氣候與環境研究
Climatic and Environmental Research

夏季青藏高原和热带印度洋热力异常对塔里木盆地夏季降水的影响

王天竺 赵勇

Influences of Summer Thermal Anomalies over the Tibetan Plateau and the Tropical Indian Ocean on Summer Rainfall in the Tarim Basin

WANG Tianzhu ZHAO Yong

在线阅读 View online: https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2021.20092

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

中亚和南亚热力差异对塔里木盆地夏季降水的影响

Effects of Thermal Contrast between Central Asia and South Asia on Summer Rainfall over the Tarim Basin

气候与环境研究. 2017, 22(5): 574 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2017.16178

青藏高原热力对四川盆地西部一次持续性暴雨影响的数值模拟

Numerical Simulation of Impacts of the Tibetan Plateau Heating on a Persistent Heavy Rainfall in Western Sichuan Basin

气候与环境研究. 2019, 24(1): 37 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2018.17166

冬季热带印度洋上层流场异常模态分析

Analysis of Abnormal Upper Circulation over the Tropical Indian Ocean in Winter

气候与环境研究. 2017, 22(4): 463 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2016.15011

夏、秋季北极海冰异常与秋、冬季青藏高原极端低温日数的关系及影响机理

Relationship of Arctic Sea Ice Coverage Anomalies in Summer-Autumn and Extreme Cold Days over the Tibetan Plateau in Autumn-Winter and the Mechanism

气候与环境研究. 2017, 22(4): 435 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2017.15170

青藏高原云水气候特征分析

Climatic Characteristic Analysis of Cloud Water over the Tibetan Plateau

气候与环境研究. 2018, 23(5): 574 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2018.18039

青藏高原上空甲烷的时空分布特征及其夏季高值形成机制分析

Characteristics of Spatial and Temporal Distributions of Methane over the Tibetan Plateau and Mechanism Analysis for High Methane Concentration in Summer

气候与环境研究. 2017, 22(3): 315 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2016.16062

关注微信公众号，获得更多资讯信息

王天竺, 赵勇. 2021. 夏季青藏高原和热带印度洋热力异常对塔里木盆地夏季降水的影响 [J]. 气候与环境研究, 26(3): 275−288. WANG Tianzhu, ZHAO Yong. 2021. Influences of Summer Thermal Anomalies over the Tibetan Plateau and the Tropical Indian Ocean on Summer Rainfall in the Tarim Basin [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 26 (3): 275−288. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2021.20092

夏季青藏高原和热带印度洋热力异常对塔里木盆地夏季降水的影响

王天竺　赵勇

成都信息工程大学大气科学学院，成都 610225

摘　要　基于 1979～2017 年欧洲中期天气预报中心（ECMWF）全球大气数值预报再分析资料 ERA-Interim 提供的地表潜热及大气环流再分析资料和英国 Hadley 气候预测和研究中心提供的全球逐月海表温度格点资料以及新疆气象信息中心提供的塔里木盆地 26 个站逐月降水资料，研究了夏季青藏高原和热带印度洋热力异常对塔里木盆地夏季降水的影响。结果表明：高原北部潜热偏强（弱）和热带印度洋海温偏暖（冷）时，200 hPa 纬向风表现为“北负（正）南正（负）”的特征，中亚和贝加尔湖上空分别为异常气旋（反气旋）和异常反气旋（气旋），在二者共同作用下，塔里木盆地上空盛行偏南（北）风，印度半岛上空为异常反气旋（气旋），有利（不利）于将低纬度水汽向北输送，配合中亚上空的异常气旋（反气旋），有利（不利）于水汽进入新疆地区，对应塔里木盆地夏季降水偏多（少）。同时发现塔里木盆地夏季降水与中亚对流层中高层的温度异常（MUTTI）表现为显著的负相关关系，同时 MUTTI 与高原潜热和印度洋海温的负相关关系显著，夏季高原潜热偏强（弱）时，高原季风偏强（弱），印度洋海温偏暖（冷），南亚季风偏弱（强），在二者共同作用下中亚对流层关键区中高层温度偏低（高），其通过影响 200 hPa 纬向风、500 hPa 环流和整层水汽输送进一步影响塔里木盆地夏季降水。

关键词　热力异常　协同影响　青藏高原　热带印度洋　塔里木盆地夏季降水

文章编号　1006-9585(2021)03-0275-14　　**中图分类号**　P461^{+}.2　　**文献标识码**　A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2021.20092

Influences of Summer Thermal Anomalies over the Tibetan Plateau and the Tropical Indian Ocean on Summer Rainfall in the Tarim Basin

WANG Tianzhu and ZHAO Yong

School of Atmospheric Sciences, *Chengdu University of Information Technology*, *Chengdu* 610225

Abstract　Based on the reanalysis data of the global atmospheric numerical forecast (ECMWF) from 1979 to 2017, the latent heat data and reanalysis data of atmospheric circulation provided by the ERA-interim, the global monthly sea surface temperature grid data provided by the Hadley Center, and the monthly precipitation data of 26 stations in the Tarim Basin provided by the Xinjiang Meteorological Information Center, the influence of the Tibetan Plateau and tropical Indian Ocean thermal anomalies on the summer precipitation in the Tarim Basin is studied. Results show that when the latent heat in the north of the plateau is strong (weak), and the sea surface temperature in the tropical Indian Ocean is warm (cold), the 200-hPa zonal wind shows the characteristics of "north negative (positive) south positive

收稿日期　2020-07-24；**网络预出版日期**　2021-01-15

作者简介　王天竺，男，1997 年出生，硕士研究生，主要从事区域气候变化研究。E-mail: 602074244@qq.com

通讯作者　赵勇，E-mail: zhaoy608@cuit.edu.cn

资助项目　国家自然科学基金项目 41875102，四川省科技计划项目 2020JDJQ0050

Funded by　National Nature Science Foundation of China (Grant 41875102), Sichuan Science and Technology Plan Project (Grant 2020JDJQ0050)

(negative)". In addition, there are abnormal cyclones (anticyclones) and abnormal anticyclones (cyclones) over Central Asia and Baikal Lake, respectively. Under the joint action of the two, the south (north) wind prevails over the Tarim Basin and over the Indian peninsula. The anticyclone (anticyclone) is advantageous (disadvantageous) to transport the water vapor in a low latitude toward the north, and it is advantageous (disadvantageous) to enter the Xinjiang area in combination with the abnormal cyclone (anticyclone) over Central Asia, corresponding to more (less) summer precipitation in the Tarim Basin. At the same time, the summer precipitation in the Tarim Basin is found to be closely related to the temperature anomaly in the middle and upper troposphere of Central Asia, while a significant negative correlation between the middle-upper troposphere temperature index (MUTTI) and the latent heat of the plateau and the sea temperature of the Indian Ocean is observed. In summer, when the latent heat of the plateau is strong, the monsoon of the plateau is strong. Meanwhile, if the sea temperature of the Indian Ocean is strong, the monsoon of South Asia is weak, resulting in the low temperature of the middle and upper troposphere of Central Asia.. The summer precipitation in the Tarim Basin is further influenced by the zonal wind of 200 hPa, the circulation of 500 hPa, and the water vapor transportation in the whole layer.

Keywords Thermal anomalies, Concurrent effects, Tibetan Plateau, Indian Ocean, Summer rainfall in Tarim Basin

1 引言

青藏高原和热带印度洋加热对区域和全球的大气环流存在重要影响，国内外气象学者开展了大量关于二者热力异常对我国夏季降水影响的研究工作（李崇银和穆明权, 2001; 晏红明等, 2001;赵平和陈隆勋, 2001; 肖子牛等, 2002; 柏晶瑜等, 2003; 段安民等, 2003; 杨辉和李崇银, 2005; Liu et al., 2012）。青藏高原春季非绝热加热的迅速增强是由地表感热增强引起的（Wu et al., 2007），而春末高原地表感热与亚洲夏季风各子系统的爆发密切相关（Yanai et al., 1992; 张永生和吴国雄, 1998; 张艳和钱永甫, 2002）。前期青藏高原主体感热加热偏强时，有利于 7 月东亚季风区降水偏多（赵平和陈隆勋, 2001; 段安民等, 2003）。到了 7 月，即季风爆发，雨季来临之后，与积雪、降水密切相关的潜热通量迅速增大，高原东部大气热源来源主要为潜热（Yanai, 1992; Ueda et al., 2003），高原潜热加热加强会引起青藏高压、西太平洋副热带高压、亚洲季风以及欧亚中高纬度地区环流的变化（赵声蓉等, 2003），进一步影响我国区域降水。7 月高原东部潜热偏强时，我国长江流域汛期降水偏多，西北地区东部降水偏少（李栋梁等, 2008）。另一方面，热带海温等下垫面因子的异常变化对大范围天气和气候变化有着重要影响，其中以热带海表温度的异常强迫对气候异常的影响尤为显著（Keshavamurty, 1982; Wallace and Blackmon, 1983; 肖子牛和李崇银, 1992; 刘娜等, 2012）。热带印度洋前期海温与梅雨期长江中下游的降水的相关很好（罗绍华等, 1985）。春季印度洋海温异常呈偶极子分布时，与我国夏季降水联系紧密（肖子牛等, 2002）。青藏高原和热带印度洋热力异常对西北干旱区夏季降水同样存在重要影响。5 月青藏高原整体感热偏弱，其西北部感热偏强时，新疆北部降水偏多（赵勇等, 2013）。7 月高原潜热表现为北高南低时，南疆地区夏季降水偏多（杨莲梅和张庆云, 2007）。春季赤道印度洋海温异常偏暖时，南亚高压偏强呈西部型，同时来自印度洋的西南季风水汽输送减弱，因此西北干旱区东部极端降水事件偏少（张雪梅等, 2009）。前年秋季印度洋海温偏暖，对应次年夏季西北干旱区降水偏少（杨金虎等, 2007）。印度洋增暖可以导致低层偏南气流的异常增强，增加印度洋水汽的向北输送，利于新疆夏季大降水的发生（杨莲梅和张庆云, 2007; Zhao et al., 2015; Zhou et al., 2015）。

上述研究表明，青藏高原和热带印度洋热力作用对中国气候可能产生不同的影响，且均与新疆夏季降水联系密切。已有研究从环流系统协同变化和海温协同变化等角度，讨论了对我国气候的影响（杨辉和李崇银, 2005; Xiao et al., 2016）。最近也有研究关注了青藏高原和热带印度洋热力强迫对东亚季风区降水的协同影响，取得了新的认识（Wu et al., 2012; Hu and Duan, 2015），但是高原和热带印度洋加热对新疆干旱区夏季降水的协同影响尚不清楚。本研究将两个区域加热一并考虑，进一步加深对新疆干旱区夏季降水异常机制的理解。

2　资料与方法

由于青藏高原气象观测站点较少且空间分布不均匀，许多学者应用再分析资料对高原的热力状况进行研究。对于再分析资料在高原地区的适用性，已有大量研究（周连童, 2009; 竺夏英等, 2012; 李瑞青等, 2012; 何冬燕等, 2013; 张浩鑫等, 2017）。欧洲中期天气预报中心 ECMWF 的高原感热、潜热以及高原地表温度资料均与高原站点观测资料的一致性较好，可以更好的表征高原的真实热力状况。因此本文所用的地表潜热资料以及各等压面 u、v 风场、温度场、相对湿度场和地表气压场资料来自于 ECMWF 提供的全球大气数值预报再分析资料 ERA-Interim（European Re-Analysis Interim data）（Simmons et al., 2007; Berrisford et al., 2011），分辨率为 1°（纬度）×1°（经度）。海表温度资料来自英国 Hadley 气候预测和研究中心提供的全球逐月海表温度格点资料（Rayner et al., 2003），分辨率为 1°（纬度）×1°（经度）。塔里木盆地 26 站（图 1）逐月降水资料由新疆气象信息中心提供，为了便于计算，本文采用双线性插值方法将降水站点资料水平插值为 1°（纬度）×1°（经度）。本文的夏季指 7～8 月的气候平均态，分析时段为 1979～2017 年。

3　结果分析

3.1　夏季青藏高原潜热和印度洋海温与塔里木盆地夏季降水的奇异值分解分析

为了揭示夏季高原潜热和印度洋海温与塔里木盆地夏季降水的关系，进行二者与塔里木盆地夏季降水的奇异值分解（SVD）分析。青藏高原（25°N～40°N，70°E～105°E）夏季标准化的地表潜热场为左场，塔里木盆地夏季降水的标准化场为右场。为更好地揭示高原夏季地表潜热对降水的控制作用，左场采用同性相关系数，右场采用异性相关系数。由于第 1 模态协方差贡献已达 54%，远高于其他模态，本研究主要讨论第一模态的空间分布型。从图 2a 可见，青藏高原北部为显著地正相关区。由图 2b 可见，右场的空间分布型为正相关，结合时间系数（图略），表明夏季高原北部潜热和塔里木盆地夏季降水呈正相关关系，表明当高原夏季地表潜热出现北强南弱的模态时，塔里木盆地夏季降水偏多，塔里木盆地西部尤为显著。夏季印度洋海温与塔里木盆地夏季降水的关系类似，由于第一模态的协方差贡献已达 68%，远高于其他模态，因此主要讨论第一模态的空间分布型。从图 2c 可见，印度洋主体为正相关区，赤道印度洋为大值区，中心值可达 0.60。由图 2d 可见，右场的空间

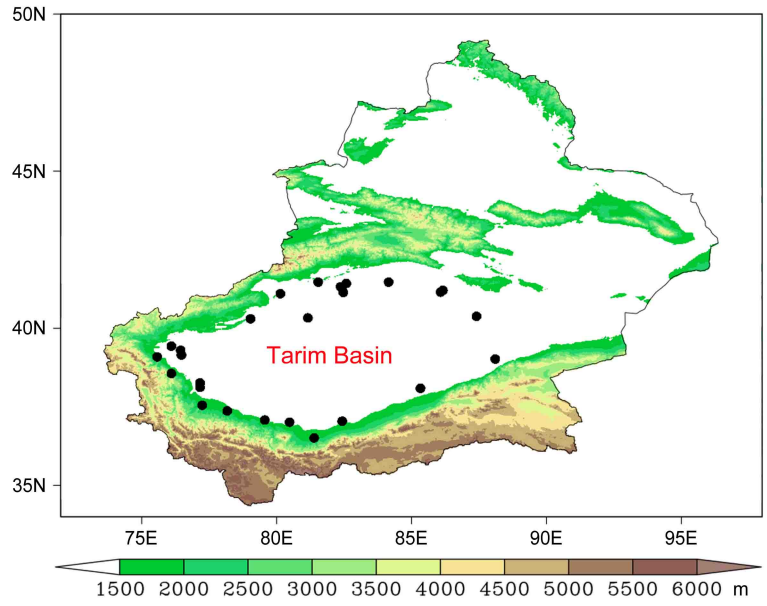

图 1　塔里木盆地 26 个气象观测站的空间分布（填色区为海拔高度，单位：m；黑色圆点为气象站点）

Fig. 1　Locations of meteorological observation stations over the Tarim Basin. Shaded areas indicate terrain height, units: m. Black dots indicate the observation stations over the Xinjiang Province

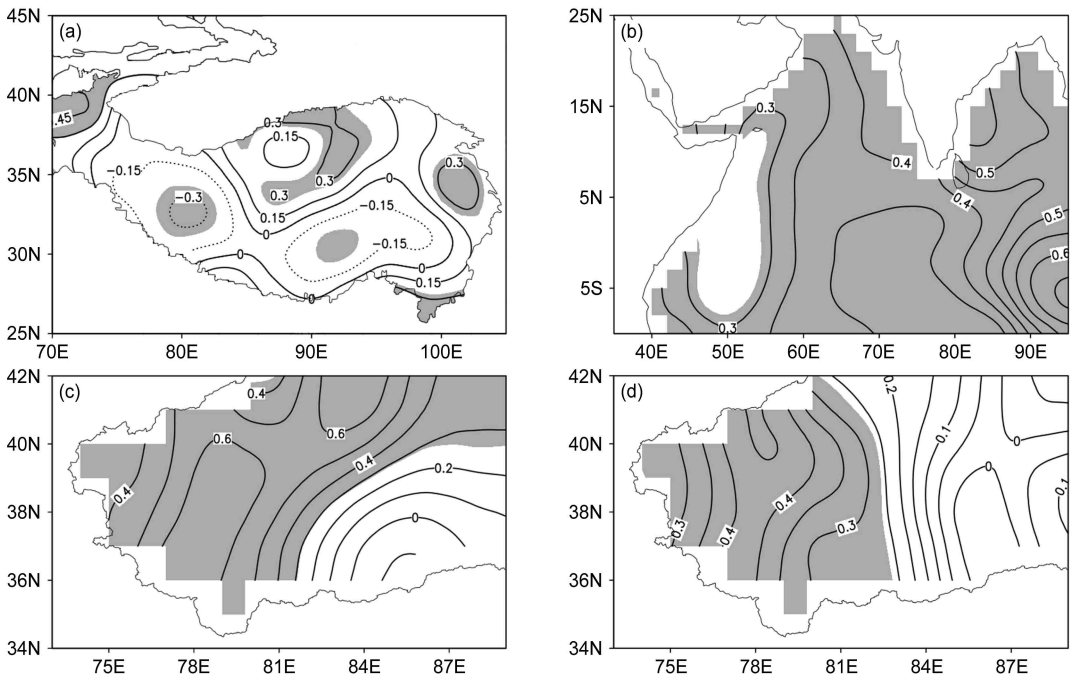

图2 1979～2017年夏季（a）青藏高原地表潜热与（c）塔里木盆地夏季降水量奇异值分解的第一模态分布和（b）印度洋海表温度与（d）塔里木盆地夏季降水量奇异值分解的第一模态分布（阴影部分通过95%信度检验）

Fig. 2 The first mode in the SVD (Singular Value Decomposition) expansion for the correlations between (a) the latent heat in the Tibetan Plateau and (c) the summer time precipitation in Tarim Basin and between (b) the temperature in Indian Ocean and (d) the summer time precipitation in Tarim Basin during 1979–2017. The shaded represent that it is significant at the 95% confidence level

分布型同样为正相关，相关高值区主要位于塔里木盆地西部。结合时间系数（图略），表明夏季印度洋海温与塔里木盆地夏季降水呈正相关关系，即当夏季海温偏强时，塔里木盆地夏季降水偏多。由上述分析可见，青藏高原和热带印度洋热力异常，均与塔里木盆地夏季降水联系紧密。

由SVD分析可见，高原潜热相关的大值区位于高原北部（34°N为界），印度洋海温为一致正相关。因此，本文分别取（34°N～38°N，85°E～100°E）和（5°S～15°N，60°E～90°E）区域作为青藏高原和印度洋加热关键区。

定义高原热力指数TPTI（Tibetan Plateau Thermal Index，I_{TPT}）和印度洋热力指数IOTI（Indian Ocean Thermal Index，I_{OTI}）为

$$I_{\mathrm{TPT}} = \mathrm{Nor}\left(H_{\mathrm{S_{TP}}}\right), \quad (1)$$

$$I_{\mathrm{IOT}} = \mathrm{Nor}\left(H_{\mathrm{S_{IO}}}\right), \quad (2)$$

其中，$H_{\mathrm{S_{TP}}}$和$H_{\mathrm{S_{IO}}}$分别为1979～2017年夏季青藏高原关键区（34°N～38°N，85°E～100°E）平均地表潜热距平和印度洋关键区（5°S～15°N，60°E～90°E）平均海温距平，Nor(x)表示对x进行标准化处理。

两个区域的加热如何协同影响塔里木盆地夏季降水呢?如表1所示，给出了青藏高原和热带印度洋4种加热情况：1）强TPTI和强IOTI年（TPTI>0.5且IOTI>0.5：1983年、1993年、1998年、2002年、2005年、2009年、2010年、2016年、2017年）；2）弱TPTI和弱IOTI年（TPTI<−0.5且IOTI<−0.5：1985年、1986年、1994年、1995年、1999年、2013年）；3）强TPTI和弱IOTI年（TPTI>0.5且IOTI<−0.5：1989年、2012年）；4）弱TPTI和强IOTI年（TPTI<−0.5且IOTI>0.5：1987年、1988年、2011年、2014年、2015年）。通过合成分析，将进一步揭示两个区域加热对塔里木盆地夏季降水的协同影响。

3.2 夏季青藏高原和印度洋热力异常对塔里木盆地夏季降水的协同影响

图3给出了1979～2017年共39年TPTI和IOTI与塔里木盆地西部（82°E以西）区域平均降水标准化距平指数（SPI）的时间序列与相关系数。二者与SPI相关性均较好，均通过了95%显著检

表 1　1979 ~ 2017 年 TPTI 和 IOTI 热力异常的 4 种情况

Table 1　Four configurations of thermal anomalous TPTI (Tibetan Plateau Thermal Index) and IOTI (Indian Ocean Thermal Index) years

	TPTI	IOTI	年份
强TPTI和强IOTI	>0.5	>0.5	1983年、1993年、1998年、2002年、2005年、2009年、2010年、2016年、2017年
弱TPTI和弱IOTI	<−0.5	<−0.5	1985年、1986年、1994年、1995年、1999年、2013年
强TPTI和弱IOTI	>0.5	<−0.5	1989年、2012年
弱TPTI和强IOTI	<−0.5	>0.5	1988年、2011年、2014年、2015年

验。那么二者的不同热力配置下，塔里木盆地降水将表现为怎样的特征?

图 4 给出了夏季高原潜热和印度洋海温 4 种异常情况下，塔里木盆地夏季降水的异常分布。由图 4a 可见，在强 TPTI 和强 IOTI 年，塔里木盆地夏季降水表现出一致偏多的特征，盆地西部降水偏多尤为显著。在弱 TPTI 和弱 IOTI 年（图 4b），塔里木盆地夏季降水表现出一致偏少的特征。在强 TPTI 和弱 IOTI 年（图 4c），塔里木盆地夏季降水表现出“西多东少”的特征。在弱 TPTI 和强 IOTI 年（图 4d），塔里木盆地夏季降水整体偏少。由此可见，高原和印度洋热力异常的不同组合，对塔里木盆地夏季降水产生了不同的影响。

降水离不开大气环流和水汽的配合，下面我们进一步给出高原潜热和印度洋海温对区域环流和水汽输送的影响。首先讨论二者加热对中亚副热带西风急流的影响。在强 TPTI 和强 IOTI 年（图 5a），200 hPa 纬向风表现为“北负南正”的特征，中亚副热带西风急流轴南侧西风显著偏强，北侧减弱，表明其急流轴位置偏南，对应塔里木盆地夏季降水偏多，这与已有研究一致（杨莲梅和张庆云, 2007; Zhao et al., 2014a, 2014b）。在弱 TPTI 和弱 IOTI 年（图 5b），200 hPa 纬向风表现为“北正南负”的异常特征，中亚副热带西风急流轴北侧西风显著偏强，南侧减弱，表明急流轴位置偏北，对应塔里木盆地夏季降水偏少（Zhao et al., 2014a, 2014b）。在强 TPTI 和弱 IOTI 年（图 5c），200 hPa 纬向风同样表现出“北负南正”的异常特征，但有所不同的是，急流强度较弱，急流轴偏东。在弱 TPTI 和强 IOTI 年（图 5d），200 hPa 纬向风表现出“正—负—正”的异常特征，急流强度偏弱。

图 6 给出了二者加热对应的夏季 500 hPa 风场的异常分布。由图 6a 可见，在强 TPTI 和强 IOTI 年，中亚和贝加尔湖上空分别为异常气旋和异常反气旋，在二者共同作用下，塔里木盆地上空盛行偏南风，有利于其夏季降水的发生。在弱 TPTI 和弱 IOTI 年（图 6b），中亚和蒙古地区上空分别受异常反气旋和异常气旋控制，在二者共同

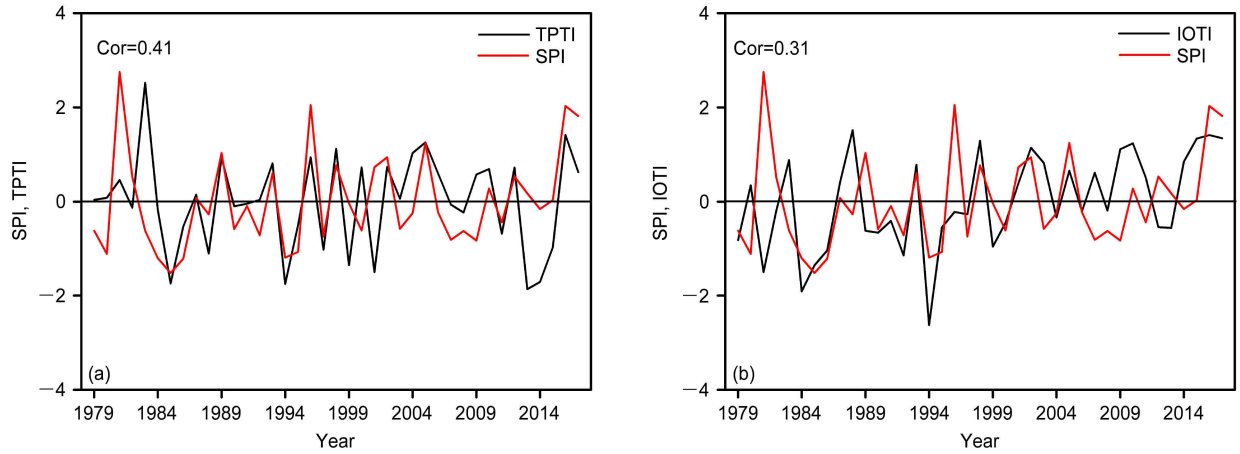

图 3　1979～2017 塔里木盆地西部地区（82°E 以西）夏季降水标准化距平指数（SPI）与（a）TPTI 及（b）IOTI 的时间序列（Cor 表示相关系数）

Fig. 3　Time series of (a) summer SPI (Standardized Precipitation Index) and TPTI, (b) SPI and IOTI in the western Tarim Basin (west of 82°E) from 1979 to 2017. Cor is the correlation coefficient

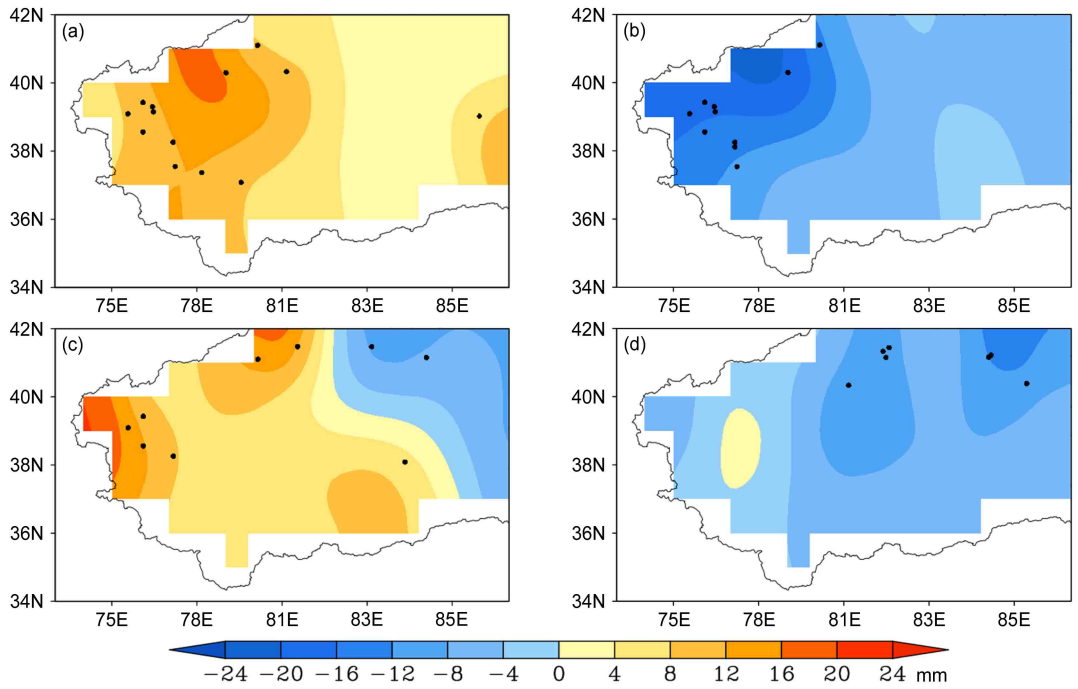

图 4 塔里木盆地夏季降水量异常的合成分布（填色区，单位：mm）：（a）强 TPTI 和强 IOTI 年（TPTI >0.5 且 IOTI>0.5）；（b）弱 TPTI 和弱 IOTI 年（TPTI<−0.5 且 IOTI<−0.5）；（c）强 TPTI 和弱 IOTI 年（TPTI>0.5 且 IOTI<−0.5）；（d）弱 TPTI 和强 IOTI 年（TPTI<−0.5 且 IOTI>0.5）。黑色圆点为通过 95% 信度检验站点

Fig. 4 Composite distributions of summer rainfall anomalies (shaded, units: mm) over the Tarim Basin in (a) strong TPTI and strong IOTI years [TPTI and IOTI greater than 0.5 SD (Standard Deviation)], (b) weak TPTI and weak IOTI years (TPTI and IOTI less than −0.5 SD), (c) strong TPTI and weak IOTI years (TPTI greater than 0.5 SD and IOTI less than −0.5 SD), and (d) weak TPTI and strong IOTI years (TPTI less than −0.5 SD and IOTI greater than 0.5 SD). Stations exceeding 95% significant confidence are dotted

作用下，新疆上空盛行偏北风，同时，塔里木盆地上空受异常反气旋控制，不利于其夏季降水。在强 TPTI 和弱 IOTI 年（图 6c），受中亚高纬异常反气旋和伊朗高原东部异常气旋共同影响，在塔里木盆地西部地区上空存在气旋式切变，有利于其夏季降水的偏多。在弱 TPTI 和强 IOTI 年（图 6d），受我国东部异常气旋和青藏高原西部的异常反气旋共同影响，塔里木盆地地区上空受偏北风控制，不利于南方的暖湿空气到达，夏季降水偏少。

除了环流动力条件，水汽条件也是新疆夏季降水不可或缺的。图 7 给出了二者加热异常对应的夏季水汽通量的异常分布。在强 TPTI 和强 IOTI 年（图 7a），印度半岛上空为异常反气旋，有利于将低纬度水汽向北输送，配合中亚上空的异常气旋，进一步输送到新疆地区，这是一个两步输送过程（Zhao et al., 2014a）。由于塔里木盆地地处中高纬地区，夏季干冷空气较多，如有暖湿气流北上，则有利于夏季降水的发生，这与江淮流域夏季降水恰好相反（段安民等, 2003）。在弱 TPTI 和弱 IOTI 年（图 7b），中亚高纬地区受异常气旋控制，印度半岛上空为气旋性切变，不利于热带海洋水汽向北输送，同时配合不利的环流动力条件，塔里木盆地夏季降水偏少。在强 TPTI 和弱 IOTI 年（图 7c），青藏高原西部为异常气旋环流控制，位置偏南，可以将阿拉伯海水汽向北输送，进入塔里木盆地西部上空。在弱 TPTI 和强 IOTI 年（图 7d），新疆地区水汽主要来自东方路径输送的太平洋水汽，但环流动力条件缺乏，因而塔里木盆地夏季降水偏少。

3.3 夏季青藏高原和印度洋热力异常对塔里木盆地夏季降水的可能影响机制

从 3.2 节的分析可知，青藏高原和热带印度洋热力异常的不同组合对塔里木盆地夏季降水可以产生不同影响。那么二者加热影响该区域夏季降水的可能机制是什么呢?已有研究表明，塔里木盆地夏季降水与中亚对流层中高层温度密切相关（Zhao et al., 2016），并且发现高原夏季风和南亚夏季风可以影响中亚对流层中高层温度（赵勇等, 2017）。图 8 给出了 TPTI 和 IOTI 分别与高原季风指数

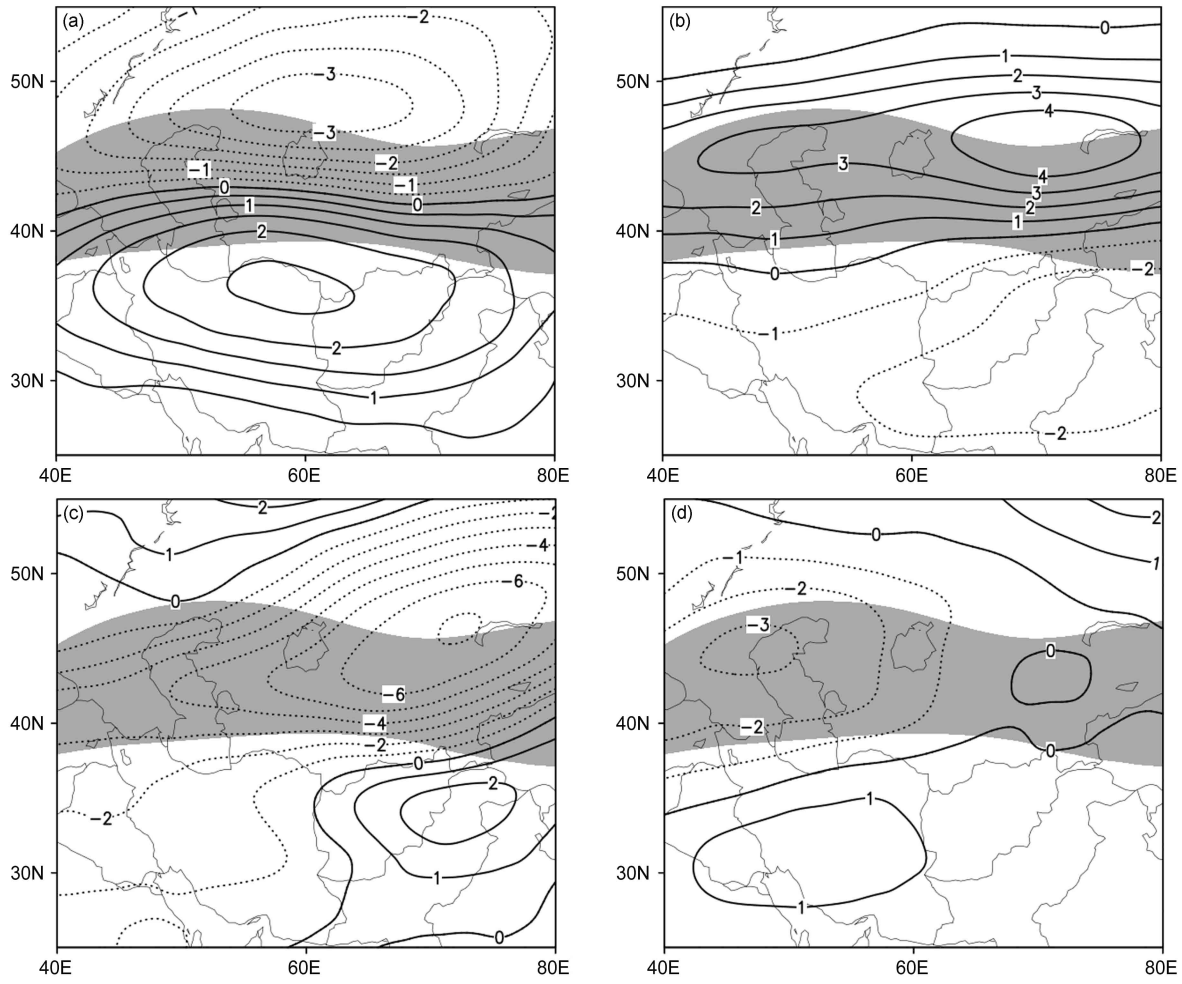

图 5　夏季 200 hPa 纬向风异常的合成分布（等值线，单位：m s^{-1}）：（a）强 TPTI 和强 IOTI 年；（b）弱 TPTI 和弱 IOTI 年；（c）强 TPTI 和弱 IOTI 年；（d）弱 TPTI 和强 IOTI 年。阴影部分为副热带西风急流的急流轴，风速大于 25 m s^{-1} 区域

Fig. 5　Composite distributions of summer zonal wind anomalies (contours, units: m s^{-1}) at 200 hPa in (a) strong TPTI and strong IOTI years, (b) weak TPTI and weak IOTI years, (c) strong TPTI and weak IOTI years, and (d) weak TPTI and strong IOTI years. The gray bandings denote the climatological axis of the subtropical westerly jet (where wind speeds are larger than 25 m s^{-1})

（PMI）和南亚季风指数（SAMI）的时间序列及相关系数。可以看出 TPTI 与 PMI 为显著正相关，IOTI 与 SAMI 表现为显著负相关，二者均通过 99% 信度检验。说明高原夏季潜热偏高时，高原季风偏强，这与岑思弦等研究一致（岑思弦等, 2014），而印度洋夏季海温偏高时，南亚季风偏弱。那么与之有密切联系的高原潜热加热和印度洋海表温度 SST（图 8）是否也与对流层中高层温度密切相关呢?如图 9 所示，可以看出 SPI 与中亚地区对流层中高层温度表现出显著负相关，高层对应异常气旋环流。图 9b 和图 9c 同样表现出相似的特征，其均与中亚地区对流层中层温度表现出显著负相关，但有所不同的是，IOTI 与印度洋对流层中高层温度的相关性极好。由上述分析，定义中亚对流层中高层温度指数 MUTTI（Middle-Upper Troposphere Temperature Index，I_{MUTT}）为

$$I_{\mathrm{MUTT}} = \mathrm{Nor}\left(H_{\mathrm{S_{CA}}}\right), \qquad (3)$$

其中，$H_{\mathrm{S_{CA}}}$为 1979～2017 年的夏季中亚对流层中高层（500～200 hPa）区域平均（35°N～45°N，60°E～80°E）空气温度距平（Zhao et al., 2014b）。

图 10 给出了二者加热对应的夏季 200 hPa 风场和高空温度场的异常分布，可以发现塔里木盆地夏季降水与中亚对流层中高层的温度异常联系密切。由图 10a 可见，在强 TPTI 和强 IOTP 年，除中亚上空对流层中层异常偏冷外，其余地区对流层中层均异常偏暖，200 hPa 风场在青藏高原西侧上空表现为异常气旋环流。在弱 TPTI 和弱 IOTI 年（图 10b），中亚中纬地区对流层中高层温度异常偏高，200

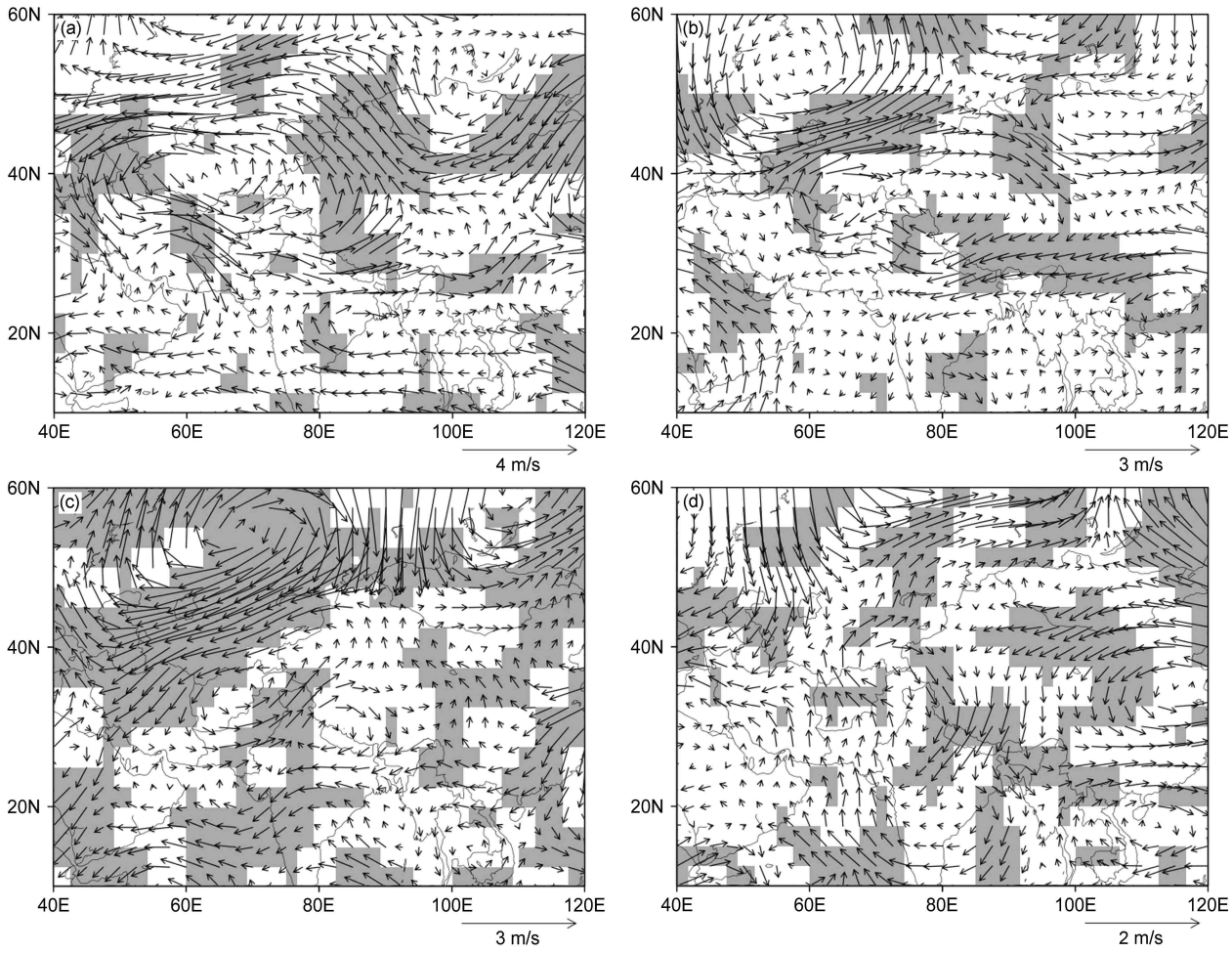

图 6 夏季 500 hPa 风场异常的合成分布（矢量，单位：m s^{-1}）：（a）强 TPTI 和强 IOTI 年；（b）弱 TPTI 和弱 IOTI 年；（c）强 TPTI 和弱 IOTI 年；（d）弱 TPTI 和强 IOTI 年。阴影部分通过 95% 信度检验

Fig. 6 Composite distributions of summer wind anomalies (vectors, units: m s^{-1}) at 500 hPa in (a) strong TPTI and strengthened IOTI years, (b) weak TPTI and weak IOTI years, (c) strong TPTI and weak IOTI years, and (d) weak TPTI and strong IOTI years. Shaded areas represent that it is significant at the 95% confidence level

hPa 风场在青藏高原西侧上空表现为异常反气旋环流。在强 TPTI 和弱 IOTI 年（图 10c），中亚中高纬对流层中高层温度异常偏高，高层对应反气旋式环流，贝加尔湖和高原西部地区对流层中高层温度异常偏低。在弱 TPTI 和强 IOTI 年（图 10d），伊朗高原和我国华北地区对流层中高层温度异常偏低，塔里木盆地夏季降水偏少。

图 11 给出了 MUTTI 分别与 SPI、TPTI 和 IOTI 的时间序列及相关系数，可以看出 MUTTI 与三者均为显著的负相关，和 IOTI 相关性最好，说明 MUTTI 受印度洋热力异常影响更为明显。二者均对中亚地区对流层中高层温度偏低具有重要影响，进一步影响塔里木盆地地区降水偏多。青藏高原夏季风在中亚对流层中层温度变化中起到重要作用，高原季风偏强，高原及新疆地区上空受异常气旋性环流控制，其西部的偏北风引导高纬地区的冷空气南下，进入中亚，导致该区域温度异常偏低，这与影响塔里木盆地降水的异常环流联系密切。南亚对流层中层温度整体异常偏高则与热带印度洋的偏暖关系密切，这在印度洋水汽输送过程中扮演了重要角色。二者共同导致了中亚和南亚对流层中层的偏冷和偏暖，形成了经向热力差异，通过影响环流和水汽输送，对塔里木盆地夏季降水产生影响，这与赵勇等的研究一致（赵勇等, 2017）。

4 结论和讨论

已有研究表明，新疆夏季降水受西风带上环流系统控制，如中亚副热带西风急流，中亚槽（涡）等（杨莲梅和张庆云, 2007），印度洋海温对低纬

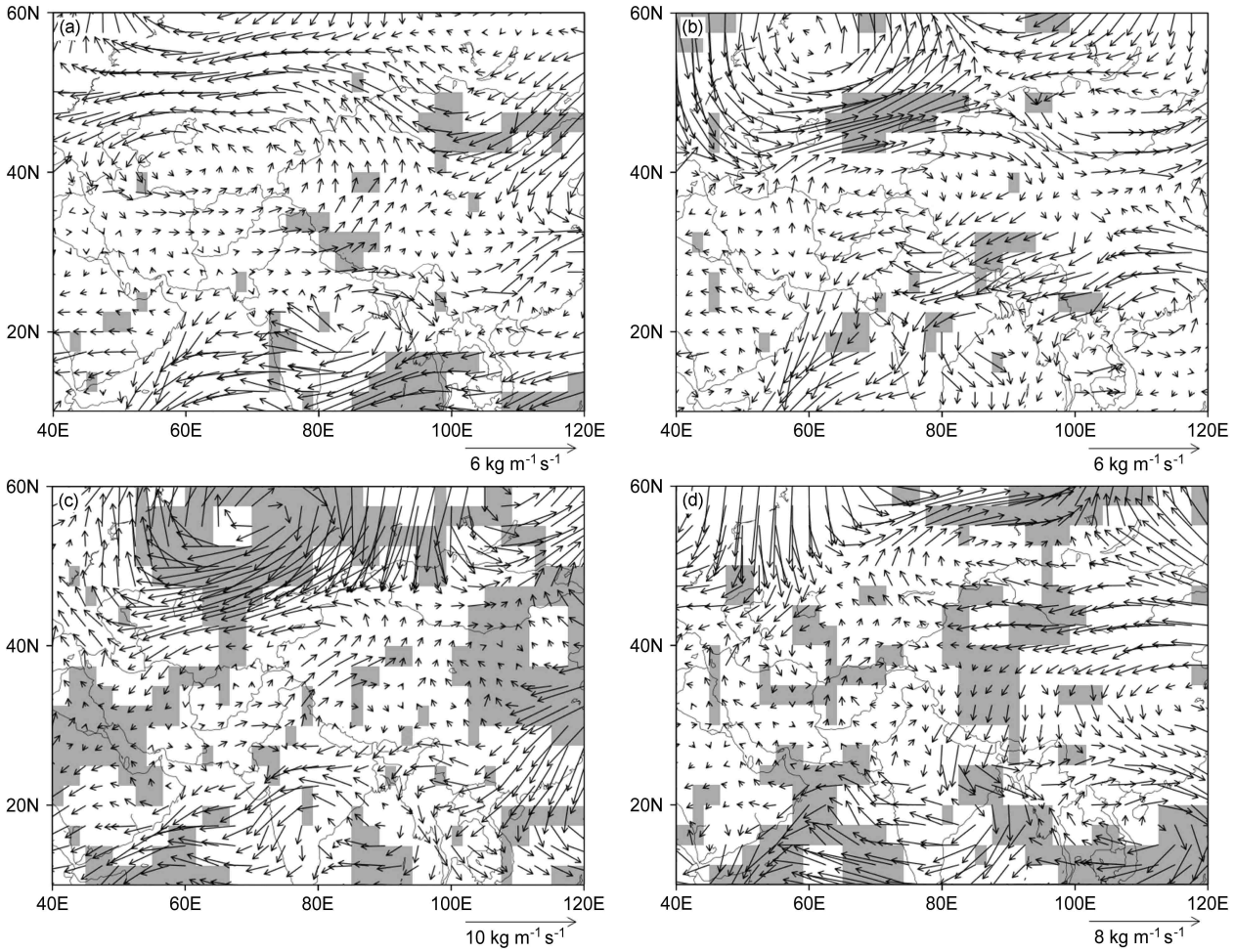

图 7　夏季水汽通量（从地表积分至 300 hPa）异常的合成分布（矢量，单位：kg m^{-1} s^{-1}）：（a）强 TPTI 和强 IOTI 年；（b）弱 TPTI 和弱 IOTI 年；（c）强 TPTI 和弱 IOTI 年；（d）弱 TPTI 和强 IOTI 年。阴影部分通过 95% 信度检验

Fig. 7　Composite distributions of summer water vapor flux anomalies (vectors, units: kg m^{-1} s^{-1}) that are vertically integrated from the surface to 300 hPa in (a) strong TPTI and strong IOTI years, (b) weak TPTI and weak IOTI years, (c) strong TPTI and weak IOTI years, and (d) weak TPTI and strong IOTI years. Shaded areas represent that it is significant at the 95% confidence level

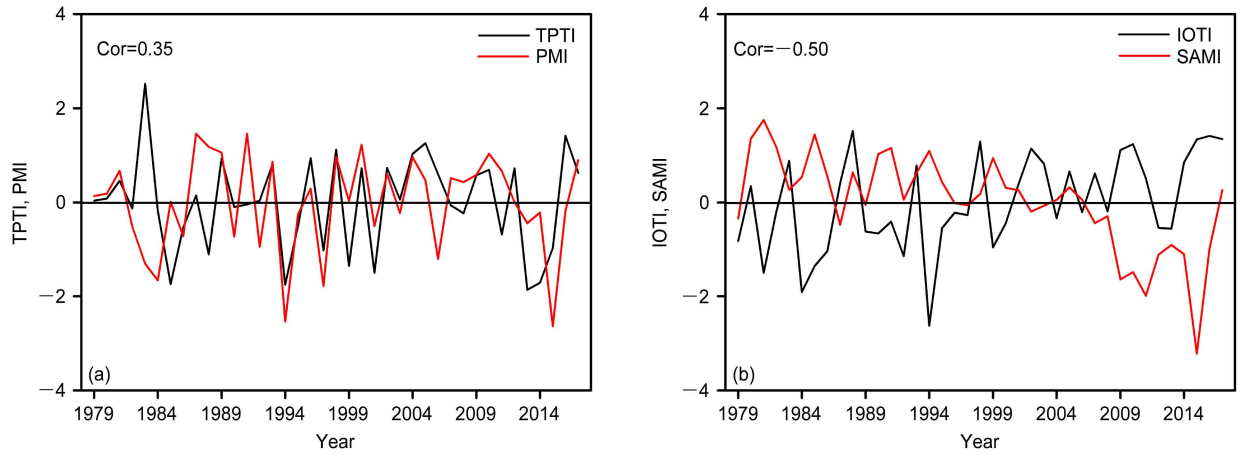

图 8　1979～2017 年（a）高原热力指数（TPTI）与高原夏季风指数（PMI）和（b）印度洋热力指数（IOTI）与南亚夏季风指数（SAMI）的时间序列（Cor 表示相关系数）

Fig. 8　Time series of (a) TPTI and PMI (Plateau Monsoon Index), (b) IOTI and SAMI from 1979 to 2017. Cor is the correlation coefficient

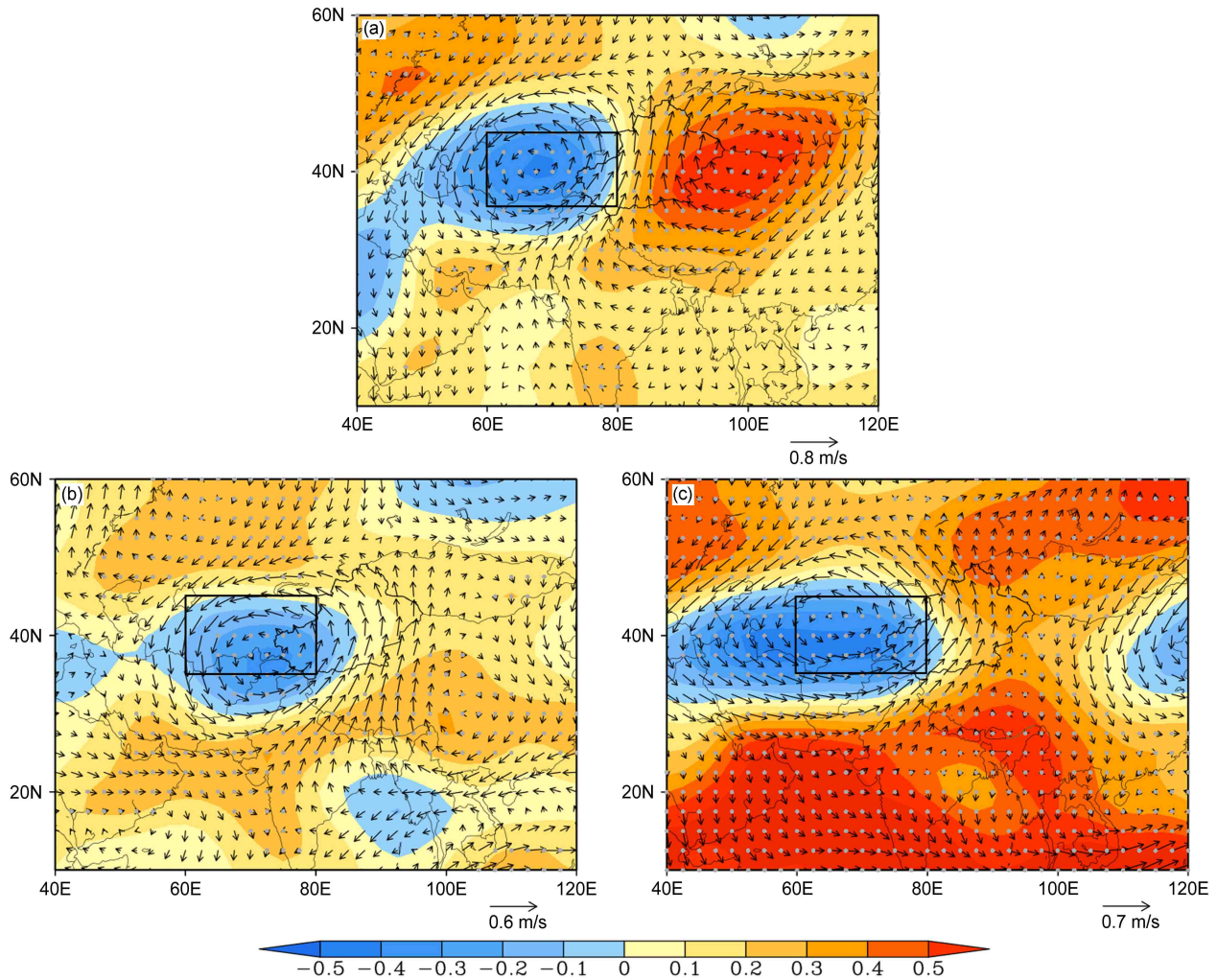

图 9 （a）塔里木盆地西部夏季降水、（b）高原热力指数和（c）印度洋热力指数分别与夏季 200 hPa 风场（矢量）以及 500～200 hPa 平均温度场（填色）的相关系数分布特征。黑色矩形为 MUTTI 关键区，灰色打点部分通过 95% 信度检验

Fig. 9 Distribution of correlation coefficient of (a) summer precipitation, (b) PMI, and (c) IOTI in the western Tarim Basin with 200-hPa wind field (vector) and 500–200-hpa average temperature field in summer. Gray dots represent that it is significant at the 95% confidence level

度水汽向北输送的动力条件影响明显（Zhao et al., 2014a; Zhao and Zhang, 2015），青藏高原热力异常对影响新疆夏季降水的大尺度环流和水汽输送均存在重要影响（赵勇等, 2013）。SVD 分析发现夏季高原北部潜热偏强（弱）时，塔里木盆地夏季降水偏多（少），大值区位于塔里木盆地西南部地区。夏季印度洋海温与塔里木盆地夏季降水表现为显著正相关，即夏季印度洋海温偏暖（低）时，塔里木盆地夏季降水一致偏多（少），以盆地西部地区尤为显著。

合成分析发现夏季高原北部潜热偏强（弱）和热带印度洋海温偏暖（冷）时，200 hPa 纬向风表现为“北负（正）南正（负）”的特征，中亚和贝加尔湖上空分别为异常气旋（反气旋）和异常反气旋（气旋），在二者共同作用下，塔里木盆地上空盛行偏南（北）风，印度半岛上空为异常反气旋（气旋），有利（不利）于将低纬度水汽向北输送，配合中亚上空的异常气旋（反气旋），有利（不利）于水汽进入新疆地区，对应中亚关键区对流层中高层温度偏低（高），塔里木盆地夏季降水偏多（少）。高原北部潜热偏强，热带印度洋海温偏冷时，200 hPa 纬向风表现为“北负南正”的异常特征，急流强度较弱，急流轴偏东，塔里木盆地西部地区上空存在气旋式切变，同时青藏高原西部为异常气旋环流控制，位置偏南，可以将阿拉伯海水汽向北输送，进入塔里木盆地西部上空，有利于其夏季降水。高原北部潜热偏弱，热带印度洋海温偏暖时，200 hPa 纬向风表现出“正—负—正”的异常

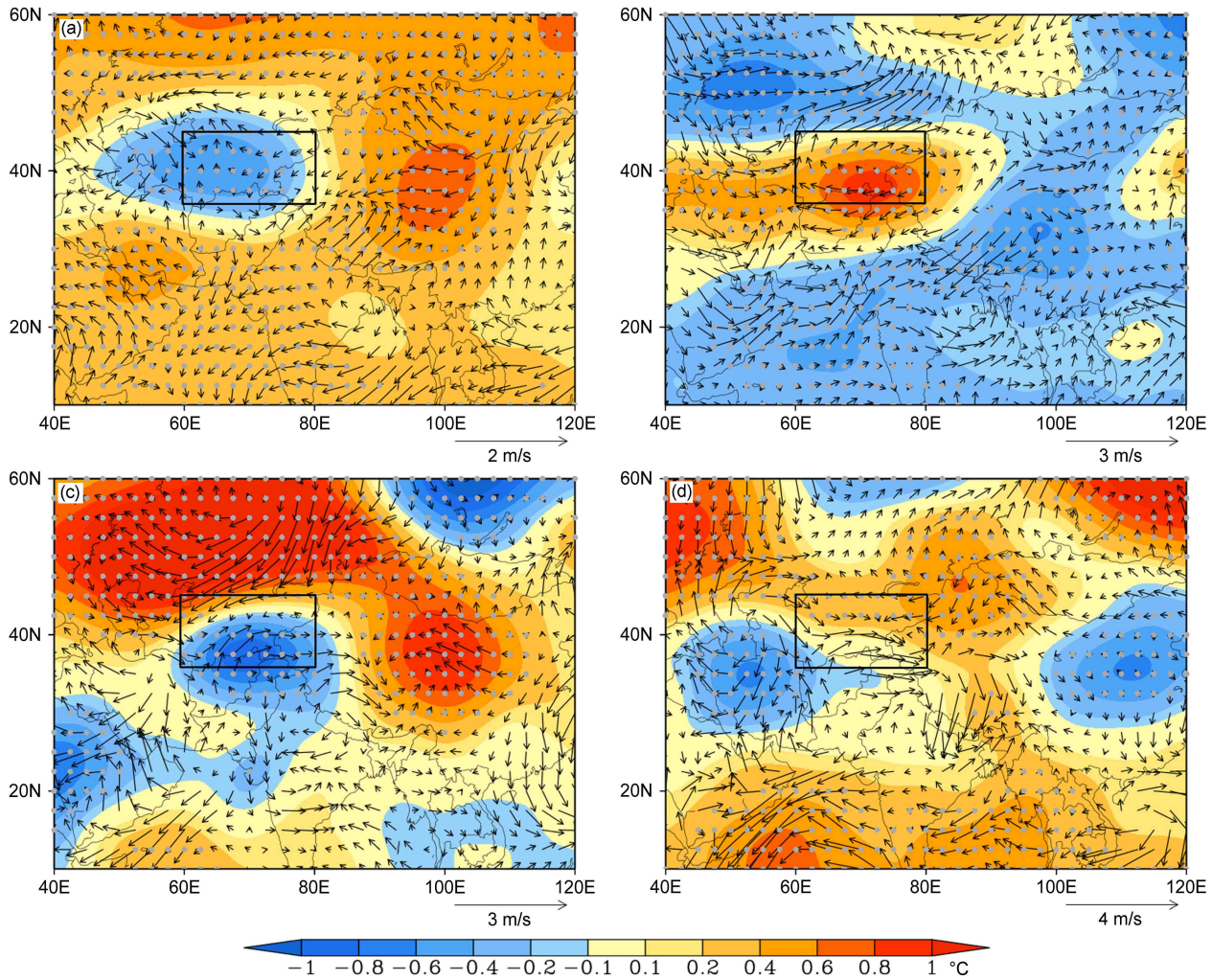

图 10　夏季 200 hPa 风场（矢量，单位：m s^{-1}）和 500～200 hPa 平均温度场（填色，单位：℃）异常的合成分布：（a）强 TPTI 和强 IOTI 年；（b）弱 TPTI 和弱 IOTI 年；（c）强 TPTI 和弱 IOTI 年；（d）弱 TPTI 和强 IOTI 年。黑色矩形为 MUTTI 关键区，阴影部分通过 95% 信度检验

Fig. 10　Composite distributions of summer wind anomalies (vectors, units: m s^{-1}) at 200 hPa and 500–200 hPa average temperature field (shaded, units: °C) in (a) strong TPTI and strong IOTI years, (b) weak TPTI and weak IOTI years, (c) strong TPTI and weak IOTI years, and (d) weak TPTI and strong IOTI years. Gray dots represent that it is significant at the 95% confidence level

特征，急流强度偏弱，受我国东部异常气旋和青藏高原西部的异常反气旋共同影响，塔里木盆地地区上空受偏北风控制，同时新疆地区水汽主要来自东方路径输送的部分太平洋水汽，但是环流动力条件缺乏，因而塔里木盆地夏季降水偏少。此外，MUTTI 与 SPI、TPTI 和 IOTI 均表现为显著负相关，同时 TPTI 与 PMI 表现为显著正相关，IOTI 与 SAMI 表现为显著负相关，说明夏季高原北部潜热偏强（弱）时，高原季风偏强（弱），导致中亚对流层中高层温度偏低（高），塔里木盆地夏季降水偏多（少）。而夏季印度洋海温偏暖（冷）时，南亚季风偏弱（强），在二者共同作用下，中亚对流层中高层温度偏低（高），塔里木盆地夏季降水偏多（少）。

本文讨论了夏季高原和印度洋热力异常对塔里木盆地夏季降水的协同影响，发现中亚地区对流层中高层的温度异常影响 200 hPa 纬向风、500 hPa 环流和整层水汽输送进一步影响塔里木盆地夏季降水。并且发现影响中亚地区对流层中高层温度的关键为高原夏季风和南亚夏季风作用，而高原夏季风和南亚夏季风与高原地表潜热和热带印度洋海温关系密切。但本文并未讨论高原夏季风和南亚夏季风的变化机制，并且高原夏季风对高原感热和潜热加热的响应又有所不同（李菲和段安民, 2011），南

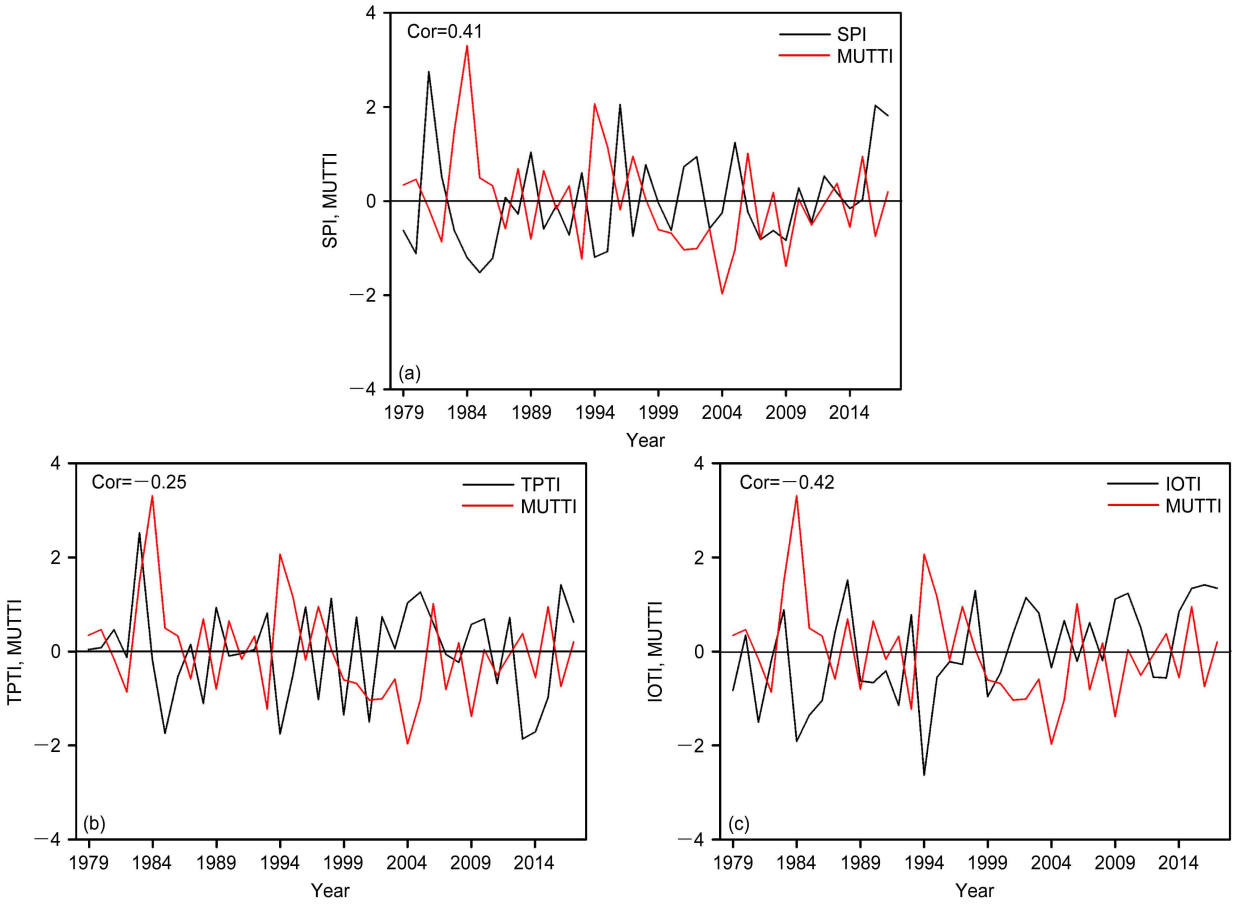

图 11 1979～2017 年（a）塔里木盆地西部夏季 SPI、（b）TPTI 和（c）IOTI 与中亚对流层 500～200 hPa 平均温度指数（MUTTI）的时间序列（Cor 表示相关系数）

Fig. 11 Time series of MUTTI (Middle-Upper Troposohere Temperature Index) and (a) SPI, (b) TPTI, and (c) IOTI from 1979 to 2017. Cor is the correlation coefficient

亚夏季风除受海陆热力差异影响外，地形强迫和高原加热作用同样是影响南亚夏季风的主要因子（Yanai et al., 1992; 吴国雄和张永生, 1998, 1999）。所以下面将借助数值试验，进一步加深高原和印度洋热力作用对高原夏季风及南亚夏季风影响的研究，进而进一步揭示其对塔里木盆地夏季降水的影响。此外，本文仅探讨了高原夏季潜热和印度洋海温与中亚对流层中高层温度的初步影响机制，但是具体地影响机制并未讨论，同样需要在未来的研究中进一步探讨。

参考文献（References）

柏晶瑜, 徐祥德, 周玉淑, 等. 2003. 春季青藏高原感热异常对长江中下游夏季降水影响的初步研究 [J]. 应用气象学报, 14(3): 363−368. Bai Jingyu, Xu Xiangde, Zhou Yushu, et al. 2003. Preliminary research on inhomogeneous distribution of Tibetan Plateau sensible heat fluxes in spring [J]. Journal of the Meteorological Sciences (in Chinese), 14(3): 363−368. doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2003.03.012

Berrisford P, Dee D P, Poli P, et al. 2011. The ERA-Interim archive: Version 2.0 [J]. Nihon Seirigaku Zasshi Journal of the Physiological Society of Japan, 31(10).

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. Cen 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), 33(10): 997−1004. Duan Anmin, Liu Yimin, Wu Guoxiong. 2003. 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, 33(10): 997−1004. doi:10.3321/j.issn:1006-9267.2003.10.011

何冬燕, 田红, 邓伟涛. 2013. 三种再分析地表温度资料在青藏高原区域的适用性分析 [J]. 大气科学学报, 36(4): 458−465. He Dongyan, Tian Hong, Deng Weitao. 2013. Applicability analysis of

three reanalysis surface temperature data over the Tibetan Plateau [J]. Trans. Atmos. Sci. (in Chinese), 36(4): 458−465. doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2013.04.008

Hu J, Duan A M. 2015. Relative contributions of the Tibetan Plateau thermal forcing and the Indian Ocean sea surface temperature basin mode to the interannual variability of the East Asian summer monsoon [J]. Climate Dyn., 45(9-10): 2697−2711. doi:10.1007/s00382-015-2503-7

Keshavamurty R N. 1982. Response of the atmosphere to sea surface temperature anomalies over the equatorial Pacific and the teleconnections of the Southern Oscillation [J]. J. Atmos. Sci., 39(6): 1241−1259. doi:10.1175/1520-0469(1982)039<1241:ROTATS>2.0.CO;2

李崇银, 穆明权. 2001. 赤道印度洋海温偶极子型振荡及其气候影响 [J]. 大气科学, 25(4): 433−443. Li Chongyin, Mu Mingquan. 2001. The dipole in the equatorial Indian Ocean and its impacts on climate [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 25(4): 433−443. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2001.04.01

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 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

李栋梁, 柳苗, 王慧. 2008. 高原东部凝结潜热及其对北半球 500 hPa 高度场和我国汛期降水的影响 [J]. 高原气象, 27(4): 713−718. Li Dongliang, Liu Miao, Wang Hui. 2008. Latent heat series over the east part of QXP in rainy season and its impact on 500 hPa height fields of northern hemisphere and precipitation in China flood season [J]. Plateau Meteor. (in Chinese), 27(4): 713−718.

李瑞青, 吕世华, 韩博, 等. 2012. 青藏高原东部三种再分析资料与地面气温观测资料的对比分析 [J]. 高原气象, 31(6): 1488−1502. Li Ruiqing, Lü Shihua, Han Bo, et al. 2012. Preliminary comparison and analyses of air temperature at 2-m height between three reanalysis data-sets and observation in the east of Qinghai−Xiang Plateau [J]. Plateau Meteor. (in Chinese), 31(6): 1488−1502.

Liu Y M, Wu G X, Hong J L, et al. 2012. Revisiting Asian monsoon formation and change associated with Tibetan Plateau forcing: II. Change [J]. Climate Dyn., 39(5): 1183−1195. doi:10.1007/s00382-012-1335-y

刘娜, 王彰贵, 凌铁军, 等. 2012. 热带太平洋潜热通量变化及其与我国夏季降水的关系 [J]. 海洋预报, 29(6): 50−57. Liu Na, Wang Zhanggui, Ling Tiejun, et al. 2012. Variations of latent heat flux in the equatorial Pacific and its relation to the anomalous summer rainfall patterns in China [J]. Marine Forecasts (in Chinese), 29(6): 50−57. doi:10.11737/j.issn.1003-0239.2012.06.007

罗绍华, 金祖辉, 陈烈庭. 1985. 印度洋和南海海温与长江中下游夏季降水的相关分析 [J]. 大气科学, 9(3): 314−320. Luo Shaohua, Jin Zuhui, Chen Lieting. 1985. The analysis of correlation between sea surface temperature in the Indian Ocean and South China Sea and precipitation in the middle and lower reaches of the Changjiang River [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 9(3): 314−320. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1985.03.13

Rayner N A, Parker D E, Horton E B, et al. 2003. Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century [J]. J. Geophys. Res., 108(D14): 4407. doi:10.1029/2002JD002670

Simmons A, Uppala S, Dee D, et al. 2007. ERA-Interim: New ECMWF reanalysis products from 1989 onwards [J]. ECMWF Newsletter, 110(110): 25−35. doi:10.21957/pocnex23c6

Ueda H, Shinoda M, Kamahori H. 2003. Spring northward retreat of Eurasian snow cover relevant to seasonal and interannual variations of atmospheric circulation [J]. International Journal of Climatology, 23(6): 615−629. doi:10.1002/joc.903

Wallace J M, Blackmon M L. 1983. Observation of low-frequency atmospheric variability [M]//Hoskins B J, Pearce R P. Large-Scale Dynamical Processes in the Atmosphere. London: Academic Press, 55-94.

吴国雄, 张永生. 1998. 青藏高原的热力和机械强迫作用以及亚洲季风的爆发 I. 爆发地点 [J]. 大气科学, 22(6): 825−838. Wu Guoxiong, Zhang Yongsheng. 1998. Thermal and mechanical forcing of the Tibetan Plateau and the Asian monsoon onset. Part I: Situating of the onset [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 22(6): 825−838. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1998.06.03

吴国雄, 张永生. 1999. 青藏高原的热力和机械强迫作用以及亚洲季风的爆发 II. 爆发时间 [J]. 大气科学, 23(1): 51−61. Wu Guoxiong, Zhang Yongsheng. 1999. Thermal and mechanical forcing of the Tibetan Plateau and Asian monsoon onset. Part II: Timing of the onset [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 23(1): 51−61. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1999.01.07

Wu G X, Liu Y M, Zhang Q, et al. 2007. The Influence of mechanical and thermal forcing by the Tibetan Plateau on Asian climate [J]. J. Hydrometeorol., 8(4): 770−789. doi:10.1175/JHM609.1

Wu G X, Liu Y M, Dong B W, et al. 2012. Revisiting Asian monsoon formation and change associated with Tibetan Plateau forcing: I. Formation [J]. Climate Dyn., 39(5): 1169−1181. doi:10.1007/s00382-012-1334-z

Xiao Z N, Liao Y C, Li C Y. 2016. Possible impact of solar activity on the convection dipole over the tropical pacific ocean [J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 140: 94−107. doi:10.1016/j.jastp.2016.02.008

肖子牛, 李崇银. 1992. 大气对外强迫低频遥响应的数值模拟 I: 对赤道东太平洋 SSTA 的响应 [J]. 大气科学, 16(6): 707−717. Xiao Ziniu, Li Chongyin. 1992. Numerical simulation of the atmospheric low-frequency teleresponse to external forcing Part I: Anomalous SSTA in the equatorial eastern Pacific Ocean [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 16(6): 707−717. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1992.06.08

肖子牛, 晏红明, 李崇银. 2002. 印度洋地区异常海温的偶极振荡与中国降水及温度的关系 [J]. 热带气象学报, 18(4): 335−344. Xiao Ziniu, Yan Hongming, Li Chongyin. 2002. The relationship between Indian Ocean SSTA dipole index and the precipitation and temperature over China [J]. Journal of Tropical Meteorology, 18(4): 335−344. doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2002.04.006

Yanai M, Li C F, Song Z S. 1992. Seasonal heating of the Tibetan Plateau and its effects on the evolution of the Asian summer monsoon [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 79(1B): 319−351. doi:10.2151/

jmsj1965.70.1B_319

杨辉, 李崇银. 2005. 热带太平洋—印度洋海温异常综合模对南亚高压的影响 [J]. 大气科学, 29(1): 99−110. Yang Hui, Li Chongyin. 2005. Effect of the tropical Pacific−Indian Ocean temperature anomaly mode on the South Asia High [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 29(1): 99−110. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2005.01.12

杨莲梅, 张庆云. 2007. 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. 2007. 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

杨金虎, 江志红, 杨启国, 等. 2007. 中国西北汛期极端降水事件分析 [J]. 中国沙漠, 27(2): 320−325. Yang Jinhu, Jiang Zhihong, Yang Qiguo, et al. 2007. Anlysis on extreme precipitation event over the Northwest China in flood season [J]. Journal of Desert Research (in Chinese), 27(2): 320−325. doi:10.3321/j.issn:1000-694X.2007.02.026

张永生, 吴国雄. 1998. 关于亚洲夏季风爆发及北半球季节突变的物理机理的诊断分析: Ⅰ季风爆发的阶段性特征 [J]. 气象学报, 56(5): 513−528. Zhang Yongsheng, Wu Guoxiong. 1998. Diagnostic investigations of mechanism of onset of Asian summer monsoon and abrupt seasonal transitions over northern hemisphere Part I [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 56(5): 513−528. doi:10.11676/qxxb1998.047

张艳, 钱永甫. 2002. 青藏高原地面热源对亚洲季风爆发的热力影响 [J]. 南京气象学院学报, 25(3): 298−306. Zhang Yan, Qian Yongfu. 2002. Thermal effect of surface heat source over the Tibetan Plateau on the onset of Asian summer monsoon [J]. J. Nanjing Inst. Meteor. (in Chinese), 25(3): 298−306. doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2002.03.002

张雪梅, 江志红, 刘晓东, 等. 2009. 东亚地区水汽输送强、弱年水汽输送的异同 [J]. 气象学报, 67(4): 561−568. Zhang Xuemei, Jiang Zhihong, Liu Xiaodong, et al. 2009. Comparison of atmospheric moisture transport between strong and weak transport years over East Asia [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 67(4): 561−568. doi:10.11676/qxxb2009.056

张浩鑫, 李维京, 李伟平. 2017. 春夏季青藏高原与伊朗高原地表热通量的时空分布特征及相互联系 [J]. 气象学报, 75(2): 260−274. Zhang Haoxin, Li Weijing, Li Weiping. 2017. Spatial and temporal distribution characteristics of surface heat fluxes over both Tibetan Plateau and Iranian Plateau in boreal spring and summer and their relationships [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 75(2): 260−274. doi:10.11676/qxxb2017.002

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), 44(9): 858−864. 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 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(9-10): 3223−3238. doi:10.1007/s00382-015-2765-0

赵声蓉, 宋正山, 纪立人. 2003. 青藏高原热力异常与华北汛期降水关系的研究 [J]. 大气科学, 27(5): 881−893. Zhao Shengrong, Song Zhengshan, Ji Liren. 2003. Heating effect of the Tibetan Plateau on rainfall anomalies over North China during rainy season [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 27(5): 881−893. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2003.05.09

赵勇, 李如琦, 杨霞, 等. 2013. 5 月青藏高原地区感热异常对北疆夏季降水的影响 [J]. 高原气象, 32(5): 1215−1223. Zhao Yong, Li Ruqi, Yang Xia, et al. 2013. Impact of the anomaly of surface sensible heat in Qinghai-Xizang Plateau and its surrounding areas on summertime precipitation in northern Xinjiang [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 32(5): 1215−1223. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2012.00117

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]. Theoretical and Applied Climatology, 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, Huang A N, Zhou Y, et al. 2016. The impacts of the summer plateau monsoon over the Tibetan Plateau on the rainfall in the Tarim Basin, China [J]. Theor. Appl. Climatol., 126(1-2): 265−272. doi:10.1007/s00704-015-1576-x

赵勇, 王前, 黄安宁. 2017. 中亚和南亚热力差异对塔里木盆地夏季降水的影响 [J]. 气候与环境研究, 22(5): 574−586. Zhao Yong, Wang Qian, Huang Anning. 2017. Effects of thermal contrast between central Asia and South Asia on summer rainfall over the Tarim Basin [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 22(5): 574−586. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2017.16178

晏红明, 严华生, 谢应齐. 2001. 中国汛期降水的印度洋 SSTA 信号特征分析 [J]. 热带气象学报, 17(2): 109−116. Yan Hongming, Yan Huasheng, Xie Yingqi. 2001. The SSTA signal characteristic analysis over India Ocean during flood season in China [J]. Journal of Tropical Meteorology, 17(2): 109−116. doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2001.02.002

周连童. 2009. 比较 NCEP/NCAR 和 ERA-40 再分析资料与观测资料计算得到的感热资料的差异 [J]. 气候与环境研究, 14(1): 9−20. Zhou Liantong. 2009. A comparison of NCEP/NCAR, ERA-40 reanalysis and observational data of sensible heat in Northwest China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 14(1): 9−20. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2009.01.02

Zhou Y, Huang A N, Zhao Y, et al. 2015. Influence of the sea surface temperature anomaly over the Indian Ocean in March on the summer rainfall in Xinjiang [J]. Theor. Appl. Climatol., 119(3-4): 781−789. doi:10.1007/s00704-014-1149-4

竺夏英, 刘屹岷, 吴国雄. 2012. 夏季青藏高原多种地表感热通量资料的评估 [J]. 中国科学: 地球科学, 55(5): 779−786. Zhu Xiaying, Liu Yimin, Wu Guoxiong. 2012. An assessment of summer sensible heat flux on the Tibetan Plateau from eight data sets [J]. Science China Earth Science, 55(5): 779−786. doi:10.1007/sl1430-012-4379-2