

RCP4.5情景下淮河流域气候变化的高分辨率模拟

高 超^{1,2}, 张正涛¹, 陈 实¹, 刘 青¹

(1. 安徽师范大学国土资源与旅游学院, 芜湖 241000;

2. 安徽省自然灾害过程与防控研究省级实验室, 芜湖 241003)

摘要: 利用CCLM高分辨率区域气候模式RCP4.5情景预估数据与淮河流域1960-2005年日尺度气象观测资料, 对比分析模式在试验期(1960-2005年)和预估期(2006-2040年)的模拟能力。结果表明: ① 试验期模式数据能较准确地模拟流域逐月平均温度时间变化特征, 相关系数达0.99(通过95%置信度检验); 日均温空间分布特征相关系数达0.72; 但在南部高海拔地区(安徽省霍山县和金寨县)精度不高; 极端最高(低)气温的空间相关性达0.77(0.88)。② 模式在试验期模拟的逐月平均降水量总体趋势与实测值变化一致, 相关系数达0.63(通过95%置信度检验); 对于旱的模拟与观测数据存在一定误差, 但整体趋势与其一致; 年均降水量和极端强降水空间分布相关系数分别达0.90和0.93, 模拟效果较好; 整体上, 模式对温度的模拟效果要好于降水模拟。③ RCP4.5情景下, 空间尺度上淮河流域未来温度和降水与观测期相比变幅小, 时间尺度上年均降水量无显著变化, 平均气温年际变化率约0.21℃/10a, 极端高温持续增长, 低温持续下降。

关键词: 气候模式; ECHAM6; CCLM; RCP4.5; 淮河流域

DOI: 10.11821/dlyj201403006

1 引言

随着全球变暖加剧, 气候变化及其影响评估已成为各国学者和政府共同关注的热点话题^[1]。政府间气候变化委员会第四次报告(IPCC-AR4)指出: 在不同排放情景下, 全球未来20年温度增幅为0.2℃/10a, 且温度增幅将会继续增加^[2]。利用气候系统模式设定不同排放情景预估气候变化成为研究热点之一。气候系统模式是定量描述气候系统变化规律的数值模型, 是预测未来气候变化和影响的最主要工具^[3]。现已有23个气候系统模式参与IPCC-AR4, 诸多学者对气候模式开展研究, 并获得了一定成果^[4-7]。对未来气候变化进行预估分析时, 广泛采用2000年IPCC在《排放情景特别报告》中定义的SRES(Special Report on Emissions Scenarios)排放情景^[8]。但SRES情景没有考虑应对气候变化的各种政策对未来排放的影响。因而, 为了协调不同科学研究机构和团队的相关研究工作, 强化排放情景对研究者和决策者研究和应对气候变化的参考作用, 并在更大范围内研究潜在气候变化和不确定性, IPCC决定为第五次评估报告开发以稳定浓度为特征的新情景: 代表性浓度路径(Representative Concentration Pathways, RCPs)^[8]。RCPs情景开发采用并行方

收稿日期: 2013-01-08; 修订日期: 2013-10-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(41101035); 国家重点基础研究发展计划(973)(2012CB955903); 教育部高校博士学科点专项科研基金项目(20113424120002, 20123424110001)

作者简介: 高超(1978-), 男, 安徽省全椒人, 博士, 副教授, 主要从事流域气候变化和水文响应研究。

E-mail: gaoqinzhao1@163.com

法, 可将气候、大气和碳循环预估 (Climate Modelings, CMs) 与排放和社会经济情景 (Integrated Assessment Models, IAMs) 有机结合起来, 提供气候变化对研究区影响、适应和脆弱性以及减排分析^[9, 10]。本文所用 ECHAM6 全球海气耦合模式为参与 IPCC-AR5 引用并参与比较的模式之一, 较之前使用的由德国马普气象研究所提供的 ECHAM5 模式^[3-5, 11], 其最大的优势在于 ECHAM6 模式模拟精度更高, 水平分辨率好于 T63 网格, 优化了短波辐射传输的表示, 完善了模式自身物理参数化过程, 更精细的刻画了陆面过程^[12]。

本文采用由 ECHAM6 驱动的区域气候模式 CCLM (COSMO Model in Climate Mode, COSMO-CLM 或 CCLM) 的 RCP4.5 情景数据^[13], 首先对该模式试验期 (1960-2005 年) 淮河流域的温度和降水进行模拟, 并与实际观测数据比较以评估模式模拟能力, 再利用模式输出的数据对流域 2006-2040 年气候变化进行预估, 实现 RCP4.5 情景下淮河流域气候变化的高分辨模拟研究。

2 研究区概况、数据来源与研究方法

2.1 研究区概况

淮河流域地处中国东部, 位于东经 111°55'-121°25', 北纬 30°55'-36°36', 介于长江和黄河流域之间。流域以北属暖温带区, 流域以南属北亚热带区。年平均气温在 11℃-16℃ 之间, 气温变化由北向南, 由沿海向内陆递增; 多年平均降水量约为 920 mm, 分布大致由南向北递减, 山区多于平原, 沿海大于内陆。

2.2 数据来源

研究数据包括实测气象数据和 CCLM 模式数据两部分。实测气象数据来源于中国气象局国家气象信息中心提供的 1960-2005 年淮河流域 128 个气象站点的逐日气温和降水量数据; 模式数据来源于区域气候模式 CCLM 模式的 RCP4.5 情景下输出的试验期流域 1960-2005 年 108 个格点逐日气温和降水量数据, 预估数据为 RCP4.5 情景下 CCLM 模式输出的流域 2006-2040 年逐日气温和降水量数据。

目前 IPCC 已识别了 4 类 RCPs (RCP8.5、RCP6、RCP4.5、RCP3-PD)。RCP8.5 为 CO₂ 排放参考范围 90 百分位数的高端路径, 其辐射强迫高于 SRES 中的高排放 (A2) 情景和化石燃料密集型 (A1F1) 情景; RCP3-PD 为比 CO₂ 排放参考范围低 10 百分位数的低端路径^[14]; RCP6 和 RCP4.5 都为中间稳定路径, 其路径形式均没有超过目标水平达到稳定, 但 RCP4.5 的优先性大于 RCP6, 其相当浓度约为 650CO₂-eq, 低于 RCP6 的 860CO₂-eq^[1]。另外就未来三大主要温室气体的排放量、浓度和辐射强迫时间变化趋势来看, 在 RCP4.5 情景下其走势将在 2040 年达到目标水平, 在 2070 年趋于稳定^[1, 15], 其时间变化与中国未来经济发展趋势较为一致, 适合中国国情, 符合政府对未来经济发展、应对气候变化的政策措施。且 RCP4.5 较之中排放 SRES-A1B 情景能更好的模拟综合情景开发过程, 将社会经济情景与气候变化结果有机统一起来, 因而本文选取 RCP4.5 情景数据。

最新的 CCLM 模式由“德国气象服务” (German Weather Service, GWD) 的局部模型发展而来, 是德国波茨坦气候变化研究所 (The Potsdam Institute for Climate Impact Research, PIK) 提供由 ECHAM6 驱动的非静力区域气候模式。早期 CCLM 模式专门为 ECHAM5 全球海气耦合模式服务, 后经 ECHAM6 优化后输入降尺度模型, 降低了不确定性等自身缺陷, 改进后的最新 CCLM 模式可更成熟的应用于天气和气候模拟与预测^[13]。模式模拟时间尺度可达百年, 空间分辨率介于 1-50 km 之间^[16]。本文应用的模式数据水平分辨率为 0.5°×0.5°。

2.3 研究方法

本文拟通过温度和降水等气象要素的平均态和极端态的时空分布特征对比,来分析CCLM模式RCP4.5情景数据在淮河流域的模拟能力(图1)。具体通过计算观测数据(1960-2005年)和试验期(1960-2005年)逐年标准化降水指数SPI(Standardized Precipitation Index, SPI),对比分析其变化曲线,检验模式模拟精度。SPI由T.B. McKee于1993年提出^[17],该指数具有空间连续性,且结构简单,易于应用,能较好地反映不同时间尺度和空间尺度的干旱强度和持续时间,在分析干旱特征方面具有独特的优势,因而被广泛用于监测和评估干旱状况^[18-20]。具体干旱等级如表1所示^[21]。

同时,评估模式对流域温度和降水极端值的模拟情况,对淮河流域各站点日最高温度、降水数据进行升序排列,并选择逐年95%的观测值作为门限峰值,利用超定量法POT(Peak Over Threshold)分别确定每一个站点的降水和温度极端事件样本序列,其形成的新序列平均值就被定义为极端高温、降水事件的阈值,根据此方法,选取5%的日最低气温数据序列平均值作为淮河流域极端低温事件的阈值,最后利用CCLM模式的RCP4.5情景数据对淮河流域未来(2006-2040年)气候变化进行预估。

3 试验期模式模拟效果

3.1 温度

3.1.1 逐月平均温度 对于温度的模拟,多数现有气候模式模拟能力较强^[3-5]。从平均温度变化趋势上看,CCLM模式输出结果和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(图2),相关系数高达0.99,各月变化幅度也保持一致。从数值上来看,淮河流域观测期各月平均温度变幅介于0.46~27.14℃之间,CCLM模拟平均温度变幅介于2.12~28.9℃,观测期年均温为14.49℃,试验期年均温为16.42℃,表明CCLM模拟值在各月均大于观测值。而从纳西效率系数上判断,两者之间的纳西效

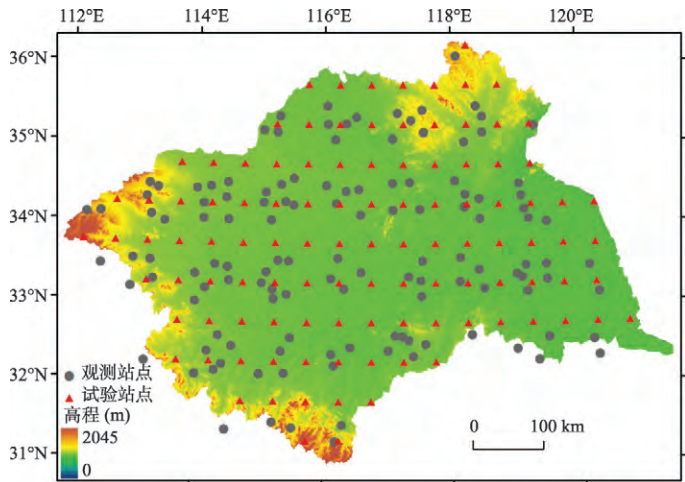


图1 研究区气象站点及CCLM模式格点
Fig. 1 Observational stations and CCLM grids in the study area

表1 SPI值干旱等级划分

Tab. 1 The categories of SPI

等级	类型	SPI值
1	无旱	$-0.5 < SPI$
2	轻旱	$-1.0 < SPI \leq -0.5$
3	中旱	$-1.5 < SPI \leq -1.0$
4	重旱	$-2.0 < SPI \leq -1.5$
5	特旱	$SPI \leq -2.0$

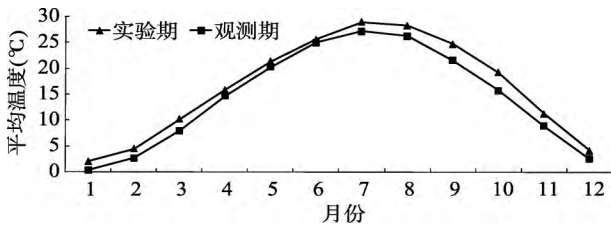


图2 淮河流域1960-2005年逐月平均温度
Fig. 2 Monthly average temperature in the Huaihe River Basin during 1960-2005

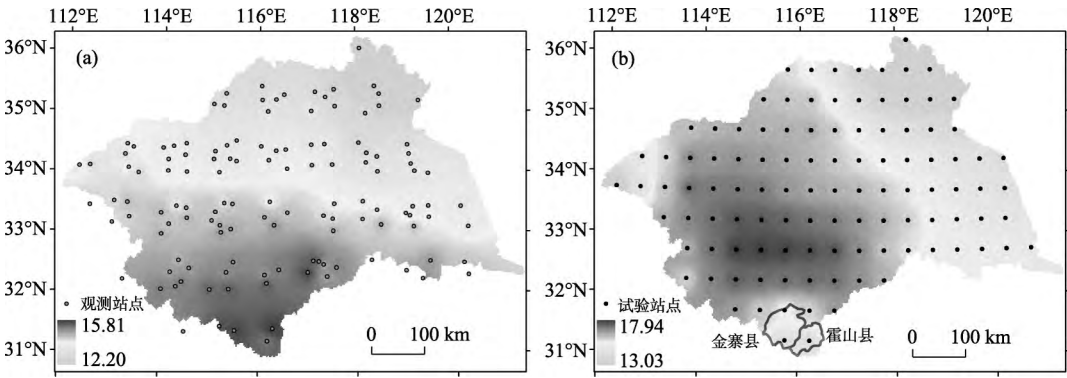


图3 淮河流域1960-2005观测期(a)和试验期(b)日均温空间分布
Fig. 3 Spatial distribution of daily average temperature in observation period (a) and experimental period (b) in the Huaihe River Basin

率值为0.95。虽模拟温度稍高于观测值，但总体模式模拟效果精度非常好。

3.1.2 日均温空间分布 对比分析观测期和试验期各站点年均温度空间分布特征(图3), CCLM模拟结果淮河流域高温中心稍向北移动, 但总体表现出内陆温度高, 沿海温度低, 南部温度高, 北部温度低的分布规律, 空间相关系数为0.72。此外, 处于最南部的两个点的模拟值明显低于观测值, 这两个格点分别位于安徽省霍山县和金寨县, 二县地处大别山区, 海拔垂直分布明显, 地处低纬度地区, 温度呈逐年上升趋势, 且温度变幅较大^[22]。在1960-2005年中, 其低温日数(低于零度)分别为758天和804天, 多于同纬度或相邻纬度格点低温日数(如425天)一倍, 低温累积积温也明显高于相邻格点。造成此种模式模拟结果, 可能受该地区所处下垫面地形、观测气象站点位置及地表复杂程度综合影响所致^[23], 导致CCLM无法准确模拟出霍山县和金寨县特殊气候现象, 从而导致日均温出现“异常”情况。

3.1.3 极端温度事件 比较极端高温阈值空间分布图(图4a1、b1), CCLM模拟的极端高温阈值结果较准确地反映了淮河流域极端高温的空间分布, 再现了流域高温中心分布, 空间相关系数为0.77; 比较淮河流域极端低温阈值分布图(图4a2、b2), CCLM模拟的极端低温也较为准确地反映出了淮河流域实际低温中心, 空间相关系数为0.88, 说明其模拟精度较高。而如前文叙述, 霍山县和金寨县由于其特殊的下垫面地形及地表复杂程度影响, CCLM无法精确模拟, 导致模拟效果出现偏差。

3.2 降水

3.2.1 逐月平均降水量 CCLM模拟结果与观测期逐月平均降水量的总体趋势相同(图5), 相关系数为0.63。流域季节性降水以春、夏季降水为主, 约占全年降水量的73%。但两者也存在较大的偏差, 差异时段主要集中在淮河流域主汛期(6-9月), 实际观测降水量在主汛期急剧升高, 在7月份达到峰值206.99 mm, 并随着汛期的结束降低至32.84 mm, 主汛期总平均降水量达到了549.87 mm, 占全年总降水量的64%。而CCLM模拟的结果则是全年各月降水量平缓变化, 主汛期降水量没有剧烈的波动现象, 汛期总平均降水量只有288.23 mm, 占全年总降水量的43%。这从一定程度上说明CCLM在淮河流域主汛期降水量的模拟有所不足, 需要进一步的完善。

3.2.2 标准化降水指数及误差分析 从SPI变化趋势上看(图6), 由CCLM模式得出的SPI变化曲线与观测SPI总体趋势是一致的, 能较准确地反映出淮河流域46a来的旱情旱灾情况。观测期SPI值变幅介于-2.5~1.18, 试验期变幅介于-2.1~0.5, 标准差分别为观测期

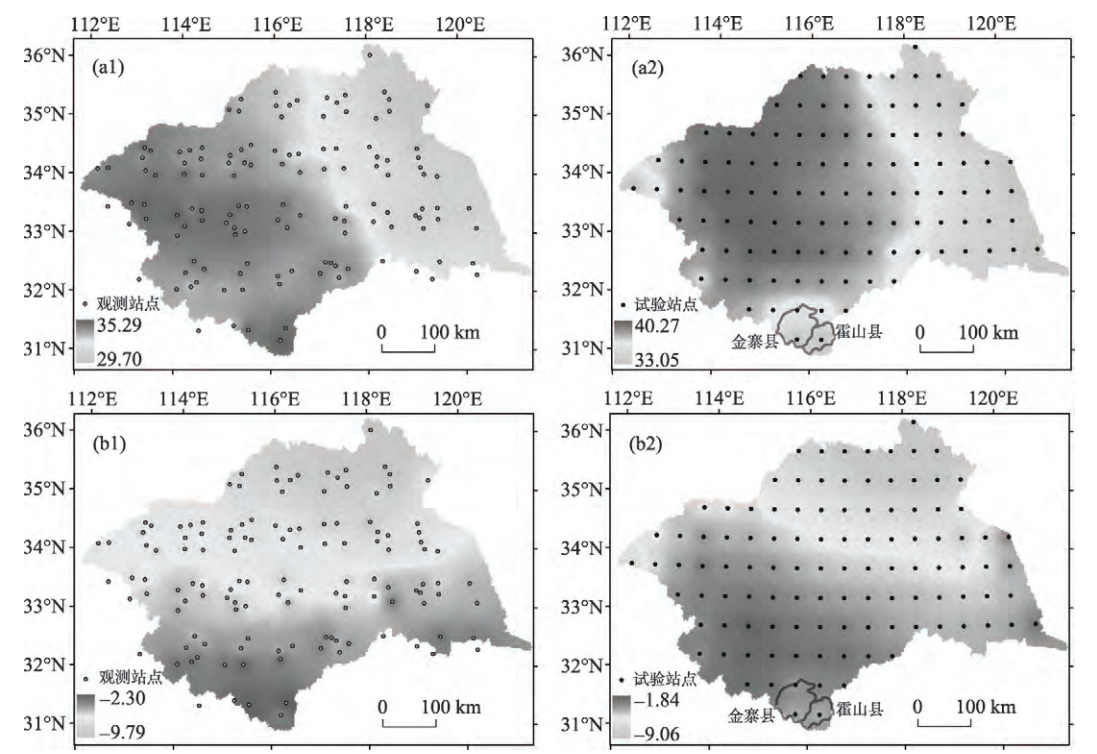


图4 淮河流域极端高温和极端低温阈值空间分布 (a1, b1 为观测期极端高/低温极端阈值, a2, b2 为试验期极端高/低温极端阈值)

Fig. 4 Spatial distribution of extreme high and low temperatures in the Huaihe River Basin (a1 and b1 are threshold values of maximum and minimum temperatures in observation period; a2 and b2 are threshold values in experimental period)

0.617 和试验期 0.620, 说明曲线波动变化大致相同。此外, 观测期共出现较重旱情旱灾 11 次, 分别为中旱 7 次, 重旱 3 次, 特旱 1 次; 而试验期共出现较重旱情旱灾 12 次, 分别为中旱 9 次, 重旱 2 次, 特旱 1 次。而就个例来讲, CCLM 精准模拟了 1988 年流域出现的严重旱情旱灾, 与观测结果吻合。

但是从图中也可以发现某些年份 (1966、1981、1991 和 2003 年) 出现了较大的偏差, 出现这种情况的可能原因: ① 以上年份的降水空间分布出现了较大偏差 (图 7), 如 1966 年和 1981 年观测期年均降水空间分布与 CCLM 空间分布出现了相反的“极端情况”, 从而导致 CCLM 得出的 SPI 与实际观测值有较大差别; ② 淮河流域受降水季节内分配异常以及地形因素共同作用, 极易出现旱涝急转的现象, 特别是近 10a 来, 旱涝急转现象出现频率约为 4 年一次^[24], 1991 年发生洪涝灾害后持续 3 个月干旱, 2003 年也属于这种情况。CCLM 无法模拟此特殊现象, 所以造成 SPI 出现较大偏差。

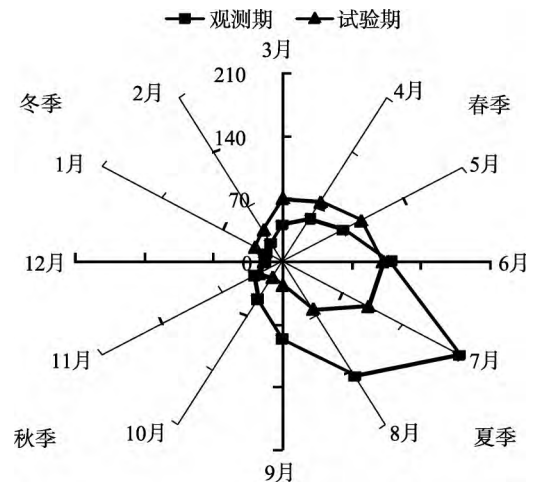


图5 淮河流域 1960-2005 年逐月平均降水量变化趋势
Fig. 5 The trends of monthly average precipitation in the Huaihe River Basin during 1960-2005

旱涝急转现象出现频率约为 4 年一次^[24], 1991 年发生洪涝灾害后持续 3 个月干旱, 2003 年也属于这种情况。CCLM 无法模拟此特殊现象, 所以造成 SPI 出现较大偏差。

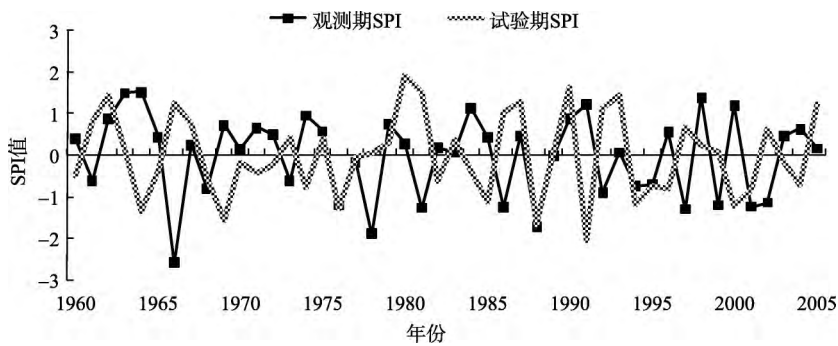


图6 淮河流域1960-2005观测期和试验期SPI值变化曲线

Fig. 6 Observation and experimental period of SPI value variation curve during 1960-2005 in the Huaihe river basin

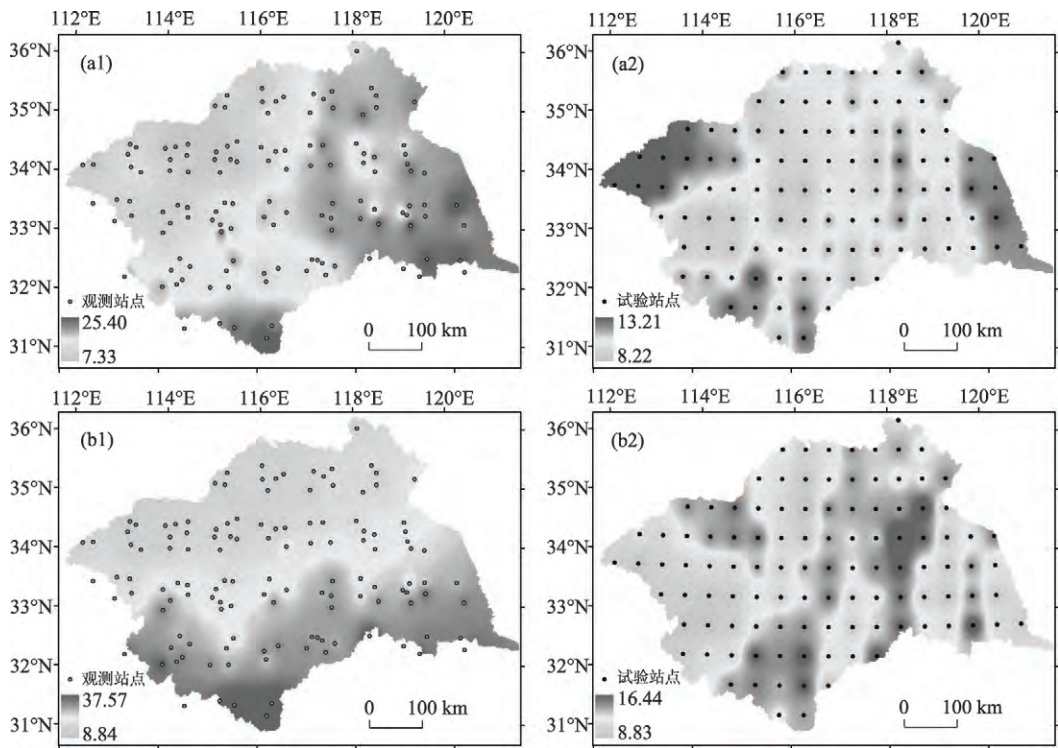


图7 1966和1981年观测期(a1, b1)、试验期(a2, b2)平均降水量空间分布图

Fig. 7 Spatial distribution of average precipitation in observation (a1, b1) and experimental periods (a2, b2) in 1966 and 1981

3.2.3 年均降水量空间分布 通过对比观测期和试验期年均降水量空间分布图可以看出(图8, 图9), CCLM能较为准确地反映出淮河流域实际降水中心, 空间相关系数高达0.90, 模拟效果较好。降水空间分布呈现流域南部降水多, 北部降水少、沿海降水多、内陆降水少的特征。观测期降水量变幅介于596.23~1384.74 mm, 试验期变幅介于454.56~1109.8 mm, 模式模拟降水量稍低于观测值。

3.2.4 极端强降水空间分布 从95%极端阈值空间分布特征可以分析出, 由CCLM模拟出的极端强降水阈值空间分布与观测阈值几乎相同, 能够十分准确地反映出实测淮河流域强降水中心, 并得益于模式的高分辨率模拟, 空间相关系数高达0.93。

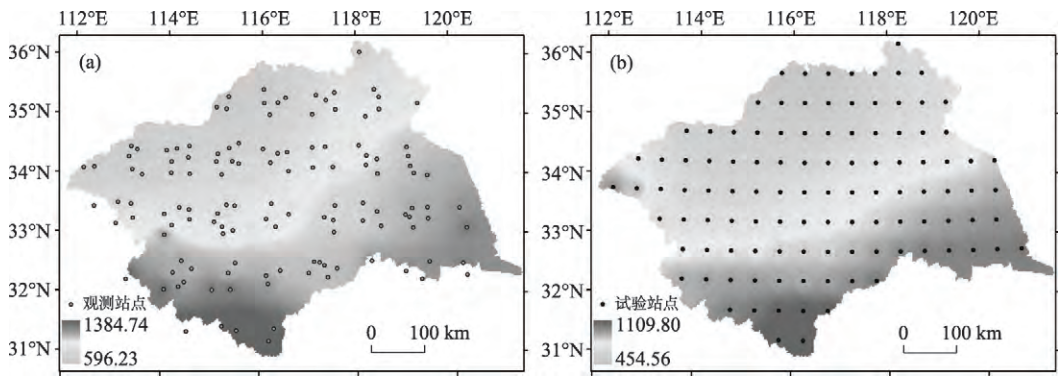


图8 淮河流域1960-2005观测期(a)和试验期(b)年均降水量空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of annual average precipitation in observation period (a) and experimental period (b) in the Huaihe River Basin during 1960-2005

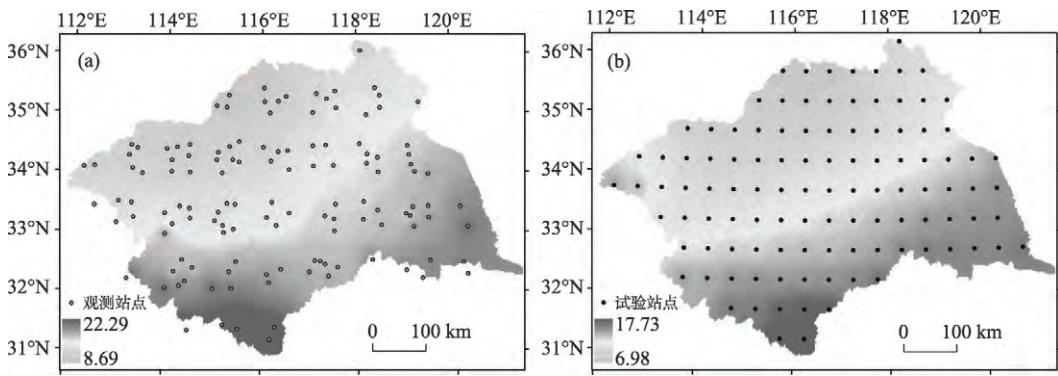


图9 淮河流域观测期(a)和试验期(b)95%极端强降水时间空间分布

Fig. 9 Spatial distribution of 95% of the extreme precipitation in observation period (a) and experimental period (b) in the Huaihe River Basin

4 未来情景预估

经计算表明，CCLM 试验期（1960-2005 年）模拟结果在时间和空间上都基本与观测数据吻合，说明 CCLM 模式较适用于淮河流域，因此其预估结果具有一定的参考价值。

4.1 温度情景预估

4.1.1 各站点年均温预估 在 RCP4.5 情景下，未来淮河流域温度波动较试验期大致相同，标准差分别为试验期 0.670 和预估期 0.667，波动变化相比而言不大。就流域整体而言，年平均温度仍呈现温度逐年上升的趋势，预估期总体年均温度为 17.28℃，其平均气温年际变化率约为 0.21℃/10a。这与 IPCC-AR4 报告指出的在不同排放情景下，全球未来温度增幅约 0.2℃/10a^[1, 2]情况吻合。

4.1.2 温度年均温、极端气温阈值空间分布 RCP4.5 情景下，未来淮河流域温度时空变化不大，较观测期没有明显变化（图 10a），空间相关系数为 0.72。预估年均温介于 13.89~18.79℃之间变化，而观测期年均温介于 12.20-15.81℃，说明到 21 世纪 40 年代，淮河流域温度整体升高，与观测期各站点平均温度相比，升高幅度约为 2.79℃。

淮河流域高温和低温中心时空分布仍与试验期保持一致（图 10b、10c）。从温度数值上看，预估期极端高温介于 33.09~41.52℃，观测期为 29.70~35.19℃；预估期极端低温介

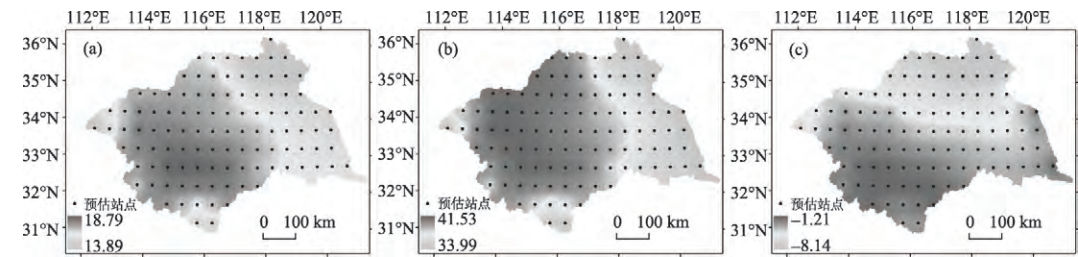


图 10 淮河流域 2006-2040 年年均温(a)、极端温度阈值(b 为高温、c 为低温)空间分布

Fig. 10 Spatial distribution of the annual average temperature (a), and threshold value of extreme temperature (b is maximum temperature, and c is minimum temperature)

于-8.13~-1.20℃之间，观测期为-9.79~-2.30℃，表明流域极端高温的温度变幅要明显高于极端低温温度变幅，极端高温增长速率也因此高于极端低温，总体表现为高温持续增长，低温持续降低。

4.2 降水情景预估

4.2.1 逐年平均降水量 相对于 CCLM 试验期年降水量均值，RCP4.5 情景下预估的淮河流域降水量振荡幅度有所减少，标准差分别为试验期 148.13 和预估期 113.39，表明出现极端洪涝灾害的次数可能有所减少。同时预估期年平均降水量约为 663.49 mm，与试验期年平均降水量 666.15 mm 持平，预估期年均降水量介于 468.12~904.94 mm 之间变化，试验期介于 390.43~979.70 mm，说明未来淮河流域年均降水量不会有太大变化。

4.2.2 各站点年平均降水量与极端强降水空间分布 在 RCP4.5 情景下，未来淮河流域降水主要集中在流域南岸和沿海地区（图 11a），与试验期年均降水量空间分布相同。对于极端强降水空间分布，流域未来强降水中心不会出现太大变化（图 11b），即分布在流域南岸和沿海地区，而流域北岸和流域内陆地区降水强度小，其时空分布与观测期十分一致。

5 结论与讨论

本文评估由 ECHAM6 驱动的最新 CCLM 区域模式 RCP4.5 情景数据对淮河流域降水和温度的模拟精度，并预估了淮河流域未来 40a（2006-2040 年）气候变化，得出以下主要结论：

（1）淮河流域模式气候变化预估研究中，有学者通过由 ECHAM5 驱动的区域气候模

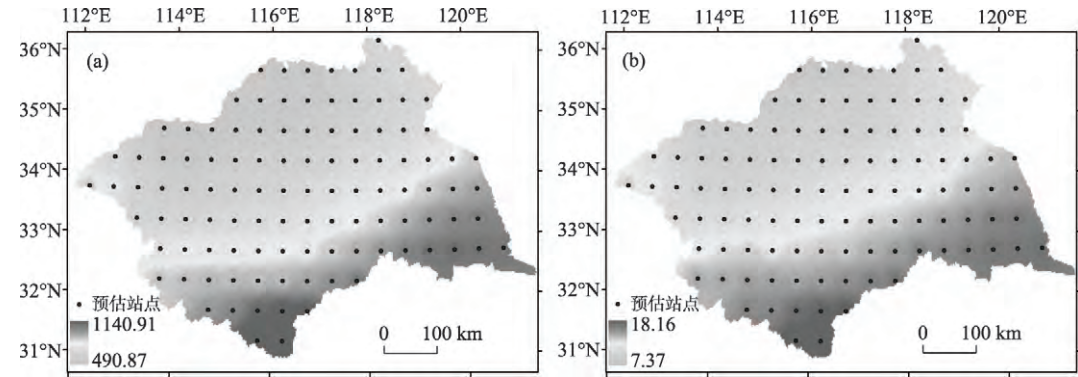


图 11 淮河流域预估期年均降水量(a)和极端强降水事件(b)空间分布

Fig. 11 Spatial distribution of the annual average precipitation (a) and extreme precipitation events (b) in the Huaihe River Basin

式CCLM的SRES情景数据对淮河流域降水变化做了预估研究,得出SRES-A1B情景下淮河流域2011-2050年降水对降水空间分布特征预估效果较好^[25]。相比之下,本文采用参与IPCC-AR5的ECHAM6模式与新情景RCP4.5,其优势使预估期数据更有说服力^[8-10];此外,对淮河流域气候的模拟评估,不但要有降水数据,还至少需要有温度数据,本文结合降水和温度对淮河流域进行模拟和预估,得出CCLM的RCP4.5情景下在淮河流域对温度的模拟精度要好于降水的模拟。

(2) 针对淮河流域旱涝格局变化研究中,有学者采用ECHAM5/MPI-OM气候模式2001-2050年流域逐月降水资料,在三种排放情景下(A2、A1B、B1)计算其标准化降水指数,分析得出淮河流域在2001-2050年除A2情景外,在A1B和B1情景下均具有显著的湿润化趋势^[4],本文通过对CCLM的RCP4.5情景数据进行分析,发现淮河流域未来40a无显著的湿润化趋势。本文时间尺度为日,模式分辨率更是达到 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$,较文献[5]的时间尺度为月,模式分辨率为 $1.875^{\circ}\times 1.875^{\circ}$ 更加精细,高分辨率模拟减少了模式模拟和预估的不确定性,对研究区未来预估的可信度将有一定程度的提高。

(3) CCLM对温度的模拟十分准确。模式模拟和实测逐月平均温度相关系数达到0.99。平均温度的空间分布相关系数也达到0.72,同时准确地模拟了1961-2005年升温趋势。模式对于极端气温的模拟也十分准确,极端高温分布的空间系数为0.77,极端低温分布达到0.88。

(4) 针对淮河流域降水模拟能力的研究中,有学者利用区域气候模式RegCM3对淮河流域1982-2001年夏季(汛期)降水集合模拟能力进行评估,得出模式对流域降水气候平均态有较强模拟能力,但对汛期6、7月份降水量,极端强降水及其空间分布的模拟能力有待提高^[26]。本文采用CCLM对淮河流域进行高分辨率降水模拟,发现模式在模拟各年逐月平均降水量的时候出现偏差,主要偏差集中在淮河流域汛期阶段;但是模式对于极端降水空间分布模拟非常准确,较好地再现了淮河流域的强降水中心,其空间相关系数均高达0.9以上。此外,通过对标准化降水指数的计算,CCLM能够较准确地再现淮河流域46a年来的旱情旱灾,如精确模拟了1988年流域大旱。

(5) 在RCP4.5情景下,平均温度升温速率为 $0.21^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,极端高温的温度变幅和升温速率要高于极端低温,总体表现为高温持续增长,低温持续降低。预估期下温度的时空变化不大,高温中心和低温中心与观测期空间分布大致相同。未来淮河流域逐年降水量不会出现太大变化,甚至发生极端洪涝事件的可能性会下降,强度可能减少;预估期降水空间分布与观测期相比变化不大,强降水中心在预估期不会有太大改变。

(6) CCLM对淮河流域的特殊现象模拟能力不足,有待提高。对降水汛期后旱涝急转现象的模拟,对霍山县和金寨县等特殊下垫面地形及地表复杂程度影响下气候的模拟效果欠佳。CCLM在模拟淮河流域气候变化中,需要完善对特殊地形地貌和气候现象的模拟,提高模拟的精确性和减少预估的不确定性。

致谢: 德国波兹坦气候影响研究所 Dr. Frank Wechsung 和 Christoph Menz 提供RCP 情景下的CCLM数据。

参考文献(References)

- [1] IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press, 2007.
- [2] 江志红, 张霞, 王冀. IPCC-AR4模式对中国21世纪气候变化的情景预估. 地理研究, 2008, 27(4): 787-799. [Jiang Zhihong, Zhang Xia, Wang Ji. Projection of climate change in China in the 21st century by IPCC-AR4 models.

- Geographical Research, 2008, 27(4): 787-799.]
- [3] 曾小凡, 李巧萍, 苏布达, 等. 松花江流域气候变化及ECHAM5模式预估. 气候变化研究进展, 2009, 5(4): 215-219. [Zeng Xiaofan, Li Qiaoping, Su Buda, et al. Change and projection of climate in the Songhua River Basin. Advance in Climate Change Research, 2009, 5(4): 215-219.]
- [4] 翟建青, 曾小凡, 苏布达, 等. 基于ECHAM5模式预估2050年前中国旱涝格局趋势. 气候变化研究进展, 2009, 5(4): 220-225. [Zhai Jianqing, Zeng Xiaofan, Su Buda, et al. Patterns of dryness/wetness in China before 2050 projected by the ECHAM5 Model. Advance in Climate Change Research, 2009, 5(4): 220-225.]
- [5] 高超, 姜彤, 翟建青. 过去 (1958-2007) 和未来 (2011-2060) 50年淮河流域气候变化趋势分析. 中国农业气象, 2012, 33(1): 8-17. [Gao Chao, Jiang Tong, Zhai Jianqing. Analysis and precipitation of climate change in the Huaihe River Basin. Chinese Journal of Agrometeorology, 2012, 33(1): 8-17.]
- [6] 郝振纯, 鞠琴, 王璐, 等. 气候变化下淮河流域极端洪水情景预估. 水科学进展, 2011, 22(5): 605-614. [Hao Zhenchun, Ju Qin, Wang Lu, et al. Prediction of extreme floods in Huaihe River basin under climate change. Advances in Water Science, 2011, 22(5): 605-614.]
- [7] 陶辉, 白云岗, 毛伟峰. CMIP3气候模式对北疆气候变化模拟评估及未来情景预估. 地理研究, 2012, 31(4): 3-7. [Tao Hui, Bai Yungang, Mao Weiyl. Assessment of CMIP3 climate models and projected climate changes in northern Xinjiang. Geographical Research, 2012, 31(4): 3-7.]
- [8] Moss R, Edmonds J, Hibbard K, et al. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. Nature, 2009, 463: 747-756.
- [9] 陈敏鹏, 林而达. 代表性浓度路径下的全球温室气体减排和对中国的挑战. 气候变化研究进展, 2010, 6(6): 436-442. [Chen Minpeng, Lin Erda. Global greenhouse gas emission mitigation under representative concentration pathways scenarios and challenges to China. Advances in Climate Change Research, 2010, 6(6): 436-442.]
- [10] Richard H Moss, Jae A Edmonds, Kathy A Hibbard et al. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. Nature, 2010, 463: 747-756.
- [11] 高超, 曾小凡, 苏布达, 等. 2010-2100年淮河径流量变化情景预估. 气候变化研究进展, 2010, 6(1): 15-21. [Gao Chao, Zeng Xiaofan, Su Buda, et al. Projected stream flow in the Huaihe River in 2010-2100. Advances in Climate Change Research, 2010, 6(1): 15-21.]
- [12] 林而达, 刘颖杰. 温室气体排放和气候变化新情景研究的最新进展. 中国农业科学, 2008, 41(6): 1700-1707. [Lin Erda, Liu Yingjie. Advance in new scenarios of greenhouse gas emission and Climate Change. Scientia Agricultura Sinica, 2008, 41(6): 1700-1707.]
- [13] Burkhard Rockel, Andreas Will, Andreas Hense, et al. The regional climate model COSMO-CLM. Meteorologische Zeitschrift, 2008, 17(4): 347-348.
- [14] Van Vuuren D P, Johannes F, Lamarque J F, et al. Work plan for data exchange between the integrated assessment and climate modeling community in support of Phase-0 of scenario analysis for climate change assessment (representative community pathways). USA: IPCC, 2008.
- [15] Riahi K, Nakicenovic N. Greenhouse gases-integrated assessment. Technological Forecasting and Social Change, 2007, 74(7): 231-239.
- [16] Bjorn Stevens, Marco Giorgetta, Monika Esch, et al. The Atmospheric Component of the MPI-M Earth System Model: ECHAM6. Journal of Geophysical Research, 2012: 2-21.
- [17] Thomas B McKee, Nolan J, Doesken, et al. The relationship of drought frequency and duration to the time scales. Eighth Conference on Applied Climatology, 1993: 7-12.
- [18] 翟禄新, 冯起. 基于SPI的西北地区气候干湿变化. 自然资源学报, 2011, 26(5): 847-857. [Zhai Luxin, Feng Qi. Dryness/wetness climate variation based on standardized precipitation index in Northwest China. Journal of Natural Resources, 2011, 26(5): 847-857.]
- [19] 赵林, 武建军, 吕爱峰, 等. 黄淮海平原及其附近地区干旱时空动态格局分析. 资源科学, 2011, 33(3): 468-476. [Zhao Lin, Wu Jianjun, Lv Aifeng, et al. Spatial and temporal analysis of drought over the Huang-Huai-Hai Plain and its surroundings based on the standardized precipitation index. Resources Science, 2011, 33(3): 468-476.]
- [20] 周磊, 武建军, 吕爱峰, 等. 华北不同地区覆盖类型区干旱演变特征. 地理研究, 2012, 31(4): 2-10. [Zhou Lei, Wu Jianjun, Lv Aifeng, et al. Drought evolution of different land cover regions in North China. Geographical Research, 2012, 31(4): 2-10.]
- [21] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 标准编号气象干旱等级. 中华人民共和国国家标准 BT/T 20481-2006. 北京: 2006, 50-51. [General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the Peoples Republic of China (AQSIQ), China National Standardizing Committee. Classification of Meteorological Drought Category//National Standard BT/T 20481-2006. Beijing, 2006: 50-51.]
- [22] 章国材, 毕宝贵, 鲍媛媛, 等. 2003年淮河流域强降水大尺度环流特征及成因分析. 地理研究, 2004, 23(4):

- 795-804. [Zhang Guocai, Bi Baogui, Bao Yuanyuan, et al. The features of the large-scale circulation leading to catastrophic flood over the Huaihe river basin during the summer of 2003 and cause exploration. *Geographical Research*, 2004, 23(4): 795-804.]
- [23] 吴迪, 裴源生. 区域气候模式 RegCM3 在海河流域的初步应用. *人民长江*, 2010, 41(3): 42-47. [Wu Di, Pei Yuansheng. Preliminary application of regional climate model RegCM3 in Huaihe River Basin. *Yangtze River*, 2010, 41(3): 42-47.]
- [24] 王胜, 田红, 丁小俊, 等. 淮河流域主汛期降水气候特征及“旱涝急转”现象. *中国农业气象*, 2009, 30(1): 31-34. [Wang Sheng, Tian Hong, Ding Xiaojun, et al. Climate characteristics of precipitation and phenomenon of drought-flood abrupt alternation during main flood season in Huaihe River Basin. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2009, 30(1): 31-34.]
- [25] 谈丰, 苏布达, 高超, 等. 高精度区域气候模式对淮河流域降水的模拟评估. *长江流域资源与环境*, 2012, 21(10): 1236-1242. [Tan Feng, Su Buda, Gao Chao, et al. High-resolution regional climate model (CCLM) for simulation of precipitation in the Huaihe River Basin, China. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2012, 21(10): 1236-1242.]
- [26] 宗培书, 王会军. RegCM3 对中国淮河流域降水模拟能力的检验及分析. *气象学报*, 2012, 70(2): 253-260. [Zong Peishu, Wang Huijun. Evaluation and analysis of RegCM3 simulated rainfall over the Huaihe River Basin of China. *Acta Meteorologica Sinica*, 2012, 70(2): 253-260.]

The high-resolution simulation of climate change model under RCP4.5 scenarios in the Huaihe River Basin

GAO Chao^{1,2}, ZHANG Zhengtao¹, CHEN Shi¹, LIU Qing¹

(1. College of Territorial Resources and Tourism, Anhui Normal University, Wuhu 241000, Anhui, China;

2. Anhui Key Laboratory of Natural Disaster Process and Prevention, Wuhu 241003, Anhui, China)

Abstract: Based on estimated data of the high-resolution simulation of climate change model under RCP4.5 (Representative Concentration Pathways) scenarios, combining with daily observed date from 1960 to 2005 in the Huaihe River basin, this paper contrasts and analyses the simulation ability of model between trial period (1960-2005) and estimated period (2006-2040). The results show that trial period data of CCLM (COSMO model in climate mode, COSMO-CLM or CCLM) can accurately simulate monthly average temperature and the correlation coefficient is 0.99 (pass the 95% confidence test); beside, the correlation coefficient of spatial distribution of average daily temperature is 0.72. However it is relatively low in the south of high altitude area (Huoshan and Jinzhai counties in Anhui province) and the spatial correlation of maximum (minimum) extreme temperature is 0.77 (0.88). Furthermore, the overall trend of monthly average precipitation is in line with the observed date and the correlation coefficient is 0.63 (pass the 95% confidence test). SPI reveals that it has errors for simulating drought, but the overall trend reaches consensus. Overall, the simulated results of temperature are better than those of the precipitation. Under RCP4.5 scenarios, the amplitude of spatial distribution of future temperature and precipitation are relatively small at spatial scale, and the annual average precipitation has no significant change at time scale. The interannual variation of average temperature is 0.21°C/10a. The threshold values of maximum and minimum temperatures show that the maximum temperature would continue to rise and the minimum temperature would decline.

Key words: climate model; ECHAM6; CCLM; RCP4.5; Huaihe River Basin