

DOI: 10.5846/stxb202012223254

郭宇,王振波,徐成东.中国机动车总颗粒物排放时空演变特征及驱动因子.生态学报,2021,41(11):4406-4417.

Guo Y, Wang Z B, Xu C D. Spatio-temporal evolution and influencing factors of total particulate matter emissions of vehicles in China. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(11): 4406-4417.

中国机动车总颗粒物排放时空演变特征及驱动因子

郭宇^{1,2}, 王振波^{2,3,*}, 徐成东²

1 上海应用技术大学生态技术与工程学院, 上海 201418

2 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101

3 中国科学院区域可持续发展与模拟重点实验室, 北京 100101

摘要: 机动车尾气颗粒物排放已成为城市空气污染的主要来源,严重影响环境空气质量和人体健康。研究基于 2011—2015 年中国市级机动车总颗粒物 (total particulate matter, TPM) 排放量数据,运用空间分析方法从存量和增量角度探究中国机动车 TPM 排放的时空演变特征,进而利用地理探测器模型定量评价其主要驱动因素的影响强度。结果表明:中国机动车 TPM 排放量呈逐年降低趋势,省会和直辖市是中国机动车 TPM 排放量减少的主要贡献者。省会和直辖市的机动车 TPM 排放量和减排量最大,其各年均值均超全国市级年均值的 2 倍。中国机动车 TPM 排放量和减排量均呈东部沿海至西部内陆地区递减趋势,且呈“低排放,高增加;高排放,高减少”的空间分布特征。“低排放,高增加”区域主要集中在中西部地区,特别是西南各省市;“高排放,高减少”区域为以京津冀为核心的泛华北平原地区。机动车 TPM 排放量的空间集聚性下降,空间随机分布趋势加强,热点区破碎化的空间分布格局日趋显著。地理探测分析表明,机动车 TPM 排放量受机动车数量的驱动作用最强,其次是机动车的使用强度,受自然环境条件的驱动作用最弱。年平均气温和海拔等自然因素主要通过与人活动的共同作用显著增强对机动车 TPM 排放量的解释力。探究机动车颗粒物排放的时空异质特征和驱动因素,对提高中国机动车尾气治理的精准性具有重大意义。

关键词: 机动车尾气;总颗粒物;时空演变;地理探测器;中国

Spatio-temporal evolution and influencing factors of total particulate matter emissions of vehicles in China

GUO Yu^{1,2}, WANG Zhenbo^{2,3,*}, XU Chengdong²

1 School of Ecology Technology and Engineering, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, China

2 Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

3 Key Laboratory of Regional Sustainable Development Modeling, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

Abstract: The particulate matter emissions of vehicles exhaust has become the main source of urban air pollution, which seriously affects ambient air quality and human health. Based on the total particulate matter (TPM) emissions data of municipal vehicles in China from 2011 to 2015, this paper explores the spatio-temporal evolution characteristics of TPM emissions of vehicles in China from emissions and emission increments by using spatial analysis method, and then quantitatively evaluates the influence intensity of main driving factors by using geographical detector model. The results show that the TPM emissions of vehicles in China have been decreasing year by year, and provincial capitals and municipalities

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41771181);国家重点研发计划(2017YFC0505702);上海高等学校一流研究生教育引领计划(沪教委高[2019]22号-24)

收稿日期:2020-12-22; 修订日期:2021-04-09

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wangzb@igsrr.ac.cn

#本研究尚不含中国港澳台统计数据

are the main contributors to the reduction of TPM emissions of vehicles in China. The TPM emissions and emission reductions of vehicles in provincial capitals and municipalities are the largest, and their annual averages are more than twice the national municipal average. Both the TPM emissions and emission reductions of vehicles in China showed a decreasing trend from the eastern coast to the western inland, and the spatial distribution characteristics of “low emission, and high increase; high emission, and high reduction”. The “low emission and high increase” region is mainly concentrated in the central and western of China, especially in the southwest provinces. The “high emission and high reduction” area is the pan-North China Plain with Beijing-Tianjin-Hebei region as the core. The number and spatial distribution range of the High-High cluster and Low-Low cluster areas of TPM emissions of vehicles have been reduced year by year, and the spatial agglomeration has declined. On the contrary, the trend of spatial random distribution has strengthened. The Low-High outlier areas have separated the concentrated and contiguous distribution of High-High cluster areas, so the spatial distribution pattern of fragmentation in the High-High cluster areas has become increasingly prominent. The analysis of geographical detection shows that the TPM emissions of vehicles are the most affected by the number of vehicles, followed by the use intensity of vehicles, and the least affected by natural environmental factors such as average annual temperature and altitude. The natural environmental factors such as annual average temperature and altitude significantly enhance the driving explanatory power of TPM emissions of vehicles through the interaction with human activities. Exploring the spatio-temporal heterogeneity and driving factors of vehicle particulate emissions is of great significance to improve the accuracy of vehicle exhaust control in China.

Key Words: motor vehicle exhaust; total particulate matter; spatio-temporal evolution; Geographic detector; China

高速的经济发展和城镇化进程在促进国家综合国力提升的同时,也拉高了能源消耗和污染物排放水平,造成了严重的大气污染问题。颗粒物污染是大气污染的重要组成部分,由于其治理过程的复杂性和对人体健康的巨大威胁,成为当前公众关注的热点问题^[1-2]。广泛开展的城市大气颗粒物源解析结果表明机动车 TPM 污染排放(主要指机动车尾气中的 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 两种污染物)是大气颗粒物的主要来源^[3],如北京市机动车源对大气 $PM_{2.5}$ 的贡献率为 37.6%^[4],济南为 17.5%^[5],郑州为 27.6%^[6],”2+26”城市平均贡献率为 21.8%^[7]。随着我国经济增长和居民生活水平的提高,机动车需求量呈爆发式增长,机动车 TPM 污染排放对大气环境的压力越来越大。如何科学识别机动车 TPM 排放的特征与规律,探析其背后的影响机制,正成为世界各国政府、专家和学者们共同关注的焦点。

当前对机动车 TPM 排放的研究多从大气污染视角开展,包括源解析^[8]、排放清单^[9]、污染物组分^[10]和基于情景分析的排放预测^[11]等方面。对机动车尾气颗粒物排放时空特征的研究多以路网和机动车流量为基础对污染物排放量进行空间分配,研究尺度从区县到城市群范围不等。如郝永佩等^[12]研究了成渝城市群机动车污染物时空分布特征,结果发现 1999—2015 年机动车 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 排放量分别增加 1.7 和 1.6 倍,且在空间上表现为城区及周围国道和高速公路的排放强度较高。樊宇彬等^[13]以北京市通州区为例进行研究,发现县道上 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的排放量比例最高。Sun 等^[14]研究了廊坊市含 PM_{10} 在内的机动车尾气排放量的时空特征,结果发现机动车尾气排放量在县级存在显著差异,建议在制定政策时应考虑当地条件,将排放增加的县作为重点治理对象。宋晓伟等^[15]对长三角城市群含机动车 TPM 在内的诸多污染物展开时空特征分析,研究结果表明长三角城市群机动车 TPM 排放量呈先增长后下降趋势,不同城市变化趋势存在一定的差异,城市内部表现为城区及城区周围的国道和高速公路排放强度较高。当前机动车 TPM 排放影响因素的研究多基于具体机动车实验及模拟结果数据,内容包括机动车类型^[16]、排放标准^[17]、燃油类型和品质^[18]、机动车运行工况^[19]等方面。机动车 TPM 排放驱动因子的研究以中微观尺度为主,对宏观和综合视角驱动因子的关注相对较少。

综上所述,机动车 TPM 排放量在城市群及县级尺度上均存在显著的时空差异,针对全国尺度而言,各地区在自然环境条件及经济社会发展水平等方面存在显著差异,机动车 TPM 排放量的时空差异特征将显得尤

为突出,同时对造成这种时空差异的驱动因素展开研究显得愈发重要,识别主要驱动因素有助于提高政策的针对性和有效性。本研究基于全国市级行政区划尺度机动车 TPM 排放量统计数据,分析 2011—2015 年机动车 TPM 排放量的时空分布变化特征,运用空间自相关方法分析机动车 TPM 排放量及排放增量空间集聚特征的变化规律,进而利用地理探测器模型定量评价各驱动因素的影响强度,以期为科学制定减轻中国机动车颗粒物排放的相关政策提供辅助决策依据,具有一定的理论和现实指导意义。

1 数据来源与研究方法

1.1 研究区域与数据来源

本研究以中国 357 个市级行政区(含省辖市)为研究单元,考虑到数据的可获取性,暂不包括中国港澳台及海南省三沙市的统计数据。市级机动车 TPM 排放数据来源于全国乃至各省、自治区、直辖市公布的 2012—2016 年环境统计年鉴、公报等,以及政府官方公布的有关数据。空间行政边界等基础地理信息数据来源于国家基础地理信息中心提供的 1:400 万矢量地图数据库(<http://www.ngcc.cn>);海拔高度和地形起伏度等地形数据来源于地理空间数据云提供的 90 m 分辨率数字高程数据(<http://www.gscloud.cn>);气温数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/site>);人均 GDP、机动车数量、财政收入等社会经济数据主要来源于 2012—2016 年的《中国城市统计年鉴》、《中国区域统计年鉴》和《中国县域统计年鉴》,部分缺失数据结合相应省市(自治区)、地市的统计年鉴、统计公报等进行补充。

1.2 研究方法

1.2.1 全局空间自相关

空间自相关分析常用于探究地理事物或要素的空间集聚和演变趋势,现已广泛应用于环境污染等相关领域研究^[20-21]。常用的空间自相关模型包括全局空间自相关和局部空间自相关。全局空间自相关用来分析研究对象在全局空间内表现出的分布特征,用 Moran's I 指数表征机动车 TPM 排放量总体空间集聚和关联效应^[22]。计算公式如下:

$$I = \frac{n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n w_{jk} (x_j - \bar{x})(x_k - \bar{x})}{\sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n w_{jk} \sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x})^2} = \frac{\sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n w_{jk} (x_j - \bar{x})(x_k - \bar{x})}{s^2 \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n w_{jk}} \quad (1)$$

$$s^2 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x})^2 \quad (2)$$

式中, I 为 Global Moran's I 指数, $I \in [-1, 1]$; x_j 、 x_k 分别为市域 j 和 k 的机动车 TPM 排放量统计值; \bar{x} 为机动车 TPM 排放量的平均值; w_{jk} 为空间权重矩阵。当 Global Moran's I 具有显著性,且当 $I > 0$ 时,表明机动车 TPM 排放空间正相关,趋于空间集聚;当 $I < 0$ 时,表明机动车 TPM 排放空间负相关,趋于空间分散;当 $I = 0$ 时,表明机动车 TPM 排放空间不相关,趋于空间随机分布。

1.2.2 局部空间自相关

全局空间自相关缺乏空间表达能力,引入局部空间自相关(Local Indicators of Spatial Association, LISA)方法研究市域机动车 TPM 排放局部区域内发生集聚或异常的具体空间位置,揭示每个研究单元机动车 TPM 排放与其临近单元间的空间自相关程度。计算方法如下:

$$I_i = \frac{n(x_j - \bar{x}) \sum_{k=1}^n w_{jk} (x_k - \bar{x})}{\sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x})^2} = \frac{(x_j - \bar{x})}{s^2} \sum_{k=1}^n w_{jk} (x_k - \bar{x}) \quad (3)$$

式中, I_i 为 Local Moran's I 指数;其余符号含义同上。通过 Z_i 检验 Local Moran's I 指数是否存在空间自相关关系,表达式如下:

$$Z_i = \frac{I - E(I)}{\sqrt{\text{var}(I)}} \quad (4)$$

式中, Z_i 为 Local Moran's I 指数的检验量; $E(I)$ 为 Local Moran's I 指数的数学期望, $\text{var}(I)$ 为 Local Moran's I 指数的方差。

1.2.3 地理探测器

地理探测器是一种探测事物空间分异性,并揭示其驱动力的一组空间统计学方法,该方法可以克服传统统计方法处理类型变量的局限性,在地理要素空间分异测度和机理分析方面得到广泛应用^[23-24]。地理探测器包含 4 个探测器,其中因子探测器的探测结果可以明确自变量 X 是否具有统计显著性及其对因变量 Y 解释力的大小;交互作用探测器的探测结果能进一步判断自变量之间的交互作用及其作用方向与类型^[25]。 q 值度量自变量的解释力,公式为^[26]:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (5)$$

式中, L 为自变量的分层数; N_h 为层 h 内的单元数; σ_h^2 为层 h 的方差; N 为研究区整体的单元数; σ^2 为研究区整体的方差。 q 的值域为 $[0, 1]$, 用于归因分析时值越大说明自变量对因变量的解释力越强。

2 结果分析

2.1 机动车 TPM 排放特征分析

2.1.1 机动车 TPM 排放年度变化规律

2011—2015 年,全国机动车 TPM 排放量呈逐年降低趋势,省会和直辖市以及普通地级市的机动车 TPM 排放量均不断下降(表 1)。省会和直辖市机动车 TPM 排放量各年均值均超全国市级年均值的 2 倍,其中省会和直辖市机动车 TPM 排放量年均值分别为 0.39、0.38、0.37、0.35、0.33 万 t,全国市级机动车 TPM 排放量年均值分别为 0.18、0.18、0.17、0.16、0.15 万 t。省会和直辖市机动车 TPM 排放量较高,表明人口集聚、经济社会发展水平较高的省会和直辖市地区大气环境受机动车 TPM 污染胁迫严重。省会和直辖市中,仅拉萨、兰州、海口、西宁 4 个城市的机动车 TPM 排放量常年低于全国市级平均水平,占比为 12.9%。

省会和直辖市是中国机动车 TPM 排放量减少的主要贡献者,全国 31 个省会和直辖市中,仅中西部 7 个省会城市机动车 TPM 排放量增加,其余省会和直辖市的机动车 TPM 排放量减少或不变,其中排放量减少的省会和直辖市占比为 71%。2011—2015 年,机动车 TPM 减排量位于前列的省会和直辖市分别为上海市、广州市、郑州市和北京市,机动车 TPM 减排量均大于等于 0.2 万 t(表 1),表明我国大城市地区机动车 TPM 减排措施严格,减排效果显著。2011—2015 年,全国市级机动车 TPM 减排量均值为 0.03 万 t,而省会和直辖市机动车 TPM 减排量均值为 0.06 万 t,是全国市级机动车 TPM 减排量均值的 2 倍。

2.1.2 机动车 TPM 排放空间格局分析

中国特大城市群地区城市机动车 TPM 排放量显著高于其他城市。2011—2015 年,机动车 TPM 排放量的高值区多位于京津冀、山东半岛、中原、辽中南、哈长、长三角、珠三角、长江中游、成渝、呼包鄂榆、天山北坡等城市群地区,低值区多位于城市群以外的城市(图 1)。整体而言,东部城市群地区机动车 TPM 排放量远高于西部。五年累计排放量居前十的城市以位于中国东部三大国家级城市群的城市为主,其中有 5 个城市位于京津冀城市群地区,分别是邯郸、沧州、石家庄、唐山、天津;有 2 个城市位于粤港澳大湾区,分别为东莞和深圳;有 1 个城市位于长三角城市群地区,为上海。而位于中部的中原城市群和西部的成渝城市群仅各含 1 个机动车 TPM 排放量居全国前十的城市,分别为周口和重庆(表 2)。这与我国东部三个特大城市群地区人口密度大、人流和物流量大、经济社会发展程度高有关,各城市之间主要通过机动车等交通工具进行频繁的人员和物资流动,由此带来大量机动车 TPM 排放,造成严重的空气污染。

表 1 全国市级机动车 TPM 排放量年度变化/ 10^4 t

Table 1 Annual changes of TPM emissions of municipal motor vehicles in China

城市 City	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2011—2015 增量 Increment from 2011—2015
北京市	0.44	0.41	0.38	0.31	0.24	-0.20
成都市	0.30	0.29	0.30	0.30	0.29	-0.01
福州市	0.24	0.21	0.20	0.20	0.18	-0.06
广州市	0.64	0.62	0.57	0.50	0.41	-0.23
贵阳市	0.20	0.20	0.21	0.22	0.23	0.03
哈尔滨市	0.47	0.46	0.46	0.45	0.43	-0.04
海口市	0.11	0.11	0.12	0.12	0.11	0.00
杭州市	0.41	0.39	0.37	0.34	0.29	-0.12
合肥市	0.25	0.24	0.26	0.28	0.30	0.05
济南市	0.43	0.37	0.36	0.32	0.26	-0.17
昆明市	0.13	0.14	0.16	0.15	0.17	0.04
拉萨市	0.06	0.07	0.07	0.06	0.07	0.01
兰州市	0.08	0.11	0.08	0.09	0.09	0.01
南昌市	0.36	0.35	0.32	0.32	0.33	-0.03
南京市	0.29	0.28	0.26	0.25	0.28	-0.01
南宁市	0.39	0.40	0.39	0.33	0.31	-0.08
上海市	0.85	0.79	0.72	0.61	0.54	-0.31
沈阳市	0.53	0.50	0.43	0.42	0.40	-0.13
石家庄市	0.76	0.73	0.78	0.58	0.58	-0.18
太原市	0.38	0.34	0.34	0.33	0.32	-0.06
天津市	0.65	0.66	0.63	0.62	0.58	-0.07
乌鲁木齐市	0.46	0.46	0.38	0.35	0.37	-0.09
武汉市	0.48	0.50	0.49	0.49	0.47	-0.01
西安市	0.20	0.18	0.17	0.17	0.16	-0.04
西宁市	0.14	0.14	0.13	0.11	0.09	-0.05
银川市	0.36	0.37	0.40	0.39	0.39	0.03
长春市	0.64	0.57	0.54	0.51	0.49	-0.15
长沙市	0.17	0.18	0.19	0.20	0.21	0.04
郑州市	0.69	0.66	0.62	0.58	0.48	-0.21
重庆市	0.73	0.70	0.70	0.72	0.73	0.00
呼和浩特市	0.38	0.38	0.39	0.39	0.38	0.00
省会和直辖市均值 Annual averages of provincial capitals and municipalities	0.39	0.38	0.37	0.35	0.33	-0.06
市级均值 Annual averages of National municipal	0.18	0.17	0.17	0.16	0.15	-0.03

表 2 2011—2015 年机动车 TPM 排放量前十的城市

Table 2 The top ten cities in terms of TPM emissions of vehicles from 2011 to 2015

年份 Year	机动车 TPM 排放量前十的城市 the top ten cities in terms of total particulate matter (TPM) emissions of vehicles
2011	邯郸、沧州、延安、唐山、东莞、深圳、上海、周口、石家庄、重庆
2012	平顶山、邯郸、沧州、延安、唐山、深圳、东莞、周口、上海、石家庄
2013	邯郸、沧州、周口、东莞、石家庄、深圳、上海、重庆、天津、郑州
2014	邯郸、沧州、周口、东莞、重庆、深圳、天津、上海、临汾、菏泽
2015	邯郸、沧州、周口、重庆、深圳、天津、东莞、临汾、石家庄、天津
5 年合计 Total of five years	邯郸、沧州、周口、东莞、深圳、重庆、上海、石家庄、唐山、天津

TPM: 总颗粒物 total particulate matter

从增量角度来看, 机动车 TPM 减排量的空间格局呈由东部沿海城市群地区向西部内陆城市群地区递减的趋势(图 2)。2011—2015 年, 中国机动车 TPM 排放量的增减情况表现为从东部沿海至西部内陆地区, 机动

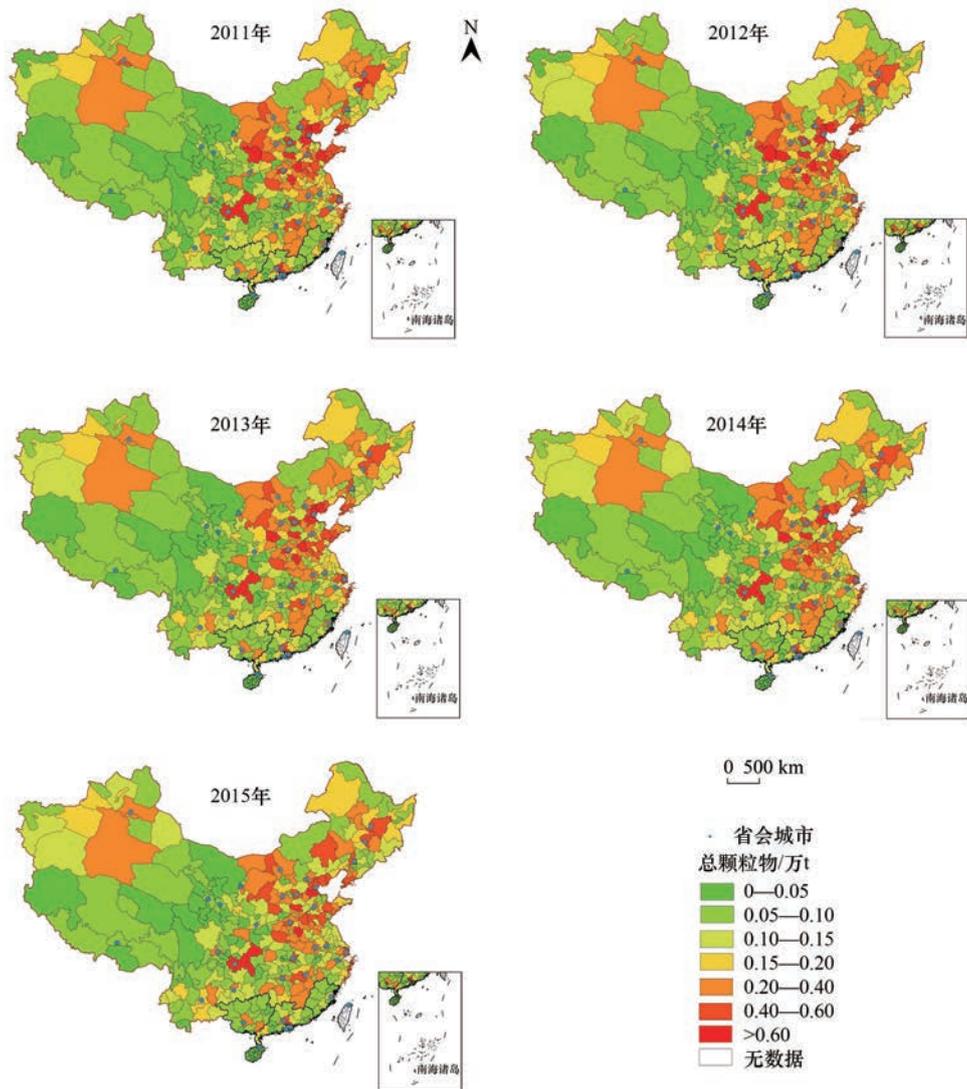


图1 2011—2015年中国机动车 TPM 排放量的空间分布

Fig.1 The spatial distribution of TPM emissions of vehicles in China from 2011 to 2015

本图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2016)1593 号的标准地图制作,底图无修改

车 TPM 排放量由减少逐渐转变为增加。机动车 TPM 减排量的高值区多位于东部沿海城市群地区,而中西部,特别是西北和西南大地区机动车 TPM 排放量增加。具体空间分布上,珠三角、长三角、山东半岛、京津冀、辽中南等东部沿海城市群地区为机动车 TPM 减排量的高值区,中原、呼包鄂榆和成渝等中西部城市群部分地区机动车 TPM 减排量稍低于东部沿海城市群,而长江中游、天山北坡、滇中、黔中等城市群的机动车 TPM 排放量有所增加。

综上所述,我国机动车 TPM 排放表现为东部沿海城市群地区同时作为排放量的高值区和减排量的高值区,而西部城市群地区排放量虽较低,但减排量少,甚至呈增长态势,与郝永佩等的研究结果相符^[12]。东部城市群地区,特别是北京、上海、广州等重点城市的机动车 TPM 排放情况与我国“大气十条”的减排目标相符,但西部城市群地区机动车 TPM 排放的增长趋势值得引起警惕。

2.2 机动车 TPM 排放空间集聚特征分析

运用 ARCGIS 软件对 2011—2015 年中国 357 个城市机动车 TPM 排放进行全局和局部莫兰指数计算 (Global and Local Moran's I),并准确识别全国机动车 TPM 排放的空间集聚特征。结果显示,2011—2015 年

全国市级机动车 TPM 排放量 Global Moran's I 指数分别为 0.22、0.21、0.23、0.22、0.21,且均通过 1% 的显著性检验,表明全国 357 个城市机动车 TPM 排放存在较高的空间正相关性,空间集聚特征明显。

2.2.1 机动车 TPM 排放空间集聚特征年度变化规律

局部空间自相关分析结果可以划分出 4 种空间聚类模式:高—高集聚区即为热点区,低—低集聚区即为冷点区,高—低集聚区为机动车 TPM 排放量低值集聚区内的相对高值区,低—高集聚区为机动车 TPM 排放量高值集聚区内的相对低值区。

统计处于不同集聚特征的城市数量发现,2011—2015 年,机动车 TPM 排放量热点区和冷点区的城市数量均呈逐年降低趋势,不显著特征的城市数量逐年增长,表明机动车 TPM 排放量的空间集聚性下降,空间随机分布趋势增强。具体地,热点区的城市数量由 2011 年 61 个降低为 2015 年 51 个;冷点区的城市数量由 2011 年 99 个降低为 2015 年 79 个;不显著特征的城市数量由 2011 年 159 个增长到 2015 年 183 个(表 3)。

2011—2015 年,机动车 TPM 排放增量空间集聚特征中处于热点区的城市数量远远高于冷点区的城市数量,且相对高值区的城市数量远远高于相对低值区的城市数量。机动车 TPM 排放增量同时存在正值和负值,热点区多表示机动车 TPM 排放量增加的城市集聚区,冷点区多表示机动车 TPM 排放量降低的城市集聚区。如前所述,全国机动车 TPM 排放量呈降低趋势,可以推断全国机动车 TPM 排放量减少的主要贡献源于少数城市,大部分城市还存在机动车 TPM 排放量不减反增的情况,表明我国机动车 TPM 减排成效的地区差异性显著。因此,需要总结减排成果显著城市的减排措施,加强在全国范围内进行推广,并结合各地市的自身特点制定合理的减排政策。

表 3 2011—2015 年处于不同空间集聚特征的城市数量统计表

Table 3 Statistics on the number of cities with different spatial agglomeration characteristics from 2011 to 2015

年份 Year	高-高集聚 High-High Cluster	高-低集聚 High-Low Outlier	低-高集聚 Low-High Outlier	低-低集聚 Low-Low Cluster	不显著 No significant
2011	61	9	29	99	159
2012	52	7	32	97	169
2013	60	9	32	94	162
2014	59	8	32	86	172
2015	51	9	35	79	183
2011—2015 增量 Increment from 2011—2015	88	21	4	41	203

2.2.2 机动车 TPM 排放空间集聚特征格局分析

2011—2015 年,机动车 TPM 排放量的热点区主要集中于山东半岛、京津冀、辽东半岛、呼包鄂榆、晋中、中原以及珠三角等城市群地区;冷点区常年集中于甘肃、青海、四川、西藏东部、广西和海南等地区(图 3)。机动车 TPM 排放量空间集聚特征显著变化的区域为泛华北平原东部的赤峰、承德、锦州、威海、盐城、淮安等城市,它们由热点区逐渐转变为非显著区,此外,珠三角地区的深圳和广州同样由热点区转变为非显著区。而泛华北平原西部和南部的南阳、信阳和巴彦淖尔等城市由非显著区转变为热点区。2011 年机动车 TPM 排放量的冷点区范围较大,涵盖甘肃、青海、西藏东部、云南、贵州、四川、海南等大部分区域,此后冷点区范围不断缩

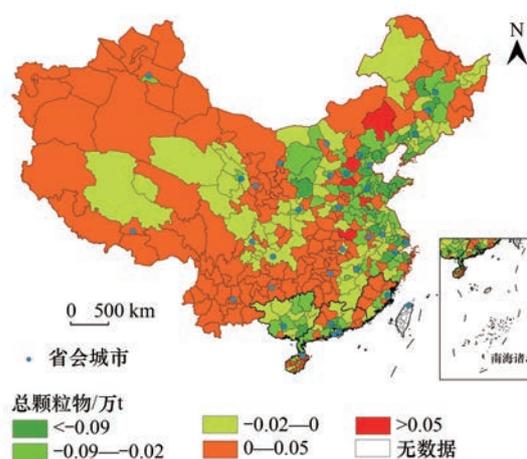


图 2 2011—2015 年中国机动车 TPM 排放增量空间分布图

Fig.2 The spatial distribution of the increase of TPM emissions of vehicles in China from 2011 to 2015

小,至 2015 年冷点区的范围仅包括甘肃、青海、四川、海南、西藏东部、广西东部和广东西部等区域,云南和贵州二省的冷点区城市数量减少最多。

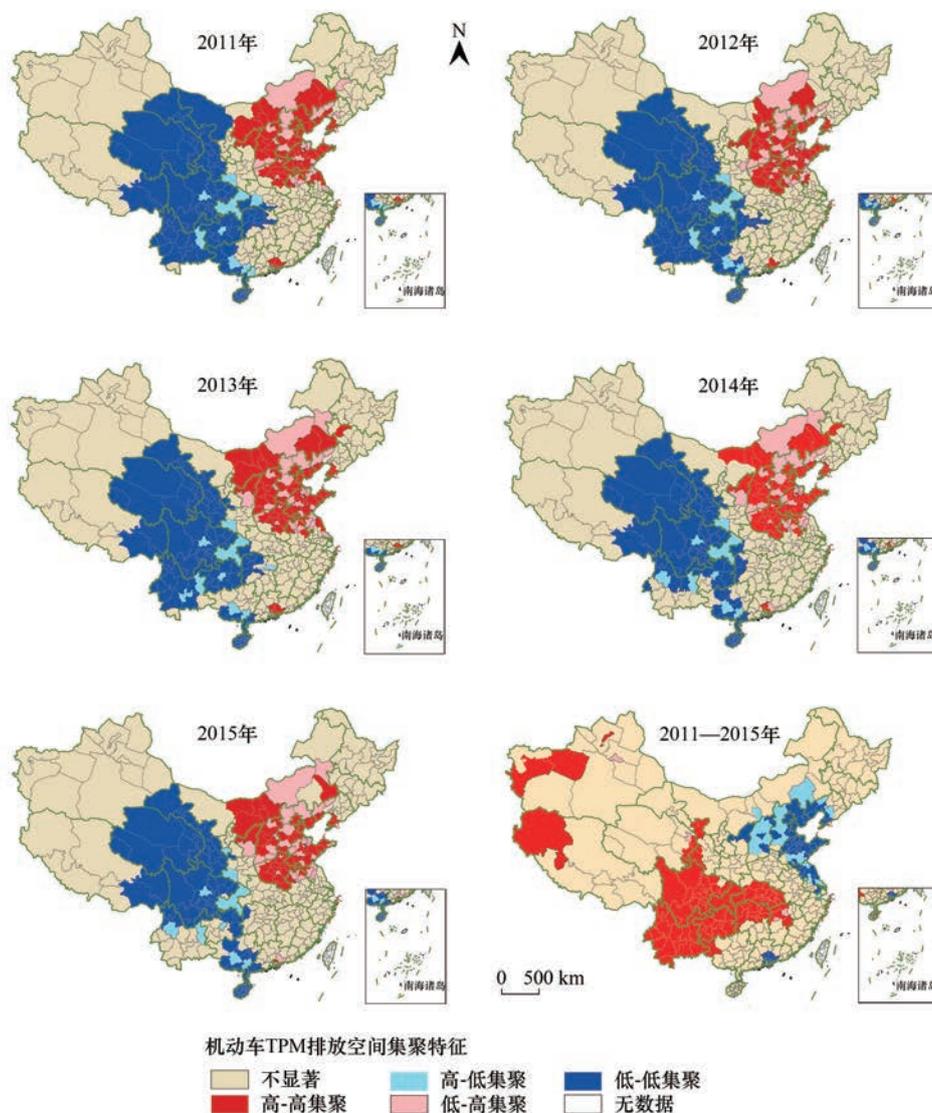


图 3 2011—2015 年中国机动车 TPM 排放量及排放增量局部空间自相关分析

Fig.3 Analysis of local spatial autocorrelation of TPM emissions and increments of vehicles in China from 2011 to 2015

机动车 TPM 排放量的相对高值区和相对低值区分别镶嵌于冷点和热点区之间(图 3)。2011—2015 年,相对低值区逐渐割裂热点区的集中连片分布,导致位于山东半岛、京津冀、辽东半岛、呼包鄂榆、晋中、中原等城市群地区的热点区范围不断缩小,热点区破碎化的空间分布格局日趋显著,表明机动车 TPM 排放量的热点区数量、范围和连片性逐年降低,对区域环境的胁迫性降低。相对高值区主要位于中西部的省会及周边城市,如成都、贵阳、重庆、曲靖、汉中、南宁和玉林等城市。这些城市是省内人口、经济、社会和文化的中心,也是机动车保有量高和使用强度大的区域,故机动车 TPM 排放量显著高于周边地区。值得注意的是,处于相对高值区的城市可能会对周边城市机动车 TPM 排放产生扩散效应,导致其周边城市由冷点区转变为非显著区。原因可能与区域内发达城市受更为严格的减排措施限制,未达到排放标准的机动车被输送到减排政策和监管相对宽松的周边城市,输送原则一般以就近地区优先,这与城市化对空气污染的溢出效应相类似^[27]。

从增量来看,珠三角、辽东半岛、河北东部、北京、天津及山东和江苏北部等区域由机动车 TPM 排放量的

热点区转变为机动车 TPM 排放增量的冷点区,表明这些区域机动车高 TPM 排放的现象得到重视,机动车 TPM 减排成效显著。云南、四川、贵州、重庆、湖北大部、青海东部、甘肃中部及湖南和安徽北部等区域为机动车 TPM 排放增量的连片热点区,表明中西部,特别是西南各省市为机动车 TPM 排放量增加的重要来源地区(图 3)。新疆的喀什地区、阿克苏地区、克拉玛依市和西藏的阿里地区为机动车 TPM 排放增量的分散热点区,表明新疆和西藏的部分地区机动车 TPM 排放量增加显著,而这些地区生态环境相当脆弱,因此机动车 TPM 排放量增加的现象亟需提前引起高度关注和重视。

对比机动车 TPM 排放量和排放增量的空间集聚特征可以发现,中国机动车 TPM 排放呈“低排放,高增加;高排放、高减少”的空间分布特征。其中“低排放,高增加”的区域为中西部地区,特别是西南各省市;“高排放、高减少”的区域为以京津冀为核心的泛华北平原地区。这主要由于近年来中西部地区,特别是西南各省市经济快速崛起、人民生活水平的提高,汽车保有量大幅增长且机动车限排政策较东部地区相对宽松,导致机动车 TPM 排放量增加;而以京津冀为核心的泛华北平原地区长期遭受雾霾等空气污染的影响,当地政府出台了大量的减排政策^[28],强力推进环保措施,虽然机动车 TPM 排放总量短期内大幅缩减困难,但增量得到严格控制,减排效果显著^[29]。

2.3 机动车 TPM 排放量影响因素分析

从宏观和综合视角出发,机动车保有量对机动车 TPM 排放量具有直接决定作用,人口密度、公路货运量和万人公共汽车拥有量能体现机动车的使用强度。一般而言,人口密度和公路货运量越大机动车使用强度越高,机动车 TPM 排放量越大;万人公共汽车拥有量的增加能有效降低私家车的使用^[30],公共汽车每公里每名乘客的颗粒物排放量最低。自然环境条件中的年均气温和海拔高度均会对机动车 TPM 排放产生重要的影响。相关研究表明,环境温度每下降约 11℃,机动车 TPM 排放量便会增加一倍^[31];海拔高度为 3000 m 时,机动车 TPM 排放量约为平原时的 2.35 倍^[32]。

通过上述分析,本研究基于 2011 年、2013 年和 2015 年全国 357 个地级市(含省辖市)市面板数据,选取与机动车污染物排放量密切相关的指标(表 4),借助地理探测器探测空间分异特征与规律的优势,探究各驱动因素对中国机动车 TPM 排放的影响程度。

表 4 机动车 TPM 排放驱动因素地理探测分析表

Table 4 Geographical detection analysis of TPM emissions of vehicles

探测指标 Index	2011 年/%	2013 年/%	2015 年/%
公路货运量(X_1) Highway freight volume	36.60 ***	37.08 ***	36.34 ***
万人公共汽车拥有量(X_2) Number of buses per 10,000 people	15.68 ***	12.67 ***	9.34 ***
机动车保有量(X_3) Motor vehicle population	41.30 ***	45.87 ***	40.69 ***
人口密度(X_4) Population density	13.79 ***	12.66 ***	13.03 ***
年平均气温(X_5) Average annual temperature	7.30 ***	7.33 ***	7.81 ***
海拔高度(X_6) Altitude	9.99 ***	9.40 ***	7.87 ***

* * * 表示 $P < 0.01$

2.3.1 机动车 TPM 排放量的单因子探测

研究结果表明,本研究所选取的 6 个驱动因素均对机动车 TPM 排放量具有显著的影响,解释力大小整体表现为:机动车保有量>公路货运量>人口密度>万人公共汽车保有量>海拔高度>年平均气温(表 4)。机动车 TPM 排放量受机动车数量的驱动作用最强,其次是受机动车使用强度的驱动作用,受自然环境条件的驱动作用最弱。

公路货运量、人口密度、年平均温度、海拔高度等指标的解释力 q 值年际变化不大,万人公共汽车拥有量的解释力 q 值逐年降低,机动车保有量的解释力 q 值呈波动变化。2011—2015 年期间国内全面推行国四排放标准,有效降低各机动车类型的污染物排放。柴油车排放作为机动车 TPM 排放的重要来源^[33],2013 年全国推行的柴油车国四排放标准对柴油车颗粒物排放做了严格的限制,对颗粒物的限值由 0.1 g/kwh 降低到

0.02 g/kwh。随着黄标车的淘汰和新排放标准的实施,机动车保有量的解释力 q 值在 2013 年左右成为研究期内的极值,与 Wu^[34] 等人的研究结果相近。2011—2015 年,我国万人公共汽车拥有量增长了 12.71%,公共汽车拥有量的增加反而会降低机动车 TPM 排放量,因此公共汽车拥有量的解释力 q 值逐年降低。

2.3.2 机动车 TPM 排放量的双因子交互驱动

各驱动因素对机动车 TPM 排放量的影响可能并不单独发生作用,因此需要进一步对各影响因素进行双因子交互探测。探测结果如表 5 所示,任何两个驱动因素交互作用的解释力均强于单一因素对因变量的解释力,非线性增强的交互作用类型的数量略高于双因子增强的交互作用类型的数量,表明各驱动因素通过两两叠加作用对机动车 TPM 排放具有显著的增强作用。机动车保有量(X_3)和年平均温度(X_5)交互作用后的解释力最强, q 值高达 55.43%;公路货运量(X_1)和机动车保有量(X_3)交互作用后的解释力次高, q 值为 49.40%。虽然年平均气温(X_5)自身的解释力 q 值较低,但与其与任何其他驱动因素交互作用的结果均为非线性增强,表明年平均气温通过与其他驱动因素的共同作用而显著增强对机动车 TPM 排放量的解释力。不能因自然环境因素在机动车颗粒物排放研究中解释力较低而忽略其影响,反而更应该加强自然环境因素与其他社会经济因素相互作用的研究,因为恶劣的自然环境会严重加剧机动车 TPM 排放。

表 5 2015 年各驱动因素交互探测结果

Table 5 Interactive detection results of various impact factors in 2015

$q/\%$	交互作用类型 Types of interaction	$q/\%$	交互作用类型 Types of interaction	$q/\%$	交互作用类型 Types of interaction
$X_1 \cap X_2 = 40.41$	双因子增强	$X_2 \cap X_3 = 45.45$	双因子增强	$X_3 \cap X_5 = 55.43$	非线性增强
$X_1 \cap X_3 = 49.40$	双因子增强	$X_2 \cap X_4 = 24.05$	非线性增强	$X_3 \cap X_6 = 45.78$	双因子增强
$X_1 \cap X_4 = 44.08$	双因子增强	$X_2 \cap X_5 = 21.73$	非线性增强	$X_4 \cap X_5 = 30.67$	非线性增强
$X_1 \cap X_5 = 46.27$	非线性增强	$X_2 \cap X_6 = 20.31$	非线性增强	$X_4 \cap X_6 = 22.17$	非线性增强
$X_1 \cap X_6 = 42.50$	双因子增强	$X_3 \cap X_4 = 47.73$	双因子增强	$X_5 \cap X_6 = 26.88$	非线性增强

X_1 :公路货运量 Highway freight volume; X_2 :万人公共汽车拥有量 Number of buses per 10,000 people; X_3 :机动车保有量 Motor vehicle population; X_4 :人口密度 Population density; X_5 :年平均气温 average annual temperature; X_6 :海拔高度 altitude

3 结论和讨论

3.1 结论

(1) 2011—2015 年,全国机动车 TPM 排放量呈逐年降低趋势。省会和直辖市机动车 TPM 排放量和减排量较高,均超全国市级年均值的 2 倍,表明省会和直辖市是中国机动车 TPM 排放量和减排量的主要贡献者。

(2) 空间上,中国特大城市群地区城市机动车 TPM 排放量显著高于其他城市,且东部高于西部。机动车 TPM 减排量的高值区多位于东部沿海城市群地区,并呈自西向东递减的空间格局,至中西部,特别是西北和西南大部分地区机动车 TPM 排放量由减少逐渐转变为增加。

(3) 研究期间,机动车 TPM 排放量的空间集聚性下降,空间随机分布趋势增强。机动车 TPM 排放量的热点区和冷点区空间分布范围均逐年缩小。机动车 TPM 排放量相对低值区割裂了热点区的集中连片分布,热点区破碎化的空间分布格局日趋显著,对区域环境的胁迫性降低。

(4) 中国机动车 TPM 排放呈“低排放,高增加;高排放,高减少”的空间分布特征。“低排放,高增加”区域为中西部地区,特别是西南各省市;“高排放,高减少”区域为以京津冀为核心的泛华北平原地区。

(5) 地理探测器的驱动因素分析结果表明,各驱动因素通过两两叠加作用对机动车 TPM 排放解释力 q 值具有显著的增强作用。年平均气温和海拔高度等自然驱动因素虽然自身解释力 q 值较低,但主要通过与其他驱动因素的共同作用而显著增强对机动车 TPM 排放量的解释力,因此需要加强自然环境驱动因素与其他社会经济驱动因素相互作用的研究。

3.2 讨论

中国机动车环境管理年报指出,2011—2015 年我国机动车颗粒物年均消减量达 1.3%,表明本研究得出

的 2011—2015 年全国机动车 TPM 排放量呈逐年下降趋势的结论符合实际。省会和直辖市及东部特大城市群地区大气污染问题突出,特大型城市及人口密集区机动车污染物排放对大气细颗粒物浓度的贡献率达到 30%左右,在极端不利气象条件下,甚至达到 50%以上^[33],这些地区往往先行探索实施更严格的减排和限排措施^[35-36]研究期内,国务院印发的“大气十条”对三大城市群区域内重点城市机动车源细颗粒物排放做了严格的限制,促使东部沿海城市群地区及一些省会和直辖市机动车 TPM 排放量降低显著。京津冀城市群是我国 PM_{2.5} 全年污染核心区^[37],雾霾天气高发,大量空气源解析研究表明机动车排放是大气污染的首要来源^[4,7],表明京津冀地区为机动车 TPM 排放量的高值核心区。“大气十条”实施后,国家每年在京津冀等重点地区推进大气污染联防联控重点工作及行动方案,2013 年以来京津冀地区 PM_{2.5} 具有较大降幅^[38],2017 年相较于 2013 年下降约 39.6%,远高于全国其他地区^[39],佐证了本研究以京津冀为核心的泛华北平原地区为机动车 TPM 排放的“高排放、高减少”区域的结论。

我国中西部地区因机动车 TPM 排放量初始值较低,重视程度不够,地方机动车环保监管条件相对宽松,导致机动车 TPM 排放量不断增加,成为机动车 TPM 排放增量的重点来源区域^[12,40]。对比 2012 年和 2016 年中国机动车环境管理年报发现,2011 年和 2015 年西南各省市(云南、贵州、四川、重庆)机动车颗粒物排放量的排放绝对量和排名均有所增加,与本研究中西南各省市为机动车 TPM 排放量“低排放,高增加”的结论相吻合。究其原因,可能与人口密度、机动车数量有关。西南部分地区位于胡焕庸线以东,人口密度较大,加上近年来云南、贵州、重庆等经济增长速度常年位居全国前列,带来机动车消费需求的增加,从而导致机动车尾气排放量的快速增长。

驱动因素分析的结果发现,气温和海拔等自然环境驱动因素与机动车保有量和公路货运量等社会经济驱动因素通过交互作用对机动车 TPM 排放量产生显著的增强作用。需要说明的是,我国西部地区以山地和高原为主,气温和地形起伏度与东部平原地区差异显著,自然环境条件相对恶劣,同样强度的社会经济活动会导致中西部山地和高原地区产生的污染物排放量远高于东部平原地区。此外,我国西部地区的生态环境承载力远低于东部^[41],生态环境极易遭受破坏。严格的机动车颗粒物排放标准具有良好的生态、经济和社会效益^[42],建议将东部地区特别是京津冀城市群地区机动车 TPM 减排的成功经验借鉴推广于中西部高速发展的城市地区,实施适度超前的机动车 TPM 污染排放治理措施,并根据当地的实际情况因城施策、因类施策,避免云、贵、川、藏、新、青等地区重走京津冀城市群地区先污染后治理的老路。

本研究重点以机动车保有量、公路货运量、万人公共汽车拥有量和人口密度等因素作为社会经济驱动因子对机动车 TPM 排放量进行驱动力探测,具有一定的代表性。此外,机动车颗粒物排放主要来源于重型货车和重型汽车^[12],按燃油类型分主要来源于柴油汽车^[33],油品质量、管控措施、技术进步也均会对机动车 TPM 排放产生影响^[43-44]。而对油品质量、管控措施和技术进步等驱动因素的分析多以定性分析为主,量化分析这些驱动因素在机动车 TPM 排放中的作用与影响有待深入研究。

参考文献(References):

- [1] 王振波,梁龙武,林雄斌,刘海猛.京津冀城市群空气污染的模式总结与治理效果评估.环境科学,2017,38(10):4005-4014.
- [2] Liang F C, Xiao Q Y, Gu D F, Xu M M, Tian L, Guo Q, Wu Z T, Pan X C, Liu Y. Satellite-based short- and long-term exposure to PM_{2.5} and adult mortality in urban Beijing, China. Environmental Pollution, 2018, 242: 492-499.
- [3] Zhao S, Xu Y. Exploring the spatial variation characteristics and influencing factors of PM_{2.5} pollution in China: evidence from 289 Chinese cities. Sustainability, 2019, 11(17): 4751.
- [4] 韩力慧,张鹏,张海亮,程水源,王海燕.北京市大气细颗粒物污染与来源解析研究.中国环境科学,2016,36(11):3203-3210.
- [5] 孙友敏,李少洛,陈春竹,李思远,姜晓婧,张桂芹.济南市机动车排气污染特征及对市区 PM_{2.5} 的影响.环境科学学报,2018,38(4):1384-1391.
- [6] 王申博,余雪,赵庆炎,杨留明,尹沙沙,张瑞芹.郑州市两次典型大气重污染过程成因分析.中国环境科学,2018,38(7):2425-2431.
- [7] 王德羿,王体健,韩军彩,谢晓栋,陈楚,曹云擎,束蕾."2+26"城市大气重污染下 PM_{2.5} 来源解析.中国环境科学,2020,40(1):92-99.
- [8] Liu B S, Yang J M, Yuan J, Wang J, Dai Q L, Li T K, Bi X H, Feng Y C, Xiao Z M, Zhang Y F, Xu H. Source apportionment of atmospheric pollutants based on the online data by using PMF and ME2 models at a megacity, China. Atmospheric Research, 2017, 185: 22-31.

- [9] de Sousa Maes A, Hoinaski L, Meirelles T B, Carlson R C. A methodology for high resolution vehicular emissions inventories in metropolitan areas: Evaluating the effect of automotive technologies improvement. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2019, 77: 303-319.
- [10] Wang Y N, Jia C H, Tao J, Zhang L M, Liang X X, Ma J M, Gao H, Huang T, Zhang K. Chemical characterization and source apportionment of PM_{2.5} in a semi-arid and petrochemical-industrialized city, Northwest China. *Science of the Total Environment*, 2016, 573: 1031-1040.
- [11] Cheewaphongphan P, Hanaoka T, Chatani S. Long-term trend of regional passenger road transport demand and emission estimation under exhaust emission regulation scenario in Thailand. *Environmental Research Communications*, 2020, 2(5): 051009.
- [12] 郝永佩, 宋晓伟, 张克新, 师贺雄. 成渝城市群机动车污染特征及减排分析. *生态环境学报*, 2020, 29(8): 1581-1591.
- [13] 樊守彬, 郭津津, 李雪峰. 区县尺度机动车高分辨率排放清单建立方法及应用. *环境科学*, 2018, 39(5): 2015-2022.
- [14] Sun S D, Jin J X, Xia M, Liu Y M, Gao M, Zou C, Wang T, Lin Y C, Wu L, Mao H J, Wang P. Vehicle emissions in a middle-sized city of China: Current status and future trends. *Environment International*, 2020, 137: 105514.
- [15] 宋晓伟, 郝永佩, 朱晓东. 长三角城市群机动车污染物排放清单建立及特征研究. *环境科学学报*, 2020, 40(1): 90-101.
- [16] 徐伟嘉, 李红霞, 黄建彰, 程晓梅, 刘永红. 佛山市机动车尾气颗粒物 PM_{2.5}的排放特征研究. *环境科学与技术*, 2014, 37(3): 152-158, 173-173.
- [17] Li X, Dallmann T R, May A A, Presto A A. Seasonal and long-term trend of on-road gasoline and diesel vehicle emission factors measured in traffic tunnels. *Applied Sciences*, 2020, 10(7): 2458.
- [18] 幸娇萍. 机动车排放 PM_{2.5}单颗粒特征及老化机理研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2018.
- [19] 李娟, 王新锋, 薛丽坤, 高晓梅, 孙雷, 王文兴. 济南市典型机动车的尾气颗粒物污染特征与影响因素研究. *环境科学学报*, 2019, 39(1): 35-43.
- [20] 周天墨, 付强, 诸云强, 胡卓玮, 杨飞. 空间自相关方法及其在环境污染领域的应用分析. *测绘通报*, 2013, (1): 53-56.
- [21] 周明卫, 康平, 汪可可, 张小玲, 胡成媛. 2016~2018年中国城市臭氧浓度时空聚集变化规律. *中国环境科学*, 2020, 40(5): 1963-1974.
- [22] 王振波, 王新明. 京津冀农民专业合作社时空演化及影响因素解析. *生态学报*, 2019, 39(4): 1226-1239.
- [23] 王琳, 赵俊三. 城市群新冠疫情时空分布格局与分异机制的地理探测. *生态学报*, 2020, 40(19): 6788-6800.
- [24] 周亮, 周成虎, 杨帆, 王波, 孙东琪. 2000-2011年中国 PM_{2.5}时空演化特征及驱动因素解析. *地理学报*, 2017, 72(11): 2079-2092.
- [25] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望. *地理学报*, 2017, 72(1): 116-134.
- [26] 潘洪义, 黄佩, 徐婕. 基于地理探测器的岷江中下游地区植被 NPP 时空格局演变及其驱动力研究. *生态学报*, 2019, 39(20): 7621-7631.
- [27] Du Y Y, Sun T S, Peng J, Fang K, Liu Y X, Yang Y, Wang Y L. Direct and spillover effects of urbanization on PM_{2.5} concentrations in China's top three urban agglomerations. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 190: 72-83.
- [28] 张国兴, 叶亚琼, 管欣, 尹江河, 吕绚丽. 京津冀节能减排政策措施的差异与协同研究. *管理科学学报*, 2018, 21(5): 111-126.
- [29] 卢亚灵, 周佳, 程曦, 张伟, 蒋洪强. 京津冀地区黄标车政策的总量减排效益评估. *环境科学*, 2018, 39(6): 2566-2575.
- [30] Lumbreras J, Valdés M, Borge R, Rodríguez M E. Assessment of vehicle emissions projections in Madrid (Spain) from 2004 to 2012 considering several control strategies. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2008, 42(4): 646-658.
- [31] Nam E, Kishan S, Baldauf R W, Fulper C R, Sabisch M, Warila J. Temperature effects on particulate matter emissions from light-duty, gasoline-powered motor vehicles. *Environmental Science & Technology*, 2010, 44(12): 4672-4677.
- [32] 王玉伟, 赵伟, 刘乐, 陆红雨, 付铁强. 海拔环境对轻型汽油车微粒排放的影响. *车用发动机*, 2014, (1): 86-89.
- [33] 中华人民共和国环境保护部. 2016年中国机动车环境管理年报. 北京: 中华人民共和国环境保护部, 2016.
- [34] Wu Y, Zhang S J, Hao J M, Liu H, Wu X M, Hu J N, Walsh M P, Wallington T J, Zhang K M, Stevanovic S. On-road vehicle emissions and their control in China: a review and outlook. *Science of the Total Environment*, 2017, 574: 332-349.
- [35] Wu Y, Wang R J, Zhou Y, Lin B H, Fu L X, He K B, Hao J M. On-road vehicle emission control in Beijing: past, present, and future. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(1): 147-153.
- [36] 上海市人民政府. 上海市人民政府关于本市实施第五阶段国家机动车排放标准的通告. *上海市人民政府公报*, 2014, (8): 46-47.
- [37] 王振波, 方创琳, 许光, 潘月鹏. 2014年中国城市 PM_{2.5}浓度的时空变化规律. *地理学报*, 2015, 70(11): 1720-1734.
- [38] 盛黎, 缪育聪, 徐权周, 杨炜迪. 对话黄顺祥: 走近中国大气污染防治. *科学通报*, 2018, 63(16): 1515-1518.
- [39] 张小曳, 徐祥德, 丁一汇, 柳艳菊, 张恒德, 王亚强, 仲峻霆. 2013~2017年气象条件变化对中国重点地区 PM_{2.5}质量浓度下降的影响. *中国科学: 地球科学*, 2020, 50(4): 483-500.
- [40] Song X W, Hao Y P. Research on the vehicle emission characteristics and its prevention and control strategy in the Central Plains Urban Agglomeration, China. *Sustainability*, 2021, 13(3): 1119.
- [41] 赵东升, 郭彩霞, 郑度, 刘磊, 吴绍洪. 生态承载力研究进展. *生态学报*, 2019, 39(2): 399-410.
- [42] Kim S, Xiao C, Platt I, Zafari Z, Bellanger M, Muennig P. Health and economic consequences of applying the United States' PM_{2.5} automobile emission standards to other nations: a case study of France and Italy. *Public Health*, 2020, 183: 81-87.
- [43] 汪晶发, 宋慧, 巴利荫, 李光华, 孙智钢. 西安市机动车污染物排放清单与空间分布特征. *环境污染与防治*, 2020, 42(6): 666-671, 677-677.
- [44] 孙传旺, 徐淑华. 城市机动车限行对 PM_{2.5}的影响与效果检验. *中国管理科学*, 2021, 29(1): 196-206.