

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

刘小康, 饶志国, 张肖剑, 黄 伟, 陈建徽, 陈发虎

(兰州大学西部环境教育部重点实验室, 兰州 730000)

摘要: 利用全球降水同位素观测网(GNIP)提供的乌鲁木齐大气降水氧同位素($\delta^{18}\text{O}_p$)观测数据(1986-2003年), 结合和田 $\delta^{18}\text{O}_p$ 数据及天山冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 记录, 分析了天山地区 $\delta^{18}\text{O}_p$ 在年上和年际尺度上的变化特征, 及其与主要气候要素(温度和降水量)的关系。结果表明, 年上尺度上, $\delta^{18}\text{O}_p$ 与月均温和月降水量均为显著正相关, 表现出明显的“温度效应”; 年际尺度上, 加权平均年 $\delta^{18}\text{O}_p$ 与年均温度却呈现负相关关系, 与降水量仍为正相关。近40~50年的天山地区4支冰芯的 $\delta^{18}\text{O}$ 具有整体偏负的变化趋势, 与研究区逐步升高的温度呈反向变化, 说明在年际至年代际尺度上, 这一区域 $\delta^{18}\text{O}_p$ 与温度之间的负相关关系是客观存在的。进一步对研究区水汽来源路径的对比分析发现: $\delta^{18}\text{O}_p$ 值偏负的高温年份(1997年)的暖季水汽相对更多来源于远源的高纬度区域, 而 $\delta^{18}\text{O}_p$ 值偏正的低温年份(1988年)则相对更多来自近源的中、低纬度区域; 同时, 研究区上风方向的欧亚大陆14个GNIP站点1997年和1988年的暖季加权平均 $\delta^{18}\text{O}_p$ 值存在高纬度区域偏负而中、低纬度区域偏正的特征; 这些结果说明年际至年代际尺度上, 天山地区 $\delta^{18}\text{O}_p$ 与温度之间的负相关, 本质上指示了西风环流南北摆动所引起的水汽来源变化, 可以作为西风环流变化的指示器。

关键词: 天山地区; 乌鲁木齐; $\delta^{18}\text{O}_p$; 水汽来源; 西风环流

DOI: 10.11821/dlxb201501008

1 引言

常年受到西风影响的亚洲中部干旱区, 是古气候研究的重点区域^[1-5], 尤其是中国新疆天山地区。已有分析结果表明, 近50年来亚洲中部干旱区的降水呈现增加趋势, 而华北降水存在减少趋势^[6]; 过去一千年, 亚洲中部干旱区在中世纪暖期时偏干、小冰期时偏湿, 而东部季风区在中世纪暖期偏湿、小冰期时偏干^[7]; 全新世(现代间冰期)期间, 亚洲中部干旱区表现为早全新世干旱、中晚全新世较为湿润的变化特征, 这与东部季风区早中全新世湿润、晚全新世相对干旱的总体特征呈现“错位相”的特征^[3]; 所有上述研究结果表明, 亚洲中部干旱区的气候变化具有明显不同于中国东部季风区的变化特征^[8]。

大气降水氧同位素($\delta^{18}\text{O}_p$)分析是现代气候和水文过程研究的重要手段, 并且由于冰芯、树轮纤维素、湖泊自生碳酸盐和洞穴石笋等地质载体的 $\delta^{18}\text{O}$ 代用指标可以客观记录

收稿日期: 2014-09-12; 修订日期: 2014-11-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(41372181; 41171091; 41130102); 兰州大学中央高校基本科研业务费专项资金(lzujbky-2014-260) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41372181, No.41171091, No.41130102; Fundamental Research Funds for the Central Universities, No.lzujbky-2014-260]

作者简介: 刘小康(1990-), 男, 甘肃天水人, 博士研究生, 主要从事地球化学与过去气候变化研究。

E-mail: liuxk07@lzu.edu.cn

通讯作者: 饶志国(1978-), 男, 湖南长沙人, 博士, 教授, 主要从事地球化学与过去气候变化研究。

E-mail: raozhg@lzu.edu.cn

$\delta^{18}\text{O}_\text{p}$ 信号, 因此被广泛应用于古气候重建中^[9-12], 尤其是测年精确的高分辨率石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录^[10]。已有研究表明, 在月和季节尺度上, 中国干旱区 $\delta^{18}\text{O}_\text{p}$ 主要受控于“温度效应”^[13-16]。然而这种 $\delta^{18}\text{O}_\text{p}$ 的年内变化特征, 却无法用来解释相关的古气候记录。一个典型的例证就是石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录, 来自天山西部伊犁盆地科桑溶洞 (42°52'N, 81°45'E, ~2000 m a.s.l.) 的石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 偏正阶段, 对应于太阳辐射减弱的低温时期 (冰期); 偏负的阶段则对应于太阳辐射增强的高温时期 (间冰期)^[17]; 这显然无法用该区域现代 $\delta^{18}\text{O}_\text{p}$ 整体在夏季偏正、而冬季偏负的年内变化特征来解释, 否则将得到冰期温度偏高、而间冰期温度偏低的错误认识。此外, 用“夏季风强度模式”来解释新疆天山石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录, 也面临诸多考验。科桑洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录在早-中全新世偏负、而晚全新世偏正的变化特征, 如果代表了亚洲夏季风强度由早-中全新世向晚全新世减弱的特征, 则与近来报道的基于多个湖泊记录重建的新疆地区湿度变化^[18]、泥炭纤维素碳同位素研究结果^[19]和天山全新世沙丘研究结果^[20]等, 所获得的该区域晚全新世气候更加湿润的认识相悖。因此, 非常有必要进一步认识和理解天山地区 $\delta^{18}\text{O}_\text{p}$ 变化的影响因素。

源于大气降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 信号需要经过复杂的输送过程和通道才能被地质载体记录, 地表土壤、植被、围岩等“地下水库”都会对原始的 $\delta^{18}\text{O}_\text{p}$ 信号有缓冲平滑作用, 因而大多数地质载体的 $\delta^{18}\text{O}$ 序列都只能记录年际或更长时间尺度的 $\delta^{18}\text{O}_\text{p}$ 信息^[11-12, 21-24]。因此, 对年际及以上时间尺度的 $\delta^{18}\text{O}_\text{p}$ 变化特征和影响因素的分析, 对地质载体 $\delta^{18}\text{O}$ 记录的解译, 具有更加直接的参考价值。

本文利用全球大气降水同位素观测网 (GNIP) 提供的新疆乌鲁木齐与和田的 $\delta^{18}\text{O}_\text{p}$ 观测数据及天山地区 4 支冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 数据, 首先分析天山地区 $\delta^{18}\text{O}_\text{p}$ 的年内变化特征及其影响因素; 进一步分析该区域 $\delta^{18}\text{O}_\text{p}$ 在年际尺度上, 与温度、降水量、水汽源地和输送路径之间的关系; 以期更真实地揭示天山地区 $\delta^{18}\text{O}_\text{p}$ 的控制影响因素, 为更深刻理解该区域的古气候演化历史和机制服务。

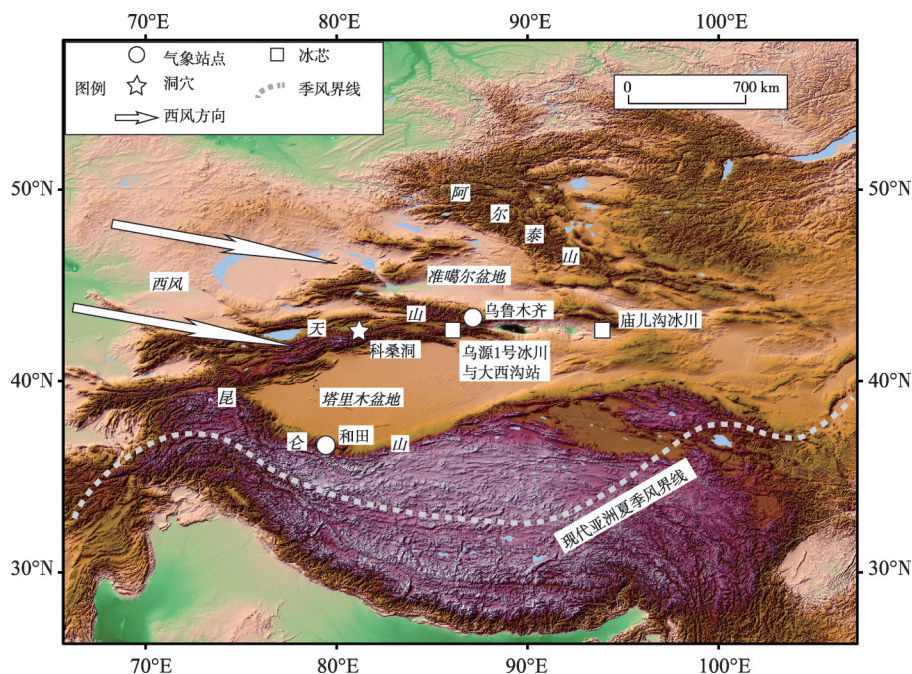


图 1 研究区域及本文所用气候记录点位置示意图(现代亚洲夏季季风界线据文献^[31])

Fig. 1 Map showing the study area and relevant study sites (Modern Asian summer monsoon limit is modified from reference^[31])

2 研究区概况

新疆是亚洲中部干旱区的重要组成部分,地貌上表现为昆仑山-塔里木盆地-天山-准噶尔盆地—阿勒泰山的“三山夹两盆”的格局(图1)。天山位于新疆地区中部,呈东西向分布并将新疆分为南北两部分。该区域属于典型的内陆干旱区,其降水的突出特征是时空分布不均且变率很大;盆地内部降水较少,且多出现极端降水事件(暴雨、暴雪等)^[25]。区内分布着中国两大沙漠,植被稀少,生态环境非常脆弱;山地降水量较高,是新疆地区水资源的主要来源。新疆地区的降水在季节上表现为夏季多而冬季少的特点(图2a和2b),尽管其降水的季节分布与东部季风区相同,但新疆地区的气候主要受西风环流控制,受季风系统的直接影响较小,属于典型的西风气候区^[3-4, 8]。近50年来,新疆地区的温度和降水经历了波动式上升的过程^[26],上世纪八十年代后期,随着气温的快速上升,降水量、冰川消融量和径流量都显著增加,内陆湖泊水位上升,植被状况改善,据此,施雅风等提出中国西北干旱区气候发生了由暖干向暖湿转型^[27],整个亚洲中部干旱区也出现了降水增加的趋势^[6]。也有研究表明,新疆地区水汽来源的变化与全球变暖的背景有着密切关系,源自高纬度大尺度的水汽含量的增加是研究区增湿的原因,并与高纬度区域快速增暖有关^[28]。本文分析天山地区的 $\delta^{18}\text{O}_p$ 变化特征及其与水汽来源的关系,可为该地区的古气候变化历史重建,提供基础资料和理论依据。

3 资料和分析方法

3.1 资料来源

本文所用 $\delta^{18}\text{O}_p$ 观测数据来自国际原子能机构和世界气象组织建立的GNIP。其中,亚洲中部干旱区共有3个GNIP站点(乌鲁木齐、和田和塔什干),塔什干仅有1971年的 $\delta^{18}\text{O}_p$ 数据。乌鲁木齐的 $\delta^{18}\text{O}_p$ 观测时段从1986到2003年(表1),其中1993-1994年、1999-2000年的 $\delta^{18}\text{O}_p$ 数据缺失;在其余年份当中,由于有4个及以上月份的 $\delta^{18}\text{O}_p$ 数据缺失,本文放弃对1992年、1995年和1998年数据的分析,因此该站点用于本文分析的数据来自1986-1991、1996-1997和2001-2003年,总共11年。和田的 $\delta^{18}\text{O}_p$ 观测年份从1988到1992年(表1),时间较短。因此,本文主要分析乌鲁木齐 $\delta^{18}\text{O}_p$ 在年上和年际尺度上的变化特征,并利用和田数据作为佐证(图2)。

本文所用冰芯数据来自天山中部乌鲁木齐河源1号冰川(43°03'N, 86°29'E)的3支透底冰芯记录的1962-1997年 $\delta^{18}\text{O}$ 数据;以及天山东部哈尔里克山庙儿沟河源3号冰川(43°03'N, 94°19'E)2号冰芯的顶部16.83 m的 $\delta^{18}\text{O}$ 数据,对应年份为1953-2004年。为了进一步分析天山地区 $\delta^{18}\text{O}_p$ 与水汽来源之间的关系,利用中国地面气候资料月值数据集(1951-2011年)中乌鲁木齐的气温和降水量数据,合成分析不同年份时研究区的水汽通量及相对水汽来源变化。此外,本文选择欧亚大陆其他12个GNIP站点的 $\delta^{18}\text{O}_p$ 数据(表1和图5),用以共同分析水汽来源变化对天山地区 $\delta^{18}\text{O}_p$ 的影响。

3.2 数据分析方法

GNIP站点的原始数据是将每月全部降水混合后测试,代表该月的 $\delta^{18}\text{O}_p$ 值。为了更好地模拟大气降水在地质载体中的混合,本文所涉及的年均、暖季和冷季 $\delta^{18}\text{O}_p$ 值均为利用月降水量进行加权平均后的 $\delta^{18}\text{O}_p$ 值,计算方法如下:

$$\delta^{18}\text{O}_w = \frac{\sum_{i=1}^n \delta^{18}\text{O}_i \cdot P_i}{\sum_{i=1}^n P_i} \quad (1)$$

表 1 欧亚大陆 14 个 GNIP 站点的位置信息和相应的加权平均暖季 $\delta^{18}\text{O}_p$ 值(5-9 月)

Tab. 1 Information about the localities and precipitation $\delta^{18}\text{O}$ ($\delta^{18}\text{O}_p$) data of 14 GNIP stations in the Eurasian continent and their weighted average warm season (May to September) $\delta^{18}\text{O}_p$ values in 1997 and 1988

站点编号	站点名称	所处国家	纬度 (°N)	经度 (°E)	观测年份	1997 年加权平 均暖季 $\delta^{18}\text{O}_p$ (‰, VSMOW)	有同位素 数据月份	1988 年加权平 均暖季 $\delta^{18}\text{O}_p$ (‰, VSMOW)	有同位素 数据月份
1713000	安卡拉	土耳其	39.95	32.88	1963-2009	-5.78	5-8 月	-5.88	5-8 月
2221700	坎达拉克沙湾	俄罗斯	67.15	32.35	1996-2000	-12.10	5-9 月	-	-
2606300	圣彼得堡	俄罗斯	59.97	30.30	1980-1990	-	-	-10.70	5-9 月
2642200	里加	拉脱维亚	56.97	24.07	1969-1989	-	-	-6.35	5-9 月
2719600	基洛夫	俄罗斯	58.65	49.62	1980-2000	-9.53	5-9 月	-	-
2740200	卡里宁	俄罗斯	56.90	35.90	1980-1989	-	-	-7.61	5-9 月
2822500	彼尔姆	俄罗斯	58.01	56.18	1973-1990	-	-	-9.17	5-7 月
2961200	巴拉宾斯克	俄罗斯	55.33	78.37	1996-2000	-8.90	5-7, 9 月	-	-
3400900	库尔斯克	俄罗斯	51.73	36.27	1996-2000	-9.75	7-9 月	-	-
3488000	阿斯特拉罕	俄罗斯	46.25	48.03	1980-2000	-5.06	5-7, 9 月	-4.99	5-9 月
3748400	巴统	格鲁吉亚	41.65	41.63	1980-1990	-	-	-5.20	8-9 月
4094900	喀布尔	阿富汗	34.57	69.21	1962-1991	-	-	0.07	5, 6, 8 月
5182800	和田	中国	37.13	79.93	1988-1992	-	-	-3.04	5-9 月
5182801	乌鲁木齐	中国	43.78	87.62	1986-2003	-8.64	5-8 月	-6.39	5-9 月

注：表中“-”表示没有数据。

式中： $\delta^{18}\text{O}_w$ 为加权平均 $\delta^{18}\text{O}_p$ 值； $\delta^{18}\text{O}_i$ 和 P_i 为对应月份 i 的 $\delta^{18}\text{O}_p$ 值和降水量实测数据。

根据 GNIP 观测数据 (1986-2003 年)，乌鲁木齐的平均温度为 7.4℃，平均降水量为 296.2 mm，其中 1997 年

的平均温度最高，1988 年的平均温度最低。因而，我们利用 1997 年和 1988 年暖季的水汽通量做合成分析，即 1997 年的暖季水汽通量减去 1988 年的暖季水汽通量代表 1997 年相对于 1988 年的暖季水汽来源变化；反之，1988 年的暖季水汽通量减去 1997 年的暖季水汽通量代表 1988 年相对于 1997 年的暖季水汽来源差异；其中水汽通量为根据中国地面气候资料月值数据集计算的 1000~300 hPa 整层水汽通量。根据乌鲁木齐观测数据，选择 1997 年和 1988 年作为高温年和低温年的代表，其降水量、温度及 $\delta^{18}\text{O}_p$ 如表 2 所示；并结合欧亚大陆 14 个 GNIP 站点（表 1 和图 5）对应年份的加权平均暖季 $\delta^{18}\text{O}_p$ 值，来分析水汽来源变化对天山地区 $\delta^{18}\text{O}_p$ 的影响。

表 2 乌鲁木齐 1997 年和 1988 年降水量、温度及加权平均 $\delta^{18}\text{O}_p$ 值

Tab. 2 Annual precipitation amount, mean annual and warm season (May to September) average temperature, and weighted average annual and warm season $\delta^{18}\text{O}_p$ values at Urumqi station in 1997 and 1988

年份	年降水量 (mm)	年均温度 (°C)	加权平均年 $\delta^{18}\text{O}_p$ (‰, VSMOW)	暖季均 温 (°C)	加权平均暖季 $\delta^{18}\text{O}_p$ (‰, VSMOW)
1997	156	10.13	-11.33	25.72	-8.64
1988	374	6.33	-7.49	19.40	-6.39

4 结果分析

4.1 天山地区 $\delta^{18}\text{O}_p$ 的年内变化及其与温度、降水量的关系

如图 2 所示，乌鲁木齐的 $\delta^{18}\text{O}_p$ 在夏季时偏正，而冬季时偏负（图 2a）； $\delta^{18}\text{O}_p$ 最大值出现在 8 月，6-8 月的 $\delta^{18}\text{O}_p$ 值基本相当，最小值出现在 12-2 月；和田 $\delta^{18}\text{O}_p$ 的年内变化与乌鲁木齐基本一致（图 2b）。对月均 $\delta^{18}\text{O}_p$ 值与月均温度、月降水量分别作一元线性回归分

析,结果显示:乌鲁木齐的月均 $\delta^{18}\text{O}_p$ 值与月均温为显著正相关 ($r = 0.99$, $p < 0.01$, 图2c);和田的月均 $\delta^{18}\text{O}_p$ 值与月均温也为显著正相关 ($r = 0.97$, $p < 0.01$, 图2d)。乌鲁木齐与和田的月均 $\delta^{18}\text{O}_p$ 值与月降水量之间的线性正相关稍差,相关系数分别为 $r = 0.84$ 和 $r = 0.68$, 分别达到99%和95%的置信度(图2e、2f)。从图2a和2b可以看出,年内尺度上, $\delta^{18}\text{O}_p$ 值与温度的变化更加一致,而与降水量的变化有明显差异。如两个站点8月份的降水量已明显下降,但是 $\delta^{18}\text{O}_p$ 值仍然很偏正,温度也偏高。这进一步说明了年内尺度上, $\delta^{18}\text{O}_p$ 值与温度的关系更加密切。

从上述结果来看,温度是影响干旱区 $\delta^{18}\text{O}_p$ 年内变化的主要因素,这与前人获得的认识^[13-16, 29-30]一致,对天山和阿勒泰山现代雪冰 $\delta^{18}\text{O}$ 的观测结果也证实了这一点^[31]。天山中部的乌鲁木齐河源1号冰川附近的大西沟气象站的观测结果,包括1995年6月至1996年6月的降水事件观测数据^[32],以及1997年5月至1998年8月的连续降水观测数据^[15],都显

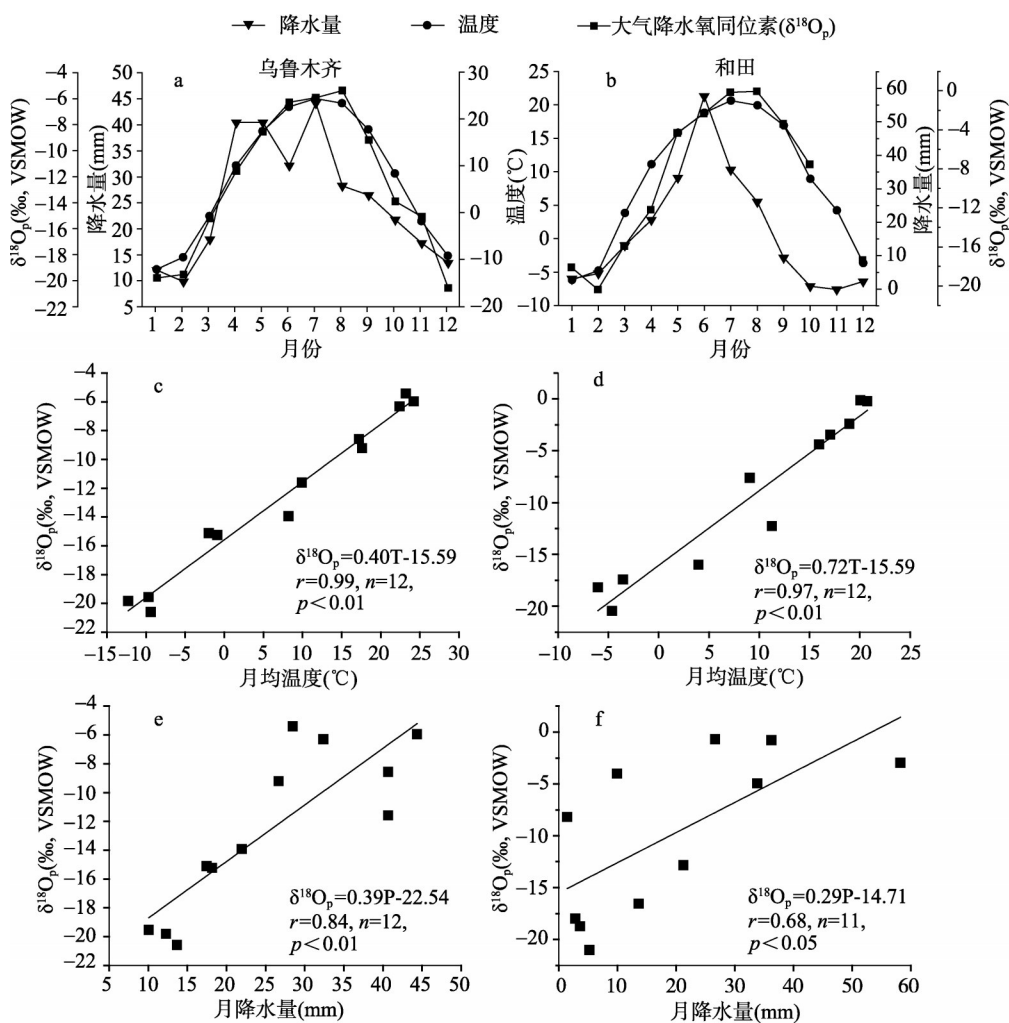


图2 乌鲁木齐与和田 $\delta^{18}\text{O}_p$ 、温度和降水量的年内变化特征及其线性相关关系(a和b, 月均 $\delta^{18}\text{O}_p$ 、月均温度和月降水量变化; c和d, 月均 $\delta^{18}\text{O}_p$ 和月均温度的相关关系; e和f, 月均 $\delta^{18}\text{O}_p$ 和月降水量的相关关系)

Fig. 2 Variations of monthly $\delta^{18}\text{O}_p$, temperature and precipitation amount at Urumqi (a) and Hotan (b) stations; linear correlations between monthly $\delta^{18}\text{O}_p$ and temperature at Urumqi (c) and Hotan (d) stations; and linear correlations between monthly $\delta^{18}\text{O}_p$ and precipitation amount at Urumqi (e) and Hotan (f) stations

示了年内尺度上, $\delta^{18}\text{O}_p$ 与温度的显著正相关关系。最近发表的对乌鲁木齐河盆地 3 个站点 $\delta^{18}\text{O}_p$ 和温度的观测结果^[33], 也证实了“温度效应”对天山地区 $\delta^{18}\text{O}_p$ 年内变化的显著影响。

4.2 天山地区年均 $\delta^{18}\text{O}_p$ 与温度、降水量的关系

对乌鲁木齐 11 年的加权平均年 $\delta^{18}\text{O}_p$ 与年均温、年降水量, 分别作一元线性回归分析。结果表明, 加权平均年 $\delta^{18}\text{O}_p$ 与年均温度呈现弱的负相关 ($r = -0.28$, 图 3a), 而与年降水量仍为弱的正相关 ($r = 0.33$, 图 3b)。虽然和田的观测数据只有 5 年, 但是在年际尺度上, 其同样显示了加权平均年 $\delta^{18}\text{O}_p$ 与年均温之间的弱的负相关关系。显然, 控制研究区内尺度 $\delta^{18}\text{O}_p$ 变化的“温度效应”, 在年际尺度上是不存在的; 相反, 在年际尺度上, 加权平均年 $\delta^{18}\text{O}_p$ 值与年均温度之间呈现出负相关关系。

从近 50 年的观测数据(中国地面气候资料月值数据集)来看, 新疆地区年内气温变化是 5 月气温回升至 0°C 以上并开始解冻, 到 10 月开始下雪, 温度降到 0°C 以下, 即第一年 10 月至第二年 4 月为冻结期。因此, 将 5-9 月和 10-4 月分别定义为新疆地区的暖季和冷季, 进而分别对乌鲁木齐逐年的暖季和冷季加权平均 $\delta^{18}\text{O}_p$ 值与对应的温度做年际尺度的线性相关分析。结果表明, 暖季(5-9 月, 也是主要降水季节)的加权平均 $\delta^{18}\text{O}_p$ 与暖季平均温度的负相关关系 ($r = -0.44$, 图 3c), 比加权平均年 $\delta^{18}\text{O}_p$ 与年均温度的负相关关系 ($r = -0.28$, 图 3a) 更强。乌鲁木齐河源 1 号冰川的研究结果也表明, 冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 与消融季节(5-9 月)平均温度之间的相关性更好^[34]; 以上结果说明天山地区暖季 $\delta^{18}\text{O}_p$ 与暖季平均

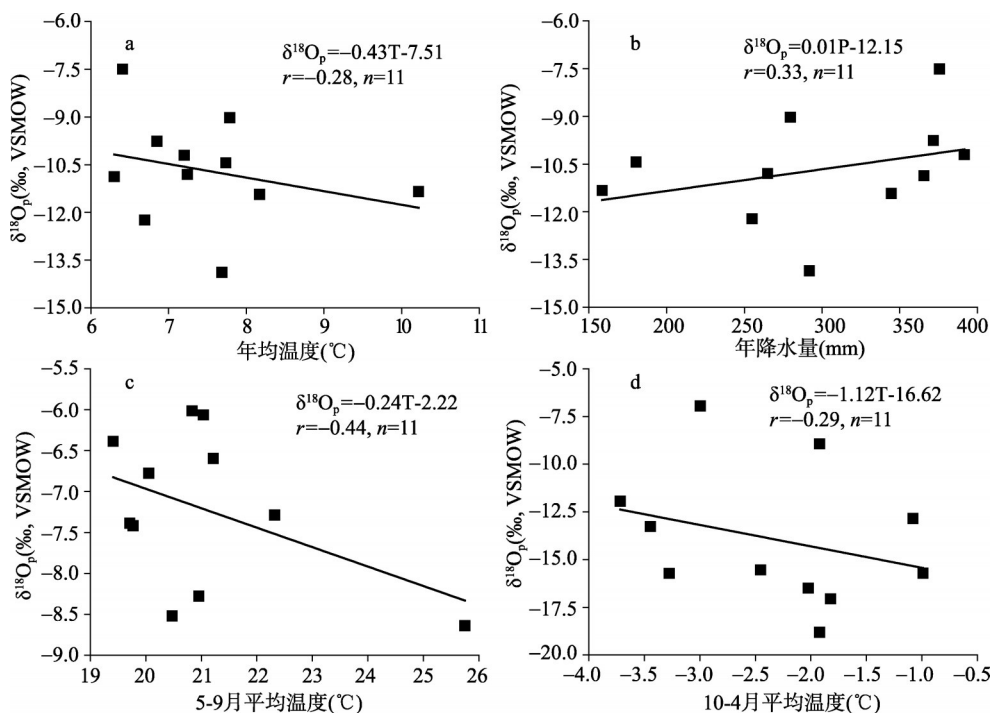


图3 乌鲁木齐年 $\delta^{18}\text{O}_p$ 与年均温度、年降水量的线性关系(a, 加权平均年 $\delta^{18}\text{O}_p$ 与年均温度; b, 加权平均年 $\delta^{18}\text{O}_p$ 与年降水量; c, 加权平均暖季(5-9 月) $\delta^{18}\text{O}_p$ 与暖季平均温度; d, 加权平均冷季(10-4 月) $\delta^{18}\text{O}_p$ 与冷季平均温度)

Fig. 3 The linear correlations between weighted average annual $\delta^{18}\text{O}_p$ and mean annual temperature (a), weighted average annual $\delta^{18}\text{O}_p$ and annual precipitation amount (b), weighted average warm season (May to September) $\delta^{18}\text{O}_p$ and warm season average temperature (c), weighted average cold season (October to April) $\delta^{18}\text{O}_p$ and cold season average temperature (d) at Urumqi station

温度的关系更加密切。此外,乌鲁木齐的冷季加权平均 $\delta^{18}\text{O}_p$ 与冷季平均温度也呈现负相关关系($r = -0.29$,图3d)。早期的研究表明,新疆暖季降水对年总降水量的贡献比例是最大的^[35],乌鲁木齐的暖季(5-9月)降水占全年降水的比例约为56%,和田暖季(5-9月)降水占全年降水约78%(图2a、2b),故而我们认为该地区的年均 $\delta^{18}\text{O}_p$ 值主要决定于暖季的 $\delta^{18}\text{O}_p$ 。更重要的是,冷季时新疆大部分地区地面冻结,尤其是山地,因此可能只有暖季的降水才能下渗并最终到达洞穴,是石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 变化的主要信号贡献者。

4.3 近40-50年天山冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 变化与温度的关系

由于天山地区有 $\delta^{18}\text{O}_p$ 观测数据的站点非常有限,且观测年份较短,并不能用来分析更长时间尺度上 $\delta^{18}\text{O}_p$ 与温度的相关性。因此我们借助 $\delta^{18}\text{O}_p$ 信号的另一记录者,即冰芯 $\delta^{18}\text{O}$,来进一步检验上述年际尺度上 $\delta^{18}\text{O}_p$ 与温度之间的负相关关系。

位于天山中部的乌鲁木齐河源1号冰川的3支透底冰芯(TS-1、TS-2和TS-3)的 $\delta^{18}\text{O}$ 数据,记录了近40年的 $\delta^{18}\text{O}_p$ 变化^[34, 36],其与邻近的大西沟气象站实测年均温度的变化如图4a所示。这3支透底冰芯的 $\delta^{18}\text{O}$ 记录,均有自冰芯底部向顶部的偏负变化趋势;与此同时,大西沟气象站点实测温度则具有上升趋势,与新疆地区近50年来的温度上升趋势^[37]一致。乌鲁木齐河源1号冰川的研究结果说明,在过去近40年间,天山地区 $\delta^{18}\text{O}_p$ 表现出与温度之间的反向变化关系。

天山东部哈尔里克山庙尔沟河源3号冰川(庙尔沟平顶冰川)2号冰芯顶部16.83 m的 $\delta^{18}\text{O}$ 数据,记录了近50年来的 $\delta^{18}\text{O}_p$ 变化(图4b)。尽管沉积后的冰芯可能受到高温融化和水汽运移等沉积期后作用,但这种过程对冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 的影响仅限于年层内^[38]。整体而言,近50年来,庙尔沟冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 自底部向顶部,同样呈现偏负变化趋势,邻近的巴里坤和伊吾气象站记录的年均温为上升趋势^[38],这与新疆地区^[26, 37]及亚洲中部

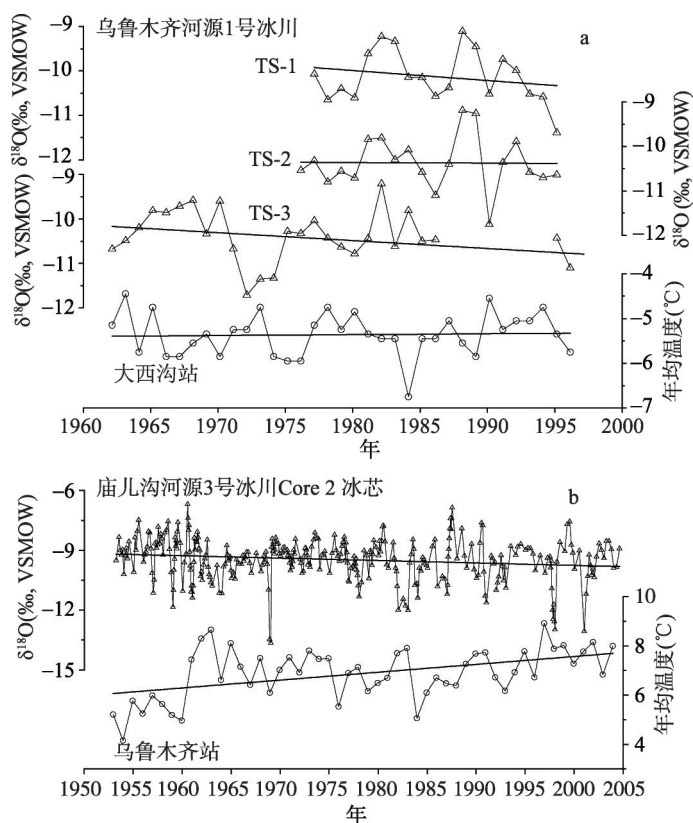


图4 (a) 天山中部乌鲁木齐河源1号冰川3支透底冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 记录(TS-1、TS-2、TS-3)与邻近的大西沟气象站年均温度随时间变化的对比(数据来自文献[34, 36]); (b) 天山东部哈尔里克山庙尔沟2号冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 记录(数据来自文献[38])与乌鲁木齐站年均温度(数据来自中国地面气候资料月值数据集)变化的对比(粗实线代表线性变化趋势)

Fig. 4 Comparisons of $\delta^{18}\text{O}$ records of three ice cores (TS-1, TS-2, TS-3) from No.1 Glacier in middle Tianshan Mountains with annual average temperature data from the nearby Daxigou Meteorological Station (a, original data from references [34, 36]); comparison of Miaogou ice core $\delta^{18}\text{O}$ record in eastern Tianshan Mountains (original data from reference [38]) with annual average temperature data from Urumqi Station (b, original data from China Surface Climate Dataset (Monthly)) (The bold lines indicate the long-term trends of each dataset)

干旱区在全球变暖下表现出的显著升温^[39]是一致的。因此, 庙儿沟冰芯记录的近 50 年 $\delta^{18}\text{O}_p$ 与研究区的温度也存在反向变化关系 (图 4b)。

上述结果说明, 尽管乌鲁木齐加权平均年 $\delta^{18}\text{O}_p$ 与年均温之间的负相关并不显著, 但是这种负相关关系可以得到近 40-50 年天山冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 数据的验证和支持。这表明该地区年际至年代际的 $\delta^{18}\text{O}_p$ 与温度之间的负相关关系, 应当是一种客观存在的事实。

5 讨论

5.1 年内和年际尺度 $\delta^{18}\text{O}_p$ 与温度相关性的差异

年内尺度上, 天山地区的 $\delta^{18}\text{O}_p$ 在夏季偏正, 而冬季偏负, 变化幅度可达 15‰ 左右, $\delta^{18}\text{O}_p$ 明显受控于“温度效应”。天山地区 $\delta^{18}\text{O}_p$ 的年内变化特征, 与东亚季风区的 $\delta^{18}\text{O}_p$ 在夏季偏负、而冬季偏正的变化模式^[10, 40]是明显不同的, 而且这种年内 $\delta^{18}\text{O}_p$ 的变化模式不能用来解释该区域的石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录在间冰期时偏负、而冰期时偏正^[17]的变化特征, 这说明天山地区 $\delta^{18}\text{O}_p$ 可能存在不同于东亚季风区的变化机制。

在年际尺度上, 乌鲁木齐的 $\delta^{18}\text{O}_p$ 表现为与温度之间的负相关关系, 并得到邻近的 4 支冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 记录与区域温度反向变化关系的支持。这种年际尺度上, $\delta^{18}\text{O}_p$ 与温度之间的负相关关系, 与研究区 $\delta^{18}\text{O}_p$ 在年内尺度上与温度呈现出的显著正相关关系, 显然是不一样的。

5.2 新疆地区大气降水水汽来源分析

研究者利用气象学统计和再分析资料, 对新疆地区大气降水的水汽来源、输送路径等开展了较多研究, 获得了一些有重要意义的认识。王旭等^[41]对 1998 年 4 月至 2000 年 10 月每小时一次的 GMS-5 水汽图像资料的分析, 发现输送至新疆的三条水汽通道分别为西南、西部和西北方向, 且主要来自西方。刘蕊和杨青^[42]计算和分析了新疆 1948-2007 年的大气水汽通量及其净收支情况, 表明新疆大气水汽输送主要受 3 支水汽输送带影响, 即西伯利亚和蒙古方向的西北风水汽输送, 孟加拉湾路径到达新疆南部的西南风水汽输送带, 以及来自大西洋的西风风水汽输送带。已有研究结果还表明, 新疆大气降水的水汽来源随季节发生变化, 夏季时以北方和西北方通道的水汽占主导, 而冬季时则西南通道水汽份额增加^[28, 43]。

本文调查了研究区上风向欧亚大陆 14 个 GNIP 站点 (表 1, 图 5) 暖季 (5-9 月) $\delta^{18}\text{O}_p$ 值分布特征 (图 5), 中、低纬度区域的 $\delta^{18}\text{O}_p$ 偏正, 高纬度区域的 $\delta^{18}\text{O}_p$ 偏负, 变化幅度可达到 5‰~10‰。由于这种分布特征的存在, 通过对高温年份和低温年份暖季水汽来源和输送路径的对比调查, 可以进一步理解该区域年际尺度上 $\delta^{18}\text{O}_p$ 与温度的负相关关系。图 5a 和 5b 分别展示了研究区高温年份 (1997 年) 和低温年份 (1988 年) 的相对暖季水汽来源变化, 以及这两个年份相应的 14 个 GNIP 站点的暖季加权平均 $\delta^{18}\text{O}_p$ 值。可见, 1997 年相对于 1988 年, 研究区有更多的水汽来自远源的高纬区域; 而 1988 年相对于 1997 年, 则有更多的水汽来自近源的中、低纬区域, 并且由于水汽源区 $\delta^{18}\text{O}_p$ 的分布特征, 导致了研究区 1997 年暖季水汽的 $\delta^{18}\text{O}$ 偏负, 而 1988 年暖季水汽的 $\delta^{18}\text{O}$ 偏正, 这种水汽来源变化引起的 $\delta^{18}\text{O}_p$ 变化, 表现在年际尺度上, 就是 $\delta^{18}\text{O}_p$ 与温度之间的负相关关系。因此, 天山地区 $\delta^{18}\text{O}_p$ 在年际尺度上与温度的负相关关系, 本质上反映了研究区在不同环流背景下的水汽来源变化。

5.3 水汽来源变化对天山地区 $\delta^{18}\text{O}_p$ 的影响

由上述分析可知, 在年际尺度上, 天山地区 $\delta^{18}\text{O}_p$ 的变化反映了水汽来源变化, 这本

质上应当是年际尺度上西风带位置的南北摆动造成的。当西风带位置偏北时,带来更多高纬度区域的 $\delta^{18}\text{O}$ 偏负的远源水汽;反之,当西风带位置偏南时,更多的中、低纬区域的 $\delta^{18}\text{O}$ 偏正的近源水汽输送至研究区。因此,研究区内记录了年际及以上时间尺度 $\delta^{18}\text{O}_p$ 信号的地质载体记录(如石笋 $\delta^{18}\text{O}$),本质上反映了西风带位置的南北移动。我们推论,当温度较高时,西风带位置偏北,此时来自高纬区域的远源水汽份额增加, $\delta^{18}\text{O}_p$ 偏负,石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 也相应偏负;当温度降低时,西风带位置偏南,中、低纬区域的近源水汽份额增多, $\delta^{18}\text{O}_p$ 偏正,石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 偏正。这种解释模式,可以用来更好地理解科桑洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值在相对温暖的早一中全新世^[44]偏负于相对寒冷的晚全新世^[17];这也说明,认为早-中全新世期间 $\delta^{18}\text{O}$ 值偏负的科桑洞石笋记录指示了亚洲季风深入到西北干旱区^[17],是值得商榷的。

近来的研究也表明,中国季风区 $\delta^{18}\text{O}_p$ 和石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 在短时间尺度上的变化,实际上是响应于ENSO循环(环流效应),其偏负和偏正变化是由远源和近源水汽输送的不同导致的^[23, 45];或者是不同水汽的降水和水汽输送路径变化所导致的^[46]。在长时间尺度上,现代间冰期(全新世)期间的季风区石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录,也被更多的认为是记录了印度夏季风的变化^[47-48],而非东亚夏季风的变化。末次间冰期时,东亚季风区石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录与黄土记录的差异,进一步说明了石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 可能并不是一个单纯的东亚夏季风强度的指示器^[49]。最近发表的来自中纬度地区的西班牙Eagle洞的水汽追踪结果,也表明了不同来源的水汽对于 $\delta^{18}\text{O}_p$ 和洞穴石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 的重要影响^[50]。实际上,天山地区这种水汽来源变化控制 $\delta^{18}\text{O}_p$ 变化的机制,与亚洲季风区 δ

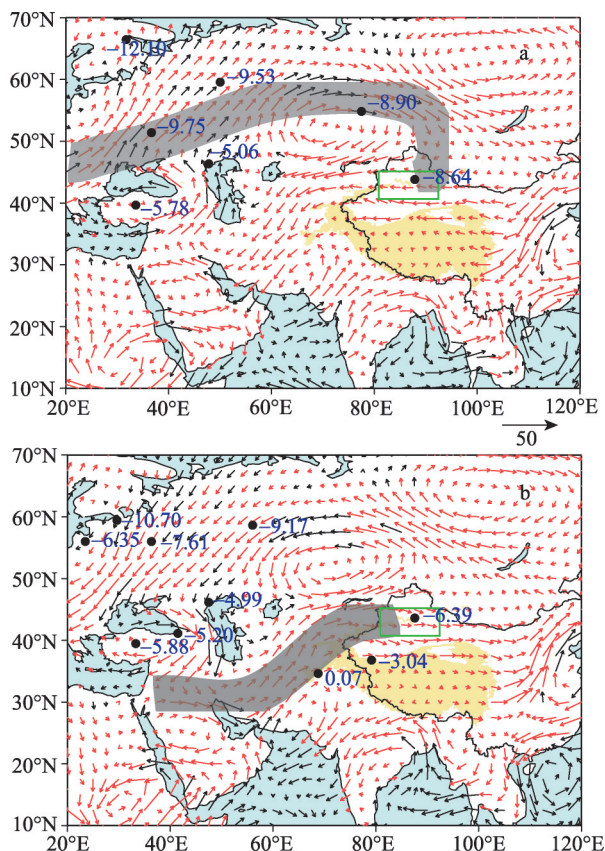


图5 天山地区高温年份(以1997年为代表)和低温年份(以1988年为代表)的暖季(5-9月)相对水汽来源差异及相应的欧亚大陆14个站点的暖季加权平均 $\delta^{18}\text{O}_p$ 值特征(a, 1997年暖季水汽通量减去1988年暖季水汽通量; b, 1988年暖季水汽通量减去1997年暖季水汽通量; 图中红色箭头为通过99%显著性检验的相对水汽变化, 灰色条带展示了相对的主要水汽输送路径, 黑色圆点表示GNIP观测站点, 蓝色数字分别代表相应的1997年(a)和1988年(b)暖季加权平均 $\delta^{18}\text{O}_p$ 值(详细数据见表1和表2), 绿色方框表示本文中的天山地区)

Fig. 5 The differences of water vapor sources of Tianshan Mountains region between warm season of 1997 (warm year) and 1988 (cold year) and the corresponding weighted average warm season $\delta^{18}\text{O}_p$ values of 14 GNIP stations in Eurasia Continent (a, warm season water vapor flux of 1997 minus that of 1988; b, warm season water vapor flux of 1988 minus that of 1997; red arrows demonstrate the relative water vapor changes that passed 99% significant testing, the grey bands indicate the main pathways of relative water vapor sources, the black dots indicate the GNIP stations, the blue numbers indicate the weighted average warm season $\delta^{18}\text{O}_p$ values in 1997 and 1988 (data are shown in Tab. 1 and Tab. 2), and the green boxes indicate the locations of Tianshan Mountains region in this study)

$\delta^{18}\text{O}_p$ 和石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 受控于水汽来源变化的“环流效应”^[45]的基本原理是一致的。因此,在年际至年代际尺度上,天山地区的 $\delta^{18}\text{O}_p$ 变化受控于西风带位置的南北摆动,可称之为 $\delta^{18}\text{O}_p$ 变化的“西风摆动模式”。

6 结论

为了更好地理解干旱区 $\delta^{18}\text{O}_p$ 的变化特征和可能的变化机制,本文利用GNIP提供的亚洲中部干旱区观测序列最长且最完整的乌鲁木齐 $\delta^{18}\text{O}_p$ 数据(1986-2003年),结合和田及欧亚大陆其他12个GNIP站点的数据,并与邻近的4支天山冰芯记录的近40~50年 $\delta^{18}\text{O}_p$ 序列进行对比,主要分析了年内和年际尺度上 $\delta^{18}\text{O}_p$ 变化与温度之间的相关关系,探讨天山地区 $\delta^{18}\text{O}_p$ 的变化机制,得到的主要认识如下:

(1) 年内尺度上,研究区 $\delta^{18}\text{O}_p$ 值在夏季偏正、冬季偏负,幅度可达15‰;乌鲁木齐与和田的 $\delta^{18}\text{O}_p$ 与月均温度的相关系数分别为 $r = 0.99$ ($n = 12$, $p < 0.01$)和 $r = 0.97$ ($n = 11$, $p < 0.01$),为显著正相关关系,说明 $\delta^{18}\text{O}_p$ 受控于年内尺度的“温度效应”。然而,该区域石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录在间冰期时偏负而冰期时偏正的变化特征(变幅约6‰),显然不能用年内尺度上 $\delta^{18}\text{O}_p$ 随温度升高而偏正的模式来解释,这应当是由于石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 不能记录年内尺度的 $\delta^{18}\text{O}_p$ 信号所造成的。

(2) 年际尺度上,乌鲁木齐的加权平均年 $\delta^{18}\text{O}_p$ 与年均温度为弱的负相关($r = -0.28$, $n = 11$),而加权平均暖季(5-9月) $\delta^{18}\text{O}_p$ 与暖季平均温度的负相关关系更强($r = -0.44$, $n = 11$);此外,天山中部和东部近40~50年的4支冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 记录,都表现出与区域温度的反向变化,说明了该区域年际尺度上的 $\delta^{18}\text{O}_p$ 与温度之间的负相关关系,是一种客观存在的事实。

(3) 年际尺度上,天山地区 $\delta^{18}\text{O}_p$ 与温度的反向变化,本质上是由西风带位置南北摆动引起的水汽来源的变化导致的:在温度较高的1997年,西风带位置偏北,来自高纬区域的 $\delta^{18}\text{O}$ 值偏负的远源水汽增多,导致研究区的 $\delta^{18}\text{O}_p$ 值偏负;在温度较低的1988年,西风带位置南移,来自中、低纬区域的 $\delta^{18}\text{O}$ 值偏正的近源水汽份额增加,导致研究区的 $\delta^{18}\text{O}_p$ 值也偏正。 $\delta^{18}\text{O}_p$ 变化的“西风摆动模式”,对理解天山地区石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 等古气候记录和区域气候变化历史,具有更直接的参考价值。需要指出的是,由于现有的 $\delta^{18}\text{O}_p$ 观测时间序列较短,今后进一步加强对 $\delta^{18}\text{O}_p$ 的观测,理解更长时间尺度的 $\delta^{18}\text{O}_p$ 记录与气候要素的关系,无疑具有重要的价值。

参考文献(References)

- [1] Rhodes T E, Gasse F, Lin R et al. A Late Pleistocene-Holocene lacustrine record from Lake Manas, Zunggar (northern Xinjiang, western China). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1996, 120(1/2): 105-121.
- [2] Herzschuh U. Palaeo-moisture evolution in monsoonal Central Asia during the last 50,000 years. *Quaternary Science Reviews*, 2006, 25: 163-178.
- [3] Chen Fahu, Yu Zicheng, Yang Meilin et al. Holocene moisture evolution in arid central Asia and its out-of-phase relationship with Asian monsoon history. *Quaternary Science Reviews*, 2008, 27(3/4): 351-364.
- [4] Chen Fahu, Chen Jianhui, Holmes J et al. Moisture changes over the last millennium in arid central Asia: A review, synthesis and comparison with monsoon region. *Quaternary Science Reviews*, 2010, 29(7/8): 1055-1068.
- [5] Yang Xiaoping, Scuderi L, Paillou P et al. Quaternary environmental changes in the drylands of China: A critical review. *Quaternary Science Reviews*, 2011, 30: 3219-3233.
- [6] Huang Wei, Chen Fahu, Feng Song et al. Interannual precipitation variations in the mid-latitude Asia and their association with large-scale atmospheric circulation. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(32): 3962-3968.
- [7] Chen Jianhui, Chen Fahu, Feng Song et al. Hydroclimatic changes in China and surrounding areas during the Medieval

- Climate Anomaly and Little Ice Age: Spatial patterns and possible mechanisms. *Quaternary Science Reviews*, 2015, 107: 98-111.
- [8] Chen Fahu, Chen Jianhui, Huang Wei. A discussion on the westerly-dominated climate model in mid-latitude Asia during the modern interglacial period. *Earth Science Frontiers*, 2009, 16(6): 23-32. [陈发虎, 陈建徽, 黄伟. 中纬度亚洲现代间冰期气候变化的“西风模式”讨论. *地学前缘*, 2009, 16(6): 23-32.]
- [9] Thompson L G, Yao Tandong, Davis M E et al. Tropical climate instability: The Last Glacial Cycle from a Qinghai-Tibetan ice core. *Science*, 1997, 276: 1821-1825.
- [10] Wang Yongjin, Cheng Hai, Edwards R L et al. A high-resolution absolute-dated Late Pleistocene Monsoon Record from Hulu Cave, China. *Science*, 2001, 294: 2345-2348.
- [11] McCarroll D, Loader N J. Stable isotopes in tree rings. *Quaternary Science Reviews*, 2004, 23: 771-801.
- [12] Leng M J, Marshall J D. Palaeoclimate interpretation of stable isotope data from lake sediment archives. *Quaternary Science Reviews*, 2004, 23: 811-831.
- [13] Zheng Shuhui, Hou Fagao, Ni Baoling. Hydrogen and oxygen isotopes compositions of atmospheric precipitation in China. *Chinese Science Bulletin*, 1983, 13: 801-806. [郑淑蕙, 侯发高, 倪葆龄. 中国大气降水中的氢氧同位素研究. *科学通报*, 1983, 13: 801-806.]
- [14] Wei Keqin, Lin Ruifen. The influence of the monsoon climate on the isotopic composition of precipitation in China. *Geochemica*, 1994, 23(1): 33-41. [卫克勤, 林瑞芬. 论季风气候对我国雨水同位素组成的影响. *地球化学*, 1994, 23(1): 33-41.]
- [15] Yao Tandong, Masson V, Jouzel J et al. Relationships between ^{18}O in precipitation and surface air temperature in the Urumqi River Basin, east Tianshan Mountains, China. *Geophysical Research Letters*, 1999, 26(23): 3473-3476.
- [16] Liu Zhongfang, Tian Lide, Yao Tandong. Spatial distribution of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation over China. *Chinese Science Bulletin*, 2009, 54(6): 804-811. [刘忠方, 田立德, 姚檀栋等. 中国大气降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的空间分布. *科学通报*, 2009, 54(6): 804-811.]
- [17] Cheng Hai, Zhang Pingzhong, Spöt C et al. The climatic cyclicity in semiarid-arid central Asia over the past 500,000 years. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39: L01705.
- [18] Wang Wei, Feng Zhaodong. Holocene moisture evolution across the Mongolian Plateau and its surrounding areas: A synthesis of climatic records. *Earth-Science Reviews*, 2013, 122: 38-57.
- [19] Hong Bing, Gasse F, Uchida M et al. Increasing summer rainfall in arid eastern-central Asia over the past 8500 years. *Scientific Reports*, 2013, 4(5279): 1-10.
- [20] Long Hao, Shen Ji, Tsukamoto S et al. Dry early Holocene revealed by sand dune accumulation chronology in Bayanbulak Basin (Xinjiang, NW China). *The Holocene*, 2014, 24(5): 614-626.
- [21] Johnson K R, Ingram B L. Spatial and temporal variability in the stable isotope systematics of modern precipitation in China: implications for paleoclimate reconstructions. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 220: 365-377.
- [22] Luo Weijun, Wang Shijie. Transmission of oxygen isotope signals of precipitation-soil water-drip water and its implications in Liangfeng Cave of Guizhou, China. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53(21): 3364-3370.
- [23] Tan Ming. Trade-wind driven inverse coupling between stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ from monsoon region of China and large scale temperature: Circulation effect on decadal to precessional timescales. *Quaternary Sciences*, 2011, 31(6): 1086-1097. [谭明. 信风驱动的中国季风区石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 与大尺度温度场负耦合: 从年代际变率到岁差周期的环流效应. *第四纪研究*, 2011, 31(6): 1086-1097.]
- [24] Genty D, Labuhn I, Hoffmann G et al. Rainfall and cave water isotopic relationships in two South-France sites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2014, 131: 323-343.
- [25] Yang Lianmei. Climate change of extreme precipitation in Xinjiang. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(4): 577-583. [杨莲梅. 新疆极端降水的气候变化. *地理学报*, 2003, 58(4): 577-583.]
- [26] Dai Xingang, Ren Yiyong, Chen Hongwu. Multi-scale feature of climate and climate shift in Xinjiang over the past 50 years. *Acta Meteorologica Sinica*, 2007, 65(6): 1003-1010. [戴新刚, 任宜勇, 陈洪武. 近50年新疆温度降水配置演变及其尺度特征. *气象学报*, 2007, 65(6): 1003-1010.]
- [27] Shi Yafeng, Shen Yongping, Kang Ersi et al. Recent and future climate change in Northwest China. *Climatic Change*, 2007, 80: 379-393.
- [28] Dai Xingang, Li Weijing, Ma Zhuguo. The variation characteristics of water vapor source in Xinjiang in recent decades. *Progress in Natural Science*, 2006, 16(12): 1651-1656. [戴新刚, 李维京, 马柱国. 近几十年新疆水汽源地变化特征. *自然科学进展*, 2006, 16(12): 1651-1656.]
- [29] Tian Lide, Yao Tandong, MacClune K et al. Stable isotopic variations in west China: A consideration of moisture sources. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112: D10112, doi: 10.1029/2006JD007718.

- [30] Li Hui, Zhou Hongfei. Variation characteristics of δD and $\delta^{18}O$ stable isotopes in the precipitation of Urumqi. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2007, 21(9): 46-50. [李晖, 周宏飞. 乌鲁木齐地区大气降水中 δD 和 $\delta^{18}O$ 的变化特征. 干旱区资源与环境, 2007, 21(9): 46-50.]
- [31] Aizen V B, Aizen E M, Joswlad D R et al. Climatic and atmospheric circulation pattern variability from ice-core isotope/geochemistry records (Altai, Tien Shan and Tibet). *Annals of Glaciology*, 2006, 43: 49-60.
- [32] Hou Shugui, Qin Dahe, Mayewski P A et al. Climatological significance of $\delta^{18}O$ in precipitation and ice core: A case study at the head of the Urumqi River, Tien Shan, China. *Journal of Glaciology*, 1999, 45(151): 517-523.
- [33] Feng Fang, Li Zhongqing, Zhang Mingjun et al. Deuterium and oxygen 18 in precipitation and atmospheric moisture in the upper Urumqi River Basin, eastern Tianshan Mountains. *Environmental Earth Sciences*, 2013, 68(4): 1199-1209.
- [34] Hou Shugui, Ren Jiawen, Qin Dahe. Modification of three ice core $\delta^{18}O$ records from area of high melt. *Annals of Glaciology*, 2006, 43: 172-176.
- [35] Wang Jiao, Ren Yiyong. Study on the change of precipitation and general circulation in Xinjiang. *Arid Zone Research*, 2005, 22(3): 326-331. [王娇, 任宜勇. 新疆降水与环流场演变研究. 干旱区研究, 2005, 22(3): 326-331.]
- [36] Hou Shugui, Qin Dahe, Li Zhongqin et al. Present environment processes of ice core $\delta^{18}O$ records of the No.1 glaciers at the headwater of Urumqi River, Xinjiang, China. *Geochimica*, 1998, 27(2): 108-116. [侯书贵, 秦大河, 李忠勤等. 乌鲁木齐河源1号冰川冰芯 $\delta^{18}O$ 记录的现代环境过程分析. 地球化学, 1998, 27(2): 108-116.]
- [37] Zhao Chuancheng, Wang Yan, Ding Yongjian et al. Spatial-temporal variations of temperature and precipitation in northern China in recent 50 years. *Plateau Meteorology*, 2011, 30(2): 385-390. [赵传成, 王雁, 丁永建等. 西北地区近50年气温及降水的时空变化. 高原气象, 2011, 30(2): 385-390.]
- [38] Song Linlin, Hou Shugui, Liu Yaping. $\delta^{18}O$ record of the Miaoergou ice core from the Karlik mountains of the east Tianshan since 1953. *Journal of Lanzhou University: Natural Sciences*, 2011, 47(5): 36-41. [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 $\delta^{18}O$ 记录. 兰州大学学报: 自然科学版, 2011, 47(5): 36-41.]
- [39] Chen Fahu, Wang Jinsong, Jin Liya et al. Rapid warming in mid-latitude central Asia for the past 100 years. *Frontier of Earth Science in China*, 2009, 3(1): 42-50.
- [40] Cheng Hai, Edwards R L, Wang Xianfeng et al. Oxygen isotope records of the stalagmites from southern China. *Quaternary Sciences*, 2005, 25(2): 157-163. [程海, 艾思本, 王先锋等. 中国南方石笋氧同位素记录的重要意义. 第四纪研究, 2005, 25(2): 157-163.]
- [41] Wang Xu, Wang Tie, Ma Yu. Characteristics of water vapour transfer in upper-middle troposphere over Xinjiang. *Xinjiang Meteorology*, 2001, 24(2): 1-3. [王旭, 王铁, 马禹. 新疆对流层中上部水汽输送特征研究. 新疆气象, 2001, 24(2): 1-3.]
- [42] Liu Rui, Yang Qing. Calculation and analysis of water vapor transportation and its net income in Xinjiang. *Journal of Desert Research*, 2010, 30(5): 1221-1228. [刘蕊, 杨青. 新疆大气水汽通量及其净收支的计算和分析. 中国沙漠, 2010, 30(5): 1221-1228.]
- [43] Shi Yuguang, Sun Zhaobo. Climate characteristics of water vapor transportation and its variation over Xinjiang. *Plateau Meteorology*, 2008, 27(2): 310-319. [史玉光, 孙照渤. 新疆水汽输送的气候特征及其变化. 高原气象, 2008, 27(2): 310-319.]
- [44] Marcott A S, Shakun J D, Clark P U et al. A reconstruction of regional and global temperature for the past 11,300 years. *Science*, 2013, 339: 1198-1201.
- [45] Tan Ming. Circulation effect: response of precipitation $\delta^{18}O$ to the ENSO cycle in monsoon regions of China. *Climate Dynamics*, 2014, 42: 1067-1077.
- [46] Dayem K E, Molnar P, Battisti D S et al. Lessons learned from oxygen isotopes in modern precipitation applied to interpretation of speleothem records of paleoclimate from eastern Asia. *Earth and Planetary Science Letters*, 2010, 295: 219-230.
- [47] Yang Xunlin, Liu Jianbao, Liang Fuyuan et al. Holocene stalagmite $\delta^{18}O$ records in the East Asian monsoon region and their correlation with those in the Indian monsoon region. *The Holocene*, 2014, 24(12): 1657-1664.
- [48] Chen Fahu, Chen Xuemei, Chen Jianhui et al. Holocene vegetation history, precipitation changes and Indian Summer Monsoon evolution documented from sediments of Xingyun Lake, south-west China. *Journal of Quaternary Science*, 2014, 29(7): 661-674.
- [49] Rao Zhiguo, Liu Xiaokang, Hua Hui et al. Evolving history of the East Asian summer monsoon intensity during the MIS5: inconsistent records from Chinese stalagmites and loess deposits. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 24(12): 1657-1664. doi: 10.1007/s12665-014-3681-z.
- [50] Krklec K, Domínguez-Villar D. Quantification of the impact of moisture source regions on the oxygen isotope composition of precipitation over Eagle Cave, central Spain. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2014, 134: 39-54.

Variations in the oxygen isotopic composition of precipitation in the Tianshan Mountains region and their significance for the Westerly circulation

LIU Xiaokang, RAO Zhiguo, ZHANG Xiaojian, HUANG Wei, CHEN Jianhui, CHEN Fahu
(Key Laboratory of Western China's Environmental Systems (Ministry of Education), Lanzhou University,
Lanzhou 730000, China)

Abstract: Proxy records of the oxygen isotopic composition of meteorological precipitation ($\delta^{18}\text{O}_p$) preserved in archives such as ice cores, lacustrine carbonates and stalagmite calcite are important for paleoclimatic studies. Therefore, knowledge of the variations and controlling mechanisms of modern $\delta^{18}\text{O}_p$ on different time scales is necessary. Here, we investigate the linear correlations between $\delta^{18}\text{O}_p$ and corresponding temperature and precipitation on monthly and inter-annual timescales, using data from the Urumqi (1986-2003) and Hotan stations of the Global Network of Isotopes in Precipitation (GNIP), and $\delta^{18}\text{O}$ data from 4 ice cores in the adjacent Tianshan Mountains. Consistent with previous reported results, modern $\delta^{18}\text{O}_p$ variations on a seasonal time scale in the Tianshan region are mainly controlled by a 'temperature effect' (indicated by a significant positive correlation between $\delta^{18}\text{O}_p$ and temperature), with more positive $\delta^{18}\text{O}_p$ values occurring in summer. However, on an inter-annual timescale, there is a weak inverse correlation between weighted average annual $\delta^{18}\text{O}_p$ and annual average temperature at Urumqi. This finding is supported by the inversely varying trends of $\delta^{18}\text{O}$ data from 4 ice cores in the central and eastern Tianshan Mountains compared to annual average temperatures in the same region during the past 40-50 years. The data from Urumqi station and the 4 ice cores demonstrate that the inverse correlation between $\delta^{18}\text{O}_p$ and temperature on inter-annual to decadal time scales is genuine. Analysis of water vapor sources and pathways for the warm year of 1997 and the cold year of 1988 reveal that more water vapor for the Tianshan area was derived from long-distance transport from high-latitude sources than during the warm year of 1997; and that more water vapor was transported from more proximal sources from mid- to low-latitude areas during the cold year of 1988. In addition, the $\delta^{18}\text{O}_p$ values are more negative in the high latitude areas than those in mid- to low-latitude areas in the Eurasian continent at the upper wind direction of Tianshan Mountains region, according to the weighted averaged warm season (May to September) $\delta^{18}\text{O}_p$ values for 14 GNIP stations in the years 1997 and 1988. Due to the distribution of $\delta^{18}\text{O}_p$ within the Eurasian continent, the relative shift of water vapor sources between warm and cold years convincingly explains the observed variations of $\delta^{18}\text{O}_p$ in the Tianshan area. Therefore, we conclude that variations in $\delta^{18}\text{O}_p$ in the Tianshan Mountains region are mainly controlled by changes in water vapor sources which are ultimately caused by northward and southward shifts in the Westerly circulation.

Keywords: Tianshan Mountains; Urumqi station; $\delta^{18}\text{O}_p$; water vapor sources; Westerly circulation