沙祎, 徐影, 韩振宇, 等. 2019. 人类活动对1961～2016年长江流域降水变化的可能影响 [J]. 大气科学, 43(6): 1265−1279. SHA Yi, XU Ying, Han Zhenyu, et al. 2019. Possible Effects of Human Activities on Trends in Precipitation over the Yangtze River Basin from 1961 to 2016 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 43(6): 1265−1279. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1903.18199

人类活动对1961～2016年长江流域降水变化的可能影响

沙祎[1,2,4]　徐影[2]　韩振宇[2]　周波涛[3]

1 中国气象科学研究院，北京 100081
2 中国气象局国家气候中心，北京 100081
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
4 中国科学院大学，北京 100049

摘　要　人类活动造成的温室气体浓度增加对气候变化的加剧做出了贡献，降水作为重要的气象要素和水循环组成部分，人类活动对其时空变化特征的影响也是当下研究的重要课题。本文以长江流域为例，利用1961～2016年CN05.1逐日降水数据和20世纪气候检测归因计划（C20C+D&A Project）中CAM5.1-1degree模式的逐日降水结果，分析了人类活动对长江流域年降水量及三个极端降水指数时空变化的影响。结果表明：包含人类活动及自然强迫因素的现实情景（All-Hist）的模拟结果与观测结果较为相近。All-Hist情景下的多试验集合平均结果对长江流域降水的模拟能力较为可靠。通过对比两种情景下模拟的长江流域降水量时空变化特征发现：考虑人类活动影响后，长江流域平均降水相对于仅考虑自然强迫情景下时呈现减少趋势，且减少趋势随时间推移加剧；极端降水受人类活动的影响随时间呈现出的增加趋势有所削弱；对平均降水及极端降水变化趋势的影响存在空间差异性，其中受人类活动影响最严重的是上游中部、东南部及中下游东南部地区，均呈现减少趋势；但在长江上游西南部极端降水受人类活动影响显著增加，需要加强该区域洪涝预防工作。另外，人类活动对平均降水的减少贡献最大的时段为2000～2009年，影响最明显季节为秋冬两季；人类活动对极端降水的影响与降水的极端程度成正相关，降水极端性越强，受人类活动影响的变化程度更大，且空间分布上的差异性也更加显著。

关键词　长江流域　人类影响　变化趋势　降水
文章编号　1006-9895(2019)06-1265-15　　**中图分类号**　P461　　**文献标识码**　A
doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1903.18199

Possible Effects of Human Activities on Trends in Precipitation over the Yangtze River Basin from 1961 to 2016

SHA Yi[1,2,4], XU Ying[2], Han Zhenyu[2], and ZHOU Botao[3]

1 *Chinese Academy of Meteorological Sciences*, *Beijing* 100081
2 *National Climate Center*, *China Meteorological Administration*, *Beijing* 100081
3 *Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters*, *Nanjing University of Information Science & Technology*, *Nanjing* 210044
4 *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049

收稿日期　2018-07-24；**网络预出版日期**　2019-03-12
作者简介　沙祎，女，1994年出生，硕士研究生，主要从事气候变化研究。E-mail: shayi218@sina.com
通讯作者　徐影，E-mail: xuying@cma.gov.cn
资助项目　国家重点研发计划项目2017YFA0603703、2017YFA0605004
Funded by　National Key Research and Development Program of China (Grants 2017YFA0603703, 2017YFA0605004)

Abstract Increased concentrations of greenhouse gases caused by human activities have been contributing to climate change. The impact of human activity on the spatiotemporal variations in precipitation patterns has been an important focus of study. This paper takes the Yangtze River basin as an example for study. Daily precipitation data observed from 1961 to 2016, and daily precipitation simulation results of using the CAM5.1-1degree model in the International CLIVAR C20C+ Detection and Attribution Project, were used to analyze the contribution of human activities to the spatial, temporal, and trend variations in annual precipitation and three extreme precipitation indices over the Yangtze River basin. Simulation results, which included both anthropogenic and natural influences, were close to observations. Using statistical methods, model simulation ability was tested. It can be concluded that the average result of multiple runs of the actual scenario was more reliable for the simulation of precipitation over the Yangtze River basin. By comparing temporal and spatial variations when accounting for the impact of human activities, average precipitation over the Yangtze River basin showed a decreasing trend when compared with natural forcing only, and this decreasing trend has intensified over time. The increasing trend in extreme precipitation, as affected by human activities, has weakened over time. Based on spatial differences in average precipitation and extreme precipitation trends and percentage anomalies, the areas most affected by human activities were shown to be the upper central and southeast regions and the middle and lower southeast region, all of which showed a decreasing impact. However, in the southwest of the upper Yangtze River, extreme rainfall has increased significantly due to human activity. Increased flood prevention work is recommended for this area. The most significant period for the reduction of average precipitation caused by human activity was 2000–2009, and the sharpest seasonal decreases shown during autumn and winter. The impact of human activities on extreme precipitation was positively correlated with the extreme degree of precipitation. Compared with general heavy precipitation (R90p), extreme heavy precipitation (R99p) was affected by human activities with a greater range and more significant differences in spatial distribution.

Keywords Yangtze River basin, Human influence, Trends, Precipitation

1 引言

气候变化早已成为受全世界关注的重要研究课题，气候变暖对环境、生态和社会经济系统均产生了深远影响，同时人类活动及社会经济的发展也对气候变化做出了贡献，政府间气候变化专门委员会（IPCC）发布的第五次气候变化评估综合报告（IPCC SYR）指出1750年以来大气二氧化碳等温室气体浓度的增加是人类活动影响气候变化的主要原因（IPCC，2014）。降水是受气候变化影响最直接和最重要的气象要素。因此，研究人类活动对不同时空尺度下降水的影响具有重要的研究意义。

长江是中国最长、世界第三大河流，全长6300公里，发源于“世界屋脊”——青藏高原的唐古拉山脉主峰各拉丹冬雪山西南侧，干流自西向东，横贯我国西南、华中、华东三大经济区，11个省、直辖市、自治区，于崇明岛以东注入东海，其庞大流域面积达180余万平方公里（图1），受到气候、地理位置、地形等自然因素和人类活动的共同影响，极端降水事件十分突出，每年发生的洪涝是中国严重的自然灾害，花费巨额的抗灾支出（CWRC，2002）。

长期以来诸多学者对长江流域平均和极端降水时空变化特征的研究取得了许多成果。IPCC AR5报告中指出长江流域降水增加（IPCC，2013），李春龙等（2013）的研究表明1951～2005年间长江全流域、上游、中下游总体的年降水量呈递减趋势，其中长江上游地区减少趋势显著，而下游呈不显著的递增趋势，也有其他结果指出长江流域年降水量无明显的变化趋势（白路遥和荣艳淑，2015）。另外，针对汛期或夏季平均降水的研究指出长江流域夏季降水量有增多趋势，特别是中下游区域增多趋势较明显（Zhang et al., 2005；Su et al., 2006），并推断气候变暖可能导致20世纪90年代以来长江流域洪水的频繁发生（姜彤等，2008）。极端降水的研究方面，很多结果均表明长江中下游和上游西部的极端降水事件频率呈增加趋势，极端降水强度也有所增强，特别是中下游地区极端降水的年际变化很剧烈（苏布达等，2006；Zhang et al., 2007a；姜彤等，2008；白路遥和荣艳淑，2015；王蒙和殷淑燕，2015；潘欣等，2017；马小芳等，2018），而在长江上游的中东部地区呈现减少趋势（王蒙和

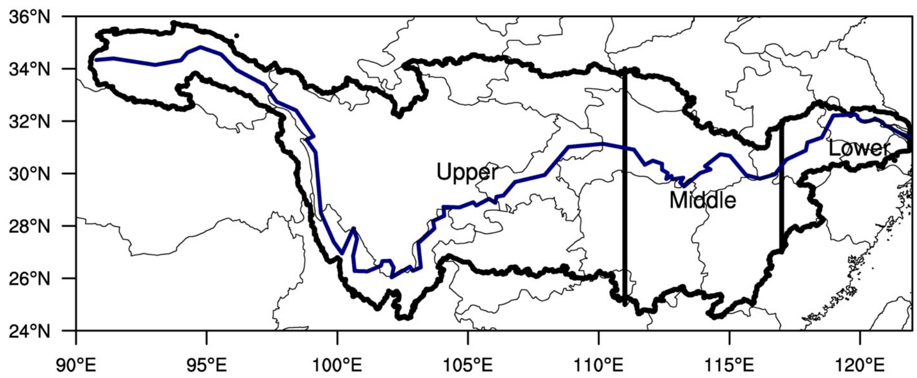

图1 长江流域空间分布图
Fig. 1 Spatial graph of Yangtze River basin

殷淑燕，2015），极端降水的空间差异性明显（白路遥和荣艳淑，2015）。还有些研究推测长江上游西部和下游西南部突发性的洪涝灾害的发生频率将会增加（Su et al., 2005; Zhang et al., 2007a）。然而前人对长江流域降水的研究更多是集中于汛期以及梅雨时期，关于极端降水的研究在时间序列上也仅限于1951～2012年，缺乏近几年的变化趋势分析。

相比之下，对于人类活动影响的检测归因工作还处于初步探索阶段。目前已有少量研究成果指出人类活动对平均降水和极端降水的影响可以被检测到（Wan et al.，2015），Fischer and Knutti（2015）发现在全球增暖0.85℃的情况下，陆地上18%较显著的极端降水是人类影响的结果，且极端事件的极端程度越强，事件发生所受到的人类影响的贡献越大。Zhang et al.（2007b）利用观测数据和多个全球模式的模拟结果指出人类活动导致了全球平均降水的小幅度减少及纬度上的重新分配，即高纬地区降水量增加、副热带地区降水减少。对极端降水的归因分析中，有研究估算出人类活动影响对于北半球年最大一日降水量增加的平均贡献为3.3%，且人类活动影响下，年最大一日降水量的重现期由1950年代早期的20年一遇变为2000年代早期的15年一遇，即人类活动使得极端降水事件发生频率加大（Zhang et al., 2013）。然而现有研究的空间尺度都仅是全球或半球尺度，对于区域尺度的研究很少，主要原因是空间尺度较小时，降水变化信号存在彼此抵消的现象（信噪比较低），且模式的分辨率和模拟结果的准确度还不足以得出可靠的结论。但随着计算机技术的发展，模式的分辨率已得到大大提高，具备了开展较小区域尺度相关分析工作的条件。

本文使用高分辨率的观测数据和20世纪气候检测归因计划（C20C+D&A Project）下CAM5.1-1degree模式的模拟结果，以长江流域为研究对象，并将其划分上游（24.5°N～36°N，91°E～111°E）、中游（24.5°N～36°N，111°E～117°E）、下游（25°N～33°N，117°E～122°E）三个范围，初步探究人类活动对1961～2016年长江流域平均降水及极端降水时空变化特征的可能影响。

2 数据和研究方法

2.1 数据

研究中使用的观测数据为利用2400多个观测站点进行格点化后的CN05.1数据集中的逐日降水数据，分辨率为0.25°×0.25°（Xu et al., 2009；吴佳和高学杰，2013），时段为1961～2016年，主要用于分析长江流域观测到的降水时空变化特征，并与模式结果进行对比，评估模式的模拟能力。使用的模式数据为20世纪气候检测归因计划(C20C+D&A Project)中的CAM5.1-1degree模式的逐日降水量的模拟结果，分辨率为1.25°×0.9375°，时间段为1959～2016年，用来分析人类活动和自然强迫对长江流域平均降水和极端降水的影响。

CAM5.1-1degree模式是CESM1.0.3地球系统模式的大气部分，按照C20C计划的要求完成了两种不同驱动场下的模拟试验，其中一个是现实情景，使用观测到的边界条件（包括海表温度、二氧化碳浓度等）进行驱动得到包含人类活动和自然强迫共同影响下的结果（简称All-Hist）；另一个是非现实情景，使用来自于CMIP5模式集合模拟的边界条件进行驱动得到仅受自然强迫作用下的结果

（简称Nat-Hist）（Stone D A，2018）。每种情景下的试验都包含400个集合（表1），但为了与观测数据的时段（1961～2016年）相匹配，本文中仅选用覆盖时段为1959～2016年的50个集合进行分析。分析时我们认为两种情景下模拟出的气象要素在时空特征上表现出的差异为人类活动影响导致的，进一步分析人类活动对长江流域降水时空变化特征的影响。

2.2 方法

本文利用CAM5.1-1degree模式的两种历史情景All-Hist和Nat-Hist的模拟结果，分析人类活动对长江流域平均降水和极端降水时空变化特征的可能影响。主要步骤如下：

（1）利用CAM5.1-1degree模式两种历史情景All-Hist和Nat-Hist 50个集合的逐日降水模拟结果，计算了三个逐年极端降水指数：RX5day、R90p和R99p。三个指数根据“气候变化检测和指标专家组（ETCCDI）”的定义计算，具体见表2。

（2）选取1961～1990年作为基准期，首先计算Nat-Hist情景下基准期内的长江流域年降水量和极端降水的平均值，再分别计算All-Hist和Nat-Hist两种情景相对于Nat-Hist情景下基准期平均值的距平百分率，通过对比距平百分率的年际变化差异来检测人类活动对长江流域平均降水和极端降水年际变化的影响。同时采用线性趋势法，通过对比两种情景下年降水量与极端降水指数年代际变化趋势值的空间分布差异，进一步检测人类活动对长江流域平均降水和极端降水空间变化特征的影响。

（3）为了更进一步考察不同季节和时段人类活动对长江平均降水的影响，我们用各季度的月平均降水量代表四季的降水量，并把时段细分为：1959～2016年（整个时段）、1960～1969年、1970～1979年、1980～1989年、1990～1999年、2000～2009年六个时段，计算All-Hist情景相对于Nat-Hist情景下平均年降水量的变化百分率，即

$$PR_{(T_i)}=PR_{\text{All-Hist}\,(T_i)}-PR_{\text{Nat-Hist}\,(T_i)}/PR_{\text{Nat-Hist}\,(T_i)}\times 100\%, \quad (1)$$

其中，$PR_{(T_i)}$代表时段T_i内All-Hist情景相对于Nat-Hist情景下的平均年降水量的变化百分率，$PR_{\text{All-Hist}\,(T_i)}$代表时段$T_i$内All-Hist情景的平均年降水量，$PR_{\text{Nat-Hist}\,(T_i)}$代表时段$T_i$内Nat-Hist情景的平均年降水量，$T_i$（$i$=1, 2, …, 6）代表6个不同的时段（即$T_1$为1959～2016年，$T_2$为1960～1969年，……，$T_6$为2000～2009年）；分析四个季节的季节降水量时，则将平均年降水量换为四个季度的月平均降水量，时段仅取1959～2016年，通过以上计算分析结果可以得出人类活动影响对长江流域平均降水贡献最大的时段和季节。分析极端降水时也采用了相同分析方法，将平均年降水量换为三种极端降水指数值，时段仅取1959～2016年。

另外为了评估模式模拟能力，研究中采用t检验法对模式模拟的年降水量年际变化进行95%置信区间检验，并参照Gleckler et al.（2008）的均方根误差标准化处理方法，计算相对均方根误差（RMSE’）来比较模式中各试验与多试验集合平均结果在不同区域对年降水量空间分布的模拟能力。RMSE’计算公式为

$$\text{RMSE'}=(\text{RMSE}-\text{RMSE}_{\text{median}})/\text{RMSE}_{\text{median}}, \quad (2)$$

其中，RMSE表示各All-Hist试验集合和观测值的均方根误差，$\text{RMSE}_{\text{median}}$表示所有试验集合均方根误差的中位数。RMSE’＞0，说明该试验集合的模拟能力弱于所有试验集合的中等水平；RMSE’＜

表1 CAM5.1-1degree模式模拟数据说明

Table 1 Description of the CAM5.1-1degree model simulation data

模拟试验情景	集合个数	时段	分辨率(经度×纬度)
All-Hist	50	1959～2016年	1.25°×0.9375°
	50	1996～2016年	
	300	2010～2013年	
Nat-Hist	50	1959～2016年	1.25°×0.9375°
	50	1996～2016年	
	300	2010～2013年	

表2 本文采用的极端降水指数定义

Table 2 Definition of extreme precipitation indices used in this work.

极端降水指数	中文名称	单位	定义
RX5day	5日最大降水量	mm	每年最大的连续5日降水量
R90p	一般强降水量	mm	每年大于1961～1990年90%分位点的日降水量的总和
R99p	极端强降水量	mm	每年大于1961～1990年99%分位点的日降水量的总和

0，说明该试验集合的模拟能力强于所有试验集合的中等水平（陈晓晨，2014）。

3 结果分析

3.1 模式模拟能力评估

研究中选用的CAM5.1-1degree模式属于CESM1地球系统模式的大气部分，是IPCC第五次报告中所用的42个气候模式之一，在IPCC报告对13个气候变量的模拟效果评估结果中CESM1（CAM5）模式对降水量模拟效果的RMSE值为−0.1左右，表现较好，且与CMIP3相比，模式对于大尺度降水、降水日循环、降水极值的全球分布特征模拟效果有所改进，可信度评价较高（IPCC，2013），但是对区域尺度降水的模拟效果改进尚需要进一步的提高。

本文利用该模式模拟结果研究长江流域降水变化，相关研究较少，为了了解模式的可靠性以及模式模拟偏差对研究结果的可能影响，本节通过对比模式模拟的现实情景（All-Hist）与观测数据相对于基准期的降水量距平百分率时空变化，并采用统计显著性检验及相对均方根误差等方法来评估模式的模拟能力。

图2从年际变化角度评估模式对长江流域年降水量的模拟能力，对比了长江流域Nat-Hist、All-Hist情景以及观测的逐年降水总量相对于基准期（1961～1990年）的距平百分率变化。比较All-Hist情景多试验平均的模拟结果与观测曲线可以发现模式模拟的年降水量相对于基准期的变化趋势在2010年之前与观测结果都呈现降水减少的趋势，但在2010年之后所有试验模拟的距平百分率的变化幅度均小于观测，All-Hist的多试验平均结果与观测结果出现了相反的变化趋势，原因可能是模式对基准期内降水量模拟结果较观测偏高略多所导致的。具体统计了不同研究时段内通过95%置信水平的试验数后得出，在1959～1979年、1959～1999年通过95%置信水平的试验分别有26个、16个，表明模式在20世纪80年代之前的模拟比较可靠。

另一方面，通过图3给出了All-Hist情景、Nat-Hist情景及观测相对于基准期（1961～1990年）年降水量的距平百分率空间分布，来检验模式对降水变化空间分布的模拟能力。结果显示，长江流域年降水量相对于基准期的变化趋势存在明显的空间差异，分别对比模式两种情景的空间分布情况与观测结果可以发现，All-Hist情景与观测的分布情况较为相近，两者结果均显示长江上游中东部降水量减少，上游西部和下游大部分地区降水量增加，说明模式对于变化极值中心位置的模拟比较可靠。另外，模拟结果对于面积较小的中游地区降水

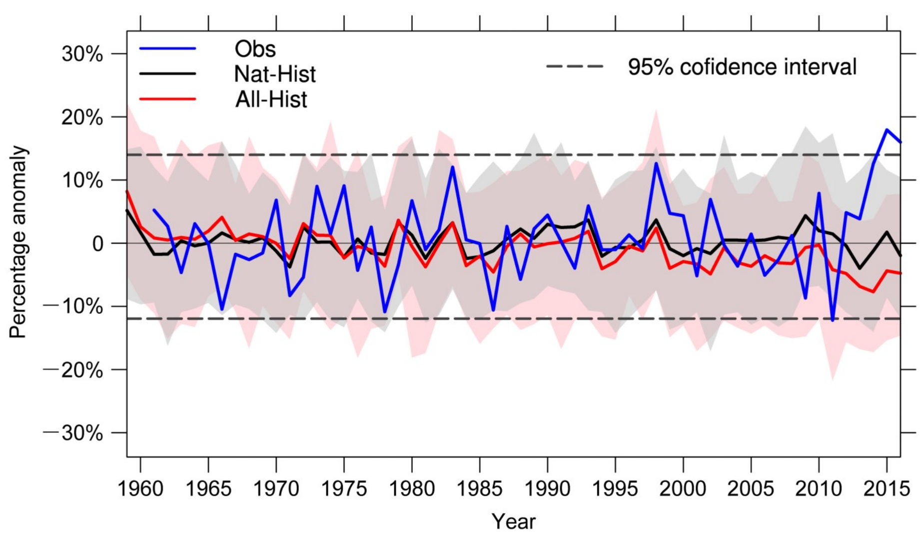

图2 长江流域年降水量相对于基准期（1961～1990年）的距平百分率年际变化及观测数据95%置信区间范围（Obs：观测；Nat-Hist：非现实情景；All-Hist：现实情景）。阴影代表50个试验集合模拟结果的最大值和最小值范围。

Fig. 2 Annual variability of percentage anomalies for annual precipitation in the Yangtze River basin relative to the reference period (1961–1990) and the 95% confidence interval of observation (Obs: observation, Nat-Hist: counterfactual scenario, All-Hist: factual scenario)

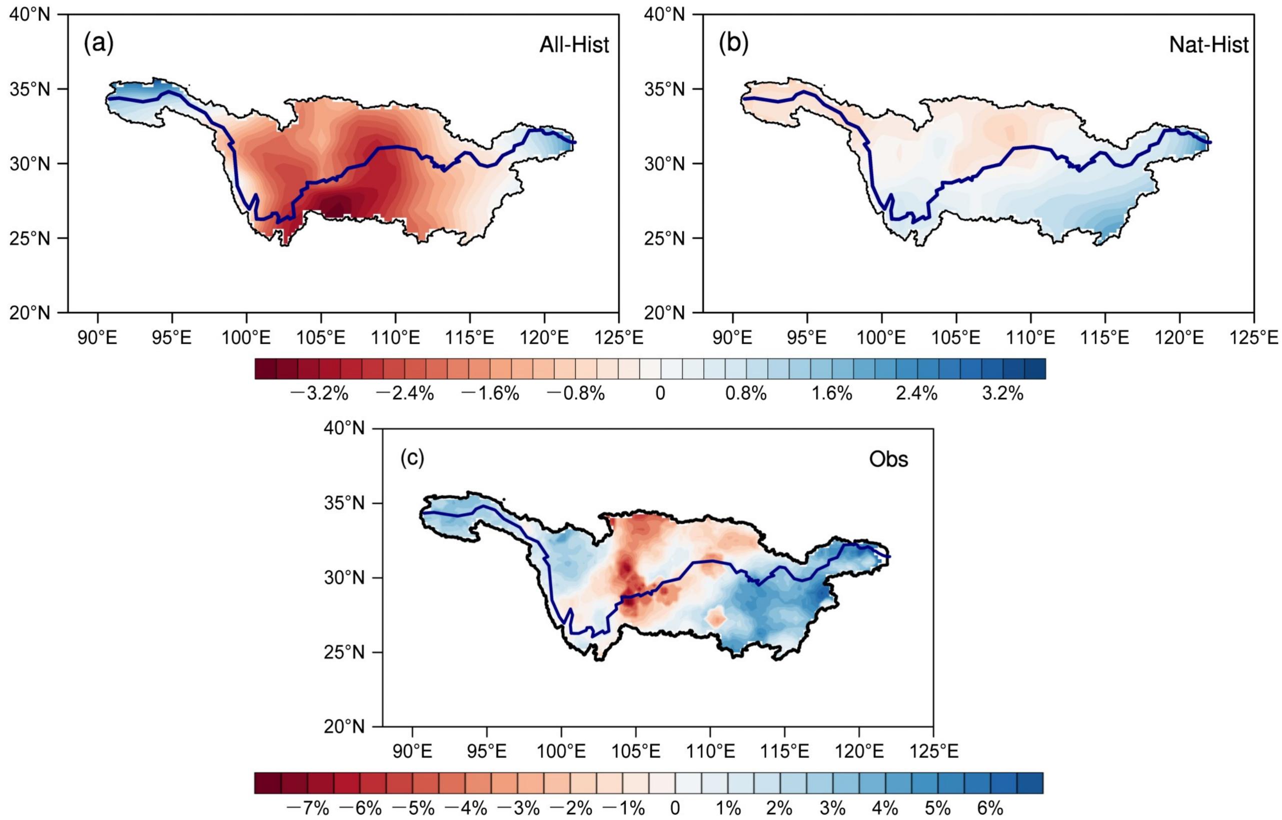

图3 长江流域年降水量相对于基准期（1961～1990年）的距平百分率空间分布：（a）All-Hist；（b）Nat-Hist；（c）观测（Obs）

Fig. 3 Spatial distribution of percentage anomalies for annual precipitation in the Yangtze River basin relative to the reference period (1961–1990): (a) All-Hist; (b) Nat-Hist; (c) Obs

量变化与观测存在一些偏差，原因可能是观测数据的空间分辨率高于模式。因此，模式中All-Hist情景对于流域降水量变化的极值中心位置具有较好的模拟能力，在面积较小的中游地区受到模式分辨率的限制模拟能力略差，但从流域整体来看模式模拟的降水空间变化分布与观测结果是较为一致的。

为了比较All-Hist情景各试验及多试验集合平均（Multi-Run Average，简称MRA）的模拟能力，分别计算了它们在长江流域和上、中、下游的相对均方根误差（图4）。结果表明，在流域各分区范围内均有近一半试验对长江的降水模拟能力是强于所有试验模拟的中等水平的，其中面积最大的上游地区的模式模拟水平与全流域的模拟水平基本一致，MRA的模拟能力要强于所有试验样本模拟能力的中等水平；中游和下游地区的模拟水平在不同试验间的模拟能力差异较大，模拟能力最佳的单个试验出现在这两个游段，但MRA的模拟能力略弱于中等水平，这可能是受长江中下游地形及沿海环境等因素的影响，该区域降水本就具有一定复杂性所导致的。但综合来看，MRA的模拟结果基本可以代表长江流域的降水量的情况，在后续研究中将选用MRA结果进行分析。

3.2 人类活动对长江流域平均降水时空变化特征的影响

本节首先对比包含人类活动和自然强迫共同影响的All-Hist情景与仅考虑自然强迫影响的Nat-Hist情景的年降水量模拟结果，初步了解人类活动对长江流域平均降水时空变化特征的可能影响。

从All-Hist和Nat-Hist情景各自相对于Nat-Hist基准期（1961～1990年）年降水量距平百分率年际变化曲线（图5）可以看出，考虑人类活动影响后的年降水量在整个研究时段均有所减少且随着时间的推移减少程度缓慢增长。说明人类活动可能导致长江流域的年降水量呈现逐年减少的变化。

图6是长江流域1961～2016年年降水量每十年的变化趋势的空间分布。结果表明，在All-Hist情

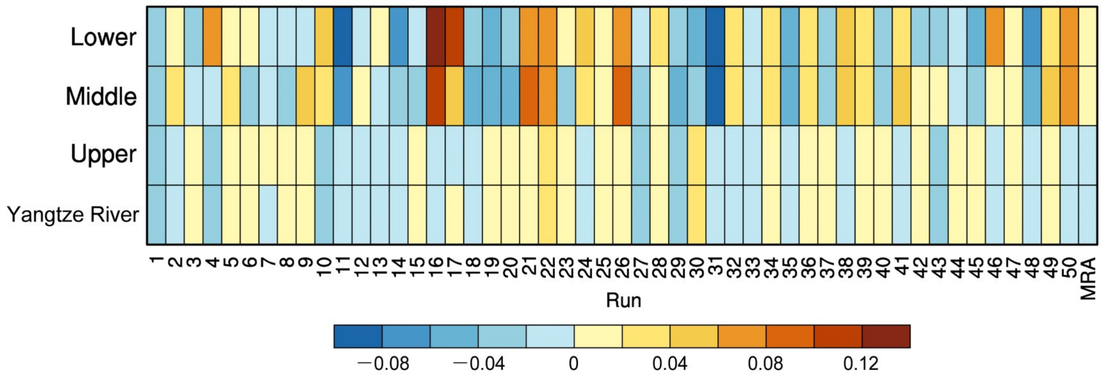

图4 CAM5.1-1degree模式的50个All-Hist情景的试验集合与多试验集合平均结果的年降水量在长江流域和各游段的相对均方根误差（RMSE’）

Fig.4 RMSE’ of 50 All-Hist runs in CAM5.1-1degree model and MRA (multi- run average) over the Yangtze River basin and its upper, middle, and lower reaches

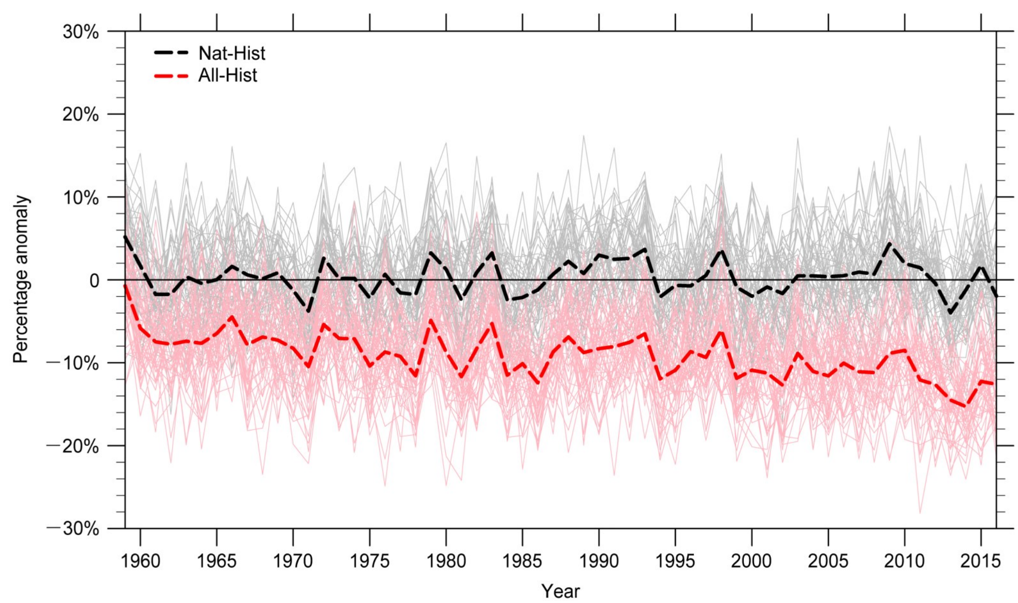

图5 长江流域相对于Nat-Hist基准期（1961～1990年）的年降水量距平百分率年际变化。灰色细线为50个试验集合的模拟结果，红色细线为所有试验集合平均的模拟结果

Fig.5 Annual variability of percentage anomalies for annual precipitation of the Yangtze River basin relative to the reference period (1961–1990) of Nat-Hist. Gray thin lines represent simulated results of 50 runs, red thin lines represent simulated results of all runs average

景下，上游中东部年降水量呈现减少趋势，尤其是上游中部减少趋势最为明显，可达到−72.23 mm $(10\ a)^{-1}$；而上游西部和下游东部地区年降水量呈增加趋势，但增加的程度相较于流域减少趋势的程度明显偏小。在Nat-Hist情景下，年降水量的变化趋势呈现完全不同的空间分布，流域内的空间差异性明显减弱，无明显的极端变化趋势中心，只有下游东南部有较为明显的增加趋势，达到了18.52 mm $(10\ a)^{-1}$。对比两种情景间差异，人类活动对长江流域的年降水量减少做出了贡献，其中长江上游中部和下游东南部年降水量受人类活动影响年降水量减少最为明显，原因可能是该区域的人类活动更频繁。

对1961～2016年不同季节All-Hist情景相对于Nat-Hist情景的降水量距平百分率的空间分布（图7）的分析，可以发现在人类活动影响下，春季长江中下游和上游东部降水呈现为负距平百分率，仅上游西部呈现正距平百分率；夏季长江流域降水量

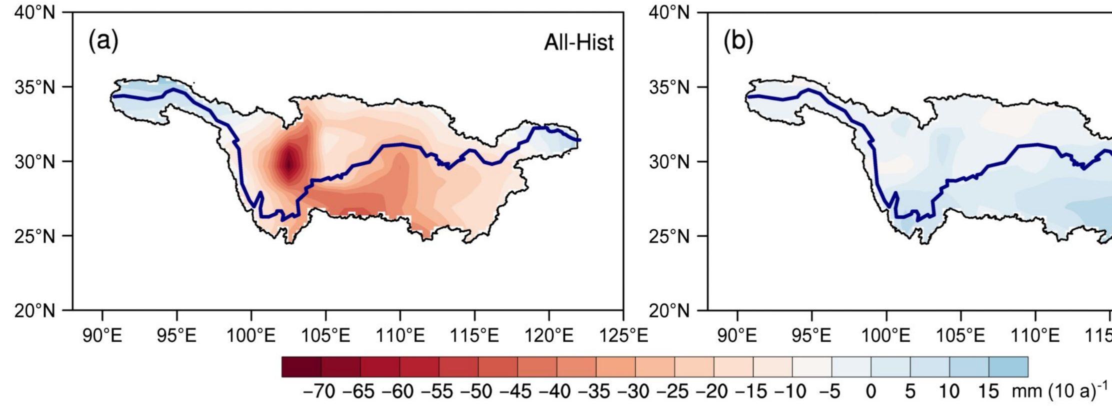

图6 长江流域年降水量年代际变化趋势[单位：mm (10 a)$^{-1}$]的空间分布：（a）All-Hist；（b）Nat-Hist

Fig. 6 Spatial distribution of the linear trend [units: mm (10 a)$^{-1}$] of annual precipitation: (a) All-Hist; (b) Nat-Hist

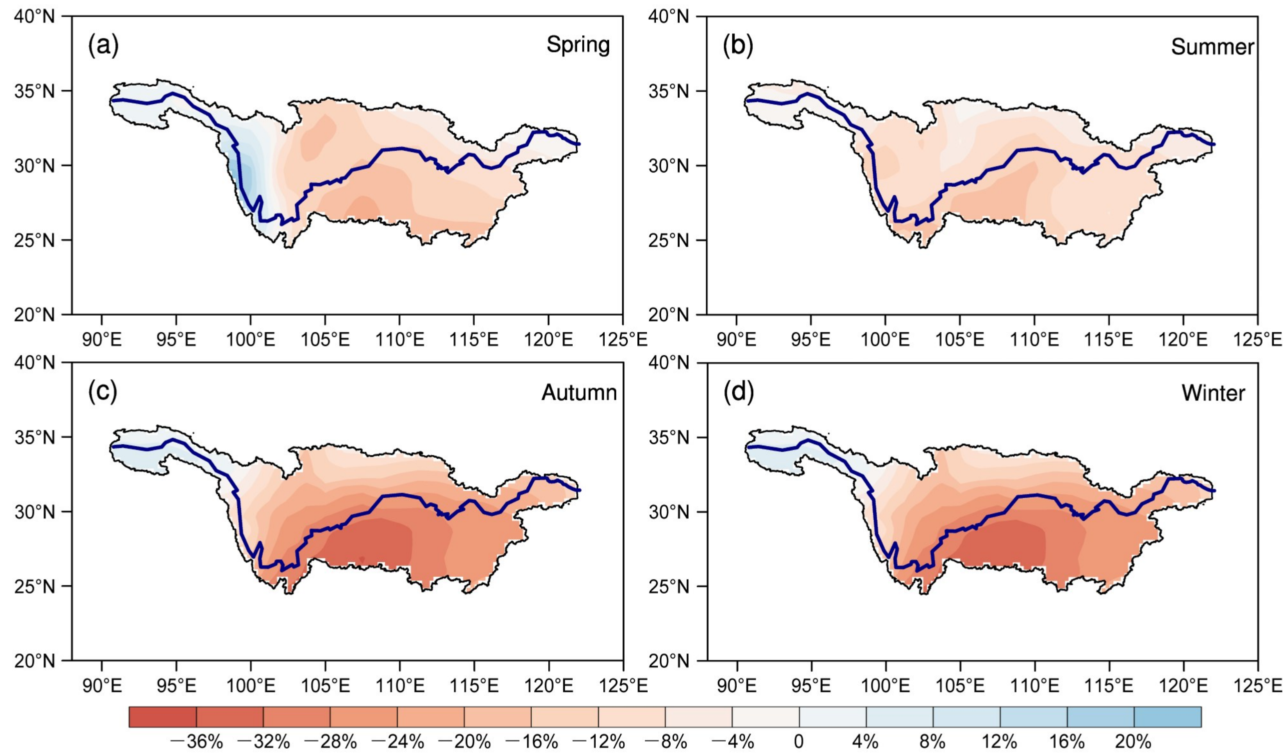

图7 1961～2016年长江流域All-Hist相对于Nat-Hist情景的（a）春季、（b）夏季、（c）秋季和（d）冬季降水量的变化百分率空间分布

Fig. 7 Spatial distribution (1961–2016) of percentage changes for seasonal precipitation of the Yangtze River basin All-Hist relative to Nat-Hist: (a) Spring; (b) summer; (c) autumn; (d) winter

整体呈现负距平，减少最明显的地区是上游东南部；秋季和冬季空间变化分布基本相似，除了上游西部小部分地区外，其他地区均呈现负距平百分率。综上，从空间分布上可以发现长江流域绝大部分区域各季节降水量受人类活动的影响均在减少。对比四季的距平百分率分布可见，夏季长江流域内降水量受人类活动影响而减少的面积最大，覆盖全流域，而春季降水量呈负距平百分率的分布范围最小。同时从表3中各季节降水量距平百分率变化的最大最小值可发现，秋季达到最小的负距平百分率，冬季其次且与秋季的距平百分率数据差距极小，由此推测秋、冬季长江流域降水量受人类活动影响的减少幅度最大，对年降水量减少变化的贡献最大。

进一步对比完整时段及细分的五个不同时段内All-Hist情景相对于Nat-Hist情景的年降水量距平百分率（图8）分布，可以得出从20世纪60年代到21世纪，每个年代的分布情况都是相似的，除了长江流域上游地区西部边缘之外，长江流域大部分地区均呈现负距平百分率，且负距平百分率的最小值出现在上游东南部。另外，随时间推移负距平百分率不断减小，说明长江流域的年降水量的减少程度受人类活动影响随时间推移不断加剧，21世纪初期的十年间减少幅度最大，达到了−27.75% $(10\ a)^{-1}$。查阅有关长江流域工业化、城镇化、信息化及农业现代化的发展的相关研究后发现2000～2012年间，沿江各省市的"三化"协调发展水平呈现上升趋势（冯献，2014），且长江干流流域对中国经济（GDP）的贡献程度也呈现随时间不断增

表3 长江流域All-Hist相对于Nat-Hist的四季降水量变化百分率的最大、最小值

Table 3 Maximum and minimum percentage changes for seasonal precipitation in the Yangtze River basin All-Hist relative to Nat-Hist

	降水量变化百分率			
	春	夏	秋	冬
最大值	21.0%	−0.2%	7.7%	7.7%
最小值	−21.3%	−19.5%	−36.1%	−35.9%

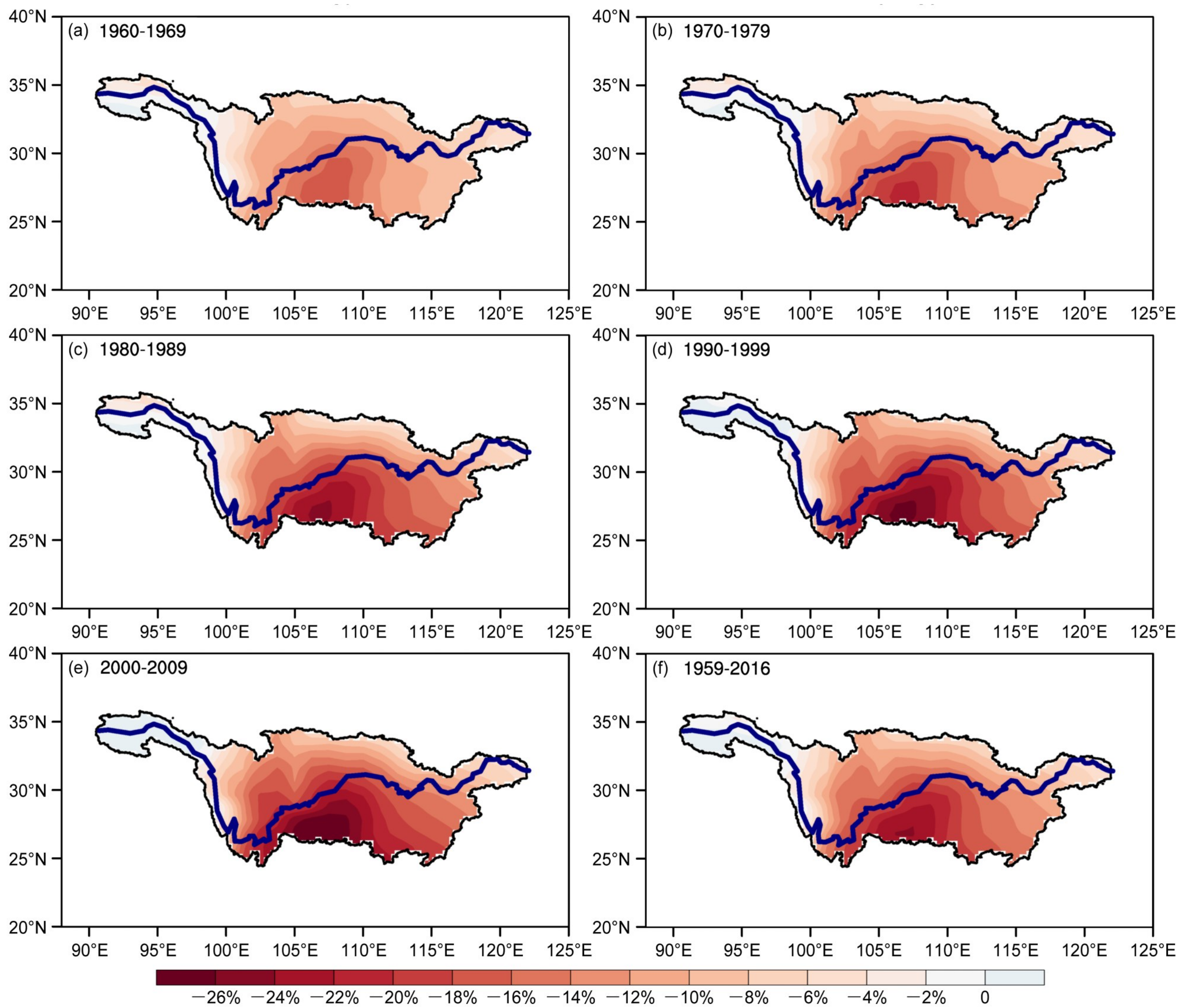

图8 长江流域All-Hist相对于Nat-Hist情景不同时段年降水量变化百分率的空间分布：（a）1960～1969年；（b）1970～1979年；（c）1980～1989年；（d）1990～1999年；（e）2000～2009年；（f）1959～2016年

Fig. 8 Spatial distribution of percentage changes for annual precipitation in different periods of the Yangtze River basin, All-Hist relative to Nat-Hist: (a) 1960–1969; (b) 1970–1979; (c) 1980–1989; (d) 1990–1999; (e) 2000–2009; (f) 1959–2016

长的变化趋势，在2000年达到44.8%（张雷和吴映梅，2005），可见人类活动的影响随时间确实在不断加剧，从而导致长江流域平均降水的减少也呈现出一致的加剧变化。

3.3 人类活动对长江流域极端降水时空变化特征的影响

除了平均降水的研究，在洪涝多发的长江流域，极端降水的研究更加受到关注，本节将通过分析长江流域两种情景下三个极端降水指数（R90p、R99p和RX5day）的时空变化特征进一步探究人类活动对于长江流域极端降水的影响。

图9给出的是长江流域All-Hist、Nat-Hist情景及观测数据的极端降水指数相对于基准期（1961～1990年）的距平百分率年际变化。图9a中R99p相

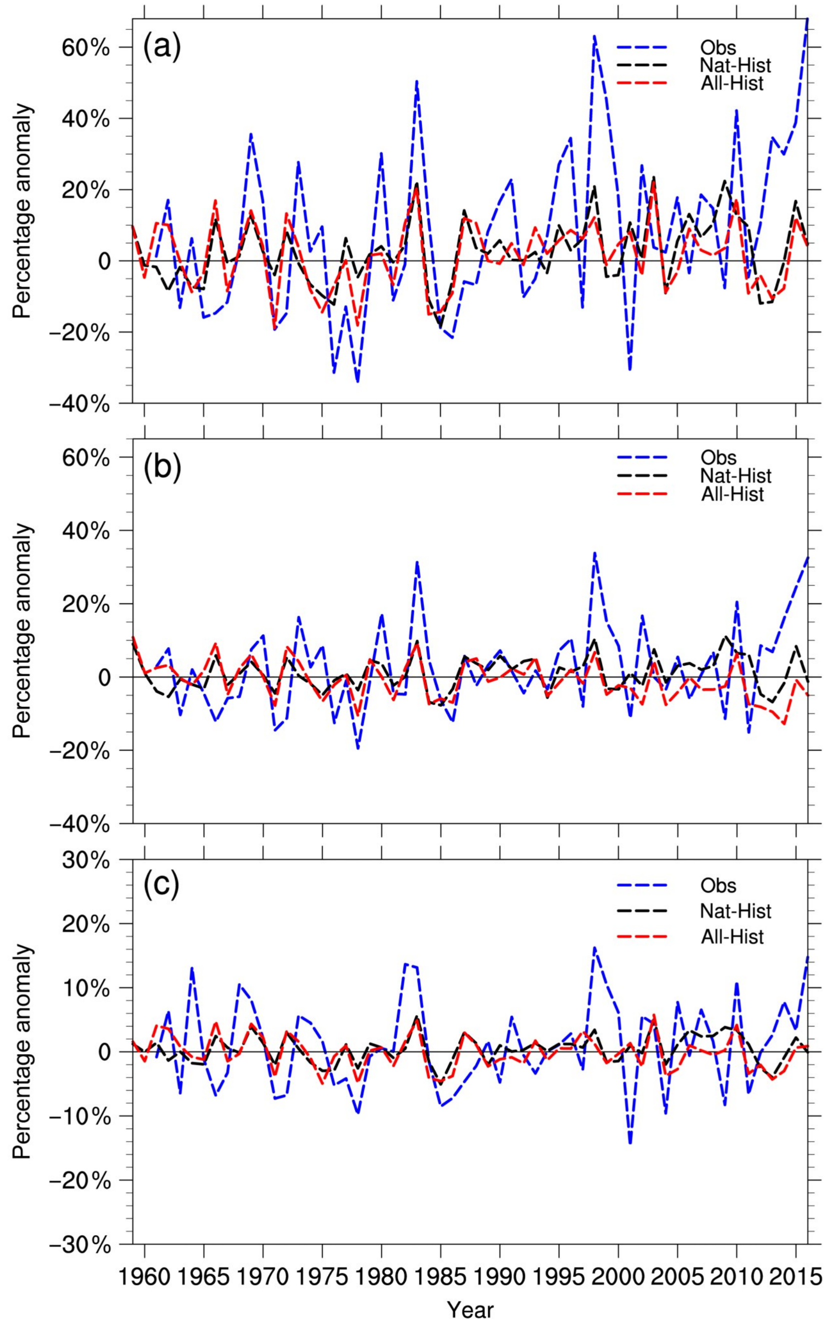

图9 长江流域相对于基准期（1961～1990年）的（a）R99p、（b）R90p和（c）RX5day极端降水指数距平百分率的年际变化

Fig. 9 Annual variability of percentage anomalies for extreme indices of the Yangtze River basin relative to the reference period: (a) R99p; (b) R90p; (c) RX5day

对于基准期平均值的距平百分率在观测及两种情景下均呈增加趋势，2016年观测的正距平百分率最大值达到68.34%，而图9b、c中R90p、RX5day在观测和两种情景下均没有明显的变化趋势。对比模式模拟结果与观测结果，曲线随时间的波动形态基本一致，说明模式对于年际变化趋势的模拟较为可靠。

为了探究人类活动对长江流域极端降水年际变化的贡献，我们计算了1961～2016年各极端降水指数两种情景下分别相对于Nat-Hist基准期的距平百分率，图10中给出了最具代表性的R99p的距平百分率年际变化，两条曲线间差别直观表现出了由人类活动影响所造成的极端降水量的年际变化。结果表明，两种情景的距平百分率随时间的波动形态基本一致，距平百分率由负变正，说明长江流域极端强降水量随时间是呈增加变化的。但对比两种情景的曲线可见，All-Hist情景的距平百分率始终较Nat-Hist情景偏小，因此我们推测人类活动对极端降水的增加存在削弱的作用，特别是当两种情景的距平百分率均呈减小趋势时，All-Hist情景的距平百分率减少幅度普遍明显大于Nat-Hist情景，由此也可以说明人类活动可能对长江流域极端强降水量起到削弱其增加甚至使其减少的影响。

图11a–d是All-Hist及Nat-Hist情景下长江流域1961～2016年一般强降水量（R90p）和极端强降水量（R99p）指数的每十年的变化趋势空间分布。结果表明，在Nat-Hist情景下，长江全流域大部分地区R90p和R99p均表现为增加趋势，上游中部的增加趋势最为明显，而上游西部地区和流域北侧边界地区则有小幅度的减少。对比R90p与R99p的变化趋势分布，可以发现R90p有不同于R99p的分布情况，R90p在中下游的东南部有集中的增加趋势。在All-Hist情景下，长江上游大部分地区R90p及R99p均表现出减少趋势，R90p的减少趋势更明显，减少趋势最为显著的区域为上游中部，达到了每十年减少39.56 mm，但上游西部及中下游东部地区仍表现出增加的趋势，可达到每十年增加12.48 mm。

图11e和f是两种模拟情景下RX5day每十年的变化趋势的空间分布。其中All-Hist情景模拟的RX5day变化趋势的空间分布结果与Zhang et al.（2007a）、白路遥和荣艳淑（2015）、潘欣等（2017）研究中观测资料的分析结果较为一致，特别是变化趋势显著的区域位置一致度很高，可见All-Hist情景模拟结果对极端降水的变化趋势空间分布的模拟较为可靠。在Nat-Hist情景下，除长江流域上游西部和东北部及下游东侧小部分地区外，长江流域大部分地区的RX5day均呈现增加趋势，特别是上游中部增加趋势最为明显，达到了每十年增加12.62 mm。在All-Hist情景下，仅有上游西部和下游东部地区呈现出增加趋势，上游中东部及中游地区的大面积区域均呈减少趋势。对比三种极端降水指数两种情景的结果发现上游中东部地区呈现

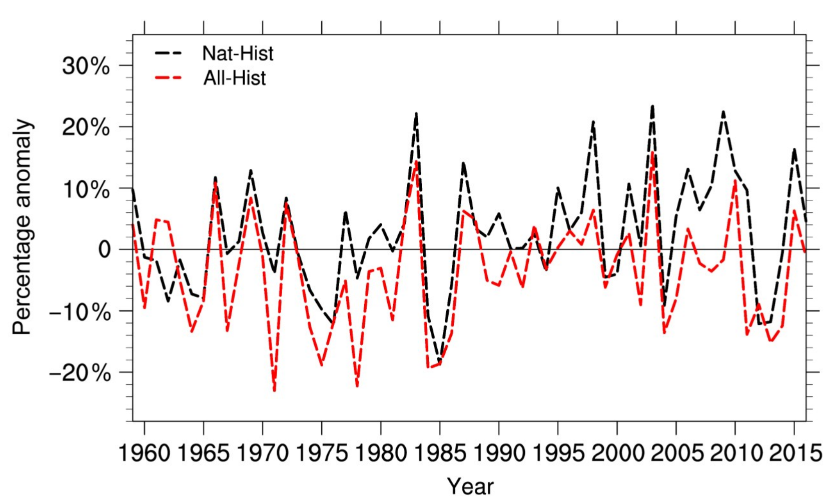

图10　长江流域相对于Nat-Hist基准期（1961~1990年）极端强降水量指数R99p距平百分率的年际变化

Fig. 10　Annual variability of percentage anomalies for R99p of the Yangtze River basin relative to reference period of Nat-Hist

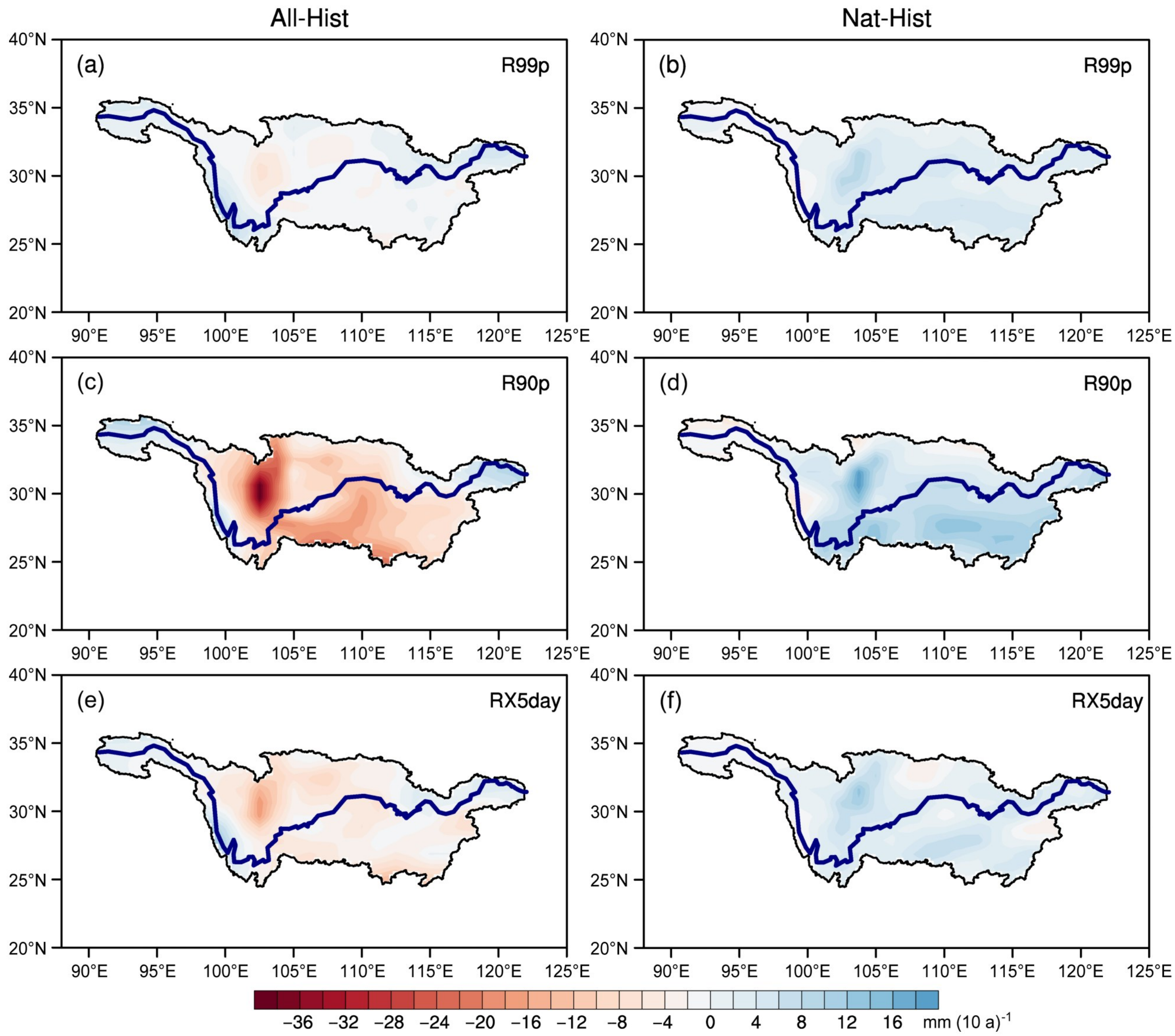

图11 长江流域极端降水指数（a、b）R99p、（c、d）R90p和（e、f）RX5day的年代际变化趋势[单位：mm (10 a)$^{-1}$]的空间分布：All-Hist（左列）；Nat-Hist（右列）

Fig. 11 Spatial distribution of the linear trend [units: mm (10 a)$^{-1}$] of (a, b) R99p, (c, d) R90p, and (e, f) RX5day extreme indices: All-Hist (left column) and Nat-Hist (right column)

明显的相反趋势，由此推测人类活动对于长江流域上游地区极端降水的影响很大，可以引起上游中东部绝大部分地区的极端降水减少，但在长江上游西南部却对极端降水做出了增加贡献。

为了更直观突出由人类活动引起的长江流域极端降水距平变化的空间分布状况，图12给出了整个研究时段（1961～2016年）长江流域All-Hist相对于Nat-Hist情景下R90p、R99p及RX5day的距平百分率空间分布。结果表明，人类活动对于长江流域极端降水影响存在一定的空间差异，且降水极端程度越强，空间差异性越为明显，人类活动的影响作用也越大。在长江流域上游及中游的大部分地区，人类活动影响下三种极端降水指数均有所减少，减少程度最为明显的地区均为上游东南部，R99p的减少程度较另两项指数更为明显，数值达到了−33.01%。相反的在长江上游西部地区，极端降水在人类活动的影响下增加，特别是在西南部边缘地区，R99p的最大正距平百分率达到了25.06%。

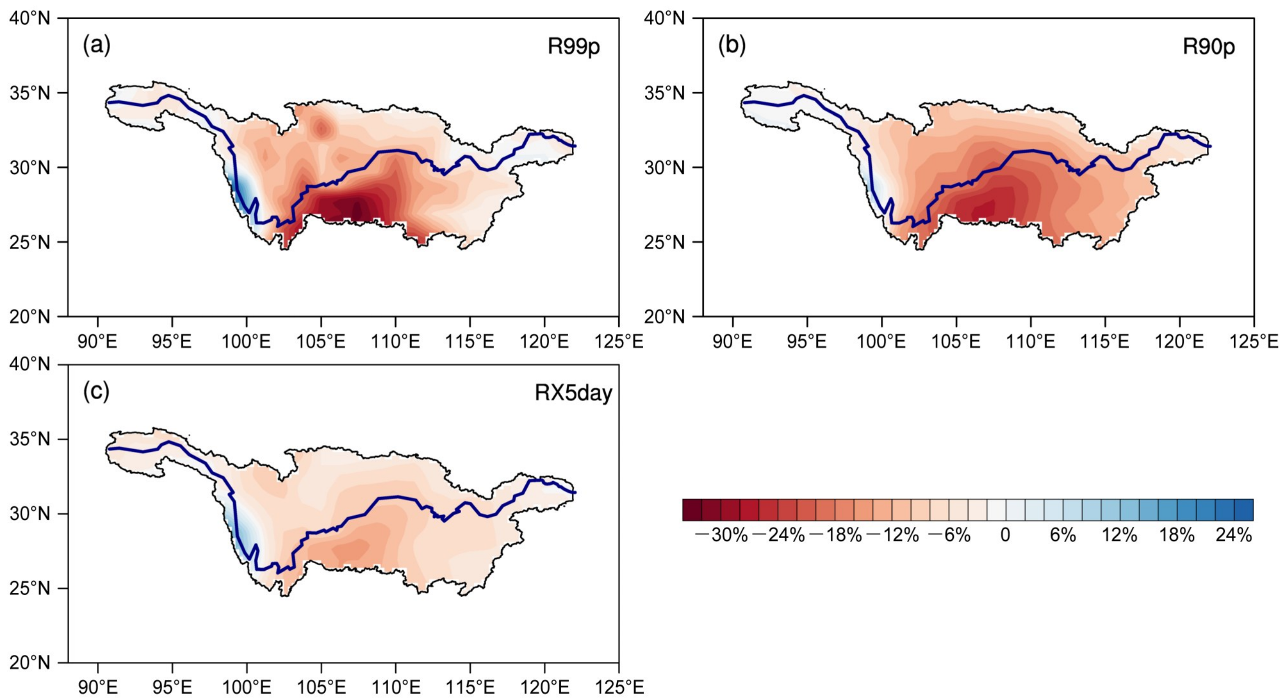

图12　长江流域All-Hist相对于Nat-Hist情景的极端降水指数（a）R99p、（b）R90p和（c）RX5day变化百分率空间分布

Fig. 12　Spatial distribution of percentage changes for (a) R99p, (b) R90p, and (c) RX5day extreme indices of the Yangtze River basin All-Hist relative to Nat-Hist

4　结论与讨论

利用CAM5.1-1degree模式模拟的包含人类活动和自然强迫共同影响的All-Hist及只考虑自然强迫的Nat-Hist情景下的模拟结果与基于中国2400多个观测站得到的格点化逐日降水数据，分析了人类活动对长江流域平均降水和极端降水时空变化特征的影响，主要结论如下：

（1）CAM5.1-1degree模式中包括人类活动和自然强迫影响的All-Hist情景对长江流域降水的时空变化的模拟结果与观测数据较为一致。All-Hist情景多试验集合平均的结果对于长江流域年降水量空间变化的模拟能力，以及2010年之前年降水量年际变化的模拟能力均较为可信。

（2）包括人类活动和自然强迫共同影响的All-Hist情景下，长江流域年降水量相对于仅考虑自然强迫的Nat-Hist情景呈现出明显的减少趋势，且减少的幅度随时间推移逐渐加大，同时人类活动的频繁度也随时间逐渐加强，说明长江流域平均降水受人类活动影响减少趋势不断加剧，减少最为显著的是最近的2000～2009年，四季中对平均降水的减少做出最大贡献的是秋季，另外夏季全流域均呈现减少趋势。

（3）长江流域绝大部分地区的年降水量受人类活动影响均减少，但仍存在一定空间差异性，减少幅度最明显的区域是上游东南部，而上游西北部的平均降水则有小幅增加。

（4）长江流域极端降水随时间推移呈小幅增加趋势，但人类活动对长江流域极端降水的增加有削弱作用，且削弱程度随时间推移有逐渐加剧的趋势。极端降水的极端程度越强，年际变化的波动越显著，人类活动对于年际变化中的贡献越大。

（5）人类活动对长江流域极端降水的影响具有空间差异性，且降水的极端程度越强，空间差异性越为明显。由两种情景下距平百分率的空间分布状况得出，减少最明显的区域是上游东南部，而上游西南部的极端降水则有明显的增加趋势，需加强洪涝预防工作。

（6）人类活动对于长江流域局部地区平均降水及极端降水变化趋势存在影响，长江上游中部及流域东南部在All-Hist情景下呈现的变化趋势与Nat-Hist情景下呈现的变化趋势相反，原因可能是这两个地区的人类活动更加密集频繁，导致人类活动对于降水的变化趋势产生了显著影响。

本文的研究还存在很多提升空间和值得讨论的细节。比如，目前研究中仅使用了20世纪气候检测归因计划下CAM5.1-1degree模式50个样本进行分析，在后续研究中将会增加其他模式的模拟结果，以减少分析结果的不确定性；模式对流域尺度降水量的模拟在时间与空间上仍存在一定偏差，需要发展更高分辨率、更完善的数值模拟框架来提高模式对于流域尺度降水的模拟效果；对时空变化特征的分析主要是从变化趋势的角度，造成长江流域降水变化的其他相关因子及物理过程还需要进行深入研究。

参考文献（References）

白路遥, 荣艳淑. 2015. 最近50年长江流域极端降水特征的再分析 [J]. 水资源研究, 4(1): 88−100. Bai Luyao, Rong Yanshu. 2015. Reanalysis of the characteristics of extreme rainfall in the Yangtze River basin during recent 50 years [J]. Journal of Water Resources Research (in Chinese), 4(1): 88−100. doi: 10.12677/JWRR. 2015. 41011

陈晓晨. 2014. CMIP5全球气候模式对中国降水模拟能力的评估 [D]. 中国气象科学研究院硕士学位论文, 106pp. Chen Xiaochen. 2014. Assessment of the precipitation over China simulated by CMIP5 multi-models [D]. M. S. thesis (in Chinese), Chinese Academy of Meteorological Sciences, 106pp

冯献. 2014. 长江流域“三化”协调发展水平综合评价与空间差异研究 [D]. 中国农业科学院博士学位论文, 155pp. Feng Xian. 2014. Study on the comprehensive evaluation and its spatial differences of the coordinated development level of industrialization, urbanization and agricultural modernization in Yangtze River basin [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Chinese Academy of Agricultural Sciences, 155pp

长江水利委员会水利部. 2002. 长江流域水旱灾害 [M]. 北京：中国水利水电出版社. Changjiang Water Resources Commission, Ministry of Water Resources (CWRC). 2002. Waterlogging and Aridity Disasters in the Yangtze River Basin (in Chinese) [M]. Beijing: China WaterPower Press.

Fischer E M, Knutti R. 2015. Anthropogenic contribution to global occurrence of heavy-precipitation and high-temperature extremes [J]. Nature Climate Change, 5(6): 560−564. doi:10.1038/nclimate2617

Gleckler P J, Taylor K E, Doutriaux C. 2008. Performance metrics for climate models [J]. Journal of Geophysical Research, 113(D6): D06104. doi:10.1029/2007JD008972.

IPCC. 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis [M]. Stocker T F, Qin D, Plattner G K, et al., Eds. Cambridge, United Kingdom and New York, USA: Cambridge University Press, 743−866.

IPCC. 2014. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M] Pachauri R K, Allen M R, Barros V R, et al., Eds. Geneva, Switzerland: IPCC, 151 pp.

姜彤, 苏布达, Gemmer M. 2008. 长江流域降水极值的变化趋势 [J]. 水科学进展, 19(5): 650−655. Jiang Tong, Su Buda, Gemmer M. 2008. Trends in precipitation extremes over the Yangtze River basin [J]. Advances in Water Science (in Chinese), 19(5): 650−655. doi:10.14042/j.cnki.32.1309.2008.05.002

李春龙, 张方伟, 訾丽, 等. 2013. 长江流域降水多年变化特征分析 [J]. 人民长江, 44(15): 11−13 , 18. Li Chunlong, Zhang Fangwei, Zi Li, et al. 2013. Analysis on variation features of multi-years precipitation in Yangtze River basin [J]. Yangtze River (in Chinese), 44(15): 11−13, 18. doi:10.3969/j.issn.1001-4179.2013.15.003

马小芳, 林爱文, 方建. 2018. 1960−2012年长江中下游极端降水与极端径流时空演变研究 [J]. 测绘与空间地理信息, 41(2): 157−160, 163. Ma Xiaofang, Lin Aiwen, Fang Jian. 2018. Research on spatio−temporal variation of extreme precipitation and extreme run off in the middle and lower reaches of Yangtze River from 1960−2010 [J]. Geomatics & Spatial Information Technology (in Chinese), 41(2): 157−160, 163. doi:10.3969/j.issn.1672-5867.2018.02.044

潘欣, 尹义星, 王小军. 2017. 1960−2010年长江流域极端降水的时空演变及未来趋势 [J]. 长江流域资源与环境, 26(3): 436−444. Pan Xin, Yin Yixing, Wang Xiaojun. 2017. Spatio−temporal characteristics and future trend of extreme precipitation in the Yangtze River basin during 1960 to 2010 [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin (in Chinese), 26(3): 436−444. doi:10.11870/cjlyzyyhj201703014

苏布达, 姜彤, 任国玉, 等. 2006. 长江流域1960-2004年极端强降水时空变化趋势 [J]. 气候变化研究进展, 2(1): 9−14. Su Buda, Jiang Tong, Ren Guoyu, et al. 2006. Observed trends of precipitation extremes in the Yangtze River basin during 1960 to 2004 [J]. Advances in Climate Change Research (in Chinese), 2(1): 9−14. doi:10.3969/j.issn.1673-1719.2007.z1.009

Stone D A, Risser M D, Angélil O M, et al. 2018. A basis set for exploration of sensitivity to prescribed ocean conditions for estimating human contributions to extreme weather in CAM5.1-1degree [J]. Weather and Climate Extremes, 19: 10−19. doi:10.1016/j.wace.2017.12.003

Su B D, Jiang T, Jin W B. 2006. Recent trends in observed temperature and precipitation extremes in the Yangtze River basin, China [J]. Theoretical and Applied Climatology, 83(1−4): 139−151. doi: 10.1007/s00704-005-0139-y

Su Buda, Xiao Bo, Zhu Deming, et al. 2005. Trends in frequency of precipitation extremes in the Yangtze River basin, China: 1960−2003/ Tendances d'évolution de la fréquence des précipitations extrêmes entre 1960 et 2003 dans le bassin versant du Fleuve Yangtze (Chine) [J]. Hydrological Sciences Journal, 50(3): 479−492. doi: 10.1623/hysj.50.3.479.65022

王蒙, 殷淑燕. 2015. 近52 a长江中下游地区极端降水的时空变化特征 [J]. 长江流域资源与环境, 24(7): 1221−1229. Wang Meng, Yin Shuyan. 2015. Spatio−temporal variations of the extreme precipitation of middle and lower reaches of the Yangtze River in recent 52 years [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin (in Chinese), 24(7): 1221–1229. doi:10.11870/cjlyzyyhj201507020

吴佳, 高学杰. 2013. 一套格点化的中国区域逐日观测资料及与其它资料的对比 [J]. 地球物理学报, 56(4): 1102–1111. Wu Jia, Gao Xuejie. 2013. A gridded daily observation dataset over China region and comparison with the other datasets [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 56(4): 1102–1111. doi:10.6038/cjg20130406

Wan Hui, Zhang Xuebin, Zwiers F, et al. 2015. Attributing northern high-latitude precipitation change over the period 1966–2005 to human influence [J]. Climate Dyn., 45(7–8): 1713–1726. doi: 10.1007/s00382-014-2423-y

Xu Ying, Gao Xuejie, Shen Yan, et al. 2009. A daily temperature dataset over China and its application in validating a RCM simulation [J]. Adv. Atmos. Sci., 26(4): 763–772. doi: 10.1007/s00376-009-9029-z

张雷, 吴映梅. 2005. 长江干流地区区域发展与国家工业化 [J]. 长江流域资源与环境, 14(5): 633–637. Zhang Lei, Wu Yingmei. 2005. Regional development in the Yangtze basin and China's industrialization [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin (in Chinese), 14(5): 633–637

Zhang Qiang, Jiang Tong, Gemmer M, et al. 2005. Precipitation, temperature and runoff analysis from 1950 to 2002 in the Yangtze basin, China / Analyse des précipitations, températures et débits de 1950 à 2002 dans le bassin du Yangtze, en Chine [J]. Hydrological Sciences Journal, 50:1–80. doi: 10.1623/hysj.50.1.65.56338

Zhang Zengxin, Zhang Qiang, Jiang Tong. 2007a. Changing features of extreme precipitation in the Yangtze River basin during 1961–2002 [J]. Journal of Geographical Sciences, 17(1): 33–42. doi: 10.1007/s11442-007-0033-x

Zhang Xuebin, Zwiers F W, Hegerl G C, et al. 2007b. Detection of human influence on twentieth-century precipitation trends [J]. Nature, 448(7152): 461–465. doi:10.1038/nature06025

Zhang Xuebin, Wan Hui, Zwiers F W, et al. 2013. Attributing intensification of precipitation extremes to human influence [J]. Geophys. Res. Lett., 40(19): 5252–5257. doi:10.1002/grl.51010