



多功能高精度 区域空气质量预报系统研发及 示范应用

陈多宏 王自发 谢敏 郑君瑜 徐伟嘉 区宇波 © 编著



中山大学出版社
SUN YAT-SEN UNIVERSITY PRESS



多功能高精度 区域空气质量预报系统研发及 示 范 应 用

陈多宏 王自发 谢敏 郑君瑜 徐伟嘉 区宇波 © 编著



中山大學出版社
SUN YAT-SEN UNIVERSITY PRESS

• 广州 •

版权所有 翻印必究

图书在版编目 (CIP) 数据

多功能高精度区域空气质量预报系统研发及示范应用/陈多宏, 王自发, 谢敏, 郑君瑜, 徐伟嘉, 区宇波编著. —广州: 中山大学出版社, 2018. 8

ISBN 978 - 7 - 306 - 06360 - 1

I. ①多… II. ①陈… ②王… ③谢… ④郑… ⑤徐… ⑥区… III. ①环境空气质量—预报—研究—广东 IV. ①X831

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 116470 号

DUOGONGNENG GAOJINGDU QUYU KONGQIZHILIANG YUBAO XITONG YANFA JI SHIFAN YINGYONG

出 版 人: 王天琪

策划编辑: 嵇春霞

责任编辑: 王 睿

封面设计: 曾 斌

责任校对: 付 辉

责任技编: 何雅涛

出版发行: 中山大学出版社

电 话: 编辑部 020 - 84110771, 84113349, 84111997, 84110779

发行部 020 - 84111998, 84111981, 84111160

地 址: 广州市新港西路 135 号

邮 编: 510275 传 真: 020 - 84036565

网 址: <http://www.zsup.com.cn> E-mail: zdcbs@mail.sysu.edu.cn

印 刷 者: 广州家联印刷有限公司

规 格: 787mm × 1092mm 1/16 15 印张 365 千字

版次印次: 2018 年 8 月第 1 版 2018 年 8 月第 1 次印刷

定 价: 62.00 元

如发现本书因印装质量影响阅读, 请与出版社发行部联系调换

《多功能高精度区域空气质量预报系统研发及示范应用》

编写指导委员会

主 任 陈春贻

副主任 李健军 吕小明 区宇波 钟流举 王自发 郑君瑜

委 员 (以姓氏笔画为序)

白 莉 许 凡 江 明 李 阳 陈多宏 张 苒
何海敬 周国强 林燕春 柴子为 徐伟嘉 谢 敏

主 编 陈多宏 王自发 谢 敏 郑君瑜 吕小明 徐伟嘉
区宇波

编 写 (以姓氏笔画为序)

王文丁 邓光侨 邓 滢 卢志想 叶斯琪 皮冬勤
刘 建 刘 亮 许 凡 苏 彦 李红霞 吴剑斌
汪 宇 沈 劲 张稳定 陈 虹 陈焕盛 林小平
周亦凌 赵江伟 钟庄敏 钟英立 晏平仲 殷晓鸿
唐 晓 黄建彰 黄奕维 康 明 嵇 萍 曾建伟
蔡日东 裴成磊 潘月云

内 容 简 介

本书基于广东省区域和城市的空气质量预报业务工作实践，提出了多功能高精度区域空气质量预报系统的集成与应用框架，阐述了区域大气污染物排放源清单及其动态管理系统、区域空气质量多模式集合数值预报技术、城市空气质量统计预报技术、区域空气质量预报产品服务系统等的研发和建设；同时，介绍了广东省大气污染案例库、基于大气污染源清单和数值模型的大气污染源解析技术方法及应用，以及空气质量预报业务与会商合作机制等内容。本书是广东省空气质量预测预报技术工作的系统总结，较全面地介绍了研究背景、研究过程、主要研究成果及其应用实践，旨在为我国区域性空气质量业务化预报与信息发布等工作提供技术借鉴和参考。

前 言

近年来,区域性大气污染尤其是城市空气污染备受公众关注,国家和广东省政府也相继出台了《大气污染防治行动计划》和《广东省大气污染防治行动方案(2014—2017年)》等一系列重要文件,要求进一步加强大气污染防治工作,确保空气质量改善目标顺利完成。大气污染的严峻形势及其区域联防联控对区域空气质量监测与预报预警提出了前所未有的技术要求。为更好地反映大气环境污染变化趋势,为环境管理决策提供及时、准确、全面的环境质量信息,有效应对大气污染事件,广东省环境监测中心开展了以预报业务为核心,以服务公众和相关环境管理部门为目的,以建设空气质量预报预警技术体系为主线的系统性研究工作,本书是对上述工作的梳理和系统总结,将为相关技术人员和研究学者提供参考。

本书由陈多宏、区宇波等策划并提出总体构思,他们设计了篇章结构,确定了各章节的重点内容及内在逻辑关系,并对全书的质量进行把关。谢敏、沈劲和叶斯琪负责全书的统稿以及内容和质量审查。该书分为上、下两编,上编内容为系统研发与集成,主要介绍空气质量预报业务发展历程及发展趋势、多功能高精度区域空气质量预报系统的建设思路及各组成部分的建设过程;下编内容为系统示范应用,主要围绕业务机制建设和系统示范应用展开详细讨论。各部分内容和主要撰写人员分别为:第1章概述,由陈多宏、沈劲撰写;第2章系统建设思路,由区宇波、谢敏撰写;第3章区域大气排放源清单的建立,由郑君瑜、叶斯琪撰写;第4章区域空气质量多模式集合数值预报系统集成,由王自发、沈劲撰写;第5章城市空气质量统计预报系统集成,由汪宇、邓滢撰写;第6章区域空气质量预报产品服务系统建设,由谢敏、李红霞撰写;第7章区域空气质量预报视频会商系统建设,由曾建伟撰写;第8章区域空气质量预报业务平台总体集成,由谢敏、徐伟嘉撰写;第9章区域空气质量预报业务机制与体系,由潘月云、谢敏、许凡撰写;第10章空气质量预报评价技术方法,由叶斯琪、嵇萍撰写;第11章区域颗粒物与臭氧污染预报方法,由汪宇、沈劲撰写;第12章广东省区域大气典型污染过程案例库建设及应用,由潘月云、周亦凌、嵇萍撰写;第13章基于源清单的来源解析方法及应用,由叶斯琪、殷晓鸿撰写;第14章基于数值模型来源解析方法及应用,由沈劲撰写;第15章定量解析气象与污染源变化对空气质量影响的方法研究及应用,由沈劲撰写;第16章减排情景设计与空气质量改善成效评估,由汪宇撰写;第17章总

结与展望，由陈多宏撰写。

本书的相关研究工作和出版得到了广东省环境保护厅、广东省各市环境监测（中心）站等单位的支持，在此表示衷心感谢！本书出版得到国家科技支撑计划项目“珠三角区域大气污染联防联控支撑技术研发与应用（2014BAC21B00）”、广东省空气质量预报预警系统建设等相关项目经费资助。由于我们知识水平和实际经验的局限性，错误和不足之处在所难免，敬请广大读者和同行专家批评指正！

编著者

2017年9月于广州

目 录

上编 系统研发与集成	1
第1章 概述	3
1.1 相关政策法规	3
1.2 区域空气质量预报技术发展历程	4
1.3 存在问题及发展趋势	5
第2章 系统建设思路	8
2.1 系统建设目标	8
2.2 技术路线	8
2.3 建设与应用思路	9
第3章 区域大气排放源清单的建立	11
3.1 区域大气排放源清单建立发展历程	11
3.2 区域大气排放源清单建立方法	14
3.3 区域排放源清单质量保证/质量控制与不确定性分析	17
3.4 区域排放源清单模式化处理	21
3.5 排放源清单管理与动态更新	24
第4章 区域空气质量多模式集合数值预报系统集成	28
4.1 数值预报模型的发展历程	28
4.2 数值预报模型的软硬件支撑	30
4.3 多模式集合数值预报模型架构	31
4.4 数值预报模型主要参数与设置	37
4.5 模式系统本地化定制开发	41
第5章 城市空气质量统计预报系统集成	46
5.1 统计预报模型概况	46
5.2 多元回归模型	47
5.3 BP神经网络模型	48
5.4 聚类回归模型	55
5.5 天气形势统计模型	56
5.6 统计模型的智能择优	57
第6章 区域空气质量预报产品服务系统建设	60
6.1 系统框架	60
6.2 预报产品生成	61
6.3 预报产品分发与共享服务	65

6.4	城市空气质量预报信息报送与管理	69
6.5	预报信息多渠道发布	72
第7章	区域空气质量预报视频会商系统建设	78
7.1	视频会商网规划设计	78
7.2	会商中心建设内容	79
7.3	网络测试模式	81
7.4	会商系统的联调与对接	83
第8章	区域空气质量预报业务平台总体集成	84
8.1	建设思路	84
8.2	多源多维数据及产品的集成与管理	84
8.3	多模式数值预报系统和统计预报模型集成	94
8.4	大气污染综合分析可视化	101
8.5	预报辅助工具开发	105
下编	系统示范应用	111
第9章	区域空气质量预报业务机制与体系	113
9.1	空气质量预报业务内容与规则	113
9.2	空气质量预报工作流程	114
9.3	空气质量预报信息发布	116
9.4	空气质量预报值班工作制度	120
9.5	一周空气质量预报回顾与预测制度	120
9.6	空气质量中长期回顾与预测机制	121
9.7	空气质量污染分析简报制度	121
9.8	空气质量预警业务机制	121
9.9	空气质量预报会商合作机制	123
第10章	空气质量预报评价技术方法	125
10.1	空气质量预报评价概述	125
10.2	模式预报效果评价指标及计算方法	126
10.3	人工订正预报效果评价指标及计算方法	127
10.4	广东省空气质量预报效果评价	128
第11章	区域颗粒物与臭氧污染预报方法	133
11.1	颗粒物污染的影响因素	133
11.2	颗粒物污染预报技术	133
11.3	PM _{2.5} /PM ₁₀ 预报案例	134
11.4	臭氧污染的影响因素	136
11.5	臭氧污染预报技术	136
11.6	臭氧预报案例	137

第 12 章	广东省区域大气典型污染过程案例库建设及应用	141
12.1	大气污染案例库建设思路与方法	141
12.2	广东省大气污染案例基本特点	143
12.3	典型大气污染案例分析	155
第 13 章	基于源清单的来源解析方法及应用	176
13.1	源清单来源解析技术方法概述	176
13.2	广东省 2014 年大气污染物排放总量	176
13.3	广东省 2014 年一级排放源分担率及排放贡献源占比	177
13.4	广东省 2014 年重点排放源贡献率	181
13.5	不同城市和地区 2014 年大气污染物排放源贡献率	186
13.6	主要污染源时间特征分析	188
13.7	主要污染物空间特征分析	192
第 14 章	基于数值模型的来源解析方法及应用	198
14.1	方法概述	198
14.2	颗粒物来源追踪技术原理	200
14.3	颗粒物来源识别案例分析	201
14.4	臭氧来源追踪技术原理	203
14.5	臭氧来源追踪案例分析	203
第 15 章	定量解析气象与污染源变化对空气质量影响的方法研究及应用	208
15.1	区分源排放与气象影响的方法	208
15.2	数值模型参数设置	209
15.3	各城市气象与源排放对不同污染物的影响	210
第 16 章	减排情景设计与空气质量改善成效评估	221
16.1	情景设计与成效评估方法体系	221
16.2	污染控制情景的设计	221
16.3	减排潜力分析与控制情景清单建立	223
16.4	情景模拟与空气质量改善成效评估	224
16.5	广东省秋季臭氧污染防治专项行动	225
第 17 章	总结与展望	227
17.1	区域空气质量预报系统建设进展总结	227
17.2	现阶段的主要技术瓶颈与难题	228
17.3	空气质量预报系统建设与应用展望	229

上 编

系统研发与集成



在我国环境空气 $\text{PM}_{2.5}$ 增多与臭氧污染问题日益凸显的情况下，空气质量监测以及预报预警业务的作用越来越重要。近年来，我国进一步加强了大气污染防治工作，建立健全大气污染监测预警体系。广东省环境保护部门随之开展了全面的业务能力建设，以逐步实现高精度区域空气质量预报为目标，进行了预报技术开发和业务系统建设。

目前，已建成的多功能高精度区域空气质量预报系统主要由预报业务平台、数值预报模型系统、高性能计算系统及会商中心等组成，全方位服务于珠三角区域及广东省空气质量业务化预报与信息發布工作。本编主要介绍空气质量预报业务的发展历程及发展趋势、多功能高精度区域空气质量预报系统的建设思路及各组成部分的建设过程，详见各章内容。

第1章 概 述

为更好地反映大气环境污染变化趋势，为环境管理决策提供及时、准确、全面的环境质量信息，有效应对大气重污染事件，改善区域空气质量，保障人民群众的环境权益，开展空气污染预报预警工作非常有必要。空气质量预报系统经历了多年的发展，在不少省市的环保部门得到应用或优化升级，但目前大多数预报系统在技术和集成等方面仍存在问题，各级环保部门对空气质量预报及其衍生功能仍存在很大需求。广东省环保部门在空气质量预报方面做了若干探索性工作，因此，本书总结预报系统建设与应用过程中的经验，为相关环保工作者提供空气质量预报系统的介绍，并为相关部门预报系统升级提供参考。

1.1 相关政策法规

2013年9月，国务院批准实施《大气污染防治行动计划》（国发〔2013〕37号，即“大气国十条”），要求全国各地进一步加强大气污染防治工作，改善空气质量。到2017年底，京津冀、长江三角洲（以下简称“长三角”）和珠江三角洲（以下简称“珠三角”）细颗粒物（ $PM_{2.5}$ ）年均浓度比2012年分别降低25%、20%和15%。同年，各省、自治区、直辖市与国家签订了《大气污染防治目标责任书》（环办函〔2013〕979号）。

为更好地完成国家下达的空气质量改善目标任务，广东省政府将开展大气重污染监测预警工作列入2013年“十件民生大事”，并定期进行督办。2014年，省政府颁布实施了《广东省大气污染防治行动方案（2014—2017年）》，要求完善全省大气环境监测网络和建立健全大气重污染监测预警体系，进一步加强大气污染防治工作，确保空气质量改善目标顺利完成。

在上述背景下，依据《城市大气重污染应急预案编制指南》（环办函〔2013〕504号）、《关于加强环境空气质量监测能力建设的意见》（环发〔2012〕33号）、《关于做好京津冀、长三角、珠三角重点区域空气重污染监测预警工作的通知》（环办函〔2013〕1358号）、《关于认真学习领会贯彻落实〈大气污染防治行动计划〉的通知》（环发〔2013〕103号）、《关于进一步做好重污染天气条件下空气质量监测预警工作的通知》（环办〔2013〕2号）、《关于信息安全等级保护工作的实施意见》（公通字〔2004〕66号）等国家及地方有关政策、法规、技术规范等，广东省实施了新一轮空气



质量预报预警系统的建设工作。

1.2 区域空气质量预报技术发展历程

空气质量预报是指利用各种技术与手段,对大气中的主要污染物浓度及其时空变化进行预报,从时间上可以分为趋势预报、短期预报和临近预报。预报预警系统是综合各种技术手段,以友好的方式展示预报结果、来源解析、成因分析、预警建议等的一体化和自动化平台。

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。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,建立大气污染物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(沈劲等,2015);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,建立大气污染物浓度在空气中的输送扩散数值模型,借助计算机来预测大气污染物浓度在空气中的动态分布,称之为数值预报(Eder等,2006)。统计预报方法相对简单,易于推广,尤其适用于污染源排放及环境现状资料较为欠缺的城市和地区,但该方法缺乏对真实大气变化过程及其内部机理的认识与把握,其预测结果与实际观测结果相比往往偏差较大,且该偏差较为随机,难以有针对性地加以改进。自20世纪70年代起,国外学者基于数值天气预报开始了大气化学模型的探索研究,特别是近20年来,由于计算机技术的高速发展,数学方法应用和发展较为迅速,空气质量数值模拟预报进展很快,预报模式在空间范围以及污染物种类上都显著增加,由局地发展到局地、城市和区域多种尺度,并且可以同时预报多种污染物(Otte等,2006)。空气质量预报模式是计算机技术、大气动力学理论和数学物理方法发展的产物,它可以弥补地面观测和遥感在研究内容和研究地点上的不足,目前已在全球范围内广泛使用。现阶段应用较为广泛的空气质量预报模式包括:美国的WRF-Chem、Models-3/CMAQ、CAMx;德国的EURAD;法国的CHIMERE;芬兰的SILAM;英国的“Your Air”系统和NAME;西班牙的EOAQF;瑞典的MAQS;荷兰的LOTOS-EUROS;中国的NAQPMS和GRAPES-CHAF等(沈劲,2011)。

环境空气质量预报从简单到先进、从定性到定量、从经验统计与数值模式分离到结合,逐步形成以数值模式结合统计模式的国际主流业务应用和科研发展模式。

20世纪60年代,欧美等发达国家和地区开展了空气质量预报工作,在预报臭氧、细颗粒物等空气污染物的浓度及污染物跨区传输的工作上取得了较好的效果。美国投入了大量的人力和物力开发研究大气污染数值预报模式,从20世纪80年代第二代处理单污染物质的酸沉降模式RADM(Middleton和Chang,1993)、ADOM(Venkatram等,1992)、STEM(Carmichael等,1991),到90年代末期推出的第三代基于“一个大气”理念开发设计的“Models-3/CMAQ”模式系统(沈劲等,2011),2000年后推出的包含大气污染物与气象场之间双向反馈作用的WRF-Chem模式(Zhang等,2012)。2007年,为应对日益增加的需求,美国联邦环保署空气质量管理局成立AirNOW系统团队,形成了一系列由区域-城市-地区构成的包括多种污染物的空气质量短期、中长期预报模



式(陆涛, 2011)。同期, 德国等欧盟国家和地区都成立专门的环保预报机构, 可以对多尺度、多物种环境空气质量进行 3~7 天的预报。在应用中, 第一代模式仅用于原生污染物扩散及简易反应性轨迹模拟; 第二代模式虽然可以模拟较为复杂的反应机制, 但是由于其设计分别针对光化学反应气态污染物或固态污染物, 因而其模拟结果通常仅为单一介质的浓度; 第三代空气质量模式采纳了“一个大气”的概念, 可以进行较为全面的空气污染物浓度模拟和空气质量预报研究(郭建秋, 2011; 薛文博等, 2013)。

自 2000 年开始, 中国环境监测总站组织 47 个环境保护重点城市开展了城市环境空气质量日报和预报工作, 各大空气质量业务预报部门普遍采用统计预报方法, 部分城市则基于更为先进的数值预报模式进行了探索性应用。目前, 我国相继研发出多个具有自主知识产权的空气质量预报模式, 例如, 中国科学院大气物理研究所的 NAQPMS 模式、中国气象科学研究院的 GUACE 模式、南京大学的 NJU-CAQPS 模式等。这些模式在区域和城市空气质量的模拟预报中有了一定的应用(Zhang 等, 2006)。其中, NAQPMS 模式已在北京、上海、广州、西安、沈阳等 10 多个城市实现了实时空气质量业务预报, 以 NAQPMS 模式为核心并结合国外先进模式 CMAQ、CAMx 集成构建的多模式集成预报系统(EMS)也在京津冀、长三角、珠三角地区应用并取得较好的效果, 在 2008 年北京奥运会、2010 年上海世博会、2010 年广州亚运会等重大活动的空气质量保障工作中发挥了重要的作用。然而, 由于国内污染源清单和排放数据库尚不健全, 大气污染数值预报模式起步较晚, 开展包含多种尺度、多种化学传输过程和多种污染源模式的精细大气污染数值预报业务模式还需一定的时间。

目前, 广东省空气质量预报系统主要包含预报业务平台、数值预报模型系统、高性能计算系统及视频会商中心。广东省环保部门通过提高现有高性能计算平台的计算能力和储存能力, 更新广东省大气污染物高分辨率排放源清单, 开发统计预报模型, 集成包括 NAQPMS、CMAQ 和 CAMx 等国内外主流空气质量模式的数值预报系统, 并将业务流程嵌入其中, 建成了全省空气质量预报业务平台, 全方位服务于广东省空气质量业务化预报与信息发布工作。

1.3 存在问题及发展趋势

1.3.1 存在的问题

(1) 预报准确性偏低。目前的自动化业务预报模型在预报准确性方面仍存在不足, 特别是在重污染时段, 预报模型时常低估污染的强度与影响范围。为增强预报业务能力, 需要不断积累和发展新技术, 提高预测准确性。由于空气质量模型主要是基于大气源排放清单与气象场进行预报, 因此, 应着重关注源清单与气象场的构建与模拟; 同时, 模型的物理化学过程算法也需要改进。

(2) 排放清单不完善。作为预报的基础性输入, 排放源清单目前存在较大的滞后性与不确定性, 仍需进一步细化。

(3) 污染来源追因结果难以解析。目前, 模型解析的细颗粒来源结果与基于受体



模型得到的结果存在一定的差距,对于臭氧来源常难以解析,解析结果偏离预期。由于区域来源无法通过实测的方法进行验证,因此面临着结果无法评估的问题。

(4) 会商与管理支撑有待完善。重污染时期多部门联合会商机制有待进一步完善,预报系统与管理需求的对接仍不够顺畅与紧密,预报系统在某些时候无法满足管理的需求,如预测到重污染时,不能给出措施建议。另外,预报与会商的流程机制与人才队伍建设有待进一步成熟。

1.3.2 发展趋势

(1) 提高模型预报的准确性。继续加深模型的本地化,改进模型的多种大气物理与化学过程的算法。源清单系统逐步升级为可实时动态更新的系统,进一步提升源清单的时效性。应用多维多源数据进行资料同化,提高预报的准确性。

(2) 提高预报时长。长期预报对于大气污染防治措施的制订与实施有重要意义,因此,未来数值预报也将向月度或更长时段发展。

(3) 完善与发展预报系统的辅助分析功能。目前的来源解析模块仍存在较多问题,未来有必要深入对比大气污染物化学成分的模拟或预报结果与实测结果,对比数值模型来源解析结果与基于其他观测方法的结果,不断提高模型来源解析结果的可靠性。另外,还要继续研发其他污染过程分析或决策支持工具。

(4) 制定和应用与健康相关的空气质量指标。通过研究不同疾病导致的入院率与死亡率等与空气污染物之间的量化关系,制定一个与健康挂钩的空气质量指标,明确其算法,并对其进行分级,应用于空气质量的评估。

参考文献

- [1] 郭建秋. 空气质量模式发展与应用现状 [J]. 北方环境, 2011 (7): 89-90.
- [2] 沈劲, 王雪松, 李金凤, 等. Models-3/CMAQ 和 CAMx 对珠江三角洲臭氧污染模拟的比较分析 [J]. 中国科学: 化学, 2011, 41 (11): 1750-1762.
- [3] 沈劲, 钟流举, 何芳芳, 等. 基于聚类与多元回归的空气质量预报模型开发 [J]. 环境科学与技术, 2015, 38 (2): 63-66.
- [4] 沈劲. 珠江三角洲臭氧生成敏感性与来源解析研究 [D]. 北京: 北京大学, 2011.
- [5] 薛文博, 王金南, 杨金田, 等. 国内外空气质量模型研究进展 [J]. 环境与可持续发展, 2013 (3): 14-20.
- [6] Carmichael G R, Peters L K, Saylor R D. The STEM-II regional scale acid deposition and photochemical oxidant model-I. An overview of model development and applications [J]. Atmospheric Environment, Part A. General Topics, 1991, 25 (10): 2077-2090.
- [7] Middleton P, Chang J S, Beauharnois M, et al. The role of nitrogen oxides in oxidant production as predicted by the Regional Acid Deposition Model (RADM) [J]. Water, Air, & Soil Pollution, 1993, 67 (1-2), pp133-159.
- [8] Eder B, Kang D, Mathur R, et al. An operational evaluation of the Eta-CMAQ air qual-



- ity forecast model [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, 40 (26): 4894 – 4905.
- [9] Otte T L, Pouliot G, Pleim J E, et al. Linking the Eta model with the Community Multiscale Air Quality (CMAQ) modeling system to build a national air quality forecasting system [J]. *Weather and Forecasting*, 2005, 20 (3): 367 – 384.
- [10] Venkatram A, Karamchandani P, Kuntasal G, et al. The development of the acid deposition and oxidant model (ADOM) [J]. *Environmental Pollution*, 1992, 75 (2): 189 – 198.
- [11] 陆涛. 美国 AIRNOW 空气质量动态发布技术在上海的应用 [J]. *环境监控与预警*, 2011, 3 (1): 4 – 7.
- [12] Zhang Y, Karamchandani P, Glotfelty T, et al. Development and initial application of the global-through-urban weather research and forecasting model with chemistry (GU-WRF-Chem) [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2012, 117 (D20).
- [13] Zhang Y, Smith J, Wang Z, et al. Medium-Range Air Quality Forecast during the Beijing Olympic Games [C]. San Francisco; AGU Fall Meeting Abstracts. 2008.