

doi: 10.13866/j.azr.2018.02.22

# 基于 GCM 和冰芯的天山地区降水同位素的水汽来源影响机制<sup>①</sup>

杨森<sup>1</sup>, 张明军<sup>1</sup>, 王圣杰<sup>1,2</sup>

(1. 西北师范大学地理与环境科学学院, 甘肃 兰州 730070;

2. 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 730070)

**摘要:** 利用 GISS-E(MERRA)、GISS-E(NCEP)、isoGSM(NCEP)、LMDZ(free)、LMDZ(ECMWF) 和 MIROC(free) 6 种 GCM 模型数据以及庙尔沟冰芯  $\delta^{18}\text{O}$  数据, 对比分析了各模型和冰芯中  $\delta^{18}\text{O}$  的年际变化特征。并用 6 种模型数据分别与庙尔沟冰芯  $\delta^{18}\text{O}$  数据进行相关性分析, 通过观察冰芯  $\delta^{18}\text{O}$  数据与距离冰芯最近模型数据的变化趋势, 选出最适用于分析天山地区降水中  $\delta^{18}\text{O}$  的 GCM 模型, 分析该模型中水汽的来源情况。结果表明: 在年际尺度上 GCM 模拟的结果中存在“温度效应”, 只是年际尺度上比年内尺度上的相关性略弱。MIROC(free) 模型模拟的倾向率变化与庙尔沟冰芯的倾向率变化一致 ( $\alpha = -0.01$ )。MIROC(free) 模型的输出结果在天山地区最接近实测结果。水汽来源的方向与比例决定着降水中  $\delta^{18}\text{O}$  值偏正/偏负的程度。依据连续小波变换方法得出, 在 1990—2001 年能量最强, 1990—2001 年降水中  $\delta^{18}\text{O}$  值虽然多次的波动偏正, 但整体偏负。研究水汽来源轨迹发现, 当降水中  $\delta^{18}\text{O}$  偏负时, 主要是由来自北冰洋的水汽增多引起的, 出现多次偏正波动时, 主要是由于中纬度大西洋的水汽增加增多造成的。

**关键词:** GCMs; 冰芯; 水汽来源; 降水同位素; 庙尔沟; 天山山区

冰芯中氢氧稳定同位素不仅可以解释水汽运输路径, 重建古气候的演化历史<sup>(1-2)</sup>, 也可以作为大气湿度指示器对水文气象进行研究<sup>(3)</sup>。冰芯具有信息量大、分辨率高和时间尺度长的优点, 是气候环境信息的载体<sup>(4)</sup>。冰芯稳定氧同位素变化与区域气象要素变化之间有较高相似性, 它可以作为反映区域气温变化的代用指标<sup>(5)</sup>。在喜马拉雅山南坡, 冰芯稳定同位素可以记录季风活动的强弱和冬季暴风雪的过程<sup>(6)</sup>。在青藏高原西部, 冰芯稳定同位素与当地普兰县气象站气温的年际变化有较好的相关性<sup>(7)</sup>。根据祁连山敦德冰芯重建了古气候演化历史, 将全新世大致分为 3 段四期<sup>(8)</sup>, 依据可可西里地区马兰冰帽钻取的冰芯, 可恢复青藏高原中部 20 世纪 20 年代以来的气候变化<sup>(9)</sup>。因此, 冰芯中稳定氧同位素变化对研究区域气候变化具有借鉴作用。

虽然全球降水同位素观测网 GNIP(Global Network of Isotopes in Precipitation) 可以对局部站点中

的降水同位素进行实地监测, 但是在天山仅有乌鲁木齐一个 GNIP 站点, 实测同位素数据不连续且观测时间较短。天山中部乌鲁木齐河源 1 号冰川的 3 根浅冰芯的流动性强, 不确定性较强<sup>(10)</sup>, 近 50 a 来以 16.8% 的速率退缩<sup>(11)</sup>。玛纳斯河流域冰川与乌鲁木齐河源 1 号冰川同位于天山中段, 是众多中国天山冰川中退缩速率较高的一支<sup>(12)</sup>。因此, 笔者只采用天山东部哈尔力克山庙尔沟河源 3 号冰川 2 号冰芯中  $\delta^{18}\text{O}$  数据。为了更合理的研究在天山地区影响冰芯中氧稳定同位素与气候的关系, 本文也借助大气环流模式 (general circulation model 简称 GCM) 对天山地区降水同位素变化进行更进一步研究。GCM 模型可以准确详细地模拟全球和区域的大气动力学和热力学特征<sup>(13)</sup>, 尤其在大尺度降水稳定氢氧同位素的变化特征与影响因素之间的相关性研究中<sup>(14)</sup>, 对没有足够实测站点统计数据的地区, 描述降水同位素的变化情况<sup>(15)</sup>。分析对比不同的

① 收稿日期: 2017-06-11; 修订日期: 2017-07-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(41161012); 国家重大科学研究计划专题项目(2013CBA01801); 冰冻圈科学国家重点实验室开放基金项目(SKLCs-OP-2017-04); 中国沙漠气象科学研究基金项目(Sqj2016001); 西北师范大学青年教师科研能力提升计划项目(NWNU-LKQN-15-8)

作者简介: 杨森(1993-), 女, 硕士研究生, 主要从事全球变化与可持续发展方面的研究。E-mail: geoyangsen@126.com

通讯作者: 张明军。E-mail: mjzhang2004@163.com

GCM 模型模拟同位素的结果偏差,在特定的地点和时间下,可以选择一种最优的模型进行模拟,对于研究该地区的气候变化具有重要的意义<sup>(16-17)</sup>。

天山大气降水同位素“温度效应”主要表现在月尺度数据上,但是刘小康等<sup>(18)</sup>认为,年尺度数据是否如此,并无充足的证据或定论,需要进一步借助 GCM 模型来探究。本文主要基于 6 种 GCM 模型数据与冰芯同位素中  $\delta^{18}\text{O}$  数据,分析 2 种数据的共性,得出冰芯数据的影响范围,并选出最适宜模拟天山地区大气降水同位素的 GCM 模型;年际或者更长时间尺度的大气降水同位素变化特征,对古气候记录的解译,更具有直接的借鉴意义。因此,本文利用拉格朗日的方法<sup>(19)</sup>在 MeteoInfo 软件中分析冰芯附近的水汽来源情况,找出在年际尺度上影响天山地区降水同位素中  $\delta^{18}\text{O}$  值偏正/偏负程度的主要原因。

## 1 研究区域概况

中国天山地区位于新疆中部,南部为塔里木盆地,北部为准噶尔盆地,将新疆分为南疆与北疆两部分。西部与吉尔吉斯斯坦交界,东部绵延至哈密以东地区,东西总长度大约 1 700 km,占天山山系总长度的 2/3 以上<sup>(20)</sup>。依据第二次冰川编目,新疆境内的天山山脉拥有冰川 7 934 条,面积 7 179.11 km<sup>2</sup>,占中国冰川总条数的 16.33%<sup>(21)</sup>。在气候变暖的背景下,响应变化趋势的产物冰湖在天山西部别珍套山地区面积扩张,数量增多<sup>(22)</sup>,也说明天山冰川呈现出加速退缩的趋势<sup>(23-24)</sup>。随着全球变化研究的深入,冰芯氧同位素作为气候代用指标受到越来越多的重视。虽然天山横亘于亚洲中部干旱区,但是天山冰川开展的长时间序列的冰芯研究相较于青藏高原来说却并不多,尤其是对于常用作温度指示器的氢氧同位素的报道比较匮乏。虽然实测降水同位素有助于理解冰芯同位素的指示意义,但是 GNIP 在提供的月尺度同位素数据库中天山南北坡仅有乌

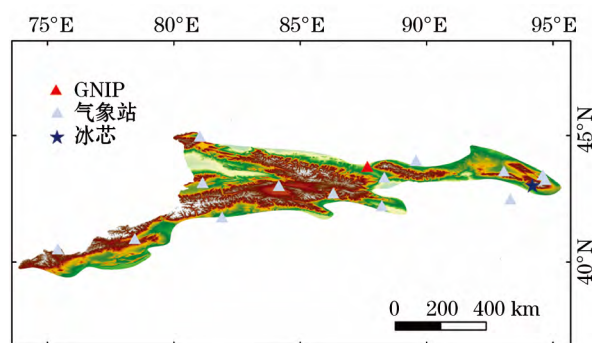


图 1 气象站点与冰芯在中国天山中的位置

Fig. 1 Locations of the meteorological stations and ice cores in the Tianshan Mountains, China

鲁木齐 1 个站点,时间跨度 17 a,监测数据 14 a,仍不足以代表天山地区稳定氧同位素分布情况。近年来新建的天山地区降水同位素网络虽然站点更为广泛,涉及从平原到山区的 20 余个站点,但是监测年份更为有限<sup>(25-26)</sup>,所以笔者加入 GCM 模型进行模拟(图 1)。

## 2 数据来源与研究方法

### 2.1 数据来源

本文所用的冰芯数据是 2005 年 8 月在天山东段哈尔力克山庙尔沟平顶冰川顶部(94°19'E, 43°03'N) 4 518 m 处钻取的 2 支透底冰芯中 Core 2 和 Core 2 冰芯上部 16.83 m 的冰芯,并已进行了测定和定年的工作,得出 1953—2004 年测定的  $\delta^{18}\text{O}$  数据<sup>(27)</sup>。本文也采用了 SWING2 (Stable Water Isotope Inter-comparison Group, Phase 2) 中的 GCM 模拟数据(表 1),包括由美国国家航空航天局发布的 GISS-E (MERRA) 和 GISS-E (NCEP) 模型数据<sup>(28)</sup>;美国斯克里普斯海洋研究中心发布的 isoGSM (NCEP) 模型数据<sup>(29)</sup>;日本东京气候系统研究中心发布的 MIROC (free) 模型数据<sup>(30)</sup>和法国气象动力实验室发布的 LMDZ (free) 和 LMDZ (ECMWF) 模型数

表 1 GCM 模型基本信息

Tab. 1 Basic information of GCMs

GCM	分辨率(经度×纬度)	时间序列	模拟方法	参考文献
GISS-E( MERRA)	2.5° × 2.022 4°	1979—2007 年	MERRA 张弛逼近	(28)
GISS-E( NCEP)	2.5° × 2°	1979—2007 年	NCEP 张弛逼近	(28)
isoGSM( NCEP)	1.875° × 1.904°	1979—2007 年	NCEP 张弛逼近	(29)
MIROC( free)	3.75° × 2.535 2°	1979—2007 年	AMIP 标准	(30)
LMDZ( free)	3.75° × 2.535 2°	1979—2007 年	ECMWF 张弛逼近	(31)
LMDZ( ECMWF)	2.812 5° × 2.790 5°	1979—2007 年	AMIP 标准	(31)

据<sup>(31)</sup> 进行研究。

MeteoInfo 软件具备强大的分析功能,支持 Hysplit 模式输出数据: Trajectory(气团轨迹)<sup>(32)</sup>,因此对后向轨迹进行分析和聚类,更为方便快捷。输入的气象数据为美国国家海洋和大气管理局空气资源实验室(<http://ready.arl.noaa.gov/archives.php>)发布的分辨率为 0.5° × 0.5° 的 NCEP/NCAR 再分析(1959 – present) 数据。

### 2.2 研究方法

用相关分析法分析天山地区 GCM 模型中 δ<sup>18</sup>O 与温度之间的相关性,用 Morlet 复数小波法分析庙尔沟冰芯中 δ<sup>18</sup>O 与温度之间矩平的时序特征,并建立显著性水平和置信区间。用交叉小波及相干小波法研究冰芯中 δ<sup>18</sup>O 与温度的能量共振和协方差分布规律,找出存在相关性的特定时段<sup>(33)</sup>,并使用红色噪音标准谱对两波谱进行显著性检验<sup>(34)</sup>。使用 MeteoInfo 软件对显著变化范围区间进行水汽来源的追踪。

Morlet 复数小波是在 Gauss 包络下的单频率复正弦函数,在频域和时域内具有较好的局部聚集性。其复数小波函数为<sup>(34)</sup>:

$$\psi(\mu) = \pi^{-\frac{1}{4}} e^{i w_0 \mu} e^{-\frac{\mu^2}{2}} \quad (1)$$

式中: ψ(μ) 为复数小波函数; w<sub>0</sub> 为常数,其值通常为 6; i 为虚数; μ 为自变量; 对于一个时间序列 x<sub>n</sub> (n = 1, 2, …, N) 的小波变换公式为<sup>(35)</sup>:

$$W_n^X(s) = \sqrt{\frac{\delta_t}{s}} \sum_{n'=1}^N x_{n'} \psi_0 \left[ (n' - n) \frac{\delta_t}{s} \right] \quad (2)$$

式中: W<sub>n</sub><sup>X</sup>(s) 为小波变化系数; δ<sub>t</sub> 为采样时间间隔; ψ<sub>0</sub> 表示其共轭复函数; n 为时间平移因子; s 为尺度因子。

交叉小波变换是依据多时间尺度来研究两个时间序列在时频域中的相互关系<sup>(36)</sup>,但交叉小波变换仅揭示两个时间序列共同的高能量区与位相关系,并不能很好地揭示时频空间两个时间序列低能量区。小波相干能很好地弥补交叉小波变换的不足,度量两者低能量区的显著相关性<sup>(37)</sup>。

## 3 研究结果

### 3.1 GCM 模拟天山地区 δ<sup>18</sup>O 的年内变化特征

由图 2 中可以看出降水中 δ<sup>18</sup>O 的变化,在温度较高的季节(7 月和 8 月) δ<sup>18</sup>O 的值高于温度较低的季节(1 月和 2 月),呈现出明显的季节性变化。在 GCM 所有模拟结果中,除 LMDZ( free) 和 LMDZ( ECMWF) 模型中在 8 月份出现最大值,其余模型的最大值均出现在 7 月,最小值出现在 1 月。在 6 种模型中,isoGSM( NCEP) 模拟的 7 月份出现所有模拟值的最大值 3‰,在 GISS-E( MERRA) 模拟的 1 月份出现所有模拟值的最小值 -29.1‰。

图 3 是 GISS-E( MERRA)、GISS-E( NCEP)、isoGSM( NCEP)、MIROC( free)、LMDZ( ECMWF) 和

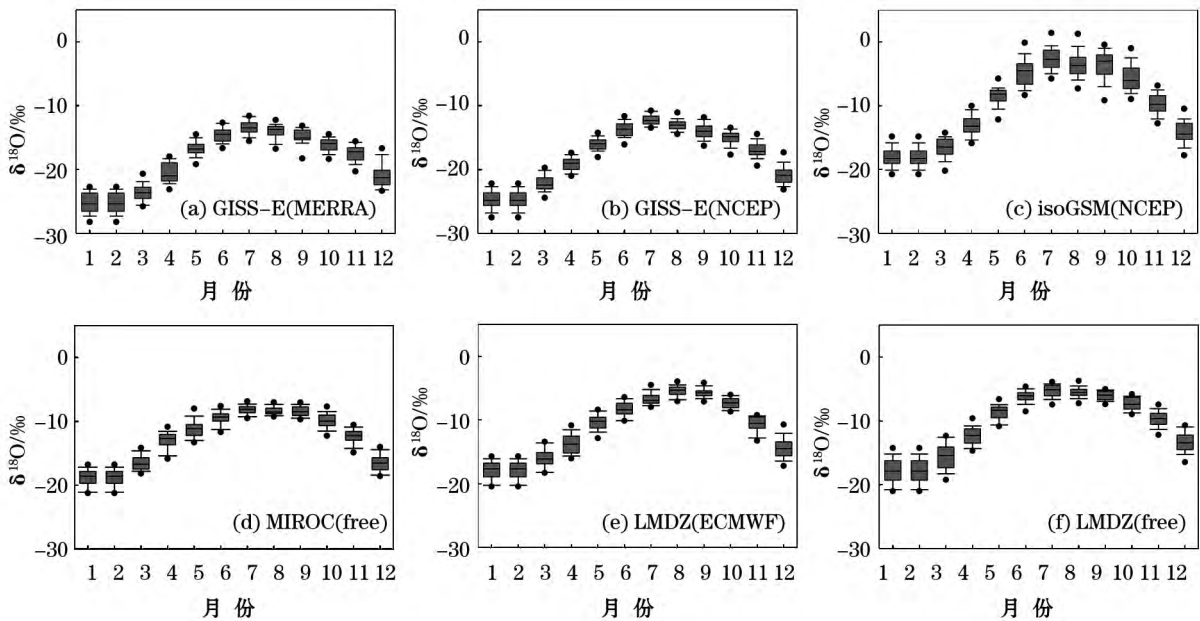


图 2 GCMs 模式模拟天山地区 δ<sup>18</sup>O 的月均变化

Fig. 2 Monthly variation of δ<sup>18</sup>O from GCMs in the Tianshan Mountains

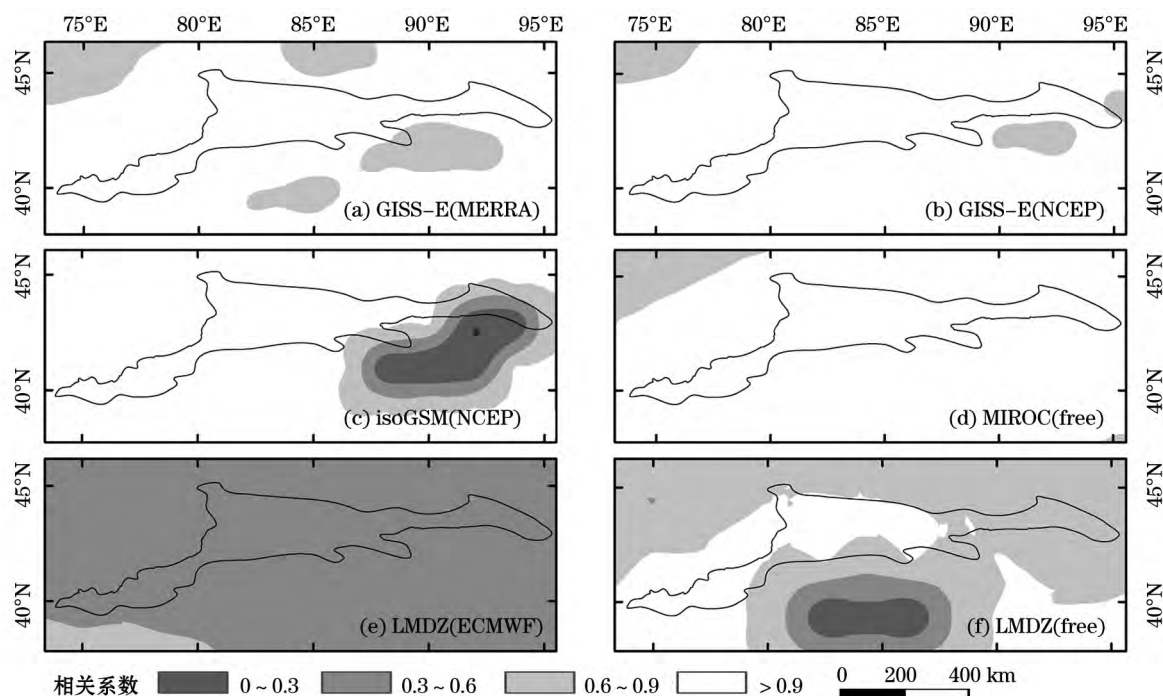


图3 GCMs 模拟天山地区月均  $\delta^{18}\text{O}$  与温度之间的相关性

Fig. 3 Correlation between temperature and monthly average value of  $\delta^{18}\text{O}$  in precipitation in the Tianshan Mountains, derived from GCMs

LMDZ( free) 模型模拟得到的天山及其周边地区降水中  $\delta^{18}\text{O}$  与温度在年内尺度上的相关性分布图。GISS-E( NCEP) 和 MIROC( free) 模型模拟的结果中, 在天山地区年内相关系数均大于 0.9 相关性较好; GISS-E( MERRA) 模型模拟的结果中, 在吐鲁番盆地西北角地区的相关系数在 0.6 ~ 0.9 之间 相关性相对较弱; isoGSM( NCEP) 模型模拟的结果中, 在吐鲁番盆地、哈尔力克山和巴里坤山地区的相关系数小于 0.6 而在博格达山以西的天山地区 相关系数大于 0.9; LMDZ( free) 模型模拟的结果中, 仅在博罗科努山和那拉提山以南的小部分天山地区, 相关系数大于 0.9; LMDZ( ECMWF) 模型模拟相关性的效果较差, 不适用于在天山地区模拟年内尺度的降水中  $\delta^{18}\text{O}$  与温度之间的相关性。在年内尺度上 GCM 模拟的结果证实了  $\delta^{18}\text{O}$  在天山地区年内变化显著受“温度效应”影响的观点<sup>(18)</sup>。

### 3.2 GCM 模拟天山地区 $\delta^{18}\text{O}$ 的年际变化特征

对比 6 种模型模拟的天山及其周边地区降水中  $\delta^{18}\text{O}$  与温度相关性的年内变化(图 3) 和年际变化(图 4) 结果表明降水中  $\delta^{18}\text{O}$  与温度的年际变化比年内变化的相关性弱, 天山大部分地区年际变化的相关系数在 0.6 ~ 0.9 之间。图 4d MIROC( free) 模型和图 4e LMDZ( ECMWF) 模型模拟结果中, 分别

在哈尔力克山以西和依连哈比尔杂山与萨阿尔明山以西的天山地区的相关系数大于 0.9 的区域面积最大 相关性较好; 图 4e LMDZ( ECMWF) 模型和图 4f LMDZ( free) 模型模拟结果分别在博格达山以东和北天山地区的相关性较差; 图 4a GISS-E( MERRA) 、图 4b GISS-E( NCEP) 和图 4c isoGSM( NCEP) 模拟结果中大部分地区温度和降水中  $\delta^{18}\text{O}$  的相关系数在 0.6 ~ 0.9 之间 相关性相对较弱。总之, 在年际尺度上 GCM 的模拟结果中也存在“温度效应”, 只是在年际尺度上呈现出的相关性比年内尺度上略弱。

### 3.3 庙尔沟冰芯中 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度变化

虽然近 50 a 新疆四季气温倾向率呈显著上升趋势, 但气温上升幅度也存在明显差异<sup>(38)</sup>, 秋冬两季增温明显, 冬季气温线性变化率最大, 为夏季的 2 倍有余<sup>(39)</sup>。但在天山东端地区夏季平均气温呈现出微弱的下降趋势<sup>(40-42)</sup>。由于庙尔沟地区没有直接观测的气象站, 且庙尔沟冰芯中的  $\delta^{18}\text{O}$  主要反映该地区夏季降水过程<sup>(43)</sup>, 因此, 本文选用与庙尔沟冰芯同位于天山南坡的哈密气象站温度数据和冰芯中  $\delta^{18}\text{O}$  数据进行分析。对庙尔沟冰芯中  $\delta^{18}\text{O}$  进行厚度加权后得到年数据, 再运用 Morlet 复数小波法计算出 51 a 间冰芯中  $\delta^{18}\text{O}$  与温度之间连续小波功

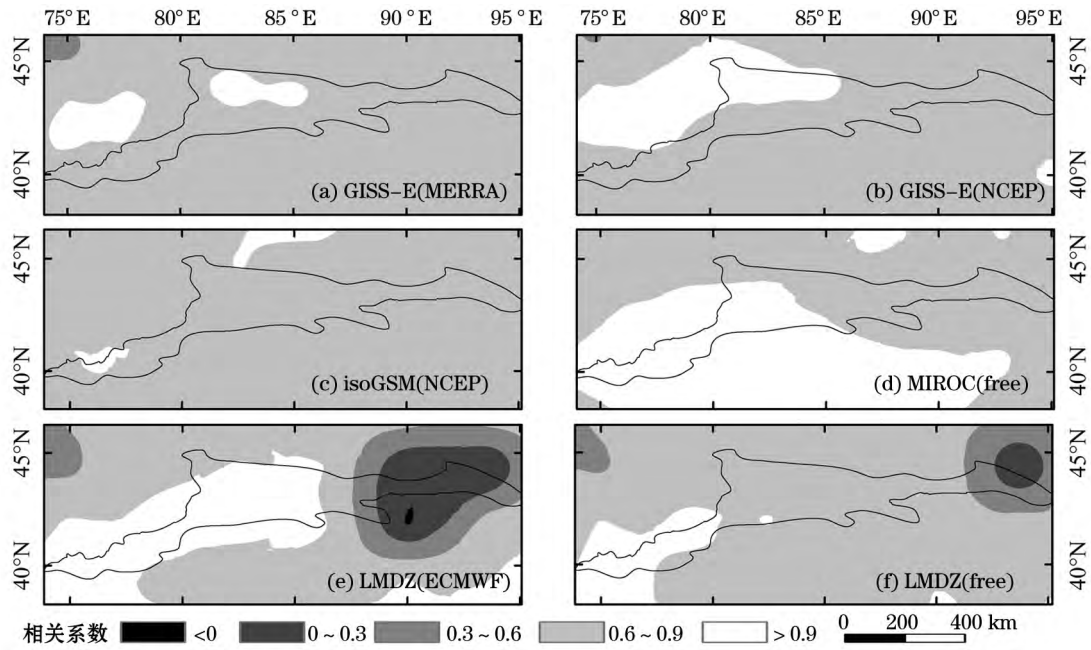
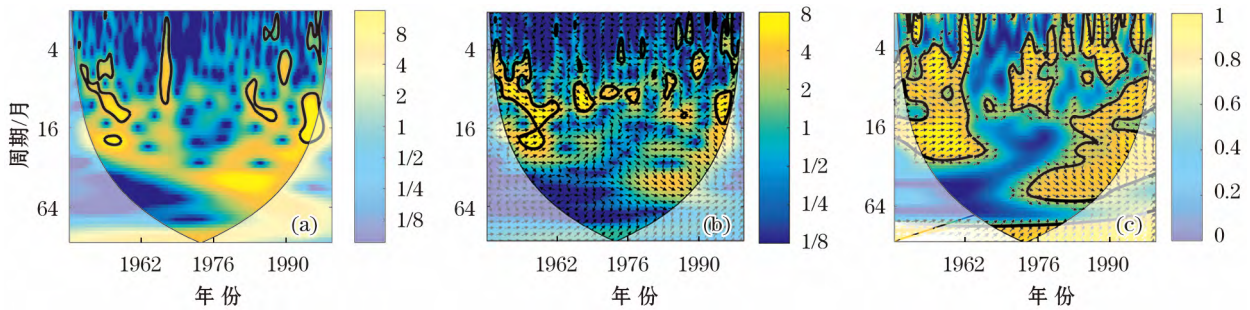


图 4 GCMs 模式模拟天山及其周边地区年均  $\delta^{18}\text{O}$  与温度之间的相关性

Fig. 4 Correlation between temperature and annual average value of  $\delta^{18}\text{O}$  in precipitation in the Tianshan Mountains and the peripheral areas , derived from GCMs



注: 粗黑线包围的范围表示通过了  $\alpha=0.05$  显著性水平下红色噪音标准谱的检验(下同) 细黑线代表影响锥曲线。

图 5 冰芯中  $\delta^{18}\text{O}$  与温度之间的连续小波功率谱、小波凝聚谱和位相谱

Fig. 5 The continuous wavelet power spectrum , cross-wavelet coherence and phase spectrum for  $\delta^{18}\text{O}$  value in precipitation in the Tianshan Mountains

率谱、小波凝聚谱和位相谱。连续小波功率谱反应冰芯中  $\delta^{18}\text{O}$  在不同年代和频率上的能量是不同的; 小波凝聚谱和位相谱反应冰芯中  $\delta^{18}\text{O}$  与温度分别在高能量区和低能量区相位变化。

图 5a 显示的是冰芯中  $\delta^{18}\text{O}$  的小波功率时频分布特征 从图 5a 可以看出 ,冰芯中  $\delta^{18}\text{O}$  在不同年代和频率上的能量强弱分布不同 ,在 1955—1961 年、1967—1969 年、1980—1990 年、1990—1992 年和 1994—2001 年期间 ,能量最强 ,并在 4 ~ 16 个月之间出现高能量显著共振周期 ,而其余年代和频率上的能量强弱则分布不显著。图 5b 是冰芯中  $\delta^{18}\text{O}$  与温度之间的高能量交叉小波功率谱图 ,显示出在 1954—

1962 年存在 4 ~ 18 个月的显著共振周期 ,相位谱呈现同相位变化 ,而其余年间共振周期相位差约为  $\pi/4$ 。图 5c 是冰芯中  $\delta^{18}\text{O}$  与温度之间低能量的小波相干谱 ,显示冰芯中  $\delta^{18}\text{O}$  与温度之间共振周期不同 ,相位差有同相位、 $\pi/4$  或  $\pi/2$  ,没有负相位 ,但相位差较为混乱。因此 ,综合图 5c 与图 5b 可以看出 ,冰芯中  $\delta^{18}\text{O}$  与哈密气象站温度之间存在着大致同相位变化 ,尤其在 1954—1962 年最为明显 ,但影响冰芯中  $\delta^{18}\text{O}$  值偏正/偏负的程度也与其他因素有关。

### 3.4 GCM 模拟与庙尔沟冰芯同位素中 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化趋势和相关性分析

选取距离庙尔沟冰芯最近的 6 种 GCM 模型模

拟的  $\delta^{18}O$  数据与冰芯中  $\delta^{18}O$  数据做线性趋势分析 (图 6)。在共同的时间条件下,从 6 种 GCM 模型模拟的结果中发现 isoGSM(NCEP) 模型、MIROC(free) 模型和 LMDZ(free) 模型模拟的  $\delta^{18}O$  值呈微弱偏负的趋势,与庙尔沟冰芯中  $\delta^{18}O$  的变化趋势基本一致。其中,MIROC(free) 模型模拟的倾向率与庙尔沟冰芯的倾向率一致 ( $\alpha = -0.01$ )。GISS-E(MERRA) 模型、GISS-E(NCEP) 模型和 LMDZ(ECMWF) 模型模拟的  $\delta^{18}O$  值呈微弱偏正的趋势。

因为实测冰芯同位素中  $\delta^{18}O$  与 GCM 模型模拟的  $\delta^{18}O$  均可以描述过去多年降水同位素的变化情况,因此对两种不同形式同位素中的  $\delta^{18}O$  进行相关性分析,可以找出最适宜在天山及其周边地区模拟的 GCM 模型。在图 7a GISS-E(MERRA) 模型、图 7b GISS-E(NCEP) 模型、图 7c isoGSM(NCEP) 模型和图 7d MIROC(free) 模型中可以看出,冰芯同位素中的  $\delta^{18}O$  与 GCM 模型模拟的  $\delta^{18}O$  呈较弱正相关关系 ( $r < 0.6$ )。在庙尔沟冰芯附近地区,图 7b

GISS-E(NCEP) 模型除了焉耆盆地及其周边相关系数在 0.4~0.5,其余天山地区的相关系数大于 0.5。图 7d MIROC(free) 模型中在整个天山地区的相关系数均在 0.5~0.6,呈较弱正相关关系。在 MIROC(free) 模型中可以看出冰芯同位素的影响范围较广,为了验证 GCM 模型模拟与冰芯同位素中  $\delta^{18}O$  相关性的准确性,选取距离庙尔沟冰芯最近的 GCM 模型中的数据,分别于其余模拟数据做相关分析。发现在图 8a GISS-E(MERRA) 模型和图 8c isoGSM(NCEP) 模型中,靠近庙尔沟冰芯的 GCM 模拟数据与周围 GCM 模拟数据之间存在小范围相关性很好的区域,相关系数在 0.8 以上。图 8b GISS-E(NCEP) 模型和图 8d MIROC(free) 模型中,则存在大范围相关系数在 0.8 以上的区域,其中图 8d MIROC(free) 模型与图 7d MIROC(free) 模型的模拟结果基本一致。

综合对比分析线性趋势和相关系数图,最终发现 MIROC(free) 模型模拟结果最接近天山地区实测

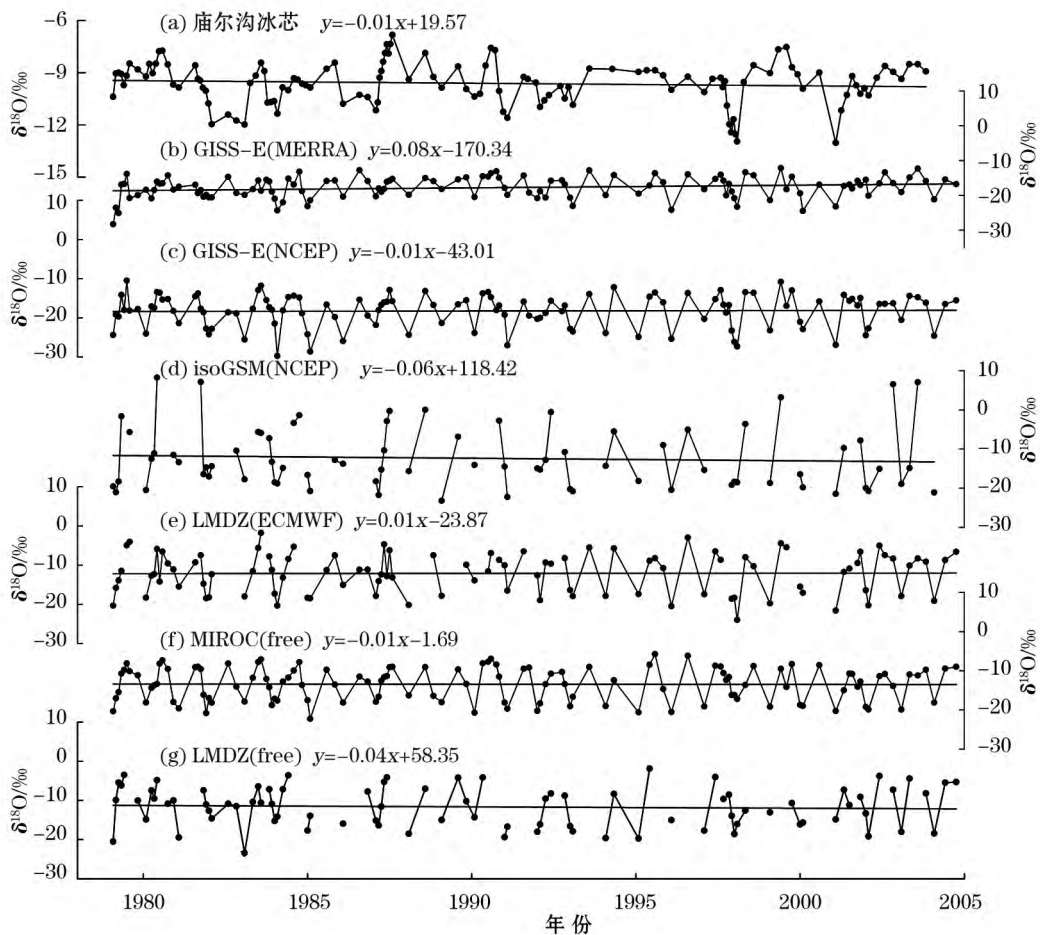


图 6 1979—2007 年庙尔沟冰芯中的  $\delta^{18}O$  与距离庙尔沟冰芯最近的 6 种模型模拟的  $\delta^{18}O$  变化趋势

Fig. 6 Comparison of  $\delta^{18}O$  in ice core from Miaoergou with the data of  $\delta^{18}O$  in ice core nearby Miaoergou during the period of 1979 - 2007 , derived from 6 models

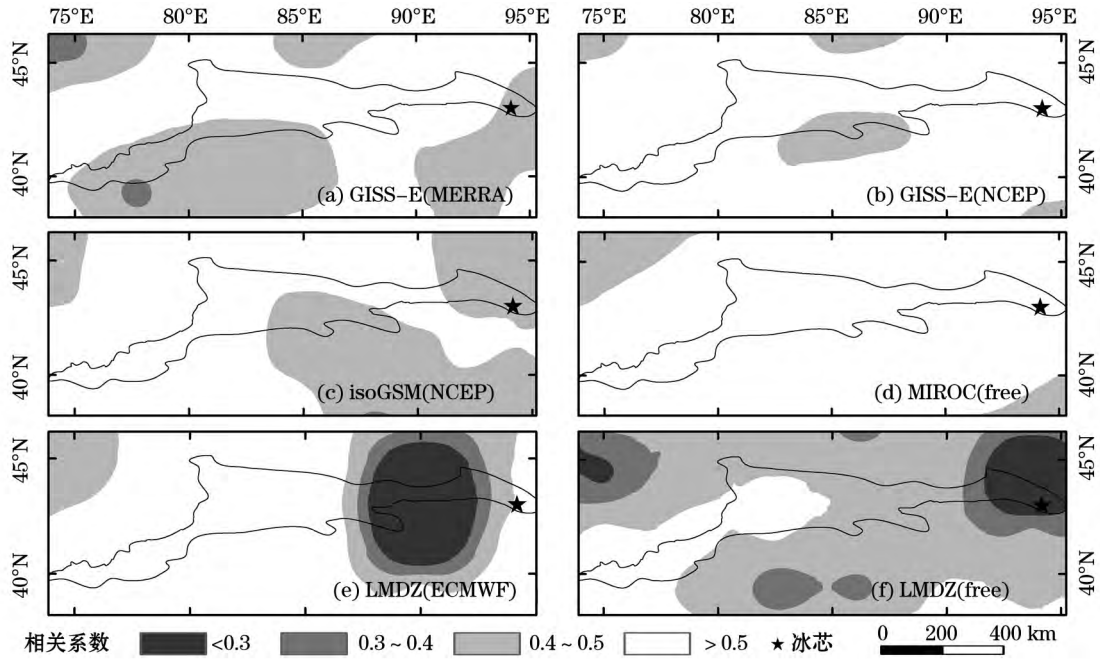


图 7 6 种模型模拟的  $\delta^{18}O$  与冰芯中  $\delta^{18}O$  之间的相关性

Fig. 7 The correlation between value of  $\delta^{18}O$  in ice core from Miaoergou and the  $\delta^{18}O$  value in precipitation in the Tianshan Mountains derived from 6 GCMs

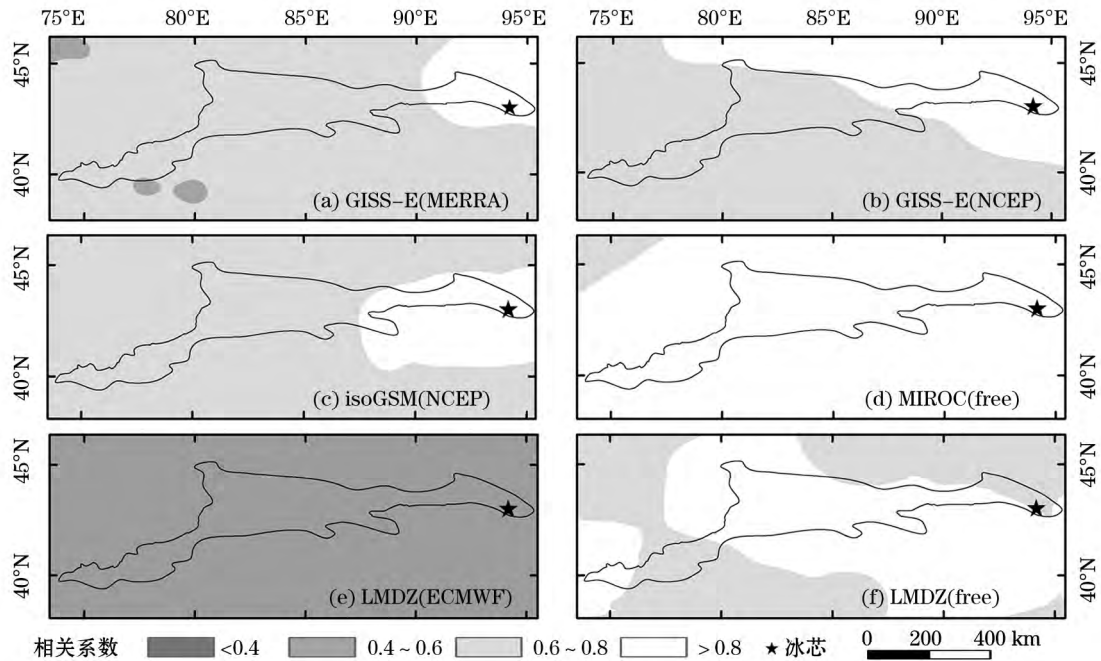


图 8 邻近庙尔沟冰芯的 6 种模型  $\delta^{18}O$  与其周边地区模型  $\delta^{18}O$  的相关性

Fig. 8 Correlation between the value of  $\delta^{18}O$  in ice core nearly Miaoergou with other  $\delta^{18}O$  values in precipitation in the peripheral area simulated by 6 GCMs

降水同位素中的  $\delta^{18}O$ 。

### 3.5 MIROC(free) 模型中的水汽来源

从图 9a 可以发现,  $\delta^{18}O$  值在不同的年代和频率上的能量强弱分布是不一致的。其中, 在 2 a 显著周期尺度上的能量最强, 主要发生在 1991—1995

年; 在 7 a 显著周期尺度上, 较强的能量发生在 1989—2002 年, 其余年代和频率上的能量强弱分布不显著。从图 9b 中可以清晰的看出, 能量最强的时间段 1990—2001 年  $\delta^{18}O$  值有 2 个显著偏负的趋势, 分别是 1990—1994 年和 1995—2001 年, 虽然在

1995 年出现了明显的转折,但是总体趋势依然处于偏负的状态。

降水同位素中  $\delta^{18}O$  的值不仅与温度、纬度、高程和降水量等因素有关,水汽的来源及其性质也是影响降水同位素中  $\delta^{18}O$  值偏正/偏负程度的重要因素<sup>(44)</sup>。由于本文得出在天山地区采用 GCM 模型中 MIROC( free) 模型模拟效果最佳,因此选择分析距离庙尔沟冰芯最近的,在 MIROC( free) 模型中的点 (43.254 2°N 92.812 5°E) 的水汽来源最具有代表性。通过 MeteoInfo 模型对临近庙尔沟冰芯 MIROC ( free) 模型中 1990—2001 年降水日 10 d 后向轨迹进行聚类平均分析。

在 1990—2002 年  $\delta^{18}O$  出现 2 个显著下降的时

间段,分别是 1990—1994 年和 1995—2001 年,1995 年出现明显的转折点。在图 10a ~ 10e 中第 1 个偏负阶段,1992 年,来自北冰洋的水汽最多,达到 5.97%,1993 年,来自中纬度大西洋的水汽最多,高达 50.54%。在图 10f ~ 10l 中第 2 个偏负阶段,2001 年,来自北冰洋的水汽最多,高达 9.62%,同年份来自中纬度大西洋的水汽也最多,高达 53.84%。当 MIROC( free) 模型中  $\delta^{18}O$  值逐渐偏负时,来自北冰洋的水汽增多,但也要综合中纬度大西洋水汽和北冰洋水汽,整体观察每年所有水汽来源的比例。在第 2 阶段的 2001 年模型中  $\delta^{18}O$  值出现最负值比第 1 阶段中出现最负值的 1994 年要偏正。因为 1994 年来自高纬度大西洋水汽占到 26.56% 2001

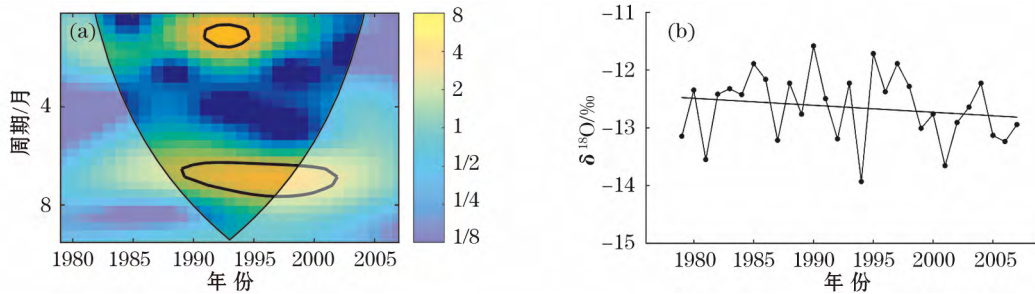


图 9 1979—2007 年邻近冰芯的 MIROC( free) 模型降水数据中  $\delta^{18}O$  的连续小波功率谱及其年际变化

Fig. 9 Continuous wavelet power spectrum of  $\delta^{18}O$  value in precipitation and its interannual variation during the period from 1979 to 2007, derived from MIROC ( free) model

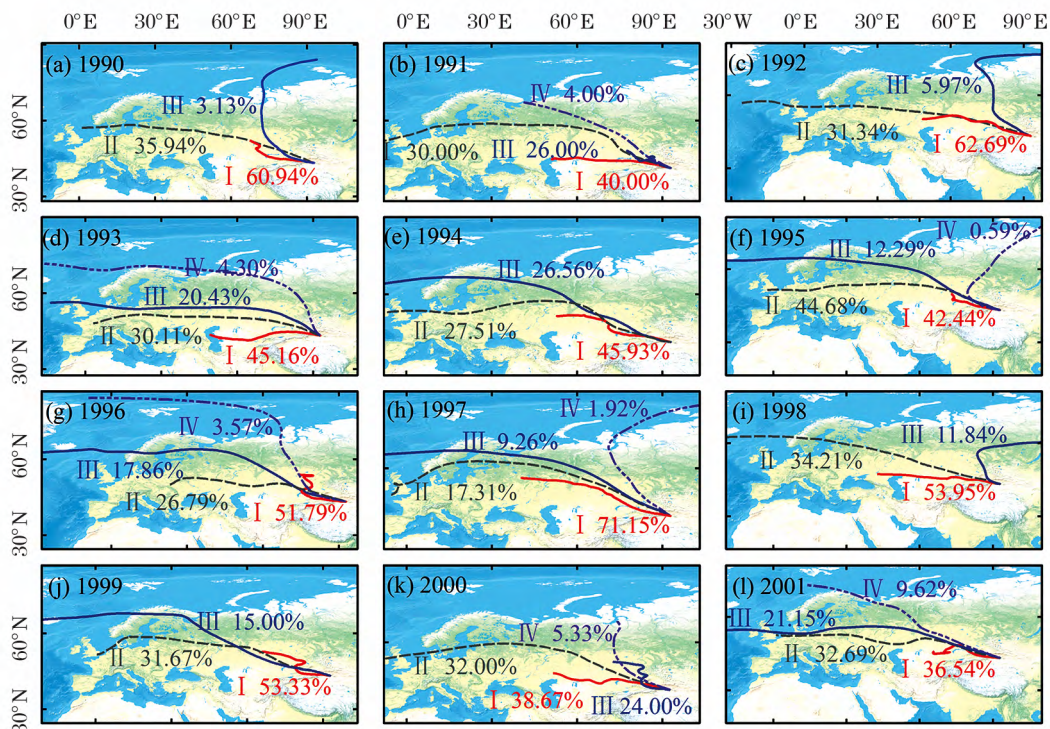


图 10 1979—2007 年 MIROC( free) 模型中降水日 10 d 后向轨迹聚类平均的空间分布

Fig. 10 Spatial distribution of 10-day backward trajectories and its cluster mean in the MIROC ( free) model on precipitation days during the period from 1979 to 2007



年来自北冰洋水汽 9.62% ,但是 2001 年来自中纬度大西洋的水汽高达 53.84% ,而 1994 年则仅有 27.51% 综合平均来看 ,1994 年模型中  $\delta^{18}\text{O}$  值比 2004 年偏负是合理的。在偏负阶段的动态变化中 , $\delta^{18}\text{O}$  值也逐渐偏正 ,1995 年是 2 段下降区间中明显的转折点 ,在显著下降年份区间中 1993 年和 1997 年出现小幅增长。从后向轨迹图中发现 ,这 3 a 来自北冰洋的水汽减少 ,1993 年仅有来自高纬度大西洋的水汽 ,而 3 a 中纬度大西洋的水汽比例增多 ,1993 年相比 1992 年增加了 19.2% ,1995 年相比 1994 年增加了 15.29% 。

从大型水体的角度考虑<sup>[45]</sup> ,发现其水汽来源有来自北冰洋、大西洋和里海地区。从海洋源与陆地源的角度可以发现 ,亚欧大陆内部再循环水汽也对局地降水有很大贡献 ,海洋来源的水汽可能未必是降水的直接来源<sup>[46]</sup> 。整体来看 ,MIROC ( free) 模型模拟的降水中  $\delta^{18}\text{O}$  值偏正的年份 ,水汽来源相对较低值的年份偏南 ;而  $\delta^{18}\text{O}$  值偏负的年份 ,水汽来源相对较高值的年份偏北。具体而言 ,来自北冰洋的水汽和中纬度大西洋的水汽是影响  $\delta^{18}\text{O}$  值偏正/偏负程度的重要指标 ,当北冰洋水汽增多时  $\delta^{18}\text{O}$  值偏负 ,而当北冰洋水汽减少、中纬度大西洋的水汽增多时 , $\delta^{18}\text{O}$  值偏正。这与刘小康等<sup>[18]</sup> 对于天山地区  $\delta^{18}\text{O}$  值偏负的高温年水汽来源于较远的高纬度地区 , $\delta^{18}\text{O}$  值偏正的低温年水汽来源于较近的中、低纬度区域相一致 ,但刘小康等仅依据观测年份较少的 GNIP 站点实测数据和天山冰芯数据分析峰值年份  $\delta^{18}\text{O}$  值的变化情况及原因 ,并没有说明在年际尺度上的变化过程和具体路径。

## 4 结论

(1) 在年际尺度上 ,GCM 的模拟结果中也存在“温度效应” ,只是在年际尺度上呈现出的相关性比年内尺度略弱。

(2) 在所用的 GCM 6 个模型当中 ,MIROC ( free) 模型的输出数据最接近实测结果 ,最适宜模拟天山地区降水中  $\delta^{18}\text{O}$  的变化情况。对在显著下降阶段进行水汽来源分析 ,发现导致模型降水中  $\delta^{18}\text{O}$  值明显偏负的主要原因是来自北冰洋水汽增多 ,当北冰洋水汽迅速减少 ,而来自中纬度大西洋的水汽增多时 ,模型中降水的  $\delta^{18}\text{O}$  值明显偏正 ,水汽来源的方向和比例决定着降水中  $\delta^{18}\text{O}$  值偏正/偏负

的程度。

## 参考文献(References):

- (1) Thomas E R ,Bracegirdle T J. Precipitation pathways for five new ice core sites in Ellsworth Land ,West Antarctica (J). *Climate Dynamics* 2014 44(7/8): 2067–2078.
- (2) Johnsen S J ,Clausen H B ,Jouzel J ,et al. Stable isotope records from greenland deep ice cores: The climate signal and the role of diffusion (J). *Ice Physics and the Natural Environment* ,1999 56: 89–107.
- (3) Schotterer U ,Froehlich K ,Gaeggeler H ,et al. Isotope records from Mongolian and Alpine ice cores as climate indicators (J). *Climatic Change* ,1997 36(3/4): 519–530.
- (4) 田立德 姚檀栋. 青藏高原冰芯高分辨率气候环境记录研究进展 (J). *科学通报* 2016 61(9): 926–937. (Tian Lide ,Yao Tandong. High-resolution climate and environmental records from the Tibetan Plateau ice cores (J). *Chinese Science Bulletin* 2016 61(9): 926–937.)
- (5) 赵华标 徐柏青 王宁练. 青藏高原冰芯稳定氧同位素记录的温度代用性研究 (J). *第四纪研究* 2014 34(6): 1215–1226. (Zhao Huabiao ,Xu Baiqing ,Wang Ninglian. Study on the water stable isotopes in Tibetan Plateau ice cores as a proxy of temperature (J). *Quaternary Sciences* 2014 34(6): 1215–1226.)
- (6) 田立德 姚檀栋 孙维贞 等. 喜马拉雅山南坡冬季暴雪对高原南部冰芯中稳定同位素记录的影响 (J). *气象学报* ,2001 59(4): 509–512. (Tian Lide ,Yao Tandong ,Sun Weizhen ,et al. The effect of snow storm in the South of Himalayas on  $\delta^{18}\text{O}$  in ice core record (J). *Acta Meteorologica Sinica* ,2001 59(4): 509–512.)
- (7) 田立德 姚檀栋 文蓉 等. 青藏高原西部纳木那尼冰芯同位素记录的气候意义初探 (J). *第四纪研究* 2012 32(1): 46–51. (Tian Lide ,Yao Tandong ,Wen Rong ,et al. A primary recognition on the climatic significance of ice core isotope record in Naimonanyi of West Tibetan Plateau (J). *Quaternary Sciences* ,2012 32(1): 46–51.)
- (8) 卫克勤 林瑞芬 祁连山敦德冰芯氧同位素剖面的古气候信息探究 (J). *地球化学* ,1994 23(4): 311–320. (Wei Keqin ,Lin Ruifen. An enquiry into palaeoclimatic information from Oxygen isotopic profile of Dunde ice core in Qilianshan (J). *Geochimica* ,1994 23(4): 311–320.)
- (9) 王有清 蒲健辰 张永亮 等. 马兰冰芯记录的青藏高原中部现代升温变化特征 (J). *冰川冻土* ,2003 25(2): 130–134. (Wang Youqing ,Pu Jianchen ,Zhang Yongliang ,et al. Characteristics of present warming change recorded in Malan ice core ,central Tibetan Plateau (J). *Journal of Glaciology and Geocryology* 2003 ,25(2): 130–134.)
- (10) 王立伟 李忠勤 董志文 等. 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川冰芯记录形成过程及年代划分 (J). *干旱区地理* 2011 34(5): 739–746. (Wang Liwei ,Li Zhongqin ,Dong Zhiwen ,et al. Chronology and record formation process of an ice core from Glacier No. 1 at Urumqi Riverhead in eastern Tianshan ,China (J). *Arid Land Geography* 2011 34(5): 739–746.)
- (11) 姚红兵 李忠勤 王璞玉 等. 近 50 a 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川变化分析 (J). *干旱区研究* ,2015 32(3): 442–447. (Yao Hongbin ,Li Zhongqin ,Wang Puyu ,et al. Area variation analysis of

- Urumqi Glacier No. 1 in past 50 decades (J). *Arid Zone Research*, 2015, 32(3): 442–447. )
- (12) 徐春海,王飞腾,李忠勤等. 1972—2013年新疆玛纳斯河流域冰川变化(J). *干旱区研究*, 2016, 33(3): 628–635. (Xu Chunhai, Wang Feiteng, Li Zhongqin, et al. Glacier variation in the Manas River Basin during the period from 1972 to 2013 (J). *Arid Zone Research* 2016, 33(3): 628–635. )
- (13) 章新平,孙志安,关华德等. 东亚水循环中水稳定同位素的GCM模拟和相互比较(J). *冰川冻土*, 2011, 33(6): 1 274–1 285. (Zhang Xiping, Sun Zhi'an, Guan Huade, et al. GCM simulation of stable water isotopes in water cycle and intercomparisons over East Asia (J). *Journal of Glaciology and Geocryology* 2011, 33(6): 1 274–1 285. )
- (14) Joussaume S, Sadourny R, Jouzel J. A general circulation model of water isotope cycles in the atmosphere (J). *Nature*, 1984, 311(5 981): 24–29.
- (15) 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.
- (16) 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): 5 867–5 892.
- (17) Sturm C, Zhang Q, Noone D. An introduction to stable water isotopes in climate models: Benefits of forward proxy modelling for paleoclimatology (J). *Climate of the Past* 2010, 6(1): 115–129.
- (18) 刘小康,饶志国,张肖勤等. 天山地区大气降水氧同位素的影响因素及其对西风环流变化的指示意义(J). *地理学报*, 2015, 70(1): 97–109. (Liu Xiaokang, Rao Zhiguo, Zhang Xiaojian, et al. Variations in the oxygen isotopic composition of precipitation in the Tianshan Mountains region and their significance for the westerly circulation (J). *Acta Geographica Sinica* 2015, 70(1): 97–109. )
- (19) Draxler R R, Hess G D. An overview of the hysplit-4 modeling system for trajectories (J). *Australian Meteorological Magazine*, 1998, 47(4): 295–308.
- (20) 胡汝骥. 中国天山自然地理(M). 北京: 中国环境科学出版社, 2004: 1–14, 180–198. (Hu Ruji. *Physical Geography of Tianshan Mountains in China* (M). Beijing: China Environmental Science Press 2004: 1–14, 180–198. )
- (21) 刘时银,姚晓军,郭万钦等. 基于第二次冰川编目的中国冰川现状(J). *地理学报*, 2015, 70(1): 3–16. (Liu Shiyin, Yao Xiaojun, Guo Wanxin, et al. The contemporary glaciers in China based on the Second Chinese Glacier Inventory (J). *Acta Geographica Sinica* 2015, 70(1): 3–16. )
- (22) 王宇,李均利,李长春等. 50 a来别珍套山冰湖的时空变化及其对气候的响应(J). *干旱区研究*, 2016, 33(2): 299–307. (Wang Yu, Li Junli, Li Changchun, et al. Spatiotemporal change of Glacial Lakes in the Biezhengtao Mountain and its response to climate change (J). *Arid Zone Research* 2016, 33(2): 299–307. )
- (23) 王圣杰,张明军,李忠勤等. 近50年来中国天山冰川面积变化对气候的响应(J). *地理学报*, 2011, 66(1): 38–46. (Wang Shengjie, Zhang Mingjun, Li Zhongqin, et al. Response of glacier area variation to climate change in Chinese Tianshan Mountains in the past 50 years (J). *Acta Geographica Sinica* 2011, 66(1): 38–46. )
- (24) Wang S J, Zhang M J, Pepin N C, et al. Recent changes in freezing level heights in High Asia and their impact on glacier changes (J). *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2014, 119(4): 1 753–1 765.
- (25) 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 B: Chemical and Physical Meteorology* 2016, 68(1): 289–299.
- (26) 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): 1 973–1 984.
- (27) Liu Y P, Hou S G, Hong S M, et al. High-resolution trace element records of an ice core from the eastern Tianshan, central Asia, since 1953 AD (J). *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2011, 116(D12).
- (28) Schmidt G A, Legrande A N, Hoffmann G. Water isotope expressions of intrinsic and forced variability in a coupled ocean-atmosphere model (J). *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2007, 112(D10): 185–194.
- (29) Yoshimura K, Kanamitsu M, Noone D, et al. Historical isotope simulation using reanalysis atmospheric data (J). *Journal of Geophysical Research Atmospheres* 2008, 113(D19): e60 941–e60 941.
- (30) Kurita N, Noone D, Risi C, et al. Intraseasonal isotopic variation associated with the Madden-Julian Oscillation (J). *Journal of Geophysical Research Atmospheres* 2011, 116(D24): 24 101.
- (31) Camille R, Sandrine B, Françoise V, 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 Atmospheres* 2010, 115(D12).
- (32) Wang Y Q. MeteInfo: GIS software for meteorological data visualization and analysis (J). *Meteorological Applications*, 2014, 21(2): 360–368.
- (33) 沈陈华. 气象因子对江苏省水稻单产的影响(J). *生态学报*, 2015, 35(12): 4 155–4 167. (Shen Chenhua. Meteorological effects on rice yields in Jiangsu Province (J). *Acta Ecologica Sinica* 2015, 35(12): 4 155–4 167. )
- (34) Torrence C, Compo G P. A practical guide to wavelet analysis (J). *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1998, 79(1): 61–78.
- (35) Grinsted A, Moore J C, Jevrejeva S. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series (J). *Nonlinear Processes in Geophysics* 2004, 11(5/6): 561–566.
- (36) 刘占明,陈子燊,路剑飞等. 广东北江流域降水时空分布及其与Nino 3区SST相关性分析(J). *自然资源学报*, 2013, 28(5): 786–798. (Liu Zhanming, Chen Zishen, Lu Jianfei, et al. Analysis of correlation between the spatio-temporal distribution of precipitation in Beijiang River Basin and SST in Nino 3 (J). *Journal of Natural Resources* 2013, 28(5): 786–798. )
- (37) Lonnie H, Huang J P. Bivariate wavelet analysis of Asia monsoon and ENSO (J). *Advances in Atmospheric Sciences*, 1996, 13(3): 299–312.
- (38) 李景林,张山清,普宗朝等. 近50 a新疆气温精细化时空变化分析(J). *干旱区地理*, 2013, 36(2): 228–237. (Li Jinglin, Zhang Shanqing, Pu Zongchao, et al. Spatial-temporal variation of

- seasonal and annual air temperature in Xinjiang during 1961 – 2010 (J). *Arid Land Geography* 2013 36(2): 228 – 237. )
- (39) 张雪芹, 孙杨, 毛炜峰, 等. 中国干旱区气温变化对全球变暖的区域响应 (J). *干旱区研究* 2010 27(4): 592 – 599. (Zhang Xueqin, Sun Yang, Mao Weiyi, et al. Regional response of temperature change in the arid regions of China to global warming (J). *Arid Zone Research* 2010 27(4): 592 – 599. )
- (40) 何清, 袁玉江, 赵勇, 等. 中亚气候变化调查研究 (M). 北京: 气象出版社, 2016. (He Qing, Yuan Yujiang, Zhao Yong, et al. Investigation on climate change in Central Asia (M). Beijing: Meteorological Press 2016. )
- (41) 李瑞雪. 中国天山山区气候变化的时空分布特征 (D). 甘肃: 西北师范大学, 2010: 13 – 14. (Li Ruixue. Spatio-temporal Distribution Characteristics of Climate Change in the Tianshan Mountainous China (D). Gansu: Northwest Normal University, 2010: 13 – 14. )
- (42) 阿依夏木·尼亚孜, 周宁芳, 杨贵名. 近 45 年哈密地区温度变化特征 (J). *气象* 2007 33(7): 89 – 97. (Ayixiamu Niyazhi, Zhou Ningfang, Yang Guiming. Analyses on characteristics of air temperature change in Hami, Xinjiang in recent 45 years (J). *Meteorological Monthly* 2007 33(7): 89 – 97. )
- (43) 宋琳琳, 侯书贵, 刘亚平. 天山东部哈尔里克山庙儿沟冰芯 1953 年以来的  $\delta^{18}\text{O}$  记录 (J). *兰州大学学报: 自然科学版*, 2011 47(5): 36 – 41. (Song Linlin, Hou Shugui, Liu Yaping.  $\delta^{18}\text{O}$  record of Miaoergou ice core from the Karlik Mountains of east Tianshan since 1953 (J). *Journal of Lanzhou University: Natural Sciences Edition* 2011 47(5): 36 – 41. )
- (44) 卫克勤, 林瑞芬. 论季风气候对我国雨水同位素组成的影响 (J). *地球化学* 1994 23(1): 33 – 41. (Wei Keqin, Lin Ruifen. The influence of the monsoon climate on the isotopic composition of precipitation in China (J). *Geochimica* 1994 23(1): 33 – 41. )
- (45) 戴新刚, 李维京, 马柱国. 近十几年新疆水汽源地变化特征 (J). *自然科学进展* 2006 16(12): 1 651 – 1 656. (Dai Xingang, Li Weijing, Ma Zhuguo. Water-vapor source shift of Xinjiang region during the recent twenty years (J). *Progress in Natural Science* 2006 16(12): 1 651 – 1 656. )
- (46) 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): 2 667 – 2 682.

## Affecting Mechanism of Moisture Sources of Isotopes in Precipitation in the Tianshan Mountains Based on GCMs and Ice Core

YANG Sen<sup>1</sup>, ZHANG Ming-jun<sup>1</sup>, WANG Sheng-jie<sup>1,2</sup>

(1. College of Geography and Environment Science Northwest Normal University Lanzhou 730070 Gansu China;

2. State Key Laboratory of Cryospheric Sciences Northwest Institute of Eco-Environment and Resources Chinese Academy Sciences, Lanzhou 730000 Gansu China)

**Abstract:** The interannual variations of  $\delta^{18}\text{O}$  from the GCMs and ice core were studied according to the six simulations of several isotope-equipped general circulation models (GCMs) (including the GISS-E(MERRA), GISS-E(NCEP), isoGSM(NCEP), LMDZ(free), LMDZ(ECMWF) and MIROC(free)) and the data of  $\delta^{18}\text{O}$  from the Miaoergou ice core. By correlation analysis the six simulations of isotope-enabled GCMs and the  $\delta^{18}\text{O}$  data from ice core were analyzed. Six simulations of isotope-enabled GCMs data and the ice core data were involved, and the monthly series of stable oxygen isotopes in precipitation for each grid were applied to calculate the linear trends. By observing the change trend of  $\delta^{18}\text{O}$  data from ice core and simulated data, the most suitable isotope-enabled general circulation model (GCM) was selected to analyze the data of  $\delta^{18}\text{O}$  in precipitation in the Tianshan Mountains, and the sources of water vapor in the most suitable model were further analyzed. The results showed that there was a “temperature effect” in the results simulated with GCMs on an interannual timescale. Generally, the correlation between oxygen isotope composition and surface air temperature on interannual timescale was lower than on seasonal timescale. The trend of MIROC(free) model was similar to that of the Miaoergou ice core ( $a = -0.01$ ). MIROC(free) model was the most suitable model used to simulate the values of  $\delta^{18}\text{O}$  in precipitation in the Tianshan Mountains, and the result from the MIROC(free) model was similar to the measured one. The direction and proportion of water vapor sources determined the poverty or enrichment degree of  $\delta^{18}\text{O}$  in precipitation. Based on the continuous wavelet transform methods, the strongest energy occurred during the period from 1990 to 2001. Even though the values of  $\delta^{18}\text{O}$  in precipitation during the period from 1990 to 2001 presented many positive fluctuations, a significant decrease trend was characterized in general. After observing the vapor source trajectories, the increased water vapor from the Arctic Ocean resulted in a significant decrease trend of  $\delta^{18}\text{O}$  in precipitation, and the increased water vapor from the mid-latitude Atlantic caused many increasingly fluctuations of  $\delta^{18}\text{O}$ .

**Key words:** GCMs; ice core; water vapor source; stable water isotopes; Miaoergou; Tianshan Mountains