

# 基于车速-流量模型的动态化道路扬尘清单编制方法与应用

贺靖贻, 宋立来, 李 虎, 舒 秦, 毕晓辉\*, 冯银厂

南开大学环境科学与工程学院, 国家环境保护城市空气颗粒物污染防治重点实验室, 天津 300350

**摘要:** 目前国内外关于道路扬尘排放的计算多采用美国环境保护局推荐的 AP-42 排放因子法, 直接计算道路扬尘的年均排放总量, 但其动态化程度不足, 难以满足日益增长的精细化管理需求. 本研究采用车速-流量模型构建高时间分辨率的道路车流量获取方法. 以天津市为例, 采用自下而上的方法, 结合本地化的排放因子以及天津市采取的道路扬尘控制措施, 借助 GIS 平台编制高时空分辨率的道路扬尘排放清单, 精细反映天津市道路扬尘排放的时空分布特征. 结果表明: ①时间尺度上, 受早晚高峰的影响, 城市道路在 08:00—09:00 与 18:00—19:00 扬尘排放强度较大, 13:00—14:00 是白天扬尘排放强度的低值时段. ②空间尺度上, 夜间 (03:00—04:00) 道路扬尘排放强度的高值区域集中在高速路段, 白天扬尘排放强度的低值时段 (13:00—14:00) 集中在城市道路中支路密集的地区, 道路扬尘排放强度高峰时期 (18:00—19:00) 集中在各类型的城市道路. 全年道路扬尘排放高值区域集中在城市支路和郊区道路. ③天津市内六区全年道路扬尘  $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$ 、TSP 排放量分别为 603、2 492 和 12 986 t, 相较以往研究有所下降. 从区域看, 道路扬尘排放总量呈偏远郊区>环城四区>市内六区的规律. 城市道路采取的洒水措施明显降低了道路扬尘排放总量. 研究显示, 受交通扰动影响, 道路扬尘排放呈现明显的时空分布差异.

**关键词:** 道路扬尘; 车速-流量模型; 动态化; 排放清单

中图分类号: X513

文章编号: 1001-6929(2023)03-0490-10

文献标志码: A

DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2022.12.15

## Construction and Application of Dynamic Fugitive Road Dust Emission Inventory Approach Based on Traffic Speed-Flow Model

HE Jingyi, SONG Lilai, LI Hu, SHU Qin, BI Xiaohui\*, FENG Yinchang

State Environment Protection Key Laboratory of Urban Particulate Air Pollution Prevention, College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300350, China

**Abstract:** The calculation of fugitive road dust emissions mostly adopts the AP-42 emission factor method recommended by the US Environmental Protection Administration. It directly calculates the average annual total emission of fugitive road dust, which is difficult to meet the growing demand for refined management for the degree of dynamics is not enough. This study develops a new approach to obtain high-time-resolution traffic volume information by using traffic speed-flow model. Taking Tianjin City as an example, this study adopts the bottom-up method and combines Tianjin's localized emission factors, road dust control measures of and GIS platform to compile a high temporal and spatial resolution fugitive road dust emission inventory, which can better reflect the temporal and spatial distribution characteristics of fugitive road dust emissions in Tianjin City. The results show that: (1) On the time scale, due to influence of traffic peaks in the morning and evening, the emissions of urban fugitive road dust are higher during 08:00-09:00 and 18:00-19:00, and 13:00-14:00 is the relatively low period of the daytime dust emission. (2) On the spatial scale, the high dust emission areas are concentrated in the highway at night (03:00-04:00), in areas with dense urban branch roads at noon (13:00-14:00) and in various urban roads at peak time (18:00-19:00). Annually, the high emission areas are concentrated in roads out of the city and dense urban branch roads. (3) The annual  $PM_{2.5}$ ,  $PM_{10}$  and TSP emissions of the six city districts are 603, 2,492 and 12,986 t, respectively, which are lower than previous studies. The total fugitive road dust emissions are as follows: remote suburbs > four districts around the city > six city districts. Sprinkling urban roads can significantly reduce the total fugitive road dust emissions. This study shows there are significant differences in the temporal and

收稿日期: 2022-10-14

修订日期: 2022-12-09

作者简介: 贺靖贻(1997-), 女, 河南南阳人, 1023674921@qq.com.

\* 责任作者, 毕晓辉(1980-), 男, 山东商河人, 教授, 博士, 博导, 主要从事大气污染成因与来源解析研究, bixh@nankai.edu.cn

基金项目: 大气重污染成因与治理攻关项目 (No.DQGG202102); 国家自然科学基金项目 (No.42275190)

Supported by National Research Program for Key Issues in Air Pollution Control, China (No.DQGG202102); National Natural Science Foundation of China (No.42275190)

spatial distribution of road dust emissions due to the dynamic changes in traffic volume.

**Keywords:** fugitive road dust; traffic speed-flow model; dynamic; emission inventory

近年来,我国环境空气质量明显改善<sup>[1]</sup>,颗粒物浓度大幅下降<sup>[2]</sup>,总体仍处于平台期、瓶颈期,各源类亟需更加精细化的减排路径与控制方案.作为我国北方城市颗粒物污染的重要来源<sup>[3-6]</sup>,道路扬尘一直是各地管控的重点,各级管理部门投入了大量人力物力<sup>[7-9]</sup>,取得了一定效果,但相关措施的精细化程度明显不足,盲目控制、过分控制的现象多有发生.在精细化管控技术支撑体系中,基于动态化排放清单的污染源排放规律的挖掘与梳理尤为重要,是指导精细化管理工作的基石<sup>[10-12]</sup>.道路扬尘排放具有明显的动态化特点,这与其产生机制密切相关<sup>[13-16]</sup>,其中机动车的行驶速度与流量的动态变化成为道路扬尘排放波动的主要驱动因素,是道路扬尘动态化清单编制中迫切需要获取的关键基础信息.

目前,国内外关于道路扬尘排放的计算多采用美国环境保护局推荐的 AP-42 排放因子法<sup>[17]</sup>,直接计算道路扬尘的年均排放总量,但其动态化程度不足<sup>[18-21]</sup>.在车流量资料的应用上,已有研究多以典型道路人工计数的方法获取交通流量<sup>[22-23]</sup>,较少将高时间分辨率的动态化车流量资料用于道路扬尘清单的编制.可见,现有道路扬尘清单编制方法动态化程度不足,难以满足日益增长的精细化管理需求.

本文拟利用高时间分辨率(10 min)道路实时速度信息,结合车速-流量模型,提出城市尺度不同类型道路高时间分辨率的车流量构建方法,并以天津市为例,构建 1 km×1 km 与 1 h×1 h 的高时空分辨率道路扬尘排放清单,探究天津市道路扬尘动态化排放规律,以为道路扬尘清单的动态化编制提供方法与思路,同时为城市道路扬尘精细化管控与空气质量数值模拟提供数据支持.

## 1 研究区域与方法

### 1.1 研究区域

天津市是我国北方第二大城市,辖 16 个行政区域,其中,和平区、河西区、南开区、河东区、河北区、红桥区是市内六区,人口密集,交通流量大;北辰区、东丽区、西青区和津南区环绕市中心,称为环城四区,由城市外扩发展而来,面积约为市内六区的 10 倍,与市内六区连接紧密;武清区、宝坻区、蓟州区、宁河区、静海区和滨海新区为 6 个郊区,位于天津市边缘,较为独立.环城四区及 6 个郊区面积较大,每个区域均有商圈和住宅密集的城市区域以及郊区.

### 1.2 道路扬尘排放因子模型

本研究采用美国环境保护局推荐的 AP-42 排放因子法<sup>[17]</sup>进行道路扬尘清单的构建,计算公式:

$$W_{Ri} = E_{Ri} \times L_R \times N_R \times \left(1 - \frac{n_r}{365}\right) \quad (1)$$

$$E_{Ri} = k_{Ri} \times (sL)^{0.91} \times W^{1.02} \times (1 - \eta) \quad (2)$$

式中:  $W_{Ri}$  为道路扬尘中  $PM_i$  (空气动力学粒径在 0~ $i$   $\mu m$  之间的颗粒物) 及 TSP (空气动力学直径  $\leq 100 \mu m$  的颗粒物) 的总排放量, g/h;  $E_{Ri}$  为道路扬尘源  $PM_i$  及 TSP 的排放因子, g/(辆·km);  $L_R$  为道路长度, km;  $N_R$  为道路车流量, 辆/h;  $n_r$  为不起尘天数, d, 取研究期间降水量大于 0.25 mm/d 的天数, 本研究从气象监测站获取天津市 2019—2021 年的降水天数, 采用 3 年降水天数的平均值 (42) 表示;  $k_{Ri}$  为道路扬尘中  $PM_i$  及 TSP 的粒度乘数, 根据《扬尘源颗粒物排放清单编制技术指南》<sup>[24]</sup>, TSP、 $PM_{10}$  和  $PM_{2.5}$  的粒度乘数分别为 3.23、0.62 和 0.15;  $sL$  为路面积尘负荷, g/m<sup>2</sup>;  $W$  为道路平均车质量, t;  $\eta$  为不同污染控制技术对扬尘的去除效率, %.

### 1.3 车流数据获取方法的构建

道路车流量的动态化是道路扬尘波动的主要驱动因素,并决定清单的时间分辨率.车速-流量模型根据交通速度与交通流量的关系,可利用道路平均速度估算道路实时车流量<sup>[25]</sup>.

Greenshields 通过大量交通调查发现,车辆在道路行驶的实时速度 ( $V$ ) 随道路交通流密度 ( $K$ ) 的增加而减少<sup>[26]</sup>,假设二者呈线性关系[见式 (4)],进而根据交通流理论中交通流量 ( $Q$ )、道路实时速度 ( $V$ )、道路交通流密度 ( $K$ ) 的关系[见式 (3)]构建了反映交通流量 ( $Q$ ) 与实时速度 ( $V$ ) 关系的 Greenshields 车速-流量模型[见式 (5)],是目前广泛使用的车速-流量模型之一.本研究在该模型基础上,结合道路实时速度信息,构建高时间分辨率的道路交通流量获取方法,以实现动态化道路扬尘清单的编制.

$$Q = K \times V \quad (3)$$

$$K = K_j \times \left(1 - \frac{V}{V_f}\right) \quad (4)$$

$$Q = K_j \times \left(V - \frac{V^2}{V_f}\right) \quad (5)$$

式中:  $Q$  为单车道车流量, 辆/h;  $V$  为道路实时速度,

km/h;  $K$ 为道路交通流密度,辆/km;  $K_j$ 为道路阻塞时的交通流密度,辆/km;  $V_f$ 为道路自由流(即畅通行驶)的速度,km/h.

道路阻塞时的交通流密度( $K_j$ )是造成交通阻塞时单位长度道路的交通流量,等级越高、自由流速度越高的道路,道路阻塞时车辆移动速度也越高,单位道路长度上的车流量即道路阻塞时的交通流密度( $K_j$ )也应越高.本研究在此基础上引入道路通行能力理论[见式(6)]<sup>[27]</sup>,其由道路实时速度、连续车流行驶时的车头间距决定[见式(7)].道路的最大通行能力表示单车道车辆以连续车流行驶时的道路车流量,即单车道能承受的最大交通流量,在数值上应等同于 Greenshields 模型中的饱和车流量.道路的最大通行能力反映不同等级道路车道上以最大交通流量通过时,由行驶速度不同造成的道路通行能力差别,结合饱和车流量数值,可以获得不同等级道路阻塞时的交通流密度 $K_j$ ,提高模型模拟精度.

$$Q' = V/L$$

(6)

$$L = L_0 + L_1 + V \times t + I \times V^2$$

(7)

式中:  $Q'$ 为车辆以连续车流通过时的道路理论通行能力,辆/h;  $L$ 为车辆以连续车流行驶时的车头间距,km;  $L_0$ 为停车时车辆安全距离,取 0.003 5 km;  $L_1$ 为车身长度,取常见车辆长度的平均值 0.004 5 km;  $t$ 为驾驶员反应时间,取 1.98 s 即 0.000 55 h;  $I$ 表示与车质量、路面阻力、黏着系数有关的参数.

实际道路往往有多条车道,不同车道交通流量分布不均匀<sup>[28-29]</sup>.本研究查阅《公路工程技术标准》<sup>[30]</sup>与实地视频调研,获取不同等级道路的车道数与车道交通流量分布情况.结合道路车道数及视频调研获取的不同道路车道交通流量分布情况,采用相应的车道系数修正多车道对交通流量的影响.

1.4 AP-42 模型中其他参数获取方法与结果

1.4.1 道路类型与长度

本研究根据道路等级及日均车流量的明显不同将天津市道路分为 7 种类型(见图 1),利用 GIS 技术结合天津市道路底图获取各类型道路的长度如表 1 所示.道路底图信息来源于全国地理信息系统<sup>[31]</sup>.

1.4.2 积尘负荷与平均车质量

道路积尘负荷为单位面积路面能通过 200  $\mu\text{m}$  标准筛的积尘质量,表征路面清洁程度.本研究拟采用张伟等<sup>[32-33]</sup>以真空吸尘法和快速采样法获取的天津市道路积尘负荷结果展开研究.道路平均车质量是道路上行驶车辆的平均质量.本研究在实测车流量的同时,同步获取车辆类型及比例数据,根据我国《汽车

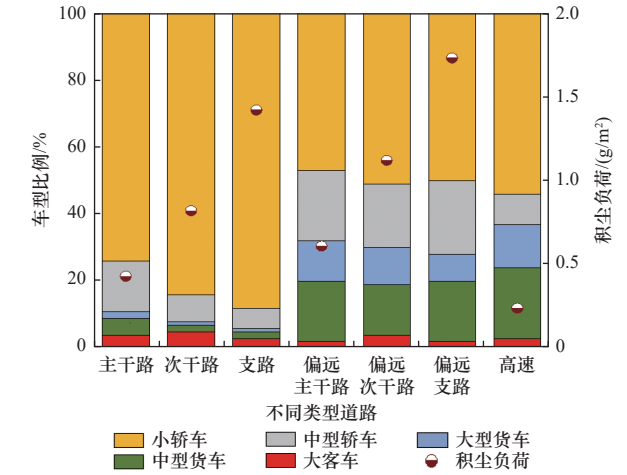


图 1 不同类型道路的车辆比例与积尘负荷

Fig.1 Vehicle type proportion and the silt loading of different road types

表 1 天津市不同类型道路长度

Table 1 Lengths of different road types in Tianjin City

| 一级类别 | 二级类别       | 道路长度/km |
|------|------------|---------|
| 城市道路 | 主干路(核心主干路) | 1 493   |
|      | 次干路        | 1 338   |
|      | 支路         | 2 056   |
| 郊区道路 | 偏远主干路      | 2 058   |
|      | 偏远次干路      | 3 017   |
|      | 偏远支路       | 5 388   |
|      | 高速         | 1 713   |

和挂车类型的术语和定义<sup>[34]</sup>将天津市道路上的车辆分为小轿车、中型轿车、大型货车、中型货车和大客车共 5 类.本研究实测城市主干路、次干路与支路三种类型道路,郊区道路的车辆比例分布情况参考天津市已有研究结果<sup>[33]</sup>,不同类型道路的车辆比例与积尘负荷如图 2 所示.查阅相应车型对应的平均车质量得到道路平均车质量如表 2 所示.

1.4.3 管控措施

道路洒水措施并不能明显降低道路积尘负荷,而是通过增加道路积尘的含水量,在润湿、凝并、固结等机理下抑制道路起尘.洒水措施虽不能降低积尘负荷,但可以在短时间内有效降低起尘效率<sup>[35]</sup>,结合天津市近年来针对城市道路采取的严格洒扫措施<sup>[36]</sup>,有必要考虑公式中控制效率措施这一参数,来纳入洒水的影响.洒水措施在短时间内与长时间平均状态下的控制效率有所不同,且逐条道路洒水的频次、时间均不一致,本研究选择《扬尘源颗粒物排放清单编制技术指南》<sup>[24]</sup>中推荐的平均状态下的控制效率进行计算,结果如表 3 所示.

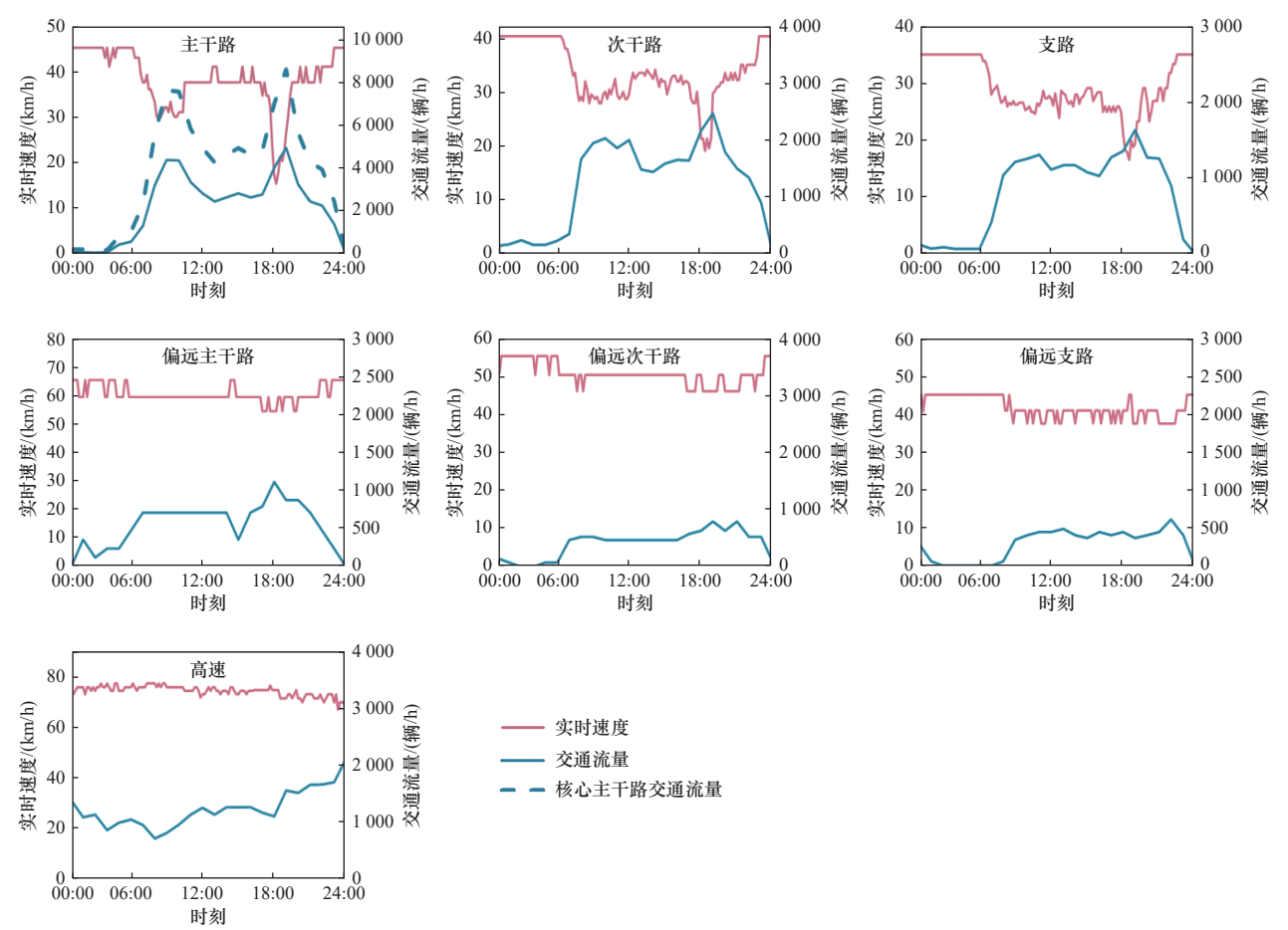


图2 基于车速-流量模型模拟的不同道路类型的交通流量

Fig.2 Traffic volume of different road types based on traffic speed-flow model

表2 不同类型道路的平均车质量

Table 2 Average vehicle weight of different road types

| 道路类型    | 主干路  | 次干路  | 支路   | 偏远主干路 | 偏远次干路 | 偏远支路 | 高速   |
|---------|------|------|------|-------|-------|------|------|
| 平均车质量/t | 1.86 | 1.83 | 1.72 | 2.77  | 2.58  | 2.39 | 2.92 |

表3 天津市对不同类型道路采取的清洁控制措施

Table 3 Road cleaning measures of different road types in Tianjin City

| 控制措施     | 道路类型 | 控制效率/%            |                  |     |
|----------|------|-------------------|------------------|-----|
|          |      | PM <sub>2.5</sub> | PM <sub>10</sub> | TSP |
| 吸尘清扫     | 主干路  | 9                 | 11               | 13  |
|          | 次干路  | 9                 | 11               | 13  |
|          | 支路   | 6                 | 7                | 8   |
| 洒水(2次/d) | 主干路  | 46                | 55               | 66  |
|          | 次干路  |                   |                  |     |

2 结果与讨论

2.1 基于车速-流量模型的动态化车流数据结果与验证

2.1.1 模拟结果

地理信息技术的发展使高时间分辨率(10 min)的道路实时速度信息获取成为可能<sup>[37-38]</sup>,采用该方法结合智能交通平台提供的道路实时速度信息,本研究模拟了覆盖天津市12个区100多条道路的车流变化情况,根据道路实时速度变化情况与日均车流量的差别分为7种类型道路,将其耦合为1 h×1 h的车流数据输入道路扬尘清单。

模拟结果(见图3)显示:城市道路流量随早晚高峰的到来呈明显的峰值变化特征,核心主干路高峰时期道路车流量可达8 000辆/h;郊区道路一天内车流量变化趋势较为平稳,日均车流量明显小于同类型的城市道路。受车道数、车速-流量模型中不同道路自由流速度、道路阻塞密度影响,车流量按道路类型呈主干路>次干路>支路的规律。

2.1.2 实测验证

本研究以实测方式检验该方法模拟道路车流量的准确性。2022年4月在交通流畅处分别选取天津市内六区主干路、次干路和支路各一条,于07:00—10:00(早高峰)、13:00—16:00(午后)、22:00—翌日

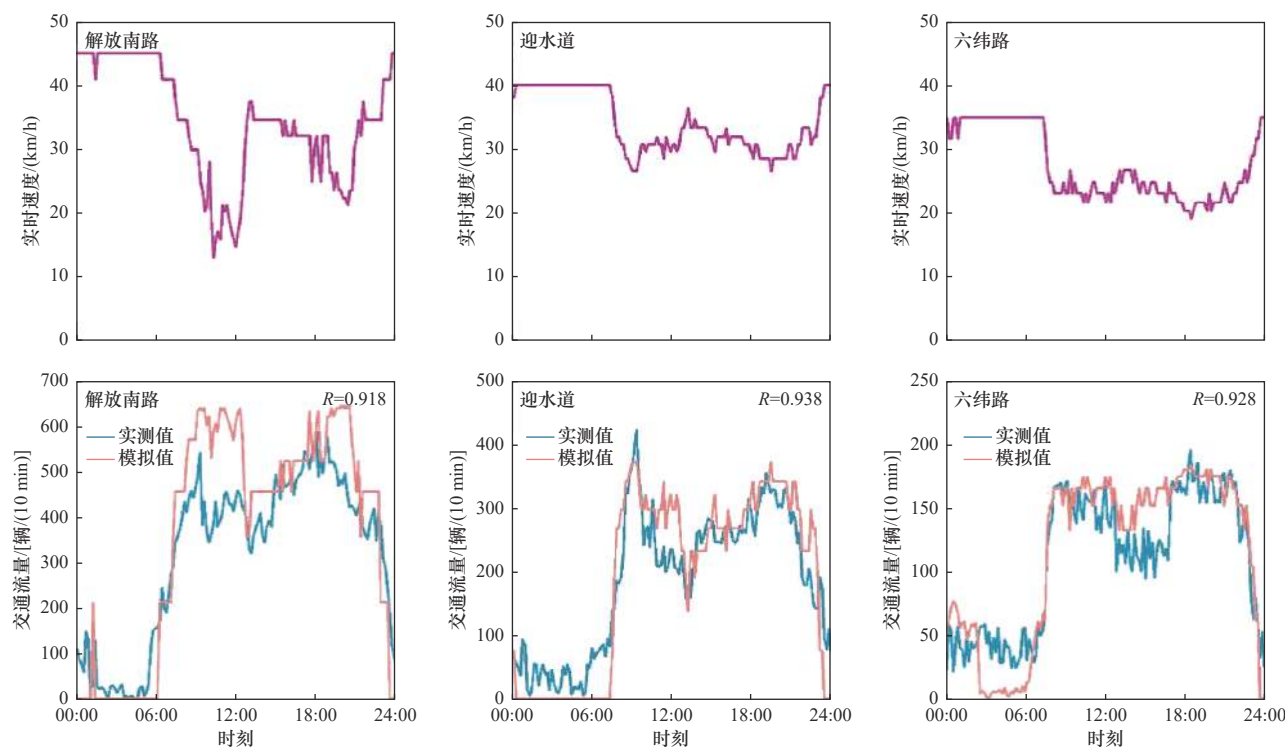


图 3 道路交通车流量实测值与模拟值的对比

Fig.3 Comparison of actual traffic flow with monitored traffic flow

01:00(夜间)三个时段,以视频拍摄和人工计数的方式实测不同类型道路一天内的车流变化情况,缺失时段以实测相近、对应时段的车流范围表示.实测的道路在等级、道路车道数、道路自由行驶速度上均有明显差异,代表不同道路类型.选取的主干路道路底图等级信息显示其为国道,为双向八车道,道路自由行驶速度在 45 km/h 以上;次干路为省道,双向六车道,道路自由行驶速度为 40 km/h;支路为县道,双向四车道,道路自由行驶速度在 35 km/h 以下.

结合实测道路的实时速度信息 (10 min),模拟道路车流量,将 3 条道路(解放南路、迎水道和六纬路)的实测值与模拟值进行皮尔逊相关性分析(见图 4),相关系数 ( $R$ ) 分别为 0.918、0.938 和 0.928,均呈显著相关 ( $P$  均小于 0.01). 3 种类型的道路车流量实测值在高峰时段 (07:00—10:00)、午后 (13:00—16:00) 及夜间 (22:00—翌日 01:00) 等不同人为活动区别明显的时段均与模拟值吻合较好,说明模拟结果可以较好地捕捉到人为活动带来的车流量日变化特征,本研究方法可反映出道路车流量在不同类型道路的分布和变化规律.

2.2 道路扬尘排放的时空变化特征

将本研究方法中获取的高时间分辨率道路车流数据输入清单,采用自下而上的方法,结合本地化排

放因子以及天津市采取的道路扬尘控制措施编制动态化的道路扬尘清单,探究天津市道路扬尘排放的时空变化特征.

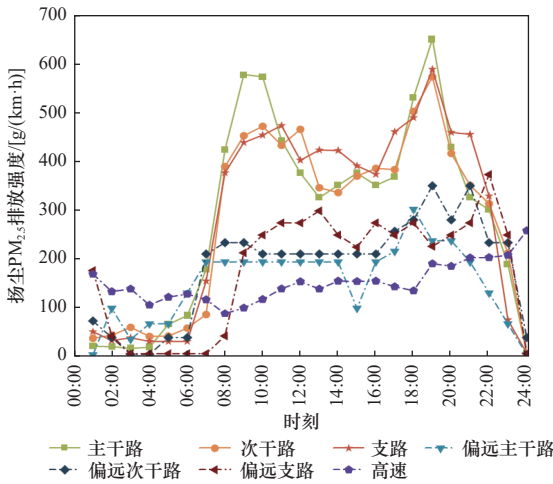


图 4 不同类型道路扬尘  $PM_{2.5}$  排放强度

Fig.4 Hourly  $PM_{2.5}$  emission intensity of different road types

2.2.1 道路扬尘  $PM_{2.5}$  排放量的时间变化特征

道路扬尘  $PM_{2.5}$  排放强度是单位长度和单位时间的道路扬尘  $PM_{2.5}$  排放量,反映不同类型道路颗粒物排放水平的差异.由图 5 可见,受日均车流量影响,虽然城市道路的积尘负荷、平均车质量均低于郊区

道路,但城市道路扬尘  $\text{PM}_{2.5}$  排放强度依然明显高于郊区道路. 不同类型道路随路面车流量的增加,车轮摩擦地面使气流携带地面积尘进入空气,道路扬尘  $\text{PM}_{2.5}$  排放强度也随之增加. 城市道路的扬尘  $\text{PM}_{2.5}$  排放强度随早晚高峰有明显的峰值变化特征,其中,在 08: 00—09: 00、18: 00—19: 00 道路扬尘  $\text{PM}_{2.5}$  排放

强度较大,13: 00—14: 00 是白天道路扬尘  $\text{PM}_{2.5}$  排放强度的低值时段;郊区道路一天内的扬尘  $\text{PM}_{2.5}$  排放强度变化趋势较平稳,排放主要集中在白天时段,夜间 18: 00—20: 00 随着人为活动的增强,道路扬尘  $\text{PM}_{2.5}$  排放强度略微上升. 高速道路在夜间的扬尘  $\text{PM}_{2.5}$  排放强度明显高于其他道路类型.

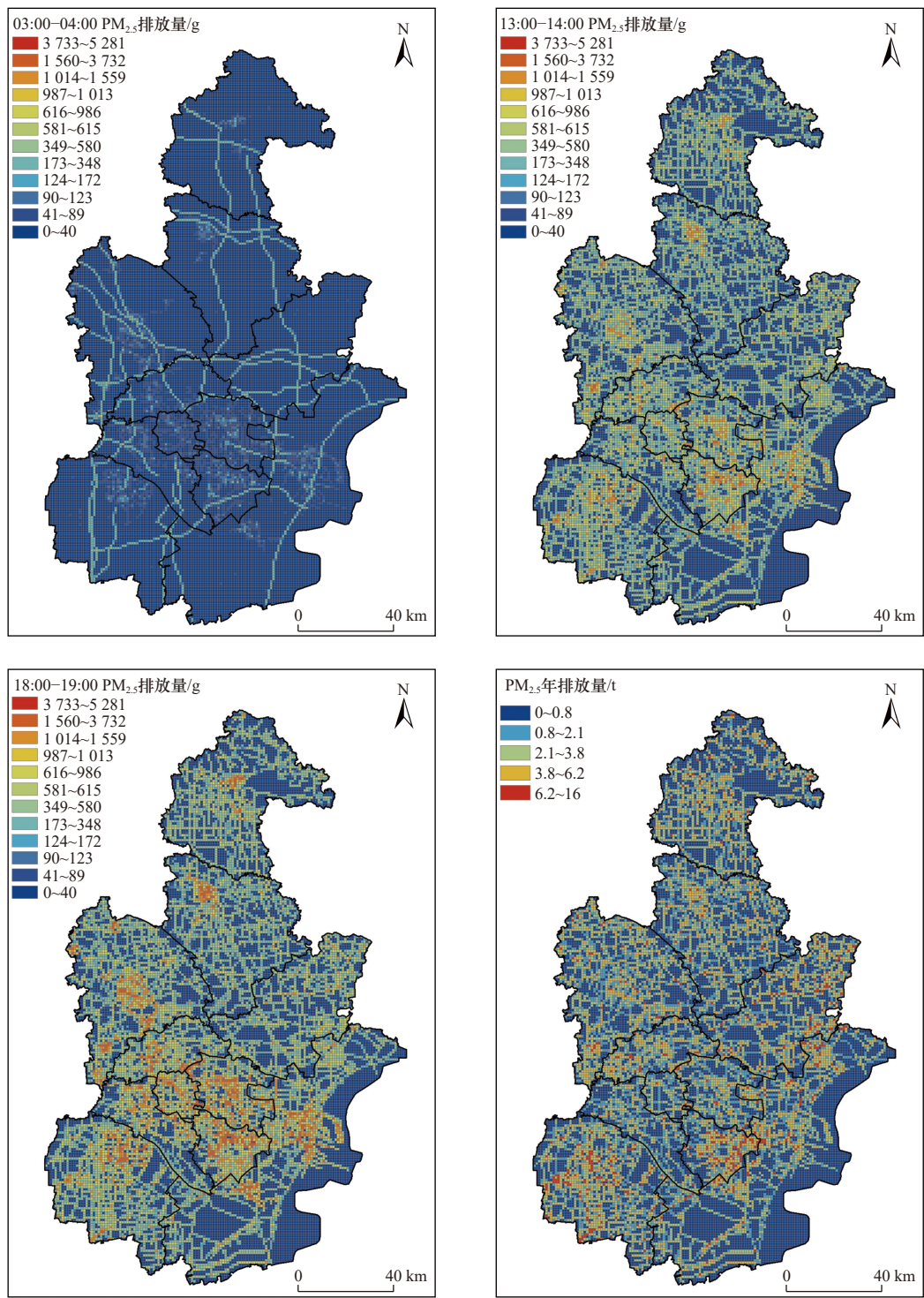


图 5 天津市不同时段及全年道路扬尘  $\text{PM}_{2.5}$  排放量的空间分布情况

Fig.5 Spatial distribution of  $\text{PM}_{2.5}$  emission at different times of the day and the whole year in Tianjin City

2.2.2 道路扬尘 PM<sub>2.5</sub> 排放量的空间变化特征

结合 GIS 的 1 km×1 km 网格,以夜晚 (03: 00—04: 00)、中午 (13: 00—14: 00)、晚高峰 (18: 00—19: 00) 以及全年的道路扬尘 PM<sub>2.5</sub> 排放量 (见 图 6) 为例,探究天津市道路不同时段及全年的道路扬尘 PM<sub>2.5</sub> 排放量空间分布特征。

单位网格内的道路扬尘 PM<sub>2.5</sub> 排放量由交通流量、道路积尘负荷、路网密度以及道路采取的控制措施效率 4 个因素决定。由 图 6 可见: 03: 00—04: 00, 道路扬尘 PM<sub>2.5</sub> 排放集中在高速路段, 主要由于夜间高速车流量较高; 白天低值时段 13: 00—14: 00, 排放集中在城市道路中支路较为密集的地区; 随着车流量的增加, 交通扰动使道路扬尘排放量继续增加, 到晚高峰 (18: 00—19: 00) 道路扬尘 PM<sub>2.5</sub> 排放量达一天内的最高时段, 高值区集中在各类型的城市道路。

由道路扬尘 PM<sub>2.5</sub> 全年排放量的分布 (见 图 6) 发现, 高值区域往往集中在城市支路和郊区道路分布密集的区域。由于洒水对道路起尘的抑制效率明显, 城市主干路与次干路分布密集区扬尘 PM<sub>2.5</sub> 排放量相对较低。

2.3 道路扬尘的排放总量及与其他研究对比

2022 年天津市内六区道路扬尘 PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>、TSP 排放总量分别为 603、2 492 和 12 986 t, 各类型颗粒物排放量均较已有研究结果<sup>[22]</sup> 有所降低。天津市不同地区不同道路类型的扬尘 PM<sub>2.5</sub> 年排放量如 图 6 所示。由 图 6 可见, 道路扬尘 PM<sub>2.5</sub> 年排放量呈偏远郊区>环城四区>市内六区的规律, 全市道路扬尘 PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>、TSP 排放总量分别为 24 741、102 264、532 763 t。

已有研究选取道路类型少、数量少, 且实际测量时间短<sup>[22]</sup>, 以此推断全天及其余道路车流量的方法存

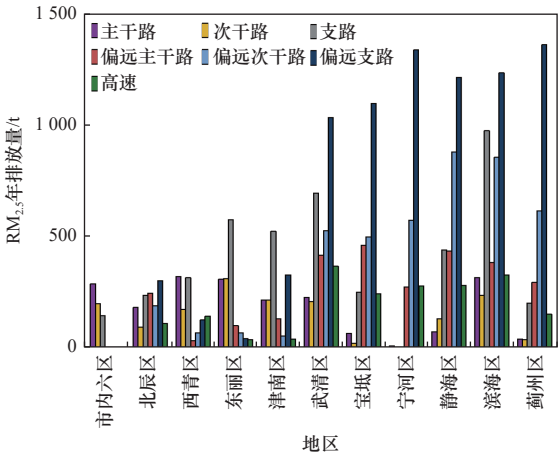


图 6 天津市不同地区不同类型道路扬尘 PM<sub>2.5</sub> 年排放量

Fig.6 Yearly PM<sub>2.5</sub> emission for different districts and road types of Tianjin City

在以下 2 个问题: ①以典型道路推断其余道路, 会造成车流量空间差异性的不确定性; ②以短时间推断全天, 可能忽略了夜间以及白天非高峰时段的车流量, 从而高估全天车流量。本研究覆盖道路类型广, 模拟道路数量多, 可以反映全部日变化特征, 且经过实试验证, 进一步增强了结果真实性, 道路车流量的空间异质性, 降低了结果在空间分布上的不确定性。以天津市内六区为例, 将本研究结果与已有研究进行对比 (见 表 4)。排放因子方面, 本研究考虑城市主干路与次干路的洒水措施, 相应道路扬尘 PM<sub>2.5</sub> 排放因子明显低于已有研究结果<sup>[22]</sup>; 道路车流量方面, 本研究中城市主干路与次干路道路车流量低于已有研究结果<sup>[22]</sup>。

2.4 清单不确定性分析

本研究构建了一种高时间分辨率的道路车流量获取方法, 能反映不同类型道路的车流分布和变化规律, 相较选取典型时段、典型道路人工测量的方法减

表 4 本研究道路扬尘 PM<sub>2.5</sub> 排放因子、道路长度、道路车流量和道路扬尘 PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>、TSP 年排放量与天津市已有研究的对比  
Table 4 Comparison of PM<sub>2.5</sub> emission factors, road length, traffic volume and PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>, TSP total annual emission in this research with other researches

| 道路类型  | PM <sub>2.5</sub> 排放因子/[g/(辆·km)] | 道路长度/km | 道路车流量/(辆/d) | 年排放量/t            |                  |        | 数据来源   |
|-------|-----------------------------------|---------|-------------|-------------------|------------------|--------|--------|
|       |                                   |         |             | PM <sub>2.5</sub> | PM <sub>10</sub> | TSP    |        |
| 主干路   | 0.11                              | 63.85   | 63 288      | 162               | 670              | 3 488  | 文献[22] |
| 次干路   | 0.17                              | 106     | 34 440      | 227               | 938              | 4 888  |        |
| 支路    | 0.49                              | 567.9   | 7 200       | 731               | 3 021            | 15 741 |        |
| 环线    | 0.09                              | 70.84   | 87 696      | 204               | 843              | 4 393  |        |
| 主干路   | 0.07                              | 82      | 53 416      | 99                | 409              | 2 133  | 本研究    |
| 核心主干路 | 0.07                              | 85      | 92 264      | 177               | 733              | 3 819  |        |
| 次干路   | 0.12                              | 164     | 29 193      | 186               | 767              | 3 996  |        |
| 支路    | 0.33                              | 68      | 19 461      | 141               | 583              | 3 038  |        |

少了车流量数据在时间、空间上对清单造成的不确定性。此外,路面积尘、道路平均车质量、气象因素的动态变化也会对道路扬尘清单造成一定不确定性。该研究采用蒙特卡罗模型<sup>[39]</sup>,量化积尘负荷在同类型道路由于采样路段不同造成的清单不确定性。模型首先拟合同类型道路积尘负荷信息,结果服从正态分布,并获取平均值,计算变异系数(CV)。主干路、次干路、支路与高速的积尘负荷 CV 分别为 30.2%、31.3%、32.5%、28.1%<sup>[32-33]</sup>,设置随机抽样次数为 10 000 次。结果表明,在 90% 置信区间下,积尘负荷造成的道路扬尘 PM<sub>2.5</sub> 排放的不确定性范围为-23.4%~68.6%。随着近年来道路管控措施力度的不断加强,道路积尘在大型城市已经处于较低的水平,日变化或年际变化波动有所减少<sup>[40-41]</sup>,路面积尘波动造成的清单不确定性呈下降趋势。平均车质量方面,不同城市区域及功能类型道路允许通过的车型不一,但总体上固定区域内固定类型道路的车质量变化较小,对清单不确定性影响较小。道路长度方面,本研究通过 GIS 分析路网底图获取天津市不同类型路网长度,各类型道路的长度及占比与《天津市综合交通“十三五”发展规划》<sup>[42]</sup>相近,不确定性较小。

### 3 结论

a) 道路扬尘具有明显的动态化排放特征,车流量的动态变化是道路扬尘排放波动的主要驱动因素,本研究构建高时间分辨率的道路车流量获取方法,探究道路扬尘排放受交通扰动的时空分布规律,为精细化管控提供数据支持,为道路扬尘动态化编制提供思路。结果显示,天津城市道路一天内的车流变化呈明显的双峰特征,核心主干路高峰时期的车流量可达到 8 000 辆/h,郊区道路白天车流变化趋势较为平稳,城市道路平均车流量明显高于郊区道路。

b) 时间尺度上,受早晚高峰的影响,天津城市道路扬尘排放集中在 08:00—09:00 与 18:00—19:00 较大,13:00—14:00 是白天排放量的低值时段;郊区道路一天内的扬尘排放变化趋势较为平稳,排放集中在白天时段。

c) 空间尺度上,天津市夜间道路扬尘排放集中在高速路段;13:00—14:00(低值时段)道路扬尘排放集中在城市道路中支路较为密集的地区;晚高峰 18:00—19:00,道路扬尘排放量达到一天内排放的高值时段,扬尘排放集中在各类型城市道路。从全年看,天津市道路扬尘排放的高值区域为城市支路和郊区道路较为密集的地区。城市主干路与次干路采取的洒水措施,可明显降低道路扬尘排放总量。

d) 天津市全年道路扬尘 PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>、TSP 排放量分别为 24 741、102 264、532 763 t。从城市区域看,道路扬尘排放总量呈偏远郊区>环城四区>市内六区的规律。

### 参考文献 (References):

- [1] 中国环境监测总站.全国城市空气质量报告[EB/OL].北京:中国环境监测总站,(2022-06-28)[2022-02-16].<http://www.cnemc.cn/jcbg/kqzlzkbjg/html>.
- [2] 王跃思,李文杰,高文康,等.2013—2017年中国重点区域颗粒物质量浓度和化学成分变化趋势[J].中国科学:地球科学,2020,50(4):453-468.  
WANG Y S,LI W J,GAO W K,et al.Trends in particulate matter and its chemical compositions in China from 2013-2017[J].Science China:Earth Sciences,2020,50(4):453-468.
- [3] 肖致美,徐虹,李立伟,等.基于在线观测的天津市PM<sub>2.5</sub>污染特征及来源解析[J].环境科学,2020,41(10):4355-4363.  
XIAO Z M,XU H,LI L W,et al.Characterization and source apportionment of PM<sub>2.5</sub> based on the online observation in Tianjin [J].Environmental Science,2020,41(10):4355-4363.
- [4] XU H,XIAO Z M,CHEN K,et al.Spatial and temporal distribution, chemical characteristics,and sources of ambient particulate matter in the Beijing-Tianjin-Hebei Region[J].Science of the Total Environment,2019,658:280-293.
- [5] GAO J J,WANG K,WANG Y,et al.Temporal-spatial characteristics and source apportionment of PM<sub>2.5</sub> as well as its associated chemical species in the Beijing-Tianjin-Hebei Region of China[J].Environmental Pollution,2018,233:714-724.
- [6] HUANG X F,YUN H,GONG Z H,et al.Source apportionment and secondary organic aerosol estimation of PM<sub>2.5</sub> in an urban atmosphere in China[J].Science China:Earth Sciences,2014,57(6):1352-1362.
- [7] 国家环境保护总局.防治城市扬尘污染技术规范[EB/OL].北京:国家环境保护总局,(2008-02-01)[2022-06-21].[https://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/bz/bzwb/other/hjbhgc/200711/t20071127\\_113439.html](https://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/bz/bzwb/other/hjbhgc/200711/t20071127_113439.html).
- [8] 中华人民共和国中央人民政府.住房和城乡建设部办公厅关于进一步加强施工工地和道路扬尘管控工作的通知[EB/OL].北京:中华人民共和国中央人民政府,(2019-04-09)[2022-04-06].[http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2019-09/29/content\\_5434651.html](http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2019-09/29/content_5434651.html).
- [9] 新乐市人民政府.新乐市城市管理综合行政执法局城市道路扬尘治理专项行动工作方案[EB/OL].新乐:新乐市人民政府,(2021-10-29)[2021-05-06].<http://info.xinle.gov.cn/content.jsp?code=sjxzlzhzfj/2022-00500>.
- [10] ZHANG Q Y.Vehicle emission inventories projection based on dynamic emission factors:a case study of Hangzhou,China[J].Atmospheric Environment,2008,42(20):4989-5002.

- [11] HUANG L. Dynamic calculation of ship exhaust emissions based on real-time AIS data[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2020, 80: 102277.
- [12] ZHANG S J, NIU T L, WU Y, et al. Fine-grained vehicle emission management using intelligent transportation system data[J]. *Environmental Pollution*, 2018, 241: 1027-1037.
- [13] 杨益, 姬亚芹, 高玉宗, 等. 基于2种采样方法的北京市夏季道路扬尘的监测及积尘负荷分布特征[J]. *环境工程学报*, 2022, 16(9): 3050-3057.
- YANG Y, JI Y Q, GAO Y Z, et al. Monitoring and distribution characteristics of dust load on roads in Beijing during summer based on two sampling methods[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2022, 16(9): 3050-3057.
- [14] CHEN S Y, ZHANG X R, LIN J T, et al. Fugitive road dust PM<sub>2.5</sub> emissions and their potential health impacts[J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 53(14): 8455-8465.
- [15] GUSTAFSSON M, GORANBLOM QVIST G, JARLSKOG I, et al. Road dust load dynamics and influencing factors for six winter seasons in Stockholm, Sweden[J]. *Atmospheric Environment*, 2019, 2: 100014.
- [16] AMATO F, BEDOGNI M, PADOAN E, et al. Characterization of road dust emissions in Milan: impact of vehicle fleet speed[J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2017, 17(10): 2438-2449.
- [17] US EPA. Emission factor documentation for AP-42, section 13.2.1 paved roads[R]. Washington DC: Environmental Protection Agency, 2010.
- [18] KUHN H. 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.
- [19] 王社扣, 王体健, 石睿, 等. 南京市不同类型扬尘源排放清单估计[J]. *中国科学院大学学报*, 2014, 31(3): 351-359.
- WANG S K, WANG T J, SHI R, et al. Estimation of different fugitive dust emission inventory in Nanjing[J]. *Journal of University of Chinese Academy of Sciences*, 2014, 31(3): 351-359.
- [20] 杨乃旺, 宋文斌, 闫东杰, 等. 基于积尘负荷的西安市铺装道路扬尘排放研究[J]. *环境科学学报*, 2021, 41(4): 1259-1266.
- YANG N W, SONG W B, YAN D J, et al. Emission characteristics of pavement road dust in Xi'an based on dust load method[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, 41(4): 1259-1266.
- [21] 宋立来, 李廷昆, 毕晓辉, 等. 京津冀地区高空间分辨率土壤扬尘清单构建及动态化方法[J]. *环境科学研究*, 2021, 34(8): 1771-1781.
- SONG L L, LI T K, BI X H, et al. Construction and dynamic method of soil fugitive dust emission inventory with high spatial resolution in Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2021, 34(8): 1771-1781.
- [22] 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.
- [23] LI L L, WANG K, SUN Z J, et al. Bottom-up emission inventory and its spatio-temporal distribution from paved road dust based on field investigation: a case study of Harbin, northeast China[J]. *Atmosphere*, 2021, 12(4): 449.
- [24] 环境保护部. 扬尘源颗粒物排放清单编制技术指南[EB/OL]. 北京: 环境保护部, (2014-12-31)[2022-04-27]. [https://www.mee.gov.cn/ywdt/hjnews/201501/t20150113\\_294134.html](https://www.mee.gov.cn/ywdt/hjnews/201501/t20150113_294134.html).
- [25] 庄焰, 吕慎. 城市道路交通流三参数关系研究[J]. *深圳大学学报*, 2005, 22(4): 78-79.
- ZHUANG Y, LV S. A study of the speed-flow-density relationships on urban roads[J]. *Shenzhen University Journal*, 2005, 22(4): 78-79.
- [26] 王殿海. 交通流理论[M]. 北京: 人民交通出版社, 2002: 45-52.
- [27] 李江. 交通工程学[M]. 北京: 人民交通出版社, 2002.
- [28] 杜柏松, 李明, 罗玲. 基于实测交通数据和可靠度理论的多车道荷载横向折减系数研究[J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2017, 36(5): 12-16.
- DU B S, LI M, LUO L. Multi-lane transverse reduction factor based on measured traffic data and reliability theory[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science)*, 2017, 36(5): 12-16.
- [29] 崔亭亭. 公路梁式桥拓宽时的荷载横向分布与横向折减系数研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.
- [30] 交通运输部公路局. 公路工程技术标准[EB/OL]. 北京: 交通运输部公路局, (2015-01-01)[2022-06-15]. <http://www.gov.cn/fuwu/bzxscx/bzh.html>.
- [31] 全国地理信息资源目录服务系统. 1:100万全国基础地理数据库[EB/OL]. 北京: 全国地理信息资源目录服务系, (2022-05-28)[2021-10-02]. <https://www.webmap.cn/commres.do?method=result100W>.
- [32] 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.
- [33] 张诗建. 基于快速检测法的天津市道路扬尘排放清单研究[D]. 天津: 南开大学, 2016.
- [34] 中国汽车技术研究中心. 汽车和挂车类型的术语和定义[EB/OL]. 北京: 中国汽车技术研究中心, (2014-06-04)[2022-02-07]. <http://www.gov.cn/fuwu/bzxscx/bzh.html>.
- [35] 李冬, 薛占刚, 刘善文, 等. 不同保洁工艺对道路尘负荷与扬尘控制效率差异的影响研究[J]. *环境科学研究*, 2022, 35(7): 1589-1595.

- LI D,XUE Z G,LIU S W,et al.Effect of various road cleaning measures on road dust silt loading and control efficiency[J]. *Research of Environmental Sciences*,2022,35(7):1589-1595.
- [36] 天津市城市管理委员会.天津市城市道路清扫保洁质量标准与作业规范 [EB/OL].天津:天津市城市管理委员会,(2019-10-29) [2022-05-06].[https://csgl.tj.gov.cn/zwgk\\_57/xzcwj/scsglw/CGWWJ/202011/t20201111\\_4052994.html](https://csgl.tj.gov.cn/zwgk_57/xzcwj/scsglw/CGWWJ/202011/t20201111_4052994.html).
- [37] LIU Y,HUANG W,LIN X,et al.Variation of spatio-temporal distribution of on-road vehicle emissions based on real-time RFID data[J]. *Journal of Environmental Sciences*,2022,116:151-162.
- [38] MENG X R,et al.Characterization of spatio-temporal distribution of vehicle emissions using web-based real-time traffic data[J]. *Science of the Total Environment*,2020,709:136227.
- [39] 陈操操,邱大庆,于凤菊,等.北京市燃气工业锅炉CO<sub>2</sub>排放因子及不确定性分析[J]. *环境科学研究*,2020,33(8):1776-1782.
- CHEN C C,QIU D Q,YU F J,et al.Carbon dioxide emission factors of nature gas boilers and its uncertainty in Beijing[J]. *Research of Environmental Sciences*,2020,33(8):1776-1782.
- [40] 肖捷颖,刘娟,郭硕,等.石家庄城市道路积尘负荷排放特征研究[J]. *环境污染与防治*,2018,40(2):186-188.
- XIAO J Y,LIU J,GUO S,et al.Study on silt loading emission characteristics of urban road in Shijiazhuang[J]. *Environmental Pollution & Control*,2018,40(2):186-188.
- [41] 崔浩然,樊守彬,韩力慧,等.北京市大兴区道路积尘年际变化特征及管控研究[J]. *中国环境科学*,2021,41(10):4556-4564.
- CUI H R,FAN S B,HAN L H,et al.Interannual variation characteristics and control of road dust in Daxing District of Beijing[J]. *China Environmental Science*,2021,41(10):4556-4564.
- [42] 天津市人民政府.天津市综合交通“十三五”发展规划 [EB/OL].天津:天津市人民政府,(2016-12-06) [2022-04-24].[https://fzgg.tj.gov.cn/zwgk\\_47325/zcfg\\_47338/zcwjx/fgwj/202012/W020201219529486485659.pdf](https://fzgg.tj.gov.cn/zwgk_47325/zcfg_47338/zcwjx/fgwj/202012/W020201219529486485659.pdf).

(责任编辑:刘 方)