气候-天气研究及预报模式(CWRF)在中国的应用：区域优化

刘术艳[1,3] 梁信忠[1] 高炜[2,3] 张华[4]

1 Illinois State Water Survey, Department of Natural Resources, University of Illinois at Urbana-Champaign, USA
2 U. S. Department of Agriculture UV-B Monitoring and Research Program, Natural Resource Ecology Laboratory, Colorado State University, USA
3 华东师范大学地理信息科学教育部重点实验室，上海 200062
4 中国气象局气候研究开放实验室，北京 100081

摘 要 从资料分析和实际模拟两个方面，对中国区域气候模拟中的首要问题——模拟区域的选取进行了研究。首先，采用相关分析确定大尺度环流因子影响中国区域降水的关键区，以保证行星及天气尺度系统能够有效地通过区域气候模式的侧边界传入模拟区域，同时依靠自身的物理机制使中尺度系统在模拟区域内部发展；其次，利用 NRA（NCEP-NCAR Reanalysis II）和 ERA（ECMWF Reanalysis 40）两再分析资料的相关性，对侧边界场资料的可信性进行分析，结果表明南部赤道洋面附近和青藏高原地区两种再分析资料的相关系数很低，表明资料的可信度低，因此侧边界的位置要尽量避开这些地区。根据以上分析结果，确定了中国区域气候模拟的最佳区域，在此基础上利用实际个例模拟对模拟区域的优化结果进行验证。将美国伊利诺伊州立大学水文研究所开发的 CWRF（Climate - Weather Research and Forecasting Model）应用于中国季风区，选取 1998 年夏季的极端洪涝事件作为验证个例，结果表明：模拟区域对区域气候模式的模拟性能有决定性的作用，资料分析确定的最佳模拟区域能够较好地再现 1998 年长江流域的极端洪涝事件。当模拟区域扩大，南部缓冲区位于赤道，东西侧边界远离环流因子影响关键区时，模拟结果急剧下降，基本无法再现实测降水。当模拟区域仅在东西方向扩大时，模拟结果略好于上述扩大的区域，但仍然远低于资料分析确定的最佳区域，表明有效地抓住主控环流因子对区域气候模拟的重要影响。资料分析和实际模拟的一致结论确定了中国区域气候模拟的最佳区域，实现了 CWRF 对中国季风区模拟区域的优化。

关键词 区域气候模式 CWRF 缓冲区 模拟区域优化 降水
文章编号 1006 - 9895 (2008) 03 - 0457 - 12 **中图分类号** P435 **文献标识码** A

Application of Climate - Weather Research and Forecasting Model (CWRF) in China: Domain Optimization

LIU Shu-Yan[1, 3], LIANG Xin-Zhong[1], GAO Wei[2, 3], and ZHANG Hua[4]

1 *Illinois State Water Survey, Department of Natural Resources, University of Illinois at Urbana-Champaign, USA*
2 *U. S. Department of Agriculture UV-B Monitoring and Research Program, Natural Resource Ecology Laboratory, Colorado State University, USA*
3 *Key Laboratory of Geographic Information Science of the Ministry of Education, East China Normal University, Shanghai* 200062
4 *Laboratory for Climate Studies, China Meteorological Administration, Beijing* 100081

Abstract A primary issue for applying a regional climate model is the computational domain design, where localiza-

收稿日期 2006 - 11 - 15，2007 - 06 - 26 收修定稿
资助项目 国家重点基础研究发展规划项目 2006CB403404 和 2006CB403707，国家自然科学基金重点项目 40730526，美国农业部全球变化紫外线辐射观测与研究实验室及遥感模式与农业可持续发展研究中心 USDA CSREES（2006 - 34263 - 16926）资助
作者简介 刘术艳，女，1977 年出生，博士，主要从事区域气候模式发展及应用方面的研究。E-mail：liusy@uiuc.edu

tion is necessary to optimize the model performance. This study focuses on the domain optimization for application of the Climate-Weather Research and Forecasting Model (CWRF), developed by Illinois State Water Survey, University of Illinois at Urbana-Champaign, in China through physical process understanding and numerical sensitivity study. First, correlation analysis of observational data is conducted to identify the key regions of large-scale circulation processes that govern China precipitation variations, and two observational reanalysis data are compared to determine the poor areas where large forcing data errors or uncertainties occur. The optimal domain is chosen such that the lateral boundary buffer zones contain the key process regions and avoid the poor data areas to accurately integrate the planetary and synoptic forcing signals while enabling the CWRF to realistically generate its own mesoscale circulation within the domain interior. This domain choice is then evaluated by a sensitivity study of the CWRF ability in simulating the 1998 summer extreme flood in China. It is demonstrated that the CWRF using the optimal domain most realistically reproduces the observed precipitation temporal evolutions and spatial patterns. The performance, however, is substantially reduced when the southern buffer zone extends to the Tropics where large driving data errors exist, and further degraded if the western and eastern buffer zones are also positioned away from the key process regions. The result indicates the great importance of the domain design in the regional climate modeling.

Key words regional climate model, CWRF, buffer zone, domain optimization, precipitation

1 引言

自 Dickinson 等[1]和 Giorgi 等[2]首先发展了区域气候模式并将其应用到气候模拟中以来，区域气候模式已广泛应用于现代气候、古气候以及未来气候变化的研究[1~8]。许多研究均表明，由于区域气候模式较 GCM (General Circulation Model) 更细致地描述地形和海陆分布以及地表植被等下垫面特征，更好地刻画气候的区域性特征，因而区域气候模式模拟的气候场空间分布与实测更为接近。

东亚地区属于典型的季风气候，其独特的海陆分布及青藏高原大地形等自然因素与各种行星尺度系统相结合造成我国气候变化异常复杂，区域气候模拟的难度很大。20 世纪 90 年代以来，国内外不少科学工作者[9~13]将区域气候模式应用于中国及东亚气候的模拟研究中，已经做了大量的工作，研究表明，区域气候模式具有模拟东亚、中国东部南部以及西太平洋地区环流与气候特征的能力。

然而，区域气候模拟还不完备，尤其对中国及东亚地区的模拟与实测偏差仍较大。一般认为，区域气候模拟的误差主要来自于模式对模拟区域内物理过程描述得不准确。很多研究工作[11, 12]从这个角度出发，对各种物理过程参数化方案进行了大量的敏感性试验，以期提高对我国区域气候的模拟能力。然而，不同的物理过程参数化方案对模拟结果并无本质改善和提高，因此需要从另一个角度进行思考。

由于区域气候模式或者要嵌套到一个全球模式中，或者要用观测场作为驱动的侧边界条件，而且在模拟全过程中均需要有侧边界场作为驱动，因此侧边界缓冲区的位置及驱动资料就显得格外重要。有研究表明，准确描述侧边界条件比改造区域气候模式的任何物理过程同等重要甚至更为重要[3,5,14~20]。

大多数关于缓冲区位置的研究主要考虑数值稳定性及模拟区域大小。Warner 等[18]建议，所要研究的区域尽量远离侧边界。但这一方法在研究时间尺度较长的气候问题时显然是不适宜的，因为在模式积分几天以后，最远的外界变化信息也会传到模式区域内部。Giorgi 等[3]对美国区域进行模拟研究时，将左侧的缓冲区置于太平洋上以避开西侧边界的复杂地形，消除由侧边界空间插值误差引起的计算不稳定。Jones 等[17]对欧洲区域的研究表明，较小的模拟区域能够较好地再现 GCM 的大尺度环流及天气尺度系统的日变化，同时指出由于较小的模拟区域侧边界场强迫过强，从而限制了 RCM (Regional Climate Model)基于自身区域或局地的物理过程产生中尺度环流的能力。Seth 和 Giorgi[19]对美国区域的研究也表明，模拟区域不能取得太小，否则侧边界强迫太强，使得 RCM 内部中尺度物理过程无法充分发展。钱永甫和刘华强[20]对 RCM 的嵌套侧边界在 GCM 中的落区对模拟结果的影响进行了研究，结果表明 GCM 侧边界值的误差对 RCM 的模拟结果有显著影响，嵌套侧边界若选择在 GCM 系统性误差较小的地区，模拟或预测效果会有明显的改进。

Liang 等[5]对上述问题进行了综合研究，指出，计算区域及侧边界处理的最优化（物理和数值上的）对区域气候模式的模拟性能有决定性的作用，物理上合理数值上优化的计算区域为区域气候模拟奠定了基础，进而为有针对性地发展合理的物理过程参数化方案提供了前提条件。并强调，区域气候模式的侧边界应尽量选在侧边界场系统性误差较小的区域，这样侧边界场的系统误差对区域气候模式模拟效果的影响将大为缩小，同时模拟区域应充分准确地分辨中小尺度过程，并保证大尺度驱动场包含的影响研究区域气候的主要天气系统信息能够有效地传入模式域。

基于这一思想，本文首先从东亚季风主要天气系统对中国区域降水影响的关键区及侧边界场资料的可信性两个方面分析设计我们所关心的中国区域气候模拟的最佳计算区域，实现模拟区域的优化，然后将美国伊利诺伊州立水文研究所开发的 CWRF (Climate - Weather Research and Forecasting Model) 应用于中国区域，研究模拟区域优化对中国夏季风降水模拟的影响。

2　模拟区域的优化

嵌套模式中侧边界的处理是关系气候要素场（主要是降水和温度）模拟成败的重要因素[13, 14]，侧边界所带来的误差是有限区域模式的主要误差来源之一。大尺度侧边界场给区域模式提供大尺度的大气结构，驱动区域模式内部中尺度和天气尺度系统发展。由于在区域气候模式积分过程中，大尺度强迫场只通过区域模式侧边界对区域大气起作用，因此，侧边界一方面应能够尽可能真实地传递行星尺度及天气尺度信息，同时使模式能够基于其内部的物理过程在外强迫大尺度环流背景下产生中尺度信息。另一方面，由于大尺度强迫场通过侧边界数值积分传入模式计算区域后，较小的资料误差会导致模式产生与实际偏离较大的模拟结果[10, 16, 17]，因此要尽量降低侧边界场资料误差对模式计算的影响，这就需要从物理过程和资料误差的分析着手。

2.1　环流场影响中国区域降水的关键区

区域气候的成因是多方面的，大尺度背景场的影响在某种程度上起主导作用，陶诗言等[21]指出长江流域旱涝发生时主要大尺度环流特征有明显差异，主要表现在东亚季风主要成员的配置上，归纳出了长江流域梅雨锋降水的天气学模型，并指出对流层上部的大尺度环流形势对长江流域梅雨期降水有重要影响，夏季在东亚西风带南缘和副高之间的地区，最有利于深对流和暴雨的发展。梁信忠等对中国降水的季节及年际变化研究指出，东亚大气环流的季节转换、季风区雨季的开始和结束都与东亚西风急流的位置及其南北移动和强度变化有密切的联系[22, 23]。高空西风急流位置及强度的变化将直接影响南亚高压和西太平洋副高的位置和强度，进而影响中国区域的降水。水汽的输送累积是产生持续性降水的关键原因，我国夏季风降水的水汽来源主要由三支来自海洋上的气流带入的，一支为低层副高西南侧的东南风，另外两支分别为印度夏季风和南海夏季风[24]。

为了确定对流层低层和高层风场、低层水汽及其输送影响中国区域降水的关键区，将中国 160 标准站的月平均降水资料分别与美国 NRA（NCEP-NCAR Reanalysis II）月平均再分析资料的200 hPa 纬向风场（简称 U200）、925 hPa 相对湿度（简称 RH925）、850 hPa 纬向和经向风场（简称 U850 和 V850）进行相关分析（图 1），计算时段为 1979～2001 年，共 23 年，69 个月。假定每个月样本是独立的，相关系数绝对值为 0.25 和 0.32 分别对应统计显著 95%和 99%的信度，我们称相关系数≥0.25 的区域为关键区。

影响中国区域降水的关键区在高纬地区与高空西风急流相对应，在高空西风急流的南北两侧分别出现了负正关键区，说明东亚急流的南进（北退）与全国降水减少（增加）的年际变化是显著相关的；另一负关键区在印度上空，反映了南亚高压的影响；南海至菲律宾地区的副热带西太平洋高低层纬向风反映了南海夏季风及 Walker 环流的强弱，对流层高层纬向风场（U200）和低层纬向风场（U850）对我国夏季旱涝的分布可以产生重要影响[25]。在 U200 上，副热带西太平洋洋面上出现了较大范围的正关键区，U850 与中国区域降水的相关图上，副热带西太平洋地区显著负相关区位置相对应，表明当副热带西太平洋 U200 增强、U850 减弱时，有利于中国区域降水偏多；当 U200 减弱、U850 增强时，则对降水偏少有利。U200 和 U850 与中国区域降水的相关系数，由赤道向高纬地区呈正负相间的高相关波列，高空与低空反位相，与东

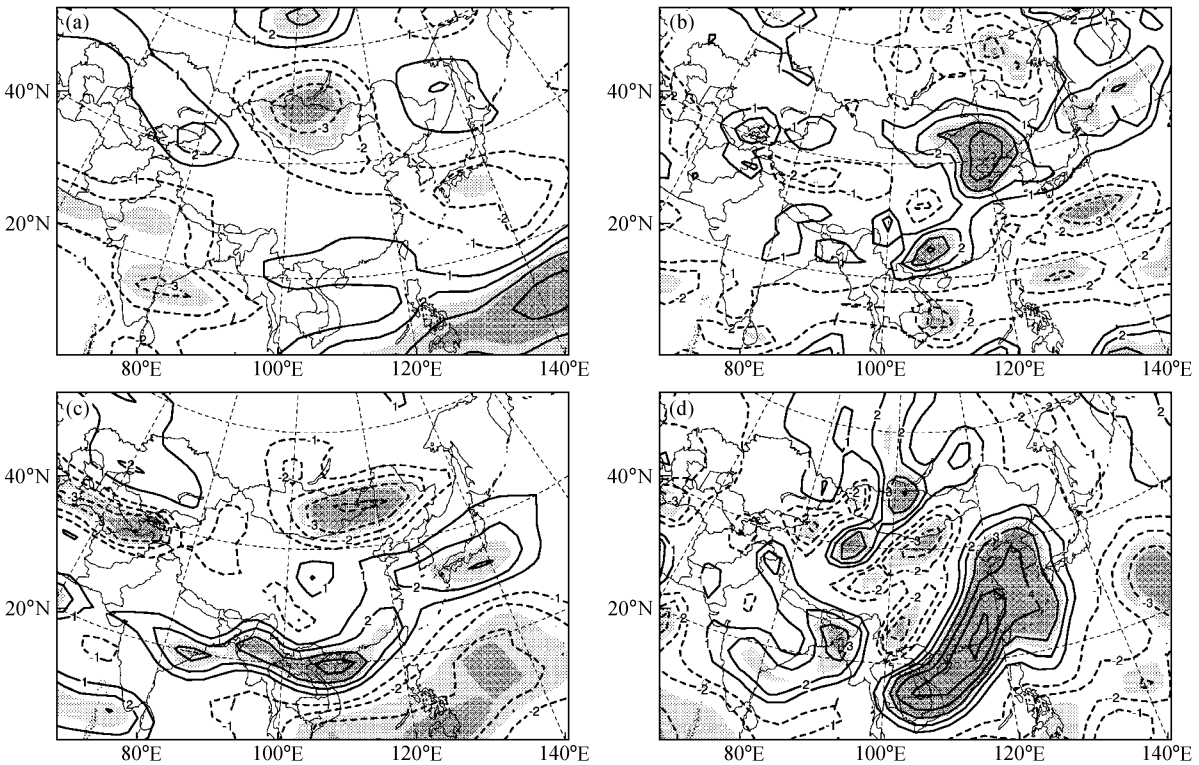

图 1 中国区域 6～8 月平均降水与环流场的相关系数（×10）分布：(a) U200；(b) RH925；(c) U850；(d) V850。实线为正值，虚线为负值；浅、深色阴影表示相关性高于 95%、99%信度检验的区域

Fig. 1 Correlation coefficients (×10) between precipitation averaged over China and circulation fields from Jun to Aug: (a) 200-hPa zonal wind (U200); (b) 925-hPa relative humidity (RH925); (c) 850-hPa zonal wind (U850); (d) 850-hPa meridional wind (V850). Solid (dashed) lines represent positive (negative) values, light (dark) shadings indicate the correlations are over the 0.05 (0.01) confidence level

亚季风系统示意图[26]对照可以发现，该波列的分布分别与东亚季风系统成员——西太平洋副热带高压、梅雨锋、西风带系统（如阻高、冷空气活动）相对应。这表明高低层纬向风影响我国夏季降水的可能途径是与东亚季风环流系统有密切联系的。我国境内低层水汽影响降水的关键区分别位于华北和东北及华南地区，由西南向东北方向倾斜，与 V850 关键区相对应，表示印度西南季风流经孟加拉湾南部以后与 105°E 附近的越赤道气流在南海南部汇合的水汽输送、西太平洋副高西南侧的东南季风水汽输送对我国降水的影响。U850 与 V850 在西太平洋的关键区则明确表征西太平洋副热带高压对中国降水的影响。

由于中国区域降水具有十分复杂的区域变化特征，降水异常的空间分布型式在各个分区并不相同，需考虑大尺度环流场对不同气候区的影响。将整个中国区域分成八个分区，分别计算各区平均降水与环流场的相关系数分布，分别得到各分区的环流场影响关键区（图略），所得结果与上文分析一致。作为示例，且根据中国季风雨带演变的特点：6 月份位于华南，7 月份北进到长江流域，8 月份到达华北，在中国东部 105°E～122°E 范围内划分三个区域：华北（32°N～40°N）、长江流域（26°N～32°N）和华南（20°N～26°N），作为资料分析和下文模式性能检验的重点。图 2 为华北、长江流域和华南三个分区平均降水与 V850 的相关系数分布，可见 V850 对华北、长江流域和华南的影响关键区较为一致，与图 1 的 V850 接近。华北、长江流域和华南区域平均降水与其他大尺度环流场的相关系数分布图及分析详见文献[27]，结果表明整个中国区域环流场影响关键区与各分区的主要关键区基本吻合。

因此，基于主控物理过程的考虑，这些关键区最好置于区域模式的边界缓冲区，以便大尺度强迫得以有效的描述[5]，并准确地传入 RCM 内区域。

2.2 侧边界场资料的误差分布

全球分析或再分析资料是 GCM 对现有离散观

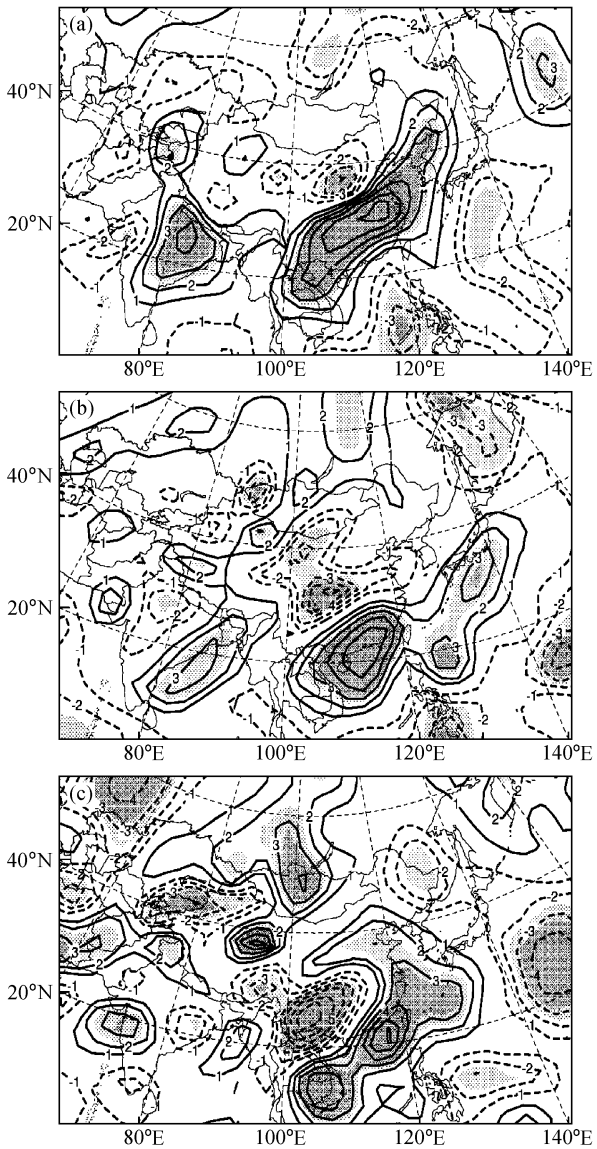

图 2　华北、长江流域和华南区域平均降水与 V850 的相关系数分布（×10）：(a) 华北；(b) 长江流域；(c) 华南。实线为正值，虚线为负值；浅、深阴影表示相关性高于 95%、99%信度检验的区域

Fig. 2　Correlation coefficients (×10) between precipitation averaged over (a) North China, (b) the Yangtze River basin and (c) South China and V850. Solid (dashed) lines represent positive (negative) values, light (dark) shadings indicate the correlations are over the 0.05 (0.01) confidence level

测数据进行最大程度同化的结果。由于赤道及其附近洋面地区站点稀少，实测数据缺乏，因此不同模式的分析资料会有很大的差异，如区域尺度上的水汽通量误差较大[28]~[31]。因此，在用全球分析或再分析资料作为模式的初始及侧边界场时，要避开资料误差较大的区域，从而避免将全球环流模式的误差代入区域模式。图 3 为 1979～2001 年夏季 ERA (ECMWF Reanalysis 40) 和 NRA 925 hPa 相对湿度和 850 hPa 经向风相关系数分布，相关系数小则表示 NRA 与 ERA 差异较大，资料可信度较低，图中阴影区是不显著相关的，浅色和深色分别表示低于 99%和 95%信度检验的区域。

在 15°N 以南的区域，两种再分析资料的相对湿度在近地面层差异明显，尤其是在热带洋面上，其相关系数很小，甚至低于 0.1。两种再分析资料在青藏高原地区差异较大，这种差异主要是由两个同化模式在垂直方向上插值采用不同的方案造成的[16]。在确定缓冲区位置时，必须尽量避开这些资料可信度低的区域。同样，当侧边界场采用 GCM 预报结果时，缓冲区应尽可能避开预报误差大的区域。

综合以上分析，得出物理上最优的模拟区域为 A，其将主控物理过程的关键区置于侧边界缓冲区内，同时避免侧边界强迫场误差显著的区域。为了研究模拟区域和侧边界位置对模拟结果的影响，我们同时设计了 B 区域和 C 区域（图 4，详见第 3 节），以数值模拟验证资料分析的结果（具体讨论见第 4 节）。

Liang 等[5] 利用美国 1993 年夏季的极端洪涝事件，进行了三个月的积分试验，确定了美国区域气候模拟的最佳区域，随后一系列的长期积分研究表明[6~8]，在此模拟区域上，对美国区域气候模拟及未来气候变化预估研究，结果均较为理想。同时，上文根据资料分析确定的区域，是建立在长期气候相关分析的基础之上，因此影响关键区在统计意义上成立，选择的模拟区域有代表性。基于此，本文进行了四个月的积分试验。

3　区域气候模式简介及试验方案

CWRF (Climate - Weather Research and Forecasting Model) 是由美国伊利诺伊州立大学水文研究所梁信忠在 WRF[32] 的基础上发展的，包含了 WRF 用于数值天气预报 (NWP) 的所有功能，同时使其能够应用于气候模拟。因此，CWRF 既可应用于数值天气预报，也可应用于气候模拟。由于开发 WRF 的初衷并不是作气候研究而是作数值天气预报，为了把 WRF 用于区域气候模拟研究，Liang

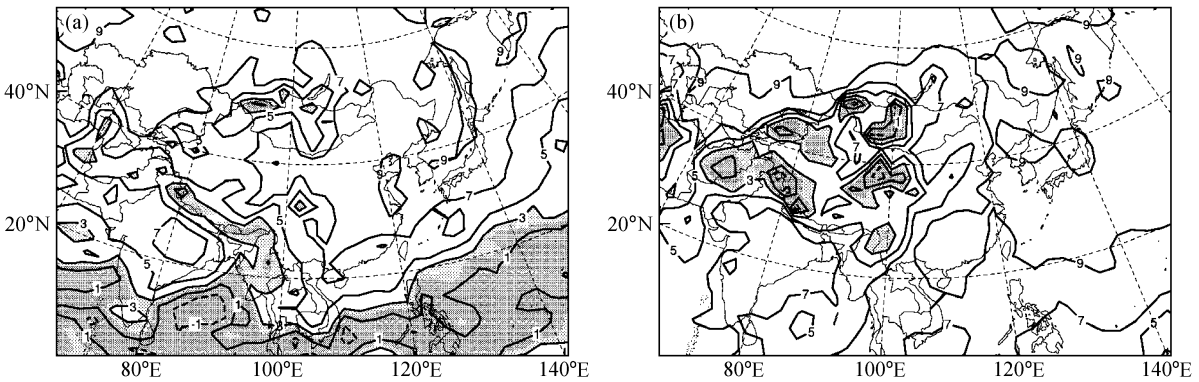

图 3 1979～2001 年夏季（6～8 月）NRA 与 ERA 环流场相关系数（×10）分布：(a) RH925；(b) V850。浅、深阴影表示相关性低于 99%、95%信度检验的区域

Fig. 3 Correlation coefficients (×10) between the NRA and ERA summer (Jun－Aug) circulation fields during 1979－2001: (a) RH925; (b) V850. Light (dark) shadings indicate the correlations fail to pass the 0.01 (0.05) confidence level

等[5, 33～37]主要在以下方面对其进行了改进：(1) 行星尺度与中尺度的相互作用：优化缓冲区处理，改善 GCM 与 RCM 侧边界的质量与能量通量交换；(2) 地面-大气相互作用：增加新的物理模块以研究行星边界层，地形强迫陆面和水文过程，观测或动态预测的植被、海洋及海冰变化；(3) 对流-云-辐射相互作用：对对流云、云微物理过程、云的形成及辐射传输采用新的参数化方案，并对它们实行全耦合；(4) 利用统一的饱和水汽方程及太阳高度角方程，统一的物理常数及内在可调参数来保持所有模块的系统一致性。以上对 WRF 模式的改进是五年以来在对模式进行细致的改造、大量的敏感性试验及严格验证的基础上完成的。

为了使本文结果普遍适用，并为后续研究作准备，以在此基础上验证不断发展改进中的 CWRF 物理过程参数化方案对区域气候模拟能力的影响，模式物理过程由下列基于 WRF 的方案组成：陆面过程采用 Noah LSM[38]，行星边界层为 YSU 方案[39]、长波辐射采用 RRTM（Rapid Radiative Transfer Model）方案[40]、短波辐射为 Dudhia 方案[41]、降水由 Thompson[42] 显式云微物理过程和改进的 Kain-Fritsch（KF-Eta）[43, 44] 积云对流参数化方案计算。

图 4 为模式的模拟区域，采用两重单向嵌套，水平分辨率分别为 90 km 和 30 km。同时设计了 A、B、C 三个不同的第一重区域（如无特殊说明，下文的模拟区域均指第一重区域）以研究侧边界缓冲区位置及模拟区域对结果的影响。三个区域均覆

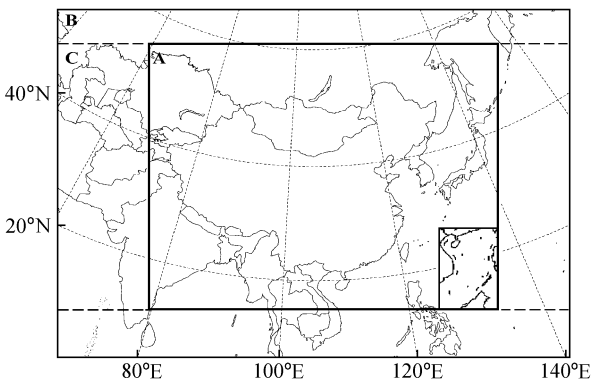

图 4 模拟区域

Fig. 4 Model domains for all experiments

盖包括青藏高原在内的整个中国，模式垂直方向非均匀分为 31 层，顶层气压 50 hPa，投影方式为兰博托投影。根据前一节的分析，A 区域为最好的选择，其经纬格点数为 72×60，区域中心位于 (38°N, 107°E)。将 A 区域在东西南北四个方向扩大，形成 B 区域，使其缓冲区偏离大尺度主控物理过程关键区，并位于 NRA 和 ERA 资料相关系数小的区域，以研究侧边界有效强迫及资料的不确定性对中国东部季风区降水模拟的影响。为了研究 B 区域与 A 区域模拟结果差异的原因以及东西和南北缓冲区位置的相对影响，设计了 C 区域，C 与 B 的东西侧边界位置相同，而南北侧边界位置与 A 同。采用完全相同的第二重区域（73×91 个格点），以排除嵌套区域对模拟结果的影响。

所有模拟方案的积分时间均为 1998 年 5 月 1 日 06 时到 8 月 31 日 18 时，共 123 天。1998 年夏

季我国长江流域出现了仅次于 1954 年的全流域特大洪涝，江南北部、鄂西南、重庆、四川东部和西南地区 6～8 月降水量达到 700～900 mm，部分地区超过 1000 mm，前后出现 8 次洪峰，致使长江流域沿岸多次发生洪涝灾害。其直接原因是亚洲夏季环流形势的异常，特别是 1997～1998 年本世纪最强的一次 El Niño 现象，其演变为 1998 年长江流域的洪涝提供了气候背景；其次西太平洋副热带高压活动异常，受 El Niño 影响，1998 年 6～8 月，与常年同期相比副高位置偏南偏西，强度偏强；第三，中尺度对流运动频繁发生，其对流云团是 1998 年洪水期间产生大暴雨的重要天气系统。因此，由中尺度与行星尺度系统异常相互作用导致的夏季气候明显异常的 1998 年就成为区域气候模式进行模拟试验的最好选择。

4　模拟结果分析

与温度气压相比，降水变率更大，地区性特征更强，准确模拟降水是最困难的，因此降水是区域气候数值模拟研究的一个重要方面。本文对模拟的 1998 年降水进行分析，研究不同的计算区域对 CWRF 模拟结果的影响。

4.1　模拟结果总体统计分析

由于分析区域包括湿润区和半干旱区，降水量南北差异很大，为了客观地表达模拟与实测的偏差，用模拟相对于实测的偏差百分比来表示模拟降水的相对偏差，用时间相关系数反映模拟结果与实测的相似程度，用均方根误差反映模拟与实测雨量的绝对偏离程度。表 1 为这些指标对中国华南、长江流域和中国华北降水在整个积分期间（5 月 1 日～8 月 31 日）的统计。

可见，就三个特征区时间统计分析而言，区域 A 模拟结果总体最佳，而区域 B 则最差。从偏差百分比来看，A 均高估了降水，B 则相反，但 A 的偏差程度均小于 B；C 高估了华北和华南的降水，低估了长江流域的降水。A 区域时间相关系数远远高于 B，在华北、长江流域和华南分别为 68.03%和 32.09%、71.63%和 31.05%、63.37%和 9.58%，C 区域除了华南区的时间相关系数（62.75%）与 A 的接近以外，华北和长江流域的结果均低于 A 而好于 B。对于 RMS，同样 A 的结果远远好于 B，C 除了华南以外，其结果介于 A 和 B 之间。

4.2　模拟区域对月平均降水空间分布的影响

图 5 为 1998 年 5～8 月实测及 CWRF 采用不同的模拟区域（A、B、C）模拟的月平均降水的空间分布。在其他条件完全相同的前提下，不同的模拟区域对模拟结果影响非常显著。5 月份实测降水中心主要维持在华南地区，A 较好地模拟出了雨区的分布，不过范围偏大；B 则基本上没有模拟出主要降水中心，C 模拟出了一个中心，但其位置与实测偏离较远。6 月份为长江流域梅雨发生时段，长江以南和华南地区分别出现了两个强降水中心，为了区别，简称为北部中心和南部中心。北部中心大范围地区出现了 20 mm/d 以上的降水，伴有 30 mm/d 以上的强降水，南部中心局部地区降水达到了 25 mm/d。A 和 C 的模拟结果虽然有明显差别，但均能模拟出南北两个降水中心，不过模拟出的两个降水中心连成一片，即模拟的雨区范围大，雨量强。B 的模拟结果与实测偏离更大。7 月为梅雨间歇期和第二度梅雨发生时段，主要雨带沿长江流域呈东西走向，其北部有一条西南-东北向的较弱雨带，南部有一强降水区。A 较好地再现了两条雨带和南部的雨区，不过，南部的雨区范围过大，强度偏强。B 没能模拟出两条雨带，虽然模拟出了南部雨区，但位置与实测相差甚远。C 模拟的降水分布形势与实测偏离也较大，强度偏强。8 月份，

表 1　不同模拟区域模拟的 1998 年降水偏差百分比、时间相关系数及均方根误差

Table 1　Simulated precipitation percentage biases, temporal correlation coefficients and root-mean-square errors in 1998 over different model domains

模拟区域	偏差百分比/%			时间相关系数/%			均方根误差/ mm·d^{-1}		
	华北	长江流域	华南	华北	长江流域	华南	华北	长江流域	华南
A	3.49	11.62	7.95	68.03	71.63	63.37	3.67	4.96	5.28
B	−9.90	−14.99	−15.07	32.09	31.05	9.58	5.05	7.46	8.52
C	10.09	−4.04	2.23	49.65	55.77	62.75	4.41	6.06	5.15

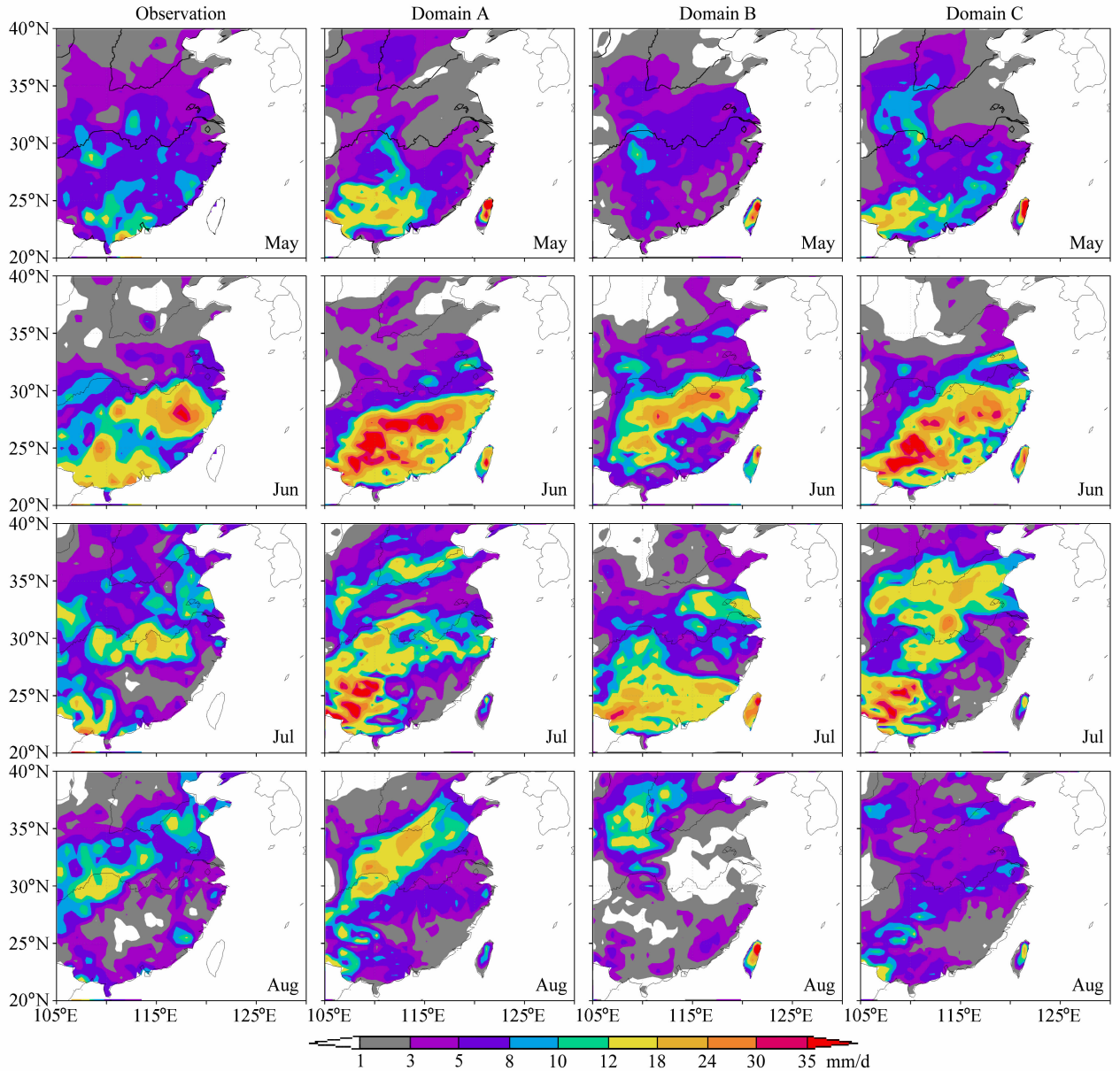

图 5 1998 年实测及 CWRF 在不同模拟区域模拟的月平均降水空间分布

Fig. 5 Spatial distributions of monthly mean precipitation for observations and simulations over different model domains in 1998

降水主要发生在黄河与长江之间，雨带呈西南-东北向倾斜，A 较好地再现了这种态势，不过雨量偏强，但是 B 和 C 则根本上失败了。

综合本节分析可知，对 1998 年月平均降水的空间分布的模拟，A 具有明显的优势，模拟结果远远好于 B 和 C。B 没能真实地模拟出各月降水，C 对 5 月和 6 月的降水模拟与 A 及实测较为接近，但 7 月和 8 月则偏差较大，与 A 的模拟结果也完全不同。B 区域为南部侧边界位于强迫资料可信度低的区域，而东西侧边界位于环流因子影响关键区以外，其模拟结果最差。C 的南部侧边界与 A 相同，而东西侧边界与 B 同，积分的前两个月与实测较为接近，但后两个月则无法真实反映实测结果，说明环流场对区域气候模拟的重要影响。由于 A 和 C 仅东西侧边界位置不同，则 7 月和 8 月模拟结果的差异在一定程度上反映了大尺度环流场在长期积分模拟中的重要作用。由此可知，在进行气候尺度上的模拟时，避免侧边界场资料误差，并考虑影响关心地区降水的环流因子关键区是设置模式区域的两大重要因子。

4.3 模拟区域对区域平均降水逐日演变的影响

图 6 分别比较了三个分析区域 1998 年 5 月 1 日至 8 月 31 日实测与 CWRF 采用不同模拟区域模拟的区域平均降水的逐日演变。1998 年夏季出现了“二度梅”，引发长江全流域性大洪水，举世瞩目。其主要特征为，5 月 1 日～6 月 11 日，雨带位于华南地区；6 月 12 日～7 月 3 日，为长江流域第一度梅雨；7 月 4 日～19 日为梅雨的间歇期；7 月 20 日～30 日为长江流域第二度梅雨，8 月以后雨带主要维持在华北地区。

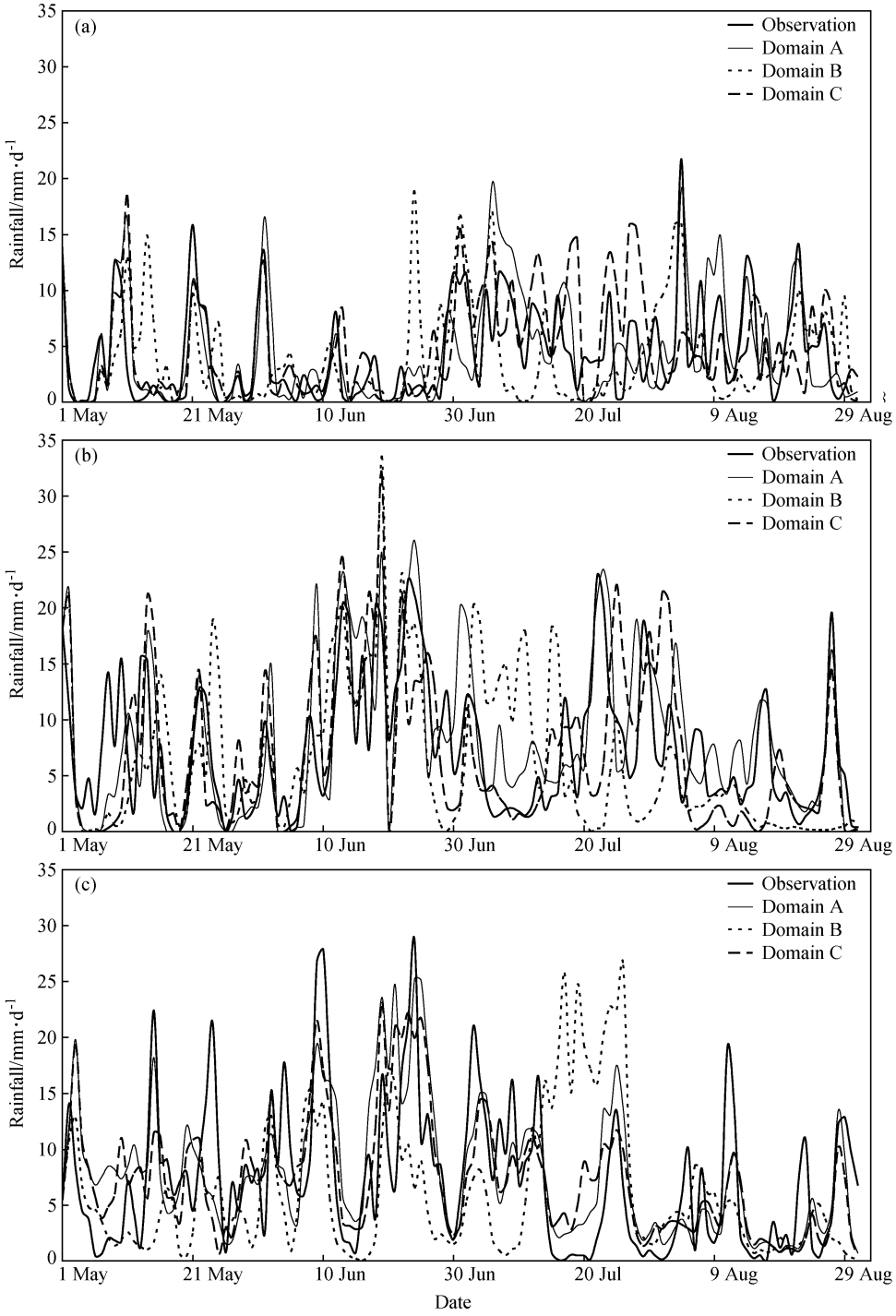

图 6　1998 年 5～8 月实测及不同模拟区域模拟的区域平均降水逐日演变 (mm/d)：(a) 华北；(b) 长江流域；(c) 华南

Fig. 6　Region-averaged daily rainfall variations during May - Aug 1998 for observations and simulations over different model domains: (a) North China; (b) the Yangtze River basin; (c) South China

对于华北区，A 在整个积分时段模拟的逐日降水强度及演变趋势均与实测吻合得较好（时间相关系数为 68.0%）；B 除了在少数几个时段与实测较为吻合以外，均不能真实地反映华北区降水的逐日演变（时间相关系数为 32.1%）；C 在 6 月 30 日以前，结果与实测和 A 较为符合，6 月 30 日以后，C 与 A 的结果差异增大，能够模拟出 7 月和 8 月中上旬降水的逐日变化，但 7 月明显偏强，8 月中上旬明显偏弱，8 月下旬，其变化趋势与实测基本不符，时间相关系数为 49.7%。A 较真实地再现了 1998 年发生在长江流域的两段梅雨及梅雨间歇期，相关系数达到了 71.6%；B 的结果与实测偏差较大（时间相关系数为 31.1%）；C 在 5 月和 6 月与 A 很接近，随着积分时间的增长，其结果与实测和 A 产生偏离，误差较大，整个模拟时段与实测的相关系数为 55.8%。在华南区，A 和 C 在整个模拟时段均与实测较为符合，两者与实测的相关系数很接近，分别为 63.4%和 62.8%；B 的结果与实测相差较大，相关系数只有 9.6%，认为不相关。

综合本节分析可知，同以上两节的分析一致，A 的模拟结果与实测最为接近，能够较好地反映 1998 年降水的逐日演变特征；B 的结果最差，基本无法反映实际情况；C 在华北和长江流域的 5 月和 6 月与 A 及实测较为接近，7 月和 8 月则偏差较大，对于华南区在整个模拟时段均与实测和 A 接近。由此可见，驱动场资料误差及大尺度环流因子对区域气候模式模拟降水至关重要；其中环流因子关键区对华南降水的模拟影响小于对华北和长江流域的影响，其部分原因归于于东亚急流对华北和长江流域的影响较为显著[23]，而南部侧边界的资料误差最大，又包括了一部分主控环流因子，因此南界资料误差更为关键。

5 结论和讨论

本文采用资料分析与实例模拟相结合的方法，对中国区域气候模拟的计算区域进行优化设计。首先，从影响中国区域降水的大尺度环流场关键区进行分析，从区域降水的物理机制出发，将关键区置于缓冲区，以保证行星及天气尺度系统能够有效地通过区域气候模式的侧边界传入模拟区域，同时依靠自身的物理机制使中尺度系统在模拟区域内部发展；然后比较 NRA 与 ERA 两个实测再分析资料，分析侧边界强迫场，使缓冲区尽可能避开相关系数低，即资料可信度差的区域。这样，首先从物理上确定了中国区域气候模拟的最佳区域 A。其后，选取 1998 年的异常洪涝作为实例模拟的验证个例，对嵌套模拟设计了三种不同的第一重区域，将 A 区域扩大，形成 B 和 C 区域，使 B 区域的四个边界均偏离环流因子影响关键区，同时南部侧边界位于资料可信度低的区域；C 区域的南北侧边界与 A 相同，而东西侧边界与 B 相同，以研究环流因子关键区及驱动场资料的相对影响。在其他条件完全相同的前提下，对三种区域设计分别积分。就总体统计误差、相关性、月平均降水的空间分布以及区域平均降水的逐日演变比较模式性能表明，A 区域的模拟结果均远远优于 B 和 C，B 的结果最差，尤其是与实测降水的时间演变一致性上。资料分析确定的最佳模拟区域能够很好地再现 1998 年长江流域的极端洪涝事件，得到了实测模拟的验证。由此确定 A 区域为中国区域气候降水模拟的最佳选择。采用与本文相同的方法，分别选取 A、B 和 C 区域，对 1991 年 5～8 月极端洪涝的模拟结果也表明，A 区域为最佳选择，所得结论与本文一致[27]。

在本文选定的最佳模拟区域的基础上，在将 CWRF 应用于中国区域气候模拟研究的后续工作中，将集中在针对中国区域气候特点的物理过程的优化上，尤其是陆气相互作用过程及对流-云-辐射过程。此外，随着模式的不断改进和发展，CWRF 目前已针对美国和中国区域形成了以 30 km水平分辨率、单重区域积分为主的设置，将其应用到中国区域还需对水平和垂直分辨率及模式是否嵌套进行敏感性试验，以获得中国季风区气候模拟的最佳配置，提高 CWRF 对中国区域气候模拟的性能。

致谢 本文的研究工作是在中国气象局 IBM 超级计算机上完成的，特此致谢。

参考文献（References）

[1] Dickinson R E, Errico R M, Giorgi F, et al. A regional climate model for the western united states. *Climate Change*, 1989, **15**: 383～422

[2] Giorgi F, Marinucci M R, Visconti G. Use of a limited-area model nested in a general circulation model for regional climate simulation over Europe. *J. Geophys. Res.*, 1990, **95**: 18413～18431

[3] Giorgi F, Mearns L O, Shields C, et al. A regional model study of the importance of local versus remote controls of the 1988 drought and 1993 flood over the central United States. *J. Climate*, 1996, **9**: 1150～1162

[4] Christensen J H, Machenhauer B, Jones R G, et al. Validation of present day regional climate simulations over Europe: LAM simulations with observed boundary conditions. *Climate Dynamics*, 1997, **13**: 489～506

[5] Liang X-Z, Kunkel K E, Samel A N. Development of a regional climate model for U. S. Midwest application. Part I: Sensitivity to buffer zone treatment. *J. Climate*, 2001, **14**: 4363～4378

[6] Liang X-Z, Li L, Kunkel K E, et al. Regional climate model simulation of U. S. precipitation during 1982 - 2002. Part I: Annual cycle. *J. Climate*, 2004, **17**: 3510～3529

[7] Liang X-Z, Li L, Dai A, et al. Regional climate model simulation of summer precipitation diurnal cycle over the United States. *Geophys. Res. Lett.*, 2004, **31**: L24208, doi: 10.1029/2004GL021054

[8] Liang X-Z, Pan J, Zhu J, et al. Regional climate model downscaling of the U. S. summer climate and future change. *J. Geophys. Res.*, 2006, **111**: D10108, doi: 10.1029/2005JD006685

[9] 符淙斌、魏和林、陈明，等. 区域气候模式对中国东部季风雨带演变的模拟. 大气科学，1998，**22** (4)：522～534
Fu Congbin, Wei Helin, Chen Ming, et al. Simulation of the evolution of summer monsoon rainbelts over Eastern China from regional climate model. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (*Scientia Atmospherica Sinica*) (in Chinese), 1998, **22** (4): 522～534

[10] Gong W, Wang W-C. A regional model simulation of the 1991 severe precipitation event over the Yangtze - Huai River valley. Part II: Model bias. *J. Climate*, 2000, **13**: 93～108

[11] 刘一鸣，丁一汇. 修正的质量通量积云对流方案及其模拟试验研究 I：方案介绍及对 1991 年洪涝过程的模拟. 气象学报，2001，**59** (1)：10～22
Liu Yiming, Ding Yihui. Modified mass flux cumulus parameterization scheme and its simulation experiment part I: Mass flux scheme and its simulation of the flooding in 1991. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2001, **59** (1): 10～22

[12] 潘劲松，翟国庆，高坤. 区域气候模拟中多种对流参数化方案的比较研究. 大气科学，2002，**26** (2)：206～220
Pan Jinsong, Zhai Guoqing, Gao Kun. Comparions of three convection parameterization schemes in regional climate simulations. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2002, **26** (2): 206～220

[13] 高学杰，徐影，赵宗慈，等. 数值模式不同分辨率和地形对东亚降水模拟影响的试验. 大气科学，2006，**30** (2)：185～192
Gao Xue-Jie, Xu Ying, Zhao Zong-Ci, et al. Impacts of horizontal resolution and topography on the numerical simulation of East Asian precipitation. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2006, **30** (2): 185～192

[14] 廖洞贤，陆维松. 有限区域预报中的一些问题. 气象学报，1982，**40** (4)：387～397
Liao Dongxian, Lu Weisong. Some problems in regional numerical weather prediction. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1982, **40** (4): 387～397

[15] 曾庆存，李荣凤. 不等距差分格式的计算紊乱问题. 大气科学，1982，**4**：345～354
Zeng Qingcun, Li Rongfeng. On the computational chaos in the finite difference schemes with non-uniform grids. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (*Scientia Atmospherica Sinica*) (in Chinese), 1982, **4**: 345～354

[16] Giorgi F, Marinucci M R, Bates G T, et al. Development of a second-generation regional climate model (RegCM2). Part II: Convective processes and assimilation of lateral boundary condition. *Mon. Wea. Rev.*, 1993, **121**: 2814～2832

[17] Jones R G, Murphy J M, Noguer M. Simulation of climate change over Europe using a nested regional climate model. I: Assessment of control climate, including sensitivity to location of lateral boundaries. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1995, **121**: 1413～1449

[18] Warner T T, Peterson R A, Treadon R E. A tutorial on lateral boundary conditions as a basic and potential serious limitation to regional numerical weather prediction. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1997, **78**: 2599～2617

[19] Seth A, Giorgi F. The effects of domain choice on summer precipitation simulation and sensitivity in a regional climate model. *J. Climate*, 1998, **11**: 2698～2712

[20] 钱永甫，刘华强. 论区域气候模式与全球模式嵌套时边界区的选择. 大气科学，2001，**25** (4)：492～502
Qian Yongfu, Liu Huaqiang. On nesting area selection of regional climate models coupled to a global climate model. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2001, **25** (4): 492～502

[21] 陶诗言，张小玲，张顺利. 长江流域梅雨锋暴雨灾害研究. 北京：气象出版社，2004
Tao Shiyan, Zhang Xiaoling, Zhang Shunli. *Study of Meiyu Front Induced Storm Rainfall along the Yangtze River* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2004

[22] 梁信忠. IAP GCM 的设计及气候数值模拟. 中国科学院大气物理研究所博士学位论文，1986
Liang X Z. The design of IAP GCM and climate numerical simulation. Ph. D. dissertation (in Chinese). Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 1986

[23] Liang X-Z, Wang W-C. Association between China monsoon rainfall and tropospheric jets. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1998, **124**: 2597～2623

[24] 周玉淑，高守亭，邓国. 江淮流域 2003 年强梅雨期的水汽输

送特征分析. 大气科学, 2005, **29** (2): 195～204
Zhou Yushu, Gao Shouting, Deng Guo. A diagnostic study of water vapor transport and budget during heavy precipitation over the Changjiang River and the Huaihe River basins in 2003. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2005, **29** (2): 195～204

[25] 何敏. 热带环流强度变化与我国夏季降水异常的关系. 应用气象学报, 1999, **10** (2): 171～180
He Min. Relationship between tropical circulation intensity and summer precipitation anomaly in China. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 1999, **10** (2): 171～180

[26] 陈隆勋, 朱乾根, 罗会邦, 等. 东亚季风. 北京: 气象出版社, 1991. 28～61
Chen Longxun, Zhu Qian'gen, Luo Huibang, et al. *East Asian Monsoon* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1991. 28～61

[27] 刘术艳. CWRF在中国东部季风区的应用. 南京信息工程大学博士学位论文, 2006
Liu Shuyan, CWRF application in East China monsoon area. Ph. D. dissertation (in Chinese). Nanjing University of Information Science & Technology, 2006

[28] Trenberth K E, Guillemot C J. Evaluation of the global atmospheric moisture budget as seen from analyses. *J. Climate*, 1995, **8**: 2255～2272

[29] Higgins R W, Mo K C, Schubert S D. The moisture budget of the central United States in spring as evaluated in the NCEP/NCAR and the NASA/DAO reanalysis. *Mon. Wea. Rev.*, 1996, **124**: 939～963

[30] Mo K C, Higgins R W. Large-scale atmospheric moisture transport as evaluated in the NCEP/NCAR and the NASA/DAO reanalysis. *J. Climate*, 1996, **9**: 1531～1545

[31] Boyle J S. Comparison of atmospheric water vapor in observational and model data sets. PCMDI Rep. 54, UCRL-ID-138187, Lawrence Livermore National Laboratory, University of California, 2000, 10 pp

[32] Skamarock W C, Klemp J B, Dudhia J, et al. A description of the Advanced Research WRF Version 2. NCAR Tech. Note NCAR/TN－486＋STR, 2005

[33] Liang, X-Z, Choi H I, Kunkel K E, et al. Development of the regional climate-weather research and forecasting model (CWRF): Surface boundary conditions. 2004, ISWS SR 2005－01, 32 pp., Ill. State Water Surv. Sci. Res., Champaign, Ill (Available at http://www.sws.uiuc.edu/pubs/pubdetail.asp? CallNumber=ISWS＋SR＋2005%2D01)

[34] Liang X-Z, Choi H I, Kunkel K E, et al. Surface boundary conditions for mesoscale regional climate models. *Earth Interactions*, 2005, **9**: 1～28

[35] Liang X-Z, Xu M, Gao W, et al. Development of land surface albedo parameterization based on Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) data. *J. Geophys. Res.*, 2005, **110**: D11107, doi: 10.1029/2004JD005579

[36] Liang X-Z, Xu M, Choi H I, et al. Development of the regional Climate－Weather Research and Forecasting Model (CWRF): Treatment of subgrid topography effects. In Proceedings of the 7th Annual WRF User's Workshop, Boulder, CO, June 19－22, 2006, 5pp

[37] Liang X-Z, Xu M, Zhu J, et al. Development of the regional climate－weather research and forecasting model (CWRF): Treatment of topography. In Proceedings of the 2005 WRF/MM5 User's Workshop, Boulder, CO, June 27－30, 2005, 5pp

[38] Ek M B, Mitchell K E, Lin Y, et al. Implementation of Noah land surface model advances in the National Centers for Environmental Prediction operational mesoscale eta model. *J. Geophys. Res.*, 2003, **108**: D22, 8851, doi: 10.1029/2002JD003296

[39] Hong S-Y, Dudhia J, Noh Y. A new vertical diffusion package with explicit treatment of the entrainment processes. Proc. Int. Workshop on NWP Models for Heavy Precipitation in Asia and Pacific Areas, Tokyo, Japan, Japan Meteorological Agency, 2003, 52～58

[40] Mlawer E J, Taubman S J, Brown P D, et al. Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-*k* model for the longwave. *J. Geophys. Res.*, 1997, **102** (D14): 16663～16682

[41] Dudhia J. Reply. *Mon. Wea. Rev.*, 1995, **123**: 2573～2575

[42] Thompson G, Rasmussen R M, Manning K. Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part I: Description and sensitivity analysis. *Mon. Wea. Rev.*, 2004, **132**: 519～542

[43] Kain J S, Fritsch J M. Convective parameterization for mesoscale models: The Kain-Fritsch scheme. *The Representation of Cumulus Convection in Numerical Models*, Emanuel K A and Raymond D J, Eds. Amer. Meteor. Soc., 1993. 246pp

[44] Kain J S. The Kain-Fritsch convective parameterization: An update. *J. Appl. Meteor.*, 2004, **43**: 170～181