

文章编号: 1008-2786-(2018)2-217-12

DOI:10.16089/j.cnki.1008-2786.000317

青藏高原西北部大气降水稳定同位素时空特征变化

孙从建^{1*}, 张子宇¹, 李捷², 陈若霞¹, 李伟¹

(1. 山西师范大学地理科学学院, 山西 临汾 041000; 2. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029)

摘 要: 作为水环境的重要指示剂, 稳定同位素已经成为区域水文学、气候学研究的重要工具。降水作为水循环的输入项, 其同位素组成是研究山地地表水过程、地下水形成转化、冰川变化等问题的必要信息。为了进一步增加对于青藏高原西北部降水过程及其控制因素的认识, 本文基于青藏高原西北部五个长期观测站点降水中 δD 和 $\delta^{18}O$ 数据, 研究了青藏高原西北部与塔里木盆地交界地区大气降水稳定同位素时空分布特征。分析结果显示该地区降水稳定同位素季节变化较为明显, 表现出夏高冬低的变化趋势, 不同月份呈现出不同的空间分布特征。除狮泉河站降水 $\delta^{18}O$ 值与温度关系不显著外, 其余站点 $\delta^{18}O$ 值随温度升高而增加。区域内降水量对降水 $\delta^{18}O$ 值的影响不显著, 降水稳定同位素高程效应明显, 降水 $\delta^{18}O$ 值随海拔上升而降低。降水过量氘 (d 值) 的分布也呈现出显著的季节差异, 总体表现出夏半年高、冬半年低的特点, 受水汽再循环的影响, 西合休站夏季降水的 d 值呈现较高的水平。研究表明, 气温是控制该地区降水同位素分馏的重要因素, 通过对于该区域降水蒸发比的计算发现, 该地区临近沙漠的和田站的降水同位素受蒸发作用最为显著, 而高海拔地区的狮泉河站降水受蒸发影响最小。

关键词: 大气降水; δD ; $\delta^{18}O$; 时空分布; 蒸发富集

中图分类号: K903

文献标志码: A

大气降水是地球各圈层物质、能量交换的重要媒介, 也是陆地水循环的重要来源^[1]。降水中稳定同位素 (δD 和 $\delta^{18}O$) 的时空特征, 可以反演大气循环, 示踪水汽来源, 反映天气气候的区域性特征^[2], 在全球与区域气候和水文研究方面具有重要价值^[3]。Criag^[4] 研究全球降水样品时发现降水中氢氧稳定同位素存在一定的线性关系, 其拟合关系式为 $\delta D = 8 \delta^{18}O + 10$, 并将其称为全球大气降水线 (Global Meteoric Water Line, GMWL)。通过对局地大气降水线拟合, 能反映出不同地理、气候条件下的水汽来源及再蒸发过程^[5], 有利于揭示区域的降水规律及其影响因素^[6]。降水 $\delta^{18}O$ 值的变化与气温、纬度、海拔、降水量等因素有关^[7], 其中在中高纬度

地区, 降水 $\delta^{18}O$ 值与温度之间往往存在显著的线性关系, 且越深入大陆内部, 其正相关关系越显著^[8-10]。研究表明, 降水中 $\delta^{18}O$ 值对海拔高度的变化也响应显著, 降水中 $\delta^{18}O$ 值随着海拔高度的升高, 呈现不断降低的变化趋势; 而在中亚天山地区, 一些研究指出降水 $\delta^{18}O$ 值也存在一定程度的反高程效应^[11-12]。降水同位素的这些环境效应为区域水循环研究提供了重要的信息。

近年来, 一些研究者在我国西部地区开展了大规模的降水稳定同位素的观测, 得到了一些有价值的研究结论。研究发现在西北干旱内陆地区, 降水稳定同位素存在显著的时空分布差异^[13-16], 且表现出较为复杂的降水过程。同时, 降水 $\delta^{18}O$ 受温度的

收稿日期 (Received date): 2017-09-01; **改回日期** (Accepted date): 2017-11-20

基金项目 (Foundation item): “率先行动”中国博士后科学基金会与中国科学院联合资助优秀博士后项目 (2015LH048); 中国博士后科学基金资助项目 (2016M590989)。[China's Postdoctoral Science Foundation and the Chinese Academy of Sciences Jointly Funded Outstanding Post Doctoral Projects (2015LH048); China Postdoctoral Science Foundation Funded Project (2016M590989)]

作者简介 (Biography): 孙从建 (1986-), 男, 河北沧州人, 博士, 副教授, 主要研究方向: 同位素水文及环境水文学。[SUN Congjian (1986-), male, born in Cangzhou, Hebei province, Ph. D., associate professor, research on in isotope hydrology and environmental hydrology] E-mail: suncongjian@sina.com

影响显著^[13],而对降水量的响应不显著^[14-15],降水受陆地蒸发水汽的影响较重^[16]。对青藏高原大规模降水同位素的研究发现^[17-21],不同区域的水汽来源及水循环方式对区域降水的同位素组成影响显著,其中高原东北部的祁连山区降水 $\delta^{18}\text{O}$ 受水汽来源、水汽运移路线与山体走向的影响较为明显^[21];青藏高原中、北部地区降水 $\delta^{18}\text{O}$ 受温度的控制影响显著,而南部及南亚地区均不存在温度效应^[19]。基于目前建成的青藏高原大气降水同位素网络 (Tibetan Network for Isotopes in Precipitation, TNIP) 中的观测数据^[22-23],研究者发现青藏高原内部降水稳定同位素空间差异显著,这与区域降水水汽来源差异有关,其中高原北部降水受西风带输送的水汽及本地蒸发的水汽影响,而南部降水的水汽来自印度洋^[17-18]。以上的结论对于增进我国西部地区降水过程、水循环过程以及气候变化影响的认识都有着重要的意义。然而,以往的研究涉及到青藏高原西北部地区的相对较少,目前建成的 TNIP 中的 24 个站点并未在青藏高原西北地区布设站点。同时该区域海拔较高,地形复杂多变,冰川广布,气候类型及山地水循环复杂,加之人迹罕至、交通不便,其降水同位素的观测一直处于空白阶段,降水同位素的时空变化规律尚不清楚。

本研究在青藏高原西北部选取了五个站点开展了长期的降水氢氧稳定同位素观测,分析了青藏高原西北部降水稳定同位素的时空变化特征,并在此基础上解析影响该区域降水稳定同位素变化的主要因素。本研究将有效的弥补青藏高原西北部地区降水稳定同位素数据的不足,增加对青藏高原西北部水循环特征的认识,有助于实现区域水资源优化配

置及合理利用。同时,本研究积累的数据与其他已有成果的结合还可提高对青藏高原整体水文循环的认识。

1 研究区概况

研究区位于青藏高原西北部 ($74.34^{\circ}\text{E} \sim 81.04^{\circ}\text{E}$, $33.61^{\circ}\text{N} \sim 39.31^{\circ}\text{N}$), 平均海拔约在 5000 m (图 1)。北部毗邻塔里木盆地,南部属于帕米尔高原的喀喇昆仑山脉,是亚洲大陆中部地区主要山脉的汇集处及现代冰川作用的中心。由于处于我国干燥高温气候与高寒山地气候交汇地区,该地区气候垂直变化极为显著。高海拔地区 (3600 m 以上) 的一月份平均气温为 -17.8°C ,七月份平均气温为 13.9°C ;而低山区 (2000 m 以下) 一月份平均气温为 -6°C ,七月份平均气温为 22.5°C ^[24]。青藏高原降水量空间差异显著,东南部降水多而西北部降水量少,其中高原西北部地区年平均降水量低于 200 mm^[25]。研究区水汽主要受控于西风带水汽输送,而复杂的地形使得区域水循环复杂,生态环境较脆弱^[26]。该区域人类活动较少,气候及水循环受人类活动干扰较少,是研究气候变化对区域水循环影响的典型地区^[27]。

2 样品采集与分析

本文选取青藏高原西北部的江卡站、沙曼站和西合休站三个站点 (表 1) 进行长期降水收集。江卡站处于提孜那甫河出山口处,沙曼站、西合休站位于喀喇昆仑山山区。样品的收集以次降水事件为单位

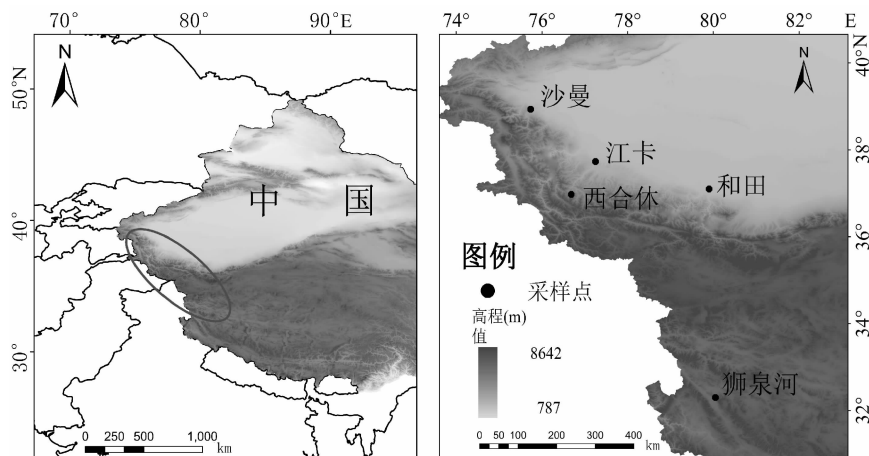


图 1 青藏高原西北部位置及采样点分布图

Fig. 1 The distribution of the location and sampling points in the northwest Tibet Plateau (NWTP)

表1 研究区主要站点的相关信息表
Tab. 1 The information of sampling sites of the study areas

| 采样点 | 海拔/m | 纬度/°N | 经度/°E | 样品数量/n | 年气温均值/℃ | 年平均相对湿/% | 研究时段 | 采样频率 |
|------|------|-------|-------|--------|---------|----------|-----------------|------|
| 西合休站 | 2960 | 36.98 | 76.68 | 36 | 4 | 49.2 | 2012.06—2013.10 | 次降水 |
| 沙曼站 | 2004 | 38.94 | 75.70 | 22 | 11.4 | 40.5 | 2012.07—2013.02 | 次降水 |
| 狮泉河站 | 4278 | 32.30 | 80.05 | 22 | 0 | 32.8 | 2001.01—2001.12 | 次降水 |
| 江卡站 | 1507 | 37.73 | 77.25 | 57 | 11.8 | 47.1 | 2011.07—2013.07 | 次降水 |
| 和田站 | 1375 | 37.10 | 79.90 | 47 | 12.7 | 45.8 | 1988.02—1992.12 | 月降水 |

开展,其中降雨样品收集后存入 5 mL 的冻存管中,用 Parafilm 封口膜密封后冷冻保存。降雪样品先由干净的托盘收集,再转入干净的塑料袋密封待融化后将水样装进 5 mL 的冻存管,用 Parafilm 封口膜密封冷冻保存。所有收集好的样品都要冷藏以待分析时取出。同时,每次降水发生时的温度、相对湿度通过温湿度计记录。三个站点在观测期内(2011—2013)共收集了 115 个水样(表 1)。

狮泉河站的降水氢氧稳定同位素引用前人研究数据^[22],和田站降水氢氧稳定同位素数据来源于全球降水同位素观测网(GNIP)。为了验证数据可比性,我们将狮泉河站及和田站数据采样期的气象数据(气温与降水量)分别与本研究观测时期(2011—2013)的气象数据进行了显著性差异检验,*t* 检验的结果显示狮泉河站与和田站数据收集时期的气象数据与本研究观测时期的气象数据在月尺度上不存在显著差异,因此可以用作比较降水同位素的空间差异。

水样氢氧稳定同位素的测定在中国科学院荒漠与绿洲生态国家重点实验室进行,使用 LWIA - V2 (DLT - 100) 液态水同位素分析仪 (Los Gatos Research, 美国) 进行分析测试。测试结果以 V - SMOW“维也纳标准平均海洋水”的千分差表示:

$$\delta(\text{‰}) = \frac{R_c - R_s}{R_s} \times 1000 \quad (1)$$

其中: R_c 和 R_s 分别为降水样品和 V - SMOW 中 D/H($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) 的比率。同位素 D 和 ^{18}O 含量分别用 δ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 表示。 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的测试精度分别为 0.3‰ 及 0.1‰。

降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的加权平均为:

$$\overline{\delta^{18}\text{O}} = \sum P_i \delta^{18}\text{O}_i / \sum P_i \quad (2)$$

式中: $\delta^{18}\text{O}_i$ 和 P_i 分别为氧稳定同位素比率和相应的降水量。

3 结果分析

3.1 青藏高原西北部降水氢氧稳定同位素的时空特征

3.1.1 降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的季节变化

区域降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 值呈现显著的季节波动(图 2)。其中江卡站降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化范围最大,介于 -25.7‰ ~ 4.3‰ 之间,最高值和最低值都分别出现在 8 月和 1 月,12 月到次年 8 月有升高趋势,8—11 月呈现降低趋势。由于江卡站临近塔克拉玛干沙漠,夏季温度高、蒸发强烈,降水较少,降水尤其短时降水受蒸发影响显著,导致降水 $\delta^{18}\text{O}$ 富集甚至高于 0‰。狮泉河站降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化范围最小 (-19.8‰ ~ -6.9‰),不同于其他站点降水 $\delta^{18}\text{O}$ 极值出现时间(高值在 7、8 月,低值在 1、2 月),该站点最高值出现在 9 月,最低值出现在 3 月,1—3 月呈现升高趋势,7—9 月呈现降低趋势。研究区的五个站点中,和田站的 $\delta^{18}\text{O}$ 年均值最大,狮泉河的 $\delta^{18}\text{O}$ 年均值最小。除狮泉河站外,其余站点均呈现夏高,冬低的特征。1—7 月份呈显著上升趋势,8—12 月呈下降趋势。

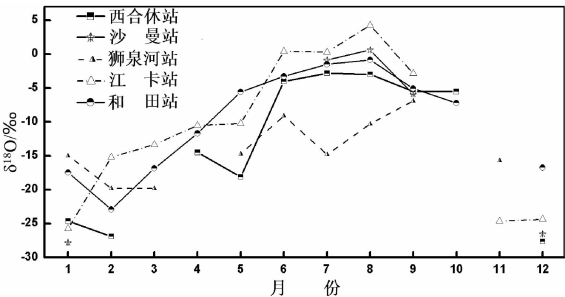


图2 青藏高原西北部降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值的季节变化
Fig. 2 Seasonal variations of precipitation $\delta^{18}\text{O}$ value in the NWTP

3.1.2 降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的空间变化

研究区降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值的空间分布分析结果显示(图3),总体上,研究区全年降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值呈现出南高北低的空间分布特征(图3),降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值空间分

布表现出显著的季节差异:1—3 月降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的极低值由北向南逐渐移动;4—5 月份降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值空间差异较小,等值线密度降低;6—9 月研究区内降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值空间分布特征相似;9—12 月 $\delta^{18}\text{O}$ 的极低

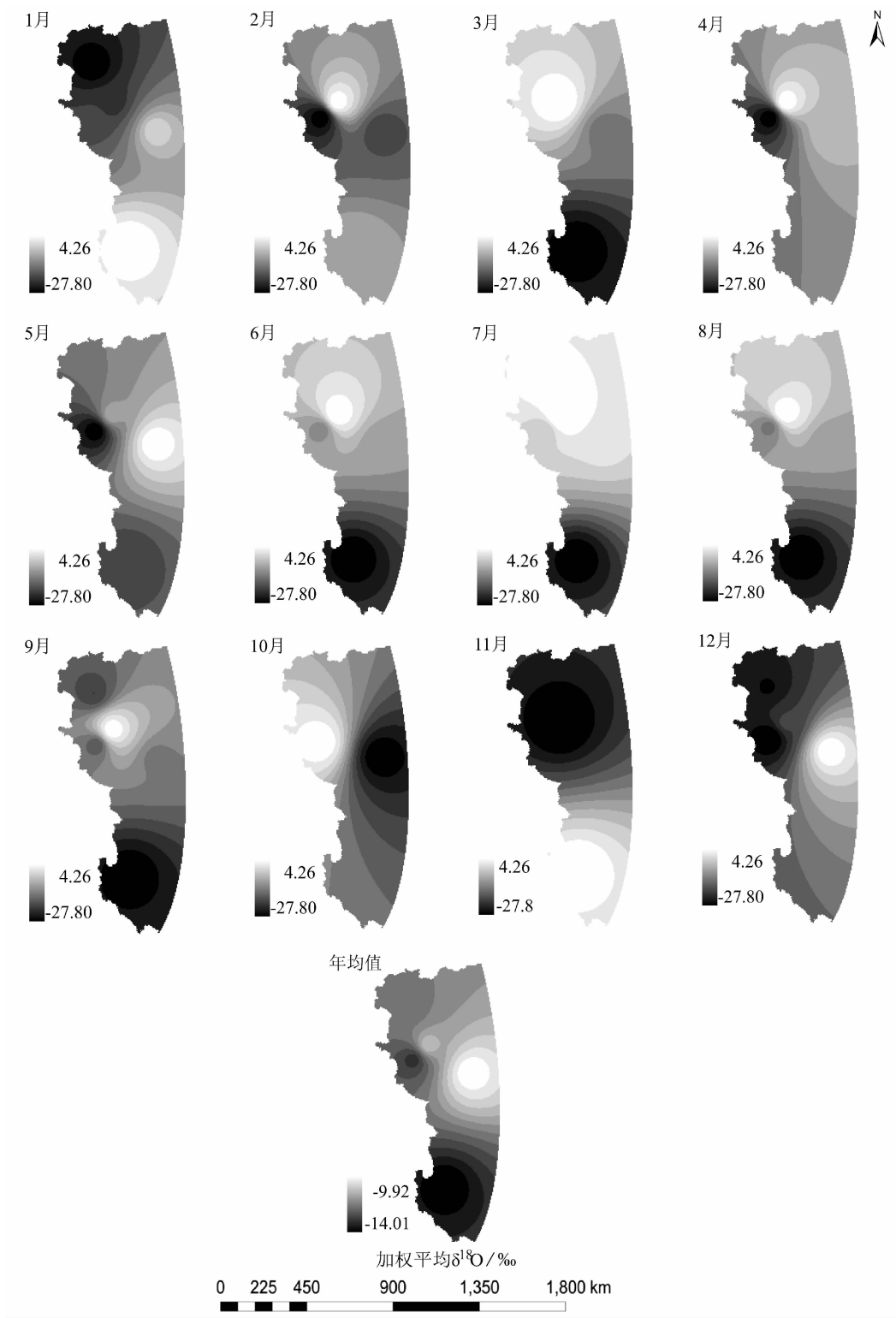


图3 青藏高原西北部降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值季节变化空间分布
Fig.3 Spatial variation of precipitation $\delta^{18}\text{O}$ value in the NWTP

值又由南向北逐渐移动。其中研究区西部及南部地区降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值月际间变化显著,东北部地区降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化较小。降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的极大值除了在11月及1月份出现在狮泉河站之外,其他季节,降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的极大值大都出现在研究区中北部。春夏季, $\delta^{18}\text{O}$ 的极低值出现在狮泉河站,秋季出现在江卡站,而冬季出现在沙曼站。

3.2 区域大气降水线

图4为青藏高原西北部地区大气降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与 δD 的线性关系图,五个站点的大气降水线方程斜率和截距均与全球大气降水线相近,海拔较低的江卡站的斜率稍小于8,其余站点的斜率和截距均大于全球降水线,较高的斜率及截距可能与该地区远离海洋、海拔较高、气温较低有一定关系。其中西合休站的大气降水线斜率最高,这可能与该站位于提孜那甫河上游河谷地带有关,来自盆地内部的二次蒸发水汽(稳定同位素较为贫化)及西风水汽受山体的抬升作用在河谷内冷凝形成降水。同时该地

区昼夜温差大,白天蒸发的水汽(指被蒸发走的水汽,富含氢同位素),夜晚受冷凝结降水,这些都可能是导致降水线高斜率的原因。而江卡站由于海拔相对较低,临近干旱的塔里木盆地,降水受蒸发作用旺盛,受蒸发后降水同位素富集,导致两地大气降水线方程的斜率和截距偏大。

3.3 降水中稳定同位素变化影响因素分析

3.3.1 降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度

该地区的降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值与温度亦呈现显著相关性(图5),其中,西合休站降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值受温度的控制最为显著,其关系为: $\delta^{18}\text{O} = 1.06T - 16.205$ ($R^2 = 0.77$),五个站点中和田站、江卡站降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值与温度的正相关关系相对较弱,其拟合关系式分别为: $\delta^{18}\text{O} = 0.70T - 18.46$ ($R^2 = 0.72$), $\delta^{18}\text{O} = 0.71T - 16.23$ ($R^2 = 0.72$)。狮泉河站降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值对气温的变化的响应不显著。

3.3.2 降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与降水量

降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值与降水量之间的负相关关系被定

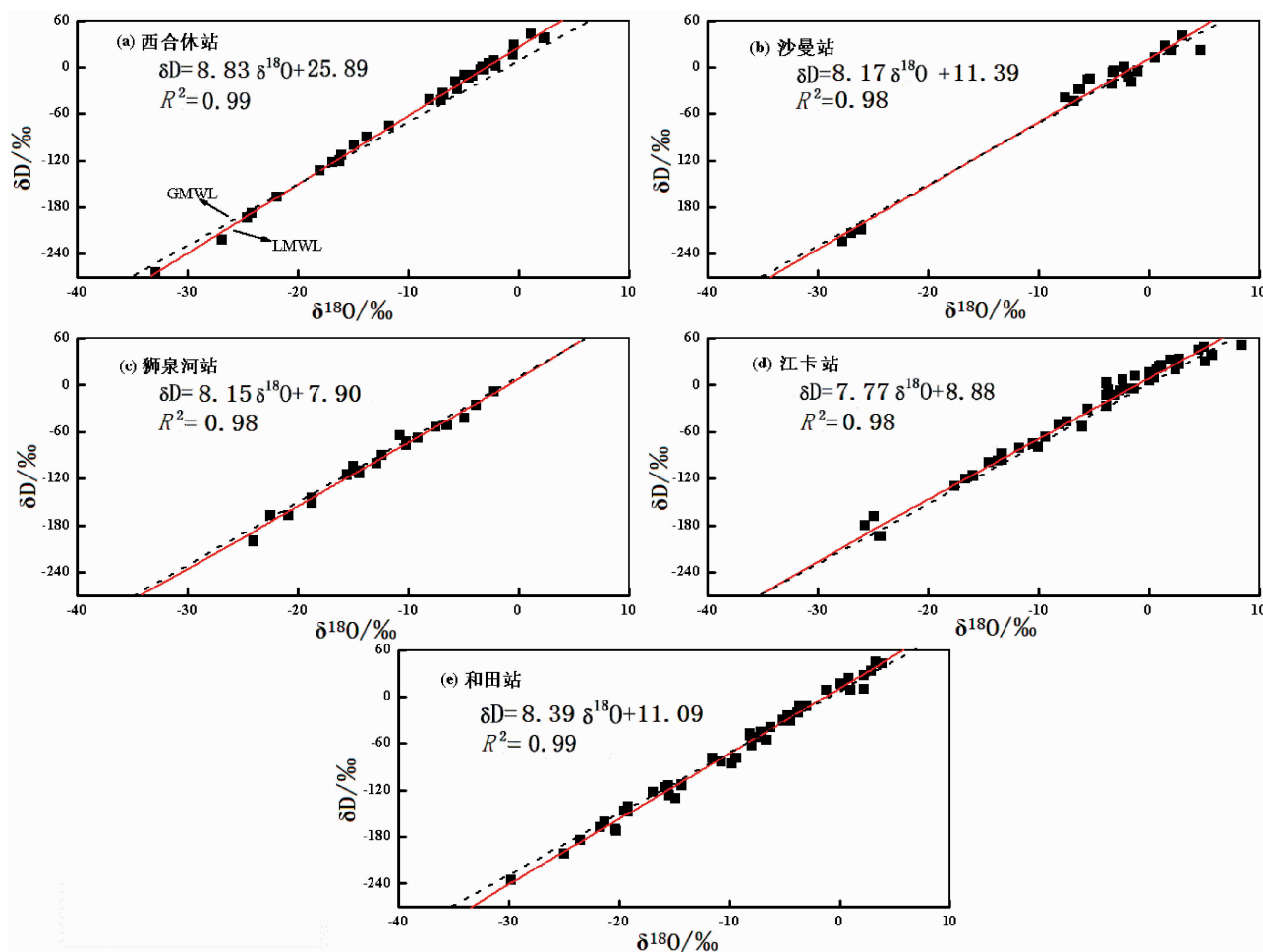


图4 青藏高原西北部大气降水线方程(LMWL)

Fig.4 The local meteoric water line in the NWTP (LMWL)

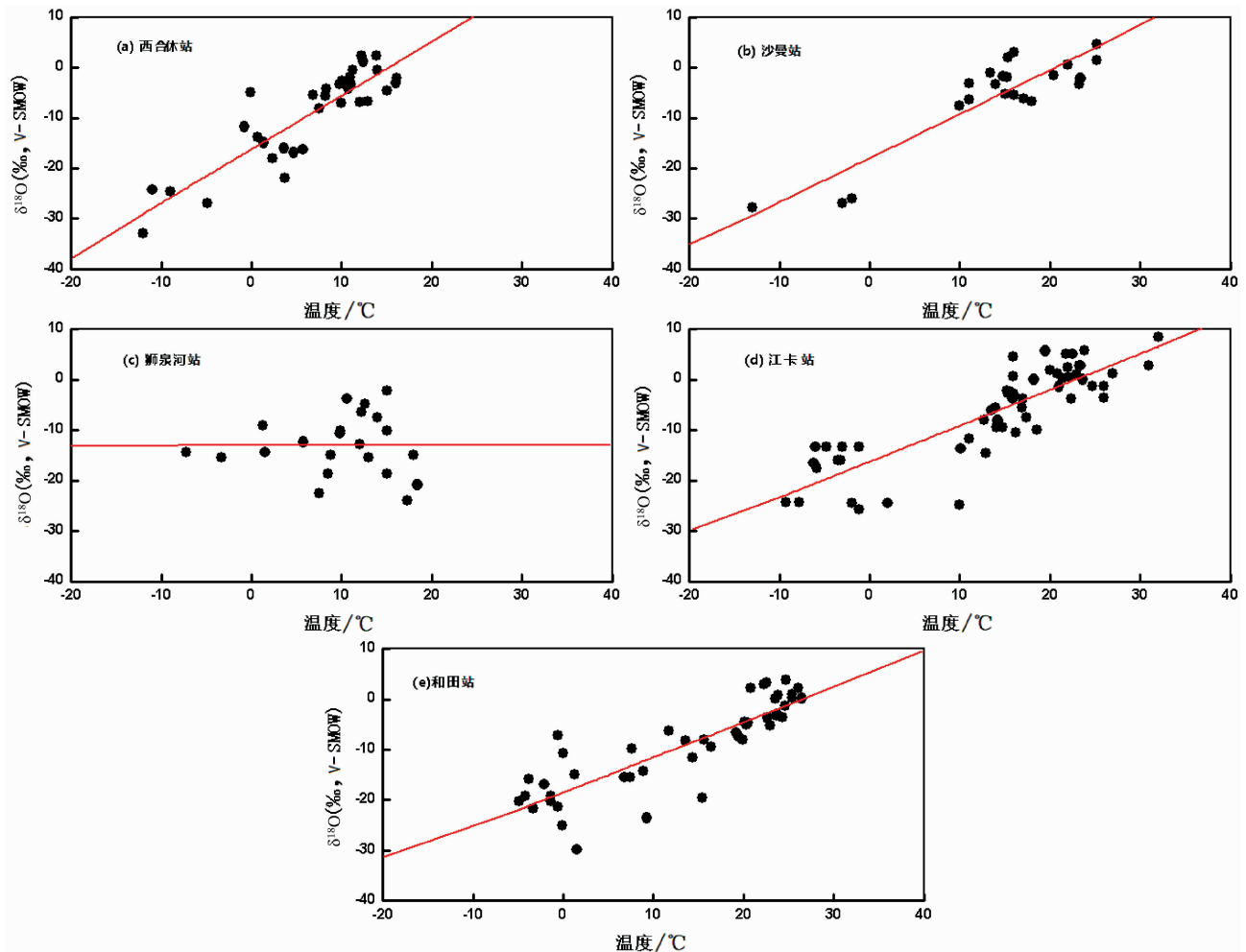


图5 青藏高原西北部大气降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值和温度的关系图

Fig. 5 The relationship between precipitation $\delta^{18}\text{O}$ value and precipitation amount in the NWTP

义为降水量效应^[28],这一现象在季风控制区域尤为显著。为了进一步检验该区域降水量与降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值的关系,我们拟合了五个站点两者间的关系式。具体如下:

西合休站: $\delta^{18}\text{O} = -0.21P - 9.03$ ($R^2 = 0.01$)

沙曼站: $\delta^{18}\text{O} = -4.08P + 3.87$ ($R^2 = 0.17$)

狮泉河站: $\delta^{18}\text{O} = 0.02P - 13.04$ ($R^2 = 0.01$)

江卡站: $\delta^{18}\text{O} = -0.22P - 5.20$ ($R^2 = 0.01$)

和田站: $\delta^{18}\text{O} = 0.96P - 11.26$ ($R^2 = 0.09$)

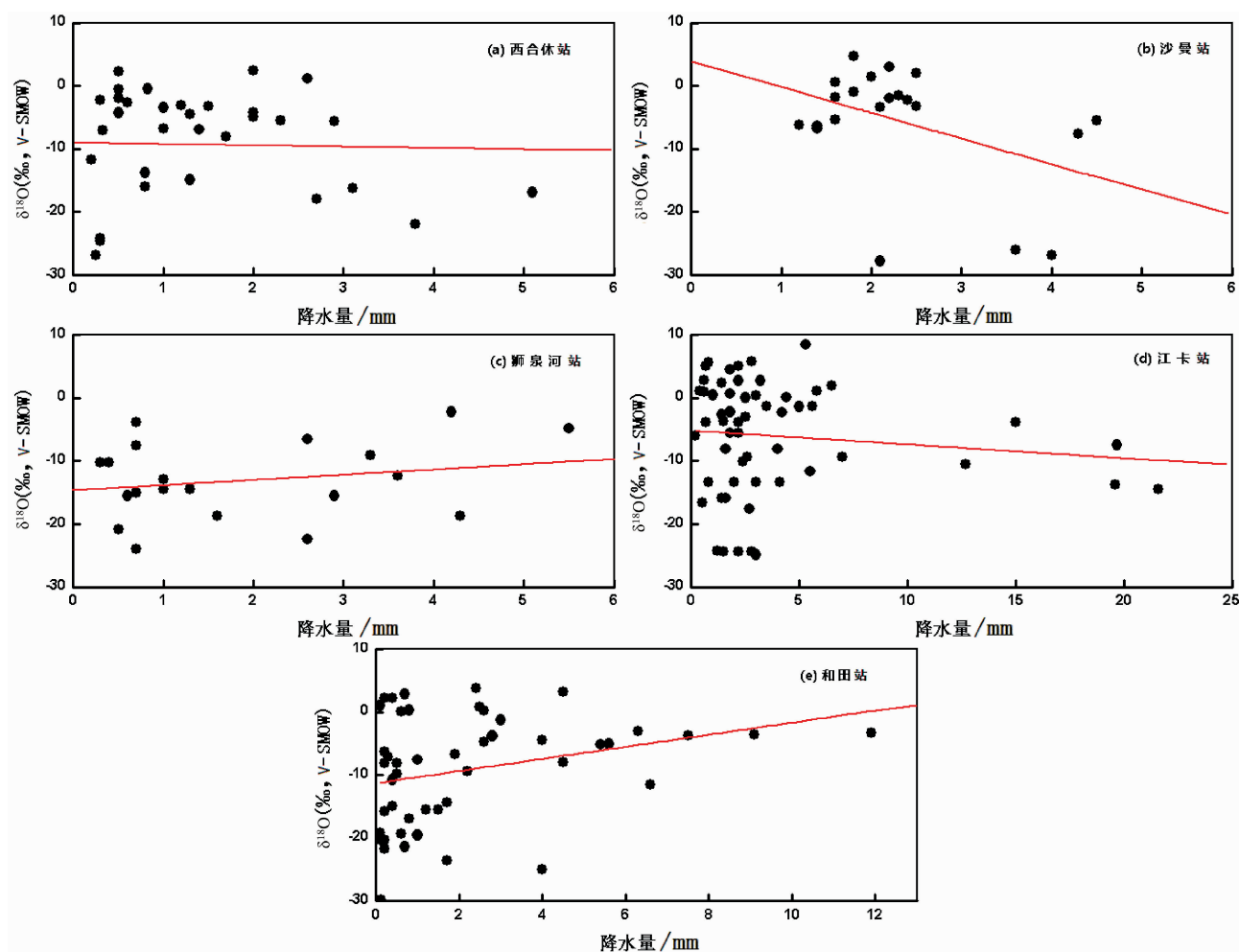
各站点降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值与降水量的相关分析结果表明,该地区降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值(和田站除外)并未随降水量的变化而发生明显的变化,降水量效应不显著(图6)。研究区地处亚洲腹地,海拔较高,气候的大陆性显著,冬季盛行西北风,来自印度洋的暖湿气流高大山体阻挡对该区域影响有限,这可能是该区域降水 $\delta^{18}\text{O}$ 并未表现出显著降水量效应的主要原因。

3.3.3 降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与高程

图7为青藏高原西北部降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值随海拔的变化情况。五站点中 $\delta^{18}\text{O}$ 的年均值与高程存在明显的负相关关系。不同季节这种高程效应在该区域差异显著,春、夏季该地区降水 $\delta^{18}\text{O}$ 高程效应明显,秋、冬季不明显,这可能与当地秋冬季节高山地区逆温层的分布有一定关系^[12]。其中夏季高程对于区域降水的负影响最为明显,其拟合关系式斜率明显大于春季及全年。

3.4 降水过量氘的变化

图8显示各站点 d 值范围变化较大,表明该区域降水过程较复杂。其中,西合休站 d 值波动范围最大(介于 -6.5‰ ~ 28.1‰),其平均值(14.4‰)也高于各站均值。和田站 d 值波动范围最小(-0.7‰ ~ 15.5‰),与降水 $\delta^{18}\text{O}$ 不同的是,该地区降水 d 的极值出现时间并未表现出显著的规律性。各站点中,和田站 d 的平均值接近全球平均水平。总体上,该区域过量氘表现为夏半年高,冬半年低的

图6 青藏高原西北部大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值和降水量的变化Fig. 6 The relationship between precipitation $\delta^{18}\text{O}$ value and air temperature in the NWTP

趋势。夏季较高的 d 值可能与当地夏季降水再度蒸发有关,如果过量氙为 10‰ 的降水在降落时被再度蒸发,则较轻的水分子重新返回水汽,必然导致降水过量氙的增大;同时夏季低海拔被蒸发的水汽(同位素较轻)爬升中在山区凝结降水,也可能是造成西合休站夏季降水过量氙高值的一个因素。

4 讨论

4.1 蒸发对降水稳定同位素的影响

在干旱半干旱区,由于气候干燥,降水时雨滴下落过程中受蒸发影响强烈,使得降水中重同位素富集,大气水汽中重同位素贫化^[29]。云底二次蒸发对青藏高原北部地区的夏季降水也具有重要影响^[30]。

研究区过量氙变化表明,该区域夏季降水受蒸发的作用显著,降水往往发生蒸发富集。为衡量蒸发对降水同位素的影响,本文进一步探讨了该区域

下半年降水中蒸发剩余比的变化特征。Kong 等^[31]提出了一个计算降水蒸发剩余比(f)的公式,认为 f 主要取决于降水过程中的蒸发速率(V_{evap})和雨滴降落时间(t_m):

$$f = \frac{Rt_m}{Rt_m + V_{\text{evap}}t_m} \quad (3)$$

其中: R 为降水强度(mm/h); t_m 为雨滴降落时间(m/s); V_{evap} 为蒸发速率(mm/s),采用以下方程^[32]进行计算:

$$V_{\text{evap}} = 4\pi \ln\left(1 + \frac{Fr}{s'}\right)(p_a - p_b) \quad (4)$$

为了方便计算降水过程中的蒸发速率,进一步将方程分成两部分, $4\pi d(1 + \frac{Fr}{s'})$ 是降水半径与温度确定,缩写为 $V_{\text{evap}1}$, $N(p_a - p_b)$ 由湿度和温度确定缩写为 $V_{\text{evap}2}$ ^[12]。根据前人研究^[32],如下经验关系求得:

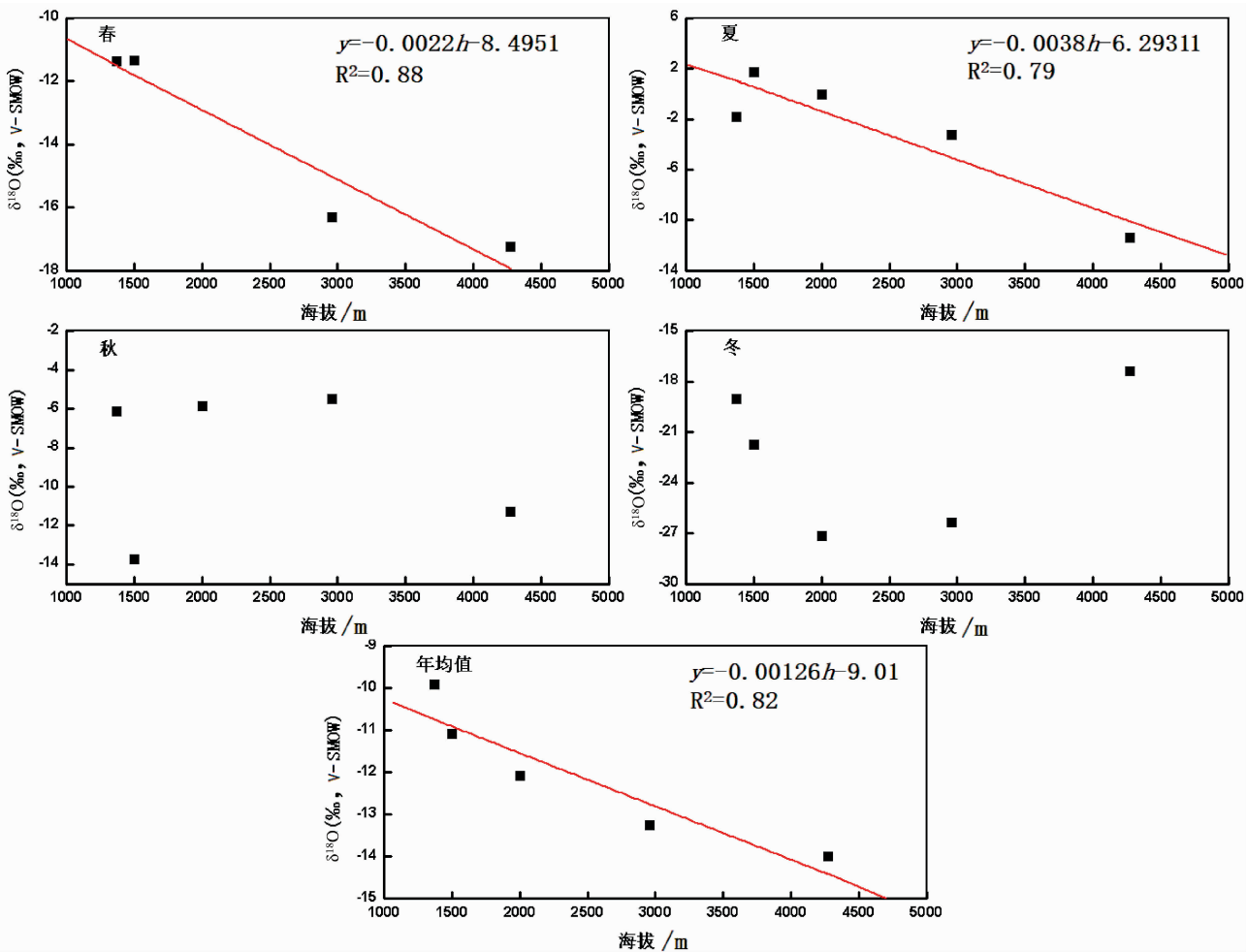


图7 青藏高原西北部降水 $\delta^{18}\text{O}$ —海拔关系的季节变化图

Fig. 7 Relationship between precipitation $\delta^{18}\text{O}$ value and altitude in the NWTP

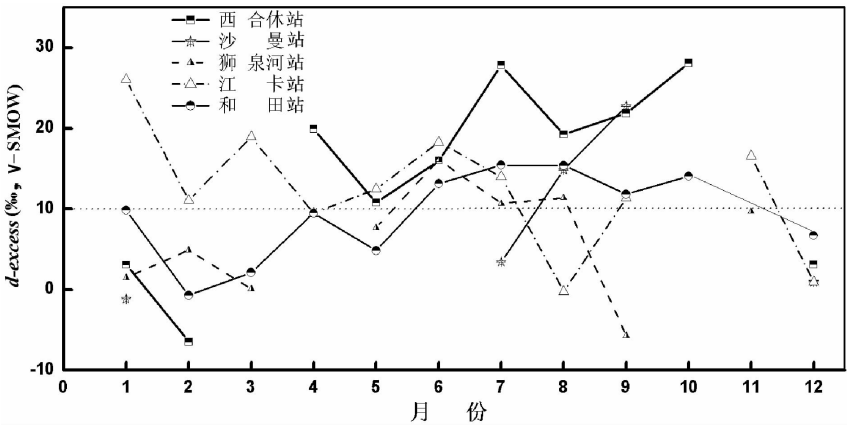


图8 青藏高原西北部大气降水 d 的季节变化

Fig. 8 The seasonal variation of the monthly deuterium excess in the NWTP

$$V_{evap2} = (-0.2445T + 131.28) \times (2r)^{1.6139}$$
$$V_{evap2} = (-0.0073h + 0.7264) \times e^{((-0.00002 * h + 0.0371) * T)}$$

其中, T 为温度 ($^{\circ}\text{C}$), h 为相对湿度 (%), r 为

半径 (mm) (根据前人的研究中亚山区降水半径平均为^[11])。同时可以得到:

$$V_{evap} = V_{evap1} \times V_{evap2} \tag{6}$$

雨滴降落时间 (t_m) 取决于降水高度 (H) 和降水

速率(V):

$$t_m = H/V \tag{7}$$

根据前人研究^[33]给出平均降水速率由以下方程得出:

$$V = 9.58 \{ 1 - \exp[- (\frac{r}{0.885})^{1.147}] \} \tag{8}$$

其中, V 的单位是 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, r 是降水半径,单位是 mm 。

降落高度 H 由 Wang 等^[34]的研究经验公式(9)求得:

$$H = 18\,400(1 + T_{ave}/273)\lg(S_0/S_b) \tag{9}$$

其中, S_0 、 S_b 分别为地表气压及云底气压(Pa), T_{ave} 为云底与地面平均气温($^{\circ}\text{C}$),其中 S_b 由公式(10)求得:

$$S_b = S_o(T_b/T_o)^{3.5}$$
$$T_b = T_d - (0.001296T_d + 0.1963)(T_o - T_d) \tag{10}$$

其中, T_0 、 T_b 、 T_d 分别为地面气温、云底气温、露点气温($^{\circ}\text{C}$)。

本文选取西合休站、狮泉河站、江卡站、和田站全年均值数据计算蒸发比,来探讨蒸发对局地降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值的影响程度。通过计算降水蒸发比(f),四个站点分别为:西合休站 18.98%、狮泉河站 3.47%、江卡站 8.94%、和田站 19.54%,和田站的降水蒸发比最大,狮泉河站的最小(图9)。

本文选取温度在 0°C 以上的样品^[28,32,34],分析蒸发比与温度的关系,其中西合休站选取 4—10 月样品,狮泉河站选取 5—9 月样品,江卡站选取 3—11 月样品,和田站选取 2—10 月样品,前人研究发现^[11,28,34]温度是影响蒸发比的主要因素之一,温度越高,蒸发比越大。对四个站点的蒸发比与温度关

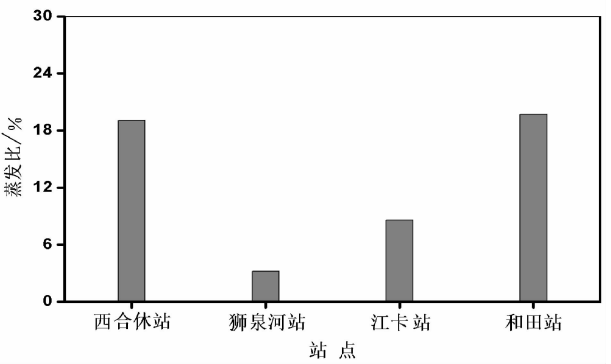


图9 各站点降水云下蒸发比均值图
Fig.9 Mapping the sub-cloud evaporation fraction at each station in the TNWP

系的研究发现,邻近沙漠的和田站夏季气温较高,降水中蒸发影响最强烈,狮泉河站海拔高温度低,蒸发比较小。

4.2 与邻近区域降水稳定同位素比较

为了更好地了解青藏高原西北部与周边地区降水稳定同位素空间分布特征,我们在已有文献中选取了天山区、河西走廊区、喜马拉雅山区、塔里木河流域、黑河流域、青藏高原中南部的降水稳定同位素进行对比研究(表2)。

其中,喜马拉雅山区的降水 $\delta^{18}\text{O}$ 年均值为七个研究区中最小的,其次是青藏高原中南部区。塔里木河流域降水 $\delta^{18}\text{O}$ 年均值最高,其次是黑河流域。七个区域中降水 $\delta^{18}\text{O}$ 最低值出现在黑河流域,最高值在青藏高原西北部和塔里木河地区,均为 8.5‰ 。过量氘均值最低出现在塔里木河流域,最高值出现在河西走廊地区。

邻近地区 $T(\text{温度}) - \delta^{18}\text{O}$ 关系中,青藏高原西北部的斜率最大,达到 0.84,显著高于邻近地区,表明该区域降水氢氧稳定同位素受温度影响更为显

表2 降水稳定同位素在青藏高原及周边地区的变化
Tab. 2 Isotope variations in precipitation at selected stations around Tibetan plateau

| 研究区 | $\delta^{18}\text{O}$ (年均值) | $\delta^{18}\text{O}(\text{‰})$ (变幅) | $D\text{-excess}$ (ave) | $T - \delta^{18}\text{O}$ 系数 | $P_{\text{mount}} - \delta^{18}\text{O}$ 系数 | Altitude - $\delta^{18}\text{O}$ 系数 | 参考文献 |
|---------|--------------------------------|---|----------------------------|---------------------------------|--|--|-----------|
| 青藏高原西北部 | -12.07($n=181$) | (-32.9,8.5) | 10.1 | 0.84 | — | -0.0024 | 本文 |
| 天山山区 | -11.62($n=1052$) | (-18.6,-3.6) | 8.5 | 0.12 | — | — | [35] |
| 河西走廊区 | -7.49 | (-21.6,-3.17) | 12.1 | 0.57 | — | — | [36] |
| 喜马拉雅山区 | -12.57($n=261$) | (-22,12) | — | — | -0.195 | -0.0017 | [37],[38] |
| 塔里木河流域 | 7.99($n=415$) | (-25.7,8.5) | 5.6 | 0.62 | — | — | [39] |
| 黑河流域 | -6.55($n=301$) | (-33.4,6.5) | 10.2 | 0.75 | — | -0.005 | [40] |
| 青藏高原中南部 | -12.26($n=2220$) | (-18.6,-5.5) | — | — | — | — | [18] |

著,天山山区的斜率最小,只有 0.12。天山山区、塔里木河流域等地区并未表现出明显的降水量效应,而喜马拉雅山区具有降水效应,斜率为 -0.195。青藏高原西北部、喜马拉雅山区、黑河流域的降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值也在一定程度上受到高程变化影响。

5 结论

基于对现有数据的分析,本文得出以下主要结论:

(1) 青藏高原西北部降水 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值年内变化明显,表现出显著的时空变化特征,且在不同月份表现出不同的降水稳定同位素空间差异。

(2) 该区降水中表现出显著的温度效应、高程效应,而降水量对降水 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值影响较弱,表明该区降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值主要受控于温度和高程。

(3) 该区降水 d 值取值范围大,水汽来源复杂,降水过程较复杂。

(4) 区域降水线特征,表现为除江卡站的斜率稍小于 8,其余站点的斜率和截距均大于全球大气降水线。

(5) 蒸发对区内降水稳定同位素影响显著,临近沙漠的和田站降水的蒸发比最大,海拔较高的狮泉河站降水蒸发比最弱。

参考文献 (References)

- [1] 黄锦忠,谭红兵,王若安,等. 我国西北地区多年降水的氢氧同位素分布特征研究 [J]. 水文, 2015, **35**(1): 33–39 [HUANG Jinzhong, TAN Hongbing, WANG Ruohan, et al. Quantitative discrimination of climate change and human activities impacting on runoff in Xitiaoxi River Basin [J]. Journal of China hydrology, 2015, **35**(1): 33–39]
- [2] 李亚举,张明军,王圣杰,等. 我国大气降水中稳定同位素研究进展 [J]. 冰川冻土, 2011, **33**(3): 624–633 [LI Yaju, ZHANG Mingjun, WANG Shengjie, et al. Progress of the research of stable isotope in precipitation in China: a review [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, **33**(3): 624–633]
- [3] 高德强,徐庆,张蓓蓓,等. 鼎湖山大气降水氢氧同位素特征及水汽来源 [J]. 林业科学研究, 2017, **30**(3): 384–391 [GAO Deqiang, XU Qing, ZHANG Beibei, et al. Characteristics of δD and $\delta^{18}\text{O}$ in Precipitation in Mt. Dinghu and its water vapor sources [J]. Forest Research, 2017, **30**(3): 384–391]
- [4] CRAIG H. Isotopic Variations in Meteoric Waters [J]. Science, 1961, **133**(3465): 1702
- [5] 黄一民,章新平,唐方雨,等. 长沙大气降水中稳定同位素变化及过量氘指示水汽来源 [J]. 自然资源学报, 2013, **28**(11): 1945–1954 [HUANG Yimin, ZHANG Xinping, TANG Fangyu, et al. Variations of precipitation stable isotope and vapor origins revealed by deuterium excess in Changsha [J]. Journal of natural resources, 2013, **28**(11): 1945–1954]
- [6] 郝玥,余新晓,邓文平,等. 北京西山大气降水中 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 组成变化及水汽来源 [J]. 自然资源学报, 2016, **31**(7): 1211–1221 [HAO Yue, YU Xinxiao, DENG Wenping, et al. The Variations of hydrogen and oxygen compositions and moisture sources in the Precipitation in Western Mountain Areas of Beijing [J]. Journal of natural resources, 2016, **31**(7): 1211–1221]
- [7] 李小飞,张明军,王圣杰,等. 黄河流域大气降水氢、氧稳定同位素时空特征及其环境意义 [J]. 地质学报, 2013, **87**(2): 269–277 [LI Xiaofei, ZHANG Mingjun, WANG Shengjie, et al. Spatial and temporal variations of hydrogen and oxygen isotopes in precipitation in the Yellow River Basin and its environmental significance [J]. Acta Geologica Sinica, 2013, **87**(2): 269–277]
- [8] 章新平,施雅风,姚檀栋. 青藏高原东北部降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化特征 [J]. 中国科学, 1995, **25**(5): 94–101 [ZHANG Xinping, SHI Yafeng, YAO Tandong, Variation characteristics of $\delta^{18}\text{O}$ in the northeast of Qinghai Tibet Plateau [J]. Science in China, 1995, **25**(5): 94–101]
- [9] 章新平,姚檀栋. 我国降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的分布特点 [J]. 地理学报, 1998, **53**(4): 356–364 [ZHANG Xinping, YAO Tandong. Distributional feature of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation in China [J]. Acta Geographica Sinica, 1998, **53**(4): 356–364]
- [10] YAO Tandong, THOMPSON L G, JIAO Keqin, et al. Recent warming as recorded in the Qinghai-Tibetan cryosphere [J]. Annals of Glaciology, 1995, **21**: 196–200
- [11] 李艳伟,杜秉玉,周晓兰. 新疆天山山区雨滴谱特性及分布模式 [J]. 南京气象学院学报, 2003, **26**(4): 465–472 [LI Yanwei, DU Bingyu, ZHOU Xiaolan. Features of eaindrop size distributions in Tianshan Area [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 2003, **26**(4): 465–472]
- [12] 孔彦龙. 基于氘盈余的内陆干旱区水汽再循环研究 [D]. 北京:中国科学院大学, 2013. [KONG Yanlong. Study on water recirculation in Inland Arid Area based on deuterium surplus [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013.]
- [13] 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 [LIU Jianrong, SONG Xianfang, YUAN Guofu, et al. Characteristics of $\delta^{18}\text{O}$ in Precipitation over Northwest China and its water vapor sources [J]. Acta Geographica Sinica, 2008, **63**(1): 12–22]
- [14] 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 [LIU Yangmin, ZHANG Mingjun, WANG Shengjie, et al. Interannual variation of stable hydrogen and oxygen isotopes in precipitation in Arid Northwest China based on GCMs [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016, **23**(1): 260–267]
- [15] 吐尔逊江·艾莎,海米提·依米提,古丽娜尔·哈别别克,等. 塔里木盆地降水中稳定同位素变化特征浅析——以和田地区为例 [J]. 安徽农业科学, 2012, **40**(4): 2163–2165

- [Tursunjan · Aysa, Aisha · Hemiti, Yimiti · Guli Rarl, et al. Analysis on variation characteristics of stable isotopes in the precipitation of Tarim Basin [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2012, **40**(4): 2163–2165]
- [16] WANG Shengjie, ZHANG Mingjun, 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
- [17] 田立德, 姚檀栋, 孙维贞, 等. 青藏高原南北降水中 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 关系及水汽循环 [J]. *中国科学: 地球科学*, 2001, **31**(3): 214–220 [TIAN Lide, YAO Tandong, SUN Weizhen, et al. Relationship between δD and $\delta^{18}\text{O}$ and water vapor cycle in the northern and southern Tibetan Plateau [J], *Science China: Earth Sciences*. 2001, **31**(3): 214–220]
- [18] YAO Tandong, MASSON-DELMOTTE V, GAO Jing, et al. A review of climatic controls on $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation over the Tibetan Plateau: Observations and simulations [J]. *Reviews of Geophysics*, 2013, **51**(4): 525–548
- [19] 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*, 2001, **31**(5): 353–361 [ZHANG Xinping, Masayoshi Nakawo, YAO Tandong, et al. Temporal and spatial variation of stable isotope composition in precipitation over the Tibetan Plateau and its adjacent area [J]. *Science in China*, 2001, **31**(5): 353–361]
- [20] 朱建佳, 陈辉, 巩国丽. 柴达木盆地东部降水氢氧同位素特征与水汽来源 [J]. *环境科学*, 2015, **36**(8): 2784–2790. [ZHU Jianjia, CHEN Hui, GONG Guoli. Hydrogen and oxygen isotopic compositions of precipitation and its water vapor sources in eastern Qaidam Basin [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(8): 2784–2790]
- [21] 贺建桥, 张伟, 周剑, 等. 山脉走向对降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 垂直递减率的影响——以黑河流域上游祁连山区为例 [J]. *冰川冻土*, 2016, **38**(2): 359–367 [HE Jianqiao, ZHANG Wei, ZHOU Jian, et al. The impact of mountain range orientation on the lapse rate of precipitation $\delta^{18}\text{O}$ in the upper reaches of the Heihe River Basin in the Qilian Mountains [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2016, **38**(2): 359–367]
- [22] 余武生, 姚檀栋, 田立德, 等. 青藏高原西部降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 变化特征 [J]. *冰川冻土*, 2004, **26**(2): 146–152 [YU Wusheng, YAO Tandong, TIAN Lide, et al. Variation of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation in the Western Tibetan Plateau [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2004, **26**(2): 146–152]
- [23] LI Zhen, YAO Tandong, TIAN Lide, et al. Variations of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation from the Muztagata Glacier, East Pamirs [J]. *Earth Science*, 2006, **49**(1): 36–42
- [24] 郭向中. 帕米尔高原植被垂直地带性及其对气候的响应 [D]. 广州: 华南师范大学, 2009 [GUO Xiangzhong. The Vertical Vegetation Zone of the Pamirs and Its Response to Climate [D]. Guangzhou: South China Normal University, 2009]
- [25] 林厚博. 青藏高原降水变化及其水汽条件研究 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2016 [LIN Houbo. The characteristic of precipitation over the Tibetan Plateau and its association with water vapor [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2016]
- [26] 孙从建, 陈伟. 天山山区典型内陆河流域径流组分特征分析 [J]. *干旱区地理*, 2017, **40**(1): 37–44 [Sun Congjian, Chen Wei. Streamflow components in inland rivers in the Tianshan Mountains, Northwest China [J]. *Arid Land Geography*, 2017, **40**(1): 37–44]
- [27] 陈曦. 中国干旱区自然地理 [M]. 科学出版社, 2015, **66**(7): 1005–1005 [CHEN Xi. Physical geography of arid areas in China [M]. China Science Publishing, 2015, **66**(7): 1005–1005]
- [28] DANSGAARD W. Stable isotopes in precipitation [J]. *Tellus*, 1964, **16**(4): 436–468
- [29] STEWART M K. Stable isotope fractionation due to evaporation and isotopic exchange of falling waterdrops: Applications to atmospheric processes and evaporation of lakes [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1975, **80**(9): 1133–1146
- [30] LIU Zhongfang, TIAN Lide, YAO Tandong, et al. Seasonal deuterium excess in Nagqu precipitation: influence of moisture transport and recycling in the middle of Tibetan Plateau [J]. *Environmental Geology*, 2008, **55**(7): 1501–1506
- [31] KONG Yanlong, PANG Zhonghe, FROELICH K. Quantifying recycled moisture fraction in precipitation of an arid region using deuterium excess [J]. *Tellus Series B-chemical & Physical Meteorology*, 2013, **65**(1): 388–402
- [32] KINZER G D, GUNN R. The evaporation, temperature and thermal relaxation-time of freely falling waterdrops [J]. *Journal of Atmospheric Sciences*, 1951, **8**(2): 71–83
- [33] BEST A C. Empirical formulae for the terminal velocity of water drops falling through the atmosphere [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2010, **76**(329): 302–311
- [34] WANG Shengjie, ZHANG Mingjun, CHE Yanjun, 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
- [35] WANG Shengjie, ZHANG Mingjun, 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 & Physical Meteorology*, 2016, **68**(sup1): 289–299
- [36] GUO Xiaoyan, FENG Qi, WEI Yongping, et al. An overview of precipitation isotopes over the extensive Hexi Region in NW China [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2015, **8**(7): 4365–4378
- [37] 文蓉, 田立德, 翁永标, 等. 喜马拉雅山南坡降水与河水中 $\delta^{18}\text{O}$ 高程效应 [J]. *科学通报*, 2012, **57**(12): 1053 [WEN Rong, TIAN Lide, WENG Yongbiao, et al. The altitude effect of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation and river water in the Southern Himalayas [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2012, **57**(12): 1053]
- [38] 章新平, 中尾正义, 藤田耕史, 等. 喜马拉雅山朗塘流域降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化 [J]. *中国科学: 地球科学*, 2001, **31**(3): 206–213. [ZHANG Xinping, MASAYOSHI Nakawo, KOJI Fujita, et al. Changes of $\delta^{18}\text{O}$ precipitation in Himalaya basin of Tang Shan Lang [J]. *Science China Earth Sciences*, 2001, **31**

- (3): 206–213
- [39] SUN Congjian, LI Xingong, CHEN Yaning, et al. Spatial and temporal characteristics of stable isotopes in the Tarim River Basin [J]. *Isotopes in Environmental & Health Studies*, 2016, **52**(3): 281–297
- [40] 吴锦奎, 杨淇越, 丁永建, 等. 黑河流域大气降水稳定同位素变化及模拟 [J]. *环境科学*, 2011, **32**(7): 1857–1866 [WU Jinkui, YANG Qiyue, DING Yongjian, et al. Variations and simulation of stable isotopes in precipitation in the Heihe River Basin [J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(7): 1857–1866]

Temporal and Spatial Characteristics of Stable Isotopes of Atmospheric Precipitation in the Northwestern Tibetan Plateau

SUN Congjian^{1*}, ZHANG Ziyu¹, LI Jie², CHEN Ruoxia¹, LI Wei¹

(1. Shanxi Normal University, School of Geographical Science, Linfen, 041000, China;

2. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: As an important indicator of water environment, stable isotope has become an important tool for regional hydrology and climatology research. Precipitation as an input of water cycle, its isotopic composition is necessary information for the study of mountain surface water process, groundwater formation and transformation, glacial change and other issues. In order to further increase understanding of the precipitation process and its controlling factors in the northwestern Tibetan Plateau, this paper has studied spatial and temporal distribution characteristics of stable isotope of atmospheric precipitation in the area between the northwestern Qinghai-Xizang Plateau and the Tarim Basin, based on the data of precipitation δD and $\delta^{18}O$ obtained at five long-term observation stations in the northwest of the Tibetan Plateau. The analysis results showed that the seasonal variations of precipitation stable isotopes in this area were obvious, showing a trend of high in summer and low in winter, and in different months it presented different spatial distribution characteristics. Except that the precipitation $\delta^{18}O$ value at the Shiquanhe station had no significant relationship with temperature, the $\delta^{18}O$ values at other stations increased with the increase of temperature. The influence of precipitation in the area on the value of precipitation $\delta^{18}O$ was not significant, but the elevation effect of precipitation stable isotope was obvious. The value of precipitation $\delta^{18}O$ decreased with elevation. The distribution of precipitation excess deuterium (d value) also showed a significant seasonal difference. The overall pattern was high in summer and low in winter. Affected by water vapor recirculation, the value of d in summer precipitation at Xihehe station was higher. Studies suggested that temperature was an important factor in controlling the isotope fractionation of precipitation in the area. Through the calculation of the precipitation-evaporation ratio in this area, it was found that the precipitation isotopes at the Hetian station near the desert were most significantly affected by evaporation, and at the Shiquan station with high altitudes, precipitation was minimally affected by evaporation.

Key words: precipitation; δD ; $\delta^{18}O$; spatial-temporal distribution; evaporation enrichment