

城市隧道源排放清单建立方法

黄青^{1,2*}, 宋韬^{1,2}, 王伯光³, 许艳玲⁴, 李悦⁵, 张展毅³ (1.暨南大学环境学院, 广东 广州 510632; 2.暨南大学广东省环境污染与健康重点实验室, 广东 广州 510632; 3.暨南大学环境与气候研究院, 广东 广州 510632; 4.环境保护部环境规划院, 北京 100012; 5.交通运输部规划研究院, 北京 100028)

摘要: 提出了城市隧道源的概念,城市隧道源像是一个地面向下水平放置的烟囱,排放高度低,排放浓度大.提出了城市隧道源排放清单的建立方法,包括排放因子法和在线监测法.对广州珠江隧道的研究表明,广州珠江隧道源 NO_x 年总排放量、年增量排放量分别为 18.8、16.6t,CO 年总排放量、年增量排放量分别为 22.7、16.8t,SO₂ 年总排放量、年增量排放量分别为 0.39、0.22t,城市隧道源对城市局地、小尺度大气环境的影响不能忽视.

关键词: 城市隧道源; 排放清单; 机动车; 空气质量

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2018)08-2898-05

DOI:10.19674/j.cnki.issn1000-6923.2018.0305

Method to establish the emission inventory for urban tunnel source. HUANG Qing^{1,2*}, SONG Tao^{1,2}, WANG Bo-guang³, XU Yan-ling⁴, LI Yue⁵, ZHANG Zhan-yi³ (1.School of Environment, Jinan University, Guangzhou 510632, China; 2.Guangdong Key Laboratory of Environmental Pollution and Health, Jinan University, Guangzhou 510632, China; 3.Institute for Environment and Climate Research, Jinan University, Guangzhou 510632, China; 4.Chinese Academy for Environmental Planning, Beijing 100012, China; 5.Transport Planning and Research Institute, Ministry of Transport, Beijing 100028, China). *China Environmental Science*, 2018,38(8): 2898~2902

Abstract: In the present study, we brought forward the concept of urban tunnel source. The urban tunnel source is similar to an underground horizontal chimney. It features with a low emission height and a high emission concentration. We developed two methods to establish the emission inventory for urban tunnel source, including the emission factor method and the on-line monitoring method. The study on the Guangzhou Zhujiang Tunnel showed that the annual total emission and the annual incremental emission of NO_x were 18.8t and 16.6t, respectively; the annual total emission and the annual incremental emission of CO were 22.7t and 16.8t, respectively; the annual total emission and the annual incremental emission of SO₂ were 0.39t and 0.22t, respectively. Therefore, the influence of urban tunnel source on the local and small-scale atmospheric environment should not be ignored.

Key word: urban tunnel source; emission inventory; vehicle; air quality

城市隧道是指位于城区(城市建成区)用于机动车通行的地下通道,其大气污染排放主要来自机动车排放,由于隧道自身结构,空气仅在隧道入口、出口与外环境进行交换,因此隧道内排放的污染物在出口处浓度较高.研究显示,位于广州市区的珠江隧道出口处 CO 为 22.299mg/m³、NO_x 为 1.917mg/m³、SO₂ 为 213μg/m³、PM₁₀ 为 1105μg/m³、PM_{2.5} 为 419μg/m³、多环芳烃为 27.067μg/m³[1-4],污染物浓度远高于广州市年均空气质量,达国家环境空气质量标准[5]日均值二级标准的几倍到几十倍.

大气污染物排放清单是在特定时间、空间尺度上对一种或几种大气污染物的排放源做出的排放量估算,涉及区域、城市、区县等各类地理或行政管理范围内大气污染源的排放结构和排放水平,是研究大气污染成因、机制和特点,开展大气环境质量数

值模拟和预报预警、制定大气污染源减排控制方案的重要基础数据[6].国内外学者们对大气污染物排放清单进行了广泛的研究工作,建立了从 NO_x、PM₁₀、PM_{2.5}、VOCs 等常规污染物到金属元素、多环芳烃(PAHs)等具有毒性和致癌性污染物的排放清单[7-12],从人为源到天然源的排放清单[13-15],从全球尺度、区域尺度、国家尺度到城市尺度的排放清单[16-23],并向高时空分辨率、小尺度精细化的方向发展[24-26].研究表明,城市移动源是影响城市大气环境质量的主要排放源之一,为此学者们利用机动车排放模型、台架测试、遥感测试等多种方式和方法建

收稿日期: 2018-01-10

基金项目: 国家自然科学基金(51308257);广州市科技局民生科技重大专项(7411802487242)

* 责任作者, 副教授, huangqing@jnu.edu.cn

立了道路机动车排放清单^[27-32],并不断对城市移动源排放清单进行完善,开展了城市非道路移动源、飞机源等排放清单的研究和建立工作^[33-34].但关于城市隧道源排放清单的研究工作较少.以往隧道大气污染的研究工作,多关注于机动车排放因子的研究^[35-37],并没有把隧道作为一个重要的排放源来建立其排放清单.本研究提出了城市隧道源排放清单的建立方法,旨在为城市局地大气环境模拟和控制、整体改善城市大气环境质量提供参考.

1 研究方法

1.1 计算方法

目前,常用的大气污染源排放清单建立方法主要有自上而下(top-down)和自下而上(bottom-up)2种方法.自上而下法主要是利用基于统计的活动水平数据(如统计年鉴)和排放因子计算各类污染源和各种污染物的排放量,该类排放清单时空分辨率较低,具有较大的不确定性.而自下而上法主要是基于排放源的逐个调查或监测数据计算各类污染源和各种污染物的排放量,该类排放清单时空分辨率较高,不确定性较小^[38].

对于城市隧道源排放清单,在计算隧道源大气污染物排放量时,将隧道看成一个柱状活塞,理想条件下单位时间内隧道入口和隧道出口通风量相同,因此一般有 2 种计算方法.方法一,通过排放因子计算一定时间内通过隧道的所有机动车的污染物排放量;方法二,通过监测数据计算该时间内活塞进出口的污染物浓度差与通风量的乘积.

方法一为排放因子法(自上而下法),主要是利用机动车排放因子、车流量、隧道长度计算隧道源大气污染物的排放量.机动车排放因子数据可通过实测(如台架测试、遥感测试等)、排放模型(如 Copert、Mobile 等)^[27-32]获得,但是这些排放因子并不能反映隧道内通行机动车的真实行驶工况,存在较大不确定性.车流量数据可从交管部门获取,但是其车型分类可能和本方法的车型分类不一致,同时车流量数据的时间分辨率将决定最终排放量数据的时间分辨率.因此,方法一的优势是简单方便,但由于排放因子和车流量数据的误差,具有较大的不确定性.

方法二为在线监测法(自下而上法),主要是利用在隧道进、出口设置的大气污染物监测设备、气象

监测设备,获取高时间分辨率的污染物浓度和风速数据,结合隧道截面积计算隧道源大气污染物的排放量,如公式(1)和公式(2)所示.由于采用了在线监测设备,可以得到较高时间分辨率的浓度和风速数据,因此可以反映隧道内污染物浓度和风速的真实变化情况,得到小时、日、周、月、年等不同时间分辨率的排放数据.与自上而下的方法相比,方法二成本较高,但其时间分辨率较高,可以满足不同研究的需要,所编制的排放清单不确定性较小.因此,对于位于敏感点附近的城市隧道源,在财力人力等允许的情况下,推荐采用方法二建立排放清单.

$$E_a = (C_{out} - C_{in}) \cdot V \cdot S \times 3.6 \quad (1)$$

$$E_t = C_{out} \cdot V \cdot S \times 3.6 \quad (2)$$

式中: C_{out} 为隧道出口处污染物浓度, mg/m^3 ; C_{in} 为隧道入口处污染物浓度, mg/m^3 ; V 为平均风速, m/s ; S 为隧道截面积, m^2 ; E_a 为隧道源增量排放量,即每小时(单位时间内)通过隧道的机动车在隧道内排放的大气污染物的量, g/h ; E_t 为隧道源总排放量,即每小时从隧道出口排出的大气污染物的量(包括两部分,一为隧道源增量排放量,二为从隧道入口处进入的大气污染物的量), g/h .

1.2 研究方案

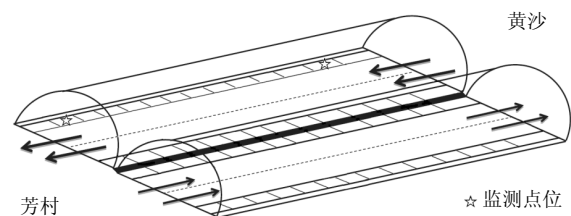


图 1 珠江隧道监测点位设置

Fig.1 Monitoring sites in the Zhujiang Tunnel

选取位于广州市老城区荔湾区的珠江隧道为研究对象,监测选取从北至南(由黄沙至芳村)通行的隧管,隧管有效总长 710m,有效截面积为 42m^2 ,单向双车道,监测仪器设置在隧道两端内部同侧,距离隧道口 10m 处(如图 1 所示).监测时段为 2013 年 8 月 11 日~13 日,监测设备为美国 Thermo 43C SO_2 Analyzer、Thermo 42C $\text{NO}-\text{NO}_2-\text{NO}_x$ Analyzer、Thermo 48C CO Analyzer 和便携式气象监测仪. NO_x 、 CO 、 SO_2 、气象等监测数据均为 5min 采集 1 次,根据研究需要将其转换为小时平均值,得到连续

3 天的小时平均数据.利用在线监测法计算珠江隧道源(从北至南通行)排放量.

2 结果与讨论

2.1 隧道入口、出口污染物浓度分析

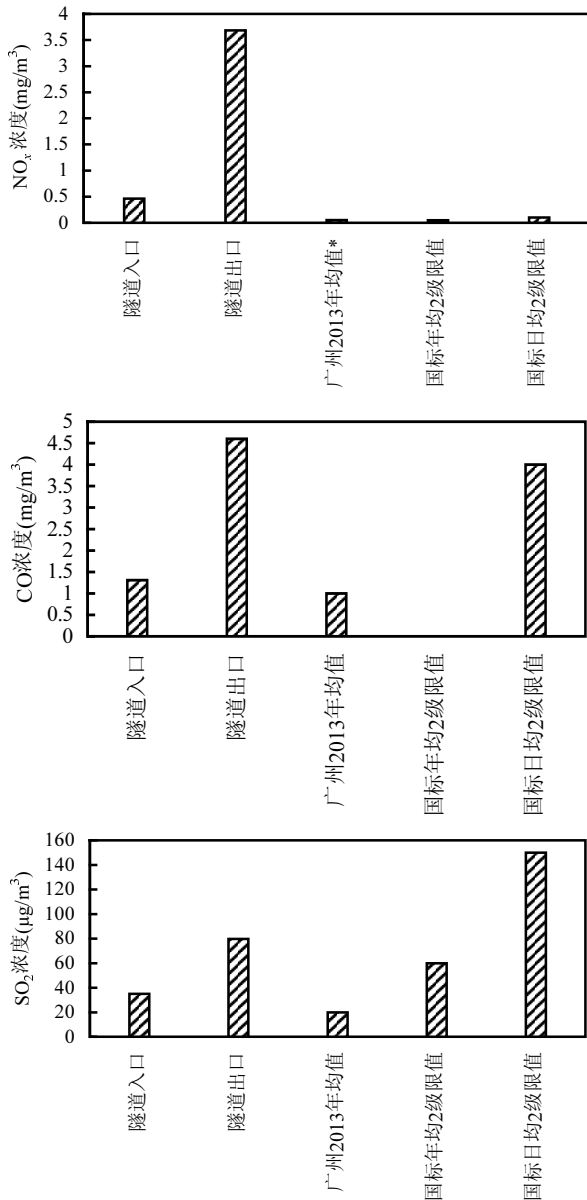


图2 NO_x、CO、SO₂平均浓度和国家环境空气质量标准
Fig.2 The average concentration of NO_x, CO and SO₂ and ambient air quality standards
*为NO₂年均值

如图2所示,监测时段隧道出口NO_x、CO、SO₂平均浓度分别为3.68mg/m³、4.60mg/m³、79.8µg/m³,均远高于隧道入口浓度,其中NO_x隧道出口为入口浓度的近8倍;隧道出口NO_x、CO、SO₂浓度均远高于

于广州市年平均浓度;隧道出口处NO_x浓度远高于国家环境空气质量标准^[5],为日均值2级限值的约37倍.由此可见,高浓度的隧道源排放对周边小尺度区域大气环境质量具有一定影响.

将监测期间每日24h的NO_x、CO、SO₂浓度平均,得到日变化曲线(图3).受车流量影响隧道出口污染物浓度呈明显的双峰分布,峰值分别出现在上午11:00和晚7:00,NO_x浓度分别为6.14,6.89mg/m³、CO浓度分别为6.18,7.40mg/m³、SO₂浓度分别为105.9,92.6µg/m³,出口处NO_x浓度为国家环境空气质量标准^[5]小时2级限值的约28倍.

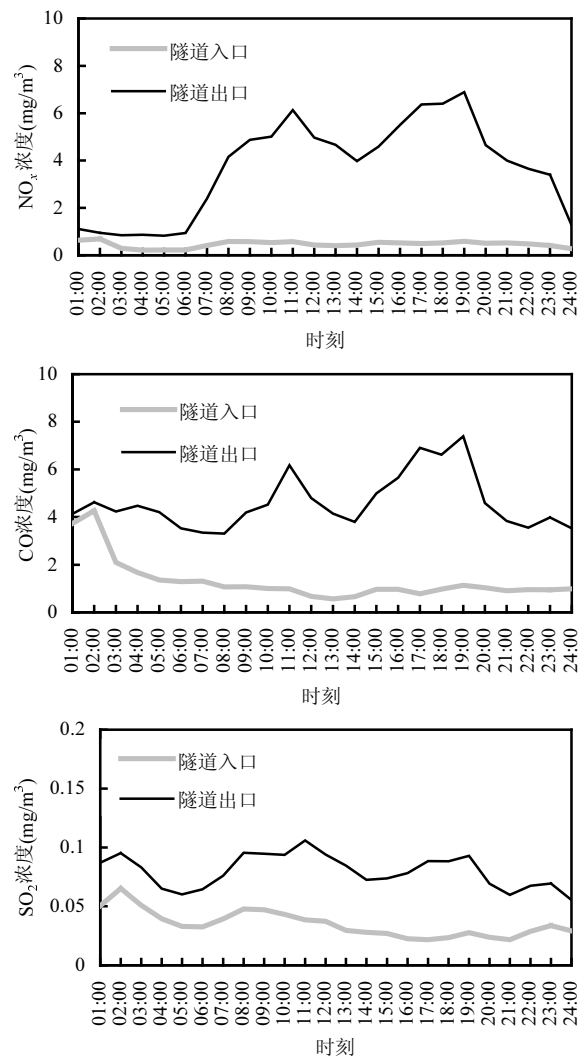


图3 NO_x、CO、SO₂浓度日变化曲线
Fig.3 Daily variation of NO_x, CO and SO₂ concentrations

2.2 隧道源污染物排放量分析

依据公式(1)、(2)计算出NO_x、CO、SO₂排放量日变化.由图4可见,受污染物浓度、隧道风速影

响,污染物排放量峰值分布与浓度峰值分布相似。 NO_x 总排放量最大值、最小值分别出现在下午 5:00 和凌晨 3:00,分别为 3.61,0.38kg/h。 NO_x 增量排放量最大值、最小值分别出现在下午 5:00 和凌晨 2:00,分别为 3.33,0.19kg/h。 CO 总排放量最大值、最小值分别出现在下午 5:00 和凌晨 6:00,分别为 3.91,1.81kg/h。 CO 增量排放量最大值、最小值分别出现在下午 5:00 和凌晨 1:00,分别为 3.46,0.48kg/h。 SO_2 总排放量最大值、最小值分别出现在上午 11:00 和凌晨 5:00,分别为 0.0614,0.0286kg/h。 SO_2 增量排放量最大值、最小值分别出现在上午 11:00 和凌晨 2:00,分别为 0.0388,0.0120kg/h。

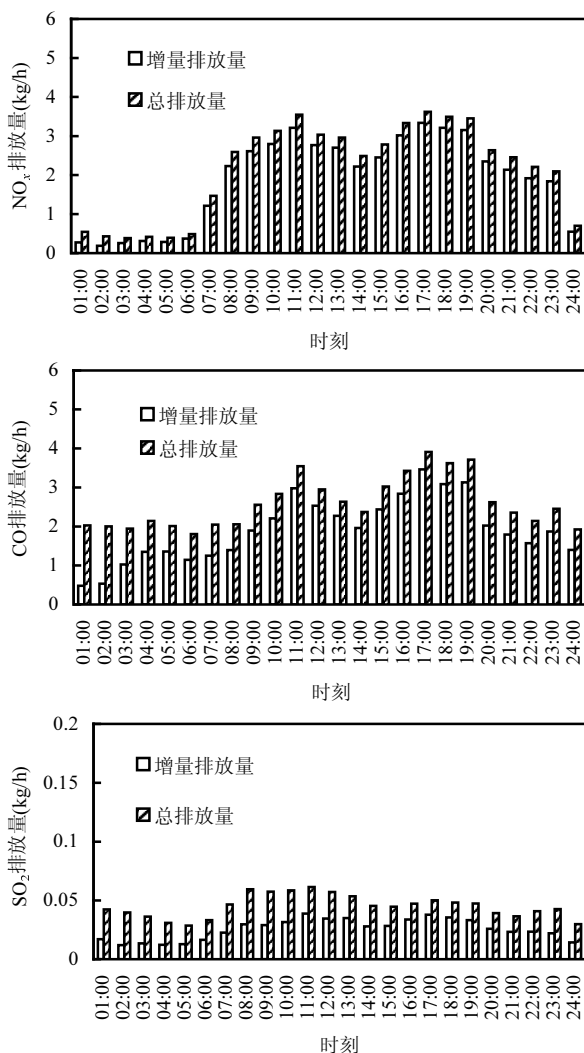


图 4 NO_x 、 CO 、 SO_2 排放量日变化曲线

Fig.4 Daily variation of NO_x , CO and SO_2 emission amount

将日变化数据合并得到日排放数据。隧道 NO_x 日总排放量、日增量排放量分别为 51.6,45.4kg,日增

量排放量占比为日总排放量的 88.0%。隧道 CO 日总排放量、日增量排放量分别为 62.1,46.0kg,日增量排放量占比为日总排放量的 74.0%。隧道 SO_2 日总排放量、日增量排放量分别为 1.08,0.61kg,日增量排放量占比为日总排放量的 57.0%。

按一年 365d 计算,隧道 NO_x 年总排放量、年增量排放量分别为 18.8,16.6t;隧道 CO 年总排放量、年增量排放量分别为 22.7,16.8t;隧道 SO_2 年总排放量、年增量排放量分别为 0.39,0.22t。进一步证明,隧道源大气污染物排放量对周边小尺度区域大气环境质量具有一定影响。

基于隧道入口、出口的监测数据可建立高时间分辨率的隧道源排放清单,通过长期持续监测,可建立小时、日、周、月、年等不同时间分辨率的源清单,为模型模拟、污染控制提供高时间分辨率的基础数据。目前,针对隧道的研究工作多关注于隧道出入口污染物浓度水平特征、机动车排放因子计算、机动车排放清单建立^[35-37],并没有将城市隧道作为一个重要的排放源。而本研究提出了城市隧道源及城市隧道源排放清单的建立方法,该研究将为城市局地大气污染研究提供基础数据。

3 结论

3.1 提出了城市隧道源排放清单的建立方法,包括排放因子法和在线监测法。

3.2 广州珠江隧道 NO_x 年总排放量、年增量排放量分别为 18.8,16.6t; CO 年总排放量、年增量排放量分别为 22.7,16.8t; SO_2 年总排放量、年增量排放量分别为 0.39,0.22t。珠江隧道源大气污染物排放,特别是 NO_x 的排放将对局地大气环境具有一定程度的影响。

参考文献:

- [1] 王伯光,张远航,吴政奇,等.广州市机动车排放因子隧道测试研究[J]. 环境科学研究, 2001,14(4):13-16.
- [2] He L Y, Hu M, Zhang Y H. Fine particle emissions from on-road vehicles in the Zhujiang Tunnel, China [J]. Environmental Science & Technology, 2008,42(12):4461-4466.
- [3] 王伯光,吕万明,周 炎,等.城市隧道汽车尾气中多环芳烃排放特征的研究 [J]. 中国环境科学, 2007,27(4):482-487.
- [4] Huang Q, Han H, Zhang Z Y, et al. The methodology to establish a high temporal resolution emission inventory for tunnel source in city [C]. The 3rd International Conference on Energy and Environmental

- Protection, 2014.
- [5] GB 3095-2012 环境空气质量标准 [S].
- [6] 杨柳林,曾武涛,张永波,等.珠江三角洲大气排放源清单与时空分配模型建立 [J]. 中国环境科学, 2015,35(12):3521-3534.
- [7] 田贺忠,郝吉明,陆永琪,等.中国氮氧化物排放清单及分布特征 [J]. 中国环境科学, 2001,21(6):14-18.
- [8] 郑君瑜,张礼俊,钟流举,等.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, 2009,29(5):455-460.
- [9] 曹国良,安心琴,周春红,等.中国区域反应性气体排放源清单 [J]. 中国环境科学, 2010,30(7):900-906.
- [10] 田贺忠,赵丹,何孟常,等.2005年中国燃煤大气梯排放清单 [J]. 中国环境科学, 2010,30(11):1550-1557.
- [11] 王堃,滑申冰,田贺忠,等.2011年中国钢铁行业典型有害重金属大气排放清单 [J]. 中国环境科学, 2015,35(10):2934-2938.
- [12] 蒋秋静,李跃宇,胡新新,等.太原市多环芳烃(PAHs)排放清单与分布特征分析 [J]. 中国环境科学, 2013,33(1):14-20.
- [13] 苏继峰,朱彬,康汉青,等.长江三角洲地区秸秆露天焚烧大气污染物排放清单及其在空气质量模式中的应用 [J]. 环境科学, 2012, 33(5):1418-1424.
- [14] 闫雁,王志辉,白郁华,等.中国植被 VOC 排放清单的建立 [J]. 中国环境科学, 2005,25(1):110-114.
- [15] 余宇帆,卢清,郑君瑜,等.珠江三角洲地区重点 VOC 排放行业的排放清单 [J]. 中国环境科学, 2011,31(2):195-201.
- [16] Pacyna E G, Pacyna J M, Steenhuisen F, et al. Global anthropogenic mercury emission inventory for 2000 [J]. Atmospheric Environment, 2006,40(22):4048-4063.
- [17] 胡泳涛,张远航,谢绍东,等.区域高时空分辨率 VOC 天然源排放清单的建立 [J]. 环境科学, 2001,22(6):1-6.
- [18] Streets D G, Bond T C, Carmichael G R, et al. An inventory of gaseous and primary aerosol emissions in Asia in the year 2000 [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2003,108(D21):8809.
- [19] Ohara T, Akimoto H, Kurokawa J, et al. An Asian emission inventory of anthropogenic emission sources for the period 1980~2020 [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2007,16(7):4419-4444.
- [20] 余宇帆,卢清,郑君瑜,等.珠江三角洲地区重点 VOC 排放行业的排放清单 [J]. 中国环境科学, 2011,31(2):195-201.
- [21] 聂磊,李靖,王敏燕,等.城市尺度 VOCs 污染源排放清单编制方法的构建 [J]. 中国环境科学, 2011,31(Suppl.):6-11.
- [22] 王孝文,田伟利,张清宇.杭州市机动车污染物排放清单的建立 [J]. 中国环境科学, 2012,32(8):1368-1374.
- [23] 陈国磊,周颖,程水源,等.承德市大气污染源排放清单及典型行业对 PM_{2.5} 的影响 [J]. 环境科学, 2016,37(11):4069-4079.
- [24] 伯鑫,赵春丽,吴铁,等.京津冀地区钢铁行业高时空分辨率排放清单方法研究 [J]. 中国环境科学, 2015,35(8):2554-2560.
- [25] 赵蓓蓓,郭秀锐,程水源,等.基于统计回归的高分辨率工业源排放大气常规污染物排放清单建立与校核方法 [J]. 安全与环境学报, 2016,16(1):273-277.
- [26] 谈佳妮,余琦,马蔚纯,等.小尺度精细化大气污染源排放清单的建立——以上海宝山区为例 [J]. 环境科学学报, 2014,34(5):1099-1108.
- [27] 郝吉明,吴焯,傅立新.北京市机动车污染分担率的研究 [J]. 环境科学, 2001,22(5):1-6.
- [28] Huo H, Zhang Q, He K, et al. High-resolution vehicular emission inventory using a link-based method: A case study of light-duty vehicles in Beijing [J]. Environmental Science & Technology, 2009, 43:2394-2399.
- [29] 宋翔宇,谢绍东.中国机动车排放清单的建立 [J]. 环境科学, 2006,27(6):1041-1045.
- [30] 马因韬,刘启汉,雷国强,等.机动车排放模型的应用及其适用性比较 [J]. 北京大学学报(自然科学版), 2008,44(2):308-316.
- [31] 李新兴,孙国金,王孝文,等.杭州市区机动车污染物排放特征及分担率 [J]. 中国环境科学, 2013,33(9):1684-1689.
- [32] 孙世达,姜巍,高卫东.青岛市机动车排放清单与空间分布特征 [J]. 中国环境科学, 2017,37(1):49-59.
- [33] 鲁君,黄成,胡馨遥,等.长三角地区典型城市非道路移动机械大气污染物排放清单 [J]. 环境科学, 2017,38(7):2738-2746.
- [34] 徐冉,郎建垒,杨孝文,等.首都国际机场飞机排放清单的建立 [J]. 中国环境科学, 2016,36(8):2554-2560.
- [35] Mancilla Y, Mendoza A. A tunnel study to characterize PM_{2.5} emissions from gasoline-powered vehicles in Monterrey, Mexico [J]. Atmospheric Environment, 2012,59:449-460.
- [36] Zhang Y L, Yang W Q, Simpson I, et al. Decadal changes in emissions of volatile organic compounds (VOCs) from on-road vehicles with intensified automobile pollution control: Case study in a busy urban tunnel in south China [J]. Environmental Pollution, 2018,233:806-819.
- [37] 于艳,王秀艳,杨文.天津市机动车二次有机气溶胶生成潜势的估算 [J]. 中国环境科学, 2015,35(2):381-386.
- [38] 李楠,卞雅慧,钟庄敏,等.广东省人为源 BC、OC 排放清单建立与校验 [J]. 环境科学学报, 2017,37(2):419-428.

作者简介: 黄青(1981-),男,湖南常德人,副教授,博士,主要从事大气环境模拟预测与规划管理研究.发表论文 20 余篇.