

刘婷婷, 陈海山, 蒋薇, 等. 2016. 基于土壤湿度和年际增量方法的我国夏季降水预测试验 [J]. 大气科学, 40 (3): 591–603. Liu Tingting, Chen Haishan, Jiang Wei, et al. 2016. Summer precipitation prediction in China using soil moisture and the year-to-year increment approach [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 40 (3): 591–603, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1507.15161.

基于土壤湿度和年际增量方法的我国 夏季降水预测试验

刘婷婷^{1,2} 陈海山^{1,2} 蒋薇³ 李忠贤^{1,2}

¹ 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心/气象灾害教育部重点实验室, 南京 210044

² 南京信息工程大学大气科学学院, 南京 210044

³ 江苏省气候中心, 南京 210008

摘 要 选取欧亚大陆 9 个关键区的土壤湿度年际增量作为预测因子, 采用变形的典型相关分析 (BP-CCA) 结合集合典型相关分析 (ECC) 方法建立集合预测模型, 对我国东部夏季降水的年际增量进行预测, 进而预测夏季降水。其中, 1980~2004 年的资料用于历史预测试验, 而 2005~2014 年的资料用于独立样本预测试验。首先利用 BP-CCA 方法对 9 个因子分别建立单因子预测模型, 然后采用 ECC 方法对 9 个预测因子按照不同的组合方式建立集合预测模型, 并且对独立样本检验的效果进行了评估。结果表明, 不同预测因子的组合对我国夏季降水均表现出一定的预测能力: 东欧平原、贝加尔湖以北、我国河套地区及长江以南地区的土壤湿度对华北夏季降水预测效果较好; 而巴尔喀什湖以北地区、我国西北地区、河套地区以及长江以南地区的土壤湿度对江淮夏季降水有较好预测效果; 东欧平原、巴尔喀什湖以北地区以及我国河套地区的土壤湿度对华南降水预测技巧较高。这三组模型预测出的降水变化趋势与相应区域的观测结果较为一致, 且预测评分 (PS) 均超过 70 分, 距平相关系数 (ACC) 均为正值。研究表明土壤湿度因子中包含了对我国夏季降水有用的预测信号, 可以考虑将土壤湿度应用于夏季降水的预测业务中。

关键词 夏季降水预测 土壤湿度 年际增量

文章编号 1006-9895(2016)03-0591-13

中图分类号 P456

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1507.15161

Summer Precipitation Prediction in China Using Soil Moisture and the Year-to-Year Increment Approach

LIU Tingting^{1,2}, CHEN Haishan^{1,2}, JIANG Wei³, and LI Zhongxian^{1,2}

¹ Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

² School of Atmospheric Sciences, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

³ Jiangsu Climate Centre, Nanjing 210008

收稿日期 2015-03-22; 网络预出版日期 2015-07-22

作者简介 刘婷婷, 女, 1990 年出生, 硕士研究生, 主要从事陆面过程与短期气候预测研究。E-mail: nuist_ltt@163.com

通讯作者 陈海山, E-mail: haishan@nuist.edu.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 41230422, 科技部公益性行业 (气象) 科研专项 GYHY201206017, 江苏省自然科学基金——杰出青年基金项目 BK20130047, 新世纪优秀人才支持计划

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grant 41230422), Special Scientific Research Project of Meteorological Public Welfare Profession of Ministry of Science and Technology (Grant GYHY201206017), Natural Science Foundation of Jiangsu Province of China—Outstanding Youth Foundation Project (Grant BK20130047), Program for New Century Excellent Talents in University

Abstract Using year-to-year increments of soil moisture in nine key regions over Eurasia as predictors, statistical prediction models were developed. These models were based on Barnett-Preisendorfer Canonical Correlation Analysis (BP-CCA) and were combined with the Ensemble Canonical Correlation analysis (ECC) method to predict the year-to-year increments of summer precipitation over eastern China, and thus obtain the prediction of summer precipitation. Specifically, data during the epochs of 1980–2004 and 2005–2014 were used to perform historical prediction and independent sample tests, respectively. First, single factor prediction models of the nine predictors were built using the BP-CCA method. Then, ensemble prediction models were developed using the ECC method, based on different combinations of the nine predictors, and the scores for the region with predictive skill in the independent sample test were also calculated. The results showed that the combinations of different predictors had different predictive skill for summer precipitation in China. The soil moisture in the eastern European Plain, in the area north of Lake Baikal, in Hetao region, and in the area south of the Yangtze River, had a good predictive effect for summer precipitation in North China. The soil moisture in the area north of Balkhash Lake, in Northwest China, in Hetao region, and in the area south of the Yangtze River, had a good predictive effect for summer precipitation in the Yangtze–Huaihe region. The soil moisture in the eastern European Plain, in the area north of Balkhash Lake, and in Hetao region, had high predictive skill for summer precipitation in South China. The precipitation change trends predicted by three models were consistent with observations in the corresponding regions. Prediction scores all exceeded 70 points, and anomaly correlation coefficients were all positive. The study shows that soil moisture contains useful signals for summer precipitation in China, and can be considered for application in summer precipitation prediction operations.

Keywords Summer precipitation prediction, Soil moisture, Year-to-year increment

1 引言

陆面约占地球表面的 1/3, 是气候系统中重要且最为复杂的组成部分, 发生于陆面的各种过程及其与大气的相互作用, 对区域乃至全球气候具有显著的影响 (陈海山和孙照渤, 2002; 黄荣辉等, 2013)。土壤湿度作为表征陆面特性的一个重要参量, 通过改变土壤热容量、地表反照率、蒸散以及感热、潜热通量, 进而对大气环流、气温、降水等产生显著影响。有研究表明, 副热带地区土壤湿度对大气的作用甚至与热带地区 SST 的作用相当 (Shukla and Mintz, 1982)。因此, 研究土壤湿度对我国降水的影响是十分必要的。

Namias (1958) 最早发现土壤湿度的季节性异常对大气的季节变化有重要影响。Walker and Rowntree (1977) 的敏感性试验指出, 干土壤可导致未来气温升高, 湿土壤则有利于后期降水持续异常。进一步, Rowntree and Bolton (1983) 和 Yeh et al. (1984) 通过数值试验证实了土壤湿度异常能够对未来的气候产生一定的影响。Schär et al. (1999) 和 Cook et al. (2006) 分别探讨了欧洲、南非地区的夏季降水异常变化与土壤湿度的可能联系。Koster et al. (2004) 指出东亚地区是显著的土壤湿度气候敏感区。

国内针对土壤湿度对气候影响的研究工作主

要是从诊断分析和数值模拟两个方面展开的。在诊断分析方面, 马柱国等 (2000) 和孙丞虎等 (2005) 基于土壤湿度站点资料, 分析了不同区域土壤湿度与气温、降水之间的联系。然而, 由于观测难度较大以及设备昂贵等因素, 土壤湿度观测资料在时空分布上存在一定的局限性。近年来, 一些学者采用土壤湿度再分析资料, 探讨了东亚季风环流、我国夏季降水与前期春季土壤湿度之间的可能联系 (左志燕和张人禾, 2007; 梁乐宁和陈海山, 2010; Zhang and Zuo, 2011; 詹艳玲和林朝晖, 2012; 高楚杰等, 2013)。张文君等 (2008) 通过对比分析多套土壤湿度资料, 指出 ERA-40 资料土壤湿度的年际变化与观测相关性最好; 而 Liu et al. (2014) 也将 ERA-Interim 等 5 套土壤湿度再分析资料与我国东部区域的观测资料进行了详细的比较评估, 发现 ERA-Interim 资料最能代表观测土壤湿度的年际变化和时空分布特征; 因此, 欧洲中心的这两套资料可作为研究我国区域土壤湿度长时间尺度的代用资料。在数值模拟方面, 一系列的工作深入研究了土壤湿度对我国气候的影响 (王万秋, 1991; 李巧萍等, 2007; 周晶和陈海山, 2012; 陈海山和周晶, 2013)。土壤湿度在我国短期气候预测中的作用也逐步引起了重视 (郭维栋等, 2007; 胡娅敏等, 2009)。张文君等 (2012) 指出, 合理描述土壤湿度变化是提高区域降水预报技巧的潜在途径之一。

李忠贤等(2012)分析了土壤湿度对夏季气候的潜在可预报性,发现年际变化的土壤湿度对夏季气候的潜在可预报性高于采用气候态的情况。以上研究成果充分说明了土壤湿度异常对气候变化尤其是我国夏季降水异常具有显著影响。因此,本文考虑将土壤湿度应用到夏季降水的预测中。

长期以来,我国夏季降水预测考虑的因子主要是环流因子和海温(毛恒青和李小泉,1998;王蕾等,2004;魏凤英和黄嘉佑,2010;顾伟宗等,2012),而利用陆面因子建立夏季降水预测模型的研究比较少。朱蒙等(2014)利用 ERA-40 和 ERA-Interim 土壤温度再分析资料,建立了基于土壤温度因子的我国东部夏季降水预测模型。虽然 Zhu(2011)对我国东北地区夏季降水进行预测时考虑了欧亚大陆西北部的土壤湿度,但是模型的预测能力仅限于东北地区。土壤湿度作为表征下垫面热力异常的重要参量,且具有一定的持续性,对后期降水具有一定的指示意义。此外,为了更好地识别土壤湿度和降水之间的年际异常信号,本文将采用年际增量方法的预测思路,在分析欧亚大陆土壤湿度年际增量与我国夏季降水年际增量的相关关系基础上,提取不同关键区的土壤湿度年际增量作为预测因子;然后分别使用变形的典型相关分析(BP-CCA)和集合典型相关分析(ECC)方法建立单因子和集合多因子的预测模型来预测我国夏季降水的年际增量,进而预测我国夏季降水变化,以期为我国夏季降水预测业务提供一定的参考。

2 资料和方法

选取 105°E 以东的我国东部 120 个测站的夏季 6~8 月平均降水量作为预测对象,资料采用国家气候中心整理的全国 160 站的月平均降水量资料。预测因子采用欧洲中期天气预报中心(ECWMF)ERA-Interim 逐月再分析表层土壤湿度资料,水平分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ 。资料时间范围均为 1979~2014 年。

2.1 年际增量方法

年际增量方法由范可等(2007)在构建长江中下游夏季降水预测模型时提出,随后又被应用于华北汛期降水(范可等,2008)、东北冬季表面气温(Fan, 2009)、夏季气温(Fan and Wang, 2010)、降水(Zhu, 2011)、北大西洋飓风频次(Fan, 2010)以及东北冬半年大雪—暴雪日数(范可和田宝强,

2013)的预测中。

此方法的预测思路是:首先计算预测因子和预测对象(降水)的年际增量(当年的变量值减去前一年的变量值);然后构建基于预测因子年际增量的预测模型,来预测降水的年际增量;最后将当年降水年际增量的预测值加上前一年降水的实测值,得到当年降水的预测值。使用年际增量方法,不仅可以放大预测因子和预测对象之间的异常信号使之更容易预测,还能在一定程度上克服年代际和年际变化预测信号不一致的问题。

2.2 变形的典型相关分析(BP-CCA)方法

CCA 方法的基本思想是:从左场和右场资料分别分离出线性组合的新变量,使得新变量间相关系数达最大、次大……,然后通过对新变量的研究来代替对原始左右场资料的研究。本文采用的 BP-CCA 法是在对两个场做主成分分析基础上的 CCA,它等价于用 EOF 和 PC 对资料进行预过滤后做 CCA。这样能够提取场的时空变化的主要信息,保留下时空尺度大的变化成分的方差,而消除掉一些小尺度变化及噪声的影响(吴洪宝和吴蕾,2005)。同时也降低了维数,减少了计算量。BP-CCA 法的具体步骤如下:

- (1) 对预测因子和预测对象进行标准化处理,以消除单位的影响;
 - (2) 将预测因子和预测对象分别做 EOF 分析,截取前几个主成分 $\alpha_i(t)$ 和 $\beta_j(t)$, 本文取累积方差贡献百分比达 80%~85%;
 - (3) 计算预测因子和预测对象前几个主成分 $\alpha_i(t)$ 和 $\beta_j(t)$ 间的协方差矩阵 $C_{\alpha\beta}$;
 - (4) 对 $C_{\alpha\beta}$ 矩阵做 SVD (Singular Value Decomposition) 运算,得到的左、右奇异向量 L_k 和 R_k , 奇异值 σ_k 是典型相关系数;
 - (5) 以 L_k 和 R_k 为权重系数向量分别将 $\alpha_i(t)$ 和 $\beta_j(t)$ 做线性组合,得到典型相关变量 $a_k(t)$ 与 $b_k(t)$;
- 最后,根据回归分析的原理,建立预测关系:

$$\hat{z}_{jt} = \sum_k \sigma_k a_k(t) \langle z_{jt} b_k(t) \rangle, j=1, 2, \dots, N_z, \quad (1)$$

其中, t 表示年份 ($1, 2, \dots, N_z$), j 是预测对象的空间点序号, z_{jt} 和 $\hat{z}_{jt}$ 分别为预测对象的实际场和预测场在第 j 个空间点的分量, $\langle \rangle$ 表示时间平均, $\langle z_{jt} b_k(t) \rangle$ 是样本平均量。

2.3 集合典型相关分析(ECC)方法

建立集合预报可以采用不同方法,本文采用回

归集合平均方法。

对单个预测因子场 S_m , $m=1, 2, \dots, M$ (M 为集合成员的个数), 第 m 个单因子场通过 CCA 方法得到的预测值记为 $\hat{z}_{jt,m}$ 。回归集合平均方法中, 回归集合平均与集合的成员满足以下线性关系:

$$\hat{z}_{jt} = \sum_{m=1}^M [b_{m,j} \hat{z}_{jt,m}], \quad (2)$$

其中, 组合系数 $b_{m,j}$ 采用回归方法确定, 原则是使集合平均预测值 $\hat{z}_{jt}$ 和对应的观测值 z_{jt} 在训练期的误差方差达最小; 对于第 j 空间点, z_{jt} 是回归的对象; $\hat{z}_{jt,m}$ 是回归因子; $b_{m,j}$ 是回归系数; 误差方差 V_j 为

$$V_j = \sum_{t=1}^N [\hat{z}_{jt} - z_{jt}]^2. \quad (3)$$

2.4 预测评估方法

为了定量评估模型的预测能力, 本文使用预测准确率 (P)、预测评分 (PS)、技巧评分 (SS) 和距平相关系数 (ACC) 四种评分方法来检验预测效果。预测准确率 (P) 作为最普遍使用的评分方法简便易行, 但有时可能因为受到气候概率影响而不能反映真实的预测水平。预测评分 (PS) 和技巧评分 (SS) 是我国业务预测中经常使用的方法。距平相关系数 (ACC) 是国际上通用的指标, 不仅可以反映预测场与实况场空间分布的一致程度, 而且能够揭示要素距平量值预报与对应观测值的偏离程度。

3 我国东部夏季降水年际增量的时空特征及其与欧亚大陆土壤湿度年际增量的相关分析

选取我国东部 (105°E 以东) 120 个气象台站的夏季 (6~8 月平均) 降水作为研究对象。对 1980~2004 年我国东部夏季降水年际增量的标准化距平场进行 EOF 分析, 研究我国东部夏季降水年际增量的时空分布特征。图 1 给出了 EOF 分析前三个模态的空间分布及相应的时间系数序列, 其中, 前三个模态的方差贡献率分别为 17.3%、14.1% 和 11.7%, 均通过 North 准则检验 (North et al., 1982)。EOF 第一模态 (EOF1) 的空间分布 (图 1a) 呈现出江淮流域 (东北大部地区) 与华南 (河套) 地区夏季降水年际增量的反位相分布; EOF 第二模态 (EOF2) 的空间分布 (图 1c) 显示出与图 1a 不同的分布形

势, 自南向北呈现出 “+ -” 的经向偶极型分布, 具体表现为长江以南地区与长江以北地区的反位相分布; EOF 第三模态 (EOF3) 的空间分布 (图 1e) 主要体现了黄淮、东南沿海地区与东部其他地区夏季降水年际增量的反位相空间分布。EOF 分析前三个模态的时间系数 (图 1b、1d、1f) 均表现出明显的年际变化特征。

利用上述我国东部夏季降水年际增量 EOF 分析的前三个时间系数序列分别与欧亚大陆 4 月表层土壤湿度年际增量进行相关分析。由图 2a 可见, 1980~2004 年降水年际增量 EOF 分析第一时间系数序列与 4 月土壤湿度年际增量在欧亚大陆北 (南) 部以正 (负) 相关为主, 且在东欧平原 (S1 区: $57^\circ\sim 65^\circ\text{N}$, $49^\circ\sim 70^\circ\text{E}$)、贝加尔湖以北 (S2 区: $52^\circ\sim 62^\circ\text{N}$, $90^\circ\sim 130^\circ\text{E}$) 和东西伯利亚 (S5 区: $59^\circ\sim 72^\circ\text{N}$, $131^\circ\sim 149^\circ\text{E}$) 地区, 两者表现为显著的正相关关系; 在巴尔喀什湖以北 (S3 区: $48^\circ\sim 53^\circ\text{N}$, $63^\circ\sim 85^\circ\text{E}$) 和我国西北 (S4 区: $37^\circ\sim 46^\circ\text{N}$, $80^\circ\sim 105^\circ\text{E}$) 地区, 两者表现为显著的负相关关系。由图 2b 所示, 第二时间系数序列与欧亚大陆土壤湿度年际增量的相关关系以负相关为主, 通过显著性检验的区域位于勒拿河流域 (S6 区: $65^\circ\sim 71^\circ\text{N}$, $115^\circ\sim 129^\circ\text{E}$)。如图 2c 所示, 第三时间系数序列与欧亚大陆土壤湿度年际增量的相关系数分布呈现南北反向, 与图 2a 的分布类似。通过显著性检验的区域位于中西伯利亚高原 (S7 区: $60^\circ\sim 73^\circ\text{N}$, $88^\circ\sim 132^\circ\text{E}$)、我国河套地区 (S8 区: $34^\circ\sim 44^\circ\text{N}$, $103^\circ\sim 115^\circ\text{E}$) 和长江以南地区 (S9 区: $22^\circ\sim 29^\circ\text{N}$, $103^\circ\sim 120^\circ\text{E}$)。为了进一步讨论两者的关系, 将上述 9 个通过 95% 以上信度检验的点所在区域作为土壤湿度关键区。

4 单因子预测模型

根据我国东部夏季降水年际增量与欧亚大陆 4 月表层土壤湿度年际增量的相关分析, 将 9 个关键区的土壤湿度年际增量分别作为预测因子, 使用 BP-CCA 方法建立我国东部夏季降水年际增量的单因子预测模型, 对 1980~2004 年夏季降水年际增量进行历史预测试验, 并计算出降水年际增量预测值和实测值之间的相关系数 (图 3), a1~a9 分别对应关键区 S1~S9。

我们发现, 将 S1 区域土壤湿度年际增量作为预测因子时, 降水年际增量预测值和实测值的相关

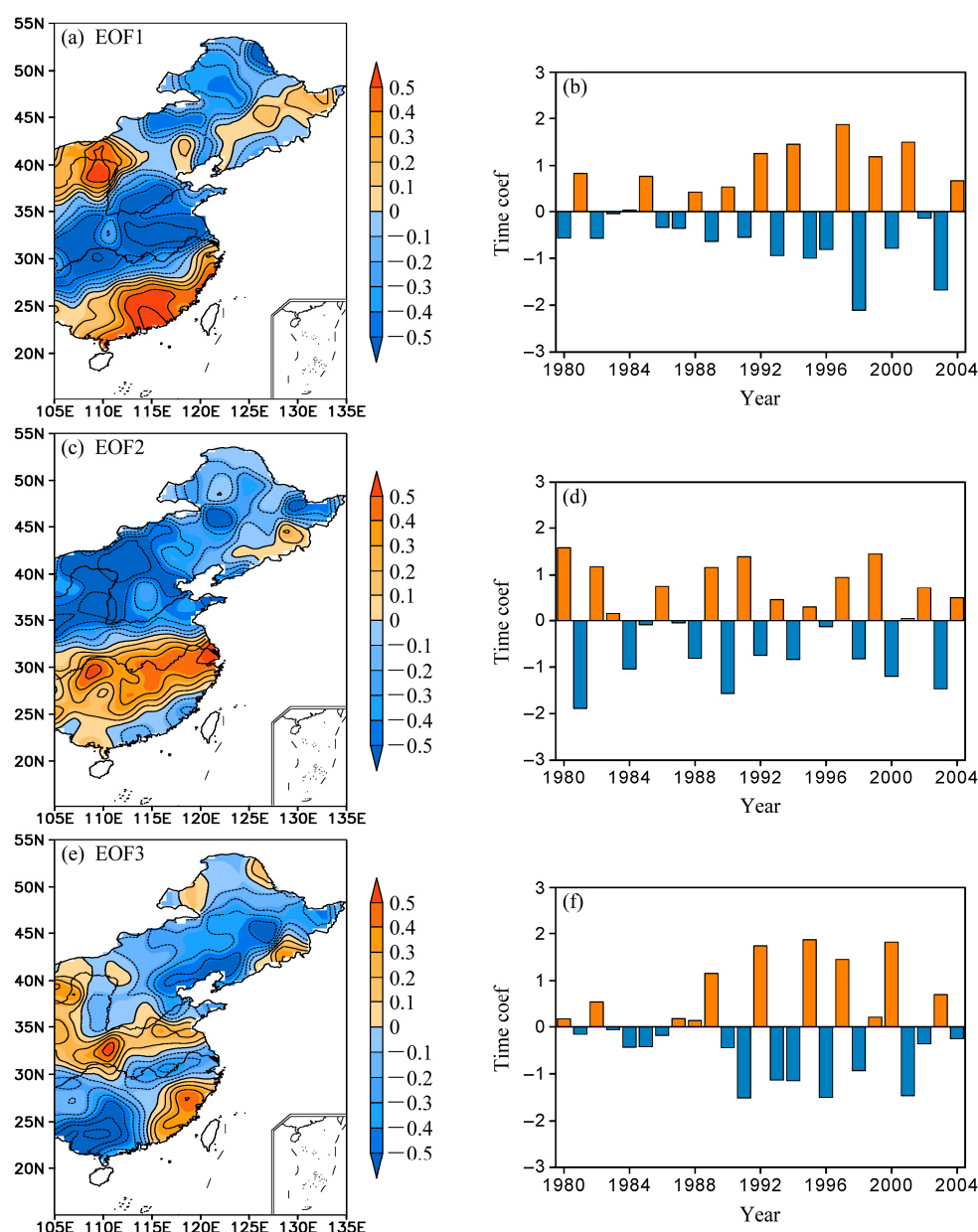


图1 1980~2004年我国东部夏季降水年际增量标准化距平场的(a、c、e) EOF分析前三个模态(EOF1、EOF2、EOF3)的空间分布及(b、d、f)相应的时间系数序列

Fig. 1 The (a, c, e) spatial distribution and (b, d, f) corresponding time series of three leading EOF (EOF1, EOF2, and EOF3) modes of the standardized anomaly of the year-to-year increment of summer precipitation in eastern China for the period 1980–2004

系数通过 90%信度检验的区域为东北北部地区、黄河流域、长江流域以及东南沿海地区,这说明基于 S1 区域土壤湿度年际增量因子的降水年际增量预测模型在以上地区存在预测技巧;基于 S2、S5、S8、S9 区域土壤湿度年际增量的单因子降水年际增量预测模型在我国东部绝大部分地区存在预测技巧;基于 S3 区域土壤湿度年际增量因子的降水年际增量预测模型在我国东北地区、山东半岛、黄土高原

及长江以南地区存在预测技巧;基于 S4、S7 区域土壤湿度年际增量的单因子降水年际增量预测模型在整个东部地区均存在预测技巧;而基于 S6 区域土壤湿度年际增量因子的降水年际增量预测模型仅对华北部分地区、长江流域和东南沿海地区有预测技巧。

随后,将各个单因子模型预测出的降水年际增量加上前一年的实测降水量,从而计算得到 1980~

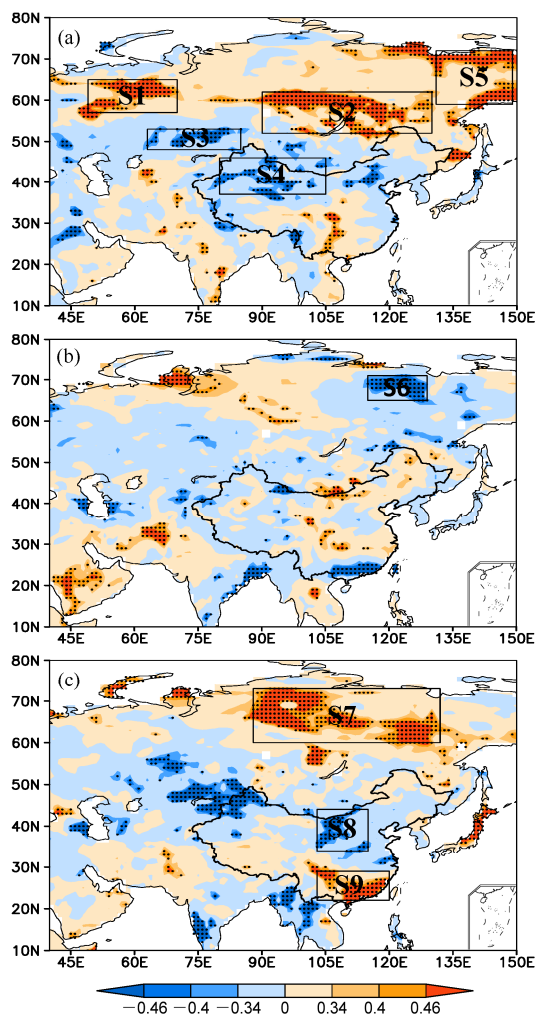


图 2 1980~2004 年我国东部夏季降水年际增量 EOF 分析 (a) 第一模态、(b) 第二模态、(c) 第三模态的时间系数序列与欧亚大陆 4 月土壤湿度年际增量的相关分布。加点点区域表示通过 95% 信度检验

Fig. 2 Correlation between the time series of the three leading EOF modes of the year-to-year increment of summer precipitation in eastern China [(a) EOF1; (b) EOF2; (c) EOF3] and the year-to-year increment of April soil moisture over Eurasia from 1980 to 2004. Dotted areas show statistically significant correlation above 95% confidence level

2004 年的降水预测值。图 4 为降水预测值和实测值之间的相关系数, b1~b9 分别对应关键区 S1~S9。

分析可知, S1 区域土壤湿度因子对东北南部地区和东南沿海地区的夏季降水存在预测技巧; S2 区域土壤湿度因子对东北地区 and 长江以南地区的夏季降水有预测技巧; S3 区域土壤湿度因子对东北部分地区和东南沿海部分地区的夏季降水存在预测技巧; S4 区域土壤湿度因子对东北地区、河套地区以及长江以南地区的夏季降水有预测技巧; S5 区域土壤湿度因子对东北平原和东南沿海地区的夏季

降水存在预测技巧; S6 区域土壤湿度因子对我国东部夏季降水几乎没有预测能力; S7 区域土壤湿度因子对东北南部地区、河套部分地区以及长江以南大部分地区的夏季降水存在预测技巧; S8 区域土壤湿度因子对东北地区 and 长江以南大部分地区的夏季降水有预测技巧; S9 区域土壤湿度因子对东北南部地区和长江以南大部分地区的夏季降水存在预测技巧。以上分析结果表明, 欧亚大陆不同区域的土壤湿度因子对我国夏季降水和夏季降水年际增量的预测具有一定的指示意义。

5 集合多因子预测模型

针对 BP-CCA 方法的局限性, 为了得到预测效果更好、更稳定的预测模型, 使用 ECC 方法建立集合多个土壤湿度因子的预测模型。其中, 对 1980~2004 年夏季降水年际增量进行历史预测试验, 对 2005~2014 年夏季降水年际增量进行独立样本预测试验。由当年降水年际增量预测值加上前一年降水实测值计算得到当年降水预测值。

对以上 9 个关键区的土壤湿度预测因子按照不同的组合方式进行集合, 共可以建立 502 个集合预测模型。分别计算各个集合预测模型得到的我国夏季降水年际增量预测值和夏季降水预测值, 与相应的实测值之间的相关系数, 并且对独立样本检验 (2005~2014 年) 中存在预测技巧的区域计算气候评分, 评估模型的预测能力。经过分析, 从中筛选出预测能力较强的三组集合预测模型。

图 5 是集合 S1、S2、S8、S9 四个区域土壤湿度作为预测因子对我国东部夏季降水进行预测, 由于篇幅的缘故只给出降水预测值和实测值的相关系数分布。图 5a 是历史预测试验, 模型对我国东部绝大部分地区的夏季降水预测效果均较好。图 5b 是独立样本预测试验, 模型对东北部分地区、华北地区和江淮地区的夏季降水有一定预测技巧。与其他模型相比较而言, 此模型是对华北地区预测效果最好的模型, 因此将其作为华北地区 (图 5b 中方框内区域) 的夏季降水预测模型。

图 6 是集合 S3、S4、S8、S9 四个区域土壤湿度作为预测因子对我国东部夏季降水进行预测, 给出降水预测值和实测值的相关系数分布。图 6a 是历史预测试验, 模型对整个东部地区的夏季降水预测效果均较好。图 6b 是独立样本预测试验, 模型对东北部分地区和江淮地区的夏季降水有预测技

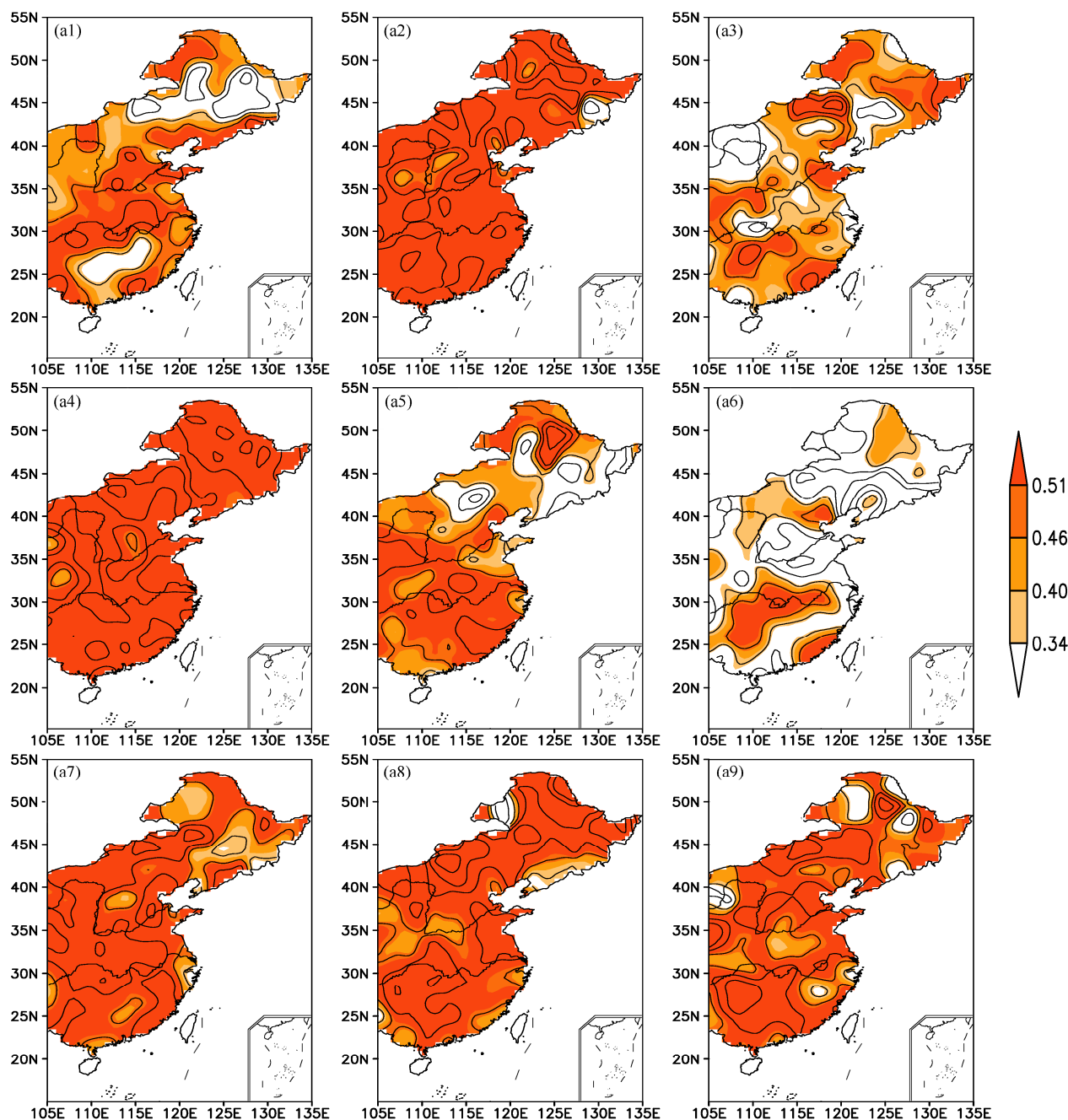


图3 1980~2004年我国东部夏季降水年际增量的单因子(S1-S9)预测模型得到的预测和实测降水年际增量场的相关系数分布(a1-a9)。阴影区域表示通过90%信度检验

Fig. 3 Geographical distribution of the correlation coefficients between the predicted and observed fields of the year-to-year increment of precipitation by the nine single factor (S1-S9) prediction models [labelled (a1) to (a9)] of the year-to-year increment of summer precipitation in eastern China from 1980 to 2004. Correlations exceeding 90% confidence level are shaded

巧,特别是对江淮地区降水的预测效果较佳,因此将此模型作为江淮地区(图6b中方框内区域)的夏季降水预测模型。

图7是集合S1、S3、S8三个区域土壤湿度作为预测因子对我国东部夏季降水进行预测,给出降

水预测值和实测值的相关系数分布。图7a是历史预测试验,模型对东部大部分地区的夏季降水预测效果均较好,相关系数除河套地区、东北部分地区以及东南部分地区外,均通过95%的信度检验。图7b是独立样本预测试验,模型对东北部分地区、江

淮地区和华南地区的夏季降水有预测技巧。由于前面已经建立了针对华北和江淮地区的降水预测模型,且效果优于此模型,因此将此模型作为华南地区(图 7b 中方框内区域)的夏季降水预测模型。

为了检验各预测模型的预测能力,分别计算华北地区、江淮地区以及华南地区区域平均的夏季降水距平百分率,给出检验期(2005~2014 年)预测

和实测的夏季降水距平百分率。如图 8a 所示,华北地区降水预测模型能够成功地再现 2005~2014 年期间华北夏季降水的略上升趋势,模型预测降水距平百分率的同号率为 9/10,在 2005、2006、2007 和 2008 年,预测值和实测值非常接近。江淮地区降水预测模型(图 8b)能够很好地呈现出 2005~2014 年期间该地区夏季降水的下降趋势,模型预测

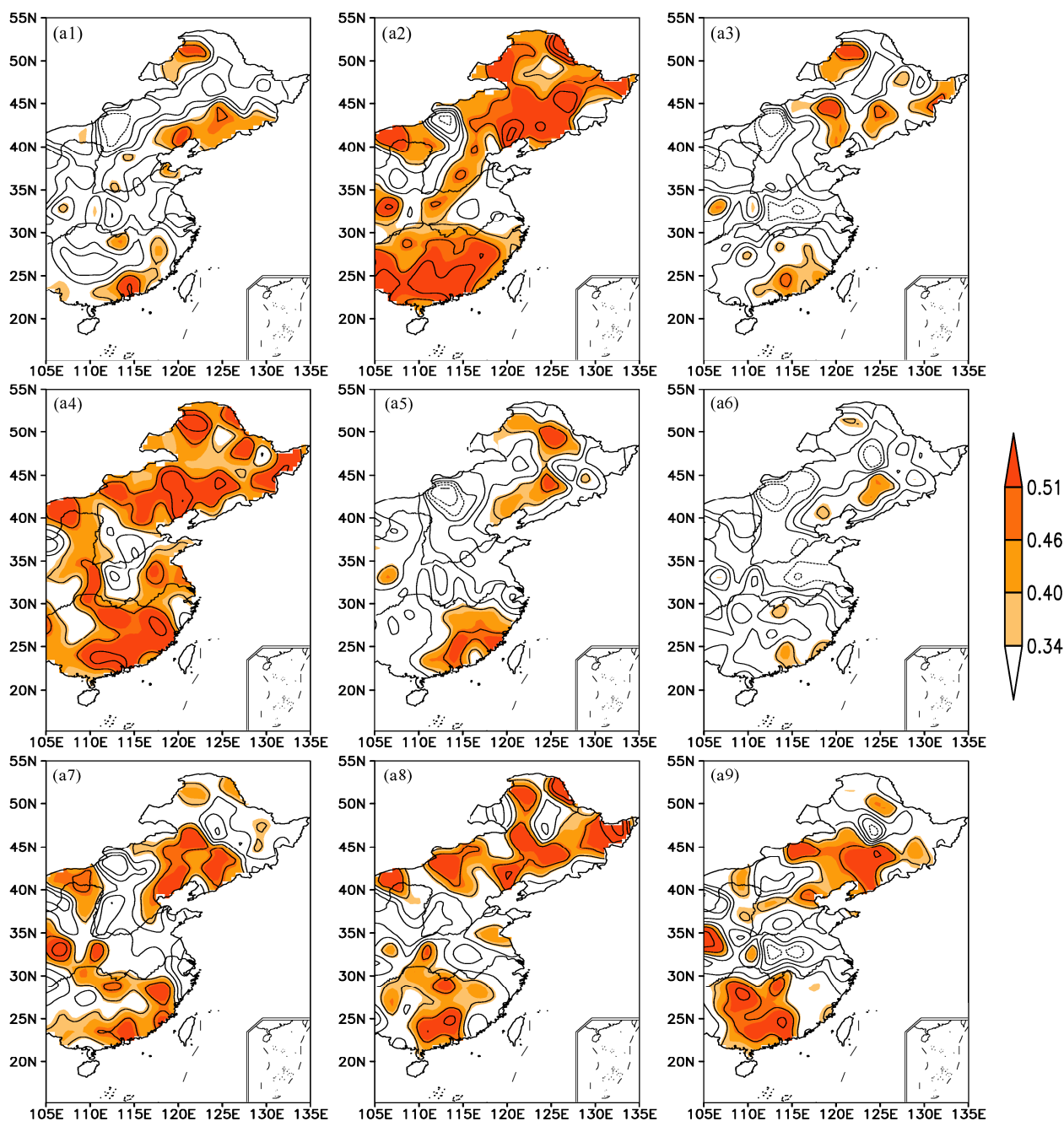


图 4 1980~2004 年我国东部夏季降水的单因子(S1-S9)预测模型得到的预测和实测降水场的相关系数分布(a1-a9)。阴影区域表示通过 90% 信度检验

Fig. 4 Geographical distribution of the correlation coefficients between the predicted and observed precipitation fields by the nine single factor (S1-S9) prediction models [labelled (a1) to (a9)] of summer precipitation in eastern China from 1980 to 2004. Correlations exceeding 90% confidence level are shaded

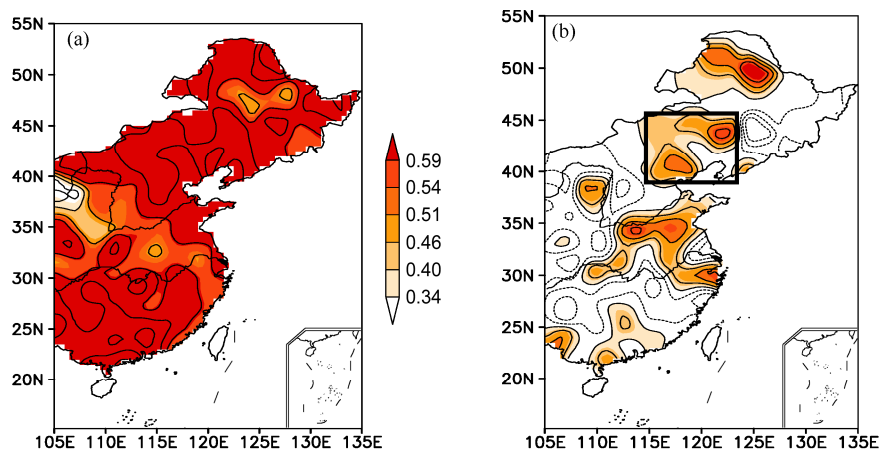


图5 集合 S1、S2、S8、S9 四个预测因子的 ECC 模型预测和实测降水场的相关系数分布：(a) 历史预测试验；(b) 独立样本预测试验

Fig. 5 Geographical distribution of the correlation coefficients between the predicted and observed precipitation fields by the Ensemble Canonical Correlation analysis (ECC) prediction model assembling four predictors (S1, S2, S8, and S9): (a) Historical prediction test; (b) independent sample test

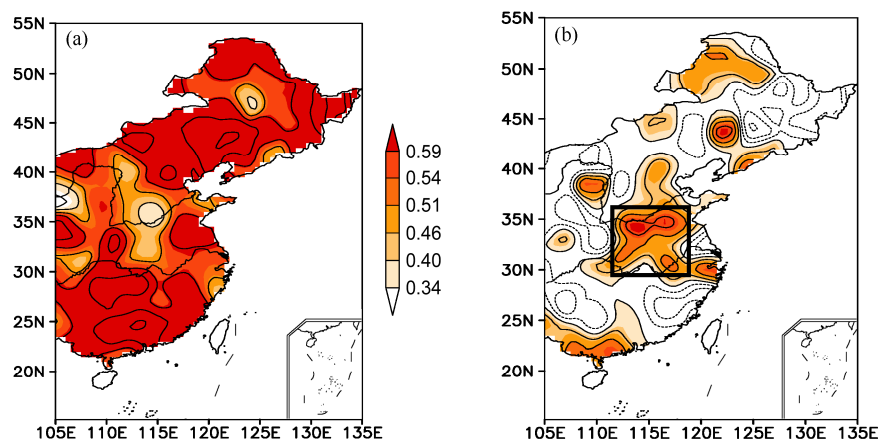


图6 集合 S3、S4、S8、S9 四个预测因子的 ECC 模型预测和实测降水场的相关系数分布：(a) 历史预测试验；(b) 独立样本预测试验

Fig. 6 Geographical distribution of the correlation coefficients between the predicted and observed precipitation fields by the ECC prediction model assembling four predictors (S3, S4, S8, and S9): (a) Historical prediction test; (b) independent sample test

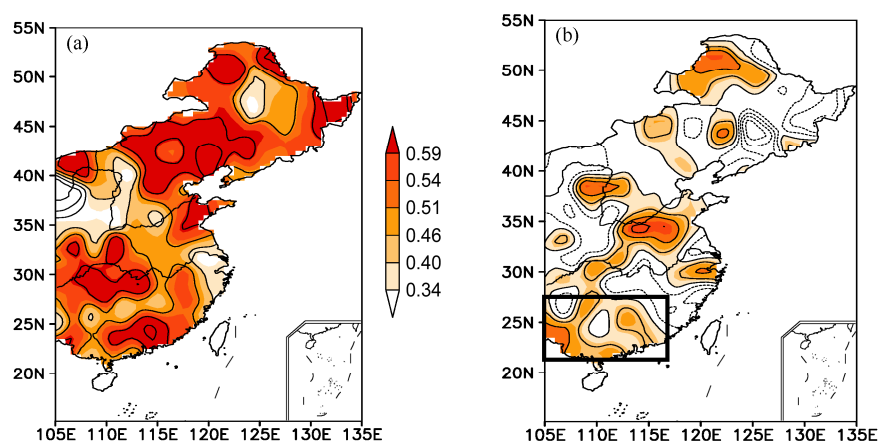


图7 集合 S1、S3、S8 三个预测因子的 ECC 模型预测和实测降水场的相关系数分布：(a) 历史预测试验；(b) 独立样本预测试验

Fig. 7 Geographical distribution of the correlation coefficients between the predicted and observed precipitation fields by the ECC prediction model assembling three predictors (S1, S3, and S8): (a) Historical prediction test; (b) independent sample test

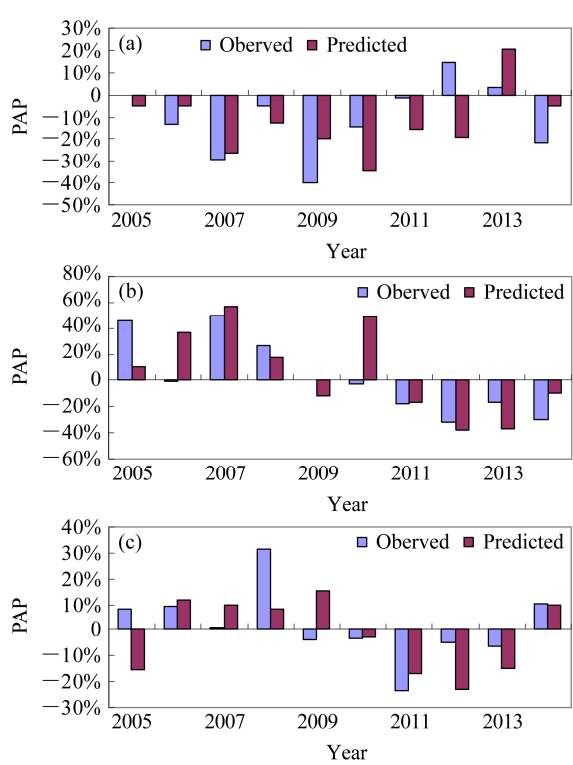


图 8 2005~2014 年 (a) 华北地区、(b) 江淮地区、(c) 华南地区的观测和预测的夏季降水距平百分率

Fig. 8 Time series of the observed and predicted summer precipitation anomaly percentage (PAP) in (a) North China, (b) the Yangtze-Huaihe region, and (c) South China, from 2005 to 2014

降水距平百分率的同号率为 7/10, 在 2007、2008、2011 和 2012 年, 预测值和实测值非常接近, 尤其是在 2011 年, 二者几乎相等。图 8c 为华南地区观测和预测的夏季降水距平百分率, 该模型预测出了华南夏季降水在 2005~2014 年期间的略下降趋势。模型预测降水距平百分率的同号率为 8/10, 在 2006、2010、2011 和 2014 年, 预测值和实测值非常接近, 尤其是在 2010 和 2014 年, 二者趋近于一致。

为了进一步评估三组集合预测模型的实际预测能力, 使用预测准确率 (P)、预测评分 (PS)、技巧评分 (SS) 和距平相关系数 (ACC) 四种预测评估方法, 对模型预测出的华北地区、江淮地区和华南地区 2005~2014 年的夏季降水分别计算预测评分, 表 1 列出了四项预测评分的十年平均值。对比这三组预测评分发现, 我国业务预测中常用的预测评分 (PS) 均超过 70 分, 国际上通用的距平相关系数 (ACC) 均为正值, 表明这三组集合预测模型对相应地区的夏季降水具有一定的预测能力。这

说明土壤湿度因子中含有对我国东部夏季降水有用的预测信号。

表 1 2005~2014 年三组集合预测模型对应的我国东部各区域夏季降水的预测评分的 10 年平均值

Table 1 Ten-year averaged prediction scores of summer precipitation in each region over eastern China by three ensemble prediction models from 2005 to 2014

地区	预测因子	预测准	预测	技巧	距平相
		确率	评分	评分	关系数
		(P)	(PS)	(SS)	(ACC)
华北地区	集合 S1、S2、S8、S9	63.8%	75.6	34.1%	0.04
江淮地区	集合 S3、S4、S8、S9	61.1%	76.8	29.3%	0.09
华南地区	集合 S1、S3、S8	57.2%	72.9	22.2%	0.14

6 结论

基于年际增量方法的预测思路, 通过对我国东部夏季降水年际增量与欧亚大陆土壤湿度年际增量的相关分析, 选取不同关键区的土壤湿度年际增量作为预测因子, 构建了我国东部夏季降水年际增量的预测模型, 进而对我国东部夏季降水进行预测。主要结论如下:

(1) 根据我国东部夏季降水年际增量 EOF 分析的前三个时间序列与欧亚大陆土壤湿度年际增量的相关关系, 选取了 9 个关键区的土壤湿度年际增量作为预测因子, 采用 BP-CCA 方法建立我国东部夏季降水年际增量的单因子预测模型, 并计算得到夏季降水的预测值。发现各关键区的预测因子对我国夏季降水和降水年际增量均表现出了一定的预测能力。

(2) 使用 ECC 方法对 9 个预测因子按照不同的组合方式建立集合预测模型并且评估预测效果, 从中筛选出三组最优的区域降水预测模型, 分别是针对华北地区、江淮地区和华南地区的夏季降水预测模型。华北地区夏季降水预测模型选取东欧平原、贝加尔湖以北地区、我国河套地区以及长江以南地区的土壤湿度作为预测因子; 江淮地区夏季降水预测模型选取巴尔喀什湖以北地区、我国西北地区、河套地区以及长江以南地区的土壤湿度作为预测因子; 华南地区夏季降水预测模型选取东欧平原、巴尔喀什湖以北地区以及我国河套地区的土壤湿度作为预测因子。

(3) 在 2005~2014 年独立样本预测试验中, 三组预测模型均显示出了较好的预测能力。模型预测出的降水变化趋势均与观测结果较为一致: 华北

地区降水预测模型预测降水距平百分率的同号率为 9/10, 而江淮地区及华南地区降水模型预测降水距平百分率的同号率分别为 7/10 和 8/10。对三组集合预测模型预测出的华北地区、江淮地区以及华南地区的夏季降水分别计算气候评分, 发现我国业务预测中常用的预测评分 (PS) 均超过 70 分, 国际上通用的距平相关系数 (ACC) 也均为正值, 表明这三组集合预测模型对相应地区的夏季降水具有一定的预测能力。

上述分析表明土壤湿度因子中含有对我国夏季降水有用的预测信号, 欧亚大陆不同区域的土壤湿度对我国夏季降水的预测具有一定的指示意义。所发展的三组集合预测模型对我国夏季降水具有一定的预测能力, 为土壤湿度因子应用于降水预测业务提供了一定的参考。另外, 年际增量方法的运用, 使影响降水的土壤湿度异常信号得到有效的放大, 有利于预测因子的确定和预测模型的建立, 这种通过预测降水年际增量进而预测降水的思路, 具有潜在的应用意义。

值得注意的是, 本文是对土壤湿度应用于降水预测业务的初步尝试, 因而仍然存在一些值得商榷的问题。模型的预测效果与关键区的选取是密不可分的, 本文最终所选取的土壤湿度关键区主要集中在中纬度地区, 根据左志燕和张人禾 (2007) 的研究, 这些关键区 4 月的土壤湿度异常信号也许能够持续到夏季, 土壤湿度的异常变化通过影响地表蒸发而使地表温度发生相应的变化, 从而改变海陆热力差异, 进一步影响中纬度的大气环流, 再进而对我国夏季降水产生影响。然而, 关于土壤湿度影响后期降水的非常明确的物理过程和机制还有待于进一步的研究。

参考文献 (References)

- 陈海山, 孙照渤. 2002. 陆气相互作用及陆面模式的研究进展 [J]. 南京气象学院学报, 25 (2): 277–288. Chen Haishan, Sun Zhaobo. 2002. Review of land atmosphere interaction and land surface model studies [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 25 (2): 277–288, doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2002.02.021.
- 陈海山, 周晶. 2013. 土壤湿度年际变化对中国区域极端气候事件模拟的影响研究 II. 敏感性试验分析 [J]. 大气科学, 37 (1): 1–13. Chen Haishan, Zhou Jing. 2013. Impact of interannual soil moisture anomaly on simulation of extreme climate events in China. Part II: Sensitivity experiment analysis [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37 (1): 1–13, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11048.
- Cook B I, Bonan G B, Levis S. 2006. Soil moisture feedbacks to precipitation in southern Africa [J]. J. Climate, 19 (17): 4198–4206, doi:10.1175/JCLI3856.1.
- 范可, 王会军, Choi Y J. 2007. 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, 52 (24): 2900–2905. Fan Ke, Wang Huijun, Choi Y J. 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:10.3321/j.issn:0023-074x.2007.24.014.
- 范可, 林美静, 高煜中. 2008. 用年际增量方法预测华北汛期降水 [J]. 中国科学, 38 (11): 1452–1459. Fan Ke, Lin Meijing, Gao Yuzhong. 2009. Forecasting the summer rainfall in North China using the year-to-year increment approach [J]. Science China Earth Sciences, 52 (4): 532–539, doi:10.1007/s11430-009-0040-0.
- 范可, 田宝强. 2013. 东北地区冬半年大雪—暴雪日数气候预测 [J]. 科学通报, 58 (8): 699–706. Fan Ke, Tian Baoqiang. 2013. Prediction of wintertime heavy snow activity in Northeast China [J]. Chinese Science Bulletin, 58 (12): 1420–1426, doi:10.1007/s11434-012-5502-7.
- Fan K. 2009. Predicting winter surface air temperature in Northeast China [J]. Atmos. Oceanic Sci. Lett., 2 (1): 14–17, doi:10.1080/16742834.2009.11446770.
- Fan K. 2010. A prediction model for Atlantic named storm frequency using a year-by-year increment approach [J]. Wea. Forecasting, 25 (6): 1842–1851, doi:10.1175/2010WAF2222406.1.
- Fan K, Wang H J. 2010. Seasonal prediction of summer temperature over Northeast China using a year-to-year incremental approach [J]. Acta Meteor. Sinica, 24 (3): 269–275.
- 高楚杰, 陈海山, 许蓓, 等. 2013. 南海海温和西南地区土壤湿度异常与中国东部夏季降水的可能联系 [J]. 热带气象学报, 29 (1): 75–82. Gao Chujie, Chen Haishan, Xu Bei, et al. 2014. Possible relationships among South China Sea SSTA, soil moisture anomalies in Southwest China and summer precipitation in eastern China [J]. J. Trop. Meteor. (in Chinese), 29 (1): 75–82, doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2013.01.009.
- 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 Meteor. Sinica (in Chinese), 70 (2): 202–212, doi:10.11676/qxxb2012.020.
- 郭维栋, 马柱国, 王会军. 2007. 土壤湿度——一个跨季度降水预测中的重要因子及其应用探讨 [J]. 气候与环境研究, 12 (1): 20–28. Guo Weidong, Ma Zhuguo, Wang Huijun. 2007. Soil moisture—An important factor of seasonal precipitation prediction and its application [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 12 (1): 20–28, doi:10.3969/j.issn.1006-9585.2007.01.003.
- 胡娅敏, 丁一汇, 廖菲. 2009. 土壤湿度资料同化对中国东部夏季区域气候模拟的改进 [J]. 科学通报, 54 (16): 2388–2394. Hu Yamin, Ding Yihui, Liao Fei. 2010. An improvement on summer regional climate simulation over East China: Importance of data assimilation of soil moisture [J]. Chinese Science Bulletin, 55 (9): 867–873, doi:10.1007/s11434-009-0285-1.
- 黄荣辉, 周德刚, 陈文, 等. 2013. 关于中国西北干旱区陆—气相互作用及其对气候影响研究的最近进展 [J]. 大气科学, 37 (2): 189–210. Huang Ronghui, Zhou Degang, Chen Wen, et al. 2013. Recent progress in

- studies of air–land interaction over the arid area of Northwest China and its impact on climate [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 37 (2): 189–210, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12303.
- Koster R D, Dirmeyer P A, Guo Z C, et al. 2004. Regions of strong coupling between soil moisture and precipitation [J]. *Science*, 305: 1138–1140, doi:10.1126/science.1100217.
- 李巧萍, 丁一汇, 董文杰. 2007. 土壤湿度异常对区域短期气候影响的数值模拟试验 [J]. *应用气象学报*, 18 (1): 1–11. Li Qiaoping, Ding Yihui, Dong Wenjie. 2007. A numerical study on effects of the soil moisture upon the regional short-term climate [J]. *J. Appl. Meteor. Sci.* (in Chinese), 18 (1): 1–11, doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2007.01.001.
- 李忠贤, 陈海山, 倪东鸿, 等. 2012. 土壤湿度对东亚夏季气候潜在可预报性影响的数值模拟 [J]. *大气科学学报*, 35 (4): 423–430. Li Zhongxian, Chen Haishan, Ni Donghong, et al. 2012. Numerical simulation of effect of soil moisture variability on potential predictability of summer climate over East Asia [J]. *Trans. Atmos. Sci.* (in Chinese), 35 (4): 423–430, doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2012.04.005.
- 梁乐宁, 陈海山. 2010. 春季华南土壤湿度异常与中国夏季降水的可能联系 [J]. *大气科学学报*, 33 (5): 536–546. Liang Lening, Chen Haishan. 2010. Possible linkage between spring soil moisture anomalies over South China and summer rainfall in China [J]. *Trans. Atmos. Sci.* (in Chinese), 33 (5): 536–546, doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2010.05.004.
- Liu L, Zhang R H, Zuo Z Y. 2014. Intercomparison of spring soil moisture among multiple reanalysis data sets over eastern China [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 119 (1): 54–64, doi:10.1002/2013JD020940.
- 马柱国, 魏和林, 符淙斌. 2000. 中国东部区域土壤湿度的变化及其与气候变率的关系 [J]. *气象学报*, 58 (3): 278–287. Ma Zhuguo, Wei Helin, Fu Congbin. 2000. Relationship between regional soil moisture variation and climatic variability over East China [J]. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 58 (3): 278–287, doi:10.11676/qxb2000.029.
- 毛恒青, 李小泉. 1998. 我国夏季降水与前期太平洋海温场关系的典型相关分析 [J]. *南京气象学院学报*, 21 (1): 130–137. Mao Hengqing, Li Xiaoquan. 1998. CCA study on relation between summer precipitation in China and previous Pacific SST [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 21 (1): 130–137.
- Namias J. 1958. Persistence of mid-tropospheric circulations between adjacent months and seasons [C]// Eyre S R. *The Rossby Memorial Volume*. Oxford: Rockefeller Institute Press and Oxford University Press, 240–248.
- North G R, Bell T L, Cahalan R F, et al. 1982. Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal functions [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 110: 699–706, doi:10.1175/1520-0493(1982)110<0699:SEITEO>2.0.CO;2.
- Rowntree P R, Bolton J A. 1983. Simulation of the atmospheric response to soil moisture anomalies over Europe [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 109 (461): 501–526, doi:10.1002/qj.49710946105.
- Schär C, Lüthi D, Beyerle U, et al. 1999. The soil–precipitation feedback: A process study with a regional climate model [J]. *J. Climate*, 12 (3): 722–741, doi:10.1175/1520-0442(1999)012<0722:TSPFAP>2.0.CO;2.
- Shukla J, Mintz Y. 1982. Influence of land-surface evapotranspiration on the earth's climate [J]. *Science*, 215 (4539): 1498–1501, doi:10.1126/science.215.4539.1498.
- 孙承虎, 李维京, 张祖强, 等. 2005. 淮河流域土壤湿度异常的时空分布特征及其与气候异常关系的初步研究 [J]. *应用气象学报*, 16 (2): 129–138. Sun Chenghu, Li Weijing, Zhang Zuqiang, et al. 2005. Distribution and variation features of soil humidity anomaly in Huaihe River basin and its relationship with climatic anomaly [J]. *J. Appl. Meteor. Sci.* (in Chinese), 16 (2): 129–138, doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2005.02.001.
- Walker J, Rowntree P R. 1977. The effect of soil moisture on circulation and rainfall in a tropical model [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 103 (435): 29–46, doi:10.1002/qj.49710343503.
- 王蕾, 张人禾, 黄嘉佑. 2004. 春季海温对中国夏季降水影响的诊断研究和预测试验 [J]. *气象学报*, 62 (6): 851–859. Wang Lei, Zhang Renhe, Huang Jiayou. 2004. Diagnostic analyses and hindcast experiments of spring SST on summer precipitation in China [J]. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 62 (6): 851–859, doi:10.11676/qxb2004.081.
- 王万秋. 1991. 土壤温湿异常对短期气候影响的数值模拟试验 [J]. *大气科学*, 15 (5): 115–123. Wang Wanqiu. 1991. Numerical experiments of the soil temperature and moisture anomalies' effects on the short term climate [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 15 (5): 115–123, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1991.05.14.
- 魏凤英, 黄嘉佑. 2010. 大气环流降尺度因子在中国东部夏季降水预测中的作用 [J]. *大气科学*, 34 (1): 202–212. Wei Fengying, Huang Jiayou. 2010. A study of downscaling factors of atmospheric circulations in the prediction model of summer precipitation in eastern China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 34 (1): 202–212, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2010.01.19.
- 吴洪宝, 吴蕾. 2005. 气候变率诊断和预测方法 [M]. 北京: 气象出版社, 148–149. Wu Hongbao, Wu Lei. 2005. *Methods for Diagnosing and Forecasting Climate Variability* [M]. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese), 148–149.
- Yeh T C, Wetherald R T, Manabe S. 1984. The effect of soil moisture on the short-term climate and hydrology change—A numerical experiment [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 112: 474–490, doi:10.1175/1520-0493(1984)112<0474:TEOSMO>2.0.CO;2.
- 詹艳玲, 林朝晖. 2012. 6月长江中下游降水和春季东亚季风区土壤湿度的关系 [J]. *气象学报*, 70 (2): 236–243. Zhan Yanling, Lin Zhaohui. 2011. The relationship between June precipitation over mid–lower reaches of the Yangtze River basin and spring soil moisture over the East Asian monsoon region [J]. *Acta Meteor. Sinica*, 25 (3): 355–363, doi:10.11676/qxb2012.023.
- 张文君, 周天军, 宇如聪. 2008. 中国土壤湿度的分布与变化 I. 多种资料间的比较 [J]. *大气科学*, 32 (3): 581–597. Zhang Wenjun, Zhou Tianjun, Yu Rucong. 2008. Spatial distribution and temporal variation of soil moisture over China. Part I: Multi-Data intercomparison [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 32 (3): 581–597, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2008.03.15.
- 张文君, 周天军, 智海. 2012. 土壤湿度影响中国夏季气候的数值试验 [J]. *气象学报*, 70 (1): 78–90. Zhang Wenjun, Zhou Tianjun, Zhi Hai. 2012. A numerical experiment on the effect of soil moisture to summer climate over China [J]. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 70 (1): 78–90, doi:10.11676/qxb2012.007.
- Zhang R H, Zuo Z Y. 2011. Impact of spring soil moisture on surface energy balance and summer monsoon circulation over East Asia and precipitation

- in East China [J]. *J. Climate*, 24 (13): 3309–3322, doi:10.1175/2011JCLI4084.1.
- 周晶, 陈海山. 2012. 土壤湿度年际变化对中国区域极端气候事件模拟的影响研究 I. 基于 CAM3.1 的模式评估 [J]. *大气科学*, 36 (6): 1077–1092. Zhou Jing, Chen Haishan. 2012. Impact of interannual soil moisture anomaly on simulation of extreme climate events in China. Part I: Model evaluation of CAM3.1 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 36 (6): 1077–1092, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11047.
- 朱蒙, 陈海山, 蒋薇, 等. 2014. 陆面热力因子应用于中国夏季降水预测的初步试验 [J]. *气象学报*, 72 (6), 1135–1142. Zhu Meng, Chen Haishan, Jiang Wei, et al. 2014. A preliminary test of the summer rainfall prediction in China based on the land surface thermal factors [J]. *Acta Meteor. Sinica (in Chinese)*, 72 (6): 1135–1142, doi:10.11676/qxxb2014.062.
- Zhu Y L. 2011. A seasonal prediction model for the summer rainfall in Northeast China using the year-to-year increment approach [J]. *Atmos. Oceanic Sci. Lett.*, 4 (3): 146–150, doi:10.1080/16742834.2011.11446920.
- 左志燕, 张人禾. 2007. 中国东部夏季降水与春季土壤湿度的联系 [J]. *科学通报*, 52 (14): 1722–1724. Zuo Zhiyan, Zhang Renhe. 2007. The spring soil moisture and the summer rainfall in eastern China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 52 (23): 3310–3312, doi:10.1007/s11434-007-0442-3.