

王雅琦, 冯娟, 李建平, 等, 2020. 西北地区东部夏季降水年际变化特征及其与环流的关系[J]. 高原气象, 39(2): 290–300.
WANG Yaqi, FENG Juan, LI Jianping, et al, 2020. Interannual Variation of Summer Precipitation in the Eastern of Northwest China and its Relationship with Circulation [J]. Plateau Meteorology, 39(2): 290–300. DOI: 10.7522/j.issn.1000-0534.2019.00023.

西北地区东部夏季降水年际变化特征 及其与环流的关系

王雅琦¹, 冯娟¹, 李建平^{1,2}, 安然¹

(1. 北京师范大学全球变化与地球系统科学研究院, 北京 100875;

2. 青岛海洋科学与技术国家实验室区域海洋动力学与数值模拟功能实验室, 山东 青岛 266237)

摘要: 利用1961–2012年夏季西北地区东部降水站点资料和NCEP/NCAR同期逐月再分析资料, 采用“均一化处理”和合成分析等方法分析了西北地区东部夏季降水的年际变化特征及其对应的环流异常。结果表明: (1)西北地区东部的夏季降水异常主要与南边界的水汽异常输送相联系; (2)西北地区东部夏季降水与西北太平洋副热带高压(简称西太副高)的位置及强度密切相联; 当西太副高偏强偏西时, 西太副高脊线西伸至我国华南地区, 对应的西北地区东部上空表现为西南风异常, 将大量的水汽从西北地区东部的南边界输入, 有利于该地区夏季降水增多; 当西太副高偏东偏弱时, 西太副高脊线西伸带来的降水影响无法到达西北地区东部, 对应着西北地区东部降水偏少。

关键词: 西北东部夏季降水; 均一化处理; 西太平洋副热带高压; 年际变化

文章编号: 1000-0534(2020)02-0290-11 **中图分类号:** P426.6 **文献标识码:** A

DOI: 10.7522/j.issn.1000-0534.2019.00023

1 引言

中国东部地区包含甘肃大部、青海东北部、宁夏全境、内蒙古西部以及陕西大部分地区, 地形以高原和平地为主。西北地区位于青藏高原北侧, 幅员辽阔, 地形复杂, 是气候变化的敏感区域。由于西北地区地处我国内陆, 四周高山环绕, 沟壑纵横, 土质疏松, 水土流失严重, 泥沙泛滥, 不同季节各地的降水环流变化也大, 各地的水汽源地等差异大(钱正安等, 2018), 这样特殊的地理位置使得该地区水汽条件差, 生态环境脆弱, 地下水资源匮乏, 对自然降水的依赖性大, 是中国同纬度地区降水最少的地方(Xie et al, 2016), 因此降水就成为了严重影响和制约西北地区发展的因素之一, 对于西北地区降水变化的研究一直受到气象学者的关注。

研究表明, 近100年来, 地球气候正经历一次

以全球变暖为主要特征的气候变化, 虽然最近几年有研究表明该变暖有停滞发生(苏京志等, 2016), 但总体变暖趋势未曾改变, 在此影响下, 我国气候也发生了显著的变化(王玉洁等, 2016), 特别地, 西北地区的气候也表现出明显的变化特征。研究发现, 我国西北地区西部和中部的气候在近30年逐渐转为暖湿型, 这引起了学术界的广泛关注(谢金南等, 2001; 刘洪兰等, 2013; 黄玉霞等, 2004; 白肇烨等, 1991; 王宝鉴等, 2004; Chen et al, 2005)。21世纪初, 施雅风等(2002)提出了关于中国西北地区气候由暖干向暖湿转变的猜测; 沈永平等(2002)也分别从可利用水资源、地下径流以及冰雪等方面证实了气候变湿的趋势。西北地区地处亚洲季风边缘地带, 受东亚和南亚季风影响较大。对于西北地区降水变化趋势、影响西北地区降水的主要因子, 近年来也有很多专家学者进行过多方面

收稿日期: 2018-07-07; 定稿日期: 2019-01-29

资助项目: 国家自然科学基金项目(41705131, 41790474, 41530424)

作者简介: 王雅琦(1993–), 女, 宁夏银川人, 硕士研究生, 主要从事海气相互作用的研究. E-mail: wangyq_bnu@163.com

通信作者: 冯娟(1983–), 女, 甘肃平凉人, 副教授, 主要从事海气相互作用、气候动力学方面的研究. E-mail: fengjuan@bnu.edu.cn

的研究。前人从年、季降水量与降水日数的研究中发现西北中西部年降水量呈增加趋势,西北东部年降水量呈减少趋势(刘维成等, 2017), 而西北地区东部为干旱、半干旱区域, 区域内部水汽条件较差, 水汽的形成主要依赖于区域外的输送(朱晓伟等, 2013)。对于春季降水, 西北地区主要的水汽输送有两支: 一支是从孟加拉湾海面上向东北方向输送的水汽; 一支是来源于地中海、里海沿新疆向东输送的水汽(纳丽等, 2008)。

针对西北地区出现的降水异常现象, 国内外已经有很多较好的研究结果, 有助于更好的认识和理解西北地区气候变化特征及机理。但是目前的大部分研究考察了西北地区的整体变化特征, 对西北地区东部研究较少且并未区分地域性差异, 而西北东、西部地区地形差异大, 影响东西部降水的原因并不相同(李栋梁等, 1997; 杨金虎等, 2007)。例如研究指出青藏高原下垫面影响使得6—8月降水趋势不同, 6月下垫面感热异常强烈使西北大部降水偏多, 到7—8月感热开始减弱, 导致西北西部、北部降水偏少(靳立亚等, 2005; 王澄海等, 2006), 而北疆地区由于天山山脉影响使得降水异常偏少(谢金南等, 2001; 赵传成等, 2011)。另外, 由于西北地区地形结构复杂多变, 不同区域下垫面状况不尽相同, 同时西北地区处于西风带控制下的沙漠边缘, 东西跨度宽, 气候背景复杂, 而降水对于地形分布较为敏感, 有些站点受到地形降水影响(王宝鉴等, 2004), 局地小气候特征导致的降水会影响整体区域特征, 因此有必要对站点数据进行各向同性分析, 剔除受局地小气候、地形等因素影响的站点, 保留能够代表西北地区东部整体降水特征的站点。基于以上分析讨论, 想要更加深入细致地对西北地区东部夏季降水异常进行分析, 有必要将该地区的气象站点进行预处理, 挑选能够代表该地区大尺度降水特征的代表性站点。本文将利用“均一化处理”的站点区分方法挑选出时空分布具有连续一致性的代表性站点表征西北地区东部夏季降水特征; 在计算水汽通量收支时, 引入格点化计算的方法, 量化分析了西北地区东部各个方向上水汽异常分布, 有助于理解与降水异常相联系的水汽来源问题。

2 资料选取和方法介绍

所使用的降水资料为中国气象局提供的台站资料, 西北地区东部共包括 156 台站逐月降水资料; 环流资料为逐月的 NCEP/NCAR 再分析资料, 水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$, 垂直方向共 17 层, 基本

要素包括位势高度、水平风速、相对湿度等。采用相关、合成等统计方法分析了与西北地区东部夏季降水相联系的大气环流异常变化特征。合成分析中, 多雨(少雨)年定义为区域平均降水值超过正(负)1.0 个标准差的年份, 合成差是指多雨年与少雨年的差值。西太平洋副热带高压(简称西太副高)脊线的定义采用董步文等(1988)和李建平等(1998)提出的思想, 利用 $u=0$ 和 $\frac{\partial u}{\partial y} > 0$ 来表征西太

副高的脊线位置(李建平等, 2008; 占瑞芬等, 2004, 2005)。强度定义采取国家气候中心定义的 500 hPa 高度场闭合 588 dagpm 所包围的区域格点数, 将少雨年闭合 588 dagpm 线围成的面积定义为 1, 多雨年 588 dagpm 线闭合的面积相对少雨年进行标记(魏凤英, 2007)。由于西北地区东部地形复杂, 降水分布不均匀, 时空差异较大, 因此本文在研究方法上采用了“均一化处理”的站点区分方法。为了实现该目的, 在对西北地区东部 156 个站点进行筛选时, 采用了“两两相关”的统计方法, 使得挑出的站点降水具有各向同性。具体挑选标准是: (1)区域内各站点降水在时间上具有连续性; (2)区域内任意两站点降水趋势变化一致且显著相关。

根据上述标准挑选出的符合要求的 76 个气象站点分布如图 1[文中涉及的地图是基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2016)1665 的世界地图制作, 底图无修改]所示。挑选出来的 76 个站点占站点总数的 48.7%, 其分布基本均匀分布在西北地区东部。

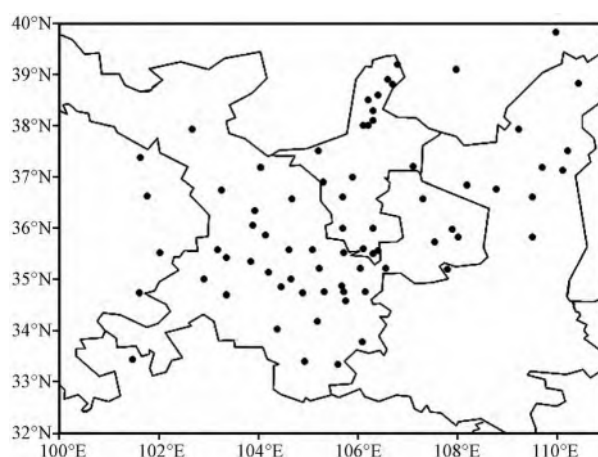


图1 西北地区东部76个站点分布

Fig. 1 Distribution of 76 stations in the eastern part of northwest China

从研究区域降水的时间序列以及其与西北地区东部全部站点降水的相关分布(图2)中可以看到, 西北地区东部的夏季降水主要以年际变化为

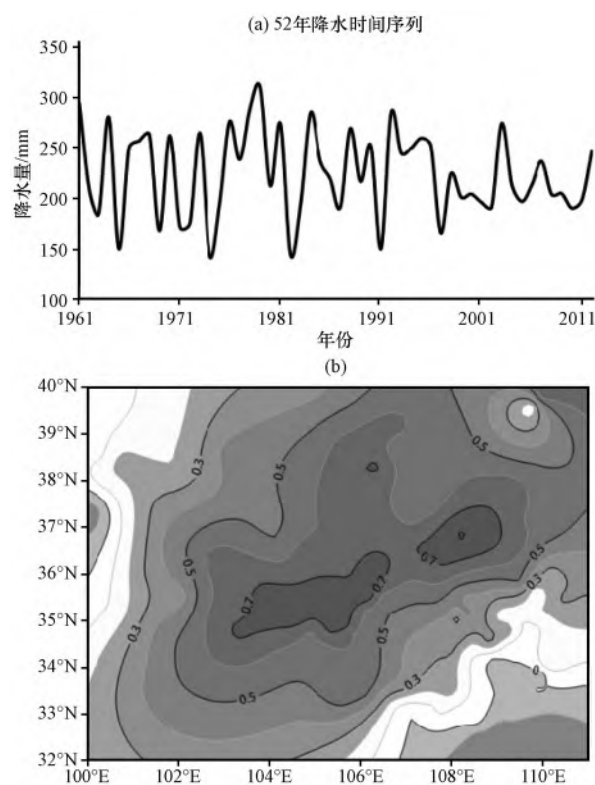


图2 西北地区东部区域平均夏季降水的时间序列(a)及其与东部站点降水的相关分布(b)

Fig. 2 Time series of summer precipitation during 1961–2012 (a) and the spatial distribution of the correlations between the rainfall series and the station rainfall (b) in the eastern northwest China

主, 无明显的年代际变化特征。并且, 西北地区东部区域平均的降水与西北地区东部各站点降水基本表现为全区一致的正相关, 这表明定义的西北地区东部降水序列与西北地区东部总体降水具有一致的变化特征, 可以反映该地区夏季降水的年际变化特征, 表明应用“均一化处理”方法挑选站点的方法是可行的。

本文还计算了某格点上的水汽输送矢量 V_q (郑菲等, 2012), 计算公式为:

$$V_q = qu\mathbf{i} + qv\mathbf{j}, \quad (1)$$

单位面积水汽输送通量矢量, 采用公式:

$$\begin{aligned} Q &= \frac{1}{g} \int_{P_s}^{P_t} qVdp = \frac{1}{g} \int_{P_s}^{P_t} qu\mathbf{i}dp + \frac{1}{g} \int_{P_s}^{P_t} qv\mathbf{j}dp \\ &= Q_\lambda\mathbf{i} + Q_\varphi\mathbf{j}, \end{aligned} \quad (2)$$

式中: Q 为水汽输送通量矢量; Q_λ 和 Q_φ 分别是纬向和经向水汽输送通量; λ 为纬度; φ 为经度; u 为纬向风; v 为经向风; g 为重力加速度; q 为比湿; P 为气压。结合西北地区东部地形特征, 平均海拔为 1100 m, $P_s=925$ hPa 和 $P_t=300$ hPa。对于西北地区东部区域 (100°E–111°E, 32°N–40°N), 4 个边界上

的水汽输送通量分别为:

$$Q_W = \sum_{i=1}^m Q_\lambda(i) \cdot L_W, \quad (3)$$

$$Q_E = \sum_{i=1}^m Q_\lambda(i) \cdot L_E, \quad (4)$$

$$Q_N = \sum_{i=1}^n Q_\varphi(i) \cdot L_N, \quad (5)$$

$$Q_S = \sum_{i=1}^n Q_\varphi(i) \cdot L_S, \quad (6)$$

式中: Q_W 、 Q_E 、 Q_N 、 Q_S 分别是西、东、北、南边界的水汽输送通量; L_W 、 L_E 、 L_N 、 L_S 分别为 4 个边界的长度; m 、 n 分别为纬向和经向的格点数。计算研究的西北地区东部总的水汽收支公式为:

$$Q_T = Q_W - Q_E + Q_S - Q_N, \quad (7)$$

若 $Q_T > 0$, 则表明该研究区域有正的水汽流入, 水汽辐合, 对应着正的降水异常; 若 $Q_T < 0$, 则该研究区域有水汽流出, 水汽辐散, 意味着负的降水异常。

所取的时间段是 1961–2012 年, 夏季是指 6–8 月平均, 西北地区东部研究范围为 100°E–111°E, 32°N–40°N。

3 西北地区东部夏季降水异常分析

3.1 气候背景

从西北地区东部夏季降水的气候平均分布 [图 3 (a)] 可以看出, 该地区多年平均降水强度呈由北向南依次递增现象, 降水极大值区域在青海东部及陕西南部秦岭一带, 而极小值集中在宁夏北部及内蒙古南部毛乌素沙漠一带。从该地区夏季降水占全年降水的比重分布 [图 3 (b)] 发现, 除宁夏北部、青海西部与甘肃东部交界处及甘肃中部与宁夏西南部交接处夏季降水占全年比重较小外 (仅为 10%~20%, 降水主要集中在春秋两季), 其他地区夏季降水都占到了全年降水的 45% 以上, 最大比重达 65%, 表明夏季降水对于全年的降水具有较大贡献, 因此研究该地区夏季降水意义重大。

图 4 给出了亚欧地区夏季平均风场和位势高度场的环流背景, 以此来分析西北地区东部夏季的主要环流背景特征。从图 4 中可以看出, 在低层 850 hPa 环流分布中, 位势高度呈现出欧洲及东亚高而亚洲大陆板块低的特征, 低纬地区盛行西风, 该西风在 100°E 地区转为西南气流, 而西北地区东部则正好处于西太副高的边缘地带, 受西南引导气流影响。而在中高层 500 hPa 和 200 hPa 的环流分布中也可以发现, 受西风急流影响, 该地区在中纬度盛

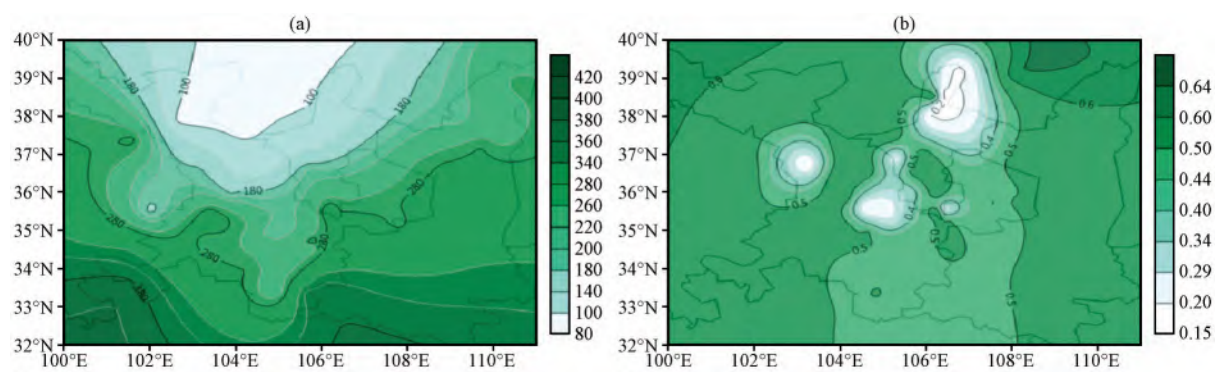


图3 西北地区东部夏季降水气候平均分布(a, 单位: mm)及夏季降水占年降水总量的百分比(b)
Fig. 3 Distribution of summer rainfall (a, unit: mm) and percentage of the summer rainfall in the annual total (b) based on station data over eastern northwest China

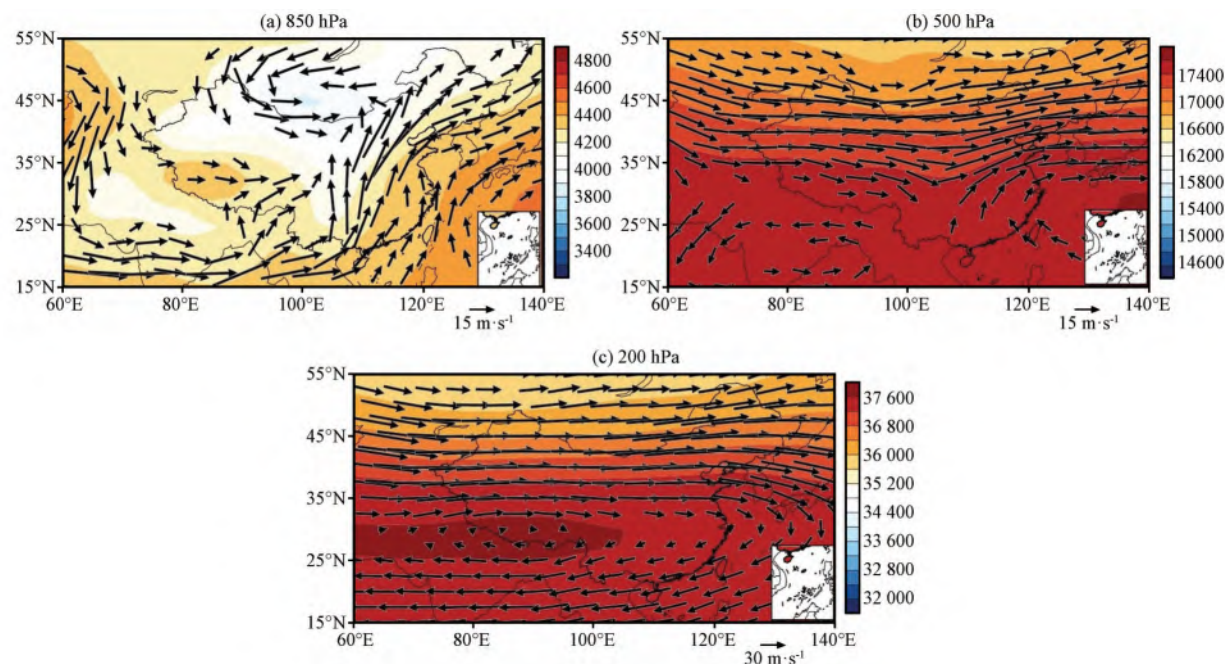


图4 1961—2012年位势高度场(彩色区, 单位: dagpm)、风场(矢量, 单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)气候态分布
Fig. 4 Boreal summer climatology of the geo-potential height (color area, unit: dagpm) and wind field (vector, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) at 850 hPa, 500 hPa and 200 hPa in the period of 1961—2012

行西风, 位势高度随纬度增加而递减, 在高层中低纬度为南亚高压控制, 中心位于 25°N — 30°N 附近, 南亚高压南侧是热带东风急流, 北侧为高空副热带西风急流。从以上分析可知, 夏季影响西北地区东部的主要环流系统包括西太副高和西风急流。在低层850 hPa西太副高中心位于洋面 140°E , 25°N 附近[图4(a)]; 中层500 hPa西太副高位置较低层偏西偏北, 位于西太平洋近海岸, 整个西太副高系统较为深厚, 从低层延伸至对流层中层, 随高度增加向西北倾斜[图4(b)]。由于张宇等(2014)发现南亚高压对于西北地区降水有一定影响, 进一步分析了南亚高压对西北地区东部降水的可能影响。基于西北地区东部夏季多雨年和少雨年南亚高压

分布特征做了合成分析(图略), 多雨年和少雨年南亚高压的差异主要在于16800 gpm等值线所包围的面积: 多雨年面积较大, 少雨年面积较小。根据合成的结果, 选取100 hPa高度场 20°N — 40°N , 40°E — 110°E 区域平均值作为南亚高压强度指数, 将之与降水的时间序列做相关后发现他们之间的相关系数只有0.2, 不显著相关, 表明南亚高压对西北地区东部夏季降水的影响有限。

3.2 环流异常分布特征

将西北地区东部区域平均的夏季降水做标准化处理, 作为反映西北地区东部夏季降水特征的指标, 定义该指标高(低)于一个正(负)标准差的年份为多(少)雨年, 在1961—2012年共计52年夏季降

水中,多雨年共 10 年:1961,1964,1976,1978,1979,1981,1984,1988,1992 和 2003 年;少雨年共 8 年:1965,1969,1971,1972,1974,1982,1991 和 1997 年。从降水多少年的对应环流异常分布可以看到,多雨年时,西太平洋(105°E—130°E)上空表现为正的高度场异常,相对应的对流层中高层为异常的反气旋性风场,表明西太副高有增强趋势。在高层 200 hPa[图 5(e)],东亚上空位势高度场有一深厚的偶极型,对应风场在我国东部有明显反气旋异常,这使得多雨年西北地区东部高层 200 hPa 受正的位势高度异常及反气旋环流异常控制,中高纬为强烈的西南风异常。在中层 500 hPa[图 5(c)],虽然偶极型没有高层那么明显,但依然可以看出风场有明显的异常,使得西北地区东部依然处于西南风控制之下。在低层 850 hPa[图 5(a)]高度场显著负异常仍然可见,但风场反气旋性异常消失,变为受到异常的西南风控制。以上结果表明高度场从

高空延伸到低层是一个明显倾斜的结构,根据地转关系,风场向高度场适应,风场表现出相似的向南倾斜。而在少雨年,高层 200 hPa[图 5(f)]在西北地区上空有一显著的高度场正异常,对应风场有反气旋异常,该地区上空受异常东北风控制,与多雨年完全相反;中层 500 hPa[图 5(d)]虽在我国东北地区有显著高度场负异常,但该环流形势无法影响西北地区,西北地区上空风场与高层相反,为异常气旋性环流,且风速较高层明显偏弱;低层 850 hPa[图 5(b)]虽在中国大部分地区高度场有显著负异常,但西北地区中部有以气旋性异常,对应东部地区为西北风控制,因此高、中、低层的环流形势都不利于西北地区东部夏季降水的形成。从以上分析可以看出,在多雨年,中层 500 hPa 西太副高明显偏强,位置偏西偏北,位于西太平洋 30°N 附近,与我国内陆地区非常接近,而南亚高压位置则相比于气候平均态向西北方向移动,位于青藏高原

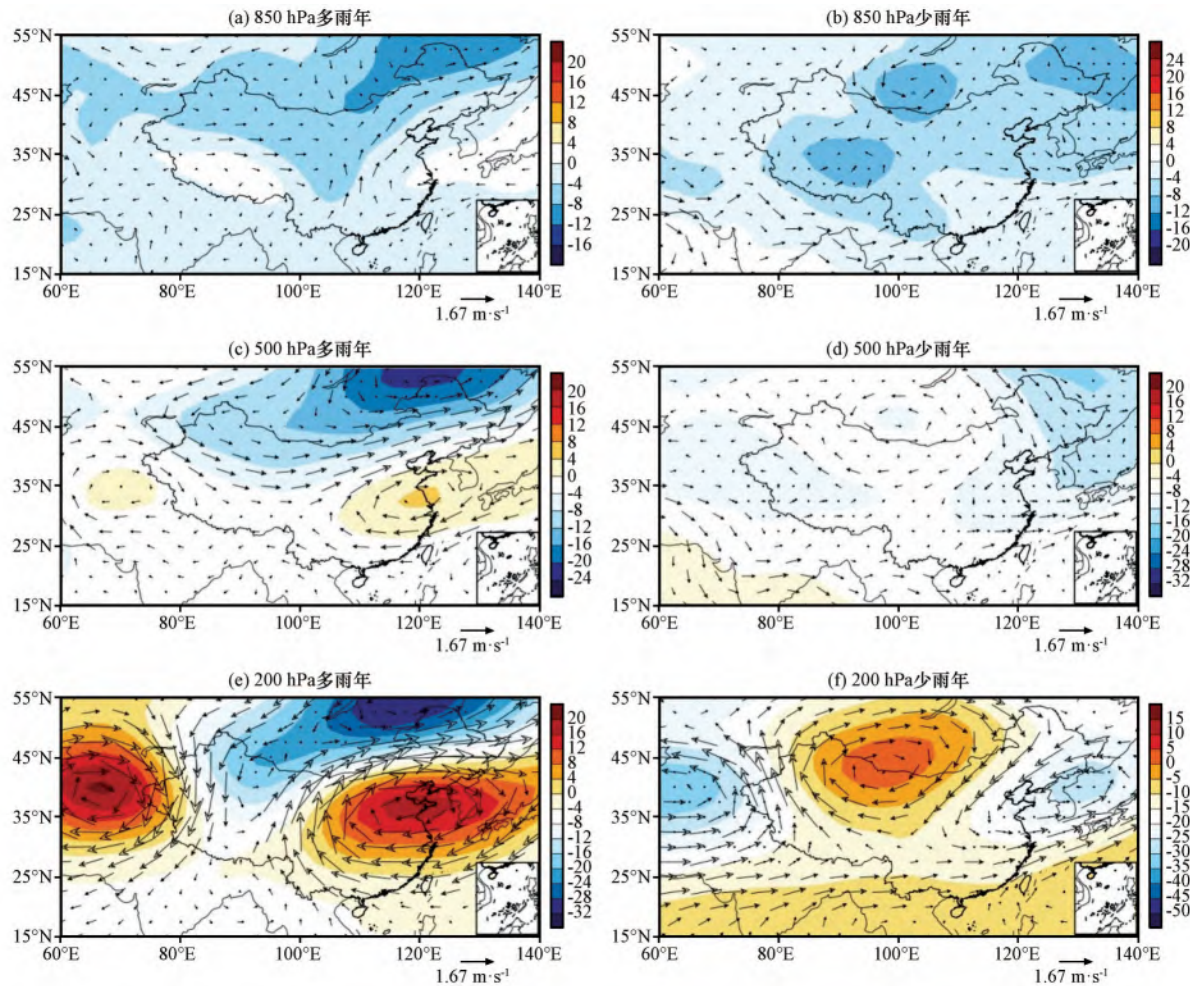


图5 多雨年和少雨年对应的位势高度场(彩色区,单位: dagpm)及风场(矢量,单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)合成分布
打点区域为位势高度场通过 90% 信度检验区域

Fig. 5 Composite pattern of the geopotential height (color area, unit: dagpm) and wind (vector, unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) for the positive and negative rainfall years. Dotted areas are statistically significant at the 90% confidence level

西侧35°N附近;而少雨年西太副高异常偏弱,南亚高压相比与气候态则向东移动,位于青藏高原上空及其东侧40°N附近。赵勇等(2018)研究也指出,南亚高压与西北地区降水有一定影响,伊朗高压型是南亚高压近35年来夏季出现最多的模态,当伊朗高压型中心偏西时,新疆大部降水偏多,反之偏少。

为了进一步分析西北地区东部夏季降水异常的水汽来源,分别对多雨及少雨年的整层水汽输送做了合成。从图6中可以看到,在多雨年,进入西北地区东部的水汽非常充沛,该地区水汽来源主要

有两支:一支是来自副热带高压输送的东南气流,在西南地区转为西南气流进入西北地区;一支是由于西风急流输送的西风气流,但是由于受到青藏高原地形影响,西风急流输送的水汽是否能够到达西北地区东部并不确定,因此这两支水汽究竟哪一个占了主导地位暂不清楚,将在下文中进行讨论。而对于少雨年[图6(b)],虽然西风急流也输送水汽,但是受地形因素影响,被青藏高原完全挡住输送路线,水汽无法进入西北内陆,而西南方向也无水汽输送,导致整个西北地区水汽匮乏,无法形成降水。

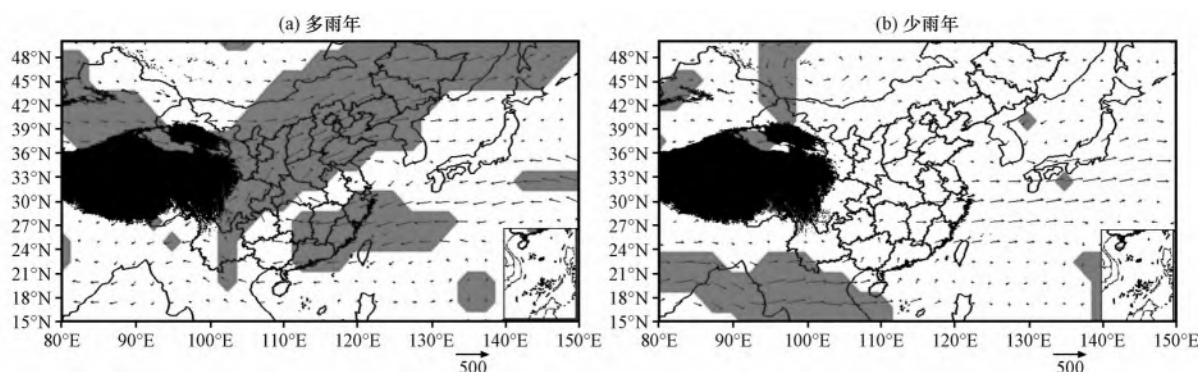


图6 多雨年和少雨年整层水汽(925~300 hPa)输送合成(矢量,单位: $\times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$)

黑色阴影区域为青藏高原,灰色阴影表示通过90%信度检验的区域

Fig. 6 Composite anomalies in the whole layers water vapor (925~300 hPa) during the positive and negative rainfall years. Unit: $\times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$. The black shadow area is the Qinghai-Tibetan Plateau.

Gray shadow indicates significant at the 90% confidence level

3.3 水汽收支分析

为了探讨西北地区东部夏季降水的水汽究竟是来自副热带高压的西南气流还是来自西风急流,对该地区水汽收支情况做了分析。由该地区气候态的夏季整层(925~300 hPa)各边界上水汽输送通量及区域总水汽收支情况[图7(c)]发现,西北地区东部在夏季有水汽辐合,是水汽汇区,南北西边界均有水汽汇入,但南边水汽输入值较大,东西方向都为向东的水汽输送,但东边界水汽输出大于西边界水汽输入,这表明南边界进入的水汽是西北地区东部的最主要的水汽来源。在多雨年[图7(a)],南北边界均为向北的水汽输送,南边界的输入远大于北边界的输出,东西边界均为向东的水汽输送,东边界的输出大于西边界输入,该地区异常的水汽辐合相比气候平均的水汽辐合明显加强,有利于降水的增多。这主要是由于相较于气候平均态,多雨年在西边界和南边界的水汽输入异常增多,虽然东边界水汽输出也异常增加,但净输入量远大于气候均值,异常净输入量超过平均态的74.4%,说明南边异常水汽输送占到了主导作用,是影响多雨年降水异常增加的主要因素;而少雨年[图7(b)]水汽输送

情况与多雨年类似,但是该地区异常的水汽辐合小于气候平均的水汽辐合,这主要是由于南边界的水汽输入相较多雨年异常偏少导致的,强弱年的差值与气候均值相差不多。这表明来自南边界的水汽输送异常变化变化是引起西北地区夏季降水异常的主导因子。

进一步对各边界经向、纬向平均水汽输送随高度的变化做了分析(图8),由于计算得到300 hPa水汽收支几乎为 $0 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$,故没有给出300 hPa分析。结果表明,西北地区东部夏季降水的水汽以南边界经向输送为主,西边界纬向输送为辅,低层925~700 hPa为纬向水汽输送的最大值高度,而在500 hPa及以上的输送几乎为 $0 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$,因此500 hPa及以上的高层水汽输送主要来源于西边界的纬向水汽输送。虽然西边界及南边界有大量水汽进入西北地区东部,但是东边界在各层都有水汽输出,导致该地区水汽净输入量较小。各层水汽在输入输出方面有明显的差距:多雨年南边界水汽输入的比少雨年多了近一倍,东边界的水汽输出在多雨年也比少雨年多出三分之一,多、少雨年的主要水汽输送差距还是集中在南边界的水汽输送,南

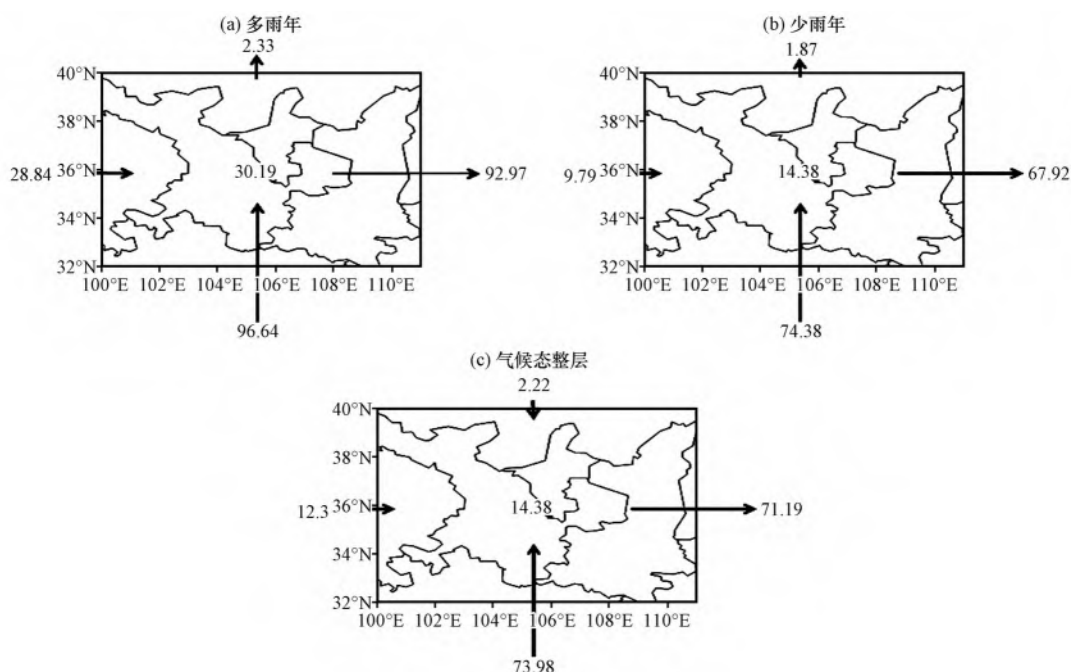


图7 夏季西北地区东部多雨年、少雨年及气候态整层(925~300 hPa)水汽收支分布(单位: $\times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 7 Composite differences in the whole layer (925~300 hPa) summer water vapor budget during the positive rainfall years, negative rainfall years and climatology. Unit: $\times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$

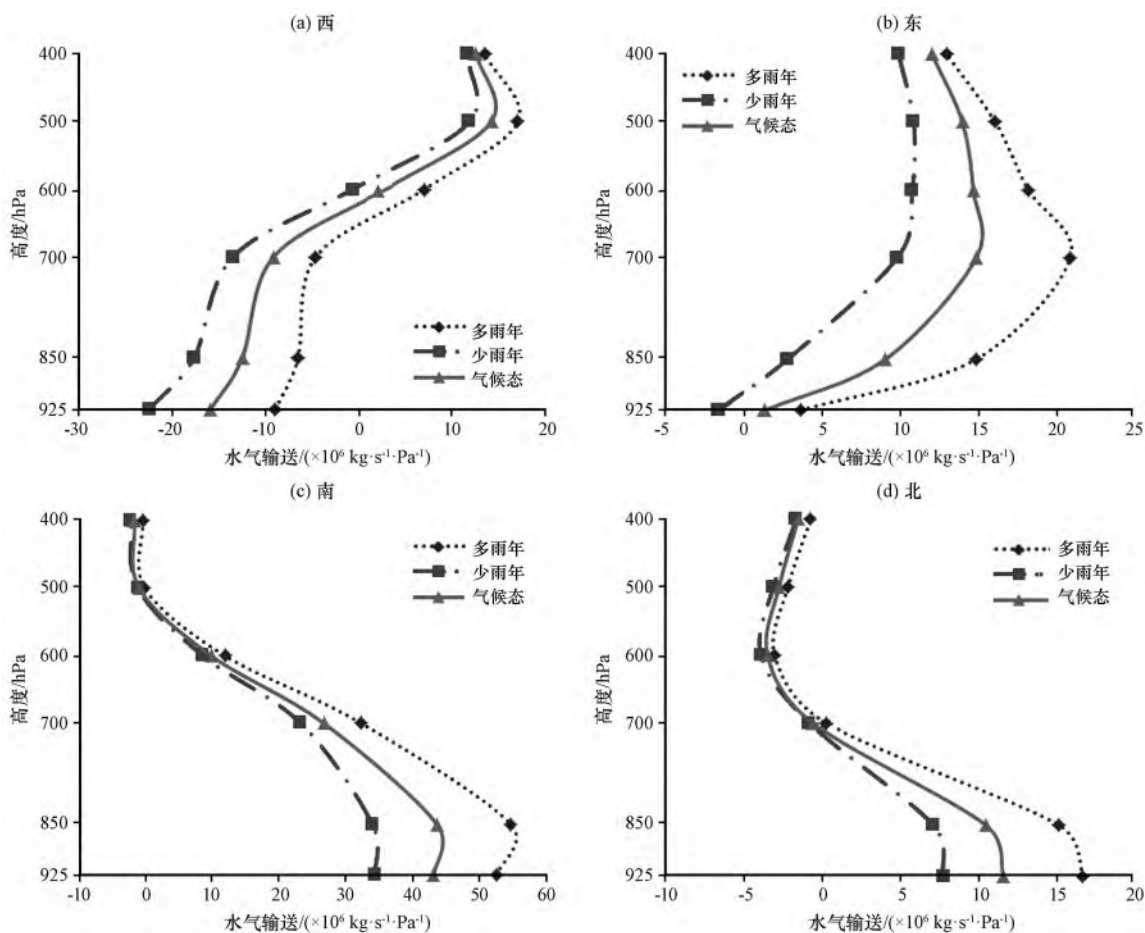


图8 西、东、南、北四个方向水汽输送随高度变化

Fig. 8 Water vapor transport in the four boundaries of west, east, south and north eastern northwest China along with height

边界多、少雨年水汽输送差额的异常占少雨年南边界水汽输送总量的30%。

以上分析表明西北地区东部夏季降水的异常主要取决于南边界的水汽异常输送,那么南边界的水汽输送异常与怎样的环流异常相联系呢?进一步分析降水多、少年位势高度场及风场的合成差结果。由图9可见,对流层从低层到高层在西太平洋均表现为正的高度场异常,对应风场为异常反气旋式环流。在中层500 hPa上[图9(b)],西北地区东部上空有显著增强的西南风,以及增强的西南水汽

输送,说明多雨年西太副高为西北地区东部提供了显著增强的西南气流输送水汽,为该地区夏季降水提供了有利的环流形势。从以上分析可以看出,从低层到高层,最显著的信号为西太副高的异常,对应的西北地区东部为异常西南风气流控制。并且,西太副高异常从低层到高层逐渐增强,200 hPa最强,在高层200 hPa可以看到有显著的环流异常,此环流异常在低层、中层并不显著,是否与其他中高纬度环流系统有关(张庆云等,1998),将在下文进一步讨论。

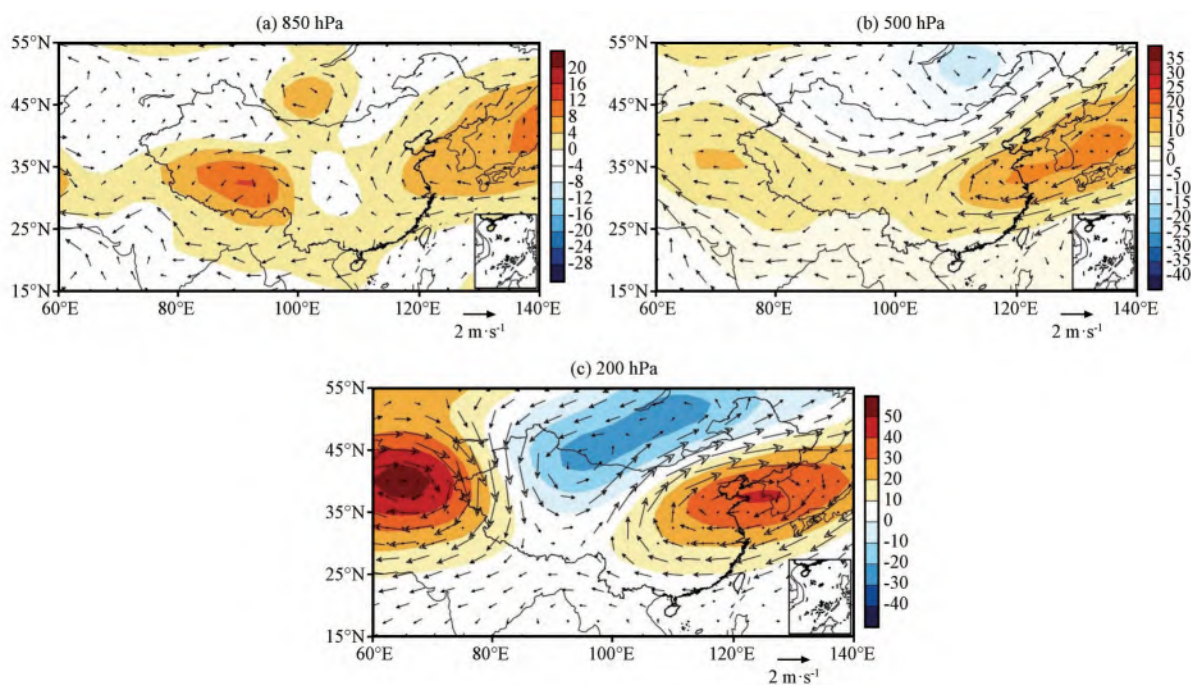


图9 夏季850 hPa、500 hPa和200 hPa位势高度场(彩色区,单位: dagpm)及风场(矢量,单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)的合成差
打点区域为位势高度场通过90%信度检验区域

Fig. 9 Composite differences between positive and negative rainfall years in summer geopotential height (color area, unit: dagpm) and wind vector field (vector, unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) at 850 hPa, 500 hPa and 200 hPa.

Dotted area indicates significant at the 90% confidence level

考虑到西太副高对夏季降水的作用,图10给出了多雨年及少雨年合成的500 hPa西太副高及其脊线位置。由图10可见,当西北地区东部夏季降水偏多时,西太副高中心有闭合的588 dagpm线,且西太副高强度偏强偏西,脊线异常西伸至我国内陆地区,副高的西南风引导气流可以将较多的水汽输送到西北地区东部,对应着夏季降水增多;少雨年虽然也有闭合的588 dagpm线,但相较于多雨年强度较弱,位置偏东,脊线位置偏南且西伸脊点未至我国内陆,西南引导气流位置偏东,对应着西北地区东部夏季偏少。为了进一步证实西太副高对于西北地区东部南边界水汽输送的影响,进一步计算了西太副高的强度,即588 dagpm线闭合的面

积,发现在多雨年西太副高的强度量级明显大于少雨年,多雨年强度量级为6。以上结果表明,由于西太副高强度的变化,对西北地区东部南边界的水汽输送产生了显著影响,导致该地区降水显著变化。这与前人研究结果当西太副高偏弱偏东时,会抑制水汽向我国输送的结论相一致(桓玉等,2018)。

4 讨论与结论

4.1 讨论

由以上分析可知,西风急流在降水少年显著增强,在高层200 hPa急流轴北侧西风明显加强,对应着西北地区东部纬向水汽收支的变化,虽然西边

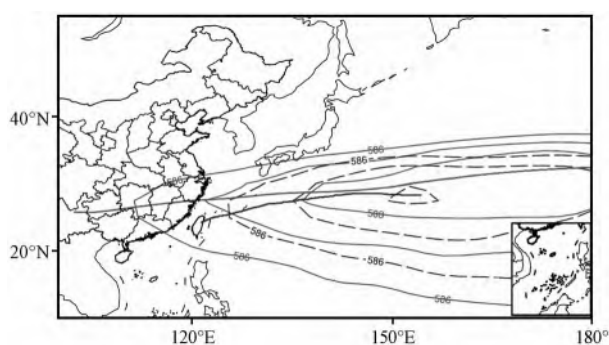


图10 多雨年(实线)、少雨年(虚线)合成的东亚地区夏季500 hPa西太副高及其脊线位置(单位: dagpm)

Fig. 10 Composite position of the northwestern Pacific subtropical high and its ridge during the positive (solid) and negative (dash line) rainfall years. Unit: dagpm

界水汽输入量大,但净流入量却很小,因此影响并不显著。虽然西风急流对西北地区东部夏季降水的影响不显著,但是前人工作也已指出西风急流与副高之前存在着显著的联系,例如杨莲梅等(2007)研究就发现,在西风急流增强的年份,西太副高南撤,脊线西伸点偏东;方晓洁等(2009)研究结果表明,夏季西风急流异常偏北时,我国长江中下游夏季降水异常偏少,河套、华北地区夏季降水异常偏多;夏季西风急流异常偏南时,我国长江中下游夏季降水异常偏多,河套、华北地区夏季降水异常偏少。虽然现有研究结果已经得出西太副高的位置和强度变化对西北地区东部夏季降水影响显著,但是西风急流的位置及强弱变化是否对该地区降水有影响尚不清楚,因此,有必要进一步分析两者的配置关系及协同作用对西北地区降水的影响,将有利于深入认识西北地区降水的变化特征及影响因素,为区域气候变化提供新的认识。

另外,西太副高是季风环流子系统成员之一,副高与季风的关系前人也做了多方面的研究。例如,当西太平洋副热带高压偏西、偏北,副热带夏季风偏强,当东南信风增强时,孟加拉湾经向环流通过平流过程进一步影响副高强度,副高增强(洪梅等,2014)。同时,陶诗言等(2001)分析了夏季位于西太副高南侧的东亚热带季风与西太副高脊线位置异常的关系发现夏季西太副高脊线位置异常偏北时,东亚热带季风区上升运动加强,夏季风增强;夏季西太平洋副热带高压脊线位置异常偏南时,热带季风区上升运动减弱,夏季风减弱。以上研究表明,副高与季风是有联系的。但是,副高与季风的关系复杂,副高并不完全受到季风活动的影响,例如近年来在研究厄尔尼诺现象与大气环流

相互作用时也注意到它对西太副高的强度和位置有很大影响(符淙斌等,1988)。在研究西太平洋副热带暖池区海温异常的作用时也发现,菲律宾周围对流活动强的夏季,副高位置偏北,反之则偏南(Nitta, 1987; 黄荣辉等, 1994)。利用李建平等(2011)定义的季风指数做了进一步分析,发现西北地区东部夏季降水时间序列与东亚夏季风指数的相关系数只有-0.02。可见,根据目前的结果,东亚夏季风强度的年际变化对该地区的夏季降水影响有限,有待进行下一步研究。

4.2 结论

对近50年西北地区东部夏季降水的特征做了分析,结果发现整个西北地区东部夏季降水由北向南逐渐增多,极大值区域集中在青海东部及陕西南部秦岭一带,基本水汽来源为西南气流。通过进一步合成分析发现,影响西北地区东部夏季降水的主要因素是西太副高,在多雨年,由于西太副高偏强偏西,强度是少雨年的6倍,对应西太平洋高空盛行异常反气旋环流,西太副高脊线西伸至我国华南地区,使得西北地区东部上空有异常的西南气流增强,导致西南水汽输送异常增加,有利于该地区降水;少雨年西太副高强度较弱,位置偏东,脊线偏南,西伸脊点未到达我国内陆,使得西北地区东部南边界水汽输入显著减小,不利于降水发生。

参考文献:

- Chen Y N, Xu Z X, 2005. Plausible impact of global climate change on water resources in the Tarim River Basin[J]. *Science in China (Earth Sciences)*, 48(1): 65-73.
- Nitta T, 1987. Convective activities in the tropical western Pacific and their impact on the Northern Hemisphere summer circulation[J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 65, 373-390.
- Xie S P, Yu K, Yan D U, et al, 2016. Indo-Western Pacific Ocean capacitor and coherent climate anomalies in Post-ENSO summer: A review[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 33(4): 411-432.
- 白肇烨, 徐国昌, 1991. 中国西北天气[M]. 北京: 气象出版社.
- 董步文, 丑纪范, 1988. 西太平洋副热带高压脊线位置季节变化的实况分析和理论模拟[J]. *气象学报*, 46(3): 361-364.
- 方晓洁, 曾晓枚, 陈雪芹, 2009. 东亚夏季200hPa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.
- 符淙斌, 滕星林, 1988. 我国夏季的气候异常与埃尔尼诺/南方涛动现象的关系[J]. *大气科学(特刊)*, 133-141.
- 洪梅, 张韧, 张海洋, 等, 2014. 西太平洋副热带高压季节内异常活动与亚洲夏季风系统的时延相关特征[J]. *大气科学学报*, 37(6): 705-714. DOI: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20131215001.
- 恒玉, 李跃清, 2018. 夏季东亚季风和南亚季风协同作用与我国南

- 方夏季降水异常的关系[J]. 高原气象, 37(6): 1563-1577. DOI: 10.7522/j.issn.1000-0534.2018.00044.
- 黄荣辉, 孙凤英, 1994. 热带西太平洋暖池的热状态及其上空的对流活动对东亚夏季气候异常的影响[J]. 大气科学, 18, 456-464.
- 黄玉霞, 李栋梁, 王宝鉴, 等, 2004. 西北地区近 40 年年降水异常的时空特征分析[J]. 高原气象, 23(2): 245-252.
- 靳立亚, 符娇兰, 陈发虎, 2005. 近 44 年来中国西北降水量变化的区域差异以及对全球变暖的响应[J]. 地理科学, 25(5): 567-572.
- 李栋梁, 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.
- 李建平, 丑纪范, 1998. 副热带高压带断裂的动力学分析-地转作用[J]. 科学通报, 34(3): 434-437.
- 李建平, 朱建磊, 2008. 晚春初夏西太平洋副热带高压南撤过程的气候学特征[J]. 气象学报, 66(6)-0926-39.
- 刘洪兰, 张强, 胡文超, 等, 2013. 1961—2011 年西北地区春季降水变化特征及其空间分异性[J]. 冰川冻土, 35(4): 857-864.
- 刘维成, 张强, 傅朝, 2017. 近 55 年来中国西北地区降水变化特征及影响因素分析[J]. 高原气象, 36(6): 1533-1545. DOI: 10.7522/j.issn.1000-0534.2017.00081.
- 纳丽, 丁永红, 郑光芬, 等, 2008. 宁夏春季降水及其典型年份水汽通量特征分析[J]. 中国沙漠, 28(3): 562-567.
- 钱正安, 蔡英, 宋敏红, 等, 2018. 中国西北旱区暴雨水汽输送研究进展[J]. 高原气象, 37(3): 577-590. DOI: 10.7522/j.issn.1000-0534.2018.00032.
- 沈永平, 王德顺, 2002. 塔里木盆地冰川及水资源变化研究新进展[J]. 冰川冻土, 24(6): 819-825.
- 施雅风, 沈永平, 胡汝骥, 2002. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号影响和前景初步探讨[J]. 冰川冻土, 24(3): 219-226.
- 苏京志, 温敏, 丁一汇, 等, 2016. 全球变暖趋缓研究进展[J]. 大气科学, 40(6): 1143-1153.
- 陶诗言, 张庆云, 张顺利, 2001. 夏季北太平洋副热带高压系统的活动[J]. 气象学报, 59(6): 747-758.
- 王宝鉴, 何金海, 黄玉霞, 2004. 西北地区近 40 年 6—9 月降水的常特征分析[J]. 气象, 30(6): 28-31.
- 王宝鉴, 黄玉霞, 何金海, 等, 2004. 东亚夏季风期间水汽输送与西北干旱的关系[J]. 高原气象, 23(6): 912-918.
- 王澄海, 崔洋, 2006. 西北地区近 50 年降水周期的稳定性分析[J]. 地球科学进展, 21(6): 576-584.
- 王会军, 范可, 2013. 东亚季风近几十年来的主要变化特征[J]. 大气科学, 37(2): 313-318.
- 王玉洁, 周波涛, 任玉玉, 等, 2016. 全球气候变化对我国气候安全影响的思考[J]. 应用气象学报, 27(6): 750-758. DOI: 10.11898/1001-7313.20160612.
- 魏凤英, 2007. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 69-70.
- 谢金南, 周嘉陵, 2001. 西北地区中、东部降水趋势的初步研究[J]. 高原气象, 20(4): 362-367.
- 谢金南, 周嘉陵, 2001. 西北地区中、东部降水趋势的初步研究[J]. 高原气象, 20(4): 362-367.
- 杨金虎, 王鹏祥, 白虎志, 等, 2007. 中国西北降水年内非均匀性特征分析[J]. 气候变化研究进展, 3(5): 276-281.
- 杨莲梅, 张庆云, 2007. 夏季东亚西风急流扰动异常与副热带高压关系研究[J]. 应用气象学报, 18(4): 452-459.
- 占瑞芬, 李建平, 何金海, 2004. 西太平洋副热带高压双脊线及其对 1998 年夏季长江流域“二度梅”的影响[J]. 气象学报, 62(3): 294-307.
- 占瑞芬, 李建平, 何金海, 2005. 北半球副热带高压双脊线的统计特征[J]. 科学通报, 50(18): 2022-2026.
- 张庆云, 陶诗言, 1998. 亚洲中高纬度对流对东亚夏季降水的影响[J]. 气象学报, 56(2): 199-211.
- 赵传成, 王雁, 丁永建, 等, 2011. 西北地区近 50 年气温及降水的时空变化[J]. 高原气象, 30(2): 385-390.
- 赵勇, 王前, 黄安宁, 2018. 南亚高压伊朗高压型与新疆夏季降水的联系[J]. 高原气象, 37(3): 651-661. DOI: 10.7522/j.issn.1000-0534.2017.00049.
- 郑菲, 李建平, 2012. 前冬南半球环状模对春季华南降水的影响及其机理[J]. 地球物理学报, 55(11): 3542-3557. DOI: 10.6038/j.issn.0001-5733.2012.11.004.
- 朱晓伟, 崔洋, 2013. 1961—2009 年西北地区东部降水时空分布及成因[J]. 干旱区研究, 30(6): 1094-1099. DOI: 10.13866/j.azr.2013.06.025.

Interannual Variation of Summer Precipitation in the Eastern of Northwest China and its Relationship with Circulation

WANG Yaqi¹, FENG Juan¹, LI Jianping^{1, 2}, AN Ran¹

(1. College of Global Change and Earth System Science (GCESS), Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. Laboratory for Regional Oceanography and Numerical Modeling, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, Shandong, China)

Abstract: Based on the meteorological station precipitation data in the Eastern of northwest China during period 1961—2012 and monthly average reanalysis data from NCEP/NCAR in the same period, using the homogenization and composite analysis methods, the characteristics of summer precipitation in the eastern of northwest China and its related circulation anomalies has been investigated. The results show that: (1) The anomalous precipitation in the eastern of northwest China is mainly related to the abnormal transportation of water vapor from the southern boundary. (2) The summer rainfall in the eastern of northwest China is closely related to the location and intensity of the northwest Pacific subtropical high (WPSH): When WPSH is strong and westward, the ridge of WPSH would extend westward and reach the Southern China region, resulting abnormal southwest wind over the eastern of northwest China, bringing more water vapor to the eastern northwest China inputted from its southern boundary, and favoring for more rainfall in this area; When WPSH is weak and eastward, the influence of WPSH can not reach the eastern northwest China, associated with less rainfall.

Key words: Summer precipitation in the eastern of northwest China; normalization method; west Pacific subtropical high; interannual variability