

# 北疆大气降水水汽源识别及其对地下水补给的指示意义

李捷<sup>1</sup>, 庞忠和<sup>1</sup>, 古丽波斯坦·吐逊江<sup>1</sup>, 孔彦龙<sup>1</sup>, 黄天明<sup>1</sup>, 白国营<sup>2</sup>, 赵泓漪<sup>2</sup>, 周东<sup>2</sup>, 杨忠山<sup>2</sup>

1. 中国科学院地质与地球物理研究所, 页岩气与地质工程重点实验室, 北京 100029

2. 北京市水文总站, 北京 100089

**摘要** 大气降水是水循环的输入项, 其同位素特征是示踪水汽来源及运动路径的有效工具。利用北疆 4 个大气降水观测站的同位素数据, 结合 HYSPLIT 模式, 重点分析了北疆大气降水同位素特征。区域大气降水线方程  $\delta D = 7.3\delta^{18}O + 3.5$ , 反映了新疆独特的干旱气候环境。受不同降水水汽来源影响, 天山及阿勒泰 2 个地区降水同位素特征表现不同。天山地区受西风带水汽季节性漂移的影响, 氡盈余夏季低冬季高, 成“V”型; 阿勒泰地区常年受北冰洋水汽影响, 氡盈余年内变幅不明显。尽管  $\delta^{18}O$  均表现为夏季富集、冬季贫化, 但多年均值差异明显, 该差异也使得利用同位素确定地下水补给来源成为可能。准东盆地东天山附近地下水主要受到来自东天山的大气降水补给, 而北侧自流区地下水同位素相对贫化, 与阿勒泰站大气降水同位素及氡盈余特征相似, 结合地形、水文地质条件等特征, 认为该区主要受克拉美丽山大气降水补给。

**关键词** 大气降水; 稳定同位素; 氡盈余; 水汽来源; 北疆; 地下水补给

环境同位素是指天然存在于自然环境中的同位素, 如氡(<sup>2</sup>H 或 D)、氧-18(<sup>18</sup>O)、氡(<sup>3</sup>H 或 T)以及放射性碳(<sup>14</sup>C)等, 它们广泛存在于自然界的水体中<sup>[1]</sup>。特别是氢氧同位素作为水分子的直接组成成分, 可直接参与水循环过程, 因而是水循环的一种良好天然示踪剂。由蒸发、凝结、降落和径流等过程形成的水体, 在运移过程中发生不同程度的同位素分馏, 因而具有不同的同位素特征, 如受蒸发过程的影响水中稳定同位素 <sup>18</sup>O 和 <sup>2</sup>H 较为富集。因此, 水中环境同位素记录了水循环的过程信息, 是研究区域水文循环的理想手段。

降水中的稳定同位素 (<sup>18</sup>O/<sup>16</sup>O 和 <sup>2</sup>H/<sup>1</sup>H) 是研究水文和气象过程的重要工具<sup>[2-3]</sup>。由于影响降水同位素的因素较少, 其分馏过程(水汽凝结、水的蒸发、冰的升华以及大气的再循环)可以准确量化, 且它们本身就是水分子的组成部分, 因此, 稳定同位素可作为水汽来源及运动路径的自然示踪剂, 利用其组成及变化规律有效地反演天气系统及大气环流过程。而且, 大气降水是水循环的输入项, 其同位素特征是进行地表水-地下水相互作用、地下水补给等相关研究的基础, 全球或局地水循环研究的重要载体, 同时也是运用冰芯、石笋等中稳定同位素重建古气候的极其重要的依据<sup>[4-6]</sup>。

具有不同同位素特征的大气降水在特定环境下补给地

下水就会产生一个特征性的同位素信号, 这个信号可作为识别地下水起源的自然示踪剂。例如, 马金珠等<sup>[7]</sup>通过对巴丹吉林沙漠南缘的地下水水化学组分及其环境同位素组成分析, 表明该区地下水主要来源于雅布赖山区。陈宗宇等<sup>[8]</sup>利用稳定同位素及水化学方法识别黑河流域地下水的补给来源, 并估算黑河水与地下水的转换数量。目前用于地下水起源识别的主要是稳定同位素, 对于氡盈余的研究较少<sup>[9-10]</sup>。Dansgaard<sup>[11]</sup>提出了氡盈余的概念 ( $d = \delta D - 8\delta^{18}O$ ), 指出它的大小与水汽源区的湿度、风速和最初蒸发时海洋表面温度 (SST) 有关, 同时又受到降水区蒸发与水分内循环的影响。因氡盈余通常只受水汽源区气候/气象因素的控制<sup>[12-13]</sup>, 故可作为大气降水水汽来源及地下水补给来源的指示剂。

干旱区约占陆地面积的 30%, 是陆地生态系统的重要组成部分, 对区域乃至全球气候变化和生态功能的维持具有重要作用。然而干旱区水资源缺乏, 如在贺兰山—乌鞘岭以西的中国西北内陆干旱区, 其面积 210 多万 km<sup>2</sup>, 约占全国陆地面积的 22%, 而水资源总量仅占全国的 4.3%, 因此干旱区的水资源合理利用至关重要。新疆是世界著名的三大极端干旱区之一, “三山夹两盆”的地形特点使得区内水循环条件更加复杂。以准噶尔盆地为例, 准噶尔盆地的地下水可能同时

收稿日期: 2015-11-24; 修回日期: 2016-03-18

基金项目: 中国博士后科学基金项目(2015M581168); 《科技导报》博士生创新研究资助计划项目(kjdb2012004)

作者简介: 李捷, 博士, 研究方向为水循环与环境同位素, 电子信箱: lijie@mail.iggcas.ac.cn; 庞忠和(通信作者), 教授, 研究方向为水循环与水岩相互作用, 电子信箱: z.pang@mail.iggcas.ac.cn

引用格式: 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; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2016.18.015

接受北部阿勒泰山系及南部天山山系的补给,尤其是沙漠腹地的地下水来源更是饱受争议。本文利用中国北疆大气降水同位素数据,结合 HYSPLIT 模式,分析北疆大气降水同位素特征及其水汽来源。以准噶尔盆地东部的准东盆地为例,对该区地下水的补给来源进行探讨,为准东盆地国家级能源建设示范基地(亿吨级煤炭生产、千万吨级煤化工和千万千瓦级煤电)用水提供科学依据。

## 1 研究区概况

新疆维吾尔自治区位于欧亚大陆中部,中国西北部,地理位置为  $73^{\circ}40' \sim 96^{\circ}23'$ , 北纬  $34^{\circ}25' \sim 49^{\circ}10'$ 。新疆地区地貌轮廓鲜明,山脉与盆地相间排列,形成“三山夹两盆”的地貌形态。由南至北排布着昆仑山、塔里木盆地、天山、准噶尔盆地、阿尔泰山。天山横亘中部,将新疆分为南北两部分。本文主要观测站分布在天山北侧及阿尔泰山南侧(图1)。

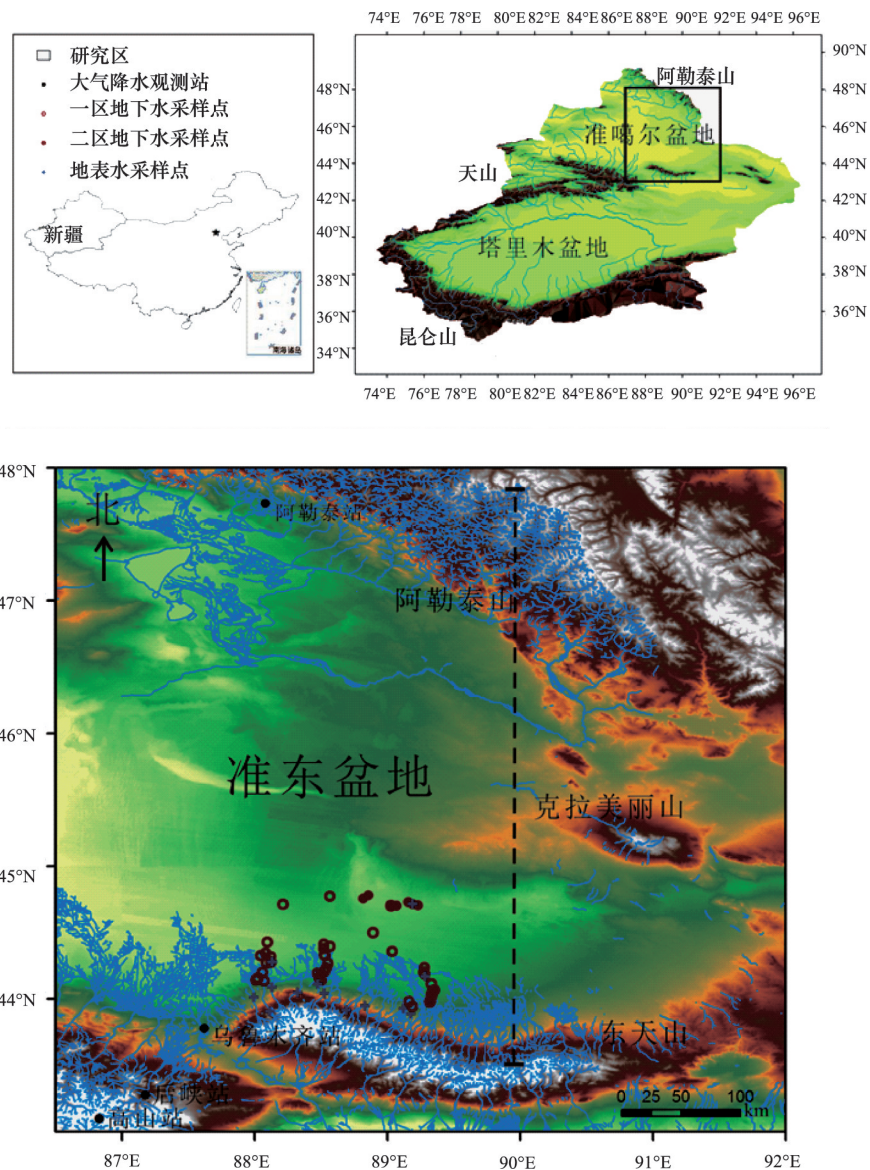


图1 研究区位置

Fig. 1 Sketch map of the study area

新疆气候属于典型的大陆干旱气候,干燥少雨,冬寒夏热,日温差大,多年平均气温  $6^{\circ}\text{C}$ , 多年平均日照时长  $9\text{ h}$ 。在空间上,受西风气候条件和地势地貌的制约明显,山地气温较低,降水充沛,蒸发量小;平原温差大,降雨少,蒸发强。多年年均(1962—2009)降水量为  $112\text{ mm}$ ,且降水多在山区发生。北疆山地一般为  $400 \sim 800\text{ mm}$ ,盆地边缘  $150 \sim 200\text{ mm}$ ,

盆地中心约  $100\text{ mm}$ 。山区较丰富的降水除就地蒸发外,大部分汇集成地表河流,一部分沿岩石裂隙渗入地下形成地下水。

准东盆地地下水含水层岩性由山前带到沙漠(或汇流中心),由卵砾石、砂砾石逐渐过渡为中粗砂、粉细砂,富水性由山前到沙漠表现为弱→强→弱的变化规律<sup>[14-15]</sup>(图2)。

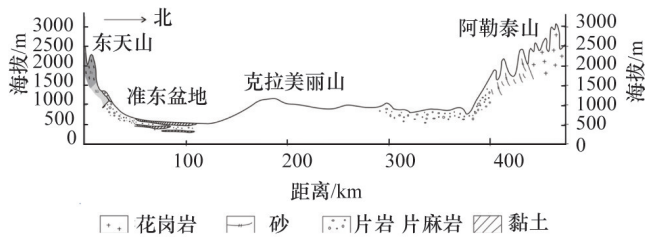


图2 研究区南北向地质剖面

Fig. 2 Geologic profile in the study area from south to north

## 2 数据来源与分析方法

### 2.1 数据来源

新疆的大气降水观测站主要有乌鲁木齐站、高山站、后峡站、阿勒泰站,其站点基本信息如表1所示。其中,乌鲁木齐站数据来源于全球同位素大气降水监测网(GNIP),温度、降雨量数据同步监测获取;高山站、后峡站数据来源于Pang等<sup>[6]</sup>的研究,温度、降雨量数据同步监测获取;阿勒泰站数据来源于Tian等<sup>[17]</sup>的研究,温度、降雨量数据来自于中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn>)。

表1 新疆大气降水观测站基本信息

Table 1 Precipitation sampling information at stations in Xinjiang

站点	位置	高程/m	$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$	$\delta^2\text{H}/\text{‰}$	年均降雨量/mm	年均温度/ $^{\circ}\text{C}$	观测时间	样品数
乌鲁木齐	87°37'E, 43°47'N	918	-10.9	-74.0	336	7.3	1986.12—2003.12	123
阿勒泰	88°05'E, 47°44'N	737	-13.8	-100.4	256	4.9	2000.06—2002.12	226
高山	86°50'E, 43°06'N	3545	-7.7	-53.6	390	-4.3	2003.04—2004.07	59
后峡	87°11'E, 43°17'N	2100	-7.9	-55.4	424	1.5	2003.05—2004.07	88

对多年同月降水中的  $\delta X$  进行加权平均,求得月均值:

$$\delta X = \sum P_i \delta X_i / \sum P_i \quad (1)$$

式中:  $\delta X_i$  和  $P_i$  分别为氧、氢稳定同位素比率和该月相应的降水量。

采用式(1)方法对月均值进行加权,求得年均值。各月降雨量加权同位素及氦盈余结果如表2所示。

2011年9月在新疆准东盆地进行水样采集,根据已有研究情况及地下水系统特点,结合现场实际情况,将研究区分为2个子区域,其中一区从东天山山前到荒漠,沿地下水流向进行取样,二区是位于研究区东北角的自流区,离克拉美丽山较近。采样点总计58个,其中河水样9个,水库水样3个,地下水样46个。数据结果及采样点分布见Li等<sup>[18]</sup>的研究。

表2 各观测站大气降水同位素及氦盈余降雨量加权值

Table 2 Precipitation-weighted monthly stable isotopes of precipitation at the four stations

站点	同位素/ $\text{‰}$	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
乌鲁木齐	$\delta^{18}\text{O}$	-19.3	-20	-15.4	-11.3	-9.7	-6.7	-6.4	-5.7	-9.8	-13.7	-16.2	-21
	$\delta^2\text{H}$	-137.5	-135.3	-109	-76.8	-70.6	-48.1	-41.8	-34.7	-64.2	-85.8	-111.9	-147
	$d$	17.1	25	14.3	13.4	7.4	5.7	9.4	10.5	14.6	23.4	17.8	21
阿勒泰	$\delta^{18}\text{O}$	-21.3	-24.2	-13.9	-11.7	-8.1	-6.8	-7.5	-8.1	-5.3	-13.5	-18.8	-21
	$\delta^2\text{H}$	-161	-185.3	-95.7	-85.7	-56.1	-48.7	-53.4	-53.9	-40.2	-94.5	-136.1	-157.6
	$d$	9.4	8.3	15.5	7.9	8.7	5.7	6.6	10.9	2.2	13.5	14.3	10.4
高山	$\delta^{18}\text{O}$	/	-19.5	-16.6	-12.5	-10.4	-6.6	-6.7	-6.8	-10.3	-10.5	-11.2	/
	$\delta^2\text{H}$	/	-134.5	-115.4	-87.9	-72.2	-44.1	-47.3	-47.0	-71.5	-79.6	-77.3	/
	$d$	/	21.5	17.4	12.1	11	8.7	6.3	7.4	10.9	4.4	12.3	/
后峡	$\delta^{18}\text{O}$	-22.2	-16.9	-14.5	-9.9	-9.6	-6.2	-5.3	-4.9	/	/	/	-16.4
	$\delta^2\text{H}$	-159.6	-119.8	-101.6	-69.8	-67.4	-43.8	-37.1	-34.5	/	/	/	-112.8
	$d$	18	15.4	14.4	9.4	9.4	5.8	5.3	4.7	/	/	/	18.4

### 2.2 气流轨迹分析

HYSPLIT(the hybrid-single particle lagrangian intergrated trajectory)模式由美国海洋大气局(NOAA)空气资源实验室ARL开发,该模式通常用来跟踪气流所携带的粒子或者气流移动方向,可实时预报风场形势,研究其移动的轨迹<sup>[19-20]</sup>。

HYSPLIT模式是Eulerian-Lagrangian混合型的扩散模式,其平流和扩散计算采用了Lagrangian法。该模式采用地形 $\sigma$ 坐标,气象数据在水平坐标上保持其原来格式,而垂直方向内插到地形 $\sigma$ 坐标系统:

$$\sigma = \frac{z_{\text{top}} - z_{\text{mst}}}{z_{\text{top}} - z_{\text{gl}}} \quad (2)$$

式中,  $z_{top}$  为轨迹模式坐标系统的顶部,  $z_{sl}$  为地形高度,  $z_{msl}$  为坐标下边界高度。

计算气流所携带粒子运动轨迹时,其最终位置由初始位置  $Q$  和第一猜测位置  $Q'$  的平均速率计算得到:

$$Q'(t + \Delta t) = Q(t) + V(Q, t)\Delta t$$

$$Q(t + \Delta t) = Q(t) + 0.5[V(Q, t) + V(Q', t + \Delta t)] \Delta t \quad (3)$$

式中,  $\Delta t$  为后推的时间步长,本文中  $\Delta t$  取 72 h。

### 3 分析与结果

#### 3.1 区域雨水线

全球大气降水线(global meteoric water line, GMWL)为全球大气降水同位素的组成提供了基准。由于区域水汽来源及蒸发模式的不同,各局地大气降水线 LMWL 通常偏离 GMWL。利用最小二乘法分析了新疆北疆地区 4 个观测站点的  $\delta D$  与  $\delta^{18}O$  的关系,得到北疆降水的 LMWL(图 3)为:

$$\delta D = 7.3\delta^{18}O + 3.5 \quad (R^2 = 0.99) \quad (4)$$

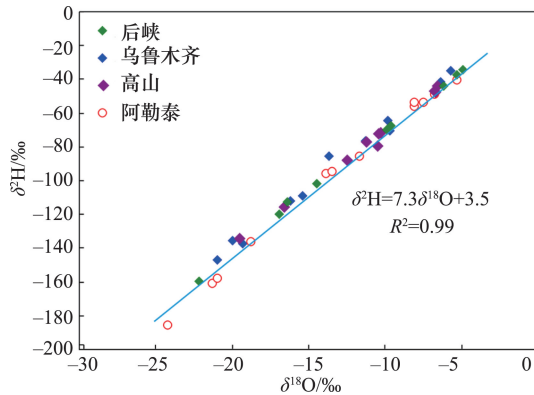


图 3 新疆大气降水  $\delta D$  与  $\delta^{18}O$  分布

Fig. 3 Correlated scatters between  $\delta D$  and  $\delta^{18}O$  in precipitation of Xinjiang

式中,斜率和截距均低于全球大气降水的平均组成 8 和 10,表明西北地区的降水过程受到了二次蒸发的影响。式(4)与李小飞等<sup>[21]</sup>利用 GNIP 站点建立的西北干旱区降水线  $\delta D = 7.2\delta^{18}O + 2.0$ ,以及柳鉴容等<sup>[22]</sup>利用 CHNIP 站点建立的  $\delta D = 7.0\delta^{18}O - 2.2$  相比,斜率和截距稍微偏大。

#### 3.2 大气降水同位素特征

将研究区分为天山地区(以乌鲁木齐站、高山站、后峡站为代表)与阿勒泰地区(以阿勒泰站为代表)分别进行讨论。从时间分布看,2区 4 个站点大气降水  $\delta^{18}O$  总体表现均为 1—8 月不断富集,9—12 月逐渐贫化(图 4)。最大值出现在夏季,最小值出现在冬季,反映了西北地区典型大陆性气候年周期的变化规律。天山地区与阿勒泰地区大气降水  $\delta^{18}O$  值时间分布差异不明显。相比而言,2 个地区氘盈余差异显著。在天山地区,3 个站点大气降水氘盈余均表现为夏季低、冬季高的趋势。在阿勒泰地区,阿勒泰站氘盈余年内变化不明显,其氘盈余年均值为 10.0‰(图 5)。这两种不同的表现特征分别与在天山 Kyrgyzstan 冰芯及阿勒泰山 Belukha 冰芯获得的结果一致<sup>[23-24]</sup>。

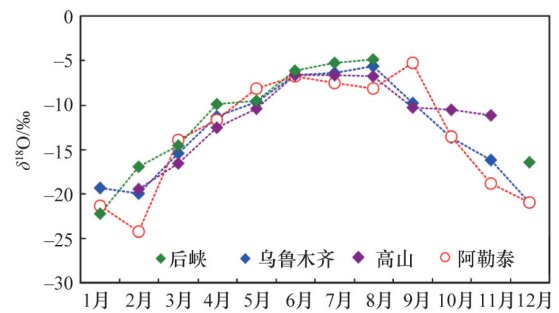


图 4 新疆大气降水  $\delta^{18}O$  的时间分布

Fig. 4  $\delta^{18}O$  variations throughout the observation period in Xinjiang precipitation

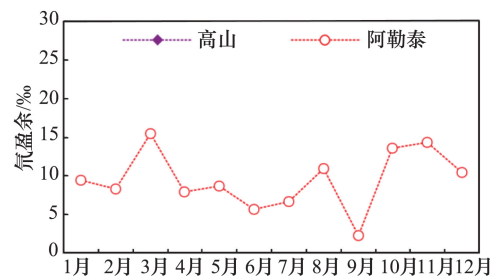
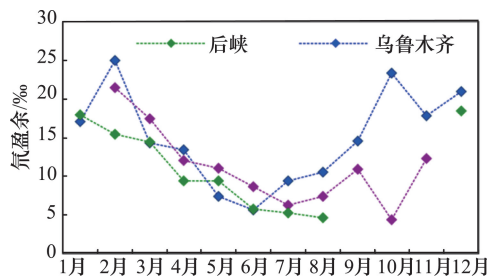


图 5 新疆大气降水氘盈余的时间分布

Fig. 5 Monthly D-excess of precipitation in four stations

将氘氧稳定同位素的相关关系式(2)代入氘盈余的定义公式中,得:

$$d = \delta^2H - 8\delta^{18}O = (7.3\delta^{18}O + 3.5) - 8\delta^{18}O = -0.7\delta^{18}O + 3.5 \quad (5)$$

因此,氘盈余与降水  $\delta^{18}O$  之间应该存在负相关关系。如图 6 所示,天山地区的乌鲁木齐站、高山站、后峡站的大气降水同位素  $\delta^{18}O$  与氘盈余表现为很好的负相关关系。而在阿

勒泰地区,阿勒泰站冬季  $\delta^{18}O$  与氘盈余却表现为成正相关关系。这种正相关关系在 Tsast Ula 冰芯中同样观测到<sup>[25]</sup>。降水同位素与氘盈余主要受降水水汽来源及水汽传输路径的影响,不同的同位素及氘盈余特征表现说明天山地区与阿勒泰地区可能受到不同降水水汽来源的影响。

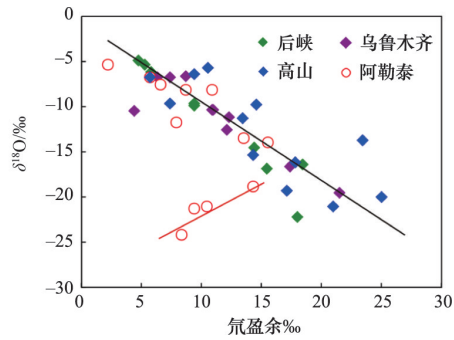
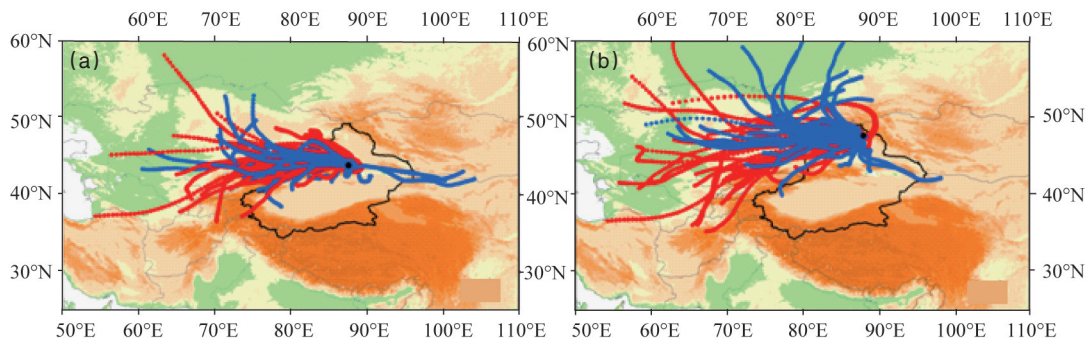


图6 新疆大气降水  $\delta^{18}\text{O}$  与氘盈余相关关系  
Fig. 6 Correlation between the  $\delta^{18}\text{O}$  and D-excess values in the four stations of Xinjiang



蓝线代表2002年7月,绿线代表2002年1月  
图7 新疆乌鲁木齐(a)和阿勒泰(b)地区冬夏季水汽输送过程追踪结果  
Fig. 7 The tracking results of water vapor transport for Wulumuqi (a) and Altay (b) station in Xinjiang region during summer and winter season

### 3.4 对地下水补给的指示意义

因天山地区(以乌鲁木齐站、高山站、后峡站为代表)与阿勒泰地区(以阿勒泰站为代表)受不同降水水汽来源影响,因此其同位素均值差异明显,如表1所示。天山地区冬夏季水汽来源一致,主要受西风带水汽控制,乌鲁木齐站  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta^2\text{H}$  多年均值分别为  $-10.9\text{‰}$ 、 $-74.0\text{‰}$ 。阿勒泰地区不仅受到西风带水汽影响,同时北冰洋水汽也可到达该区。阿勒泰站  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta^2\text{H}$  多年均值分别为  $-13.8\text{‰}$  和  $-100.4\text{‰}$ 。该差异使得利用同位素确定地下水补给来源成为可能。

图8展示了新疆准东盆地水体同位素组成。研究区地下水的  $\delta^{18}\text{O}$  与  $\delta^2\text{H}$  变化范围较大,  $\delta^{18}\text{O}$  值为  $-4.7\text{‰}$  ~  $-13.0\text{‰}$ ,  $\delta^2\text{H}$  值为  $-62.9\text{‰}$  ~  $-93.8\text{‰}$ 。根据同位素特征及水文地质条件,将研究区地下水分为一区及二区2个部分(图1)进行讨论。

一区地下水同位素较为富集,其中300 m以浅的地下水样品同位素  $\delta^{18}\text{O}$  均值为  $-10.9\text{‰}$ ,  $\delta^2\text{H}$  均值为  $-72.9\text{‰}$ ,与乌鲁木齐站大气降水同位素特征( $\delta^{18}\text{O}$  为  $-10.9\text{‰}$ ,  $\delta^2\text{H}$  为  $-74.0\text{‰}$ )一致,表明研究区南部地下水(井深小于200 m)的主要补给来源为来自东天山大气降水。深层水(井深在300~400 m)同位素  $\delta^{18}\text{O}$  相对贫化,在  $-11.7\text{‰}$  到  $-12.6\text{‰}$ ,这部分地下水  $^{14}\text{C}$

### 3.3 HYSPLIT 模拟

为确定北疆地区降水水汽来源,利用HYSPLIT模式对北疆地区的水汽来源进行追踪模拟。文中模拟层高度选取为1500 m,计算2002年7月(代表夏季,图7中蓝线)及1月(代表冬季,图7中红线)乌鲁木齐及阿勒泰站相应的水汽路径。从图7可以看出,天山地区冬夏季水汽来源一致,主要受西风带水汽控制,夏季降水主要由水汽来源于大西洋的暖湿气流。阿勒泰地区不仅受到西风带水汽影响,同时北冰洋水汽也可到达该区。因此,天山地区降水同位素及氘盈余的年内变化主要受控于西风带水汽的季节性漂移。而阿勒泰地区降水同位素及氘盈余的年内变化主要受不同水汽来源影响。

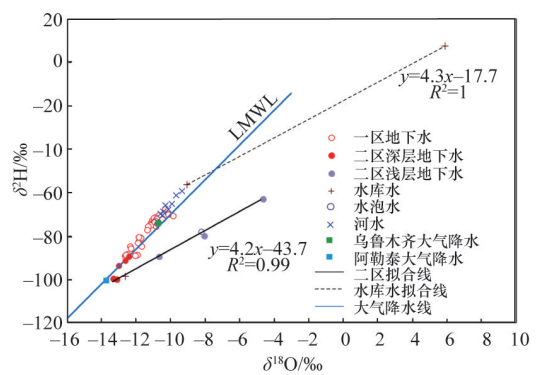


图8 研究区地表水及地下水氢氧同位素组成  
Fig. 8 The  $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^2\text{H}$  relation of the surface water and groundwater in the study region

的变化范围为1.2到8.3 pmc,年龄较老,与地下水补给期相对寒冷的气候环境有关<sup>[26]</sup>。在中国的民勤盆地<sup>[27]</sup>、华北平原<sup>[28]</sup>等地存在类似现象,古水的同位素相对贫化。

二区位于研究区东北部,克拉美丽山附近,两口自流井(ZD08和ZD10)其同位素值接近,  $\delta^{18}\text{O}$  分别为  $-13.2\text{‰}$  和  $-13.4\text{‰}$ ,是整个研究区同位素最贫化的样品。ZD08自流在

地面形成水泡, ZD09取自ZD08自流形成的水泡, 因受到水面蒸发的影响,  $\delta^{18}\text{O}$  为 $-8.3\text{‰}$ ,  $\delta^2\text{H}$  为 $-77.6\text{‰}$ 。ZD07, ZD11和ZD12三个样品取自该区浅部, 埋深最大为5 m, 通过洛阳铲取得。这3个样品明显受到蒸发的影响, 样点分布偏离大气降水线。拟合区内受到蒸发的地下水及水泡水, 得到一条蒸发线, 斜率为4.2, 与水库蒸发线斜率基本一致。蒸发线与当地大气降水线的交点与阿勒泰站大气降水同位素特征( $\delta^{18}\text{O}$  为 $-13.8\text{‰}$ ,  $\delta^2\text{H}$  为 $-100.4\text{‰}$ )接近。二区内3个深层地下水样品 $^{14}\text{C}$ 均小于3.5 pmc, 地下水 $^{14}\text{C}$ 年龄较老。尽管与南部深层地下水相比, 深层地下水年龄均较老, 但该区地下水同位素明显贫化于南部, 说明2个区域内古地下水可能存在不一致的补给来源。自克拉美丽山向南, 显示出明显的山前冲洪积扇特征, 地下水富水性由强变弱。根据地下水流场, 地下水流向自北转为西北方向, 来自南侧的补给到达克拉美丽山附近的可能性较小。水化学特征上, 相对较低的Ca、Mg含量, 较高的F含量(数据见文献[18])也说明了与南部地区地下水不同的补给来源。结合地形条件、地下水水文地质特征以及水化学数据, 所以推断该区地下水, 无论是浅层地下水还是深层地下水, 其可能的补给来源均为克拉美丽山, 而克拉美丽山隶属于阿勒泰山脉, 其降水同位素组成与阿勒泰站相近。

#### 4 结论

1) 利用北疆地区乌鲁木齐、高山、后峡、阿勒泰站4个站点的大气降水同位素数据, 建立当地大气降水线方程(LM-WL)为 $\delta\text{D} = 7.3\delta^{18}\text{O} + 3.5$ , 反映中国西北典型的干旱气候环境。

2) 因水汽源不同, 天山地区及阿勒泰地区大气降水同位素及氘盈余特征表现不同。2个地区 $\delta^{18}\text{O}$ 均表现为夏季富集、冬季贫化, 但多年均值差异明显。天山地区受西风带水汽季节性漂移的影响, 氘盈余夏季低冬季高, 成“V”型; 阿勒泰地区常年受北冰洋水汽影响, 氘盈余年内变幅不明显。

3) 天山地区与阿勒泰地区大气降水同位素均值不同, 对准东盆地地下水补给来源进行了识别。结果表明东天山附近浅层地下水同位素富集, 而氘盈余大于10, 与乌鲁木齐站大气降水同位素及氘盈余均值一致。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。东天山为该地下水的主要补给来源。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。

#### 参考文献 (References)

- [1] 德罗斯特 W, 莫泽尔 H, 诺伊迈尔 F, 等. 同位素方法在地下水水文学中的应用[M]. 张人权, 编译. 北京: 地质出版社, 1983: 4-80.  
Derluost W, Mozer H, Nowimair F, et al. Application of isotopes in groundwater hydrology[M]. Zhang Renquan, trans. Beijing: Geological Publishing House, 1983: 4-80
- [2] Clark I, Fritz P. Environmental isotopes in hydrogeology[M]. Boca Ra-  
ton: CRC Press, 1997.
- [3] Craig H. Isotopic variations in meteoric waters[J]. Science, 1961, 133: 1702-1073.
- [4] 吴华武, 章新平, 关华德, 等. 不同水汽来源对湖南长沙地区降水中 $\delta\text{D}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ 的影响[J]. 自然资源学报, 2012, 27(8): 1404-1414.  
Wu Huawu, Zhang Xiping, Guan Huade, et al. Influences of different moisture sources on  $\delta\text{D}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  in precipitation in Changsha, Hunan Province[J]. Journal of Natural Resources, 2012, 27(8): 1404-1414.
- [5] Kong Yanlong, Pang Zhonghe. Statistical analysis of stream discharge in response to climate change for Urumqi River catchment, Tianshan Mountains, central Asia[J]. Quaternary International, 2014: 336: 44-51
- [6] 苏小四, 万玉玉, 董维红, 等. 马莲河河水与地下水的相互关系: 水化学和同位素证据[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2009, 39(6): 1087-1094.  
Su Xiaosi, Wan Yuyu, Dong Weihong, et al. Hydraulic relationship between Malianhe River and groundwater: hydrogeochemical and isotopic evidences[J]. Journal of Jinlin University: Earth Science Edition, 2009, 39(6): 1087-1094.
- [7] 马金珠, 黄天明, 丁贞玉, 等. 同位素指示的巴丹吉林沙漠南缘地下水补给来源[J]. 地球科学进展, 2007, 22(9): 922-930.  
Ma Jinzhu, Huang Tianming, Ding Zhenyu, et al. Environmental isotopes as the indicators of the groundwater recharge in the South Badain Jaran Desert[J]. Advances in Earth Science, 2007, 22(9): 922-930.
- [8] 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, 33(6): 9-14.  
Chen Zongyu, Wan Li, Nie Zhenlong, et al. Identification of groundwater recharge in the Heihe Basin using environmental isotopes[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2006, 33(6): 9-14.
- [9] Li Jie, Pang Zhonghe, Kong Yanlong, et al. Contrasting seasonal distribution of stable isotopes and deuterium excess in precipitation over China[J]. Fresenius Environmental Bulletin, 2014, 23(9): 2074-2085.
- [10] Kong Yanlong, Pang Zhonghe, Froehlich K. Quantifying recycled moisture fraction in precipitation of an arid region using deuterium excess [J/OL]. Tellus Series B—Chemical and Physical Meteorology, 2013, 65: 19251, doi: 10.3402/tellusb.v65i0.19251.
- [11] Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation[J]. Tellus, 1964, 16(4): 436-468.
- [12] Froehlich K, Gibson J, Aggarwal P. Deuterium excess in precipitation and its climatological significance[C]//Proceedings of Study of Environmental Change Using Isotope Techniques, Vienna: IAEA, 2002: 54-65.
- [13] Merlivat L, Jouzel J. Global climatic interpretation of the deuterium-oxygen 18 relationship for precipitation[J]. Journal of Geophysical Research, 1979, 84(C8): 5029-5033.
- [14] 庞忠和. 新疆水循环变化机理与水资源调蓄[J]. 第四纪研究, 2014, 34(5): 907-917.  
Pang Zhonghe. Mechanism of water cycle changes and implications on water resources regulation in Xinjiang Uygur Autonomous Region[J]. Quaternary Sciences, 2014, 34(5): 907-917.
- [15] 刘斌, 陈旭光, 程强, 等. 准噶尔盆地天山北麓水文地质条件变化特征[J]. 新疆地质, 2011, 29(1): 90-94.  
Liu Bin, Chen Xuguang, Cheng Qiang, et al. The changing characteristic of hydrogeologic condition in the southern areas of Junggar Basin (The northern piedmont areas of the Tianshan Mountains)[J]. Xinjiang Geology, 2011, 29(1): 90-94.
- [16] Pang Zhonghe, Kong Yanlong, Froehlich K, et al. Processes affecting isotopes in precipitation of an arid region[J]. Tellus, 2011, 63B: 352-

- 359.
- [17] Tian Lide, Yao tandong, MacClune K, et al. Stable isotopic variations in west China: A consideration of moisture sources[J/OL]. *Journal of Geophysical Research- Atmospheres*, 2007, 112(D10): doi:10.1029/2006JD007718.
- [18] Li Jie, Pang Zhonghe, Froehlich K, et al. Paleo-environment from isotopes and hydrochemistry of groundwater in East Junggar Basin, Northwest China[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 529: 650-661.
- [19] Draxler R, Rolph G. 2003: HYSPLIT (HYBRID Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) model[J/OL]. NOAA Air Resources Laboratory, 2013: www.arl.noaa.gov/ready/hysplit4.html.
- [20] Breitenbach S F M, Adkins J F, Meyer H, et al. Strong influence of water vapor source dynamics on stable isotopes in precipitation observed in Southern Meghalaya, NE India[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2010, 292: 212-220.
- [21] 李小飞, 张明军, 李亚举, 等. 西北干旱区降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 变化特征及其水汽输送[J]. *环境科学*, 2012, 33(3): 711-719  
Li Xiaofei, Zhang Mingjun, Li Yaju, et al. Characteristic of  $\delta^{18}\text{O}$  in precipitation and moisture transports over the arid region in Northwest China[J]. *Environmental Science*, 2012, 33(3): 711-719.
- [22] 柳鉴容, 宋献方, 袁国富, 等. 西北地区大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的特征及水汽来源[J]. *地理学报*, 2008, 63(1): 12-22.
- Liu Jianrong, Song Xianfang, Yuan Guofu, et al. Characteristics of  $\delta^{18}\text{O}$  in Precipitation over Northwest China and its water vapor sources [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2008, 63(1): 12-22.
- [23] Aizen V B, Aizen E, Fujita K, et al. Stable-isotope time series and precipitation origin from firn-core and snow samples, Altai glaciers, Siberia[J]. *Journal of Glaciology*, 2005, 51(175): 637-654.
- [24] Kreuz K J, Wake C P, Aizen V B, et al. Seasonal deuterium excess in a Tien Shan ice core: Influence of moisture transport and recycling in Central Asia[J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(18): 1922.
- [25] Schotterer U, Fröhlich K, Gäggeler H, et al. Isotope records from Mongolian and Alpine ice cores as climate indicators[J]. *Climatic Change*, 1997, 36: 519-530.
- [26] Gonfiantini R. Environmental isotopes in lake studies[M]/Fritz P, Fontes J C, ed. *Handbook of Environmental Isotope Geochemistry*[M]. New York: Elsevier, 1986(3): 113-168.
- [27] Edmunds W, Ma J, Aeschbach-Hertig W, et al. Groundwater recharge history and hydrogeochemical evolution in the Minqin Basin, North West China[J]. *Applied Geochemistry*, 2006, 21(12): 2148-2170.
- [28] Chen Zongyu, Qi Jixiang, Xu Jianming, et al. Paleoclimatic interpretation of the past 30 ka from isotopic studies of the deep confined aquifer of the North China plain[J]. *Applied Geochemistry*, 2003, 18(7): 997-1009.

## Identification of moisture sources in Junggar Basin and its implication for groundwater recharge

LI Jie<sup>1</sup>, PANG Zhonghe<sup>1</sup>, TURSUN Gulbostan<sup>1</sup>, KONG Yanlong<sup>1</sup>, HUANG Tianming<sup>1</sup>, BAI Guoying<sup>2</sup>, ZHAO Hongyi<sup>2</sup>, ZHOU Dong<sup>2</sup>, YANG Zhongshan<sup>2</sup>

1. Key Laboratory of Shale Gas and Geoenvironment, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China
2. Beijing Hydrological Center, Beijing 100089, China

**Abstract** Precipitation is the input of the water cycle, and stable isotopes of precipitation ( $^{18}\text{O}$  and  $^2\text{H}$ ) are powerful tools in tracing moisture sources and trajectories. In this paper, the characteristics of stable isotopes and deuterium excess in the precipitation are analyzed in the North Xinjiang based on observation data of four precipitation stations and HYSPLIT model. The local meteoric water line (LMWL) is established as  $\delta\text{D} = 7.3\delta^{18}\text{O} + 3.5$ , indicating the specific regional meteorological conditions. The Tianshan area and Altay area showed different isotopic characteristics due to different moisture sources. The monthly deuterium values in Tianshan area are low in summer and high in winter, which can be attributed to the seasonal drift of the westerlies. The monthly deuterium values in Altay area are constant due to the effect of arctic air mass. Although the monthly  $\delta^{18}\text{O}$  values in both areas are high in summer and low in winter, the amount-weighted averages are diverse, which makes it possible for identifying groundwater recharge areas. The intersection point of the evaporation line near Kelameili Mountain and LMWL has similar values of stable isotopes to the precipitation from Altay station, indicating that groundwater recharge from Kelameili Mountain. Groundwaters near East Tianshan Mountain have similar  $\delta^{18}\text{O}$  values, similar to the precipitation from Urumqi station, which suggesting groundwater in this area is recharged from East Tianshan Mountain.

**Keywords** precipitation; stable isotopes; deuterium excess; moisture sources; North Xinjiang; groundwater recharge

(责任编辑 王媛媛)