



环境同位素在识别伊犁河谷地下水补给来源中的指示作用

邵 杰¹, 李 瑛², 李树才¹, 滕 超¹, 杨欣杰¹, 曹 军¹, 陈喜庆¹

1. 中国地质调查局 自然资源实物地质资料中心, 河北 三河 065201;

2. 中国地质调查局 西安地质调查中心, 陕西 西安 710054

摘 要: 重点分析了研究区潜水、浅层承压水、泉水及地表水 δD 、 $\delta^{18}O$ 的分布特征, 并对 5 组水文钻探井地下水样品进行分析。潜水 δD 变化范围为 $-97.32\text{‰} \sim -67.51\text{‰}$, 平均值为 -80.34‰ ; $\delta^{18}O$ 为 $-15.85\text{‰} \sim -10.66\text{‰}$, 平均值为 -12.08‰ 。浅层承压水 δD 为 $-111.93\text{‰} \sim -68.38\text{‰}$, 平均值为 -84.79‰ ; $\delta^{18}O$ 为 $-16.01\text{‰} \sim -10.52\text{‰}$, 平均值为 -12.30‰ 。泉水 δD 为 $-102.06\text{‰} \sim -71.63\text{‰}$, 平均值为 -84.10‰ ; $\delta^{18}O$ 为 $-14.21\text{‰} \sim -9.70\text{‰}$, 平均值为 -12.24‰ 。地表水 δD 为 $-90.53\text{‰} \sim -60.99\text{‰}$, 平均值为 -72.58‰ ; $\delta^{18}O$ 在 $-13.20\text{‰} \sim -9.54\text{‰}$, 平均值为 -11.21‰ 。地下水 $\delta^{13}C$ 为 $-9.4\text{‰} \sim -5.6\text{‰}$, 平均值为 -8.3‰ , 极差为 3.8‰ 。结果表明: 地下水与地表水均起源于当地大气降水。潜水与浅层承压水水力联系较强, 潜水与浅层承压水属于同一含水系统。与浅层承压水相比, 深层承压水年龄较大, 在 20 ka 左右, 属于沉积埋藏水。深层承压水与浅层承压水的水力联系较弱。潜水与浅层承压水的 $\delta^{13}C$ 值较为接近, 且接近大气 CO_2 的 $\delta^{13}C$ 值 -7‰ 。研究区地下水中碳的主要来源为大气 CO_2 。

关键词: 环境同位素; 含水系统; δD - $\delta^{18}O$ 关系; $\delta^{13}C$; 伊犁河谷; 新疆

INDICATION OF ENVIRONMENTAL ISOTOPES IN IDENTIFYING THE GROUNDWATER RECHARGE SOURCES IN ILI RIVER VALLEY

SHAO Jie¹, LI Ying², LI Shu-cai¹, TENG Chao¹, YANG Xin-jie¹, CAO Jun¹, CHEN Xi-qing¹

1. Cores and Samples Center of Natural Resources (CSCNR), CGS, Sanhe 065201, Hebei Province, China;

2. Xi'an Center of China Geological Survey, Xi'an 710054, China

Abstract: This study analyzes the distribution characteristics of δD and $\delta^{18}O$ in phreatic water, shallow confined water, spring water and surface water, as well as the $\delta^{13}C$ of five groups of groundwater samples from hydrologic drilling wells. The results show that both groundwater and surface water originate from the local meteoric water. The phreatic water and shallow confined water, belonging to the same aquifer system, have a strong hydraulic connection. The age of deep confined water is about 20 ka, older than the shallow confined water, belonging to sedimentary buried water, with weak hydraulic relation between the two. The $\delta^{13}C$ values of phreatic water and shallow confined water are close to each other, approximating that of atmospheric CO_2 (-7‰) which serves as the main source of carbon in groundwater of the study area.

Key words: environmental isotope; aquifer system; δD - $\delta^{18}O$ relation; $\delta^{13}C$; Ili River Valley; Xinjiang

收稿日期: 2021-05-06; 修回日期: 2021-09-04. 编辑: 李兰英.

基金项目: 中国地质调查项目“新疆伊犁河谷地下水资源及环境问题调查与评价(1212011220972); 新疆伊犁河谷霍城-霍尔果斯口岸水文地质调查(12120115046401); 伊犁河谷西部平原区 1:5 万水文地质调查(121201011000150021); 实物地质资料汇集与服务(DD20190411)”。

作者简介: 邵杰(1989—), 男, 工程师, 主要从事水工环地质调查与研究, 通信地址 河北省三河市燕郊经济技术开发区燕灵路 245 号, E-mail//313439358@qq.com

通信作者: 李瑛(1979—), 男, 正高级工程师, 主要从事水工环地质调查与研究, 通信地址 陕西省西安市友谊东路 438 号, E-mail//304437186@qq.com

0 引言

水中各种元素的同位素是水的“指纹”,其记录了地下水形成、补给、径流与排泄过程中的信息,能否合理利用和有效保护水资源主要取决于人类对水循环的认识水平。环境同位素可以用来有效地示踪水循环,如指示水的来源,不同环境状况下水的运移和数量(包括江河湖泊),确定水的年龄,记录水-岩相互作用,尤其在研究地下水和地下水储量方面,更是卓有成效,从而为认识地下水的形成、运动及其成分变化机制提供重要的依据,为合理利用宝贵的水资源奠定基础^[1-5]。王文科等^[6]借助同位素手段研究关中盆地地下水环境演化与可再生维持途径。陈宗宇等^[7]通过研究华北平原地下水的同位素分布特征对中国北方第四系地下水同位素分层及其指示意义进行了研究探讨。侯光才等^[8]通过同位素水文地质研究深化了鄂尔多斯盆地地下水的分布特征。Li 等^[9]通过对北京潮白河流域地下水氢氧稳定同位素和水化学的分析,将地下水划分为古地下水和现代地下水,并得到这两种地下水具有不同的同位素组成和不同的补给环境,对北京市地下水管理具有借鉴意义。Ma 等^[10]通过对敦煌盆地地下水水化学和同位素研究,确定了含水层中地下水的水化学过程,辨识了地下水的补给环境和补给源以及停留时间,并得出承压水的最近一次补给来自冰期的寒冷气候条件下,而该区承压水一段时间内可能无法更新的结论。

1949 年以来,在伊犁河谷相继开展 1:10 万、1:20 万、1:50 万等不同精度的水文地质测绘工作,基本查明了区域地下水的补、径、排等条件。中国地质调查局西安地质调查中心开展的伊犁河谷地下水资源及其环境问题调查评价项目工作,为查明伊犁河谷地区含水层空间分布和结构、区域地下水补径排条件、地下水资源潜力评价、地下水资源合理开发利用等方面提供了资料支撑,并对伊犁河谷地区的地下水流系统及地下水循环演化开展了相关研究^[11-14]。由于近年来关于研究区水体(地表水、潜水、承压水、泉水等)同位素方面的研究开展的较少且不够深入,在整理分析前人工作成果基础上,本文试图通过综合分析研究区水体(地表水、潜水、承压水、泉水等)氢氧、¹³C、¹⁴C 同位素的空间分布特征,以此利用同位素证据探讨地下水与地表水的补给来源、潜水与浅层承压水的水力联系、浅层承压水与深层承压水的水力联系、深层承压水的年龄及性

质等科学问题。

1 数据来源与研究方法

1.1 研究区概况

伊犁河谷地处我国新疆天山山脉西段,区内地形地貌形态较复杂,总体呈“三山夹两谷地一盆地”的格局,呈三角形,东部顶点为特克斯河与巩乃斯河交汇处,西部底边朝向中哈边界,东高西低,地势由东向西倾斜,东西长 170 km。伊犁河谷地北部自西向东分布着北西走向的科古琴山、博罗科努山和依连哈比尔尕山等北天山支脉。山区面积占全区面积的 70%以上。根据内外营力地质作用及地形特征,区内主要地貌类型为冰蚀侵蚀褶皱断块山、剥蚀堆积块状隆起山和堆积平原三大类。区内降水比较丰沛,具有湿润大陆性中温带气候的特征。气候特点是冬夏两季较长,春秋两季较短,春季升温迅速,夏季温和多雨,秋季降温较快,冬季较长较暖,日照时间长,光热资源丰富。据《新疆维吾尔自治区水资源公报(2010)》,2010 年地下水资源量(已扣除与地表水资源量间的重复量)为 $4.34 \times 10^8 \text{ m}^3$,地下水实际开采量为 $4.15 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

伊犁河谷为典型的受河谷控制的山间谷地,区内第四纪地层相当发育,包括各个不同时期的多种成因类型的堆积物。区内主要发育四大河流,分别是巩乃斯河、伊犁河、特克斯河以及喀什河。在四大河流控制作用下,形成了三大河谷区,分别是伊犁-巩乃斯河谷、特克斯河谷及喀什河谷。伊犁谷地呈典型喇叭状,西端开口处宽约 90 km,沿伊犁河和巩乃斯河向南东东延伸至东部合拢,为一断陷谷地。第四系厚度由东向西增大,最厚达近千米,地层结构多次由单层到多层交替,岩层颗粒也多次由粗到细变化^[15]。地下水的补给、径流、排泄条件受地形、地貌、地层、岩性结构、构造、水文、气象等因素的制约。

在山前冲洪积扇区,地下水埋藏较深,深度大于 100 m,而在河流冲洪积扇的河谷区两侧,地下水埋藏较浅,大多在 0~15 m 范围内。由此可见,地下水的埋藏深度从山前强倾斜砾质平原到山前缓倾斜含砾细土平原再到冲洪积细土平原逐渐变小。研究区北部及南部的山区是地下水的主要补给区,山前冲洪积或冰水沉积倾斜平原是地下水的主要径流区,而盆地或谷地中部平原区则是地下水的主要排泄区。在谷地两侧虽

有南北向径流,但整个谷地的地下水总流向是由东向西大体与巩乃斯河及伊犁河的流向相一致^①。

1.2 数据来源

样品采样过程中严格按照《环境同位素分析水样采集》导则进行。²H 和 ¹⁸O 样品的采集使用 30 mL PET 棕色塑料瓶采集,取样前使用经过 0.02 μm 滤膜过滤的样品,清洗不少于 3 次,采集必须使瓶内不留气泡,采集完成后使用封口膜进行外围瓶盖封口。分不同水源种类进行采集,其中氢氧稳定同位素潜水样品 59 组、浅层承压水样品 25 组、泉水样品 17 组、地表水样品 19 组,共计 120 组。¹³C 稳定同位素地下水样品 5 组,5 组样品采自研究区水文钻探井,¹⁴C 深层承压水样 3 组。样品测试工作由自然资源部地下水矿泉水及环境监测中心完成。

1.3 研究方法

采用把地下水 δD-δ¹⁸O 图上的数据绘成平面图的方法,并附以全球与地方大气降水线作为参考。将所测水体氢氧稳定同位素样品置于全球雨水线以及当地雨水线中,分析伊犁河谷地下水、地表水中的 δD 与 δ¹⁸O 之间的关系,总结地下水、地表水中 δD 与 δ¹⁸O 在不同地貌单元所呈现出的分布特征。并且总结其对地下水在补给、径流、排泄以及不同层位地下水的水力联系的指示意义。¹³C 稳定同位素广泛参与碳循环,通过分析地下水样品 δ¹³C 的最大值、最小值、平均值、极差等特征值,分析地下水 ¹³C 稳定同位素的来源,进而识别地下水的补给来源^[16]。应用 ¹⁴C 估算深层承压水年龄,以此探讨分析深层承压水的更新速率及其与浅层承压水的水力联系强度。

2 结果与分析

2.1 δD-δ¹⁸O 分析

距离伊犁河谷最近的全球降水同位素网(GNIP)监测站为乌鲁木齐站。据 1986—2002 年大气降水的同位素组成,当地雨水线方程为: δD =7.2δ¹⁸O+4.5,由于气候干燥、蒸发强烈,与全球雨水线相比斜率稍小^[17]。

δD-δ¹⁸O 样品测试结果特征值见表 1。59 组潜水样埋深范围为 2.5~40.0 m,25 组浅层承压水样埋深为 40.0~170.0 m。据表 1 及图 1,将潜水与浅层承压水的氢氧稳定同位素进行对比分析发现:潜水和浅层承压水样品 δD、δ¹⁸O 变化范围、极差、平均值均较为接近,且潜水和浅层承压水氢氧稳定同位素大多数位于全球雨水线的左上方、当地大气雨水线附近(图 1),表明潜水的补给来源为当地大气降水,且补给来源曾经历了较强的蒸发作用而引起氢氧重同位素富集。这表明二者相互转换频繁,具有较强的水力联系。泉水与地表水的氢氧稳定同位素进行对比分析发现:泉水和地表水样品 δD、δ¹⁸O 变化范围、极差、平均值均较为接近,且泉水和地表水氢氧稳定同位素大多数位于全球雨水线的左上方及当地大气雨水线附近(图 2),表明地表水的补给来源为当地大气降水,且补给来源曾经历了较强的蒸发作用而引起氢氧重同位素富集。

2.2 ¹³C 分析

研究区样品 ¹³C 稳定同位素分析测试结果见表 2。δ¹³C 的变化范围为-9.4‰~-5.6‰,平均值为-8.3‰,极差为 3.8‰,最小值为-9.4‰,最大值为-5.6‰。样品取样深度范围为 1.9~198.0 m,取样深度跨度为 197.1 m,而取样样品 δ¹³C 变化范围较小。由此可见,研究区不

表 1 氢氧稳定同位素参数统计特征值表
Table 1 Statistical eigenvalues of hydrogen and oxygen stable isotope parameters

特征值	潜水		浅层承压水		泉水		地表水	
	δD	δ ¹⁸ O	δD	δ ¹⁸ O	δD	δ ¹⁸ O	δD	δ ¹⁸ O
最大值	-67.51	-10.66	-68.38	-10.52	-71.63	-9.70	-60.99	-9.54
最小值	-97.32	-15.85	-111.93	-16.01	-102.06	-14.21	-90.53	-13.20
极差值	29.81	5.19	43.55	5.49	30.43	4.51	29.54	3.66
平均值	-80.34	-12.08	-84.79	-12.30	-84.10	-12.24	-72.58	-11.21

含量单位:‰。

①伊犁地区水利电力勘测设计院. 新疆伊犁地区地下水资源报告. 1990.

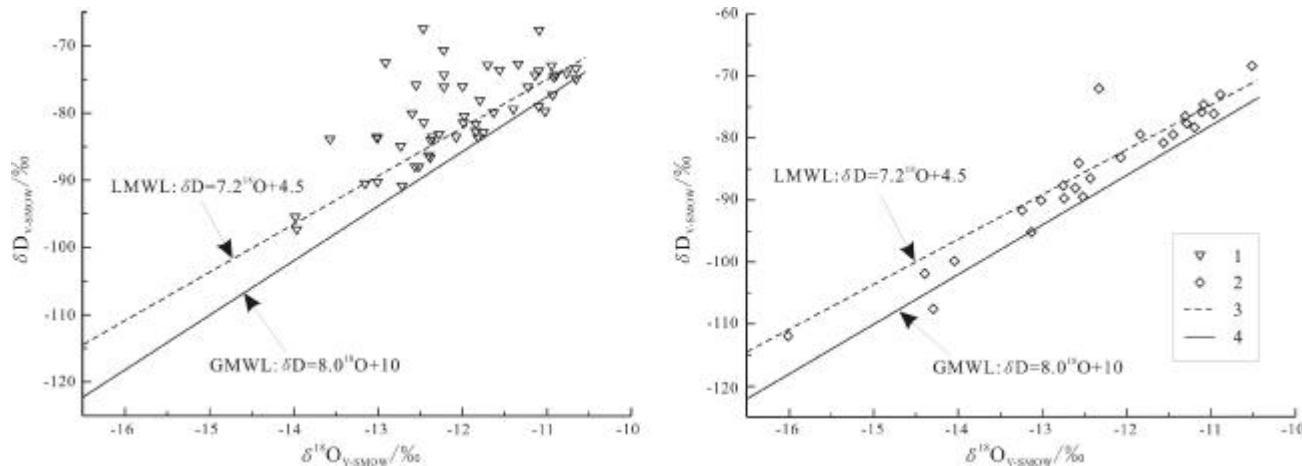


图 1 研究区潜水及承压水 δD - $\delta^{18}O$ 关系

Fig. 1 The δD - $\delta^{18}O$ relationship of phreatic and confined water in the study area

1—潜水样(phreatic water sample); 2—承压水样(confined water sample); 3—当地雨水线(local meteoric water line, LMWL); 4—全球雨水线(global meteoric water line, GMWL)

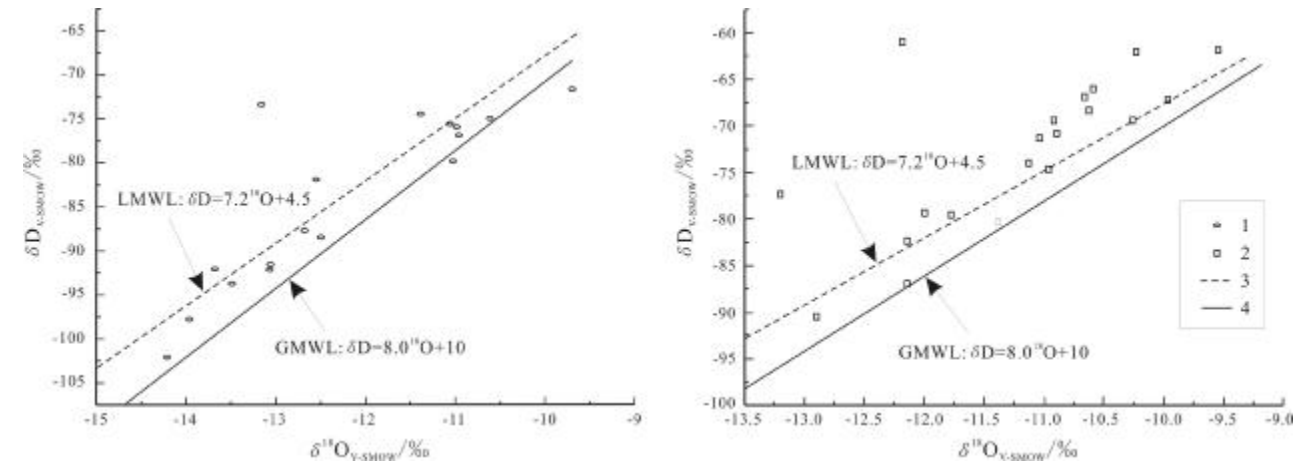


图 2 研究区泉水及地表水 δD - $\delta^{18}O$ 关系

Fig. 2 The δD - $\delta^{18}O$ relationship of spring and surface water in the study area

1—泉水样(spring water sample); 2—地表水样(surface water sample); 3—当地雨水线(LMWL); 4—全球雨水线(GMWL)

同深度地下水的 $\delta^{13}C$ 值较为接近, 且与 CO_2 的 $\delta^{13}C$ 值 -7‰ 相近, 说明研究区地下水中碳的主要来源为大气 CO_2 .

表 2 ^{13}C 稳定同位素分析测试结果表

Table 2 Stable isotopic analysis and testing results of ^{13}C		
样品编号	取样深度/m	$\delta^{13}C/\text{‰}$
ZK1	175.0	-5.6
ZK3	198.0	-9.0
ZK4	10.7	-8.0
ZK8	1.9	-9.4
ZK14	121.6	-9.4

2.3 ^{14}C 分析

在研究区采集 3 组深层承压水, 水位埋深在 198.0~240.0 m. 由表 3 可知, 承压水在埋深 240 m 左右, 地下水校正年龄为 23 ka, 埋深在 200 m 左右, 地下水校正年龄为 19.5 ka. 与浅层承压水相比较, 深层承压水年龄较大, 属于沉积埋藏水, 这也从侧面反映该地区的深层承压水与浅层承压水的水力联系较弱.

3 对比分析

近年来, 相关专家学者利用同位素数据, 在新疆及伊犁河谷地区识别地下水补给来源问题. 李捷等^[18]利

表 3 承压水 ¹⁴C 测试结果

Table 3 ¹⁴C radioactive isotope test results of confined water

样品编号	取样深度/m	现代碳占比/%	校正年龄/ka
ZK4	240.0	5.55±1.60	23.90±2.38
ZK3-2	236.0	6.01±0.65	23.24±0.89
ZK3-1	198.0	9.48±0.62	19.48±0.54

用大气降水监测站 δD 、 $\delta^{18}O$ 多年平均值与当地地下水的 δD 、 $\delta^{18}O$,通过分析天山地区受不同降水水汽来源影响对地下水补给来源进行识别,认为深层地下水同位素相对贫化,与补给期相对寒冷的气候环境有关,东天山为该区地下水的主要补给来源,且克拉美丽山附近深层地下水与浅层地下水同位素均贫化,与阿勒泰站大气降水同位素特征相符,该区主要接受克拉美丽山的补给。王骞迎等^[19]利用氢氧稳定同位素数据与当地大气降水线方程进行对比分析,表明研究区内地下水、伊犁河及支流河水样品集中分布在当地山区大气降水线与平原区大气降水线之间,略靠近山区降水线,说明研究区内地下水、伊犁河及其支流主要接受山区大气降水补给。本文研究结果显示,研究区潜水与承压水均起源于当地大气降水,且从区域上进一步表明了潜水与承压水的水力联系强度特征以及深层承压水的年龄与性质。

4 讨论

环境同位素技术广泛地应用于地下水循环演化研究中,通过分析氢氧同位素分布特征,可以查明氢氧稳定同位素与当地大气降水同位素的关系。本研究对泉水、潜水、浅层承压水及地表水氢氧稳定同位素特征分析表明:4 种不同种类水源的氢氧稳定同位素分布特征与当地大气降水十分相近,且 δD 与 $\delta^{18}O$ 变化范围很相似,揭示了它们均来源当地大气降水。

碳在天然有机循环过程中,同位素组成的变化范围超过 10%。一般来说,在碳的有机循环中,轻同位素倾向于富集在有机质(如石油等富含 ¹²C)中,相反在碳的无机循环中,重同位素倾向于富集在无机盐(如碳酸盐富含 ¹³C)中。上述两种碳循环均与大气二氧化碳有密切关系,也是自然界中碳同位素分馏的两个最重要的过程^[20]。地下水碳同位素组成受制于地下水本身形成、迁移及赋存的环境。地下水中碳的来源主要有大

气 CO₂、土壤和现代生物碳,一般条件下,大气 CO₂ 的 $\delta^{13}C$ 为-7‰左右,土壤和现代生物碳的 $\delta^{13}C$ 为-25‰左右。研究区不同埋藏深度地下水的 $\delta^{13}C$ 值较为接近,且与大气 CO₂ 值相近。研究区地下水中的碳主要来源于大气 CO₂,说明地下水中的 ¹³C 源自于当地大气降水。

5 结论

(1)潜水 δD 变化范围为-97.32‰~-67.51‰, $\delta^{18}O$ 为-15.85‰~-10.66‰,浅层承压水 δD 变化范围为-111.93‰~-68.38‰, $\delta^{18}O$ 为-16.01‰~-10.52‰,并且潜水与浅层承压水的补给来源经历了较强的蒸发作用而引起氢氧重同位素富集。潜水与浅层承压水相互转化频繁,水力联系较强。潜水与浅层承压水属于同一地下水含水系统。与浅层承压水相比,深层承压水年龄较大,属于沉积埋藏水。

(2)泉水 δD 变化范围为-102.06‰~-71.63‰, $\delta^{18}O$ 为-14.21‰~-9.70‰,地表水 δD 变化范围为-90.53‰~-60.99‰, $\delta^{18}O$ 为-13.20‰~-9.54‰。4 种不同种类水源的氢氧稳定同位素分布特征与当地大气降水十分相近,且 δD 与 $\delta^{18}O$ 变化范围很相似,说明均源自于当地大气降水。

(3) $\delta^{13}C$ 的变化范围为-9.4‰~-5.6‰,平均值为-8.3‰,极差为 3.8‰,不同埋藏深度地下水的 $\delta^{13}C$ 值较为接近,与 CO₂ 的 $\delta^{13}C$ 值相近。研究区地下水中的碳主要来源于大气 CO₂,指示了地下水中的 ¹³C 来源当地大气降水。

参考文献(References):

[1]李健,王辉,魏丽琼. 格尔木河流域平原区地下水同位素及水化学特征[J]. 西北地质, 2007, 40(4): 94-100.

Li J, Wang H, Wei L Q. Isotopic and hydrochemical characteristics of groundwater in the Golmud River Basin[J]. Northwestern Geology, 2007, 40(4): 94-100.

[2]刘芬,王水献,蓝永超,等. 黑河流域张掖盆地地表水-地下水系统同位素特征及转化关系[J]. 南水北调与水利科技, 2014, 12(2): 92-96.

Liu F, Wang S X, Lan S C, et al. Environmental isotopes features and exchanges of surfacewater-groundwater system in the Zhangye Basin of Heihe River watershed [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014, 12(2): 92-96.

[3]王文祥,安永会,李文鹏,等. 基于环境同位素技术的张掖盆地地下水流动系统分析[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(2): 25-30.

- Wang W X, An Y H, Li W P, et al. Groundwater flow system analysis of the Zhangye Basin based on environmental isotope techniques[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2016, 43(2): 25–30.
- [4]徐树媛. 李雅庄矿区地下水水化学及环境同位素特征研究[J]. *南水北调与水利科技*, 2013, 11(2): 67–70, 120.
- Xu S Y. Research on groundwater chemistry and environmental isotope in Liyazhuang mining area[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2013, 11(2): 67–70, 120.
- [5]孙金凤, 高宗军, 冯建国, 等. 泰莱盆地水环境同位素分布特征及其意义[J]. *水电能源科学*, 2019, 37(12): 30–32.
- Sun J F, Gao Z J, Feng J G, et al. Distribution characteristics of hydrogen and oxygen isotopes in water environment and its significance in Tailai Basin[J]. *Water Resources and Power*, 2019, 37(12): 30–32.
- [6]王文科, 王雁林, 段磊, 等. 关中盆地地下水环境演化与可再生维持途径[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2006: 53–65.
- Wang W K, Wang Y L, Duan L, et al. Groundwater environment evolution and renewable maintenance in Guanzhong Basin [M]. Zhengzhou: Yellow River Water Conservancy Press, 2006: 53–65. (in Chinese)
- [7]陈宗宇, 张光辉, 聂振龙, 等. 中国北方第四系地下水同位素分层及其指示意义[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 2002, 27(1): 97–104.
- Chen Z Y, Zhang G H, Nie Z L, et al. Groundwater isotopic stratification and its implications in northern China[J]. *Earth Science — Journal of China University of Geosciences*, 2002, 27(1): 97–104.
- [8]侯光才, 张茂省, 刘方, 等. 鄂尔多斯盆地地下水勘查研究[M]. 北京: 地质出版社, 2008: 67–72.
- Hou G C, Zhang M S, Liu F, et al. Groundwater exploration in Ordos Basin[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2008: 67–72. (in Chinese)
- [9]Li J, Liu J, Pang Z, et al. Characteristics of chemistry and stable isotopes in groundwater of the Chaobai River catchment, Beijing[J]. *Procedia Earth and Planetary Science*, 2013, 7: 487–490.
- [10]Ma J Z, He J H, Qi S, et al. Groundwater recharge and evolution in the Dunhuang Basin, northwestern China[J]. *Applied Geochemistry*, 2013, 28: 19–31.
- [11]邵杰. 新疆伊犁-巩乃斯河谷地下水循环演化规律研究[D]. 西安: 长安大学, 2015: 16–18.
- Shao J. Groundwater circulation and evolution pattern in Yili-Gongnaisi Valley of Xinjiang Autonomous Region [D]. Xi'an: Chang'an University, 2015: 16–18.
- [12]邵杰, 李瑛, 王文科, 等. 水化学在新疆伊犁河谷地下水循环中的指示作用[J]. *水文地质工程地质*, 2016, 43(4): 30–35.
- Shao J, Li Y, Wang W K, et al. Indicative effects of hydrochemistry on groundwater circulation in the Yili River Valley of Xinjiang[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2016, 43(4): 30–35.
- [13]叶人源. 新疆伊犁-巩乃斯河谷地表水与地下水转化关系研究[D]. 西安: 长安大学, 2015: 9–13.
- Ye R Y. Interaction of surface water and groundwater in Yili-Gongnaisi River Valley[D]. Xi'an: Chang'an University, 2015: 9–13.
- [14]邵杰, 李瑛, 井晶晶, 等. 新疆霍城县水环境同位素特征及其指示作用[J]. *干旱区资源与环境*, 2017, 31(1): 167–172.
- Shao J, Li Y, Jing J J, et al. Feature of isotopes of water environment and their indication in Huocheng County of Xinjiang[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2017, 31(1): 167–172.
- [15]中国科学院新疆地理研究所. 天山山体演化[M]. 北京: 科学出版社, 1986: 126–129.
- Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Science. Evolution of Tianshan Mountains [M]. Beijing: Science Press, 1986: 126–129. (in Chinese)
- [16]王恒纯. 同位素水文地质概论[M]. 北京: 地质出版社, 1900: 66–68.
- Wang H C. Introduction to isotope hydrogeology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1900: 66–68. (in Chinese)
- [17]刘宗鑫, 董新光, 吴彬, 等. 新疆鄯善县水环境氢氧同位素特征及其指示作用[J]. *水资源与水工程学报*, 2014, 25(2): 162–165, 171.
- Liu Z X, Dong X G, Wu B, et al. Feature of hydrogen and oxygen isotopes of water environment and their indication in Shanshan County of Xinjiang [J]. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2014, 25(2): 162–165, 171.
- [18]李捷, 庞忠和, 古丽波斯坦·吐逊江, 等. 北疆大气降水水汽源识别及其对地下水补给的指示意义[J]. *科技导报*, 2016, 34(18): 118–124.
- Li J, Pang Z H, Tursun G, et al. Identification of moisture sources in Junggar Basin and its implication for groundwater recharge[J]. *Science & Technology Review*, 2016, 34(18): 118–124.
- [19]王骞迎, 张艺武, 苏小四, 等. 伊犁河谷西部平原多级次地下水循环模式[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2020, 18(4): 167–177.
- Wang Q Y, Zhang Y W, Su X S, et al. Study on multi-level groundwater cycle pattern in the western plain of Yili River Valley [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2020, 18(4): 167–177.
- [20]马致远, 钱会. 环境同位素地下水文学[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2004: 19–20.
- Ma Z Y, Qian H. Environmental isotope groundwater hydrology[M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 2004: 19–20. (in Chinese)