

基于不同方法的省级机动车大气污染物 排放清单研究——以江苏省为例

黄奕玮^{1,2}, 赵瑜^{1,2}, 杨杨^{1,2}, 谢轶松³, 谢放尖³, 许立峰⁴

(1. 南京大学环境学院, 南京 210023; 2. 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 南京 210023;
3. 南京市环境保护科学研究院, 南京 210009; 4. 南京市机动车排气污染监督管理中心, 南京 210009)

摘要:为了详细评估省级尺度机动车污染物排放特征,基于相同的车辆活动水平信息,分别采用 COPERT 模型和基于国内实测的排放因子数据建立了江苏省 2012 年机动车大气污染物排放清单。结果表明,由于排放因子的差异,基于国内实测的排放因子法估算氮氧化物(nitrogen oxides, NO_x)、一氧化碳(carbon monoxide, CO)、非甲烷挥发性有机物(non-methane volatile organic compounds, NMVOCs)、细颗粒物(particulate matter_{2.5}, PM_{2.5})、黑碳(black carbon, BC)和有机碳(organic carbon, OC)排放量分别为 COPERT 模型结果的 2.38、1.39、1.49、2.66、3.33 和 1.72 倍。不同测试数据和模型结果比较表明,COPERT 模型可能对我国机动车 CO、NO_x 和 NMVOC 的排放因子有所低估,而不同测试的颗粒物排放因子结果不确定性较大。小型汽油客车对 CO 和 NMVOC 的排放贡献率分别为 36% 和 23%;重型货车对 NO_x、PM_{2.5} 和 BC 的贡献率都超过 50%。基于 COPERT 模型计算结果和全省道路等级信息对机动车排放量进行空间分配,污染物排放主要集中在经济较为发达和路网较为密集的江苏南部地区;城际间高速路网对 NO_x 和颗粒物排放分布的影响较为明显。

关键词:机动车;大气污染物;排放清单;排放因子;COPERT 模型;空间分布;江苏省

中图分类号:X511

文献标志码:A

文章编号:2095-2783(2017)03-0346-08

Study on the emission inventory of provincial vehicles based on different methods: a case of Jiangsu Province

HUANG Yiwei^{1,2}, ZHAO Yu^{1,2}, YANG Yang^{1,2}, XIE Yisong³, XIE Fangjian³, XU Lifeng⁴

(1. School of the Environment, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 2. State Key Laboratory of Pollution Control and Resources Reuse, Nanjing 210023, China; 3. Nanjing Research Institute of Environment Protection, Nanjing 210009, China; 4. Nanjing Vehicle Emission Regulatory Center, Nanjing 210009, China)

Abstract: To deeply analyze the emission characteristics of provincial vehicles, two emission inventories of on-road mobile source for Jiangsu in 2012 were established based on COPERT and emission factors method, respectively, based on the same sources of basic data. Comparing the two methods, we found that the different applications of emission factors contributed to the big gap of NO_x, PM_{2.5}, BC and OC, emission factors method were 2.38, 1.39, 1.49, 2.66, 3.33 and 1.72 times of COPERT, respectively. COPERT may underestimate the emission factors of CO, NO_x and NMVOC while the uncertainty of emission factors of particular based on observation is larger by comparing different monitoring data and COPERT. Passenger car contribute 36% and 23% for CO and NMVOC, respectively, while the contribution of heavy-duty-truck for NO_x, PM_{2.5} and BC are more than 50%. Based on COPERT and road network information, GIS technology is applied to analyze the spatial distribution of vehicle emission intensity. The results reveal that the contribution of the south of Jiangsu is relative bigger and emission intensity is larger. Moreover, inter-city highway system has a significant impact on the emission distribution of NO_x and particulate matter.

Keywords: vehicles; emission of on-road mobile source; emission inventory; emission factors; COPERT; spatial distribution; Jiangsu Province

随着经济的发展,人们对机动车的需求日益增加,有研究表明,到 2050 年中国机动车总保有量将可能达到 5.30 亿~6.23 亿辆^[1]。机动车排放的大气污染物 CO、NO_x、非甲烷挥发性有机物(NMVOCs)、SO₂、NH₃、PM_{2.5} 和 PM₁₀ 等对大气环境造成严重的影响,如 NO_x 和 NMVOCs 在光化学作用下形成二次气溶胶^[2],导致能见度降低,危害人类健康。因此,建立准确的机动车排放清单以增进

对其排放特征的了解,为空气质量模拟和污染控制政策的制定提供可靠的数据支持十分必要。

国内从 20 世纪 90 年代就已经开展了机动车排放清单的研究工作,目前国内机动车排放清单的计算主要使用以下几种方法:1)基于有限道路或台架实测的排放因子法(如环境保护部推荐的排放因子^[3]);2)以 COPERT^[4] 和 MOBILE 模型为代表的平均速度模型;3)以 IVE 模型为代表的行驶工况模

收稿日期:2016-09-09

基金项目:高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20120091120019)

第一作者:黄奕玮(1992-),男,硕士研究生,主要研究方向为城市机动车排放清单编制

通信作者:赵瑜,教授,主要研究方向为人为源大气污染物排放特征,yuzhao@nju.edu.cn

型等方法建立。通过对本地化数据的监测以及对部分参数的假设,对相应算法及模式进行完善和改进,由此计算得到最终的排放清单。李伟等^[5]在2003年分析1995年机动车相关数据的基础上建立了CO、NO_x和SO₂等10种污染物排放因子及排放总量的计算方法;Wang等^[6]和Chen等^[7]分别在2007年应用IVE模型计算了上海市机动车污染物排放清单^[6-7];Wang等^[8]还在2009年运用COPERT模型计算了中国城市1995—2005年的排放清单;姚欣灿等^[9]在2010年应用MOBILE和PART5模型计算了广州市2010年机动车排放清单;Lang等^[10]在2014年对中国1999—2011年机动车的排放进行评估。部分国外研究者也对我国机动车排放清单有所关注,如Ohara等^[11]在2007年估测了中国2000年机动车排放清单;Saikawa等^[12]在2011年使用最新的数据重新计算了2000年中国机动车的排放清单,并且分析了在中国普遍使用欧3标准油品以后空气质量的变化情况;Klimont等^[13]计算了2000年及2005年中国道路机动车NO_x、黑碳(black carbon, BC)和有机碳(organic carbon, OC)的排放量,并且预测了2020年及2030年机动车的排放状况。值得一提的是Zheng等^[14]基于公开统计资料,使用Gompertz函数估算县级市的机动车保有量,用机动车残存函数估算省级机动车保有量,最终得到0.05°×0.05°的高精度全国机动车排放清单。该研究为区域机动车排放清单的建立提供了新的思路及方法。

目前我国已经采用了新车排放标准阶段性加严等措施对机动车的大气污染物排放进行控制,但污染物排放总量仍然持续增加,对大气环境造成了严重的影响^[15]。江苏作为中国经济发达省份,其机动车保有量最近几年一直呈现上升趋势,2012年底已达到了1604.18万辆^[16]。较高的机动车保有量和污染物排放量成为长三角区域大气灰霾和光化学污染产生的重要原因^[17]。目前针对区域和省级尺度的机动车排放清单研究较少,且多数研究采用单一的方法建立排放清单。由于所使用方法和数据的不同,各种结果之间存在明显差异,且差异产生的来源并未得到充分的评估,导致在区域尺度对机动车大气污染物排放量的估算仍存在较大不确定性。本研究以江苏省为例,在使用相同的基础数据的情况下,采用基于实测数据的排放因子法和COPERT模型2种方法建立机动车大气污染物排放清单,并通过对结果的比较,找出不同方法之间产生差异的原因,旨在为建立准确的省级尺度机动车污染物排放清单提供参考和借鉴。

1 方法与数据

本研究采用2种方法,即COPERT模型和基于实测数据的排放因子法,分城市计算2012年江苏省机动车的大气污染物排放量。

1.1 COPERT 模型

COPERT IV模型是在欧洲环境署资助下,基于对欧洲机动车排放特征的充分研究和完善,开发的可在WINDOWS平台上使用的模型^[4]。与MOBILE、IVE和MOVES等模型相比^[18-19],本模型界面友好,所需输入的参数信息相对较少,并能够同时计算多类污染物排放量。由于我国机动车大气污染物排放标准参照欧洲标准制定,对COPERT模式模型有较好的适应性,因此本研究采用COPERT模型计算江苏省机动车污染物排放量,并与国内实测排放因子结果进行比较。

COPERT模型针对城区、乡村和高速公路分别计算污染物的排放量。模型中污染物的排放量主要来源于3个过程,即发动机热稳定运行排放、冷启动排放以及燃料蒸发排放。发动机热稳定运行排放是指机动车在正常行驶的过程中所产生的排放量,各车型一定控制技术水平的发动机的排放因子只与机动车行驶速度有关。冷启动排放是指机动车刚刚运行到正常行驶所产生的排放,其排放因子需在热稳定状态时的排放因子基础上增加1个附加值而得到;燃料蒸发排放产生的NMVOCs水平则取决于燃料蒸汽压和环境温度。

COPERT模型所需输入参数总计15个,包括国家/地域气象参数、燃料信息、车辆信息、年均行驶里程、平均累计行驶里程、车速和车辆技术水平信息。相对于其他模型而言,COPERT模型参数易于获取,可操作性强。

1) 国家/地域气象参数

国家/区域气象参数包括各个城市基准年逐月最高、最低气温以及平均相对湿度。这项参数对COPERT模型的蒸发排放有很大影响。本研究从中国气象科学数据共享服务网^[20]获得江苏省各城市(以南京市为例)气象资料,见表1。

表1 南京市2012年气象参数

月份	平均相对湿度/%	平均最低气温/°C	平均最高气温/°C
1	66	0.2	6.0
2	68	0.3	6.3
3	68	5.4	13.4
4	64	13.3	23.4
5	66	17.5	26.9
6	69	22.1	29.6
7	68	25.7	33.8
8	72	25.1	32.2
9	71	19.0	26.5
10	64	14.4	23.2
11	70	6.4	14.4
12	71	0.6	7.0

2) 燃料信息

燃料信息指的是汽油的雷德蒸汽压(reid vapor

pressure, RVP)、汽油含硫量以及柴油含硫量, 该部分的信息主要来自中国汽油、柴油标准。由于江苏省普遍采用 2012 年普遍采用的国三汽油以及柴油, 国四汽油在 2012 年使用率不高, 因此本研究采用国三汽油和国三柴油标准: 国三汽油的雷德蒸汽压 (RVP) 在 11 月一次年 4 月不大于 88 kPa, 在 5—10 月为不大于 72 kPa。国四汽油含硫量不大于 0.005%, 柴油的含硫量不大于 0.005%; 国三柴油的含硫量不大于 0.035%, 汽油的含硫量不大于 0.015%。

3) 车型分类

COPERT 模型是由欧洲环境署针对欧洲地区的情况开发的, 其对机动车车型的划分与我国具有一定的差异, 因而要先将中国车型按照欧洲的车型分类进行匹配, 然后输入到 COPERT 模型中。表 2 给出了具体的匹配方法。

表 2 中国车型与 COPERT 模型之间的转化

中国车型划分	COPERT 模型划分
微型客车(排量<1 L)	小客车
小型客车(载客≤9 人)	
中型客车(载客 9~20 人)	大客车
大型客车(载客≥20 人)	
轻型货车(载重<4.5 t)	轻型货车
微型货车(载重<0.75 t)	
中型货车(载重 4.5~12 t)	重型货车
重型货车(载重>12 t)	
轻便摩托车(排量≤50 cm ³)	摩托车
普通摩托车(排量>50 cm ³)	

4) 机动车保有量和控制技术构成

江苏省分城市各类机动车保有量通过各城市统计年鉴获得。全省 2012 年机动车保有量为 1 274.155 1 万辆, 其中小客车 873.405 3 万辆、轻型货车 42.611 3 万辆、重型货车 44.569 4 万辆、大客车和摩托车分别为 19.614 7、293.954 2 万辆。具体车型分类信息见图 1(a)。

南京市机动车的控制水平信息来源于机动车排气污染监督管理中心的实际调研和统计结果(图 1(b)); 由于数据缺失, 其他城市不同车型的控制水平比例基于南京的结果按机动车保有量进行分配^[21]。

5) 平均累计行驶里程

平均累计行驶里程的计算公式为

$$M = V \times A \quad (1)$$

式中: M 为平均累积行驶里程, km; V 为机动车年均行驶里程, km; A 为平均车龄, a。

年均行驶里程指的是车队中的某类机动车在 1a 中的行驶情况, 是影响机动车污染物排放量的关键因素。本研究的年均行驶里程数据主要参考《道路机动车排放清单编制技术指南(试行)》^[3]。

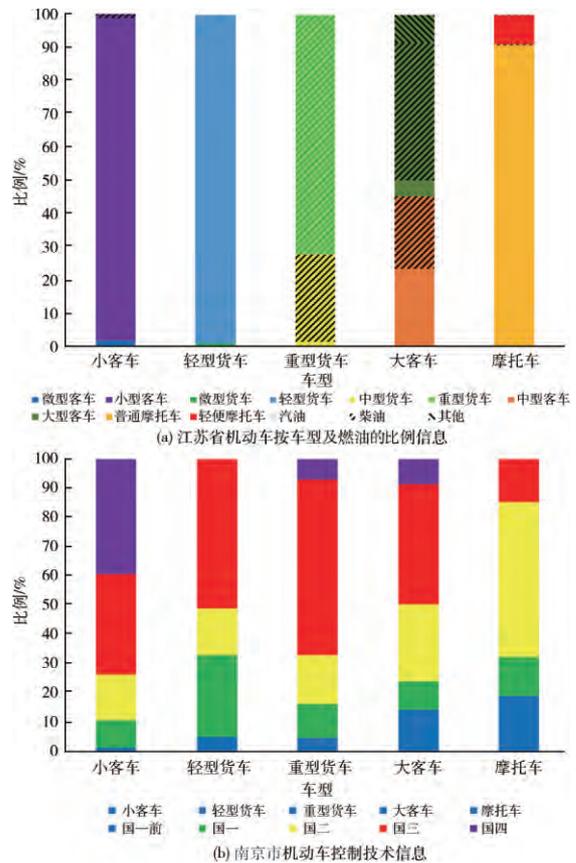


图 1 2012 年江苏省机动车按车型及燃油分类比例信息和南京市机动车控制技术信息

6) 车速

COPERT IV 模型将道路类型分为城区、乡村和高速。由于无法获得每个城市实际的城区道路车速值, 选取已有文献的相关调研值。其中, 无锡、常州、苏州、镇江和南京的城区道路车速设定为 2 km/h^[22], 徐州、南通、连云港、扬州与泰州车速为 30 km/h, 淮安、盐城和宿迁车速为 24 km/h。城市间乡村道路车速差异没有城区道路明显, 根据文献^[23], 乡村车速取 40 km/h, 小客车高速的平均速度为 100 km/h, 大客车高速的车速为 80 km/h, 摩托车车速为 60 km/h。

1.2 基于国内实测的排放因子法

基于国内现有实测数据计算机动车大气污染物排放量, 计算公式为

$$Q_{m,n} = \sum (P_{m,i,j} \times V_i \times E_{m,i,j,n}) \quad (2)$$

式中: Q 为机动车排放量, t; m, i, j 和 n 分别为城市、车型、控制水平和污染物类型; P 为机动车保有量, 辆; E 为机动车的排放因子, g/(km·辆)。

主要活动水平数据来源(机动车保有量的数据及年均行驶里程)与 COPERT 模型相同。排放因子主要通过基准排放系数结合研究区域实际情况进行修正为

$$E = B \times \varphi \times \gamma \times \lambda \times \theta \quad (3)$$

式中: B 为基准排放系数, $g/(km \cdot 辆)$,来源于环保部编制的《道路机动车排放清单编制技术指南(试行)》^[3]; φ 、 γ 、 λ 和 θ 分别为环境修正因子、平均速度修正因子、劣化修正因子和车辆其他使用条件(如负载系数、油品质量等)修正因子。本研究所采用的修正因子依据文献^[3]的原则和方法,结合本地化实际情况加以修正获得。

2 结果与讨论

2.1 2种方法的排放总量及差异来源

使用基于实测的排放因子法和基于 COPERT 模式这 2 种方法计算的 2012 年江苏省机动车 9 类大

气污染物排放量的对比结果如表 3 所示。表 3 中,中国多尺度排放清单(multi-resolution emission inventory for China, MEIC)^[24]的机动车排放活动水平主要来源于江苏省能源平衡表数据、排放因子来源于国家机动车排放模型(international vehicle emissions, IVE)^[25]。

COPERT 模型法和基于的实测排放因子法的结果有一定差异。由于 2 种计算方法中车型比例、机动车保有量和行驶里程数据来源相同,排放的差异主要因为对排放因子的估算不同。表 4 总结了 2 种方法中典型污染物分车型的平均排放因子。

表 3 COPERT 模型与基于实测的排放因子法结果对比

污染物名称	基于实测的排放因子法/万 t	基于 COPERT 模式/万 t	MEIC/万 t	相对偏差 ¹ /%	相对偏差 ² /%
CO	128.520 8	92.625 4	142.896 0	-11	39
NO _x	65.048 5	27.285 8	51.303 2	21	138
SO ₂	8.305	0.908 4	0.856 0	-3	-9
NH ₃	0.753 6	0.766 2	0.010 7	99	-2
NMVOCS	23.511 2	15.731 3	13.999 7	40	49
PM _{2.5}	2.982 8	1.119 7	0.245 2	18	166
PM ₁₀	3.285 0	1.381 0	2.471 2	25	138
BC	1.571 6	0.471 4	1.192 4	24	233
OC	0.509 6	0.296 8	0.278 9	45	72

注:相对偏差¹为(基于实测的排放因子法-MEIC)/基于实测的排放因子法;相对偏差²为(基于实测的排放因子法-COPERT)/基于实测的排放因子法。

表 4 COPERT 模型与基于实测的排放因子法的排放数据

指标	计算方法	g/km				
		小客车	轻型货车	重型货车	大客车	摩托车
CO	COPERT 模型	1.95	2.66	1.24	1.81	7.73
	排放因子法	2.3	6.8	6.2	12.77	6.35
NO _x	COPERT 模型	0.2	1.07	4.9	8.38	0.22
	排放因子法	0.17	4.03	9.5	7.19	0.15
PM _{2.5}	COPERT 模型	0.01	0.09	0.16	0.25	0.02
	排放因子法	0.01	0.15	0.42	0.27	0.02
NMVOCS (尾气排放)	COPERT 模型	0.27	0.21	0.36	0.51	1.4
	排放因子法	0.36	1.27	1.18	1.22	2.08

对于 SO₂,基于 COPERT 模型获得的排放结果高于基于实测的排放因子法以及 MEIC 清单的结果。这是由于 2012 年江苏省普遍使用国三汽油和柴油,部分车开始使用国四的汽油和柴油,排放因子法根据实际情况选取了 5 种(国一前、国一、国二、国三和国四)控制水平参数进行计算;而 COPERT 模型对于硫含量只能选用 1 种类型的油品参数,本研究选择国三油品参数,导致计算结果较其他 2 种方法计算结果偏高。而 MEIC 基于省级活动水平与排放因子数据,其计算结果与排放因子法结果较为接近。

对于 CO,基于实测的排放因子法结果与 MEIC 结果分别是 COPERT 模型结果的 1.39 倍和 1.54

倍,排放因子法结果与 MEIC 结果较为接近。汽油小客车是 CO 的主要排放源,由表 4 可以看出,基于国内实测的汽油小客车平均排放因子高于 COPERT 模型估算的结果,且与 Huo 等^[26]通过车载上路实测获得的排放因子更为接近(图 2(a))。对于控制水平较差的车型(如国一前和国一),COPERT 模型的排放因子明显较低,说明 COPERT 模型可能对中国车辆 CO 的排放水平略有低估。

对于 NMVOCS, COPERT 模型与基于实测的排放因子法结果高于 MEIC,基于实测的排放因子法结果是 COPERT 模型法结果的 1.49 倍。NMVOCS 的排放分为蒸发排放与热运行尾气管排放,其主要

来源于汽油小客车及摩托车。蒸发排放量与雷德蒸汽压的大小有关,本研究 2 种方法所采用的蒸汽压数据相同,两者之间的差异不大。对于尾气管排放,由表 4 可见,COPERT 模型的汽油小客车及摩托车的排放因子明显低于国内实测的排放因子数据,这主要是由于 NMVOC 主要来源于汽油的不完全燃烧,相同车型中国机动车对燃料的使用率与美国、欧洲(尤其是德国)机动车相比相差较大,所以 COPERT 模型及 MEIC 可能对中国车辆 NMVOCs 的排放水平略有低估。

对于 NO_x 而言,2 种方法计算结果相差较大,基于实测的排放因子法计算结果约为 COPERT 模型结果的 2.4 倍,MEIC 的结果略低于基于实测的排放因子法。NO_x 的排放量主要来源于重型柴油车,如图 2(b)所示,不同控制水平条件下基于实测的重型柴油车排放因子明显高于 COPERT 模型的结果,且与 Huo 等^[27]通过车载上路实测选取的结果较为接

近。这说明 COPERT 模型可能没有充分考虑中国重型柴油车排放特征,较大程度低估了其 NO_x 排放水平,基于实测的排放因子法的结果更为合理。

PM_{2.5}、PM₁₀、BC 和 OC 排放主要来源于重型柴油车及大客车,COPERT 模型的计算结果仅为基于实测排放因子方法的 29%~58%,MEIC 结果与本研究排放因子法结果更为接近。以 PM_{2.5} 为例,本研究中基于实测的重型货车及大客车 PM_{2.5} 的排放因子显著高于 COPERT 模型的结果(表 4)。然而,在不同控制水平条件下,COPERT 模型获得的排放因子与 Huo 等^[27]车载测试的结果更为接近(图 2(c)),这说明对于中国机动车颗粒物的排放特征,不同测试结果偏差较大,导致对其排放量的估算仍然存在较高的不确定性。对于特定地区或城市,还需大量开展本地化测试的研究,以提高对排放估算的准确性。

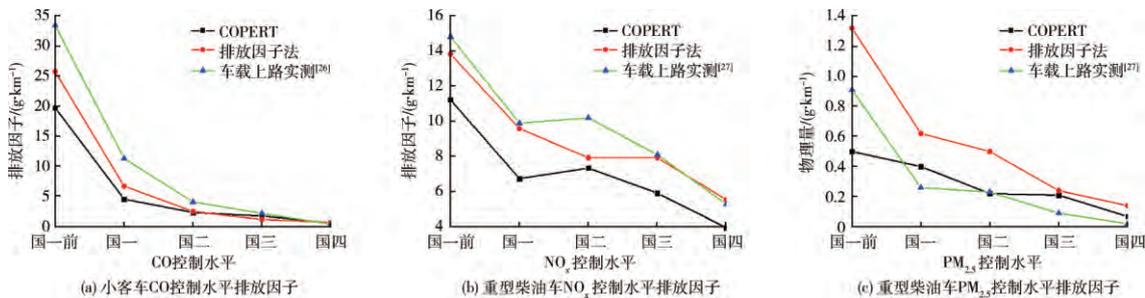


图 2 不同控制水平下排放因子比较

这 2 种方法计算的 NH₃ 排放结果差异不大,基于实测的排放因子法结果略高,但 MEIC 的结果显著低于上述 2 种方法,说明不同清单中 NH₃ 排放估算的不确定性较大,需要在今后的研究中进一步改善。机动车本身的氨排放并不高,但是为了使机动车达到更严格的 NO_x 排放标准,选择性还原催化技术得到一定程度的应用,致使柴油车氨排放的速率有所提高,从而增加了机动车尾气中氨的排放量^[28]。早在 2001 年黄荣光等^[29]就提出中国的催化还原技术能够达到欧洲的标准,因此 2 种方法计算出来的排放量相差较小。

2.2 不同车型和道路类型的机动车排放贡献分析

基于实测的排放因子法较 COPERT 模型对车型划分更加细致。图 3 给出了使用该方法计算出不同车型对各类污染物排放的贡献率。汽油车是 CO 的主要贡献源,如小型汽油客车排放占总排放量的 42%。这主要是由于汽油小客车保有量大,且其燃烧效率相对柴油车较低,故不完全燃烧产物 CO 的排放因子较高。NMVOCs 同样是不完全燃烧的产物,且其蒸发排放主要来源于汽油使用,因此小客车和摩托车排放贡献较大,分别占排放总量的 36% 和 23%。柴油车是 PM_{2.5}、PM₁₀、BC 和 OC 主要贡献

源,如重型货车对 BC 排放贡献约为 52%。由于柴油车柴油与空气混合不均匀,存在局部高温缺氧,导致较高的颗粒物排放。NO_x 主要也来源于柴油车,重型柴油的排放贡献高达 54%,主要原因是压燃式柴油发动机效率较高,燃烧室内存在着富余空气,这些富余空气在高温下易形成 NO_x,导致 NO_x 的高排放。

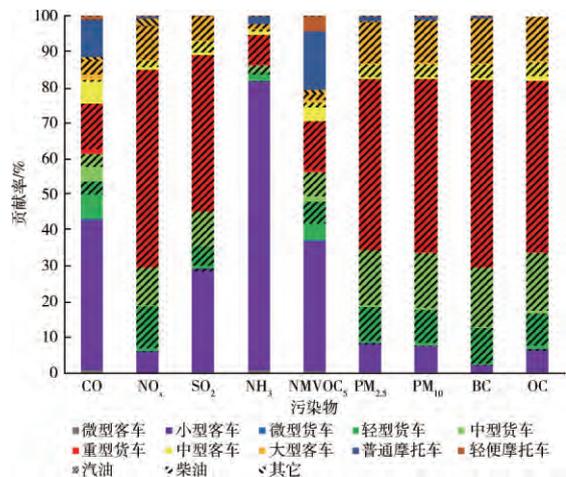


图 3 不同车型机动车排放对各类污染物的贡献率

图 4 基于 COPERT 模型计算结果给出行驶在不同类型道路上的机动车对各类污染物排放的贡献。对于所有污染物,均是城区道路排放占比较大。对于 CO 和 NMVOCs,城区道路排放所占比例远远高于高速公路及乡村道路,主要是因为这 2 种污染物大部分来源于汽油小客车,而汽油小客车主要行驶于城区道路。对于 NO_x、PM_{2.5}、BC 和 OC,高速公路的排放比例有所升高,由于这些污染物主要来源于柴油货车,受到城区通行限制的影响,柴油货车在城区的行驶时间和里程较低。由于机动车保有量较少,乡村道路对于每种污染物的排放量贡献相对较低。

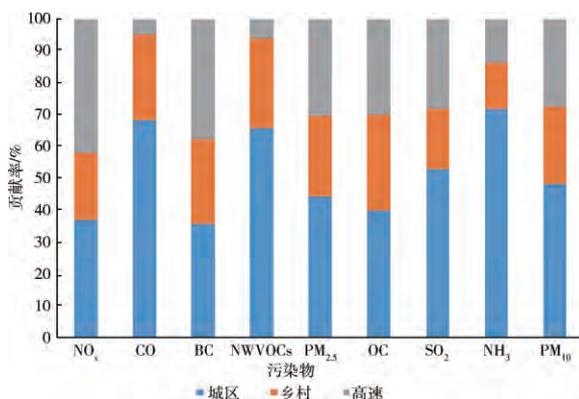


图 4 不同道路类型对机动车排放的污染物的贡献

2.3 机动车排放的城市和空间分布

图 5 为 2 种方法下江苏省各城市对机动车典型大气污染物排放的贡献率。由图 5 可以看出,2 种方法下,不同城市的机动车污染物排放贡献率差异不大。在江苏 13 个城市中,苏州市机动车的各类污染物排放量最高,宿迁、泰州和淮安的排放量相对较低。除苏州外,南通、徐州与南京的 CO 排放分列 2~4 位;对于 NO_x、PM_{2.5}、PM₁₀ 和 BC,南京、无锡和徐州分担率较高;对于 NMVOCs,排放主要集中在南通、徐州和盐城。总体而言,各种污染物的排放量主要集中在经济较为发达、机动车保有量较多和路网

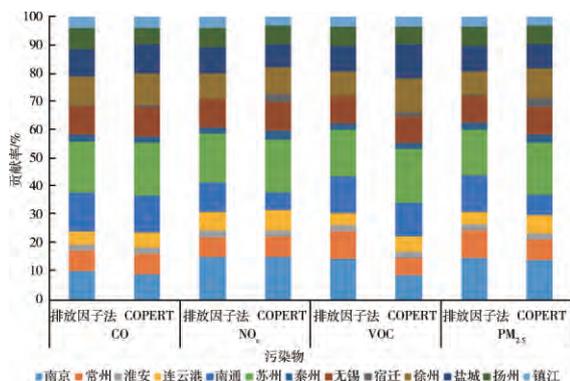


图 5 2 种方法下江苏省各城市对机动车典型大气污染物排放的贡献率

较为密集的江苏南部地区,江苏北部地区徐州和盐城排放量相对较高。

本研究基于 COPERT 模型对不同类型道路污染物排放量的计算结果,结合江苏省路网数据以及不同等级道路的长度分配信息完成江苏省机动车污染物排放的空间分配。图 6 为基于 COPERT 模型结果的江苏省 2012 年典型污染物机动车排放量空间分布。从图 6 可以看出,道路机动车排放的空间分布与路网分布基本一致。这是由于苏南地区路网密集,机动车保有量大,排放强度相对较高。对于以柴油车贡献为主的 NO_x、PM_{2.5}、BC 和 OC,城际间高速路网对排放分布的影响较为明显;对于 CO 及 NMVOCs,城区由于路网密集,小客车保有量较大,导致其路网分布较为集中。本研究精细化的排放空间分布结果为进一步开展区域化学传输模拟以及评估道路交通源排放对空气质量的影响提供了可靠依据。

3 结论

使用 COPERT 模型和基于国内实测的排放因子,分别建立了 2012 年江苏省机动车排放清单。在活动水平相同的情况下,2 种方法主要的差异源于排放因子的确定。对于 CO、NO_x、PM_{2.5}、BC 和 OC,基于国内实测的排放因子法的计算结果分别为 COPERT 模型结果的 1.39、2.38、2.66、3.33 和 1.72 倍;2 种方法对 NH₃ 排放的计算结果相差不大。通过与上路测试结果的比较发现,COPERT 模型可能对我国机动车 CO、NO_x 和 NMVOC 的排放因子有所低估;颗粒物的排放因子不同测试结果之间不确定性较大。2 种方法结果都表明汽油小客车是 CO 的主要污染源;重型柴油车是 NO_x、PM_{2.5}、PM₁₀、BC 和 OC 主要的污染源;摩托车和汽油小客车是 NMVOCs 的主要排放源。COPERT 模型结果表明,对于所有污染物,城区道路的车辆排放所占比例较大;对于 NO_x、PM_{2.5}、BC 和 OC,高速公路排放比例有所升高;上述污染物主要来源于柴油货车,受到城区通行限制的影响,柴油货车在城区的行驶时间和里程较低;由于保有量较少,乡村道路车辆对污染物的排放贡献相对较低。

因为部分活动水平数据的缺乏,本研究只能根据文献以及专家估计进行假设(如除了南京以外的其余城市机动车控制水平保有量信息)。由于 COPERT 模型本身的缺陷,对 SO₂ 排放的估算有一定的不确定性。随着车辆控制技术水平的逐步提高,建议未来加强对国四、国五等具有较先进控制水平车辆的本地化排放特征进行测试,以进一步完善排放清单,降低排放量估算的不确定性。

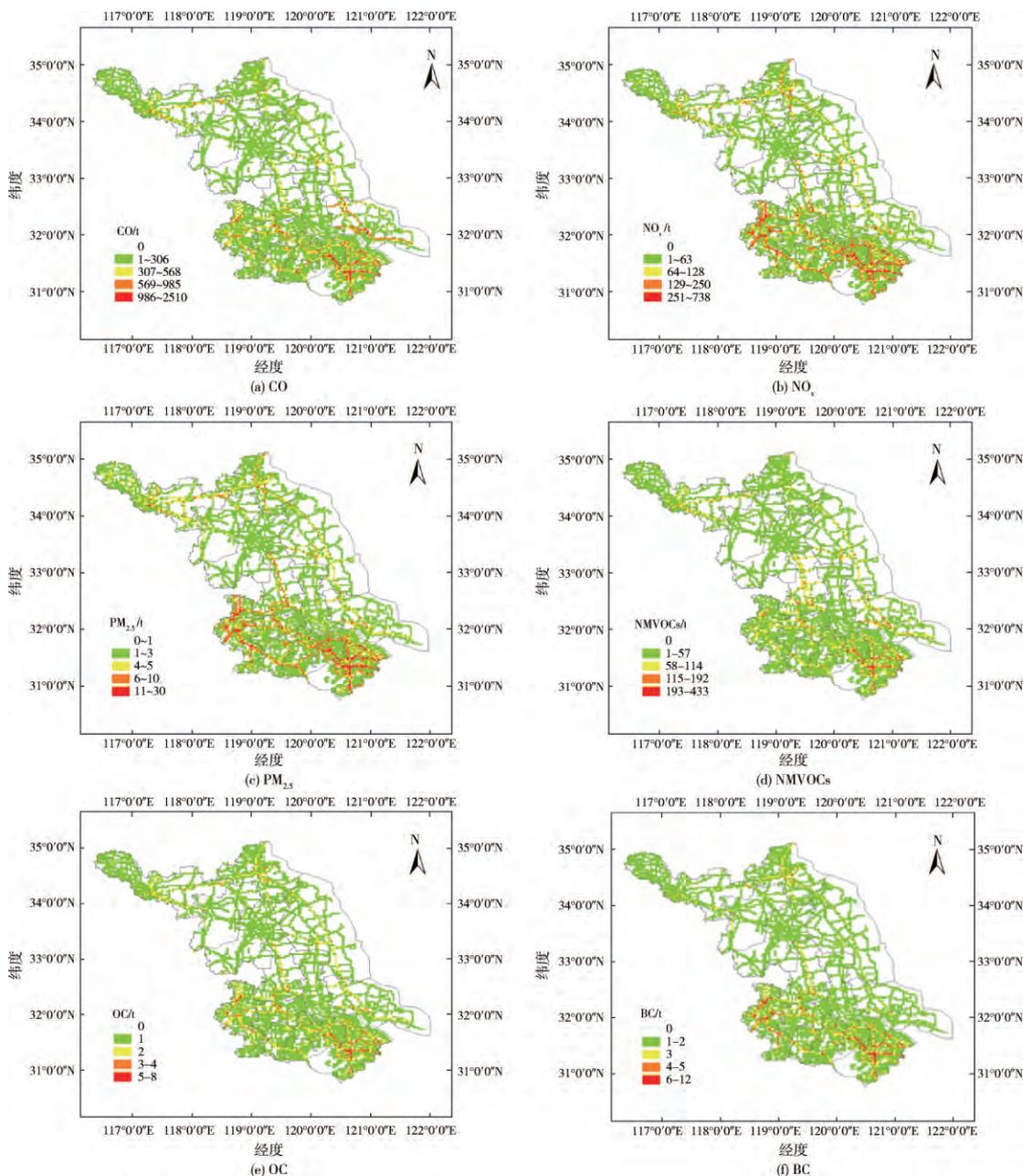


图 6 基于 COPERT 模型结果的江苏省 2012 年典型污染物机动车排放量空间分布(分辨率 3 km×3 km)

(由于印刷关系, 查阅本文电子版请登录 http://www.paper.edu.cn/journal/display_journal_detail/20.html)

[参考文献] (References)

[1] HUO H, WANG M. Modeling future vehicle sales and stock in China [J]. Energy Policy, 2011, 43 (3): 17-29.
 [2] LI Jing, WU Rongrong, LI Yaqi, et al. Effects of rigorous emission controls on reducing ambient volatile organic compounds in Beijing, China [J]. Science of the Total Environment, 2016, 557/558: 531-541.
 [3] 中华人民共和国环境保护部. 道路机动车排放清单编制技术指南(试行) [EB/OL]. [2014-08-01]. [http://www.mep.gov.cn/gkml/hbb/bgth/201407/W020140708-](http://www.mep.gov.cn/gkml/hbb/bgth/201407/W020140708-387895271474.pdf)

387895271474.pdf.
 Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. On-road emission inventory guidebook [EB/OL]. [2014-08-01]. <http://www.mep.gov.cn/gkml/hbb/bgth/201407/W020140708387895271474.pdf>. (in Chinese)
 [4] European Environment Agency. COPERT III; Computer programmer to calculate emissions from road transport-user manual [EB/OL]. [2000-11-27]. http://www.eea.europa.eu/publications/Technical_report_No_50.
 [5] 李伟, 傅立新, 郝吉明, 等. 中国道路机动车 10 种污染物的排放量 [J]. 城市环境与城市生态, 2003, 16(2): 36-38.
 LI Wei, FU Lixin, HAO Jiming, et al. Emission inventory of 10 kinds of air pollutants for road traffic vehi-

- cles in China [J]. *Urban Environment & Urban Ecology*, 2003, 16(2): 36-38. (in Chinese)
- [6] WANG Haikun, CHEN Changhong, HUANG Cheng, et al. On-road vehicle emission inventory and its uncertainty analysis for Shanghai, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2008, 398(1/2/3): 60-67.
- [7] CHEN Changhong, HUANG Cheng, JING Qiguo, et al. On-road emission characteristics of heavy-duty diesel vehicles in Shanghai [J]. *Atmosphere Environment*, 2007, 41(26): 5334-5344.
- [8] WANG Haikun, FU Lixin, ZHOU Yu, et al. Trend in vehicular emissions in China's mega cities from 1995 to 2005 [J]. *Environmental Pollution*, 2010, 158(2): 394-400.
- [9] 姚欣灿, 黄如娜, 农加进, 等. 广州市2010年道路机动车排放清单研究[J]. *广州环境科学*, 2012, 27(2): 20-24.
YAO Xincan, HUANG Ru'na, NONG Jiajin, et al. Vehicle emission inventory of Guangzhou in 2010 [J]. *Environmental Science of Guangzhou*, 2012, 27(2): 20-24. (in Chinese)
- [10] LANG Jianlei, CHEN Shuiyuan, ZHOU Ying, et al. Air pollutant emissions from on-road vehicles in China, 1999-2011 [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 496: 1-10.
- [11] 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(7): 4419-4444.
- [12] 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.
- [13] KLIMONT Z, COFALA J, XING J, et al. Projections of SO₂, NO_x and carbonaceous aerosols emissions in Asia [J]. *Tellus Series B: Chemical and Physical Meteorology*, 2009, 61(4): 602-617.
- [14] ZHENG B, HUO H, ZHANG Q, et al. High-resolution mapping of vehicle emissions in China in 2008 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, 14(8): 9787-9805.
- [15] 张少君. 中国典型城市机动车排放特征与控制策略研究[D]. 北京: 清华大学, 2014.
ZHANG Shaojun. Characteristics and emission control strategies of vehicle emissions in typical cities of China [D]. Beijing: Tsinghua University, 2014. (in Chinese)
- [16] 江苏省统计局. 江苏统计年鉴—2013[EB/OL]. [2016-08-01]. <http://www.jssb.gov.cn/2013nj/indexc.htm>.
Jiangsu Bureau of Statistics. Jiangsu statistical yearbook; 2013 [EB/OL]. [2016-08-01]. <http://www.jssb.gov.cn/2013nj/indexc.htm>. (in Chinese)
- [17] 翟一然. 长江三角洲地区大气污染物人为源排放特征研究[D]. 南京: 南京大学, 2012.
ZHAI Yiran. Anthropogenic air pollutant emissions in the Yangtze River Delta Region [D]. Nanjing: Nanjing University, 2012. (in Chinese)
- [18] United States Environmental Protection Agency. User's guide to MOBILE 6.1 and MOBILE 6.2: mobile source emission factor model [R]. Washington DC: United States Environmental Protection Agency, EPA420-R-03-010, 2003.
- [19] KROUPAL J, MICHAELS H, CUMBERWORTH M, et al. EPA's plan for MOVES: a comprehensive mobile source emission model [C]// Proceedings of the 12th CRC on-road vehicle emissions workshop. San Diego, CA: EPA, 2002: 15-17.
- [20] Weather underground of Nanjing, China [EB/OL]. [2012-01-01]. https://www.wunderground.com/history/airport/ZSNJ/2012/1/1/DailyHistory.html?req_city=%E5%8D%97%E4%BA%AC&req_state=32&req_statename=China&reqdb.zip=00000&reqdb.magic=1&reqdb.wmo=58238.
- [21] 南京市统计局. 南京市统计年鉴 2013 [EB/OL]. [2016-08-01]. <http://221.226.86.104/file/nj2004/2013/index.htm>.
Nanjing Bureau of Statistics. Nanjing statistical yearbook; 2013 [EB/OL]. [2016-08-01]. <http://221.226.86.104/file/nj2004/2013/index.htm>. (in Chinese)
- [22] CAI Hao, XIE Shaodong. Estimation of vehicular emission inventories in China from 1980 to 2005 [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, 41(39): 8963-8979.
- [23] JACKSON T R. Fleet characterization data for mobile6; development and use of age distribution, average annual mileage accumulation rates and projected vehicle counts for use in mobile6 [R]. Washington DC: United States Environmental Protection Agency, 2001.
- [24] Tsinghua University. Multi-resolution Emission Inventory for China [EB/OL]. [2012-01-01]. <http://www.meicmodel.org/cloud/>.
- [25] LI M, ZHANG Q, KUROKAWA J, et al. MIX: a mosaic Asian anthropogenic emission inventory for the MICS-Asia and the HTAP projects [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 2015, 15(23): 34813-34869.
- [26] HUO Hong, YAO Zhiliang, ZHANG Yingzhi, et al. On-board measurements of emissions from light-duty gasoline vehicles in three mega-cities of China [J]. *Atmospheric Environment*, 2012, 49: 371-377.
- [27] HUO Hong, YAO Zhiliang, ZHANG Yingzhi, et al. On-board measurements of emissions from diesel trucks in five cities in China [J]. *Atmospheric Environment*, 2012, 54: 159-167.
- [28] 杨俊. 广州市机动车尾气中氨气的排放因子研究 [D]. 广州: 暨南大学, 2011.
YANG Jun. Study on ammonia emission factors of vehicles exhaust in Guangzhou city [D]. Guangzhou: Jinan University, 2011. (in Chinese)
- [29] 黄荣光, 孙加林, 钱琳, 等. 汽车尾气净化三效催化剂研究成果及产业化建设[J]. *中国有色金属学报*, 2001, 11(S1): 245-250.
HUANG Rongguang, SUN Jialin, QIAN Lin, et al. Achievements and industrialization on three-way catalyst for purification automotive emissions [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2001, 11(S1): 245-250. (in Chinese)