

陈冬冬, 戴永久. 2009. 近五十年中国西北地区夏季降水场变化特征及影响因素分析 [J]. 大气科学, 33 (6): 1247-1258. Chen Dongdong, Dai Yongjiu. 2009. Characteristics and analysis of typical anomalous summer rainfall patterns in Northwest China over the last 50 years [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (6): 1247-1258.

近五十年中国西北地区夏季降水场 变化特征及影响因素分析

陈冬冬^{1, 2} 戴永久^{1*}

1 北京师范大学地理学与遥感科学学院/地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875

2 中国气象局气象探测中心, 北京 100081

摘 要 利用中国气象局信息中心提供的西北地区 1951~2005 年夏季月平均资料集和 1958~2002 年 ERA40 资料, 分析近五十年来西北地区夏季降水场的主要变化特征, 及与之相关的大尺度水汽输送和环流场变化, 讨论大尺度环流指数如涛动、极涡、赤道太平洋 Niño3.4 区海温与西北地区夏季降水的相关性。结果表明, 近五十年西北西部尤其是南疆的降水增多, 与西伯利亚 (50°N~60°N, 40°E~70°E) 上空位势高度增加和伊朗高原 (35°N~42.5°N, 60°E~75°E) 上空位势高度减少有很大关系。1987 年后, 西北西侧水汽辐合也是该区降水增多的一个重要因素。西北东部降水受海温影响大。此外, 北大西洋涛动、极涡面积可以反映近几十年来西北降水西增东减的年际波动。极涡面积大小与西北降水第一模态相关性尤其突出, 可以作为考察西北降水变化的一个重要指标。

关键词 西北 夏季降水 EOF 水汽输送 大气涛动 极涡

文章编号 1006-9895 (2009) 06-1247-12

中图分类号 P426

文献标识码 A

Characteristics and Analysis of Typical Anomalous Summer Rainfall Patterns in Northwest China over the Last 50 Years

CHEN Dongdong^{1, 2} and DAI Yongjiu¹

1 School of Geography/State Key Laboratory of Earth Surface Process and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875

2 Meteorological Observation Centre of China Meteorological Administration, Beijing 100081

Abstract Based on the 1951-2005 monthly rainfall data in Northwest China, which is provide by the Chinese Meteorological Administration Data Center, the authors analyze the spatial and temporal patterns of JJA rainfall in Northwest China. The author try to explain these patterns by using water vapor transport and atmospheric circulation by ERA40 reanalysis data. Results show that the rainfall increase in the west part of Northwest China is highly related to 500-hPa geopotential height changes in Siberia (50°N-60°N, 40°E-70°E) and the Iranian plateau (35°N-42.5°N, 60°E-75°E). Water vapor convergence is another important factor especially after 1987. The rainfall decrease in the west part of Northwest China can be modified by the sea surface temperature. Atmospheric circulation systems, such as the North Atlantic Oscillation (NAO), the North Pacific Oscillation, the Niño 3.4 SST, and the

收稿日期 2008-06-17, 2008-11-13 收修定稿

资助项目 国家杰出青年基金 40225013

作者简介 陈冬冬, 女, 1982 年出生, 博士研究生, 主要从事西北干旱区气候特征分析。E-mail: chendd.bnu@gmail.com

* 通讯作者 E-mail: yongjiudai@bnu.edu.cn

vortex area index, are discussed with typical anomalous patterns of summer rainfall. It shows that the NAO and the vortex area have some relations with year-to-year changes of the first EOF mode of rainfall in Northwest China. As the correlation between the first principle component and the vortex area index is high, the vortex area can be used as an indicator to predict the rainfall change in Northwest China.

Key words Northwest China, summer rainfall, EOF, water vapor transport, atmospheric oscillation, polar vortex

1 引言

近半个世纪以来,全球迅速增暖使能量分配和水汽输送发生了很大变化,干旱区局地水循环加剧(Yeh et al., 1985; Wang, 2001; 胡汝骥等, 2002),我国西北地区气候发生了显著变化。西北地区气候自 1987 年以来,出现了由暖干向暖湿的转变(施雅风等, 2003),并且降水增多主要发生在西北西部,西北东部的季风边缘地区降水量明显减少(李栋梁等, 1997; 宋连春等, 2003; 张存杰等, 2003)。认清干旱气候背景下西北地区降水的多时空尺度振荡规律,对预测西北地区未来气候变化有着十分重要的意义(韦志刚等, 2000)。

以往对西北地区降水的研究工作多为对行政区域内降水基本变化规律的研究,分区多根据站点地理位置状况。这种分区虽有一定合理性,但统计结果受站点影响较大。近来,较多使用统计上常用的 EOF/REOF 方法对研究区域进行分区研究。该方法基于站点降水场的协方差系数,对其进行正交分解,所得前几个空间函数部分不仅抓住了降水场主要变化特征,且相互独立。而且与之对应的时间系数可以代表场的时间特征。这种方法不仅没有固定的函数形式,而且对气象数据的原始分布没有特殊要求。方差较大的前几个分量,其空间函数物理意义清晰,能够反映要素场的主要特征(黄嘉佑, 1990)。

李栋梁等(1997)利用西北 90 个测站 1960~1990 年夏季降水资料,采用 EOF、REOF 等方法对夏季降水量的空间异常特征和时间变化规律进行了诊断研究,并利用大气环流模式检验了青藏高原地面感热异常对西北地区降水的影响。蔡晓军等(1998)和赵庆云等(1999)分别用类似方法讨论了春末夏初和西北全年降水场的主要空间特征以及时间演替特征,并对旋转后 6 个荷载向量所代表的主要异常敏感区进行了讨论。黄山江等(2004)对西北春夏季降水场的 EOF 分解后,挑选典型站点来

对春夏季降水的时空特征进行描述。黄玉霞等(2004)利用更全面的资料(137 个西北站点,1961~2000 年资料),用类似方法对西北地区降水的时空特征进行了分区和讨论。韦志刚等(2000)将主分量分析和奇异谱分析相结合,分析了西北地区降水的演变趋势和年际变化规律,并讨论了西北地区降水的主要周期。以往研究结果加深了我们对西北降水时空分布的认识,但探讨这种空间特征成因的文章并不多。

Zhou et al. (2005) 曾用 EOF 方法分析了我国东部季风区的降水特征,并从水汽输送和环流场的角度对降水场的空间分布状况进行了讨论。我国西北地区远离海洋,加之青藏高原的地形屏障阻挡,湿空气很难越过高山输送到西北地区。大气中水汽含量的缺乏和没有足够的水汽输送被认为是西北干旱的主要成因。蔡英等(2003)认为,近 50 年来西北地区东部大气可降水量逐渐减少,这可能是该区域明显干旱化的一个原因。

过去对西北地区大气水汽特征的研究大都依靠单站的探空资料。1994 年,高晓清(1994)利用西北地区 1960~1969 年 10 个探空资料计算了西北地区水汽平均输送情况,指出西北地区水汽最大输送高度在 600~700 hPa,夏季水汽输送量是冬季的两倍。崔玉琴(1994)根据西北自然边界走向,采用最邻近边界的 20 个站次探空测站高空资料,计算了 1981~1986 年各边界的水汽通量,并指出西北上空水汽的主要来源。也有学者利用日本地球静止气象卫星 GMS-5 提供的水汽图像进行水汽输送分析(郑新江等, 1997; 王旭等, 2001),但 GMS-5 所能提供的水汽图像只能反映中高层大气湿度,而大气中约 48.7% 水汽含量在 850 hPa 以下,因此 GMS-5 水汽图像不能反映大气中水汽的总量(王旭等, 2001)。

近年来,有不少学者用再分析格点资料来分析西北地区的水汽状况。Yu et al. (2001) 分析了西北地区四季大气水汽含量的气候分布特征,指出:

西北地区大气水汽含量东部最多也最为稳定,而西北西部地区,大气中水汽主要集中在南疆盆地和天山北部,且随季节变化较大。水汽含量较少的地区为西北地区中部,尤以青海西部和北部为最少。王秀荣等(2002)利用1958~1997年西北19个国家基准站降水数据和同期NCEP资料,分析了西北夏季干旱和湿润年份的前期春季物理量场的特征,对影响西北夏季干湿状况的前期背景作了较全面的阐述。此后王秀荣等(2003)又分析了西北地区夏季水汽含量的特征,结果表明夏季西北西部整层大气水汽含量与降水分布类似,但西北中、东部二者的分布却有一定差异。俞亚勋等(2003)用1958~2000年NCEP资料分析指出,西北上空水汽的分布受大气环流和下垫面地理因子等影响,具有十分明显的季节变化特征,并指出,西北大气水汽含量自20世纪50年代末至80年代中期呈明显下降趋势,之后又开始波动上升。王宝鉴等(2004)使用1961~2000年NCEP月平均再分析资料,分析了东亚夏季风期间水汽输送与西北干旱的关系,结果表明东亚夏季风对我国降水的影响主要位于 100°E 以东地区。何金海等(2005)用合成法讨论了西北地区近50年夏季降水异常场的水汽输送和环流特征。赵兵科等(2006)通过1987年前后平均环流场和湿度场的变化来解释西北地区向暖湿转变的原因。靳立亚等(2006)利用西北地区25个地面站点1968~1998年月降水量资料以及同期25个探空站点的资料,讨论了西北地区降水和大气水汽的关系,并分析了冷暖年水汽特征的差异。结果表明西北地区主要以纬向水汽输送为主,且水汽输送的两个主要通道对应降水的极大值中心,并指出全球变暖对西北地区大气水汽分布有一定影响。

鉴于水汽输送对西北地区降水的重要性,本文通过对近五十年西北夏季降雨场的EOF分解,获取西北夏季降水场主要时空特征,然后分析造成这一主要时空特征的水汽输送状况。本文包括以下几部分内容,首先讨论近五十年西北夏季降水场的主要空间分布特征和时间演变;然后根据西北降水场的主要时空特征,分析与之相关联的水汽输送状况,并根据环流场变化对水汽输送异常进行解释;最后还讨论了大尺度环流指数(如大气涛动,极涡指数等)对西北夏季降雨的影响。本文所做工作对了解西北地区降水特征和成因具有一定参考意义。

2 资料与处理方法

本文所用资料来自中国气象局信息中心提供的西北地区地面日气候资料集。资料时段为1951~2005年,记录了西北地区及内蒙古自治区224个测站资料信息。本文主要讨论 110°E 以西的191个西北测站的特征。

由于早期气象资料缺失较多,对数据进行以下条件的筛选:(1)剔除明显错误的记录(如降水低于零)。(2)所统计站点的资料长度不少于30年;(3)所统计年的缺测站点数不超过站点总数 $1/3$ 。(4)只考虑测站月降水量在 $x_i - \bar{x} < 4\sigma$ 范围的记录,否则赋为缺测。这里 $x_i (i=1, 2, \dots, 48)$ 为测站月降水量, \bar{x} 和 σ 为该站48年的平均月降水量和降水方差。最终选取1958~2005年186个测站资料来讨论西北地区各强度降水的变化。站点分布见图1b中圆点所示。

高空数据为月平均ERA40再分析资料,其水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$,垂直23层(分别为1000、925、850、775、700、600、500、400、300、250、200、150、100、70、50、30、20、10、7、5、3、2、1 hPa)。为与站点序列一致,选用1958~2000年数据进行分析。

本文使用地面气压以及高空各等压面的经向风、纬向风、比湿来计算整层水汽输送量。计算公式为:

$$Q = \frac{1}{g} \int_{p_t}^{p_s} q \mathbf{V} dp,$$

其中, q 为比湿(单位:k/kg), \mathbf{V} 表示水平风速(单位:m/s), p_s 、 p_t 分别是大气柱下界气压(地表面气压)和上界气压(取300 hPa)。 g 表示重力加速度。 Q 表示整层水汽积分。Zhou et al. (2005)曾指出,即便在水汽含量丰富的热带海域上空,每年300 hPa以上的水汽通量也不超过 $2 \sim 3$ cm。因此本文计算水汽时从地表积分到300 hPa高度。

3 分析与结论

3.1 夏季降水场时空特征

对夏季西北月降水统计表明,夏季站点平均降水为173.6 mm,占年总降水量53%。1958~2005年西北地区夏季降水平均分布和降水变化百分率如图1所示。从降水空间分布可以看出,西北夏季有

两个明显的多雨中心，分别在西北东南部和天山西部。从量值来看，西北东部大部分地区超过 200 mm，部分地区可达 350 mm，而天山西部基本在 150 mm 左右。其他地区降水一般都在 100 mm 以下。北疆在 50~100 mm 之间，南疆和西北中部大部分地区夏季降水不超过 50 mm。

由于不同地区降水量差异较大，这里用相对趋势来描述西北各站点的变化（图 1b），即每十年当地夏季降水增加量相对于当地夏季平均降水量的百分率。实心圆表示测站降水增多，反之表示减少。圆圈大小表示变化的幅度。图 1 反映了近半个世纪以来，西北东部降水减少而西部降水增多的现象，其中西北西部降水增多以南疆最为突出，大部分测站每十年增加量都超过当地降水平均的 5%。这与以往研究结果一致。

主分量分析是一种简化数据集的线性变换方法，这种变化可以减少数据集的维数，同时保持变换后前几个变量方差贡献最大的特征。因此通过对

主要分量的分析，可以宏观、系统地得出数据集的主要特征。由于西北降水地域差异大，这里用降水距平百分率来进行主分量分析。首先求出数据集相关系数矩阵的特征根和特征向量，然后根据原始数据集和特征向量，求出西北地区降水场的时间函数部分。为使结果更有意义，这里将时间函数部分标准化，并用降水距平百分率对标准化主分量的回归系数来表示降水场空间函数部分（黄嘉佑，1990；Zhou et al., 2005）。

分析结果表明前两个主分量分别解释总方差的 17.7% 和 12.8%，第三模态为 7.2%。North 验证（North et al., 1982）表明第三、四模态间不独立，前两模态相互独立（图略）。因此，这里用前两个模态特征来代表西北降水场的变化，并讨论影响西北降水分布的环流状况。西北降水模态场和时间序列场分别如图 2、3 所示。如前所示，模态图中等值线为降水距平百分率对标准化主分量（PC）的回归系数（当 PC 变化一个标准差时，西北地区降水

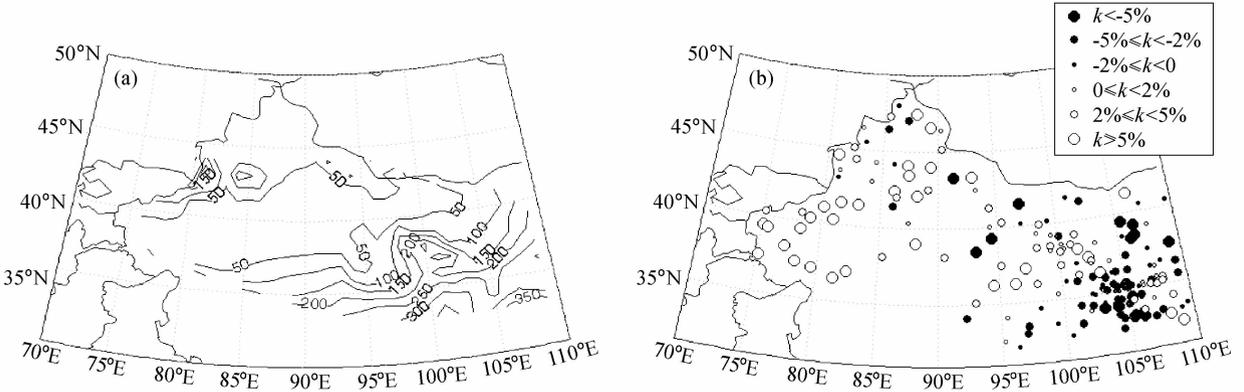


图 1 1958~2005 西北夏季降水场特征：(a) 空间分布（单位：mm）；(b) 变化趋势 k [单位： $(10a)^{-1}$]
Fig. 1 JJA (Jun, Jul, and Aug) mean rainfall in Northwest China during 1958–2005: (a) Isohyets (mm); (b) secular trend k [units: $(10 a)^{-1}$]

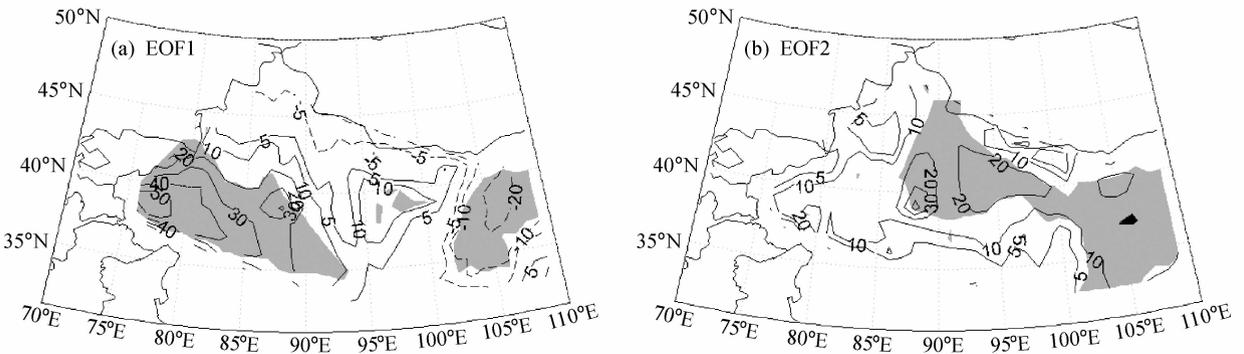


图 2 夏季降水前两个 EOF 模态的空间分布：(a) EOF1；(b) EOF2。阴影：回归系数通过 95% 信度 t 检验
Fig. 2 The leading EOF modes of JJA mean rainfall: (a) EOF1; (b) EOF2. Shaded regions are significant at 95% confidence level

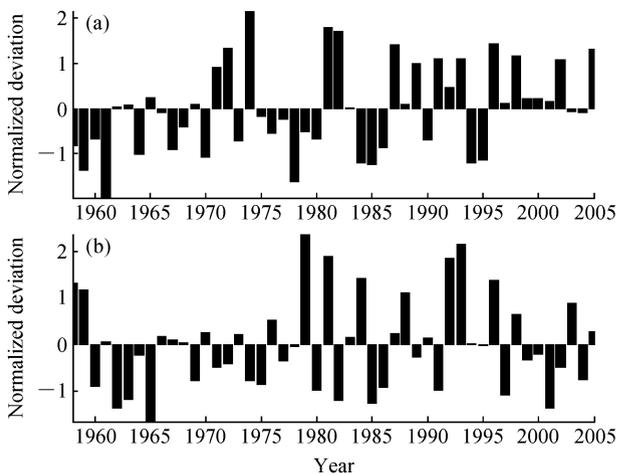


图3 与夏季前两个降水模态场相对应的标准化主分量序列:

(a) 第一主分量序列; (b) 第二主分量序列

Fig. 3 The normalized principal components (PCs) corresponding to the first two leading modes of JJA mean rainfall: (a) The first principle component (PC1); (b) the second principle component (PC2)

相对于平均值的改变量)。

从夏季降水场主要模态(图 2a)可以看出,近五十年西北夏季降水在东西部呈反相变化,表现为西部降水增多而东部降水减少,其中南疆地区降水增加最为突出。图 3 中阴影区域反映了变化显著的区域。西北西部降水增多和东部降水减少是近五十年来夏季西北地区降水变化的一个主要特征。

观察 PC1 序列发现,1987 年后大部分年代降水都呈现正距平,表明 1987 年后西北进入相对湿润的年代,这与以往研究结果一致。变化较显著的年份有 1987、1991、1996、1998、2002、2005,且 1985 年后 PC1 一般都在一个标准差以上。对比第一模态降水场分布(图 2a)可知,在 PC1 大于一个标准差的年份,南疆大部分地区降水增加量达到该地区平均值 30% 以上。南疆西部增量高达平均值的 50%。西北东部降水减少也比较显著,减少量基本在该地区平均降水量 15% 左右。由于夏季西北东部降水量远大于南疆干旱地区,相对于东部均值 15% 的减少量对西北总降水仍占较大比重。近年来,西北东部干旱已经引起学者们的重视(王宝鉴等, 2004; 张玉娟等, 2005)。

PC1 在近五十年呈现增长趋势(0.248/10a),并且变化显著。周期分析表明 PC1 有较为显著的 9 年和 3 年周期。韦志刚等(2000)曾将 PCA 和

SSA 相结合分析了我国西北降水的周期,发现准 8.5 年、准 3~4 年和准 5.1 年周期在西北地区比较突出。本文结果与之基本一致。

第二模态图(图 2b)表明西北降水场另一显著特征就是西北全区的一致变化,其中甘肃、新疆西部等地区变化量较大。统计结果表明,PC2 近五十年并没有显著增长的趋势,这与最近几年 PC2 的持续负距平有关。1995 年后西北东部降水一直减少,减少最明显的河西走廊和新疆吐鲁番地区。1996、1998、2002、2005 年两地区降水减少量达该地区平均降水量的 20%。对 PC2 的谐波分析表明第二模态分布具有 12 年和 3 年的周期特征。

3.2 影响夏季降水场的水汽原因

水汽是影响降水的重要条件。图 4 是夏季水汽输送对西北降水场的回归。对比图 4 与西北夏季降水模态图分布,可知水汽输送异常对降水异常场有着举足轻重的作用。

与第一模态相关的水汽输送图中,在高纬(50°N~70°N, 70°E~100°E)附近有异常水汽在西西伯利亚平原顺时针大面积南下,大部分水汽在气流引导下在 50°N 纬线附近向西输送,部分自阿尔泰山进入我国北疆和内蒙古地区。部分向西输送的水汽经黑海、里海继续向南输送,在伊朗高原地区与低纬水汽汇聚,由我国西北西部进入新疆。图 4 中阴影显示伊朗高原水汽对我国西南边境的水汽输送有较重要作用。这支异常水汽距离我国南疆较近,如果环流场适宜,可以从我国边境进入西藏、南疆境内。这将对南疆西部降水增多起重要作用。后面我们会讨论与第一模态降水相关的环流场特征。西北东部主要是异常的东北方向水汽,由于西北东部以低纬季风水汽输送为主,异常的东北方向水汽输送表明近五十年来季风输送水汽减少,与模态图所反映的东部降水减少相一致。

影响第二模态降水的水汽输送图表明,高纬地区有显著的水汽输送自北疆西部进入我国西北。这支水汽输送影响范围较大,包括我国新疆中东部、西北东部大部分地区以及华北部分省份。图 4 中另一特征就是来自低纬经我国中部向北方向的异常水汽输送,我国西北地区在这支异常水汽影响下,降水会有一些增加。

以上对水汽输送异常的分析表明,西北夏季降水异常场的分布与水汽输送有很好的-一致性,水汽

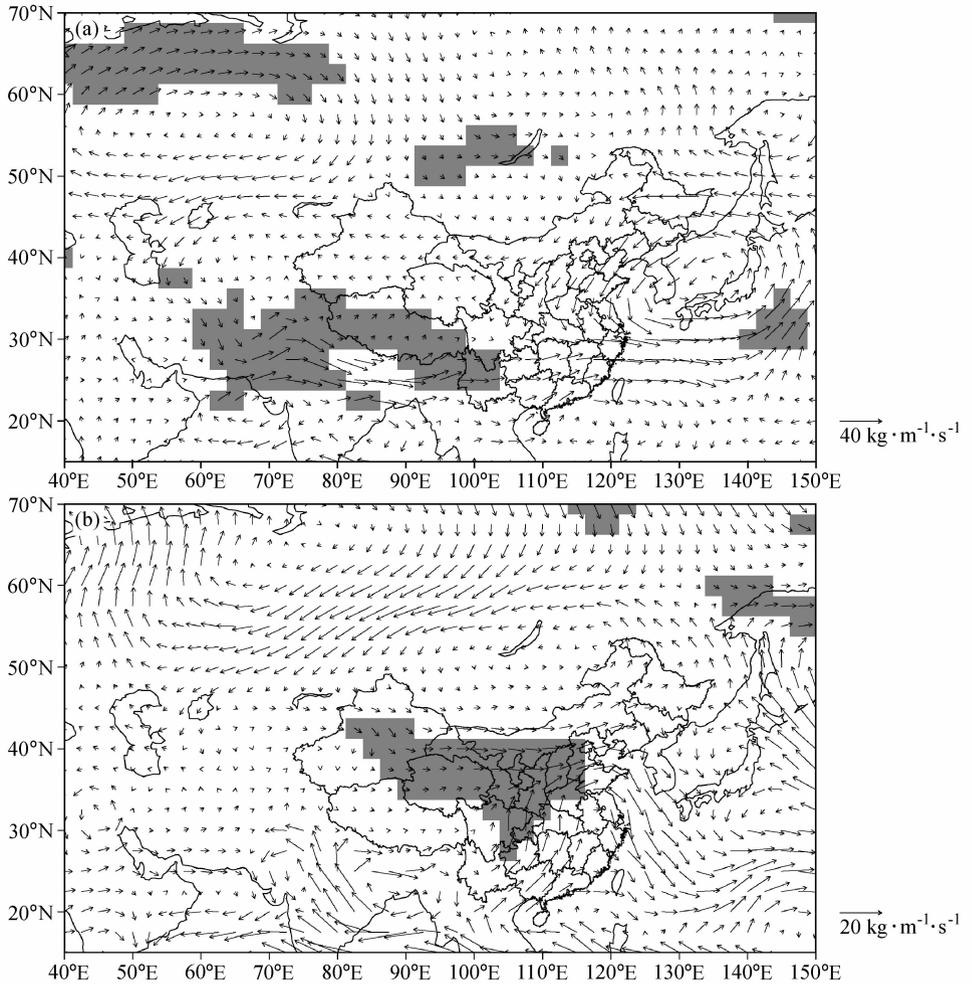


图4 1958~2002年夏季西北上空的水汽输送对PC1(a)和PC2(b)的回归图。阴影:通过95%信度验证的地区

Fig. 4 Anomalies of vertically integrated summer water vapor transport in Northwest China during 1958 - 2002 regressed on (a) PC1 and (b) PC2. Shaded regions are significant at 95% confidence level

输送的路径和水汽输送量的大小是决定西北降水空间分布的主要因素。由于西北上空水汽含量较少,水汽输送受大气环流影响大,下面将讨论西北上空环流场的变化,以加深对水汽输送异常的理解。

3.3 大气环流对夏季降水场的影响

500 hPa 气压场可以反映大气的基本环流情况。200 hPa 风场的大小和位置与低空大气辐散辐合有一定关系,可以反映大气的垂直运动特征。这里将通过 500 hPa 位势高度变化和 200 hPa 经向风变化来对大气环流异常进行讨论。

图 5 是 1958~2002 年夏季 500 hPa 位势高度距平对西北夏季降水场的回归图。图中阴影为年均(1958~2002) 500 hPa 等压面上位势高度大小,其分布可以反映大气基本环流形势。图中等值线为年

均 500 hPa 等压面上各点位势高度变化对夏季 PC 的回归值,表示当 PC 变化一个标准差,即发生模态场图中所标降水量变化时各点位势高度变化。同样,本文也在后面(图 7)描述了 1958~2002 年夏季 200 hPa 纬向风场对夏季降水场的回归。

从图 5 看,与第一模态降水场有关的环流场上有三个较显著的位势高度变化中心。分别是 40°E~90°E, 45°N 以北的位势高度增加和 45°N 以南的位势高度减少,以及日本海上空的位势高度减少。在 40°E~90°E 范围内的两个位势高度变化区域,高纬位势高度增加比较显著,容易激发顺时针环流,与图 4 中高纬地区的顺时针水汽输送相对应。低纬位势高度减少量虽不如高纬增加量大,但也形成了闭合中心,中心位于南疆西部 60°E~75°E 范围内,

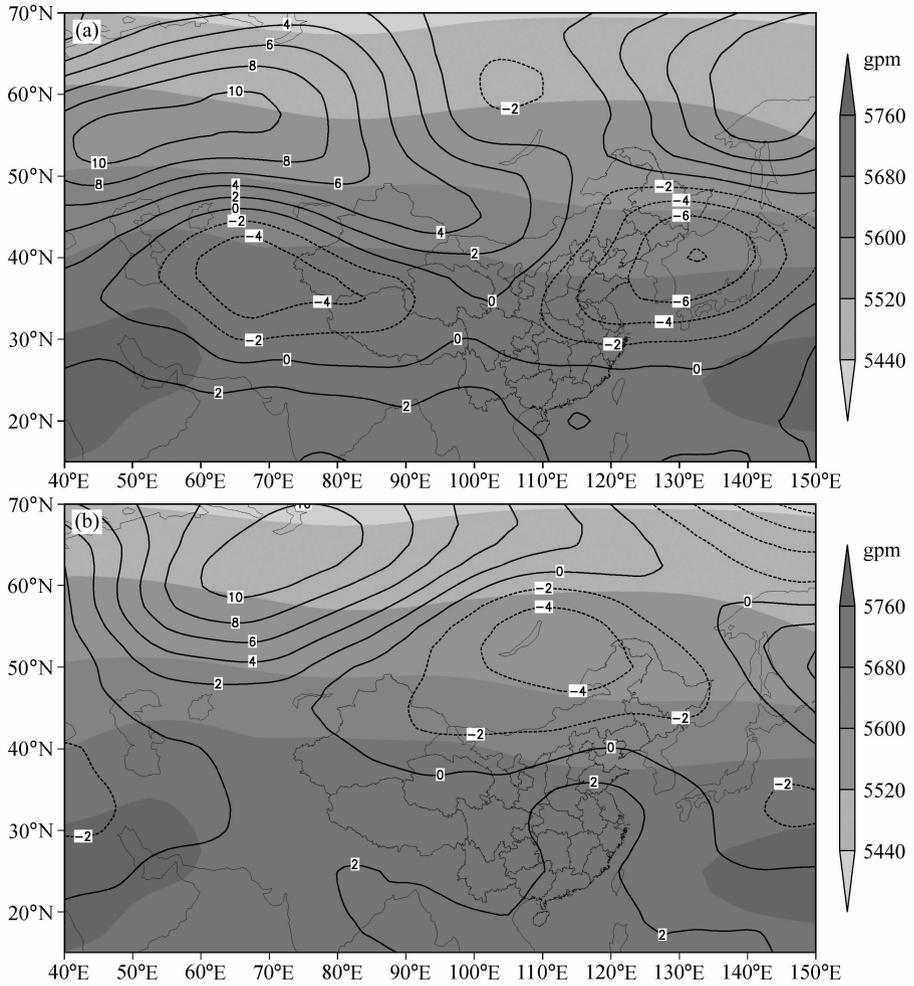


图 5 1958~2002 年夏季 500 hPa 位势高度距平 (单位: gpm) 对 PC1 (a) 和 PC2 (b) 的回归图。阴影表示 45 年平均位势高度
 Fig. 5 Anomalies of 500-hPa geopotential height (gpm) in summer during 1958 - 2002 regressed on (a) PC1 and (b) PC2. Shadings indicate 45-year means

这一负变化与图 4 中南下水汽逆时针向新疆输送相对应。由此可见，环流场异常对水汽输送异常有重要作用。这也反映了西伯利亚上空位势高度增加和新疆西部位势高度减少对西北西部（尤其南疆）降水增多有重要作用。

图 5 中另一显著变化中心在远离西北的日本海上空。从图 5 看，该范围位势高度减小和高纬地区位势高度增加在华北上空构成显著的梯度分布，由此产生的东北风异常会削弱季风北上的影响范围，这就很好地解释了图 4 西北东南部的的水汽变化状况。同样，这也反映了西北东部的降水减少与环流场变化引起的水汽输送异常有很大关系。

影响第二模态降水的环流场上有较显著的两个位势高度变化中心，分别是西伯利亚上空位势高度

增加和西伯利亚东部位势高度减少。图形数值表明西伯利亚上空位势高度变化不仅范围广而且增加量大，这会引导高纬西西伯利亚平原水汽沿顺时针向南输送，并从北疆和内蒙古地区进入我国，主要影响范围是北疆和西北中部。西北西南部上空位势高度比较稳定，模态图也表明该地区降水变化不显著，而北疆东部和西北中东部变化较大。

为进一步考察高空位势高度变化对西北降水影响，这里讨论了当 PC 变化时，500 hPa 等压面上位势高度变化显著区域（图 5 中闭合等值线区域）与西北降水的相关性。

图 5 表明与第一模态相关的位势高度变化较显著，同时考虑第一模态揭示了近五十年来西北降水的主要空间分布特征，因此这里只分析图 5a 中位

势高度显著变化区域与西北降水的关系。参考图 5a, 这里重点分析西伯利亚上空 ($50^{\circ}\text{N}\sim 60^{\circ}\text{N}$, $40^{\circ}\text{E}\sim 70^{\circ}\text{E}$)、伊朗高原上空 ($35^{\circ}\text{N}\sim 42.5^{\circ}\text{N}$, $60^{\circ}\text{E}\sim 75^{\circ}\text{E}$) 以及日本海上空 ($35^{\circ}\text{N}\sim 45^{\circ}\text{N}$, $120^{\circ}\text{E}\sim 140^{\circ}\text{E}$) 的位势高度变化序列。

根据图 1 近五十年西北夏季降水变化趋势和图 2a 夏季降水主要模态场的分布, 这里以 100°E 以东站点降水平均值来描述近五十年西北东部的降水特性。由于西北西部面积广阔、地势复杂, 并且降水在南北部也有不同特征。这里仅以夏季降水增多最显著的南疆为考察对象, 即对 41°N 以南, 90°E 以西的测站进行分析。

根据图 5a 特征, 这里重点考察西伯利亚上空位势高度增加、伊朗高原上空位势高度减少对南疆降水的影响, 以及日本海上空位势高度减少对西北

东部降水的影响 (如图 6 所示)。图 6 中实线表示降雨序列, 虚线表示位势高度变化序列。

通过图 6 可以看出, 近五十年西北西部尤其南疆的降水增多与西伯利亚 ($50^{\circ}\text{N}\sim 60^{\circ}\text{N}$, $40^{\circ}\text{E}\sim 70^{\circ}\text{E}$) 高空位势高度增加以及伊朗高原 ($35^{\circ}\text{N}\sim 42.5^{\circ}\text{N}$, $60^{\circ}\text{E}\sim 75^{\circ}\text{E}$) 高空位势高度减少有很大关系。计算发现南疆降水与两地区位势高度序列的相关系数分别为 0.46 和 -0.6, 并且都通过显著性验证。

西北东部降水与日本海高空位势高度序列相关性小 (相关系数为 0.26, 并且不显著), 这与东部站点选择范围广有一定关系, 也不排除两者在图 5 所表现的特性是其它系统共同所致。西北东部位于季风边缘地区, 近年来西北东部降水显著减少, 已有不少学者对季风和干旱区的关系进行了讨论。张

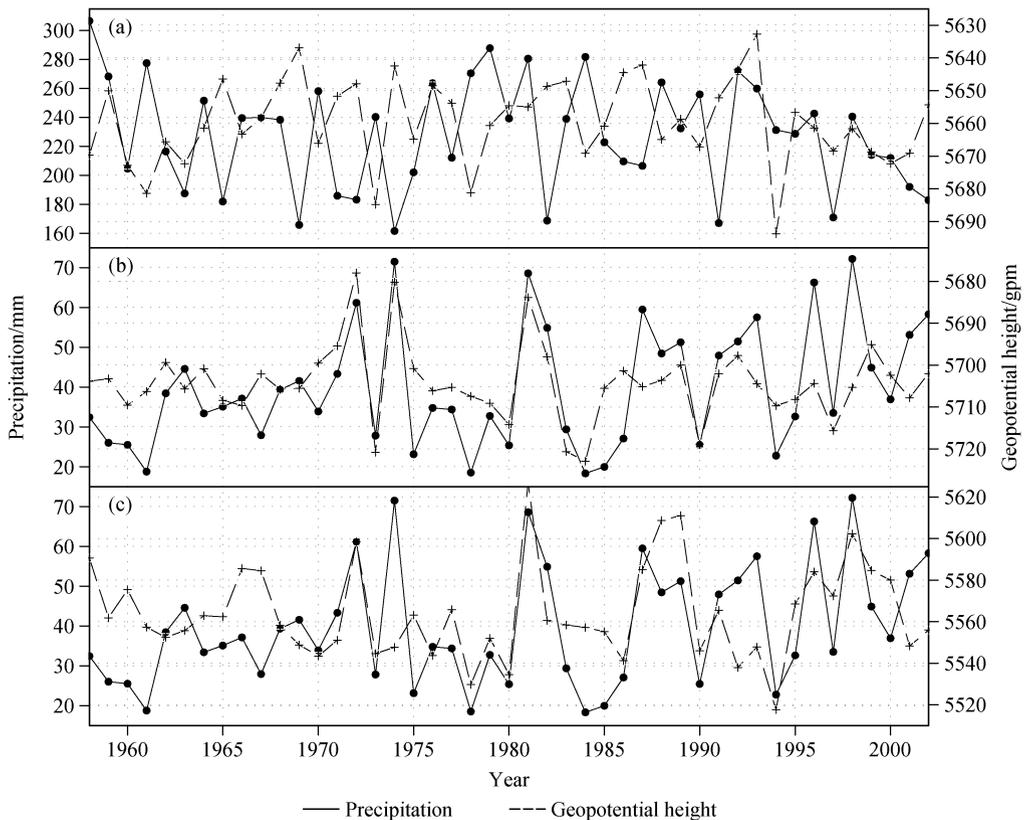


图 6 (a) 西北东部夏季降水量变化与 500 hPa 日本海上空 ($35^{\circ}\text{N}\sim 45^{\circ}\text{N}$, $120^{\circ}\text{E}\sim 140^{\circ}\text{E}$) 位势高度变化; (b) 南疆夏季降水量变化与 500 hPa 伊朗高原上空 ($35^{\circ}\text{N}\sim 42.5^{\circ}\text{N}$, $60^{\circ}\text{E}\sim 75^{\circ}\text{E}$) 位势高度变化; (c) 南疆夏季降水量序列与西伯利亚 ($50^{\circ}\text{N}\sim 60^{\circ}\text{N}$, $40^{\circ}\text{E}\sim 70^{\circ}\text{E}$) 500 hPa 高空位势高度变化

Fig. 6 (a) Time series of summer rainfall in the east part of Northwest China and 500-hPa geopotential height in the Sea of Japan ($35^{\circ}\text{N}\sim 45^{\circ}\text{N}$, $120^{\circ}\text{E}\sim 140^{\circ}\text{E}$); (b) time series of summer rainfall in the south part of Xinjiang and 500-hPa geopotential height in the Iranian plateau ($35^{\circ}\text{N}\sim 42.5^{\circ}\text{N}$, $60^{\circ}\text{E}\sim 75^{\circ}\text{E}$); (c) time series of summer rainfall in the south part of Xinjiang and 500-hPa geopotential height in Siberia ($50^{\circ}\text{N}\sim 60^{\circ}\text{N}$, $40^{\circ}\text{E}\sim 70^{\circ}\text{E}$)

广周等(2000)研究发现,东南季风边缘区(河西走廊中东部、甘肃中部地区)在全球气候变暖背景下,变暖使东南季风边缘区的夏季风减弱,并存在夏季变干趋势。这一特征与我国西北东部近年来降水减少相一致。高由禧等(1962)、张存杰等(2002)和王宝鉴等(2004)的研究都表明,东亚夏季风对我国降水的影响主要位于 100°E 以东,其中包括了西北东部一些地区。由此可见,东部降水减少与季风的关系更为密切,后面对 Niño 3.4 海温与西北东部降水的相关分析也说明了这一点。

水汽输送受大气辐散辐合影响也较大。高空急流加剧会导致低空气流上升,这里绘制了影响我国西北降水异常场的 200 hPa 风场变化(图 7)。与前面类似,这里图 7 中的阴影反映了 1958~2002 年西北上空平均纬向风状况。可以看出西风极值区在 $35^{\circ}\text{N}\sim 45^{\circ}\text{N}$ 范围,我国西北大部分地区都处于该急流影响范围内。高空风越强越容易激发低空气流辐合、上升,为形成降水提供了条件。从图 6 中影响第一模态降水的高空风场等值线变化看, $25^{\circ}\text{N}\sim 35^{\circ}\text{N}$ 的伊朗高原上空西风强度增加。该地区上空风强度会加大低空水汽辐合,部分阿拉伯海水汽会在大气逆时针气流影响下向北输送,并从南疆西部进入我国。

与夏季第二模态降水场有关的高空风变化中,沿 110°E 经度圈从高纬到低纬有三个变压中心,这可能与某种大气波动有关。后面会进一步讨论环流指数与西北降水的关系。从图 7b 反映的纬向风变化看, $40^{\circ}\text{N}\sim 50^{\circ}\text{N}$ 范围西风增加比较明显,该范围西风异常增加对水汽北上有很大促进作用。

1987 年后,西北由暖干向暖湿的突变已有不少学者进行过验证。图 3 中 PC1 的序列也反映出这一现象。为更直观地表示西北上空水汽散合的变化,这里通过 1958~1987 与 1988~2002 西北上空水汽辐散的差异(图 8)作进一步说明。

上图 8 中水汽辐散为正、辐合为负。可以看出 1987 年后南疆上空为水汽辐合,此外我国新疆西部境外水汽也以辐合为主,但河西走廊、天山和大部分北疆区域夏季水汽辐散。以上特征以及图 7 中西风变化都与近五十年来西北夏季降水空间分布有较好的一致性。

3.4 环流指数与夏季降水场关系

进一步观察图 5、图 7 发现,在 500 hPa 位势高度与 PC1 的回归图中(图 5),沿 60°N 纬线从西到东有“+ - +”的位势高度变化中心,沿 65°E 经线和 135°E 经线也有高纬位势高度增加和低纬位势高度减少。500 hPa 位势高度与 PC2 回归图中,高纬地区沿 60°N 经线有“+ - +”的分布。同样图 7 也有类似的波动状况。这种正负交替分布形势可能与某种大气波动有关,这里将展开讨论大气环流指数与西北夏季降水场的相关性。

描述海平面气压场的三种遥相关型分别是北大西洋涛动(NAO)、北太平洋涛动(NPO)和南方涛动(SO)。由于南方涛动指数 SO 与赤道东太平洋海温有很好的相关性。这里用 Niño 3.4 区的海温来代替 SO 的变化。其中,NAO、NPO 序列来自 <http://www.cses.washington.edu/data/indices.shtml#atmospheric>, Niño3.4 海温来自于 www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices, 这些序列都是从

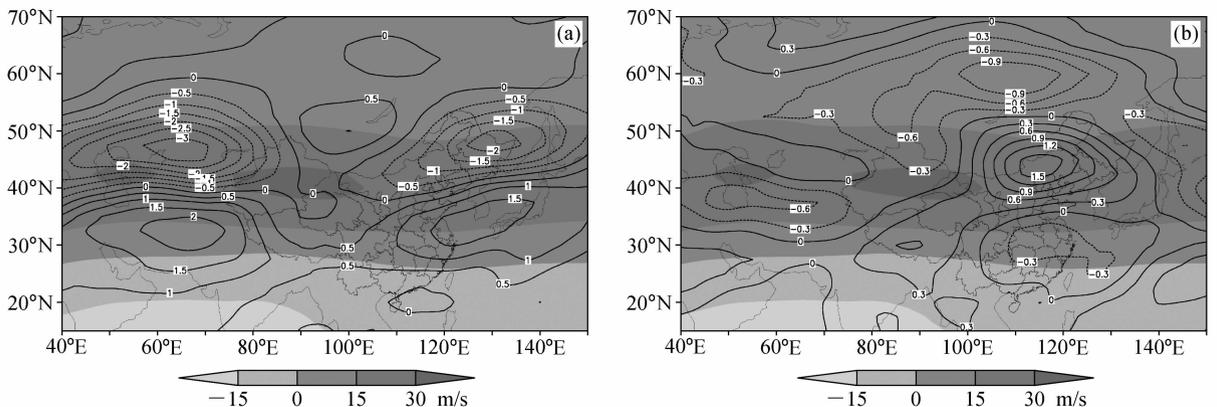


图 7 1958~2002 年夏季 200 hPa 纬向风对夏季 PC1 (a) 和 PC2 (b) 的回归图(等值线,单位: m/s)。阴影: 45 年平均纬向风值
Fig. 7 Anomalies of 200-hPa zonal wind in summer during 1958 - 2002 regressed on (a) PC1 and (b) PC2 (isolines, units: m/s). Shadings indicate 45-year means

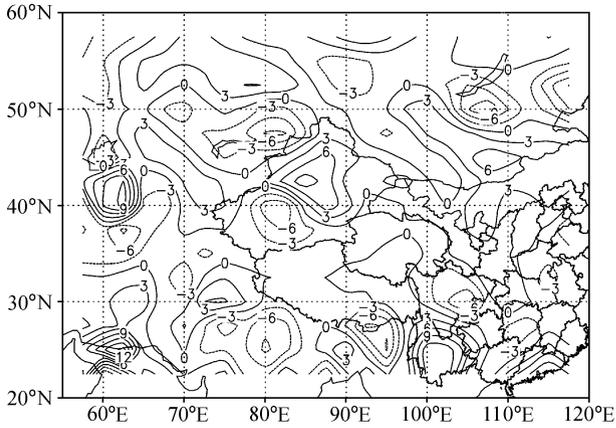


图 8 1988~2002 与 1958~1987 西北上空水汽辐散差异 (单位: $10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 8 Difference of water vapor divergence over Northwest China between 1988-2002 and 1958-1987 (units: $10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)

1950 年到 2006 年。

高纬度环流系统受极涡影响大,极涡中心的移动、极涡强度大小和极涡面积变化都会影响到中高纬度甚至低纬度的天气系统变化。这里讨论北半球极涡面积指数 (North Hemispheric Vortex Area Index) 和亚洲区极涡面积指数 (Asian Vortex Area Index) 与西北夏季降水场的关系。亚洲区域所选范围为 $60^{\circ}\text{E} \sim 150^{\circ}\text{E}$, 北半球区域为 $0^{\circ} \sim 360^{\circ}\text{E}$, 计算方法参见吉林省气象科学研究所极涡和气温预报课题协作组 (1989) 的报告^①。极涡指数时间序列范围是 1951~2005 年。

表 1 是各气象指数与夏季前两模态降水之间的关系。由于一些气象指数存在明显的线性趋势,这里也对滤波后的序列 (去掉线性变化后序列) 进行了相关分析,可以体现出两序列年际波动的相关性。

从表 1 反映的特征看,北大西洋涛动 (NAO) 和北太平洋涛动 (NPO) 与夏季西北降水关系并不显著。但滤波后北大西洋涛动与西北夏季第一模态相关性很强,相关系数为 0.43,北太平洋涛动与第二模态相关性很强,相关系数高达 -0.66。这两个相关都通过 99% 显著性验证。这一现象说明,NAO 和 NPO 对西北地区夏季降水的年际尺度波动影响很显著,NAO 年际波动主要影响第一模态降水场的变化,NPO 则影响第二模态降水场的年际变化。

表 1 一些气象指数与西北地区夏季降水场主要模态的相关性

Table 1 Correlations between the climate indices and the first two PCs for JJA mean rainfall in Northwest China

	PC1		PC2	
	原始序列	滤波后序列	原始序列	滤波后序列
NAO	0.02	0.43 ^a	0.09	0.13
NPO	-0.06	-0.15	-0.22	-0.66 ^a
Niño 3, 4 SST	0.19	-0.06	-0.06	0.76 ^a
北半球极涡面积指数	-0.32 ^b	-0.7 ^a	-0.08	-0.04
亚洲区极涡面积指数	-0.28	-0.48 ^a	-0.01	-0.16

注: 上标“a”表示通过 99% 信度验证; 上标“b”表示通过 95% 信度验证。

我国学者曾对 ENSO 与西北地区降水进行过研究 (张存杰等, 2003; 冯建英等, 2000), 都表明了海温对近来西北东部降水减少有一定影响。

从表 1 海温与降水模态场相关性大小看,降水对西北降水影响并不显著。但滤波后海温与第二模态降水场降水相关性较好。原始序列相关性不好可以解释为海温影响范围主要集中在东部区域,而 PC1 反映的是整个西北地区降水场的变化。仅对 100°E 以西北站点进行分析,结果表明东部降水与海温显著相关,相关系数为 0.41。由此可见,海温变化所导致的环流场差异,其影响范围可以波及到我国西北东部的季风边缘地区。

极涡与第一模态降水的相关性较好,北半球极涡面积和亚洲区极涡面积与夏季第一模态降水的相关性为 -0.32 和 -0.28。滤波后的序列相关性分别高达 -0.7 和 -0.48,两者均通过 99% 显著性验证。序列分析表明近几十年来极涡面积显著减小,减少趋势为: 北半球极涡面积 -0.49%/10a, 亚洲极涡面积 -0.46%/10a。负相关性表明西北东部降水减少、西部降水增多的现象越来越突出,这与前面的分析相一致。极涡面积变化可以作为考察西北地区降水变化的一个重要指标。

4 小结

(1) 近五十年西北夏季降水的主要特征是东、西部的反相变化,表现为西北西部降水增多、东部降水减少。这一特征在 1987 年后最为突出。西北降水有 3 年和 10 年左右的周期。

① 极涡和气温预报课题协作组. 1989. 北半球 500 hPa 极涡特征参量的计算与使用说明. 吉林省气象科学研究所报告 (2): 1-4.

(2) 水汽输送是影响西北降水的主要因素,而环流场调节则是水汽输送变化的主要原因。近五十年来,西北西部降水增多与多年平均 500 hPa 等压面上西伯利亚上空位势高度增加和境外西侧上空位势高度减少有很大关系。西北东部处于季风边缘地区,其降水量多少与季风强弱有很大关系。

(3) 1987 年后,西北西侧尤其南疆地区的水汽辐合是该区降水增多的一个重要因素。

(4) 北大西洋涛动与西北夏季降水第一模态降水相关性好,北太平洋涛动与第二模态相关性好。Niño3.4 区海温主要影响西北东部降水。近来,极涡面积减少与西北降水西增东减的现象有很好的相关性,可以用极涡年际波动来定量描述西北东西部降水的波动状况。

致谢 感谢中国气象局信息中心提供的分析资料,感谢几位评审专家提出的宝贵修改意见。

参考文献 (References)

蔡英,钱正安,宋敏红. 2003. 华北和西北区干湿年间水汽场及东亚夏季风的对比分析 [J]. 高原气象, 22 (1): 14-23. Cai Ying, Qian Zheng'an, Song Minhong. 2003. Contrast analyses on water vapor and EASM between dry and wet years of Northwest and North China [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 22 (1): 14-23.

蔡晓军,李栋梁,姚辉. 1998. 中国西北地区春末夏初降水异常的时空变化特征 [J]. 高原气象, 17 (2): 170-181. Cai Xiaojun, Li Dongliang, Yao Hui. 1998. The spatial and temporal variation features of precipitation anomaly during late spring and early summer over the Northwest China [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 17 (2): 170-180.

崔玉琴. 1994. 西北内陆上空水汽输送及其源地 [J]. 水利学报, (9): 79-87. Cui Yuqin. 1994. The transport of vapour and its sources in Northwest China [J]. Journal of Hydraulic Engineering (in Chinese), (9): 79-87.

高晓清. 1994. 西北干旱地区大气中水汽的平均输送 [J]. 高原气象, 13 (3): 307-313. Gao Xiaqing. 1994. The mean moisture transferring in air over northwest arid region [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 1994, 13 (3): 307-313.

高由禧,徐淑英. 1962. 东亚季风的若干问题 [M]. 北京: 科学出版社, 49-63. Gao Youxi, Xu Shuying. 1962. Several Questions of the East Asian Summer Monsoon (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press.

何金海,刘芸芸,常越. 2005. 西北地区夏季降水异常及其水汽输送和环流特征分析 [J]. 干旱气象, 23 (1): 10-16. He Jinhai, Liu Yunyun, Chang Yue. 2005. Analysis of summer precipitation anomaly and the feature of water vapor transport and circulation in Northwest China [J]. Arid Meteorology (in Chinese), 23 (1):

10-16.

胡汝骥,马虹,樊自立,等. 2002. 新疆水资源对气候变化的响应 [J]. 自然资源学报, 17 (1): 22-27. Hu Ruji, Ma Hong, Fan Zili, et al. 2002. Response of water resources to climate change in Xinjiang [J]. Journal of Natural Resources (in Chinese), 17 (1): 22-27.

黄嘉佑. 1990. 气象统计分析与预报方法 [M]. 北京: 气象出版社, 182-188. Huang Jiayou. 1990. Meteorological Statistical Analysis and Prediction Method (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press.

黄山江,王谦谦,刘星燕. 2004. 西北地区春季和夏季降水异常特征分析 [J]. 南京气象学院学报, 27 (3): 336-346. Huang Shanjiang, Wang Qianqian, Liu Xingyan. 2004. Analysis of anomalous characteristics of spring and summer precipitation in Northwest China [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 27 (3): 336-346.

黄玉霞,李栋梁,王宝鉴,等. 2004. 西北地区近 40 年降水异常的时空特征分析 [J]. 高原气象, 23 (2): 246-252. Huang Yuxia, Li Dongliang, Wang Baojian, et al. 2004. Analysis on temporal-spatial features of annual precipitation in Northwest China in recent 40 years [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 23 (2): 246-252.

靳东亚,符娇兰,陈发虎. 2006. 西北地区空中水汽输送时变特征及其与降水的关系 [J]. 兰州大学学报(自然科学版), 42 (1): 1-5. Jin Liya, Fu Jiaolan, Chen Fahu. 2006. Spatial and temporal distribution of water vapor and its relationship with precipitation over Northwest China [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences) (in Chinese), 42 (1): 1-5.

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 (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 21 (3): 331-340.

李耀辉,李栋梁,赵庆云,等. 2000. ENSO 对中国西北地区秋季异常降水的影响 [J]. 气候与环境研究, 15 (2): 205-213. Li Yaohui, Li Dongliang, Zhao Qingyun, et al. 2000. Effect of ENSO on the autumn rainfall anomaly in Northwest China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 15 (2): 205-213.

North G R, Bell T L, Cahalan R F. 1982. Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal functions [J]. Mon. Wea. Rev., 110, 699-706.

宋连春,张存杰. 2003. 20 世纪西北地区降水量变化特征 [J]. 冰川冻土, 25 (2): 143-148. Song Lianchun, Zhang Cunjie. 2003. Changing features of precipitation over Northwest China during the 20th century [J]. Journal of Glaciology and Geocryology (in Chinese), 25 (2): 143-148.

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问题评估 [M]. 北京: 气象出版社. Shi Yafeng, Shen Yongping, Li Dongliang, et al. 2003. An Assessment of the Issues of

- Climatic Shift from Warm-Dry to Warm-Wet in Northwest China (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press.
- 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. Wang Baojian, Huang Yuxia, He Jinhai, et al. 2004. Relation between vapor transportation in the period of East Asian summer monsoon and drought in Northwest China [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 23 (6): 912-918.
- Wang H. 2001. The weakening of the Asian monsoon circulation after the end of 1970's [J]. Adv. Atmos. Sci., 18 (3): 376-386.
- 王秀荣, 徐祥德, 姚文清. 2002. 西北地区干、湿夏季的前期环流和水汽差异 [J]. 应用气象学报, 13 (5): 550-559. Wang Xiurong, Xu Xiangde, Yao Wenqing. 2002. Differences in circulation and moisture between dry and wet years in Northwest China [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 13 (5): 550-559.
- 王秀荣, 徐祥德, 苗秋菊. 2003. 西北地区夏季降水与大气水汽含量状况区域性特征 [J]. 气候与环境研究, 8 (1): 35-42. Wang Xiurong, Xu Xiangde, Miao Qiuju. 2003. Regional characteristics of summer precipitation and water vapor amount in Northwest China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 8 (1): 35-42.
- 王旭, 王铁, 马禹. 2001. 新疆对流层中上部水汽输送特征研究 [J]. 新疆气象, 24 (2): 1-3. Wang Xu, Wang Tie, Ma Yu. 2001. Characteristics of water vapour transfer in upper-middle troposphere over Xinjiang [J]. Bimonthly of Xinjiang Meteorology (in Chinese), 24 (2): 1-3.
- 韦志刚, 董文杰, 惠小英. 2000. 中国西北地区降水的演变趋势和年际变化 [J]. 气象学报, 58 (2): 234-243. Wei Zhigang, Dong Wenjie, Hui Xiaoying. 2000. Evolution of trend and interannual oscillatory variabilities of precipitation over the Northwest China [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 58 (2): 234-243.
- Yeh T C, Fu Congbin. 1985. Climate change—A global and multi-disciplinary themes [C] // Malone T F, Roederer J G. Global Change, Cambridge University Press, 127-146.
- Yu Yaxun, Wu Guoxiong. 2001. Water vapor content and its mean transfer in the atmosphere over Northwest China [J]. Acta Meteorologica Sinica, 15 (2). 191-204.
- 俞亚勋, 王劲松, 李青燕. 2003. 西北地区空中水汽时空分布及变化趋势分析 [J]. 冰川冻土, 25 (2): 149-155. Yu Yaxun, Wang Jinsong, Li Qingyan. 2003. Spatial and temporal distribution of water vapor and its variation trend in atmosphere over Northwest China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology (in Chinese), 25 (2): 149-156.
- 赵庆云, 李栋梁, 李耀辉. 1999. 西北区降水时空特征分析 [J]. 兰州大学学报 (自然科学版), 35 (4): 124-128. Zhao Qingyun, Li Dongliang, Li Yaohui. 1999. An analysis of precipitation time and spatial features in Northwest China [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Science) (in Chinese), 35 (4): 124-128.
- 赵兵科, 蔡承侠, 杨莲梅, 等. 2006. 新疆夏季变湿的大气环流异常特征 [J]. 冰川冻土, 28 (3): 434-442. Zhao Bingke, Cai Chengxia, Yang Lianmei, et al. 2006. Atmospheric circulation anomalies during wetting summer over Xinjiang region [J]. Journal of Glaciology and Geocryology (in Chinese), 28 (3): 434-442.
- 张存杰, 高学杰, 赵红岩. 2003. 全球气候变暖对西北地区秋季降水的影响 [J]. 冰川冻土, 25 (2): 157-164. Zhang Cunjie, Gao Xuejie, Zhao Hongyan. 2003. Impact of global warming on autumn precipitation in the Northwest China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology (in Chinese), 25 (2): 157-164.
- 张存杰, 谢金南, 李栋梁, 等. 2002. 东亚季风对西北地区干旱气候的影响 [J]. 高原气象, 21 (2): 193-198. Zhang Cunjie, Xie Jinnan, Li Dongliang, et al. 2002. Effect of East-Asian monsoon on drought climate of Northwest China [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 21 (2): 193-198.
- 张广周, 马镜娴, 谢金南. 2000. 季风边缘区域气候变化与预测研究 [M]. 北京: 气象出版社. Zhang Guangzhou, Ma Jingxian, Xie Jinnan. 2000. Climate Change and Climate Prediction along the Monsoon Boundary Zone (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press.
- 张玉娟, 谢金南, 罗哲贤. 2005. 我国西北地区东部可降水量变化趋势的初步研究 [J]. 南京气象学院学报, 28 (2): 254-259. Zhang Yujuan, Xie Jinnan, Luo Zhexian. 2005. A preliminary study on the evolutionary trend of precipitable water in the East of Northwest China [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 28 (2): 254-259.
- 郑新江, 许健民, 李献洲. 1997. 夏季青藏高原水汽输送特征 [J]. 高原气象, 16 (3): 274-281. Zheng Xinjiang, Xu Jianmin, Li Xianzhou. 1997. Characteristics of water vapor transfer in upper troposphere over Qinghai-Xizang Plateau in summer [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 16 (3): 274-281.
- Zhou T J, Yu R C. 2005. Atmospheric water vapor transport associated with typical anomalous summer rainfall patterns in China [J]. J. Geophys. Res., 110, D08104, doi: 10.1029/2004JD005413.