

分辨率和陆面方案对长江流域短期气候预测影响

张录军¹, 王 乐¹, 邢雯慧², 黄 勇³, 张雅琦⁴, 刘树棣⁵

(1. 南京大学中国气象局-南京大学气候预测研究联合实验室, 江苏 南京 210023;

2. 长江水利委员会水文局, 湖北 武汉 430010; 3. 广东电力科学研究院, 广东 广州 510080;

4. 三峡水利枢纽梯级调度通信中心, 湖北 武汉 430010; 5. 山东省惠民县气象局, 山东 惠民 251700)

摘要: 利用区域气候模式 RegCM4.5, 分别选取不同陆面参数化方案和空间分辨率, 对 5 个长江流域降水异常年份进行短期气候回报试验, 分析对气温和降水预测效果的影响及其最优组合。结果表明: 空间分辨率的提高可以改善流域降水和气温的预测性能; 而不同陆面方案引起的地表净辐射能量分布不同及其地表蒸散差异, 最终导致流域内气温和降水预测效果不一致。RegCM(CLM4.5+30 km)对流域内小雨预测结果最好, 而 RegCM(BATS+30 km)预测流域内大雨和暴雨效果最优; RegCM(CLM3.5+30 km)对流域内气温预测能力最好。

关键词: 区域气候模式(RegCM4.5); 预测; 空间分辨率; 陆面参数化方案; 长江流域

中图分类号: P461 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2016)06-0800-10

区域气候模式是进行区域气候模拟和预测的重要工具。在区域模式中, 各种物理过程对空间尺度大小具有不同的敏感性, 特别是影响局地强降水、热浪等极端事件的物理过程, 对空间分辨率十分敏感^[1]; 而陆面过程是气候系统的重要组成部分, 陆-气之间的能量和物质交换过程是引起大气环流异常和气温及降水变化的重要成因^[2]。因此, 研究模式空间分辨率和陆面方案对气象预测(或模拟)效果的影响具有重要意义。Olsson 和 Berg^[3]发现区域气候模式 RCA3 中空间分辨率的提高有利于局地尺度降水的模拟; 刘德强和冯杰^[4]指出 GRAPES_MES 模式中水平分辨率的改变对中国东部区域 3~7 d 的降水预报有重要影响; 刘向培^[5]发现, 区域气候模式 RegCM4 中采用不同陆面方案会造成模拟地表蒸发和潜热通量的差异, 进而影响中国降水模拟。长江流域地形复杂、植被多样, 持续性强降水、热浪等极端天气气候事件频发, 对陆面方案和空间分辨率提出了更高的要求。刘景卫等^[6]发现大气模式 LMDZ4 中分辨率的改变对长江流域降水模拟具有重要影响; 曾新民等^[7]指出天气预报(Weather Research Forecast, WRF)模式中改进陆面方案可以提高模式对长江流域暴雨的模拟能力。从研究对象来看, 前人的研究大多单一地分析分辨率或陆面方案对气候预测(模拟)的作用, 但针对二者综合效应对气候预测(模拟)影响的研究较少; 从时间尺度来看, 目前的研究主要针对分辨率或陆面方案在 3~7 d 的天气预报中的作用, 而关于二者在长江流域短期气候(30~90 d)预测中作用的研究相对匮乏。

因此, 本文利用 RegCM4.5 模式, 选取 CLM3.5、CLM4.5、BATS 陆面参数化方案和 30 km、60 km 分辨率对长江流域汛期降水异常年份气候进行回顾性预测, 并结合长江流域 811 个台站气温和降水数据对数值预测结果进行评估分析, 研究不同陆面参数化方案和分辨率对长江流域短期气候预测性能的影响, 找出二者在长江流域短期气候预测中的最优组合。

收稿日期: 2016-04-11; 网络出版时间: 2016-11-17

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20161117.0910.002.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40975040); 中国南方电网有限责任公司科技项目(K-GD2015-0246)

作者简介: 张录军(1970—), 男, 吉林延边人, 副教授, 主要从事气候预测方面研究。E-mail: ljzhang@nju.edu.cn

通信作者: 王乐, E-mail: 821616952@qq.com

1 模式简介和方案设计

1.1 区域气候模式 RegCM4.5

意大利国际理论物理中心开发的 RegCM 系列模式是全球最具代表性的区域气候模式之一。该中心最新发布的 RegCM4.5 模式在原有 BATS 陆面参数化方案的基础上又增加了 CLM 方案,包括 CLM3.5 和 CLM4.5。

1.2 陆面方案选取

目前,BATS、CLM3.5 和 CLM4.5 方案是国内外使用较广泛和认可度较高的 3 个陆面方案。Steiner 等^[8]指出,BATS 和 CLM 陆面方案拥有一些共同点,但在反照率、表面通量、土壤湿度结构、径流、植被冠层辐射、光合作用和积雪处理等方面均存在差异,其中 CLM 方案刻画的植被、积雪和土壤中的物理过程更为详细。CLM4.5 方案是在 CLM3.5 方案的基础上发展起来的,宋耀明等^[9]指出,与 CLM3.5 方案相比,CLM4.5 方案引入了新的迭代方案、湖泊方案,还改进了土壤水文、植被冠层辐射和光合作用等过程。

这 3 种陆面方案在反照率、表面通量、植被冠层辐射、光合作用和土壤水文过程等方面的差异会引起地表感热、潜热通量和地表水汽蒸散等预测的偏差,而这些差异最终会影响气温和降水的预测效果。因此,本文中选取 BATS、CLM3.5 和 CLM4.5 三种陆面方案。

1.3 方案设计

本文预测区域如图 1 所示,中心位于(29°30' N,106° 00'E),试验选取了 BATS、CLM3.5、CLM4.5 三种陆面参数化方案以及 30 km、60 km 两种水平分辨率。60 km 的网格系统中,垂直分层 18 层,时间积分步长不超过 180 s。30 km 的网格系统中,垂直分层 23 层,时间积分步长不超过 90 s,二者的大气顶气压均为 5 hPa。模式侧边界采用指数松弛方案,积云对流采用了 Grell 和 Emanuel 方案,模式的初始驱动场由欧洲中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)提供。

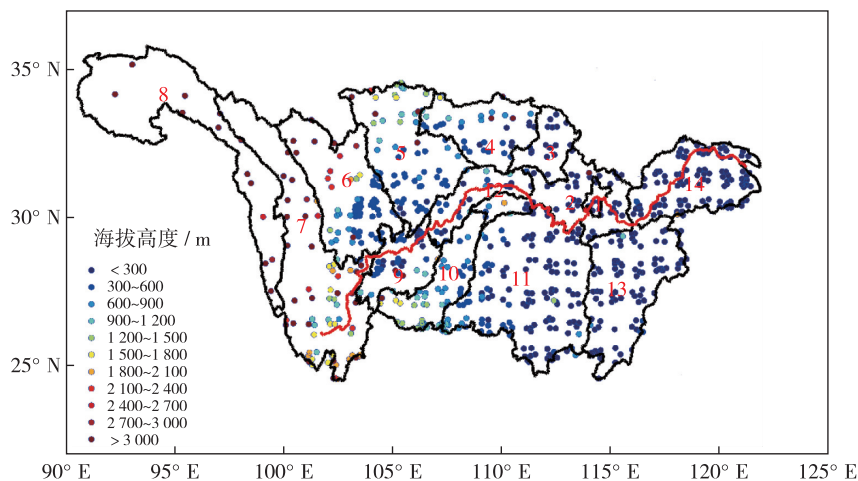


图 1 长江流域分区及站点分布

Fig. 1 Distribution of stations of the Yangtze River basin and its subareas

目前极端降水的模拟和预测是数值模式工作的难点和重点,近几十年来,长江流域异常强降水事件频发,给社会经济带来巨大损失,因此,长江流域强降水事件的预测对短期气候预测有重要的指示意义。选取近 30 年引发长江流域重大洪涝灾害的 5 个汛期极端强降水事件(1998 年、2010—2012 年和 2014 年)进行个例回测。其中 1998 年、2010—2012 年的预测个例从 5 月 1 日开始,到 8 月 31 日结束,以 4 月 1 日到 30 日为模式调整时间。2014 年的预测个例从 8 月 1 日开始,到 10 月 31 日结束,以 7 月 1 日到 31 日为模式调整时间。前人的研究表明^[10-11],垂直分辨率和时间积分步长对模式的模拟结果影响较小,因此,通过分析 5 个个例的预测结果,可以研究水平分辨率和陆面方案对长江流域短期气候预测的影响。为了便于分析,将 5—

8 月定义为夏季, 8—10 月定义为秋季。

文中根据长江流域的水系特征将其划分为 14 个子区域^[12](图 1), 包括武汉市、长江中游干流、汉江中下游、汉江上游、嘉陵江、岷沱江、金沙江中下游、金沙江上游、屏寸区间、乌江、洞庭湖、三峡区间、鄱阳湖水系和长江下游。对比资料包括长江流域 811 站降水和温度资料, 图 1 给出了观测站点分布。

2 模式预测结果分析

2.1 长江流域夏秋季气温和降水空间预测场

图 2 为 2012 年夏季(图 2(a)—图 2(f))和 2014 年秋季(图 2(a1)—图 2(f1))观测及预测的长江流域降水空间分布。2012 年夏季, 观测结果(图 2(a))显示, 流域东南部和长江下游偏南地区存在 10 mm/d 的强降水区。30 km 分辨率和 BATS 陆面方案(R-BATS-30)相匹配时(图 2(b)), 模式预测的流域特别是流域中部降水值明显高于观测, 试验较合理地预测出了流域东南部的强降水区, 但其位置比观测偏南; 30 km 分辨率和 CLM3.5(R-CLM3.5-30)(图 2(c))及 CLM4.5(R-CLM4.5-30)(图 2(d))陆面方案相匹配时, 模式预测的流域降水值在整个流域均比观测偏低, 二者均未能预测出流域东南部 10 mm/d 的强降水区; 60 km 分辨率和 BATS 陆面方案(R-BATS-60)相匹配时(图 2(e)), 模式较好地预测了流域中部 10 mm/d 的强降水区, 但其预测的长江上游降水明显高于观测, 且模式未能预测出流域东南部的强降水区; 60 km 分辨率和 CLM3.5 方案(R-CLM3.5-60)匹配时(图 2(f)), 模式预测的降水值在整个流域均比观测显著偏低, 在流域东南部, 模式预测结果为 2 mm/d 的降水小值中心, 这与观测完全相反。综合来看, BATS 陆面方案和 30 km 水平分辨率相

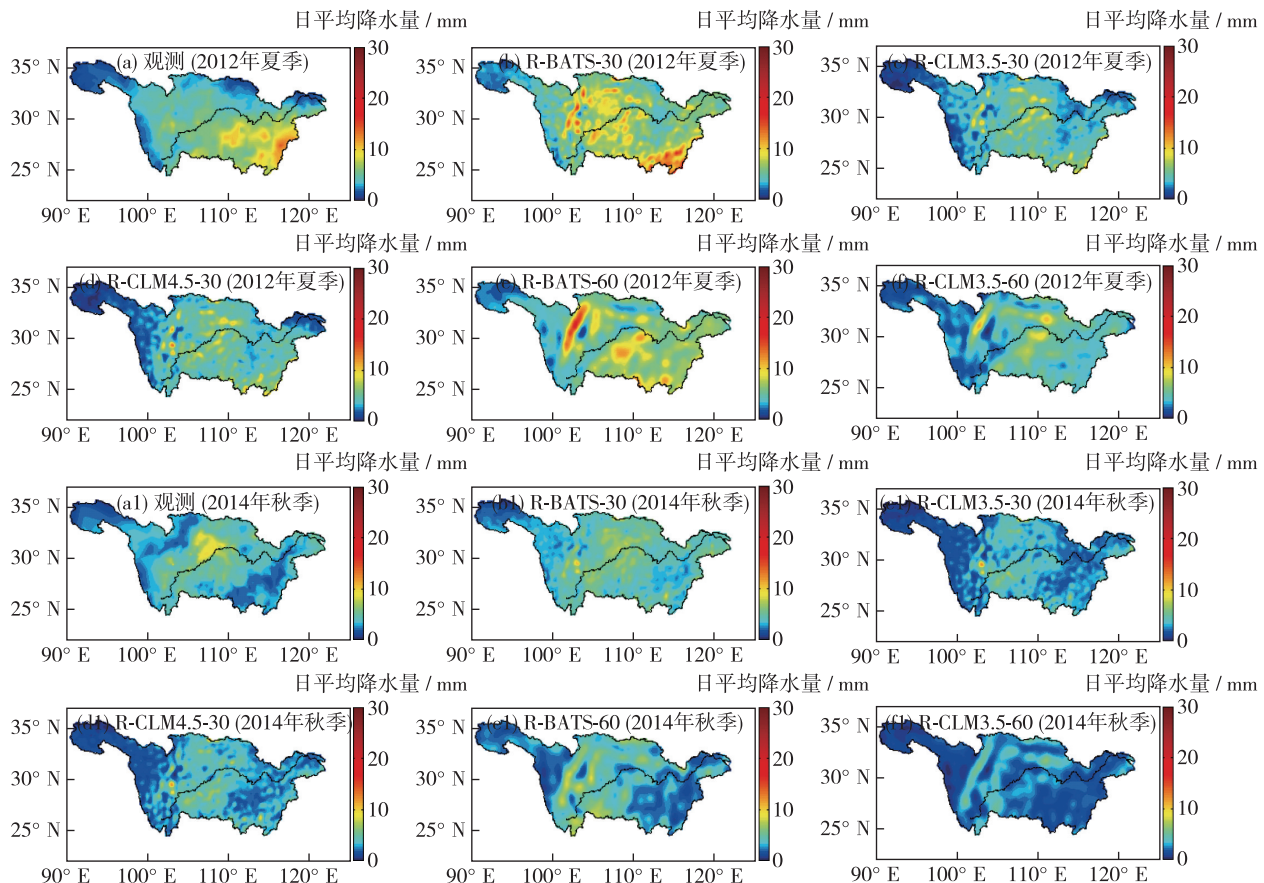


图 2 2012 年夏季和 2014 年秋季长江流域降水场空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of precipitation in the summer of 2012 and autumn of 2014 in the Yangtze River basin

匹配时, RegCM4.5 模式能够很好地预测长江流域夏季降水的位置和强度。2014 年秋季(图 2(a1)—图 2(f1))预测结果显示, R-BATS-30、R-CLM3.5-30、R-CLM4.5-30 对降水的预测效果较好, 其中 R-BATS-30 预测的降水值在长江流域东西部均比观测偏高, 在流域中部比观测略微偏低。R-CLM3.5-30 和 R-CLM4.5-30 预测的降水值在整个长江流域均比观测偏低。

图 3 是 2012 年夏季(图 3(a)—图 3(f))和 2014 年秋季(图 3(a1)—图 3(f1))观测与预测的长江流域气温空间分布。2012 年夏季, 观测结果显示长江流域气温东高西低, 在长江中游附近存在一条 16 °C 的低温带(图 3(a))。采用不同分辨率和陆面方案时, 模式均能较合理地预测出流域温度东高西低的分布形式, 但各方案下模式预测的气温分布有所差异。R-BATS-30 预测的气温在整个长江流域均低于观测; R-CLM3.5-30 和 R-CLM4.5-30 较好地预测出了流域东部 25 °C 的气温高值中心和流域西部 10 °C 的气温低值中心, 但预测的流域中部气温较观测偏低; R-BATS-60 和 R-CLM3.5-60 预测的气温在流域东西部低于观测, 但在流域中部高于观测; 此外, 与观测相比, 各方案下模式预测的长江中游低温带气温更低、范围更广。2014 年秋季, R-CLM3.5-30 对气温的预测效果最好, 但与 2012 年夏季不同的是: R-CLM4.5-30 和 R-BATS-60 预测的气温在长江流域东部明显低于观测。其余 3 个年份的强降水事件在表 1 中具体分析。

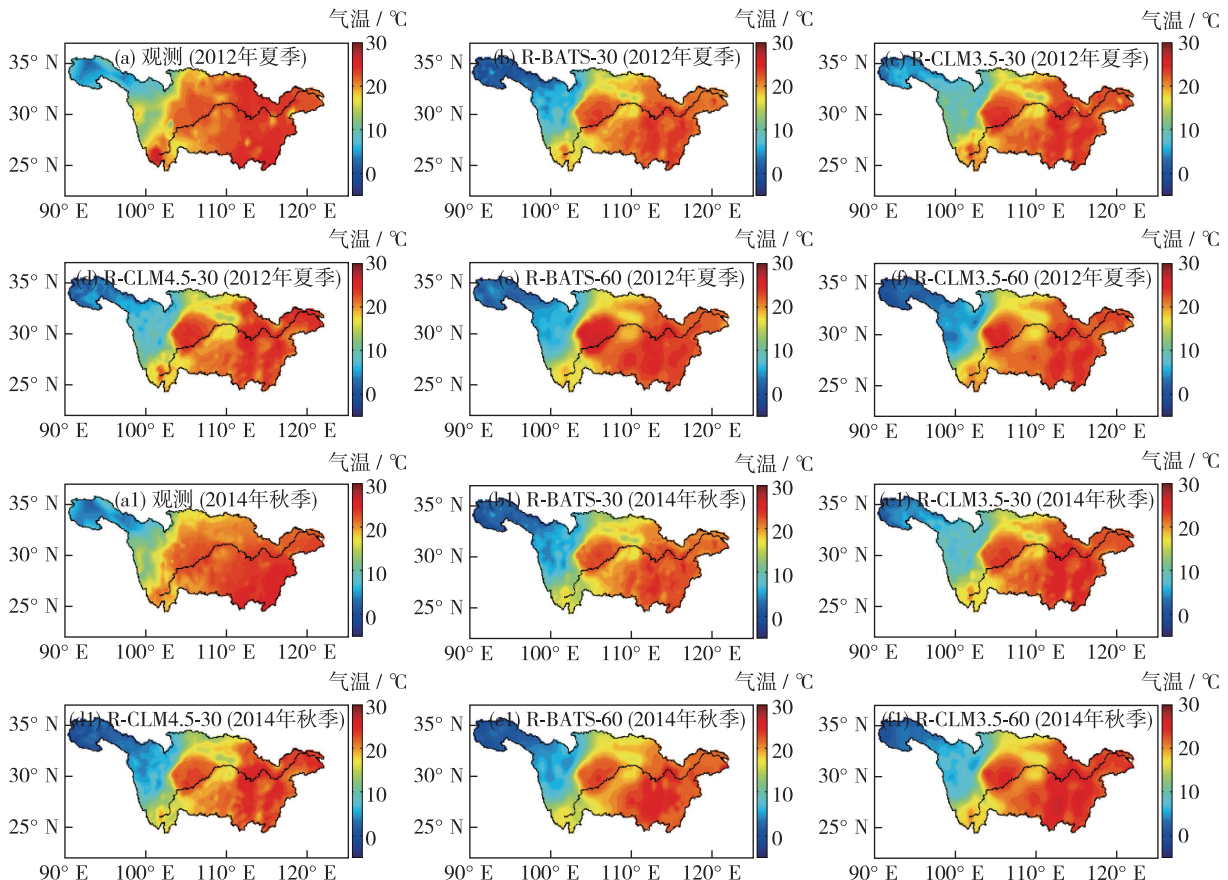


图 3 2012 年夏季和 2014 年秋季长江流域气温场空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of air temperature in the summer of 2012 and autumn of 2014 in the Yangtze River basin

为定量比较模式预测气温和降水的空间分布与观测的相符程度, 表 1 给出 5 个例中长江流域气温和降水预测与实况的空间相关系数。对于降水, 5 个例中 R-BATS-30 的空间相关系数均明显高于其他方案。此外, 5 个例中 30 km 分辨率下的空间相关系数明显大于 60 km 分辨率下的空间相关系数; 对于气温, 5 个例中各方案下的空间相关系数值均在 0.9 左右, 这说明 RegCM4.5 模式很好地预测了长江流域气温的空间分布, 且不同陆面方案和空间分辨率对气温空间分布预测的影响并不大。此外还发现, 5 个例中相比相同分辨率不

表 1 长江流域预测与观测的空间相关系数

Table 1 Spatial correlation coefficient of prediction and observation of the Yangtze River basin

模式	1998 年		2010 年		2011 年		2012 年		2014 年	
	降水	气温	降水	气温	降水	气温	降水	气温	降水	气温
R-BATS-30	0.136	0.896	0.169	0.887	0.164	0.900	0.153	0.902	0.151	0.903
R-CLM3.5-30	0.103	0.921	0.146	0.913	0.147	0.913	0.130	0.927	0.144	0.908
R-CLM4.5-30	0.099	0.904	0.142	0.899	0.146	0.906	0.131	0.926	0.136	0.901
R-BATS-60	0.095	0.912	0.103	0.906	0.059	0.913	0.077	0.920	0.088	0.899
R-CLM3.5-60	0.083	0.897	0.062	0.892	0.046	0.895	0.049	0.900	0.068	0.895

注:加粗数字通过 95% 的显著性检验。

同陆面方案下降水空间相关系数值的差别,相同陆面方案不同分辨率下的降水空间相关系数值差别更大,这说明 RegCM4.5 模式预测长江流域夏秋季降水空间分布时,分辨率对预测结果的影响要比陆面方案的影响大。

综合来看,30 km 分辨率和 BATS 陆面方案相匹配时,RegCM4.5 模式对夏秋季长江流域降水空间分布的预测效果最好,而空间分辨率和陆面方案的改变对于长江流域气温空间分布预测效果的影响相对较小。

2.2 长江各支流区域气温和降水量预测效果

2012 年夏季,对于降水(图 4(a)),观测的长江流域日平均降水量在 1~14 mm 之间,在预测的第 10 天、第 30 天、第 55 天、第 75 天、第 85 天、第 95 天、第 115 天共发生 7 次强降水过程。R-BATS-30 预测的长江流域平均降水量为 2~14 mm,略大于观测,而其他方案预测的降水量为 1~11 mm,均小于观测。从强降水事件的预测成功率来看,R-BATS-30 的预测成功率为 100%,R-BATS-60 的预测成功率为 57%,其他 3 种方案为 43%。对于气温(图 4(b)),观测的气温在 15~23 °C 之间变化,而各方案下模式预测的气温多在 12~20 °C 之间变化,明显低于观测,但模式预测的气温随时间的变化与实际情况有很好的一致性,其中 R-CLM3.5-30 预测的气温在 13~21 °C 之间变化,最接近观测。2014 年秋季,长江流域降水和气温的分析结果与夏季类似,但值得注意的是,此时 R-CLM4.5-30 对强降水的预测效果仅次于 R-BATS-30。

综合来看,R-BATS-30 和 R-CLM3.5-30 分别对长江流域区域平均降水和气温值的预测效果达到最好。

由于降水通常发生在相对全区域更小的范围,各子区域降水强度分布与全区域有所不同,有必要进一步分析各子区域降水预测误差的分布。由表 2 可见,长江流域 14 个子区域中,R-BATS-30 预测降水的相对误差在 9 个子区域相比其他方案最小,R-BATS-60 在 4 个子区域相对误差最小,R-CLM4.5-30 在 1 个子区域相对误差最小,而其他方案的相对误差在 14 个子区域均较大。这说明对于日累计降水量的预测,不同的区域有着不同的分辨率和陆面方案最优组合。

对于气温,做与表 2 相同的处理(表略),其结果显示:R-CLM3.5-30 在 8 个子区域相对误差最小,R-CLM3.5-60 在 5 个子区域相对误差最小,而其余方案仅有 R-BATS-60 在 1 个子区域相对误差最小。这说明对于日平均气温的预测,不同区域同样有不同的分辨率和陆面方案最优组合。综合来看,R-BATS-30 对各子区域的降水预测效果相对更好,而 R-CLM3.5-30 对各子区域的气温预测效果相对更佳。

2.3 气温和降水的预测评分分析

预测评分是评估模式预测效果的一种常用方法,可以较全面地反映出预测结果的优劣。文中采用 4 种评分方法来分析 RegCM4.5 模式的预测效果:

(1) 距平符号一致率(P)反映了预测结果对气候变化趋势预测的准确率:

$$P = \frac{100}{N} \sum_{i,j} N_{i,j} \quad (1)$$

式中: N 代表总站点数; $N_{i,j}$ 代表距平符号一致的站点数。

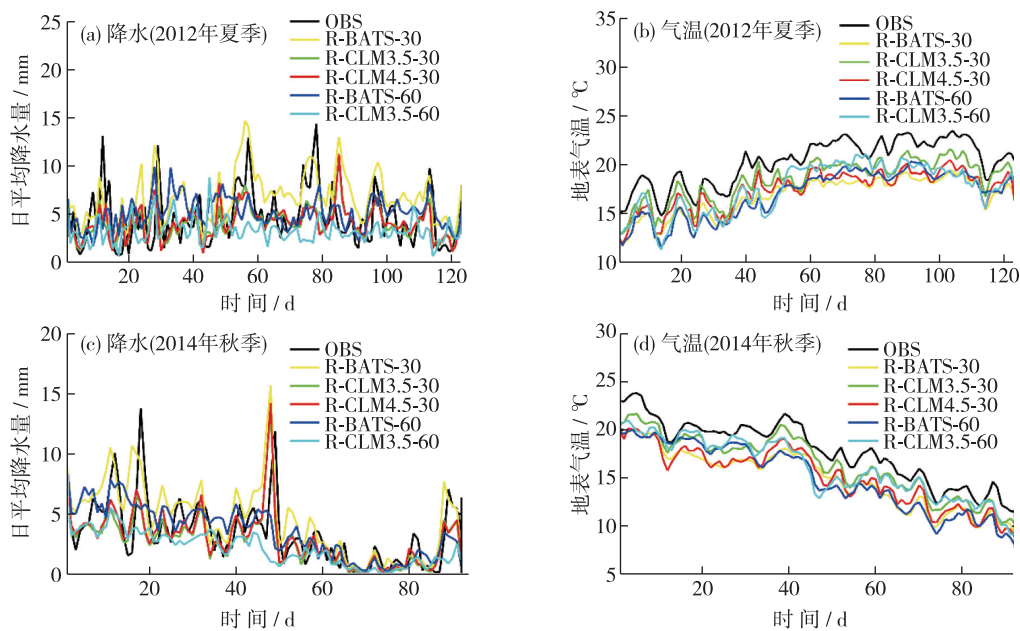


图 4 2012 年 5—8 月和 2014 年 8—10 月长江流域观测与预测气温、降水量的逐日变化
Fig. 4 Daily air temperature and precipitation (observation and prediction) of the Yangtze River basin in May, June, July, August 2012 and August, September, October 2014

表 2 2012 年夏季长江流域各分区平均降水预测的相对误差

Table 2 Relative error of precipitation in each partition of the Yangtze River basin in the summer of 2012

区域	相对误差/%				
	R-BATS-30	R-CLM3.5-30	R-CLM4.5-30	R-BATS-60	R-CLM3.5-60
洞庭湖区	18.16	-29.76	-27.76	-14.95	-52.35
汉江上游	0.01	-24.34	-15.77	13.94	-24.32
汉江中下游	12.27	-19.82	-7.87	26.33	-15.80
嘉陵江	2.26	-31.41	-29.84	-11.41	-29.03
金沙江上游	9.72	-41.13	-42.81	-13.69	-46.65
金沙江中下游	3.94	-34.89	-33.66	-10.53	-46.19
岷沱江	4.57	-33.84	-32.18	9.98	-39.35
屏寸区间	16.03	-26.95	-24.87	-17.05	-37.83
鄱阳湖水系	37.96	-30.63	-27.90	-10.66	-62.21
三峡区间	13.59	-16.34	-11.93	-19.77	-33.42
乌江	10.58	-26.57	-25.69	-13.96	-40.37
武汉市	20.51	-37.37	-22.13	-5.63	-42.20
长江下游	23.57	-28.45	-25.20	-8.69	-42.76
长江中游干流	11.67	-29.52	-22.27	-13.23	-31.90

注：加粗数值表示某区域降水相对误差在 5 种方案下最小。

(2) 空间距平相关系数(A)评分是预测与观测的气候距平之间位相误差的度量：

$$A = \frac{\sum_{i,j} (F_{i,j} - C_{i,j})(O_{i,j} - C_{i,j})}{\sqrt{\sum_{i,j} (F_{i,j} - C_{i,j})^2} \sqrt{\sum_{i,j} (O_{i,j} - C_{i,j})^2}} \quad (2)$$

式中：F 代表模式预测场；O 代表观测场；C 代表观测气候距平场。

(3) 均方根误差(R)反映预测和观测变量之间的偏离程度:

$$R = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i,j} (F_{i,j} - O_{i,j})^2} \tag{3}$$

(4) TS 评分(T)用来统计降水预测结果的准确率:

$$T = N_1 / (N_1 + N_2 + N_3) \tag{4}$$

式中: N_1 代表预测和观测都有雨的站点数; N_2 代表预测有雨而观测无雨的站点数; N_3 代表预测无雨而观测有雨的站点数。

由表 3 可知, 对 2012 年夏季降水, R-BATS-30 的 P 评分为 62.81, 明显高于其他方案, 这说明 R-BATS-30 对长江流域夏季降水的预测效果最好; 对 2012 年夏季的气温, R-CLM3.5-30 的 P 评分为 73.27, 远高于其他方案, 这说明 R-CLM3.5-30 对长江流域气温的预测效果最好, 由空间距平相关系数和均方根误差评分也能得到与 P 评分相同的结论。此外, R-CLM3.5-60 的 P 评分高于 R-BATS-30 的 P 评分, 由于本试验中水平分辨率的提高可以提升气温的预测效果, 这表明 RegCM4.5 模式中陆面方案对气温预测效果的影响要大于水平分辨率的影响。

由于同一模式对不同等级降水的预测性能往往并不一致, 需要进一步分析 RegCM4.5 模式对不同等级降水的预测效果。表 4 是模式对不同等级降水的 T 评分, 可以看到, 模式各方案对于小雨均有较高的 T 评分, 除 R-BATS-30 外, 模式各方案的 T 评分随着降水等级的提升而减小。其中, R-CLM4.5-30 对小雨的 T 评分最高, R-BATS-30 对中雨、大雨和暴雨的 T 评分最高, 特别是对于暴雨, R-BATS-30 的 T 评分要远高于其他方案。结合图 4(a)、图 4(c)与表 4, 可以证明 R-BATS-30 对于异常强降水有着较好的预测效果。综合来看, 对于不同等级降水的预测, 分辨率和陆面方案有着不同的最优组合。

表 3 2012 年夏季模式对长江流域平均气温和降水的评估参数

Table 3 Assessment parameters of temperature and precipitation of the Yangtze River basin in the summer of 2012

模式	降水			气温		
	P	A	R	P	A	R
R-BATS-30	62.81	0.16	8.31	73.27	0.42	4.05
R-CLM3.5-30	60.54	0.13	9.86	81.69	0.61	2.49
R-CLM4.5-30	57.47	0.11	12.12	72.36	0.46	3.82
R-BATS-60	60.47	0.14	10.09	72.91	0.46	3.69
R-CLM3.5-60	59.59	0.11	9.22	79.11	0.55	3.66

表 4 2012 年夏季模式对长江流域不同等级降水的 T 评分

Table 4 T score of different level precipitation of the Yangtze River basin in the summer of 2012

模式	降水 T 评分/%			
	小雨 (0~10mm)	中雨 (10~25 mm)	大雨 (25~50 mm)	暴雨 (>50 mm)
R-BATS-30	62.41	10.15	6.44	10.52
R-CLM3.5-30	62.88	8.56	5.42	5.45
R-CLM4.5-30	63.15	8.67	5.22	4.27
R-BATS-60	59.25	8.05	3.99	6.37
R-CLM3.5-60	58.95	5.20	4.45	4.69

3 机理分析

水汽是大气降水十分重要的条件, 水汽的来源主要有平流输送和地表蒸散两个方面, 影响长江流域夏秋季降水的水汽平流输送主要是来自孟加拉湾、南海和热带西太平洋的暖湿季风气流, 陆面方案的改变对这些来自海上的暖湿气流的影响并不大。相反, 不同陆面方案中土壤水文过程等的差异显然会影响地表蒸散情况。因此, 主要从地表水汽蒸发的角度来分析不同陆面方案对降水预测的影响机理。以 2012 年为例, 表 5

给出了 3 种陆面参数化方案下长江流域 14 个分区降水量和蒸发量差异的对比。可以看到, 预测蒸发量差异的空间分布与降水量类似, 总体上较大的降水量差异与较大的蒸发量差异相对应, 在 BATS 分别和 CLM3.5、CLM4.5 的差异中, 地表水分蒸发量差异均超过降水量差异的 30%, 在长江中下游地区更是超过 50%。因此, 可以认为, 预测区域地表水分蒸发是降水的重要来源, 而陆面方案的不同会造成地表水分蒸散的差异, 最终通过大气水分循环影响降水预测。

不同陆面方案中反照率、植被冠层辐射和植被光合作用的不同对地表能量通量模拟也有直接影响, 按照表 5 的方法分析不同陆面方案下长江流域各分区内的感热、潜热通量差异和地表净吸收能量差异(表略), 发现 CLM3.5 和 CLM4.5 下预测的感热和潜热通量在各分区均比 BATS 偏低, 其中 CLM3.5 下的潜热通量在长江流域平均偏低 21.85 W/m^2 , CLM4.5 下的潜热通量偏低 19.68 W/m^2 。从地表吸收的太阳辐射能量来看, CLM3.5 下的预测结果在长江流域各分区偏高 $7 \sim 16 \text{ W/m}^2$, CLM4.5 下的预测结果偏高 $3 \sim 10 \text{ W/m}^2$ 。CLM3.5 和 CLM4.5 方案中的这种能量平衡过程会导致地表吸收的太阳辐射能量偏多, 这些能量不能以潜热的形式有效地传输给大气, 从而大量地储存在地表中, 因此, 模式预测的地表气温相比 BATS 方案下结果偏高。此外, CLM3.5 下预测的净吸收太阳辐射能量要高于 CLM4.5, 这也使得 CLM3.5 下预测的温度略高于 CLM4.5。

表 5 2012 年夏季长江流域各分区预测日平均降水量和蒸发量差异 mm
Table 5 Difference of predicted precipitation and evaporation in each
partition of the Yangtze River basin in the summer of 2012

区域	BATS-CLM3.5		BATS-CLM4.5		CLM3.5-CLM4.5	
	降水	蒸发	降水	蒸发	降水	蒸发
洞庭湖区	3.46	1.54	3.50	1.77	-0.20	-0.14
汉江上游	1.83	0.15	2.07	0.16	-0.06	-0.15
汉江中下游	2.66	0.24	3.55	1.82	-0.09	-0.21
嘉陵江	2.13	1.58	1.07	0.90	-0.11	-0.20
金沙江上游	1.66	1.42	3.03	0	-0.15	-0.31
金沙江中下游	2.46	0.70	2.00	-0.36	-0.11	-0.34
岷沱江	1.64	0.84	2.93	1.28	-0.18	-0.31
屏寸区间	2.96	1.96	1.61	0.75	0	-0.10
鄱阳湖水系	5.09	1.71	3.74	2.04	-0.32	-0.12
三峡区间	1.55	1.55	1.99	0.32	-0.18	-0.17
乌江	3.60	1.05	3.22	0.27	-0.18	-0.23
武汉市	3.49	2.01	2.08	0.96	-0.47	-0.42
长江下游	2.22	1.22	2.98	1.35	-0.10	-0.04
长江中游干流	2.10	0.83	2.85	0.26	-0.18	-0.19

综上所述, 3 种陆面方案在反照率、植被冠层辐射和植被光合作用等方面的差异会造成模拟地表吸收辐射量和潜热通量的偏差, 将直接影响地表气温预测; 而三者在土壤水文过程等方面的差异会造成模拟的地表蒸散与气温偏差, 影响大气可降水量, 进而影响降水预测。此外, 降水改变空气湿度, 也会在一定程度上影响到达地表的太阳辐射, 从而影响气温预测。

前文中只分析了 2012 年和 2014 年两个降水个例。表 1 结果显示, 1998 年、2010 年、2011 年的个例中, 各方案对气温和降水的空间分布预测能得到与 2012 年和 2014 年一致的结论。事实上, 这 3 个年份的降水个例中, 模式对气温和降水的时间变化、子区域平均值、不同等级降水的预测结果均能得到与 2012 年和 2014 年类似的结论(表略)。因此, 可以用 2012 年和 2014 年的分析结果来代表 5 个预测个例。

4 结 论

(1) 多个例结果表明, RegCM4.5 模式中, 空间分辨率的提高可以改善长江流域气温和降水的短期气候预测性能。

(2) 与观测相比, BATS 方案下该模式预测的长江流域降水偏多, CLM 方案下模式预测的流域降水偏少, 而两种方案下模式预测的流域气温均偏低。

(3) 3 种陆面方案中反照率、植被冠层辐射和植被光合作用的差异会引起模式预测的地表水热交换过程差异, 最终导致该模式对流域内降水和气温的预测能力不一致。

(4) 对于长江流域不同子区域气温和降水值的预测, 空间分辨率和陆面方案的最优组合不同。

(5) R-CLM4.5-30 对流域内小雨的预测效果更好, R-BATS-30 预测流域内大雨和暴雨的效果最优, 而 R-CLM3.5-30 对流域内气温的预测效果最佳。

致谢: 由国家重点研发计划专项(2016YFA0602102)和江苏省“气候变化”协同创新中心资助。

参考文献:

- [1] 刘向培, 王汉杰, 刘金波. 区域气候模式分辨率对夏季降水模拟的影响[J]. 水科学进展, 2011, 22(5): 615-623. (LIU X P, WANG H J, LIU J B. Influence of spatial resolution in a regional climate model on summer precipitation simulation [J]. Advances in Water Science. 2011, 22(5): 615-623. (in Chinese))
- [2] ZENG X M, WANG B, ZHANG Y J. Effects of land surface schemes on WRF-simulated geopotential heights over China in summer 2003 [J]. Journal of Hydrometeorology, 2016, 17(3): 829-851.
- [3] OLSSON J, BERG P. Impact of RCM spatial resolution on the reproduction of local, subdaily precipitation [J]. Journal of Hydrometeorology, 2015, 16(2): 534-547.
- [4] 刘德强, 冯杰. GRAPES_MES 中时间步长和空间分辨率对于预报效果的影响[J]. 大气科学, 2015, 39(6): 1165-1178. (LIU D Q, FENG J. The impacts of time-step size and spatial resolution on the prediction skill of the GRAPES-MESO forecast system [J]. Chinese Journal of Atmosphere Sciences, 2015, 39(6): 1165-1178. (in Chinese))
- [5] 刘向培. 不同陆面方案对降水模拟的影响[J]. 水科学进展, 2013, 24(5): 658-666. (LIU X P. Influence of land surface schemes on precipitation simulation [J]. Advances in Water Science, 2013, 24(5): 658-666. (in Chinese))
- [6] 刘景卫, 周天军, 满文敏. 变网格大气模式对 1998 年东亚夏季风异常的模拟研究[J]. 地球物理学报, 2013, 56(1): 12-26. (LIU J W, ZHOU T J, MAN W M. Simulation study on the anomalous East Asian summer monsoon in 1998 using a variable-grid atmospheric general circulation model [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(1): 12-26. (in Chinese))
- [7] 曾新民, 吴志黄, 宋帅, 等. WRF 模式不同陆面方案对一次暴雨事件模拟的影响[J]. 地球物理学报, 2012, 55(1): 16-28. (ZENG X M, WU Z H, SONG S, et al. Effects of land surface schemes on the simulation of a heavy rainfall event by WRF [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(1): 16-28. (in Chinese))
- [8] STEINER A L, PAL J S, GIORGI F, et al. The coupling of the Common Land Model (CLMO) to a regional climate model (RegCM) [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2005, 82(3): 225-243.
- [9] 宋耀明, 范轶, 马天娇. 陆面过程模式 CLM4.5 在半干旱区退化草原站的模拟性能评估[J]. 大气科学学报, 2014, 37(6): 794-803. (SONG Y M, FAN Y, MA T J. Evaluation of simulation performance of land surface model NCAR_CLM4.5 at a degraded grassland station in semi-arid area [J]. Trans Atmos Sci, 2014, 37(6): 794-803. (in Chinese))
- [10] 长江水利委员会. 长江防洪地图集[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 56-62. (Changjiang Water Resources Commission. Atlas for Yangtze River flood control [M]. Beijing: Science Press, 2001: 56-62. (in Chinese))
- [11] 曾新民, 刘金波, 宋帅, 等. 区域气候模式垂直分辨率对我国夏季降水模拟的影响[J]. 水动力学研究与进展, 2009, 24(1): 71-81. (ZENG X M, LIU J B, SONG S, et al. Effects of vertical resolution on simulation of summer precipitation in China by a regional climate model [J]. Journal of Hydrodynamics, 2009, 24(1): 71-81. (in Chinese))
- [12] 陆维松. 垂直分辨率与水平分辨率协调问题的研究[J]. 南京气象学院学报, 1990, 13(3): 274-285. (LU W S. Research on the coordination of vertical and horizontal resolutions [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 1990, 13(3): 274-285. (in Chinese))

Effect of different spatial resolutions and land surface parameterization schemes on the short-term climate prediction in the Yangtze River basin *

ZHANG Lujun¹, WANG Le¹, XING Wenhui², HUANG Yong³, ZHANG Yaqi⁴, LIU Shudi⁵

(1. CMA-NJU Joint Laboratory for Climate Prediction Studies, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 2. The Yangtze River Water Resources Commission Hydrology Bureau, Wuhan 430010, China; 3. Guangdong Electric Power Research Institute, Guangzhou 510080, China; 4. Cascade Dispatching Communication Center of the Three Gorges Project, Wuhan 430010, China; 5. Meteorological Bureau of Shandong Province Huiming County, Huiming 251700, China)

Abstract: In this paper, we predict the air temperature and precipitation of the Yangtze River basin in five years with abnormal precipitation by the Regional Climate Model (RegCM4.5). We compare the prediction results of air temperature and precipitation with three land surface parameterization schemes and two spatial resolutions. The results show that high spatial resolution can improve the accuracy of air temperature and precipitation prediction; Different land surface schemes can cause different temporal-spatial distribution of surface net flux and evapotranspiration, leading to uncertainty prediction performance of air temperature and precipitation in the Yangtze River basin. Through the comparative analysis, we found that CLM4.5 with 30 km resolution is the best combination of predicting light rain, and BATS with 30 km resolution is the optimal choice of predicting heavy rain. CLM3.5 with 30 km resolution gives the best performance for predicting air temperature in the Yangtze River basin.

Key words: Regional climate model (RegCM4.5); prediction; spatial resolution; land surface parameterization scheme; Yangtze River basin

* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 40975040).