

文章编号: 1671-6612 (2019) 04-449-08

土方工程施工扬尘排放研究进展

刘嘉明¹ 狄育慧¹ 梅源² 王雪艳¹

(1. 西安工程大学城市规划与市政工程学院 西安 710048;

2. 西安建筑科技大学土木工程学院 西安 710055)

【摘要】 土方工程施工扬尘已成为困扰我国环境空气质量的重要污染源之一。现有成果主要从扬尘源解析、扬尘排放特性和扬尘排放相关量化模型三个方面的研究内容进行梳理。试图归纳总结国内外有关土方工程施工扬尘的研究进展, 拟理清土方工程施工扬尘系列问题的研究方向, 为城市土方工程施工扬尘的评估和治理提供参考

【关键词】 土方工程施工; 尘源解析; 排放特性; 扬尘扩散规律

中图分类号 X706 文献标识码 A

Research Progress on Dust Emission from Earthwork Construction

Liu Jiaming¹ Di Yuhui¹ Mei Yuan² Wang Xueyan¹

(1. Xi'an Polytechnic University, College of chemistry and environmental engineering, Xi'an, 710048;

2. Xi'an University of Architecture and Technology, Civil Engineering Institute, Xi'an, 710055)

【Abstract】 Earthwork construction dust has become one of the important pollution sources that plague China's ambient air quality. The existing achievements are mainly combed from the research contents of three aspects: dust source analysis, dust emission characteristics and dust emission related quantitative models. This paper attempts to summarize the research progress of dust in earthwork construction at home and abroad, and to clarify the research direction of the dust collection problem of earthwork construction, and provide reference for the assessment and treatment of urban earthwork construction dust.

【Keywords】 Earthwork construction; dust source analysis; emission characteristics; dust diffusion law

0 引言

近年来, 雾霾天气引发的呼吸系统疾病和心血管不适的病例正呈现逐年上升的趋势, 大气环境中的颗粒污染物已成为公众关注的焦点。研究表明, 环境空气中PM10每升高 $10\mu\text{g}/\text{m}^3$, 则由颗粒物引起呼吸系统疾病死亡率上升3.4%, 心血管疾病死亡率上升1.4%^[1]。医学界也认为颗粒物对健康的影响程度取决于颗粒物的粒径大小^[2]。

参照空气动力学颗粒物粒径可划分为PM2.5、

PM10和TSP三大类, 是雾霾和沙尘(扬尘)天气的重要组成部分。而颗粒物多来源于建筑施工、能源化工和尾气污染, 其中包括施工扬尘、道路扬尘、煤炭燃烧和汽车尾气等。而施工扬尘是我国众多城市大气颗粒物的重要来源之一^[3]。对扬尘源解析、扬尘排放特性、扬尘估算评价模型和抑尘措施等方面的研究成果进行归纳和总结, 探讨该领域的研究方向及拟解决的关键问题具有重要的理论价值和现实意义。

基金项目: 陕西省教育厅产业化项目资助(项目编号: 15JF017);

西安市科技局高校院所人才服务企业工程项目资助(项目编号: 2017074CG/RC037(XAGC012))

作者简介: 刘嘉明(1993.10-), 男, 在读研究生, E-mail: 1318165612@qq.com

通讯作者: 狄育慧(1964.02-), 女, 博士, 教授, E-mail: 470836165@qq.com

收稿日期: 2018-08-27

1 扬尘源解析

建筑扬尘和道路扬尘是美国加州南部海岸地区环境空气中PM10的主要尘源,在John G^[4]等人基于化学质量平衡模型(Chemical Mass Balance)以下简称“CMB模型”的解析中已基本得到证实。之后,Pouliot G^[5]在此基础上进行了深化,认为除道路扬尘和建筑扬尘外,农业耕作及采矿作业亦是该地区环境空气中PM2.5和PM10的主要尘源,且借助CMAQ(Community Multiscale Air Quality)模型,解析结果表明环境中PM10的40~60%是由于人为原因排放所致。不难看出CMB模型和CMAQ模型均能准确的判断尘源类别,但CMAQ模型的解析功能更为丰富。除借助源解析模型外,也有学者通过分析扬尘中的特征元素以此推断尘源类别。就北京市而言,华蕾^[6]等对市内无组织排放源与固定排放源排放的PM10采样并做扬尘元素族谱分析后指出Si、Ca、Fe、Al四种元素为北京市PM10标识元素,于此合理推测土壤尘、建筑扬尘、土方工程施工扬尘及钢铁尘是北京市PM10的主要尘源。之后,韩力慧^[7]在此基础上予以验证和补充,认为除Al、Ti、Ca、Mg为代表的地壳元素外,由建筑施工产生的Ca²⁺和SO₄²⁻在众多离子团中其含量占主导地位。此亦可验证建筑扬尘、土方工程施工扬尘是影响北京大气环境的重要污染源。同年,西班牙学者Amato F^[8]等对巴塞罗那多条道路PM10采样后借助元素量化法指出扬尘颗粒中地壳元素含量较高,道路PM10多源自道路周边建筑工地土方施工扬尘和土壤风蚀。在已有成果基础上余南娇^[9]等使用单颗粒气溶胶飞行时间质谱仪(SPAMS)分别对土方施工扬尘、建筑施工扬尘、道路尘的标识元素进行深入探究,研究指出广州市土方施工扬尘标识元素为Al、建筑施工扬尘标识元素为Si、道路扬尘标识元素为Ca。就上述研究方法而言,元素族谱分析法、元素量化法和SPAMS均能合理的明确不同扬尘源中的特定标识元素,但就不同扬尘源对大气环境污染的贡献程度并未得到体现。应明确指出建筑扬尘、土方工程施工扬尘等扬尘源对大气环境污染程度的贡献率并应引起足够的重视。也为日后防治与治理扬尘污染提供有力的鉴别手段和参考依据。

初步明确建筑扬尘、土方工程施工扬尘等扬尘源的标识元素后,扬尘排放贡献率也是衡量扬尘排放量的重要指标,亦可用于描述扬尘污染架构,为

日后有针对性的拟定扬尘防治措施提供理论支持。就天津市而言,城市PM2.5与PM10排放贡献率之和高达24%,这一比例是Zelenka M P^[10]等借助目标转换因子分析的数值模型TTFA(Target Transformation Factor Analysis)先识别确定环境中污染源类别,再通过CMB模型进行分配量化后计算所得。长春市大气环境中75%的PM2.5是由于本地区扬尘源排放所致,这其中又约有19.47%是由土方施工扬尘和周边道路扬尘排放引起^[11],排放贡献率仅次于燃煤锅炉和工业生产的扬尘排放。目光转至西南地区代表城市重庆,该市大气环境PM10主要源自土方施工扬尘、道路扬尘、施工现场的建材尘、煤烟尘和钢铁冶炼尘,其中土方施工扬尘和周边道路扬尘对重庆市PM10的贡献率高达33.85%^[12]。

基于上述总结,土方工程施工现场或是建筑施工现场直接或间接排放的土方工程施工扬尘、建筑施工扬尘、施工现场周边道路扬尘均是大气环境中扬尘颗粒的主要来源。借助已有源解析模型能够有效的辨识扬尘源类型,此类研究方法和模型随着时间的推移不断被完善,解析可靠性较强。在解析得到扬尘源类别后,探究、明确不同尘源的标识元素,日后通过直接检验扬尘样本中的化学元素,并找到相应的标识元素后便可简洁直观地描述出扬尘组分。值得注意的是国内该领域的学者研究侧重点偏向于京津冀地区、东南沿海地区和部分南方城市,而对我国西北地区(多为黄土地区)的扬尘源解析和标识元素的探究缺乏足够的重视。

2 扬尘排放特性研究

扬尘排放特性是建立扬尘估算排放模型与模拟预测扬尘扩散模式的基础,在掌握扬尘源解析的基础上明确扬尘排放特性就显得极为重要。就北京市而言, Maogui Hu^[13]等借助聚类法与EMD(Empirical Mode Decomposition)模型相结合的方式,分别从季节性和城市横纵跨度上对城市上空PM10浓度分布特征加以探究。季节上,冬夏两季城市PM10浓度有所回落,春季PM10浓度呈上升趋势;从城市跨度上看,南部城区PM10浓度远高于北部城区。田刚^[14]等人则将研究侧重点放在尘源附近扬尘垂直方向和水平方向上的扩散规律,结果表明,在垂直地面方向1.5~4.1m不同高度处扬尘

浓度与高度的2次方成反比;在相同水平高度(3m)处扬尘浓度与监测点距尘源距离的2次方成反比。季节性和城市跨度上的研究仅能宏观的指出扬尘污染现状;而探究尘源及附近扬尘浓度空间区域上的分布特征不仅能评估尘源的污染影响范围,也能为制定降尘方案起到指导作用。

除宏观探究环境扬尘浓度分布特征外,也有学者从微观上针对扬尘产生机理、粒径分布及特定粒径扬尘颗粒的排放贡献率展开探究。在Farhad A^[15]的研究中指出,建筑施工现场内切割、钻井及混凝土搅拌过程中PM2.5与PM10的排放量占建筑扬尘颗粒物总排放量的52~64%,且切割工序超细颗粒物排放量最多。Ketchman K^[16]等在探讨城市高层建筑基坑开挖阶段中定量评估不同粒径颗粒物的排放量时,实测指出在开挖阶段中排放的PM10占挖掘阶段总排放量的23%,PM2.5占总排放量的13%;其中土料搬运过程PM10排放量占该过程总排放量的89%,PM2.5占总排放量的90%。在德国,某建筑施工现场向环境排放的颗粒物占总量的17%,其中土方工程施工扬尘排放占7%,其余施工活动占10%^[17]。目光回到国内就北京市而言,Xiao-Dong LI^[18]等人发现相比于建筑主体施工,土方工程施工活动扬尘排放浓度高且强度波动较大;土方施工时道路两侧及钢筋加工区是扬尘集中区域,扬尘污染较为严重。黄天健^[19]等也进行验证,他表示土方施工阶段施工区域内及道路两侧扬尘浓度较其他区域扬尘浓度明显偏高,不同区域扬尘污染情况差异显著,土方施工阶段PM10的排放浓度相比于地基建设阶段和主体施工阶段是最高的^[20]。蒋楠^[21]则在其研究中指出,西安市建筑施工活动排放的PM10占城市PM10总排放量的35.8%。明确指出土方工程施工扬尘和建筑施工扬尘应重点监测,也是日后扬尘防治的重点方向。

除分析土方工程施工扬尘和建筑施工扬尘的排放贡献率外,对该类扬尘产生机理的探究也不应被忽视。风蚀能将土方填料或土壤表面的细颗粒卷扬进入大气环境,且这类颗粒的粒径不大于10 μm , Van Pelt R S^[22]等在其研究中予以证实,并认为风蚀是一个筛选过程。这表明在没有外力作用的情况下,粒径较大的颗粒依靠风蚀作用进入大气环境的能力有限。同年,曾庆存^[23]等提出正是由于阵风的三维相干结构使得边界层内部的扬尘颗粒能够克

服大气下沉气流而卷扬上升,直至大气对流层将扬尘颗粒输送至远方。且风力对扬尘浓度的影响确实存在风力阈值^[24]。就呼市某典型施工场地而言,场地内部扬尘粒径分布呈双峰形,峰值粒径范围在3.2~5.6 μm 和10~18 μm ,且有PM2.5:PM10:TSP=0.21:0.53:1^[25]。赵普生^[26,27]同样指出土方施工阶段的开挖与回填、土料堆积与运输过程扬尘污染较为严重。土方施工阶段产生的扬尘里大粒径的颗粒含量较高,卷扬后沉降速度较快,扬尘污染影响范围有限,但在大风天气下扬尘排放强度和污染影响范围明显增加。

从土方施工产生的扬尘颗粒的粒径分布来看,这部分扬尘颗粒粒径普遍较大,这使得扬尘颗粒最终得以沉降回到地表。降尘能够作为土方工程施工扬尘的监测指标,能够表明不同施工阶段扬尘污染的严重程度,降尘指标的可行性在田刚^[28]的研究中基本得到证实。在此基础上樊守彬^[29]等予以深化,将PM10空间浓度分布与空间降尘分布相对照后认为PM10空间浓度分布规律与空间降尘分布规律总体趋于一致,也证实降尘法能够描述PM10的空间浓度分布情况。就成都市一处典型土方工程而言,降尘量(ΔDF)平均为8.33t/(km²·30d),其中土方开挖和土方回填阶段占降尘总量的32%^[30]。方由降尘占比可合理推测得知整个土方工程施工阶段的扬尘产生量占总扬尘量的比例将会高于32%。此外,黄玉虎^[31,32]等研究指出降尘(ΔDF)与排放强度(EI)间存在明显的正相关性,降尘量(ΔDF)及背景降尘量(DFb)与风速间也存在正相关性。不过上述排放强度(EI)只能反映激发扬尘量,而降尘(ΔDF)既能反映激发扬尘量又能度量风蚀扬尘强度,降尘(ΔDF)指标优势明显。

从气象因子角度分析,土方施工扬尘的排放强度与风速间存在明显相关性^[33],扬尘排放强度随着风速的增大先是缓慢上升,当超过某一风速阈值范围时扬尘的排放强度迅速增大;而相对湿度增大到某一定值后,再增加湿度将不会影响扬尘的产生^[34,35]。樊守彬^[36]等在其研究中指出土方扬尘PM10的浓度与温度、湿度、风速呈正相关,与风向呈负相关。这与郭翔翔^[37]和夏菲^[38]的研究结论相矛盾,郭翔翔认为PM10浓度与湿度呈负相关,而夏菲则指出PM10浓度与温度和风速呈负相关。与此同时,马小铎^[39]和周莉薇^[40]均在其研究中发现土方扬

尘中 PM_{2.5} 的浓度变化趋势与相对湿度呈正相关,与温度呈负相关。整合上述研究后可以发现气象因子对扬尘浓度的影响程度不尽相同,不能以偏概全,需因地制宜地探讨气象因子与扬尘排放强度之间的关联性。

由上述粒径分布和扬尘贡献率分析可知,建筑施工活动中,土方施工阶段扬尘排放量占主导地位,土方施工扬尘颗粒粒径较大,使用降尘法作为参照指标可以较好的衡量扬尘浓度的大小。此外,因为我国黄土区域面积之大,黄土土质易于扬尘,且针对于黄土而言没有具体可查的研究资料,故可尝试探究降尘法在黄土地区的适用性外,无论是土方施工扬尘的产生机理理论分析,或是粒径分布及扬尘颗粒贡献率的测试,或多或少的存在研究留白,这也为日后的相关研究留有探索空间。再针对气象因子与扬尘浓度相关性中的互异结论,需要结合特定研究区域及该区域内的气象要素做具体分析,也正是由于存在差异性,气象因子与扬尘浓度间的相关性的探究才显得极有必要。

3 扬尘排放相关量化模型研究

为量化与评价我国土方扬尘扩散及污染程度,有学者针对土方扬尘建立排放模型及模拟扩散特征展开研究。就郑州市而言,城市扬尘的主要来源为建筑施工、土方工程开挖和裸露地面土壤扬尘。徐媛倩^[41,42]等借助 AP-42 扬尘排放估算模型计算得到上述扬尘源中 PM_{2.5}、PM₁₀ 和 TSP 的排放因子和排放量分别为 3.36g/m²·a、20.16g/m²·a、67.21g/m²·a 和 597t、3581t、11937t。此外,四维通量法也是评估扬尘排放的量化模型之一,田刚^[43,44]等借此得到北京近郊土方施工工地内 TSP 的排放因子数值上是 AP-42 手册中推荐扬尘排放模型计算排放因子的 1.83 倍,施工工地出入口道路 PM₁₀ 的排放因子是正常道路排放因子的 2~10 倍。除使用 AP-42 手册中排放模型计算排放因子和排放量外,翟绍岩^[45]在其学位论文中指出虽然 AP-42 手册中含有适用于不同条件下的扬尘排放模型,但实际使用时还是存在地区局限性,必须依据和参考本施工地区相应的气象条件和施工特征对手册中的排放模型和排放量估算模型进行修正,以满足地区适用性减小计量误差,更有助于准确评估施工地区扬尘污染状况。樊守彬^[46]认为虽然量化

模型评估存在数值上的差异,但评估结果是一致的,这也在后续的研究中^[47]基本予以证实。也就是说量化预测模型虽存在不确定性,但这种不确定性是可控的可避免的。

除北京和郑州市外,珠三角地区建筑施工中土方开挖、地基建设、土方回填和一般建设阶段 PM₁₀ 的排放因子分别为 0.41g/(h·m²)、0.14g/(h·m²)、0.12g/(h·m²)和 0.11g/(h·m²)^[48]。由排放因子估算得到 2014 年珠三角地区施工扬尘总排放量高达 3.524×10⁴t,其中土方开挖阶段扬尘排放量最多,土方回填阶段扬尘排放量最少。再者,将风力扬尘排放模块应用于区域空气质量模型系统 AURAMS (A Unified Regional Air Quality Modeling System) 得到的结论^[49]与雷诺方程的数值解法、斯托克斯方程 (*N-S* 方程)、*k- ω* 剪应力传输模型对湍流风场进行三维数值模拟得到的结论^[50]相同。两者共同指出,风力的卷扬与侵蚀程度严重依赖于研究区域的风场特性,且风场受场地地形变化影响巨大,由此排入大气的扬尘颗粒对环境空气质量有至关重要的影响。此外,模拟响应模型还包括 SAS 非线性回归模型^[51]、FDM 模型^[52]、DPM 气固两相流离散模型^[53]、ISC3 模型^[54]、BP 神经网络模型^[55]和 CMAQ 模型^[56],以及大气色散模型软件 ADMS3.1^[57]这些模型预测扬尘影响半径与实际监测值相符程度高,能较好的解析不同影响因素条件下扬尘浓度的变化趋势,且在实际工程扬尘预测及污染评估中可行性强,可信度高,有着广泛的适用范围。

值得注意的是对不同模型的模拟结果相对比形成对照组也同样重要。将正交因子分解模型 PMF (Positive Matrix Factorization) 与 CMB 模型的量化结果相对照,PMF 模型能够区分土方施工扬尘与道路尘,这是 CMB 模型所不具备的特征^[58]。借助地理加权回归 GWR (Geographically Weighted Regression) 和时间地理加权回归 GTWR (Gross Trailer Weight Rating) 模型对台湾地区 PM 系列颗粒物的时空分布结果相对照^[59],结果表明 GWR 与 GTWR 模型模拟结果一致性程度高,但 GTWR 模型对 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 在时空扩散解释能力与拟合程度上相比于 GWR 而言更胜一筹。秦珊珊^[60]基于 PM_{2.5} 与 PM₁₀ 浓度采样的基础上使用差分自回归移动平均模型 (ARIMA) 和神经网络模型 (BPNN)

对大气悬浮颗粒PM_{2.5}和PM₁₀浓度区间进行预测并形成对照,结合监测数据,模型预测结果表明神经网络模型预测精度更好,对PM_{2.5}和PM₁₀浓度波动范围预测值更为合理,更适合应用于工程领域。

不难发现扬尘估算模型和扬尘扩散预测模型种类及形式多样,但不同的估算模型需要与实际研究区域的施工特征、当地气象因素以及实际施工参数选取合适的估算模型。虽然估算模型间的解析解存在数值差异,若误差在允许范围内则可认为模型评估结果是一致的,误差与不确定性是可控的是可避免的,其之间并无优劣之分。计算结果与实测值相差过大,则需对模型进行修正,使其满足本地区研究需求。正是因为我国黄土区域面积之大,黄土土质易于扬尘,且针对于黄土而言没有具体可查的研究资料,这也为建立与修正适用于黄土地区土方施工扬尘估算预测模型留有研究空间。

4 扬尘的降尘对策研究

无论是扬尘估算模型还是扩散预测模型,均应因地制宜突出地区适用性。若能较好的量化扬尘排放量和评估扬尘扩散污染程度,这也是制定降尘和抑尘措施的基础。以现有技术手段和方式方法可以主要归纳为四个方面:物理抑尘、化学抑尘、植被降尘、物理降尘。

基于风场特性与模拟结果^[61],围栏高度的增加有助于抑制扬尘的扩散与迁移。此外,对稻草编织而成的地表遮盖物的抑尘性能测试^[62]后发现没有办法依靠单一抑尘手段消除裸露地表PM_{2.5}与PM₁₀的排放,这也为后继研究人员利用多种抑尘方式相结合的方法提高抑尘效率提供了明确思路。化学抑尘方面,抑尘剂与地面间形成的抗脆硬化膜未被破坏前能长期减少PM₁₀的排放^[63],在此基础上,田森林^[64]和谭卓英^[65]等进行延伸,其借助正交实验找到最优抑尘剂配比方案,提出一种具有固结路面、粘结、凝并、吸湿、保水特性的抑尘剂。但使用化工类抑尘剂会存在难降解和环境隐患,故有专家学者认为可利用植被降尘,如Chang Y M^[66]等通过系列实验证实利用常见草种覆盖裸露地表是一种廉价而有效的抑尘与降尘方式,且最大降尘率不超过45%。而林地的抑尘能力明显强于自然草地,且林地的抑尘能

力与林地种植分密度呈正相关性^[67]。此外,植被叶片的大小、平滑或是褶皱、有蜡表面或是存在毛滴都会影响植被的抑尘能力^[68],这也为城市绿化与扬尘减排净化相结合提供了良好思路。通过实际调研发现,目前以抑尘网遮盖、地表洒水湿润和定期清洁^[69]为主要降尘手段。

5 展望

基于上述分析,土方施工扬尘是大气颗粒污染物的重要来源之一,该领域已引起我国专家学者足够的重视,但是没有提出合理的对策,也缺乏依据。我国黄土地区面积广阔,针对黄土地区土方施工扬尘还存在研究留白,据此希望研究得到相应的衡量和评估依据,拟提出合理对策,丰富土方施工扬尘研究理论。亦可参照现有扬尘排放量估算方法和扬尘预测模型,结合黄土地区土质、施工特点和气象要素对估算方法和预测模型进行合理修正,通过不同模型间的对照分析,使所建模型具有广泛适用性,以实现不同环境下土方施工扬尘量的合理预测。后续研究中需要探究黄土地区土方施工扬尘扩散规律与气象因子间的相关性,并明确气象因子间对扩散规律的耦合作用效果,以此拟定切实可行的有效抑尘措施。此将是土方施工扬尘系列问题的研究趋势与热点问题。

6 结语

(1) 当前土方施工扬尘领域的研究主要围绕扬尘源解析、扬尘排放特性和扬尘排放相关量化模型展开,与黄土地区土方施工扬尘有关的上述研究相对较少,而西北地区因扬尘导致的雾霾天气又比较多发,因此黄土地区可参照上述几点展开探究,丰富既有理论成果。

(2) 气象因子是影响扬尘浓度和扩散规律的重要影响因素,不同地区的气象因子与施工扬尘浓度间的相关性存在差异,需要明确黄土地区气象因子与土方施工扬尘间的相关性,深入探讨气象因子间的相互耦合效果是必要的。

(3) 针对同一研究区域,不同的估算办法和预测模型的数值差异是可控的或可消除的。在此基础上结合地区特征对其进行优化修正,建立适用于黄土地区土方施工扬尘排放量估算方法,搭建扬尘预测模型,并拟定切实可行的有效抑尘措施。

参考文献:

- [1] D W Dockery ,C A Pope III. Acute Respiratory Effects of Particulate Air Pollution[J]. Public Health, 1994,15:107-132.
- [2] Kim K H, Kabir E, Kabir S. A review on the human health impact of airborne particulate matter[J]. Environment International, 2015,74:136-143.
- [3] Zhang Zhi-hui, Wu Fan. Health impairment due to building construction dust pollution[J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology), 2008, 48(6):922-925.
- [4] John G Watson, Judith C Chow, Zhiqiang Lu, et al. Chemical Mass Balance Source Apportionment of PM10 during the Southern California Air Quality Study[J]. Aerosol Science & Technology, 1994,21(1):1-36.
- [5] Pouliot G, Simon H, Bhave P, et al. Assessing the Anthropogenic Fugitive Dust Emission Inventory and Temporal Allocation Using an Updated Speciation of Particulate Matter[M]. Air Pollution Modeling and its Application XXI. Springer Netherlands, 2011:1086-92.
- [6] 华蕾,郭婧,徐子优,等.北京市主要 PM10 排放源成分谱分析[J].中国环境监测,2006,22(6):64-71.
- [7] 韩力慧,庄国顺,程水源,等.北京地面扬尘的理化特性及其对大气颗粒物污染的影响[J].环境科学,2009, 30(1):1-8.
- [8] Amato F, Pandolfi M, Viana M, et al. Spatial and Chemical Patterns of PM10 in Road Dust Deposited in Urban Environment[J]. Atmospheric Environment, 2009, 43(9):1650-1659.
- [9] 余南娇,黄渤,李梅,等.大气细颗粒物扬尘源单颗粒质谱特征[J].中国环境科学,2017,37(4):1262-1268.
- [10] Zelenka M P, Wilson W E, Chow J C, et al. A combined TTFM/CMB receptor modeling approach and its application to air pollution sources in China[J]. Atmospheric Environment, 1994,28(8):1425-1435.
- [11] 孔茹钰.长春市大气中细颗粒物源排放清单编制研究[D].长春:吉林大学,2016.
- [12] 鲁磊.重庆市主城区大气 PM10 来源的混合模型解析研究[D].重庆:重庆大学,2008.
- [13] Maogui Hu, Lin J, Wang J, et al. Spatial and Temporal Characteristics of Particulate Matter in Beijing, China Using the Empirical Mode Decomposition Method[J]. Science of the Total Environment, 2013,458-460(3): 70-80.
- [14] 田刚,李钢,闫宝林,等.施工扬尘空间扩散规律研究[J].环境科学,2008,29(1):259-262.
- [15] Farhad A, Prashant K, Mike M. The Exposure to Coarse, Fine and Ultrafine Particle Emissions from Concrete Mixing, Drilling and Cutting Activities[J]. Journal of Hazardous Materials, 2014,279(279):268-279.
- [16] Ketchman K, Bilec M. Quantification of Particulate Matter from Commercial Building Excavation Activities Using Life-Cycle Approach[J]. Journal of Construction Engineering & Management, 2013,139(12):1-11.
- [17] Faber P, Drewnick F, Borrmann S. Aerosol Particle and Trace Gas Emissions from Earthworks, Road Construction, and Asphalt Paving in Germany: Emission Factors and Influence on Local Air Quality[J]. Atmospheric Environment, 2015,122:662-671.
- [18] Xiao-Dong LI, Shu SU, Huang T J, et al. Monitoring and Comparative Analysis of Construction Dust at Earthwork and Main Structure Construction Stages[J]. China Safety Science Journal, 2014,24(5):126-131.
- [19] 黄天健,李小冬,苏舒,等.建筑工程土方施工阶段扬尘污染监测与分析[J].安全与环境学报,2014,14(3): 317-320.
- [20] 孙猛,高翔,刘茂辉,等.扬尘在线监测在施工工地扬尘污染监管中的应用研究[J].环境科学与管理,2016, 41(11):142-145.
- [21] 蒋楠,吕柏霖.西安扬尘污染的控制与治理研究[C].2014 中国环境科学学会学术年会,2014.
- [22] Van Pelt R S, Zobeck T M. Chemical Constituents of Fugitive Dust[J]. Environmental Monitoring & Assessment, 2007,130(1-3):3-16.
- [23] 曾庆存,胡非,程雪玲.大气边界层阵风扬尘机理[J].气候与环境研究,2007,12(3):251-255.
- [24] 马小铎.影响 PM2.5 的理化因素及相关问题的模型研究[D].北京:北京交通大学,2015.
- [25] 黄玉虎,蔡煜,毛华云,等.呼和浩特市施工扬尘排放因子和粒径分布[J].内蒙古大学学报(自然版),2011, 42(2):230-235.
- [26] 赵普生.城市建筑施工及铺装道路扬尘污染评估与防治技术研究[D].南京:南开大学,2008.
- [27] 赵普生,冯银厂,金晶,等.建筑施工扬尘特征与监控指

- 标[J].环境科学学报,2009,29(8):1618-1623.
- [28] 黄玉虎,田刚,秦建平,等.不同施工阶段扬尘污染特征研究[J].环境科学,2007,28(12):2885-2888.
- [29] 樊守彬,杨力鹏,程水源.道路环境颗粒物浓度空间分布研究[J].环境科学与技术,2011,34(7):56-58.
- [30] 杨松,叶芝祥,杨怀金,等.建筑施工降尘的污染特征及来源分析[J].环境工程,2015,(s1):324-329.
- [31] 黄玉虎,李钢,杨涛,等.道路扬尘评估方法的建立和比较[J].环境科学研究,2011,24(1):27-32.
- [32] 黄玉虎,蔡煜,毛华云,等.呼和浩特施工扬尘排放因子和粒径分布[J].内蒙古大学学报(自然版),2011,42(2):230-235.
- [33] 田刚,樊守彬,黄玉虎,等.风速对人为扬尘源PM10排放浓度和强度的影响[J].环境科学,2008,29(10):2983-2986.
- [34] Kinsey J S, Linna K J, Squier W C, et al. Characterization of the fugitive particulate emissions from construction mud/dirt carryout[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2004,54(11):1394-404.
- [35] Zhang G Q, Liu Z C, Wang L, et al. Emission Characteristics of Fugitive Dust Generation of Falling Material and Its Model[J]. Journal of Shandong Agricultural University, 2008,39(1).
- [36] 樊守彬,李钢,田刚.施工现场扬尘排放特征分析[J].环境科学与技术,2011,(s2):209-211.
- [37] 郭翔翔,甘麟雄,丁一,等.南宁市工地基础施工扬尘分布量化分析[J].广西大学学报(自然科学版),2016,41(4):1285-1290.
- [38] 夏菲.西安市郭杜镇10月份PM10浓度时空变化与防治措施研究[D].西安:陕西师范大学,2015.
- [39] 马小铎.影响PM2.5的理化因素及相关问题的模型研究[D].北京:北京交通大学,2015.
- [40] 周莉薇.西安工程大学金花校区PM2.5浓度分布研究[D].西安:西安工程大学,2015.
- [41] 徐媛倩,姜楠,燕启社,等.郑州市土壤扬尘排放量的估算及分布特征研究[C].中国环境科学学会学术年会,2015:3541-3548.
- [42] [徐媛倩,姜楠,燕启社,等.郑州市裸露地面风蚀扬尘排放清单研究[J].环境污染与防治,2016,38(4):22-27.
- [43] 田刚,樊守彬,李钢,等.施工工地出口附近道路交通扬尘排放特征研究[J].环境科学,2007,28(11):2626-2629.
- [44] 田刚,黄玉虎,李钢.四维通量法施工扬尘排放模型的建立与应用[J].环境科学,2009,30(4):1003-1007.
- [45] 翟绍岩.上海市道路、建筑工地扬尘(PM)排放估算方法研究[D].上海:华东师范大学,2008.
- [46] 樊守彬,张东旭,田灵娣.AP-42道路交通扬尘排放模型评估及其在北京市的应用[J].环境工程学报,2016,10(5):2501-2506.
- [47] 刘玉峰,丛晓春,张旭.露天堆场扬尘量分布的计算[J].环境污染与防治,2006,28(2):146-148.
- [48] 杨杨.珠三角地区建筑施工扬尘排放特征及防治措施研究[D].广州:华南理工大学,2014.
- [49] Park S H, Gong S L, Gong W, et al. Relative impact of windblown dust versus anthropogenic fugitive dust in PM2.5 on air quality in North America[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2010,115(D16):751-763.
- [50] Badr T, Harion J L. Numerical Modelling of Flow over Stockpiles: Implications on Dust Emissions[J]. Atmospheric Environment, 2005,39(30):5576-5584.
- [51] Lee C H, Tang L W, Chang C T. Modeling of Fugitive Dust Emission for Construction Sand and Gravel Processing Plant[J]. Environmental Science & Technology, 2001,35(10):2073-2077.
- [52] 赵普生,冯银厂,张裕芬,等.建筑施工扬尘排放因子定量模型研究及应用[J].中国环境科学,2009,29(6):567-573.
- [53] 秦智聃.基于CFD对建筑业粉尘浓度的计算及防护管理研究[D].重庆:重庆交通大学,2013.
- [54] Sivacoumar R, Mohan R S, Chinnadurai S J, et al. Modeling of Fugitive Dust Emission and Control Measures in Stone Crushing Industry[J]. J Environ Monit, 2009,11(5):987-997.
- [55] 郭默.基于BP神经网络的施工扬尘量化建模研究[D].兰州:兰州大学,2010.
- [56] 薛亦峰,周震,黄玉虎,等.北京市建筑施工扬尘排放特征[J].环境科学,2017(6):2231-2237.
- [57] T J Appleton, S W Kingman, I S Lowndes, et al. The Development of a Modelling Strategy for the Simulation of Fugitive Dust Emissions from in-pit Quarrying Activities: a UK Case Study[J]. International Journal of Mining Reclamation & Environment, 2006,20(1):57-82.
- [58] Song Y, Xie Z S, Zeng L, et al. Source Apportionment of

- PM2.5 in Beijing by Positive Matrix Factorization[J]. *Atmospheric Environment*, 2006,40(8):1526-1537.
- [59] Chu H J, Huang B, Lin C Y. Modeling the Spatio-Temporal Heterogeneity in the PM10-PM2.5 Relationship[J]. *Atmospheric Environment*, 2015,102: 176-182.
- [60] 秦珊珊. 悬浮颗粒物PM10与PM2.5的统计分析预测[D]. 兰州: 兰州大学, 2014.
- [61] 邓济通, 黄远东, 张强, 等. 围栏高度对施工扬尘迁移扩散影响的数值模拟研究[J]. *环境工程*, 2014,32(4):83-86.
- [62] Su K T, Chang Y M, Hu W H, et al. Comparison of Reduction Efficiency of Woven Straw for Entrained Emissions of Particulate Matter with Diameters Less Than 10 μm (PM10) and Less Than 2.5 μm (PM2.5) from Exposed Areas at Construction Sites[J]. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2010,37(5):787-795.
- [63] Gillies J A, Watson J G, Rogers C F, et al. Long-Term Efficiencies of Dust Suppressants to Reduce PM10 Emissions from Unpaved Roads[J]. *J Air Waste Manag Assoc*, 1999,49(1):3-16.
- [64] 郑云海, 田森林, 李林, 等. 基于表面活性剂的施工扬尘抑尘剂及其性能[J]. *环境工程学报*, 2017(4):2391-2396.
- [65] 谭卓英, 赵星光, 刘文静, 等. 露天矿公路扬尘机理及抑尘[J]. *北京科技大学学报*, 2005,27(4):403-407.
- [66] Chang Y M, Hu W H, Su K T, et al. PM10 Emissions Reduction from Exposed Areas Using Grass-Planted Covering: Field Study of a Construction Site[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2014,140(12):1-5.
- [67] 潘德成, 孟宪华, 吴祥云, 等. 不同气象因子及植被类型对矿区排土场扬尘的影响[J]. *干旱区资源与环境*, 2014,28(1):136-141.
- [68] Liu L, Guan D, Peart M R. The Morphological Structure of Leaves and the Dust-Retaining Capability of Afforested Plants in Urban Guangzhou, South China[J]. *Environmental Science & Pollution Research*, 2012, 19(8):3440-3449.
- [69] Sivacoumar R, Mohan R S, Chinnadurai S J, et al. Modeling of Fugitive Dust Emission and Control Measures in Stone Crushing Industry[J]. *J Environ Monit*, 2009,11(5):987-997.