

DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2019.0107

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. [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.]

## 基于 Stewart 模型改进方案的新疆降水同位素的云下蒸发效应比较

周苏娥<sup>1</sup>, 张明军<sup>1</sup>, 王圣杰<sup>1,2</sup>, 孟鸿飞<sup>1</sup>, 张亚宁<sup>1</sup>, 余秀秀<sup>1</sup>

(1. 西北师范大学 地理与环境科学学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 陕西省河流湿地生态与环境重点实验室, 陕西 渭南 714099)

**摘 要:** 干旱半干旱区降水稀少, 蒸发能力大, 雨滴在云下易发生蒸发现象并改变其同位素比率, 明确雨滴降落过程中稳定氢氧同位素的变化在同位素水文学研究中具有重要意义。Stewart 模型常被用于评估雨滴中同位素比率的变化, 云下雨滴降落过程中的气温、相对湿度等是模型输入的关键参数。目前广泛采用的大气均质假设往往与自然条件有差异, 这种均质假设对模拟结果产生的影响有待明确。基于 2016 年 7 月至 2017 年 6 月新疆 66 个地面气象站逐小时观测资料与 8 个探空站的高空定时观测资料, 通过三种 Stewart 模型算法方案(方案①以地面气象资料代替大气气象参数, 方案②假设地面气象资料与预测的云底气象参数均匀变化, 以其平均值代入模型, 方案③根据高空探测资料, 分层计算大气参数)的对比, 深入研究新疆降水同位素的云下二次蒸发效应。结果表明: (1) 三种方案计算的新疆各分区云下二次蒸发存在明显的季节差异, 蒸发剩余比( $f$ )均呈现出秋冬较大、春夏较小的趋势, 各分区的  $\Delta\delta D$ 、 $\Delta\delta^{18}O$  和  $\Delta d$  均为春夏较大、秋冬较小。(2) 从空间来看,  $\Delta d$  均值在准噶尔盆地西部和塔里木盆地东侧北缘较小。对于蒸发剩余比( $f$ )均值、 $\Delta\delta D$  均值、 $\Delta\delta^{18}O$  均值和  $\Delta d$  均值来说, 三种方案的差异性主要体现在塔里木盆地。(3) 蒸发剩余比( $f$ )与  $d$ -excess 的变化量存在相关性, 整体来看, 三种方案的斜率均表现为塔里木盆地 > 阿尔泰山地 > 准噶尔盆地 > 天山山地。无论是新疆各分区(除天山山方案②)还是新疆全境, 三种方案的  $f$  与  $\Delta d$  的线性关系均  $> 1.0\%/‰$ , 最为干旱的塔里木盆地方案③的斜率高达  $1.496\%/‰$ , 这可能与新疆地处干旱半干旱气候区有关。毋庸置疑方案③是后续云下二次蒸发效应研究的方向。

**关键词:** 新疆; 降水; 稳定同位素; 云下二次蒸发; Stewart 模型改进方案

**中图分类号:** P426.61 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2019)02-0304-12

### 0 引言

降水是陆地水资源的主要输入形式和水循环过程中的重要环节, 而水中的稳定氢氧同位素作为重要的示踪剂已被广泛应用于复杂的气候和水文过程研究中。挖掘降水中的氢氧同位素信息可以揭示区域水汽来源路径的变化, 是研究区域内水循环机制的重要基础<sup>[1-6]</sup>。雨滴从云层底部下降到地面的过程中, 经过不饱和空气时易发生蒸发, 即云下二次蒸发。受到云下蒸发的影响, 降水中的重同位素( $^2H$  和  $^{18}O$ ) 富集, 过量氘(也称氘盈余,  $d$ -excess =

$\delta D - 8\delta^{18}O$ ) 降低, 大气降水线斜率下降<sup>[7-9]</sup>。

Stewart<sup>[10]</sup>曾在实验观测的基础上, 对雨滴在不同气体环境下水滴蒸发过程中的稳定同位素变化进行了研究, 该模型及其改进方案对之后的云下蒸发同位素分馏研究影响很大。特别是近年来, 基于 Stewart 的各种改进模型对不同地区的云下二次蒸发做了大量的定量研究<sup>[11-17]</sup>, 丰富了对典型区域的云下二次蒸发季节规律和区域差异的认识, 但是在算法上确实存在着或多或少的差异。例如, Froehlich 等<sup>[18]</sup>研究发现阿尔卑斯山区雨滴蒸发剩余比较大时, 蒸发剩余比与  $d$ -excess 变化量存在  $1\%/‰$

收稿日期: 2018-06-02; 修订日期: 2019-03-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(41701028; 41771035); 陕西省河流湿地生态与环境重点实验室开放基金项目(SXSD201703) 资助

作者简介: 周苏娥(1993-), 女, 甘肃静宁人, 2016年在西北师范大学获学士学位, 现为西北师范大学在读硕士研究生, 从事全球变化与可持续发展研究。E-mail: geozse@126.com

通信作者: 张明军, E-mail: mjzhang2004@163.com.

的线性关系; 也有研究直接利用不同采样点的降水同位素差异和  $1\text{‰}/\%$  的线性关系反推雨滴蒸发率<sup>[19-20]</sup>。但 Salamalikis 等<sup>[21]</sup>和 Wang 等<sup>[22]</sup>的研究发现,  $1\text{‰}/\%$  的线性关系并不适用于所有区域, 简单套用  $1\text{‰}/\%$  的斜率, 可能会带来较大误差。除云下的气温、相对湿度外, 雨滴直径也是 Stewart 模型的重要输入参数, 但并非气象观测的常规指标, 因此前人多将其初始值设置为定值, 如 Froehlich 等<sup>[18]</sup>、Kong 等<sup>[23]</sup>和 Crawford 等<sup>[24]</sup>在不同区域的研究中分别将初始雨滴直径设定为 2.6 mm(阿尔卑斯山)、0.74 mm(新疆乌鲁木齐河流域)和 1.0 mm(澳大利亚东南部), 而后对雨滴直径进行迭代处理。当然, 从现代的雨滴谱监测来看, 雨滴直径存在复杂的规律, 统一的初始值未必符合自然界的实际情况<sup>[22]</sup>。此外, 关于雨滴降落高度的算法也不尽一致, 一些研究<sup>[21, 23-24]</sup>以 850 hPa(海拔约 1 500 m)作为云底高度, 云底高度与地面海拔之差即为雨滴降落距离, 对于沿海的低海拔区域有时也忽略地面海拔直接以 1 500 m 代入计算, 而 Wang 等<sup>[22]</sup>利用抬升凝结高度估算云底高度对新疆不同站点的云下二次蒸发进行了模拟, 其雨滴的降落距离则为  $(657 \pm 454)$  m。总体而言, 在应用各种改进的 Stewart 模型时, 大气条件的设定是其中较为关键的, 在目前可见的文献中以均质假设和分层假设为主。所谓均质假设, 即将雨滴从云底降落到地面过程中的空气看成是均质体, 以地面参数为输入参数来研究云下二次蒸发, 该方案应用比较广泛<sup>[17-18, 21-23]</sup>; 与均质假设不同, 所谓分层假设是根据几个标准等压面将大气划分为若干个均质的层位组合, 是在均质假设基础上通过迭代计算得到, 例如 Crawford 等<sup>[24]</sup>在对澳大利亚麦夸里沼泽的研究中就基于再分析数据进行了分层计算。

新疆地处干旱半干旱区, 降水稀少, 蒸发能力大, 因此量化云下二次蒸发对降水同位素的影响尤为重要。Wang 等<sup>[22]</sup>在 Stewart 模型参数优化的基础上研究了新疆中部 20 余个站点的云下二次蒸发强度, 结果表明不同站点雨滴从云底降落到地面的过程中同位素发生了不同程度的变化。Kong 等<sup>[23]</sup>基于 GNIP 站点(乌鲁木齐)和实测数据(中国科学院天山冰川观测试验站后峡基本站和高山站)降水同位素数据分析了乌鲁木齐河流域中上游的云下蒸发差异, 其蒸发剩余比与  $\Delta d$  的斜率为  $1.1\text{‰}/\% \sim 1.2\text{‰}/\%$ 。任雯等<sup>[25]</sup>利用我国西北东部的 GNIP 数据, 分析了二次蒸发的发生条件、季节特征、影

响因素及其对降水同位素的影响, 发现当近地表水汽压差  $>0.52$  kPa 时, 雨滴降落过程发生云下二次蒸发。干旱区云下蒸发对降水同位素的影响是毋庸置疑的, 但是不同算法对结果的影响究竟有多大, 尚缺乏明确的认识。为了深入认识不同计算方案的对比性, 本文在以往各种改进模型的基础上, 整理出了三种方案进行比较计算, 并以小时尺度的气象数据带入, 进而评估不同方案对新疆降水同位素云下二次蒸发强度计算结果的影响。

## 1 数据与方法

### 1.1 研究区概况

新疆维吾尔自治区位于中国西北边陲, 远离海洋, 面积为  $1.66 \times 10^6$  km<sup>2</sup>, 约占中国陆域面积的 1/6。地处  $75^{\circ}20'41'' \sim 96^{\circ}25' E$ ,  $34^{\circ}15' \sim 49^{\circ}10'45'' N$ <sup>[26]</sup>。地形轮廓以“三山夹两盆”著称, 山地和盆地为其主要地貌类型。独特的地理位置, 复杂的地貌类型, 多样化的自然环境, 典型的温带大陆性干旱气候, 使其区内日照充足, 热量丰富, 蒸发量大, 降水稀少, 全区年平均降水量仅有 146 mm, 大部分区域年降水量的变差系数介于  $0.2 \sim 0.7$ <sup>[27-28]</sup>, 且降水时空分布不均, 降水量北疆较南疆丰富, 山地较盆地丰富, 西部地区较东部地区丰富, 少量的降水导致了新疆极端脆弱的生态环境<sup>[28-31]</sup>, 是全球气候变化的敏感区域<sup>[32]</sup>。根据中国自然地理总论<sup>[33]</sup>, 本文分为准噶尔盆地温带荒漠区、阿尔泰山山地草原及针叶林区、天山山地草原和针叶林区、塔里木盆地暖温带荒漠区这四个自然区分区进行研

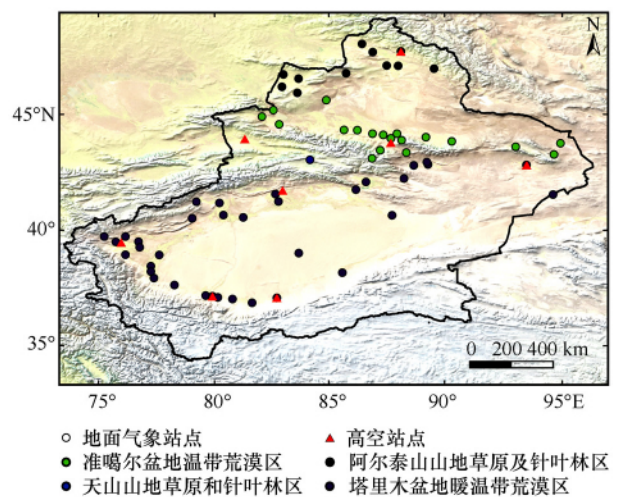


图1 新疆气象站点空间分布  
(分区根据中国自然地理区划<sup>[33]</sup>)

Fig. 1 Spatial distribution of meteorological stations in Xinjiang<sup>[33]</sup>

究(图1),在文中为了方便描述,分别简称为准噶尔盆地、阿尔泰山、天山山地和塔里木盆地。

## 1.2 数据来源

本文采用中国气象数据网(<http://data.cma.cn/data>)提供的中国地面气象站逐小时观测资料,选用2016年7月至2017年6月的66个站点的新疆地面小时数据资料(主要包括气温、降水量、水汽压和相对湿度等参数),同时选取新疆(阿勒泰、乌鲁木齐、库车、喀什、和田、民丰、伊宁和哈密)8个探空站的高空定时观测资料(<http://weather.uwyo.edu>),包括气温、降水量、露点温度和相对湿度等参数。利用反距离加权法(Inverse Distance Weighted,简称IDW)将探空站的高空数据插值到各地面气象站位置。

## 1.3 研究方法

受云下二次蒸发的影响,雨滴中的稳定同位素在未发生蒸发的云底处与经过蒸发降落到地面处存在差别,云下二次蒸发效应可用云底雨滴与降落到地面雨滴的同位素差值来表示。本文采用三种计算方案进行计算,这里首先介绍方案①,即以常规地面气象参数作为输入项的均质假设方案。假设云底降水与云层中水汽达到平衡分馏状态,参考Stewart<sup>[10]</sup>和Froehlich等<sup>[18]</sup>的研究, $\Delta d$ (云底雨滴中的 $d$ -excess与地面雨滴中的 $d$ -excess之差)可以表示为:

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

类似地,云底雨滴中的 $\delta D$ ( $\delta^{18}O$ )与地面雨滴中 $\delta D$ ( $\delta^{18}O$ )的之差( $\Delta\delta D$ )或( $\Delta\delta^{18}O$ )可以表示为:

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

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

式中: ${}^2\alpha$ 和 ${}^{18}\alpha$ 分别为氢和氧同位素在水-气间的平衡分馏系数<sup>[34-35]</sup>;  ${}^2\gamma$ 、 ${}^{18}\gamma$ 、 ${}^2\beta$ 和 ${}^{18}\beta$ 的计算方法见文献<sup>[10]</sup>, $f$ 为雨滴剩余比,即雨滴从云底降落至地面的过程中,经过蒸发后雨滴剩余质量占原质量的百分率<sup>[22]</sup>。

$$f = \frac{m_{\text{end}}}{m_{\text{end}} + m_{\text{ev}}} \quad (4)$$

式中: $m_{\text{end}}$ 为落地时的质量; $m_{\text{ev}}$ 为蒸发损失掉的质量。

虽然雨滴在降落过程中的形状会发生复杂的变化<sup>[36-37]</sup>,但在云降水物理学模拟时一般假设为球体<sup>[38]</sup>,因此其落地时的质量可以表示为:

$$m_{\text{end}} = \frac{4}{3}\pi r_{\text{end}}^3 \rho \quad (5)$$

式中: $m_{\text{end}}$ 为雨滴落地时的质量; $r_{\text{end}}$ 为雨滴的落地半径; $\rho$ 为水的密度。

$$m_{\text{ev}} = \frac{r_{\text{ev}} H}{v_{\text{end}}} \quad (6)$$

$$v_{\text{end}} = 9.58e^{0.0354H} \left[1 - e^{-\left(\frac{D}{1.77}\right)^{1.147}}\right] \quad (7)$$

式中: $m_{\text{ev}}$ 为蒸发损失掉的质量; $r_{\text{ev}}$ 为雨滴蒸发速率; $v_{\text{end}}$ 为雨滴下降的末速度<sup>[39]</sup>;  $e$ 为自然常数; $H$ 为雨滴下落的高度(即云底高度)<sup>[40-42]</sup>;  $D$ 为雨滴直径(mm)。

雨滴蒸发速率( $r_{\text{ev}}$ ),即单位时间内蒸发的水质量,可以表示为 $Q_1$ 和 $Q_2$ 的乘积<sup>[43]</sup>,即:

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

式中: $Q_1$ 是环境温度( $T$ )和雨滴直径( $D$ )的函数,其单位为 $\text{cm}$ ;  $Q_2$ 是环境温度( $T$ )和相对湿度( $RH$ )的函数,单位为 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ,Wang等<sup>[22]</sup>利用双线性插值法得到不同气象条件下的 $Q_1$ 和 $Q_2$ 。

参考Wang等<sup>[22]</sup>的方法利用实测的降水强度来推算雨滴大小。Best<sup>[44]</sup>提出全球降雨雨滴直径的分布符合以下的经验公式:

$$1 - F = e^{-\left(\frac{D}{AI^p}\right)^n} \quad (9)$$

式中: $e$ 为自然常数, $D$ 为雨滴直径(mm);  $I$ 为降水强度( $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ );  $F$ 为大气中直径不大于 $D$ 的雨滴累积体积百分比,参数 $n$ 、 $A$ 和 $p$ 分别取2.25、1.30和0.232。取雨滴累计体积百分比为50%,即 $F=0.5$ ,则可导出雨滴直径与降水强度的关系式:

$$D_{50} = \sqrt[n]{0.69AI^p} \quad (10)$$

需要指出,新疆地处干旱半干旱区,气象参数在降水时段与非降水时段差异明显,因此采用地面气象站逐小时观测资料来进行分析。

考虑到云底和地面参数的不同,如果大气中的气象参数在垂直方向上呈均匀变化,那么可以将云底与地面参数的平均值作为云下二次蒸发效应的输入参数进行计算,即方案②。也就是说,原本以地面气象参数(气温、相对湿度等)输入,改为以地面气象参数(与方案①一致)和云底气象参数<sup>[22]</sup>的平均值输入。该方案虽不及分层假设准确,但是相对而言更符合大气层的基本特征。

当然,大气层中的气温、相对湿度等参数本身既非均质也非均匀变化,于是提出方案③,即根据高空探测资料,分层计算大气参数。根据新疆海拔等实际情况,以850 hPa、700 hPa、500 hPa三个气压层为分界线对雨滴降落过程进行分段计算。即从

地面开始,以地面气象参数向高空方向进行迭代计算,直至云底高度位置。对雨滴直径也进行了分段平均处理,云底雨滴直径如下

$$D_c = \sqrt[3]{\frac{6(m_{\text{end}} + m_{\text{ev}})}{\pi\rho}} \quad (11)$$

式中:  $D_c$  为云底雨滴直径;  $m_{\text{end}}$  为雨滴落地时的质量;  $m_{\text{ev}}$  为蒸发损失掉的质量;  $\rho$  为水的密度。

不难看出,本文的三种方案中,其主要的 Stewart 模型的主要思路是一致的。三种方案的差别仅在于输入项的不同,概括而言,方案①即为常规的均质假设,方案③的分层假设对大气层的刻画最为精确,方案②而是一种折中方案。在实际计算中,方案①和方案②仅需要地面气象参数,方案③则不仅需要地面资料还需要探空资料的支持。

## 2 结果与分析

### 2.1 蒸发剩余比、 $\Delta\delta D$ 、 $\Delta\delta^{18}O$ 和 $\Delta d$ 的季节变化

从季节的角度来研究云下二次蒸发效应(如图 2),季节按照春季(3-5月)、夏季(6-8月)、秋季(9-11月)和冬季(12月-次年2月)进行划分,图 2(a)、2(b)、2(c)为各分区三种方案下的蒸发剩余比( $f$ )的季节变化,可以看出,各分区的  $f$  均呈现出秋冬较大,春夏较小的趋势。在春夏秋三季,阿尔泰山地和准噶尔盆地,三种方案差别不大,天山山地和塔里木盆地的  $f$  均值为方案② > 方案①和③;冬季各分区的  $f$  均值都较大,接近于 100%。图 2(d)、2(e)、2(f)可以看出  $\Delta\delta D$  的季节差异明显,整体呈春夏较大、秋冬较小的态势,春夏两季,阿尔泰山地和准噶尔盆地的  $\Delta\delta D$  均值为方案③ > 方案①和②,天山山地和塔里木盆地的  $\Delta\delta D$  均值为方案①和③ > 方案②;秋季,各分区的  $\Delta\delta D$  均值为方案② > 方案①和③,冬季各分区的  $\Delta\delta D$  均值都较小。图 2(g)、2(h)、2(i)可以看出  $\Delta\delta^{18}O$  的季节变化与  $\Delta\delta D$  类似,也呈春夏较大、秋冬较小的态势,春夏两季,阿尔泰山地和准噶尔盆地的  $\Delta\delta^{18}O$  均值为方案③ > 方案①和②,天山山地的  $\Delta\delta^{18}O$  均值为方案①和③ > 方案②,塔里木盆地的  $\Delta\delta^{18}O$  均值为方案③ > 方案①和②;秋季,准噶尔盆地和塔里木盆地的  $\Delta\delta^{18}O$  均值为方案③ > 方案② > 方案①,阿尔泰山地的  $\Delta\delta^{18}O$  均值为方案② > 方案①和③,天山山地的  $\Delta\delta^{18}O$  均值为方案③ > 方案①和②,冬季,各分区的  $\Delta\delta^{18}O$  都较小。图 2(j)、2(k)、2(l)可以看出  $\Delta d$  整体呈春夏较小、秋冬较大的态势,季节差异明显,春夏两季,阿尔泰山地、

准噶尔盆地和塔里木盆地的  $\Delta d$  均值为方案③ < 方案①和②,天山山地的  $\Delta d$  均值为方案② > 方案①和③;秋季,阿尔泰山地的  $\Delta d$  均值为方案① > 方案②和③,准噶尔盆地、天山山地和塔里木盆地的  $\Delta d$  均值为方案①和② > 方案③,冬季,各分区的  $\Delta d$  均值都较大,从整个新疆来看,春季,  $\Delta d$  均值方案②比方案①增加了 0.60‰,而方案③比方案①减小了 3.37‰;夏季,  $\Delta d$  均值方案②比方案①减小了 0.23‰,而方案③比方案①减小了 8.25‰;秋季,  $\Delta d$  均值方案②比方案①减小了 0.55‰,而方案③比方案①减小了 2.09‰;冬季,  $\Delta d$  均值方案②比方案①减小了 0.10‰,而方案③比方案①减小了 0.40‰。

### 2.2 蒸发剩余比、 $\Delta\delta D$ 、 $\Delta\delta^{18}O$ 和 $\Delta d$ 的分区

#### 空间变化

云下二次蒸发主要发生在液态或混合态水中,因此蒸发剩余比最大值可达到 100%。蒸发剩余比( $f$ )是云下二次蒸发的重要参数之一,图 3(a)、3(b)、3(c)反映了三种 Stewart 模型改进方案下蒸发剩余比( $f$ )的变化情况,可以看出新疆各分区的  $f$  中值均超过 90%。阿尔泰山地的  $f$  均值为方案① > 方案③ > 方案②;准噶尔盆地和塔里木盆地的  $f$  均值为方案② > 方案① > 方案③;天山山地的  $f$  均值为方案② > 方案③ > 方案①。图 3(d)、3(e)、3(f)反映了三种方案下  $\Delta\delta D$  的变化情况,新疆各分区的  $\Delta\delta D$  中值都不超过 10‰,阿尔泰山地和准噶尔盆地的  $\Delta\delta D$  均值为方案③ > 方案② > 方案①;天山山地和塔里木盆地的  $\Delta\delta D$  均值为方案③ > 方案① > 方案②。图 3(g)、3(h)、3(i)反映了三种方案  $\Delta\delta^{18}O$  的变化情况,各分区的  $\Delta\delta^{18}O$  均值均不超过 5‰,阿尔泰山地和准噶尔盆地的  $\Delta\delta^{18}O$  均值为方案③ > 方案② > 方案①;天山山地和塔里木盆地的  $\Delta\delta^{18}O$  均值为方案③ > 方案① > 方案②。图 3(j)、3(k)、3(l)反映了三种方案下  $\Delta d$  的变化情况,阿尔泰山地和准噶尔盆地的  $\Delta d$  均值为方案① > 方案② > 方案③;天山山地和塔里木盆地的  $\Delta d$  均值为方案② > 方案① > 方案③。

### 2.3 蒸发剩余比、 $\Delta\delta D$ 、 $\Delta\delta^{18}O$ 和 $\Delta d$ 的空间变化

雨滴蒸发剩余比( $f$ )、 $\Delta\delta D$ 、 $\Delta\delta^{18}O$  和  $\Delta d$  的空间分布特征(如图 4),如图 4(a)、4(b)、4(c)所示,  $f$  在阿尔泰山地、准噶尔盆地中部、天山山地和塔里木盆地南缘较大,大部分  $f$  超过 85%,三种方案的差别主要体现在塔里木盆地,  $f$  均值为方案②比方案①增加了 0.01%,方案③比方案①减小了

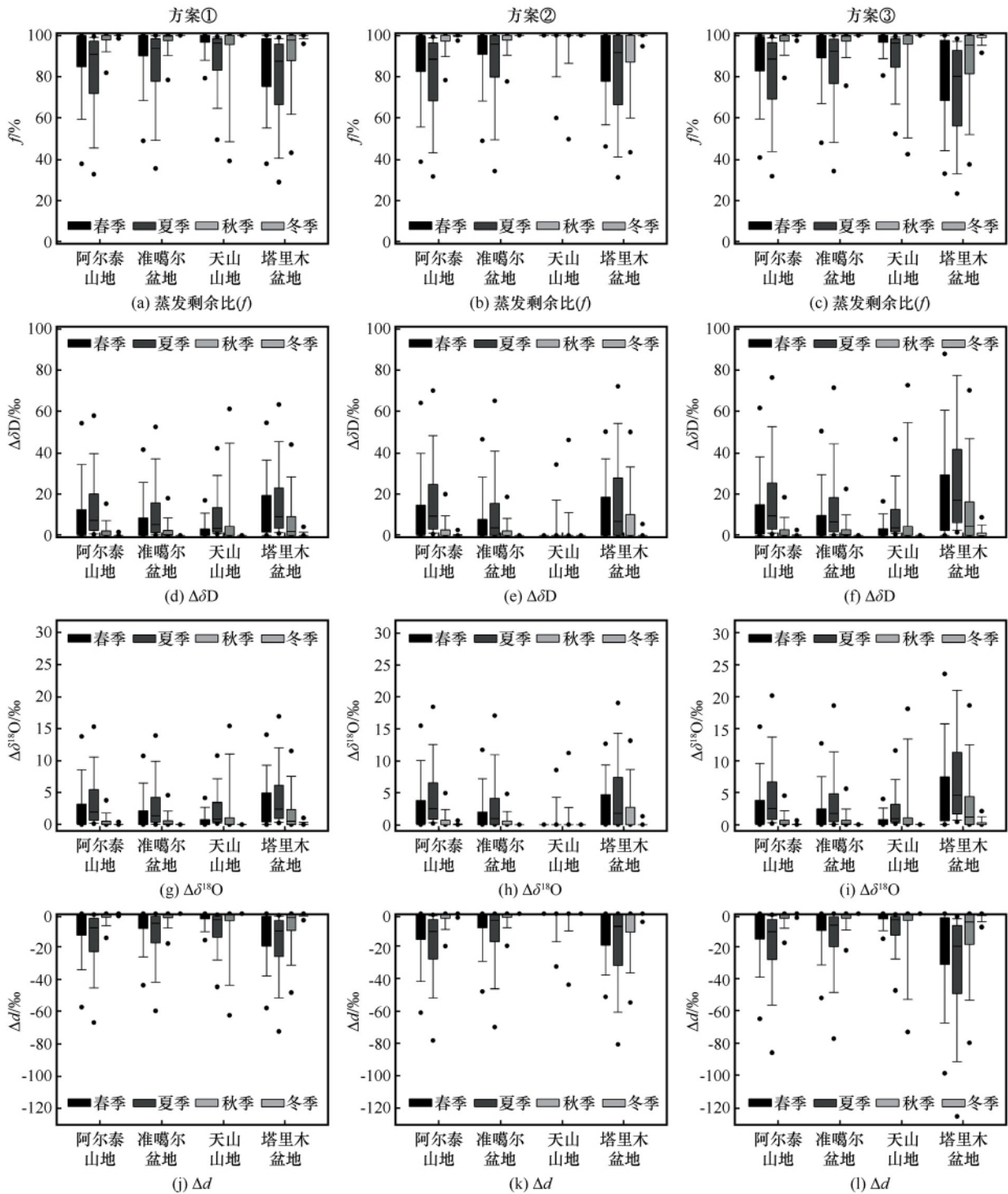


图2 基于三种 Stewart 模型改进方案的 2016 年 7 月 - 2017 年 6 月新疆雨滴蒸发剩余比( $f$ )、 $\Delta\delta D$ 、 $\Delta\delta^{18}O$  和  $\Delta d$  的季节变化  
 Fig.2 Seasonal variation of  $f$ ,  $\Delta\delta D$ ,  $\Delta\delta^{18}O$  and  $\Delta d$  in precipitation in Xinjiang by three Stewart model improvement schemes from July 2016 to June 2017

0.04%。从图 4 (d)、4 (e)、4 (f) 可以看出  $\Delta\delta D$  在新疆具有明显的区域特征,准噶尔盆地西部、塔里木盆地的  $\Delta\delta D$  均值较大,三种方案的差异性主要体现在塔里木盆地,  $\Delta\delta D$  均值为方案②比方案①增加了 1.19‰,方案③比方案①增加了 9.42‰。由

图 4 (g)、4 (h)、4 (i) 可以看出  $\Delta\delta^{18}O$  的区域分布与  $\Delta\delta D$  类似,三种方案差异主要体现在塔里木盆地,  $\Delta\delta^{18}O$  均值为方案②比方案①增加了 0.25‰,方案③比方案①增加了 2.56‰。由图 4 (j)、4 (k)、4 (l) 为  $\Delta d$  的空间分布,整体来看新疆阿尔泰山地、



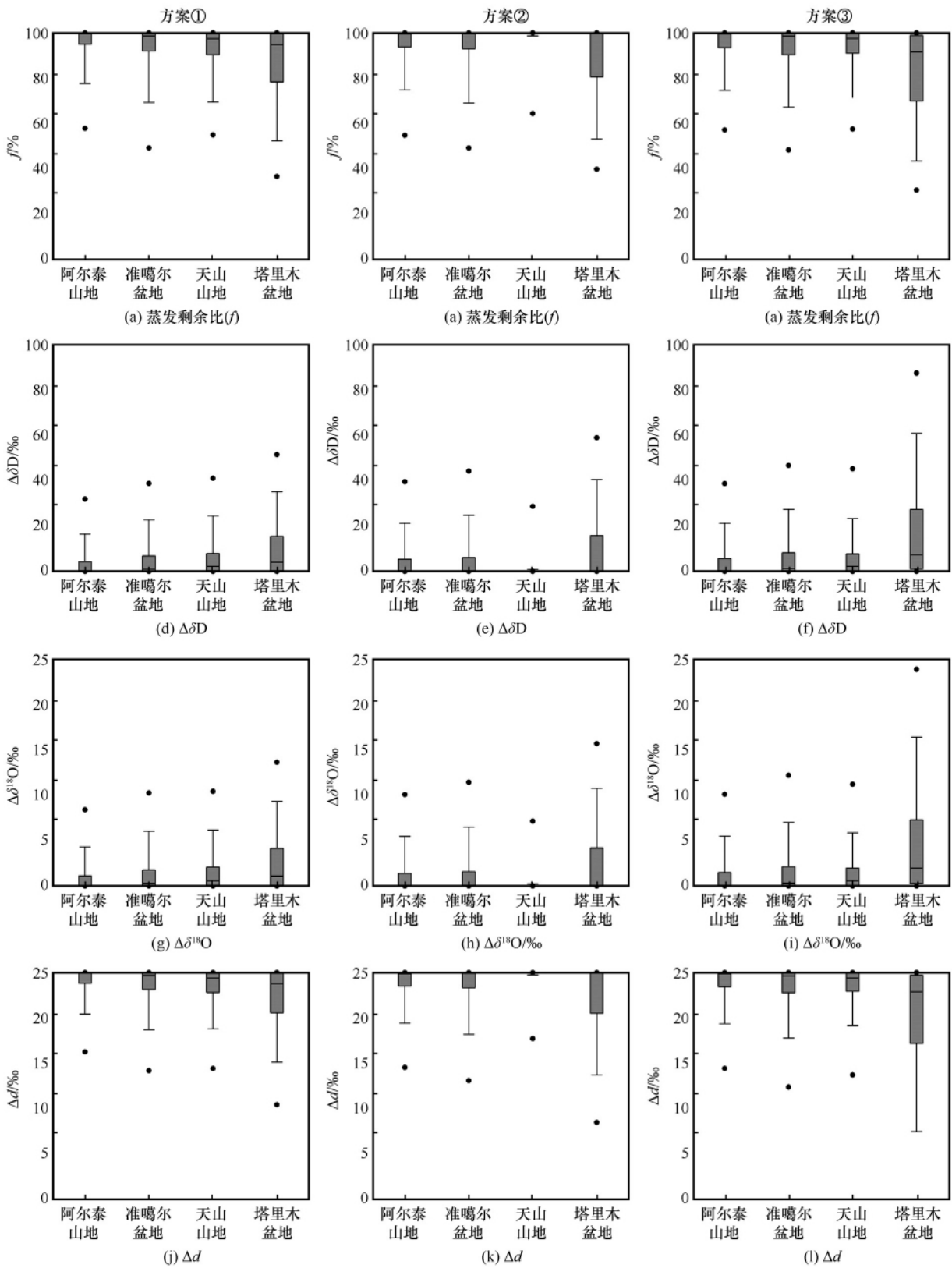


图3 基于三种 Stewart 模型改进方案的 2016 年 7 月 - 2017 年 6 月新疆雨滴蒸发剩余比( $f$ )、 $\Delta\delta D$ 、 $\Delta\delta^{18}O$  和  $\Delta d$  的分区空间变化

Fig. 3 Spatial distribution of  $f$ ,  $\Delta\delta D$ ,  $\Delta\delta^{18}O$  and  $\Delta d$  in precipitation in the four regions of Xinjiang by three Stewart model improvement schemes from July 2016 to June 2017

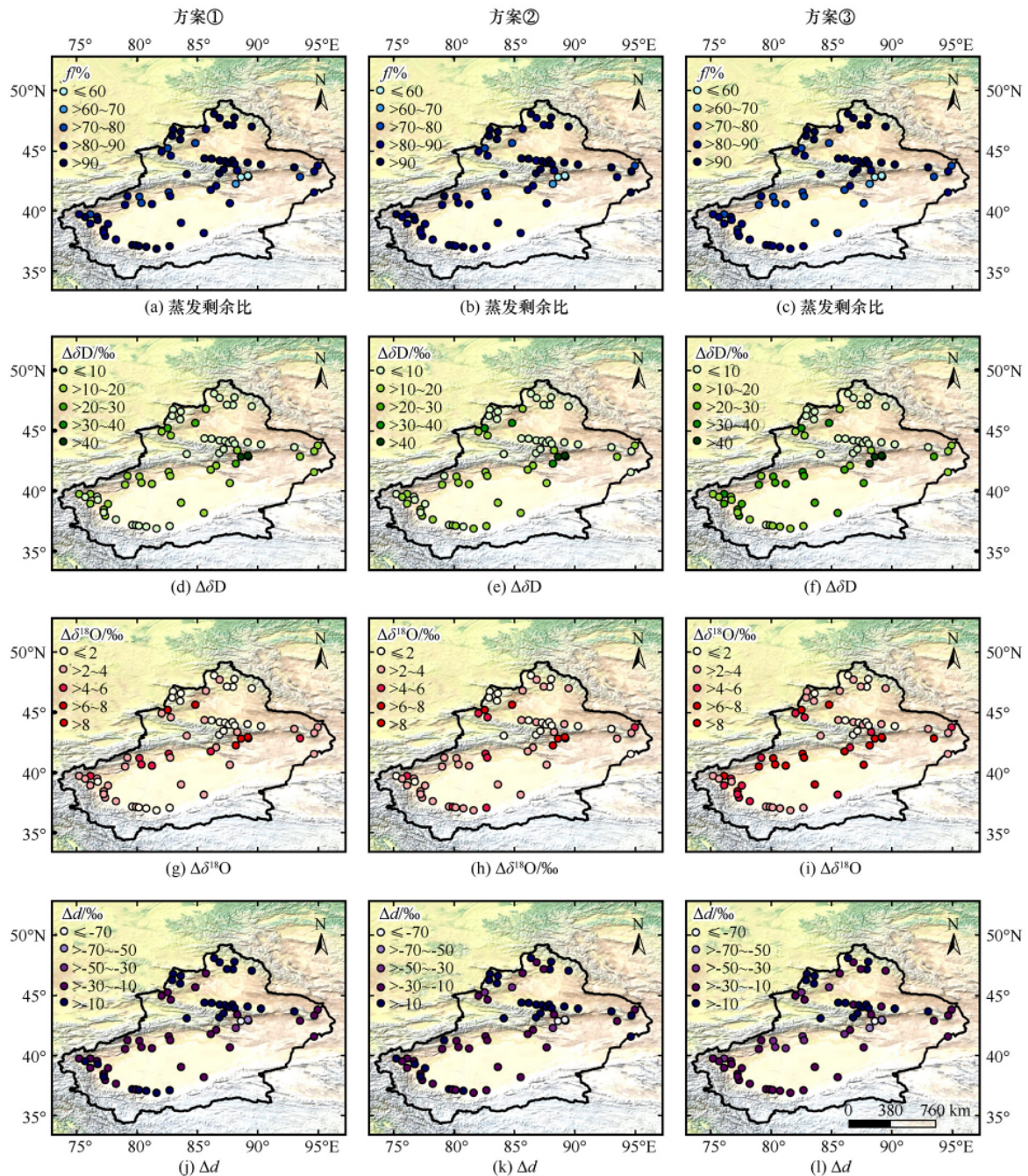


图4 基于三种 Stewart 模型改进方案的 2016 年 7 月 - 2017 年 6 月新疆蒸发剩余比( $f$ )、 $\Delta\delta D$ 、 $\Delta\delta^{18}O$  和  $\Delta d$  的空间分布  
 Fig.4 Spatial distribution of  $f$ ,  $\Delta\delta D$ ,  $\Delta\delta^{18}O$  and  $\Delta d$  in precipitation in Xinjiang by three Stewart model improvement schemes from July 2016 to June 2017

准噶尔盆地中东部、塔里木盆地南缘的  $\Delta d$  均值较大 ( $\Delta d \geq -24\text{‰}$ )。方案①、方案②和方案③  $< -24\text{‰}$  的站点分别有 6 个、6 个和 22 个, 三种方案的差异主要体现在塔里木盆地,  $\Delta d$  均值为方案②比方案①减小了  $0.82\text{‰}$ , 方案③比方案①减小了  $11.10\text{‰}$ 。

#### 2.4 雨滴蒸发剩余比与 $\Delta d$ 的关系

图 5 显示了三种 Stewart 模型改进方案下新疆  $f$

和  $\Delta d$  两者之间的关系, 可以看出,  $f$  和  $\Delta d$  的线性关系的斜率为方案①接近  $1.0\text{‰}/\text{‰}$  (除塔里木盆地为  $1.074$ ), 方案②接近  $1.1\text{‰}/\text{‰}$  (除天山山地为  $0.902$ ), 方案③为  $1.181 \sim 1.496\text{‰}/\text{‰}$ 。且  $R^2$  均  $> 0.85$ , 线性关系的斜率整体呈方案③  $>$  方案②  $>$  方案①的规律 (除天山山地呈方案③  $>$  方案①  $>$  方案②), 无论是新疆各分区 (天山山地方案②除外) 还是新疆全境, 三种方案计算出的蒸发剩余比 ( $f$ )

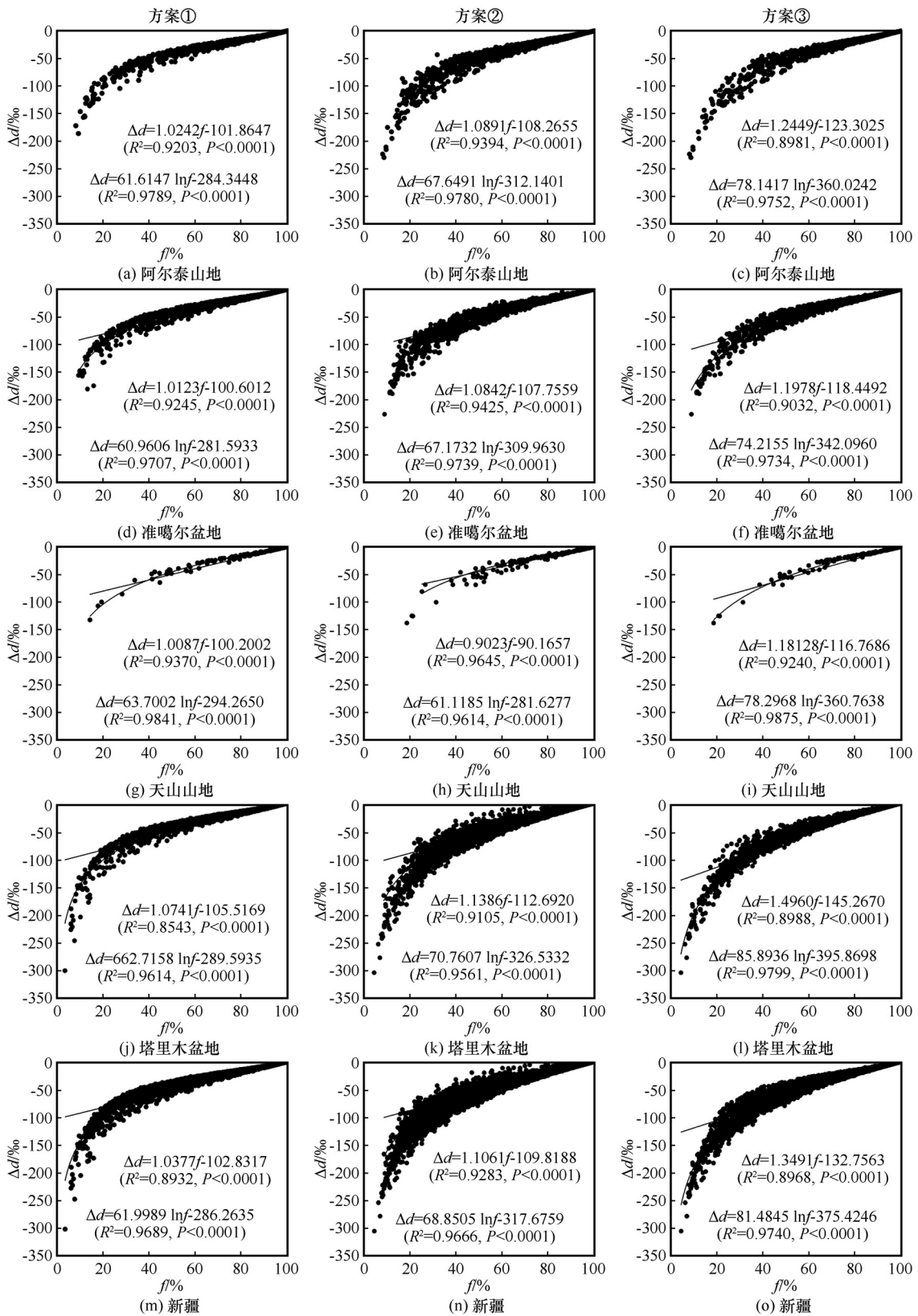


图5 基于三种 Stewart 模型方案的 2016 年 7 月 - 2017 年 6 月新疆不同蒸发剩余比(*f*)与降水水中  $\Delta d$  的关系  
 Fig. 5 Relationship between *f* and  $\Delta d$  in precipitation in Xinjiang by three Stewart model improvement schemes from July 2016 to June 2017



与  $\Delta d$  的斜率明显  $> 1.0\text{‰}$ ，最为干旱的塔里木盆地方案③的斜率高达  $1.496\text{‰}$ 。

### 3 讨论

在干旱半干旱地区，云下二次蒸发效应不容忽视<sup>[6, 17, 21]</sup>，从本研究中的三种 Stewart 模型改进方案来看，新疆降水同位素云下二次蒸发效应总体的区域格局和季节差异都可以得到较好的刻画，但是在数值上仍有细微差异，

为进一步探讨新疆的云下二次蒸发效应，本文参考 Kong 等<sup>[23]</sup>和 Crawford 等<sup>[24]</sup>的研究，在 Wang 等<sup>[22]</sup>的基础上对 Stewart 模型进行了改进，并用三种改进方案对新疆的云下二次蒸发效应进行了对比分析，研究结果与前人的较为一致。 $\Delta d$  在各区均为方案③  $<$  方案①和②，方案①和②比较接近。这主要是因为气温、相对湿度和雨滴直径是云下二次蒸发的主要影响因素<sup>[22, 45-46]</sup>，通过前人的研究发现，相对湿度与雨滴直径对  $\Delta d$  的影响较大<sup>[22]</sup>，而方案①在计算时直接将地面气温、相对湿度(常规地面气象参数)和雨滴直径(常规地面气象参数计算结果)等参数代入运算；方案②考虑到云底和地面参数的不同，将各气象站点云底与地面参数的平均值代入运算；方案③是以 850 hPa、700 hPa 和 500 hPa 为分界线对整个降雨过程进行分层研究，而计算时对气温、相对湿度、雨滴直径等参数进行了分段平均运算，使其结果更为细化。可以发现，方案①中的气温偏大，相对湿度偏小，方案②通过平均运算，使得气温降低、相对湿度增大，而在方案③中通过对云底雨滴直径的计算，使得雨滴直径变大，在分段平均过程中气温降低、相对湿度增大，而  $\Delta d$  随温度的降低而增大，随相对湿度和雨滴直径的增大而增大，因此  $\Delta d$  为方案③  $<$  方案①和②。

已有大量研究表明  $f$  和  $\Delta d$  两者之间存在相关性<sup>[18, 23-24]</sup>，例如，Froehlich 等<sup>[18]</sup>的研究发现阿尔卑斯山区雨滴蒸发剩余比较大时，雨滴蒸发剩余比与  $d$ -excess 变化量存在明显的  $1\text{‰}$  的线性关系，Kong 等<sup>[23]</sup>研究发现天山中段乌鲁木齐河流域中上游蒸发剩余比与  $\Delta d$  的斜率为  $1.1\text{‰} \sim 1.2\text{‰}$ ，Salamalikis 等<sup>[21]</sup>研究得出雨滴蒸发量每增大  $1\%$ ， $\Delta d$  约减小  $1.1\text{‰} \sim 1.3\text{‰}$ 。本文研究发现，无论是新疆各分区(天山山地区方案②除外)还是新疆全境，三种方案计算出的蒸发剩余比( $f$ )与  $\Delta d$  的斜率明显  $> 1.0\text{‰}$ ，最为干旱的塔里木盆

地区方案③的斜率高达  $1.496\text{‰}$ 。从不同方案来看，各分区(除塔里木盆地为  $1.074\text{‰}$ )和新疆全境的方案①的斜率接近  $1.0\text{‰}$ ，各分区(除天山山地区为  $0.902\text{‰}$ )和新疆全境的方案②的斜率接近  $1.1\text{‰}$ ，各分区和新疆全境的方案③的斜率为  $1.181\text{‰} \sim 1.496\text{‰}$ 。本研究中的蒸发剩余比( $f$ )与  $\Delta d$  的线性关系方案①的结果与 Froehlich 等<sup>[18]</sup>的结果相近，方案②的结果与 Kong 等<sup>[23]</sup>的结果相近，而方案③(除塔里木盆地)的结果与 Salamalikis 等<sup>[21]</sup>的结果接近。线性关系在蒸发剩余比较大时比较显著，而在干旱条件下，蒸发剩余比往往较小，这种线性关系可能存在很大的偏差，Wang 等<sup>[22]</sup>对天山的研究已证实这一点。

### 4 结论

本文结合 2016 年 7 月至 2017 年 6 月新疆 66 个地面气象站逐小时观测资料与 8 个探空站的高空定时观测资料，利用三种 Stewart 模型算法方案对比研究了新疆的云下二次蒸发效应，得出以下几条结论：

(1) 三种方案计算的新疆各分区云下二次蒸发存在明显的季节差异，蒸发剩余比( $f$ )均呈现出秋冬较大、春夏较小的趋势。各分区的  $\Delta\delta D$ 、 $\Delta\delta^{18}O$  和  $\Delta d$  春夏较大、秋冬较小。从整个新疆来看， $\Delta d$  均值夏秋冬三季(除春季外)均为方案②  $<$  方案①，春夏秋冬四季均为方案③  $<$  方案①。且方案②和方案①较为接近，方案③明显  $<$  方案①和②

(2) 从空间来看，阿尔泰山地、准噶尔盆地中部、天山山地和塔里木盆地南缘的蒸发剩余比( $f$ )较大(超过  $80\%$ )，而  $\Delta d$  均值在准噶尔盆地西部和塔里木盆地东侧北缘较小。三种方案下的雨滴蒸发剩余比( $f$ )均值、 $\Delta\delta D$  均值、 $\Delta\delta^{18}O$  均值和  $\Delta d$  均值在不同分区表现不一。就整体而言，三种方案的蒸发剩余比均值、 $\Delta\delta D$  均值、 $\Delta\delta^{18}O$  均值和  $\Delta d$  均值的差异性主要体现在塔里木盆地， $f$  均值、 $\Delta\delta D$  均值、 $\Delta\delta^{18}O$  均值和  $\Delta d$  均值为方案②比方案①分别增加了  $0.01\%$ 、 $1.19\%$ 、 $0.25\%$  和  $-0.82\%$ ，方案③比方案①分别增加了  $-0.04\%$ 、 $9.42\%$ 、 $2.56\%$  和  $-11.10\%$ 。

(3) 蒸发剩余比( $f$ )与  $d$ -excess 的变化量存在着相关性，三种方案的斜率均表现为塔里木盆地  $>$  阿尔泰山地  $>$  准噶尔盆地  $>$  天山山地。就三种方案来看，各分区(除塔里木盆地为  $1.074\text{‰}$ )和新疆全境的方案①的斜率接近  $1.0\text{‰}$ ，各分区

(除天山山地为  $0.902\text{‰}$ ) 和新疆全境的方案②的斜率接近  $1.1\text{‰}$ , 各分区和新疆全境的方案③的斜率为  $1.181\text{‰} \sim 1.496\text{‰}$ , 可以发现, 无论是新疆各分区(天山山地方案②除外) 还是新疆全境,  $f$  与  $\Delta d$  的线性关系明显大于  $1.0\text{‰}$ , 最为干旱的塔里木盆地方案③的斜率高达  $1.496\text{‰}$ 。

(4) 三种方案均能说明云下二次蒸发效应, 在现有研究中多用方案①和②, 其虽不及方案③细化, 但也能说明云下二次蒸发效应, 但分层假设即方案③毋庸置疑是后续云下二次蒸发效应研究的方向。

#### 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] Liu Jianrong, Song Xianfang, Yuan Guofu, et al. Stable isotopes of summer monsoonal precipitation in southern China and the moisture sources evidence from  $\delta^{18}\text{O}$  signature [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2008, 18(2): 155 - 165.
- [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] Zhang Mingjun, Wang Shengjie. A review of precipitation isotope studies in China: basic pattern and hydrological process [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2016, 26(7): 921 - 938.
- [5] Araguás-Araguás L, Froehlich K, Rozanski K. Stable isotope composition of precipitation over southeast Asia [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1998, 103(D22): 28721 - 28742.
- [6] 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. [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.]
- [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(2) [2018-08-15]. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/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] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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. [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.]
- [13] 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. [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.]
- [14] 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. [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.]
- [15] 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.
- [16] Li Zongxing, Feng Qi, Wang Q J, 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.
- [17] 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.
- [18] Froehlich 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.
- [19] 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.
- [20] Peng Tsungren, Wang Chunguo, Huang Chichao, et al. Stable isotopic characteristic of Taiwan's precipitation: A case study of western Pacific monsoon region [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2010, 289(3/4): 357 - 366.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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 [2018-08-15]. <https://doi.org/10.3402/tellusb.v65i0.19251>.
- [24] 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.
- [25] 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. [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.]
- [26] Zhang Shanqing, Pu Zongchao, Li Jinglin. The spatial-temporal variation of sunshine duration in Xinjiang during 1961–2010[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(11): 1481–1492. [张山清, 普宗朝, 李景林. 近50年新疆日照时数时空变化分析[J]. *地理学报*, 2013, 68(11): 1481–1492.]
- [27] Chen Rong, Zhang Mingjun, Wang Shengjie, et al. Spatial and temporal distribution of hourly rain intensity and its influencing factors in summer of Xinjiang during 2008–2014[J]. *Arid Zone Research*, 2017, 34(6): 1240–1249. [陈荣, 张明军, 王圣杰, 等. 2008–2014年新疆夏季逐时雨强时空特征及其影响因素[J]. *干旱区研究*, 2017, 34(6): 1240–1249.]
- [28] Su Hongchao, Shen Yongping, Han Ping, et al. Precipitation and its impact on water resources and ecological environment in Xinjiang region[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2007, 29(3): 343–350. [苏宏超, 沈永平, 韩萍, 等. 新疆降水特征及其对水资源和生态环境的影响[J]. *冰川冻土*, 2007, 29(3): 343–350.]
- [29] Liu Youcun, Jiao Keqin, Zhao Kui, et al. The response of precipitation to global climate change in the Tianshan Mountains, China[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2017, 39(4): 748–759. [刘友存, 焦克勤, 赵奎, 等. 中国天山地区降水对全球气候变化的响应[J]. *冰川冻土*, 2017, 39(4): 748–759.]
- [30] Ma Yi, Bai Lei, Li Qian, et al. The error analysis of the long term air temperature and precipitation in Northwest China simulated by WRF model[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2016, 38(1): 77–78. [马奕, 白磊, 李倩, 等. 区域气候模式在中国西北地区气温和降水长时间序列模拟的误差分析[J]. *冰川冻土*, 2016, 38(1): 77–78.]
- [31] Zhu Xiaofan, Zhang Mingjun, Wang Shengjie, et al. Diurnal variation characteristics of precipitation of Xinjiang in summer during 2008–2013[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, 35(2): 478–488. [朱小凡, 张明军, 王圣杰, 等. 2008–2013年新疆夏季降水的日变化特征[J]. *生态学杂志*, 2016, 35(2): 478–488.]
- [32] Liu Wei, Jiang Fengqing, Li Xiaolan. Spatiotemporal evolution of adaptive capacity to climate change in Xinjiang[J]. *Arid Zone Research*, 2017, 34(3): 531–540. [刘伟, 姜逢清, 李小兰. 新疆气候变化的适应能力时空演化特征[J]. *干旱区研究*, 2017, 34(3): 531–540.]
- [33] Zheng Du, Yang Qinye, Wu Shaohong, et al. General physical geography of China[M]. Beijing: Science Press, 2015. [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.]
- [34] 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.
- [35] Criss R. Principles of stable isotope distribution[M]. New York: Oxford University, 1999.
- [36] Thurai M, Szak Il M, Bringi V N, et al. Drop shapes and axis ratio distributions: Comparison between 2D video disdrometer and wind-tunnel measurements[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2009, 26(7): 1427–1432.
- [37] Szak Il M, Mitra S K, Diehl K, et al. Shapes and oscillations of falling raindrops: a review[J]. *Atmospheric Research*, 2010, 97(4): 416–425.
- [38] Yang Jun, Chen Baojun, Yin Yan, et al. Cloud precipitation physics[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2011. [杨军, 陈宝君, 银燕, 等. 云降水物理学[M]. 北京: 气象出版社, 2011.]
- [39] Best A C. Empirical formulae for the terminal velocity of water drops falling through the atmosphere[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1950, 76(329): 302–311.
- [40] Wang Jingfeng, Chagnon F J F, Williams E R, et al. Impact of deforestation in the Amazon basin on cloud climatology[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2009, 106(10): 3670–3674.
- [41] Fletcher J, Bretherton C. Evaluating boundary layer-based mass flux closures using cloud-resolving model simulations of deep convection[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2010, 67(7): 2212–2225.
- [42] 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.
- [43] Kinzer G D, Gunn R. The evaporation, temperature and thermal relaxation-time of freely falling waterdrops[J]. *Journal of Meteorology*, 1951, 8(2): 71–83.
- [44] Best A C. The size distribution of raindrops[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1950, 76(327): 16–36.
- [45] Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation[J]. *Tellus*, 1964, 16(4): 436–468.
- [46] 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 [2018-08-15]. <https://www.researchgate.net/publication/228500285>.

## A comparison of sub-cloud secondary evaporation effect of precipitation isotope in Xinjiang based on the Stewart model improvement scheme

ZHOU Su'e<sup>1</sup>, ZHANG Mingjun<sup>1</sup>, WANG Shengjie<sup>1,2</sup>, MENG Hongfei<sup>1</sup>,  
ZHANG Yaning<sup>1</sup>, YU Xiuxiu<sup>1</sup>

(1. College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China; 2. Key Laboratory for Ecology and Environment of River Wetlands in Shaanxi Province, Weinan 714099, Shaanxi, China)

**Abstract:** The sub-cloud secondary evaporation is easy to occur and change its isotope ratio in the arid and semi-arid areas with low precipitation and high evaporation. In the isotope hydrology study it is necessary to have a better understanding of variability in stable hydrogen and oxygen isotopes of raindrops from cloud base. The Stewart model is often used for evaluation the change in isotope ratios in raindrops. Temperature and relative humidity of raindrops falling under the cloud are the key input parameters of the model. Now, the widely used atmospheric mean hypothesis is different from natural conditions, the impact of which on the simulation results remains to be determined. Based on the hourly meteorological observations at surface as well as the daily radiosonde observation in Xinjiang from July 2016 to June 2017, the effect of sub-cloud secondary evaporation in Xinjiang was analyzed using the Stewart model improvement schemes (i. e., schemes ①, ② and ③). It is found that: (1) There are obvious seasonal variation of sub-cloud evaporation found by the three schemes, the trend of  $f$  is larger in autumn and winter and smaller in spring and summer, and  $\Delta\delta D$ ,  $\Delta\delta^{18}O$  and  $\Delta d$  is smaller in autumn and winter and larger in spring and summer. (2) Spatially,  $\Delta d$  is less in the western region of Junggar Basin and northern edge of Turpan-Hami Basin. In terms of  $f$ ,  $\Delta\delta D$ ,  $\Delta\delta^{18}O$  and  $\Delta d$ , the differences among the three schemes are obvious in the Tarim Basin. (3) There is correlation between  $f$  and  $\Delta d$ . On the whole, the slopes of the three Stewart model improvement schemes are highest in Tarim Basin, following by the Altai region and the Junggar Basin, and then the Tianshan Mountains. It can be found that the linear relationship between  $f$  and  $\Delta d$  of the three Stewart model improvement schemes is larger than 1.0‰/‰ in Xinjiang, except the second scheme in the Tianshan Mountains, the slope of the third scheme in Tarim Basin reaches up to 1.496‰/‰, which may be due to Xinjiang located in the arid and semi-arid climate zone. There is no doubt that schemes ③ is the research direction of sub-cloud secondary evaporation in the future.

**Key words:** Xinjiang; precipitation; stable isotope; sub-cloud evaporation; Stewart model improvement scheme

( 本文编辑: 庞瑜, 周成林)