大气科学
CHINESE JOURNAL OF ATMOSPHERIC SCIENCES

西南夏季降水多因子降维客观预测方法研究

庞轶舒 周斌 祝从文 秦宁生 杨严

Multifactor Descending Dimension Method of Objective Forecast for Summer Precipitation in Southwest China

PANG Yishu ZHOU Bin ZHU Congwen Qin Ningsheng YANG Yan

在线阅读 View online: https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.2005.20120

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

基于BCC_CSM模式的中国东部夏季降水预测检验及订正

Verification and Correction of East China Summer Rainfall Prediction Based on BCC_CSM Model

大气科学. 2017, 41(1): 71 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1602.15280

利用高原积雪信号改进我国南方夏季降水预测的新方法及其在2014年降水预测中的应用试验

Improve the Prediction of Summer Precipitation in South China by a New Approach with the Tibetan Plateau Snow and the Applicable Experiment in 2014

大气科学. 2017, 41(2): 313 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1605.16104

夏季副高次季节尺度东西变动特征及其与中国西南降水的关系

Characteristics of the Subseasonal-Scale Zonal Movement of Subtropical High in Summer and Its Relationship with Precipitation in Southwest China

大气科学. 2021, 45(1): 1 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.2003.19204

夏季亚洲对流层中上层温度年际变率的预测水平评估及其在我国东部降水预测中的应用

Evaluation on the Prediction Skill of the Interannual Variability of Summer Asian Upper Tropospheric Temperature and Its Application to Prediction of Precipitation in Eastern China

大气科学. 2020, 44(1): 150 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1906.18244

东北夏季降水预测技巧偏低的原因探讨

The Causes of Low Predictive Skills of Precipitation in Flood Season in Northeast China

大气科学. 2020, 44(5): 913 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1911.19132

WRF模式边界层参数化方案对川渝盆地西南涡降水模拟的影响

Influence of Different Planetary Boundary Layer Parameterization Schemes on the Simulation of Precipitation Caused by Southwest China Vortex in Sichuan Basin Based on the WRF Model

大气科学. 2021, 45(1): 58 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.2005.19171

关注微信公众号，获得更多资讯信息

庞轶舒, 周斌, 祝从文, 等. 2021. 西南夏季降水多因子降维客观预测方法研究 [J]. 大气科学, 45(3): 471−486.　PANG Yishu, ZHOU Bin, ZHU Congwen, et al. 2021. Multifactor Descending Dimension Method of Objective Forecast for Summer Precipitation in Southwest China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 45(3): 471−486. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2005.20120

西南夏季降水多因子降维客观预测方法研究

庞轶舒[1,2]　周斌[1]　祝从文[3]　秦宁生[2]　杨严[4]

1 四川省气候中心，成都 610072
2 中国气象局成都高原气象研究所/高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室，成都 610072
3 中国气象科学研究院，北京 100081
4 江苏省镇江市气象局，镇江 212003

摘　要　本文改进了现有的多模态时间稳定性判别标准，提出一种筛选稳定高相关预测信号的思路，对 1981～2016 年西南夏季降水距平百分率多模态的时间稳定性、时空特征和可预测模态关键信号等进行了分析研究，在此基础上构建了多因子降维预测模型。结果表明，前 9 个模态在预测时效为 3 年和近 10 年内稳定，累计方差贡献率占 70%，是西南夏季降水的主要模态。结合稳定高相关概念和最优子集回归方法得到主模态 PC（Principal Component）系数的最优预测信号和预测方程。回报检验结果表明，各方程对 PC 系数有较好的拟合效果，复相关系数为 0.62～0.84，均通过了 99.99% 的显著性检验，同号率均大于 69%。构建的多因子降维预测模型对西南夏季降水的空间分布，正负趋势和异常级有较好的回报效果：距平相关系数（Anomaly Correlation Coefficient，简称 ACC）平均值为 0.58；时间相关系数（Temporal Correlation Coefficient，简称 TCC）在除零星站点外的整个区域通过 90% 的显著性检验，且大部分区域通过 99.9% 的显著性检验；趋势异常综合评分（PS）平均分为 84，其中区域降水最异常的十年，PS 平均分为 87.1。经过 13 年（1971～1980 年和 2017～2019 年）的预报检验，该模型的 PS 平均分为 72。其中 2017～2019 年的 PS 均分为 77，优于发布预测评分。

关键词　西南夏季降水　多因子　时间稳定模态　稳定高相关　预测模型
文章编号　1006-9895(2021)03-0471-16　　**中图分类号**　P456.8　　**文献标识码**　A
doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2005.20120

Multifactor Descending Dimension Method of Objective Forecast for Summer Precipitation in Southwest China

PANG Yishu[1,2], ZHOU Bin[1], ZHU Congwen[3], Qin Ningsheng[2], and YANG Yan[4]

1 *Sichuan Climate Center*, *Chengdu* 610072
2 *Institute of Plateau Meteorology*, *China Meteorological Administration/Heavy Rain and Drought-Flood Disasters in Plateau and Basin Key Laboratory of Sichuan Province*, *Chengdu* 610072
3 *Chinese Academy of Meteorological Sciences*, *Beijing* 100081

收稿日期　2020-03-02；**网络预出版日期**　2020-11-24
作者简介　庞轶舒，女，1988 年出生，工程师，硕士，主要从事短期气候预测、气候变化等研究。E-mail: pangyishu@126.com
通讯作者　周斌，E-mail: 2535455813@qq.com
资助项目　中国气象局成都高原气象研究所创新团队项目 BROP202043，国家自然科学基金项目 41772173，高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室科技发展基金项目省重点实验室 2018-青年-06、SCQXKJQN2019006，四川省科技计划项目 2019YJ0620，中国气象局气候变化专项 CCSF202034

Funded by　Innovation Team Project of Institute of Plateau Meteorology, CMA (Grant BROP202043), National Natural Science Foundation of China (Grant 41772173), Heavy Rain and Drought–Flood Disasters in Plateau and Basin Key Laboratory of Sichuan Province (Grant 2018-YOUTH-06 and SCQXKJQN2019006), Science and Technology Projects of Sichuan Province (Grant 2019YJ0620), Project for Climate Change, CMA (Grant CCSF202034)

4 *Jiangsu Zhenjiang Meteorological Bureau*, *Zhenjiang* 212003

Abstract In this paper, the existing criteria of EOF (Empirical Orthogonal Function) modes temporal stability are improved, and a scheme for electing stable high correlation prediction signals is proposed. Moreover, the temporal stability of EOF modes, the temporal and spatial characteristics, and the key signals to predictable modes of summer precipitation anomaly percentage from 1981 to 2016 in Southwest China are analyzed. Hence, a multi-factor descending dimension prediction model is established. The results show that the first nine modes are stable within 3 years lead and in recent 10 years for climate prediction. They account for nearly 70% of the variance contribution rate and primary to summer precipitation anomaly percentage in Southwest China. The optimal prediction signals and the corresponding equations for primary PCs (Principal Component) are selected and built with the stable high correlation concept and the optimal subset regression method. These equations are recognized for having good capabilities for PC fitting. Their complex correlation coefficients range from 0.62 to 0.84, all passing the significance test of 99.99%, and their sign coincidence rates are greater than 69%. The prediction model built on that basis has a good hindcast skill for the spatial distribution, variation trend, and abnormal level of summer precipitation in Southwest China. Its mean ACC (Anomaly Correlation Coefficient) score is 0.58. The TCCs (Temporal Correlation Coefficient) pass the 90% significance test in the whole region except for sporadic stations and pass the 99.9% significance test in most areas. While the mean PS (Prediction Score) score is 84, the mean PS score is 87.1 for precipitation in the most abnormal 10 years. According to forecast test in 13 years (1971–1980 and 2017–2019), this model's mean PS score is 72, and the mean PS score is 77, which is higher than that of published forecasts in 2017–2019.

Keywords Summer precipitation in Southwest China, Multi-factors, Temporal stable modes, Stable high correlation, Prediction model

1 引言

汛期旱涝预测是各级政府制定国民经济计划，组织防汛抗旱和部署防灾减灾的重要决策依据，分析汛期旱涝分布特征、研究发展预测技术方法以提高预测准确率是当前业务和科研部门的重点。

西南地区气候特征和影响系统十分复杂，夏季降水受东亚夏季风、高原夏季风和西南季风耦合调制（周顺武和假拉, 2003; 吕俊梅等, 2004; 白莹莹等, 2014; 王颖和李栋梁, 2015），水汽来源包括孟加拉湾、南海、西太平洋（蒋兴文等, 2007）和阿拉伯海（庞轶舒等, 2017），受到多区域外强迫的影响（陈永仁和李跃清, 2007; 李永华等, 2012）。基于经验和已有研究的主观研判方法出错概率较高，预测技巧不稳定，发展客观预测方法成为解决这一问题的关键。近几年，国内外多种气候数值模式如 CFSv2.0、ECWMF_System4、BCC_CSM 等客观预测产品在日常业务中应用，但限于模式性能及计算误差等因素，对降水预测技巧不够高（董敏等, 2013; Saha et al., 2014）。为提高区域降水客观预测水平，气象工作者在模式降尺度预测和物理统计方法两个方向深入探索（李维京和陈丽娟, 1999; 范可等, 2007; 贾小龙等, 2010; 顾伟宗等, 2012; 康红文等, 2012; 刘长征等, 2013; 陈丽娟等, 2017; Lü et al., 2019），并就西南区域建立了几个预测模型（李媛媛等, 2010; 郑然等, 2019; 舒建川等, 2019）。这些模型一定程度上提高了西南夏季降水的客观预测准确率，但在建模时以全区降水平均值为基础，一定程度上忽略了区域内的气候多样性。其中一些模型的预测因子或限于大气环流或限于海洋，种类单一，预测技巧还有可提高的空间。

研究表明，EOF 多模态预测法可将二维要素预测降维成多模态时间系数预测。由于各模态正交，同时考虑多模态的前兆信号不仅体现区域降水的多样性，也能实现多因子预测。该方法的前提是模态随时间稳定（庞轶舒等, 2014）。中国气象科学研究院利用该方法，在深入分析了中国夏季降水多模态的海温、雪水当量等前兆信号及其物理机制后，建立了相应的预测模型，近 3 年的业务预测技巧趋势异常综合评分（PS）均在 70 分以上。Lü et al.（2019）基于前期秋季海表温度与中国冬季气温的研究，利用上述预测思路构建统计预测模型，取得较好的预测效果。另外，Zhu et al.（2008）基于高度场与东亚季风区域降水前三个模态降水的关系，通过统计降尺度方法预测降水，与多模式集合本身的预测技巧（ACC）相比，该方法提高了 0.18 以

上。这些研究成果均证明了多模态降维预测方法的可行性和有效性。

然而截止目前，西南地区夏季降水的哪些模态是时间稳定的？如何从大量预测信号中提取有效预测信号？西南夏季降水稳定模态的有效预测信号是哪些？这些问题尚未得到解决和分析。因此，解决上述问题，研究并建立西南夏季降水多因子降维预测模型，是提高本地客观预测技术的新探索，也是值得研究的科学问题。

2　资料和方法

2.1　资料

本文采用 1971～2019 年全国气象台站西南地区 80 个站点逐月降水观测资料；1970～2019 年美国国家环境预报中心（NCEP/NCAR）逐月再分析海平面气压场（SLP），850 hPa、925 hPa 的 U、V 风场资料（2.5°×2.5°）；1970～2019 年美国罗格斯大学全球冰雪实验室逐月积雪资料（1.0°×1.0°）；1970～2019 年国家气候中心新百项指数（https://cmdp.ncc-cma.net/Monitoring/cn_index_130.php [2019-06-10]）以及其他 19 个环流和冰雪指数（具体定义见表 1）。

2.2　方法

本文研究和建模技术路线如图 1 所示。建模时段为 1981～2016 年，预报检验时段为 1971～1980 年和 2017～2019 年，气候平均指 1981～2010 年。在研究的过程中，主要利用经验正交分解（Empirical orthogonal function，简称 EOF）、Morlet 小波分析、时间相关（Temporal correlation coefficient，简称 TCC）、距平相关（Anomaly correlation coefficient，简称 ACC）、滑动交叉检验、一元线性回归、最优子集回归等方法。利用 Student-t 方法检验相关系数的显著性。利用 TCC、同号率（PCR）、ACC 和趋势异常综合评分（PS 评分）等评估方法对预测模型进行回报和预报检验。

ACC 表示空间相似度，$-1 \leqslant \mathrm{ACC} \leqslant 1$，ACC 越大，空间相似度越高，当 ACC 为 1 时，表示空间分布完全一致。TCC 为时间相关系数，$-1 \leqslant \mathrm{TCC} \leqslant 1$，TCC 越大，时间相关度越高，变化趋势越一致。PCR 为符号相同的概率，$0 \leqslant \mathrm{PCR} \leqslant 100\%$，PCR 越大，正负异常趋势越一致。趋势异常综合评分（PS 评分，见公式 1）是由国家气候中心制

表 1　其他 19 个指数的名称及定义

Table 1　Other 19 indices and their definition

序号	名称	定义或出处
1	西伯利亚高压强度	(40°N～60°N, 80°E～120°E)区域内平均海平面气压值，并进行标准化。
2	澳大利亚高压	(35°S～25°S, 120°E～150°E)区域内面积加权平均的海平面气压(SLP)。
3	马斯克林高压	(35°S～25°S, 40°E～90°E)区域内面积加权平均的海平面气压。
4	东亚季风(郭其蕴, 1985)	10°N～50°N范围内，每10个纬度上110°E和160°E的海平面气压差，将大于或者等于5 hPa的气压差累计，并进行标准化。
5	东亚西北太平洋季风	U_{850} (5°N～15°N, 90°E～130°E)－U_{850} (20°N～30°N, 110°E～140°E)
6	南亚季风	(10°N～30°N, 70°E～110°E)区域内V(850 hPa) －V(200 hPa)
7	西北太平洋季风	U_{850}(5°N～15°N, 100°E～130°E)－U_{850}(20°N～30°N, 110°E～140°E)
8	印度季风	U_{850}(5°N～15°N, 40°E～80°E)－U_{850}(20°N～30°N, 70°E～90°E)
9	Webster-Yang季风(Webster and Yang, 1992)	U_{850}(0°～20°N, 40°E～110°E)－U_{200}(0°～20°N, 40°E～110°E)
10	澳大利亚季风	(110°E～130°E, 15°S～5°S)区域内平均850 hPa 纬向风。
11	菲律宾越赤道气流	(5°S～5°N, 120°E～130°E)区域内面积加权平均的925 hPa经向风。
12	孟加拉湾越赤道气流	(5°S～5°N, 80°E～90°E)区域内面积加权平均的925 hPa经向风
13	南海越赤道气流	(5°S～5°N, 100°E～110°E)区域内面积加权面积的925 hPa经向风
14	索马里越赤道气流	(5°S～5°N, 40°E～50°E)区域内面积加权平均925 hPa经向风
15	新几内亚越赤道气流	(5°S～5°N, 145°E～155°E)区域内面积加权平均的925 hPa经向风
16	欧亚积雪面积	http://climate.rutgers.edu/snowcover/table_area.php?ui_set=2 [2019-06-28]
17	北美大陆积雪面积	http://climate.rutgers.edu/snowcover/table_area.php?ui_set=2 [2019-06-28]
18	青藏高原积雪面积	青藏高原(国境线以内26°～40°N, 74°E～104°E)的积雪面积
19	新疆北部积雪面积	新疆北部(国境线以内40°～50°N, 74°E～96°E)的积雪面积

注：表中未标记出处的指数均引自2010年版《气候系统监测诊断年报》(中国气象局国家气候中心, 2011)

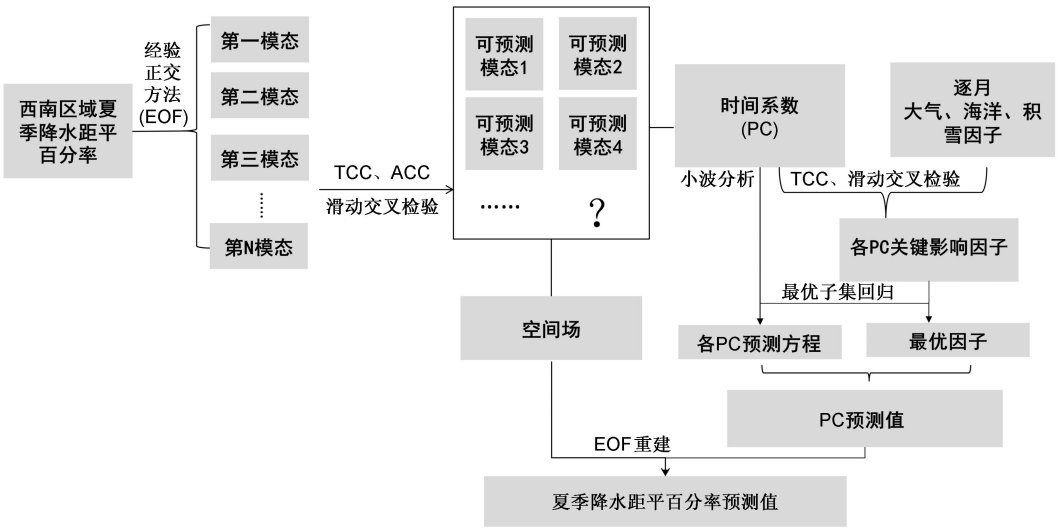

图 1 西南夏季降水多因子降维客观预测研究及建模技术路线

Fig. 1 Research and establishment scheme of multifactor descending dimension prediction model for summer precipitation in Southwest China

定的常规气候趋势预测业务评分标准，能够检验预测结果对异常趋势的把握。

$$\mathrm{PS}=\frac{aN_0+bN_1+cN_2}{(N-N_0)+aN_0+bN_1+cN_2+M}\times 100, \qquad (1)$$

其中，N_0 为趋势预测正确站数，N_1 为 1 级异常预测正确站数，N_2 为 2 级异常预测正确站数，M 为 2 级异常漏报站数，N 为参加考核总站数，a、b、c 为权重系数，分别取 a=2，b=2，c=4。在降水预测中，一级异常：50%>降水距平百分率（PAP）≥20%，−20%≥PAP>−50%；二级异常：PAP≥50%，PAP≤−50%。

3 夏季降水主模态的时间稳定性分析

在 EOF 重建过程中，参与模态越多，重建场与原始场越接近。然而，在预测过程中，只有 EOF 模态在预测时效内稳定，该模态的信息才可用于未来的气候预测，对应的 PC 系数作为预报对象才是有效的，否则会产生虚假预测信息扰乱预测效果（章基嘉等, 1979）。庞轶舒等（2014）提出时间稳定性指数（Stability Index，简称 SI）以检验 EOF 模态的时间稳定性。然而该检验方法未考虑资料序列长度变化前后各模态因方差贡献改变造成的位序飘逸情况，导致部分模态出现假“不稳定”，使预测有效信息缺失。为解决这一问题，考虑到 EOF 模态具有的正交性特征，本文的时间稳定性指数定义如下：

（1）首先利用滑动交叉检验方法对资料序列长度进行处理：

$$R_{i,t}=R_0-\left(\sum_{k=i}^{i+(t-1)} r_k\right), \qquad (2)$$

其中，$R_{i,t}$ 为时间长度处理后的资料（i=1981, 1982, …, 2016；t 为剔除时间长度，取值为 1 a、2 a、3 a、4 a）；R_0 为原始资料（1981～2016 年夏季降水场）；r 为样本元素。

（2）分别计算序列处理前各模态与处理后所有模态空间场的 ACC 和时间系数的 TCC 的乘积，并挑选出最大值定义为 SI。SI 对应的模态位序在资料序列处理前后不一致时，该模态位序发生飘逸。因 ACC 和 TCC 不小于 0.52 时，均通过 99.99% 显著性检验，此时 SI≥0.27。因此本文将 0.27 设为稳定标准。

时间稳定性检验结果表明，当 t≤2 a，即预测时效为 1～2 年时，西南夏季降水第 1～9 模态的 SI 恒大于 0.27，通过稳定性检验。第 10 模态则在剔除起始年为 2000 年的样本时，未通过检验（图 2a, b）。当 t=3 时，第 1～9 个模态的 SI 恒大于 0.27，通过检验。第 10 模态的不稳定年增至 4 年，在剔除起始年为 1998、1999、2000 和 2011 年的样本时，SI<0.27，未通过检验（图 2c）。当 t=4 a 时，第 1～7 和 9 模态的 SI≥0.27，通过检验。第 8 模态有两个不稳定年，分别是 2010 和 2015 年。第 10 模态的不稳定年有 3 个，分别是 1998、1999 和 2010 年。进一步分析发现，在剔除以 2010 和

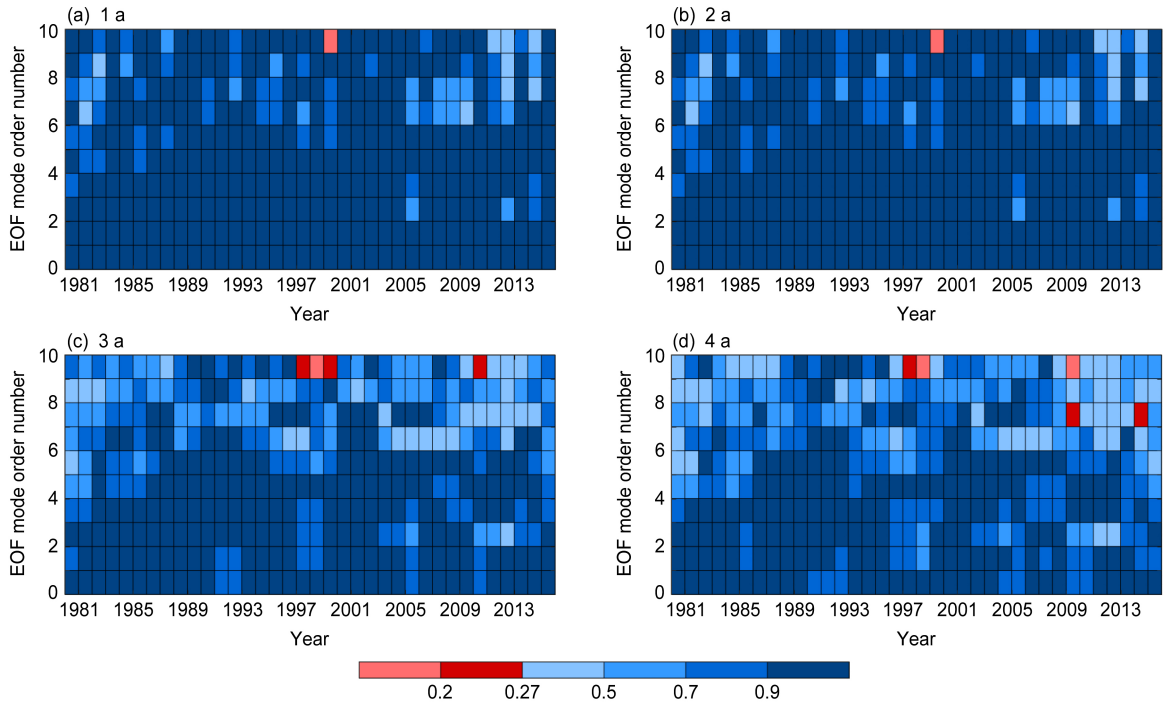

图 2　1981～2016 年西南夏季（6～8 月）降水距平百分率前 10 个 EOF 模态在随机剔除（a）1 a、（b）2 a、（c）3 a 和（d）4 a 的时间稳定系数 SI。横坐标为剔除起始年份，纵坐标为 EOF 模态顺序号

Fig. 2　Stability indices for (a) 1 a, (b) 2 a, (c) 3 a, and (d) 4 a samples removed of the first ten EOF modes of summer precipitation anomaly percentage in Southwest China from 1981 to 2016. The abscissa and the ordinate denote the start year of samples removed and the order of EOF mode, respectively

2015 为起始年的 4 年样本时，第 8 模态的 SI 分别为 0.26 和 0.22，略低于检验临界值（图 2d）。

为了进一步检验各模态在近 10 年的时间稳定性。本文将 1981～2010，1981～2011，.....，1981～2015，1981～2017，1981～2018，1981～2019 年西南夏季降水距平百分率分别做 EOF 分解，以 1981～2016 年的主模态为基准计算各时段前 10 个模态的 SI。结果表明，近 10 年，前 10 个模态的 SI 恒大于 0.27，通过时间稳定性检验（图 3）。

以上分析说明，西南夏季降水前 9 个模态的气候信息在时效为 3 年的情况下和近 10 年稳定不变，可用于气候预测。尽管在预测时效为 4 年时，第 8 模态稳定性略低，但因不稳定年仅占 5.6%，对应的 SI 接近临界值，考虑到第 1～7 和 9 模态时间稳定，为将尽可能多的气候信息应用于预测，因此把前 9 个模态判定为预测可用信息。

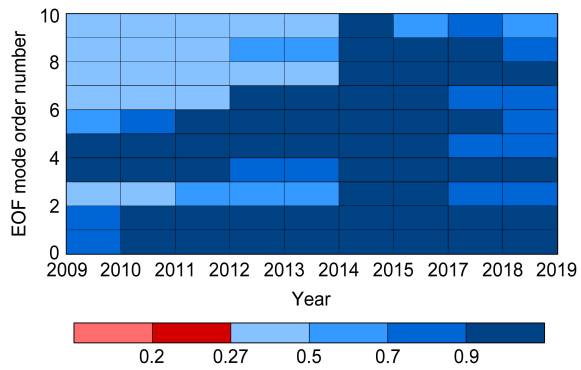

图 3　1981 年至近 10 年（2010～2019 年，不包含 2016 年）西南夏季降水距平百分率前 10 个 EOF 模态的时间稳定系数 SI。横坐标为年份，纵坐标为模态顺序号

Fig. 3　Stability indices of the first ten EOF modes of summer precipitation percentage in Southwest China from 1981 to recent 10 years（2010–2019, excluding 2016）. The abscissa and the ordinate denote the year and the order of EOF modes, respectively

4　夏季降水可预测模态的时空特征及预测潜力分析

西南夏季降水距平百分率经 EOF 分解后快速收敛，前 6 个模态的方差贡献率变化斜率均小于−1，第 7～10 模态的斜率在−0.25 和−0.5 之间波动，至第 11 模态后恒大于−0.25，变化趋于平稳。前 9 个模态的方差贡献率分别为 16.1%、12.62%、9.92%、

8.68%、6.48%、4.89%、3.76%、3.58% 和 3.20%，总和 70%，包含西南夏季降水异常变化的主要信息（图 4）。

前 9 个模态空间分布各异，第 1 模态表现为除四川中部、西藏西南部外的大部地区降水偏少（图 5a）；第 2 模态呈南北分布型，西南地区

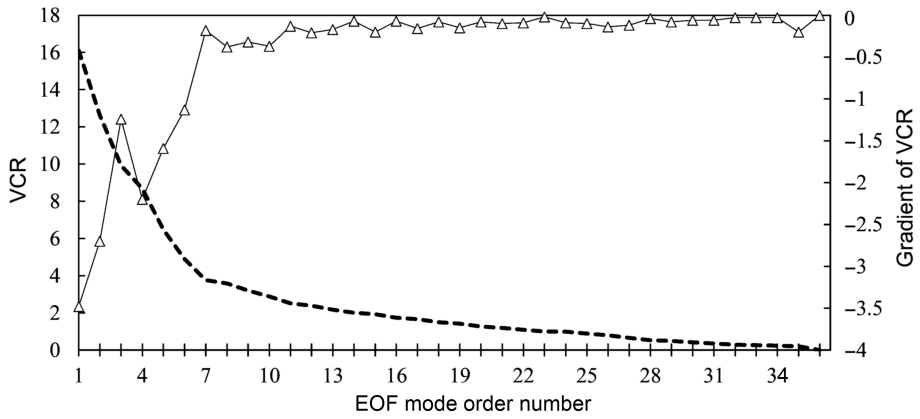

图 4 1981～2016 年西南夏季（6～8 月）降水距平百分 EOF 模态的方差贡献率（黑色加粗虚线）及其变化斜率（黑色带三角形线）（横坐标表示 EOF 模态顺序号）

Fig. 4 VCR (Variance contribution rate, black bold dotted line) and its gradient (black solid line with triangle) of the EOF modes of summer (June, July and August) precipitation anomaly percentage in Southwest China from 1981 to 2016（The abscissa denotes the order of EOF modes）

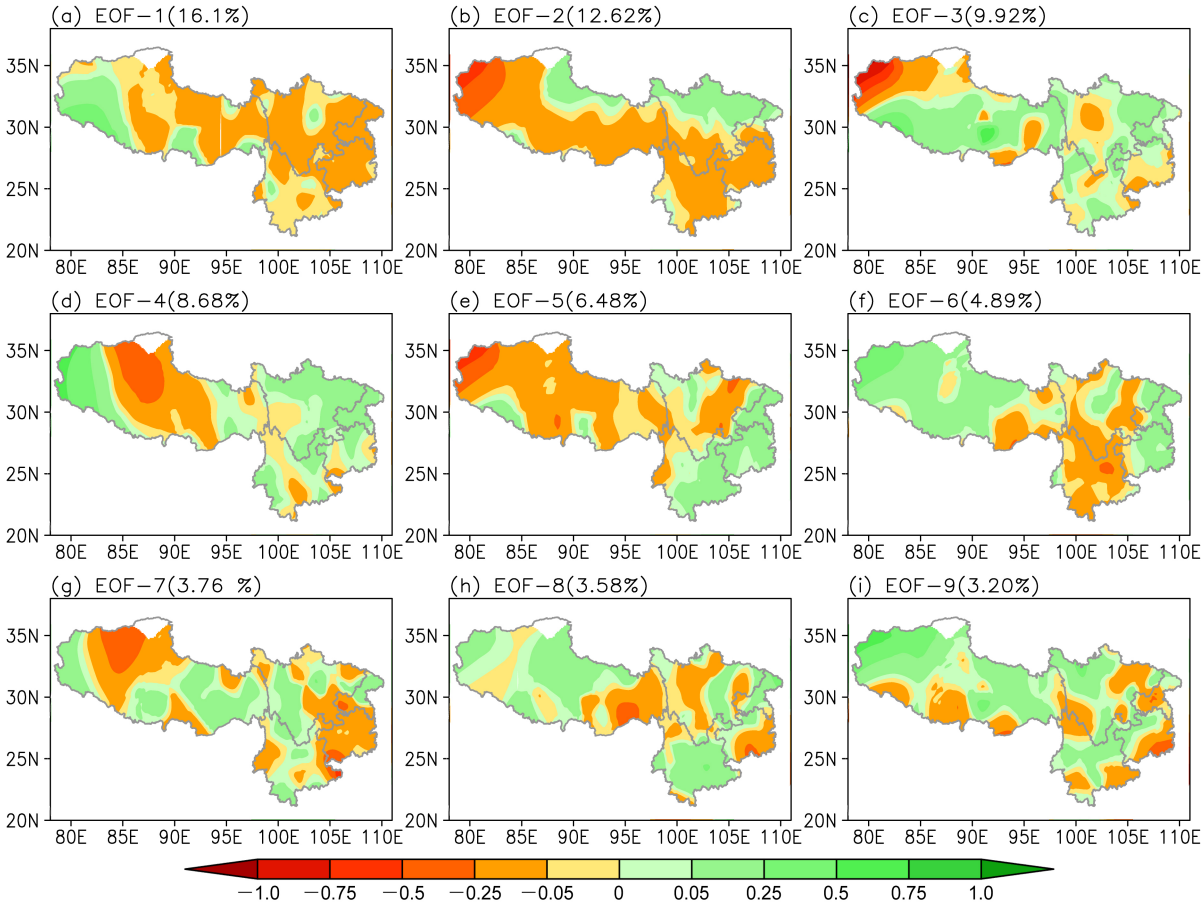

图 5 1981～2016 年西南夏季（6～8 月）降水距平百分率前 9 个 EOF 模态的空间分布场

Fig. 5 Spatial fields of the first nine EOF modes of summer (June, July and August) precipitation anomaly percentage in Southwest China from 1981 to 2016

30°N 以北降水偏多，以南降水偏少（图 5b）；第 3 模态表现为西南大部降水偏多，四川西部、贵州东部、西藏西北部和云南局部降水偏少（图 5c）；第 4 模态表现为四川甘孜南部，贵州东部和西部，西藏中部降水偏少，其余地区降水偏多（图 5d）；第 5 模态呈“西北少，东南多”分布，西藏和四川大部降水偏少，其余地区降水偏多（图 5e）；第 6 模态总体呈“东西川字型”分布，表现为云南、四川大部和西藏东部降水偏少，区域内其余地区降水偏多（图 5f）；第 7 模态中，重庆东北部、四川盆地西北部、川藏高原东南部、云南中南部降水偏多，其余地区降水偏少（图 5g）；第 8 模态表现为云南、重庆大部、四川东部、贵州西部和西藏中西部地区降水偏多，区域内其余地区降水偏少（图 5h）；第 9 模态主要表现为西藏大部、四川西部、云南西北部、贵州西部以及重庆北部降水偏多，其余地区降水偏少（图 5i）。

经过 Morlet 小波分析检验发现，前 9 个模态的 PC 系数均以年际变化为主，但各模态的变化周期不完全相同。第 1 和 4 模态的显著周期为 2 和 6 年，第 2、5 和 6 模态的显著周期为 3 年，第 3 模态的显著周期为 3 和 6 年，第 7、8 和 9 模态的显著周期则为 2 年。各模态 PC 的强弱以及位相差异造成不同时段西南夏季降水分布不同。在 1990 年以前，第 1、2、5、7、8 和 9 模态变化显著，是西南夏季降水变化的主要信息。1990 年后至 21 世纪初，第 1、2、4、6、7 和 9 模态变化显著，是主要变化信息。2005 年后，第 1、3、4、5、6、7 和 8 模态变化显著，是主要变化信息。上世纪 80 年代以来，前 9 个模态的显著变化信息交替涵盖了整个时段。其中，第 1 模态的变化信息始终显著，且显著周期的全局功率谱（小波谱的平均状态）强度超过所有其他模态，是西南夏季降水最常出现和最主要的变化信息，与其方差贡献率位序一致（图略）。

那么利用西南夏季降水前 9 个模态构建预测模型，预测潜力有多大？经检验，前 9 个模态的重建值与观测值的 ACC 平均值为 0.78。其中，ACC 最大值对应 2013 年，为 0.97，空间分布基本一致，最小值对应 2016 年，为 0.61，空间分布高度相似（图 6a）。从各站点变化趋势上来看，除四川甘孜个别站点回算值的 TCC 仅通过 99.5% 的显著性检验外，其余区域 TCC 均大于 0.513，通过 99.9% 的显著性检验，且其中的大部分区域 TCC 高于 0.7，时间变化趋势高相关（图 6c）。PS 评分的均分为 90.8，最高分对应 1998 年，为 98.32，最低分对应 1985 年，为 82.43（图 6b）。说明利用前 9 个模态构建预测模型，对西南夏季降水的空间形态、时间变化趋势和趋势异常均有较高的预测潜力，利用该方法建立西南夏季降水的预测模型是有潜力和价值的。

5　构建夏季降水多因子降维客观预测模型

每年 4 月初，气象部门需向各级政府提供当年夏季气候趋势预测意见，为汛期防灾减灾的部署和准备做保障。到 5 月，结合最新大气环流系统的调整和变化做进一步的订正预测以供参考。考虑到实际需求和资料获取的因素，本文以 3 月起报为例建立西南夏季降水预测模型。在建立模型过程中，主要关注和挑选月尺度因子以便捕捉到预测因子的调整和变化。

5.1　多模态的最优预测信号

已有研究表明，西太平洋副热带高压（蒋兴文等, 2007; 李永华等, 2009; 周长艳等, 2011），印缅槽（秦剑等, 1997; 董文杰等, 2001）和中高纬环流系统（陶诗言等, 1998; 孙林海和何敏, 2004; 孙小婷等, 2017; 黄小梅等, 2017）是西南夏季降水的直接影响系统。作为全球大气环流的成员，上述环流系统与其上、下游，高、低层，不同纬度的全球其他环流系统有直接或间接的关联（Wallace and Gutzler, 1981; 李崇银和龙振夏, 1992, 1997; 刘屹岷和吴国雄, 2000; Nakamura and Fukamachi, 2004; Ogi et al., 2004; 任荣彩等, 2004; 陈永仁和李跃清, 2007; Yu and Zhou, 2007; Mohankumar and Pillai, 2008; 孙照渤等, 2010）。与此同时，不同区域的海洋（假拉和周顺武, 2003; 程炳岩等, 2010; 李永华等, 2012, 2016; 谭晶等, 2015; 庞轶舒等, 2020）、积雪（陈烈庭和阎志新, 1979; 叶月珍和方之芳, 1999; 陈兴芳和宋文玲, 2000; Gong, et al., 2003; 陈海山和孙照渤, 2003; 陈海山等, 2003; 李震坤等, 2009; 穆松宁和周广庆, 2010; 李永华等, 2011; 左志燕和张人禾, 2012），以及太阳辐射（潘静等, 2010; Zhao and Wang, 2014; Zhao et al., 2017; 丁一汇, 2019）等气候因子强迫影响上述环流系统的变化，是西南夏季降水气候预测的重要信号。本文采用的 149 个指

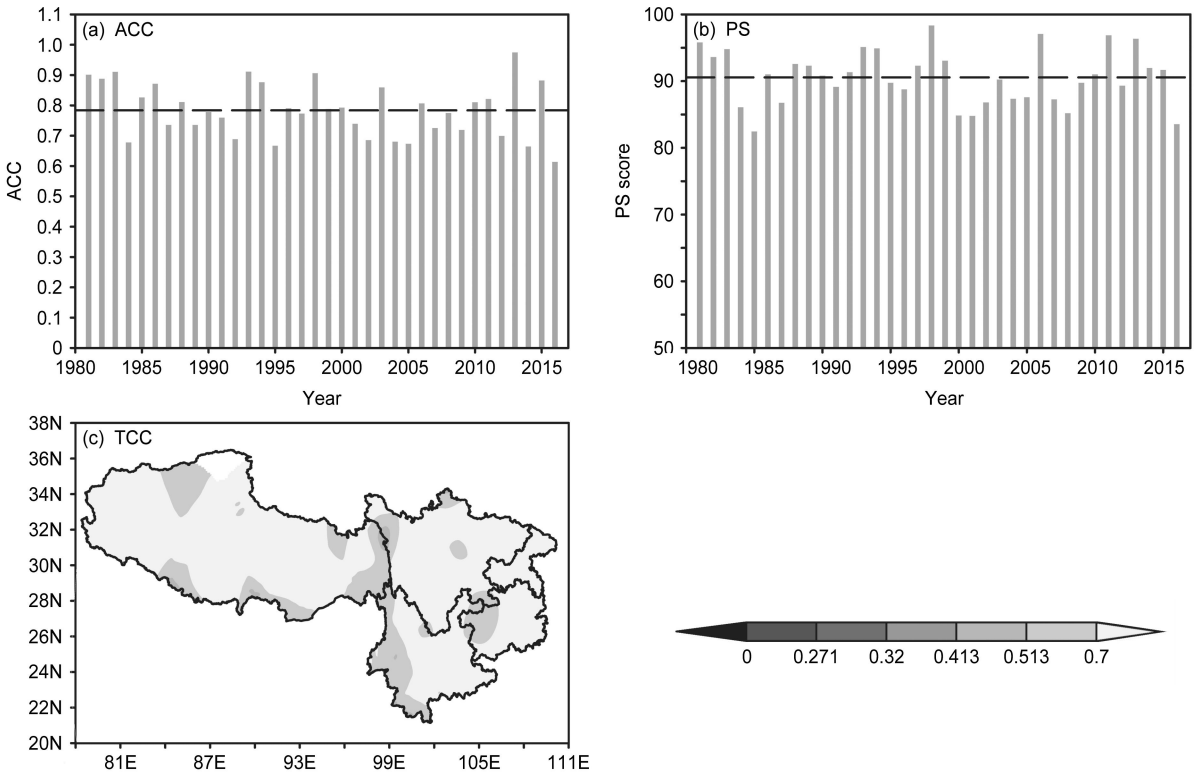

图 6 西南夏季降水距平百分率前 9 个模态重建值与观测值的（a）ACC（距平相关系数）、（b）PS 评分（趋势异常综合评分）和（c）TCC（时间相关系数）。（a、b）黑色实线表示平均值；（c）中灰度图表示数值，0.271、0.32、0.413、0.513 分别为 90%、95%、99%、99.9% 显著性检验的临界值

Fig. 6 (a) ACC (Anomaly Correlation Coefficient), (b) PS score (Prediction Score), and (c) TCC (Temporal Correlation Coefficient) of the first nine EOF modes reconstruction values and observation values of summer precipitation anomaly percentage in Southwest China. In (a, b) the black solid line represents the average value; in (c), the shaded area represents the value, where 0.271, 0.32, 0.413, and 0.513 correspond to 90%, 95%, 99%, and 99.9% critical values of significance test, respectively

数较为全面地包含了全球多区域大气环流系统、海温、积雪面积和太阳辐射等气候特征信号，对西南夏季降水有直接或者间接的物理影响，适用于各模态 PC 预测因子的挑选。

在气候预测领域，最优子集回归（Optimal Subset Regression，简称 OSR）是从自变量所有可能的子集回归中以 CSC 准则（考虑数量和趋势预测效果的双评分准则）确定出一个最优回归方程的方法（魏凤英, 2007; 柯宗建等, 2009），具有相对于其他预测方法不能比拟的预测效果（周月华等, 2019）。柯宗建等（2009）利用该方法对中国季节降水进行降尺度预报，对预报效果有明显改善。纪忠萍等（2016）建立了东亚夏季风强度多尺度最优子集回归预测模型，不仅对季风强度的年际变化具有较好的预测能力，对异常极值年份也具有一定的预测能力。在该方法运算过程中，假设考虑有 m 个自变量的回归，除去方程一个变量也不含的空集外，实际有 2^m-1 个变量子集。建立最优回归预测方程需从所有可能的回归中确定出一个效果最优的子集回归，计算量十分巨大。尽管 Furnival（1971）和 Furnival and Wilson（1974）针对 OSR 运算量问题进行了完善和修改。但当预测因子个数较多，若直接进行挑选，计算量依旧是问题。因此，本文首先筛选出前 9 个模态的稳定高相关因子。筛选规则如下：

（1）结合滑动交叉检验（公式 1）和 TCC 方法，计算 t=0～3 a 时，前 9 模态 PC 系数与前一年 9 月至当年 8 月各指数的相关系数（Correlation Coefficient，简称 Cr）。

（2）计算在 t=1～3a 时，Cr 平均序列的标准差 TS。

当 Cr（t=0）通过 90% 显著性检验的同时 TS≤0.2，则认为对应的指数和 PC 系数在该月份稳定高相关。

丁一汇（2003）指出大气环流与海洋、海冰、积雪等其他圈层的耦合是缓变过程，相较于前者大气环流的内部变化较快。因此，在经初步筛选的因子中，挑选临近月份的稳定高相关大气环流因子，和最高相关月份的稳定高相关海温、冰雪等外强迫因子作为各模态的备选预测信号（表略）进行最优子集回归，得到第 1～9 模态的最优预测因子。第 1 个模态有 11 个，第 2 模态有 7 个，第 3 模态有 6 个，第 4 模态有 13 个，第 5 模态有 5 个，第 6 模态有 7 个，第 7 模态有 5 个，第 8 模态有 4 个，第 9 模态有 7 个（表 2）。

从各个模态的最优因子可以看出，第 1 模态影响的信号主要来源于热带海洋，包括冬季赤道中东太平洋海温、西太平洋暖池面积和秋季热带印度洋海温偶极子，以及与这些海温场有密切关联的环流系统——西太副高西伸脊点，中、东太平洋信风，

表 2　西南夏季降水距平百分率 3 月起报的前 9 个模态最优预测信号

Table 2　The optimal prediction signals elected for forecast in March of the first nine modes of summer precipitation anomaly percentage in Southwest China

PC系数	预测因子	名称	时间(月份)
PC1	X_1	西太平洋副高西伸脊点指数	3
	X_2	50 hPa纬向风指数	3
	X_3	赤道中东太平洋200 hPa纬向风指数	3
	X_4	850 hPa中太平洋信风指数	3
	X_5	850 hPa东太平洋信风指数	3
	X_6	NINO 1+2区海表温度距平指数	12
	X_7	NINO Z区海表温度距平海表温度指数	1
	X_8	西太平洋暖池面积指数	2
	X_9	热带印度洋海温偶极子指数	11
	X_{10}	南方涛动指数	3
	X_{11}	澳大利亚季风	3
PC2	X_1	亚洲区极涡面积指数	2
	X_2	太平洋区极涡面积指数	2
	X_3	亚洲区极涡强度指数	2
	X_4	850 hPa中太平洋信风指数	2
	X_5	西太平洋暖池强度指数	2
	X_6	索马里越赤道气流	3
	X_7	SNOWCOVER_EURASIA	3
PC3	X_1	北大西洋涛动指数	3
	X_2	极地-欧亚遥相关型指数	3
	X_3	西风漂流区海温指数	12
	X_4	热带印度洋海温偶极子指数	12
	X_5	西伯利亚高压强度	3
	X_6	SNOWCOVER_NAM	9
PC4	X_1	南海副高脊线位置指数	3
	X_2	太平洋区极涡强度指数	3
	X_3	太平洋-北美遥相关型指数	3
	X_4	赤道中东太平洋200 hPa纬向风指数	3
	X_5	NINO W区海表温度距平指数	3
	X_6	热带北大西洋海温指数	11
	X_7	西太平洋暖池强度指数	10
	X_8	大西洋多年代际振荡指数	11
	X_9	南方涛动指数	2
PC4	X_{10}	热带太平洋射出长波辐射指数	11
	X_{11}	北太平洋年代际振荡指数	3
	X_{12}	大西洋海温三极子指数	10
	X_{13}	SNOWCOVER_TIBET	10
PC5	X_1	太平洋—北美遥相关型指数	3
	X_2	北大西洋—欧洲环流W型指数	3
	X_3	NINO B区海表温度距平指数	9
	X_4	副热带南印度洋偶极子指数	3
	X_5	SNOWCOVER_XINJIANG	3
PC6	X_1	亲潮区海温指数	10
	X_2	西风漂流区海温指数	10
	X_3	东亚西北太平洋季风	3
	X_4	西北太平洋季风	3
	X_5	韦杨季风	3
	X_6	SNOWCOVER_NAM	9
	X_7	SNOWCOVER_XINJIANG	1
PC7	X_1	东太平洋副高脊线位置指数	3
	X_2	北大西洋—欧洲区极涡强度指数	3
	X_3	准两年振荡指数	10
	X_4	索马里越赤道气流	3
	X_5	SNOWCOVER_NAM	3
PC8	X_1	西太平洋副高脊线位置指数	3
	X_2	NINO W区海表温度距平指数	9
	X_3	类ENSO指数	11
	X_4	SNOWCOVER_NAM	9
PC9	X_1	亚洲经向环流指数	3
	X_2	东大西洋-西俄罗斯遥相关型指数	3
	X_3	热带印度洋海温偶极子指数	1
	X_4	大西洋海温三极子指数	12
	X_5	新几内亚越赤道气流	3
	X_6	SNOWCOVER_NAM	11
	X_7	SNOWCOVER_XINJIANG	2

注：表中9～12月为前一年的月份，1～3月为当年的月份

赤道高层 200 hPa 纬向风，南方涛动，澳大利亚季风等，同时还有来自平流层的影响，如 50 hPa 纬向风。第 2 模态主要受春季欧亚中高纬积雪和冬季西太海洋暖池的共同强迫，相关的环流系统，如极涡、中太平洋信风、索马里越赤道气流等对该模态的变化有指示意义。第 3 模态主要受到冬季中高纬太平洋、热带印度洋、北美积雪的强迫，欧亚中高纬环流的变化是其关键环流信号。相较于前 3 个模态，第 4 模态的影响因素更为多元复杂，同时受秋季赤道中东太平洋、北大西洋、西太平洋的年际、年代际变化的共同强迫，并与这些强迫相关的大气环流系统，如南海副高脊线位置，赤道中东太平洋 200 hPa 纬向风强度，北大西洋三极子、南方涛动等密切联，同时秋季受青藏高原积雪的强迫，与中高纬环流变化密切相关。第 5 模态主要受春季南印度洋、新疆积雪和前期秋季赤道中东太平洋的共同强迫，与中高纬环流系统变化密切关联。第 6 模态主要受到前期秋季远东海区及其关联的季风环流系统、北美积雪和冬季新疆积雪的共同影响。第 7 模态主要受到春季北美积雪和前期秋季平流层的影响，与高纬和上游大气环流系统密切关联。第 8 模态则主要受到前期秋季赤道中东太平洋海温和北美积雪的强迫，与前期西太副高脊线位置密切相关。第 9 模态同时受到前期秋季北美积雪和冬季热带印度洋、北大西洋、新疆积雪的共同强迫，与中高纬环流和上游越赤道气流密切关联。由上述分析可知，西南夏季降水主要模态的影响因素多元，每个模态的变化都受到全球多区域气候系统影响，而不同模态的影响因素各有不同，随着不同信号每年的强弱异常，西南夏季降水各模态的权重变化，进而造成不同年份西南降水复杂而多样的分布。

5.2 预测模型的建立及预测技巧评估

通过最优子集回归（OSR）方法得到各模态的最优子集回归方程：

$$\widehat{PC1} = 5.6 - 17.9X_1 + 5.8X_2 - 15.1X_3 - 35.9X_4 + 23.7X_5 - 57.5X_6 + 36.3X_7 + 21.7X_8 - 16.7X_9 + 18.7X_{10} + 31.5X_{11}, \quad (3)$$

$$\widehat{PC2} = 2.8 + 18.4X_1 - 34.8X_2 + 21.8X_3 - 33.4X_4 - 13.3X_5 + 23.3X_6 + 22.1X_7, \quad (4)$$

$$\widehat{PC3} = 5.0 - 33.3X_1 + 17.2X_2 + 20.1X_3 + 29.8X_4 - 24.6X_5 - 26.2X_6, \quad (5)$$

$$\widehat{PC4} = 0.34 + 23.2X_1 - 12.0X_2 + 9.1X_3 + 26.2X_4 - 28.9X_5 - 33.1X_6 - 27.7X_7 + 41.5X_8 - 42.2X_9 + 28.9X_{10} + 24.1X_{11} + 22.1X_{12} + 29.9X_{13}, \quad (6)$$

$$\widehat{PC5} = 2.0 - 11.1X_1 - 18.6X_2 - 15.2X_3 + 10.4X_4 - 36.0X_5, \quad (7)$$

$$\widehat{PC6} = 0.9 + 34.5X_1 - 39.8X_2 - 236.8X_3 + 244.5X_4 + 22.3X_5 - 15.9X_6 + 33.6X_7, \quad (8)$$

$$\widehat{PC7} = 2.0 + 14.2X_1 + 13.1X_2 - 14.5X_3 - 2.1X_4 + 8.4X_5, \quad (9)$$

$$\widehat{PC8} = -2.9 - 28.0X_1 - 10.4X_2 - 11.6X_3 - 19.8X_4, \quad (10)$$

$$\widehat{PC9} = -1.03 - 6.5X_1 + 10.0X_2 - 9.6X_3 + 13.6X_4 + 12.8X_5 + 9.01X_6 + 15.46X_7. \quad (11)$$

经过检验，各方程对相应的 PC 系数有很好的拟合效果。拟合值与观测值的复相关系数分别为 0.63、0.84、0.77、0.84、0.77、0.71、0.62、0.77 和 0.79，均通过了 99.99% 的显著性检验。同号率分别为 69.4%、75%、83.3%、91.7%、75%、77.8%、77.8%、77.8% 和 77.8%。

将主模态预测方程与对应 EOF 空间模态联合，构建出西南夏季多因子降维预测模型。经回报试验发现，该预测模型能够很好地拟合西南夏季降水空间分布，逐年 ACC 仅有一年为负值，最高值达 0.88，超过 2/3 年份的 ACC 大于 0.5，36 年平均值为 0.58，与实况分布接近（图 7a）。利用 PS 评分检验后发现，回报值能够较好的把握各个站点的正负趋势和异常级，36 年来，所有年份的评分均在 70 分以上，超过 2/3 年份的评分高于 80，平均分为 84 分。为进一步考察该模型对西南夏季降水异常年份的回报效果，按照 PS 评分的异常级对异常站点个数统计。经过排序，1998、2006、1983、1994、2015、1992、1997、1989、1993 和 2002 为西南区域异常降水最多发的十年，降水一级异常以上站点占比分别为 65%、51.2%、50%、50%、50%、48.8%、47.5%、46.25%、45% 和 45%。这十年的 PS 平均分为 87.1 分，其中最高分为 93.18，对应 1993 年，最低分为 75 分，对应 1994 年（图 7b）。由此可以看出，该模型对夏季降水异常年有较好的回报技巧。从逐站 TCC 检验结果来看，该模型仅高原个别站点上没有预报技巧，其余地区的趋势预测技巧均通过 90% 的显著性检验，且大部地区的 TCC 通过了 99.9% 的显著性检验（图 8）。

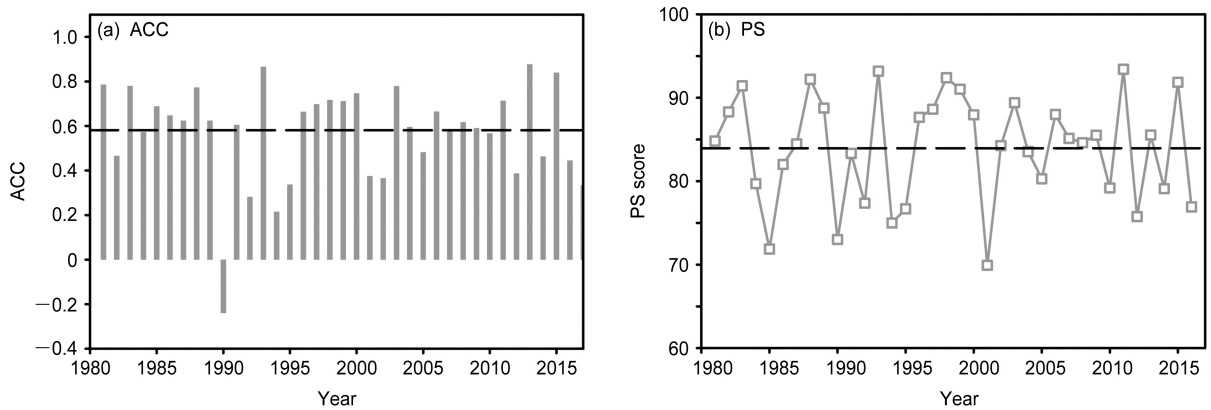

图 7　西南夏季降水多因子降维预测模型降水距平百分率回报值与观测值的（a）ACC 和（b）PS 评分（虚线为评分均值）

Fig. 7　(a) ACC and(b) PS score between the hindcast by multifactor descending dimension forecast model and observation values of summer precipitation anomaly percentage in Southwest China. The dotted lines represent the average value

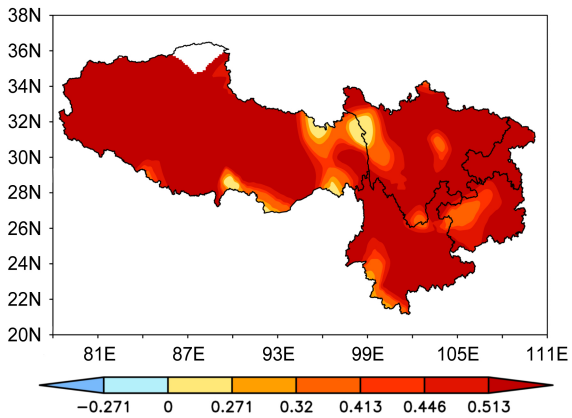

图 8　西南夏季降水多因子降维预测模型降水距平百分率回报值与观测值的 TCC（±0.271、0.32、0.413，0.446 和 0.513 分别为 90%、95%、99%、99.5%、99.9% 显著性检验的临界值）

Fig. 8　TCC between the hindcast by multifactor descending dimension forecast model and observation values of summer precipitation anomaly percentage in Southwest China (± 0.271, 0.32, 0.413, 0.446, and 0.513 correspond to 90%, 95%, 99%, 99.5%, and 99.9% critical values of significance test, respectively)

为进一步检验此模型的预测效果，利用 PS 评分对 1978～1980 年和 2017～2019 年进行后报检验。检验结果表明，13 年里，仅 1974 年低于 60 分，有 9 年高于 70 分，平均分为 72 分。国家气候中心于 2013 年开始发布季节预测 PS 评分，其中 2017～2019 年，西南区域省级发布均分为 73、76 和 70，平均分为 73。这三年，模型的评分分别是 74、80 和 77，平均分为 77，优于发布评分。由此可以看出，该模型对西南地区夏季降水气候趋势有较好的预测技巧，可用于夏季降水预测业务参考（表 3）。

6　结论

本文改进了现有的多模态时间稳定性判别标准，提出一种筛选稳定高相关预测信号的思路，对西南夏季降水距平百分率多模态的时间稳定性，时空特征，可预测模态的关键信号等问题进行了分析研究，在此基础上构建了西南夏季降水多因子降维预测模型。

研究结果表明，西南夏季降水距平百分率前 9 个模态在预测时效为 3 年和近 10 年均稳定，累计方差贡献率占 70%，是夏季降水变化的主要模态。前 9 个模态空间分布各异，PC 系数均以年际变化为主，但显著周期和时段各不相同，交替组合涵盖上世纪 80 年代至今西南夏季降水的主要气候变化特征。

结合本文提出的稳定高相关因子概念和最优子集回归方法对 149 项全球大气海洋等气候因子进行逐一筛选，得到主模态 PC 系数的最优预测信号和最优子集回归方程。其中第 1 模态影响的信号主要来源于平流层、热带海洋及其相关环流系统。第 2 模态主要受欧亚中高纬积雪和西太平洋暖池的共同强迫，并与相关的环流系统密切关联。第 3 模态受到中高纬太平洋、热带印度洋、北美积雪的共同强迫，与中高纬环流系统变化密切关联。第 4 模态信号来源于中东太平洋、北大西洋、西太平洋及其相关的环流系统，青藏高原积雪和中高纬环流系统。第 5 模态的信号来源于南印度洋、赤道中东太平洋、新疆积雪和中高纬环流系统。第 6 模态受到远东海区及其相关的环流系统、北美积雪和冬季新疆积雪

表 3 西南夏季降水预测 PS 评分

Table 3 PS scores of forecasts for summer precipitation in Southwest China

年份	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	2017	2018	2019	2017～2019年平均
模型评分	72	79	75	57	83	77	68	60	70	64	74	80	77	77
发布评分	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	73	76	70	73

的共同影响。第 7 模态受到北美积雪和平流层的影响，与高纬和上游大气环流系统密切关联。第 8 模态受赤道中东太平洋海温和北美积雪的强迫，与前期西太副高脊线位置密切相关。第 9 模态的信号则来源于北美积雪、印度洋、北大西洋、新疆积雪、中高纬及上游越赤道环流系统。经回报检验，各方程的复相关系数大于 0.6，通过 99.99% 的显著性检验，同号率大于 69%，对 PC 系数有很好的拟合效果。

所构建的西南夏季降水多因子降维预测模型对西南夏季降水空间分布、正负趋势和异常级有较好的拟合效果，ACC 在超过 2/3 的年份中大于 0.5，平均分为 0.58，PS 评分超过 2/3 年份中大于 80，平均分为 84。与此同时，对降水异常年份也有较高的回报技巧，西南夏季降水最异常 10 年的 PS 平均分大于 87 分。除高原零星站点外，该模型 TCC 通过 90% 的显著性检验，且在大部地区通过了 99.9% 的显著性检验。经过 13 年（1971～1980 和 2017～2019 年）的预报检验，有 9 年的 PS 评分大于 70 分，平均分为 72 分。其中，2017～2019 年平均分为 77，而西南地区发布预报评分均分为 73，模型预测技巧优于发布预测技巧。以上结果说明，西南夏季降水多因子降维预测方法及其预测模型可一定程度上提高西南夏季降水的预测技巧。

多因子降维预测方法可将区域气候多样性和多因子同时考虑，对西南夏季降水有不错的预测技巧。然而，因该方法舍弃了次要模态的气候信息，使得局地预测潜力较低，成为这种方法的局限性（图 6）。那么如何将次要气候信息进行有效利用，突破预测潜力瓶颈，以进一步提高西南夏季降水预测技巧，将是今后要研究的重点问题。

参考文献（References）

白莹莹, 张炎, 李强, 等. 2014. 四川盆地夏季降水区域差异及其与季风的联系初探 [J]. 气象, 40(4): 440−449. Bai Yingying, Zhang Yan, Li Jiang, et al. 2014. Preliminary study on regional difference of summer rainfall in Sichuan Basin and their connections with summer monsoons [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 40(4): 440−449. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2014.04.006

陈烈庭, 阎志新. 1979. 青藏高原冬春季积雪对大气环流和我国南方汛期降水的影响 [M]//长江流域规划办公室. 中长期水文气象预报文集 (第一集). 北京: 水利电力出版社, 185–194. Chen Lieting, Yan Zhixin. 1979. Impacts of Himalayan winter-spring snow cover on atmospheric circulation and rainfall during the rainy season in southern China [M]//Changjiang Water Resource Commission. Collected Papers on Medium- and Long-Term Hydrologic and Meteorological Forecasts (1) (in Chinese). Beijing: Water Conservancy and Power Press, 185–194.

陈兴芳, 宋文玲. 2000. 冬季高原积雪和欧亚积雪对我国夏季旱涝不同影响关系的环流特征分析 [J]. 大气科学, 24(5): 585−592. Chen Xingfang, Song Wenling. 2000. Circulation analysis of different influence of snow cover over the Tibetan Plateau and Eurasia in winter on summertime droughts and floods of China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 24(5): 585−592. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2000.05.02

陈海山, 孙照渤. 2003. 欧亚积雪异常分布对冬季大气环流的影响 I. 观测研究 [J]. 大气科学, 27(3): 304−316. Chen Haishan, Sun Zhaobo. 2003. The effects of Eurasian Snow cover anomaly on winter atmospheric general circulation. Part I. Observational studies [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 27(3): 304−316. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2003.03.02

陈永仁, 李跃清. 2007. 夏季北半球极涡与南亚高压东西振荡的关系 [J]. 高原气象, 26(5): 1067−1076. Chen Yongren, Li Yueqing. 2007. Relationships between polar vortex and oscillation of South Asia high in east and west directions [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 26(5): 1067−1076.

陈海山, 孙照渤, 朱伟军. 2003. 欧亚积雪异常分布对冬季大气环流的影响 II. 数值模拟 [J]. 大气科学, 27(5): 848−860. Chen Haishan, Sun Zhaobo, Zhu Weijun. 2003. The effects of Eurasian snow cover anomaly on winter atmospheric general circulation. Part II. Model simulation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 27(5): 848−860. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2003.05.06

陈丽娟, 顾伟宗, 伯忠凯, 等. 2017. 黄淮地区夏季降水的统计降尺度预测 [J]. 应用气象学报, 28(2): 129−141. Chen Lijuan, Gu Weizong, Bo Zhongkai, et al. 2017. The statistical downscaling method of summer rainfall prediction over the Huang-Huai valley [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 28(2): 129−141. doi:10.11898/1001-7313.20170201

程炳岩, 郭渠, 孙卫国. 2010. 川渝地区降水变化与 Nino3 区 SST 的关系及其稳定性分析 [J]. 气象, 36(3): 27−33. Cheng Binyan, Guo Qu, Sun Weiguo. 2010. Relationship between SST in Nino3 and the precipitation over Chongqing and Sichuan and its stability [J].

Meteorological Monthly (in Chinese), 36(3): 27−33. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2010.3.004

丁一汇. 2003. 动力季节预报的现状和未来 [C]//新世纪气象科技创新与大气科学发展——中国气象学会 2003 年年会“气候系统与气候变化”分会论文集. 北京: 中国气象学会, 100–106. Ding Yihui. 2003. Present situation and future of dynamic seasonal forecast [C]//China Meteorological Society, Proceedings of the "Climate System and Climate Change" Branch of the 2003 Annual Meeting of China Meteorological Society (in Chinese). Beijing: Chinese Meteorological Society, 100–106.

丁一汇. 2019. 太阳活动对地球气候和天气的影响 [J]. 气象, 45(3): 297−304. Ding Yihui. 2019. Effect of solar activity on Earth's climate and weather [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 45(3): 297−304. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2019.03.001

董文杰, 韦志刚, 范丽军. 2001. 青藏高原东部牧区雪灾的气候特征分析 [J]. 高原气象, 20(4): 402−406. Dong Wenjie, Wei Zhigang, Fan Lijun. 2001. Climatic character analysis of snow disasters in East Qinghai–Xizang Plateau livestock farm [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 20(4): 402−406. doi:10.3321/j.issn:1000-0534.2001.04.009

董敏, 吴统文, 王在志, 等. 2013. BCC_CSM1.0 模式对 20 世纪降水及其变率的模拟 [J]. 应用气象学报, 24(1): 1−11. Dong Min, Wu Tongwen, Wang Zaizhi, et al. 2013. Simulation of the precipitation and its variation during the 20th century using the BCC climate model (BCC_CSM1.0) [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 24(1): 1−11. doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2013.01.001

范可, 王会军, Young-Jean C. 2008. 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, 53(4): 602−609. Fan Ke, Wang Huijun, Young-Jean C. 2008. A physically-based statistical forecast model for the middle-lower reaches of the Yangtze River valley summer rainfall [J]. Chinese Science Bulletin, 53(4): 602−609. doi:10.1007/s11434-008-0083-1

Furnival G M. 1971. All possible regressions with less computation [J]. Technometrics, 13(2): 403−408. doi:10.1080/00401706.1971.10488794

Furnival G M, Wilson R W M. 1974. Regressions by leaps and bounds [J]. Technometrics, 16(4): 499−511. doi:10.1080/00401706.1974.10489231

Gong G, Entekhabi D, Cohen J. 2003. Modeled Northern Hemisphere winter climate response to realistic Siberian snow anomalies [J]. J. Climate, 16(23): 3917−3931. doi:10.1175/1520-0442(2003)016<3917:MNHWCR>2.0.CO;2

顾伟宗, 陈丽娟, 李维京, 等. 2012. 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, 70(2): 202−212. Gu Weizong, Chen Lijuan, Li Weijing, et al. 2012. Development of a downscaling method in China regional summer precipitation prediction [J]. Acta Meteorological Sinica (in Chinese), 70(2): 202−212. doi:10.11676/qxxb2012.020

郭其蕴. 1985. 东亚夏季风的变化与中国降水 [J]. 热带气象, 1(1): 44−52. Guo Jiyun. 1985. The variations of summer monsoon in East Asia and the rainfall over China [J]. Journal of Tropical Meteorology, 1(1): 44−52.

黄小梅, 蒋兴文, 肖丁木. 2017. 四川地区 7 月和 8 月降水异常空间型及其环流特征 [J]. 热带气象学报, 33(5): 654−665. Huang Xiaomei, Jiang Xingwen, Xiao Dingmu. 2017. Analysis of July and August precipitation in spatial distribution patterns and associated atmospheric circulation characteristics in Sichuan [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 33(5): 654−665. doi:10.16032/j.issn.1004-4965.2017.05.009

纪忠萍, 谷德军, 林爱兰. 2016. 东亚夏季风强度的多尺度统计预测模型 [J]. 大气科学, 40(2): 227−242. Ji Zhongping, Gu Dejun, Lin Ailan. 2016. A multiscale statistical prediction model of East Asian summer monsoon intensity [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 40(2): 227−242. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1504.14274

假拉, 周顺武. 2003. 印度洋海温异常对印度季风、高原夏季降水的影响 [J]. 高原气象, 22(S1): 132−137. Jia La, Zhou Shunwu. 2003. The effect of Indian Ocean SST anomaly on Indian monsoon and summer precipitation over Tibetan Plateau [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 22(S1): 132−137. doi:10.3321/j.issn:1000-0534.2003.z1.017

贾小龙, 陈丽娟, 李维京, 等. 2010. BP–CCA 方法用于中国冬季温度和降水的可预报性研究和降尺度季节预测 [J]. 气象学报, 68(3): 398−410. Jia Xiaolong, Chen Lijuan, Li Weijing, et al. 2010. Statistical downscaling based on BP–CCA: Predictability and application to the winter temperature and precipitation in China [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 68(3): 398−410. doi:10.11676/qxxb2010.039

蒋兴文, 李跃清, 李春, 等. 2007. 四川盆地夏季水汽输送特征及其对旱涝的影响 [J]. 高原气象, 26(3): 476−484. Jiang Xingwen, Li Yueqing, Li Chun, et al. 2007. Characteristics of summer water vapor transportation in Sichuan basin and its relationship with regional drought and flood [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 26(3): 476−484. doi:10.3321/j.issn:1000-0534.2007.03.006

康红文, 祝从文, 左志燕, 等. 2012. 多模式集合预报及其降尺度技术在东亚夏季降水预测中的应用 [J]. 气象学报, 70(2): 192−201. Kang Hongwen, Zhu Congwen, Zuo Zhiyan, et al. 2012. Statistical downscaling of pattern projection using multi-model output variables as predictors [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 70(2): 192−201. doi:10.11676/qxxb2012.019

柯宗建, 张培群, 董文杰, 等. 2009. 最优子集回归方法在季节气候预测中的应用 [J]. 大气科学, 33(5): 994−1002. Ke Zongjian, Zhang Peiqun, Dong Wenjie, et al. 2009. An application of optimal subset regression in seasonal climate prediction [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33(5): 994−1002. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2009.05.10

李崇银, 龙振夏. 1992. 准两年振荡及其对东亚大气环流和气候的影响 [J]. 大气科学, 16(2): 167−176. Li Chongyin, Long Zhenxia. 1992. QBO and its influence on the general atmospheric circulation and the climate in East Asia [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 16(2): 167−176. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1992.02.05

李崇银, 龙振夏. 1997. 西太平洋副高活动与平流层 QBO 关系的研究 [J]. 大气科学, 21(6): 670−678. Li Chongyin, Long Zhenxia.

1997. Study on subtropical high activity over the western Pacific and QBO in the stratosphere [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 21(6): 670−678. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1997.06.04

李维京, 陈丽娟. 1999. 动力延伸预报产品释用方法的研究 [J]. 气象学报, 57(3): 338−345. Li Weijing, Chen Lijuan. 1999. Research on reexplanation and reanalysis method of dynamical extended range forecast products [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 57(3): 338−345. doi:10.11676/qxxb1999.032

李永华, 徐海明, 刘德. 2009. 2006 年夏季西南地区东部特大干旱及其大气环流异常 [J]. 气象学报, 67(1): 122−132. Li Yonghua, Xu Haiming, Liu De. 2009. Features of the extremely severe drought in the East of Southwest China and anomalies of atmospheric circulation in summer 2006 [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 67(1): 122−132. doi:10.11676/qxxb2009.013

李震坤, 武炳义, 朱伟军. 2009. 春季欧亚积雪异常影响中国夏季降水的数值试验 [J]. 气候变化研究进展, 5(4): 196−201. Li Zhenkun, Wu Bingyi, Zhu Weijun. 2009. Numerical simulation on effect of spring Eurasian snow cover on summer rainfall in China [J]. Advances in Climate Change Research (in Chinese), 5(4): 196−201. doi:10.3969/j.issn.1673-1719.2009.04.002

李媛媛, 马振峰, 田伟. 2010. 多因子集合相似模型的研究及其在川渝汛期降水预测中的应用 [J]. 成都信息工程学院学报, 25(6): 647−651. Li Yuanyuan, Ma Zhenfeng, Tian Wei. 2010. The model of ensemble numerical prediction and its application in focast of summer precipitation in Sichuan and Chongqing [J]. Journal of Chengdu University of Information Technology (in Chinese), 25(6): 647−651.

李永华, 卢楚翰, 徐海明, 等. 2011. 夏季青藏高原大气热源与西南地区东部旱涝的关系 [J]. 大气科学, 35(3): 422−434. Li Yonghua, Lu Chuhan, Xu Haiming, et al. 2011. Contemporaneous relationships between summer atmospheric heat source over the Tibetan Plateau and drought/flood in eastern Southwest China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35(3): 422−434. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.03.04

李永华, 卢楚翰, 徐海明, 等. 2012. 热带太平洋-印度洋海表温度变化及其对西南地区东部夏季旱涝的影响 [J]. 热带气象学报, 28(2): 145−156. Li Yonghua, Lu Chuhan, Xu Haiming, et al. 2012. Anomalies of sea surface temperature in Pacific–Indian Ocean and effects on drought/flood in summer over Eastern of Southwest China [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 28(2): 145−156. doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2012.02.001

李永华, 向波, 卢楚翰, 等. 2016. 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, 40(2): 437−450. Li Yonghua, Xiang Bo, Lu Chuhan, et al. 2016. Impact of Madden–Julian Oscillation activities on precipitation in summer over the East of Southwest China and its possible mechanism [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 40(2): 437−450. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1506.15134

刘屹岷, 吴国雄. 2000. 副热带高压研究回顾及对几个基本问题的再认识 [J]. 气象学报, 58(4): 500−512. Liu Yimin, Wu Guoxiong. 2000. Reviews on the study of the subtropical anticyclone and new insights on some fundamental problems [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 58(4): 500−512. doi:10.11676/qxxb2000.053

刘长征, 杜良敏, 柯宗建, 等. 2013. 国家气候中心多模式解释应用集成预测 [J]. 应用气象学报, 24(6): 677−685. Liu Changzheng, Du Liangmin, Ke Zongjian, et al. 2013. Multi— model downscaling ensemble prediction in national climate center [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 24(6): 677−685. doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2013.06.004

吕俊梅, 任菊章, 琚建华. 2004. 东亚夏季风的年代际变化对中国降水的影响 [J]. 热带气象学报, 20(1): 73−80. Lv Junmei, Ren Juzhang, Ju Jianhua. 2004. The interdecadal variability of East Asia monsoon and its effect on the rainfall over China [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 20(1): 73−80. doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2004.01.008

Lü Junmei, Zhu Congwen, Pang Yishu, et al. 2019. A statistical forecast model for the Chinese winter temperature based on autumn SST anomalies [J]. Theor. Appl. Climatol., 137(1-2): 805−822. doi:10.1007/s00704-018-2631-1

Mohankumar K, Pillai P A. 2008. Stratosphere–troposphere interaction associated with biennial oscillation of Indian summer monsoon [J]. J. Atmos. Sol.-Terr. Phys., 70(5): 764−773. doi:10.1016/j.jastp.2007.12.001

穆松宁, 周广庆. 2010. 冬季欧亚大陆北部新增雪盖面积变化与中国夏季气候异常的关系 [J]. 大气科学, 34(1): 213−226. Mu Songning, Zhou Guangqing. 2010. Relationship between winter northern Eurasian fresh snow extent and summer climate anomalies in China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34(1): 213−226. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2010.01.20

Nakamura H, Fukamachi T. 2004. Evolution and dynamics of summertime blocking over the Far East and the associated surface Okhotsk high [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 130(599): 1213−1233. doi:10.1256/qj.03.101

Ogi M, Yamazaki K, Tachibana Y. 2004. The summerannular mode in the Northern Hemisphere and its linkage to the winter mode [J]. J. Geophys. Res. Atmos., 109(D20): D20114. doi:10.1029/2004JD004514

潘静, 李崇银, 顾薇. 2010. 太阳活动对中国东部夏季降水异常的可能影响 [J]. 气象科学, 30(5): 574−581. Pan Jing, Li Chongyin, Gu Wei. 2010. The possible impact of solar activity on summer rainfall anomaly in eastern China [J]. Journal of the Meteorological Sciences (in Chinese), 30(5): 574−581. doi:10.3969/j.issn.1009-0827.2010.05.002

庞轶舒, 祝从文, 刘凯. 2014. 中国夏季降水异常 EOF 模态的时间稳定性分析 [J]. 大气科学, 38(6): 1137−1146. Pang Yishu, Zhu Congwen, Liu Kai. 2014. Analysis of stability of EOF modes in summer rainfall anomalies in China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38(6): 1137−1146. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1402.13274

庞轶舒, 马振峰, 杨淑群, 等. 2017. 盛夏高原季风指数的探讨及其对四川盆地降水的影响 [J]. 高原气象, 36(4): 886−899. Pang Yishu, Ma Zhenfeng, Yang Shuqun, et al. 2017. Discussion of plateau monsoon index and its impact on precipitation in Sichuan Basin in

midsummer [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 36(4): 886−899. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2016.00027

庞轶舒, 秦宁生, 王春学, 等. 2020. ENSO 事件的季节演变对西南夏季降水异常的影响分析 [J]. 高原气象, 39(3): 581−593. Pang Yishu, Qin Ningsheng, Wang Chunxue, et al. 2020. Analysis on the impact of ENSO events seasonal evolution on summer rainfall anomalies in Southwest China [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 39(3): 581−593. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2019.00044

秦剑, 琚建华, 解明恩, 等. 1997. 低纬高原天气气候 [M]. 北京: 气象出版社, 210pp. Qin Jian, Ju Jianhua, Xie Ming'en, et al. 1997. Weather & Climate over Low Latitude Plateau (in Chinese) [J]. Beijing: China Meteorological Press, 210pp.

任荣彩, 刘屹岷, 吴国雄. 2004. 中高纬环流对 1998 年 7 月西太平洋副热带高压短期变化的影响机制 [J]. 大气科学, 28(4): 571−578. Ren Rongcai, Liu Yimin, Wu Guoxiong. 2004. On the short-term variation of subtropical anticyclone over the western Pacific affected by the mid-high latitudes circulation in July 1998 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 28(4): 571−578. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2004.04.09

Saha S, Moorthi S, Wu Xingren, et al. 2014. The NCEP climate forecast system version 2 [J]. J. Climate, 27(6): 2185−2208. doi:10.1175/JCLI-D-12-00823.1

舒建川, 蒋兴文, 黄小梅, 等. 2019. 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, 38(2): 349−358. Shu Jianchuan, Jiang Xingwen, Huang Xiaomei, et al. 2019. Statistical downscaling modeling analysis of summer precipitation in Southwest China [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 38(2): 349−358. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2018.00078

孙林海, 何敏. 2004. 欧亚环流异常对中国夏季降水的影响及其预测研究 [J]. 气象学报, 62(3): 355−364. Sun Linhai, He Min. 2004. The relationship between summer precipitation in China and circulation anomaly in Euroasia and its application in precipitation prediction [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 62(3): 355−364. doi:10.11676/qxxb2004.036

孙照渤, 陈海山, 谭桂容, 等. 2010. 短期气候预测基础 [M]. 北京: 气象出版社. Sun Zhaobo, Chen Haishan, Tan Guirong, et al. 2010. Elements of Short Period Climate Predictions (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press.

孙小婷, 李清泉, 王黎娟. 2017. 我国西南地区夏季长周期旱涝急转及其大气环流异常 [J]. 大气科学, 41(6): 1332−1342. Sun Xiaoting, Li Qingquan, Wang Lijuan. 2017. Characteristics of long-cycle abrupt drought–flood alternations in southwest China and anomalies of atmospheric circulation in summer [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 41(6): 1332−1342. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1705.16282

谭晶, 王彰贵, 黄荣辉, 等. 2015. 云南雨季降水异常的热带海温和大气环流异常分析 [J]. 热带海洋学报, 34(2): 15−23. Tan Jing, Wang Zhanggui, Huang Ronghui, et al. 2015. Analysis of tropical sea surface temperature and atmospheric circulation anomalies and their relationship with abnormal precipitation in Yunnan during rainy season [J]. Journal of Tropical Oceanography (in Chinese), 34(2): 15−23. doi:10.3969/j.issn.1009-5470.2015.02.003

陶诗言, 张庆云, 张顺利. 1998. 1998 年长江流域洪涝灾害的气候背景和大尺度环流条件 [J]. 气候与环境研究, 3(4): 290−299. Tao Shiyan, Zhang Qingyun, Zhang Shunli. 1998. The great floods in the Changjiang River valley in 1998 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 3(4): 290−299. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.1998.04.01

Wallace J M, Gutzler D S. 1981. Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter [J]. Mon. Wea. Rev., 109(4): 784−812. doi:10.1175/1520-0493(1981)109<0784:TITGHF>2.0.CO;2

王颖, 李栋梁. 2015. 变暖背景下青藏高原夏季风变异及其对中国西南气候的影响 [J]. 气象学报, 73(5): 910−924. Wang Ying, Li Dongliang. 2015. Variation of the Tibetan Plateau summer monsoon under the background of global warming and its impact on the climate in southwestern China [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 73(5): 910−924. doi:10.11676/qxxb2015.060

Webster P J, Yang Song. 1992. Monsoon and ENSO: Selectively interactive systems [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 118(507): 877−926. doi:10.1002/qj.49711850705

魏凤英. 2007. 现代气候统计诊断与预测技术 [M]. 2 版. 北京: 气象出版社. Wei Fengying. 2007. Statistical Diagnosis and PredictionTechniques of Modern Climate (in Chinese) [M]. 2nd ed. Beijing: China Meteorological Press.

叶月珍, 方之芳. 1999. 青藏高原热力状况与四川盆地汛期降水的联系 [J]. 高原气象, 18(2): 162−170. Ye Yuezhen, Fang Zhifang. 1999. The relationship between thermal regime in Qinghai–Xizang Plateau and precipitation in Sichuan basin during flood season [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 18(2): 162−170. doi:10.3321/j.issn:1000-0534.1999.02.004

YU Rucong, ZHOU Tianjun. 2007. Seasonality and Three-Dimensional structure of interdecadal change in the East Asian monsoon [J]. Journal of Climate, 20: 5344−5355. doi:10.1175/2007JCLI1559.1

章基嘉, 孙照渤, 兰国明. 1979. 亚洲 500 毫巴候平均环流的天气统计学分析 [J]. 南京气象学院院报 (1): 33−41. Zhang Jijia, Sun Zhaobo, Lan Guoming. 1979. Weather statistical analysis of Asian 500 mb mean circulations [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese)(1): 33−41.

Zhao Liang, Wang Jingsong. 2014. Robust response of the East Asian monsoon rainband to solar variability [J]. J. Climate, 27(8): 3043−3051. doi:10.1175/JCLI-D-13-00482.1

Zhao Liang, Wang Jingsong, Liu Haiwen, et al. 2017. Amplification of the solar signal in the summer monsoon rainband in China by synergistic actions of different dynamical responses [J]. J. Meteor. Res., 31(1): 61−72. doi:10.1007/s13351-016-6046-6

郑然, 刘嘉慧敏, 马振峰. 2019. 年际增量方法在西南夏季降水预测中的应用 [J]. 气象学报, 77(3): 489−496. Zheng Ran, Liu Jiahuimin, Ma Zhenfeng. 2019. Application of an interannual increment method for summer precipitation forecast in Southwest China [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 77(3): 489−496. doi:10.11676/qxxb2019.027

中国气象局国家气候中心. 2011. 气候系统监测诊断年报: 2010 [M]. 北京: 气象出版社. National Climate Center of China

Meteorological Administration. 2011. Annual Report on Climate System Monitoring and Diagnosis: 2010 (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press.

周顺武, 假拉. 2003. 印度季风的年际变化与高原夏季旱涝 [J]. 高原气象, 22(4): 410−415. Zhou Shunwu, Jia La. 2003. Interannual variation of Indian monsoon and summer flood/drought over Tibetan Plateau [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 22(4): 410−415. doi:10.3321/j.issn:1000-0534.2003.04.016

周长艳, 李跃清, 卜庆雷, 等. 2011. 盛夏川渝盆地东西部旱涝并存的特征及其大气环流背景 [J]. 高原气象, 30(3): 620−627. Zhou Changyan, Li Yueqing, Bu Qinglei, et al. 2011. Features of drought-flood coexistence in West and East of Sichuan–Chongqing basin in midsummer and its relating background of atmospheric circulation [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 30(3): 620−627.

周月华, 刘敏, 万素琴, 等. 2019. 湖北省气候业务技术手册 [M]. 北京: 气象出版社. Zhou Yuehua, Liu Min, Wan Suqin, et al. 2019. Climate Business Technological Manual of Hubei Province (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press.

Zhu Congwen, Park C K, Lee W S, et al. 2008. Statistical downscaling for multi-model ensemble prediction of summer monsoon rainfall in the Asia–Pacific region using geopotential height field [J]. Adv. Atmos. Sci., 25(5): 867−884. doi:10.1007/s00376-008-0867-x

左志燕, 张人禾. 2012. 中国春季降水异常及其与热带太平洋海面温度和欧亚大陆积雪的联系 [J]. 大气科学, 36(1): 185−194. Zuo Zhiyan, Zhang Renhe. 2012. The anomalies of spring rainfall in China and its relation with tropical Pacific SST and Eurasian snow [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36(1): 185−194. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.01.14