

城市环境 PM_{2.5} 空间分布监测方法研究进展

丁冰, 陈健*, 王彬, 伊力塔

(浙江农林大学 亚热带森林培育国家重点实验室培育基地 浙江 临安 311300)

摘要: 随着城市化和工业化的发展,城市环境中日益增多的 PM_{2.5} 对人类健康造成了严重威胁。本文旨在分析总结目前 PM_{2.5} 空间分布的相关监测方法以及空气质量预测模型。当下, PM_{2.5} 浓度的监测不仅涉及大气化学、污染物的源解析、大气化学运输模型、线性及非线性空气质量模拟等方面,还涉及地理信息系统与卫星遥感等新技术的运用。本文在比较传统 PM_{2.5} 监测与新型监测方法不同的基础上,分析了各自的优劣,为空气质量监测提供建议和指导。

关键词: PM_{2.5}; 空间分布; 健康; 监测

中图分类号: X513 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9250(2016)01-0130-09 **doi:** 10.14050/j.cnki.1672-9250.2016.01.018

大气颗粒物 PM_{2.5} 是对空气中空气动力学直径小于或等于 2.5 μm 的固体颗粒或液滴的总称,它具有来源广泛、地区特性强、化学结构复杂等特点,而且对生命健康的危害不容忽视。大量研究证明: PM_{2.5} 能随呼吸抵达细支气管壁,并干扰肺内的气体交换,对人体呼吸系统、心血管系统和生殖系统产生影响^[1-3]。自 20 世纪 90 年代以来,欧美发达国家建立了较为完善的空气质量监测网络,并一直致力于城市尺度空气质量模拟的研究与应用工作,相继建立了各自成功的应用模型系统,如丹麦的 OML 模型、芬兰的 UDM-FMI 和 CAR-FMI 系统、欧盟的 TRACT 系统等。相关监测数据表明我国目前已成为世界 PM_{2.5} 污染最严重的地区,自 2012 年来京津冀地区频繁雾霾,这一现象使 PM_{2.5} 污染得到了更广泛地关注。然而,与其他国家相比,我国对于 PM_{2.5} 的监测起步较晚,监测设备和监测方法仍有争议。2012 年 2 月,新修订的《环境空气质量标准》中,我国首次制定 PM_{2.5} 国家环境质量标准,要求 2012 年开始在京津冀、长三角、珠三角等重点区域以及直辖市和省会城市开展细颗粒物与臭氧等项目监测。直到 2013 年已在 113 个环境保护重点城市和国家环境保护模范城市开展监测,预计在 2015 年将覆盖所有地级以上城市。本文旨在综述 PM_{2.5} 的主要监

测方法的基础上重点分析不同监测方法的应用范围及优缺点,以期对区域 PM_{2.5} 的监测提供参考的同时为区域环境质量评价提供方法支持。

1 基于地基观测的 PM_{2.5} 监测方法

目前,各国环保部门广泛采用的 PM_{2.5} 监测方法主要包括三种:重量法、β 射线吸收法和微量振荡天平法。

1.1 重量法

这是一种研究比较成熟的颗粒物浓度测量方法。该方法分别通过具有一定切割特性的采样器,以恒速抽取定量体积空气,使环境空气中 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 等不同粒径的颗粒物被截留在已知质量的滤膜上,根据采样前后滤膜的重量差和采样体积,计算出 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 浓度。杨军^[4]对重量法测定大气中总悬浮颗粒物(TSP:空气中动力学直径小于 100 μm 的颗粒物)的不确定度进行了评定。为了保证检测数据的可靠、准确,一些运用重量法的实验还运用 Meta 分析(Meta 分析是一种对多个同类研究结果进行合并汇总的分析方法)等分析方法分析了一些对测量有影响的重要因素,同时也设法消除这类误差。比如:湿度会对这种测量方法产生一定影响,而用携带全程标准控制滤膜可以消除湿度

收稿日期: 2015-02-40; 改回日期: 2015-08-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(41101421, 41471442); 浙江省重点科技创新团队项目(2011R50027); 浙江省省院合作项目(2014SY16); 金华市科技局农业类重点项目(2014-2010)。

第一作者简介: 丁冰(1992-),女,硕士研究生,生态学专业。E-mail: 502023749@qq.com.

* 通讯作者: 陈健(1979-),副教授,研究方向为环境遥感、大气气溶胶和 3S 信息技术应用。E-mail: chenjian@126.com.

变化造成的称量误差。这类研究都体现了该方法的日益成熟。

1.2 β 射线吸收法

β 射线吸收法同样是一种应用较为广泛的用于监测颗粒物浓度的方法。这种方法是利用Beta射线衰减的原理进行的。环境空气由采样泵吸入采样管,经过滤膜后排出,颗粒物沉淀在滤膜上,当 β 射线通过沉积着颗粒物的滤膜时,Beta射线的能量衰减,通过对衰减量的测定便可计算出颗粒物的浓度。为了更好的提高测量的准确性,张玉钧等^[5]早在2001年就提出了 β 射线自动监测大气中PM₁₀含量的设计方案。梅建鸣^[6]则提出了消除水汽对实测结果影响,来提高对PM₁₀测量准确度的方法。

1.3 微量振荡天平法

微量振荡天平法通过振荡频率变化计算出沉积在滤膜上颗粒物的质量,再根据流量、现场环境温度和气压计算出该时段颗粒物标志的质量浓度。陆钊等^[7]设计了基于振荡天平技术的大气颗粒物PM₁₀浓度连续监测系统;还有人将振荡天平技术的大气颗粒物监测系统校准方法进行了讨论。更有学者研究了以上多种方法之间的对比^[8]。

总的来说,目前我国PM_{2.5}的监测主要以传统的地面监测为主(监测仪器大多按以上三种方法进行),此类方法的优点在于能够准确测量颗粒物的浓度及其时间变化,获取颗粒物的物理和光学特性。相关研究也较为完善,例如:解淑艳^[9]对 β 射线法和微量振荡天平法的工作原理和使用情况进行概述,给出了国内现有 β 射线法和微量振荡天平法的比对测试结果。邓芙蓉等^[10]对三种不同厂家生产的光散射原理的便携式PM_{2.5}监测仪、空气监测仪监测PM_{2.5}结果进行比较,发现不同型号的颗粒物监测仪监测结果可能会有差别。阎逢旗等^[11]、浦一芬和吴瑞霞^[12]利用光学粒子计数器、能见度仪和颗粒物质量监测器对近地面大气气溶胶粒子数密度、大气能见度、颗粒物质量浓度(PM₁₀、PM_{2.5}和PM_{1.0})等进行了联合观测实验,给出了利用粒子数密度计算PM₁₀、PM_{2.5}、PM_{1.0}和大气能见度的经验计算公式。此外,通过采样分析还可以研究污染物的化学成分^[13-14],在此基础上对颗粒物污染进行源解析^[15],为大气环境质量监测、评估提供了大量宝贵数据。

但传统监测方法在获得准确的PM_{2.5}浓度及化学组成的同时,也存在不可忽视的缺陷:地面监测需要一定仪器,这些设备价格昂贵,并存在维护困

难、操作复杂等缺点,在广大农村、小城镇、经济欠发达地区难以推广,即使在大城市中,现有的仪器数量也不多,往往以点盖面,难以准确描述城区内不同位置的颗粒物水平。因此,常规的地面监测无法满足对大区域内PM_{2.5}动态变化监测,难以对污染物来源及输送通道进行准确分析。

2009年,郭涛等^[16]采用美国TSI公司制造的DustTrak(Model 8520)测量仪器来记录监测数据。这是一种便携式直读仪器,可设定时间间隔自动记录监测数据。一定程度上弥补了自动监测站定点监测的不足。但只可适用于小范围,缺陷依旧明显。

2 基于卫星遥感的PM_{2.5}监测

与地面监测点相比,卫星遥感具有大范围获取连续、动态数据的优势,能够弥补地面监测站点空间上的不足,实现缺少地面监测站点的区域PM_{2.5}浓度监测,为大气污染的全方位立体监测提供了重要的信息来源。

实际上,利用卫星遥感估算PM_{2.5}的相关研究主要是围绕卫星遥感气溶胶光学厚度(Aerosol Optical Depth, AOD)展开的,通过林海峰等^[17]做的北京市近地层颗粒物浓度与AOD相关性分析的研究可以发现:PM_{2.5}浓度和AOD具有显著相关性。因此,通过获取AOD数据来研究地表颗粒物浓度是有意义的。现实中,人们通过建立遥感AOD数据与近地面PM_{2.5}的相关关系从而实现遥感监测PM_{2.5}时空分布的目的。建立相关性的方法主要包括两种类型:一种是利用遥感AOD数据直接与近地面PM_{2.5}建立相关性,另一种是首先对遥感AOD数据进行湿度和垂直等影响因素订正后再与近地面PM_{2.5}的建立相关性。

2.1 AOD与近地面PM_{2.5}的直接相关模型

在欧美等发达地区,由于拥有较为完善的空气质量监测网络,利用卫星AOD产品反演地面颗粒物浓度的工作已经广泛开展^[18-20]。Engle-Cox等^[21]将MODIS标准AOD与美国全境地面站点监测的PM_{2.5}进行了综合的相关分析,二者整体上的相关系数 R^2 为0.43(PM_{2.5}日均值)和0.40(PM_{2.5}小时均值)。基于二者的相关关系,他们利用MODIS AOD估算了全美的PM_{2.5}空间分布,并且与地面观测插值结果进行了大空间尺度上的比对,验证了卫星遥感估算近地面颗粒物的适用性。Wang和Christopher^[22]以美国亚拉巴马州为例,将MODIS标准

AOD 与地面 $PM_{2.5}$ 浓度进行了比较,发现 MODIS AOD 与对应的 $PM_{2.5}$ 小时均值呈线性相关,其相关系数 R 为 0.7,而二者月均值的相关系数 R 达到 0.92,不仅揭示了 MODIS 在空气污染监测方面的巨大潜力,也表明在更大的时间尺度上,卫星遥感 AOD 与近地面颗粒物浓度间具有更高的一致性。Hu 等^[23]提出了关于卫星遥感和表面气溶胶运输的新算法,这种算法可以寻找源并监测由生物质燃烧和沙尘暴产生的气溶胶的运输和演变。除此之外,Liu 等^[24]通过建立 AOD 和 $PM_{2.5}$ 回归关系模型,估算了美国东部 4 个季节的平均颗粒物排放浓度。Guttikunda 等^[25]在德里基于分辨率为 1 km 的遥感影像做了 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 等的污染物日报。还有一些学者对不同卫星传感器上获取的数据所建立的不同模型进行了分析比较,以获得更为准确的模型^[26]。然而目前国内相关方面研究相对缺乏,仅在北京、南京、珠三角和香港等地区开展了部分探索性研究。例如:Li 等^[27]在国内较早的开展了 MODIS AOD 在近地面颗粒物浓度估算方面的应用潜力研究,他们将 MODIS 10 km-AOD 与北京地区近地面 PM_{10} 浓度(由空气污染指数反推计算)进行了比对,发现二者有一定的相关性;接着,他们通过改进反演算法,使 MODIS AOD 的空间分辨率达到 1 km,并应用于香港地区大气污染监测。刘勇^[28]利用南京的空气污染指数与 MODIS AOD 产品进行比较;因此,MODIS AOD 可以作为监测 $PM_{2.5}$ 分布以及传输的有效补充手段。

2.2 考虑多种因素修正的 AOD 与近地面 $PM_{2.5}$ 的相关模型

由于气溶胶光学厚度是气溶胶消光系数从地面到大气层顶的积分,是指表征无云大气铅直气柱中颗粒物散射或吸收造成的消光程度,而近地面颗粒物浓度是经过 50℃ 烘干的干粒子质量浓度,因此 AOD 和近地面干粒子质量浓度之间存在气溶胶垂直分布和大气水汽两个影响因素,需要进行多因素修正。国外学者们对此方面的探究开展得如火如荼。Liu 等^[29]在美国东海岸和中部的两个站点,分别基于激光雷达和大气化学模式(GEOS-Chem)获取气溶胶垂直廓线对 MISR AOD 进行垂直订正,并对二者的订正效果进行了比较和评价,为这方面的工作提供了有益的借鉴。Van Donkelaar 等^[30]同样基于大气化学传输模式,分别对 MODIS 和 MISR 的 AOD 数据进行订正,并在年平均的尺度上考察了

二者与近地面 $PM_{2.5}$ 的相关关系;他们的工作表明,气溶胶消光系数的相对垂直廓线是影响 AOD 与 $PM_{2.5}$ 相关关系的最主要因素。为了使研究更加精确,学者们做出的探究远不止这些,还将各种气象因素考虑在影响 AOD 的范围之内。Pelletier 等^[31]针对 AERONET 提供的地基 AOD 和邻近站点 PM_{10} 浓度,建立 AVCM(Additive Varying Coefficient Model)模型,综合考虑风速、压力、相对湿度和大气可降水量等气象因素,使得近地面颗粒物浓度和 AOD 相关系数 R^2 由 0.27 上升为 0.76,可见诸多因素对 AOD 的影响还是存在的,通过修正可以较好的提高精确度。Choi 等^[32]利用相似的方法,在年平均和季节平均的尺度上考察了东亚地区 MODIS AOD 与近地面 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 的相关关系。

经过更多的探究,可以推断出气溶胶的垂直分布是 AOD-PM 相关关系中最主要的不确定性来源,同时若不考虑粒子的吸湿增长给消光特性带来的变化,将会给计算引入较大的误差。反之,将其赋予恰当的修正方法则可以较好的提高两者的相关性。Li 等^[33]在研究北京地区(单点)MODIS AOD 与 PM_{10} 浓度相关关系时,进行了垂直订正以及湿度订正,相关 R^2 由 0.25 上升到 0.54。何秀等^[34]和王静等^[35]利用 MODIS AOD 产品分别在北京大学站点进行 PM_{10} 监测浓度和清华园进行了 $PM_{2.5}$ 监测浓度分析,经过两年时间资料的对比分析,证实了气溶胶遥感光学厚度经过垂直和湿度影响订正后,可以应用于地面 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 的监测。同时王静等^[35]利用相对湿度和气溶胶标高等气象条件进行校正后,AOD 与 $PM_{2.5}$ 具有较高的相关性。为了获取更高的相关性,学者们不断提出新算法和估算的新方法。王子峰^[36]和郑卓云等^[37]利用改进后的反演算法反演得到高分辨率 AOD 数据(1 km×1 km),Wang 等^[38]还计算了 AOD 与 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 之间的相关性。陶金花等^[39]建立了一种基于卫星遥感 AOD 来估算近地面颗粒物浓度的新方法。该方法考虑大气边界层厚度和近地面相对湿度的区域分布变化情况,基于大气边界层模式模拟结果和卫星遥感气溶胶光学厚度进行近地面颗粒物浓度估算,和常规方法相比 R^2 有显著提高。

所以目前仍难以在 AOD 与近地面颗粒物浓度间建立一个稳定、可靠的相关模型。将气溶胶垂直分布和相对湿度影响引入相关模型,可以提高 AOD 与近地面颗粒物浓度的相关水平,但这两个因素随

空间和时间的变化很大,将点尺度的相关经验模型应用于区域尺度会导致结果的空间局限性。例如:采用地基激光雷达测得的混合层高度对AOD进行垂直订正,由于地基激光雷达站点数量有限,其监测结果难以匹配区域尺度的卫星像元,只能采取单点代替或多点内插方法近似得到区域尺度的监测结果。而星载传感器的幅宽一般都在数百至数千公里,这种尺度下的大气状况差异巨大,下垫面类型复杂,气溶胶分布随时间、地域变化很大。因此,上述方法有“以点带面”问题,导致小范围内效果较好,大区域尺度结果较差。同理,湿度订正也同样存在空间局限性问题^[39]。

3 基于模型的PM_{2.5}监测

针对利用地基或遥感方法监测或预测区域浓PM_{2.5}质量浓度空间分布特征的缺陷,许多研究者提出了通过建立模型的方法来弥补这些方法的不足。总的来说,利用模型监测或预测PM_{2.5}质量浓度空间分布特征包括两种类型:确定性模型和统计模型。

3.1 确定性模型

确定性模型,也叫大气化学传输模型(Chemical Transport Models, CTMs),其主要对大气的物理传输、化学反应过程进行模拟研究,通过与地面、航天等观测值的比较与验证,来对污染物来源进行分析,并且实现对污染物浓度的分布进行预测。复杂的化学传输模型中通常包括了不同的化学机制、化学动力学表达式、反应速度系数、化学物种数和气相反应等部分。典型的CTMs模型有:CMAQ^[40-43], GEOS-Chem^[44-45], LOTOS-EUROS^[46], MOZART^[47]等。这类模型应用的准确性基于应用的尺度和排放源的数据。与统计模型相比它们更为复杂,需要更多的计算,但并不是非常准确。正如Appel等^[48]和Manders^[49]等所发现的:CMAQ模型、LOTOS-EUROS模型等都依赖于许多独立的因素,但运用这些因素综合起来运算就会产生累计误差。减小预测过程中的误差则是部分科学家近年来所追求的,如:2004年,Yu等^[50]在美国东部运用Eta-CMAQ模型来预测PM_{2.5}浓度,预测过程中便考虑了碳气溶胶浓度、SO₄²⁻浓度等来减小误差。同样,Doraiswamy等^[51]在总结模型预测中表示:在春夏季PM_{2.5}浓度预测较低是因为低估了硫酸盐和总碳浓度造成的,而在冬季预测的PM_{2.5}浓度偏高则是由于过高估计了硫酸盐浓度而造成的。

在过去几十年中,这一模型已被应用于确定外界颗粒物的浓度^[52-53]。尽管这一模型中仍有许多不确定因素,但在北美和欧洲,部分此类模型已被应用于大气质量监测之中。例如McKeen^[54]运用ICARTT/NEAQS的数据进行大气化学运输模型研究,但是发现数据结果会产生显著的负偏差(15%~25%)和整体不相关性。2013年,李世广等^[55]利用CMAQ模型对成渝经济区PM_{2.5}浓度进行了模拟分析,获得了较好的结果,但准确性受到污染物原清单的影响。

同时,学者还发现当统计模型运用化学运输模型的数据作为参数时,模型展现出的拟合度比二者中的任一都要高^[56]。威尼斯是一个欧洲公认的高污染的城市,又由于其临近阿尔卑斯山脉、泻湖、海洋因而具有非常复杂的生态环境,Pecorari^[57]等将光化学模型应用于此处的PM_{2.5}研究,从三个具有不同排放特性的区域采集样本进行分析,探究出细颗粒物浓度与季节和气象的紧密相关性,可谓是这方面的新进展。

3.2 统计模型

卫星遥感监测受到遥感观测的固有特征、AOD反演算法、回归模型估算误差、地形、云覆盖、混合层高度、气压、相对湿度、风速、风向、温度和颗粒物化学组成等因素的影响。所以,AOD与地面颗粒物浓度之间的相关性在不同区域、不同季节、甚至同一地点不同日期之间都存在差异^[21,58]。因此,以上基于站点的研究结果很难进行区域推广。而且,这些研究大都利用传感器气溶胶光学厚度产品,其空间分辨率不高,难以满足评价区域大气颗粒物污染的需要。此外,AOD数据只能在晴空无云的天气才能获得,特别是在中国南方地区,由于阴雨天气较多,一年中能够获得AOD数据的天数有限,这就极大限制了利用AOD数据来估算地面PM_{2.5}浓度方法的应用。因此,需要寻找一种新的方法,在不受天气影响的状况下,既能充分体现PM_{2.5}的时间变化,又能描述PM_{2.5}的空间差异。

统计学方法利用多样化的技术、多种算法来建立空气质量和气象因素之间的关系。现在已有关于两者之间关系的大量研究,但针对PM_{2.5}的并不多。近年来,有的研究在利用遥感手段的基础上,考虑了气象因素对PM_{2.5}浓度的影响。如:Tian和Chen^[59]在安大略湖综合考虑遥感测量和地面气象因子(如:空气湿度、风速等)来建立模型预测和统

计每小时 $PM_{2.5}$ 浓度,发现温度和相对湿度对模型的影响很大。这么做不仅提高了二者的相关性,一定程度上还可以提高模型的分辨率。谢意^[60]在引用垂直订正和湿度订正的基础上订正之后得到的四季最优模型和全年最优模型均比直接估算模型的确定性系数有所提高,而当引入风速、气压和气温等气象因子参与 $PM_{2.5}$ 卫星遥感估算模型的构建时,所建立各季节多元回归模型的相关系数普遍提高,模型拟合与预测的精度有所提高。这种运用其他因素来完善 AOD-PM 关系的方法拓宽了我们的思路。

相关研究表明, $PM_{2.5}$ 的排放与区域交通道路状况、土地利用情况、人口情况、自然条件和气象因素等因子密切相关。可以通过对空气总悬浮颗粒物来源和分布影响的因子分析,将地表覆盖情况因子、降雨强度和风速因子建立了空气总悬浮颗粒物遥感信息模型。该模型较好的模拟了空气总悬浮颗粒物的分布,为空气总悬浮颗粒物浓度的分布研究提出一种新思路。探求 $PM_{2.5}$ 与土地利用、气象因子的关系的算法已从简单的线性发展成复杂的非线性。学者们在探究的过程中还加入了地统计学等方法。如 Akita 等^[61]运用 MW(移窗法)和 BME(贝叶斯最大熵法)的结合来建立模型,测量美国全年平均细颗粒物浓度。这一方法解决了对大尺度的估算模拟问题。

在统计模型中人工神经网络(ANN)的这一算法被广泛应用于 $PM_{2.5}$ 监测中。例如: Pérez 等^[62]以前期的区域每天 $PM_{2.5}$ 平均浓度、风速、风向及湿度作为模型输入因子,运用 ANN 模型实现了智利圣地亚哥的每小时 $PM_{2.5}$ 平均浓度的预测。Ordieres 等^[63]比较了三种典型的人工神经网络来预测 El Paso(Texas)和 Ciudad Juárez(Chihuahua)的 $PM_{2.5}$ 的日平均浓度,发现径向基函数人工神经网络(RBF-ANN)具有最短的训练时间和更稳定的预测结果。Voukantsis 等^[64]以 CO 、 NO_x 和 SO_2 作为训练因子,利用神经网络模型实现了希腊塞萨洛尼和赫尔辛基 $PM_{2.5}$ 浓度的预测,并取得了较好的预测结果。目前,我国也对人工神经网络有一定的研究,例如:王敏等^[65]在相关方面进行研究,其成果在肯定 BP 人工神经网络预测模型可用于揭示 $PM_{2.5}$ 浓度空间变异特征的同时,也证实了其相对于普通克里格插值方法在固定空间点位准确预测 $PM_{2.5}$ 浓度方面的优势。郭建平^[66]利用 2007~2008 年的 MODIS/Ter-

ra 气溶胶光学厚度产品,考虑中国东部地区 5 个大气成分站点风速、风向、温度、湿度和边界层高度等气象数据,构建后向(BP)神经网络,提出了基于 MODIS AOD 产品估算 $PM_{2.5}$ 的模型,能较好地应用于 $PM_{2.5}$ 监测。尽管人工神经网络模型可以取得较好的 $PM_{2.5}$ 浓度预测精度,但是其主要为黑箱模型,缺乏足够的理论支撑和解释,难以在区域尺度上进行任意推广和应用。

除开人工神经网络模型,回归模型也经常被用来预测空气质量。You 等^[67]将 MODIS 和 MISR 模型对西安的 $PM_{2.5}$ 状况进行了模拟比较,不仅发现 MISR、AOD 的四季整体拟合度比较好,还发现可见度和相对湿度对统计模型的拟合具有很大的影响。土地利用回归模型(Land Use Regression, LUR)利用交通道路状况、土地利用情况、人口情况、自然条件和气象因素等预测因子,可以获得较为准确的高分辨率的大气污染物浓度空间分布。Briggs 等^[68]在关于空气质量与健康的小区域变化研究中,首次应用 LUR 模型将大气污染状况空间化。目前,这一模型已经成功地应用于欧洲和北美一些城市 NO_2 、 NO_x 、 $PM_{2.5}$ 年平均浓度的估算,以及不同环境下 $PM_{2.5}$ 和 VOC_s 等背景值的估算。Ross 等^[69]在 2007 年模拟美国 San Diego 的 NO_2 浓度空间分布, R^2 达到 0.79; Rosenlund 等^[70]2008 年模拟 Rome 的 NO_2 浓度空间分布, R^2 达到 0.69。Merbitz 等^[71]甚至提出颗粒物在几十米的小范围内变化很大,尤其是在道路、建筑异质性大的地方。但这一方法在我国运用仍然较少。陈莉等^[72]成功的将这一方法运用于模拟天津市大气污染物浓度的空间分布,这一研究利用 LUR 模型模拟的天津 NO_2 浓度空间分布, R^2 达到 0.691,在考虑风向指数的情况下, R^2 达到 0.849,利用该模型模拟的天津 PM_{10} 浓度空间分布, R^2 达到 0.946,在考虑风向指数的情况下 R^2 为 0.980,可见模拟结果令人满意。Chu 等^[73]则在台湾利用土地加权回归和土地时空加权回归进行栅格计算,研究 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 分布的异质性和浓度之间的关系。自 2013 年雾霾大范围爆发之后,内地相关研究得到了较快的推进。例如:赵晨曦等^[74]也对北京地区冬春 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 污染水平时空分布及进行了探究。总结出颗粒物浓度从北部山区到南部地区逐渐递增,风速和相对湿度是影响污染物质量浓度分布的主要因素。李松等^[75]则利用相关软件技术对贵阳市 $PM_{2.5}$ 质量浓度进行探究,发现

PM_{2.5}质量浓度与主城区距离的相关系数高达-0.89,一般污染状态下,城乡PM_{2.5}质量浓度差异显著,空气质量优劣状态下的城乡差异较小。这一方法能弥补AOD因阴雨天气造成获得数据的天数有限的不足,在雨水较多的南方地区尤为适用。但是这种方法的缺陷是时间分辨率较低,进行整体分析需在前期长时间收集数据的基础上进行,所以只能用来估测较长时间范围内PM_{2.5}浓度平均值。

若把LUR模型与AOD适当结合,则可以兼顾LUR模型高空间分辨率和遥感AOD高时间分辨率的优点,从而实现PM_{2.5}浓度高时空分辨率的估测。如Liu等^[76]用AOD、气象参数和土地利用信息预测PM_{2.5}浓度,并与无AOD数据的模型进行比较,发现有AOD数据的模型准确性明显较高;Hu等^[77]在美国东南部利用相似方法测量地表PM_{2.5}浓度,同样获得准确度较高的模型。Olvera等^[78]则运用主成分分析法来优化小范围内的LUR监测模型。近期,Beckerman等^[79]针对这种多方法结合的PM_{2.5}浓度预测模型给出了自己最新的研究成果,他们的领先之处在于:(1)采用了1464个预测点数据,如此大的数据量为预测的准确性提供了保障;(2)他们最先如实导出约1200万的车流量数据用以统计,不同于先前用道路数据进行换算;(3)他们运用了BME等最新算法进行建模。此次研究建构的模型具有科学的框架结构,这使得只要根据当地情况稍加改动,模型便能运用于不同时空的预测。在国内,这方面的研究也很薄弱,仅有白志鹏团队利用

LUR模型进行了一些探讨研究,将LUR模型和遥感AOD数据结合进行PM_{2.5}浓度分布估测相关研究还未见报道^[70]。眼下,多种方法结合的PM_{2.5}浓度预测刚刚起步,技术的成熟性仍有待提高,随着各门交叉学科的竞相涌现,拥有着巨大的发展潜力。

4 研究展望

随着城市化和工业化的发展,城市大气污染现象十分普遍,在多数城市,可吸入颗粒物都是首要大气污染物。国内外学者在城市PM_{2.5}监测方面取得了较多的研究成果,但在很多方面仍然需要进一步深入研究。

从单种方法来说,可以考虑从以下几方面来改进:(1)目前用于PM_{2.5}监测的遥感数据多为MODIS气溶胶光学厚度产品,其较低空间分辨率极大限制了PM_{2.5}的预测精度,如何得到高空间和时间分辨率的气溶胶光学产品,并将其应用于区域PM_{2.5}预测有待进一步研究;(2)AOD与地面PM_{2.5}浓度之间的相关性受混合层高度、气压、相对湿度、风速、风向和温度等气象因素的影响,特别是相对湿度颗粒物粒径影响较大。目前对MODIS AOD不仅应进行垂直和湿度订正,还需要同时考虑其他气象因素的影响,进一步加强,从而提高PM_{2.5}的预测精度;(3)模型建立时获取更多更为精确的现实数据是十分必要的;(4)使模型与多种算法更完美的结合以达到更加准确预测也是今后需要关注的方向。

参 考 文 献

- [1] Dockery D W, Pope C A, Xu X, et al. An association between air pollution and mortality in six US cities[J]. New England Journal of Medicine, 1993, 329(24): 1753-1759.
- [2] Hornberg C, Maciuleviciute L, Seemayer N H, et al. Induction of Sister Chromatid Exchanges(SCE) in human tracheal epithelial cells by the fractions PM₁₀ and PM_{2.5} of airborne particulate[J]. Toxicology Letter, 1998, 96-97: 215-220.
- [3] 时宗波,邵龙义, Jones T P, 等. 城市大气可吸入颗粒物对质粒DNA的氧化性损伤[J]. 科学通报, 2004, 49(7): 673-678.
- [4] 杨军. 重量法测定大气中总悬浮颗粒物(TSP)的不确定度评定[J]. 计量与测试技术, 2008, 35(8): 61-62.
- [5] 张玉钧,刘文清,郑朝晖,等. β射线自动监测大气中PM₁₀含量的设计方案[J]. 光子学报, 2001, 30(3): 369-374.
- [6] 梅建鸣. β射线法空气PM₁₀监测结果的准确性探讨[J]. 干旱环境监测, 2010, 24(4): 241-244.
- [7] 陆钊,刘建国,陆亦怀,等. 基于振荡天平技术的大气颗粒物PM₁₀浓度连续监测系统[J]. 大气与环境光学学报, 2007, 2(5): 361-365.
- [8] 郑道敏,吴微燕,王贤沛,等. β射线衰减法和重量法测定环境空气中PM₁₀的对比研究[J]. 环境污染与防治, 2007, 29(2): 138-140.
- [9] 解淑艳,王晓彦,吴远名,等. 环境空气中PM_{2.5}自动监测方法比较及应用[J]. 中国环境监测, 2013, 29(2): 150-155.
- [10] 邓芙蓉,王欣,吴少伟,等. 三种空气颗粒物监测仪监测结果比较研究[J]. 环境与健康杂志, 2009, 26(6): 504-506.
- [11] 阎逢旗,胡欣陵,虞统. 用光学粒子计数器测颗粒物质量浓度和能见度[J]. 量子电子学报, 2004, 20(1): 98-102.
- [12] 浦一芬,吴瑞霞. 2004年北京秋季大气颗粒物的化学组分和来源特征[J]. 气候与环境研究, 2006, 11(6): 739-744.

- [13] 王庚辰, 谢骅, 万小伟, 等. 北京地区空气中 PM_{10} 的元素组分及其变化[J]. 环境科学研究, 2004, 17(1): 41–44.
- [14] 王淑兰, 柴发合, 周来东, 等. 成都市大气可吸入颗粒物来源解析研究[J]. 地理科学, 2006, 26(6): 717–721.
- [15] Kumar N, Chu A, Foster A. An empirical relationship between $PM_{2.5}$ and aerosol optical depth in Delhi Metropolitan[J]. Atmospheric Environment, 2007, 41(21): 4492–4503.
- [16] 郭涛, 马永亮, 贺克斌. 区域大气环境中 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 空间分布研究[J]. 环境工程学报, 2009, 3(1): 147–150.
- [17] 林海峰, 辛金元, 张文煜, 等. 北京市近地层颗粒物浓度与气溶胶光学厚度相关性分析研究[J]. 环境科学, 2013, 34(3): 826–834.
- [18] Pelletier B, Santer R, Vidot J. Retrieving of particulate matter from optical measurements: A semiparametric approach[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres(1984–2012), 2007, 112(D6).
- [19] Lee H J, Liu Y, Coull B A, et al. A novel calibration approach of MODIS AOD data to predict $PM_{2.5}$ concentrations[J]. Atmospheric Chemistry and Physics Discussions, 2011, 11(3): 9769–9795.
- [20] Van Donkelaar A, Martin R V, Levy R C, et al. Satellite-based estimates of ground-level fine particulate matter during extreme events: A case study of the Moscow fires in 2010[J]. Atmospheric Environment, 2011, 45(34): 6225–6232.
- [21] Engel-Cox J A, Holloman C H, Coutant B W, et al. Qualitative and quantitative evaluation of MODIS satellite sensor data for regional and urban scale air quality[J]. Atmospheric Environment, 2004, 38(16): 2495–2509.
- [22] Wang J, Christopher S A. Intercomparison between satellite-derived aerosol optical thickness and $PM_{2.5}$ mass: Implications for air quality studies[J]. Geophysical Research Letters, 2003, 30(21): 2095.
- [23] Hu R M, Sokhi R S, Fisher B E A. New algorithms and their application for satellite remote sensing of surface $PM_{2.5}$ and aerosol absorption[J]. Journal of Aerosol Science, 2009, 40(5): 394–402.
- [24] Liu Y, Park R J, Jacob D J, et al. Mapping annual mean ground-level $PM_{2.5}$ concentrations using Multiangle Imaging Spectroradiometer aerosol optical thickness over the contiguous United States[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres(1984–2012), 2004, 109(D22): 206–215.
- [25] Guttikunda S K, Calori G. A GIS based emissions inventory at 1 km $\times$ 1 km spatial resolution for air pollution analysis in Delhi, India[J]. Atmospheric Environment, 2013, 67(0): 101–111.
- [26] Liu Y, Franklin M, Kahn R, et al. Using aerosol optical thickness to predict ground-level $PM_{2.5}$ concentrations in the St. Louis area: A comparison between MISR and MODIS[J]. Remote Sensing of Environment, 2007, 107(1): 33–44.
- [27] Li C, Lau A, Mao J, et al. Retrieval, validation, and application of the 1-km aerosol optical depth from MODIS measurements over Hong Kong[J]. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, 2005, 43(11): 2650–2658.
- [28] 刘勇. MODIS 气溶胶光学厚度与南京主城区空气污染指数的关系研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2007.
- [29] Liu Y, Wang Z, Wang J, et al. The effect of aerosol vertical profiles on satellite-estimated surface particle sulfate concentrations[J]. Remote Sensing of Environment, 2011, 115(2): 508–513.
- [30] Van Donkelaar A, Martin R V, Park R J. Estimating ground-level $PM_{2.5}$ using aerosol optical depth determined from satellite remote sensing[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres(1984–2012), 2006, 111(D21): 201–210.
- [31] Pelletier B, Santer R, Vidot J. Retrieving of particulate matter from optical measurements: A semiparametric approach[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres(1984–2012), 2007, 112(D6): 208–225.
- [32] Choi Y S, Park R J, Ho C H. Estimates of ground-level aerosol mass concentrations using a chemical transport model with Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer(MODIS) aerosol observations over East Asia[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres(1984–2012), 2009, 114(D4): 204–218.
- [33] Li C C, Mao J T, Lau A K, et al. Application of MODIS aerosol product in the study of air pollution in Beijing[J]. Science in China, Ser. D, Earth Science, 2005a, 35: 177–186.
- [34] 何秀, 邓兆泽, 李成才, 等. MODIS 气溶胶光学厚度产品在地面 PM_{10} 监测方面的应用研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2010, 2: 178–184.
- [35] 王静, 杨复沫, 王鼎益, 等. 北京市 MODIS 气溶胶光学厚度和 $PM_{2.5}$ 质量浓度的特征及其相关性[J]. 中国科学院研究生院学报, 2010, 1: 13–19.
- [36] 王子峰. 卫星遥感估算近地面颗粒物浓度的算法研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2010.
- [37] 郑卓云, 陈良富, 郑君瑜, 等. 高分辨率气溶胶光学厚度在珠三角及香港地区区域颗粒物监测中的应用研究[J]. 中国环境科学, 2011, 31(6): 1154–1161.
- [38] Wang Z, Chen L, Tao J, et al. Satellite-based estimation of regional particulate matter(PM) in Beijing using vertical-and-RH correcting method[J]. Remote Sensing of Environment, 2010, 114(1): 50–63.
- [39] 陶金花, 张美根, 陈良富, 等. 一种基于卫星遥感 AOT 估算近地面颗粒物的方法[J]. 中国科学(地球科学), 2013, 43(1): 143–154.

- [40] 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(地球科学), 2005, 35(z1): 131-144.
- [41] 付维雅. 第三代空气质量模型的研究与应用[D]. 西安: 陕西师范大学, 2010.
- [42] 王丽涛, 潘雪梅, 郑佳, 等. 河北及周边地区霾污染特征的模拟研究[J]. 环境科学学报, 2012, 4: 925-931.
- [43] 陈训来, 冯业荣, 范绍佳, 等. 离岸型背景风和海陆风对珠江三角洲地区灰霾天气的影响[J]. 大气科学, 2008, 3: 530-542.
- [44] 杨艳. 基于 GEOS-Chem 模型的大气二氧化碳循环模拟研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2010.
- [45] 漏嗣佳, 朱彬, 廖宏. 中国地区臭氧前体物对地面臭氧的影响[J]. 南京气象学院学报, 2010, 33(4): 451-459.
- [46] Manders A, Schaap M, Hoogerbrugge R. Testing the capability of the chemistry transport model LOTOS-EUROS to forecast PM₁₀ levels in the Netherlands[J]. Atmospheric Environment, 2009, 43(26): 4050-4059.
- [47] Pfister G G, Emmons L K, Hess P G, et al. Contribution of isoprene to chemical budgets: A model tracer study with the NCAR CTM MOZART - 4[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres(1984-2012), 2008, 113(D5): 308-328.
- [48] Appel K W, Bhawe P V, Gilliland A B, et al. Evaluation of the community multiscale air quality(CMAQ) model version 4. 5: Sensitivities impacting model performance; Part II—Particulate matter[J]. Atmospheric Environment, 2008, 42(24): 6057-6066.
- [49] Manders A, Schaap M, Hoogerbrugge R. Testing the capability of the chemistry transport model LOTOS-EUROS to forecast PM₁₀ levels in the Netherlands[J]. Atmospheric Environment, 2009, 43(26): 4050-4059.
- [50] Yu S, Mathur R, Schere K, et al. 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[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres(1984-2012), 2008, 113(D6): 204-223.
- [51] Doraiswamy P, Hogrefe C, Hao W, et al. A retrospective comparison of model-based forecasted PM_{2.5} concentrations with measurements[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2010, 60(11): 1293-1308.
- [52] Bessagnet B, Hodzic A, Vautard R, et al. Aerosol modeling with CHIMERE—Preliminary evaluation at the continental scale[J]. Atmospheric Environment, 2004, 38(18): 2803-2817.
- [53] Schaap M, Loon M V, Brink H T, et al. Secondary inorganic aerosol simulations for Europe with special attention to nitrate[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2004, 4(3): 857-874.
- [54] McKeen S, Chung S H, Wilczak J, et al. Evaluation of several PM_{2.5} forecast models using data collected during the ICARTT/NEAQS 2004 field study[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres(1984-2012), 2007, 112(D10): S20-39.
- [55] 李世广, 蒋厦, 傅洪金, 等. 基于空气质量模型 CMAQ 的成渝经济区(四川) PM_{2.5} 浓度数值模拟研究[J]. 大气环境, 2013, 32: 109-113.
- [56] Konovalov I B, Beekmann M, Meleux F, et al. Combining deterministic and statistical approaches for PM₁₀ forecasting in Europe[J]. Atmospheric Environment, 2009, 43(40): 6425-6434.
- [57] Pecorari E, Squizzato S, Masiol M, et al. Using a photochemical model to assess the horizontal, vertical and time distribution of PM_{2.5} in a complex area: Relationships between the regional and local sources and the meteorological conditions [J]. Science of the Total Environment, 2013, 443: 681-691.
- [58] Pelletier B, Santer R, Vidot J. Retrieving of particulate matter from optical measurements: A semiparametric approach[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres(1984-2012), 2007, 112(D6).
- [59] Tian J, Chen D. A semi-empirical model for predicting hourly ground-level fine particulate matter PM_{2.5} concentration in southern Ontario from satellite remote sensing and ground-based meteorological measurements[J]. Remote Sensing of Environment, 2010, 114(2): 221-229.
- [60] 谢意. 大气细颗粒物(PM_{2.5}) 质量浓度的遥感估算模型研究——以南京仙林为例[D]. 南京: 南京师范大学, 2013.
- [61] Akita Y, Chen J, Serre M L. The moving-window Bayesian Maximum Entropy framework: Estimation of PM_{2.5} yearly average concentration across the contiguous United States[J]. Health of National Institutes, 2012, 22(5): 496-501.
- [62] Pérez P, Trier A, Reyes J. Prediction of PM_{2.5} concentrations several hours in advance using neural networks in Santiago, Chile[J]. Atmospheric Environment, 2000, 34(8): 1189-1196.
- [63] Ordieres J B, Vergara E P, Capuz R S, et al. Neural network prediction model for fine particulate matter PM_{2.5} on the US-Mexico border in El Paso(Texas) and Ciudad Juárez(Chihuahua) [J]. Environmental Modelling & Software, 2005, 20(5): 547-559.
- [64] Voukantsis D, Karatzas K, Kukkonen J, et al. Intercomparison of air quality data using principal component analysis, and forecasting of PM₁₀ and PM_{2.5} concentrations using artificial neural networks, in Thessaloniki and Helsinki[J]. Science of the Total Environment, 2011, 409(7): 1266-1276.
- [65] 王敏, 邹滨, 郭宇, 等. 基于 BP 人工神经网络的城市 PM_{2.5} 浓度空间预测[J]. 环境污染与防治, 2013, 35(9): 63-70.
- [66] 郭建平, 吴业荣, 张小曳, 等. BP 网络框架下 MODIS 气溶胶光学厚度产品估算中国东部 PM_{2.5} [J]. 环境科学, 2013, 34(3): 817-825.
- [67] You W, Zang Z, Pan X, et al. Estimating PM_{2.5} in Xi'an, China using aerosol optical depth: A comparison between the MODIS and MISR re-

- trieval models[J]. *Science of the Total Environment* ,2015(505) : 1156–1165.
- [68] Briggs D J , Collins S , Elliott P , *et al.* Mapping urban air pollution using GIS: A regression-based approach[J]. *International Journal of Geographical Information Science* ,1997 ,11(7) : 699–718.
- [69] Ross Z , English P B , Scalf R , *et al.* Nitrogen dioxide prediction in Southern California using land use regression modeling: potential for environmental health analyses[J]. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology* ,2005 ,16(2) : 106–114.
- [70] Rosenlund M , Forastiere F , Stafoggia M , *et al.* Comparison of regression models with land-use and emissions data to predict the spatial distribution of traffic-related air pollution in Rome[J]. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology* ,2007 ,18(2) : 192–199.
- [71] Merbitz H , Fritz S , Schneider C. Mobile measurements and regression modeling of the spatial particulate matter variability in an urban area[J]. *Science of the Total Environment* ,2012 ,438: 389–403.
- [72] 陈莉,白志鹏,苏笛,等. 利用 LUR 模型模拟天津市大气污染物浓度的空间分布[J]. *中国环境科学* ,2009 ,29(7) : 685–691.
- [73] Chu H J , H B , Lin C Y. Modeling the spatio-temporal heterogeneity in the PM_{10} – $PM_{2.5}$ relationship [J]. *Atmospheric Environment* ,2015 (102) : 176–182.
- [74] 赵晨曦,王云琦,王玉杰,等. 北京地区冬春 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 污染水平时空分布及其与气象条件的关系[J]. *环境科学* ,2014 ,35(2) : 418–427.
- [75] 李松,邓宝昆,邵技新,等. 基于 GIS 的贵阳 $PM_{2.5}$ 质量浓度城乡过渡特征及影响因素研究[J]. *生态环境学报* ,2014 ,23(8) : 1298–1304.
- [76] Liu Y , Paciorek C J , Koutrakis P. Estimating regional spatial and temporal variability of $PM_{2.5}$ concentrations using satellite data , meteorology , and land use information[J]. *Environmental Health Perspectives* ,2009 ,117(6) : 886.
- [77] Hu X , Waller L A , Al-Hamdan M Z , *et al.* Estimating ground-level $PM_{2.5}$ concentrations in the southeastern U. S. using geographically weighted regression[J]. *Environmental Research* ,2013 ,121: 1–10.
- [78] Olvera H A , Garcia M , Li W , *et al.* Principal component analysis optimization of a $PM_{2.5}$ land use regression model with small monitoring network [J]. *Science of the Total Environment* ,2012 ,425: 27–34.
- [79] Beckerman B S , Jerrett M , Serre M L , *et al.* A hybrid approach to estimating national scale spatiotemporal variability of $PM_{2.5}$ in the contiguous United States[J]. *Environmental Science & Technology* ,2013 ,47: 7233–7241.

A Review on Monitoring Methods for Spatial Distribution of Urban $PM_{2.5}$

DING Bing , CHEN Jian , WANG Bin , YI Lita

(The Nurturing Station for the State Key Laboratory of Subtropical Silviculture ,
Zhejiang Agriculture and Forestry University , Lin'an 311300 , China)

Abstract: Recently , there has been enormous progress in the research area of atmospheric aerosol. The objective of this paper is to provide a comprehensive theoretical review on monitoring and computational methods for urban $PM_{2.5}$ and air quality models. This review includes sources of air pollution , primary and secondary pollutants , atmospheric chemistry , atmospheric chemical transport models , computer programs for dispersion modeling , online and offline air quality modeling , data assimilation , parallel computing , applications of geographic information system in air quality modeling , air quality index , as well as the use of satellite and remote sensing data in air quality modeling. All above are comprehensively discussed and reviewed with respect to various literature and methods related. This paper may serve as a compendium for scientists who work in air quality modeling field.

Key words: $PM_{2.5}$; source; health; monitor