

肖科丽, 赵国令, 方建刚, 等. 影响陕西夏季降水主要因子及增量预测方法. 应用气象学报, 2017, 28(4): 458-469.

DOI: 10.11898/1001-7313.20170407

# 影响陕西夏季降水主要因子及增量预测方法

肖科丽<sup>1)2)\*</sup> 赵国令<sup>3)</sup> 方建刚<sup>4)</sup> 孙 嫻<sup>4)</sup>

<sup>1)</sup>(陕西省气象干部培训学院, 西安 710016)

<sup>2)</sup>(陕西省气象学会, 西安 710016)

<sup>3)</sup>(陕西省气象局, 西安 710014)

<sup>4)</sup>(陕西省气候中心, 西安 710014)

## 摘 要

应用 1959—2008 年夏季(6—8 月)NCEP/NCAR 月平均 500 hPa 高度场、海表温度再分析资料及 ERA-40 气候指数、国家气候中心 74 项环流特征量等资料,经普查得到 6 个影响陕西夏季降水的主要因子,分别是西太平洋副热带高压强度指数、赤道平流层准两年振荡指数、低层越赤道气流指数、大气角动量指数、赤道太平洋海温、赤道 500 hPa 高度。将这些主要因子的年际增量、距平与陕西夏季降水的相关性及其所建立的预测模型进行对比分析,结果表明:因子年际增量具有明显的信号放大作用,增量因子的相关系数平均比距平相关系数高 0.1 左右;主要因子和夏季降水存在各自的长周期变化,造成其相关性不稳定,经过增量变换后,可以有效滤掉长周期变化,提高因子质量和预测模型的稳定性。前一年秋季赤道中东太平洋海温增量分布与陕西夏季降水相关密切,当该区域出现正增量分布时,当年夏季(6—8 月)700 hPa 西太平洋副热带高压位置偏北、偏西,形成陕西夏季多雨的环流形势;反之,当该区域出现负增量分布时,当年夏季 700 hPa 副热带高压位置异常偏东,形成陕西干旱少雨的环流形势。

**关键词:** 年际增量; 距平; 陕西夏季降水

## 引 言

陕西地处我国内陆西北地区东部,位于青藏高原东北侧边缘,夏季降水年际变率大,旱涝灾害频繁发生,往往造成重大经济损失和人员伤亡,因此,提高夏季降水预测水平,对防灾减灾、安全度汛具有重大意义。陕西夏季降水不但受夏季风、中高纬度阻塞高压、西风带系统、西太平洋副热带高压(简称副高)等大气内部动力不稳定性及非线性相互作用的影响,还受海温异常、积雪、土壤等下垫面的外强迫作用等,致使产生夏季降水的因素复杂,预测难度较大。短期气候预测中东亚季风区等热带外地区预测技巧有待提高<sup>[1]</sup>。尽管随着观测资料增加和范围不断扩展以及动力气候模式性能的不断改进和完善,

短期气候预测得到快速发展,预测质量不断提高<sup>[2-8]</sup>,但根据目前的气候服务需求,业务预测水平仍需要进一步提高。为有效改进统计预测方法,提高预测能力,王会军等<sup>[9-10]</sup>提出了年际增量预测思想。年际增量定义为当年气候变量的观测值( $Y_n$ )与其前一年变量值( $Y_{n-1}$ )的差值,简称增量( $\Delta Y = Y_n - Y_{n-1}$ )。增量能够准确反映气候变量的准两年变化特征,可有效利用前一年的观测信息,较好地反映气候变量年际和年代际变化信息。增量反映气象变量动态变化规律,具有更加敏感的特点,更能准确表达气候变量的变化趋势。近年来,范可等<sup>[11-15]</sup>先后研制了长江中下游地区汛期降水、华北汛期降水及东北地区冬半年大雪-暴雪日数增量预测等多种方法,陈红<sup>[16]</sup>利用增量方法建立淮河流域夏季极端降水事件频次预测模型,肖科丽等<sup>[17]</sup>建立陕西汛期

2017-01-03 收到, 2017-05-22 收到再改稿。

资助项目: 教育部科技基础性工作专项(2013FY112500), 陕西省气象局研究型业务重点科研项目(2013Z-6), 陕西省气象局科技成果应用与推广项目(2014T-5)

\* email: xklnew@126.com

降水年际增量预测模型,显示了较好的预测效果。

精选优化因子是建立物理统计预测方法最根本的基础性研究工作<sup>[18-20]</sup>,因此,首先选取影响陕西夏季降水的主要因子,但作为主要因子应满足以下 4 个条件:①与陕西夏季降水相关显著,②具有明确的物理意义,③该因子要素对夏季降水的影响有一定持续性和规律性(连续多月与降水呈现高相关),④该要素的影响范围较大。文中通过对主要因子增量与因子距平的对比,证明增量及其预测方法具有一定优势,为今后精选优化因子及增量预测方法的推广应用提供参考。

### 1 资料和方法

将 1959—2008 年夏季(6—8 月)陕西省区域平均降水量作为预测对象(即陕西夏季降水)。预测因子资料采用 NCEP/NCAR 月平均 500 hPa 高度场和全球月平均海表温度再分析资料、大气和海洋气候指数 ERA-40;国家气候中心 74 项环流特征量等。ERA-40 气候指数包含大气遥相关、海温等指数,如北美遥相关指数、赤道平流层准两年振荡指数、Niño 区海温指数等。74 项环流特征量是以 500 hPa 环流为主的逐月环流特征量指数,如副高强度指数、极涡面积指数等,还包括太阳黑子、南方涛动指数等非 500 hPa 环流指数。

相关分析时,因子增量与夏季降水增量计算相关,因子距平与夏季降水距平计算相关。因子分析时段为前一年 1 月至当年 8 月,共 20 个月的逐月气

候变量,预测模型使用的全部为前期因子。

### 2 气候指数因子

根据前面确定的条件,在气候指数中选取了 4 项符合条件的影响陕西夏季降水的主要因子:副高强度指数、赤道平流层准两年振荡指数、低层越赤道气流指数、大气角动量指数。

#### 2.1 副高强度指数

副高是影响陕西夏季降水的重要影响系统,副高的强度、位置,直接影响陕西夏季降水的多寡和雨带位置。图 1 是陕西夏季降水与副高强度指数相关系数变化曲线。由图 1 可见,从前一年 11 月至当年 8 月,除当年 2 月外,增量和距平的相关系数一直维持在 0.3~0.55 之间,均达到 0.05 显著性水平。前一年秋季副高强度指数比前者增量相关系数大,11 月前者相关系数为 0.51,后者为 0.37;冬春季则是副高强度指数增量相关系数比其距平更显著,当年 1 月和 3 月前者相关系数为 0.51 和 0.55,后者为 0.48 和 0.39。副高强度指数增量及其距平与陕西夏季降水分别有 7 个月、6 个月相关系数达到 0.01 显著性水平。可见,前一年秋冬季至当年春季副高强度对陕西夏季降水具有很好的指示意义,即当该时段副高偏强时,沿副高西北侧外围的水汽输送到我国西北地区东部,易造成陕西夏季降水偏多,反之,易偏少。黄嘉佑等<sup>[21]</sup>在分析副高、极涡与我国夏季降水关系时,得出副高与我国北方降水相关的类似结论。

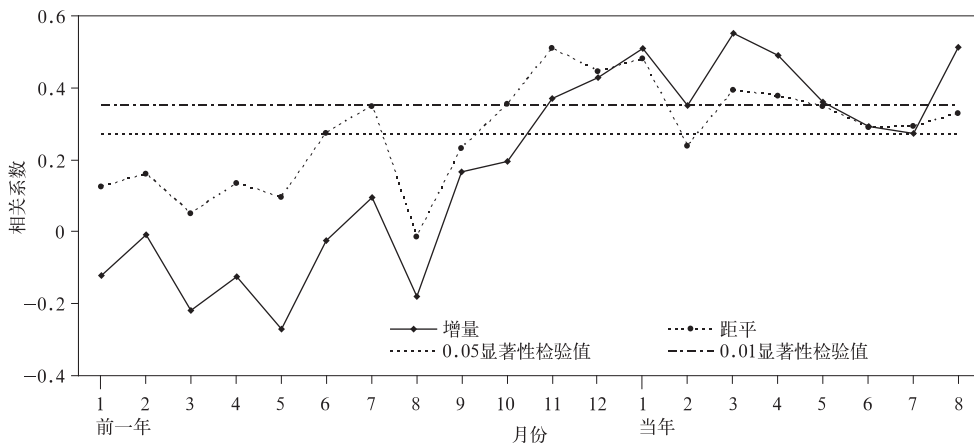


图 1 陕西夏季降水与西太平洋副热带高压强度指数相关系数

Fig. 1 The correlation coefficient between the index of summer precipitation in Shaanxi and the West Pacific subtropical high intensity

大气环流异常特征具有一定持续性,前期冬春季的异常特征,在下一个季节甚至隔季也有表现<sup>[22]</sup>。通过计算得到夏季6—8月副高强度与当年1—5月逐月副高强度相关系数均在0.6左右,说明从冬季到夏季副高强度具有明显持续性特征。

## 2.2 赤道平流层准两年振荡指数

赤道平流层准两年振荡(QBO)是目前所发现的大气环流最稳定、最典型的准周期变化。QBO影响对流层顶和对流层的热带垂直气流主要在QBO位相的中后期和位相转换期。西风位相中后期及向东风位相的转换期,影响对流层顶和上层的是异常下沉气流,这样必然会造成Hadley环流减弱,副高偏弱,我国北方夏季降水易偏少<sup>[23]</sup>。研究表明:平流层低层的纬向风垂直切变可以影响副高,相对于

东风切变副高脊线位置偏北,强度偏强;相对于西风切变则副高脊线位置偏南,强度偏弱<sup>[24]</sup>。

西北地区东部的夏季降水具有准两年周期性振荡<sup>[25]</sup>,图2为陕西夏季降水与QBO指数的相关系数。由图2可见,相关系数变化规律性强,QBO增量及其距平无论是其相关性的正、负符号还是变化趋势均一致。从前一年1月开始相关系数由0逐渐上升,到8月达到最高,QBO指数增量相关系数达0.5,其距平相关系数为0.4;之后又缓慢下降,到当年春季已转换为负相关;当年6—8月QBO指数增量相关系数为-0.43,其距平相关系数为-0.31。在分析的时间段内,QBO指数与陕西夏季降水相关系数达到0.01显著性水平其增量为10个月,其距平为4个月。

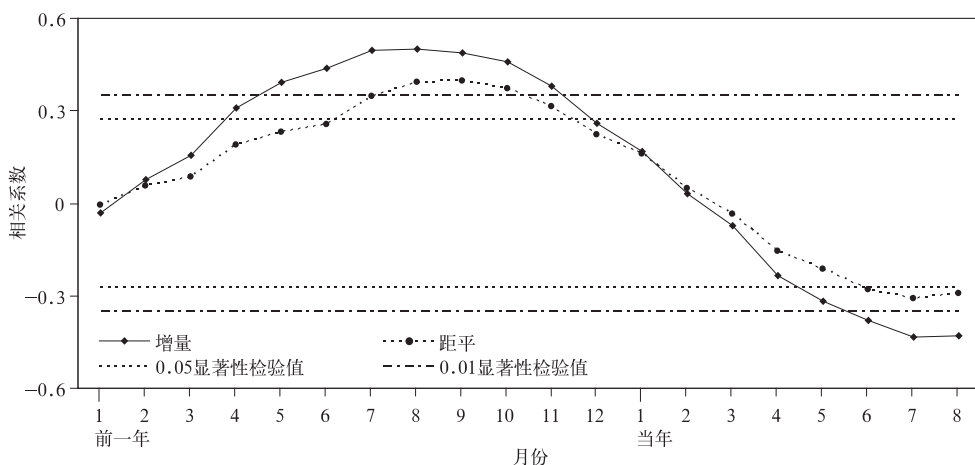


图2 陕西夏季降水与QBO指数相关系数

Fig. 2 The correlation coefficient between the summer precipitation in Shaanxi and QBO

## 2.3 低层越赤道气流指数

越赤道气流是南北半球质量、动量、热量、水汽等交换的途径,是影响南北半球天气气候的重要因素之一。越赤道气流主要通过其作为南北半球物质、能量的交换途径而影响副高脊线位置、亚洲季风爆发早晚以及台风的生成等,南北半球通过越赤道气流连接在一起相互影响、相互作用。厄尔尼诺年夏季马斯克林高压减弱,导致索马里越赤道气流变弱,而澳大利亚高压加强;拉尼娜年则相反<sup>[26]</sup>。东半球6—9月低层自南向北的越赤道气流总量与中国大陆降水多寡有直接联系<sup>[27]</sup>。越赤道气流尤其是索马里急流的加强使东亚沿岸大气环流出现波列状异常分布,并加强了南半球向北半球的水汽输送,从而显著影响东亚夏季降水<sup>[28]</sup>。图3显示,前

一年7—10月低层越赤道气流指数与陕西夏季降水呈显著正相关,8月最大,该指数增量及距平与陕西夏季降水相关系数分别达到0.52和0.43;当年春季至夏季呈显著的负相关,3月最大,该指数增量及距平与陕西夏季降水相关系数分别为-0.51和-0.31。分析时间段内,共7个月增量达到0.01显著性水平,而其距平未达到0.01显著性水平。

研究表明,索马里急流与我国西北地区东部降水呈明显的正相关,索马里急流的变化超前于陕西夏季降水0.45年(5.4个月)<sup>[29]</sup>,而图3显示,越赤道气流变化比陕西夏季降水超前8~10个月。

## 2.4 大气角动量指数

地球系统由固体地球、大气和海洋等流体圈组成,作为一个整体,地球的角动量守恒。相对于地球

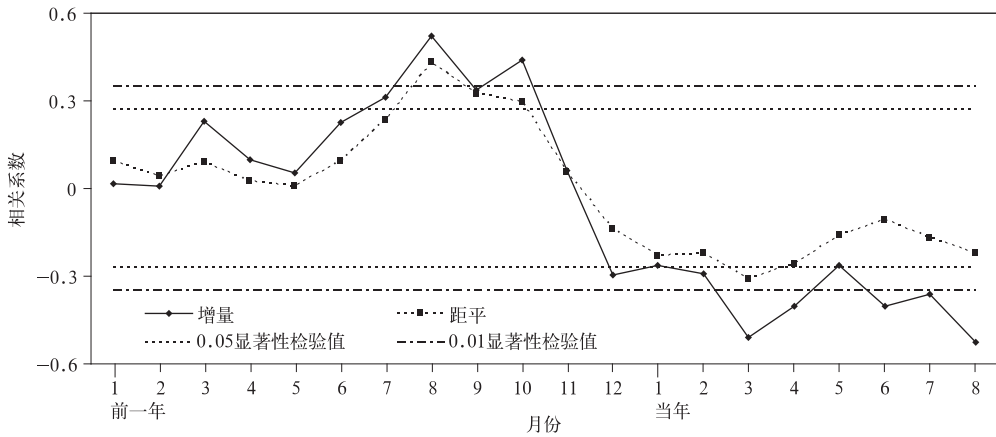


图 3 陕西夏季降水与低层越赤道气流指数相关系数

Fig. 3 The correlation coefficient between the summer precipitation in Shaanxi and the low-level cross-equatorial flow

表面运动的空气,因受到摩擦和山脉的作用,大气角动量(AAM)不断发生变化。作为一个描述大气环流的基本变量,AAM的平衡和异常反映了大气活动与固体地球、海洋在时空尺度上的耦合过程。当出现强的厄尔尼诺时,AAM往往相应出现极大值,反之,出现极小值<sup>[30]</sup>。图4反映了陕西夏季降

水与AAM指数的关系,前一年6—12月,为显著的正相关,该指数增量及距平与陕西夏季降水的相关系数均达到0.01显著性水平,增量略优于距平。当年夏季(6—8月),相关系数转为负相关,增量相关系数达-0.52,而距平仅为-0.23。

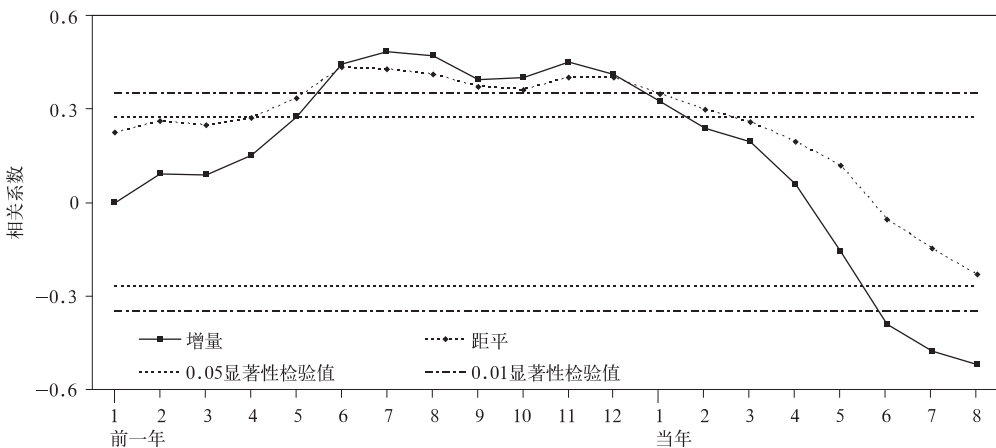


图 4 陕西夏季降水与大气总体角动量指数相关系数

Fig. 4 The correlation coefficient between the summer precipitation in Shaanxi and the atmospheric angular momentum

### 3 陕西夏季降水与海温

#### 3.1 相关分析

海温异常是影响夏季降水的重要外强迫因子<sup>[31-34]</sup>。通过对陕西夏季降水相关最显著月海温场的分析,找出影响的关键区域以及海温增量与其距

平的差异。将陕西夏季降水与前期海温场相关系数达到0.05显著性水平的格点合计数最大的月份作为相关最显著月。经分析,海温增量达到0.01显著性水平的格点合计数在前一年11月达到最大值,共496个格点(图略);海温距平10月达到0.05显著性水平格点合计数为最大值,共190个格点。由于前一年10—12月海温增量及距平的高相关格点合

计数均较大,为便于分析,统一将 10 月作为最显著月。10 月海温与夏季降水相关系数分布见图 5。由图 5 可知,赤道地区从印度洋至太平洋相关系数表现为“+ - +”分布型,无论是相关系数大小还是范围,海温增量与陕西夏季降水相关均优于海温距平。海温增量(图 5a)的 2 个正相关区分别位于印度洋西北部(10°S~10°N,60°E~80°E)及太平洋中

东部(10°S~10°N,180°~80°W),相关系数最大值分别为 0.4 和 0.6;负相关区位于印度洋东部至太平洋西部(10°S~10°N,90°E~160°E)的暖池区,相关系数为-0.6。海温距平(图 5b)的 2 个正相关区位置与增量基本一致,相关系数及范围略小;负相关区范围非常小,位于(0°~20°S,150°E~180°),相关系数仅为-0.3。

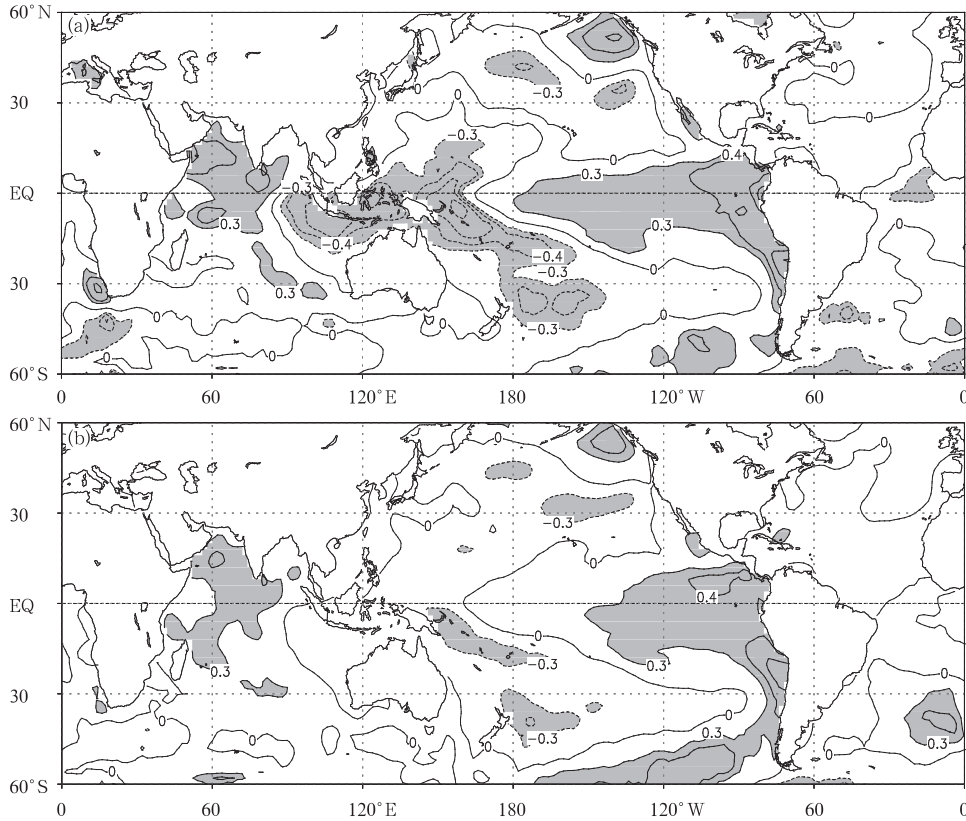


图 5 陕西夏季降水与前一年 10 月海温增量(a)及海温距平(b)相关系数分布  
(阴影区表示达到 0.05 显著性水平)

Fig. 5 The correlation coefficient between the summer precipitation in Shaanxi and the previous Oct SST(the shaded denotes passing the test of 0.05 level)  
(a)SST increment,(b)SST anomaly

相关系数在印度洋“西正东负”及太平洋“西负东正”的分布形态,也从另一方面证明了印度洋海温偶极子与太平洋海温偶极子的反位相关系<sup>[35]</sup>。如果印度洋和太平洋海温同时出现这种反位相偶极子振荡现象,会进一步增强陕西夏季降水的气候信号,使预测结果更为可靠。

图 5 还显示,在南北半球西风漂流区海温增量和海温距平均存在显著的负相关区。研究表明,6 月、11 月西风漂流区海温偏低(偏高),则次年 7 月

副高偏强(偏弱),陕西夏季易出现多雨(少雨)<sup>[36-37]</sup>。

Niño 区海温对夏季降水的影响具有重要意义<sup>[38-39]</sup>,对 Niño1+2 区海温与夏季降水的关系作了进一步研究(图 6)。由图 6 可见,前一年 6 月至当年 1 月 Niño1+2 区海温与夏季降水呈显著的正相关,具有很好的持续性,11 月相关系数最大达到 0.5。在分析时间段内,相关系数海温增量明显大于海温距平,大部分月份海温增量比海温距平偏高 0.1 以上。

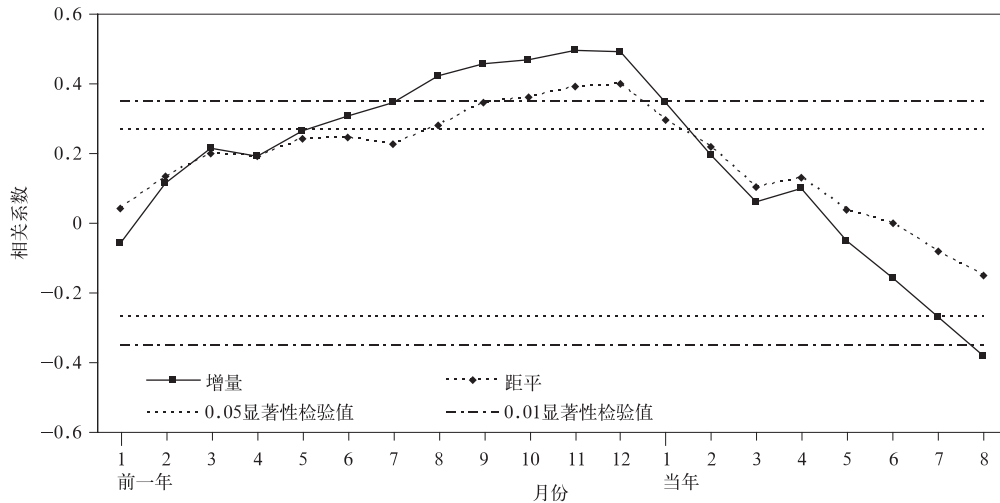


图 6 陕西夏季降水与 Niño1+2 区海温指数相关系数

Fig. 6 The correlation coefficient between the index of the summer precipitation in Shaanxi and Niño1+2

### 3.2 海温分布对夏季降水环流形势的影响

海温异常必然导致大气环流的调整与适应,进而造成夏季降水异常。因此,对秋季赤道中东太平洋海温对大气环流的影响进行深入分析。由前面分析可知,海温增量与夏季降水的相关更为显著且与海温距平具有一致性,因此,针对海温增量进行分析。当前一年秋季中东太平洋(10°S~10°N,180°~80°W,)区域海温为正增量时,称为正分布;反之,当前一年秋季中东太平洋(10°S~10°N,180°~80°W)区域海温为负增量时,称为负分布。将该区域内 2000—2012 年秋季海温增量正、负分布分别进行统计分析。正分布共 8 年,包括 2000,2002,2004,2006,2008,2009,2011,2012 年;负分布共 5 年,包

括 2001,2003,2005,2007,2010 年。

图 7a 为前一年秋季海温为正分布时,当年夏季 6—8 月 700 hPa 环流合成。由图 7a 可见,当年夏季欧亚中高纬度地区 700 hPa 为平直西风环流,东北亚地区为较强的反气旋环流,副高中心位于 37°N,122°E,位置偏北、偏西,其西侧外围为较强的偏南气流,形成陕西夏季多雨的环流形势。海温为正分布时,往往伴随着一次厄尔尼诺事件,Zhang 等<sup>[40]</sup>最早提出了厄尔尼诺盛期时西北太平洋会出现异常反气旋,Wang 等<sup>[41]</sup>则进一步指出了西北太平洋局地海气相互作用过程使该异常反气旋从厄尔尼诺盛期的冬季持续到次年夏季,且副高异常偏西,从而加强副热带东亚地区的季风环流<sup>[42]</sup>。当前一年秋季海温

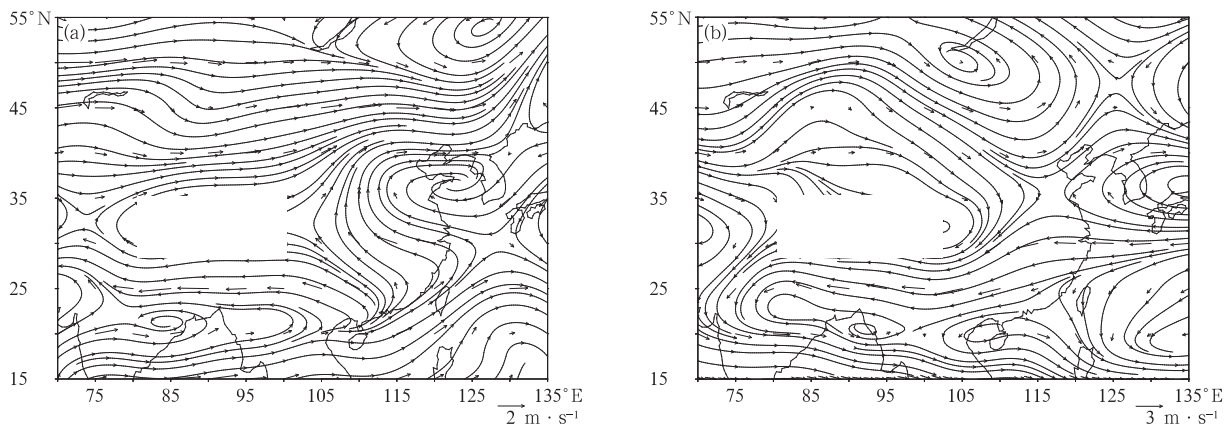


图 7 前一年秋季海温增量出现正分布(a)、负分布(b)后当年 6—8 月 700 hPa 流场

Fig. 7 700 hPa flow field from Jun to Aug after positive SST increment distribution(a) and negative SST increment(b) in previous autumn

为正分布,当年夏季降水量平均偏多8.3%。

图7b为前一年秋季海温为负分布时,当年夏季6—8月700 hPa环流合成。由图7b可见,当年夏季蒙古至河套地区700 hPa受较强的反气旋影响,陕西受一致的西北气流控制,水汽输送被阻断,副高中心位于 $36^{\circ}\text{N}, 135^{\circ}\text{E}$ ,位置偏北,但异常偏东,表现为陕西典型的少雨环流形势。当前一年秋季海温为负分布时,当年夏季降水量平均偏少11.3%。

#### 4 陕西夏季降水与500 hPa高度场相关分析

将夏季前期逐月500 hPa高度格点与陕西夏季降水进行相关分析,前一年12月500 hPa高度场增量和其距平相关系数达到0.05显著性水平的格点合计数均达最大(前者格点数为346,后者格点数为178),所以,将前一年12月确定为与陕西夏季降水相关最显著月份(图8)。由图8可见,500 hPa高度场增量及其距平在 $20^{\circ}\text{S}\sim 20^{\circ}\text{N}$ 范围内,存在环绕赤道地区高相关带,经分析,高相关带从前一年9月一

直维持到当年3月(图略),说明其影响的持续性强。高度场增量高相关带范围和相关系数均比距平大,除了环赤道的高相关带外,高度场增量还在澳大利亚南部和 $55^{\circ}\text{S}, 140^{\circ}\text{W}$ 存在0.5以上的高相关区域,而其距平不存在。

500 hPa高度场增量在澳大利亚南部的高相关区(图8a),揭示了澳大利亚附近环流系统对夏季降水的影响。澳大利亚高压作为亚澳季风环流系统的成员之一,其强弱影响亚洲夏季风环流的变化,进而影响中国的天气气候<sup>[43]</sup>。另外,500 hPa高度场增量在南半球中高纬度地区还存在多处相关显著区域,近年来,南极涛动AAO(Antarctic Oscillation)被认为是南半球中高纬度地区一个主要的气候变率模态,这些高相关中心的高度场与同期AAO指数的相关系数均在0.4左右,达到0.01显著性水平,说明与AAO有一定的内在联系,而500 hPa高度场距平与陕西夏季降水相关图(图8b)显示,南半球无明显的相关区。

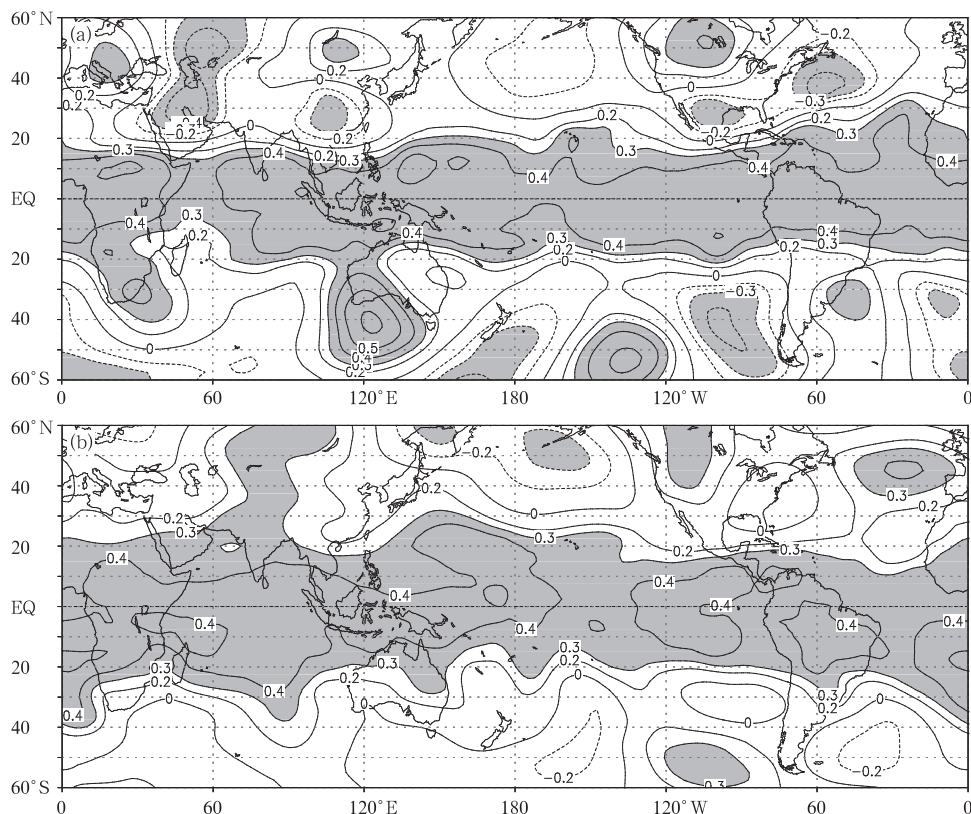


图8 陕西夏季降水与前一年12月500 hPa高度场增量(a)及其距平(b)相关系数分布  
(阴影区表示达到0.05显著性水平)

Fig. 8 The correlation coefficient between the summer precipitation in Shaanxi and 500 hPa height in previous Dec(the shaded denotes passing the test of 0.05 level)  
(a)500 hPa height increment, (b)500 hPa height anomaly

### 5 增量预测模型与距平预测模型对比

根据以上分析,副高强度指数、QBO 指数、低空越赤道气流指数、AAM 指数、赤道中东太平洋海温以及赤道 500 hPa 高度 6 个影响要素符合本文确定的主要因子条件,选取 6 个要素的增量、距平各自相关最显著月或格点(海温、高度)作为入选模型的主要因子,选取因子与陕西夏季降水相关系数如表 1 所示。因子包括: $X_1$ ,副高强度指数(增量为当年 3

月,距平为前一年 11 月); $X_2$ ,前一年 8 月 QBO 指数; $X_3$ ,前一年 8 月低层越赤道气流指数; $X_4$ ,前一年 11 月 AAM 指数; $X_5$ ,根据海温相关场分析,在前一年 10 月太平洋分别选取相关最高的格点海温作为预测因子,增量格点位置为  $6^{\circ}\text{S}, 158^{\circ}\text{E}$ ,距平格点位置为  $22^{\circ}\text{S}, 74^{\circ}\text{W}$ ; $X_6$ ,根据 500 hPa 高度场分析,在前一年 12 月环赤道高相关带上选取因子,增量格点位置为  $10^{\circ}\text{N}, 25^{\circ}\text{E}$ ,距平格点位置为  $0^{\circ}, 35^{\circ}\text{E}$ 。采用 6 个主要因子的增量、距平分别建立预测模型。

表 1 主要因子与陕西夏季降水的相关系数

Table 1 The correlation between forecast factor and summer precipitation in Shaanxi

类型	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$
因子增量	0.49	0.50	0.52	0.45	0.63	0.64
因子距平	0.42	0.39	0.43	0.38	0.57	0.46

增量预测模型为

$$\Delta Y = 2.4 + 0.6X_1 + 1.2X_2 + 58.6X_3 - 14.4X_4 + 0.6X_5 - 46.1X_6, \quad (1)$$

预测结果为

$$Y_n = \Delta Y + Y_{n-1}. \quad (2)$$

距平预测模型为

$$Y_n = -9370 + 0.7X_1 + 1.3X_2 + 97.2X_3 - 16.7X_4 + 1.5X_5 + 23.6X_6. \quad (3)$$

其中, $Y_n$  为降水预测值, $Y_{n-1}$  为前一年夏季降水实测值。建立模型所用的资料年代为 1959—2008 年,增量预测模型和距平预测模型的复相关系数、交叉

检验同号率、模型  $F$  值分别为 0.77 和 0.72,70% 和 66%,11 和 8。可见增量预测模型的各项统计参数均优于距平预测模型。以 2009—2014 年为预测年份,预测结果见表 2。由表 2 可见,正、负号一致率增量预测模型为 4/6,距平预测模型为 3/6;6 年预测结果的相对误差增量预测模型为 17.1%,距平预测模型为 16.1%,误差均在 20% 之内,具有一定的预测意义,也说明选取的 6 个主要因子包含了影响陕西夏季降水的主要气候信号,且增量预测模型具有一定优势。

表 2 2009—2014 年增量预测模型、距平预测模型降水距平百分率预测结果

Table 2 Results of prediction modes of increment and anomaly from 2009 to 2014

年份	增量模型预测值/%	距平模型预测值/%	实测值/%	增量预测相对误差百分率/%	距平预测相对误差百分率/%
2009	5.7	11.9	3.3	2.3	8.3
2010	5.4	-14.6	31.9	-20.0	-35.5
2011	18.8	-10.9	0.1	18.6	-11.0
2012	10.7	2.8	-2.5	13.5	5.4
2013	-5.8	-8.9	-0.1	-5.7	-8.8
2014	9.9	-1.4	-23.1	42.7	28.1

### 6 增量预测优势原因

将陕西夏季降水序列转换为增量后,资料序列变化幅度明显放大(图略)。夏季降水标准差增量为 80.6 mm,距平为 57.5 mm;6 个主要因子的标准差增量为 62.0 mm,距平为 41.1 mm,增量放大了 1.5

倍。研究表明:预测量及预测因子振幅增大使预测量与因子之间的相互关系更易于表达,预测难度下降<sup>[10]</sup>。

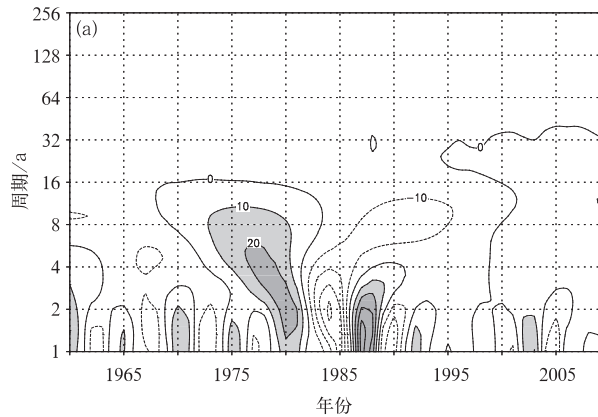
预测量和每个预测因子各自都存在复杂的多时间尺度振荡现象,陕西夏季降水存在明显的 30 年左右的周期变化<sup>[44]</sup>,预测因子同样具有自身的长周期变化,这种长周期变化的不一致,必然会造成预测因



子的不稳定。魏凤英<sup>[45]</sup>在分析北极涛动 AO(Arctic Oscillation)与降水的关系时指出,预测因子与预测量的相关系数存在年代际变化,从而给预测带来困难。可以采用小波分析及滤掉长周期变化趋势的方法,进一步探讨增量优势原因。

### 6.1 Marr 小波分析

将陕西夏季降水增量和距平进行 Marr 小波变换(图 9),由图 9a 可知,降水增量小波系数以 5 年



左右短周期为主,具有明显的滤波作用;降水距平小波系数总体分布在 1~64 年比较宽泛的时间尺度范围内能量收敛较慢,包含的时间周期比较复杂(图 9b)。在 8 年的时间尺度上,降水小波系数方差存在最大值(图略),小波系数(夏季降水)存在明显的 27 年左右周期;小波系数在 28 年时间尺度上存在次大值,该时间尺度上,降水距平在 1985 年出现由负距平向正距平的转换。

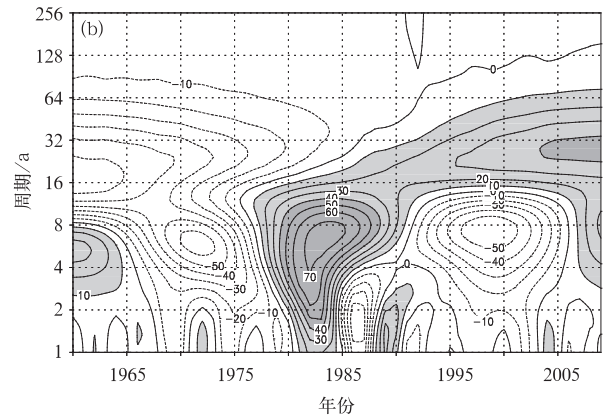


图 9 陕西夏季降水 Marr 小波变换 (a)降水增量,(b)降水距平

Fig. 9 The Marr wavelet transform of summer precipitation in Shaanxi

(a)precipitation increment,(b)precipitation anomaly

陕西夏季降水增量 Marr 小波系数主要分布在 1~16 年时间尺度范围内(图 9a),其方差在时间尺度为 1 年的位置存在最大值,之后方差迅速减小,能量收敛很快(图略)。在时间尺度为 1 年的位置,存在明显的 5 年周期,说明夏季降水增量以 5 年左右的短周期为主,有效地滤掉夏季降水的长周期变化特征。

对 6 个因子的增量和距平分别进行 Marr 小波变换(图略)。6 个因子的增量 Marr 小波系数方差最大值均出现在时间尺度为 1 年,6 个因子对应的主要周期分别为 4,2,4,3,5,5 年;因此,预测量和预测因子增量的主要周期为 5 年及以下的短周期,长周期被滤掉,使得预测量与预测因子之间的周期更趋一致,增强了预测量与因子的相关性,也使预测难度下降。6 个因子距平 Marr 小波系数方差的最大

值出现位置很不一致, $X_1 \sim X_6$  的方差最大值分别出现在时间尺度为 24,1,4,14,14,21 年,小波系数的主要周期分别为 1980 年左右出现由正值转为负值,2 年、14 年、60 年、60 年、1985 年由正值向负值转换。可见因子距平与降水主要周期不一致,必然会影响预测模型的稳定性。

### 6.2 滤掉因子长周期趋势变化

将陕西夏季降水及 6 个因子分别滤掉长周期变化(多项式拟合作为长周期)后进行相关分析(表 3),结果显示: $X_1, X_2, X_3, X_4$  的相关系数与原相关系数值比较均有增大, $X_5$  无变化,只有  $X_6$  略下降,说明长周期变化不一致对因子质量的影响。选取预测因子时,在考虑物理意义及相关系数大小的同时,应考虑预测量与预测因子长周期变化的一致性,使预测模型的稳定性增加<sup>[46]</sup>。由表 3 还可知,因子距

表 3 滤掉因子长周期变化后的相关系数比较

Table 3 The correlation coefficient of factors without long-periodic variations

相关系数	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$
因子距平相关系数	0.41	0.30	0.41	0.36	0.54	0.50
滤掉趋势项变化后因子距平相关系数	0.45	0.35	0.49	0.37	0.54	0.47
因子增量相关系数	0.55	0.42	0.49	0.46	0.56	0.66

平即使滤掉长周期变化后,相关系数有所增大,但仍然小于因子增量的相关系数,说明因子增量不仅有效滤掉长周期影响,可能还具有其他方面的优势,如气象要素信息的放大作用等未知因素的影响。

## 7 结论与讨论

本文分析了陕西夏季降水与主要影响因子增量及因子距平的相关特征,并基于因子增量、因子距平分别建立陕西夏季降水预测模型,主要结论如下:

1) 前一年秋季赤道中东太平洋  $10^{\circ}\text{S}\sim 10^{\circ}\text{N}$ ,  $180^{\circ}\sim 80^{\circ}\text{W}$  海温场出现正(负)异常分布时,当年夏季700 hPa 形成有利于陕西夏季多雨(少雨)的环流形势。

2) 在  $20^{\circ}\text{S}\sim 20^{\circ}\text{N}$  范围内,陕西夏季降水与前一年12月500 hPa 高度场增量及其距平均存在环绕地球赤道地区的高相关带,其范围和相关系数500 hPa 高度场增量均比距平大,且均表现为正相关,说明前一年12月该区域增量、距平为正(负)时,夏季降水易偏多(偏少)。

3) 预测因子增量、预测因子距平在表达与预测量的关系时,二者相关系数的正、负号以及变化趋势具有一致性;对于同一个预测因子,因子增量的相关系数一般比因子距平高0.1左右;应用主要因子建立的预测模型,增量预测模型的统计性能和预测结果优于距平预测模型。

预测量与预测因子自身存在多时间尺度周期变化特征,且各自周期变化不一致,造成预测因子不稳定。将预测因子和预测量进行增量变换后,明显放大了预测信号;同时,增量滤掉了气候变量中的长周期波动,使陕西夏季降水和主要因子之间的位相变化趋于一致,这可能是增量预测优于距平预测的一个重要原因。选取预测因子时,考虑物理意义及相关系数的同时,关注因子与预测量变化趋势的一致性,则预测模型会更加稳定。

## 参考文献

- [1] 李维京,郑志海,孙丞虎.近年来我国短期气候预测中动力相似预测方法研究与应用进展. *大气科学*,2013,37(2):341-350.
- [2] 任宏利,丑纪范.统计-动力相结合的相似误差订正法. *气象学报*,2005,63(6):988-993.
- [3] 任宏利,丑纪范.数值模式的预报策略和方法研究进展. *地球科学进展*,2007,22(4):376-385.
- [4] 王绍武.现代气候学研究进展.北京:气象出版社,2001:306-311.
- [5] Barnston A G, Kumar A, Goddard L, et al. Improving seasonal prediction practices through attribution of climate variability. *Bull Amer Meteor Soc*,2005,86:59-72.
- [6] Wang H J, Zhao G Q, Zhao Y. An effective method for correcting the seasonal-interannual prediction of summer climate anomaly. *Adv Atmos Sci*,2000,17(2):234-240.
- [7] 贾小龙,陈丽娟,高辉,等.我国短期气候预测技术进展. *应用气象学报*,2013,24(6):641-655.
- [8] 吴统文,宋连春,刘向文,等.国家气候中心短期气候预测模式系统业务化进展. *应用气象学报*,2013,24(5):533-543.
- [9] 王会军,张颖,郎咸梅.论短期气候预测的对象问题. *气候与环境研究*,2010,15(3):225-228.
- [10] 王会军,范可,郎咸梅,等.我国短期气候预测的新理论、新方法和新技术.北京:气象出版社,2012.
- [11] 范可,王会军,Choi Y J. 一个长江中下游夏季降水的物理统计预测模型. *科学通报*,2007,52(24):2900-2905.
- [12] 范可,林美静,高煜中.用年际增量方法预测华北汛期降水. *中国科学(地球科学)*,2008,38(11):1452-1459.
- [13] 范可,田宝强.东北地区冬半年大雪-暴雪日数气候预测. *科学通报*,2013,58(8):699-706.
- [14] Fan Ke, Wang H J. A new approach to forecasting typhoon frequency over the western North Pacific. *Wea Forecasting*,2009,24:974-978.
- [15] Fan Ke. Predicting winter surface air temperature in Northeast China. *Atmos Oceanic Sci Lett*,2009,2(1):14-17.
- [16] 陈红.淮河流域夏季极端降水事件的统计预测模型研究. *气候与环境研究*,2013,18(2):221-231.
- [17] 肖科丽,赵国令,方建刚,等.陕西汛期降水年际增量预测新技术研究. *气象*,2015,41(3):328-335.
- [18] 熊开国,封国林,黄建平,等.最优多因子动态配置的东北汛期降水相似动力预报试验. *气象学报*,2012,70(2):213-221.
- [19] 郭玲,何金海,祝从文.影响长江中下游夏季降水的前期潜在预报因子评估. *大气科学*,2012,36(2):337-349.
- [20] 朱蒙,陈海山,蒋薇,等.陆面热力因子应用于中国夏季降水预测的初步试验. *气象学报*,2014,72(6):1135-1142.
- [21] 黄嘉佑,刘珂,赵昕奕.副高、极涡因子对我国夏季降水的影响. *大气科学*,2004,28(4):517-526.
- [22] 孙力,安刚.东亚地区春冬季与夏季大气环流异常相互关系的研究. *应用气象学报*,2002,13(6):650-661.
- [23] 郑彬,林爱兰,谷德军,等.对流层准两年振荡最新研究进展. *热带气象学报*,2010,26(4):504-508.
- [24] 李崇银,龙振夏.西太平洋副高活动与平流层 QBO 关系的研究. *大气科学*,1997,21(6):670-678.
- [25] 施小英,施晓晖.夏季青藏高原东南部水汽收支气候特征及其影响. *应用气象学报*,2008,19(1):42-46.
- [26] 陈兵,郭品文,向渝川.夏季低空越赤道气流与 ENSO 的关系. *南京气象学院学报*,2005,28(1):36-43.
- [27] 李曾中.越赤道气流与中国天气关系的初步统计分析. *气象*,1986,12(4):10-14.

- [28] 王会军, 薛峰. 索马里急流的年际变化及其对半球间水气输送和东亚夏季降水的影响. *地球物理学报*, 2003, 46(1): 18-25.
- [29] 李国昌, 董安祥, 赵建华. 越赤道气流与西北地区东部夏季降水的联系. *南京气象学院学报*, 2006, 29(2): 254-257.
- [30] Chao B F. Interannual length-of-day variation with relation of southern oscillation/El Niño. *Geophys Res Lett*, 1984, 11: 541-544.
- [31] 符淙斌, 腾星林. 我国夏季的气候异常与埃尔尼诺/南方涛动现象的关系. *大气科学*, 1988, 12(特刊D): 133-141.
- [32] 符淙斌. El Niño 时期赤道增暖的两种类型. *科学通报*, 1985, 30(8): 596-599.
- [33] 柯宗建, 华丽娟, 钟霖浩, 等. 海温异常对东亚夏季风强度先兆信号的影响. *应用气象学报*, 2015, 26(5): 536-544.
- [34] 李秀萍, 罗勇, 郭品文, 等. 春夏季赤道中东太平洋海温异常变化与东亚夏季风关系的研究. *应用气象学报*, 2006, 17(2): 176-182.
- [35] 李崇银. 印度洋海温偶极子和太平洋海温异常. *科学通报*, 2001, 46(20): 1747-1751.
- [36] 李德萍, 吴结晶, 马艳. 北太平洋海温分布与7月副高的遥相关分析. *海洋科学进展*, 2007, 25(4): 391-400.
- [37] 肖科丽, 赵国令, 方建刚, 等. 影响陕西汛期降水空间分布的强信号. *气象科技*, 2008, 36(4): 400-403.
- [38] 陈月娟, 周任君, 武海峰. Niño1+2 海区冷、暖水期西太平洋副高的特征及其对东亚季风的影响. *大气科学*, 2002, 26(3): 374-385.
- [39] 金祖辉, 陶诗言. ENSO 循环与中国东部地区夏季和冬季降水关系的研究. *大气科学*, 1999, 23(6): 663-672.
- [40] Zhang R H, Sumi A, Kimoto M. Impact of El Niño on the East Asian monsoon: A diagnostic study of the '86/87' and '91/92' events. *J Meteor Soc Japan*, 1996, 74(1): 49-62.
- [41] Wang B, Wu R G, Fu X H. Pacific-East Asian teleconnection: How does ENSO affect East Asian climate? *J Climate*, 2000, 13(9): 1517-1536.
- [42] Wang Yafei, Wang Bin, Oh J H. Impact of the preceding El Niño on the East Asian summer atmosphere circulation. *J Meteor Soc Japan*, 2001, 79: 575-588.
- [43] 毛天松, 徐启春, 许乃猷. 105°E 越赤道气流与亚洲夏季风的相互关系. *海洋预报*, 1990, 7(4): 1-7.
- [44] 肖科丽, 王娜, 魏娜, 等. 陕西省2010年盛夏极端多雨的气候特征及成因分析. *气候与环境研究*, 2014, 19(3): 311-320.
- [45] 魏风英. 我国短期气候预测的物理基础及其预测思路. *应用气象学报*, 2011, 22(1): 1-11.
- [46] 李维京, 李怡, 陈丽娟, 等. 我国冬季气温与影响因子关系的年代际变化. *应用气象学报*, 2013, 24(4): 385-396.

## Main Influencing Factors of Summer Precipitation and Prediction Method of Annual Increment in Shaanxi

Xiao Keli<sup>1)2)</sup> Zhao Guoling<sup>3)</sup> Fang Jiangang<sup>4)</sup> Sun Xian<sup>4)</sup>

<sup>1)</sup> (Shaanxi Meteorological Training Center, Xi'an 710016)

<sup>2)</sup> (Shaanxi Provincial Meteorological Society, Xi'an 710016)

<sup>3)</sup> (Shaanxi Provincial Meteorological Bureau, Xi'an 710014)

<sup>4)</sup> (Shaanxi Provincial Climate Center, Xi'an 710014)

### Abstract

Basic conditions that affect main factors of summer precipitation in Shaanxi are determined, which means that the correlation coefficient is high and the significance is verified, the physical meaning is clear, abnormalities of meteorological factors could be reflected and have lasting effect. NCEP/NCAR reanalysis data of the monthly mean 500 hPa height, sea surface temperature, ERA-40 climate index, and 74 meteorological characteristics of National Climate Center are used in the investigation. Six main climatic factors are met by the census, including the western Pacific subtropical high intensity, equatorial strata, zonal wind, lower-level equatorial airflow, atmospheric angular momentum, equatorial Pacific SST, and the equatorial 500 hPa height field. The analysis of the correlation between anomalies of inter-annual increment, the standard deviation in the six incremental factors and the summer precipitation in Shaanxi, showing that the inter-annual increment factor have obvious signal amplification effect. The standard deviation of six increment factors is 1.5 times larger than anomaly factors, and the correlation coefficient of the increment factor is about 0.1. Both predictive factors and predictive variables have long-term changes, and changes are often inconsistent, resulting in unstable factors. After incrementally transformed in meteorological elements, long-term changes of summer precipitation and main factors are effectively filtered out, and the stability of factor quality and prediction model is improved. Based on the increment and anomaly of six main factors, the summer precipitation forecasting model of Shaanxi is established. Results show that the incremental forecasting model have obvious advantages with good accuracy. The cross test of the same rate show that the increment is 70% and the anomaly is 66%. The distribution of SST in the eastern equatorial Pacific in the precious summer is closely related to summer precipitation in Shaanxi. When the annual increment of the sea area is positive, 700 hPa subtropical high is abnormally northerly or westerly in the next summer, the west periphery side of it is strong southerlies, leading to rainy circulation situation. On the contrary, 700 hPa subtropical high being abnormally easterly prone to drought circulation situation in Shaanxi.

**Key words:** annual increment; anomaly; summer precipitation