

# 降尺度技术的应用研究进展

陈超君<sup>1</sup> 王钦<sup>2</sup>

(1 中国气象局武汉暴雨研究所 暴雨监测预警湖北省重点实验室, 武汉 430074;

2 中国民航飞行学院广汉分院气象台, 德阳 618307)

**摘要:** 大量数值预报产品的应用表明, 尽管许多数值预报产品的参考价值很高, 但预报的结果总存在一些误差, 数值模式精细化预报准确性和可靠性至今仍存在不少问题。基于现有条件, 对数值预报产品进行降尺度将成为精细化预报方法研究的一个热点。降尺度技术作为一种新的精细化预报途径, 已成为一个重要的研究领域。为此, 本文对降尺度技术的概念、该技术中各个方法的优缺点进行了概述, 归纳了该技术在国内外的研究进展, 为降尺度技术在数值模式中的应用研究提供参考。

**关键词:** 精细化预报, 数值模式, 降尺度

**DOI:** 10.3969/j.issn.2095-1973.2014.02.008

## Recent Advances on the Application for the Downscaling Technology

Chen Chaojun<sup>1</sup>, Wang Qin<sup>2</sup>

(1 Hubei Key Laboratory for Heavy Rain Monitoring and Warning Research, Institute of Heavy Rain, China

Meteorological Administration, Wuhan 430074 2 Civil Aviation Flight University of China, Deyang 618307)

**Abstract:** A great number of applications of NWP (Numerical Weather Prediction) products show that, although many NWP products have a high reference value, the prediction results always have some deviations. Moreover, problems about the accuracy and predictability of the fine forecasting by numerical models still exist so far. Conducting the downscaling interpretation to the NWP product will be a hot spot in the fine forecasting research. Downscaling techniques, as a new way to fine forecasting, have become an important field for study. In this paper, the concept for downscaling techniques, the technology advantages and disadvantages of each method are outlined. Technology in the domestic and foreign research progress in the application of numerical models is summed up for reference.

**Keywords:** fine forecast, numerical model, downscaling

### 1 引言

随着经济的发展和人民生活水平的不断提高, 人们对气象预报的种类和精度要求越来越高<sup>[1]</sup>。中国气象局因此提出了气象预报要向精细化方向发展的战略思想。所谓精细化, 其“精”是指预报质量, 预报要精确, 准确率要高, 要出精品。其“细”, 是指天气预报内容的细化程度, 即提高预报产品的时间、空间、量级的分辨率。制作“定时、定点、定量”的客观精细化预报将成为天气预报发展的必然。

数值预报由于其明确的物理机制, 被认为是精细

化天气预报的发展方向。随着观测手段的日益丰富和计算机水平的飞速提高, 数值模式在天气预报业务中得到了越来越广泛的应用<sup>[2]</sup>。但大量数值预报产品的应用表明, 尽管许多数值预报产品的参考价值很高, 但由于数值预报结果受模式初始场、边界条件、物理过程、地形、植被及模式本身的设计等诸多方面的影响, 预报模式描述的毕竟是模式大气, 而非真实大气, 还有模式的可预报性问题等, 所以数值模式发展还存在一定的不足, 模式许多方面还不够完善, 因此数值模式输出产品不可避免地会存在一定的误差<sup>[2]</sup>。如何有效消除模式产品误差是提高模式预报水平的一个重要方面, 对数值预报产品的释用起到重要的决策作用。

目前气候模式(GCM)对大尺度环流场的预报还是不错的, 但是GCM的空间精度仍然比较粗糙<sup>[3]</sup>,

收稿日期: 2013年9月30日; 修回日期: 2013年12月27日  
第一作者: 陈超君(1985—), Email: lvcha-52314@163.com  
资助信息: 国家自然科学基金(41275107); 湖北省气象科技发展基金(2014Q04); 水利部公益性行业科研专项(201201063)

很难捕捉到区域或是局地上的大气物理过程,因而目前还不适合用于区域或是局地天气预报。由于模式都是通过参数化方案对云等进行预报的,这种预报对局地地形有很大的依赖性,加上大部分模式都是日本、欧洲或是美洲等国家研发的,对其他地区的参数化方案,考虑得可能不是很精确,从而使得这些模式在其他国家地区的预报效果并不那么理想<sup>[4]</sup>。现在主要有两种方法可以弥补数值模式预报的不足,一是发展更高分辨率的数值模式;二是降尺度法。但要想通过增加模式时空分辨率,改进动力模式本身的各个环节,改善模式的物理过程和参数化方案来提高预报准确率是很难的,为了弥补这种缺陷,降尺度将是目前更为可选的方法,它能在现有模式的基础上改善预报结果,提高预报技巧,减少改进模式成本。

在目前的天气预报基础上,如何利用数值预报产品的精度,在时间尺度、空间尺度和量级上做进一步的细化,且细化后的气象要素预报产品的准确率要达到可以对外发布的水平,这是基层台站精细化预报面临的主要问题,数值预报产品的统计降尺度释用课题也由此应运而生。而我国对于降尺度技术的应用介绍较少<sup>[1,5]</sup>,尤其是该方法在短期天气预报中的应用有限。本文就降尺度技术的应用研究情况及其价值进行简述。

## 2 降尺度技术简介

现有应用的降尺度法有动力降尺度法、统计降尺度法、统计与动力相结合的降尺度法<sup>[6,7]</sup>。动力降尺度方法多用于气候预测<sup>[8]</sup>,即利用与气候模式耦合的区域气候模式(RCM)来预估区域未来气候变化情景。目前动力降尺度方法还应用于区域风能资源评价<sup>[9,10]</sup>研究方面。该方法基于物理定律的初值,具有物理意义明确,可不受观测资料的影响,能应用于很多地方,也可应用于不同分辨率的优点;其缺点是计算量大、费机时,没有利用或没有充分利用已有的实况历史资料。目前来看,动力降尺度<sup>[11-13]</sup>主要有两个发展方向:一种是提高GCM的水平分辨率,这无疑会大大增加计算量;另一个方向是在低分辨率GCM中嵌套高分辨率有限区域模式(LAM),这是一个有生命力的发展方向。但是LAM的边值条件的确定,与GCM的嵌套技术以及局地模式系统性误差的减少都是难点,此外该方法的计算量也较大,相比之下,统计降尺度计算量小而易于操作。

统计降尺度也称经验降尺度<sup>[14]</sup>,是由大尺度气候信息获取小尺度气候信息的有力工具,它可视为是与动力降尺度平行的降尺度方法,或者可被看做是动力降尺度的补充。它能由模式输出资料与气象要素之间

的统计关系,建立要素预报模型,做出对要素的定量预报。该方法的基本原理在于采用统计经验的方法,利用观测资料建立预报因子与预报要素之间的线性或非线形统计关系,建立要素预报模型,做出对要素的定量预报,并用独立的观测资料检验这种关系,最后再把这种关系应用于模式输出资料来对变量进行预报。文献[6]系统介绍了统计降尺度的原理与建模等相关问题。统计降尺度方法利用了大量的实况资料,有计算效率高、能输出较高分辨率或站点尺度的气象要素等优点,所以能弥补动力降尺度的一些不足,却没有利用或没有充分利用已掌握的物理知识。目前来看,统计与动力相结合的降尺度法在实际业务中更为适用。

目前对数值预报产品的统计降尺度释用方法主要有模式输出统计(Model Output Statistical, MOS)法、完全预报法(Perfect Prognostic Method, PP)、卡尔曼滤波(Kalman Filter)和人工神经网络等方法。MOS的优点是在建立在统计学多元线性回归模型的基础上,预报方程中自动考虑了数值预报的系统误差和局地气候,同时大量引用了其他方法难以引用的物理量场作为预报因子<sup>[15]</sup>(如垂直速度、假相当位温,涡度等物理意义明确、预报信息量较大的因子)。但常规MOS方法中大多采用统计回归方法和确定的建模途径,这些方法对样本充分、变化较为平稳的预报目标的释用效果较好,同时建立MOS预报模型需要大量的数值预报产品的历史资料,因而MOS预报模型受到历史资料样本的限制;数值模式产品的变化,使得MOS预报模型的统计学基础也随之改变,使常规的MOS预报无法适应数值预报模式的变化。PP法<sup>[16]</sup>要求模式预报是完全正确的,即预报的精度完全依赖模式预报的质量。卡尔曼滤波最早由卡尔曼于1960年提出<sup>[15]</sup>,该方法通过处理一系列带有误差的实际测量数据而得到所需要的物理参数的最佳估算值。根据这一基本思想,用以处理一系列带有误差的预报值而得到预报值的最佳估算值,这对提高预报精度具有重要现实意义。该方法具有适应性强、受数值预报模式更新的影响较小、所需样本资料少等优点,得到气象工作者的重视。但该方法一般只适用于线性系统,而大部分系统都是非线性的,同时还要选择物理意义清楚,相关系数高的因子。神经网络法则缺乏可信的物理过程。所以针对降尺度的适用性问题,发展独立于模式和历史样本资料的降尺度技术,将成为降尺度技术更好地应用于数值预报的一种有效方法。

### 3 降尺度研究现状与进展

截至目前, 学者们已将多种统计方法和人工智能技术应用于气象要素的降尺度研究。统计降尺度工作始于20世纪90年代<sup>[4]</sup>, 在近十几年的发展过程中, 降尺度取得了一系列成就, 在气候和水文方面已发展成相当完善的领域。Wilby等<sup>[17-19]</sup>对降尺度方法的应用做了较为详细的介绍。回顾了目前气候上的降尺度技术, 主要有4种方法: 回归的方法, 基于天气(环流)的方法, 随机天气发生器和有限区域气候模式。对几个降水模式应用降尺度方法试验, 对比表明基于环流的降尺度方法对目前的观测和降水的预报性能最好。Fowler等<sup>[20]</sup>也回顾了水文模型中降尺度技术近来的方法, 分别介绍了降尺度的概念、新方法, 对比了不同的研究方法对水文模式效果的影响。一直以来, 欧洲和北美国家对降尺度研究与应用较多, 得出的结论大多是某种统计降尺度在某地区适用, 不具有普遍性, 为了寻找更好、更普遍的降尺度方法, 学者们也对不同降尺度方法进行了较详细的对比研究<sup>[21-26]</sup>, 如Murphy<sup>[23]</sup>分别评估了统计降尺度和动力降尺度对局地气候的预报技巧。尽管统计方法对夏季温度的预报比较好, 动力方法对冬季降水估计稍微好些, 但总的来说, 动力和统计方法对局地温度和降水预报性能相当。文中认为通过提高代表性的物理过程和增加模式分辨率有助于提高动力降尺度的预报效果, 而提高统计降尺度预报效果则需要有更长时间序列的可靠观测资料和更多有预报意义的变量。Schoof等<sup>[25]</sup>对比了神经网络和回归方法对温度和降水的降尺度预报效果。Ramirez等<sup>[26]</sup>基于线性和非线性的降尺度方法, 使用人工神经网络和多元线性回归建立了巴西东南部的观测降水和天气尺度环流的诊断方程, 并将建立的诊断方程应用于Eta模式的输出, 对降水进行预报, 并对人工神经网络和多元线性回归方法的预报性能进行了评估。除对温度和降水的降尺度研究外, 目前降尺度方法已开始应用于更多的气象要素预报中。如Salameh等<sup>[27]</sup>对法国南部近地面风进行了统计降尺度研究, 该研究通过统计的方法, 对大尺度的高层大气和近地面大气场进行调整, 从而将近地面风的预报降尺度应用到法国南部各个气象站点的预报中, 结果表明这种方法对风速预报有一定的改进作用。

降尺度方法作为一种新的精细化预报途径, 国内近几年也开始了该方面的研究。2001年起中央气象台就发展建立了以模式直接输出(DMO)、模式输出统计(MOS)、神经网络和综合集成等统计释用技术为基础的客观要素预报方法, 通过业务预报的

实践检验发现, 统计释用的方法对现在的业务数值预报结果有明显改进能力。刘永和等<sup>[28]</sup>对气象中的统计降尺度方法做了详细的综述, 同时认为统计降尺度是解决由低分辨率气象模式输出到流域尺度转换的手段之一, 是未来提高天气预报准备率的主要发展趋势。朱宏伟等<sup>[14]</sup>同时结合区域气候中统计降尺度方法的应用进展、研究热点和发展趋势对降尺度方法概念、原理和应用研究做了详细综述。针对降尺度的优点及适用性, 学者们也做了许多研究工作, 主要是关于对未来降水和温度预报方面的研究<sup>[29-31]</sup>。范丽军等<sup>[6]</sup>将降尺度模拟的中国区域1和7月气温及月降水量结果与区域气候模式模拟结果进行比较发现, 将统计降尺度方法应用于我国气温预测是可行的。赵芳芳等<sup>[32]</sup>的研究中对这方面做了重点分析, 同时还应用降尺度模型SDSM(Statistical Downscaling Model)对气温做了详细预报。前面研究都主要是针对未来区域气候或未来温度、降水方面的应用, 对于降尺度方法在中尺度短期天气预报中的应用较少, 主要就李江萍等<sup>[5]</sup>在系统论述统计降尺度法的基本原理、一般步骤的基础上, 初步探讨了统计降尺度法在中期天气预报方面的应用。吴建秋等<sup>[1]</sup>利用 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 再分析资料以及自动站的气温观测资料, 采用线性回归和卡尔曼滤波相结合的方法, 对南京地区进行温度预报, 预报结果表明: 用该统计降尺度方法对南京地区温度进行预报的方法是可行的, 可得到精度较高且稳定的预报结果, 其预报结果具有较好的使用价值和参考价值。王辉赞等<sup>[33]</sup>利用卡尔曼滤波的降尺度方法, 对T106数值预报产品进行了预报优化。通过T106数值预报资料建立预报模型, 其后通过独立样本对副高面积指数和脊线指数进行预报。结果表明, 卡尔曼滤波方法能对预报对象提供更准确、有效的跟踪和描述, 较其他统计预报方法的自适应能力更强。

### 4 总结与展望

(1) 精细化、量化是未来天气预报技术发展的主要方向, 预报的时间分辨率由现在的以天为单位到小时为单位, 空间分辨率由现在的以县行政区域为单位的几十、上百千米区域到以镇为单位的几千米区域。而实现这种预报业务的精细化, 主要依赖于高分辨率的数值模式: 要提高精细化预报质量, 就必须大力发展数值预报产品的降尺度释用技术。

(2) 对数值模式预报产品进行降尺度释用, 得到本地区天气要素的预报已是国际上通行的做法, 其技术方法主要有: MOS、PP和卡尔曼滤波等。这些降尺度技术, 能够根据模式输出资料与气象要素之间的

统计关系, 建立要素预报模型, 做出对要素的定量预报。但这些方法对模式及历史资料的依赖性较强, 所以发展独立于模式和历史样本资料的降尺度技术, 使其具有更广的普遍性, 对提供定时、定点、定量的预报是非常必要的。

(3) 基于具有明确物理意义和可靠观测资料模型的降尺度技术将会有更好的发展前景。它能在现有模式的基础上改善模式预报结果, 减少改进模式的成本, 提高预报技巧, 不失为一条提高预报能力的捷径。这与正面发展模式并不矛盾, 通常数值模式预报结果越精确, 降尺度后的效果越理想。

(4) 精细化预报作为气象服务的一个重要组成部分, 如何将气象预报精细化到乡镇, 对乡镇进行及时准确的天气预报是摆在气象学家面前的一个更为迫切的任务。它的准确性和可靠性都对国民经济和社会各部门趋利避害, 对人们的日常生活各个方面有着非常重要的意义。因此, 采用有效的降尺度技术, 改进和发展适合自身的模式后处理技术, 对完善数值模式预报系统和提高模式预报准确率是非常必要的研究工作。

目前, 在数值预报业务中, 天气学、统计学和动力学等预报方法都扮演着重要角色。如何将这些方法相互结合、发挥各自优势形成新的预报技术, 是非常值得探讨的重要科学问题。近年来国内外数值模式后处理的发展已经取得了丰硕的成果, 但很多问题还有待解决, 这些方面的研究都有待进一步加强。

#### 参考文献

- [1] 吴建秋, 郭品文. 基于统计降尺度技术的精细化温度预报. 中国科技信息, 2009, 12: 44-48.
- [2] 陈敏, 王迎春, 仲跻芹, 等. 北京地区中尺度数值业务预报的客观检验. 应用气象学报, 2003, 14(5): 522-532.
- [3] Coulibaly P, Dibike Y B, Anctil F. Downscaling precipitation and temperature with temporal neural networks. Journal of Hydrometeorology, 2005, 6(4): 483-496.
- [4] 任丽娜, 翟宇梅, 王力维. 多模式集合在统计降尺度应用上的研究进展. 科学技术与工程, 2011, 11(29): 7185-7194.
- [5] 李江萍, 王式功. 统计降尺度法在数值预报产品释用中的应用. 气象, 2008, 34(6): 41-45.
- [6] 范丽军, 符淙斌, 陈德亮. 统计降尺度法对未来区域气候变化情景预估的研究进展. 地球科学进展, 2005, 20(3): 320-329.
- [7] 殷志远, 赖安伟, 公颖, 等. 气象水文耦合中的降尺度方法研究进展. 暴雨灾害, 2010, 29(1): 89-95.
- [8] 陈丽娟, 李维京, 张培群, 等. 降尺度技术在月降水预报中的应用. 应用气象学报, 2003, 14(6): 648-655.
- [9] 吴琼, 贺志明, 聂秋生, 等. 动力降尺度法对鄱阳湖区风能资源模拟效果分析. 资源科学, 2012, 34(12): 2337-2346.
- [10] 李艳, 汤剑平, 王元, 等. 区域风能资源评价分析的动力降尺度研究. 气候与环境研究, 2009, 14(2): 192-200.
- [11] Reborra N, Ferraris L, von Hardenberg J, et al. RainFARM: Rainfall downscaling by a filtered autoregressive model. Journal of Hydrometeorology, 2006, 7(4): 724-738.
- [12] Wu P L, Lin P L, Juang H M H. Local mean bias correction in a regional model downscaling: A case study of the South China Sea summer monsoon of 1998. Monthly Weather Review, 2009, 137(9): 2869-2892.
- [13] Branković Č, Matjačić B, Ivatek-Šahdan S, et al. Downscaling of ECMWF ensemble forecasts for cases of severe weather: Ensemble statistics and cluster analysis. Monthly Weather Review, 2008, 136(9): 3323-3342.
- [14] 朱宏伟, 杨森, 赵旭喆, 等. 区域气候变化统计降尺度研究进展. 生态学报, 2011, 31(9): 2602-2609.
- [15] 薛志磊, 张书余. 气温预报方法研究及其应用进展综述. 干旱气象, 2012, 30(3): 451-458.
- [16] Klein W H, Lewis F. Computer forecasts of maximum and minimum temperatures. Journal of Applied Meteorology, 1970, 9(3): 350-359.
- [17] Wilby R L, Dawson C W, Barrow E M. SDSM-A decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. Environmental Modelling and Software with Environment Data News, 2002, 17(2): 145-157.
- [18] Wilby R L, Hay L E, Gutowski W J, et al. Hydrological responses to dynamically and statistically downscaled climate model output. Geophysical Research Letters, 2000, 27(8): 1199-1202.
- [19] Wilby R L, Wigley T M L. Downscaling general circulation model output: A review of methods and limitations. Progress in Physical Geography, 1997, 21(4): 530-548.
- [20] Fowler H J, Blenkinsop S, Tebaldi C. Linking climate change modelling to impacts studies: Recent advances in downscaling techniques for hydrological modelling. International Journal of Climatology, 2007, 27(12): 1547-1578.
- [21] Zorita E, von Storch H. The Analog method as a simple statistical downscaling technique: Comparison with more complicated methods. Journal of Climate, 1999, 12(8): 2474-2489.
- [22] Gutmann E D, Rasmussen R M, Liu C, et al. A Comparison of statistical and dynamical downscaling of winter precipitation over complex terrain. Journal of Climate, 2011, 25(1): 262-281.
- [23] Murphy J. An evaluation of statistical and dynamical techniques for downscaling local climate. Journal of Climate, 1999, 12(8): 2256-2284.
- [24] Wood A W, Leung L R, Sridhar V, et al. Hydrologic implications of dynamical and statistical approaches to downscaling climate model outputs. Climatic Change, 2004, 62(1-3): 189-216.
- [25] Schoof J T, Pryor S C. Downscaling temperature and precipitation: A comparison of regression-based methods and artificial neural networks. International Journal of Climatology, 2001, 21(7): 773-790.
- [26] Ramírez M C, Ferreira N J, Velho H F C. Linear and nonlinear statistical downscaling for rainfall forecasting over southeastern Brazil. Weather and Forecasting, 2006, 21(6): 969-989.
- [27] Salameh T, Drobinski P, Vrac M, et al. Statistical downscaling of near-surface wind over complex terrain in southern France. Meteorology and Atmospheric Physics, 2008, 103(1-4): 253-265.
- [28] 刘永和, 郭维栋, 冯锦明, 等. 气象资料的统计降尺度方法综述. 地球科学进展, 2011, 26(8): 837-847.
- [29] 范丽军. 统计降尺度方法集合预估华东气温的初步研究. 高原气象, 2010, 29(2): 392-402.
- [30] 魏凤英, 黄嘉佑. 我国东部夏季降水量统计降尺度的可预测性研究. 热带气象学报, 2010, 26(4): 483-488.
- [31] 高红霞, 汤剑平. 黄河源区未来地面气温变化的统计降尺度分析. 南京大学学报(自然科学), 2010, 46(6): 631-641.
- [32] 赵芳芳, 徐宗学. 黄河源区未来地面气温变化的统计降尺度分析. 高原气象, 2008, 27(1): 153-161.
- [33] 王辉赞, 张韧, 王彦磊, 等. 基于 Kalman 滤波的副热带高压数值预报误差修正. 热带气象学报, 2006, 22(6): 661-666.