

李冬,陈建华,张月帆,等.道路扬尘检测方法研究进展[J].环境工程技术学报,2021,11(3):537-545.

LI D, CHEN J H, ZHANG Y F, et al. Research progress of detection methods of road dust[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2021, 11(3): 537-545.

## 道路扬尘检测方法研究进展

李冬,陈建华\*,张月帆,高健,张凯,竹双

中国环境科学研究院

**摘要** 道路扬尘是城市大气颗粒物的主要来源之一,为改善城市环境空气质量、降低大气颗粒物浓度,必须采取有效措施控制道路扬尘。确定道路扬尘检测方法是控制道路扬尘的关键一步,完善和发展当前道路扬尘检测方法对有效削减城市道路扬尘排放量、精准治理道路扬尘具有重要意义。通过实证分析等方法,研究了当前国内外主要的道路扬尘排放的检测方法(降尘法、AP-42法和TRAKER法)以及主要的道路环境监测方法(道路扬尘微观站监测法和大气环境移动监测车监测法)。对不同道路扬尘检测方法的原理、特点及应用进行综述和对比,指出当前的道路扬尘检测方法均具有各自的优点和局限性,地方政府和科研人员需要结合研究目的及技术成本等因素考虑选择合适的检测方法,进一步制定标准化采样方法并完善相应标准,从而实现城市道路扬尘的精准检测。

**关键词** 道路扬尘;降尘法;AP-42法;TRAKER法;道路扬尘微观站监测法;大气环境移动监测车监测法

中图分类号:X513 文章编号:1674-991X(2021)03-0537-09 doi:10.12153/j.issn.1674-991X.20200213

## Research progress of detection methods of road dust

LI Dong, CHEN Jianhua\*, ZHANG Yuefan, GAO Jian, ZHANG Kai, ZHU Shuang

Chinese Research Academy of Environmental Sciences

**Abstract** Road dust is one of the main sources of urban atmospheric particles. Effective measures should be taken to control road dust for improving the quality of urban ambient air and reducing the concentration of atmospheric particles. It is a key step to determine the detection methods of road dust. And it is of great significance to improve and develop the current detection technologies of road dust emission for effectively reducing and accurately controlling urban road dust. Through empirical analysis, the main detection methods of road dust emission at home and abroad were analyzed, including dust fall method, AP-42 and TRAKER method, as well as the main monitoring methods of road environment, such as road dust micro station monitoring method and atmospheric environment mobile vehicle monitoring method. Then the principles, characteristics and applications of different road dust detection methods were summarized and compared. As a whole, the current road dust detection methods had their own advantages and limitations. It was suggested that the local governments and researchers should select appropriate detection methods in combination with the research purpose and technical cost, the standardized sampling methods should be further developed, and the corresponding environmental protection standards should be improved, so as to realize the accurate control of urban road dust.

**Key words** road dust; dust-fall method; AP-42 method; TRAKER method; road dust micro station monitoring method; atmospheric environment mobile vehicle monitoring method

收稿日期:2020-08-28

基金项目:国家自然科学基金项目(42075182);大气重污染成因与治理攻关项目(DQGG0304-05);国家重点研发计划项目(2019YFC0214200);中央级公益性科研院所基本科研业务专项(JY-21277132-201309046)

作者简介:李冬(1994—),男,硕士研究生,主要从事大气环境化学研究,1161442798@qq.com

\* 责任作者:陈建华(1970—),女,研究员,博士,主要从事大气环境化学研究,chenjh@craes.org.cn

随着城市经济的快速发展,城市机动车的保有量和道路面积不断扩大,道路扬尘对城市空气污染的贡献率也在逐渐增大<sup>[1]</sup>。道路扬尘的来源主要有 2 种:1) 由机动车尾气、城市裸地、建筑施工等直接排放的一次扬尘;2) 已经沉降的颗粒物在其他外力作用下(如机动车行驶或道路清扫作业)再次扬起并进入大气的二次扬尘。其中,一次扬尘约占道路扬尘污染的 70% 以上<sup>[2]</sup>。

从世界各国大气污染治理的历程看,道路扬尘是城市大气 PM<sub>10</sub> 的主要来源之一。韩国国立科学研究院研究发现,在首尔由扬尘排放的 PM<sub>10</sub> 占全市总 PM<sub>10</sub> 的 80.53%,其中道路扬尘贡献率高达 75%<sup>[3]</sup>。Claiborn 等<sup>[4]</sup>研究发现,美国华盛顿州 3/4 的 PM<sub>10</sub> 来自道路扬尘排放。Zimmer 等<sup>[5]</sup>则认为,铺装道路扬尘对美国丹佛地区主要城市 PM<sub>10</sub> 的贡献率达 40%~70%。江澜<sup>[6]</sup>利用二重源解析技术得出邯郸市大气颗粒物 PM<sub>10</sub> 中,道路扬尘贡献约占 55%。许妍等<sup>[7]</sup>利用 AP-42 模型对天津市道路扬尘排放量进行计算,结果表明天津市城区道路扬尘中 PM<sub>10</sub> 的年排放量高达 5 372 t。道路扬尘污染控制已经成为大气颗粒物污染控制和提高城市空气质量的当务之急。

研究道路扬尘检测方法对我国城市道路扬尘精细化治理具有重要意义。国外学者对道路扬尘的研究起步较早,但由于早期对扬尘的认识不足以及各种检测技术不成熟,使得道路扬尘的研究发展较为缓慢。直到 20 世纪 60 年代,随着测试技术的发展和分析仪器精度的提高,道路扬尘的相关研究取得了一定的进展<sup>[8]</sup>。经典的道路扬尘检测方法包括降尘法、AP-42 法、TRAKER 法、通量塔法、隧道法等,其中,降尘法、AP-42 法和 TRAKER 法应用较为广泛,至今仍被普遍采用。近年来,随着移动源对城市大气污染贡献的增大,以机动车污染排放为代表的道路环境颗粒物治理已经成为我国打好污染防治攻坚战当务之急。建设以涵盖道路扬尘、机动车尾气(NO<sub>x</sub>、细颗粒物、VOCs、CO)等多种污染物在内的道路环境空气质量检测技术体系至关重要。因此,道路扬尘微观站、大气环境移动监测车等监测方法应运而生。

当前国内外对道路扬尘排放检测方法的综述文献较少且较早,该类文献大多综合性强,缺乏全面性、系统性和时效性。如翟绍岩等<sup>[9]</sup>较早地对 AP-42 法和 TRAKER 法进行了概括和总结,着重对比了 2 种检测方法的优势和不足;朱振宇等<sup>[10]</sup>针对

降尘法、AP-42 法和 TRAKER 法 3 种方法进行了简要介绍和优缺点分析。笔者在上述文献综述的基础上,结合最新研究进展,对道路扬尘的检测方法进行概括和评述,并探讨道路扬尘检测方法的技术及理论发展现状,以期为我国道路扬尘的科学检测、精细化治理提供建议。

## 1 道路扬尘检测方法

降尘法、AP-42 法和 TRAKER 法是当前国内外被广泛应用的道路扬尘检测方法。此外,还包括一些非主流检测方法:1) 通量塔法<sup>[11]</sup>。将颗粒物检测仪安置在不同塔高上,测量道路扬尘的垂直扩散。虽然该方法符合直观地测量扬尘的思维,并且在 AP-42 法和 TRAKER 法建立和校正中得到了应用,但其受气象影响因素较大。2) 隧道法<sup>[12]</sup>。通过密闭隧道环境测定道路扬尘排放因子,但排放因子中包含了道路扬尘和机动车尾气两部分,可能导致排放因子被高估。3) 扩散模型系列方法<sup>[13-14]</sup>。包括扩散模型法、示踪物质模拟法等,虽然该类方法操作简单,但测定误差较大。种种局限性使得上述非主流方法在当前并未得到广泛应用,因此,暂且对该类方法不做过多论述。

### 1.1 降尘法

降尘法是一种早期发明的道路扬尘检测方法。国外学者 Jones<sup>[15]</sup>于 1984 年利用降尘法进行道路扬尘采集,其将金属托盘放置在路边,发现车速与金属托盘中的降尘质量具有较好相关性,降尘法在道路扬尘检测领域得到推广和应用。

采用该检测方法要选取具有代表性的路段,采样前确保集尘缸内干净且无任何杂质。一般将集尘缸布设在道路两侧的路灯杆上,并用 GPS 记录采样点的位置和收集时间。样品的实验室处理过程一般包括去除杂质(垃圾和树叶等)、干燥器平衡、筛分、称重等步骤。我国降尘法采样的具体要求及细则可参考 GB/T 15265—1994《环境空气 降尘的测定 重量法》。除了按照标准中规定的要求进行扬尘测定,监测高度、监测点与道路的水平距离等均应该根据研究道路的降尘分布确定。

随着各种道路扬尘检测方法的出现,相较而言当前对降尘法的应用较少,其主要应用于道路扬尘的粒径分析、化学组分及溯源分析。如王帅杰等<sup>[16]</sup>采用降尘法对石家庄市铺装道路扬尘量进行估算,采样高度设置为 1.5 m,采样周期为 30 d,结果表明总悬浮颗粒物(TSP)的浓度与地面因子呈准对数关

系。秦伟<sup>[17]</sup>对石家庄市夏冬两季道路扬尘的排放特征进行了研究,利用降尘缸收集了市区4类道路1.5和2.5 m高处的扬尘样品,在再悬浮及分级采样后进行了无机元素、碳组分及水溶性离子等化学组分分析。王士宝等<sup>[18]</sup>采用降尘法对乌鲁木齐市道路扬尘的PM<sub>2.5</sub>粒度乘数进行了测定,以期提高道路扬尘排放因子的计算精度。

## 1.2 AP-42法

美国国家环境保护局和中西部研究所于1968年首次提出AP-42道路扬尘排放模型,它是一种将污染物排放的影响因素与排放量联系到一起的模型。AP-42法目前在美国已经形成标准,英国专家<sup>[19]</sup>认为AP-42法并不符合英国实际情况;德国<sup>[20]</sup>将AP-42法进行修正并应用;我国HJ/T 393—2007《防治城市扬尘污染技术规范》中关于道路扬尘检测的规范内容主要基于AP-42法。

AP-42法具有成熟的理论体系和试验步骤,道路扬尘排放量的确定过程包括实际路面采样、道路积尘负荷(sL)计算、排放因子计算和排放量计算。道路积尘负荷表示单位面积路面上粒径小于75 μm的颗粒物的质量,单位为g/m<sup>2</sup>,它被用来表征路面的清洁程度,同时也是计算铺装道路扬尘排放因子重要参数<sup>[21-22]</sup>。

在AP-42法的理论研究上,国外学者主要针对排放因子的完善开展了大量研究。Cowherd等<sup>[23]</sup>在1984年首次提出道路积尘负荷,并将其作为排放因子的解释变量:

$$E = K \times (sL)^p \quad (1)$$

式中: $E$ 为颗粒物排放因子,g/(辆·km),即一辆机动车行驶1 km产生的颗粒物质量; $K$ 为粒度乘数,主要取决于排放因子和道路积尘负荷; $p$ 为经验常数。该模型的排放因子是基于可吸入颗粒物(当时美国国家环境保护局将粒径小于15 μm的粒子称为可吸入颗粒物)的排放因子获得的。通过测量可吸入颗粒物的质量浓度等计算可吸入颗粒物排放因子,再对可吸入颗粒物排放因子进行比例缩放而获得PM<sub>10</sub>的排放因子。颗粒物的排放因子与道路积尘负荷呈正相关,与车速呈负相关。同时,道路积尘负荷也与车速呈负相关,因此,该版本中仅把道路积尘负荷作为主要解释变量。

通过对不同类型的道路进行实测获得道路积尘负荷数据,并选取其中10个满足质量标准和最具代表性的数据与计算的排放因子进行线性回归分析,再对式(1)取对数、消减残差等处理,最终得到 $p$ 为

0.8, $K$ 为3.97 g/(辆·km)。

后续经过不断地完善和修订,得到了当前最新版本。最新排放因子在式(1)基础上将铺装道路上的平均车质量( $w$ )纳入排放因子中作为另一个解释变量<sup>[24]</sup>:

$$E = K \times (sL)^p \times w^b \quad (2)$$

式中: $K, p, b$ 数值由93组在美国不同类型道路上采集的试验数据进行多元线性回归得到,数据在代入前已经去除了汽车尾气排放、轮胎磨碎碎片等颗粒物的影响,最终得到 $p$ 为0.91, $b$ 为1.02, $K$ 为0.62 g/(辆·km)。该试验得到的 $K$ 值至今仍作为道路扬尘中PM<sub>10</sub>的粒度乘数( $K_{10}$ )被广泛应用。根据粒径谱仪的筛分结果,可以确定PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub>,记做 $\gamma$ <sup>[24]</sup>,道路扬尘中PM<sub>2.5</sub>的粒度乘数( $K_{2.5}$ )按下式计算:

$$K_{2.5} = \gamma \times K_{10} \quad (3)$$

道路扬尘排放量( $W$ )的计算公式如下:

$$W = E \times L \times N \times (1 - n_r/365) \times 10^{-6} \quad (4)$$

式中: $L$ 为道路长度,km; $N$ 为平均车流量,辆/a; $n_r$ 为不起尘天数,d。

目前,AP-42法已经成为许多国家研究道路扬尘排放量的主流方法,美国绝大多数的道路扬尘排放检测是依据AP-42法进行的。近年来,国内学者先后采用AP-42法对北京<sup>[25-26]</sup>、天津<sup>[27-28]</sup>、珠三角<sup>[29]</sup>等地区的主要城市道路扬尘排放进行了研究,确定了部分城市的道路积尘负荷,对城市精准治理道路扬尘、编制道路扬尘排放清单发挥了重要作用。

同时,国内学者从道路积尘采集方法和排放因子本地化方面不断完善和发展AP-42法。在道路积尘采集方法方面,樊守彬等<sup>[30]</sup>开发出一种移动式路面尘负荷测试系统,可对道路进行连续采样。黄玉虎等<sup>[31]</sup>发明了道路积尘湿式采样器,即对采样区域内的积尘采用液体收集的方法,将采样器与采样区域密闭对接,用液体冲刷并收集。与干式吸尘法相比,湿式吸尘法可以检测洒水车作业后的潮湿路面以及相对清洁(积尘量极少,难以收集)的道路。在排放因子优化方面,部分学者针对特定城市的道路扬尘排放因子进行了本地化处理,包括优化排放因子、测定不同区域粒度乘数等。如Chen等<sup>[32]</sup>采用再悬浮系统研究了北京市道路扬尘的粒径分布特征,该方法可以有效确定道路扬尘的粒径分布,为测定道路扬尘粒度乘数提供了方法。樊守彬等<sup>[33]</sup>对北京市通州区按不同道路类型和车流量级别进行积尘采样,采用再悬浮系统和颗粒物粒径谱仪对道路

积尘的粒径进行测量,发现粒径主要分布在 7.5 ~ 8  $\mu\text{m}$ ;以积尘负荷 0.5  $\text{g}/\text{m}^2$  为界限展开讨论,发现积尘负荷小于和大于 0.5  $\text{g}/\text{m}^2$  的积尘中粒度乘数存在差别,且粒度乘数均高于 AP-42 文件的推荐值 0.15  $\text{g}/(\text{辆} \cdot \text{km})$ 。南开大学姬亚琴团队对天津市<sup>[34]</sup>、乌鲁木齐市<sup>[18]</sup>等不同城市的道路扬尘中  $\text{PM}_{2.5}$  的粒度乘数特征进行了研究,发现不同类型机动车道的粒度乘数差别较大。

### 1.3 TRAKER 法

TRAKER 全称 testing re-entrained aerosol kinetic emissions from roads,即道路再悬浮气溶胶的动力排放测试系统,是一种评价道路扬尘排放的快速在线检测方法。其具体检测方法为:将颗粒物检测仪安装在机动车上,将传感器和采样头分别布设在机动车的前轮后侧(用于测量包括环境背景的地面扬尘浓度)和引擎盖上(用于测量颗粒物环境背景浓度);车上同时配备 GPS 定位系统进行实时定位,并配备数据收集和處理系统,实时反馈检测结果。Kuhns 等<sup>[35]</sup>首次采用 TRAKER 法进行道路现场测试,发现 TRAKER 法具有检测道路扬尘空间分布的能力,并且可以评估道路清扫、降水和季节变化等因素对扬尘排放的影响。Etyemezian 等<sup>[36]</sup>利用颗粒物检测仪(TSI, DustTrak 5820)测量了道路扬尘排放潜势,并给出了基于 TRAKER 法的数学描述。TRAKER 法理论上认为道路扬尘与机动车车速呈正相关,通过拟合的经验公式构建理论。TRAKER 法主要理论公式如下:

$$T = T_A - T_B = a \times S_A^b \quad (5)$$

$$\text{EF}_A = k \times T^{1/3} \quad (6)$$

$$\theta_A = \text{EF}_A / S_A \quad (7)$$

式中: $T$  为校正后的 TRAKER 信号浓度,  $\text{mg}/\text{m}^3$ ;  $T_A$  为车轮后侧测量的  $\text{PM}_{10}$  浓度,  $\text{mg}/\text{m}^3$ ;  $T_B$  为引擎上方测量的  $\text{PM}_{10}$  环境背景浓度,  $\text{mg}/\text{m}^3$ ;  $S_A$  为机动车行驶的速度,  $\text{m}/\text{s}$ ; Etyemezian 等<sup>[36]</sup>通过试验求得铺装道路中  $b$  约为 3;  $a$  与道路清洁程度有关,随着所检测道路的不同而变化;  $\text{EF}_A$  为道路扬尘排放因子,  $\text{g}/(\text{辆} \cdot \text{km})$ ;  $k$  为与 TRAKER 信号排放相关的经验常数,约为 8.8 [ $\text{g}/(\text{辆} \cdot \text{km})$ ]/( $\text{mg}/\text{m}^3$ )<sup>1/3</sup>;  $\theta_A$  为对速度校正后的排放因子(即相同单位速度下的排放因子),将其定义为道路扬尘排放潜势。

由式(5)~式(7)可得:

$$\theta_A = k \times a^{1/3} \quad (8)$$

由式(8)可知,排放潜势仅取决于  $a$ ,而  $a$  与路

面的清洁程度有关,反映了过往车辆引起的  $\text{PM}_{10}$  排放。

国外学者早期主要利用 TRAKER 法研究道路扬尘排放潜势,后续也有许多学者在前人理论上对 TRAKER 法进行了改进,如改变采样口的位置、针对不同城市开展不同目的的研究等<sup>[37-39]</sup>。Zhu 等<sup>[40]</sup>在前人理论上采用 TRAKER 法对 Tahoe 湖周围道路扬尘排放特征进行了全年的监测研究,道路类型包括主要公路、城市道路和街区道路,通过与通量塔的测量值进行线性拟合,得到排放因子与 TRAKER 信号( $\text{PM}_{10}$  浓度)之间的关系,进而获得排放潜势。Edvardsson 等<sup>[41]</sup>将 2 个相同的颗粒物检测仪放置在机动车顶部的保护盒中,其中一个检测仪的采样头放置在左反光镜上,用以记录  $\text{PM}_{10}$  的环境浓度,另一个检测仪的采样头放置在后挡风玻璃处,用以测量道路扬尘。

### 1.4 道路扬尘检测方法的联合应用

将不同的传统道路扬尘检测方法进行联合应用也是当前道路扬尘测定的主要技术手段之一。一方面,通过不同方法联用可以实现优势互补;另一方面,实际扬尘监测难以测量到其真实值,采用 2 种及以上方法进行联测和对比能提高测定精度。道路扬尘检测方法的联合应用主要基于各种方法间的理论联系、采样的便捷性和采样目的。

近年来,我国学者主要针对降尘法、AP-42 法和 TRAKER 法的联合应用开展了大量研究。如黄玉虎等<sup>[42]</sup>分别采用降尘法和 AP-42 法对北京市城八区不同类型道路进行了监测,并对 2 种方法进行了评估和比较,发现 2 种评估方法具有很好的正相关关系,相关系数( $R^2$ )为 0.78,并对 2 种方法的优劣进行了对比。张诗建等<sup>[43]</sup>联用 AP-42 法和 TRAKER 法研究了机动车车速对道路扬尘排放特征的影响,认为利用 AP-42 法计算不同城市、不同道路交通扬尘的排放因子和排放量时,除了需要考虑车流量和平均车质量外,还应该将机动车行驶速度考虑在内,这为 AP-42 法的进一步完善提供了依据。郭硕<sup>[44]</sup>联用 TRAKER 法和 AP-42 法建立了道路积尘负荷和 TRAKER 信号间的经验公式,研究了石家庄市夏季铺装道路机动车道的道路扬尘排放特征。这些研究都有助于未来道路扬尘检测方法的发展。

将 AP-42 法和 TRAKER 法联合应用具有现实可行性:1)从理论角度看,AP-42 法理论成熟、应用广泛,具有完整、具体的排放因子和排放量计算步骤,但在铺装道路扬尘排放因子计算中忽略了车速

对道路扬尘的影响;而 TRAKER 法考虑了车速对道路扬尘的影响。2) 从采样便捷性角度看, AP-42 法采样安全系数低、速度慢;而 TRAKER 法具有快速在线、安全便捷的优点。

## 2 道路环境颗粒物的监测方法

道路环境颗粒物监测方法按监测方式可分为固定监测法和移动监测法。其中,固定监测法又包括自动连续采样法和被动采样法。从国内外看,英国<sup>[45]</sup>、美国<sup>[46-48]</sup>、新西兰<sup>[49]</sup>等国家较早地建设了道路环境空气质量监测网络(由多个固定监测点组成),并出台了相应的标准。与之相比,我国道路环境颗粒物监测工作相对薄弱,目前仅在北京、上海、广州等个别城市建立了少量的交通污染监测点<sup>[50]</sup>。该类固定监测点俗称微观站,主要包括城市环境评价点、城市清洁对照点、区域背景传输点和交通污染监控点等。移动监测法主要通过车载仪器实现对大气环境的动态监测。

### 2.1 道路扬尘微观站监测法

道路扬尘微观站原理与城市环境空气质量监测站近似。由于大多数城市环境空气质量监测站布设在建筑物顶部平台或公园绿化平地,不能准确代表近路面环境的污染状况,因此道路扬尘微观站得以建立<sup>[51]</sup>。道路扬尘微观站是一种集数据采集、存储、传输和管理于一体的无人值守的环境采集系统,通过部署在沿街道路形成一套大气网格化环境质量监管系统,以云计算、大数据等新兴技术手段为支撑。除了可以实时监测道路扬尘颗粒物浓度外,还增加了数据上报、数据与监控视频融合、数据超标报警的功能。采用单元网格布点管理的方式,按照“网定格、格定责、责定人”的理念,建立“横向到边、纵向到底”的区域网格化监控平台,从源头有效地控制扬尘污染。即环保人员可以根据数据的变化,准确查找污染源的位置。目前,国内许多环保公司在研发微观站设备,并在一些城市和地区投入使用。如北京市大兴区、安徽省合肥市等通过建立道路扬尘微观站开展道路扬尘精细化治理,取得了良好的环境效益。

### 2.2 大气环境移动监测车监测法

大气环境移动监测车监测法也是我国当前主流的监测方法之一,目前在北京、石家庄、天津、唐山、潍坊、西安等多个城市和地区投入使用。大气环境移动监测车结合现代激光传感器等技术,是集环境巡查、信息处理、现场指挥于一体的移动环境指挥平台,可以实现对道路扬尘污染的日常巡检,以及对污

染性突发事件的实时监测<sup>[52]</sup>。该车由车体、空气质量传感器、气象系统、视频系统、数据采集系统、后备电源安全系统等组成。该监测法在原理上与 TRAKER 法近似但又存在理论区别, TRAKER 法通过实测颗粒物浓度换算得到道路扬尘排放潜势,而大气环境移动监测车直接获取颗粒物浓度作为结果,可以针对某个区域大气环境质量进行实时监测,监测数据可实时准确地传送至生态环境决策部门,进而提供技术支撑。

## 3 不同检测方法的优缺点对比

上述道路扬尘检测方法具有不同的优缺点,适用于不同目的的道路扬尘排放研究工作。不同道路扬尘检测方法的优缺点对比结果见表1。

降尘法利用降尘缸在一定时间段内进行样品收集,与 AP-42 法相比,采样安全。收集的样品由车辆激发扬起并自然沉降,能够真实反映车辆行驶过程中激发扬尘的真实情况,且能够反映一段时间内道路扬尘的平均状况,因此适用于以道路扬尘化学组分分析及溯源为目的的研究工作。然而,与 AP-42 法和 TRAKER 法相比,降尘法不能满足快速评估的需求,无法计数扬起并飘走的道路扬尘,易混入其他源的大气颗粒物降尘,受气象因素影响,且忽略了道路扬尘与车流量、车速、车质量之间的关系。此外,降尘法无法计算排放因子和排放量。

AP-42 法理论完善且被广泛采用,是当前较为成熟的一种道路扬尘检测方法。AP-42 法基本能够满足快速评估的需求,评估速度介于降尘法和 TRAKER 法之间,适用于以短时间内检测城市道路相对污染状况为目的的研究工作。采集的道路积尘通过再悬浮吸附到滤膜后,也可以进行相关化学组分及溯源分析,能够计算道路扬尘的排放因子和排放量。然而,由于 AP-42 模型本身具有不确定性,国内外许多学者对其进行了评估与试验验证。如 Venkatram<sup>[53]</sup>认为 AP-42 法的基本假设与实际状况并不相符, AP-42 法假设铺装道路路面颗粒物去除和来源处于动态平衡状态,使得路面上形成一层颗粒物层,其厚度与道路上的压痕平均深度有关。而在实际道路上,道路积尘会随着机动车车轮的挤压、机动车诱导气流、热射流等综合尘化作用再悬浮和再沉降而变化。Zimmer 等<sup>[5,54-55]</sup>相继通过试验论证了采用道路积尘负荷模拟计算排放因子的局限性,发现道路积尘负荷与排放因子间关系并不明显,粒度乘数背后的物理意义尚不清楚,无法验证。樊守

表 1 不同检测方法的对比

Table 1 Comparison of different detection methods

采样方法	优势	不足
降尘法	实施安全、操作简单、误差较小;能够反映一定时间内道路降尘的平均状况,具有代表性;能够较好地反映行驶车辆对道路扬尘的激发情况;适合于对道路扬尘化学组分的分析	评估周期较长,评估成本较高;极易受天气状况的影响(如大风、降水等);自然沉降使得收集细粒子扬尘较难,收集不完全;无法定量描述扬尘与车流量、车速和车质量之间的关系
AP-42 法	能够反映和评价路面污染程度,便于道路日常管理;技术相对成熟,应用较为广泛;成本较低,实施条件简单,能够满足快速评估需求	不能反映路面车辆激发扬尘的真实状况,不能反映风蚀扬尘;模型本身具有不确定性,忽略了车速对扬尘的影响;评估结果仅能代表短时间内的路面情况,评估误差较大;消耗大量人力物力、操作复杂、安全系数低
TRAKER 法	快速准确、简单安全;可实时在线显示道路扬尘污染状况、不同地点的污染程度;可对路面进行连续性监测;可在短时间内监测更多的活动水平	目前在国内外尚没有形成标准;转换公式为经验公式,误差较大
道路扬尘微观站监测法	网格化监测,可迅速识别污染源;适用于城市道路扬尘管理和精细化治理;省时省力、安全;传感器设备价格低廉,易于安装	目前尚未形成标准,各地采用的仪器型号、规格、站点数量及位置等无明确规定;目前无法用于计算道路扬尘排放量、编制道路扬尘排放清单;数据易发生漂移,造成数据不准确
大气环境移动监测车监测法	可对城市近路面环境实现动态监测;适用于城市道路扬尘管理和精细化治理;监测环境颗粒物的同时,可人为直观地发现污染源现场;可利用成熟监测仪器自行改装和搭建监测车,成本与道路扬尘微观站监测法相比较低	若提高检测范围,需要多台监测车辆同时进行监测;监测数据质量有待提高

彬等<sup>[56]</sup>认为 AP-42 法的铺装道路扬尘排放量的计算中缺乏对车速的考虑,研究发现排放因子与车速呈指数关系,幂指数为 2.7 ~ 2.8,车速越高,排放因子越大。此外,AP-42 法中各参数的确定主要依据为美国本土的道路试验,与我国道路实际状况可能存在差异。如我国现行道路扬尘检测规范中采用的 PM<sub>10</sub> 粒度乘数仍取值 0.62 g/(辆·km)。此外,该采样方法需要操作人员在实际路面进行采样,相对耗费人力物力且较为危险。虽然 AP-42 法存在局限性,不能够完全真实评估实际道路的绝对污染程度,但它却可以定量地评价道路清扫的质量、不同类型道路间的相对污染程度,仍然在道路扬尘检测中发挥着重要的作用。

TRAKER 法作为快速检测的主要技术之一,具有快速准确、实时在线、简单安全的特点。降尘法和 AP-42 法均在城市典型道路上按照一定的间隔进行采样,检测的活动水平有限,而 TRAKER 法却实现对道路连续检测、实时反映不同地点的污染状况,快速识别污染问题和污染源。此外,虽然 AP-42 法也能满足快速评估需求,但其评估速度远小于 TRAKER 法。然而,为了提高 TRAKER 法的科学性和准确性,仍然有许多环节需要进行试验验证和完善,如风速等气象参数对车轮带起的颗粒物扩散的

影响,不同车型、车质量和路面状况的影响等。目前 TRAKER 法仅限用于以检测道路污染程度为目的的研究,若对道路扬尘进行化学组分分析及溯源,仍然要结合降尘法或 AP-42 法。

与上述方法相比,道路扬尘微观站及大气环境移动监测车监测法主要利用传感器技术。采用传感器技术的微型站设备成本低,易于安装,可广泛布点,具有快速监测、准确识别道路扬尘污染源的优点,主要适用于城市道路扬尘治理、政府精细化道路扬尘管控。然而,目前该类方法不适用于计算道路扬尘排放因子、排放量以及编制道路扬尘排放清单。该方法目前我国尚未形成标准,各城市或地区对采样的仪器型号、规格、设立监测点数量和位置等无明确规定和要求,无法用于区域性道路扬尘排放情况的对比与评价,且后期运营费用较高。此外,微型化设备采用传感器技术,其数据易发生漂移,造成数据不准确。虽然许多地区对大气网格化监控做了有益尝试,但还是存在覆盖范围和监测要素不全、监测与监管结合不紧密等问题。大气环境移动监测车监测法同样主要依靠传感器技术,因此也存在传感器性能稳定性问题,成品监测车价格相对高昂,但可根据需求利用监测仪器自行搭建监测车,缩减成本。若想扩大监测范围,可多辆监测车同时进行监测。

## 4 结论与建议

当前流行的道路扬尘检测方法包括降尘法、AP-42法和TRAKER法,以及道路扬尘微观站监测法和大气环境移动监测车监测法,不同检测方法具有各自的优缺点。其中,降尘法、AP-42法和TRAKER法主要由欧美国家发明,我国早期道路扬尘检测方法主要参照西方的方法。随着道路扬尘已经不再是欧美国家大气环境的主要突出问题,欧美国家在道路扬尘检测方面的研究相对减少。为积极应对我国大气复合污染、解决道路扬尘等问题,伴随新技术产生的道路扬尘微观站监测法和大气环境移动监测车监测法被大量投入使用。为进一步规范和提高我国道路扬尘检测方法,提出如下建议。

(1)继续优化道路扬尘排放因子。传统检测方法主要采用西方道路扬尘采样技术,在排放因子确定上,大多借鉴欧美等国的排放因子或文献中的经验数据,这严重影响扬尘源排放清单和排放量核算的准确度。虽然我国学者针对排放因子本地化投入了大量研究,但仍不够全面和系统,研究结果受技术方法和手段等限制,我国仍需要以优化道路扬尘排放因子为目的开展大量的研究工作。

(2)科研人员和政府管理人员可结合检测目的选取合适的检测方法。若以计算道路扬尘排放量、编制排放清单、化学组分及溯源分析为目的,仍需要采用AP-42法或道路扬尘排放检测方法的联合应用;若以道路扬尘的直接管控为目的,上述方法均可实现。但我国各省(区、市)发展水平参差不齐,地方政府需要考虑投入成本,选取适合当地经济条件的检测方法。

(3)继续推动道路扬尘新兴检测方法的发展,进一步提升传感器的稳定性能。建议采用国标方法的小型化设备与道路扬尘微观站设备进行组合布点,数据统一联动校准。考虑到监测设备可能受到干扰气体或环境差异引起数据偏差,应着手建立和完善严谨、规范的环境质量校准体系。

(4)当前我国尚无标准化的道路扬尘检测方法,应结合新兴方法完善并统一道路扬尘排放的检测标准。我国关于道路扬尘的检测标准主要依据HJ/T 393—2007《防治城市扬尘污染技术规范》,该规范主要参照美国国家环境保护局的AP-42法,由于该规范制定较早,部分内容已经无法满足评估当前城市道路扬尘排放状况,应着手进一步完善。

## 参考文献

- [1] SAIKAWA E, KUROKAWA J, TAKIGAWA M, et al. The impact of China's vehicle emissions on regional air quality in 2000 and 2020: a scenario analysis [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, 11(18): 9465-9484.
- [2] 方国浩, 范明志, 盛利平. 道路扬尘污染源分析和治理方式[J]. *商用汽车*, 2008(9): 86-89.  
FANG G H, FAN M Z, SHENG L P. A study on pollution of road dust and emission and solutions [J]. *Commercial Vehicle*, 2008(9): 86-89.
- [3] 颜敏. 首尔市大气污染治理经验及借鉴[J]. *环境科学导刊*, 2018, 37(4): 6-9.  
YAN M. Experience and enlightenment of air pollution control in Seoul City [J]. *Environmental Science Survey*, 2018, 37(4): 6-9.
- [4] CLAIBORN C, MITRA A, ADAMS G, et al. Evaluation of PM<sub>10</sub> emission rates from paved and unpaved roads using tracer techniques [J]. *Atmospheric Environment*, 1995, 29(10): 1075-1089.
- [5] ZIMMER R A, REESER W K, CUMMINS P. Evaluation of PM<sub>10</sub> emission factors for paved streets [M]//CHOW J C, ONO D M. PM<sub>10</sub> standards and nontraditional particulate source controls. Pittsburgh, PA: Air Waste Management Association, 1992: 311-323.
- [6] 江澜. 邯郸市城市道路尘来源解析及对策研究[J]. *山西建筑*, 2011, 37(5): 208-209.  
JIANG L. On analysis of dust origins of urban roads in Handan and their strategies [J]. *Shanxi Architecture*, 2011, 37(5): 208-209.
- [7] 许妍, 周启星. 天津城市交通道路扬尘排放特征及空间分布研究[J]. *中国环境科学*, 2012, 32(12): 2168-2173.  
XU Y, ZHOU Q X. Emission characteristics and spatial distribution of road fugitive dust in Tianjin, China [J]. *China Environmental Science*, 2012, 32(12): 2168-2173.
- [8] 侯益铭, 叶泽甫, 竹涛. 铺装道路扬尘研究现状[C]//《环境工程》2019年全国学术年会论文集. 北京:《环境工程》编辑部, 2019: 388-392.
- [9] 翟绍岩, 乐群, 魏海萍, 等. 扬尘估算的采样方法对比[J]. *环境科学与管理*, 2007, 32(11): 122-124.  
ZHAI S Y, YUE Q, WEI H P, et al. The comparison of field sampling methods for dust emission estimating [J]. *Environmental Science and Management*, 2007, 32(11): 122-124.
- [10] 朱振宇, 张诗建, 张亚飞, 等. 道路交通扬尘采样方法研究进展[J]. *环境与可持续发展*, 2014, 39(1): 41-45.  
ZHU Z Y, ZHANG S J, ZHANG Y F, et al. Research progress on the sampling methods of road traffic dust [J]. *Environment and Sustainable Development*, 2014, 39(1): 41-45.
- [11] MATHISSEN M, SCHEER V, KIRCHNER U, et al. Non-exhaust PM emission measurements of a light duty vehicle with a mobile trailer [J]. *Atmospheric Environment*, 2012, 59: 232-242.
- [12] 何月欣. 基于AP-42方法的东北三省道路扬尘排放清单研究[D]. 长春: 中国科学院大学(中国科学院东北地理与农业生态

- 态研究所),2018.
- [13] ETYEMEZHIAN V, KUHNS H, GILLIES J, et al. Vehicle-based road dust emission measurement: I. methods and calibration [J]. *Atmospheric Environment*, 2003, 37(32):4559-4571.
- [14] CLAIBORN C, MITRA A, ADAMS G, et al. Evaluation of PM<sub>10</sub> emission rates from paved and unpaved roads using tracer techniques [J]. *Atmospheric Environment*, 1995, 29(10):1075-1089.
- [15] JONES T E. Dust emission from unpaved roads in Kenya [R]. Crowthorne: Transport and Road Research Laboratory, 1984.
- [16] 王帅杰, 朱坦, 洪刚. 石家庄市地面起尘量估算方法 [J]. *城市环境与城市生态*, 2003, 16(6):248-250.  
WANG S J, ZHU T, HONG G. Evaluating particulate emission inventory from ground surfaces in Shijiazhuang City [J]. *Urban Environment & Urban Ecology*, 2003, 16(6):248-250.
- [17] 秦伟. 基于降尘法的石家庄市夏冬两季道路扬尘排放特征研究 [D]. 石家庄: 河北科技大学, 2019.
- [18] 王士宝, 姬亚芹, 张伟, 等. 乌鲁木齐道路扬尘 PM<sub>2.5</sub> 粒度乘数特征 [J]. *环境科学研究*, 2018, 31(7):1201-1206.  
WANG S B, JI Y Q, ZHANG W, et al. PM<sub>2.5</sub> particle size multiplier feature of road dust in Urumqi City [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2018, 31(7):1201-1206.
- [19] Airborne Particles Expert Group. Source apportionment of airborne particulate matter in the United Kingdom [R]. Wokingham: Transport Research Laboratory, 1999:1-10.
- [20] DRING I, JACOB J, LOHMEYER A, et al. Estimation of the "non exhaust pipe" PM<sub>10</sub> emissions of streets for practical traffic air pollution modelling [C]//STURM P, MINARIK S. Proceedings of the 11th International Symposium, Transport and Air Pollution. Graz: Graz University of Technology, 2002:309-316.
- [21] 王凯, 樊守彬, 孙改红, 等. 北京市延庆区道路扬尘排放特征及影响因素 [J]. *环境工程技术学报*, 2019, 9(1):1-7.  
WANG K, FAN S B, SUN G H, et al. Emission characteristics and impact factors of road fugitive dust in Yanqing District, Beijing City [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2019, 9(1):1-7.
- [22] 吴丽萍, 文科军. 机动车行驶过程道路扬尘影响因素试验研究 [J]. *环境科学与管理*, 2008, 33(12):34-36, 80.  
WU L P, WEN K J. Study on the effective factors of road dust during motor vehicle running [J]. *Environmental Science and Management*, 2008, 33(12):34-36, 80.
- [23] COWHERD J C, ENGLEHART P J. Paved road particulate emissions [R]. Washington DC: US Environmental Protection Agency, 1984:8-30.
- [24] US EPA. Emission factor documentation for AP-42, section 13.2.1 paved roads [R]. Washington DC: Office of Air Quality Planning and Standards, US Environmental Protection Agency, 2011:1-13.
- [25] 亓浩云, 樊守彬, 王凯. 北京市不同功能区冬季道路扬尘排放特征 [J]. *环境工程技术学报*, 2020, 10(3):323-329.  
QI H Y, FAN S B, WANG K. Characteristics of dust emissions from roads in different functional areas of Beijing [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2020, 10(3):323-329.
- [26] 竹涛, 李冉冉, 李笑阳, 等. 北京市道路扬尘时空变化特征的研究 [J]. *环境污染与防治*, 2016, 38(12):38-42.  
ZHU T, LI R R, LI X Y, et al. Research on temporal-spatial variation characteristics of road dust in Beijing City [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2016, 38(12):38-42.
- [27] 许妍, 周启星. 天津城市交通道路扬尘排放特征及空间分布研究 [J]. *中国环境科学*, 2012, 32(12):2168-2173.  
XU Y, ZHOU Q X. Emission characteristics and spatial distribution of road fugitive dust in Tianjin, China [J]. *China Environmental Science*, 2012, 32(12):2168-2173.
- [28] 张伟, 姬亚芹, 李树立, 等. 天津市春季典型道路积尘负荷分布特征 [J]. *中国环境监测*, 2018, 34(1):54-59.  
ZHANG W, JI Y Q, LI S L, et al. The distribution characteristics of silt loading of typical roads in Tianjin during spring [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2018, 34(1):54-59.
- [29] 彭康, 杨杨, 郑君瑜, 等. 珠江三角洲地区铺装道路扬尘排放因子与排放清单研究 [J]. *环境科学学报*, 2013, 33(10):2657-2663.  
PENG K, YANG Y, ZHENG J Y, et al. Emission factor and inventory of paved road fugitive dust sources in the Pearl River Delta Region [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, 33(10):2657-2663.
- [30] 樊守彬, 田刚, 程水源. 移动式路面尘负荷测试系统及应用 [J]. *环境科学与技术*, 2012, 35(3):139-142.  
FAN S B, TIAN G, CHENG S Y. Spatial distributions of road silt loading based on mobile monitoring system [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 35(3):139-142.
- [31] 黄玉虎, 李东晨, 秦建平, 等. 道路积尘湿式采样器研发与测试评价 [J]. *环境工程学报*, 2017, 11(3):1975-1980.  
HUANG Y H, LI D C, QIN J P, et al. Developing and test evaluating of wet road dust sampler [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2017, 11(3):1975-1980.
- [32] CHEN J H, ZHENG H F, WANG W, et al. Resuspension method for road surface dust collection and aerodynamic size distribution characterization [J]. *China Particology*, 2006, 4(6):300-303.
- [33] 樊守彬, 杨涛, 王凯, 等. 道路扬尘排放因子建立方法与应用 [J]. *环境科学*, 2019, 40(4):1664-1669.  
FAN S B, YANG T, WANG K, et al. Methods and application of road fugitive dust emission factor localization [J]. *Environmental Science*, 2019, 40(4):1664-1669.
- [34] 张伟, 姬亚芹, 李树立, 等. 天津市春季样方法道路扬尘 PM<sub>2.5</sub> 粒度乘数特征 [J]. *中国环境科学*, 2016, 36(7):1955-1959.  
ZHANG W, JI Y Q, LI S L, et al. PM<sub>2.5</sub> size multiplier feature of road dust in Tianjin during spring with quadrat sampling method [J]. *China Environmental Science*, 2016, 36(7):1955-1959.
- [35] KUHNS H, ETYEMEZHIAN V, LANDWEHR D, et al. Testing re-entrained aerosol kinetic emissions from roads: a new approach to infer silt loading on roadways [J]. *Atmospheric Environment*, 2001, 35(16):2815-2825.
- [36] ETYEMEZHIAN V, KUHNS H, CHOW J, et al. Using TRAKER to understand spatial and temporal trends in road dust emissions: the



- treasure valley road dust study [J]. *Atmospheric Environment*, 2003, 37:4559-4571.
- [37] KUHNS H, ETYEMEZIAN V, GREEN M, et al. Vehicle-based road dust emission measurement: Part II. effect of precipitation, wintertime road sanding, and street sweepers on inferred PM<sub>10</sub> emission potentials from paved and unpaved roads [J]. *Atmospheric Environment*, 2003, 37(32):4573-4582.
- [38] ETYEMEZIAN V, KUHNS H, NIKOLICH G. Precision and repeatability of the TRAKER vehicle-based paved road dust emission measurement [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, 40(16):2953-2958.
- [39] KUHNS H, GILLIES J, ETYEMEZIAN V, et al. Spatial variability of unpaved road dust PM<sub>10</sub> emission factors near El Paso, Texas [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2005, 55(1):3-12.
- [40] ZHU D Z, KUHNS H D, BROWN S, et al. Fugitive dust emissions from paved road travel in the Lake Tahoe Basin [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2009, 59(10):1219-1229.
- [41] EDVARDSSON K, MAGNUSSON R. Monitoring of dust emission on gravel roads: development of a mobile methodology and examination of horizontal diffusion [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, 43(4):889-896.
- [42] 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.
- HUANG Y H, LI G, YANG T, et al. Establishment and comparison of evaluation methods for fugitive road dust [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2011, 24(1):27-32.
- [43] 张诗建, 姬亚芹, 朱振宇, 等. 机动车车速对道路交通扬尘排放特征的影响 [J]. *环境污染与防治*, 2016, 38(4):82-84.
- ZHANG S J, JI Y Q, ZHU Z Y, et al. Influence on emission characteristics of road traffic dust caused by vehicle speed [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2016, 38(4):82-84.
- [44] 郭硕. 石家庄市道路扬尘排放特征研究 [D]. 石家庄: 河北科技大学, 2018.
- [45] MARSDEN G, BELL M C. Road traffic pollution monitoring and modelling tools and the UK national air quality strategy [J]. *Local Environment*, 2001, 6(2):181-197.
- [46] US Environmental Protection Agency. EPA history: clean air act of 1970/1977 [EB/OL]. (2018-08-08) [2020-05-31]. <https://www.epa.gov/history/epa-history-clean-air-act-19701977>.
- [47] A summary for transportation programs and provisions of the clean air act amendments of 1990: FHWA-PD-92-023 [S]. Washington DC: US Department of Transportation, Federal Highway Administration, 1992.
- [48] HOWITT A M, MOORE E M. Linking transportation and air quality planning: implementation of the transportation conformity regulations in 15 nonattainment areas [R]. Washington DC: US Environmental Protection Agency, 1999.
- [49] New Zealand Ministry of Transport. Land transport management act 2003: 2003 No 118 [S]. Wellington: New Zealand Ministry of Transport, 2003.
- [50] 梁文艳, 孙德智, 黄珊. 编制城市交通道路环境空气质量监测技术规范的探讨 [J]. *环境科学研究*, 2010, 23(5):581-586.
- LIANG W Y, SUN D Z, HUANG S. Discussion of the compilation of technical specifications for monitoring air quality of urban typical traffic roads [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2010, 23(5):581-586.
- [51] 熊新竹, 陶双成, 高硕晗, 等. 国外道路环境空气质量监测技术体系建设经验及对我国的启示 [J]. *交通运输研究*, 2019, 5(3):25-33.
- XIONG X Z, TAO S C, GAO S H, et al. Experience of foreign road environmental air quality monitoring technology system construction and its enlightenment to China [J]. *Transport Research*, 2019, 5(3):25-33.
- [52] 秦孝良, 侯鲁健, 高健, 等. 基于移动传感器的城市道路颗粒物污染特征 [J]. *中国环境科学*, 2020, 40(3):948-955.
- QIN X L, HOU L J, GAO J, et al. Pollution characteristics of particulate matter in urban roads: high spatial and temporal resolution monitoring based on mobile sensors [J]. *China Environmental Science*, 2020, 40(3):948-955.
- [53] VENKATRAM A. A critique of empirical emission factor models: a case study of the AP-42 model for estimating PM<sub>10</sub> emissions from paved roads [J]. *Atmospheric Environment*, 2000, 34(1):1-11.
- [54] KANTAMANENI R, ADAMS G, BAMESBERGER L, et al. The measurement of roadway PM<sub>10</sub> emission rates using atmospheric tracer ratio techniques [J]. *Atmospheric Environment*, 1996, 30(24):4209-4223.
- [55] ASHBAUGH L, CHANG D, FLOCCHINI R G, et al. Traffic generated PM<sub>10</sub> "hot spots" [R]. California: Air Quality Group, Crocker Nuclear Laboratory, University of California, 1996.
- [56] 樊守彬, 李雪峰, 张东旭, 等. 道路交通扬尘排放因子测量系统研发及应用 [J]. *环境科学学报*, 2016, 36(10):3569-3575.
- FAN S B, LI X F, ZHANG D X, et al. Development and application of an emission factor measurement system for road fugitive dust [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, 36(10):3569-3575. □