陈海山,施思,周晶. 2011. BCC 气候模式对中国近 50 a 极端气候事件的模拟评估[J]. 大气科学学报,34(5):513-528.
Chen Hai-shan, Shi Si, Zhou Jing. 2011. Evaluation of recent 50 years extreme climate events over China simulated by Beijing Climate Center(BCC) climate model[J]. Trans Atmos Sci, 34(5):513-528.

BCC 气候模式对中国近 50 a 极端气候事件的模拟评估

陈海山[1,2],施思[1,2],周晶[1,2]
(南京信息工程大学 1. 气象灾害省部共建教育部重点实验室;2. 大气科学学院,江苏 南京 210044)

摘要:利用中国区域 437 站 1958—2005 年逐日气温和降水资料,评估了国家气候中心(Beijing Climate Center,BCC)气候模式对中国近 50 a 极端气候事件空间分布、时间演变等方面的模拟能力。结果表明:1)模式对极端温度和降水多年平均的空间分布具有一定的模拟能力,但尚存在系统性的偏差。暖昼日数的模拟优于冷夜日数,全年冷夜日数的模拟优于冬季和夏季的模拟,而全年和夏季暖昼日数的模拟优于冬季的模拟。极端降水频次的模拟优于极端降水量的模拟;夏季和全年的模拟优于冬季的模拟。夏季极端降水频次的模拟较好,但冬季的模拟在长江中下游和华南偏小、北方偏大,而全年的模拟在长江下游及南部沿海地区系统性偏大;夏季和全年极端降水量的模拟系统性偏低,而冬季在北方偏高、南方偏低。2)模式较好地模拟出了夏季和全年冷夜日数的全国较为一致的减少趋势,再现东北和东南沿海地区冬季冷夜日数的减少趋势,但模拟的趋势较实测偏弱。模式对暖昼日数长期趋势的模拟效果较理想,较好地反映出了大部分地区暖昼事件发生频率显著增加的特征,但冬季的模拟尚有待改进。模式较好地模拟出了夏季和全年极端降水频次的长期趋势,较好地刻画了极端降水频次"南增北减"的特征;模式对冬季极端降水频次的变化趋势几乎无模拟能力。同样,模式也较好地模拟出了极端降水量夏季南增北减的分布形势和冬季的总体增加趋势,但对全年的模拟不理想。3)模式能较好地模拟出冷夜日数和暖昼日数异常变化的主要空间型,对 EOF 第一模态的时间演变特征具有一定模拟能力;但模式对第二模态时间演变特征的刻画能力较差。模式对极端降水指标的年际变化具有一定的模拟能力,对部分区域极端降水事件的年际变化具有较好的模拟能力;但模拟能力表现出了明显的区域性差异,部分区域极端降水年际变化的模拟结果与实况甚至相反,模式对极端降水年际变化的模拟能力还有待提高。所得结果可为 BCC 气候模式的改进及极端气候模拟、预估提供一定的参考。

关键词:极端气候事件;空间分布;时间演变;长期趋势;BCC 气候模式;数值模拟;模式评估
中图分类号:P463 **文献标识码**:A **文章编号**:1674-7097(2011)05-0513-16

Evaluation of recent 50 years extreme climate events over China simulated by Beijing Climate Center(BCC) climate model

CHEN Hai-shan[1,2], SHI Si[1,2], ZHOU Jing[1,2]
(1. Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education;
2. School of Atmospheric Sciences, NUIST, Nanjing 210044, China)

Abstract: By using 1958—2005 daily air temperature and precipitation data from 437 stations over China, the performance of the Beijing Climate Center(BCC) climate model on simulating the spatial and temporal variations of the extreme temperature and precipitation events is evaluated. Results show: 1)

收稿日期:2010-12-11;**改回日期**:2011-08-30
基金项目:国家科技支撑计划课题(2007BAC29B03);江苏省"333 高层次人才培养工程"资助项目;江苏省"青蓝工程"资助项目
作者简介:陈海山(1973—),男,云南玉溪人,博士,教授,博士生导师,研究方向为陆气相互作用、陆面过程与气候数值模拟、气候变化与短期气候预测,haishan@nuist.edu.cn.

BCC model can capture the predominant spatial patterns of the averaged extreme temperature and precipitation events, but produce systematic bias compared to the observations. On the whole, the model performs better in warm days (TX95p) simulation than cold nights (TN5p) simulation. The simulation of annual TN5p is better than those of winter and summer, and the simulations of the annual and summer TX95p are better than that of winter. The simulation of the frequency of extreme precipitation (R95p) is better than that of the extreme precipitation amounts (R95t), and the simulations of the annual and summer R95p (R95t) are better than that of winter. BCC model reproduces main features of summer R95p, but overestimates (underestimates) winter R95p in the northern regions of China (the mid-lower reaches of Yangtze River and South China). Systematically positive bias is found in the annual R95p simulation over the lower Yangtze River and the southern part coastal areas of China. It is found that both summer and annual R95t are underestimated. For winter case, R95t is overestimated (underestimated) to some extent in north (south) part of China. 2) Consistently decreasing trends of summer and annual TN5p over China and decreasing trend of winter TN5p in the Northeast and Southeast China are well reproduced, however the simulated trends are somewhat underestimated. The model has very good performance in simulating the long-term trends of TX95p and describes the significant increasing trends over most areas. However, the simulation of winter TX95p needs to be improved in the future. About summer and annual R95p, the observed increasing (decreasing) trends in the southern (northern) region are well simulated. The model shows poor performance in winter R95p simulation. The model also produces satisfactory results for both summer and winter R95t simulation, but gives bad results for the annual case. 3) BCC model captures the spatial patterns of leading EOF modes of TN5p and TX95p anomalies, also the main features of the temporal evolution of the first EOF modes, but fails to describe the temporal evolution of the second EOF modes. The model reproduces some basic features about the interannual variation of the extreme precipitation, and has very good performance in some areas. However, the model performance exhibits evident regional differences, and the simulated results over some areas are even contrary to the observation, which suggests that the capability of the model in simulating the interannual variability of extreme precipitation events needs to be greatly improved. This study provides some clues for BCC model improvement as well as its applications in extreme climate events simulation and projection.

Key words: extreme climate event; spatial pattern; temporal evolution; long-term trend; BCC climate model; numerical simulation; model evaluation

0 引言

随着全球气候的持续变暖,一方面与气温有关的极端事件频繁发生,另一方面由于变暖带来的水循环加快,导致极端降水事件也日趋增多(IPCC, 2001,2007)。因此,有关极端气候演变规律、物理机制及其预估引起了国内外学者的广泛关注。近年来,中国学者针对我国的极端气温、降水和极端天气气候事件开展了大量的研究(胡宜昌等 2007;翟盘茂等,2007)。一系列工作先后就我国极端气温和极端降水的时空演变规律及其变化趋势进行了大量的研究(Zhai and Eskridge,1997;江志红等,1998;任福民和翟盘茂,1998;Zhai et al. ,1999;翟盘茂和潘晓华,2003;刘学华等,2006;蔡敏等,2007;王冀和江志红,2008;杨金虎等,2008a;陈海山等,2009;王志福和钱永甫,2009),另外的一些研究则从大气环流异常和海温等外强迫的角度探讨了我国及区域极端气候的成因(何卷雄等,2002;张永领和丁裕国,2004;王冀等,2007;所玲玲等,2008;杨金虎等,2008b;史军等,2009)。

气候模式作为气候模拟和未来气候变化预估的重要工具,在全球变暖及人类活动影响气候变化的研究以及未来气候的变化趋势预估中得到了广泛的应用。近年来,我国学者采用气候模式开展了大量有关我国未来气候变化预估的研究工作(石广玉等,2002;高学杰等,2003;徐影等,2003;姜大膀等,2004;许吟隆,2005;王冀等,2008;赵宗慈等,2008;江志红等,2009)。由于气候模式的本身尚存在系统性的误差,这在很大程度上增加了气候模拟和气候预估的不确定性,而模式评估本身也就显得尤为重要。近年来,中国国家气候中心在 NCAR CAM3 模式基础上,发展了中国国家气候中心新一代的气

候模式 BCC_AGCM2.0.1(Wu et al.,2008a,2008b)。国内,已有不少学者利用该模式开展了大量的研究。例如 Wu et al.(2008b)系统评估了 BCC_AGCM2.0.1 模式对降水、温度、环流等要素的气候平均态和季节循环状况的模拟能力,指出该模式在多方面的性能均优于 CAM3.0。王璐等(2009)分析了模式对亚澳季风年际变率的模拟情况;董敏等(2009)则评估了 BCC_AGCM2.0.1 模式对热带季节内振荡的模拟能力,发现模式在模拟热带季节内振荡方面比 CAM3.0 模式有明显改进。颉卫华和吴统文(2010)利用该模式对 1998 年 6 月 24 日—7 月 3 日发生在我国江淮流域的强降水天气过程进行了回报试验,指出该模式对 20 mm 以上的降水具有一定的预报能力,但对大于 30 mm 的强降水的预报能力则较差。以上研究表明,BCC_AGCM 2.0.1 模式对东亚气候的模拟能力相较于 CAM3 来说有了显著的提高,但该模式对中国极端天气气候事件的模拟能力如何?目前还缺乏系统全面的评估。

正是基于以上考虑,本文重点利用中国区域 437 站 1958—2005 年逐日最高气温、最低气温和逐日降水资料,从极端气候的空间分布、时间演变和长期趋势等角度,较为全面评估 BCC_AGCM 2.0.1 模式对中国区域极端气候事件的模拟能力,以期为 BCC 模式的改进及其在极端气候模拟及预估提供一定的参考。

1　模式、资料和方法

1.1　模式和资料

BCC_AGCM2.0.1 是由中国国家气候中心开发的新一代全球大气环流模式,模式的水平分辨率为 T42,垂直分 26 层,主要用于气候预测及气候变化的相关研究。有关 BCC 气候模式的动力框架及主要物理过程的详细介绍可参考 Wu et al.(2008a,2008b)和董敏等(2009)的文章。

文中所用模式资料来源于 BCC_AGCM2.0.1 模式 20 世纪气候模拟试验的结果,模式积分时间从 1870 年至 2006 年,这里选取 1958—2005 年逐日最高气温、最低气温和降水模式结果进行分析。观测资料来源于国家气候中心整编的 753 站逐日最高、最低气温和逐日降水资料。考虑到缺测及台站迁徙所造成的观测资料的不完整性,剔除了缺失数据较多(缺测大于 5%)的站点,最后选取 437 站 1958—2005 年逐日最高气温、最低气温和降水资料,站点分布如图 1 所示。为了便于模式结果与站点资料的比较,通过双线性插值法将模式结果插值到相应的站点上。

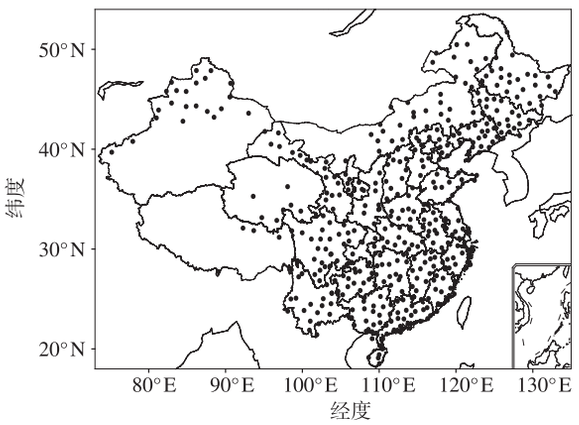

图 1　中国 437 站的分布情况

Fig. 1　The geographic distribution of 437 stations in China

1.2　方法

中国气候状况复杂,不能绝对地规定极端气候事件标准,应考虑不同地区的气候状况,不适合采用绝对阈值判断极端事件。本文从政府间气候变化委员会指数专家小组 ETCCDMI(Expert Team on Climate Change Detection,Monitoring and Indices)提供的 27 个表征极端天气气候变化的气候代用指数中选取了冷夜日数(TN5p)、暖昼日数(TX95p)以及极端降水量(R95p)这三个指标,另外引入翟盘茂等(2003)定义的极端降水频次(R95t)来反映极端降水事件。表 1 给出了本文用到的极端气候指标。

表 1　极端天气气候事件指数的定义

Table 1　Definitions of the indices of extreme climate events

代码	指标名称	定义	单位
TN5p	冷夜日数	日最低气温(TN)<第 5 百分位值的日数	d
TX95p	暖昼日数	日最高气温(TX)>第 95 百分位值的日数	d
R95p	极端降水量	日降水量>第 95 百分位值的总降水量	mm
R95t	极端降水次数	日降水量>第 95 百分位值的日数	d

文中各指标的长期变化趋势,以线性函数 $Y=a+bt$ 来拟合资料序列 $T(t)$,可按照最小二乘法可求出常数项 a 和趋势项 b,计算公式如下:

$$a=\frac{\sum t^2\sum T-\sum t\sum tT}{n\sum t^2-\left(\sum t\right)^2},$$

$$b = \frac{n\sum tT - \sum t\sum T}{n\sum t^2 - (\sum t)^2}。$$

2 极端气温事件的模拟评估

2.1 多年平均的空间分布

图 2 给出了模式模拟和观测的多年平均(1958—2005 年)夏季、冬季、全年冷夜和暖昼日数差值场的空间分布,重点考察模式对极端气温事件多年平均空间分布特征的模拟能力。由图 2a 不难发现,模式对全年冷夜日数的模拟能力总体优于冬季和夏季的模拟。除个别站点外,模式对夏季冷夜日数的模拟值较实况存在不同程度的偏大,偏差较大的区域主要出现在西北东部、西南地区及南部沿海地区(相对偏差超过 100%)(图 2a1);而模式模拟与观测的冬季冷夜日数差值分布存在较明显的空间差异,模拟值在华北、东北西南部和新疆东北部较观测有不同程度的偏小,其余地区总体为正偏差,我国南部地区的相对偏差多超过 100%(图 2a2)。对应全年的模拟情况,模拟值在东北、甘肃及云南等地区偏高 10% ~20%,而东部及北疆地区则有不同程度的偏低(图 2a3)。

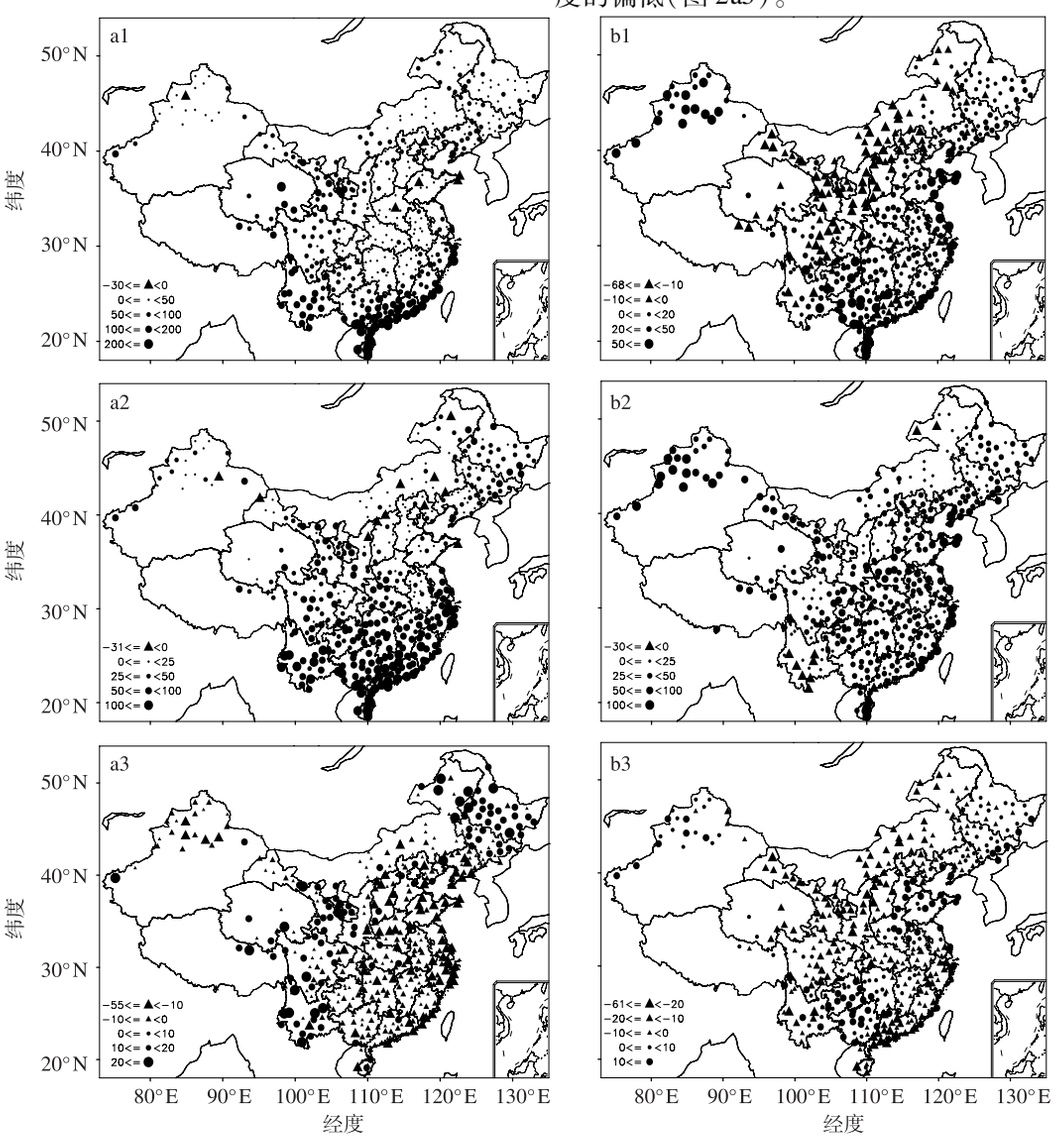

图 2 观测和模拟的冷夜(a)和暖昼(b)差值百分比的空间分布(其中 1、2、3 分别为夏季、冬季和全年;差值百分比 =(模拟值 - 观测值)/观测值 ×100%;单位:%)

Fig. 2 Spatial patterns of differences in percentage between the observed and simulated (a) cold nights (TN5p) and (b) warm days (TX95p) (In which 1, 2 and 3 represents summer, winter and annual, respectively. The difference percentage (%) is given by the simulation minus the observation divided by the observation)

相比之下,模式对暖昼日数的模拟能力总体优于对冷夜日数的模拟,模式对全年和夏季暖昼日数的模拟能力总体优于冬季。夏季暖昼日数的模拟值在沿海地区、北疆及南方地区偏高 50% 以上,其余大部分区域则较观测值偏低大约 50%(图 2b1);而冬季的模拟值,除少数站点外总体偏大,尤其是在我国西北西部、甘肃、东北南部及南部沿海地区偏大较为明显(偏差均大于 50%),部分站点的偏差甚至超过了 100%(图 2b2)。全年暖昼日数的模拟与实况相比,总体偏低,相对偏差介于 -20% ~ -60% 之间(图 2b3)。

2.2　极端气温长期趋势的空间分布

为了进一步分析 BCC 气候模式对我国极端事件长期趋势的模拟能力,以下计算并对比模拟和观测的极端气候事件的气候倾向率。图 3 给出了全国冷夜日数长期趋势的空间分布,可以看出,夏季冷夜日数除华中地区呈增加趋势外,全国其余大部均呈较明显的减小趋势(图 3a1)。与夏季不同,观测的冬季(图 3a2)和全年(图 3a3)的冷夜日数则主要表现为全国范围内的明显减小趋势,尤其是东北、内蒙

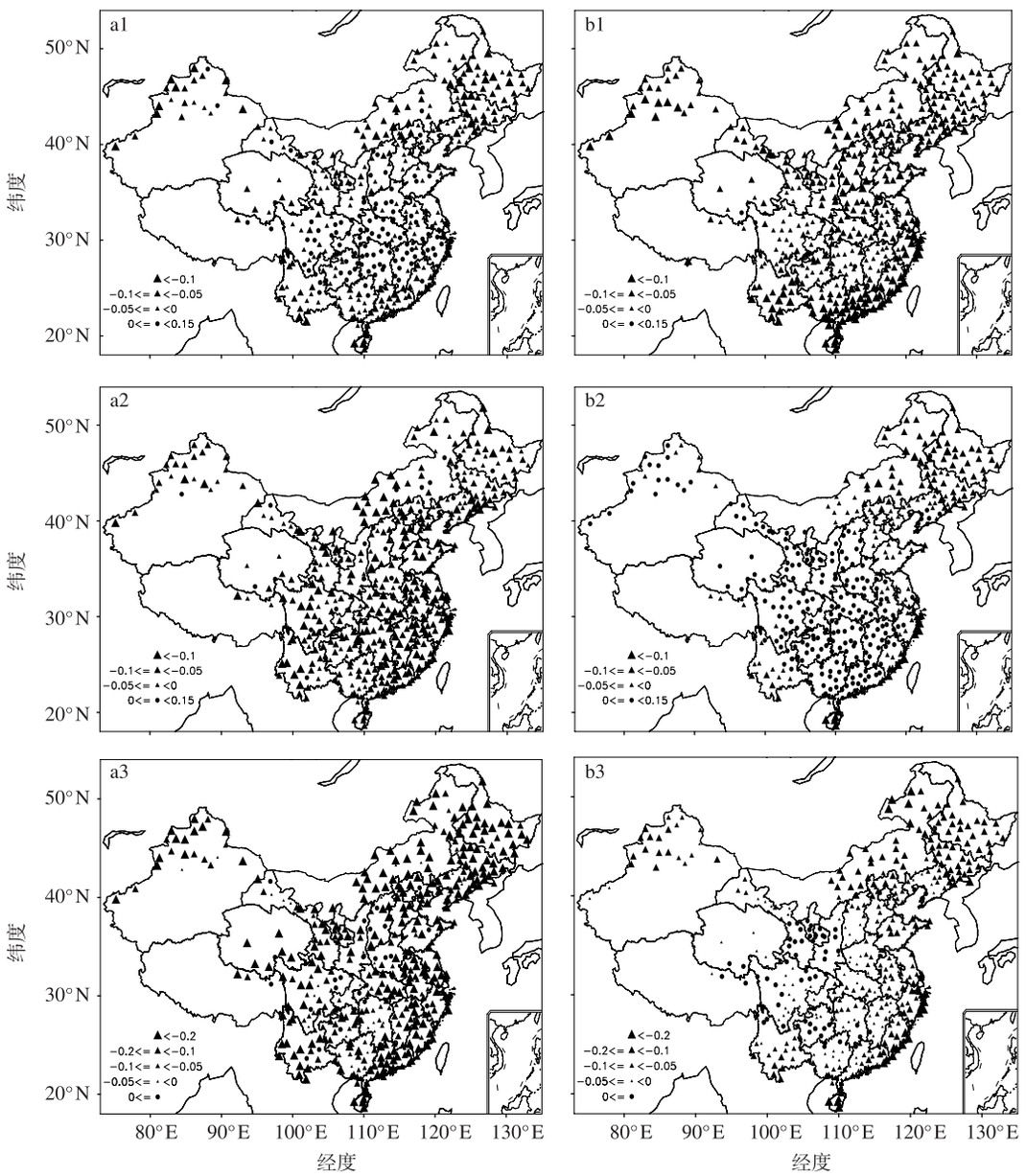

图 3　观测(a)和模拟(b)的冷夜日数的长期趋势系数的空间分布(其中 1、2、3 分别表示夏季、冬季和全年;单位:d/a)

Fig. 3　Spatial patterns of long-term trends of (a) observational and (b) simulated clod nights (TN5p) (In which 1, 2 and 3 means summer, winter and annual. Units: $d \cdot a^{-1}$)

东部、西北西部、青藏高原东部、西南及东南沿海地区的减小趋势最为显著。

模式模拟的夏季冷夜日数在全国呈现较一致的减少趋势，但模拟的南部地区减少趋势比实况偏强，模式没能模拟出华中地区的冷夜日数的区域性增加趋势（图 3b1）。对于冬季而言，模拟的冷夜日数在东北和东南沿海小部分地区为减少趋势，与实况基本一致；但模式模拟的黄河以南区域为不同程度的增加趋势，与实况相反（图 3b2）。就全年来说，模式基本上抓住了观测到的冷夜日数的减少趋势，但模拟的冷夜日数的变化趋势比实测强度有不同程度的偏弱现象（图 3b3）。

图 4a 给出了观测的全国 437 站暖昼日数长期趋势的空间分布，可以看出我国大部分地区夏季、冬季和全年的暖昼日数总体上呈增加趋势，其中增加最为显著的区域为东北、内蒙古、云贵及东南沿海地区，多数站点的增幅超过 0.1 d/a，而华中部分地区的暖昼日数则呈弱的减少趋势。此外，夏季的增加趋势总体强于冬季。模式对中国暖昼日数气候倾向率的模拟效果较为理想，较好反映出了大部分地区

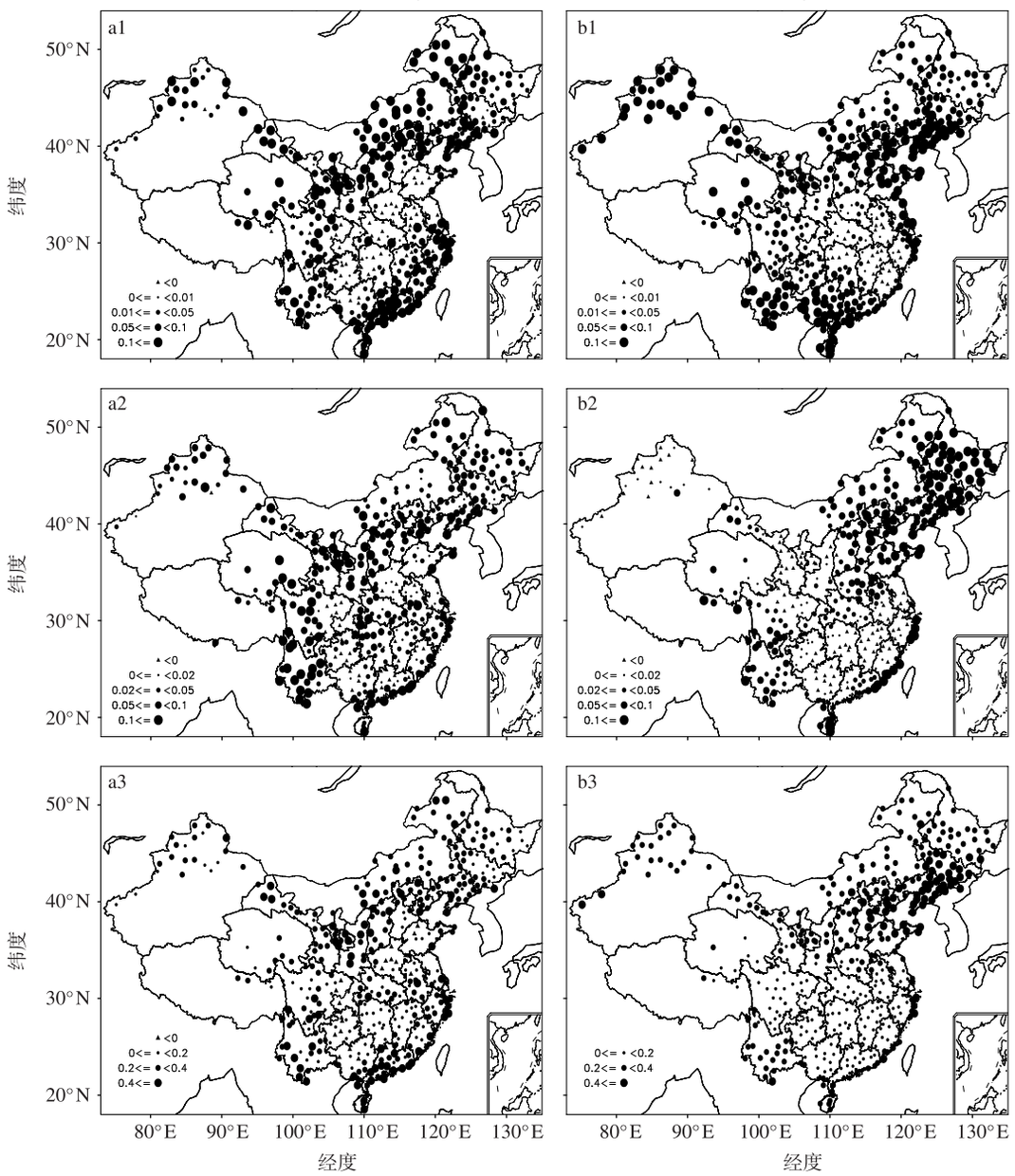

图 4 观测（a）和模拟（b）的暖昼日数的长期趋势系数的空间分布（其中 1、2、3 分别表示夏季、冬季和全年；单位：d/a）

Fig. 4 Spatial patterns of long-term trends of (a) observational and (b) simulated warm days (TX95p) (In which 1, 2 and 3 means summer, winter and annual. Units: $d \cdot a^{-1}$)

暖昼事件发生频率显著增加的特征。夏季(图 4b1)和全年(图 4b3)的模拟结果所反映出的空间特征与实况几乎一致。冬季(图 4b2)全国暖昼日数变化趋势的模拟结果具有一定的区域性差异,东北、西南以及东南沿海地区的模拟效果较好,青藏高原以东的模拟值较观测值偏小;但模式在北疆及长江以南地区的模拟结果与实况出现了相反的趋势。

2.3　极端气温的时空分布特征

为了更好地评估模式对极端气温事件时空演变的模拟能力,首先采用经验正交函数(EOF)分解方法提取出模拟和观测的极端气温指数异常变化的主要空间模态和相应的时间系数,通过比较分析,进一步探讨 BCC 气候模式对极端气温事件演变特征的模拟能力。表 2 分别给出了冬、夏季和全年冷夜和暖昼日数 EOF 分析的前两个模态的方差贡献率及二者的累计方差贡献率,不难发现观测和模拟的极端气温指标 EOF 分析的前两个模态的累积方差贡献率均高达 40% 左右,全年暖昼日数 EOF 分析前两个模态的累积方差贡献率甚至超过了 57% 。因此,可以认为极端气候指标 EOF 分析的前两个模态基本上能够反映极端气温事件时空演变的主要特征,下面将重点对观测和模拟的极端气候指标 EOF 分析前两个模态的空间分布及其时间演变进行对比。

表 2　极端气温指数 EOF 分析前两个模态方差贡献率

Table 2　The percentage of the first two modes to the total variance of EOFs of extreme temperature indices　%

		EOF 第一模态方差贡献率		EOF 第二模态方差贡献率		前两个模态方差贡献率	
		观测	模拟	观测	模拟	观测	模拟
冷夜日数	夏季	22.9	30.4	11.9	13.9	34.8	44.3
	冬季	31.9	32.0	12.9	19.9	44.8	51.9
	全年	34.9	34.3	8.8	16.6	43.7	50.9
暖昼日数	夏季	24.9	24.8	15.9	16.3	40.8	41.1
	冬季	40.4	33.3	10.1	20.3	50.5	53.6
	全年	47.6	46.8	10.0	14.4	57.6	61.2

从观测结果来看,夏季和全年冷夜日数的 EOF 第一模态均表现为全国一致性的变化,而冬季冷夜日数 EOF 第一模态除青藏高原东部地区外,其余大部分区域也为一致性的变化(图 5a1—3),上述分布体现了冷夜日数具有全国一致性增加或减少的特点。而对于第二模态而言(图 5c1—3),我国南方地区、西部地区冷夜日数的变化与华北、东北地区冷夜日数的变化存在反相关系,表明我国南方地区、西部地区冷夜日数的增加(减少),通常对应华北、东北地区冷夜日数的减少(增加)。通过对比不难发现,模拟的 EOF 前两个模态所表现出的空间型与实况非常一致,表明模式很好地模拟出了夏季、冬季和全年冷夜日数第一模态、第二模态的空间分布特征(图 5b1—3、d1—3)。为了进一步分析模式对冷夜日数事件演变的刻画能力,图 6 给出了 EOF 模态对应的时间系数。不难发现,观测的冷夜日数 EOF 第一模态的时间系数总体呈递减趋势(图 6a1、b1、c1),表明我国近 50 a 的冷夜日数总体呈减少趋势。而冷夜日数第二模态的时间系数具有与第一模态时间系数类似的变化趋势,并表现出明显的年际变化特征(图 6a2、b2、c2)。模式较好模拟出了夏季和全年冷夜日数 EOF 第一模态对应时间系数的演变特征,模拟与观测的相关系数分别为 0.45 和 0.33;模式对冬季冷夜日数 EOF 第一模态对应时间系数的演变特征的模拟能力总体较差。此外,模式也基本上没能模拟出第二模态对应时间系数的变化特征,模拟与观测的时间系数相关性很小(图 6)。综上所述,模式能较好给出冷夜日数异常变化的主要空间型,对第一模态对应时间系数的变化特征也具有一定模拟能力;对夏季的模拟最好,全年次之,而冬季最差。模式基本上不能反映 EOF 第二模态的时间演变规律。

与冷夜日数类似,观测的夏季、冬季和全年暖昼日数的第一模态也表现为全国一致性变化(图 7a);20 世纪 80 年代以来,对应的时间系数均呈显著的上升趋势,表明暖昼日数呈全国一致性的增多趋势。第二模态则表现为典型的南北反相变化(图 7c),其对应的时间系数无明显的长期趋势,但存在明显的年际变化;夏季和冬季暖昼日数也有类似的特点,夏季具有很强的年际异常,但冬季年际变化的振幅相对较小。模式对夏季、冬季和全年暖昼日数空间型的模拟效果较好。模拟的暖昼日数第一模态的空间型能较好地反映出观测到的全国一致性变化,并且高值中心和观测的高值区位置基本吻合(图 7b);模式模拟的第二模态空间型也与观测结果相符,表现为暖昼日数的南北反相变化特征(图 7d)。模式较好模拟出了夏季和全年暖昼日数 EOF 第一模态对应时间系数的演变特征,模拟与观测的相关系数分别为 0.40 和 0.59;但模式对冬季暖昼日数 EOF 第一模态对应时间系数的演变特征的模拟能力总体较

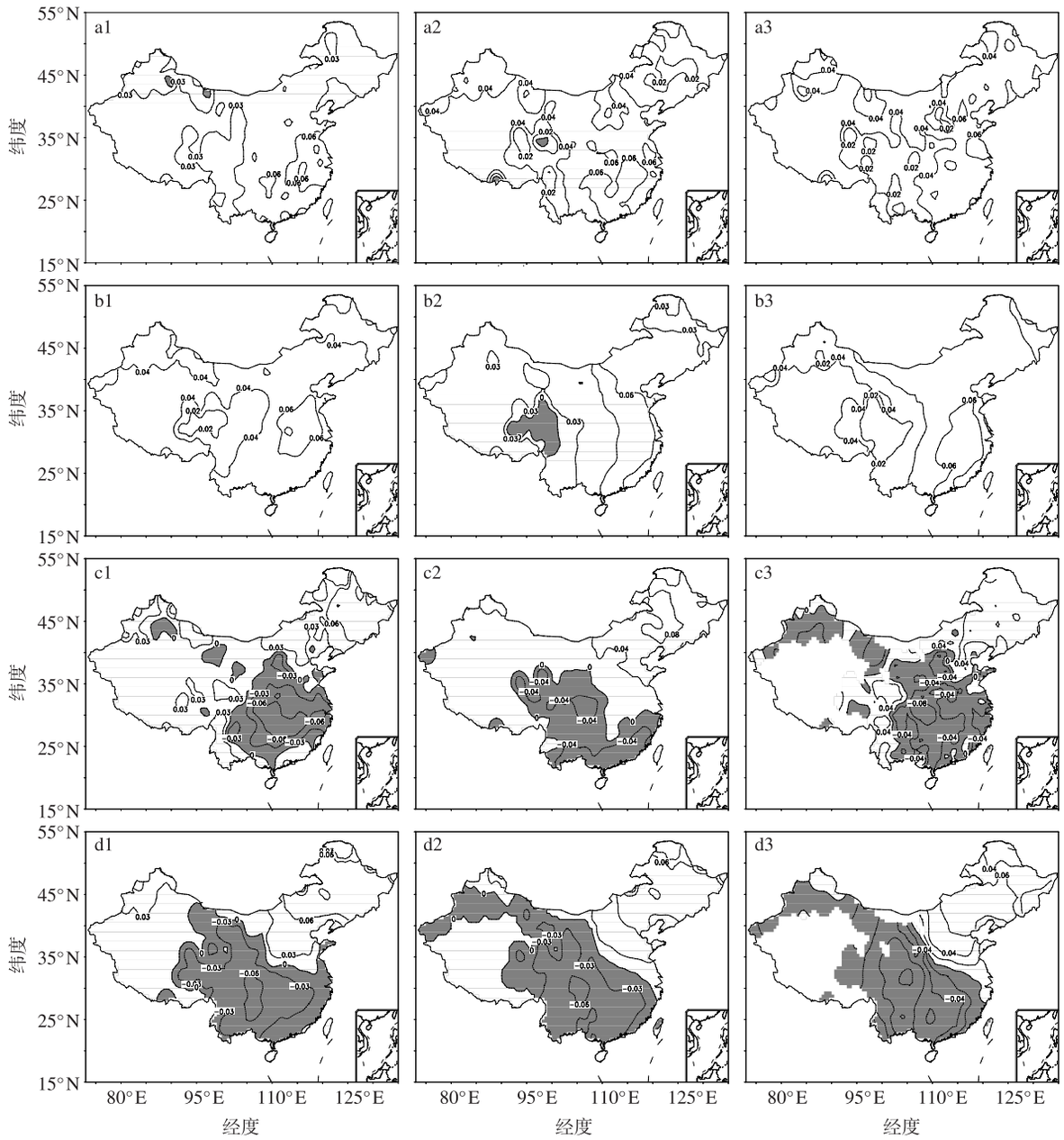

图 5 冷夜日数 EOF 分析的前两个空间模态(a. 观测的第一模态;b. 模拟的第一模态;c. 观测的第二模态;d. 模拟的第二模态;其中 1、2、3 分别表示夏季、冬季和全年;阴影表示负值区)

Fig. 5 Spatial distributions of two leading EOF modes of cold night (TN5p) (a. observed EOF1; b. simulated EOF1; c. observed EOF2; d. simulated EOF2. In which 1, 2 and 3 represents summer, winter and annual, respectively, and negative values are shaded)

差,基本上没能模拟出第二模态对应时间系数的变化特征(图 8)。不难发现,模式能较好再现暖昼日数异常变化的主要空间型,对第一模态对应时间系数的变化特征也具有一定的模拟能力,对全年的模拟最好,夏季次之,而冬季最差。模式基本上不能反映 EOF 第二模态的时间演变规律。模式基本能抓住极端气温时空演变的主要特征,但对其细致特征的刻画能力尚有待提高。

3 极端降水事件的模拟评估

3.1 多年平均极端降水的空间分布

图 9 为观测和模拟的夏季、冬季和全年极端降水指数差值场的空间分布。总体而言,模式对夏季极端降水频次的模拟较好,东部和南部沿海的模拟值偏大,而西北西部和东北部分地区的模拟值则有所偏小,但相对误差的绝对值基本上保持在 10% 左

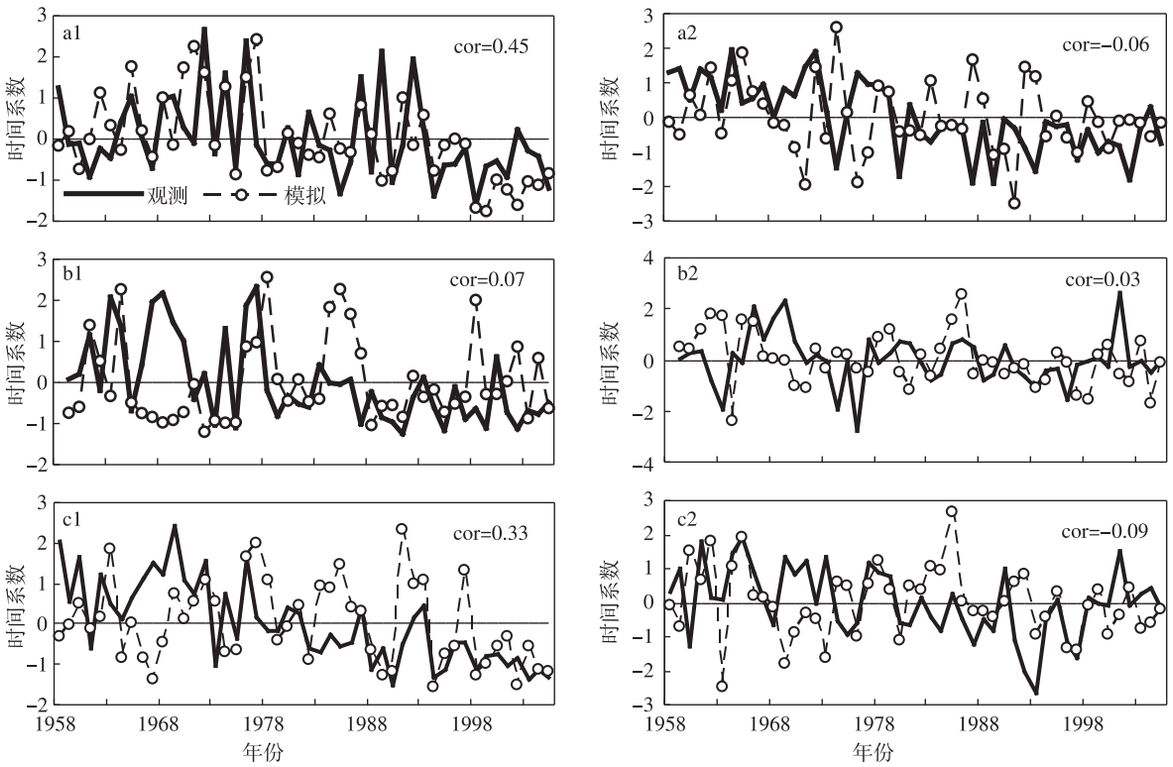

图 6　冷夜日数 EOF 分析的前两个空间模态对应的时间系数(其中 1、2 分别表示第一和第二模态;a、b、c 分别表示夏季、冬季和全年;粗实线为观测,带圆圈的虚线为模拟,图右上角为观测和模拟时间系数的相关系数)

Fig. 6　Time coefficients of the first two EOF modes of cold night (TN5p) (a, b and c represents summer, winter and annual, respectively; 1 means EOF1 and 2 EOF2. Dark solid line shows the observation and dash line with circles the simulation. Correlation coefficient between the observation and simulation is given on the top right corner of each panel)

右(图 9a1)。冬季极端降水次数的模拟在长江中下游地区和华南地区有不同程度的偏小,而北方地区的模拟则较实况有所偏大(图 9a2)。模式对全年极端降水频次的模拟结果表现为,在长江下游及南部沿海地区出现系统性偏大,而在西北西部和青藏高原东部地区则有所偏小(图 9a3)。对于极端降水量的模拟,夏季的模拟值较实测普遍偏小,尤其在长江以南及西北西部地区(最大偏差超过 90%),而在西北东部、青藏高原东部、华北和东北则偏差相对较小(相对误差在 50% 以内)(图 9b1)。模式对冬季极端降水量的模拟在长江以南存在明显的偏低,华南沿海地区偏低 50% 左右;北方区域的模拟值则有不同程度的偏高,其中在内蒙古地区偏高最明显,部分站点甚至超过 200%(图 9b2)。模式对全年极端降水量的多年平均的模拟较观测总体偏低,偏低最明显的区域主要位于北疆和长江以南地区(图 9b3)。总的说来,模式对极端降水频次和极端降水量的多年平均分布具有一定的模拟能力,模式对极端降水频次的模拟总体优于对极端降水量的模拟;对夏季和全年极端降水指标的模拟优于对冬季的模拟。

3.2　极端降水长期趋势的空间分布

为了进一步分析 BCC 气候模式对我国极端降水事件长期趋势的模拟能力,图 10 给出了观测和模拟的极端降水频次长期趋势的空间分布。由图 10a1 可以看出,观测的夏季极端降水次数的长期趋势在空间上总体表现为"南增北减"的分布特征,夏季我国北方地区极端降水次数表现为不同程度的减少趋势,而广大南方地区的极端降水频次则普遍增加,长江流域尤为明显。模式较好模拟出极端降水次数长期趋势的上述空间分布特征,但明显低估了长江流域极端降水频次的增加趋势(图 10b1)。与夏季情况明显不同,观测的冬季极端降水次数除在四川盆地、云南出现小范围的减小趋势外,总体表现为全国一致性的增加趋势;冬季极端降水事件的发生频次在全国大范围内有不同程度的上升趋势,尤其是长江以南东部地区的上升趋势最为显著(图 10a2)。从模拟结果(图 10b2)来看,模式模拟的冬季极端降水频次的长期趋势的空间分布几乎与实况完全相反,模式对冬季极端降水频次的变化趋势几乎没有模拟能力。相比之下,模式基本上抓住了全

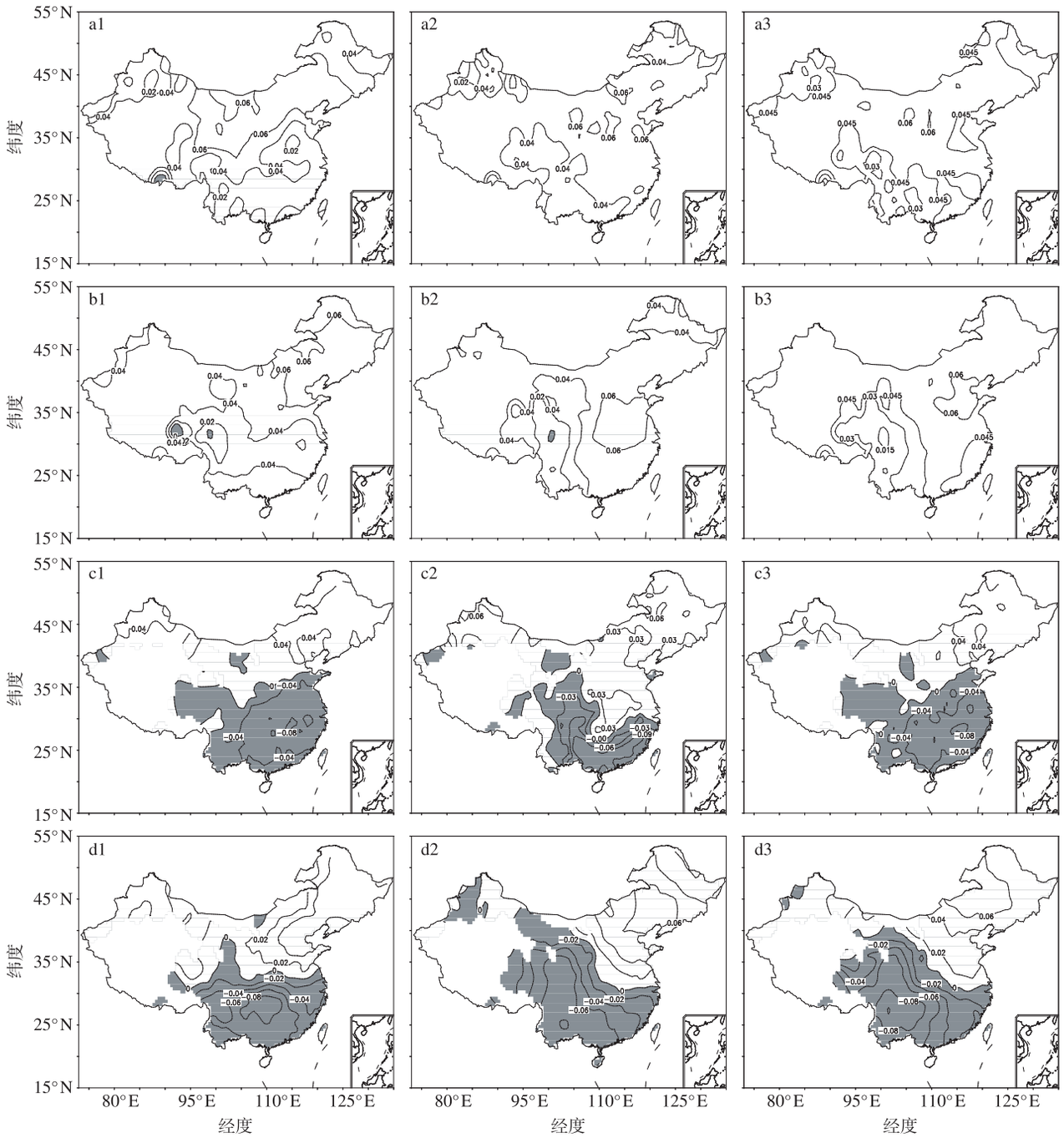

图 7 暖昼日数 EOF 分析的前两个空间模态(a. 观测的第一模态;b. 模拟的第一模态;c. 观测的第二模态;d. 模拟的第二模态;其中 1、2、3 分别表示夏季、冬季和全年;阴影表示负值区)

Fig. 7 Spatial distributions of two leading EOF modes of warm days (TX95p) (a. observed EOF1; b. simulated EOF1; c. observed EOF2; d. simulated EOF2. In which 1, 2 and 3 represents summer, winter and annual, respectively, and negative values are shaded)

年极端降水次数长期变化趋势的主要特征,模式大致模拟出了极端降水频次在南方区域的增加趋势和在北方大部分区域的减少趋势,但模拟的趋势均较观测结果有所偏弱,模式在西北和东北地区的模拟效果较差,变化趋势与实况出现相反的情况。

图 11 给出了观测和模拟的极端降水量长期趋势的空间分布。观测的夏季极端降水量主要表现为南增北减的分布形势,其中长江中下游地区的增加趋势最为显著;模式较好地模拟出了夏季极端降水量南增北减的总体分布形势,但模式低(高)估了长江中下游(华南)地区的增加趋势。观测的冬季极端降水量总体为增加趋势,且长江流域以北的北方

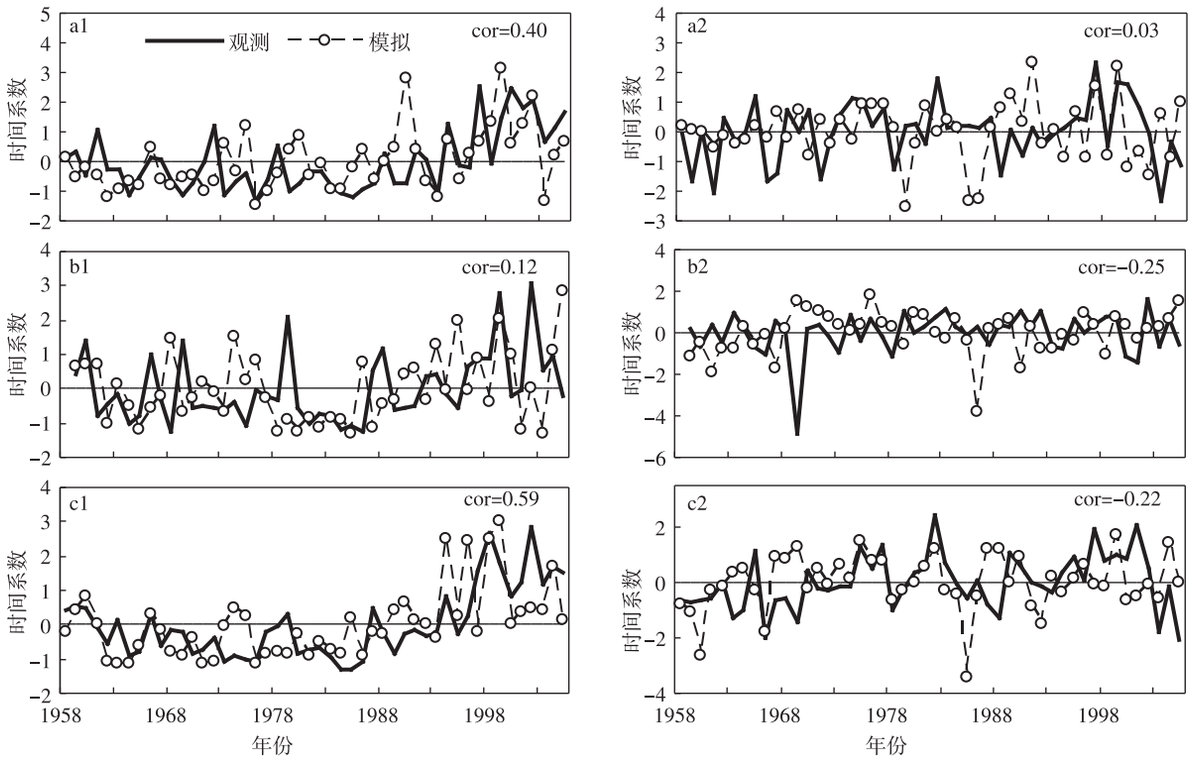

图 8　暖昼日数 EOF 分析的前两个空间模态对应的时间系数(其中 1、2 分别表示第一和第二模态;a、b、c 分别表示夏季、冬季和全年;粗实线为观测,带圆圈的虚线为模拟,图右上角为观测和模拟时间系数的相关系数)

Fig. 8　Time coefficients of the first two EOF modes of warm days(TX95p) (a, b and c represents summer, winter and annual, respectively; 1 means EOF1 and 2 EOF2. Dark solid line shows the observation and dash line with circles the simulation. Correlation coefficient between the observation and simulation is given on the top right corner of each panel)

区域增加趋势明显强于南方区域,模式基本上没能模拟出冬季极端降水量的上述变化趋势(图 11a2、b2)。观测的全年极端降水量在长江中下游地区、青藏高原东侧和西北地区有增加的趋势,而在华北、内蒙及邻近地区呈减小趋势,模式总体上模拟出了上述分布的主要特点,但模式在东北、西北西部和西南地区的模拟效果较差,模拟结果甚至与实况相反(图 11a3、b3)。

3.3　极端降水的年际变化

极端降水事件的发生具有很强的区域性特征,为了进一步考察模式对区域极端降水事件年际变化的模拟能力,图 12 给出了观测与模拟的极端降水频次、极端降水量的相关分布。不难发现,模式对极端降水指标的年际变化具有一定的模拟能力,但模式的模拟能力表现出明显的区域性差异。对夏季极端降水频次而言,观测和模拟的高相关区主要集中在西北、内蒙古、河套地区以及长江中下游部分地区,表明模式基本能够模拟出上述区域极端降水频次的年际变化特征;但模拟结果在东北东部、江淮及华南则为负相关,模式不能模拟出上述区域极端降水频次的演变特征(图 12a1);全年极端降水频次的相关分布与夏季大致相似(图 12a3)。总体而言,模式对冬季极端降水频次年际变化的模拟能力要优于夏季和全年的情况,显著正相关区域出现在东北、黄淮流域及我国西南,多数站点的相关系数通过了 0.05 信度的显著性检验(图 12a2),说明模式对上述区域极端降水频次的年际变化具有较强的模拟能力。模拟和观测的夏季、冬季和全年极端降水量的相关分布与极端降水频次的结果基本类似(图 12b1—3)。综上所述,模式对部分区域极端降水事件的年际变化有一定模拟能力;但总体而言,模式结果与观测差异明显,模拟的极端降水的年际变化在一些区域甚至与实况相反,模式对极端降水年际变化的模拟能力还有待提高。

4　结论

本文从中国极端气温和降水的空间分布、时间演变等视角,通过 BCC 气候模式 20 世纪气候的模拟结果与观测结果的对比分析,评估了 BCC 气候模式对中国区域极端气候事件的模拟能力,主要结论

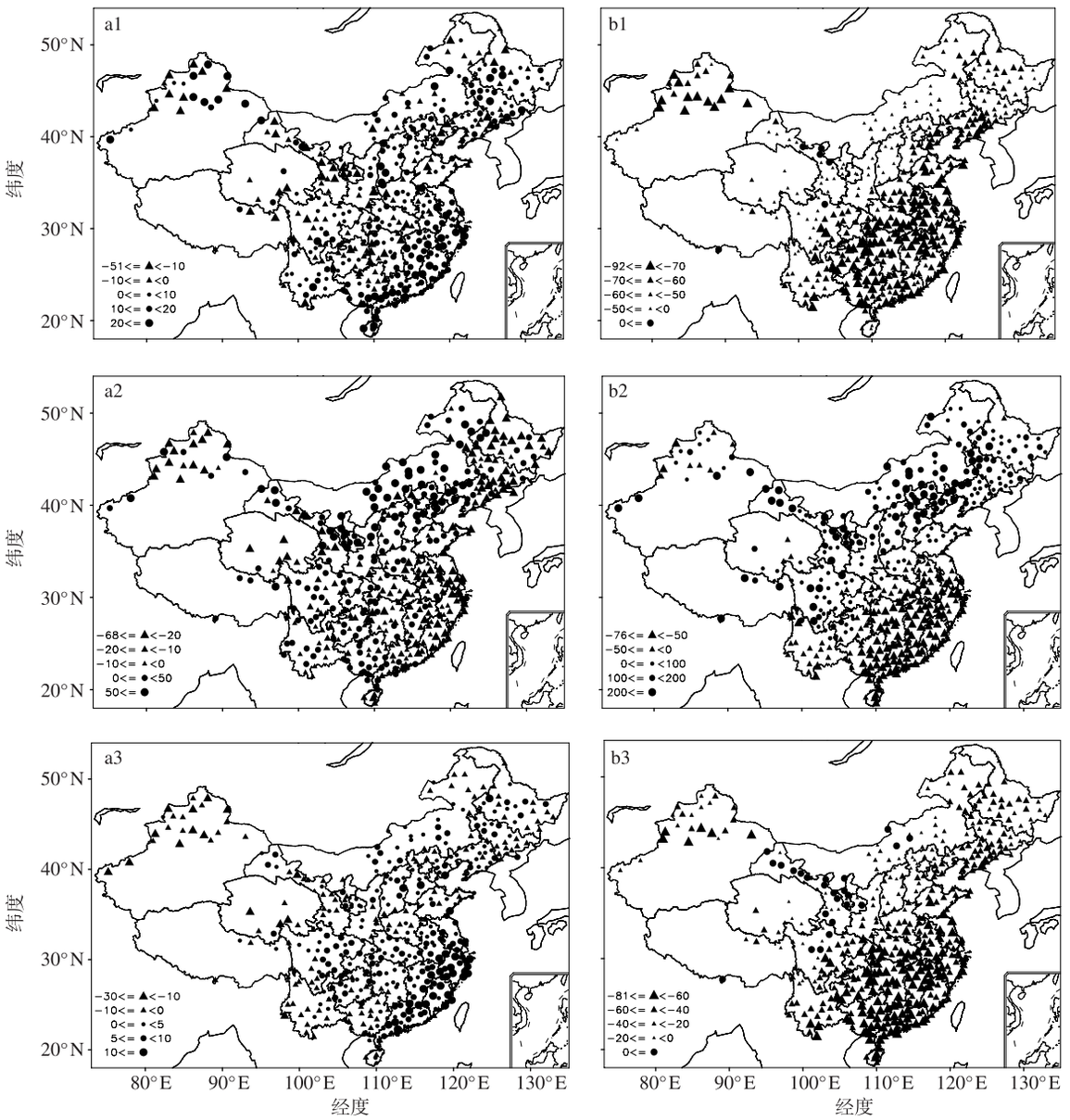

图 9 观测和模拟的极端降水频次(a)和极端降水量(b)差值百分比的空间分布(其中 1、2、3 分别为夏季、冬季和全年;差值百分比 =(模拟值 − 观测值)/观测值 ×100%;单位:%)

Fig. 9 Spatial patterns of differences in percentage between the observed and simulated (a) R95t and (b) R95p (In which 1, 2 and 3 represents summer, winter and annual, respectively. The difference percentage (%) is given by the simulated minus the observation divided by the observation)

如下:

1)模式对近 50 a 我国极端气温多年平均的空间分布、年际异常的时空演变和长期趋势具有一定的模拟能力,但尚存一些不足。

a)模式基本上能反映出多年平均的冷夜日数和暖昼日数的空间分布,模式对暖昼日数的模拟优于对冷夜日数的模拟,全年冷夜日数的模拟优于冬季和夏季的模拟,而全年和夏季暖昼日数的模拟优于冬季的模拟。不足之处在于:模拟的夏季和冬季冷夜日数总体较观测偏大,而全年冷夜日数则有所偏小;模拟的夏季暖昼日数在东部偏高、西部偏低,而冬季则存在普遍偏高的现象,模拟的全年暖昼日数则以偏低为主。

b)模式能较好地给出冷夜日数和暖昼日数异常变化的主要空间型,对 EOF 第一模态的时间演变特征具有一定的模拟能力;但模式对第二模态时间演变特征的刻画能力较差。总的说来,模式基本能抓住极端气温时空演变的主要特征,但对其细致特征的刻画能力尚有待提高。

c)模式对冷夜日数和暖昼日数的长期趋势也

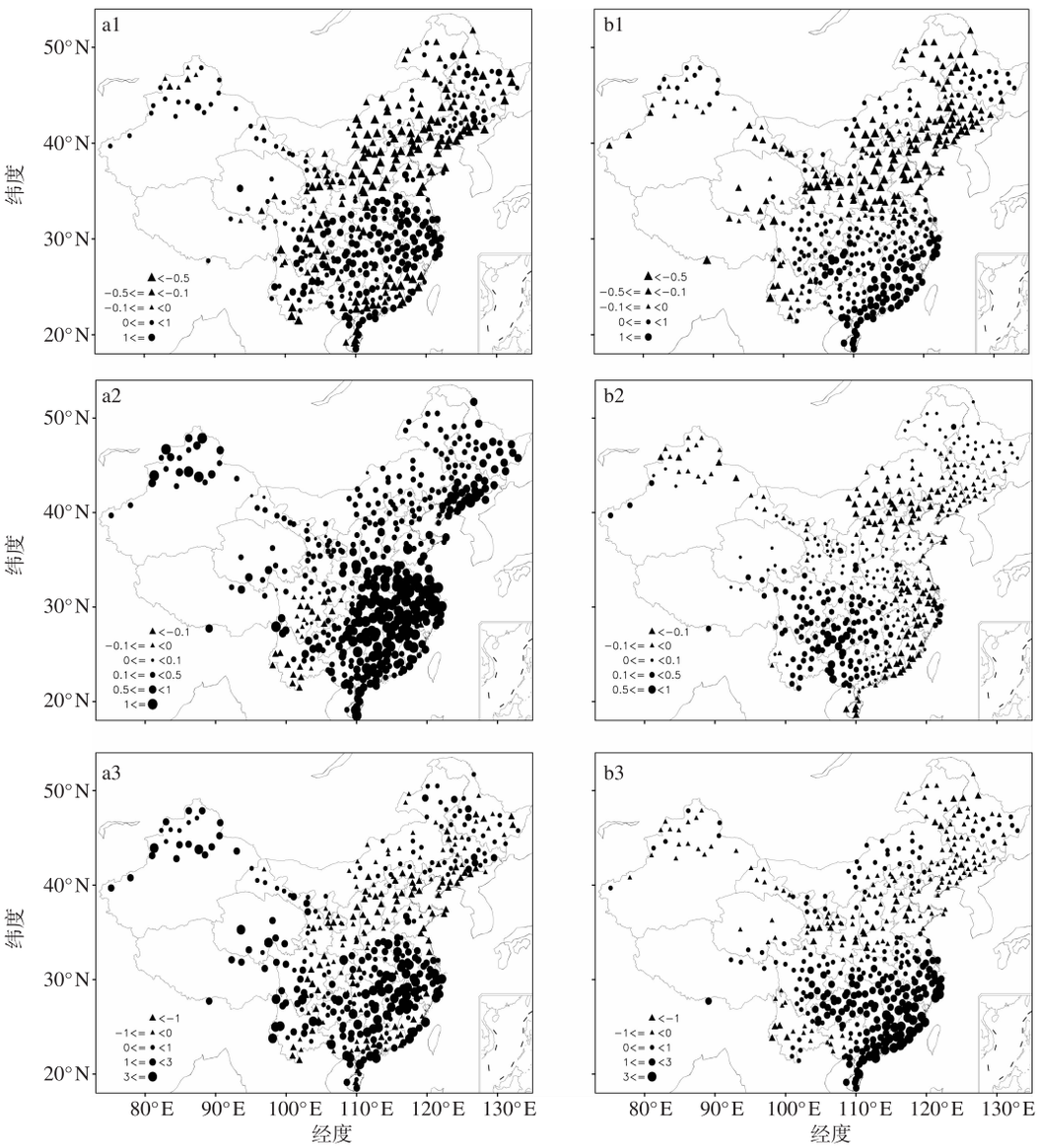

图 10　观测(a)和模拟(b)的极端降水频次长期趋势系数的空间分布(其中 1、2、3 分别表示夏季、冬季和全年;单位:d/a)

Fig. 10　Spatial patterns of long-term trends of (a) observed and (b) simulated R95t (In which 1, 2 and 3 means summer, winter and annual, respectively. Units: $d \cdot a^{-1}$)

具有较好的模拟能力。模式较好地模拟出了夏季和全年冷夜日数的全国较为一致的减少趋势,再现了东北和东南沿海部分地区冬季冷夜日数的减少趋势,但模拟的趋势较实测有所偏弱。模式对暖昼日数长期趋势的模拟效果较理想,较好地反映了大部分地区暖昼事件发生频率的显著增加特征,但冬季的模拟结果尚有待改进。

2)模式较好模拟出近 50 a 我国极端降水的空间分布、长期趋势和年际异常的主要特征,但对极端降水较为细致特征的模拟能力还有待提高。

a)模式对极端降水频次和极端降水量多年平均的空间分布具有一定的模拟能力,极端降水频次的模拟总体优于极端降水量的模拟;夏季和全年的模拟优于冬季的模拟。对于极端降水频次,夏季的模拟较好,但冬季的模拟在长江中下游和华南地区有不同程度偏小、北方偏大,而全年模拟在长江下游及南部沿海出现系统性偏大。对于极端降水量,夏季和全年的模拟系统性偏低,而冬季在北方偏高、南方偏低。

b)模式能较好地模拟出夏季和全年极端降水频次的长期趋势,较好地刻画极端降水频次“南增北减”的特征;模式对冬季极端降水频次的变化趋

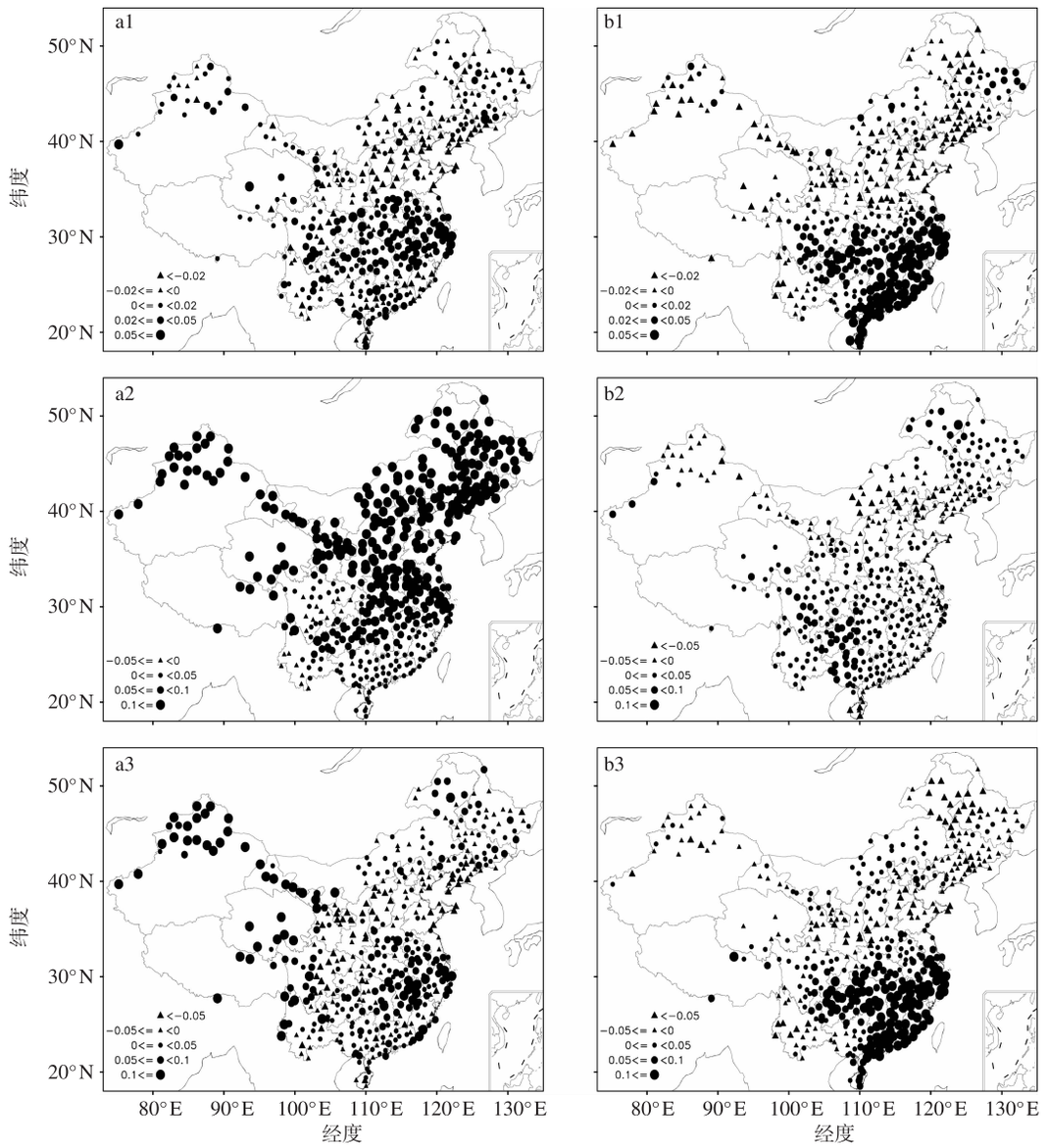

图 11 观测(a)和模拟(b)的极端降水量长期趋势系数的空间分布(其中 1、2、3 分别表示夏季、冬季和全年;单位:d/a)

Fig. 11 Spatial patterns of long-term trends of (a) observed and (b) simulated R95p (In which 1, 2 and 3 means summer, winter and annual, respectively. Units: $d \cdot a^{-1}$)

势几乎没有模拟能力。同样,模式也较好地模拟出了极端降水量夏季南增北减的分布形势和冬季的总体增加趋势,但对全年的模拟不理想。

c)模式对极端降水指标的年际变化有一定的模拟能力,对部分区域极端降水事件的年际变化具有较好的模拟能力;但模拟能力表现出明显的区域性差异,部分区域极端降水年际变化的模拟结果与实况甚至相反,模式对极端降水年际变化的模拟能力还有待提高。

本文利用观测资料,评估了 BCC 气候模式对极端气候事件的模拟能力,所得结果可为 BCC 模式的改进和相关领域的应用研究提供一定参考。但值得指出的是,由于本研究中仅仅选择了为数不多的几个指标来反映极端气候事件,因此所开展的评估工作还是初步的,研究结果尚具有一定的局限性;研究对模拟结果还缺乏深层次的剖析,对于模拟结果与观测存在明显差异的原因也还有待进一步深入分析。

致谢:中国国家气候中心吴统文研究员、董敏研究员、刘向文博士在 BCC 模式资料获取中提供了大力帮助和支持。谨致谢意!

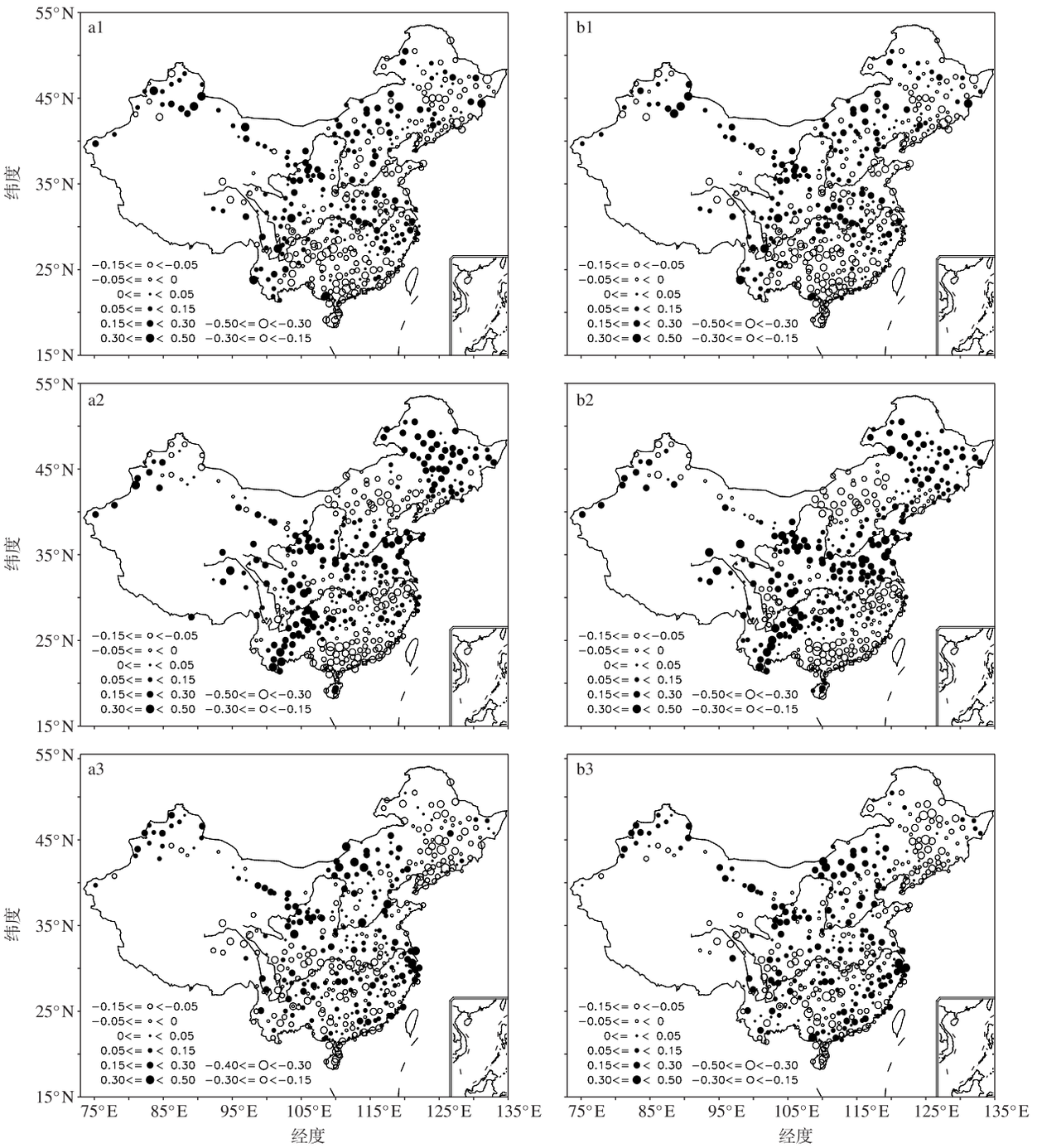

图 12　观测与模拟的极端降水事件时间序列的相关分布(a. 极端降水频次;b. 极端降水量;其中 1、2 和 3 分别代表夏季、冬季和全年)

Fig. 12　Geographic distribution of the correlation coefficients between the observed and the simulated extreme precipitation indices(a. R95t;b. R95p. In which 1,2 and 3 means summer,winter and annual,respectively)

参考文献:

蔡敏,丁裕国,江志红. 2007. 我国东部极端降水时空分布及其概率特征[J]. 高原气象,26(2):309-318.

陈海山,范苏丹,张新华. 2009. 中国近 50 a 极端降水事件变化特征的季节性差异[J]. 大气科学学报,32(6):743-751.

董敏,吴统文,王在志,等. 2009. 北京气候中心大气环流模式对季节内振荡的模拟[J]. 气象学报,67(6):912-922.

高学杰,赵宗慈,丁一汇,等. 2003. 温室效应引起的中国区域气候变化的数值模拟Ⅱ:中国区域气候的可能变化[J]. 气象学报,61(1):29-38.

何卷雄,丁裕国,姜爱军. 2002. 江苏冬夏极端气温与大气环流及海温场的遥相关[J]. 热带气象学报,18(1):73-82.

胡宜昌,董文杰,何勇. 2007. 21 世纪初极端天气气候事件研究进展[J]. 地球科学进展,22(10):1066-1075.

姜大膀,王会军,郎咸梅. 2004. 全球变暖背景下东亚气候变化的最新情景预测[J]. 地球物理学报,47(4):590-596.

江志红,丁裕国,屠其璞. 1998. 中国近 50 年夏冬极端气温场的年代际空间型态及其演变特征研究[J]. 应用气象学报,10(增刊):97-103.

江志红,陈威霖,宋洁,等. 2009. 7 个 IPCC AR4 模式对中国地区极端降水指数模拟能力的评估及其未来情景预估[J]. 大气科学,33(1):109-120.

刘学华,季致建,吴洪宝,等. 2006. 中国近 40 年极端气温和降水的分布特征及年代际差异[J]. 热带气象学报,22(6):619-624.

任福民,翟盘茂. 1998. 1951—1990 年中国极端气温变化分析[J]. 大气科学,22(2):217-227.

石广玉,王喜红,张立盛,等. 2002. 人类活动对气候影响的研究,Ⅱ. 对东亚和中国气候变化的影响[J]. 气候与环境研究,7(2):255-266.

史军,丁一汇,崔林丽. 2009. 华东极端高温气候特征及成因分析[J]. 大气科学,33(2):347-357.

所玲玲,黄嘉佑,谭本馗. 2008. 北极涛动对我国冬季同期极端气温的影响研究[J]. 热带气象学报,24(2):163-168.

王冀,江志红. 2008. 1960—2005 年长江中下游极端降水指数变化特征分析[J]. 气象科学,28(4):384-388.

王冀,江志红,张海东,等. 2007. 1957—2000 年东北地区春季极端气温变化及其与北极涛动的关系[J]. 气候变化研究进展,3(1):41-45.

王冀,江志红,丁裕国,等. 2008. 21 世纪中国极端气温指数变化情况预估[J]. 资源科学,30(7):1085-1092.

王璐,周天军,吴统文,等. 2009. BCC 大气环流模式对亚澳季风年际变率主导模态的模拟[J]. 气象学报,67(6):973-982.

王志福,钱永甫. 2009. 中国极端降水事件的频数和强度特征[J]. 水科学进展,20(1):1-9.

颉卫华,吴统文. 2010. 全球大气环流模式 BCC_AGCM2. 0. 1 对 1998 年夏季江淮流域强降水过程的回报试验研究[J]. 大气科学,34(5):962-978.

许吟隆. 2005. 中国 21 世纪气候变化的情景模拟分析[J]. 南京气象学院学报,28(3):323-329.

徐影,丁一汇,赵宗慈,等. 2003. 我国西北地区 21 世纪季节气候变化情景分析[J]. 气候与环境研究,8(1):19-25.

杨金虎,李耀辉,王鹏祥,等. 2008a. 中国年极端降水事件的时空分布特征[J]. 气候与环境研究,13(1):75-83.

杨金虎,江志红,白虎志. 2008b. 西北区东部夏季极端降水事件同太平洋 SSTA 的遥相关[J]. 高原气象,27(2):331-338.

翟盘茂,潘晓华. 2003. 中国北方近 50 年温度和降水极端事件变化[J]. 地理学报,58(增刊):1-10.

翟盘茂,王萃萃,李威. 2007. 极端降水事件变化的观测研究[J]. 气候变化研究进展,3(3):144-147.

张永领,丁裕国. 2004. 我国东部夏季极端降水与北太平洋海温的遥相关研究[J]. 南京气象学院学报,27(2):244-252.

赵宗慈,罗勇,江滢,等. 2008. 未来 20 年中国气温变化预估[J]. 气象与环境学报,24(5):1-5.

IPCC. 2001. Climate Change 2001: The Science of Climate Change [M]//TAR(2001). Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, et al. Cambridge UK: Cambridge University Press.

IPCC. 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis[M]// Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Solomon S, Qin D, Manning M, et al. Cambridge: Cambridge University Press.

Wu T, Yu R, Zhang F. 2008a. A modified dynamic framework for atmospheric spectral model and its application[J]. J Atmos Sci, 65(7):2235-2253. doi:10. 1175/2007JAS2514. 1.

Wu T, Yu R, Zhang F, et al. 2008b. The Beijing Climate Center atmospheric general circulation model: Description and its performance for the present-day climate[J]. Clim Dyn, 34(1):123-147. doi: 10. 1007/s00382-008-0487-2.

Zhai P M, Eskridge R E. 1997. Atmospheric water vapor over China [J]. J Climate, 10(10):2643-2652.

Zhai P M, Sun A J, Ren F M, et al. 1999. Changes of climate extremes in China[J]. Clim Change, 42(1):203-218.

(责任编辑:刘菲)