

赵勇, 黄安宁, 王前, 等. 2016. 青藏高原地区 5 月热力差异和后期夏季北疆降水的联系 [J]. 气候与环境研究, 21 (6): 653–662. Zhao Yong, Huang Anning, Wang Qian, et al. 2016. The relation between thermal anomaly contrast over the Tibetan Plateau and its surrounding areas in May and summer rainfall in northern Xinjiang [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 21 (6): 653–662, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2016.15276.

## 青藏高原地区 5 月热力差异和后期夏季 北疆降水的联系

赵勇<sup>1</sup> 黄安宁<sup>2</sup> 王前<sup>2</sup> 杨青<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 成都信息工程大学大气科学学院, 成都 610225

<sup>2</sup> 南京大学大气科学学院, 南京 210093

<sup>3</sup> 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所, 乌鲁木齐 830002

**摘要** 基于美国国家环境预测中心/美国国家大气研究中心(NCEP/NCAR)再分析月平均资料和新疆70站降水资料, 分析了1961~2010年5月青藏高原地区地表热力异常差异和新疆夏季降水的联系。奇异值分解(SVD)分析发现, 当5月青藏高原视热源偏弱, 高原西北部地区偏强时, 北疆夏季降水偏多。定义了一个热力差异指数来表征两个区域热力异常的对比程度, 发现考虑这种大尺度热力差异对比要比单一地区与区域气候有更为密切的联系。当热力差异指数为负时, 即5月青藏高原视热源偏弱, 其西北部视热源偏强时: (1) 西亚副热带西风急流位置偏南; (2) 500 hPa中亚上空和贝加尔湖上空分别对应异常气旋和反气旋环流, 在二者共同作用下, 北疆上空盛行异常的偏南气流, 有利于低纬度的暖湿气流北上, 形成有利于降水的环流形势; (3) 印度半岛上空为异常反气旋环流, 中亚上空为异常气旋环流, 形成北疆夏季降水水汽的两步型输送, 阿拉伯海水汽被输送至中亚和新疆地区。偏相关分析发现, 青藏高原热力异常主要影响对流层中高层大气环流和水汽输送的第二步环流条件, 高原西北部热力异常则影响水汽输送的第一步环流条件。

**关键词** 青藏高原 热力差异 两步型输送 夏季降水 新疆干旱区

文章编号 1006-9585 (2016) 06-0653-10

中图分类号 P461

文章标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2016.15276

## The Relation between Thermal Anomaly Contrast over the Tibetan Plateau and Its Surrounding Areas in May and Summer Rainfall in Northern Xinjiang

ZHAO Yong<sup>1</sup>, HUANG Anning<sup>2</sup>, WANG Qian<sup>2</sup>, and YANG Qing<sup>3</sup>

<sup>1</sup> School of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225

<sup>2</sup> School of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093

<sup>3</sup> Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration, Ürümqi 830002

**Abstract** Based on the NCEP/NCAR reanalysis monthly mean data and the precipitation data at 70 stations in Xinjiang, the relationship between the thermal anomaly contrast over the Tibetan Plateau and its surrounding areas in May and summer rainfall in Xinjiang were analyzed. By using the singular value decomposition (SVD) method, it was found that

收稿日期 2015-12-17; 网络预出版日期 2016-05-23

作者简介 赵勇, 1979年出生, 男, 副研究员, 主要从事干旱区气候变化和模拟研究。E-mail: zhaoyong@idm.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 91437109、41375101, 公益性行业专项 GYHY201406001

**Funded by** Nation Science Foundation of China (Grants 91437109, 41375101), Project for Public Good Dedicated to the Meteorological Sector in China (Grant GYHY201406001)

when the thermal anomalies were negative over the Tibetan Plateau and positive over the northwestern portion of the Tibetan Plateau, more summer rainfall occurred in northern Xinjiang. An index was defined to reflect the intensity of the large-scale thermal contrast between the two regions, and it was found that the thermal contrast between the two regions had a close relation with summer rainfall in northern Xinjiang. This relation is closer than that between thermal anomalies in any single region and summer rainfall in northern Xinjiang. When the index is negative, it indicates that the apparent heat source is weaker over the Tibetan Plateau and stronger over northwestern portion of the Tibetan Plateau. Under such a thermal pattern, (1) the subtropical westerly jet shifted further south; (2) an anomalous cyclone was located over central Asia and an abnormal anticyclone developed over Baikal Lake at 500 hPa, respectively. As a result, anomalous southerly winds prevailed over northern Xinjiang, which were favorable for the transport of warm and moist air from low latitude regions; (3) combined with the anomalous anticyclone over the Indian Peninsula and the anomalous cyclone over central Asia, which formed the two-step transport of water vapor, the water vapor from the Arabian Sea could be transported to central Asia and northern Xinjiang. Partial correlation analysis indicated that thermal anomalies over the Tibetan Plateau largely affect circulations in the middle and high troposphere and the second step of water vapor transport, while the thermal anomalies over northwestern Plateau mainly influence the first step of water vapor transport.

**Keywords** Tibetan Plateau, Thermal contrast, Two-step transport, Summer rainfall, Xinjiang arid zone

## 1 引言

青藏高原是世界上最大最陡峭的大地形，其动力和热力作用是形成和维持北半球大气环流的重要原因之一，气流对热源的热力适应形成高原上空近地层低压和中高层的青藏高压，高原上空大尺度大气热源激发出的热力波及与之相联系的热量和动量传播对周边地区的天气气候有着重要影响（Wu, 1984; Ye and Wu, 1998; 吴国雄和刘屹岷, 2000; 刘新等, 2002; 周秀骥等, 2009）。半个多世纪以来，青藏高原大地形的热力作用对周边大气环流和天气气候影响的研究一直受到国内外气象学者的广泛关注，开展了大量关于青藏高原热力异常影响我国天气气候的研究工作（赵平和陈隆勋, 2001; 段安民等, 2003; 杨莲梅和张庆云, 2007a）。

夏季青藏高原是北半球陆地上最大的热源，直接加热对流层中层大气，会使其上空大气与周边地区形成强烈的热力差异，并且这种热力差异存在季节和季节内变化，加剧对大气环流强迫的复杂性，对环流和气候有更为重要的影响。针对青藏高原热力差异的研究，更多集中在青藏高原和其下游及其东北侧地区的热力差异。东亚地区对流层中高层温度梯度由南暖北冷转为南冷北暖最早于5月下旬发生在高原南侧，青藏高原与海洋的热力对比与亚洲季风爆发有密切关系，东亚副热带季风建立与亚洲大陆（青藏高原）与西太平洋之间的纬向热力差异转换有关（Li and Yanai, 1996; Wu and Zhang, 1998; 祁莉等, 2007）。春季对流层中低层在高原北侧及

太平洋上空存在明显热力对比，当这种热力对比增强时，西太平洋副热带高压减弱东撤，南海夏季风增强北进，导致长江中下游流域夏季降水减少（Wang and Qian, 2009）。正如海陆热力差异对季风活动的影响要大于仅有海洋或陆地热力异常的作用，高原加热引起的这种热力差异对高原周边地区的天气气候会有更大的影响。赵勇和钱永甫（2009）发现5月青藏高原和其以北区域地表温度异常存在大尺度的热力对比，导致东亚副热带西风急流位置变化，进而影响江淮流域夏季降水，这种大尺度的热力对比要较单一区域的热力异常与江淮流域夏季降水有更好的相关关系。岑思弦等（2014）发现青藏高原东部与其北侧热力差异增大时，青藏高原夏季风偏强，南北气流在长江流域辐合，上升运动增强，长江流域夏季降水偏多。青藏高原和其东部平原的热力对比增强时，高原上空的热低压加强，西北太平洋副热带高压位置偏南，对应着90°E~110°E地区的南涝北旱（朱艳峰等, 2010）。20世纪后半叶，受全球增暖的影响，青藏高原春季积雪增加，热源强度减弱，引起夏季高原上空温度降低，东亚与其周边海域热力差异减弱，西太平洋副热带高压位置偏南，东亚夏季风减弱，对我国东部地区出现南涝北旱具有重要贡献（Yu et al., 2004; Zhao et al., 2007; 阳坤等, 2010; Duan et al., 2011）。

青藏高原地区热力异常及差异不仅对东部季风区降水存在重要影响，与其西北部干旱区夏季降水也联系密切。夏季青藏高原上空盛行上升气流，与之联系的高原北侧有补偿的下沉气流生成，这是

造成青藏高原北侧干旱的重要原因之一(叶笃正和高由禧, 1979)。夏季青藏高原下垫面感热增强时, 有利于西北东南部降水偏多, 而西北西部(新疆)降水减少(李栋梁等, 1997)。青藏高原大气热源强度的年际变化与随后高原及周边地区平均垂直环流的年际变化联系密切, 是造成高原北侧干旱区干湿年际变化的重要原因之一(吴统文和钱正安, 1996)。从热力差异的角度分析发现, 当夏季青藏高原北部潜热偏强, 南部偏弱时, 新疆南部降水偏少(杨莲梅和张庆云, 2007a), 5月青藏高原感热偏弱, 伊朗高原偏强时, 新疆北部夏季降水偏多(赵勇等, 2013)。上述针对青藏高原热力异常及差异对我国夏季降水的影响研究工作, 更多集中在东部季风区, 干旱区相对较少。青藏高原热力异常引起的纬向(高原—高原下游平原、海洋)和经向(高原—高原东北侧地区)热力差异, 主要通过影响东亚副热带西风急流、西太平洋副热带高压等大尺度环流系统来影响高原下游东亚季风区的天气气候, 但不适用于讨论其对西北干旱区气候的影响。那么一个自然的问题, 青藏高原地区热力异常及差异是否也与其西北部干旱区夏季降水存在联系, 不同区域的热力异常对干旱区环流的单独作用如何, 对降水的影响又怎样? 这些区域间热力异常又如何影响干旱区降水? 这些问题, 有必要进一步讨论。本文主要讨论青藏高原地区热力差异对西北干旱区西部, 新疆地区降水夏季降水的影响, 该区域也是近30年来西北干旱区夏季降水增加最为显著的地区(施雅风等, 2003)。

## 2 数据和方法

本研究所用的资料包括再分析资料和台站降水观测资料, 其中再分析资料由美国国家环境预测中心/美国国家大气研究中心(NCEP/NCAR)提供(Kalnay et al., 1996), 包括地面气压和对流层中12个等压面上的温度( $T$ )、维向风( $u$ )、经向风( $v$ )和垂直速度( $\omega$ )等, 资料水平分辨率为 $2.5^{\circ}$ (纬度) $\times 2.5^{\circ}$ (经度); 降水资料为新疆气象信息中心提供的经过质量控制的新疆70站逐月降水(图1)。所有资料时间覆盖长度为1961~2010年, 如无特别说明, 本文的夏季指7月和8月的平均态。

视热源 $Q$ 的计算采用Yanai et al. (1973)提出的倒算法, 具体公式推导见岑思弦等(2014)。大

气顶层气压取100 hPa,  $Q$ 为正(负)时, 表示气柱中总的非绝热加热(冷却), 称之为大气热源(热汇)。

本文利用奇异值分解(SVD)、回归、偏相关等统计方法讨论了不同物理量之间的关系。

## 3 结果分析

### 3.1 青藏高原地区5月视热源 $Q$ 和新疆夏季降水的SVD分析

已有研究发现, 青藏高原5月热力异常与中国夏季降水有密切的联系, 这主要是由于5月热力异常与夏季热力异常有较好的异常持续性(段安民等, 2003; 赵勇和钱永甫, 2009)。为了揭示青藏高原地区5月视热源 $Q$ 与新疆夏季降水的关系, 进行二者与新疆夏季降水的SVD分析。取青藏高原地区( $25^{\circ}\text{N} \sim 45^{\circ}\text{N}, 70^{\circ}\text{E} \sim 105^{\circ}\text{E}$ )5月标准化的 $Q$ 场为左场, 新疆70站夏季降水的标准化场为右场。为了更好的揭示视热源 $Q$ 场对降水场的控制作用, 左场采用同性相关系数, 右场采用异性相关系数。由于第一模态的协方差贡献已达38%, 远高于其它模态, 本文主要讨论第一模态的空间分布型, 空间分布型在一定程度上反映了两个场的遥相关特征。从图2a左场的空间分布型可见, 青藏高原为负相关区, 相关中心值高达-0.50以上, 高原西北部为正相关区, 相关中心值达0.50以上, 二者之间存在明显的经向热力差异。右场的空间分布型(图2b)

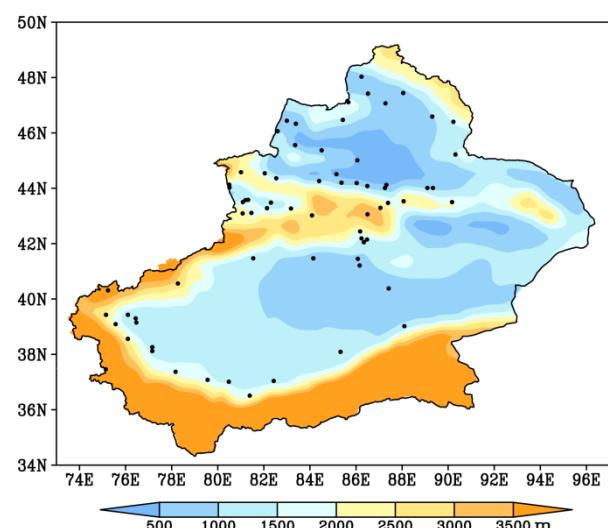


图1 新疆气象观测站点分布(填色部分表示地形高度)

Fig. 1 Locations of meteorological observation stations (dot) in Xinjiang (colored areas indicate the terrain height)

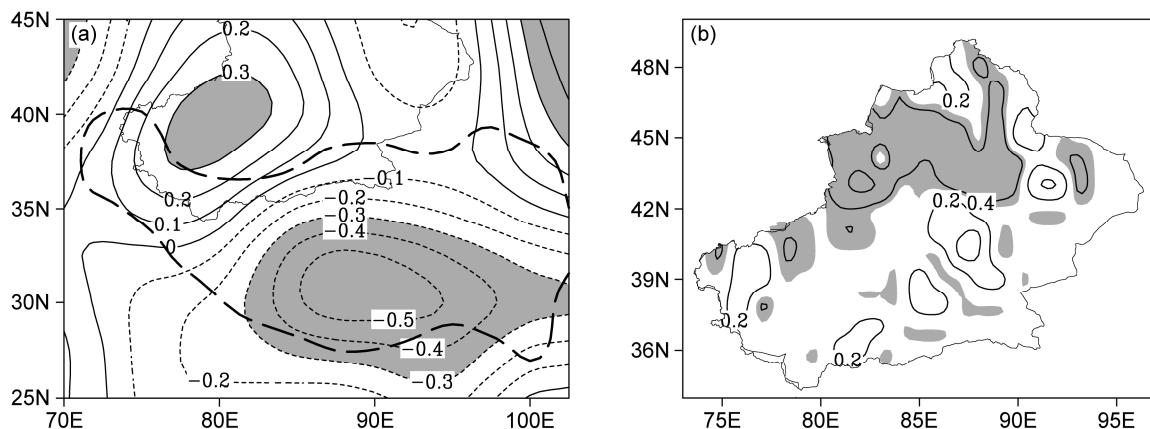


图 2 (a) 5月青藏高原地区视热源  $Q$  与 (b) 新疆夏季降水量的 SVD 分析的第一模态分布 (阴影部分通过 95% 信度检验)

Fig. 2 The first mode in the SVD (Singular Value Decomposition) expansion between  $Q$  over the Tibetan Plateau and its surrounding areas in May and summer precipitation in Xinjiang. (a) The left field relevant to the  $Q$  over the Tibetan Plateau and its surrounding areas in May was expanded for a homogeneous correlation pattern, (b) the right field relevant to summer precipitation in Xinjiang was expanded for a heterogeneous correlation pattern. Shaded areas are for values at/above the 95% confidence level

以正相关为主，高相关区主要位于  $42^{\circ}\text{N}$  以北地区，高值中心与该地区夏季降水的均方差大值中心基本重合（图略）。5月青藏高原地区视热源  $Q$  与新疆夏季降水两个场时间系数的相关系数为 0.74，说明两个场的关系密切。由两个场的空间分布型和时间系数关系可以判定，5月当青藏高原视热源偏弱，其西北部地区偏强时，北疆夏季降水将偏多。

从上述结果可知，5月青藏高原主体和其西北部地区视热源与夏季北疆降水关系密切，高原地区存在明显的热力经向差异。已有研究表明，考虑高原地区的热力差异要比仅考虑单一地区对区域降水有更重要的影响（赵勇和钱永甫，2009；朱艳峰等，2010；岑思弦等，2014）。因此，定义一个指数来反映这种热力差异，进而分析其和北疆夏季降水的联系。根据图 2a，取  $(25^{\circ}\text{N} \sim 35^{\circ}\text{N}, 80^{\circ}\text{E} \sim 100^{\circ}\text{E})$  区域作为青藏高原关键区， $(35^{\circ}\text{N} \sim 45^{\circ}\text{N}, 75^{\circ}\text{E} \sim 85^{\circ}\text{E})$  区域作为青藏高原西北部关键区，热力差异指数（Thermal Contrast Index, TCI）为

$$I = (Q_{\text{TP}} - Q_{\text{NW}})_{\text{NOR}}, \quad (1)$$

其中， $Q_{\text{TP}}$  和  $Q_{\text{SW}}$  分别为 1961~2010 年 50 年的 5 月青藏高原关键区和高原西北部关键区平均的  $Q$  距平，其差值的标准化值为热力差异指数。计算了 5 月热力差异指数与夏季热力差异指数的相关，相关系数达 0.60，说明该热力差异指数在 5 月和夏季期间具有较好的异常持续性。

夏季降水指数（Summer Precipitation Index, SPI）：定义新疆  $42^{\circ}\text{N}$  以北地区 50 年的 7 月和 8 月

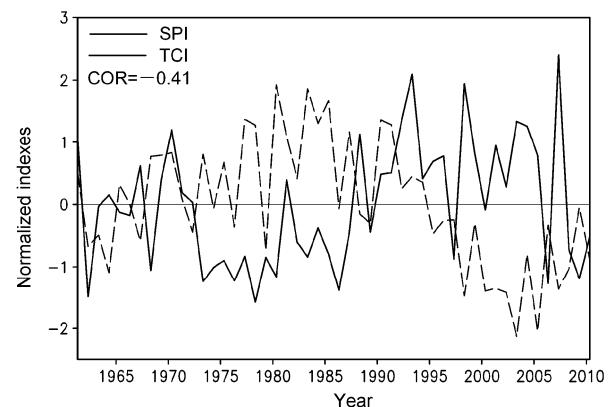


图 3 1961~2010 年青藏高原地区 5 月热力差异指数和北疆夏季降水指数的年际变化

Fig. 3 Annual variations of TCI (Thermal Contrast Index) in May and SPI (Summer Precipitation Index) during 1961 to 2010

总降水量的标准化距平值为该地区夏季降水指数。

热力差异指数和夏季降水指数年际变化（图 3）总的的趋势基本相反，具有相似的年代际变化特征，相关系数达  $-0.41$ ，通过 95% 的信度检验，大于仅考虑青藏高原的  $-0.32$  和高原西北部的  $0.37$ 。1987 年以前，热力差异指数大多为正，即青藏高原视热源异常大于高原西北部视源热异常，北疆大多降水偏少；而 1987 年后，热力差异指数则大多为负，即青藏高原视热源异常小于高原西北部视热源异常，北疆大多降水偏多。

### 3.2 青藏高原地区热力差异与环流和水汽输送的关系

图 4a 给出了夏季降水指数与 200 hPa 纬向风的

回归分布, 由图可见, 北疆夏季降水与 $40^{\circ}\text{E} \sim 80^{\circ}\text{E}$ 间的纬向风关系密切, 该区域200 hPa纬向风对应西亚副热带西风急流, 急流位置的南北变化, 对夏季新疆降水有重要影响(杨莲梅和张庆云, 2008; Zhao et al., 2014a)。图4a显示 $40^{\circ}\text{N}$ 以南西风加强, 以北西风减弱, 对应了西风急流轴线偏南, 北疆夏季降水偏多。当5月热力差异指数为负时(图4b), 即5月青藏高原视热源偏弱, 其西北部视热源偏强时, 200 hPa纬向风异常分布与图4a一致, 反映了西亚副热带西风急流位置偏南。

图5a给出了夏季降水指数与500 hPa风场的回归分布, 中亚上空和贝加尔湖上空分别为异常气旋和反气旋环流, 在二者共同作用下, 新疆上空盛行异常的偏南气流, 有利于低纬度的暖湿气流北上, 中亚上空的气旋系统是造成新疆夏季降水的关键系统之一(张云惠等, 2012)。由于新疆纬度较高, 因此, 在夏季冷空气是不缺的, 如有低纬的暖湿气

流北上, 则有利于降水的发生, 这与江淮流域夏季降水恰相反, 在江淮流域, 夏季由于东亚夏季风的背景, 盛行偏南风, 降水的形成与北方冷空气的频率和强度联系更紧密一些(段安民等, 2003)。图5b显示了5月热力差异指数与500 hPa风场的回归分布, 环流分布与图5a相反, 中亚上空和贝加尔湖上空分别为异常反气旋和气旋环流, 说明热力差异指数偏弱年500 hPa风场的异常分布特征, 与夏季降水指数偏强年500 hPa风场的异常相似, 反之亦然。

新疆作为干旱区, 除了环流动力条件, 水汽输送也是一个重要因素。图6a给出了夏季降水指数与水汽通量的回归分布。由图可见, 当北疆夏季降水偏多时, 对应越赤道索马里急流增强, 加大了热带水汽的向北半球输送, 印度半岛上空为异常反气旋环流, 将低纬水汽输送至中纬度地区, 同时在中亚上空配合一个异常气旋环流, 继续将已输送至中

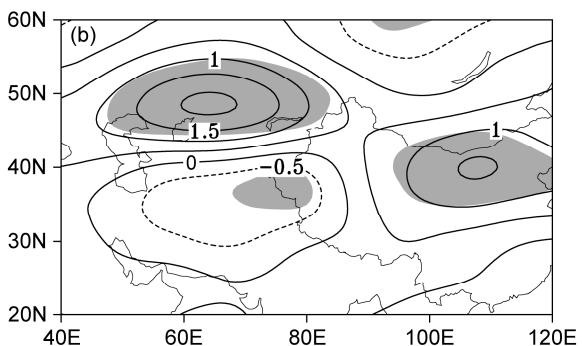
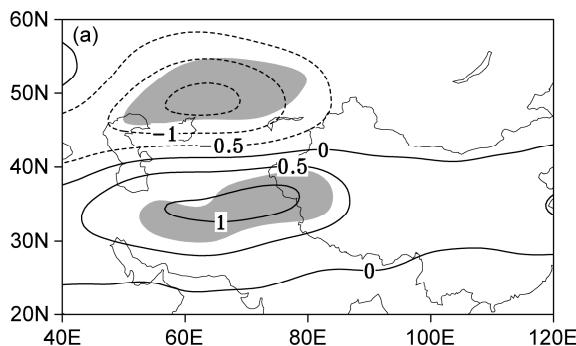


图4 (a) 北疆夏季降水指数、(b) 5月热力差异指数和200 hPa纬向风的回归分布(单位:  $\text{m s}^{-1}$ , 阴影部分通过95%信度检验)

Fig. 4 Regressions of 200-hPa zonal winds in the summer on (a) the SPI and (b) the TCI in May (contour, units:  $\text{m s}^{-1}$ ). Shaded areas are for values at/above the 95% confidence level

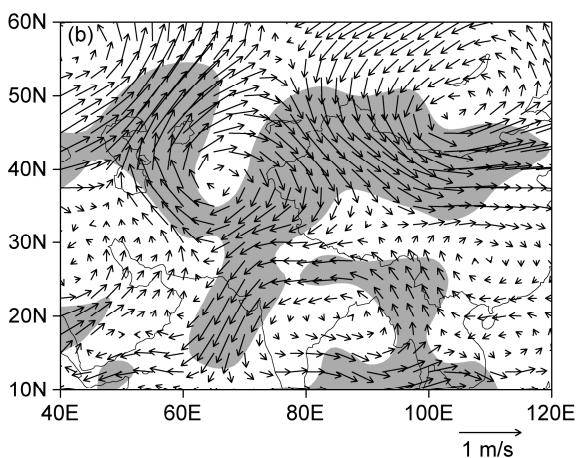
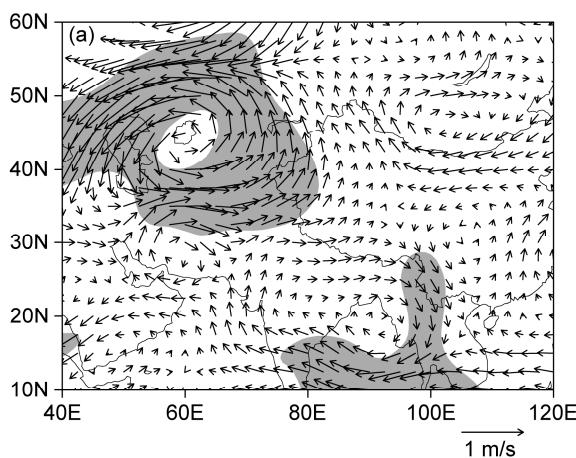


图5 (a) 北疆夏季降水指数、(b) 5月热力差异指数和500 hPa风场的回归分布(单位:  $\text{m s}^{-1}$ , 阴影部分通过95%信度检验)

Fig. 5 Regressions of 500-hPa wind vectors in the summer on (a) the SPI and (b) the TCI in May (vectors, units:  $\text{m s}^{-1}$ ). Shaded areas are for values at/above the 95% confidence level

纬度的水汽向北输送，进入中亚和新疆上空。如此水汽输送过程，有两个重要动力过程，第一步印度半岛上空的异常反气旋将热带水汽输送至中纬地区（ $30^{\circ}\text{N} \sim 40^{\circ}\text{N}$ ），第二步中亚上空的异常气旋，进一步将水汽输送至中高纬度地区，因而将这种水汽输送命名为两步型输送（Zhao et al., 2014b）。图 6b 显示了 5 月热力差异指数与水汽通量的回归分布，水汽输送与图 6a 相反，即当 5 月热力差异指数为负时，水汽输送过程与图 6a 一致。虽然从气候平均来讲，新疆夏季降水的水汽输送途径为西方路径，但是在夏季，热带印度洋是新疆夏季降水的一个重要水汽源地，尤其是大降水的发生，南方路径的水汽输送显得更为重要（张家宝和邓子风，

1987；杨莲梅和张庆云，2007b）。从以上分析可见，南支低纬热带水汽输送对新疆夏季降水具有更为重要的作用。

### 3.3 不同区域热力异常对环流和水汽输送的影响

从 3.2 部分的分析可知，5 月青藏高原及其西北部热力差异对与新疆夏季降水有重要联系的环流和水汽输送存在重要影响，假如仅考虑高原或者高原西北部，单一区域的热力异常与环流和水汽输送的关系如何？为回答这个问题，本节进行了偏相关分析。

图 7a 给出了 5 月青藏高原关键区（ $25^{\circ}\text{N} \sim 35^{\circ}\text{N}$ ,  $80^{\circ}\text{E} \sim 100^{\circ}\text{E}$ ）区域平均的视热源  $Q$  与 200 hPa 纬向风的偏相关分布，去除高原西北部（ $35^{\circ}\text{N} \sim$

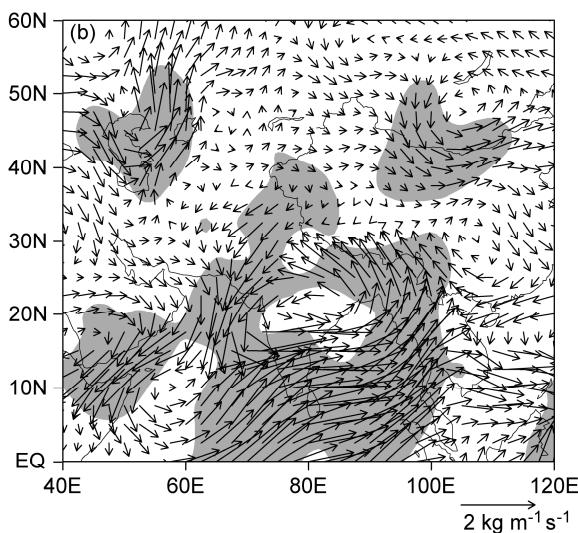
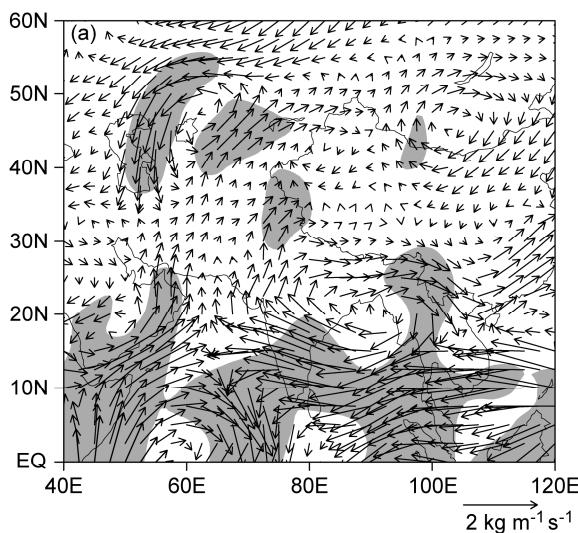


图 6 (a) 北疆夏季降水指数、(b) 5 月热力差异指数和水汽通量的回归分布 (从地表积分至 300 hPa, 单位:  $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ , 阴影部分通过 95% 信度检验)

Fig. 6 Regressions of water vapor flux vertically integrated from surface to 300 hPa in the summer on (a) the SPI and (b) the TCI in May (vector, units:  $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ ). Shaded areas are for values at/above the 95% significant confidence level

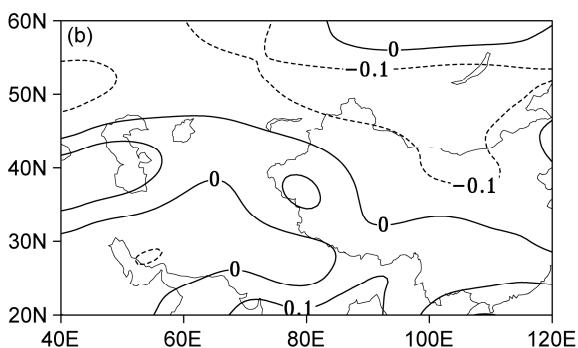
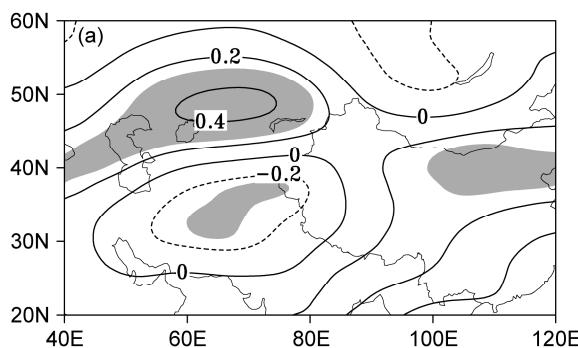


图 7 5 月 (a) 青藏高原关键区 ( $25^{\circ}\text{N} \sim 35^{\circ}\text{N}$ ,  $80^{\circ}\text{E} \sim 100^{\circ}\text{E}$ ) 平均  $Q$  (去除高原西北部  $Q$  的影响)、(b) 高原西北部关键区 ( $35^{\circ}\text{N} \sim 45^{\circ}\text{N}$ ,  $75^{\circ}\text{E} \sim 85^{\circ}\text{E}$ ) 平均  $Q$  (去除青藏高原  $Q$  的影响) 与 200 hPa 纬向风的偏相关分布 (阴影部分通过 95% 信度检验)

Fig. 7 (a) Partial correlation of regionally averaged  $Q$  over the domain ( $25^{\circ}\text{N} \sim 35^{\circ}\text{N}$ ,  $80^{\circ}\text{E} \sim 100^{\circ}\text{E}$ ) in the Tibetan Plateau in May and 200-hPa zonal winds after excluding the effect of regionally averaged  $Q$  over the domain ( $35^{\circ}\text{N} \sim 45^{\circ}\text{N}$ ,  $75^{\circ}\text{E} \sim 85^{\circ}\text{E}$ )，(b) partial correlation of regionally averaged  $Q$  over the domain ( $35^{\circ}\text{N} \sim 45^{\circ}\text{N}$ ,  $75^{\circ}\text{E} \sim 85^{\circ}\text{E}$ ) in the northern part of the Tibetan Plateau in May and 200-hPa zonal winds after excluding the effect of regionally averaged  $Q$  over the domain ( $25^{\circ}\text{N} \sim 35^{\circ}\text{N}$ ,  $80^{\circ}\text{E} \sim 100^{\circ}\text{E}$ )。Shaded areas are for values at/above the 95% confidence level

$45^{\circ}\text{N}$ ,  $75^{\circ}\text{E} \sim 85^{\circ}\text{E}$ ) 因子影响。由图可见, 青藏高原视热源偏强时,  $40^{\circ}\text{N}$  以北西风增强, 以南偏弱, 反映西亚副热带西风急流位置偏北, 反之, 当青藏高原视热源偏弱时, 西亚副热带西风急流位置偏南。图 7b 给出了 5 月青藏高原西北部关键区区域平均的视热源  $Q$  与 200 hPa 纬向风的偏相关分布, 我们发现去除青藏高原因子影响后, 这一区域加热对 200 hPa 纬向风基本无影响, 由此说明在青藏高原和其西北部热力差异对西亚副热带西风急流影响中, 青藏高原扮演了关键角色。

图 8a 显示了 5 月青藏高原关键区区域平均的视热源  $Q$  与 500 hPa 风的偏相关分布, 去除高原西北部因子影响。由图可见, 5 月青藏高原视热源偏强时, 中亚和贝加尔湖上空对应异常反气旋和气旋, 二者共同作用下, 新疆上空盛行异常偏北风, 反之, 当青藏高原视热源偏弱时, 中亚和贝加尔湖上空对应异常气旋和反气旋, 二者共同作用下, 新疆上空盛行异常偏南风, 就是引起新疆夏季异常降水的主导环流。研究表明, 青藏高原春、夏季热源近年来呈减弱趋势, 对应新疆北疆地区降水偏多, 尤其是大雨降水, 说明青藏高原热源减弱很可能是造成北疆夏季大降水偏多的一个重要因子(赵勇等, 2010; Duan et al., 2011)。假如去除青藏高原的影响, 仅考虑高原西北部加热, 我们发现当高原西北部视热源偏强时, 中亚和贝加尔湖上空呈异常气旋和反气旋, 但气旋的位置偏南, 在二者共同作

用下, 新疆上空盛行异常偏南风(图 8b)。综上, 青藏高原和高原西北部加热, 均对 500 hPa 环流存在影响, 但前者更为显著一些。

图 9a 显示了 5 月青藏高原关键区区域平均的视热源  $Q$  与水汽通量的偏相关分布, 由图可见, 去除高原西北部影响后, 青藏高原 5 月视热源变化与水汽通量关系并不密切, 这与青藏高原热力异常对影响我国东部季风区降水的水汽存在直接的调制作用(徐祥德等, 2015) 是不同的。图 9b 给出了 5 月青藏高原西北部关键区区域平均的视热源  $Q$  与水汽通量的偏相关分布, 假如仅考虑高原西北部热力影响, 印度半岛上空存在显著的异常反气旋环流, 反气旋西部偏南风把热带水汽输送至中纬度地区, 完成水汽两步型输送的第一步。需要指出的是, 青藏高原加热虽然在水汽输送的第一步过程中作用不大, 但是它导致的中亚上空异常气旋是水汽两步型输送的第二步, 从这个角度, 青藏高原在新疆北部夏季降水水汽输送过程中也具有一定作用。为何高原西北部地区热力异常对水汽输送的第一步存在如此重要的联系? Zuo et al. (2012) 研究发现高原北侧区域及我国东部地区与热带海洋的热力对比改变是亚洲夏季风减弱的重要因素, 亚洲夏季风减弱, 尤其是南亚夏季风减弱, 对应印度半岛上空反气旋环流(Zhao et al., 2014b), 是水汽向北输送的第一步条件, 因而从这个角度, 可以解释高原西北部地区热力异常与印度半岛上空的异常反气

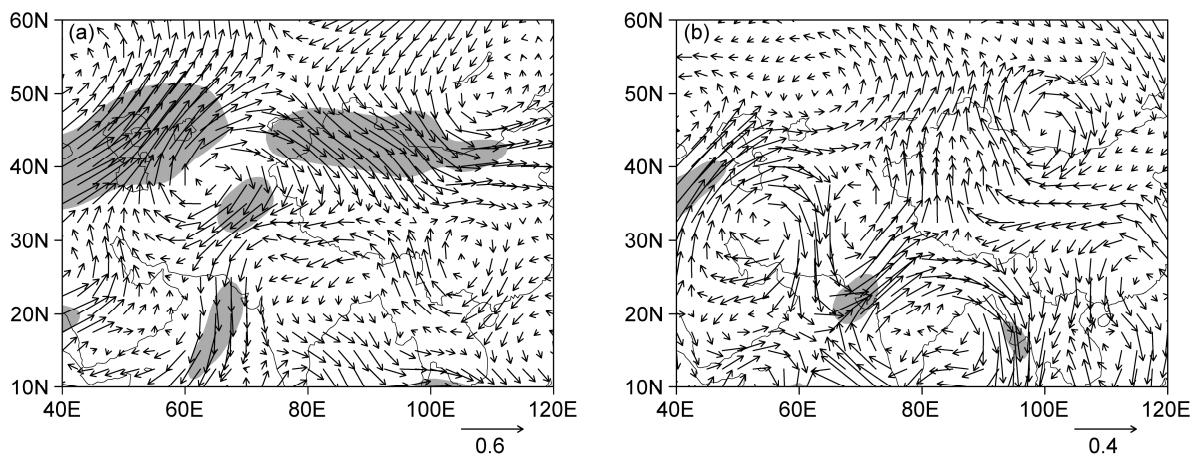


图 8 5月 (a) 青藏高原关键区 ( $25^{\circ}\text{N} \sim 35^{\circ}\text{N}$ ,  $80^{\circ}\text{E} \sim 100^{\circ}\text{E}$ ) 平均  $Q$  (去除高原西北部  $Q$  的影响)、(b) 高原西北部关键区 ( $35^{\circ}\text{N} \sim 45^{\circ}\text{N}$ ,  $75^{\circ}\text{E} \sim 85^{\circ}\text{E}$ ) 平均  $Q$  (去除青藏高原  $Q$  的影响) 与 500 hPa 风场的偏相关分布 (阴影部分通过 95% 信度检验)

Fig. 8 (a) Partial correlation of regionally averaged  $Q$  over the domain ( $25^{\circ}\text{N} \sim 35^{\circ}\text{N}$ ,  $80^{\circ}\text{E} \sim 100^{\circ}\text{E}$ ) in the Tibetan Plateau in May and 500 hPa wind vectors after excluding the effect of regionally averaged  $Q$  over the domain ( $35^{\circ}\text{N} \sim 45^{\circ}\text{N}$ ,  $75^{\circ}\text{E} \sim 85^{\circ}\text{E}$ ), (b) partial correlation of regionally averaged  $Q$  over the domain ( $35^{\circ}\text{N} \sim 45^{\circ}\text{N}$ ,  $75^{\circ}\text{E} \sim 85^{\circ}\text{E}$ ) in the northern Plateau in May and 500-hPa wind vectors after excluding the effect of regionally averaged  $Q$  over the domain ( $25^{\circ}\text{N} \sim 35^{\circ}\text{N}$ ,  $80^{\circ}\text{E} \sim 100^{\circ}\text{E}$ ). Shaded areas are for values at/above the 95% confidence level

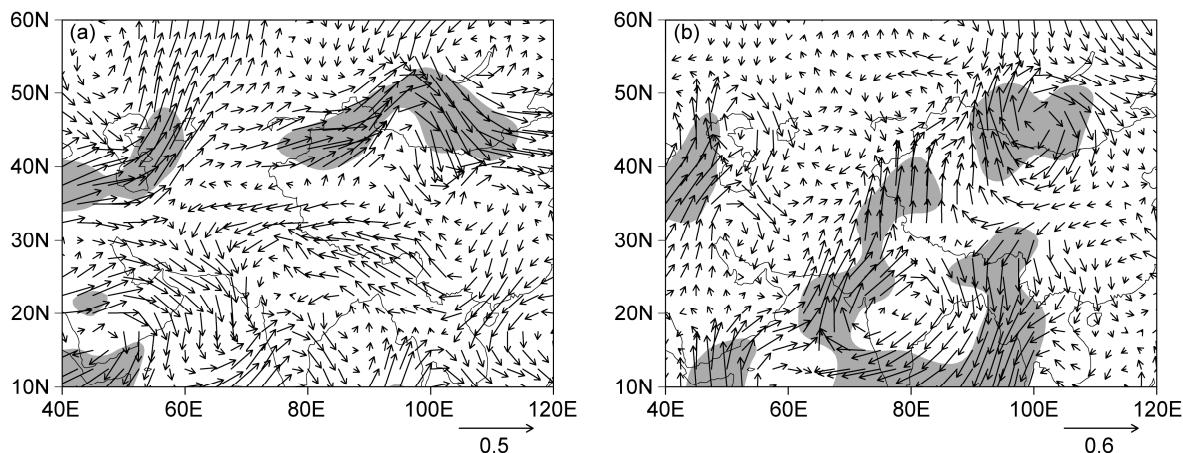


图 9 5月 (a) 青藏高原关键区 ( $25^{\circ}\text{N} \sim 35^{\circ}\text{N}$ ,  $80^{\circ}\text{E} \sim 100^{\circ}\text{E}$ ) 平均  $Q$  (去除高原西北部  $Q$  的影响)、(b) 高原西北部关键区 ( $35^{\circ}\text{N} \sim 45^{\circ}\text{N}$ ,  $75^{\circ}\text{E} \sim 85^{\circ}\text{E}$ ) 平均  $Q$  (去除青藏高原  $Q$  的影响) 与水汽通量 (地表积分至 300 hPa) 的偏相关分布 (阴影部分通过 95% 信度检验)

Fig. 9 (a) Partial correlation of regionally averaged  $Q$  over the domain of ( $25^{\circ}\text{N} \sim 35^{\circ}\text{N}$ ,  $80^{\circ}\text{E} \sim 100^{\circ}\text{E}$ ) in the Tibetan Plateau in May and water vapor flux vertically integrated from surface to 300 hPa after excluding the effect of regionally averaged  $Q$  over the domain of ( $35^{\circ}\text{N} \sim 45^{\circ}\text{N}$ ,  $75^{\circ}\text{E} \sim 85^{\circ}\text{E}$ ), (b) partial correlation of regionally averaged  $Q$  over the domain of ( $35^{\circ}\text{N} \sim 45^{\circ}\text{N}$ ,  $75^{\circ}\text{E} \sim 85^{\circ}\text{E}$ ) in the northern Tibetan Plateau in May and water vapor flux vertically integrated from surface to 300 hPa after excluding the effect of regionally averaged  $Q$  over the domain of ( $25^{\circ}\text{N} \sim 35^{\circ}\text{N}$ ,  $80^{\circ}\text{E} \sim 100^{\circ}\text{E}$ ). Shaded areas are for values at/above the 95% confidence level

旋 (气旋) 存在如此密切联系的一个可能因素。

#### 4 结论和讨论

SVD 分析发现, 5月青藏高原地区视热源  $Q$  异常分布型与新疆夏季降水存在密切联系, 当 5月青藏高原视热源  $Q$  偏弱, 其西北部地区偏强时, 对应新疆夏季降水偏多, 尤其是北疆地区。青藏高原和其西北部地区存在明显经向热力差异, 这与已有讨论的夏季潜热青藏高原南北异常分布型和青藏高原与其上游地区的伊朗高原感热形成的纬向热力差异有明显不同 (杨莲梅和张庆云, 2007a; 赵勇等, 2013)。定义了一个热力差异指数, 反映青藏高原和西北部地区视热源  $Q$  异常变化对比, 热力差异指数与夏季降水指数相关系数达 -0.41, 大于仅考虑青藏高原或高原西北部单一区域, 说明这种大尺度的热力差异对区域气候有更为重要的影响。

当 5月热力差异指数为负时, 即青藏高原视热源偏弱, 其西北部地区偏强时, 对应  $40^{\circ}\text{E} \sim 80^{\circ}\text{E}$  间,  $40^{\circ}\text{N}$  以北西风减弱, 以南增强, 表明西亚副热带西风急流位置偏南, 是导致新疆北部夏季降水一个重要的大尺度环流条件 (杨莲梅和张庆云, 2008; Zhao et al., 2014a); 同时, 500 hPa 风场中纬度对应一异常波列, 中亚和贝加尔湖上空为异常气旋和反气旋环流, 二者共同作用下, 北疆上空盛行异常偏南风,

是北疆夏季降水的主导风向; 形成典型的水汽两步型输送过程, 第一步, 印度半岛上空为异常反气旋, 将阿拉伯海的水汽输送至中纬度地区, 然后中亚上空的异常气旋, 继续将中纬度的水汽向北输送, 完成水汽的第二步输送, 这与季风区的直接水汽输送有明显的不同。如果仅考虑单一区域加热的影响, 青藏高原加热对影响新疆北部夏季降水的环流动力条件具有更为重要影响。对水汽输送二者的影响过程不同, 高原西北部加热主要影响水汽输送的第一步, 而青藏高原影响第二步。

以上分析发现, 青藏高原地区热力差异与新疆夏季降水关系密切, 对北疆夏季降水有重要联系的环流和水汽输送存在重要影响, 总体来说, 青藏高原的作用要更为重要一些, 不仅影响中高层大气环流, 还对水汽输送也存在一定调制作用。北疆夏季降水, 受西风带上环流系统控制, 如西亚副热带西风急流, 中亚气旋等 (杨莲梅和张庆云, 2008; 张云惠等, 2012), 这些系统又受高纬和低纬系统影响, 如北极涛动 (AO) 与西亚副热带西风急流位置变化联系紧密, 印度洋海温对低纬度水汽向北输送动力条件影响明显 (Zhao et al., 2014a; Zhao and Zhang, 2015)。本文的分析表明, 青藏高原加热对西亚副热带西风急流和水汽输送都具有重要影响, 那么它与北极涛动和印度洋海温的影响区别是什么? 青藏高原在影响新疆夏季降水的中高低纬环

流相互作用中又扮演了什么角色, 值得进一步研究。视热源包含了感热和潜热等分量, 已有的分析发现前期5月青藏高原感热偏弱对应北疆夏季降水偏多, 夏季高原北部潜热偏强, 南部偏弱时, 南疆夏季降水偏多(杨莲梅和张庆云, 2007a; 赵勇等, 2013), 上述结果说明高原感热和潜热对新疆夏季降水的影响时间和区域存在一定差异。大尺度背景下, 感热加热会在加热区以东的对流层高层激发出反气旋式环流, 潜热加热则在加热区以西的对流层高层激发出反气旋式环流, 说明大气环流对高原感热和潜热的响应存在不同(李菲和段安民, 2011), 那么一个自然的问题, 如何区分感热和潜热对新疆不同区域夏季降水的相对贡献? 后续将借助模式资料和数值试验, 进一步回答以上问题。

## 参考文献 (References)

- 岑思弦, 巩远发, 赖欣, 等. 2014. 青藏高原东部与其北侧热力差异与高原季风及长江流域夏季降水的关系 [J]. 气象学报, 72 (2): 256–265.
- Ceng Sixian, Gong Yuanfa, Lai Xin, et al. 2014. The relationship of the thermal contrast between the eastern Tibetan Plateau and its northern side with the plateau monsoon and the precipitation in the Yangtze River basin in summer [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 72 (2): 256–265, doi:10.11676/qxxb2014.020.
- 段安民, 刘屹岷, 吴国雄. 2003. 4~6月青藏高原热状况与盛夏东亚降水和大气环流的异常 [J]. 中国科学(D辑): 地球科学, 33 (10): 997–1004.
- Duan Anmin, Liu Yimin, Wu Guoxiong. 2005. Heating status of the Tibetan Plateau from April to June and rainfall and atmospheric circulation anomaly over East Asia in midsummer [J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 48 (2): 250–257, doi: 10.1360/02yd0510.
- Duan A M, Li F, Wang M R, et al. 2011. Persistent weakening trend in the spring sensible heat source over the Tibetan Plateau and its impact on the Asian summer monsoon [J]. J. Climate, 24 (21): 5671–5682, doi: 10.1175/JCLI-D-11-00052.1.
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 77 (3): 437–471, doi: 10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2.
- Li C F, Yanai M. 1996. The onset and interannual variability of the Asian summer monsoon in relation to land-sea thermal contrast [J]. J. Climate, 9(2): 358–375, doi: 10.1175/1520-0442(1996)009<0358:TOAIVO>2.0.CO;2.
- 李栋梁, 谢金南, 王文. 1997. 中国西北夏季降水特征及其异常研究 [J]. 大气科学, 21 (3): 331–340. Li Dongliang, Xie Jinnan, Wang Wen. 1997. A study of summer precipitation features and anomaly in Northwest China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 21 (3): 331–340, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1997.03.10.
- 李菲, 段安民. 2011. 青藏高原夏季风强弱变化及其对亚洲地区降水和环流的影响——2008年个例分析 [J]. 大气科学, 35 (4): 694–706. Li Fei, Duan Anmin. 2011. Variation of the Tibetan Plateau summer monsoon and its effect on the rainfall and the circulation in Asia—A case study in 2008 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35 (4): 694–706, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2011.04.09.
- 刘新, 李伟平, 吴国雄. 2002. 夏季青藏高原加热和北半球环流年际变化的相关分析 [J]. 气象学报, 60 (3): 267–277. Liu Xin, Li Weiping, Wu Guoxiong. 2002. Interannual variation of the diabatic heating over the Tibetan Plateau and the Northern Hemispheric circulation in summer [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 60 (3): 267–277, doi: 10.11676/qxxb2002.033.
- 祁莉, 何金海, 张祖强, 等. 2007. 纬向海陆热力差异的季节转换与东亚副热带季风环流 [J]. 科学通报, 52 (24): 2895–2899. Qi Li, He Jinhai, Zhang Zuqiang, et al. 2007. Seasonal cycle of the zonal land-sea thermal contrast and East Asian subtropical monsoon circulation [J]. Chinese Science Bulletin, 53 (1): 131–136, doi: 10.1007/s11434-007-0518-0.
- 施雅风, 沈永平, 李栋梁, 等. 2003. 中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨 [J]. 第四纪研究, 23 (2): 152–164. Shi Yafeng, Shen Yongping, Li Dongliang, et al. 2003. Discussion on the present climate change from warm-dry to warm-wet in Northwest China [J]. Quaternary Sciences (in Chinese), 23 (2): 152–164, doi: 10.3321/j.issn:1001-7410. 2003.02.005.
- Wang Z F, Qian Y F. 2009. The relationship of land-ocean thermal anomaly difference with Meiyu and South China Sea summer monsoon [J]. Adv. Atmos. Sci., 26 (1): 169–179, doi: 10.1007/s00376-009-0169-y.
- Wu G X. 1984. The nonlinear response of the atmosphere to large-scale mechanical and thermal forcing [J]. J. Atmos. Sci., 41 (16): 2456–2476, doi: 10.1175/1520-0469(1984)041<2456:TNRota>2.0.CO;2.
- 吴国雄, 刘屹岷. 2000. 热力适应、过流、频散和副高 I. 热力适应和过流 [J]. 大气科学, 24 (4): 433–446. Wu Guoxiong, Liu Yimin. 2000. Thermal adaptation, overshooting, dispersion, and subtropical anticyclone. Part I: Thermal adaptation and overshooting [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 24 (4): 433–446, doi: 10.3878/j.issn. 1006-.
- Wu G X, Zhang Y S. 1998. Tibetan plateau forcing and the timing of the monsoon onset over South Asia and the South China Sea [J]. Mon. Wea. Rev., 126 (4): 913–927, doi: 10.1175/1520-0493(1998)126<0913:TPFATT>2.0.CO;2.
- 吴统文, 钱正安. 1996. 青藏高原北侧地区干湿年夏季垂直环流差异的对比分析及青藏高原的热力影响 [J]. 气象学报, 54 (5): 558–568. Wu Tongwen, Qian Zheng'an. 1996. The comparative analyses of differences between vertical circulation on north side of Tibetan Plateau in wet and dry summer and thermal effects of the plateau [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 54 (5): 558–568, doi: 10.11676/qxxb1996.058.
- 徐祥德, 赵天良, 施晓晖, 等. 2015. 青藏高原热力强迫对中国东部降水和水汽输送的调制作用 [J]. 气象学报, 73 (1): 20–35. Xu Xiangde, Zhao Tianliang, Shi Xiaohui, et al. 2015. A study of the role of the Tibetan Plateau's thermal forcing in modulating rainband and moisture transport in eastern China [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 73 (1): 20–35, doi: 10.11676/qxxb2014.051.
- Yanai M, Esbensen S, Chu J H. 1973. Determination of bulk properties of tropical cloud clusters from large-scale heat and moisture budgets[J]. J. Atmos. Sci., 30 (4): 611–627, doi: 10.1175/1520-0469(1973)030<0611: DOBPOT>2.0.CO;2.

- 阳坤, 郭晓峰, 武炳义. 2010. 青藏高原地表感热通量的近期变化趋势 [J]. 中国科学: 地球科学, 40 (7): 923–932. Yang Kun, Guo Xiaofeng, Wu Bingyi. 2010. Recent trends in surface sensible heat flux on the Tibetan Plateau [J]. *Science China Earth Sciences*, 54 (1): 19–28, doi: 10.1007/s11430-010-4036-6.
- 杨莲梅, 张庆云. 2007a. 南疆夏季降水异常的环流和青藏高原地表潜热通量特征分析 [J]. 高原气象, 26 (3): 435–441. Yang Lianmei, Zhang Qingyun. 2007a. Surface latent heat flux characteristics over Tibetan Plateau and circulations of summer precipitation anomalies in South Xinjiang [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 26 (3): 435–441, doi: 10.3321/j.issn:1000-0534.2007.03.001.
- 杨莲梅, 张庆云. 2007b. 新疆北部汛期降水年际和年代际异常的环流特征 [J]. 地球物理学报, 50 (2): 412–419. Yang Lianmei, Zhang Qingyun. 2007b. Circulation characteristics of interannual and interdecadal anomalies of summer rainfall in North Xinjiang [J]. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 50 (2): 412–419, doi: 10.3321/j.issn:0001-5733. 2007.02.011.
- 杨莲梅, 张庆云. 2008. 新疆夏季降水年际变化与亚洲副热带西风急流 [J]. 应用气象学报, 19 (2): 171–179. Yang Lianmei, Zhang Qingyun. 2008. Interannual variation of summer precipitation in Xinjiang and Asian subtropical westerly jet stream [J]. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 19 (2): 171–179, doi: 10.3969/j.issn:1001-7313.2008.02.006.
- 叶笃正, 高由禧. 1979. 青藏高原气象学 [M]. 北京: 科学出版社, 202–212. Ye Duzheng, Gao Youxi. 1979. *Qinbai-Xizang Plateau Meteorology* (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 202–212.
- Ye D Z, Wu G X. 1998. The role of the heat source of the Tibetan Plateau in the general circulation[J]. *Meteor. Atmos. Phys.*, 67 (1–4): 181–198, doi: 10.1007/BF01277509.
- Yu R C, Wang B, Zhou T J. 2004. Tropospheric cooling and summer monsoon weakening trend over East Asia[J]. *Geophys. Res. Lett.*, 31 (22): L22212, doi: 10.1029/2004GL021270.
- 张家宝, 邓子风. 1987. 新疆降水概论 [M]. 北京: 气象出版社, 255–263. Zhang Jiabao, Deng Zifeng. 1987. *Precipitation Conspectus in Xinjiang* (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorology Press, 255–263.
- 张云惠, 杨莲梅, 肖开提·多莱特, 等. 2012. 1971~2010 年中亚低涡活动特征 [J]. 应用气象学报, 23 (3): 312–321. Zhang Yunhui, Yang Lianmei, Xiaokaiti Duolaite, et al. 2012. The central Asian vortexes activity during 1971–2010 [J]. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 23(3): 312–321, doi: 10.3969/j.issn.1001-7313.2012.03.007.
- 赵平, 陈隆勋. 2001. 35 年来青藏高原大气热源气候特征及其与中国降水的关系 [J]. 中国科学 (D 辑), 31(4): 327–332. Zhao Ping, Chen Longxun. 2001. Climatic features of atmospheric heat source/sink over the Qinghai-Xizang Plateau in 35 years and its relation to rainfall in China [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 44 (9): 858–864, doi: 10.1007/BF02907098.
- Zhao P, Zhou Z J, Liu J P. 2007. Variability of Tibetan spring snow and its associations with the hemispheric extratropical circulation and East Asian summer monsoon rainfall: An observational investigation [J]. *J. Climate*, 20 (15): 3942–3955, doi: 10.1175/JCLI4205.1.
- 赵勇, 钱永甫. 2009. 青藏高原地区地表热力异常与夏季东亚环流和江淮降水的关系 [J]. 气象学报, 67 (3): 397–406. Zhao Yong, Qian Yongfu. 2009. Relationship between the Tibetan Plateau surface thermal anomalies and the summer circulation over East Asia and rainfall in the Yangtze and Huaihe River areas [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 67 (3): 397–406, doi: 10.11676/qxxb2009.039.
- 赵勇, 黄丹青, 古丽格娜, 等. 2010. 新疆北部夏季强降水分析 [J]. 干旱区研究, 27 (5): 773–779. Zhao Yong, Huang Danqing, Guligena, et al. 2010. Analysis on summer heavy rainfall in the northern Xinjiang[J]. *Arid Zone Research* (in Chinese), 27 (5): 773–779.
- 赵勇, 杨青, 黄安宁, 等. 2013. 青藏和伊朗高原热力异常与北疆夏季降水的关系 [J]. 气象学报, 71 (4): 660–667. Zhao Yong, Yang Qing, Huang Aning, et al. 2013. Relationships between the anomalies of surface sensible heat in the Tibetan Plateau and Iran Plateau and summertime precipitation in North Xinjiang [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 71 (4): 660–667, doi: 10.11676/qxxb2013.055.
- Zhao Y, Wang M Z, Huang A N, et al. 2014a. Relationships between the West Asian subtropical westerly jet and summer precipitation in northern Xinjiang [J]. *Theor. Appl. Climatol.*, 116 (3–4): 403–411, doi: 10.1007/s00704-013-0948-3.
- Zhao Y, Huang A N, Zhou Y, et al. 2014b. Impact of the middle and upper tropospheric cooling over central Asia on the summer rainfall in the Tarim basin, China[J]. *J. Climate*, 27 (12): 4721–4732, doi: 10.1175/JCLI-D-13-00456.1.
- Zhao Y, Zhang H Q. 2015. Impacts of SST warming in tropical Indian Ocean on CMIP5 model-projected summer rainfall changes over central Asia [J]. *Climate Dyn.*, 46 (9): 3223–3238, doi: 10.1007/s00382-015-2765-0.
- 周秀骥, 赵平, 陈军明, 等. 2009. 青藏高原热力作用对北半球气候影响的研究 [J]. 中国科学 (D 辑), 39 (11): 1473–1486. Zhou Xiuji, Zhao Ping, Chen Junming, et al. 2009. Impacts of thermodynamic processes over the Tibetan Plateau on the Northern Hemispheric climate [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 52 (11): 1679–1693, doi: 10.1007/s11430-009-0194-9.
- 朱艳峰, 张博, 陈隆勋. 2010. 夏季青藏高原与其东部平原的热力差异对中国降水的影响 [J]. 科学通报, 55 (6): 483–489. Zhu Yanfeng, Zhang Bo, Chen Longxun. 2010. Thermal difference between the Tibetan Plateau and the plain east of plateau and its influence on rainfall over China in the summer [J]. *Chinese Science Bulletin*, 55 (14): 1437–1444, doi: 10.1007/s11434-009-0613-5.
- Zuo Z Y, Yang S, Kumar A, et al. 2012. Role of thermal condition over Asia in the weakening Asian summer monsoon under global warming background [J]. *J. Climate*, 25 (9): 3431–3436, doi: 10.1175/JCLI-D-11-00742.1.