinese with English abstract).
- Wang Q, Zhou X Y, Huo Z B, Shi L, Zhang Y B. 2019. Building an up-and-coming city: An overview of the geological data sharing service platform of the Xiong'an New Area[J]. *China Geology*, 3(4): 566–568.
- Weaver T R, Frapce S K, Cherry J A. 1995. Recent cross-formational fluid flow and mixing in the shallow Michigan basin[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 107(6): 697–707.
- Xia Y B, Chen G F, Liu F T, Zhang J, Ning H. 2024. Hydrogeochemical characteristics and health risk assessment of groundwater in grassland watersheds of cold and arid regions in Xilinhot, China[J]. *Water*, 16: 2488.
- Xing Lina. 2012. Chemical Characteristics and Hydrogeochemical Processes of Groundwater in Typical Sections of North China Plain[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 1–67 (in Chinese with English abstract).
- Xing Lina, Guo Huaming, Wei Liang, Zhan Yanhong, Hou Chuntang, Li Ruimin, Wang Yi. 2012. Evolution feature and genesis of fluoride groundwater in shallow aquifer from North China Plain[J]. *Journal of Earth Science and Environment*, 34(4): 57–67 (in Chinese with English abstract).
- Xing Yi, Zhang Surong, Liu Jihong, Wang Changyu. 2019. Effect of crop root soil on agricultural product safety: Take the eastern part of Baoding Hebei province as an example[J]. *Geological Survey and Research*, 42(3): 219–224,234 (in Chinese with English abstract).
- Yang Q, Li Z, Ma H, Wang L, Martin J D. 2016. Identification of the hydrogeochemical processes and assessment of groundwater quality using classic integrated geochemical methods in the Southeastern part of Ordos basin, China[J]. *Environmental Pollution*, 218: 879–888.
- Yuan Hanqing, Li Qiao, Tao Hongfei, Mahemujiang-Aihemaiti, Yang Wenxin, Su Yanpeng. 2020. Groundwater arsenic enrichment factors of Kuitun River Basin, Xinjiang[J]. *Environmental Chemistry*, 39(2): 524–530 (in Chinese with English abstract).
- Zhao K, Qi J, Yi C, Ma B, Li Y, Guo H, Wang X, Wang L, Li H. 2021.

- Hydrogeochemical characteristics of groundwater and pore-water and the paleoenvironmental evolution in the past 3.10 Ma in the Xiong'an New Area, North China[J]. *China Geology*, 4(3): 476-486.
- Zhang Zhuo, Liu Futian, Chen Sheming. 2023. Review on the application of H, O, Sr, Ca, Li and B isotopes in the research of high-fluoride groundwater[J]. *North China Geology*, 46(3): 49-56 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zonghu, Shi Dehong, Ren Fuhong, Yin Zhengzhou, Sun Jichao, Zhang Cuiyun. 1997. Discussion on the evolution of Quaternary groundwater system in North China Plain[J]. *Science in China (Series D)*, 27(2): 168-173 (in Chinese).
- Zhang Zonghu, Shen Zhaoli, Xue Yuqun, Ren Fuhong, Shi Dehong, Yin Zhengzhou, Zhong Zuoshen, Sun Xinghe. 2000. Evolution of Groundwater Environment in North China Plain[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Zhang Zonghu. 2005. History and present situation of groundwater in North China Plain[J]. *Chinese Journal of Nature*, 27(6): 311-315 (in Chinese).
- Zhu T, Rao Z, Guo F, Zhan N, Wang Y, Arandiyani H, Li X J. 2018. Simultaneous determination of 32 polycyclic aromatic hydrocarbon derivatives and parent PAHs using Gas Chromatography-Mass Spectrometry: Application in groundwater screening[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 101: 664-671.
- 曹玉清, 胡宽璐. 2009. 地下水化学动力学与生态环境区划分[M]. 北京: 科学出版社.
- 陈毅. 2018. 白洋淀流域平原区地下水-孔隙水的水化学特征和水文地球化学过程[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 1-91.
- 窦妍. 2010. 鄂尔多斯盆地北部白垩系地下水水文地球化学演化及循环规律研究[D]. 西安: 长安大学, 1-160.
- 郭海朋, 白晋斌, 张有全, 王丽亚, 石菊松, 李文鹏, 张作辰, 王云龙, 朱菊艳, 王海刚. 2017. 华北平原典型地段地面沉降演化特征与机理研究[J]. *中国地质*, 44(6): 1115-1127.
- 郭淑君, 于蕾, 任政委, 王春辉, 明园园. 2021. 高密度电阻率法在雄安新区起步区第四系地质结构精细划分中的应用研究[J]. *华北地质*, 44(1): 45-51.
- 郭志娟, 周亚龙, 王乔林, 王成文, 宋云涛, 刘飞, 杨峥, 孔牧. 2021. 雄安新区土壤重金属污染特征及健康风险[J]. *中国环境科学*, 41(1): 431-441.
- 韩博, 夏雨波, 马震, 王小丹, 郭旭, 林良俊, 裴艳东. 2023. 雄安新区工程地质层组划分、三维地质结构构建及其在城市规划建设中的应用[J]. *中国地质*, 50(6): 1903-1918.
- 何登发, 单帅强, 张煜颖, 鲁人齐, 张锐锋, 崔永谦. 2018. 雄安新区的三维地质结构: 来自反射地震资料的约束[J]. *中国科学: 地球科学*, 48(9): 1207-1222.
- 贾红霞, 肖昕, 张双, 白新雷, 孙宗连. 2010. 地球化学环境与常见地方病[J]. *能源与环境*, (2): 46-48.
- 孔晓乐, 王仕琴, 赵焕, 袁瑞强. 2015. 华北低平原区地下水中氟分布特征及形成原因: 以南皮县为例[J]. *环境科学*, 36(11): 4051-4059.
- 李英, 吴平, 张勃, 黄小琴, 韩强强, 李阳, 徐兆祥, 余堃. 2020. 灵武市北部高氟地下水的分布特征及影响因素[J]. *环境化学*, 39(9): 2520-2528.
- 李勇, 高旭波, 张鑫, 罗文婷, 胡钦红. 2017. 运城盆地高砷区地下水-沉积物中砷的地球化学特征研究[J]. *安全与环境工程*, 24(5): 68-74.
- 林年丰. 1991. 医学环境地球化学[M]. 长春: 吉林科学技术出版社, 239-240.
- 刘丙国. 2013. 人群环境健康调查评价与应用研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 1-105.
- 刘宏伟, 王国明, 高明达. 2023. 太行山前平原浅层地下水年龄及其对含水层固有脆弱性的指示意义[J]. *华北地质*, 46(2): 63-68.
- 刘开明, 胥勤勉, 段连峰, 牛文超, 滕飞, 王小丹, 张伟, 董杰. 2020. 雄安新区西部GB014孔第四纪地层结构与演化过程[J]. *科学通报*, 65(20): 2145-2160.
- 刘志远, 李晓, 张云鹏, 吉云平, 杨劲松, 王克冰. 2021. 河北省顺平县太行山山前平原区浅层地下水及界河冲积扇电性特征研究[J]. *工程地球物理学报*, 18(6): 930-937.
- 罗卫, 黄满湘. 2004. 地质环境与地方病[J]. *地质灾害与环境保护*, 15(4): 1-4, 14.
- 马岩, 李洪强, 张杰, 孙晟, 夏雨波, 冯杰, 龙慧, 张京卯. 2020. 雄安新区城市地下空间探测技术研究[J]. *地球学报*, 41(4): 535-542.
- 孟瑞芳, 杨会峰, 包锡麟, 徐步云, 李磊, 李谨丞. 2024. 京津冀平原非常规水资源利用前景分析及其生态环境效应[J]. *中国地质*, 51(1): 221-233.
- 陶甄, 刘淑均. 1984. 环境污染对健康的影响——几种污染物人群接触的阈限值[J]. *环境科学动态*, (2): 31-32.
- 田梦莎. 2016. 巴中市恩阳区凤凰庙红层区浅层地下水水文地球化学特征[D]. 成都: 成都理工大学, 1-80.
- 王金金. 2020. 北京平谷平原区浅层地下水化学特征演化研究[D]. 成都: 成都理工大学, 1-80.
- 邢丽娜. 2012. 华北平原典型剖面上地下水化学特征和水文地球化学过程[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 1-67.
- 邢丽娜, 郭华明, 魏亮, 詹燕红, 侯春堂, 李瑞敏, 王轶. 2012. 华北平原浅层含氟地下水演化特点及成因[J]. *地球科学与环境学报*, 34(4): 57-67.
- 邢怡, 张素荣, 刘继红, 王昌宇. 2019. 农作物根系土对农产品安全的影响分析——以保定东部地区为例[J]. *地质调查与研究*, 42(3): 219-224, 234.
- 袁翰卿, 李巧, 陶洪飞, 马合木江·艾合买提, 杨文新, 宿彦鹏. 2020. 新疆奎屯河流域地下水神富集因素[J]. *环境化学*, 39(2): 524-530.
- 张卓, 柳富田, 陈社明. 2023. 氢氧、锶钙和锂硼同位素在高氟地下水研究中的应用[J]. *华北地质*, 46(3): 49-56.
- 张宗祜, 施德鸿, 任福弘, 殷正宙, 孙继朝, 张翠云. 1997. 论华北平原第四系地下水系统之演化[J]. *中国科学(D辑: 地球科学)*, 27(2): 168-173.
- 张宗祜, 沈照理, 薛禹群, 任福弘, 施德鸿, 殷正宙, 钟佐桑, 孙兴和. 2000. 华北平原地下水环境演化[M]. 北京: 地质出版社.
- 张宗祜. 2005. 华北平原地下水的历史和现状[J]. *自然杂志*, 27(6): 311-315.

附中文参考文献