李娟,曾晓东,陈红,等. 2016. 强度尺度分解方法在气候温度场检验中的应用 [J]. 大气科学, 40 (6): 1117–1126. Li Juan, Zeng Xiaodong, Chen Hong, et al. 2016. Application of the intensity-scale technique for verification of climatological surface temperature simulation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 40 (6): 1117–1126, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1603.15180.

强度尺度分解方法在气候温度场检验中的应用

李娟^{1,2} 曾晓东^{1,2,3} 陈红¹ 蔡其发¹

1 中国科学院大气物理研究所国际气候与环境科学中心,北京 100029
 2 中国科学院大学,北京 100049
 3 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,南京 210044

摘 要本文首次将 Casati 等提出的强度尺度分解方法应用到气候地表温度场的检验中,探讨此方法用于评估气候模拟场误差的详细空间信息的适用性。以新一代气候系统模式模拟的月平均地表温度为例,传统的统计分析方法(较为常用的是空间相关系数和均方根误差、EOF分析等)不能完全反映模拟场误差的空间信息;强度尺度分解方法可计算不同阈值和空间尺度上的均方误差和模拟技巧,评估对应的模拟能力,定量给出模拟场主要误差的空间信息(误差范围即温度阈值及对应的空间尺度),例如,亚洲东部地区1月单年及多年平均的模拟场在230K 阈值 1600 km 模拟技巧非常低。本研究表明强度尺度分解方法适用于气候温度场的检验评估,能定量给出误差的空间信息。

关键词 强度尺度分解方法 空间检验 地表气温
 文章编号 1006-9895(2016)06-1117-10 中图分类号 P468 文献标识码 A
 doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1603.15180

Application of the Intensity-Scale Technique for Verification of Climatological Surface Temperature Simulation

LI Juan^{1, 2}, ZENG Xiaodong^{1, 2, 3}, CHEN Hong¹, and CAI Qifa¹

1 International Center for Climate and Environment Sciences, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

3 Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disaster, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

Abstract The applicability of the intensity-scale approach for the verification of climate simulation is investigated in this paper. The monthly mean surface temperature simulated by a new generation of climate system model is taken as an example. While the traditional statistical verification cannot fully reflect the spatial information of the simulation error, the intensity-scale approach can quantitatively assess the spatial information of the simulation by calculating the mean square errors and skill scores of the spatial components with different wavelet scales and intensities. For example, in East Asia, the skill score of temperature threshold 230 K and spatial scale 1600 km is very low for simulations of both January of single year and multi-year average. This study shows that the intensity-scale approach is suitable for the verification of climatological temperature simulation, and can provide quantitative spatial information of the error.

收稿日期 2015-04-09; 网络预出版日期 2016-03-30

作者简介 李娟,女,1981年出生,博士研究生,主要从事数值天气预报和产品检验方面的研究工作。E-mail: lijuan@mail.iap.ac.cn

通讯作者 曾晓东, E-mail: xdzeng@mail.iap.ac.cn

资助项目 中国科学院战略性先导科技专项 XDA05110103

Funded by Chinese Academy of Sciences Strategic Priority Research Program (Grant XDA05110103)

1118

Keywords The intensity-scale approach, Spatial verification, Surface temperature

1 引言

在对气候模式模拟空间场的检验评估中,常用 的方法包括目测比较分析和数据统计分析。通常情 况下,目测比较模拟场和观测场以及两者差值的空 间分布,可抓住物理量场的整体特征及空间结构特 征,大致了解模式的总体模拟能力和存在的误差, 但是具有主观性和非定量性。为了定量地评估模式 模拟的空间场空间分布特征的总体模拟能力,常采 用的方法是数据统计分析方法,多是基于点对点的 对比,利用列联表定义一系列评分指数来评估模拟 能力,其结果多是一个单值来定量表现两物理量场 之间的误差、线性关系等。较简单常用的有空间相 关系数(皮尔逊相关系数)和均方根误差等,但均 存在一定的局限性(Briggs and Levine, 1997)。空 间相关系数描述了两图线性相关程度,但是不能反 映误差的绝对大小,例如,对一个二维场同该场乘 以一个常数后进行比较,得到的相关系数是1,不 能够区分两个场的差异。均方根误差反映了两场误 差幅度的平均状态,但是忽略了两场的线性相关 性。特别是当模拟对象发生位置偏移时,上述方法 会发生"双重惩罚"问题(Jolliffe and Stephenson, 2003)。这些方法虽然能一定程度上定量给出模式 模拟的空间场空间分布特征的总体模拟能力,但是 不能具体反映空间信息,甚至产生与目测比较相左 的结论。另外, EOF 分解能够把随时间变化的变量 场分解为各正交模态的独立演变过程。模态上每个 点上值的大小表示这个点的变化, 值越大则可以理 解成这个点特别活跃,总是跳离平均值特别远,其 正负没有绝对的意义,只表示相对的正反位相。EOF 分解很容易将变量场的信息集中在几个模态上,并 且分离出的模态结构也有一定的物理意义,但是其 反映的是空间点上物理量的变化,反映不了物理量 本身的空间结构。

近年来针对天气预报检验发展了很多新的创 新方法(例如空间检验方法等),本文所使用的强 度尺度分解方法就是天气预报空间检验方法中尺 度分离法中的一种,由Casati et al.(2004)提出, 主要是针对定量降水预报(QPFs)的检验。该方法 不仅能够在不同的空间尺度上(例如,大尺度锋面 降水和小尺度对流降水)进行检验,而且能够对不

同的预报强度进行评估。主要是用不同的强度阈值 对降水进行分级得到不同降水等级上的二进制误 差场,并应用 Haar 小波进行尺度分离得到不同空 间尺度成员,在此基础上计算各个空间尺度上的预 报误差信息以及预报技巧。不同的空间尺度事件对 应着不同的物理过程,了解了各空间尺度上的预报 能力就能够更加深入地对模式中各物理过程的预 报能力进行评判。Casati (2010) 又对该方法进行 了改进,采用了更加标准的小波分解步骤,解决了 该方法在使用中发现的一些问题:首先,去除了预 处理和校准数据部分,采用有偏预报场;增加了能 量以及能量百分比的概念,用于评估偏差和尺度结 构; 增加了业务运行聚合方法以及去除二阶检验区 域约束的不同方法。Mittermaier(2006)应用该方 法研究表明, 云可分辨尺度模式相对于对云采用参 数化的粗分辨率模式提升了强降水的预报能力; Csima and Ghelli (2008) 将其加入到评估业务降水 预报的检验中,对业务降水预报能力进行了长期评 估; 孔荣等(2010)将强度尺度检验技术应用于"世 界气象组织天气研究计划—北京奥运会预报示范 项目"中4个邻近预报参加系统的1h定量降水预 报检验;徐同等(2012)将该技术应用于上海区域 中尺度模式的定量降水预报检验。

气候场与天气场有着本质的区别,它是在某一时间段内大量天气过程的综合平均,不仅包括这段时间经常发生的天气状况,还包括偶尔出现的极端 天气状况,一般比较稳定。Wang et al.(2009)提 出尽管天气预报检验和气候模拟评估之间有较大 差异,还是可以将天气预报检验的新方法(特别是 空间检验方法和概率预报集合检验方法等)应用到 气候模拟评估中,主要包括可以将这些方法应用在 气候平均模拟场、季节或年际预测、多时间序列分 解得到的模态评估中等。本文就是尝试将强度尺度 分解方法应用到气候系统模式模拟的地表温度场 的检验评估中,定量给出模拟误差场的空间信息, 这方面的研究还比较少见。强度尺度分解方法

(Casati et al., 2004; Casati, 2010)采用的 Haar 小波 是非连续性的,因此其较适用于非连续场(如降水 场)的检验。Picart et al. (2012)将该方法应用到 了连续场的检验中,对海表面温度和叶绿素 a 场进 行了检验。其主要是在阈值的选取方面采用了百分 位方法,依据比较数据的统计分布而设定,不需要 对被分析的数据有预先的了解,比较了场的内在空 间结构。

本文采用绝对阈值的选取方法,首次尝试将强 度尺度分解方法应用到气候地表温度模拟场的检 验评估中,并检验此方法的适用性。首先进行个例 检验,采用目测比较、数据统计分析、强度尺度分 解三种方法分别对 1982 年 1 月检验区域的月平均 地表温度场进行检验,介绍强度尺度分解方法的具 体应用,比较三种方法的不同特点。其次,介绍强 度尺度分解方法在多年预报检验中的应用方法。最 后将强度尺度分解方法应用在不同检验区域不同 月份的预报检验中,进一步验证该方法的适用性。

2 强度尺度分解方法原理

2.1 二进制误差分解

强度尺度分解方法是在不同的强度阈值和不同的空间尺度上对模拟场进行模拟技巧评估,其要求检验区域必须是正方形二阶区域(即区域格点为2^{*L*}×2^{*L*},*L*取正整数)。对于观测场*I*_{*X*}和模拟场*I*_{*Y*},首先要根据自身需求选择强度分级阈值*u*,可采用绝对阈值选取法(直接选取)或百分位选取法(相当于订正后选取)等。文中需要对气候系统模式模拟结果进行直接评估,故采用了绝对阈值选取法。然后应用阈值*u*将观测场和模拟场分别转换为二进制场:

$$I_{X} = \begin{cases} 1 & X > u \\ 0 & X \leq u \end{cases}, I_{Y} = \begin{cases} 1 & Y > u \\ 0 & Y \leq u \end{cases}.$$
 (1)

二进制误差场 Z 被定义为二进制的模拟场减去二进制的观测场,即:

$$Z = I_Y - I_X. \tag{2}$$

最后对二进制误差场进行二维离散 Haar 小波分解 (Casati et al., 2004)。以检验区域格点为 2^L×2^L为 例,通过 Haar 小波分解后可以得到 L+1 个不同空 间尺度成员。这些空间成员 l=1,2,3,...,L+1 所对应 的分辨率分别是 2^{l-1}=1,2,4,...,2^L 个格点。分解过 程如下:首先对原始图进行一级滤波,得到四个部 分,分别是水平和垂直方向的低频成分;水平方向 的低频成分和垂直方向的高频成分;水平方向的高 频成分和垂直方向的低频成分;水平方向和垂直方 向的高频成分。其中,水平和垂直方向的低频成分 经过二维 Haar 离散小波逆变换成为第一父小波成 员,剩下的包含有高频成分的三个部分分别进行二 维 Haar 离散小波逆变换,得到三个重构场,将这 三个重构场相加获得第一母小波成员(即第一个空 间尺度成员);然后对第一父小波成员重复以上的 操作,可以得到第二母小波成员以及第二父小波成 员;以此类推最后得到 *L* 个母小波成员和第 *L*+1 父 小波成员(整个区域的平均值),即 *L*+1 个不同空 间尺度成员。另外由于二维离散 Haar 小波变换是 正交的,因此得到的各空间尺度成员也是正交的, 这是该方法的一个主要特征。二进制误差场可以用 二维离散小波分解后的成员和表示:

$$Z = \sum_{l=1}^{L+1} Z_l.$$
 (3)

2.2 二进制均方误差

均方误差定义为各模拟值误差的平方和的平均 值,将不同阈值 *u* 和不同空间尺度 *l* 上的均方误差 表示为 *E_{u,l}*,可以用来评估模式对各强度阈值在不 同空间尺度上的模拟误差。由于离散小波的正交 性,那么不同空间尺度上的均方误差之和就等于原 始二进制场上的均方误差,即:

$$E_{u} = \sum_{l=1}^{L+1} E_{u,l}.$$
 (4)

对于每一个强度阈值,还可以计算各个空间尺度对总的均方误差 *E*_u的贡献率,即:

$$P_{u,l} = (\frac{E_{u,l}}{E_u}) \times 100\%.$$
 (5)

2.3 强度尺度技巧评分

仅使用均方误差来评估模拟技巧会出现问题。比如,大尺度模拟对象发生小的位置偏差和小尺度模拟对象发生大的位置偏差,计算的均方误差值可能一样,但是前者的技巧明显应该高一些。因此,Casati设计了强度尺度技巧评分。首先评估随机产生的二进制误差场的均方误差期值 Eurand,

$$E_{u \text{ rand}} \sim B \cdot s \cdot (1-s) + s \cdot (1-B \cdot s), \qquad (6)$$

其中, *B* 为偏差,即模拟发生数与观测发生数的比值; *s* 为击中率,即观测发生数占总网格数的比。 其次将 *E*_{u, rand} 均分到 *L*+1 个尺度上,得到强度尺度 技巧评分:

$$S_{u,l} = 1 - \frac{E_{u,l}}{E_{u,rand} / (L+1)}.$$
 (7)

因此,可以对各强度阈值在不同空间尺度上的模拟 技巧进行评估。*Sul*为正值时,阈值*u*、尺度*l*上模拟 的均方误差小于该阈值该尺度上的均方误差期值, 表示有模拟技巧;反之,*Su*,/为负值时,则模拟的均 方误差大于均方误差期值,无模拟技巧。

3 强度尺度分解方法在模拟评估中的应用

3.1 数据说明及区域选择

本文应用的数据是中国科学院大气物理研究 所研发的新一代气候系统模式的模拟产品,水平分 辨率为 1°×1°,记为 CSM。其中,大气环流模式采 用具有较高分辨率且物理过程完善的新一代大气 环流模式 IAP-AGCM (张贺等, 2009; 孙泓川等, 2012; Zhang et al., 2013; Su et al., 2014; Yan et al., 2014); 大洋环流模式采用第三代全球海洋模式 LICOM (Liu et al., 2004, 2012); 陆面过程模式是 改进的通用陆面过程模式 CLM3.0(Dickinson et al., 2006)。观测数据采用 CRU 和 NECP 再分析资料的 混合产品,记为 CRUNCEP (http://www.cesm.ucar. edu/models/cesm1.2/ clm/clm forcingdata esg. html [2016-05-06])。该数据分辨率为 0.5°×0.5°, 文中将 其线性整合为 1°×1°。选取 1 月份的月平均地表温 度数据进行比较,时间范围为 1982~2010 年,检 验区域为亚洲东部(15°N~78°N, 97°E~160°E), 格点为 64×64; 作为对照, 另选取 1982 年 6 月份 的月平均地表温度数据进行比较,检验区域为亚洲 东北部 (43°N~74°N, 87°E~118°E), 格点为 32 $\times 32$ °

3.2 气候态及个例检验分析

本节首先应用目测比较分析方法对气候系统 模式 CSM 模拟的 1982~2010 年检验区域的 1 月份 地表温度气候态以及 1982 年 1 月月平均的整体模 拟情况和存在的误差有个大致的了解,并以 1982 年 1 月月平均地表温度为例,应用统计分析方法和 强度尺度分解方法进行模拟评估,比较两方法的评 估结果,检验强度尺度分解方法是否能够定量自动 地得出目测比较方法所了解到的模拟误差的空间 信息。

图 la-c 给出了 1982~2010 年 1 月份地表温度 气候态 CSM 模式模拟与 CRUNCEP 观测对比以及 误差。观测图中温度从南到北呈带状分布,并且 海陆差异明显,同一纬度海洋温度明显比陆地要 高。模式模拟出了南北带状分布以及明显的海陆差 异,但是海洋温度整体比观测偏高,中低纬的陆地 地表温度与观测较为一致,最大差异出现在了高纬 俄罗斯东北部区域,观测数据在该区域大部地区的 温度在 230 K 以下,而模拟值偏高,没有 230 K 温 度线。1982 年 1 月的情况与气候态大致一致(图 1d-f),观测数据在俄罗斯东北部区域有了更大范围 的 230 K 线,甚至出现了 220 K 线,而模拟的 230 K 线范围明显偏小,模拟值偏大。下面以 1982 年 1 月月平均地表温度模拟检验评估为例,对比统计分 析方法和强度尺度分解方法的评估结果,考察强度 尺度分解方法的适用性。

3.2.1 统计分析方法

本节所采用的统计分析方法是空间相关系数 *r* 和均方根误差 *E*_{RMSE},公式如下:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{N} (M_i - \overline{M})(O_i - \overline{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N} (M_i - \overline{M})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^{N} (O_i - \overline{O})^2}}, \quad (8)$$
$$E_{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N} (M_i - O_i)^2}{N}}, \quad (9)$$

其中, *M* 是模拟场, *O* 是观测场, *N* 是检验区域的 格点个数。空间相关系数 *r* 用于衡量模拟场和观测 场的线性相关程度, 取值范围为[-1, 1]。均方根误 差用于表述检验区域内误差幅度的平均情况。

理想的检验评分系统应该包含充足的信息,并 且能够通过这些检验结论重构出模拟和观测场的 分布。但这些方法都是基于点对点的检验,不能反 映场的空间信息。通过计算得出 1982 年 1 月 CSM 模式模拟的月平均地表温度场与 CRUNCEP 观测场 的空间相关系数 r=0.9767 (气候态 r=0.9844),均方 根误差 *E*_{RMSE}=5.95 (气候态 *E*_{RMSE}=4.72)。从两个 数值可以看出两个场具有较高的正相关,误差较 大,但对于目测比较的结论 230 K 模拟范围有较大 的误差则无从反映。

3.2.2 强度尺度分解方法

强度尺度分解方法所分离的各尺度空间成员 并不与原始场相似,但将各尺度空间成员相加能够 组合成原始场。其能够评估模式不同强度阈值在不 同空间尺度上的模拟能力,得到各阈值各尺度上的 均方误差大小以及模拟技巧,反映出一些误差场的 空间信息。

首先根据图 1 中观测场和模拟场的取值范围, 采用绝对阈值选取法均匀地确定分级阈值为 220、 230、240、250、260、270、280、290、300 K(称 粗阈值)。检验区域格点数为 64×64(即 2⁶×2⁶), 因此可以分离出 7 个不同的空间成员。模式空间分 辨率 1°,约等于 100 km,故前 6 个空间尺度分别对 应为 100、200、400、800、1600、3200 km。图 2 给出了各阈值各空间尺度上的强度尺度技巧评分 (图 2a 为 1982 年,图 2b 为气候态)。从图 2a 中可以看出:中间阈值 240~290 K 的评分值在各个空间尺度上都为正,说明他们都有模拟技巧。目测 290 K 线模拟比观测明显偏北,但其各个空间尺度上的



图 1 (a) CSM 模式模拟的气候态地表温度;(b) CRUNECP 观测的气候态地表温度;(c) 模式模拟与观测的气候态地表温度之差。(d)、(e)、(f) 同(a)、(b)、(c), 但为 1982 年 1 月平均的地表温度。单位:K

Fig. 1 (a) Climatological surface temperature simulated by CSM (Climate System Model developed by Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences) during 1982–2010. (b) As in Fig. a, but for CRUNCEP (Climatic Research Unit and National Centers for Environmental Prediction) data. (c) The differences climatological surface temperature between CSM results and CRUNCEP data. (d, e, f) As in Figs. a, b, c, but for mean surface temperature of Jan 1982. Units: K



图 2 粗阈值各空间尺度上的强度尺度技巧评分:(a) 1982 年;(b) 气候态

Fig. 2 Two-dimension plots of intensity-scale skill scores as a function of coarse threshold and spatial scale: (a) 1982; (b) climate state

评分却都为正,主要原因就是其均方误差期值 (0.3193)较大,但在尺度3和尺度4上的评分相





Fig. 3 $\,$ Binary field differences between the simulations and observations for the threshold of 230 K

对其他尺度上的评分还是明显低的,也相应反映了 该阈值误差的尺度范围。而在高温和低温两极的评 分值在个别尺度上则出现了负值,即无模拟技巧。 特别是阈值 230 K 在尺度 5 上出现了一个很明显的 负值,说明对 230 K 的模拟在尺度 5 上误差较大, 无模拟技巧,这与目测比较的结论相同(这一特点 在气候态的检验结果中也比较明显,见图 2b)。阈 值 220 K 和 230 K 的均方误差期值都比较低,较容 易产生负值区域。

下面进一步分析阈值 230 K 在尺度 5 上误差最 大的原因。图 3 给出了温度阈值 230 K 时的模拟与 观测二进制误差场。可以看出模拟过多地模拟了 230 K 以上的温度区域,这个误差区域在经向上最 大宽度范围是 60°N~73°N,大约为 1300 km。图 4 给出了该二进制误差场经由二维离散 Haar 小波分 解后获得的母小波成员误差图,表1给出了各尺度 上的均方误差、对总均方误差的贡献率、技巧评分。 可以看出尺度 5 (约等于 1600 km)的均方误差最 大,贡献率达到了 30%多,技巧评分-0.9796。定量 地说明原始二进制误差场上误差范围的尺度大约



图 4 230 K 阈值时二进制误差场经由二维离散 Haar 小波分解后获得的母小波成员

Fig. 4 Mother wavelet scale components obtained from the binary error field, which is decomposed by a two-dimensional discrete Haar wavelet for the threshold of 230 K

在 1600 km 左右,这与实际情况 1300 km 很接近。 将 230 K 附近的阈值进行加密得到各尺度上的

强度尺度技巧评分(图 5)。可以看到阈值 225~231 K 在尺度 5 上的技巧评分值都是负的,无技巧评分。 特别要注意的是,当阈值为 225 K,在尺度 4 上的





技巧评分最低,远低于尺度 5 的评分,说明阈值为 225 K 时误差范围的尺度大约应该是在尺度 4 上(约 等于 800 km)。从各阈值各尺度上的均方误差 *E_{u,l}* 柱状图中也可以看出阈值 228~231 K 在尺度 5 上 的均方误差最大,阈值 225 K 尺度 4 的均方误差最大(图略)。图 6 分别给出了阈值 225、228、229、230、231、235 K 的模拟与观测二进制误差场。从 图中可以看出阈值 225 K 的误差范围明显比其他阈值的误差范围小很多,其经向最大宽度范围是 60°N~69°N,大约为 900 km。阈值 228~231 K 的误差区域经向最大宽度范围大约是在 1300 km。强度尺度检验方法的结论与其基本一致,说明该方法能够定量地给出误差范围的大小。

3.3 强度尺度分解方法在多年模拟检验中的应用

应用强度尺度分解方法对 CSM 气候系统模式 模拟的 29 年(1982~2010年)逐年的 1 月份月平 均地表温度数据与相应的 CRUNCEP 数据进行了比 较分析。在相同的检验区域上进行了粗阈值分尺度 比较,结果发现大多数年份模拟阈值为 230 K 的误 差在尺度 5 上都比较大,模拟技巧评分相对较低。 由于技巧评分本身不是线性的,因此反映 29 年的



图 6 阈值 225、228、229、230、231、235 K 时模拟与观测的二进制误差场 Fig. 6 Binary field differences between the simulations and observations for thresholds of 225, 228, 229, 230, 231, 235 K



图 7 阈值 230 K 时不同空间尺度上的盒须图(1982~2010年) Fig. 7 Box-whisker plot of the skill score versus error spatial scale during the period 1982–2010 for the threshold of 230 K

表1 阈值 230 K 时各尺度上的检验指标

Table 1Indices for verification of each spatial scale for thethreshold of 230 K

尺度	$E_{u, l}$	$P_{u, l}$	$S_{u, l}$
1	0.0096	10.85	0.29
2	0.0103	11.61	0.24
3	0.0145	16.40	-0.08
4	0.0109	12.26	0.19
5	0.0268	30.11	-0.98
6	0.0088	9.88	0.35
7	0.0079	8.89	0.42

技巧评分情况不能够简单地进行平均。本文采用盒 须图,分别表示出了技巧评分在这 29 年中最低、 25%分位、中分位、75%分位、最高的技巧评分值。 图 7 给出了阈值 230 K 时在不同空间尺度上的盒须 图。图中下引线的最低点代表的是 29 年中所得到 的技巧评分最小值;上引线的最高点代表的是最大 值;中间盒子底线、顶线和中位线分别是 25%分位、 75%分位和 50%分位所对应的技巧评分值。从图中 可以看出:尺度 5 上的盒子主体值以及中分位值都 明显低于其他尺度,说明模拟误差主要是在尺度 5 上。另外尺度 1 下引线的最低点达到了-1.95,这是 因为 1991 年 1 月北方整体温度偏高(观测图略), 230 K 范围在多年中最小,达不到更大的尺度。

3.4 强度尺度分解方法在不同区域不同月份的检验应用

图 8 给出了 1982 年 6 月 CSM 模式模拟的月平 均地表温度与 CRUNCEP 观测的对比。模式模拟的 基本分布形势与观测相似,温度高低中心位置和强

度与观测基本一致,主要误差是模式模拟的 280 K 线比观测偏北约 700 km。应用强度尺度方法在 280 K 附近加密阈值得到各空间尺度的技巧评分(图 9),其中阈值 278~280 K 的空间尺度 4 上都有明 显的负值,无模拟技巧,误差尺度约为 800 km,定 量地表达了目测检验结果。

4 总结和讨论

本文首次尝试将强度尺度分解方法应用到气 候系统模式模拟的地表月平均温度的检验评估中, 讨论气候模拟场误差的详细空间信息,从中得到以 下几点结论:

(1)以1982年1月(亚洲东部)为例,应用 三种方法分别对检验区域的地表月平均温度模拟 场进行评估,可以得出:目测比较明显看出模拟场 230 K范围线与观测场有较大的误差,经向方向的 误差范围大约是在1300 km 左右;统计分析方法仅 能得出两个场具有较高的正相关,误差较大,无从 反映误差场的空间信息;应用强度尺度分解方法 后,可以发现230 K 阈值在尺度5(大约1600 km) 上模拟技巧非常低,定量地反映了误差场的空间信 息,与目测结论基本一致。

(2)应用强度尺度分解方法对相同检验区域相同月份 1982~2010 年 29 年的模拟情况进行检验评估分析,发现在这 29 年中大部分年份都出现了与1982 年相似的误差空间信息,即 230 K 阈值在尺度5(大约 1600 km)上模拟技巧相对其他尺度明显低。这个误差在 29 年中大部分年份都出现了,说明模式对这个区域的模拟有待改进。

(3)改变检验区域和检验月份,通过强度尺度 分解方法也定量得到了与目测比较相一致的误差 空间信息。

需要指出的是,强度尺度分解方法中用到的 Haar 小波是非连续的,因此适合于非连续场(如天 气过程的降水场)的检验,通过对不同强度阈值不 同空间尺度成员进行评估,从而分离出并客观定量 评价中尺度降水和对流性降水的预报效果,特别是 能够很好地表达预报对象位置偏移误差及其大小。 而气候温度场是连续场,本文工作表明 Haar 小波 同样也可用于该连续场的检验,但是否存在更适合 于温度场检验的子波尚有待于进一步研究。此外, 降水场本身具有不同空间尺度的物理过程,不同尺 度的模拟差异可能主要体现对应的降水参数化方



图 8 1982 年 6 月的月平均地表温度(单位: K): (a) CSM 模式模拟; (b) CRUNECP 观测; (c) 模拟与观测之差 Fig. 8 Monthly mean surface temperature (units: K) of June 1982: (a) CSM results; (b) CRUNCEP data; (c) the differences between CSM results and CRUNCEP data





案的结果。与之相比,地表温度场不仅在纬度上具 有显著梯度变化,而沿经度方向大尺度特征则一般 反映海洋性与大陆性气候差异,而在局部的空间结 构则体现陆表特征(如地形、植被分布等)差异, 因而对气候温度场的检验反映的是上述多因素共 同作用的复杂结果。强度尺度分解方法采用的温度 强度阈值及尺度,一般而言没有普适的物理意义, 因此需要针对具体问题对于误差结果进行分析。例 如,本文研究的对东北亚区域 1982 年 1 月的模拟 情况,去除该区域平均偏差的整体影响后,误差相 对于实况值的散点分布图显示模式在实况

(CRUNCEP) 温度 240~290 K 的误差有正有负, 但在实况 230 K 以下误差基本为正(图略),表明 模式在该区域对 230 K 以下温度模拟存在系统偏差。具体分析发现,实况中 230 K 以下温度分布区域中心大陆南北方向较窄,同时地势相对较高。而 230 K 阈值下对应的误差空间尺度 5,主要反映实况场低温区温度分布的空间尺度,模拟场在这个地方没有模拟出低于 230 K 的低温区。模式研发及评估人员可利用这些信息,从模式对主要物理过程及模式方案(如海陆相互作用、复杂地形影响、大气环流场的描述等)方面,分析模式产生上述偏差的原因。另一方面,如果将强度尺度分解方法应用于逐日的温度场分析时,还可能出现模式模拟的温度场中心区域出现一定偏差,此时误差对应的空间尺度主要体现为模拟场与实况场的空间偏移。

在使用强度尺度分解方法进行温度场研究时, Picart 采用百分位阈值选取方法生成非连续的空间 结构场。固定百分位间隔使得各百分位阈值的检验 格点个数一样,其所对应的绝对阈值分布范围却不 均。检验格点个数一样,则 B=1, s 等于百分位间 隔,各百分位阈值的均方误差期值 Eu rand 就是一个 常数,计算技巧评分时就仅跟 Eu.1 有关。由于一般 情况下,中间百分位绝对阈值的分布范围要小于两 边百分位绝对阈值的分布范围,因此中间百分位的 技巧评分会低于两边百分位的技巧评分 (Kwiatkowski et al., 2014)。同时百分位的选取方 法本身就是进行了一次订正再进行评估,因此该方 法适用于对中短期气候预测等的诊断评估(这些预 测常对模式模拟的结果进行后处理以排除系统误 差)。而绝对阈值选取方法是将温度场转换为非连 续的空间分布场。各绝对阈值的检验格点个数不 同,计算技巧评分时与 Eu, 1 和 Eu, rand 都有关。由于

*E*_{*u*, rand} 在中间绝对阈值时较大,在两边极值时较小,因此如本文所示,通常两边极值的技巧评分会相对差些。该方法适用于耦合模式(如气候系统模式、地球系统模式等)的误差诊断分析,因为在这些系统中不同分系统模式之间有大量数据传递,需要对各分系统的模拟结果进行直接检验。

参考文献 (References)

- Briggs W M, Levine R A. 1997. Wavelets and field forecast verification [J]. Mon. Wea. Rev., 125 (6): 1329–1341, doi:10.1175/1520-0493(1997)125< 1329:WAFFV>2.0.CO;2.
- Casati B, Ross G, Stephenson D B. 2004. A new intensity-scale verification approach for the verification of spatial precipitation on forecasts [J]. Meteor. Appl., 11 (2): 141–154, doi:10.1017/S1350482704001239.
- Casati B. 2010. New developments of the intensity-scale technique within the spatial verification methods intercomparison project [J]. Wea. Forecasting, 25 (1): 113–143, doi:10.1175/2009WAF2222257.1.
- Csima G, Ghelli A. 2008. On the use of the intensity-scale verification technique to assess operational precipitation forecasts [J]. Meteor. Appl., 15 (1): 145–154, doi:10.1002/met.49.
- Dickinson R E, Oleson K W, Bonan C, et al. 2006. The community land model and its climate statistics as a component of the community climate system model [J]. J. Climate, 19 (11): 2302–2324, doi:10.1175/JCLI3742.1.
- Jolliffe I T, Stephenson D B. 2003. Forecast Verification: A Practitioner's Guide in Atmospheric Science [M]. New York: Wiley and Sons, 240pp.
- 孔荣,王建捷,梁丰,等. 2010. 尺度分解技术在定量降水临近预报检验 中的应用 [J]. 应用气象学报, 21 (5): 535–544. Kong Rong, Wang Jianjie, Liang Feng, et al. 2010. Applying scale decomposition method to verification of quantitative precipitation nowcasts [J]. J. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese), 21 (5): 535–544, doi:10.11898/1001-7313.20100503.
- Kwiatkowski L, Halloran P R, Mumby P J, et al. 2014. What spatial scales are believable for climate model projections of sea surface temperature?
 [J] Climate Dyn., 43 (5–6): 1483–1496, doi:10.1007/s00382-013-1967-6.
- Liu Hailong, Zhang Xuehong, Li Wei, et al. 2004. An eddy-permitting oceanic general circulation model and its preliminary evaluation [J]. Adv. Atmos. Sci., 21 (5): 675–690, doi:10.1007/BF02916365.
- Liu Hailong, Lin Pengfei, Yu Yongqiang, et al. 2012. The baseline evaluation of LASG/IAP climate system Ocean Model (LICOM) version

2 [J]. Acta Meteor. Sinica, 26 (3): 318–329, doi:10.1007/s13351-012-0305-y.

- Mittermaier M P. 2006. Using an intensity-scale technique to assess the added benefit of high-resolution model precipitation forecasts [J]. Atmos. Sci. Lett., 7 (2): 36–42, doi:10.1002/asl.127.
- Picart S S, Butenschön M, Shutler J D. 2012. Wavelet-based spatial comparison technique for analysing and evaluating two-dimensional geophysical model fields [J]. Geosci. Model Dev., 5 (1): 223–230, doi:10.5194/gmd-5-223-2012.
- Su Tonghua, Xue Feng, Zhang He. 2014. Simulating the intraseasonal variation of the East Asian summer monsoon by IAP AGCM4.0 [J]. Adv. Atmos. Sci., 31 (3): 570–580, doi:10.1007/s00376-013-3029-8.
- 孙泓川,周广庆,曾庆存. 2012. IAP 第四代大气环流模式的耦合气候系统模式模拟性能评估 [J]. 大气科学, 36 (2): 215–233. Sun Hongchuan, Zhou Guangqing, Zeng Qingcun. 2012. Assessments of the climate system model (CAS-ESM-C) using IAP AGCM4 as its atmospheric component [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36 (2): 215–233, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.11062.
- Wang Bin, Xie Xin, Li Lijuan. 2009. A review on aspects of climate simulation assessment [J]. Adv. Atmos. Sci., 26 (4): 736–747, doi:10. 1007/s00376-009-9038-y.
- 徐同, 戴建华, 李佳, 等. 2012. 强度尺度方法在模式定量降水预报检验 中的应用 [J]. 气象与环境科学, 35 (1): 1–7. Xu Tong, Dai Jianhua, Li Jia, et al. 2012. Applying intensity-scale approach to verification of model quantitative precipitation forecast [J]. Meteor. Environ. Sci. (in Chinese) 35 (1): 1–7, doi:10.3969/j.issn.1673-7148.2012.01.001.
- Yan Zhengbin, Lin Zhaohui, Zhang He. 2014. The relationship between the East Asian subtropical westerly jet and summer precipitation over East Asia as simulated by the IAP AGCM4.0 [J]. Atmos. Oceanic Sci. Lett., 7 (6): 487–492, doi:10.3878/AOSL20140048.
- 张贺, 林朝晖, 曾庆存. 2009. IAP AGCM-4 动力框架的积分方案及模式 检验 [J]. 大气科学, 33 (6): 1267–1285. Zhang He, Lin Zhaohui, Zeng Qingcun. 2009. The computational scheme and the test for dynamical framework of IAP AGCM-4 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (6): 1267–1285, doi:10.3878/j.issn.1006-9895. 2009.06.13.
- Zhang He, Zhang Minghua, Zeng Qingcun. 2013. Sensitivity of simulated climate to two atmospheric models: Interpretation of differences between dry models and moist models [J]. Mon. Wea. Rev., 141(5): 1558–1576, doi:10.1175/MWR-D-11-00367.1.