

时空投影模型(STPM)的次季节至季节(S2S)预测应用进展



通信作者简介:徐邦琪,教授/博士生导师。长期致力于延伸期天气预报理论与方法的研究,国家重点研发计划项目首席科学家,江苏省特聘教授。在季节内振荡动力机理、季节内振荡和天气尺度系统相互作用、延伸期预报方法与模型研制方面取得了一系列创新性研究成果。迄今发表SCI学术论文40余篇,专著两部。根据Google Scholar,论文总计被SCI引用1100余次。

徐邦琪^{①*},臧钰歆^①,朱志伟^①,李天明^{①②}

① 南京信息工程大学 气象灾害教育部重点实验室/气候与环境变化国际联合实验室/气象灾害预报预警与评估协同创新中心,江苏 南京 210044;

② 夏威夷大学马诺阿分校 大气科学学院 国际太平洋研究中心,檀香山 夏威夷 96822

摘要 随着数值天气预报技术和季节动力预报系统的发展,短期天气预报及长期气候预测的能力持续提高,然而介于两者之间的次季节至季节(S2S,两周至三个月)预测技巧偏低,成为当今气象学界和业务服务的难题。南京信息工程大学国家特聘专家李天明教授团队于2012年研发了基于时空投影技术的统计预报模型(STPM),成功地对中国大陆降水和气温距平,以及区域极端降水、夏季高温、冬季低温和西太平洋台风群发事件等高影响天气进行提前10~30 d的预报,并在国家气候中心及多个省份开展了业务应用。STPM也成功应用于台湾春雨预报、南海季风爆发和ENSO预测等季节至年际变化的预测。本文对S2S预测的理论基础、STPM的发展和进行了完整的介绍,并讨论了S2S预测业务中所面临的挑战和未来展望。

关键词 时空投影模型(STPM);次季节至季节(S2S)预测;延伸期天气预报;可预报性来源;极端天气

我国位于东亚季风区,天气和气候系统复杂多变,气象灾害频发,提高极端天气过程的预测准确率和预报时效是我国气象业务上的一大任务和挑战,也是保障国家社会经济发展和人民安全的迫切需求。随着数值天气预报技术和季节动力预报系统的发展,灾害天气的中短期(数小时至两周)确定性预报及气候(三至六个月)概率预测能力持续提高。然而,介于两者之间的次季节(或“延伸期”)预报能力薄弱,从而限制了无缝隙天气-气候预报系统的发展(Brunet et al., 2010; 丑纪范等, 2010; 丁一汇和梁萍, 2010; Lau et al., 2011; Vitart et al., 2017; Pegion et al., 2019)。了解延伸期预报的可预报性来源和提高灾害天气的次季节尺度预报能力,是近十年国际上前沿的难点问题(Vitart and Robertson, 2019)。

为了填补天气和气候预报之间的间隙,世界气象组织(WMO)下设的世界天气研究计划(WWRP)和世界气候研究计划(WCRP)于2011年联合发起了次季节至季节(subseasonal-to-seasonal, S2S)预测计划(Vitart et al., 2017),主要目标为建立S2S多模式数据库,重点研究高影响天气次季节预测的潜在可预报性,提高数值预报模式对未来两周至三个月内的天气预报能力。S2S计划自2013年11月正式启动,为期5 a(2013—2018年)的第一期(phase I)计划已完成了全球

* 联系人, E-mail: pangchi@nuist.edu.cn

2019-10-28 收稿, 2019-11-20 接受

国家重点研发计划资助项目
(2018YFC1505804)

引用格式:徐邦琪,臧钰歆,朱志伟,等,2020.时空投影模型(STPM)的次季节至季节(S2S)预测应用进展[J].大气科学学报,43(1):212-224.

Hsu P C, Zang Y X, Zhu Z W, et al., 2020. Subseasonal-to-seasonal (S2S) prediction using the spatial-temporal projection model (STPM) [J]. Trans Atmos Sci, 43(1):212-224. doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20191028002. (in Chinese).

11家业务预报模式的次季节回报试验和实时预报数据平台的建设,评估了S2S模式对高影响天气的预报能力,发现热带季节内振荡(MJO)及其遥相关、平流层信号、海陆气相互作用等过程对次季节预报能力的影响。为了进一步拓展次季节预报产品在社会经济领域的应用,加强对S2S可预报性来源的挖掘,持续改进并提高次季节预报能力,WMO S2S计划任务组于2019年开展为期5a的第二期(phase II)研究计划。美国近年也组织了多模式次季节预报试验(subseasonal experiment, SubX)计划(Pegion et al., 2019),共有8家来自美国和加拿大的业务和研究机构研发的全球模式参与,提供1999—2015年共17a的回报试验数据,以及不小于18个月的实时预报试验产品,其主要强调多模式集合预报策略对次季节尺度预报的改进,并加强科研向业务(research-to-operation, R2O)的转化。

次季节预报的难点主要在于可预报性来源的匮乏(Lau et al., 2011; Vitart et al., 2017; Pegion et al., 2019)。中短期天气预报主要是初值问题,逐日预报的可预报性上限为10~14d(Lorenz, 1963);而季节到年际尺度气候预测对大气而言主要是边值问题,主要来自下垫面(海洋、海冰、陆面)的强迫。介于天气与气候之间的次季节尺度预报既是初值问题、又是边值问题,因此更加复杂。但因为大气初始信息的贡献在延伸期尺度上已很大程度地衰减,然而下垫面信号的作用却还显现得不够充分,所以亟需寻求更多的潜在可预报性来源(Vitart et al., 2017; Pegion et al., 2019; 章大全等, 2019)。

许多研究(毛江玉和吴国雄, 2005; Zhang, 2005; 温之平等, 2006; Jia et al., 2011; 李崇银等, 2013; Hsu et al., 2016)已指出大气季节内振荡(MJO或ISO)与天气和气候系统之间相互作用密切,其活动(传播、强度和位相演变)对天气和气候有重要的影响,因此MJO/ISO是次季节预报的主要可预报性来源之一(Brunet et al., 2010; Lau et al., 2011)。我国学者已尝试基于季节内低频异常信号与天气系统变化的统计关系和相关的物理过程,建立适用于不同区域降水和气温的延伸期统计预报方法(孙国武等, 2013; 杨秋明, 2014, 2018; 陈官军等, 2017),并取得了一定的成效。传统的统计预报方法往往利用前期某个时段(例如:前一句或前一个月)及某些特定区域(例如:区域平均)的大尺度异常信号作为预报因子,对未来某个时段、某个区域的天气要素进行预报。由于前期先兆信号可能起源于不同区域,且这

些大尺度异常信号往往经过时间演变和空间传播,进而影响局地的天气现象,若采用特定时间、固定区域的大尺度场作为预报因子,可能会忽略了大尺度场随时间和空间演变过程中可提供的重要可预报性来源,造成预报能力的偏低和不稳定(Hsu et al., 2012)。因此,南京信息工程大学国家特聘专家李天明教授团队于2012年提出了基于空间-时间投影技术(spatial-temporal projection method)的统计预报模型(STPM),STPM考虑了大尺度预报因子和预报场之间时空演变的耦合关系(Hsu et al., 2012),有效地提高了我国降水、气温、灾害天气事件和季风爆发的S2S预测技巧(Hsu et al., 2015; Zhu et al., 2015; Zhu and Li, 2017a, 2017b, 2017c, 2018; Zhu et al., 2017),目前已成为国家气候中心业务预报系统之一。

本文将较全面地回顾和介绍S2S预报理论和STPM的预报应用进展。第一节首先介绍S2S主要可预报性来源和预报理论;第二节对STPM的方法和原理进行详细介绍,包括在实时业务应用中用来有效提取低频先兆信号的非传统带通滤波方法;接下来给出STPM在次季节(第三节)和季节-年际(第四节)尺度预报的实例;第五节综合讨论STPM在S2S预报业务中的局限性,以及S2S预报的挑战和展望。

1 S2S可预报性来源和预报理论基础

如前所述,短期天气预报和长期气候预测的主要可预报性来源分别为大气的初值和边值状态。然而,S2S预测主要关注未来两周至三个月的预报,对这个时间尺度(即次季节或延伸期)的预报而言,大气的初始信息在不断衰减,外强迫的下垫面作用仅开始显现,因此,气象学家不断努力地在找寻和挖掘次季节预报的潜在可预报性来源(National Academy of Sciences, 2010; Lau et al., 2011; 郑志海等, 2013; Vitart et al., 2017; 章大全等, 2019),当今气象学家一般认为S2S的可预报性来源不仅限于大气中的次季节尺度信号,其他时间尺度的信号也可能影响S2S预测能力,且除了大气内部变率,地球系统中其他圈层(海洋、陆面、冰雪圈)过程也可提供S2S可预报性来源。关于S2S的可预报性来源大致包含以下三类:

第一类为大气中具有S2S时间尺度特征的准周期性模态变率(modes of variability),例如:季节内振荡(MJO/ISO)、ENSO、平流层准两年振荡、印

度洋偶极子等。其中, MJO/ISO 具有 10~90 d 变率周期 (Madden and Julian, 1971, 1994), 正好介于天气变化 (<10 d) 和季节平均状态 (90 d) 之间, 其周期性振荡被认为是次季节预报的重要可预报性来源 (Zhang, 2005; Lau et al., 2011)。MJO/ISO 的对流和环流在传播的过程中, 可能与全球不同区域的天气或气候系统产生交互作用, 例如: 热带海洋上季节内振荡处于活跃相位时, 热带气旋生成数目较多且强度较强 (Maloney and Dickinson, 2003; Li and Zhou, 2013; Zhou et al., 2018); 季节内振荡影响全球季风的建立与活动, 亚洲、澳洲、美洲、非洲季风降水均具有明显的季节内尺度周期 (Annamalai and Slingo, 2001), 亚洲季风区夏季 ISO 对流的北移有利于华南和江淮地区的暴雨发生 (Zhu et al., 2003; Ren et al., 2013), 其相位变化与江淮流域旱涝发生紧密关联 (Yang and Li, 2003; Hsu et al., 2016)。虽然 MJO/ISO 活跃于热带地区, 但其深对流所激发的波列可向中高纬度传播, 继而引发热带与中高纬度天气变化的遥相关联 (Stan et al., 2017); 而中高纬度季节内振荡信号往往与寒潮活动有关, 比如 2008 年我国南方持续性低温雨雪冰冻灾害的发生即是中高纬 ISO 与热带 MJO 相互作用的结果 (Hong and Li, 2009)。因此, 深入了解 MJO/ISO 对不同地区天气变化的调控过程和机理, 改进数值模式模拟和预报 MJO/ISO 的能力, 是提升次季节预报的关键途径 (Vitart et al., 2017; Pegion et al., 2019)。

第二类为地球系统中较缓变的过程, 包括: 上层海洋热容量、海冰、雪盖、土壤湿度和温度等 (National Academy of Sciences, 2010; Vitart et al., 2017; Pegion et al., 2019)。这些具有较高持续性的缓变异常信号可以“记忆”初始的异常状态, 并影响系统内部接下来的发展和演化特征。Koster et al. (2011) 和 Thomas et al. (2016) 的研究发现, 土壤湿度和温度的记忆可持续数周, 进一步通过影响蒸发和地表能量平衡状态, 导致气温和降水的变化, 因此数值模式中对土壤状态初始化过程的处理, 会对气温和降水的 S2S 预报产生一定的影响。

第三类则为外部强迫产生的可预报性, 例如: 太阳入射辐射的变化、人为排放的气溶胶、火山喷发事件等。这些外强迫因子对长期气候变化的影响显著 (Stocker et al., 2013), 但目前对于其在 S2S 预报尺度的贡献所知甚少。Tian et al. (2011) 指出, 气溶胶异常对 MJO 产生明显的调制作用, 因而通过 MJO 异常环流的活动, 可能进一步影响气象要素的次季

节预报技巧。WMO S2S 项目的第二期计划中也特地增设了大气成分对 S2S 预测影响的子课题研究。

2 STPM 方法介绍

统计预报模型通常基于大尺度信号 (预报因子) 与气象要素 (预报量) 的统计关联, 利用预报前期的大尺度预报因子, 对未来的降水和气温等气象要素进行预报。传统的统计预报模型针对不同预报时次进行建模, 预报因子为前期某个时间 (或某个时段平均、某个区域平均) 的大尺度变量, 但考虑到前期大尺度信号和未来气象要素在时间和空间上不断演变, 若采用某个时间或空间平均的预报因子, 可能会损失许多有用的预报信息。时空投影模型 (STPM) 与传统统计预报方法最大的差异在于 STPM 采用了预报因子和预报量在时间和空间演化 (即时间和空间函数) 的耦合模态进行建模和预报。根据提取预报因子和预报量时空耦合模态的方法不同, 本文将介绍两种不同的 STPM 预报模型 (Hsu et al., 2012; Hsu et al., 2015)。

第一种 STPM (STPM1, 图 1a) 是基于扩展奇异值分解法 (E-SVD) 提取预报因子和预报量时空演变的耦合模态, 预报因子 (X) 为预报时次 (t) 前期随时间演变的大尺度场, 因此 X 为空间 (i, j) 和时间 (n, n 代表 t 之前的 n 个时次) 的函数, 预报量 (Y) 同样也可以是空间和时间的函数 (m 可以代表不同的空间和时间维度, 例如: 未来 6 候的中国降水分布, 或未来 12 个月的 Niño3.4 指数等等)。建模时期 (图 1 中黑实线箭头的步骤), 利用 SVD 分析, 得到 Y 和 X 的前 K 个耦合模态 (U_k 和 V_k) 和相应的时间序列 (u_k 和 v_k), 接着进行回报试验, 将预报时次前期大尺度场 X 投影到 V_k 上, 可以得到 v_k , 由于 SVD 提取的是高度耦合模态, u_k 和 v_k 的变化高度相似, 因此可以用 v_k 取代 u_k 来重建 Y , 即利用 v_k 与 U_k 的乘积加总, 可求得预报量 Y 。预报模型的 K 值可采用累计解释方差足够大 (例如: 70% 以上) 的前 K 个模态, 或是基于回报试验进行交叉检验可确定具有最佳预报技巧的前 K 个模态。实时预报 (图 1 中绿虚线箭头的步骤) 时, 同样是将预报时次 t_p 前期的 X_p 投影至 V_k 上, 再利用 v_k 与 U_k 的乘积加总, 可求得预报量 Y_p 。此外, X 可为多个不同的大尺度场 (潜在预报因子), 利用建模时期回报试验的交叉检验, 亦可明确哪些潜在预报因子具有较佳预报能力, 实时预报时, 即可保留这些较佳预报因子进行预报, 将期预报结果进行最优集成 (optimal ensemble), 以

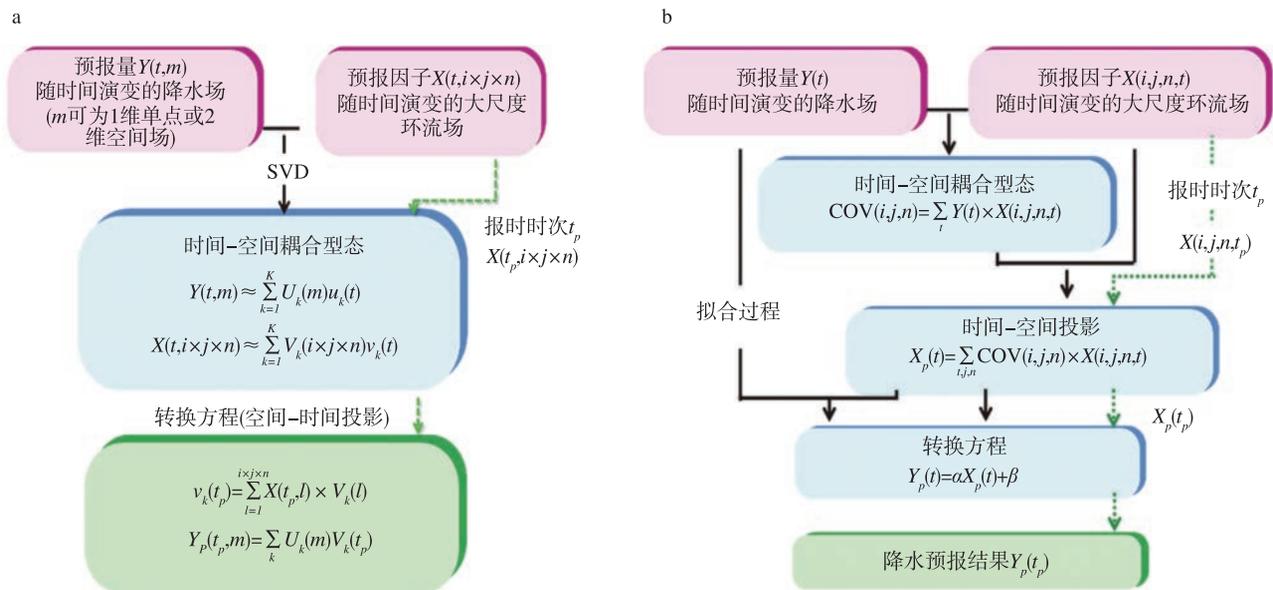


图1 两种 STPM 预报的主要步骤(STPM1 预报模型是基于 SVD 分析来提取预报量和预报因子的时间-空间耦合信息特征,并建立预报方程(X 和 Y 分别为标准化的大尺度预报因子和预报量, i 和 j 为空间格点, t 为时间, $n(m)$ 分别为 t 之前(之后)的超前(滞后)候, K 为所取的前 K 个的 SVD 模式, U_k 和 V_k 为预报量和预报因子的奇异向量, u_k 和 v_k 则为对应的时间系数;黑色实线箭头代表建模流程,绿色虚线箭头为 t_p 时次的预报流程。STPM2 类似 STPM1,但预报模型是基于斜方差(covariance, COV)来提取预报量和预报因子的时间-空间耦合模式, X_p 为大尺度预报因子对 COV 的投影,再利用多元线性回归建立转换/预报方程。详细步骤及说明请见参考文献 Hsu et al. (2012) 及 Hsu et al. (2015)): (a) STPM1; (b) STPM2

Fig.1 Major steps of the two types of STPM prediction. (a) The STPM1 prediction model is constructed using the spatial-temporal coupled modes of predictors and predictand derived from the SVD analysis. X and Y are the normalized predictor and predictand, respectively. i and j denote the spatial grids, t is time, and $n(m)$ indicates the preceding (succeeding) $n(m)$ pentads before (after) time t . K is the total number of SVD modes. U_k and V_k denote the singular vectors of predictor and predictand, respectively. u_k and v_k indicate the time series of the expansion coefficient of the k th SVD mode for the predictor and predictand, respectively. The solid black arrows indicate the developing procedures of STPM1. The forecast procedures at time t_p are denoted by green dashed arrows. (b) Similar to STPM1, but the spatial-temporal coupled modes in STPM2 are derived from the covariance analysis (COV). The coupled pattern projection (X_p) is obtained by multiplying the covariance field with each predictor. The transfer function is constructed with a linear regression method. See text for more detailed information. Adopted from Hsu et al. (2012) and Hsu et al. (2015)

获得最终预报产品。

第二种 STPM (STPM2, 图 1b) 同样是基于预报因子和预报量时空演变的耦合变化来进行预报,但 STPM2 是挑选 X 和 Y 高度相关的所有格点来进行协方差(covariance, COV)分析,建立 X 与 Y 的耦合信息。同样地,将 X 投影在 COV 可得到一个系数 X_p ,利用建模时期得到的 X_p 和 Y 建立回归方程。实时预报时,将 t_p 时次的 X 投影到 COV 上,再把 X_p 代入回归方程,则可得到 t_p 时次的 $Y(Y_p)$ 。Hsu et al. (2012) 比较了采用固定时间的预报因子和考虑了随时间演化的预报因子,两者对台湾春雨预报技巧的影响(图 2)。由图可见,采用单一月份大尺度场作为 STPM2 的预报因子,得到的春雨预报技巧极

不稳定,而考虑了预报因子随时间的演变,预报技巧不仅提高许多,预报能力也相当稳定,可见大尺度场的时空演变信息对预报技巧和稳定性的提升有较大帮助。

次季节预报往往使用大尺度场的低频信号作为预报因子,但是带通滤波会损失边界信息,在实时业务预报中不宜作为提取低频信号的工具。Hsu et al. (2015) 提出了一种“非传统带通滤波”提取大气低频信号的方法。该方法首先从原始数据中去除缓变的年循环及更长周期的分量,再利用滑动平均去除超低频及天气尺度高频分量等步骤,最后保留季节内尺度的分量。通过“非传统带通滤波”方法得到的季节内尺度分量与带通滤波高度一致,以福建强

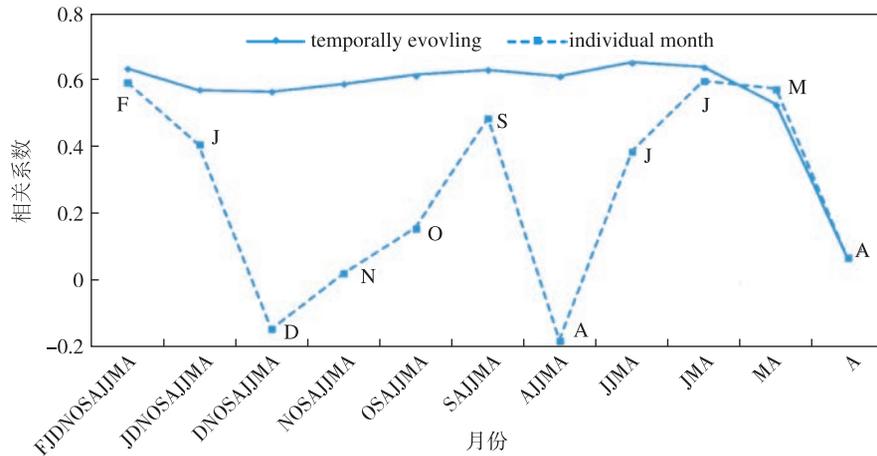


图2 STPM2对台湾地区春雨的时间相关系数预报技巧(实线为采用随时间演变的大尺度预报因子(925 hPa 纬向风)的预报技巧;横轴代表使用的月份信息(例如:JJMA 为采用前一年4月演变到7月的大尺度信息);虚线为采用单月份预报因子(例如:A 代表采用4月的大尺度信息)的预报技巧,采用的月份标注在虚线旁)(Hsu et al.,2012)

Fig.2 STPM2 forecast skills measured by the TCC between predicted and observed MAM rainfall in Taipei for a temporally evolving predictor (solid line) and an individual month predictor (dashed line). Here, the predictor is a 925 hPa zonal wind field. The letters on the x-axis indicate the preceding months used in the STPM. For example, JJMA indicates that the predictor includes information from April to July in the previous year. The letters shown along the dashed line indicate the specific month used in the rainfall forecast. Adopted from Hsu et al. (2012)

降水指数为例,时间相关系数达到 0.83,低频大尺度场的空间相关系数均高于 0.7(图 3),可知此“非传统带通滤波”能有效获取预报因子的低频分量,并获得良好的实时预报效果。

3 STPM 次季节预报应用

3.1 中国地区降水的延伸期(10~30 d)预报

中国南方的暖季降水往往受到热带 MJO(水汽输送)和中高纬 ISO(大尺度背景环流场)的调控,呈现低频的特征。Hsu et al. (2015) 和 Li et al. (2016) 利用南方降水发生前期的热带和中高纬低频信号演变作为预报因子,对华南春季降水和前汛期降水分别进行 STPM 建模,进行回报试验。结果显示,STPM 对华南地区春季和前汛期降水的预报时效可达 25~30 d。然而,STPM 延伸期预报技巧依赖于预报因子(MJO/ISO)信号的强弱,Li et al. (2016) 指出,在 MJO 活跃期间,STPM 对华南春雨的预报技巧较高,且较稳定。

Zhu and Li (2017b) 进一步将 STPM 应用于整个中国大陆的降水延伸期预报业务中。中国幅员辽阔,受到不同气候系统的影响,考虑到影响不同区域降水的低频信号来源可能不同,Zhu and Li (2017b) 利用旋转经验正交函数分解(EOF)方法,将全国

范围内具有一致季节内变率的站点划分为十个不同子区域(图 4a),再针对不同区域分别寻找前期预报因子、确定预报因子的投影区域,建立 STPM,最后将不同区域季节内降水变率的预报结果进行整合。独立预报检验表明,全国大部分区域预报技巧可持续 20 d 以上(预报实例如图 4b 所示)。此方法已在国家气候中心业务化,实时发布未来 10~30 d 全国范围的降水预报结果。

3.2 极端气温事件的次季节预报

在全球变暖的背景下,极端天气事件频发,这些持续时间长、影响范围大的强降水和高、低温事件往往与大气季节内振荡活动有关。利用影响中国夏季 10~80 d 季节内地表气温的潜在预报因子,其中包括来自欧洲、东北亚及热带太平洋等地区的低频大尺度环流异常信号,STPM 能够提前 30 d 预报出全国大部分地区 30~80 d EOF 滤波后的地表气温异常,并能够提前 15 d 预报超过 30% 以上的热浪事件(Zhu and Li, 2018)。对于中国大陆冬季气温预报,提前 5~30 d 预报的有效空间相关技巧都高于 60% (图 5a)。中国大部分地区 30% 以上的极端低温事件可以成功预报,图 5b 给出南京单站预报实例(Zhu and Li, 2017c)。

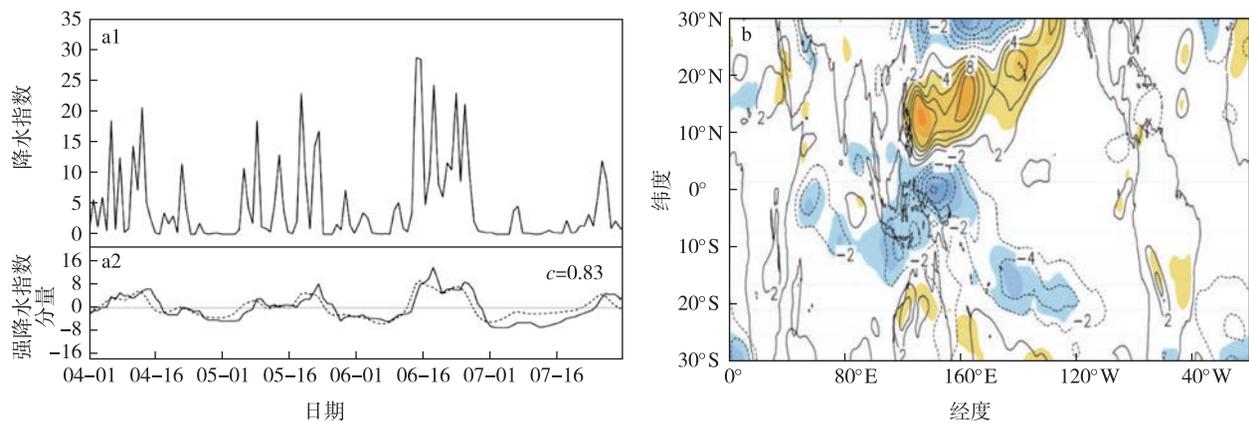


图3 2010年4—7月福建强降水指数时间序列及通过非传统带通滤波(实线)和 Butterworth 带通滤波(虚线)的10~60 d 强降水指数分量(a;相关系数0.83);2013年12月1日的10~60 d 850 hPa 纬向风场(b,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;阴影和等值线分别为带通滤波和非传统带通滤波提取的信号)(Hsu et al.,2015)

Fig.3 (a)The heavy rainfall index in April—July 2010 is shown in the top panel.The bottom panel shows 10—60 days heavy rainfall signals extracted from the non-filtering method (solid curve) and the Butterworth band-pass filtering (dashed curve).The correlation coefficient between the two different time series is shown in the upper-right corner. (b) Intraseasonal (10—60 d) U_{850} (unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) derived from the band-pass filtering (shaded) and non-filtering method (contoured) on an arbitrary day (Dec.1,2013).Adopted from Hsu et al.(2015)

3.3 台风的次季节预报

台风是发生在热带及副热带洋面上的强低压系统,台风过境时常带来狂风暴雨天气,引起海面巨浪,严重威胁航海安全。台风登陆后带来的风暴可能摧毁庄稼、各种建筑设施等,造成人民生命、财产的巨大损失。台风的短期预报和气候预测系统在业务单位已发展得较为成熟,而热带气旋发生的延伸期尺度预报一直是业务空白。Zhu et al. (2017)研究了热带低频信号的时空演变对西北太平洋台风群发(图6a)的影响机制,并进一步利用STPM对台风群发指数进行提前10~30 d的预报。针对54个台风群发事件的回报试验结果显示,STPM成功地提前10(20) d 预报出80%(69%)的台风群发事件(图6b)。

4 季节至年际预报应用

4.1 台湾春雨预报

冬季为台湾的干季,在每年五月中下旬梅雨季来临前,春雨(3至5月降水)可舒缓干季水资源的匮乏,因此春雨降水量预报对台湾地区水资源分配有着重大的指示意义。早期研究(Chen et al.,2003; Jiang et al.,2003)已经指出,台湾春雨除了受到ENSO及其相关的菲律宾反气旋影响外,也与中纬度锋面系统、副热带高压等系统的变化有关。Hsu et al.(2012)利用前11个月(前一年春季、夏季、秋

季至冬季)的海温、低层水汽和大气低、中、高层环流场的演变过程与台湾春雨量寻找协同变化的特征,基于STPM进行统计预报。1979—2010年春雨预报的交叉检验结果显示,其与观测春雨量的时间相关系数达0.6,降水量级的预报误差(均方根误差)约为0.8个标准差。

4.2 南海季风爆发的预报

南海夏季风(SCSSM)的建立标志着东亚雨季的开始,SCSSM爆发日期的预测在业务上十分重要。Zhu and Li(2017b)分别从季节预报和延伸期预报的角度,来建立物理-经验模型(physical-empirical model,PEM)和时空投影模型(STPM),对SCSSM爆发日期进行S2S预测。PEM是基于逐步多元回归模型,选择的大尺度预报因子为:西伯利亚地区的中低层大气的温度趋势(3月减1月的850至500 hPa积分的气温场)、3月的热带太平洋纬向海温差值、南半球高纬的高压和副热带的低压差值,这三个预报因子在物理上与SCSSM爆发关系密切,分别代表了SCSSM爆发前期西伯利亚地区中低层大气的增温、太平洋上类似拉妮娜结构的海温异常信号和南半球环状模信号。独立预报(2005—2014年)期间,PEM预报的SCSSM爆发日期与观测的相关系数达到了0.72(图7a)。

为了更加细致地预报SCSSM爆发演变过程,STPM利用影响南海季风爆发的次季节大尺度环流

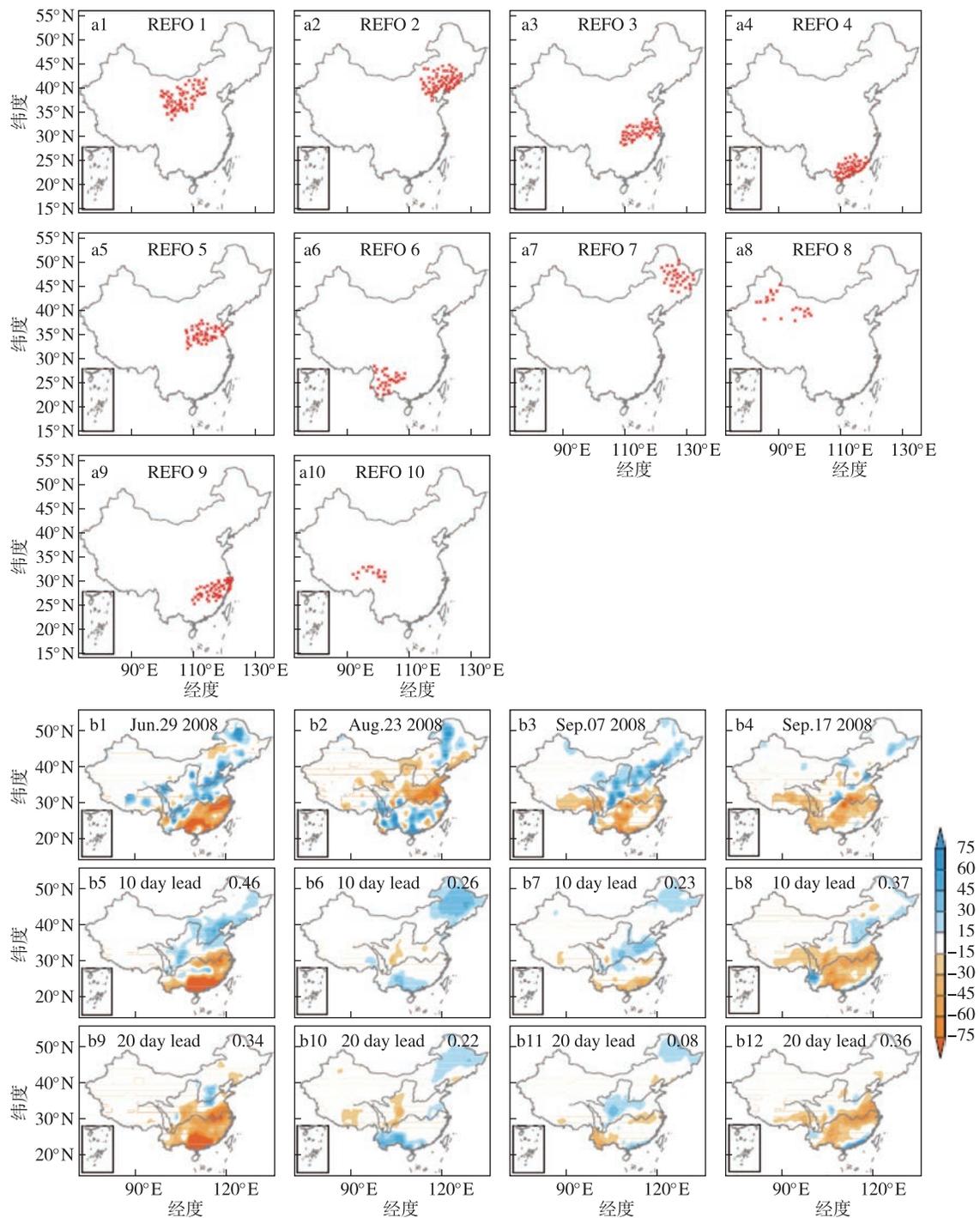


图4 1979—2010年中国夏季季节内(10~80 d)降水的REOF前十个模态(a;红色标记载荷值超过0.4的站点);2008年夏季预报实例(b;由上、中、下列分别是观测、提前10 d、20 d预报的降水异常;蓝色和橘红色阴影分别为降水正异常和负异常;单位: $0.1 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$;右上角标注空间相关系数)(Zhu and Li,2017b)

Fig.4 (a) The first 10 REOF modes of 10—80 day summer intraseasonal rainfall (April 30 to October 27) for 1979—2010.The red symbols mark the station with the loading value exceeding 0.4.(b)Forecast example during the summer of 2008.Shaded areas from up to down, respectively, are the observation, 10 d lead and 20 d lead forecasted rainfall anomalies (unit: $0.1 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$).The pattern correlation coefficient between the observation and 10 and 20 d lead forecasted rainfall anomalies are shown in each panel of the forecasted results.Adopted from Zhu and Li (2017b)

信号,从延伸期预报的角度来构建统计预报模型。利用第19至24候的热带地区MJO信号、北印度洋

季风涡旋活动和南北半球间高低压系统演变特征,预报25—35候南海地区平均的850 hPa纬向风的

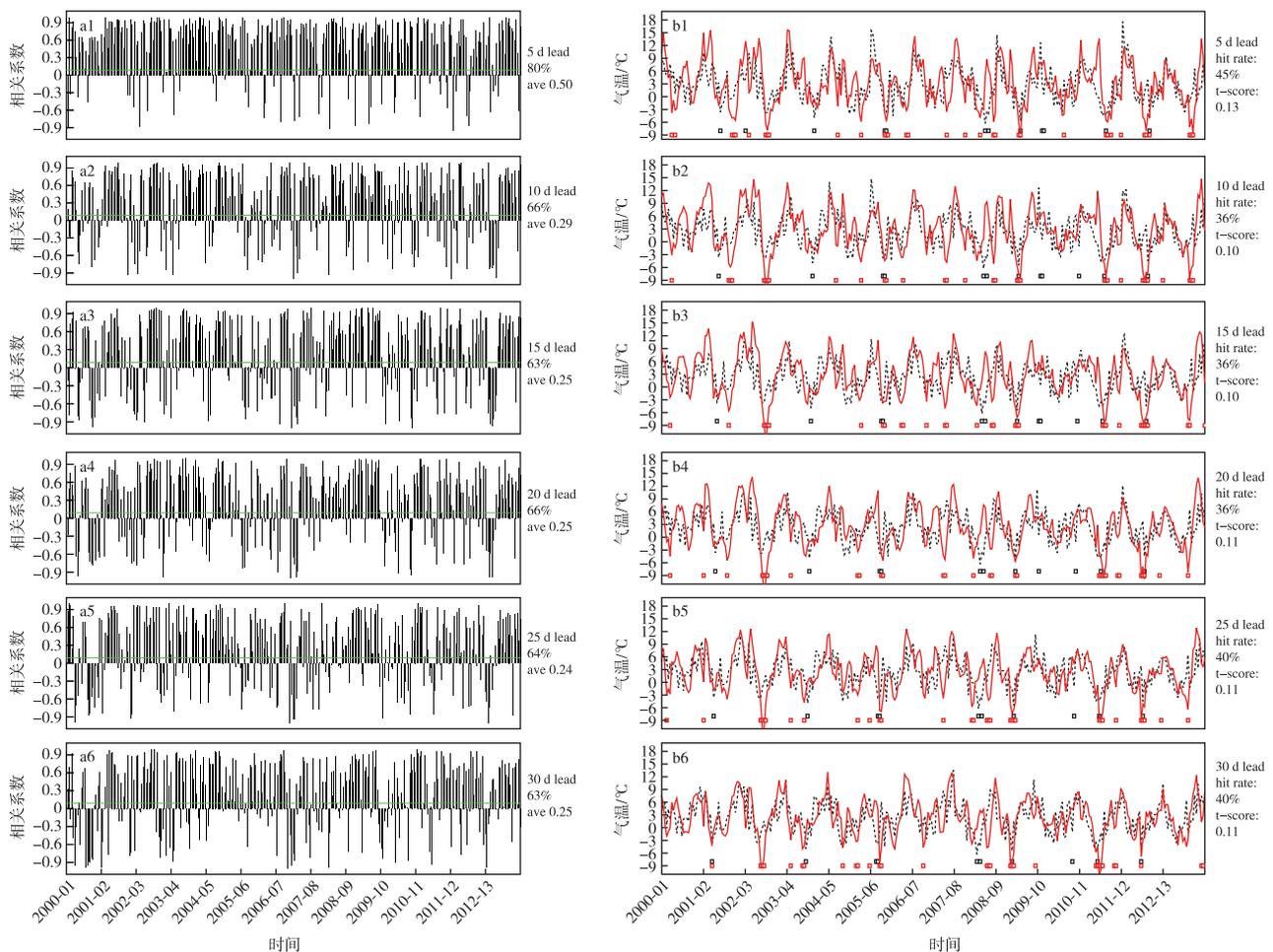


图5 提前5~30 d(a1—a6分别为提前5,10,15,20,25,30 d)预报2000/2001—2012/2013年冬季地表气温的空间相关技巧,即预报场与实际观测的EOF前三模态组合场的空间相关系数(a;绿线为置信度99%的显著性检验);提前5~30 d(b1—b6分别为提前5,10,15,20,25,30 d)预报(红线)与观测(黑线)的南京站地表气温及其极端冷事件(b;预报为红色方框,观测为黑色方框;图右标注预报命中百分比和预报风险评分)(Zhu and Li,2017c)

Fig.5 (a) The pattern correlation coefficient skills(bars) evolution for the 5—30 day lead (a1—a6 are 5, 10, 15, 20, 25 and 30 d leads, respectively) forecasted for 10—80 day SAT against the EOF-filtered 10—80 d SAT during the forecast period of 2000/2001—2012/2013. The green line is the threshold of the 99% confidence level. (b) The observed (dashed line) and 5—30 d lead (b1—b6 are 5, 10, 15, 20, 25 and 30 d leads, respectively) forecasted (solid line) winter SAT at Nanjing Gauge Station, along with the defined extreme cold day (ECD) (the black and red rectangles are the observed and forecasted ECD, respectively), during the forecast period of 2000/2001—2012/2013. The hit rate and threat score of the ECD are shown to the right of each panel. Adopted from Zhu and Li (2017c)

演变,根据预报出的850 hPa纬向风确定SCSSM爆发日期。STPM与独立预报时期的时间相关系数技巧达到了0.9。2005—2014年的预报中,其中6a的预报结果与观测完全相符,其余年份的预报结果与观测仅相差1~2候(图7b)。STPM立足延伸期预报角度来预测南海季风爆发过程,这对传统的基于季节预测的观点来预报南海季风爆发早晚是一个有益补充。

4.3 ENSO 预报应用

ENSO是年际变率中最主要的信号,过去已有

大量研究讨论了ENSO发展的关键物理过程(Mcphaden,1999,2003;Su et al.,2010;Chen et al.,2016;Chen et al.,2017),例如:异常SST的持续性、混合层温度的垂直结构、斜温层深度和赤道上的西风爆发。Pan et al.(2019)利用1950—2000年夏季至冬季(8月至次年1月)Niño3.4 SST异常的时间演变与前期(2月至7月)关键变量(SST持续性、混合层异常、斜温层深度异常、西风爆发指数)的时间-空间耦合关系(详见Pan et al.(2019)的表1),建立了STPM预报模型。2001—2016年Niño3.4的独

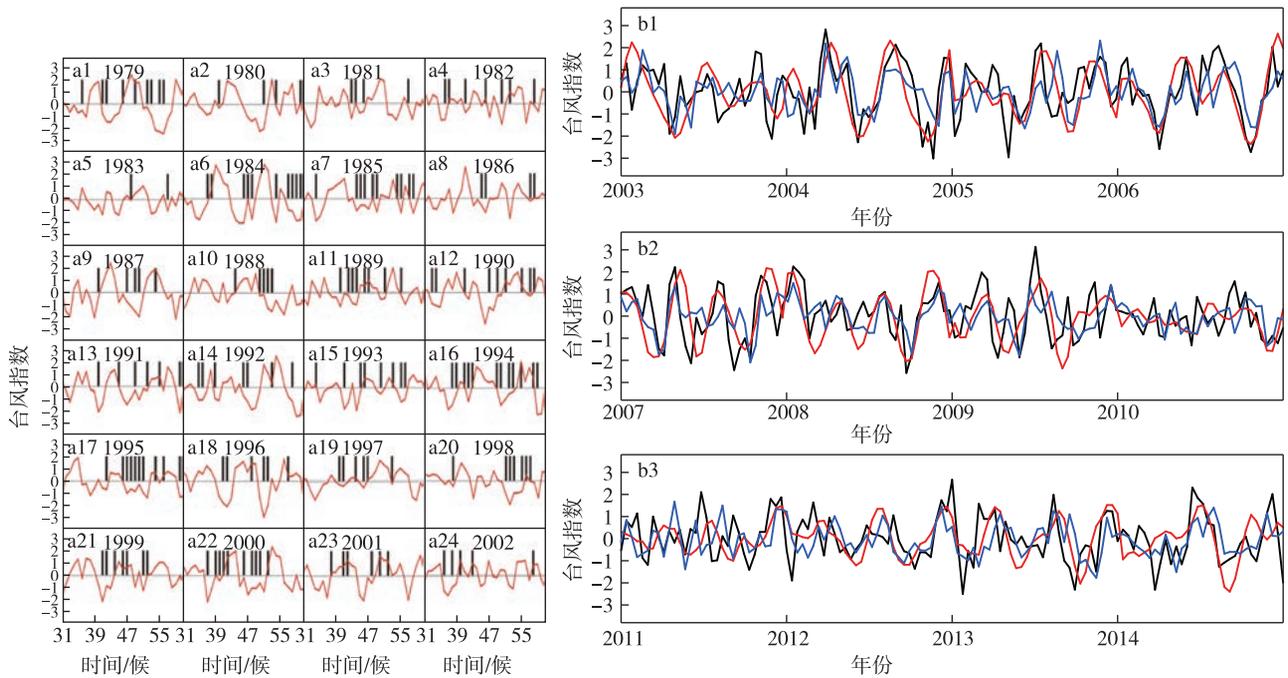


图6 1979—2002年31—61候群发性台风事件(柱状)发生的逐候时间演变及群发性台风指数(红色实线)(a);2003—2014年的观测(黑线)和预报(红色和蓝色为基于两类STPM预报)的群发性台风指数(b)(Zhu et al., 2017)

Fig.6 (a) Pentad temporal distribution (pentad 31 to pentad 61) of CTC genesis (bars) and the CTC index based on OLR (red line) for the period of 1979—2002. (b) The observed (black) and 10 d lead forecasted CTC index (blue and red) produced by two STPMs for the period 2003—2014. Adopted from Zhu et al. (2017)

立预报结果显示,利用每年春季至夏季的大尺度海洋异常信号演变特征,STPM能提前六个月准确地预报出夏季至冬季 Niño3.4 异常海温的时间演变。

5 未来挑战和展望

STPM以低频先兆信号和预报要素之间时空耦合演化过程为基础,可提供预报能力较高且稳定的S2S预报产品,已在国家及省级业务机构提供全国降水、气温和西北太平洋台风群发的延伸期实时预报产品,成效显著。然而,在日益精进的延伸期预报技术发展中,当今仍面临以下几方面的局限,有待进一步突破。

1) 极端天气过程的延伸期预报理论较为缺乏:极端天气发生的概率低,但致灾严重,目前对于极端天气在延伸期(次季节)尺度的可预报性来源的认识有限,极端天气的延伸期预报技巧较低,与中短期天气预报和气候预测相比仍有较大的差异。WMO S2S 预测计划也明确提出了该计划将重点研究高影响天气的次季节可预报性。因此,未来需加深对极端天气过程的变化规律、机理及其与地球多圈层(海-陆-气)低频异常信号的相互作用等科学问题的认识和理解,找出有效的可预报来源,提高10~30 d 极端天气过程预报能力。

2) 统计模型对极端天气强度预报能力较低:目前STPM模型对极端温度和强降水有一定的预报能力,约30%~40%的极端气温事件能提前15 d 预报出来。然而,与实际的极端事件相比,统计模型对灾害天气的强度预报往往较低,对于过程的预报也有较大难度,在防灾应用中产生了局限。未来需持续优化STPM,并结合动力模式,改进对强度和过程的预报能力。

3) 缺乏延伸期动力模式的集合预报技术:多模式的集合预报是气象业务预报的主流趋势,相较于单一动力模式预报,多动力模式集合预报有更高的预报能力。如何有效地、智能地优选模式并给予集合权重,最大程度地提高延伸期极端天气的概率预报能力,仍是亟待解决的重要科学和技术问题。

目前,南京信息工程大学牵头的国家重点研发计划“10~30 d 极端天气过程可预报性及预报理论与方法研究”项目,正致力于我国极端天气过程的延伸期预报理论与方法研究,并开展其监测和预报系统的建设。项目一方面集结了国内在季节内振荡和极端天气研究领域的优势团队,深入研究持续性极端天气过程发生、发展和演变的规律和物理过程,揭示10~30 d 低频模态的动力机理及其与极端天气过程的相互作用;另一方面也通过与业务单位的合

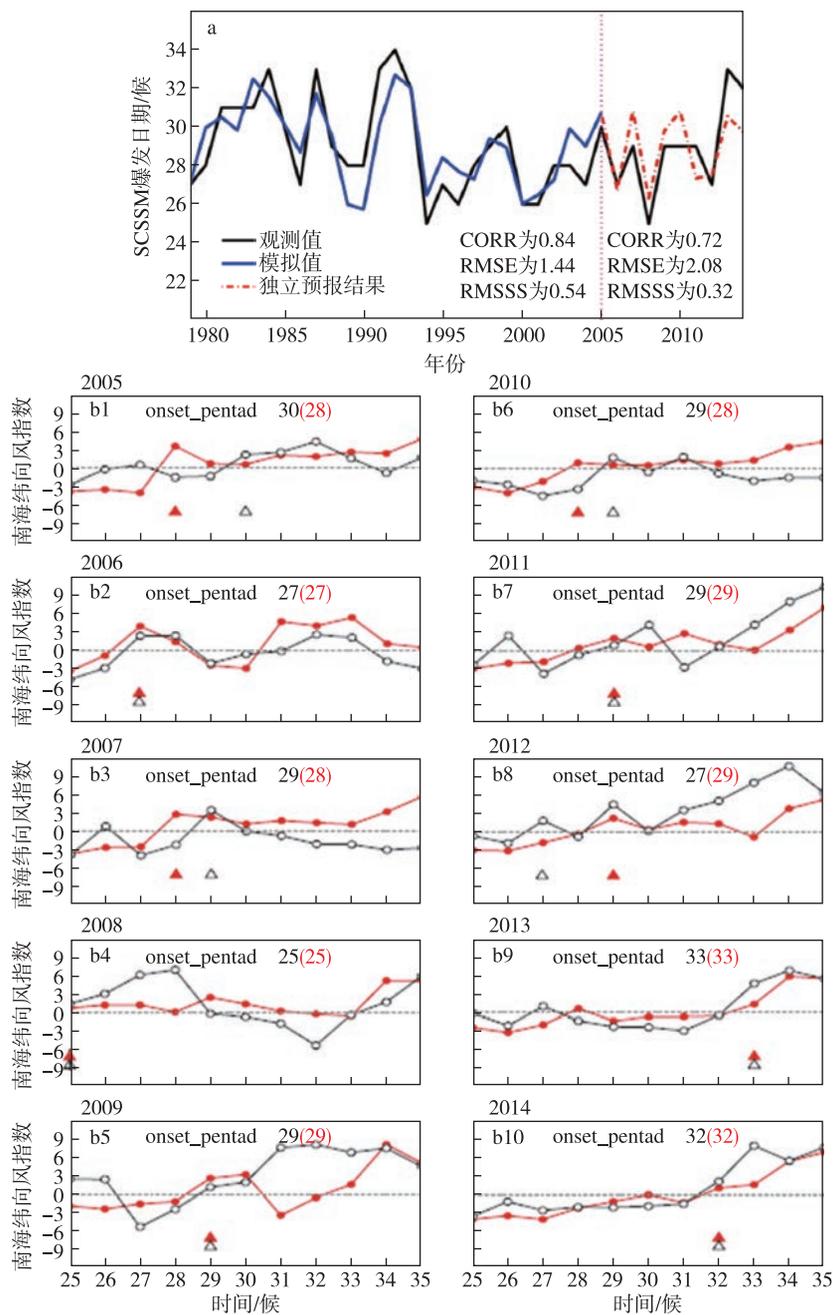


图7 基于PEM的南海季风爆发日期序列(1979—2014年)(a;黑色为观测,蓝色为模拟结果,红色为独立预报结果);基于STPM预报南海季风爆发期间(25—35候)的南海地区纬向风指数(b;黑线为观测,红线为预报,黑三角为观测爆发日期,红三角为预报观测日期)(Zhu and Li, 2017b)

Fig.7 (a) The time series of the observed (black line) and reforecast (blue solid line) and independent forecasted (red dashed line) SCSSM onset pentad. (b) The observed (black) and forecasted (red) zonal wind ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) averaged over the SCS region ($5^{\circ} - 15^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ} - 120^{\circ}\text{E}$) from the 25th to 35th pentads for 2005—2014. An open (closed) triangle denotes the observed (forecasted) SCSSM onset pentad. Adopted from Zhu and Li (2017b)

作,将明确当今业务主流模式对10~30 d极端天气过程的预报不确定性和可预报性来源,并在理论的基础上研发10~30 d极端天气过程预报的新方法和

新技术,力图进一步提高我国延伸期天气预报的水平,建成无缝隙天气气候预报系统。

参考文献 (References)

- Annamalai H, Slingo J M, 2001. Active/break cycles: diagnosis of the intraseasonal variability of the Asian Summer Monsoon[J]. *Clim Dyn*, 18(1/2): 85-102.
- Brunet G, Shapiro M, Hoskins B, et al., 2010. Collaboration of the weather and climate communities to advance subseasonal-to-seasonal prediction[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 91(10): 1397-1406.
- Chen George T J, Jiang Z H, Wu M C, 2003. Spring heavy rain events in Taiwan during warm episodes and the associated large-scale conditions[J]. *Mon Wea Rev*, 131(7): 1173-1188.
- 陈官军, 魏凤英, 姚文清, 等, 2017. 基于低频振荡信号的中国南方冬半年持续性低温指数延伸期预报试验[J]. *气象学报*, 75(3): 400-414. Chen G J, Wei F Y, Yao W Q, et al., 2017. Extended range forecast experiments of persistent winter low temperature indexes based on intra-seasonal oscillation over Southern China[J]. *Acta Meteorol Sin*, 75(3): 400-414. (in Chinese).
- Chen L, Li T, Wang B, et al., 2017. Formation mechanism for 2015/16 super El Niño[J]. *Sci Rep*, 7: 2975.
- Chen M C, Li T, Shen X Y, et al., 2016. Relative roles of dynamic and thermodynamic processes in causing evolution asymmetry between El Niño and La Niña[J]. *J Climate*, 29(6): 2201-2220.
- 丑纪范, 郑志海, 孙树鹏, 2010. 10~30 d 延伸期数值天气预报的策略思考: 直面混沌[J]. *气象科学*, 30(5): 569-573. Chou J F, Zheng Z H, Sun S P, 2010. The think about 10—30 d extended-range numerical weather prediction strategy: facing the atmosphere chaos[J]. *Sci Meteor Sin*, 30(5): 569-573. (in Chinese).
- 丁一汇, 梁萍, 2010. 基于 MJO 的延伸预报[J]. *气象*, 36(7): 111-122. Ding Y H, Liang P, 2010. Extended range forecast basing on MJO[J]. *Meteorol Mon*, 36(7): 111-122. (in Chinese).
- Hong C C, Li T, 2009. The extreme cold anomaly over Southeast Asia in February 2008: roles of ISO and ENSO[J]. *J Climate*, 22(13): 3786-3801.
- Hsu P C, Li T, Lin Y C, et al., 2012. A spatial-temporal projection method for seasonal prediction of spring rainfall in northern Taiwan[J]. *J Meteor Soc Japan*, 90(2): 179-190.
- Hsu P C, Li T, You L J, et al., 2015. A spatial-temporal projection model for 10—30 day rainfall forecast in South China[J]. *Clim Dyn*, 44(5/6): 1227-1244.
- Hsu P C, Lee J Y, Ha K J, 2016. Influence of boreal summer intraseasonal oscillation on rainfall extremes in Southern China[J]. *Int J Climatol*, 36(3): 1403-1412.
- Jia X L, Chen L J, Ren F M, et al., 2011. Impacts of the MJO on winter rainfall and circulation in China[J]. *Adv Atmos Sci*, 28(3): 521-533.
- Jiang Z H, Chen G T-J, Wu M C, 2003. Large-scale circulation patterns associated with heavy spring rain events over Taiwan in strong ENSO and non-ENSO years[J]. *Mon Wea Rev*, 131(8): 1769-1782.
- Koster R D, Mahanama S P P, Yamada T J, et al., 2011. The second phase of the global land-atmosphere coupling experiment: soil moisture contributions to subseasonal forecast skill[J]. *J Hydrometeor*, 12(5): 805-822.
- Lau W K M, Waliser D E, Waliser D, 2011. Predictability and forecasting [M]//Intraseasonal variability in the atmosphere-ocean climate system. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg: 433-476.
- 李崇银, 潘静, 宋洁, 2013. MJO 研究新进展[J]. *大气科学*, 37(2): 229-252. Li C Y, Pan J, Song J, 2013. Progress on the MJO research in recent years[J]. *Chin J Atmos Sci*, 37(2): 229-252. (in Chinese).
- Li R C Y, Zhou W, 2013. Modulation of western North Pacific tropical cyclone activity by the ISO. Part I: genesis and intensity[J]. *J Climate*, 26(9): 2904-2918.
- Li W K, Hsu P C, He J H, et al., 2016. Extended-range forecast of spring rainfall in Southern China based on the Madden-Julian Oscillation[J]. *Meteorol Atmos Phys*, 128(3): 331-345.
- Lorenz E N, 1969. Three approaches to atmospheric predictability[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 50: 349.
- Madden R A, Julian P R, 1971. Detection of a 40—50 day oscillation in the zonal wind in the tropical Pacific[J]. *J Atmos Sci*, 28(5): 702-708.
- Madden R A, Julian P R, 1994. Observations of the 40—50-day tropical oscillation: a review[J]. *Mon Wea Rev*, 122(5): 814-837.
- Maloney E D, Dickinson M J, 2003. The intraseasonal oscillation and the energetics of summertime tropical western north Pacific synoptic-scale disturbances[J]. *J Atmos Sci*, 60(17): 2153-2168.
- 毛江玉, 吴国雄, 2005. 1991 年江淮梅雨与副热带高压的低频振荡[J]. *气象学报*, 63(5): 762-770. Mao J Y, Wu G X, 2005. Intraseasonal variability in the Yangtze-Huaihe river rainfall and subtropical high during the 1991 Meiyu period[J]. *Acta Meteorol Sin*, 63(5): 762-770. (in Chinese).
- McPhaden M J, 1999. Genesis and evolution of the 1997—98 El Niño[J]. *Science*, 283(5404): 950-954.
- McPhaden M J, 2003. Tropical Pacific Ocean heat content variations and ENSO persistence barriers[J]. *Geophys Res Lett*, 30(9): 1480.
- National Academy of Sciences, 2010. Assessment of intraseasonal to interannual climate prediction and predictability[M]. Washington: National Academies Press.
- Pan X, Zhu Z, Li T, 2019. Empirical prediction of ENSO evolution using spatial-temporal projection Model[J]. *Int J Climatol*, accepted.
- Pegion K, Ben P K, Becker E, et al., 2019. The Subseasonal Experiment (SubX): a multimodel subseasonal prediction experiment[J]. *Bull Amer Mete-*

- or Soc, 100(10).
- Ren X J, Yang X Q, Sun X G, 2013. Zonal oscillation of western Pacific subtropical high and subseasonal SST variations during Yangtze persistent heavy rainfall events[J]. *J Climate*, 26(22): 8929-8946.
- Stan C, Straus D M, Frederiksen J S, et al., 2017. Review of tropical-extratropical teleconnections on intraseasonal time scales[J]. *Rev Geophys*, 55(4): 902-937.
- Stocker T F, Qin D, Plattner G-K, et al., 2013. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[R]//IPCC. *Climate change 2013: the physical science basis*. Cambridge, United Kingdom and New York, USA: Cambridge University Press; 1535. doi: 10.1017/CBO9781107415324.
- Su J Z, Zhang R H, Li T, et al., 2010. Causes of the El Niño and La Niña amplitude asymmetry in the equatorial eastern Pacific[J]. *J Climate*, 23(3): 605-617.
- 孙国武, 李震坤, 信飞, 等, 2013. 延伸期天气过程预报的一种新方法: 低频天气图[J]. *大气科学*, 37(4): 945-954. Sun G W, Li Z K, Xin F, et al., 2013. Low-frequency synoptic map: new method for extended range forecasting[J]. *Chin J Atmos Sci*, 37(4): 945-954. (in Chinese).
- Tian B J, Waliser D E, Kahn R A, et al., 2011. Modulation of Atlantic aerosols by the Madden-Julian oscillation[J]. *J Geophys Res*, 116(D15): D15108.
- Thomas J A, Berg A A, Merryfield W J, 2016. Influence of snow and soil moisture initialization on sub-seasonal predictability and forecast skill in boreal spring[J]. *Clim Dyn*, 47(1/2): 49-65.
- Vitart F, Robertson A W, 2019. Introduction: why sub-seasonal to seasonal prediction (S2S)? [M]//*Sub-Seasonal to Seasonal Prediction*. Elsevier: 3-15.
- Vitart F, Ardilouze C, Bonet A, et al., 2017. The subseasonal to seasonal (S2S) prediction project database[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 98(1): 163-173.
- 温之平, 黄荣辉, 贺海晏, 等, 2006. 中高纬大气环流异常和低纬 30~60 天低频对流活动对南海夏季风爆发的影响[J]. *大气科学*, 30(5): 952-964. Wen Z P, Huang R H, He H Y, et al., 2006. The influences of anomalous atmospheric circulation over mid-high latitudes and the activities of 30-60 d low frequency convection over low latitudes on the onset of the South China sea summer monsoon[J]. *Chin J Atmos Sci*, 30(5): 952-964. (in Chinese).
- Yang H, Li C Y, 2003. The relation between atmospheric intraseasonal oscillation and summer severe flood and drought in the Changjiang; Huaihe River Basin[J]. *Adv Atmos Sci*, 20(4): 540-553.
- 杨秋明, 2014. 基于 20~30 d 振荡的长江下游地区夏季低频降水延伸期预报方法研究[J]. *气象学报*, 72(3): 494-507. Yang Q M, 2014. Study of the method of the extended-range forecast for the low frequency rainfall over the lower reaches of the Yangtze River in summer based on the 20-30 day oscillation[J]. *Acta Meteorol Sin*, 72(3): 494-507. (in Chinese).
- 杨秋明, 2018. 长江下游夏季低频温度和高温天气的延伸期预报研究[J]. *地球科学进展*, 33(4): 385-395. Yang Q M, 2018. A study of the extended-range forecast for the low frequency temperature and high temperature weather over the lower reaches of Yangtze River valley in summer[J]. *Adv Earth Sci*, 33(4): 385-395. (in Chinese).
- Zhang C D, 2005. Madden-Julian oscillation[J]. *Rev Geophys*, 43(2): RG2003. doi: 10.1029/2004RG000158.
- 章大全, 郑志海, 陈丽娟, 等, 2019. 10~30 d 延伸期可预报性与预报方法研究进展[J]. *应用气象学报*, 30(4): 416-430. Zhang D Q, Zheng Z H, Chen L J, et al., 2019. Advances on the predictability and prediction methods of 10-30 d extended range forecast[J]. *J Appl Meteor Sci*, 30(4): 416-430. (in Chinese).
- 郑志海, 黄建平, 封国林, 等, 2013. 延伸期可预报分量的预报方案和策略[J]. *中国科学: 地球科学*, 43(4): 594-605. Zheng Z H, Huang J P, Feng G L, et al., 2013. Forecast scheme and strategy for extended-range predictable components[J]. *Sci Sin Terrae*, 43(4): 594-605. (in Chinese).
- Zhou H Y, Hsu P C, Qian Y T, 2018. Close linkage between quasi-biweekly oscillation and tropical cyclone intensification over the western North Pacific[J]. *Atmos Sci Lett*, 19(7): e826. doi: 10.1002/asl.826.
- Zhu C W, Nakazawa T, Li J, et al., 2003. The 30—60 day intraseasonal oscillation over the western North Pacific Ocean and its impacts on summer flooding in China during 1998[J]. *Geophys. Res Lett*, 30: 1952.
- Zhu Z W, Li T, 2017a. Empirical prediction of the onset dates of South China Sea summer monsoon[J]. *Clim Dyn*, 48(5/6): 1633-1645.
- Zhu Z W, Li T, 2017b. The statistical extended-range (10—30-day) forecast of summer rainfall anomalies over the entire China[J]. *Clim Dyn*, 48(1/2): 209-224.
- Zhu Z W, Li T, 2017c. Statistical extended-range forecast of winter surface air temperature and extremely cold days over China[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 143(704): 1528-1538.
- Zhu Z W, Li T, 2018. Extended-range forecasting of Chinese summer surface air temperature and heat waves[J]. *Clim Dyn*, 50(5/6): 2007-2021.
- Zhu Z W, Li T, Hsu P C, et al., 2015. A spatial—temporal projection model for extended-range forecast in the tropics[J]. *Clim Dyn*, 45(3/4): 1085-1098.
- Zhu Z W, Li T, Bai L, et al., 2017. Extended-range forecast for the temporal distribution of clustering tropical cyclogenesis over the western North Pacific[J]. *Theor Appl Climatol*, 130(3/4): 865-877.

Subseasonal-to-seasonal (S2S) prediction using the spatial-temporal projection model (STPM)

HSU Pang-chi¹ , ZANG Yuxin¹ , ZHU Zhiwei¹ , LI Tim^{1,2}

¹Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education (KLME) / Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change (ILCEC) / Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters (CIC-FEMD) , Nanjing University of Information Science & Technology , Nanjing 210044 , China ;

²Department of Atmospheric Sciences , International Pacific Research Center , University of Hawaii at Manoa , Honolulu 96822 , USA

With the current developments of numerical weather forecasting technology and seasonal prediction systems , the ability of short-term weather forecast and long-term climate prediction continues to improve. However , the prediction skill of the subseasonal to seasonal (S2S , two weeks to three months) system is relatively weak , and this has become a challenging issue for the meteorological community and operational services. In 2012 , the research team led by Prof. Tim Li at Nanjing University of Information Science & Technology developed the spatial-temporal projection model (STPM). The STPM exhibits high skill in predicting the rainfall and temperature anomalies and extreme events in China , such as extreme precipitation , heatwave , extreme cold days and typhoon clustering events , at the lead time of 10 to 30 d. Real-time extended-range weather forecast have been carried out using the STPM at the National Climate Center and in several provinces. In addition to the subseasonal forecast , the STPM has also been successfully applied to the forecasts of spring rain in Taiwan , the onset of the South China Sea monsoon and ENSO. In the present paper , we introduce the physical basis of S2S prediction and the development and application of STPM , and discuss the challenges and future prospects of S2S prediction.

spatial-temporal projection model (STPM) ; subseasonal-to-seasonal (S2S) prediction ; extended-range weather forecast ; source of predictability ; extreme weather

doi : 10. 13878 / j. cnki. dqkxxb. 20191028002

(责任编辑 : 刘菲)