王澄海,余莲. 2011. 区域气候模式对不同的积云参数化方案在青藏高原地区气候模拟中的敏感性研究 [J]. 大气科学, 35 (6): 1132-1144. Wang Chenghai, Yu Lian. 2011. Sensitivity of regional climate model to different cumulus parameterization schemes in simulation of the Tibetan Plateau climate [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35 (6): 1132-1144.

## 区域气候模式对不同的积云参数化方案在 青藏高原地区气候模拟中的敏感性研究

### 王澄海 余莲

兰州大学大气科学学院,兰州 730000

摘要本文使用 MIROC3.2\_hires 模式输出资料作为 RegCM3 (The ICTP Regional Climate Model, V3.0) 初边 界资料,对 RegCM3 中常用的 3 种积云参数化方案 Anthes-Kuo (AK)、Grell-Fritsch&-Chappell (GFC)和 MIT-Emanuel (MIT)方案在青藏高原地区的降水和气温模拟结果进行比较,检验了不同参数化方案在高原地区气候 模拟的敏感性。结果表明,AK方案相对于 GFC 和 MIT 方案均较好地再现了气温和降水的时、空分布主要特征, 就偏差大小而言,AK方案最接近观测,GFC方案次之,MIT 相对较差,但 3 种方案模拟的温度均存在一个系统 性的冷偏差。AK方案在空间分布特征和区域平均的年际变化特征上更接近于观测,但模拟的多年平均温度在高 原大部分地区仍存在一个系统性冷偏差,尤其在高原主体冷的偏差约达4℃;而在塔里木盆地和准噶尔盆地则偏 高约2℃;青藏高原南部冷偏差大于北部,年际变率较观测值略小。降水的模拟结果则表明,在高原主体部分较 观测偏多0~6 mm/d,高原北部降水模拟偏多而南部偏少,降水年际变率也略小于观测值。因此,就年、季、月 尺度而言,积云参数化方案对中尺度区域气候模式的模拟结果产生的差异并不敏感。另外,RegCM3 相对 MICRO3.2\_hires显著改进了 GCM 的模拟结果,尤其对地形复杂的天山、塔里木盆地、准噶尔盆地、昆仑山、冈 底斯山脉和高原东南部地区的温度和降水细节上的刻画要明显好于 GCM 模拟结果,表明区域气候模式在青藏高

关键词 区域气候模拟 积云参数化方案 青藏高原地区 温度和降水
 文章编号 1006 - 9895 (2011) 06 - 1132 - 13
 中图分类号 P462
 文献标识码 A

## Sensitivity of Regional Climate Model to Different Cumulus Parameterization Schemes in Simulation of the Tibetan Plateau Climate

WANG Chenghai and YU Lian

College of Atmospheric Science, Lanzhou University, Lanzhou 730000

**Abstract** To examine the sensitivity of cumulus parameterization scheme in climate simulating over the Tibetan Plateau, three cumulus parameterization schemes in RegCM3 (The ICTP Regional Climate Model, V3.0), Anthes-Kuo (AK), Grell-Fritsch& Chappell (GFC), and MIT-Emanuel (MIT) are compared and analyzed in temperature and precipitation simulation over the Tibetan Plateau. The results show that AK, GFC and MIT schemes well reproduce the distribution of temperature and precipitation over the Tibetan Plateau, and the spatial distribution and annual change of the simulated temperature and precipitation with AK scheme are more closed to observations than

**收稿日期** 2010-11-10, 2011-03-30 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 41071028、40875050,公益性行业(气象)科研专项 GYHY201006023

作者简介 王澄海,男,1961年出生,教授,主要从事气候模拟和寒旱区陆面过程。E-mail:wch@lzu.edu.cn

other schemes. The simulated temperature shows that there is a systematic cold bias over the Tibetan Plateau about the three schemes. There is a cold bias about 4°C over Tibet and a warm bias about 2°C over Tarim and Junggar Basin, the cold bias over the south is large than the north over Tibet, and the variability of temperature is slightly smaller than the observed values. Precipitation simulation results indicate that the simulated precipitation is 0 - 6 mm/d more than observed one, the simulated one is high in the north and low in the south, the variability of precipitation is also slightly smaller than the observed values. In addition, RegCM3 distinctly improved the MICRO3. 2 simulation results, the distribution details of temperature and precipitation are better than the MICRO3. 2 simulations for complex terrains, such as Tianshan, Tarim Basin, Junggar Basin, Kunlun Mountain, Gangdise Mountain, and southeastern Tibetan Plateau, which implies that the RegCM3 performance is successful in downscaling. **Key words** Tibetan Plateau, RegCM3, cumulus parameterization scheme, temperature and precipitation

## 1 引言

积云参数化方案在大气模式及模拟中有着至关 重要的作用。因此,中尺度模式中对积云参数化的 设计对天气事件的模拟效果有着决定性的作用 (Liang et al., 2001, 2007; Kunkel et al., 2002). 中尺度模式在加以发展后往往用于 GCM 的动力降 尺度,或者用作区域气候模拟 (Samel et al., 1995; Leung and Ghan, 1999a; Liang et al., 2001; Leung and Qian, 2003; Leung et al., 2003, 2006)。气候 模拟中,积云参数化方案的选择和发展仍然是重要 的内容(成安宁等, 1998; Leung and Ghan, 1999b; Leung et al., 2006)。青藏高原是中高纬度 海拔最高且地形复杂的高原,一方面,高原西部的 大部分地区属于气象观测的空白区,需要数值模拟 的结果弥补观测的不足;另一方面,由于特殊的地 形,许多模式在这个地区的模拟结果不理想(刘黎 平等,2000;刘华强等,2002)。因此,在青藏高原 进行气候模拟时,如何选择积云参数化,既是深入 理解特殊下垫面上天气气候过程发生、发展机理的 基本问题, 也是东亚季风区气候模拟必须解决的问 题。

积云参数化方案在区域气候模拟中有着重要作用。研究表明,在其他条件相同的情况下,不同的 积云对流参数化方案模拟的温度和降水差异较大 (Giorgi, 1989, 1991; Giorgi et al., 1993a, 1993b; Giorgi and Shields, 1995; 成安宁等, 1998; 潘劲松 等, 2002; 冯锦明和符淙斌, 2007)。RegCM3 模式 能够模拟出高原及其周边地区降水和气温的主要分 布特征(张冬峰等, 2005; 屈鹏等, 2009), 对青藏 铁路沿线各测站月平均气温的模拟较好, 对平均降 水也有一定的模拟能力, 但对降水年际变化的模拟 能力较差。在 NNRP2 (2.5°×2.5°) 资料驱动下, RegCM3 在青藏高原西部地区夏季降水和温度的 模拟结果表明,当空间分辨率为 50 km 时, AK 积 云参数化方案可以系统性地降低降水量偏大的倾 向,并显著减小了陡峭地形处 NPS (数值点风暴) 现象发生的频率(鲍艳等, 2006a, 2006b)。相似的 研究则认为(杨雅薇和杨梅学, 2008),使用 ECM-WF/ERA-40 (2.5°×2.5°) 资料作为初边界条件, 在 45 km 空间分辨率上对高原夏季温度和降水的 模拟结果显示,AK 方案可以较好地模拟出夏季高 原温度的分布,但在地形复杂地区则有较大的冷偏 差;在地形起伏较大的区域降水模拟由于 NPS 现 象,模拟的降水值偏大,并且在空间相似度方面要 逊色于 GFC 方案。可见, RegCM3 在青藏高原地 区的模拟效果随着初边界条件、模拟时间长度 (Spin-up 时间长度)、空间分辨率及对流参数化方 案的洗取不同,其结果存在着差异。

区域气候模式的模拟结果受许多因素影响。 Liang et al. (2001)的研究指出,模拟区域和缓冲 区(赵宗慈和罗勇,1999)的大小对降水的模拟影 响较大,初边界资料的精度和分辨率对模拟结果也 有着显著影响(Gao et al., 2001;郑益群等, 2002);侧边界嵌套方案(Emanuel,1991;魏和林 等,1998;赵宗慈和罗勇,1999;Liu et al.,2002) 和陆面过程方案(Giorgi,1991;丁一汇等,1998; 王澄海和师锐,2007;王澄海等,2008)以及模式 分辨率(高学杰等,2006)、模拟长度及Spin-up时 间等对模拟结果都有着重要的影响。目前有关青藏 高原地区的区域气候模拟研究中,初边界资料分辨 率较粗,也多见于 AK和 GFC 二种参数化方案的 分析比较,且模拟时间较短,缺少季节和长时间模 拟结果的比较分析,因此,其结论具有较大的不确 定性。本文使用水平分辨率较高(1°×1°)的初边 界资料,对 RegCM3.0 中的 AK、GFC 及 MIT 三 种参数化方案在青藏高原地区的气候模拟中的差异 进行分析比较,并探讨其可能的原因。

## 2 模式介绍和试验设计

本文使用的区域气候模式为 RegCM3 (Pal et al., 2007) 是意大利国际理论物理中心 (ICTP) 在 RegCM2 (Giorgi et al., 1993a, 1993b) 的基础上研 发改进的。文中使用的资料包括中国气象局信息中 心提供的青藏高原地区时间连续性较好的 31 个台 站观测温度和降水资料, CRU (Climatic Research Unit) (Brohan et al., 2006) 的温度和降水资料。CCSR/NIES/FRCGC/MIROC3.2\_hires (Center for Climate System Research, University of Tokyo, National Institute for Environmental Studies, and Frontier Research Center for Global Change, Japan

Agency for Marine-Earth Science and Technology) (Hasumi and Emori, 2004)的输出结果,该模式为 T106,相当于 1.1°×1.1°, MIROC3.2\_hires 资料 用于为 RegCM3 提供初边界资料。

考虑到青藏高原的地形和区域特征,以及对高 原有重要影响的南海、孟加拉湾等地区(Rauscher et al., 2006),本文中的模式模拟区域包括了青藏 高原及其周边地区。中心点选在(33°N,90°E)(如 图 1),空间分辨率为60 km,时间步长为120 s,模 拟时间长度为1990年10月1日到2001年1月31 日,共10年4个月。本文Spin-up的时段取为3个 月。我们只分析1991年1月1日到2000年12月 31日10年的模拟结果。

试验设计和参数化的选择如表1所示。

由于高原西部缺少观测资料,为了便于检验模 拟结果,采用 CRU 的温度和降水资料作为参考值。 已有的研究表明,CRU 资料在中国地区与实际观

表 1	敏	感性试验	方	案	
Table	1	Schemes	for	sensitivity	experiments

	试验方案		
	AK	GFC	MIT
物理框架	MM5 (Grell et al., 1994)	MM5	MM5
地图投影方式	Lambert	Lambert	Lambert
辐射方案	CCM3 (Kiehl et al., 1996)	CCM3	CCM3
陆面参数化方案	BATS (Dickinson et al., 1993)	BATS	BATS
侧边界方案	指数松弛方案	指数松弛方案	指数松弛方案
PBL方案	Holtslag (Holtslag et al., 1990)	Holtslag	Holtslag
积云参数化方案	AK	GFC	MIT
大尺度降水方案	SUBEX (Beheng, 1994; Giorgi, 1990)	SUBEX	SUBEX
海洋表面通量方案	Zeng (Zeng et al., 1998)	Zeng	Zeng
压力梯度方案	常用方案	常用方案	常用方案



图 1 模拟区域 (扇形框)海拔高度 (单位:m)及台站分布区域 (矩形框)

Fig. 1 The altitude, region of observation stations (rectangle) in the research domain (sector)



图 2 CRU 和观测的温度 (a) 和降水量 (b) 的相关图 Fig. 2 The scatter diagrams of CRU and observed (a) temperature and (b) precipitation

测资料的相关性比较高,尤其在东部地区的一致性 较好;研究也指出,CRU资料在观测资料稀疏的西 部地区也可参考使用(闻新宇等,2006)。为进一 步检验CRU和观测资料的相关性,本文对CRU资 料和高原东部地区的31个气象观测站的温度(单 位:℃)、降水(单位:mm/d)资料进行了对比 (1991年1月~2000年12月)。

如图 2 所示, 在高原东部地区, CRU 温度与实际观测温度的相关显著。但是在数值上 CRU 温度 要比实际观测温度偏高约 1℃左右, 这主要是夏季 CRU 温度较实际观测温度偏高。CRU 降水和实际 观测降水的变化趋势基本一致, 但夏季 CRU 降水 较观测资料偏小。总体上, 高原东部地区 CRU 和 观测的温度和降水之间存在着较高的一致性。因 此, 在检验高原西部地区的模拟结果时, 以 CRU 作为参考值和模拟结果进行比较。在高原东部观测 站较多的地区,则使用实际观测资料, 但同时给出 了 CRU 资料便于对高原整体进行对比。

# 3 三种参数化方案的模拟结果与观测的偏差

#### 3.1 年平均温度的比较

注意到模式年并不是实际的对应的年份,因此,本文中使用的"年际变化"更多指的是"年循环"特征。图 3 给出了三种参数化方案模拟与CRU温度差值的 10 年平均的空间分布图。可以看出,在青藏高原地区由于受地形影响显著,在珠峰等海拔高度变化较大地区的气温模拟值与观测值之间的差异较大。而在准噶尔盆地、塔里木盆地以及

高原中西部等地区的(图 3c、d、e)差异相对较小。 我们也注意到,在青藏高原东侧陡峭地形处也很好 地再现出垂直温度梯度的变化,表现为一条带状的 等温线密集区。与此同时,三种参数化方案对多年 平均温度的模拟结果在整个高原的区域分布形态和 CRU资料比较一致,表明模式中的三种参数化方 案对高原及周边地区的温度都具有一定的模拟能 力。

三种方案下的模拟结果在高原北部的塔里木和 准噶尔盆地都存在着一个暖偏差(约2℃左右),在 冈底斯山脉以北的高原主体部分存在着一个系统性 的冷偏差(约4℃左右),在冈底斯山脉以南的地区 存在一个从西到东的较大冷偏差(约6℃左右)带 状分布。总体而言,高原南部冷偏差大于北部。除 了高原南侧高大地形的带状分布地区外,AK 方案 (图 3c)的在高原主体地区与 CRU 温度的差值较 GFC 方案(图 3d)和 MIT 方案(图 4e)要小一些, 尤其是在高原东北部的柴达木盆地等地区,考虑到 CRU 的温度较观测温度偏高的事实,可以推知, AK 方案下的模拟结果基本和观测一致。

三种参数化方案下的模拟结果与 CRU 的相关 系数的计算结果发现, 三种方案与 CRU 资料具有 显著的相关性, 但 AK 方案正的高相关区域大于 GFC 方案和 MIT 方案的高相关区(通过 99.9%信 度检验)。由此可知, AK 方案下模拟的温度在高 原上的区域性刻画与 CRU 资料更为一致。同时, 三种方案下的模拟结果在刻画高原温度的区域细节 上要好于 MIROC3. 2\_hires 模拟的温度(图 3b)。 显示出了区域模式的动力降尺度效果。 (a)

40°N

30°N





图 3 CRU 平均温度及 MIROC3. 2\_hires 温度、RegCM3 三种方案模拟的温度与 CRU 温度的差 (单位:℃): (a) CRU 平均温度; (b) MI-ROC3. 2\_hires-CRU; (c) AK-CRU; (d) GFC-CRU; (e) MIT-CRU

Fig. 3 (a) The mean CRU temperature and (b-e) the differences of temperature between MIROC3. 2\_hires, simulations with three schemes and CRU: (b) MIROC3. 2\_hires-CRU; (c) AK-CRU; (d) GFC-CRU; (e) MIT-CRU. Units: °C

我们注意到,尽管 CRU 资料也存在着误差, 但在空间分布上,三种参数化方案在高原西部及 南、东部边缘地区的模拟误差仍然大于高原主体 区。这部分由于 MIROC3.2\_hires 提供的资料本身 在高原西部就存在一个较大的冷偏差,另一方面也 反映出陡峭地形作用在模式中仍存在问题。上述结 果表明,就区域气候模式而言,在高原地区的气候 模拟中,尽管 AK 方案稍优于 GFC 和 MIT,但不 同的参数化方案对模拟结果的影响并不显著。

#### 3.2 降水模拟偏差的比较

作为表征气候特征的基本参数之一,降水的模

拟是否准确是衡量模式性能的主要指标之一。从图 4 中可以看出高原地区多年平均降水呈东南向西北 递减的空间分布,三种参数化方案下均模拟出了这 一大的特征。同样,三种方案下的模拟也再现了天 山山脉、昆仑山脉、祁连山、青藏高原东侧及雅鲁 藏布江大拐弯地区的降水大值中心。表明在区域尺 度上,三种参数化均能较好地模拟出高原及周边地 区的降水特征。从模拟值与 CRU 的差值(图 4c、 d、e)可以看出,三种方案在高原南部的珠穆朗玛 峰以北的大片区域、高原东南部的怒江、巴颜喀拉 山脉和大雪山地区模拟的降水较 CRU 偏小,而在



图 4 同图 3, 但为降水量(单位: mm/d) Fig. 4 Same as Fig. 3, but for precipitation (mm/d)

天山山脉、昆仑山脉、祁连山、青藏高原东侧及雅 鲁藏布江大拐弯地区模拟的降水偏大,尤其是 MIT 方案模拟偏差最大,在高原主体部分系统性偏高; AK 方案与 CRU 的差值较 GFC 方案和 MIT 方案 要小。除去大地形及其周边地区,模式模拟的年平 均降水量在高原大部分地区偏多 0~0.6 mm/d,整 体上,高原北部地区的降水模拟值偏大,而南部地 区偏少。考虑到 CRU 较观测的降水资料偏大的情 况(图 2),模拟的误差要小于图 4 的结果。与 MI-ROC3.2\_hires 的模拟结果相比较,三种方案的模 拟结果刻画出了高原降水分布的细节,尤其是在地 形起伏较大、降水也较大的天山、塔里木盆地、高 原东南部地区更为明显。反映出较为详细的下垫面 资料也能改善降水的模拟效果。

图 5 给出的三种参数化方案与 CRU 的相关图 表明,模拟降水与 CRU 资料相关性在高原主体部 分较好 (r>0.5, P>99.9%),但在准噶尔盆地的 周边地区、塔里木盆地的南部边缘、塔里木河、罗 布泊和柴达木盆地却是弱的负相关区,AK 方案和 MIT 方案正的高相关区稍大于 GFC 方案和 MIT 方案的高相关区。

由上可见,区域气候模式在 AK 方案、GFC 方 案及 MIT 方案下都较好地再现出了高原温度和降 水的分布特征。但温度在高原主体部分存在冷偏差



图 5 模拟的降水与 CRU 降水的相关系数: (a) AK 和 CRU; (b) GFC 和 CRU; (c) MIT 和 CRU

Fig. 5 The distribution of precipitation correlation coefficient between CRU and simulations with (a) AK, (b) GFC, (c) MIT schemes

(4℃左右),在塔里木盆地和柴达木盆地存在暖偏 差(2℃左右);而降水在主体部分偏高(0~6 mm/d 左右),在高原西南和东南地区偏小,这与已有的研 究(Grell et al., 1994)结论是一致的。相比之下, AK 方案较 GFC 方案和 MIT 方案更好地再现了高 原温度和降水的区域分布特征。因此,区域气候模 式中的积云参数化方案在年尺度的模拟结果中,总 体上对温度和降水的模拟差异不是本质和决定性 的。

#### 3.3 月尺度的模拟偏差分析

模式模拟的温度和降水的月变化是除了气候平

均态之外检验模式性能的又一重要内容,但高原上的绝大多数观测站点都分布在高原东部地区,因此 在检验模拟结果月变化特征时,本文利用青藏高原 东部地区 31个台站1991年1月到2000年12月的 温度和降水的实际观测资料(OBS)和模拟结果进 行对比分析。在与台站资料对比时,选取图1中矩 形区域的模拟资料和CRU资料。

如图 6 所示,和多年平均的结果类似,三种方 案的模拟的温度在月变化趋势上与 CRU 和 OBS 是 一致的,但都存在一个系统性的偏差(5℃左右), AK 方案冬季的温度较 GFC 和 MIT 方案更接近 CRU和OBS, 夏季 GFC和MIT 方案与CRU和 OBS更接近。三种方案对降水的模拟在月变化趋 势上与 CRU 和 OBS 也是比较一致的, 但是在数值 上偏差较大。AK 和 GFC 方案都在春秋季模拟的 偏大,而且GFC方案对夏季降水的模拟相对于AK 方案偏高很多, MIT 方案模拟的降水与 CRU 和 OBS的偏差最大,几乎是其 2~3 倍。从三种方案 与CRU和OBS的散点图(图7)可以看出,三种方 案对温度的模拟都较好,相关系数都在 0.98 以上, AK 方案与 CRU (r=0.987) 和 OBS (r=0.985) 更接近,但存在一个系统性的偏差,而且夏半年的 偏差较冬半年大;模拟的降水(图8)与CRU和 OBS的相关也比较高 (r>0.75) (相关系数均通过 99.9%信度检验),春秋季节降水的模拟效果较冬、 夏季节差一些,虽然 MIT 方案模拟的降水与 CRU 和 OBS 的相关较高, 但是 AK 方案却在降水的量 级上较 GFC 和 MIT 方案更接近 CRU 和 OBS。

上述分析可以看出,积云参数化方案对月尺度 上的模拟结果要比年尺度的模拟结果影响更显著。 不同的参数化方案在不同的季节表现出不同的模拟 误差。反映出积云参数化方案对物理过程的描述不 同,也就对不同性质和不同类型降水的模拟效果不 同。从图 8 中可以清楚地看出,三种参数化方案对 小于 1.0 mm/d 的降水的模拟全都偏大。对较大降 水(1.0~3.0 mm/d)的模拟误差较大,而对于大于 3.0 mm/d 的降水模拟,误差要小于前二者的误差。 但是,MIT 下的模拟结果整体偏大。由于 AK 属 于质量、水汽侵入方案,认为积云本身的上升运动 侵入到深厚的条件不稳定层中,把低层大尺度环境 场辐合的水汽输送到高层,凝结成云降雨,释放潜 热。这与高原地区的地形抬升作用较大相吻合。因



图 6 模拟、CRU 和观测的温度 (a) 及降水 (b) 的月变化 Fig. 6 The monthly variation of simulated, CRU, and observed (a) temperature and (b) precipitation

此,对降水的模拟也较其他方案更接近观测。而从 云功函数考虑的 MIT 方案则假设当云层中部浮力 大于云底层时发生对流,混合卷入是云浮力垂直梯 度的函数。这种情况下往往过高地考虑了对流产生 的降水,从图 6b 可以清楚地看出,模拟的夏季降 水整体偏大。

#### 3.4 青藏高原东部地区模拟平均误差

为了进一步分析比较模拟结果与观测的年际变 化差异,我们计算了AK方案、GFC方案、MIT方 案、CRU和OBS温度和降水的年际变率(表 2)。 可以看出,三种方案模拟的温度的年际变率都较观 测要小,AK和MIT方案温度年际变率更接近观 测值,这说明AK和MIT方案对长时间尺度上有 较好的模拟。对降水的年际变化,虽然GFC方案 在年际变率上较AK方案接近观测,但AK方案在 降水总量上却与观测更吻合,而MIT方案模拟的 降水却为减小的趋势,与CRU和OBS相反。表 3 给出的三种方案模拟结果与观测值的平均绝对误差 表明,AK 方案的温度和降水与OBS 的平均绝对误 差要小于GFC 和 MIT 方案,MIT 模拟降水与观测 差值几乎是AK 和 GFC 的 2 和 3 倍,表明AK 方 案对高原温度和降水的模拟更接近观测值,而MIT 不适合于高原地区的气候模拟。

#### 表 2 温度和降水模拟值及观测值的年际变率 (1991~2000 年)

Table 2	The	trend of simul	lated and	observed	temperature	and
precipita	tion	(1991 - 2000)				

	温度年际变率/ ℃・(10 a) <sup>-1</sup>	降水年际变率/ mm・(10 a) <sup>-1</sup>
OBS	0.61	72.02
CRU	1.25	30.67
AK	0.23	11.68
GFC	0.17	24.10
MIT	0.29	-41.98





Fig. 7 The scatter diagrams of simulated temperature vs. CRU and observed temperature

表 3 温度和降水模拟值与观测值之间平均绝对误差 (1991~2000 年)

Table 3The meanabsolute differences between simulated andobserved temperature and precipitation (1991 - 2000)

	温度/℃		降水/mm・ $d^{-1}$	
	OBS	CRU	OBS	CRU
AK	-5.13	-6.41	0.53	0.60
GFC	-5.25	-6.53	0.87	0.93
MIT	-5.14	-6.42	2.13	2.19

综上分析,不管在月、年尺度上,总体而言, AK 方案较 GFC 和 MIT, RegCM3 对高原温度和 降水的区域变化特征的描述上与实况更为接近。积 云参数化方案在时间尺度较短的气候模拟上对降水 模拟的误差更为敏感;高原上地形陡峭的珠峰、高 原边坡等地区的模拟结果相对于高原主体要差。高 原主体的温度和降水模拟仍然存在着系统性的误 差,但总体上具有较好的模拟能力。相比之下,不 同的积云参数化方案对温度的模拟影响不大。



图 8 模拟与 CRU 和观测降水量的散点图

## 4 结论和讨论

本文通过对 RegCM3 中的三种不同参数化方 案在青藏高原地区的区域气候模拟结果的分析比 较,得到了以下初步结论:

(1)不同积云参数化方案在较长时间尺度的区域气候模拟结果中差别不大。也就是说,在气候尺度的模拟结果中,由于平均的结果,不同的参数化方案均能模拟出气候平均值,这是因为,区域气候模拟的结果本身是 GCM 降尺度的结果,其模拟的

气候平均状况主要取决于 GCM 的模拟效果。本文的分析结果也显示出,在年尺度上,三种参数化方案模拟的温度在高原北部的塔里木盆地和巴丹吉林沙漠存在着一个暖偏差(约 2℃左右),在整个高原的主体部分存在着一个系统性的冷偏差(约 4℃左右),尤其在冈底斯山脉南侧存在一个带状分布的冷偏差高值区(6℃左右)。这与 MIROC3.2\_hires 在这些地区的模拟结果相吻合。AK 方案对高原温度的区域分布的描述与实况更为一致,且与观测的高相关区较 GFC 和 MIT 方案大。降水的模拟在高

Fig. 8 The scatter diagrams of simulated precipitation vs. CRU and observed precipitation

原南部的珠穆朗玛峰附近、高原东南部的怒江、巴 颜喀拉山脉和大雪山等地形复杂的地区模拟的降水 偏小,在天山山脉、昆仑山脉、祁连山、青藏高原 东侧及雅鲁藏布江大拐弯地区模拟降水偏大,在高 原主体部分存在系统性的偏高;也和 MIROC3.2\_ hires 大的分布相一致。相比之下,AK 方案与 CRU 的差值较 GFC 和 MIT 方案要小,平均而言, 模拟的年平均降水量在高原主体部分偏多 0~ 0.6 mm/d,高原南部地区偏少,AK 方案模拟的降 水更接近实况。

(2) 在月、季尺度上,参数化方案对模拟结果 的影响要比年尺度上明显。这是由于不同的积云参 数化方案对云物理过程的描述不同所致,而不同季 节降水的性质和物理过程也不同。因此,在月尺度 上,参数化方案对于降水的模拟误差更为敏感。本 文的结果显示,总体上,三种参数化方案均能较好 地再现温度和降水的气候分布特征,但都存在着系 统性的偏差,温度存在5℃左右的偏差。由于高原 地区的降水多和地形抬升相联系,AK 质量侵入方 案更接近于实际,因此,AK和GFC方案模拟降水 偏多 0.5 mm/d 和 0.9 mm/d, 而 MIT 方案由于过 高的强调了对流的作用, 较之 AK 和 GFC 方案, 分 别偏多3倍和2倍,在对流较强的夏季偏多更为显 著。这也表明,对于时间尺度较短的天气过程,由 于影响的天气系统不同,积云参数化方案之间的模 拟差异也许大于月尺度上的误差。

(3) 作为动力降尺度的主要工具, RegCM3 相 对于 MICRO3. 2, 显著地改进了 GCM 的模拟结 果, 尤其对地形复杂的天山、塔里木盆地、准噶尔 盆地、昆仑山、冈底斯山脉和高原东南部地区的温 度和降水细节上的刻画要明显好于 GCM 模拟结 果。除去改进 GCM 的模拟结果外, 区域模式中对 地形的处理和下垫面的处理仍然是需要加以研究的 重点, 文中的结果显示出, 在冬半年降水量的模拟 结果好于春秋两个过渡季节, 而这两个季节恰好是 高原地区土壤冻融、积雪和融雪、植被覆盖变化较 大的季节。

虽然 RegCM3 反映出的区域气候模式的模拟 结果仍然存在着偏差,但仍不失为我们理解区域气 候变化的一个不可替代的工具,因此,根据不同的 模拟时间尺度选用合理和较好的参数化方案仍然是 必要的。我们注意到,由于高原地区观测台站稀 少,在用于模式检验时使用了 CRU 资料,在检验 误差时存在着一定的偏差。我们也注意到,一些新 的、质量更高的格点资料 (如 GPCP、APHRODI-TE 等)已用于模式检验 (Xie et al., 2007; Xu et al., 2009),在此基础上,加上有效的统计手段对 误差进行分析,结果可能会更加完善,也是提高模 拟效果的途径之一。这将是我们下一步开展的工 作。

**致谢** 甘肃省超级计算中心所提供的良好的计算环境,中国气象局信息中心提供了观测数据,在此一并致谢。国家气候中心高学杰为本文提供了 CCSR/NIES/FRCGC/MIROC3.2\_hires 资料,特致感谢。

#### 参考文献 (References)

- 鲍艳,吕世华,陆登荣,等. 2006a. RegCM3 模式在西北地区的应用研究 I:对极端干旱事件的模拟 [J].冰川冻土,28 (2):164-174. Bao Yan,Lü Shihua,Lu Dengrong, et al. 2006a. Application of regional climate model (RegCM3) in Northwest China I: Simulation of an arid extreme event [J]. Journal of Glaciology and Geocryology (in Chinese), 28 (2): 164-174.
- 鲍艳,吕世华,左洪超,等. 2006b. RegCM3 模式在西北地区的应用研究 II:区域选择及参数化方案的敏感性 [J].冰川冻土,28
  (2):175-182. Bao Yan,Lü Shihua,Zuo Hongchao, et al. 2006b. Application of regional climate model (RegCM3) in Northwest China II: Sensitivity experiment for domain choice and cumulus convection parameterization [J]. Journal of Glaciology and Geocryology (in Chinese), 28 (2):175-182.
- Beheng K D. 1994. A parameterization of warm cloud microphysical conversion processes [J]. Atmos. Res., 33: 193-206.
- Brohan P, Kennedy J J, Harris I, et al. 2006. Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: A new dataset from 1850 [J]. J. Geophys. Res., 111, D12106, doi: 10.1029/2005JD006548.
- 成安宁, 陈文, 黄荣辉. 1998. 积云对流参数化方案对气候数值模 拟的影响 [J]. 大气科学, 22 (6): 814 - 824. Cheng Anning, Chen Wen, Huang Ronghui. 1998. Influence of convective parameterization schemes on climate numerical simulation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 22 (6): 814 - 824.
- 丁一汇,张晶,赵宗慈. 1998. 一个改进的陆面过程模式及其模拟 试验研究第二部分:陆面过程模式与区域气候模式的耦合模拟试 验[J]. 气象学报,56(3):385-400. Ding Yihui, Zhang Jing, Zhao Zongci. 1998. An improved land surface processes model and its simulation experiment Part 2: Land surface processes model (LPM ZD) and its coupled simulation experiment with regional climate model [J]. Acta Meteorologica Sinice (in Chinese), 56

(3): 385-400.

- Dickinson R E, Henderson S A, Kennedy P J. 1993. Biosphere-atmosphere transfer scheme (BATS) version 1e as coupled to the NCAR community climate model [R]. NCAR Tech. Note, NCAR/TN-387+STR, pp72.
- Emanuel K A. 1991. A scheme for representing cumulus convection in large-scale models [J]. J. Atmos. Sci., 48: 2313-2329.
- 冯锦明, 符淙斌. 2007. 不同区域气候模式对中国地区温度和降水 的长期模拟比较 [J]. 大气科学, 31 (5): 805 - 814. Feng Jinming, Fu Congbin. 2007. Inter-comparison of long-term simulations of temperature and precipitation over China by different regional climate models [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31 (5): 805 - 814.
- 高学杰,徐影,赵宗慈,等. 2006. 数值模式不同分辨率和地形对东 亚降水模拟影响的试验 [J]. 大气科学,30(2):185-192. Gao Xuejie, Xu Ying, Zhao Zongci, et al. 2006. Impacts of horizontal resolution and topography on the numerical simulation of East Asian precipitation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30(2): 185-192.
- Gao Xuejie, Zhao Zongci, Ding Yihui, et al. 2001. Climate change due to greenhouse effects in China as simulated by a regional climate model [J]. Advance in Atmospheric Sciences, 18 (6): 1224-1230.
- Giorgi F, Visconti G. 1989. Two-dimensional simulations of possible mesoscale effects of nuclear war fires 2. Model results [J]. J. Geophys. Res., 94: 1127 1144.
- Giorgi F. 1990. Simulation of regional climate using a limited area model nested in a general circulation model [J]. J. Climate, 3: 941-963.
- Giorgi F. 1991. Sensitivity of simulated summertime precipitation over the western United States to different physics parameterizations [J]. Mon. Wea. Rev., 119: 2870-2888.
- Giorgi F, Marinucci M R, Bates G T. 1993a. Development of a second-generation regional climate model (RegCM2). Part I: Boundary-layer and radiative transfer processes [J]. Mon. Wea. Rev., 121: 2794 – 2813.
- Giorgi F, Marinucci M R, Bates G T, et al. 1993b. Development of a second-generation regional climate model (RegCM2). Part II: Convective processes and assimilation of lateral boundary conditions [J]. Mon. Wea. Rev., 121: 2814-2832.
- Giorgi F, Shields C. 1995. Test of precipitation parameterization available in latest version of NCAR regional climate model (RegCM) over continental United States [J]. J. Geophys. Res., 104: 6353-6375.
- Grell G A, Dudhia J, Stauffer D R. 1994. A description of the fifthgeneration Penn State/NCAR mesoscale model (MM5) [R]. NCAR Tech. Note, NCAR-TN-398 + STR, NCAR, Boulder, Colorado, pp121.
- Hasumi H, Emori S. 2004. K-1 Coupled GCM (MIROC) description [R]//K-1 Model Developers Tech. Rep. 1, 1-34.

- Holtslag A A M, de Bruijn E I F, Pan H L. 1990. A high resolution air mass transformation model for short-range weather forecasting [J]. Mon. Wea. Rev., 118: 1561–1575.
- Kiehl J T, Hack J J, Bonan G B, et al. 1996. Description of the NCAR community climate model (CCM3) [R]. Tech. Rep., NCAR/TN-420 + STR, National Center for Atmospheric Research.
- Kunkel K E, Andsager K, Liang X Z, et al. 2002. Observations and regional climate model simulations of heavy precipitation events and seasonal anomalies: A comparison [J]. J. Hydrometeor, 3: 322-334.
- Leung L R, Ghan S J. 1999a. Pacific Northwest climate sensitivity simulated by a regional climate model driven by a GCM. Part I: Control simulations [J]. J. Climate, 12: 2010-2030.
- Leung L R, Ghan S J. 1999b. Pacific Northwest climate sensitivity simulated by a regional climate model driven by a GCM. Part II:  $2 \times CO_2$  simulations [J]. J. Climate, 12: 2031-2053.
- Leung L R, Qian Y. 2003. The sensitivity of precipitation and snowpack simulations to model resolution via nesting in regions of complex terrain [J]. J. Hydrometeor, 4: 1025-1043.
- Leung L R, Qian Y, Han J, et al. 2003. Intercomparison of global reanalyses and regional simulations of cold season water budgets in the western United States [J]. J. Hydrometeor, 4: 1067-1087.
- Leung L R, Kuo Y H, Tribbia J. 2006. Research needs and directions of regional climate modeling using WRF and CCSM [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc, 87: 1747-1751.
- Liang X Z, Kunkel K E, Samel A N. 2001. Development of a regional climate model for U. S. midwest applications. Part I: Sensitivity to buffer zone treatment [J]. J. Climate, 14: 4363 – 4378.
- Liang X Z, Xu M, Kunkel K E, et al. 2007. Regional climate model simulation of U. S. – Mexico summer precipitation using the optimal ensemble of two cumulus parameterizations [J]. J. Climate, 20: 5201–5207.
- 刘华强, 钱永甫, 郑益群. 2002.  $P-\sigma$ 坐标系区域气候模式与 GCM 的嵌套试验 [J]. 高原气象, 21 (2): 113 118. Liu Huaqiang, Qian Yongfu, Zheng Yiqun. 2002. The tests of a  $P-\sigma$  hybrid coordinate regional climate model nested into a GCM [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 21 (2): 113–118.
- 刘黎平,钱永甫,吴爱明. 2000. 区域模式和 GCM 对青藏高原和西 北地区气候模拟结果的对比分析 [J]. 高原气象,19(3):313-322. Liu Liping, Qian Yongfu, Wu Aiming, et al. 2000. Comparison of simulated results of regional climate in summer over Qinghai – Xizang Plateau and Northwest China [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 19(3):313-322.
- Liu Huaqiang, Qian Yongfu, Zheng Yiqun. 2002. Effects of nested area size upon regional climate simulations [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 19 (1): 111-120.
- 潘劲松, 翟国庆, 高坤. 2002. 区域气候模拟中多种对流参数化方 案的比较研究 [J]. 大气科学, 26 (2): 206-220. Pan Jinsong,

Zhai Guoqing, Gao Kun. 2002. Comparisons of three convection parameterization schemes in regional climate simulations [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 26 (2): 206– 220.

- Pal J S, Giorgi F, Bi X Q, et al. 2007. Regional climate modeling for the developing world: The ICTP RegCM3 and RegCNET [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 88: 1395-1409.
- 屈鹏,杨梅学,郭东林,等. 2009. RegCM3 模式对青藏高原夏季气 温和降水的模拟 [J]. 高原气象,28 (4):738-744. Qu Peng, Yang Meixue, Guo Donglin, et al. 2009. Simulation of summer air temperature and precipitation over Tibetan Plateau with regional climate model (RegCM3) [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 28 (4):738-744.
- Rauscher S A, Seth A, Qian J H, et al. 2006. Domain choice in an experimental nested modeling prediction system for South America [J]. Theoretical and Applied Climatology, 86: 229-246.
- Samel A N, Wang S W, Wang W C. 1995. A comparison between observed and GCM-simulated summer monsoon characteristics over China [J]. J. Climate, 8: 1690-1696.
- 魏和林,符淙斌,王维强. 1998. 区域气候模式侧边界的处理对东 亚夏季风降水模拟的影响 [J]. 大气科学,22(5):780-790. Wei Heling, Fu Congbin, Wang Weiqiang. 1998. The effect of lateral boundary treatment of regional climate model on the East Asian summer monsoon rainfall simulation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 22(5):780-790.
- 闻新宇, 王绍武, 朱锦红, 等. 2006. 英国 CRU 高分辨率格点资料 揭示的 20 世纪中国气候变化 [J]. 大气科学, 30 (5): 894-904. Wen Xinyu, Wang Shaowu, Zhu Jinghong. 2006. An overview of China climate change over the 20th century using UK UEA/CRU high resolution grid data [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (5): 894-904.
- 王澄海,师锐. 2007. 青藏高原西部陆面过程特征的模拟分析 [J]. 冰川冻土,29 (1):73-81. Wang Chenghai, Shi Rui. 2007. Simulation of the land surface processes in the western Tibetan Plateau in summer [J]. Journal of Glaciology and Geocryology (in Chinese), 29 (1):73-81.
- 王澄海,师锐,左洪超. 2008. 青藏高原西部冻融期陆面过程的模

拟分析 [J]. 高原气象, 27 (2): 1-10. Wang Chenghai, Shi Rui, Zuo Hongchao. 2008. Analysis on simulation of characteristic of land surface in western Qinghai – Xizang Plateau during frozen and thawing [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 27 (2): 1-10.

- Xie P P, Chen M Y, Yang S, et al. 2007. A gauge-based analysis of daily precipitation over East Asia [J]. J. Hydrometeorology, 8 (3): 607-626.
- Xu Y, Gao X J, Shen Y, et al. 2009. A daily temperature dataset over China and its application in validating a RCM simulation [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 26 (4): 763-772.
- 杨雅薇,杨梅学. 2008. RegCM3 在青藏高原地区的应用研究:积 云参数化方案的敏感性 [J].冰川冻土,30(2):250-258. Yang Yawei, Yang Meixue. 2008. Application of regional climate model (RegCM3) to the Tibetan Plateau: Sensitivity experiments for cumulus convection parameterization scheme [J]. Journal of Glaciology and Geocryology (in Chinese), 30 (2): 250-258.
- 赵宗慈, 罗勇. 1999. 区域气候模式在东亚地区的应用研究——垂 直分辨率与侧边界对夏季季风降水影响研究 [J]. 大气科学, 23 (5): 522-532. Zhao Zongci, Luo Yong. 1999. Investigations of application for the regional climate model over East Asia [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 23 (5): 522-532.
- 张冬峰,高学杰,白虎志,等. 2005. RegCM3 模式对青藏高原地区 气候的模拟 [J]. 高原气象,24 (5):714-720. Zhang Dongfeng, Gao Xuejie, Bai Huzhi, et al. 2005. Simulation of climate over Qinghai – Xizang Plateau utilizing RegCM3 [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 24 (5):714-720.
- 郑益群,钱永甫,桂祈军,等. 2002. 初、边值条件对区域气候模拟 的影响 [J]. 大气科学,26(6):795-806. Zheng Yiqun, Qian Yongfu, Gui Qijun, et al. 2002. Effects of initial/lateral boundary conditions on regional climate simulations [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 26(6):794-806.
- Zeng X, Zhao M, Dickinson R E. 1998. Intercomparison of bulk aerodynamic algorithms for the computation of sea surface fluxes using TOGA COARE and TAO data [J]. J. Climate, 11: 2628– 2644.