

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkj.2019.0046

范薇,周金龙,曾妍妍,等.塔里木沙漠公路沿线浅层地下水化学特征[J].南水北调与水利科技,2019,17(2):157-165. FAN W,ZHOU J L,ZENG Y Y,et al. Hydrochemical characteristics of shallow groundwater along the Tarim desert highway[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2019,17(2):157-165. (in Chinese)

## 塔里木沙漠公路沿线浅层地下水化学特征

范薇<sup>1,2</sup>,周金龙<sup>1,2</sup>,曾妍妍<sup>1,2</sup>,周殷竹<sup>3</sup>,陈云飞<sup>1,2</sup>,李玲<sup>1,4</sup>,侯珺<sup>1,5</sup>

(1.新疆农业大学水利与土木工程学院,乌鲁木齐 830052;2.新疆水文水资源工程技术研究中心,乌鲁木齐 830052;3.中国地质大学(北京)水资源与环境学院,北京 100083;  
4.新疆工程学院,乌鲁木齐 830052;5.新疆大学资源与环境科学学院,乌鲁木齐 830046)

**摘要:**为研究新疆塔里木沙漠公路沿线浅层地下水水化学特征及其成因,运用数理统计、Piper 三线图、Gibbs 图、相关性分析和离子比值等方法分析研究区 2014 年 20 组浅层地下水水样测试结果,并探讨沙漠公路沿线水化学演化过程的主要控制因素。研究结果表明,浅层地下水中主要阴阳离子为  $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{Na}^+$ ; TDS 介于 543.61~10 249.74 mg/L,平均值为 4 087.58 mg/L;pH 值的范围在 7.11~9.05,平均值为 7.87;总硬度超过 450 mg/L 的水样占 95%;地下水水化学类型以  $\text{SO}_4 \cdot \text{Cl-Na}$  型、 $\text{SO}_4 \cdot \text{Cl-Na} \cdot \text{Mg}$  型和  $\text{SO}_4 \cdot \text{Cl-Na} \cdot \text{Ca}$  型为主;地下水中  $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{Na}^+$  是 TDS 的主要来源,且  $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{Na}^+$  主要来源于岩盐或蒸发岩溶解;各主要离子间均有较好的相关性,其来源具有一致性;大气降水作用对研究区地下水化学组分几乎没有影响,地下水主要受蒸发浓缩和岩石风化作用影响;地下水中主要离子来源受硅酸盐岩和蒸发盐岩风化溶解影响较大,同时受到碳酸盐岩的溶解和阳离子交换作用影响。

**关键词:**水化学特征;饱和指数;成因分析;离子来源;塔里木沙漠公路

中图分类号:P641 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



### Hydrochemical characteristics of shallow groundwater along the Tarim desert highway

FAN Wei<sup>1,2</sup>, ZHOU Jinlong<sup>1,2</sup>, ZENG Yanyan<sup>1,2</sup>, ZHOU Yinzhu<sup>3</sup>, CHEN Yunfei<sup>1,2</sup>, LI Ling<sup>1,4</sup>, HOU Jun<sup>1,5</sup>

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China;  
2. Xinjiang Hydrology and Water Resources Engineering Research Center, Urumqi 830052, China;  
3. School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;  
4. Xinjiang Institute of Engineering, Urumqi 830023, China;  
5. College of Resources and Environmental Science, Xinjiang University, Urumqi 830046, China)

**Abstract:** Desert Highway in Xinjiang, we analyzed the test data of 20 groundwater samples in the study area in 2014 and explored the major controlling factors of the hydrochemical evolution processes along the highway by means of mathematical statistics, Piper triangular diagrams, Gibbs figure, correlation analysis, and ion ratios. The results showed that the major anions and cations in the shallow groundwater were  $\text{SO}_4^{2-}$  and  $\text{Na}^+$ . The total dissolved solids (TDS) concentration ranged from 543.61 to 10 249.74 mg/L with an average value of 4 087.58 mg/L. The pH ranged from 7.11 to 9.05 with an average value of 7.87. 95% of the water samples had a total hardness above 450 mg/L. The major hydrochemical types of groundwater were  $\text{SO}_4 \cdot$

收稿日期:2018-10-09 修回日期:2018-11-30 网络出版时间:2018-12-07

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.tv.20181204.1735.007.html>

基金项目:国家自然科学基金(41662016);中国地质调查局西北地区主要城市地下水污染调查评价(1212011220982)

作者简介:范薇(1993—),女,新疆沙湾人,在读博士,主要从事干旱区地下水资源评价与保护研究。E-mail:597003672@qq.com

通信作者: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、灌区土壤水-盐运移监测与模拟、土壤地球化学等研究工作。E-mail:zjzhoujl@163.com

Cl-Na, SO<sub>4</sub> · Cl-Na · Mg and SO<sub>4</sub> · Cl-Na · Ca, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> and Na<sup>+</sup> were the main sources of TDS, and they were mainly derived from rock salt or evaporite dissolution. All the major ions had good correlation with each other, and their sources were consistent. Atmospheric precipitation had little effect on the chemical composition of groundwater in the study area. The groundwater was mainly affected by evaporation and rock weathering. The main ion source in groundwater was greatly affected by the weathering and dissolution of silicate rock and evaporite rock. It was also affected by the dissolution of carbonate rock and cation exchange.

**Key words:** hydrochemical characteristics; saturation indices; origin analysis; ion source; Tarim desert highway

地下水化学组分是地下水与环境相互作用的产物,了解地下水的化学特征及形成作用,对地下水资源的保护和可持续开发利用具有重要意义<sup>[1]</sup>。塔里木沙漠公路北起新疆维吾尔自治区(以下简称“新疆”)轮台县 314 国道,南连民丰县 315 国道,南北贯通塔克拉玛干沙漠,位于塔里木盆地中部偏东地带,全长 562 km。沙漠公路可以分为北段(绿洲区)、中段(沙漠区)和南段(绿洲区)。为保证其安全运行,国家建立了塔里木沙漠公路防护林生态工程,并采用地下水进行滴灌。前人对沙漠公路沿线沙漠区地下水形成分布规律,地下水化学成分空间分布特征等内容进行了研究<sup>[2-6]</sup>。但目前尚缺乏对该区地下水化学成分形成机制的系统研究,本文综合运用数理统计、Gibbs 图、Piper 三线图及离子比值等方法对塔里木沙漠公路沿线浅层地下水水化学特征及其成因进行分析,以期对地下水资源评价、合理开发利用及生态环境建设提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

塔克拉玛干沙漠位于我国新疆天山与昆仑山、阿尔金山之间的最大内陆盆地—塔里木盆地,呈椭圆形,总面积 33.78 万 km<sup>2</sup>。总体地势西高东低,南高北低。气候干旱少雨,年降水量 10~50 mm,年蒸发为 3 638.6 mm<sup>[7]</sup>。塔里木沙漠地面景观以流动性高大复合沙垄为主,土壤类型绝大部分为流动风沙土。塔里木沙漠公路介于 37°~42°N 和 82°~85°E,基本沿 84°E 呈南北向穿越塔克拉玛干沙漠。

沙漠公路沿线地表水极度匮乏,但地下水储存量较大,据估算,地下水基础储存量为 16.29 亿 m<sup>3</sup>,年动态补给量为 9 671 万 m<sup>3</sup> 至 9 931 万 m<sup>3</sup>。主要含水层类型为:古河道含水层(分布在古河道及其两侧一定范围内,含水层以细砂为主,沉积物相对河间平原颗粒要粗,岩性均匀);河间平原含水层(位于古河道间受洪水泛滥影响地区,含水层有许多黏土、亚黏土夹层,厚度不等,也有细砂);干三角洲平原含水层

(位于沙漠公路南段,纵向沙垄覆盖区,含水层上层有风积砂和水沉积沙交互层,下部属河流冲洪积沉积);风积沙含水层(主要分布在较大古河道区的表层和纵向沙垄覆盖区的上部地层,多属极细砂)。浅层地下水水位埋深较浅(一般小于 10 m),水力坡度平缓(约 1‰~2‰)<sup>[2]</sup>。

浅层地下水主要以第四系松散岩类孔隙潜水形式出现,沙漠内第四系松散沉积物可厚达 400~600 m。盆地中部的巨厚砂土堆积,成为地下水储藏、运移的良好介质场所,而山前河流在向盆地中部流动过程中的大量渗漏则是沙漠中地下水的可靠保证。河流对沙漠地下水的强烈补给仅局限在河流两侧和末端邻近的沙漠边缘地带,对沙漠腹地地下水影响需要有较长时期。地下水补给主要来自沙漠南缘平原区的地下径流,沙漠公路北段沿线浅层地下水形成主要源于塔里木河河水及其中游地区古河道季节洪水补给。沙漠区地下水的排泄,除少数以潜流方式排入塔里木河冲积平原外,主要是通过蒸发和植物蒸腾方式垂直消耗,且这种消耗伴随在整个缓慢的径流过程中<sup>[8]</sup>,塔里木沙漠公路防护林生态工程滴灌水源地并开采也是地下水的排泄方式之一。地下水大致流向为由南向北,至塔里木冲积平原折向东流。

### 1.2 样品采集与处理

2014 年沿塔里木沙漠公路共采集浅层地下水样品 20 组,井深范围为 5~180 m,覆盖公路段 562 km。浅层地下水样品采集点依据《地下水污染调查评价规范(1:50 000—1:250 000)》(DD 2007—01)且遵循区域控制的原则进行布设,采样点分布见图 1。沙漠公路北段取样点包括 X7、X13、X14、X15、X16、X17,中段取样点包括 X8、X9、X10、X11、X12,南段取样点包括 X1、X2、X3、X4、X5、X6、X18、X19、X20。水样严格按《地下水环境监测技术规范》(HL/T 164—2004)进行采集、保存、送样。在开泵 10 min 后进行样品采集,采集样品时用所采集的井水对取样瓶润洗 3~5 次,采用 1 500 mL 聚乙烯瓶取样并原样保存。

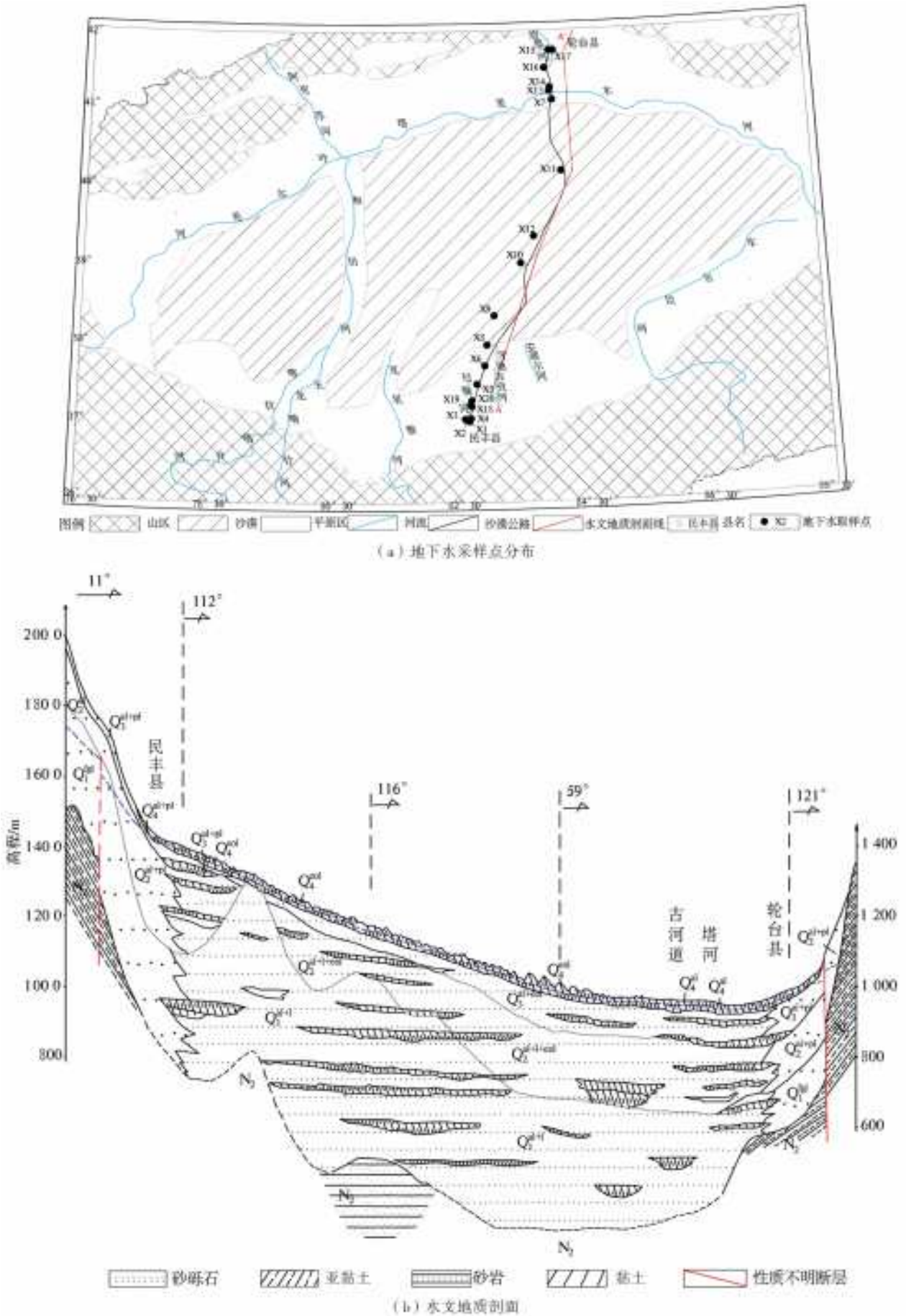


图 1 地下水采样点分布及水文地质剖面

Fig. 1 Distribution of the groundwater samples and hydrogeological sections

### 1.3 分析项目与方法

水样测试严格依据《生活饮用水检验方法》(GB/T5750—2006)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检测,检测项目的选择依据《地下水环境监测技术规范》(HL/T164—2004),包括  $K^+$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $Na^+$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $HCO_3^-$ 、 $Cl^-$ 、 $SO_4^{2-}$ 、 $NO_3^-$ 、pH、TDS 和总硬度(TH)。主要检测仪器为 iCAP6300 等离子体发射光谱仪,pH 检测下限为 0.01,其余项目检测下限均为 0.05 mg/L。采用阴阳离子平衡检验方法对水样数据进行可靠性检验,取阴阳离子平衡的相对误差 E 的绝对值小于 5%为可靠数据,经检验,所有数据均为可靠数据。

## 2 结果与分析

### 2.1 水化学组成特征

各水化学参数统计及检测结果分别见表 1 和表 2。

由表 1 可知,地下水呈弱碱性。研究区地下水水样硬度超过 450 mg/L 的水样占 95%,所以该区地下水硬度类型为极硬水。除地下水点 X7 的  $NO_3^-$  质量浓度(52 mg/L)较高外,整体上  $NO_3^-$  质量浓度较低,说明该区受人类活动影响较小。地下水水体中阳离子各组分质量浓度整体为  $Na^+ > Ca^{2+} > Mg^{2+} > K^+$ ,阴离子质量浓度表现为  $SO_4^{2-} > Cl^- > HCO_3^-$ ,沙漠公路沿线地下水中  $Na^+$  和  $SO_4^{2-}$  质量浓度占明显优势。由图 2、3 可知, $K^+$  质量浓度沿流向呈递减趋势, $Mg^{2+}$ 、 $Na^+$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $SO_4^{2-}$ 、 $Cl^-$  和  $HCO_3^-$  等质量浓度沿流向呈增加趋势,而 pH 沿流向整体有减小趋势,主要是由于在沙漠公路南段受岩石风化作用明显,风化产生较多的碱性物质,使公路南段的 pH 相对较高,TDS 质量浓度沿流向有较大变化,总体呈增加趋势,主要是沿流向随路径增加溶解矿物的增多使水中离子浓度增加而 TDS 也不断增大。

表 1 地下水中主要离子质量浓度统计

Tab. 1 Mass concentration of major ions in groundwater

单位:mg/L

项目	$K^+$	$Ca^{2+}$	$Na^+$	$Mg^{2+}$	$HCO_3^-$	$Cl^-$	$SO_4^{2-}$	$NO_3^-$	TDS	TH	pH
最大值	193.70	552.90	2 170.10	690.70	726.20	2 976.01	3 607.56	52.00	10 249.74	3 786.30	9.05
最小值	3.66	67.30	69.30	24.85	36.62	103.45	226.03	0.40	543.61	292.90	7.11
均值	41.90	227.29	898.92	195.76	230.58	1 251.12	1 281.40	7.99	4 087.58	1 378.82	7.87
中值	33.71	187.40	1 020.80	172.10	126.10	1 368.07	1 117.00	4.73	4 648.51	1 259.00	7.92
标准差	42.97	118.19	620.83	158.15	196.98	817.87	846.42	11.46	2 540.28	896.71	0.47

表 2 地下水中主要离子检测结果

Tab. 2 Detection results of major ions in groundwater

样点编号	井深/m	离子浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )										
		$K^+$	$Na^+$	$Ca^{2+}$	$Mg^{2+}$	$Cl^-$	$SO_4^{2-}$	$HCO_3^-$	$NO_3^-$	TDS	TH	pH
X1	100	8.46	69.30	76.32	24.85	103.45	226.03	36.62	3.60	543.61	292.90	8.11
X2	100	10.37	141.00	176.50	53.50	220.10	485.30	127.60	6.32	1 170.00	661.00	7.81
X3	60	6.85	71.00	152.90	37.49	109.50	419.60	124.60	8.80	881.20	535.90	7.41
X4	35	45.88	207.50	270.80	169.00	281.80	1 123.00	322.10	0.80	2 277.00	1 372.00	7.27
X5	60	35.68	988.60	338.00	273.20	1 930.00	1 106.00	51.66	11.56	4 719.00	1 969.00	7.96
X6	120	43.00	1 255.00	275.40	226.40	1 660.00	1 821.00	60.77	12.76	5 337.00	1 619.00	7.88
X7	30	31.74	1 118.00	271.00	200.00	1 454.00	1 447.00	540.30	52.00	4 862.00	1 501.00	7.33
X8	120	60.35	1 698.00	109.00	153.40	1 885.00	1 689.00	206.60	3.88	5 714.00	903.70	8.00
X9	100	48.72	1 459.00	177.40	214.40	1 858.00	1 595.00	103.30	11.48	5 429.00	1 326.00	7.90
X10	105	56.28	1 248.00	170.30	202.00	1 930.00	1 111.00	97.24	17.60	4 797.00	1 257.00	7.94
X11	120	29.76	1 374.00	197.40	186.70	1 930.00	1 417.00	66.85	0.86	5 180.00	1 261.00	8.14
X12	120	41.90	1 053.00	67.30	67.30	1 319.00	853.70	103.30	9.48	3 502.00	548.90	8.38
X13	60	13.61	608.80	173.80	127.30	868.60	801.70	333.90	0.68	2 780.00	958.30	7.50
X14	60	15.18	473.10	159.90	137.10	700.20	763.50	394.60	1.04	2 468.00	963.30	7.53
X15	45	5.87	162.70	154.20	88.18	542.70	244.60	72.85	2.20	1 254.00	748.10	8.21
X16	180	26.77	1 610.00	552.90	444.60	2 223.00	2 659.00	45.53	0.56	8 565.00	3 213.00	9.05
X17	16	3.66	242.30	228.20	70.47	344.90	639.30	343.00	0.40	1 717.00	860.70	7.11
X18	5	193.70	2 170.10	377.58	690.70	2 976.01	3 607.56	390.61	3.85	10 249.74	3 786.30	8.25
X19	5	66.60	971.40	396.20	373.40	1 269.00	2 257.00	726.20	6.36	5 728.00	2 527.00	7.29
X20	5	93.65	1 057.59	220.66	175.21	1 417.15	1 361.67	464.03	5.58	4 578.02	1 272.30	8.23

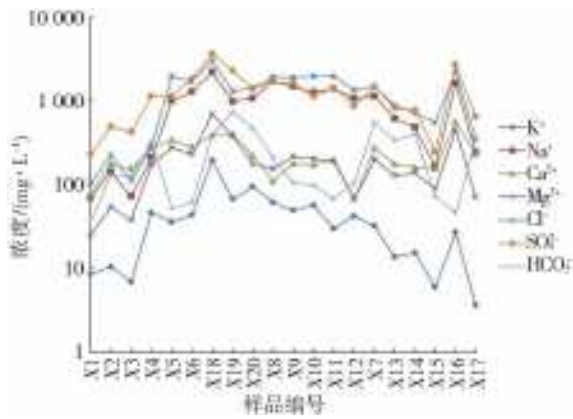


图3 塔里木沙漠公路沿线地下水水化学参数沿流向变化情况  
Fig. 2 Variations of hydrochemical parameters along the flow direction along the Tarim desert highway

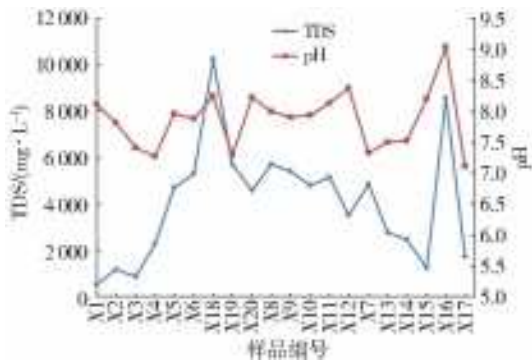


图3 pH及TDS沿流向变化情况  
Fig. 3 Variations of pH and TDS along the flow direction

### 2.2 地下水化学类型

研究区地下水水化学类型,按舒卡列夫法进行分类,沙漠公路北段水化学类型主要有  $SO_4 \cdot Cl-Na \cdot Mg$  型、 $SO_4 \cdot Cl-Na$  型、 $SO_4 \cdot Cl-Na \cdot Ca$  型和  $Cl-Na \cdot Ca \cdot Mg$  型;南段主要有  $SO_4 \cdot Cl-Na \cdot Mg$  型、 $SO_4 \cdot Cl-Na$  型、 $SO_4-Ca$  型、 $SO_4-Na \cdot Ca \cdot Mg$  型和  $SO_4 \cdot Cl-Na \cdot Ca$  型;公路中段沙漠区地下水水化学类型主要为  $SO_4 \cdot Cl-Na$  型。

由图4可以看出,由公路北段至南段,地下水中阳离子趋向于  $Ca^{2+}$  端,阴离子趋向于  $SO_4^{2-}$  端。研究表明,当阴离子多偏向于  $SO_4^{2-}-Cl^-$ ,阳离子多偏向于  $Na^+ + K^+$  时,表示水体受蒸发影响较严重<sup>[9]</sup>。且从公路北段绿洲区至中段沙漠区,地下水中  $SO_4^{2-}$ 、 $Cl^-$  和  $Na^+$  离子浓度呈增加趋势,说明在沙漠区蒸发作用是决定地下水水化学成分的主导作用<sup>[10]</sup>。根据研究区水文地质条件,初步推测该区浅层地下水水化学组分受岩盐和石膏的溶滤作用控制。

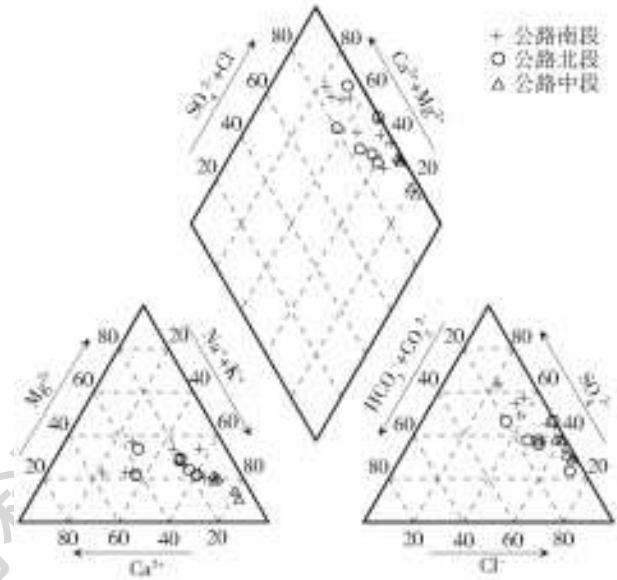


图4 浅层地下水 Piper 三线图  
Fig. 4 Piper diagrams for ions in shallow groundwater

### 2.3 各化学指标间的相互关系

利用 SPSS 软件对浅层地下水水样的水化学参数进行 Spearson 相关系数计算,结果见表3。由表3可知,TDS 与  $Na^+$ 、 $K^+$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $SO_4^{2-}$  和  $Cl^-$  都存在显著正相关关系,其中 TDS 与  $SO_4^{2-}$ 、 $Na^+$  的

表3 地下水中各化学指标间相关关系  
Tab. 3 Correlation coefficients between major ions in groundwater

	$K^+$	$Ca^{2+}$	$Na^+$	$Mg^{2+}$	$HCO_3^-$	$Cl^-$	$SO_4^{2-}$	$NO_3^-$	TDS	TH	pH
$K^+$	1.00										
$Ca^{2+}$	0.34	1.00									
$Na^+$	0.67**	0.39	1.00								
$Mg^{2+}$	0.67**	0.81**	0.75**	1.00							
$HCO_3^-$	0.30	0.17	-0.01	0.04	1.00						
$Cl^-$	0.6**	0.47*	0.93**	0.82**	-0.15	1.00					
$SO_4^{2-}$	0.77**	0.67**	0.87**	0.87**	0.18	0.77**	1.00				
$NO_3^-$	0.39	-0.02	0.19	0.22	-0.03	0.22	0.17	1.00			
TDS	0.72**	0.59**	0.92**	0.88**	0.10	0.87**	0.96**	0.19	1.00		
TH	0.61**	0.9**	0.63**	0.96**	0.16	0.69**	0.84**	0.13	0.79**	1.00	
pH	0.22	-0.12	0.45*	0.18	-0.48*	0.51*	0.19	-0.02	0.30	0.05	1.00

注: \*\*表示在 0.01 上显著相关; \*表示在 0.05 上显著相关。

相关关系最显著,说明  $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{Na}^+$  是 TDS 的主要来源。而  $\text{SO}_4^{2-}$  与  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  和  $\text{Cl}^-$  均有显著相关关系,说明  $\text{SO}_4^{2-}$  与  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  和  $\text{Cl}^-$  有同一来源,可能来源于岩盐或蒸发岩溶解,且该区域地下水较易发生水盐交互运动<sup>[11]</sup>。 $\text{Cl}^-$  与  $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  有显著相关关系,说明  $\text{Cl}^-$  主要来源于  $\text{NaCl}$  和  $\text{MgCl}_2$  等盐岩的风化。各离子间均有较好的相关性,表明其来源具有一致性。

### 3 讨论

#### 3.1 基于 Gibbs 图的地下水中化学成分来源

Gibbs 图是一种半对数坐标图,一般认为离子起源的自然控制因素分为岩石风化型、大气降水控

制型和蒸发—浓缩型<sup>[12]</sup>。由研究区地下水水化学 Gibbs 图(图 5)可以看出,沙漠公路中段(沙漠区)浅层地下水点均分布于蒸发浓缩作用控制区;公路南段(绿洲区)、北段(绿洲区)的浅层地下水主要分布于蒸发浓缩作用控制区,并在岩石风化作用影响下向 Gibbs 图中部移动。由于研究区干旱少雨,大气降水作用对研究区地下水化学组分几乎没有影响。

#### 3.2 基于离子比的地下水中化学成分来源

$(\text{Na}^+ + \text{K}^+)$  与  $\text{Cl}^-$  的毫克当量比值关系可以识别干旱半干旱地区盐化机制。由图 6(a)可以看出,地下水大多数点位于  $\gamma(\text{Na}^+ + \text{K}^+)/\gamma\text{Cl}^- = 1$  的上方,说明研究区地下水中  $\text{Na}^+ + \text{K}^+$  主要来源于岩盐溶解,而极少数点位于  $\gamma(\text{Na}^+ + \text{K}^+)/\gamma\text{Cl}^- = 1$  的

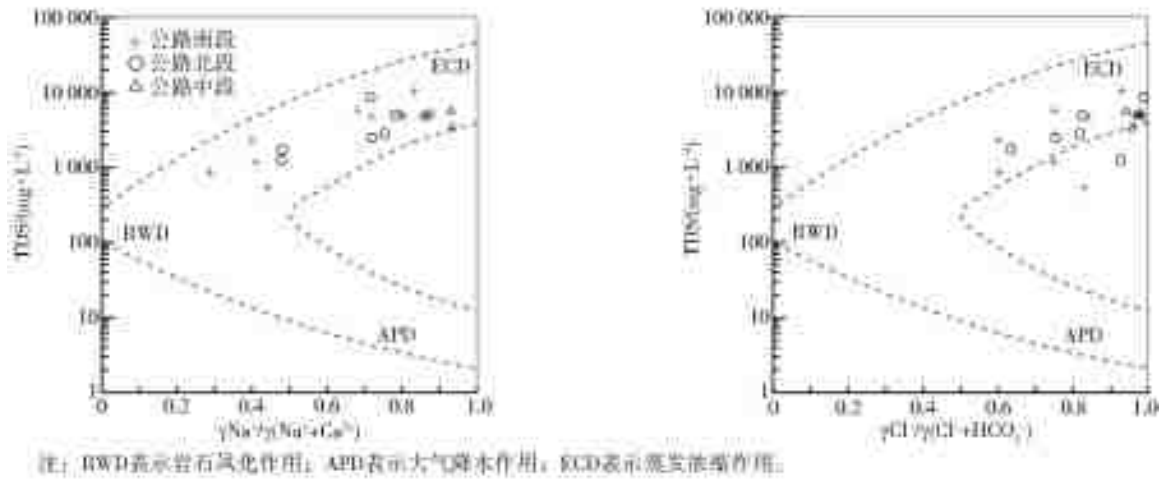


图 5 研究区地下水化学 Gibbs 图

Fig. 5 Gibbs plot of the major ions in the groundwater in study area

下方,说明研究区在发生岩盐溶解的同时还发生着硅酸盐等的溶解<sup>[13]</sup>。地下水中的  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  主要来自含钙和镁的碳酸盐或硅酸盐和蒸发岩的溶解,用  $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$  与  $(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$  的当量浓度比值关系来推断其来源<sup>[14]</sup>。由图 6(b)可以看出,地下水大多数点位于  $\gamma(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/\gamma(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}) = 1$  的下方,说明研究区地下水中的  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  主要来源于硅酸盐和蒸发岩的溶解,部分来自碳酸盐的溶解。 $(\text{SO}_4^{2-} + \text{Cl}^-)$  与  $\text{HCO}_3^-$  的毫克当量比值反映地下水中化学成分的主要来源<sup>[15]</sup>,由图 6(c)可以看出,所有浅层地下水取样点均位于  $\gamma(\text{SO}_4^{2-} + \text{Cl}^-)/\gamma\text{HCO}_3^- = 1$  的左上方,且偏离较远,说明蒸发岩为该区域地下水化学成分的主要来源。 $(\text{Na}^+ - \text{Cl}^-)$  与  $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) - (\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$  的关系常用来判断地下水是否发生阳离子交换作用,若发生阳离子交换作用,其关系将表现出负相关性,斜率为 -1<sup>[16]</sup>。研究区地下水样  $(\text{Na}^+ - \text{Cl}^-)$  与

$(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) - (\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$  有较强的相关关系( $R^2 = 0.7301$ ),且比值在 -1 左右(图 6(d)),说明研究区发生了阳离子交换作用。而大多数地下水样点位于直线下方,说明发生了反阳离子交换作用,即水中的  $\text{Ca}^{2+}$  置换出岩土所吸附的部分  $\text{Na}^+$ ,从而使地下水中的  $\text{Na}^+$  增多而  $\text{Ca}^{2+}$  减少。

#### 3.3 岩石风化源类型

通过  $\gamma\text{Ca}^{2+}/\gamma\text{Na}^+$ 、 $\gamma\text{Mg}^{2+}/\gamma\text{Na}^+$  与  $\gamma\text{HCO}_3^-/\gamma\text{Na}^+$  比值端元图,进一步确定与研究区地下水水化学特征有关的岩石风化源类型。由图 7 可以看出,研究区地下水取样点主要分布在硅酸盐岩和蒸发盐岩控制端元之间,且偏向硅酸盐岩控制端元,其中,沙漠公路北段地下水主要受硅酸盐岩风化溶解作用控制,沙漠公路中段与南段则主要受硅酸盐岩风化溶解作用控制,其次为蒸发盐岩风化。取样点远离碳酸盐岩控制端元,说明研究区地下水主要离子受碳酸盐岩的作用较小。研究表明,水体中  $\text{SO}_4^{2-}$  主要

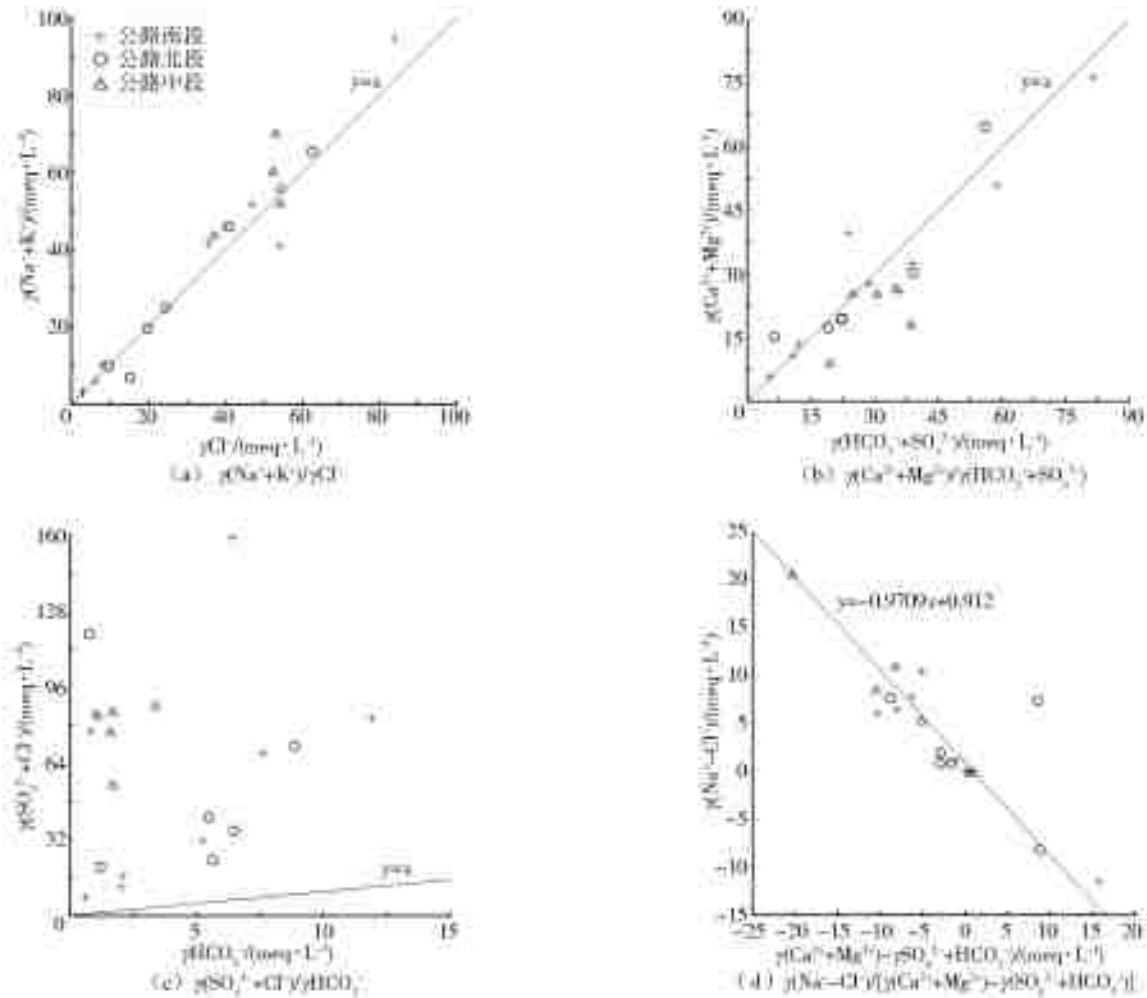


图 6 地下水离子比值相关

Fig. 6 Relationships between the ion ratios of groundwater

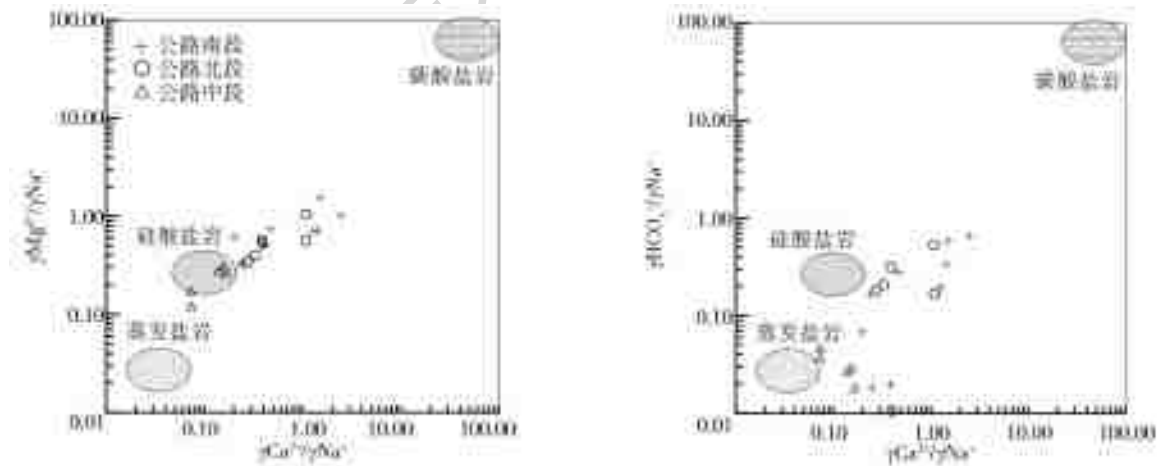


图 7 研究区地下水离子比值端元图

Fig. 7 The end-member diagrams of ion ratios for the groundwater in study area

来源为蒸发岩的溶解;  $\text{Ca}^{2+}$  主要来源于岩石中石灰石和石膏的溶解;  $\text{Mg}^{2+}$  主要来源为碳酸盐、蒸发岩和硅酸盐;  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$  主要来自火成岩或者变质岩, 如钠长石、正长石和云母等硅酸盐矿物, 且两种离子在地下水中比例的增大主要与地下水的蒸发浓缩有关<sup>[17-19]</sup>。

### 3.4 蒸发浓缩作用

由研究区 Gibbs 图可以得知, 地下水水化学主要受蒸发浓缩作用的影响。利用水文地球化学模拟软件 PHREEQC 计算研究区浅层地下水水样的各矿物饱和指数 SI, 用 SI 来进一步确定蒸发浓缩作用对地下水水化学成分的影响。SI > 0 时, 表示该矿物相对

水溶液处于过饱和状态;SI=0 时,表示矿物相对水溶液正好处于平衡状态;SI<0 时,表示该矿物相对水溶液未达到饱和状态,矿物将发生溶解<sup>[20]</sup>。由表 4 可知,方解石(全部取样点)和白云石(X1 除外)SI 值均

大于 0,说明研究区方解石和白云石等碳酸盐矿物处于饱和状态。石膏和岩盐 SI 值均小于 0,说明研究区地下水中石膏和岩盐矿物溶解占主导地位,这与前述分析结果吻合,且与 Zhou<sup>[21]</sup>的研究结果相同。

表 4 地下水中主要矿物的饱和指数

Tab. 4 The saturation index of major minerals in groundwater

编号	方解石	白云石	石膏	岩盐	编号	方解石	白云石	石膏	岩盐
X1	0.07	0.00	-1.30	-6.74	X11	0.43	1.17	-0.66	-4.30
X2	0.57	0.96	-0.81	-6.14	X12	0.47	1.28	-1.17	-4.55
X3	0.14	0.01	-0.87	-6.73	X13	0.55	1.32	-0.80	-4.96
X4	0.49	1.11	-0.49	-5.90	X14	0.63	1.54	-0.84	-5.15
X5	0.40	1.05	-0.55	-4.43	X15	0.67	1.45	-1.17	-5.69
X6	0.25	0.76	-0.44	-4.40	X16	1.22	2.69	-0.14	-4.20
X7	0.68	1.57	-0.52	-4.51	X17	0.36	0.55	-0.68	-5.73
X8	0.50	1.49	-0.86	-4.22	X18	1.38	3.38	-0.27	-3.96
X9	0.33	1.08	-0.67	-4.29	X19	0.86	2.05	-0.28	-4.64
X10	0.37	1.15	-0.80	-4.33	X20	1.40	3.04	-0.61	-4.54

## 4 结 论

(1)塔里木沙漠公路沿线地下水中  $\text{Na}^+$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  质量浓度占明显优势,pH 值的范围在 7.11~9.05,属于弱碱性水;TDS 变化范围 543.61~10 249.74 mg/L,总体为微咸水-咸水;总硬度超过 450 mg/L 的水样占 95%,属于极硬水。

(2)塔里木沙漠公路沿线地下水水化学类型以  $\text{SO}_4 \cdot \text{Cl} \cdot \text{Na}$  型、 $\text{SO}_4 \cdot \text{Cl} \cdot \text{Na} \cdot \text{Mg}$  型和  $\text{SO}_4 \cdot \text{Cl} \cdot \text{Na} \cdot \text{Ca}$  型为主,地下水主要受蒸发浓缩和岩石风化作用影响,地下水中主要离子来源受硅酸盐岩和蒸发盐岩风化溶解影响较大,同时受到碳酸盐岩的溶解影响。

(3)研究区地下水中  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  主要来源于硅酸盐和蒸发岩的溶解。研究区地下水水化学特征还受阳离子交换作用影响。

### 参考文献(References):

- [1] ZHANG F, JIN Z D, HU G, et al. Seasonally chemical weathering and  $\text{CO}_2$  consumption flux of Lake Qinghai river system in the northeastern Tibetan Plateau[J]. Environmental Earth Sciences, 2009 (59): 297-313. DOI:10.1007/s12665-009-0027-3.
- [2] 范敬龙,徐新文,雷加强,等.塔里木沙漠公路沿线地下水流速流向测定[J].工程勘察,2009,37(8):51-55. (FAN J L, XU X W, LEI J Q, et al. Measuring the velocity and direction of groundwater along Tarim desert highway[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2009,37(8):51-55. (in Chinese))

- [3] 范敬龙,徐新文,雷加强,等.塔里木沙漠公路沿线地下水空间变异性及分布规律研究[J].干旱区资源与环境,2009,23(10):137-142. (FAN J L, XU X W, LEI J Q, et al. Spatial variability and distribution of groundwater along the Tarim desert highway[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2009, 23(10): 137-142. (in Chinese)) DOI:10.13448/j.cnki.jalre.2009.10.018.
- [4] 中国石油天然气总公司塔里木石油勘探开发指挥部.塔里木沙漠石油公路[M].北京:石油工业出版社,1996. (China National Petroleum Corporation Tarim Petroleum Exploration and Development Headquarters. Tarim desert oil highway[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1996. (in Chinese))
- [5] 杜虎林,马振武.塔里木沙漠公路与沙漠油田区域水资源研究及其利用评价[M].北京:海洋出版社,2005. (DU H L, MA Z W. Research and utilization evaluation of regional water resources in Tarim desert highway and desert oilfield[M]. Beijing: Ocean Press, 2005. (in Chinese))
- [6] 中国科学院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. (Comprehensive scientific expedition of the taklimakan desert of the chinese academy of sciences. evaluation and utilization of water resources in the taklimakan desert area[M]. Beijing: Science Press, 1993. (in Chinese))
- [7] 李江风.塔克拉玛干沙漠和周边山区天气气候[M].北京:科学出版社,2003:201-574. (LI J F. Weather and climate in the Taklimakan desert and surrounding mountains



- [M]. Beijing: Science Press, 2003: 201-574. (in Chinese))
- [8] 范敬龙, 雷加强, 金小军, 等. 塔克拉玛干沙漠浅层地下水位对单井抽水的响应过程研究[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(9): 45-50. (FAN J L, LEI J Q, JIN X J, et al. Response process of shallow groundwater level to single well pumping in Taklimakan desert[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2012, 26(9): 45-50. (in Chinese)) DOI: 10. 13448/j. cnki. jalre. 2012. 09. 033.
- [9] 张利田, 陈静生. 我国河水主要离子组成与区域自然条件的关系[J]. 地理科学, 2000, 20(3): 236-240. (ZHANG L T, CHEN J S. The relationship between the composition of the major ion of river of China and regional natural factors[J]. Scientia Geographica Sinica, 2000, 20(3): 236-240. (in Chinese)) DOI: 10. 13249/j. cnki. sgs. 2000. 03. 007.
- [10] 高业新, 王贵玲, 刘花台, 等. 石羊河流域的水化学特征及其地表水与地下水的相互转化[J]. 干旱区资源与环境, 2006, 20(6): 84-88. (GAO Y X, WANG G L, LIU H T, et al. Analysis the interaction between the unconfined groundwater and surface water based on the chemical information along the Shiyang River, northwestern China[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2006, 20(6): 84-88. (in Chinese)) DOI: 10. 13448/j. cnki. jalre. 2006. 06. 016.
- [11] 郜银梁, 陈军锋, 张成才, 等. 黑河中游灌区水化学空间变异特征[J]. 干旱区地理, 2011, 34(4): 575-583. (GAO Y L, CHEN J F, ZHANG C C, et al. Hydrochemical characteristics of the irrigation area in the middle reaches of the Heihe River basin[J]. Arid Land Geography, 2011, 34(4): 575-583. (in Chinese)) DOI: 10. 13826/j. cnki. cn65-1103/x. 2011. 04. 003.
- [12] LASAGA A C, SOLER J M, GANOR J, et al. Chemical weathering rate laws and global geochemical cycles[J]. Geochimica Et Cosmochimica Acta, 1994, 58(10): 2361-2386. DOI: 10. 1016/0016-7037(94)90016-7.
- [13] 张艳, 吴勇, 杨军. 阆中市思依镇水化学特征及其成因分析[J]. 环境科学, 2015, 36(9): 3230-3237. (ZHANG Y, WU Y, YANG J. Hydrochemical characteristics and reasoning analysis in Siyi Town, Langzhong City[J]. Environmental Science, 2015, 36(9): 3230-3237. (in Chinese)) DOI: 10. 13227 j. hjkx. 2015. 09. 014.
- [14] JALALI M. Chemical characteristics of groundwater in parts of mountainous region, Alvand, Hamadan, Iran[J]. Environmental Geology, 2006, 51(3): 433-446. DOI: 10. 1007/s00254-006-0338-6.
- [15] 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. (LUAN F J, ZHOU J L, JIA R L, et al. Hydrochemical characteristics and formation mechanism of groundwater in plain areas of Barkol-Yiwu basin, Xinjiang[J]. Environmental Chemistry, 2017, 36(2): 380-389. (in Chinese)) DOI: 10. 7524/j. issn. 0254-6108. 2017. 02. 2016062001.
- [16] XIAO J, JIN Z D, ZHANG F. Hydrochemical characteristics, controlling factors and solute sources of groundwater within the Tarim River basin in the extreme arid region, NW Tibetan Plateau[J]. Quaternary International, 2015, 380-381(5): 237-246. DOI: 10. 1016/j. quaint. 2015. 01. 021
- [17] 孙从建, 陈若霞, 张子宇, 等. 山西浅层地下水水化学特性时空变化特征分析[J]. 干旱区地理, 2018, 41(2): 314-324. (SUN C J, CHEN R X, ZHANG Z Y, et al. Temporal and spatial variation of hydrochemical characteristics of shallow groundwater in Shanxi Province[J]. Arid Land Geography, 2018, 41(2): 314-324. (in Chinese)) DOI: 10. 13826/j. cnki. cn65-1103/x. 2018. 02. 012.
- [18] 崔小顺, 郑昭贤, 程中双, 等. 穆兴平原北区浅层地下水水化学分布特征及其形成机理[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(4): 146-153. (CUI X S, ZHENG Z X, CHENG Z S, et al. Hydrochemical distribution characteristics of shallow groundwater in the north of Muling-Xingkai plain and their formation mechanism[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(4): 146-153. (in Chinese)) DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 2018. 0108.
- [19] 李潇瀚, 张翼龙, 王瑞, 等. 呼和浩特盆地地下水水化学特征及成因[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(4): 136-145. (LI X H, ZHANG Y L, WANG R, et al. Hydrochemical characteristics and formation mechanism of groundwater in Hohhot basin[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(4): 136-145. (in Chinese)) DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 2018. 0107.
- [20] 曾妍妍, 周金龙, 贾瑞亮, 等. 新疆祁漫塔格地区地表水水化学特征及成因分析[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(6): 64-70. (ZENG Y Y, ZHOU J L, JIA R L, et al. Hydrochemical characteristics and causes of surface water in Qimantage area, Xinjiang[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2017, 31(6): 64-70. (in Chinese)) DOI: 10. 13448/j. cnki. jalre. 2017. 180.
- [21] ZHOU P P, WANG Z M, ZHANG J Y, et al. Study on the hydrochemical characteristics of groundwater along the Taklimakan desert highway[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75: 1378. DOI: 10. 1007/s12665-016-6204-2.