

文章编号: 1008-2786-(2019)6-808-10
DOI:10.16089/j.cnki.1008-2786.000471

甘肃夏季降水同位素云下二次蒸发效应

周苏娥, 张明军*, 王圣杰, 周盼盼, 车彦军

(西北师范大学 地理与环境科学学院, 兰州 730070)

摘 要: 降水中稳定同位素值会因雨滴降落过程中受到云下二次蒸发的影响而发生变化, 研究雨滴云下二次蒸发对利用降水氢氧稳定同位素解释水循环过程具有重要意义。本文利用 2017 年 6 月—8 月甘肃 74 个地面气象站逐小时观测资料与 10 个高空气象站定时观测资料, 基于改进的 Stewart 模型(分层假设)深入研究了甘肃夏季降水同位素的云下二次蒸发。结果表明: (1) 甘肃各分区的云下二次蒸发存在明显的时间变化, 从月尺度看, Δd (d -excess 变化量) 均值在陇南山地和甘南高原均为 7 月最小, 在陇中黄土高原和河西地区均为 6 月最小; 从小时尺度看, Δd 值在 2:00 ~ 15:00 这一时间段较小, 且甘南高原的 Δd 均值变化幅度最大。 (2) 从空间来看, 陇中黄土高原、甘南高原(除舟曲)、陇南山地(除文县)和河西地区(除马鬃山、酒泉和武威) Δd 均值分别 $> -15\text{‰}$, 而陇中黄土高原的 Δd 均值最高。 (3) 不同分区蒸发剩余比(f)和 Δd 的线性关系的斜率均超过 $1\text{‰}/\%$, 这可能与甘肃的气候有关。 (4) 当气温较高, 降水量、相对湿度和雨滴直径较小时, 云下二次蒸发效应明显。

关键词: 甘肃; 降水; 稳定同位素; 云下二次蒸发; 改进的 Stewart 模型

中图分类号: P426.61

文献标志码: A

氢氧稳定同位素 ^{18}O 和 $\text{D}(^2\text{H})$ 对环境的变化具有高度敏感性, 在复杂的气候和水文过程研究中常作为示踪剂^[1-5]。大气降水是陆地水资源得以补充的重要来源, 是水循环过程的重要环节, 而在降水过程中, 雨滴经过不饱和空气时经历蒸发, 即云下二次蒸发, 这会使降水同位素值发生改变(^{18}O 和 ^2H 等重同位素富集), 过量氘 ($d\text{-excess} = \delta\text{D} - 8\delta^{18}\text{O}$) 降低^[6-9], 因此可以通过云下二次蒸发效应的研究进一步明晰区域水循环机理。随着研究的日益深化, 简单的定性描述已不能满足需求, 我们应对云下二次蒸发过程进行参数优化, 使得研究更为精细化^[10]。

云下二次蒸发是水循环过程中不可或缺的部分^[11], 已有大量学者针对其存在性不断展开验证^[10, 12-16], Stewart 模型及其各种改进方案是量化雨滴云下二次蒸发的重要方法^[11-12, 18-21]。根据对雨滴降落过程是否分层, Stewart 模型可以分为均质假设和分层假设^[25]。将雨滴降落过程中的空气看成均质体, 仅将地面参数代入计算的是均质假设, 也是目前云下二次蒸发研究中使用最多的方法^[9, 11, 22-25]; 分层假设是在均质假设的基础上, 以多个等压面为分界线对雨滴降落过程进行了分层, 同时将地面参数和高空参数代入计算^[25-26]。Stewart 模型较为复杂, 涉及到很多参数, 除了气温和相对湿度等常规气象参数外, 雨滴直径和雨滴降落高度也是模型中必不可少的参数。由于雨滴直径并非常规

收稿日期 (Received date): 2019-04-16; **改回日期** (Accepted date): 2019-07-08

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金项目(41771035); 甘肃省高等学校科研项目(2016B-019) [National Natural Science Foundation of China (41771035); Scientific Research Project of Institutions of Higher Learning in Gansu Province (2016B-019)]

作者简介 (Biography): 周苏娥(1993-), 女, 甘肃静宁人, 硕士研究生, 主要研究方向: 全球变化与可持续发展。[ZHOU Su'e (1993-), female, born in Jingning, Gansu province, M. Sc. candidate, research on global change and sustainable development] E-mail: geozse@126.com

*** 通讯作者** (Corresponding author): 张明军(1974-), 男, 甘肃宁县人, 教授, 主要研究方向: 冰川与环境演变、气候变化与水文过程。[ZHANG Mingjun (1974-), male, born in Ningxian, Gansu province, professor, specialized in glaciers and environmental evolution, climate change and hydrological processes] E-mail: mjzhang2004@163.com

指标且较难测定,前人一般采用定值来表示^[9,24,26],当然,雨滴直径存在复杂的规律,在Stewart模型中用统一的初始值未必准确^[23,25]。对于雨滴降落高度(即云底高度与地面海拔之差),一些研究也采用定值表示^[22,24-26]。而Wang等^[23]在新疆的研究中对雨滴直径和雨滴降落高度的计算进行了改进,直接以常规气象参数代入计算表示雨滴直径和雨滴降落高度,使计算结果更为精确,但在算法上采用的还是均质假设。Crawford等^[26]在对澳大利亚东南部的研究中以距地面200、400、600、850、1000、1250和1500 m为分界线对云下二次蒸发过程进行了详细的分层假设研究,实现了Stewart模型的进一步优化,仍用定值表示直径是其唯一的不足。周苏娥等^[25]通过均质假设和分层假设的对比分析,研究了新疆的云下二次蒸发,并在研究中对雨滴直径和雨滴降落高度均用气象参数来表示。

甘肃省地处我国西北腹地,海洋水汽难以到达,加上地形复杂、降水稀少、蒸发量较大,属于干旱半干旱区,云下二次蒸发效应明显^[10,21,27]。刘洁遥等^[10]利用西北地区8个GNIP站点数据和2个实测站点的降水同位素数据分析了 $\delta^{18}\text{O}$ 和 d 的时空分布,通过定量分析发现云下二次蒸发作用在冬季风期间较弱,在夏季风期间较强;在不同范围内,气温、降水量、水汽压和相对湿度等参数对云下二次蒸发的影响不同。Chen等^[27]以西北地区的永登、皋兰、兰州、榆中四个采样点的420个降水样本及相关气象参数为基础,研究发现云下二次蒸发对同位素的影响在降雨量较小的情况下显著,且二次蒸发速率夏季较高,冬季较低,区域空间差异明显,降水量、气温、水汽压和相对湿度是影响云下二次蒸发的主要因素。Li等^[21]利用祁连山和河西走廊的12个采样点的461个事件降水样品研究发现云下二次蒸发对降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的影响较大,尤其是小降雨事件,降水每蒸发1.0%,祁连山和河西走廊的 $\delta^{18}\text{O}$ 分别富集1.2%和2.6%,气温和相对湿度分别是祁连山和河西走廊云下二次蒸发的重要影响因素。由此可见,关于甘肃云下二次蒸发已有大量成果,但其多以局地采样^[21,27]或仅涉及部分站点^[10,16]的研究较多,涉及甘肃绝大多数站点的研究较少,且研究方法均采用的是均质假设,总体而言,利用Stewart模型对甘肃云下二次蒸发研究进一步细化显得尤为重要。本文在前人^[23,25-26]研究的基础上,采用甘肃及其周边

的10个探空站的高空数据和甘肃74个地面气象站的小时数据,涵盖了甘肃全省的气象站点,将雨滴降落过程进行分层(以850、700和500 hPa为分界线)研究,且在部分参数(雨滴直径和云底高度)的计算过程中将气象参数代入计算,研究结果更为准确。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

甘肃省界于 $32^{\circ}31' \sim 42^{\circ}57' \text{N}$, $92^{\circ}13' \sim 108^{\circ}46' \text{E}$ 。地势自西北向东南倾斜,东西长约1655 km,南北宽约530 km,面积 $45.37 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。山地、高原、平川、河谷、沙漠、戈壁等地貌类型兼而有之。该区气候干燥,属大陆性很强的温带季风气候,自东南向西北年降水量递减,气象要素的垂直变化明显,这也使得该地成为全球气候变化的敏感区域,同时也是生态的脆弱区^[28-29]。雨滴降落过程中经历云下二次蒸发,在干旱半干旱区尤为明显^[11,22]。考虑到甘肃省地理条件差异较大,且气象站点分布不均,本文将甘肃分为陇南山地区(9个站点)、陇中黄土高原区(43个站点)、甘南高原区(8个站点)以及河西地区(14个站点)进行研究(图1)。

1.2 数据来源

本文采用甘肃2017年夏季(6月—8月)的74个地面气象站逐小时观测资料(<http://data.cma.cn/data>),选用气温、降水量、水汽压和相对湿度等参数;并选取2017年夏季(6月—8月)甘肃及其周边10个高空站点(马鬃山、酒泉、敦煌、民勤、合作、榆中、崆峒、西宁、延安和汉中)的降水量、相对湿度、气温和露点温度等参数(<http://weather.uwyo.edu>)。由于高空站点相对较少,在具体计算过程中利用IDW插值对高空数据进行处理,使地面站点与高空站点相对应。

1.3 研究方法

由于甘肃地域辽阔,境内地形复杂,地势自西北向东南倾斜,且海拔差异较大,因此在研究中将甘肃分为陇南山地区、陇中黄土高原区、甘南高原区以及河西地区四个分区进行研究。考虑到甘肃复杂的环境条件,本文的研究中将雨滴从云底降落到地面的过程以等压线(850、700和500 hPa)为分界线进行分层研究,且考虑到蒸发的条件,将气温低于 0°C 的数据未代入计算,具体参考周苏娥等^[25]的方法。

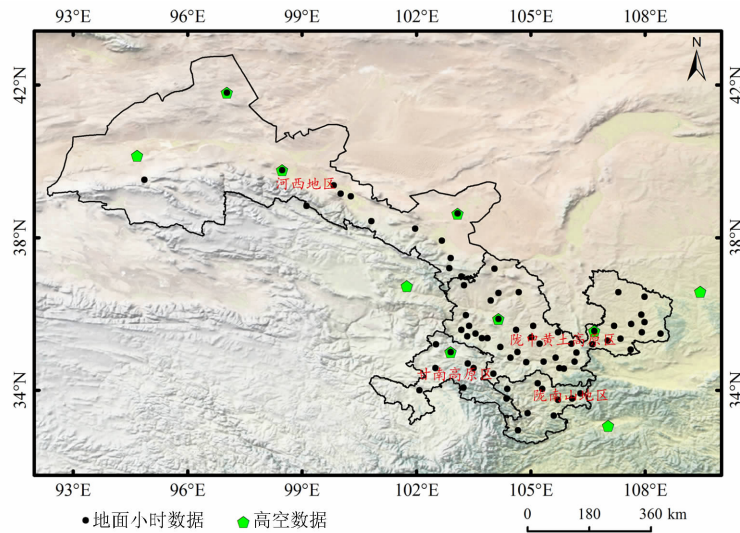


图1 甘肃气象站点空间分布

Fig. 1 Distribution of meteorological station in different regions in Gansu province, China

地面雨滴和云底雨滴中的 d -excess 之差可以用 Δd 来表示,计算公式如下:

$$\Delta d = \left(1 - \frac{2}{\alpha}\right) (f^{2\beta} - 1) - 8 \left(1 - \frac{18}{\alpha}\right) (f^{18\beta} - 1) \quad (1)$$

类似地,地面雨滴和云底雨滴中的 δD ($\delta^{18}O$) 之差可以用 $\Delta\delta D$ ($\Delta\delta^{18}O$)^[22,25] 来表示:

$$\Delta\delta D = \left(\frac{2}{\alpha}\right) (f^{2\beta} - 1) \quad (2)$$

$$\Delta\delta^{18}O = \left(\frac{18}{\alpha}\right) (f^{18\beta} - 1) \quad (3)$$

式中,Stewart^[32]对参数 2γ 、 18γ 、 2β 和 18β 已进行详细说明; α 和 18α 为平衡分馏系数^[30-31]; f 为雨滴剩余比,即雨滴降落过程中经历云下二次蒸发,剩余的质量占雨滴降落时质量的百分比^[23]。

在 Stewart 模型中,输入参数较多且较为复杂,其中雨滴直径是重要的输入参数,且本文采用分层假设的计算方法,在计算过程中不仅涉及地面雨滴直径(D_{50}),还涉及云底雨滴直径(D_c),具体计算公式如下:

$$D_{50} = \sqrt[n]{0.69AI^p} \quad (4)$$

$$D_c = \sqrt{\frac{6(m_{\text{end}} + m_{\text{ev}})}{\pi\rho}} \quad (5)$$

式中,参数 n 、 A 和 p 均取定值^[25]; I 为降水强度 ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$); m_{end} 为雨滴落地时的质量 (g); m_{ev} 为蒸发的质量 (g); ρ 为水的密度 (g/cm^3)。

由于甘肃陇南山地区、陇中黄土高原区、甘南高

原区以及河西地区四个分区地形、海拔差异较大,分层难度较大,因此在分层过程中根据具体站点处海拔、气压等实际情况,分 6 种情况进行计算。当站点气压 $> 850 \text{ hPa}$,分为 3 种情况:(1)站点气压 $>$ 云底气压 $> 850 \text{ hPa}$;(2) $850 \text{ hPa} >$ 云底气压 $> 700 \text{ hPa}$;(3) $700 \text{ hPa} >$ 云底气压 $> 500 \text{ hPa}$ 。当 $850 \text{ hPa} >$ 站点气压 $> 700 \text{ hPa}$,分为 2 种情况:(4)站点气压 $>$ 云底气压 $> 700 \text{ hPa}$;(5) $700 \text{ hPa} >$ 云底气压 $> 500 \text{ hPa}$ 。当 $700 \text{ hPa} >$ 站点气压 $> 500 \text{ hPa}$,只有 1 种情况:(6)站点气压 $>$ 云底气压 $> 500 \text{ hPa}$ 。

2 结果与分析

2.1 f 、 $\Delta\delta D$ 、 $\Delta\delta^{18}O$ 和 Δd 的时间变化

2.1.1 f 、 $\Delta\delta D$ 、 $\Delta\delta^{18}O$ 和 Δd 的逐时变化

由图 2 可以看出,甘肃各分区的蒸发剩余比 f 、 $\Delta\delta D$ 、 $\Delta\delta^{18}O$ 和 Δd 的逐时变化各不相同。图 2(a、b、c、d)为四个分区 f 的逐时变化, f 值越大,说明蒸发作用越小; f 值越小,说明蒸发作用越大。可以看出,陇南山地、陇中黄土高原和甘南高原的小时变化在 6 月、7 月较小,8 月较大,河西地区 6 月、8 月较小,7 月较大,整体来看,各分区的 f 大约在 2:00 ~ 15:00 这一时间段较小,即云下二次蒸发越强烈。图 2(e、f、g、h)为四个分区 $\Delta\delta D$ 的逐时变化,可以看出,陇南山地、陇中黄土高原和甘南高原 6 月、7 月较大,8 月较小,河西地区 6 月、8 月较大,7 月较小,

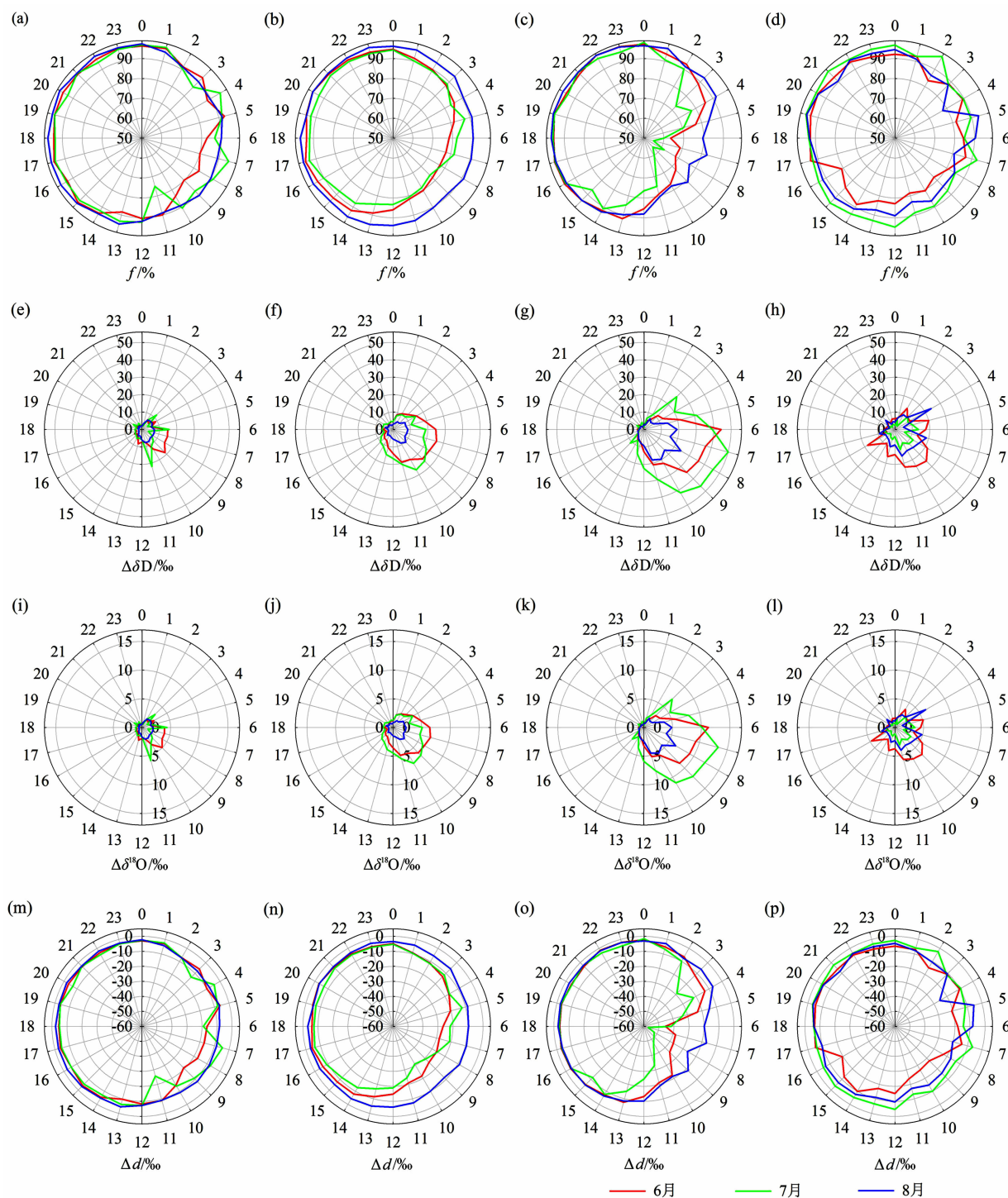


图2 甘肃2017年6月—8月各分区 f 、 $\Delta\delta D$ 、 $\Delta\delta^{18}O$ 和 Δd 的逐时变化:陇南山地(a, e, i, m);

陇中黄土高原(b, f, j, n);甘南高原(c, g, k, o);河西地区(d, h, l, p)

Fig.2 Hourly variation of f , $\Delta\delta D$, $\Delta\delta^{18}O$ and Δd in precipitation in the Longnan Mountain area (a, e, i, m), the Loess Plateau of central Gansu (b, f, j, n), the Gannan Plateau (c, g, k, o), the Hexi Region (d, h, l, p) in Gansu province from June to August 2017

各分区的 $\Delta\delta D$ 大约在 2:00 ~ 12:00 这一时间段较大。由图 2(i, j, k, l) 可以看出, $\Delta\delta^{18}O$ 的变化与 $\Delta\delta D$ 类似, 陇南山地、陇中黄土高原和甘南高原 6 月、7 月较大, 8 月较小, 河西地区 6 月、8 月较大, 7 月较

小, $\Delta\delta^{18}O$ 大约在 3:00 ~ 12:00 这一时间段较大。图 2(m, n, o, p) 为四个分区 Δd 的小时变化, 可以看出, Δd 的变化与 f 的变化类似, 陇南山地、陇中黄土高原和甘南高原 6 月、7 月较小, 8 月较大, 河西地区

6月、8月较小,7月较大。 Δd 大约在2:00~15:00这一时间段比较小,云下二次蒸发越强烈,且甘南高原的变化幅度较大,说明云下二次蒸发的变化较大。

2.1.2 f 、 $\Delta\delta D$ 、 $\Delta\delta^{18}O$ 和 Δd 的月变化

甘肃各分区的 f 、 $\Delta\delta D$ 、 $\Delta\delta^{18}O$ 和 Δd 的月变化如图3所示。图3a显示了甘肃不同分区 f 的月变化,陇南山地、陇中黄土高原和甘南高原 f 均值8月最大,6月最小;河西地区 f 均值7月最大,6月最小。图3b显示了甘肃不同分区降水中 $\Delta\delta D$ 的月变化,陇南山地和陇中黄土高原的 $\Delta\delta D$ 均值6月最大,8月最小;甘南高原的 $\Delta\delta D$ 均值7月最大,8月最小;河西地区的 $\Delta\delta D$ 均值6月最大,7月最小。图3c显示了甘肃不同分区降水中 $\Delta\delta^{18}O$ 的月变化,陇南山地和陇中黄土高原的 $\Delta\delta^{18}O$ 均值8月最小;甘南高原的 $\Delta\delta^{18}O$ 均值7月最大,6月最小;河西地区的 $\Delta\delta^{18}O$ 均值6月最大,7月最小。图3d显示了甘肃不同分区降水中 Δd 的月变化,陇南山地的 Δd 均值8月最大,7月最小;陇中黄土高原的 Δd 均值8月最大,6月最小;甘南高原的 Δd 均值7月最小,6月最大;河西地区的 Δd 均值6月最小,7月最大。整体来看,陇南山地、陇中黄土高原、甘南高原和河西地区的云下二次蒸发均为6月较强烈。

2.2 f 、 $\Delta\delta D$ 、 $\Delta\delta^{18}O$ 和 Δd 的空间变化

f 、 $\Delta\delta D$ 、 $\Delta\delta^{18}O$ 和 Δd 的空间分布如图4所示。

由图可以看出,在陇南山地, f 均值较大,呈由西向东呈增加的规律; $\Delta\delta D$ 均值和 $\Delta\delta^{18}O$ 均值(除文县、武都)较小; Δd 均值(除文县) $> -15\text{‰}$ 。在陇中黄土高原, f 均值呈中间小、东西高的规律分布; $\Delta\delta D$ 均值和 $\Delta\delta^{18}O$ 均值(除景泰、永登和环县)较小; Δd 均值 $> -15\text{‰}$,较大。在甘南高原, f 均值(除舟曲和玛曲)均较大; $\Delta\delta D$ 均值(除玛曲、舟曲)和 $\Delta\delta^{18}O$ 均值(除玛曲、舟曲)较小; Δd 均值(除卓尼和舟曲)为 $-15\text{‰} \sim -10\text{‰}$ 。在河西地区, f 均值在乌鞘岭最大、在马鬃山和酒泉最小; $\Delta\delta D$ 均值(除马鬃山、酒泉和武威)和 $\Delta\delta^{18}O$ 均值(马鬃山、酒泉、高台和武威)值较小; Δd 均值(除马鬃山、酒泉和武威) $> -15\text{‰}$ 。

2.3 f 与 Δd 的关系

f 与 Δd 之间存在显著的相关性(如图5),已有研究发现,在 f 值较大(f 值在90%以上甚至更大时)的情况下二者存在一个斜率约为 $1\text{‰}/\%$ ($1.1\text{‰}/\%$ 或 $1.2\text{‰}/\%$)的关系,即蒸发量每增加1%,则降水 Δd 减小约 1‰ ^[9,24],但是在干旱的环境下,雨滴从云底降落到地面的 f 值可能低于90%,对于一些较小的雨滴在降落过程中几乎蒸发殆尽^[33]。从图5a可以看出,陇南山地 f 和 Δd 的线性关系的斜率为 $1.23\text{‰}/\%$, R^2 为0.90。从图5b可以看出,

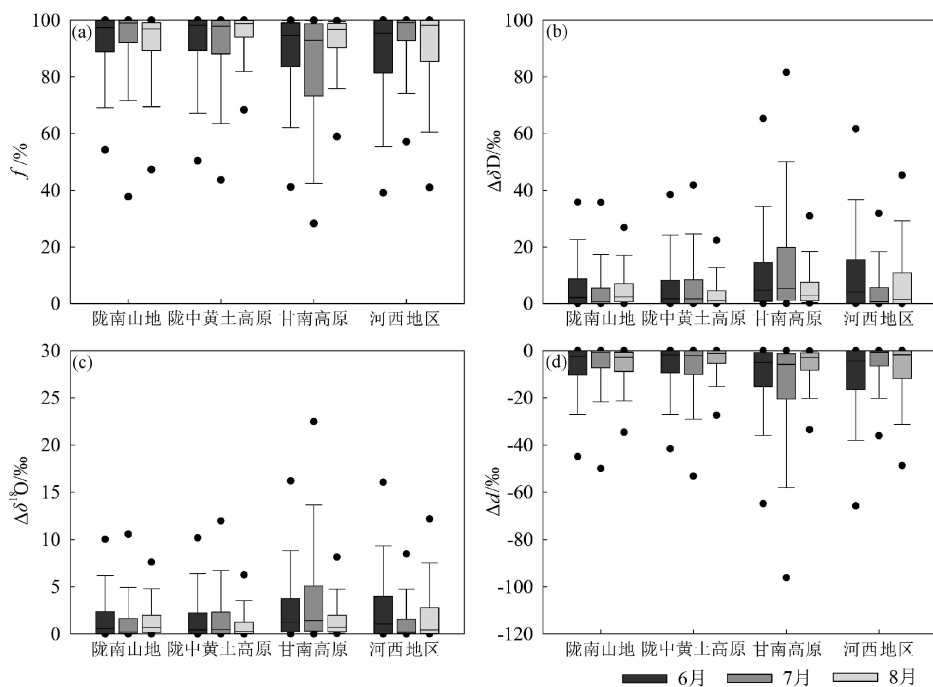


图3 甘肃2017年6月—8月各分区 f 、 $\Delta\delta D$ 、 $\Delta\delta^{18}O$ 和 Δd 的月变化

Fig. 3 Monthly variation of f , $\Delta\delta D$, $\Delta\delta^{18}O$ and Δd in precipitation in Gansu province from June to August in 2017

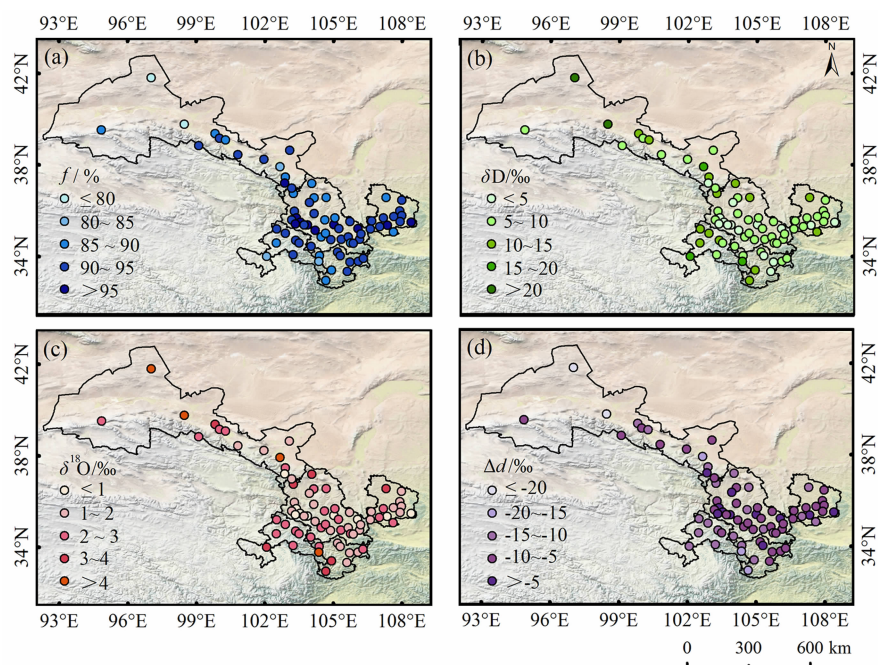


图4 甘肃2017年6月—8月 f 、 $\Delta\delta D$ 、 $\Delta\delta^{18}O$ 和 Δd 的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of f , $\Delta\delta D$, $\Delta\delta^{18}O$ and Δd in precipitation in Gansu province from June to August 2017

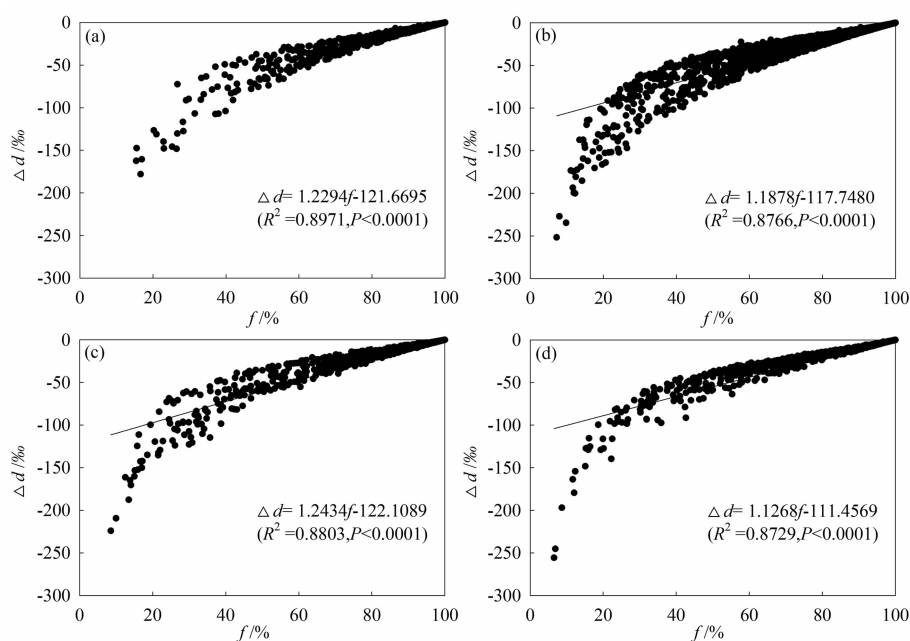


图5 2017年6月—8月甘肃各分区 f 与 Δd 的关系:

(a) 陇南山地; (b) 陇中黄土高原; (c) 甘南高原; (d) 河西地区

Fig. 5 Relationship between f and Δd in precipitation in the Longnan Mountain (a), the Loess Plateau of central Gansu (b), the Gannan Plateau (c) and the Hexi Region (d) from June to August 2017

陇中黄土高原 f 和 Δd 的线性关系的斜率为 $1.19\text{‰}/\%$, R^2 为0.88。从图5c可以看出,甘南高原 f 和 Δd 的线性关系的斜率为 $1.24\text{‰}/\%$, R^2 为0.88。从图5d可以看出,河西地区 f 和 Δd 的线性

关系的斜率为 $1.13\text{‰}/\%$, R^2 为0.87。整体来看四个分区的斜率均 $>1\text{‰}/\%$,甘南高原的斜率最高,四个分区 R^2 均超过0.85,陇南山地的 R^2 最大。

2.4 气象要素与 Δd 的关系

前人研究发现,云下二次蒸发的主要影响因素为气温、降水量、相对湿度和雨滴直径^[23,27,34],其中对 Δd 影响较大的是雨滴直径和相对湿度^[23]。各气象要素(气温、降水量、相对湿度和雨滴直径)与 Δd 的关系如图 6 所示,从图 6a 可以看出,当气温较低时,云下二次蒸发 Δd 接近于 0,随着气温的升高, Δd 明显降低。从图 6b 可以看出,当降雨量较小时, Δd 较小,说明云下二次蒸发较强,当降雨量较多时, Δd 较大,接近于 0。从图 6c 可以看出,当相对湿度较低时, Δd 较小,随着相对湿度增加, Δd 逐渐变大。从图 6d 可以看出,当地面雨滴直径较小时, Δd 较小,说明云下二次蒸发强烈,随着雨滴直径增加, Δd 逐渐接近于 0。因此可以发现当气温较高,相对湿度、降雨量和雨滴直径较小时, Δd 较小,说明云下二次蒸发效应强烈,而当气温较低,相对湿度、降雨量和雨滴直径较大时, Δd 较大,说明云下二次蒸发效应不明显。

3 讨论

在干旱半干旱地区,云下二次蒸发效应不容忽视^[11,22-23]。Stewart 模型是云下二次蒸发研究的重要

方法,前人对 Stewart 模型已进行相关改进,对云下二次蒸发的定量研究已有大量成果^[9,11,22-24,26-27],目前 Stewart 模型以均质假设和分层假设为主。分层假设是在均质假设的基础上发展而来的,在 Stewart 模型的改进过程中,Wang 等^[23]对雨滴直径和云底高度的计算方法进行了改进,以常规气象参数代入计算,但在云下二次蒸发的计算过程中还是采用均质假设。Crawford 等^[26]对 Stewart 模型进行了改进(采用分层假设),不足之处表现为对雨滴直径还是直接用定值表示。在本文的研究中为进一步探讨甘肃的云下二次蒸发效应,使用常见气象参数表示雨滴直径和云底高度,采用改进后的 Stewart 模型(分层假设),对雨滴降落过程进行了合理的分层研究,且研究过程中既涉及地面数据又涉及高空数据,计算结果较为精准。

从 f 、 $\Delta\delta D$ 、 $\Delta\delta^{18}O$ 和 Δd 的空间分布可以看出, $\Delta\delta D$ 和 $\Delta\delta^{18}O$ 的变化类似, f 和 Δd 的变化类似。且陇南山地的 Δd 均值除文县较小,其他站点的值均较大,说明文县的云下二次蒸发效应强烈;陇中黄土高原的 Δd 均值普遍较大,说明云下二次蒸发较小;甘南高原 Δd 均值除卓尼和舟曲较小外,其他站点均较大,说明卓尼和舟曲的云下二次蒸发强烈;河西地区 Δd 均值除马鬃山、酒泉和武威较小外,其他站

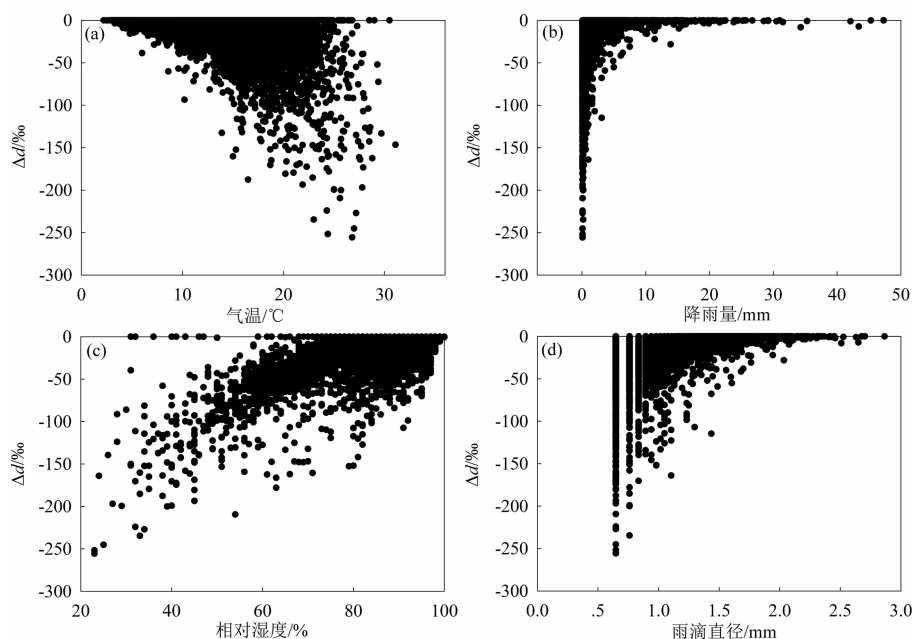


图 6 2017 年 6 月—8 月甘肃各要素 ((a) 气温、(b) 降水量、(c) 相对湿度、(d) 雨滴直径) 与降水 Δd 的关系

Fig. 6 Relationship between the parameters ((a) temperature, (b) precipitation, (c) relative humidity, (d) raindrop diameter) and Δd in precipitation in Gansu province from June to August 2017

点较大,说明马鬃山、酒泉和武威的云下二次蒸发强烈。从 Δd 的月变化可以看出,陇南山地和甘南高原 Δd 均值7月最小;陇中黄土高原和河西地区的 Δd 均值6月最小。在7月陇南山地和甘南高原的云下二次蒸发最明显,在6月陇中黄土高原和河西地区的云下二次蒸发最明显。云下二次蒸发效应受多种因素的影响,已有研究发现云下二次蒸发的主要影响因素有气温、降水量、相对湿度和雨滴直径等参数^[20,23,34-36]。本文研究发现当气温较高,降水量、相对湿度和雨滴直径较小时,云下二次蒸发效应明显。

f 和 Δd 两者之间存在相关性^[9,24,26]。本文对甘肃2017年夏季(6月—8月)的 f 与 Δd 的关系进行了研究,发现其斜率均 $>1\text{‰}/\%$,陇南山地、陇中黄土高原、甘南高原和河西地区 f 和 Δd 的线性关系的斜率分别为 $1.23\text{‰}/\%$ 、 $1.19\text{‰}/\%$ 、 $1.24\text{‰}/\%$ 和 $1.13\text{‰}/\%$,四个分区 R^2 均超过0.85,陇南山地的 R^2 最大,可以发现 f 和 Δd 的线性关系在陇南山地和甘南高原与Salamalikis等^[22]研究结果接近,陇中黄土高原和河西地区与Kong等^[24]研究结果相近。

4 结论

本文结合甘肃74个地面气象站逐小时观测资料与10个高空气象站定时值观测资料,用改进后的Stewart模型对甘肃雨滴降落过程中的云下二次蒸发进行了分层(以850、700和500 hPa处的等压线为分界线)研究,得出以下几条主要结论:

(1)从时间变化来看,甘肃各分区云下二次蒸发存在显著差异性。从月变化看,蒸发剩余比在陇南山地、陇中黄土高原和甘南高原为8月最大,6月最小;河西地区7月最大,6月最小。 $\Delta\delta D$ 和 $\Delta\delta^{18}O$ 的变化类似,在陇南山地和陇中黄土高原均为8月最小,甘南高原7月最大,河西地区6月最大,7月最小, Δd 均值在陇南山地和甘南高原7月最小,陇中黄土高原和河西地区6月最小;从小时变化看,甘南高原的变化幅度大于其他三区,且在2:00~15:00这一时间段的 Δd 比较小。

(2)从空间看,甘肃的云下二次蒸发存在明显的空间差异。陇中黄土高原区的 Δd 较其他三区大,其值 $>-15\text{‰}$,甘南高原(除卓尼和舟曲)的 Δd 值均为 $-15\text{‰} \sim -10\text{‰}$,陇南山地(除文县)和

河西地区(除马鬃山、酒泉和武威)的 Δd 值分别 $>-15\text{‰}$ 。

(3)甘肃不同分区蒸发剩余比和 Δd 的线性关系的斜率均超过 $1\text{‰}/\%$,这可能与甘肃的气候有关。

(4)影响云下二次蒸发的因素主要包括气温、降雨量、相对湿度和地面雨滴直径等参数。当气温较高,降水量、相对湿度和雨滴直径较小时,云下二次蒸发效应明显。

参考文献(References)

- [1] GAT J R. Oxygen and hydrogen isotopes in the hydrologic cycle [J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 1996, **24** (1): 225-262.
- [2] BASKARAN M, NOVELL T, NASH K, et al. Tracing the seepage of subsurface sinkhole vent waters into Lake Huron using radium and stable isotopes of Oxygen and Hydrogen [J]. Aquatic Geochemistry, 2016, **22**(4): 1-26.
- [3] AEMISEGGER F, PFAHL S, SODEMANN H, et al. Deuterium excess as a proxy for continental moisture recycling and plant transpiration [J]. Atmospheric Chemistry & Physics, 2014, **14** (8): 29721-29784.
- [4] WARRIER C U, BABU M P. A study on the spatial variations in stable isotopic composition of precipitation in a semiarid region of Southern India [J]. Hydrological Processes, 2012, **26** (25): 3791-3799.
- [5] LIU Jianrong, SONG Xianfang, YUAN Guofu, et al. Stable isotopes of summer monsoonal precipitation in southern China and the moisture sources evidence from $\delta^{18}O$ signature [J]. Journal of Geographical Sciences, 2008, **18**(2): 155-165.
- [6] WU Huawu, ZHANG Xinping, LI Xiaoyan, et al. Seasonal variations of deuterium and oxygen-18 isotopes and their response to moisture source for precipitation events in the subtropical monsoon region [J]. Hydrological Processes, 2015, **29**(1): 90-102.
- [7] KRESS A, SAURER M, SIEGWOLF R T W, et al. A 350 year drought reconstruction from Alpine tree ring stable isotopes [J/OL]. Global Biogeochemical Cycles, 2010, **24**, GB2011, doi: 10.1029/2009GB003613.
- [8] STEEN-LARSEN H C, MASSON-DELMOTTE V, SJOLTE J, et al. Understanding the climatic signal in the water stable isotope records from the NEEM shallow firn/ice cores in northwest Greenland [J]. Journal of Geophysical Research, 2011, **116**(D6): 161-165.
- [9] FROELICH K, KRALIK M, PAPESCH W, et al. Deuterium excess in precipitation of Alpine regions: moisture recycling [J]. Isotopes in Environmental and Health Studies, 2008, **44**(1): 61-70.
- [10] 刘洁遥, 张福平, 冯起, 等. 西北地区降水稳定同位素的云下

- 二次蒸发效应[J]. 应用生态学报, 2018, **29**(5): 1479 – 1488. [LIU Jieyao, ZHANG Fuping, FENG Qi, et al. Influence of below-cloud secondary evaporation on stable isotope composition in precipitation in Northwest China. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, **29**(5): 1479 – 1488]
- [11] MA Qian, ZHANG Mingjun, WANG Shengjie, et al. An investigation of moisture sources and secondary evaporation in Lanzhou, Northwest China [J]. Environmental Earth Sciences, 2014, **71**(8): 3375 – 3385.
- [12] 孟玉川, 刘国东. 长江流域降水稳定同位素的云下二次蒸发效应[J]. 水科学进展, 2010, **21**(3): 327 – 334. [MENG Yuchuan, LIU Guodong. Effect of below-cloud secondary evaporation on the stable isotopes in precipitation over the Yangtze River Basin [J]. Advances in Water Science, 2010, **21**(3): 327 – 334]
- [13] CORTECCI G, DINELLI E, MUSS M. Isotopic composition and secondary evaporation effects on precipitation from the urban centre of Bologna, Italy [J]. Periodico di Mineralogia, 2008, **77**(1): 53 – 61.
- [14] PENG H, MAYER B, HARRIS S, et al. The influence of below-cloud secondary effects on the stable isotope composition of hydrogen and oxygen in precipitation at Calgary, Alberta, Canada [J]. Tellus B, 2007, **59**(4): 698 – 704.
- [15] ZHU Guofeng, LI Jiafang, SHI Peiji, et al. Relationship between sub-cloud secondary evaporation and stable isotope in precipitation in different regions of China [J]. Environmental Earth Sciences, 2016, **75**(10): 876.
- [16] 任雯, 郑新军, 吴雪, 等. 云下二次蒸发对降水过程中氢氧稳定同位素构成的影响[J]. 干旱区研究, 2017, **34**(6): 1263 – 1270. [REN Wen, ZHENG Xinjun, WU Xue, et al. Effect of below-cloud secondary evaporation on stable isotopes of hydrogen and oxygen in precipitation over the east of northwest China [J]. Arid Zone Research, 2017, **34**(6): 1263 – 1270]
- [17] 潘素敏, 张明军, 王圣杰. 新疆夏季云下二次蒸发对雨滴稳定同位素影响的定量研究[J]. 干旱区地理, 2018, **41**(3): 488 – 498. [PAN Sumin, ZHANG Mingjun, WANG Shengjie. Quantitative study of sub-cloud secondary evaporation effect on stable isotopes in raindrops during summer in Xinjiang [J]. Arid Land Geography, 2018, **41**(3): 488 – 498]
- [18] 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 oxygen and hydrogen isotopes in precipitation in the Yellow River and its environmental significance [J]. Acta Geologica Sinica, 2013, **87**(2): 269 – 277]
- [19] ZHANG Xinping, XIE Zichu, YAO Tandong. Mathematical modeling of variations on stable isotopic ratios in falling raindrops [J]. Acta Meteorologica Sinica, 1998, **12**(2): 213 – 220.
- [20] 赵诗坤, 庞朔光, 文蓉, 等. 海河流域降水稳定同位素的云下二次蒸发效应[J]. 地理科学进展, 2015, **34**(8): 1031 – 1038. [ZHAO Shikun, PANG Shuoguang, WEN Rong, et al. Influence of below-cloud secondary evaporation on stable isotope composition in precipitation in the Haihe River Basin, China [J]. Progress in Geography, 2015, **34**(8): 1031 – 1038]
- [21] LI Zongxing, FENG Qi, WANG Yamin, et al. Effect of sub-cloud evaporation on the $\delta^{18}\text{O}$ of precipitation in Qilian Mountains and Hexi Corridor, China [J]. Sciences in Cold and Arid Regions, 2016, **8**(5): 378 – 387.
- [22] SALAMALIKIS V, ARGIRIOU A A, DOTSIKA E. Isotopic modeling of the sub-cloud evaporation effect in precipitation [J]. Science of the Total Environment, 2016, **544**: 1059 – 1072.
- [23] 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.
- [24] KONG Yanlong, PANG Zhonghe, FROEHLICH K. Quantifying recycled moisture fraction in precipitation of an arid region using deuterium excess [J/OL]. Tellus B: Chemical and Physical Meteorology, 2013, **65**, doi: 10.3402/tellusb.v65i0.19251.
- [25] 周苏娥, 张明军, 王圣杰, 等. 基于 Stewart 模型改进方案的新疆降水同位素云下蒸发效应比较[J]. 冰川冻土, 2019, **41**(2): 304 – 315. [ZHOU Su'e, ZHANG Mingjun, WANG Shengjie, et al. A comparison of sub-cloud secondary evaporation effect of precipitation isotope in Xinjiang based on the Stewart model improvement scheme [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2019, **41**(2): 304 – 315]
- [26] CRAWFORD J, HOLLINS S E, MEREDITH K T, et al. Precipitation stable isotope variability and subcloud evaporation processes in a semi-arid region [J]. Hydrological Processes, 2017, **31**(1): 20 – 34.
- [27] CHEN Fenli, ZHANG Mingjun, WANG Shengjie, et al. Relationship between sub-cloud secondary evaporation and stable isotope in precipitation of Lanzhou and surrounding area [J]. Quaternary International, 2015, 380/381: 68 – 74.
- [28] 李栋梁, 刘德祥. 甘肃气候[M]. 北京: 气象出版社, 2000: 93 – 96. [LI Dongliang, LIU Dexiang. Climate change of Gansu Province [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2000: 93 – 96]
- [29] 马中华, 张勃, 张建香, 等. 近 30 年甘肃省气温时空变异分析[J]. 高原气象, 2012, **31**(3): 760 – 767. [MA Zhonghua, ZHANG Bo, ZHANG Jianxiang, et al. Analyses on spatial-temporal differentiation of air temperature in Gansu province during 1979 – 2008 [J]. Plateau Meteorology, 2012, **31**(3): 760 – 767]
- [30] FRIEDMAN I, O'NEIL J. Data of geochemistry: Compilation of stable isotope fractionation factors of geochemical interest [M]. Washington, D. C.: US Government Printing Office, 1977: 117.

- [31] CRISS R. Principles of stable isotope distribution[M]. New York: Oxford University, 1999: 264.
- [32] STEWART M K. Stable isotope fractionation due to evaporation and isotopic exchange of falling water drops; applications to atmospheric processes and evaporation of lakes [J]. Journal of Geophysical Research, 1975, **80**(9): 1133 – 1146.
- [33] YANG Y M, KANG I S, ALMAZROUI M. A mass flux closure function in a GCM based on the Richardson number [J]. Climate Dynamics, 2014, **42**(5): 1129 – 1138.
- [34] 靳晓刚, 张明军, 王圣杰, 等. 基于氢氧稳定同位素的黄土高原云下二次蒸发效应[J]. 环境科学, 2015, **36**(4): 1241 – 1248. [JIN Xiaogang, ZHANG Mingjun, WANG Shengjie, et al. Effect of below-cloud secondary evaporation in precipitation over the Loess Plateau based on the stable isotopes of hydrogen and oxygen [J]. Environmental Science, 2015, **36**(4): 1241 – 1248]
- [35] UEMURA R, MATSUI Y, YOSHIMURA K, et al. Evidence of deuterium excess in water vapor as an indicator of ocean surface conditions[J/OL]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2008, **113**(D19): D19114.
- [36] 陈粉丽. 基于大气降水稳定同位素的兰州市水循环研究[D]. 兰州: 西北师范大学, 2016: 88 – 96. [CHEN Fenli. Water cycle research in Lanzhou City based on stable isotope in precipitation [D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2016: 88 – 96]

Sub-cloud Secondary Evaporation in Summer Precipitation Isotope in Gansu, China

ZHOU Su'e, ZHANG Mingjun*, WANG Shengjie, ZHOU Panpan, CHE Yanjun

(College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Atmospheric precipitation is an important part of the water cycle. The stable isotope value in precipitation will be influenced by sub-cloud secondary evaporation during the drop of raindrops. Therefore, the study of secondary evaporative effect under the raindrop is of great significance to explain the water cycle process using stable hydrogen and oxygen isotopes of precipitation. Using hourly meteorological observations at surface as well as the daily radiosonde observation and observation data of upper-air meteorological stations at regular intervals of in Gansu province during June to August 2017, the sub-cloud secondary evaporation effect of summer precipitation isotopes were studied based on the hierarchical hypothesis. Results showed that: (1) There were obvious temporal variations of sub-cloud evaporation in different districts of Gansu province. On the monthly scale, the mean value of Δd (d -excess variation) of the Longnan Mountain and the Gannan Plateau was the smallest in July, while it was the smallest in the Loess Plateau of central Gansu and the Hexi Region in June. From the hourly scale, the mean value of Δd was small in the period from 2:00 to 15:00, and the magnitude of change in Gannan Plateau was the largest. (2) In terms of spatial perspective, the mean values of Δd were higher than -15% , in the Loess Plateau of central Gansu, Gannan Plateau (except Zhouqu), the Longnan Mountain area (except Wenxian) and the Hexi area (except Mazong Shan, Jiuquan and Wuwei) respectively, among which the Δd mean value of the Loess Plateau of central Gansu was the highest. (3) The slope of the linear relationship between evaporation residual ratio and Δd in different regions was more than $1\%/%$, which may be related to the climate of Gansu province. (4) Air temperature, precipitation amount, relative humidity and surface raindrop diameter were the important factors affecting the sub-cloud evaporation. The sub-cloud evaporation was more obvious when the temperature was higher, the precipitation amount and the relative humidity were lower, and the raindrop diameter was small.

Key words: Gansu; precipitation; stable isotope; sub-cloud evaporation; Stewart model improvement schemes