

云南夏季降水异常的影响因子及物理统计预测方法

王秀英¹ 王俊杰²

(1 云南省普洱市气象局, 普洱 665000; 2 普洱学院, 普洱 665000)

摘要 云南夏季降水年际变化较大, 影响因子众多, 夏季降水的预测较为困难。使用 1965—2017 年云南省 122 个气象观测站的逐日降水资料和 NCEP 大气环流资料, 采用年际增量的方法来预测云南夏季降水。文中基于云南夏季降水年际增量变化规律和影响夏季降水的环流形势及物理过程, 选取了 6 个具有物理意义的预测因子, 包括: 前期 2 月南太平洋海温异常、前期 2 月东亚北部海平面气压异常、前期 4 月北美 500 hPa 位势高度异常、前期 5 月太平洋北部海平面气压异常、前期 1 月印度半岛北部 500 hPa 位势高度异常及前期 2 月澳洲以南地区 200 hPa 高度场偶极子异常, 来建立云南夏季降水预测模型。并对预测模型进行逐年交叉检验和 1998—2017 年逐年独立样本检验。交叉检验中夏季降水年际增量预测值和观测值的相关系数为 0.85, 相对均方根误差为 8.0%。回报检验中夏季降水年际增量的相对均方根误差为 9.1%, 63.0% 的异常年份预测值能够准确地预报出夏季降水异常。该预测模型有较好的预测能力。

关键词 年际增量方法; 预测模型; 夏季降水异常; 短期气候预测

中图分类号: P426 **DOI:** 10.19517/j.1671-6345.20190529 **文献标识码:** A

引言

夏季降水异常是区域性干旱或洪涝等灾害发生的最直接的决定性因素^[1], 汛期降水对国民经济特别是农业生产有极大的影响。近年来, 随着国民经济的发展, 气象灾害所造成的经济损失也越来越严重^[2]。因此, 通过深入地研究影响夏季降水异常的关键物理过程, 提前、准确地预测夏季降水对国民经济发展具有重要的意义。

影响中国汛期降水的基本因素是多方面的, 包括大气环流、准两年振荡和太阳活动、天文条件、地球物理因素等^[3]。而大气环流因子是影响我国天气变化的重要因素之一^[4]。已有的研究表明, 前期冬季极涡、北太平洋副热带高压及南亚高压面积及强度与我国夏季降水关系密切^[3,5]。索马里急流(SMJ)作为最主要的越赤道气流, 影响两个半球间水汽输送, 可对东亚夏季降水产生影响^[6]。冬季和春季印度洋海温异常年际变率模态通过改变印度洋和孟加拉湾向长江中游地区的水汽输送而影响我国

东部夏季降水^[7]。强的 ENSO 循环不仅直接影响中国东部夏季降水异常, 而且能对其他控制东亚夏季降水的因子造成影响, 进而影响中国东部的降水^[8]。超强的 El Niño 可通过影响菲律宾附近低层异常反气旋环流影响我国东部 6—7 月的降水, 热带大气季节内振荡(Madden-Julian Oscillation, MJO)活动对 8 月降水有重要影响^[9]。南极涛动(AntArctic Oscillation, AAO)、东亚高纬环流、南太平洋海平面气压、青藏高原冬春积雪等是长江中下游夏季降水的重要影响因子^[10-11]。东亚夏季风异常可影响黄淮地区夏季的降水^[12], 北半球高度场环流异常与海河流域东南部的降水关系密切^[13]。欧亚中高纬度高度场异常升高、西风带异常减弱, 黄河流域夏季降水异常减少^[14]。对于西南地区而言, MJO 与西南地区东部夏季降水之间存在着显著的关系^[15]。

云南地处低纬高原, 受季风气候影响, 降水主要集中在夏季, 夏季降水约占全年总降水量的 55%~65%^[16]。前期研究表明, 5 月南亚高压脊线位置偏北, 有利于夏季南海和西太平洋向云南输送水

<http://www.qxkj.net.cn> 气象科技

云南省普洱市气象局李崇银院士工作站(2018IC150)、云南省普洱学院创新团队(CXTD003)共同资助

作者简介: 王秀英, 女, 1986 年生, 高级工程师, 主要从事气候预测方面的研究, Email: 410518631@qq.com

收稿日期: 2019 年 12 月 11 日; 定稿日期: 2020 年 11 月 13 日

汽^[17]。印度洋暖池中北部、西太平洋暖池西部正异常,西太平洋暖池东北部负异常,有利于低纬高原地区的水汽和热量输送,动力辐合及垂直运动加强,降水增多^[18]。印度洋热带赤道地区低层东风加强和高空西风加强、亚洲地区中高纬度温度的升高是 2002 年云南夏季降水显著减少的重要原因^[19]。6—10 月热带中东印度洋 MJO 指数持续为正,在热带印度洋地区激发出异常的下沉环流,使得南亚地区垂直环流圈异常减弱,热带印度洋向云南输送的西南暖湿气流减弱,是导致 2009 年夏季至秋季云南的降水持续偏少的成因^[20]。

由于对影响短期气候异常的关键物理过程及气候可预报性缺乏足够的认识,气候预测模型的预测能力有限,目前我国短期气候预测的质量远不能满足需求^[14]。面对复杂的气候预测问题,近年来提出了年际增量的方法^[21-24],年际增量方法定义为当年的变量值减前一年的变量值。通过变量的转化可将气候预测对象由距平转换为年际增量。这一方法不仅可以反映对流层中层大气环流及气象要素的准两年变化,可放大相关环流的异常信号。还可以将气候预测由距平转换为由前一年的观测信息来对后一年进行预测,对气候预测要素的年际及年代际趋势变化有很好的预测能力。采用年际增量方法可确实有效提高长江中下游夏季降水的预测技巧^[25],在东北大雪-暴雪日数的气候预测上具有较高的预测能力^[26],对云南普洱雨季开始期的异常年份预测具有较好的效果^[27]。而云南夏季降水年际变化大,降水异常的预测较为困难,相关的研究少。鉴于此,我们利用夏季降水变量场及预测因子场年际增量,将气候预测的对象及因子由距平转换为年际增量,得到云南夏季降水及预测因子的年际增量。进而利用多元线性回归的方法,建立云南夏季降水的统计预测模型,并通过 53 年交叉样本独立检验和 20 年的回报检验,再次检验模型的预测能力。

文中所使用的降水资料为云南省 122 个气象观测站的逐日降水观测资料,大气环流资料使用美国国家环境预报中心(NCEP)的再分析月平均资料,包括高度场、风场、海平面气压场,水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$,海温资料同样来源于 NCEP,水平分辨

率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 。所有资料选取时段为 1965—2017 年共 53 年。

1 云南夏季降水

云南 122 个站点分布(图 1a)及夏季平均站点降水变化图(图 1c)显示,云南夏季降水具有年际变化大,但年代际变化趋势不显著的特点。为分析云南 122 个站点夏季降水变化是否一致,能否使用全省站点平均值反映云南夏季降水。本文使用经验正交函数(Empirical Orthogonal Function, EOF)对云南夏季降水进行空间函数和时间函数的分解,采用 Kaiser 的标准公式验证变量场的主模态,提取变量距平场的主要信息^[28]:

$$\lambda_m > T/K \sum_{k=1}^K X_{k,k} \quad (1)$$

式中, $X_{k,k}$ 为所分解变量场的第 k 个方差, K 为保留到第 K 个模态, λ_m 为保留变量场 EOF 的特征值, T 取 0.7^[28]。

若第 1 模态为主模态,则 $\lambda_1 = 4.222 \times 10^7$, $T \sum_{k=1}^1 X_{k,k} = 2.9554 \times 10^7$, 满足式(1)。若主模态保留到第 2 模态,则 $\lambda_2 = 9.2136 \times 10^6$, $T/2 \sum_{k=1}^2 X_{k,k} = 4.7555 \times 10^7$, 不满足式(1)。由此可知,第 1 模态即为云南夏季降水的主模态。图 1 为 1965—2017 年云南省 122 个站点夏季降水距平 EOF 分解的主模态空间函数 EOF1(图 1a)及标准化时间系数 PC1(图 1b),主模态占总方差贡献的 35.1%。EOF1 反映了云南省夏季降水变化一致的特征,即云南省夏季降水全省一致偏多或偏少。变化相对较明显的地区为滇东中部,滇南、滇西、滇北部分边缘地区,云南大部地区夏季降水变化相对较小。从标准化时间系数 PC1 中可见云南夏季降水的年际变化明显,分别选取时间系数大于 1 和小于 -1 的年份来表示云南夏季降水正异常年和负异常年。正异常年主要集中在 2012 年以后,负异常年主要集中在 70 年代至 2009 年。2003 年以后夏季降水呈显著上升趋势,出现 3 年负异常、4 年正异常。

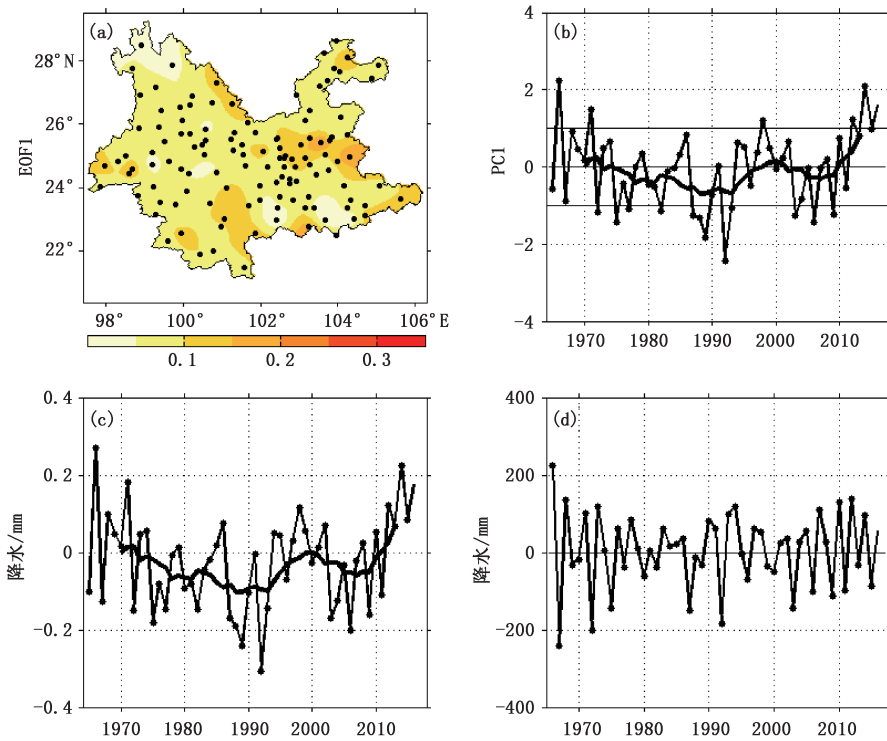


图1 1965—2017年云南夏季降水距平 EOF 第1 模态:(a) EOF1 与夏季降水距平的相关系数及空间分布及站点空间分布(圆点), (b) 标准化时间系数(PC1)及 11 年滑动平均曲线(折线), (c) 标准化夏季降水及 11 年滑动平均曲线(折线), (d) 夏季降水年际增量

2 云南夏季降水年际增量环流形势及预测因子

使用云南 122 个气象观测站的夏季降水平均值年际增量(图 1d)来分析与云南夏季降水年际增量有关的年际增量环流。研究发现,北太平洋副热带海区海水的蒸发超过降水,其上为副热带高压。北太平洋副热带环流是海洋经向上热输送的重要系统,是我国乃至全球的重要水汽源地^[29],也是影响我国天气气候的重要环流系统^[30]。从 500 hPa(图 2a)、200 hPa(图略)位势高度场上可见,东北太平洋上副热带高压较前一年异常偏强,海平面气压场上(图 2b)赤道太平洋中部海平面气压异常偏高。赤道太平洋中部海平面气压为西南-东北向,西南方向上显著增强。此大气环流背景下,云南夏季降水异常增多。700 hPa 风场(图 2c)显示,赤道中太平洋的海平面气压异常加强了赤道东风,使赤道中太平洋至南海南部出现东风异常。进而有利于西南至华南地区偏南风的增强及其水汽的输送。西南风与青藏高原南部的偏西气流所形成的低空切变有利于云南夏季降水。同样的,500 hPa 流场(图 2d)表现

为欧亚大陆中高纬为气旋式环流异常,而巴尔喀什湖至贝加尔湖以东地区为显著的反气旋式环流异常。导致东亚 50°N 附近西风减弱,有利于大气经向环流的加强,阻塞形式增加(中阻型)。对应的中国南部为气旋式环流异常,500 hPa 等压面上为上升气流控制(图略),有利于云南区域气流的辐合及抬升,夏季降水异常增多。同时巴尔喀什湖南部的异常东北气流及中国南部的气旋式环流异常,有利于青藏高原东部偏北气流与西南暖湿气流形成的中空切变,此切变是提供云南地区夏季降水的一个重要的动力成因(图 2d)。

综上所述,云南夏季降水较前一年增多的年际增量环流为,较前一年而言,赤道中太平洋海平面气压异常增高,东北太平洋上副热带高压异常偏强,有利于对流层低层西南地区西南风的增强及低空切变的生成,同时有利于云南区域水汽的输送。而欧亚大陆中高纬为气旋式环流异常,巴尔喀什湖至贝加尔湖以东地区为显著的反气旋式环流异常,有利于云南中空切变的生成,上升运动增强。中低空切变是云南夏季降水的主要动力机制。

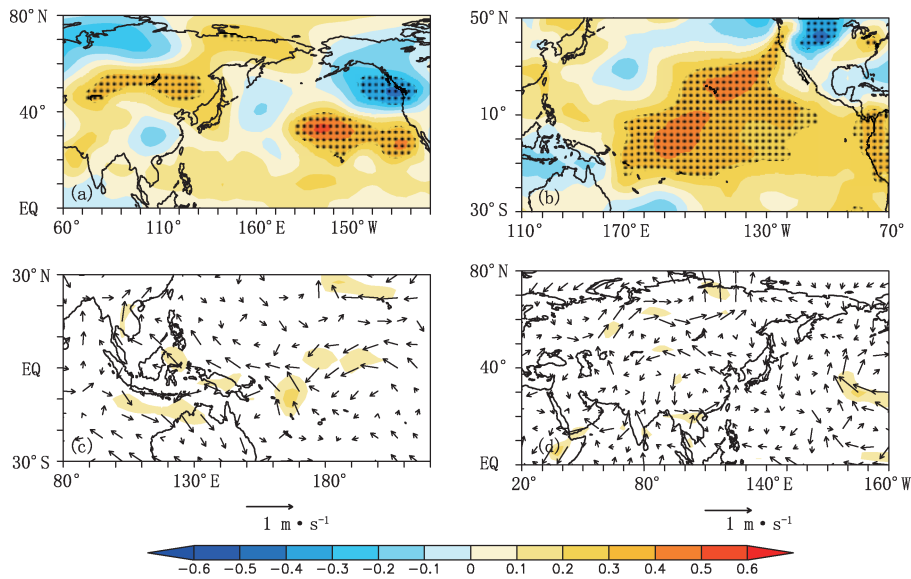


图 2 1967—2017 年云南夏季降水年际增量与同期各环流因子年际增量的相关系数:

(a)500 hPa 位势高度场,(b)海平面气压;(c)700 hPa 风场,(d)500 hPa 风场,
(打点区表示通过 0.05 的显著性水平,下同)

基于云南夏季降水年际增量环流形势,我们选取前期显著相关且具有影响云南夏季降水年际增量变化的物理过程来分析云南夏季降水。

海洋热容量大,使得海温的变化存在明显的持续性及滞后性,能将大气环流的异常信息贮存和记忆,因此海气相互作用是造成短期气候变化的重要因子。近年来随着海温观测资料、资料同化技术和资料重构技术的提高,南太平洋海温异常的研究逐步深入。研究发现,南太平洋海温对东亚气候具有重要影响^[31]。通过考察云南夏季降水与 2 月海温的年际增量在 1967—2017 年的相关场,我们选取显著相关区域($45^{\circ}\sim 35^{\circ}\text{S}$, $85^{\circ}\sim 75^{\circ}\text{W}$)的海温作为预测因子 x_1 ,这一区域海温的年际增量与云南夏季降水年际增量相关系数为 -0.59 ,超过 0.01 的显著性水平(图 3a)。Nino 3.4 海区以南位置太平洋海温偏低时,关键区上空可激发出反气旋式环流异常^[32](图 3b),随后 5 月南半球中高纬绕极环流异常增强,澳大利亚、南太平洋高压异常增强,南极涛动 AAO 为异常正位相(图 3c),此时 ENSO 异常信号并不强(图略)。研究指出,AAO 可以通过两个经向遥相关,即欧亚经向遥相关和太平洋型遥相关来影东亚气候^[33]。弱的 AAO 正异常,热带西太平洋对流减弱,黄淮及华北为反气旋式环流异常^[25](图略)。作为能够反映 AAO 异常的东南太平洋海温,

前期其异常偏高,随后夏季巴尔喀什湖至贝加尔湖阻高(中阻型)异常减弱(图 3 d),我国为反气旋式环流异常(图略)。夏季巴尔喀什湖至贝加尔湖阻高与我国的反气旋式环流异常正是影响云南夏季水汽输送及动力抬升的重要天气系统(图 2a,图 2d),因此,我们选取东南太平洋($45^{\circ}\sim 35^{\circ}\text{S}$, $85^{\circ}\sim 75^{\circ}\text{W}$)2 月海温作为云南夏季降水的预测因子。

极地对全球变化的响应较敏感,北半球极涡中心出现频率最高、最集中的区域是以极地为中心向亚洲北部新地岛以东的喀拉海、太梅尔半岛和中西伯利亚伸展,另一端伸向加拿大东部^[34]。而亚洲极涡强度对北半球极涡面积的影响最大^[35]。研究发现,北半球极涡的异常可引起北极涛动(Arctic Oscillation, AO)的异常^[36](图 4b)。AO 依赖于对流层中低层经向和纬向风异常对平均气温的水平输送可对东亚大槽进行影响^[35],槽前贝加尔湖地区对流层中低层存在着明显的气旋式环流异常(图 4 b,c),此环流异常可影响东亚的天气气候。因此,我们选取($75^{\circ}\sim 85^{\circ}\text{N}$, $130^{\circ}\sim 145^{\circ}\text{E}$)2 月海平面气压作为预测因子 x_2 。这一区域海平面气压与云南夏季降水年际增量在 1967—2017 年具有很高的相关,相关系数为 0.45,超过 0.01 的显著性水平(图 4a)。前期 2 月这一区域海平面气压与后期夏季 200 hPa 在贝加尔湖以东地区有很好的相关,前期东亚高纬海

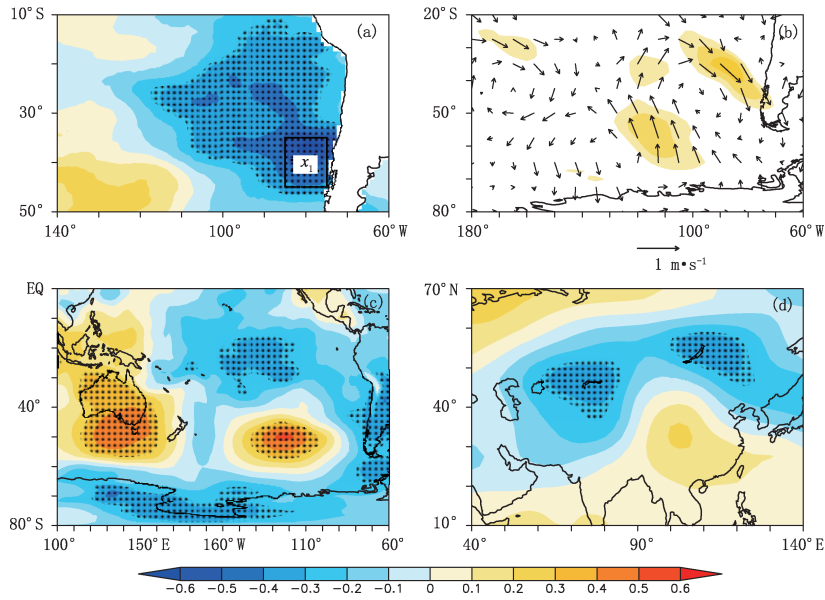


图 3 1967—2017 年年际增量环流相关场:(a)云南夏季降水年际增量与 2 月海温(x_1), (b) x_1 与 2 月 1000 hPa 风场, (c) x_1 与 5 月海平面气压, (d) x_1 与夏季 200 hPa 位势高度

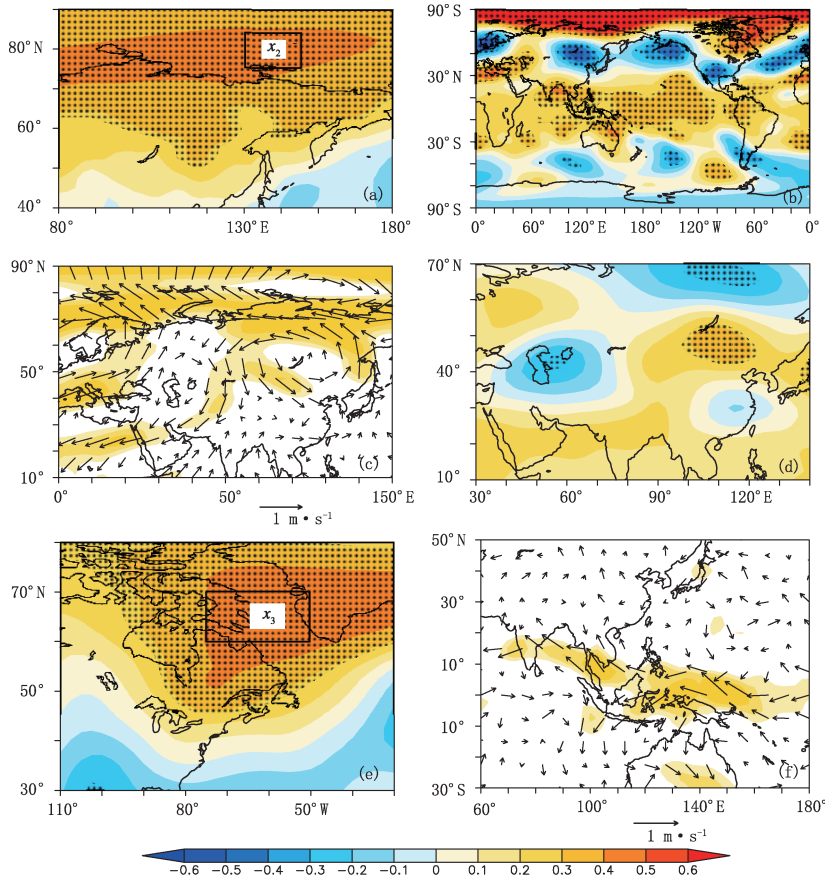


图 4 1967—2017 年年际增量环流相关场:(a)云南夏季降水年际增量与 2 月海平面气压(x_2), (b) x_2 与 2 月 200 hPa 位势高度, (c) x_2 与 2 月 500 hPa 风场, (d) x_2 与夏季 200 hPa 位势高度, (e)云南夏季降水年际增量与 4 月 500 hPa 位势高度, (f)4 月 500 hPa 位势高度(x_3)与夏季 500 hPa 风场

平面气压异常增高,随后夏季贝加尔湖以东地区阻塞形势显著增强,此阻高正是云南夏季中空切变线形成的关键系统(图 2a,d),因此我们选取这一区域的海平面气压作为云南夏季降水的预测因子。

此外,极涡与北太平洋副热带高压是影响我国天气气候变化最主要的大气环流系统^[34]。研究发现前期 4 月北美(60°~70°N,75°~50°W)500 hPa 位势高度较前一年增高,云南夏季降水增多。这一区域的平均 500 hPa 位势高度指数的年际增量与云南夏季降水的年际增量在 1967—2017 年相关很高,相关系数为 0.47,超过 0.01 的显著性水平(图 4e)。因此,我们选取前期 4 月北美(60°~70°N,75°~50°W)500 hPa 位势高度的平均指数作为第 3 个预测因子 x_3 。前期 4 月北美绕极环流与对流层低层西南地区西南风相关显著,前期绕极环流异常增强,后期夏季 500 hPa(图 4f)、700 hPa(图略)等压面上赤道西太平洋东风异常增强,西南地区西南风异常增强,有利于南海暖湿气流向西南地区输送。而西南地区西南风异常正是影响云南夏季降

水的重要天气系统,西南风异常在中纬西风的协同作用下,有利于云南区域形成中低空切变,有利于云南夏季降水的增多。

北半球副热带高压是亚洲季风环流的主要成员之一,其脊线的位置与东亚夏季风有关^[37],其强度、位置变化与我国夏季降水有着密切的联系^[38]。第四个预测因子是能够反映前期北半球副热带高压变化的预测因子,它是前期 5 月(55°~65°N,160°~145°W)平均海平面气压年际增量,与云南夏季降水年际增量相关系数在 1967~2017 年为 -0.55,超过 0.01 的显著性水平(图 5a)。前期这一区域的海平面气压与后期夏季 30°N 附近东北太平洋 500 hPa 位势高度有很高的相关。前期这一区域的海平面气压较前一年增加,后期夏季 30°N 附近东北太平洋上副热带高压较前一年异常减弱(图 5b),而东北太平洋上副热带高压正是影响云南夏季降水的重要系统(图 2a),因此我们选取这一区域的海平面气压作为云南夏季降水的预测因子 x_4 。

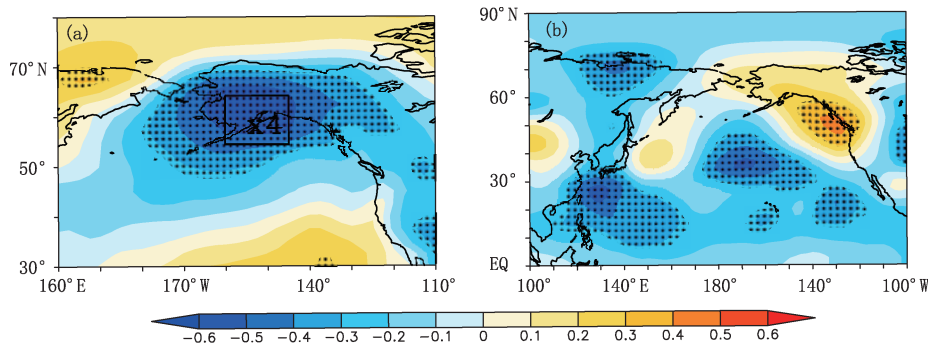


图 5 1967—2017 年年际增量环流相关场:(a) 云南夏季降水年际增量与 5 月海平面气压(x_4), (b) x_4 与夏季 500 hPa 位势高度

研究发现,前期 1 月印度半岛北部(20°~30°N,70°~80°E)区域 500 hPa 位势高度较前一年增大,云南夏季降水较前一年减少,这一区域 500 hPa 平均位势高度指数的年际增量与云南夏季降水在 1967—2017 年相关系数为 -0.45,超过 0.01 的显著性水平(图 6a)前期 1 月印度半岛北部 500 hPa 位势高度与后期夏季东北太平洋上副热带高压相关显著(图略)。前期 1 月 500 hPa 这一区域位势高度增加,后期夏季印度半岛至西太平洋 30°N 附近为反气旋式环流异常(图 6b),孟加拉湾位势高度异常增加,不利于孟加拉湾季风槽的加强及云南至中国南

部对流层中层的垂直运动的发展(图 6c,d)。而对流层中层的上升运动正是影响云南夏季降水的重要物理量因子。因此,我们选取前期 1 月(20°~30°N,70°~80°E)区域 500 hPa 位势高度平均指数作为另一个预测因子(x_5)。

另外,南北半球可通过越赤道气流进行物理量的强烈交换,前期 2 月 200 hPa 位势高度南半球澳洲以南区域(50°~65°S,170°~180°E)较前一年增大,(40°~45°S,120°~130°E)区域较前一年减小,云南夏季降水增多(图 7a)。为描述这种偶极子变化,以 200 hPa(50°~65°S,170°~180°E)平均位势

高度和(40°~45°S, 120°~130°E)平均位势高度的差作为偶极子指数。前期 2 月南半球澳洲以南区域偶极子指数与后期夏季巴尔喀什湖至贝加尔湖以东地区位势高度相关显著。前期 2 月这一偶极子指数增加, 后期夏季巴尔喀什湖至贝加尔湖以东地区位

势高度增加, 阻塞形势增强(图 7b)。以上阻高正是影响云南夏季降水的重要系统(图 2a), 因此, 我们选取(50°~65°S, 170°~180°E)及(40°~45°S, 120°~130°E)平均位势高度的差作为云南夏季降水的预测因子(x_6)。

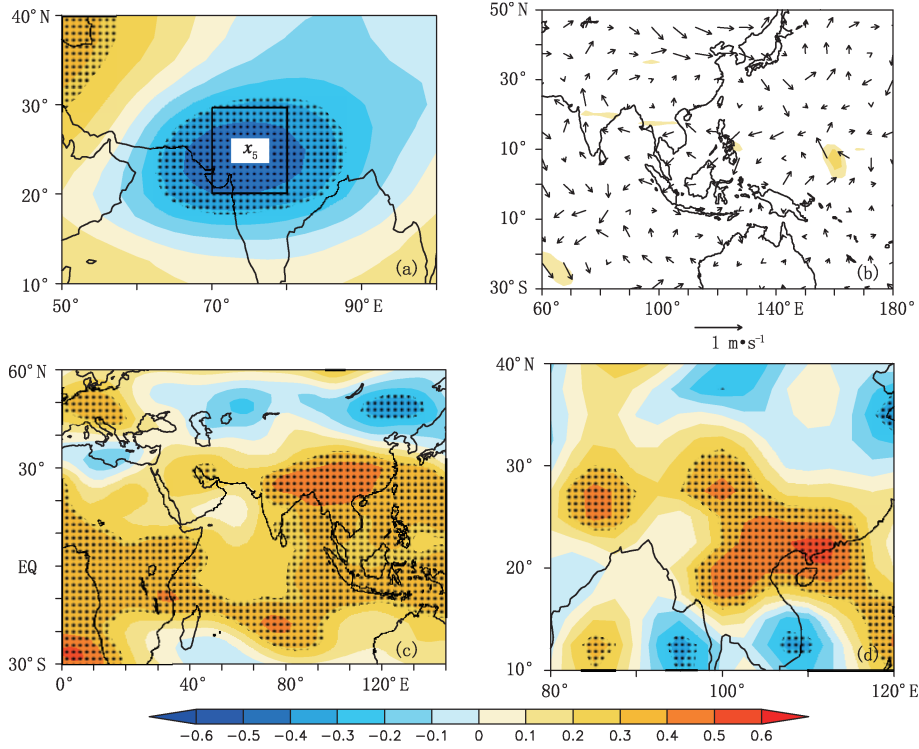


图 6 1967—2017 年年际增量环流相关场:(a) 云南夏季降水年际增量与 1 月 500 hPa 位势高度(x_5); (b) x_5 与夏季 500 hPa 风场;(c) x_5 与夏季 500 hPa 位势高度;(d) x_5 与夏季 500 hPa 垂直速度

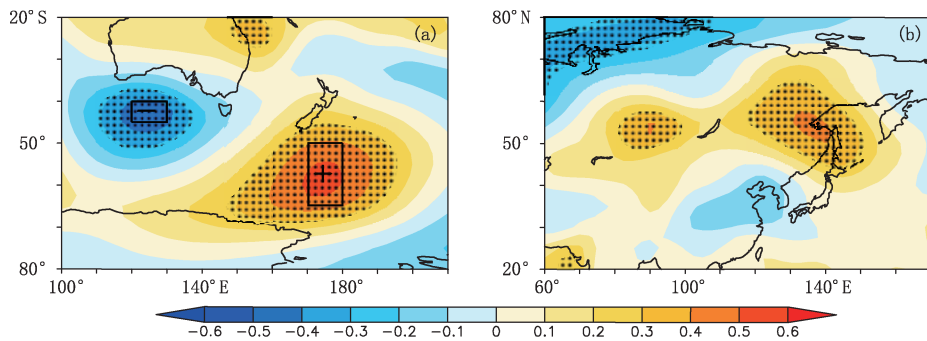


图 7 1967—2017 年年际增量环流相关场:(a) 云南夏季降水年际增量与 2 月 200 hPa 位势高度, (b) 2 月 200 hPa 相关显著区高度差(x_6)与夏季 500 hPa 位势高度

3 预测模型检验

为检验以上 6 个预测因子之间的独立性, 使用 Pearson 相关系数对因子间多重共线性进行了检验。若因子间的 Pearson 相关系数的绝对值大于

0.7, 且相关关系显著时, 可判定两因子在回归分析中存在多重共线性的可能较大^[39]。Pearson 相关系数见表 1, 因子 x_1 与因子 x_2 相关系数绝对值最大, 为 0.39, 其余因子间相关系数绝对值均小 0.32。参照以上标准, 可判定以上预测因子间不存在多重共

线性,因子间相互独立,可构建预测模型。

表 1 预测因子间 Pearson 相关系数

	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6
x_1	1	-0.39	0.23	0.10	-0.18	-0.20
x_2	-0.39	1	-0.19	-0.04	0.21	0.07
x_3	0.23	-0.19	1	0.12	-0.20	-0.25
x_4	0.10	-0.04	0.12	1	-0.22	-0.31
x_5	-0.18	0.21	-0.20	-0.22	1	0.22
x_6	-0.20	0.07	-0.25	-0.31	0.22	1

采用多元线性回归分析的方法,使用 1967—2017 年共 51 年的以上 6 个预测因子年际增量来建立云南夏季降水年际增量预测模型。为避免统计预测模型的过度拟合,使用交叉检验的方法,将每一年作为预测年,其余年份建立预测模型来预测目标年云南夏季降水年际增量,分别建立 51 个预测模型进行检验。同时还对 1998—2017 年共 20 年进行了逐年回报检验,逐年回报检验是将前期数据建立模型,依次预测后一年的云南夏季降水年际增量,以此来检验预测模型的预测能力。文中还使用降水距平百分率及相对均方根误差做了检验,表达式为:

$$P = [(R - \bar{R}) / \bar{R}] \times 100\% \quad (2)$$

$$\sigma = \frac{\sqrt{(\sum_{i=1}^N (R_i - R'_i)^2) / N}}{R} \times 100\% \quad (3)$$

表达式(2)、(3)中, P 为云南夏季降水距平百分率, R 为云南夏季降水, \bar{R} 为云南夏季降水气候平均值(取 1967—2017 年平均值)。文中 P 大于 13% 表示降水偏多, P 小于 -13% 表示降水偏少^[40], P 介于两者之间表示降水正常。 σ 为相对均方根误差, R_i 为观测值, R'_i 为预测值, N 为预测模型检验的数量。

图 8 显示了云南夏季降水预测值和观测值在 1967—2017 年年际增量及降水距平百分率。云南夏季降水年际增量的观测值和预测值交叉检验中相关系数为 0.85,降水年际增量相对均方根误差为 8.0%。对夏季降水年际增量变化超过 100 mm 的 15 年中,观测值与预测值同号率为 100%,53% 的预测值与观测值相差小于 50 mm,仅 1975 年预测值与观测值相差超过 100 mm。从图 8b 可见预测模型能够很好地模拟 1967—1974 年、1987—1994 年、2003—2017 年的夏季降水距平百分率的变化趋势。夏季降水距平百分率异常(偏多或偏少)的 13 年中,观测值与预测值同号率为 85%,有 62% 的年份预测值能够准确地预报出夏季降水的异常。而使用国家气候中心第一代全球海-气耦合模式(CGCM/NCC)对云南区域夏季降水预测,预测值和实况值相关系数小于 0.3^[41],通过检验和对比,年际增量法对云南夏季降水的预测具有显著的优势。

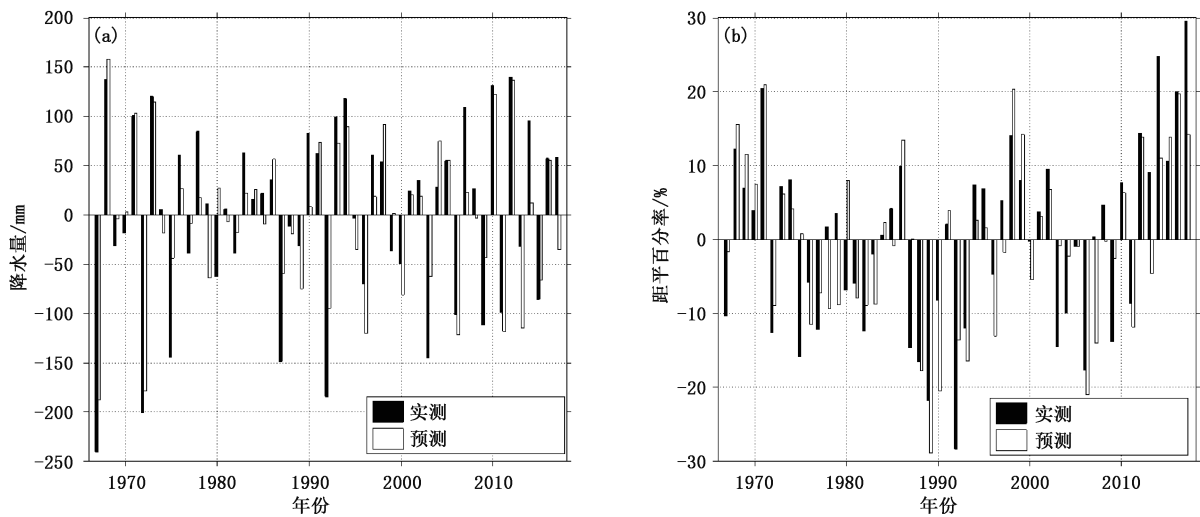


图 8 1967—2017 年云南夏季降水预测模型交叉检验结果:
(a)年际增量逐年交叉检验,(b)距平百分率年际增量逐年交叉检验

图 9a 为 1998—2017 年(20 年)的夏季降水年际增量回报检验结果,降水年际增量相对均方根误差为 9.1%,观测值与预测值同号率为 80%。夏季降水年际增量变化超过 100 mm 的 5 年中,2003 年及 2009 年观测值与预测值相差大于 90 mm,其余 3

年均小于 25 mm。1998—2017 年间夏季降水距平百分率异常(偏多或偏少)的 8 年中,有 2 年观测值与预测值符号相反,其余年份预测值能够准确地预报出夏季降水的异常,且与观测值相差均小于 16% (图 9b)。

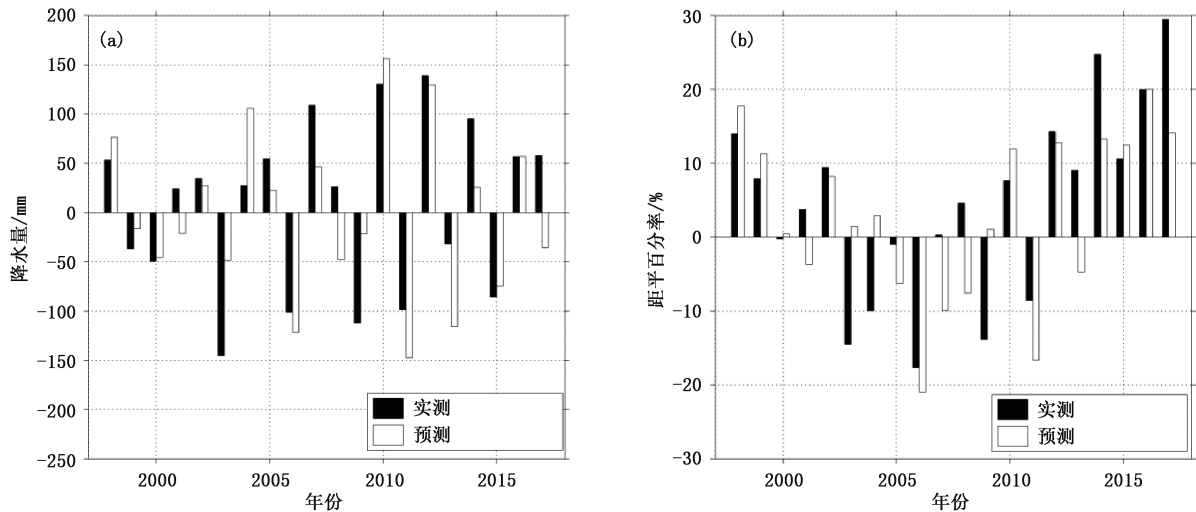


图 9 云南夏季降水 1998—2017 年预测模型回报检验结果:
(a)年际增量逐年回报检验,(b)距平百分率年际增量逐年回报检验

4 结论和讨论

本文通过分析云南夏季降水有关的年际增量环流及相应的物理过程,选取了 6 个具有物理意义的预测因子,包括:①前期 2 月南太平洋海温异常;②前期 2 月东亚北部海平面气压异常;③前期 4 月北美 500 hPa HGT 异常;④前期 5 月太平洋北部海平面气压异常;⑤前期 1 月印度半岛北部 500 hPa HGT 异常;⑥前期 2 月南半球澳洲以南地区 200 hPa HGT 偶极子异常。使用以上预测因子来建立夏季降水的物理统计预测模型。通过对 1967—2017 年 51 年的交叉检验及 1998—2017 年的回报检验,显示预测模型对夏季降水的异常变化及逐年的变化趋势能够较好地完成预测。

影响短期气候预测的因子众多,期间关系复杂。基于统计模式和动力模式的夏季降水预测水平为 60%~70%^[25]。国家气候中心第一代全球海-气耦合模式在云南夏季降水的预测中,预测值和实况值相关系数小于 0.3^[41]。云南夏季降水预测方法的研究仍处于探索阶段,在影响夏季降水的物理过程方面仍需探索,未来充分使用动力模式和通过改进统

计分析方法,可发展新的气候预测方法,提高预测效果。

致谢:作者由衷的感谢李崇银院士工作站及范可老师、田宝强博士的给予的极大帮助!

参考文献

- [1] 覃志年,胡娅敏,陈丽娟. 广西夏季降水的多时间尺度特征及影响因子[J]. 应用气象学报, 2013, 24(5): 565-575.
- [2] 吴国雄,李建平,周天军,等. 影响我国短期气候异常的关键区:亚印太交汇区[J]. 地球科学进展, 2006, 21(11): 1109-1118.
- [3] 陈兴芳,赵振国. 中国汛期降水预测研究及应用[M]. 北京:气象出版社, 2000: 66-92.
- [4] 黄嘉佑,刘舸,赵昕奕. 副高、极涡因子对我国夏季降水的影响[J]. 大气科学, 2001, 28(4): 517-526.
- [5] 张琼. 南亚高压的演变规律、机制及其对区域气候的影响[D]. 南京:南京大学, 1999.
- [6] 王会军,薛峰. 索马里急流的年际变化及其对半球间水汽输送和东亚夏季降水的影响[J]. 地球物理学报, 2003, 46(1): 18-25.
- [7] 徐志清,范可. 冬季和春季印度洋海温异常年际变率模态对中国东部夏季降水的可能影响过程[J]. 大气科学, 2012, 36(5): 879-888.
- [8] 薛峰,刘长征. 中等强度 ENSO 对中国东部夏季降水的影响

- 及其与强 ENSO 的对比分析[J]. 科学通报, 2007, 52: 2798-2805.
- [9] 袁媛, 高辉, 柳艳菊. 2016 年夏季我国东部降水异常特征及成因简析[J]. 气象, 2017, 43(1):115-121.
- [10] 范可, 王会军. 南极涛动异常与 2006 年我国东部夏季降水形式预测[J]. 应用气象学报, 2006, 17(3):283-384.
- [11] 郑丽娜, 张子涵, 王旭, 等. 东亚夏季风异常与黄淮地区夏季降水的关系[J]. 气象科技, 2019, 47(1):62-69.
- [12] 张薇, 宋燕, 王式功, 等. 青藏高原冬春积雪特征及其对我国夏季降水的影响[J]. 气象科技, 2019, 47(6):941-951.
- [13] 马宁, 谢均, 郭军, 等. 海河流域夏季降水与北半球环流异常的相关[J]. 气象科技, 2016, 44(3):400-407.
- [14] 邢峰, 韩荣青, 李维京. 夏季黄河流域降水气候特征及其与大气环流的关系[J]. 气象, 2018, 44(10): 1295-1305.
- [15] 李永华, 向波, 卢楚翰, 等. 热带大气季节内振荡对西南地区东部夏季降水的影响及其可能机制[J]. 大气科学, 2016, 40(2): 437-450.
- [16] 解明恩, 张万诚. 云南短期气候预测方法与模型[M]. 北京: 气象出版社, 2000.
- [17] 郭志荣, 江燕如, 彭丽霞, 等. 5 月南亚高压与云南地区夏季降水的关系[J]. 气象科学, 2014, 34(4): 397-403.
- [18] 张秀年. 印太暖池区域海气相互作用的年际变化及其与低纬高原夏季降水异常的关系研究[D]. 昆明: 云南大学, 2012.
- [19] 肖子牛, 石文静, 段玮. 云南夏季降水量在 21 世纪初的突变减少及原因分析[J]. 气象, 2016, 42(3):261-270.
- [20] Lü J M, Ju J H, Ren J Z, et al. The influence of the Madden-Julian Oscillation activity anomalies on Yunnan's extreme drought of 2009-2010 [J]. *Sci China Earth Sci*, 2012, 55: 98-112, doi: 10.1007/s11430-011-4348-1.
- [21] Fan K, Wang H J. Seasonal prediction of summer temperature over Northeast China using a year-to-year incremental approach [J]. *Acta Meteorol Sin*, 2010, 24: 269-275.
- [22] Sun B, Wang H J. Larger variability, better predictability? [J]. *Int J Climatol*, 2013, 33, 2341-2351, doi: 10.1002/joc.3582.
- [23] Wang H J, Zhou G Q, Zhao Y. An effective method for correcting the seasonal-interannual prediction of summer climate anomaly [J]. *Adv Atmos Sci*, 2000, 17(2): 234-240.
- [24] 胡娅敏, 王永光, 王娟怀, 等. 登陆华南台风强度的前兆信号分析及预测[J]. 气象, 2017, 43(10): 1278-1286.
- [25] 范可, 王会军, Choi Youngjean. 一个长江中下游夏季降水的物理统计预测模型[J]. 科学通报, 2007, 52(24): 2900-2905.
- [26] 范可, 田宝强. 东北地区冬半年大雪-暴雪日数气候预测[J]. 科学通报, 2013, 58(8), 699-706.
- [27] 王秀英, 田宝强, 范可. 基于年际增量方法的云南省普洱雨季开始期气候预测[J]. 大气科学学报, 2019, 42(6), 801-813.
- [28] Liu Ying, Fan Ke. An application of hybrid downscaling model to forecast summer precipitation at stations in China [J]. *Atmospheric Research*, 2014, 143: 17-30.
- [29] 吴立新, 刘秦玉, 胡敦欣 等. 北太平洋副热带环流变异及其对我国近海动力环境的影响[J]. 地球科学进展, 2007, 22(12): 1124-1130.
- [30] 李熠, 杨修群, 谢倩. 北太平洋副热带高压年际变异与 ENSO 循环之间的选择性相互作用[J]. 地球物理学报, 2010, 53(7): 1543-1553.
- [31] 高晶, 高辉. 副热带东南太平洋海温对东北夏季降水的影响及可能机制[J]. 大气科学, 2015, 39(5): 967-977.
- [32] 高辉, 高晶. 黑潮冬季海温对我国东北地区夏季降水预测信号的增强[J]. 海洋学报, 2014, 36(7): 27-33.
- [33] Fan K, Wang H J. Antarctic oscillation and the dust weather frequency in North China [J]. *Geophys Res Lett*, 2004, 31, L10201, doi:10.1029/2004GL019465.
- [34] 张恒德. 极涡的活动特征与数值模拟及其对我国气候的影响[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2005.
- [35] 沈伯竹. 21 世纪以来欧亚冷冬频发与冬季 AO、极涡的联系及其机理[D]. 兰州: 兰州大学, 2013.
- [36] 魏科. 北半球平流层极涡年际和季内变异及其对东亚冬季风的影响[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2007.
- [37] 陶诗言, 张庆云, 张顺利. 夏季北太平洋副热带高压系统的活动[J]. 气象学报, 2001, 59(6): 747-758.
- [38] 王绍武, 叶瑾琳, 龚道溢, 等. 中国东部夏季降水型的研究[J]. 应用气象学报, 1998, 9(增刊 1), 65-74.
- [39] Mansfield E R, Helms B P. Detecting multicollinearity [J]. *The American Statistician*, 1982, 36(3a): 158-160.
- [40] 王绍武, 龚道溢, 陈振华. 近百年来中国的严重气候灾害[J]. 应用气象学报, 1999, 10(增刊): 43-53.
- [41] 顾伟宗, 陈丽娟. 李维京等. 降尺度方法在中国不同区域夏季降水预测中的应用[J]. 气象学报, 2012, 70(增刊 2): 202-212.

Influencing Factors and Physical Statistical Prediction Methods of Summer Rainfall Anomaly in Yunnan

WANG Xiuying¹ WANG Junjie²

(1 Puer Meteorological Service, Yunnan, Puer 665000; 2 Puer University, Yunnan, Puer 665000)

Abstract: Because of the obvious interannual variation of summer precipitation in Yunnan and various influencing factors, it is difficult to predict summer precipitation. The daily precipitation observation data from 122 meteorological stations in Yunnan Province from 1965 to 2017 and NCEP atmospheric circulation data and the year-to-year increment method are used to predict summer precipitation in Yunnan. In order to provide a theoretical basis for the prediction of summer precipitation in Yunnan, it is indispensable to analyze the varying regularities and physical processes affecting the year-to-year increments of summer rainfall and atmospheric circulation. The prediction model is established based on the method of multiple linear regression analysis. Six predictors that have explicitly physical meaning are selected: the anomaly of the SST (Sea Surface Temperature) in the South Pacific in February, SLP (Sea Level Pressure) in Northeast Asia in February, 500 hPa geopotential height in May over the North America in April, SLP in the northern Pacific in May, 500 hPa geopotential height in the northern India in January, and 200 hPa geopotential height in South Australia in February. Using the above six predictors, the prediction model of summer rainfall is established. In addition, not only the crossing-test verification is conducted on the prediction model is with the independent samples from 1965 to 2017, but also the prediction test verification is conducted from 1998 to 2017. In the crossing-test verification, the correlation coefficients between predicted and observed interannual increments of summer rainfall is 0.85, and the root mean square relative error is 8.0%. In the prediction test verification, the root mean square relative error of is 9.1%. The prediction model makes good predictions, about 63.0% of the summer rainfall anomaly. The prediction model shows satisfactory forecasting ability.

Keywords: year-to-year increment method; prediction model; summer rainfall anomaly; short-term climate prediction