### DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2016.07.2015110301

郭巧玲,熊新芝,姜景瑞.窟野河流域地表水-地下水的水化学特征[J].环境化学,2016,35(7);1372-1380 GUO Qiaoling, XIONG Xinzhi, JIANG Jingrui. Hydrochemical characteristics of surface and ground water in the Kuye River Basin [J]. Environmental Chemistry, 2016, 35(7): 1372-1380

2016

# **窟野河流域地表水-地下水的水化学特征**\*

郭巧玲1\*\* 能新芝1 姜景瑞2

(1. 河南理工大学资源环境学院, 焦作, 454003; 2. 河南省地矿局第三地质矿产调查院, 信阳, 640000)

摘 要 通过对窟野河流域地表水和地下水样品进行水化学分析,探讨了该流域不同水体水化学特征和主要 离子来源.结果表明,地表水与地下水均偏弱碱性.河水的水质类型由上游的 Na<sup>+</sup>-Ca<sup>2+</sup>-HCO<sub>3</sub>-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 型演变为下 游的 Na<sup>+</sup>-Ca<sup>2+</sup>-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>-HCO<sub>3</sub>型.上游矿井水距离河道 5 km 以内的水化学类型与河水较为相近为 Ca<sup>2+</sup>-Na<sup>+</sup>-HCO<sub>3</sub> 型;大于5 km 的水化学类型为 Ca<sup>2+</sup>-Mg<sup>2+</sup>-HCO;型.随着距离的增大,矿井水与河水的联系减弱.上游生活用水 井深小于180 m 且距离河道小于1 km 的地下水水化学特征与河水较为相似,为 Na\*-Ca2+-HCO、-SO4-型;井深 大于 180 m 且距离河道大于 1 km 的水化学类型为 Ca<sup>2+</sup>-Na<sup>+</sup>-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>-HCO<sub>3</sub> 型和 Ca<sup>2+</sup>-Na<sup>+</sup>-HCO<sub>3</sub>-Cl<sup>-</sup>型,与河水有 一定的差距.下游灌溉用水水化学类型为 Na\*-Ca2+-SO2--HCO3型,与下游河水水质一致.上游河水与地下水, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>与Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>,Ca<sup>2+</sup>与Mg<sup>2+</sup>相关性较强,说明这些离子同源,可能来源于含有碳酸盐、石膏的岩石中,印证 了矿物溶解和阳离子交换对水化学演化的影响;下游河水与地下水,K\*与SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、Cl<sup>-</sup>相关性较强,且K\*、Ca<sup>2+</sup>、 Na<sup>+</sup>相互间均呈现正相关,这些阳离子可能来源于含长石的砂岩.

关键词 水化学,河水,地下水,相关性分析, 窟野河流域.

# Hydrochemical characteristics of surface and ground water in the Kuye River Basin

GUO Qiaoling<sup>1\*\*</sup> XIONG Xinzhi<sup>1</sup> JIANG Jingrui<sup>2</sup>

(1. Institute of Resource & Environment, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, 454003, China; 2. No.3 Institute of Geological & Mineral Resources Survey of Henan Geological Bureau, Xinyang, 640000, China)

Abstract: This paper investigated hydrochemical characteristics and sources of major ions both of the surface water and groundwater samples in Kuye River Basin. The results showed that surface water and groundwater were weak alkaline. The hydrochemical type of river water transformed from Na<sup>+</sup>-Ca<sup>2+</sup>-HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> to Na<sup>+</sup>-Ca<sup>2+</sup>-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>-HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> from upstream to downstream. The hydro chemical type of the mine water in the upstream of the river within 5 km distance was similar to the river water and belonged to Ca<sup>2+</sup>-Na<sup>+</sup>-HCO<sub>3</sub>, but changed to Ca<sup>2+</sup>-Mg<sup>2+</sup>-HCO<sub>3</sub> when the distance was greater than 5 km. With increasing distance, the connection between mine water and river water became weak. The hydrochemical type of the domestic water in the mining area was similar to that of the river water and belonged to Na<sup>+</sup>-Ca<sup>2+</sup>-HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> when the distance was within 1 km and depth within 180 m. It changed to Ca2+-Na+-SO4--HCO3 and Ca2+-Na+-HCO3-Cl- when the distance was more than 1 km

\*国家自然科学基金(41201020),河南省高校科技创新团队支持计划项目(15IRTSTHN027).

Corresponding author, Tel: 15538992635, E-mail: guoqiaoling@ hpu.edu.cn.

<sup>2015</sup>年11月3日投稿(Received: November 3, 2015).

Supported by the National Natural Science Foundation of China (41201020) and Technological Innovation Team of Colleges and Universities in Henan Province of China(15IRTSTHN027).

<sup>\* \*</sup> 通讯联系人,Tel:15538992635, E-mail: guoqiaoling@hpu.edu.cn.

and depth than 180 m. Correlation analysis showed that  $SO_4^{2-}$  was significantly correlated with  $Mg^{2+}$ , and  $Ca^{2+}$  was significantly correlated with  $Mg^{2+}$  in river water and groundwater in upstream. It suggested that these ions came from the same source in the rocks containing carbonate and gypsum, which confirmed that mineral dissolution and cation exchange impacted the water chemical evolution.  $K^+$  was significantly correlated with  $SO_4^{2-}$  and  $Cl^-$ . At the same time  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$  and  $Na^+$  were positively correlated in river water and groundwater in downstream, The cations may have come from sandstone containing feldspar.

Keywords: hydrochemical, river water, groundwater, correlation analysis, Kuye River.

水资源是基础性的自然资源和战略性的经济资源,是制约我国干旱半干旱地区生态环境建设与社 会经济可持续发展的重要因素<sup>[1-2]</sup>.长期以来,在气候变化和以水资源开发利用为核心的人类活动影响 下,产生了一系列生态环境负效应<sup>[3-4]</sup>.天然水的化学成分是水在循环过程中与周围环境长期相互作用 的结果,地下水与地表水相互转化过程中,水中溶解的物质伴随水量的交换同步进行.水化学组成在一 定程度上记录着水体形成、运移的历史<sup>[5]</sup>.掌握水循环系统的水化学演化过程,明确地表水与地下水的 转化规律,对维持干旱半干旱区生态系统的健康稳定有着极其重要的现实意义<sup>[67]</sup>.

窟野河位于黄土高原水蚀风蚀交错区,流域内植被稀少,侵蚀严重,地形切割破碎,属于干旱半干旱 过渡带,降水稀少且暴雨集中,水土流失异常严重,生态环境极其脆弱<sup>[8]</sup>.流域内煤炭资源十分丰富,著 名的神府东胜煤田位于窟野河流域的矿区面积 2482 km<sup>2</sup>,这里的煤炭,具有埋藏浅、易开采、煤质优等特 点.20世纪 80年代年均煤炭开采量约为 29×10<sup>4</sup> t,21 世纪初的开采量一直保持在 5000×10<sup>4</sup> t以上, 2010年后更是超过了 10000×10<sup>4</sup> t<sup>[9-10]</sup>.随着煤炭资源的大规模开采,流域水资源供需矛盾日益突出,河 川径流显著减少甚至断流,严重威胁到流域的生态环境与社会经济的可持续发展<sup>[11]</sup>.目前,对窟野河流 域的研究主要集中在径流<sup>[12-13]</sup>、泥沙<sup>[14-15]</sup>和洪水<sup>[16-17]</sup>等方面,关于水文地球化学和水体主要离子的资 料积累较少.

本文通过现场调查取样,实验室水样化学成分测定,分析窟野河流域不同水体的水化学特征,揭示 流域水循环特征,为流域水资源评价、管理和水资源的合理开发利用提供科学依据.

# 1 实验部分(Experimental section)

### 1.1 研究区概况

窟野河是黄河中游河——龙区间右岸一级支流,发源于内蒙古自治区伊克昭盟东胜市,从神木县石 圪台进入陕西境内,于陕西省神木县贺家川镇沙峁头村汇入黄河.支流悖牛川在神木县店塔镇北与干流 交汇,交汇口以上称乌兰木伦河,交汇口以下为窟野河.河长 241.8 km,流域面积 8706 km<sup>2</sup>,属温带干旱 半干旱大陆性季风气候<sup>[18]</sup>.其中,乌兰木伦河与悖牛川为窟野河上游,干流为窟野河下游.流域上游沙丘 连绵,风沙较大;下游千沟万壑、支离破碎<sup>[19]</sup>.流域内煤炭资源丰富,主要分布在上游乌兰木伦河两侧, 下游神木县至入黄口主要为农业区.

流域上游分布的地层有中生界的侏罗系、白垩系和新生界的新近系、第四系.该区主要含水层有第 四系全新统冲洪积潜水含水层,上更新统萨拉乌苏组含水层,侏罗系烧变岩含水层,延安组基岩风化裂 隙和砂岩孔裂隙含水层.其中萨拉乌苏组和侏罗系烧变岩含水层,埋藏较浅,均位于浅部主采煤层附近, 是上游矿区重要的生态水源和供水水源<sup>[20]</sup>.流域下游分布的地层有中生界的三叠系、侏罗系和新生界 的新近系、第四系.区内主要含水层为第四系全新统冲积层孔隙潜水、中更新统风积黄土裂隙孔洞潜水 和侏罗系、三叠系碎屑岩孔隙裂隙水.

### 1.2 样品采集

依据窟野河水系特征、水文地质条件及不同河段人类活动的差异,分别在乌兰木伦河、悖牛川和窟 野河采样.乌兰木伦河沿岸矿区密集,地下水采集矿井水和生活用水两类.窟野河沿岸分布大量农田,主 要依靠大口井灌溉,地下水采集为灌溉水.2014年9月与2015年7月对整个窟野河流域进行调查并采 集样品 75个,其中河水样品 34个(乌兰木伦河 11个,悖牛川 4个,窟野河 19个),地下水 41个(乌兰木 伦河生活用水 15个,矿井水 11个;悖牛川生活用水 2个;窟野河灌溉用水 13个).河水样品主要沿流域 地形由上游到下游,地下水主要取自现有的生活水井或灌溉水井,矿井水取自矿区工作面.采样过程中 对各取样点进行 GPS 定位(经纬度,高程),采样点分布情况见图 1.采集水样时,将取样瓶先用水样清洗 3次,保证样品瓶中不含气泡后密封.



图 1 窟野河流域取样点分布 Fig.1 Distribution of sampling sites in Kuye River Basin

1.3 样品分析

采用 SX731 型便携式电导率仪现场测定水温、pH 值、TDS(总溶解固体)和 EC(电导率).样品的基本离子分析包括: $CO_3^{2-}$ 、HCO<sub>3</sub>、Cl<sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>.其中,CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>、HCO<sub>3</sub>采用酸碱指示剂法测试,SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>采用重量法测定,Cl<sup>-</sup>采用硝酸银滴定法测定,K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>样品用 0.45  $\mu$ m 针筒式滤膜过滤器过滤后采用原子吸收分光光度计测定.每个离子重复做 3 次,取其平均值.

## 2 结果与讨论(Results and discussion)

## 2.1 水化学特征

2.1.1 河水的化学特征

测定不同河段河水的化学成分,分析河水水化学特征随空间的变化.主要的水化学指标统计结果见表 1,河水 pH 值变化范围为 7.64—9.29,均呈弱碱性,悖牛川河段、窟野河河段和乌兰木伦河河段 pH 均值依次为 8.99、8.17 和 8.10.在弱碱性条件下,由水中溶解 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>和 HCO<sub>3</sub> 的平衡关系可知,CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>含量较少,不足二者总量的 5%,因而本研究中忽略不计<sup>[21]</sup>.

乌兰木伦河河水电导率变化范围为 859—1467 µs·cm<sup>-1</sup>,均值为 1112.82 µs·cm<sup>-1</sup>,TDS 变化范围为 578—1040 mg·L<sup>-1</sup>,均值为 776.91 mg·L<sup>-1</sup>.阳离子质量浓度大小依次为:Na<sup>+</sup>>Ca<sup>2+</sup>>Mg<sup>2+</sup>>K<sup>+</sup>,平均浓度分 别为 64.50、32.00、8.71、5.00 mg·L<sup>-1</sup>;阴离子质量浓度大小依次为:HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>>Cl<sup>-</sup>,平均浓度分别为 385.99、149.74、60.23 mg·L<sup>-1</sup>.水体主要离子组成中以 Na<sup>+</sup>和 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 占绝对优势,分别占阳离子和阴离子 总量的 64.77%和 58.58%.

35 卷

悖牛川河水电导率变化范围为 725—1470 μs·cm<sup>-1</sup>,均值为 1211.75 μs·cm<sup>-1</sup>, TDS 变化范围为 491—1030 mg·L<sup>-1</sup>,均值为 847.25 mg·L<sup>-1</sup>.此河段电导率和 TDS 变化范围均较大,主要是由于悖牛川的 采样点有一个为悖牛川的支流,其电导率和 TDS 较悖牛川偏小.阳离子质量浓度大小依次为:Na<sup>+</sup>>Ca<sup>2+</sup>> Mg<sup>2+</sup>>K<sup>+</sup>,平均浓度分别为 120.20、56.68、10.23、3.20 mg·L<sup>-1</sup>;阴离子质量浓度大小依次为:HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>> Cl<sup>-</sup>,平均浓度分别为 175.58、150.71、81.33 mg·L<sup>-1</sup>.水体主要离子组成中以 Na<sup>+</sup>和 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 占优势,分别占 阳离子和阴离子总量的 63.15%和 43.08%.

窟野河河水电导率变化范围为 886—1616 μs·cm<sup>-1</sup>,均值为 1089.68 μs·cm<sup>-1</sup>, TDS 变化范围为 487—1160 mg·L<sup>-1</sup>,均值为 749.53 mg·L<sup>-1</sup>.阳离子质量浓度大小依次为:Na<sup>+</sup>>Ca<sup>2+</sup>>Mg<sup>2+</sup>>K<sup>+</sup>,平均浓度分 别为 110.89、65.99、17.04、5.42 mg·L<sup>-1</sup>;阴离子质量浓度大小依次为:HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>>Cl<sup>-</sup>,平均浓度分别为 270.18、232.02、63.91 mg·L<sup>-1</sup>.水体主要离子组成中以 Na<sup>+</sup>和 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 占优势,分别占阳离子和阴离子总量 的 55.63%和 47.73%.

一般而言,从上游至下游随着蒸发作用的持续,地表水的矿化度会增大.研究区上游悖牛川和乌兰 木伦河的电导率与 TDS 平均值比窟野河段大,这可能与不同区域自然地理条件的差异及人类活动有关. 上游河道两岸工业区分布密集,特别是煤矿开采产生的废水等对地表水产生较大影响.

Table 1         Mean values of chemical compositions of river water in Kuye River											
		<b>U</b>	EC/	TDS/	主要离子浓度 Major ion concentration/(mg·L <sup>-1</sup> )						
		рп	$(\mu S\!\boldsymbol{\cdot}\!\mathrm{cm}^{-1})$	$(mg \cdot L^{-1})$	$SO_4^{2-}$	$HCO_3^-$	Cl-	Ca <sup>2+</sup>	${ m Mg}^{2+}$	$Na^+$	$K^+$
乌兰木伦河	最小值	7.86	859.00	578.00	121.37	268.40	41.24	19.62	6.26	26.12	4.23
	最大值	8.23	1467.00	1040.00	317.99	513.77	73.19	53.54	14.72	121.59	5.67
	平均值	8.10	1112.82	776.91	149.74	385.99	60.23	32.00	8.71	64.50	5.00
悖牛川	最小值	8.31	725.00	491.00	135.10	139.37	14.44	37.82	7.29	41.58	2.61
	最大值	9.29	1470.00	1030.00	182.18	256.88	117.18	81.66	14.28	162.54	3.54
	平均值	8.99	1211.75	847.25	150.71	175.58	81.33	56.68	10.23	120.20	3.20
窟野河	最小值	7.64	886.00	487.00	137.84	226.82	35.88	22.66	9.43	35.44	3.44
	最大值	8.92	1616.00	1160.00	419.17	317.00	95.49	141.90	32.46	138.54	7.20
	平均值	8.17	1089.68	749.53	232.02	270.18	63.91	65.99	17.04	110.89	5.42

#### 表1 窟野河河水水化学特征统计表

2.1.2 地下水的化学特征

野外实地测试时,除了乌兰木伦河距离河道 998 m,深 132 m 的一口生活水井 pH 值为 6.76 外,其余 测点均呈弱碱性. 窟野河地下水的主要水化学指标统计结果见表 2.乌兰木伦河段地下水采集了生活用 水与矿井水两类,生活用水取自 80—280 m 的井水,距离河道 100—1500 m 之间.生活用水电导率变化 范围为 208—1504  $\mu$ s·cm<sup>-1</sup>,均值为 830.67  $\mu$ s·cm<sup>-1</sup>,TDS 变化范围为 296—1070 mg·L<sup>-1</sup>,均值为 626.07 mg·L<sup>-1</sup>.阳离子质量浓度大小依次为:Na<sup>+</sup>>Ca<sup>2+</sup>>Mg<sup>2+</sup>>K<sup>+</sup>,平均浓度分别为 37.00、23.04、6.13、 2.22 mg·L<sup>-1</sup>;阴离子质量浓度大小依次为:HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>>Cl<sup>-</sup>>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>,平均浓度分别为 272.85、101.45、 61.54 mg·L<sup>-1</sup>.水体主要离子组成中以 Na<sup>+</sup>和 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 占绝对优势,分别占阳离子和阴离子总量的 63%和 54.11%.矿井水电导率变化范围为 304—1365  $\mu$ s·cm<sup>-1</sup>,均值为 541.82  $\mu$ s·cm<sup>-1</sup>,TDS 变化范围为 203—847 mg·L<sup>-1</sup>,均值为 306.36 mg·L<sup>-1</sup>.阳离子质量浓度大小依次为:Ca<sup>2+</sup>>Na<sup>+</sup>> Mg<sup>2+</sup>>K<sup>+</sup>,平均浓度分别为 46.44、24.42、12.39、2.55 mg·L<sup>-1</sup>;阴离子质量浓度大小依次为:HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>>Cl<sup>-</sup>,平均浓度分别为241.84、 38.98、6.8 mg·L<sup>-1</sup>.水体主要离子组成中以 Ca<sup>2+</sup>和 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 占绝对优势,分别占阳离子和阴离子总量的 54.13%和 84%.

悖牛川采集的地下水样为生活用水,井深 20—30 m.电导率变化范围为 714—890 μs·cm<sup>-1</sup>,均值为 802 μs·cm<sup>-1</sup>,TDS 变化范围为 491—612 mg·L<sup>-1</sup>,均值为 551.50 mg·L<sup>-1</sup>.阳离子质量浓度大小依次为: Ca<sup>2+</sup>>Na<sup>+</sup>> Mg<sup>2+</sup>>K<sup>+</sup>,平均浓度分别为 104.19、46.47、15.38、5.44 mg·L<sup>-1</sup>;阴离子质量浓度大小依次为: HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>>Cl<sup>-</sup>,平均浓度分别为 233.65、128.79、16.45 mg·L<sup>-1</sup>.水体主要离子组成中以 Ca<sup>2+</sup>和 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 占 优势,分别占阳离子和阴离子总量的 60.76%和 62%.

窟野河采集的地下水为浅层灌溉用水,电导率变化范围为924—2060 μs·cm<sup>-1</sup>,均值为1265.77 μs·cm<sup>-1</sup>,TDS 变化范围为656—1490 mg·L<sup>-1</sup>,均值为884.92 mg·L<sup>-1</sup>.阳离子质量浓度大小依次为:Ca<sup>2+</sup>>Na<sup>+</sup>> Mg<sup>2+</sup>>K<sup>+</sup>,平均浓度分别为155.15、94.30、36.28、3.54 mg·L<sup>-1</sup>;阴离子质量浓度大小依次为:HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>>SO<sub>4</sub><sup>2+</sup>>Cl<sup>-</sup>,平均浓度分别为401.06、208.76、100.82 mg·L<sup>-1</sup>.水体主要离子组成中以Ca<sup>2+</sup>和HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>占优势,分别占阳离子和阴离子总量的53.63%和56.44%.

				EC/ (μs·cm <sup>-1</sup> )	$\frac{\text{TDS}}{(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})}$	主要离子浓度 Major ion concentration/(mg·L <sup>-1</sup> )						
			рН			$SO_4^{2-}$	$HCO_3^-$	Cl-	Ca <sup>2+</sup>	${\rm Mg}^{2+}$	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>
乌兰木伦河 -	生活用水	最小值	6.76	208.00	296.00	2.07	183.10	9.98	5.76	0.39	1.92	1.50
		最大值	8.44	1504.00	1070.00	165.30	409.62	322.00	52.30	16.23	138.78	3.02
		平均值	7.71	830.67	626.07	61.54	272.85	101.45	23.04	6.13	37.00	2.22
	矿井水	最小值	7.25	304.00	203.00	14.38	184.22	3.52	22.38	6.89	3.40	1.59
		最大值	7.87	1365.00	847.00	202.22	562.96	10.18	82.86	27.06	125.82	5.25
		平均值	7.64	541.82	306.36	38.98	241.84	6.80	46.44	12.39	24.42	2.55
悖牛川	生活用水	最小值	7.56	714.00	491.00	74.89	232.29	10.42	97.08	14.31	21.24	2.70
		最大值	7.68	890.00	612.00	182.69	235.02	22.48	111.30	16.44	71.70	8.19
		平均值	7.62	802.00	551.50	128.79	233.65	16.45	104.19	15.38	46.47	5.44
窟野河	灌溉用水	最小值	7.17	924.00	656.00	119.13	263.22	17.12	68.70	11.18	32.81	1.43
		最大值	7.74	2060.00	1490.00	360.31	527.43	362.70	348.06	91.60	143.30	12.36
		平均值	7.35	1265.77	884.92	208.76	401.06	100.82	155.15	36.28	94.30	3.54

**表 2** 窟野河流域地下水水化学特征统计表 **Table 2** Mean values of chemical compositions of ground water in Kuve River basin

2.2 水化学类型

Piper 三线图是一种对水样进行分类的图示方法,通常用以说明水体总的化学性质,并利用阴阳离子每升毫克当量的百分数表示水体的相对成分<sup>[22-23]</sup>.利用 Gw-chart 软件(USGS 开发)绘制出水化学 Piper 三线图如图 2 所示.





窟野河上游河水阳、阴离子分布比较集中,阳离子以 Na<sup>+</sup>与 Ca<sup>2+</sup>为主,阴离子以 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>与 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>为主. 由于乌兰木伦河段河水与悖牛川段河水来源的差异,水化学类型有所不同.乌兰木伦河段河水化学类型 为 Na<sup>+</sup>-Ca<sup>2+</sup>-HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>型;悖牛川段河水化学类型为 Na<sup>+</sup>-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>-HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>型.矿井水阳、阴离子分布非常集 中,阳离子以 Ca<sup>2+</sup>为主,阴离子以 HCO<sub>3</sub> 为主,矿井水采集深度约为 100 m,采样点与河道距离的不同致 使水化学类型有所差异,距离河道 5 km 以内水样的水化学类型与河水较为相近,为 Ca<sup>2+</sup>-Na<sup>+</sup>-HCO<sub>3</sub> 型, 大于 5 km 的水化学类型为 Ca<sup>2+</sup>-Mg<sup>2+</sup>-HCO<sub>3</sub> 型,随着距离的增大,矿井水与河水的联系减弱.对于生活用 水,随着井深和距离河道远近的不同,水的阳、阴离子差异较大.井深小于 180 m、距离河道小于 1 km 的 地下水水化学特征与河水一致,为 Na<sup>+</sup>-Ca<sup>2+</sup>-HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 型;井深大于 180 m、与河道距离大于 1 km 的水 化学类型为 Ca<sup>2+</sup>-Na<sup>+</sup>-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>-HCO<sub>3</sub> 型和 Ca<sup>2+</sup>-Na<sup>+</sup>-HCO<sub>3</sub>-Cl<sup>-</sup>型.

窟野河下游河水的阳、阴离子分布与上游河水相近,阳离子以 Na<sup>+</sup>与 Ca<sup>2+</sup>为主,阴离子主要是 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>与 HCO<sub>3</sub>,水化学类型主要为 Na<sup>+</sup>-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>-HCO<sub>3</sub>型和 Na<sup>+</sup>-Ca<sup>2+</sup>-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>-HCO<sub>3</sub>型.灌溉用水阳离子以 Ca<sup>2+</sup>与 Na<sup>+</sup>为主,阴离子以 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>与 HCO<sub>3</sub> 为主,水化学类型多为 Ca<sup>2+</sup>-Na<sup>+</sup>-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>-HCO<sub>3</sub> 型,部分为 Ca<sup>2+</sup>-Mg<sup>2+</sup>-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>-HCO<sub>3</sub>型.

河水中阳离子以 Na<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>为主,阴离子以 HCO<sub>3</sub> 为主,这与黄河干流优势阳离子为 Ca<sup>2+</sup>,阴离子为 HCO<sub>3</sub> 较为一致<sup>[24]</sup>.上游河水水质类型为 Na<sup>+</sup>-Ca<sup>2+</sup>-HCO<sub>3</sub>-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 型和 Na<sup>+</sup>-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>-HCO<sub>3</sub>,下游为 Na<sup>+</sup>-Ca<sup>2+</sup>-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>-HCO<sub>3</sub> 型,与同处于黄河中游的无定河水化学类型为重碳酸盐类钠·钙型水较为一致<sup>[25]</sup>.

2.3 离子相关性分析和矿物饱和指数

相关性分析可以揭示水体水化学参数的相似相异性以及来源的一致性与差异性<sup>[26-27]</sup>,用 SPSS 软件分别计算出不同水体各主要水化学参数之间的 Pearson 相关性系数,用 r 值表示(表 3).其中,r > 0代表两变量正相关,r < 0代表两变量负相关. $|r| \ge 0.8$ 时,可以认为两变量间显著相关; $0.5 \le |r| \le 0.8$ 时,可以认为两变量中度相关; $0.3 \le |r| \le 0.5$ 时,可以认为两变量低度相关; $|r| \le 0.3$ 说明相关程度弱,基本不相关<sup>[28]</sup>.矿物饱和指数(Saturation index,简称 SI)能够指示含水层中的矿物与地下水之间所处的状态,从而反应地下水成分变化的趋势,各类水样的矿物饱和指数采用 Visual MIN TEQ 3.0 软件分析<sup>[29]</sup>.

窟野河水化学参数相关性矩阵显示,上游河水中,SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>与Mg<sup>2+</sup>呈正相关,相关系数是0.733,与Ca<sup>2+</sup>、Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>相关性较差;HCO<sub>3</sub>与K<sup>+</sup>呈现正相关,相关系数是0.713,与Mg<sup>2+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Na<sup>+</sup>呈现较弱的负相关;Cl<sup>-</sup>与Na<sup>+</sup>呈现显著正相关,相关系数是0.85;Mg<sup>2+</sup>与Ca<sup>2+</sup>呈现正相关,相关系数是0.755.这表明,SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>与Mg<sup>2+</sup>、Ca<sup>2+</sup>同源,Cl<sup>-</sup>与Na<sup>+</sup>、HCO<sub>3</sub>与K<sup>+</sup>同源.其他各离子相关性均不明显.下游河水与上游差异较大,SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>与Cl<sup>-</sup>呈现正相关,相关系数是0.841;K<sup>+</sup>与SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、HCO<sub>3</sub>、Cl<sup>-</sup>呈现正相关,相关系数分别是0.607、0.569和0.747;Mg<sup>2+</sup>与Ca<sup>2+</sup>呈现显著正相关,相关系数是0.910.Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>与SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、HCO<sub>3</sub>、Cl<sup>-</sup>呈现不同程度的负相关.河水在整个流程上SI<sub>石膏</sub>均小于0,范围是-2.05—-1.25,因此河水在整个流程上相对于石膏处于未饱和状态;而SI<sub>方解石</sub>和SI<sub>自云石</sub>在整个流程上均大于0,范围分别是0.11—1.54和0.11—2.73,故河水在整个流程上相对于方解石和白云石均处于过饱和状态.

上游生活用水 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 与 Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、Na<sup>+</sup>呈现正相关,相关系数分别是 0.562,0.534 和 0.825;Ca<sup>2+</sup> 与 Mg<sup>2+</sup>、K<sup>+</sup>呈现正相关,相关系数分别是 0.807 和 0.752.这表明上游生活用水中阳离子可能主要来源于硫酸盐.生活用水的 SI<sub>石膏</sub>均小于 0,相对于石膏处于未饱和状态;SI<sub>方解石</sub>和 SI<sub>白云石</sub>的值基本在-1—0.5 之间,处于未饱和或过饱和状态,仅有一个井水水样 SI<sub>方解石</sub>为-1.46,SI<sub>白云石</sub>为-3.49,可能是由于所处含水层不同导致的差异.这表明地下水在运动过程中可能继续溶解石膏矿物.

矿井水 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 与 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>、Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>呈现显著正相关,相关系数分别是 0.987,0.961 和 0.912;HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 与 Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>呈现显著正相关,相关系数分别是 0.961 和 0.900;Na<sup>+</sup>与 K<sup>+</sup>呈现显著正相关,相关系数是 0.824; Ca<sup>2+</sup>与 Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>相关性相对较弱.这表明水中的 Ca<sup>2+</sup>和矿物中的 Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>发生交换反应影响了地下水中硫酸盐矿物和碳酸盐矿物的溶解,进而对地下水组分产生了影响.矿井水的 SI<sub>看常</sub>均小于 0,相对于石膏处于未饱和状态;SI<sub>方解石</sub>和 SI<sub>自云石</sub>的值基本在 0—0.6 之间,处于过饱和状态.水循环的过程中将会溶解石膏 矿物,并不会产生方解石和白云石的沉淀.

下游灌溉用水 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 与 Cl<sup>-</sup>、K<sup>+</sup>呈现正相关,相关系数分别是 0.744 和 0.791;Cl<sup>-</sup>与 Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>呈现正相 关,相关系数分别是 0.709 和 0.877;Ca<sup>2+</sup>与 Na<sup>+</sup>呈现正相关,相关系数是 0.738,这与下游河水相似,K<sup>+</sup>、 Ca<sup>2+</sup>、Na<sup>+</sup>相互间均呈现正相关,表明阳离子可能来源于含有长石的砂岩.灌溉用水 SI<sub>石音</sub>均小于 0,相对 于石膏处于未饱和状态;而 SI<sub>方解石</sub>和 SI<sub>白云石</sub>均大于 0,相对于方解石和白云石均处于过饱和状态,这与河 水较为相似.表明灌溉用水与河水有较密切的水力联系.

岩石化学风化作用是控制河水化学组成的主导因素,流域不同测点水化学组成的差异是由各区域 不同的黄土或碎屑岩性质决定,岩石和土壤中的微量蒸发盐矿物(石膏等)也使河水中的溶解盐含量提 高.同时,该区地处干旱半干旱地区,蒸发作用在河水溶质的形成中也起到重要作用.

		5	 (a)上游河水 B	iver water in the	upper reaches	J	
	SO4-	HCO <sub>2</sub>	Cl <sup>-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K+
$SO_{4}^{2-}$	1	-0.294	0.038	0.384	0.733 **	0.249	0.135
HCO <sub>3</sub>		1	-0.630*	-0.582*	-0.425	-0.871 **	0.713*
Cl <sup>-</sup>			1	-0.160	-0.263	0.850 **	-0.336
Ca <sup>2+</sup>				1	0.755 **	0.217	-0.569 *
Mg <sup>2+</sup>					1	0.114	-0.074
Na <sup>+</sup>						1	-0.536 *
K <sup>+</sup>							1
			(b)下游河	水 Downstream ri	ver water		
	$SO_{4}^{2-}$	HCO <sub>3</sub>	Cl-	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	$Na^+$	K <sup>+</sup>
$SO_{4}^{2-}$	1	0.300	0.841 **	-0.626 **	-0.468 *	-0.055	0.607 **
HCO <sub>3</sub>		1	0.368	-0.505 *	-0.591 **	-0.295	0.569 *
Cl-			1	-0.618 **	-0.493 *	-0.091	0.747 **
Ca <sup>2+</sup>				1	0.910**	0.353	-0.705 **
Ma <sup>2+</sup>				-	1	0.358	-0.543 *
Ng <sup>+</sup>					1	1	-0.207
Na V <sup>+</sup>						1	1
K		( 0	 ) ト 流 止 活 田 水 Γ	omestic water in	the upper reaches		1
	SO <sup>2-</sup>	HCO:		Ca <sup>2+</sup>	Ma <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K+
SO <sup>2-</sup>	1	-0.328	-0.573*	0.562 *	0.534 *	0.825 **	0.152
HCO <sub>2</sub>	1	1	0.811 **	-0.432	-0.574 *	-0.188	-0.118
Cl <sup>-</sup>			1	-0.472	-0.598 *	-0.512*	-0.221
Ca <sup>2+</sup>				1	0.807 **	0.295	0.752*
Мg <sup>2+</sup>					1	0.505 *	0.442
Na <sup>+</sup>						1	0.037
K <sup>+</sup>							1
			(d)上游矿井水	Mine water in the	upper reaches		
	$SO_{4}^{2-}$	HCO <sub>3</sub>	Cl-	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	$Na^+$	K <sup>+</sup>
$SO_{4}^{2-}$	1	0.987 **	0.135	0.713 *	0.456	0.961 **	0.912 **
HCO <sub>3</sub>		1	0.111	0.762 **	0.475	0.961 **	0.900 **
Cl <sup>-</sup>			1	-0.324	-0.330	0.198	0.181
Ca <sup>2+</sup>				1	0.587	0.662 *	0.634 *
Mg <sup>2+</sup>					1	0.358	0.402
Na <sup>+</sup>						1	0.824 **
K <sup>+</sup>							1
			(e)下游灌溉用	水 Downstream ir	rigation water		
	$SO_4^{2-}$	HCO <sub>3</sub>	Cl-	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>
$SO_{4}^{2-}$	1	-0.274	0.744 **	0.041	-0.037	0.300	0.719 **
HCO <sub>3</sub>		1	-0.128	-0.189	0.374	0.060	0.112
Cl-			1	0.442	0.190	0.709 **	0.877 **
Ca <sup>2+</sup>				1	0.241	0.738 **	0.261
Mg <sup>2+</sup>					1	0.135	0.243
Na <sup>+</sup>						1	$0.620^{*}$
K <sup>+</sup>							1

表 3 窟野河流域河水和地下水的水化学参数相关性矩阵

注:\*\*表示在 0.01 置信度下显著相关,\*表示在 0.05 置信度下显著相关.

Note: \* \* indicated a significant correlation between the 0.01 confidence level, \* indicated a significant correlation between the 0.05 confidence level.

35 卷

## 3 结论(Conclusion)

(1) 窟野河流域地表水与地下水均偏弱碱性.河水与生活用水为中等矿化度水, 矿井水为低矿化度水, 灌溉用水为高矿化度水.河水中 Na<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>为优势阳离子, HCO<sub>3</sub>为优势阴离子; 地下水中, 生活用水以 Na<sup>+</sup>和 HCO<sub>3</sub>占绝对优势, 矿井水与灌溉用水以 Ca<sup>2+</sup>和 HCO<sub>3</sub>占绝对优势.

(2)河水的水质类型由上游的 Na<sup>+</sup>-Ca<sup>2+</sup>-HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>型和 Na<sup>+</sup>-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>-HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>型演变为下游的 Na<sup>+</sup>-Ca<sup>2+</sup>-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>-HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>型.上游矿区矿井水随着与河道距离的增加,与河水的联系逐渐减弱.生活用水由于井深和与河道距离的不同,水化学类型有所差异,井深较浅、距离河道较近的地下水水化学特征与河水一致.下游灌溉用水水化学类型与下游河水一致,水力联系密切.

(3)上游河水与地下水 SO<sup>2-</sup><sub>4</sub> 与 Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup>与 Mg<sup>2+</sup>相关性较强, 说明这些离子同源, 可能来源于 含有碳酸盐、石膏的岩石中, 印证了矿物溶解和阳离子交换对水化学演化的影响; 下游河水与地下水 K<sup>+</sup> 与 SO<sup>2-</sup><sub>4</sub>、Cl<sup>-</sup>相关性较强, 且 K<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Na<sup>+</sup>相互间均呈现正相关, 这与研究区地层中含有长石砂岩有关. 河 水、矿井水和灌溉用水相对于方解石和白云石均处于过饱和状态, 这和矿井水、灌溉用水分别与河水联 系密切有一定关系. 生活用水相对于方解石和白云石基本处于未饱和状态.

#### 参考文献(References)

- [1] 胡汝骥,樊自立,王亚俊,等.中国西北干旱区的地下水资源及其特征[J].自然资源学报,2002,17(3):322-326.
   HU R J, FAN Z L, WANG Y J, et al. Groundwater resources and their characteristics in arid lands of Northwestern China[J]. Journal of Natural Resources, 2002,17(3):322-326(in Chinese).
- [2] 冯建国,李桂花,屈卉,等.窟野河(陕西段)水质变化原因分析[J].人民黄河,2012,34(11):76-77,84. FENG J G,LI G H,QU H, et al. Analysis on reasons of water quality variation of Kuye River (Shaanxi Section) [J]. Yellow River, 2012, 34(11):76-77,84(in Chinese).
- [3] 朱海勇,陈永金,刘加珍,等.塔里木河中下游地下水化学及其演变特征分析[J].干旱区地理,2013,36(1):8-18.
   ZHU H Y, CHEN Y J, LIU J Z, et al. Variation and evolution of groundwater chemistry in the middle and lower reaches of the Tarim River
   [J]. Arid Land Geography, 2013,36(1):8-18(in Chinese).
- [4] 杨泽元,王文科,王雁林,等.干旱半干旱区地下水引起的表生生态效应及其评价指标体系研究[J].干旱区资源与环境,2006,20 (3):105-111.

YANG Z Y, WANG W K, WANG Y L, et al. Research on supergene eco-effect induced by groundwater in arid and semi-arid regions and Its Assessment Index System[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2006, 20(3):105-111(in Chinese).

[5] 聂振龙,陈宗宇,程旭学,等.黑河干流浅层地下水与地表水相互转化的水化学特征[J].吉林大学学报(地球科学版),2005,35 (1):48-53.

NIE Z L, CHEN Z Y, CHENG X X, et al. The chemical information of the interaction of unconfined groundwater and surface water along the Heihe River, Northwestern China[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2005,35(1):48-53(in Chinese).

[6] 董维红,苏小四,侯光才,等.鄂尔多斯白垩系地下水盆地地下水水化学类型的分布规律[J].吉林大学学报(地球科学版),2007,37 (2):288-292.

DONG W H,SU X S, HOU G C, et al. Distribution law of groundwater hydrochemical type in the ordos cretaceous artesian basin [J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2007,37(2):288-292(in Chinese).

- [7] 滕彦国,左锐,王金生,等.区域地下水演化的地球化学研究进展[J].水科学进展,2010,21(1):127-136. TENG Y G,ZUO R,WANG J S, et al. Progress in geochemistry of regional groundwater evolution[J]. Advances in Water Science, 2010, 21(1):127-136(in Chinese).
- [8] 雷泳南,张晓萍,张建军,等.窟野河流域河川基流量变化趋势及其驱动因素[J].生态学报,2013,33(5):1559-1567. LEI Y N,ZHANG X P,ZHANG J J, et al. Change trends and driving factors of base flow in Kuye River Catchment[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013,33(5):1559-1567(in Chinese).
- [9] 吴喜军,李怀恩,董颖,等.陕北地区煤炭开采等人类活动对河道径流影响的定量识别[J].环境科学学报,2014,34(3):772-780.
   WU X J,LI H E, HONG Y, et al. Quantitative identification of coal mining and other human activities on river runoff in northern Shaanxi region[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014,34(3):772-780(in Chinese).
- [10] 蒋晓辉,谷晓伟,何宏谋. 窟野河流域煤炭开采对水循环的影响研究 [J]. 自然资源学报,2010,25(2):300-307.
   JIANG X H, GU X W, HE H M. The influence of coal mining on water resources in the Kuye River Basin [J]. Journal of Natural Resources, 2010,25(2):300-307(in Chinese).
- [11] 王小军,蔡焕杰,张鑫,等.窟野河季节性断流及其成因分析[J].资源科学,2008,30(3):475-480.
   WANG X J,CAI H J,ZHANG X, et al. Analysis on the seasonal drying-up causes of Kuye River[J]. Resources Science, 2008,30(3): 475-480(in Chinese).
- [12] 郭巧玲,熊新芝,郝彬,等.近 50 年来窟野河径流年内分配及变化趋势研究[J].干旱区资源与环境,2014,28(7):35-40.

GUO Q L, XIONG X Z, HAO B, et al. Variation trends of runoffs seasonal distribution of the Kuyehe basin over the past 50 years [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2014, 28(7):35-40(in Chinese).

学

[13] 刘二佳,张晓萍,张建军,等.1956-2005 年窟野河径流变化及人类活动对径流的影响分析[J].自然资源学报,2013,28(7): 1159-1168.

LIU E J,ZHANG X P,ZHANG J J, et al. Variation of annual streamflow and the effect of human activity in the Kuye River during 1956 to 2005[J]. Journal of Natural Resources, 2013,28(7):1159-1168(in Chinese).

- [14] 范念念,薛小妮.窟野河泥沙输移与冲淤特征分析[J].泥沙研究,2010,35(2):75-80.
   FAN N N,XUE X N.Analysis on sediment movement characters in the Kuye River[J]. Journal of Sediment Reseach, 2010,35(2):75-80 (in Chinese).
- [15] 郭巧玲,陈新华,孙斌.窟野河水沙变化及驱动力分析[J].水土保持学报,2015,29(1):17-20.
   GUO Q L, CHEN X H, SUN B. Analysis of water and sediment changes and related driving forces in Kuye River Basin[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015,29(1):17-20(in Chinese).
- [16] 王璨,周秀平,王文圣. 窟野河洪水序列变异点综合诊断[J].水电能源科学,2012,30(7):50-53.
   WANG C,ZHOU X P,WANG W S. Comprehensive diagnosis of chang piont of flood series in Kuye River[J]. Water Resources and Power, 2012,30(7):50-53(in Chinese).
- [17] 赵晓坤,王随继.窟野河洪水特性及变化趋势分析[J].干旱区资源与环境,2012,26(4):92-96.
   ZHAO X K,WANG S J. Analysis on the flood characteristics and its change trend in the Kuye River basin[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2012,26(4):92-96(in Chinese).
- [18] 苏念良,马文进,蔡文彦,等. 窟野河水文特性分析[J].水资源与水工程学报,2007,18(2):65-68. SUNL,MAWJ,CAIWY, et al. Analysis on hydrological characteristic of Kuyehe River[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2007,18(2):65-68(in Chinese).
- [19] 周海霞,朱永利. 浅议窟野河自然、社会经济、历史文化景观[J].内蒙古水利,2011(1):177-178. ZHOU H X,ZHU Y L. Discussion on the natural, social and economic, historical and cultural landscape of the Kuye River[J]. Inner Mongolia Water Conservancy, 2011(1):177-178(in Chinese).
- [20] 冀瑞君,彭苏萍,范立民,等.神府矿区采煤对地下水循环的影响——以窟野河中下游流域为例[J].煤炭学报,2015,40(4): 938-943.

JI R J, PENG S P, FAN L M, et al. Effect of coal exploitation on groundwater circulation in the Shenfu mine area: An example from middle and lower reaches of the Kuye River basin[J]. Journal of China Coal Society, 2015,40(4):938-943(in Chinese).

- [21] 陈静生,陶澍,邓宝山,等.水环境化学[M].北京:高等教育出版社,1987,48-60.
   CHEN J S, TAO S, DENG B S, et al. Water environmental chemistry[M]. Beijing: Higher Education Press, 1987, 48-60(in Chinese).
- [22] 王瑞久.三线图解及其水文地质解释[J].工程勘察,1983(6):6-11.
   WANG R J. Three line diagram and its hydrogeological interpretation [J].Geotechnical Investigation and Surveying, 1983(6):6-11(in Chinese).
- [23] 汪敬忠,吴敬禄,曾海鳌,等.内蒙古河套平原水体同位素及水化学特征[J].地球科学与环境学报,2013,35(4):104-112. WANG J Z, WU J L,ZENG H A, et al. Characteristics of water isotope and hydrochemistry in Hetao Plain of Inner Mongolia[J].Journal of Earth Sciences and Environment, 2013,35(4):104-112(in Chinese).
- [24] 陈静生,王飞越,何大伟.黄河水质地球化学[J].地学前缘,2006,13(1):58-73.
   CHEN J S, WANG F Y, HE D W, et al. Geochemistry of water quality of the Yellow River basin[J].Earth Science Frontiers,2006,13(1): 58-73(in Chinese).
- [25] 聂树人.陕西榆林地区河流水化学的主要地理特征[J].人民黄河,1982,(6):43-47.
   NIE S R. Main geographical features of the river water chemistry in Yulin[J].Yellow River, 1982,(6):43-47(in Chinese).
- [26] 胡春华,童乐,万齐远.环鄱阳湖浅层地下水水化学特征的时空变化[J].环境化学,2013,32(6):974-979.
   HU C H, TONG L, WAN Q Y. Spatial and temporal variation of shallow groundwater chemical characteristics around Poyang Lake[J].
   Environmental Chemistry,2013,32(6):974-979(in Chinese).
- [27] 孙斌,多元统计方法在鄂尔多斯白垩系盆地都思兔河地下水系统水化学空间分布规律研究中的应用[D].长春:吉林大学,2007. SU B.Application of multivariate statistics method into research on spatial distribution law of hydrochemistry in Dusituhe groundwater system in Ordos Cretaceous Basin[D]. Changchun; Jilin University,2007(in Chinese).
- [28] 胡春华,周文斌,夏思奇.鄱阳湖流域水化学主离子特征及其来源分析[J].环境化学,2011,30(9):1620-1626.
   HU C H,ZHOU W B,XIA S Q, et al. Characteristics of Major Ions and the influence factors in Poyang Lake Catchment[J].Environmental Chemistry,2011,30(9):1620-1626(in Chinese).
- [29] 丁贞玉,马金珠,何建华.腾格里沙漠西南缘地下水水化学形成特征及演化[J].干旱区地理,2009,32(6):948-957. DING Z Y, MA J Z, HE J H. Geochemical evolution of groundwater in the southwest of Tengger Desert, NW of China[J]. Arid Land Geography, 2009,32(6):948-957(in Chinese).