甘肃敦煌地区疏勒河尾闾区地下水 化学特征及成因分析

刘德玉^{1,2)},贾贵义²⁾,张伟^{1,2)},喻生波^{1,2)},魏玉涛^{1,2)}



Pre-pub. online

Dec., 2021

Pre-pub. on line: www. geojournals.cn/georev

1)甘肃省地下水工程及地热资源重点实验室,兰州,730050;2)甘肃省地质环境监测院,兰州,730050

内容提要: 疏勒河尾闾区是护卫敦煌绿洲及文化的生态安全屏障,但是对地下水化学的研究相对较少。本次研究在野外调查及采样测试的基础上,综合运用数理统计、Piper 三线图、离子相关性分析、Gibbs 图及离子比例系数等方法明确了疏勒河尾闾区的地下水化学特征,并对其成因进行了分析。结果表明:疏勒河尾闾区地下水水质总体呈弱碱性,具有高溶解性总固体及高硬度的特征,水化学类型主要为 Cl⁻ · SO²₄ – Na⁺型。地下水水化学演化是由蒸发浓缩作用主导,同时风化溶解和阳离子交换共同作用的结果。地下水中的 Ca²⁺及 Mg²⁺主要来自于蒸发岩及硅酸盐的溶解,Na⁺主要来源于岩盐溶解。高氟水的形成与片麻岩中普遍存在的黑云母矿物、蒸发浓缩主导的水文地球化学作用以及地势低洼的地形条件有关。成果不仅丰富了疏勒河流域内的地下水化学研究,亦可为敦煌绿洲生态安全屏障区的保护与建设提供科学依据。

关键词: 疏勒河; 尾闾区; 西湖自然保护区; 甘肃敦煌绿洲; 地下水化学

疏勒河尾闾区地处甘肃敦煌盆地西部,为典型 的西北内陆极端干旱区。研究区大部分位于敦煌西 湖国家级自然保护区内部,其主要保护对象为湿地 -荒漠生态系统以及野生动植物,范围自东向西包 含后坑、小马迷兔、大马迷兔、湾腰、哈拉齐等地。研 究区内独特的湿地生态系统不仅具有涵养水源的功 能,而且还有效阻挡了库姆塔格沙漠东扩,是保卫敦 煌绿洲和敦煌文化的强有力生态屏障。但是自20 世纪 50~60 年代以来,在疏勒河上游修建了众多农 田水利工程,大部分水资源被截流用于中、下游农田 灌溉,流入尾闾区的水量急剧减少并经常断流,导致 河道干涸、尾闾区旱化,仅在雨季泄洪时,有少部分 地表水汇入。地表水资源的减少导致区内地下水位 持续下降,湿地萎缩,植被退化,土地荒漠化及盐渍 化程度加剧(袁海峰等,2009;杨俊仓等,2014),生 态屏障功能受到严重影响。在地表水资源相对匮乏 的干旱地区,地下水资源具有不可替代的作用(魏 水莲等,2017)。地下水作为维系干旱区湿地植被 正常生长的关键因素,研究其化学组分特征及形成 原因对于生态环境保护与恢复至关重要。

目前,国内学者在地下水开发利用程度较高的

疏勒河流域中下游玉门-瓜州盆地开展的地下水化 学研究较多,针对该地区的地下水化学演化规律 (赵玮等.2015)、地下水化学特征及控制因素(张百 祖等,2020)进行了较为系统的研究。疏勒河尾闾 区自然环境条件相对原始,人烟稀少,地下水开发利 用程度很低,已有研究多集中在盐渍土特征(魏玉 涛等,2020;喻生波等,2020;刘普幸等,2012;张克新 等,2012)、土壤水分特征(陈文业等,2015;张伟等, 2020)、地下水资源开发利用评价(程旭学等. 2008)、湿地演化(段浩等,2015)、植物群落生态特 征(张继强等,2019)等方面,有关地下水化学的研 究相对较少。本文通过野外调查及采样测试,研究 了该区域的地下水化学特征及成因,并与流域中下 游玉门-瓜州盆地已有的地下水化学研究成果(赵 玮等,2015;张百祖等,2020)进行了对比分析。成果 不仅丰富了疏勒河流域内的地下水化学研究,亦可 为敦煌绿洲生态安全屏障区的保护与建设提供科学 依据。

1 疏勒河尾闾区概况

注:本文为甘肃省地下水工程及地热资源重点实验室开放基金资助项目(编号:201903)的成果。

收稿日期:2021-07-31;改回日期:2021-12-13;网络首发:2021-12-20;责任编辑:章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2021.12.135 作者简介:刘德玉,男,1988年生,硕士,工程师,主要从事水文地质方面的研究;Email: Ldeyu2010@163.com。通讯作者:贾贵义,男,1961

年生,教授级高级工程师,主要从事水文地质方面的研究;Email: 378002440@qq.com。

1.1 基本情况

研究区范围北至疏勒河河谷与走廊北山交界一带,西至库姆塔格沙漠东缘,南至敦煌西湖国家级自然保护区的湾腰一带,东至玉门关一带,其距离敦煌 市西约 90km(图1)。地理坐标为:92°50'~93°57' E,40°3'~40°28'N,面积约 3130km²。

研究区气候极端干旱,昼夜温差大,年平均气温 9.9℃,年均降水量小于 50 mm,蒸发量高达 2500 mm 以上。全年日照时间长,风沙多。区内主要河 流为河西走廊三大内陆河之一的疏勒河,发源于疏 勒南山和托来南山之间,自昌马峡出山,流经玉门、 瓜州、敦煌等地,最终注入哈拉齐等尾闾。

区域地势总体南北高,中西部低,海拔 812~ 1315m,靠近北山一带地势最高,南部湾腰一带地势 最低。地貌类型主要可分为低山丘陵、冲洪(冲湖) 积平原及沙漠戈壁。区内除沼泽湿地周边植被较为 茂盛外,其余地区植被稀疏,生长有芦苇、柽柳、胡

杨、骆驼刺、梭梭等植物。研 究区生态环境极为脆弱,自然 环境条件相对原始,基本为无 人区。

1.2 地层岩性

前第四系主要分布在山 地及盆地基底,地层岩性包 括:太古代-古元古代(Ar-Pt₁)的片麻岩、斜长角闪岩、 大理岩、黑云母石英片岩等; 奥陶系-志留系(O-S)的石英 片岩、大理岩、黑云母斜长片 麻岩等;二叠系(P)的角斑 岩、流纹岩、砾岩、灰岩透镜 体;新近系(N)的砂质泥岩、 砂砾岩、砂岩。

第四系地层主要分布于 冲洪(冲湖)积平原区,地层 时代从下更新统(Qp₁)、中更 新统(Qp₂)、上更新统(Qp₃)、 全新统(Qh)均有分布,岩性 主要有亚砂土、亚黏土、粉细 砂、细砂、中砂、粗砂等,多呈 互层关系。在哈拉齐一带还 有淤泥层及盐硝分布。

1.3 水文地质

区域内的地下水类型主

要为第四系松散岩类孔隙水,含水层岩性主要为中 细砂及含砾中砂,可分为潜水、承压水两种类型。潜 水水位埋深普遍在1~3m,在湖积洼地区域一般小 于1m,在东南部的二墩村一带埋深20~30m。含水 层颗粒从南到北渐细,厚度由南、东向北、西方向变 薄。潜水含水层厚度一般小于20m,承压含水层厚 度大多在30~50m。地下水补给来源主要有:疏勒 河地下潜流补给、多坝沟等南部沟谷河流侧向径流 补给、少量北山基岩裂隙水及雨洪补给。地下水径 流缓慢,在保护区湿地与疏勒河河道两侧地下水浅 埋区以蒸发蒸腾排泄为主。

2 地下水样品采集及测试

2.1 地下水样品采集

本次研究于 2015 年 11 月~2016 年 8 月在研究 区内共采集地下水样品 83 组,其中浅井样品 79 组, 钻孔样品 4 组。采样点井深 1~45m,地下水位埋深



图 1 疏勒河尾闾区地理位置图 Fig. 1 Geographical location map of the Shule River tail area



图 2 疏勒河尾闾区采样点分布图

Fig. 2 Distribution map of sampling points in the tail area of the Shule River

0.5~22m,地下水类型为第四系松散岩类孔隙水,采 样点分布情况见图 2。地下水样品严格按照《地下 水环境监测技术规范(HJ/T164-2004)》进行采样、 保存和运送,由具备 CMA 资质的甘肃地质工程实验 室完成样品测试工作。

2.2 地下水样品测试

对采集的 83 组地下水样品开展 pH、总硬度(水 中所含 Ca²⁺、Mg²⁺的总量)、溶解性总固体(TDS)、 Na⁺、K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、SO₄²⁻、NO₃⁻、Cl⁻、HCO₃⁻、CO₃²⁻等 测试工作。此外,为分析研究区内 F⁻含量的高低与 分布情况,从中抽稀选取 28 组水样加测 F⁻指标。 pH 采用多功能便携式水质测试仪现场测定,总硬度 采用乙二胺四乙酸二钠滴定法测定,TDS 用重量法 (105℃烘干)测定,Na⁺、K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺采用电感耦 合等离子体发射光谱法测定,SO²⁻₄、NO₃⁻、Cl⁻、F⁻采 用离子色谱法测定,HCO⁻₃、CO₃²⁻采用滴定法测定。

3 结果与分析

3.1 地下水化学特征

3.1.1 地下水化学参数统计分析

研究区地下水的 pH、溶解性总固体(TDS)、总 硬度、K⁺、Cl⁻等 12 项水化学指标见表 1、表 2。由表 1、表 2 可知该区地下水的 pH 值介于 6.8~8.7,平 均值为 7.6,总体呈弱碱性。总硬度值介于 90.1~ 11009.0mg/L,平均值为 3097.3mg/L,以极硬水(>



图 3 疏勒河尾闾区 TDS 含量空间分布图 Fig. 3 Spatial distribution of TDS content in the tail area of the Shule River

表
乺
影
۱W M
¥
×
で 下
전
回
尾
河
流
1 ,
表

Table 1 List of hydrochemical parameters in the tail area of Shule River

	水质类型	HCO ₃ ⁻ ・Cl ⁻ -Na ⁺ 型	SO_4^{2-} · $CI^ Na^+ \overline{W}$	$SO_4^{2-}-Na^+ \cdot Mg^{2+}$ 型	$CI^- \cdot SO_4^{2-} - Na^+ Warder$	$CI^{-} \cdot SO_4^{2^-} - Na^+ \cdot Ca^{2^+}\overline{W}$	S04 ²⁻ —Na ⁺ 型	$CI^- \cdot SO_4^{2^-} - Na^+ \overline{W}$	$\mathrm{HCO_3}^{-} \cdot \mathrm{SO_4}^{2-}$ – Na^{+} War	$SO_4^{2-} \cdot HCO_3^{-} - Na^+ \overline{W}$	HCO ₃ ⁻ ・Cl ⁻ -Na ⁺ 型	$CI^{-} \cdot SO_{4}^{2^{-}} - Na^{+} \cdot Mg^{2^{+}} \overline{W}$	$CI^{-} \cdot SO_{4}^{2^{-}} - Na^{+} \cdot Mg^{2^{+}} \overline{W}$	$CI^- \cdot SO_4^{2-} - Na^+ \overline{W}$	$CI^- \cdot SO_4^{2-} - Na^+ W$	$SO_4^{2-} \cdot CI^ Na^+ \overline{W}$	$SO_4^{2-} \cdot CI^ Na^+ \overline{W}$	$SO_4^{2-} \cdot CI^ Na^+ \overline{W}$	$\mathrm{SO}_4^{2^-} - \mathrm{Na}^+ \cdot \mathrm{Mg}^{2^+} \cdot \mathrm{Ca}^{2^+} \overline{\mathrm{W}}$	$CI^- \cdot SO_4^{2^-} - Na^+ \overline{W}$	HCO ₃ ⁻ ・Cl ⁻ -Na ⁺ 型	$Cl^- \cdot SO_4^{2-}-Na^+\overline{W}$	$SO_4^{2-} \cdot CI^ Na^+ \overline{W}$	$\mathrm{SO_4}^{2^-}$ · Cl^- - Na^+ · Mg^{2^+} $\overline{\mathrm{W}}$	$SO4^{2-}$ · HCO3 ⁻ · Cl ⁻ -Na ⁺ · Mg ²⁺ · Ca ²⁺ 型	$SO_4^{2-} \cdot CI^ Na^+ \overline{W}$	$CI^- \cdot SO_4^{2-} - Na^+ W$	$CI^{-} \cdot SO_{4}^{2^{-}} - Na^{+} \cdot Ca^{2^{+}} \overline{W}$	$CI^- \cdot SO_4^{2-} - Na^+ \overline{x}U$	$SO_4^{2-} \cdot CI^ Na^+ \overline{W}$	$\mathrm{HCO}_{3}^{-} \cdot \mathrm{SO}_{4}^{2^{-}-\mathrm{Na}^{+}} \overline{\mathrm{W}}$	$\mathrm{HCO_3}^{-} \cdot \mathrm{SO_4}^{2^-} - \mathrm{Na}^+ \overline{\mathrm{W}}$	SO_{a}^{2-} · CI^{-} - Na^{+} \overline{W}
	μd	7.69	7.72	6.82	7.18	7.91	7.86	7.69	7.50	7.43	7.33	7.04	7.32	7.32	7.66	7.88	7.52	8.42	7.47	7.35	7.39	7.48	7.53	7.29	7.05	8.49	7.74	7.45	7.39	7.32	8.38	8.69	7,26
	溶解性 总固体	1476.0	56299.0	8122.0	9342.0	6984.0	13319.0	58972.0	1092.0	2446.0	1476.0	12700.0	33044.0	22693.0	4246.0	53604.0	38659.0	4641.0	5564.0	20649.0	891.6	16656.0	3826.0	1228.0	2230.0	9913.0	16940.0	5038.0	7863.0	5806.0	477.8	509.7	17216.0
	总硬度	524.4	4354.0	3411.0	2162.0	2312.0	2157.0	2887.0	300.2	348.3	248.2	3673.0	8487.0	5423.0	1191.0	1791.0	5079.0	725.6	2634.0	4854.0	216.2	1982.0	850.7	533.4	1126.0	470.4	1181.0	1781.0	1161.0	1536.0	90.1	90.1	3065.0
	L L	-	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
	NO_3^-	11.92	1.48	1.78	9.62	115.33	94.46	175.40	0.54	0.88	1.18	1.14	4.08	11.75	0.08	0.71	6.08	1.22	0.50	5.32	0.50	12.00	3.08	0.05	3.50	4.81	3.50	3.03	1.82	1.68	3.13	3.08	0.50
(T)	HCO_{3}^{-}	754.20	617.50	744.40	870.10	157.40	288.00	392.50	595.50	981.20	810.30	676.10	436.90	1181.00	261.20	1567.00	663.90	139.10	141.60	505.20	534.50	990.90	584.50	230.60	625.80	2437.00	2087.00	356.30	402.70	497.90	222.10	208.70	591.90
浓度,p(mg	SO_4^{2-}	309.3	22911.0	4391.0	3012.0	2214.0	7030.0	19535.0	283.4	805.0	260.3	4354.0	9707.0	6432.0	1273.0	20836.0	16163.0	2032.0	3129.0	7541.0	133.5	5565.0	1407.0	447.7	864.6	2913.0	5178.0	1840.0	1643.0	2387.0	143.1	152.7	7313.0
质量	Cl ⁻	280.1	13339.0	776.4	2668.0	2272.0	1571.0	18702.0	122.7	274.4	267.3	3944.0	12293.0	8110.0	1331.0	13268.0	8908.0	894.1	691.3	5788.0	159.5	4600.0	875.5	282.9	356.7	2101.0	4857.0	1425.0	3201.0	1294.0	54.6	55.3	4166.0
	Mg^{2+}	68.5	934.6	475.9	384.0	184.7	229.7	336.6	35.5	49.6	21.4	706.1	1898.0	1023.0	170.1	386.5	911.5	115.5	335.9	844.6	30.6	371.9	141.0	91.1	160.4	97.2	257.6	184.7	114.2	237.0	15.8	15.3	410.2
	Ga^{2+}	97.0	202.4	581.2	232.5	621.2	485.0	601.2	61.7	57.7	64.1	306.6	268.5	444.9	196.4	80.2	531.1	100.2	501.0	551.1	36.1	180.4	108.2	63.3	186.4	28.1	48.1	408.8	276.6	224.4	10.0	10.8	551.1
	Na^+	325.4	18359.0	1478.0	2487.0	1452.0	3627.0	19269.0	285.0	754.0	449.2	2959.0	8424.0	5918.0	994.8	17964.0	11616.0	1268.0	770.8	5380.0	258.8	5266.0	975.2	215.2	325.4	3422.0	5266.0	963.5	2389.0	1384.0	126.5	146.4	4398.0
	K^{+}	7.0	242.5	45.9	114.7	45.2	139.1	189.0	5.0	13.6	7.2	90.5	229.6	163.4	145.2	285.0	191.8	81.7	65.4	286.9	5.8	165.4	23.5	12.1	18.2	29.0	286.9	35.4	36.3	29.0	13.6	2.6	81.7
ロ オ	牛 编品 号	QJ-01	QJ-02	QJ-03	QJ-04	QJ-05	QJ-06	QJ-07	QJ-08	60−lĢ	QJ-10	QJ-11	QJ-12	QJ-13	QJ-14	QJ-15	QJ-16	QJ-17	QJ-18	QJ-19	QJ-20	QJ-21	QJ-22	QJ-23	QJ-24	QJ-25	QJ-26	QJ-27	QJ-28	QJ-29	QJ-30	QJ-31	01 - 32
	序步		0	ю	4	5	9	٢	8	6	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32

地质论评

	水质类型	Cl ⁻ · SO ₄ ^{2Na+} 型	$CI^{-} \cdot SO_4^{2^-} - Na^+ \cdot Mg^{2^+}$ 2 ²⁴ 2 ²⁴	$CI^{-} \cdot SO_4^{2^-} - Na^+ \overline{W}$	$\mathrm{Cl}^{-}\cdot\mathrm{SO}_{4}^{2^{-}}-\mathrm{Na}^{+}\overline{\mathrm{W}}$	$CI^{-} \cdot SO_4^{2^-} - Na^+ \cdot Mg^{2^+}$ 型	$CI^- \cdot SO_4^{2^-} - Na^+ \overline{W}$	$Cl^{-} \cdot SO_4^{2^-} - Na^+ \cdot Mg^{2^+}$ 型	CINa+型	CI ⁻ -Na ⁺ 型	$\mathrm{SO_4}^{2^-} \cdot \mathrm{Cl}^ \mathrm{Na}^+ \cdot \mathrm{Mg}^{2^+}$ 2	$CI^{-} \cdot SO_4^{2^-} - Na^+ \cdot Mg^{2^+}$ 型	$SO_4^{2-} \cdot CI^ Na^+ \overline{W}$	$CI^{-} \cdot SO_{4}^{2} - Na^{+} \overline{W}$	$\mathrm{SO_4}^{2-}$ · Cl^- - Na^+ · Mg^{2+} $\overline{\mathrm{W}}$	$CI^{-} \cdot SO_4^{2^-} - Na^+ \cdot Mg^{2^+}$ 型	$Cl^{-} \cdot SO_4^{2^-} - Na^+ \overline{W}$	$\mathrm{Cl}^{-}\cdot\mathrm{SO}_{4}^{2^{-}-\mathrm{Na}^{+}}$	CI ⁻ —Na ⁺ • Mg ²⁺ 型	$CI^- \cdot SO_4^{2-} - Na^+ \cdot Mg^{2+} \overline{W}$	$\mathrm{SO_4}^{2^-} \cdot \mathrm{Cl}^ \mathrm{Na}^+ \cdot \mathrm{Mg}^{2^+}$ 2	$\mathrm{Cl}^{-}\cdot\mathrm{SO}_{4}^{2^{-}}-\mathrm{Na}^{+}\overline{\mathrm{W}}$	$CI^- \cdot SO_4^{2-}-Na^+\overline{W}$	$\mathrm{SO_4}^{2^-} \cdot \mathrm{Cl}^ \mathrm{Na}^+ \cdot \mathrm{Mg}^{2^+}$ 2	HCO ₃ ⁻ • SO ₄ ²⁻ -Na ⁺ 型	$SO_4^{2-} \cdot Cl^ Na^+ \overline{W}$	$CI^{-} \cdot SO_4^{2^-} - Na^+ \cdot Mg^{2^+} \overline{W}$	$CI^{-} \cdot SO_4^{2^-} - Na^+ \cdot Mg^{2^+}$	$CI^- \cdot SO_4^{2-}-Na^+\overline{W}$	Cl ⁻ −Na ⁺ ・Mg ²⁺ 型	$SO_4^{2-} \cdot CI^ Na^+ \overline{W}$	$ ext{Cl}^{-} \cdot ext{SO}_4^{2^-} - ext{Na}^+ ext{Warther}$	$SO_4^{2-} \cdot HCO_3^{-} \cdot CI^ Na^+ W$	$Cl^{-} \cdot SO_4^{2^-} - Na^+ \cdot Mg^{2^+} \overline{W}$	$SO_4^{2-} \cdot Cl^ Na^+ Wa$
	Ηd	7.50	7.06	7.22	7.63	7.51	7.38	7.39	7.88	7.57	8.28	7.43	7.69	7.76	7.22	6.99	7.08	7.44	7.12	7.31	7.60	7.35	7.15	7.68	8.41	7.39	7.60	7.54	7.24	7.61	7.33	7.38	8.36	7.19	8.25
	溶解性 总固体	29694.0	21501.0	17959.0	27905.0	12850.0	6226.0	29261.0	44335.0	30051.0	1054.0	4398.0	17581.0	55674.0	12755.0	17233.0	41076.0	11396.0	28963.0	18162.0	4579.0	56446.0	12500.0	6563.0	453.1	41544.0	1835.0	4010.0	24760.0	45768.0	22494.0	20783.0	715.1	17331.0	1082.0
	总硬度	4303.0	7531.0	3578.0	7066.0	5399.0	1902.0	11009.0	8482.0	7481.0	400.3	1561.0	2552.0	4404.0	3503.0	5594.0	8517.0	3212.0	9648.0	6715.0	1641.0	4984.0	2592.1	2502.0	100.1	5004.0	705.6	1351.0	4729.0	3303.0	4253.0	2877.0	135.1	5254.0	255.2
	F-	-	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	0.85	1.75	1.09	1.56	3.15	3.63	3.06	4.64	0.84	1.59	0.46
	NO_3^-	51.35	0.50	36.07	0.50	0.74	12.62	6.31	82.49	7.10	5.14	1.72	3.82	32.60	3.82	0.50	3.29	2.89	10.12	6.56	4.51	7.44	2.99	24.99	3.28	1.84	0.50	16.00	25.64	3.42	19.78	7.85	4.87	2.40	9.10
/L)	HCO_{3}^{-}	610.20	256.30	323.40	142.80	144.00	361.20	444.20	117.20	140.30	130.60	394.20	616.30	234.30	556.50	314.80	327.10	146.40	151.30	255.10	423.50	2199.00	275.80	313.60	198.90	275.80	266.00	278.20	846.90	1245.00	615.10	2211.00	217.20	582.10	142.80
欲度,p(mg	SO_4^{2-}	7109.0	4827.0	4419.0	6974.0	2877.0	1969.0	9126.0	6124.0	2017.0	480.3	1494.0	7733.0	16523.0	4851.0	5274.0	10216.0	3924.0	3905.0	4044.0	1907.0	17212.0	4349.0	2822.0	120.1	17484.0	533.2	1364.0	6845.0	20510.0	9462.0	7205.0	220.0	6436.0	377.5
质量	CI-	12089.0	9143.0	6864.0	11345.0	5860.0	2012.0	10884.0	22690.0	17372.0	182.9	1253.0	3723.0	19942.0	3545.0	6346.0	16778.0	3723.0	15200.0	8110.0	1037.0	18967.0	3886.0	1532.0	56.7	10086.0	581.4	1241.0	8970.0	9803.0	5495.0	5424.0	117.0	5229.0	248.2
	${\rm Mg}^{2+}$	534.7	1270.0	404.7	1354.0	866.5	177.4	2163.0	1455.0	1418.0	64.4	239.4	455.7	868.9	683.0	906.0	1638.0	478.8	1543.0	1030.6	218.8	1035.0	443.6	360.9	18.5	907.8	113.0	223.6	815.5	707.3	717.0	595.5	21.9	941.9	40.1
	Ca^{2+}	841.7	921.8	765.5	597.2	733.5	468.9	841.7	998.0	657.3	54.1	230.5	270.5	330.7	276.6	741.5	709.4	497.0	1318.0	990.0	296.6	288.6	306.6	406.8	9.6	507.0	96.2	172.3	549.1	156.3	521.0	170.3	18.0	551.1	36.1
	Na ⁺	8582.0	5176.0	5265.0	7398.0	2389.0	1372.0	5852.0	12685.0	8424.0	197.1	955.6	5040.0	17592.0	2850.0	3760.0	11398.0	2639.0	6857.0	3766.0	879.2	17584.0	3338.0	1219.0	126.5	12060.0	350.2	813.5	6989.0	13714.0	5614.0	6134.0	197.1	3766.0	276.8
	K^{+}	180.9	34.4	43.2	165.4	51.3	33.4	165.4	242.5	84.8	5.3	27.1	47.4	267.1	38.8	45.1	168.7	58.1	53.0	87.3	24.0	251.8	32.0	36.4	2.9	308.6	23.5	28.5	104.6	209.2	286.9	72.3	15.0	86.2	8.7
1	神 御 む 日 日	QJ-33	QJ-34	QJ-35	QJ-36	QJ-37	QJ-38	QJ-39	QJ-40	QJ-41	QJ-42	QJ-43	QJ-44	QJ-45	QJ-46	QJ-47	QJ-48	QJ-49	QJ-50	QJ-51	QJ-52	QJ-53	QJ-54	QJ-55	QJ-56	QJ-57	QJ-58	QJ-59	QJ-60	QJ-61	QJ-62	QJ-63	QJ-64	QJ-65	0J-66
	字 、	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	99

	水质类型	8 $Cl^{-} \cdot SO_4^{2^-} - Na^+ \cdot Mg^{2^+}$ 型	$Cl^{-} \cdot SO_4^{2-} - Na^+ \overline{W}$	2 SO4 ²⁻ ・Cl ⁻ -Na ⁺ 型	7 CI ⁻ · SO ₄ ²⁻ -Na ⁺ 型	2 CI ⁻ · SO ₄ ²⁻ -Na ⁺ 型	4 Cl ⁻ ・SO ₄ ²⁻ -Na ⁺ 型	5 CI ⁻ · SO ₄ ²⁻ -Na ⁺ 型	1 Cl ⁻ -Na ⁺ 型	3 $CI^{-} \cdot SO_4^{2-} - Na^+ \cdot Mg^{2+} \overline{W}$	$6 \qquad \text{CI}^{-} \cdot \text{SO}_{4}^{2^{-}-\text{Na}^{+}} \cdot \text{Mg}^{2^{+}}\overline{\text{W}}$	9 $\operatorname{CI}^{-} \cdot \operatorname{SO}_{4}^{2^{-}-\operatorname{Na}^{+}} \cdot \operatorname{Mg}^{2^{+}} \overline{\operatorname{W}}$	4 Cl ⁻ · SO ₄ ²⁻ -Na ⁺ 型	4 Cl ⁻ ・SO ₄ ^{2Na+} 型	5 CI ⁻ · SO ₄ ²⁻ -Na ⁺ 型	1 $Cl^{-} \cdot SO_4^{2-} - Na^{+} \cdot Mg^{2+} \overline{W}$	3 SO4 ²⁻ ・Cl ⁻ -Na ⁺ 型	2 SO4 ²⁻ ・Cl ⁻ -Na ⁺ 型	
	Hd	7.38	7.85	8.32	7.43	7.23	7.6	7.55	7.5	7.33	7.50	7.59	7.4	7.82	7.76	8.1	8.23	8.12	
	溶解性心固体	11281.0	4432.0	789.0	28140.0	18773.0	28545.0	12583.0	10896.0	10154.0	8732.0	9544.0	11718.0	37340.0	12651	1250	2596	999.2	
	总硬度	4103.0	1016.0	222.2	5705.0	3062.0	5990.0	3393.0	3232.0	4884.0	3513.0	3413.0	2502.0	3878.0	1952	446.4	258.2	312.2	
	F.	2.96	0.84	0.71	1.12	3.46	1.31	1.06	0.81	0.62	1.35	1.20	1.08	0.51	1.52	0.67	0.41	0.47	
	NO_3^-	4.68	1.28	8.17	2.99	2.40	5.09	14.28	3.05	5.09	5.60	3.42	19.38	30.92	1.4	22.43	5.39	0.50	
(T)	HCO_{3}^{-}	762.70	257.50	131.80	411.30	394.20	273.40	256.30	344.10	183.10	274.60	301.40	490.60	104.90	227	119.6	219.7	139.1	
浓度,p(mg	SO_4^{2-}	4131.0	1359.0	280.5	9967.0	5990.0	9280.0	3220.0	2010.0	3367.0	2868.0	3180.0	2570.0	10759.2	3516	434.2	931.8	396.7	4- 077300-F
质量	Cl ⁻	3545.0	1471.0	166.6	8695.0	6116.0	9634.0	5043.0	4999.0	3430.0	2836.0	3120.0	4715.0	13277.1	4573	328.3	652.3	189.3	
	${\rm Mg}^{2+}$	881.1	131.3	38.2	1049.0	369.5	1090.0	501.9	506.8	726.7	682.5	630.7	392.5	601.6	325.7	68.3	41.3	47.2	10 + F 4 F 2
	Ca^{2+}	190.4	190.4	26.1	555.1	617.2	601.2	531.1	458.9	757.5	281.4	326.7	354.7	561.1	244.5	66.1	35.3	47.3	
	Na ⁺	2073.0	1099.0	177.6	7538.0	5380.0	7680.0	3072.0	2690.0	1684.0	1845.0	2061.0	3369.0	11945.0	3780	250.6	800	230.5	17 2 一口
	K^{+}	41.2	33.1	15.5	63.9	31.9	104.5	44.1	35.4	51.3	45.2	38.3	36.8	92.1	86.4	10.1	9.6	7.1	स्रिय हो
t ž	補 部 也	QJ-67	QJ-68	QJ-69	QJ-70	QJ-71	QJ-72	QJ-73	QJ-74	QJ-75	QJ-76	QJ-77	QJ-78	0J-79	ZK-01	ZK-02	ZK-03	ZK-04	Ш.Н. Н
	专	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	LL	78	<i>4</i>	80	81	82	83	1

1 17枚木飯巡风。 に枚皆たい 42 17枚这开, 5 注:pH 兀重刹;件面釉节サ 450mg/L)居多,占比83.2%,其次为硬水 (300~450mg/L)及微硬水(150~300mg/ L),占比均为 6.0%,软水(<150mg/L)占 比最小,为4.8%。

TDS 值变化范围大,为 453.1~ 58972.0mg/L,平均值为 16184.1mg/L。 其中,盐水(10~50g/L)占比较大,为49. 4%,其次为咸水(3~10g/L)及微咸水(1 ~3g/L),占比分别为22.9%及13.3%,少 部分为淡水(<1g/L)及卤水(>50g/L),占 比分别为 8.4% 及 6.0%。通过 TDS 含量 空间分布图(图3)可得出:沿着疏勒河流 向,自研究区东部的玉门关到西部的哈拉 齐.TDS含量总体呈上升趋势,区内大部 分地下水为高 TDS 的盐水,低 TDS 的淡 水零星分布于玉门关~后坑一带的沼泽 湿地区。

地下水中的阳离子平均质量浓度大 小依次为 $\rho(Na^+) > \rho(Mg^{2+}) > \rho(Ca^{2+}) > \rho$ (K^{+}) ,阴离子平均质量浓度大小依次为 ρ $(Cl⁻) > \rho(SO_4^{2-}) > \rho(HCO_2) > \rho(NO_3^{-}), 优$ 势阳离子为 Na⁺ 及 Mg²⁺, 优势阴离子为 Cl⁻及 SO₄。此外,地下水中 F⁻的质量浓 度介于 0.4~4.6mg/L, 平均质量浓度为 1.5mg/L。按照《地下水质量标准(GB/T 14848-2017)》,F⁻离子的Ⅲ类水质量浓 度限值为 1. 0mg/L, 样品超标率为 60. 7%,达到Ⅳ~V类水,说明高氟水在研究 区内分布较为广泛。

pH值的变异系数最小(0.1),说明其 空间变异性小、离散程度低、相对稳定。 但除 pH 值外,其余 10 项指标的变异系数 均较大(0.7~2.2),说明这些水化学指标 的含量存在着较强-强的空间变异性,影 响因素较为复杂.离散程度较高。

3.1.2 地下水化学类型分析

通过绘制疏勒河尾闾区地下水化学 Piper 三线图(图 4)可分析得出:地下水 中阳离子以 Na⁺ 及 Mg²⁺ 为主, 阴离子以 Cl^- 及 SO²⁻₄为主。水化学类型较为复杂, 共有 15 种类型(表 3),主要为 Cl⁻ · SO₄²⁻ $-\mathrm{Na}^{+}$ 型、Cl⁻ · SO₄²⁻ $-\mathrm{Na}^{+}$ · Mg²⁺型、SO₄²⁻ · Cl⁻-Na⁺型,占比分别为 32.5%、19.3%以

表 2 疏勒河尾闾区地下水化学参数统计特征值

Table 2 Statistical eigenvalues of hydrochemical parameters in the tail area of the Shule River

	质量浓度, p (mg/L)													
	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	C1 ⁻	SO4 ²⁻	HCO3-	NO ₃ ⁻	F^{-}	总硬度	TDS	рп		
最小值	2.6	126.5	9.6	15.3	54.6	120.1	104.9	0.1	0.4	90.1	453.1	6.8		
最大值	308.6	19269.0	1318.0	2163.0	22690.0	22911.0	2437.0	175.4	4.6	11009.0	58972.0	8.7		
平均值	85.8	4456.0	364.9	530.6	5318.7	5147.0	508.5	12.3	1.5	3097.3	16184.1	7.6		
标准差	85.6	4856.7	283.6	478.7	5526.4	5376.9	482.3	26.6	1.1	2512.5	15514.4	0.4		
变异系数	1.0	1.1	0.8	0.9	1.0	1.0	0.9	2.2	0.7	0.8	1.0	0.1		

及 18.1%。另外,还有少部分 HCO₃·SO₄²⁻-Na⁺型 及 HCO₃·Cl⁻-Na⁺型水的分布,占比合计 8.4%,零 星分布在玉门关~后坑一带。其余 10 种水化学类 型共占比 21.7%。总体上,地下水化学类型显示出

典型的极端干旱区高矿化度水的特征。

3.1.3 地下水离子相关性分析

地下水离子相关性分析可以揭示地下水水化学参数的相似相异性及地下水来源的一致性和差异性



Fig. 4 Piper trigram of hydrochemistry in the tail area of the Shule River(the unit of the ions in figures is mg/L)

2021年

	Table 3 Statistics of hydrochemical types in the tail area of the Shule River														
序号	水化学类型	数量 /组	占比 (%)	序号	水化学类型	数量 /组	占比 (%)								
1	Cl ⁻ · SO ₄ ²⁻ -Na ⁺ 型	27	32.5	9	Cl ⁻ · SO ₄ ²⁻ -Na ⁺ · Ca ²⁺ 型	2	2.4								
2	$Cl^- \cdot SO_4^{2-} - Na^+ \cdot Mg^{2+} $	16	19.3	10	SO4 ²⁻ · HCO3 ⁻ · Cl ⁻ -Na ⁺ 型	1	1.2								
3	SO ₄ ²⁻ · Cl ⁻ -Na ⁺ 型	15	18.1	11	$\mathrm{SO_4}^{2-} \cdot \mathrm{HCO_3}^- \cdot \mathrm{Cl}^ \mathrm{Na}^+ \cdot \mathrm{Mg}^{2+} \cdot \mathrm{Ca}^{2+} \mathfrak{V}$	1	1.2								
4	$\mathrm{SO_4}^{2-} \cdot \mathrm{Cl}^ \mathrm{Na}^+ \cdot \mathrm{Mg}^{2+} \mathfrak{W}$	5	6.0	12	SO4 ²⁻ • HCO3 ⁻ -Na ⁺ 型	1	1.2								
5	HCO3 ⁻ · SO4 ²⁻ -Na ⁺ 型	4	4.8	13	SO4 ²⁻ -Na ⁺ 型	1	1.2								
6	HCO3 ⁻ · Cl ⁻ -Na ⁺ 型	3	3.6	14	SO ₄ ²⁻ -Na ⁺ • Mg ²⁺ 型	1	1.2								
7	Cl ⁻ -Na ⁺ 型	3	3.6	15	SO_4^{2-} -Na ⁺ · Mg ²⁺ · Ca ²⁺ 型	1	1.2								
8	Cl ⁻ -Na ⁺ ・Mg ²⁺ 型	2	2.4												

表 3 疏勒河尾闾区地下水化学类型统计值 Table 3 Statistics of hydrochemical types in the tail area of the Shule Rive

(钱声源等,2020)。本次研究的 Pearson 相关性系数矩阵见表 4。由表 4 可知,研究区地下水中的 TDS 与 Na⁺、Cl⁻及 SO₄²⁻ 质量浓度的相关性最强,相 关系数均达到 0.9 以上,说明这三种离子的浓度大 小与空间分布对 TDS 的影响最大。Cl⁻与 Na⁺质量 浓度的相关性显著,相关系数达到 0.9,说明发生了 岩盐的溶解;SO₄²⁻与 Na⁺的质量浓度相关性强,相关 系数为 0.933,说明研究区内产生芒硝等硫酸盐矿 物的溶解作用。

3.2 地下水成因分析

3.2.1 地下水 Gibbs 图

Gibbs 图常用来定性分析地下水化学组分的成

因及变化趋势,判断地下水是否受蒸发浓缩、岩石风 化或者大气降水作用的控制(高帅等,2019)。通过 绘制研究区地下水 Gibbs 图(图 5)可分析得出:大 部分采样点分布于蒸发浓缩作用控制区域,少部分 分布于岩石风化作用控制区域。由此说明,研究区 地下水化学组分的形成主要受控于蒸发浓缩作用影 响,其次为岩石风化作用,大气降水作用影响较小。 另外,还有个别采样点分布于 Gibbs 图的范围之外, 表明研究区地下水除受上述作用的影响外,还可能 受到其它因素的影响,如阳离子交替吸附作用(孙 英等,2019)。

3.2.2 离子比例系数

地下水离子组分之间的比例关系常被用来研究

表 4 疏勒河尾闾区地下水化学参数相关系数矩阵

项目	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	C1 ⁻	SO_4^{2-}	HCO3-	NO ₃ ⁻	总硬度	TDS	pН
K^+	1										
Na^+	0. 785 * *	1									
Ca ²⁺	0. 256 *	0.338**	1								
Mg^{2+}	0.519**	0. 549 * *	0.687**	1							
Cl	0. 690 * *	0.900 * *	0. 583 * *	0.753 * *	1						
$\mathrm{SO_4}^{2^-}$	0. 791 * *	0. 933 * *	0. 253 *	0. 489 * *	0.731 * *	1					
HCO3-	0.314 * *	0. 278 *	-0. 258 *	-0.011	0.106	0.308 * *	1				
NO ₃ ⁻	0.212	0.331 * *	0. 287 * *	-0.011	0.332 * *	0. 239 *	-0. 109	1			
总硬度	0.480**	0. 526 * *	0. 821 * *	0.979 * *	0.756**	0. 455 * *	-0.081	0.073	1		
TDS	0. 797 * *	0. 989 * *	0.438**	0.656 * *	0. 931 * *	0. 928 * *	0. 244 *	0.310**	0. 638 * *	1	
$_{\rm pH}$	-0.143	-0.131	-0. 500 * *	-0. 437 * *	-0. 221 *	-0.171	-0.105	0.124	-0. 484 * *	-0.204	1

	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	e 1 - 1 1			6 4L CL L	D ¹
Table 4 Correlation	coefficient matrix o	i nydrocnemical	parameters in th	ne tall area ol	the Shule	River

注:***在 0.01 级别(双尾),相关性显著;*在 0.05 级别(双尾),相关性显著。表中各离子及总硬度和 TDS 为质量浓度。







水文地球化学问题,定性揭示地下水的成因(蒙琪, 2021)。通过分析地下水中离子比例特征,可以有 效地判断地下水化学组分的来源及其形成过程(尹 子悦等,2018)。本次研究采用的离子比例系数有

$$\frac{\gamma(\text{Cl}^{-})}{\gamma(\text{Na}^{+}) + \gamma(\text{K}^{+})} \quad \text{(II, } \frac{\gamma(\text{HCO}_{3}^{-}) + \gamma(\text{SO}_{4}^{2^{-}})}{\gamma(\text{Ca}^{2^{+}}) + \gamma(\text{Mg}^{2^{+}})} \quad \text{(II, } \frac{\gamma(\text{HCO}_{3}^{-})}{\gamma(\text{SO}_{4}^{2^{-}}) + \gamma(\text{Cl}^{-})} \qquad \text{(II, } \frac{\gamma(\text{HCO}_{3}^{-})}{\gamma(\text{Ca}^{2^{+}}) + \gamma(\text{Cl}^{-})} \qquad \text{(II, } \frac{\gamma(\text{HCO}_{3}^{-}) + \gamma(\text{Mg}^{2^{+}}) - \gamma(\text{HCO}_{3}^{-}) - \gamma(\text{SO}_{4}^{2^{-}})}{\gamma(\text{Ca}^{2^{+}}) + \gamma(\text{Mg}^{2^{+}}) - \gamma(\text{HCO}_{3}^{-}) - \gamma(\text{SO}_{4}^{2^{-}})} \qquad \text{(II, } \frac{\gamma(\text{HCO}_{3}^{-}) + \gamma(\text{HCO}_{3}^{-})}{\gamma(\text{Ca}^{2^{+}}) + \gamma(\text{Mg}^{2^{+}}) - \gamma(\text{HCO}_{3}^{-}) - \gamma(\text{SO}_{4}^{2^{-}})} \qquad \text{(II, } \frac{\gamma(\text{HCO}_{3}^{-}) + \gamma(\text{HCO}_{3}^{-})}{\gamma(\text{Ca}^{2^{+}}) + \gamma(\text{Mg}^{2^{+}}) - \gamma(\text{HCO}_{3}^{-}) - \gamma(\text{SO}_{4}^{2^{-}})} \qquad \text{(II, } \frac{\gamma(\text{HCO}_{3}^{-}) + \gamma(\text{HCO}_{3}^{-})}{\gamma(\text{HCO}_{3}^{-}) + \gamma(\text{HCO}_{4}^{-})} \qquad \text{(II, } \frac{\gamma(\text{HCO}_{3}^{-}) + \gamma(\text{HCO}_{3}^{-})}{\gamma(\text{HCO}_{3}^{-}) + \gamma(\text{HCO}_{4}^{-})} \qquad \text{(II, } \frac{\gamma(\text{HCO}_{3}^{-}) + \gamma(\text{HCO}_{3}^{-})}{\gamma(\text{HCO}_{4}^{-}) + \gamma(\text{HCO}_{3}^{-})} \qquad \text{(II, } \frac{\gamma(\text{HCO}_{3}^{-}) + \gamma(\text{HCO}_{4}^{-})}{\gamma(\text{HCO}_{3}^{-}) + \gamma(\text{HCO}_{4}^{-})} \qquad \text{(II, } \frac{\gamma(\text{HCO}_{3}^{-}) + \gamma(\text{HCO}_{4}^{-})}{\gamma(\text{HCO}_{4}^{-}) + \gamma(\text{HCO}_{4}^{-})} \qquad \text{(II, } \frac{\gamma(\text{HCO}_{4}^{-}) + \gamma(\text{HCO}_{4}^{-})}{\gamma(\text{HCO}_{4}^{-})} \qquad \text{(II, } \frac{\gamma(\text{HCO}_{4}^{-}) + \gamma(\text{HCO}_{4}^{-})}{\gamma(\text{HCO}_{4}^{-}) + \gamma(\text{HCO}_{4}^{-})} \qquad \text{(II, } \frac{\gamma(\text{HCO}_{4}^{-}) + \gamma(\text{HCO}_{4}^{-})}{\gamma(\text{HCO}_{4}^{-}) + \gamma(\text{HCO}_{4}^{-})} \qquad \text{(II, } \frac{\gamma(\text{HCO}_{4}^{-}) + \gamma(\text{HCO}_{4}^{-})}{\gamma(\text{HCO}_{4}^{-}) + \gamma(\text{HCO}_{4}^{-})}} \qquad \text{(II, } \frac{\gamma(\text{HCO}_{4}^{-}) + \gamma(\text{HCO}_{4}^{-})}{\gamma(\text{HCO}_{4}^{-}) + \gamma(\text{HCO}_{4}^{-})}} \qquad \text{(II, } \frac{\gamma(\text{HCO}_{4}^{-}) + \gamma(\text{HCO}_{4}^{-})}{\gamma(\text{HCO}_{4}^{-})} \qquad \text{(II, } \frac{\gamma(\text{HCO}_{4}^{-}) + \gamma(\text{HCO}_{4}^{-})}{\gamma(\text{HCO}_{4}^{-})}} \qquad \text{(II, } \frac{\gamma(\text{HCO}_{4}^{-$$

$$\gamma(Na^{+}) - \gamma(Cl^{-})$$
 值,各离子

的单位采用毫克当量浓度(meg/L)。图 6 中的 1:1

等值线以及线性函数均由 Origin 软件根据 数据自动拟合而成。

$$(1) \ \frac{\gamma(\operatorname{Cl}^{-})}{\gamma(\operatorname{Na}^{+})+\gamma(\operatorname{K}^{+})} \text{f}$$

Cl⁻与(Na⁺+K⁺)的毫克当量浓度比值 可以用来判断地下水中 Na⁺和 K⁺来源于 岩盐的溶解(比值>1)还是硅酸岩的溶解 (比值<1)(吴平等,2019)。由图 6a 可知, 大部分的采样点分布在 1:1 等值线的附近 及上方,少部分采样点分布于 1:1 等值线 的下方,说明研究区地下水中 Na⁺和 K⁺主 要来源于岩盐溶解,其次为硅酸岩的溶 解。

(2)
$$\frac{\gamma(\operatorname{HCO}_{3}^{-})+\gamma(\operatorname{SO}_{4}^{2^{-}})}{\gamma(\operatorname{Ca}^{2^{+}})+\gamma(\operatorname{Mg}^{2^{+}})}$$

(HCO₃⁻+SO₄²⁻)/(Ca²⁺+Mg²⁺)的毫克 当量浓度比值可以用来判断地下水中 Ca²⁺和 Mg²⁺来源于碳酸盐(比值>1)、蒸发 岩和硅酸盐的溶解(比值<1)(刘凯旋等, 2019)。由图 6b 可知,大部分的采样点分 布在 1:1 等值线的下方,少部分采样点分 布于 1:1 等值线的上方,说明研究区地下 水中 Ca²⁺和 Mg²⁺主要来源于岩盐、石膏、 芒硝等蒸发岩及硅酸盐的溶解,其次为大 理岩、灰岩等碳酸盐的溶解。

(3)
$$\frac{\gamma(\text{HCO}_{3}^{-})}{\gamma(\text{SO}_{4}^{2^{-}})+\gamma(\text{Cl}^{-})}$$

HCO₃^{-/}(SO₄²⁻+Cl⁻)的毫克当量浓度比 值可以用来判断地下水中的化学成分主 要来源于

蒸发岩的溶解(比值>1)还是碳酸盐 的溶解(比值<1)(孙英等,2019)。由图 6c可知,采样点均分布在1:1等值线的上方,说明 蒸发岩的溶解对研究区地下水化学成分特征起主导 作用。

(4)
$$\frac{\gamma(\operatorname{Ca}^{2^{+}}) + \gamma(\operatorname{Mg}^{2^{+}}) - \gamma(\operatorname{HCO}_{3}^{-}) - \gamma(\operatorname{SO}_{4}^{2^{-}})}{\gamma(\operatorname{Na}^{+}) - \gamma(\operatorname{Cl}^{-})} \text{ff}$$

阳离子交换作用是形成地下水水化学组分的重要水 文地 球化学 过程 (蒙琪, 2021), 通过计算 $Ca^{2+}+Mg^{2+}-HCO_{3}^{-}-SO_{4}^{2-}$ <u>Na⁺-Cl⁻</u>的毫克当量浓度比值可以判

断地下水中是否发生了阳离子交换作用(刘基等, 2021)。若二者在图中呈现负相关关系,表明地下





水中发生了阳离子交换作用(孙英等,2019)。由图 6d 中可知,研究区地下水水样的斜率为-0.47914, 呈负相关关系,拟合精度高,为0.97693,说明研究 区含水介质中的 Na⁺与地下水中的 Ca²⁺及 Mg²⁺发生 了阳离子交换作用,使得地下水中 Na⁺含量增加, Ca²⁺及 Mg²⁺含量减少。

3.2.3 高氟水成因分析

如前文所述,研究区内浅层高氟水的分布较为 广泛,局部地段地下水中的F⁻离子含量高达3~ 5mg/L。根据F⁻离子质量浓度空间分布图(图7), 其高值区主要分布在疏勒河以北的山前冲洪积平原 以及玉门关—后坑、大马迷兔~湾腰~哈拉齐一带 的洼地湖塘周边。

高氟水的形成一般主要与其原生地质环境背景 有关。研究表明,片麻岩中黑云母含量达 20%-40%,而云母类矿物中含易溶性氟本底值很高(高 丽,2002)。研究区南、北两侧的走廊山脉基岩区广 泛分布太古代-古元古代的片麻岩、黑云母石英片 岩以及奧陶系-志留系的黑云母斜长片麻岩。富含 黑云母的岩石矿物为地下水中的氟离子提供了丰富 的物质来源,而研究区蒸发浓缩主导的水文地球化 学作用是驱动氟离子向浅层地下水中迁移、富集的 重要影响因素,地势低平的汇水洼地为氟的累积提 供了有利的地形条件,该地区地下水位埋深浅,地下 水径流滞缓,在垂向强烈的蒸发作用影响下,有利于 盐分的浓缩和氟的大量富集(巴建文等,2021)。

4 讨论

本次研究主要对疏勒河尾闾区的地下水化学特 征及成因进行了研究分析,通过与地处研究区上游 的玉门-瓜州盆地已有的地下水化学研究成果进行 对比分析,研究两者在地下水化学特征及成因机制 方面的异同,可以进一步系统揭示疏勒河尾闾区地 下水化学参数的变化特征及演化规律。





(1) 疏勒河流域中-下游玉门-瓜州盆地地下水 的 TDS 平均含量为 972mg/L(赵玮等,2015), 到尾 闾区 TDS 平均含量陡然增加, 达到 16184mg/L, 相 差 16 倍之多。与我国内陆河流域地下水演化具有 沿着地下水流动方向 TDS 含量缓慢增大的规律 (Wen Xiaohu et al.,2012)略有不同的是:本次研究 发现从疏勒河中下游到尾闾区地下水的 TDS 含量 快速增加,呈现加速咸化的发展趋势。

(2)中-下游的玉门-瓜州盆地地下水阴离子主 要为 SO²⁻₄及 Cl⁻,阳离子主要为 Na⁺及 Mg²⁺(赵玮 等,2015;张百祖等,2020),而尾闾区的优势阴离子 为 Cl⁻及 SO²⁻,优势阳离子与玉门-瓜州盆地一致。 从中-下游盆地到尾闾区,地下水化学类型由 SO²⁻₄ ·Cl⁻-Na⁺·Mg²⁺型逐渐演变为 Cl⁻·SO²⁻₄-Na⁺型, 反映出沿水流方向,受地下水补给来源的减少、地下 水径流速度的减缓、水岩相互作用时间的延长以及 蒸发浓缩作用的加强导致的水文地球化学的水平分 带性。

(3)中-下游的玉门-瓜州盆地的地下水水化学 演化是由蒸发浓缩作用、岩石风化溶解和阳离子交 换共同作用的结果(赵玮等,2015;张百祖等, 2020),与尾闾区的演化模式相同。不同之处在于, 中下游盆地地下水水化学演化的主控因素是岩石风 化溶解作用(张百祖等,2020),尾闾区则是蒸发浓 缩作用占主导。

(4)岩盐、石膏、芒硝等蒸发岩的溶解对中-下 游玉门-瓜州盆地地下水化学成分的形成起主导作 用(赵玮等,2015;张百祖等,2020),与尾闾区相同。

除此之外,需要说明的是:本次研究结果是基于 2015年11月~2016年8月的采样数据分析所得。 在2017年,随着"疏勒河河道恢复与归束工程"的 投入使用以及双塔水库生态流量的不断下泄,干涸 的疏勒河河道恢复了生机,地表水沿河道向下游持 续径流, 直达尾闾区西端哈拉齐一带, 河道两岸及保 护区内的天然植被逐渐恢复,湿地面积扩大,保卫敦 煌绿洲及文化的生态屏障功能得到有效增强。地表 径流量的加大势必增强了对尾闾区地下水的侧向径 流补给量以及增大了地下水径流速度,除了会引起 地下水位上升外,大量地表水的混入,会使得尾闾区 地下水原有的 TDS、硬度、pH 等化学指标的含量、水 质情况以及水化学类型随之发生较大变化。而本次 研究成果可作为大规模生态输水工程实施前的地下 水化学参数对照值,可作为下一步开展相关调查研 究工作的基础。

5 结论

(1) 疏勒河尾闾区地下水水质总体呈弱碱性, 具有高 TDS 及高硬度的特征,大部分为极硬水以及 盐水~咸水,水化学类型主要为 Cl⁻ · SO₄²⁻ -Na⁺型。 地下水中 Na⁺、Cl⁻及 SO₄²⁻ 与 TDS 的质量浓度相关 性最强,对 TDS 的贡献最大。

(2) 疏勒河尾闾区地下水水化学演化是由蒸发浓缩作用主导、风化溶解和阳离子交换共同作用的结果。地下水中的 Ca²⁺及 Mg²⁺主要来自于岩盐、石

膏、芒硝等蒸发岩及硅酸盐的溶解,其次为大理岩、 灰岩等碳酸盐的溶解。Na⁺主要来源于岩盐溶解, 其次为硅酸岩的溶解。

(3) 疏勒河尾闾区内浅层高氟水分布较为广 泛。片麻岩中普遍存在的黑云母矿物、蒸发浓缩主 导的水文地球化学作用以及地势低洼的地形条件是 形成高氟水的主要原因。

致谢:感谢审稿专家提出的宝贵修改意见!

参考文献 / References

(The literature whose publishing year followed by a "&" is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a "#" is in Chinese without English abstract)

- 巴建文, 闫成云. 2010. 河西走廊平原区地下水中氟的富集规律及 成因探讨. 干旱区资源与环境, 24(3): 93~97.
- 陈文业,赵明,张继强,李广宇,吴三雄,袁海峰,窦英杰,吴婷, 陈旭,罗文莉,朱丽,邴丹珲,冯颖,孙飞达,谈嫣蓉. 2015. 敦煌西湖荒漠-湿地生态系统植被与土壤水分空间异质性研 究.冰川冻土,37(6):1670~1679.
- 程旭学,陈崇希,闫成云,赫明林,喻生波,王有权,贾贵义,曹炳 媛,屈君霞,韩巍,刘海,王志强,赵聚林,蒋文. 2008. 河西 走廊疏勒河流域地下水资源合理开发利用调查评价. 北京:地 质出版社.
- 段浩, 潘世兵, 李琳. 2015. 基于灰色模型的敦煌西湖保护区湿地 演化研究. 干旱区资源与环境, 29(1): 198~202.
- 高丽. 2002. 河西走廊地理环境特点与地方性氟中毒的关系. 中国 地方病学杂志, 21(2): 134~136.
- 高帅,李常锁,贾超,孙斌,张海林,逄伟. 2019. 济南趵突泉泉域 岩溶水化学特征时空差异性研究. 地质学报,93(s1):61~70.
- 刘基,高敏,王强民,杨建,赵春虎. 2019. 呼伦贝尔煤电基地地下 水化学特征及其影响因素. 灌溉排水学报,38(12):78~84.
- 刘凯旋,刘启蒙,柴辉婵,张妹,李竞赢. 2019. 孙疃矿区地下水化 学特征及其控制因素研究. 煤炭工程, ,51(4):74~79.
- 刘普幸,张克新,霍华丽,潘竞虎. 2012. 疏勒河中下游绿洲胡杨林 土壤水盐的空间变化特征与成因. 自然资源学报,27(6):942 ~952.
- 蒙琪. 2021. 石羊河流域中下游浅层地下水水化学特征及其成因. 干旱区资源与环境, 35(3): 80~87.
- 钱声源,张乾坤,陈从建,杨国平. 2020. 焦作地区地下水水化学特征分析及水质评价. 长江科学院院报,37(4):30~36.
- 孙英,周金龙,魏兴,雷米,曾妍妍,马俊,尹鹏. 2019. 巴楚县平 原区地下水水化学特征及成因分析.环境化学,38(11):2601 ~2609.
- 魏水莲,刘新平,赵学勇,张铜会,云建英,张婧,张建鹏,冯静, 苏娜. 2017. 科尔沁沙地奈曼地区地下水水质时空变化特征. 中国沙漠,37(3):571~579.
- 魏玉涛,刘德玉,张伟,喻生波,吴耀坤.2020. 荒漠-湿地生态系 统区盐渍土特征及空间变异性.水文地质工程地质,47(2): 183~190.
- 吴平, 闫中永, 李英, 黄小琴, 徐兆祥, 童彦钊. 2019. 青铜峡市北 部地下水水化学特征及成因分析. 宁夏工程技术, 18(4): 379 ~384.
- 杨俊仓,施锦,陈伟涛.敦煌西湖湿地演化趋势及保护对策. 2014. 兰州大学学报(自然科学版),50(5):716~721.
- 尹子悦,林青,徐绍辉. 2018. 青岛市大沽河流域地下水水化学时

空演化及影响因素分析. 地质论评, 64(4): 1030~1042.

- 袁海峰,庞晓燕,李永华. 2009. 甘肃敦煌西湖国家级自然保护区 作用及现存问题的分析. 湿地科学与管理,5(1):21~23.
- 喻生波,屈君霞. 2020. 敦煌西湖国家级自然保护区湿地土壤盐渍 化特征研究. 干旱区资源与环境,34(6):131~138.
- 张百祖,宋天琪. 2020. 疏勒河流域地下水化学特征及控制因素研究. 人民黄河,42(6):68~78.
- 张继强,陈文业,谈嫣蓉,刘冬皓,袁海峰,王斌杰,刘鸿源,陈旭. 2019. 甘肃敦煌西湖湿地芦苇盐化草甸植物群落生态位特征研究.南京林业大学学报(自然科学版),43(2):191~196.
- 张克新,刘普幸,霍华丽,张锐,曹立国,安建科. 2012. 敦煌绿洲 天然胡杨林下土壤水盐空间变化特征研究. 土壤通报,43(3): 563~570.
- 张伟,刘德玉,喻生波,吴耀坤. 2020. 极端干旱区敦煌西湖湿地土 壤水分特征及空间变异性研究. 甘肃地质, 29(1-2): 79~84.
- 赵玮,何建华,马金珠. 2015. 疏勒河流域玉门-瓜州盆地地下水化 学演化特征. 干旱区研究, 32(1):56~64.
- Ba Jianwen, Yan Chengyun. 2010&. A discussion of the enrichment and formation of fluorine in groundwater in the plain of Hexi corridor. Journal of Arid Land Resources and Environment, 24(3): 93~97.
- Chen Wenye, Zhao Ming, Zhang Jiqiang, Li Guangyu, Wu Sanxiong, Yuan Haifeng, Dou Yingjie, Wu Ting, Chen Xu, Luo Wenli, Zhu Li, Bing Danhun, Feng Ying, Sun Feida, Tan Yanrong. 2015&. Spatial heterogeneity of vegetation and soil moisture in the desertwetland ecosystem in Dunhuang Xihu, Gansu Province, China. Journal of Glaciology and Geocryology, 37(6): 1670~1679.
- Cheng Xuxue, Chen Chongxi, Yan Chengyun, He Minglin, YU Shengbo, Wang Youquan, Jia Guiyi, Cao Bingyuan, Qu Junxia, Han wei, Liu Hai, Wang Zhiqiang, Zhao Julin, Jiang Wen. 2008# . Investigation and assessment of groundwater resources rational exploitation and utilization in Shule River Basin of Hexi corridor. Beijing: Geological Publishing House.
- Duan Hao, Pan Shibin, Li Lin. 2015&. Wetland change forecast in Dunhuang Xihu Nature Reserve based on gray model. Journal of Arid Land Resources and Environment, 29(1): 198~202.
- Gao Li. 2002&. The relationship between endemic fluorosis and geographical environment in the West-river region. Chinese Journal of Endemiology, 21(2): 134~136.
- Gao Shuai, Li Changsuo, Jia Chao, SunBin, Zhang Hailin, Pang Wei. 2019&. Spatiotemporal difference study of karst hydrochemical characteristics in the Baotu Spring area of Jinan. Acta Geologica Sinica, 93(s1): 61~70.
- Liu Ji, Gao Min, Wang Qiangmin, Yang Jian, Zhao Chunhu. 2019&. Hydrochemical characteristics and their influencing factors of groundwater in Hulunbuir coal-electricity base. Journal of Irrigation and Drainage, 38(12): 78~84.
- Liu Kaixuan, Liu Qimeng, Chai Huichan, Zhang Mei, Li Jingying. 2019&. Chemical characteristics and control factors of groundwater in Suntuan coal mine. Coal Engineering, 51(4): 74~79.
- Liu Puxing, Zhang Kexin, Huo Huali, Pan Jinghu. 2012&. Characteristics and causes of the spatial variations of soil water and salt content under populus euphratica Oliv in the middle and lower reaches of the Shule River Basin. Journal of Natural Resources, 27 (6): 942~952.
- Meng Qi. 2021&. Hydrochemical characteristics and controlling factors of the shallow groundwater in the midstream and downstream areas of Shiyang river basin. Journal of Arid Land Resources and Environment, 35(3): 80~87.

- Qian Shengyuan, Zhang Qiankun, Chen Congjian, Yang Guoping. 2020&. Groundwater hydrochemical characteristics and water quality assessment in Jiaozuo. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 37(4): 30~36.
- Sun Ying, Zhou Jinlong, Wei Xing, Lei Mi, Zeng Yanyan, Ma Jun, Yin Peng. 2019&. Hydrochemical characteristics and cause analysis of groundwater in the plain area of Bachu County. Environmental Chemistry, 38(11): 2601~2609.
- Wei Shuilian, Liu Xinping, Zhao Xueyong, Zhang Tonghui, Yun Jianying, Zhang Jing, Zhang Jianpeng, Feng Jing, Su Na. 2017&. Spatial and temporal variability analysis of groundwater quality in Naiman region of Horqin sandy land. Journal of Desert Research, 37 (3): 571~579.
- Wei Yutao, Liu Deyu, Zhang Wei, Yu Shengbo, Wu Yaokun. 2020&. Characteristics and spatial variability of saline soil in desert – wet ecosystem area, Gansu Province, China. Hydrogeology & Engineering Geology, 47(2): 183~190.
- Wen Xiaohu, Diao Meina, Wang De, Gao meng. 2012&. Hydrochemical characteristics and salinization processes of groundwater in the shallow aquifer of Eastern Laizhou Bay, China. Hydrological Processes, 26(15): 2322~2332.
- Wu Ping, Yan Zhongyong, Li Ying, Huang Xiaoqin, Xu Zhaoxiang, Tong Yanzhao. 2019&. Hydrochemical characteristics and formation mechanism of groundwater in the north of Qingtongxia. Ningxia Engineering Technology, 18(4): 379~384.
- Yang Juncang, Shi Jin, Chen Weitao. 2014&. Evolution trend of and protection measures for Dunhuang west lake wetland. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 50(5): 716~721.

Yin Ziyue, Li Qing, Xu Shaohui. 2018&. Spatial-temporal variations

and controlling factors of groundwater hydrochemical characteristics in the Dagu River Basin. Geological Review, 64(4): 1030~1042.

- Yuan Haifeng, Pang Xiaoyan, Li Yonghua. 2009&. Analysis of functions and existing problems of the West Lake National Nature Reserve in Dunhuang, Gansu. Wetland Science & Management, 5 (1): 21~23.
- Yu Shengbo, Qu Junxia. 2020&. Soil salinization characteristics of wetland in Dunhuang Xihu National Nature Reserve. Journal of Arid Land Resources and Environment, 34(6): 131~138.
- Zhang Baizu, Song Tianqi. 2020&. Geochemical evolution of groundwater in the Yumen-Guazhou Region of Shule River Basin. Yellow River, 42(6): 68~78.
- Zhang Jiqiang, Chen Wenye, Tan Yanrong, Liu Donghao, Yuan Haifeng, Wang Binjie, Liu Hongyuan, Chen Xu. 2019&. Niche characteristics of a salinized phragmites communis meadow in a wetland of West Lake, Dunhuang, Gansu Province. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 43(2): 191~196.
- Zhang Kexin, Liu Puxing, Huo Huali, Zhang Rui, Cao Liguo, An Jianke. 2012&. The spatial variations of soil water and saline content under populus euphratica in Dunhuang oasis. Chinese Journal of Soil Science, 43(3): 563~570.
- Zhang Wei, Liu Deyu, Yu Shengbo, Wu Yaokun. 2020&. Study on soil moisture characteristics and spatial variability of wetlands in extremely arid regions. Gansu Geology, 29(1-2): 79~84.
- Zhao Wei, He Jianhua, Ma Jinzhu. 2015&. Geochemical evolution of groundwater in the Yumen-Guazhou Region of Shule River Basin. Arid Zone Research, 32(1): 56~64.

Hydrochemical characteristics and genetic mechanism analysis of groundwater in the tail area of the Shule River, Dunhuang, Gansu

LIU Deyu^{1,2)}, JIA Guiyi²⁾, ZHANG Wei^{1,2)}, YU Shengbo^{1,2)}, WEI Yutao^{1,2)}

1) Key Laboratory of Groundwater Engineering and Geothermal Resources in Gansu Province, Lanzhou, 730050;

2) Gansu Institute of Geological Environment Monitoring, Lanzhou, 730050

Abstract: The tail area of the Shule River is an ecological security barrier to protect Dunhuang Oasis and culture, but there is relatively little research on hydrochemical chemistry. Based on field investigation and sampling test, the hydrochemical characteristics and Genetic Mechanism of groundwater in the tail area of the Shule River were confirmed through the methods of mathematical statistics, Piper trigram, ion correlation analysis, Gibbs diagram, and ion proportion coefficient. The results show that the groundwater quality in the tail area of the Shule River is weakly alkaline, with high total dissolved solids and high hardness, and the main hydrochemical type is $CI^- \cdot SO_4^{2-} - Na^+$. The hydrochemical evolution of groundwater is dominated by evaporation concentration, accompanied by weathering dissolution and cation exchange. Ca^{2+} and Mg^{2+} in groundwater are mainly derived from the dissolution of evaporite and silicate, and Na⁺ is dominated sourced from the dissolution of rock salt. The formation of high fluoride water is related to the widespread biotite minerals in gneiss, hydrogeochemical action dominated by evaporation and concentration, and low-lying topographic conditions. This research not only enrich the study of hydrochemical in the Shule River Basin, but also provide scientific basis for the protection and construction of the ecological security barrier of Dunhuang Oasis.

Keywords: Shule River; tail area; Xihu Nature Reserve; Dunhuang Oasis, Gansu; hydrochemical

Acknowledgements: This study was supported by the Open Fund of Key Laboratory of Groundwater Engineering and Geothermal Resources in Gansu Province(No. 201903)

Firstauthor: LIU Deyu, male, born in 1988, engineer, mainly engaged in hydrogeology research; Email: Ldeyu2010@163.com

Corresponding author: JIA Guiyi, male, born in 1961, professor of engineering, mainly engaged in hydrogeology research; Email: 378002440@ qq. com

Manuscript received on: 2021-07-31; Accepted on: 2021-12-13; Network published on: 2021-12-20

Doi: 10.16509/j.georeview.2021.12.135

Edited by: ZHANG Yuxu