

兼顾数值预报理论和业务预报需求的 《数值天气预报》课程教学改革与实践

吴小飞*, 张 宇, 杨凯晴

成都信息工程大学大气科学学院, 四川 成都

收稿日期: 2025年8月3日; 录用日期: 2025年9月4日; 发布日期: 2025年9月12日

摘 要

数值天气预报技术迅猛发展, 为促进课程教学与气象业务深度融合, 提升本科生数值预报专业能力, 使其更好适应现代气象业务需求, 本文基于《数值天气预报》课程特点和知识体系, 系统分析了我校当前的教学现状, 通过深化培养目标和创新教学模式, 从科教融合、需求导向、实践强化三个方面梳理并探索了课程内容与预报业务结合的教学设计与案例, 有效加强了理论教学与业务应用之间的有机衔接, 为全面提升教学质量, 培养理论基础扎实、业务能力突出的复合型气象人才提供借鉴和参考。

关键词

数值天气预报, 教学改革设计, 实践能力培养, 理论教学提升

Teaching Reform and Practice of the Course “Numerical Weather Prediction” Balancing Numerical Prediction Theory and Operational Prediction Needs

Xiaofei Wu*, Yu Zhang, Kaiqing Yang

School of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu Sichuan

Received: Aug. 3rd, 2025; accepted: Sep. 4th, 2025; published: Sep. 12th, 2025

Abstract

Numerical weather forecasting technology is developing rapidly, with the aim of enhancing the

*通讯作者。

文章引用: 吴小飞, 张宇, 杨凯晴. 兼顾数值预报理论和业务预报需求的《数值天气预报》课程教学改革与实践[J]. 教育进展, 2025, 15(9): 902-909. DOI: 10.12677/ae.2025.1591754

professional ability of undergraduates in numerical weather forecasting, which is essential for them to better adapt to the needs of modern meteorological operations. It is crucial to strengthen the deep integration of course teaching and weather forecasting operations. Based on the characteristics and knowledge system of the “Numerical Weather Prediction” course, this paper systematically analyzed the current teaching status in our university. By deepening the training objectives and innovating the teaching model, we have sorted out and explored the teaching design and cases combining course content with prediction service from the three aspects of integration of science and education, demand orientation, and practice reinforcement, effectively strengthening the organic connection between theoretical teaching and service application, and providing reference for comprehensively improving the teaching quality and cultivating compound meteorological talents with solid theoretical foundation and outstanding prediction ability.

Keywords

Numerical Weather Prediction, Curriculum Reform Design, Practical Skills Development, Theoretical Teaching Improvement

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

《自然》杂志封面文章指出：“数值天气预报的发展如同一次寂静的革命，已成为所有物理科学中影响最大的领域之一” [1]。数值天气预报基于高性能计算平台，通过求解描述大气运动学和热力学的偏微分方程组，在给定初始场和边界条件的约束下，模拟大气系统的时空演变，进而实现对未来天气的定量预测。作为气象领域的前沿技术，数值天气预报大幅提升了预报准确率，是当前天气预报业务的主要手段之一，在保障人民生命财产安全、护航生态文明建设、助力社会可持续发展方面具有不可替代的支撑作用。提高天气预报的准确率，既依赖于高密度的地面 - 高空气象观测网络与先进的数值模拟技术作为硬件支撑，更需要培养掌握数值预报核心理论、精通数值模式运行调试与产品释用的复合型人才。

在气象现代化建设进程中，人才培养是基础性、先导性工程。如何突破传统教学范式，从知识体系、教学方式及科学前沿融合等方面改进革新，培养“懂模式、会应用”且满足预报业务需求的专业人才，值得深入探索。2025年6月，中国气象局“加强气象人才源头培养工作研讨会”在南京召开。会议指出，加强气象人才源头培养是新时代加快推进气象高质量发展的必然要求，是气象部门贯彻落实党的二十届三中全会关于教育、科技、人才一体推进改革部署的重要举措。会议强调，气象部门和高校需双向奔赴，强化供需对接，共同推动气象人才培养提质增效。会议特别强调，气象部门与各高校将合力构建教育、科技、人才三位一体的协同培养生态，健全“产学研用”协同育人机制，进一步加强局校交流和科研合作，促进教学能力全面提升；共建共享科教资源，加强气象典型案例和事业发展史课程开发，及时更新教材体系，促进教学内容精准对接；推动教育教学与工作岗位需求有机衔接，强化大学生实习实践、思政教育和科普宣传，为学生深入了解气象事业、树立职业荣誉感、促进成长成才营造良好环境。

结合学校实际，我校作为中国气象局的共建高校，一方面承载着为国家各级气象部门培养一线业务人员的责任，要求学生具备业务预报技能；另一方面，大气科学作为学校拥有“本科 - 硕士 - 博士”一体化人才培养体系的重要学科，也肩负着培养科研人才的重任。《数值天气预报》课程是教育部《普通高等学校本科专业类教学质量国家标准》规定的大气科学专业核心课程之一 [2]，而数值模拟不仅是当前

气象业务预报的重要手段，也是大气科学研究的重要工具。因此，有必要结合国家气象业务人才培养的实际需求和学校大气科学学科发展现状，梳理该课程的当前问题，并从兼顾数值预报理论与业务应用的角度探索教学改革路径。

2. 课程开设现状及不足

纵观国内外高校，《数值天气预报》课程均被列为大气科学本科教育的专业核心课程，且授课学时普遍在 40 课时以上。该课程以理论教学为主，各高校的教学内容大体相似。在实践教学环节，各高校的侧重点有所不同。例如，兰州大学和南京信息工程大学详细介绍了 WRF 模式的应用；浙江大学和南京大学则专门开设了气象数值模拟实践课程。我校同样开设了模式应用、数值产品评估与释用等实践课程。但由于理论课程与实践课程相互独立，导致数值预报理论与模式应用的衔接不够紧密。数值天气预报课程在本科教学环节中存在的主要问题可归纳为以下三个方面：

(1) 教学内容与学科发展前沿的结合不足

作为一门发展迅速的应用型科学，数值天气预报领域的新理论、新技术不断涌现并广泛应用于实际业务预报和科学研究领域，这意味着课程内容不仅需要涵盖经典的预报理论和方法，也要不断更新与之密切相关的学科前沿进展，避免出现教学内容与学科发展现状脱节、知识体系滞后的现象。针对这个问题，国内多所高校教学团队开展了相应的教学改革实践[3]-[6]，我校也通过开设进阶课程如《数值预报产品检验评估》，将主流数值模式应用、模式性能评估及业务产品应用等内容纳入教学体系，有效提升了学生的实践能力，然而如何建立教学科研联动机制，实现课程内容与科研动态的精准对接，为本科生未来职业发展奠定有利先机，仍是需要突破的关键问题。

(2) 理论教学与实践应用存在脱节

根据历年学生课程评价及教师教学反馈，发现学生普遍认为课程学习难度较大，存在知识掌握困难、跟进步伐吃力等现象。这主要是因为课程本身理论深度较高，涉及大量复杂的公式推导，由公式符号到数值算法的实现过程又较为抽象，学生在原理认知过程中花费较多精力，导致对课程整体知识框架和核心内容的理解不够深入。迫切需要调整教学内容和授课方式，结合业务中广泛使用的现代数值模式，增强课堂吸引力，提高教学效果。

(3) 实践教学环节相对薄弱

作为强应用性的专业课程，实践教学应占据重要地位。虽然目前的教学计划中安排了上机实践教学环节，但由于课时资源限制，难以通过现有的上机实践充分掌握复杂的大气数值模型架构和应用出口，导致在常规教学周期内往往难以实现理想的教学效果。这种理论与实践的不平衡，制约了学生解决实际问题的能力培养，也影响了课程整体教学效果。需要在实践教学环节针对数值模式的使用、模式性能评估、数值产品释用三方面加强。

这些问题的存在，不仅限制了课程教学质量提升，也不利于培养适应现代气象业务需求的专业人才，亟需通过系统的教学改革予以解决。

3. 数值预报理论和业务预报需求相结合的教学探索

根据课程的性质和作用以及目前本科生的不同出口需要，针对上述三个关键问题，整合最新数值模拟领域研究进展、数值产品在我国预报业务中的应用、由方程到可执行代码的数值模拟实践三个方面构建了“前沿-业务-实践”三维融合的教学案例体系，总结设计了《数值天气预报》课程各章节与预报业务相结合的教学案例(表 1)，力求使构建的教学案例科学严谨，有效拓宽学生的国际化技术视野、提升解决实际业务问题的专业素养、激发对数值预报技术的探究热情，最终实现人才培养与行业发展需求的无缝对接。

Table 1. Teaching cases combining theoretical knowledge points with common numerical elements and their corresponding introduction methods in teaching

表 1. 课程理论知识点与常用数值结合的案例及其在教学中的导入方式

章节名称	知识要点	结合案例	导入方式
第 1 章 绪论	数值天气预报的发展历史及未来趋势	(1) 1950 年世界第一张数值天气预报图的诞生[7] (2) 1957 年我国第一张数值天气预报图的诞生 (3) 数值预报科学家及团队: Vilhelm Bjerknes、J. G. Charney、顾震潮、中国气象局地球系统数值预报中心[8]	课堂讲解 + 扩展阅读
第 2 章 数值预报模式基本方程组	数值天气预报模式及其分类; 数值模拟中的垂直坐标系	(1) WRF 地形追随垂直坐标系和非静力坐标系 (2) CMA-MESO 混合垂直坐标系 (3) 数值模拟中垂直坐标系选取和设置需考虑的因素, 以青藏高原及周边为例	动画演示 + 启发提问 + 拓展阅读
第 3 章 地图投影坐标系中的大气运动基本方程组	常用正形投影的适用范围及其参数的计算	(1) 最适合中国区域模拟的地图投影类别 (2) 如何在 WRF/CMA-MESO 中设置各类投影 (3) 地图放大系数公式计算和编程计算的差别	课堂讲解 + 编程实践
第 4 章 数值差分计算方案	线性计算不稳定; 非线性计算不稳定; 时间积分格式	(1) 非结构网格和自适应算法等新技术在数值模拟中的应用(MPAS 模式、FREST 模式、Fluidity 模式) (2) WRF 模式中的三阶 Runge-Kutta (RK3)格式和 CMA-MESO 的半隐式半拉格朗日格式	动画演示 + 拓展阅读
第 5 章 正压原始方程模式	空间守恒差分格式; 空间差分格式与地转适应; 时间积分方案	(1) WRF 模式中 Arakawa C 格式网格和 CMA-MESO 模式中的 Arakawa B 网格进行对比 (2) 国家最高科学技术奖获得者叶笃正先生与能量频散	编程实践 + 小组汇报
第 6 章 斜压原始方程模式	斜压原始方程模式的空间差分格式和时间积分方案	(1) 常见线性斜压模式(Liner Baroclinic Model, LBM)介绍 (2) 国家最高科学技术奖获得者曾庆存先生首创半隐式差分法、首次成功求解大气斜压原始方程组	动画演示 + 兴趣试验
第 7 章 初始条件和边界条件	初值处理原理和方法; 数据同化; 常见边界条件; 嵌套网格	(1) 数据同化的发展历程 (2) WRF 嵌套网格, 中国 CMA 系列模式的嵌套关系; (3) 新型拉伸网格和边网格模式(MPAS, FV3, Fluidity)	动画演示 + 启发提问
第 8 章 模式中的物理过程及其参数化方案	次网格过程; 大尺度凝结过程; 对流参数化方案	(1) 次网格过程与“灰区”尺度问题 (2) 变网格模式中的尺度自适应参数化方案	虚拟仿真试验 + 扩展阅读

通过引入新型教学案例和实践环节, 以期达到如下目的:

(1) 科学前沿成果和预报技术融入教学实践

数值天气预报从 100 年前理查森最初的“天气预报工厂”构想, 发展为现今融合了大气科学、信息技术、计算数学和高性能计算的复杂体系, 是多学科理论创新与技术突破的集中体现。中国科学家从顾震潮院士开创东亚地区数值预报, 到我国自主研发的新一代多尺度通用资料同化与数值天气预报系统——CMA 模式体系业务化运行, 以及最新的以华为盘古模型为代表的 AI 气象预报技术, 这些技术创新不断推动我国数值预报技术的跨越式发展, 天气预报准确率的显著提升。在第 1、2 章的教学内容中, 通过课堂讲解和课后拓展阅读全面介绍国际主流预报模型, 特别是我国目前业务使用的 CMA 模型, 将最近的

科研进展和技术成果有机融入知识体系,使学生形成完善的预报理论和应用体系,拓宽视野的同时激发学习热情和探索欲望。

(2) 构建以业务需求为载体的数值预报教学框架

我国天气预报业务覆盖范围广,地域差别大,预报需求具有多层次、多样化的特点,各级别气象部门所需要的产品资料和计算资源有着明显的差异。例如,国家级气象中心的业务工作包括利用超级计算机群运行和调试全球模式提高预报系统精度,但对于地方台站来说,在预报工作中合理调用各类数值预报产品、运行相关程序解释产品则更为重要。针对这样的业务需求特点,在讲授当前的天气预报业务中,需要针对不同的情况作出多种层次的讲解和对比,通过视频展示、课堂演示等手段,让学生更加清晰地认识当前气象部门的需求,将理论知识与业务实际相联系,深刻理解学习这门课的重要意义,便于将这门课的知识和技能应用于日后的工作之中去。

(3) 模式运行和数值预报产品释用丰富课程实践

数值预报技术发展迅速,预报员必须与时俱进地根据其新属性调整产品应用策略,避免盲目使用、过分依赖,才能充分发挥数值预报工具的技术优势,切实提高预报效果,近年来人工智能等新型技术的引入更是对预报提出更高要求。针对这一问题,在教学环节和实践环节中引入模式产品解读案例、模式数据偏差订正、模式评分几个部分,尝试增设对 CMA 数值预报产品的模拟性能评估,利用气象局现行释用技术对数值预报产品进行订正解释。通过课堂讲授和动手实验双重手段,帮助学生更好地了解 CMA 数值预报产品性能,适应无缝隙智能网格预报的发展需求。

4. 教学案例介绍

本文选取课程教学内容第四章“数值差分计算方案”作为教改案例进行说明。本章主要讲解各类差分格式的稳定性、准确性和计算效率等特征。原授课内容以理论教学为主,内容较为抽象,缺乏与实际数值模式的结合,无法让学生直观理解差分格式在实际数值模式中的重要作用。因此,本着兼顾理论教学和业务实际需要的教学改革目标,教改内容让差分格式与当前国内外主流数值模式进行了结合。差分格式的基础在于网格选取和划分,网格划分一定程度上决定了模式数值算法的计算效率、稳定性和准确度。因此,教学内容纳入了当前全球大气模式的主要网格类型、各类网格主要特征以及主流代表模式。通过融入如表 2 的教学内容,学生可在本章理论知识的基础上,进一步结合实际得到如下收获:

(1) 网格类型对数值算法的影响。传统教学中,数值差分格式讲解,仅简单举例将网格分为等距和不等距网格、正方形和三角形网格等,缺乏对网格结构及其影响的讲解,学生对网格结构的含义及优缺点理解不够全面。通过本次改革,重点讲解了各类网格对全球大气空间的剖分方式、极地处理方式及由此导致的数值计算准确性和计算效率问题。该内容可让学生更为直观地理解数值差分算法不仅依赖于差分格式本身,还与网格划分方式密切相关。尤其在数值模拟实践中,网格划分还将影响数值计算的效率。引入全球大气模式网格的对比分析,不仅给学生理解抽象的数值差分理论提供了载体,还有助于培养学生的模式实际使用能力。例如,针对全球不同区域的模拟,应当根据网格特性选用不同全球网格划分方式,扬长避短。

(2) 国内外主流模式常用的网格。教学中对代表性模式的选取作了针对性考虑,主要选取中国主要业务机构和科研机构的模式。例如,中国气象局作为我国的气象业务部门,选取了四个模式,其中 CAM-GFS 为天气预报业务主力模式,BCC-CSM2-MR 为气候预测业务主流模式,GRIST 为国际前沿的变网格模式;同时,中国科学院大气物理研究所作为大气科学研究的代表性科研机构,选取了两个模式,其中 CAS-ESM 2.0 为国家大科学装置-地球模拟器的原型模式,CAS FGOALS-f2 为多次参加全球耦合模式比较计划(CMIP)、国际次季节-季节预测计划(S2S Project)等国际计划的模式。而国外,主要选取目前使用

最广泛的模式，如欧洲中长期预报中心(ECMWF)、美国国家大气科学中心(NCAR)、美国能源部(DOE)、美国地球流体力学实验室(GFDL)和德国马普研究所的模式。以上模式均为学生在未来科研和工作中大概率会接触到的模式，因此选取介绍。

(3) 前沿变网格模式。变网格模式可以通过对局部区域的网格进行拉升，实现特定区域的加密和稀疏，达到兼顾小尺度过程的精细化模拟和计算资源的节省，是数值模式网格发展的前沿方向。因此，教学中也引入了 MPAS-A、ICON 和 GRIST 等变网格模式，让学生及时关注前沿发展。

Table 2. Characteristics of global atmospheric model grid
表 2. 全球大气模式网格特征

网格类型	网格结构	极区处理	均匀性	计算效率	代表性模式
经纬网格	结构网格，以经纬度为坐标划分，呈矩形	极点处网格点密集，存在数值计算集中问题	差，赤道与极区网格点间距和单元面积差异大	低，极区计算负载高，易导致高性能计算负载不均	中国气象局 CAM-GFS 模式、BCC-CSM2-MR 模式；中国科学院 CAS-ESM2.0 模式(优化)；美国国家大气研究中心 CAM6 模式
高斯网格	结构网格，经度等间距，纬度不等间距，极点处无网格点	通过特殊的纬度分布设计，避免极点处网格过于密集	中，简化高斯网格可使全球网格点间距近似恒定	中，较经纬网格计算效率有所提升	欧洲中期天气预报中心 ECMWF IFS 模式
阴阳网格	结构网格，由两个类似经纬度网格的“半网格”拼接而成	无极点密集问题，采用准均匀网格，单元面积差异小	好，全球网格单元面积变化率通常 < 10%	高，负载均衡性好，适合大规模并行计算	中国气象局 GRAPES_YY 模式
立方球投影网格	结构网格，由六个正方形面组成，每个极点对应一个面，赤道方向分四个面	极点对应一个面，不存在极区网格密集问题	好，每个面内网格近似均匀，单元面积差异小	高，各面可独立并行计算	中国科学院 CASFGOALS-f2；美国海洋和大气管理局 UFS 模式、GFDL AM 模式
正二十面体三角形网格	非结构网格，以正二十面体为基础，每面是三角形，通过细分增加顶点和边	无极点问题，网格在极点附近自然过渡	好，三角形分布均匀，最大网格距和最小网格距之比约为 1.2	中高，非结构化网格的数值计算对格式要求高	德国气象局和马克斯普朗克气象研究所的 ICON 模式
球面正二十面体六边形网格	非结构网格，基于正二十面体剖分，以六边形为主	无极点问题，网格分布均匀	好，六边形具有拓扑关系一致、采样效率高等优点	中高，计算效率依赖算法	中国气象局 GRIST 模式
非结构的球面质心泰森多边形网格	非结构网格，主要是六边形，可平滑过渡加密特定区域	无极点问题，可根据需要在特定区域加密	好，兼顾全局均匀性与局部加密能力	中高，网格生成阶段耗时严重	美国国家大气研究中心 MPAS-A 模式

5. 教改效果评估

本教学改革内容已经在 2023~2025 年期间完成了三个年级的教学。本课程的开课学期为本科三年级,因此已有两届学生毕业。从学生学习效果和毕业选择的初步反馈情况看,本次教学改革已经初步取得了一定效果,主要体现在以下方面:

(1) 教学效果评估。从学生的课堂学习积极性来看,对单纯的数值预报理论公式推导,学生互动积极性明显偏低,而当涉及到与实际模式案例相结合的内容时,学生的积极性和提问率明显上升。从平时作业和期末考试效果来看,往年涉及到开放性题目时,学生答题方式往往倾向于罗列相关知识点,而近两年部分学生已能够结合数值模式和实际模拟案例,展开一些初步的针对性分析。从教学平台资源的查阅统计数据看,除授课课件外,同学们对相关的课外资料,如综述性论文、视频资料和模拟案例等,也表现出了明显的兴趣,下载和浏览次数较高。

(2) 期末评教反馈。自 2023 年春季学期开展教学内容改革实践以来,本门课程在 2023 年春季学期和 2024 年春季学期学生评教中均获得优秀,2025 年评教结果暂未公布。同时,在课程评价中,大部分学生对在理论讲解的同时融入实际的数值模拟案例给出了积极评价。

(3) 学生深造选择。前面很长一段时间,学生对数值模拟相关的工作有一定的畏惧感。如考上研究生后,不太愿意选择数值模拟相关的研究方向。近年来,学院自上而下,从理论教学和编程能力培养等各方面进行了调整和加强,本门课程的教学改革也是其中的一部分。过去三年,基于上课激发的兴趣,学生也愿意在课后进一步与老师讨论数值天气预报的未来发展趋势,以及从事相关研究应该具备的能力。经过深入的了解后,越来越多的学生将数值模拟作为了自己未来深造的研究方向。

6. 结语

数值天气预报是现代气象业务和科研的核心技术,其发展水平直接关系到天气预报的准确性和气象服务的质量。随着高性能计算、人工智能等技术的快速进步,数值预报技术正经历深刻变革,对人才培养提出了更高要求。当前,《数值天气预报》课程的教学仍面临教学内容滞后于学科前沿、理论与实践脱节、实践教学薄弱等问题,亟需通过系统性改革提升教学效果,培养既掌握数值预报理论又精通业务应用的复合型人才。

本文基于“前沿-业务-实践”三维融合的教学理念,提出将科学前沿进展、业务需求与实践应用紧密结合的教学案例体系,旨在增强学生对数值预报技术的整体认知和应用能力。通过引入国际主流模式(如 WRF)和我国自主研发的 CMA 模式,结合数据同化,帮助学生构建完整的知识框架;同时,依托气象部门的业务资源,强化模式运行、产品释用和偏差订正等实践环节,提升学生解决实际问题的能力。此外,课程改革还需注重局校协同,推动“产学研用”深度融合,确保教学内容与行业需求动态衔接。

未来,随着无缝隙智能网格预报和地球系统模式的发展,以及人工智能技术的快速发展,数值天气预报课程需持续迭代教学内容和方法,加强计算科学、大数据分析气象学的交叉融合,为气象现代化建设和全球气候变化研究输送更多高素质人才。教学改革的最终目标,是让学生不仅能理解数值预报的理论精髓,更能灵活运用技术工具服务业务需求,为我国气象事业的高质量发展提供坚实支撑。

基金项目

成都信息工程大学本科教育教学研究与改革项目暨本科教学工程项目(JYJG2024016)。

参考文献

- [1] Bauer, P., Thorpe, A. and Brunet, G. (2015) The Quiet Revolution of Numerical Weather Prediction. *Nature*, 525, 47-

55. <https://doi.org/10.1038/nature14956>
- [2] 教育部高等学校教学指导委员会, 主编. 普通高等学校本科专业类教学质量国家标准(上) [M]. 北京: 高等教育出版社, 2018: 151-156.
- [3] 曹帮军, 巩远发, 吴小飞, 等. 公共卫生事件下“数值天气预报”教学改革探索[J]. 教育教学论坛, 2021(41): 93-96.
- [4] 方雪薇, 李兴, 苏东生. “数值天气预报”教学改革探索——以科研和气象业务紧密联系需求为背景[J]. 教育教学论坛, 2023(12): 65-68.
- [5] 陈科艺, 郑佳锋, 刘琰琰. 基于科研导师制度的实验教学模式创新探讨——以“数值天气预报”和“雷达气象学”本科教学为例[J]. 教育教学论坛, 2022(15): 57-60.
- [6] 顾西辉, 邓琪敏, 陈蕾, 等. 大气科学专业教学与科研实践融合的研讨式教学模式研究[J]. 创新教育研究, 2023, 11(10): 3297-3303.
- [7] Harper, K. (2008) *Weather by the Numbers: The Genesis of Modern Meteorology*. The MIT Press.
<https://doi.org/10.7551/mitpress/9780262083782.001.0001>
- [8] 沈学顺, 王建捷, 李泽椿, 等. 中国数值天气预报的自主创新发展[J]. 气象学报, 2020, 78(3): 451-476.