

# 基于模式误差修正的安徽省沿江地区降水变化特征预估

康海迪<sup>1,2</sup>, 程先富<sup>1,2</sup>

(1. 安徽师范大学 国土资源与旅游学院, 安徽 芜湖 241003;  
2. 安徽自然灾害过程与防控研究省级实验室, 安徽 芜湖 241003)

**摘要:** [目的] 模拟未来降水的变化特征, 为安徽省沿江地区的农业生产及防洪减灾等提供理论依据。[方法] 基于 RCP4.5 温室气体排放情景, 应用 MRI-CGCM3 模式误差修正数据模拟安徽省沿江地区 1960—2065 年的降水变化。[结果] 误差修正模式数据对安徽省沿江地区降水变化特征模拟性能较好。未来不同时间段降水差异较大, 春夏降水多, 秋冬降水少。2036—2065 年四季和年均日降水量的增加幅度大于 2006—2035 年, 秋季差异最大。就数据波动幅度而言, 不同时段夏季降水波动均较大, 春季均较小。2006—2035 年秋冬波动较小, 2036—2065 年秋冬波动偏大。从区域降水变化特征来看, 2006—2065 年安徽省沿江地区日降水量呈现由北向南逐渐增加的条带性地理特征和春夏降水多, 秋冬降水少季节特征。较于 2006—2035, 2036—2065 年区域的降水地理变化特征会更加明显而且季节性变化速率增加, 降水距平地理变化条带性趋势及方向因季节而异。[结论] 安徽省沿江地区未来降水波动幅度变大, 降雨量增加。

**关键词:** MRI-CGCM3 模式; 优化模式; 降水变化; 地理特征

**文献标识码:** B

**文章编号:** 1000-288X(2017)01-0188-08

**中图分类号:** P954

**文献参数:** 康海迪, 程先富. 基于模式误差修正的安徽省沿江地区降水变化特征预估[J]. 水土保持通报, 2017, 37(1): 188-195. DOI: 10. 13961/j. cnki. stbctb. 2017. 01. 034; Kang Haidi, Cheng Xianfu. Prediction of regional precipitation along Yangtze River in Anhui Province based on model error correction[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(1): 188-195. DOI: 10. 13961/j. cnki. stbctb. 2017. 01. 034

## Prediction of Regional Precipitation Along Yangtze River in Anhui Province Based on Model Error Correction

KANG Haidi<sup>1,2</sup>, CHENG Xianfu<sup>1,2</sup>

(1. College of Territorial Resources and Tourism, Anhui Normal University, Wuhu, Anhui 241003, China;  
2. Anhui Key Laboratory of Natural Disaster Process and Prevention, Wuhu, Anhui 241003, China)

**Abstract:** [Objective] The objective of this paper is to simulate the characteristics of precipitation in the future, in order to provide a theoretical basis for agricultural production and flood control and disaster mitigation in the region along the Yangtze River in Anhui Province. [Methods] Based on scenario of RCP4.5 greenhouse gas emissions, regional precipitation along the Yangtze River in Anhui Province during 1960—2065 was simulated using the MRI-CGCM3 model error correction data. [Results] The error correction model data can well simulate the variation characteristics of precipitation along the Yangtze River in Anhui Province. There were big differences in precipitation in different periods of the future, and more precipitation in spring and summer, less precipitation in autumn and winter. The increase of daily precipitation in the four seasons and the average annual precipitation of 2036—2065 was higher than that in 2006—2035, and the biggest difference in autumn. In terms of the data fluctuations, the precipitation fluctuations in different periods

收稿日期: 2016-06-01

修回日期: 2016-07-25

资助项目: 国家自然科学基金项目“流域尺度洪涝灾害风险评估方法研究: 以巢湖流域为例”(41271516); 安徽师范大学研究生科研创新项目(2016yks068); 安徽师范大学研究生科研创新项目(2015cxsj163)

第一作者: 康海迪(1988—), 女(汉族), 安徽省亳州市人, 硕士研究生, 主要研究方向为洪涝灾害脆弱性动态评估。E-mail: 1558729138@qq.com。

通讯作者: 程先富(1967—), 男(汉族), 安徽省合肥市人, 教授, 博士生导师, 主要从事区域环境与自然灾害方面的研究。E-mail: Xianfucheng@sina.com。

were larger in summer, smaller in the spring. The smaller fluctuations occur in autumn and winter of 2006—2035, and higher fluctuations in autumn and winter in 2036—2065. As for regional precipitation variation characteristics, the daily precipitation increases gradually from north to south with the seasonal characteristics of more precipitation in autumn and winter than that in spring and summer in Anhui Province along the Yangtze River in 2006—2065. Compared to 2006—2035, the geographical features of the regional precipitation change in 2036—2065 were more obvious and the seasonal variation rate increased. The geographical change strip trends and direction of precipitation anomaly varies by seasons. [Conclusion] The regional future precipitation increases but with higher variability along the Yangtze River in Anhui Province.

**Keywords: MRI-CGCM3 model; optimization model; precipitation change; geographical characteristics**

近些年来,由于气候变化引起的极端气候事件数量在不断增加,强度在提高,发生的区域越来越多。中国众多专家和学者积极投身于这一气候研究当中,开展了大量气候变化预估工作<sup>[1-2]</sup>。王国庆等<sup>[3]</sup>利用在 3 种 RCPs 排放情景下的 7 个气候模式的资料,分析了未来 30 a 海河流域气候变化趋势,指出未来降水可能呈上升趋势。吴晶等<sup>[4]</sup>基于西北干旱区 78 个站点数据,评估 CMIP5 的 39 个模式对降水、平均温度模拟能力,得出中国西北干旱区年、季降水量模拟值与观测值的相关系数很差,均不到 0.1。Xu 等<sup>[5]</sup>和 Sillmann 等<sup>[6]</sup>利用多个模式对中国区域极端降水模拟能力进行评估,指出模式能较好的模拟出极端降水的空间分布及线性变化趋势。

目前,基于 RCPs 情景下(IPCC 利用单位面积的辐射强迫强度来表示未来 100 a 稳定浓度的新情景,即 RCPs 情景)降水特征的研究相对较少,而且主要集中在全国尺度<sup>[7-12]</sup>,以及珠江流域<sup>[13]</sup>、淮河流域、长江中下游区域<sup>[14]</sup>等,而针对安徽省沿江地区的研究较少。为了避免模式数据的不稳定性和减小误差,过去大多采用多模式集合平均的方法。

在过去的几十年里,安徽省沿江地区气候已经发生明显变化,流域气温升高,降水增加,出现极端天气的次数增加,特别是 2016 年安徽省宣城市、芜湖市等沿江区域发生了洪涝灾害。基于 IPCC5 模型的安徽省沿江地区降水特征研究,将有助于专家、学者对该地区降水特征的理解和认识,帮助政府决策部门制定更加合理有效地相关管理措施。本文拟利用 1960—2005 年安徽省沿江地区县级降水资料对 MRI-CGCM3 模式在 RCP 4.5 情景下的模拟能力进行检验,再对模型模拟 2006—2065 年安徽省沿江地区的降水特征进行分析和预估,以为安徽省沿江地区的农业生产及防洪减灾等提供理论依据。

## 1 研究区概况与研究方法

### 1.1 研究区概况

安徽省位于中国东南部,是一个襟江近海的内陆

省份,属于暖温带和亚热带过渡区,南方温度高于北方,常年平均气温 14~17℃。安徽省沿江地区地处长江流域中下游,包括合肥,芜湖,巢湖,滁州,宣城,马鞍山,铜陵,安庆,池州 9 个市以及六安的金安区和舒城县,共 59 个县(市、区)。该区域以丘陵地区为主,北部为暖温带半湿润季风气候,南部为亚热带湿润性季风气候,距海较近,受季风影响显著,气候温暖湿润,四季分明,梅雨显著,夏雨集中,秋高气爽,冷暖气团交会频繁,天气多变,加之水系发达,使安徽省沿江地区成为长江中下游地区洪涝灾害最频繁、最严重的地区之一。

### 1.2 数据来源

观测数据为 1960—2005 年县级逐日降水量数据。模式数据是 MRI-CGCM3 在 RCP4.5 情景下的历史时期(1960—2005 年)和预估时期(2006—2065 年)的降水量模拟数据。数据分辨率为  $1.125^\circ \times 1.125^\circ$ ,数据的时间跨度为 1960—2065 年。借鉴前人研究经验,以及检验模式对历史气候的模拟能力,本文中选定的历史验证时期为 1960—2005 年,模拟预估时段为 2006—2065 年。

### 1.3 研究方法

#### 1.3.1 空间相关系数

$$\text{标准差: } D(x) = E\{[x - E(x)]^2\} \quad (1)$$

式中: $E(x)$ ——图像像素的均值; $D(x)$ ——图像像素值的标准差。

协方差公式:

$$\text{COV}(x, y) = E\{[x - E(x)][y - E(y)]\} \quad (2)$$

式中: $\text{COV}(x, y)$ ——待比较两幅图像的协方差; $x, y$ ——待比较的两幅图像的像素灰度值。

$$\text{空间相关系数: } R(x, y) = \frac{\text{COV}(x, y)}{\sqrt{D(x)} \sqrt{D(y)}} \quad (3)$$

式中: $R(x, y)$ ——待比较两幅图像的空间相关系数。

1.3.2 相对误差 空间相关系数只能反映出两者之间的相似趋势变化,而不能反映模式模拟的准确度,相对误差反映的是模拟数据与观测数据之间的偏离程度,即数据结果的可信度。

$$\delta = \frac{\sum_{j=1}^{46} |X_j - Y_j|}{\sum_{j=1}^{46} X_j} \quad (j=1, 2, \dots, 46) \quad (4)$$

式中:  $X_j, Y_j$ ——1960—2005 年实测站点数据, 模式数据或优化模式数据;  $\delta$ ——观测数据和模式数据之间的平均相对误差。

1.3.3 优化模式方法 由于 MRI-CGCM3 模式数据相对于实测站点数据系统性偏低, 本文在参考大量气候领域和其他领域论文的误差改进方法的基础上, 以相对误差为基础, 进行模式数据的系统偏差校正的同时减小误差率, 这有助于消除误差异常区域, 减少数据异常波动产生的频率。

$$\text{符号率: } \lambda = \frac{u}{46} \quad (5)$$

若  $\lambda \geq 90\%$ ,

$$O_j = (1 + \delta)Y_j \quad (\text{单位为 mm/d, } j=1, 2, \dots, 46) \quad (6)$$

若  $\lambda \leq 10\%$

$$O_j = (1 - \delta)Y_j \quad (\text{单位为 mm/d, } j=1, 2, \dots, 46) \quad (7)$$

若  $90\% < \lambda < 10\%$ , 则需更换优化方法。

式中:  $u$ ——实测站点数据与模式数据误差的正负号数;  $\lambda$ ——正负号占总体数量的比例;  $Y_j$ ——降水量;  $O_j$ ——优化后的 1960—2005 年 MRI-CGCM3 模式数据, 此后简称修正数据。

由于本文选用模式数据系统性偏低, 并且符合  $\lambda \geq 90\%$  的要求, 所以采用(6)式。

1.3.4 降水距平百分率 降水距平百分率反映的是该数据精密度, 数据偏离数据中心的程度。

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^{30} Z_i}{30} \quad (8)$$

由于国际上关于气候变化分析一贯的做法是取 30 a 的统计数据作为分析的对比数据, 所以选择  $Z(i), i=1, 2, \dots, 30$  代表 1976, 1977,  $\dots, 2005$  年的观测的降水资料,  $Z$  是 1976—2005 年的实际降水的平均值(mm/d)。

$$M_j = O_j - Z \quad (9)$$

$$Q = \frac{\sum_{j=1}^{46} M_j}{46Z} \times 100\% \quad (10)$$

式中:  $O_j$ ——1960—2005 年的模式数据或修正数据;  $M_j$ ——1960—2005 年降水距平;  $Q$ ——1960—2005 年降水距平百分率; ( $j=1, 2, \dots, 46$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 模式验证

2.1.1 年季日降水量的时间序列验证 如图 1 所

示, 安徽省沿江地区模式数据的年均日降水量比实际数据明显偏低, 平均小 0.7 mm。

模式数据和实际数据均没有明显的上升和下降趋势, 模式数据较好的模拟出实测数据时间趋势变化特征。

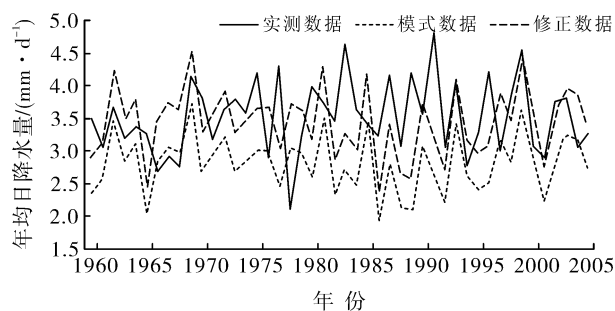


图 1 1960—2005 年研究区实际、模式、修正数据年均日降水量

针对模式年平均日降水量数据系统性偏低这一问题, 本文采用相对误差修正的方法进行模式数据修正, 修正数据不仅保留了模式数据时间趋势变化特征, 而且更加接近实测年均日降水量, 两者相差 0.08 mm, 故消除了系统性偏低的这一问题。修正数据年均日降水量与实测数据的相对误差由修正前的 16%, 下降为 8%, 模式模拟效果得到了很大的提高。

1960—2005 年降水季节性特征明显, 模式数据对四季的实测数据时间趋势变化特征模拟能力较好, 但夏季与年均日降水量出现了类似的系统性偏低的现象。修正数据将系统性偏差由 2.4 mm 减小为 0.9 mm。修正数据对四季降水的时间趋势模拟能力与模式数据相同, 能够较好的反映实测数据的变化特征。

总体来说, 修正数据不仅保留了模式数据的变化特征, 而且能够有效的减小模式数据的系统性偏差。所以, 本文采用修正数据代替模式数据进行分析。

除异常值外, 春、夏、秋、冬日降水量的修正数据和实测数据的分别为: 2~5.8, 3~8, 0.5~3.6, 0.5~2.5 mm。由此可见, 修正数据的季节特征明显, 春夏降水多, 秋冬降水少。

2.1.2 年季日降水量的空间分布验证 如图 2 所示, 由安徽省沿江地区 1960—2000 年年均日降水量模式数据相对误差分布图可以看出, 除岳西县外, 其他区域相对误差均低于 20%, 介于 10%~20% 的区域大于 1/2, 而修正数据的相对误差明显得到改善, 大部分区域相对误差均低于 10%。模式数据相对误差存在偏大区域, 修正数据消除了误差异常区域, 区域平均相对误差减少了 4%。

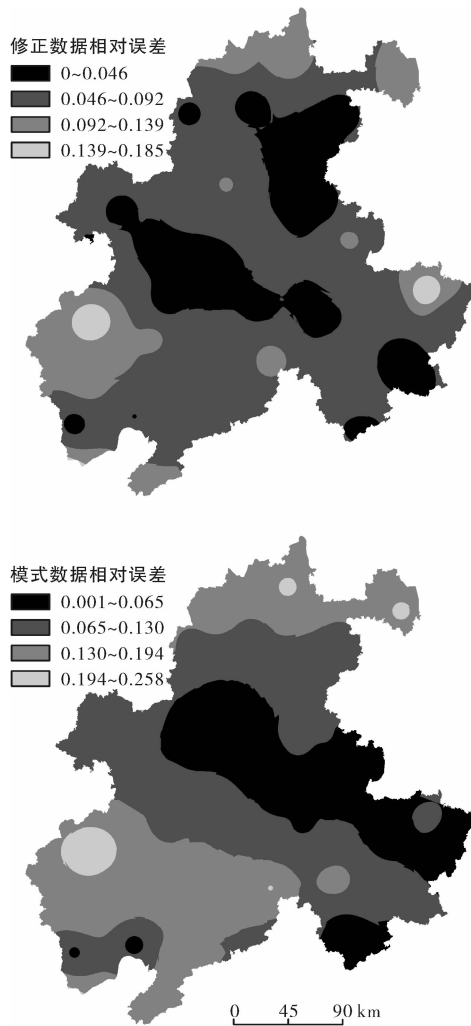


图 2 1960—2000 年研究区年均日降水量模式数据、修正数据相对误差分布

利用 1960—2000 年改进指标修正 2000—2005 年模式数据,得到 2000—2005 年修正数据。如图 3 所示,2000—2005 年模式数据的相对误差大部分区域位于 10%~25%,其中北部的滁州市所辖区域相对误差大于 20%。2000—2005 年修正数据相对误差低于 10%的区域约占 3/5,区域平均相对误差为 8.4%,而模式数据为 15.2%,优化后相对误差减小了 7%。在 2000—2005 年这一验证改进指标时段,利用修正数据不仅使相对误差减少,而且消除了异常

区域,区域所有相对误差均低于 18%,这与 1960—2000 年改进指标训练阶段优化效果一致。

由表 1 可知,1960—2005 年修正数据的相对误差均有所减小,其中夏季减小最明显为 24.65%。2000—2005 年四季优化降水数据,除秋季与模式数据相对误差接近外,其他季节均有明显的减小,其中夏季减小最大为 21.4%。部分季节和时间段的模式数据的相对误差大于 20%,而修正数据的相对误差大多在 15%以下,以修正数据预测未来降水可信度较高。

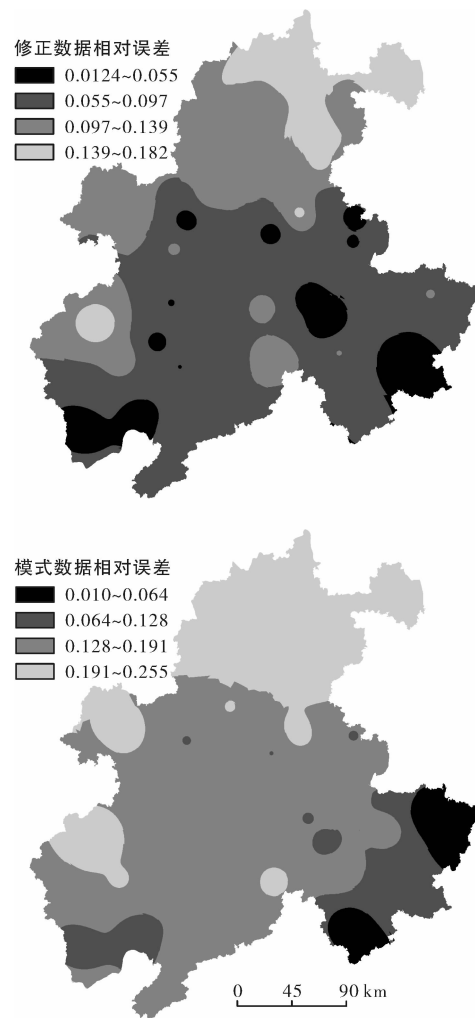


图 3 2000—2005 年研究区年均日降水量模式数据及修正数据相对误差分布

表 1 模式及修正研究区 1960—2005 年平均日降水量与实测数据相对误差

%

相对误差	1960—2000 年相对误差					2000—2005 年相对误差				
	春季	夏季	秋季	冬季	年均	春季	夏季	秋季	冬季	年均
模式数据	11.78	40.09	10.82	16.17	9.84	19.46	36.17	13.06	24.06	15.21
修正数据	10.93	15.44	8.12	6.69	6.16	8.46	14.77	13.45	13.52	8.41

根据表 2,以年均日降水量空间分布的相似性为例,模式数据、修正数据与实测数据空间相关系数为 0.94,

模拟、修正数据的空间分布与实测数据紧密相关。修正数据降低了相对误差,减少了误差异常区域,而且未改

变数据时间趋势特征,故四季、年均日降水量的模式数据、修正数据与实测数据空间相关系数相同。四季日均降水量除夏季外,其他季节的空间相关性呈现出强相关特征,均大于 0.94,其中春季最高可达 0.99。

表 2 研究区模拟、实测、修正 1960—2005 年  
平均日降水量空间分布比较

名称	日降水量/mm			标准差	空间相关性
	最小值	最大值	平均值		
模拟数据	1.85	3.61	2.71	0.41	0.94
实测数据	2.50	4.44	3.40	0.54	—
修正数据	2.03	3.97	2.97	0.45	0.94

1960—2005 年实测数据年均日降水量为 2.5~3 mm,分布于研究区北部,1/6 的南部区域为 4~4.4 mm,中间区域介于 3~4 mm,呈现由北向南逐渐增加的条带性日均降水量分布特征,修正数据很好的模拟出实测数据日降水量的这种地理特征,同时使日降水量低值区域面积减小,高值区域面积增加,条带方向性更加接近实测数据。除了春季外,其他季节修正数据与实测数据差异均低于模式数据与实测数据均值差异,其中修正数据将夏季均值差异由 2.42 mm 减小为 1.03 mm。

总体来说,修正数据能够有效减小模式数据空间分布的系统偏差和相对误差,使异常误差区域出现频率减小,从而有助于降低模式数据的不确定性,而且修正数据能够保留模式数据的时间趋势特征,所以修正数据代替模式数据更加准确预测未来降水的空间分布特征和时间趋势特征。

## 2.2 安徽省沿江地区降水变化预估

### 2.2.1 安徽省沿江地区年季降水时间序列变化预估

在 RCP4.5 排放情景下(图 4),2006—2065 年修正数据年均日降水量年际间波动较大,呈现微弱的增长趋势,日降水量增长速度为 0.043 mm/10 a。

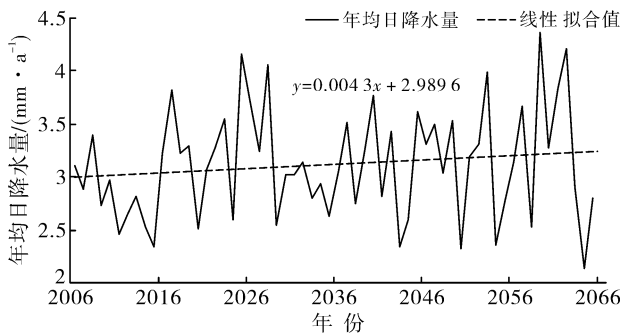


图 4 安徽省沿江地区 2006—2065 年年均日降水量

从表 3 可知 2036—2065 年较于 2006—2035 年,除了春季日降水量无明显变化外,其他季节均呈现增长的趋势。秋季增长最大为 0.3 mm,夏季和冬季增长了 0.13 mm,年均日降水量增加 0.12 mm。

表 3 研究区 2006—2065 年各季日降水量

时间	日降水量/mm	
	2006—2035 年	2035—2065 年
春季	4.01	3.99
夏季	4.87	5.00
秋季	2.07	2.37
冬季	1.42	1.55
年均	3.06	3.18

较于基准期(1976—2005 年),21 世纪初期年降水距平减小,说明此阶段年均日降水量呈减小趋势,而在 2016 年出现降水极高值,2016 年安徽省沿江地区爆发洪涝灾害使修正数据的得到了验证(图 5)。2006—2065 年年降水距平百分率相对于基准期呈现较大的波动性,但总体呈现增长趋势,增长速度为 1.55 mm/10 a。随着时间推移,降水波动性则越大,旱涝急转的现象可能会增加。2006—2035 年,年均日降水量极高值和年降水距平百分率均在 2026 年出现极高值,而 2036—2065 年,极高值则为 2058 年。这意味着 21 世纪 20 年代后期、50 年代后期的出现偏涝现象的频率可能会增加,但降水较多的前后年份一般降水明显低于平均水平,所以发生洪涝灾害的前后年份可能会较早。2010 年前后、30 年代前期降水距平低于平均水平,这一时期以偏旱现象为主。

由表 4 可知,2006—2035,2036—2065 年春季日降水距平均为负值,其他季节偏大,其中夏季最大,易发生洪涝灾害,春季变化特征不明显。较于 2006—2035,2036—2065 年春季日降水减少趋势变弱,其他季节增加幅度变大,秋季增加最大为 13.47%,年均增加为 4.47%,2006—2035 年呈现的趋湿特征,2036—2065 年趋湿特征更加明显。

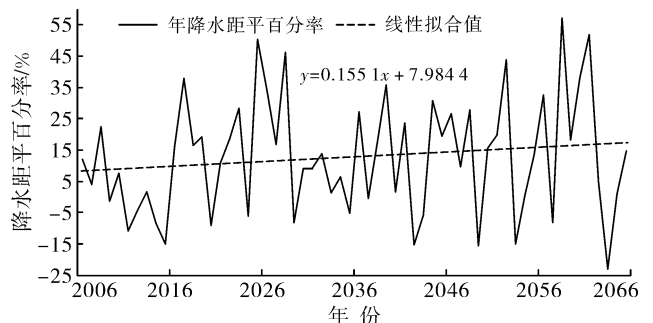


图 5 安徽省沿江地区 2006—2065 年年降水距平百分率

安徽省沿江地区日降水量自身有明显的波动,较于基准期也有较大的波动特征。总体来说,2006—2065 年日降水量呈增加趋势,且随着时间推移,趋湿特征更加明显,偏涝和旱涝急转现象也会增加。

表 4 2006—2065 年年季降水距平百分率

时间	降水距平/%	
	2006—2035 年	2035—2065 年
春季	-5.69	-1.92
夏季	40.33	43.16
秋季	4.19	17.66
冬季	5.75	15.78
年均	10.48	14.95

2.2.2 安徽省沿江地区降水空间分布预估 2006—2065 年,安徽省沿江地区降水自北向南呈条带性递增。这种地理分布特征受季节影响,但也表现出局部差异。春季降水最大值区域位于宿松县、东至县等研究区最南部,其他季节的日降水量最大值则在东南部的宣城市所辖区域内,这可能与东南部靠近黄山市有关,黄山市四季都是安徽省降水的最大值中心。

四季日降水量最小值位于北部滁州市所辖区域,长江沿岸是降水中值区域。此外,安徽省沿江地区日降水量的多寡也与季节相关,春夏降水多,秋冬降水少。春季、夏季日降水量分别约 4,4.9 mm,秋冬日降水量分别约 2.2,1.5 mm。

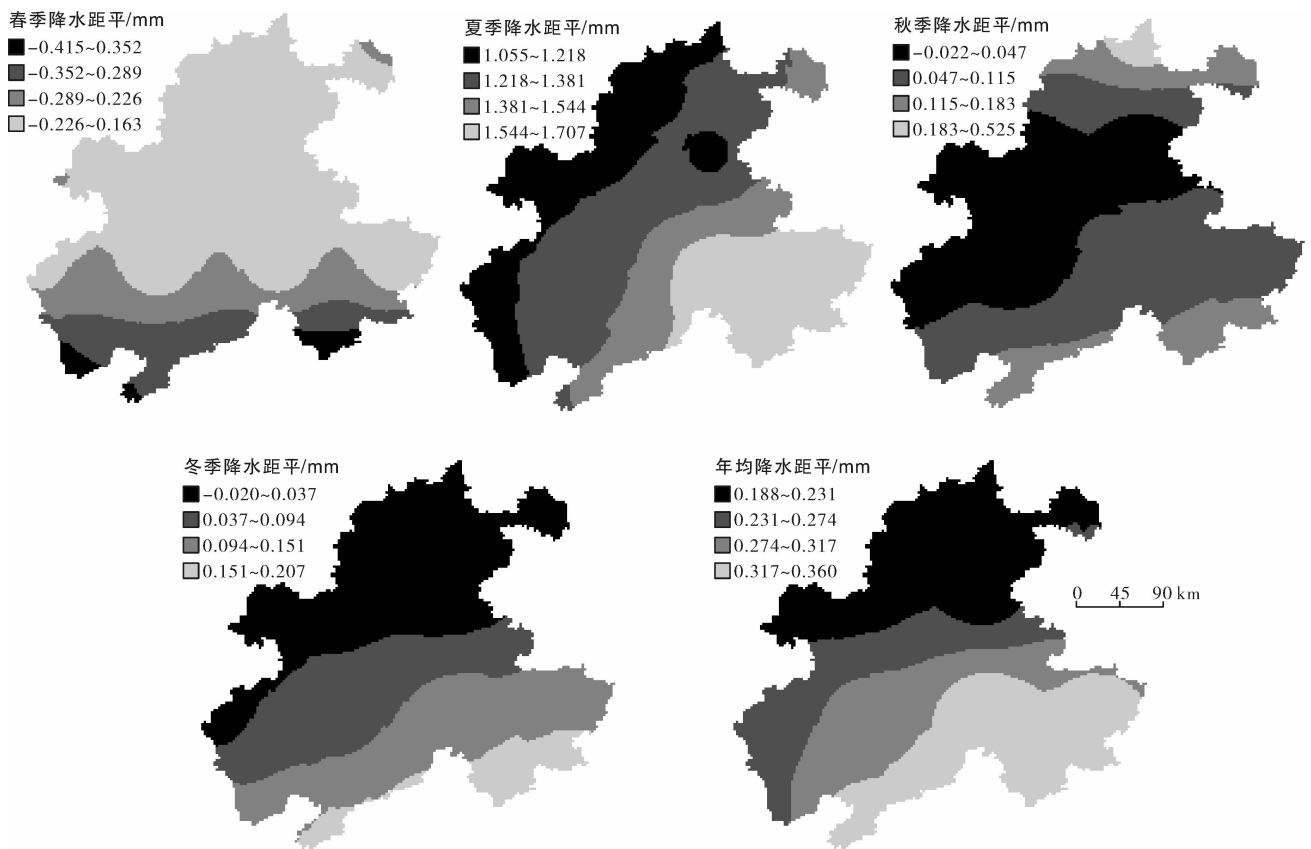


图 6 2006—2035 年研究区相对于 1976—2005 年降水距平空间分布

由图 6 可知,安徽省沿江区域 2006—2035 年的降水距平表现出一定的季节和区域变化特征,相较于基准期,春季降水距平减小 0.24 mm,增加最多的夏季为 1.4 mm。秋、冬两季日降水距平和年均日降水距平在整个研究区变化不大,除极少区域外,年均减少 0.2~0.36 mm,秋季增加 0~0.2 mm,冬季在 0 左右附近有微弱的波动。夏季日降水量区域变化特征丰富,日降水量增 4.87 mm,由西北向东南降水距平增加幅度逐渐明显,降水距平增加最多东南部约为 1.7 mm,马鞍山、池州、芜湖次之,夏季东南部日降水

量增加约为 1.5 mm,这意味这一时段夏季,特别是东南部出现涝灾可能性较大。

由图 7 可知,2036—2065 年秋季、年均日降水量分别为 2.37,3.18 mm,两者距平相近,距平值为 0.24~0.56 mm,并呈现由西北向东南逐渐增加的特征。春季、夏季日降水量为 4,5 mm,相对于 1976—2005 年,安徽省沿江地区春季降水距平减少 0.16~0.51 mm,夏季增加为 1.16~1.92 mm/d。冬季日降水量为 1.55 mm,长江沿岸北部大于 1/2 的区域的降水距平在 0 左右波动,长江沿岸南部降水距平在

0.2~0.42 mm,冬季日降水量总体呈微弱的增加趋势。与研究区冬季日降水量相比,绩溪县最南端的极小地区增加较明显,这可能与绩溪县临界的南部区域降水增加偏多有关。

降水不仅地理性变化特征明显,而且季节性变化

也大于 2006—2035 年。在四季中,除春季与 2006—2035 年相近外,其他季节性的降水变化相对较大,秋季降水距平比 2006—2035 年大 0.3 mm,夏季、冬季均大 0.13 mm,这意味着研究区 2036—2065 年会呈更加趋湿倾向。

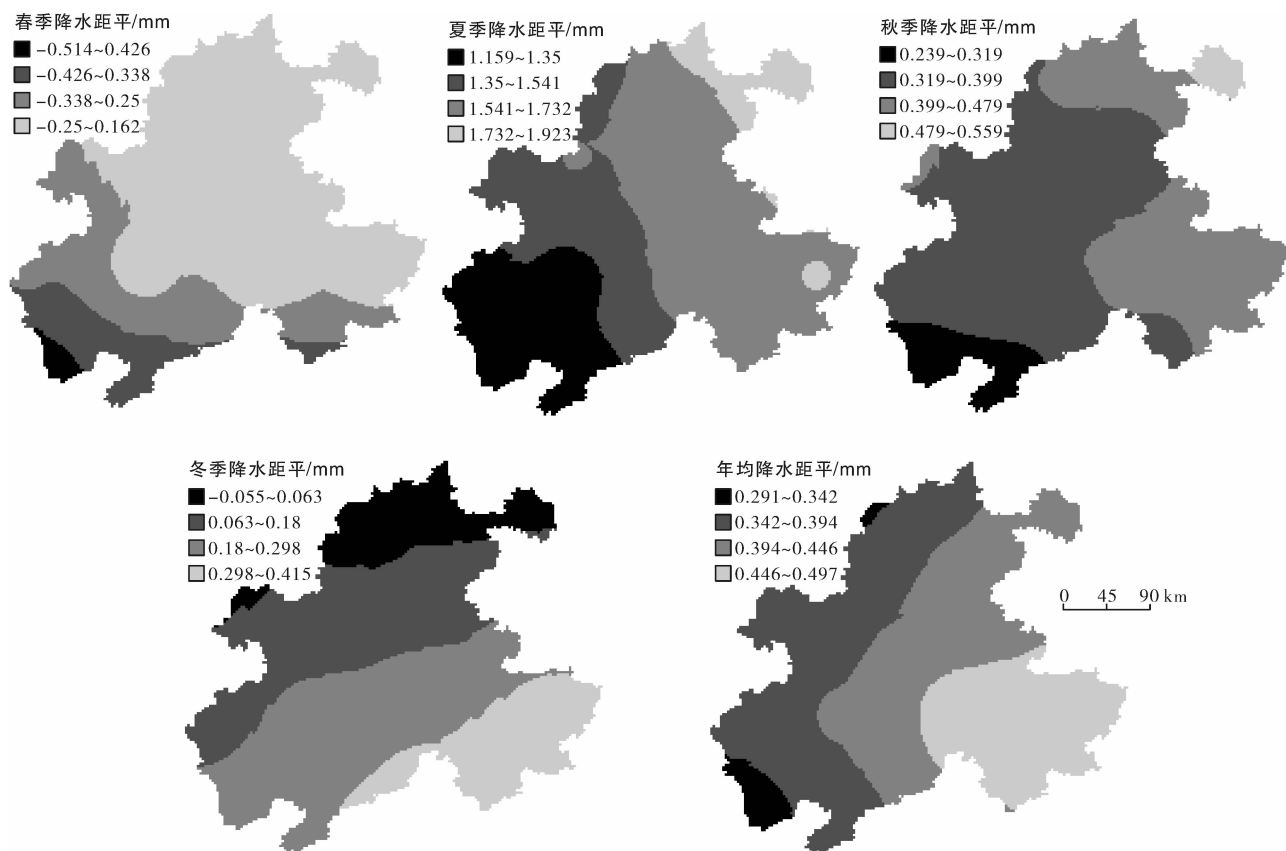


图 7 研究区 2036—2065 年相对于 1976—2005 年降水距平空间分布

总体来说,多年平均降水空间分布的模拟结果表明,安徽省沿江地区日降水量具有明显的由北向南逐渐增加条带性地理特征和春夏降水多,秋冬降水少季节特征。2036—2065 年相比于 2006—2035 年,区域的降水地理变化特征会更加明显而且季节性变化速率增加,夏季日降水量变化最大,冬季日降水量变化最小,降水距平地理变化条带性趋势及方向因季节而异。

### 3 结果与讨论

(1) 在 RCP4.5 情景下,应用修正数据对于安徽省沿江地区日降水进行了效果检验,检验结果表明该修正数据对降水的预估有一定的可靠性。

(2) 从时间序列来看,较于 2006—2035,2036—2065 年降水呈现更明显的趋湿化特征,波动性也是相对较大。较于基准期,2006—2065 年夏季降水波动幅度大于 40%,这意味着未来阶段夏季更易出现

洪涝灾害。除春季降水距平均较小外,2036—2065 年秋冬季节降水距平明显大于 2006—2035 年,这一阶段秋冬季节出现降水异常现象可能多于 2006—2035 年。

(3) 从区域降水变化特征来看,安徽省沿江地区日降水量具有明显的由北向南逐渐增加条带性地理特征和春夏降水多,秋冬降水少季节特征。较于 2006—2035,2036—2065 年区域的降水地理变化特征会更加明显而且季节性变化速率增加。2006—2065 年降水距平地理变化条带性趋势及方向因季节而异。夏季降水变化最快,2006—2035 年,研究区东南部以及 2036—2065 年中东部都是发生洪涝灾害频率较大的重点区域。新一代的 CMIP5 模式较于 CMIP4 及更早的气候模式有了较大的发展和进步,模拟能力也有了进一步的提高,但也存在着一些现在还没有解决的问题。虽然 MRI-CGCM3 对于降水空间分布的模拟与实际数据之间的空间相关系数较高,

但存在着系统误差,这将增加未来降水预估的不确定性。考虑到模式的可靠性和排放情景的合理性,本文对 MRI-CGCM3 模式进行相对误差的修正,以实测站点数据对修正数据进行验证,不仅保留空间相关系数较高的优点,而且明显的减小了相对误差,提高了降水预测研究的可信度。今后仍需要开展更多误差修正工作和多模式单独模拟与集成模拟的分析工作,以进一步减少模拟结果的误差和不确定性。

致谢:感谢中山大学肖明忠博士提供的气候情景数据,感谢国家气候中心高学杰老师、CMIP 耦合模式比较工程的 Torsten Rathmann 给予的帮助。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 姜彤,苏布达,王艳君,等. 四十年来长江流域气温、降水与径流变化趋势[J]. 气候变化研究进展,2005,1(2):65-68.
- [2] 富元海. CMIP3 模式预估的 21 世纪东亚夏季降水年际变率变化过程[J]. 中国科学:地球科学,2012,42(12):1937-1950.
- [3] 王国庆,张建云,李岩,等. 海河流域基于多模式的未来气候变化趋势[J]. 资源科学,2014,36(5):1043-1050.
- [4] 吴晶,罗毅,李佳,等. CMIP5 模式对中国西北干旱区模拟能力评价[J]. 干旱区地理,2014,37(3):499-508.
- [5] Xu Ying, Xu Chonghai, Gao Xuejie, et al. Projected changes in temperature and precipitation extremes over the Yangtze River basin of China in the 21st century[J]. Quaternary International, 2009,208(1):44-52.
- [6] Sillmann J, Kharin V V, Zhang X, et al. Climate extremes indices in the CMIP5 multi-model ensemble (Part1): Model evaluation in the present climate[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2013, 118(4):1-18.
- [7] 姜大膀,富元海. 2 °C 全球变暖背景下中国未来气候变化预估[J]. 大气科学,2012,36(2):234-246.
- [8] 江志红,陈威霖,宋洁,等. 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,2009,33(1):109-120.
- [9] 陈晓晨,徐影,许崇海,等. CMIP5 全球气候模式对中国地区降水模拟能力的评估[J]. 气候变化研究进展,2014,10(3):217-225.
- [10] Xie Pingping, Chen Mingyue, Yang Song, et al. A gauge-based analysis of daily precipitation over East Asia[J]. Journal of Hydrometeorology, 2007,8(3):607-626.
- [11] Xu Ying, Xu Chonghai. Preliminary assessment of simulations of climate changes over China by CMIP5 multi-models[J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 2012,5(6):489-494.
- [12] 陈活泼. CMIP5 模式对 21 世纪末中国极端降水事件变化的预估[J]. 科学通报,2013,58(8):743-752.
- [13] 彭俊台,张强,陈晓宏,等. 珠江流域极端降雨时空演变特征分析[J]. 灾害学,2011,26(4):24-28.
- [14] 韩乐琼,韩哲,李双林. 不同代表性浓度路径(RCPs)下 21 世纪长江中下游强降水预估[J]. 大气科学学报,2014,37(5):529-540.
- [13] 张磊,王文,文明章,等. 基于 FloodArea 模型的山洪灾害精细化预警方法研究[J]. 复旦学报:自然科学版,2015,54(3):282-287.
- [14] 谢五三,田红,卢燕宇. 基于 FloodArea 模型的大通河流域暴雨洪涝灾害风险评估[J]. 暴雨灾害,2015,34(4):384-387.
- [15] 姜智怀,张毅之,蔡哲,等. 基于河道栅格的山洪灾害淹没模拟[J]. 气象,2014,40(8):1013-1018.
- [16] 文明章,林昕,游立军,等. 山洪灾害风险雨量评估方法研究[J]. 气象,2013,39(10):1325-1330.
- [17] 叶丽梅,周月华,李兰,等. 通城县一次暴雨洪涝淹没个例的模拟与检验[J]. 气象,2013,39(6):699-703.
- [18] 刘义花,鲁延荣,周强,等. 基于 GIS 栅格数据的青海省羊智沟洪水动态模拟[J]. 中国农业大学学报,2015,20(3):169-174.
- [19] 胡桂胜,陈宁生,邓虎. 基于 GIS 的西藏林芝地区泥石流易发与危险区分析[J]. 水土保持研究,2012,19(3):195-199.
- [20] 林志强,唐叔乙,何晓红,等. 西藏高原汛期水汽输送特征与降水异常[J]. 气象,2011,37(8):984-990.
- [21] 张洪江,北原曜,谢明曙,等. 晋西几种不同土地利用状况下糙率系数的研究[J]. 北京林业大学学报,1994,16(4):86-92.
- [22] Geomer. Floodarea and Floodarea HPC: ArcGIS-extension for calculating flooded areas: User Manual V10.0 [M/OL]. Heidelberg: Geomer GmbH, 2011 [2016-05-01]. [http://www.geomer.de/fileadmin/templates/main/res/downloads/floodarea10\\_manual\\_englisch.pdf](http://www.geomer.de/fileadmin/templates/main/res/downloads/floodarea10_manual_englisch.pdf)
- [23] 林志强,假拉,罗骝翮,等. 西藏高原闪电特性时空分布特征[J]. 气象科技,2012,40(6):1002-1006.

(上接第 187 页)