

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, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11048. 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.

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

陈海山^{1,2} 周晶³

1 南京信息工程大学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 江苏省气象局, 南京 210008

摘要 利用 NCAR CAM3.1 大气环流模式, 设计了有、无土壤湿度年际异常的两组数值试验, 探讨了土壤湿度年际异常对极端气候事件模拟的可能影响。结果表明, 模式模拟的极端气候事件对土壤湿度异常十分敏感, 土壤湿度异常对极端气候指标的多年平均空间分布、年际变率以及年际变化均具有重要影响。当不考虑土壤湿度的年际异常时: (1) 模拟的暖夜日数、暖昼日数和热浪持续指数的发生频次在全国范围内均明显减少, 而霜冻日数则明显增加。极端降水指标的响应表现出明显的空间差异, 极端降水频次在江淮流域明显减小, 而极端降水强度则表现为东北减弱、长江流域增强; 中雨日数和持续湿期在我国大部分地区减少。(2) 极端气温指标的年际变率在我国大部分地区呈减小趋势; 而极端降水事件的变化则较为复杂, 极端降水频次和极端降水强度的年际变率在长江以南有所增强, 而北方地区则有所减弱。中雨日数和持续湿期的年际变率在我国呈现出较为一致的减少趋势。(3) 模式对暖夜日数、霜冻日数的年际变化的模拟能力明显下降, 并对 4 个极端降水指标的年际变化的模拟能力在全国多数区域均有不同程度的下降。

关键词 极端气候事件 数值模拟 土壤湿度 年际异常 敏感性试验分析

文章编号 1006-9895(2013)01-0001-13

中图分类号 P461

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11048

Impact of Interannual Soil Moisture Anomaly on Simulation of Extreme Climate Events in China. Part II: Sensitivity Experiment Analysis

CHEN Haishan^{1,2} and ZHOU Jing³

1 Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

2 College of Atmospheric Science, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

3 Jiangsu Meteorological Bureau, Nanjing 210008

Abstract Using NCAR Community Atmosphere Model (CAM 3.1), two numerical experiments are designed to explore the possible influence of the soil moisture anomaly on the simulation of extreme climate events. Results show that the simulated extreme climate events are sensitive to the soil moisture anomaly, and the anomaly has significant impacts on the climatology, interannual variability, and interannual variations of extreme climate events. Without the interannual anomaly of soil moisture included, the simulated Tn95p (warm nights), Tx95p (warm days), and HWDI (heat wave

收稿日期 2011-06-02, 2012-05-18 收修定稿

资助项目 国家科技支撑计划课题 2007BAC29B03, 国家自然科学基金资助项目 41075082、40905045, 江苏省“333 高层次人才培养工程”、“青蓝工程”和江苏高校优势学科建设工程资助项目 PAPD

作者简介 陈海山, 男, 1973 年出生, 博士、教授, 主要从事陆面过程与气候数值模拟研究。E-mail: haishan@nuist.edu.cn

duration) significantly decrease in most areas of China, while FD (frost days) increases on the whole. It is also found that the response of the simulated precipitation extremes to the soil moisture anomaly exhibits significant spatial difference. The simulated P95p (the frequency of extreme heavy precipitation) obviously decreases in the Huaihe River basin, and R95p (the intensity of extreme heavy precipitation) also drops in the northeast of China but increases in the Yangtze River valley. Both the simulated R10 (number of days with precipitation greater than 10 mm) and CWD (the consecutive wet days) have experienced an evident drop in most areas of China. In addition, the interannual variability of the temperature extremes has decreased in most areas of China, but the situations of precipitation extremes are much complicated. Both the interannual variability of P95p and R95p decrease in North China and increase over the regions south of the Yangtze River. Throughout the whole country, the interannual variability of R10 and CWD decrease. Results also suggest that the performance of the model in simulating the interannual variations of the extreme climate indices, especially for Tn95p and FD, will become worse when the interannual anomaly of the soil moisture is removed.

Keywords Extreme climate, Numerical simulation, Soil moisture, Interannual anomaly, Sensitivity experiment analysis

1 引言

陆面作为气候系统的重要组成部分, 对大气和气候变化的影响显著(Shukla and Mintz, 1982; Dickinson, 1983, 1995; 陈海山和孙照渤, 2002)。土壤湿度作为陆面过程中的重要参量, 通过改变地表反照率、土壤热容量、感热、潜热, 进而对气候产生重要影响(马柱国等, 2001)。土壤湿度和大气之间的反馈过程在气候系统中非常重要, 在副热带地区土壤湿度的作用甚至可与海洋相比(Schär et al., 1999)。国内外众多学者利用土壤观测资料探讨了土壤湿度与气候之间的联系。Namias (1958)最早发现土壤湿度的季节性异常对大气的季节变化具有重要作用; Vinnikov 等(1991, 1996)分析了前苏联和俄罗斯的十几个站点数据, 发现土壤湿度异常分为受土壤类型、地形、植被等影响的小尺度白噪音部分和受降水、蒸发影响的大尺度红噪音部分。Koster 等(2004)的研究指出中国东部地区是显著的土壤湿度气候敏感区。马柱国等(2000)的研究表明, 无论超前还是滞后, 表层土壤湿度和气温、降水均有密切关系。随后, 国内不少学者的研究也指出土壤湿度年际异常与我国降水有着十分紧密的联系(孙丞虎等, 2005; 左志燕和张人禾, 2007; 梁乐宁和陈海山, 2010)。

然而, 由于观测资料的限制, 从观测分析的角度研究土壤湿度与气候的关系具有很大的困难, 而数值模拟自然成为开展土壤湿度与气候关系研究的重要手段(Robock et al., 2000)。例如, Walker and Rowntree (1977)、Shukla and Mintz (1982)早就通过数值模拟证明了土壤湿度异常会对后期气候产生重要影响。Yeh et al. (1984) 和王万秋 (1991)

通过数值模拟, 指出土壤湿度增加能够使后期降水增加, 温度降低。刘永强等(1992)的模拟结果表明, 土壤湿度变化在短期气候异常的持续过程中起着主导作用。Cook et al. (2006)指出土壤湿度对于南非地区降水存在一个负反馈的作用。此外, Huang et al. (1996) 和 Dirmeyer (2000) 指出对土壤湿度模拟的改进有助于改善降水和温度的预报。Sen-evilatne et al. (2006)从土壤湿度与气温反馈的角度出发, 证明了土壤湿度在气温变率的变化中所起的重要作用。以上研究表明, 土壤湿度的异常对气候变化有着重要的影响。但现有的一些研究工作表明, 尽管数值模拟是研究土壤湿度对气候影响的重要工具, 但是目前的气候模式对东亚区域土壤湿度变化的模拟能力亟待提高(张文君等, 2008a、2008b; 熊明平等, 2011)。

极端气候事件是一种小概率随机性事件, 具有转折突发性, 成因较复杂。由于极端气候事件造成的损失巨大, 对极端气候事件成因和机理的研究是近年来世界各国学者普遍关注的热点问题。目前对极端气候事件的形成机理尚不完全清楚, 主要集中于探讨极端事件与大尺度气候变率(You et al., 2009; 史军等, 2009)以及海表温度(SST)(王冀等, 2007; 所玲玲等, 2008; 李威和翟盘茂, 2009)的关系上, 从土壤湿度这一外强迫角度来进行分析尚处于尝试阶段。Fischer et al. (2007)利用CHRM区域模式, 模拟结果表明欧洲有50%~80%的夏季暖日数可能受土壤湿度—气温相互作用的影响。Vautard et al. (2007)利用MM5模拟研究了欧洲1994年的热浪过程, 认为地中海地区前冬和早春的降水不足使得该地区的土壤湿度偏低, 阻碍了局地对流云的形成并加强了感热通量, 在偏南风的作用

下, 偏干的信号北移造成其他地区的夏季高温。那么, 土壤湿度作为影响气候的一个重要因子, 对我国的极端气候事件会产生何种程度的影响?

文章的第 I 部分详细评估了 NCAR 全球大气环流模式 CAM3.1 (Community Atmosphere Model V3.1) 对中国区域极端气候指数的模拟能力 (周晶和陈海山, 2012), 在此基础上, 本文通过设计土壤湿度年际变化异常的敏感试验, 重点探讨土壤湿度的年际异常对极端气候事件的可能影响, 以期为深入认识极端气候的形成机理及其改善气候模式对极端气候模拟研究提供一些参考。

2 试验设计、资料和方法

2.1 试验设计

本文使用美国国家大气研究中心 (NCAR) 的全球大气环流模式 CAM3.1 (Community Atmosphere Model V3.1) (Collins et al., 2004), 设计了以下两组试验:

(1) 控制试验 (CTL): 试验采用 T42 分辨率, 积分时间从 1949 年 9 月 1 日到 2001 年 9 月 30 日, 海表温度采用 1949~2001 年的月平均观测资料, 土壤湿度由模式自由演算。

(2) 敏感性试验 (aw10): 同控制试验, 但模式的 10 层土壤湿度均由 CTL 试验计算得到的气候月平均资料替代。

CTL 试验可反映出土壤湿度的年际异常, 而敏感性试验 aw10 中不同层土壤湿度则由 CTL 试验输出的不同层土壤湿度计算得到的多年气候平均值给定, 故不包含土壤湿度的年际异常。以第 5 层的土壤湿度为例: 图 1 是控制实验和敏感性试验 ($20^{\circ}\text{N} \sim 50^{\circ}\text{N}$, $70^{\circ}\text{E} \sim 110^{\circ}\text{E}$) 的区域第 5 层土壤湿度的 1961~2000 年的时间变化。研究重点对两

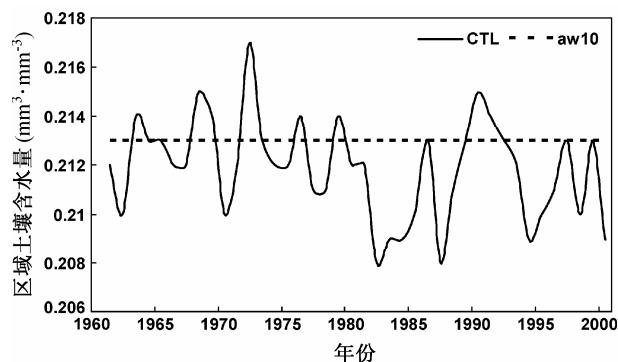


图 1 1961~2000 年东亚区域第五层土壤湿度的变化曲线

Fig. 1 Time series of regional averaged soil moisture of 5th layer during 1961–2000 over East Asia

组试验模拟的最近 40 年 (1961~2000 年) 的极端气候指标进行考察, 通过二者的差异来探讨土壤湿度异常对极端气候事件的可能影响。

2.2 资料和方法

研究选取了暖夜 (Tn95p)、暖昼 (Tx95p)、热浪持续指数 (HWDI) 和霜冻日数 (FD) 作为极端气温事件的四个考察指标, 极端降水频次 (P95p)、极端降水强度 (R95p)、中雨日数 (R10) 和持续湿期 (CWD) 作为极端降水事件的四个考察指标。此外, 通过双线性插值法将各要素分别插值到选取的中国区域 452 个站点上。为了客观地反映全国的总体平均状况, 全国极端气候事件时间序列的生成采用面积加权的方法 (Jones and Hulme, 1996)。本文中涉及的观测数据、有关指标的定义及相关站点的分布参见文章第 I 部分 (周晶和陈海山, 2012)。

3 试验结果分析

为了探讨土壤湿度异常对极端气候事件模拟的可能影响, 以下通过对控制试验 (CTL) 与敏感性试验 (aw10) 结果的比较分析, 分别从两组试验给出的极端气候指标的多年平均空间分布和时间演变这两个方面来评估土壤湿度异常对极端气候事件的可能影响。

3.1 空间分布的变化

为了考察极端气候事件在全国的总体分布形势, 首先讨论两组试验模拟的多年平均的极端气温、降水指数的空间分布特征及其二者的差异, 土壤湿度异常所能引起的极端气候指数空间分布的变化是这里关注的重点。图 2 给出了敏感性试验 (aw10) 与控制试验 (CTL) 模拟的 1961~2000 年极端气温指数差值百分比的空间分布, 从图中可以看出, 在不考虑土壤湿度年际异常的情况下, 模式模拟的暖夜日数在全国大部分地区出现明显的减少, 多数区域减少 30% 左右; 仅东北东部小范围区域出现了增加, 且变幅较小 (总体低于 20%) (图 2a)。模拟的暖昼日数的情况也出现大致类似的变化, 除长江下游及以南的范围地区略有增加之外, 全国的暖昼日数也出现了明显的减少, 其中华北、西北、华南地区的减少最为显著, 大致减小了 30% (见图 2b)。图 2c 是热浪持续指数的变化情况, 不考虑土壤湿度年际异常时, 模拟的热浪持续指数总体呈现全国一致的减少; 与控制试验相比, 大部

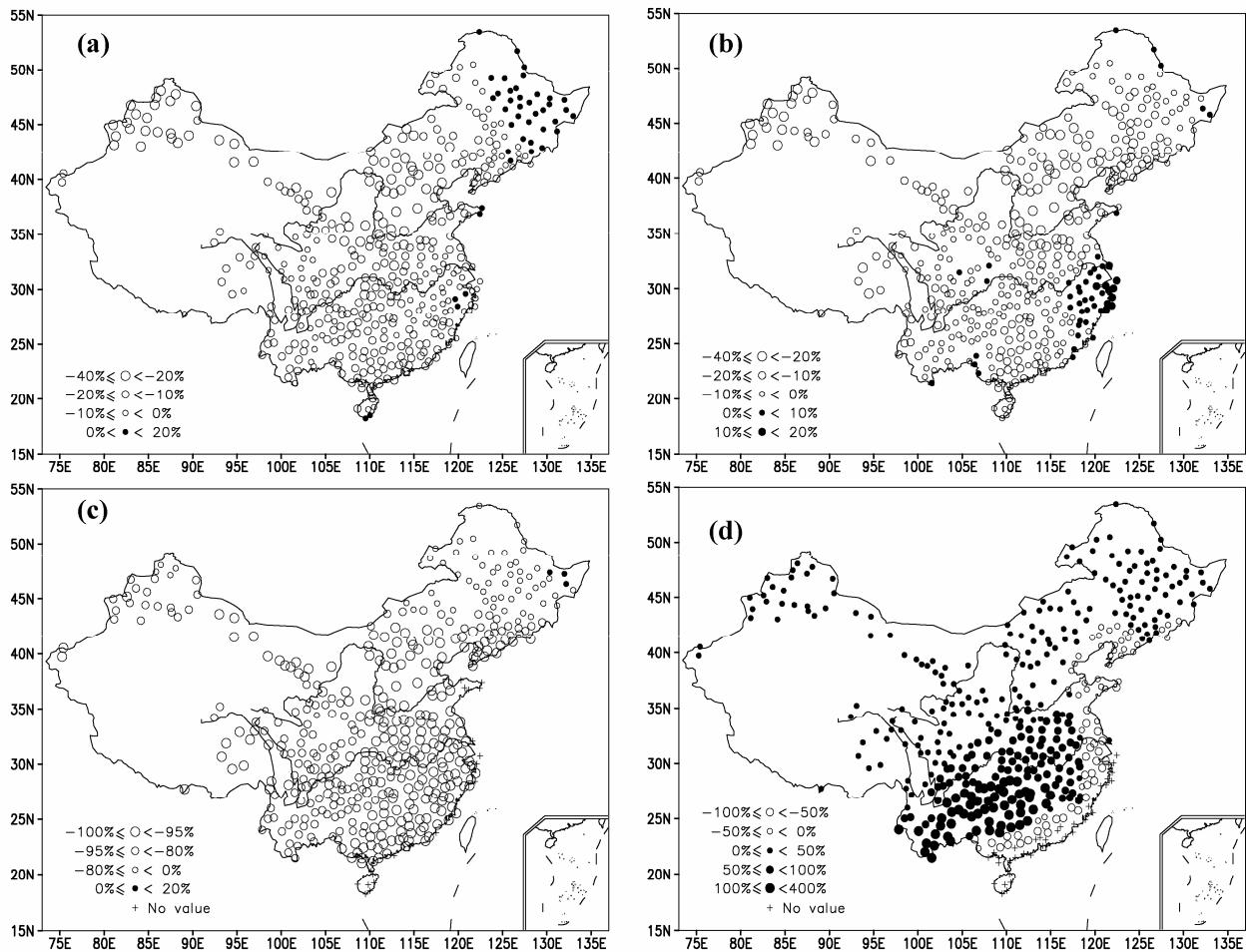


图 2 模式模拟的极端气温指数差值百分比的空间分布: (a) 暖夜; (b) 暖昼; (c) 热浪持续指数; (d) 霜冻日数。差值百分比定义为: (敏感试验—控制试验)/控制试验×100%

Fig. 2 Geographic distribution of the difference percentage of the simulated extreme temperature indices between the CTL (control experiment) and aw10 (sensitivity experiment), in which (a), (b), (c), and (d) represents Tn95p (warm nights), Tx95p (warm days), HWI (heat wave duration), and FD (frost days), respectively. The difference percentage is defined by $(aw10 - CTL)/CTL \times 100\%$

分区域的下降幅度超过了 90%。与上述三个暖指标的变化相比, 霜冻日数的变化则表现出大致相反的变化形式, 霜冻日数除沿海地区出现减少外, 大部分地区的霜冻日数则有不同程度的增加, 尤其是长江以南的广大地区增加最为明显, 部分地区的增加幅度甚至远远超过了 100% (图 2d)。

图 3 给出了土壤湿度异常所引起的各极端降水指标模拟结果变化的空间分布。总体而言, 不考虑土壤湿度异常的情况下, 所讨论的 4 个极端降水指数均以减小为主, 但具体分布特征则存在一定的空间差异。与控制试验相比, 敏感性试验模拟的极端降水频次在东部大部分区域减少, 但在我国西部地区则有所增加, 其中江淮流域的减少较为明显, 减少达 30%; 而北疆的增加趋势最为显著, 增幅大于

50%, 部分站点甚至超过了 100% (图 3a)。极端降水强度的变化主要表现为我国东南沿海地区的明显增加和淮河流域较弱的增加, 其他区域以减少为主, 尤其是东北、华北区域的减小较明显 (图 3b)。中雨日数和持续湿期的变化情况较为类似, 二者的空间分布特征均以全国范围内一致性的减少为主 (图 3c、d)。

为了能够对土壤湿度异常影响极端气候指标空间分布的模拟能力进行定量化的评估, 分别计算了两组试验模拟的多年平均的年极端气候指标与观测的空间相关系数 (见表 1)。不难发现, 对于所讨论的大多数极端气候指数而言, 两组试验与观测的相关系数均发生了明显的改变。与控制试验相比, 敏感性试验与观测的空间相关系数对于多数指

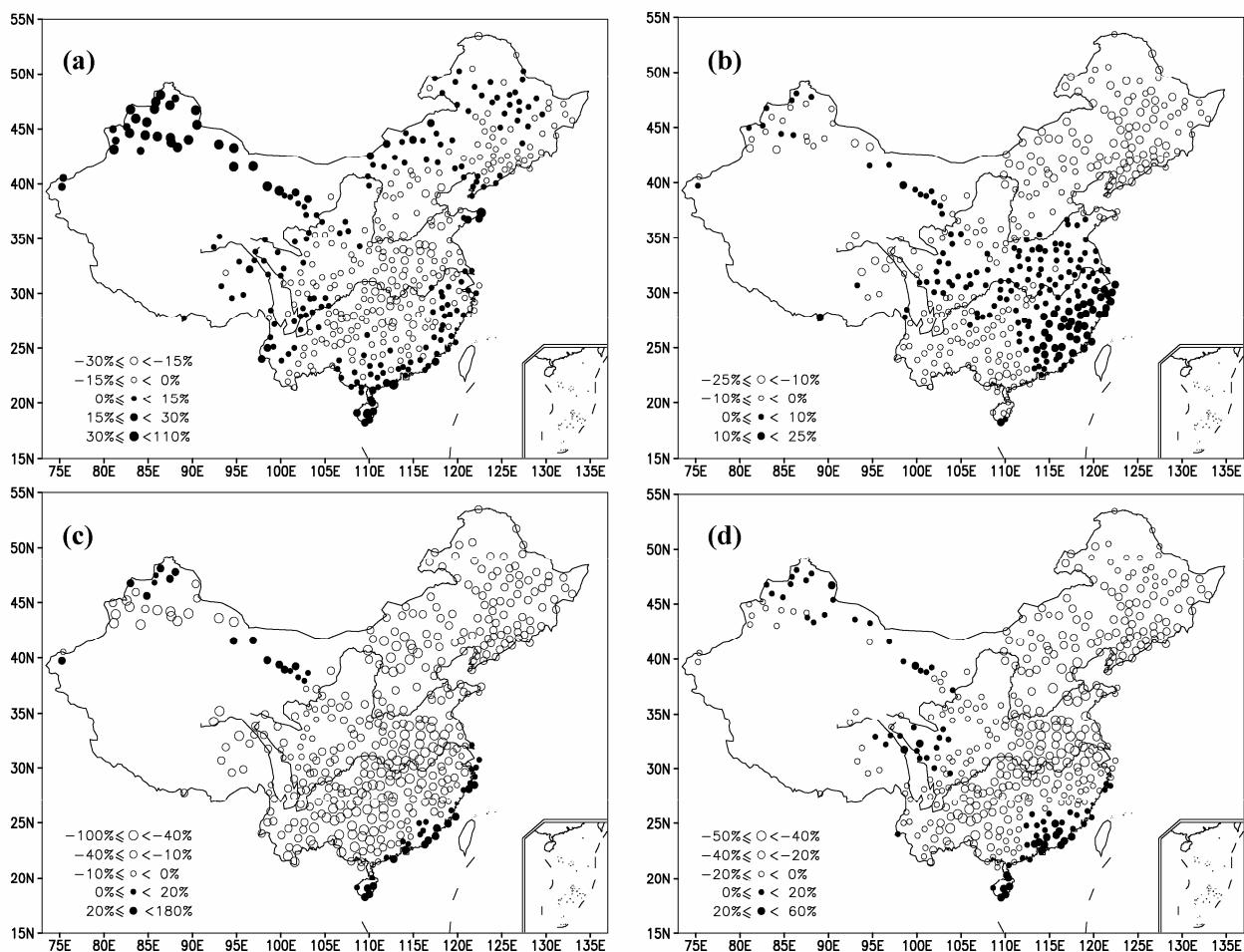


图3 同图2, 但为极端降水指数: (a) 极端降水频次; (b) 极端降水强度; (c) 中雨日数; (d) 持续湿期

Fig. 3 Same as Fig. 2, but for extreme precipitation indices, in which (a), (b), (c), and (d) represents P95p (frequency of extreme heavy precipitation), R95p (intensity of extreme heavy precipitation), R10 (number of days with precipitation greater than 10mm), and CWD (consecutive wet days), respectively

表 1 控制试验(CTL)和敏感试验(aw10)模拟的全国平均的年极端气候指数与观测的空间相关系数以及两者之间的差值

Table 1 The correlation coefficients of averaged annual extreme climate indices over China between the observations and the simulations from CTL and aw10 experiments and their differences

	极端气候指标							
	Tn95p	Tx95p	HWDI	FD	P95p	R95p	R10	CWD
CTL与观测的空间相关系数	0.01	0.12	0.36	0.90	0.59	0.34	0.40	0.67
aw10与观测的空间相关系数	-0.04	-0.09	0.18	0.81	0.46	0.44	0.34	0.66
两者差值(CTL-aw10)	0.05	0.21	0.18	0.09	0.13	-0.10	0.06	0.01

标均有了明显的降低, 但我们也注意到个别指标(R95p)有一定的提高。上述结果说明, 不考虑土壤湿度年际异常时, 模式模拟的极端气候指标与观测之间的相关性降低, 这也表明考虑土壤湿度异常的模拟结果(即控制试验)更能反映实际观测的空间分布特征, 这也从另外一个侧面再次说明了土壤湿度对于极端气候事件模拟的重要性。

3.2 时间演变

3.2.1 年际变率的空间变化

标准差可用来定量描述气候要素的年际变率, 气候要素的标准差较大则表明该要素具有大的年际变率和显著的年际变化; 反之, 则年际变率弱, 年际变化不明显。为了考察土壤湿度异常对极端气候事件年际变率模拟的影响, 这里首先分析有、无

土壤湿度年际异常情况下，模拟的极端气候指标标准差的变化情况。图 4 给出了两组试验模拟的极端温度指数标准差的差值百分比。与控制试验相比，敏感性试验模拟的各个指数的标准差均发生了较明显的变化。对于四个指标的总体情况而言，不考虑土壤湿度异常时，极端气温指标的年际变率以减小为主，但也有少数区域出现了年际变率的增加，且不同指标响应形态的空间分布存在一定的差异。由图 4a 所示，模拟的暖夜日数的年际变率除在东北东部、青藏高原东部明显增加（增幅接近 100%）外，全国其余大部分区域的年际变率均出现不同程度的减小，对土壤湿度异常变化的相对敏感区域主要集中在长江以南、西北以及河套等地区（变幅为 50% 左右）。模拟的暖昼日数的年际变率在全国绝大部分地区也主要是减小的，但在长三角南部区域的少数站点存在明显的增大现象，其增幅甚至超过 200%（图 4b）。此外，不考虑土壤湿度的年际异常，热浪持续指数和霜冻日数的年际变率

也主要表现为较一致的减小，热浪持续指数年际变率在华北、南方大部分地区的减小甚至超过了 95%（图 4c）；而霜冻日数的年际变率变幅大值区域主要位于东北和长江流域，减小高达 50% 以上（图 4d）。不难发现，当不考虑土壤湿度的年际异常时，中国区域极端气温指数的年际变率总体减弱。

图 5 是土壤湿度异常对极端降水指数年际变率的影响情况。不考虑土壤湿度年际异常时，模拟的极端降水频次和极端降水强度的年际变率也出现了明显的变化，但其影响存在明显的空间差异。极端降水频次和强度年际变率的差异呈现南北大致相反的变化特征：南方大部分区域，极端降水频次和降水强度的年际变率均总体表现为增加；而北方区域则以减小为主。从变化的幅度来看，差值的大值区主要出现在河套地区及江淮流域，上述区域的极端降水频次和强度对土壤湿度年际异常最为敏感。而中雨日数和持续湿期的年际变率则基本上为全国一致的明显减小。对于中雨日数（图 5c）和持

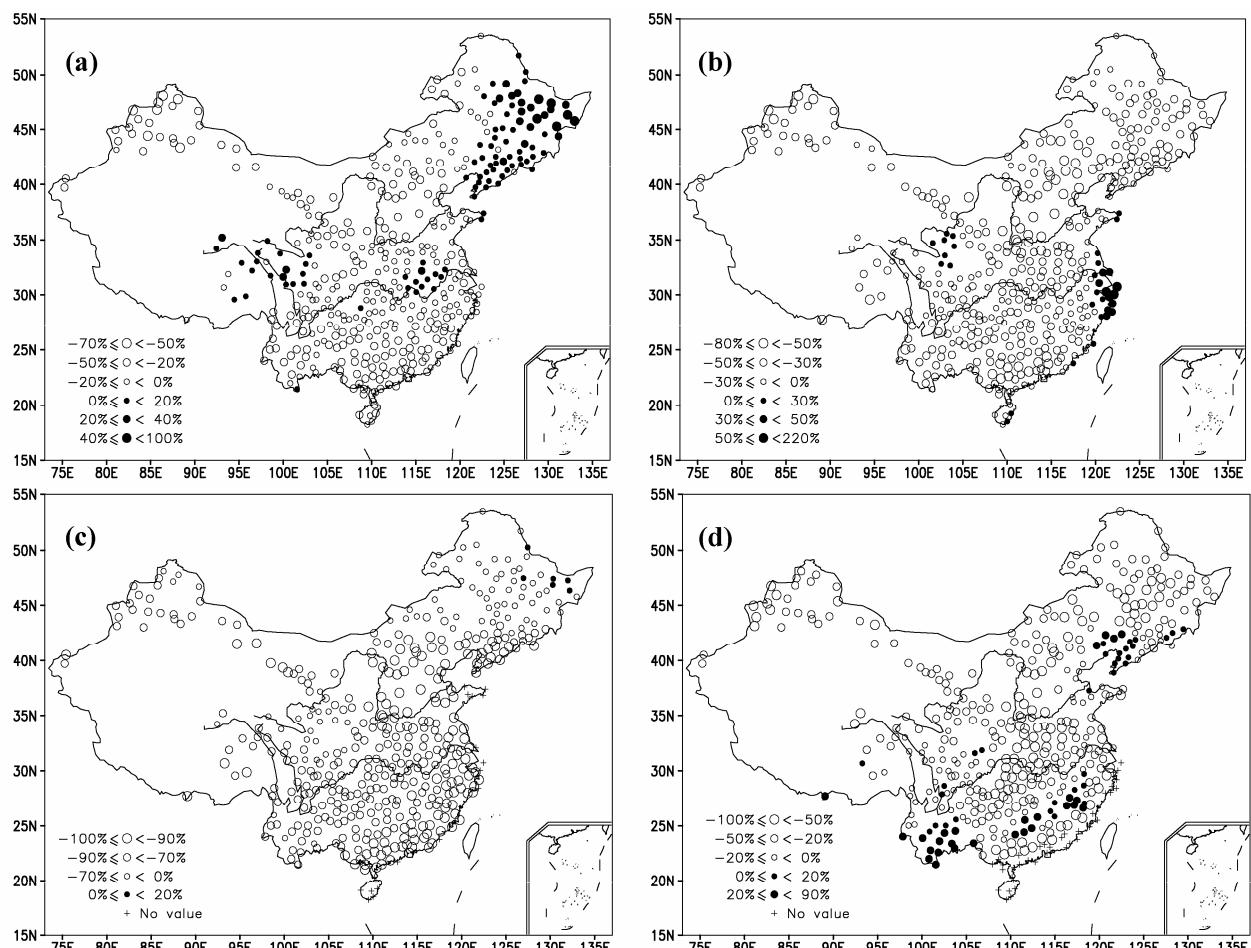


图 4 极端气温指数标准差的差值百分比 $[(\text{敏感试验} - \text{控制试验}) / \text{控制试验}] \times 100\%$: (a) 暖夜; (b) 暖昼; (c) 热浪持续指数; (d) 霜冻日数

Fig. 4 The difference percentage of the standard deviation $[(\text{aw10} - \text{CTL}) / \text{CTL}] \times 100\%$ for the annual extreme temperature indices: (a) Tn95p; (b) Tx95p; (c) HWI; (d) FD

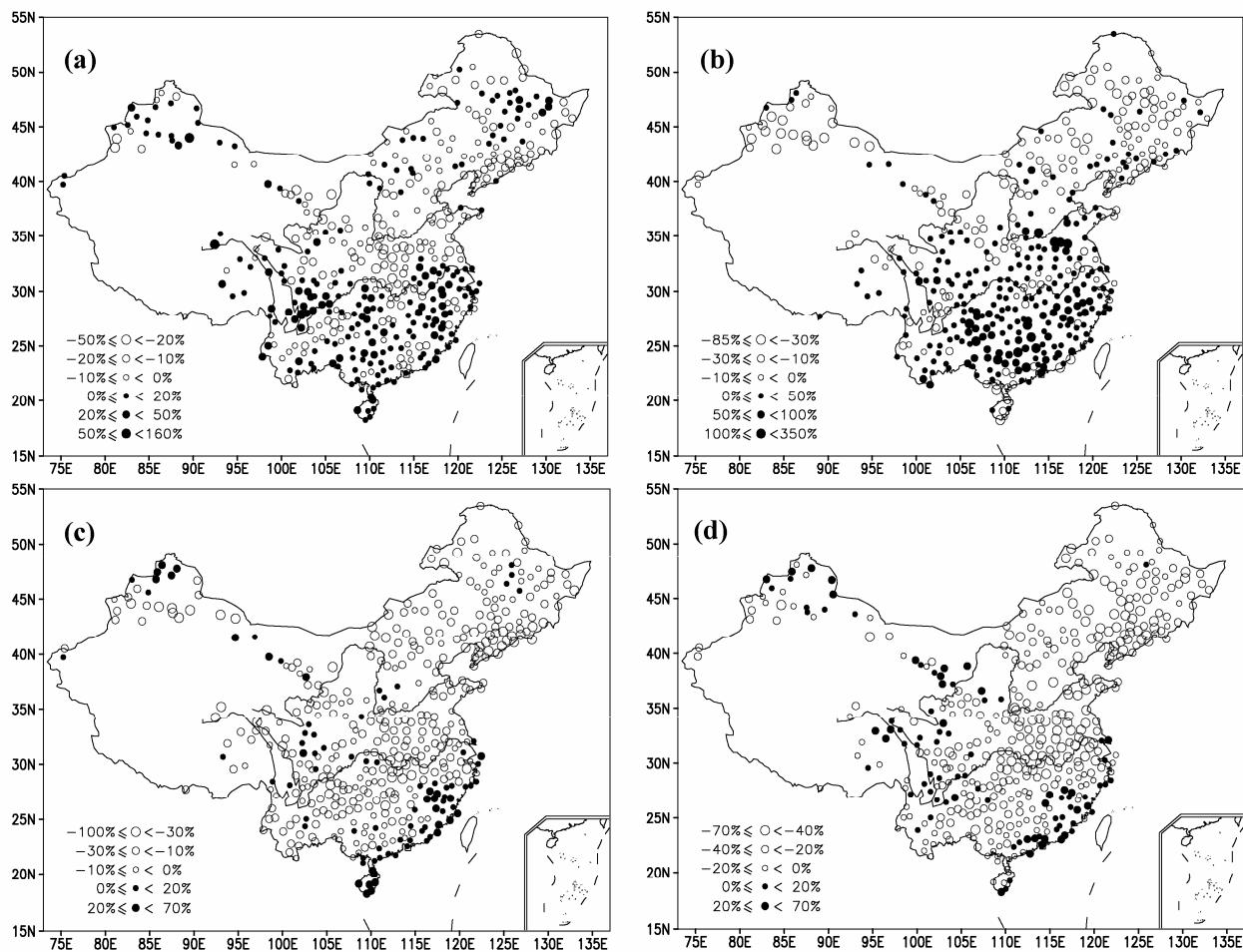


图 5 同图 4, 但为极端降水指数: (a) 极端降水频次; (b) 极端降水强度; (c) 中雨日数; (d) 持续湿期

Fig. 5 Same as Fig. 4, but for extreme precipitation indices: (a) P95p; (b) R95p; (c) R10; (d) CWD

续湿期(图 5d), 年际变率对土壤湿度异常的敏感区均主要位于长江流域和东北地区。

3.2.2 年际变化

为了考察土壤湿度年际异常对极端气候事件年际变化的影响, 这里根据全国加权平均的年极端气候指标的距平序列, 通过两组试验的模拟结果与观测的对比分析, 评估土壤湿度异常对区域平均年极端气温和降水指数年际变化的总体影响。

图 6 给出了观测和两组试验模拟的 1961~2000 年不同极端气温指标的年际变化曲线。不考虑土壤湿度的年际异常, 模拟的极端气温指标年际变化的变化幅度出现了不同程度的减少, 暖夜日数、暖昼日数的年际变化幅度减小总体不明显, 但霜冻日数, 尤其是热浪持续指数的年际变化幅度较实际观测产生了较大的偏差。通过与观测的对比, 可以发现两组试验对极端气温指标年际变化的模拟能力也发生了一些变化。对暖夜和暖昼日数, 两组试

验都能较好地反映出年际变化的观测特征(图 6a、b)。此外, 我们还计算了两组试验模拟的时间序列与观测时间序列的相关系数(见表 2), 便于更直观地对结果进行客观的评价。不难发现, 不考虑土壤湿度年际异常时, 降低了模拟的暖夜日数以及霜冻日数分别与观测值之间的年际相关系数(暖夜: 从 0.92 下降为 0.82; 霜冻日数: 从 0.31 下降为 0.22), 模式对暖夜和霜冻日数的年际变化模拟能力有所下降(见表 2)。但我们也注意到, 在不考虑土壤湿度异常情况时, 模式对暖昼日数和热浪持续指数的模拟能力反而有所提高, 但考虑土壤湿度年际异常时(控制试验), 能够给出热浪持续指数更合理的年际变化振幅(图 6c)。

极端降水指标年际变化的模拟结果如图 7 所示, 从两组试验对极端降水的模拟结果来看, 有、无土壤湿度异常情况时, 模拟的极端降水指标的年际变化也产生了较大差异。由表 2 可以发现, 不考

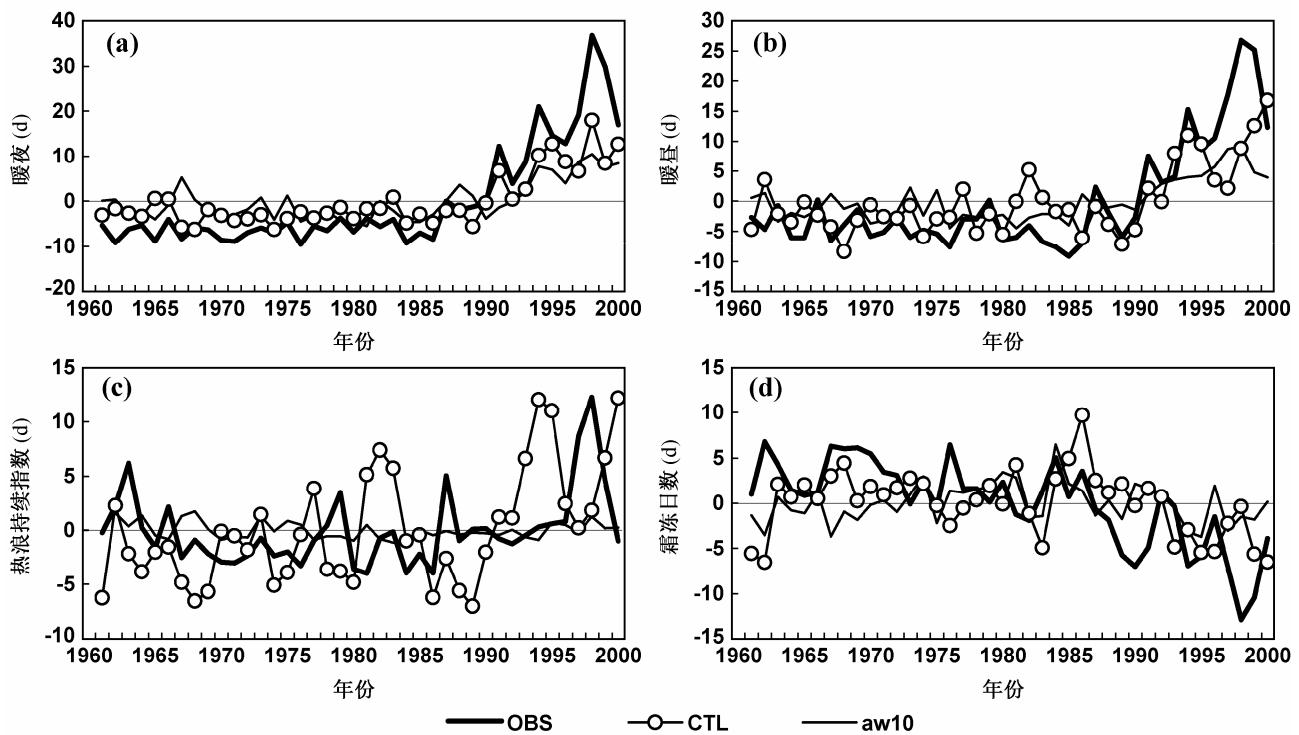


图 6 观测和模拟的全国平均年极端气温指标的年际变化曲线: (a) 暖夜; (b) 暖昼; (c) 热浪持续指数; (d) 霜冻日数。OBS: 观测; CTL、aw10: CTL、aw10 数值试验的模拟结果

Fig. 6 Interannual variations of the observed and simulated annual extreme temperature indices averaged over China: (a) Tn95p; (b) Tx95p; (c) HWDI; (d) FD.
OBS: observations; CTL and aw10 represent the simulations from CTL and aw10 numerical experiments, respectively

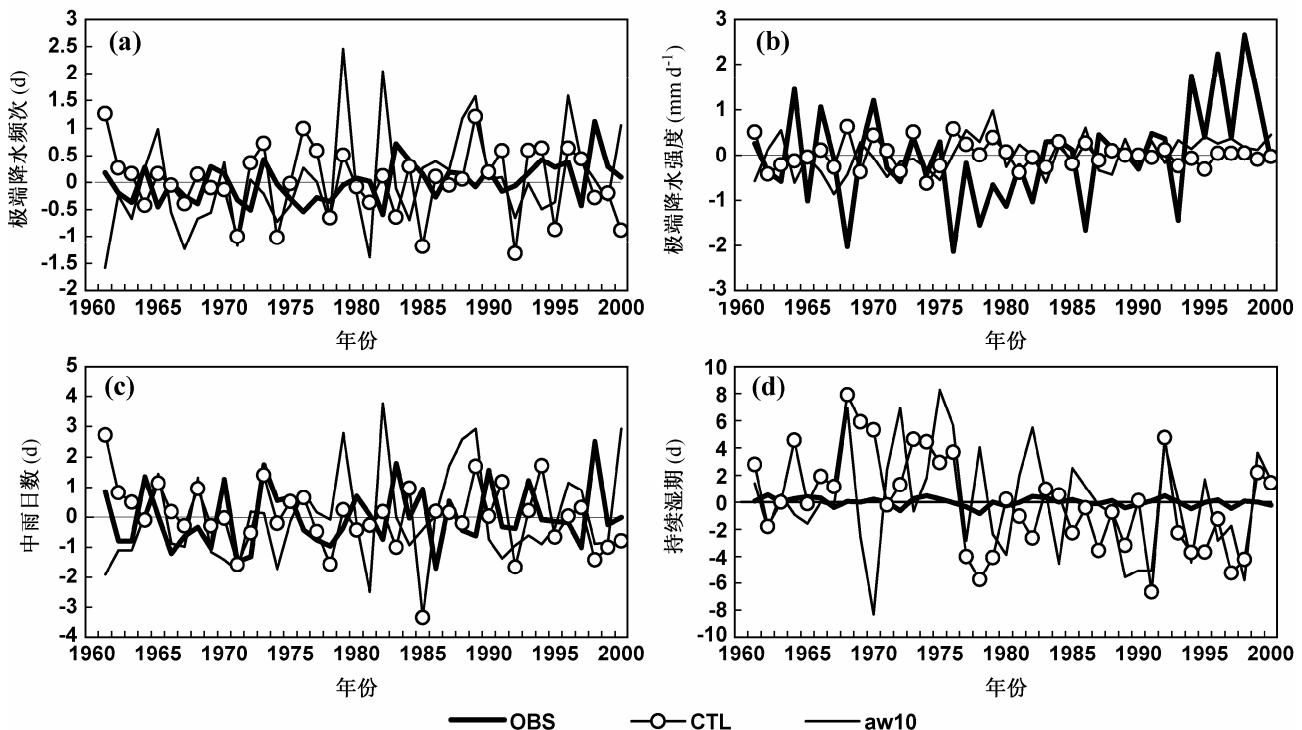


图 7 同图 6, 但为极端降水指数: (a) 极端降水频次; (b) 极端降水强度; (c) 中雨日数; (d) 持续湿期

Fig. 7 Same as Fig. 6, but for extreme precipitation indices: (a) P95p; (b) R95p; (c) R10; (d) CWD

虑土壤湿度年际异常时, 模式对极端降水事件的模拟能力有明显减小; 考虑土壤湿度的年际异常, 总体上可以提高模式对极端降水指标的模拟能力, 但模式对极端降水年际变化的细节特征刻画能力总体较差。另外, 尽管考虑了土壤湿度年际异常后, 均在不同程度上提高了对极端降水指标的模拟能力, 但并没有改善模式对极端降水强度, 尤其是持续湿期的年际振幅模拟中存在的严重偏差(图 7d)。

表 2 控制试验 (CTL) 和敏感性试验 (aw10) 模拟与观测的 1961~2000 年全国平均的年极端气候指数的相关系数以及两者之间的差值

Table 2 Correlation coefficients of the averaged annual extreme climate indices over China between the observations and the simulations from CTL and aw10 experiments during 1961–2000 and their differences

	极端气候指标							
	Tn95p	Tx95p	HWDI	FD	P95p	R95p	R10	CWD
CTL 与观测的时间相关系数	0.92	0.74	0.13	0.31	-0.12	-0.13	-0.03	0.38
aw10 与观测的时间相关系数	0.82	0.82	0.23	0.22	-0.07	-0.10	-0.15	0.05
两者差值 (CTL-aw10)	0.10	-0.08	-0.10	0.09	-0.05	-0.03	0.12	0.33

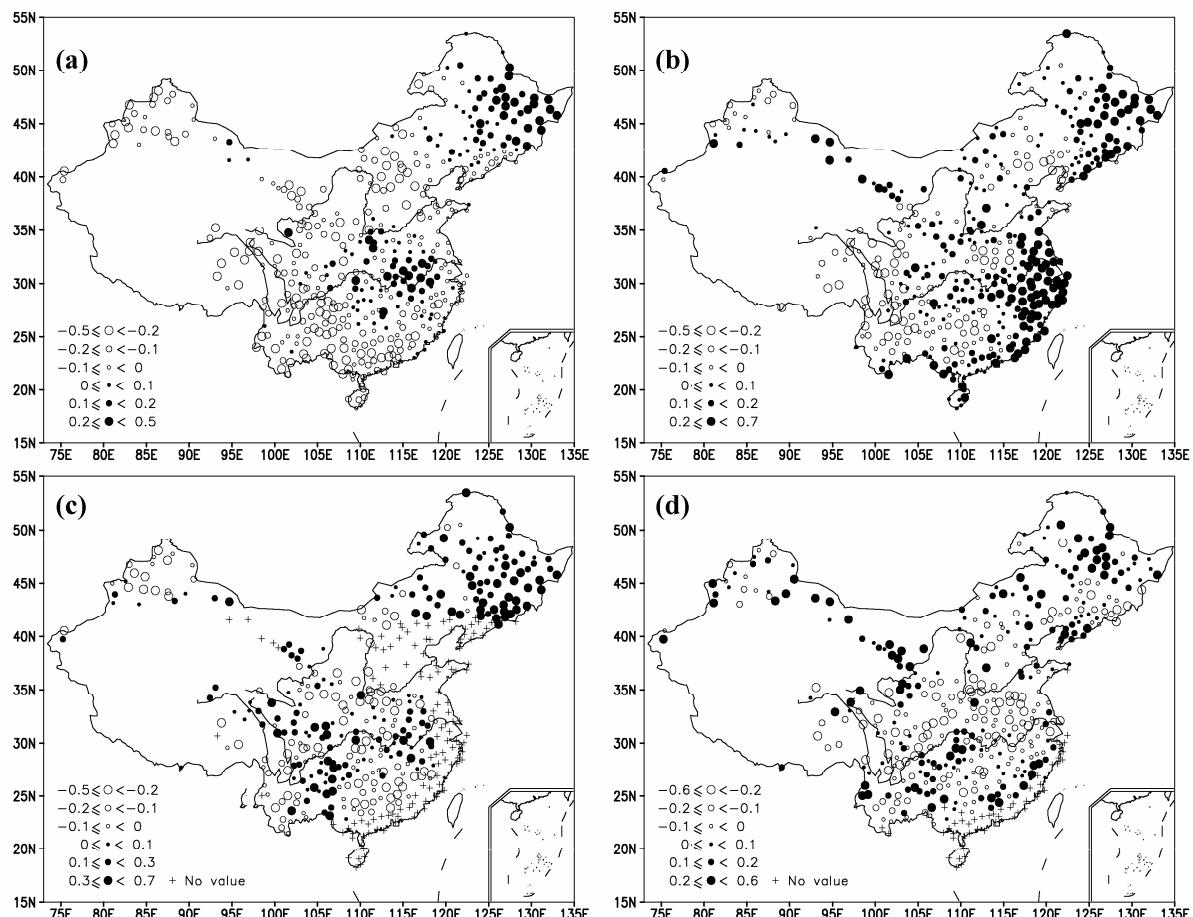


图 8 观测与模式模拟的极端气温指标年际相关系数的差值场 (敏感性试验 aw10—控制试验 CTL): (a) 暖夜; (b) 暖昼; (c) 热浪持续指数; (d) 霜冻日数

Fig. 8 Geographic distribution of the difference (aw10 minus CTL) of the correlation coefficients between the observed and simulated extreme temperature indices: (a) Tn95p; (b) Tx95P; (c) HWDI; (d) FD

极端气候事件的发生具有很强的区域性, 以上从全国区域平均的整体特征分析了土壤湿度异常对极端气候事件模拟产生的影响。为了进一步考察土壤湿度异常对区域性极端气候模拟的影响, 探讨土壤湿度异常对极端气候模拟的重要性, 这里分别计算了敏感性试验与控制试验模拟的全国各站极端气候指标与实测数据的相关系数, 并在图 8 和图 9 中给出二者相关系数差值的空间分布。不难发现,

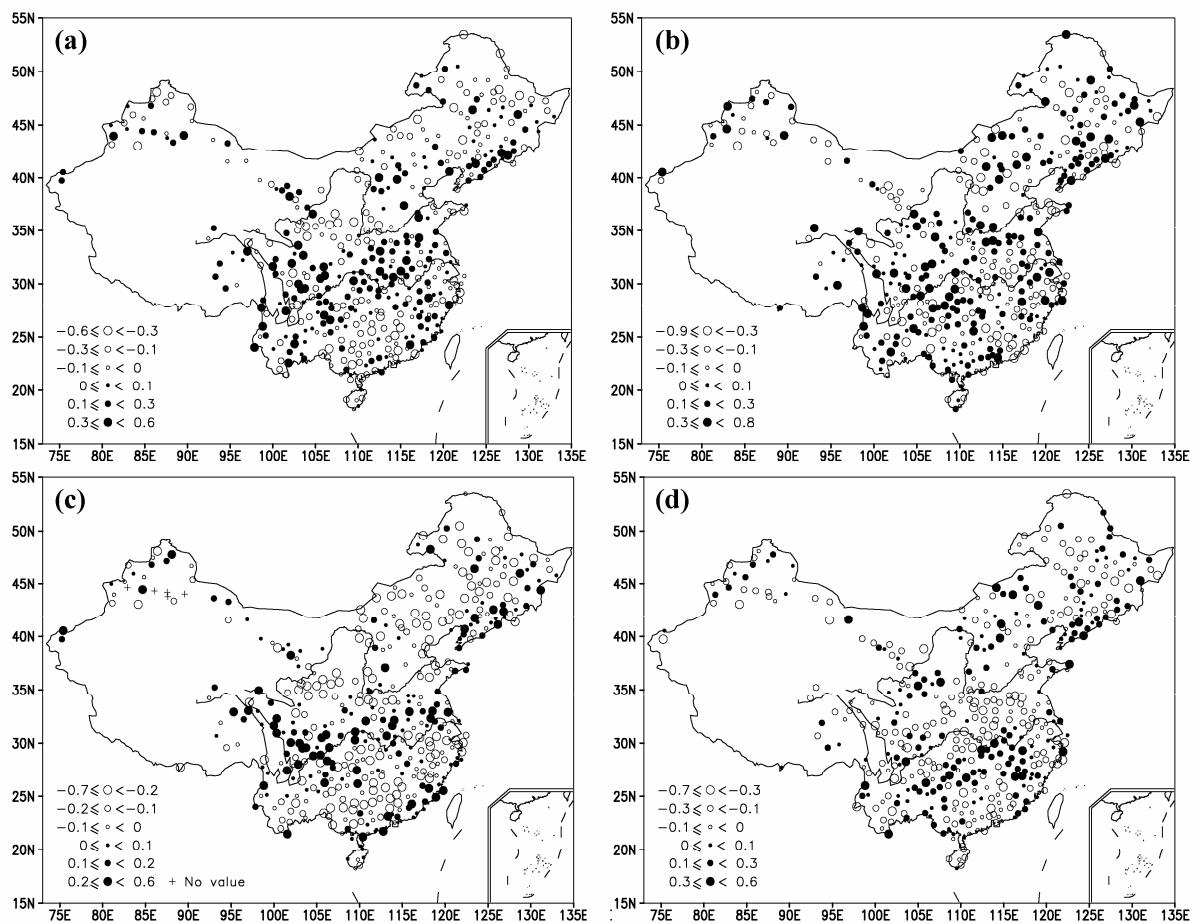


图 9 同图 8, 但为极端降水指标: (a) 极端降水频次; (b) 极端降水强度; (c) 中雨日数; (d) 持续湿期

Fig. 9 Same as Fig. 8, but for extreme precipitation indices: (a) P95p; (b) R95p; (c) R10; (d) CWD

有、无土壤湿度年际异常情况下, 模式模拟的极端温度和降水指标与观测的相关系数存在显著的差别, 且存在较明显的空间差异。不考虑土壤湿度年际异常时, 大范围区域极端温度指标与观测的相关性出现了明显的减小, 但也存在相关系数区域性增加的现象。具体情况为: 不考虑土壤湿度异常时, 暖夜、暖昼和持续热浪指数模拟能力下降的区域主要出现在除东北和长江流域外的广大区域; 而霜冻日数的模拟能力下降的区域主要出现在我国黄河以南、长江以北地区。对于极端降水指数的模拟, 总体而言, 极端降水强度(图 9b)、持续湿期(图 9d)的模拟对土壤湿度异常响应的空间分布较为零散外, 其他 2 个指标的响应特征大致类似: 在不考虑土壤湿度年际异常时, 模式的模拟能力下降的区域主要出现在我国北方地区和长江以南地区。上述结果进一步表明, 考虑土壤湿度的年际异常, 总体上可以提高模式对大部分区域极端气候指标年际变化特征的模拟能力。

4 总结与讨论

文章利用 NCAR CAM3.1 模式, 设计了有、无土壤湿度年际异常的两组数值试验, 对近 40 年(1961~2000 年)我国极端气候事件进行模拟, 通过对比分析两组试验的模拟结果, 探讨了土壤湿度异常对极端气候事件模拟的可能影响。主要结论如下:

(1) 模式模拟的极端气候事件的发生对土壤湿度的异常十分敏感, 土壤湿度异常能够显著改变多年平均的极端气候事件的空间分布。不考虑土壤湿度年际异常, 暖夜日数、暖昼日数和热浪持续指数的发生频次在全国范围内明显减少; 而霜冻日数则明显增加。对于极端降水指标, 在不考虑土壤湿度的年际异常情况下, 极端降水指标的响应存在明显的空间差异, 极端降水频次在江淮流域明显减小, 而极端降水强度则表现为东北减弱、长江流域增强; 中雨日数和持续湿期在我国大部分地区以减小

为主, 其中东北地区和长江流域减小最为明显。总体来看, 不考虑土壤湿度年际异常, 除个别指标外($R95p$), 模式对极端气温、降水事件的空间分布模拟能力均有所下降。

(2) 土壤湿度的年际异常对极端气候指标年际变率的模拟也具有重要影响: 从年际变率的空间变化来看, 不考虑土壤湿度年际异常时, 极端气温指标的年际变率除少数地区外, 大部分地区以减小为主; 而极端降水事件的变化则较为复杂, 极端降水频次和极端降水强度的年际变率在长江以南有所增强, 而在北方地区则有所减弱。中雨日数和持续湿期的年际变率在我国呈现出较为一致的减少趋势, 尤其是以长江流域和东北地区的减小最为显著。

(3) 土壤湿度的年际异常对极端气候指标的年际变化的模拟也有十分重要的影响。不考虑土壤湿度年际异常时, 极端气温指标的年际变化的变幅呈现不同程度的减小; 而极端降水指标的响应情况较为复杂, 年际变化幅度总体有增强趋势, 其中以中雨日数和持续湿期较为明显。从全国总体来看, 不考虑土壤湿度的年际异常, 模式对暖夜日数、霜冻日数的年际变化的模拟能力明显下降; 除中雨日数外, 模式对极端降水指标的年际变化的模拟能力也有所下降。从全国各区域角度, 模式对极端降水、极端气温的年际变化模拟能力在多数区域都有着不同程度的下降。

上述分析表明极端气候模拟对土壤湿度异常十分敏感, 土壤湿度作为影响气候的重要驱动因子, 对极端气温事件和极端降水事件的年际变化及其变化幅度均能够产生明显的影响, 要合理反映极端气候的年际变率, 土壤湿度异常的作用是不可忽视的; 考虑土壤湿度的年际异常可以显著提高模式对极端气温的模拟能力, 但土壤湿度异常对极端降水模拟的影响较为复杂也相对较弱。最近, 张文君等(2012)利用“全球土壤湿度计划第2阶段”提供的土壤湿度资料强迫区域气候模式RegCM3, 通过数值试验讨论了土壤湿度对东亚夏季气候模拟效果的影响; 认为合理考虑土壤湿度的作用, 能够提高区域气候模式对中国夏季降水和气温的空间分布及逐日变化的模拟效果, 且气温对土壤湿度的敏感性强于降水。他们的研究表明, 合理的土壤湿度能够提高区域气候模式对中国夏季气候的模拟能力。这与本文给出的土壤湿度异常对极端气候模

拟影响的结果总体上是一致的。

值得注意的是, 本文给出的控制试验的结果并不完全优于敏感性试验的结果, 这也在一定程度上说明了极端气候模拟以及对土壤湿度响应的复杂性。由于极端气候事件的影响因子众多, 模式对极端气候事件的模拟能力并没有因为考虑土壤湿度的异常得到全面提高, 有关土壤湿度异常对极端气候模拟影响的具体特征和物理机制尚不清楚, 值得做进一步的深入研究。本文的研究工作还是探索性的, 研究结果也只是初步的。尽管本文的研究表明极端气候事件的模拟对土壤湿度十分敏感, 合理描述土壤湿度的异常可以在一定程度上改善模式对极端气候事件的空间分布和年际变化的模拟; 提高模式对土壤湿度的模拟能力, 对于极端气候的模拟具有十分重要的意义。但是, 本文的研究工作仅仅从敏感性的角度考察了土壤湿度及其异常对极端气候事件模拟的可能影响, 至于土壤湿度及其异常影响极端气候的机理尚不清楚, 还有待深入分析。此外, 数值试验方案的设计方面还有待改进, 由于模式模拟的土壤湿度年际异常与实际观测的土壤湿度异常之间可能存在偏差(张文君等, 2008a, 2008b; 熊明等, 2011), 需要进一步考察考虑更真实土壤湿度年际变化对模拟结果的影响。还需要指出的是, 由于敏感性试验没有包含土壤湿度日循环, 对模拟结果也可能带来一定的影响; 关于土壤湿度日循环和年际异常的相对重要性, 可以通过设计更为合理的试验方案来加以识别。另外, 如何选定模式模拟结果对区域土壤湿度异常响应的关键区, 评估不同区域土壤湿度异常对模拟结果的影响, 上述问题将是我们下一步研究工作的重点。

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.
- Collins W D, Rasch P J, Boville B A, et al. 2004. Description of the NCAR Community Atmosphere Model (CAM 3.0) [R]. Technical Report NCAR/TN-464+STR, National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado. 210.
- Cook B I, Bonan G B, Levis S. 2006. Soil moisture feedbacks to precipitation in southern Africa [J]. J. Climate, 19: 4198–4206.
- Dickinson R E. 1983. Land surface processes and climate—Surface albedos

- and energy balance [J]. *Advances in Geophysics*, 25: 305–353.
- Dickinson R E. 1995. Land processes in climate models [J]. *Remote Sensing of Environment*, 51 (1): 27–38.
- Dirmeyer P A. 2000. Using a global soil wetness dataset to improve seasonal climate simulation [J]. *J. Climate*, 13: 2900–2922.
- Fischer E M, Seneviratne S I, Lüthi D, et al. 2007. Contribution of land-atmosphere coupling to recent European summer heat waves [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 34 (6): L06707.
- Huang J, Van de Dool H M, Georgakakos K P. 1996. Analysis of model-calculated soil moisture over the United States (1931–1993) and applications to long-range temperature forecasts [J]. *J. Climate*, 9: 1350–1362.
- Jones P D, Hulme M. 1996. Calculating regional climatic time series for temperature and precipitation: Methods and illustrations [J]. *International Journal of Climatology*, 16: 361–377.
- 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.
- 李威, 翟盘茂. 2009. 中国极端强降水日数与 ENSO 的关系 [J]. 气候变化研究进展, 5 (6): 336–342. Li Wei, Zhai Panmao. 2009. Relationship between ENSO and frequency of extreme precipitation days in China [J]. *Advances in Climate Change Research* (in Chinese), 5 (6): 336–342.
- 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]. *Transactions of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 33 (5): 536–546.
- 刘永强, 叶笃正, 季劲钩. 1992. 土壤湿度和植被对气候的影响——II 短期气候异常持续性的数值试验 [J]. 中国科学 B 辑, (5): 554–560.
- Liu Yongqiang, Ye Duzheng, Ji Jinjun. 1992. Influence of soil moisture and vegetation on the climate—II Numerical experiments of persistent anomalies on the short term climate [J]. *Scientia Sinica (Series B)* (in Chinese), (5): 554–560.
- 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 Meteorologica Sinica* (in Chinese), 58 (3): 278–287.
- 马柱国, 符淙斌, 谢力, 等. 2001. 土壤湿度和气候变化关系研究中的某些问题 [J]. 地球科学进展, 16 (4): 563–568. Ma Zhuguo, Fu Congbin, Xie Li, et al. 2001. Some problems in the study on the relationship between soil moisture and climatic change [J]. *Advance in Earth Sciences* (in Chinese), 16 (4): 563–568.
- Namias J. 1958. Persistence of mid-tropospheric circulation between adjacent months and seasons [C]// Rossby Memorial Volume. Oxford: Rockfeller Institute Press and Oxford University Press, 240–248.
- Robock A, Vinnikov K Y, Srinivasan G, et al. 2000. The global soil moisture data bank [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 81: 1281–1299.
- 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: 722–741.
- Seneviratne S I, Lüthi D, Litschi M, et al. 2006. Land-atmosphere coupling and climate change in Europe [J]. *Nature*, 443 (7108): 205–209.
- 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): 347–358. Shi Jun, Ding Yihui, Cui Linli. 2009. Climatic characteristics of extreme maximum temperature in East China and its causes [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 33 (2): 347–358.
- Shukla J, Mintz Y. 1982. Influence of land-surface evapotranspiration on the earth's climate [J]. *Science*, 215 (4539): 1498–1501.
- 孙丞虎, 李维京, 张祖强, 等. 2005. 淮河流域冬春季土壤温湿度异常对夏季降水的影响及其应用的研究 [J]. 气象学报, 63 (1): 115–121.
- Sun Chenghu, Li Weijing, Zhang Zuqiang, et al. 2005. Impact of Huaihe River basin soil temperature and humidity abnormality in pre-winter and springtime on the anomalous summer rainfall and its application [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 63 (1): 115–121.
- 所玲玲, 黄嘉佑, 谭本道. 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. Suo Lingling, Huang Jiayou, Tan Benkui. 2008. The influence of winter Arctic Oscillation on maximum and minimum air temperature over China in winter [J]. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 24 (2): 163–168.
- Vautard R, Yiou P, D'Andrea F, et al. 2007. Summertime European heat and drought waves induced by wintertime Mediterranean rainfall deficit [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 34 (4): L07711.
- Vinnikov K Y, Yeserkepova I B. 1991. Soil moisture: Empirical data and model results [J]. *J. Climate*, 4: 66–79.
- Vinnikov K Y, Robock A, Speranskaya N A, et al. 1996. Scales of temporal and spatial variability of midlatitude soil moisture [J]. *J. Geophys. Res.*, 101: 7163–7174.
- 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: 29–46.
- 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.
- Wang Ji, Jiang Zhihong, Zhang Haidong, et al. 2007. Variations of spring extreme temperature indexes in Northeast China and their relationships with the Arctic Oscillation [J]. *Advances in Climate Change Research* (in Chinese), 3 (1): 41–45.
- 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.
- 熊明朋, 陈海山, 俞淼. 2011. CLM3. 0 对中国区域陆面过程的模拟试验及评估 (II): 土壤湿度 [J]. 气象科学, 31 (1): 1–10. Xiong Mingming, Chen Haishan, Yu Miao. 2011. Simulation of land surface processes over China and its validation. Part (II): Soil moisture [J]. *Scientia Meteorologica Sinica* (in Chinese), 31 (1): 1–10.
- 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.
- You Q L, Kang S C, Aguilar E, et al. 2011. Changes in daily climate extremes in China and their connection to the large scale atmospheric circulation during 1961–2003 [J]. *Climate Dyn.*, 36 (11–12): 2399–2417, doi: 10.1007/s00382-009-0735-0.
- 张文君, 周天军, 宇如聪. 2008a. 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 Ruchong. 2008a. Distribution and changes of soil moisture in China I. Comparison among various datasets [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 32 (3): 581–597.

- Tianjun, Yu Rucong. 2008a. 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.
- 张文君, 宇如聪, 周天军. 2008b. 中国土壤湿度的分布与变化 II. 耦合模式模拟结果评估, 大气科学, 32 (5): 1128–1146. Zhang Wenjun, Yu Rucong, Zhou Tianjun. 2008b. Spatial distribution and temporal variation of soil moisture over China. Part II: The evaluations for coupled models' simulations [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32 (5): 1128–1146.
- 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 Meteorologica Sinica (in Chinese), 70 (1): 78–90.
- 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. Numerical experiments on response of extreme climate events to anomaly of soil moisture. Part I: Model evaluation based on CAM3. 1 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36 (6): 1077–1092.
- 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. Relationship between Spring soil moisture and summer precipitation over East Asia [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 52 (14): 1722–1724.