

附件 5

《环境空气质量数值预报技术规范》
(征求意见稿)》

编制说明

《环境空气质量数值预报技术规范》

标准编制组

二〇一九年四月

项目名称：环境空气质量数值预报技术规范

项目统一编号：2017-17

承担单位：中国环境监测中心站、中国科学院大气物理研究所、南京大学、上海市环境监测中心、广东省环境监测中心、北京市环境保护监测中心

编制组主要成员：李健军、刘冰、丁俊男、朱莉莉、王威、王自发、晏平仲、王体健、李蒙蒙、王茜、沈劲、程念亮

标准所技术管理负责人：顾闫悦

监测司项目负责人：李江

目 录

1	项目背景.....	1
1.1	任务来源.....	1
1.2	工作过程.....	1
2	标准制订的必要性分析.....	2
2.1	环境空气质量数值预报对大气污染防治工作的重要意义.....	2
2.2	环境空气质量数值预报相关标准无法满足环保业务工作需要.....	3
3	国内外数值预报相关技术方法研究.....	3
3.1	国外数值预报相关技术方法研究.....	3
3.2	国内环境空气质量数值预报技术方法研究.....	6
4	标准制修订的原则、方法和技术路线.....	8
4.1	标准制订的基本原则.....	8
4.2	标准制订的方法.....	8
5	标准研究内容.....	8
5.1	适用范围.....	8
5.2	规范性引用文件.....	9
5.3	术语和定义.....	9
5.4	环境空气质量数值预报模式基本要求.....	9
5.5	环境空气质量数值预报模式运算.....	10
5.6	环境空气质量数值预报模式效果评估.....	12
6	与开题报告的差异说明.....	18
7	标准实施建议.....	18
8	参考文献.....	18

环境空气质量数值预报技术规范

编制说明

1 项目背景

1.1 任务来源

为适应国家经济社会发展和环境保护工作需要，指导全国环境空气质量数值预报工作有序开展，根据《国家环境保护标准制修订工作管理办法》（国环规科技〔2017〕1号），《环境空气质量数值预报技术规范》项目列入2017年标准制修订项目中，项目统一编号：2017-17。中国环境监测总站（以下简称总站）承担本标准的制订任务，协作单位为中国科学院大气物理研究所、南京大学、上海市环境监测中心、广东省环境监测中心、北京市环境保护监测中心。

1.2 工作过程

2017年3月，总站根据《环境空气质量数值预报技术规范》（2017-17）的编制任务，组织本规范编制协作单位中国科学院大气物理研究所、南京大学、上海市环境监测中心、广东省环境监测中心和北京市环境保护监测中心，成立“环境空气质量数值预报技术规范”编制组，在北京召开规范开题报告第一次研讨会，制定规范编制技术路线，布置工作任务并明确工作进度要求，提出下一步重点开展数值模式预报、模式污染源清单等内容的国内外调研工作；初步提出规范草案的基本框架，并对规范草案、格式和编写风格进行统一要求；启动规范开题报告及规范草案编制工作。

2017年4~5月，编制组结合规范研究任务和研究成果，完成模式组成和功能、模式污染源清单、模式适用性和关键因素、模式预报效果评估以及数值预报模式技术应用等相关调研和资料收集工作，编制完成开题报告初稿及规范草案初稿。

2017年5月，总站在湖北武汉组织召开规范开题报告编制研讨会，对规范草案进行深入研讨，提出下一步重点开展模式不确定性影响因素、模式评估方法等内容的国内外调研。

2017年6月，编制组针对武汉研讨会上提出的相关意见，进一步对模式相关影响因素、国内外模式评估方法进行调研，并根据标准草案的基本框架，开展相应规范内容的详细编写工作。

2017年7月，总站在青海西宁组织召开了规范开题报告编制第二次研讨会，对开题报告初稿内容进行进一步梳理，提出下一步重点加强国内外环境空气质量数值预报方法、数值模式污染来源解析等内容调研，并对数值预报模式系统组成和功能相关内容进行修改完善。

会后，编制组根据研讨会的意见和建议，进一步规范了标准草案和开题报告的书写格式，并且增加了预报模式影响因素等内容。

2017年8月，总站在北京召开了规范开题报告编制第三次研讨会，提出进一步加强对污染减排成效评估、敏感性试验法、颗粒物来源解析、模式线性规划、ReaAEMS模式发展与应用、模式气象-化学反馈等内容调研，继续修改完善开题报告初稿和标准草案的内容。

2017年9月，编制组根据北京研讨会的讨论意见，增加了初始边界条件模块等内容的编写，并增加了会上建议的相关内容调研。

2017年11月，总站在北京召开规范开题专家预审会，专家对开题报告初稿和标准草案进行了深入讨论，建议将模式污染来源解析、空气质量达标规划等模式扩展应用从标准正文部分移至附录中，作为资料性附录使用。

2017年12月,根据开题预审会的专家意见,编制组对标准草案和开题报告进行了相应的调整,提交原环境保护部环境监测司和标准所。

2018年1月,根据原环境保护部环境标准研究所的反馈,按照标准规范格式进一步修改开题报告和标准草案,并补充完善参考文献。

2018年2月,原环境保护部环境监测司和标准所组织召开标准开题论证会,专家提出结合环境管理需求,进一步明确标准的适用范围,增加国内外环境空气质量数值预报方法标准调研,突出重点,完善环境空气质量预报效果评估内容。

2018年3~4月,编制组根据专家意见,删除了正文中大气污染物排放清单、空气质量集合预报、模式污染源解析、重污染应急预案、污染源减排成效评估、空气质量达标规划等术语和定义,以及所有附录。将附录A环境空气质量数值预报效果评估方法整理至规范正文“环境空气质量数值预报效果评估”中;调整预报模式部分章节结构,将“环境空气质量数值预报模式系统的组成”部分改为“环境空气质量数值预报数据前处理”和“环境空气质量数值预报模式运算和产品”两部分;修改完善了环境空气质量预报效果评估部分的内容,编写完成标准规范和编制说明(征求意见稿)。

2018年5月,总站组织召开了标准规范和编制说明(征求意见稿)专家预审会,专家提出提高区域尺度和城市尺度的“预报时长”要求、明确数值预报效果评估的评估时间间隔、增加预报效果评估的测算城市,对AQI级别预报准确率、单项污染物预报相关系数、重污染预报性能关键评估指标提出准确率要求。

2018年6~7月,按照专家意见修改文本和编制说明,编制组增加评估方法及适用性测算内容。在全国范围内选取20个不同区域代表城市利用本规范的评估方法进行环境空气质量数值模式预报评估测算,并根据测算结果,给出了AQI级别预报准确率达到60%、PM_{2.5}预报相关系数达到0.55、大于等于5天的重污染天开展重污染预报性能评估的要求。

2018年8月,生态环境部生态环境监测司和标准所组织召开标准征求意见稿技术审查会,与会专家提出以下修改意见(1)在编制说明中进一步补充完善评估关键参数的制定依据;(2)按照《环境保护标准出版技术指南》(HJ 565-2010)的相关要求进行标准文本和编制说明的编写。会后,编制组按照专家意见,编制完成标准和编制说明(征求意见稿),简化编制说明中的国内外标准情况调研,按照专家意见重新整理编制说明中的研究内容,删除了PM_{2.5}预报相关系数达到0.55的预报性能评估要求。

2 标准制订的必要性分析

2.1 环境空气质量数值预报对大气污染防治工作具有重要意义

环境空气质量预报是一项复杂的系统工程,是当今环境科学研究的热点与难题。通过各类预报方法与手段相结合,可对痕量气体、气溶胶等多种大气污染物在城市、区域、全球尺度下的不同类型污染过程进行模拟预测研究,研究内容涉及气象、物理、化学等多个学科,包含宏观、微观多种过程,是当前城市及区域污染防控与治理的有效途径。

目前国际上空气质量预报的方法有两种,一种是以统计学方法为基础,利用现有数据,基于统计分析,研究大气环境的变化规律,建立大气污染浓度与气象参数间的统计预报模型,预测大气污染物浓度,称之为统计预报。常用的空气质量统计预报方法包括回归方程法、天气形势分类法、神经网络法、趋势外推法和决策树法等。统计预报方法具有相对简单易行的特点,适用于污染情况较为单一或污染规律性明显的城市。

另一种则是以大气动力学理论为基础,基于对大气物理和化学过程的理解,在给定的气象场、源排放以及初始和边界条件下,通过一套复杂的偏微分方程组描述大气污染物在空气中的各种物理化学过程(输送、扩散、转化、沉降等),并利用计算机高速运算进行数值计

算方法的求解,预报污染物浓度动态分布和变化趋势,提供高时空分辨率的污染物浓度分布。数值模式预报主要涉及高性能计算系统、空气质量模式、气象数值模式、源清单编制与动态更新机制、监测网络数据同化和综合分析工具等,是目前国内外主流的环境空气质量预报技术方法之一。在京津冀、长三角、珠三角等空气质量预报平台建设和业务发展过程中,以及在北京奥运会、上海世博会、广州亚运会、南京青奥会、北京 APEC、北京抗战胜利纪念日阅兵、杭州 G20 峰会、北京“一带一路”等重大活动保障中,利用空气质量数值预报模式在城市尺度和区域尺度方面,积累了重要的业务研发和应用工作经验,为重污染过程预警应急、减排控制、区域大气污染防治协作等提供重要的技术支撑。

2. 2环境空气质量数值预报缺乏相关标准无法满足环保业务工作需要

近 20 年来,随着计算机技术的高速发展,数学方法应用和发展较为迅速,空气质量数值模拟与预报模式发展速度很快,目前空气质量数值预报模式在空间范围以及污染物种类上都显著增加,空间范围由局地发展到局地、城市、区域、国家等多种尺度,并且可以同时预报多种污染物。在引入美国、欧洲等国家和地区数值预报模式技术的同时,我国的高校和科研院所也开展了各具特色的空气质量数值预报模式的研发。

2013 年,《大气污染防治行动计划》提出明确要求,到 2015 年底,全国重点区域、省、自治区、直辖市、省会城市和计划单列市要建立辖区重污染天气监测预警体系。在此背景下,全国各地环境监测部门陆续开展空气质量预报能力建设。出于服务环境管理部门污染防治与管控目的,截止 2015 年底,全国共有 24 个省级、28 个城市级环境监测部门建设了空气质量数值预报模式系统。但是由于目前我国环境监测部门在进行空气质量数值预报模式系统建设中,缺乏基本的行业应用标准和基本的技术规范,所建的数值预报系统良莠不齐,组成和功能差异较大,并且模式本地化程度也有很大差别,导致各地数值预报模式的准确率相差甚远,难以有效引导各地区和城市开展环境空气质量业务预报,及其利用数值预报优势为环境管理和污染管控提供技术支持。因此,非常有必要在全国环境监测系统的空气质量业务预报领域,对环境空气质量数值预报基本组成要求、尺度时效、效果评估等关键技术进行规定,从而为全国环境监测系统利用数值预报技术开展例行空气质量业务预报提供最基本的基础,为各地开展环境空气质量数值预报系统建设提供最基础的要求。

3 国内外数值预报相关技术方法研究

3. 1国外数值预报相关技术方法研究

3. 1. 1空气质量数值预报模式发展

空气质量数值模式,自上世纪 70 年代以来,历经烟流扩散模型、拉格朗日轨迹模型到欧拉网格模型,发展到当今主流的以区域多尺度空气质量模式系统(Community Multi-scale Air Quality Modeling System,简称 CMAQ)为代表的第三代多尺度空气质量模型系统,再到气象与污染耦合在线的天气研究与预报-化学模式(Weather Research and Forecasting-Chemistry model,简称 WRF-Chem),其技术已经日渐成熟并广泛应用于空气质量预报、污染成因分析以及环境政策评估等多个领域。

20 世纪 60 年代至 80 年代初,以箱式模型、局地烟流扩散模型以及拉格朗日轨迹模式为代表的第一代空气质量模式得到发展。这类扩散模型采用较为简单、高度参数化的线性机制描述大气物理化学过程,适于模拟化学活性较低、大气状态稳定的惰性污染物长期平均浓度。第一代模式仅适用于模拟无化学活性污染物的扩散及简易的有一定化学活性的轨迹模拟,不适合在复杂地形和对流条件下使用。

20 世纪 70 年代末至 90 年代初,随着大气化学、边界层物理等基础理论研究的显著进

展, 模式研究得到长足发展, 以欧拉网格模型为主的第二代空气质量模式逐渐形成。欧拉模式使用固定坐标系来描述污染物的输送与扩散, 能够更好描述存在时间变化的污染物浓度分布状况。第二代模式仍侧重于单一的大气污染问题, 主要针对光化学反应的气态污染物或固态污染。然而由于排放到空气中的污染物种复杂多样, 往往呈现出复合型污染的特点, 第二代模式无法满足日益增长的研究需要。

20 世纪 90 年代后, “一个大气”的概念被提出, 将整个大气作为研究对象, 能在各个空间尺度上模拟所有大气物理和化学过程的第三代空气质量模式系统逐步发展起来。代表模式如美国环保局 (Environmental Protection Agency, 简称 EPA) 开发的第三代空气质量模型 (Model-3, 1999), 包括稀疏矩阵源排放处理模式 (Sparse Matrix Operator Kernel Emission, 简称 SMOKE)、中尺度气象模式 5 (Mesoscale Model 5, 简称 MM5) 和 CMAQ 三部分, 可在局地、城市、区域和大陆等多种空间尺度上针对包含各种气态污染物和气溶胶成分在内的 80 多种污染物展开逐时模拟, 并有更加完善的化学机制可供选择。天气研究与预报模型 (Weather Research and Forecasting Model, 简称 WRF) 是新一代中尺度气象模式预报系统, 具有广泛的应用领域, 对湍流交换、大气辐射、积云降水、云微物理及陆面等多种物理过程均有不同的参数化方案, 可以为化学模式在线提供大气流场。

3.1.2 气象模式进展

气象模式主要是为空气质量数值预报模式系统提供温度、气压、湿度、风速、风向、降水、云、辐射等气象要素。目前最广泛应用是 1997 年美国国家大气研究中心 (National Center for Atmospheric Research, 简称 NCAR) 中小尺度气象处 (Mesoscale Microscale Meteorology Lab, 简称 MMM)、国家环境预报中心 (National Centers for Environmental Prediction, 简称 NCEP) 的环境模拟中心 (Environmental Modeling Center, 简称 EMC)、预报系统试验室 (Forecast System Laboratory, 简称 FSL) 的预报研究处和俄克拉荷马大学的风暴分析预报中心 (Center for Analysis and Prediction of Storms, 简称 CAPS) 四个部门联合研究建立的中尺度天气研究预报模式 WRF, 其采用高度模块化、并行化和分层设计技术, 主要解决分辨率为 1~10 公里、时效为 60 小时以内的有限区域天气预报和模拟问题。

3.1.3 模式污染源清单处理模型发展

由于不同空气质量模式对源排放输入数据的要求不同, 研究人员开发出了源排放前处理模型来处理源输入数据以满足模式的要求。目前常见的源排放清单处理模型有美国北卡罗来纳微电子中心 (Microelectronic Center of North Carolina, 简称 MCNC) 开发的 SMOKE 模型、加拿大排放处理系统 (Canadian Emission Processing System, 简称 CEPS)、综合区域排放处理工具 (Consolidated Community Emission Processing Tool, 简称 CONCEPT) 以及美国 EPA 开发的排放预处理系统 (Emissions Preprocessor System, 简称 EPS)、高山地球物理公司 (Alpine Geophysics) 开发的排放模拟系统 (Emission Modeling System, 简称 EMS) 等。

其中 SMOKE 模式是应用最为广泛的排放源处理模式, 现为美国 EPA 源排放处理的官方模型, 该模型中采用稀疏矩阵方法进行运算, 直接为模式系统提供网格化的排放源。SMOKE 模型可以为多种空气质量模型提供输入, 考虑了面源、点源及移动源 3 部分, 针对不同类型排放源的空间分布属性、时间变化规律, 设置不同时空分配曲线, 更合理地反映不同类型排放的时空特征。此外, 还可根据用户选择的化学机制对排放数据进行化学分裂。

3.1.4 大气化学资料同化技术发展

资料同化技术在气象预报中应用已超过三十年, 但由于缺乏大范围的实时空气质量监测数据, 在空气质量预报方面的应用刚刚起步。随着多种大气化学成分监测平台的建立, 大气

化学资料同化技术得到快速发展。大气化学资料同化开始起初主要应用于气体成分并实现同时同化多种气体。例如, Inness 等(2015)将臭氧、一氧化碳和二氧化氮监测数据同化到欧洲中心中尺度预报模式中,发现在生物质燃烧季节,同化对南非一氧化碳浓度模拟改进显著;同化对平流层和对流层顶层的臭氧模拟改进显著,但对对流层底层的影响较小。

此后,随着最优插值、三维变分、四维变分和卡尔曼滤波等同化技术的发展,气溶胶数据(包括从多种卫星平台获得的气溶胶光学厚度)也被同化到空气质量模式中。Tombette 等(2009)采用最优插值技术实现欧洲地面 PM₁₀ 观测数据同化。Pagowski 等(2010)采用三维变分技术同化美国大陆地区的 PM_{2.5} 浓度。Bocquet 等(2015)综述了资料同化技术在大气环境领域的发展和应用。

3.1.5 国外模式评估研究进展

目前,国外已有一些空气质量模式效果评估的相关技术规范(Cox 等, 1992; US EPA, 2007; Derwent, 2010),以及一些研究综述针对定量评估模式预测和观测间的模拟误差进行了总结归纳(Chang and Hanna, 2004; Yu 等, 2007)。

美国 EPA (US/EPA--454/R-92/025, 1992)提供了模型科学性、统计性和业务性的评价建议。其中,在统计性评价上,认为首要关注模式对污染物浓度最大值的模拟能力,其次关心时间、位置和气象条件的模拟准确性以及在不同(气象)条件下最大浓度模拟能力。

Oresks 等人(1994)认为实际的模式检验仅是局部的和某些条件下的。在模式评估时应当按照某些条件分别评价,在站点评估上也应划分为城市点位、工业点位和郊区点位等。

Seigneur 等(2000)针对颗粒物和能见度的预报效果提出四个方面评估:(1)预报评估(Operational evaluation),利用统计方法评估模式对颗粒物和能见度的预报能力;(2)诊断评估(diagnostic evaluation),评估模式对于颗粒物二次组分、粒径分布、时-空变率、通量等模拟评估;(3)解析评估(mechanistic evaluation),评估模式在不同气象、排放、地形区域等相对条件下的模拟响应和模拟敏感性;(4)概率评估(Probabilistic evaluation),评估模式预测和观测之间的不确定度。

《空气质量模式效果评估(2010)》旨在评估模式结果与观测结果的不一致性以及可能的原因,建议分三方面开展:(1)科学评估,评估模式本身是否满足业务需求;(2)业务评估,利用标准化平均偏差和相关系数等统计参数评估模式预报与观测的一致性;(3)诊断评估,评估空气质量模式中大气污染物浓度对排放变化对的响应能力。

3.1.6 国外数值预报标准规范发展

世界气象组织制定《生物气象和空气质量预报规范》(WMO/TD No.1184),定义了空气质量预报模型的分类、组成和数据。

1996年,美国 EPA 制定了《空气质量模型规范》(40 CFR Ch.1 (7-1-99 Edition)),规定了推荐模型、模型适用条件、模型输入数据以及模型不确定性等。美国 EPA 通过每年召开工作组会议、和美国气象学会科研团队签订合作协议、吸纳技术和用户团队的新模型评论和其他研究团队的科研成果,保证空气质量预报标准规范的发展。

欧盟在欧洲空气公共信息 II 项目(Common Information on European Air II,简称 CITEAIR II)(2008-2011年)支持下制定了《城市空气质量预报实践规范》,该项目目的是交换在区域空气质量保护和政策发展方面的良好经验,介绍了参与 CITEAIR II 项目的空气质量预报模式及其业务化运行方式,提出了三个不同复杂层次的预报系统,其主要成果是提出“CITEAIR”方法,可促进本地空气质量预报系统在其他地区的业务化运行。

加拿大萨斯喀彻温省环保部于 2012 年制定《萨斯喀彻温省空气质量模拟规范》,对短距离污染物扩散模拟进行规范,并规定了扩散模型的应用范围、排放资料、输入数据等。

3. 2国内环境空气质量数值预报技术方法研究

3. 2. 1 空气质量数值预报模式发展

国内主要空气质量模式的发展同国际发展类似,也经历了三个阶段,第一代模式主要是高斯烟流模式。第二代模式有城市尺度的空气质量预报模式和区域尺度污染物欧拉输送模式,如中国科学院大气物理研究所的区域空气质量模式(Regional Air Quality Model,简称RAQM模式)和南京大学的区域酸沉降模式(Regional Acid Deposition Model System,简称RegADMS)。第三代模式建构了从全球尺度、区域尺度及套网格的大气环境模式系列,代表模式有中国科学院大气物理研究所的嵌套网格空气质量预报模式系统(Nested Air Quality Prediction Modeling System,简称NAQPMS)、南京大学的区域大气环境模式系统(Regional Atmospheric Environment Modeling System,简称RegAEMS)、中国气象科学研究院的化学天气数值预报系统(CMA Unified Atmospheric Chemistry Environment,简称CUACE)等。

2014年至今,NAQPMS模式研发了二次污染前体物来源解析技术、气象-污染双向反馈技术、气溶胶微观动力学模拟技术、二次有机气溶胶模拟技术、应急管控快速评估技术等,极大提高了预报性能。RegAEMS模式在2008年以后加入了无机气溶胶、沙尘气溶胶、海盐气溶胶、二次有机气溶胶、汞化学等模块,并增加了支持MM5、WRF等气象模式输出数据的接口,支持多层嵌套网格。中国雾-霾数值预报系统(CUACE/Haze-fog)2.0版在原来版本基础上,完善升级了液相化学反应、气溶胶和雾的辐射反馈效应、微量气体和气溶胶排放源的边界层内扩散等物理化学方案,并更新了排放源清单和排放源处理方式。

3. 2. 2 模式排放源清单处理研究进展

Wang等(2011)在SMOKE模型的基础上,利用新编辑的源分类代码、时空分配参数、化学廓线等,建立了珠三角排放源前处理模型SMOKE-PRD,成功应用到珠三角区域空气质量预报中。吴其重等(2012)将SMOKE模式与东亚区域排放清单和北京本地大气污染排放数据相整合,可处理获得高分辨率的网格化排放数据并与嵌套网格空气质量模式(NAQPMS)相耦合。吕岩(2015)参考SMOKE模型,开发了大气污染物排放源处理系统(Emission Inventory Processing System,简称EMIPS),能够处理用于排放源编制的基础数据(活动水平、排放因子等)以及已经格点化的排放源数据,并成功运用于生成各类空气质量模式可用的排放源清单数据。清华大学开发的中国多尺度排放清单模型(Multi-resolution Emission Inventory for China,简称MEIC),可以为各类大气化学模式和气候模式提供高精度(0.25°、0.5°和1°)的源排放数据。

3. 2. 3 气象模式进展

国内气象模式专家在国外研究成果的基础上,结合我国实际,对气象模式的各个物理过程进行了评估和改进。曾新民等(2012)研究提出改进陆面方案可提高WRF模式对暴雨的模拟能力。娄姗姗等(2015)研究提出微物理方案的选取对降水的雨强、位置、雨区范围的模拟影响较大,积云参数化方案对降水的范围、雨带的位置影响较大。

3. 2. 4 大气化学资料同化进展

中科院大气所基于NAQPMS模式,发展耦合了最优插值、集合卡尔曼滤波、三维变分等多种同化技术,可以实现PM₁₀、PM_{2.5}、SO₂、NO₂、O₃、CO等六项污染物的同化。Liu等(2011)利用三维变分方法将MODIS反演的AOD数据同化到模式中,并研究其对沙尘模拟的影响。Lin等(2008)利用集合卡尔曼滤波技术同化中国北方的地面PM₁₀观测数据以提高NAQPMS模式的沙尘模拟能力。Tang等(2011)基于集合卡尔曼滤波算法开展了京

京津冀臭氧资料同化试验，并建立了臭氧资料集合同化系统。黄思等（2016）利用最优插值同化方法，研究发现同化数据不仅对 PM_{2.5} 空间分布特征描述更细致，且其数据精度在独立验证站点上也明显高于模拟数据。

3.2.5 模式数值预报结果订正

目前预报结果订正研究多数是针对气象预报结果（常俊等，2015），但是也有一些研究已开始探讨空气质量预报结果的订正。何金梅等（2017）利用误差滚动线性回归订正方法对中国气象局的 CUACE 模式预报的 6 种污染物（PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂、O₃ 和 CO）的 24 小时结果进行订正，研究发现，订正后模式对 O₃ 的预报准确率可提高 1.1%~5.5%，对其他污染物的预报准确率可提高 8.7%~75%。王开燕（2017）利用主观评分法（Mean Opinion Score，简称 MOS）方法对模式预报结果进行订正，订正后粗颗粒物 PM₁₀ 等级预报准确率从 64.7% 提高到 77.6%，细颗粒物 PM_{2.5} 从 59.9% 提高到 74.5%。

3.2.6 模式评估研究进展

北京、上海、广州等多地建立了区域空气质量数值预报系统，并尝试开展空气质量数值系统评估研究。邓涛等（2013）利用 TS 评分和预报效率 EH 等对珠三角灰霾数值预报系统进行了业务运行评估。李杰等（2014）和杨文夷等（2014）分别评估了 NAQPMS 模式对东亚地区 PM₁₀ 和 O₃ 的时空变化模拟能力。潘锦秀等（2016）建立了一种适用于区域重污染天气过程预报的评估新方法，分析了 NAQPMS 模式系统对 2013-2014 年京津冀区域静稳型、沙尘型和特殊型 3 类重污染天气过程的预报能力。朱莉莉等（2015）则检验了 NAQPMS 模式对江苏省 2013 年夏季 PM_{2.5} 浓度未来 24 小时和未来 7 天潜势预报效果。陈焕盛等（2013）、谢敏等（2012）和 Wu 等（2012）评估并检验了珠三角地区空气质量多模式（包括 NAQPMS、CMAQ、CAMx）的预报效果。上海市环境监测中心对业务化空气质量数值预报系统开展站点预报评估、城市预报评估和污染等级预报评估。其中，城市预报评估主要对比各城市日均浓度预报效果。污染等级评估取数值模式分时段预报结果与实测相比，主要评价各物种和 AQI 级别预报准确率、偏高和偏低比率。

3.2.7 国内相关标准研究

总站总结各地空气质量预报业务中的实践经验，在 2014 年编制了《环境空气质量预报预警方法技术指南》（第一版），并于 2017 年重新编制并发布了《环境空气质量预报预警方法技术指南》（第二版）。指南明确了数值模式预报是开展环境空气质量预报的一种重要技术手段，并对数值预报的输入数据要求、数值预报模式和输出数据及其分析方法进行详细的解释说明。

相比环境保护部门，气象部门更早开展数值天气预报业务，中国气象局制定《关于规范全国数值天气预报业务布局的意见》，规范了全国数值天气预报业务布局与分工。

国家气象中心针对不同的预报时效分别编制了《短期天气预报》（GB/T 21984-2017）和《中期天气预报》（GB/T 27956-2011）标准。短期天气预报是指某一区域或地点未来 72 h 内天气变化的预先估计和预报。中期天气预报是指某一区域未来 72 h 以上，240 h 内天气变化的预先估计和预告。

数值天气预报产品是气象部门预报未来天气状况的重要参考，其质量控制对于确保预报准确性尤为关键。2017 年 9 月 7 日，国家气象中心发布了《数值天气预报产品检验规范》（GB/T 34303-2017），建立了数值天气预报产品检验规范，定义了数值天气预报产品的检验内容、检验公式和检验方法，定义了平均误差、平均绝对误差、均方根误差等多项检验标准；对于预报准确性给出了漏报率、空报率、预报准确率等多项评价标准。

4 标准制修订的原则、方法和技术路线

4.1 标准制订的基本原则

我国环境保护标准制修订管理办法规定了标准制修订工作遵循的基本原则：以科学发展观为指导，以实现经济、社会的可持续发展为目标，以国家环境保护相关法律、法规、规章、政策和规划为根据，通过制定和实施标准，促进环境效益、经济效益和社会效益的统一；有利于保护生活环境、生态环境和人体健康；有利于形成完整、协调的环境保护标准体系；有利于相关法律、法规和规范性文件的实施；与经济、技术发展水平和相关方的承受能力相适应，具有科学性和可实施性，促进环境质量改善；以科学研究成果和实践经验为依据，内容科学、合理、可行；根据本国实际情况，可参照采用国外相关标准、技术法规；制定过程和技术内容应公开、公平、公正。

本标准在制订过程中，主要依据以下三个基本原则：

(1) 明确本标准的适用范围，以满足我国城市环境空气质量预报业务工作基本需求为出发点；

(2) 本标准规定的内容针对业务化应用的环境空气质量数值预报模式提出；

(3) 本标准规定的模式基本要求和评估方法等具有可比性和普遍适用性，易于推广使用。

4.2 标准制订的方法

在标准制订的过程中，首先，充分调研国外发达国家、地区以及我国自主研发的空气质量数值预报先进技术，包括在空气质量数值预报模式、模式源清单、空气质量数值预报模式评估与应用等方面的相关文献和资料，作为本规范的基本技术基础。

其次，总结目前全国范围内开展的不同层级（国家、区域、省级、城市）的空气质量预报平台和全国业务预报体系建设的丰富经验，综合考虑业务预报今后发展的应用需求，以及环境管理部门对空气质量业务预报的管理和技术支持要求。

再次，开展本规范相关内容的研究和编制，包括定义环境空气质量数值预报模式基本组成和要求，规范模式应用的基本形式，提出数值预报效果评估的方法等。

最后，编制完成符合中国国情、具有科学性、先进性和可操作性的环境空气质量数值预报技术规范，达到服务我国环境空气质量业务预报，为环境管理及环境空气质量改善提供基础技术支持的目标。

5 标准研究内容

5.1 适用范围

本标准适用于我国城市级环境空气质量预报业务部门，省级及以上环境空气质量预报业务部门可参照执行。标准仅针对日常业务工作中应用的环境空气质量数值预报模式做出规定，不涉及对其他预报方法及预报人员等方面的内容规定，也不涉及科学研究目的数值预报模式。

本标准对环境空气质量数值预报模式的基本要求、运算处理和成效评估方法等内容进行规定，目的是规范生态环境部门对数值预报模式的建设和使用，保证业务化应用的环境空气质量数值预报模式的科学性和可靠性，为环境空气质量预报和管理以及大气污染管控提供有效的技术支持。

5.2 规范性引用文件

本次规范制订主要引用《环境空气质量标准》（GB 3095-2012）作为总体要求，其次引用《环境空气质量指数（AQI）技术规定》（HJ 633）和《环境空气质量数值预报模式源清单技术指南（试行）》（总站预报字（2015）30号）等标准文件对特定方面进行技术规范。

5.3 术语和定义

本规范定义了4个关键术语，即环境空气质量数值预报模式、环境空气质量数值预报、模式污染源清单和大气化学资料同化。

环境空气质量数值预报模式是基于控制污染现象的基本物理和化学原理，用数学方程组描述大气污染现象，借助于大型计算机通过数值方法求解基本方程组，从而预测各种不同条件下的空气质量状况的系统。本定义主要参考了《大气环境化学》（第二版）第七章第一节关于空气质量预报模式的定义。

环境空气质量数值预报是利用环境空气质量数值模式，对大气中的主要污染物浓度及时空变化进行形势预报，预测城市和区域环境空气质量状况和潜在污染过程，为群众的生产和生活提供指导和服务，为管理部门采取应对措施提供科学依据。本定义主要参考了《环境空气质量预报预警方法技术指南》（第一版）第九章第一节“预报术语标准”中“数值预报”的定义。

模式污染源清单是基于大气污染物源排放清单和源清单处理模式，结合人口和交通路网等地理信息数据，以及不同类型排放源的时间分配曲线，根据环境空气质量数值预报模式直接输入的时空分辨率、化学机制要求，处理获得的网格化源排放数据。本定义主要参考了《环境空气质量数值预报模式源清单技术指南（试行）》（总站预报字（2015）30号）第三章“源清单模型方法”中“污染排放源清单”的定义。

大气化学资料同化是基于最优估计理论，利用模式状态变量的时空演变规律和物理化学属性的持续约束，将多源大气化学成分观测信息不断融入到环境空气质量模式系统中，以更加精确地估计或预测未知变量，减小不确定性的方法。本定义主要参考了《环境空气质量预报预警方法技术指南》（第一版）第九章第一节“预报术语标准”中“资料同化”的定义。

5.4 环境空气质量数值预报模式基本要求

建立数值预报模式应考虑空间尺度范围、空间分辨率、预报时长和预报输出时间间隔等基本要求。

5.4.1 空间尺度范围

空气质量预报模式应客观反映一定空间范围内的环境空气质量状况和变化规律，根据模式计算区域的覆盖范围分为全球尺度、大陆尺度、区域尺度和城市尺度。本规范中关于尺度范围的定义参考了唐孝炎等（2006）编著的《大气环境化学》（第二版）第七章第一节中关于模式描述的空间尺度的相关定义。

5.4.2 空间分辨率

根据目前全国环境空气质量预报模式系统建设的经验，城市尺度的预报模式水平分辨率通常为1公里~5公里，因此规定城市级预报模式水平分辨率不低于5公里×5公里；城市群区域尺度预报水平分辨率通常为10公里~30公里，例如我国中东部区域为15公里×15公里，因此规定区域尺度预报模式水平分辨率不低于15公里×15公里；根据计算和时效需求，通常情况下大陆尺度预报模式水平分辨率不低于50公里×50公里，全球尺度预报模式的水平分辨率不低于经度1°×纬度1°。

预报模式垂直层可根据不同需求非等距分层，开展空气质量预报最为关注的是和人类活动密切相关的边界层内，因此规定边界层内设置分层不少于5层；而为了反映垂直气象和污

染物变化情况，垂直方向分层设置不少于 10 层。为了计算和展示的便利，通常情况下，模式污染物源清单空间分辨率同预报模式水平分辨率设置是一致的。

5.4.3 预报时长

根据目前生态环境部和各级环保部门区域、省级和城市开展空气质量预报的要求，为了满足环境管理部门实施大气污染管控和防治等应急措施，要求直辖市、省会城市和计划单列市开展未来 3 天城市 AQI 预报，目前全国重点城市（包括直辖市、省会城市和计划单列市）已经开展未来 72 小时城市 AQI 预报，重点区域中的长三角、珠三角区域已开展未来 5 天预报，京津冀及周边区域开展未来 10 天预报。因此规范中要求全球和大陆尺度模式预报时长不少于 7 天，以满足为国家/省级等提供未来 7 天时效的预报指导产品；区域尺度模式预报时长不少于 5 天，以满足为城市群及其周边地区提供未来 5 天时效的预报指导产品；城市尺度模式预报时长不少于 3 天，为环境管理部门和公众出行提供重要参考。

5.4.4 预报输出时间间隔

根据《环境空气质量标准》（GB 3095-2012）规定，及与环境空气质量监测和发布相匹配，规定空气质量数值预报模拟输出的时间间隔为 1 小时以内，保证能够获得逐小时环境空气质量预报数据。

5.5 环境空气质量数值预报模式运算

5.5.1 模式污染源清单处理

本标准对模式污染源清单处理要求的具体输入参数进行了定义。区域大气污染源排放清单是进行模式污染源清单处理的基础输入数据；时间和空间分配系数是对污染源清单进行时间和空间分配的必要输入；化学物种谱是对污染源清单按照规定化学机制进行物种分配的必要输入。

本标准对模式污染源清单处理的基本属性进行了定义。基准年规定了大气污染源排放清单的基准年份，是保障实时空气质量预报准确性的重要因素；覆盖范围规定了模式污染源排放清单的空间范围，是限制空气质量预报模拟区域的关键因素；排放物质种类规定了模式污染源清单中排放污染物种类；排放来源分类规定了模式污染源清单中排放源的类别；时间和空间分辨率分别规定了模式污染源排放清单的时间和空间分辨率，通常模式要求污染源排放清单时间分辨率为 1 小时，空间分辨率根据空气质量预报区域范围定义，高时空分辨率污染源排放清单是保障空气质量预报准确性的重要因素。

本标准还规定了模式污染源清单中的排放来源类别和排放污染物种类，选取大气污染物排放的最主要贡献源和污染物排放量高、化学活性大，对空气质量有重要影响的污染物种类。

5.5.2 模式气象预报场前处理

由于气象预报模式原始输出结果的单位、网格设置和数据格式均不一定能完全满足空气质量预报模式输入气象预报场的要求，因此需要对气象预报模式的原始输出进行前处理，以驱动空气质量预报模式正常运行。

本标准规定了空气质量预报模式的输入气象预报场应包括的基本属性，其中起始时刻、时段范围和时间分辨率界定了时间属性，以便与空气质量数值预报模式的时间设置对接；区域网格坐标参数规定了与模式网格相关的属性，以便与空气质量数值预报模式的网格设置对接；边界层方案、辐射方案、陆面过程方案和云物理方案规定了所用的关键物理参数化方案，以便与空气质量数值预报模式的相关物理化学参数化方案对接。

本标准规定的气象要素种类均为保障空气质量数值预报模式各类化学机制正常运行的必要输入。其中风速、风向等对于大气化学输送及扩散模拟有重要意义，降水不仅影响液相及多相化学反应机制，同时影响污染物湿沉降过程。

5.5.3 初始边界条件设置

通过调研目前常用的空气质量数值预报模式（NAQPMS、CMAQ、CAMx、WRF-Chem等）后，对通用的预报初值获取方法进行了规定，包括：（1）采用模式缺省值，一般在模式首次预报时采用该方法获取初值。（2）从已获得的模式输出或分析资料中提取处理，一般在首次预报完成后，后续预报均采用该方式获取预报初值以减小预报初值误差的影响，提升预报效果。（3）大气化学资料同化。

其中，大气化学资料同化是一种将观测数据和模式系统紧密联系起来的数据分析技术，利用模式状态变量的时空演变动力学和物理化学属性的持续约束将观测信息不断融入到模式系统中，获得精度更高的污染物浓度场，为空气质量数值预报提供精度更高的初始条件，从而更加精确估计或预测未知变量，减小不确定性。目前常用的同化方法包括最优插值、三维变分、四维变分、集合卡尔曼滤波等。最优插值是一种最小均方误差的估计方法，根据分析误差方差最小原则求解最优观测权重。最优插值方案由于简单易行、计算代价小的特点使其在现代资料同化领域仍然得到非常广泛的应用。变分方法把一个物理学问题或其它学科问题转化为求泛函极值的问题，减少原有某些问题的约束条件，最终解又能收敛或近似收敛到原约束问题的解。三维变分不需要挑选观测，所有观测资料被同时使用，分析解可考虑较为复杂和弱非线性的观测算子，通过在代价函数中加入强迫项来实现观测引入时的物理或经验约束。四维变分将三维变分在某一时刻的空间全局最优，扩展到某一时间段内的空间和时间的全局最优，其是一种平滑算法，通过最小化代价函数来求解反演问题，便于引入新的估计变量，利用模式物理化学特征来融合一段时间内的所有观测资料。集合卡尔曼滤波是一种高斯分布下的递归贝叶斯滤波方法，不需要存储所有以前的数据，每次有新的观测可用时，都可以进行一次估计，是一种顺序资料同化方法，能应用于复杂的非线性系统，方便考虑不同来源的模式误差。

本标准对预报模式边界值获取方法进行规定，包括：（1）采用模式缺省值，一般在无法获取比模式计算区域范围更大的数据时采用该方法获取边界值；（2）从全球模式的预报结果中提取，该方法利用全球预报的结果为区域模式提供边界值，可以考虑模式计算区域以外的污染物输送对模式计算区域的影响。

5.5.4 大气化学传输运算

本标准规定了大气化学传输运算需要包含的主要物理化学过程。对目前主流空气质量数值预报模式（NAQPMS、CMAQ、CAMx、WRF-Chem等）的调研结果表明，物理化学过程对模式预报结果的准确性至关重要。

（1）平流过程是指大气中风携带污染物进行输送的过程，包含水平和垂直平流过程。一般来说，垂直风速只有每秒几毫米或几厘米，对污染物垂直输送贡献很小。而水平风矢量在行星边界层中可达2~10 m/s，是污染物水平输送的主控因子，污染物的输送量和输送距离与水平风矢量大小直接相关，水平风越大，污染物输送越远，混入的空气越多，对污染物的稀释作用越大。

（2）扩散过程是指大气中的污染物在湍流混合作用下逐渐分散稀释的过程，包含水平和垂直扩散过程。通常水平扩散项的量级远小于水平平流项，对污染物水平输送贡献很小。而垂直扩散项则非常重要，其输送能力远大于垂直平流，是污染物垂直输送的主要机制。扩散过程主要受风向、风速、气流温度分布、大气稳定度等气象条件和地形条件的影响。

（3）干沉降是指在降水的条件下，由于重力、湍流运动、热运动和静电力的作用，污染物尤其是颗粒物在大气输送过程中被地面滞留，形成连续不断由大气向地面的质量迁移过程。干沉降是污染物的重要汇过程，且在任何时候都能发生。

(4) 湿沉降是指悬浮于大气中的各种污染物由于云滴、雨滴吸收及降水冲刷而沉降的过程。湿沉降可分为云内和云下两个过程。在云内，云滴、雨滴可吸收、溶解污染物，而污染物一旦进入云滴、雨滴当中，会发生电离并与其他污染物离子发生化学反应，即液相化学作用。发生降水时，被溶解、吸收的污染物会随雨滴降落到地面而被清除，即云内湿清除过程。另外，降水也可通过吸收、冲刷等作用清除云下的污染物，即云下湿清除过程。若无降水发生，则溶解于云滴、雨滴中的污染物会通过挥发、蒸发再次回到大气中。湿沉降是污染物的重要汇过程。在空气质量模式中，湿沉降过程可分为气体沉降过程和气溶胶沉降过程。通常不同模式采用的湿沉降计算公式不同，湿沉降参数化方案最常用的形式是：湿清除速率与被清除物质的浓度成比例。

(5) 气相化学是指大气中气态物质之间发生的均相反应。人为排放的各种气体污染物，如气态二氧化硫、氮氧化物、氯化氢、氟化氢、氨等，进入大气环境后，在一定条件下（如在相对湿度或温度较高，或在阳光照射下）会彼此之间或与大气中的其他痕量气体（如一氧化碳、臭氧、氢氧自由基、过氧化氢自由基等）发生化学反应，即气相反应。

(6) 气溶胶化学是指大气中气溶胶成分生成、转化的化学过程，包括无机气溶胶过程和有机气溶胶过程。

(7) 液相化学是指在大气中发生在云滴、雨滴等液态环境中的化学反应过程。发生液相反应的过程主要有降水反应、酸反应和氧化性降低反应等。

(8) 多相反应是指发生在大气固体颗粒物表面、含表面水层的固体颗粒物表面和云粒子表面的化学转化和光化学过程。例如 N_2O_5 在硫酸盐、硝酸盐、铵盐、有机碳和海盐湿表面的反应； O_3 在气溶胶表面的反应等。

在不同的地形特征、气象条件、污染排放特征和浓度变化规律下，若要保障模式的预报效果，需要设置不同的参数方案。因此对于特定的模拟区域，需要采用不同的物理化学参数方案组合，在对各季节典型时段空气质量进行模拟分析的基础上，最终确定最优物理化学过程关键参数方案组合。

5.5.5 预报产品输出

由于各个模式输出数据的变量种类、数据格式均存在差异，因此需要结合实际业务需求，经过数据提取、诊断和计算等过程，基于模式原始数据制作相关预报产品。另外，规定将不同模式的原始输出结果转换成格式统一的标准化数据是为了实现对不同模式预报产品的横向对比分析和业务化应用集成。

本标准规定了空气质量预报产品的种类。其中基本产品的定义参考了《环境空气质量标准》(GB 3095-2012) 中对环境空气污染物基本项目的规定和《环境空气质量指数(AQI)技术规定(试行)》(HJ 633-2012) 中对空气质量指数的规定。可选产品参考了目前环境监测业务单位的实际业务需求，是对空气质量预报基本产品的补充。

此外，本标准还规定了气象条件预报产品的种类。气象条件预报基本产品的规定参考了本标准 5.2.1 为空气质量数值预报模式系统提供的气象要素场的定义。此外，还加入了垂直风场，主要是因为垂直风场会显著影响污染物的垂直扩散和输送，对地面污染物浓度造成较大影响。其他产品参考了目前环境监测业务单位的实际业务需求，是对气象条件预报基本产品的补充。

5.6 环境空气质量数值预报模式效果评估

数值模式模拟结果的可靠性是其应用的前提条件，系统客观评价不同预报方法的预报效果，是进一步规范环境空气质量预报的服务工作，不断提高预报质量和预报水平的重要依据。但目前国内并未形成规范的评价体系，各区域、省级、和城市级预报缺少统一、规范的预报

评价方法。

本标准规定的评估方法适用于环境空气质量数值模式的业务预报性能检验,通过将预报结果与实况进行对比,评估各类预报参数和产品的准确率,分析误差来源,指导在环境监测领域的城市开展空气质量数值预报工作。

5.6.1 评估内容

(1) 评估对象

评估对象选取《环境空气质量标准》(GB 3095-2012)确定的常规污染物,二氧化硫(SO₂)、二氧化氮(NO₂)、一氧化碳(CO)、颗粒物(粒径小于等于10微米,PM₁₀)、颗粒物(粒径小于等于2.5微米,PM_{2.5})、臭氧(O₃)的日最大1小时平均和日最大8小时滑动平均,以及《环境空气质量指数(AQI)技术规定(试行)》(HJ 633-2012)中规定的空气质量指数(AQI)、AQI级别和首要污染物等。

(2) 评估类别

按照实际业务预报内容分为空气质量指数预报评估、单项污染物浓度预报统计评估、重污染预报评估。所选评估方法能够反映模式预报和观测间的预报差异,同时能够指示模拟误差可能的原因,用于指导模式后期改进。按照US EPA(2007),Chang和Hanna(2004)的指导建议,针对不同的评估内容,选取适合的评估方法。

空气质量指数预报评估通过统计AQI预报范围、空气质量指数预报级别、首要污染物预报准确率评估,综合评价数值模式对城市空气质量指数的预报效果。

单项污染物浓度预报统计评估主要适用于数值预报对城市各污染物浓度的偏差、误差和相关性等方面的预报效果评估。城市单项污染物浓度预报结果计算方法参考《环境空气质量标准》(GB 3095-2012)中城市平均浓度计算方法相关规定。

重污染预报评估主要用于评估数值预报对重污染过程的预报效果。

(3) 评估时效

根据目前空气质量数值预报模式的预报时效能力水平,分别对环境空气质量数值预报模式提前24小时、48小时、72小时预报结果进行评估。

(4) 评估周期

预报评估以每日例行的空气质量预报为基础,考虑数据有效性要求,本标准仅规定开展季度和年度空气质量预报评估,进行月度评估时可参照执行。

(5) 评估实况

本标准中与模式模拟结果进行对比的实况数据使用的是全国环境空气质量日报发布的城市环境空气质量日报AQI和各项污染物浓度数据。

(6) 预报结果处理与计算

本标准中的预报结果处理方式和计算方法均参照GB 3095和HJ 633中的相关要求。

5.6.2 评估方法及适用性测算

(1) AQI范围预报准确率评估

由于空气质量数值预报模式计算过程中,污染源排放清单、气象预报和边界条件等存在一定程度的不确定性,AQI预报结果通常为范围预报。评估时段内AQI实况在AQI预报范围内,则记为准确。

本标准采用偏差百分比的方法对AQI预报范围区间进行定义,与采用规定数值的AQI预报范围区间定义方法相比,本方法体现了AQI预报范围随AQI数值等比例变化的原则,一定程度上解决了不同地区和不同污染状况下,评估方法无法统一的问题,并能有效规避AQI数值在区间临界点时可能出现的两侧区间预报评估结果矛盾的问题。

按照本标准方法,对我国17个已开展数值预报的省会城市和计划单列市2017年模式

24 小时预报结果进行 AQI 预报范围准确率测算，结果如下表所示。

表 5-1 空气质量指数 (AQI) 范围预报准确率评估 (单位: %)

城市	AQI 预报范围为 ±15%区间	AQI 预报范围为 ±20%区间	AQI 预报范围为 ±25%区间	AQI 预报范围为 ±30%区间
1	41%	49%	52%	56%
2	16%	21%	28%	35%
3	29%	38%	44%	47%
4	38%	50%	58%	66%
5	27%	36%	43%	50%
6	16%	22%	31%	39%
7	31%	40%	47%	55%
8	45%	55%	65%	74%
9	26%	33%	39%	44%
10	24%	35%	44%	51%
11	19%	23%	26%	33%
12	26%	35%	44%	51%
13	32%	43%	50%	56%
14	25%	33%	38%	42%
15	23%	34%	45%	56%
16	28%	38%	48%	55%
17	24%	33%	41%	49%

当 AQI 预报范围为±15%区间时，准确率平均值约为 28%，中位数为 26%，准确率大于 28%的情况占到总概率的四分之三。

当 AQI 预报范围为±20%区间时，准确率平均值约为 36%，中位数为 35%，准确率大于 35%的情况占到总概率的四分之三。

当 AQI 预报范围为±25%区间时，准确率平均值约为 44%，中位数约为 44%，准确率大于 40%的情况占到总概率的四分之三。

当 AQI 预报范围为±30%区间时，准确率平均值约为 51%，中位数为 51%，准确率大于 44%的情况占到总概率的四分之三。

基于以上分析，取±25%作为 AQI 预报范围要求是合理的。

(2) AQI 级别预报准确率评估

将 AQI 预报范围对应得到 AQI 预报级别或级别范围，若 AQI 实况级别在 AQI 预报级别范围内，则认为 AQI 级别预报准确。

按照本标准方法，对上述 17 个城市 2017 年 24 小时、48 小时和 72 小时预报结果进行 AQI 预报级别准确率测算，结果如图 5-1 所示。

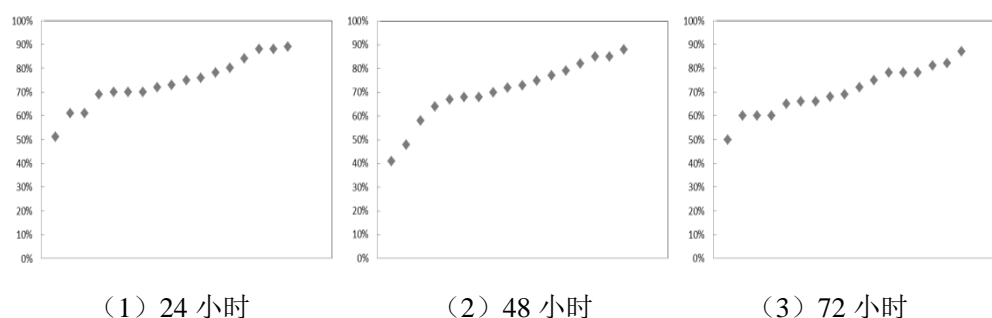


图 5-1 空气质量指数 (AQI) 级别预报准确率分布图

根据测算结果，不同预报时效 AQI 级别预报准确率相差不大，其中 24 小时准确率范围为 51%~89%，平均值为 74%，中位数为 73%；48 小时准确率范围为 41%~88%，平均值为

71%，中位数为 72%；72 小时准确率范围为 50%~87%，平均值为 70%，中位数为 69%，因此本标准对不同预报时效的 AQI 级别预报准确率进行统一规定。

由图 5-1 可知，大多数城市的 AQI 级别预报准确率在 60%~90% 范围内，准确率在该范围内的城市数量超过 88%，因此规定 AQI 级别预报准确率须达到 60%。

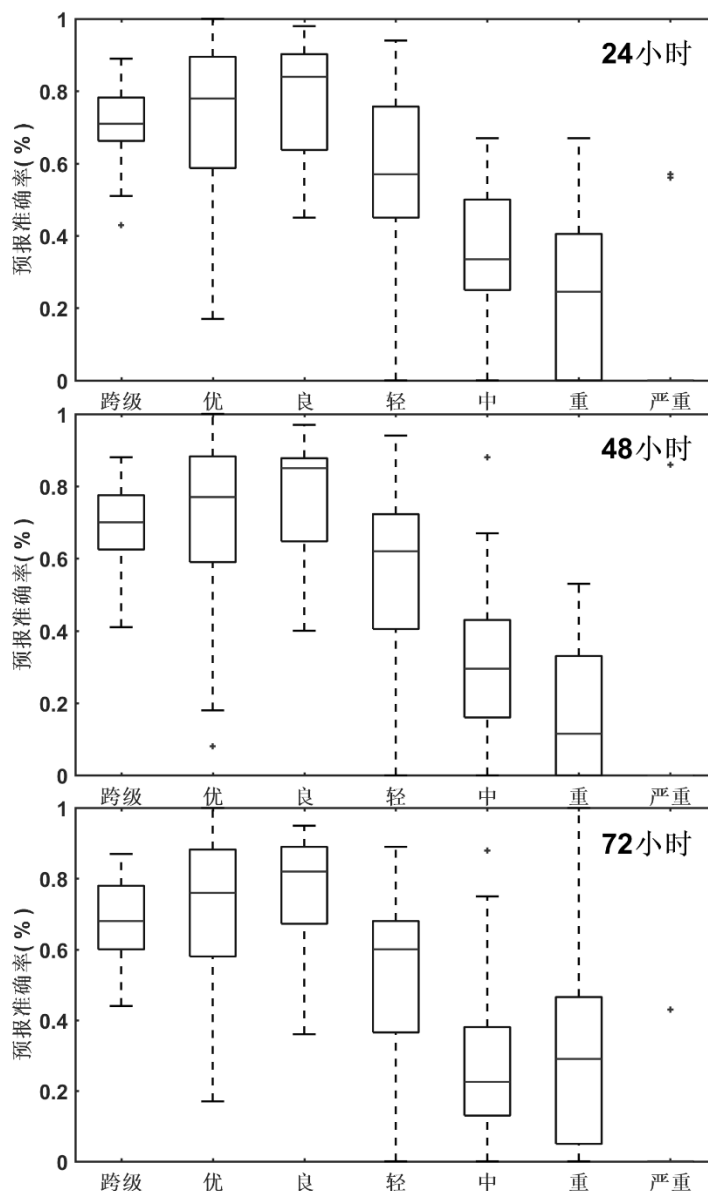


图 5-2 空气质量指数 (AQI) 分级别预报准确率分布图

从分级别预报准确率来看，一级预报准确率最高可达到 100%，大部分城市 24 小时、48 小时、72 小时准确率均在 76% 以上；二级准确率最高值为 95%~98%，大部分城市 24 小时、48 小时、72 小时准确率均在 82% 以上。数值预报在实况为优良情况下准确率整体高于其他级别。实况空气质量为轻度污染时，所有城市 24 小时、48 小时、72 小时级别准确率中位数在 60% 左右，污染程度越重，准确率整体呈现下降趋势。由于部分城市重污染（空气质量级别为重度和严重污染）天数较少甚至不出现重污染天气，导致整体重污染样本较少。

(3) 首要污染物预报准确率评估

选取北京、上海和广州作为典型城市，进行首要污染物预报准确率测算。结果表明，评估首要污染物准确率在 32.4%~71.3%。

由于我国地域辽阔，不同区域污染类型存在较大差异，同时首要污染物存在较明显的季节差异，对首要污染物的预报方法和难度也存在较大差异，很难制定全国统一标准。因此本标准仅对首要污染物预报评估方法进行描述，为业务预报及评功提供指导性参考。

(4) 单项污染物浓度预报评估

均方根误差 **RMSE** 反映了预报值与观测值之间的误差，其单位与预报值和实测值相同，均为 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，数值范围为 $[0, \infty)$ ，**RMSE** 越小表示预报越准确，**RMSE** 越大表示预报误差越大。**RMSE** 可用来评估指定城市不同模型的预报水平。用来比较不同城市之间预报水平时，需与观测值结合进行评估。

标准化平均偏差 **NMB** 反映了预报值与观测值之间的偏差与观测值的相对大小，是一个无量纲数，数值范围为 $(-\infty, +\infty)$ ，**NMB**=0 表示无偏差，**NMB**<0 表示预报偏低，**NMB**>0 表示预报偏高，数值越大表示偏差越大。**NMB** 可直接用来比较不同城市的预报水平。

相关系数 **r** 反映了预报值与观测值随时间变化趋势的相似程度，是一个无量纲数，数值范围为 $[-1, 1]$ ，**r**>0 表示正相关，**r**<0 表示负相关，相关系数越大，说明数值预报对污染趋势预报效果越好。

我国大气污染主要以颗粒物 (**PM₁₀**、**PM_{2.5}**) 和臭氧污染为主，**SO₂**、**CO**、**NO₂** 浓度水平较低。对于 **PM₁₀**，其浓度水平与沙尘天气密切相关，沙尘天气由多种因素共同影响且作用机理复杂，受到气象预报不确定性和未知沙尘源的影响较大，现有的沙尘数值模式对沙尘天气尚不能很好的模拟。臭氧通常在夏季温度较高的时间段浓度较高，对其进行年度统计评估的数据有效性可能不足。因此，本标准对单项污染物浓度预报评估没有提出限制性指标。

(5) 重污染预报性能评估

重污染与其他级别相比有自己的特点（比如区域传输影响显著等等），加之重污染涉及预警管控，因此单独制定重污染预报性能评估有重要意义。

重污染预报准确率侧重于对实际发生重污染的预报性能评估，范围为 $[0,1]$ ，越接近 1 说明重污染预报能力越强，当 **APR** 为 1 时表示所有污染过程均被预报命中。

本研究选取省会城市、直辖市等代表城市，分别计算 24 小时、48 小时和 72 小时的重污染过程预报准确率，结果如表 5-2、5-3、5-4 所示。

在实际重污染天数小于 5 天时，代表城市 24 小时预报准确率平均为 0%、48 小时为 0%、72 小时为 25%。当重污染天数即样本量较少时，重污染预报性能评估的统计学意义不明显。此时可侧重于 **AQI** 范围、**AQI** 级别等评估预报性能，而不单独考察重度污染的预报成效。

当实际重污染天数大于等于 5 天时，代表城市 24 小时预报准确率平均为 33%、48 小时为 29%、72 小时为 28%。此时考虑对模式进行重污染预报性能评估是合理的。

重污染预报检验评分是综合考察模式的重污染预报性能，不仅评估实际发生重污染的预报性能，即重污染预报准确率，还对模式预报发生重污染情况和程度进行考察，是对重污染预报准确率的综合评判。其范围为 $[0,1]$ ，越接近 1 说明预报效果越好。

表 5-2 代表城市 24 小时重污染预报准确率评估（单位：%）

城市	实况重污染天数	预报重污染天数	实况或预报重污染天数	重污染准确率	评分
1	11	0	11	0.00%	0
2	6	6	9	67.00%	0.78
3	30	5	33	20.00%	0.27

4	4	20	24	0.00%	0
5	25	14	31	36.00%	0.32
6	1	1	2	0.00%	0
7	3	0	3	0.00%	0
8	7	13	18	29.00%	0.17
9	11	12	21	36.00%	0.24
10	6	1	7	0.00%	0
11	-	2	2	-	0
12	37	22	43	57.00%	0.51
13	8	1	9	13.00%	0.11

表 5-3 代表城市 48 小时重污染预报准确率评估（单位：%）

城市	实况重污染天数	预报重污染天数	实况或预报重污染天数	重污染准确率	评分
1	11	0	11	0.00%	0
2	6	6	9	33.00%	0.56
3	30	5	33	3.00%	0.12
4	4	20	24	0.00%	0.21
5	25	14	31	44.00%	0.42
6	1	1	2	0.00%	0.5
7	3	0	3	0.00%	0
8	7	13	18	29.00%	0.44
9	11	12	21	18.00%	0.24
10	6	1	7	0.00%	0.14
11	-	2	2	-	0
12	37	22	43	59.00%	0.56
13	8	1	9	13.00%	0.22

表 5-4 代表城市 72 小时重污染预报准确率评估（单位：%）

城市	实况重污染天数	预报重污染天数	实况或预报重污染天数	重污染准确率	评分
1	11	0	11	9.00%	0.09
2	6	6	9	67.00%	0.78
3	30	5	33	7.00%	0.06
4	4	20	24	25.00%	0.33
5	25	14	31	36.00%	0.32
6	1	1	2	100.00%	1
7	3	0	3	0.00%	0
8	7	13	18	14.00%	0.44
9	11	12	21	18.00%	0.29
10	6	1	7	0.00%	0.14
11	-	2	2	-	0
12	37	22	43	49.00%	0.47

13	8	1	9	25.00%	0.22
----	---	---	---	--------	------

上述统计结果显示，代表城市重污染预报的准确率和检验评分数值范围较大，考虑到我国地域辽阔，不同区域重污染天数、污染特征、首要污染物等差异较大，很难制定全国统一标准。本标准仅对重污染预报性能的评估方法进行描述，为业务预报及评价提供参考。

6 与开题报告的差异说明

无。

7 标准实施建议

本标准以目前国内外主流的数值预报模式研究发展为基础，结合国内环境监测领域开展环境空气质量数值业务预报的实践应用，规定了最基础的空气质量数值模式要求，其适用范围限定在我国环境监测领域的空气质量数值模式业务预报中。

8 参考文献

- Asman, W. A. H., J. Berdowski, T. Pulles, F. Slemr, J. Staehelin, P. Sturm and W. Winiwarter (2000). Generation and Evaluation of Emission Data Annual Report 1999: 1-16.
- Bergin, M. S., G. S. Noblet, K. Petrini, J. R. Dhieux, J. B. Milford and R. A. Harley (1999). Formal uncertainty analysis of a Lagrangian photochemical air pollution model. *Environmental Science & Technology* 33(7): 1116-1126.
- Bieser, J., A. Aulinger, V. Matthias, M. Quante and P. Builtjes (2011). SMOKE for Europe - adaptation, modification and evaluation of a comprehensive emission model for Europe. *Geoscientific Model Development* 4(1): 47-68.
- Brooks, H.E. and C.A. Doswell III, 1996: A comparison of measures-oriented and distributions-oriented approaches to forecast verification. *Wea. Forecasting*, 11, 288-303.
- Briggs, W.M. and R.A. Levine, 1997: Wavelets and field forecast verification. *Mon. Wea. Rev.*, 125, 1329-1341.
- Brown, B.G., R.R. Bullock, C.A. David, J.H. Gotway, M.B. Chapman, A. Takacs, E. Gilleland, K. Manning, J. Mahoney, 2004: New verification approaches for convective weather forecasts. 11th Conf. Aviation, Range, and Aerospace Meteorology, 4-8 Oct 2004, Hyannis, MA.
- Bocquet, M., Elbern, H., Eskes, H., Hirtl, M., Žabkar, R., Carmichael, G. R., Flemming, J., Inness, a., Pagowski, M., Pérez Camaño, J. L., Saide, P. E., San Jose, R., Sofiev, M., Vira, J., Baklanov, a., Carnevale, C., Grell, G., Seigneur, C. Data Assimilation in Atmospheric Chemistry Models: Current Status and Future Prospects for Coupled Chemistry Meteorology Models. *Atmos. Chem. Phys.* 2015, 15 (10), 5325–5358
- Carter W P L. 1988. Documentation for the SAPRC atmospheric photochemical mechanism preparation and emissions processing programs for implementation in airshed models[R]. Prepared for California Air Resources Board, Contract(No.A5-122-32).214
- Carter W P L. 2000a. Documentation of SAPRC-99 chemical mechanism for VOC reactivity assessment[R]. Report.1-231
- Carter W P L. 2000b. Implementation of SAPRC-99 chemical mechanism into the models-3 framework: Report to the United States Environmental Protection Agency[R].1-106
- Casati, B., Ross, D.B. Stephenson, 2004: A new intensity-scale approach for the verification of spatial

- precipitation forecasts, *Met. Apps.*, 11, 141-154.
- Chang, J. C., Hanna, S. R. (2004). Air quality model performance evaluation. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 87(1), 167-196.
- Chen, S. Y., C. Zhao, Y. Qian, L. R. Leung, J. P. Huang, Z. W. Huang, J. R. Bi, W. Zhang, J. S. Shi, L. Yang, D. S. Li and J. X. Li (2014). Regional modeling of dust mass balance and radiative forcing over East Asia using WRF-Chem. *Aeolian Research* 15: 15-30.
- Cox, W. M. (1992). Protocol for determining the best performing model (No. PB-93-226082/XAB; EPA--454/R-92/025). Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC (United States). Technical Support Div..
- Damrath, U., 2004: Verification against precipitation observations of a high density network – what did we learn? Intl. Verification Methods Workshop, 15-17 September 2004, Montreal, Canada.
- Davis, C., B. Brown, and R. Bullock, 2006: Object-based verification of precipitation forecasts. Part I: Methods and application to mesoscale rain areas. *Mon. Wea. Rev.*, 134, 1772-1784.
- Derwent, D., Fraser, A., Abbott, J., Jenkin, M., Willis, P., & Murrells, T. (2010). Evaluating the performance of air quality models. Report prepared for the UK Department for Environment, Food and Rural Affairs.
- Ebert, E.E., 2008: Fuzzy verification of high resolution gridded forecasts: A review and proposed framework. *Meteorol. Appl.*, 15, 51-64.
- Ebert, E.E. and J.L. McBride, 2000: Verification of precipitation in weather systems: Determination of systematic errors. *J. Hydrology*, 239, 179-202.
- Evensen G. Inverse methods and data assimilation in nonlinear ocean models[C]// International Conference of the Center for Nonlinear Studies on Nonlinear Science. Elsevier Science Publishers B. V. 1994:108-129.
- Finley, J.P., 1884: Tornado predictions. *Amer. Meteor. J.*, 1, 85-88.
- Fu, X., S. X. Wang, B. Zhao, J. Xing, Z. Cheng, H. Liu and J. M. Hao (2013). Emission inventory of primary pollutants and chemical speciation in 2010 for the Yangtze River Delta region, China. *Atmospheric Environment* 70: 39-50.
- Gao, Y., M. Zhang, Z. Liu, L. Wang, P. Wang, X. Xia, M. Tao and L. Zhu (2015). Modeling the feedback between aerosol and meteorological variables in the atmospheric boundary layer during a severe fog-haze event over the North China Plain. *Atmospheric Chemistry And Physics* 15(8): 4279-4295.
- Gao, Y., M. G. Zhang, X. H. Liu and L. L. Wang (2016). Change in diurnal variations of meteorological variables induced by anthropogenic aerosols over the North China Plain in summer 2008. *Theoretical And Applied Climatology* 124(1-2): 103-118.
- Gery M W, Whitten G Z, Killus J P, et al. A photochemical kinetics mechanism for urban and regional scale computer modeling[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1989, 94(D10): 12925-12956.
- Grell, G., S. R. Freitas, M. Stuefer and J. Fast (2011). Inclusion of biomass burning in WRF-Chem: impact of wildfires on weather forecasts. *Atmospheric Chemistry And Physics* 11(11): 5289-5303.
- Grell, G. A., S. Emeis, W. R. Stockwell, T. Schoenemeyer, R. Forkel, J. Michalakes, R. Knoche and W. Seidl (2000). Application of a multiscale, coupled MM5/chemistry model to the complex terrain of the VOTALP valley campaign. *Atmospheric Environment* 34(9):

1435-1453.

- Grell, G. A., S. E. Peckham, R. Schmitz, S. A. McKeen, G. Frost, W. C. Skamarock and B. Eder (2005). Fully coupled "online" chemistry within the WRF model. *Atmospheric Environment* 39(37): 6957-6975.
- Inness A, Flemming J. Data assimilation of satellite retrieved ozone, carbon monoxide and nitrogen dioxide with ECMWF's Composition-IFS[J].(2015). *British Journal of Obstetrics & Gynaecology*, 97(10):869-71.
- Irwin, J. S., Civerolo, K., Hogrefe, C., Appel, W., Foley, K., & Swall, J. (2008). A procedure for inter-comparing the skill of regional-scale air quality model simulations of daily maximum 8-h ozone concentrations. *Atmospheric Environment*, 42(21), 5403-5412.
- Jacobson, M. Z. (1997). Development and application of a new air pollution modeling system .3. Aerosol-phase simulations. *Atmospheric Environment* 31(4): 587-608.
- Jacobson, M. Z. (1998). Studying the effects of aerosols on vertical photolysis rate coefficient and temperature profiles over an urban airshed. *Journal Of Geophysical Research-Atmospheres* 103(D9): 10593-10604.
- Jenkin M E, Saunders S M, Pilling M J. The tropospheric degradation of volatile organic compounds: a protocol for mechanism development[J]. *Atmospheric Environment*, 1997, 31(1): 81-104.
- Jenkin M E, Watson L A, Utembe S R, et al. A Common Representative Intermediates (CRI) mechanism for VOC degradation. Part 1: Gas phase mechanism development[J]. *Atmospheric Environment*, 2008, 42(31): 7185-7195.
- Kong, X., R. Forkel, R. S. Sokhi, P. Suppan, A. Baklanov, M. Gauss, D. Brunner, R. Baro, A. Balzarini, C. Chemel, G. Curci, P. Jimenez-Guerrero, M. Hirtl, L. Honzak, U. Im, J. L. Perez, G. Pirovano, R. San Jose, K. H. Schlunzen, G. Tsegas, P. Tuccella, J. Werhahn, R. Zabkar and S. Galmarini (2015). Analysis of meteorology-chemistry interactions during air pollution episodes using online coupled models within AQMEII phase-2. *Atmospheric Environment* 115: 527-540.
- Konovalov, I. B., M. Beekmann, I. N. Kuznetsova, A. Yurova and A. M. Zvyagintsev (2011). Atmospheric impacts of the 2010 Russian wildfires: integrating modelling and measurements of an extreme air pollution episode in the Moscow region. *Atmospheric Chemistry And Physics* 11(19): 10031-10056.
- Li, M., Q. Zhang, J. Kurokawa, J. H. Woo, K. B. He, Z. F. Lu, T. Ohara, Y. Song, D. G. Streets, G. R. Carmichael, Y. F. Cheng, C. P. Hong, H. Huo, X. J. Jiang, S. C. Kang, F. Liu, H. Su and B. Zheng (2017). MIX: a mosaic Asian anthropogenic emission inventory under the international collaboration framework of the MICS-Asia and HTAP. *Atmospheric Chemistry And Physics* 17(2): 935-963.
- Lin, C., Z. Wang, and J. Zhu (2008), An ensemble Kalman filter for severe dust storm data assimilation over China, *Atmos. Chem. Phys.*, 8,2975–2983, doi:10.5194/acp-8-2975-2008.
- Liu, L., X. Huang, A. J. Ding and C. Fu (2016). Dust-induced radiative feedback in north China: A dust storm episode modeling study using WRF-Chem. *Atmospheric Environment* 129: 43-54.
- Liu, Z., Q. Liu, H.-C. Lin, C. S. Schwartz, Y.-H. Lee, and T. Wang (2011), Three-dimensional variational assimilation of MODIS aerosol opticaldepth: Implementation and application to a dust storm over East Asia, *J. Geophys. Res.*, 116, D23206, doi:10.1029/2011JD016159.
- Mellor, G.L., and T. Yamada, Development of a turbulence closure model for geophysical fluid

- problems, *Rev. Geophys.*, 20, 851-875, 1982.
- Moran, M. D., S. Menard, D. Talbot, P. Huang, P. A. Makar, W. Gong, H. Landry, S. Gravel, S. Gong, L. P. Crevier, A. Kallaur and M. Sassi (2010). Particulate-Matter Forecasting with GEM-MACH15, A New Canadian Air-Quality Forecast Model. *Air Pollution Modeling And Its Application Xx*: 289-293.
- Murphy, A. H. (1993). What is a good forecast? An essay on the nature of goodness in weather forecasting. *Weather and forecasting*, 8(2), 281-293.
- Murphy, A.H. and R.L. Winkler, 1987: A general framework for forecast verification. *Mon. Wea. Rev.*, 115, 1330-1338.
- Murphy, A.H., B.G. Brown, and Y.-S. Chen, 1989: Diagnostic verification of temperature forecasts. *Wea. Forecasting*, 4, 485-501.
- Oreskes, N., Shrader-Frechette, K., & Belitz, K. (1994). Verification, validation, and confirmation of numerical models in the earth sciences. *Science*, 263(5147), 641-646.
- Pagowski, M., G. A. Grell, S. A. McKeen, S. E. Peckham, and D. Devenyi(2010), Three-dimensional variational data assimilation of ozone and fine particulate matter observations: Some results using the Weather Research and Forecasting—Chemistry model and Grid-point Statistical Interpolation, *Q. J.R. Meteorol. Soc.*, 136(653), 2013–2024, doi:10.1002/qj.700.
- Roberts, N.M. and H.W. Lean, 2008: Scale-selective verification of rainfall accumulations from high-resolution forecasts of convective events. *Mon. Wea. Rev.*, 136,78-97.
- Seigneur C, Pun B, Pai P, et al. Guidance for the performance evaluation of three-dimensional air quality modeling systems for particulate matter and visibility[J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2000, 50(4): 588-599.
- Streets, D. G., T. C. Bond, G. R. Carmichael, S. D. Fernandes, Q. Fu, D. He, Z. Klimont, S. M. Nelson, N. Y. Tsai, M. Q. Wang, J. H. Woo and K. F. Yarber (2003). An inventory of gaseous and primary aerosol emissions in Asia in the year 2000. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres* 108(D21).
- Stockwell W R. A homogeneous gas phase mechanism for use in a regional acid deposition model[J]. *Atmospheric Environment* (1967), 1986, 20(8): 1615-1632.
- Stockwell W R, Middleton P, Chang J S, et al. The second generation regional acid deposition model chemical mechanism for regional air quality modeling[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1990, 95(D10): 16343-16367.
- Stockwell W R, Kirchner F, Kuhn M, et al. A new mechanism for regional atmospheric chemistry modeling[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1997, 102(D22): 25847-25879.
- Tang X, Zhu J, Wang Z F, et al. 2011. Improvement of ozone forecast over Beijing based on ensemble Kalman filter with simultaneous adjustment of initial conditions and emissions [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11 (24): 12901–12916
- Theis, S.E., A. Hense and U. Damrath, 2005: Probabilistic precipitation forecasts from a deterministic model: a pragmatic approach. *Meteorol. Appl.*, 12, 257-268.
- Torseth, K., W. Aas, K. Breivik, A. M. Fjaeraa, M. Fiebig, A. G. Hjellbrekke, C. L. Myhre, S. Solberg and K. E. Yttri (2012). Introduction to the European Monitoring and Evaluation Programme (EMEP) and observed atmospheric composition change during 1972-2009. *Atmospheric Chemistry And Physics* 12(12): 5447-5481.
- US EPA. (2007). *Guidance on the use of models and other analyses for demonstrating attainment*

- of air quality goals for ozone, PM_{2.5}, and regional haze. US Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards.
- Wang, H., G. Y. Shi, X. Y. Zhang, S. L. Gong, S. C. Tan, B. Chen, H. Z. Che and T. Li (2015). Mesoscale modelling study of the interactions between aerosols and PBL meteorology during a haze episode in China Jing-Jin-Ji and its near surrounding region - Part 2: Aerosols' radiative feedback effects. *Atmospheric Chemistry And Physics* 15(6): 3277-3287.
- Wang, S. S., J. Y. Zheng, F. Fu, S. S. Yin and L. J. Zhong (2011). Development of an emission processing system for the Pearl River Delta Regional air quality modeling using the SMOKE model: Methodology and evaluation. *Atmospheric Environment* 45(29): 5079-5089.
- Wong, D. C., J. Pleim, R. Mathur, F. Binkowski, T. Otte, R. Gilliam, G. Pouliot, A. Xiu, J. O. Young and D. Kang (2012). WRF-CMAQ two-way coupled system with aerosol feedback: software development and preliminary results. *Geoscientific Model Development* 5(2): 299-312.
- Wu Q.Z., Wang Z.F., Chen H.S., et al., 2012. An evaluation of air quality modeling over the Pearl River Delta during November 2006. *Meteorol Atmos Phys.* 116:113-132
- Yu, S., Eder, B., Dennis, R., Chu, S. H., & Schwartz, S. E. (2006). New unbiased symmetric metrics for evaluation of air quality models. *Atmospheric Science Letters*, 7(1), 26-34.
- Yu, S., Mathur, R., Schere, K., Kang, D., Pleim, J., Young, J., ... & Rao, S. T. (2008). Evaluation of real - time PM_{2.5} forecasts and process analysis for PM_{2.5} formation over the eastern United States using the Eta - CMAQ forecast model during the 2004 ICARTT study. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 113(D6).
- Zepeda-Arce, J., E. Foufoula-Georgiou, and K.K. Droegemeier, 2000: Space-time rainfall organization and its role in validating quantitative precipitation forecasts. *J. Geophys. Res.*, 105 (D8), 10,129-10,146.
- Zhang, Q., D. G. Streets, G. R. Carmichael, K. B. He, H. Huo, A. Kannari, Z. Klimont, I. S. Park, S. Reddy, J. S. Fu, D. Chen, L. Duan, Y. Lei, L. T. Wang and Z. L. Yao (2009). Asian emissions in 2006 for the NASA INTEX-B mission. *Atmospheric Chemistry and Physics* 9(14): 5131-5153.
- Zheng, J. Y., L. J. Zhang, W. W. Che, Z. Y. Zheng and S. S. Yin (2009). A highly resolved temporal and spatial air pollutant emission inventory for the Pearl River Delta region, China and its uncertainty assessment. *Atmospheric Environment* 43(32): 5112-5122.
- 曹国良, 张小曳, 龚山陵, 安兴琴, 王亚强, 2011, 中国区域主要颗粒物及污染气体的排放源清单, *科学通报*, 56 (3): 261-268.
- 常俊, 彭新东, 范广洲, 车玉章. 2015. 结合历史资料的数值天气预报误差订正[J]. *气象学报*, 73(2): 341-354
- 邓涛, 邓雪娇, 吴兑等. 珠三角灰霾数值预报模式与业务运行评估[J]. *气象科技进展*, 2012, 2(6): 38-44.
- 国家气象中心. 《中期天气预报》(GB/T 27956-2011), 2011.
- 国家气象中心. 《数值天气预报产品检验规范》(GB/T 34303-2017), 2017.
- 国家气象中心. 《短期天气预报》(GB/T 21984-2017), 2017。
- 何金梅, 刘 抗, 王玉红, 等. CUACE 模式在兰州城市空气质量预报中的检验订正[J]. *干旱气象*, 2017, 35(3): 495-501
- 贺克斌, 余学春, 陆永琪, 郝吉明, 傅立新 (2003). 城市大气污染物来源特征. *城市环境与城市生态* 16(6): 269-271.

- 胡高硕, 徐永福, 贾龙. 烟雾箱模拟丙烯-NO_x 的大气光化学反应[J]. 化学学报, 2011, 69(14):1593-1600.
- 环境保护部. 扬尘源颗粒物排放清单编制技术指南(试行). 2014.
- 环境保护部. 生物质燃烧源大气污染物排放清单编制技术指南(试行). 2014.
- 环境保护部. 大气细颗粒物一次源排放清单编制技术指南(试行). 2014.
- 环境保护部. 大气挥发性有机物源排放清单编制技术指南(试行). 2014.
- 环境保护部. 大气氨源排放清单编制技术指南(试行). 2014.
- 环境保护部. 大气可吸入颗粒物一次源排放清单编制技术指南(试行). 2014.
- 环境保护部. 道路机动车大气污染物排放清单编制技术指南(试行). 2014.
- 环境保护部. 非道路移动源大气污染物排放清单编制技术指南(试行). 2014.
- 黄成, 陈长虹, 李莉, 程真, 王红丽, 王杨君, 黄海英, 张刚锋 and 陈宜然 (2011). 长江三角洲地区人为源大气污染物排放特征研究. 环境科学学报 31(9): 1858-1871.
- 黄思, 唐晓, 王自发, 等. 2016. 基于观测、模拟和同化数据的 PM_{2.5} 污染回顾分析 [J]. 气候与环境研究, 21
- 李杰, 杨文夷, 陈焕盛, 等. 2014. 东亚大气可吸入颗粒物时空分布的数值模拟研究[J]. 环境科学学报, 34(3): 548-557
- 刘峻峰, 李金龙, 白郁华. 大气光化学烟雾反应机理比较(II)HO_x 和光化学氧化产物的比较 [J]. 环境化学, 2001, 20(4):313-319.
- 娄珊珊, 陈光舟, 邱学兴. WRF 不同参数化方案对安徽一次暴雨过程模拟的影响分析[J]. 气象科学, 2015, 35(03):370-378.
- 吕岩 (2015). 大气污染物排放源处理系统 EMIPS 的开发与应用. 西安建筑科技大学.
- 潘锦秀, 朱彬, 晏平仲, 等. 2016. 京津冀区域重污染天气过程数值预报评估新方法[J]. 环境科学学报, 36(8): 2752-2760
- 唐孝炎, 张远航和邵敏. 大气环境化学(第二版) [M]. 高等教育出版社. 2006.
- 田贺忠, 郝吉明, 陆永琪, 朱天乐 (2001). 中国氮氧化物排放清单及分布特征. 中国环境科学 21(6): 493-497.
- 王丽涛, 张强, 郝吉明, 贺克斌 (2005). 中国大陆 CO 人为源排放清单. 环境科学学报 25(12): 1580-1585.
- 王茜, 伏晴艳, 王自发等. 集合数值预报系统在上海市空气质量预测预报中的应用研究[J]. 环境监控与预警, 2010, 02(4):1-6, 11.
- 王自发, 谢付莹, 王喜全等. 2006. 嵌套网格空气质量预报模式系统的发展与应用. 大气科学 30(5): 778-790.
- 王自发, 吴其重, Alex Ghaguidi, 等. 2009. 北京空气质量多模式集成预报系统的建立及初步应用. 南京信息工程大学学报: 自然科学版, 1(9): 19-26
- 王哲, 王自发, 李杰, 等. 气象-化学双向耦合模式(WRF—NAQPMS)研制及其在京津冀秋季重霾模拟中的应用[J]. 气候与环境研究, 2014, 19(2):153-163.
- 王兴平, 孙旭东, 左颖明, 白乃彬 (1998). 中国大陆 SO₂1°×1°网格排放估计. 北京联合大学学报 12(2): 48-52.
- 王兴平, 左颖明, 孙旭东, 白乃彬 (1999). 中国大陆 1°×1°网格排放估计. 北京联合大学学报 13(2): 64-68.
- 王开燕, 邓涛, 邓雪娇, 等. 珠三角空气质量数值预报系统的检验与订正研究[J]. 环境科学与管理, 2017, 42(1):47-49.
- 吴其重, 徐文帅, 赵秀娟, 何友江 (2012). 北京市大气可吸入颗粒物排放源空间优化及模式验证. 环境科学雪豹 32(10): 2548-2558.

- 谢敏,钟流举,陈焕盛. CMAQ 模式及其修正预报在珠三角区域的应用检验[J]. 环境科学与技术, 2012, 35 (2): 96-101.
- 杨雨灵, 谭吉华, 孙家仁, 王莉莉, 王学远, 张元勋, 霍群, 赵伟 (2015). 华北地区一次强灰霾污染的天气学效应. 气候与环境研究 20(5): 555-570.
- 杨文夷, 李杰, 陈焕盛等. 2014. 东亚边界层臭氧时空分布的数值模拟研究.中国环境科学,34(7):1633-1641
- 曾新民, 吴志皇, 宋帅,等. WRF 模式不同陆面方案对一次暴雨事件模拟的影响[J]. 地球物理学报, 2012, 55(1):16-28.
- 张强, Z. Klimont, D. Streets, 霍红, 贺克斌. 中国人为源颗粒物排放模型及 2001 年排放清单估算. 自然科学进展. 2006, 16(2): 223-231.
- 张远航, 李金龙, 唐孝炎. 一个液相化学反应机理的建立和应用[J]. 环境科学学报, 1993, 13(4):460-472.
- 赵斌, 马建中 (2008). 天津市大气污染源排放清单的建立. 环境科学学报 28(2): 368-375.
- 朱莉莉, 晏平仲, 王自发等.2015.江苏省级区域空气质量数值预报模式效果评估.中国环境监测.31(2):17-23.
- 中国环境监测总站.《环境空气质量标准》(GB3095-2012). 2012.
- 中国环境监测总站.《环境空气质量监测点位布设技术规范(试行)》(HJ664-2013). 2013.
- 中国环境监测总站. 环境空气质量预报预警方法技术指南(第一版)[M]. 中国环境出版社. 2014.
- 中国环境监测总站. 环境空气质量预报预警方法技术指南(第二版)[M]. 中国环境出版社. 2017.