

彭康, 杨杨, 郑君瑜, 等. 2013. 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, 33(10): 2657-2663

Peng K, Yang Y, Zheng J Y, et al. 2013. Emission factor and inventory of paved road fugitive dust sources in the Pearl River Delta region[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 33(10): 2657-2663

珠江三角洲地区铺装道路扬尘排放因子与排放清单研究

彭康, 杨杨, 郑君瑜*, 尹沙沙, 高宗江, 黄晓波

华南理工大学环境与能源学院, 广州 510006

收稿日期: 2013-01-16 修回日期: 2013-03-06 录用日期: 2013-03-06

摘要:对珠江三角洲地区不同等级道路共采集了 65 个道路扬尘样品, 并调研了道路的车流量、车辆构成和道路长度等有关活动水平数据, 采用美国环保署推荐的 AP-42 方法估算了该地区不同等级道路扬尘排放因子和排放量, 并分析了道路扬尘排放的时空特征与不确定性范围. 结果表明: 高速公路、一级、二级、三级和四级道路尘负荷分别为 $1.05 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 、 $0.99 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 、 $1.30 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 、 $1.35 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $1.45 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$; 不同等级道路扬尘总悬浮颗粒物 (Total Suspended Particulate, TSP)、 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 的平均排放因子分别为 $8.32 \text{ g}\cdot\text{VKT}^{-1}$ (Grams per Vehicle Kilometer Traveled)、 $1.60 \text{ g}\cdot\text{VKT}^{-1}$ 和 $0.39 \text{ g}\cdot\text{VKT}^{-1}$, 对应的排放量分别为 $2755.1 \times 10^3 \text{ t}$ 、 $528.8 \times 10^3 \text{ t}$ 和 $127.9 \times 10^3 \text{ t}$, 其定量不确定性范围分别为 $-91.7\% \sim 175.1\%$ 、 $-91.6\% \sim 178.9\%$ 及 $-91.5\% \sim 176.5\%$.

关键词: 珠江三角洲; 道路扬尘; 排放因子; 排放清单

文章编号: 0253-2468(2013)10-2657-07 中图分类号: X51 文献标识码: A

Emission factor and inventory of paved road fugitive dust sources in the Pearl River Delta region

PENG Kang, YANG Yang, ZHENG Junyu*, YIN Shasha, GAO Zongjiang, HUANG Xiaobo

College of Environment and Energy, South China University of Technology, Guangzhou 510006

Received 16 January 2013; received in revised form 6 March 2013; accepted 6 March 2013

Abstract: 65 fugitive dust samples from different types of paved roads in Pearl River Delta (PRD) region were collected. Based on the collected activity data of vehicle flows, vehicle fleets and road length, 2010-based road fugitive dust emission factors and inventories of PRD were developed following AP-42 methodologies recommended by the USEPA, the spatial, temporal characteristics, and uncertainty of road fugitive dust emissions were analyzed. The results show that the road silt loadings of express way, national Level I, Level II, Level III and Level IV roads are $1.05 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 、 $0.99 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 、 $1.30 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 、 $1.35 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ and $1.45 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$; the average fugitive dust emission factors of Total Suspended Particulate (TSP), PM_{10} and $\text{PM}_{2.5}$ are $8.32 \text{ g}\cdot\text{VKT}^{-1}$ 、 $1.60 \text{ g}\cdot\text{VKT}^{-1}$ and $0.39 \text{ g}\cdot\text{VKT}^{-1}$; while the emission inventories and their quantitative uncertainties of TSP, PM_{10} and $\text{PM}_{2.5}$ are $2755.1 \times 10^3 \text{ t}$ ($-91.7\% \sim 175.1\%$)、 $528.8 \times 10^3 \text{ t}$ ($-91.6\% \sim 178.9\%$) and $127.9 \times 10^3 \text{ t}$ ($-91.5\% \sim 176.5\%$), respectively.

Keywords: Pearl River Delta; road fugitive dust; emission factors; emission inventory

1 引言 (Introduction)

近年来, 伴随着工业发展和城市化进程的加快, 珠江三角洲 (以下简称“珠三角”) 地区的空气质量问题受到了广泛关注 (郑君瑜等, 2009), 气溶胶污染、臭氧污染以及灰霾天气现象频有发生 (Deng

et al., 2008; Zheng et al., 2010), 直接影响人们的生活质量和身体健康. 区域大气污染呈现出典型的大气复合污染特征 (Zhang et al., 2008). 珠三角地区光化学污染和大气颗粒物浓度的增加是造成城市灰霾天气的重要因素, 且对城市能见度降低有直接的影响. 随着珠三角地区交通道路建设的加快, 城

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项大气灰霾成因与控制之大气灰霾溯源——大气污染源清单完善及校核子课题 (No. XDB05020303)

Supported by the Highly Resolved Temporal and Spatial Emission Inventory of Hazy Precursors for the Pearl River Delta Region (No. XDB05020303)

作者简介: 彭康 (1985—), 男, E-mail: chinakpeng@qq.com; * 通讯作者 (责任作者), E-mail: zheng.junyu@gmail.com

Biography: PENG Kang (1985—), male, E-mail: chinakpeng@qq.com; * **Corresponding author**, E-mail: zheng.junyu@gmail.com

市机动车保有量的增加,交通道路扬尘排放已成为城市大气颗粒物的主要来源之一(许艳玲等,2007;樊守彬等,2011;刘泽常等,2012),控制道路扬尘成为城市空气颗粒物污染治理和提高局地空气质量的重点。

道路扬尘既是大气颗粒物污染的源,同时也是受体,主要来源于大气降尘、车辆遗撒、路面破损、车轮车身带泥、轮胎磨损、市政施工、道路施工、道路清扫、生物碎屑、道路附近的裸露土壤以及未铺装道路等,道路扬尘会在车辆碾压和气流夹带等合力的作用下重新扬起进入到大气环境中,成为大气颗粒物排放的二次源(USEPA,2011)。

美国学者对道路扬尘排放的研究比较成熟(Watson *et al.*, 1989;Chow *et al.*, 1992),在研究方法上,有 TRAKER 法(Etyemezian *et al.*, 2003)、Upwind-downwind 法(Dyck *et al.*, 1976)、以及美国环保署在《空气污染物排放因子汇编》里推荐的 AP-42 方法(USEPA, 2011)等;此外,有学者研究分析了不同气象条件(Kuhns *et al.*, 2001)、车流量(Kuhns *et al.*, 2003)以及道路状况(Etyemezian *et al.*, 2003)等对道路扬尘排放的影响。目前对国内道路交通扬尘排放的研究较少,现有的研究主要集中在北京、济南和呼和浩特等地,且主要以道路扬尘负荷(樊守彬等,2007)和成分谱(冯银厂等,2003;韩力慧等,2009)研究为主,目前有樊守彬(2011)、刘泽常(2012)和黄成等(2011)分别对呼和浩特、济南和长江三角洲地区的道路扬尘排放因子和排放量进行了探讨,而针对珠三角地区交通道路扬尘排放的研究还比较缺乏。

由于交通道路扬尘具有连续排放的特点,其对局地空气质量的影响较大,各地有关部门已逐渐开始重视对交通道路扬尘的防控工作,但由于缺乏实际的实验数据支持,难以制定科学合理的控制措施。为此,本研究通过对珠三角地区各等级典型铺装道路进行扬尘样品采集,以现场实测数据为基础,参考美国环保署推荐的 AP-42 方法,估算珠三角地区交通道路扬尘排放因子和排放量,深入分析道路扬尘排放的时变化、空间分布等特征,为空气质量模型提供数据支持和道路扬尘控制方案的制定提供科学依据。

2 数据与方法(Data and methods)

2.1 研究区域与研究对象

本文研究区域包括广州、深圳、珠海、中山、东

莞、佛山、江门、肇庆(端州区、鼎湖区、高要区和四会市)和惠州(惠城区、惠阳县、惠东县和博罗县)9个珠三角地区城市。本文研究的扬尘颗粒物分为 TSP、PM₁₀及 PM_{2.5} 3种。研究对象为珠三角地区高速公路、一级道路、二级道路、三级道路及四级道路。

2.2 道路扬尘排放因子及排放量估算方法与模型

2.2.1 道路扬尘排放量估算方法 本文采用排放因子法估算珠三角地区 2010 年道路扬尘的排放量,估算公式如式(1)所示。

$$Q_j = \frac{24 \times 365}{1000} \sum_{i=1}^n E_{ij} \times L_i \times V_i \quad (1)$$

式中, Q_j 为各等级道路第 j 种扬尘颗粒物的排放量(kg); n 为道路的等级数量,根据国家公路技术等级分类,将估算道路类型分为高速公路、一、二、三、四级道路等 5 个道路等级; E_{ij} 为第 i 种等级道路上第 j 种扬尘颗粒物排放因子($g \cdot VKT^{-1}$, Grams per Vehicle Kilometer Traveled, 即平均每辆车行驶 1 km 扬起的扬尘颗粒物排放量); L_i 为研究区域内第 i 种等级道路的总长度(km); V_i 为第 i 种等级道路的日平均车流量(辆 h^{-1})。

2.2.2 道路扬尘排放因子估算模型 AP-42 方法是美国环保署有关学者在多年实践研究经验基础上总结开发的一套方法体系,并根据实际情况进行更新和完善,在全球范围内得到了众多研究学者的认可和支持(Watson *et al.*, 1989;樊守彬等,2007)。该体系对道路扬尘排放因子的估算模型见式(2)。

$$E_{ij} = k_j \times (sL)^{0.91} \times (W_i)^{1.02} \times (1 - P/4N) \quad (2)$$

式中, E_{ij} 为第 i 种等级道路上第 j 种扬尘颗粒物排放因子($g \cdot VKT^{-1}$); k_j 为道路扬尘第 j 种扬尘颗粒物的粒度乘数($g \cdot VKT^{-1}$); sL 为道路尘负荷值($g \cdot m^{-2}$, 即单位面积道路扬尘中直径小于或等于 75 μm 的颗粒物重量); W_i 为第 i 种等级道路的平均车重(t); P 为基准年内降雨量超过 0.254 mm 的天数; N 为基准年的天数,2010 年为 365 d;(1 - $P/4N$)项表示降雨因素影响道路扬尘排放的折算因子。

2.3 模型参数获取

2.3.1 粒度乘数 k_j 本研究采用美国 EPA 通过大量的实验和回归分析而得的数据,估算道路扬尘中 TSP、PM₁₀、PM_{2.5} 时分别取 3.23、0.62、0.15。

2.3.2 道路尘负荷 sL 由于道路尘负荷存在地域差异性,本研究通过对珠三角地区各等级道路典型路段进行道路扬尘样品采集和实验室分析,通过公式(3)来计算获得。

$$sL = \frac{W - (W_{20} - M_{20}) - (W_{100} - M_{100}) - (W_{200} - M_{200})}{S} \quad (3)$$

式中, W 为扬尘样品总质量(g); M_{20} 、 M_{100} 和 M_{200} 分别为 20 目、100 目和 200 目标准筛净重(g); W_{20} 、 W_{100} 和 W_{200} 分别为振动过筛后 20 目、100 目和 200 目标准筛及筛上物总重量(g); S 为采样面积(m^2).

2.3.3 平均车重 W_i 即通过某等级道路所有车辆的平均重量,通过公式(4)估算各等级道路的平均车重.

$$W_i = \sum_{j=1}^n W_{ij} \times K_{ij} \quad (4)$$

式中, K_{ij} 为第 i 种等级道路上第 j 种车型的车辆比例; W_{ij} 为第 i 种等级道路上第 j 种车型的单车重量(t).

本研究通过对典型道路现场调研获取不同等级道路的车流量和各车型比例等相关数据,并通过在交通管理部门调研得到各车型的车重信息,根据各车型的车重和比例数据计算出珠三角各等级道路的平均车重,如表 1 所示.

表 1 珠三角地区各等级道路的平均车重信息

类型	高速公路	一级道路	二级道路	三级道路	四级道路
平均车重	2.70	2.02	2.18	2.20	2.59

2.3.4 珠三角地区不同等级道路长度 采用资料调研的方式,对珠三角地区各市 2011 年的统计年鉴进行查阅,收集到珠三角地区各市不同等级道路长度信息,如表 2 所示.

表 2 珠三角各市不同等级道路长度信息表

Table 2 Lengths of different road types in the PRD

城市	道路长度/km					资料来源
	高速	一级道路	二级道路	三级道路	四级道路	
广州	577	975	974	1473	3741	2011 年广州统计年鉴
深圳	340	691	270	217	100	2011 年深圳统计年鉴
佛山	71	336	125	431	403	2011 年佛山统计年鉴
珠海	217	2394	1317	178	532	2011 年珠海统计年鉴
东莞	115	277	556	314	502	2011 年东莞统计年鉴
中山	420	1347	409	921	2107	2011 年中山统计年鉴
惠州	345	236	768	609	5971	2011 年惠州统计年鉴
江门	371	723	806	1475	4663	2011 年江门统计年鉴
肇庆	190	393	942	788	8864	2011 年肇庆统计年鉴
合计	2646	7373	6166	6407	26883	

2.3.5 珠三角地区不同等级道路的车流量 通过连续 24 h 对监测道路的车流量进行实地观测和调查,结合到有关交通部门进行实地调研的方式,获得各等级道路的日平均车流量数据,如表 3 所示.

表 3 珠三角地区各等级道路的日平均车流量信息

Table 3 The traffic flows of different road types in the PRD

类型	辆 h^{-1}				
	高速公路	一级道路	二级道路	三级道路	四级道路
日均车流量	2093	2354	1202	818	212

3 道路尘负荷测试(Road silt loading measurements)

3.1 样品采集

参考 AP-42 方法的采样规范(USEPA, 2011),

使用真空吸尘器(飞利浦 FC8222)吸取一定面积的道路路面积尘,尘袋为环保纸袋,吸尘后密封尘袋并贴好标签,放入密封袋中.在采样过程中记录采样面积、车流情况、车道状况、地理位置、周围环境以及气象数据(风速、温度、湿度等)要素信息.

本研究共对珠三角地区 63 条不同等级道路进行了实地调查,在此基础上选取了 33 条典型道路进行扬尘样品采集,样品总数 65 个,其中有效样品 61 个.

3.2 样品处理

将道路扬尘样品送回实验室后,转移到干燥皿,去除样品中的树叶、烟头、垃圾等杂质,在 105 °C 条件下进行烘干,烘干后进行称重;对 20 目、100 目、200 目标准筛进行清洁和称重,然后由上而下叠

层放置,将烘干后的样品放于 20 目标准筛上并密封筛口,然后在 WQS 振动筛上(振动频率为 $3000 \text{次}\cdot\text{min}^{-1}$,上海仪电物理光学仪器有限公司生产)振动过筛,振动时间为 30 ~ 60 min,振动结束后称量并记录各标准筛及筛上物的重量,以估算道路尘负荷。

4 结果与讨论 (Results and discussion)

4.1 道路扬尘排放因子

4.1.1 不同等级道路尘负荷 基于扬尘样品的分析结果,通过公式(3)估算得到珠三角地区不同等级道路尘负荷,如表 4 所示。

珠三角地区各城市不同道路的总平均尘负荷为 $1.228 \text{g}\cdot\text{m}^{-2}$,小于北京市道路的平均尘负荷值 $3.82 \text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ (Chen *et al.*, 2011),这主要是因为北京地区的降尘量相对较大(樊少彬等, 2010),且珠三角地区地处中国南方,降雨频率较高,空气湿度相对较高,因而其道路尘负荷值比北方地区小。从表 4

表 4 珠三角地区各等级道路的平均尘负荷水平

Table 4 The silt loading of different road types in the PRD

类型	平均值		
	平均值	最大值	最小值
高速公路	1.05	4.18	0.22
一级道路	0.99	3.94	0.21
二级道路	1.30	3.14	0.29
三级道路	1.35	3.69	0.15
四级道路	1.45	5.51	0.45

可知,珠三角地区各等级道路尘负荷值大小顺序为:四级道路 > 三级道路 > 二级道路 > 高速公路 > 一级道路,这主要是因为道路尘负荷水平和车流量的大小有关,车流量越大,道路尘负荷值越小,高速公路和一级道路由于车流量较大,路尘在车辆行驶过程中容易被扬起,所以路面尘负荷较小,而四级道路车流量相对较小,其对应的尘负荷值相对较大。

表 5 珠三角地区与其他城市道路尘负荷值范围比较

Table 5 Comparison of silt loading between the PRD and other cities

区域	平均值范围	资料来源
珠三角	0.99 ~ 1.45	本研究
济南市	1.30 ~ 2.01	刘泽常等,2012
Washington	1.2 ~ 3.2	Candis <i>et al.</i> , 1995
Bangkok	1.37 ~ 27	Limpaseni., 2001
Kanpur	18 ~ 84	Shaskar <i>et al.</i> , 2008

从表 5 可知,珠三角地区不同等级道路尘负荷水平与济南市的相近,略小于美国华盛顿的尘负荷水平,远小于印度坎普尔的道路尘负荷值,说明道路尘负荷水平存在较大的地区差异性。

4.1.2 道路扬尘排放因子 结合本研究实测获得的尘负荷,基于不同等级道路车流量估算得到的平均车重等相关数据,通过公式(2)可以估算得到珠三角地区不同等级道路的扬尘排放因子,如表 6 所示。

表 6 珠三角地区不同等级道路的扬尘排放因子

Table 6 Fugitive dust emission factors of different road types in the PRD

类型	道路扬尘颗粒物排放因子/($\text{g}\cdot\text{VKT}^{-1}$)		
	TSP	PM ₁₀	PM _{2.5}
高速公路	8.34	1.60	0.39
一级道路	5.89	1.13	0.27
二级道路	8.15	1.56	0.38
三级道路	8.50	1.63	0.39
四级道路	10.74	2.06	0.50
平均值	8.32	1.60	0.39

从表 6 可知,珠三角地区不同等级道路扬尘 TSP、PM₁₀ 和 PM_{2.5} 的平均排放因子分别为 $8.32 \text{g}\cdot\text{VKT}^{-1}$ 、 $1.60 \text{g}\cdot\text{VKT}^{-1}$ 和 $0.39 \text{g}\cdot\text{VKT}^{-1}$ 。在各等级道路的不同扬尘颗粒物排放因子中,高速公路和一级道路的扬尘排放因子相对较小,其次是二级和三级道路,四级道路的扬尘排放因子最大。结合各等级道路尘负荷水平和车流量数据分析,从总体上,车流量越大,道路尘负荷值越小,道路扬尘排放因子越小。

对国内外不同城市和地区的道路扬尘 PM₁₀ 排放因子进行分析,如表 7 所示。

表 7 珠三角地区与其他城市道路扬尘 PM₁₀ 排放因子比较

Table 7 Comparison of PM₁₀ emission factors of fugitive dust between the PRD and other cities

区域	PM10	资料来源
珠三角	1.13 ~ 2.06	本研究
济南市	1.55 ~ 4.73	刘泽常等, 2012
呼和浩特市	1.50 ~ 5.00	樊守彬等, 2011
Washington	0.40 ~ 1.70	Candis <i>et al.</i> 1995
Bangkok	0.50 ~ 25.00	Limpaseni. 2001
Kanpur	9.20 ~ 42.50	Shaskar <i>et al.</i> 2008

从表 7 可知,在各城市和地区的道路扬尘 PM₁₀ 排放因子中,珠三角地区比美国华盛顿高,稍低于中国济南市和呼和浩特市,远低于印度坎普尔,说

明不同国家和地区的道路扬尘排放因子差异较大,可能是由于不同国家和地区的道路背景降尘量和道路车流量不同的影响,而道路的保洁措施和频率也是影响道路扬尘排放的重要因素。

4.2 道路扬尘排放清单

4.2.1 道路扬尘排放清单 结合调研得到的道路长度和车流量等活动数据,采用本研究估算的道路扬尘排放因子,利用公式(1)估算得到 2010 年珠三角地区各等级道路的道路扬尘排放量,如表 8 所示。

表 8 2010 年珠三角地区各等级道路扬尘排放量

Table 8 Fugitive dust emissions of different road types in the PRD in 2010

类型	总排放量/ 10^3 t		
	TSP	PM ₁₀	PM _{2.5}
高速公路	404.4	77.6	18.8
一级道路	894.8	171.8	41.6
二级道路	528.9	101.5	24.6
三级道路	390.5	75.0	18.1
四级道路	536.4	103.0	24.9
合计	2755.1	528.8	127.9

从表 8 可知,2010 年珠三角地区各级道路扬尘源 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 的排放量分别为 528.8×10^3 t 和 127.9×10^3 t,而在各等级道路的道路扬尘排放量中,一级道路的排放量最大,其次是四级道路,排放量最小的是三级道路,主要是因为一级道路的道路长度和车流量均较大,而四级道路虽然车流量小,但道路总长度最长,所以扬尘总排放量相对较高。

将珠三角地区道路扬尘源与该地区的其他污染源的 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 的排放量进行对比分析,如表 9 所示。

表 9 珠三角地区不同污染源的 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 排放量对比

Table 9 Comparison of PM₁₀ and PM_{2.5} emissions among different sources in the PRD

污染源	年份	PM ₁₀ / 10^3 t	PM _{2.5} / 10^3 t	数据来源
道路扬尘源	2010 年	528.8	127.9	本研究
工业源	2006 年	228.9	88.2	zheng <i>et al.</i> , 2009
电厂源	2006 年	89.1	38.2	
道路移动源	2006 年	92.5	74.2	
船舶源	2006 年	4.6	3.7	
生物质燃烧源	2006 年	7.2	3.1	

由表 9 可知,与珠三角地区 2006 年工业源、电厂源、道路移动源和生物质燃烧源等主要大气污染源相比,该地区 2010 年道路扬尘源的 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 的排放量很大。尽管道路扬尘尘负荷测试及估算过

程有较高的不确定性,但研究结果表明:其对大气颗粒物中 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 的贡献不容忽视。

在此基础上,对珠三角地区不同城市的道路扬尘 PM₁₀ 与 PM_{2.5} 的排放量进行估算,可得到其扬尘排放量情况,如图 1 所示。

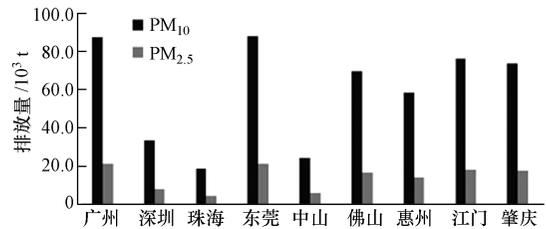


图 1 2010 年珠三角地区各市道路扬尘 PM₁₀ 与 PM_{2.5} 排放情况

Fig. 1 PM₁₀ and PM_{2.5} emission of road dust of different cities in PRD in 2010

从图 1 可以看出,广州和东莞的道路扬尘 PM₁₀ 与 PM_{2.5} 排放量相对较大,其次是江门、肇庆、佛山和惠州,然后是深圳和中山,而珠海的道路扬尘排放量最小,造成城市之间道路扬尘排放量差异的最主要原因是各城市的不同等级道路的总长度和车流量不同,广州和东莞的高速公路与一级道路的道路长度大,城市的路网密集,且车流量较大,故扬尘排放量相对较高;而珠海的等级道路长度小,因而其扬尘排放量相对较小。

4.2.2 道路扬尘排放的时间变化特征 将不同等级道路扬尘排放量根据珠三角地区典型城市道路车流量日变化数据进行分配,估算得到扬尘排放量的日变化曲线,图 2 为 PM₁₀ 的日变化曲线。

从各等级道路扬尘排放量的时间变化图可以看出,07:00—09:00 和 17:00—19:00 这两个时间段的道路扬尘排放量达到高值,是因为这两个时间段为上下班高峰期,车流量比较大;09:00—12:00 扬尘排放量呈下降趋势,12:00—14:00 期间出现白

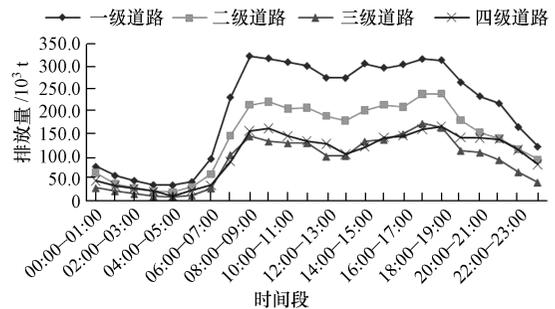


图 2 各等级道路 PM₁₀ 排放量的时间变化图

Fig. 2 Temporal characteristics of road dust emission of different types of road

天最低值,是因为这个时间段市民用餐和午休,车流量相对较小;夜间扬尘排放量均很低,主要是因为夜间各等级道路的车流量均很小.该变化曲线与车汶蔚等(2010)对珠三角地区机动车污染排放的时变化曲线基本一致.

4.2.3 不确定性分析 排放源清单的不确定性分析方法主要有定性分析、半定量分析和定量分析等3种(Zheng *et al.*, 2004; 钟流举等, 2007). 本研究开发的排放清单不确定性主要来源于各等级道路长度、车流量、平均车重、道路尘负荷等关键代表性数据缺失而引起的不确定性. 在估算道路扬尘排放量过程中,各等级道路长度数据主要来源于珠三角各市的统计年鉴,其不确定性相对较小;车流量数据主要由典型道路现场调查和通过对交通管理部门进行数据调研获取,由于车流量是一个动态值,同一等级道路在不同城市中的车流量也有所差异,故其具有一定的不确定性;平均车重由各车型的车

重和车流量换算而得,因而会有一定的误差;而道路尘负荷是道路扬尘排放因子的重要指标,其不仅与采样位置有关,还与天气、道路保洁、车流量、采样仪器以及采样操作等诸多因素有直接的关系,因而实际的不确定性可能更大. 由于缺乏多组车流量和平均车重等活动数据,本文仅对由道路尘负荷引起的排放清单不确定性进行探讨,通过自展模拟和蒙特卡罗模拟法(Frey *et al.*, 2002; Zheng *et al.*, 2005)来对其进行定量分析,得到珠三角地区2010年交通道路扬尘 TSP、PM₁₀及 PM_{2.5}的可量化不确定性范围为: -91.7% ~ 175.1%、-91.6% ~ 178.9%及 -91.5% ~ 176.5%.

4.2.4 珠三角地区道路扬尘排放空间分布及特征

基于标准道路长度的分配因子建立方法,通过使用 ArcGIS 对交通道路扬尘排放进行空间分配,得到珠三角地区2010年交通道路扬尘 TSP、PM₁₀及 PM_{2.5}的排放空间分布情况,如图3所示.

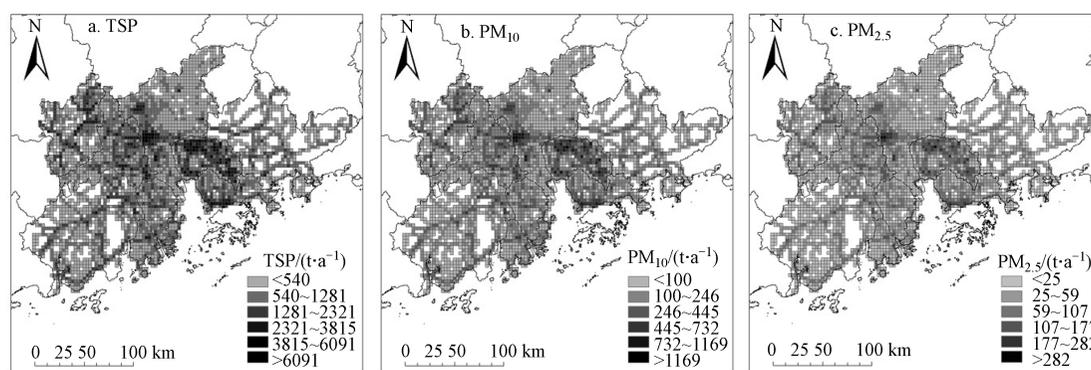


图3 珠三角地区道路扬尘 TSP、PM₁₀和 PM_{2.5}排放空间分布特征

Fig.3 Spatial characteristics of TSP, PM₁₀, and PM_{2.5} of road dust emission in PRD

由图3可见,珠三角地区交通道路扬尘 TSP、PM₁₀及 PM_{2.5}的排放呈现相似的空间分布特征,排放量较大的区域主要是广州和东莞,其次是江门、肇庆、佛山和惠州,排放量最小的则是珠海.

5 结论(Conclusions)

1) 珠三角地区不同等级道路的尘负荷值分别为:一级道路 $0.99 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 、二级道路 $1.30 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 、三级道路 $1.35 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 、四级道路 $1.45 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$.

2) 珠三角地区不同等级道路扬尘 TSP、PM₁₀、及 PM_{2.5}的排放因子差异较大,高速公路: $8.34 \text{ g} \cdot \text{VKT}^{-1}$ 、 $1.60 \text{ g} \cdot \text{VKT}^{-1}$ 、 $0.39 \text{ g} \cdot \text{VKT}^{-1}$;一级道路: $5.89 \text{ g} \cdot \text{VKT}^{-1}$ 、 $1.13 \text{ g} \cdot \text{VKT}^{-1}$ 、 $0.27 \text{ g} \cdot \text{VKT}^{-1}$;二级道路: $8.15 \text{ g} \cdot \text{VKT}^{-1}$ 、 $1.56 \text{ g} \cdot \text{VKT}^{-1}$ 、 0.38

$\text{g} \cdot \text{VKT}^{-1}$;三级道路: $8.50 \text{ g} \cdot \text{VKT}^{-1}$ 、 $1.63 \text{ g} \cdot \text{VKT}^{-1}$ 、 $0.39 \text{ g} \cdot \text{VKT}^{-1}$;四级道路: $10.74 \text{ g} \cdot \text{VKT}^{-1}$ 、 $2.06 \text{ g} \cdot \text{VKT}^{-1}$ 、 $0.50 \text{ g} \cdot \text{VKT}^{-1}$.

3) 珠三角地区2010年交通道路扬尘 TSP 排放量为 $2755.1 \times 10^3 \text{ t}$, PM₁₀为 $528.8 \times 10^3 \text{ t}$, PM_{2.5}为 $127.9 \times 10^3 \text{ t}$,由道路尘负荷不确定性引起的 TSP、PM₁₀、及 PM_{2.5}排放量的定量不确定性范围分别为: -91.7% ~ 175.1%、-91.6% ~ 178.9%及 -91.5% ~ 176.5%.

4) 各等级道路扬尘 TSP、PM₁₀、及 PM_{2.5}排放的小时变化曲线一致,在 07:00—09:00 和 17:00—19:00 这两个时间段的道路扬尘排放量达到峰值,12:00—14:00 期间出现白天最低值,夜间排放均比白天排放低.

5) 珠三角地区交通道路扬尘 TSP、PM₁₀ 及 PM_{2.5} 的排放呈现相似的空间分布特征,排放量较大的区域主要是广州和东莞,排放量最小的则是珠海。

参考文献 (References):

- Bhaskar V S, Sharma M. 2008. Assessment of fugitive road dust emissions in Kanpur, India; A note [J]. *Transportation Research Part D-Transport and Environment*, 13(6): 400-403
- Candis C, Arundhati M, Glenn A, *et al.* 1995. Evaluation of PM₁₀ emission rate from paved and unpaved roads using tracer techniques [J]. *Atmospheric Environment*, 29: 1075-1089
- 车汶蔚. 2010. 珠江三角洲高时空分辨率机动车污染排放清单开发及控制对策研究[D]. 广州: 华南理工大学. 39-41
- Chen J H, Wei W, Liu H J, *et al.* 2011 Determination of road dust loadings and chemical characteristics using resuspension [J]. *Environ Monit Assess*, DOI 10.1007/s10661-011-2071-1
- Chow J, Liu C, Cassmassi J, *et al.* 1992. A Neighborhood Scale Study of PM₁₀ Source Contributions in Rubidoux [J]. *Atmospheric Environment*, 26A: 693-706
- Deng X J, Tie X X, Wu D, *et al.* 2008. Longterm trend of visibility and its characterizations in the Pearl River Delta (PRD) region, China. *Atmospheric Environment* [J]. 42 (7):1424-1435
- Dyck R I J, Stukel J J. 1976. Fugitive dust emissions from trucks on unpaved roads [J]. *Environmental Science and Technology*, 10 (10): 1045-1048
- Etyemezian V, Kuhns H, Gillies J, *et al.* 2003. Vehicle-based road dust emission measurement (III): effect of speed, traffic volume, location, and season on PM₁₀ road dust emissions in the Treasure Valley, ID [J]. *Atmospheric Environment*, 37:4583-4593
- Etyemezian V, Kuhns H, Gillies J, *et al.* 2003. Vehicle-based road dust emission measurement; I-methods and calibration [J]. *Atmospheric Environment*, 37: 4559- 4571
- 樊守彬, 秦建平, 蔡煜. 2011. 呼和浩特交通扬尘排放清单研究 [J]. *环境科学与管理*, 36(6): 19-22
- 樊守彬, 田刚, 李钢, 等. 2007. 北京铺装道路交通扬尘排放规律研究[J]. *环境科学*, 28(10): 2396-2399
- 冯银厂, 吴建会, 朱坦, 等. 2003. 济南市和石家庄市扬尘的化学组成[J]. *城市环境与城市生态*, 16: 57-59
- Frey H C, Zheng J Y. 2002. Probabilistic analysis of driving cycle-based highway vehicle emission factors [J]. *Environmental Science & Technology*, 36: 5184-5191
- 韩力慧, 庄国顺, 程水源, 等. 2009. 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*, 30(1): 1-8
- 黄成, 陈长虹, 李莉, 等. 2011. 长江三角洲地区人为源大气污染物排放特征研究[J]. *环境科学学报*, 31(9):1858-1871
- Kuhns H, Landwehr D, MacDougall C, *et al.* 2001. Testing Re-entrained Aerosol Kinetic Emissions from roads (TRAKER): a new approach to infer silt loading on roadways [J]. *Atmospheric Environment*, 35: 2815-2825
- Kuhns H, Etyemezian V, Green M, *et al.* 2003. Vehicle-based road dust emission measurement-Part II: Effect of precipitation, wintertime road sanding, and street sweepers on inferred PM₁₀ emission potentials from paved and unpaved roads [J]. *Atmospheric Environment*, 37: 4573-4582
- 刘泽常, 张猛, 郝长瑞, 等. 2012. 济南市道路扬尘排放因子估算及其影响因素研究[J]. *环境科学与技术*, 35(1): 150-154
- USEPA. 2011. Emission factor documentation for AP-42, Section 13.2. 1: Paved Roads[R]. Kansas City: Midwest Research Institute
- USEPA. 2011. Compilation of air pollutant emission factors, Vo. II: stationary point and area sources. APPENDIX C. 1. procedures for sampling surface/bulk dust loading [R]. MO: Midwest Research Institute
- USEPA. 2011. Compilation of air pollutant emission factors, Vo. II: stationary point and area sources. APPENDIX C. 2. procedures for laboratory analysis of surface/bulk dust loading samples [R]. MO: Midwest Research Institute
- Watson J, Chow J, Mathai C, *et al.* 1989. Receipt or models in air resources management: a summary of the APCA international specialty conference [J]. *Journal Air Waste Management Association*, 39: 419-426
- 许艳玲, 程水源, 陈东升, 等. 2007. 北京市交通扬尘对大气环境质量的影晌[J]. *安全与环境学报*, 7(1): 53-56
- Zhang Y H, Su H, Zhong L J, *et al.* 2008. Regional ozone pollution and observation based approach for analyzing ozone-precursor relationship during the PRIDE-PRD2004 Campaign [J]. *Atmospheric Environment*, 42(25): 6203-6218
- Zheng J Y, Frey H C. 2004. Quantification of variability and uncertainty using mixture distributions; evaluation of sample size, mixing weights, and separation between components [J]. *Risk Analysis*, 24(3): 553-571
- Zheng J Y, Frey H C. 2005. Quantitative analysis of variability and uncertainty with known measurement error; methodology and case study [J]. *Risk Analysis*, 25(3): 663-675
- Zheng J Y, Zhang L J, Che W W, *et al.* 2009. A highly resolved temporal and spatial air pollutant emission inventory for the Pearl River Delta region, China and its uncertainty assessment [J]. *Atmospheric Environment*, 43:5112-5122
- 郑君瑜, 张礼俊, 钟流举, 等. 2009. 珠江三角洲大气面源排放清单及空间分布特征[J]. *中国环境科学*, 29(5): 455-460
- Zheng J Y, Zhong L J, Wang T, *et al.* 2010. Ground-level ozone in the Pearl River Delta region; analysis of data from a recently established regional air quality monitoring network [J]. *Atmospheric Environment*, 44(6): 814-823
- 钟流举, 郑君瑜, 雷国强, 等. 2007. 大气污染物排放清单不确定性定量分析方法与案例研究[J]. *环境科学研究*, 20(4): 15-19
- 广州市统计局. 2011. 广州统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社
- 深圳市统计局. 2011. 深圳统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社
- 佛山市统计局. 2011. 佛山统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社
- 珠海市统计局. 2011. 珠海统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社
- 东莞市统计局. 2011. 东莞统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社
- 中山市统计局. 2011. 中山统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社
- 惠州市统计局. 2011. 惠州统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社
- 肇庆市统计局. 2011. 肇庆统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社
- 江门市统计局. 2011. 江门统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社