

西北干旱区降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 变化特征及其水汽输送李小飞¹, 张明军^{1,2*}, 李亚举¹, 王圣杰¹, 黄小燕¹, 马潜¹, 马雪宁¹

(1. 西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070; 2. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冰冻圈科学国家重点实验室/天山冰川观测试验站, 兰州 730000)

摘要: 以 IAEA/WMO 提供的乌鲁木齐 (1986~2003 年)、张掖 (1986~2003 年) 和田 (1988~1992 年) 大气降水稳定同位素观测数据和气象要素为基础, 通过回归分析得到西北干旱区大气降水方程, 并对降水中稳定同位素的时空变化特征及其与气温和降水量的相关关系进行了分析; 采用 HYSPLIT4.9 模型对 3 个站点水汽来源进行追踪, 建立了西北干旱区的水汽输送模式, 并对冰冻圈 $\delta^{18}\text{O}$ 的记录进行了探讨。结果表明, 该区大气降水方程为 $\delta\text{D} = 7.24\delta^{18}\text{O} + 1.96\text{‰}$, 局地蒸发较强烈; 乌鲁木齐、张掖与和田降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 分别波动于 $-20.58\text{‰} \sim -5.4\text{‰}$ 、 $-18.58\text{‰} \sim -2.46\text{‰}$ 和 $-20.33\text{‰} \sim -0.01\text{‰}$, 均表现出冬低夏高的特点, 而 d 值则表现为冬高夏低; 从空间分布来看, $\delta^{18}\text{O}$ 张掖最高, 和田次之, 乌鲁木齐最低, d 值则乌鲁木齐最高, 和田次之, 张掖最低; 降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 温度效应显著, 相关系数分别为 0.85、0.81、0.86, 而降水量效应不存在; 水汽来源轨迹表明, 该区全年有两条水汽路径, 分别为西风带输送的大西洋海洋水汽以及极地北冰洋地区水汽, 受其影响 $\delta^{18}\text{O}$ 冬半年较低, 夏半年则较高; 由于冰冻圈环境的独特性, 该区冰川雪冰中 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化与相应的气象站记录对应关系良好, 很好地反映着气温的变化。

关键词: 稳定同位素; 水汽来源; 大气降水; 冰冻圈; 西北干旱区

中图分类号: X142; X143 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)03-0711-09

Characteristics of $\delta^{18}\text{O}$ in Precipitation and Moisture Transports over the Arid Region in Northwest ChinaLI Xiao-fei¹, ZHANG Ming-jun^{1,2}, LI Ya-ju¹, WANG Sheng-jie¹, HUANG Xiao-yan¹, MA Qian¹, MA Xue-ning¹

(1. College of Geography and Environment Sciences, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China; 2. State Key Laboratory of Cryospheric Sciences /Tianshan Glaciological Station, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Based on the observed data of stable isotopes in precipitation and meteorological statistics at Ürümqi (1986–2003), Zhangye (1986–2003), and Hotan (1988–1992) from IAEA/WMO, the precipitation equation of arid region in Northwest China was calculated through the regression analysis, and the characteristics of stable isotopic in precipitation, as well as the correlation between stable isotopic and meteorological records, were analyzed. The water vapor source of the three sites was tracked by the HYSPLIT4.9 model, and water vapour transmission regime of arid region in Northwest China was established, while the record of $\delta^{18}\text{O}$ in cryosphere was discussed. Results showed that the precipitation equation of $\delta\text{D} = 7.24\delta^{18}\text{O} + 1.96\text{‰}$ indicates intense evaporation; $\delta^{18}\text{O}$ values at Ürümqi, Zhangye and Hotan fluctuates at $-20.58\text{‰} \sim -5.4\text{‰}$, $-18.58\text{‰} \sim -2.46\text{‰}$ and $-20.33\text{‰} \sim -0.01\text{‰}$, respectively. The $\delta^{18}\text{O}$ value is low in winter and high in summer, but the values of d -excess is on the contrary; The spatial distribution shows that $\delta^{18}\text{O}$ value at Zhangye is highest, followed by Hotan, and the lowest is at Ürümqi; The highest of d -excess value is at Ürümqi, followed by Hotan, the lowest is at Zhangye; The temperature effect of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation is significant with the correlation coefficients of 0.85, 0.81 and 0.86, respectively, and the rainfall effect does not exist; The modeled trajectory of vapor source showed there are two main paths all the year, which are from the Atlantic Ocean via Westerlies and the Arctic region, respectively, influence by different vapor sources, the seasonality of $\delta^{18}\text{O}$ values lower in winter, higher in summer; In addition, according to the cryospheric environment, the correlation between $\delta^{18}\text{O}$ in snow pack or ice core and the corresponding meteorological station record was significant, which reflects the variation of temperature efficiently.

Key words: stable isotopes; water vapour source; precipitation; cryosphere; arid region in Northwest China

水体中的稳定同位素作为水汽来源及运动路径 的自然示踪剂 其组成及变化规律能有效的反演天

收稿日期: 2011-05-20; 修订日期: 2011-08-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(41161012); 教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-10-0019); 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2010CB951003)

作者简介: 李小飞(1985~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为环境地球化学, E-mail: geoli2010@163.com

* 通讯联系人, E-mail: mjzhang2004@163.com

气系统及大气环流过程^[1]. 降水是水资源的主要输入因子, 对其稳定同位素组成及比率大小的分析有利于人们了解和认识不同地理区域的水汽来源^[2], 也可以反映大气水汽循环的整个历史^[3,4].

大气降水中稳定同位素的研究在国外开始比较早, 利用稳定同位素示踪法来追踪水汽来源也是国际上研究的热点^[5~9]. 我国大气降水中稳定同位素研究于 1989 年在青藏高原展开^[10], 成果丰硕^[11~15]. 至今, 针对整个西北地区的水汽输送过程、变化规律和机制的研究也已取得了一些重要的研究进展^[1,16~20]. 然而, 对于西北干旱区这一特殊地理区域的研究多集中于小尺度局部地区(德令哈^[21]、祁连山^[22]、乌鲁木齐^[23,24]). 关于该区域大尺度、大空间降水稳定同位素的研究却很少; 由于西北干旱区水循环过程的复杂性和独特性, 因此分析其大气降水中的环境同位素组成, 掌握其时空分布规律, 对于探清我国境内大气降水同位素的时空分布规律具有重要意义; 其次, 不同的水汽来源与输送过程所导致的降水中稳定同位素的变化可能会影响冰芯气候记录^[25], 所以开展西北干旱区降水中稳定同位素与水汽来源关系研究也是该区冰芯研究不断发展的需要; 在最近的研究中, 陈中笑等^[26]通过对中国降水稳定同位素的时空分布特征及其影响因素的分析发现, 同处西北的乌鲁木齐、和田和张掖 $\delta^{18}\text{O}$ 差异较大, $\delta^{18}\text{O}$ 与 d 的关系以及水汽来源影响也存在较多疑问. 基于此, 本研究利用国际原子能机构(International Atomic Energy Agency, IAEA)和世界气象组织(World Meteorological Organization, WMO)公布的张掖、和田及乌鲁木齐三站的数据, 分析了西北干旱区降水中稳定同位素的时空变化特征和不同控制因子对降水中稳定同位素的影响, 探讨了它们与水汽来源的关系以及雪层、冰芯中 $\delta^{18}\text{O}$ 的记录. 对于深入探讨区域水分来源变化及其水文循环过程研究具有积极的意义, 将有助于进一步深刻明晰干旱区的水循环特征.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

西北干旱区是指北纬 35° 以北、东经 106° 以西的广大内陆区, 包括新疆维吾尔自治区、青海省的昆仑山以北、日月山以西的海西和北二自治州, 甘肃省乌鞘岭以西河西走廊的酒泉、张掖和武威三地区, 内蒙古自治区贺兰山以西的阿拉善盟, 总面积 $2.3428 \times 10^6 \text{ km}^2$, 占全国国土面积的 24.5%; 从北

向南, 依次分布有阿尔泰山、天山、帕米尔高原、喀喇昆仑山、昆仑山和祁连山等(图 1), 它们拦截西风和南亚季风带来的水汽, 形成较多的降水和数量众多的冰川, 孕育了相对稳定的河川径流, 成为我国西北干旱地区水资源的重要组成部分^[27].

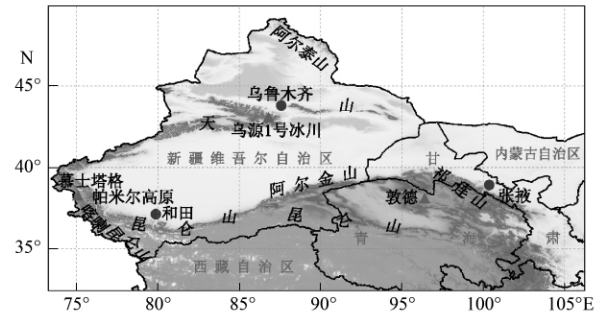


图 1 研究区域概况

Fig. 1 Location of the study area

1.2 数据来源和分析方法

IAEA/WMO 在我国西北干旱区设有 3 个观察站点: 张掖($38^\circ55' \text{ N}$, $100^\circ25' \text{ E}$) 位于河西走廊中部, 属于典型的温带大陆性干旱气候; 和田($37^\circ07' \text{ N}$, $79^\circ55' \text{ E}$) 位于新疆西南部, 昆仑山(中段)北麓塔里木盆地以南, 属于暖温带极端干旱荒漠气候, 全年干旱少雨、多风沙; 乌鲁木齐($43^\circ46' \text{ N}$, $87^\circ37' \text{ E}$) 位于新疆中部, 地处天山山脉北麓、准噶尔盆地南缘, 属中温带大陆性干旱气候. 张掖(1986~2003 年)、和田(1988~1992 年)和乌鲁木齐站(1986~2003 年)降水同位素资料(不完全统计)和气象要素分别来自全球降水同位素观测网(Global Network of Isotope in Precipitation, GNIP)和相关气象台站, 观测网中各个观测点数据主要包括降水中 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的月平均值以及观测站点降水量、气温、水汽压以及经纬度等信息. 氢氧稳定同位素的比率以相对于标准平均大洋水(standard mean ocean water, SMOW)的千分差, 即国际规定统一采用待测样品中某元素的同位素比值与标准同种同位素的相对千分差作为量度, 表示为如下形式:

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

式中 $R_{\text{样品}}$ 为降水、雪层或冰芯样中 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 的比值, R_{SMOW} 为 SMOW 中 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 的比值.

1.3 气流轨迹分析

气流轨迹是指大气气团在一定时间内的运动路径, 可以用来分析降水气团的来源和传输途径^[28]. 文中的空气轨迹采用美国国家海洋与大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration,

NOAA) 空气资源实验室 (air resources laboratory, ARL) 开发的混合单粒子拉格朗日积分轨迹模型 (hybrid single particle lagrangian integrated trajectory model, HYSPLIT) 进行计算. HYSPLIT 模型使用的气象资料来自于美国国家环境预报中心 (National Centers for Environmental Prediction, NCEP) 的全球再分析资料 (global reanalysis). 该轨迹包括气团水平和垂直两方向的运移路径.

2 结果与分析

2.1 大气降水线

在全球尺度下, 大气降水中 δD 与 $\delta^{18}\text{O}$ 之间的关系——全球大气降水线 (global meteoric water line, GMWL) 的关系表现为:

$$\delta\text{D} = 8.0\delta^{18}\text{O} + 10.0\text{‰} \quad (2)$$

大气水线的斜率反映两类稳定同位素 D 和 ^{18}O 分馏速率的对比关系, 常数项指示气对平衡状态的偏离程度^[29]. 因此, 大气水线对于研究水循环过程中稳定同位素的变化具有重要意义.

由于影响因素的不同, 各局地大气水线 (local meteoric water line, LMWL) 也不同. 利用 GNIP 在西北干旱区三站点观测到的月大气降水中 δD 与 $\delta^{18}\text{O}$ 构成的局地大气降水线 (图 2) 为:

$$\delta\text{D} = 7.24\delta^{18}\text{O} + 1.96\text{‰} \quad (3)$$

可以看出, 西北干旱区大气水线的斜率和截距均低于全球水线值. 斜率稍小于 8 表明该地区降水的水汽来自于具有不同稳定氧同位素比率的源地, 同时也反映了其降水历经了一定的蒸发过程. 蒸发程度稍大于降雨^[30], 是雨滴在云底相对于干燥的大气发生部分分馏的结果^[2]. 在仅考虑海表面水的蒸发和凝结物降落时 2 个非平衡蒸发过程对 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的影响时, 由于凝结物降落过程中的蒸发速率与温度成正比, δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度增大的方向相同, 即大气水线将沿着稳定同位素比率增大的方向逐渐偏离; 因此温度越高, 湿度越小, 偏离程度就越大, 大气水线的斜率也越小, 截距值也将随着偏离的程度而偏向小值^[31]. 因此, 西北干旱区大气水线较小的斜率和截距值可以较好地反映该区自然地理状况和气象条件.

2.2 大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的时空分布

2.2.1 季节差异

气象条件 (温度、降水量) 是制约降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 大小的重要因素之一^[32]. 因此, 随着气象要素的季节变化, 降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 也会发生相应的变化.

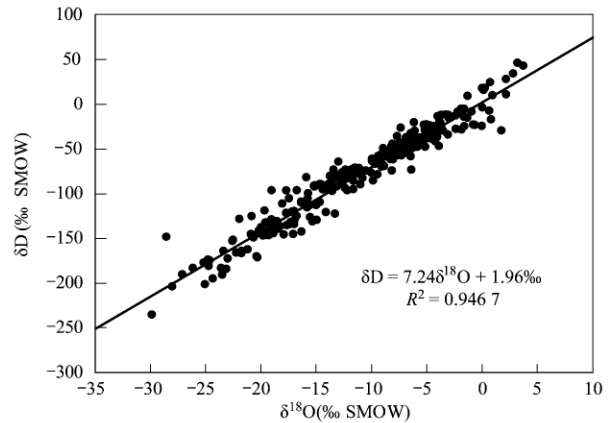


图 2 西北干旱区大气降水 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 相关散布

Fig. 2 Correlated scatters between δD and $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation of arid Northwest China

图 3 表示西北干旱区三站点降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 、 d 、温度和降水量的时空变化. 乌鲁木齐 [图 3 (a)]、张掖 [图 3 (b)] 与和田地区 [图 3 (c)] 降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 值分别介于 $-20.58\text{‰} \sim -5.4\text{‰}$ 、 $-18.58\text{‰} \sim -2.46\text{‰}$ 和 $-20.33\text{‰} \sim -0.01\text{‰}$. $\delta^{18}\text{O}$ 值均表现出冬低夏高的特点, 季节变化明显, 反映了其不同季节具有不同性质的水汽来源地和冷凝温度. 乌鲁木齐降水中 d 值介于 $2.7\text{‰} \sim 21.2\text{‰}$, 平均值为 13.3‰ , 季节变化也较为明显, 表现为冬高夏低; 张掖降水中 d 值季节变化与乌鲁木齐基本相同, 但平均值为 8.0‰ , 比全球平均值 10‰ 偏低; 研究发现, 在天山冰芯中 d 值也有同样的季节变化^[33]. 与乌鲁木齐和张掖不同, 和田地区降水中 d 值季节变化波动较大, 夏秋季节 d 值较高, 其余月份值偏小, 平均值为 8.3‰ . 这表明和田地区与乌鲁木齐和张掖有不同性质的降水水汽来源. d 值的季节变化实际反映了水汽来源地蒸发条件的季节差异. 乌鲁木齐和张掖冬季较高的 d 值可能是由于降雪造成的, 而夏季较低的 d 值则可能是因再蒸发引起; 和田 d 值冬低夏高, 表明夏季受西风带的影响降水量大, d 值带有海洋水汽的特点, 而冬季较低的 d 值可能因较为干燥造成再蒸发增强引起^[26].

2.2.2 空间差异

西北干旱区降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 d 值存在明显的空间变化. 图 3 (d) 为西北干旱区 3 个站点降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 d 值的空间变化. 张掖降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 多年平均值为 -8.8‰ , 和田为 -9.14‰ , 乌鲁木齐为 -12.29‰ . 可以看出张掖与和田 $\delta^{18}\text{O}$ 值明显大于乌鲁木齐, 差异显著; 同时 d 值也有较大的差异, 张掖与和田表现为低值区, 多年平均值分别为 6.2‰ 和 7.9‰ ; 乌

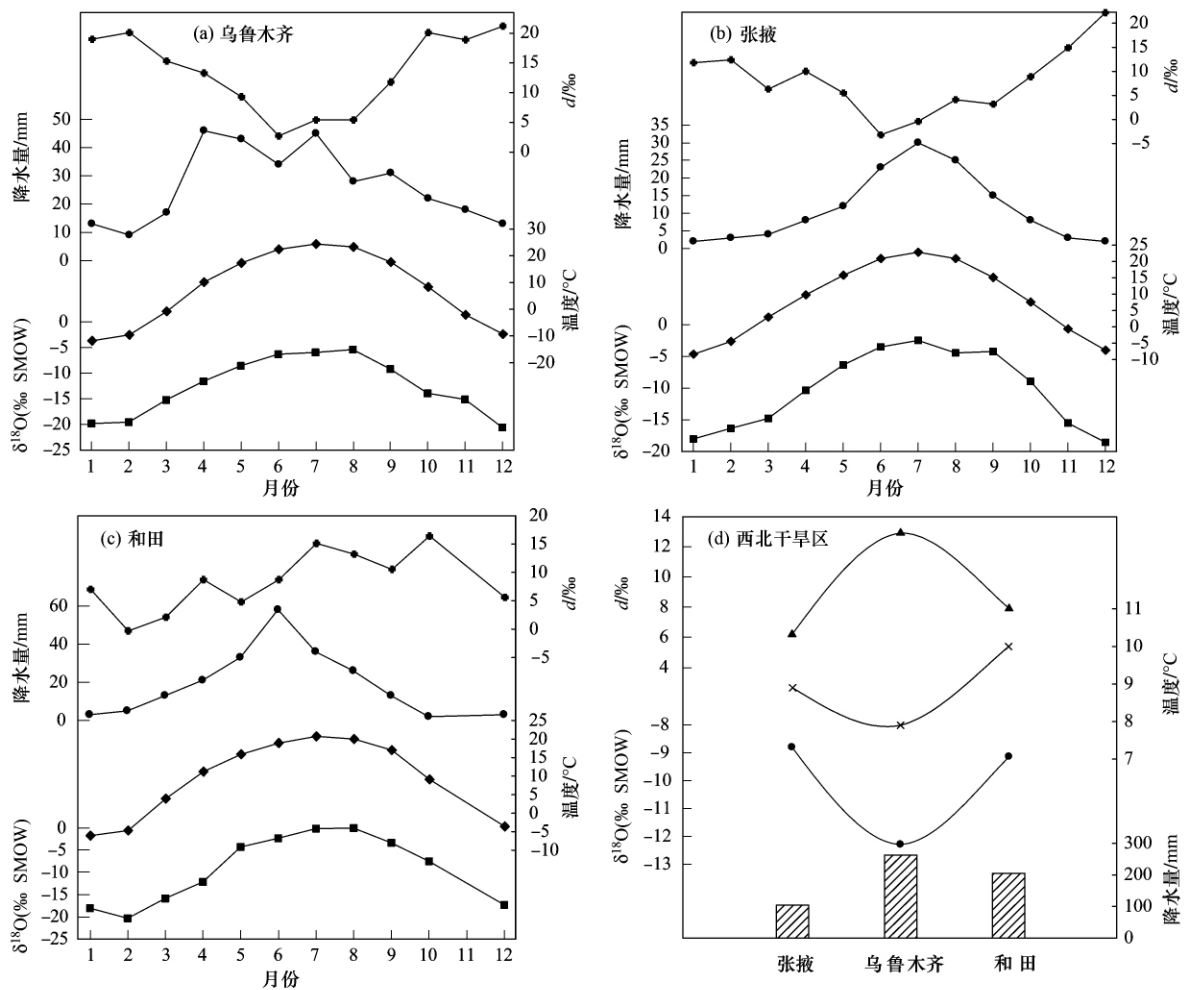


图3 西北干旱区降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 、 d -excess、温度和降水量的时空变化

Fig. 3 Spatial and temporal variations of $\delta^{18}\text{O}$, d -excess, air temperature and precipitation amount in precipitation of arid Northwest China

乌鲁木齐则为高值区,多年平均值为 12.9‰ 。由于西北干旱区年均降水量和水汽压均较小,因此张掖及和田地区偏高的 $\delta^{18}\text{O}$ 表明该地区再蒸发作用较大;再蒸发作用主要表现在,干旱地区表面水体(湖泊、河流等)中 $\delta^{18}\text{O}$ 偏高,使得蒸发水汽中 $\delta^{18}\text{O}$ 亦偏高,因而造成这2个地区 $\delta^{18}\text{O}$ 值相对偏高;而乌鲁木齐相对较低的 $\delta^{18}\text{O}$ 显示出一定的大陆效应作用。 d 值反映了上空水汽团的同位素组成特征,并取决于水汽蒸发源地的状况,如空气相对湿度、海表温度、盐度及风速等^[26,34]。乌鲁木齐降水中较高的 d 值表明了水汽蒸发源地 d 值的特征;受西风带的影响,冬夏季来源于不同源地的水汽长驱直入,同时还受到下垫面水汽补给的影响;由于下垫面水汽蒸发的 d 值本身也较高,进一步加剧了乌鲁木齐 d 值冬高夏低的变化特征;并且,该站点冬、春季降水量占全年降水量比重大,加之冬、春季空气相对湿度较低,使得该

地区整年降水中的 d 值偏高,且远高于其他2个站点。

2.3 大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度和降水量的关系

1964年 Dansgaard^[4]依据当时在大西洋和北极的观测资料,提出了影响降水中稳定同位素的主要因素有:水汽源的情况、温度效应、降水量效应、大陆效应、高度效应和纬度效应等。然而,在影响降水稳定同位素组成的诸多要素中,温度被认为是与之关系最密切的^[35]。气温对降水中稳定同位素产生作用的主要机制是:地面温度在一定程度上与上空降水云团的冷凝温度有对应关系,而后者与降水的 δ 值有直接关系^[36]。因此,降水中稳定同位素的变化主要取决于温度、降水量及距离水汽源的水平垂直距离。

通过对乌鲁木齐、张掖与和田月降水平均 $\delta^{18}\text{O}$ 与月平均温度之间的回归分析,获得直线方程分别为:

$$\delta^{18}\text{O}(\text{‰}) = 0.40t - 15.37$$

$$(\text{乌鲁木齐 } R^2 = 0.7221 \quad n = 117) \quad (4)$$

$$\delta^{18}\text{O}(\text{‰}) = 0.50t - 14.00$$

$$(\text{张掖 } R^2 = 0.6481 \quad n = 73) \quad (5)$$

$$\delta^{18}\text{O}(\text{‰}) = 0.68t - 15.35$$

$$(\text{和田 } R^2 = 0.7336 \quad n = 46) \quad (6)$$

图4表示乌鲁木齐、张掖及和田三站 $\delta^{18}\text{O}$ 与取样温度的相关散布。可以看出,西北干旱区3个观测站与温度均呈正相关关系,最高相关系数可达0.86(和田)。对3个观测站降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与月降水量进行回归,获得直线方程分别为:

$$\delta^{18}\text{O}(\text{‰}) = 0.09p - 14.68$$

$$(\text{乌鲁木齐 } R^2 = 0.1037 \quad n = 117) \quad (7)$$

$$\delta^{18}\text{O}(\text{‰}) = 0.18p - 11.30$$

$$(\text{张掖 } R^2 = 0.1624 \quad n = 73) \quad (8)$$

$$\delta^{18}\text{O}(\text{‰}) = 0.10p - 10.97$$

$$(\text{和田 } R^2 = 0.1096 \quad n = 46) \quad (9)$$

可以看出,各站点降水中的 $\delta^{18}\text{O}$ 没有随着降水量的增大而显著贫化,这表明西北干旱区不存在降水量效应。这一现象符合经典同位素理论:降水量效应在内陆区通常不显著,而主要发生在中低纬度海岸和海岛地区,它的产生与强烈的对流现象相联系^[37,38];而中高纬度大陆内部地区 $\delta^{18}\text{O}$ 受温度影响较大^[39,40]。西北干旱区存在显著的温度效应,并且这种效应远远掩盖了降水量效应,表明整个区域全年表现为中高纬度大陆性气候的特点,同时也反映了该区域特殊的自然地理和气象条件(不受季风影响,夏季较高的降水量也与地形雨相关)。

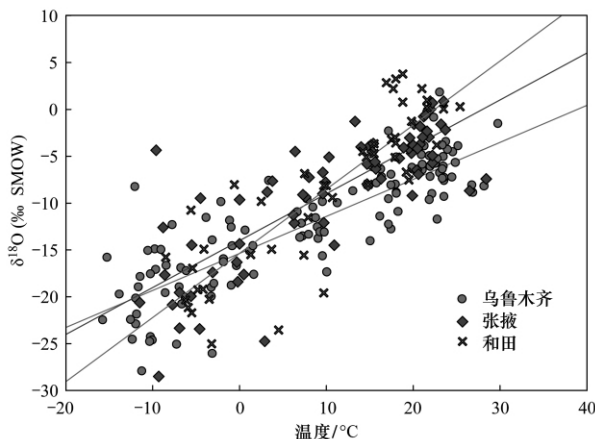


图4 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度的相关散布

Fig. 4 Correlation of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation with air temperature

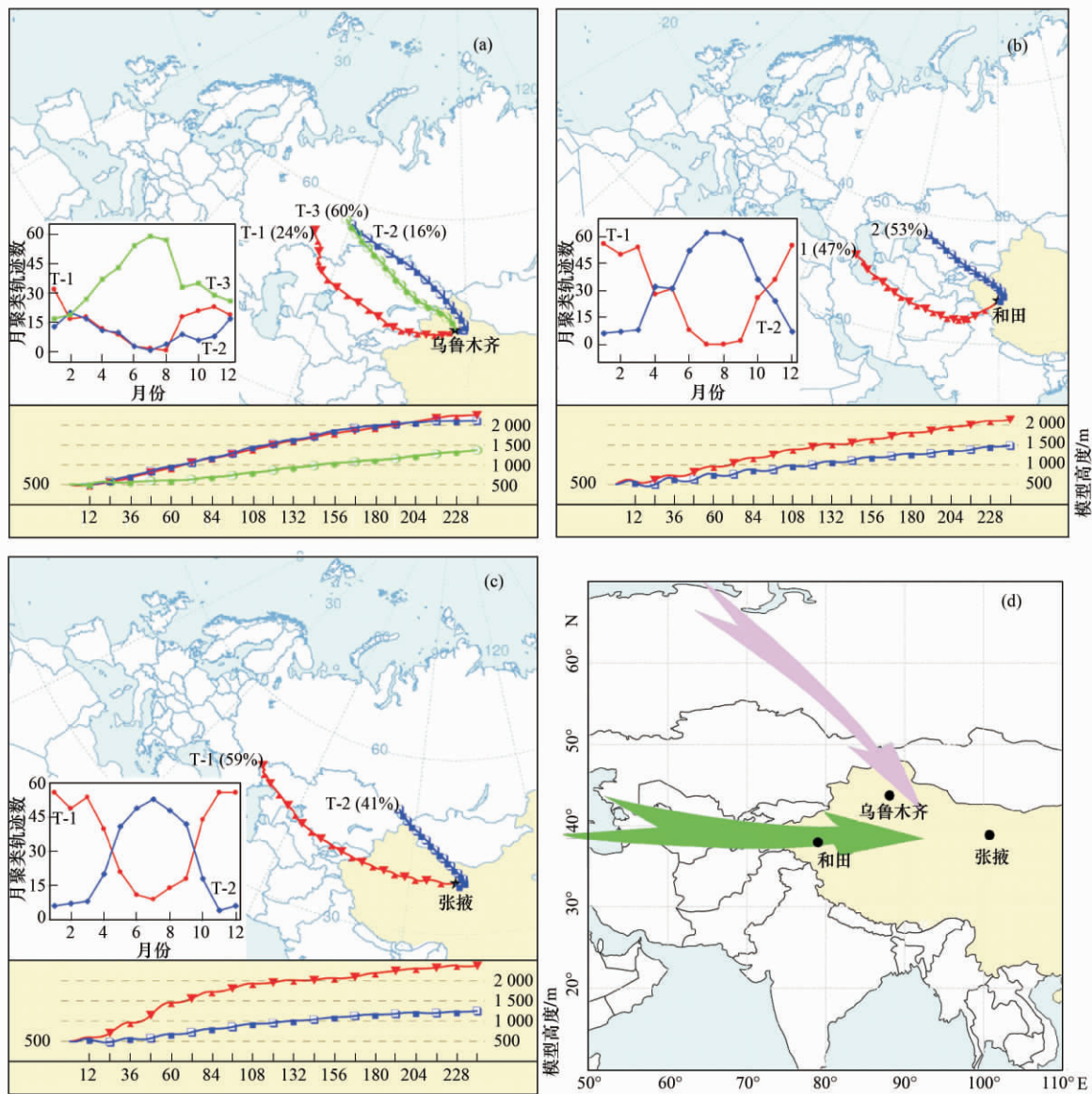
3 讨论

3.1 降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 反映的水汽来源

研究表明,大气降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 不仅与局地气候要素(如气温、降水量等)存在相关关系,同时也与大气水汽输送过程紧密联系^[28,36,41]。由于西北干旱区降水多集中在4~10月,其他月份降水量较少,并且该区4~10月平均温度都在 0°C 以上。在影响降水稳定同位素组成的诸多要素中,温度被认为是与之关系最密切的^[35]。鉴于此,笔者在研究西北干旱区大气降水稳定同位素与水汽来源关系时,将研究时期分为冬半年(11月~次年3月)和夏半年(4~10月)。通过HYSPLIT 4.9模型分别对乌鲁木齐(1986~2003年)、张掖(1986~2003年)与和田(1988~1992年)逐年每天到达的大气降水来源轨迹(10 d回溯)进行了计算,并将全年的气流轨迹进行聚类平均。

乌鲁木齐站全年有3条水汽来源路径[图5(a)]:源自俄罗斯乌拉尔山脉的水汽气流,途经哈萨克斯坦,约有60%和16%通过阿拉山口进入新疆而影响我国西北干旱区形成降水[图5(a), T-2, T-3],且两条轨迹分别来自于不同高度层的水汽气团;受西风带纬向环流影响,来自于西欧及其附近的水汽占24%,途经中亚通过伊犁河谷进入我国西北地区[图5(a), T-1]。三条轨迹中T-1和T-2主要代表了冬半年水汽轨迹,T-3主要代表了夏半年的水汽轨迹。和田站则全年有两条水汽轨迹,且均来自西风带环流带来的黑海、里海及其附近的海源水汽,分别通过伊犁河谷和阿拉山口进入新疆,同时也分属于冬、夏半年[图5(b)]。与和田相似,张掖也有两条水汽来源路径,如图5(c)所示,但不同之处是约有59%的水汽气流源自里海及其附近地区,途经中亚地区由伊犁河谷进入中国境内[图5(c), T-1];另一条则源于中亚东北部边缘与俄罗斯、蒙古和中国边境交界处,沿中蒙边境直达张掖[图5(c), T-2];两条轨迹也分别代表了不同高度层的水汽气团,T-1轨迹代表了冬半年水汽轨迹,T-2代表了夏半年的水汽轨迹。

冬半年,三站降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 值都较低,这是由于重同位素总是优先从水汽中分离出来,随着水汽的运移, δ 值表现为逐渐贫化,同时也反映了来自高纬度的水汽源区。水汽轨迹表明三站大气降水都来自高纬度源于西风带输送的黑海、里海、咸海及附近地区的海源水汽。由于沿途水汽通过降水过程使得水汽中的 $\delta^{18}\text{O}$ 值不断贫化,再加上冬季气温较低,蒸发少,沿途水汽补充较少,使得剩余水汽中 $\delta^{18}\text{O}$ 值相对较低。气团轨迹分析结果与前文冬季较低的



(a) 乌鲁木齐站 2002 ~ 2003 年气流后向轨迹聚类图; (b) 和田站 1991 ~ 1992 年气流后向轨迹聚类图;
(c) 张掖站 2002 ~ 2003 年气流后向轨迹聚类图; (d) 西北干旱区影响稳定同位素的水汽输送模式

图 5 气流后向轨迹聚类图

Fig. 5 Backward trajectories cluster of moisture

δ 值的结论一致。

然而, 夏半年降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 均呈现富集。三站夏半年主要受欧洲及俄罗斯西部内陆或北冰洋地区发源水汽影响, 且均属于中低层水汽气团。由于夏季大陆内部气温普遍较高, 蒸发量大, 大陆内部湖泊、河流等汇入了大部的局地蒸发水汽, 然而同位素正好富集于湖泊、河流。因此, 虽然来自北部的水汽在经过长途输送后同位素损耗较多, 但由于西北干旱区地处亚洲中部内陆地区, 湿度较低, 降雨较少, 产生降水的水汽有相当一部分来自于局地蒸发; 其次, 干旱地区表面水体中 $\delta^{18}\text{O}$ 也偏高, 因此蒸发水汽中 $\delta^{18}\text{O}$

亦偏高; 再加上在干旱气候条件下雨滴在降落过程中由于蒸发而产生的重同位素的富集, 致使夏半年降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 值在整体上表现为高值。

综上所述可以看出, 西北干旱区全年大气降水水汽主要源自于西面及西北方向 [图 5 (d)] 的海源^[10], 主要表现为两条较大的水汽源地: 即西风带输送的大西洋海源水汽以及极地北冰洋地区水汽源地^[42]。但是极地北冰洋地区的水汽在经过欧洲俄罗斯和中亚过程中水汽大大贫化, 局地蒸发的陆源水汽给以补充, 即陆源水汽性质突出。可以表明西北干旱区降水水汽的分馏主要以动力分馏 (温度、湿度等) 为

主, 雨滴在降落过程中历经了一定的二次蒸发过程^[1], 降水水汽中也混入大量的由局地再蒸发的水汽. 降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 值高低可反映水汽的来源, 来自海洋性气团的降水 $\delta^{18}\text{O}$ 较低, 来自局地蒸发形成的降水 $\delta^{18}\text{O}$ 较高^[43]. 西北干旱区两条水汽来源分别代表了海源和陆源不同性质的水汽, 也代表了冬夏不同的水汽来源地, 因而冬、夏半年表现出不同的 δ 值. 长距离的水汽输送, 使得损耗较多, 再加上该区域全年降水较少, 从而导致年平均 δ 值也较低. 而上文所得 δ 值较大的空间分布差异则主要是大陆效应所引起的. $\delta^{18}\text{O}$ 具有明显的从沿海向内陆减小的趋势. 随着向内陆的深入, 温度上升, 降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 随着内陆的深入而偏负, 这实际上反映了温度变化的影响.

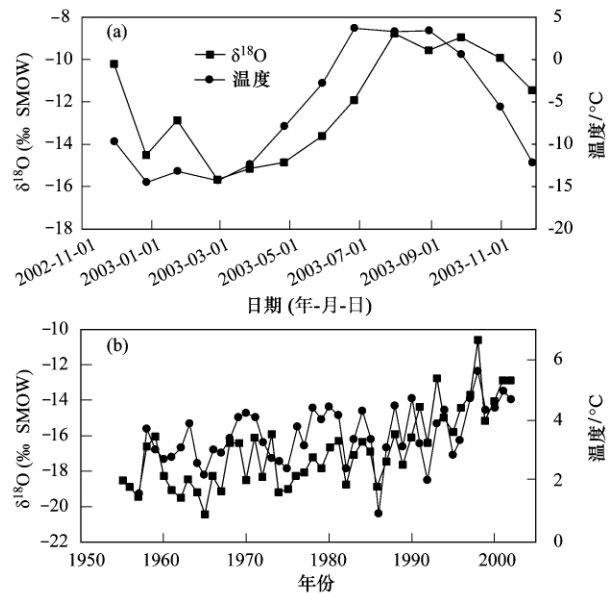
3.2 降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与雪层、冰芯的记录

西北干旱区从北向南依次分布有阿尔泰山、天山、帕米尔高原、喀喇昆仑山、昆仑山和祁连山等(图1), 高大的山脉使得西风和南亚季风带来的水汽不可穿越, 从而在山区形成较多的降水和数量众多的冰川^[44, 45]. 我国西北干旱区降水的水汽来源变化不仅影响降水中稳定同位素的空间变化以及季节变化, 也与该区积雪、冰芯中稳定同位素相关.

张明军等^[46]对乌鲁木齐站毗邻区天山乌鲁木齐河源1号冰川2002~2003年表层雪与气温关系的研究发现, 表层雪样品中 $\delta^{18}\text{O}$ 季节变化特征明显, $\delta^{18}\text{O}$ 表现出冬低夏高, 表明新降雪样品中 $\delta^{18}\text{O}$ 可以很好地代表温度的变化. 李亚举等^[47]在其研究中也进一步验证了以上结论, 同时表明在干季和湿季温度效应具有不同的特点. 图6(a)为2002~2003年乌鲁木齐站邻近区天山乌鲁木齐河源1号冰川雪坑中 $\delta^{18}\text{O}$ 与相应大西沟气象站气温的对比, 以及和田毗邻地区慕士塔格冰芯^[48]中 $\delta^{18}\text{O}$ 与塔什库尔干气象站1955~2002年温度的年际对比[图6(b)], 同样的关系也出现在张掖邻近区祁连山敦德冰芯与其相应的祁连、托勒气象站气温的对比当中^[15]. 可以看出, 西北干旱区冰川雪层、冰芯中 $\delta^{18}\text{O}$ 与当地气温变化对应关系很好, 即雪层和冰芯中的 $\delta^{18}\text{O}$ 很好地反映了气温的变化, 并且这种关系可以用来反演和恢复古气候和古环境^[49].

4 结论

(1) 西北干旱区水线为: $\delta\text{D} = 7.24 \delta^{18}\text{O} + 1.96\text{‰}$. 这个关系式与全球和中国大气水线方程相比, 截距和斜率都偏低. 斜率稍小于8表明该区降水的水汽来自于具有不同稳定氧同位素比率的源地,



(a) 天山乌鲁木齐河源1号冰川雪坑中 $\delta^{18}\text{O}$ 与塔什库尔干气象站气温的对比^[47];

(b) 慕士塔格冰芯中 $\delta^{18}\text{O}$ 与塔什库尔干气象站气温的对比^[48]

图6 雪层、冰芯中 $\delta^{18}\text{O}$ 与气温的关系

Fig. 6 Comparison of $\delta^{18}\text{O}$ in snow pit, ice core and air temperature

同时也反映了其降水历经了一定的蒸发过程, 蒸发程度稍大于降雨.

(2) $\delta^{18}\text{O}$ 和 d 值均表现出显著的时空变化. 从时间变化上看, 不同季节来源于不同源地、性质的水汽输送在某种程度上决定了降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 d 值的高低; 在空间变化上, 该区地处中亚内陆, 特殊的地理区位使其降水水汽来源虽受西风环流的影响, 但偏北方向的陆源水汽和局地蒸发水汽则影响更大.

(3) 该区降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度之间存在显著的正相关关系, 远远掩盖了降水量对 $\delta^{18}\text{O}$ 的作用. 这一结论符合经典同位素理论: 即受大陆性气候的影响, 中高纬度内陆地区降水中稳定同位素比率与温度存在显著的正相关关系.

(4) 通过对西北干旱区大气降水水汽来源的分析, 全年有两条水汽来源. 冬、夏半年降水水汽均来自于西面及西北方向的海源: 即西风带输送的大西洋海源水汽以及极地北冰洋地区水汽源地; 分馏主要以动力分馏为主, 雨滴在降落过程中历经了一定的二次蒸发过程, 降水水汽中也混入大量的由局地再蒸发的水汽, 大陆性质显著.

(5) 由于冰冻圈环境的独特性, 研究区域三站邻近区山脉冰川雪层、冰芯的变化与相应的气象站记录具有良好的对应关系. 雪层、冰芯中 $\delta^{18}\text{O}$ 的季节变化显著, 且与该区降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化基

本一致;雪层、冰芯中 $\delta^{18}\text{O}$ 很好地反映了气温的变化。

参考文献:

- [1] 柳鉴容, 宋献方, 袁国富, 等. 西北地区大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的特征及水汽来源 [J]. 地理学报, 2008, **63**(1): 12-22.
- [2] Araguás-Araguás L, Froehlich K, Rozanski K. Stable isotope composition of precipitation over southeast Asia [J]. Journal of Geophysical Research, 1998, **103**(D22): 28721-28742.
- [3] Dansgaard W. The abundance of $\delta^{18}\text{O}$ in atmospheric water and water vapour [J]. Tellus, 1953, **5**(4): 461-469.
- [4] Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation [J]. Tellus, 1964, **16**(4): 436-468.
- [5] Gat J R, Matsui E. Atmospheric water balance in the Amazon basin: an isotopic evapotranspiration model [J]. Journal of Geophysical Research, 1991, **96**(D7): 13179-13188.
- [6] Petit J R, White J W C, Young N W, et al. Deuterium excess in recent Antarctic snow [J]. Journal of Geophysical Research, 1991, **96**(D3): 5113-5122.
- [7] Qin D H, Petit J R, Jouzel J, et al. Distribution of stable isotopes in surface snow along the route of the 1990 International Trans-Antarctica Expedition [J]. Journal of Glaciology, 1994, **40**(134): 107-118.
- [8] Kondoh A, Shimada J. The origin of precipitation in eastern Asia by deuterium excess [J]. Journal of Japan Society of Hydrology & Water Resources, 1997, **10**(6): 627-629.
- [9] Yamanaka T, Shimada J, Miyaoka K. Footprint analysis using event-based isotope data for identifying source area of precipitated water [J]. Journal of Geophysical Research, 2002, **107**(D22): 4624, doi: 10. 1029/2001JD001187.
- [10] 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.
- [11] Tian L D, Masson-Delmotte V, Stievenard M, et al. Tibetan Plateau summer monsoon northward extent revealed by measurements of water stable isotopes [J]. Journal of Geophysical Research, 2001, **106**(D22): 28081-28088.
- [12] Zhang X P, Nakawo M, Fujita K, et al. Variation of precipitation $\delta^{18}\text{O}$ in Langtang Valley, Himalayas [J]. Science in China (Series D), 2001, **44**(9): 769-778.
- [13] Tian L D, Yao T D, Numaguti A, et al. Relation between stable isotope in monsoon precipitation in southern Tibetan Plateau and moisture transport history [J]. Science in China (Series D), 2001, **44**(Supp. 1): 267-274.
- [14] 章新平, 中尾正义, 姚檀栋, 等. 青藏高原及其毗邻地区降水中稳定同位素成分的时空变化 [J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2001, **31**(5): 353-361.
- [15] Tian L D, Yao T D, Schuster P F, et al. Oxygen-18 concentrations in recent precipitation and ice cores on the Tibetan Plateau [J]. Journal of Geophysical Research, 2003, **108**(D9): 4293, doi: 10. 1029/2002JD002173.
- [16] 崔玉琴. 西北内陆上空水汽输送及其源地 [J]. 水利学报, 1994, (9): 79-87.
- [17] Gao G, Huang C Y. Climate change and its impact on water resources in north China [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2001, **18**(5): 718-732.
- [18] 任宏利, 张培群, 李维京, 等. 中国西北部地区春季降水及其水汽输送特征 [J]. 气象学报, 2004, **62**(3): 365-374.
- [19] 王可丽, 江灏, 赵红岩. 西风带与季风对中国西北地区的水汽输送 [J]. 水科学进展, 2005, **16**(3): 432-438.
- [20] 林振耀, 郑度. 新疆塔里木盆地东缘水汽输送探讨 [J]. 干旱区研究, 1992, **9**(2): 1-7.
- [21] 尹常亮, 姚檀栋, 田立德, 等. 德令哈大气水汽中 $\delta^{18}\text{O}$ 的时间变化特征——以2005年7月~2006年2月为例 [J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2008, **38**(6): 723-731.
- [22] 周石桥, 中尾正义, 坂井亚规子, 等. 祁连山七一冰川积雪和大气降水中的氢氧稳定同位素变化 [J]. 科学通报, 2007, **52**(18): 2187-2193.
- [23] 李晖, 周宏飞. 乌鲁木齐地区大气降水中 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化特征 [J]. 干旱区资源与环境, 2007, **21**(9): 47-51.
- [24] 李晖, 蒋忠诚, 王月, 等. 新疆地区大气降水中稳定同位素的变化特征 [J]. 水土保持研究, 2009, **16**(5): 157-161.
- [25] 田立德, 马凌龙, 余武生, 等. 青藏高原东部玉树降水中稳定同位素季节变化与水汽输送 [J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2008, **38**(8): 986-992.
- [26] 陈中笑, 程军, 郭品文, 等. 中国降水稳定同位素的分布特点及其影响因素 [J]. 大气科学学报, 2010, **33**(6): 667-679.
- [27] 康尔泗, 程国栋, 董增川. 中国西北干旱区冰雪水资源与出山径流 [M]. 北京: 科学出版社, 2002. 14-15.
- [28] 郑琰明, 钟巍, 彭晓莹, 等. 粤西云浮市大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与水汽来源的关系 [J]. 环境科学, 2009, **30**(3): 637-643.
- [29] 章新平, 孙维贞, 刘晶淼. 西南水汽通道上昆明站降水中的稳定同位素 [J]. 长江流域资源与环境, 2005, **14**(5): 665-669.
- [30] 吴旭东. 成都地区大气降水稳定同位素组成反应的气候特征 [J]. 地质学报, 2009, **29**(1): 52-54, 58.
- [31] 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.
- [32] 徐振, 刘玉虹, 王中生, 等. 卧龙降水稳定同位素与季风活动的关系 [J]. 环境科学, 2008, **29**(4): 1007-1013.
- [33] Kreutz K J, Wake C P, Aizen V B, et al. Seasonal deuterium excess in a Tien Shan ice core: influence of moisture transport and recycling in Central Asia [J]. Geophysical Research Letters, 2003, **30**(18): 1922, doi: 10. 1029/2003GL017896.
- [34] Merlivat L, Jouzel J. Global climatic interpretation of the deuterium-oxygen 18 relationship for precipitation [J]. Journal of Geophysical Research, 1979, **84**(C8): 5029-5033.
- [35] Yapp C J. A model for the relationships between precipitation D/H ratios and precipitation intensity [J]. Journal of Geophysical Research, 1982, **87**(C2): 9614-9620.
- [36] 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.
- [37] 章新平, 姚檀栋. 我国降水中的 $\delta^{18}\text{O}$ 的分布特点 [J]. 地理

- 学报, 1998, **53**(4): 356–363.
- [38] 章新平, 姚檀栋. 全球降水中氧同位素比率的分布特点 [J]. 冰川冻土, 1994, **16**(3): 202–210.
- [39] Kohn M J, Welker J M. On the temperature correlation of $\delta^{18}\text{O}$ in modern precipitation [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2005, **231**(1–2): 87–96.
- [40] Yu W S, Yao T D, Tian L D, *et al.* Relationships between $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation and air temperature and moisture origin on a south-north transect of the Tibetan Plateau [J]. Atmospheric Research, 2008, **87**(2): 158–169.
- [41] 徐彦伟, 康世昌, 周石桥, 等. 青藏高原纳木错流域夏、秋季大气降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与水汽来源及温度的关系 [J]. 地理科学, 2007, **27**(5): 718–723.
- [42] Tian L D, Yao T D, MacClune K, *et al.* Stable isotopic variations in west China: a consideration of moisture sources [J]. Journal of Geophysical Research, 2007, **112**: D10112, doi: 10.1029/2006JD007718.
- [43] 杨梅学, 姚檀栋, 田立德, 等. 藏北高原夏季降水的水汽来源分析 [J]. 地理科学, 2004, **24**(4): 426–431.
- [44] 刘潮海, 康尔泗, 刘时银, 等. 西北干旱区冰川变化及其径流效应研究 [J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 1999, **29**(1): 55–62.
- [45] 杨针娘. 中国冰川水资源 [M]. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1991. 137–141.
- [46] 张明军, 周平, 李忠勤, 等. 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川雪中 $\delta^{18}\text{O}$ 的演化过程 [J]. 兰州大学学报 (自然科学版), 2009, **45**(5): 36–40, 47.
- [47] 李亚举, 张明军, 李忠勤, 等. 表层雪中稳定同位素季节变化及其与水汽输送的关系——以天山乌鲁木齐河源 1 号冰川积累区为例 [J]. 地理研究, 2011, **30**(5): 953–962.
- [48] Tian L D, Yao T D, Li Z, *et al.* Recent rapid warming trend revealed from the isotopic record in Muztagata ice core, eastern Pamirs [J]. Journal of Geophysical Research, 2006, **111**: D13103, doi: 10.1029/2005JD006249.
- [49] Yao T D, Thompson L G, Mosley-Thompson E, *et al.* Climatological significance of $\delta^{18}\text{O}$ in north Tibetan ice cores [J]. Journal of Geophysical Research, 1996, **101**(D23): 29531–29537.