·前沿评述·

# 空气质量数值模型的构建及应用研究进展

谭成好,陈昕,赵天良*,单云鹏
(南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心,中国气象局气溶胶－云－降水重点开放实验室,江苏　南京　210044)

**摘　要**:综述了近年来国内外空气质量模型的发展历程、空气质量数值模型构建的关键技术以及应用研究。指出了目前空气质量数值预报及应用主要面临气象条件,尤其是大气边界层模拟、大气污染物排放源和大气物理化学过程等问题。提出,应当通过规范化制作和完善排放源清单数据,建立统一的排放源分析标准,提高排放源数据的准确性;多向发展观测手段,加大监测密度和频率,并进行实验室化学分析,提出适合我国的大气物理化学机制。就空气质量模式而言,对模式方案进行优化,以及使用气象、卫星资料同化等技术手段,将其与观测相结合,构建监测与预报系统相结合的统一体系,应用于多平台。

**关键词**:空气质量模式;大气物理;大气化学;数值预报
**中图分类号**:X51　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1674－6732(2014)06－0001－07

## Research Progress on the Development and Application of Air Quality Models

TAN Cheng-hao, CHEN Xin, ZHAO Tian-liang*, SHAN Yun-peng
(*Climate and Weather Disasters Collaborative Innovation Center, Nanjing University of Information Science &Technology; Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, Nanjing, Jiangsu* 210044, *China*)

**Abstract**: This paper reviewed the development process of air quality model in China and abroad, the key technology in numerical model of air quality and its application research. The modeling prediction of air quality was currently confronting three major issues: the large uncertainties in air pollutant emission inventory, modeling meteorology conditions especially boundary layer and the physical and chemical processes in the atmosphere. It was proposed that the standardized production and the more precise data of emission inventory could improve the accuracy of emission data with the unified standard in analyzing emission sources, and the multi-direction development of measurement methods and the enhancement in both monitoring density and frequency with lab study would be used to build the suitable physical and chemical mechanism for Chinese air environment. By optimizing the parameterization schemes in air quality models and introducing the technology of data assimilation with meteorology and satellite observations as well as the air quality measurement, a unified system integrating air quality monitoring and modeling prediction subsystems would be realized in the multi-platform of application.

**Key words**: Air quality model; Atmospheric physics; Atmospheric chemistry; Numerical simulation

大气作为一个极端复杂的反应系统,其中每时每刻都有大量的化学和物理机制发生。外场观测、实验室分析、数值模式模拟等方法都可以用于空气质量的研究,但由于大气环境外场观测和实验室研究在时间和空间方面具有局限性,难以应用于较大时空尺度的大气扩散和污染预报,因此空气质量数值模拟具有其不可代替的作用。作为当今大气环境研究的热点与难题,空气质量模式通过模拟各种大气污染物的时空分布,可应用于大气污染预报预警,是城市及区域大气污染控制研究的重要手段之一。空气质量预测预报是一项复杂的系统工程,模

**收稿日期**:2014－09－02;**修订日期**:2014－09－15
**基金项目**:江苏省科技支撑计划－社会发展重大研究基金资助项目(BE2012771);南京信息工程大学人才启动基金资助项目(20110304);江苏高校优势学科建设工程基金资助项目(PAPD)。
**作者简介**:谭成好(1991—),男,硕士,从事大气环境数值模拟和气候分析工作。
*通讯作者:赵天良　E-mail:tlzhao@nuist.edu.cn

式的相关研究始于上世纪中期,经历了 3 个发展阶段,如今已发展到了第 3 代空气质量模式[1-3]。

## 1　空气质量模式的发展历程

### 1.1　第一代空气质量模式

20 世纪 60 年代至 70 年代末,第一代空气质量模式以局地烟流扩散模式、箱模式以及拉格朗日轨迹模式为主,代表有高斯模式、CALPUFF(California Puff Model)模式和 EKMA(Empirical Kinetic Modeling Approach)模式等,可用来模拟原生性污染物的扩散。基本的高斯模式是在实测资料分析的基础上,应用湍流统计理论,得到污染物扩散的正态分布模型;其后以 PASQUILL 和 GIFFORD 等学者为代表,通过对野外观测数据的分析,建立了各种气象条件下的扩散参数曲线,使高斯模式得到了广泛应用。为了解决城市光化学烟雾问题,此后还引入了箱式光化学模型。这一时期的扩散模式采用简单、高度参数化的线性机制描述大气物理化学过程,适用于模拟惰性污染物的长期平均浓度。

### 1.2　第二代空气质量模式

20 世纪 80 年代初至 90 年代初,随着云降水物理、大气化学机制的研究取得进展,空气质量模式得到了相应发展,加入了较为复杂的气象模型、气象参数和详细的非线性化学反应机制,逐步形成了以欧拉网格模型为主的第二代空气质量模式。代表性的有三维城市尺度的光化学污染模式 UAM(Urban Airshed Model)模式、区域光化学污染模式 RTM(Radiative Transfer Model)模式和区域酸沉降模式,如 RADM(Regional Acid Deposition Model)、STEM - Ⅱ(Sulfur Transport and Deposition Model)、ADOM(Acid Deposition and Oxidant Model)模式。

### 1.3　第三代空气质量模式

从 20 世纪 90 年代起,空气质量模式的开发进入第三阶段。以美国国家环保局 EPA 为例,其开发出了第三代空气质量模型 Model - 3。该模型不再区分单一的污染问题,引入了“一个大气”的概念,将整个大气作为研究对象,在各个空间尺度上模拟所有大气物理和化学过程,进行局地、城市、区域和大陆等多种尺度的污染物模拟和预报研究。当前,主流的第三代空气质量模式有 Model - 3/CMAQ(Models - 3 Community Multiscale Air Quality Modeling System),CAMx(Comprehensive Air Quality Model with Extensions),WRF - Chem(Weather Research and Forecasting coupled with Chemistry)等。第三代空气质量模式的最大特点是考虑大气动力学与大气化学间的双向耦合,实现多种污染物、多尺度的大气污染预报。在模式中完善和引入了更多的化学机制,并增加考虑了气溶胶等污染物对气象场的反馈作用。而将第三代空气质量模式应用于预报的过程中,采用多模式集合预报的技术已成为发展趋势。

## 2　空气质量模式的应用现状

目前,国外空气质量预报模式研发朝着建立大气污染物的多尺度复合污染物方向发展。与天气气候模式完全耦合的模式系统已经成为大气环境模式发展的必然趋势。例如,加拿大环境部围绕全球及区域空气质量模式及模拟,开发了包括沙尘气溶胶起沙、传输、干沉降及云中核化和云下降水清洗等物理过程的沙尘预报模型;研发了包括硫酸盐,有机碳,黑碳,沙尘,海盐等的气溶胶模型,并实现了与加拿大空气环境模式及加拿大业务天气气候预报模式 GEM/RCM(Global Environment Model/Regional Climate Model)的耦合;以加拿大天气预报模式为基础,建立了半挥发永久有机污染物的三维动力模式 GEM/POPs(Global Environment Model / Persistent Organic Pollutants),并对全球大气中有机污染物浓度,传输和源汇收支关系、自然和人为气溶胶的贡献及全球传输等进行了长时间连续模拟。

与国外空气质量数值模型的发展过程一致,我国主要空气质量数值模型的发展也经历了 3 个阶段。第一代模型主要以高斯烟流模型为主,第二代模式包括城市尺度的空气质量预报模式及区域尺度污染物欧拉输送模式。现在空气质量模式的发展也进入了第三代,通过自主研发和改进国外模式,模型的参数和功能作了相应的修订和改进,形成了具有适应区域特点的多尺度、多污染物的综合模型体系,并应用于大气环境决策和服务。在 2008 年北京奥运会期间和 2010 年上海世博会期间,都运用了集合空气质量模式提供大气环境监测和污染预警服务[4-5]。

## 3　空气质量数值模型构建的关键技术

随着大气物理化学理论的不断完善和相关研究的深入,应用动力 - 化学耦合的模式进行空气质

量预报已成为趋势,即由天气气候模式提供气象背景场支持,驱动运行化学传输模式。以 Model - 3 模式系统为例,该系统由 3 大部分组成:中尺度气象模式 MM5、排放模式系统 SMOKE 和通用多尺度空气质量模式系统 CMAQ。气象模式 MM5 模拟输出的气象场结果通过到气象化学界面处理模块 MCIP,转换为应用程序界面格式文件,再输入到化学输送模式 CCTM 中;排放模式系统 SMOKE 主要是处理排放源资料数据,CMAQ 模式系统则是多污染物、多尺度的空气质量预报系统。因此,Model - 3 模式系统能够用于大气复合污染物的模拟研究。

当前,化学传输模式考虑的主要过程有:来自人为源和自然源的气体和一次颗粒物的排放;平流输送,对流输送和湍流扩散;气相和液相化学过程中气体的转化;由气体冷凝、液相反应后水滴蒸发、异质核化、凝结产生或进一步改变气溶胶;气溶胶的干湿沉降过程。如今的空气质量预报系统是多污染物、多尺度的模式系统,可同时综合处理复杂的空气污染(如气态污染物和颗粒物、毒化物、酸沉降和能见度等)问题。在搭建空气质量预报平台时,排放源的准确性会对模拟结果产生影响,并且对气溶胶及其物理、化学过程的考虑也尤为重要[6-7]。

### 3.1　排放源

污染源排放给出了单位时间、单位面积上的污染物的排放量,是空气质量模式的重要部分。常见的排放来源包括城市工业源,生物源,生物质燃烧,交通运输,火山喷发等。对于不同的排放来源,可通过生成排放清单和数据资料来进行描述。排放定量的方法总的来说有两种,一种是常见的自下而上的估算方法,通过进行分类别、分地域的调查,将所得的各种排放来源(如发电厂、工厂、各种生产部门及居民燃烧等)的能源统计数据和排放因子来制作排放清单。这一方法来源直接,但有很大的不确定性,时间滞后性大且不易更新[8]。另一种是自上而下的清单制造技术,利用卫星遥感观测,并结合地面、高空的气象资料来反演和监测地面的排放量[9]。在编制排放源清单时,还可通过一些统计数据(如人口,土地利用等)对已知的总的排放进行空间分配。自上而下的排放定量方法通常要借助于模式反演,将各类型的观测数据、大气化学传输模式与原有的排放清单综合考虑获取优化的排放。此外,在排放源清单的制作过程中,还可采用"自上而下"和"自下而上"相结合的方法,以互为补充和验算排放源结果。在用于模式输入前,排放源清单还需要经过一定的预处理过程,对多种排放源数据进行程序处理后可用于区域和全球化学模式。在排放源的处理过程中,可以使用人口密度、土地利用数据等进行排放的空间分配,利用化学物质种类进行时间分配,用于输入空气质量模式[10]。在 CMAQ 模式中, SMOKE 模块根据算法将排放数据内插到模式网格点上,并将年排放资料转化为排放源强度,将各物种的小时分辨率的排放量用于空气质量模式。

### 3.2　气溶胶粒子的方案

就粒子尺度而言,模式中对气溶胶粒子的描述主要有以下 3 种方式:①将气溶胶分为多个粒径档[11-13],这种方案能更准确地描述气溶胶粒子,但计算量较大;②模态表述,每种气溶胶被给定一种模态分布函数[14-16],这种方案计算简便,但假设每个模态都是正态分布的;③采用矩的方式来描述粒径分布,而不是尺度大小本身[17-18],这种方案可以精确有效地模拟大尺度模式中尺度分离的气溶胶微物理过程。

根据对气溶胶粒子的分类,模式中会考虑元素和有机碳、沙尘等一次气溶胶。通过对气溶胶分类方案进行详细描述,并采用分档的气溶胶描述方式,可应用于气溶胶模块[19]。此外,气溶胶的最初尺度分布要从一次排放源获得,矿物沙尘气溶胶的粒径分布观测很难,不同源区排放,不同时间,不同地点和不同气象条件的分布之间存在很大差异,因此很难描述出一个有代表性的沙尘气溶胶尺度分布。文献[20]研究表明,矿物沙尘气溶胶在粗模态和细模态都有分布 。如果仅考虑矿物沙尘气溶胶在粗模态的分布,会低估表面沙尘气溶胶的浓度,以及对沙尘气溶胶充当云凝结核和参与非均相化学反应造成影响,因此还必须考虑矿物沙尘气溶胶在积聚模态和粗模态的分布[15]。

### 3.3　气 - 粒转化方案

气溶胶一般在靠近排放源的地方是外部混合的,随着扩散过程,发生凝结增长或与其他粒子聚合,逐渐转变为内部混合状态。有机物在液相化学过程中对二次气溶胶(SOA)产生的作用机制,是除传统的有机气体产生 SOA 外的另一重要机制[21]。WRF - Chem 中的 MOSAIC 模块发展了气 - 粒转化方案 ASTEM,其中采用"动态 pH"(dynamic po-

tential of hydrogen)的概念,分步处理 $H_2SO_4$ 等的气粒转化过程[13]。关于粒子增长转换模态的问题,CMAQ 中采用了 JACOBSON 等描述的分档模式中的气溶胶粒子增长模态转换方法[22]。

### 3.4　干湿沉降过程

气溶胶粒子的干沉降用湿粒径大小计算,干沉降过程采用阻力方法,根据地表利用确定不同的阻力系数。湿沉降方案中考虑了云中和云下的清除过程。云中气溶胶粒子分为 2 种,一种是被云清除或被云所携带的气溶胶粒子,作为云滴的组成部分;另一种是没有形成云滴或者形成之后由于云水蒸发再次浮于云中的气溶胶粒子。第一种气溶胶的清除,即气溶胶的云内清除仅考虑布朗扩散机制,忽略了气溶胶粒子形成冰核被清除的过程,而云下降水对大气颗粒物有显著的清洗作用。GONG 等[21](2011)的研究表明,模式模拟的大气颗粒物 PM(Particulate Matter)浓度与模式中的云下清除理论相关,当选用不同的方案时,模拟的 $PM_{2.5}$ 和 $PM_{10}$ 浓度会有差异。

### 3.5　气相化学机制

#### 3.5.1　CBM－Z 光化学方案

CBM－Z 光化学机制由 GERY 等[24](1989)的 CBM－IV(Carbon Bond Mechanism)发展而来,其已经被多种模式采用且得到很好的评估[23－24]。CBM－Z 机制在 CBM－IV 的基础上,修订了部分化学反应过程,增加了化学反应的物种,并考虑了更多的化学反应类型。与前者相比,CBM－Z 机制考虑更加全面,能应用于更长的时间范围和更大的空间尺度上,适用性更广泛。在 WRF－Chem 模式中,CBM－Z 机制包括了 66 种气相化学物质的 175 种化学反应,并可分为对流层背景、城市、大陆以及远洋 4 种不同的反应类型。

#### 3.5.2　RADM2 方案

WRF－Chem 中采用由 RADM 改进而来的 RADM2 光化学方案和 MADE/SORGAM 气溶胶参数化方案[25]。RADM2 方案包括 63 个化学物种和 156 个化学反应,是一种考虑了精细的化学预报和现有计算资源的折中方案,其广泛应用于对氧化物和其他空气污染物的预报中。对于无机物,此方案中包含有 14 种稳定物质,4 种活跃中间物和 3 种常量物种(氧气、氮气和水),有机化学部分包括 26 种稳定物质和 16 种过氧自由基[26]。

#### 3.5.3　RACM 方案

RACM 方案由 RADM2 修订而来,对生物臭氧前体物描述更加详细,对烯烃参与的化学反应考虑得更加完整,尤其是对烯烃的氧化反应,以及与其他自由基的反应机理进行了大量订正。在此方案中将人为源排放的烯烃分成了 4 类,其中包括 77 个化学物种和 237 个化学反应[27]。

## 4　空气质量模型的应用研究

### 4.1　空气质量预报模式系统

在空气质量模式(如 WRF－Chem)模拟研究的基础上,可建立区域空气质量预报模式系统,为今后进行更长时间的空气质量预警与预报建立试验平台。由于污染源时空特征十分复杂,在利用最新排放源清单及排放源数值处理系统时,预报模式系统还可采用动力统计相结合的区域模式－MOS 方法和城市污染源“Nudging”修正技术。这一多尺度空气质量模式预报系统可用于区域与城市尺度对流层气体中大气污染物水平和气溶胶浓度的预报和模拟,以及城市光化学烟雾和大气灰霾的预报业务和环境评估。

### 4.2　大气污染减排监控的模拟应用

应用区域空气质量预报模式系统可进行一定区域大气污染减排敏感性试验,限定模拟区域的排放源(点源及面源)强度和位置,以多年平均的气象场为背景场以及空气污染事件伴随的气象条件,模拟空气质量变化。同时可分析各不同区域减排控制对区域大气污染的影响,设计不同的情景方案开展敏感性调控试验,筛选优化的应急预案和控制措施,为大气污染监控预警方案提供背景污染水平的定量化信息,尤其是来自控制区以外的污染源贡献的增加。

在模拟期间,一旦出现污染超标或者重污染事件,则污染物区域传输源追踪系统将被启动。利用 WRF－Flexpart 模式,能得到可能影响模拟区域的污染物来源的后向轨迹,再结合排放源的分布情况得到需要控制的重点源,并通过关闭远距离排放源和局地的源,分析得到局地源和输送的贡献比例,其中 WRF－Chem 模式和 WRF/CMAQ 模式中都有各自的追踪选项。另外一个选择是利用后向轨迹模式 HYSPLIT,并结合大气化学模式模拟得到的化学场分布,通过人为引入湍流扩散,干湿沉降等必要的物理化学过程,来实现能够充分反映物理化学过程和气团移动过程相互作用的示踪方法。

### 4.3　排放源反演模型发展

近年来,排放源模式、源反演模型等间接源排放估算方法成为定量计算污染源排放量及其时空变化规律的主要研究方向之一,其可为空气质量模式提供高时空分辨率、多排放参数的污染源排放清单。通过污染源同化反演方法,CMAQ 模式迭代器源修正反演模型,对其在中国不同地区、不同季节、不同天气过程的适用性及其对空气质量预报改进的长期客观效果检验,表明采用源同化模型可明显改善污染物浓度预报水平,预报效果明显优于被普遍应用的初始源[28]。就同化方法而言,国际流行的同化方法主要是四维变分同化和集合卡尔曼滤波,而国内在大气化学资料同化方面采用最优插值法等[29]。

### 4.4　污染事件的诊断

在大气污染事件发生之后,可利用空气污染模式进行污染事件的模拟,对污染物的环境影响作用进行评价。通过个例模拟和分析,空气质量模式不仅提供了污染事件发生期间污染物的时空分布状况,还能揭示不同种类污染源在大气污染中所起的作用。在这一过程中,空气质量模式模拟出研究区域内污染物的来源、扩散和反应情况,并对不同时期影响污染物浓度变化的因子进行判别。在对污染事件发生过程中的物理、化学机理及各类型污染物的变化规律进行研究之后,能诊断出污染事件产生和发展的原因,为大气污染研究和污染防治提供参考依据。

## 5　存在问题

### 5.1　大气边界层模拟

大气边界层是靠近地球表面、受地面摩擦阻力影响的大气层区域,也是空气质量研究的主要区域。边界层中的湍流活动有利于大气污染物的扩散,空气质量也是针对大气边界层中所发生的物理化学现象和大气污染物分布及变化进行研究。因此,准确地模拟大气边界层特征对空气质量数值预报至关重要,不同的边界层方案会导致模拟结果出现偏差。

文献[30]指出在模拟过程中 YSU 方案模拟出的边界层高度比 MYJ 方案模拟的高,更有利于污染物的扩散。在城市气象数值模拟中,地面具有非均匀性,动力学和热力、辐射差异明显,会对数值模拟的结果产生影响。此外,观测数据的缺乏也使得难以对模拟结果进行验证。模型预报总存在不确定性,这是因为资料在输入过程中存在误差,并且对大气中随机过程的模拟同样存在不确定性。

### 5.2　大气污染物排放源

排放源的不确定性同样是影响当前空气质量模式研究结果准确性的主要因素之一,亦对污染源的调控产生较大影响。随着城市的快速发展,排放源的时空变化非常迅速,这给排放源清单的研究工作带来很大困难。排放源的基本年份,覆盖范围,排放物质种类,排放来源分类,时间和空间分辨率都是影响排放源适用性的重要因素。对于空气质量模式在我国的应用而言,源清单数据亟需细化和规范,时空分辨率也需要提高。为了能提供是用于第三代空气质量模型的源清单,还需制作基于多化学物种的源清单,对本地源化学成分进行分配。

### 5.3　大气物理化学过程

目前大气化学模型是建立在对大气物理化学过程的现有理解的基础上提出的,随着对大气物理化学研究的推进,大气中多相化学反应,新粒子和二次气溶胶的形成等新认识将有助于大气化学模型的改进。前体物与二次污染物反应复杂,是气象条件和大气化学性质的复杂函数,提供准确的相关参数能将大气一次污染物和二次污染物对空气污染的贡献区别开来,提高模拟的准确性。目前使用的空气质量模式中的反应机制是在清洁条件下所提出,在我国复合型大气污染的背景下,其适用性有待提高,化学反应机理及适用性还须进一步地完善和验证。

## 6　展望

空气质量数值预报及应用的 3 个主要困难及其引起的不确定性,限制了目前空气质量模式模拟的能力。因此,国内外对模式模拟能力的评估表明目前空气质量数值模拟依然具有一定的误差。尽管空气质量模式基本上能够模拟观测的大气污染物的空间分布及季节和日变化,但是相对数量上仍存在一定的误差,尤其是对严重的大气污染事件的模拟。目前以模拟和观测的大气污染物浓度数值之间的两倍的误差作为模式模拟能力评估可以接受的合理范围。鉴于此现状,空气质量模式模拟依然是大气环境科学研究的难点和热点,其中,由于大气污染物排放源时空变化的复杂性,污染物排放源清单是空气质量模式模拟的最薄弱的环节。许

多新方法(逆过程模式,污染物源同化和城市污染源“Nudging”技术等)的发展都尝试解决大气污染物排放源的不确定性。新粒子和二次气溶胶的产生,大气边界层和大气污染物对大气环境的反馈作用等也是目前空气质量数值模型最前沿的研究方面。为了纠正模式模拟的系统误差,大气科学的资料同化,动力统计相结合预报订正方法和多模式集合预报方法近来也被应用于空气质量的模式预报。

随着经济发展和城市化建设,我国污染源排放日渐增强,污染物种类日趋复杂,导致我国大气污染日趋严重。近年来灰霾事件频发,表明我国大气环境形势面临严峻的挑战,因而将空气质量模型应用于区域环境预报和预警已成必然趋势。对于研究污染物长距离传输、进行环境影响评价、分析污染物来源,空气质量模式也有广泛的应用前景。在现有的模拟水平上,空气质量模式的发展和完善还有较大空间。一方面,应当通过规范化制作和完善排放源清单数据,建立统一的排放源分析标准,提高排放源数据的准确性;另一方面应当多向发展观测手段,加大监测密度和频率,并进行烟雾箱实验,提出适合我国的大气物理化学机制。就空气质量模式而言,对模式方案进行优化,以及使用气象、卫星资料同化等技术手段,可以提高空气质量模式的准确性。将其与观测相结合,构建监测与预报系统相结合的统一体系,应用于多平台,是空气质量模型平台发展的方向。

## [参考文献]


[1] 王自发,庞成明,朱江,等. 大气环境数值模拟研究新进展[J]. 大气科学,2008,32(4):987 - 995.

[2] 安兴琴,左洪超,吕世华,等. Models-3 空气质量模式对兰州市污染物输送的模拟[J]. 高原气象,2006,24(5):748 - 756.

[3] 程兴宏. 空气质量模式“源同化”模型及排放源影响效应研究[D]. 北京:中国科学院研究生院,中国气象科学研究院,2008.

[4] 陆涛. 长三角区域空气质量预警联动系统及其在上海世博会的应用[J]. 环境监测管理与技术,2011 (5):68 - 73.

[5] 黄江平,王喜全,王自发,等. 2008 年北京奥运会期间污染控制效果数值模拟——以个例分析为例[J]. 气候与环境研究,2010 (1):11 - 20.

[6] 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,2010,2(4):1 - 6.

[7] 许建明,徐祥德,刘煜,等. CMAQ-MOS 区域空气质量统计修正模型预报途径研究[J]. 中国科学:D 辑,2006,35(A01):131 - 144.

[8] XU W Y,ZHAO C S,RAN L,et al. A new approach to estimate pollutant emissions based on trajectory modeling and its application in the North China Plain[J]. Atmospheric Environment,2013(71):75 - 83.

[9] JIANG Z,JONES D,KOPACZ M,et al. Quantifying the impact of model errors on top - down estimates of carbon monoxide emissions using satellite observations[J]. Journal of Geophysical Research:Atmospheres (1984 - 2012),2011,116(D15).

[10] WANG X,LIANG X Z,JIANG W,et al. WRF-Chem simulation of East Asian air quality:Sensitivity to temporal and vertical emissions distributions[J]. Atmospheric Environment,2010,44(5):660 - 669.

[11] KLEEMAN M J,CASS G R,ELDERING A. Modeling the airborne particle complex as a source-oriented external mixture[J]. Journal of Geophysical Research, 1997, 102 (D17): 21355 - 21372.

[12] 吴成来,林朝晖. WRF-Chem 模式中两种起沙参数化方案对东亚地区一次强沙尘暴过程模拟的影响[J]. 气候与环境研究,2014,19(4):419 - 436.

[13] ZAVERI R A,EASTER R C,FAST J D,et al. Model for simulating aerosol interactions and chemistry (MOSAIC)[J]. Journal of Geophysical Research,2008,113(D13):D13204.

[14] BINKOWSKI F S,ROSELLE S J. Models - 3 Community Multiscale Air Quality (CMAQ) model aerosol component 1. Model description[J]. Journal of Geophysical Research:Atmospheres (1984 - 2012),2003,108(D6).

[15] EASTER R C,GHAN S J,ZHANG Y,et al. MIRAGE:Model description and evaluation of aerosols and trace gases[J]. Journal of Geophysical Research:Atmospheres (1984 - 2012),2004,109(D20).

[16] WILSON J,CUVELIER C,RAES F. A modeling study of global mixed aerosol fields[J]. Journal of Geophysical Research:Atmospheres (1984 - 2012),2001,106(D24):34081 - 34108.

[17] WRIGHT D L,KASIBHATLA P S,MCGRAW R,et al. Description and evaluation of a six - moment aerosol microphysical module for use in atmospheric chemical transport models[J]. Journal of Geophysical Research:Atmospheres (1984 - 2012),2001,106(D17):20275 - 20291.

[18] MCGRAW R,WRIGHT D L. Chemically resolved aerosol dynamics for internal mixtures by the quadrature method of moments[J]. Journal of Aerosol Science,2003,34(2):189 - 209.

[19] GONG S L,BARRIE L A,BLANCHET J P,et al. Canadian Aerosol Module:A size - segregated simulation of atmospheric aerosol processes for climate and air quality models 1. Module development[J]. Journal of Geophysical Research:Atmospheres (1984 - 2012),2003,108(D1):AAC 3 - 1 - AAC 3 - 16.

[20] ARIMOTO R,RAY B J,LEWIS N F,et al. Mass - particle size distributions of atmospheric dust and the dry deposition of dust to the remote ocean[J]. Journal of Geophysical Research:Atmospheres (1984 - 2012),1997,102(D13):15867 - 15874.

[21] GONG W,STROUD C,ZHANG L. Cloud processing of gases and

aerosols in air quality modeling[J]. Atmosphere,2011,2(4):567 - 616.

[22] JACOBSON M Z. Development and application of a new air pollution modeling system-Ⅱ. Aerosol module structure and design [J]. Atmospheric Environment,1997,31(2):131 - 144.

[23] 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 (1984 - 2012),1989,94(D10):12925 - 12956.

[24] ZAVERI R A,PETERS L K. A new lumped structure photochemical mechanism for large - scale applications[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984 - 2012),1999,104(D23):30387 - 30415.

[25] GRELL G A,PECKHAM S E,SCHMITZ R,et al. Fully coupled "online" chemistry within the WRF model[J]. Atmospheric Environment,2005,39(37):6957 - 6975.

[26] BAKLANOV A,MAHURA A,SOKHI R. Integrated systems of meso-meteorological and chemical transport models[M]. Springer,2011.

[27] STOCKWELL W R,LAWSON C V,SAUNDERS E,et al. A review of tropospheric atmospheric chemistry and gas-phase chemical mechanisms for air quality modeling[J]. Atmosphere,2011,3(1):1 - 32.

[28] 程兴宏.空气质量模式"源同化"模型及排放源影响效应研究[D].北京:中国科学院研究生院、中国气象科学研究院,2008.

[29] LI Z,ZANG Z,LI Q B,et al. A three-dimensional variational data assimilation system for multiple aerosol species with WRF-Chem and an application to $PM_{2.5}$ prediction[J]. Atmospheric Chemistry and Physics,2013,13(8):4265 - 4278.

[30] 张碧辉,刘树华,马雁军.MYJ 和 YSU 方案对 WRF 边界层气象要素模拟的影响[J].地球物理学报,2012,55(7):2239 - 2248.

栏目编辑　李文峻

·时讯快递·

# 中国环境与发展国际合作委员会 2014 年年会圆满闭幕

为期 3 天的中国环境与发展国际合作委员会(以下简称"国合会")2014 年年会在完成各项议题后于今日圆满闭幕。环境保护部部长、国合会中方执行副主席周生贤出席闭幕式并作总结讲话。

今年《中国绿色转型进程评估与展望》研究报告,深入分析了经济发展与环境保护的关系,研究了如何利用经济政策和经济手段来推动绿色转型、解决环境问题的思路和对策,强调从根本上解决环境问题,必须在调整经济结构上求突破,在转变生产方式上下功夫,在改进消费模式上促变革。《生态文明建设背景下的环境保护制度体系创新》研究报告,立足推进生态环境治理体系现代化这一目标,回答了解决一些重要热点问题的思路,如环境保护的社会治理、生态环境保护管理体制改革和环境管理战略转型等,对加强环境保护具有很强的现实意义。《基于生态文明理念的城镇化发展模式与制度》研究报告,针对中国城镇化面临的形势和问题,倡导绿色交通、土地集约利用、文化遗产保护、人与周边环境和谐相处。《生态保护红线制度创新》研究报告,强调划定生态保护红线并加强红线区域管理,是解决生态环境问题的重要举措,强调尽快划定保护区域,把良好生态系统保护起来。《大气污染防治行动计划绩效评估与区域协调机制》研究报告,从建立《大气十条》绩效评估指标与方法体系、"十三五"与 2030 年大气污染防治目标、强化区域大气污染防治协调机制等三方面,对加强信息共享、监测预警、执法监督、重污染天气应对等方面联动,提出了十分有益的政策建议。《政府环境审计制度》研究报告,呼吁建立完善的政府和领导环境审计制度,推动中国环境审计的规范化、法制化。

会议期间,各方形成了一系列共识:一是要紧紧围绕早日实现"蓝天常在、青山常在、绿水常在"三个常在,进一步加大《大气污染防治行动计划》的实施力度,抓紧编制实施《水污染防治行动计划》、《土壤污染防治行动计划》。二是抓住战略机遇,加快推进绿色转型。提出必须做好顶层设计,制定清晰明确的路线图和时间表,并采取有力的措施加以实施。倒逼传统产业转型升级,带动环保产业发展,培育新的经济增长点,实现环境保护与经济发展的协调融合、互利共赢。三是加快提升环境治理能力,不断丰富完善生态文明和环境保护的四梁八柱。要充分发挥市场机制在环境保护中的作用,从生产、流通、分配、消费的再生产全过程入手,制定和实施有利于环境保护的价格、税收、财政、金融等政策,创造公平的市场竞争环境。以新修订的《环境保护法》实施为龙头,开展相关法律法规的修订,建立有力保护生态环境的法律法规体系。四是积极应对新常态,深化生态环保体制改革。提出必须形成权界清晰、分工合理、权责一致、运转高效、法制保障的生态环保管理体制,建立统一监管所有污染物排放的环境保护管理制度,加强生态保护的统一规划、统一监管和严格考核,切实解决职责分散交叉、权责不一致的问题;独立进行环境监管和行政执法,切实解决环境监管权威性和独立性不够的问题;探索编制自然资源资产负债表,对领导干部实行自然资源资产离任审计,建立生态环境损害责任终身追究制,切实解决政府环保责任落实不到位的问题。

(摘自《中国环境报》)