

文章编号: 2096-1618(2018)02-0184-06

# 高原冬季雪深与重庆夏季降水的年际关系研究

吴树炎<sup>1</sup>, 顾建峰<sup>2</sup>, 刘海文<sup>3</sup>, 周 括<sup>4</sup>, 傅 宁<sup>3</sup>, 朱玉祥<sup>5</sup>

(1. 成都信息工程大学大气科学学院 高原大气与环境四川省重点实验室, 四川 成都 610225; 2. 重庆市气象局, 重庆 401147; 3. 中国民航大学, 天津 300300; 4. 中国科学院大气物理研究所 云降水物理与强风暴重点实验室, 北京 100029; 5. 中国气象局气象干部培训学院, 北京 100081)

**摘要:**为了探究青藏高原冬季雪深对重庆夏季降水的影响,利用地面观测资料和 NCEP/ NCAR 再分析资料集等资料,使用相关分析、合成分析等方法,分析了二者之间的年际关系。结果表明:冬季高原积雪与重庆夏季降水之间存在着显著的正相关关系,当前期青藏高原冬季雪深越深(浅),重庆夏季降水则偏多(少)。青藏高原冬季积雪影响重庆夏季降水的主要原因是当前期青藏高原积雪异常偏深时,在当年夏季,中国大陆东部以及西太平洋地区500 hPa位势高度距平场呈“++”“三极”型分布,表明副热带高压异常偏南,东亚夏季风偏弱,异常偏弱的东亚夏季风使得来自南海、中南半岛和日本海的两支水汽在长江流域辐合,有利于重庆夏季降水的偏多;当青藏高原积雪偏浅时,中国大陆东部以及西太平洋地区500 hPa位势高度呈“+-”“偶极”型分布,副热带高压异常偏北,东亚夏季风异常偏强,使得来自索马里越赤道的异常偏强的水汽一直延伸到我国的东北地区,重庆在单一的暖湿气流控制之下,不利于在重庆地区形成水汽的辐合,导致重庆夏季降水偏少。

**关键词:**气象学;积雪;青藏高原;重庆降水;年际关系

**中图分类号:**P466

**文献标志码:**A

**doi:**10. 16836/j. cnki. jcuit. 2018. 02. 013

## 0 引言

重庆是中国著名的山城,夏季受旱涝灾害的影响,常给当地国民经济和人民生命财产造成重大损失<sup>[1]</sup>。比如1998年的特大洪涝和2006年的特大干旱,都给重庆以及中国西南东部地区造成了特别严重的损失和较大的社会影响。为了揭示影响重庆夏季旱涝的物理机制,一些科技工作者对重庆旱涝原因进行了大量研究。比如,周浩等<sup>[2]</sup>认为,东亚夏季风强年,夏季整个重庆区域降水偏少;重庆汛期降水与前期1-5月南半球中高纬度(40°S~60°S)环流异常有显著关系<sup>[3]</sup>。研究表明:极涡<sup>[4]</sup>、西太平洋副热带高压<sup>[5]</sup>、南亚高压<sup>[6]</sup>、中高纬度阻塞高压<sup>[7]</sup>都与重庆夏季期间降水存在显著关系。由于西南低涡对西南地区夏季降水有着重要影响<sup>[8]</sup>,石鹏翔等<sup>[9]</sup>和宋美洋等<sup>[10]</sup>分别从重庆夏季低涡有暴雨和低涡无暴雨的角度,分析了中尺度低涡的气候学特征。此外,李永华等<sup>[11]</sup>研究表明,前期赤道东太平洋海表温度异常偏高,则西南地区东部包括重庆夏季降水偏多。这些研究表明,影响重庆夏季降水的因子非常复杂。

青藏高原作为平均海拔高度大于3000 m的抬高热源,对维持东亚夏季风环流起着重要作用<sup>[12-14]</sup>。Chen等<sup>[15]</sup>以及Wu等<sup>[16]</sup>研究认为,中国东部夏季降水和高原冬季雪盖在年际和年代际时间尺度上有着紧密的关系。郑益群等<sup>[17]</sup>研究表明,青藏高原积雪的增加会明显减弱亚洲夏季风的强度,并且使华南的降水减少,江淮流域的降水增多。Zhu等<sup>[18]</sup>发现,春季高原热源与当年夏季副热带高压之间存在着显著的正相关关系。

综上所述,青藏高原积雪与东亚夏季风<sup>[17]</sup>以及副热带高压<sup>[18]</sup>有重要关系,东亚夏季风<sup>[2]</sup>以及副热带高压<sup>[5]</sup>又对重庆夏季降水有着重要的影响,那么,青藏高原积雪是否也应与重庆夏季降水之间存在着关系。如果两者之间存有关系,它们之间的关系是什么?高原积雪又是怎样影响重庆夏季降水的多寡?为此,通过研究青藏高原积雪与重庆夏季降水之间的年际关系,以期为重庆夏季降水的短期气候提供更多的科学依据。

## 1 资料和方法

所用资料包括:重庆34个观测站的降水资料由重庆市气候中心提供。这34个台站的站点空间分布由图1中给出,降水资料的时间跨度为1961-2010年。

收稿日期:2017-03-07

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(91337215);四川省科技处应用基础基金资助项目(2015JY0109);重庆市气象局开放式研究基金资助项目(KFJJ-201102、YU-XM-201103028)

文中的夏季指6-8月。中国气象局国家气象信息中心提供的逐日台站雪深资料,其时间跨度为1961-2010年。其中,冬季是指上一年的12月与当年1,2月。NCEP/NCAR再分析资料<sup>[19]</sup>,其水平分辨率为 $2.5^{\circ}\times 2.5^{\circ}$ ,其中包括风场、位势高度场、比湿场。为了和降水资料时间跨度保持一致,也选取为1961-2010年。

垂直积分的水汽通量 $Q$ 的计算公式<sup>[20]</sup>分为纬向水汽输送通量:

$$Q_u = -\frac{1}{g} \int_{p_s}^p q u dp$$

经向水汽输送通量:

$$Q_v = -\frac{1}{g} \int_{p_s}^p q v dp$$

其中, $p_s$ 代表地表面气压, $p$ 取300 hPa, $q$ 代表比湿, $g$ 代表重力加速度,水汽通量的单位为 $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$ 。

文中使用的方法还有相关分析、合成分析以及 $t$ 检验等方法<sup>[21]</sup>。

图1给出重庆34个气象台站的空间分布。由图可见,34个观测站均匀分布在重庆境内,基本上能够代表重庆的气象要素。将重庆34个观测站夏季降水量求取算术平均,为重庆夏季降水,并将之标准化,作为重庆夏季降水指数。

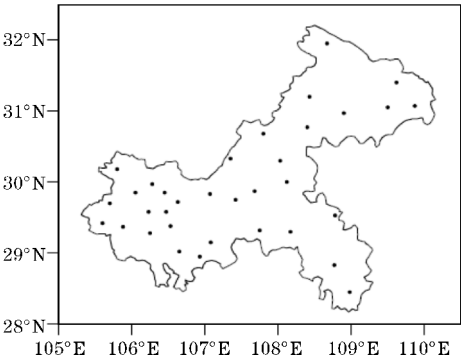


图1 重庆地区34个站点分布

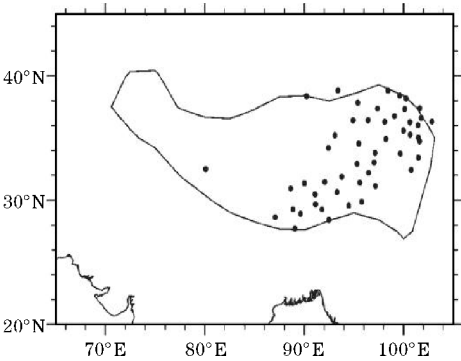


图2 青藏高原及邻近地区50个站点分布

图2给出了高原积雪观测台站的空间分布,主要分布于青藏高原东部地区。参照朱玉祥等<sup>[22-23]</sup>定义

高原积雪指数的方法,选取无缺测值的50个台站的冬季雪深的平均值作为高原积雪强度,将之标准化后定义为高原冬季雪深指数(SDI)。

## 2 结果分析

### 2.1 重庆夏季降水和高原冬季雪深的年际关系

图3给出了重庆夏季降水指数和高原冬季雪深指数的时间序列。从图3中不难发现,无论是高原雪深还是重庆夏季降水都有明显的年际和年代际变化特征。高原冬季雪深和重庆夏季降水,两者的变化趋势大约在1996年前后发生了明显的年代际转变:高原雪深由1996年前的变深趋势转变为其后的变浅趋势;同时,重庆夏季降水也在1996年前后由上升趋势转变为其后的下降趋势。重庆夏季降水指数和高原冬季雪深指数表现为较一致的同位相变化,为此,计算了两者的相关系数,结果显示两者的相关系数值为0.329,通过了0.05的显著性水平检验。

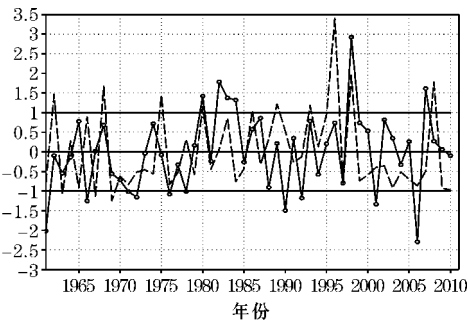


图3 重庆夏季降水指数(实线)和高原冬季雪深指数(虚线)时间序列

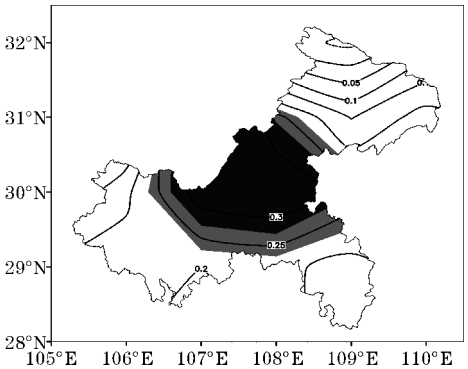


图4 高原冬季雪深指数与重庆34个观测站夏季降水的相关系数分布(其中阴影由浅到深分别表示通过0.1和0.05显著性检验)

为了进一步分析高原冬季雪深与重庆夏季降水在年际时间尺度上的相互关系,图4给出了高原冬季雪深指数与重庆34个站夏季降水的相关系数分布,高原冬季雪深指数与重庆夏季降水呈明显的正相关,并且

在重庆的中部地区,其相关系数通过了0.05的显著性水平检验。这表明,高原冬季雪深越深(浅),重庆在该年夏季的降水则偏多(少),且在重庆中部地区表现最为明显。以上分析表明前期冬季高原雪深与重庆夏季降水有密切的关系,在年际时间尺度上存在着显著的正相关关系。这与杨凯等<sup>[24]</sup>的数值试验结论相一致。

2.2 高原冬季雪深在年际时间尺度上影响重庆夏季降水的可能原因

为了探究前期高原冬季积雪强度变化如何影响重庆夏季降水之间的年际关系,同时保证一定数量的样本数,选取图 3 中的高原雪深指数大于0.9和小于-0.9的年作为高原积雪偏深年和偏浅年的标准。由雪深指数的逐年变化(图 3)得到高原积雪偏深的年份有 1962, 1968, 1975, 1980, 1986, 1989, 1993, 1995, 1996, 1998 和 2008 年,共 11 年;高原积雪偏浅的年份有 1963, 1965, 1967, 1969, 2003, 2009 和 2010 年,共 7 年。

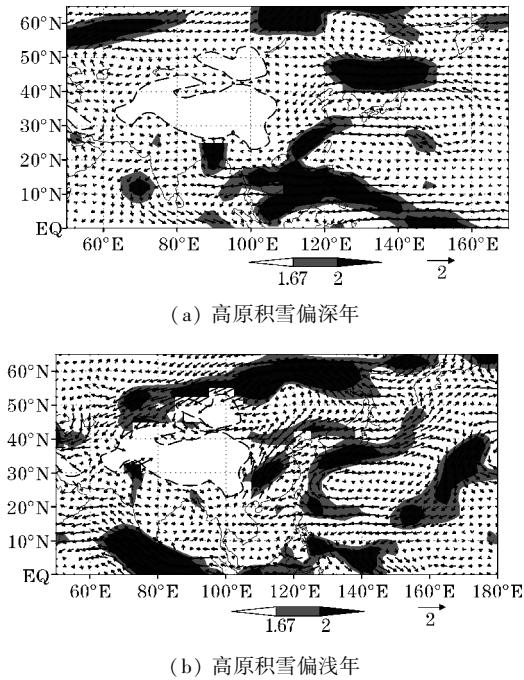


图 5 夏季 850 hPa 风场(单位:m/s)的距平合成(阴影由浅到深分别表示通过0.1和0.05显著性检验)

图 5 给出了前期冬季高原积雪偏深年与偏浅年的夏季850 hPa风场的距平合成。由图 5(a)可见,在中国大陆东部及其以东海域,850 hPa距平风场从低纬度到高纬度存在着“异常反气旋”,“异常气旋”和“异常反气旋”的“三极型”环流分布;在中高纬度地区外兴安岭和威海附近分别有一异常反气旋。位于中国华南至台湾岛附近存在异常的反气旋环流,表明副热带高压异常偏南。异常偏南的副热带高压导致其南部的暖

湿气流和来自于北方的异常干冷空气在30 °N附近形成一条辐合线,重庆正处于这条辐合线的西部;来自于海洋的暖湿空气和来自于北方的冷空气在重庆地区相交绥,显然有利于重庆夏季降水的异常偏多。

在高原积雪异常偏浅的年份,850 hPa 的距平风场合成图 5(b)和图 5(a)相比,并非是完全的反位相分布。在欧亚大陆中高纬地区,中高纬度地区外兴安岭和威海附近的异常反气旋不复存在,取而代之的是位于大兴安岭附近的一个异常气旋,贝加尔湖以南和威海附近的异常气旋。在中国大陆东部以及西太平洋海域上,从低纬度到高纬度为“异常反气旋”和“异常气旋”的“偶极”型分布。西太平洋附近的异常反气旋环流表明西太平洋副热带高压异常偏强,异常偏强的副热带高压表明东亚夏季风异常偏强,该异常偏强的东亚夏季风一直延伸到中国的东北附近西行,大约在贝加尔湖附近形成一异常气旋。重庆受强东亚夏季风的影响下,降水偏少<sup>[2]</sup>。

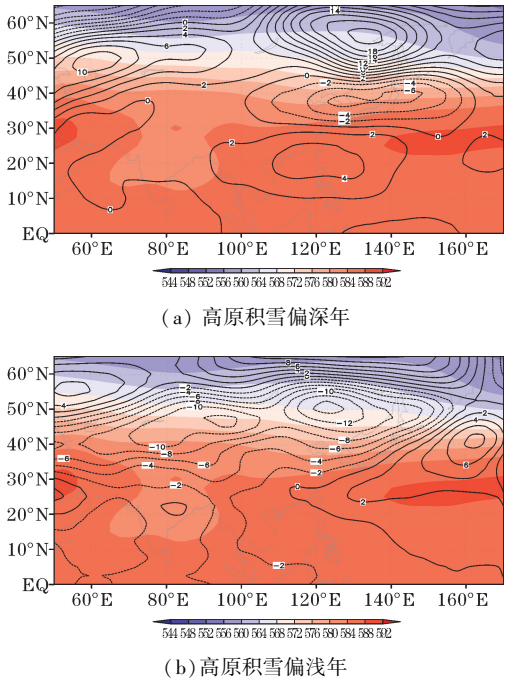


图 6 夏季 500 hPa 位势高度场(填色,单位:dagpm)及其距平合成(单位:dagpm)

图 6 给出了前期冬季高原积雪偏深年与偏浅年的500 hPa位势高度的距平合成。和图 5(a)低层850 hPa的距平风场相对应的是,在对流层中层500 hPa位势高度上,当高原冬季积雪偏深时,500 hPa位势高度的距平在中国大陆东部及西太平洋上空也呈现“+--+”三极型分布(图 6a)。其中,低纬度正的中心主要位于中国南海以及台湾岛附近,对比500 hPa位势高度的气候态(图略),该正距平中心的存在表明西太平洋副热带高压异常偏东偏南,异常偏南的副热带高压表明东亚夏



季风偏弱,异常偏弱的东亚夏季风有利于将来自海洋的暖湿气流与来自于高纬的偏北气流在重庆地区聚集,使得重庆夏季降水偏多。

当高原冬季积雪偏浅时,在中国大陆东部及西太平洋上空,500 hPa位势高度距平也表现为“+ -”偶极型分布(图6b);其中,正的距平中心主要位于海上,与500 hPa位势高度气候平均态相比较,表明副热带高压异常偏北;而负的距平中心主要位于中高纬度的贝加尔湖以及鄂霍次克海以西地区。欧亚大陆以及中国大陆主要为负的距平所控制,正的距平中心主要位于西太平洋海上,这种“东高西低”的距平分布,由地转风关系可知,非常有利于东亚夏季风的偏强,异常偏强的东亚夏季风可以到达中国东北部地区(图5b)。重庆在单一的暖湿气流影响下,不利于冷暖空气在重庆的交绥,显然也不利于重庆夏季降水的偏多。

### 2.3 高原冬季雪深在年际时间尺度上影响重庆夏季降水的水汽输送分析

源源不断的水汽供应是产生降水的一个重要条件<sup>[25]</sup>,降水的多寡与重庆上空的水汽辐合存在着密切的关系,在此分别合成了高原冬季积雪偏深和偏浅时重庆夏季整层积分的水汽通量距平(图7)。当冬季高原积雪偏深时,在中国东部长江以及以南地区的水汽距平场通过了0.05的显著性水平检验,这支水汽主要来自于南海、和中南半岛;另一支通过0.05显著性水平

检验的水汽主要位于中国的东北及其以北地区,其主要为来自于日本海的偏东气流;这两支水汽在长江流域地区聚集,形成水汽的辐合,有利于重庆夏季的降水的异常偏多。但是,当高原积雪异常偏浅时,影响重庆夏季降水的水汽通道和高原积雪异常偏多时的水汽来源并不相同。图7(b)最显著的特征是一支来自于索马里的水汽越过赤道,一直延伸到中国的东北地区,该支异常偏强的水汽在贝加尔湖附近形成气旋性环流。重庆尽管水汽比较充足,但是其并不能在重庆地区形成水汽的辐合,因此,不利于重庆夏季降水的偏多。

## 3 结论

利用地面观测资料和 NCEP/NCAR 再分析资料,分析了冬季高原积雪与重庆夏季降水的年际关系,得到如下结论:

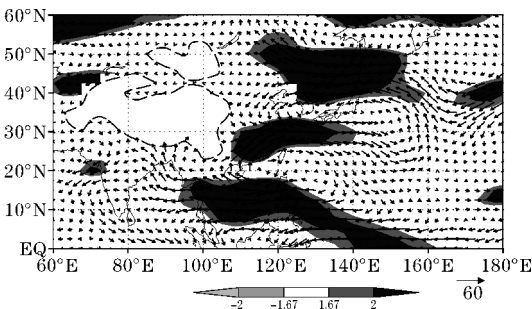
(1)前期冬季高原雪深与重庆夏季降水在年际时间尺度上存在着显著的正相关关系。高原冬季雪深越深(浅),重庆在该年的降水则偏多(少)。两者的年代际变化特征是,大约在1996年前后,高原雪深发生了年代际变浅,同时,重庆夏季降水也发生了由多变少的年代际变化。

(2)当青藏高原积雪偏深时,500 hPa位势高度距平场在中国大陆东部以及西太平洋地区从南到北表现为“+ - +”的“三极”型分布;异常偏南的副热带高压有利于重庆夏季降水的偏多;当青藏高原雪深偏浅时,500 hPa位势高度距平场在中国大陆东部以及西太平洋地区表现为“+ -”偶极型分布;异常偏北的副热带高压十分有利于重庆夏季降水的偏少。

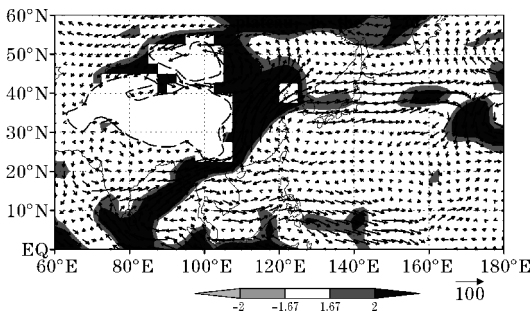
(3)青藏高原积雪主要通过影响东亚夏季风的强弱,然后影响重庆夏季降水的多寡。当高原冬季积雪偏深时,东亚夏季风偏弱,来自海上的水汽在异常偏弱的东亚夏季风影响下,在重庆地区和来自北方的冷空气相遇,十分有利于重庆夏季降水的偏多。反之,当高原冬季积雪偏浅时,东亚夏季风异常偏强,重庆在单一的暖湿气流影响下,不利于重庆夏季降水的偏多。

(4)当冬季高原积雪偏深时,造成来重庆夏季的降水异常偏多的水汽主要来源于南海、中南半岛的水汽和日本海的偏东气流,这两只水汽在长江流域聚集,有利于重庆夏季的降水的异常偏多;当高原积雪异常偏浅时,来自索马里越赤道的异常偏强的水汽一直延伸到中国的东北地区,该支水汽不能在重庆地区形成水汽的辐合,不利于重庆夏季降水的偏多。

使用常规的统计方法,研究了冬季高原积雪与重



(a)高原积雪偏深年



(b)高原积雪偏浅年

图7 夏季整层积分的水汽通量距平合成(单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ )

(其中阴影由浅到深分别表示通过0.1和0.05显著性检验)

庆夏季降水的年际关系,而冬季高原积雪影响重庆夏季降水的物理机制,尚需数值模式加以进一步验证。

## 参考文献:

- [1] 刘德,李永华. 重庆地区夏季降水时空分布特征分析[J]. 成都气象学院学报,1999,14(1):93-96.
- [2] 周浩,唐红玉,程炳岩. 东亚夏季风与重庆夏季降水的关系研究[J]. 西南大学学报(自然科学版),2010,32(1):81-88.
- [3] 周浩,唐红玉,程炳岩,等. 南半球前期环流异常与重庆汛期降水的关系研究[J]. 高原气象,2011,30(1):174-181.
- [4] 周浩,程炳岩,叶钊,等. 近47年影响重庆汛期降水的气候因子分析研究[J]. 西南大学学报(自然科学版),2010,32(9):107-114.
- [5] 周浩,程炳岩,叶钊. 重庆汛期降水与西太平洋副热带高压的关系[J]. 云南大学学报(自然科学版),2010,32(1):63-67.
- [6] 周浩,程炳岩,康俊. 盛夏南亚高压位置异常与重庆降水气温的联系[J]. 西南大学学报(自然科学版),2014,36(7):110-116.
- [7] 叶钊,巩远发,李永华,等. 亚欧阻塞高压的变化特征及其与重庆夏季降水的联系[J]. 西南师范大学学报(自然科学版),2014,39(9):164-172.
- [8] 李国平. 高原涡、西南涡研究的新进展及有关科学问题[J]. 沙漠与绿洲气象,2013,7(3):1-6.
- [9] 石鹏翔,刘海文,段伯隆,等. 影响重庆夏季暴雨的中尺度低涡的气候学特征[J]. 成都信息工程大学学报,2016,31(3):305-310.
- [10] 宋美洋,顾建峰,刘海文,等. 重庆夏季低涡无暴雨的气候学分析[J]. 成都信息工程大学学报,2016,31(4):413-418.
- [11] 李永华,卢楚翰,徐海明,等. 热带太平洋-印度洋海表温度变化及其对西南地区东部夏季旱涝的影响[J]. 热带气象学报,2012,28(2):145-156.
- [12] Flohn H. Large-scale Aspects of the "Summer Monsoon" in South and East Asia[J]. Meteorological Society of Japan,1957,75:180-186.
- [13] 叶笃正,高由禧. 青藏高原气象学[M]. 北京:科学出版社,1979:279.
- [14] Zhao Ping,Zhou Zijiang,Liu Jiping. Variability of Tibetan Spring Snow and Its Associations with the Hemispheric Extratropical Circulation and East Asian Summer Monsoon Rainfall: An Observational Investigation[J]. Journal of Climate,2007,20(15):3942-3955.
- [15] Chen Lieting, Wu Renguang. Interannual and Decadal Variations of Snow Cover over Qinghai-Xizang Plateau and Their Relationships to Summer Monsoon Rainfall in China[J]. Advance in Atmospheric Sciences,2000,17(1):18-30.
- [16] Wu Tongwen, Qian Zhengnan. The Relation between the Tibetan Winter Snow and the Asian Summer Monsoon and Rainfall: An Observational Investigation[J]. Journal of Climate,2003,16(12):2038-2051.
- [17] 郑益群,钱永甫,苗曼倩,等. 青藏高原积雪对中国夏季风气候的影响[J]. 大气科学,2000,24(6):761-774.
- [18] Zhu Yuxiang, Liu Haiwen, Ding Yihui, et al. Interdecadal variation of spring snow depth over the Tibetan Plateau and its influence on summer rainfall over East China in the recent 30 years[J]. International Journal of Climatology, 2014, 35(12):3654-3660.
- [19] Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project[J]. Bulletin of American Meteorological Society, 1996,77(3):437-471.
- [20] 丁一汇. 高等天气学[M]. 北京:气象出版社,2005:585.
- [21] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京:气象出版社,2007:296.
- [22] 朱玉祥,丁一汇,徐怀刚. 青藏高原大气热源和冬春积雪与中国东部降水的年代际变化关系[J]. 气象学报,2007,65(6):946-958.
- [23] 朱玉祥,丁一汇,刘海文. 青藏高原冬季积雪影响我国夏季降水的模拟研究[J]. 大气科学,2009,33(5):903-915.
- [24] 杨凯,胡田田,王澄海. 青藏高原南、北积雪异常与中国东部夏季降水关系的数值试验研究[J]. 大气科学,2017,41(2):345-356.
- [25] 刘海文,丁一汇. 华北汛期大尺度降水条件的年代际变化[J]. 大气科学学报,2011,34(2):146-152.

## Interannual Relationship between Winter Snow Depth over Tibetan Plateau and Summer Precipitation over Chongqing

WU Shu-yan<sup>1</sup>, GU Jian-feng<sup>2</sup>, LIU Hai-wen<sup>3</sup>, ZHOU Kuo<sup>4</sup>, FU Ning<sup>3</sup>, ZHU Yu-xiang<sup>5</sup>

(1. College of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Plateau Atmospheric and Environment Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610225, China; 2. Chongqing Meteorological Administration, Chongqing 401147, China; 3. Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China; 4. Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Key Laboratory of Cloud-Precipitation Physics and Severe Storms (LACS), Beijing 100081, China; 5. China Administration Training Centre, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Using observations and NCEP/NCAR reanalysis data, this paper investigates the interannual relationship between the winter snow depth over the Tibetan Plateau (TP) and the summer rainfall in Chongqing. Results show a significant positive correlation between them, which indicates more (less) summer rainfall in Chongqing when preceding winter snow depth is deeper (shallower) over the TP. Mechanism analysis reveals that when the winter snow depth over the TP is deeper, a tripole appears in the Eastern China and western Pacific in terms of 500 hPa geopotential height anomalies. It suggests a southward displacement of the subtropical high and thus a weaker East Asian summer monsoon (EASM). Further, this circulation pattern induces the water vapor from South China Sea and Indo-China Peninsula to converge in Yangtze River basin, which is favorable for more precipitation in Chongqing. However, when the winter snow depth over the TP is shallower, the EASM intensifies with the subtropical high moving northward and an anomalous dipole in the 500 hPa geopotential height. The water vapor of the Somali cross-equatorial stream flow stretches into the Northeast China. Chongqing experiences less summer rainfall due to the worse convergence condition dominated by the single warm and moist air.

**Keywords:** meteorology; accumulated snow; Tibetan Plateau; rainfall in Chongqing; interannual relationship