

基于年际增量法的华西秋雨预测模型建立及检验

王春学¹ 郑然¹ 李栋梁² 唐红玉³ 马振峰¹ 茅海祥⁴

(1 四川省气候中心/高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室,成都 610072;

2 南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室,南京 210044;

3 重庆市气候中心,重庆 401147; 4 贵州省铜仁市气象局,铜仁 554300)

摘要 利用 1962—2018 年华西地区 301 个气象台站秋季降水量资料和国家气候中心整理的 130 项气候系统指数,采用年际增量法建立了华西秋雨预测模型。首先通过相关分析挑选了 4 个与华西秋雨年际增量前 3 主模态密切相关的影响因子,进而采用多元线性回归方法进行建模,拟合时段和后报时段分别选为 1962—1991 年和 1992—2018 年。华西秋雨年际增量前 3 主模态累积值的预测模型通过了 $\alpha=0.01$ 的显著性水平检验,表明该模型具有较高的拟合预测能力。然后用相同的预测因子分别建立华西地区 301 个气象站点的华西秋雨年际增量预测模型,大部分模型都通过了显著性检验。用 PS 评分指标对预测效果进行检验,结果显示后报期年平均 PS 评分达 74.5 分。从空间分布来看后报期大部分站点的 PS 评分都超过 60 分,其中四川盆地南部、贵州东部和湖南西部等地超过 80 分。与华西各省和国家气候中心发布的近 6 年秋季降水预测 PS 评分进行比较,发现模型后报结果有显著优势。总体来看,用年际增量法建立的华西秋雨预测模型具有较高的预测技巧和实际应用价值。

关键词 年际增量;华西秋雨;气候预测

中图分类号: P456 DOI: 10.19517/j.1671-6345.20190498 文献标识码: A

引言

目前气候预测仍然是国际难题,而中国华西地区处于青藏高原东侧,地形十分复杂,并且受到热带季风、副热带季风和青藏高原季风等诸多气候系统共同影响,所以该地区气候预测难度也更大^[1-3]。近些年,有关华西秋雨变化规律和成因分析的研究比较多^[4-7],但涉及预测方法的研究则相对匮乏^[8]。秋季是秋收秋种时节,华西地区又是中国主要粮食产区,秋雨的多寡将直接影响到粮食的生产安全。

年际增量法是范可等^[9]提出的一种新的气候预测方法,该方法可以放大预测对象的预测信号,并且其描述的气候异常有一定的确定性。近几年,该方法被应用到中国华北^[10]、西北^[11]、西南^[12]以及华南^[13]等地的汛期和春季降水预测方法研究当中,预测效果提升明显。进入 21 世纪以来华西秋雨有逐渐增强的变化趋势,所以华西秋雨的气候预测就显

得尤为重要^[14-15]。如果年际增量法能够提高华西秋雨的预测水平,那么无疑将会对华西地区的气象防灾减灾以及粮食生产安全提供有力的科技支撑。

1 资料和方法

1.1 资料

(1)根据华西秋雨监测气象行业标准^[16],华西秋雨监测区包括的湖北、湖南、重庆、四川、贵州、陕西、宁夏和甘肃等 8 个行政区,共 373 个气象站。本文选择了资料完整性较好的 301 个站(图 1),使用 1961—2018 年逐月降水量资料,并将 9—11 月累加为秋季降水量。

(2)国家气候中心整理的 1961—2018 年 130 项气候系统指数资料,下载自国家气象业务内网(<http://10.1.64.154/idata/web/climateBuzi/index?menuId=404>),筛选出的 4 个预测因子定义为:南方涛动指数为标准化的塔希提与达尔文站月平均海

<http://www.qxkj.net.cn> 气象科技

中国气象局核心业务发展专项(YBGJXM(2019)0606)、国家自然科学基金项目(41275097)共同资助

作者简介:王春学,男,1985 年生,工程师,硕士,主要从事短期气候诊断与预测研究,Email:wangchunxue2009@163.com

收稿日期:2019 年 11 月 21 日;定稿日期:2020 年 6 月 22 日

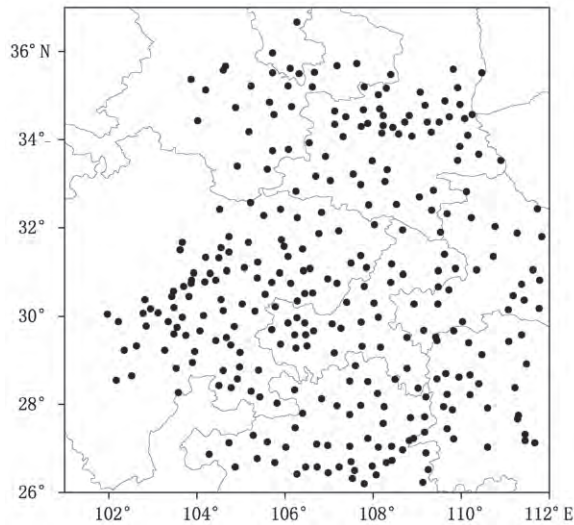


图 1 华西秋雨监测区 301 个站点分布

平面气压之差的序列标准化值。西太平洋暖池面积指数为 $30^{\circ}\text{S}\sim 30^{\circ}\text{N}$ 、 $120^{\circ}\sim 180^{\circ}\text{E}$ 区域内,海表温度超过 28.0°C 区域的球面面积。中太平洋信风指数为 $5^{\circ}\text{N}\sim 5^{\circ}\text{S}$ 、 $175^{\circ}\sim 140^{\circ}\text{W}$ 区域 850 hPa 纬向风场平均值的标准化值。准两年振荡指数为赤道地区 30 hPa 纬向风平均值。

(3) 国家气候中心及华西地区各省 2015—2018 年秋季降水预测趋势异常综合检验 (P_s) 评分,并进行平均处理,资料来源于国家气象业务内网 (<http://10.1.64.154/idata/web/climateBuzi/index?menuId=601>)。

1.2 方法

(1) 年际增量法:定义年际增量为当年变量值减去前一年的变量值,例如 2018 年秋季降水的年际增量为 2018 年秋季降水量减去 2017 年秋季降水量。

(2) 回归方程 F 检验:统计量 F 遵从自由度为 m 和 $n-m-1$ 的 F 分布。

$$F_{\text{统计量}} = \frac{U/m}{Q/n-m-1} \quad (1)$$

其中, U 为回归平方和, Q 为残差平方和, m 为自变量个数, n 为时间长度。

(3) 趋势异常综合检验 (P_s): 比较预测与实况

降水距平百分率情况,评分公式为:

$$P_s = 100 \frac{AN_0 + BN_1 + CN_2}{N - N_0 + AN_0 + BN_1 + CN_2 + M} \quad (2)$$

其中, N 为实际参加评估的总数; N_0 为趋势预测正确(符号一致)的总数; N_1 为 1 级异常(20%~50%)预测正确的总数; N_2 为 2 级异常(超过 50%)预测正确的总数; M 为漏报数(没有预报二级异常而实况超过 100%);参数 A 、 B 、 C 分别取 2、2、4。逐年检验时,统计站数;逐站检验时,统计年数。

(4) 经验正交函数(Empirical Orthography Function, EOF)展开, EOF 方法没有固定的函数,能够对不规则分布的站点进行分解,并且收敛速度快,可以将变量场信息集中到几个具有一定物理意义的空间模态上,所以 EOF 成为气候科学研究中分析变量场的主要工具。

2 华西秋雨年际增量 EOF 分析

将 1961—2018 年华西地区 301 个气象站的秋季降水量资料处理成 1962—2018 年的年际增量序列,然后对其进行 EOF 分析, EOF 展开的前 3 个模态通过了显著性检验,累计方差贡献率为 53.3%,即前 3 个模态为华西秋雨年际增量的主模态。第 1 模态解释方差为 23.8%,从其特征向量空间分布(图 2a1)来看,总体表现为南北反向异常型,大值中心出现在陕西南部、四川西部和贵州东北部至湖南西部地区。从其对应的时间系数(TC1)来看,秋季降水年际增量没有明显的变化趋势,但年际波动显著(图 2a2)。第 2 模态解释方差为 18.5%,除甘肃南部和陕西南部少量站点为正值外,华西其余大都都为负值,负值中心出现在贵州北部地区,即总体表现为全区一致变化型,对应的时间系数(TC2)也主要为年际波动(图 2b);第 3 模态解释方差为 11%,表现为东西反向异常型,大值中心出现在四川盆地西部和湖北的西北部地区,相应的时间系数(TC3)在 2010 年代年际波动变小(图 2c)。

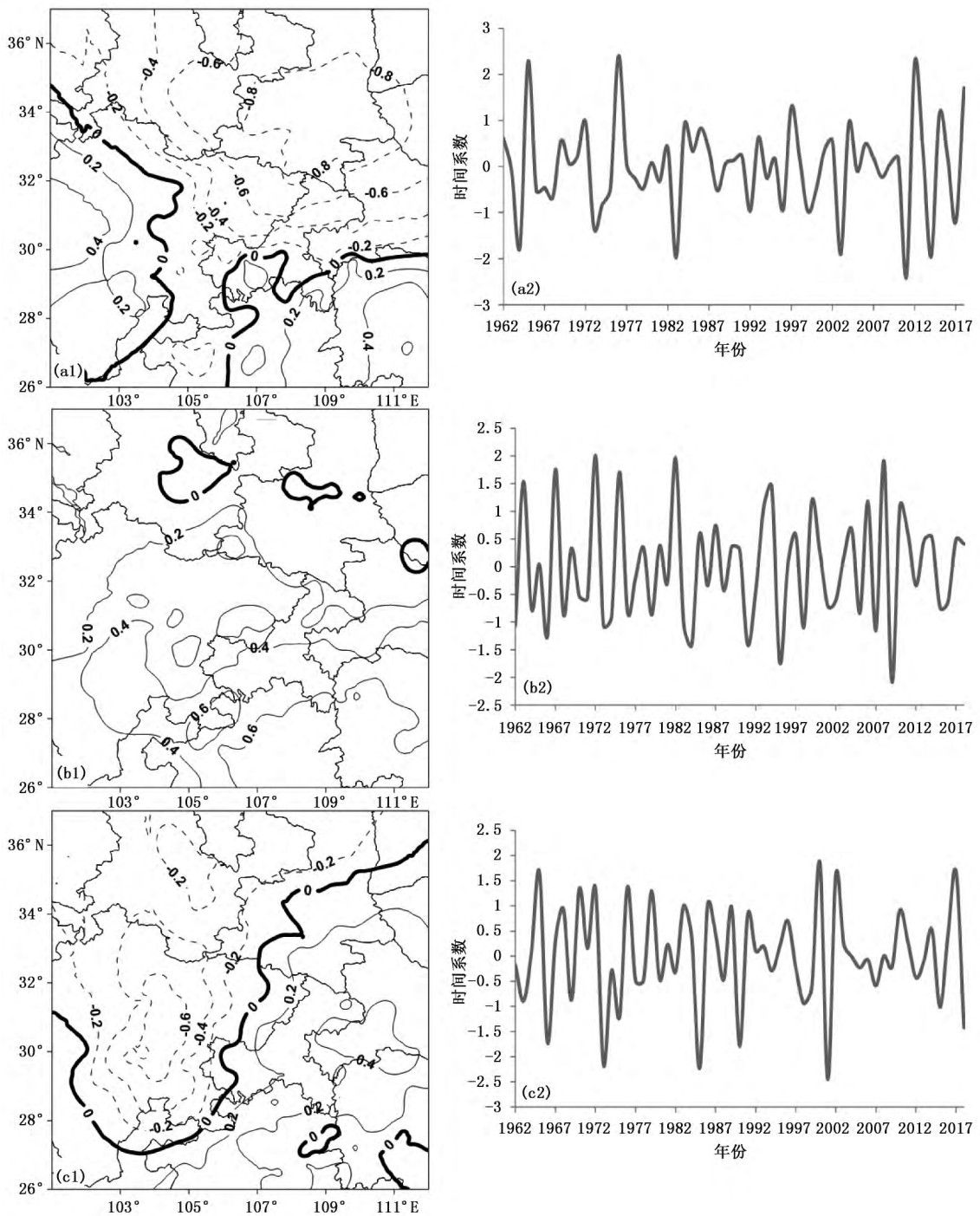


图 2 1962—2018 年华西秋雨年际增量 EOF 展开前 3 模态空间分布(a1、b1、c1)及其对应的时间系数(a2、b2、c2)

3 气候预测关键因子

国家气候中心整理的 130 项气候系统指数是我国气候预测的重要参考指标,其中包含了几乎所有重要的大气和海洋气候预测信号。为了寻找影响华

西秋雨异常的关键因子,本文将处理成年际增量序列,并使用华西秋雨年际增量 EOF 展开前 3 模态的时间系数分别与 130 项气候系统指数进行相关分析,从中寻找存在稳定相关的指数。

分析发现 TC1 与 6—11 月南方涛动指数相关

显著,其中与 9 月相关系数最高,前期与 7 月和 8 月相关最好; TC1 与 6—11 月中太平洋信风指数相关显著,其中与 9 月相关系数最高,前期与 8 月相关最好。TC2 与 6—10 月西太平洋暖池面积指数显著相关,其中与 7 月的相关系数最高。TC3 与准 2 年振荡指数显著相关,其中与 8—10 月的相关系数最高(表 1)。

南方涛动对太平洋地区乃至全球的大气环流都有着重要影响,是气候预测的关键因子,与我国秋季大范围降水异常也有密切关系^[17-18]。研究表明赤道太平洋信风张弛与厄尔尼诺现象密切相关,并且

有一定的先兆性^[19-20]。热带太平洋暖池对东亚夏季风年际和季节内变化都起到非常重要的作用,暖池热含量与华西秋雨强度也存在显著正相关^[21-22]。另外研究也表明平流层季节变化特征具有长期的相对稳定性,不但对低层环流系统有直接影响,也与我国异常天气气候有着密切的联系,对西南夏季旱涝预测有一定指示意义^[23-24]。可以认为通过分析筛选出的 4 个气候系统指数对华西秋雨都有比较明确的物理指示意义,所以确定这 4 个指数作为华西秋雨年际增量的预测因子。

表 1 EOF 展开前 3 模态时间系数与 1—11 月气候系统指数的相关系数

| 气候系统指数/模态 | 1月 | 2月 | 3月 | 4月 | 5月 | 6月 | 7月 | 8月 | 9月 | 10月 | 11月 |
|-------------|------|-------|------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 南方涛动/TC1 | 0.42 | 0.2 | 0.15 | -0.34 | -0.41 | -0.54* | -0.71* | -0.71* | -0.78* | -0.65* | -0.46* |
| 中太平洋信风/TC1 | 0.31 | 0.2 | 0.02 | -0.14 | -0.28 | -0.55* | -0.54* | -0.63* | -0.67* | -0.64* | -0.61* |
| 西太平洋暖池/TC2 | 0.06 | -0.12 | 0.17 | -0.06 | -0.19 | -0.53* | -0.58* | -0.5* | -0.23 | -0.48* | -0.4 |
| 准 2 年振荡/TC3 | 0.31 | 0.19 | 0.05 | -0.18 | -0.44 | -0.62* | -0.74* | -0.79* | -0.79* | -0.79* | -0.77* |

注: * 为通过 $\alpha=0.01$ 的显著性检验。

4 预测模型建立及检验

4.1 前 3 主模态累积年际增量回归模型的建立

根据相关分析,选取 7 月的南方涛动指数(x_1)、8 月的中太平洋西风指数(x_2)、7 月的西太平洋暖池面积指数(x_3)和 8 月的准 2 年振荡指数(x_4)作为预测因子,利用 EOF 分析前 3 模态时间系数的累加序列(TC)作为因变量,采用多元线性回归方法建立华西秋雨前 3 主模态累积年际增量预测模型。利用 1962—1991 年的资料进行预测模型拟合,1992—2018 年为后报检验时段。建立的预测模型如式(3):

$$y = -0.074 - 0.37x_1 - 0.18x_2 - 0.18x_3 - 0.02x_4 \quad (3)$$

根据式(1)计算得到模型的 F 统计量值为 14.8, 大于 4.2($F_{\alpha=0.01}$),即通过置信度检验。同时预测模型的复相关系数为 0.86,也通过了 $\alpha=0.01$ 的显著性检验,所以可以认为该模型的拟合度比较高。从拟合/后报效果来看(图 3),拟合/后报序列与 TC 序列基本吻合,其中拟合期在 TC 超过 1 倍标准差的 16 年里有 15 年位相与之同位相;后报期在 TC 超过 1 倍标准差的 18 年里有 13 年与之同位相。

4.2 站点年际增量预测模型的建立

上文分析表明,利用年际增量法可以有效地预

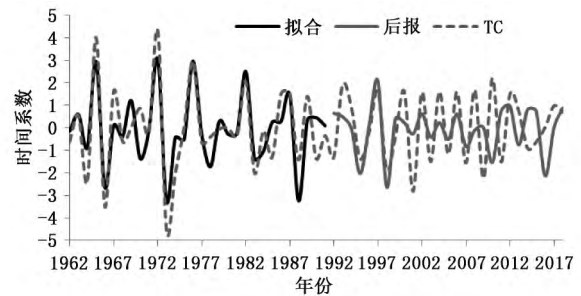


图 3 华西秋雨年际增量 EOF 展开前 3 主模态累积时间系数(TC)与拟合/后报值变化曲线

测华西秋雨前 3 主模态的异常情况,但是实际业务中往往更需要得到各个站点的降水预测,所以利用以上 4 个气候系统指数,采用同样的方法分别对华西地区 301 个站点建立各自的华西秋雨年际增量预测模型。

从各站预测模型的 F 检验(图 4)来看,陕西南部、四川东北部、重庆北部和西南部的部分站点模型没有通过检验,其余大部分模型都通过了 $\alpha=0.1$ 的显著性水平检验,其中甘肃南部到陕西中部、四川盆地西南部和贵州东北部的模型通过了 $\alpha=0.01$ 的显著性水平检验。从站点数量统计来看,有 79.4% 的站点通过了 $\alpha=0.1$ 的显著性水平检验,66.8% 的站

点通过了 $\alpha=0.05$ 的显著性水平检验,40.1%的站点通过了 $\alpha=0.01$ 的显著性水平检验。即总体来看,大多数站点预测模型的拟合度都比较理想。

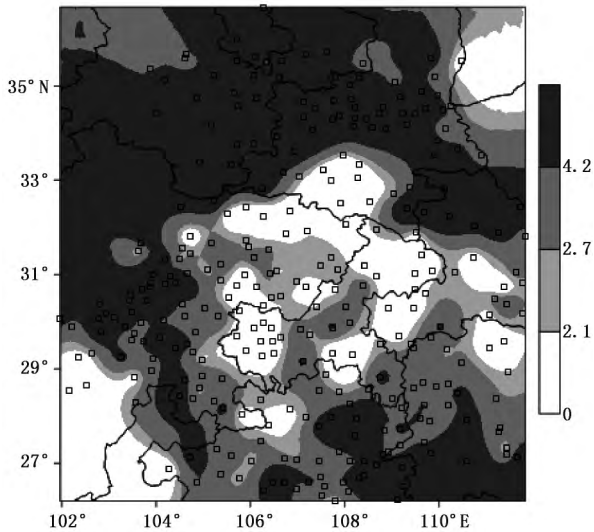


图 4 各站点华西秋雨年际增量预测模型 F 检验 ($F_{0.1}=2.1, F_{0.05}=2.7, F_{0.01}=4.2$) 空间分布

4.2.1 预测效果逐年检验

在气候预测中通常使用 PS 评分对预测结果进行检验^[25],这里也从 PS 评分角度进一步对以上预测效果进行分析。首先利用年际增量预测结果和实况降水量回算出秋季降水量预测值,然后计算 PS 评分。图 5 给出了华西秋雨年际增量预测模型拟合期和后报期 PS 评分逐年变化,其中拟合期 PS 评分

在 59~95 分之间,平均值为 79.8 分;后报期 PS 评分较拟合期略有下降,但也保持在较高水平,除 1995 年外,其他所有年份均超过 57 分,平均为 74.5 分,其中有 9 年超过 80 分。

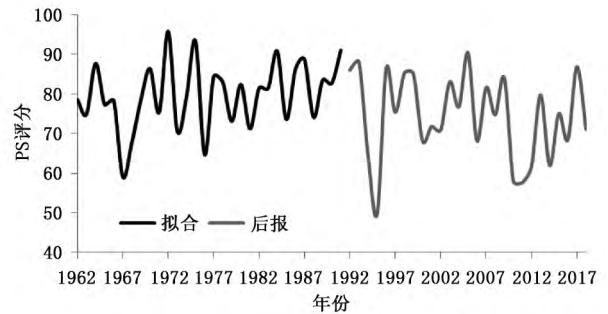


图 5 1962—2018 年华西秋雨年际增量预测模型拟合期和后报期 PS 评分逐年变化

4.2.2 预测效果逐站检验

上节从华西地区逐年拟合/后报角度对华西秋雨预测效果进行了总体检验,那么各个站点的拟合/后报效果如何呢?

图 6 给出了 PS 评分空间分布,可以看到拟合期华西大部分站点 PS 评分都超过 70 分,其中四川和重庆北部、陕西和甘肃大部、以及湖南和湖北的西北部超过 80 分(图 6a);后报期除陕西北部局地外,其余大部分地区的 PS 评分都超过 60,其中四川盆地南部、贵州东部和湖南西部等地超过 80 分(图 6b)。

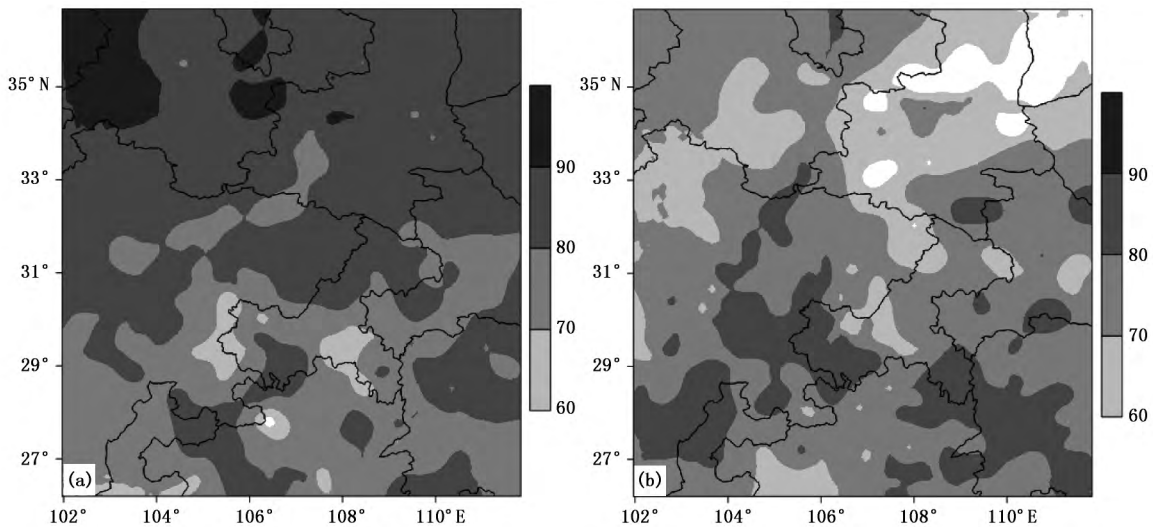


图 6 华西秋雨各站点秋季降水年际增量预测模型拟合期(a)和后报期(b)PS 评分空间分布

4.2.3 实况对比检验

为了进一步分析模型的预测水平,利用华西各省和国家气候中心发布的 2013—2018 年秋季降水预测检验评分结果进行比较(图 7)。可以发现,近 6 年各省发布的秋季降水 PS 评分与国家气候中心发布的结果比较接近,2013、2015 和 2016 年国家气候中心的评分略高,2014、2017 和 2018 年各省评分略高,6 年平均分别为 61.4 分和 62 分。与模型后报的结果比较,近 6 年模型 PS 评分均超过了各省和国家气候中心发布的评分,平均达 73.8 分,即利用年际增量法建立的预测模型有明显优势。

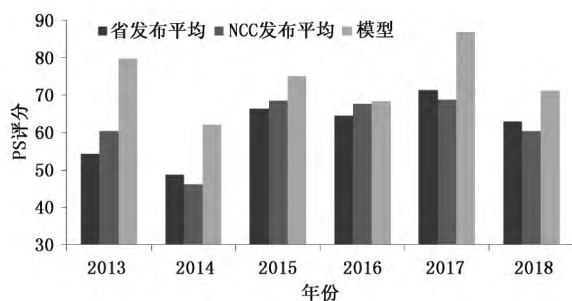


图 7 2013—2018 年华西地区各省和国家气候中心发布的秋季降水预测 PS 评分与模型后报结果对比

5 结论

研究发现南方涛动指数、中太平洋信风指数、西太平洋暖池面积指数和准 2 年振荡指数与华西秋雨都有稳定的相关关系,是华西秋雨年际增量的关键预测因子。利用这 4 个气候因子建立华西秋雨年际增量前 3 主模态的预测模型,拟合期为 1962—1991 年,后报期为 1992—2018 年,回归模型通过了 $\alpha = 0.01$ 的 F 检验和复相关系数检验,即预测模型具有较高的拟合预测能力。

使用相同的因子建立各个站点的华西秋雨年际增量预测模型,其中接近 80% 的模型都通过了 $\alpha = 0.01$ 的显著性水平检验。从逐年来看,拟合期 PS 评分年平均值为 79.8 分;后报期 PS 评分较拟合期略有下降,但也保持在较高水平,平均为 74.5 分。

逐站检验表明,拟合期华西大部分站点 PS 评分在都超过 70 分,其中四川和重庆北部、陕西和甘肃大部、以及湖南和湖北的西北部超过 80 分;后报期除陕西北部局地外,其余大部分地区的 PS 评分都超过 60,其中四川盆地南部、贵州东部和湖南西

部等地超过 80 分。

与华西各省和国家气候中心发布的 2013—2018 年秋季降水预测评分比较,模型后报的 PS 评分均超过了发布的评分,平均达 73.8 分,从 PS 评分和稳定性来看,模型均优于发布结果,说明基于年际增量方法的华西秋雨预测模型具有较高的预测技巧。

参考文献

- [1] 丁一汇. 季节气候预测的进展和前景[J]. 气象科技进展, 2011, 1(3): 14-27.
- [2] 贾小龙, 陈丽娟, 高辉, 等. 我国短期气候预测技术进展[J]. 应用气象学报, 2013, 24(6): 641-655.
- [3] 舒建川, 蒋兴文, 黄小梅, 等. 中国西南夏季降水预测的统计降尺度建模分析[J]. 高原气象, 2019, 38(2): 349-358.
- [4] 罗霄, 李栋梁, 王慧. 华西秋雨演变的新特征及其对大气环流的响应[J]. 高原气象, 2013, 32(4): 1019-1031.
- [5] 赵佳玉, 马振峰, 范广洲. 热带大气季节内振荡对华西秋雨的影响[J]. 高原气象, 2016, 35(6): 1487-1497.
- [6] 徐金霞, 闫彩霞, 钟燕川, 等. 北半球秋季欧亚遥相关与华西秋雨的关系[J]. 气象科技, 2017, 45(3): 492-498.
- [7] 孙昭萱, 杨小波, 马振峰. 近 50 年西南地区秋雨监测指标的建立及成因分析[J]. 气象科技, 2013, 41(5): 883-888.
- [8] 王春学, 马振峰, 王佳津, 等. 华西秋雨准 4 年周期特征及其与赤道太平洋海表温度的关系[J]. 大气科学, 2015, 39(3): 643-652.
- [9] 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[J]. 科学通报, 2007, 52(24): 2900-2905.
- [10] 范可, 林美静, 高煜中. 用年际增量方法预测华北汛期降水[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2008(11): 1452-1459.
- [11] 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[J]. 应用气象学报, 2017, 28(4): 458-469.
- [12] 郑然, 刘嘉慧敏, 马振峰. 年际增量方法在西南夏季降水预测中的应用[J]. 气象学报, 2019, 77(3): 489-496.
- [13] Fan K. A statistical prediction model for spring rainfall over Northern China based on the interannual increment approach [J]. Journal of Tropical Meteorology, 2012, 18(4): 543-550.
- [14] 蒋竹将, 马振峰, 刘佳, 等. 一种改进的华西秋雨指数及其气候特征[J]. 大气科学, 2014, 38(1): 32-44.
- [15] 张艳红, 刘维, 张蕾. 2017 年秋季气候对农业生产的影响[J]. 中国农业气象, 2018, 39(1): 69-71.
- [16] 李多, 司东, 柯宗建, 等. 中国雨季监测指标 华西秋雨[Z]. 中国气象局, 全国气候与气候变化标准化技术委员会, 2019, QX/T 496-2019.
- [17] 施能. 厄尔尼诺/南方涛动与我国秋季大尺度降水预报[J]. 南京气象学院学报, 1990, 13(2): 174-183.
- [18] 谌芸, 施能. 厄尔尼诺/南方涛动与我国秋季气候异常[J]. 热

- 带气象学报, 2003, 19(2):137-146.
- [19] 巢纪平, 张丽. 赤道不同海域对信风张弛的响应特征——对 El Nino 研究的启示[J]. 大气科学, 1998, 22(4):428-442.
- [20] 李耀辉, 李栋梁, 赵庆云, 等. 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, 2000, 5(2):205-213.
- [21] 黄荣辉, 孙凤英. 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, 1994, 18(2):141-151.
- [22] 郑然, 刘嘉慧敏, 马振峰. 夏季西太平洋暖池热含量对华西秋雨的影响及可能的物理机制[J]. 气象学报, 2018, 76(5):714-725.
- [23] 王玉佩. 30(50) hPa 流型及其季节变化与我国旱涝的关系[J]. 气象学报, 1986, 44(2):227-233.
- [24] 李跃清, 王猛. 夏季青藏高原上空 30-50 天大气低频振荡与南亚高压活动的关系[J]. 高原山地气象研究, 1999, 9(3):6-11.
- [25] 孙银川, 郑广芬, 王素艳, 等. DERF2.0 模式对宁夏不同时间尺度降水的预测评估[J]. 气象科技, 2019, 47(4):631-638.

Establishment and Test of Huaxi Autumn Rain Forecasting Model Based on Interannual Increment Method

WANG Chunxue¹ ZHENG Ran¹ LI Dongliang² TANG Hongyu³
MA Zhenfeng¹ MAO Haixiang⁴

(1 Sichuan Provincial Climate Center/Heavy Rain and Drought-Flood Disasters in Plateau and Basin Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610072; 2 Nanjing University of Information Science & Technology, Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education, Nanjing 210044; 3 Chongqing Climate Center, Chongqing 401147; 4 Tongren Meteorological Service, Guizhou, Tongren 554300)

Abstract : Based on the autumn precipitation data of 301 meteorological stations in West China from 1962 to 2018 and 130 climatic system indices compiled by the National Climate Center, the autumn rainfall prediction model in West China is established by using the interannual incremental method. Four influencing factors closely related to the first three main modes of the annual increment of Huaxi autumn rainfall are selected through correlation analysis. The multivariate linear regression method is used to establish the model, and the fitting and the hindcast periods are selected as 1962—1991 and 1992—2018, respectively. The main-mode prediction model of interannual increment of Huaxi autumn rainfall has passed the significance test of $\alpha=0.01$, which shows that the model has a high capability of fitting and forecasting. The interannual incremental forecasting models of Huaxi autumn rainfall for 301 meteorological stations are established with the same forecasting factors, and most of the models have passed the significance test. The results are checked by two indicators: symbol consistency rate and PS score. The results show that the average annual PS score is 74.5 in the hindcast test period. In terms of spatial distribution, the PS scores of all stations in the hindcast test period exceeds 60, and more than 80 points are scored in the southern of Sichuan Basin, Eastern Guizhou and Western Hunan. Compared with the PS scores of autumn precipitation forecast published by the western provinces and the National Climate Center in recent 6 years, it is found that the results of the model have significant advantages. Generally, the Huaxi autumn rain prediction model based on the interannual increment method has high prediction skills and practical application value.

Keywords : interannual increment method; Huxi autumn rain; climate prediction