

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2019.05.003

阿拉善地区降水同位素特征与水汽来源

王 帅,饶文波,金 可,张文兵,陈堂清,郑芳文,王雅宁

(河海大学地球科学与工程学院,江苏 南京 210100)

摘要: 基于 2013—2015 年阿拉善高原阿右旗的降水氢氧稳定同位素组成数据,分析阿拉善高原降水 δD 和 $\delta^{18}O$ 的特征与变化规律,揭示当地的水汽来源与迁移路径。结果表明:(a)阿拉善高原降水 δD 和 $\delta^{18}O$ 的变化呈现明显的季节特征,即夏季偏高,冬季偏低。(b)主要气象参数(降水量、气温、大气湿度和风速)中,气温是控制阿拉善高原降水 δD 和 $\delta^{18}O$ 的主导因素;通过与周边区域的比较,阿拉善高原当地大气降水线的斜率和截距较低,这是由阿拉善高原降水受到非平衡蒸发作用强烈所致;(c)HYSPLIT 气团轨迹模型模拟和降水同位素分析揭示了阿拉善高原阿右旗降水主要来自西风 and 极低气团。

关键词: 氢氧同位素;降水;气象参数;HYSPLIT 气团轨迹模型;水汽来源;阿拉善高原;阿右旗
中图分类号: P426 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2019)05-0411-09

Hydrogen and oxygen isotopic characteristic and moisture source of precipitation of Alxa Desert Plateau

WANG Shuai, RAO Wenbo, JIN Ke, ZHANG Wenbing, CHEN Tangqing,
ZHENG Fangwen, WANG Yaning

(College of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 210100, China)

Abstract: Local precipitation is a precious water resource on the Alxa Desert Plateau of West Inner-Mongolia, Northwest China. The Hydrogen and oxygen isotope compositions in the precipitation of this region were investigated during 2013 and 2015 to explore the influences on precipitation isotopes and to reveal the moisture source of precipitation. The results show that: (a) δD and $\delta^{18}O$ values in the precipitation show a distinct seasonal variation, with higher values in summer and lower values in winter, on the Alxa Desert Plateau. (b) Among main meteorological parameters (precipitation amount, air temperature, atmospheric humidity and wind speed), air temperature is the most predominant factor controlling isotopic compositions of precipitation on both daily and monthly scales. The local meteoric water line is defined by the relationship between δD and $\delta^{18}O$ on the Alxa Desert Plateau and has lower slope and intercept than those of surrounding areas, implying stronger non-equilibrium evaporation of raindrops in this region. (c) In combination with the HYSPLIT air mass trajectory model, the evidence of precipitation isotopes suggests there was a dominant control of westerly and polar air masses on the Alxa Desert Plateau, and the moisture of local precipitation mainly originated from the north and west throughout all the year.

Key words: Hydrogen and oxygen; HYSPLIT air mass trajectory model; precipitation; meteorological parameters; moisture source; Alxa Desert Plateau; Ayouqi

基金项目: 国家自然科学基金(41273015)

作者简介: 王帅(1992—),男,博士研究生,主要从事水文地球化学研究。E-mail:wangshuaiw18@163.com

通信作者: 饶文波,研究员。E-mail:raowenbo@163.com

引用本文: 王帅,饶文波,金可,等.阿拉善地区降水同位素特征与水汽来源[J].河海大学学报(自然科学版),2019,47(5):411-419.

WANG Shuai, RAO Wenbo, JIN Ke, et al. Hydrogen and oxygen isotopic characteristic and moisture source of precipitation of Alxa Desert Plateau[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2019,47(5):411-419.

大气降水是 GSPAC(地下水-土壤-植被-大气连续体)的一个重要组成部分。它不仅是陆地水的初始来源,也是生物生存用水的重要来源。因此,降水特性的深入研究对于区域水循环和水资源科学管理至关重要。氢和氧是水分子的 2 个基本元素,水汽运动过程中,因存在同位素分馏过程,其同位素组成会不断发生改变^[1-3],因此氢氧稳定同位素可以用于表征降水的成因与变化,目前已被广泛应用于水循环研究中^[4-10]。

阿拉善高原位于我国内蒙古西部,降水量小,蒸发强烈,是亚洲沙尘暴高发地带^[11-13]。近年来,人类活动的增加和干旱的高原气候致使这里生态环境恶化,水资源短缺^[14]。当地降水作为有限的水资源,对植物和人类的生存发展愈加重要。为了有效利用与管理该地区稀缺的降水资源,有必要了解当地降水的特征和来源。另外,由于阿拉善高原存在大量的地下水资源,当地的地下水补给一直被研究者关注^[15-18]。了解当地降水的同位素组成是认识区域水文循环的一个重要环节。目前,在黑河流域、石羊河流域和兰州等周边地区已开展了当地大气降水的同位素示踪研究^[19-22],但阿拉善地区的降水研究还不够系统和完善。

笔者对 2013—2015 年阿拉善高原阿右旗降水 δD 和 $\delta^{18}O$ 开展了详细的研究,分析降水同位素组成变化的影响因素,并从同位素示踪与 HYSPLIT 气团轨迹模型模拟的角度阐明了当地降水的水汽来源与迁移路径。

1 研究区概况

阿拉善高原(37°24'N~42°47'N,97°10'E~106°53'E)位于我国内蒙古西部,是亚洲中部干旱荒漠区的重要组成部分。腾格里沙漠和巴丹吉林沙漠是高原上 2 个主要的沙漠,分别位于阿拉善高原的东南部和西北部(图 1)。2 个沙漠总面积为 $8.7\times 10^4\text{ km}^2$,气候非常干旱,植物稀少,流动沙丘占 85% 以上^[8];年降水量在 30~200 mm 之间,年蒸发量大于 2400 mm,平均温度 7~9.6℃^[23]。整体上,腾格里沙漠比巴丹吉林沙漠降水量多。西风是该地区降水的主要控制因素,同时来自北极的气团也可以到达该地区,亚洲夏季风也是影响因素之一。

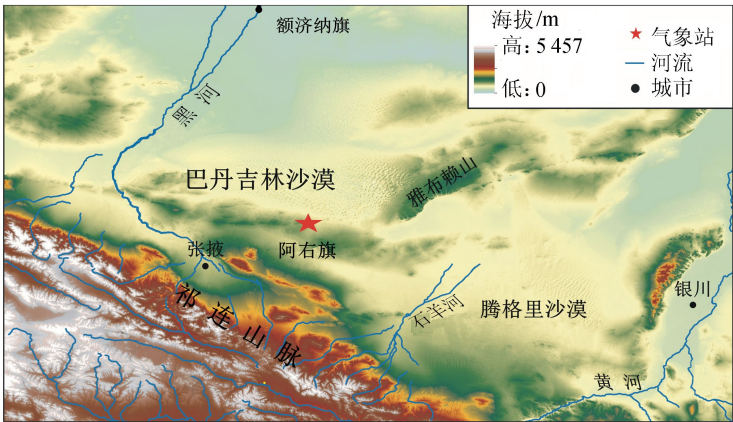


图 1 研究区示意图
Fig.1 Map of the study area

2 样品采集与分析

阿右旗气象站位于巴丹吉林沙漠和腾格里沙漠之间的过渡带(图 1),用标准降水收集器收集该站 2013—2015 年的降水样品,共 75 个。经过清洗和干燥的收集器放置于地面 2 m 以上,并用塑料盖封好,防止非降水期间干沉降的污染。每次降水结束后,将 100 ml 降水样品装入瓶中,密封保存在冰箱中,温度保持在 5℃ 以下。

氢氧同位素组成在中国科学院青藏高原研究所的液态水同位素分析仪上测定(L2130-i, Picarro, USA)。标准样品参数为 QYTB2: $\delta^{18}O_{V-SMOW}=-1.974\%$, $\delta D_{V-SMOW}=-15.760\%$; QYTB: $\delta^{18}O_{V-SMOW}=-0.81\%$, $\delta D_{V-SMOW}=-6.19\%$; QYTB1: $\delta^{18}O_{V-SMOW}=-0.09\%$, $\delta D_{V-SMOW}=-0.48\%$ 。 $\delta^{18}O$ 和 δD 的测试精度分别为 $\pm 0.015\%$ 和 $\pm 0.1\%$ 。日降雨的同位素数据见图 2。通过日降水同位素值和相应的降水量,计算了每月的体积加权平均值(图 3)。气象参数(降水量、气温、大气湿度、风速)由阿右旗气象局提供(图 2)。

采用由 NOAA 空气资源实验室设计的 HYSPLIT 气团轨迹模型模拟水汽来源与路径^[24],后向轨迹模拟的高度设置为 1000 m,持续时间为 240 h。

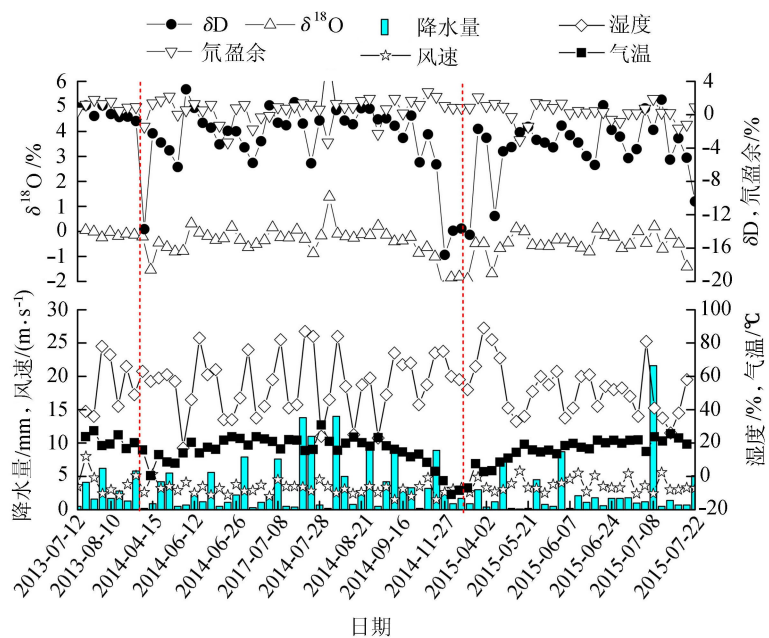


图 2 阿右旗日降水同位素组成和气象参数日变化特征
Fig.2 Temporal variations of isotopic composition in precipitation and meteorological parameters on a daily scale at AYQ

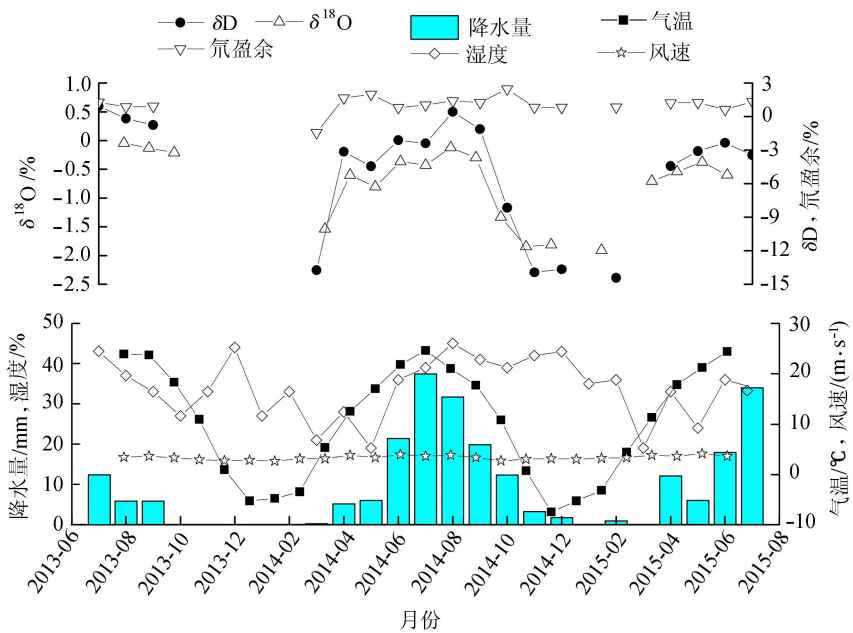


图 3 阿右旗月降水同位素组成和气象参数月变化特征
Fig.3 Temporal variations of isotopic composition in precipitation and meteorological parameters on a monthly scale at AYQ

3 结果与讨论

3.1 降水氢氧稳定同位素特征

阿右旗日降水 $\delta^{18}\text{O}$ 变化范围为 $-2.23\% \sim 1.38\%$, δD 的变化范围为 $-16.81\% \sim 7.74\%$, 氕盈余变化范围为 $-3.4\% \sim 2.7\%$, 变化幅度很大(图 2)。降水 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 表现出明显的季节变化, 即夏季明显高于冬季(图 2)。与日降水相比, 月降水 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 变化更显著, 但氕盈余随季节变化不大(图 2 和图 3)。阿拉善高原降水氢氧稳定同位素组成的变化与周边地区(河西走廊、黑河流域和乌鲁木齐等)大致相似^[19,22,25]。

2013—2015 年间, 阿右旗日降水量在 $0.1 \sim 21.6 \text{ mm}$ 之间变化, 其中日降雨量小于 1 mm 的有 27 d、大于

1 mm 的有 48 d, 夏季降水量较高, 冬季偏低。日平均气温在 $-10.9 \sim 30.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间(图 2)。与降水一样, 气温也呈现明显的季节性变化(图 3)。日大气湿度在 $17\% \sim 89\%$ 之间, 最大值出现在 3—5 月, 最低值出现在 6—8 月。然而, 月平均大气湿度在 $19\% \sim 45\%$ 之间波动, 并不随季节变化。日均风速为 $1.5 \sim 8\text{ m/s}$, 没有明显的季节变化特征。月平均风速在 $2.6 \sim 4.1\text{ m/s}$ 之间变化, 与季节有一定的同步变化关系, 但不显著。

通常来说, 干旱地区的气候会影响当地降水中氢氧稳定同位素组成^[19]。由图 2~3 可知, 降水同位素组成的季节性变化和降水量、气温一致, 但与风速和大气湿度不一致。因此, 降水氢氧稳定同位素组成与降水量和气温的相关性比与风速和大气湿度的更为显著。

3.2 降水氢氧稳定同位素组成的影响因素

降水的氢氧稳定同位素组成通常受多种因素控制, 如降水量、气温、大气湿度、风速、海拔高度和纬度等^[1,26-27], 其中主要因素为降水量、气温、大气湿度、风速。

3.2.1 降水量

已有研究指出, 在东南季风区和西南季风区, 降水量对降水氢氧稳定同位素组成的影响显著, 对内陆地区的降水氢氧稳定同位素组成影响小^[28]。但是, 在夏季, 包括黑河流域、西宁地区和沱沱河流域在内的中国西北地区, 降水量对同位素组成的影响不应被忽视^[29-30]。虽然在日和月尺度上, 降水量与氢氧稳定同位素组成的变化趋势一致(图 2~3), 但是两者间的相关性较差(图 4(a))。因此, 干旱地区降水量不是影响降水氢氧稳定同位素组成的主要因素, 这与 Guo 等^[22]对河西走廊的研究结果相同。

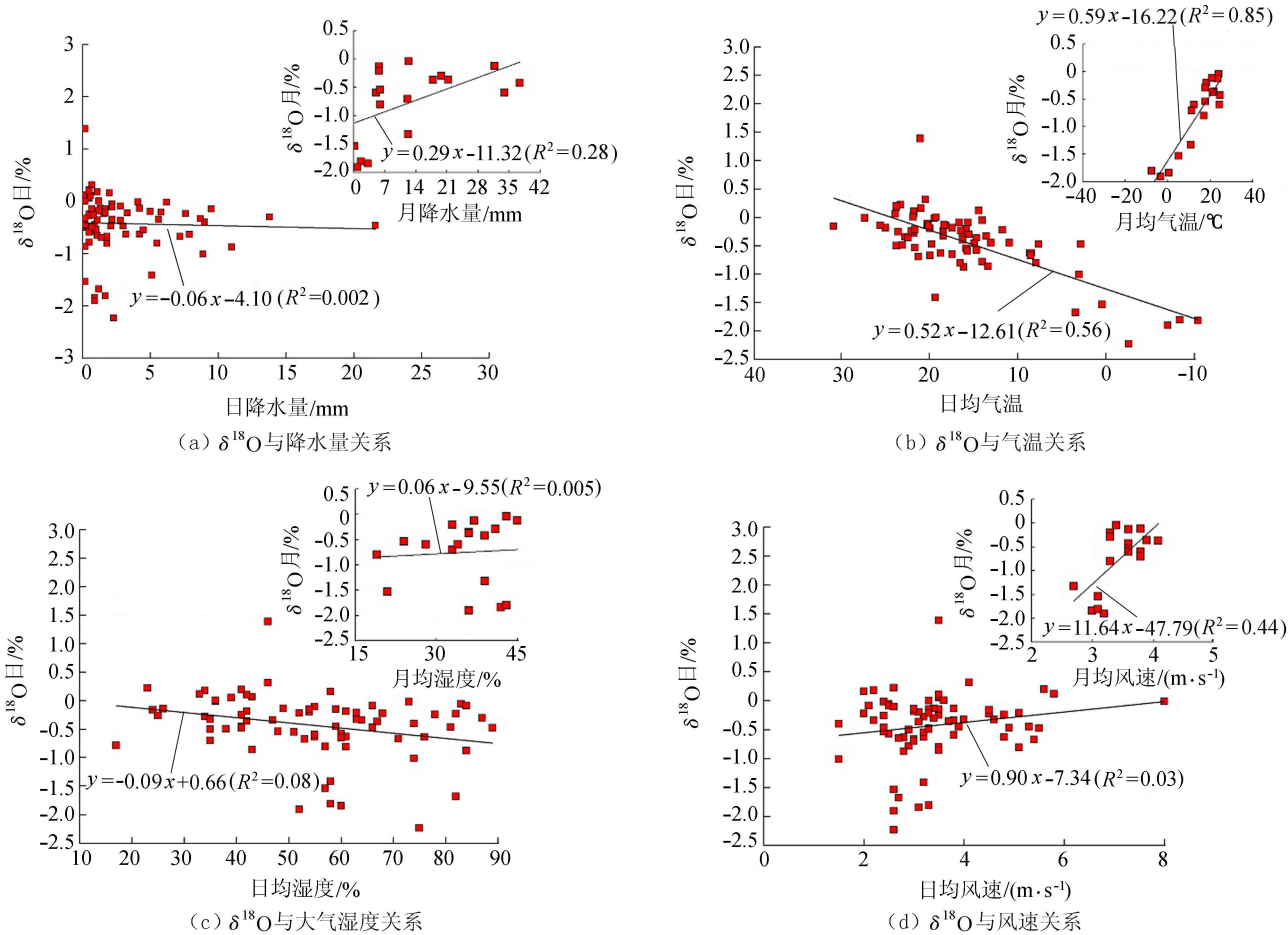


图 4 阿右旗降水氢氧稳定同位素和气象要素的关系

Fig. 4 Relationship of precipitation isotopes and meteorological parameters on the Alxa Desert Plateau

3.2.2 气温

阿右旗气象站降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 与气温的线性回归方程见图 4(b), 由图可知 $\delta^{18}\text{O}$ 与气温有很好的相关性, 而且月尺度上的相关性好于日尺度。冬季降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 较低, 夏季 $\delta^{18}\text{O}$ 较高(图 2 和图 3), 因此气温是控制阿拉善高原降水氢氧稳定同位素组成的主要因素。我国北方其他地区(如兰州及周边地区)也得到了类似的

研究结果^[19-20]。然而,Zhang 等^[31]和 Zhou 等^[32]的研究指出,降水同位素组成在年的尺度上温度效应并不显著,这一原因需要以后进一步探讨。

3.2.3 大气湿度

通常,低湿度会导致二次蒸发增强,而大气湿度增加时,二次蒸发会减弱,因此 $\delta^{18}\text{O}$ 和大气湿度之间呈现负相关性^[4,27,33]。研究表明,兰州及其周边地区 $\delta^{18}\text{O}$ 和大气湿度的负相关是由于较强的二次蒸发造成的^[18]。阿右旗气象站 $\delta^{18}\text{O}$ 和大气湿度的线性回归方程见图 4(c),由图可知在日尺度上 $\delta^{18}\text{O}$ 和大气湿度的负相关性很小,在月尺度上两者正相关性也很小。因此,大气湿度不是影响阿右旗降水氢氧稳定同位素组成的重要因素。

3.2.4 风速

风速也被认为是影响降水同位素组成的一个重要因素,这是因为:(a)它会导致蒸发,影响同位素组成变化;(b)可以加速雨滴和空气中水蒸气之间的同位素交换^[34-36]。基于数据拟合的阿右旗降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与风速之间的线性回归方程见图 4(d),由图可知日尺度上 $\delta^{18}\text{O}$ 和风速之间相关性很小,但是在月尺度上两者有一定正相关性。因此在月尺度上阿右旗降水稳定同位素组成受到风速的影响。

综上,降水量和大气湿度无论在日尺度还是月尺度上都不是影响阿右旗降水氢氧稳定同位素组成的主要因素;风速在月尺度上对降水的同位素变化有影响;气温无论在日尺度还是月尺度上都是影响降水氢氧同位素组成的主导因素。

3.3 西北不同地区的当地降水线

由于地理位置和气象条件不同,每个地区都有各自的大气降水 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 关系式,这种关系式被称为当地降水线(LMWL)^[37-38]。基于 2013—2015 年阿右旗气象站的降水同位素数据,建立当地降水线方程: $\delta\text{D} = 7.3\delta^{18}\text{O} + 2.14 (R^2 = 0.92, n = 75)$ 。阿右旗当地降水线的斜率和截距均低于全球大气降水线(GMWL)^[1],表明该地区的降水经历了强烈的蒸发。阿右旗降水线的斜率和截距比周边地区(乌鲁木齐、祁连山、拉萨、那曲、兰州、黄土高原等)的低(表 1),这是由于阿拉善高原蒸发作用强烈,降水在降落过程中经历了更强烈的蒸发过程,导致斜率下降,氕盈余(截距)减小。此外,阿拉善高原降水线的斜率和截距与河西走廊地区较为相似,说明两地气候环境类似^[19-20,22]。这些地区中榆树沟和鄂尔多斯高原降水线的截距和斜率最低,表明这两地蒸发作用更加显著^[39-40,45]。

表 1 西北不同地区降水线方程

Table 1 Local meteoric water lines of different areas in North and West China					
地区	研究区域	LMWL	相关系数 R^2	研究时间	引用文献
西部地区	乌鲁木齐河上游	$\delta\text{D} = 7.78\delta^{18}\text{O} + 13.75$	0.97	2006—2007 年	[24]
	榆树沟流域	$\delta\text{D} = 6.614\delta^{18}\text{O} - 2.953$	0.98	2013 年	[39]
	石羊河流域	$\delta\text{D} = 7.62\delta^{18}\text{O} + 4.4$	0.96	2008—2009 年	[19]
河西走廊	黑河流域	$\delta\text{D} = 7.82\delta^{18}\text{O} + 7.63$	0.999	2002—2004 年	[18]
	河西地区	$\delta\text{D} = 7.48\delta^{18}\text{O} + 8.01$	0.98	1986—2010 年	[20]
内蒙古	阿拉善高原	$\delta\text{D} = 7.30\delta^{18}\text{O} + 2.14$	0.92	2013—2015 年	本研究
	鄂尔多斯高原	$\delta\text{D} = 6.45\delta^{18}\text{O} - 6.51$	0.87	1999—2008 年	[40]
祁连山	野牛沟	$\delta\text{D} = 7.647\delta^{18}\text{O} + 12.396$	0.989	2008—2009 年	[41]
	大野口	$\delta\text{D} = 7.163\delta^{18}\text{O} + 5.695$	0.983	2008—2009 年	[41]
西藏	那曲	$\delta\text{D} = 7.7\delta^{18}\text{O} + 4.6$	0.96	2000 年	[42]
	拉萨	$\delta\text{D} = 7.9\delta^{18}\text{O} + 6.3$	0.97	1996 年	[43]
甘肃	兰州	$\delta\text{D} = 7.5\delta^{18}\text{O} + 5.07$	0.94	2011—2013 年	[20]
黄土高原	岔巴沟	$\delta\text{D} = 7.43\delta^{18}\text{O} + 2.8$	0.924	2004—2005 年	[44]

3.4 水汽来源和迁移路径

我国西北地区水汽的潜在来源有局部蒸发、西风、极地气团、东南季风和西南季风^[4,46]。阿拉善高原位于我国西北地区的中心,气候上受西风带、极地气团和东南季风的影响^[11,13]。

如图 5 所示,暖季(4—9 月)阿右旗降水的 $\delta\text{D} > -5.0\%$, $\delta^{18}\text{O} > -0.75\%$;寒季(1—3 月,10—12 月) $\delta\text{D} < -7.5\%$, $\delta^{18}\text{O} < -1.25\%$ 。暖季阿右旗降水同位素值小于长沙降水,寒季与乌鲁木齐和拉萨的降水同位素值较为接近。研究表明,长沙的降水由东南季风补给,拉萨的降水由西南季风补给,而乌鲁木齐的降水来源于

西风和极地气团^[4,41]。因此,阿拉善高原的降水在暖季可能与东南季风有关,在寒季与西南季风、西风和极地气团有关。氘盈余通常能够反映水汽的来源^[47]。 $\delta^{18}\text{O}$ 和氘盈余的似乎关系支持氢氧同位素分析获得的结论(图5(b)),然而根据水汽输送过程中同位素分馏原理,即使阿拉善高原和长沙的水汽来源相同,两地降水的同位素组成也会有所不同,因为两地相距2100 km,海拔相差1500 m,并且气候条件也不相同^[25]。此外,阿拉善高原降水中的 $\delta^{18}\text{O}$ 和氘盈余值在月变化上与长沙不同(图5(c)(d)),所以东南季风并不是阿拉善高原降水的主要来源。来自印度洋主导的青藏高原南部降水的水汽不会被西南季风带到阿拉善高原^[38]。因此,来自大西洋和北冰洋的水汽经过黑海、里海、咸海,被西风 and 极地气团带到阿拉善高原,这是阿拉善降水的主要水汽来源。这一推论的主要根据有:(a)如图5(c)(d)所示,阿拉善高原月降水同位素组成变化大致与水汽来自西方和北方的乌鲁木齐降水的一致^[25];(b)暖季阿拉善高原降水同位素值与乌鲁木齐的相比偏高,而寒季两地类似;(c)水汽从乌鲁木齐到阿拉善高原运移过程中,由于暖季强烈蒸发使得其同位素值上升,但在寒季没有强烈的蒸发,所以同位素值不发生较大变化^[25]。

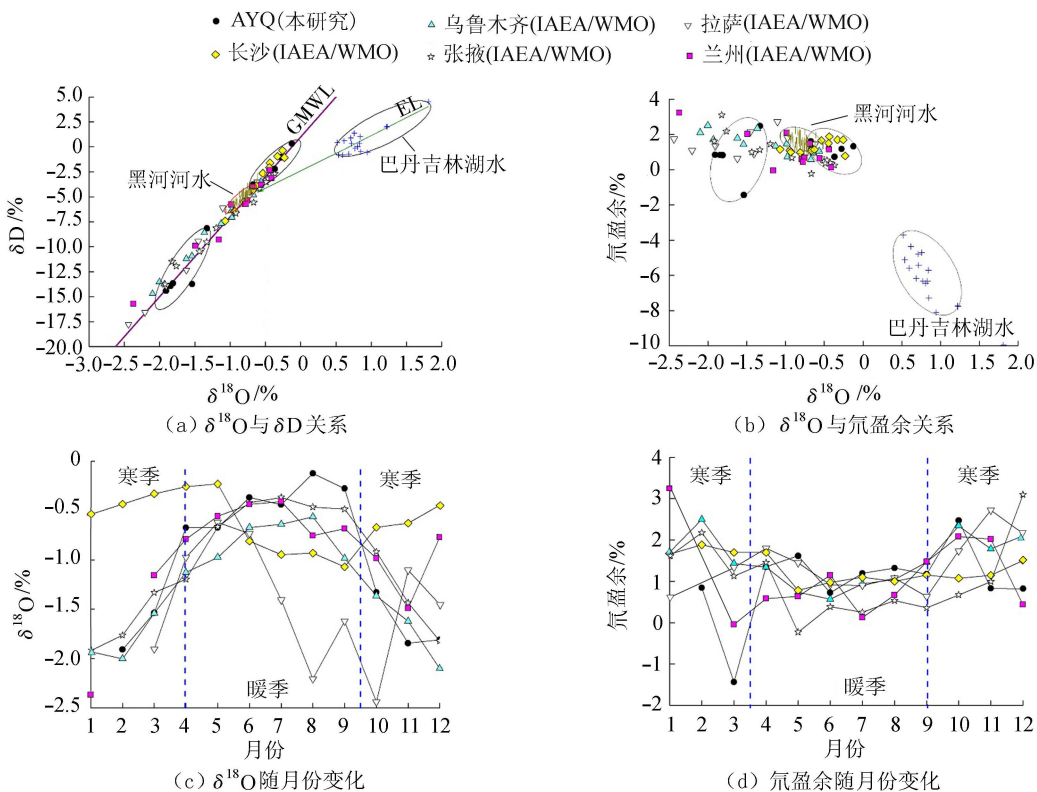


图5 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 关系以及 $\delta^{18}\text{O}$ 和氘盈余的分布(月加权平均值)

Fig. 5 Relationship of δD - $\delta^{18}\text{O}$, monthly distribution of $\delta^{18}\text{O}$ and deuterium excess (value of each month is a weighted mean in terms of the multi-year monthly data)

理论上,我国西北干旱地区降雨的氘盈余和 $\delta^{18}\text{O}$ 会较全球降水线(GMWL)偏高和偏低。在寒季,由于温度低,雨水蒸发量小,氘盈余值会比暖季高, $\delta^{18}\text{O}$ 会比暖季低^[25,48-49]。但是,如图5(d)所示,阿拉善高原降水中氘盈余在寒季的值并不比暖季高,这说明其受到当地或附近地表水体蒸发的影响。另外,阿拉善高原当地盐湖湖水的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 值很高,而氘盈余值很低(图5(b)),这是由于湖水经历了长期的蒸发。盐湖凝固点比淡水低,在寒季湖水不会完全结冰。因此,湖水会产生蒸发,在一定程度上影响了阿拉善高原降水的同位素组成。黑河流域在阿拉善高原的西部和南部(图1),如果水汽从黑河到达阿拉善高原,根据瑞利分馏模型,由于蒸发强烈,会有更低的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 值和更高的氘盈余值,并不符合图5(a)(b)的结果。因此,黑河河水对阿拉善高原降水的同位素组成几乎没有影响。

HYSPLIT模型表明阿拉善高原的降水由西风和极地气团主导(图6)。如表2所示,阿右旗气象站的水汽分别来自西北方向、北部和西部,比例各占33.3%,22.7%和21.3%。因此,HYSPLIT模型模拟结果进一步支持了同位素分析的结论(图5)。许多周边地区(榆树沟流域、乌鲁木齐流域、黑河流域、石羊河流域和兰

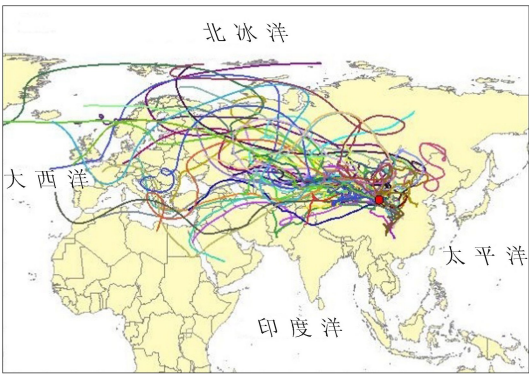


图 6 2013—2015 年阿右旗 75 次降水气团后向轨迹

Fig.6 HYSPLIT calculated backward trajectories of precipitation events ending at AYQ during 2013 and 2015

表 2 基于 HYSPLIT 模型模拟的阿右旗降水水汽来源统计

Table 2 Moisture source of each precipitation at AYQ traced by HYSPLIT model

水汽来源	阿右旗气象站(75 次降水)			
	暖季(4—9 月)		寒季(10 月至次年 3 月)	
	次数	百分比/%	次数	百分比/%
北 方	17	22.7	1	1.3
西北方向	25	33.3	5	6.7
南 方	4	5.3	—	—
东南方向	—	—	—	—
东 方	2	2.7	—	—
东北方向	3	4	—	—
西 方	16	21.3	2	2.7
西南方向	—	—	—	—

州地区)都已经进行了相关研究,并都得出了相似的结论^[19,22,25,39]。因此,包括阿拉善高原在内的我国西北地区的水汽主要来自大西洋、北冰洋、黑海、里海、咸海的西风 and 极地气团以及当地水体蒸发。

4 结 论

- a. 2013—2015 年之间,阿拉善高原上阿右旗气象站降水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 值分别在 -2.232% 到 1.38% 和 -16.81% 到 7.74% 之间波动,表现出明显的季节性变化,即夏季偏高,冬季偏低,与降水量和气温的变化规律一致。建立的当地大气降水线($\delta\text{D}=7.30\delta^{18}\text{O}+2.14$),比周围区域降水线的斜率和截距更低,意味着阿拉善高原的降水受到非平衡蒸发作用更强烈。
- b. 该地区降水同位素的温度效应无论在日尺度还是月尺度上都非常显著,但降水量和空气湿度对同位素的组成影响不是很大。风速在月尺度上对降水同位素有一定影响,但在日尺度上影响很小。降水氢氧同位素的关系也明显受气象因素的影响:降水线的斜率分别随着降水量增加、气温降低、大气湿度增加、风速减小而增大。
- c. 基于同位素分析和 HYSPLIT 模型,阿拉善高原降水的水汽来源主要是来自大西洋、北冰洋、黑海、里海、咸海的西风 and 极地气团以及当地水体蒸发。

参考文献:

[1] DANSGAARD W. Stable isotopes in precipitation[J]. Tellus,1964,16(4):436-468.

[2] 孙晓旭,徐进,苏治国. 真空蒸馏提取与原位采集对土壤水氢氧稳定同位素值比值的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版),2017,45(6):503-508. (SUN Xiaoxu, XU Jin, SU Zhiguo. Effects of vacuum distillation extraction and in-situ collection methods on the ratio of hydrogen and oxygen isotope of soil water[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2017,45(6):503-508. (in Chinese))

[3] GAT J R, GONFLANTINI R. Stable isotope hydrology-deuterium and oxygen-18 in the water cycle[M]. Vienna:IAEA,1981.

[4] ARAGUÁS-ARAGUÁS L, FROEHLICH K, ROZANSKI K. Stable isotope composition of precipitation over southeast Asia[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres,1998,103(D22):28721-28742.

[5] 王轶凡,瞿思敏,李代华,等. 小流域降雨径流氢氧同位素特征分析及其对径流分割的指示意义[J]. 河海大学学报(自然科学版),2017,45(4):365-371. (WANG Yifan, QU Simin, LI Daihua, et al. Characteristics of hydrogen and oxygen isotopes in rainfall-runoff in small watershed and their implications for runoff separation [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2017,45(4):365-371. (in Chinese))

[6] 陈建生,彭靖,詹沪成,等. 鄱阳湖流域河水、湖水及地下水同位素特征分析[J]. 水资源保护,2015,31(4):1-7. (CHEN Jiansheng, PENG Jing, ZHAN Lucheng, et al. Isotopic characteristics of river water, lake water and groundwater in Poyang Lake Basin[J]. Water Resources Protection, 2015, 31(4):1-7. (in Chinese))

[7] 张文卿,王文凤,刘淑芹,等. 长白山矿泉水补给径流与排泄关系[J]. 河海大学学报(自然科学版),2019,47(2):108-113. (ZHANG Wenqing, WANG Wenfeng, LIU Shuqin, et al. Relationship of recharge runoff and drainage for the mineral water in the

- Changbai Mountain[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2019, 47(2): 108-113. (in Chinese))
- [8] HUGHES C E, CRAWFORD J. Spatial and temporal variation in precipitation isotopes in the Sydney Basin, Australia[J]. Journal of Hydrology, 2013, 489(3): 42-55.
- [9] 汪集旻, 陈建生, 陆宝宏, 等. 同位素水文学的若干回顾与展望[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2015, 43(5): 406-413. (WANG Jiyang, CHEN Jiansheng, LU Baohong, et al. Review and prospect of isotope hydrology[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2015, 43(5): 406-413. (in Chinese))
- [10] 张文卿, 陈建生, 姜淑坤, 等. 基于同位素水化学分析的松嫩平原大布苏湖流域地下水补给源研究[J]. 水资源保护, 2017, 33(1): 9-14. (ZHANG Wenqing, CHEN Jiansheng, JIANG Shukun, et al. Study of recharge source of Dabusu Lake in Songnen Plain based on isotopic and hydrochemical analysis[J]. Water Resources Protection, 2017, 33(1): 9-14. (in Chinese))
- [11] 朱震达, 吴正, 刘恕, 等. 中国沙漠概论(修订版)[M]. 北京: 科学出版社, 1980.
- [12] XUAN Jie, SOKOLIK I N. Characterization of sources and emission rates of mineral dust in Northern China[J]. Atmospheric Environment, 2002, 36(31): 4863-4876.
- [13] YANG Xiaoping, ROST K T, LEHMKUHL F, et al. The evolution of dry lands in northern China and in the Republic of Mongolia since the Last Glacial Maximum[J]. Quaternary International, 2004, 118/119: 69-85.
- [14] 林年丰, 汤洁. 中国干旱半干旱区的环境演变与荒漠化的成因[J]. 地理科学, 2001, 21(1): 24-29. (LIN Nianfeng, TANG Jie. Environmental evolution and causes of desertification in arid and semi-arid regions of China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2001, 21(1): 24-29. (in Chinese))
- [15] 陈建生, 赵霞, 盛雪芬, 等. 巴丹吉林沙漠湖泊群与沙山形成机理研究[J]. 科学通报, 2006, 51(23): 2789-2796. (CHEN Jiansheng, ZHAO Xia, SHENG Xuefen, et al. Study on formation mechanism of lake group and sandy mountain in Badain Jaran Desert[J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(23): 2789-2796. (in Chinese))
- [16] MA Jinzhu, EDMUNDS W M. Groundwater and lake evolution in the Badain Jaran Desert ecosystem, Inner Mongolia[J]. Hydrogeology Journal, 2006, 14(7): 1231-1243.
- [17] GATES J B, EDMUNDS W M, DARLING W G, et al. Conceptual model of recharge to southeastern Badain Jaran Desert groundwater and lakes from environmental tracers[J]. Applied Geochemistry, 2008, 23(12): 3519-3534.
- [18] YANG Xiaoping, MA Nina, DONG Jufeng, et al. Recharge to the inter-dune lakes and Holocene climatic changes in the Badain Jaran Desert, Western China[J]. Quaternary Research, 2010, 73(1): 10-19.
- [19] WU Jinkui, DING Yongjian, YE Bosheng, et al. Spatio-temporal variation of stable isotopes in precipitation in the Heihe River Basin, Northwestern China[J]. Environmental Earth Sciences, 2010, 61(6): 1123-1134.
- [20] MA Jinzhu, ZHANG Peng, ZHU Gaofeng, et al. The composition and distribution of chemicals and isotopes in precipitation in the Shiyang River system, northwestern China[J]. Journal of Hydrology, 2012, 436/437(3): 92-101.
- [21] CHEN Fenli, ZHANG Mingjun, MA Qian, et al. Stable isotopic characteristics of precipitation in Lanzhou City and its surrounding areas, Northwest China[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 73(8): 4671-4680.
- [22] GUO Xiaoyan, FENG Qi, WEI Yongping, et al. An overview of precipitation isotopes over the Extensive Hexi Region in NW China[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2015, 8(7): 4365-4378.
- [23] RAO Wenbo, CHEN Jun, YANG Jiedong, et al. Sr isotopic and elemental characteristics of calcites in the Chinese deserts: Implications for eolian Sr 9.6[J]. Geochimica Et Cosmochimica Acta, 2009, 73(19): 5600-5618.
- [24] STEIN A F, DRAXLER R R, ROLPH G D, et al. NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2016, 96(12): 150504130527006.
- [25] FENG Fang, LI Zhongqin, ZHANG Mingjun, et al. Deuterium and oxygen-18 in precipitation and atmospheric moisture in the upper Urumqi River Basin, eastern Tianshan Mountains[J]. Environmental Earth Sciences, 2013, 68(4): 1199-1209.
- [26] CRAIG H. Isotopic variations in meteoric waters[J]. Science, 1961, 133: 1702.
- [27] CLARK I, FRITZ P. Environmental isotopes in hydrogeology[J]. Crc Pr Inc, 1997, 43(5): 532-532.
- [28] 章新平, 姚檀栋. 我国降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的分布特点[J]. 地理学报, 1998, 53(4): 356-364. (ZHANG Xinping, YAO Tandong. Distributional features of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation in China[J]. Acta Geographica Sinica, 1998, 53(4): 356-364. (in Chinese))
- [29] 张应华, 仵彦卿. 黑河流域中上游地区降水 $\delta^{18}\text{O}$ 变化特征[J]. 冰川冻土, 2007, 29(3): 440-445. (ZHANG Yinghua, WU Yanqing. Variation characteristics of precipitation of $\delta^{18}\text{O}$ in the middle and upper reaches of the Heihe Basin[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2007, 29(3): 440-445. (in Chinese))
- [30] 章新平, 姚檀栋. 青藏高原东北地区现代降水中 δD 与 $\delta^{18}\text{O}$ 的关系研究[J]. 冰川冻土, 1996, 18(4): 360-365. (ZHANG Xinping, YAO Tandong. Study on the relationship between δD and $\delta^{18}\text{O}$ in modern precipitation in the northeast of the Tibetan

- Plateau[J]. Journal of Glaciology and Geocryology,1996,18(4):360-365. (in Chinese))
- [31] ZHANG Xinping, LIU Jingmiao, TIAN Lide, et al. Variations of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation along vapor transport paths[J]. Advances in Atmospheric Sciences,2004,21(4):562-572.
- [32] ZHOU Shiqiao, NAKAWO M, SAKAI A, et al. Water isotope variations in the snow pack and summer precipitation at July 1 Glacier, Qilian Mountains in northwest China[J]. Science Bulletin,2007,52(21):2963-2972.
- [33] PENG Haidong, MAYER B, HARRIS S, et al. The influence of below-cloud secondary effects on the stable isotope composition of hydrogen and oxygen in precipitation at Calgary, Alberta, Canada[J]. Tellus, 2010, 59(4):698-704.
- [34] FRIEDMAN I, MACHTA L, SOLLER R. Water-vapor exchange between a water droplet and its environment[J]. Journal of Geophysical Research,1962,67(7):2761-2766.
- [35] WEBSTER P J, YANG Song. Monsoon and ENSO: selectively interactive systems[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society,1992,118:877-926.
- [36] PANG Hongxi, HE Yuanqing, ZHANG Zhonglin. Positive correlation between $\delta^{18}\text{O}$ in monsoon precipitation and atmospheric wind speed[J]. Science Bulletin,2004,49(9):938-941.
- [37] JONES M D, LENG M J, ARROWSMITH C, et al. Local $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ variability in UK rainfall[J]. Hydrology & Earth System Sciences Discussions,2007,4(4):2403-2423.
- [38] PRICE R M, SWART P K, WILLOUGHBY H E. Seasonal and spatial variation in the stable isotopic composition ($\delta^{18}\text{O}$ and δD) of precipitation in south Florida[J]. Journal of Hydrology,2008,358(3/4):193-205.
- [39] WANG Xiaoyan, LI Zhongqin, TAYIER R, et al. Characteristics of atmospheric precipitation isotopes and isotopic evidence for the moisture origin in Yushugou River basin, Eastern Tianshan Mountains, China[J]. Quaternary International,2015, 380/381:106-115.
- [40] YIN Lihe, HOU Guangcai, SU Xiaosi, et al. Isotopes (δD and $\delta^{18}\text{O}$) in precipitation, groundwater and surface water in the Ordos Plateau, China: implications with respect to groundwater recharge and circulation[J]. Hydrogeology Journal,2011,19(2):429-443.
- [41] ZHAO Liangju, YIN Li, XIAO Honglang, et al. Isotopic evidence for the moisture origin and composition of surface runoff in the headwaters of the Heihe River basin[J]. Chinese Science Bulletin,2011,56(4):406-416.
- [42] LIU Zhongfang, TIAN Lide, YAO Tandong, et al. Seasonal deuterium excess in Nagqu precipitation: influence of moisture transport and recycling in the middle of Tibetan Plateau[J]. Environmental Geology,2008,55(7):1501-1506.
- [43] 田立德,姚檀栋,孙维贞,等. 青藏高原南北降水中 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 关系及水汽循环[J]. 中国科学,2001,31(3):214-220. (TIAN Lide, YAO Tandong, SUN Weizhen, et al. The relationship between δD and $\delta^{18}\text{O}$ and water vapor cycle in the precipitation of the Tibetan Plateau[J]. Science China,2001,31(3):214-220. (in Chinese))
- [44] 刘鑫,宋献方,夏军,等. 黄土高原岔巴沟流域降水氢氧同位素特征及水汽来源初探[J]. 资源科学,2007,29(3):59-66. (LIU Xin, SONG Xianfang, XIA Jun, et al. Characteristics of hydrogen and oxygen isotopes and preliminary analysis of vapor source for precipitation in Chabagou Catchment of the Loess Plateau [J]. Resources Science,2007,29(3):59-66. (in Chinese))
- [45] RAO Wenbo, JIN Ke, JIANG Sanyuan, et al. Chemical and strontium isotopic characteristics of shallow groundwater in the Ordos Desert Plateau, North China: Implications for the dissolved Sr source and water-rock interactions[J]. Chemie der Erde-Geochemistry,2015,75(3):365-374.
- [46] JOHNSON K R, INGRAM B L. Spatial and temporal variability in the stable isotope systematics of modern precipitation in China: implications for paleoclimate reconstructions[J]. Earth & Planetary Science Letters,2004,220(3/4):365-377.
- [47] JOUZEL J. Isotopes in cloud physics: multiphase and multistage condensation processes[M]. Philadelphia: Elsevier B V,1986.
- [48] STEWART M K. Stable isotope fractionation due to evaporation and isotopic exchange of falling waterdrops: applications to atmospheric processes and evaporation of lakes[J]. Journal of Geophysical Research,1975,80(9):1133-1146.
- [49] GAT J R. Oxygen and hydrogen isotopes in the hydrologic cycle[J]. Annual Review of Earth & Planetary Sciences,2003,24(1):225-262.