

# 济南市典型道路交通状况及其对空气质量的差异化影响

王宇佳<sup>1</sup>,王新锋<sup>1\*</sup>,张博<sup>2</sup>,赵立健<sup>3</sup>,刘一平<sup>4</sup>,司书春<sup>5</sup>,薛丽坤<sup>1</sup>

(1.山东大学环境研究院生态环境大数据创新研究中心,山东 青岛 266237; 2.济南市公安局交通警察支队,山东 济南 250014; 3.济南市生态环境数字化应用中心,山东 济南 250101; 4.山东诺方电子科技有限公司,山东 济南 250002; 5.山东大学物理学院,山东 济南 250100)

**摘要:**为研究城市道路的实际交通状况及不同类型机动车流量对环境空气质量的影响,以济南市为例,调查典型道路上的机动车流量与精细车型结构,分析交通状况的时空变化特征,探究交通状况对主要大气污染物质量浓度的影响。结果表明,机动车流量的昼夜变化呈双峰型,工作日双峰出现时间早,且峰值更突出,车流量整体上大于双休日。不同道路上车型结构相似,其中汽油车、小型车占绝大部分,柴油车、中大型车占比较小,不同路段柴油车的比例及其时间变化特征有明显差异。相关性分析表明:NO<sub>2</sub>、O<sub>3</sub>质量浓度与汽油车、小型车流量显著相关,PM<sub>2.5</sub>质量浓度与2 h前的柴油车流量相关性较好。随机森林回归分析结果显示:气象因素对城市大气污染物质量浓度影响更大(特征重要性得分为66.4%~94.6%),交通因素也有明显影响(特征重要性得分为5.4%~33.7%)。其中,温度对O<sub>3</sub>、NO<sub>2</sub>质量浓度影响很大(特征重要性得分为89.8%、59.7%),湿度对PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>质量浓度影响显著(特征重要性得分为34.8%、40.4%),汽油车流量对NO<sub>2</sub>质量浓度有一定影响(特征重要性得分为9.4%),柴油车流量对PM<sub>2.5</sub>与PM<sub>10</sub>质量浓度影响较大(特征重要性得分为11.0%、9.8%)。

**关键词:**道路交通;机动车流量;车型构成;空气质量;影响因素

中图分类号:X851

文献标志码:A

**引用格式:**王宇佳,王新锋,张博,等.济南市典型道路交通状况及其对空气质量的差异化影响[J].山东大学学报(工学版),2025,55(1):138-148.

WANG Yujia, WANG Xinfeng, ZHANG Bo, et al. Traffic conditions on typical roads in urban Jinan and the differentiated impacts on air quality[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2025, 55(1):138-148.

## Traffic conditions on typical roads in urban Jinan and the differentiated impacts on air quality

WANG Yujia<sup>1</sup>, WANG Xinfeng<sup>1\*</sup>, ZHANG Bo<sup>2</sup>, ZHAO Lijian<sup>3</sup>, LIU Yiping<sup>4</sup>, SI Shuchun<sup>5</sup>, XUE Likun<sup>1</sup>

(1. Big Data Research Center for Ecology and Environment, Environmental Research Institute, Shandong University, Qingdao 266237, Shandong, China; 2. Traffic Police Detachment of Jinan Public Security Bureau, Jinan 250014, Shandong, China; 3. Jinan Municipal Digital Application Center of Ecology and Environment, Jinan 250101, Shandong, China; 4. Shandong Nova Electric Technology Co., Ltd., Jinan 250002, Shandong, China; 5. School of Physics, Shandong University, Jinan 250100, Shandong, China)

**Abstract:** In order to study the impact of actual traffic conditions on urban roads and different types of motor vehicle flows on environmental air quality, taking Jinan City as an example, this study investigated the traffic flow and detailed vehicle types on typical roads, analyzed the spatiotemporal characteristics of traffic conditions, and explored the effects of traffic conditions on the concentrations of major air pollutants. The results showed that the diurnal variation of traffic flow exhibited a bimodal pattern, with earlier and more prominent peaks occurring on weekdays and the overall traffic flow was higher than on weekends. The vehicle types were similar on different roads, with gasoline and small vehicles accounting for the majority, while diesel, mid-size and large vehicles contributed a small proportion. There were obvious differences in the proportion and temporal variation characteristics of

收稿日期:2023-08-02

基金项目:山东省自然科学基金资助项目(ZR2020YQ30);生态环境部大气重污染成因与治理攻关项目(DQGG202123);山东大学基本科研业务费资助项目(2020QNQT012)

第一作者简介:王宇佳(2000—),女,山东济南人,硕士研究生,主要研究方向为大气环境化学。E-mail:202212983@mail.sdu.edu.cn

\*通信作者简介:王新锋(1985—),男,河南洛阳人,副教授,博士生导师,博士,主要研究方向为大气环境化学。E-mail:xinfengwang@sdu.edu.cn

diesel vehicles on different roads. Correlation analyses demonstrated that the concentrations of  $\text{NO}_2$  and  $\text{O}_3$  were significantly correlated with the flow of gasoline and small vehicles, while the  $\text{PM}_{2.5}$  concentration had a good correlation with the flow of diesel vehicles two hours ago. The results of random forest regression analyses showed that meteorological factors had a greater influence on the concentrations of urban air pollutants (feature importance score: 66.4%-94.6%). There were also obvious influences from traffic factors (feature importance score: 5.4%-33.7%). Among these influencing factors, temperature had a large impact on the  $\text{O}_3$  and  $\text{NO}_2$  concentrations (feature importance score: 89.8%, 59.7%), while humidity had a significant impact on the  $\text{PM}_{2.5}$  and  $\text{PM}_{10}$  concentrations (feature importance score: 34.8%, 40.4%). In addition, the flow of gasoline vehicles had a certain influence on the  $\text{NO}_2$  concentrations (feature importance score: 9.4%), while the diesel vehicle flow had an apparent effect on the  $\text{PM}_{2.5}$  and  $\text{PM}_{10}$  concentrations (feature importance score: 11.0%, 9.8%).

**Keywords:** road traffic; motor vehicle traffic flow; vehicle types; air quality; influencing factors

## 0 引言

交通源是城市大气污染物的重要来源之一,主要包括氮氧化物( $\text{NO}_x$ )、一氧化碳(CO)、挥发性有机物(VOCs)和颗粒物(PM)等<sup>[1-3]</sup>,对城市空气质量和人体健康有显著影响<sup>[4-6]</sup>。道路交通源属于移动源,排放高度低,排放区域人群密集<sup>[7]</sup>,且通常呈现明显的时空异质性。道路车流量、车型结构和车速在短时间、短距离内快速变化<sup>[8-11]</sup>,影响交通源的排放特征,进而影响城区大气污染物的质量浓度。截至2022年,我国机动车保有量已超过4亿辆,而且每年以超过2000万辆的速度持续增长,道路交通源的环境影响不容忽视。

随着工业等其他污染源的严格管控和高效治理,道路交通源对城市空气质量的影响日益突出<sup>[12]</sup>。以往研究通过估算机动车尾气的排放量,定量评估交通源的影响与贡献<sup>[13-15]</sup>。例如,文献[16]利用综合空气质量模型(comprehensive air quality model, CAMx)分析了珠三角地区 $\text{NO}_x$ 的来源,通过跟踪移动源发现重型柴油车对当地 $\text{NO}_x$ 的贡献高达30.8%;文献[17]结合中国多尺度排放清单(multi-resolution emission inventory for China, MEIC)模型和分层相关性传播(layer-wise relevance propagation, LRP)算法发现,上海市区交通源对 $\text{PM}_{2.5}$ 的贡献从2011年的18.03%逐渐增长到2017年的24.37%;文献[9]基于出租车GPS轨迹数据、车牌识别数据和地理信息推断城市交通流量,利用车辆排放因子模型估算大气污染物排放量,发现数量较少的重型车贡献了较大比例的CO排放量。上述研究基于排放量量化了机动车尾气的总体贡献,指出道路交通源对城市大气污染的重要影响。然而,由于环境条件与大气传输过程的复杂性,机动车尾气排放量的贡献并不能完全代表对大气污染物质量浓度的实际贡献<sup>[18]</sup>,因此需要综合分析交通

状况信息与空气质量之间的关联关系,进而评估实际道路行驶的机动车对环境空气质量的影响。

目前,已有研究对交通状况与大气污染物质量浓度进行了关联分析<sup>[19-20]</sup>。文献[21-23]分别调查了杭州市、重庆市、南充市部分道路机动车流量,并分析与大气污染物质量浓度之间的相关性,发现车流量对空气质量有一定影响;文献[24]分析了南京市多条道路车流量、车速、车型构成的时空变化特征、污染物质量浓度变化趋势以及它们之间的相关关系,结果表明交通状况与 $\text{NO}_2$ 、CO质量浓度的时空变化趋势高度关联;文献[25]调查发现,乌鲁木齐春节期间 $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{PM}_{10}$ 、 $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_2$ 和CO质量浓度下降与机动车流量下降有关。然而,由于机动车类型、流量、速度等均会影响大气污染物的排放量<sup>[26]</sup>,且实际交通状况时空差异性大,通过静态交通信息仍然难以准确评估道路交通对空气质量的影响。

近年来,济南市机动车保有量呈逐年上升趋势,截至2021年末已达344.7万辆<sup>[27]</sup>。这些机动车排放大量的污染物到环境空气中,进一步加剧城市空气污染。本研究以济南市为例,详细调查了不同道路上机动车流量、车型结构以及车速逐时变化特征,分析同期的空气质量状况及影响因素,并通过多元回归与特征重要性分析探究了道路交通状况对空气质量的影响程度。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域与点位

根据济南市区道路交通图像抓拍系统监控点的位置分布、环境空气质量监测站的布设情况,选择不同方位的邻近空气质量监测站的工业南路、二环东路、腊山河西路、舜耕路作为交通状况监测点,调查期间对经过的车辆进行连续实时拍照并记录车速。4个交通状况监测点与邻近的空气质量监测站如表1所示。

表1 交通状况监测点与空气质量监测站  
Table 1 Traffic condition monitoring points and air quality monitoring stations

编号	道路名称	监测点地理坐标(x,y)	道路性质	车道情况	空气质量监测站地理坐标(x,y)	监测点与空气质量监测站距离/m
1	工业南路	(117.130, 36.688)	主干道	双向十车道	开发区(117.127, 36.672)	400
2	二环东路	(117.063, 36.691)	主干道	双向八车道	省种子仓库(117.061, 36.687)	500
3	腊山河西路	(116.902, 36.686)	主干道	双向六车道	农科所(116.937, 36.665)	4 600
4	舜耕路	(117.006, 36.602)	主干道	双向六车道	科干所(116.986, 36.611)	1 900

## 1.2 研究数据

受交通图像抓拍系统存储限制,选择2022年4月9日—15日作为研究时段,调研、搜集以下3方面数据:(1)交通数据,包括工业南路、二环东路、腊山河西路、舜耕路4个交通状况监测点单向道路的逐小时车流量、车型构成及车速信息;(2)空气污染物质量浓度数据,包括监测道路附近空气质量监测站NO<sub>2</sub>、臭氧(O<sub>3</sub>)、PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub>4种易超标污染物的小时平均质量浓度;(3)气象数据,包括各空气质量监测站逐小时的温度、相对湿度、风速和风向数据。

## 1.3 机动车分类与流量统计

根据《道路交通管理机动车类型》(GA 802—2019)<sup>[28]</sup>,我国机动车主要划分为载客汽车、载货汽车、专项作业车、有轨电车、摩托车和挂车六大类。截至2021年底,我国载客汽车和载货汽车分别达到26 015.84和3 258.47万辆<sup>[29]</sup>。因此,本研究基于道路机动车图像,按照机动车牌照颜色、外形特征,主要识别并分析讨论了载客汽车与载货汽车两大类机动车。根据车型,将机动车划分为小型车、中型车、大型车<sup>[28]</sup>,其中小型车包括小型客车、出租车、轻型货车,中型车包括中型客车、中型货车,大型车包括大型客车、公交车、重型货车。根据燃料类型,又可分为汽油车、柴油车、新能源汽车。需要说明,蓝牌车辆一般为小型车,主要使用汽油作为燃料,部分使用柴油、天然气或液化石油气等,但由于无法从车牌上识别,故本研究统一归为汽油车;黄牌车辆一般总质量超过4.5 t或车长超过6 m,主要使用柴油作为燃料,统一归为柴油车,中型汽油、柴油载客汽车均为黄色牌照,因此仅统计为中型客车,未区分燃料类型;绿色牌照是新能源汽车的专用牌照,包括纯电动汽车、插电式混合动力汽车和燃料电池汽车。本研究根据道路交通连续抓拍图像,通过计算机统计与人工计数相结合的方法,获得交通状况监测点分车型的逐小时车流量、车型结构与车速数据,机动车图像和车速信息由交通图像抓拍系统提供,该系统采用图像处理、目标检测和图像识别算法对道路机动车进行精确识别,能够有效区分不同车型,可以作为调查路段24 h交通流量与车型结构统计的基本依据。

## 2 结果与分析

### 2.1 济南市区典型道路交通状况

车流量是影响城市道路交通大气污染物排放量的关键因素,深入理解车流量的变化规律至关重要<sup>[30-32]</sup>。调查期间,济南市区4个交通监测点车流量水平及拥堵状况有一定区别。其中,工业南路监测点车流量最大,平均车流量高达11 240辆/d,从交通流抓拍图像中观察到交通拥堵状况较为频繁。随着济南市“东强”战略的实施,东部城区聚集了一系列中央商务区、融创文旅城以及大型社区等重点项目,工业南路监测点位于高新万达商圈附近,道路交通早、晚高峰期均处于饱和状态。舜耕路和二环东路车流量次之,平均车流量分别为8 682、8 331辆/d。腊山河西路靠近住宅区域,车道数少,车流量明显小于其他监测点,平均车流量仅为4 023辆/d,调查期间未发生明显车辆拥堵情况。

济南市区4条道路车流量变化情况如图1所示。图1(a)和(b)分别展示了工作日与双休日4个交通监测点的24 h平均车流量,取4月11日—15日为平均代表工作日,4月9日和10日为平均代表双休日水平。需要说明,由于交通流图像缺失,工业南路监测点只有4月9日—11日的的数据。由图1可知,4个交通监测点日间车流量均明显高于夜间,凌晨0:00—5:00车流量一直保持很低水平,6:00开始增大,车流量随时间呈现“早晚高峰”的双峰变化特征。工作日的车流量相对更高,且峰值更加突出,早、晚高峰分别出现在7:00—8:00和17:00—18:00,基本对应工作日上、下班时间,午间低谷出现在12:00—13:00。4个交通监测点中,工业南路车流量最大,工作日早、晚交通高峰期的车流量峰值分别为893、1 225辆/h。腊山河西路车流量最小,午间无明显低谷,早、晚高峰期的车流量峰值分别为452、370辆/h。二环东路与舜耕路车流量水平整体相似,二环东路早、晚高峰期的车流量峰值分别为810、654辆/h,舜耕路早、晚高峰期的车流量峰值分别为705、1 048辆/h。与工作日相比,双休日早

高峰滞后,出现在 9:00—10:00,午间车流量低谷不明显。周末虽然上班往返的机动车减少,但因出游等其他原因外出的机动车增多,机动车出行时间分散,因此双休日车流量下降主要集中在早晚高峰期,且日变化曲线较为平滑。

除工业南路外 3 个交通监测点车流量的周变化趋势如图 1(c)所示。由图 1(c)可以看出,二环东路和舜耕路工作日的车流量为 8 091~9 290 辆/d、腊山河西路为 4 057~4 230 辆/d,均高于双休日的车流量(7 611~8 546 辆/d、3 690~3 830 辆/d),而且一周内星期日车流量最小(7 611~8 181 辆/d、3 690 辆/d),星期一、二、五车流量相对较大(8 612~9 290 辆/d、4 070~4 230 辆/d)。出现车流量的“周末效应”,主要是由于星期一是第一个工作日,市民上班、上学等需求导致车流量大幅度增加,早高峰时期车流量大;星期五是最后一个工作日,市民下班、放学、返城等需求导致星期五晚高峰时期车流量较一般工作日车流量大。

低谷时段车速也有小幅提升,而早、晚交通高峰时段的车速最小。夜间车速波动较大,与车流较少时频繁加速及天气条件变化等因素有关,例如 4 月 11 日 23:00—24:00 出现降雨导致该时段车速下降。

济南市市区 4 个交通监测点不同燃料类型车辆的占比情况如图 2 所示。

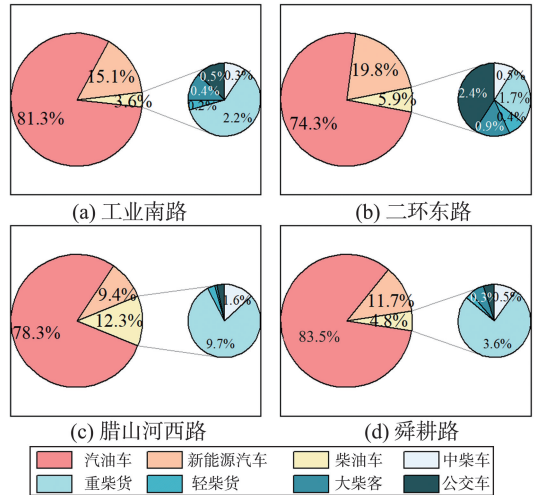


图 2 济南市市区 4 条道路不同燃料类型车辆的占比情况  
Fig.2 Proportions of vehicles with different fuel types on four roads in urban Jinan

按燃料类型分类时,各道路车型结构基本一致,其中汽油车占比最大,高于 70%,除腊山河西路外,其他 3 条道路均是柴油车占比最小。然而,不同道路柴油车的构成有较大区别,其中腊山河西路柴油车占比相对较高,主要是柴油货车,中、重型柴油货车占柴油车的 92%左右,与腊山河西路是中、重型货车进入市区的主要绕行道路有关。根据济南市主城区的限行规则,交通高峰期中、重型载货汽车等禁行绕城高速以内区域,全天禁行二环路以内区域,腊山河西路作为介于西绕城高速和二环路之间的南北向主干道,是非高峰期途经市区的载货汽车的主要通道之一。工业南路、舜耕路的柴油车构成与腊山河西路接近,柴油货车的占比显著高于柴油客车,分别达到了 75%、88%。二环东路各类柴油车比例相当,柴油客车占比略高于柴油货车,主要是由于济南长途汽车东站位于二环东路监测点附近,因此柴油客车数量明显高于其他道路。另外,近年来新能源汽车在机动车中的占比不断提高,其中二环东路新能源汽车的比例已经接近 20%,而且 4 个交通监测点新能源出租车在所有出租车中占比约 85%,新能源公交车在公交车中占比约 80%,可见济南市大部分出租车、公交车已经逐步转型为新能源汽车。

4 个交通监测点不同大小车辆的占比情况如图 3 所示。可以看出,小型车的比例最大,占各道路机

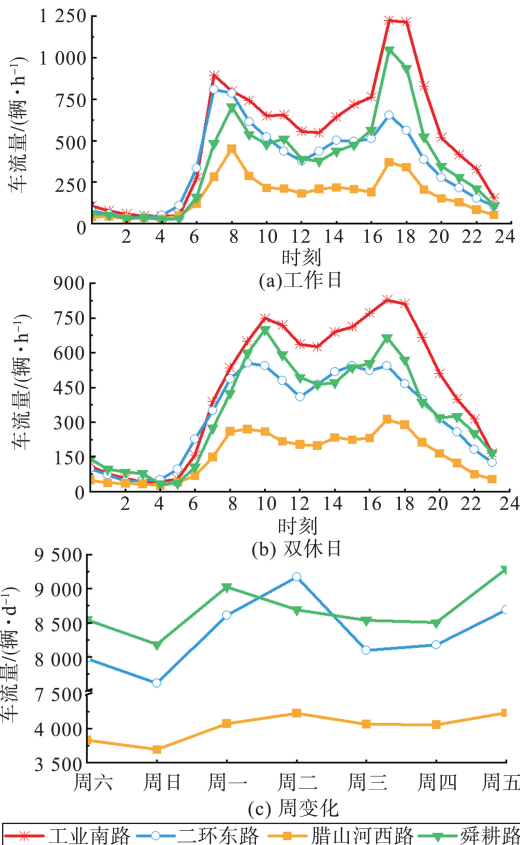


图 1 济南市市区 4 条道路车流量变化

Fig.1 Variation of traffic flows on four roads in urban Jinan

观测期间 4 个交通监测点的小时平均车速在 43~55 km/h 波动。其中,舜耕路车速相对较大,为 46.5~54.3 km/h;二环东路车速略小,为 46.2~52.4 km/h。另外,小时平均车速与车流量呈现相反的时间变化趋势:夜间车流量减小,车速增大,其中 0:00—6:00 的车速普遍高于其他时段,午间车流量

动车总数的85%以上,其中工业南路、舜耕路小型车占比分别高达92.7%和91.8%;其次为大型车,其中腊山河西路大型车占比相对其他三条路最高,达12%,主要为重型载货汽车,由于二环东路大型载客汽车、公交车数量较多,其大型车的比例也较高,达10.3%;中型车占比最小,工业南路、舜耕路中型车的占比均不足1%。

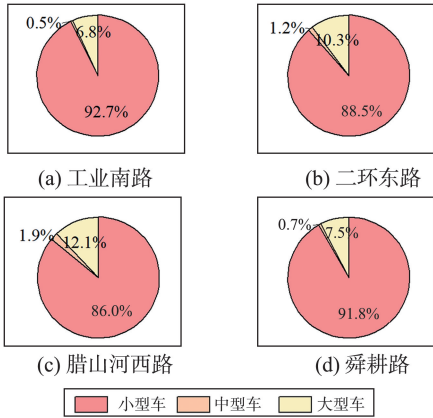
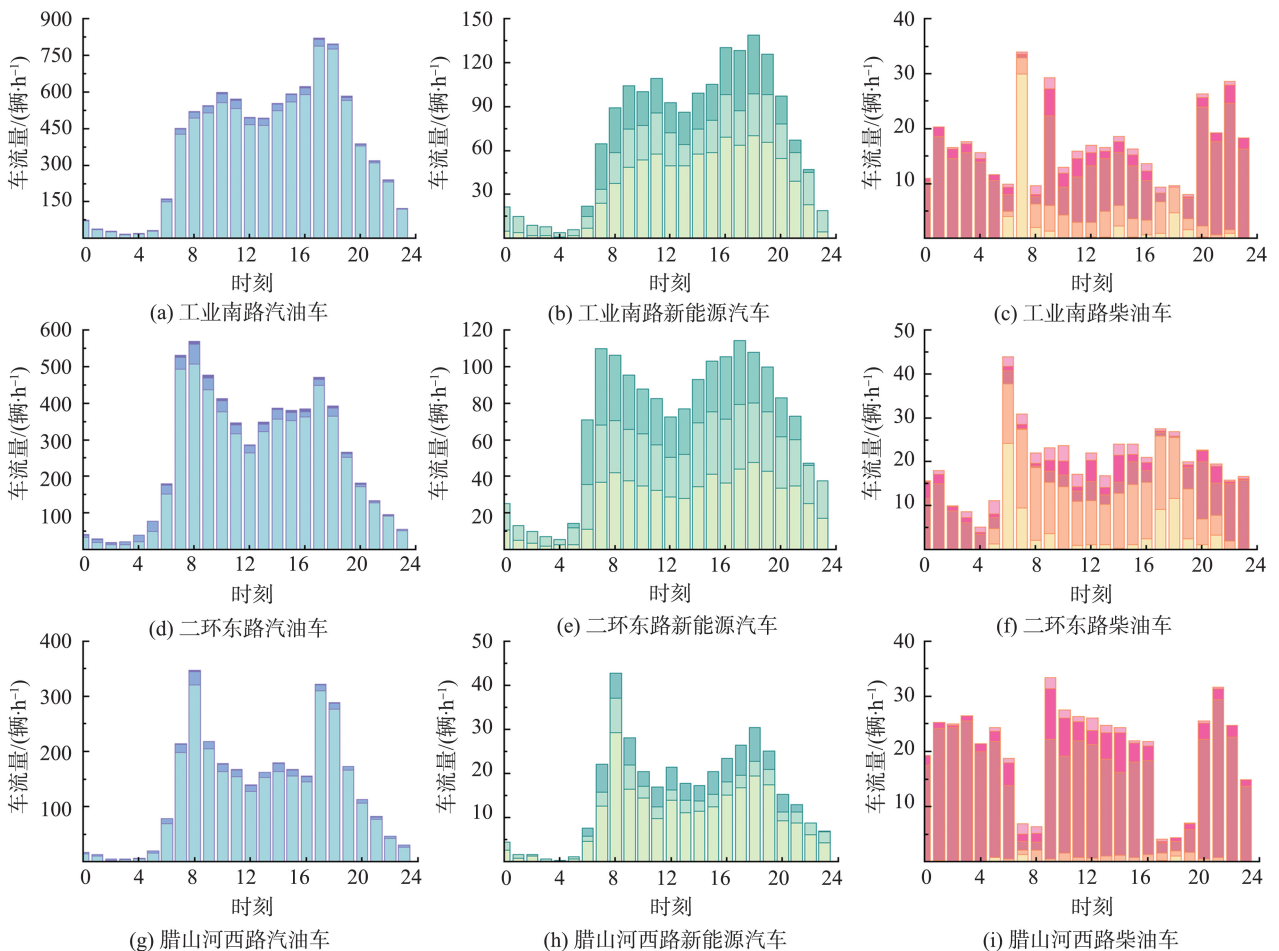


图3 济南市区4条道路不同车辆的占比情况  
Fig.3 Proportions of vehicles with different sizes on four roads in urban Jinan

本研究进一步分析了不同类型车流量的昼夜变化情况,济南市4条道路不同车型车流量逐时变

化如图4所示。由图4可知,汽油车和新能源汽车流量与总车流量的昼夜变化规律基本一致,4个交通监测点均呈现双峰型特征。汽油车流量“昼高夜低”的变化趋势主要由小型载客汽车决定,轻型汽油货车在汽油车中占比第二高,在日间和夜间均有一定的车流量。出租车主要在日间通行,也呈现出“昼高夜低”的日变化规律。中、重型柴油货车主要在夜间行驶,白天的车流量相对较小,与市区部分道路中、重型柴油货车的限行政策有关。柴油车流量的昼夜变化规律与汽油车有显著区别,而且不同道路的柴油车流量的昼夜变化特征差异较大。其中,中、重型柴油货车大部分集中在夜间行驶,而公交车、大型柴油客车等多在日间行驶。工业南路、腊山河西路、舜耕路柴油货车占比较大,柴油车流量与汽油车、新能源汽车流量呈现出明显相反的变化趋势,即早晚低、其他时段高。值得注意的是,受校车、通勤车等影响,工业南路早晨7:00时大型柴油客车数量突然增多,柴油车流量出现了一个短暂的峰值;二环东路是济南市民出城、旅游的主要道路,公交车与旅游巴士繁忙,柴油车流量呈现“早晚高峰”的双峰型变化特征,与汽油车、新能源汽车流量相似。



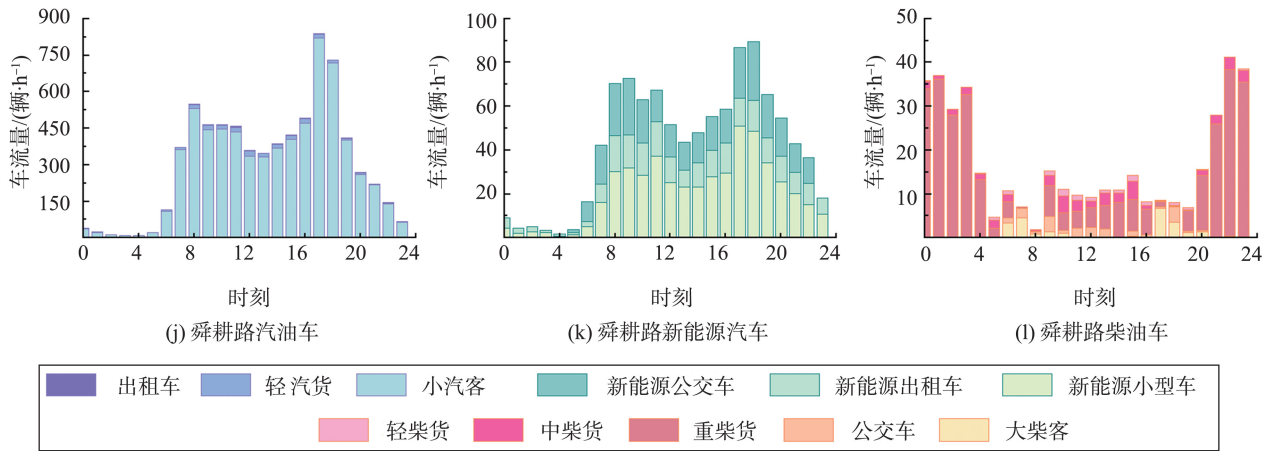


图 4 济南市市区 4 条道路不同车型车流量逐时变化

Fig.4 Hourly variation of traffic flow for different types of vehicles on four roads in urban Jinan

### 2.2 城市交通与空气质量关联分析

调查期间 4 个交通监测点主要大气污染物质量浓度、交通状况、气象参数的平均昼夜变化如图 5 所示。由图 5 可知,济南市市区 4 条道路附近监测站的大气污染物质量浓度的变化趋势总体一致,但变化幅度、峰值与谷值出现的时间有一定区别,反映局地排放以及扩散传输的差异。

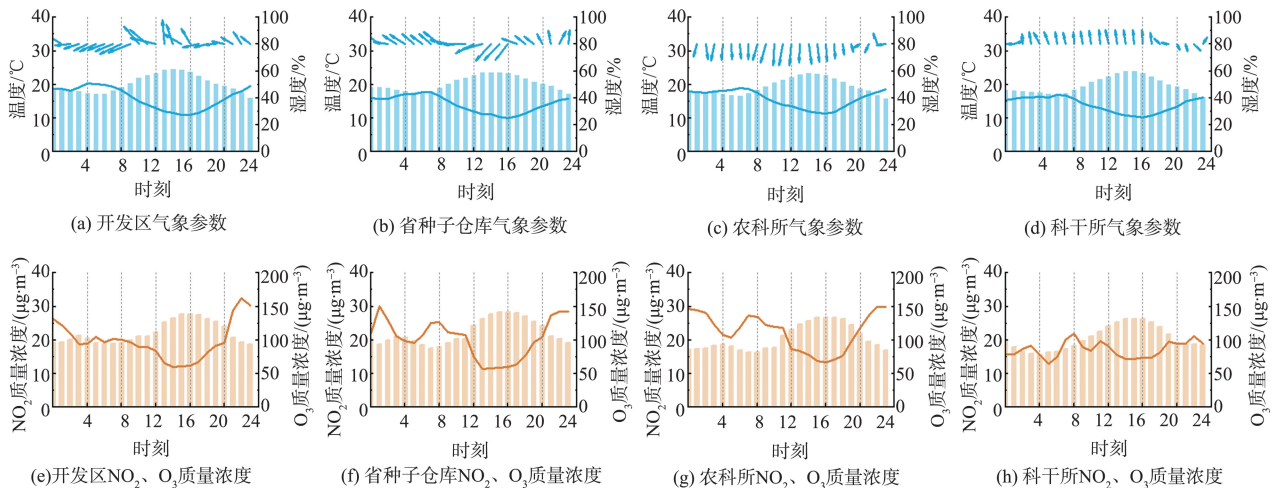
NO<sub>2</sub> 质量浓度的昼夜变化一定程度上受到附近道路交通排放的影响,早高峰时段 NO<sub>2</sub> 质量浓度随着汽油车流量增大而升高,夜间工业南路、腊山河西路 NO<sub>2</sub> 质量浓度随着柴油车流量的增大也有所上升,不过 NO<sub>2</sub> 质量浓度的晚高峰比交通流量滞后,与夜间柴油车排放、混合层高度降低、大气反应活性降低等因素有关<sup>[33]</sup>。另外,工作日的 NO<sub>2</sub> 质量浓度也明显高于双休日,且其早高峰比双休日提前 1~2 h,与道路车流量的“周末效应”相似。

O<sub>3</sub> 质量浓度与 NO<sub>2</sub> 质量浓度呈现一定的相反的变化规律,与气温变化趋势较为一致,一般在午

后 15:00 左右出现峰值,各站点平均峰值质量浓度为 132~142 μg/m<sup>3</sup>,这与其光化学生成机制有关。O<sub>3</sub> 质量浓度通常在交通早高峰时段下降到最低,主要是 NO 的滴定作用导致消耗 O<sub>3</sub> 所致。工作日 O<sub>3</sub> 质量浓度出现峰、谷时间较双休日早 1~2 h,可能受到了 NO<sub>x</sub>“周末效应”的影响<sup>[34]</sup>。

PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub> 质量浓度的昼夜变化趋势与柴油车流量有部分相似之处,夜间随着柴油车流量的增大,4 个监测站颗粒物质量浓度均有所升高,说明其可能受到了交通源排放的影响。其中,农科所的 PM<sub>10</sub> 质量浓度均值高达 79.8 μg/m<sup>3</sup>,显著高于其他 3 个监测站,夜间质量浓度升高也更明显,这与附近路段柴油车流量大、重型柴油货车比例高(9.4%)有关。

综上所述,济南市市区 NO<sub>2</sub> 质量浓度的昼夜变化特征与机动车流量的变化规律较为相似,PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub> 质量浓度变化与柴油车流量部分相似,交通状况对附近空气质量的影响可能存在一定的滞后性。



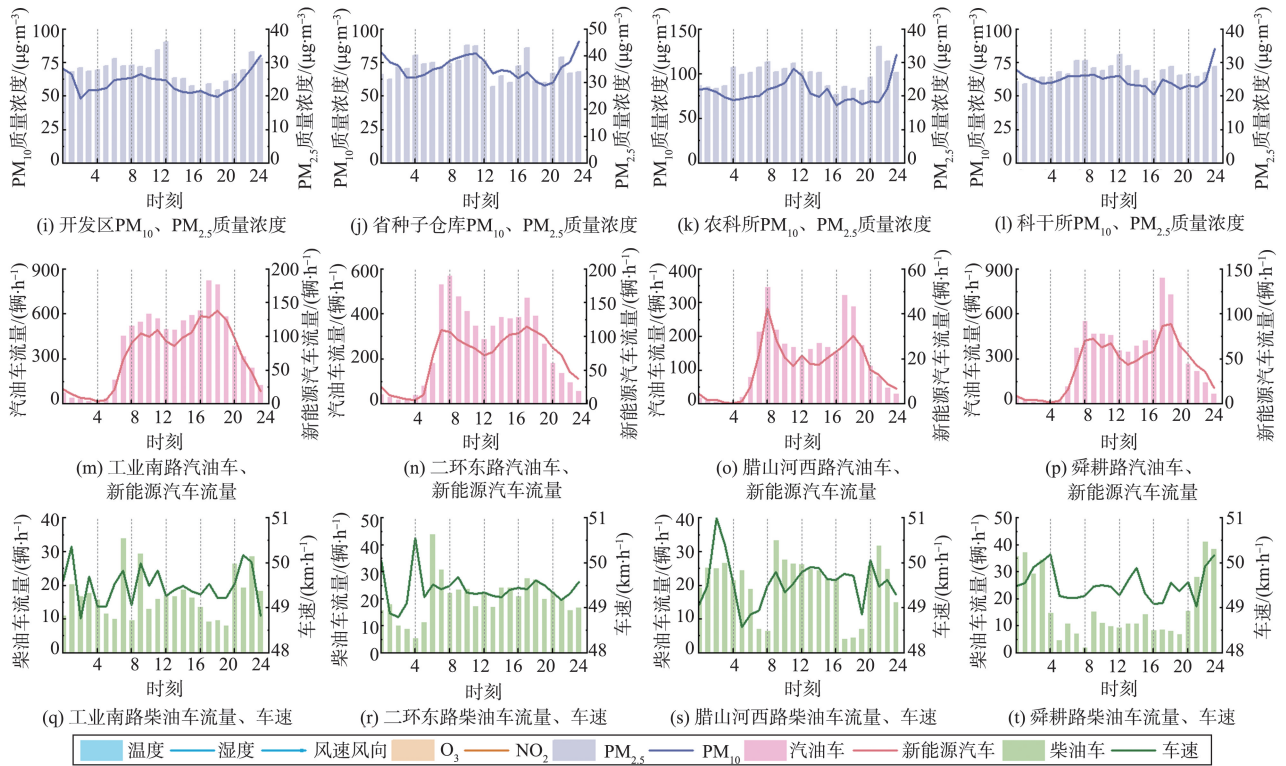


图5 济南市区4个空气质量监测站气象参数、空气污染物质量浓度与附近交通状况的平均昼夜变化

Fig.5 Average diurnal variations of meteorological parameters and air pollutant concentrations in four air quality monitoring stations and the nearby traffic conditions in urban Jinan

为了进一步理解车型结构与大气污染物质量浓度的内在联系,选取与空气质量监测站距离不超过500 m的交通监测点工业南路和二环东路,分析各类机动车流量与大气污染物质量浓度之间的相

关性。考虑到交通因素与空气质量之间并非简单的线性关系<sup>[18,35-36]</sup>,本研究选用 Spearman 相关系数进行相关性分析,结果见表2。

表2 济南市区各类机动车流量与空气污染物质量浓度相关系数

Table 2 Correlation coefficients between traffic flows for different types of vehicles and air pollutant concentrations in urban Jinan

空气污染物	时间点	Spearman 相关系数 $\rho$				
		汽油车	柴油车	小型车	中型车	大型车
NO <sub>2</sub>	实时	0.141 *	0.026	0.154 *	0.174 **	0.124
	滞后 1 h	0.191 **	0.035	0.205 **	0.243 **	0.199 **
	滞后 2 h	0.209 **	0.005	0.223 **	0.275 **	0.214 **
O <sub>3</sub>	实时	0.211 **	0.000	0.209 **	-0.136 *	0.095
	滞后 1 h	0.246 **	0.019	0.242 **	-0.131 *	0.108
	滞后 2 h	0.275 **	0.030	0.272 **	-0.122	0.116
PM <sub>2.5</sub>	实时	-0.031	0.092	-0.031	0.161 *	0.054
	滞后 1 h	-0.025	0.126	-0.021	0.083	0.084
	滞后 2 h	-0.001	0.163 *	0.004	0.105	0.121
PM <sub>10</sub>	实时	-0.011	0.094	-0.012	0.002	-0.007
	滞后 1 h	0.015	0.118	0.013	-0.058	0.032
	滞后 2 h	0.024	0.079	0.025	-0.105	0.052

注:\*\*表示在0.01水平(双尾)相关性显著,\*表示在0.05水平(双尾)相关性显著。

由表2可知,除柴油车外的各类机动车流量均与NO<sub>2</sub>质量浓度呈现出一定的正相关性,说明NO<sub>2</sub>作为机动车尾气的主要污染物之一,其质量浓度与机动车流量密切相关。O<sub>3</sub>质量浓度与汽油车、小型车流量显著相关,且相关系数随时间的滞后而增

大,考虑到城市O<sub>3</sub>污染主要来自前体物VOCs与NO<sub>x</sub>的快速光化学反应以及污染物的积累<sup>[37]</sup>,因此上述结果说明大量汽油车、小型车尾气排放的VOCs和NO<sub>x</sub>可能促进了O<sub>3</sub>的二次生成。另外,PM<sub>2.5</sub>质量浓度与2h前的柴油车流量呈现出一定的

正相关性,这与柴油车尾气直接排放的颗粒物以及气态污染物的生成转化有关<sup>[38]</sup>。总体来看,随着时间的滞后,机动车流量与大气污染物质量浓度之间相关性有所增强,说明道路交通排放对空气质量的影响存在滞后性和弥散性<sup>[39]</sup>,这与文献[18]利用深度学习模型模拟的结果一致。

### 2.3 各因素对大气污染物质量浓度的综合影响

城市大气污染物的质量浓度变化,除了受到道路交通等排放影响外,还与气象条件密切相关。其中,风向、风速影响污染物的扩散和传输,能把污染物从排放源传输到空气质量监测站点;温度和湿度则会影响二次污染物的生成和损耗。将气象因素与大气污染物质量浓度作相关性分析,结果显示气象条件对污染物质量浓度影响显著。

其中,风速决定了大气污染物的扩散与输送能力。开发区、省种子仓库监测站 NO<sub>2</sub> 质量浓度与风速表现出显著的负相关性( $\rho = -0.207$ ,  $p < 0.01$ ),风速增大有利于污染物的稀释扩散<sup>[40]</sup>。然而 PM<sub>10</sub> 质量浓度则与风速呈一定的正相关性( $\rho = 0.204$ ,  $p < 0.01$ ),这可能是由于当风速增大时,区域传输和扬尘增加导致颗粒物质量浓度有所升高<sup>[41]</sup>。

大气温度对 O<sub>3</sub> 和 NO<sub>2</sub> 质量浓度有显著影响。其中, O<sub>3</sub> 质量浓度与大气温度呈高度正相关( $\rho = 0.899$ ,  $p < 0.01$ )。随着光照增强、温度升高,光化学反应增强, O<sub>3</sub> 生成加快,从而导致 O<sub>3</sub> 质量浓度升高<sup>[42]</sup>。另外,温度升高也增加前体物 VOCs 的排放,进而促进 O<sub>3</sub> 的生成。与此同时,高温条件下强烈的光化学过程会促进 NO<sub>x</sub> 的消耗,因而 NO<sub>2</sub> 质量浓度与温度呈显著的负相关性( $\rho = -0.609$ ,  $p < 0.01$ )。

相对湿度对颗粒物和 O<sub>3</sub> 质量浓度影响较大。在高湿度条件下,颗粒物表面的非均相反应及水层中的液相反应加快,二次颗粒物特别是水溶性二次气溶胶的生成速率增加,进而导致 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度上升<sup>[43]</sup>,呈现显著的正相关性( $\rho = 0.380$ ,  $p < 0.01$ )。另外,相对湿度与 O<sub>3</sub> 质量浓度呈显著的负相关关系( $\rho = -0.521$ ,  $p < 0.01$ )。有研究表明,在我国许多城市,湿度增加会使 O<sub>3</sub> 质量浓度降低<sup>[40]</sup>, O<sub>3</sub> 的损耗与前体物减少是湿度增大时 O<sub>3</sub> 质量浓度下降的主要原因<sup>[42]</sup>。

为全面理解各因素对城市大气污染物质量浓度的综合影响,本研究选取汽油车流量、柴油车流量、车速、温度、湿度、风速作为自变量, NO<sub>2</sub>、O<sub>3</sub>、PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub> 的质量浓度分别作为因变量,进行多元线性回归分析,回归模型为

$$\begin{cases} y_n = \alpha_0 + \alpha_1 x_{n1} + \alpha_2 x_{n2} + \dots + \alpha_6 x_{n6} + \varepsilon_n \\ \varepsilon_n \sim N(0, \sigma^2) \end{cases}, \quad (1)$$

式中:  $y_n$  为因变量 NO<sub>2</sub>、O<sub>3</sub>、PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub> 的质量浓度,  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ;  $x_{n1}, x_{n2}, \dots, x_{n6}$  分别为自变量汽油车流量(辆/h)、柴油车流量(辆/h)、车速(km/h)、温度(°C)、相对湿度(%)、风速(m/s);  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_6$  为回归系数;  $\varepsilon_n$  为随机误差。

将工业南路、二环东路两个邻近空气质量监测站的监测点共 240 组数据导入 SPSS 进行多元线性回归,拟合结果如表 3 所示。

表 3 空气污染物质量浓度多元回归分析结果  
Table 3 Results of multiple regression analyses for air pollutant concentrations

模型输出	指标	NO <sub>2</sub>	O <sub>3</sub>	PM <sub>2.5</sub>	PM <sub>10</sub>
标准化系数	汽油车	0.118	-0.091	0.067	-0.094
	柴油车	0.002	-0.006	0.044	0.010
	车速	-0.005	0.013	0.008	0.047
	温度	-0.722	0.904	-0.192	0.250
	湿度	-0.134	-0.052	0.316	0.437
	风速	-0.166	0.010	-0.011	0.150
拟合情况	R <sup>2</sup>	0.494	0.832	0.191	0.192
	调整 R <sup>2</sup>	0.481	0.828	0.169	0.171
	F	37.492	189.754	8.926	9.062
	p	0.000**	0.000**	0.000**	0.000**

注: \*\*表示在 0.01 水平(双尾)相关性显著, \*表示在 0.05 水平(双尾)相关性显著。

整体来看,气象因素的标准化系数大于交通因素,对大气污染物质量浓度的影响更为显著,这与前文相关性分析结果一致。其中,温度是影响 NO<sub>2</sub>、O<sub>3</sub> 质量浓度的关键气象因素,标准化系数分别为 -0.722 和 0.904;湿度是影响 PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub> 质量浓度的关键气象因素,标准化系数分别为 0.316 和 0.437。交通因素中,汽油车流量对大气污染物质量浓度的影响较柴油车略大。决定系数 R<sup>2</sup> 表示自变量对因变量变化的解释程度,取值 0~1,其值越接近于 1,说明回归模型的拟合效果越好。需要说明,考虑气象与交通因素的多元线性回归模型对 PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub> 的拟合效果较差, R<sup>2</sup> 仅为 0.19 左右,说明城市大气颗粒物质量浓度还明显受到其他因素如扬尘、工业等排放的影响。

由于机动车尾气排放对空气质量的影响具有动态性和复杂性,利用线性回归分析很难有效识别道路交通特征和污染物质量浓度之间复杂的非线性响应关系。随机森林(random forest, RF)模型是一种基于决策树的机器学习算法<sup>[44-45]</sup>,鉴于其在表示复杂非线性关系方面的优势,本研究基于随机森林算法应用特征重要性排序增强模型的可解释性,探究了各因素对大气污染物质量浓度变化的相对重要性和非线性响应关系。首先,将汽油车流量、柴油车流量、车速、温度、湿度、风速作为解释变量,

NO<sub>2</sub>、O<sub>3</sub>、PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>的质量浓度作为因变量,按8:2的比例划分训练集和验证集,构建随机森林回归模型;其次,利用模型验证集的决定系数R<sup>2</sup>量化和比较各影响因素对大气污染物质量浓度变化的解释程度,结果如表4所示。

表4 空气污染物质量浓度随机森林回归分析结果  
Table 4 Results of random forest regression analyses for air pollutant concentrations

模型输出	指标	NO <sub>2</sub>	O <sub>3</sub>	PM <sub>2.5</sub>	PM <sub>10</sub>
特征重要性得分/%	汽油车	9.4	2.1	10.0	6.8
	柴油车	5.9	2.1	11.0	9.8
	车速	4.4	1.2	6.5	17.1
	温度	59.7	89.8	30.5	17.8
	湿度	8.5	3.5	34.8	40.4
	风速	12.2	1.3	7.2	8.2
	拟合情况	模拟 R <sup>2</sup>	0.952	0.983	0.888
	预测 R <sup>2</sup>	0.725	0.928	0.544	0.478

随机森林回归与多元线性回归分析结果基本一致。气象因素的特征重要性得分最大,其中温度是影响NO<sub>2</sub>、O<sub>3</sub>质量浓度的关键因素,特征重要性得分分别达到60%、90%;湿度为PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>质量浓度的关键影响因素,特征重要性得分分别为34.8%、40.4%。在随机森林模型的拟合结果中,交通因素的特征重要性得分增大,对大气污染物质量浓度变化的贡献占5.4%~33.7%,其中汽油车流量对NO<sub>2</sub>质量浓度影响较大,柴油车流量对PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>质量浓度影响较大,另外PM<sub>10</sub>质量浓度还在一定程度上受到车速的影响(特征重要性得分17%左右),这与道路扬尘有关<sup>[30]</sup>。总体上,随机森林回归模型拟合效果优于多元线性回归模型,R<sup>2</sup>有明显提高。

### 3 结论

(1)济南市区4条道路的机动车流量为168~468辆/h,随时间变化规律相似,总体呈现“早晚高峰”的日变化特征,双休日双峰出现时间比工作日滞后,车流量整体小于工作日,呈现明显的“周末效应”。不同道路车型结构相似,按燃料类型分类时,汽油车占比最大(74.3%~83.6%),新能源汽车次之(9.4%~19.8%),柴油车占比最少(3.6%~12.3%);按车型大小分类时,小型车占比最大(86%~92.7%),大型车次之(6.8%~12.1%),中型车占比最少(0.5%~1.9%)。其中汽油车和新能源汽车流量的日变化均为双峰型,而柴油车在不同道路上的日变化特征差异显著。

(2)城市道路附近的环境空气质量一定程度上受到交通源的影响,早、晚高峰期NO<sub>2</sub>质量浓度随机动车流量增大有一定升高,夜间PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>质量浓度随柴油车流量增大而有所上升。NO<sub>2</sub>质量浓度与除柴油车外的各类机动车流量均表现出一定的正相关性,O<sub>3</sub>质量浓度与汽油车、小型车流量显著相关,PM<sub>2.5</sub>质量浓度与2h前的柴油车流量有关。随着时间推移,交通因素与大气污染物质量浓度的相关性增强,说明道路交通排放对空气质量的影响存在滞后性。

(3)回归分析结果表明,温度是影响NO<sub>2</sub>、O<sub>3</sub>质量浓度的关键因素,湿度是影响PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>质量浓度的关键因素;交通因素中,汽油车流量对NO<sub>2</sub>质量浓度影响较大,柴油车流量对PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>质量浓度影响更大。随机森林回归模型的拟合效果优于多元线性回归模型,有利于准确评价交通因素的非线性影响。

### 参考文献:

- [1] CAI H, XIE S. Determination of emission factors from motor vehicles under different emission standards in China [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2010, 46(3):319-326.
  - [2] LANG J L, CHENG S Y, ZHOU Y, et al. Air pollutant emissions from on-road vehicles in China, 1999-2011 [J]. Science of the Total Environment, 2014, 496:1-10.
  - [3] ZHANG K, BATTERMAN S. Near-road air pollutant concentrations of CO and PM<sub>2.5</sub>: a comparison of MOBILE6.2/CALINE4 and generalized additive models [J]. Atmospheric Environment, 2010, 44(14):1740-1748.
  - [4] ANENBERG S C, MILLER J, MINJARES R, et al. Impacts and mitigation of excess diesel-related NO<sub>x</sub> emissions in 11 major vehicle markets [J]. Nature, 2017, 545(7655):467-471.
  - [5] DANDAPAT S, GHOSH T, SHANKAR U, et al. A relook at the pollution certification of in-use vehicles in India and a way forward [J]. Asian Transport Studies, 2020, 6:100020.
  - [6] YAN L X, LUO X, ZHU R, et al. Quantifying and analyzing traffic emission reductions from ridesharing: a case study of Shanghai [J]. Transportation Research Part D, 2020, 89:102629.
  - [7] 刘晓, 陈强, 郭文凯, 等. 移动源排放VOCs特征及臭氧生成潜势研究——以兰州市为例 [J]. 环境科学学报, 2018, 38(8):3220-3228.
- LIU Xiao, CHEN Qiang, GUO Wenkai, et al. Emission characteristics and ozone formation potential of VOCs

- from mobile sources: a pilot study in Lanzhou [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, 38(8):3220-3228.
- [8] JIANG L H, XIA Y, WANG L, et al. Hyperfine-resolution mapping of on-road vehicle emissions with comprehensive traffic monitoring and an intelligent transportation system [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2021, 21(22):16985-17002.
- [9] LIU J L, HAN K, CHEN X Q, et al. Spatial-temporal inference of urban traffic emissions based on taxi trajectories and multi-source urban data [J]. *Transportation Research Part C*, 2019, 106:145-165.
- [10] GATELY C K, HUTYRA L R, PSTEERSON S, et al. Urban emissions hotspots: quantifying vehicle congestion and air pollution using mobile phone GPS data [J]. *Environmental Pollution*, 2017, 229:496-504.
- [11] WU L L, CHANG M, WANG X M, et al. Development of the real-time on-road emission (ROE v1.0) model for street-scale air quality modeling based on dynamic traffic big data [J]. *Geoscientific Model Development*, 2020, 13(1):23-40.
- [12] 杨柳. 基于交通流控制的城市交通环境颗粒物污染特征研究[D]. 北京:清华大学, 2011.
- YANG Liu. Study on characteristics of roadside particulate matter with different patterns in traffic flow [D]. Beijing: Tsinghua University, 2011.
- [13] 李笑语, 吴琳, 邹超, 等. 基于实时交通数据的南京市主次干道机动车排放特征分析[J]. *环境科学*, 2017, 38(4):1340-1347.
- LI Xiaoyu, WU Lin, ZOU Chao, et al. Emission characteristics of vehicle exhaust in artery and collector roads in Nanjing based on real-time traffic data [J]. *Environmental Science*, 2017, 38(4):1340-1347.
- [14] HE J J, WU L, MAO H J, et al. Development of a vehicle emission inventory with high temporal-spatial resolution based on NRT traffic data and its impact on air pollution in Beijing-part 2: impact of vehicle emission on urban air quality [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, 16(5):3171-3184.
- [15] 刘永红, 詹鹏铭, 刘建昌, 等. 广东佛山交通扬尘排放特征研究[J]. *环境科学与技术*, 2014, 37(8):80-86.
- LIU Yonghong, ZHAN Juanming, LIU Jianchang, et al. Characteristics of fugitive road dust emission in Foshan, Guangdong Province [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 37(8):80-86.
- [16] LU X C, YAO T, LI Y, et al. Source apportionment and health effect of  $\text{NO}_x$  over the Pearl River Delta region in southern China [J]. *Environmental Pollution*, 2016, 212:135-146.
- [17] DU W J, CHEN L L, WANG H R, et al. Deciphering urban traffic impacts on air quality by deep learning and emission inventory [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2023, 124:745-757.
- [18] 陈连亮. 基于深度学习的空气质量和交通关联性研究 [D]. 合肥:中国科学技术大学, 2021.
- CHEN Lianliang. Research on the correlation between air quality and traffic by deep learning [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2021.
- [19] KENDRICK C M, KOONCE P, GEORGE L A. Diurnal and seasonal variations of  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$  and  $\text{PM}_{2.5}$  mass as a function of traffic volumes alongside an urban arterial [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, 122:133-141.
- [20] 冯海霞, 王琦, 杨立才, 等. 拥堵环境下道路交通对城市空气质量的影响 [J]. *山东大学学报(工学版)*, 2021, 51(1):128-134.
- FENG Haixia, WANG Qi, YANG Licai, et al. Impact analysis of road traffic on urban air quality in congested environment [J]. *Journal of Shandong University (Engineering Science)*, 2021, 51(1):128-134.
- [21] 董红召, 许慧鹏, 卢滨, 等. 城市交通道路氮氧化物浓度的 CART 回归树预测研究 [J]. *环境科学学报*, 2019, 39(4):1086-1094.
- DONG Hongzhao, XU Huipeng, LU Bin, et al. A CART-based approach to predict nitrogen oxide concentration along urban traffic roads [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, 39(4):1086-1094.
- [22] 李永锋, 马杰, 王胜蓝, 等. 重庆市典型道路机动车排放  $\text{NO}_2$  污染特征 [J]. *环境工程技术学报*, 2022, 12(5):1601-1608.
- LI Yongfeng, MA Jie, WANG Shenglan, et al. Research on the pollution characteristics of  $\text{NO}_2$  emitted by motor vehicles on typical roads in Chongqing [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2022, 12(5):1601-1608.
- [23] 李坤, 李友平, 刘汉明, 等. 南充市车流量对城市空气质量的影响分析 [J]. *广东化工*, 2014, 41(15):163-164.
- LI Kun, LI Youping, LIU Hanming, et al. Influence of traffic flows on urban air ambient quality in Nanchong, China [J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2014, 41(15):163-164.
- [24] 邹超, 吴琳, 李笑语, 等. 南京市交通流与  $\text{NO}_2$ 、CO 时空分布特征关系研究 [J]. *环境科学学报*, 2017, 37(10):3894-3905.
- ZOU Chao, WU Lin, LI Xiaoyu, et al. Relationship between traffic flow and temporal and spatial variations of  $\text{NO}_2$  and CO in Nanjing [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, 37(10):3894-3905.
- [25] 郭宇宏, 王自发, 康宏, 等. 机动车尾气排放对城市空气质量的影响研究——以乌鲁木齐市春节前后对比分析 [J]. *环境科学学报*, 2014, 34(5):1109-1117.
- GUO Yuhong, WANG Zifa, KANG Hong, et al. Impact of automobile vehicles exhaust emissions on

- metropolitan air quality: analysis study on the air pollution change before and after the Spring Festival in Urumqi City, China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, 34(5):1109-1117.
- [26] SHARMILA A G, ILANGO T. A review on influence of age of vehicle and vehicle traffic on air pollution dispersion[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2022, 60: 1629-1632.
- [27] 济南市统计局, 国家统计局济南调查队. 2021年济南市国民经济和社会发展统计公报[EB/OL]. (2022-03-04) [2023-07-02]. [http://jntj.jinan.gov.cn/art/2022/3/4/art\\_57208\\_4745382.html](http://jntj.jinan.gov.cn/art/2022/3/4/art_57208_4745382.html).
- [28] 公安部交通管理科学研究所. 道路交通管理机动车类型:GA 802—2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
- [29] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2022:529.
- [30] 赵静琦, 姬亚芹, 李越洋, 等. 天津市道路车流量特征分析[J]. *环境科学研究*, 2019, 32(3):399-405.  
ZHAO Jingqi, JI Yaqin, LI Yueyang, et al. Distribution characteristics of traffic volume for typical roads in Tianjin City[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2019, 32(3):399-405.
- [31] DENG F Y, LÜ Z F, QI L J, et al. A big data approach to improving the vehicle emission inventory in China[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1):2801.
- [32] YANG D Y, ZHANG S J, NIU T L, et al. High-resolution mapping of vehicle emissions of atmospheric pollutants based on large-scale, real-world traffic datasets[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, 19(13):8831-8843.
- [33] 高婵娟, 赵敏超, 丁若男, 等. 2018年吉林市大气污染物浓度变化及其与气象因素的相关性分析[J]. *环境工程*, 2021, 39(5):71-79.  
GAO Chanjuan, ZHAO Qichao, DING Ruonan, et al. Variations of atmospheric pollutants concentrations and their correlation with meteorological factor in Jilin City in 2018[J]. *Environmental Engineering*, 2021, 39(5): 71-79.
- [34] ABELEIRA A J, FARMER D K. Summer ozone in the northern Front Range metropolitan area: weekend-weekday effects, temperature dependences, and the impact of drought[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, 17(11):6517-6529.
- [35] YANG J N, WEN Y F, WANG Y, et al. From COVID-19 to future electrification: assessing traffic impacts on air quality by a machine-learning model[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2021, 118(26):e2102705118.
- [36] XIA Y, JIANG L H, WANG L, et al. Rapid assessments of light-duty gasoline vehicle emissions using on-road remote sensing and machine learning[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 815:152771.
- [37] WANG T, XUE L K, BRIMBLECOMBE P, et al. Ozone pollution in China: a review of concentrations, meteorological influences, chemical precursors, and effects[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 575:1582-1596.
- [38] CHU B W, MA Q X, LIU J, et al. Air pollutant correlations in China: secondary air pollutant responses to NO<sub>x</sub> and SO<sub>2</sub> control[J]. *Environmental Science & Technology Letters*, 2020, 7(10):695-700.
- [39] LANG J L, LIANG X Y, LI S Y, et al. Understanding the impact of vehicular emissions on air pollution from the perspective of regional transport: a case study of the Beijing-Tianjin-Hebei region in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 785:147304.
- [40] HU M M, WANG Y F, WANG S, et al. Spatial-temporal heterogeneity of air pollution and its relationship with meteorological factors in the Pearl River Delta, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2021, 254:118415.
- [41] 赵秀玲. 中国城市典型空气污染物时空分布特征与影响因素研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2021.  
ZHAO Xiuling. Study on spatial and temporal distribution characteristics and influencing factors of typical air pollutants in Chinese cities [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2021.
- [42] 李英杰, 陈军辉, 韩丽, 等. 气象因素对成都中心城区近地面臭氧的影响[J]. *环境科学与技术*, 2020, 43(增刊2):7-15.  
LI Yingjie, CHEN Junhui, HAN Li, et al. Effects of meteorological factors on near-surface ozone in central Chengdu[J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 43(Suppl.2):7-15.
- [43] 岳岩裕, 王晓玲, 张蒙晰, 等. 武汉市空气质量状况与气象条件的关系[J]. *暴雨灾害*, 2016, 35(3): 271-278.  
YUE Yanyu, WANG Xiaoling, ZHANG Mengxi, et al. Air quality condition in Wuhan and its relationship to meteorological factors[J]. *Torrential Rain and Disasters*, 2016, 35(3):271-278.
- [44] BREIMAN L. Random forests[J]. *Machine Learning*, 2001, 45(1):5-32.
- [45] 夏晓圣, 陈菁菁, 王佳佳, 等. 基于随机森林模型的中国PM<sub>2.5</sub>浓度影响因素分析[J]. *环境科学*, 2020, 41(5):2057-2065.  
XIA Xiaosheng, CHEN Jingjing, WANG Jiajia, et al. PM<sub>2.5</sub> concentration influencing factors in China based on the random forest model[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(5):2057-2065.