
利用高分辨率气候模式对湖北未来气候变化的模拟与预估^{*1}

邓婷¹ 王润^{1,2*} 姜彤³ 黄金龙^{4,5} 方晓¹ 刘润¹

(1. 湖北大学资源环境学院, 湖北 武汉 430062;

2. 区域开发与环境响应湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430062;

3. 中国气象局国家气候中心, 北京 100081;

4. 中国科学院 新疆生态与地理研究所荒漠与绿洲生态国家重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830011;

5. 中国科学院大学, 北京 100049)

【摘要】: 利用高分辨率区域气候模式 CCLM 对湖北省降水和气温的模拟数据, 对比分析了基准期(1961~2005年)的模拟结果和同期 CN05.1 的观测数据, 并对 RCP4.5 情景下的未来(2006~2050年)气候进行了年尺度和季节尺度的预估。结果表明: (1)CCLM 区域气候模式较好地模拟了湖北气温的演变趋势及其空间分布格局, 对降水的时空波动模拟与同期 CN05.1 在降水时空变化上的匹配度较弱; (2)RCP4.5 情景下, 2006~2050年湖北 T 、 T_{\min} 、 T_{\max} 呈上升趋势。四季气温呈一致上升的趋势, 冬季的上升速度最快, 对年尺度上 T 、 T_{\min} 、 T_{\max} 上升的趋势贡献最大。(3)RCP4.5 情景下, 2006~2050年湖北 T 、 T_{\min} 、 T_{\max} 呈全区一致上升的格局。其中增幅最大的区域均集中于汉江湖北段北部。春季 T 、 T_{\min} 、 T_{\max} 增温大值区位于西北山地区; 夏季中部平原区 T 、 T_{\min} 、 T_{\max} 相较于其他区域增幅较大; 秋季西南山地区 T 和 T_{\max} 较其他区域增温较高, T_{\min} 的增温大值区位于汉江湖北段北部; 冬季鄂东南丘陵 T 相较于其他区域增幅较大, 汉江湖北段北部 T_{\min} 增温较大, 西南山地 T_{\max} 增温较大。

【关键词】: 气候模式; CCLM; RCP4.5; 模拟与预估; 湖北

【中图分类号】: P463 **【文献标识码】**: A **【文章编号】**: 1004-8227(2017)06-0937-08

¹ 收稿日期: 2016-10-17; 修回日期: 2017-01-12

基金项目: 湖北省“楚天学者”计划项目特别支持[CHUTIAN Scholarship Program]

作者简介: 邓婷(1992~), 女, 硕士研究生, 主要从事区域可持续方面研究. E-mail: dengting@student.hubu.edu.cn

*通讯作者 E-mail: rwang@iue.ac.cn

气候变化及其影响评估已成为当今国际社会普遍关注的全球性热点话题。观测到的气候变化已对淡水资源、植被、陆地和海洋生态系统、粮食安全、人类健康和生计等造成不利影响^[1,2]。未来气候变化造成的风险在很大程度上取决于未来气候变化量^[3]。准确预估气候变化对未来应对气候变化及提出相应的减缓和适应措施具有重要的指导意义。目前,由于全球气候模式(Global Climate Models, GCMs)的分辨率较低,最新的国际耦合模式比较计划第五阶段(CMIP5)里多数模式的分辨率在 $1^{\circ}\sim 2^{\circ}$ 之间,以及气候模式在物理过程参数化等方面还需进一步完善,而区域气候受地形、下垫面植被等影响较大,粗格网分辨率的模式难以满足研究需求^[4]。基于区域气候模式(Regional Climate Models, RCMs)开展湖北的高分辨率模拟与预估,具有重要的理论和现实意义。

本文运用的是德国气象局(the German Weather Service, DWD)的局地模型(Local Model, LM)发展而来的动力降尺度模式(COSMO Model in Climate Mode, CCLM),它以全球模式ECHAM6的输出结果为边界条件,模拟时间尺度可达百年,分辨率范围为 $1\sim 50$ km。该模式已在中国区域、长江、淮河、珠江、塔里木河流域尺度及云南等地得到了应用^[5~10]。对于模式数据在复杂地形区域进行模拟和预估,是模式数据实际应用的重要研究问题。对不同区域和不同尺度进行降尺度的模拟和预估,可以搜集更多的研究方法和成果,帮助提高模式数据在预估结果不确定性方面的认识。

湖北面积为 18.59 万 km^2 ,其中山地占 56% ,丘陵占 24% ,平原湖区占 20% ,东、西、北三面环山,中间低平,略呈向南敞开的完整盆地。西北山地为秦岭东延部分和大巴山的东段,东北部为大别山山脉,东南边为幕阜山,中部为江汉平原,地形复杂,属于气候变化的敏感地区。已有研究表明,气候变暖幅度的不断增长将致使湖北省气象灾害“灾种增多、频率加快、灾情趋重”^[11]。在气候变化的背景下,湖北湿地减少,水域萎缩,气候变化将增大农业生产的不稳定性、加剧外来生物入侵事件发生,以及对气候生产力、水文水资源造成影响^[12~15]。湖北省气候变化的不利影响可能不断显现并放大,适应气候变化的任务必将艰巨而持久。

未来气候变化预估基于温室气体排放情景,代表性浓度路径(Representative Concentration Pathways, RCPs)是新一代温室气体排放情景,包括4种典型浓度路径RCP8.5、RCP6、RCP4.5、RCP2.6。其中RCP8.5是最高的温室气体排放情景;RCP2.6为低端路径;RCP6与RCP4.5情景是通过采取一系列技术和措施来控制温室气体排放不超过目标水平,并使总辐射强迫在2100年之前达到稳定的中间稳定路径,但RCP4.5(2100年辐射强迫稳定在 $4.5\text{W}/\text{m}^2$)的优先性大于RCP6^[16]。本文利用CCLM高分辨率区域气候模式输出的RCP4.5情景的逐日资料,通过对湖北省气温和降水的观测数据和模拟数据进行对比分析,综合评估了该模式在复杂地形下对气温和降水的模拟能力,对湖北未来的气候时空特征进行了预估,以期对湖北如何适应气候变化减少风险等方面提供参考依据。

1 数据与方法

1.1 数据来源

研究数据包括模式数据和实测气象数据。模式数据来源于德国波茨坦气候影响研究所(The Potsdam Institute for Climate Impact Research, PIK)基于德国气象局LM发展而来的CCLM模式,其空间分辨率为 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ 。CCLM模式输出的试验期湖北省1961~2005年73个格点逐日的平均(T)和最低(T_{\min})、最高气温(T_{\max}),以及降水数据(P),以及预估期2006~2050年的RCP4.5情景下的相应数据。实测数据为基于国家气象信息中心2400余全国国家级台站(基本、基准和一般站)的日观测数据插值构建的1961~2014年的日平均格点化数据集(CN05.1),分辨率为 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$,要素包含降水、平均气温、日最高气温、日最低气温^[17]。本文选取CN05.1中1961~2005年实测气象数据,用于CCLM模拟能力评估。

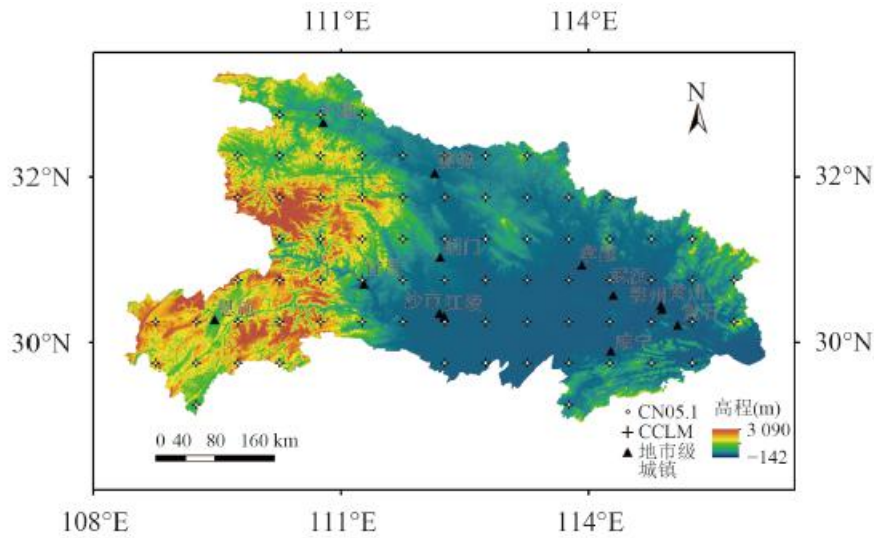


图 1 湖北省CN05.1格点和CCLM格点分布图

Fig.1 Distributions of CN05.1 Grids and CCLM Grids in Hubei Province

1.2 方法

基于湖北观测资料 CN05.1 和 CCLM 模拟的降水、平均气温、最高气温和最低气温的逐日资料，分别计算每个格点逐年的月平均值和年平均值，用算术平均法计算区域均值，以描述月尺度和年尺度的状况。

分别使用偏差(BIAS)、相关系数(r)和皮尔森空间相关系数(PCOR)评价模式与观测数据在时间变化和空间分布特征上的一致性。

$$BIAS = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)$$

偏差(BIAS):

式中：n 为样本个数；X、Y 分别为样本数值。

相关系数(r)：取值范围为[-1, 1]，r>0 表示正相关，r<0 表示负相关，|r|表示了变量之间相关程度的高低。

$$r_{XY} = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2}}$$

式中：N 为样本个数；X、Y 分别为样本数值。

皮尔森空间相关系数(PCOR)：可通过 ArcGIS 的空间分析功能计算，用于衡量两个栅格图层的相关性，求得的价值越接近 1，说明实测值与模拟值得空间相关性越强。

$$PCOR_{ij} = \frac{Cov_{ij}}{\delta_i \delta_j}$$

式中：Cov_{ij} 为两序列的协方差； δ_i 为 i 序列标准差； δ_j 为 j 序列标准差。

2 试验期模式模拟效果

2.1 CCLM 对基准期逐月数据的模拟能力评估

图 2 给出了 1961~2005 年湖北省逐月平均降水量、逐月平均温度、逐月最低气温、逐月最高气温的实测和模拟逐月数据的对比。从数值上看，降水量、平均温度、最低温度和最高温度的偏差分别为 -15.22 mm、1.70 °C、1.10 °C 和 1.09 °C，P 模拟结果与观测值相差最大，并且 P 模拟的峰值出现在 4 月份，与实测的 7 月份不符；CCLM 模式模拟的 T、T_{min}、T_{max} 均与 CN05.1 实测数据虽有偏高 1 °C 的暖偏差，但较为接近。CCLM 模拟的 T、T_{min}、T_{max} 峰值都在 7 月份，与观测数据的结果一致。从平均数据变化趋势上看，P、T、T_{min} 和 T_{max} 的相关系数分别为 0.56、0.992、0.987 和 0.997。降水值适度相关，逐日气温值均呈显著相关关系。CCLM 模式输出的结果与实际观测的逐月平均温度在时间变化趋势上具有很高的相似度。总体来看，在时间特征上，CCLM 模式数据对湖北降水的模拟能力较弱，对气温的模拟能力较强。

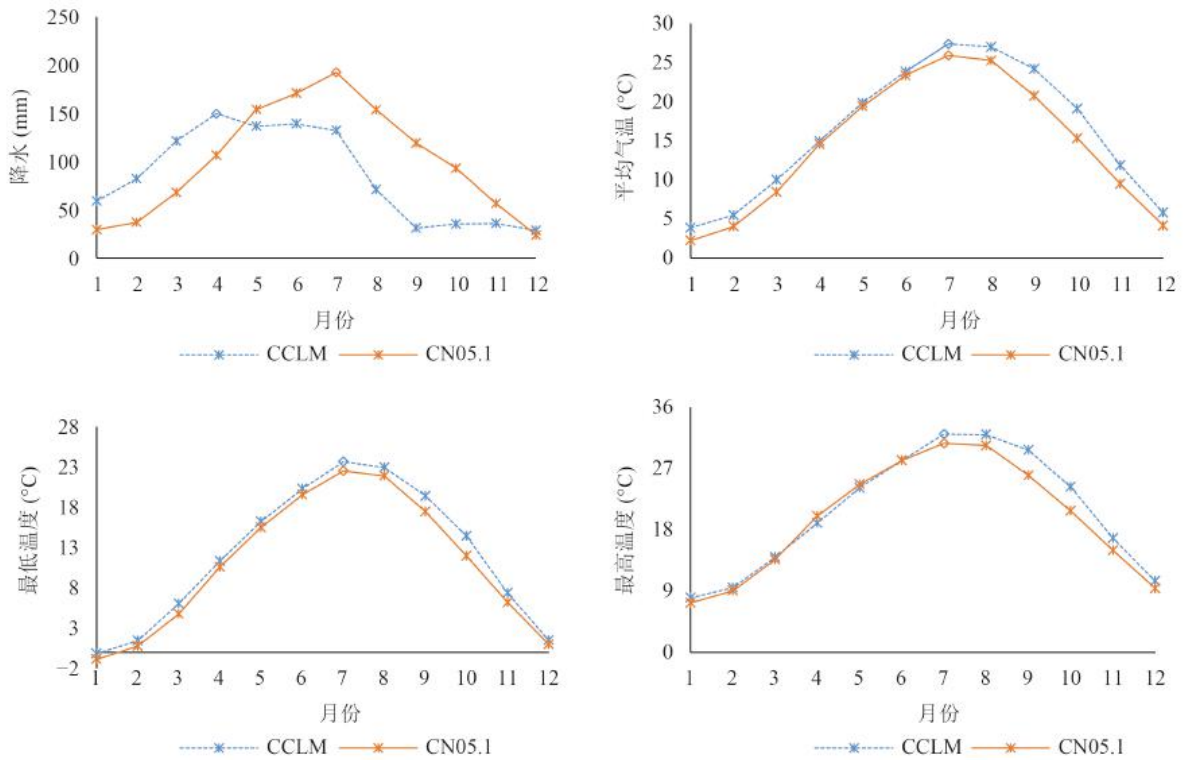


图2 湖北1961~2005年模拟和观测的逐月 P 、 T 、 T_{\min} 、 T_{\max}

Fig.2 Comparison of Simulated Monthly Mean P , T , T_{\min} , T_{\max} with Observed Time Series in Hubei Province for 1961-2005

2.2 CCLM对基准期空间分布的模拟能力评估

图3给出了观测期和实验期湖北省年降水量、年平均气温、最低气温、最高气温的空间分布特征，CCLM模拟结果显示湖北降水由南向北逐渐减少的趋势，中心在鄂西南区域，但没有反映出鄂东南的降水中心，空间相关系数仅为0.26。气温模拟结果和实测结果的空间相关系数为0.97，模拟出中部江汉平原地区温度较高，西部、东北部、东南部山地地区气温相对较低，尤其是西部高山地区低于其他地区的分布规律，这也与汪高明^[18]利用湖北省1961~2007年77个地面观测站的观测资料得出的结论一致。 T_{\min} 和 T_{\max} 的模拟效果也较好，空间相关系数为0.95和0.97。总体来看，在空间分布特征上，CCLM模式数据对湖北降水的模拟能力不显著，对气温的模拟能力较强。

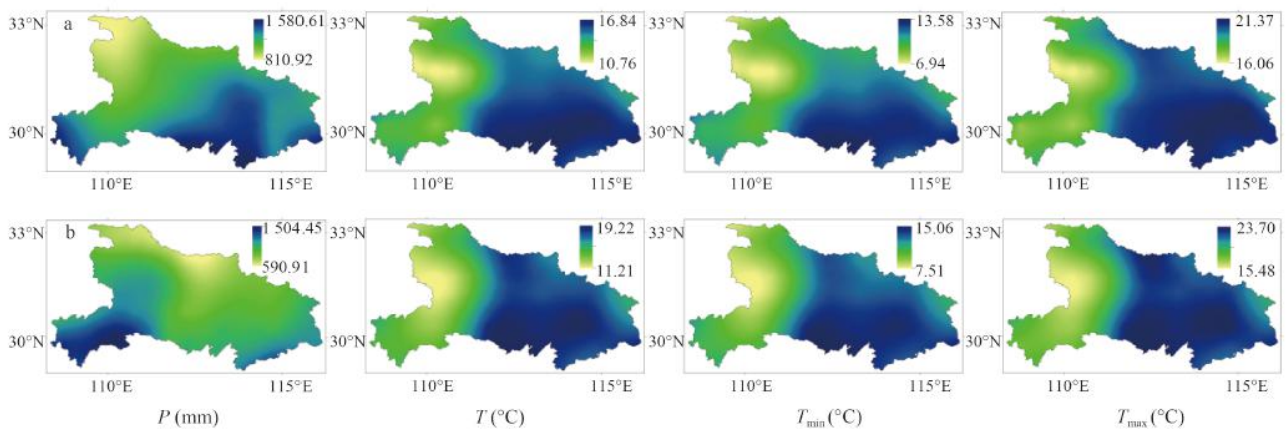


图3 1961~2005年观测(a)与模拟(b)的 P 、 T 、 T_{\min} 和 T_{\max} 空间分布

Fig.3 Spatial Distribution of Observed(a)and Simulated(b) P , T , T_{\min} , T_{\max} in Hubei Province for 1961–2005

对比分析观测与模拟结果的时间序列和空间分布特征可以得出，CCLM对湖北降水的模拟与同期观测数据在降水时空变化上的匹配度较弱，对气温的模拟能力较强。

3 RCP4.5 情景下未来气温预估

3.1 2006~2050 年气温年尺度预估

图4给出了RCP4.5情景下湖北2006~2050年 T 、 T_{\min} 、 T_{\max} 较基准期(1961~2005年)的平均状况的变化量。可以看出，以CN05.1序列为参照，逐月数据相关系数为0.992、0.987、0.997的基础上，2006~2050年 T 、 T_{\min} 、 T_{\max} 将呈现整体上升趋势，线性趋势分别为0.35、0.32、0.38 $^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 。基于1961~2007年实测数据的气温特征分析结果，近47年湖北省年平均气温总体呈上升趋势，平均增温趋势值为0.17 $^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ^[18]。可知湖北气温上升的趋势将继续保持，并且速率将有所加大。从5a滑动平均曲线可以看出，2005~2023年呈波动上升；2023~2029年呈下降趋势；2029~2034年上升趋势明显；2035~2050年波动变化，有小幅度的上升趋势。这期间年平均 T 、 T_{\min} 、 T_{\max} 分别达到基准期的109.8%、108.2%、112.4%。

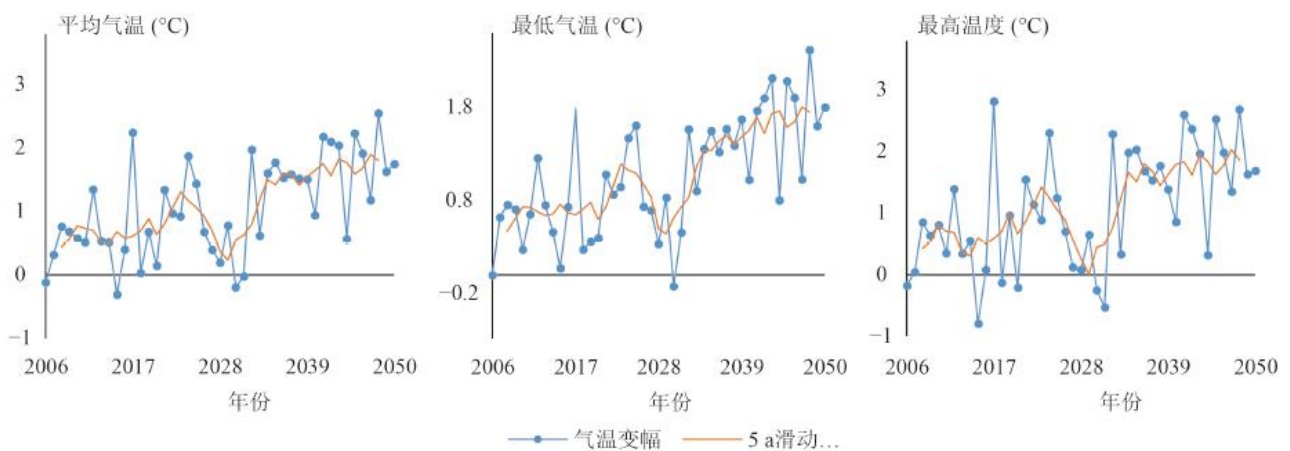


图4 RCP4.5情景湖北年平均 P 、 T 、 T_{\min} 、 T_{\max} 预估

Fig.4 Projection of Annual Mean P , T , T_{\min} , T_{\max} in Hubei Province Under RCP4.5 Scenario

图5给出了RCP4.5情景下湖北2006~2050年 T 、 T_{\min} 、 T_{\max} 较基准期(1961~2005年)平均状况变化的空间分布。从 T 、 T_{\min} 、 T_{\max} 相对于基准期的升温幅度图可知,以CN05.1序列为参照,空间相关系数为0.97、0.95、0.97的基础上,整个区域未来平均气温将增加2.06℃,最低气温将增加2.06℃,最高气温将增加2.08℃。 T 、 T_{\min} 、 T_{\max} 均呈全区一致上升的格局,其中增幅最大的区域都集中于汉江流域湖北段的北部,南部地区增温幅度较小。

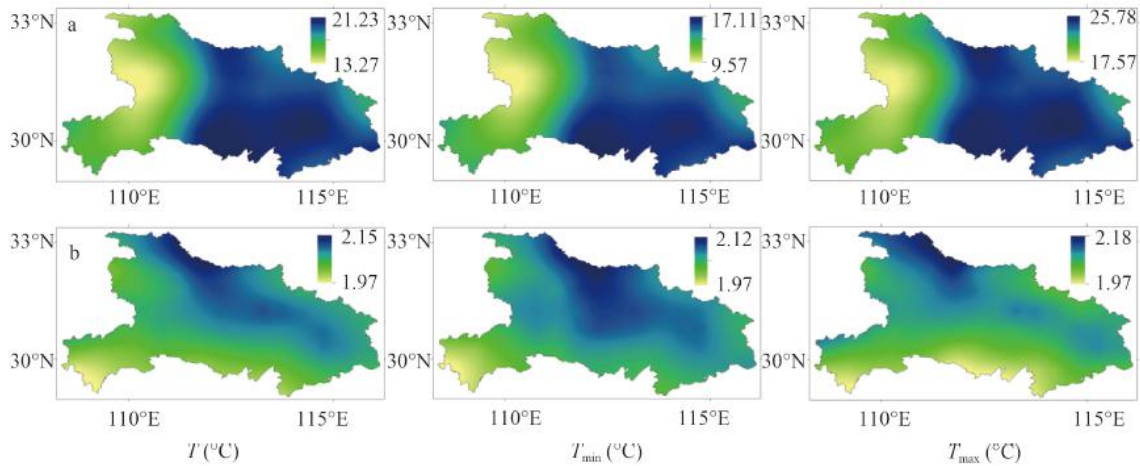


图5 RCP4.5情景下湖北年平均 T 、 T_{\min} 、 T_{\max} 的空间分布(a)和相对于基准期的空间变化(b)

Fig.5 Spatial Distribution of Projected Annual Mean T , T_{\min} , T_{\max} and Its Spatial Changes Comparing to the Reference Period (b)

3.2 2006~2050年气温季节尺度预估

图6给出了RCP4.5情景下,2006~2050年湖北省春季(3~5月)、夏季(6~8月)、秋季(9~11月)、冬季(12~次年2月)四季的 T 、 T_{\min} 、 T_{\max} 的时间序列。从数值上看,2006~2050年 T 序列夏季多变,方差最大,为1.40;春、秋、冬季序列的方差分别为0.96、1.00、1.16。2017年,春季和夏季 T 增幅最大,为2.86、4.08℃,2021年秋季气温增幅3.10℃,2043年冬季 T 增温3.18℃,为基准期的67.3%;比较2006~2050年的 T_{\min} 数值可知, T 序列冬季的方差最大,为1.04,春、夏、秋季序列的方差分别为0.79、1.03、0.80。2048年春季 T_{\min} 增幅出现最大值2.45℃,夏季增幅最大值出现在2017年,为3.50℃。2043年秋季和冬季 T_{\min} 增幅出现最大值3.09、3.49℃,冬季增幅为基准期平均状况0.64℃的545.3%;对比 T_{\max} 2006~2050年的数值可知, T 序列夏季的方差最大,为1.81,春、秋、冬季序列的方差分别为1.27、1.31、1.48。春季增幅最大值出现在2017年,为3.68℃;夏季的出现2012年,为4.90℃;秋季的在2021年,为3.60℃;冬季的在2045年,为3.77℃。

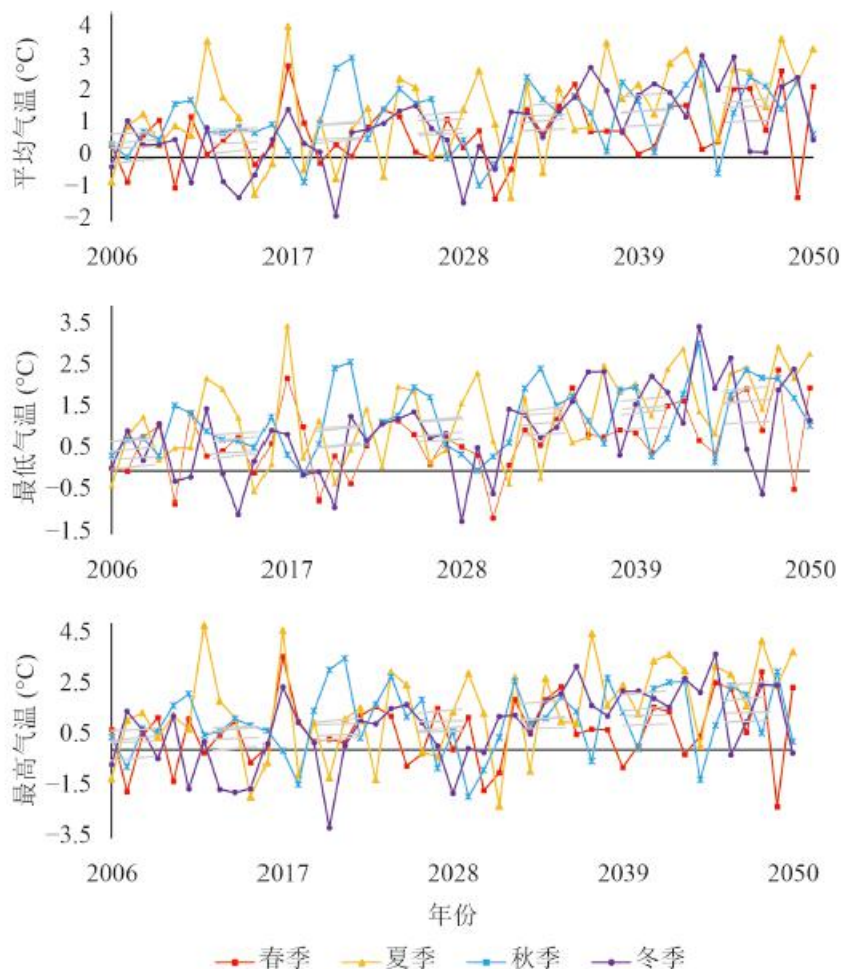


图 6 RCP4.5情景湖北平均 T 、 T_{\min} 、 T_{\max} 的季节预估

Fig.6 Projection of Seasonal Mean T , T_{\min} , T_{\max} in Hubei Province Under RCP4.5 Scenario

比较趋势可知,以CN05.1序列为参照,逐月数据相关系数为0.992、0.987、0.997的基础上,四季气温呈一致上升的趋势,冬季的上升速度最快,对年尺度上 T 、 T_{\min} 、 T_{\max} 上升的趋势贡献最大,趋势分别为0.49、0.41、0.59 $^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$;夏季上升的速度次之, T 、 T_{\min} 、 T_{\max} 的趋势分别为0.46、0.38、0.54 $^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$;春秋季节 T 、 T_{\min} 、 T_{\max} 上的趋势在0.20 $^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 左右,春季分别为0.21、0.22、0.20 $^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$;秋季分别为0.21、0.24、0.17 $^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 。基于1961~2014年实测数据的四季气温特征分析结果,湖北省四季平均气温变化趋势除夏季表现出了降温外,其他各季节均为增温,以冬季增温最为明显,春季次之^[18]。湖北省夏季平均日最高气温呈下降趋势;冬季平均日最低气温上升趋势显著。对比本文结果至2050年冬季 T 、 T_{\min} 保持较快上升,春秋季节依然会上升,夏季 T 、 T_{\max} 不降反升。

图7给出了RCP4.5情景下,2006~2050年湖北省春季(3~5月)、夏季(6~8月)、秋季(9~11月)、冬季(12~次年2月)四季的 T 、 T_{\min} 、 T_{\max} 相对于基准期的空间变化分布。以CN05.1序列为参照,空间相关系数为0.97、0.95、0.97的基础上,2006~2050年,湖北四季全区的 T 、 T_{\min} 、 T_{\max} 都呈一致上升的趋势,夏季上升的幅度最大,分别为1.18~1.63、1.11~1.46、1.27~1.85 $^{\circ}\text{C}$,中部区域增温幅度稍大;秋季 T 、 T_{\min} 、 T_{\max} 增温幅度为1.03~1.38、1.02~1.20、0.91~1.43 $^{\circ}\text{C}$, T 、 T_{\max} 增幅的大值区在西南区域, T_{\min} 增幅的大值区位于汉江流域湖北段北部区域;冬季 T 、 T_{\min} 、 T_{\max} 增温幅度为0.87~1.02、0.84~1.07、0.84~1.01 $^{\circ}\text{C}$ 。

T 增温幅度较大的区域主要处于东南区域, T_{min} 增温幅度最大的区域主要处于西南区域, T_{max} 增温幅度最大的区域在于西南区域; 春季 T、 T_{min} 、 T_{max} 增温幅度为 0.61~0.86、0.68~0.85、0.48~0.91 °C, 增温幅度较大的区域主要处于西北区域。

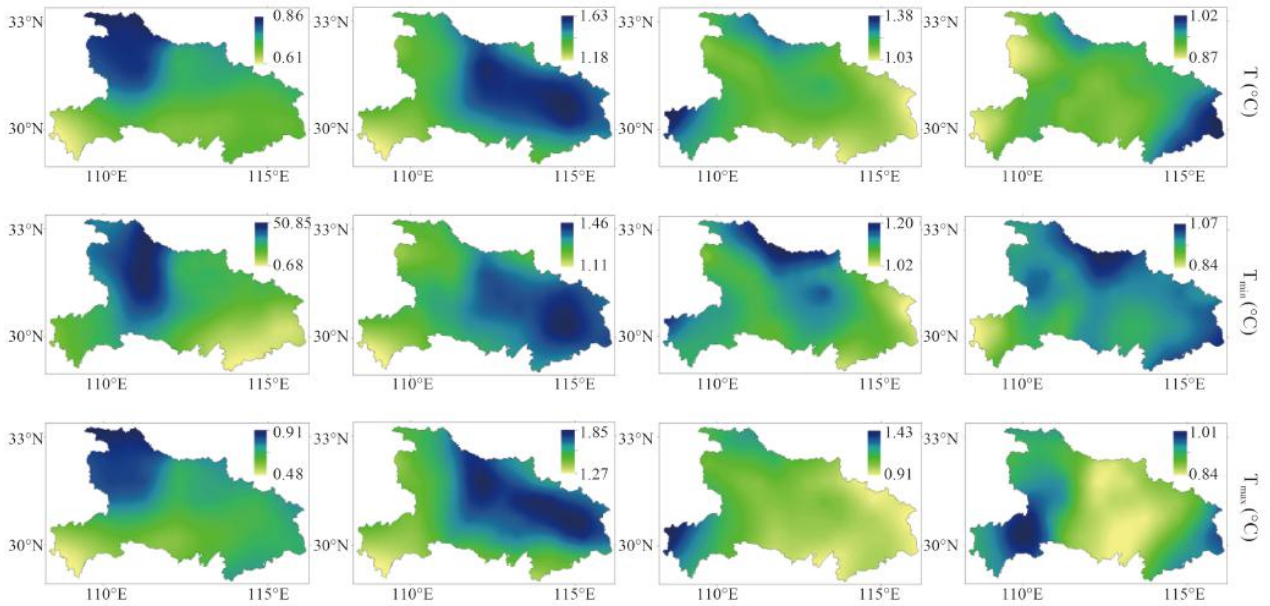


图7 RCP4.5情景湖北平均 T 、 T_{min} 、 T_{max} 春季、夏季、秋季、冬季的相对于基准期的空间变化

Fig.7 Spatial Distribution of Seasonal Mean T , T_{min} , T_{max} in Hubei Province Under RCP4.5 Scenario (Relative to 1961–2005)

4 结论与讨论

通过评估高分辨率气候模式 CCLM 对湖北气候的模拟能力, 预估了湖北未来(2006~2050 年)气候的时空变化, 得出以下主要结论: (1)CCLM 较好地模拟了气温的月波动及其空间分布格局, 对湖北降水的时空波动模拟能力弱于气温, 其偏差可能来源于驱动区域气候模式的全球气候模式, 也可能是由于 CCLM 对大气环流特征模拟不足。(2) 本文通过对 CCLM 的 RCP4.5 情景气温逐日数据进行分析, 年尺度上, 2006~2050 年湖北省 T 、 T_{min} 、 T_{max} 呈上升趋势; 空间分布上, 气温呈全区一致上升的趋势, 并且表现出北多南少的特点。(3) 季节尺度上, 四季气温呈一致上升的趋势, 冬季的上升速度最快, 对年尺度上 T 、 T_{min} 、 T_{max} 上升的趋势贡献最大。夏季上升的速度次之, 春秋季节 T 、 T_{min} 、 T_{max} 上的趋势在 0.2 °C/10 a 左右。春季, T 、 T_{min} 、 T_{max} 增温大值区位于西北山地区, 夏季中部平原区 T 、 T_{min} 、 T_{max} 相较于其他区域增幅较大; 秋季, 西南山地区 T 和 T_{max} 较其他区域增温较高, T_{min} 的增温大值区位于汉江湖北段北部; 冬季, 鄂东南丘陵 T 相较于其他区域增幅较大, 汉江湖北段北部 T_{min} 增温较大, 西南山地 T_{max} 增温较大。

目前区域尺度上的气候预估的结果尚存在很大的不确定性。不确定性主要表现在两个方面: (1) 区域气候模式数据建立的基础是全球更大区域的复杂气候系统。这一数据降尺度应用就存在增加区域空间模拟, 增加数据量以提高可靠性的问题, 这同时也是气候模拟预估的关键问题。(2) 未来情景的演化方向。全球气候系统受到自然特别是人为干扰, 对干扰的预估存在不同程度的设定, 这些设定的变化增加了预估的不确定性。湖北省是位于长江中游一个区域地形较复杂的省份, 气候的形成和变化受到不同范围尺度天气系统的影响, 主要包括由西南越过赤道向东输送的索马里越赤道气流, 越赤道向东北输送的孟加拉湾气流, 南海附近气流和太平洋气流。

本文以 1961~2050 期间湖北省气温降水要素的变化分析为目的, 采用 CN05.1 实测资料验证基准期 CCLM 的输出精度, 进而对研究区预估期的气温降水的变化幅度及速率进行分析, 实际上是从较大区域的天气系统结合实测资料来模拟预估湖北省这样一个地形较复杂区域的整体气候变化情况。也就是说, 即使利用实测资料, 对于地形和天气系统较复杂区域, 进行区域整体未

来气候变化的模拟和预估，也要考虑各个站点代表的主要天气系统在区域的比重。本研究所一方面对模式数据降尺度应用提供了案例，另一方面也将对模式数据在更大区域范围内应用时提高对不确定性的认识提供了研究基础。在今后的研究中需在温室气体排放情景的基础上，考虑自然变化的影响；分析气候系统各圈层的相互作用；开展多模式、多情景的对比研究，提高对未来气候预估的精度。

根据本文的预估结果，结合其他学者在湖北省做的研究，可做出以下的推论：(1)李晓冬等^[13]对湖北气候生产力的研究表明，未来“暖湿型”气候对湖北作物生长最有利，“冷干型”气候对作物生长最不利，北部地区是气候变化的敏感区。结合预估结果，可以知道未来湖北四季气温呈一致上升的趋势，冬季的上升速度最快，北部气温变化较明显。为应对气候变化，需调整作物布局，改革耕作制度。加强农业基础设施建设，提高农业抗御气象灾害的能力。(2)按照本文得到湖北省各年份、各季节的气温及降水平均值的方法，可得到湖北旬降水量和旬平均气温。结合易灵伟等^[14]通过构建湖北中稻生育期内旬际日照时数、平均温度、降水适宜度的隶属函数，建立综合适宜度评价模型，得出的湖北中稻的气象产量预估模型，可以预估未来湖北中稻的产量。(3)冯明等^[15]探讨了湖北省降水和气温变化对长江湖北段干流径流量的影响。研究表明，长江湖北段的年径流量在总体上随降水量的增加而上升，随气温的下降而增加。根据本文得出2006~2050年 T 、 T_{min} 、 T_{max} 将呈现整体上升趋势，在逐月降水数据相关系数为0.56的基础上，2006~2050年 P 将以线性趋势 $-15.09\text{mm}/10\text{a}$ 的速率下降。根据预估的结果可知，长江流域湖北段的径流量在未来可能会有所减少。

参考文献:

- [1] 姜 彤, 李修仓, 巢清尘, 等. 《气候变化2014: 影响、适应和脆弱性》的主要结论和新认知[J]. 气候变化研究进展, 2014, 10(3):157 - 166.
- 【JIANG T, LI X C, CHAO Q C, et al. Highlights and understanding of climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability[J]. Progressus Inquisitiones de Mutatione Climatis, 2014, 10(3):157 - 166.】
- [2] LI C B, QI J G, YANG L S, et al. Regional vegetation dynamics and its response to climate change—a case study in the Tao River Basin in Northwestern China[J]. Environmental Research Letters, 2014, 9(12):125003.
- [3] IPCC. Climate Change 2013: The physical science basis. Contribution of working group I to the Fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[R]. Cambridge, United Kingdom and New York, USA: Cambridge University Press, 2013: 89.
- [4] 刘鸿波, 张大林, 王 斌. 区域气候模拟研究及其应用进展[J]. 气候与环境研究, 2006, 11(5): 649 - 668.
- 【LIU H B, ZHANG D L, WANG B. Recent advances in regional climate modeling and applications[J]. Climatic and Environmental Research, 2006, 11(5): 649 - 668.】
- [5] 钟 军, 苏布达, 翟建青, 等. 中国日降水的分布特征和未来变化[J]. 气候变化研究进展, 2013, 9(2): 89 - 95.
- 【ZHONG J, SU B D, ZHAI J Q, et al. Distribution characteristics and future trends of daily precipitation in China[J]. Progressus Inquisitiones de Mutatione Climatis, 2013, 9(2): 89 - 95.】
- [6] 陶 辉, 黄金龙, 翟建青, 等. 长江流域气候变化高分辨率模拟与RCP4.5情景下的预估[J]. 气候变化研究进展, 2013, 9(4): 246 - 251.

【TAO H, HUANG J L, ZHAI J Q, et al. Simulation and projection of climate changes under the RCP4.5 scenario in the Yangtze River Basin based on CCLM[J]. *Progressus Inquisitiones de Mutatione Climatis*, 2013, 9(4): 246 - 251.】

[7] 高超, 张正涛, 陈实, 等. RCP4.5 情景下淮河流域气候变化的高分辨率模拟[J]. *地理研究*, 2014, 33(3): 467 - 477.

【GAO C, ZHANG Z T, CHEN S, et al. The high-resolution simulation of climate change model under RCP4.5 scenarios in the Huaihe River Basin[J]. *Geographical Research*, 2014, 33(3):467 - 477.】

[8] FISCHER T, MENZ C, SU B D, et al. Simulated and projected climate extremes in the Zhujiang River Basin, South China, using the regional climate model COSMO-CLM[J]. *International Journal of Climatology*, 2013, 33(14): 2988 - 3001.

[9] 黄金龙, 陶辉, 苏布达, 等. 塔里木河流域极端气候事件模拟与 RCP4.5 情景下的预估研究[J]. *干旱区地理*, 2014, 37(3): 490 - 498.

【HUANG J L, TAO H, SU B D, et al. Simulation of climate extreme events in the Tarim River Basin and projection under the RCP4.5 scenario[J]. *Arid Land Geography*, 2014, 37(3): 490 - 498.】

[10] 朱娴韵, 苏布达, 黄金龙, 等. 云南气候变化高分辨率模拟与 RCP4.5 情景预估[J]. *长江流域资源与环境*, 2015, 24(3): 476 - 481.

【ZHU X Y, SU B D, HUANG J L, et al. Simulation of climatic change in Yunnan Province and RCP4.5 scenario projected trend by CCLM[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, 24(3): 476 - 481.】

[11] 潘家华, 赵行姝, 陈正洪, 等. 湖北省应对气候变化的方案分析与政策含义[J]. *气候变化研究进展*, 2008, 4(5): 309 - 314.

【PAN J H, ZHAO X S, CHEN Z H, et al. Provincial climate change program: Hubei case study and its policy implications[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2008, 4(5): 309 - 314.】

[12] 许自成, 黎妍妍, 毕庆文, 等. 湖北烟区烤烟气候适生性评价及与国外烟区的相似性分析[J]. *生态学报*, 2008, 28(8): 3832 - 3838.

【XU Z C, LI Y Y, BI Q W, et al. Evaluation on climatic feasibility of tobacco-growing areas in Hubei and its similarity to that of foreign tobacco-growing area[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(8):3832 - 3838.】

[13] 李晓冬, 杜耘, 吴胜军, 等. 湖北作物气候生产力演变及其对气候变化的响应[J]. *农业系统科学与综合研究*, 2009, 25(3): 294 - 298.

【LI X D, DU Y, WU S J, et al. Evolvement and effects of climateproductivity on climate change in Hubei Province[J]. *System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture*, 2009, 25(3): 294 - 298.】

[14] 易灵伟, 杨爱萍, 刘文英, 等. 湖北中稻气候适宜度指标构建及其对产量影响的定量评估与应用[J]. 中国农学通报, 2015, 31(23):109 - 115.

【YI L W, YANG A P, LIU W Y, et al. Index construction of climatic suitability on middle-season rice in Hubei Province and quantitative evaluation and application of its effect on yield[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(23): 109 - 115.】

[15] 冯明, 纪昌明, 王丽萍, 等. 气候变化及其对湖北长江水文水资源的影响[J]. 武汉大学学报(工学版), 2006, 39(1): 1 - 5, 25.

【FENG M, JI C M, WANG L P, et al. Study on impact of climatic change on hydrology and water resources of Yangtze River reaches in Hubei Province[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2006, 39(1): 1 - 5, 25.】

[16] 王绍武, 罗勇, 赵宗慈, 等. 新一代温室气体排放情景[J]. 气候变化研究进展, 2012, 8(4): 305 - 307.

【WANG S W, LUO Y, ZHAO Z C, et al. New generation of scenarios of greenhouse gas emission[J]. Progressus Inquisitiones de Mutatione Climatis, 2012, 8(4): 305 - 307.】

[17] 吴佳, 高学杰. 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, 2013, 56(4): 1102 - 1111.

【WU J, GAO X J. A gridded daily observation dataset over China region and comparison with the other datasets[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(4): 1102 - 1111.】

[18] 汪高明. 湖北省近 47 年气温和降水气候特征分析[D]. 兰州: 兰州大学硕士学位论文, 2009.

【WANG G M. Analysis on climatic characteristics of temperature and precipitation in Hubei Province in recent 47 years[D]. Lanzhou: Master Dissertation of Lanzhou University, 2009.】