

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

潘素敏¹, 张明军¹, 王圣杰^{1,2}

(1 西北师范大学地理与环境科学学院,甘肃 兰州 730070;

2 中国科学院西北生态环境资源研究院冰冻圈科学国家重点实验室,甘肃 兰州 730000)

摘要: 在干旱区,雨滴在云下降落易受到二次蒸发的影响,明确降水从云层底部降落到地面过程中稳定氢氧同位素的变化在同位素水文学研究中很有必要。基于新疆地面气象站逐小时的观测资料,采用改进后的Stewart模型,研究了新疆雨滴云下蒸发剩余比(从云下到近地面雨滴蒸发后剩余体积占原体积的百分率 f)、雨滴中 δD 变化量($\Delta\delta D$)和过量氘变化量(Δd)的时空特征,并分析了 Δd 与气象要素的关系。结果表明:(1)新疆降水中 Δd 和蒸发剩余比存在明显的空间差异。(2)当在气温低、相对湿度大、降水强度大、雨滴直径大的情况下,蒸发剩余比较大, Δd 接近于0,蒸发剩余比与 Δd 间的线性关系明显,斜率较低。不同气象条件下,蒸发剩余比与 Δd 的关系并不固定,利用这一线性关系反推蒸发剩余比应慎重。(3)敏感性分析可以得出,如果各气象站的气温升高 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$, Δd 降幅为 $0.26\% \sim 3.10\%$;如果相对湿度升高 5% , Δd 升幅为 $1.23\% \sim 8.34\%$;如果雨强增大 10% , Δd 升幅为 $0.06\% \sim 0.89\%$;如果雨滴直径增加 0.2 mm , Δd 升幅为 $0.98\% \sim 8.16\%$,但雨滴直径增加量大于 1.2 mm 时, Δd 变化量趋于稳定。

关键词: 新疆; 降水; 稳定同位素; 云下蒸发; 过量氘

中国分类号: P426.612 文献标识码:A 文章编号:1000-6060(2018)03-0488-11(488~498)

DOI:10.13826/j.cnki.cn65-1103/x.2018.03.007

氢氧稳定同位素作为天然的示踪剂,是解析水汽来源与水力联系、恢复古气候环境、揭示生态过程的重要手段^[1-3],而降水中的稳定同位素比率变化规律是同位素水文学研究的重要基础^[4-6]。降水中的D与¹⁸O比率总体呈线性关系,并常以大气水线^[7](Meteoric Water Line,简称MWL)的形式表现;但是,D比¹⁸O分馏速率快,DANSGAARD^[8]采用过量氘(deuterium excess,即 $d\text{-excess} = \delta D - 8\delta^{18}\text{O}$)的概念来描述二者分馏速率的差异,其大小与水汽源区的湿度、风速和海面气温有关,同时又受到降水区蒸发与水分内循环的影响。

一般来说,受云下二次蒸发影响,降水中的重同位素富集,氘盈余降低,但这一认识往往仅限于定性的描述,对降水从云底降落到地面过程中同位素变化量的认识还相对有限。STEWART^[9]基于实

验方法研究了在不同气体与气象条件下,蒸发和同位素交换对雨滴中稳定同位素的影响。此后,Stewart的雨滴模型也被广泛应用在各种水同位素模型中,用以刻画云下同位素的分馏机制变化^[10-13]。FROEHLICH等^[14]建立了校正云下蒸发过程的模型,研究了阿尔卑斯山区降水中的 $d\text{-excess}$,结果表明雨滴蒸发量与 $d\text{-excess}$ 存在明显的线性关系。考虑到FROEHLICH等^[14]对于部分参数没有详细介绍其算法,KONG等^[15]明确了部分算法并将其应用到了天山中段乌鲁木齐河流域中上游,类似的方法在祁连山的黑河流域和石羊河流域也有应用^[16-17]。鉴于以往算法的局限性,WANG等^[18]在Stewart模型的基础上提出了另一种计算蒸发剩余比的思路,并将降水高度、雨滴直径等参数根据地面气象资料设为变量,能够更好地利用实测资料完善对同位素云下

收稿日期:2017-12-02; 修订日期:2018-02-20

基金项目:国家自然科学基金项目(41161012,41701028);冰冻圈科学国家重点实验室开放基金(SKLCs-OP-2017-04)和西北师范大学青年教师科研能力提升计划项目(NWNU-LKQN-15-8)资助

作者简介:潘素敏(1992-),山西忻州人,硕士研究生,主要从事全球变化与可持续发展方面的研究。E-mail:pansumin33@163.com

通讯作者:张明军,教授。E-mail:mjzhang2004@163.com

蒸发效应的认识,对天山地区20余个站点进行了评估。除此之外,围绕降水同位素的云下蒸发效应,对Stewart模型的各种改进案例在其他国家也有发表^[13]。

1961年全球范围内开始建立大气降水同位素监测网络(Global Network of Isotopes in Precipitation, 简称GNIP),其中涉及新疆降水同位素月值的只有两个站点。随后的研究虽然层出不穷,但大部分集中在天山北坡乌鲁木齐河中上游^[19-21]。为了扩展对亚洲中部干旱区降水同位素的认识,近年来西北师范大学在天山南北坡与山区开展了全面的降水同位素监测^[18,22-24],该监测网络对研究天山地区乃至新疆的降水同位素提供了重要的平台^[25]。新疆地处干旱半干旱区,蒸发量较大,云下二次蒸发作用对同位素的影响不容忽视,明确云下降水中稳定同位素的变化很有必要。从以往月尺度^[15]和事件尺度^[18]下不同站点云下蒸发对降水同位素影响的研究基础来看,进一步应用改进的Stewart模型和更广泛的气象监测资料揭示同位素云下蒸发效应的时空差异仍具有重要的意义。对于干旱区而言,降水时段与非降水时段的气象参数差异明显,即使是在同一降水事件内气象参数也存在复杂的变化,有必要尝试利用小时尺度的气象参数开展相应的模拟工作。因此,本文基于新疆地面自动气象站的逐小时观测资料,采用改进后的Stewart模型,研究了新疆云下蒸发剩余比和同位素变化量的区域差异与月变化,分析了气象要素与过量氘变化量的关系及云下未蒸发时过量氘的含量,进一步验证了蒸发剩余比和过量氘变化量的线性关系。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

新疆深居内陆,距海遥远,降水偏少,形成了明显的大陆性气候,土地面积 $166 \times 10^4 \text{ km}^2$,占中国陆地面积的1/6。山脉与盆地相间分布,喻称“三山夹二盆”。本文根据《中国自然地理总论》^[26]将新疆分为4个子区进行研究,分别是阿尔泰山地区草原针叶林区、准噶尔盆地荒漠区、天山山地荒漠草原针叶林区和塔里木盆地荒漠区(1~4号研究区),各个区域内气象站点的数量依次为11、19、1、35个(图1)。

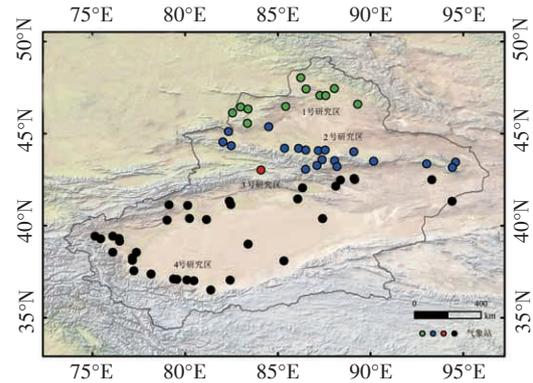


图1 新疆气象站点空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of meteorological stations in Xinjiang

1.2 数据来源

本文使用中国气象数据网(<http://data.cma.cn>)提供的新疆66个地面自动气象站逐小时观测资料,该数据更新周期为7d,包括气温、气压、水汽压、相对湿度和降水量等地面常规气象参数的小时数据。新疆地处大陆内部,属于典型的大陆性气候,夏季降水在全年降水中所占比重较大,因此本文主要关注2016年夏季(6~8月)新疆降水中 Δd 的变化及降水中云下 Δd 的含量。在66个站点中,共有5805组小时数据显示降水量不少于 $0.1 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,并利用改进后的Stewart模型对过量氘的变化量进行计算。此外,本文还采用BOWEN等^[27-28]提供的全球氢氧同位素格点数据(<http://wateriso.utah.edu/waterisotopes/>),空间分辨率为 $10' \times 10'$,选取其中与66个气象站经纬度对应的氢氧同位素数据,用于量化新疆云下降水中 d -excess的含量。

云下二次蒸发效应可通过云底雨滴和降落至地面的雨滴中同位素的差异来表示,假设云下降水与周围水汽达到平衡分馏状态,则云底雨滴中的 d -excess与地面雨滴中的 d -excess之差(Δd)^[9,14]可以表示为:

$$\Delta d = \left(1 - \frac{i\gamma}{i\alpha_c}\right) \left(f_r^{i\beta} - 1\right) - 8 \left(1 - \frac{i\gamma}{i\alpha_c}\right) \left(f_r^{i\beta} - 1\right) \quad (1)$$

式中: $i\gamma$ 、 $i\beta$ 由Stewart^[9]定义; $i\alpha_c$ 为平衡分馏系数; f_r 为雨滴从云下降落到近地面过程中经蒸发后剩余的物质占原物质的比例。当 i 为2时表示氢同位素(^2H ,即D),当 i 为18时表示氧同位素(^{18}O)。类似地,云底雨滴中的 δD 与地面雨滴中 δD 之差($\Delta \delta D$)可以表示为:

$$\Delta\delta D = \left(1 - \frac{i\gamma}{i\alpha_c}\right) \left(f_r^{i\beta} - 1\right) \quad (2)$$

参数 $i\gamma$ 和 $i\beta$ 的计算方法^[9]为:

$$i\gamma = \frac{i_r RH}{1 - i\alpha \left({}^iD_r / {}^iD_r'\right)^n (1 - RH)} \quad (3)$$

$$i\beta = \frac{1 - i\alpha \left({}^iD_r / {}^iD_r'\right)^n (1 - RH)}{i\alpha \left({}^iD_r / {}^iD_r'\right)^n (1 - RH)} \quad (4)$$

式中: $i\alpha_c$ 为平衡分馏系数; RH 为相对湿度; ${}^iD_r / {}^iD_r'$ 为水同位素分子扩散系数, 对 ${}^2D_r / {}^2D_r'$ 和 ${}^{18}D_r / {}^{18}D_r'$ 分别取 1.024 和 1.028 9, n 取 0.58。

参数 ${}^2\alpha$ 、 ${}^{18}\alpha$ 的计算方法^[29-30]为:

$${}^2\alpha = \exp\left(\frac{2.4844 \times 10^4}{T^2} - \frac{76.248}{T} + 5.2612 \times 10^{-2}\right) \quad (5)$$

$${}^{18}\alpha = \exp\left(\frac{1.137 \times 10^3}{T^2} - \frac{0.4156}{T} - 2.0667 \times 10^{-3}\right) \quad (6)$$

式中: T 为气温(K)。

蒸发剩余比 (f_r), 这里参考 WANG 等^[18]的方法, 通过雨滴从云底降落至地表的质量变化计算:

$$f_r = \frac{m_{end}}{m_{end} + m_{ev}} \quad (7)$$

式中: m_{end} 是雨滴落地时的质量(g); m_{ev} 为雨滴蒸发损失的质量(g), 可表示为单位时间内雨滴蒸发速率 (r_{ev}) 与雨滴降落时间 (t) 的乘积, 雨滴降落时间可采用拉普拉斯云高公式和雨滴末速度计算得到^[18]。

根据 KINZER 等^[31], 雨滴蒸发速率 (r_{ev}) 可以表示为 Q_1 和 Q_2 的乘积, 即

$$r_{ev} = Q_1 Q_2 \quad (8)$$

式中: Q_1 是气温和雨滴直径的函数(cm); Q_2 是气温和相对湿度的函数 ($g \cdot cm^{-1} \cdot s^{-1}$)。本文参考 WANG 等^[18]的方法, 根据 KINZER 等^[31]文献中不同气温、相对湿度和雨滴直径参数下的 Q_1 和 Q_2 , 利用双线性插值的方法分别得到本研究中具体气象参数下 Q_1 和 Q_2 的数值。

2 结果与分析

2.1 蒸发剩余比、 Δd 和 $\Delta\delta D$ 的时空变化

2.1.1 蒸发剩余比、 Δd 和 $\Delta\delta D$ 的时间变化 图 2a 显示了新疆不同区域雨滴蒸发剩余比的月变化。阿尔泰山地区的蒸发剩余比在 9.03% ~ 99.98%, 准噶尔盆地区在 5.26% ~ 99.92%, 天山山地区的蒸发剩余

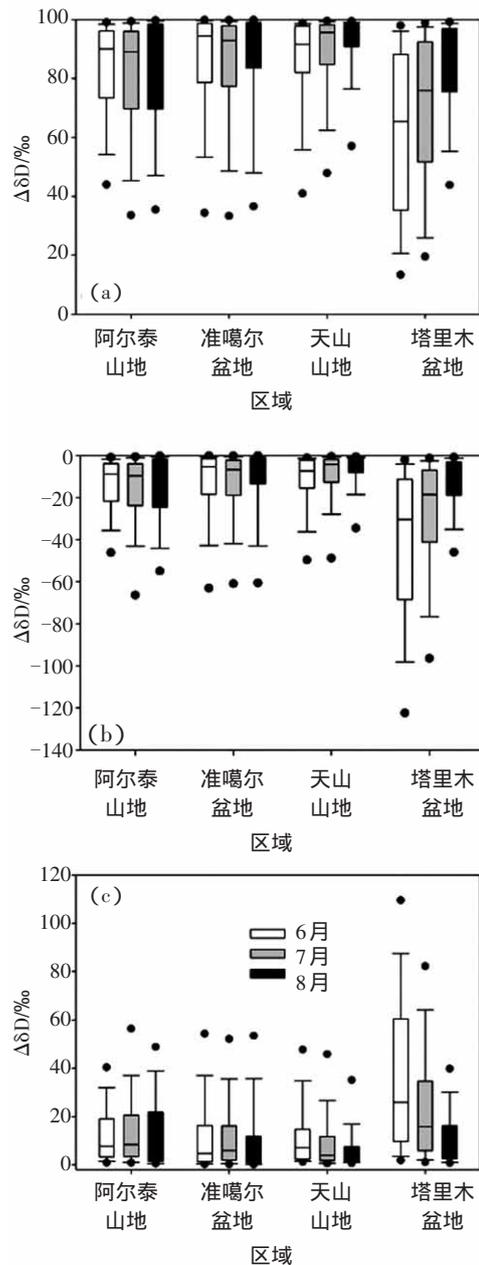


图 2 2016 年夏季新疆蒸发剩余比、 Δd 和 $\Delta\delta D$ 的月变化
Fig. 2 Monthly variation of remaining fraction, Δd and $\Delta\delta D$ in precipitation in Xinjiang during summer 2016

比在 16.57% ~ 99.78%。塔里木盆地区的蒸发剩余比在 9.70% ~ 99.77%。从月变化上看, 阿尔泰山地区、准噶尔盆地区的蒸发剩余比 7 月最小, 6 月最大。天山山地区、塔里木盆地区的蒸发剩余比 6 月最小, 8 月最大。在四个研究区内, 塔里木盆地区的蒸发剩余比的变化差异最大, 6、7 月蒸发剩余比均低于 70%, 8 月蒸发剩余比较 6、7 月大。

图 2b 显示了新疆不同区域降水中 Δd 的月变

化,变化趋势与蒸发剩余比类似。从中值来看,阿尔泰山地区、准噶尔盆地区、天山山地区降水中 Δd 均 $> -10\%$,塔里木盆地区降水中 $\Delta d < -10\%$ 。从月变化来看,阿尔泰山地区、准噶尔盆地区、天山山地区的降水中 Δd 的月变化差异较塔里木盆地区小,6~8月降水中塔里木盆地区 Δd 的中值变幅最大,变幅在 -40% ~ -10% 之间,而阿尔泰山地区、准噶尔盆地区、天山山地区的降水中 Δd 的在 -20% ~ 0% 。

$\Delta\delta D$ (图2c)的变化表现出与蒸发剩余比、 Δd 相反的变化趋势。从月变化上看,阿尔泰山地区、准噶尔盆地区的 $\Delta\delta D$ 7月最大,6月最小,天山山地区、塔里木盆地区的 $\Delta\delta D$ 月变化相似,6月最大,8月最小。在4个研究区内,塔里木盆地区的 $\Delta\delta D$ 变化差异最大。

图3显示了不同研究区内蒸发剩余比和 Δd 两者之间的相关性。四个研究区内蒸发剩余比和 Δd 的相关性都较好,其中阿尔泰山地区、准噶尔盆地

区、天山山地区 r^2 均超过0.90。阿尔泰山地区、天山山地区的斜率均小于 $1\% \cdot \%^{-1}$,其中天山山地区的斜率更接近 $1\% \cdot \%^{-1}$ 。准噶尔盆地区和塔里木盆地的斜率均超过 $1\% \cdot \%^{-1}$,其中塔里木盆地区的斜率较大、相关性较差, r^2 为0.89,在4个研究区中塔里木盆地的相关性最差,斜率最大。当蒸发剩余比大于80%时,蒸发剩余比和 Δd 的线性关系较好,当蒸发剩余比小于60%时,则线性关系逐渐变弱,甚至偏离线性关系。

2.1.2 蒸发剩余比、 Δd 和 $\Delta\delta D$ 的空间变化 Stewart模型需要气温、相对湿度与雨强等气象因子的输入,图4是新疆夏季降水期间平均气温、平均相对湿度、平均雨强的空间分布。与夏季平均气温相比,降雨时整个新疆气温都会偏低,阿尔泰山地区、塔里木盆地区大部分气象站的平均气温在 $15 \sim 20\text{ }^\circ\text{C}$,天山山地区和部分准噶尔盆地区的气象站气温低于 $15\text{ }^\circ\text{C}$ 。整个新疆降雨时的相对湿度都大于50%,

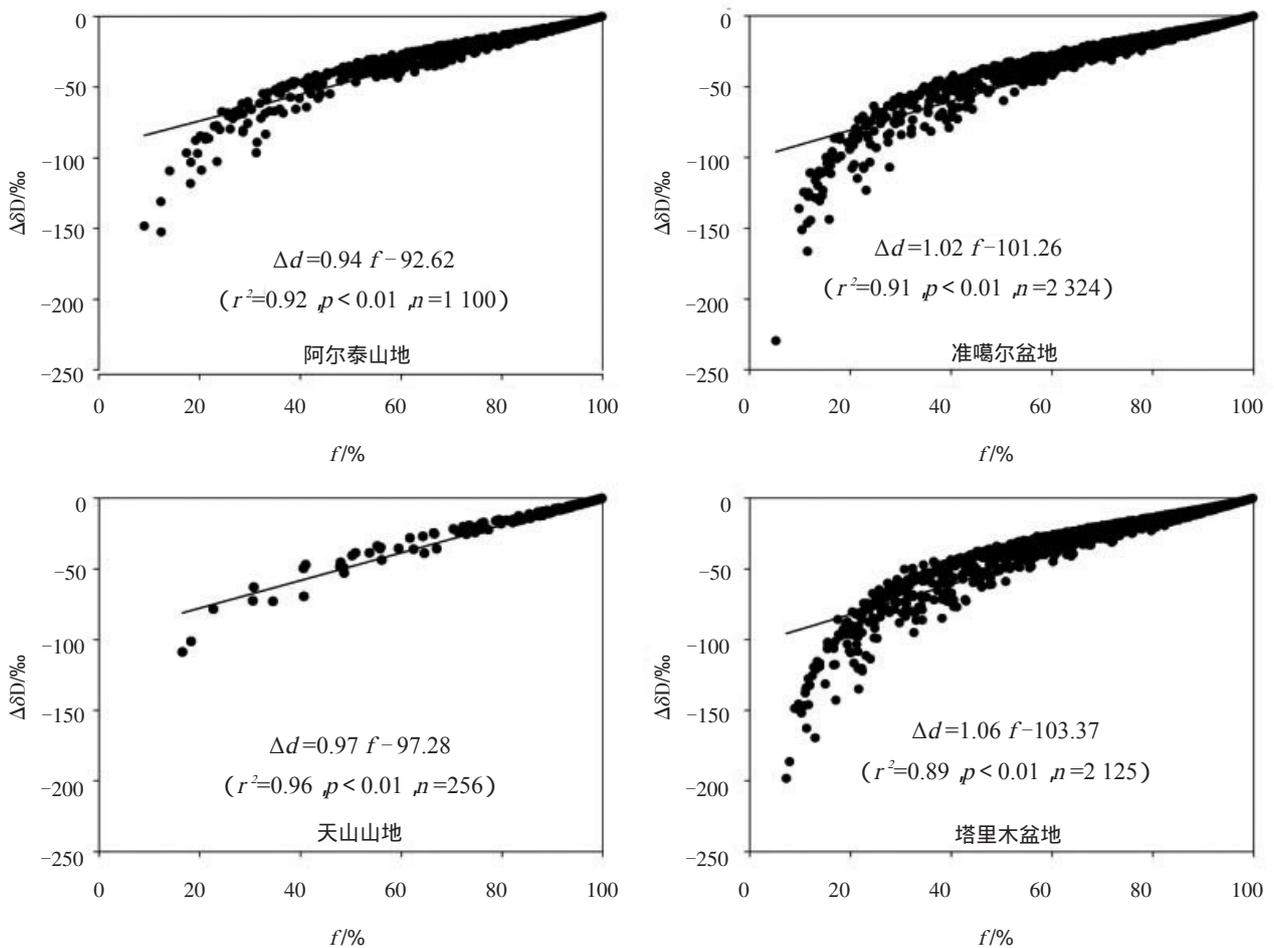


图3 2016年夏季新疆蒸发剩余比和 Δd 的关系

Fig. 3 Relationship between remaining fraction and Δd in precipitation in Xinjiang during summer 2016

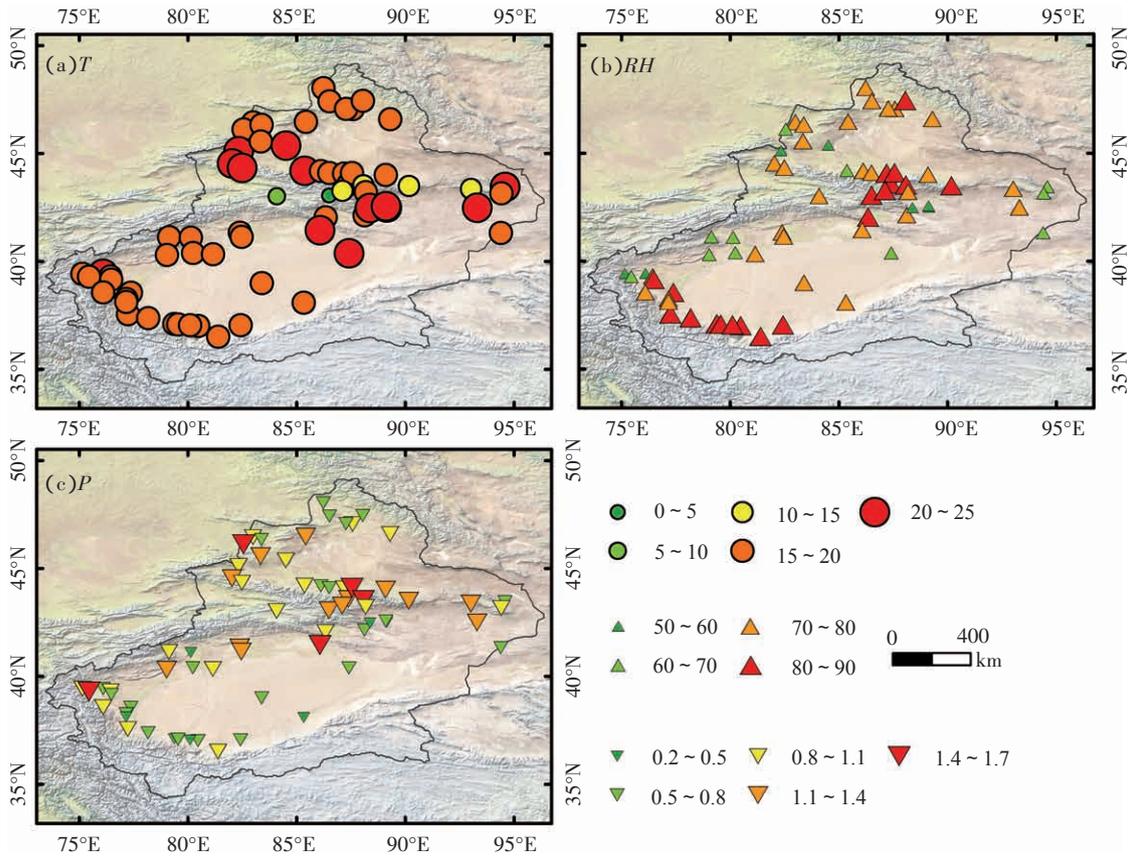


图4 2016年夏季新疆降水期间气象要素的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of meteorological parameters in precipitation events in Xinjiang during summer 2016

在塔里木盆地南缘、准噶尔盆地南缘平均相对湿度最高,甚至高于80%。全区夏季平均雨强在塔里木盆地南缘较小,在塔里木盆地北缘、准噶尔盆地平均雨强较大。由此可见,降水时段内的气象参数与非降水时段确实存在着显著的差异,夏季平均状态的气象参数空间分布未必与降水时段内的气象参数空间分布完全吻合。

图5显示了新疆蒸发剩余比(图5a)、 Δd (图5b)和 $\Delta\delta D$ (图5c)的空间分布特征。新疆阿尔泰山地北部地区、准噶尔盆地东南地区、塔里木盆地南缘地区的蒸发剩余比较大,大部分蒸发剩余比均超过80%,这可能是由于相对湿度大、气温较低造成的。吐鲁番盆地北缘地区、准噶尔盆地西部地区蒸发剩余比较小,大部分蒸发剩余比均小于75%。 Δd 呈现出与蒸发剩余比类似的空间分布,新疆北部阿尔泰山地、准噶尔盆地东南地区、塔里木盆地南缘的 Δd 较大, Δd 均超过-20%,吐鲁番盆地北缘、准噶尔盆地的西部地区 Δd 较小, Δd 均小于-30%。新疆北部阿尔泰山地北部地区、准噶尔盆地东南地区、塔里

木盆地南缘地区的 $\Delta\delta D$ 较小,大部分 $\Delta\delta D$ 均超过20%,吐鲁番盆地北缘地区、准噶尔盆地西部地区 $\Delta\delta D$ 较大,大部分 $\Delta\delta D$ 均超过30%。

2.2 气象要素与 Δd 的关系

研究时段内新疆全部降水中蒸发剩余比和 Δd 的关系可以发现,蒸发剩余比和 Δd 的线性关系随着气温的升高而变弱,即正相关,随着相对湿度、降水强度和雨滴直径的增大而变强,即负相关。当气温低于0℃时,蒸发量小, Δd 约为0。当相对湿度高于95%时, Δd 变化较小。从降水强度和 Δd 的关系来看,当降水强度小于1mm时, Δd 在0‰~-230‰之间,变化幅度大,但随着降水强度的增加, Δd 则越接近0。在雨滴直径大于2mm的情况下, Δd 越接近0,当雨滴直径较小的情况下, Δd 在0‰~-230‰之间, Δd 的变化幅度较大。

气象条件的差异性导致了蒸发剩余比和 Δd 的不同(表1)。当气温低于10℃时,蒸发剩余比和 Δd 的线性关系极强, r^2 为0.99,斜率小于1‰·℃⁻¹,但气温介于10~20℃时(包含10℃),蒸发剩余比和

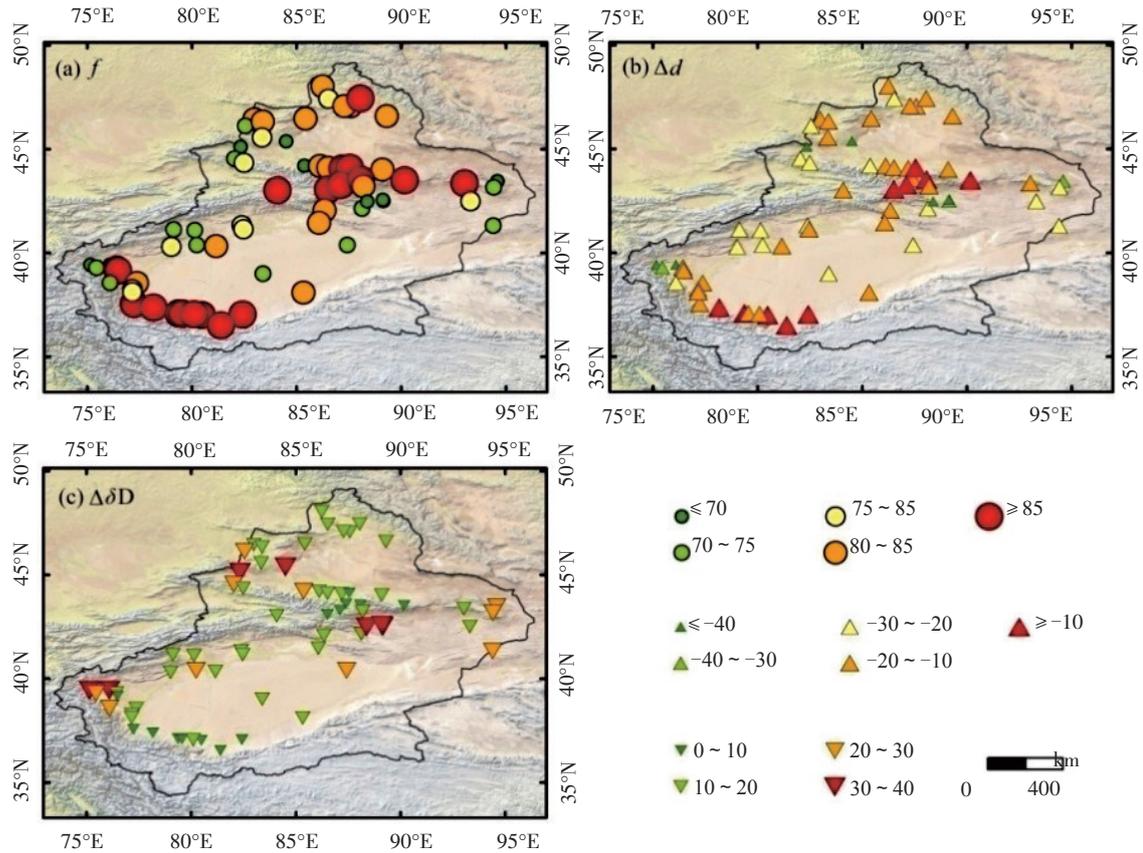


图5 2016年夏季新疆蒸发剩余比、 Δd 和 $\Delta\delta D$ 的空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of remaining fraction , Δd and $\Delta\delta D$ in precipitation in Xinjiang during summer 2016

Δd 线性关系较好,斜率小于 $1\% \cdot \%^{-1}$,相关性没有前者好,当气温高于 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,斜率明显增大,达到 $1.2\% \cdot \%^{-1}$ 线性关系和相关性变弱。在相对湿度小于70%的情形下,斜率高达 $1.4\% \cdot \%^{-1}$ 线性关系最弱,但随着相对湿度的增大,蒸发剩余比和 Δd 也逐渐增大,当相对湿度高于90%蒸发剩余比大于80% Δd 高于 -10‰ 。在降水强度不小于 $5\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 情况下,蒸发剩余比和 Δd 高度相关, r^2 为0.99,斜率为 $1.10\% \cdot \%^{-1}$,当降水强度小于 $5\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 且不小于 $1\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 时,斜率为 $1.10\% \cdot \%^{-1}$,与前者斜率相同,但当降水强度小于 $1\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 时,斜率变小,为 $1.04\% \cdot \%^{-1}$,蒸发剩余比和 Δd 相关性最弱。当雨滴直径小于 0.8 mm 时,斜率为 $1.02\% \cdot \%^{-1}$, r^2 为0.88,随着雨滴直径的增大,斜率也在增加,相关性增强,当雨滴直径不小于 5 mm 时,斜率达到 $1.11\% \cdot \%^{-1}$, r^2 升到0.98。

综上所述,通过对比不同气象条件下蒸发剩余比和 Δd 的关系可以明确,当在气温低、相对湿度大、降水强度大、雨滴直径大的情况下,蒸发剩余比则会较大, Δd 接近于0,蒸发剩余比和 Δd 的线性关系

较强,斜率较小,即蒸发剩余比增加1%时 Δd 的变化一般小于1‰;当在与之相反的情形下,蒸发剩余比则会较小, Δd 变化显著,蒸发剩余比和 Δd 的线性关系变弱,斜率变大,即蒸发剩余比减小1%时 Δd 的变化往往大于1‰。这与WANG等^[18]之前的研究得出的结果是吻合的。

2.3 d-excess变化量的敏感性分析

敏感性分析(Sensitivity Analysis)是分析某个或某几个敏感性较强的因素的变动对某一对象带来的影响及其影响程度的分析。图6显示了不同气温和相对湿度的变化能引起 Δd 的变化情况。2016年夏季新疆降水时的气温在 $-2.6\sim 31.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间波动,平均气温为 $16.53\text{ }^{\circ}\text{C}$,相对湿度在22%~99%之间波动,平均相对湿度为82.26%,降水强度在 $0.1\sim 23.5\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 之间波动。以 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为步长来研究气温从降低 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 至升高 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 情况下 Δd 的变化情况,如果各气象站的气温升高 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$, Δd 降幅为 $0.26\text{‰}\sim 3.10\text{‰}$ 。如果各气象站的相对湿度升高5%, Δd 升幅为 $1.23\text{‰}\sim 8.34\text{‰}$ 。如果各气象站的雨强增大10%,

表1 不同影响因子下蒸发剩余比和 Δd 的关系

Tab. 1 Relationship between remaining fraction and Δd under different conditions

影响因子	范围	斜率	截距	相关系数	样本数量
气温 / °C	$T < 10$	0.87	-87.49	0.90**	563
	$10 \leq T < 20$	0.88	-87.95	0.93**	4 053
	$T \geq 20$	1.20	-111.52	0.84**	1 189
相对湿度 / %	$RH < 70$	1.40	-119.41	0.76**	879
	$70 \leq RH < 90$	0.70	-72.36	0.97**	3 215
	$RH \geq 90$	0.79	-79.36	0.98**	1 990
雨强 / $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$	$P < 1$	1.04	-101.54	0.86**	4 036
	$1 \leq P < 5$	1.10	-109.56	0.98**	1 631
	$P \geq 5$	1.10	-109.37	0.99**	138
雨滴直径 / mm	$D < 1$	1.02	-100.48	0.88**	2 066
	$1 \leq D < 5$	1.10	-108.89	0.94**	2 586
	$D \geq 5$	1.11	-111.58	0.98**	1 153

**在0.01水平上显著相关

Δd 升幅为0.06‰ ~ 0.89‰。

雨滴直径和形态不属于常规气象观测,但雨滴直径是云下二次蒸发研究中的重要参数之一。前人在大部分的研究中将雨滴直径设为定值,例如FROELICH等^[14]研究阿尔卑斯山云下二次蒸发效应时将其设为2.6 mm, KONG等^[15]研究天山乌鲁木齐河中上游时将其设为0.76 mm。近年来也有研究将其设为变量,例如WANG等^[18]研究中国天山云下

二次蒸发效应时,雨滴直径主要在0.6 ~ 1.2 mm之间波动。图6d反映了以0.2 mm为步长雨滴直径增加量从-0.2 ~ 2 mm引起 Δd 的变化情况。如果雨滴直径增加0.2 mm Δd 升幅为0.98‰ ~ 8.16‰,但雨滴直径增加量大于1.2 mm时 Δd 的变化基本趋于稳定。

2.4 云下 d -excess

上文通过模型得到了新疆不同区域降水同位素从云底到近地面的变化量,而地面降水同位素

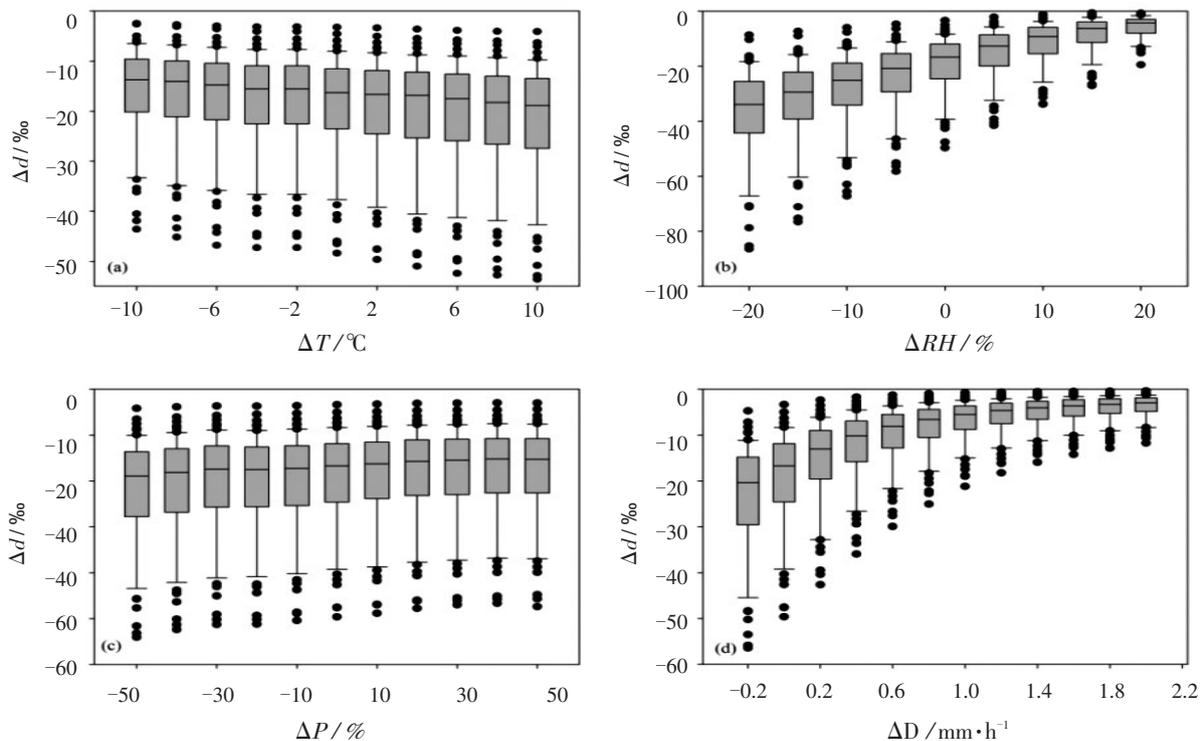


图6 2016年夏季新疆不同条件下降水中 Δd 的变化

Fig. 6 Variation of Δd in precipitation under different conditions in Xinjiang during summer 2016

值(即地面的降水同位素景观)已知,云下降水同位素的分布情况即可获得。本文采用BOWEN等^[27-28]提出的同位素景观模型,将本研究得到的同位素变化量与之进行加和,得到了云下降水中 *d-excess* 的值(图7)。6月(图7a)云下降水中 *d-excess* 的值在阿尔泰山地区、准噶尔盆地区、天山山地区大部分均低于40‰,塔里木盆地区云下降水中 *d-excess* 的值变化幅度较大。7月(图7b)云下降水中 *d-excess* 的值在阿尔泰山地区、准噶尔盆地区、天山山地区较小,塔里木盆地区云下降水中 *d-excess* 的值超过50‰的气象站的数量减少。8月(图7c)云下降水中 *d-excess* 的值大部分站点都小于30‰,其中一部分甚至小于10‰,只有两个气象站云下降水中 *d-excess* 超过50‰。综上所述,6~8月云下降水中 *d-excess* 的值逐渐变小,这一现象在塔里木盆地最为明显,说明该区域蒸发较为强烈。

3 讨论

在内陆干旱半干旱地区,云下二次蒸发过程对

降水中氢氧稳定同位素影响不容忽视^[18, 32-33]。FROEHLICH等^[14]研究阿尔卑斯山区降水中的 *d-excess*,表明雨滴蒸发量每增大1%, Δd 约减小1‰,二者存在明显的线性关系。由于输入气象参数相对较多,这种线性关系被尝试应用于其他研究区^[34-36],即根据同位素的变化量反推雨滴的蒸发量,进而评价云下二次蒸发的强度。然而,上述关系是基于湿润条件下提出的,雨滴蒸发量与 Δd 之间这种线性关系的适用性需要进一步的考虑。KONG等^[14]在研究天山中段乌鲁木齐河流域中上游云下蒸发过程中得出降水蒸发剩余比每增加1%,氘盈余降低1.1‰~1.2‰,与FROEHLICH等^[14]存在细微的差异,但KONG等^[14]模拟得到的仍然是蒸发剩余比相对较高(>95%)情况下的结果,即在输入月平均气象参数时雨滴在云下并未经历极其强烈的蒸发。实际上,在一些干旱的环境下,雨滴从云底落到地面的蒸发量大于10%可能十分普遍^[37],雨滴在降落至地面前几乎完全蒸发也是有可能的,那么利用1‰/‰的线性关系在干旱地区进行反推可能就不一定合理了。实际上,WANG等^[18]将Stewart的降水高

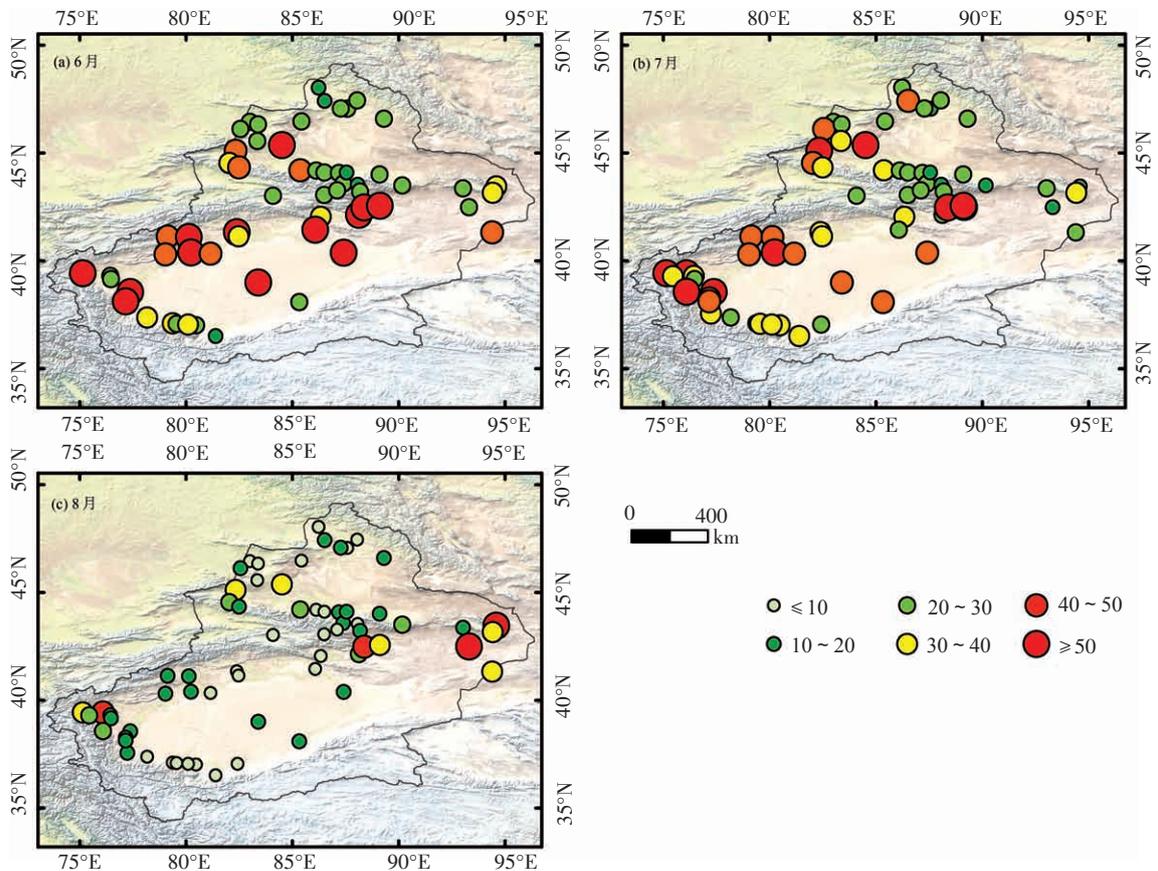


图7 2016年夏季新疆云底降水中 *d-excess* 的空间变化

Fig. 7 Spatial distribution of cloud-base *d-excess* in precipitation in Xinjiang during summer 2016

度、雨滴直径等参数根据气象资料设为变量,基于事件尺度的降水资料计算了整个天山降水同位素云下蒸发效应,证实 $1‰ \cdot \%^{-1}$ 的线性关系未必适用于蒸发剩余比较小的区域,尤其是在干旱区,这种适用性会降低。SALAMALIKIS等^[13]研究得出雨滴蒸发量每增大1% Δd 约减小 $1.1‰ \sim 1.3‰$ 。显然同一降水事件内气象参数的变化复杂,本研究采用逐小时数据分析了新疆云下二次蒸发对 d -excess的影响,得出在不同的气象条件和雨滴直径下,约 $1‰ \cdot \%^{-1}$ 的线性关系确实发生变化。从本文小时尺度的分析计算来看,反推 $1‰ \cdot \%^{-1}$ 的线性关系存在一定的不确定性,尤其是在干旱区, $1‰ \cdot \%^{-1}$ 的线性关系的使用条件需慎重考虑。

4 结 论

本研究利用改进后 Stewart 模型对新疆降水从云底到地面过程中 d -excess变化量进行了定量计算,分析了气象要素与 Δd 的关系,并且给出了新疆6~8月云下 d -excess的空间分布图。本研究主要得出以下结论:

(1)4个研究区内,降水中 d -excess从云底到地面过程中变化差异较大。从月变化看,阿尔泰山地区、准噶尔盆地区的 Δd 和蒸发剩余比7月最小,6月最大。天山山地区、塔里木盆地区的 Δd 和蒸发剩余比在月变化上相似,6月最小,8月最大。在空间上,阿尔泰山地北部地区、准噶尔盆地东南地区、塔里木盆地南缘地区的 Δd 和蒸发剩余比较大,吐鲁番盆地北缘地区、准噶尔盆地的西部地区 Δd 和蒸发剩余比较小。 δD 表现出与蒸发剩余比和 Δd 相反的变化趋势。蒸发剩余比和 Δd 存在线性关系,即蒸发剩余比每增加1%,总体而言降水中 Δd 减小约1‰。

(2)当在气温低、相对湿度大、降水强度大、雨滴直径大的情况下,蒸发剩余比则会较大, Δd 接近于0,二者线性关系明显,斜率较低,即蒸发剩余比增加1%时 Δd 的变化往往小于1‰;当在与之相反的情形下,蒸发剩余比减小1%时 Δd 的变化往往大于1‰。反推 $1‰ \cdot \%^{-1}$ 的线性关系存在一定的不确定性,尤其是在干旱区, $1‰ \cdot \%^{-1}$ 的线性关系的使用条件需慎重考虑。

(3)通过敏感性分析可以得出,如果各气象站

的气温升高 2°C , Δd 降幅为 $0.26‰ \sim 3.10‰$ 。如果各气象站的相对湿度升高5%, Δd 升幅为 $1.23‰ \sim 8.34‰$ 。如果各气象站的雨强增大10%, Δd 升幅为 $0.06‰ \sim 0.89‰$ 。如果雨滴直径增加 0.2 mm , Δd 升幅为 $0.98‰ \sim 8.16‰$,但雨滴直径增加量大于 1.2 mm 时, Δd 变化量基本趋于稳定。 Δd 对相对湿度的变化响应叫其他参数更为强烈。

(4)6~8月云下降水中 d -excess的值逐渐变小。具体来说,随着时间的推移云下降水中 d -excess的值超过50‰的气象站的个数逐渐变少, d -excess的值小于20‰的气象站的个数逐渐增多,这一现象在塔里木盆地区最为明显,表明该区域蒸发较为强烈。

参考文献(References)

- [1] ANDREEVA D B, ZECH M, GLASER B, et al. Stable isotope ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$, $\delta^{18}\text{O}$) record of soils in Buryatia, southern Siberia: Implications for biogeochemical and paleoclimatic interpretations [J]. Quaternary International, 2013, 290: 82-94.
- [2] KLEIN E S, NOLAN M, MCCONNELL J, et al. McCall Glacier record of Arctic climate change: Interpreting a northern Alaska ice core with regional water isotopes [J]. Quaternary Science Reviews, 2016, 131: 274-284.
- [3] CINER B, WANG Y, PARKER W. Oxygen isotopic variations in modern cetacean teeth and bones: Implications for ecological, paleoecological, and paleoclimatic studies [J]. Science Bulletin, 2016, 61(1): 92-104.
- [4] CRAWFORD J, HUGHES C E, PARAKES S D. Is the isotopic composition of event based precipitation driven by moisture source or synoptic scale weather in the Sydney Basin, Australia? [J]. Journal of Hydrology, 2013, 507: 213-226.
- [5] ZHANG M, WANG S. A review of precipitation isotope studies in China: Basic pattern and hydrological process [J]. Journal of Geographical Sciences, 2016, 26(7): 921-938.
- [6] LI J, TAO T, PANG Z, et al. Identification of different moisture sources through isotopic monitoring during a storm event [J]. Journal of Hydrometeorology, 2015, 16(4): 1918-1927.
- [7] CRAIG H. Isotopic variations in meteoric waters [J]. Science, 1961, 133(3465): 1702-1703.
- [8] DANSGAARD W. Stable isotopes in precipitation [J]. Tellus, 1964, 16(4): 436-468.
- [9] 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.
- [10] ZHANG X, XIE Z, YAO T. Mathematical modeling of variations on stable isotopic ratios in ratios in falling raindrops [J]. Acta Me-

- teologica Sinica ,1998 ,12(2) :213-220.
- [11] GEORGAKAKOS K P ,BRAS R L. A hydrologically useful station precipitation model :1.Formulation[J]. Water Resources Research ,1984 ,20(11) :1585-1596.
- [12] YOSHIMURA K ,KANAMITSU M ,NOONE D ,et al. Historical isotope simulation using reanalysis atmospheric data[J]. Journal of Geophysical Research :Atmospheres ,2008 ,113(D19) :2156-2202.
- [13] SALAMALIKIS V ,ARGIRIOU A A ,DOSTSIKA E. Isotopic modeling of the sub-cloud evaporation effect in precipitation[J]. Science of the Total Environment ,2016 ,544 :1059-1072.
- [14] 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.
- [15] KONG Y ,PANG Z ,FROELICH K. Quantifying recycled moisture fraction in precipitation of an arid region using deuterium excess[J]. Tellus B ,2013 ,65 :19251.
- [16] LI Z ,FENG Q ,WANG Q ,et al. Contributions of local terrestrial evaporation and transpiration to precipitation using $\delta^{18}\text{O}$ and D-excess as a proxy in Shiyang inland river basin in China[J]. Global and Planetary Change ,2016 ,146 :140-151.
- [17] LI Z ,FENG Q ,WANG Q ,et al. The influence from the shrinking cryosphere and strengthening evapotranspiration on hydrologic process in a cold basin ,Qilian Mountains[J]. Global and Planetary Change ,2016 ,144 :119-128.
- [18] WANG S ,ZHANG M ,CHE Y ,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.
- [19] YAO T ,VALERIE M ,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.
- [20] PANG Z ,KONG Y ,FROELICH K ,et al. Processes affecting isotopes in precipitation of an arid region[J]. Tellus B ,63(3) :352-359.
- [21] FENG F ,LI Z ,ZHANG M ,et al. Deuterium and oxygen 18 in precipitation and atmospheric moisture in the upper Urumqi River Basin ,eastern Tianshan Mountains[J]. Environmental Earth Sciences ,2013 ,68(4) :1199-1209.
- [22] WANG S ,ZHANG M ,HUGHES C E ,et al. Factors controlling stable isotope composition of precipitation in arid conditions :An observation network in the Tianshan Mountains ,Central Asia[J]. Tellus B ,2016 ,68 :26206.
- [23] WANG S ,ZHANG M ,CHE Y ,et al. Contribution of recycled moisture to precipitation in oases of arid Central Asia :A stable isotope approach[J]. Water Resources Research ,2016 ,52(4) :3246-3257.
- [24] WANG S ,ZHANG M ,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.
- [25] 王圣杰 ,张明军.新疆天山降水稳定同位素的时空特征与影响因素[J]. 第四纪研究 ,2017 ,37(5) :1119-1130. [WANG Shengjie ,ZHANG Mingjun. Spatio-temporal characteristics and influencing factors of stable isotopes in precipitation across the Chinese Tianshan Mountains[J]. Quaternary Sciences ,2017 ,37(5) :1119-1130.]
- [26] 郑度 ,杨勤业 ,吴绍洪 ,等.中国自然地理总论[M].北京 :科学出版社 ,2015. [ZHENG Du ,YANG Qinye ,WU Shaohong ,et al. General Physical Geography of China [M]. Beijing :Science Press ,2015.]
- [27] BOWEN G J ,REVENAUGH J. Interpolating the isotopic composition of modern meteoric precipitation[J]. Water Resources Research ,2003 ,39(10) :1299.
- [28] BOWEN G J ,WASSENAAR L I ,HOBSON K A. Global application of stable hydrogen and oxygen isotopes to wildlife forensics [J]. Oecologia ,2005 ,143(3) :337-348.
- [29] FRIEDMAN I ,O'NEIL J R. Compilation of stable isotope fractionation factors of geochemical interest [M]// FLEISCHER M. Data of Geochemistry. Washington ,USA :US Geological Survey ,1977.
- [30] CRISS R E. Principles of stable Isotope Distribution [M]. New York ,USA :Oxford University ,1999.
- [31] KINZER GD ,GUNN R. The evaporation ,temperature and thermal relaxation-time of freely falling waterdrops[J]. Journal of Meteorology ,1951 ,8(2) :71-83.
- [32] 赵诗坤 ,庞朔光 ,文蓉 ,等.海河流域降水稳定同位素的云底二次蒸发效应[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.]
- [33] 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.]
- [34] MA Q ,ZHANG M ,WANG S ,et al. An investigation of moisture sources and secondary evaporation in Lanzhou ,northwest China [J]. Environmental Earth Sciences ,2014 ,71(8) :3375-3385.
- [35] CHEN F ,ZHANG M ,WANG S ,et al. Relationship between sub-cloud secondary evaporation and stable isotope in precipitation of Lanzhou and surrounding area [J]. Quaternary International ,2015 ,380 :68-74.
- [36] PENG T R ,LIUK K ,WANG C H ,et al. A water isotope approach to assessing moisture recycling in the island-based precipitation of Taiwan :A case study in the western Pacific[J]. Water Resources Research ,2011 ,47(8) :W08507.
- [37] 吴兑.关于雨滴在云下蒸发的数值试验[J].气象学报 ,1991 ,49(1) :116-121. [WU Dui. The numerical test on evaporation of raindrop beneath cloud[J]. Acta Meteorologica Sinica ,1991 ,49(1) :116-121.]

Quantitative study of sub-cloud secondary evaporation effect on stable isotopes in raindrops during summer in Xinjiang

PAN Su-min¹, ZHANG Ming-jun¹, WANG Sheng-jie^{1,2}

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

2 State Key Laboratory of Cryospheric Science, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, CAS, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract : In the arid area, the sub-cloud secondary evaporation usually occurs to the raindrops. It is important to understand the variation of the stable hydrogen and oxygen isotopes of the raindrops when they travel from cloud-base to the ground in the isotope hydrological studies. Based on the hourly meteorological observations from the meteorological stations in Xinjiang, China, the temporal and spatial characteristics of the sub-cloud evaporation residue ratio (which is the ratio of the residual volume of the raindrops after the evaporation as they travel from cloud-base to the near-surface to the original volume, f), the δD variation ($\Delta\delta D$) of the raindrops and the deuterium excess change (Δd) were analyzed by using the modified Stewart model. The relationship between Δd and meteorological parameters as well as the sensitivity analysis of Δd were also analyzed. The results showed as follows: (1) The values of Δd and f present spatial dependency in Xinjiang. (2) Under the conditions of low temperature, high relative humidity, high rainfall intensity and large raindrop diameter, f is usually large and Δd is close to 0. The linear relationship between f and Δd is evidenced and the slope is low. However the regression coefficients are not always stable under different meteorological conditions, thus the inversion computation of the parameter f based on this linear relationship should be treated with caution. (3) The sensitivity analysis indicates that, if the temperature was increased by 2 °C, Δd was decreased by 0.26‰ - 3.10‰; if the relative humidity was increased by 5%, Δd was increased by 1.23‰ - 8.34‰; if precipitation intensity was increased by 10%, Δd was increased by 0.06‰ - 0.89‰; if the raindrop diameter was increased by 0.2 mm, Δd was increased by 0.98‰ - 8.16‰. However, if the raindrop diameter was larger than 1.2 mm, Δd tended to be stable.

Key words : Xinjiang; precipitation; stable isotope; sub-cloud evaporation; deuterium excess