

新疆和田河流域绿洲区浅层地下水 水化学特征及成因分析

李玲^{1,2}, 周金龙^{1,3}, 齐万秋⁴, 陈锋⁴, 陈云飞^{1,3}

(1. 新疆农业大学水利与土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052; 2. 新疆工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830023; 3. 新疆水文水资源工程技术研究中心, 新疆 乌鲁木齐 830052; 4. 新疆地矿局第二水文地质工程地质大队, 新疆 昌吉 831100)

摘要:以和田河流域绿洲区2014年44组浅层地下水样的化学数据为基础,运用描述性统计分析法、Piper三线图、Gibbs图和离子比值法对该区浅层地下水水化学特征进行了分析研究。结果表明,研究区地下水呈中性-偏碱性,大部分为硬度较高的微咸水,且处于氧化状态下。常见阳离子的含量差别较大,由大到小依次为 $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$;常见阴离子的含量差别不大,由大到小依次为 $\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-}$ 。沿地下水流程从强径流区到弱径流区,离子的含量越来越多,TDS逐渐升高,水化学类型从混合型转变为以Cl-Na型和 $\text{Cl} \cdot \text{HCO}_3 - \text{Na} \cdot \text{Ca}$ 型为主。影响研究区地下水化学成分形成和变化的因素主要有蒸发浓缩作用、溶滤作用、阳离子交替吸附作用及人类活动。

关键词:浅层地下水;水化学特征;绿洲区;和田河流域

中图分类号:P641.3

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2018)03-0014-07

Hydrochemical characteristics and formation reasons of shallow groundwater in oasis area of Hotan River Basin, Xinjiang

LI Ling^{1,2}, ZHOU Jinlong^{1,3}, QI Wanqiu⁴, CHEN Feng⁴, CHEN Yunfei^{1,3}

(1. College of Hydraulic and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China;

2. Xinjiang Institute of Engineering, Urumqi 830023, China; 3. Xinjiang Hydrology and Water Resources

Engineering Research Center, Urumqi 830052, China; 4. No. 2 Hydrogeology and Engineering Geology Party,

Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Resources Exploration and Development, Changji 831100, China)

Abstract: Based on 44 sets of groundwater hydrochemical data from the oasis area of Hotan river basin in 2014, the descriptive statistical analysis, Gibbs diagram, Piper diagram and ion ratio method were applied to study the hydrochemical characteristics of shallow groundwater. The results showed that the groundwater in the study area was neutral - alkaline, most of which was brackish water with high hardness and was in oxidation state. The difference among the content of major cations was significant, which in turn were Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} and K^+ . The difference among the content of main anions was not significant, which in turn were HCO_3^- , Cl^- and SO_4^{2-} . Along the path of groundwater runoff, from the strong runoff area to the weak runoff area, the content of ions and TDS in groundwater increased gradually and the hydrochemical type changed from mixed type to Cl-Na type and $\text{Cl} \cdot \text{HCO}_3 - \text{Na} \cdot \text{Ca}$ type. The changes of chemical composition in groundwater were influenced by evaporation concentration, cation exchange and adsorption, dissolution and human activities.

Key words: shallow groundwater; hydrochemical characteristics; oasis area; Hotan river basin

收稿日期:2017-10-01; 修回日期:2017-12-12

基金项目:中国地质调查局西北地区主要城市地下水污染调查评价项目(1212011220982); 新疆自治区高峰学科-水利工程学科基金项目(xjslgcfk20161103)

作者简介:李玲(1982-),女,山东日照人,博士研究生,讲师,主要从事水文地球化学及地下水保护等方面的研究。

通讯作者:周金龙(1964-),男,浙江龙游人,教授,博士生导师,主要从事干旱区地下水利用与保护、水土环境地球化学等研究工作。

1 研究背景

地下水中的化学成分是地下水与外界环境长期相互作用的产物^[1],其形成与变化受气候条件、地层岩性、地形地貌、地表水及人类活动等因素控制^[2]。识别地下水化学特征及影响因素是水文地球化学重要的研究内容之一。不同地区各种因素对地下水化学特征的影响程度不同^[3]。干旱半干旱地区地下水化学成分受气候影响较为明显,卢颖等^[4]采用因子分析法得出控制张掖盆地地下水化学成分形成与改变的主要因素是蒸发浓缩作用,其次是溶滤作用;Wen Xiaohu 等^[5]根据同位素特征及离子比例关系得出在额济纳盆地大部分地下水都经历了长时间的蒸发浓缩作用。Islam 等^[6]、Ma Fengshan 等^[7]研究表明,沿海地区地下水水化学特征主要受到海水入侵的影响,且地下水与海水混合作用的程度不同,主要离子成分也有所差别。王珺瑜等^[8]、袁建飞等^[9]研究表明,岩溶发育区地下水中化学成分主要来自碳酸盐岩的溶解。王晓曦等^[10]发现在冲积海积平原区,地下水中阳离子含量的变化很大程度上受阳离子交替吸附作用控制。人类活动对地下水的干扰越来越强烈,吕路等^[11]、刘君等^[12]研究发现过量开采条件下,地下水的水化学类型及主要阴阳离子的含量都发生了一定程度的变化。

和田河流域绿洲区位于新疆维吾尔自治区(以下简称“新疆”)昆仑山北麓、塔里木盆地南缘,周围被广阔的沙漠、戈壁所包围,气候异常干旱,地下水与地表水转换频繁,地下水中的化学成分复杂多变。关于该区地下水水化学特征许多学者从不同角度进行了研究,但未对其成因进行系统分析,如赵长森等^[13]、乔云峰等^[14]、张晓伟等^[15]对地下水中主要离子与综合参数的相关性进行了分析;刘敏^[16]分析了地下水中化学成分的空间分布规律;张艳丽^[17]从主要离子及水化学类型等方面对和田县地下水水化学特征进行了研究^[17]。本文在前人研究成果的基础上,依托中国地质调查局项目“西北地区主要城市地下水污染调查评价”,运用描述性统计分析法、Piper 三线图、Gibbs 图和离子比值法等对和田河流域绿洲区浅层地下水水化学特征及其成因进行分析,以期为合理利用和保护地下水资源提供一定的理论依据。

2 材料与方法

2.1 研究区概况

和田河流域绿洲区位于和田河中游,沿喀拉喀

什河和玉龙喀什河分布,包括和田县、洛浦县、墨玉县与和田市“三县一市”。和田河流域属暖温带大陆性干旱沙漠气候,四季分明,光热资源丰富,多年平均降水量 35.6 mm,实测年蒸发量 2 159 ~ 3 137 mm。

和田河流域绿洲区水文地质条件比较简单,均为第四系孔隙潜水,在 259.1 m 勘探深度内没有揭露到承压含水层^[18]。该区地表覆盖了巨厚的第四纪松散堆积物,一般厚度为 500 ~ 600 m,主要由渗透性好的卵砾石、砂砾石、中粗砂、细砂和粉砂土等组成,没有区域性成层的黏性土,有利于地表水转化为地下水,是本区地下水的主要储存场所。下伏古近纪-新近纪地层,由渗透性差的砂质、粉砂质和泥质岩组成,构成了相对隔水的基底^[19]。绿洲南部位位于冲积平原中上部,沉积颗粒较粗,地势高,地下水水力坡度相对较大,为 1‰ ~ 4‰;北部属于冲积平原尾部,沿两河呈条带状分布,与沙漠相毗邻,沉积颗粒细,地势平缓,水力坡度小于 1‰。根据含水介质及水动力条件的不同,将绿洲浅层地下水系统划分为强径流区和弱径流区(见图 1)。

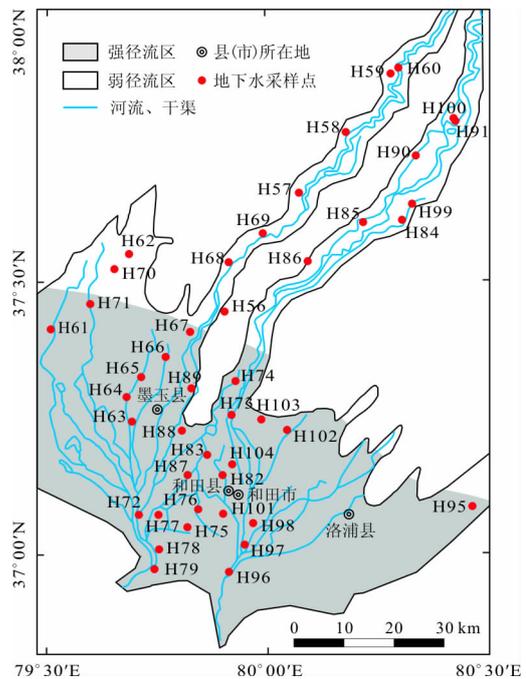


图1 和田河流域绿洲区地下水采样点分布图

研究区干旱少雨,大气降水一般不会成为地下水的有效补给,地下水的主要补给来自河流、渠系及田间灌溉水的入渗,其次有山区基岩裂隙水的侧向补给。强烈的地面蒸发和植物蒸腾、侧向潜流补给北部沙漠区以及人工开采是该区地下水的重要排泄方式^[19]。

2.2 采样点布置及测试

2014年7月课题组在研究区进行了1:25万区域水文地质调查,共采集地下水样44组,全部为潜水样,调查井深为6~100m,控制面积约为4138 km²,采样点分布见图1。水样严格按照《地下水环境监测技术规范》(HJ/T164-2004)进行采集、保存和送样,并由中国地质科学院水文地质环境地质研究所矿泉水检测中心进行检测。检测项目包括pH值、水温、溶解氧(DO)、氧化还原电位(*E_h*)和电导率(*EC*)等5项现场必测指标, K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、Al³⁺、NH₄⁺、Cl⁻、SO₄²⁻、HCO₃⁻、CO₃²⁻、NO₃⁻、NO₂⁻、F⁻、I⁻、总硬度(*TH*)、溶解性总固体(*TDS*)等28项无机指标。

3 结果与分析

3.1 水化学参数统计特征

采用描述性统计分析法对研究区44组地下水样的检测数据进行整理和计算(结果见表1),并依据统计结果对地下水水化学特征进行初步分析。

研究区浅层地下水pH值的均值为7.56,属于

中性-偏碱性水,大部分地下水的pH值变化范围为6.5~8.5,符合《生活饮用水卫生标准》(GB5749-2006),只有少数地下水的pH值较高,如H61、H62和H70的pH值分别为8.99、9.09和10.50。

*EC*和*TDS*可以反映出地下水中离子的含量,水中溶解的离子越多,地下水的*TDS*越高,导电性越好,其*EC*值也就越大^[20]。如表1所示,地下水*EC*的均值为2496 μs/cm, *TDS*的均值1506.0 mg/L,超过了《生活饮用水卫生标准》(GB5749-2006)中的标准限值,表明该区地下水中离子含量较大。

DO和*E_h*可以指示地下水的氧化还原状态,通常情况下,DO值在3.5~13.5 mg/L, *E_h*值大于400 mV,为高氧化环境的特点;没有溶解氧, *E_h*为负值时,地下水处于还原状态^[1]。研究区地下水的*E_h*最小值为7 mV,均值为194 mV, DO最大值为7.35 mg/L,均值为2.75 mg/L,表明地下水大多处于氧化状态。该区浅层地下水样均为潜水,直接通过包气带跟大气相通,且包气带岩性多为砂石,透气性好,故地下水与大气中的氧气接触密切,大多具有一定的氧化能力。

表1 地下水检测指标的描述性统计

统计量	<i>TDS</i>	<i>TH</i>	pH	DO	<i>EC</i>	<i>E_h</i>	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻
最小值	209.4	119.6	6.86	0.73	690	7	22.58	30.60	6.30	3.79	25.13	33.46	130.70
最大值	3404.0	1468.0	10.50	7.35	5230	263	773.40	385.20	169.10	64.54	1102.00	964.10	787.00
均值	1506.0	620.9	7.56	2.75	2496	194	295.94	132.86	70.21	24.77	399.29	329.86	433.26

注: *EC*单位为μs/cm, *E_h*单位为mV, pH无量纲,其余指标单位为mg/L。

*TH*的均值为620.9 mg/L,超过了《生活饮用水卫生标准》(GB5749-2006)中的标准限值。研究区地下水硬度高除了与Ca²⁺、Mg²⁺有关外,还受到*TDS*的影响。*TH*与*TDS*的Pearson系数 $r = 0.829$,表明*TH*与*TDS*呈正向显著相关,即随着*TDS*的升高,*TH*也不断增加。这是因为若地下水的*TDS*升高,水中离子的总量增加,离子强度就显著增强,那么在强电解质作用下水中钙、镁碳酸盐的溶解度增加,更多的Ca²⁺、Mg²⁺进入到浅层地下水中,从而导致硬度升高^[21]。

3.2 常见离子及*TDS*空间分布特征

(1)水平方向。地下水中常见阳离子中含量最多的是Na⁺,均值为295.94 mg/L,其次是Ca²⁺,均值为132.86 mg/L, Mg²⁺和K⁺的含量较少;3种常见阴离子的含量均较高, HCO₃⁻的均值为433.26 mg/L, Cl⁻的均值为399.29 mg/L, SO₄²⁻的均值为

329.86 mg/L。根据研究区实际情况,沿玉龙喀什河和喀拉喀什河,在强径流区和弱径流区共选取了18个地下水采样点,绘制常见离子的含量及*TDS*变化曲线图(图2)。

由图2可知,沿地下水流程,各常见离子的含量和*TDS*均不断增加,越靠近沙漠区含量越高,其中Na⁺+K⁺、SO₄²⁻、Cl⁻的含量高且变化波动状况一致, Ca²⁺和Mg²⁺的含量较低,增幅也小。

(2)垂直方向。研究表明西北干旱地区潜水发生蒸发的最大深度为6~7.5 m,绿洲区井深为6~20 m的调查井地下水埋深均小于8 m,井深为20~100 m的调查井地下水埋深基本都大于8 m。故将绿洲区潜水分成浅层潜水(井深为6~20 m)和中深层潜水(井深为20~100 m)两类进行分析。如图3所示,不同深度潜水中常见离子的含量及*TDS*的高低具有一定的差异。中深层潜水中常见阳离子、常

见阴离子及 TDS 的平均含量均小于浅层潜水。Ca²⁺ 和 HCO₃⁻ 平均含量的差距较小,而浅层潜水中

K⁺ + Na⁺、Mg²⁺、Cl⁻、SO₄²⁻ 的平均含量约为中深层潜水中的 2 倍,这主要与当地极为干旱的气候有关。

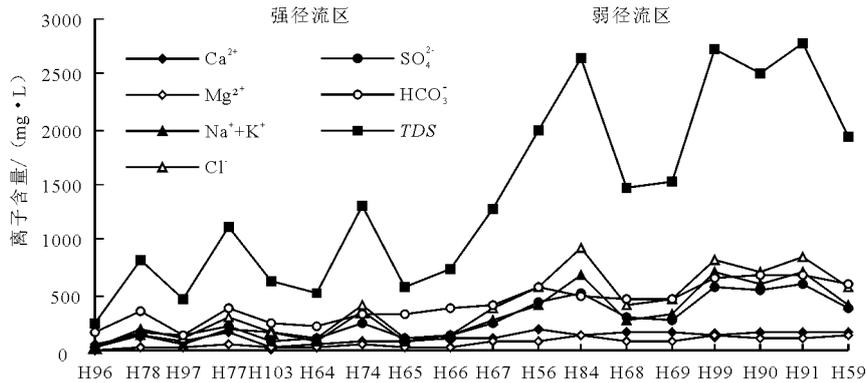


图 2 地下水中常见离子含量及 TDS 变化曲线图

3.3 水化学类型

采用 Piper 三线图及舒卡列夫分类法来确定绿洲地下水水化学类型^[22-23]。Piper 三线图将菱形分成 9 个区,落在不同区域的水样具有不同的水化学特征,将绿洲区浅层地下水水样分两组(强径流区和弱径流区)投在图上(图 4)。由图 4 可知,90.9% 的水样落在 7 区和 9 区,其余水样落在 5 区和 6 区,水样分布较分散,表明地下水中化学成分复杂多变,水化学类型具有多样性,据统计共有 22 种之多。强径流区的水样大致位于 9 区内偏右侧,还有少量分散在 5 区、6 区和 7 区,表明水中主要离子(尤其是阴离子)的主导性不明显,Cl⁻、SO₄²⁻、HCO₃⁻ 的含量均未超过 50%,阳离子则以 Na⁺ 和 Ca²⁺ 为主,水化学类型为混合型。弱径流区地下水水样分布较集中,全部落在 7 区和 9 区且大多落在 7 区,说明地下

水中 Na⁺、Cl⁻ 的含量增加,水化学类型以 Cl - Na 型和 Cl · HCO₃ - Na · Ca 型为主。

4 讨论

影响研究区地下水中化学成分的形成过程主要有蒸发浓缩作用、溶滤作用、阳离子交替吸附作用及人类活动等^[24]。

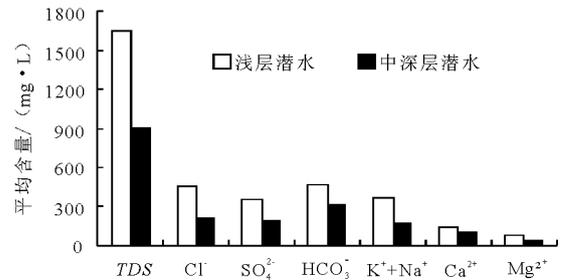


图 3 不同深度地下水中常见离子及 TDS 的平均含量

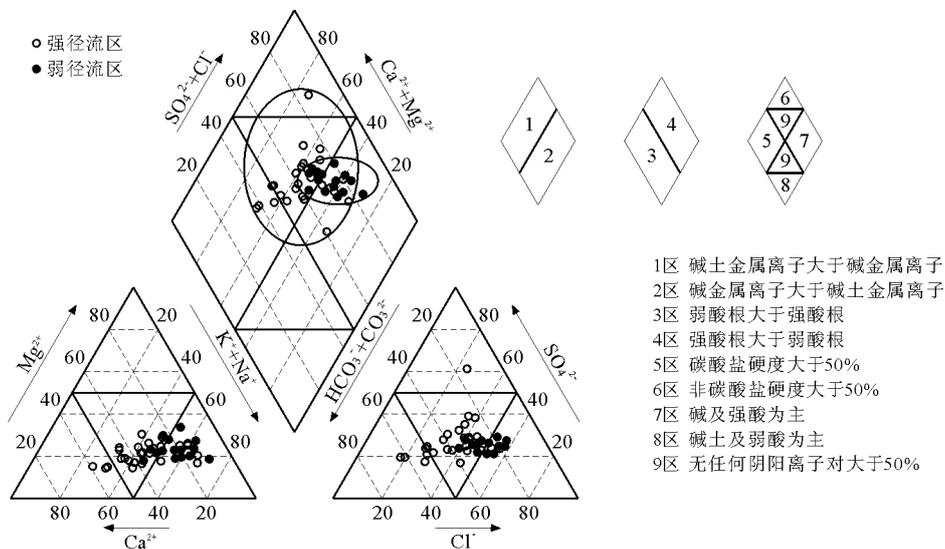


图 4 和田河流域绿洲区地下水 Piper 三线图

Gibbs图是判断地下水化学成分形成与变化影响因素的一种重要手段,从图中能直接反映出地下水中化学成分的形成过程属于“大气降水型”、“岩石风化型”还是“蒸发浓缩型”^[25-26]。将研究区强径流区和弱径流区的地下水样分别投在Gibbs图上,如图5。从图5可以看出,绝大多数水样落在

ECD和RWD范围内,没有水样落在APD的范围,表明影响研究区地下水化学成分形成与变化的主要因素是蒸发浓缩作用,其次是岩石风化作用,基本不受大气降水的影响;弱径流区的水样大多数落在ECD区域,表明地下水中的化学成分受蒸发浓缩作用的控制更为显著。

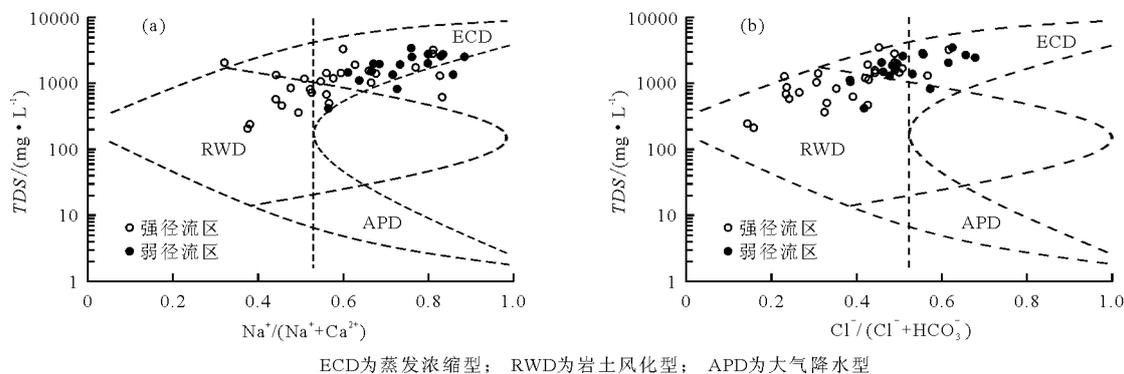


图5 和田河流域绿洲区地下水 Gibbs 图

4.1 蒸发浓缩作用

水化学类型、常见离子以及TDS沿地下水流程的规律性变化与蒸发浓缩作用密切相关。研究区地下水埋深自南向北逐渐减小,靠近出山口处地势较高,包气带岩土颗粒以砂砾石为主且厚度大,地下水埋深在9~30 m,局部地区大于30 m,则地下水径流强烈,水化学作用以溶滤作用为主,蒸发浓缩作用较弱,水中常见的阴离子以 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 为主, Cl^- 未显示出优势性;而靠近沙漠区包气带岩土颗粒以粉细砂为主,厚度小,地下水埋深较浅,大部分在3~5 m,则地下水径流变缓,溶滤作用减弱,蒸发浓缩作用增强,地下水中的离子得到不断累积,TDS升高,其中 Na^+ 占阳离子总量的比例增加, SO_4^{2-} 占阴离子总量的比例下降, Cl^- 的优势性也越来越明显,逐渐形成以 Na^+ 和 Cl^- 为主TDS较高的水。

4.2 溶滤作用

地下水中化学成分主要来自于岩盐、石膏、芒硝

等蒸发岩和钙、镁碳酸盐岩的溶解以及硅铝酸盐矿物的风化溶解。通过离子的比例关系,一定程度上可以反映不同岩性对地下水水化学成分的影响^[27-28]。图6(a)显示,研究区全部水样点位于 $\gamma(\text{Na}^+ + \text{K}^+)/\gamma\text{Cl}^- = 1:1$ 的等值线上方且靠近等值线,表明地下水经历了强烈的溶滤作用,在溶解了岩盐的同时,也溶解了少量其他含钠、钾的难溶矿物如硅铝酸盐矿物。图6(b)中,90.9%的水样位于 $\gamma(\text{HCO}_3^-)/\gamma(\text{SO}_4^{2-} + \text{Cl}^-) = 1:1$ 等值线的下方且离子浓度越大越偏离等值线,由此可判断地下水中的化学成分主要来自于蒸发岩的溶解,只有少部分来自于碳酸盐岩的溶解。图6(c)中大多数水样位于 $\gamma(\text{SO}_4^{2-} + \text{HCO}_3^-)/\gamma(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) = 1:1$ 等值线的下方,表明 HCO_3^- 主要来自于碳酸盐岩而不是硅铝酸盐矿物^[29]。因此研究区地下水中化学成分的主要物质来源依次为蒸发岩、碳酸盐岩和硅铝酸盐矿物。

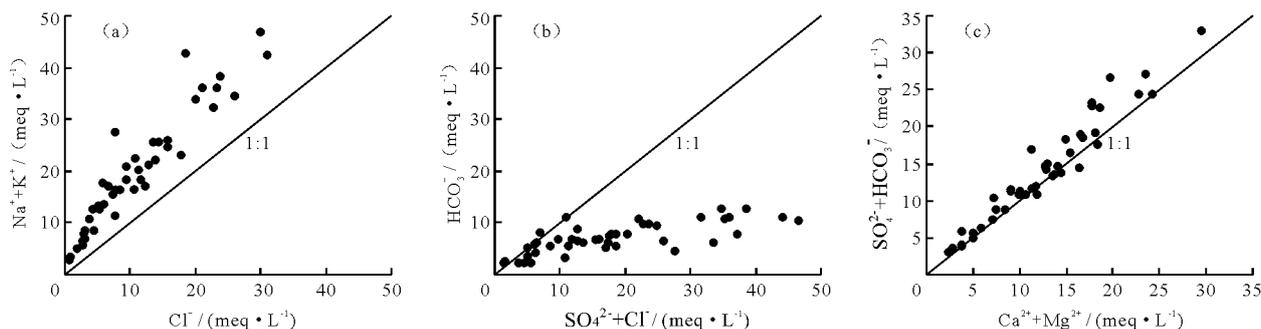


图6 地下水中主要离子比值关系图

4.3 阳离子交替吸附作用

由图2可知, Ca^{2+} 与 Na^+ 的含量沿地下水流程的变化规律正好相反, Na^+ 增多时 Ca^{2+} 在减少, Na^+ 减少时 Ca^{2+} 在增加, 这可能与地下水发生了 Na^+ 和 Ca^{2+} 之间的交替吸附作用有关。离子比值法可用来判断是否发生了阳离子交替吸附作用, 当 $\gamma\text{Na}^+/\gamma\text{Cl}^-$ 比值等于1时, 表明地下水中的 Na^+ 来源于沉积岩中岩盐的溶解, 当 $\gamma\text{Na}^+/\gamma\text{Cl}^-$ 比值大于1时, 表明地下水中的 Na^+ 还有其他来源, 可能来自于 $\text{Ca}-\text{Na}$ 的离子交换^[30]。图7为地下水中 Cl^- 与 $\gamma\text{Na}^+/\gamma\text{Cl}^-$ 的关系图, 由图7可知, 88.6%的水样 $\gamma\text{Na}^+/\gamma\text{Cl}^-$ 比值大于1, 表明研究区内绝大部分地下水都发生了阳离子交替吸附作用。岩土颗粒越细, 比表面积越大, 阳离子交替吸附作用越强烈^[1]。从强径流区到弱径流区, 沉积的岩土颗粒越来越细, 由此可推断沿地下水流程 Na^+ 和 Ca^{2+} 之间的交替吸附作用越来越强烈。但由图7可发现, 弱径流区浅层地下水的 $\gamma\text{Na}^+/\gamma\text{Cl}^-$ 值更靠近等值线, 且当 Cl^- 含量不断增加时, $\gamma\text{Na}^+/\gamma\text{Cl}^-$ 值却不断降低, 两者同时说明 Na^+ 和 Ca^{2+} 之间的阳离子交替吸附作用的强度沿地下水流程并非越来越强烈。这是由于当地下水中 Na^+ 含量较高且超过岩土颗粒表面可交换阳离子的平衡浓度时, 会抑制 Ca^{2+} 与岩土颗粒所吸附的 Na^+ 交替吸附^[31-32]。

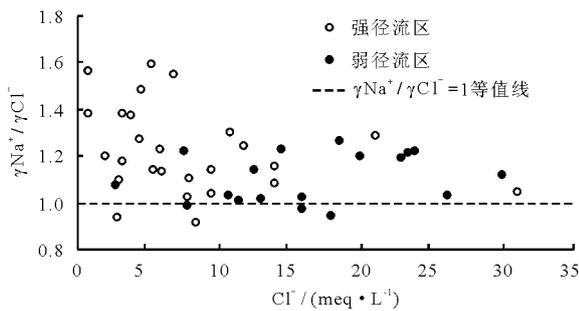


图7 地下水中 Cl^- 与 $\gamma\text{Na}^+/\gamma\text{Cl}^-$ 比值关系图

4.4 人类活动的影响

绿洲区为和田地区重要的农业生产基地, 农牧业灌溉用水量占总用水量的95%以上^[33]。由于绿洲内有些地方的灌溉方式相对落后, 多为串灌、漫灌等, 2014年农田实灌毛用水量高达915.6 $\text{m}^3/\text{亩}$ ^[33]。此外灌区内大部分水利工程修建时间都较久远, 内部渠道防渗率依然较低, 导致灌溉水利用系数很低, 约为45%^[34]。大量的水除就地蒸发外, 则通过包气带渗入地下含水层, 引起地下水水位抬升, 在强烈的蒸发作用下, 产生土壤盐渍化问题。绿

洲北部地下水埋藏较浅, 土壤盐渍化问题更为严重, 土壤中的积盐通过灌溉水及地表水的入渗作用进入到地下水中, 成为绿洲北部弱径流区地下水中离子含量及TDS更高的另一个重要因素。

5 结论

(1)和田河流域绿洲区的地下水TDS和硬度较高, 基本为微咸水和高硬度水, 大多呈中性-偏碱性, 且处于氧化状态下。常见阳离子的含量差别较大, 由大到小依次为 $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$; 常见阴离子的含量差别不大, 由大到小依次为 $\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-}$ 。

(2)从强径流区到弱径流区地下水水化学类型、常见离子的含量以及TDS呈现规律性变化, 常见离子的含量和TDS沿地下水流程均不断增加, 越靠近沙漠区含量越高, 水化学类型由混合型转变成以 $\text{Cl}-\text{Na}$ 型和 $\text{Cl}\cdot\text{HCO}_3-\text{Na}\cdot\text{Ca}$ 型为主。

(3)和田河流域绿洲区地下水中的化学成分主要来自于蒸发岩和碳酸盐岩的溶解, 其形成与变化主要受蒸发浓缩作用和溶滤作用、阳离子交替吸附作用及人类活动的影响, 几乎不受大气降水的影响。

参考文献:

- [1] 沈照理. 水文地球化学基础[M]. 北京:地质出版社, 1993.
- [2] WANG Wenke, DUAN Lei, YANG Xiaoting, et al. Shallow groundwater hydro-chemical evolution and simulation with special focus on Guanzhong Basin, China[J]. Environmental Engineering and Management Journal, 2013, 12(7):1447-1455.
- [3] 赵焕, 王仕琴, 孔晓乐, 等. 华北低山丘陵区潜龙河流域地下水水质特征及成因分析[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(2):17-24.
- [4] 卢颖, 郭建强. 基于多元统计方法的张掖盆地地下水水化学特征分析[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(5):129-135.
- [5] WEN Xiaohu, WU Yanqing, SU J, et al. Hydrochemical characteristics and salinity of groundwater in the Ejina Basin, Northwestern China[J]. Environmental Geology, 2005, 48(6):665-675.
- [6] ISLAM D U, MAJUMDER R K, UDDIN M J, et al. Hydrochemical characteristics and quality assessment of groundwater in Patuakhali District, Southern Coastal Region of Bangladesh[J]. Exposure & Health, 2017, 9(1):43-60.
- [7] MA Fengshan, WEI Aihua, DENG Qinghai, et al.

- Hydrochemical characteristics and the suitability of groundwater in the coastal region of Tangshan, China[J]. *Journal of Earth Science*, 2014, 25(6): 1067 - 1075.
- [8] 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.
- [9] 袁建飞, 邓国仕, 徐芬, 等. 毕节市北部岩溶地下水水文地球化学特征[J]. *水文地质工程地质*, 2016, 43(1): 12 - 21.
- [10] 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.
- [11] 吕路, 杨军耀. 过度开采对地下水水化学特征的影响研究[J]. *长江科学院院报*, 2017, 34(9): 14 - 18 + 23.
- [12] 刘君, 陈宗宇, 王莹, 等. 大规模开采条件下我国北方区域地下水水化学变化特征[J]. *地球与环境*, 2017, 45(4): 408 - 414.
- [13] 赵长森, 沈冰, 董宝恩, 等. 和田子项目区地下水水化学分析及利用对策[J]. *水资源与水工程学报*, 2004, 15(3): 28 - 31.
- [14] 乔云峰, 王晓红, 沈冰, 等. 和田绿洲地下水特征及其对生态植被的影响分析[J]. *长江科学院院报*, 2004, 21(2): 28 - 31.
- [15] 张晓伟, 沈冰, 关东海, 等. 新疆和田地下水水化学成分特征灰色关联分析[J]. *西安理工大学学报*, 2006, 22(1): 96 - 98.
- [16] 刘敏. 和田绿洲地下水时空分布规律及其生态环境效应研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2007.
- [17] 张艳丽. 和田县(市)地下水水化学基本特征[J]. *新疆地质*, 2008, 26(2): 184 - 188.
- [18] 塔克拉玛干沙漠综合科学考察队. 塔克拉玛干沙漠地区水资源评价与利用[M]. 北京: 科学出版社, 1993.
- [19] 马金珠. 新疆和田地区地下水资源及其可持续开发利用[J]. *中国沙漠*, 2002, 22(3): 242 - 248.
- [20] 张兆迪, 于开宁, 刘景涛. 银川平原水化学特征分析[J]. *水文地质工程地质*, 2017, 44(3): 23 - 30.
- [21] 姜体胜, 杨忠山, 黄振芳, 等. 北京郊区浅层地下水总硬度变化趋势及其机理浅析[J]. *水文地质工程地质*, 2010, 37(4): 33 - 37.
- [22] 孙一博, 刘朋飞, 王文科. 关中盆地浅层地下水水化学空间分布规律的研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2015, 26(3): 20 - 23.
- [23] 姜体胜, 曲辞晓, 王明玉, 等. 北京平谷平原区浅层地下水水化学特征及成因分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2017, 31(11): 122 - 127.
- [24] 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.
- [25] 刘永林. 不同构造单元水体水化学特征及硒区域分异机制[D]. 北京: 中国科学院大学, 2013.
- [26] 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.
- [27] WU Hao, CHEN Jie, QIAN Hui, et al. Chemical characteristics and quality assessment of groundwater of exploited aquifers in Beijiao water source of Yinchuan, China: A case study for drinking, irrigation, and industrial purposes[J]. *Journal of Chemistry*, 2015, 16: 1 - 14.
- [28] 邵杰, 李瑛, 侯光才, 等. 新疆伊犁河谷地下水化学特征及其形成作用[J]. *干旱区资源与环境*, 2017, 31(4): 99 - 105.
- [29] 李会亚, 冯起, 陈丽娟, 等. 民勤绿洲灌区地下水水化学特征及其演化驱动机理[J]. *干旱区研究*, 2017, 34(4): 733 - 740.
- [30] LIN Manli, PENG Weihua, GUI Herong. Hydrochemical characteristics and quality assessment of deep groundwater from the coal-bearing aquifer of the Linhuan coal-mining district, Northern Anhui Province, China[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2016, 188(2016): 202.
- [31] 钱程, 武雄. 盐池内流区地下水水化学特征及其形成作用[J]. *干旱区资源与环境*, 2016, 30(3): 169 - 175.
- [32] ASIWAJU - BELLO Y A, OLABODE F O, DUVBIAMA O A, et al. Hydrochemical evaluation of groundwater in Akure Area, South-western Nigeria, for irrigation purpose[J]. *European International Journal of Science and Technology*, 2013, 2(8): 235 - 249.
- [33] 新疆维吾尔自治区水利厅. 新疆维吾尔自治区水资源公报[R]. 乌鲁木齐: 新疆维吾尔自治区水利厅, 2014.
- [34] 李建成, 董克鹏, 艾合买提江, 等. 新疆和田地区地表水水资源评价[R]. 和田: 新疆和田水文水资源勘测局, 2014.