

# “他乡”或许不再是“异乡”

## ——ECMWF“揭开灰色地带的谜底”学术会评介

■ 贾朋群

近年来，在数值预报领域里，灰色地带经常被用于表示那些还无法得到解析的问题，既可能是指该现象的尺度与模式格局不匹配，也可以指该现象的物理过程尚不清晰等。ECMWF组织的这次会议，直面“灰色地带”这个数值模式发展遇到的难点问题。经过学者的不懈努力，目前模式中用灰色地带代表的“他乡”，或许在以后不再是“异乡”，而这样的谜底揭开之时，将是天气气候模式模拟技术真正实现换代的开始。



从物理学的角度看，气象学者真正拥有了自己的“一亩三分地”的标志，是1950年数值天气预报（NWP）试验的成功，这标志着气象学者真正有能力用物理和数学方法，解析大气运动的规律，是现代气象学开始成熟的重要标志。在此之前，虽然早在1904年，皮耶克尼斯等人就提出了天气预报问题是一个物理初值问题，控制大气运动的动力、热力学方程组几乎完美地被展现，但是这组准确的非线性方程组几乎没有可能得到数学解。1920年代，理查孙尝试手工计算求解没有成功，原因之一恰恰是计算过于精确，使得微弱的计算能力并没有用于计算大气主流或大尺度运动。而查尼等人借助人类第一台电子计算机终于获得NWP的成功，最关键的因素是敢于向大气运动的“原始方程”下手，创立了正压大气等一系列理念，从而充分简化了非线性方程组，将格点化的计算聚焦到最重要的大气大尺度运动上。

20世纪下半叶，气象学者快速扩展了自己的领地，这些研发工作大约是沿着两条线进行的：一条线是借助计算能力的提升让模式的分辨率更加精细化，

从而让解析计算和参数化更加准确和合理；另一条线则更为重要，即在查尼用“滤波镜”看大气运动后，开始用“放大镜”观察大气运动的细节，让最初被简化的非线性方程组，逐步放弃简化或降低被简化的程度，于是模式运行得到的“模拟大气”一步步接近真实。在这样的模式改进进程中，一个重要的问题是无法绕开的：原始方程组中那些用参数化、格点化计算和非线性数学方式表达的大气变量或变量间的关系等，到底能否用数值方法完美解析，从而当模式分辨率提高时摆脱各类简化？为了回答这样的问题，目前全球主要数值天气预报机构——欧洲中期天气预报中心（ECMWF）在2017年末，召开了一次有些特别的学术会议，会议名称就是“揭开灰色地带的谜底”（Shedding light on the greyzone，也可译为“照亮灰色地带”）。

这次看似“无厘头”的会议，实际上直指数值天气预报在进入水平分辨率为1~10 km时，一些新的方法和技术手段可能带来的模拟能力在本质上得到提升机会。历时3天的会议，交流了30篇报告，报告人主要来自主要气象中心的研发部门（21人，其中：ECMWF 5人、英国气象局4人、德国气象局3人、法国和韩国气象局各2人）和欧美大学等机构。

### 1 认识数值模拟的灰色地带

近年来，在数值预报领域里，灰色地带经常被用于表示那些还无法得到解析的问题，既可能是指该现象的尺度与模式格距不匹配，也可以指该现象的物理过程尚不清晰等。会议开始，来自ECMWF的两位专家在进行背景介绍时，分别从两个方面介绍了对会议主题中“灰色地带”的理解，并给出了他们的思考。

Andy Brown用一张目前模拟进程中，变量 $X$ 在经过动力、参数化和耦合过程的演化图（图1），描述了物理参数化过程中产生的灰色地带涉及领域的例子：长波/短波辐射、对流、云与微物理、大气成分、边界层、湍流混合和重力波拖曳等。他在提出启发参会者的多个问题之后，给出可能的解答是对不确定性来源给出全新表达的可能性的探索。他提出的问题包括：

- 1) 开展区域模拟10年多以来，针对灰色地带的认识有哪些？是否存在一般性的方法，或者是否存在对过程、个例和模式都十分关键的要素？
- 2) 传统的离散方法从传统物理动力学视角审视，是否在处理灰色地带时还行之有效，或者我们是否需要换个角度思考？
- 3) km-量级地表异质性是基本可解析的问题吗？从复杂地形区域模拟中我们可以得到什么，是否能帮助我们在全球尺度上规范参数化？
- 4) 北半球动力过程对全球灰色地带天气和气候预报非常重要的证据是什么？
- 5) 在增加分辨率时需要怎样的随机参数化面对灰色地带？已有的概念是否适合1~10 km范围？
- 6) 含灰色地带的全球模式并不便宜，当实现这样的分辨率时，计算/可伸缩性的机会和限制是什么？
- 7) 如何获得系统性的进步？是验证个例吗？

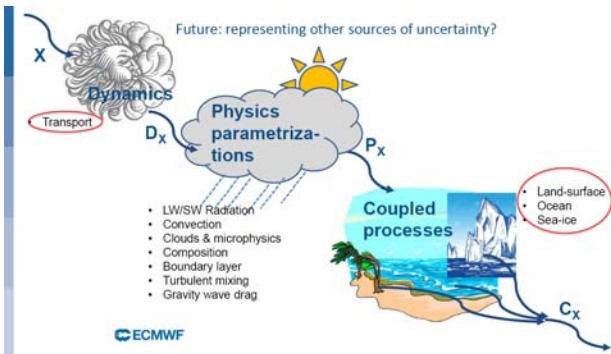


图1 变量 $X$ 经过动力、参数化和耦合过程的演化过程和物理参数化过程中与灰色地带相关的过程的例子

同样来自ECMWF的Nils P. Wedi则从区域模拟角度，进一步阐述了灰色地带。他认为，灰色地带就是一种在分辨率边缘的模拟（图2），要照亮全球天气和气候模拟的灰色地带，过去10余年的区域天气预报或许可以借鉴从而将模拟和预报推进到全球尺度。他认为，LES（大尺度涡旋模拟，这里指空间分辨率达到惯性次尺度，但无法分辨运动的最小尺度的模拟活动，作者注）对于区域天气预报，以及从区域向全球尺度的过度有一定的对比意义，更有很多信息和做法可以借鉴。

两位背景介绍专家的发言，大致为读者描绘了一张较为清晰的灰色地带的图像，即这样的地带是指

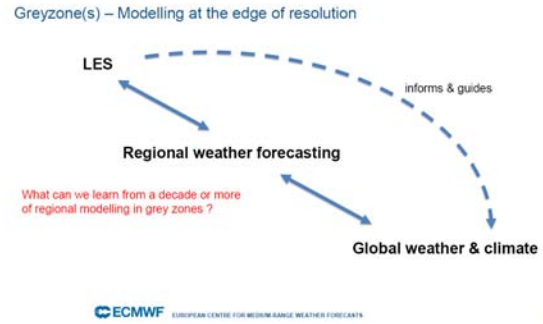


图2 从LES（大尺度涡旋模拟）到区域天气预报，再到全球天气和气候的模拟之间相互借鉴和启发过程

数值天气预报和气候模拟活动中，因确定性的动力过程无法完整解析带来的对模拟对象没有把握的表达，或在模拟手段上采用的过渡性和缺乏成熟理论依据的方式。这样的灰色地带，即是气象模拟界面对未知挑战的一种概括，更是一种“自省”和提示。这样的地带，不仅会随着模拟活动的拓展而进一步发现，还会随着新技术或方法的引进而被“收复失地”，即灰色地带被照亮。而模式本身的分辨率，则更像是一把双刃剑，其增加的与尺度相关的解析能力，能照亮一些灰色地带的同时，还会因为新的更小尺度过程进入模拟过程，使得在模拟过程中意识到新的灰色地带。而这样的灰色地带反复扩张和被照亮的过程，生动呈现了模式能力的进步。

## 2 认识对流

本次会议报告中，有超过10篇报告主要关注的是对流问题。对流是让气象学界爱恨交加的主题：成功揭示大气大尺度对流活动即是数值模式价值的最好体现，又因为对流活动的多尺度性和复杂性，对这样过程的全面描述还需要更多的努力。

英国气象局的统一模式（UM）是业务预报模式分辨率提升的排头兵之一，该模式的流体静力学中尺度模拟在1990年代初，格距就达到17 km，1998年为12 km。2005年格距为4 km的英国区域模式业务运行。目前扩展版英国区域模式（UKV），从2017年9月开始进行每小时循环运算。UKV通过提高分辨率，更新了对流模式，降水预报能力得到提升。从针对2014年7月8日一次降水活动的对比模拟结果（图3）可以看出，全球模式给出的降水在时间上是间歇的而且没能给出任何地形造成强降水的结果。而4 km分辨率模式虽然在雨量分布上预报得更好，但也存在强降水偏多而弱降水偏少的问题。分辨率更高的1.5 km模式在雨量模拟方面表现更好，尤其是在强、弱降水之间平衡方面。更高分辨率模式的模拟结果（图4）也

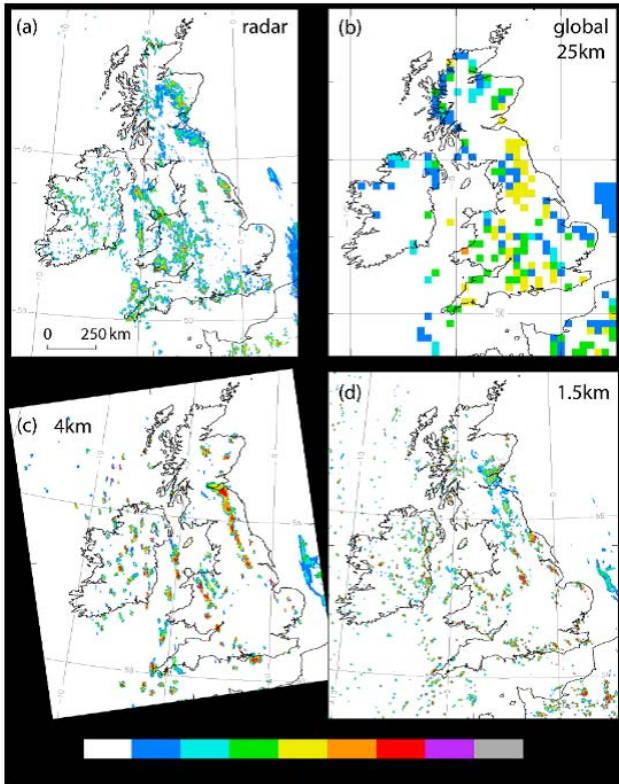


图3 雷达和不同分辨率模式模拟的2014年7月8日降水过程 (a-d)

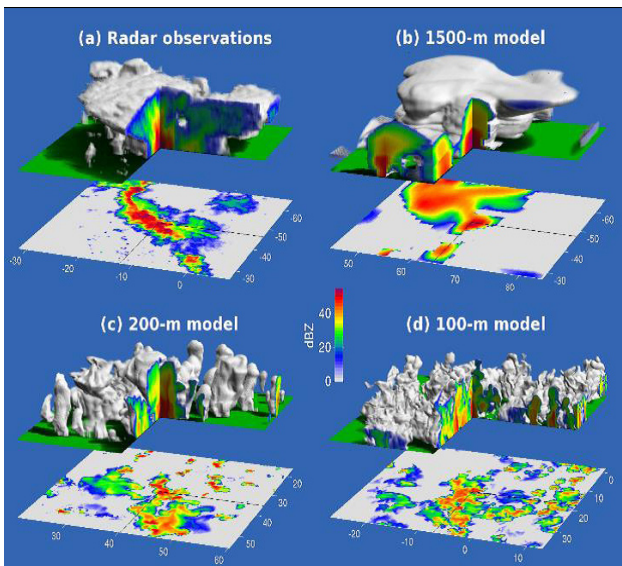


图4 3D可视化的雷达和不同分辨率模式模拟的2012年8月25日降水过程 (a-d)

在提示英国气象局未来模式发展的方向。这类研究和预报实践表明，尽管模式分辨率的提升并没有理论上的极限，但是在利用和验证这些结果的时候，需要考虑缺乏小尺度可预报性的知识。未来如何改进在km级模式中的对流表达，与会作者认为还是要依据观测带来的信息改进参数化方案，而未来模式进入100 m分

辨率的湍流模式阶段后，还需大量研究给予支撑，最初模式应该瞄准城市尺度模式和制定城市模拟战略。

### 3 更加重视热带对流

世界上最激烈的对流无疑发生在热带，而且因为这里的对流经常在垂直方向上有深厚的伸展，可到达平流层低层而被称为深对流。法国图卢兹大学和日本气象厅（JMA）的学者，分别用一张图（图5a和图5b）说明了不同的模式分辨率进行深对流模拟的方法和不确定性的来源，以及所谓灰色区域在对流上的划分。法国学者还重点介绍了云解析模式（CRM）和LES方法模拟热带深对流的进展和挑战。研究表明，CRM在模拟MJO信号和日循环等方面表现较好，但因为缺乏云组织信息，导致模拟结果对湍流参数化非常敏感，而结合LES后收敛性可以更好。日本学者的研究，则更多从业务预报方面，介绍了JMA的2 km业务高分变率模式在预报强降水方面更加准确的优势。但是模式的对流启动延迟和对流活动持续时间偏长等问题困扰着研发人员。研究表明，对流启动问题有时是

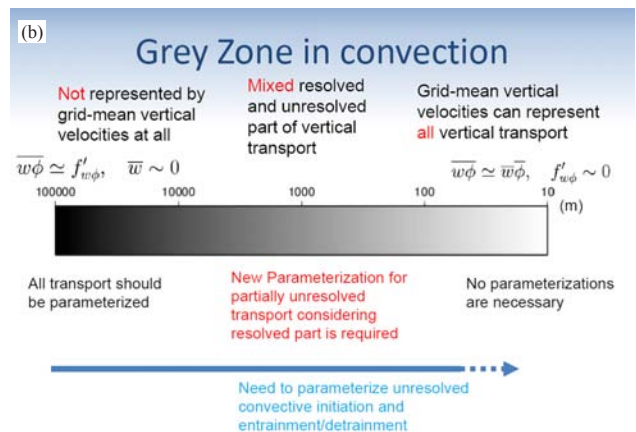
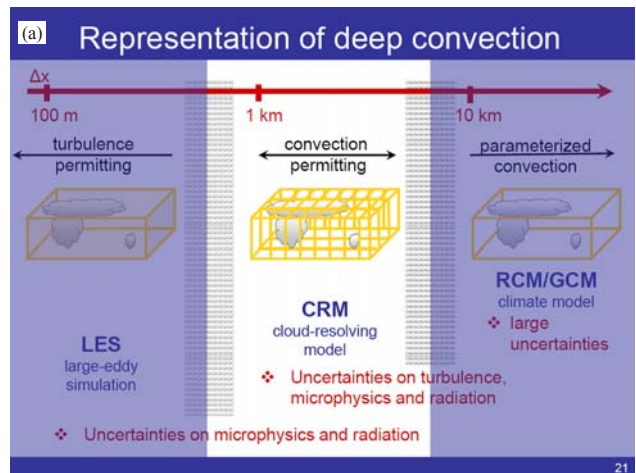


图5 在湍流模拟中深对流的尺度和处理方法划分 (a) 和对流模拟的灰色区域 (b)

因为一些无法解析的小尺度现象导致，因此这些现象应该在参数化中加入，而参数化面临的主要挑战，来自对卷吸/逸出 (entrainment/detrainment) 过程参数化效果，如当前2 km模式中积云高度过高可能来自缺少卷吸/逸出机制。

#### 4 边界层和次网格难题

边界层问题的研究，尤其是涉及大气湍流等问题，几乎和气象动力学问题研究具有同样悠久的历史，而次网格问题虽然随着模式分辨率的提升而在被压缩，却因大气运动一直可以追溯到气体分子尺度，新的次网格问题或许无法穷尽。

法国气象局学者在分析了湍流尺度、次网格尺度和天气尺度与模式格距之间的关系 (图6) 后，指出了该领域的灰色地带，提出实现在灰色地带湍流分布纯次网格解析的目标。实现这一目标的方法也是多元和灵活的，一些边界层个例可以参照LES方法处理，而LES粗颗粒场，向纯解析场转化。此外，还有计算解析和次网格湍流通量的结合以及基于理论的一般化处理等。

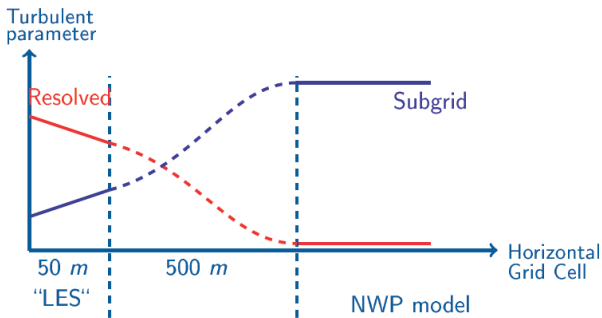


图6 不同尺度的湍流参数化方法

法国学者还进一步介绍了LES水平粗颗粒场如何诊断并得到参考尺度的过程 (图7)，指出要素的细

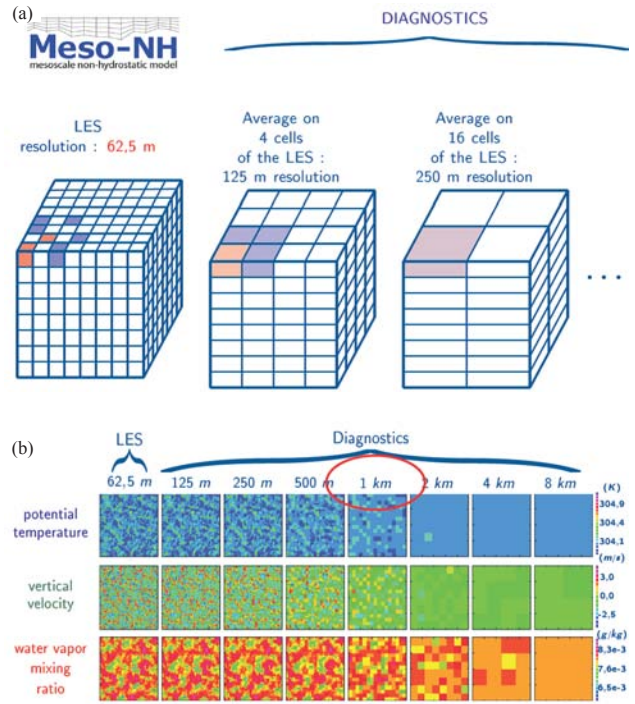


图7 在湍流模拟领域 LES粗颗粒场的诊断 (a) 和建立灰色地带参考 (b) 示意图

微结构当分辨率超过1 km达到中尺度时消失，即在1 km分辨率时可见的结构，可以视为湍流的灰色地带。

与法国学者多元化的思路不同，来自加州理工的学者介绍了统一参数化的理念 (图8)。这一方法的思路，是将从小尺度的湍流到大尺度对流，实现统一的尺度调整参数化方案，即建立涡旋扩散/质量通量模型 (Eddy-Diffusivity/Mass-Flux model, EDMF)。这一模型目前已经在ECMWF、NCEP和美国军方得到应用，但面临的挑战体现在卷流模式、卷流间相互作用、预测卷流发生、与微物理过程的耦合和稳定边界层处理等几个方面。

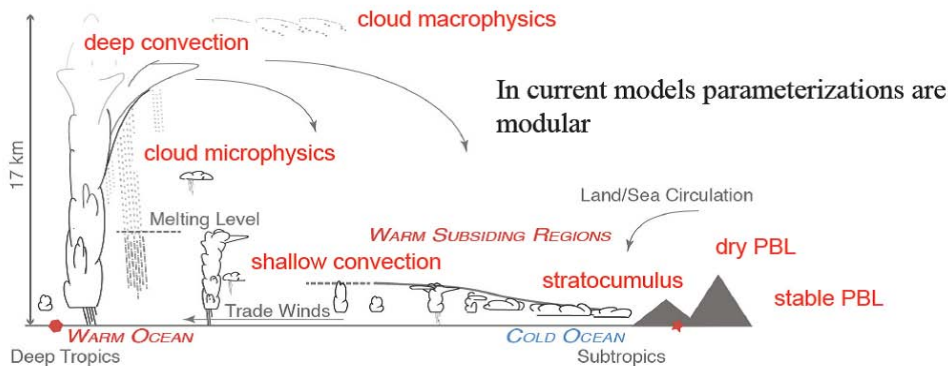


图8 边界层、对流和宏/微物理的统一参数化

(下转304页)

## 5 会议启示

本次会议虽然局限于数值预报领域，内容复杂和前沿，但关系到气象发展的未来方向。本文从会议报告中略拾一二并分类进行介绍，试图让读者了解会议的框架信息。会上不仅很多报告还涉及了前述问题更多层面，一些主题报告，例如，针对地形、区域模式和不确定性问题，限于篇幅并未在文中介绍。

ECMWF组织的这次会议，类似会议名称，有些灰色和低调，但是3天时间里数十位与会专家研讨的问题，却是数值模式（包括天气和气候模式）发展最核心的内容，也是气象学科内部必须直接面对的难点问题。换句话说，气象科学未来更大的突破，首先需要更多地照亮目前的灰色地带。而主办方的办会目的也是十分明确的：为落实ECMWF未来十年战略中研

发5 km全球模式出谋划策。ECMWF要保持全球数值预报排头兵的地位，这样的战略设想固然十分关键，而面对制约模式发展的灰色地带，即这些在数值模拟领域尚没有有效手段进行解析的“他乡”，如何转变成学者们可以充分掌控的领地，需要从战略、战术和新理念、技术突破等多角度审视，从而找到一条可行之路。参会的学者各自诠释了他们对灰色地带的独特理解，让这一概念瞄准了更多的未知但关键的领域和模式改进细节。可以说，参会专家是未来天气气候模式重要改进的工匠中的代表，正是要靠这些工匠们的不懈努力，目前模式中用灰色地带代表的“他乡”，或许在以后不再是“异乡”，而这样的谜底揭开之时，将是天气气候模式模拟技术真正实现换代的开始。

(作者单位：中国气象局气象干部培训学院)