

基于长程相关性特征的北京气候中心气候系统模式对中国气温的模拟性能评估*

赵珊珊¹⁾²⁾ 何文平^{1)†}

1)(中国气象局国家气候中心, 北京 100081)

2)(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)

(2014年4月19日收到; 2014年6月13日收到修改稿)

传统对数值模式模拟效果的评估主要是基于均值、趋势、概率密度分布、极值等方面的特征比较模拟要素与观测值的差异或是通过分析模拟值与观测值之间的相关性来定量判断. 这类评估方法主要考虑了模式模拟结果与观测资料在统计上的差异, 缺乏对两者在动力学特征上的比较. 鉴于此, 本文基于气象观测资料演变过程中所展现的长程相关性特征, 利用去趋势波动分析方法对观测资料和模式模拟数据进行标度分析, 研究模式模拟结果是否具有类似于观测资料中的长程相关性特征, 进而通过比较观测资料和模式模拟结果的标度指数, 从大气演变的内在动力学特征上对模式模拟性能进行评估. 本文对北京气候中心气候系统模式对中国地表气温的模拟性能进行了评估, 结果表明, 该模式能够较好地反映出中国区域气温要素的长程相关性特征, 对东北、西北中东部、江淮、江南东部等地模拟效果较好, 但对于青藏高原地区及西北大部、华北、黄淮等地的模拟效果相对较差, 其中对青藏高原地区和西北西部的模拟效果最差.

关键词: 去趋势波动分析, 标度指数, 长程相关性, 模式性能评估

PACS: 92.60.Wc

DOI: 10.7498/aps.63.209201

1 引言

北京气候中心气候系统模式(Beijing Climate Center Climate System Model, BCC_CSM)是由国家气候中心在NCAR-CCSM框架基础上研发的全球海洋-陆地-海冰-大气多圈层耦合的全球气候-碳循环耦合模式, 其中BCC_CSM1.1(m)是目前的一个较新版本, 并已经参与了第五次耦合模式比较计划(the Coupled Model Intercomparison Project Phase 5, CMIP5). 对BCC_CSM的模拟性能的评估已有很多研究. 石彦君等^[1]指出BCC_CSM1.0.1气候系统模式对中国区域的地面温度场模拟效果较好. 姚遥等^[2]评估了8个CMIP5模式对中国气温的模拟能力, 发现BCC_CSM1.1

模式对霜冻日数(日最低气温小于 0°C 的天数)的模拟在东北地区较好, 西北地区较差; 对中国东部模拟的暖事件偏多, 冷事件较少, 西部则相反. 研究表明, BCC_CSM1.1模式能够模拟出1960—2005年全球^[3]和中国^[4]地表温度的变暖趋势; 在年代际尺度上, 对中国东部气温的模拟好于西部; 在年际尺度上, 对中国西北地区西南部和东部、西南地区北部气温的模拟较好. 郭彦等^[5]分析了CMIP5中25个模式的模拟结果, 发现这些模式对中国20世纪后期气温变化的模拟明显好于20世纪前期. 吴统文等^[6]的研究表明, BCC_CSM1.1(m)能够模拟出1971—2000年全球地表气温的空间分布特征, 与ERA40再分析资料的显著误差主要出现在极区和有地形变化的地区, 误差值在 2°C 以内; 与BCC_CSM1.1相比, BCC_CSM1.1(m)模拟的地

* 全球变化研究国家重大科学研究计划(批准号: 2012CB955902)、国家自然科学基金(批准号: 41275074, 41175067)和公益性行业(气象)科研专项(批准号: GYHY201106015, GYHY201106016)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: wenping_he@163.com

表气温气候场总体上有所改进.

从上述研究工作中不难发现, 传统对数值模式模拟效果的评估方法主要是基于模拟要素的均值、趋势、概率密度(包括频次)、极值等方面的特征与观测值的差异大小来定量判断. 这类评估方法主要是考虑了模式模拟值与观测资料在统计上的差异, 但缺乏对观测资料与模拟资料在动力学特征上的比较. 鉴于此, 本文另辟蹊径, 拟从观测资料中所蕴藏的大气内在动力学特征角度出发, 尝试对模式的模拟效果进行动力学意义上的定量评估.

非线性科学的研究成果表明, 自然界中的许多事物具有分形特征. 对于一个随机变化的过程, 亦满足这种分形特征, 但随机变量的演化在时间上没有任何相关性. 气候系统是一个典型的具有自组织、自适应的非线性系统, 过去的气候演变对于气候系统未来的状态演变趋势具有长时间的作用, 这种作用已经被许多科学家所揭示和证明^[7-13]. 在非线形科学中, 这种长期持续性的作用常被称为“长程相关性”(标度性), 或“长期自记忆性”, 它意味着气候系统的演化状态具有持续性特点. 长程相关性本质上描述的是气候系统在不同时间尺度上演变的自相似性. 去趋势波动分析方法(detrended fluctuation analysis, DFA)是一种研究时间序列长程相关性的非线性方法, 它可以将气候时间序列中的趋势性变化滤除, 挖掘非平稳时间序列中的内禀关联性特征. 通过DFA方法获得的标度指数较传统的方法更为可靠, 因此, 该方法已经得到了广泛的研究和应用^[14-20]. 如Zhou等^[18]研究了多分形DFA方法与传统多分形分析方法的关系; Tang等^[20]揭示了DFA标度指数与Lempel-Ziv复杂度具有很高的相关性.

本文基于气候系统的长程相关性特征, 提出了一种基于大气演变的内在动力学特征的模式评估方法, 并结合地面台站观测的逐日气温资料对BCC_CSM1.1(m)气候系统模式在中国地区的模拟性能进行评估. 本文的主要思路简述如下: 首先利用DFA方法对观测资料和模式模拟结果进行标度分析, 再考察模式模拟结果是否具有类似于观测资料中的长程相关性特征; 若有, 则通过比较观测资料和模式模拟结果的标度指数之间的差异评估模式的模拟效果.

2 资料及方法

2.1 模拟数据和观测资料

BCC_CSM1.1(m)是一个全球气候-碳循环耦合模式, 关于该模式的一些具体细节描述可以参考文献^[21-25]. 由于CMIP5的历史试验在2006年以后外强迫场与之前有所不同, 在本研究中采用了1975—2005年BCC_CSM1.1(m)历史试验输出的逐日气温资料, 包括日平均、日最高和日最低气温. 相应研究时段的逐日气温观测资料来源于国家气象信息中心, 主要包括了中国600个气象台站的日平均、日最高和日最低气温记录. 为了便于定量的评估观测和模拟资料中长程相关性的差异, 站点观测数据被插值到与模式网格精度一致的格点上.

2.2 DFA方法

DFA方法的计算过程简述如下: 对于时间序列 $\{x_i, i = 1, 2, \dots, N\}$, 首先计算序列的累积量 X_n ,

$$X_n = \sum_{i=1}^n \Delta x_i, \quad (1)$$

$\Delta x_i = x_i - \bar{x}$, 这里 \bar{x} 为序列 $\{x_i, i = 1, 2, \dots, N\}$ 的平均值. 然后将累积量序列 $\{X_i, i = 1, 2, \dots, N\}$ 分成不重合的等长度(窗口长度)为 τ 的子序列. 对于 p 阶DFA分析过程(DFA_p), 在每一段长度为 τ 的累积量子序列中, 对其局部趋势采用 p 阶多项式进行拟合. 将累计量序列去掉局部拟合趋势后可得到波动序列 $\{y_\tau(i), i = 1, 2, \dots, N\}$. 最后, 平均所有各段波动序列 y_τ 的方差可得到均方波动函数 $F_p(\tau)$:

$$F_p(\tau) = \left\langle \frac{1}{\tau[N/\tau]} \sum_{i=1}^{\tau[N/\tau]} y_\tau^2(i) \right\rangle^{1/2}, \quad (2)$$

$\langle \cdot \rangle$ 表示对所有的窗口取平均. 若 $F_p(\tau)$ 与窗口长度 τ 存在标度关系, 则有

$$F_p(\tau) \sim \tau^\gamma, \quad (3)$$

其中 γ 为标度指数. 若 $\gamma > 1/2$, 意味着序列具有长程相关性, 表明过去的增加趋势(减少)暗含着未来极有可能仍然保留这种增加(减少)的趋势; 若 $\gamma < 1/2$, 表明序列具有反的持续相关性; $\gamma = 1/2$ 则表明序列不具有相关性, 为随机序列. 在本研究中使用2阶DFA分析.

3 BCC_CSM1.1(m)对中国地区气温要素的模拟效果评估

3.1 观测资料和模式模拟值的DFA分析

已有的研究表明^[26], 气温随时间的演变具有长程相关性特征. 为了考察BCC_CSM1.1(m)模拟的气温要素是否具有此种特征, 本文对其模拟的中国区域的日气温要素进行了DFA分析. 图1分别给出了观测与模拟的北京站日平均、日最高和日最低气温的DFA分析结果. 无论是日平均气温, 还是日最低和日最高气温, BCC_CSM1.1(m)模拟的气温要素均展示了类似于台站观测资料中的标度特征, 即窗口长度的对数与均方波动函数的对数在月以上的时间尺度上呈现较好的线性关系, 表明北京站的气温具有分形特征. 对于观测资料, 北京站的日平均、日最高和日最低气温的标度指数值分别为0.71, 0.69和0.69. 根据标度指数的物理意义可知, 北京站的逐日气温要素具有明显的长程相关性特征. 模式模拟的北京日平均、日最高和日最低气温的标度指数值分别为0.73, 0.69和0.73. 这意味着该模式能够较好地模拟北京站日气温要素的长程相关性特征. 就观测资料和模拟结果的标度指数的差异大小而言, BCC_CSM1.1(m)对北京站日气

温要素的模拟都较接近观测, 其中日最高气温的模拟效果最好, 其次是日平均气温, 日最低气温的模拟效果相对较差(图1). 此外, BCC_CSM1.1(m)模拟的日气温要素的均方波动函数值的对数均明显大于观测资料, 表明模拟的日气温要素的方差也较观测资料偏大. 对BCC_CSM1.1(m)模拟的中国区域其他站点的日气温要素也进行了DFA分析, 结果表明模式模拟数据均具有标度特征, 且能够较好地模拟中国地表日气温要素随时间演变的长程相关性特征.

3.2 模式对中国地表气温要素的模拟评估

由于气温的观测资料和模式模拟结果均展现出标度性特征, 因此可基于模式模拟值与观测资料的标度指数之间的差异对模式的模拟效果进行定量评估. 鉴于此, 本文对BCC_CSM1.1(m)模式对中国区域的气温要素的模拟效果进行了定量评估. 对1975—2005年观测的日平均气温的DFA分析结果表明, 中国区域的日平均气温的标度指数都明显大于0.6, 且呈现出西部和东北部高于中东部的特征(图2(a)). 这意味着中国日平均气温具有长程相关性, 中国西部和东北部的日平均气温具有较强的

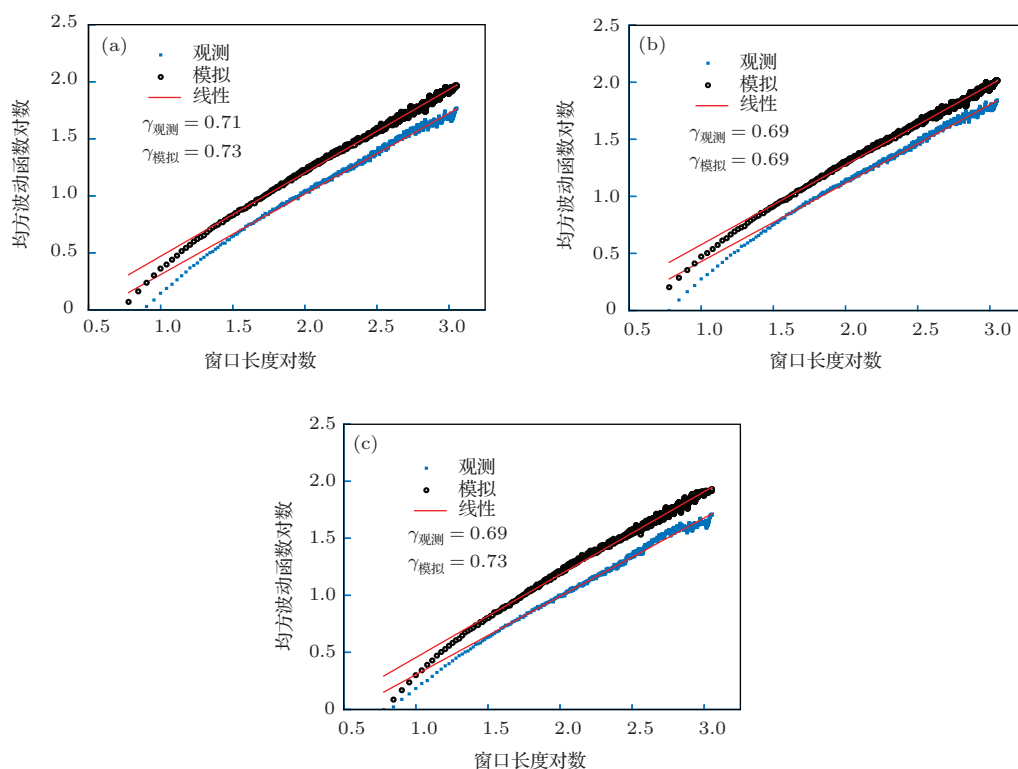


图1 北京站气温观测与模拟值的DFA2分析(1975—2005年) (a) 日平均气温的观测与模拟值的DFA分析; (b) 同图1(a), 但为日最高气温; (c) 同图1(a), 但为日最低气温

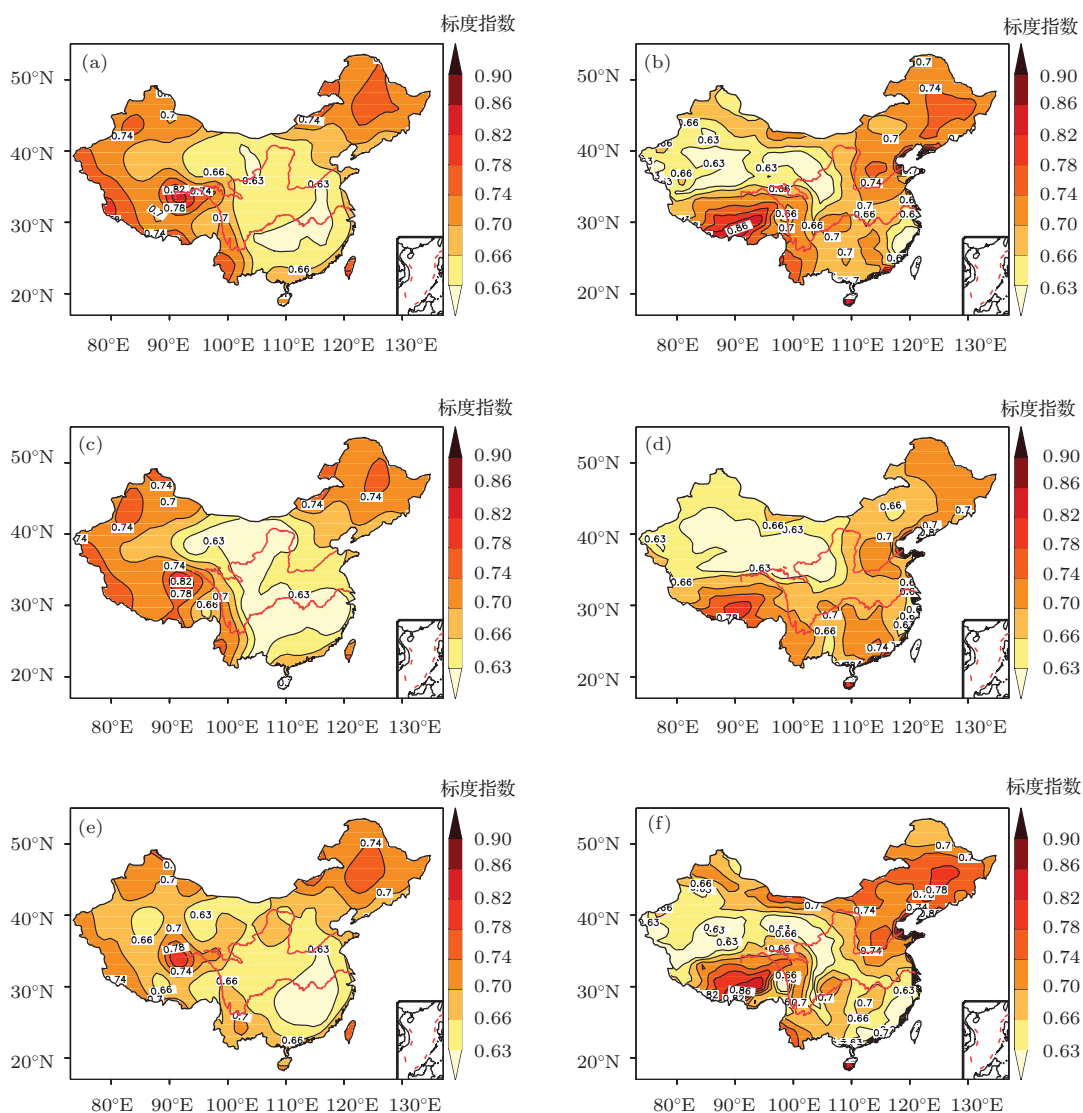


图2 (网刊彩色) 中国日地表气温观测资料与BCC_CSM1.1(m)模拟气温数据的标度指数分布(1975—2005年) (a) 日平均气温的标度指数分布; (b) 同图2(a), 但为模式模拟资料; (c) 日最高气温的标度指数分布; (d) 同图2(c), 但为模式模拟资料; (e) 日最低气温的标度指数分布; (f) 同图2(e), 但为模式模拟资料

持续性变化特征, 尤其是东北大部、内蒙古大部、新疆大部、青藏高原大部以及云南大部等地, 这些地区标度指数在0.7以上. 中国中东部大部地区标度指数小于0.7, 其中江西北部及贵州、湖北、安徽等地标度指数在0.63以下(图2(a)). 模式模拟的日平均气温标度指数均大于0.6, 表明模式对于日平均气温的长程相关性特征具有一定的模拟能力, 其中标度指数大值区($\gamma > 0.7$)主要位于东北、华北、黄淮及青藏高原大部、内蒙古大部、云南等地(图2(b)). 与观测数据相比, 模式模拟的日平均气温的标度指数在西北地区大部偏小, 青藏高原北部和西部及新疆大部标度指数偏小0.05—0.1, 其中西藏西部和北部、青海南部、新疆西部局地偏小0.1以上; 而在华北大部、黄淮、江南中西部及贵州、重庆、西藏东部等地标度指数一般偏大0.05—0.1, 其中西

藏东南部、华北南部局地偏大0.1—0.15. 模式模拟的中国其余大部地区日平均气温的标度指数均接近观测(图3(a)).

对日最高气温的DFA2分析结果表明, 台站观测的日最高气温具有长程相关性, 且与观测的日平均气温的标度指数空间分布较为类似, 即具有西部和东北部高于中东部的特征, 标度指数在0.7以上的地区与日平均气温基本一致(图2(c)). 与日平均气温标度指数的空间分布相比, 日最高气温的标度指数小于0.63的范围更大, 包括了西北中东部、西南东北部、江南、江汉等地. 模式模拟的日最高气温标度指数大值区($\gamma > 0.7$)主要位于青藏高原东南部、东北大部、华北大部、江南中西部、华南大部及云南等地(图2(d)). 与观测数据相比, 模式模拟的日最高气温标度指数在青藏高原北部和西部、新疆

等地普遍偏小0.05—0.1 (图3(b)), 在这些地区标度指数均在0.6以上(图2(d)), 表明模式模拟的日最高气温的长程相关性虽然在这些地区有所减弱, 但还是能够对这一特征进行较好的模拟. 在华北大部、黄淮大部、江汉、江南大部、华南东部及贵州大部、重庆、四川东部、西藏东南部等地模式模拟的标度指数比观测一般偏大0.05—0.1, 局地偏大0.1以上; 中国其余地区的模拟值的标度指数均接近观测(图3(b)).

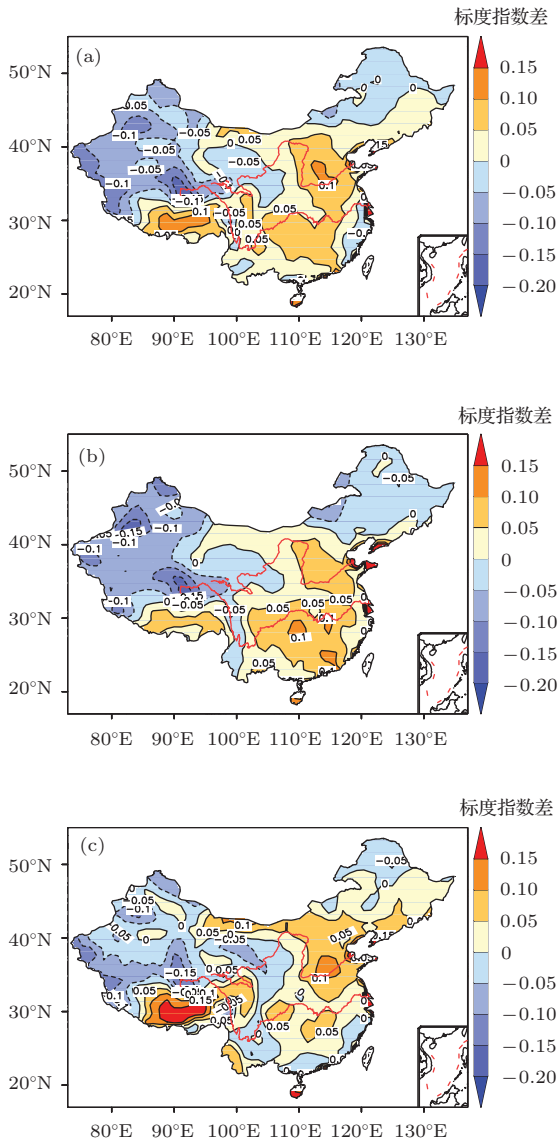


图3 (网刊彩色) BCC_CSM1.1(m) 模拟的气温与观测的中国区域日地表气温(1975—2005年)的标度指数之差的空间分布 (a) 日平均气温; (b) 日最高气温; (c) 日最低气温

观测的日最低气温亦具有长程相关性, 其标度指数的空间分布特征与日平均气温相似, 但长程相关性相对较强的地区($\gamma > 0.7$)的范围明显变小, 主

要分布在东北大部、内蒙古东北部、新疆北部、青海南部、西藏北部和西南部等地(图2(e)). 模式对日最低气温模拟的标度指数大值区($\gamma > 0.7$)主要位于青藏高原大部、新疆北部、内蒙古大部、东北、华北、黄淮及云南南部等地(图2(f)). 与观测相比, 新疆北部局地、甘肃中部、青藏高原北部等地模式模拟的日最低气温标度指数偏小0.05—0.1, 其中青海西南部偏小0.1以上(图3(c)), 但这些地区模式模拟的日最低气温标度指数一般在0.6以上(图2(f)), 表明模式仍能够模拟出日最低气温的长程相关性特征; 华北大部、黄淮及湖南北部、重庆、四川西部、西藏东部、内蒙古西部等地模拟的日最低气温标度指数偏高0.05—0.1, 其中西藏东南部偏高0.1以上(图3(c)), 表明模式在这些地区模拟的日最低气温的长程相关性偏强; 中国其余大部地区模拟的日最低气温标度指数接近观测(图3(c)).

4 结 论

本文采用DFA方法对中国地表气温的观测资料和BCC_CSM1.1(m)模式模拟值进行了标度分析, 发现观测的日地表气温具有很好的长程相关性特征. 这种特征激发了我们利用DFA方法对BCC_CSM1.1(m)模式模拟效果进行定量评估的思路, 进而探讨了基于大气演变的内在动力学特征对模式模拟性能进行评估的可行性, 这与以往对数值模式模拟性能的评估方法是截然不同的, 即传统对于模式性能的评估主要基于模拟值与观测值在统计特征上差异的显著性, 而本研究的优越性主要体现在尝试从观测资料中所蕴含的气候系统演变的内在动力学特征入手, 定量考察模式对这种动力学特征的模拟程度, 进而对模式的性能进行评估.

本文的研究结果表明, 中国区域台站观测的日平均气温和日最高气温的标度指数都表现为西部和东北部大、中东部小的特征. 观测的日最低气温标度指数空间分布特征与日平均气温、日最高气温类似, 但亦存在一些细节上的差异. 总体而言, BCC_CSM1.1(m)模拟能够较好地反映出中国区域地表气温要素的长程相关性特征, 对东北、西北中东部、江淮东部模拟效果较好, 但对于青藏高原地区及西北大部、华北、黄淮等地的模拟效果相对较差, 其中对青藏高原地区和西北西部的模拟效果最差.

参考文献

- [1] Shi Y J, Ren Y L, Wang S G, Shang K Z, Li X, Zhou G L 2012 *Plateau Meteorol.* **31** 1257 (in Chinese) [石彦君, 任余龙, 王式功, 尚可政, 李旭, 周甘霖 2012 高原气象 **31** 1257]
- [2] Yao Y, Luo Y, Huang J B 2012 *Advances in Climate Change Research* **8** 250 (in Chinese) [姚遥, 罗勇, 黄健斌 2012 气候变化研究进展 **8** 250]
- [3] Gao F, Xin X G, Wu T W 2012 *Chin. J. Atmos. Sci.* **36** 1165 (in Chinese) [高峰, 辛晓歌, 吴统文 2012 大气科学 **36** 1165]
- [4] Zhou X, Li Q Q, Sun X B, Wei M 2014 *J. Appl. Meteorol. Sci.* **25** 95 (in Chinese) [周鑫, 李清泉, 孙秀博, 魏敏 2014 应用气象学报 **25** 95]
- [5] Guo Y, Dong W J, Ren F M, Zhao Z C, Huang J B 2013 *Advances in Climate Change Research* **9** 181 (in Chinese) [郭彦, 董文杰, 任福民, 赵宗慈, 黄健斌 2013 气候变化研究进展 **9** 181]
- [6] Wu T W, Song L C, Li W P, et al. 2014 *Acta Meteorol. Sin.* **72** 12 (in Chinese) [吴统文, 宋连春, 李伟平等 2014 气象学报 **72** 12]
- [7] Bartos I, Jánosi I M 2006 *Nonlin. Proc. Geophys.* **13** 571
- [8] Zheng Z F, Zhang X L, Cao H X, Xie Z, Pan J H 2007 *Chin. J. Geophys.* **50** 420 (in Chinese) [郑祚芳, 张秀丽, 曹鸿兴, 谢庄, 潘家华 2007 地球物理学报 **50** 420]
- [9] Liu S D, Rong P P, Chen J 2000 *Acta Meteorol. Sin.* **58** 111 (in Chinese) [刘式达, 荣平平, 陈炯 2000 气象学报 **58** 111]
- [10] Cheng J, She Z S, Liang S, Liu S D 2003 *J. Nanjing Inst. Meteorol.* **26** 24 (in Chinese) [陈炯, 余振苏, 梁爽, 刘式达 2003 南京气象学院学报 **26** 24]
- [11] Koscielny-Bunde E, Bunde A, Havlin S, Goldreich 1996 *Physica A* **231** 393
- [12] Cao H X 1993 *Sci. China* **23** 104 (in Chinese) [曹鸿兴 1993 中国科学 **23** 104]
- [13] Feng G L, Dong W J 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 2347 (in Chinese) [封国林, 董文杰 2003 物理学报 **52** 2347]
- [14] Peng C K, Buldyrev S V, Havlin S, Simons M, Stanley H E, Goldberger A L 1994 *Phys. Rev. E* **49** 1685
- [15] Peng C K, Havlin S, Goldberger A L 1995 *Chaos* **5** 82
- [16] He W P, Feng G L, Wu Q, Wan S Q, Chou J F 2008 *Nonlin. Proc. Geophys.* **15** 601
- [17] Hou W, Zhang D Q, Zhou Y, Yang P 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 109203 (in Chinese) [侯威, 章大全, 周云, 杨萍 2011 物理学报 **60** 109203]
- [18] Zhou Y, Leung Y, Yu Z G 2011 *Chin. Phys. B* **20** 090507
- [19] Zhu S S, Xu Z X, Yin K X, Xu Y L 2011 *Chin. Phys. B* **20** 050503
- [20] Tang Y F, Liu S L, Jiang R H, Liu Y H 2013 *Chin. Phys. B* **22** 030504
- [21] Wu T W, Yu R C, Zhang F 2008 *J. Atmos. Sci.* **65** 2235
- [22] Wu T W, Yu R C, Zhang F, Wang Z Z, Dong M, Wang L N, Jin X, Chen D L, Li L 2010 *Clim. Dyn.* **34** 123
- [23] Wu T W 2012 *Clim. Dyn.* **38** 725
- [24] Xin X G, Wu T W, Zhang J 2012 *Advances in Climate Change Research* **8** 378 (in Chinese) [辛晓歌, 吴统文, 张洁 2012 气候变化研究进展 **8** 378]
- [25] Ji J J, Huang M, Li K R 2008 *Sci. China D: Earth Sci.* **51** 885
- [26] He W P 2008 *Ph. D. Dissertation* (Lanzhou: Lanzhou University) (in Chinese) [何文平 2008 博士学位论文 (兰州: 兰州大学)]

Performance evaluation of Chinese air temperature simulated by Beijing Climate Center Climate System Model on the basis of the long-range correlation^{*}

Zhao Shan-Shan¹⁾²⁾ He Wen-Ping^{1)†}

1) (National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China)

2) (Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

(Received 19 April 2014; revised manuscript received 13 June 2014)

Abstract

The traditional evaluation of simulation performance for numerical model is based on the differences in average, trend, probability density distribution, extreme value, variance and self-correlation between observational data and the simulated data by numerical model. These evaluation methods mainly depend on the comparison of statistical difference between the simulation and observation, but ignore the comparison in the dynamical characteristics of climate system. In view of this, in the present paper we use detrended fluctuation analysis (DFA) method to analyze the scaling characteristics of daily temperature from observational data and the corresponding simulated data by climate model, and investigate whether the long-range correlation of meteorological elements can exist in the simulated data of climate model. If so, we can assess the performance of climate model based on the comparison of scaling index between the observational data and the simulated data. As an example, the performances of Beijing Climate Center Climate System Model (BCC_CSM1.1(m)) model, including simulated daily average temperature, daily maximum temperature and daily minimum temperature, are assessed by using DFA. The results indicate that the long-range correlation characteristics of temperature in China can be simulated by BCC_CSM1.1(m). But the simulation errors are relatively large in Qinghai-Tibet Plateau, most West China, North China, and Huanghuai district. Thereinto, the performance of BCC_CSM1.1(m) in Qinghai-Tibet Plateau and western West China is worst in China.

Keywords: detrended fluctuation analysis, scaling exponent, long-range correlation, model performance evaluation

PACS: 92.60.Wc

DOI: 10.7498/aps.63.209201

^{*} Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2012CB955902), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 41275074, 41175067), and the Special Scientific Research Fund of Meteorological Public Welfare Profession of China (Grant Nos. GYHY201106015, GYHY201106016).

[†] Corresponding author. E-mail: wenping_he@163.com