

北京市大气 PM<sub>2.5</sub> 监测·模拟和评估技术程念亮<sup>1,2,3</sup>, 李云婷<sup>1</sup>, 孙峰<sup>1</sup>, 张大伟<sup>1</sup>, 徐文帅<sup>1</sup>, 王欣<sup>1</sup>, 邱启鸿<sup>1</sup>, 董欣<sup>1</sup>, 孟凡<sup>2,3</sup>, 李红霞<sup>4</sup>

(1. 北京市环境保护监测中心, 大气颗粒物监测技术北京市重点实验室, 北京 100048; 2. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875; 3. 中国环境科学研究院, 北京 100012; 4. 中山大学先进技术研究院, 广东广州 510275)

**摘要** 针对北京市大气污染防治工作的突出问题和难点问题, 介绍了北京市大气二次污染物 PM<sub>2.5</sub> 监测、模拟和评估关键技术, 旨在为国内各城市环境空气质量评价、模拟评估、预报预警, 以及重污染应急、重大活动空气质量保障等重要环境管理工作提供有力的技术支持, 为管理部门提供准确、及时、全面的信息。

**关键词** 北京市; PM<sub>2.5</sub>; 重大活动; 评估体系; 预报预警

**中图分类号** S181.3 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2016)34-0085-05

Monitoring, Simulating and Evaluating Techniques of Atmospheric PM<sub>2.5</sub> in Beijing

CHENG Nian-liang<sup>1,2,3</sup>, LI Yun-ting<sup>1</sup>, SUN Feng<sup>1</sup> et al (1. Beijing Municipal Key Laboratory of Atmospheric Particulate Monitoring Technology, Beijing Municipal Environmental Monitoring Center, Beijing 100048; 2. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875; 3. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012)

**Abstract** Aiming at outstanding problems and difficult problems in the air pollution control in Beijing, the key techniques for monitoring, simulating and evaluating the secondary air pollutant PM<sub>2.5</sub> in Beijing were introduced, so as to provide powerful technical supports for evaluating, simulating and forecasting environmental air quality and ensuring air quality in heavy pollution and major activities, and to provide accurate, timely and all-round information for administrative departments in domestic cities.

**Key words** Beijing; PM<sub>2.5</sub>; Major activities; Evaluating system; Forecasting and early-warning

北京市大气环境问题历来受到国内外的高度关注。自1998年以来,北京市不断采取有力措施,开展大气污染防治工作,连续实施十多个阶段的大气污染控制计划,在首都经济社会快速发展的同时,空气质量取得了明显改善,全市主要污染物 SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、PM<sub>10</sub> 浓度较1998年显著下降,北京市大气污染问题得到了有效缓解和遏制<sup>[1-2]</sup>。但是,北京作为仍在继续发展的超大型城市,建设规模依然在扩大,人口仍在持续增加,机动车保有量经过多年的高速增长已经超过500万辆,机动车尾气、采暖、建筑工地扬尘、工业燃煤等本地污染源排放形成的复合型污染特征明显,同时还会受到邻近重工业省市的区域污染输送影响,空气污染形势依然比较严峻。

2013年国家正式实施新的环境空气质量标准(GB 3095-2012),增加了PM<sub>2.5</sub>等二次污染物,对北京市大气污染治理提出了更高的要求,也形成了更大的挑战<sup>[3]</sup>。在新的评价体系实施后,北京市空气质量特点发生相应的变化,与API评价体系相比,北京市达标(优、良)天数比例明显下降,而重污染天数比例显著上升(AQI体系中5级和6级为重污染日,API体系中4级和5级为重污染日),并且首要污染物由原先的PM<sub>10</sub>占主导转为呈现分布多样化的状态。新标准条件下,北京市多项污染物浓度超过国家标准限值,特别是二次污染物PM<sub>2.5</sub>问题突出,目前PM<sub>2.5</sub>年均浓度超标1.5倍,秋冬季重污染问题频发,全年重污染日超过40d,复合性

二次污染成为北京市大气污染的突出特征<sup>[4-5]</sup>。

在此背景下,2013年国务院印发《大气污染防治行动计划》,北京市政府发布《北京市2013—2017年清洁行动计划》和《北京市空气重污染应急预案》,以坚决有力的污染控制措施推进首都空气质量改善<sup>[6-7]</sup>。笔者针对北京市大气污染防治工作中的突出问题和难点问题,重点介绍了近年来北京市大气二次污染物PM<sub>2.5</sub>的支撑技术,旨在为国内各城市环境空气质量评价、模拟评估、预报预警,以及重污染应急、重大活动空气质量保障等重要环境管理工作提供有力的技术支持,为管理部门提供准确、及时、全面的信息。

1 PM<sub>2.5</sub> 监测及特征分析

为了全面提升基于AQI评价技术标准的空气质量预报技术水平,北京市环保监测中心在地面常规监测网络的基础上,在不同海拔高度的山区建立了垂直方向梯度监测站;在常规6项污染物的监测网络基础上,构建了以PM<sub>2.5</sub>组分在线观测、PM<sub>2.5</sub>实时源解析、空间观测(光学)为主体的三维立体观测网络(图1);利用PM<sub>2.5</sub>水溶性离子组分在线分析仪、PM<sub>2.5</sub>有机碳/无机碳分析仪等基于化学分析方法的在线设备实现对PM<sub>2.5</sub>组分在线观测;利用基于质谱方法的单颗粒飞行时间质谱仪实现对PM<sub>2.5</sub>实时成分分析及来源解析;利用微脉冲激光雷达、激光云高仪、温廓线雷达等基于光谱吸收、光学散射和遥感等技术为核心的测量设备开展空间观测,辅助分析评估和预报本地空气质量,分析区域间污染物传输对空气质量的相互影响,以非常规的三维立体综合观测作为地面常规监测的补充,对大气污染的生成和传输规律特性有了进一步了解。刘保献等<sup>[8]</sup>、杨懂艳等<sup>[9]</sup>、Zhao等<sup>[10]</sup>研究表明北京市PM<sub>2.5</sub>重污染期间采暖季硫酸盐离子呈暴发性增长趋势,12h内可增长10倍,非采暖季则以硝酸盐快速增长为主;从组分特征来看,二次无机离子占比超过65%,阳离

**基金项目** 环境保护公益性行业科研专项(201409005);国家科技支撑计划项目(2014BAC23B03, 2016YFC0208902);北京市委组织部优秀人才培养项目(20160002173G166);北京市团委优秀青年人才培养项目(2016-02-06)。

**作者简介** 程念亮(1987-),男,山东泰安人,工程师,博士,从事大气环境监测、模拟、预报与评估研究。

**收稿日期** 2016-10-14

子中  $\text{NH}_4^+$  最高,阴离子以  $\text{NO}_3^-$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  为主;从气象要素来看,主要表现为风速小、湿度大、正变温、负变压、逆温强等。这揭示了重污染期间近地面“静稳天气”下,北京市及邻近周边地区边界层中上部污染物跨城市输送影响超过 50%。北京地区  $\text{PM}_{2.5}$  污染问题均离不开综合减排和区域联防联控

控,且区域输送的空间尺度不局限于城市间,可扩展到城市群,仅进行京津冀区域治理不能完全满足污控需求。这些研究结果为京津冀区域联防联控工作提供了重要的科学依据,为《北京市清洁空气行动计划》重污染应对措施的制订和实施奠定了基础。

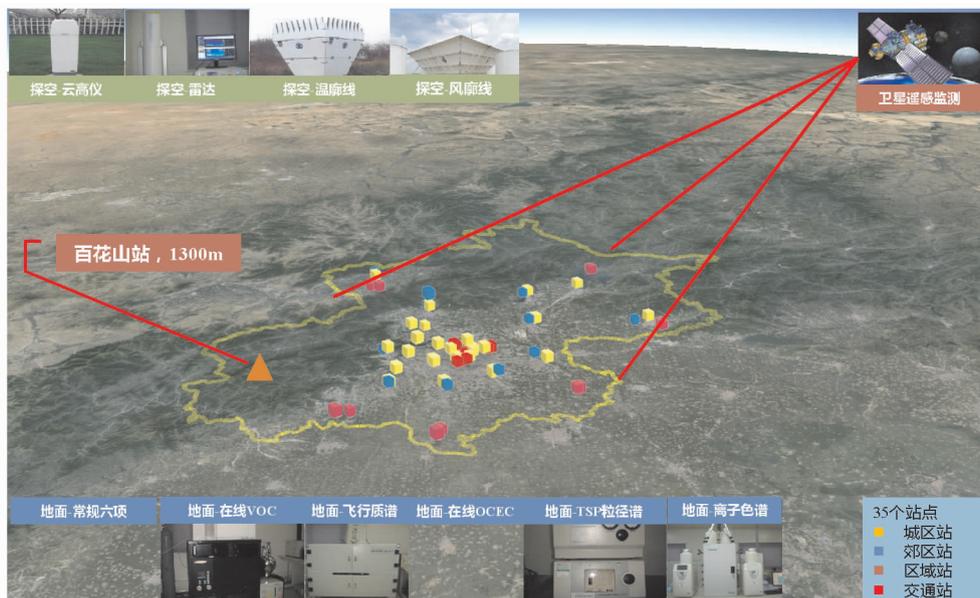


图1 北京市三维立体观测网络

Fig. 1 Three-dimensional monitoring network in Beijing

## 2 $\text{PM}_{2.5}$ 预报预测技术

与国内外大多数城市类似,北京市的空气质量预报技术体系也由统计预报模式、数值预报模式和专家诊断订正 3 个部分组成<sup>[11]</sup>。经过多年的发展,北京市的空气质量预报产品在 2013 年已经包括了对夜间和白天以及未来 3 d 的短期分区预报,并基于历史的统计信息形成了分区预报的动态系数,可每天自动生成分区的预报结果。此外,针对重大社会事件以及节假日,可提供基于气象预测资料的未来 7~10 d 空气质量的变化趋势分析。

近年来,基于多个科研项目和联合中国科学院大气物理研究所等合作单位,集合团队力量重点拓展完善二次污染物  $\text{PM}_{2.5}$  预报业务系统及性能。在统计预报方面,采用不同统计方法对多个环境监测站点的可吸入颗粒物、二氧化硫( $\text{SO}_2$ )、一氧化碳(CO)和二氧化氮( $\text{NO}_2$ )等污染物,建立 6、12、24 h 不同时段的统计模型,形成多方法、多站点、多项污染物、多时段的统计预报模型集合。在北京市的业务预报应用中,利用数据挖掘技术,通过采用相关性分析、线性回归、判别分析、分类回归树和时间序列分析等多种统计分析技术及方法,建立针对不同预报要求的各种统计预报模型,并开展了  $\text{PM}_{10}$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{SO}_2$  等多项污染物的浓度或级别预报。在数值预报方面,充分考虑当前国际上广泛应用的中尺度气象模式、空气质量模式以及排放源处理模型,同时结合北京市空气污染特点,选用中国科学院大气物理研究所自主开发的 NAQPMS 模式,美国 EPA 的 CMAQ 模式,美国 Environ 公司在城市大气化学中广泛应用的 CAMx 模式等作为空气质量

数值预报体系的核心模式,并采用统一的气象模式作为污染的驱动场,采用统一的排放源处理过程。

在重污染研判技术方面,基于大数据和认知学习的区域重污染过程判别预报方法体系,基于深度学习算法、相关反馈算法等自动识别京津冀地区及周边地区的重污染过程,并对重污染过程原因进行分析,包括过程内因分析、气象条件分析和传输分析。具体分析要素包括异动组分、逆温、湿度、风速、气压场形势、传输路径等。能快速识别相似案例并形成预报结果,形成基于大数据分析和精准化模式的区域重污染过程预测研判技术及业务化平台。

此外,还建立了重污染和重大活动保障期间视频会商平台,极大地降低了预报的不确定性,支持了重污染应急工作,特别是北京市 2015 年启动的 2 次空气重污染红色预警。红色预警期间,北京市委书记郭金龙、市长王安顺、环保部科技司罗毅司长等在监测中心会商大厅调研空气质量保障和重污染应急等工作情况。领导高度重视,技术人员以科学的态度做好研判;通过视频会商将区域内环保技术人员动员起来,共同打好大气污染防治攻坚战。同时,也间接深化了区域大气污染联防联控,加强对重污染精细化预警预报研究,增强了人民对大气污染防治的信心。

综上所述,北京市监测中心集成数值、统计、判别预报技术,创新性建立空气质量预报预警体系,引领和促进了全国空气质量预报预警工作。同时,北京市成为国内首个发布 AQI 标准下空气质量预报信息的城市,为全国空气质量预报预警体系建设起到引领示范作用,并被国际重点城市借鉴吸

收,同时还向亚洲其他城市推广<sup>[12-15]</sup>。

### 3 PM<sub>2.5</sub> 评估分析技术

重大活动的空气质量保障是北京市乃至周边省(市、自治区)政府一项常态化的工作任务。开展减排措施、气象条件后分析及评估研究是国内外急需研究和关注的问题,为保障国际重大活动期间空气质量所采取的临时性减排措施较为罕见,不可重复,且为评估减排措施对空气质量改善及评估工作提供了难得的机会<sup>[16-17]</sup>。分析重大活动期间北京市及周边地区保障措施的实施后各项大气污染物浓度特征,相对客观准确地评估保障措施与污染物排放规模下降、污染排

放量削减、空气质量改善之间的内在定性定量关系是重点和难点所在。同时,建立规范的空气质量综合观测组织体系和科学的措施效果评估方法体系,能够为环境管理部门的官方权威发布提供准确的评估结果和丰富的数据支撑<sup>[18]</sup>。一方面,服务于环境管理,为保障措施的总体效果提供评估结论和数据支撑,并将结果及时向媒体和公众发布;另一方面,可为“十三五”期间北京市大气污染的控制措施及下一阶段清洁空气行动计划的制订提供技术支撑。笔者以 2015 年“抗战胜利 70 周年阅兵”空气质量保障为例,阐述重大活动期间北京市空气质量分析的技术体系(图 2)。

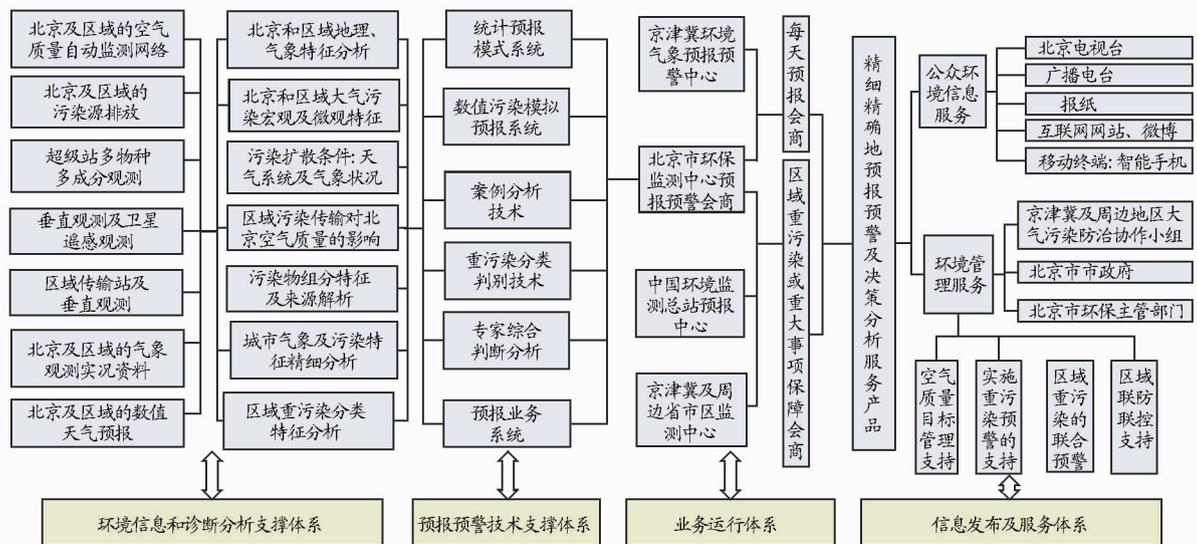


图 2 北京市空气质量预报技术体系

Fig. 2 The framework of air quality forecasting platform in Beijing

采用大数据的观测评估和先进的模型评估相结合,基于地面观测网络、综合实验室、遥感监测、垂直观测等三维监测手段,获取高时空分辨率的观测数据,采用同比、环比、空间差异分析和过程分析等方法评估环境空气质量状况和变化响应;应用源清单、数值模拟、化学质量平衡、动态源解析等多种源解析方法,确定污染物减排量、各源类的贡献,综合分析减排措施与空气质量变化之间的关系。评估大气污染物包括重点污染物(PM<sub>2.5</sub>、O<sub>3</sub>)、其他常规污染物(SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub>、PM<sub>10</sub>和CO)以及研究性监测污染物(VOCs、NH<sub>3</sub>)等。评估空间范围重点是北京市区,其次周边区域,包括京津冀和周边 7 省区。评估的时间段划分为“保障前”“保障期间”和“保障后”。2015 年“抗战胜利 70 周年阅兵”期间北京市空气质量保障技术路线如图 3 所示。

2015 年 8 月 20 日至 9 月 3 日,北京市细颗粒物(PM<sub>2.5</sub>)平均浓度为 17.8 μg/m<sup>3</sup>,同比下降 73.2%,连续 15 d 达到一级优水平,相当于世界发达国家大城市水平。若不采取保障措施,PM<sub>2.5</sub>浓度比实际浓度将增加约 70%;津冀晋蒙鲁豫等周边省区市空气质量同步明显改善,70 个地级以上城市的 PM<sub>2.5</sub>平均浓度同比下降 40% 左右。“阅兵”期间空气质量保障措施实现的污染物减排比例及环境污染物浓度改善比例略高于 2015 年 APEC 会议空气质量保障方案<sup>[6-7,19-20]</sup>(图

4)。

北京市重大活动空气质量保障技术及其成功经验,为北京连续实现“APEC 蓝”“田径蓝”“阅兵蓝”提供了关键、翔实的科学技术支撑,相关方法也在其他城市承办国家级重大活动保障中得到普遍推广应用。

北京市环境保护监测中心及相关技术团队建立了以大气环境信息综合诊断分析技术、重污染案例分析及判别预报技术、空气质量动态统计预报模型系统、多模式集合数值模拟及预报系统为核心的空气质量预报预警技术方法体系,能够及时有效地提供空气重污染预报预警信息,对北京市近几年发生的重污染过程均能做到及时发现与有效识别,全年重污染应急预警启动日次对重污染日的覆盖率超过 85%,对北京市空气重污染应急工作的开展发挥了重要的技术支撑作用。在项目成果的支持下,北京市在全国率先多次提前发布空气重污染预警并取得成功,在空气质量实况仍为“优良”的状况下,提前 24~72 h 启动预警并实施污染控制。特别是 2015 年北京市实施了 2 次空气重污染红色预警,发布空气重污染红色预警技术难度大,实施风险高,成功预报预警并支持了政府管理部门启动区域应急减排,有效减缓了污染积累。研究表明,与不采取应急措施相比,实施红色应急措施后环境 PM<sub>2.5</sub>浓度下降了 20%~25%<sup>[21-22]</sup>。北京市首发空气重污染红色预警被评为 2015 年中国环保十大事件之一,

项目技术成果与环境管理密切结合,社会效益和环境效益显著,为北京市重污染应急及大气污染防治工作的改进完善做出了突出贡献。

服务首都核心功能定位,圆满完成重大活动保障,实现“APEC蓝”和“阅兵蓝”,树立了全社会对实现“北京蓝”常态化的信心。在不利气象条件下,科学指导启动最高级别强化

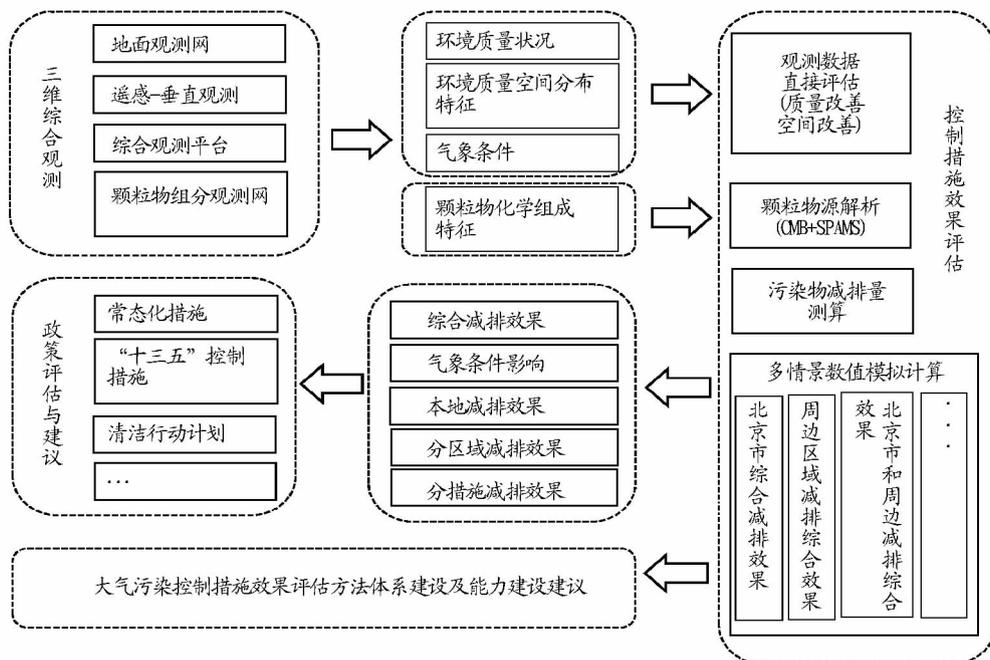
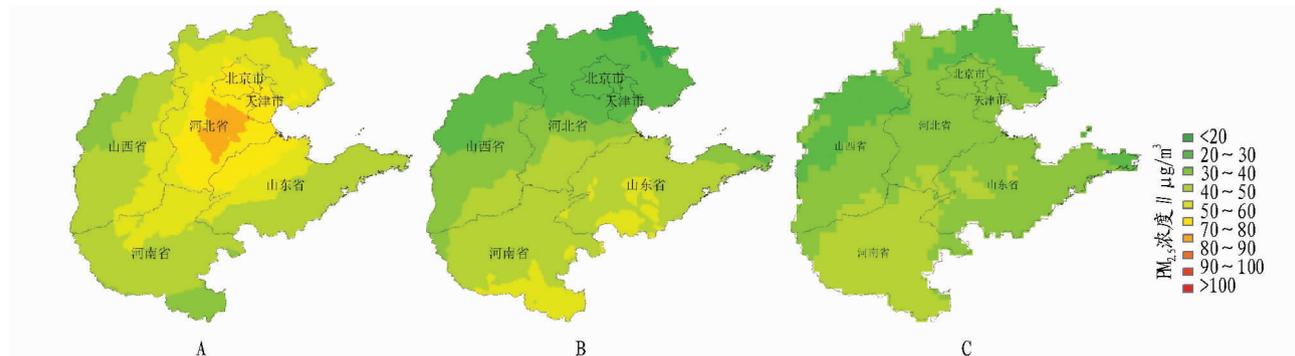


图3 2015年“抗战胜利70周年阅兵”期间北京市空气质量评估技术路线

Fig. 3 The technical route of air quality assessment during the military parade on September 3<sup>rd</sup> of 2015 for commemorating 70th anniversary of China's victory in World War II



注:A.空气质量保障前;B.空气质量保障期间;C.空气质量保障后。

Note: A. Before ensuring air quality; B. During the period for ensuring air quality; C. After ensuring air quality.

图4 2015年“抗战胜利70周年阅兵”前后北京市及周边地区 $PM_{2.5}$ 浓度的空间变化

Fig. 4 The spatial changes of  $PM_{2.5}$  concentrations in Beijing and its surrounding areas before and after the military parade on September 3<sup>rd</sup> of 2015 for commemorating 70th anniversary of China's victory in World War II

减排措施,明确时间节点、应急区域、控制行业和减排物种,为重大活动的成功举办做出了突出贡献。通过模拟评估改善效果,科学论证“人努力”是保障成功的主要因素,进一步增强了全社会早日实现“北京蓝”常态化的信心<sup>[23-24]</sup>。多渠道发布空气质量预报信息,为公众规避重污染和健康出行提供服务,促进全社会环境保护意识的提升。始终坚持成果面向公众的及时发布和宣传,向社会公布 $PM_{2.5}$ 的监测及预报结果,第一时间全面发布到网络和手机等平台,立即引起了全社会的高度关注。通过北京城市电视平台,空气质量实时信息和未来3d预报信息在全市7500个楼宇电视和7块户

外大屏每天发布26次。通过北京交通广播、北京卫视、微博、微信、现场讲解等渠道,更广泛地开展环保宣传、环境资讯发布、环保知识科普等工作。自2013年以来,监测中心微博粉丝83万,累积博文6152条。特别是重污染应急期间,点击率激增,成为公众健康出行的重要依据,为及时采取临时减排措施减缓污染程度,指导公众规避空气重污染对健康的影响等发挥了积极作用。累计接待公众参观47批1151人,媒体采访294批942人,各地区交流调研151批1765人,其中接待习近平总书记、张高丽副总理、郭金龙书记调研组,全国人大副委员长沈跃跃率领的全国人大环资委调研组,中

组部挂职干部,韩国京畿道政府环境考察团,意大利环境、国土和海洋部可持续发展、环境损害欧盟和国际事务司司长一行,韩国 KBS 专题片栏目组等机构团体调研参观 63 批次,523 人次<sup>[25-26]</sup>。研究注重环境保护宣传,提高了公民环保意识;获得广泛关注,取得了良好的社会效益和环境效益。

#### 4 结论

(1)北京市环保监测中心集成数值、统计、判别预报技术,创新性建立空气质量预报预警体系,在全国率先开展新空气质量标准的业务预报和信息发布,提高了空气质量以及重污染过程的模拟性能,综合预报级别准确率超过了 80%。

(2)首次集成建立了包含会前方案可行性研判、会期综合预报预警、会后快速综合评价的重大活动空气质量保障技术。圆满完成各类重大活动保障,实现了“APEC 蓝”“田径蓝”和“阅兵蓝”,增强了全社会对于早日实现常态化“北京蓝”的信心。

(3)全方位多渠道发布空气质量预报信息,为公众规避重污染和健康出行提供服务,促进全社会环境保护意识的提升,取得了良好的社会效益和环境效益。

#### 参考文献

- [1] CHAN C K, YAO X H. Air pollution in mega cities in China[J]. Atmospheric environment, 2008, 42(1): 1-42.
- [2] VINGARZAN R. A review of surface ozone background levels and trends[J]. Atmospheric environment, 2004, 38(21): 3431-3442.
- [3] 中华人民共和国环境保护部. 环境空气质量标准(试行)[S]. 北京:中国环境科学出版社, 2012.
- [4] 程念亮, 李云婷, 张大伟, 等. 2013 年 1 月北京市一次空气重污染成因分析[J]. 环境科学, 2015, 36(4): 1154-1162.
- [5] 程念亮, 李云婷, 张大伟, 等. 2014 年 10 月北京市 4 次典型空气重污染过程成因分析[J]. 环境科学研究, 2015, 28(2): 163-170.
- [6] 北京市环境保护监测中心. 2015 年两大活动期间空气质量保障效果综合评估报告[R]. 北京:北京市环境保护监测中心, 2015.
- [7] 北京市环境保护监测中心. APEC 空气质量保障环境空气质量改善效果评估报告[R]. 北京:北京市环境保护局, 2014.
- [8] 刘保献, 张大伟, 陈添, 等. 北京市 PM<sub>2.5</sub> 主要化学组分浓度水平研究与

- 特征分析[J]. 环境科学学报, 2015, 35(12): 4053-4060.
- [9] 杨懂艳, 刘保献, 张大伟, 等. 2014 年 APEC 前后北京城区 PM<sub>2.5</sub> 中水溶性离子特征分析[J]. 环境科学, 2015, 36(12): 4325-4330.
- [10] ZHAO P S, ZHANG X L, XU X L, et al. Long-term visibility trends and characteristics in the region of Beijing, Tianjin, and Hebei, China [J]. Atmospheric research, 2011, 101(3): 711-718.
- [11] 程念亮, 李云婷, 孙峰, 等. 北京市空气重污染天气类型分析及预报方法简介[J]. 环境科学与技术, 2015, 38(5): 189-194.
- [12] 程念亮, 张大伟, 陈添, 等. 2015 年北京市两次红色预警期间 PM<sub>2.5</sub> 浓度特征[J]. 环境科学, 2016, 37(7): 2409-2418.
- [13] 程念亮, 李云婷, 张大伟, 等. 2014 年 APEC 期间北京市空气质量改善分析[J]. 环境科学, 2016, 37(1): 66-73.
- [14] 程念亮, 李军杰, 李云婷, 等. 基于 matlab 北京市 PM<sub>2.5</sub> 动态分区统计预报模型的开发[J]. 环境工程学报, 2015, 9(10): 4965-1970.
- [15] COGLIANI E. Air pollution forecast in cities by an air pollution index highly correlated with meteorological variables[J]. Atmospheric environment, 2001, 35(16): 2871-2877.
- [16] LEE B K, JUN N Y, LEE H K, et al. Analysis of impacts on urban air quality by restricting the operation of passenger vehicles during Asian Game events in Busan, Korea [J]. Atmospheric environment, 2005, 39(12): 2323-2338.
- [17] BEIG G, CHATE D M, GHUDE S D, et al. Quantifying the effect of air quality control measures during the 2010 Commonwealth Games at Delhi, India [J]. Atmospheric environment, 2013, 80: 455-463.
- [18] WANG T, XIE S D. Assessment of traffic-related air pollution in the urban streets before and during the 2008 Beijing Olympic Games traffic control period[J]. Atmospheric environment, 2009, 43(35): 5682-5690.
- [19] 国家环境保护部. APEC 会议空气质量保障方案(试行)[Z]. 北京:北京市环境科学出版社, 2014.
- [20] 国家环境保护部. 大阅兵空气质量保障方案(试行)[Z]. 北京:北京市环境科学出版社, 2015.
- [21] 程念亮, 张大伟, 李云婷, 等. 2000~2014 年北京市 SO<sub>2</sub> 时空分布及一次污染过程分析[J]. 环境科学, 2015, 36(11): 3961-3970.
- [22] 李云婷, 程念亮, 张大伟, 等. 2013 年北京市不同方位 PM<sub>2.5</sub> 背景浓度研究[J]. 环境科学, 2015, 36(12): 4331-4340.
- [23] 程念亮, 李云婷, 张大伟, 等. 2013 年北京市细颗粒物时空分布特征研究[J]. 环境工程, 2015, 33(10): 43-46.
- [24] 程念亮, 陈添, 张大伟, 等. 2015 年春节北京市空气质量分析[J]. 环境科学, 2015, 36(9): 3150-3158.
- [25] 程念亮, 李云婷, 张大伟, 等. 2014 年北京市城区臭氧超标日浓度特征及与气象条件的关系[J]. 环境科学, 2016, 37(6): 2041-2051.
- [26] 程念亮, 李云婷, 张大伟, 等. 2013~2014 年北京市 NO<sub>2</sub> 时空分布研究[J]. 中国环境科学, 2016, 36(1): 18-26.

(上接第 84 页)

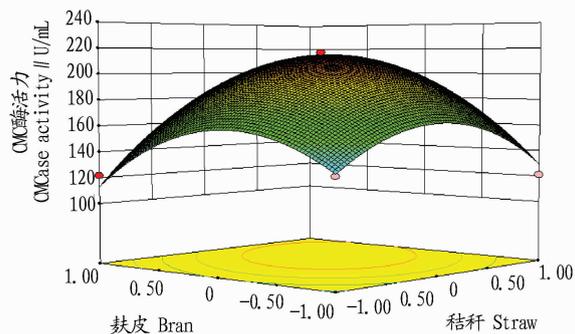


图 7 秸秆和麸皮交互作用的响应面

Fig. 7 Response surface of interaction between straw and bran

酶活力的预测值为 229.68 U/mL。验证试验表明, CMC 酶活力为 229.14 U/mL, 相对误差为 2.364%, 表明利用该优化方法得到的产纤维素酶培养基配方可靠。

#### 3 结论与讨论

(1) 该试验富集培养的 18 组菌系以玉米秸秆为限制性

因素驯化至 18 代, 筛选出 4 组 CMC 酶活力较高的菌系。结果表明, CMC 酶活力随着驯化代次的增加而逐渐提高, 10 代以上趋于稳定, 18 代时菌系 16 的 CMC 酶活力最高, 达 82.40 U/mL。

(2) 采用响应面优化结果确定最佳碳源、氮源配比为秸秆 12.21 g/L, 麸皮 14.53 g/L, 豆粕 12.97 g/L, 酶活验证值为 229.14 U/mL, 与预测值的相对误差为 2.364%, 表明试验可靠。各因素对 CMC 酶活力的影响从大到小依次为豆粕、秸秆、麸皮, 且秸秆与麸皮交互项对 CMC 酶活力的影响最为显著。

#### 参考文献

- [1] 左旭, 王红彦, 王亚静, 等. 中国玉米秸秆资源量估算及其自然适宜性评价[J]. 中国农业资源与区划, 2015, 36(6): 5-10, 29.
- [2] 迟德龙, 刘波. 谈黑龙江玉米秸秆综合利用[J]. 农机使用与维修, 2015(7): 27-28.
- [3] 周俊强, 邱忠平, 韩云平, 等. 纤维素降解菌的筛选及其产酶特性[J]. 环境工程学报, 2010, 4(3): 705-708.
- [4] 徐海, 钱卫, 朱明田, 等. 酸水解麸皮对斜卧青霉菌产纤维素酶的影响[J]. 食品与发酵工业, 1997(1): 15-17.