荀学义,胡泽勇,崔桂凤,等. 2018. 青藏高原季风对我国西北干旱区气候的影响 [J]. 气候与环境研究, 23 (3): 311–320. Xun Xueyi, Hu Zeyong, Cui Guifeng, et al. 2018. The effect of Tibetan Plateau monsoon on the climate in the arid area of Northwest China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 23 (3): 311–320, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2017.17024.

## 青藏高原季风对我国西北干旱区气候的影响

荀学义 1,2,3 胡泽勇 1,4 崔桂凤 5 张和平 3 胡英华 3 杨保成 6

- 1中国科学院寒区旱区环境与工程研究所寒旱区陆面过程与气候变化重点实验室, 兰州 730000
- 2 内蒙古大学生态与环境学院, 呼和浩特 010021
- 3 内蒙古自治区气象台, 呼和浩特 010051
- 4中国科学院青藏高原地球科学卓越创新中心,北京 100101
- 5 内蒙古呼和浩特市第十八中学,呼和浩特 010022
- 6 呼伦贝尔市气象局,内蒙古自治区呼伦贝尔 021008

摘 要 基于 ERA-Interim 逐月再分析资料及同期高原和我国西北干旱区观测站温度与降水资料,分析高原季风与西北干旱区气候的关系,对比高原典型强弱季风年平均大尺度环流和水汽输送条件的差异,探讨高原强弱季风年西北干旱区气候差异形成的原因。研究结果表明:高原季风与我国西北干旱区气候相关关系显著;高原强弱季风年对应的大尺度环流和垂直环流系统存在明显差异;水汽条件和抬升条件好坏与降水量多寡配合得较好,即强高原季风年,高原北部边缘水汽条件和抬升条件更有利于降水,而弱高原季风年,高原北部边缘水汽条件和抬升条件偏差,对应降水量较常年同期偏少。

关键词 高原季风 西北干旱区 环流系统 水汽输送

文章编号 1006-9585 (2018) 03-0311-10

中图分类号 P462.4+1

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2017.17024

## The Effect of Tibetan Plateau Monsoon on the Climate in the Arid Area of Northwest China

XUN Xueyi<sup>1,2,3</sup>, HU Zeyong<sup>1,4</sup>, CUI Guifeng<sup>5</sup>, ZHANG Heping<sup>3</sup>, HU Yinghua<sup>3</sup>, and YANG Baocheng<sup>6</sup>

- 1 Key Laboratory for Land Surface Process and Climate Change in Cold and Arid Regions, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000
- 2 School of Ecology and Environment, Inna Mongolia University, Hohhot 010021
- 3 Inner Mongolia Autonomous Region Meteorological Observatory, Hohhot 010051
- 4 Center for Excellence in Tibetan Plateau Earth Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101
- 5 No.18 Middle School of Hohhot, Hohhot 010022
- 6 Hulunbuir Meteorological Bureau, Hulunbuir, Inner Mongolia Autonomous Region 021008

**Abstract** Based on monthly mean ERA-Interim reanalysis data and the temperature and precipitation data in the arid area of Northwest China during 1979–2013, differences in climate in the arid area of Northwest China between strong and weak monsoon years are analyzed. Correlation between the plateau monsoon and climate in the arid area of

收稿日期 2017-02-18; 网络预出版日期 2017-12-23

作者简介 荀学义, 男, 1979年出生, 高工, 主要从事区域气候与陆面过程研究。E-mail: xunmengfei8@163.com.

**资助项目** 中国科学院战略性先导科技专项 XDA2006010101,国家自然科学基金项目 91537101、41661144043,中国科学院寒旱区陆面过程与气候变化重点实验室开放基金项目 LPCC201306

Funded by Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences (Grant XDA2006010101), National Natural Science Foundation of China (Grants 91537101 and 41661144043), Key Laboratory Program of Land Surface Process and Climate Change in Cold and Arid Regions, Chinese Academy Sciences (Grant LPCC201306)

Northwest China is quantified. The mean large-scale circulation and water vapor transport are compared between strong and weak plateau monsoon years. The results show that the correlation between the plateau monsoon and climate in the arid area of Northwest China is significant. There are obvious differences in large scale circulation and vertical circulation system between the strong and weak monsoon years. The water vapor condition and uplifting condition are in good agreement with precipitation. The ability of water vapor uplifting along the northern flank of the Plateau is one of the important factors affecting climate in the arid area of Northwest China.

Keywords Tibetan Plateau monsoon, Arid area of Northwest China, Circulation system, Water vapor transport

## 1 引言

中国是世界上受干旱灾害影响较严重的国家之一,干旱和半干旱气候覆盖了一半以上的国土面积。西北干旱和半干旱区约占国土面积的30%(张林源和蒋兆理,1992;王志伟和翟盘茂,2003),占西北地区总面积的88%(俞亚勋等,2001),是我国三大自然区域之一。由于干旱灾害的长期影响,西北地区的经济发展受到了严重限制(符淙斌和安芷生,2002;郑水红和王守荣,2003)。若让西北干旱区资源得到合理配置,就必须深入分析干旱和半干旱区形成及维持的原因。

对于我国西北干旱和半干旱区形成及维持的 原因,长期以来中外学者进行了诸多研究。叶笃正 等(1979)认为,夏季青藏高原(下称高原)上升 气流在高原外围补偿下沉,造成高原外围少雨带,形 成干旱区,特别是高原北侧的补偿下沉气流,加剧了 西北地区干旱气候(叶笃正和高由禧,1979; 朱德琴 等,2006)。研究表明西北干旱区深居内陆,远离海 洋,途经高原地形屏障阻挡,水汽明显不足(徐国 昌,1986;张家宝和邓子风,1987;白肇烨等,1988), 西风气流在高原北侧绕流时形成反气旋性高压辐 散下沉气流带,进一步加剧了西北干旱程度(叶笃 正和高由禧,1979;徐国昌和张志银,1983;徐国 昌,1986; 张家宝和邓子风,1987; 白肇烨等,1988; 钱正安等, 1998)。黄荣辉和陈际龙(2010)在阐 述西部水汽较东部明显偏少的原因时指出, 我国东 部季风区由于湿度大,夏季水汽输送通量散度依赖 于湿度平流和风场的辐合(辐散),而西北干旱和 半干旱区受高原、天山和祁连山等山脉的阻挡,孟 加拉湾、南海和热带西太平洋向西北输送的水汽很 难到达我国西北干旱和半干旱区,导致西部夏季气 候平均纬向和经向水汽输送通量均比东部季风湿 润区小一量级。符淙斌和马柱国(2008)、李岩瑛 等(2009)从区域尺度地气相互作用和大尺度气候 背景变化的角度给出了新的解释,并提醒后续研究注意,在增暖背景下,干旱化进程中的转折性变化和突变特征及其人类活动的贡献,是今后关于北方干旱化形成机理研究和预测的关键科学问题。当然,也有研究认为,高原的存在使印度西南季风大幅度北进,造成高原雨季,对西北干旱具有缓解作用(Hahn and Manabe, 1975)。

综合前人研究可以看到,西北干旱气候形成和 维持的原因与高原大地形的作用密切联系,或者阻 挡着东南水汽西北上,或者加剧高原北侧补偿气流 影响,或者通过影响全球气候系统或地气相互作用 对西北干旱气候产生间接影响。那么高原通过影响 其上空与北侧环流系统对西北干旱气候的影响如 何,现在以及将来都是研究西北干旱气候形成及维 持的重要话题。因此,深入分析高原或高原系统变 化对西北干旱气候的影响十分必要。

本文将利用 ERA-Interim 和观测资料,结合高原季风异常年特征,从高原季风与西北干旱气候的关系和高原季风环流结构入手,配合高原季风水汽输送差异,探讨高原季风对我国西北干旱区气候的影响。

## 2 资料与方法

### 2.1 资料说明

ERA-Interim 是 ECMWF(European Center for Medium-Range Weather Forecasts,ECMWF)继 ERA-40 之后推出的新的再分析资料,其中,资料处理由三维同化系统变为四维同化系统,并引进了较多的卫星和地面观测资料,具有较 ERA-40 再分析资料更好的效果。许多研究表明,ECMWF 再分析资料在中国区域气候变化研究中具有较好的适用性(van den Hurk et al.,2000;Akperov and Mokhov,2010;荀学义等,2011)。因此,本文数据采用  $1979\sim2013$  年 ERA-Interim 逐月  $1.0^\circ$ (纬度)× $1.0^\circ$ (经度)再分析资料,用于计算高原季风指数,分析高原季风异常年环流系统和水汽输送

条件的差异。另外,还用到青藏高原及我国西北干 早区气象站夏季气温和降水量资料,资料长度均是 1979~2013年,来自中国气象局国家气象信息中心。 2.2 方法简介

Xun et al. (2012)的研究认为,高原季风变化与高原低压系统强度和位置变动密切相关,因此在传统高原季风指数(简称传统指数)中引入了高原近地层低压系统中心位置参数,定义了动态高原季风指数(简称动态指数),研究表明,动态指数能够更好的描述高原季风强度和位置的变化特征。动态指数公式如下:

$$I(\lambda,\phi) = H_1' (\lambda + \delta\lambda,\phi) + H_2' (\lambda - \delta\lambda,\phi) + H_3' (\lambda,\phi + \delta\phi) + H_4' (\lambda,\phi - \delta\phi) - 4H_0' (\lambda,\phi),$$
(1)

其中,( $\lambda$ ,  $\phi$ )是高原近地层气压系统中心位置,( $\delta\lambda$ ,  $\delta\phi$ )是沿纬度和经度方向距中心位置的距离, $H_0'(\lambda,\phi)$ 、 $H_1'(\lambda+\delta\lambda,\phi)$ 、 $H_2'(\lambda-\delta\lambda,\phi)$ 、 $H_3'(\lambda,\phi+\delta\phi)$ 和 $H_4'(\lambda,\phi-\delta\phi)$ 表示高原近地层气压系统中心及周围四点位置上的高度距平,文中 $\delta\lambda$ 取9°, $\delta\phi$ 取6°。

### 3 高原季风与西北干旱区气候的关系

#### 3.1 高原季风

"季风"是气象界的永恒课题。汤懋苍(1998)按照冬夏之间盛行风交角大于等于 120°的季风定义,统计过我国各地季风分布,发现高原特别是藏北和青南地区存在一块"季风区",这用当时被普遍接受的海陆热力差异形成的东南季风或西南季风理论无法解释,因此,针对高原"季风"现象需另辟蹊径,寻求另外解释途径。叶笃正等(1957)最先提出:夏季"贴近高原周围的风基本上是绕着

高原作气旋式旋转,同时向高原耦合造成上升运动,这种现象是由高原的热力作用所造成的",无独有偶,汤懋苍(1998)于 1961 年利用探空站和地面站资料,分析高原地区 1~12 月 600、700 和850 hPa 的月平均图时印证了这一设想。这为徐淑英和高由禧(1962)明确提出"高原季风"概念奠定了基础,同时"高原近地层夏季是个热低压,冬季是个冷高压"的设想,也强烈地暗示着高原存在独立的季风体系。

汤懋苍等(1979)在高原季风的平均气候特征研究中证实,高原存在自成一气候性的气压系统,且与此气压系统相适应,高原周围有一冬夏盛行风向相反的季风层存在,可称它为"高原季风"。该季风层与西南季风和东南季风间有明显的气候平均界线,其北界与夏季高原北侧的高压轴一致,南界与冬季高原南侧的低压轴一致,东界与东南季风风向基本一致,位于夏季偏南风厚度最薄的轴线处,同时,季风层以高原中部最高,向四周逐渐降低。如果说"青藏高原气象学"(叶笃正和高由禧,1979)使高原季风已得到广泛承认的话,那么(Tang and Reiter, 1984)对美国西部的高原季风的研究,则让高原季风得到国际同行的认可。

### 3.2 高原季风演变特征

根据动态指数公式,计算了夏季动态指数,并进行标准化得到标准化夏季动态指数,该指数大小用于描述高原夏季风强弱,本文涉及到的夏季动态高原季风指数均为标准化夏季动态指数,为了便于描述,以下将标准化夏季动态指数简述为夏季指数,高原季风均指高原夏季风。

图 1 为夏季指数变化曲线,图中实原点线表示 夏季指数随时间的演变特征,虚线表示夏季指数随 时间变化趋势,点状线表示夏季指数为±1 的临界

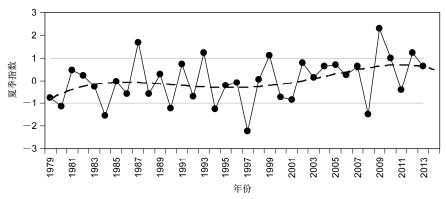


图 1 标准化动态高原季风指数(夏季指数)变化曲线

Fig. 1 Interannual variation of normalized dynamic plateau monsoon index

值。可以看出,20世纪80年代末到20世纪90年代中后期,高原季风呈明显的增强趋势,20世纪90年代末到20世纪末中后期高原季风由强缓慢减弱,此后至21世纪初中后期,高原季风再次呈明显的增加趋势,21世纪20年代初高原季风再次出现转弱趋势。总体而言,高原季风呈现出准周期性的波动增强趋势。高原季风这种变化趋势与汤懋苍(汤懋苍,1995)分析的近百年来高原季风变化的阶段性特征基本一致,从而验证了动态指数的合理性。

为了探讨高原季风对我国西北干旱气候的影响,采用相关分析法研究了高原季风与我国西北干旱气候的关系,采用合成分析法阐述了高原季风对我国西北干旱气候影响的机制机理。经过筛选,选取夏季指数即|夏季指数|≥1 的值作为高原季风异常强或弱年,其中选取夏季指数≥1 的1987年、1993年、1999年、2009年、2010年、2012年作为异常强季风年,选取夏季指数≤-1 的1980年、1984年、1990年、1994年、1997年、2008年作为异常弱季风年,用于异常强或弱季风年合成,通过异常强和弱季风年的差异特征,深入探讨高原季风对我国西北干旱气候的影响。

### 3.3 高原季风与西北干旱区气候的相关性

高原与我国西北干旱区毗邻,高原上空与我国西北干旱区环流互相作用、互相联系(蔡英等,2003,2015;荀学义等,2015),高原上空环流形式的变化与我国西北干旱区气候密切相关。

图 2 是夏季指数与我国西北干旱区温度和降水 量相关系数的空间分布图。从夏季指数与温度的空 间相关分布图 2a 中可以看到, 高原主体区与新疆 东部、甘肃、宁夏、陕西与内蒙古中部和西部呈正 相关关系,其中高原主体呈显著正相关关系,即当 高原季风偏强时, 高原主体与除新疆中部和西部外 的西北干旱区温度偏高,反之当高原季风偏弱时, 高原主体与除新疆中部和西部外的西北干旱区温 度偏低;新疆中部和西部呈负相关关系,其中,新 疆西部呈显著负相关关系,即当高原季风偏强时, 新疆中部和西部温度偏低, 反之高原季风偏弱时, 新疆中部和西部温度偏高。在夏季指数与降水量相 关关系的空间分布图 2b 中,除西藏北部、青海和 甘肃大部与温度空间相关分布基本一致外,其余地 区与温度空间相关分布相反,表明高原季风偏强 年,新疆大部、西藏北部、青海和甘肃大部降水量 偏多,其余地区降水量偏少,反之高原季风偏弱年, 新疆大部、西藏北部、青海和甘肃大部降水量偏少, 其余地区降水量偏多。

值的关注的是,在温度和降水量空间相关分布 图中,青海省南部为显著正相关关系,而在新疆西 部和南部及内蒙古河套地区为显著负相关关系。温 度和降水量空间相关分布的这种差异,是由于影响 系统、水汽输送及气候类型的差异造成的,为了阐 明这种形成机制机理的差异,接下来重点探讨环流 系统和水汽输送特征对我国西北干旱气候的作用。

# 4 高原季风对西北干旱区气候的影响机制

### 4.1 环流形势差异

### 4.1.1 高度场

图 3 是异常强、弱高原季风年平均高度场与距平场。强高原季风年 100 hPa (图 3a) 空间分布图中,高原地区处于两个异常环流系统过度区,其中异常低压中心位于土库曼斯坦东部,高原西部和新疆大部分地区为异常低压系统控制,异常高压中心位于云南和贵州交界处,高原中东部和甘肃省南部地区受异常高压系统影响,致使南压高压位置偏东,中心位于 90°E 附近,分布在乌拉尔山附近的副热带长波槽(图 3c) 较常年明显加强,控制着西北偏西和高原北部边缘地区,西北地区东部则为584 dagpm线北抬高压脊控制,不利于西北冷空气东移南下。

对弱高原季风年而言,100 hPa(图 3b)和 500 hPa(图 3d)异常环流形势基本与强高原季风年呈反位相的特征,同时南压高压位置偏西,中心位于83°E 附近,乌拉尔山附近分布着弱脊(图 3d),副热带长波槽东移至内蒙古西部至四川盆地西部一带,西北偏西地区处在副热带长波槽后脊前区,西北地区东部则为槽前系统所控制。

### 4.1.2 风矢量场

图 4 是异常强、弱高原季风年平均风距平流线 图。异常强、弱高原季风年,100~500 hPa 平均风 场异常环流形势(图 4a、4b)位相基本相反,从强 高原季风年高层异常环流形势图 4a 中可以看到, 中国大陆自西向东异常环流呈"气旋"—"反气 旋"—"气旋"的形势排列,高原及西北地区异常 西南气流盛行,有利于高原上空叠加在经向环流圈

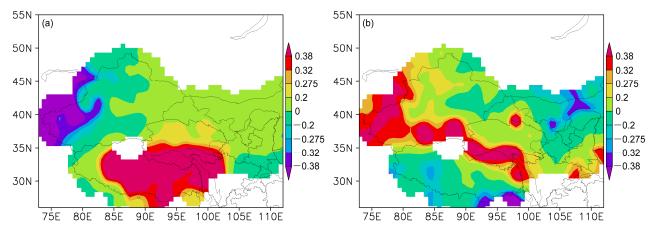


图 2 夏季指数与我国西北干旱区(a)温度和(b)降水量相关系数空间分布

Fig. 2 Correlation coefficients of the normalized plateau monsoon index with (a) temperature and (b) precipitation in the arid area of Northwest China

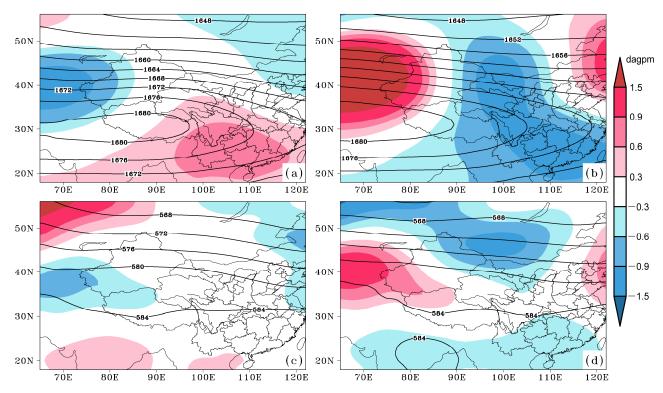


图 3 (a, b) 100 hPa 和 (c, d) 500 hPa 平均高度场(实线,单位: dagpm)与距平场(阴影区): (a、c) 强高原季风年; (b、d) 弱高原季风年 Fig. 3 Average geopotential height (solid lines, units: dagpm) and its anomalies (coloured) at (a, b) 100 hPa and (c, d) 500 hPa: (a, c) Strong plateau monsoon years; (b, d) weak plateau monsoon years

上的次级环流(图 5a、5c)加强北移,致使高原及北侧纬向西风环流减弱;甘肃东部、内蒙古西中部受异常西北气流控制。对流层低层 600~850 hPa 异常环流形势(图 4c)表现为,高原主体分布着异常西南风,与新疆西南部和高原北缘异常东南风形成气流复合带,甘肃省东部和内蒙古西中部地区为异常反气旋式环流控制着。新疆西部和高原北缘的异常环流形势既有助于加强中层偏南水汽的向北传

递,也为低层偏南气流沿着高原东北侧向西北输送 提供了更有利的条件,甘肃东部和内蒙古西中部则 削弱了水汽汇集的能力。

弱高原季风年,高层异常环流形势(图 4b)表现为高原及西北地区异常偏北气流盛行,高原上空叠加在经向环流圈上的次级环流(图 5b、5d)减弱缩小,对流层低层 600~850 hPa 异常环流形势(图 4d) 在高原主体为异常偏北风控制,异常西北风影

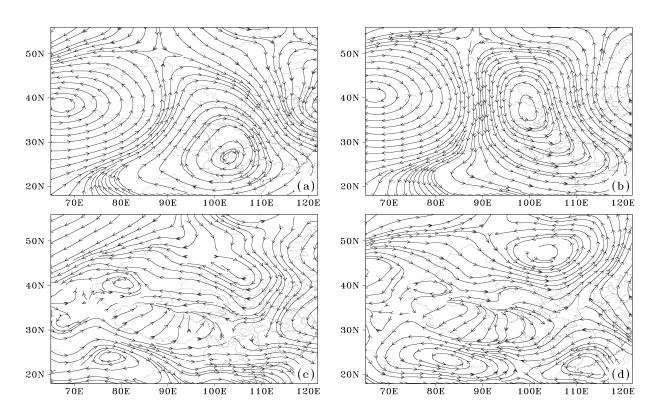


图 4 (a、b)100~500 hPa 和(c、d)600~850 hPa 平均风距平流线图:(a、c)强高原季风年;(b、d)弱高原季风年

Fig. 4 Wind anomalies streamlines averaged between (a, b) 100-500 hPa and (c, d) 600-850 hPa: (a, c) Strong plateau monsoon years; (b, d) weak plateau monsoon years

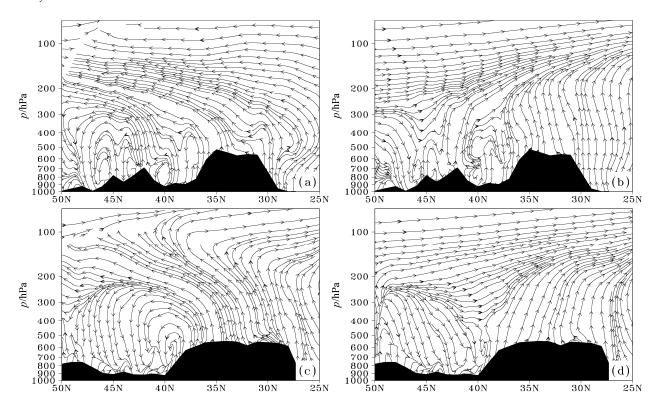


图 5 沿 (a、b) 80°E 和 (c、d) 90°E 经圈平均环流剖面: (a、c) 强高原季风年; (b、d) 弱高原季风年

Fig. 5 Vertical profiles of average circulation along (a, b) 80°E and (c, d) 90°E: (a, c) Strong plateau monsoon years; (b, d) weak plateau monsoon years

响着高原和西北干旱区,新疆和高原为异常反气旋 式环流控制,甘肃东部和内蒙古西中部处于异常气 旋式环流区,这种异常环流形势对向新疆和高原输 送的偏南水汽具有削弱作用,但有利于甘肃东部和 内蒙古西中部地区水汽的传输积累。

### 4.2 水汽分布差异

大气中的水分含量和水汽输送与大气环流密切相关,作为能量和水分循环中的重要一环,对区域水分平衡具有重要作用(史玉光和孙照渤,2008)。为了进一步探讨西北干旱区气候,特别是降水量多寡差异的形成原因,深入分析强、弱高原季风年西北干旱区水汽条件的差异是十分必要的。

图 6 是强高原季风年和弱高原季风年平均比湿差值场。从图中可以看到,除了内蒙古西中部平均比湿差值为负值外,高原和西北干旱区平均比湿差值基本为正值,并且在高原北缘形成一条正值中心带,从 600 hPa 到 850 hPa,随着海拔高度的降低,地形影响作用凸显,新疆西部地区出现了平均比湿差值正值中心,对新疆腹地的塔里木盆地而言,平均比湿差值受海拔高度的影响不大。分析表明,与弱高原季风年相比较,强高原季风年,除内蒙古西中部水汽条件较差外,西北干旱区水汽含量偏多,

新疆西部和高原北部沿地形水汽堆积特征也更明 显。

图 7 是强高原季风年和弱高原季风年水汽通量散度差值场,水汽通量辐合提供了低层抬升和被抬升空气潮湿程度的度量,用于定量描述水汽的汇聚区域。从图 7a 中可以看到,对流层低层水汽主要汇聚在新疆西北部、高原东部和东北部边缘低海拔地区,600 hPa以上(图 7b)高原北缘、北疆、南疆和新疆西部均有水汽汇聚,其分布特征暗合了夏季指数与降水正相关系数的空间分布形势(图 2b)。因此,强高原季风年,新疆西部、高原北缘和甘肃西部水汽汇聚条件比弱季风年更好,也更有利于成云致雨,致使降水量偏多;相反,在塔里木盆地、准噶尔盆地水汽汇聚条件较差,致使降水量偏少。

### 4.3 辐合抬升条件差异

大气中的水汽能否成云致雨降落到地面,需要 具备较好的环流背景和水汽条件,但若同时辐合抬 升等扰动条件显著,则降水强度或量级一般会加 强。本文内容探讨的是高原季风对我国西北干旱气 候的影响,不涉及短时强降水的成因分析,因此本 节分析辐合抬升条件,只是为了探讨强、弱高原季

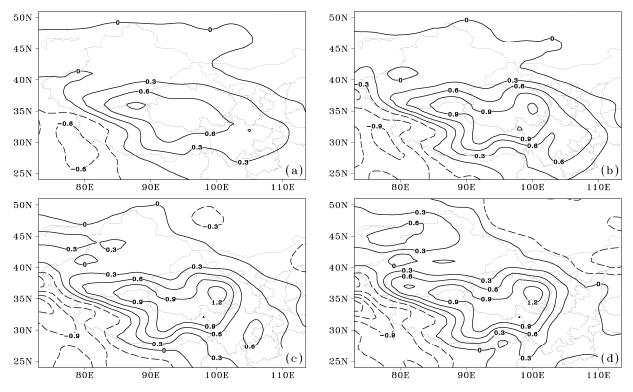


图 6 强高原季风年与弱高原季风年 (a) 500 hPa、(b) 600 hPa、(c) 700 hPa 和 (d) 850 hPa 平均比湿差值场 (单位: 10<sup>-3</sup> g/kg)

Fig. 6 Differences in average specific humidity at (a) 500 hPa, (b) 600 hPa, (c) 700 hPa, and (d) 850 hPa between strong and weak plateau monsoon years (units:  $10^{-3}$  kg/kg)

风年辐合抬升条件的差异,以及辐合抬升条件与降 水区域的对应关系,短时强降水与辐合抬升条件的 内在关系如何将于后续工作中涉及。

图 8 是强高原季风年与弱高原季风年各层平均 散度差值场。从图中可以看到,新疆西部、高原北 缘和甘肃西部平均散度差值为负值,中心位于新疆 西部和高原北缘,其特征与平均比湿差值的正值 (图 6)及水汽汇集区(图 7b)吻合,甘肃东部和 内蒙古西中部为正值,对应平均比湿差值负值区,上述水平辐合区与高原季风和降水量的显著正相关区(图 2b)对应,这种特征在受地形影响较小的500~700 hPa(图 8a、8b、8c)层中表现的更为明显。

值得关注的是,塔里木盆地和准噶尔盆地同样 为负值区,但对应平均比湿差值的正值区,通过分 析高原上空叠加在经向环流的次级环流(图 5)可 以发现,强高原季风年,塔里木盆地、准噶尔盆地

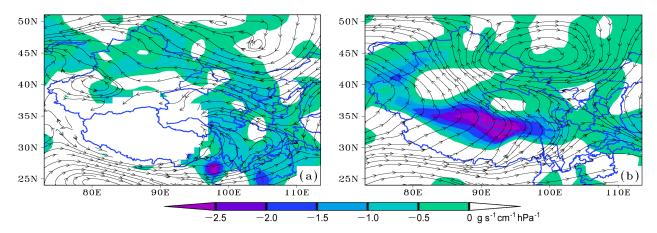


图 7 强高原季风年和弱高原季风年(a)地面至 600~hPa 和(b)600~hPa 以上垂直积分的水汽通量散度差值场(填色,单位: $g~s^{-1}~cm^{-1}~hPa^{-1}$ );流线表示水汽通量差值场

Fig. 7 Differences in the water vapor flux divergence (color filling, units:  $g s^{-1} cm^{-1} hPa^{-1}$ ) vertically integrated from (a) the surface to 600 hPa and (b) from 600 hPa upward between strong and weak plateau monsoon years; the streamlines stand for differences in the water vapor fluxes

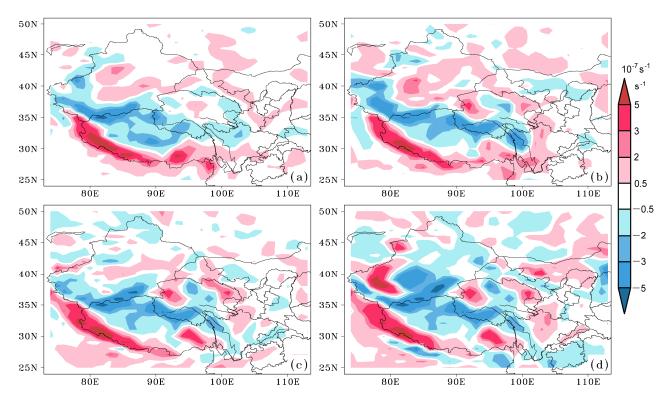


图 8 强高原季风年与弱高原季风年 (a) 500 hPa、(b) 600 hPa、(c) 700 hPa 和 (d) 850 hPa 平均散度差值场

Fig. 8 Differences in the divergence at (a) 500 hPa, (b) 600 hPa, (c) 700 hPa, and (d) 850 hPa between strong and weak plateau monsoon years

处于次级环流的气流下沉区,而在弱季风年,次级 环流的气流下沉区南压减弱,因此,尽管强高原季 风年塔里木盆地和准格尔盆地的平均比湿条件比 弱季风年好,但缺少较好的水汽抬升条件,致使强 高原季风年降水量偏少。

### 5 结论

利用 ERA-Interim 和观测资料,从高原季风与西北干旱气候的关系和高原季风环流结构入手,配合高原季风水汽输送差异,分析了高原季风与西北干旱区气候的关系,通过对比高原典型强弱季风年平均大尺度环流和水汽输送条件的差异,探讨了高原季风对我国西北干旱区气候的影响,从而得到以下结论:

- (1) 1979 年以来,高原季风呈现出准周期性的波动增强趋势。强高原季风年,高原主体与除新疆中部和西部外的西北干旱区温度偏高,新疆大部、西藏北部、青海和甘肃大部降水量偏多;弱高原季风年,高原主体与除新疆中部和西部外的西北干旱区温度偏低,新疆大部、西藏北部、青海和甘肃大部降水量偏少。
- (2) 异常强、弱高原季风年,中高层位势高度 场和风场异常环流形势位相相反。强高原季风 年,南压高压位置偏东,副热带长波槽控制着西北 偏西和高原北部边缘地区,高原上空叠加在经向环 流圈上的次级环流加强北移,对流层低层,高原主 体异常西南风与新疆西南部和高原北缘异常东南 风形成气流复合带;弱高原季风年,南压高压位置 偏西,副热带长波槽位于内蒙古西部至四川盆地西 部一带,西北偏西地区处在副热带长波槽后脊前 区,西北地区东部则为槽前系统所控制,高原上空 叠加在经向环流圈上的次级环流减弱缩小,对流层 低层异常偏北或西北风影响着高原和西北干旱区, 新疆和高原为异常反气旋式环流控制,甘肃东部和 内蒙古西中部处于异常气旋式环流区。
- (3)与弱高原季风年相比,强高原季风年新疆西部和高原北部边缘地区,水汽条件更有利于形成降水,而甘肃东部和内蒙古西中部则相反。
- (4)强高原季风年,新疆西部、高原北缘和甘肃西部的水平辐合区域,与平均比湿差值正值对应的区域对应,有利于水汽汇聚;塔里木盆地和准噶尔盆地同样为水平辐合区,但该区域属于次级环流

的气流下沉区,缺少较好的水汽抬升条件,不利于 水汽汇聚。

### 参考文献 (References)

- Akperov M G, Mokhov I I. 2010. A comparative analysis of the method of extratropical cyclone identification [J]. Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics, 46: 574–590, doi:10.1134/S0001433810050038.
- 白肇烨, 徐国昌, 孙学筠, 等. 1988. 中国西北天气 [M]. 北京: 气象出版社, 443pp. Bai Zhaoye, Xu Guochang, Sun Xuejun, et al. 1988. The Weather in Northwest China (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 442pp.
- 蔡英,李栋梁,汤懋苍,等. 2003. 青藏高原近 50 年来气温的年代际变化 [J]. 高原气象, 22: 464–470. Cai Ying, Li Dongliang, Tang Maocang, et al. 2003. Decadal temperature changes over Qinghai—Xizang Plateau in recent 50 years [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 22: 464–470, doi:10.3321/j.issn:1000-0534.2003.05.006.
- 蔡英,宋敏红,钱正安,等. 2015. 西北干早区夏季强干、湿事件降水环流及水汽输送的再分析 [J]. 高原气象,34: 597-610. Cai Ying, Song Minhong, Qian Zheng'an, et al. 2015. Reanalyses of precipitation circulation and vapor transportation of severe dry and wet events in summer in arid region of Northwest China [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 34: 597-610, doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2015.00049.
- 符淙斌, 安芷生. 2002. 我国北方干旱化研究——面向国家需求的全球变化科学问题 [J]. 地学前缘, 9: 271–275. Fu Congbin, An Zhisheng. 2002. Study of aridification in northern China——A global change issue facing directly the demand nation [J]. Earth Science Frontiers (in Chinese), 9: 271–275, doi:10.3321/j.issn:1005-2321.2002.02.004.
- 符淙斌, 马柱国. 2008. 全球变化与区域干旱化 [J]. 大气科学, 32: 752-760. Fu Congbin, Ma Zhuguo. 2008. Global change and regional aridification [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32: 752-760, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2008.04.05.
- Hahn D G, Manabe S. 1975. The role of mountains in the South Asian monsoon circulation [J]. J. Atmos. Sci., 32: 1515–1541, doi:10.1175/1520-0469(1975)032<1515:TROMIT>2.0.CO;2.
- 黄荣辉, 陈际龙. 2010. 我国东、西部夏季水汽输送特征及其差异 [J]. 大气科学, 34: 1035–1045. Huang Ronghui, Chen Jilong. 2010. Characteristics of the summertime water vapor transports over the eastern part of China and those over the western part of China and their difference [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34: 1035–1045, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2010.06.01.
- 李岩瑛, 钱正安, 薛新玲, 等. 2009. 西北干旱区夏半年深厚的混合层与干旱气候形成 [J]. 高原气象, 28: 46-54. Li Yanying, Qian Zheng'an, Xue Xinling, et al. 2009. Deep mixed layer in Northwest China dry area in summer half year and formation of the dry climate [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 28: 46-54.
- 钱正安, 吴统文, 吕世华, 等. 1998. 夏季西北干旱气候形成的数值模拟——高原地形和环流场等的影响 [J]. 大气科学, 22: 753-762. Qian Zheng'an, Wu Tongwen, Lü Shihua, et al. 1998. Numerical simulation of Northwest China arid climate formation— Effects of the Qinghai—Xizang Plateau terrain and circulation field[J]. Scientia Atmospherica Sinica (in

- Chinese), 22: 753-762, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1998.05.10.
- 史玉光, 孙照渤. 2008. 新疆水汽输送的气候特征及其变化 [J]. 高原气象, 27: 310–319. Shi Yuguang, Sun Zhaobo. 2008. Climate characteristics of water vapor transportation and its variation over Xinjiang [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 27: 310–319.
- 汤懋苍. 1995. 高原季风的年代际振荡及其原因探讨 [J]. 气象科学, 15 (4): 64–68. Tang Maocang. 1995. Discussion on inter-decade oscillation of plateau monsoon and its causes [J]. Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese), 15 (4): 64–68, doi:10.3969/2012jms.00\*\*.
- 汤懋苍. 1998. 青藏高原季风的形成、演化及振荡特征 [J]. 干旱气象, 16 (1): 3–16. Tang Maocang. 1998. The formation, evolution and oscillation characteristics of the Tibetan Plateau monsoon [J]. Journal of Arid Meteorology (in Chinese), 16 (1): 3–16.
- Tang M C, Reiter E R. 1984. Plateau monsoons of the Northern Hemisphere: A comparison between North America and Tibet [J]. Mon. Wea. Rev., 112: 617–637, doi:10.1175/1520-0493(1984)112<0617:PMOTNH>2.0.CO;2.
- 汤懋苍, 沈志宝, 陈有虞. 1979. 高原季风的平均气候特征 [J]. 地理学报, 34: 33–42. Tang Maocang, Shen Zhibao, Chen Youyu. 1979. On climatic characteristics of the Xizang Plateau monsoon [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 34: 33–42.
- van den Hurk B, Viterbo P, Beljaars A, et al. 2000. Offline validation of the ERA40 surface scheme [R]. Technical Memorandum No. 295.
- 王志伟, 翟盘茂. 2003. 中国北方近 50 年干旱变化特征 [J]. 地理学报, 58 (S1): 61–68. Wang Zhiwei, Zhai Panmao. 2003. Climate change in drought over northern China during 1950–2000 [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 58 (S1): 61–68, doi:10.11821/xb20037s007.
- 徐国昌. 1986. 气候变化, 干旱和沙漠化——1986 年的世界气象日 [J]. 气象, 12 (3): 24–26. Xu Guochang. 1986. Climate, drought and desertification——the World Meteorological Day in 1986 [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 12 (3): 24–26, doi:10.7519/j.issn. 1000-0526.1986.03.006.
- 徐国昌, 张志银. 1983. 青藏高原对西北干早气候形成的作用 [J]. 高原气象, 2 (2): 9–16. Xu Guochang, Zhang Zhiyin. 1983. The effect of Qinghai–Xizang Plateau on the formation of dry climate over the Northwest of China [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 2 (2): 9–16.
- 徐淑英, 高由禧. 1962. 西藏高原的季风现象 [J]. 地理学报, 28: 111–123. Xu Shuying, Gao Youxi. 1962. The phenomena of the Tibet Plateau monsoon [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 28: 111–123, doi:10.11821/xb196202002.
- 荀学义, 胡泽勇, 崔桂凤, 等. 2015. 青藏高原近地层及北侧气压系统的季节性振荡变化 [J]. 冰川冻土, 37: 360–368. Xun Xueyi, Hu Zeyong, Cui Guifeng, et al. 2015. Seasonal variations of the pressure systems in surface layer and northern regions of the Tibetan Plateau [J]. Journal of Glaciology and Geocryology (in Chinese), 37: 360–368, doi:10.7522/j. issn.1000-0240.2015.0039.
- Xun X Y, Hu Z Y, Ma Y M. 2012. The dynamic plateau monsoon index and

- its association with general circulation anomalies [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 29: 1249–1263, doi:10.1007/s00376-012-1125-9.
- 荀学义, 胡泽勇, 吴学宏, 等. 2011. 三套位势高度再分析资料在青藏高原地区的对比分析 [J]. 高原气象, 30: 1444–1452. Xun Xueyi, Hu Zeyong, Wu Xuehong, et al. 2011. Comparative analyses of three geopotential height reanalysis data in Qinghai—Xizang Plateau [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 30: 1444–1452.
- 叶笃正, 高由禧. 1979. 青藏高原气象学 [M]. 北京: 科学出版社. Yeh Tucheng, Gao Youxi. 1979. Qinghai-Xizang Plateau Meteorology (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press.
- 叶笃正,罗四维,朱抱真. 1957. 西藏高原及其附近的流场结构和对流层大气的热量平衡 [J]. 气象学报, 28: 108–121. Yeh Tucheng, Luo Siwei, Zhu Baozhen. 1957. The wind structure and heat balance in the lower troposphere over Tibetan Plateau and its surrounding [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 28: 108–121, doi:10.11676/qxxb1957.
- 叶笃正, 杨广基, 王兴东. 1979. 东亚和太平洋上空平均垂直环流(一)夏季 [J]. 大气科学, 3 (1): 1–11. Yeh Tucheng, Yang Guangji, Wang Xingdong. 1979. The average vertical circulations over the East Asia and the Pacific area, (I) in summer [J]. Scientia Atmospherica Sinica (in Chinese), 3 (1): 1–11.
- 俞亚勋, 王宝灵, 谢金南, 等. 2001. 青藏高原东北侧地区干湿年夏季环流异常的对比分析 [J]. 气候与环境研究, 6: 103–112. Yu Yaxun, Wang Baoling, Xie Jinnan, et al. 2001. Contrast on the large scale circulation anomaly over Tibetan Plateau northeastern side for drought and rainy in summer [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 6: 103–112, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2001.01.12.
- 张家宝, 邓子风. 1987. 新疆降水概论 [M]. 北京: 气象出版社, 44–58. Zhang Jiabao, Deng Zifeng. 1987. The Introduction to Precipitation in Xinjiang (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 44–58.
- 张林源, 蒋兆理. 1992. 论我国西北干旱气候的成因 [J]. 干旱区地理, 15 (2): 1–12. Zhang Linyuan, Jiang Zhaoli. 1992. The genesis of the arid climate of northwestern China [J]. Arid Land Geography (in Chinese), 15 (2): 1–12, doi:10.13826/j.cnki.cn65-1103/x.1992.02.001.
- 郑水红, 王守荣. 2003. 西北干旱区水资源供需分析与可持续利用对策研究 [J]. 气候与环境研究, 8: 52–59. Zheng Suihong, Wang Shourong. 2003. Analysis on supply and demand of water resource and study on relevant strategies of sustainable utilization in the arid region of the Northwest China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 8: 52–59, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2003.01.07.
- 朱德琴, 陈文, 刘辉志, 等. 2006. 我国西北典型干旱区和高原地区地表辐射能量收支特征的比较 [J]. 气候与环境研究, 11: 683–690. Zhu Deqin, Chen Wen, Liu Huizhi, et al. 2006. The comparison of surface radiation budget between typical arid region in Northwest China and plateau region [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 11: 683–690, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2006.06.02.