

吕光辉, 于恩涛, 向伟玲, 等. 2009. WRF 模式分辨率对新疆异常降雨天气要素模拟的影响 [J]. 气候与环境研究, 14 (1): 85-96.
Lü Guanghui, Yu Entao, Xiang Weiling, et al. 2009. Effect of horizontal and vertical resolution on WRF simulation of the unusual rainfall event in Xinjiang [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 14 (1): 85-96.

WRF 模式分辨率对新疆异常降雨 天气要素模拟的影响

吕光辉^{1,2,4} 于恩涛^{1,2} 向伟玲^{1,2} 张广兴³

- 1 新疆大学资源与环境科学学院, 乌鲁木齐 830046
- 2 绿洲生态教育部重点实验室, 乌鲁木齐 830046
- 3 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所, 乌鲁木齐 830002
- 4 新疆大学干旱生态环境研究所, 乌鲁木齐 830046

摘要 利用新一代中尺度气候数值模式 WRF 对中国西北干旱典型地区——新疆 2000 年 10 月的异常降雨事件进行模拟, 主要研究了不同水平分辨率、垂直分辨率以及不同积云参数化过程对气温、降雨和土壤温度模拟的影响。结果表明: 不同分辨率的模拟基本上均模拟出了地面气温的分布特征, 且随着水平分辨率的提高, 模式模拟能力显著提高, 对地面气温值、分布范围的模拟渐趋合理, 同时模式对于地形引起的温度分布变化的模拟更加趋近实际。水平分辨率、垂直分辨率的提高同样改善了模式对降水的模拟能力, 分辨率的提高不仅改进了模式对降雨分布区模拟的精度, 也增强了对于地形引起的降雨变异的模拟能力。在土壤温度模拟上, 不同分辨率的试验均能模拟出土壤温度的分布特征, 较高水平分辨率有利于描述土壤温度分布细节, 但更容易出现“数值点风暴”现象。

关键词 WRF 模式 异常降雨事件 水平分辨率 垂直分辨率

文章编号 1006-9585 (2009) 01-0085-12 **中图分类号** P461 **文献标识码** A

Effect of Horizontal and Vertical Resolution on WRF Simulation of the Unusual Rainfall Event in Xinjiang

LÜ Guanghui^{1,2,4}, YU Entao^{1,2}, XIANG Weiling^{1,2}, and ZHANG Guangxing³

- 1 College of Resources and Environment Sciences, Xinjiang University, Urumqi 830046
- 2 Key Laboratory of Oasis Ecology (Xinjiang University) Ministry of Education, Urumqi 830046
- 3 Institute of Desert and Meteorology, China Meteorological Administration, Urumqi 830002
- 4 Institute of Arid Ecology and Environment, Xinjiang University, Urumqi 830046

Abstract The Weather Research and Forecasting Model (WRF) is used to simulate unusual rainfall event over Xinjiang during 5-7 October 2000, and the effects of model's horizontal and vertical resolution on the unusual weather events are investigated in detail. In principle, the model is able to characterize the spatial distribution of unusual weather. The results indicate that the increase in horizontal resolution could reduce the bias of the modeled surface temperature and precipitation. A finer vertical resolution leads to obviously improved rainfall simulations

收稿日期 2007-11-22 收到, 2008-10-10 收到修定稿

资助项目 中国博士后科学基金 20060391036 和新疆高校计划项目 XJEDU2005I06

作者简介 吕光辉, 男, 1963 年出生, 博士, 教授, 主要从事干旱区生态学研究。Email: ler@xju.edu.cn

with smaller biases. The increase in both horizontal and vertical resolution could produce better predictions of temperature and precipitation. The simulation of soil temperature is better with finer horizontal resolution, but “numerical storms” are also observed in the 10 km resolution test.

Key words Weather Research and Forecasting Model, extreme weather events, horizontal resolution, vertical resolution

1 引言

在大气和陆地生态系统研究中, 模式模拟方法正成为重要且极具发展前景的不可替代的研究手段。自 20 世纪 70 年代以来, 气候模式逐渐从全球模式向区域模式方向发展, 区域气候模式在全球模式的基础上提高了研究区域的时空分辨率。与全球模式相比, 区域气候模式不仅能体现较大尺度的环流强迫特征, 而且能细致描述区域内中小尺度的地形、下垫面状况等区域特征, 还能利用更高分辨率的资料同化, 因此模式模拟方法有利于提高模式的模拟能力和预报能力 (Kalnay et al., 1998; Colle et al., 2000), 可用于逐日和逐小时的天气过程的模拟研究。

考察一个模式的模拟能力, 首先考察它对气候平均态的模拟能力 (一般来讲, 多数模式都有这种能力), 其次考察它对气候变化的模拟能力, 这一点非常重要。但这两者有时并不统一, 对气候平均场有较好模拟性能的模式, 不一定能较好地模拟气候变化, 反之亦然。这是因为如果模式对初始场以及外强迫因子的变化不敏感时, 虽然能模拟出平均场, 但可能对气候变化的模拟不好。反之, 如果模式敏感, 则有可能模拟出气候变化, 但对平均场的模拟有系统误差。因此为了考察模式性能, 最好选取异常天气事件作为个例。

气候模拟领域中, 空间分辨率对于模式模拟影响的验证一直是重要的研究内容, Giorgi et al. (1996a, 1996b) 利用 RegCM2 详细比较了不同分辨率对降水模拟的影响, 发现大尺度平均降水量对分辨率十分敏感, 降水强度、频率以及表面通量对分辨率也是敏感的, 同时发现物理过程参数化较分辨率对模式模拟能力影响更大。结果还表明, 模式对极端干旱降水的模拟比对洪涝和多雨事件有更好的性能。赵宗慈等 (1999) 比较了东亚区域气候模拟中不同垂直分辨率的影响, 结果表明, 高垂直分辨率时的模拟降水明显优于低分

辨率, 但容易引起“数值点风暴”。Leung et al. (2003) 利用两个不同分辨率嵌套的方法比较了不同分辨率对区域气候长期模拟的影响, 发现对夏季而言, 较高分辨率不仅提高了沿海山区及盆地降雨的模拟能力, 而且改善了模式模拟的平均区域降水, 而对于冬季则只提高了沿海山区及盆地的降水模拟能力。汤剑平等 (2006) 利用 NCAR MM5 对江淮流域梅雨期强降水进行模拟实验, 研究了不同水平、垂直分辨率对梅雨强降水模拟的影响, 结论是水平分辨率的提高改善了降水模拟能力, 同时随水平分辨率提高, 地形及其他局部强迫因子作用更加明显, 导致局地性降水的比率也会增加; 垂直分辨率提高也改善了降水模拟能力; 不同积云参数化方案对强降水分布模拟都比较相似。

从国内的研究现状来看, 空间分辨率对区域气候模拟的影响研究多集中在我国东部季风区, 而对西北干旱区的研究很少。我国西北地区是世界上气候变率很大的地区, 其气候变化在东亚、中国及全球的气候变化中都有重要地位 (施雅风等, 2003), 因此研究在西北干旱区特殊的地理气候环境下, 空间分辨率对气候模式模拟影响有重要意义。本文利用新一代气候数值模式 WRF 对中国西北干旱典型地区——新疆 2000 年 10 月的异常降雨事件进行模拟, 主要研究不同水平分辨率、垂直分辨率以及不同积云参数化过程对气温、降雨和土壤温度模拟的影响。

2 方案设计

2.1 模式简介

本文采用新一代中尺度数值模式 WRF, 该模式是从 MM5 发展而来的第二代数值天气预报系统, 被设计用做大气科学研究和气候业务预报。WRF 模式有许多新特性, 包括多动力学核心、三维数据同化系统, 支持并行运算的软件架构以及支持系统扩展的功能, 该模式可用于从米级直至

几千公里模拟尺度。

WRF 模式是美国国家气象研究中心 (NCAR)、美国国家环境预测中心 (NCEP)、美国预测系统实验室 (FSL)、美国空军天气局 (AFWA) 等多家机构通力合作的结果, 该模式提供了更完善的物理过程参数化、数据处理算法和资料同化系统, 使得模拟更加精确和有效, 不仅支持气候实时模拟, 也支持气候敏感性实验。模式在数据输入方面, 除了原来的地形、土地利用方式等资料外, 还采用了具有更高分辨率的地表反照率、植被及土壤类型等资料。

区域气候模式虽然在各个地区可以通用, 但是在不同的地理区域模拟能力不同 (鲍艳等, 2006), 模式对模拟区域的选择 (赵宗慈等, 1999)、初边值条件 (Gao et al., 2001; 郑益群等, 2002)、侧边界嵌套方案 (Liu et al., 2002; 魏和林等, 1998) 及模式中一些主要物理过程参数化方案 (Yanai et al., 1968; Miyakoda et al., 1971; Giorgi, 1991; Giorgi et al., 1993; Giorgi et al., 1995; 丁一汇等, 1998; 林朝晖等, 2001; 史学丽等, 2001; 苏凤阁等, 2002; 纪立人等, 2005) (如积云对流参数化和陆面过程方案选择) 很敏感。本文参考其他数值模拟试验设定了参数化方案, 如表 1 所示。

2.2 模拟时段的天气状况、资料及模拟评估方法

2000 年 10 月, 新疆北部地区出现长时间的异常天气状况, 气温持续偏低, 日平均气温比历年同期偏低 5 °C 以上, 降水量持续偏多。10 月北疆地区的平均气温偏低, 居历史第一位, 降水量偏多居历史第二位。

表 1 模式物理和动力选项

Table 1 Model physics and dynamics options

选项	方案
微物理	Single-Moment 3-class 方案
长波辐射	RRTM 长波辐射
短波辐射	Dudhia 短波辐射
表层物理	MM5 相似方案
陆面过程	5 层热力混合方案
行星边界层方案	延世大学方案
积云参数化	Kain-Fritsch 方案 Grell-Devenyi 方案

从新疆 55 个气象站 (站点分布见图 1a) 实测日平均气温 (图 2a) 看, 北疆气温明显低于南疆, 阿勒泰地区、博州、喀什都出现了低于 3 °C 的天气。从降雨量 (图 2b) 上看, 在低温地区出现了异常降雨天气, 10 月 5 日阿勒泰、富蕴、伊宁和昭苏的日降水量分别为 11.9、10.6、20.3 和 13.8 mm; 10 月 6~9 日持续有降雨天气, 为进行异常天气模拟研究提供了极好的个例。

本文模拟时段为 2000 年 10 月 4 日 12 时到 10 月 8 日 12 时 (北京时间), 使用 WRF 实时模拟模式运行, 积分时间步长 3 min, 本文按一日 24 h 做结果分析, 因此选取 10 月 5~7 日的结果。模式使用 Lambert 投影, 试验区域中心点在 (45°N, 83°E), 水平范围为 2 340 km×1 890 km, 地形资料准确地捕捉了天山山脉、昆仑山等地形特征, 对塔里木盆地和吐鲁番盆地也有很好地反映, 在土地利用方式数据中, 土地利用以半沙漠 (id=19, id 为土地利用方式类名, 下同) 和灌丛 (id=8) 为主, 土壤类型以沙土 (id=1) 和沙质粘土 (id=10) 为主 (图 3)。

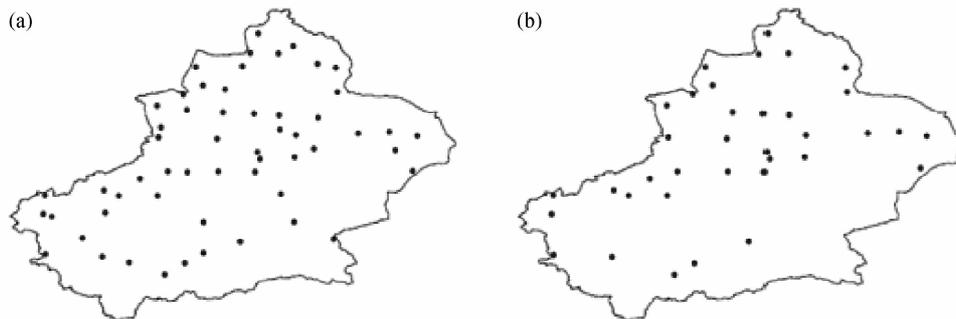


图 1 新疆实测站点分布: (a) 55 个国家基准站点; (b) 36 个土壤温度数据站点

Fig. 1 Distribution of observation station of Xinjiang: (a) 55 basic observation stations of state; (b) 36 observation stations of soil temperature

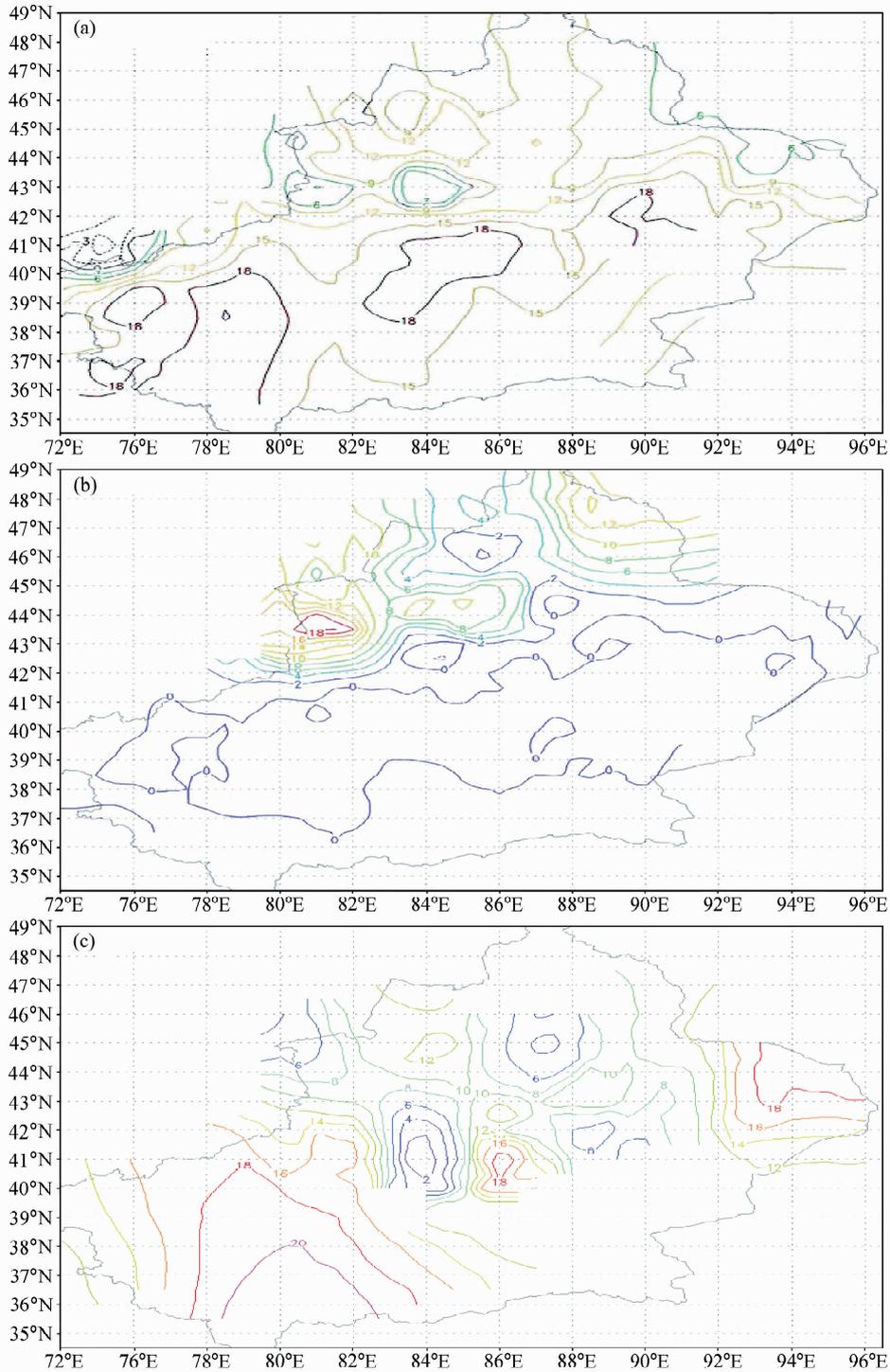


图2 2000年10月5日实测 (a) 气温 (单位:°C)、(b) 降雨量 (单位:mm) 和 (c) 土壤温度 (单位:°C)
Fig. 2 Observed temperature (a), precipitation (b) and soil temperature (c) on 5 Oct 2000

初始和侧边界场来自 NCEP 的航空 FNL (Final Analysis) 资料, 该资料的水平分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$, 垂直方向到 100 hPa, 共分为 21 层, 时间间隔为 6 h。分别用水平分辨率为 90、30 和 10 km

及 23 和 14 层 σ 垂直分层 (表 2) 对 2000 年 10 月新疆地区的异常天气过程进行模拟。模式每 3 h 输出一次数据, 选取实测和模拟总降雨量分析降雨情况, 取实测和模拟地面 2 m 气温分析日平均

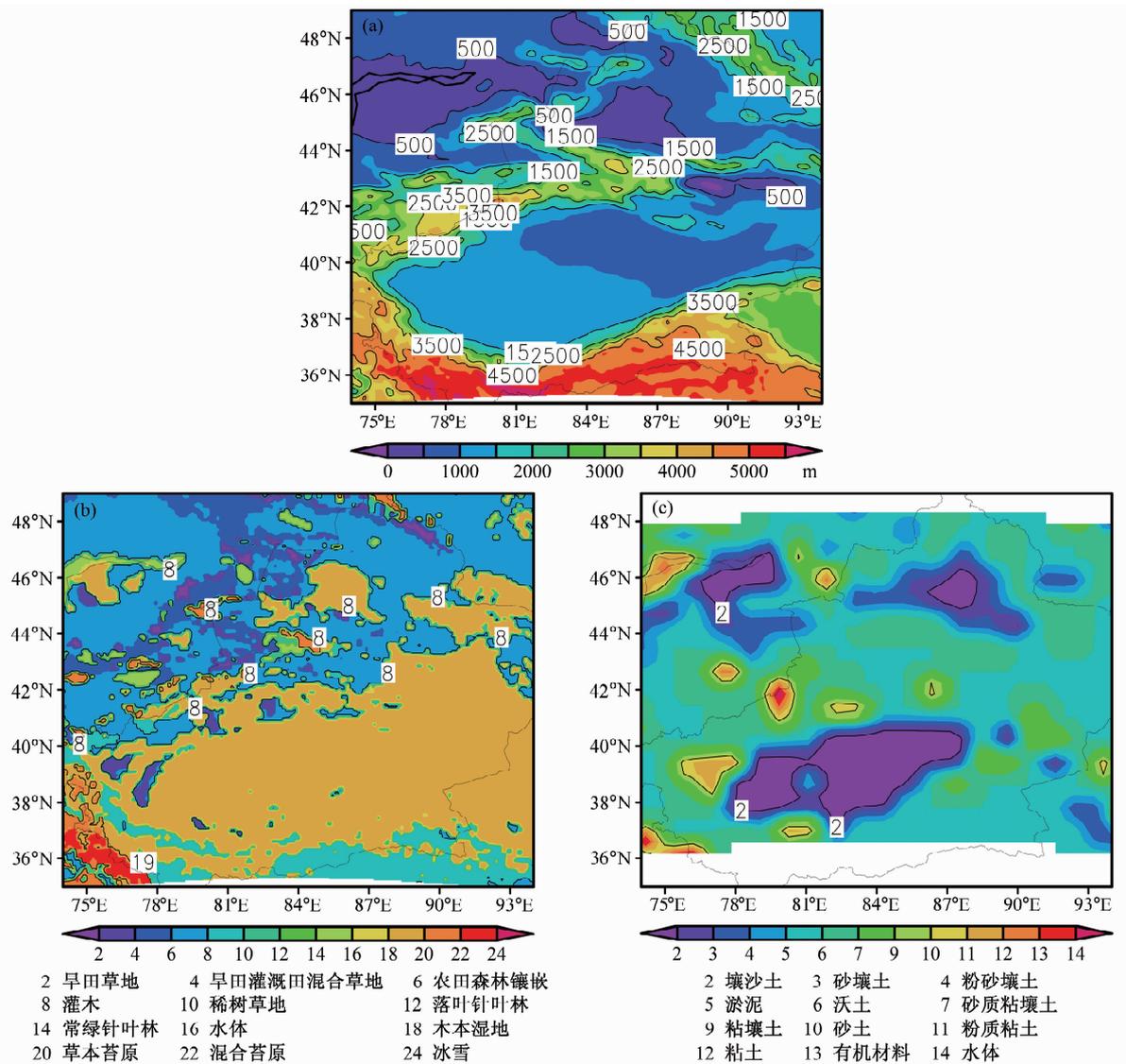


图3 研究区分布图：(a) 地形；(b) 土地利用方式；(c) 土壤类型

Fig. 3 (a) Topography, (b) landuse and (c) soil types experiment domain

表 2 不同水平、垂直分辨率模拟试验

Table 2 Simulation experiments of different resolution schemes

试验	水平分辨率/km	分辨率	积云参数化	垂直层
Kf-90-23	90	10'	KF 方案	23
Kf-30-23	30	10'	KF 方案	23
Kf-10-23	10	2'	KF 方案	23
Gr-90-23	90	10'	GD 方案	23
Gr-30-23	30	10'	GD 方案	23
Gr-10-23	10	2'	GD 方案	23
Kf-90-14	90	10'	KF 方案	14
Kf-30-14	30	10'	KF 方案	14
Kf-10-14	10	2'	KF 方案	14
Gr-90-14	90	10'	GD 方案	14
Gr-30-14	30	10'	GD 方案	14
Gr-10-14	10	2'	GD 方案	14

气温资料，取实测和模拟地面土壤温度平均分析土壤温度数据。实测资料有新疆 55 个国家基准站 (图 1a) 日均气温、降雨量资料，36 站点 (图 1b) 土壤温度数据，实测气温、降雨量、土壤温度图利用 GrADS 插值生成。

3 结果分析

3.1 气温

图 4 为用不同水平分辨率及不同的积云参数化方案模拟的 2000 年 10 月 5 日新疆地区的日平均地面气温分布，不同分辨率的模拟试验都成功

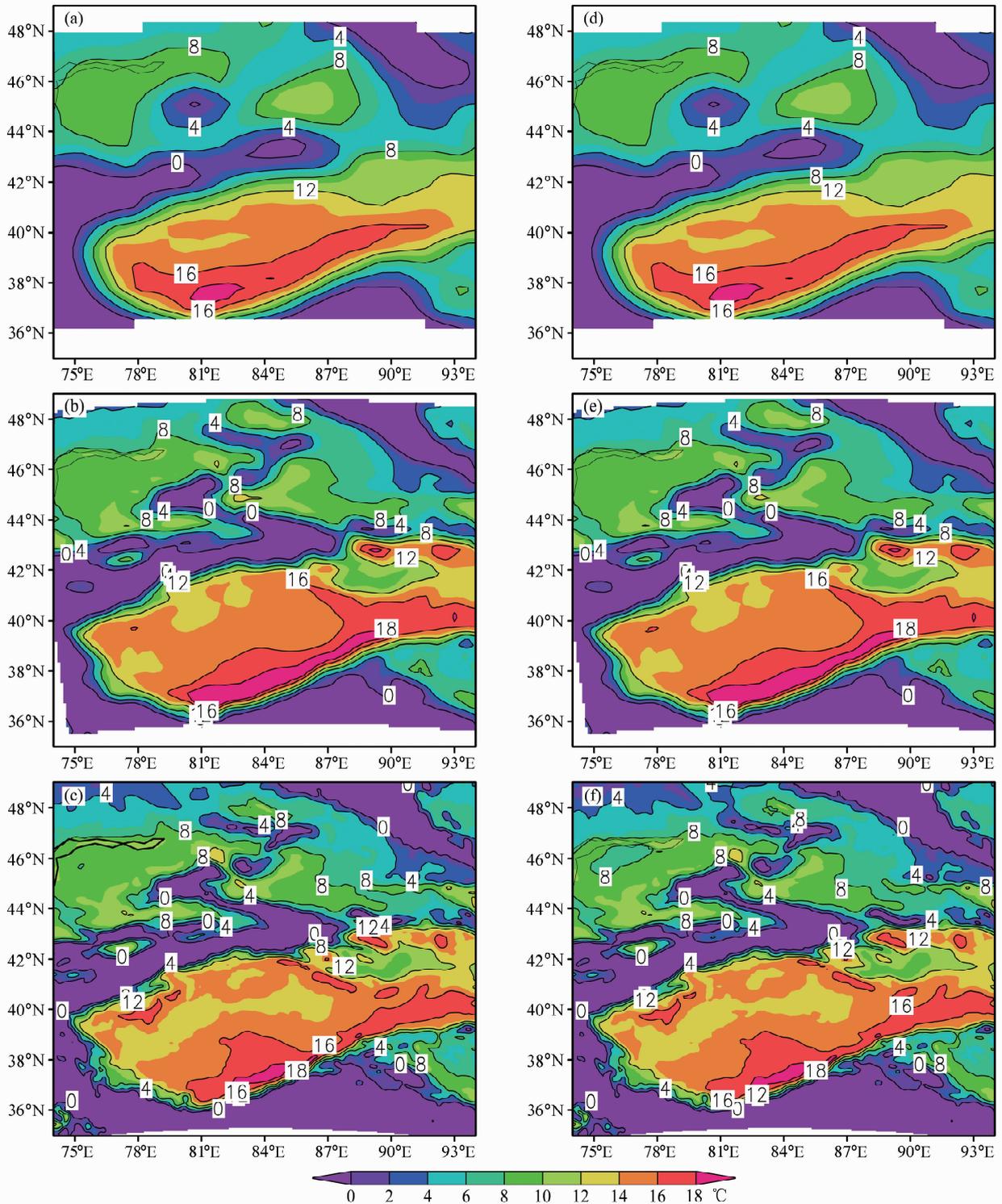


图 4 不同水平分辨率参数化方案模拟的 2000 年 10 月 5 日新疆地面气温: (a) Kf-90-23; (b) Kf-30-23; (c) Kf-10-23; (d) Gr-90-23; (e) Gr-30-23; (f) Gr-10-23

Fig. 4 Surface temperature on 5 Oct 2000 in Xinjiang simulated with different resolutions and cumulus schemes by WRF: (a) Kf-90-23; (b) Kf-30-23; (c) Kf-10-23; (d) Gr-90-23; (e) Gr-30-23; (f) Gr-10-23

地再现了地面气温的分布特征, 并都基本模拟出了塔里木盆地的高温区和阿勒泰山地、天山山区等低温区。

总体来看, 新疆北部模拟较理想, 南疆模拟结果准确度相对较低, 塔里木盆地地面气温模拟值较实测温度偏低 3~6 °C。从不同水平分辨率看, 90 km 分辨率模拟的塔里木盆地 12 °C 等温线范围过大, 并且没有模拟出 18 °C 的高温中心, 在阿勒泰山区, 虽然模拟出了低温中心分布, 但气温随地形变化趋势却没有反映出来; 30 km 分辨率试验模拟出了塔里木盆地 18 °C 高温中心, 对伊犁谷地和吐鲁番盆地等的气温模拟分布特征表现要优于 90 km 分辨率实验; 10 km 分辨率试验不仅模拟出了塔里木盆地的高温中心, 并且对地形引起的气温变化描述十分清晰。模拟的阿勒泰山地、吐鲁番盆地和伊犁谷地的地面气温分布趋近于实测气温。从图 4 还可以看出, 气温对于参数化方案选择并不敏感, 不同的积云参数化方案气温分布差别不是很明显。

为更详细分析不同分辨率对气温模拟的影响, 本文将与气象站经纬度对应点的模式输出值作为模式模拟值, 计算了新疆 55 个站点模式模拟值与气象站观测值的偏差 (B_{ias})、标准误差 (E_{RMS}) 和相关系数 (R)。

$$B_{ias} = \frac{\sum_i (\phi_{im} - \phi_{io})}{N}, \quad (1)$$

$$E_{RMS} = \left[\frac{\sum_i (\phi_{im} - \phi_{io})^2}{N} \right]^{1/2}, \quad (2)$$

$$R = \frac{\sum_i (\phi_{im} - \bar{\phi}_m)(\phi_{io} - \bar{\phi}_o)}{\left[\sum_i (\phi_{im} - \bar{\phi}_m)^2 \sum_i (\phi_{io} - \bar{\phi}_o)^2 \right]^{1/2}}, \quad (3)$$

其中, ϕ_{im} 为 WRF 模式模拟值, ϕ_{io} 为气象站观测值, $\bar{\phi}_m$ 为 WRF 模式模拟值均值, $\bar{\phi}_o$ 为气象站观测值均值, N 为站点数。

从表 3 可以看出, Kain-Fritsch 参数化方案和 Grell-Devenyi 参数化方案, 随着水平分辨率的提高, 偏差减小, 模式模拟的气温值增大, 但是标准误差和相关系数没有相同的趋势, 而是出现了“中间优两头劣”的趋势。30 km 试验结果要优于分辨率更高和更低的试验, 这是否显示了 WRF 出现了对于分辨率提高的“饱和现象”呢? 经过深入分析, 认为其原因是: 1) 模式使用的 NCEP/FNL 输入资料的分辨率是 $1^\circ \times 1^\circ$, 可以提供准确的大尺度气象要素分布及时间演变, 但对细节反映较差, 可能影响高分辨率的模拟, 出现饱和现象; 2) 将与气象站经纬度对应点的模式输出值作为模式模拟值, 其精度受模式水平垂直网格插值的影响, 实测资料使用新疆 55 个气象站资料, 其分辨率低于 30 km, 影响了对模式的检验效果; 3) 尽管高分辨率能够模拟出温度的细微空间结构, 但温度分布及演变的细微差别会导致采用传统的统计方法计算的评分 (如偏差、标准误差) 大大降低; 4) 水平及垂直分辨率的提高, 使模式的水平网格和垂直分层发生变化, 对物理过程参数化会产生较大影响。基于低分辨率的边界层方案可能不合适, 或需对其中的参数进行调整, 或需要对模式的物理过程作相应的改进, 包括云、辐射过程、对流参数化过程、陆面过程等, 但分辨率是否饱和需要更多实例验证。

在温度的模拟上, Kain-Fritsch 参数化方案和 Grell-Devenyi 积云参数化方案差别很小, 这也可以从图 4 中反映出来。

我们也对比分析了 14 层垂直分辨率模拟结果 (图略), 从结果来看, 垂直分辨率的提高改善了模式对气温的模拟能力, 23 层分辨率模拟结果要优于 14 层分辨率结果, 并且低垂直分辨率对于地形引起的气温变化模拟没有高分辨率试验合理。

3.2 降水

采用不同水平、垂直分辨率及不同的积云参

表 3 不同水平分辨率和参数化方案模式模拟气温与实测数据的偏差、标准误差和相关系数

Table 3 Bias, root-mean-square error and coefficient of correlation of observed and simulated temperature of different resolutions and cumulus scheme

	Kf-90-23	Kf-30-23	Kf-10-23	Gr-90-23	Gr-30-23	Gr-10-23
偏差	-5.07	-4.40	-4.33	-5.26	-4.32	-4.23
标准误差	6.41	5.81	6.17	6.57	5.77	6.19
相关系数	0.61	0.69	0.62	0.62	0.70	0.62

数化方案，利用 WRF 模式模拟了 2000 年 10 月 5 日新疆地区的日降水量分布，如图 5 所示，各种参数化方案都模拟出了主要的降雨带，但各个方

案对降水带的位置、强度及分布趋势模拟各不相同。

从 Kain-Fritsch 积云参数化方案 23 层模拟结

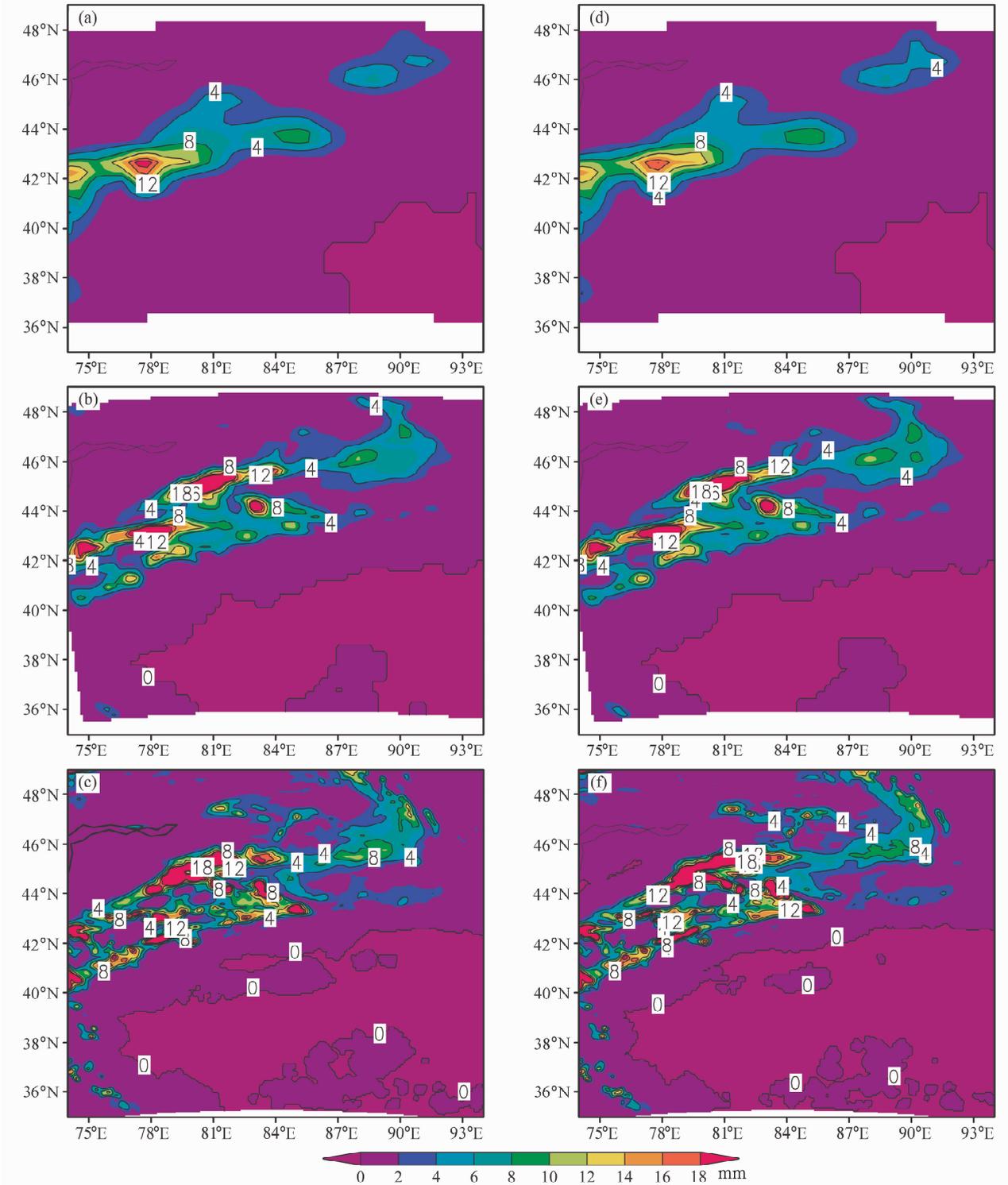


图 5 同图 4，但为降雨

Fig. 5 Same as Fig. 4, but for precipitation

果看, 90 km 模拟的降水准确性明显低于其他结果, 模拟的阿勒泰山区降雨偏弱, 降雨等值线稀疏, 基本没有反映出地形引起的降雨趋势; 30 km 分辨率合理地模拟出了降雨分布区, 对山区降雨模拟较好, 模拟的降雨分布范围和强度与实际比较接近, 并且成功地模拟出阿勒泰地区的强降雨中心; 10 km 分辨率的试验不仅理想地模拟出了降雨分布特征和强度, 并且对地形引起的降雨模拟的更加细致, 结果更合理, 更接近实际。因此, 随着水平分辨率的提高, 模式对降水的模拟能力也在提高。在 Grell-Devenyi 积云参数化试验中, 90 km 模拟和 Kain-Fritsch 参数化模拟结果很相似, 降雨等值线稀疏, 没有反映出地形引起的降雨趋势, 30 km 分辨率能合理地模拟出降雨分布区, 对山区降雨模拟较好, 10 km 分辨率的试验模拟出了降雨分布特征和强度, 对地形引起的降雨模拟更加细致。

从表 4 可以看出, 随着水平分辨率的提高, 偏差和标准误差一直在减小。从偏差来看, 不论 Kain-Fritsch 方案还是 Grell-Devenyi 方案, 其模拟的降雨量值都在增大, 模拟数据和实测数据的相关系数越来越高, 模拟性能显著提高。不同的积云参数化方案对降雨的模拟也很有影响, 可以看出, Grell-Devenyi 方案要优于 Kain-Fritsch 方案, 90、30 和 10 km 分辨率的模拟试验中, Grell-Devenyi 方案结果均优于 Kain-Fritsch 参数化方案, 说明西部干旱区和东部季风区一样 (汤剑平等, 2006),

Grell-Devenyi 方案更适用。

为了更细致地检验不同积云方式和分辨率对整个降雨过程的影响, 同时计算了新疆 55 个气象站 2000 年 10 月 5~7 日实测温度与模式 (Kain-Fritsch 参数化方案) 模拟值的偏差、标准误差和相关系数 (如表 5 所示)。随着水平分辨率的升高, 标准误差减小, 说明较高的水平分辨率确实提高了对降水过程模拟的精度。10 km 分辨率的偏差、标准误差都比其他分辨率小, 但是相关系数也小; 对降雨过程总体而言, 30 km 分辨率相关系数最大。从偏差上可以看出, Kain-Fritsch 参数化方案随着水平分辨率的提高, 模拟的降雨量在减小。

我们也比较了 14 层垂直分辨率的模式结果 (图略), 高垂直分辨率模拟结果优于垂直分辨率, 并且低垂直分辨率对于地形引起的降雨量的变化没有高分辨率详细。

3.3 土壤温度

图 6 为不同水平分辨率模拟的 2000 年 10 月 5 日新疆 36 个站点实测日土壤温度与 90、30 和 10 km 水平分辨率的土壤温度分布情况。由于站点稀少, 实测土壤温度插值很粗糙, 但不同分辨率的模拟试验大致再现了土壤温度的分布特征, 不同分辨率对土壤温度分布特征模拟基本相同。90 和 30 km 试验都模拟出了阿勒泰山地、天山山地土壤高低温分布区, 但总体来说, 模拟值均偏低, 也没有模拟出实测数据中的最高温度; 10 km 分

表 4 不同水平分辨率和参数化方案模式模拟降水与实测数据的偏差、标准误差和相关系数

Table 4 Bias, root-mean-square error and coefficient of correlation of observed and simulated precipitation of different resolutions and cumulus scheme

	Kf-90-23	Kf-30-23	Kf-10-23	Gr-90-23	Gr-30-23	Gr-10-23
偏差	1.70	1.59	1.32	1.82	1.58	1.33
标准误差	4.77	4.29	4.20	4.66	4.28	4.11
相关系数	0.29	0.51	0.51	0.36	0.51	0.55

表 5 不同水平分辨率和参数化方案模式模拟土壤温度与实测数据的偏差、标准误差和相关系数

Table 5 Bias, root-mean-square error and coefficient of correlation of observed and simulated soil temperature of different resolutions

	Kf-90-23	Kf-30-23	Kf-10-23
偏差	1.12	0.88	-0.60
标准误差	4.37	4.46	3.08
相关系数	0.21	0.28	0.11

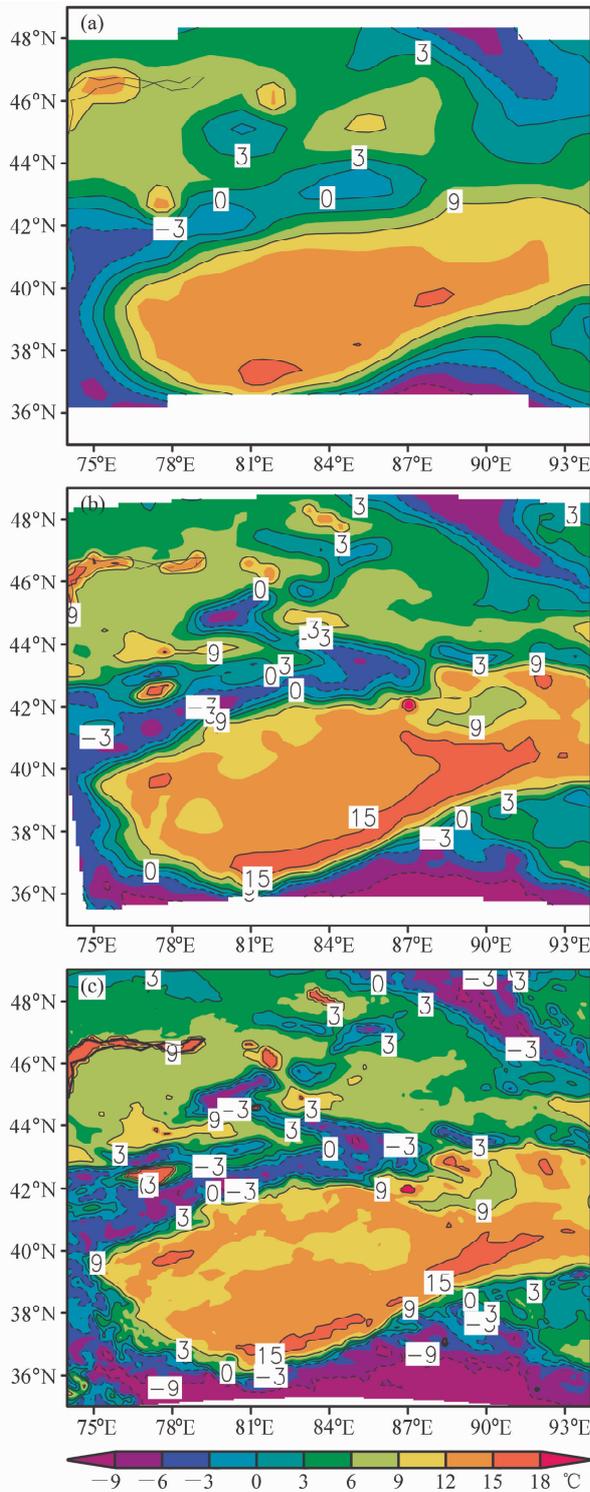


图6 不同水平分辨率参数化方案模拟的2000年10月5日新疆土壤温度分布: (a) 90 km; (b) 30 km; (c) 10 km

Fig. 6 Soil temperature on 5 Oct 2000 in Xinjing simulated with different resolutions and cumulus schemes by WRE: (a) 90 km; (b) 30 km; (c) 10 km

分辨率能合理地模拟出因地形引起的土壤温度的变化,如阿勒泰山区、伊犁谷地和昆仑山区,对吐鲁番地区的模拟也要明显优于低水平分辨率试验,因此高水平分辨率有利于描述土壤温度的分布细节。

在10 km土壤分布图上,我们观察到许多数值异常点。本文假定局地(山地地形中垂直高程差小于10 km)温差超过 30°C 为“数值点风暴”,则可以看出高水平分辨率模式有利于描述土壤分布细节,但更容易出现“数值点风暴”,分析其原因:1)异常值都出现在山地地形上,因此模式准备资料中高分辨率地形资料的准确性、陆面过程对于高分辨率地形的敏感程度都可能影响土壤温度结果;2)本文时间步长是3 min,与本文使用的5-layer thermal diffusion陆面过程时间步长是否协调,也可能是引起“数值点风暴”的原因。

4 结论与讨论

利用WRF模式对2000年10月新疆异常降雨状况进行模拟,考察了不同水平、垂直分辨率对异常降雨事件模拟的影响。通过分析可以得出以下结论:

(1)不同分辨率的模拟试验均成功再现了地面气温的分布特征,但对温度值的模拟却不相同。总体来看,新疆北部模拟结果较理想,塔里木盆地气温模拟值较实测温度偏低 $3\sim 6^{\circ}\text{C}$ 。分辨率的提高增强了模式对气温的模拟能力,并且对地形引起的气温变化描述更加清晰。气温对于参数化方案选择并不敏感,不同的积云参数化方案气温分布差别不是很明显。

(2)各种参数化方案均模拟出了主要的降雨带,但各个方案对降雨带的位置、强度及分布趋势模拟各不相同。随着水平分辨率的提高,模式对于降水的模拟能力在提高。不同的积云参数化方案对降水的模拟精度也影响较大,总体上Grell-Devenyi方案要优于Kain-Fritsch参数化方案。

(3)WRF分辨率提高是否会出现“饱和现象”?本文30 km试验结果要优于更高的分辨率,经过分析认为,模式输入资料的分辨率、验证资料分辨率、温度分布时间演变差别和模式参数化方案都可能是其原因,但分辨率是否饱和需要更

多实例验证。

(4) 不同分辨率的模拟试验大致再现了土壤温度的分布特征, 不同分辨率对高低温中心的分布特征和区域模拟基本相同, 高水平分辨率有利于描述土壤温度分布细节。

(5) 假定局地(山地地形中垂直高程差小于 10 km) 温差超过 30 °C 为“数值点风暴”, 则高水平分辨率模式有利于描述土壤分布细节, 但更容易出现“数值点风暴”, 这可能与地形资料的准确性、陆面过程对于高分辨率地形的敏感程度、模拟的时间步长等因素有关, 有待进一步证实。

本文利用 WRF 模式的水平、垂直分辨率对短期异常降雨事件模拟的影响进行了探讨, 但空间分辨率对气候模拟的影响应该包括对长期气候平均状态和短期异常天气事件的影响两个方面, 因此, 以后研究中将加深空间分辨率对长期气候平均值模拟影响的探讨。

参考文献 (References)

- 鲍艳, 吕世华, 陆登荣, 等. 2006. RegCM3 模式西北地区的应用研究 I: 极端干旱事件的模拟 [J]. 冰川冻土, 28 (2): 164 - 175. Bao Yan, Lü Shihua, Lu Dengrong, et al. 2006. 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 - 175.
- Colle B A, Mass C F, Westrick K J. 2000. MM5 precipitation verification over the Pacific Northwest during the 1997-99 cool seasons [J]. Wea. Forecasting, 15: 730 - 744.
- 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耦合的模拟试验 [J]. 气象学报, 56 (4): 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 Sinica (in Chinese), 56 (4): 385 - 400.
- Gao Xuejie, Zhao Zongci, Ding Yihui, et al. 2001. Climate change due to greenhouse effects in China [J]. Advance in Atmospheric Sciences, 18 (2): 1224 - 1230.
- Giorgi F. 1991. Sensitivity of simulated summer time precipitation over the western United States to different physics parameterizations [J]. Mon. Wea. Rev., 11: 2870 - 2888.
- Giorgi F, Marinucci M R, Canio D, et al. 1993. Development of second generation regional climate model (RegCM 2). Convective processes and assimilation of lateral boundary conditions [J]. Mon. Wea. Rev., 121: 2814 - 2832.
- Giorgi F, Christine S. 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.
- Giorgi F, Marinucci M R. 1996a. An investigation of the sensitivity of simulated precipitation to model resolution and its implications for climate studies [J]. Mon. Wea. Rev., 124: 148 - 166.
- Giorgi F, Mearns L O, Shields C, et al. 1996b. A regional model study of the importance of the 1998 drought and the 1993 flood over the central United States [J]. J. Climate, 9: 1150 - 1162.
- 纪立人, 陈嘉滨, 张道民, 等. 2005. 数值预报模式动力框架发展的若干问题综述 [J]. 大气科学, 29 (1): 120 - 130. Ji Liren, Chen Jiabin, Zhang Daomin, et al. 2005. Review of some numerical aspects of the dynamic framework of NWP model [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 29 (1): 120 - 130.
- Kalnay E, Lord S J, McPherson R D. 1998. Maturity of operational numerical weather prediction: Medium range [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 79: 2753 - 2769.
- Leung L R, Qian Y. 2003. The sensitivity of precipitation and snow pack simulations to model resolution via nesting in regions of complex terrain [J]. Hydrometeor., 10: 1025 - 1043.
- Liu Huaqiang, Qian Yongfu, Zheng Yiqun. 2002. Effects of nested area size on regional climate simulations [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 19 (1): 111 - 120.
- 林朝晖, 杨小松, 郭裕福. 2001. 陆面过程模式对土壤含水量初值的敏感性研究 [J]. 气候与环境研究, 6 (2): 240 - 248. Lin Zhaohui, Yang Xiaosong, Guo Yufu. 2001. Sensitivity of land surface model to the initial condition of soil moisture [J]. Climate and Environmental Research (in Chinese), 6 (2): 240 - 248.
- Miyakoda K, Strickler R F, Nappo C J, et al. 1971. The effect of horizontal grid resolution in an atmospheric circulation model [J]. J. Atmos. Sci., 28 (4): 481 - 499.
- 史学丽, 丁一汇, 刘一鸣. 2001. 区域气候模式对中国东部夏季气候的模拟实验 [J]. 气候与环境研究, 6 (2): 249 - 254. Shi Xueli, Ding Yihui, Liu Yiming. 2001. Simulation experiments of summer rainbelt in China with the regional climate model [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 6 (2): 249 - 254.
- 施雅凤, 沈永平, 李栋梁, 等. 2003. 中国西北地区由暖干向暖湿转型特征和趋势探讨 [J]. 第四纪研究, 23 (2): 152 - 164. Shi Yafeng, Shen Yongping, Li Dongliang, et al. 2003. Discussion on the present climate change from warm dry to warm wet in Northwest China [J]. Quaternary Sciences (in Chinese), 23 (2): 152 - 164.
- 苏凤阁, 郝振纯. 2002. 一种陆面过程模式对径流的模拟研究 [J]. 气候与环境研究, 7 (4): 423 - 432.
- Su Fengge, Hao Zhenchun. 2002. A study of stream flow simulations using a land surface model [J]. Climate and Environmental

- Research (in Chinese), 7 (4): 423 - 432.
- 汤剑平, 赵鸣, 苏炳凯. 2006. 分辨率对区域气候极端事件模拟的影响 [J]. 气象学报, 64 (4): 432 - 443. Tang Jianping, Zhao Ming, Su Bingkai. 2006. Effects of model resolution on the simulation of regionally climatic extreme events [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 64 (4): 432 - 443.
- 魏和林, 符淙斌, 王维强, 等. 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 Helin, Fu Congbin, Wang Weiqiang, et al. 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.
- Yanai M, Nitta T. 1968. Finite difference approximation for baroscopic instability problem [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 46 (5): 389 - 403.
- 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): 795 - 806.
- 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 Asian [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 23 (5): 522 - 532.