

# 天山北坡绿洲城市车流量与对流层 NO<sub>2</sub> 垂直柱浓度关系研究

赵晓蓉<sup>1,2</sup>, 李艳红<sup>1,2\*</sup>

1. 新疆师范大学地理科学与旅游学院, 新疆 乌鲁木齐 830054

2. 新疆维吾尔自治区重点实验室“新疆干旱区湖泊环境与资源实验室”, 新疆 乌鲁木齐 830054

**摘要** 为探讨天山北坡河谷绿洲城市车流量与对流层 NO<sub>2</sub> 垂直柱浓度(VCD)的关系, 基于各城市车流量状况, 利用地基多轴差分光谱仪(Mini MAX-DOAS)在2018年—2019年天山北坡经济带上的综合性大城市乌鲁木齐、工业型中等城市石河子和工业型小城市阜康市中心区连续固定监测, 并沿城市交通主干道进行车载移动监测, 研究车流量对 NO<sub>2</sub> VCD 的影响, 对比分析山盆体系河谷绿洲城市与中东部发达城市污染严重原因的差异。结果表明: (1)天山北坡大中小城市的车流量日均值大城市乌鲁木齐(1 406 辆/5 min)远大于中小城市, 中等城市石河子(203 辆/5 min)和小城市阜康(185 辆/5 min)差异并不显著( $p > 0.05$ ), 而各类城市 NO<sub>2</sub> VCD 整体差异显著( $p < 0.05$ ), 其日变化峰值有所差异, 表现为乌鲁木齐( $22.613 \times 10^{15} \text{ molec} \cdot \text{cm}^{-2}$ ) > 阜康( $17.758 \times 10^{15} \text{ molec} \cdot \text{cm}^{-2}$ ) > 石河子( $15.272 \times 10^{15} \text{ molec} \cdot \text{cm}^{-2}$ ), 三类城市的车流量和 NO<sub>2</sub> VCD 的日变化趋势一致, 都呈现出“早晚高, 中午低”的变化趋势; 季节变化中三类城市的车流量和 NO<sub>2</sub> VCD 均为: 冬春季 > 秋冬季; (2)虽然早晚各监测点的车流量有所差异, 但三类城市的车流都集中在市中心附近; 移动监测数据表明, NO<sub>2</sub> VCD 高值出现在车流较高的市区, 并且在各城市风向稳定时, 下风向浓度大于上风向; 由于居住空间差异, 人们在城市各功能区间的活动, 车辆流向和 NO<sub>2</sub> VCD 都集中于人流密集的商业区, 说明车辆对 NO<sub>2</sub> VCD 具有较大贡献; (3)2009年—2019年10年间天山北坡大中小城市经济生产总值增长率在200%以上, 乌鲁木齐、石河子机动车增长率超过北京、上海等发达城市, 城市快速发展, 并处于河谷绿洲地带, 地势南高北低, 冬季逆温层深厚, 静风天数较多, 采暖期长达6个月, 造成冬季污染严重。天山北坡城市除人为污染排放外, 自然因素对污染物形成聚集作用。

**关键词** 天山北坡; 车流量; 对流层 NO<sub>2</sub> 垂直柱浓度; 地基多轴差分光谱仪

**中图分类号**: X511 **文献标识码**: A **DOI**: 10.3964/j.issn.1000-0593(2021)02-0345-09

## 引言

随着城市的不断发展与扩张, NO<sub>2</sub> 排放居高不下, 引起大气酸沉降、灰霾、臭氧等一系列环境问题, 严重危害生态环境和人体健康。研究表明<sup>[1]</sup>, 对流层 NO<sub>2</sub> 主要来自于机动车尾气和工业排放<sup>[2]</sup>。对大气对流层 NO<sub>2</sub> 的研究方法主要有卫星遥感资料和地基多轴差分吸收光学技术(DOAS)等。Richtre<sup>[3]</sup>等对比 GOME-2 和 SCIAMACHY 反演了 NO<sub>2</sub> 柱浓度在不同地区和季节的差异; Velders<sup>[4]</sup>等在此基础上利用三维模式, 反演全球对流层 NO<sub>2</sub> 分布情况; Lee<sup>[5]</sup>等利用成像 DOAS 数据对污染源排放烟羽扩散模型进行改进; Kim<sup>[6]</sup>

等韩国学者基于 OMI 传感器, 发现东北亚地区城市 NO<sub>2</sub> 浓度逐年呈增长趋势; 章吴婷<sup>[7]</sup>结合 GOME, SCIAMACHY 和 OMI 传感器监测反演 NO<sub>2</sub> 柱浓度数据; 闫欢欢<sup>[8]</sup>、程韵初<sup>[9]</sup>、崔远政<sup>[10]</sup>等基于 OMI 卫星遥感反演资料, 认为我国 NO<sub>2</sub> 空间分布呈现出: 东部最高、中部较低、西北最低的空间格局; 并且西部地区 NO<sub>2</sub> 污染的主要驱动因素是交通排放。李素文<sup>[11]</sup>、王焯如<sup>[12]</sup>、吴子扬<sup>[13]</sup>、仝泽鹏<sup>[14]</sup>等利用 DOAS 技术对北京、上海、合肥、新疆大中小城市等地区进行长期监测, 认为机动车保有量和车流量的增加是市区 NO<sub>2</sub> 主要污染源。王章军<sup>[15]</sup>等采用 DOAS 技术, 对青岛市污染气体进行连续监测, 认为 NO<sub>2</sub> 浓度与交通流量变化趋势呈正相关并出现显著“周末效应”。以上研究都指出车辆对 NO<sub>2</sub>

收稿日期: 2020-07-17, 修订日期: 2020-10-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(41761007), 新疆师范大学“十三五”校级重点学科应用经济学招标课题(17SDKD0401), 新疆师范大学硕士研究生科研创新基金项目(XSY202002009)资助

作者简介: 赵晓蓉, 女, 1997年生, 新疆师范大学地理科学与旅游学院硕士研究生 e-mail: 1010797670@qq.com

\* 通讯作者 e-mail: lyh0704@126.com

的贡献,但具体车流量对  $\text{NO}_2$  污染的时空分布及影响因素研究较少。干旱区晴朗少云的天气对于光谱观测十分有利,本文从车流量对大气污染的影响方面出发,选取新疆天山北坡城市,经济快速发展,机动车保有量迅速增长,并位于高大天山山脉迎风坡的河谷绿洲地带,冬季长达 6 个月的供暖期,污染物浓度随之加强。利用 MAX-DOAS 技术,通过对 2018 年和 2019 年天山北坡乌鲁木齐及周边城市石河子和阜康 3 个城市市区进行固定监测,对主要交通干道进行 DOAS 车载移动监测,分析车流量与对流层  $\text{NO}_2$  柱浓度的时空变化规律,结合工厂、商业区、地形和气象因素分析污染原因,为治理天山北坡城市改进机动车尾气排放措施、治理大气污染提供数据参考。

## 1 实验部分

### 1.1 研究区概况

2013 年—2018 年,我国机动车保有量增加 32.7%,年均增长 5.8%。在 2018 年,全国机动车保有量达到 3.27 亿辆,新疆维吾尔自治区机动车达 396.61 万辆。2018 年全国机动车氮氧化物( $\text{NO}_x$ )排放总量达到 662.7 万吨,占全国排放总量的 13.9%,机动车尾气排放氮氧化物已经成为大气污染的主要来源,煤烟—机动车混合型大气污染特征日渐显著。在天山北坡经济带的作用下,西部综合性城市乌鲁木齐作为新疆的首府,交通设施齐全,有 1 个国际机场和 3 个火车站,公共交通包括地铁、8 条 BRT 专线和若干环线快客。工业型中等城市石河子机场和火车站各一个,公路总里程 1 640 km,公交线路 36 条。工业型小城市阜康距离乌鲁木齐国际机场 45 km, G7 京新高速公路、省道 303、重点铁路运输线乌准铁路横贯全境。随着交通格局的逐渐完善,机动车保有量的日益增长,城市道路发展滞后车辆拥堵严重,交通贡献的氮氧化物不断增加,机动车尾气产生的氮氧化物已成为对流层  $\text{NO}_2$  的主要来源之一。2018 年在全疆 19 个城市中,乌鲁木齐市、石河子和阜康市全年空气质量排名均处于倒数,乌鲁木齐和阜康空气污染属于混合型污染,石河子属于煤烟沙尘型污染;而另外这三个城市都位于天山北坡和准噶尔盆地边缘(如图 1),属于山盆体系下的河谷绿洲城市,冬季在冷高压的控制下多为静风天气,大气层结稳定,逆温层较厚,阻止了空气水平和垂直运动,导致污染物集聚、扩散困难,机动车引起的  $\text{NO}_2$  污染应该引起重视。

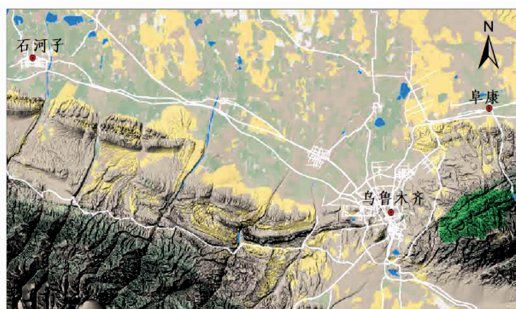


图 1 研究区概况示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the research area

### 1.2 监测方法与数据处理

#### 1.2.1 车流量数据

2018 年—2019 年,在乌鲁木齐、石河子和阜康市各城市主干道的交通节点利用数码相机进行车流量监测,早晨的监测时间在 9—12 点,中午在 12—15 点,傍晚在 19—20 点,早晚车流监测时间正值高峰期。在市中心分别将车辆监测点选取在新医路立交桥(附近是新疆师范大学昆仑校区)、石河子大学附近、阜康天赐宾馆。其监测点附近均为商业区、学校等人群密集地,车流量大。

#### 1.2.2 $\text{NO}_2$ 垂直柱浓度数据

观测仪器 miniMAX-DOAS 是德国海德堡大学和 Hoffmann 公司联合开发的利用太阳散射光反演地面  $\text{NO}_2$  垂直柱浓度的便携式应用被动 DOAS 技术的多轴差分吸收光学设备。仪器在测量过程中会产生包括暗电流和电子偏移的噪音,选用 350~430 nm 波长来反演对流层  $\text{NO}_2$  垂直柱浓度,将光谱导入 Windoas 软件消除系统噪音带来的影响。图 2(a, b)分别为 2018 年 12 月 13 日 11:30 在乌鲁木齐市 MAX-DOAS 固定监测获得的  $30^\circ$  仰角的观测光谱反演示例的拟合曲线与拟合残差。参照《国家环境空气质量检测规范》(试行),根据城市人口分布、车流量状况,同时根据城市功能布局、出入城市状况制定各城市的移动监测路线。乌鲁木齐、石河子和阜康各城市的固定监测点选择在新疆师范大学昆仑校区、石河子大学附近和阜康天赐宾馆附近,固定监测的时间为每天 9:00—19:00。车载 MAX-DOAS 监测是沿着各城市的外环路进行监测,监测时间同样也在 9:00—19:00。乌鲁木齐移动监测在围绕外环路和纵贯市区的河滩快速路,石河子沿北一、西三、北十五、东七路进行监测,阜康市围绕准噶尔路、Z529、G335 进行环城监测。选取 2018 年—2019 年进行固定监测和移动监测的数据。对车流量和  $\text{NO}_2$  浓度的数据进行了  $t$  检验和相关性分析,以及结合车载 MAX-

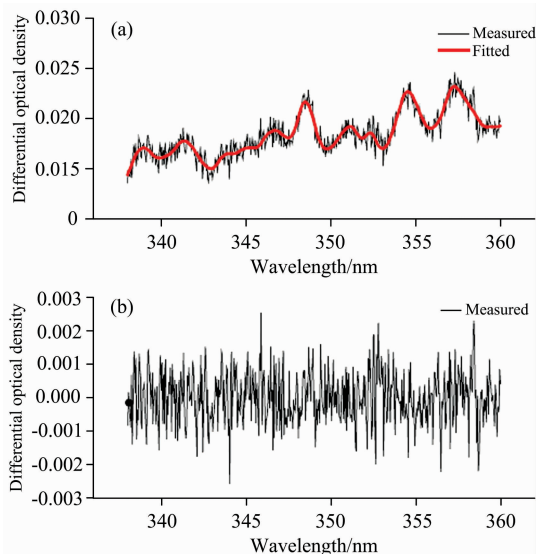


图 2 MAX-DOAS 测量光谱反演示例

(a): 拟合曲线; (b): 拟合残差

Fig. 2 MAX-DOAS measurement spectral inversion example

(a): Fitting curve; (b): Fitting residual

DOAS 监测的 NO<sub>2</sub> 数据利用 Arcgis 进行克里金插值分析。

### 1.2.3 各功能区数量数据

在高德开发平台 <https://lbs.amap.com/> 经过 POI 搜索得到, 以车辆监测点为中心, 搜索附近 1 000 m 范围内的各种功能区, 并统计其数量。

## 2 结果与讨论

### 2.1 各城市车流量的时间变化

图 3 为三个城市的车流量日变化都呈现出“早晚高, 晚上略高于早晨”的特征。乌、石、阜在每日早高峰车流量分别达到 1 418, 204 和 183 辆/5 min, 此后车流量逐渐降低, 在 12:00—14:00 到达低谷, 分别为 1 351, 191 和 171 辆/5 min, 晚上 19:00—21:00 出现一天最高峰, 分别是 1 448, 211 和 201 辆/5 min。如图 4, 经过 *t* 检验 ( $p < 0.05$ ), 三个城市车流量的季节变化显著。但是最大值都出现在冬季, 乌、石、阜三个城市冬季车流量分别为 1 483, 270 和 211 辆/5 min。乌鲁木齐市和阜康都是夏季时车流量最低, 分别为 1 247 和 147 辆/5 min。石河子在秋季时车流量最低, 为 148 辆/5 min。乌、石、阜三个城市车流量季节变化分别为: 冬 > 春 > 秋 > 夏、冬 > 春 > 夏 > 秋、冬 > 春 > 秋 > 夏。

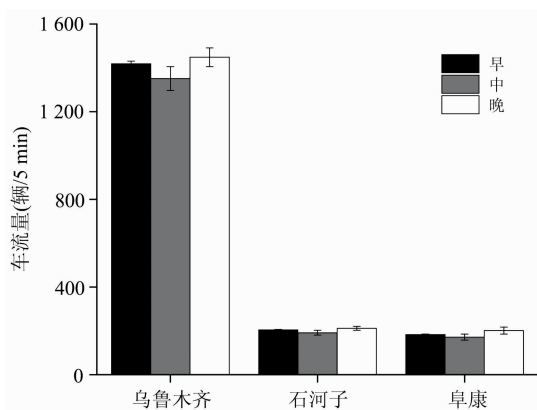


图 3 各城市车流量的日变化

Fig. 3 Diurnal variation of traffic flow in different cities

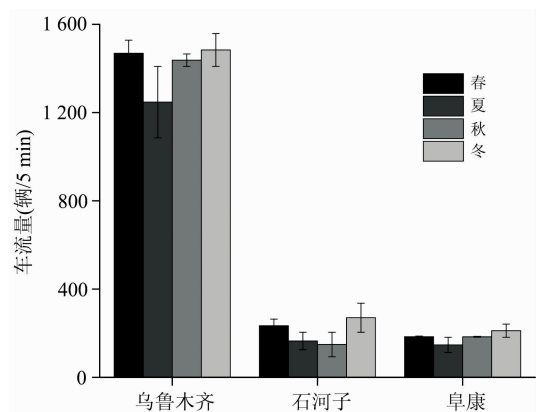


图 4 各城市车流量的季节变化

Fig. 4 Seasonal variation of traffic flow in different cities

### 2.2 各城市 NO<sub>2</sub> VCD 的时间变化

由图 5 可见, 三个城市对流层 NO<sub>2</sub> VCD 和车流量的日变化趋势一致, 都呈现出“早晚高, 中午低”的趋势, 并且晚上浓度最高。三个城市早上和晚上、中午和晚上差异显著 ( $p < 0.05$ ), 早上和中午的 NO<sub>2</sub> VCD ( $p > 0.05$ ) 差异不显著。但是三个城市 NO<sub>2</sub> VCD 变化幅度不同, 其中乌鲁木齐变化幅度最大, 为  $14.03 \times 10^{15} \text{ molec} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。石河子和阜康两个城市变化幅度相对平缓, 最大变幅分别是  $9.15 \times 10^{15}$  和  $10.10 \times 10^{15} \text{ molec} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。三个城市对流层 NO<sub>2</sub> VCD 在 19:00 达到最高峰, 在 13:00 达到低谷。13:00—15:00 NO<sub>2</sub> VCD 处于相对平稳状态, 而 15:00—19:00 间 NO<sub>2</sub> VCD 急剧增长。全天大部分时间乌鲁木齐市对流层 NO<sub>2</sub> VCD 均大于石河子和阜康两个城市。图 6, 在季节变化中, 除了春季和秋季 ( $p > 0.05$ ) 差异性不显著外, 其余季节差异性均显著。三个城市的 NO<sub>2</sub> VCD 都在冬季达到最大值, 分别为 18.9, 13.55 和  $14.95 \times 10^{15} \text{ molec} \cdot \text{cm}^{-2}$ ; 都在夏季达到最小, 分别为 13.38, 10.71 和  $8.82 \times 10^{15} \text{ molec} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。乌鲁木齐市在四个季节的 NO<sub>2</sub> VCD 均大于石河子和阜康, 石河子在春、夏、秋三个季节大于阜康。三个城市的季节变化都是: 冬 > 春 > 秋 > 夏。

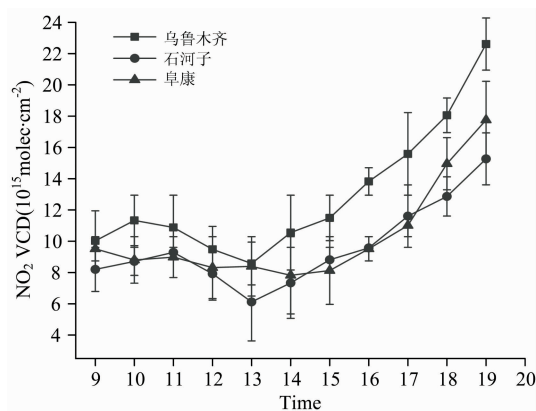


图 5 各城市 NO<sub>2</sub> VCD 的日变化

Fig. 5 Diurnal variations of NO<sub>2</sub> VCD in cities

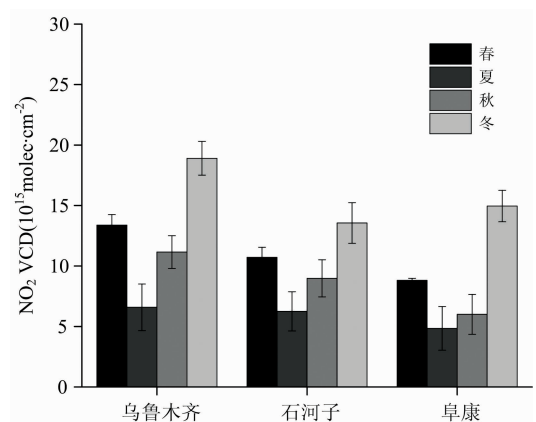


图 6 各城市 NO<sub>2</sub> VCD 的季节变化

Fig. 6 Seasonal changes in NO<sub>2</sub> VCD in various cities

### 2.3 各城市市区车流量和 NO<sub>2</sub> VCD 的分布

三个城市中车流量和 NO<sub>2</sub> VCD 都在冬季呈现最大值, 利用 2018 年和 2019 年冬季移动监测的 NO<sub>2</sub> VCD 数据进行克里金插值分析, 并叠加各车辆监测点的早晚车流量状况, 分析车辆流向, 得到图 7(a, b, c)。在乌鲁木齐新医路、广汇商业区和燕儿窝车流量是晚 > 早, 平均车流量为 1 298, 1 561 和 241 辆/5 min, 而在苏州路和华凌市场是早 > 晚, 平均车流量为 583 和 912 辆/5 min, 北部苏州立交桥车流量最小。虽各监测点的早晚车流量有所差异, 但车流的流向基本一致, 车辆向新医路和广汇商业区集中。在由图 7(a) 整体上可以看出乌鲁木齐的 NO<sub>2</sub> VCD 浓度的高值集中在市区内部,

与车流量的分布近似, NO<sub>2</sub> VCD 的浓度在车流量较高的广汇商业区和华凌市场达到高值, 分别为  $34.23 \times 10^{15}$  molec · cm<sup>-2</sup>, 并且在东南风的主导下, 市区西北角出现高值, 达到  $22.43 \times 10^{15}$  molec · cm<sup>-2</sup>。石河子市早晚车流量最大值都出现在距离市区较近的玛河大厦, 平均车流在 290 辆/5 min [见图 7(b)], 最小出现在北工业园区, 平均值在 50 辆/5 min。在早晚的车流对比中, 除了玛河大厦车流量为早 > 晚, 其余都是晚 > 早。车流量流向基本在市区中心和客运站集中。NO<sub>2</sub> VCD 高值集中南部, 在南部车流较大的玛河大厦附近浓度最大为  $16.83 \times 10^{15}$  molec · cm<sup>-2</sup>, 在西北风的主导下, 浓度在东南达到高值。在车流量最小的工二连浓度最

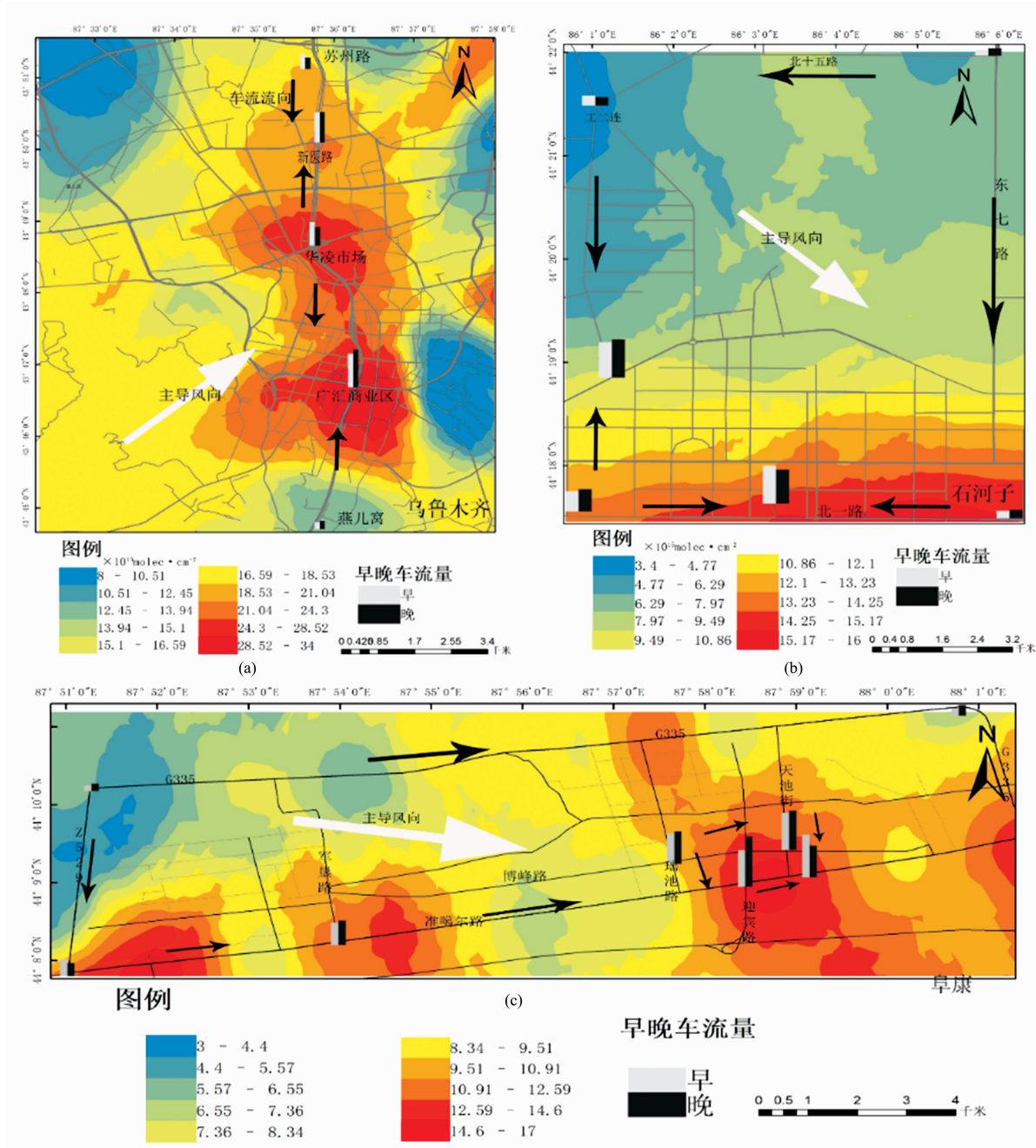


图 7 各城市车流量和 NO<sub>2</sub> 浓度的空间分布状况

Fig. 7 The spatial distribution of traffic flow and NO<sub>2</sub> concentration in each city



小,为  $3.67 \times 10^{15} \text{ molec} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。在阜康市,可以看出有两个循环,一个是内流一个是外流[见图 7(c)],外流基本流向不变,均为流向市区内和工厂,在市中心的内流中早晨是向阜康天赐宾馆附近的商业区集中,晚上有中国烟草和天池商贸两个集中点。 $\text{NO}_2$  VCD 在南部有三个高值,第一个小高峰在西南部的工业区,为  $15.67 \times 10^{15} \text{ molec} \cdot \text{cm}^{-2}$ ,第二个高值在军垦路,第三个高值在市中心的阜康天赐宾馆附近,其车流量最大。在西北风的主导下,东南部出现污染次高值,为  $13.75 \times 10^{15} \text{ molec} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。由此可以看出各城市车流量差异明显,最大值和最小值都是乌鲁木齐 > 石河子 > 阜康,车流量最大值都出现在市区人流密集的商业区和贸易中心,而最小值都在远离中心城市的未完全开发的地方。车流量较大的地方,  $\text{NO}_2$  VCD 也会出现高值。

2.4 各城市  $\text{NO}_2$  VCD 成因分析

2.4.1 内因

表 1 车流量与  $\text{NO}_2$  VCD 的相关性分析

Table 1 Correlation analysis between traffic flow and  $\text{NO}_2$  VCD

$\text{NO}_2$ VCD	早	中	晚	春	夏	秋	冬
车流量	0.538**	0.506*	0.528**	0.639**	0.266	0.703**	0.750**

注: \*\* 在 0.01 水平下显著相关, \* 在 0.05 水平下显著相关

2.4.1.2 车流量与各功能区数量的关系

如表 2,车流量的大小与各功能区的数量呈显著正相关。车辆在城市中各功能区间高度流动,早晨从住宅区流向商业区、科教单位、政府机关、企业公司,中午则从办公场所流向餐饮购物等地,晚上则与早上相反,从办公区返回到住宅区。正是人们居住空间的分异,造成车辆的移动,则带来  $\text{NO}_2$  的空间分异。在表 3 中可以看出,餐饮购物较多的地方车流量相应较大,  $\text{NO}_2$  浓度高。其中,车流量与住宅相关性最强,因为人们的各项活动都是以住宅区为出发地和目的地。

表 2 车流量与各功能区数量的相关性分析

Table 2 Correlation analysis between traffic flow and the number of functional areas

	餐饮购物	住宅	科教	政府机关	企业公司
车流量	0.741**	0.924**	0.790**	0.780**	0.878**

注: \*\* 在 0.01 水平下显著相关, \* 在 0.05 水平下显著相关

2.4.2 外因

2.4.2.1 地形的影响

天山北坡的乌鲁木齐西、南、东三面环山,呈喇叭状地形;阜康则在这样喇叭口地形的右侧,石河子南倚天山,北接古尔班通古特沙漠。山盆体系下的河谷绿洲城市,夏、秋季山谷风表现明显,大气对流层较厚,对流运动明显,污染物易于扩散。在冬、春季,准噶尔盆地冷空气南下,遇到高大天山山脉阻挡返折向下,积聚于山脚下,形成厚的逆温层,大气层结稳定,不利于污染物垂直扩散;经常出现静风天气,并且持续时间长,不利于污染物水平扩散,导致污染物集聚,引发冬季严重的大气污染。

2.4.1.1 车流量对  $\text{NO}_2$  VCD 的影响

对三个城市早中晚和春夏秋冬的车流量数据与相对应的  $\text{NO}_2$  VCD 数据进行相关性分析。表 1 所示,车流量与  $\text{NO}_2$  VCD 的日变化与季节变化都呈现显著正相关。 $\text{NO}_2$  VCD 出现的高峰与早晚上下班高峰期相一致,中午由于午间休息时间短,部分通勤人员选择在单位附近就餐,车流量出现“低谷”,而傍晚下班后时间充裕休闲人数增多车流量最大。早晚由于太阳高度角较小,太阳光强度弱,并且正值早晚车流高峰期,机动车排放的  $\text{NO}_2$  不易分解,则早晚的车流量与  $\text{NO}_2$  VCD 相关性最强;虽中午车流较早、晚下降不明显,但由于中午光照强,  $\text{NO}_2$  发生光化学反应,则中午  $\text{NO}_2$  VCD 较低。在车流量与  $\text{NO}_2$  VCD 的季节相关性中,冬 > 秋 > 春 > 夏。冬季相关性最强,因为冬季天气寒冷,人们多会选择开车出行,车流最大,则  $\text{NO}_2$  VCD 也最高。

表 3 各城市数车点附近 1 km 范围内的功能区数量

Table 3 The number of functional areas within 1 km of each city's car-count point

	餐饮购物	住宅	科教	政府机关	企业公司	
乌鲁木齐	苏州立交桥	1 155	48	54	69	156
	新医路立交桥	1 490	84	134	92	230
	华凌市场	1 741	102	131	129	340
	广汇商业区	1 732	112	101	169	265
	燕北路	83	4	6	9	23
石河子	玛河大厦	769	19	83	41	34
	西公园东	74	4	12	6	18
	客运站	1 178	21	17	17	96
	工二连	4	0	1	0	19
	北工业园区东北角	1	0	0	0	3
阜康	娃哈哈食品厂	6	0	0	3	6
	中国烟草	1 199		24	55	58
	白润时代广场	380	17	19	26	25
	商贸中心	1 311	31	45	103	94
	阜康天赐饭店	1 256	32	44	127	86
	准噶尔路军垦路	6	1	2	1	3
	阜西工业园区	0	0	0	0	1
国道 335 右上角	1	1	0	0	1	
国道 335 左上角	0	0	0	1	0	

2.4.2.2 风向风速影响

风会对大气污染物起到扩散作用,首先风向会影响污染物的水平移动方向,其次风速大小影响污染物扩散程度。由图 8 和图 9 可知,三个城市的 0~4 和 4~8  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  的低风速天气的占比在冬季最高。其次是秋、春、夏。这与  $\text{NO}_2$  浓度的季节变化大致相同,因低风速天气不易于污染物扩散。乌

鲁木齐在春、夏、秋三个季节主导风向是东北风，结合乌鲁木齐喇叭状的地形，风从喇叭口进入。但是春、夏季  $12.1 \sim 16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  占比分别为 15% 和 29%，有利于污染物的扩散，则市区内污染物较小。冬季则以西南风为主导，将污染物传输至城区，并且  $4.1 \sim 8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的风速占到 96%，不利于污染物的扩散稀释，则  $\text{NO}_2$  VCD 较高。石河子全年以西、西北

风为主，将西北部工业区的污染传输至下风向的市区，冬季  $0 \sim 4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的风速占比达到 81%，更不利于污染物的扩散。阜康春、秋季以东北风为主，夏、冬季以西、西北风为主，而这些风向都会受到南部山脉的阻挡，冬季  $0 \sim 4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的风速占 48%，导致污染物聚集。

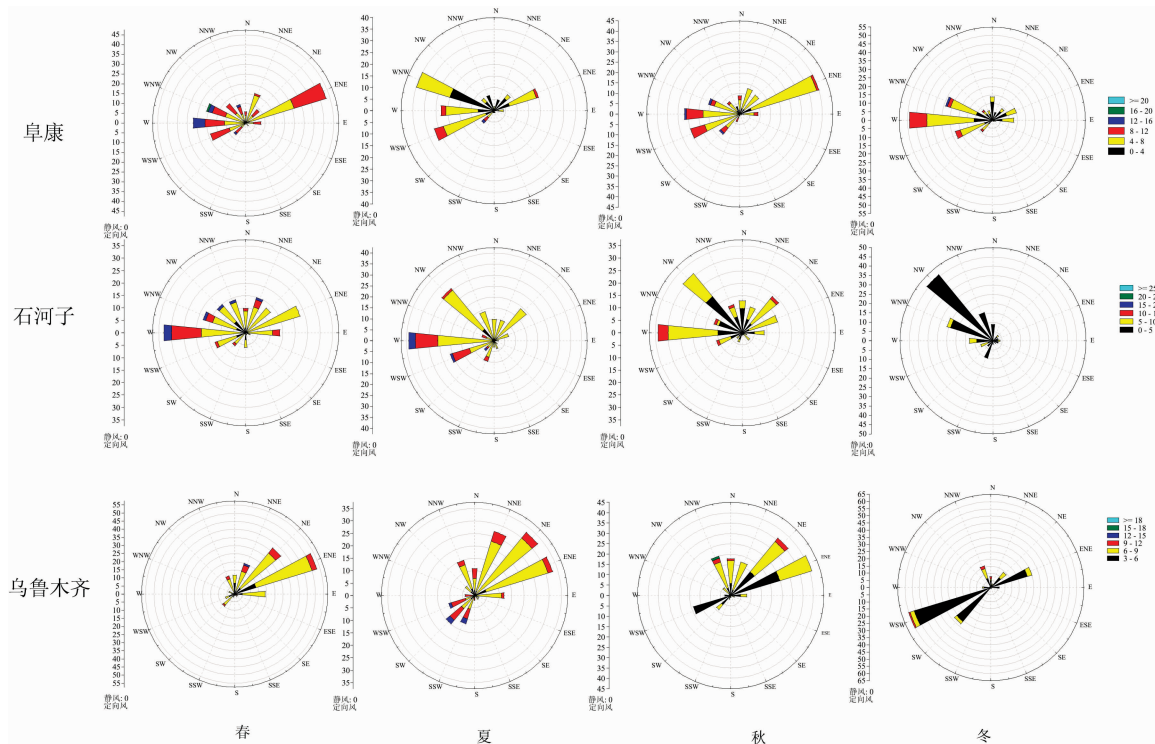


图 8 各城市四季的风速的风向

Fig. 8 Wind direction of wind speed in each city in four seasons

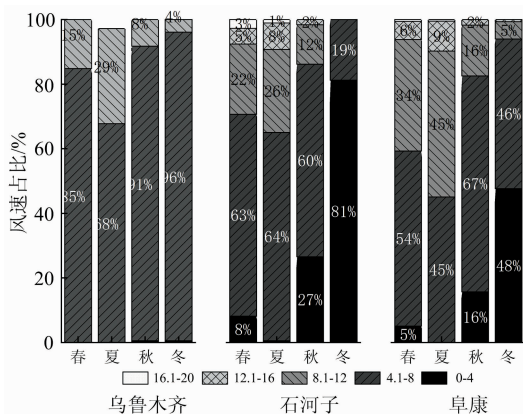


图 9 各城市的四季风速占比情况

Fig. 9 Proportion of wind speed in each city in four seasons

2.5 影响污染的人为因素

天山北坡的三类城市的车流量和污染特征，与我国其他地区的城市出现相同变化趋势。日变化呈现“双峰型”，季节变化均为冬季最高，夏季最低，在空间上车辆都集中于市区，污染物浓度则由市区向城市外围逐渐递减。在内地个别

城市出现周末效应，而天山北坡三类城市并无此发现。乌鲁木齐车流量最大，但与其他城市研究结果对比发现，乌鲁木齐车流量 ( $1\,049 \text{ 辆}/5 \text{ min}$ ) 大于天津<sup>[16]</sup> ( $586 \text{ 辆}/5 \text{ min}$ )、北京<sup>[17]</sup> ( $500 \text{ 辆}/5 \text{ min}$ )、南京<sup>[18]</sup> ( $368 \text{ 辆}/5 \text{ min}$ ) 等城市。天山北坡三类城市年平均  $\text{NO}_2$  VCD (乌鲁木齐为  $10.48 \times 10^{15} \text{ molec} \cdot \text{cm}^{-2}$ ，石河子为  $9.87 \times 10^{15} \text{ molec} \cdot \text{cm}^{-2}$ ，阜康为  $8.65 \times 10^{15} \text{ molec} \cdot \text{cm}^{-2}$ ) 小于京津冀地区 ( $18 \times 10^{15} \text{ molec} \cdot \text{cm}^{-2}$ )、山东<sup>[19]</sup> ( $17.34 \times 10^{15} \text{ molec} \cdot \text{cm}^{-2}$ )，大于苏北、安徽、浙江杭州、宁波以南等地区<sup>[20]</sup> ( $5 \times 10^{15} \text{ molec} \cdot \text{cm}^{-2}$ )、珠江三角洲<sup>[21]</sup> ( $7.4 \times 10^{15} \text{ molec} \cdot \text{cm}^{-2}$ )。天山北坡的乌鲁木齐、石河子和阜康车流数量与  $\text{NO}_2$  浓度有较强的相关性，这便是天山北坡污染浓度高的内在原因。表 4 对比发现，天山北坡三类城市在 2009 年—2019 年 10 年间经济生产总值增长率在 200% 以上，大于北京、上海等发达城市，石河子机动车增长最为迅速，达到 555%，其次是乌鲁木齐，达到 375%，远大于其他城市，说明在这 10 年间，天山北坡城市经济迅猛发展，机动车保有量快速增长，以煤炭为主的能源结构、火力发电、化工生产、机动车尾气排放，随之带来严重的环境污染。

## 2.6 影响污染的自然因素

国内的平原型和沿海型城市污染严重主要是由于内在排放强度大,北方地区有冬季燃煤和机动车辆的排放,南方地区有工业污染和机动车排放,并且受季风气候影响,夏季高温多雨,冬季寒冷干燥,多静稳天气则形成严重污染;盆地型城市工业发展迅速,污染排放突出,由于地形的限制,位于背风坡或四周高、中间低,形成焚风效应和逆温天气,污

染物不易扩散。这些城市污染严重不仅有内在的污染排放还有外部的地形和气象因素影响。而在我国西北部的天山山脉和准噶尔盆地这样的巨大山盆体系下,形成由河流灌溉而来的河谷绿洲城市,在大陆性气候的作用下,西北地区冬季漫长,供暖期长达半年之久,并且高大的天山山脉阻挡南下的冷空气,在此回旋,形成深厚逆温层,大气层结温度,污染物不易扩散。

表 4 国内城市对比分析  
Table 4 Comparative analysis of domestic cities

城市类型	代表城市	2009 年—2019 年 经济生产总值 增长率/%	2009 年—2019 年 机动车保有量 增长率/%	影响因素
平原型城市	北京	198.09	47.61	自然: 1. 北部和西北有 1 000 m 左右山脉阻挡, 背风坡气流下沉; 2. 夏季高温多雨, 冬季寒冷干燥; 人为: 1. 以煤炭为主的能源结构; 2. 机动车保有量基数大; 3. 农业秸秆还田。
沿海型城市	上海	156.06	182.28	自然: 1. 亚热带季风气候、冬季风速小, 降水较少, 污染物聚集; 2. 夏、秋季降水偏多, 东南季风有利于污染物的扩散和稀释; 人为: 1. 机动车保有量较大; 2. 人口密集; 3. 工业发达的浙江大部、安徽东南、江苏南部潜在外来污染源影响。
盆地型城市	成都	277.84	143.90	自然: 1. 位于青藏高原背风区, 形成“中间低, 四周高”的地形; 2. 冬季高层出现“干暖盖”, 静风频率高, 逆温大幅出现; 人为: 1. 经济增长迅速; 2. 机动车保有量的增加。
天山北坡 河谷绿洲型城市	乌鲁木齐 石河子 阜康	211.71 262.30 215.12	375.68 555.68 26.00	自然: 1. 位于天山北坡的河谷地区, 受高大天山山脉的阻挡, 冬季形成深厚逆温层; 2. 冬季多静稳天气; 人为: 1. 供暖期长达 6 个月; 2. 经济的快速发展; 3. 机动车保有量的连续增长。

## 3 结 论

车流量对 NO<sub>2</sub> 有明显贡献, 并且 NO<sub>2</sub> 污染严重的原因不仅有污染物的排放, 另外城市的形态和风向风速对其污染的扩散有明显影响, 结合乌鲁木齐、石河子、阜康三类不同规模城市车流量, 利用地基多轴差分光谱仪 (Mini MAX-DOAS) 对 NO<sub>2</sub> VCD 进行监测, 分析了不同城市车流量和 NO<sub>2</sub> VCD 的时间和空间变化, 并分析其原因, 得出以下结论:

(1) 天山北坡的乌鲁木齐、石河子、阜康三个城市的车流量和市区 NO<sub>2</sub> VCD 的日变化都呈现出“早晚高, 晚上高于早晨”的变化特征; 季节变化表现出冬春季大于秋季的特征; 这些时间变化上与人们的出行习惯和生活方式有密切关

系。三个城市的车流量状况: 乌鲁木齐 > 石河子 > 阜康。

(2) 三类城市的车流空间分布中, 各监测点的车流量有所差异并不是所有地点都是晚上 > 早晨, 这便造成了车流的明显流向, 经过分析显示车流向都集中于市中心或人群密集的商业中心等。住宅区的数量与车流量的数量最为相关, 这便产生了人们利用车辆在空间上的流动, 则形成污染物的空间分布。并且对车载 MAX-DOAS 监测的数据进行克里金插值分析, NO<sub>2</sub> 浓度高值区也同样出现在车流密集的地点, 表明车流对 NO<sub>2</sub> VCD 的贡献显著。

(3) 天山北坡城市在近十年间经济增长率和机动车保有量迅速增长, 污染严重不仅由于大量人为排放, 更不能忽略的是三个城市都处于都处天山-准噶尔盆地的山盆体系下, 阻挡南下的冷空气, 造成污染物聚集。另外冬春季低风速天数较多, 逆温层深厚、大气层结稳定, 不利于污染物的扩散。

## References

- [1] WANG Jing-fa, SONG Hui, BA Li-meng(汪晶发, 宋慧, 巴利萌). Environmental Pollution and Control(环境污染与防治), 2020, 42(6): 666.
- [2] FENG Guo-qiang, LI Jing, WU Zhuo-er, et al(冯国强, 李菁, 武卓尔, 等). China Population, Resources and Environment(中国人口·资源与环境), 2020, 30(3): 93.

- [ 3 ] Richter A, Begoin M, Hilboll A, et al. Atmospheric Measurement Techniques Discussions, 2011, 4(19): 1147.
- [ 4 ] Velders G J M, Granier C, Portmann R W, et al. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2001, 106(D12): 12643.
- [ 5 ] Lee Hanlim, Ryu Jaeyong, Jeong Ukkyo, et al. Bull. Korean Chem. Soc., 2014, 35(12): 3427.
- [ 6 ] Kim D R, Lee J B, Song C K, et al. Atmospheric Pollution Research, 2015, 6(5): 768.
- [ 7 ] ZHANG Wu-ting, ZHANG Xiu-ying, LIU lei, et al(章吴婷, 张秀英, 刘磊, 等). Journal of Remote Sensing(遥感学报), 2018, 22(2): 335.
- [ 8 ] YAN Huan-huan, ZHANG Xing-ying, WANG Wei-he(闫欢欢, 张兴赢, 王维和). Science and Technology Review(科技导报), 2015, 33(17): 41.
- [ 9 ] CHENG Yun-chu, WU Ying(程韵初, 吴莹). Progress in Geophysics(地球物理学进展), 2020, 35(5): 1644.
- [10] CUI Yuan-zheng, JIANG Lei, ZHANG Wei-shi, et al(崔远政, 姜磊, 张为师, 等). Acta Scientiae Circumstantiae(环境科学学报), 2019, 39(12): 4152.
- [11] LI Su-wen, LIU Wen-qing, QIN Min, et al(李素文, 刘文清, 秦敏, 等). Journal of Safety and Environment(安全与环境学报), 2011, 11(1): 118.
- [12] WANG Zhuo-ru, ZHOU Bin, WANG Shan-shan, et al(王焯如, 周斌, 王珊珊, 等). Acta Physica Sinica(物理学报), 2011, 60(6): 182.
- [13] WU Zi-yang, XIE Pin-hua, XU Jin, et al(吴子扬, 谢品华, 徐晋, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2020, 40(3): 720.
- [14] TONG Ze-peng, LI Yan-hong, LIU Yan, et al(仝泽鹏, 李艳红, 刘岩, 等). Environmental Pollution and Control(环境污染与防治), 2018, 40(7): 812.
- [15] WANG Zhang-jun, HAO Jing, SONG Chen-guang, et al(王章军, 郝菁, 宋晨光, 等). Laser and Optoelectronics Progress(激光与光电子学进展), 2020, 57(9): 242.
- [16] ZHAO Jing-qi, JI Ya-qin, LI Yue-yang, et al(赵静琦, 姬亚芹, 李越洋, 等). Research of Environmental Sciences(环境科学研究), 2019, 32(3): 399.
- [17] MENG Jian, FU Hua, ZHAO Xiao-lin, et al(孟健, 付桦, 赵晓林, 等). Journal of Capital Normal University • Natural Science Edition(首都师范大学学报 • 自然科学版), 2006, (2): 89.
- [18] YANG Hao-ming, WANG Hui-zhong, WU Yun-bo(杨浩明, 王惠中, 吴云波). Environmental Science and Technology(环境科技), 2011, 24(S2): 98.
- [19] ZHOU Chun-yan, LI Qing, HE Ying-xia, et al(周春艳, 厉青, 何颖霞, 等). China Environmental Science(中国环境科学), 2015, 35(8): 2281.
- [20] WEI Ying-ying, YANG Su-qin, CHEN Zhi-quan, et al(韦英英, 杨苏勤, 陈志泉, 等). Environmental Science and Technology(环境科学与技术), 2018, 41(3): 80.
- [21] LIU Xian-tong, ZHENG Teng-fei, WAN Qi-lin, et al(刘显通, 郑腾飞, 万齐林, 等). Journal of Tropical Meteorology(热带气象学报), 2015, 31(2): 193.

## Study on the Relationship Between Urban Traffic Flow and Tropospheric NO<sub>2</sub> Vertical Column Density in Oasis on the North Slope of Tianshan Mountain

ZHAO Xiao-rong<sup>1,2</sup>, LI Yan-hong<sup>1,2\*</sup>

1. College of Geographical Science and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, China

2. Key Laboratory of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Xinjiang Laboratory of Lake Environment and Recourse in Arid Area, Urumqi 830054, China

**Abstract** Inquiring into the northern region of Tianshan Mountain valley oasis, urban traffic and the link between tropospheric NO<sub>2</sub> vertical column density, Employing ground-based multi-axis difference spectrometer, (Mini MAX-DOAS) in 2018—2019, the north slope of Tianshan Mountains, economic belt comprehensive city Urumqi, Shihezi and in addition, medium-sized city, small continuous fixed monitoring Fukang city downtown area, carrying on the vehicle-mounted mobile monitoring on the city traffic trunk road, based on the urban traffic condition. Studying the influence of the tropospheric NO<sub>2</sub> vertical column density, and analysis of mountain valley oasis city with developed cities of middle basin system's pollution differences. The results show that: (1) Medium cities of the north slope of Tianshan Mountain cities of daily mean value flow in Urumqi (1 406/5 min) greater than the small and medium-sized cities, medium-sized city Shihezi (203/5 min) and the small city Fukang (185/5 min), there is



no significant difference ( $p > 0.05$ ), and all kinds of city  $\text{NO}_2$  VCD overall significant difference ( $p < 0.05$ ), the daily variation of the peak, Urumqi ( $22.613 \times 10^{15}$  molec  $\cdot \text{cm}^{-2}$ )  $>$  Fukang ( $17.758 \times 10^{15}$  molec  $\cdot \text{cm}^{-2}$ )  $>$  Shihezi ( $15.272 \times 10^{15}$  molec  $\cdot \text{cm}^{-2}$ ). The daily variation trend of traffic flow and  $\text{NO}_2$  VCD in the three cities is consistent, showing a trend of "high in the morning and evening, low at noon". In the seasonal variation, the traffic flow and  $\text{NO}_2$  VCD of the three types of cities are: winter and spring  $>$  autumn and summer; (2) Although the traffic flow at the monitoring points in the morning and evening is different, the traffic flow of the three types of cities is concentrated near the city center; The movement monitoring data show that the high  $\text{NO}_2$  VCD value occurs in urban areas with high traffic flow, and when the wind direction is stable in each city, the downwind concentration is greater than the upwind concentration. Due to the differences of living space, people's activities in various functional areas of the city, traffic flow and  $\text{NO}_2$  VCD are concentrated in the commercial district with dense population, indicating that vehicles have a great contribution to  $\text{NO}_2$  VCD; (3) 2009—2019, ten years north slope of Tianshan Mountain medium cities economic growth rate of GDP over 200%, Urumqi, Shihezi motor vehicle growth rate than developed cities such as Beijing, Shanghai, rapid urban development, and in the valley oasis area, low meteorological terrain north, the winter inversion layer, deep calm wind days more, heating period 6 months long, causing serious pollution in winter. In addition to the anthropogenic pollution discharge, natural factors contribute to the accumulation of pollutants in the north slope of Tianshan Mountain.

**Keywords** The north slope of Tianshan Mountain; Traffic flow; Troposphere  $\text{NO}_2$  vertical column density; Ground-based MAX-DOAS(Multi-axis differential optical absorption spectroscopy)

(Received Jul. 17, 2020; accepted Oct. 28, 2020)

\* Corresponding author

## 关于《光谱学与光谱分析》调整审稿费收费标准的通知

尊敬的《光谱学与光谱分析》广大作者、读者：我刊自 2018 年 7 月 1 日以后登记的稿件向投稿作者收取审稿费 200 元/篇，在您投稿之前，为免受经济损失，请您必须考虑：

1. 没有创新的一般性稿件，请您不要投稿。
2. 没有国家级基金资助的稿件，请您不要投稿。
3. 不是光谱专业的稿件，请您不要投稿。
4. 与其他文章重合率超过 10% 的稿件，请您不要投稿。

所投稿件经初审通过后，作者会收到缴纳审稿费的通知。请作者及时从我刊网站(<http://www.gpxygpx.com>)查询稿件是否处于交审稿费状态，在收到通知后，请及时缴纳审稿费；如在 10 天之内没有收到您的审稿费，被视为自动放弃，我刊不再受理。交费后我刊开据增值税电子普通发票，并传至作者提供的电子邮箱，作者可自行打印。

联系电话：010-62181070, 62182998

电子邮箱：chngpxygpx@vip.sina.com

感谢您多年来对《光谱学与光谱分析》的支持和厚爱！

《光谱学与光谱分析》期刊社

2018 年 6 月 30 日