

广州市黄埔大沙地NO₂污染特征分析及来源解析

张雪梅¹, 侯红霞², 张金文², 毕燕茹², 黄渤²

¹广州开发区环境监测站, 广东 广州

²广州禾信仪器股份有限公司, 广东 广州

Email: 442390436@qq.com

收稿日期: 2020年9月25日; 录用日期: 2020年10月19日; 发布日期: 2020年10月26日

摘要

于2020年1月1日~4月23日对广州市及黄埔区各站点NO₂进行分析, 结果表明黄埔大沙地站点NO₂污染较为严重。NO₂与PM_{2.5}源解析结果相关分析表明, 大沙地站点NO₂同时受到移动源和周边工业源的影响, 其中受到移动源的影响程度高于工业源。污染源分布表明, 站点NO₂一定程度受到周边大型钢铁及发电企业的影响。车流量和车型分析表明, NO₂污染高峰日受重型货车的影响较大。拥堵数据分析表明, 站点周边3公里左右分别在早7时、10时、18~19时出现拥堵高峰, 特别是18~19时拥堵次数和拥堵长度都较大, 拥堵后NO₂的质量浓度显著升高。此外, 以含钒颗粒物作为船舶排放示踪物, 发现黄埔大沙地NO₂的污染在特定时段会受到东南区域港口船舶尾气排放影响。因此, 黄埔大沙地站点NO₂受到了道路移动源、工业源、船舶排放的综合影响, 需进行综合性的污染防控。

关键词

NO₂来源, 移动源, 工业源, 拥堵分析, 船舶排放

Pollution Characteristics and Source Apportionment of NO₂ at Huangpu Dashadi of Guangzhou City

Xuemei Zhang¹, Hongxia Hou², Jinwen Zhang², Yanru Bi², Bo Huang²

¹Guangzhou Development District Environmental Monitoring Station, Guangzhou Guangdong

²Guangzhou Hexin Instrument Co., Ltd., Guangzhou Guangdong

Email: 442390436@qq.com

Received: Sep. 25th, 2020; accepted: Oct. 19th, 2020; published: Oct. 26th, 2020

Abstract

The NO₂ concentrations of major environmental air quality evaluation sites of Guangzhou City and Huangpu District were analyzed from January 1 to April 23, 2020. The results showed that the Dashadi site in Huangpu was highly affected by NO₂. Correlation analysis between NO₂ and PM_{2.5} sources showed that NO₂ in this site was affected by both mobile sources and industrial sources, in which the effect of mobile sources was higher. According to the distribution of pollution sources, NO₂ in this site was possibly affected by the steel and power generation companies around. Traffic flow and vehicle types analysis showed that heavy trucks emissions contributed a lot to the NO₂ pollution. Analysis of traffic congestion data within 3 kilometers around the site showed that, the congestion peaks appeared at 7:00, 10:00 and 18:00 - 19:00, respectively. At 18:00 - 19:00, high frequency and long length of congestion was recognized, resulting in high concentration of NO₂. Moreover, using V-containing particles as a tracer of ship emissions, it was found that NO₂ pollution in the Huangpu Sands was affected by ship emissions from ports in the southeast region during a certain period of time. Therefore, NO₂ at the Dashadi site is affected by mobile sources, industrial sources, and ship emissions, and comprehensive pollution prevention and control strategies are required.

Keywords

Sources of NO₂, Mobile Source, Industrial Source, Congestion Analysis, Ship Emissions

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

二氧化氮(NO₂)是大气对流层和平流层化学反应中的重要物种之一,对地球生态环境和人体健康都有着极其重要的影响[1] [2]。NO₂是形成硝酸型酸雨、酸雾以及光化学烟雾的主要污染物[3] [4],是大气PM_{2.5}中硝酸盐的前体物[5]。NO₂在平流层中会与臭氧发生催化反应,分解臭氧,破坏臭氧层[6]。过高浓度的NO₂会损害人类呼吸系统,引起肺气肿和支气管炎等疾病[7]。因此NO₂浓度及其在大气中的化学过程受到了广泛关注。在2012年环境保护部修订并发布的《环境空气质量标准》(GB3095-2012)中,NO₂已经被列为大气污染物总量控制指标。

大气中NO₂来自化石燃料高温燃烧、生物质高温燃烧、汽车尾气排放等人为源排放的NO_x(NO和NO₂)[8] [9] [10]。NO和NO₂在O₃和自由基的作用下可以互相转化[11]。NO₂自然源主要来自大气闪电氧化、微生物硝酸盐分解和生物质自然燃烧等过程[12] [13] [14]。由于环境中燃烧源无处不在,NO₂的停留时间相对较短,其浓度具有区域性、季节性分布特征。卫星遥感监测结果表明,20世纪九十年代中期到2011年以前,中国对流层NO₂高浓度区域主要集中在东部地区,且呈现明显的逐年增长的趋势[15] [16]。2011年~2013年,东部地区NO₂浓度表现为下降;2005年~2013年中国NO₂浓度高值区主要分布在华北、长江三角洲、珠江三角洲及四川盆地等人口密集、人类活动频繁的大型城市地区[17]。中国NO₂浓度存在很明显的季节性变化特征,可能与各地区NO₂排放源差异和气象条件有关[16] [17] [18]。长春市2000~2010年NO₂的长期监测数据分析显示,NO₂排放源主要为工业生产和热力供应过程中的燃料燃烧和机动车尾气排放[19]。2017年王国强等通过典型的城市交通干线附近二氧化氮的监测、量化分析,得

出城市二氧化氮污染与机动车尾气的相关性较高[20]。卫星遥感监测弥补了传统 NO_2 地面监测方法空间覆盖度低、人为干扰大等缺陷, 为大尺度空间、长时序时间的监测提供了可行性。但卫星遥感监测所获取的数据准确性和可信度都没有地面临监测高。

广州市是广东省政治、经济和文化中心, 是拥有数百万人口的国际化城市, 是中国目前 NO_2 浓度不达标的许多城市之一(GB 3095-2012) (生态环境部 2012)。黄宇琳等[21]研究表明, 2013~2016 年广州、佛山、珠海 NO_2 日均浓度分别为 46.4、48.4 和 33.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 对居民死亡人数有影响, 应引起重视。大气污染源排放清单结果表明, 广州、深圳、东莞、佛山是广东省 NO_x 的主要排放城市[22]。广州市黄埔区, 位于广州市东部, 东至东江与东莞市麻涌镇相望; 东北部与增城区新塘镇接壤, 南部临珠江与番禺区相邻; 西部与天河区、白云区相连, 北部与从化区毗邻。广州市黄埔区 2015~2017 年 NO_2 浓度年均值变化幅度不大, NO_x 年均值逐年上升, 黄埔区 NO_x 超标集中于冬季; $\text{NO}-\text{NO}_2-\text{NO}_x$ 浓度日变化为双峰曲线与上下班高峰时间一致, 可能是主要受机动车尾气排放影响[23]。

为推动广州市空气质量达标进程, 广州市人民政府还于 2017 年制定了广州市环境空气质量达标计划(2016~2025 年)。本研究针对可能影响广州市黄埔区 NO_2 污染的主要因素(工业污染、道路移动源、船舶)进行统计分析。

2. 研究方法

2.1. 采样点位与采样时间

监测点位于广州市黄埔区第八十六中学(N: 23°06'11.29", E: 113°26'18.35"), 简称黄埔大沙地, 周边工业较多, 离中国石化广州分公司直线距离约为 3 km; 道路密集, 且周边分布有大量物流公司, 大货车较多; 黄埔大沙地南面为珠江航道, 分布有较大量港口码头、物流公司等, 包括黄埔港、广浚黄埔码头、嘉利码头、洪圣沙轮渡码头等众多码头(如图 1)。采样时间为 2020 年 1 月 1 日~4 月 23 日。



Figure 1. Distribution Map of pollution sources around Huangpu Dashadi site

图 1. 黄埔大沙地站点周边污染源分布图

2.2. 监测仪器

美国 Thermo Fisher Scientific 公司生产的 42i 型化学发光 NO-NO₂-NO_x 分析仪；广州禾信仪器股份有限公司生产的单颗粒气溶胶质谱仪(SPAMS0515)。

2.3. 数据分析方法

NO₂ 质量浓度值由广州市国控点位的 NO-NO₂-NO_x 分析仪直接测得；颗粒物来源及含钒颗粒物随时间变化由单颗粒气溶胶质谱仪直接测得，SPAMS0515 由进样系统、测径系统、电离系统和质谱分析系统组成，气溶胶经由 PM_{2.5} 切割头进入进样系统，通过空气动力学透镜引入颗粒物至真空系统，再将聚焦颗粒物送至中轴线，在测径系统里测定单颗粒粒径，随后精确触发 266 nm 激光电离颗粒物，在电离系统里单颗粒中的各种正负离子成分同时电离，最后进入飞行时间质谱分析系统同时检查正负离子，将测得的颗粒质谱图与系统内污染源谱库进行对比，统计各种来源颗粒的数量，即得到相关的源解析数据。最终将黄埔大沙地点位的细颗粒物分为餐饮、扬尘、生物质燃烧、移动源、燃煤、工业工艺、二次无机源以及其它 8 大来源；机动车拥堵信息由高德地图上获取。

3. 结果与讨论

3.1. 污染情况概述

2020 年 1~4 月，黄埔大沙地点位 NO₂ 的浓度为 48.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，在广州市 11 个国控点中浓度最高。相比 2019 年同期，黄埔大沙地站点下降了 7.9%，在 11 个国控点中降幅排名倒数第三。图 2，从黄埔区 6 个点位来看，1~4 月份黄埔大沙地点 NO₂ 的浓度是最高的，比黄埔镇龙点位高出 76%，说明黄埔大沙地点位 NO₂ 的污染相对来说较为严重。

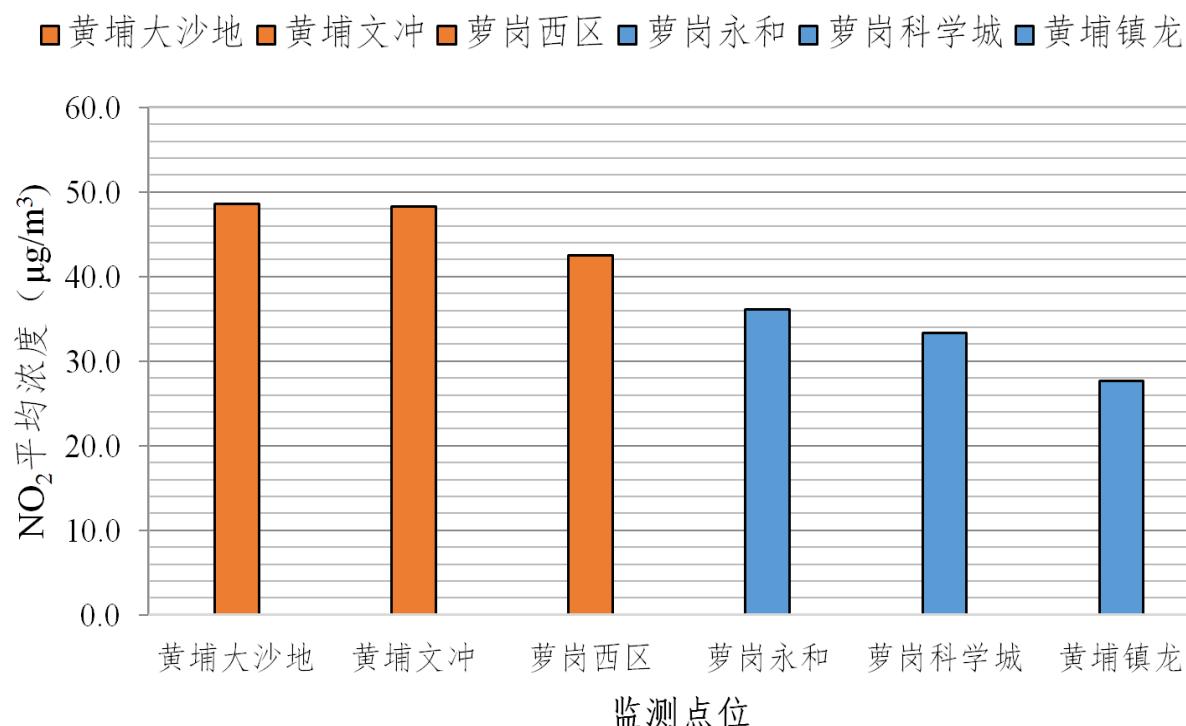


Figure 2. Overview of NO₂ concentrations at stations in Huangpu District (January-April)
图 2. 黄埔区各站点 NO₂ 浓度概况(1~4 月)

3.2. 污染来源初步分析

3.2.1. NO_2 工作日与非工作日规律分析

对监测期间 NO_2 监测数据按照工作日(周一至周五)、非工作日(周六至周日)进行分析。如图 3 所示, 黄埔大沙地学站点工作日时段的 NO_2 浓度值为 $51 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 比非工作日时段高出 18.6%。进一步对工作日时段、非工作日时段的 NO_2 浓度值小时变化规律进行分析(图 4 所示), 由图可见, 黄埔大沙地学站点 NO_2

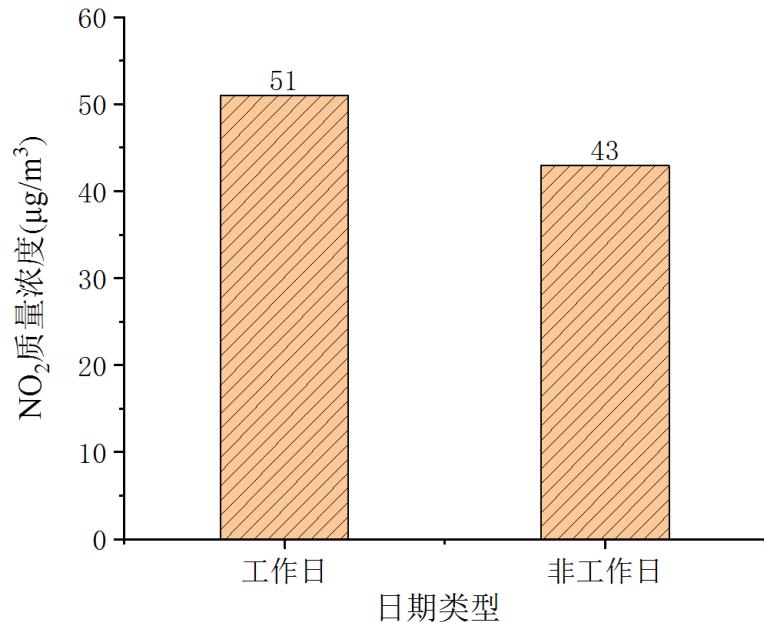


Figure 3. Daily average of NO_2 concentration in working day and non-working day

图 3. 工作日时段、非工作日时段 NO_2 浓度日均值

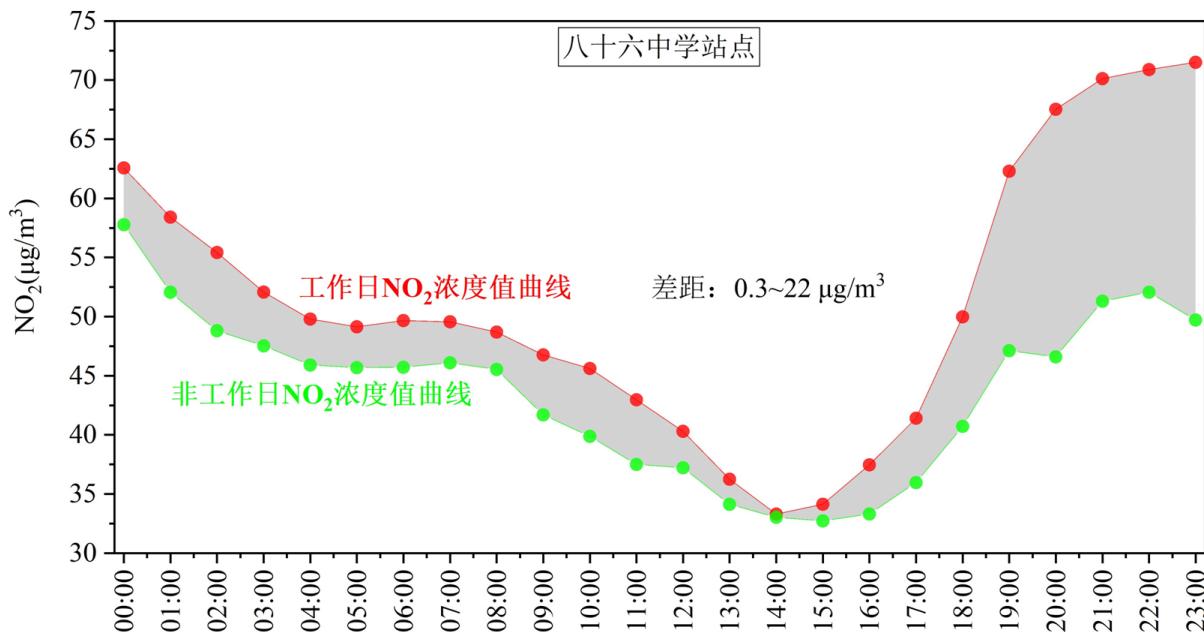


Figure 4. Variation characteristics of NO_2 hourly values in different periods at Huangpu Dashadi site

图 4. 黄埔大沙地站点不同时段 NO_2 小时值变化特征

浓度值在各个小时时段均高于非工作日时段，尤其在晚上 19 时后差距显著增大，在 23 时 NO_2 浓度差值高达 $22 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，工作日比非工作日高出近一倍，说明 NO_2 受工作日时段和非工作日时段的影响非常显著。部分工业企业由于生产需要会实施不同的轮换上班制度来保证周末正常生产作业，受工作日与非工作日的影响有限，受工作日时段和非工作日时段的影响最大是道路移动源。根据大气污染源排放清单方法，计算出道路移动源时间分配系数，道路移动源工作日时段和非工作日时段时间系数差距为 0.047，非工作日时段比工作日时段低 30% 左右，与黄埔大沙地 NO_2 的变化规律较为符合。

3.2.2. 基于颗粒物来源辅助判定 NO_2 来源

站点布设的 $\text{PM}_{2.5}$ 在线源解析设备，能够判别 $\text{PM}_{2.5}$ 的主要一次来源，而往往污染源的污染物排放，会涉及多污染参数，其中就包括了 $\text{PM}_{2.5}$ 和 NO_2 ，因此，基于不同来源的颗粒物与 NO_2 的相关性分析，能够为 NO_2 的来源提供一定指向。图 5 为 NO_2 浓度值大于 $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 及小于等于 $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 对应的污染源分布结果，从图中可以看出，不同 NO_2 浓度的颗粒物首要污染源均为移动源，次要污染物都是工业工艺源。表 1 为黄埔大沙地各污染源与 NO_2 浓度相关系数，从表 1 中可以看出大沙地站点 NO_2 与多数污染源呈正相关，其中扬尘、移动源、工业工艺源等污染源颗粒数与 NO_2 浓度相关系数稍高，分别为 0.44、0.27 和 0.24，可见大沙地站点 NO_2 同时受到移动源和工业源的影响，其中受到移动源的影响程度高于工业源。

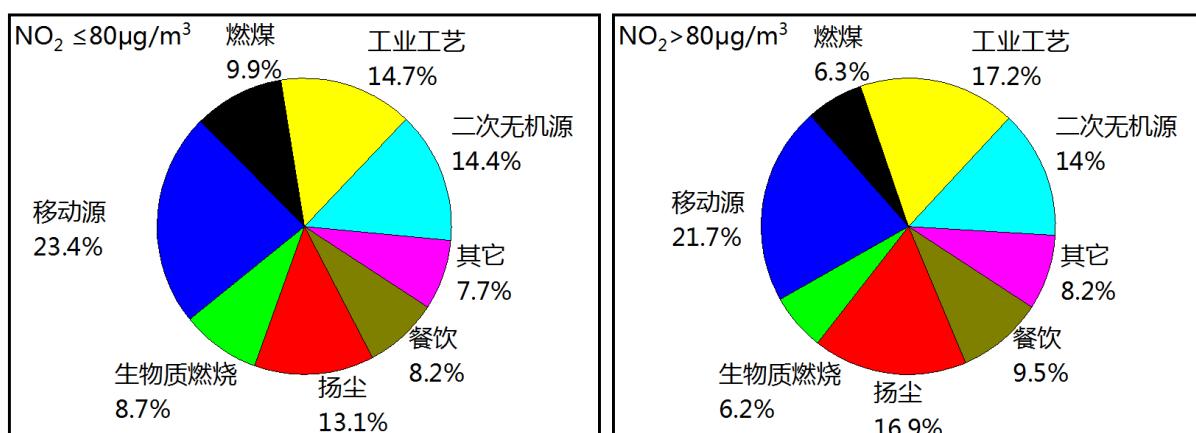


Figure 5. Distribution of pollution sources corresponding to different NO_2 concentrations at Huangpu Dashadi site
图 5. 黄埔大沙地不同 NO_2 浓度对应的污染源分布

Table 1. The Correlation Coefficient R of pollution sources and NO_2 concentrations at Huangpu Dashadi site

表 1. 黄埔大沙地各污染源与 NO_2 浓度相关系数 R

颗粒物来源类别	餐饮	扬尘	生物质燃烧	机动车尾气	燃煤	工业工艺	二次无机源	其它
颗粒数相关系数	0.18	0.44	-0.13	0.27	-0.11	0.24	0.22	0.16
占比相关系数	0.01	0.17	-0.38	0.12	-0.33	0.12	-0.05	-0.02

3.3. 工业源分析

黄埔区南部三站点(大沙地、文冲、萝岗西区) NO_2 浓度整体较高(图 2)，结合图 6 的 NO_2 排放量数据分析，该片区 NO_2 大型排放企业分布较多，广石化、鞍钢联众、粤华发电、恒运发电、恒运企业均在此区域，最大 NO_2 年排放量达 652~1345 吨，说明该片区域的 NO_2 高值一定程度受到大型企业排放的影响。

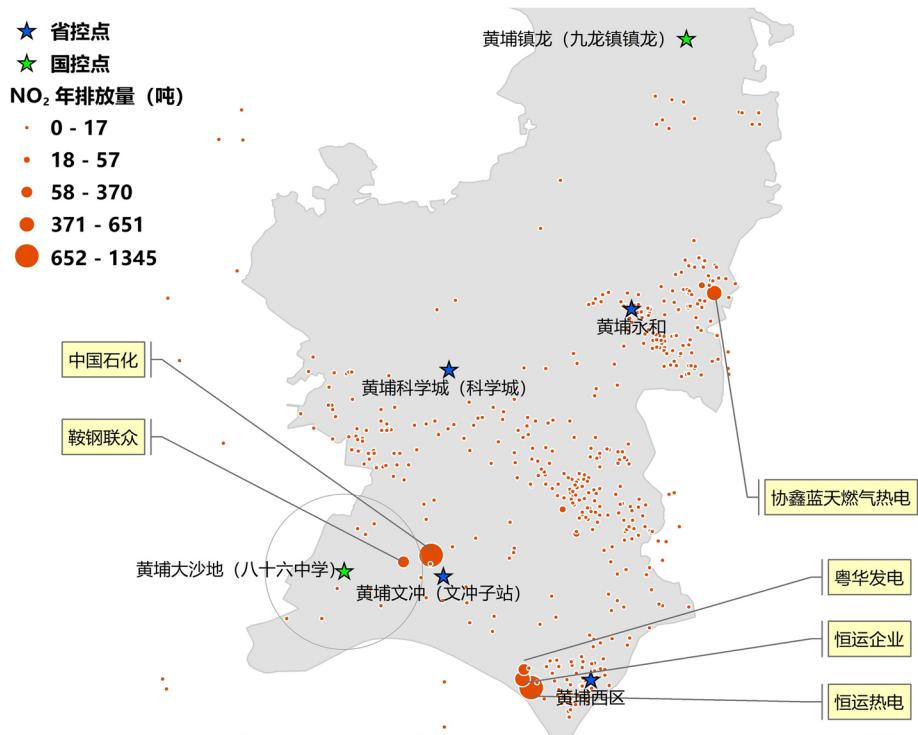


Figure 6. Distribution of NO₂ emission and distribution of NO₂ major discharge enterprises in Huangpu District

图 6. 黄埔区 NO₂ 年排放量分布及 NO₂ 重点排放企业分布

3.4. 移动源分析

3.4.1. 道路移动源对 NO₂ 影响分析

1) 车流量分析

统计 4 月 1~16 日的黄埔大沙地附近的主干道黄埔东路的车流量及车型信息，分别作出图 7 和图 8。由图 7 可见 4 月 8~9 日和 14 日均出现车流量峰值，车流量变化与黄埔大沙地站点测点的 NO₂ 浓度变化基本吻合。从图 8 可见 4 月 8~9 日和 14~15 日 NO₂ 浓度高峰时段，重型货车出行比例较高，说明重型货车对 NO₂ 的贡献相对较高。

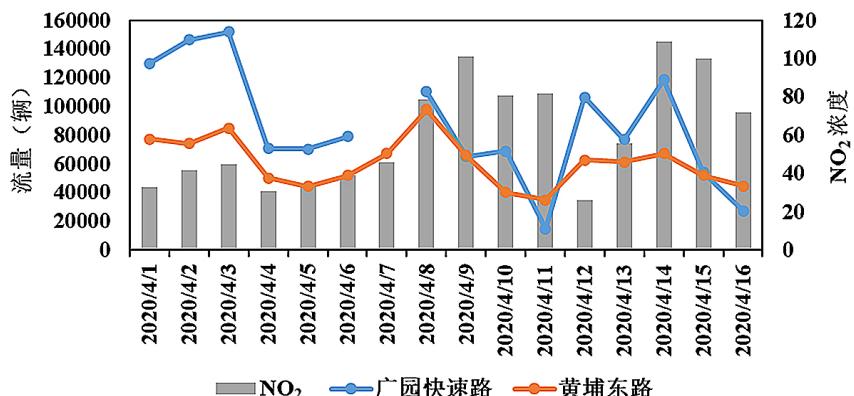


Figure 7. Daily variation of vehicle flow and NO₂ concentrations at Huangpu Dashadi site during pollution period

图 7. 污染期间车流量与黄埔大沙地 NO₂ 浓度日变化

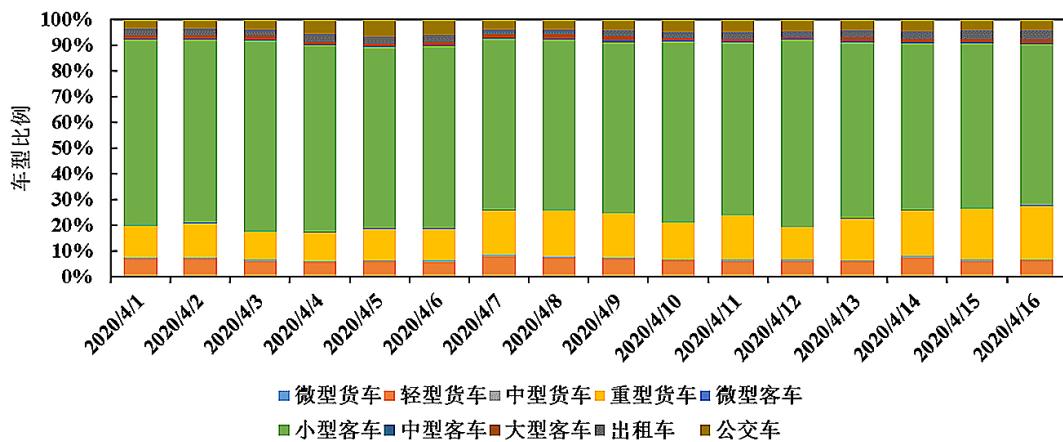


Figure 8. Daily variation of vehicle type structure on Huangpu East road during monitoring period
图 8. 监测期间黄埔东路车型结构日变化

2) 道路拥堵精细化分析

从高德地图上获取黄埔区 4 月 22 日 24 小时道路路况大数据, 每隔 30 分钟获取一次, 共获取 48 个时刻的路况拥堵信息。

a) 拥堵时间规律

图 9 和图 10 为黄埔大沙地站点周边 3 公里拥堵特征与 NO_2 的 24 h 统计规律。由图中可知, 站点周边拥堵呈多峰分布, 分别在早 7 时、10 时、18~19 时出峰。其中, 早 10 时和 18~19 时分别为早晚高峰峰值, 拥堵程度又以晚高峰为甚。下午 18 时起的晚出行高峰, 对 NO_2 有显著的拉升作用。

b) 拥堵空间分布

图 11 和图 12 为黄埔大沙地站点周边 3 公里范围内拥堵路段及拥堵信息。由图中可知, 黄埔大沙地站点周边多条道路拥堵严重, 尤其是站点 1 公里范围内, 点位西北的茅岗路和城门大街, 东北的珠江北路、大沙东路、港湾西四街, 东南的蟹山路均严重拥堵, 拥堵长度基本超过 3 公里, 珠江北路、港湾西四街拥堵长度甚至长达 6 公里, 说明黄埔大沙地占比 NO_2 质量浓度的升高严重受到了周边车辆的影响。

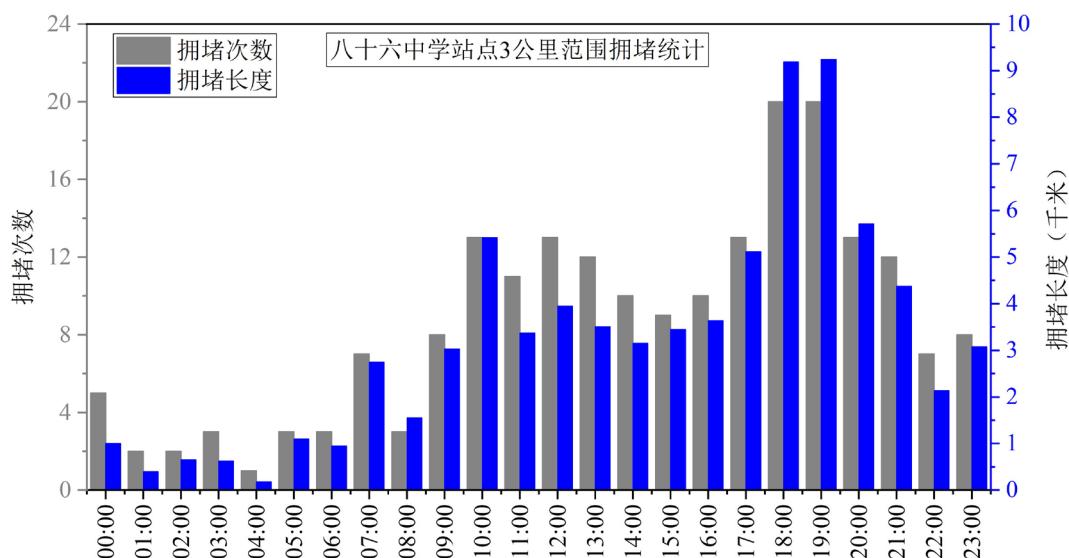


Figure 9. Statistics of congestion frequency and length in 3 km area of Huangpu Dashadi site
图 9. 黄埔大沙地站点 3 公里范围拥堵次数和拥堵长度统计

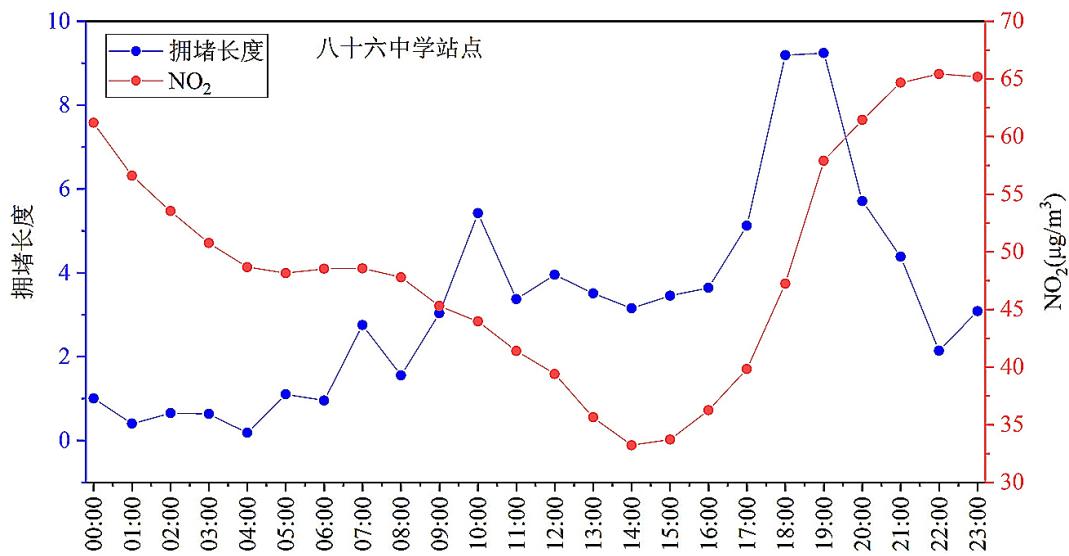
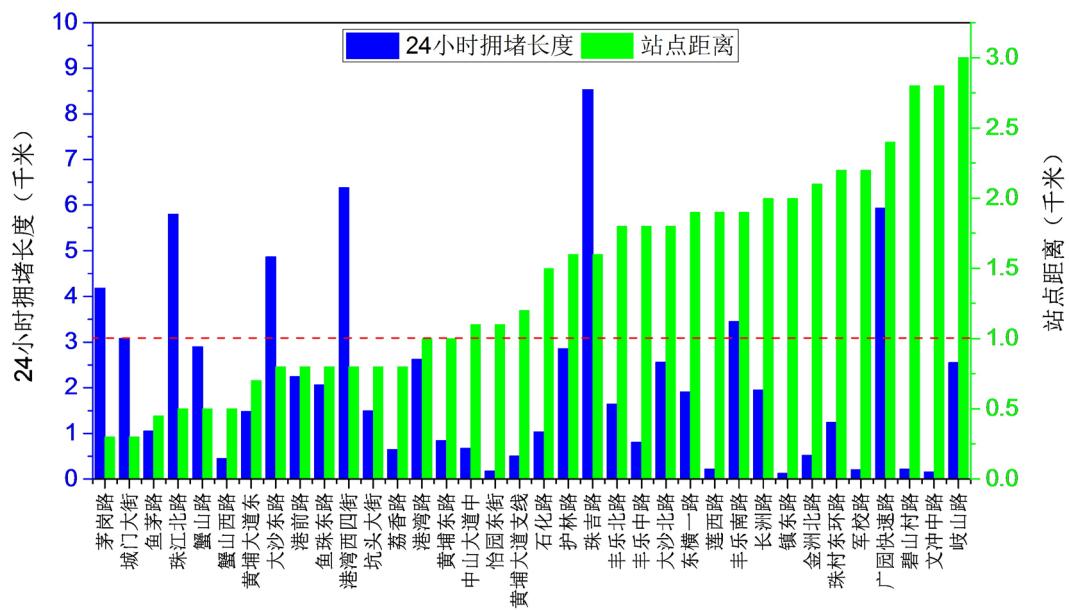
Figure 10. 24 h variation of NO_2 and length of 3 km traffic jam around Huangpu Dashadi site图 10. 黄埔大沙地站点周边 3 公里拥堵长度与 NO_2 的 24 h 变化规律

Figure 11. Congestion information within 3 km around Huangpu Dashadi site

图 11. 黄埔大沙地站点周边 3 公里范围内拥堵信息

3.4.2. 船舶源对 NO_2 影响分析

黄埔大沙地南面为珠江航道，分布有较大量港口码头、物流公司等。以含钒(V)颗粒作为船舶源排放的示踪离子进行分析，数据显示(图 13)，V 颗粒在部分时段与 NO_2 浓度同步出现高值(3月 10~13 日、3月 21~28 日、4月 9~12 日)，结合风速风向来看(图 14)，含 V 颗粒主要来自监测点偏东南面区域，与港口码头方向一致，说明这些时段内站点空气质量一定程度受到了来自码头的船舶尾气排放影响。但在 4 月 14~17 日 NO_2 浓度高值时段，含 V 颗粒数浓度及占比无明显增长。可见，船舶排放对特定情况下会影响站点，4 月 9~12 日的 NO_2 污染受到了船舶的影响，但 14~17 日的污染则与港口码头关联不大。

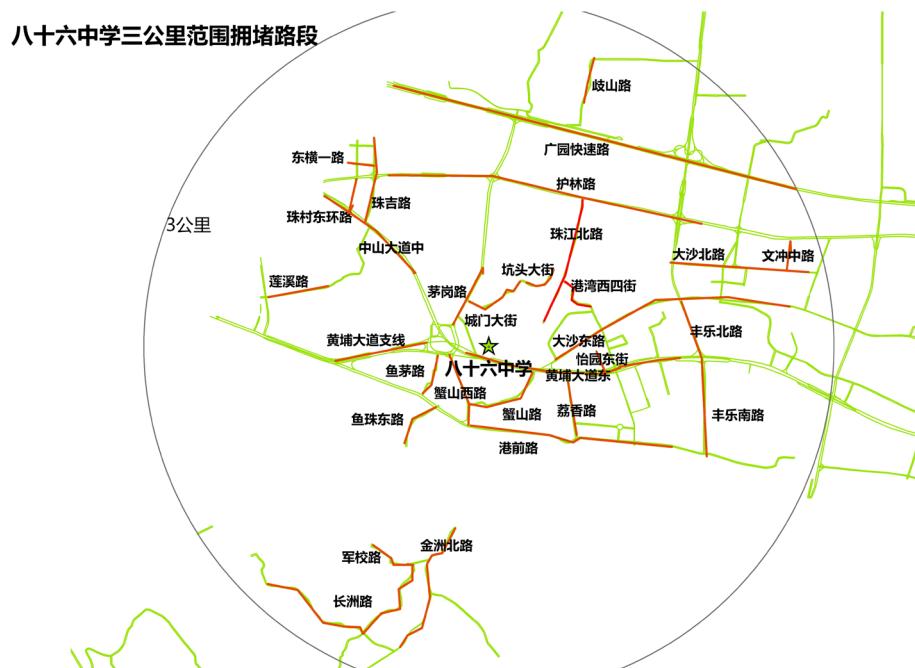


Figure 12. Congested road sections within 3 km around Huangpu Dashadi site
 图 12. 黄埔大沙地站点周边 3 公里范围内拥堵路段

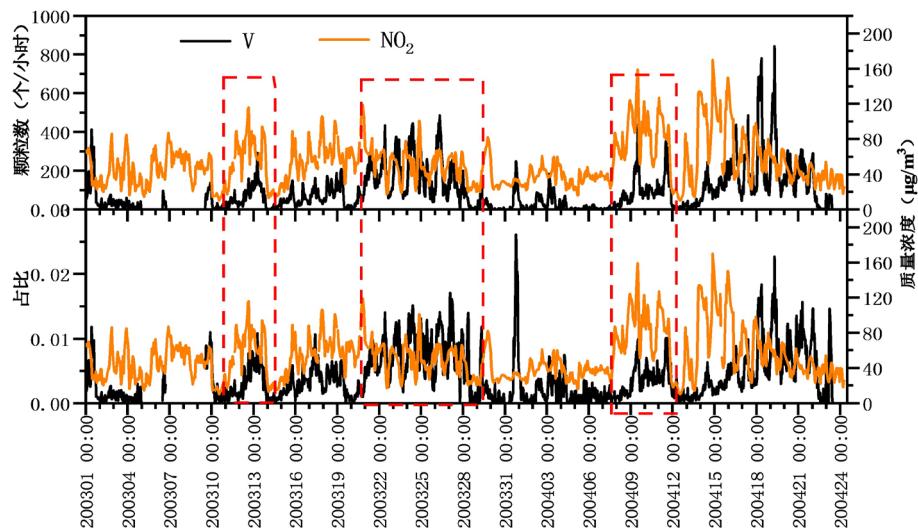


Figure 13. Variation trend of concentration of V-containing particles and NO₂ in Huangpu Dashadi site from January to April
 图 13. 黄埔大沙地站点 1~4 月含 V 颗粒与 NO₂ 质量浓度变化趋势

4. 结论

- 1) 2020 年 1~4 月, 黄埔大沙地站点 NO₂ 的浓度在广州 11 个国控点中浓度最高, 且相比 2019 年同期, 在 11 个国控点中降幅排名倒数第三, NO₂ 的污染较为严重。
- 2) 黄埔大沙地站点 NO₂ 主要受到移动源和工业源的影响, 其中受到移动源的影响程度高于工业源。
- 3) 道路车流量及拥堵分析表明: 黄埔大沙地周边车流量的变化与黄埔大沙地站点 NO₂ 的浓度变化基本吻合, 周边 3 公里左右分别在早 7 时、10 时、18~19 时出现拥堵高峰, 特别是 18~19 时拥堵次数和拥

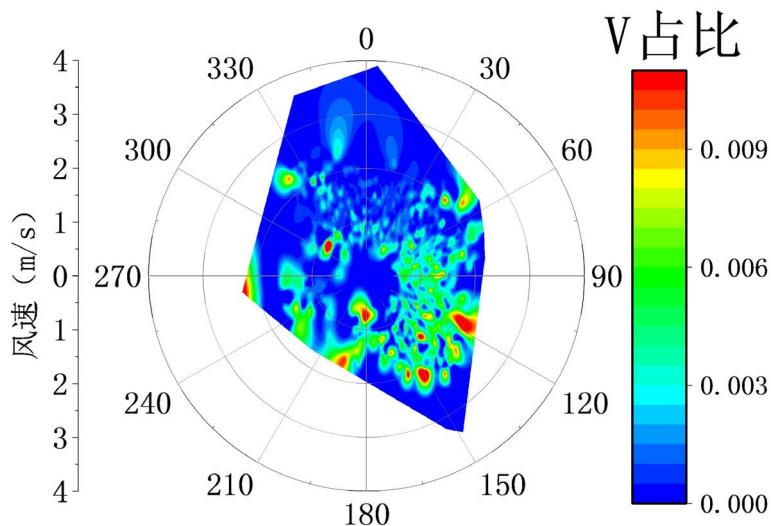


Figure 14. 3-d Map of V-bearing particles in the wind direction of Huangpu Dashadi site during January to April

图 14. 黄埔大沙地 1~4 月含 V 颗粒占比风速风向三维图

堵长度都较大，拥堵后 NO_2 的质量浓度显著升高，且重型货车对 NO_2 的贡献相对较大。从空间分布上来看，2020 年 1~2 月黄埔大沙地点位的 NO_2 主要受点位北部的影响，3、4 月份主要受点位周边尤其是西北、西南方向道路移动源的影响。

4) 通过对含钒颗粒物的分析，黄埔大沙地 NO_2 的污染一定程度受到了东南区域港口船舶尾气排放影响。

基金项目

本研究受到以下项目资助：广州市科技计划项目珠江科技新星专题(201806010064)；“广东特支计划”科技创新青年拔尖人才项目(2019TQ05L169)。

参考文献

- [1] 张彦军, 牛铮, 王力, 常超一. 基于 OMI 卫星数据的城市对流层 NO_2 变化趋势研究[J]. 地理与理信息科学, 2008, 24(3): 96-99.
- [2] 郑晓霞, 李令军, 赵文吉, 等. 京津冀地区大气 NO_2 污染特征研究[J]. 生态环境学报, 2014, 23(12): 1938-1945.
- [3] 咸龙. 基于 OMI 卫星数据中国西部二氧化氮时空分布及影响因素分析[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 西北师范大学, 2019.
- [4] 王跃启, 江洪, 张秀英, 等. 基于 OMI 卫星遥感数据的中国对流层 NO_2 时空分布[J]. 环境科学研究, 2009, 22(8): 932-937.
- [5] 梁丹, 王彬, 王云琦, 等. 重庆市冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 及气态污染物的分布特征与来源[J]. 环境科学研究, 2015, 28(7): 1039-1046.
- [6] 辛名威. 基于 OMI 遥感数据的河北省大气 NO_2 垂直柱浓度时空变化研究[D]: [硕士学位论文]. 石家庄: 河北师范大学, 2013.
- [7] 秦瑜, 赵春生. 大气化学基础[M]. 北京: 气象出版社, 2003.
- [8] Fu, M., Liu, H., Jin, X. and He, K. (2017) National-To Port-Level Inventories of Shipping Emissions in China. *Environmental Research Letters*, 12, Article ID: 114024. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa897a>
- [9] Liu, F., Beirle, S., Zhang, Q., van der, A.R.J., Zheng, B., Tong, D. and He, K. (2017) NO_x Emission Trends over Chinese Cities Estimated from OMI Observations during 2005 to 2015. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17, 9261-9275. <https://doi.org/10.5194/acp-17-9261-2017>

-
- [10] Ding, J., van der, A.R.J., Mijling, B., Jalkanen, J.-P., Johansson, L. and Levelt, P.F. (2018) Maritime NO_x Emissions over Chinese Seas Derived from Satellite Observations. *Geophysical Research Letters*, **45**, 2031-2037. <https://doi.org/10.1002/2017GL076788>
 - [11] Gurung, A., Levy, J.I. and Bell, M.L. (2017) Modeling the Intraurban Variation in Nitrogen Dioxide in Urban Areas in Kathmandu Valley. *Nepal Environmental Research*, **155**, 42-48. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.01.038>
 - [12] 江文华, 马建中, 颜鹏. 利用 GOME 卫星资料分析北京大气 NO₂ 污染变化[J]. 应用气象学报, 2006, 17(1): 67-72.
 - [13] Lin, J.T. (2012) Satellite Constraint for Emissions of Nitrogen Oxides from Anthropogenic, Lightning and Soil Sources over East China on a High-Resolution Grid. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **12**, 2881-2898.
 - [14] 费蕾蕾. 闪电活动对近地面大气中氮氧化物、臭氧及颗粒物的影响[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国科学院大学, 2017.
 - [15] Wang, T., Wei, X.L., Ding, A.J., et al. (2009) Increasing Surface Ozone Concentrations in the Background Atmosphere of Southern China, 1994-2007. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **9**, 6217-6227. <https://doi.org/10.5194/acp-9-6217-2009>
 - [16] Huang, J.P., Zhou, C.H., Lee, X., et al. (2013) The Effects of Rapid Urbanization on the Levels in Tropospheric Nitrogen Dioxide and Ozone over East China. *Atmospheric Environment*, **77**, 558-567.
 - [17] 高晋徽, 朱彬, 王言哲, 康汉青. 2005-2013 年中国地区对流层二氧化氮分布及变化趋势[J]. 中国环境科学, 2015, 35(8): 2307-2318.
 - [18] 张兴赢, 张鹏, 张艳, 等. 近 10a 中国对流层 NO₂ 的变化趋势、时空分布特征及其来源解析[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2007, 37(10): 1409-1416.
 - [19] 房春生, 温卓, 杨楠, 等. 长春市大气中 SO₂ 与 NO₂ 长期污染特征及防治对策分析[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(10): 1671-1815.
 - [20] 王国强, 黄国栋, 王波. 城市交通干线附近二氧化氮污染研究[J]. 资源节约与环保, 2018(11): 98-100.
 - [21] 黄宇琳, 蔡小双, 梁自勉, 等. 广东省 3 个城市大气污染物二氧化氮对居民的死亡效应研究[J]. 华南预防医学, 2019, 4(45): 101-106.
 - [22] 潘月云, 李楠, 郑君瑜, 等. 广东省人为源大气污染物排放清单及特征研究[J]. 环境科学学报, 2015, 35(9): 2655-2669.
 - [23] 钟漂斯. 广州市黄埔区臭氧污染特征研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 广州大学, 2018.