DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2014.02.022

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

刘 芬[1,2], 王水献[1,2], 蓝永超[2], 胡兴林[3]

(1. 兰州大学 资源环境学院, 兰州 730000; 2. 中国科学院寒区旱区与环境工程研究所, 兰州 730000;
3. 甘肃省水文水资源局, 兰州 730000)

摘要: 在西北干旱区内陆河流域, 地表水与地下水转化频繁, 流域内河流和含水层之间的相互作用历来是水循环研究的关键环节。环境同位素作为水循环研究中的示踪剂, 可以有效地揭示流域河流-含水层之间的转化关系。根据张掖盆地黑河河水及其两岸地下水中的稳定氢氧同位素资料及氘过量参数(d)值, 分析了张掖盆地内不同水体中的δD、$\delta^{18}O$ 和 d 值的分布规律及其所指示的地下水主要补给来源和地下水与黑河河水的相互作用关系。结果表明, 张掖盆地内地下水和地表水同源于山区的降水和冰雪融水, 不同深度地下水之间的水力联系密切, 为统一的河流-地下水系统。在张掖盆地灌溉区, 绿洲农田灌溉严重影响了地下水和河水之间的转化, 导致地下水补给地表水的增加。运用质量守恒原理, 定量分析了盆地地下水与地表水转化的转化量, 为正确评价和合理利用水资源奠定了基础。

关键词: 环境同位素; 地下水; δD; $\delta^{18}O$; 张掖盆地; 黑河流域; 干旱区

中图分类号: P426.61 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2014)02-0092-05

Environmental Isotopes Features and Exchanges of Surface-water-Groundwater System in the Zhangye Basin of Heihe River Watershed

LIU Fen[1,2], WANG Shui-xian[1,2], LAN Yong-chao[2], HU Xing-lin[3]

*(1. College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;
2. Cold and Arid Regions Environment and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 3. Hydrology and Water Resources Bureau of Gansu Province, Lanzhou 730000, China)*

Abstract: In the arid inland river basin of western China, groundwater and surface water exchange frequently, and the interaction between the river and aquifer in the river basin is an important research aspect of water cycle. Environmental isotopes can effectively reveal the relationship between the river and aquifer as tracers in the water cycle. Based on the environmental isotope features of hydrogen, oxygen, and deuterium excess (d) in groundwater and Heihe River of the Zhangye Basin, the spatial characteristics of δD, $\delta^{18}O$, and d in different water bodies were analyzed, which may indicate the main sources of groundwater and the interaction between groundwater and Heihe River. The results indicated that the groundwater and river water are mainly derived from the snow milting water and rainfall and the hydraulic connection of groundwater in different depths is very high. In the irrigation area of the Zhangye Basin, flood irrigation on vast farmlands has caused significant impacts on the interaction between groundwater and river water, resulting in the increasing of groundwater recharging river water. The exchange between groundwater and river water was analyzed quantitatively using the mass conservation principle, which can provide scientific basis for accurate assessment and reasonable utilization of water resources.

Key words: environmental isotopes; groundwater; δD; $\delta^{18}O$; Zhangye Basin; Heihe River Watershed; arid zone

在西北干旱地区, 地下水是支持国民经济发展的重要水源, 正确识别地下水的补给来源并厘清地下水与河水之间的相互转化关系和转换量, 对建立区域水循环模式、揭示水资源形成机制、评价水资源总量及地下水污染治理, 从而进行

收稿日期: 2013-12-03 修回日期: 2014-01-14 网络出版时间: 2014-03-10
网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13476/j.cnki.nsbdqk.2014.02.001.html
基金项目: 兰州大学中央高校基本科研业务费专项资金"黑河流域中游河流-含水层转化过程"(lzujbky-2010-181)和中国科学院内陆河流域生态水文重点实验室开放基金联合资助
作者简介: 刘 芬(1986-), 女, 甘肃庆阳人, 硕士研究生, 主要从事地下水数值模拟和水资源利用研究。E-mail: fliu2011@lzu.edu.cn
通讯作者: 王水献(1975-), 男, 河南临颍人, 讲师, 博士, 主要从事干旱区水资源利用与环境保护研究。E-mail: wangshuixian@lzu.edu.cn

水资源合理开发利用和科学管理等都具有重要的理论意义和实际价值[1-3]。

环境同位素存在于各种自然水体中,每种水体都具有独特的同位素组成。由于水循环的作用,产生了同位素分馏,从而引起不同水体中同位素含量的变化。氘" 和氧(^{18}O)的同位素特征δD、$\delta^{18}O$,以及量化各地区大气降水线与全球大气降水线的偏差而产生的氘盈余($\delta d = \delta D - 8\delta^{18}O$)等环境同位素特征为水体打上了各种环境因素影响的特征" 标记",因此成为追踪各种水文作用的理想示踪剂。目前环境同位素已成功地应用于指示水的来源、确定水的年龄、记录水- 岩相互作用、研究水库渗漏以及水土流失等方面,也被广泛应用于地下水补给来源的确定、地下水系统演化以及地下水与地表水之间的相互作用等方面的研究[4-5]。

张掖盆地位于黑河流域中游,属于典型的干旱地区,由于特殊的自然环境和人类活动的影响,其地表水与地下水资源及其循环转化关系引起了国内外学者的广泛关注。目前已有学者利用同位素手段进行了相关方面研究:张光辉等采用环境同位素法、水文分割法、Tamers 和 IAEA 模型等方法开展了黑河流域水循环过程与地下水形成演化模式研究,表明降水量和气温是改变研究区平原地下水补给的两大要素,二者分别占 91%、9% 的权重,而且黑河流域地下水同位素特征与补给源的属性和数量密切相关,具有非均一性[5-9];陈崇宇等利用环境同位素法和水均衡方法识别了流域地下水补给来源[10];聂振龙等应用环境同位素方法研究了黑河源区水文循环特征,并基于水化学方法识别了沿黑河干流不同地带地下水与地表水的相互转化关系[11-12];张应华等利用同位素上游降水中 $\delta^{18}O$ 变化特征,定量分析了黑河中游盆地黑河地下水与地表水的转化量[13-14]。仵彦卿等运用 Stratagem EH4 电导率成像系统发现在哨马营至板滩井存在一个地堑式断层,断裂带为古河道,同时又运用地球物探、盆地地质演化等多种研究方法,综合分析了黑河下游盆地河水与地下水的转化途径及方式[15]。以上研究大多以降水作为切入点,通过环境同位素在水循环中的时空变化,得到宏观尺度上地表水- 地下水系统的相互作用转化特征。

考虑到地下水和河水转化因时因地不同而呈现不同的关系,笔者在张掖盆地沿河流流向采集具有不同水体来源的地下水和地表水样,以质量守恒原理为理论基础,通过分析水体中 δD、$\delta^{18}O$ 的空间分布特征,揭示地下水的补给来源及其与地表水体之间的关系,从而为张掖盆地地下水资源评价和地下水合理开采利用提供科学依据,同时该项工作对黑河水量科学调度及水资源合理配置、高效利用也具有重要意义。

1　研究区概况

张掖盆地的气候特征表现为热量充足,日照长,温差较大,且凉爽湿润,属于大陆荒漠性气候,地理位置为东径 105°19′ - 106°44′,北纬 38°42′ - 39°47′,地处河西走廊中段,西靠临泽,东与山丹、民乐相依,南为肃南裕固族自治县,北依龙首山,总面积约 4 240 km²。黑河中游地区为莺落峡至正义峡区间,在行政区域上包括张掖盆地的甘州区和临泽、高台两县。年均降水量从南部的 250 mm 向北降低至 100 mm 以下,同时沿线海拔则从 2 000 m 以上降至 1 000 m 左右,这样大的地面落差为地表水- 地下水- 地表水之间的转化创造了有利条件。张掖盆地是整个黑河流域地表水与地下水转换最为频繁的地段,是水循环演化的关键地带,同时也是全流域水资源利用程度最高和利用量最大的地区[16]。区内地形地貌平坦,地面海拔一般在 1 050~ 1 200 m,地势东高西低、南高北低,在地貌上可分为祁连山山前冲洪积戈壁平原、盆地中部冲洪积细土平原和北部龙首山山前戈壁平原。盆地潜水系统是一个比较复杂的开放系统,第四系含水系统可分为山前冲积扇单一潜水子含水层系统和细土平原多层潜水- 承压水子含水层系统。整个张掖盆地具有相对独立的补给、径流、排泄特征,构成相对独立的水文地质单元,而盆地内部地表河水与地下水之间的相互转化,将河流与含水层相互连接,从而构成一个统一的" 河流- 含水层" 系统。

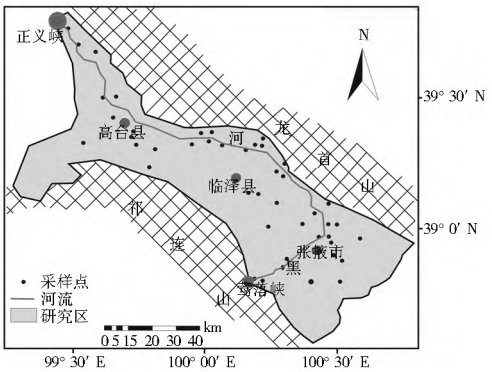

图 1　张掖盆地位置及取样点分布

Fig. 1　Geographic map of the Zhangye Basin and location of water sampling points

2　样品采集与研究方法

2.1　样品采集

地下水环境同位素样品主要沿张掖盆地长轴方向采取,并辅以垂直于黑河的剖面,地表水样品则沿黑河自出山口莺落峡至下游正义峡采取。采样时间为 2010 年 10 月中旬,采集样品 49 个,其中地下水样 37 个,地表水样 12 个,基本控制了张掖盆地黑河影响带。地下水样多取自机井、大口井和手压井,井深在 8~ 120 m 之间。

2.2　地表水- 地下水转化估算方法

按照质量守恒原理,可以估算出地下水排泄到河水中的份额,其质量守恒方程为[5]:

$$O_s \cdot Q_s = O_g \cdot Q_g + O_b \cdot (Q_s - Q_g) \tag{1}$$

式中:O_s 为取样点河水中的 $\delta^{18}O$ 值;O_g 为取样点地下水中 $\delta^{18}O$ 值;O_b 为河流上游来水中 $\delta^{18}O$ 值;Q_s 为取样点河水流量;Q_g 为地下水排泄量。则由公式(2)可以计算出地下水排泄量占河水流量的百分比。

$$f = (Q_g/Q_s) \times 100\% = (O_s - O_b)/(O_g - O_b) \times 100\% \tag{2}$$

2.3　样品的测定方法

样品的 δD 和 $\delta^{18}O$ 由中国林科院国家重点实验室测定,使用仪器为 MAT251 稳定同位素气体质谱仪,测定方法分别为 CO_2 平衡法和金属铀还原法,测试精度分别是 δD 为 ±0.01%,$\delta^{18}O$ ±0.002%。水样测试结果见表 1。

表 1 张掖盆地水样的 δD、$\delta^{18}O$ 和 d 值

Table 1 δD, $\delta^{18}O$, and d value of water samples in the Zhangye Basin

编号	水点类型	δD (‰)	$\delta^{18}O$ (‰)	d/‰	编号	水点类型	δD (‰)	$\delta^{18}O$ (‰)	d/‰
HR-1	河水	-47.55	-8.13	17.47	HS-1	河水	-50	-8.09	14.72
HR-2	河水	-47.98	-8.06	16.47	HS-2	深地下水	-53.9	-8.28	12.34
HR-3	河水	-52.41	-8.44	15.14	HS-3	深地下水	-57.7	-9.99	22.22
HR-4	河水	-50.94	-8.14	14.19	HS-4	深地下水	-55.5	-9.24	18.42
HR-5	河水	-49.51	-7.92	13.82	HS-5	深地下水	-55	-9.29	19.32
HR-6	河水	-51.89	-8.58	16.71	HS-6	中地下水	-53.6	-8.3	12.80
HR-7	河水	-49.67	-8.39	17.41	HS-7	潜水	-57.3	-8.66	11.98
HR-8	河水	-43.57	-6.21	6.13	HS-8	河水	-52.5	-7.89	10.62
HR-9	河水	-46.00	-6.36	4.92	HS-9	泉水	-52.3	-7.91	10.98
HR-10	河水	-41.06	-7.34	17.68	HS-10	深地下水	-55.2	-9.8	23.20
HG1	深地下水	-51.27	-9.01	20.83	HS-11	中地下水	-53.3	-8.08	11.34
HG2	中地下水	-43.46	-7.35	15.36	HS-12	中地下水	-54.3	-8.03	9.94
HG3	深地下水	-62.45	-9.20	11.13	HS-13	潜水	-51.1	-7.67	10.26
HG4	潜水	-51.19	-8.09	13.52	HS-14	深地下水	-48.9	-9.45	26.70
HG5	潜水	-48.18	-7.40	11.02	HS-15	中地下水	-53	-7.86	9.88
HG6	潜水	-49.81	-8.94	21.68	HS-16	深地下水	-63	-9.37	11.96
HG7	潜水	-46.19	-7.26	11.90	HS-17	深地下水	-66.3	-9.53	9.94
HG8	中地下水	-47.13	-7.32	11.44	HS-18	深地下水	-60.5	-9.31	13.98
HG9	潜水	-48.01	-6.69	5.51	HS-19	深地下水	-62.1	-9.42	13.26
HG10	机井	-47.51	-6.76	6.60	HS-20	中地下水	-58.7	-8.95	12.90
HG11	潜水	-46.39	-6.33	4.29	HS-21	潜水	-59.9	-9.26	14.18
HG12	潜水	-46.81	-6.66	6.45	HS-22	潜水	-56.3	-8.63	12.74
HG13	潜水	-44.17	-5.75	1.83	HS-23	中地下水	-74.3	-10.41	8.98
HG14	中地下水	-45.35	-6.47	6.38	HS-24	泉水	-54.1	-7.87	8.86
					HS-25	深井地下水	-69.8	-9.61	7.08

3 结果与分析

3.1 黑河河水氢氧稳定同位素组成

国际原子能机构 IAEA 和世界气象组织 WMO 建立的全球降水同位素观测网 GNIP 中包含中国 27 个监测点的大气降水 δD 和 $\delta^{18}O$ 资料，其中张掖地区大气降水的 $\delta^{18}O$ 和 δD 加权平均值(1986 年- 2000 年)分别是- 6.4‰和- 42‰，因此当地大气降水线方程(LMWL)见公式(3)[2]：

$$\delta D = 6.87\delta^{18}O + 3.45 \quad (3)$$

Dansgaard(1964)提出了氘过量的概念，并将其定义为：

$$d = \delta D - 8\delta^{18}O \quad (4)$$

由此，自莺落峡水文站至正义峡水文站，黑河河水中 δD、$\delta^{18}O$ 和 d 值特征见表 2。

由表 2 可知，黑河河水中的 δD 在- 41.06‰~ - 52.5‰之间，平均值为- 48.59‰，变差系数为- 7.35%；$\delta^{18}O$ 在- 6.21‰~ - 8.58‰之间，平均值为- 7.80‰，变差系数为- 9.89%。以上结果表明，不同环境同位素在地表水- 地下水转化系统中的转化能力也不同，$\delta^{18}O$ 的转化能力较 δD 强烈。黑河河水中 d 值在 4.92‰~ 17.68‰之间，平均值为 13.77‰，变差系数为 31.55%，说明水体受到强烈的蒸发作用，导致重同位素富集。

从研究区 4 种不同水样的 δD- $\delta^{18}O$ 关系图(图 2)可以看出，黑河河水水样中环境同位素分布特征为：($\delta^{18}O$，δD)特征点均靠近当地降水线(GMWL)，仅正义峡水文站处河水样(HR10)紧靠降水线，并沿斜率为 3.93 的蒸发线(EL：δD=

表 2 张掖盆地水样同位素组成统计

Table 2 Statistic characteristics of δD, $\delta^{18}O$, and d in water samples of the Zhangye Basin

项目		δD (‰)	$\delta^{18}O$ (‰)	d(‰)
河水	最大值	-41.06	-6.21	17.68
	最小值	-52.50	-8.58	4.92
	平均值	-48.59	-7.80	13.77
	变差系数	-7.35	-9.89	31.55
中深层地下水	最大值	-43.46	-6.47	26.70
	最小值	-74.30	-10.41	6.38
	平均值	-56.58	-8.83	14.06
	变差系数	-13.56	-11.18	38.72
浅层地下水	最大值	-44.17	-5.75	21.68
	最小值	-59.90	-9.26	1.83
	平均值	-50.38	-7.57	10.17
	变差系数	-9.84	-14.83	52.39

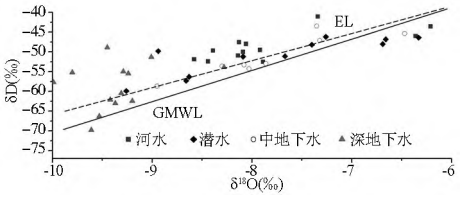

图 2 研究区不同水体 δD- $\delta^{18}O$ 关系

Fig. 2 Relationship between δD and $\delta^{18}O$ of different water bodies in the study area

3.934 6δ^{18}O− 17.237) 分布。

一般来讲,河水水体同位素特征(δ^{18}O, δD) 与该处河水与上游之间的距离呈正相关关系,主要原因是水体经过强烈蒸发所引起的同位素分馏,越接近河流下游,降水越少,空气的干燥程度越高,则引起的同位素分馏效应越大。从图 3 可以看出,黑河河水同位素从出山口莺落峡到下游正义峡存在明显的递增趋势,但在中游 δD 和 δ^{18}O 降低,这可能与中游地区强烈的农业灌溉有关。

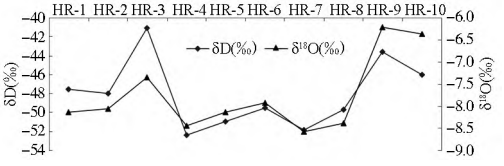

图 3　河水中同位素沿河流方向的变化

Fig.3　Variation of δD and δ18O of stream water along flow direction

3.2　地下水氢氧稳定同位素特征

表 2 和图 2 显示,不同含水层地下水中氢氧稳定同位素组成不同,地下水中 δD 和 δ^{18}O 空间变化大。

浅层地下水中的 δD 在− 44.17‰~ − 59.90‰之间,平均值为− 50.38‰,变差系数为− 9.84%;δ^{18}O 在− 5.75‰~ − 9.26‰之间,平均值为− 7.57‰,变差系数为− 14.83%;d 在 1.83‰~ 21.68‰之间,平均值为 10.17‰,变差系数为 52 39%。

中深层地下水中的 δD 在− 43.46‰~ − 74.30‰之间,平均值为− 56.58‰,变差系数为− 13.56%;δ^{18}O 在− 6.47‰~ − 10.41‰之间,平均值为− 8.83‰,变差系数为− 11.18%;d 在 6.38‰~ 26.70‰之间,平均值为 14.06‰,变差系数为 38.72%。

由图 2 可以看出,地下水中氢氧同位素组成大多位于当地大气降水线(GMWL) 下方,δD 和 δ^{18}O 方程可表示为:

$$\delta D = 5.3325\delta^{18}O - 9.0007 \quad (5)$$

斜率小于张掖盆地降水线(LWML),表明地下水的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,使氢氧同位素点偏离大气降水线并位于其右下方。

根据地下水中的 δD 和 δ^{18}O 值,可以将研究区地下水分为 3 类:第 I 类水样点位于降水线的左上方,这可能是存在较强水岩相互作用的结果;第 II 类水样点位于降水线的左下方,主要取自黑河沿岸且靠近河流,地下水位埋深浅,存在较为明显的氧同位素重化漂移,地下水可能经历了较强的蒸发作用或存在较强的水岩作用;第 III 类为水样散布于局部蒸发线附近,包含剩余水样,主要取自黑河北岸和南岸较远离河流的区域。

由于地下水与河水的氢氧稳定同位素组成差别较大,因此利用线性区间估计方法来对二者关系进行了分析(见图 4)。河水和地下水的同位素转化关系表现为线性特征:

$$\delta D = 5.0313\delta^{18}O - 11.551 \quad (6)$$

其中相关系数 $R = 0.804$, $F = 81.062 > F_{0.05}(1, 49) = 4.10$, 在 $\alpha = 0.05$ 水平下二者线性关系显著。

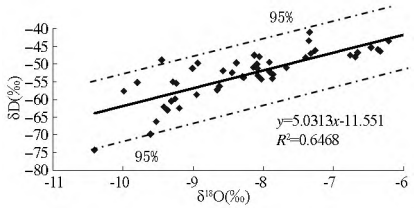

图 4　河水和地下水中 δD-δ^{18}O

Fig.4　Relationship between δD and δ^{18}O of stream water and groundwater

由图 4 可知,河水和地下水的 δ^{18}O、δD 特征点均分布于蒸发线的 95% 置信区间内,表明研究区内河水和地下水同源于大气降水,在进入山口之前经历蒸发作用,自莺落峡进入张掖盆地后,河水大量入渗补给地下水,地下水所受蒸发作用弱,因此其 δD 和 δ^{18}O 普遍小于河水。此外,季节差别和温度效应也增加了二者的差别[15,17-18]。

3.3　地表水− 地下水转化关系

根据样品测试结果,由公式(2) 计算得到各测点上地下水排泄量对河水流量的贡献百分比(见表 3)。可以发现,研究区从新黑河大桥断面至正义峡断面位置,为地下水排泄区间,其整体补给趋势明显递增,局部呈现波浪型正态分布趋势,并在高崖水文站至平川大桥区间和高台大桥至正义峡区间达到峰值。呈现这种正态分布趋势的主要原因是,黑河流域中游地区为绿洲农田灌溉密集区,大量的引水灌溉和地下水开采改变原有的地下水和河水转化关系,从而导致河水对沿程地下水补给渗漏减少,相对应的地下水向地表水的排泄量增加。在张掖盆地,个别区域灌溉用水导致地下水对河水的补给量增加超过 80%。

表 3　河流各测点地下水排泄所占河水中的百分比

Table 3　Percentages of groundwater discharge over total surface water flux at each measurement site

项目	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8	H9
O_s(‰)	− 8.06	− 8.44	− 8.14	− 7.92	− 8.58	− 8.39	− 6.21	− 6.36
O_g(‰)	− 7.35	− 9.20	− 8.09	− 7.40	− 8.94	− 6.76	− 5.75	− 6.47
O_b(‰)	− 8.13	− 8.06	− 8.44	− 8.14	− 7.92	− 8.58	− 8.39	− 6.21
f(%)	9.22	33.99	85.22	30.47	64.65	10.49	82.45	60.31
断面位置	新黑河大桥	高崖水文站	黑河大桥下	平川黑河大桥		高台黑河大桥	罗成黑河大桥	正义峡水文站

由此可见,黑河河水与地下水的交换情况沿程是有所变化的,不同地段随地下水水位高低起伏而发生补给或排泄。通常情况下,地表水以补给地下水为主,但是在农业灌区附近,农田灌溉改变了地下水和地表水之间的转化方式和转化量,以地下水排泄补给地表水为主,使其对地表水的贡献量超过 50%。这种地下水与地表水之间补给方式的转换,将导致河水补给地下水量的减少。

4　结论

(1) 张掖地下水和河水同源于山区大气降水,二者都经

受一定蒸发作用而产生重同位素聚集。温度效应和蒸发程度不同导致二者同位素组成存在较大差异。利用这种差异,能很好地分析河水与地下水之间的相互转化。地下水主要由经历蒸发作用的河水在洪积扇的大量入渗补给,而浅层地下水由于接受河流引水灌溉的补给,蒸发作用强烈,水土相互作用频繁,河流与地下水存在密切的水力联系。

(2) 黑河河水与地下水的交换随沿程发生变化,不同地段随地下水水位高低起伏而发生补给或排泄。在盆地中游灌溉密集区,农业引水改变了河流与地下水的补排关系,使得地下水通过排泄补给地表水,其对地表水的贡献量一般超过 50%。

参考文献(References):

[1] 宋献方,刘相超,夏军,等.基于环境同位素技术的怀沙河流域地表水和地下水转化关系研究[J].中国科学 D 辑:地球科学,2007,37(1):102-110.(SONG Xian-fang, LIU Xiang-chao, XIA Jun, et al. A Study of Interaction Between Surface Water And Ground-Water Using Environmental Isotope in Huaisha River Basin[J]. Science In China: 2007, 37(1): 102-110. (in Chinese)

[2] 苏小四,林学钰.银川平原地下水循环及其可更新能力评价的同位素证据[J].资源科学,2004,26(2):29-35.(SU Xiao-si, LIN Xue-yu. Cycle Pattern and Renewablity Evaluation of Groundwater in Yinchuan Basin Isotopic Evidences[J]. Resources Science, 2004, 26(2): 29-35. (in Chinese)

[3] Paternoster M, Liotta M, Favara R. Stable Isotope Ratios in Meteoric Recharge and Groundwater at Mt. Vulture Volcano, Southern Italy[J]. Journal of Hydrology, 2008, 348: 87-97.

[4] 张应华,仵彦卿,温小虎,等.环境同位素在水循环研究中的应用[J].水科学进展,2006,17(5):738-747.(ZHANG Ying-hua, WU Yan-qing, WEN Xiao-hu, et al. Application of Environmental Isotopes in Water Cycle[J]. Advances in Water Science, 2006, 17(5): 738-747. (in Chinese)

[5] Mahlknecht J, Schneider J F, Merkel B J, et al. Groundwater Recharge in A Sedimentary Basin in Semi-arid Mexico [J]. Hydrogeology Journal, 2004, 12: 511-530.

[6] 张光辉,聂振龙,张翠云,等.黑河流域走廊平原地下水补给变异特征与机制[J].水利学报,2005,36(6):715-720.(ZHANG Guang-hui, NIE Zhen-long, ZHANG Cui-yun, et al. Mechanism and Characteristics of Groundwater Replenishment Variation in Middle Reaches of Heihe River Basin [J]. Journal of hydraulic Engineering, 2005, 36(6): 715-720. (in Chinese)

[7] 张光辉,聂振龙,刘少玉,等.黑河流域走廊平原地下水补给源组成及其变化[J].水科学进展,2005,16(5):673-678.(ZHANG Guang-hui, NIE Zhen-long, LIU Shao-yu, et al. Characteristic and Variation of Groundwater Recharge Resources in the Middle Reaches of Heihe River Basin [J]. Advances in Water Science, 2005, 16(5): 673-678. (in Chinese)

[8] 张光辉,聂振龙,王金哲,等.黑河流域水循环过程中地下水同位素特征及补给效应[J].地球科学进展,2005,20(5):511-518.(ZHANG Guang-hui, NIE Zhen-long, WANG Jin-zhe, et al. Isotopic Characteristic and Recharge Effect of Groundwater in the Water Circulation of Heihe River Basin[J]. Advances in Earth Science, 2005, 20(5): 511-518. (in Chinese)

[9] 张光辉,陈宗宇,聂振龙,等.黑河流域地下水同位素特征及其对古气候变化的响应[J].地球学报,2006,27(4):341-348.(ZHANG Guang-hui, CHEN Zong-yu, NIE Zhen-long, et al. Isotopic Characteristics of Groundwater and its Response to Paleoclim Variation in Heihe River Basin[J]. Journal of Earth Science, 2006, 27(4): 341-348. (in Chinese)

[10] 张光辉,聂振龙,谢悦波,等.甘肃西部平原区地下水同位素特征及更新性[J].地质通报,2005,24(2):149-155.(ZHANG Guang-hui, NIE Zhen-long, XIE Yue-bo, et al. Isotopic Characteristics of Groundwater and its Renewal in the Plain Area of Western Gansu [J]. Regional Geology of China, 2005, 24(2): 149-155. (in Chinese)

[11] 陈宗宇,万力,聂振龙,等.利用稳定同位素识别黑河流域地下水的补给来源[J].水文地质工程地质,2006,(6):9-14.(CHEN Zong-yu, WAN Li, NIE Zhen-long, et al. Identification of Groundwater Recharge in the Heihe Basin Using Environmental Isotopes[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2006, (6): 9-14. (in Chinese)

[12] 聂振龙,陈宗宇,申建梅,等.应用环境同位素方法研究黑河源区水文循环特征[J].地理与地理信息科学,2005,21(1):104-108.(NIE Zhen-long, CHEN Zong-yu, SHEN Jian-mei, et al. Environmental Isotopes as Tracers of Hydrological Cycle in the Rechargearea of the Heihe River[J]. Geography and Geo-Information Science, 2005, 21(1): 104-108. (in Chinese)

[13] 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 Zhen-long, CHEN Zong-yu, CHENG Xu-xue, 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)

[14] 张应华,仵彦卿,丁建强,等.运用氧稳定同位素研究黑河中游盆地地下水与河水转化[J].冰川冻土,2005,27(1):106-110.(ZHANG Ying-hua, WU Yan-qing, DING Jian-qian, et al. Exchange of Groundwater and River Water in a Basin of the Middle Heihe River by Using $\delta^{18}O$[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2005, 27(1), 106-110. (in Chinese)

[15] 张应华,仵彦卿.黑河流域中上游地区降水中 $\delta^{18}O$ 变化特征[J].冰川冻土,2007,29(3):440-445.(ZHANG Ying-hua, WU Yan-qing. Characteristics of the $\delta^{18}O$ in Precipitation in the Upper and Middle Reaches of Heihe River [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2007, 29(3): 440-445. (in Chinese)

[16] 黑河中游张掖盆地地下水开发风险评价及调控[D].兰州:兰州大学,2011.(Risk Assessment and Regulation of Groundwater Development in Zhangye Basin of the Middle Reaches of the Heihe River[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2011. (in Chinese)

[17] 仵彦卿,张应华,温小虎,等.西北黑河下游盆地河水与地下水转化的新发现[J].自然科学进展,2004,14(12):1428-1433.(WU Yan-qing, ZHANG Ying-hua, WEN Xiao-hu. The New Found of Transformation Between River and Groundwater in Hehei Basin Downstream, Northwst[J]. Progress in Natural Science, 2004, 14(12): 1428-1433. (in Chinese)

[18] 刘延锋,靳孟贵,李旭峰.新疆焉耆盆地水环境同位素特征及其指示作用[J].地质科技情报,2009,28(6):89-94.(LIU Yan-feng, JIN Meng-gui, LI Xu-feng. Features of Environmental Isotopes of Hydrogen and Oxygen of Water and Their Indication in Yanqi Basin, China[J]. Geological Science and Technology Information, 2009, 28(6): 89-94. (in Chinese)