

李双建,薛冬梅,杨梦凡,等.天津河水和地下水主要离子特征及成因分析[J].环境科学与技术,2020,43(2):144-149. Li Shuangjian, Xue Dongmei, Yang Mengfan, et al. Characteristics and sources of major ions in rivers and groundwater in Tianjin[J]. Environmental Science & Technology, 2020, 43(2): 144-149.

天津河水和地下水主要离子特征及成因分析

李双建¹, 薛冬梅^{1*}, 杨梦凡¹, 张兵¹, 李军¹, 王中良^{1,2*}

(1. 天津师范大学地理与环境科学学院,天津市水资源与水环境重点实验室,天津 300387;

2. 中国科学院地球化学研究所,环境地球化学国家重点实验室,贵州 贵阳 550002)

摘要:文章对天津地区主要河流及地下水进行了系统研究,通过对其水化学特征的分析,以期探讨其水体组成及成因。研究结果表明:(1)天津地区水体的优势阳离子为 Na^+ ,阴离子地表水以 Cl^- 和 SO_4^{2-} 占主导,地下水以 Cl^- 和 HCO_3^- 为主。地表水随河流流向直至入海水体呈现为由 HCO_3^- - $\text{Na}(\text{Ca})$ 型过渡为 $\text{Cl}(\text{SO}_4)$ - Na 型直至演化为 Cl - Na 型;地下水随径流方向(从北至南),呈现为由 HCO_3^- - Ca 型向 Cl - Na 型水演化。水体的离子组成和水化学特征均呈现出显著的水平地带分布特征。(2)蒸发-浓缩和岩石风化是天津地区水化学类型的主导因素,且沿径流方向呈现为岩石风化向蒸发-浓缩机制的转换。(3)影响天津河水水化学成分的基岩主要为硅酸盐岩,地下水主要受碳酸盐岩和硅酸盐岩的影响。此外,海水入侵以及离子交换对水体的水化学组成和特征也有重要作用。

关键词:天津; 河水; 地下水; 水化学; 成因

中图分类号:X52 文献标志码:A doi:10.19672/j.cnki.1003-6504.2020.02.022 文章编号:1003-6504(2020)02-0144-06

Characteristics and Sources of Major Ions in Rivers and Groundwater in Tianjin

LI Shuangjian¹, XUE Dongmei^{1*}, YANG Mengfan¹, ZHANG Bing¹,

LI Jun¹, WANG Zhongliang^{1,2*}

(1. Tianjin Key Laboratory of Water Resources and Environment, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China;

2. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China)

Abstract: The hydrochemistry of main rivers and groundwater were investigated to understand the major ion composition and its origin of water in Tianjin. The results showed that Na^+ is the dominant cation of water. In terms of anions, Cl^- and SO_4^{2-} are primary in surface water; Cl^- and HCO_3^- are dominant in groundwater. The water types of surface water changed from HCO_3^- - $\text{Na}(\text{Ca})$ to $\text{Cl}(\text{SO}_4)$ - Na until Cl - Na along river flows till estuaries; while the groundwater types changed from HCO_3^- - Ca to Cl - Na along the groundwater flow direction (from north to south) demonstrating horizontal zonal distribution. In addition, evaporation-crystallization and rock weathering are the primary geochemical processes responsible for the origins of the major ions in water. Chemical compositions of rivers were mainly influenced by silicate rocks, while groundwater was controlled by carbonate and silicate rocks. Moreover, seawater intrusion and ion exchange showed significant effects on hydrochemical composition and characteristics of water.

Key words: Tianjin; rivers; groundwater; hydrochemistry; origin

水体的水化学特征和演化分布受控于地质地貌、岩性特征、地表风化侵蚀、气候条件、人为因素等环境因素,且能对环境因子的变化产生重要的响应机制^[1-2]。这种特性对研究不同时间尺度和空间尺度的地球化学进程有重要的指示意义。

对水体水化学特征的研究主要集中在大型水系流域和典型地质构造区。陈静生等^[3-5]根据多年来的

水化学资料对长江、黄河、珠江等大型流域进行了统计分析,得到了各水系主要离子的化学类型及其含量的变化趋势,并对其响应的环境因子进行了探讨。韩贵琳等^[6]对典型碳酸盐岩地区的乌江水系河流进行了研究,发现河水水化学组成以 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 为主,主要来源于碳酸盐风化,硅酸盐和蒸发岩风化影响较小,人为干扰也具有一定作用。韩非等^[7]

《环境科学与技术》编辑部:(网址)http://jks.chinajournal.net.cn(电话)027-87643502(电子信箱)hjkxyjs@vip.126.com

收稿日期:2020-01-02;修回2020-02-08

基金项目:科技部国家重点研发计划项目(2018YFD0800400);国家自然科学基金面上项目(41973017);天津市自然科学基金重点项目(19JCZDJC40700)

作者简介:李双建(1994-),男,硕士研究生,从事河口沉积物反硝化及厌氧氨氧化反应机理研究,(电子信箱)32095@163.com;*通讯作者,副研究员,博士,主要从事人类活动对地表、地下水、河口以及近海等的污染程度以及未来发展趋势的研究,(电子信箱)xuedongmei@tjnu.edu.cn

通过实地调查和室内试验对咸水入侵后的莱州湾南岸地下水水化学特征进行了分析,探讨了6类地下水的形成原因,发现咸淡水过渡带发生了阳离子交换。

天津是全国功能性缺水最为严重的地区之一,人均水资源占有量仅为全国人均水平的1/15,远低于世界警戒线1 000 m³/a^[8]。为满足该地区的生产生活和发展需要,实现水资源的可持续利用和保护尤为重要。自20世纪60年代以来由于地下水的过度开采,地下漏斗和地面沉降问题的涌现,造成了海水入侵和地下水咸化的加剧^[9],使得天津地区的地表水和地下水的化学特征和化学组成产生重大变化。因此,长期以来对天津地区的研究主要集中在咸水或海水入侵或水质的咸化等方面,特别是主要河流及水库等局部区域的水质变化^[10]。但对整个区域水体系统研究和量化分析较少,地表水体和地下水相结合的研究尤为缺乏。本文对天津地区主要河流及地下水进行了系统研究,通过对其水中主要离子组成及水化学特征的分析,以探讨其水体的成因。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

天津地处华北平原东北部,海河流域下游,东临渤海,北靠燕山,位于北纬38°33′~40°14′,东经116°42′~118°03′。天津属于暖温带半湿润季风气候区,年平均气温12~14.5℃,年平均降水量为360~970 mm,主要集中于6~8月份。年平均蒸发量(1 160 mm)远远大于年平均降水量(600 mm)^[11],且蒸发量由北至南递增^[11]。

天津地表水体以海河水系为主,由自然河道(海河、蓟运河等)和人工河道(潮白新河、永定新河、大沽排污河等)构成^[12]。地下水也作为重要水源,对该区的生产生活发挥重要作用。水源主要以降水补给为主^[12],降水的地区性分异和季节性变化使得天津地区的不同局部水体的水量和水质均有所差异。

天津地区地形平坦,西北高,东南低,绝大部分地区由第四系沉积物覆盖,仅在北部蓟县山区仍有古老岩系出露^[13],基岩以碳酸盐岩和花岗岩为主^[14]。自北至南,由山前平原到滨海平原,沉积层从冲洪积层向海积层转变,含水颗粒逐渐变细,地下水径流条件变差,富水性降低,呈现出由北向南的水动力水平分带特点^[15]。天津地区形成了多样的土壤类别,由北至南主要分布着棕壤(蓟县)、潮土(宝坻、武清、宁河、静海等)、滨海盐土(塘沽、汉沽、大港)^[11]

第四纪以来,中国东部沿海发生的6次海侵中有4次,包括对天津平原的海水以及古海岸线的分布产生重要影响,形成了4个海侵层^[16,17]。咸水主要分布于环渤海滨海平原及邻近冲积平原与海侵层有关的粘性土与细颗粒砂层的互层之中,分布面积8 980 km²,底界埋深一般40~200 m^[16],通过影响现今天津平原地下水赋存环境和水循环进程,而进一步的影响地下水的水化学组成和特征。

1.2 样品采集及分析方法

2012年11月沿河流(蓟运河、潮白新河、永定新河、海河、大沽排污河)流向直至入海口处(潮蓟永河入海口和海河入海口)共采集河水水样49个;2014年5月在地下水开采较为广泛的区县(蓟县、宝坻、武清、宁河、汉沽、静海、大港)采集地下水水样13个(表1),采样点分布如图1所示。电导率(EC)、pH和溶解氧(DO)取样后立即使用水质参数仪(Thermo Orion, USA)进行测定。水样经0.22 μm的醋酸纤维膜过滤,用于阴、阳离子测定。测定阳离子的水样立即加入HCl,使得pH<2后密封保存。利用酸碱滴定法,以酚酞和甲基橙测定水样中HCO₃⁻的含量。阴离子(SO₄²⁻、Cl⁻)利用高效液相色谱进行分析,阳离子(K⁺、Ca²⁺、Na⁺、Mg²⁺)用电感耦合等离子体-发射光谱进行测定,NO₃⁻浓度均由连续流动式自动分析仪(Auto Analyzer 3, Seal, Germany)测定。将测得的地表水和地下水样的阴阳离子进行无机电荷平衡标准化处理(NICB=(TZ⁺-TZ⁻)/TZ⁺),阴、阳离子电荷之差的均值分别为-0.06和-1.23,说明所测数据误差很小。

表1 天津地下水采样点编号及埋深
Table 1 The groundwater sampling well depth in Tianjin

| 地下水采样点 | 样品编号 | 埋深/m |
|--------|------|-------|
| 蓟县 | JX1 | 15 |
| | JX2 | 50 |
| | JX3 | 15 |
| | JX4 | 14 |
| 宝坻 | BD1 | 60 |
| | BD2 | 10 |
| 武清 | WQ1 | 80 |
| | WQ2 | 30 |
| 宁河 | NH | 50 |
| | HG1 | 1 500 |
| 汉沽 | HG2 | 200 |
| | JH | 200 |
| 大港 | DG | 2 |

2 结果与讨论

2.1 物理化学参数及主要离子浓度

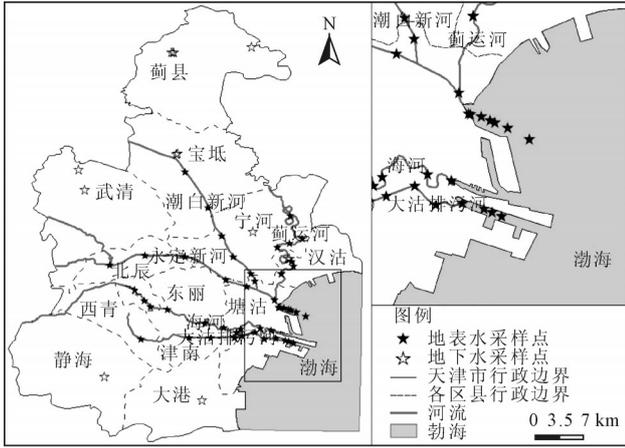


图1 天津地表水和地下水采样点分布图
Fig.1 The sampling locations of surface water and groundwater in Tianjin

河水水样的pH范围为7.0~8.7,均值为8.1,接近弱碱性环境。电导率(EC)范围为834~39 600 $\mu\text{S}/\text{cm}$,均值为7 547 $\mu\text{S}/\text{cm}$,大致呈现为沿着水体的流向直至入海口逐渐增大的趋势。DO变化范围为2.7~11.5 mg/L,均值为8.9 mg/L。水中可溶性固体总颗粒物(TDS)的范围为409~19 400 mg/L,均值为3 691 mg/L。水体的总阳离子当量浓度($\text{TZ}^+ = \text{Na}^+ + \text{K}^+ + 2\text{Mg}^{2+} + 2\text{Ca}^{2+}$)的变化范围为10.5~337.3 meq/L,均值为67.0 meq/L。水中总阴离子当量浓度($\text{TZ}^- = \text{Cl}^- + 2\text{SO}_4^{2-} + \text{HCO}_3^- + \text{NO}_3^-$)的变化范围为9.3~412.3 meq/L,均值为77.4 meq/L。

地下水水样的pH范围为6.4~8.4,均值为7.4,接近中性环境。电导率(EC)范围为556~5 970 $\mu\text{S}/\text{cm}$,均值为1 710 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。DO变化范围为1~8.0 mg/L,均值为4.2 mg/L。水中可溶性固体总颗粒物(TDS)的范围为270~2 830 mg/L,均值为824.6 mg/L。地下水水样的 TZ^+ 的变化范围为6.5~88.7 meq/L,均值为22.6 meq/L。水体 TZ^- 的变化范围为6.8~105.3 meq/L,均值为39.7 meq/L。

2.2 主要离子组成

将采集的河水(河流均值)以及地下水水样的水化学特征反映在阴阳离子三角图(图2)中。因天津地区西北高,东南低的地形条件以及其他环境因素的制约,使得地下水体的主要径流方向为由北至南或由西北向东南^[15]。天津北部地下水(蓟县)样点,其水化学类型由 $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}$ 向 $\text{Cl}^- - \text{Ca}$ 型过渡,表明蓟县水样的主要离子可能来源于碳酸盐岩。这与蓟县基岩以碳酸盐岩为主的覆被条件相符^[14]。此外,Cl含量和相对比重的增加,可能与土壤、灌溉水、降雨、施肥(含氯的氮、钾肥、人畜粪肥)等等因素有关^[16],具体来源还需进一步的分析探讨。总体而言,天津地区的地表水和地下水的离子组成和水化学特征均大体呈现出明显的水平地带分布规律。地表水沿河流流向直至近海水体呈现出 $\text{HCO}_3^- - \text{Na}(\text{Ca})$ 型过渡为 $\text{Cl}(\text{SO}_4) - \text{Na}$ 型直至演化为 $\text{Cl} - \text{Na}$ 型;地下水体从北至南由 $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}$ 型向 $\text{Cl} - \text{Na}$ 型水演化。

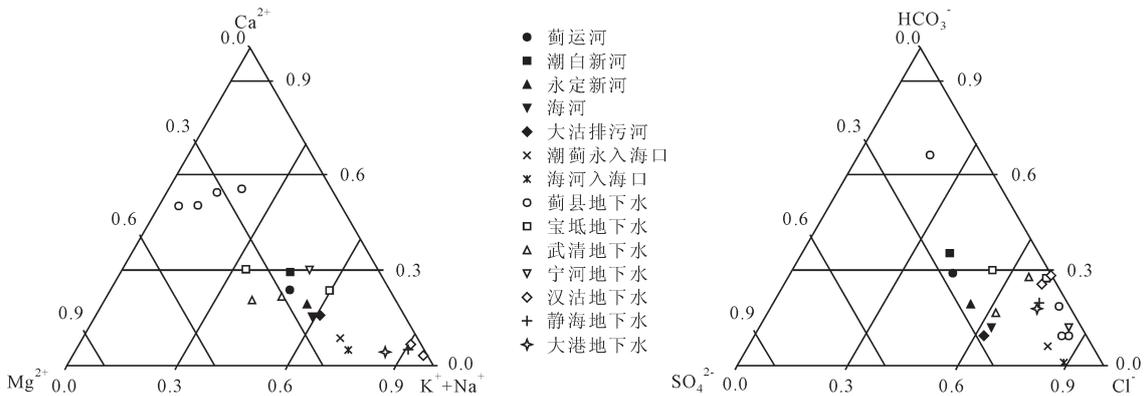


图2 天津地区地表水和地下水的水化学组成
Fig.2 Chemical compositions of major ions in surface water and groundwater in Tianjin (meq/L)

2.3 主要离子来源与成因分析

2.3.1 Gibbs图分析

Gibbs图是基于世界上不同地区的不同类型水体溶质的化学组成,绘制形成的反映水体水化学特征主要控制机制(大气降水、岩石控制、蒸发-浓缩)的示意图^[9]。图3为天津地区水体数据在Gibbs图中的分布情况。如图3所示,天津地区的水体数据主要分布于岩石控制和蒸发-浓缩控制区。就地表水而言,流经天津北部地区的大部分河水水样(蓟运河、潮白新河、永定新河)

河)的阳离子分布沿着河流的流向呈现为由岩石控制区向蒸发-浓缩主导机制的转变,然而流经市区的河流(海河和大沽排污河)的部分水样和所有的入海口水样更趋近于蒸发-浓缩控制区,更多的体现了蒸发-浓缩作用的影响。地下水样的阳离子分布情况较为分散和复杂,部分地区(宝坻、武清、宁河)水样分布于蒸发-浓缩控制区,蓟县除一个采样点位于岩石控制区,其他3个样点均在岩石控制区外,且有向蒸发-浓缩控制区靠近趋势,因此,初步推断蓟县采样点区域

受到二者共同作用的影响。此外,天津南部(静海)和滨海地区(汉沽和大港)水样中的Na⁺在阳离子中的相对比重很高(约为95%),甚至高于蒸发-浓缩主导区,其过量的Na⁺可能与海水入侵、离子交换、人为影响等很多因素有关,具体的来源和成因还需要进一步的分析探讨。

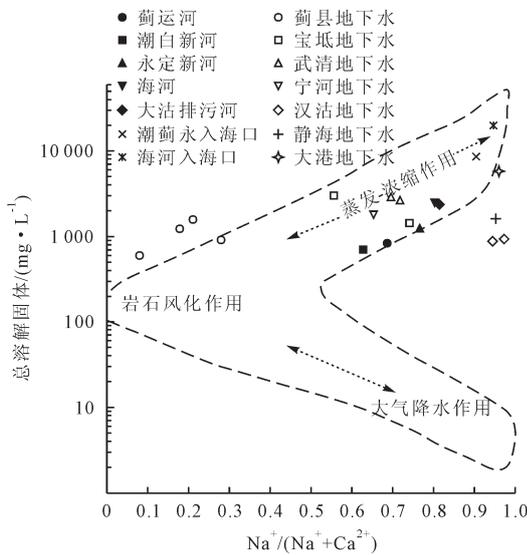


图3 天津地区水体在Gibbs图的分布
Fig.3 Gibbs plot of water chemistry of surface water and groundwater in Tianjin

2.3.2 离子岩性来源分析

为了进一步探究影响天津地区水体中的可溶性盐的来源,将不同岩性(碳酸盐岩、硅酸盐岩、蒸发盐岩)和海水来源的典型端元表示在图4的主要离子配比图中。由图4可以发现地表水体中大部分河流的阳离子主要来源于硅酸盐岩,入海口水体则更加趋近海水端元。地下水水样则在不同地区的分布较为分散,可能受到多种因素的影响。天津北部(蓟县)的地下水样的离子比值主要介于碳酸盐岩和硅酸盐岩之间,同时其水化学类型由HCO₃-Ca向Cl-Ca型过渡,表明蓟县水样的主要离子可能受到碳酸盐岩的影响。天津中部(宝坻、武清、宁河)的地下水中的离子分布可能主要受硅酸盐岩影响。另外,水体的流动和更新过程中可能与土壤间存在多种方式的交互作用如阳离子交换、淋溶等。由于天津潮土普遍布,加之地平的地势和密布的滩涂,使土壤长期处于淹水条件下,水体与土壤间的阳离子交换和盐渍化加剧,使得土壤中富含硫酸盐和氯化物。土壤的成分和盐渍化特征进一步的影响甚至改变了水体的性质和表征。位于天津南部(静海)和滨海地区(汉沽和大港)的地下水水体的离子配比显著区别于典型的三大岩性来源,其Na⁺含量和相对比重处于绝对优势,可能是与海水倒灌、地下咸水入侵、蒸发-浓缩或与土壤的阳离子交换等环境因素有关^[7,20]。

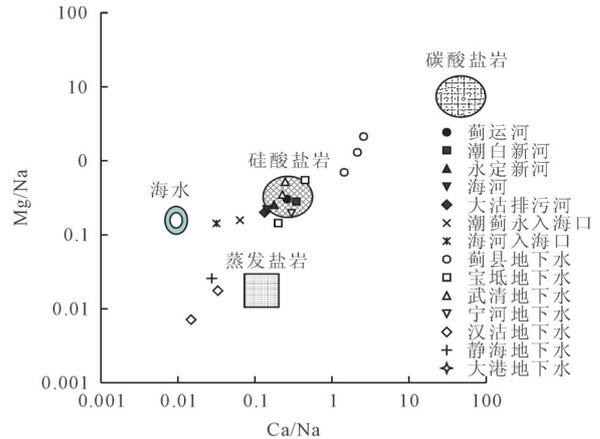


图4 天津地区(地表水和地下水)水化学离子关系配比图
Fig.4 End-members of different sources for surface water and groundwater in Tianjin

综上所述,可以发现地表水体(河水)的离子来源可能以硅酸盐岩为主,入海口水体接近海水,地下水样随径流方向(由北至南)呈现出较明显的水平地带性分异规律,依次以碳酸盐岩、硅酸盐岩影响为主。不同岩性的影响呈现出的水平地带性分异规律与水体的水化学特征及主要控制作用的变化相符。

2.3.3 海水入侵影响

4次海侵造成了海平面高于当今的海平面,使得古海岸线向天津平原西部推进,影响宁河、汉沽、静海、大港等众多地区以及蓟运河、潮白新河、永定新河、海河等流域。另外由于地下含水层结构的地区差异,可能导致入侵的海水在不同地区的地下赋存量以及埋深有较大差异,从而对水体特别是地下水的化学组成和特征产生不同程度的影响。

蓟县位于天津平原北部,基岩以碳酸盐岩和花岗岩为主,以重碳酸盐型水为主^[14],地势较高且地下含水介质多为砂、砾石为主,水动力条件良好,为岩土溶滤和地下水的更新提供必要条件^[21]。就所采集的不同深度的蓟县的4个水样临近岩石控制区,表明其形成可能以岩石风化作用为主。此外,浅层(~15 m)水体为Cl(HCO₃)-Ca型水,而较深水体(50 m)以HCO₃-Ca型水为主。

就不同深度采集的宝坻和武清地下水水样,地下水类型以Cl(HCO₃)-Na(Mg)为主,主要受到蒸发-浓缩作用控制。其水体中较高的Cl⁻含量可能与岩土溶滤不充分有关,因为宝坻和武清中部平原地带以多层的中、细砂和粉细砂构成,间夹厚层黏土、亚黏土层,水动力交换条件较差,形成的地下水中Cl⁻或SO₄²⁻含量和相对比重越高,HCO₃⁻越少^[21]。此外,通过岩性图发现宝坻和武清地下水的离子来源与硅酸盐岩较为相近,且该区域土壤覆被类型以潮土为主,水体与土壤间可能会有离子交换作用发生,具体仍需要进一步分析。天津南部(静海)和滨海平原(宁河、汉沽、大港)

受到海水入侵影响的程度最大^[16],且地下含水介质由粉砂、细砂组成,水动力交换条件较差,地表覆被盐渍化土壤,咸水体分布埋深较浅,储量丰富。所采集的水样可以发现水化学类型以Cl(HCO₃)-Na和Cl-Na为主,且受到蒸发-浓缩作用强烈影响,离子来源趋近于蒸发盐岩,可能与海水入侵形成的地下咸水体有关,或是与盐渍化土壤产生了离子交换作用而导致的水体咸化,亦或是二者同时存在。

2.3.4 离子交换

离子交换会影响水体的水化学组成和特征。(Ca²⁺+Mg²⁺)与(HCO₃⁻+SO₄²⁻)的当量浓度之比可以用于判断离子交换作用是否存在^[22]。天津地区水体的(Ca²⁺+Mg²⁺)与(HCO₃⁻+SO₄²⁻)的当量浓度比值如图5所示。若以方解石、白云石或石膏等碳酸盐岩矿物溶解为主,则(Ca²⁺+Mg²⁺)/(HCO₃⁻+SO₄²⁻)更趋近于1:1线分布,而离子交换作用的发生则可能会导致样点排布向1:1线右侧转变^[23]。如图5所示,天津地区的所有河水样点(河流均值)均集中于1:1线分布,而入海口水体和北部地下水样点(蓟县)则主要位于1:1线上方分布,表明水体中的Ca²⁺和Mg²⁺的含量较高,特别是入海口水体。蓟县水体中较多的Ca²⁺和Mg²⁺可能与以碳酸盐岩为主的基岩和含水层^[14]有关。海水中的Ca²⁺和Mg²⁺含量本底值很高,入海口水体在与海水不断交汇的过程中,可能混入更多原有海水中的Ca²⁺和Mg²⁺。然而,天津地区大部分地下水样点,特别是天津南部(静海)和滨海地区(宁河、汉沽、大港)的地下水样点均位于1:1线的下方,表明水体阳离子中Ca²⁺和Mg²⁺含量低而Na⁺含量较高,过多的Na⁺可能与该地区受到海咸水入侵的强烈干扰以及广泛分布的盐渍化土壤有关^[21]。水体中的Ca²⁺和Mg²⁺与土壤或地下咸水中含有或吸附的Na⁺发生了交换,因此水体中的Ca²⁺和Mg²⁺含量大幅下降,而Na⁺含量上升。

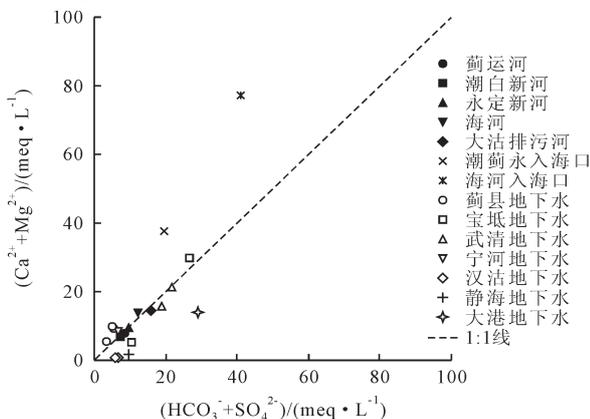


图5 天津流域(地表水和地下水)的(Ca²⁺+Mg²⁺)-(HCO₃⁻+SO₄²⁻)关系图

Fig.5 Cation exchange reactions for surface

Water and groundwater in Tianjin

3 结论

(1)天津地区的水体的优势阳离子Na⁺,地表水以Cl⁻和SO₄²⁻占主导,地下水以Cl⁻和HCO₃⁻为主。地表水随河流流向直至入海水体呈现为由HCO₃⁻-Na(Ca)型过渡为Cl(SO₄)-Na型直至演化为Cl-Na型;地下水随径流方向(从北至南),呈现为由HCO₃⁻-Ca型向Cl-Na型水演化。水体的离子组成和水化学特征均呈现出显著的水平地带分布特征。

(2)蒸发-浓缩和岩石风化是天津地区水化学类型的主导作用,且沿径流方向呈现为岩石风化向蒸发-浓缩的转换。

(3)影响天津地表水形成的基岩主要为硅酸盐岩,地下水主要受碳酸盐岩和硅酸盐岩的影响。此外,海水入侵以及离子交换对水体的水化学组成和特征也有重要作用。

[参考文献]

[1] 王晓曦,王文科,王周锋,等. 滦河下游河水及沿岸地下水水化学特征及其形成作用[J]. 水文地质工程地质, 2014,41(1):25-33,73-74.
Wang Xiaoxi, Wang Wenke, Wang Zhoufeng, et al. Hydrochemical characteristics and formation mechanism of river water and groundwater along the downstream Luanhe River, northeastern China[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2014,41(1):25-33,73-74.

[2] 孙媛媛,季宏兵,罗建美,等. 赣南小流域的水文地球化学特征和主要风化过程[J]. 环境化学, 2006,25(5):550-557.
Sun Yuanyuan, Ji Hongbing, Luo Jianmei, et al. Hydro-geochemistry and chemical weathering process of small watersheds in the southern Jiangxi Province[J]. Environmental Chemistry, 2006,25(5):550-557.

[3] 陈静生,关文荣,夏星辉,等. 长江中、上游水质变化趋势与环境酸化关系初探[J]. 环境科学学报, 1998,18(3):265-270.
Chen Jinagsheng, Guan Wenrong, Xia Xinghui, et al. Evolution in water quality and its relation with environmental acidification in the upper and middle reaches of the Yangtze River[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 1998,18(3):265-270.

[4] 陈静生,李荷碧,夏星辉,等. 近20年来黄河水质变化趋势及原因分析[J]. 环境化学, 2000,19(2):97-101.
Chen Jinagsheng, Li Hebi, Xia Xinghui, et al. A study on waterquality trend in the Yellow River system in recent two decades[J]. Environmental Chemistry, 2000,19(2):97-102.

[5] 陈静生,何大伟. 珠江水系河水主要离子化学特征及成因[J]. 北京大学学报:自然科学版, 1999,35(6):786-793.
Chen Jingsheng, He Dawei. Chemical characteristics and genesis of major ions in the Pearl River basin[J]. Acta Scientiarum Naturalium, Universitatis Pekinensis, 1999, 35(6):

- 786-793.
- [6] 韩贵琳,刘丛强. 贵州乌江水系的水文地球化学研究[J]. 中国岩溶, 2000,19(1):35-43.
Han Guilin, Liu Congqiang. Hydrogeochemistry of Wujiang River water in Guizhou Province[J]. *Carsologica Sinica*, 2000,19(1):35-43.
- [7] 韩非,薛禹群,吴吉春,等. 莱州湾南岸咸水入侵条件下地下水的水化学特征与卤水形成[J]. 地质论评, 2001,47(1):102-108.
Han Fei, Xue Yuqun, Wu Jichun, et al. Hydrochemical characteristics of groundwater in salt-water intrusion condition and genesis of brine along the south coast of Laizhou Bay, China[J]. *Geological Review*, 2001,47(1):102-108.
- [8] 王凯燕,王文卓,李琼芳,等. 天津地区21年地下水埋深变化特征及其影响因素[J]. 水资源保护, 2014,30(3):45-49.
Wang Kaiyan, Wang Wenzhuo, Li Qiongfang, et al. Characteristics of changes of groundwater buried depth and influencing factors in Tianjin plain area over past 21 years[J]. *Water Resources Protection*, 2014,30(3):45-49.
- [9] 刘伟忠,刘帅. 天津市地下水资源可持续利用的对策建议[J]. 地下水, 2005,27(2):114-115.
Liu Weizhong, Liu Shuai. Groundwater resources and its sustainable development in Tianjin[J]. *Groundwater*, 2005, 27(2):114-115.
- [10] 李军,刘从强,岳甫均,等. 天津地区地表水咸化的水化学证据[J]. 环境化学, 2010,29(2):285-289.
Li Jun, Liu Congqiang, Yue Fujun, et al. Hydrochemical evidence of surface water salinization process in Tianjin coastal plain[J]. *Environmental Chemistry*, 2010,29(2):285-289.
- [11] 陈晶晶. 基于情境模拟的天津市中心城区暴雨内涝风险分析与管理[D]. 上海:华东师范大学, 2010.
Chen Jingjing. Waterlogging Risk Analysis and Management of Tianjin Downtown Based on Scenario Simulation [D]. Shanghai: East China Normal University, 2010.
- [12] 邢美楠,张圆,檀翠玲,等. 天津市滨海新区水文水资源概况[C]. 中国环境科学学会学术年会论文集, 2013:6160-6163.
Xing Meinan, Zhang Yuan, Tan Cuiling, et al. A Survey on Hydrology and Water Resources in Binhai New District, Tianjin[C]. Chinese Society for Environment Science, 2013: 6160-6163.
- [13] 柴蕊. 天津市周良庄地热田地下水热水的水化学及钙华研究[D]. 北京:中国地质大学, 2006.
Chai Rui. Study of Hydrochemistry and Tufa in Thermal Groundwater in Zhouliangzhuang Geothermal Field, Tianjin [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2006.
- [14] 王中良,李军,刘丛强,等. 咸化水体中DIC的同位素组成及环境过程分析[J]. 地球化学, 2011,40(6):552-558.
Wang Zhongliang, Li Jun, Liu Congqiang, et al. Isotopic composition and environmental behavior of dissolved inorganic carbon in brackish surface water[J]. *Geochimica*, 2011, 40(6):552-558.
- [15] 王兰化. 天津市平原区深层淡水咸化-咸水下移问题的讨论[J]. 地质调查与研究, 2004,27(3):169-176.
Wang Lanhua. A discussion on the deep fresh water salinization in the plain region of Tianjin City[J]. *Geological Survey and Research*, 2004,27(3):169-176.
- [16] 王家兵. 华北平原深层淡水在开采条件下接受上覆咸水越流补给:以天津平原为例[J]. 水文地质工程地质, 2002(6): 35-38.
Wang Jiabing. Leakage recharge from pores saline groundwater to deep fresh groundwater on the condition of pumping in Huabei Plain: a case of Tianjin Plain[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2002(6):35-38.
- [17] 徐钦琦,林和茂. 中更新世以来中国东部六次海侵及其天文学的解释[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1993,13(1):12-20.
Xu Qinqi, Lin Hema. An astroclimatological explanation of six marine transgressions in eastern China since middle Pleistocene[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1993,13(1):12-20.
- [18] 刘春生,李西双. 氯对植物的营养功效、毒害及含氯化肥的合理施用[J]. 山东农业大学学报, 1996,27(1):118-122.
Liu Chunsheng, Li Xishuang. The nutritive functions and poison of chlorine on plants and rational application of chlorine fertilizer[J]. *Journal of Shandong Agricultural University*, 1996,27(1):118-122.
- [19] Gibbs R J. Mechanisms controlling world water chemistry [J]. *Science*, 1970,170:1088-1090.
- [20] 张琳怡. 天津滨海地区地下水咸化的水化学及锶同位素示踪研究[D]. 天津:天津师范大学, 2012.
Zhang Linyi. Using Hydrochemistry and Strontium Isotopes to Identify the Sources of Salt in Groundwater Waters of the Tianjin Coastal Area[D]. Tianjin: Tianjin Normal University, 2012.
- [21] 张兆辉,陈宗宇,费宇红,等. 海河流域平原地下水同位素年龄及其水化学区域分布特征[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2001,20(4):412-415.
Zhang Zhaohui, Chen Zongyu, Fei Yuhong, et al. Regional distribution characteristics of groundwater isotopic ages and hydrogeological chemical types in the plain of Haihe River Basin[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2001,20(4):412-415.
- [22] Fisher RS, Mulican WF. Hydrochemical evolution of sodium-sulphate and sodium-chloride groundwater beneath the Northern Chihuahuan desert Trans-Pecos, Texas, USA[J]. *Hydrogeology Journal*, 1997,5(2):4-16.
- [23] Jun Xiao, Jin Dongjin, Hu Ding, et al. Geochemistry and solute sources 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.