

文章编号: 1671-6612 (2022) 02-182-07

地下空间空气质量及外环境因素影响分析研究

邱泽正¹ 庞丽萍² 杨晨媛²

(1. 武汉第二船舶设计研究所 武汉 430064;

2. 北京航空航天大学航空科学与工程学院 北京 100191)

【摘要】 随着使用地铁出行的乘客越来越多, 封闭式环境下的地铁内部的空气质量受到越来越多人的关注。为了解地铁站台空气质量环境, 以及影响其空气质量环境的主要因素。采用 CPR-KA 空气质量检测仪, 对北京 6 个地铁站台的空气质量进行了现场测试调研, 包括 PM₁₀、PM_{2.5}、NH₃、CH₂O、CO、NO₂、SO₂、TVOCs 等 8 种气体。结果表明, 地铁站台内的空气质量较好, 其主要污染物气体 (PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂ 和 CO) 受到客流量, 大气环境以及列车频率的影响。

【关键词】 地铁; 空气质量; 大气环境; 相关性分析

中图分类号 X823 文献标识码 A

Analysis and Research on Influencing Factors of Underground Space Air Quality and External Environment

Qiu Zezheng¹ Pang Liping² Yang Chenyuan²

(1. Wuhan 2nd Ship Design and Research Institute, Wuhan, 430064;

2. School of Aeronautical Science and engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing, 100191)

【Abstract】 As more and more passengers use subway to travel, more and more people pay attention to the air quality environment of subway platform. In order to receive the air quality environment of subway platform and the main factors. The CPR-KA air quality detector was used to test the air quality of six subway stations in Beijing, including PM₁₀ PM_{2.5}, NH₃, CH₂O, CO, NO₂, SO₂, TVOCs and other eight kinds of air. The results show that the air quality in subway stations is good. The main pollutants (PM_{2.5}, PM₁₀, SO₂ and CO) are affected by passenger flow, atmospheric environment and train frequency.

【Keywords】 Subway; Air quality; Atmospheric environment; Correlation analysis

作者简介: 邱泽正 (1985.4-), 男, 博士, 高级工程师, 从事环控生保研究工作, E-mail: 364149086@qq.com

通讯作者: 庞丽萍 (1973.4-), 女, 教授, E-mail: pangliping@buaa.edu.cn

收稿日期: 2021-09-06

0 引言

地面空间运行的地铁作为人们日常出行时, 最常用的一种交通工具, 在缓解地面交通压力方面, 扮演了重要角色。乘客每天要在地铁中花费 0.3-3 小时, 但是地铁内部环境相对封闭, 通风不畅, 容易污染物聚集^[1]。这些污染性气体对人体都会产生一定的损害。因此, 了解地铁站内部的空气质量变得非常有必要。

查询大量参考文献, 对于地铁内部空气质量的研究比较片面, 对于地铁内部整体环境的评估也较

少。并且只是针对地铁中的气体环境进行了单一的评价^{[2],[3]}。王刚等^[4]通过评估地铁车厢内的 CO₂ 和颗粒物浓度, 分析了乘客密度对于地铁空气质量的影响。左甜甜^[5]虽然评估的污染物参较多 (CO 浓度、CO₂ 浓度、甲醛浓度、TVOC 浓度、颗粒物浓度、氨浓度), 但是对于地铁内部的空气质量没有进行整体概括分析。

而我们本次测试, 不仅测试 6 个地铁站台内部了 8 种气体, 而且对于地铁内部整体空气质量进行了评价。相比较以往的研究, 本文更加全面的描述

地铁内部环境。

1 方法

1.1 测试站点基本信息

本次研究从 2019.5.30 至 2019.6.21 的夏季开始进行。对 6 个地铁站台内的 8 种气体 (PM₁₀、PM_{2.5}、NH₃、CH₂O、CO、NO₂、SO₂、TVOCs) 进行陆续的实际测试。气体环境因素的测试周期为早 8:00 至晚 22:00, 每隔两分钟测量一次。列车频率以及人流量是由地铁公司提供得来的, 每 30min 测试一次。

每个地铁站的测试地点都在在站台中间, 距离地面 1.2 米。测试站点具体信息如表 1 所示, 其中 2019.6.15 为周六、2019.6.16 为周日, 其余时间为工作日。由于大多数公司周六也要工作, 因此周六为半工作日。在夏季, 地铁站内部的空调通风系统处于运行状态。六个地铁站内部的空调通风系统皆采用“一次回风系统”, 即 1/2 回风与 1/2 新风混合后, 进入地铁内部。

表 1 测试站点基本信息

Table 1 Essential information of subway

车站	测试时间	车站类型
S1	2019.5.30	普通站, 全屏蔽
S2	2019.6.13	普通站, 半屏蔽
S3	2019.6.20	普通站, 全屏蔽
S4	2019.6.21	普通站, 全屏蔽
S5	2019.6.14-6.15	换乘站, 全屏蔽

表 3 所示。

表 3 各环境参数期间的最大允许浓度

Table 3 Maximum allowable concentration of environmental parameters

气体种类	CO	CH ₂ O	TVOCs	SO ₂	NH ₃	NO ₂	PM ₁₀	PM _{2.5}
最大允许值	10mg/m ³	0.12mg/m ³	0.6mg/m ³	0.5mg/m ³	0.2mg/m ³	0.24mg/m ³	0.25mg/m ³	75μg/m ³

除此之外, 本文采用 SPSS Statistics 23.0 软件 (IBM, United States) 分析了 PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂ 和 CO 浓度与客流量、室外气体、列车频率等的相关性, 所有统计检验均使用 0.05 置信度。

2 结果和讨论

2.1 地下空间质量测试分析

由图 1 可得:

S6 2019.6.16-6.17 普通站, 全屏蔽

自动记录了各自站台的客流量数据和列车频率 (每隔半小时统计一次)。并从 <http://beijingair.sinaapp.com/> 获得各站点的室外气体环境 (PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂、CO)。

1.2 测试设备和精度

本次研究使用 CPR-KA 空气质量监测器对全屏蔽地铁站台内气体环境进行实际测试, 测量仪器设备的具体特点以及环境参数的测量范围和精度如表 2 所示。

表 2 各环境参数的测量范围及精度

Table 2 Measuring range and accuracy of each environmental parameter

环境参数	监测范围	监测精度
NH ₃	0~30ppm	0.001ppm
TVOCs	0~10ppm	0.001ppm
CO	0~50ppm	0.001ppm
CH ₂ O	0~10ppm	0.001ppm
NO ₂	0~2ppm	0.0001ppm
SO ₂	0~2ppm	0.0001ppm
PM ₁₀	0~0.5mg/m ³	0.001mg/m ³
PM _{2.5}	0~0.5mg/m ³	0.001mg/m ³

1.3 分析方法

本项研究依据标准[6]-Error! Reference source not found., 给定各气体的最大浓度允许值, 如

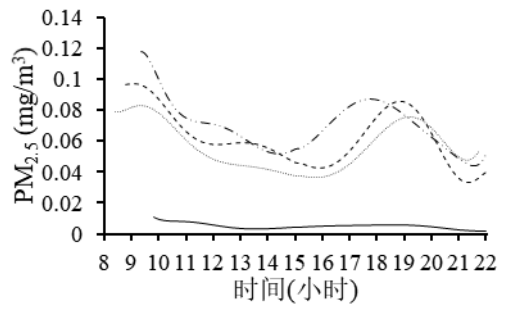
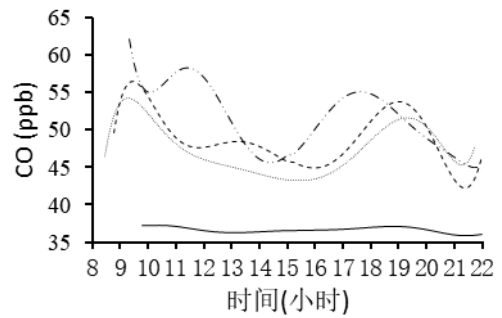
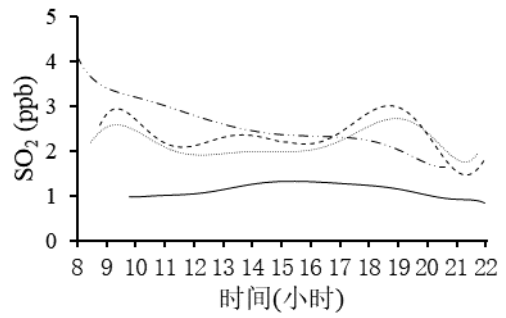
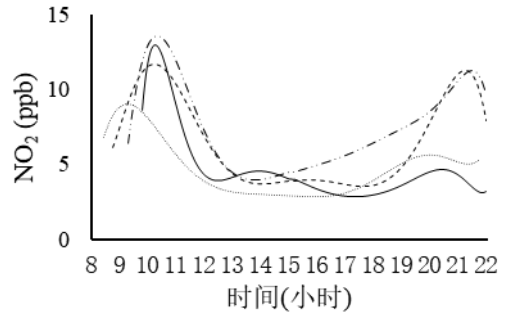
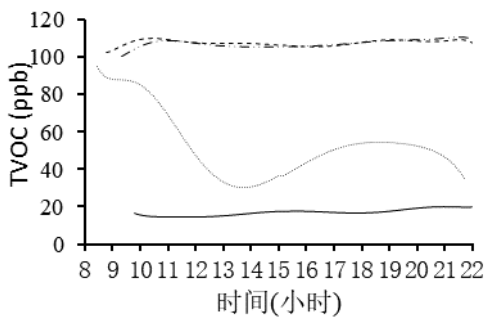
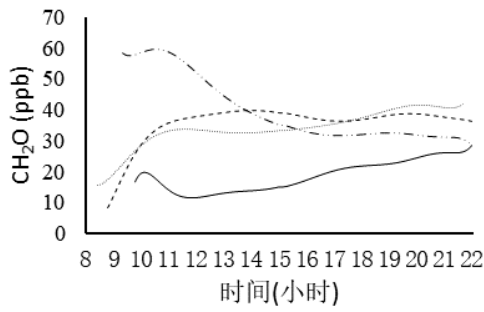
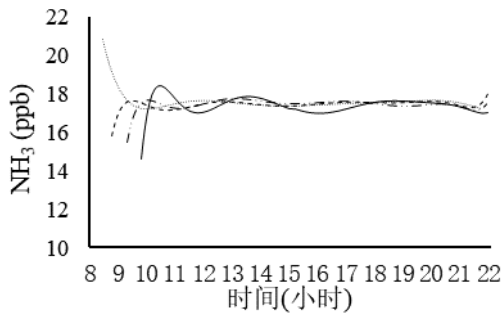
(1) S1-S4 地铁站的列车频率和客流量随时间都有一定的变化。在测试时间段内, 列车频率和客流量的高峰都在 8:00-9:00 和 18:00-19:00。四个地铁站的列车频率和客流量各不相同。

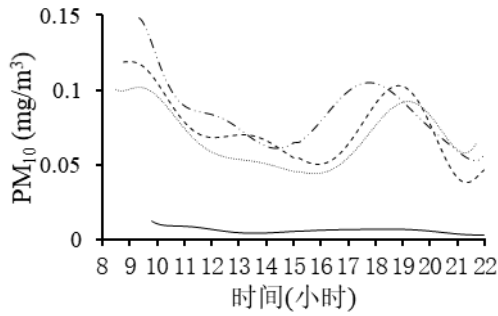
(2) S5 与 S6 站台客流量和列车频率高峰在 8:00-9:00 和 18:00-19:00。S5-2 与 S6-2 客流量想接近。S5 与 S6 站台的列车频率在工作日和周六日相同, 且工作日列车频率高于周六日。

在本次现场调查研究中, 一共测试了六个车站, 每

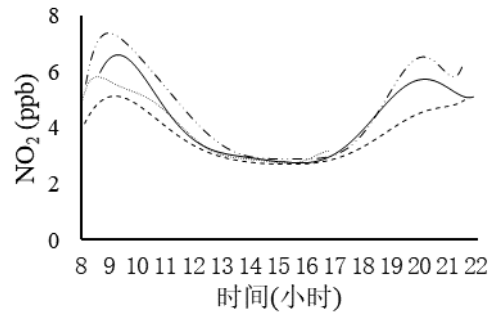
个车站测试了 8 种气体 (PM₁₀、PM_{2.5}、NH₃、CH₂O、CO、NO₂、SO₂、TVOCs)，为了解每种气体的来源及影响因素，S1-S4 站为工作日，

—— S1 - - - S2 ····· S3 - · - S4



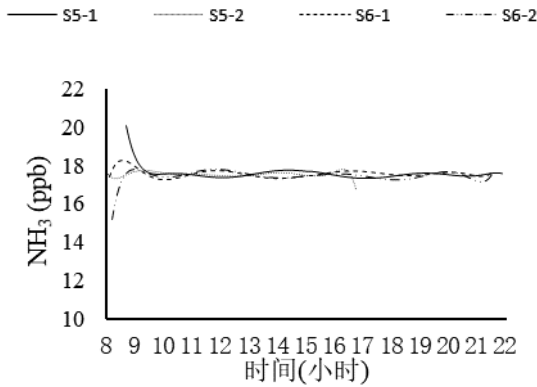


(h) PM₁₀

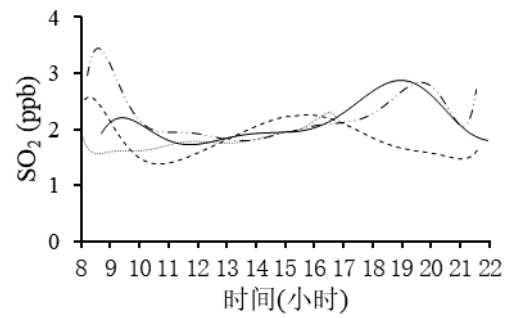


(d) NO₂

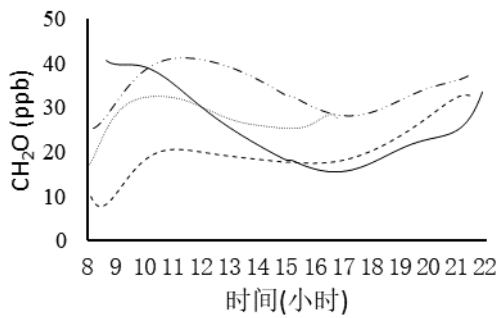
图 2 为在工作日期间不同站台之间的气体对比图; S5-1、S6-2 为工作日, S5-1 为周六, S6-2 为周日,



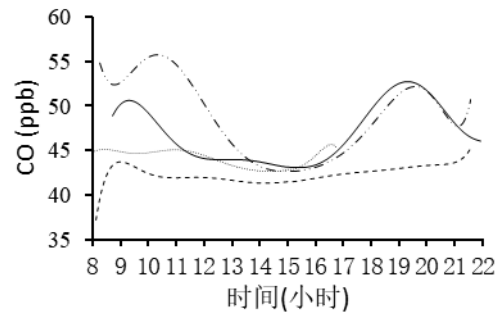
(a) NH₃



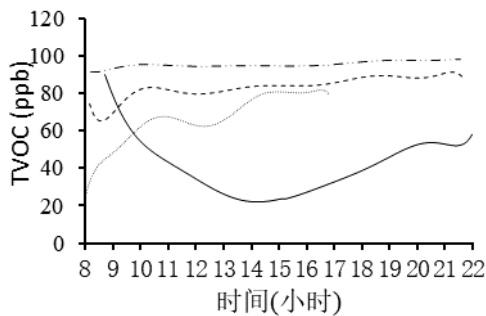
(e) SO₂



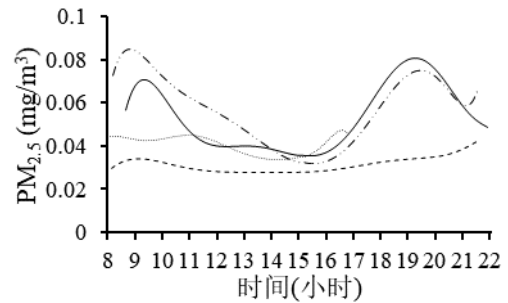
(b) CH₂O



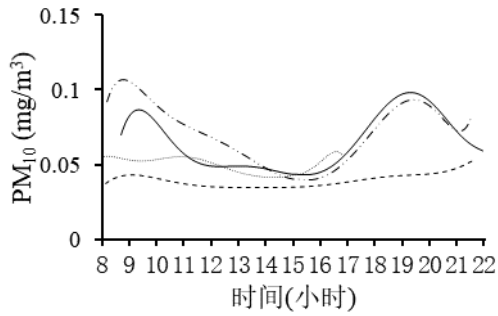
(f) CO



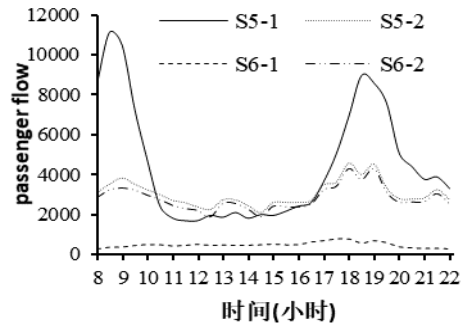
(c) TVOCs



(g) PM_{2.5}



(h) PM₁₀

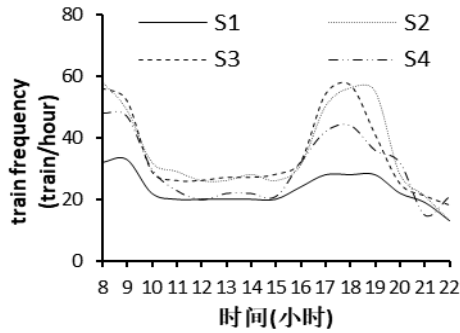


(b) 客流量

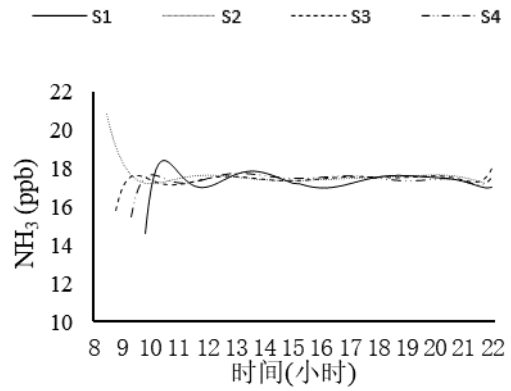
图3 为在工作日与周六周日站台气体浓度对比图。

图1 地铁列车频率和客流量

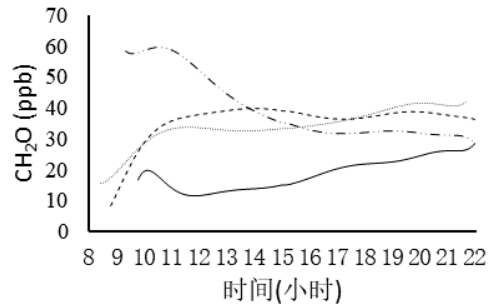
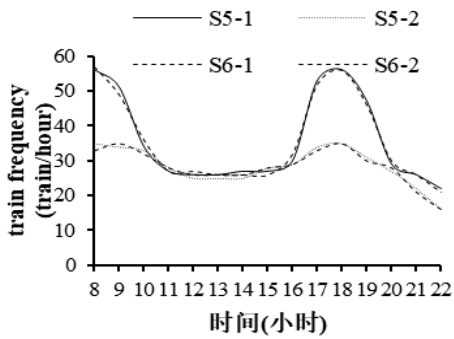
Fig.1 Frequency and passenger flow of subway trains



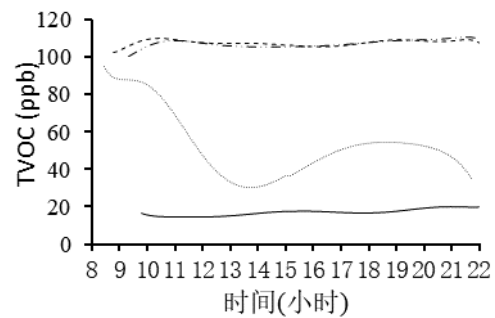
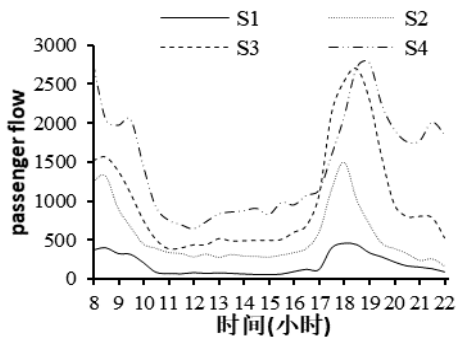
(a) 列车频率



(a) NH₃



(b) CH₂O



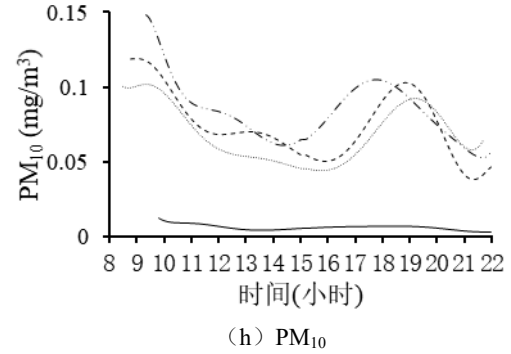
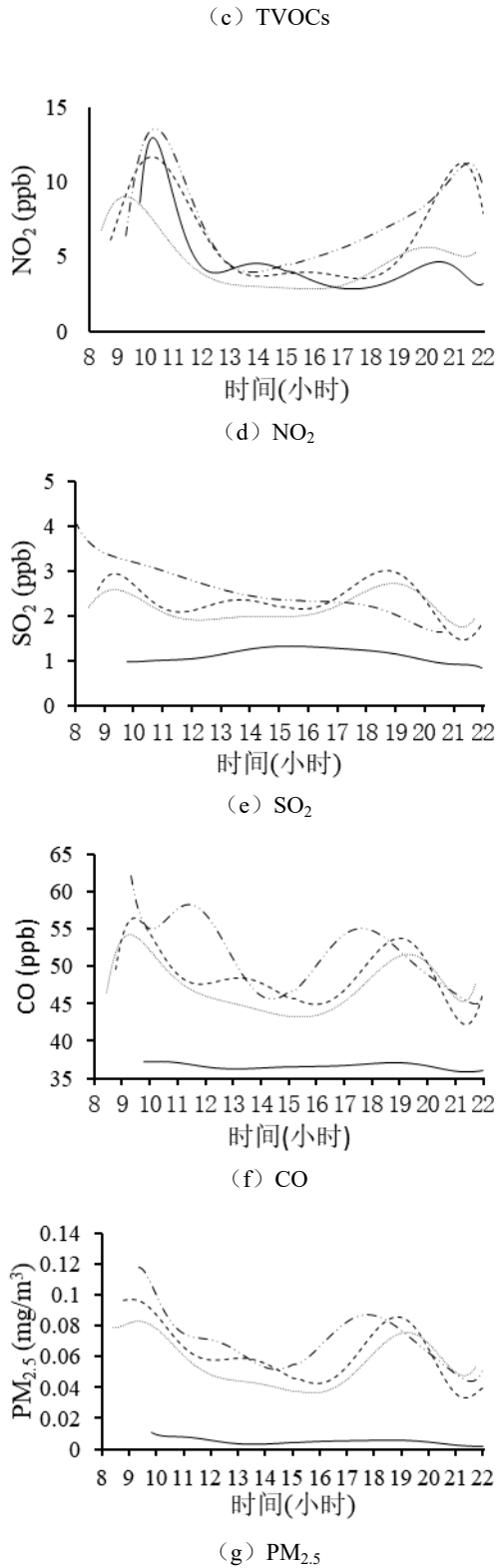
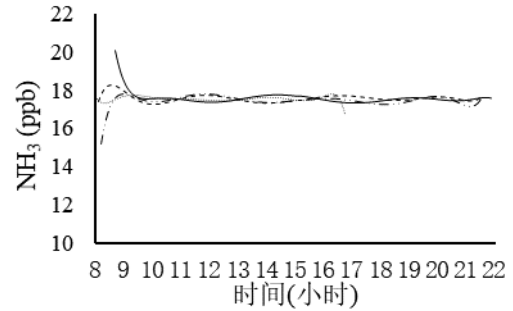


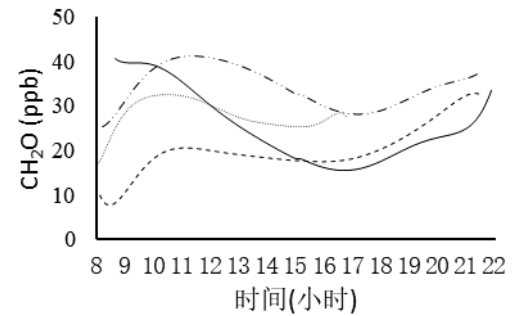
图 2 工作日期间 S1、S2、S3 和 S4 地铁站台地铁环境参数 (PM₁₀、PM_{2.5}、NH₃、CH₂O、CO、NO₂、SO₂、TVOCs)

Fig.2 Environmental parameters (PM₁₀、PM_{2.5}、NH₃、CH₂O、CO、NO₂、SO₂、TVOCs) of subway platforms S1, S2, S3 and S4 during weekdays

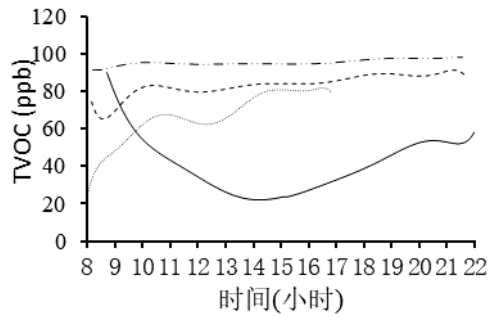
— S1-1 - - - S1-2 ····· S2-1 - · - S2-2



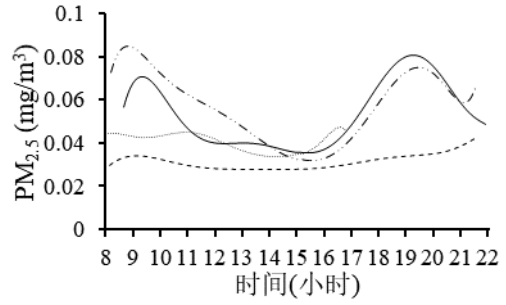
(a) NH₃



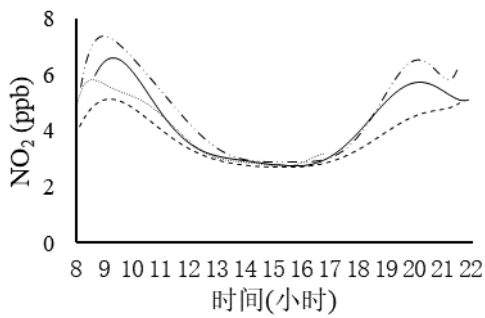
(b) CH₂O



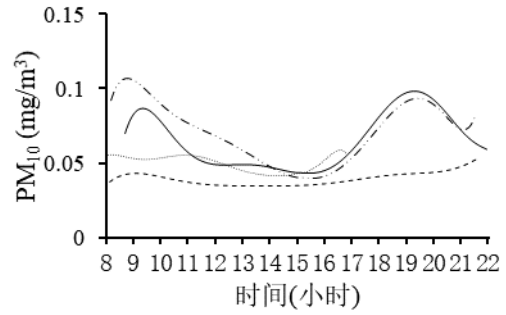
(c) TVOCs



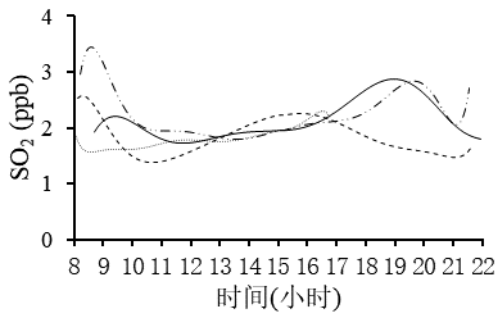
(g) PM_{2.5}



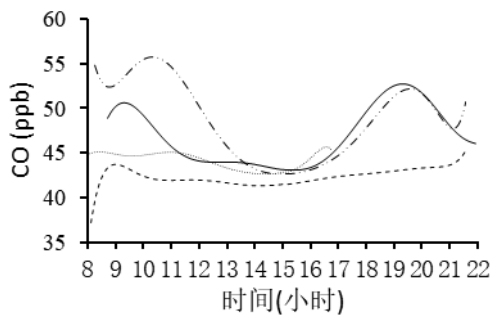
(d) NO₂



(h) PM₁₀



(e) SO₂

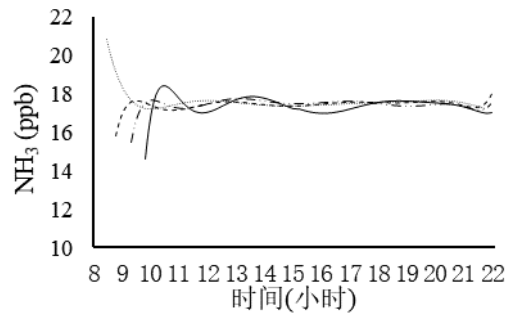


(f) CO

图3 在工作日、周六日期间S5和S6地铁站台环境参数 (PM₁₀、PM_{2.5}、O₂、NH₃、CH₂O、CO、CO₂、NO₂、SO₂、TVOCs)

Fig.3 Environmental parameters (PM₁₀、PM_{2.5}、O₂、NH₃、CH₂O、CO、CO₂、NO₂、SO₂、TVOCs) of S5 and S6 subway platform during weekdays and weekends

从 — S1 ··· S2 - - - S3 - · - S4



(a) NH₃

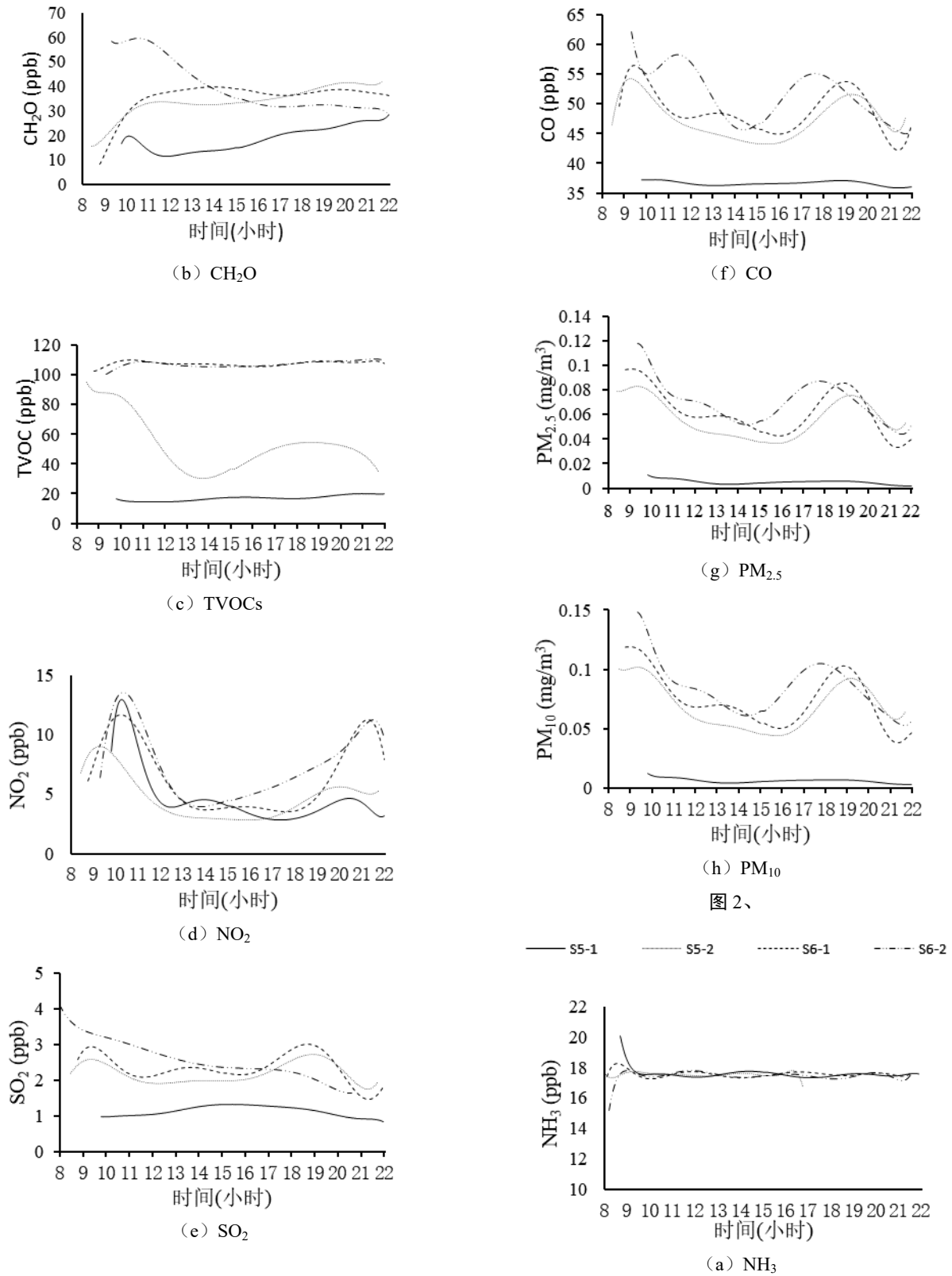
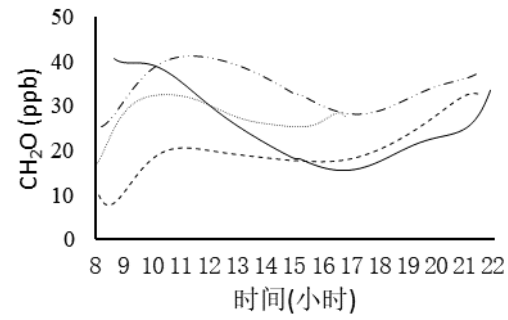
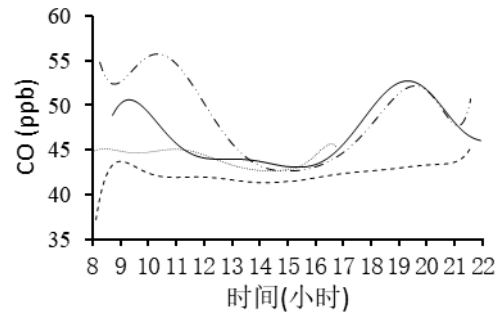


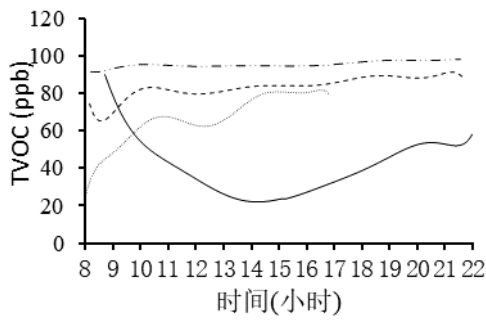
图 2、



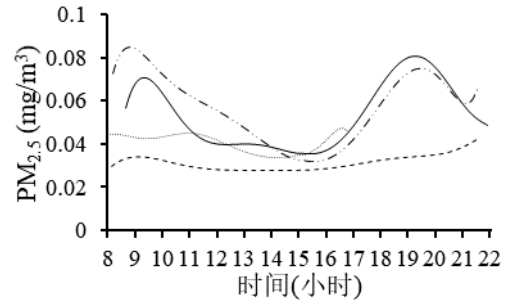
(b) CH₂O



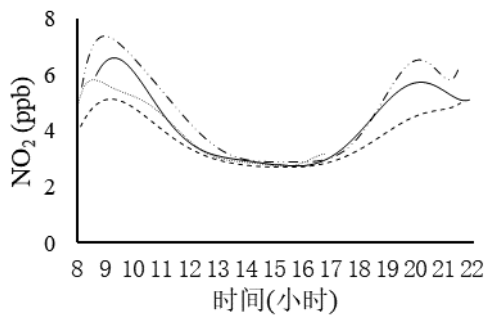
(f) CO



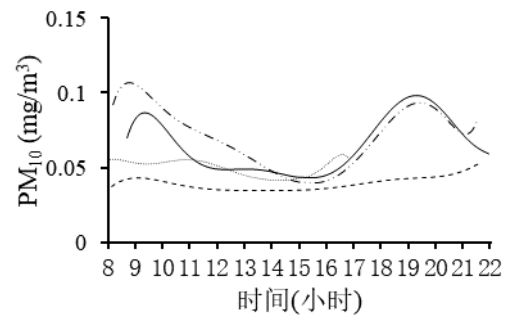
(c) TVOCs



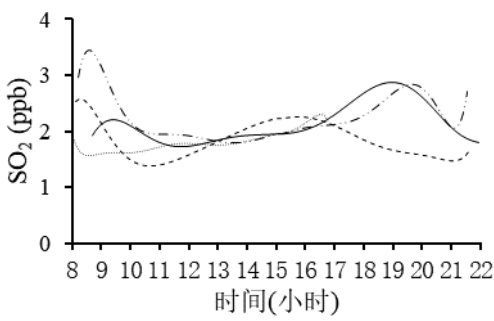
(g) PM_{2.5}



(d) NO₂



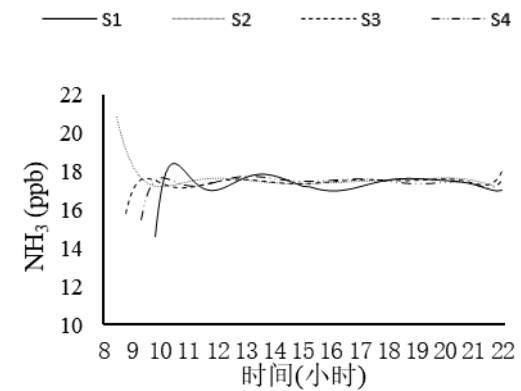
(h) PM₁₀



(e) SO₂

图 3 可得出如下结论:

- (1) 由于地铁内部有卫生间, 导致地铁内有一定的 NH₃ 影响乘客身体健康。



(a) NH₃

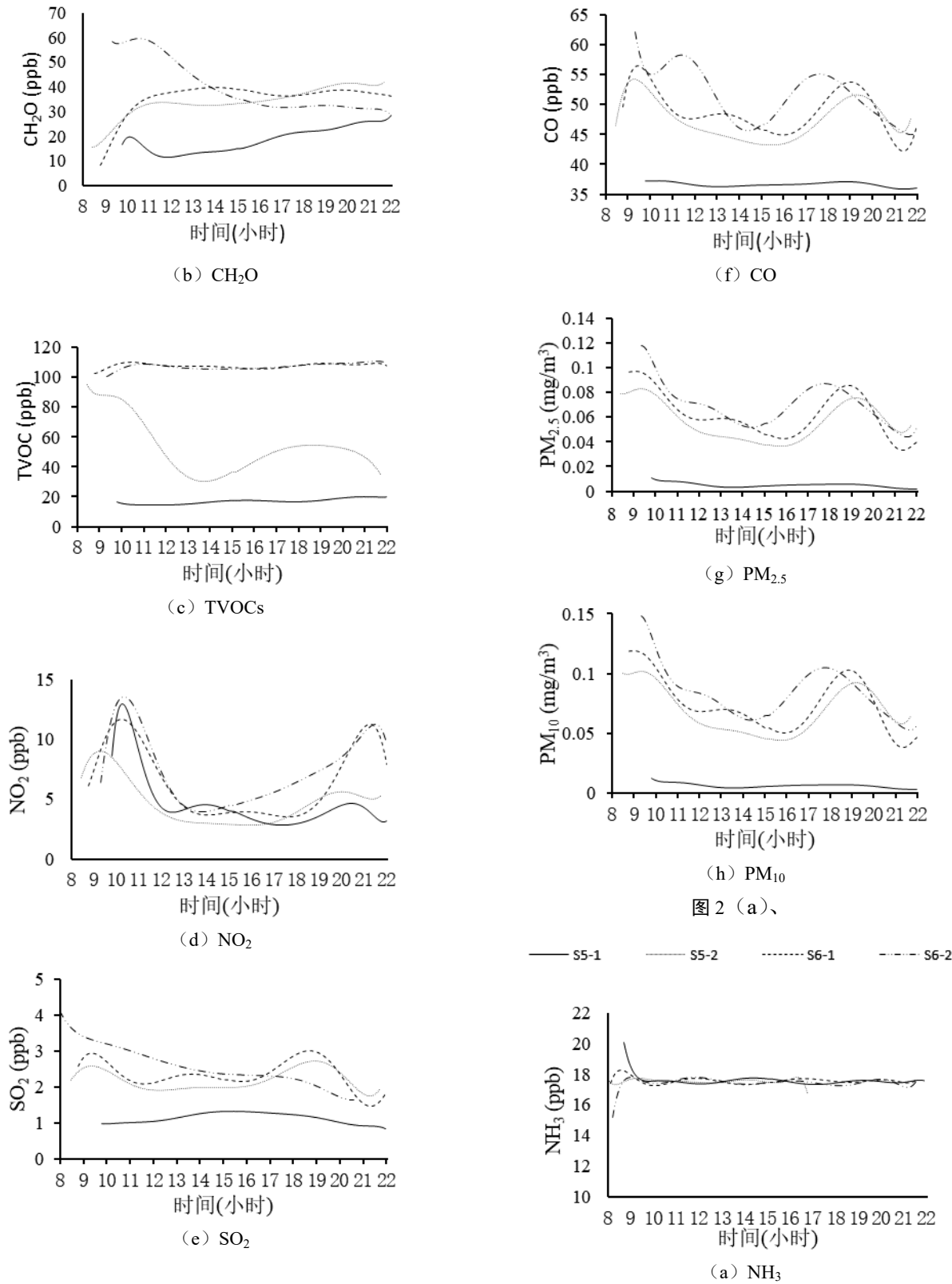
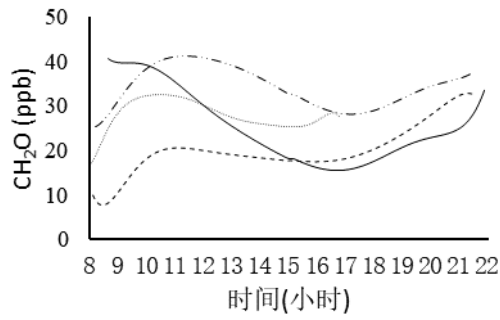
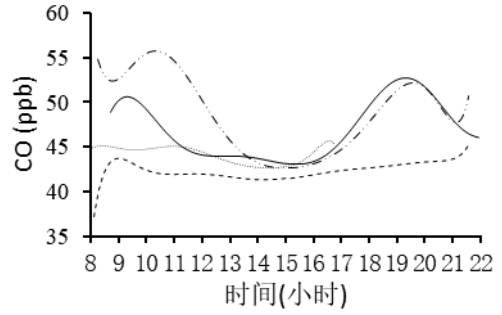


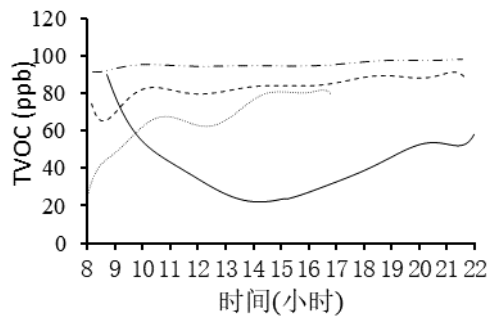
图 2 (a)、



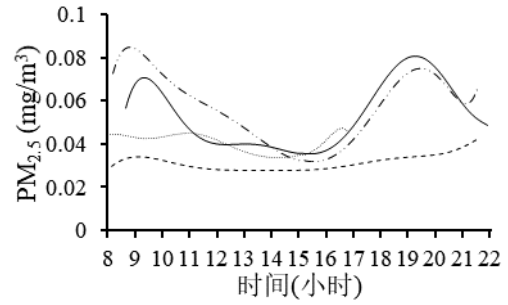
(b) CH₂O



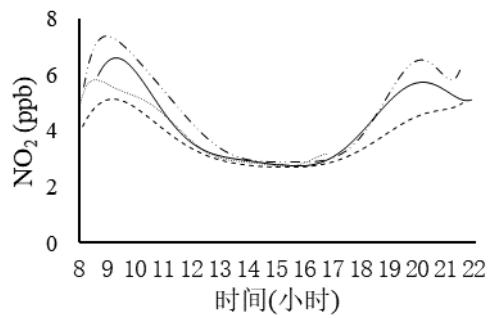
(f) CO



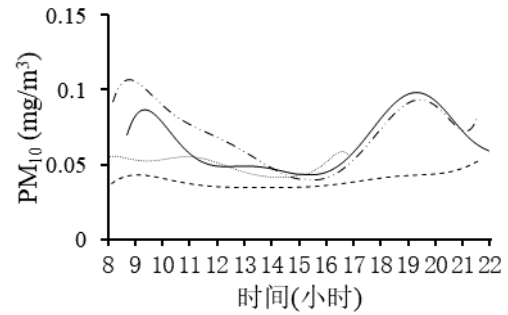
(c) TVOCs



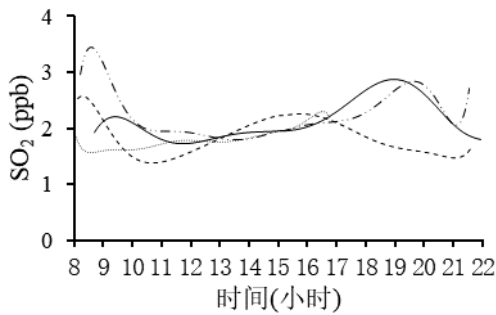
(g) PM_{2.5}



(d) NO₂



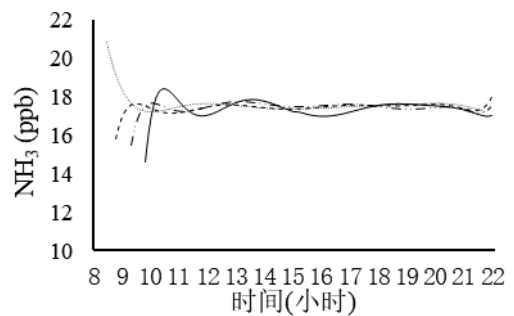
(h) PM₁₀



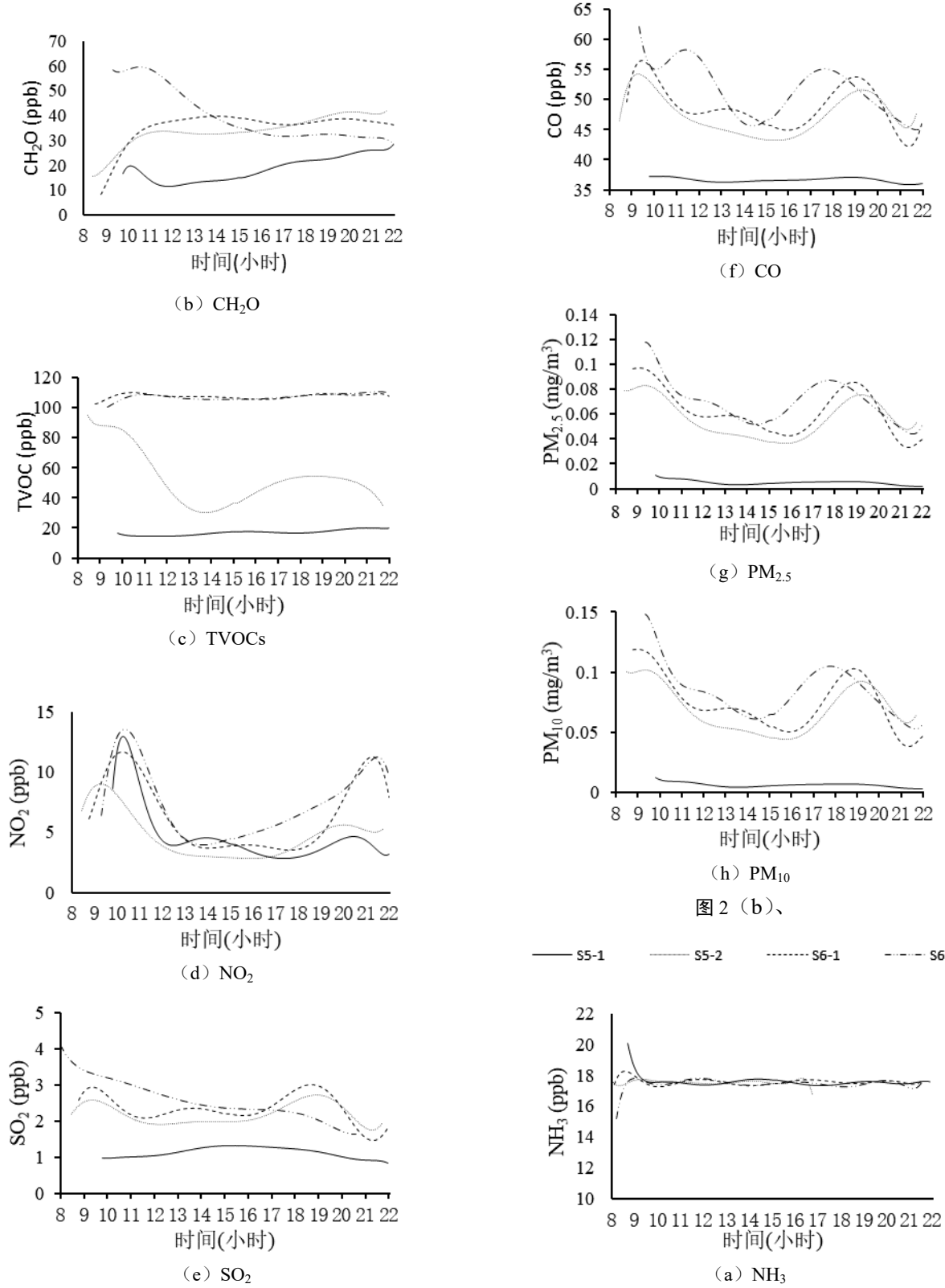
(e) SO₂

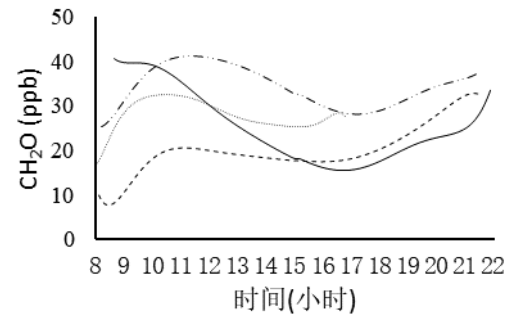
图 3 (a) 中测试的所有站台的 NH₃ 浓度基本保持在 17-18ppb 左右, 在规定允许范围内 **Error! Reference source not found.**, 且 NH₃ 浓度在时间和空间上都没有变化。

(2) — S1 — S2 - - - S3 - · - S4

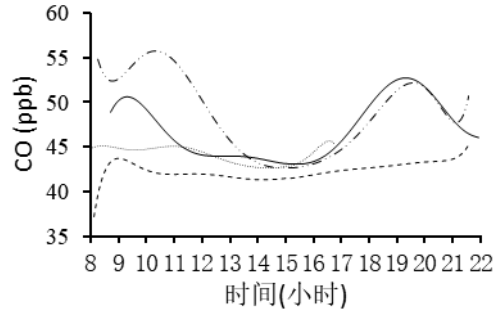


(a) NH₃

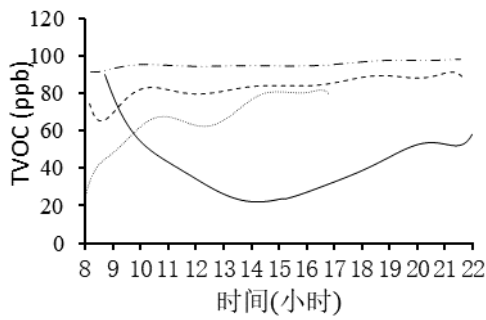




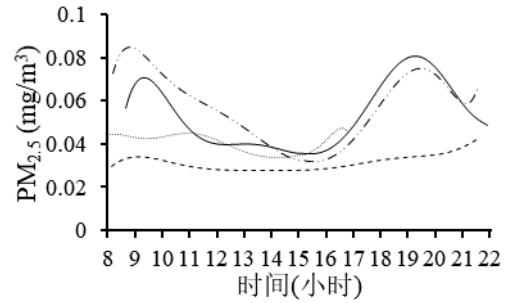
(b) CH₂O



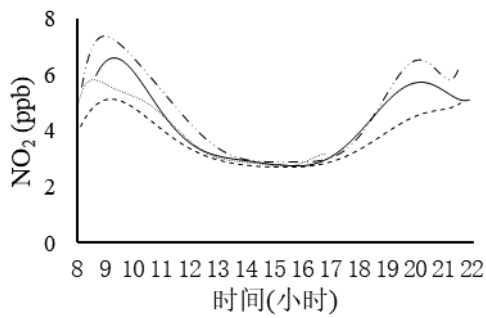
(f) CO



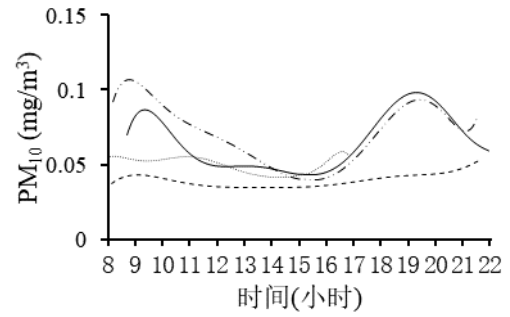
(c) TVOCs



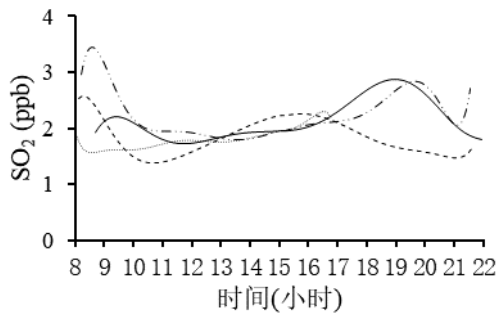
(g) PM_{2.5}



(d) NO₂

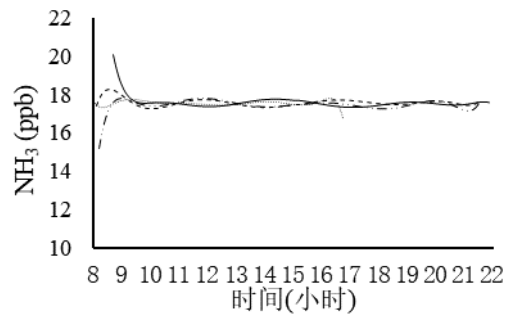


(h) PM₁₀



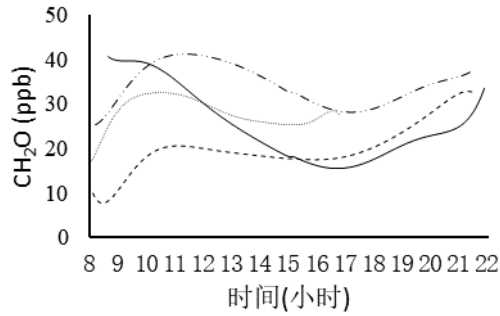
(e) SO₂

— S5-1 - - - S5-2 S6-1 - · - · S6-2

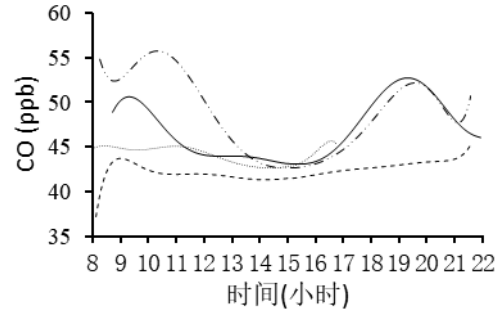


(a) NH₃

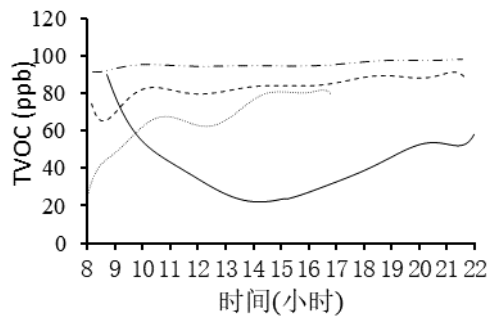
图3 (b) 中, S4 (28-60ppb) 的 CH₂O 浓度最高, 低于规定^[6]。



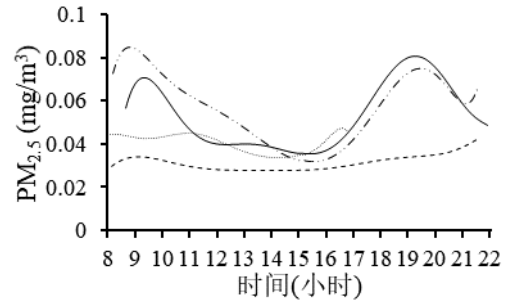
(b) CH₂O



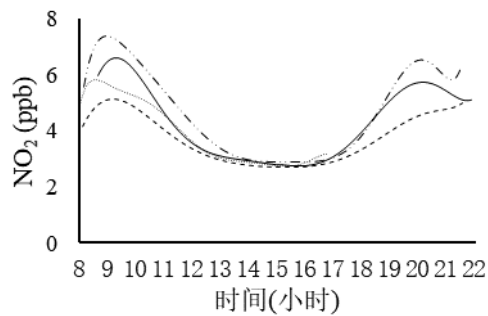
(f) CO



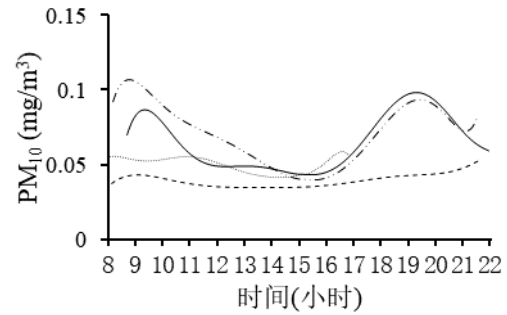
(c) TVOCs



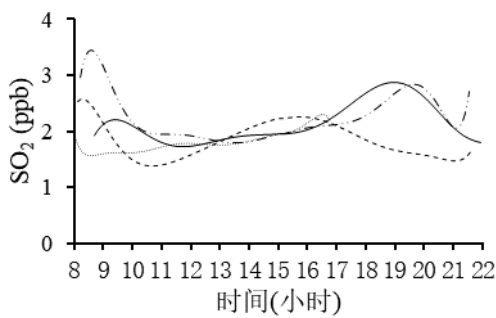
(g) PM_{2.5}



(d) NO₂



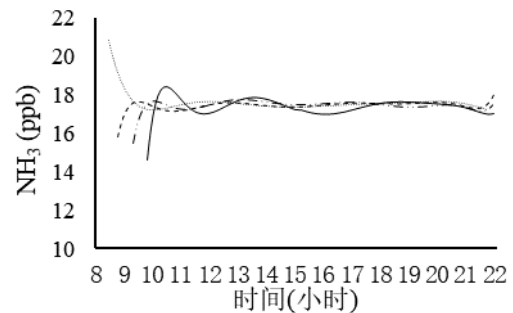
(h) PM₁₀

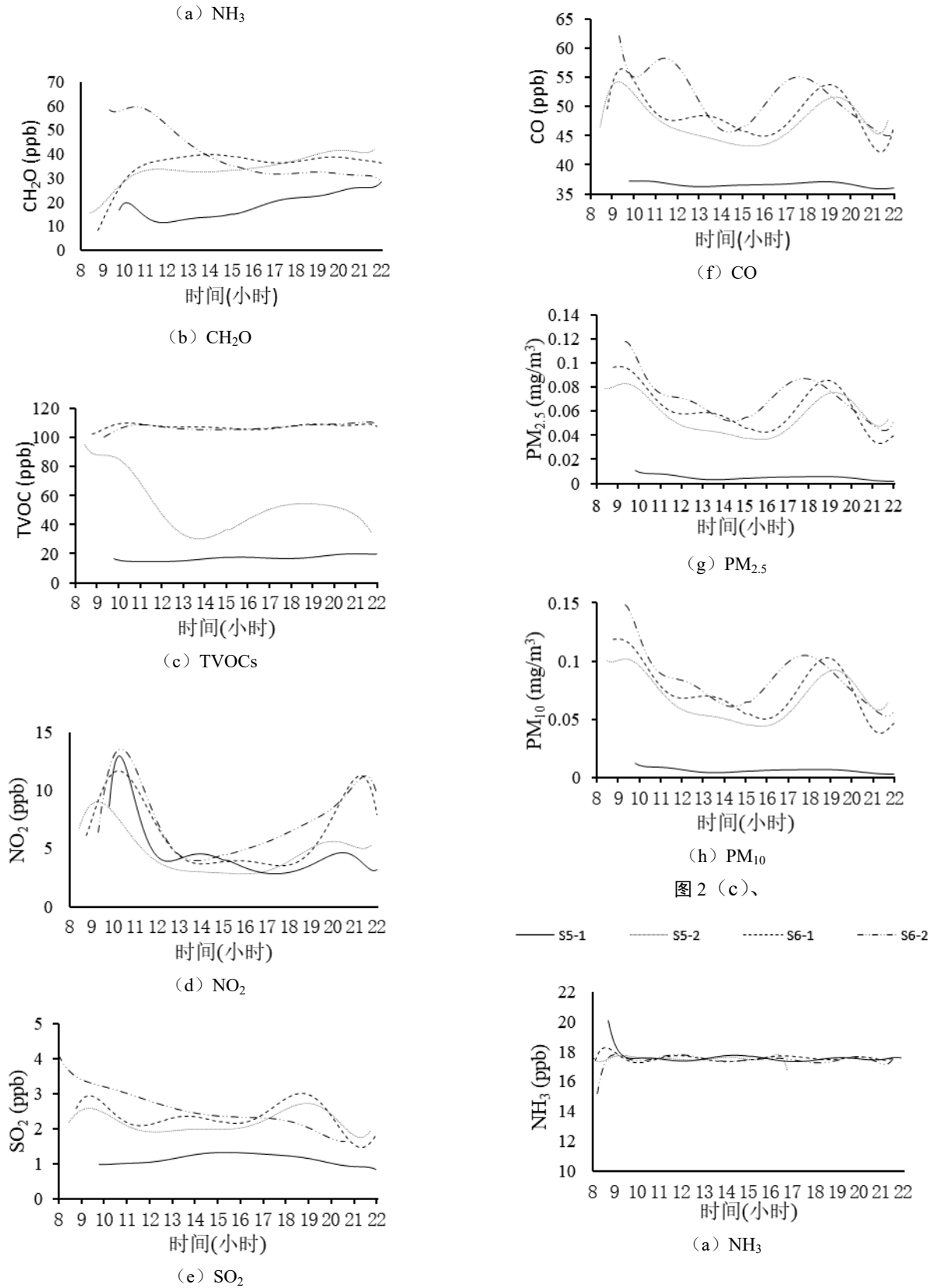


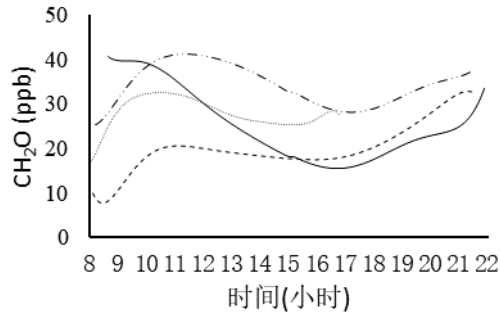
(e) SO₂

图 3 (b) 中, 同一车站, S6-2 (工作日) 高于 S6-1 (周日) 的 CH₂O 浓度, CH₂O 受客流量的影响; S5-2 与 S6-2 的客流量相同, 而 CH₂O 浓度不同, 可能是由于通风条件不同造成的 Error! Reference source not found.

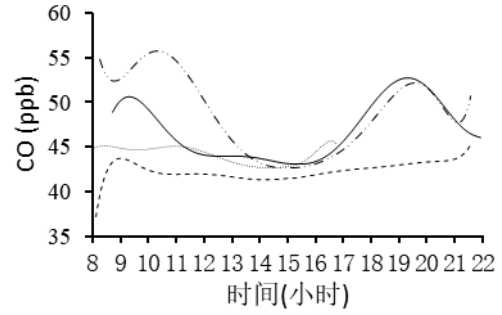
(3) — S1 ··· S2 - - - S3 - · - S4



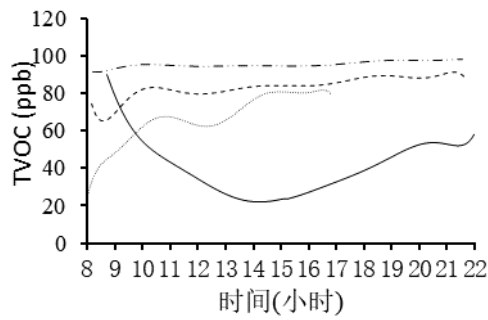




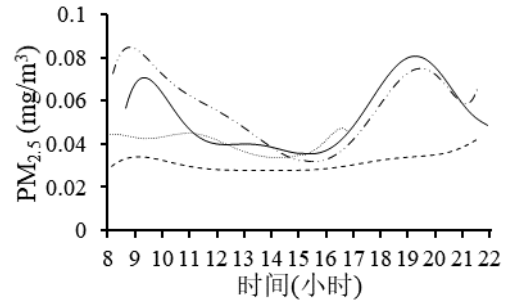
(b) CH₂O



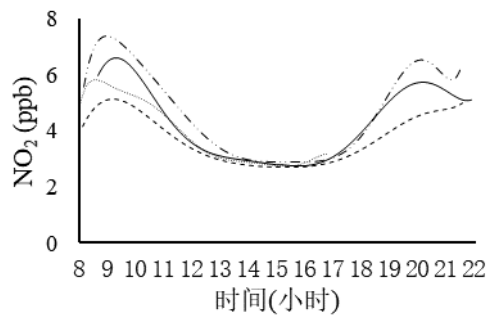
(f) CO



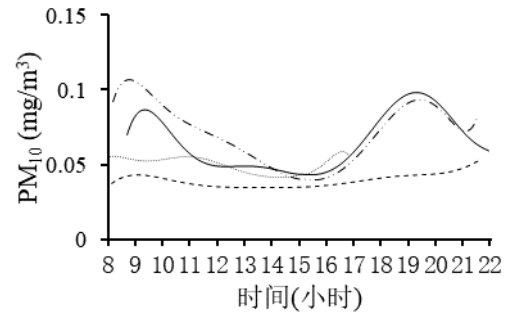
(c) TVOCs



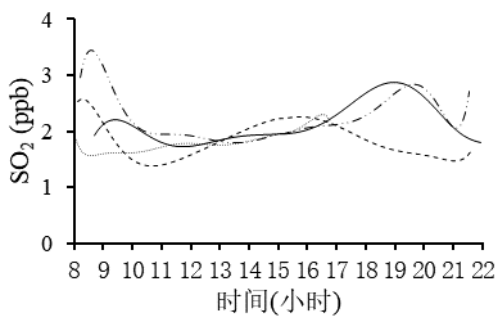
(g) PM_{2.5}



(d) NO₂



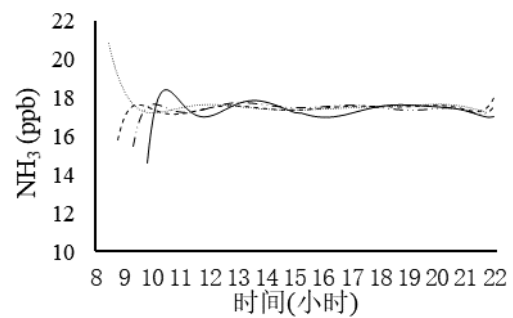
(h) PM₁₀

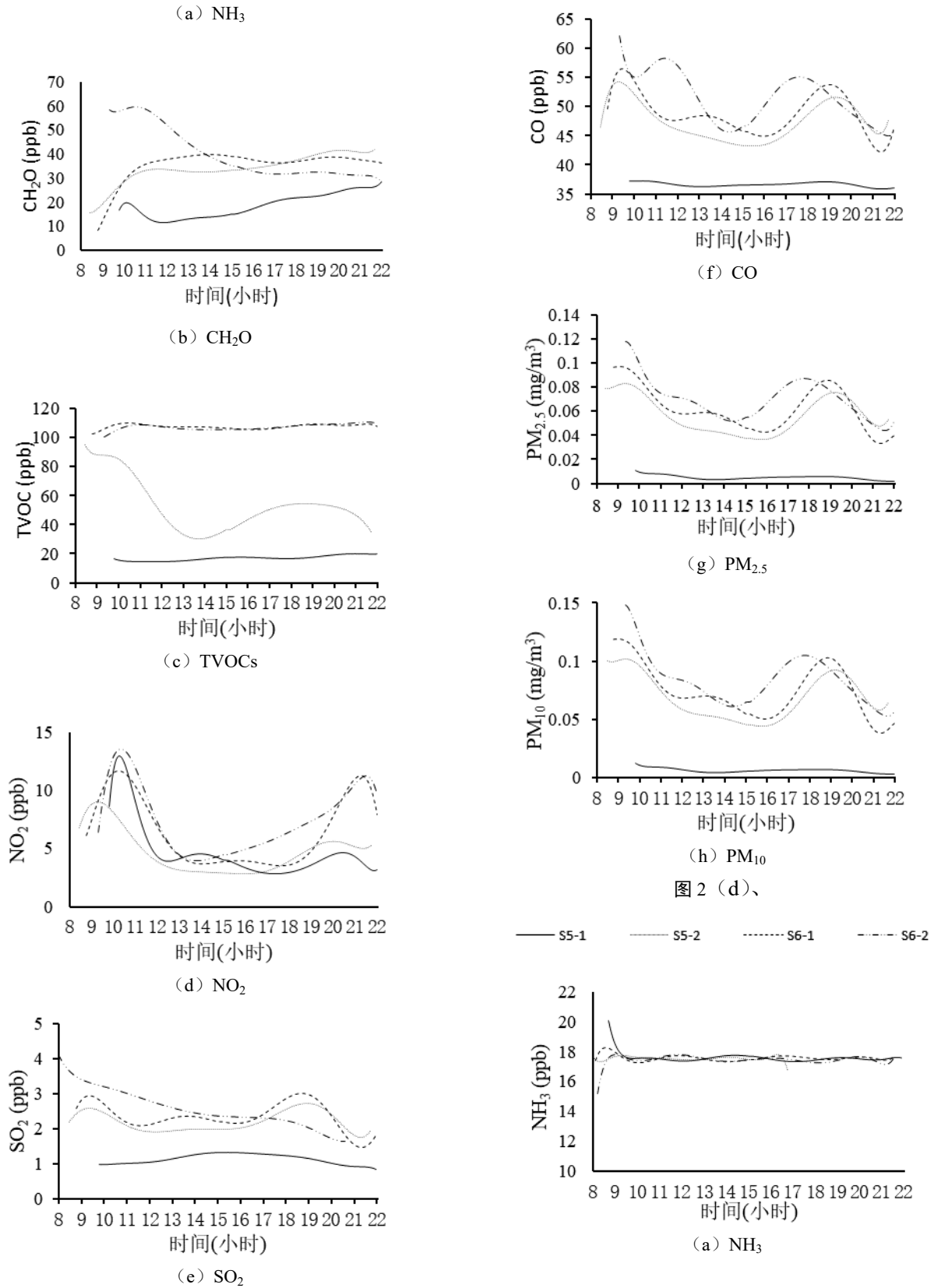


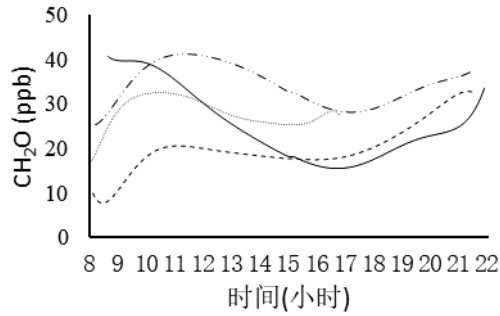
(e) SO₂

图 3 (c) 中 S3 (103-111ppb)、S4 (100-112ppb) 的 TVOCs 浓度最高, 在标准规定范围内。客流量高, TVOCs 浓度高, 说明地铁站内的 TVOCs 与空气流通相关。

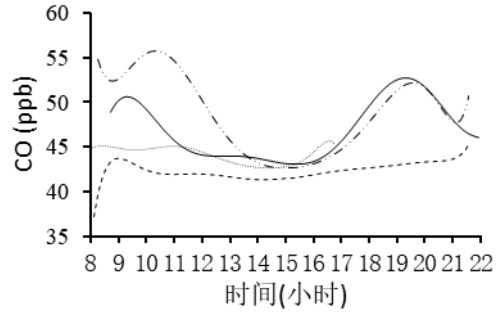
(4) — S1 — S2 - - - S3 - - - S4



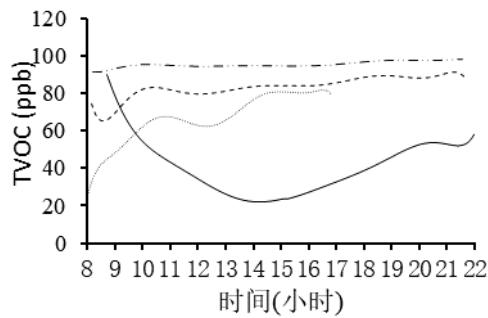




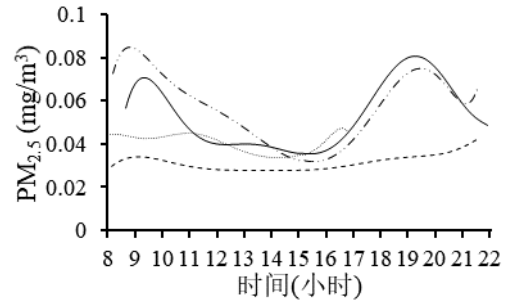
(b) CH₂O



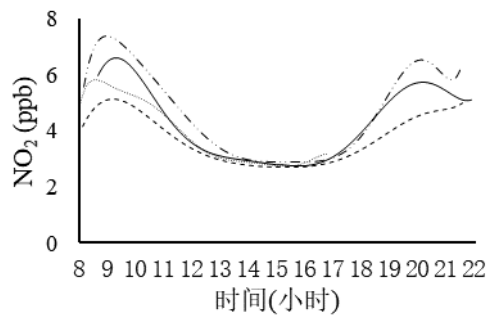
(f) CO



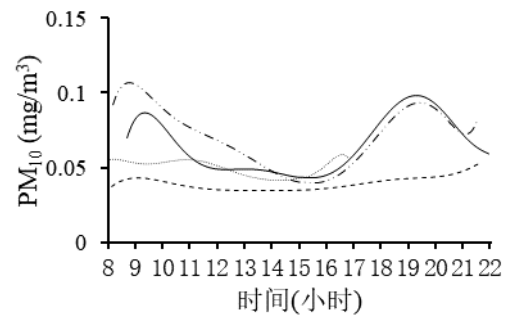
(c) TVOCs



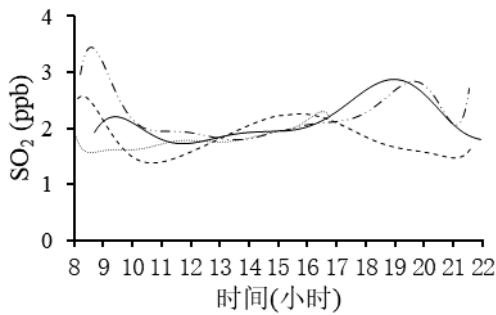
(g) PM_{2.5}



(d) NO₂



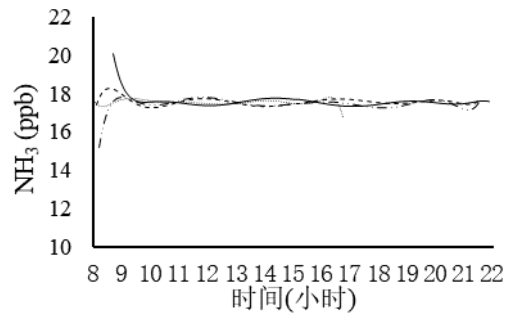
(h) PM₁₀



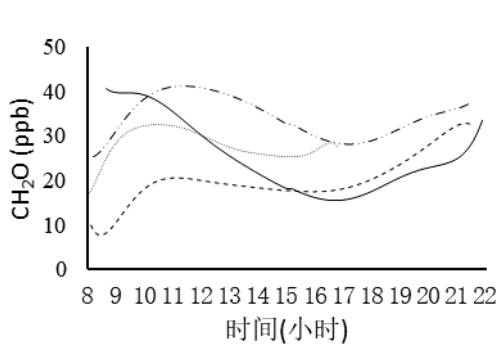
(e) SO₂

图 3 (d) 中, S2 (2.8-10.8ppb)、S3 (2.6-15.2ppb) 站台的 NO₂ 浓度最高, 在标准范围内 **Error! Reference source not found.** 图 3 (d), 客流量高的站台 NO₂ 浓度略高于客流量低的站台;

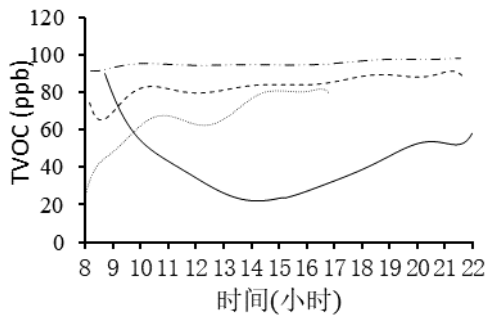
— S5-1 — S5-2 S6-1 - - - S6-2



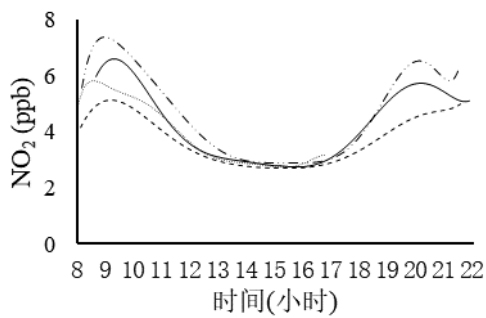
(a) NH₃



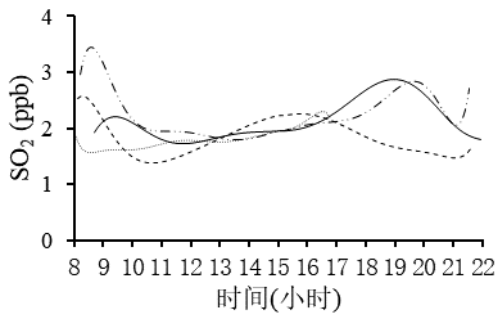
(b) CH₂O



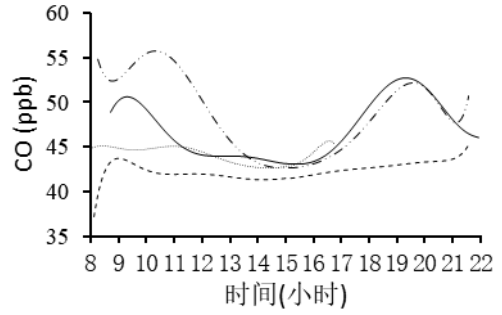
(c) TVOCs



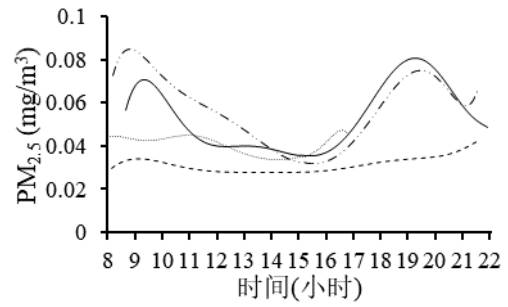
(d) NO₂



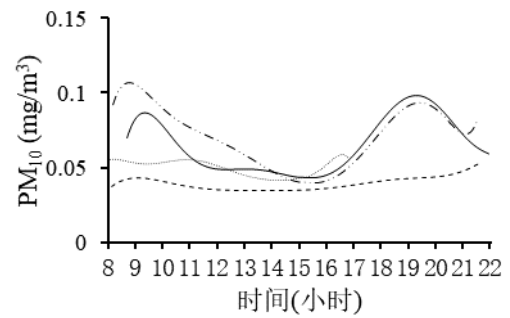
(e) SO₂



(f) CO



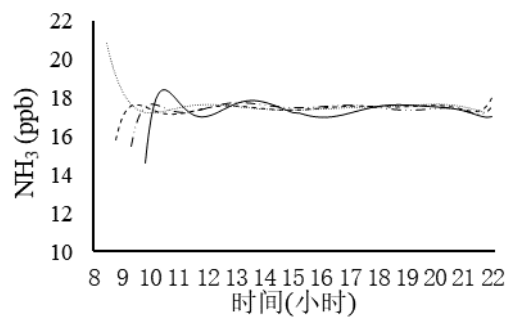
(g) PM_{2.5}



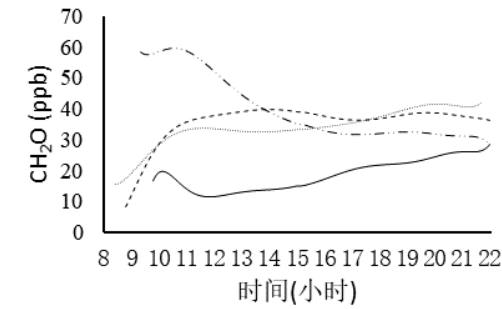
(h) PM₁₀

图3 (d), 同一站台, 工作日时期 NO₂ 浓度高于周六日时期。

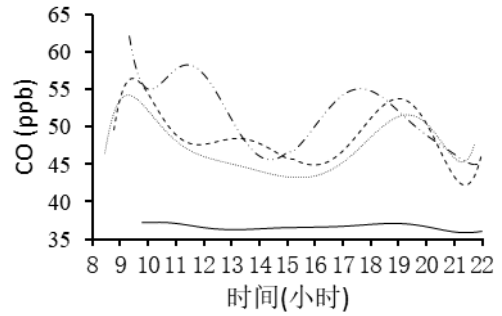
(5) — S1 S2 - - - - S3 - · - · S4



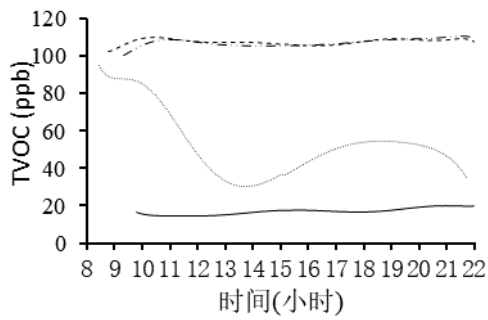
(a) NH₃



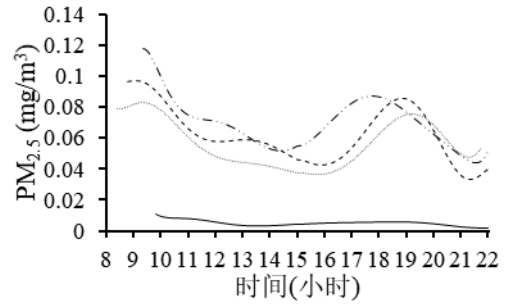
(b) CH₂O



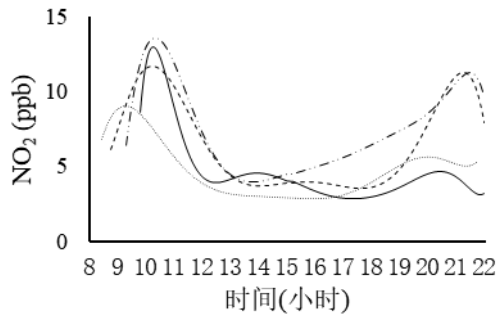
(f) CO



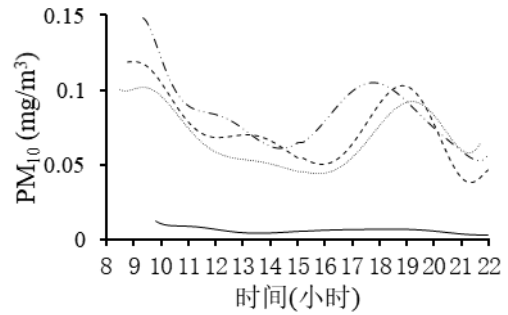
(c) TVOCs



(g) PM_{2.5}

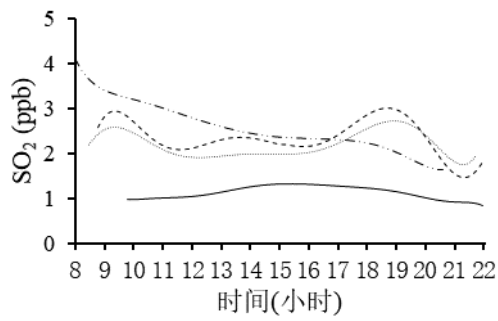


(d) NO₂



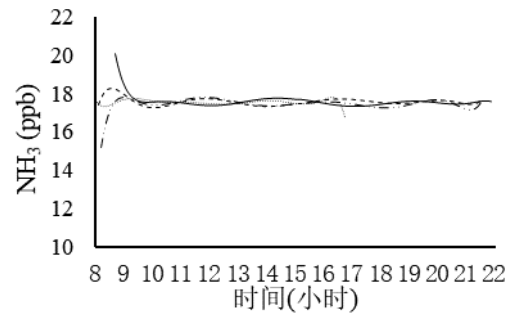
(h) PM₁₀

图 2 (e)、

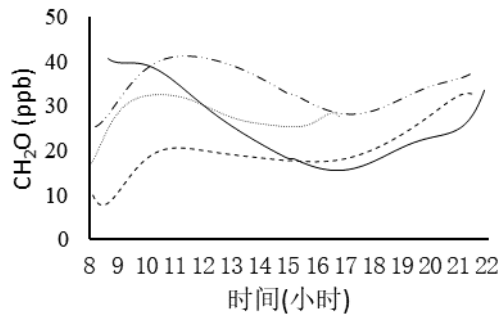


(e) SO₂

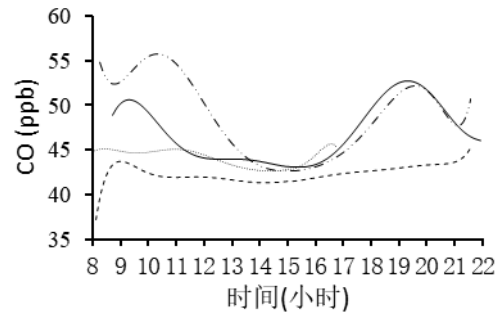
— S5-1 S5-2 - - - - S6-1 - · - · S6-2



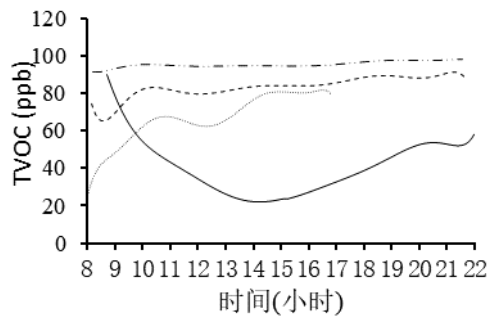
(a) NH₃



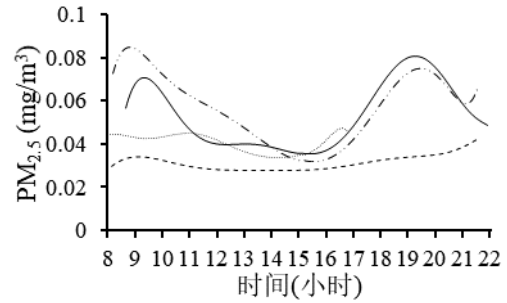
(b) CH₂O



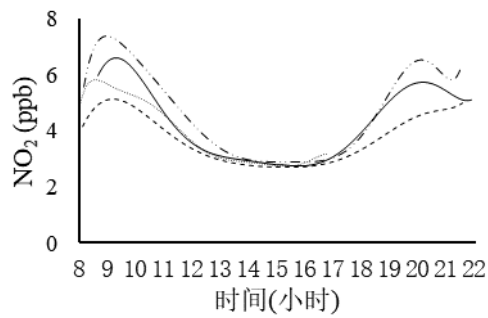
(f) CO



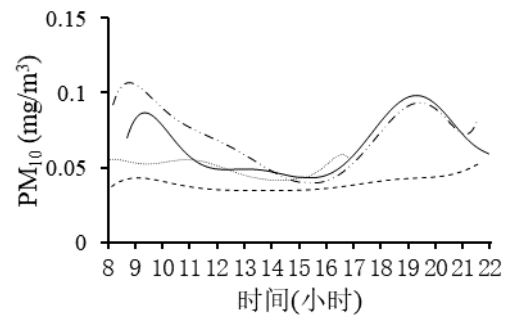
(c) TVOCs



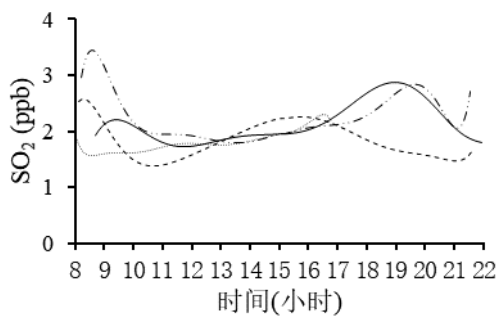
(g) PM_{2.5}



(d) NO₂



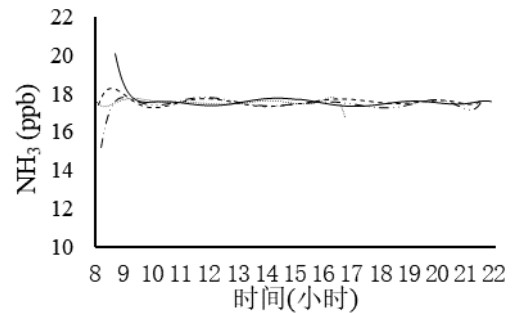
(h) PM₁₀



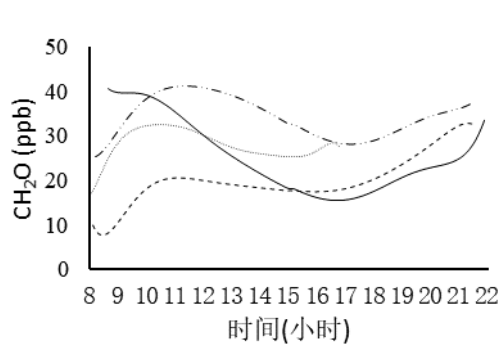
(e) SO₂

图 3 (e) 中, S4 (1.6~4.4ppb) 站台的 SO₂ 浓度波动范围最大, 浓度最高, 低于规定值 **Error! Reference source not found.** 图 3 (e), 客流量高的站台 SO₂ 浓度高于客流量低的站台;

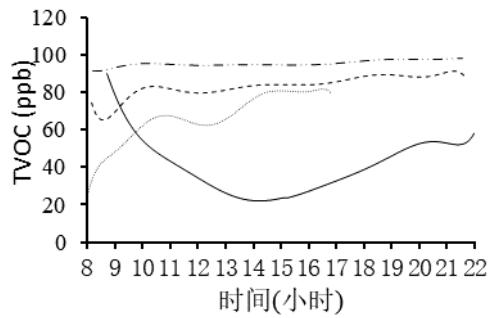
— S5-1 — S5-2 S6-1 -.-.- S6-2



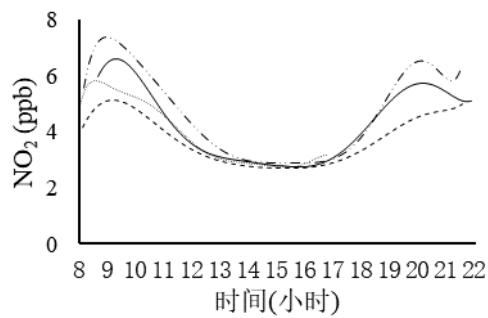
(a) NH₃



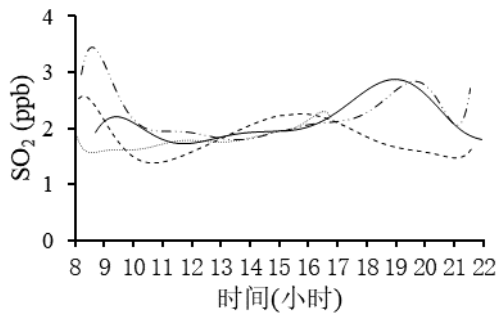
(b) CH₂O



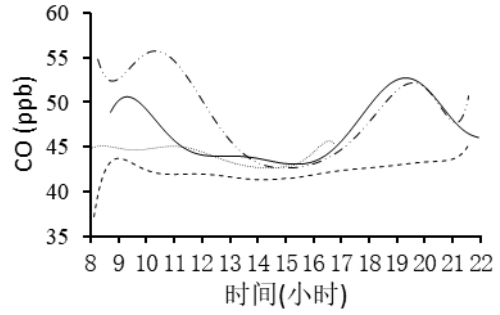
(c) TVOCs



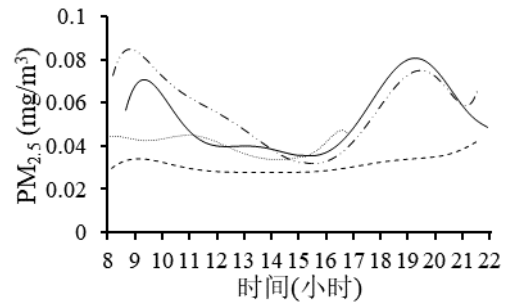
(d) NO₂



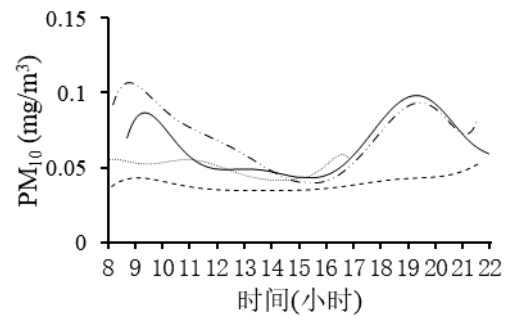
(e) SO₂



(f) CO

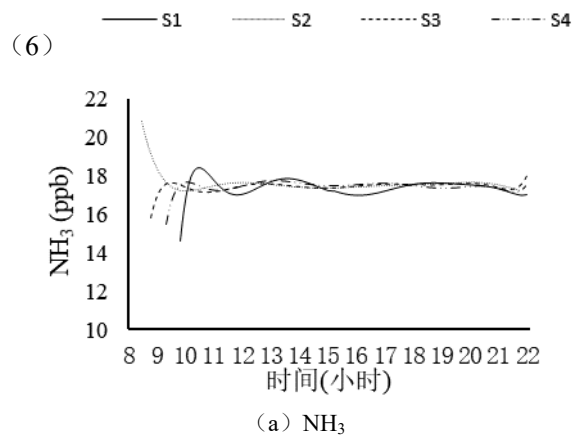


(g) PM_{2.5}

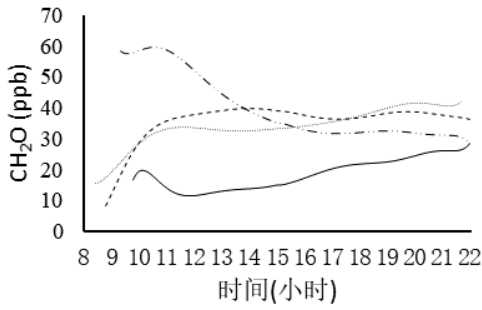


(h) PM₁₀

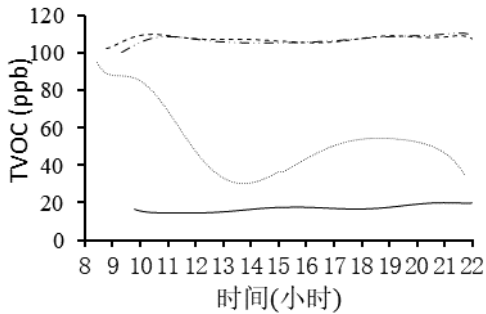
图 3 (e), 在列车频率高峰时刻, 工作日与周六日的 SO₂ 浓度相差较大, 其余时刻列车频率相同时, SO₂ 浓度变化不大。说明人员流动和列车频率对 SO₂ 浓度有一定的影响。



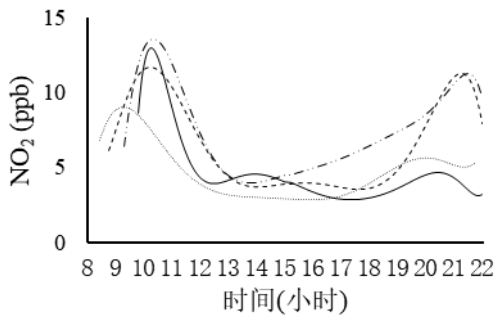
(a) NH₃



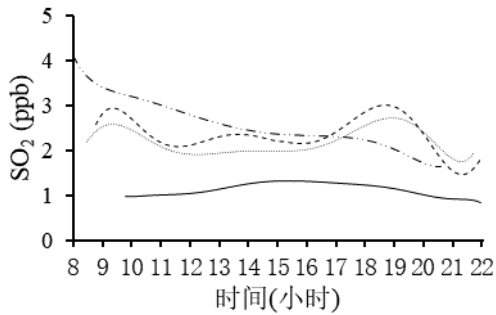
(b) CH₂O



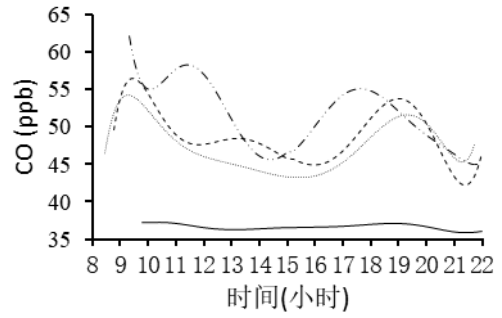
(c) TVOCs



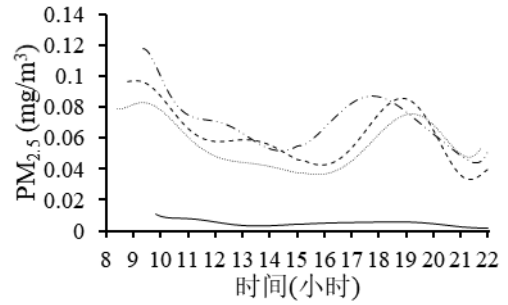
(d) NO₂



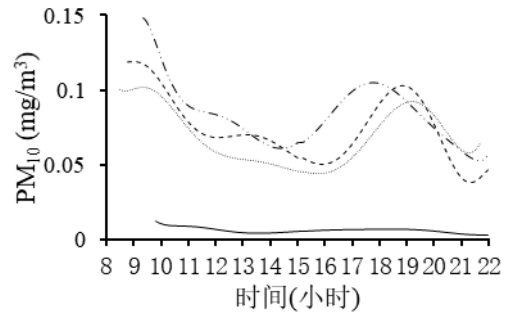
(e) SO₂



(f) CO



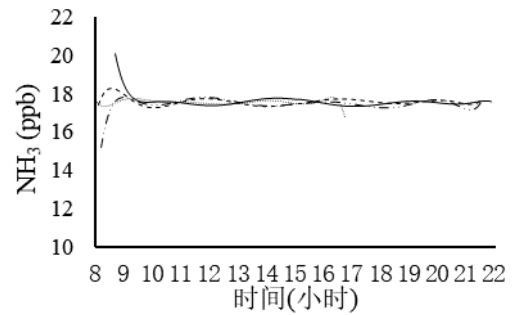
(g) PM_{2.5}



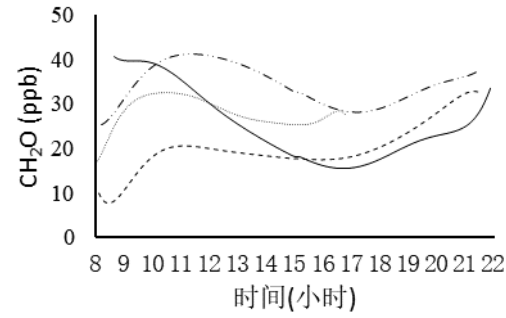
(h) PM₁₀

图 2 (f)、

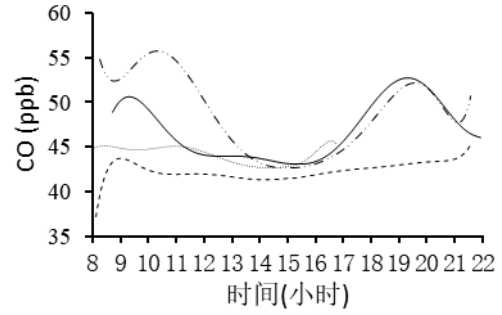
— S5-1 — S5-2 - - - S6-1 - · - S6-2



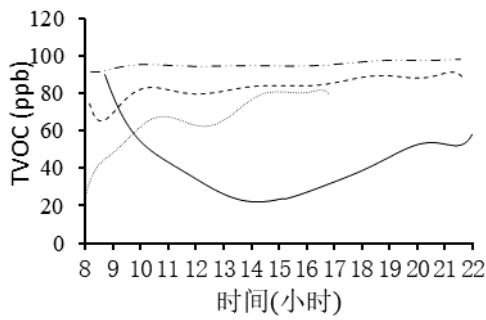
(a) NH₃



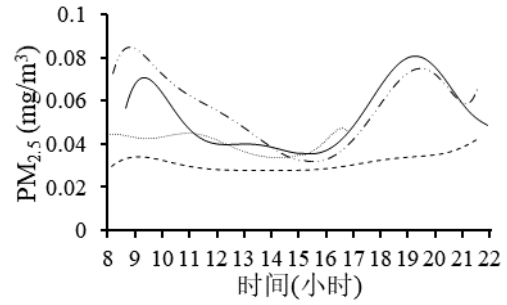
(b) CH₂O



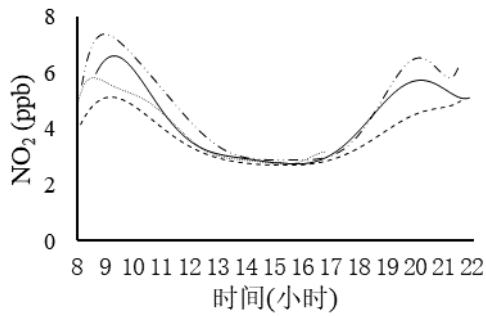
(f) CO



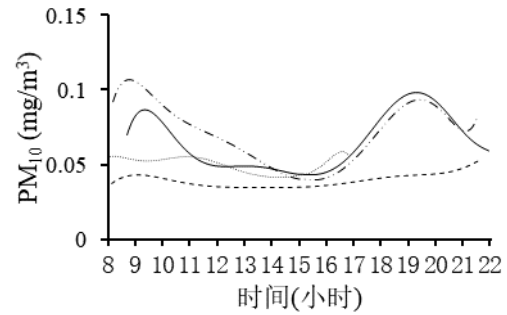
(c) TVOCs



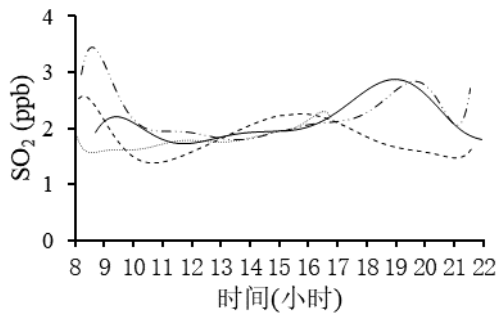
(g) PM_{2.5}



(d) NO₂



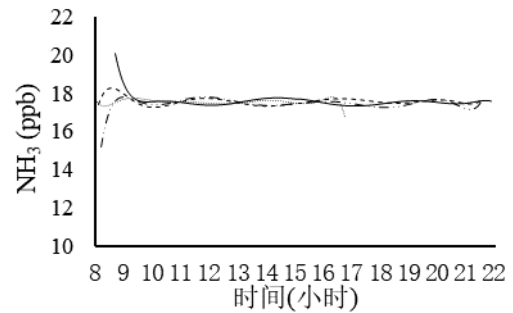
(h) PM₁₀



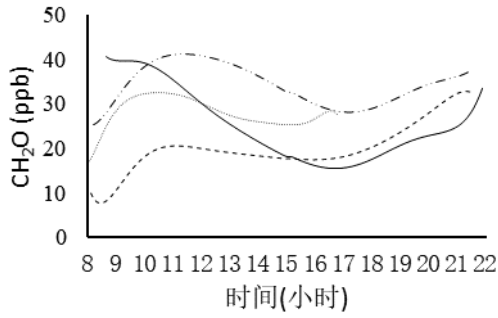
(e) SO₂

图 3 (f) 中, S4 (44-63ppb) 的 CO 浓度最高, 在规定值范围内^{[6]-[8]}。图 3 (g), 客流量高的站台 CO 浓度高于客流量低的站台;

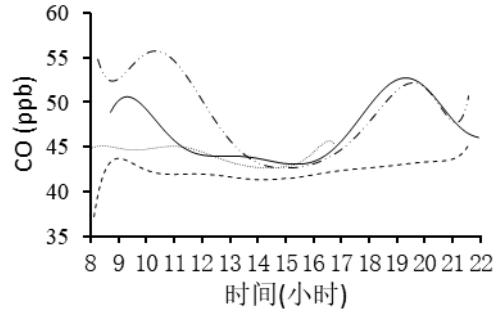
— S5-1 - - - S5-2 ····· S6-1 - - - S6-2



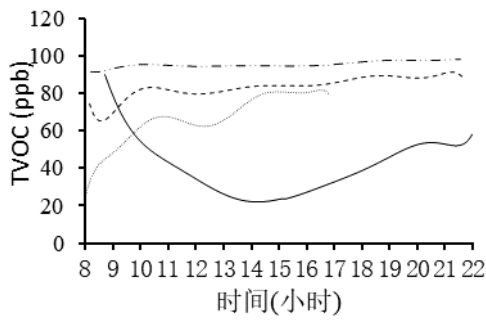
(a) NH₃



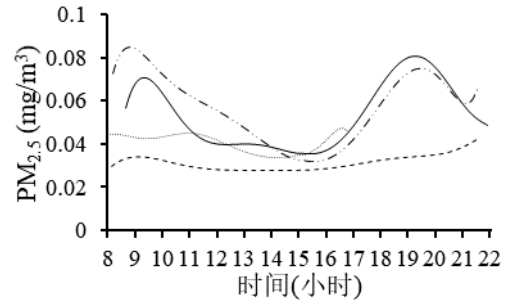
(b) CH₂O



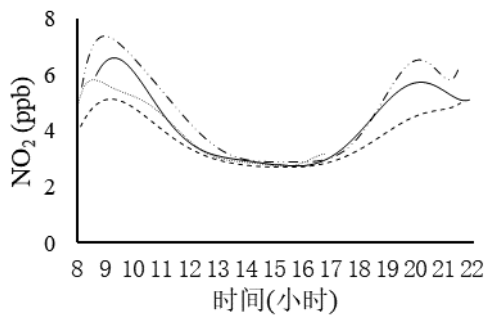
(f) CO



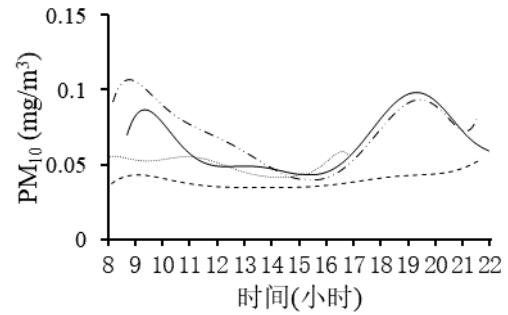
(c) TVOCs



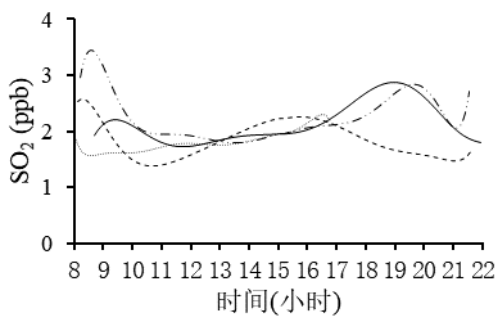
(g) PM_{2.5}



(d) NO₂



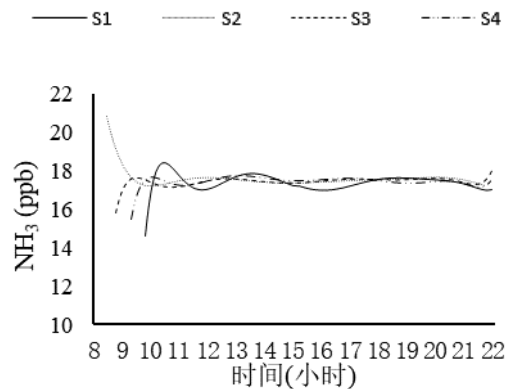
(h) PM₁₀

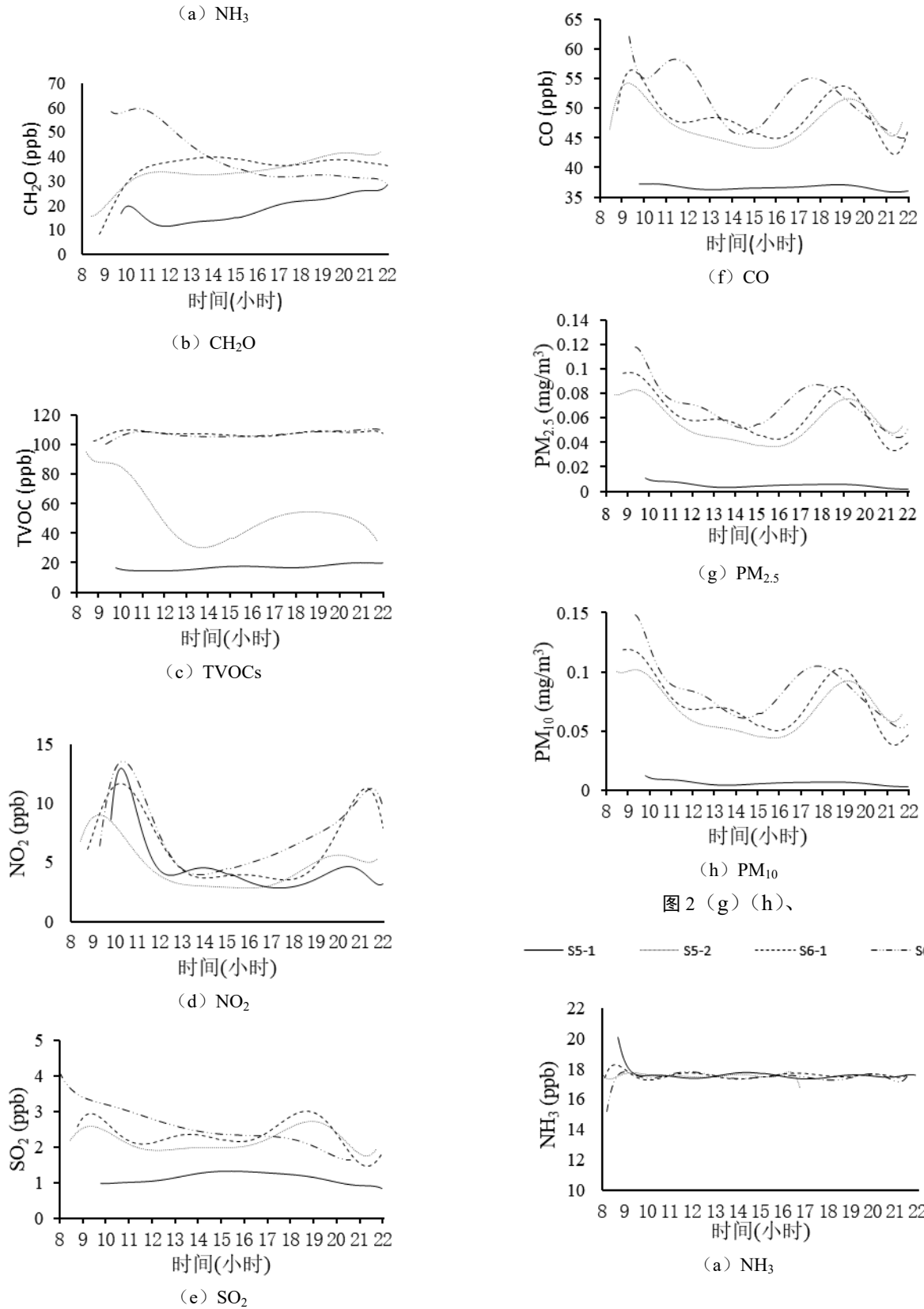


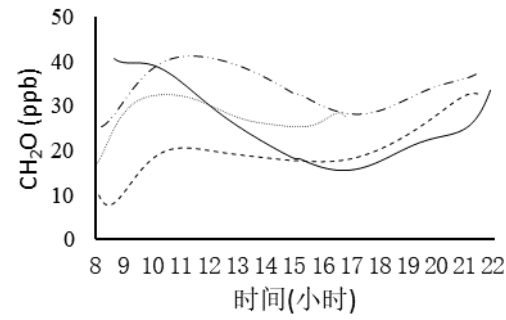
(e) SO₂

图 3 (f), 工作日与周日的 CO 浓度差比工作日与周六 CO 浓度差大。说明 CO 受客流量的影响。S5-2 与 S6-2 客流量相近、列车频率相差较大时, CO 浓度相差较大, 可能受列车频率的影响。

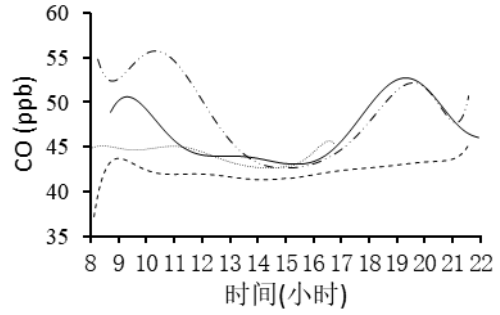
(7) 由



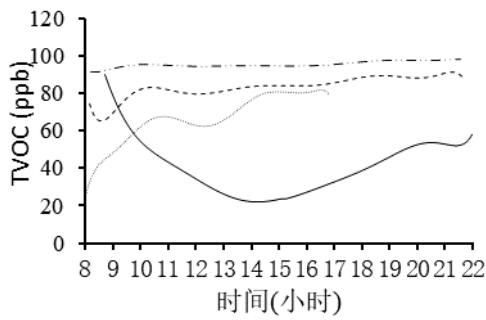




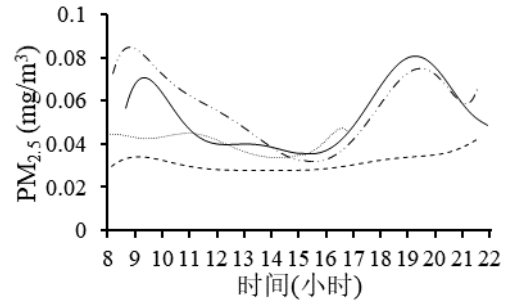
(b) CH₂O



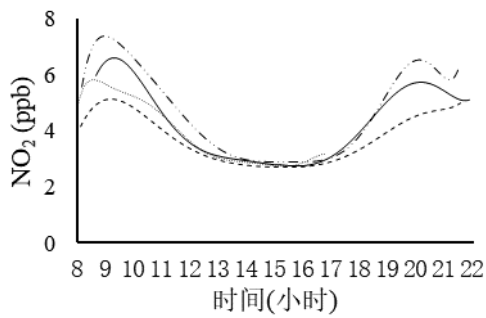
(f) CO



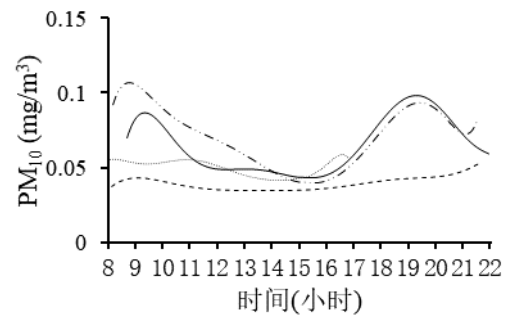
(c) TVOCs



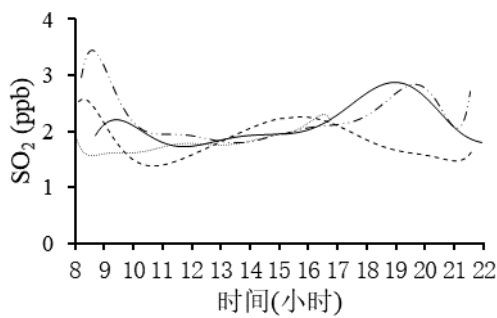
(g) PM_{2.5}



(d) NO₂

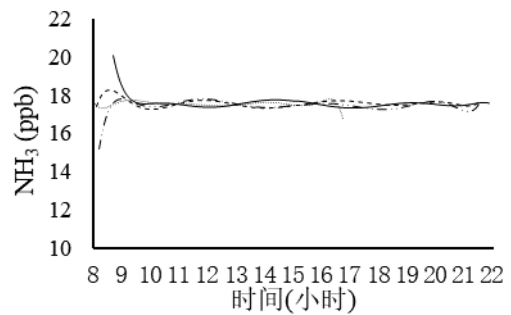


(h) PM₁₀



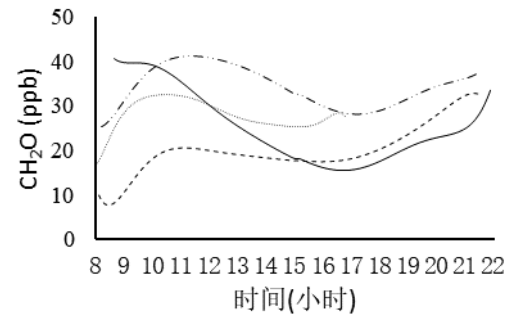
(e) SO₂

— S5-1 — S5-2 - - - S6-1 - - - S6-2

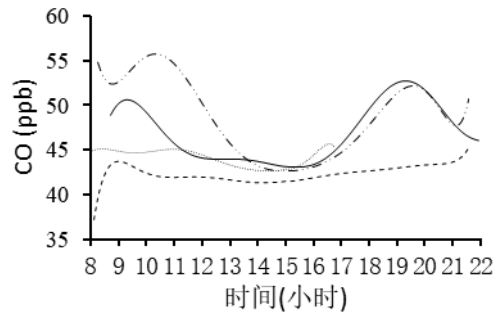


(a) NH₃

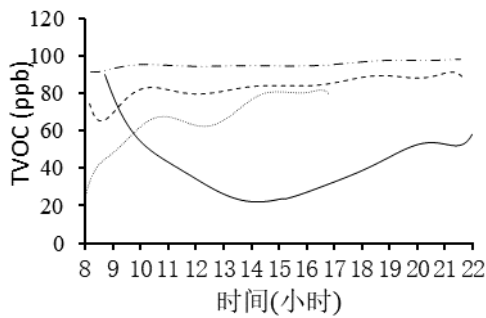
图 3 (g) (h) 中, S4 站台在所测试站台中 PM₁₀ (0.046-0.15mg/m³)、PM_{2.5} (0.038-0.12mg/m³) 最高, 在规定值范围内^{[6][7]}。Error! Reference source not found。



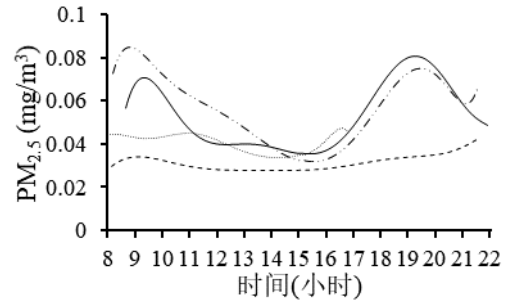
(b) CH₂O



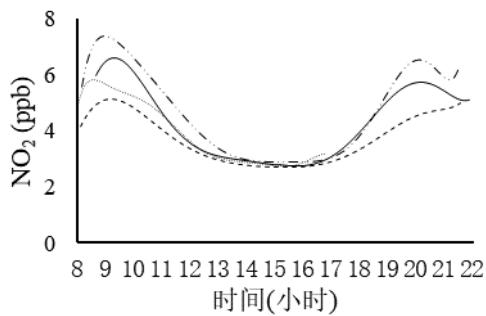
(f) CO



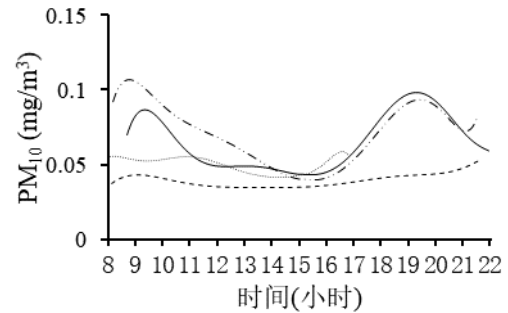
(c) TVOCs



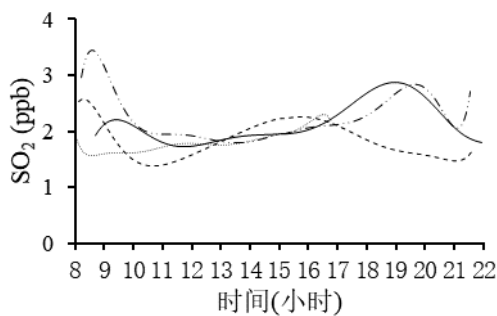
(g) PM_{2.5}



(d) NO₂



(h) PM₁₀

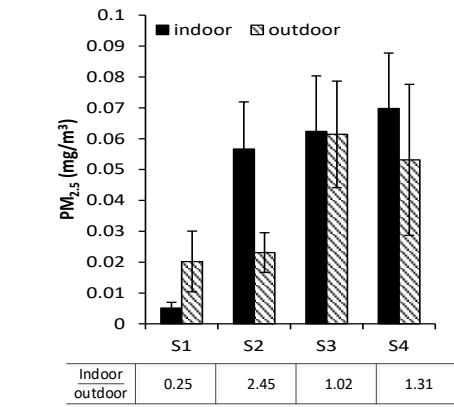


(e) SO₂

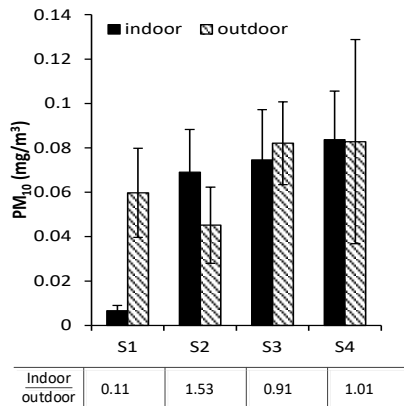
图 3 (g) (h) 中, 同一站台, 客流量高时, PM_X 浓度高。人员的流动导致颗粒物的再悬浮, 并且客流量大的同时, 导致空气流通不佳, 从而导致污染性气体不能及时排出。S5-2 与 S6-2 客流相同, 但列车频率相差较大, 其 PM_X 浓度相差较大, 因此, 人员流动与列车运行都会影响 PM_X 的浓度 **Error! Reference source not found.**

2.2 大气环境对地下空间空气质量影响分析

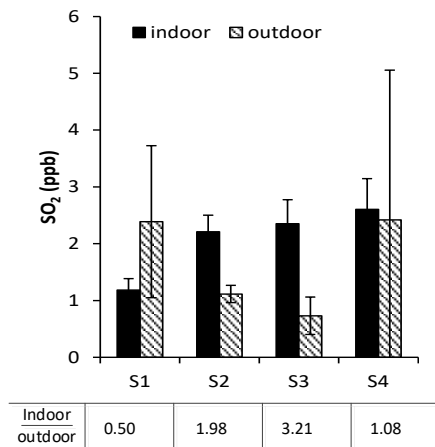
地铁是一个封闭的空间环境, 除了内部产生的污染物外, 还有外部进入地铁内部的污染物。为了解地铁站台气体污染物与室外气体污染的联系, 我们主要选择了工作日时期的四个站台 (S1-S4) 进行分析。对室内外五种气体进行平均浓度和标准差分析, 并计算了室内外气体浓度比值, 如图 4 所示。



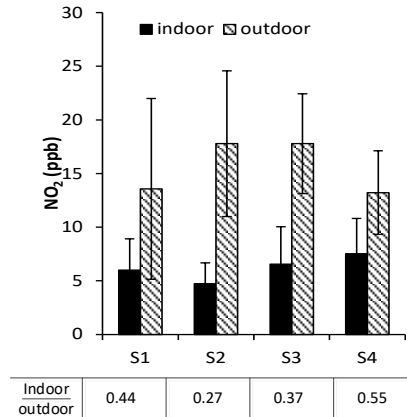
(a) PM_{2.5}



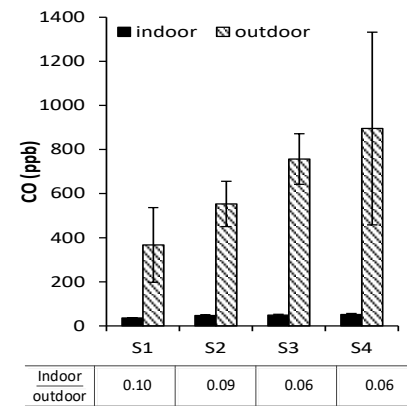
(b) PM₁₀



(c) SO₂



(d) NO₂



(e) CO

图4 S1、S2、S3 和 S4 站台室内外气体平均浓度和标准差对比 (PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂、CO)

Fig.4 Comparison of mean indoor and outdoor parameters and standard deviations on platforms S1, S2, S3 and S4 (PM_{2.5}, PM₁₀, SO₂, NO₂, CO)

从图4，可得出如下结论：

(1) 图4 (a) (b) 中，我们可以得到，PM_{2.5} 室内外比 I/O 为 0.25-2.45，PM₁₀ 室内外比 I/O 为 0.11-1.53。因此表明除了室外进入地铁内部的颗粒物外，由于铁路的摩擦和车轮的制动系统，地铁内部也会产生一定的 PM_x。在四个地铁站中，S2 的 PM_{2.5}、PM₁₀ 室内外浓度比最大。由表 1 可知，S2 为半屏蔽站，当列车驶入车站，大量颗粒物也会随之进入站台，导致其地铁内部颗粒物浓度明显高于室外。

(2) 图4 (c) 中，SO₂ 的室内外 I/O 为 0.5-3.21，整体来说，室内 SO₂ 浓度高于室外。这与其他研究一致，夏季室内高于室外，冬季则相反。

可能是因为夏季室内外温度较高, 汽车尾气和工业排气大量排到空气中, 扩散较快。同时, 夏季地铁空调通风机处于运行状态, 通风机中没有 SO_2 过滤设施, 因此导致室外 SO_2 涌入地铁含量较多, 室内 SO_2 与室外 SO_2 浓度以及空气流通速度有关 **Error! Reference source not found.**

(3) 地铁内部 NO_2 主要通过通风系统、手扶梯等来自室外。图 4 (d) 显示六个车站中, 室外 NO_2 浓度明显高于室内, 室内外比 I/O 为 0.27-0.55。

(4) 地铁内部 CO 也主要来源于大气环境。图 4 (e) 显示室内外 CO 浓度有数量级上的差异, 其室内外比 I/O 为 0.07-0.1。

2.3 主要污染物室内外浓度相关性分析

表 4 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 和 CO 浓度的相关性系数分析

Table 4 Correlation coefficient analysis of $\text{PM}_{2.5}$, PM_{10} , SO_2 , NO_2 and CO concentrations

	$\text{PM}_{2.5}$	PM_{10}	SO_2	NO_2	CO
客流量	0.378**	0.390**	0.334**	-0.029	0.348**
室外气体	0.532**	0.220*	0.152	0.537**	0.584**
列车频率	0.337**	0.385**	0.526**	-0.147	0.320**

注: * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$ 。

由表 4 可知, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度与列车频率 ($r=0.337$, $p < 0.01$)、客流量 ($r=0.378$, $p < 0.01$) 和室外气体 ($r=0.532$, $p < 0.01$) 有显著相关性, 受室外气体影响大于列车频率和客流量。 PM_{10} 浓度受到客流量, 室外气体浓度和列车频率的影响。 PM_{10} 浓度与室外气体相关性 ($r=0.220$, $p < 0.05$) 低于客流量 ($r=0.390$, $p < 0.01$) 和列车频率 ($r=0.385$, $p < 0.01$) 相关性。颗粒物浓度与客流量有关, 这可能是因为人员的走动会导致颗粒物漂浮在空气中, 并且人员密度大, 通风不畅, 空气中的总体污染含量增加。并且, 铁路的摩擦和车轮的制动系统, 导致地铁内部也会产生一定颗粒物。除此之外, 由于通风系统以及地铁口的影响, 导致室外的颗粒物进入地铁站台内部。 SO_2 浓度受到室外气体影响, 但相关性 ($r=0.152$) 较弱。 SO_2 浓度与客流量 ($r=0.334$, $p < 0.01$) 和列车频率 ($r=0.526$, $p < 0.01$) 相关性显著, 其中受列车频率影响大于客流量。 NO_2 与客流量 ($r=-0.029$) 和列车频率 ($r=-0.147$) 负相关

性较弱, 与室外气体 ($r=0.537$, $p < 0.01$) 的相关性显著, 主要受室外气体的影响。CO 浓度与列车频率 ($r=0.0320$, $p < 0.01$)、客流量 ($r=0.348$, $p < 0.01$) 和室外气体 ($r=0.584$, $p < 0.01$) 有显著相关性, 受室外气体影响大于列车频率和客流量。 NO_2 和 CO 均来自于室外环境, 主要受室外影响较大。 SO_2 和 CO 受列车频率以及客流量的影响, 主要是因为, 通风量一定的情况下, 人流量大, 导致空气流通不畅, 因此污染物含量增加。

3 结论

本文对地下空间运行的地铁六个站台的 8 种气体进行了测试, 分析了 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、CO、 NO_2 和 SO_2 的室内外气体平均浓度, 并用 SPSS 软件分析了 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 和 CO 浓度与客流量、室外气体、列车频率等的相关性。主要结论如下:

(1) 所测试的六个站台的 8 种气体 (PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 NH_3 、 CH_2O 、CO、 NO_2 、 SO_2 、TVOCs) 均在标准规定允许的范围内。北京夏季地铁站台内部空气质量环境较好。

(2) 发现地下空间地铁主要污染物浓度受室外环境的影响较大。除此之外, 受列车频率和客流量的影响也比较大。因此, 可以在客流量大时, 通过增加通风量的进行空气质量的改善。

参考文献:

- [1] V Mugica-álvarez, J Figueroa-Lara, M Romero-Romo. Concentrations and properties of airborne particles in the Mexico City subway system[J]. Atmospheric Environment, 2012,49:284-293.
- [2] 贾康阔, 张金萍, 陈翰, 等. 不同建筑环境空气中颗粒物 $\text{PM}_{1.0}$ 、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 的污染水平及对比研究[J]. 建筑科学, 2021,37(4):33-40.
- [3] 石岩, 黄贤闯, 李恒, 等. 冬季长春地铁车厢内空气质量调研分析[J]. 北方建筑, 2020,5(6):49-52.
- [4] 王刚, 邵李燕, 王明明, 等. 乘客密度对地铁车厢空气品质的影响研究[J]. 建筑热能通风空调, 2021,40(1):35-38, 34.
- [5] 左甜甜. 西安地铁环境空气品质调查及其污染因素分析研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2015.
- [6] GB 9672-1996, 公共交通等候室卫生标准[S]. 香港: 商务印书馆, 1996.

- [7] TB/T 1932-2009,旅客列车卫生及监测技术规定[S].北京:中国铁道出版社,2009. (下转第 236 页)