

内蒙古达里诺尔湖流域地表水和地下水环境同位素特征及补给关系*

甄志磊¹, 李畅游^{1**}, 李文宝¹, 胡其图², 刘晓旭¹, 刘志娇¹, 于瑞雪¹

(1: 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018)

(2: 赤峰市克旗达里诺尔国家级自然保护区生态旅游有限公司, 赤峰 025373)

摘要: 为了探明达里诺尔湖流域地表水与地下水的氢(H)、氧(O)同位素的变化特征及相互补给关系, 于2013年对达里诺尔湖及其周围的河水、井水、泉水中H、O同位素进行了取样分析, 并结合总溶解性固体悬浮物(TDS)和区域水文地质对达里诺尔湖流域的补给关系进行讨论分析。结果表明: 1) 河水、泉水、井水中H、O同位素的值基本落在全球雨水线上, 湖水H、O同位素落在全球雨水线的右下方, 说明河水、井水、泉水没有发生蒸发分馏, 而湖水则发生较大程度的蒸发分馏; 对达里诺尔湖流域地表水与地下水的H、O同位素进行回归模拟, 得出该区域的蒸发趋势线方程: $\delta D = 4.8753 \delta^{18}O - 20.139$ ($n = 32$, $R^2 = 0.9968$)。蒸发线表明, 这些水样具有相同水源的特征。2) 从实地考察发现, 泉水补给河水, 泉水和河水补给湖水, 同时井水、泉水和河水有相似的 δD 、 $\delta^{18}O$ 和TDS值, 且不随季节变化而变化, 推断达里诺尔湖附近地下水补给湖水; 区域水文地质条件亦证明达里诺尔湖周边地下水补给湖水。

关键词: 氢氧同位素; 固体悬浮物; 地下水; 地表水; 补给关系; 达里诺尔湖

Characteristics of environmental isotopes of surface water and groundwater and their recharge relationships in Lake Dali basin

ZHEN Zhilei¹, LI Changyou¹, LI Wenbao¹, HU Qitu², LIU Xiaoxu¹, LIU Zhijiao¹ & YU Ruixue¹

(1: *Water Conservancy and Civil Engineering College of Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, P. R. China*)

(2: *National Nature Reserve Ecological Tourism Co., LTD of KeShenKeTeng DaLiNuoEr, Chifeng 025373, P. R. China*)

Abstract: To examine the characteristics of hydrogen and oxygen isotopes change in surface water and groundwater and their relationships of discharge and recharge in the Lake Dali basin, the hydrogen and oxygen isotopes were detected from the water samples of rivers, wells and springs around the Lake Dali in 2013. The discharge-recharge relationship in the Lake Dali basin was analyzed with regional hydrogeology and total dissolved solids (TDS) of the lake. The results showed that 1) the values of hydrogen and oxygen isotopes in the rivers, springs and wells are all on the globe rainfall lines, while those in the lake are at the right below the globe rainfall line. It means there was no evaporation in the rivers, wells and springs, but a larger evaporation in the lake. The regression analysis of groundwater and lake water of the Lake Dali basin was performed and the regional evaporation equation is $\delta D = 4.8753 \delta^{18}O - 20.139$ ($n = 32$, $R^2 = 0.9968$). The evaporation equation showed that the water samples have the characteristics of identical water source. 2) It is observed that springs recharge rivers and both of them recharge lake. Meanwhile, springs, rivers and lake have the similar values of δD , $\delta^{18}O$ and TDS, and the values do not change with seasons. It can conclude that the groundwater around Lake Dali recharges the lake, and it is also proved with regional hydrogeological conditions.

Keywords: Hydrogen and oxygen isotopes; total dissolved solids; groundwater; surface water; recharge relationship; Lake Dali

地表水和地下水是水循环的重要组成部分, 地表水与地下水之间的交换补偿关系则是水循环过程研究的重要方向之一。现有研究结果显示, 内蒙古高原湖泊群主要呈串珠状分布在内蒙古高原至大兴安岭沿线,

* 国家自然科学基金项目(51169017)、内蒙古自治区重大科技项目(20091408)和内蒙古自然科学基金项目(2012MS0615)联合资助。2013-12-20 收稿; 2014-04-14 收修改稿。甄志磊(1987~), 男, 博士研究生; E-mail: zhencheng7666@163.com.

** 通信作者; E-mail: nndlichangyou@163.com.

这一区域的地质构造显示存在北东方向的重力与磁场的异常带上^[1-2];而在自然地理条件上,特别是内蒙古中西部地区(如达里诺尔湖),属干旱-半干旱气候区,年均降水量往往远小于年均蒸发量^[3-4]。虽然传统的区域水文地理观点认为降水形成的地表径流和地下径流是湖泊水体的主要补给来源,但是对降水主要集中在夏季的内蒙古高原来讲,上述理论显然存在一定的问题^[5]。

伴随元素地球化学方法的不断成熟,液态水稳定同位素方法成为研究大气降水、地表水和地下水之间相互转化关系及转化量的一种有效的手段,尤其是在转化关系复杂的干旱和半干旱地区^[6]。¹⁸O和氘(D)是稳定的环境示踪剂,在不同尺度上被用于跟踪水文循环^[7]。例如,Fritz等研究了降雨过程中径流和 $\delta^{18}\text{O}$ 随时间的变化,评价了涨水期的降雨量和地下水径流量的关系^[8];Payne等描述泉水的补给区,确定了泉水的补给源^[9]。Katz等用地下水和地表水之间H、O同位素和水化学组成的明显区别,为调查地表水和地下水系统提供了定量的方法^[10]。Anne等建立了湖水同位素质量平衡模型,并为模型规定了条件,模型和实测值显示,湖水的下面一定得到地下水的补给^[11]。在国内,液态水稳定同位素技术和水化学相结合的方法已经被广泛应用到湖水与地下水补给来源分析研究中。Ma等对石羊河流域地下水循环过程中的水化学和稳定同位素地球化学特征进行研究发现,含水层主要由起源于山区的地表水补给,降水、地表水和地下水之间存在频繁的相互转换^[12-14];聂振龙和陈宗宇等用稳定同位素(²H和¹⁸O)及水化学方法识别黑河流域地下水和地表水的补给来源、组成和径流过程^[15-16]。张华安等通过对巴丹吉林沙漠湖泊和地下水氢氧同位素分析,发现巴丹吉林沙漠东南部湖泊和地下水具有相似的蒸发趋势,确定了两者之间存在一定的补给关系^[17]。然而,时至今日,对内蒙古高原上的湖泊地表水和地下水之间补给关系的研究尚不多见。

达里诺尔湖(以下简称:达里湖)是内蒙古高原上一个较大的湖泊,南部为浑善达克沙地,其它方位上为草原,其特殊的地理环境使得达里湖成为生态旅游、渔业和科学研究的重要之地。从实地调查分析,达里湖的水量主要靠4条河水的注入和大气降水补给。从2012年(丰水年)的水文数据可知,4条河年入湖总量仅为 $4424.49 \times 10^4 \text{ m}^3$,其中耗来河年入湖量最小,为 $13.28 \times 10^4 \text{ m}^3$,且经常出现断流。达里湖处在半干旱地区,蒸发量大于降雨量(蒸发量是降雨量的3.6倍,参考白音敖包气象站)。2010年,达里湖湖面面积为 188.48 km^2 ,比1999年缩小将近 25.06 km^2 ^[18],水资源日益紧张。为保证达里湖流域经济持续发展和生态环境的良性循环,迫切需要对达里湖流域的地下水和湖水的补给关系进行深入研究。达里湖的研究多集中在水化学^[19]和有机碳^[20]方面,在达里湖流域,湖水和地下水补给关系仍然未被研究,所以,探讨地下水与湖水是否存在补给关系,对达里湖的经济和生态平衡具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

达里湖位于内蒙古高原,其形成原因与新构造运动密切相关。第三纪初期(也可称为古近纪初期),内蒙古高原曾发生过很大的地面下降运动,导致规模巨大的内陆湖盆形成,而达里湖就是这一巨大内陆湖的组成部分之一。目前,达里湖湖盆东北的剥蚀低山出露古生代的变质碎屑岩及灰岩,其上覆盖有中生代的火山角砾岩;湖盆东南的达尔乌拉(大王庙)附近山地为早二叠纪-中侏罗纪的粗粒花岗岩斑岩;北面湖盆底部亦见有中生代的火山角砾岩出露,而在湖盆的西北部则分布着大面积的玄武岩熔岩盆地。因此,达里湖也可以看成一个岩溶堵塞湖。达里湖流域含水层主要包括松散堆积层孔隙水和基岩裂隙水。

达里湖位于克什克腾旗西部,春季干旱多风,夏季短促酷热,秋季气温较低,昼夜温差较大,冬季漫长寒冷。多年平均降水量396.1 mm,受季风影响降水量年内时空分布不均,降水主要集中在6—8月份,其降雨量占全年的79.2%。最大降水量为522.5 mm,最小降水量为262 mm。该地区因受日照、植被、风速、气温等因素的影响,蒸发量平原区高于山区,多年平均蒸发量为1425.3 mm,为多年平均降水量的3.6倍。

1.2 采样与测试

依据湖泊水深的变化特征及河水入湖位置,对湖泊采样点进行了布置;河水布点依据靠近湖边位置和交通条件确定;井水布点依据水位埋深(表1)和交通条件确定。采样点具体位置见图1。本研究于2013年9月28日和11月11日共采集井水、河水、泉水和湖水样品40个(表2)。使用500 ml细口聚乙烯瓶作为采样瓶,使用前用原水润洗3次,采样后用封口膜封住,防止蒸发分馏,水样通过 $0.45 \mu\text{m}$ 的滤膜后进行测试。

稳定同位素²H或³H、¹⁴C、¹⁸O等可作为水、碳、养分和溶质循环的示踪剂^[21-22]. 水体在蒸发、凝聚、降落和径流等运移过程中发生不同程度的同位素分馏,水中稳定同位素¹⁸O和²H受气候的影响,表现了它们起源的标志特征^[21,23]. δD和δ¹⁸O采用美国LGR公司LMIA-V2(DLT-100)液态水同位素分析仪测定,分析精度均为±0.2‰. 总溶解性固体悬浮物(TDS)采用TDS测试笔(EUTECH, TDSTestr10 low+)现场测定.

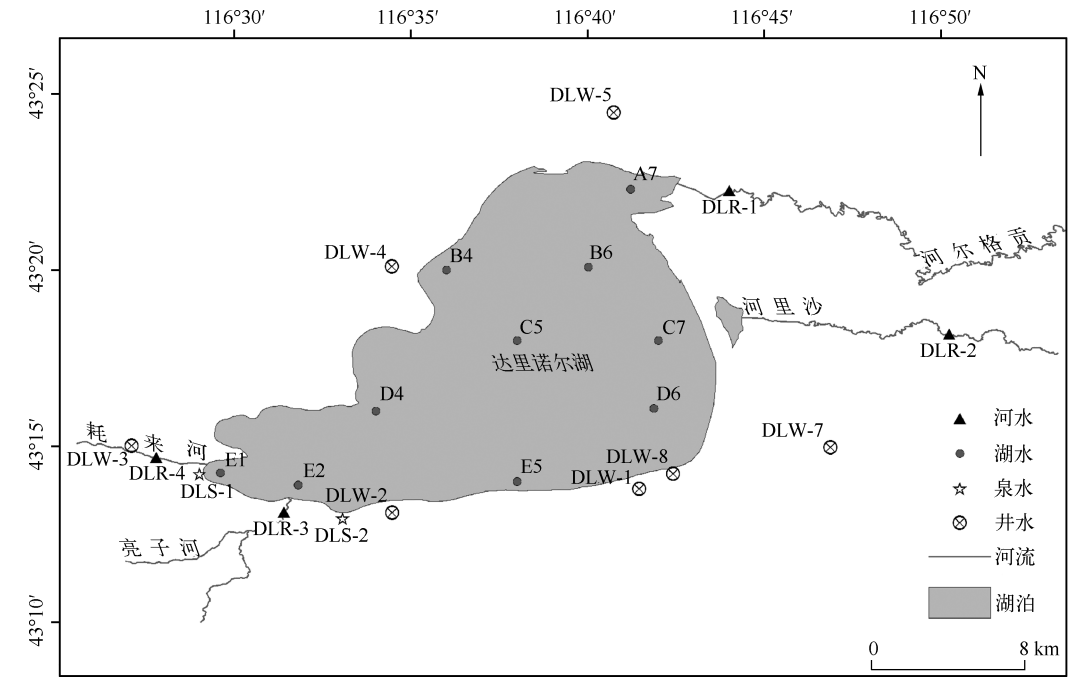


图1 达里诺尔湖流域地表水和地下水采样点分布

Fig. 1 Distribution of surface water and groundwater sampling sites in Lake Dali basin

表1 2013年达里诺尔湖流域井水水位埋深和湖水水位变化*

Tab. 1 Buries depth of groundwater and lake water level changes in Lake Dali basin in 2013

样品编号	埋深(水位)/m					
	6月10日	6月20日	7月14日	7月28日	8月20日	9月27日
DLW-1	4.7	4.7	4.4	4.4	4.5	—
DLW-2	10.5	10.6	9.8	8.7	8.8	8.5
DLW-3	4.1	4.2	3.9	3.8	4.0	4.5
DLW-4	6.2	5.9	5.8	5.7	—	—
DLW-5	10.7	10.6	10.5	10.5	10.4	10.6
DLW-7	1.9	2.0	1.7	1.7	2.0	2.3
DLW-8	3.4	3.5	3.2	3.1	3.1	3.4
湖水	-85	-86	-77	-75	-80	-87

* “—”表示数据缺失.

2 结果与讨论

2.1 水体氢、氧同位素分析

研究区湖水和泉水的δD和δ¹⁸O值变化范围较小,河水和井水的变化范围较大.湖水的δD变化范围为-38.74‰~-36.33‰,δ¹⁸O值为-3.93‰~-3.27‰;河水的δD变化范围为-101.83‰~-78.51‰,

$\delta^{18}\text{O}$ 值为 $-15.74\text{‰} \sim -12.01\text{‰}$; 井水的 δD 变化范围为 $-85.61\text{‰} \sim -57.53\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}$ 值为 $-13.53\text{‰} \sim -8.09\text{‰}$ (表 2)。通过对 9 月 (夏季) 和 11 月 (秋季) 的氢、氧同位素的变化分析发现, 两个季节的数据较接近 (表 2), 这表明达里湖湖水及其周围的地下水氢、氧同位素较稳定, 从而推断湖水的补给水源较稳定, 不随季节的变化而变化。这与岱海较稳定的补给水源特征相似^[5]。

表 2 达里诺尔湖流域地表水和地下水的 TDS、氢和氧同位素测定值*

Tab. 2 TDS and the H, O isotope testing results of surface water and groundwater in Lake Dali basin

样品类型	样品编号	2013 年 9 月 28 日			2013 年 11 月 11 日		
		$\delta\text{D}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$	TDS/(g/L)	$\delta\text{D}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$	TDS/(g/L)
井水	DLW-1	-83.73	-13.28	0.16	-84.22	-13.43	0.18
	DLW-2	-82.64	-13.11	0.12	-83.86	-12.67	0.23
	DLW-3	-85.61	-13.44	0.24	-84.55	-12.62	0.29
	DLW-4	-84.75	-13.30	0.83	-85.14	-13.22	0.63
	DLW-5	-57.53	-8.36	1.72	-59.02	-8.09	1.58
	DLW-7	-84.90	-13.53	0.39	-85.54	-12.99	0.41
	DLW-8	-83.87	-13.23	0.51	-84.63	-12.78	0.43
河水	DLR-1	-101.83	-15.74	0.21	-100.19	-15.23	0.31
	DLR-2	-84.04	-13.01	0.31	-78.51	-12.01	0.34
	DLR-3	-81.94	-12.81	0.16	-82.69	-12.75	0.22
	DLR-4	-83.32	-12.64	0.23	-82.63	-12.35	0.15
泉水	DLS-1	-84.30	-13.33	0.19	-84.38	-13.13	0.13
	DLS-2	-82.21	-12.81	0.13	-83.08	-12.87	0.11
湖水	A7	-36.44	-3.46	5.07	-36.81	-3.58	5.42
	B4	-37.78	-3.37	5.21	-36.82	-3.50	5.67
	B6	-37.23	-3.43	4.85	—	—	—
	C5	-37.05	-3.30	5.76	—	—	—
	D4	-36.96	-3.31	5.84	—	—	—
	D6	-37.46	-3.27	5.82	—	—	—
	E1	-36.76	-3.34	4.85	-37.58	-3.62	5.34
	E2	-37.12	-3.41	5.74	-38.74	-3.62	6.12
	E5	-36.33	-3.46	5.74	-37.17	-3.93	5.86

* “—”表示数据缺失。

从图 2 可以看出, 河水、井水和泉水中的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 基本落在全球雨水线 (GMWL)^[24] 上, 说明三者主要水源来自大气降水, 且没有发生蒸发分馏作用; 而湖水落在全球雨水线的右下方, 各湖水样品的氢、氧同位素值基本一致, 且明显大于河水、泉水和井水的同位素值, 说明达里湖的开阔水域环境使湖水受到强烈蒸发作用的影响, 易导致同位素过度分馏, δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 会强烈富集^[25-27], 同时也符合达里湖地处干旱半干旱地区蒸发量大于降雨量的事实。井水、泉水和河水除样品 DLR-1 (贡格尔河) 和 DLW-5 (井水) 以外, δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值基本都保持一致。 $\delta\text{D} - \delta^{18}\text{O}$ 的“蒸发斜率”是湿度的函数^[21], 通过对达里湖流域湖水和地下水的氢、氧同位素进行回归模拟 (图 2), 得出区域的蒸发趋势线方程:

$$\delta\text{D} = 4.8753\delta^{18}\text{O} - 20.139 \quad (n = 32, R^2 = 0.9968) \quad (1)$$

蒸发线 1 明显偏离 GMWL。这种现象往往出现在干燥气候或封闭盆地中^[28]。蒸发线 1 表明, 这些水样具有相同水源的特征, 而落在蒸发线不同部位的水样则反映了它们遭受不平衡蒸发程度存在差异。与内蒙古高原上岱海流域的蒸发线斜率 4.9678^[5] 和乌梁素海流域的 4.66^[29] 对比发现, 达里湖流域的蒸发程度与岱海相近, 但小于乌梁素海的蒸发程度。

实地考察发现, DLR-3 (亮子河) 和 DLR-4 (耗来河) 得到了浑善达克沙地中泉水的补给, DLS-1 和 DLS-2

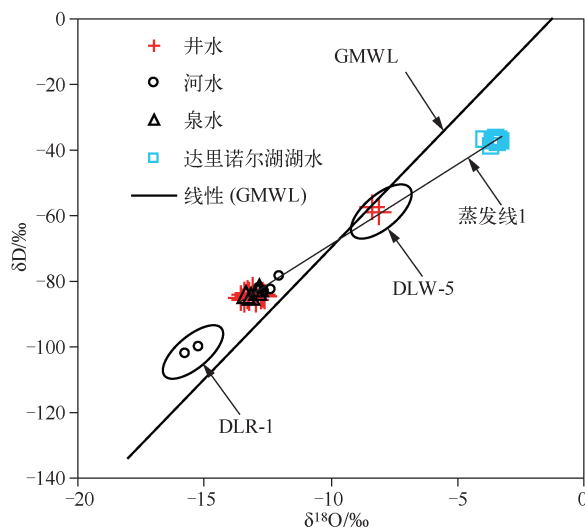


图2 达里诺尔湖流域地表水和地下水
氢、氧同位素的回归模拟

Fig. 2 The $\delta D - \delta^{18}O$ relationship of surface water and
groundwater in Lake Dali basin

位素值也会升高^[31]. 因此, 分析流域水体中 TDS 的空间分布趋势, 可以大概了解流域内地表水和地下水进一步的补给-交换关系.

从图3可以看出, 除 DLW-5 点位外, 地下水表现出相似的 TDS 值, 变化范围为 0.12 ~ 0.83 g/L. DLW-5 点位的 TDS 值较高, 正好与此点氢、氧同位素值较高相吻合. 湖水中 TDS 值都较高, 变化范围为 4.85 ~ 5.84 g/L, 是地下水中 TDS 值的 10 倍左右, 说明蒸发作用使得湖水中溶解性固体悬浮物富集, 这与湖水中各点位较高的氢、氧同位素值相吻合.

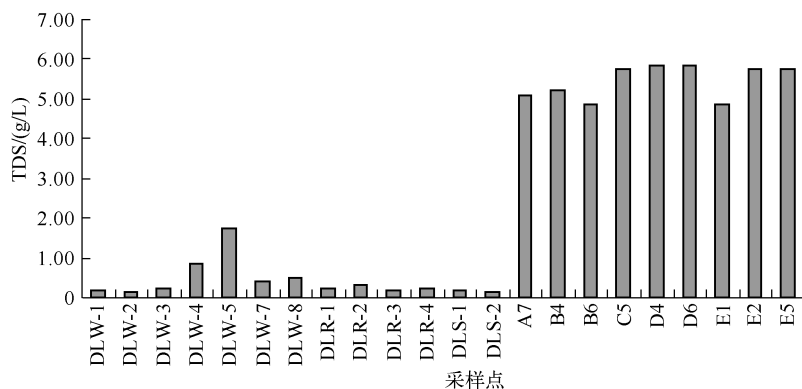


图3 9月份达里诺尔湖流域地表水和地下水 TDS 的变化

Fig. 3 Variation of TDS of surface water and groundwater in Lake Dali basin in September

2.3 地下水循环的演变分析

从区域水文地质条件可知, 达里湖东部山区, 岩石裸露, 岩层节理裂隙发育, 且多为开型, 有利于大气降雨的直接入渗, 成为地下水的主要补给区. 入渗山区的地下水一小部分以泉水的形式常年排泄于沟谷, 大部分以潜流的形式补给山前、河谷阶地砂砾石层潜水. 达里湖西部高原地面平缓开阔, 地表水系不发育, 表

泉水直接补给达里湖, 而井水与泉水的氢、氧同位素值相似, 说明达里湖周围地下水补给湖水; 位于达里湖北岸的 DLW-5 井水样品的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值大于其它井水样品且小于湖水, 通过观察达里湖流域的综合水文地质图, 达里湖流域没有发现断裂带, 所以无法确定此处地下水与地表水的补给关系, 下一步工作需要寻找其它水源井替代此点. 而 DLR-1 (贡格尔河) 具有较低的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值, 是因为贡格尔河发源于克什克腾旗东北部黄岗梁地区阿拉哈山西麓, 距离达里湖流域较远.

2.2 水体的 TDS 特征

TDS 反映的是水体中总固体性离子的浓度, 在一定程度上也反映了水循环过程中停留时间的长短. 在水体运动过程中, 当可溶性矿物不断溶解, 形成离子并与邻近的岩层和土壤交换时, 水体中电导率 (EC) (EC 与 TDS 呈正相关) 随着流动路径和停留时间的延长逐渐增大^[30]. 通常 TDS 和同位素值具有相似的变化趋势, 沿径流方向随 TDS 的升高, 同

层为风积沙,上层无黏土覆盖,下部为巨厚的中细砂、粉细砂层,有利于降雨入渗和贮存。入渗该区的地下水均以潜流的形式排泄入达里湖,成为地下水的补给径流区。地下水的径流方向和地表水径流方向相吻合。高平原达尔罕盆地(达里诺尔盆地)地下径流方向为北西向,地下水水力坡度 5‰。综上所述,达里湖流域地下水与地表水的关系是地下水补给地表水,与氢、氧同位素分析得出的结论相同。

3 结论

1) 河水、泉水、井水中氢氧同位素的值基本落在全球雨水线上,说明它们的主要水源为降雨,并且没有发生蒸发分馏;湖水落在全球雨水线的右下方,是因为湖水宽阔的水域,易发生蒸发分馏作用。通过对达里湖区域的地表水和地下水的氢、氧同位素进行回归模拟,发现这些水样具有相同水源的特征。

2) 通过对 2013 年 9、11 月数据分析可知,井水、泉水和河水有相似的 δD 、 $\delta^{18}O$ 和 TDS 值,并且不随季节变化而变化;从实地考察发现,泉水补给河水,泉水和河水补给湖水,由此推断达里湖附近地下水补给湖水。对于达里湖北岸 DLW-5 样点,不能确定其与湖水的补给关系,需要进一步的验证。

3) 从区域水文地质条件分析,达里湖东部主要以潜流的形式补给山前、河谷阶地砂砾石层潜水,达里湖西部地下水均以潜流的形式排泄入达里湖,其流域内无断裂带,进一步证明了达里湖周围地下水补给湖水。致谢:感谢审稿专家提出的宝贵意见;感谢达里诺尔国家级自然保护区生态旅游有限公司在采样过程中给予的大力帮助。

4 参考文献

- [1] 马宗晋,高祥林,宋正范. 中国布格重力异常水平梯度图的判断和构造解释. 地球物理学报, 2006, **49**(1): 106-114.
- [2] 张建国,刘晓灿,唐庭梅等. 汶川地震前后中国大陆地磁场动态演化特征初步研究. 地震研究, 2009, **32**(3): 231-234.
- [3] 张存厚,吴学宏,李永利. 内蒙古近 45a 蒸发量气候变化特征分析. 干旱区资源与环境, 2007, **21**(12): 93-98.
- [4] 穆少杰,李建龙,陈奕兆等. 2001—2010 年内蒙古植被覆盖度时空变化特征. 地理学报, 2012, **67**(9): 1255-1268.
- [5] 陈建生,季弼宸,刘震等. 内蒙古高原岱海接受远程深循环地下水补给的环境同位素及水化学证据. 湖泊科学, 2013, **25**(4): 521-530.
- [6] 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. 水科学进展, 2006, **17**(5): 738-745.
- [7] Gibson JJ, Edwards TWD, Birks SJ *et al.* Progress in isotope tracer hydrology in Canada. *Hydrological Processes*, 2005, **19**: 303-327.
- [8] Fritz P, Cherry J, Weyer KU *et al.* Storm runoff analyses using environmental isotopes and major ions. In: IAEA ed. Interpretation of environmental isotope and hydrochemical data in groundwater hydrology 1975. Vienna: Workshop Proceedings, 1976: 111-130.
- [9] Payne BR, Leontiadis J, Dimitroulas C. A study of the Kalamos springs in Greece with environmental isotopes. *Water Resources Research*, 1978, **14**(4): 653-658.
- [10] Katz BG, Coplen TB, Bullen TD. Use of chemical and isotopic tracers to characterize the interactions between ground water and surface water in Mantled Karst. *Ground Water*, 1997, **35**: 1014-1028.
- [11] Seebach A, Dietz S, Lessmann D *et al.* Estimation of lake water-groundwater interactions in meromictic mining lakes by modeling isotope signatures of lake water. *Isotopes in Environmental and Health Studies*, 2008, **44**(1): 99-110.
- [12] Ma JZ, Wang XS, Edmunds WM. The characteristics of ground-water resources and their changes under the impacts of human activity in the arid Northwest china—a case study of the Shiyang River Basin. *Journal of Arid Environment*, 2005, **61**: 277-295.
- [13] Ma JZ, Ding ZY, Gates JB *et al.* Chloride and the environmental isotopes as the indicators of the groundwater recharge in the Gobi Desert, northwest China. *Environmental Geology*, 2008, **55**(7): 1407-1419.
- [14] Ma JZ, Ding ZY, Edmunds WM *et al.* Limits to recharge of groundwater from Tibetan plateau to the Gobi desert, implications for water management in the mountain front. *Journal of Hydrology*, 2009, **364**(1/2): 128-141.
- [15] 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. 地理与地理信息科学, 2005, **21**(1): 104-108.

- [16] 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. 水文地质工程地质, 2006, (6): 9-14.
- [17] 张华安, 王乃昂, 李卓仑等. 巴丹吉林沙漠东南部湖泊和地下水的氢氧同位素特征. 中国沙漠, 2011, 31(6): 1623-1629.
- [18] 甄志磊, 张生, 史小红等. 基于遥感技术的达里诺尔湖湖面演化研究. 中国农村水利水电, 2013, (7): 6-9.
- [19] 何志辉, 姜宏, 毕凤山. 达里湖水化学和水生生物学再调研. 大连水产学院学报, 1996, 11(2): 1-13.
- [20] 孙圆圆, 何江, 吕昌伟等. 达里诺尔湖沉积物中无机碳的形态组成. 生态学报, 2013, 33(2): 610-618.
- [21] 张慧, 张新基. 水文地质学中的环境同位素. 南京: 黄河水利出版社, 2006: 3-77.
- [22] 李锋. 中国北方沙尘源区铅同位素分布特征及其示踪意义的初步研究. 中国沙漠, 2007, 27(5): 738-744.
- [23] 张应华, 仵彦卿. 黑河流域中游盆地地下水补给机理分析. 中国沙漠, 2009, 29(2): 370-375.
- [24] Graig H. Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, 1961, 133: 1702-1703.
- [25] 巩同梁, 田立德, 刘东年等. 羊卓雍湖流域湖水稳定同位素循环过程研究. 冰川冻土, 2007, 29(6): 914-920.
- [26] 焦鹏程, 王弭力, 刘成林. 新疆罗布泊盐湖卤水的氟同位素特征及其地质意义. 核技术, 2004, 27(9): 710-715.
- [27] 胡海英, 包为民, 王涛等. 同位素技术在湖泊水文学中的应用研究. 水电能源科学, 2008, 26(1): 40-43.
- [28] 李文鹏, 好爱兵, 郑跃军等. 塔里木盆地地区地下水环境同位素特征及其意义. 地学前缘, 2006, 13(1): 191-198.
- [29] 陈建生, 张志伟, 刘震等. 乌梁素海及其周边地区水源补给关系同位素研究. 水资源保护, 2013, 29(4): 12-18.
- [30] Song X, Liu X, Xia J *et al.* A study of interaction between surface water and groundwater using environmental isotope in Huaisha River basin. *Earth Sciences*, 2006, 49(12): 1299-1310.
- [31] 王利书, 唐泽军. 石羊河流域地下水循环的同位素和地球化学演化特征. 环境科学学报, 2013, 33(6): 1748-1755.