

杨凯, 胡田田, 王澄海. 2017. 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, 41 (2): 345–356. Yang Kai, Hu Tiantian, Wang Chenghai. 2017. A numerical study on the relationship between the spring–winter snow cover anomalies over the northern and southern Tibetan Plateau and summer precipitation in East China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 41 (2): 345–356, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1604.16119.

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

杨凯 胡田田 王澄海

兰州大学大气科学学院/甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室, 兰州 730000

摘 要 青藏高原冬、春积雪有着显著的南、北空间差异, 本文利用通用地球系统模式 (CESM) 设计了增加高原南、北冬、春积雪的敏感性试验, 结果表明: 当高原南部冬、春积雪异常偏多, 长江及其以北地区夏季降水偏多, 华南大部分地区夏季降水偏少; 而当高原北部冬、春积雪异常偏多, 华北及东北地区夏季降水偏多, 长江下游南部地区夏季降水偏少, 雨带更偏北。青藏高原南、北部冬、春积雪异常影响中国东部夏季降水的物理机制的分析结果表明, 高原不同区域 (南部和北部) 冬、春积雪异常引起的非绝热加热异常效应都可持续到夏季, 且北部积雪异常持续时间更长。高原南部和北部积雪异常偏多均会减弱高原北侧上空大气的水平温度梯度, 进而减弱高原北侧西风急流的位置及强度, 进而影响下游出口区处急流的强度和位置, 且高原北部积雪异常偏多的影响更大。当高原南部积雪异常偏多, 急流出口区的西风急流加强且偏南; 而高原北部积雪异常偏多, 出口区的西风急流减弱且偏北。相应地, 对流层中层 500 hPa 西太平洋副热带高压减弱, 低层 850 hPa 异常反气旋环流, 影响中国东部地区水汽输送, 从而影响了中国东部地区夏季雨带的变化。当高原南部积雪异常偏多, 异常反气旋性环流位于东海附近, 有利于更多水汽输送至长江流域, 华南水汽输送减少; 当高原北部积雪异常偏多, 异常反气旋性环流相对偏北, 更有利于华北及东北水汽输送, 雨带偏北。

关键词 青藏高原积雪 非绝热加热 西风急流 中国东部降水

文章编号 1006-9895(2017)02-0345-12

中图分类号 P435

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1604.16119

A Numerical Study on the Relationship between the Spring–Winter Snow Cover Anomalies over the Northern and Southern Tibetan Plateau and Summer Precipitation in East China

YANG Kai, HU Tiantian, and WANG Chenghai

College of Atmospheric Science, Lanzhou University/Key Laboratory of Arid Climatic Change and Disaster Reduction of Gansu Province, Lanzhou 730000

Abstract This study investigates the relationship between the spring–winter snow cover anomalies over the northern and southern Tibetan Plateau (TP) and summer precipitation in East China (EC) based on numerical experiments of

收稿日期 2016-01-15; 网络预出版日期 2016-04-21

作者简介 杨凯, 男, 1992 年出生, 硕士研究生, 主要从事数值模式、陆气相互作用研究。E-mail: yangk2010@lzu.edu.cn

通讯作者 王澄海, E-mail: wch@lzu.edu.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 91437217、41275061、41471034、41661144017, 中央高校基本科研业务专项 lzujbky-2015-k03

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grants 91437217, 41275061, 41471034, and 41661144017), Fundamental Research Funds for the Central Universities (Grant lzujbky-2015-k03)

CESM (Community Earth System Model). The results show that snow cover anomalies over the southern and northern TP can lead to two patterns of summer precipitation in EC. Larger snow cover in the southern TP leads to excessive rainfall in the Yangtze River basin and northeastern China and less precipitation in southern China; larger snow cover in the northern TP results in enhanced rainfall in northern and northeastern China and less rainfall in the south of the lower reaches of Yangtze River. The possible mechanism of the impacts of snow cover anomalies in the northern and southern TP on summer precipitation in EC is that, changes in the diabatic heating over TP in the summer caused by snow cover anomalies results in weakened temperature gradient and westerly jet on the northern side of TP, and subsequent anomaly of westerly in the exit region. These anomalies further influence the West Pacific Subtropical High (WPSH) in the mid-troposphere and lead to anomalous anticyclonic circulation over EC. Heavier snow cover in the southern TP leads to enhanced westerly jet in the exit region, while heavier snow cover in northern TP results in weakened westerly jet. The degree of the WPSH weakening caused by larger snow cover in the northern TP is greater than that caused by the larger snow cover in southern TP. Thereby the anomalous anticyclonic circulation is located more northward. As a result, the summer rainfall belt shifts northward.

Keywords Snow cover in the Tibetan Plateau, Diabatic heating, Westerly jet, Summer precipitation in East China

1 引言

青藏高原作为亚洲夏季风系统的重要成员,通过其热力和动力强迫对亚洲季风区的大气环流及天气、气候有重要影响(He et al., 1987; 张顺利和陶诗言, 2001; 简茂球和罗会邦, 2001; 孙颖和丁一汇, 2002; 包庆等, 2008)。青藏高原地区陆面最为显著的特征是冬、春季存在着大面积的积雪、冻土(韦志刚等, 2002; Wang et al., 2003)。积雪通过改变地表反照率, 影响地表能量收支, 春季的融雪又会影响地表水文过程, 增加土壤湿度, 影响高原对其上空大气的非绝热加热作用(李伟平等, 2001; 王澄海等, 2001; 尚大成和王澄海, 2006), 进而对大气环流及天气气候造成影响(Barnett et al., 1989)。相比欧亚积雪, 青藏高原积雪对东亚季风建立及其大气环流的影响更为重要(Yasunari et al., 1991; Zwiers, 1993)。

青藏原积雪对东亚地区天气气候的影响一直是研究的热点。自 Blanford (1884) 提出喜马拉雅地区降雪与印度干旱之间存在显著相关后, 陈烈庭和阎志新(1979)研究表明青藏高原冬、春积雪影响中国南方汛期降水及大气环流。陈烈庭(1998)进一步分析青藏高原积雪与中国南方前汛期降水的关系, 指出高原春季多雪对应初夏华南降水偏多。陈乾金等(2000)的研究表明, 冬季高原积雪异常与夏季长江流域的旱涝成正相关, 并指出高原多雪和少雪所反映出的环流特征不同。吴统文和钱正安(2000)对比分析了高原冬、春季多、少雪年后期中国地区夏季降水分布和环流特征, 高原冬、春积雪通过改变后期高原的热状况影响后期东亚

大气环流的季节变化和南亚与东亚的夏季风环流。Wu and Qian (2003) 的研究进一步证实冬季高原积雪异常与后期夏季长江流域降水呈显著正相关, 并指出高原积雪通过改变其上空大气温度影响海陆温差及夏季风强度。高原积雪不仅与中国东部降水有关, 还与西北地区的降水有关。王澄海等(2000)研究认为冬季高原南部积雪多, 西北春季降水少, 并认为高原积雪是一个相对较慢的外强迫过程。青藏高原积雪对中国夏季降水影响的研究已作为降水预测的信号运用在中国夏季降水预测中(韦志刚等, 1998; 陈兴芳和宋文玲, 2000; 陈烈庭, 2001; 彭京备等, 2006; 朱玉祥等, 2007; 范可等, 2007)。但由于积雪资料种类各异、时间长度及研究方法的不同, 已有的研究揭示出的高原积雪与中国夏季降水的关系仍存在差异(朱玉祥和丁一汇, 2007)。

研究也指出, 高原冬、春积雪存在着显著的空间分布差异, 高原积雪年际异常变化的敏感区随季节有着显著的空间变化, 并具有多尺度性(伯玥等, 2014), 因此, 其反照率和融雪引起的非绝热加热也应该存在着空间差异(王澄海和崔洋, 2011)。以往大多数的研究都是把高原积雪作为一个整体来分析其气候效应, 积雪在空间分布上差异对后期气候的影响未得到重视。高原积雪在空间和时间尺度上的这种变化, 对亚洲季风及夏季降水如何影响仍需进一步的研究。另外, 之前的研究结果大多数基于统计方法分析得到, 但其内在的物理机制需要通过数值试验加以验证和深入探讨(霍飞等, 2014)。

在全球变暖的背景下, 欧亚积雪呈现减少趋势(Solomon et al., 2007; Ding et al., 2008), 但青藏高

原积雪增加,并呈现出显著的年代际变化(李培基, 1996; Chen and Wu, 2000; Zhang et al., 2004)。青藏高原局地性极端降雪事件增加(Sun et al., 2010; 王传辉等, 2011; 吴国雄等, 2013)和高原不对称升温叠加(宋辞等, 2012; 姚永慧和张百平, 2015),可能使积雪的空间差异性更加显著。为深入认识和理解青藏高原地区积雪的空间异常与中国夏季降水之间的联系,加深青藏高原热力强迫在亚洲季风系统中作用的认识,减少青藏高原积雪在中国夏季降水预测中的不确定性,本文利用通用地球系统模式(Community Earth System Model, 简称 CESM),设计敏感性试验,探讨青藏高原冬、春积雪南、北异常与中国东部夏季降水的关系及其可能的物理机制。

2 资料和数值试验设计

2.1 资料

本文采用美国气候预测中心(Climatic Prediction Center)提供的全球陆地(PREC/L)月平均降水(Chen et al., 2002),NCEP/NCAR 提供的月平均的位势高度场和风场资料(Kistler et al., 2001),水平分辨率均为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 。

2.2 模式简介

本文采用美国国家大气研究中心(NCAR)发展的新一代地球系统模式(CESM1_2_0, Hurrell et al., 2013),该模式是一个完全的耦合模式,由大气(CAM4)、陆面(CLM4.0)、海洋(POP2)、海冰(CICE)、陆冰(SGLC)、地表径流(RTM)和海浪(SWAV)这 7 个不同的物理模块组成,并通过耦合器(CPL7)将各个模块耦合起来。

陆面模块 CLM4.0 对土壤水热传输方案有较大改进(Lawrence et al., 2011),包括 Richards 方程的改进、考虑有机质对水热参数计算的影响、土壤分

层由 10 层增加到 15 层,并且对地表蒸发、径流、雪盖模型等方面也进行了改进。研究结果表明 CLM4.0 对青藏高原及中国区域陆面过程有较好地模拟(赖欣等, 2014; 熊建胜等, 2014)。

2.3 试验设计

近 30 年青藏高原冬、春积雪 EOF 分析结果表明,前三个空间模态中最为主要的特征是,青藏高原冬、春积雪存在南北空间异常(伯玥等, 2014; Wang et al., 2015)。因此,基于该统计分析结果,本文设计两组敏感性试验:高原南、北冬春积雪分别增加(SE)和一组控制试验(CTL)。本文采用的模块设置为 B_2000(B),即各个模块都参与模式积分,模拟区域为全球范围,选用的网格分辨率是 f19_g16,即大气和陆面模块水平分辨率为 2.5° (经度) $\times 1.9^{\circ}$ (纬度),大气垂直方向共 26 层,海洋和海冰模块水平分辨率为 1° (格点数 384×320)左右,海洋垂直方向共 60 层。考虑到积雪异常偏多主要表现为地表反照率增大,影响地表能量收支。高原青藏大部分地区 10 月份开始降雪,积雪分布持续到 3 月份左右,4、5 月份高原融雪开始,因此从 11 月到翌年 3 月对反照率进行修改,雪的平均反照率在 0.6~0.9(方宗义等, 1996; 蒋熹, 2006),因此,本文将积雪偏多区域的反照率设置为 0.9。敏感性试验中除了对反照率进行修改外,其他物理过程与控制试验完全相同。

具体的试验方案如下:

- (1) 控制试验 CTL: 模式不做任何修改。
- (2) 敏感性试验 SE1: 将高原南部的地表反照率增大到 0.9(图 1a)。
- (3) 敏感性试验 SE2: 强高原北部的地表反照率增大到 0.9(图 1b)。

每个试验积分 20 年,前 10 年作为 spin-up,后 10 年结果分析。

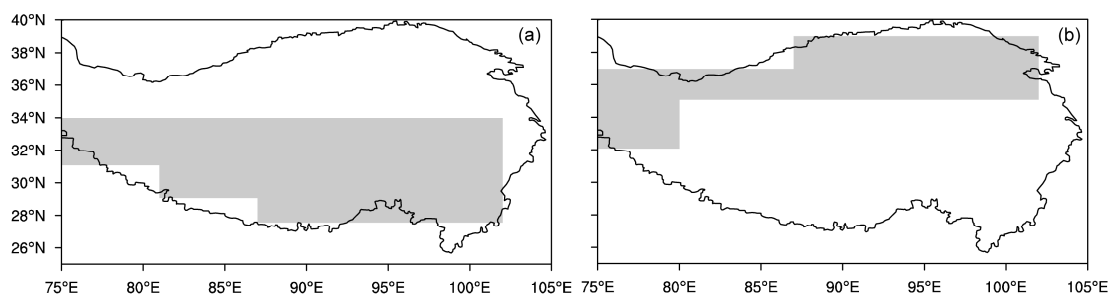


图 1 敏感性试验 (a) SE1 和 (b) SE2 中地表反照率增大的区域(灰色阴影部分)

Fig. 1 Regions where surface albedo increases (gray shading) in (a) SE1 (sensitive experiment 1) and (b) SE2 (sensitive experiment 2)

3 模拟结果分析

3.1 模式模拟能力检验

为了保证模式能够很好再现研究区域内的气候特征,图 2a、b 给出了 PREC/L 资料和控制试验得到的夏季降水分布。可以看出, CESM 模式比较好地再现出中国东部地区夏季降水南多北少的空间分布特征,华南、长江流域和黄淮流域降水模拟值与 PREC/L 资料的气候平均态值一致,但四川盆地和东北地区降水模拟偏大。环流形式上(图 2c、d), CESM 模式能够模拟出夏季对流层高层中纬度西风带和高原南侧东风带,但日本海附近的西风模拟偏弱。模式也能再现出对流层中层西太平洋副热带高压(简称西太副高)等影响我国夏季天气气候的重要系统,模拟出的副高位置和 NCEP 资料一致但强度要偏强。在低层,模式能模拟出来自孟加拉湾的西南风和来自西太平洋的东南风等重要水汽输送带。因此,总体上 CESM 模式能较好地模拟出中国东部地区降水分布特征和东亚地区主要的环流特征,具有较好模拟中国夏季气候的能力。

3.2 青藏高原冬、春积雪南、北异常对中国东部夏季降水的影响

图 3 给出了模式敏感性试验模拟出的中国东部地区夏季降水异常分布。从图 3a 可以看出,当青藏高原南部冬、春积雪异常偏多(反照率增大),华南降水偏少,长江以北地区降水偏多;而当高原北部冬、春积雪异常偏多(反照率增大),华北及东北降水偏多,相比高原南部多雪,降水正异常偏多区域更偏北,长江下游南部地区降水偏少,且华南沿海地区降水偏多。我们也注意到,在华南西部的降水模拟偏大,在敏感性试验中,该地区仍然是大的偏差中心,尤其在高原南部积雪增多的试验中,该地区的偏差最为明显,间接的表明该地区的降水对高原地区气候变化的响应,尤其对高原南部气候变化的响应较强。

上述结果表明,冬、春积雪在高原南北分布的差异,会导致后期下游地区的不同气候效应。因此,青藏高原南北部冬、春积雪异常对中国夏季降水的“信号”也不同。那么青藏高原冬、春积雪通过什么物理机制影响后期中国东部夏季降水呢?

4 青藏高原冬、春积雪影响中国东部夏季降水的物理机制

青藏高原冬、春季积雪异常偏多(地表反照率

增大),会导致同期的温度异常偏低(图略),同期高原地表非绝热加热减弱。进入 4、5 月份,随着高原地区温度升高,积雪异常偏多引起的近地层大气异常偏冷减弱,地表非绝热加热负的异常也减弱,局部地区甚至出现地表净长波辐射和感热正的异常(图略)。对于高原积雪正常年份,4~5 月高原融雪、融冻开始,相变过程吸热会减缓地表升温,而对于高原积雪异常偏多年份,由积雪引起的地表偏冷会持续到春季,高原的融雪、融冻过程在 4、5 月份没有开始或者才刚刚开始,相变过程对高原地表温度回升的减缓程度要比正常年份弱,同时地表温度升高对地表偏冷异常抵消,因此相比正常年份春季高原地表局部地区相对偏暖,同时高原的融雪过程推迟(Wang et al., 2015)。

为了说明不同区域积雪异常偏多产生的非绝热加热效应的不同,图 4 给出了青藏高原 6、7、8 月和夏季平均(JJA)的地表向外的净长波辐射(NLR)、地表感热通量(SH)、地表潜热通量(LH)和大气顶向外射出的长波辐射(OLR)的逐月变化。由图可见,6 月份,随着季风的建立和高原地表温度的进一步回升,融雪过程最为剧烈,同时降水也开始增加,导致潜热(LH)增大,地表向外净长波辐射(NLR)和感热(SH)减小。当高原南部积雪异常偏多,融雪过程则主要集中在 6 月份,融雪区域主要表现在西南部,东南部则可能有降水的参与。7 月份以后,随着高原雨季的开始,高原地表的 NLR、SH 和 LH 变化很难分辨出降水和前期土壤过程的相对贡献,但是,前期的积雪多少引起的非绝热加热异常对总的潜热是正贡献。同理,当高原北部积雪异常偏多,融雪过程主要在 6 月及以前,但由积雪融化引起的非绝热加热效应更多的叠加在 7 月份,表明高原南部和北部积雪偏多对地表非绝热加热的影响都能持续到夏季,且北部多雪持续的时间更长。8 月份是高原雨季中降水最多的时段,图 4b 则反映出 8 月份潜热变小,部分地区出现正的异常,也说明是由于高原积雪异常引起的地表非绝热加热减小的原因。可见,高原南北的冬、春积雪异常偏多,会影响高原非绝热的持续时间,进而影响高原上部大气之间的相互作用的时段。

高原南、北非绝热加热的异常变化,必然引起高原和大气环流之间相互作用的不同。为进一步说明高原非绝热加热和高原南北两侧大气之间的相互作用,图 5 给出了敏感性试验中位温纬向偏差值

和纬向风的经向剖面, 以及敏感性试验与控制试验的差值图。从图中可以看出, 夏季, 青藏高原是一个强大的热源。当青藏高原南部积雪异常偏多, 会

在高原主体北部上空的西风急流所在的区域产生一个负的温度异常 (图 5b), 高原其余区域的大气温度则为正异常, 高原上空大气的水平温度梯度在

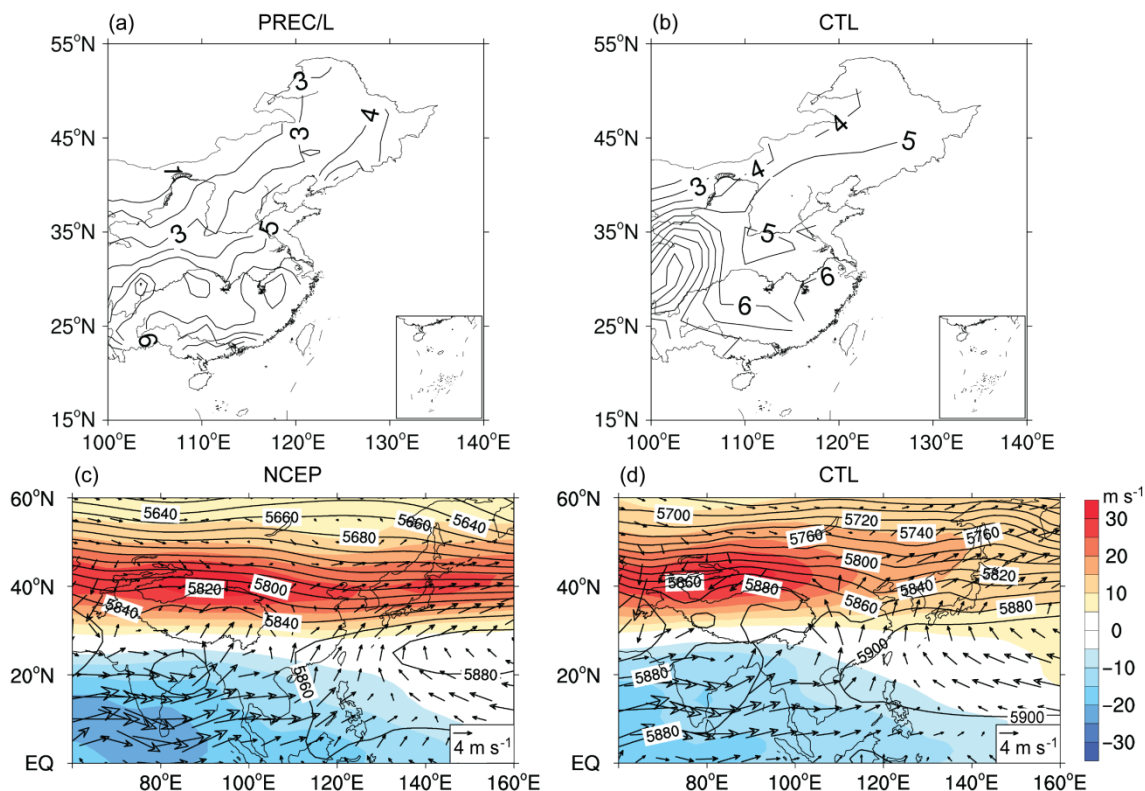


图 2 1981~2010 年夏季平均的 (a) PREC/L 资料显示的降水场 (单位: mm d^{-1}), (c) NCEP 资料显示的 200 hPa 纬向风 (填色, 单位: m s^{-1})、500 hPa 位势高度 (等值线, 单位: gpm) 和 850 hPa 水平风场 (箭头, 单位: m s^{-1})。 (b)、(d) 同 (a)、(c), 但为 CTL 试验的平均值

Fig. 2 1981–2010 summer mean (a) precipitation (units: mm d^{-1}) from PREC/L data, (c) 200 hPa zonal wind (shaded, units: m s^{-1}), 500 hPa geopotential height (contours, units: gpm), and 850 hPa horizontal wind (vectors, units: m s^{-1}) from NCEP data. (b), (d) As in (a), (c), but means from CTL (control experiment)

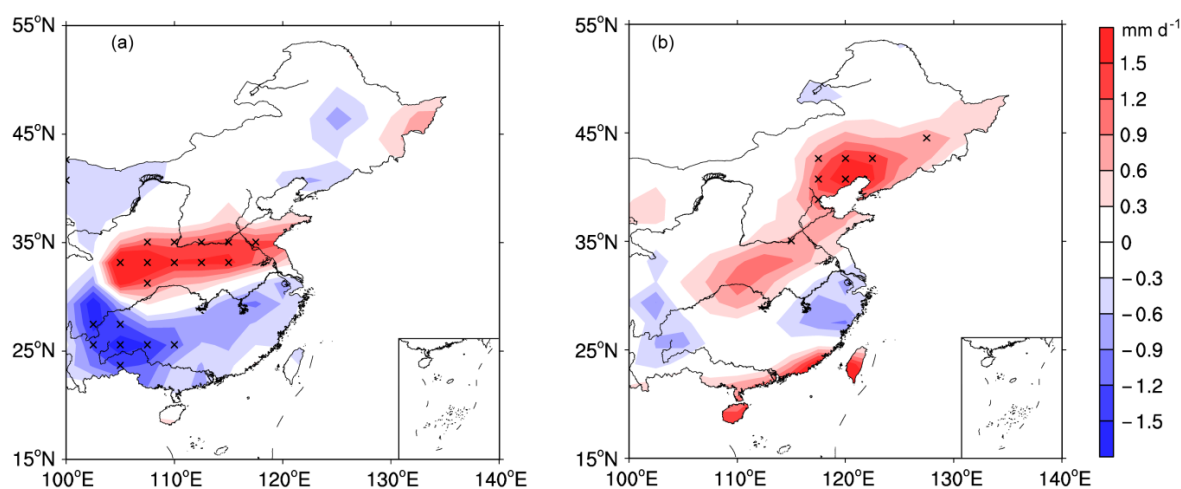


图 3 中国东部夏季降水 (单位: mm d^{-1}) 的敏感性试验与控制试验差值: (a) SE1-CTL; (b) SE2-CTL。黑色叉号 (x) 代表该格点的数值通过 90% 信度 t 检验

Fig. 3 Differences of summer (JJA) precipitation (units: mm d^{-1}) between sensitive experiment and control experiment in East China: (a) SE1-CTL; (b) SE2-CTL. Black crosses (x) indicate grid cells with the values significant at the 90% confidence level by Student's t test

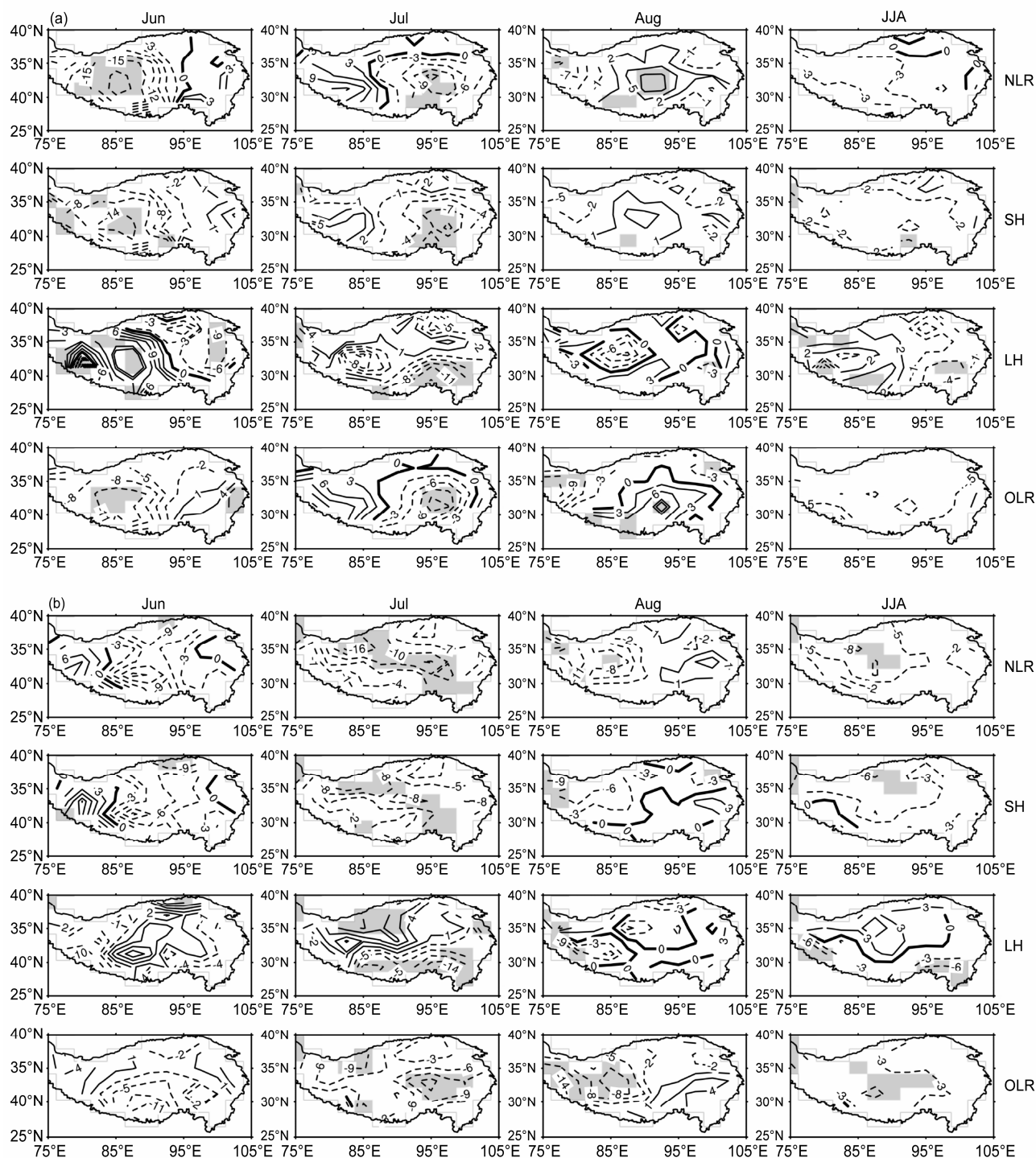


图4 青藏高原6、7、8月、夏季(6~8月)平均的敏感性试验与控制试验的地表向外净长波辐射(NLR, 单位: W m^{-2})、地表感热通量(SH, 单位: W m^{-2})、地表潜热通量(LH, 单位: W m^{-2})和大气顶向外射出的长波辐射(OLR, 单位: W m^{-2})的差值:(a) SE1-CTL; (b) SE2-CTL。阴影代表该格点的数值通过90%信度 t 检验

Fig. 4 Differences in net longwave radiation (NLR, units: W m^{-2}), sensible heat fluxes (SH, units: W m^{-2}), latent heat fluxes (LH, units: W m^{-2}) at the surface and outgoing longwave radiation (OLR, units: W m^{-2}) on the top of the atmosphere between sensitive experiment and control experiment over Tibetan Plateau for June, July, August, and JJA mean: (a) SE1-CTL, (b) SE2-CTL. Shaded areas indicate grid cells with values significant at the 90% confidence level by Student's t test

高原北侧减小, 根据热成风原理, 高原北侧的西风急流减弱。图 5b 清楚地表现出高原北部上空的西风急流显著减弱, 同时, 高原南侧对流层中上部大气的水平温度梯度减小, 高原以南的对流层中上部的东风急流减弱。而当高原北部积雪异常偏多, 会强迫出高原整体异常偏冷, 同时强迫出高原以北的中纬度大气温度强的正异常, 由于高原上空大气的水平温度梯度在高原北侧减小更加显著, 相生世应西风急流减弱更为明显; 高原南侧上空大气的水平温度梯度也减小, 相应东风急流也减弱, 但和高原南部积雪偏多相比, 急流减弱的幅度较小。由此可见, 高原南北积雪异常偏多, 都会引起高原北侧的西风急流减弱, 及高原以南的对流层中上部的

东风急流减弱。

为了分析高原上空大气温度的异常所引起高原南、北侧的东、西风急流的异常对下游的大气环流的影响, 根据 Schieman et al. (2009) 给出的判断西风急流的条件: $|V| \geq 30 \text{ m s}^{-1}$, $u \geq 0 \text{ m s}^{-1}$, 图 6 给出了平均的敏感性试验、控制试验和 1981~2010 年平均的 NCEP/NCAR 再分析资料计算的夏季 (JJA) 的 500 hPa 和 100 hPa 高度之间最大水平风速以及 200 hPa 纬向风敏感性试验与控制试验的差值。相比再分析资料计算得到的平均态而言, 控制试验模拟的西风气流在朝鲜半岛附近偏弱, 不能满足急流的条件, 但比较 Schieman et al. (2009) 根据 ERA-40 资料计算的结果, 对应位于朝鲜半岛—

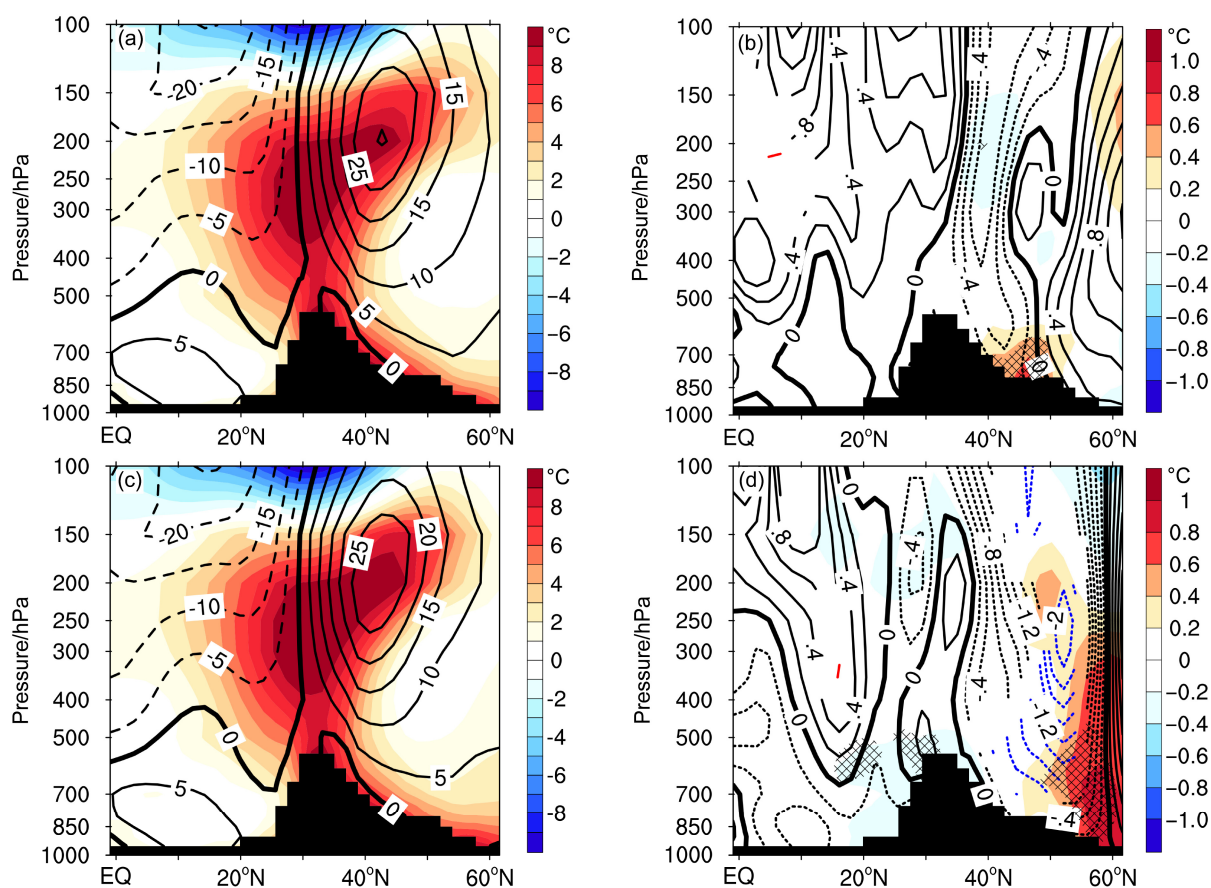


图 5 夏季 $80^{\circ}\sim 100^{\circ}\text{E}$ 平均的 (a、c) 敏感试验的位温纬向偏差值 (填色, 单位: $^{\circ}\text{C}$) 和纬向风 (等值线, 单位: m s^{-1}) 的经向—垂直剖面及 (b、d) 相应的敏感性试验与控制试验差值的经向—垂直剖面: (a) SE1; (b) SE1—CTL; (c) SE2; (d) SE2—CTL。黑色填充代表青藏高原地形; 虚线代表负值; 图 b、d 中的红色实线和蓝色虚线分别代表正的和负的纬向风差值通过 80% 信度检验, 网格状阴影区代表位温纬向偏差值通过 80% 信度 t 检验

Fig. 5 The latitude–height cross sections averaged over $80^{\circ}\sim 100^{\circ}\text{E}$ for JJA mean zonal deviation of potential temperature (shaded, units: $^{\circ}\text{C}$) and zonal wind (contour lines, units: m s^{-1}): (a) SE1; (b) SE1—CTL; (c) SE2; (d) SE2—CTL. Black shading indicates Tibetan Plateau; dashed lines represent negative values; red solid lines and blue dashed lines in Figs. b and d, respectively, represent positive and negative value of the difference of zonal wind significant at 80% confidence level by Student's t test; latticed shadings indicate values of the difference of zonal deviation of potential temperature significant at the 80% confidence level by Student's t test

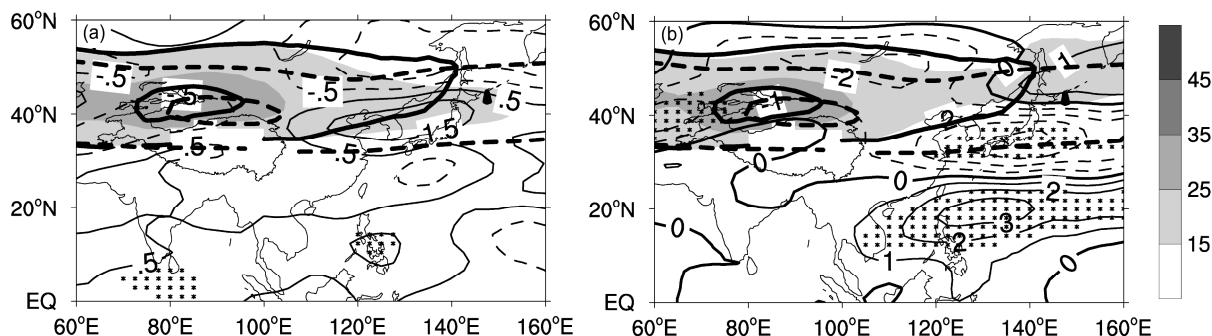


图6 夏季对流层上层西风气流(500 hPa和100 hPa高度之间的最大水平风速,单位: m s^{-1})的敏感性试验(阴影区)、控制试验(粗实线,两条等值线数值分别为 30 m s^{-1} 和 15 m s^{-1})、NCEP/NCAR资料的1981~2010年的平均态(粗虚线,两条等值线数值分别为 30 m s^{-1} 和 15 m s^{-1})以及敏感性试验与控制试验的200 hPa纬向风差值(SE-CTL,细等值线,等值线间隔为 1 m s^{-1}):(a) SE1;(b) SE2。点代表该格点的纬向风差值通过90%信度 t 检验

Fig. 6 JJA mean westerly flow which is the maximum horizontal wind speed between 100 hPa and 500 hPa over upper troposphere from sensitive experiment (shaded), CTL (thick solid contours, the values of these two contours are 30 m s^{-1} and 15 m s^{-1} , respectively), 1981–2010 averaged NCEP/NCAR data (thick dashed contours, the values of these two contours are 30 m s^{-1} and 15 m s^{-1} , respectively), and the differences (thin contours in 1 m s^{-1} interval) of 200-hPa zonal wind between sensitive experiment and CTL: (a) SE1; (b) SE2. Dots indicate grid cells with zonal wind differences significant at the 90% confidence level by Student's t test

日本海附近的夏季西风急流出口区, CESM 模式的控制试验的结果明显偏弱, 因此, 本文把风速 $\geq 15 \text{ m s}^{-1}$ 的区域作为急流区域。从图6中可以看出, 当高原南部积雪异常偏多, 高原北侧200 hPa纬向风减弱, 高原北侧西风急流偏弱, 急流出口区的纬向风加强, 导致急流出口区西风急流加强且急流位置偏南。而当高原北部积雪异常偏多, 副热带西风急流在高原北侧和急流出口区都减弱且急流位置偏北。对应降水异常分布型态, 高原北部积雪异常偏多引起的降水正异常区域偏北, 说明降水异常分布型态与急流位置变化有较好的对应。这与已有研究指出的夏季西风急流与中国东部夏季降水关系较一致(杜银等, 2009; 方晓洁等, 2009)。对比青藏高原南北积雪异常偏多对西风急流的影响, 可以发现高原对其北侧西风急流的影响能够进一步引起下游急流出口区西风的异常。

为了进一步分析青藏高原南、北部冬、春积雪异常对下游大气环流的影响, 图7给出了200 hPa、500 hPa和850 hPa位势高度和水平风场的敏感性试验与控制试验差值。可以看出, 由于高原积雪异常偏多引起的上空大气偏冷会导致高原上空环流出现气旋性异常变化, 相应南亚高压减弱。当高原南部积雪异常偏多, 在对流层上层引起的异常气旋性环流变化偏南且相对偏弱, 蒙古—东北地区的位势高度减弱, 相应的流场为异常气旋性环流变化, 急

流出口区的西风急流加强。在急流出口区东南侧的对流层中层, 也出现位势高度减弱异常, 说明西太副高减弱。对应低层东海附近(30°N , 125°E)流场为异常反气旋性环流变化, 有利于更多的水汽输送到江淮流域, 华南的水汽输送减少, 这与高原南部积雪异常偏多引起的降水异常分布对应。相比青藏高原南部积雪异常偏多, 高原北部积雪异常偏多引起的异常气旋性环流变化偏北且偏强, 这与高原非绝热加热引起的高原上空及其北侧大气温度异常变化有关。同时, 在高原北侧蒙古到东北一带地区的位势高度增强, 相应的流场为异常反气旋性环流变化, 急流出口区的西风急流减弱。同样, 在对流层中层, 西太副高减弱, 相比高原南部积雪异常偏多, 减弱程度更大。相应地, 在低层朝鲜半岛附近(34°N , 125°E)流场为异常反气旋性环流变化, 变化程度更强, 有利于水汽输送到华北及东北地区, 对应降水异常偏多区域更偏北。研究指出, 青藏高原热力作用通过罗斯贝波在对流层高层沿副热带西风急流传播影响下游系统(Wang et al., 2008; 霍飞等, 2014), 本文的研究结果进一步证实高原非绝热加热异常对其北侧及下游急流出口区西风急流的影响这一机制, 高原南部和北部积雪异常偏多对副热带西风急流及东亚大气环流的影响不同, 从而引起不同的中国东部地区夏季降水的异常分布。

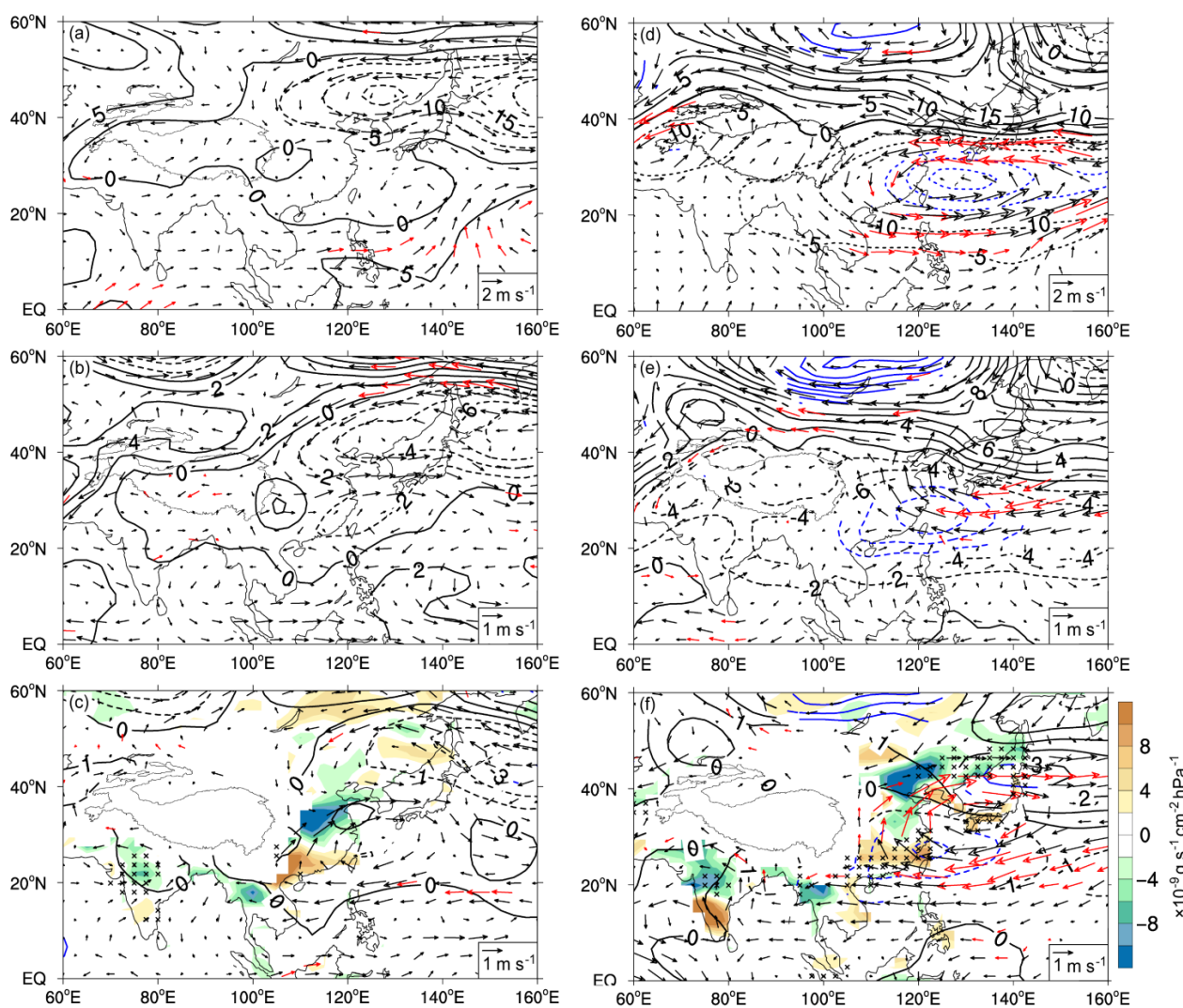


图 7 夏季 200 hPa (上)、500 hPa (中) 和 850 hPa (下) 位势高度 (等值线, 单位: gpm , 实线代表正值, 虚线代表负值) 和水平风场 (箭头, 单位: m s^{-1}) 的敏感性试验与控制试验差值: (a)、(b)、(c) SE1—CTL; (d)、(e)、(f) SE2—CTL。 (c) 和 (f) 中填色区代表水汽通量散度差值 (单位: $10^{-9} \text{ g s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ hPa}^{-1}$)。蓝色等值线、红色箭头和黑色叉号分别代表格点的位势高度差值、水平风场差值和水汽通量散度差值通过 90% 信度 t 检验

Fig. 7 Differences in JJA mean geopotential height (contours, units: gpm , solid lines represent positive differences, dashed lines represents negative differences) and horizontal wind (vectors, units: m s^{-1}) between sensitive experiment and control experiment at 200 hPa (upper panels), 500 hPa (middle panels), and 850 hPa (bottom panels): (a), (b), (c) SE1—CTL; (d), (e), (f) SE2—CTL. Color shaded areas in Figs. c and f represent differences of vapor flux divergence (units: $10^{-9} \text{ g s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ hPa}^{-1}$). Blue lines, red vectors, and black crosses, respectively, indicate grid cells with values of geopotential height differences, horizontal wind differences, and differences of vapor flux divergence significant at the 90% confidence level by Student's t test

5 结论和讨论

本文对青藏高原冬、春积雪在其南、北部的分布异常与中国东部夏季降水的关系进行了分析研究, 初步揭示了青藏高原冬、春积雪在南北部异常与中国东部夏季降水可能的物理机制, 得到以下几点结论:

(1) 青藏高原南部和北部异常多雪对周边大气

环流和下游气候和有着不同的气候效应。数值试验的结果表明, 青藏高原南北部积雪异常, 分别对应着中国东部地区夏季两种降水异常分布型态。当青藏高原南部冬、春积雪异常偏多, 长江流域及其北侧—秦岭一带夏季降水增多, 华南地区降水减少; 当冬春高原北部积雪异常偏多, 华北和东北夏季降水增加, 而长江下游南侧地区降水减少。

(2) 青藏高原南北积雪异常偏多都会导致春季

高原融雪过程减缓推并迟到夏季,进而影响夏季高原地表的非绝热加热的变化,高原冬、春积雪异常能够持续到夏季。当高原南部异常积雪异常偏多,高原融雪过程主要集中在6月,地表潜热通量增大,而地表向外射出净的长波辐射和地表感热通量减小,地表非绝热加热减弱,积雪异常引起的高原地表非绝热加热的贡献可持续到7月。从整个夏季平均来看,这种异常主要表现在高原中部及西南部。当高原北部积雪异常偏多,融雪过程引起的地表非绝热加热贡献可延续到8月,高原北部多雪所引起的高原地表非绝热加热异常持续的时间相对较长。

(3) 夏季青藏高原地表非绝热的变化通过引起高原北侧大气温度的异常,影响高原北侧西风急流,引起急流出口区的西风异常,并通过其南侧的西太平洋副热带高压影响我国东部地区夏季水汽输送,造成夏季降水异常。高原南部积雪异常偏多,会引起高原北侧西风急流减弱,下游急流出口区西风加强且偏南,500 hPa 西太副高减弱,影响低层南海附近的反气旋性环流异常,使得向长江流域的水汽输送增加。当高原北部积雪异常偏多,高原上空大气在其北侧的西风急流减弱的程度更显著,急流出口区西风急流减弱且偏北。相比高原南部积雪异常偏多,高原北部积雪异常偏多引起西太副高减弱的程度更大,在低层引起的反气旋性异常环流偏北,更有利于华北及东北地区水汽输送,导致中国东部地区夏季雨带更偏北。

参考文献 (References)

- 包庆, Wang B, 刘屹岷, 等. 2008. 青藏高原增暖对东亚夏季风的影响——大气环流模式数值模拟研究 [J]. 大气科学, 32 (5): 997–1005.
- Bao Q, Wang B, Liu Y M, et al. 2008. The impact of the Tibetan Plateau warming on the East Asian summer monsoon—A study of numerical simulation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32 (5): 997–1005, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2008.05.01.
- Barnett T P, Dümenil L, Schlese U, et al. 1989. The effect of Eurasian snow cover on regional and global climate variations [J]. J. Atmos. Sci., 46 (5): 661–686, doi:10.1175/1520-0469(1989)046<0661:TEOESC>2.0.CO;2.
- Blanford H F. 1884. On the connexion of the Himalaya snowfall with dry winds and seasons of drought in India [J]. Proc. Roy. Soc. London, 37 (232–234): 3–22, doi:10.1098/rspl.1884.0003.
- 伯明, 李小兰, 王澄海. 2014. 青藏高原地区积雪年际变化异常中心的时间变化特征 [J]. 冰川冻土, 36 (6): 1353–1362.
- Bo Yue, Li Xiaolan, Wang Chenghai. 2014. Seasonal characteristics of the interannual variations centre of the Tibetan Plateau snow cover [J]. Journal of Glaciology and Geocryology (in Chinese), 36 (6): 1353–1362.
- 陈烈庭. 1998. 青藏高原冬春季异常雪盖与江南前汛期降水关系的检验和应用 [J]. 应用气象学报, (S1): 2–9.
- Chen Lieting. 1998. Test and application of the relationship between anomalous snow cover in winter–spring over Qinghai–Xizang Plateau and the first summer rainfall in southern China [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese), (S1): 2–9.
- 陈烈庭. 2001. 青藏高原异常雪盖和 ENSO 在 1998 年长江流域洪涝中的作用 [J]. 大气科学, 25 (2): 184–192.
- Chen Lieting. 2001. The role of the anomalous snow cover over the Qinghai–Xizang Plateau and ENSO in the great floods of 1998 in the Changjiang River valley [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 25 (2): 184–192, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2001.02.04.
- 陈烈庭, 阎志新. 1979. 青藏高原冬春季积雪对大气环流和我国南方汛期降水的影响 [C]// 中长期水文气象预报文集 (1). 北京: 水利电力出版社, 185–194.
- Chen Lieting, Yan Zhixin. 1979. The influence of winter–spring snow cover over Tibetan Plateau on atmospheric circulation and flood season precipitation in south China [C]// Middle- and Long-Term Water Temperature Forecast Corpus (1) (in Chinese). Beijing: China Waterpower Press, 185–194.
- Chen Lieting, Wu Renguang. 2000. Interannual and decadal variations of snow cover over Qinghai–Xizang Plateau and their relationships to summer monsoon rainfall in China [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 17 (1): 18–30, doi:10.1007/s00376-000-0040-7.
- Chen M Y, Xie P P, Janowiak J E, et al. 2002. Global land precipitation: A 50-yr monthly analysis based on gauge observations [J]. Journal of Hydrometeorology, 3 (3): 249–266, doi:10.1175/1525-7541(2002)003<0249:GLPAYM>2.0.CO;2.
- 陈乾金, 高波, 李维京, 等. 2000. 青藏高原冬季积雪异常和长江中下游主汛期旱涝及其与环流关系的研究 [J]. 气象学报, 58 (5): 582–595.
- Chen Q J, Gao B, Wi W J, et al. 2000. Studies on relationships among winter snow cover over the Tibetan Plateau and droughts/floods during Meiyu season in the middle and lower reaches of the Yangtze River as well as in the atmosphere/ocean system [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 58 (5): 582–595, doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2000.05.007.
- 陈兴芳, 宋文玲. 2000. 欧亚和青藏高原冬春季积雪与我国夏季降水关系的分析和预测应用 [J]. 高原气象, 19 (2): 214–223.
- Chen Xingfang, Song Wenling. 2000. Analysis of relationship between snow cover on Eurasia and Qinghai–Xizang Plateau in winter and summer rainfall in China and application to prediction [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 19 (2): 214–223.
- Ding Y H, Wang Z Y, Sun Y. 2008. Interdecadal variation of the summer precipitation in East China and its association with decreasing Asian summer monsoon. Part I: Observed evidences [J]. International Journal of Climatology, 28 (9): 1139–1161, doi:10.1002/joc.1615.
- 杜银, 张耀存, 谢志清. 2009. 东亚副热带西风急流位置变化及其对中国东部夏季降水异常分布的影响 [J]. 大气科学, 33 (3): 581–592.
- Du Y, Zhang Y C, Xie Z Q. 2009. Location variation of the East Asia subtropical westerly jet and its effect on the summer precipitation anomaly over eastern China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (3): 581–592, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2009.03.15.
- 范可, 王会军, Choi Y J. 2007. 一个长江中下游夏季降水的物理统计预测模型 [J]. 科学通报, 52 (24): 2900–2905.
- Fan K, Wang H J, Choi Y J. 2007. A physically-based statistical forecast model for the

- middle–lower reaches of the Yangtze River valley summer rainfall [J]. Chinese Science Bulletin, 53 (4): 602–609, doi:10.1007/s11434-008-0083-1.
- 方晓洁, 曾晓枚, 陈雪芹. 2009. 东亚夏季 200 hPa 西风急流时空分布特征与我国夏季降水关系的初步分析 [J]. 气象与环境科学, 32 (2): 11–15. Fang Xiaojie, Zeng Xiaomei, Chen Xueqin. 2009. Spatial and temporal distribution characteristics of westerly jet in 200 hPa in East Asia and the analysis of relationship between it and summer precipitation in China [J]. Meteorological and Environmental Sciences (in Chinese), 32 (2): 11–15.
- 方宗义, 刘玉洁, 林曼筠. 1996. 青藏高原地表反照率计算研究 [J]. 气象学报, 54 (5): 580–589. Fang Zongyi, Liu Yujie, Lin Manyun. 1996. The research and calculation of surface albedo over the Tibetan Plateau from satellite data [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 54 (5): 580–589, doi:10.11676/qxb1996.060.
- He H Y, McGinnis J W, Song Z S, et al. 1987. Onset of the Asian summer monsoon in 1979 and the effect of the Tibetan Plateau [J]. Mon. Wea. Rev., 115 (9): 1966–1995, doi:10.1175/1520-0493(1987)115<1966:OOTASM>2.0.CO;2.
- 霍飞, 江志红, 刘征宇. 2014. 春夏季青藏高原积雪对中国夏末秋初降水的影响及其可能机制 [J]. 大气科学, 38 (2): 352–362. Huo Fei, Jiang Zhihong, Liu Zhengyu. 2014. Impacts of late spring Tibetan Plateau snow cover on early autumn precipitation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38 (2): 352–362, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.13139.
- Hurrell J W, Holland M M, Gent P R, et al. 2013. The community earth system model: A framework for collaborative research [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 94 (9): 1339–1360, doi:10.1175/BAMS-D-12-00121.1.
- 简茂球, 罗会邦. 2001. 1998 年青藏高原东部及其邻近地区大气热源与南海夏季风建立的关系 [J]. 高原气象, 20 (4): 381–387. Jian M Q, Luo H B. 2001. Heat sources over Qinghai–Xizang Plateau and surrounding areas and their relationships to onset of SCS summer monsoon in 1998 [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 20 (4): 381–387.
- 蒋熹. 2006. 冰雪反照率研究进展 [J]. 冰川冻土, 28 (5): 728–738. Jiang X. 2006. Progress in the research of snow and ice albedo [J]. Journal of Glaciology and Geocryology (in Chinese), 28 (5): 728–738.
- Kistler R, Collins W, Saha S, et al. 2001. The NCEP–NCAR 50-year reanalysis: Monthly means CD-ROM and documentation [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 82 (2): 247–267, doi:10.1175/1520-0477(2001)082<0247:TNNYRM>2.3.CO;2.
- 赖欣, 文军, 岑思弦, 等. 2014. CLM4.0 模式对中国区域土壤湿度的数值模拟及评估研究 [J]. 大气科学, 38 (3): 499–512. Lai Xin, Wen Jun, Cen Sixian, et al. 2014. Numerical simulation and evaluation study of soil moisture over China by using CLM4.0 model [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38 (3): 499–512, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1401.13194.
- Lawrence D M, Oleson K W, Flanner M G, et al. 2011. Parameterization improvements and functional and structural advances in version 4 of the Community Land Model [J]. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 3 (1): M03001, doi:10.1029/2011MS00045.
- 李培基. 1996. 青藏高原积雪对全球变暖的响应 [J]. 地理学报, 51 (3): 260–265. Li Peiji. 1996. Response of Tibetan snow cover to global warming [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 51 (3): 260–265, doi:10.11821/xb199603008.
- 李伟平, 吴国雄, 刘屹氓, 等. 2001. 青藏高原表面过程对夏季青藏高压的影响——数值试验 [J]. 大气科学, 25 (6): 809–816. Li W P, Wu G X, Liu Y M, et al. 2001. How the surface processes over the Tibetan Plateau affect the summertime Tibetan anticyclone: Numerical experiments [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 25 (6): 809–816, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2001.06.08.
- 彭京备, 陈烈庭, 张庆云. 2006. 多因子和多尺度合成中国夏季降水预测模型及预报试验 [J]. 大气科学, 30 (4): 596–608. Peng J B, Chen L T, Zhang Q Y. 2006. The statistic prediction model and prediction experiments of the summer rain over China by multiple factors and multi-scale variations [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (4): 596–608, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2006.04.06.
- Schiemann R, Lüthi D, Schär C. 2009. Seasonality and interannual variability of the westerly jet in the Tibetan Plateau region [J]. J. Climate, 22 (11): 2940–2957, doi:10.1175/2008JCLI2625.1.
- 尚大成, 王澄海. 2006. 高原地表过程中冻融过程在东亚夏季风中的作用 [J]. 干旱气象, 24 (3): 19–22. Shang D C, Wang C H. 2006. The effect of the frozen–thaw process in Tibetan Plateau on summer monsoon over eastern Asia [J]. Arid Meteorology (in Chinese), 24 (3): 19–22.
- Solomon S, Qin D, Manning M, et al. 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press.
- 宋辞, 裴韬, 周成虎. 2012. 1960 年以来青藏高原气温变化研究进展 [J]. 地理科学进展, 31 (11): 1503–1509. Song C, Pei T, Zhou C H. 2012. Research progresses of surface temperature characteristic change over Tibetan Plateau since 1960 [J]. Progress in Geography (in Chinese), 31 (11): 1503–1509, doi:10.11820/dlkxjz.2012.11.011.
- Sun J Q, Wang H J, Yuan W, et al. 2010. Spatial–temporal features of intense snowfall events in China and their possible change [J]. J. Geophys. Res., 115 (D16): D16110, doi:10.1029/2009JD013541.
- 孙颖, 丁一汇. 2002. 青藏高原热源异常对 1999 年东亚夏季风异常活动的影响 [J]. 大气科学, 26 (6): 817–828. Sun Ying, Ding Yihui. 2002. Influence of anomalous heat sources over the Tibetan Plateau on the anomalous activities of the 1999 East Asian summer monsoon [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 26 (6): 817–828, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2002.06.10.
- Wang B, Bao Q, Hoskins B, et al. 2008. Tibetan Plateau warming and precipitation changes in East Asia [J]. Geophys. Res. Lett., 35 (14): L14702, doi:10.1029/2008GL034330.
- 王澄海, 崔洋. 2011. 东亚夏季风建立前青藏高原地气温差变化特征 [J]. 气候与环境研究, 16 (5): 586–596. Wang C H, Cui Y. 2011. Characteristics of the difference of temperature between surface and atmosphere over the Tibetan Plateau in the early stage of East Asian summer monsoon onset [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 16 (5): 586–596, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2011.05.05.
- 王澄海, 董文杰, 韦志刚. 2001. 青藏高原季节性冻土年际变化的异常特征 [J]. 地理学报, 56 (5): 523–531. Wang C H, Dong W J, Wei Z G. 2001. The feature of seasonal frozen soil in Qinghai Tibet Plateau [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 56 (5): 525–531, doi:10.11821/

- xb200105003.
- Wang Chenghai, Dong Wenjie, Wei Zhigang. 2003. A study on relationship between freezing thawing processes of the Qinghai-Xizang Plateau and the atmospheric circulation over East Asia [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 46 (3): 438–448, doi:10.1002/cjg2.3361.
- 王澄海, 董安祥, 王式功, 等. 2000. 青藏高原积雪与西北春季降水的相关特征 [J]. *冰川冻土*, 22 (4): 340–346. Wang C H, Dong A X, Wang S G, et al. 2000. The correlation between precipitation in Northwest China during spring and snow depth in the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology* (in Chinese), 22 (4): 340–346.
- Wang C H, Yang K, Li Y, et al. 2015. Impacts of spatiotemporal anomalies of Tibetan Plateau snow cover on summer precipitation in East China [J]. *J. Climate*, in press, doi:10.1175/JCLI-D-16-0041.1.
- 王传辉, 周顺武, 唐晓萍, 等. 2011. 近 48 年青藏高原强降水量的时空分布特征 [J]. *地理科学*, 31 (4): 470–477. Wang C H, Zhou S W, Tang X P, et al. 2011. Temporal and spatial distribution of heavy precipitation over Tibetan Plateau in recent 48 years [J]. *Scientia Geographica Sinica* (in Chinese), 31 (4): 470–477.
- 韦志刚, 罗四维, 董文杰, 等. 1998. 青藏高原积雪资料分析及其与我国夏季降水的关系 [J]. *应用气象学报*, 9 (S1): 39–46. Wei Zhigang, Luo Siwei, Dong Wenjie, et al. 1998. Snow cover data on Qinghai-Xizang Plateau and its correlation with summer rainfall in China [J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 9 (S1): 39–46.
- 韦志刚, 黄荣辉, 陈文, 等. 2002. 青藏高原地面站积雪的空间分布和年代际变化特征 [J]. *大气科学*, 26 (4): 496–508. Wei Zhigang, Huang Ronghui, Chen Wen, et al. 2002. Spatial distributions and interdecadal variations of the snow at the Tibetan Plateau weather stations [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 26 (4): 496–508, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2002.04.07.
- 吴国雄, 段安民, 张雪芹, 等. 2013. 青藏高原极端天气气候变化及其环境效应 [J]. *自然杂志*, 35 (3): 167–171. Wu Gouxiong, Duan Anmin, Zhang Xueqin, et al. 2013. Extreme weather and climate changes and its environmental effects over the Tibetan Plateau [J]. *Chinese Journal of Nature* (in Chinese), 35 (3): 167–171.
- 吴统文, 钱正安. 2000. 青藏高原冬春积雪异常与中国东部地区夏季降水关系的进一步分析 [J]. *气象学报*, 58 (5): 570–581. Wu Tongwen, Qian Zheng'an. 2000. Further analyses of the linkage between winter and spring snow depth anomaly over Qinghai-Xizang Plateau and summer rainfall of eastern China [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 58 (5): 570–581.
- Wu T W, Qian Z A. 2003. The relation between the Tibetan winter snow and the Asian summer monsoon and rainfall: An observational investigation [J]. *J. Climate*, 16 (12): 2038–2051, doi:10.1175/1520-0442(2003)016<2038:TRBTTW>2.0.CO;2.
- 熊建胜, 张宇, 王少影, 等. 2014. CLM4.0 土壤水分传输方案改进在青藏高原陆面过程模拟中的效应 [J]. *高原气象*, 33 (2): 323–336. Xiong Jiansheng, Zhang Yu, Wang Shaoying, et al. 2014. Influence of soil moisture transmission scheme improvement in CLM4.0 on simulation of land surface process in Qinghai-Xizang Plateau [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 33 (2): 323–336, doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2014.00012.
- 姚永慧, 张百平. 2015. 青藏高原气温空间分布规律及其生态意义 [J]. *地理研究*, 34 (11): 2084–2094. Yao Yonghui, Zhang Baiping. 2015. The spatial pattern of monthly air temperature of the Tibetan Plateau and its implications for the geocology pattern of the Plateau [J]. *Geographical Research* (in Chinese), 34 (11): 2084–2094, doi:10.11821/dlyj201511007.
- Yasunari T, Kitoh A, Tokioka T. 1991. Local and remote responses to excessive snow mass over Eurasia appearing in the northern spring and summer climate—A study with the MRI GCM [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 69 (4): 473–487.
- 张顺利, 陶诗言. 2001. 青藏高原积雪对亚洲夏季风影响的诊断及数值研究 [J]. *大气科学*, 25 (3): 372–390. Zhang Shunli, Tao Shiyun. 2001. The influences of snow cover over the Tibetan Plateau on Asian summer monsoon [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 25 (3): 273–390, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2001.03.07.
- Zhang Y S, Li T, Wang B. 2004. Decadal change of the spring snow depth over the Tibetan Plateau: The associated circulation and influence on the East Asian summer monsoon [J]. *J. Climate*, 17 (14): 2780–2793, doi:10.1175/1520-0442(2004)017<2780:DCOTSS>2.0.CO;2.
- 朱玉祥, 丁一汇. 2007. 青藏高原积雪对气候影响的研究进展和问题 [J]. *气象科技*, 35 (1): 1–8. Zhu Yuxiang, Ding Yihui. 2007. Influences of snow cover over Tibetan Plateau on weather and climate: Advances and problems [J]. *Meteorological Science and Technology* (in Chinese), 35 (1): 1–8.
- 朱玉祥, 丁一汇, 徐怀刚. 2007. 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*, 65 (6): 946–958. Zhu Y X, Ding Y H, Xu H G. 2007. The decadal relationship between atmospheric heat source of winter and spring snow over Tibetan Plateau and rainfall in East China [J]. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 65 (5): 946–958, doi:10.11676/qxxb2007.089.
- Zwiers F W. 1993. Simulation of the Asian summer monsoon with the CCC GCM-1 [J]. *J. Climate*, 6 (3): 469–486, doi:10.1175/1520-0442(1993)006<0469:SOTASM>2.0.CO;2.