

西安市机动车污染物排放清单与空间分布特征*

汪晶发¹ 宋 慧^{2#} 巴利萌¹ 李光华¹ 孙智钢¹

(1.长安大学水利与环境学院,陕西 西安 710064;2.长安大学建筑工程学院,陕西 西安 710064)

摘要 基于机动车排放因子(MOVES)模型和地理信息系统(ArcGIS)技术,建立了西安市2017年分辨率为1 km×1 km的机动车污染物排放清单。结果显示:2017年西安市机动车污染物PM_{2.5}、PM₁₀、NO_x(NO+NO₂)、NO、NO₂、N₂O和挥发性有机物(VOCs)的年排放总量分别为126.1×10⁴、138.2×10⁴、2 884.2×10⁴、2 577.8×10⁴、306.4×10⁴、27.9×10⁴、1 281.2×10⁴ kg;柴油车是PM_{2.5}、PM₁₀和NO_x排放的主要来源,贡献率分别为80.2%、79.5%和75.8%;VOCs和N₂O则主要来自汽油车,贡献率分别为74.2%、89.7%;总体看来,研究区域内不同污染物的空间分布规律相似,这与西安市公路分布有关,PM_{2.5}和NO_x的排放主要集中在主城区及周边县区的高速路和国道,而VOCs的排放主要集中在主城区二环及环内。

关键词 机动车排放清单 空间分布 MOVES模型 西安市

DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.2020.06.003

Study on the vehicle emission inventory and spatial distribution characteristics in Xi'an WANG Jingfa¹, SONG Hui², BA Limeng¹, LI Guanghua¹, SUN Zhigang¹, (1. School of Water and Environment, Chang'an University, Xi'an Shaanxi 710064; 2. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an Shaanxi 710064)

Abstract: A vehicle emission inventory with a resolution of 1 km×1 km in Xi'an for the year 2017 was developed based on the motor vehicle emission simulator (MOVES) model and geographic information system (ArcGIS) technique. The results showed that the total emissions of PM_{2.5}, PM₁₀, NO_x (NO+NO₂), NO, NO₂, N₂O and volatile organic compounds (VOCs) were 126.1×10⁴, 138.2×10⁴, 2 884.2×10⁴, 2 577.8×10⁴, 306.4×10⁴, 27.9×10⁴ and 1 281.2×10⁴ kg, respectively; the main source of PM_{2.5}, PM₁₀ and NO_x were diesel vehicle with contribution of 80.2%, 79.5% and 75.8%, respectively. Meanwhile, gasoline vehicle contributed the most of the VOCs and N₂O emission, the contribution rate of which were 89.7% and 95.4%, respectively. In addition, the spatial distribution of different pollutants had similar characteristics, which caused by the shape of highway in Xi'an. The emissions of PM_{2.5} and NO_x were mainly concentrated in the central downtown, the expressway and national highway in surrounding counties, while emissions of VOCs were concentrated in the second ring and its inner of central downtown.

Keywords: vehicle emission inventory; spatial distribution; MOVES model; Xi'an

近年来,随着城市的快速发展和经济的持续增长,机动车保有量也迅速增加。大量研究表明,机动车尾气排放的污染物对环境空气质量具有不利影响,尤其是颗粒物(PM_{2.5}和PM₁₀)、NO_x和挥发性有机物(VOCs)等已成为导致区域性空气污染问题的关键因素^[1-2]。国内学者已在郑州市^[3]、成都市^[4]、南京市^[5]和佛山市^[6]等典型城市对机动车污染物的排放进行了研究,初步获得了机动车污染物中PM_{2.5}、PM₁₀、NO_x、VOCs等污染物的排放特征,但其中有关N₂O的排放清单研究相对较少。N₂O作为一种温室气体具有较强的反应活性^[7],是造成城市光化学烟雾污染的前体物。随着机动车保有量的增

加,N₂O及其反应产物对环境和人体健康的不利影响越来越大,因此N₂O排放清单研究也亟需重视。

西安市位于关中城市群的中心,处于天然的“U”字形河谷地带,不利于大气污染物的扩散^[8],而随着机动车保有量的不断增加,机动车排放对城市污染的贡献愈发显著,并将威胁当地居民健康。因此,建立高分辨率的机动车排放清单不仅是控制区域大气污染的基础,而且在本地机动车精准减排和政府决策等方面也具有重要作用^[9]。

本研究基于本地化修正的机动车排放因子(MOVES)模型,以2017年为基准年建立西安市机动车污染物排放清单。同时,结合西安市道路网信

第一作者:汪晶发,男,1994年生,硕士研究生,研究方向为机动车污染防治。# 通讯作者。

* 国家重点研发计划项目(No.2018YFC180037);陕西省重点研发计划项目(No.2018ZDCXL-SF-02-05)。

息,采用自上而下的方法对各污染物进行了高分辨率(1 km×1 km)的空间分配研究,研究结果可为当地大气污染防治提供数据支持。

1 材料与方法

1.1 研究区域

以关中地区的中心城市西安市为研究对象,研究区域包含了西安市主城区及周边的阎良区、临潼区、长安区、高陵县、鄠邑区、蓝田区和周至县 7 个区县,区域总面积为 10 752 km²,具体地理位置如图 1 所示。

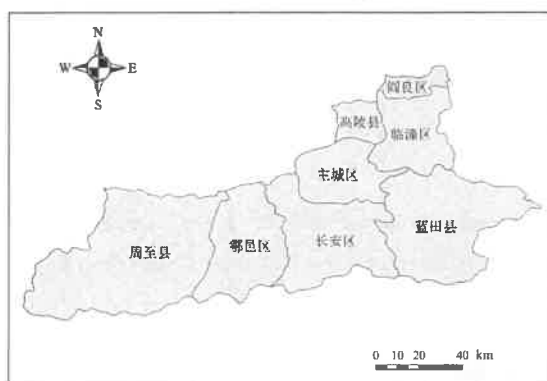


图 1 西安市地理位置

Fig.1 The geographical location of Xi'an

1.2 排放清单计算方法

本研究基于 MOVES 模型法估算机动车污染物的排放量,计算方法见式(1):

$$Q_j = \sum_i (F_{ij} \times P_i \times V_i) \quad (1)$$

式中: Q_j 为污染物 j 的年排放总量, g; F_{ij} 为 i 型车对污染物 j 的单车排放因子, g/(km·辆); P_i 为 i 型车的总保有量, 辆; V_i 为 i 型车的单车年均行驶里程, km。机动车的车型包括小型客车、中型客车、大型客车、轻型货车、中型货车、重型货车、公交车、出租车、摩托车和低速汽车(包含低速货车和低速三轮车)共 10 种车型。研究的污染物有 PM_{2.5}、PM₁₀、NO_x、NO、NO₂、N₂O 和 VOCs。

1.2.1 排放因子本地化修正

排放因子是建立合理排放清单的基础,能够反映一定活动水平下机动车污染物的排放量^[10]。国内外研究中大部分采用模型法^[11-13]测算污染物排放因子,其中美国环境保护署开发的 MOVES 模型属于行驶工况类交通排放模型,本研究通过对

MOVES 模型的参数进行本地化修正,计算了西安市 10 种车型 7 种污染物的排放因子。本地化修正主要围绕模型中的车龄分布、车辆速度分布、车辆行驶里程分布和气象要素(温度及湿度)4 类参数展开。

(1) 车龄分布

MOVES 模型中的车龄分布参数采用研究区内在用机动车不同注册年份的车辆在同类型车总保有量中的占比计算获取^[14]。本研究基于“西安市统计年鉴”中近 20 年的保有量数据,根据不同车型逐年保有量中的新注册量和淘汰量,整理计算得到了 10 种车型的车龄分布数据。

(2) 车辆速度与行驶里程分布

基于西安市交通局提供的 2017 年 5 种车型(中型客车、大型客车、公交车、出租车和重型货车)的机动车全球定位系统(GPS)数据,获得了相应车型 2017 年的实时速度和经纬度信息。另外依据调研结果,选取 50 辆小型客车作为测试车辆,通过在测试车辆上安装 GPS 设备并连续监测一个月,获取车辆的行驶速度信息。将获得的所有车辆的 GPS 数据导入到地理信息系统(ArcGIS)中,与西安市道路地图相匹配,进而计算得到各个类型机动车的速度分布占比和行驶里程分布占比。

(3) 气象要素

基于课题组在陕西省体育场周边设立的气象站(108°56'E, 34°14'N)的实时观测数据,得到西安市 2017 年各月的平均温度和相对湿度,具体数值见表 1。

1.2.2 机动车保有量

2017 年西安市机动车总保有量为 283.3 万辆,其中小型客车占比为 86.4%;轻型货车次之,占比 5.8%;而中型、重型货车相对较少,二者合计仅占 1.7%。从燃料类型来看,西安市机动车以汽油车为主,占比为 92.8%,而柴油车、天然气车分别占 6.0%、1.2%。从技术等级来看,国Ⅳ标准车占总保有量的 51.4%;而国Ⅴ标准车相对较少,占总保有量的 12.5%,国Ⅲ及以下标准车的保有量占比为 36.1%。

1.2.3 年均行驶里程

在西安市机动车检测站进行实地抽样调查,获得共计约 100 万条机动车检测数据。基于数据中车辆的累积行驶里程和注册年份等信息,计算获得各

表 1 西安市月平均温度和相对湿度
Table 1 Monthly mean temperature and relative humidity in Xi'an

项目	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
温度/℃	1.9	7.4	15.8	20.1	23.7	28.4	30.0	30.2	21.4	16.8	9.6	3.5
相对湿度/%	56.7	40.4	51.7	51.1	53.5	52.4	65.2	60.0	67.1	52.4	64.0	45.3

车型的年均行驶里程(VKT)数据(见图2)。其他车型如公交车、出租车、低速车等则根据陕西省统计年鉴中的车辆运营里程与运营车数的比例估算得到。

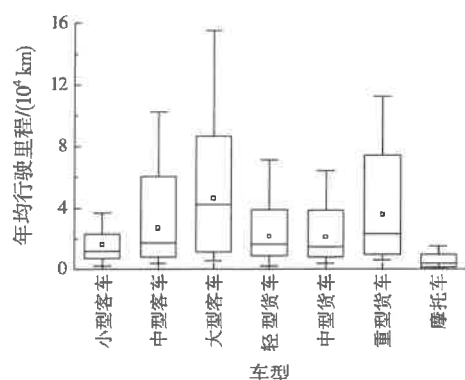


图2 不同车型年均行驶里程
Fig.2 Annual average travelled kilometers of various types of vehicles

1.3 空间分配方法

为便于分配计算,将西安市路网划分为4种道路类型,包括高速路、国道、快速路(环线和快速干道)和城市道路(包括主干路、次干路和支路)。同时以西安市路网为基础,应用 ArcGIS 建立 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 分辨率的空间网格(地理坐标系为 WGS1984),网格数共计 12 533 个。基于创建的网格和路网进行污染物的空间分配,具体方法参考文献[10]。

本研究基于年排放总量和日排放总量分别对机动车污染物的年排放和日排放进行空间分配。其中,日排放总量的计算方法为:将年排放总量按照车辆各月的行驶里程占比计算得到月排放总量,然后根据不同月份工作日和非工作日的工作日数,得到工作日和非工作日的平均日排放总量。

2 结果与讨论

2.1 机动车污染物排放清单

根据西安市机动车污染物排放因子、机动车保

有量和年均行驶里程,计算得到西安市 2017 年机动车尾气排放的污染物总量,不同车型的 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 NO_x 、 NO 、 NO_2 、VOCs 和 N_2O 的年排放量汇总见表 2。

由表 2 可见,机动车排放的 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 分别为 126.1×10^4 、 $138.2 \times 10^4\text{ kg}$,说明机动车排放的颗粒物以细颗粒为主。小型客车是 VOCs 的主要贡献源,其对 VOCs 的贡献率为 55.3%;另外,摩托车的保有量在机动车总保有量中占比仅为 4.3%,但其对 VOCs 的贡献率为 11.8%。重型货车是 NO_x 的主要贡献源,其对 NO_x 的贡献率为 46.3%。其中, NO 是 NO_x 的主要组成成分,占 NO_x 总排放量的 89.4%, NO_2 仅占 10% 左右。另外,小型客车也是 N_2O 的主要贡献源,其对 N_2O 的贡献率为 78.6%。研究表明, N_2O 是一种强力的温室气体,其每分子产生的温室效应大约是 CO_2 的 300 倍^[15]。因此,在控制温室效应方面,减少 N_2O 的排放同样需要引起重视。另一方面,重型货车是颗粒物排放的主要车型,其对 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 的贡献率分别为 47.0%、46.6%。综上所述,在机动车减排控制中,可以把不同车型的贡献率作为出发点,控制颗粒物和 NO_x 的排放应以重型货车为主,而减少 N_2O 和 VOCs 的排放则应重点关注小型客车,另外在 VOCs 排放控制上还需加强对摩托车的管控力度。

2.1.1 燃料类型贡献率

西安市机动车燃料类型主要包含汽油、柴油和天然气 3 种,各燃料类型车对不同污染物排放量的贡献如图 3 所示。柴油车保有量占比仅为 6.0%,但对 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 NO_x 的贡献率分别为 80.2%、79.5%、75.8%。因此,在控制颗粒物和 NO_x 方面应着重加强对柴油车的管控措施,如对高排放柴油车的升级改造、更新尾气净化设备等。但研究表明,颗

表 2 西安市 2017 年机动车不同车型污染物排放总量
Table 2 The pollutants emission inventory of different vehicle types for 2017 in Xi'an

项目	$\text{PM}_{2.5}$	PM_{10}	$\text{NO}_x^{1)}$	NO	NO_2	VOCs	N_2O
小型客车	20.9	23.6	462.9	416.3	46.6	709.1	21.9
中型客车	2.1	2.3	41.3	37.7	3.6	22.5	0.4
大型客车	10.1	10.9	253.6	220.9	32.7	22.9	0.2
轻型货车	19.5	21.3	439.5	399.7	39.8	132.4	2.2
中型货车	8.1	8.8	105.8	98.1	7.7	21.6	0.1
重型货车	59.2	64.4	1 334.3	1 185.7	148.6	156.6	0.2
出租车	0.9	1.0	19.0	17.1	1.9	29.2	0.9
公交车	0.4	0.4	128.7	111.2	17.5	19.5	1.6
摩托车	1.4	1.6	22.3	20.9	1.4	150.6	0.3
低速汽车	3.5	3.9	76.9	70.2	6.7	16.8	0.1
合计	126.1	138.2	2 884.2	2 577.8	306.4	1 281.2	27.9

¹⁾ 本研究中 NO_x 仅包含 NO 、 NO_2 。

粒物和 NO_x 的生成存在相悖关系,降低颗粒物排放会引起 NO_x 的上升,同时 NO_x 和油耗之间也存在这种相悖关系^[16],因此从减少颗粒物、 NO_x 和油耗的角度来看,可以将柴油车的内净化技术侧重于减少颗粒物,柴油车后处理技术侧重于减少 NO_x 的排放。另一方面,汽油车是 VOCs 和 N_2O 的主要排放源,贡献率分别为 74.2%、89.7%。由于汽油车中以私家车为主,保有量较大,因此在控制 VOCs 方面不仅要限制车辆用油中有机物(如烯烃、芳香烃等)的含量,还要加强对私家车数量及出行的管控措施。

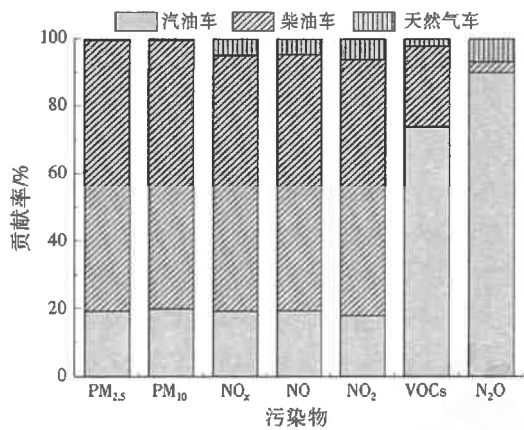


图3 西安市机动车污染物排放燃料类型贡献率
Fig.3 Contribution ratio of vehicle-emitted pollutants with different fuel types

2.1.2 技术等级贡献率

2017年西安市不同技术等级的机动车污染物排放贡献率如图4所示。由图4可见,国IV及以下标准车是所有污染物排放的主要贡献源,对污染物排放量的贡献超过77.2%。其中国III及以下标准车保有量仅占36.1%,但对颗粒物、 NO_x 和 VOCs 排放的贡献率均在70%以上,这可能与老旧车辆后处理装置的处理效率较差,使用油品中添加物的成分较多且含量较大等因素有关。国V标准车的保有量占12.5%,对颗粒物、 NO_x 和 VOCs 等污染物排放贡献相对较低,其中对 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 的贡献率均仅为1.8%。国V标准车排放对 NO_2 的贡献率高达21.2%,可能是由于更多的NO在处理装置中

已被充分氧化。基于以上分析可知,提高机动车技术等级是控制机动车污染物排放的一种有效措施。

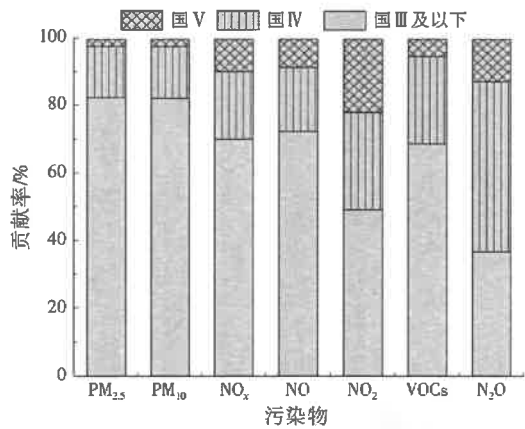


图4 西安市机动车污染物技术等级贡献率
Fig.4 Contribution ratio of vehicle-emitted pollutants with different technologies

2.1.3 排放清单对比

将本研究与其他研究的排放清单进行比较,对于进一步提高西安市机动车排放清单的精确性具有实质意义。通过查阅文献,收集总结了西安市及各地近年来机动车排放清单的研究结果,具体见表3。

由表3可以看出,本研究中各污染物排放量与其他研究结果在同一数量级上,但数值上有所差异。与郑州市相比,本研究中 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 和 NO_x 排放量总体偏低70%~80%,这可能与不同地区、不同基准年的机动车保有量和行驶里程存在较大差异有关。与西安市其他年份的机动车排放清单相比,本研究计算得到的机动车污染物排放量小于文献[17]、文献[18]的结果,其原因可能与西安市近年来车辆技术等级的提升有关,2011年西安市还未实施国V标准,且老旧车辆的保有量较大,因此导致了污染物排放总量较后期的研究结果偏大。

2.2 空间分布

2.2.1 年排放空间分析

本研究以3种典型污染物($\text{PM}_{2.5}$ 、 NO_x 和 VOCs)为例进行西安市机动车排放的空间分布分析,年空间分布结果如图5所示。可以看出,污染物

表3 各地机动车排放清单研究结果比较
Table 3 Comparison of vehicle emission inventory in different cities

城市	年份	$\text{PM}_{2.5}$	PM_{10}	NO_x	VOCs	N_2O	数据来源
西安市	2017	1.261	1.382	28.842	12.812	0.279	本研究
西安市	2012	1.9	2.7	41.0	15.3		文献[17]
西安市	2011		3.7	48.8	58.1		文献[18]
郑州市	2013	5.9	6.6	106.0			文献[3]
成都市	2016		11	72	45		文献[4]
南京市	2013	1.0		28.8			文献[5]
佛山市	2014	1.8		2.3	44.6		文献[6]

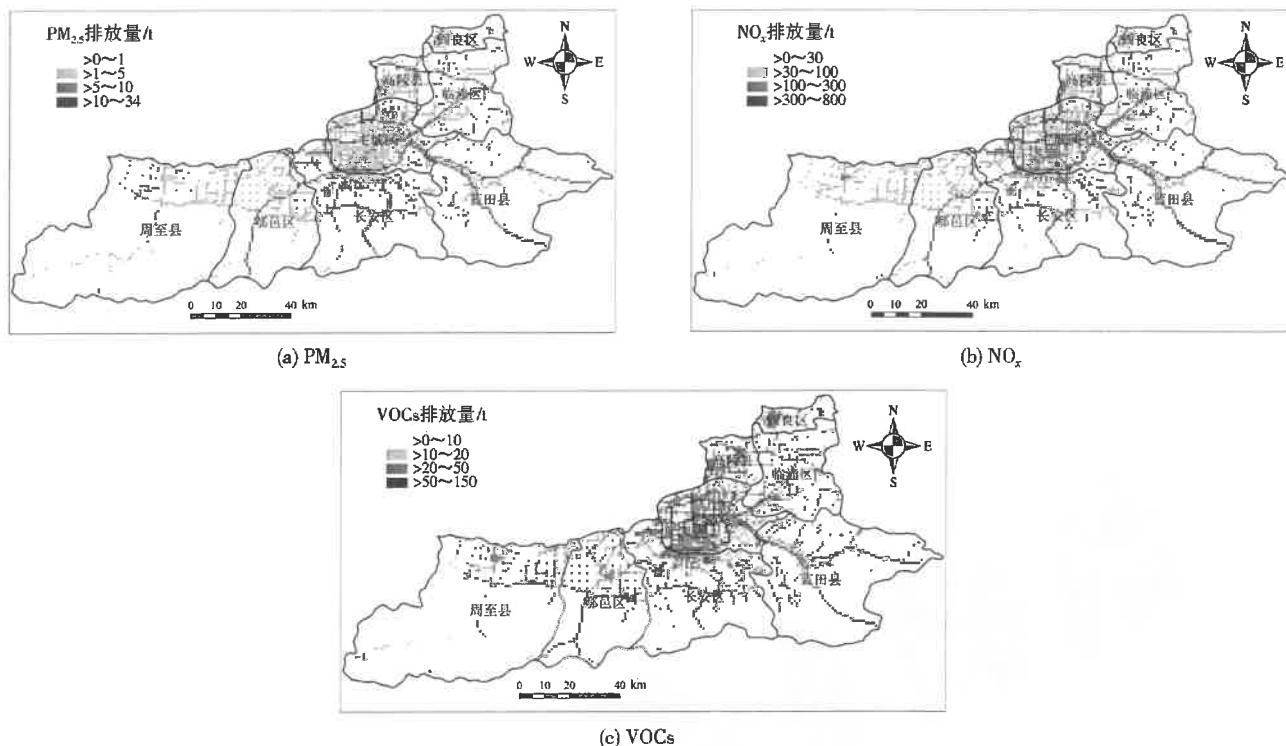


图5 2017年西安市机动车排放污染物年空间分布
Fig.5 Annual spatial distribution of vehicle-emitted pollutants in Xi'an

在排放区域内表现出相似的特征,均从主城区向四周呈放射状分布,与西安市“米”字形公路分布有关。而从污染物排放量的分布特征看,PM_{2.5}和NO_x呈现出较为一致的分布规律,排放量主要分布在西安市主城区和各县区的高速路及国道,而VOCs在主城区内的分布更加集中,尤其是二环及环内的排放量较大。综上所述,该排放量分布特征表明了西安市高速路、国道和环线以内的车辆是污染物的重要来源。

2.2.2 日排放空间分析

西安市机动车排放污染物PM_{2.5}、NO_x和VOCs的日空间分布如图6所示。结果表明,各污染物排放的空间分布特征在工作日和非工作日期间并无明显差异,但在工作日期间,高排区域的排放量数值会略高于非工作日。这可能是由于工作日车流量相对较大,增加了污染物排放源;同时受此影响,车辆行驶速度也会相对减小,车辆怠速情况相应加重,因此该情形下污染物排放也会更加严重^[19]。因此在工作日期间,机动车污染物排放量与非工作日相比相对较大。

2.3 不确定性分析

本研究中,机动车保有量数据来源于西安市统计年鉴,数据权威可信,不确定性较低。但统计年鉴

中的车型与本研究所使用的MOVES模型中设定的车型并不完全一致,因此在车型匹配过程中可能会产生一定误差。另外,本研究采用MOVES模型模拟的排放因子,模型本身已综合考虑了车龄分布、车辆速度、道路类型、燃油信息、行驶里程和气象信息等本地化因素,其模拟结果较为可靠。客车、货车和摩托车的VKT虽然来源于机动车检测站,但其他车型是根据统计年鉴中的数据估算而来,也会导致清单的估算结果存在偏差。另外,机动车污染物的空间分布中也存在一定的不确定性。由于本研究中的道路类型划分是以MOVES模型采用的道路类型为主,城区道路划分相对较粗,仅分为快速路和城市道路,所以主城区的污染物分布也存在一定偏差。综上所述,本研究建立的机动车污染物排放清单和空间分布较为可靠,不确定性相对较低。

3 结论

(1) 2017年西安市机动车污染物PM_{2.5}、PM₁₀、NO_x、NO、NO₂、N₂O和VOCs的年排放总量分别为126.1×10⁴、138.2×10⁴、2 884.2×10⁴、2 577.8×10⁴、306.4×10⁴、27.9×10⁴、1 281.2×10⁴ kg。重型货车是PM_{2.5}、PM₁₀和NO_x的主要来源,贡献率分别为47.0%、46.6%和46.3%;小型客车是N₂O和

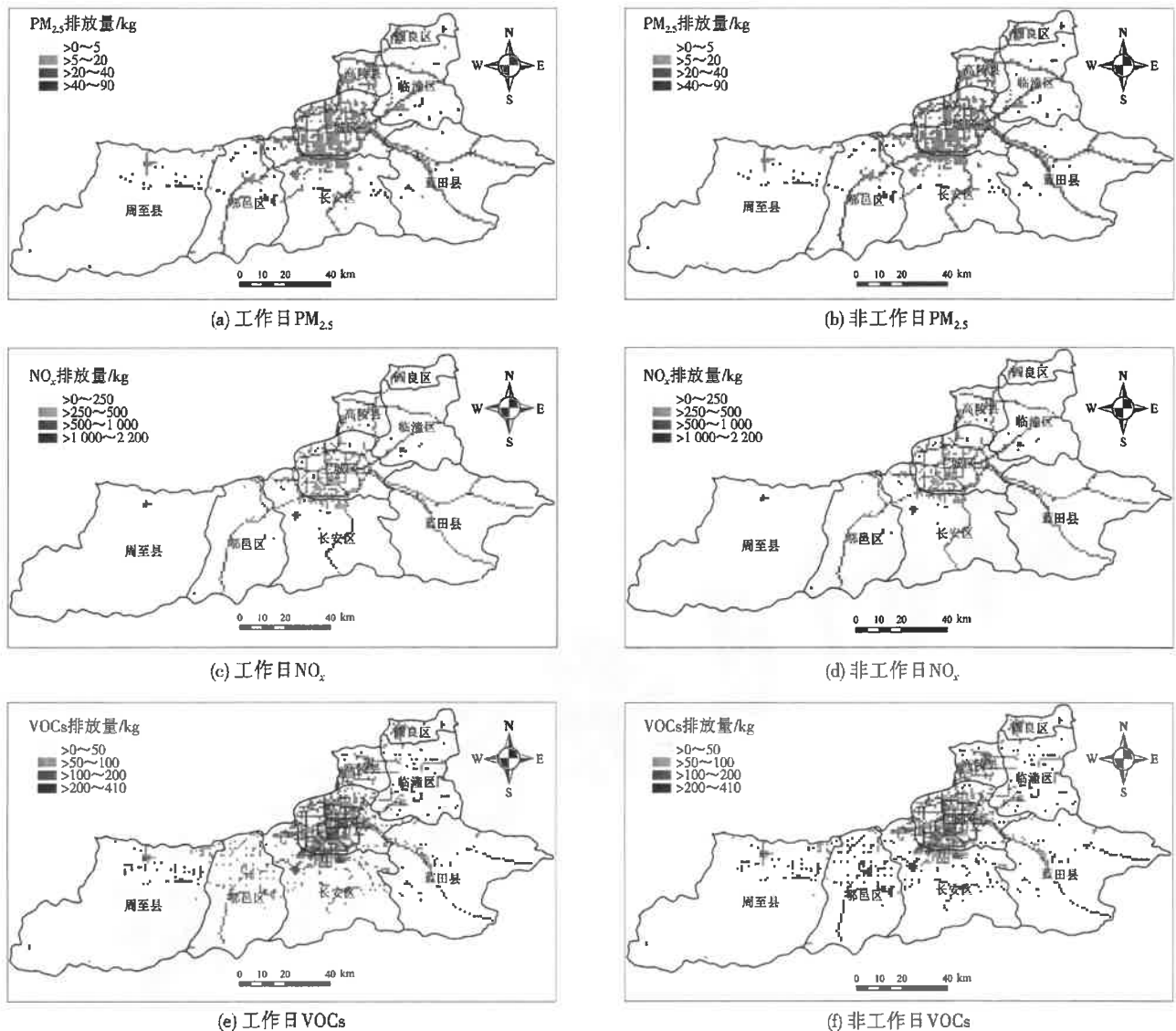


图6 西安市机动车排放污染物日空间分布

Fig.6 Diurnal spatial distribution of vehicle-emitted pollutants in Xi'an

VOCs 的主要来源,贡献率分别为 78.6%和 55.3%。

(2) 柴油车是 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 NO_x 排放主要来源,贡献率分别为 80.2%、79.5%和 75.8%;汽油车是 VOCs 和 N_2O 排放的主要来源,贡献率分别为 74.2%和 89.7%。因此从贡献率考虑,控制颗粒物和 NO_x 的排放以控制柴油车为主,而减少 N_2O 和 VOCs 的排放以控制汽油车为主。

(3) 2017 年西安市机动车污染物排放中以国 IV 及以下标准车为主,对各种污染物的贡献率均超过 77.2%。国 III 及以下标准车的保有量虽然占总量的 36.1%,但其对颗粒物、 NO_x 和 VOCs 排放的贡献率均在 70%以上。国 V 标准车对 NO_2 排放的贡献率较大,为 21.2%。可以看出,提高机动车技术等级和淘汰老旧车辆能够有效降低污染物的排放。

(4) 2017 年西安市机动车排放各污染物的年

空间分布表现出相似特征,与西安市“米”字形公路分布有关。颗粒物和 NO_x 的排放量主要集中在西安主城区和外围各县区的高速路及国道;而 VOCs 主要集中在主城区以内,尤其以二环及环内为主。工作日与非工作日相比, $PM_{2.5}$ 、 NO_x 和 VOCs 的日分布特征无明显差异;但在工作日期间,机动车污染物排放量与非工作日期间相比偏大。

参考文献:

- [1] RECHE C, QUEROL X, ALASTUEY A, et al. New considerations for PM, black carbon and particle number concentration for air quality monitoring across different European cities[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2011, 11(13): 6207-6227.
- [2] SAKAMOTO Y, SHOJI K, BUI M T, et al. Air quality study in Hanoi, Vietnam in 2015-2016 based on a one-year observation of NO_x , O_3 , CO and a one-week observation of VOCs[J]. Atmospheric Pollution Research, 2018, 9(3): 544-551.

(下转第 677 页)