

石梦雨,王圣杰,姚俊强,等. 基于 GCM 的乌鲁木齐水汽稳定同位素变化特征及其与 ENSO 的关系[J]. 干旱气象,2018,36(6):895-904, [SHI Mengyu, WANG Shengjie, YAO Junqiang, et al. Variation of Stable Isotope in Water Vapor over Urumqi and Its Relationship with ENSO Based on Isotope-enabled GCMs[J]. Journal of Arid Meteorology, 2018, 36(6):895-904], DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2018)-06-0895

# 基于 GCM 的乌鲁木齐水汽稳定同位素变化特征及其与 ENSO 的关系

石梦雨<sup>1,2</sup>, 王圣杰<sup>1,2,3</sup>, 姚俊强<sup>1</sup>, 王高飞<sup>4</sup>, 张明军<sup>2</sup>

(1. 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所, 新疆 乌鲁木齐 830002;  
2. 西北师范大学地理与环境科学学院, 甘肃 兰州 730070;  
3. 中国科学院西北生态环境资源研究院冰冻圈科学国家重点实验室,  
甘肃 兰州 730000; 4. 新疆阿勒泰地区气象局, 新疆 阿勒泰 836500)

**摘要:**利用第二稳定水同位素比较小组(SWING2)提供的同位素大气环流模式(GCM)的模拟数据(HadAM3、LMDZ-free 和 LMDZ-nudge),以新疆乌鲁木齐为例,对比分析了该区域大气水汽中稳定同位素垂直剖面的季节变化,分析了同位素比率与气象要素之间的关系以及 ENSO 对大气水汽稳定同位素的影响。结果表明:各模拟结果中大气水汽中  $\delta^{18}\text{O}$  在季节变化上均表现为 7 月较高,1 月较低;在垂直层面上, $\delta^{18}\text{O}$  随气压的降低而逐渐减小。降水和水汽中  $\delta^{18}\text{O}$  的季节变化趋势一致,但由于瑞利分馏的影响,降水中  $\delta^{18}\text{O}$  比水汽中  $\delta^{18}\text{O}$  更富集。在垂直层面上,大气水汽中  $\delta^{18}\text{O}$  与温度呈正相关,与纬向风和经向风的相关性较小,降水中  $\delta^{18}\text{O}$  与纬向风和经向风的相关性也较小。在厄尔尼诺年, $\delta^{18}\text{O}$  与 SST 呈负相关,在拉尼娜年则呈正相关,大气环流异常使研究区气温和降水发生变化,进一步也会影响水汽中的同位素值,ENSO 一定程度上对研究区水汽同位素的变化产生影响。

**关键词:**水汽同位素;GCM;ENSO;乌鲁木齐

**文章编号:**1006-7639(2018)06-0895-10 DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2018)-06-0895

**中图分类号:**P426

**文献标志码:**A

## 引言

大气降水中的稳定同位素作为水循环过程中重要的示踪剂,已经被广泛应用于水汽来源诊断、局地水汽再循环评估等众多领域<sup>[1]</sup>。冰芯、树轮、洞穴沉积物、珊瑚等记录的稳定同位素信息,也可用于反演古气候变化等研究。而相对于降水同位素而言,水汽中稳定同位素的监测不受天气现象的影响,可以敏感地反映出水汽的动态过程<sup>[2]</sup>,在空间和时间上具有良好的连续性,因而更有助于理解天气尺度的同位素影响机制,在研究水循环以及大气环流等方面具有独特优势<sup>[3-4]</sup>。近年来,随着对水汽同位素认识的加深和在线监测技术的迅猛发展,针对水汽稳定氢氧同位素的研究已经呈现出从地面监测到

大气廓线监测,再到卫星遥感技术反演和同位素大气环流模式(general circulation model,简称 GCM)模拟的综合研究格局<sup>[5]</sup>。就中国而言,近年来将近地面的水汽同位素监测结果用于水循环研究的案例越来越多<sup>[6-9]</sup>。

限于成本,地面在线水汽同位素监测设备尚难以在短时间内进行大规模的推广,现有的监测往往局限在较少的几个研究区<sup>[10-13]</sup>,难以刻画出大范围的空间分布特征,并且缺乏长时间的实地监测数据,是制约大气水汽同位素研究的主要问题之一。而遥感监测虽然具有相对较好的时空连续性,但时空分辨率仍比较有限,精度不高,对于水汽同位素的细节特征刻画不足<sup>[5]</sup>。相比之下,尽管同位素 GCM 时空分辨率和模拟精度还参差不齐,但在认识同位素

收稿日期:2018-02-20;改回日期:2018-07-05

基金项目:中国沙漠气象科学研究基金(Sqj2016001)、国家自然科学基金项目(41701028)、冰冻圈科学国家重点实验室开放基金(SKLCOS-OP-2017-04)和甘肃省高等学校科研项目(2018C-02)共同资助

作者简介:石梦雨(1994-),女,汉族,硕士研究生,主要从事寒旱区生态水文过程研究. E-mail: rainregen@163.com.

通信作者:王圣杰(1987-),汉族,副教授,主要从事同位素水文学研究. E-mail: geowang@126.com.

的动力机制方面表现出独特的优势:一方面,在一些缺乏实测数据的地区,GCM 可以弥补这些地区同位素数据的缺失;另一方面,针对水汽同位素组成过程的研究为解释水文循环的古气候变化提供了一个改进的框架<sup>[14]</sup>。

自 JOUSSAUME 等<sup>[15]</sup>首次运用 GCM 对降水同位素进行模拟后,各种基于 GCM 的同位素研究便层出不穷<sup>[16-21]</sup>。但由于不同的 GCM 在算法、数据源等方面并不相同,对降水和水汽中稳定同位素的模拟结果准确性差异巨大,不同模式之间的气象参数存在较大差别,模拟降水同位素的变化不同<sup>[17]</sup>。且由于模式的不确定性,模拟值和监测值存在较大差异。在对韩国济州岛 850 ~ 500 hPa 高度层中水汽同位素的季节变化研究发现,GCM 模拟的大气水汽中稳定同位素在冬季富集,而由 TES 卫星遥感反演的实测值显示稳定同位素在夏季富集<sup>[22]</sup>,为解释这种反季节性,需要采用实地监测数据来确认和验证。除此之外,温度、湿度、降水量以及不同的水汽来源等也是影响水汽同位素变化的主要因素,对示踪古气候具有重要作用<sup>[12]</sup>。

ENSO 是厄尔尼诺与南方涛动大尺度海气相互作用的一种现象,通过大气环流影响全球气候<sup>[23]</sup>,使世界各地产生异常的天气现象<sup>[24-25]</sup>,潜在地影响降水中稳定同位素的变化。在我国,ENSO 显著地影响季风区降水同位素的变化,受大气环流运动的影响,降水中  $\delta^{18}\text{O}$  与 ENSO 存在显著的相关关系,具体表现为在厄尔尼诺年,降水同位素与其呈负相关,而拉尼娜年则呈正相关<sup>[26-28]</sup>。先前的研究主要针对季风区,而非季风区的研究相对较少。

乌鲁木齐是新疆维吾尔自治区的首府,地处天山北麓,远离海洋,属温带大陆性干旱气候<sup>[29]</sup>。该区常年受西风气流控制,冬季气温较低,蒸发作用弱,夏季气温较高,蒸发强烈,绿洲气候效应明显。作为亚洲中部干旱区的典型代表,乌鲁木齐在全球降水同位素网络(GNIP)中的多年监测数据受到同位素水文学研究的重视<sup>[30]</sup>,其他的短期监测也多有

研究<sup>[30-32]</sup>。然而,对乌鲁木齐乃至整个亚洲中部干旱区而言,水汽同位素的实地监测还极为匮乏,制约了对干旱气候背景下水资源研究的深入开展。因此,本文选取几种国际上常用的同位素 GCM,以乌鲁木齐为例分析 20 世纪末期以来的水汽同位素季节变化及其与气象要素的关系,以明确这一区域大气水汽稳定同位素的基本特征,并分析水汽中同位素与 ENSO 的关系,分析 ENSO 事件是否影响研究区水汽中的稳定同位素,以期为研究亚洲中部干旱区水汽过程以及水文循环提供科学依据。

## 1 数据与方法

采取的 GCM 模拟数据来源于第二稳定水同位素比较小组(stable water isotope intercomparison group, Phase2, 简称“SWING2”)。根据数据的可获取性,选取 3 种模拟结果用以分析乌鲁木齐大气水汽的同位素特征,包括 HadAM3、LMDZ-free 和 LMDZ-nudge(表 1)。HadAM3<sup>[33]</sup> 是英国哈德利中心研发的模式,采用 AMIP 的标准模拟。LMDZ-free 和 LMDZ-nudge<sup>[34]</sup> 由法国气象动力实验室研发,前者采用 AMIP 的标准模拟,后者根据 NCEP 风场进行张弛逼近。为便于比较,选取每个模式中最靠近乌鲁木齐的格点数据进行分析。考虑到乌鲁木齐累年(1981—2002)平均地面气压为 766 hPa,以及当地大气水汽基本集中在 825 ~ 464 hPa 高度层<sup>[35]</sup>,对 HadAM3 选取 700 hPa、600 hPa、500 hPa、400 hPa 和 300 hPa 层面进行分析,对 LMDZ-free 和 LMDZ-nudge 选取 765 hPa、663 hPa、546 hPa、425 hPa 和 318 hPa 层面进行分析。

稳定同位素  $\delta^{18}\text{O}$  (‰) 的比率以相对于维也纳标准平均大洋水(VSMOW)的千分差表示,即:

$$\delta^{18}\text{O} = [R/R_{\text{SMOW}} - 1] \times 1000\text{‰}$$

式中: $R$  为模式中模拟的大气水汽或降水中 $^{18}\text{O}$ 与 $^{16}\text{O}$ 的比值; $R_{\text{SMOW}}$ 为维也纳标准大洋水中 $^{18}\text{O}$ 与 $^{16}\text{O}$ 的比值,模式中取  $2005.2 \times 10^{-6}$ 。

表 1 本研究使用的 GCM 基本信息

Tab. 1 Basic information of GCM used in this study

模式	水平分辨率	垂直分层	时间段
HadAM3	3.75° × 2.5°	17	1958—2003 年
LMDZ-free	3.75° × 2.5352°	19	1979—2007 年
LMDZ-nudge	3.75° × 2.5352°	19	1979—2009 年

## 2 结果分析

### 2.1 大气水汽中 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化特征

#### 2.1.1 大气水汽中 $\delta^{18}\text{O}$ 的季节变化

图1为3种模式模拟的乌鲁木齐不同季节(1、4、7和10月分别代表冬、春、夏和秋季)水汽同位素的垂直廓线。可以明显看出3种模式模拟的结果相似,其变化趋势自近地面开始,随着高度的升高, $\delta^{18}\text{O}$ 逐渐贫化<sup>[36]</sup>,不同季节降低趋势不同。1月大气水汽中 $\delta^{18}\text{O}$ 较其他几个月份低,7月较高;在垂直层面,随气压的降低, $\delta^{18}\text{O}$ 的值也逐渐降低。1月大气水汽中 $\delta^{18}\text{O}$ 较为贫化,在西风影响下,长距离的水汽输送使得重同位素在途中优先凝结下落,轻同位素随水汽的输送路径到达研究区<sup>[35]</sup>,加之冬季气温较低,蒸发微弱,沿途水汽补充较少,使得水汽中的 $\delta^{18}\text{O}$ 越来越贫化。7月气温较高,此时较强的西风气流将水汽输送到乌鲁木齐<sup>[37-38]</sup>,在云下蒸发和水汽再循环影响下,这一时期的 $\delta^{18}\text{O}$ 较其他月份富集。而4月和10月,3种模式模拟的 $\delta^{18}\text{O}$ 变化趋势大致相同,这一时期 $\delta^{18}\text{O}$ 随气压的变化没有1月和7月明显。

大气水汽是降水产生的主要来源,水汽在冷却

过程中由于冷凝作用,部分水汽凝结形成降水,另一部分则留在气团中。因此,选取3种模式大气水汽中最接近地面的气压层(HadAM3选取700 hPa, LMDZ-free和LMDZ-nudge选取765 hPa)中 $\delta^{18}\text{O}$ ,以及降水中的 $\delta^{18}\text{O}$ 值,比较凝结过程是否对降水中的同位素值产生影响。依据研究区气温和降水量的季节变化,将4—9月定义为夏半年,10月至次年3月定义为冬半年<sup>[39]</sup>。图2是3种模式模拟的乌鲁木齐近地面水汽和降水中的 $\delta^{18}\text{O}$ 的月变化。可以看出,3种模式模拟的水汽和降水中的 $\delta^{18}\text{O}$ 的季节差异明显,水汽和降水中的 $\delta^{18}\text{O}$ 在夏半年富集,在冬半年贫化<sup>[30,38]</sup>。模拟的最大值出现在夏半年,最小值出现在冬半年。比较水汽和降水中的 $\delta^{18}\text{O}$ 的季节变化发现,降水中的 $\delta^{18}\text{O}$ 较水汽中的 $\delta^{18}\text{O}$ 富集,水汽在凝结过程中产生瑞利分馏,使得重同位素优先凝结下落,轻同位素则留在气团中<sup>[36]</sup>,因此当地降水中的 $\delta^{18}\text{O}$ 要比大气水汽中的 $\delta^{18}\text{O}$ 高。

#### 2.1.2 水汽中 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度、纬向风、经向风的关系

降水中的 $\delta^{18}\text{O}$ 一般在低纬地区与降水量呈负相关,表现为降水量效应,在中高纬地区与温度呈正相关,表现为温度效应<sup>[40]</sup>。但是,中高纬地区降水和水汽中 $\delta^{18}\text{O}$ 的影响机制远不止温度效应这么简单,

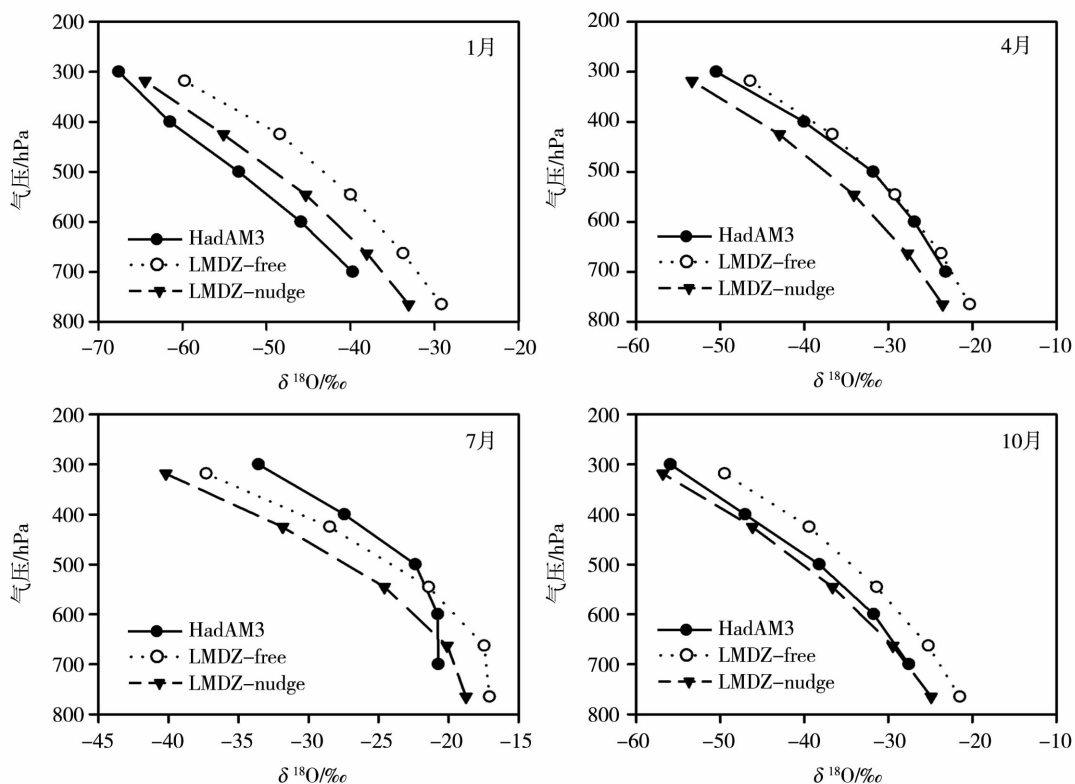


图1 3种模式模拟的乌鲁木齐不同季节大气水汽中 $\delta^{18}\text{O}$ 的垂直廓线

Fig. 1 Vertical profiles of  $\delta^{18}\text{O}$  in atmospheric water vapor over Urumqi in different seasons simulated by three models

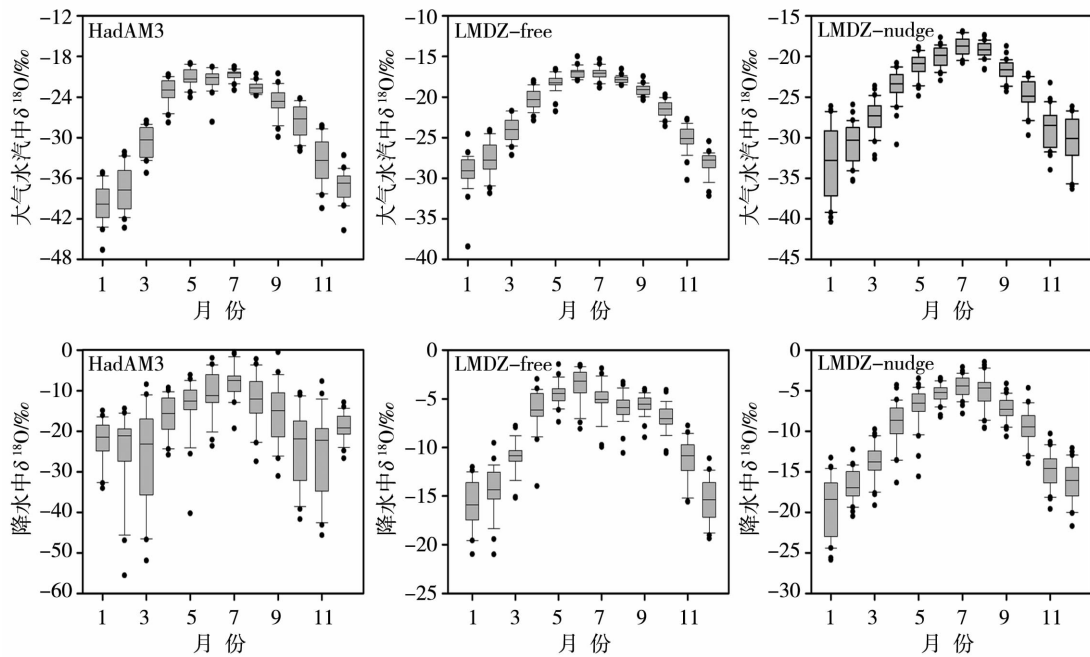


图2 3种模式模拟的乌鲁木齐近地面水汽和降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的月变化

Fig.2 Monthly variation of  $\delta^{18}\text{O}$  in water vapor near surface and precipitation of Urumqi simulated by three models

水汽在输送过程中会受到局地或大尺度对流的影响,高空和地面的风向不同,水汽含量也不同,其 $\delta^{18}\text{O}$ 也不尽相同。

为更好地模拟大气水汽中 $\delta^{18}\text{O}$ 与相关气象要素的关系,选取3种模式模拟的不同气压层中的温度、纬向风和经向风来分析大气水汽中 $\delta^{18}\text{O}$ 与它们之间的相关关系。另外,由于HadAM3模式模拟的纬向风和经向风的格点位置与模拟 $\delta^{18}\text{O}$ 的格点位

置不同,在分析相关性时,模拟结果存在偏差。表2为3种模式在不同气压层上 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度、纬向风和经向风的相关性。可以看出,3种模式模拟的大气水汽不同气压层中 $\delta^{18}\text{O}$ 与各气象要素的相关性大不相同。其中3种模式在模拟温度与 $\delta^{18}\text{O}$ 的关系时,整体表现出很好的一致性,在每个气压层, $\delta^{18}\text{O}$ 与温度均呈显著的正相关关系。显然,水汽中 $\delta^{18}\text{O}$ 也存在着类似于降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的温度效应<sup>[40]</sup>。

表2 3种模式模拟的大气水汽中不同气压层 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度、纬向风和经向风的相关系数

Tab.2 The correlation coefficients between  $\delta^{18}\text{O}$  in atmospheric water vapor and temperature, zonal and meridional wind speed on different pressure layers simulated by three models

气压/ hPa	HadAM3			LMDZ - free			LMDZ - nudge		
	温度	纬向风	经向风	温度	纬向风	经向风	温度	纬向风	经向风
700	0.90 **	-0.64 **	-0.44 **	—	—	—	—	—	—
600	0.95 **	-0.32 **	-0.01	—	—	—	—	—	—
500	0.96 **	-0.01	0.22 **	—	—	—	—	—	—
400	0.97 **	0.33 **	0.38 **	—	—	—	—	—	—
300	0.96 **	0.60 **	0.39 **	—	—	—	—	—	—
765	—	—	—	0.86 **	-0.22 **	0.34 **	0.91 **	-0.27 **	-0.07
663	—	—	—	0.93 **	0.04	0.57 **	0.93 **	-0.23 **	0.31 **
546	—	—	—	0.94 **	-0.17 **	0.49 **	0.93 **	-0.26 **	0.35 **
425	—	—	—	0.94 **	-0.30 **	0.44 **	0.93 **	-0.21 **	0.40 **
318	—	—	—	0.94 **	-0.29 **	0.49 **	0.93 **	-0.06 **	0.41 **

注: \*\* 表示通过0.01的显著性检验

乌鲁木齐常年存在的西风气流一定程度上会使大气中水汽的分布偏移,因此,对不同气压层水汽中  $\delta^{18}\text{O}$  与纬向风的关系进行相关性分析,看其是否对垂直大气水汽中  $\delta^{18}\text{O}$  的分布产生影响。如表 2 所示,在 HadAM3 模式中,在 700 ~ 300 hPa 之间, $\delta^{18}\text{O}$  与纬向风风速的相关性由负相关变为正相关。从近地面到高空,其变化趋势比较明显。在 LMDZ - free 模式中, $\delta^{18}\text{O}$  和纬向风的相关性没有 HadAM3 明显,除 600 hPa 相关系数为正外,其余气压层中大气水汽中  $\delta^{18}\text{O}$  与风速基本呈负相关。在 LMDZ - nudge 模式中, $\delta^{18}\text{O}$  与风速呈负相关,但相关性不明显,相关系数最低值出现在 318 hPa。3 种模式模拟的大气水汽中  $\delta^{18}\text{O}$  与纬向风相关性的不同,与模式模拟的方法和选取的气压层不同有关。总体上,大气水汽中  $\delta^{18}\text{O}$  与纬向风的相关性较小,尽管纬向风不是造成大气水汽中  $\delta^{18}\text{O}$  变化的主要原因,但它对大气水汽中  $\delta^{18}\text{O}$  的分布仍产生影响。

GCM 模拟的大气水汽中  $\delta^{18}\text{O}$  与经向风的相关性如表 2 所示,除 HadAM3 模式的 700、600 hPa 和 LMDZ - nudge 的 765 hPa 呈负相关外,其他均呈正相关。在 HadAM3 模式中,大气水汽中  $\delta^{18}\text{O}$  与经向风速在 500 hPa、400 hPa、300 hPa 为正相关,相关系数最大出现在 300 hPa。在 LMDZ - free 模式中, $\delta^{18}\text{O}$  与经向风自近地面向高空总体上呈正相关,相关系数最大出现在 663 hPa。在 LMDZ - nudge 模式中,相关系数最大出现在 318 hPa。与纬向风相似,大气水汽中  $\delta^{18}\text{O}$  与经向风的相关性较弱,但整体上对大气水汽的分布也会产生一定影响。

模式模拟的大气水汽中  $\delta^{18}\text{O}$  与纬向风和经向风的关系仍存在季节差异,不能直观地反映出年际变化的情况,因此,分析 7 月乌鲁木齐近地面大气水汽和降水中  $\delta^{18}\text{O}$  与纬向风和经向风的相关性,判断在 7 月,风是如何影响大气水汽中稳定同位素的变化。图 3 为 7 月乌鲁木齐大气水汽和降水中  $\delta^{18}\text{O}$  与纬向风和经向风的相关关系。其中, HadAM3 选取 700 hPa, LMDZ - free 和 LMDZ - nudge 模式选取 765 hPa。可以看出,3 种模式模拟的大气水汽中  $\delta^{18}\text{O}$  与纬向风基本呈负相关, LMDZ - free 模拟的相关性最大, LMDZ - nudge 模拟的相关性较小,即纬向风速越大,水汽中  $\delta^{18}\text{O}$  越小,而分析水汽中  $\delta^{18}\text{O}$  与经向风的关系发现,除 LMDZ - free 的相关性较好外,其他两种模式的相关性较差。降水中,  $\delta^{18}\text{O}$  与纬向风呈正相关关系<sup>[41]</sup>,除 LMDZ - free 外,  $\delta^{18}\text{O}$  与经向风也呈正相关关系。水汽和降水中  $\delta^{18}\text{O}$  与纬向风和经向风的相关性的不同,一方面由于模式自

身的模拟存在偏差,另一方面,水汽和降水同位素数据同期的风速差别可能也是导致相关性差异的原因<sup>[2]</sup>。

## 2.2 ENSO 对水汽中 $\delta^{18}\text{O}$ 的影响

ENSO 主要发生在赤道中东太平洋,通过大气环流影响全球气候,这可能会在水汽中的稳定同位素组成上体现出来<sup>[27]</sup>。ENSO 事件一般由海表温度异常(SSTA)以及南方涛动指数(SOI)来定义。SSTA 与 SOI 的关系为判定厄尔尼诺和拉尼娜的标准,当 SSTA 为正值,SOI 为负值时,该事件倾向厄尔尼诺,反之为拉尼娜。就中国区域而言,以 Niño3.4 (5°N—5°S, 170°W—120°W) 的 3 个月海表温度滑动平均绝对值达到或者超过 0.5 (-0.5),且持续时间至少 5 个月判定为一次厄尔尼诺(拉尼娜)事件<sup>[42]</sup>。依据美国海洋大气局(<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/>)所提供信息,将研究阶段的厄尔尼诺和拉尼娜事件进行排序,如表 3 所示。

表 3 1980—2010 年厄尔尼诺和拉尼娜事件  
Tab. 3 El Niño and La Niña events during 1980 - 2010

事件	起止时间	持续时间/ 月	峰值/ °C
厄尔尼诺	1982 年 4 月至 1983 年 7 月	16	2.2
	1986 年 8 月至 1988 年 3 月	20	1.7
	1991 年 5 月至 1992 年 7 月	15	1.7
	1994 年 8 月至 1995 年 4 月	9	1.0
	1997 年 4 月至 1998 年 5 月	14	2.4
	2002 年 5 月至 2003 年 3 月	11	1.3
	2004 年 7 月至 2005 年 3 月	9	0.7
	2009 年 7 月至 2010 年 4 月	10	1.5
拉尼娜	1984 年 9 月至 1985 年 7 月	11	-1.1
	1988 年 4 月至 1989 年 6 月	15	-1.8
	1995 年 7 月至 1996 年 4 月	10	-1.0
	1998 年 6 月至 2001 年 3 月	34	-1.7
	2007 年 6 月至 2008 年 7 月	14	-1.6
	2010 年 5 月至 2011 年 5 月	13	-1.7

研究区大气水汽中  $\delta^{18}\text{O}$  所反映出的 ENSO 信息也表现在与海表温度(SST)的关系上,将厄尔尼诺事件和拉尼娜事件发生时大气水汽中的  $\delta^{18}\text{O}$  与同时期的 SST 值进行相关分析,发现水汽中的  $\delta^{18}\text{O}$  与 SST 存在显著的相关关系(图 4)。在厄尔尼诺事件发生时,3 种模式模拟的水汽中  $\delta^{18}\text{O}$  与 SST 均呈

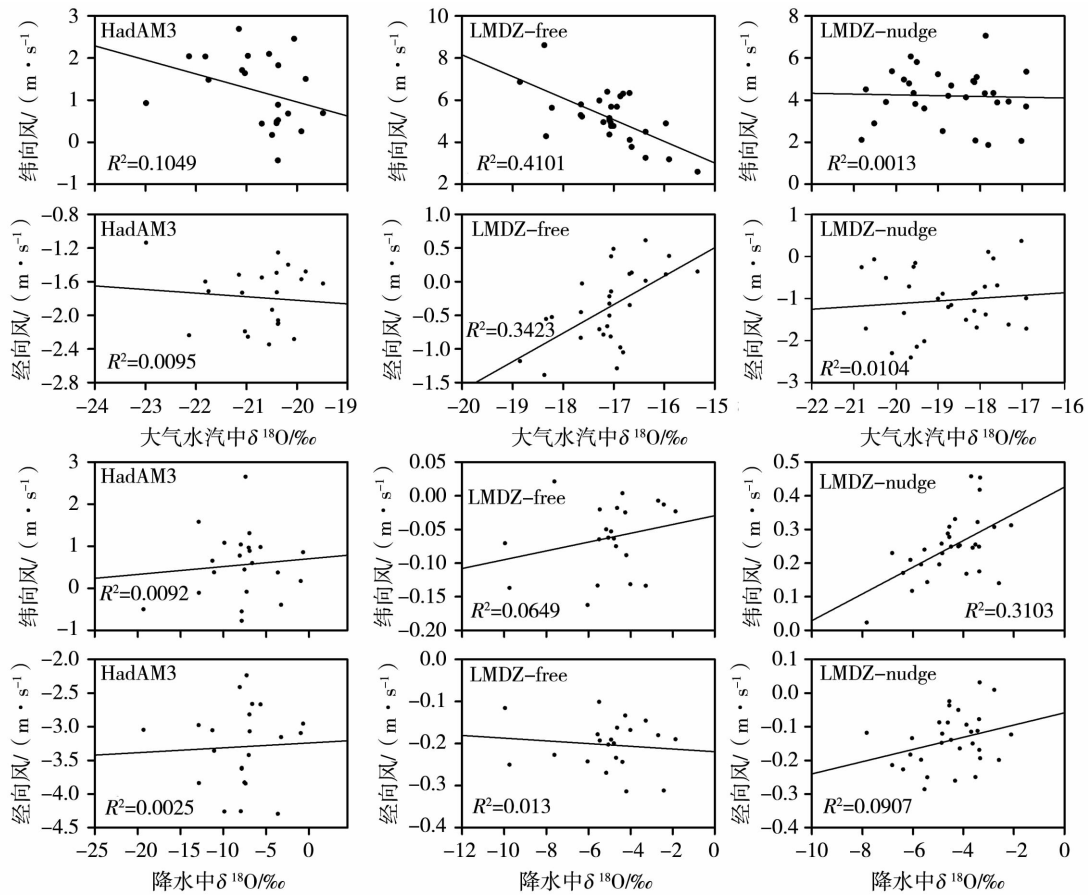


图3 3种模式模拟的7月近地面大气水汽和降水中 $\delta^{18}O$ 与纬向风、经向风的相关性

Fig. 3 Correlation between  $\delta^{18}O$  in water vapor near surface and precipitation and zonal, meridional wind speed in July simulated based on three models

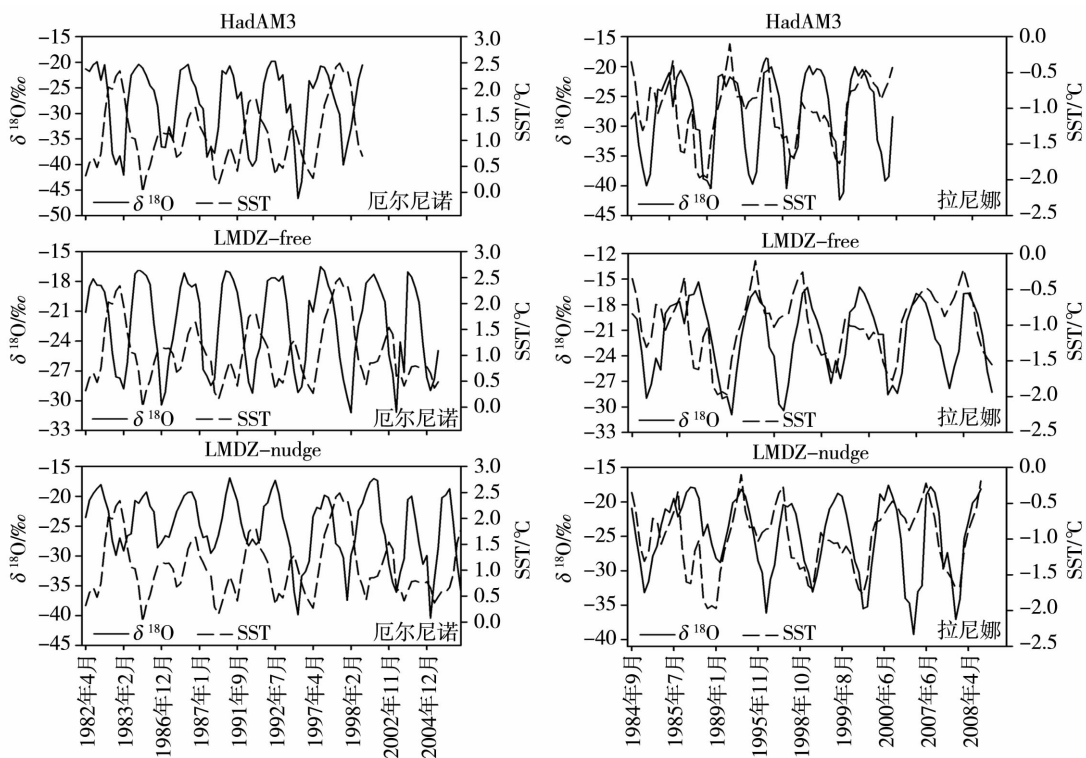


图4 3种模式模拟的 ENSO 期间大气水汽中 $\delta^{18}O$ 与 SST 的变化

Fig. 4 Variations of  $\delta^{18}O$  in atmospheric water vapor and SST in ENSO events simulated by three models

明显的负相关, SST 较高时期,水汽中的  $\delta^{18}\text{O}$  相对较低;在拉尼娜事件发生时,水汽中的  $\delta^{18}\text{O}$  与 SST 呈现正相关, SST 较低时期,水汽中的  $\delta^{18}\text{O}$  也相对较低。

表 4 列出在厄尔尼诺和拉尼娜事件发生时,水汽中  $\delta^{18}\text{O}$  与 SST 的相关关系。可以看出,厄尔尼诺事件时,水汽中  $\delta^{18}\text{O}$  与 SST 的相关系数均为负,相关性最高为 HadAM3 模式,相关系数为  $-0.41$ ,即当

赤道中东太平洋的 SST 越高时,乌鲁木齐大气水汽中  $\delta^{18}\text{O}$  越低。在拉尼娜事件中,水汽中  $\delta^{18}\text{O}$  与 SST 的相关系数均为正,相关性最高出现在 LMDZ - nudge 模式,相关系数为  $0.47$ ,当 SST 较低时,大气水汽中  $\delta^{18}\text{O}$  的值相对较高。大气环流这种遥相关一定程度上影响研究区水汽稳定同位素的变化,但具体影响仍需要进一步的分析。

表 4 ENSO 期间大气水汽中  $\delta^{18}\text{O}$  与 SST 相关关系

Tab. 4 Correlation between  $\delta^{18}\text{O}$  in atmospheric water vapor and SST in ENSO events

模式	厄尔尼诺			拉尼娜		
	回归方程	<i>n</i>	<i>r</i>	回归方程	<i>n</i>	<i>r</i>
HadAM3	$\delta^{18}\text{O} = -4.78 \text{ SST} - 22.76$	74	-0.41	$\delta^{18}\text{O} = 6.59 \text{ SST} - 21.57$	70	0.41
LMDZ - free	$\delta^{18}\text{O} = -2.57 \text{ SST} - 19.58$	94	-0.34	$\delta^{18}\text{O} = 4.56 \text{ SST} - 17.26$	77	0.47
LMDZ - nudge	$\delta^{18}\text{O} = -2.40 \text{ SST} - 22.63$	100	-0.25	$\delta^{18}\text{O} = 4.78 \text{ SST} - 20.30$	84	0.38

ENSO 主要通过大尺度大气环流影响气候变化,较为明显地表现在气温和降水中,选取研究阶段最强烈的一次厄尔尼诺(1997 年 4 月至 1998 年 5 月)和拉尼娜(1998 年 6 月至 2001 年 3 月)事件,分析该阶段研究区气温和降水量与近地面大气水汽中  $\delta^{18}\text{O}$  的关系(图 5)。在厄尔尼诺事件中,3 种模式

模拟的  $\delta^{18}\text{O}$  与气温和降水量的变化趋势基本相似,气温最大值出现在 7 月,最小值出现在 1 月,降水量最大值出现在 5 月,最小值出现在 4 月和 10 月。在拉尼娜事件中,总体上  $\delta^{18}\text{O}$  与气温和降水量的关系与厄尔尼诺相似,但研究区并没有体现出明显的降水量效应,温度是影响水汽中  $\delta^{18}\text{O}$  变化的主要因素。

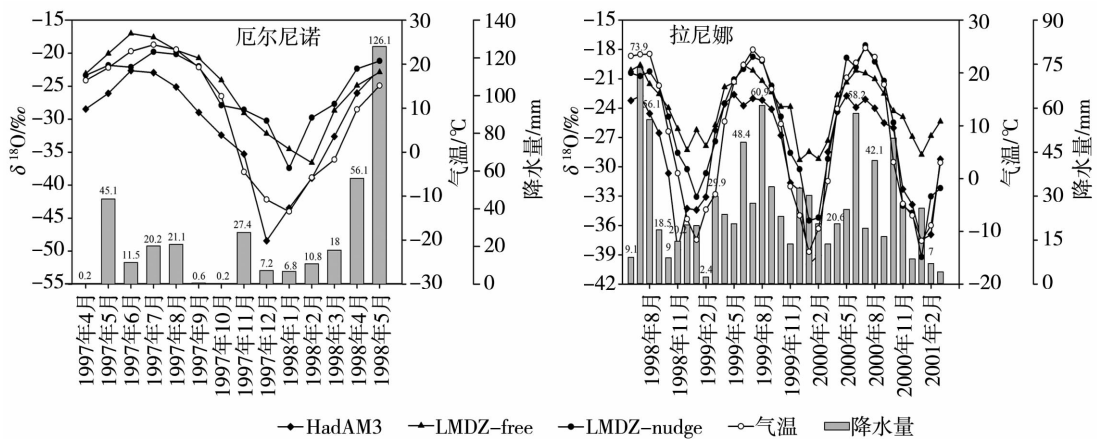


图 5 3 种模式模拟的 ENSO 期间大气水汽中  $\delta^{18}\text{O}$  与温度和降水量的变化

Fig. 5 The variation of  $\delta^{18}\text{O}$  in atmospheric water vapor simulated by three models and temperature and precipitation in ENSO events

ENSO 主要发生在中东赤道太平洋上,对中低纬地区尤其是东亚季风区影响较大<sup>[43]</sup>,新疆地区虽然全年受西风影响,但近年来的大量气象研究表明印度季风带来的水汽可能对新疆的极端降水事件产生重要影响,某些情况下水汽自阿拉伯海和孟加拉湾北上翻越青藏高原输送至亚洲中部干旱区,这可以从水汽路径和天气系统过程得到印证<sup>[44-45]</sup>。也

有研究对新疆降水与 ENSO 的遥相关进行分析<sup>[46-48]</sup>,如 CHEN 等<sup>[46]</sup>利用分位数回归模型分析北疆湿季降水量与尼诺指数的关系,揭示两者之间显著相关,北疆在厄尔尼诺事件中降水量较高,拉尼娜事件相反,ENSO 一定程度上影响北疆的降水量。当然,ENSO 与大气环流异常的遥相关对东亚及太平洋地区影响较大,对高纬及内陆地区的物理机制

仍需要进一步地辨析。

### 3 结 论

(1) 大气水汽中  $\delta^{18}\text{O}$  季节变化在不同模式中呈现出较好的一致性。自近地面向高空, 水汽中  $\delta^{18}\text{O}$  随着气压的降低而逐渐减少, 水汽中  $\delta^{18}\text{O}$  在夏季富集, 冬季贫化。同时, 与降水中的  $\delta^{18}\text{O}$  相比, 由于瑞利分馏的影响, 降水中的  $\delta^{18}\text{O}$  明显较水汽中  $\delta^{18}\text{O}$  富集。

(2) 大气水汽中  $\delta^{18}\text{O}$  与温度呈正相关, 降水中的温度效应也同样存在于水汽中。7 月近地面, 水汽中  $\delta^{18}\text{O}$  与纬向风呈负相关, 除 HadAM3 模式外, 与经向风呈正相关。而在降水中除 LMDZ - free 外,  $\delta^{18}\text{O}$  与纬向风和经向风均呈正相关。这种相关性的不同, 一部分是由于模式自身模拟存在偏差, 另一方面, 风速的差别可能也会导致相关性的差异。

(3) 大气水汽中  $\delta^{18}\text{O}$  在厄尔尼诺事件和拉尼娜事件中的季节变化特征存在差异, 在厄尔尼诺事件中, 水汽中  $\delta^{18}\text{O}$  与 SST 呈显著的负相关, 在拉尼娜事件中则相反。而大气环流异常使研究区气温和降水发生变化, 进一步也会影响水汽中的同位素值。ENSO 一定程度上对研究区水汽同位素的变化产生影响, 但其具体原因需要进一步的辨析。

#### 参考文献:

[1] ZHANG M J, WANG S J. A review of precipitation isotope studies in China: Basic pattern and hydrological process[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2016, 26(7): 921 - 938.

[2] 柳景峰, 效存德, 丁明虎, 等. 南极科考断面水汽同位素观测与模拟及其反映的水循环信息[J]. *冰川冻土*, 2014, 36(6): 1440 - 1449.

[3] 庞洪喜, 何元庆, 卢爱刚, 等. 天气尺度下丽江季风降水中  $\delta^{18}\text{O}$  变化[J]. *科学通报*, 2006, 51(10): 1218 - 1224.

[4] 王圣杰, 张明军. 新疆天山降水稳定同位素的时空特征与影响因素[J]. *第四纪研究*, 2017, 37(5): 1119 - 1130.

[5] 柳景峰, 丁明虎, 效存德. 大气水汽氢氧同位素观测研究进展——理论基础、观测方法和模拟[J]. *地理科学进展*, 2015, 34(3): 340 - 353.

[6] 谢宇龙, 章新平, 姚天次, 等. 长沙近地面水汽中稳定同位素的监测与分析[J]. *环境科学*, 2016, 37(2): 475 - 481.

[7] HU Z M, WEN X F, Sun X M, et al. Partitioning of evapotranspiration through oxygen isotopic measurements of water pools and fluxes in a temperate grassland[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2014, 119(3): 358 - 372.

[8] WEN X F, YANG B, SUN X M, et al. Evapotranspiration partitioning through in-situ oxygen isotope measurements in an oasis cropland[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2016(230/231): 89 - 96.

[9] WEN X F, LEE X H, SUN X M, et al. Dew water isotopic ratios and their relationships to ecosystem water pools and fluxes in a crop-

land and a grassland in China[J]. *Oecologia*, 2012, 168(2): 549 - 561.

[10] YU W S, TIAN L D, MA Y M, et al. Simultaneous monitoring of stable oxygen isotope composition in water vapour and precipitation over the central Tibetan Plateau[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, 15(18): 10251 - 10262.

[11] 崔江鹏, 田立德, 刘琴, 等. 青藏高原中部大气水汽稳定同位素捕捉到印度洋台风“费林”信号[J]. *科学通报*, 2014, 59(35): 3526 - 3532.

[12] YU W S, TIAN L D, RISI C, et al.  $\delta^{18}\text{O}$  records in water vapor and an ice core from the eastern Pamir Plateau: Implications for paleoclimate reconstructions[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2016, 456: 146 - 156.

[13] LEE J E, RISI C, FUNG I, et al. Asian monsoon hydrometeorology from TES and SCIAMACHY water vapor isotope measurements and LMDZ simulations: Implications for speleothem climate record interpretation[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2012, 117(D15): D15112, DOI:10.1029/2011JD017133.

[14] GALEWSKY J, STEEN - LARSEN H C, FIELD R D, et al. Stable isotopes in atmospheric water vapor and applications to the hydrologic cycle[J]. *Reviews of Geophysics*, 2016, 54(4): 809 - 865.

[15] JOUSSAUME S, SADOURNY R, JOUZEL J. A general circulation model of water isotope cycles in the atmosphere [J]. *Nature*, 1984, 311(6): 24 - 29.

[16] RISI C, NOONE D, WORDEN J, et al. Process - evaluation of tropospheric humidity simulated by general circulation models using water vapor isotopologues: 1. Comparison between models and observations[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2015, 117(D5): D05304, DOI:10.1029/2011JD016623.

[17] CONROY J L, COBB K M, NOONE D. Comparison of precipitation isotope variability across the tropical Pacific in observations and SWING2 model simulations[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, 118(11): 5867 - 5892.

[18] MIDHUN M, RAMESH R. Validation of  $\delta^{18}\text{O}$  as a proxy for past monsoon rain by multi - GCM simulations[J]. *Climate Dynamics*, 2016, 46(5/6): 1371 - 1385.

[19] 章新平, 孙治安, 张新主, 等. 不同模式模拟的降水稳定同位素效应的比较和评估[J]. *第四纪研究*, 2016, 36(6): 1343 - 1357.

[20] WANG S J, ZHANG M J, CHEN F L, et al. Comparison of GCM - simulated isotopic compositions of precipitation in arid central Asia[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2015, 25(7): 771 - 783.

[21] 杨森, 张明军, 王圣杰. 基于 GCM 和冰芯的天山地区降水同位素的水汽来源和影响机制[J]. *干旱区研究*, 2018, 35(2): 425 - 435.

[22] LEE J, WORDEN J, KOH D C, et al. A seasonality of  $\delta\text{D}$  of water vapor (850 - 500 hPa) observed from space over Jeju Island, Korea[J]. *Geosciences Journal*, 2013, 17(1): 87 - 95.

[23] ZHANG Y, JOHN M, WALLACE, et al. ENSO - like interdecadal variability: 1900 - 93[J]. *Journal of Climate*, 1997, 10(5): 1004 - 1020.



- [24] ROPELEWSKI C F, HALPERT M S. North American precipitation and temperature patterns associated with the El Niño/Southern Oscillation (ENSO) [J]. *Monthly Weather Review*, 1986, 114(12): 2352 – 2362.
- [25] 阙志萍, 吴凡, 周军辉, 等. 江西省 2015 年 11 月降水异常特征及其成因分析[J]. *干旱气象*, 2018, 36(2): 263 – 271.
- [26] 董小芳, 邓黄月, 张峦, 等. 上海降水中氢氧同位素特征及与 ENSO 的关系[J]. *环境科学*, 2017, 38(5): 1817 – 1827.
- [27] 温艳茹, 王建力. 重庆地区大气场降水中氢氧同位素变化特征及与大气环流的关系[J]. *环境科学*, 2016, 37(7): 2462 – 2469.
- [28] 章新平, 姚檀栋, 金会军. ENSO 事件对青藏高原古里雅冰芯中现代  $\delta^{18}\text{O}$  的影响[J]. *冰川冻土*, 2000, 22(1): 23 – 28.
- [29] 沙比提, 买买提, 欢乐希, 等. 1961—2014 年乌鲁木齐地区气候特征及干湿区变化[J]. *干旱气象*, 2016, 34(3): 448 – 455.
- [30] WANG S J, ZHANG M J, HUGHES C E, et al. Factors controlling stable isotope composition of precipitation in arid conditions: an observation network in the Tianshan Mountains, central Asia [J]. *Tellus Series B – Chemical and Physical Meteorology*, 2016, 68(1): 26206.
- [31] LIU J R, SONG X F, YUAN G F, et al. Stable isotopic compositions of precipitation in China [J]. *Tellus Series B – Chemical and Physical Meteorology*, 2014, 66(1): 22567.
- [32] YAO T D, MASSON V, JOUZEL J, et al. Relationships between  $\delta^{18}\text{O}$  in precipitation and surface air temperature in the Urumqi River Basin, East Tianshan Mountains, China [J]. *Geophysical Research Letters*, 1999, 26(23): 3473 – 3476.
- [33] TINDALL J C, VALDES P J, SIME L C. Stable water isotopes in HadCM3: Isotopic signature of El Niño Southern Oscillation and the tropical amount effect [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2009, 114(D4): D04111, DOI:10.1029/2008JD010825.
- [34] RISI C, BONY S, VIMEUX F, et al. Water – stable isotopes in the LMDZ4 general circulation model: Model evaluation for present – day and past climates and applications to climatic interpretations of tropical isotopic records [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115(D12): D12118, DOI:10.1029/2009JD013255.
- [35] 章新平, 张新主, 关华德, 等. 由 TES 反演的大气水汽中  $\delta\text{D}$  的时空分布特征[J]. *气象学报*, 2012, 70(6): 1367 – 1380.
- [36] 顾慰祖, 庞忠和, 王全九, 等. 同位素水文学[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 79 – 81, 112 – 115.
- [37] WANG S J, ZHANG M J, CHE Y J, et al. Influence of below – cloud evaporation on deuterium excess in precipitation of arid central Asia and its meteorological controls [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2016, 17(7): 1973 – 1984.
- [38] WANG S J, ZHANG M J, CRAWFORD J, et al. The effect of moisture source and synoptic conditions on precipitation isotopes in arid central Asia [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2017, 122(5): 2667 – 2682.
- [39] 刘杨民, 张明军, 王圣杰, 等. 基于 GCM 的西北干旱区降水稳定氢氧同位素年际变化模拟 [J]. *水土保持研究*, 2016, 23(1): 260 – 267.
- [40] DANSGAARD W. Stable isotopes in precipitation [J]. *Tellus*, 1964, 16(4): 436 – 468.
- [41] 周慧, 章新平, 姚天次, 等. 我国暖半年降水中  $\delta^{18}\text{O}$  与水汽输送 [J]. *第四纪研究*, 2018, 38(2): 314 – 326.
- [42] 弓泓, 王彰贵, 赵传湖, 等. 一种新的厄尔尼诺指数 [J]. *海洋预报*, 2017, 34(3): 17 – 25.
- [43] CAI Z, TIAN L D, BOWEN G J. ENSO variability reflected in precipitation oxygen isotopes across the Asian summer monsoon region [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2017, 475: 25 – 33.
- [44] 杨莲梅, 关学锋, 张迎新. 亚洲中部干旱区降水异常的大气环流特征 [J]. *干旱区研究*, 2018, 35(2): 249 – 259.
- [45] 姚俊强, 杨青, 毛炜峰. 西北干旱区大气水分循环要素变化研究进展 [J]. *干旱区研究*, 2018, 35(2): 269 – 276.
- [46] CHEN X, WANG S S, HU Z Y, et al. Spatiotemporal characteristics of seasonal precipitation and their relationships with ENSO in Central Asia during 1901 – 2013 [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2018, 28(9): 1341 – 1368.
- [47] HU Z Y, ZHOU Q M, CHEN X, et al. Variations and changes of annual precipitation in Central Asia over the last century [J]. *International Journal of Climatology*, 2017, 37(S1): 157 – 170.
- [48] TAN X Z, SHAO D G. Precipitation trends and teleconnections identified using quantile regressions over Xinjiang, China [J]. *International Journal of Climatology*, 2016, 37(3): 1510 – 1525.

## Variation of Stable Isotope in Water Vapor over Urumqi and Its Relationship with ENSO Based on Isotope-enabled GCMs

SHI Mengyu<sup>1,2</sup>, WANG Shengjie<sup>1,2,3</sup>, YAO Junqiang<sup>1</sup>,

WANG Gaofei<sup>4</sup>, ZHANG Mingjun<sup>2</sup>

- (1. Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration, Urumqi 830002, China;
2. College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China;
3. State Key Laboratory of Cryospheric Sciences, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;
4. Altay Meteorological Bureau of Xinjiang, Altay 836500, Xinjiang, China)

**Abstract:** Based on the simulations of isotope-enabled GCMs (HadAM3, LMDZ-free and LMDZ-nudge) compiled by the SWING2 (Stable Water Isotope Intercomparison Group, Phase 2), the stable isotope of water vapor in Urumqi of Xinjiang was focused in this study. The seasonal variations of vertical profiles of stable isotopes in water vapor were analyzed, and the relationships between stable isotopes and meteorological parameters as well as ENSO were also studied. The results show that the simulated value of  $\delta^{18}\text{O}$  in water vapor was always high in July and low in January. In the vertical profile,  $\delta^{18}\text{O}$  decreased gradually with the decline of pressure. The  $\delta^{18}\text{O}$  values in precipitation and water vapor showed a consistent seasonal trend. However,  $\delta^{18}\text{O}$  in precipitation was more enriched than that in water vapor due to the influence of the Rayleigh fractionation. For the vertical profile, there was a positive correlation between air temperature and  $\delta^{18}\text{O}$  in water vapor, but the correlation was relatively weak between zonal and meridional wind speed and  $\delta^{18}\text{O}$  in water vapor, which was similar to the situations of  $\delta^{18}\text{O}$  in precipitation. In El Niño years, the  $\delta^{18}\text{O}$  in water vapor negatively correlated with SST, but the positive correlation was presented in La Niña years. The atmospheric circulation anomaly influenced air temperature and precipitation as well as the isotope composition in water vapor in the study area. To some extent, ENSO influenced the water vapor isotope across this region.

**Key words:** water vapor isotope; GCM; ENSO; Urumqi

## 欢迎订阅 2019 年《干旱气象》

《干旱气象》由中国气象局兰州干旱气象研究所、中国气象学会干旱气象学委员会主办,是我国干旱气象领域科学研究的专业性学术期刊,反映有关干旱气象监测、预测和评估的最新研究成果,充分展示干旱气象领域整体的研究和应用水平。期刊主要刊载干旱气象及相关领域有一定创造性的学术论文、研究综述、简评,国内外干旱气象发展动态综合评述、学术争鸣以及相关学术活动。具体包括:国内外重大干旱事件分析、全球及干旱区气候变化、干旱气象灾害评估及对策研究、水文、生态与环境、农业与气象、可再生能源开发与利用、地理信息与遥感技术的应用等。本刊还免费刊载干旱气象研究成果、研究报道、学术活动、会议消息等。《干旱气象》已被《中国学术期刊(光盘版 CAJ-CD)》、万方数据-数字化期刊群、中国核心期刊(遴选)数据库、中国科技论文统计源期刊、重庆维普中文科技期刊数据库、教育阅读网、台湾华谊线上图书馆等全文收录。

《干旱气象》内容丰富、信息量大、研读性强,适合广大气象科研业务工作者、各相关专业技术人员、大专院校师生阅读。

《干旱气象》为双月刊,国内外公开发行人。2019 年正刊 6 期,每期定价 36 元,全年 216 元。欢迎广大读者订阅,并可以随时邮局款汇购买,款到开正式发票。

编辑部地址:甘肃省兰州市东岗东路 2070 号 中国气象局兰州干旱气象研究所 《干旱气象》编辑部  
 邮政编码:730020 联系电话:0931-2402270 电子信箱:ghs\_ghqx@sina.com  
 银行汇款:建设银行嘉峪关路支行 户名:中国气象局兰州干旱气象研究所  
 账号:62050138000800000057