

乌鲁木齐市大气污染物NO₂输送路径及潜在源分析

王 勃^{1,2}, 李艳红^{1,2*}

(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:为深化对乌鲁木齐市大气污染物NO₂的传输路径和潜在来源的研究,文章利用2017—2022年OMI遥感监测对流层NO₂垂直柱浓度(VCD)数据分析了乌鲁木齐市NO₂浓度的大气污染特征,运用后向轨迹模型、潜在源区贡献分析法和浓度权重轨迹分析法,揭示了不同季节NO₂潜在源区及其对研究区NO₂ VCD的贡献变化趋势。结果表明:五年来,乌鲁木齐市NO₂ VCD波动下降,各区NO₂ VCD在2020年春季变幅最大,降幅介于18.45%~35.25%之间;空间上高污染区范围持续缩小至人口基数较大的中心城区;乌鲁木齐市大气NO₂污染的气团轨迹受山盆体系的地形影响较大,春、秋、冬三季来自哈萨克斯坦境内的长距离气流频率持续提高(2022年占比分别为25.74%、21.11%、41.83%);影响NO₂污染的潜在源区呈现显著季节变化特征,秋冬季源区分布广、贡献度高,而春夏季源区分布狭窄、贡献度低。潜在源区主要为本地源区和西部源区,本地源区作为重度污染源区出现在秋冬季,对NO₂污染的贡献逐渐增强,源区范围逐渐收缩至乌鲁木齐市沙依巴克区和达坂城区;西部源区主要为中度污染区,近年来向西扩展至伊犁哈萨克自治州西南部、阿克苏地区以及巴音郭楞蒙古自治州等区域。

关键词: 乌鲁木齐; 对流层NO₂垂直柱浓度(VCD); 后向轨迹; 潜在源区贡献; 浓度权重轨迹

中图分类号: X511 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-9659(2024)02-0062-12

随着世界人口不断增加和人类活动不断升级,全球多数城市的空气质量持续恶化^[1],当前全世界有86%的城市(25亿人)NO₂暴露水平超过了世界卫生组织(WHO)推荐的每年最大建议值(20μg/m³)^[2]。在我国,99.68%的人口生活在NO₂污染水平超过WHO空气质量指导值(10μg/m³)的地区,随着城市化水平的不断提高,未来我国NO₂污染水平和人群暴露风险仍较高^[3]。作为O₃的重要前体物,NO₂是各国环保部门重点监控的六大大气污染物之一^[4-5],影响对流层化学结构,参与形成臭氧(O₃)、酸雨和气溶胶颗粒物(PM)^[6-7],严重损害人类健康、破坏当地生态环境^[8-10]。因此,城市NO₂污染问题是当前大气污染领域的研究热点之一。

目前,已有学者对大气NO₂污染的时空变化特征^[11-12]、影响因素^[13]、区域输送^[14-15]及遥感数据反演^[16-18]等方面进行了大量研究,指出城市大气污染的程度受多种因素的综合影响,包括气象条件、本地污染物排放和外来污染物输送。研究表明,风速较低、逆温较强等气象条件有利于形成污染天气^[19-20]。而外来污染物的输送受到局部地形条件、气象条件和区域污染物分布的影响,输送距离可以从几百米到区域、洲际甚至全球范围不等^[21]。因此,研究大气污染不仅需要追溯污染物排放源,还需分析大气污染的扩散路径和辐射范围^[22]。乌鲁木齐市位于天山山脉和准噶尔盆地之间,处于中天山峡谷北端的开口处,西南部为吐鲁番盆地^[23-24]。由于其地理位置的特殊性,南下的冷空气受天山山脉阻挡,易形成深厚的逆温层,导致城市污染物容易聚积,重污染天气出现频率较高^[14-15]。另外,作为天山北坡经济带的核心城市,近十年来,乌鲁木齐市经济生产总值(GDP)和机动车保有量增幅远高于北京、天津和南京等东部沿海城市^[25]。随着城市建设水平和机动车保有量快速增长,城市大气污染防治压力持续增大,需要不断提升区域大气污染监测、预警和防治能力,持续加强大气污染物的监测和防控。目前区域大气污染联防联控已成为乌鲁木齐市空气污染治理的焦点^[23]。

因此,为了更好地深化对乌鲁木齐市大气污染物NO₂的传输途径和潜在来源的研究,文章基于

[收稿日期]2023-10-11

[修回日期]2023-11-09

[作者简介]王 勃(1997-),男,硕士研究生,主要从事干旱区气候与环境方面研究,E-mail:bo17735734047@163.com.

*[通讯作者]李艳红(1977-),女,教授,主要从事干旱区气候与环境方面研究,E-mail:lyh0704@126.com.

2017—2022年乌鲁木齐市高光谱遥感监测NO₂数据与GDAS气象数据,利用后向轨迹模型分析不同季节乌鲁木齐市污染源气团的运动轨迹变化特征,并结合MeteoInfoMap平台的潜在源区贡献分析(PSCF)和污染物浓度权重轨迹分析(CWT)模块研究污染物潜在源区的分布范围及污染传输贡献的动态变化趋势,旨在为乌鲁木齐市大气污染防治和区域联防联控提供数据参考。

1 数据来源及研究方法

1.1 研究区概况

乌鲁木齐市作为天山北坡经济带核心城市(图1),西部、东部和南部与天山山脉(海拔3000~4500 m)接壤,北部为准噶尔盆地南缘,属于山盆体系下的河谷绿洲城市,为温带大陆性干旱气候^[26],一年内7、8月最热,平均气温为25.7℃;1月最冷,平均气温为-15.2℃,冬季受冷高压控制,常出现静风天气,大气层结稳定,逆温层较厚,导致污染物扩散困难^[27]。截至2021年底,乌鲁木齐市行政区域面积14216.3 km²,人口405.44万人,市机动车保有量达130.98×10⁴辆,中心城区包括新市区(326 km²)、水磨沟区(277.56 km²)、天山区(245 km²)和沙依巴克区(328 km²)。作为中国西部地区重要的交通枢纽和全疆路网中心,乌鲁木齐市有6条国家干线高速和国道过境,拥有兰新铁路、南疆铁路、北疆铁路等铁路交通,位于新市区的乌鲁木齐地窝堡国际机场是国家门户枢纽机场之一。根据新疆维吾尔自治区生态环境厅公布的数据,2022年市区大气污染物NO₂年均浓度较2020年同期降低了6.95%。尽管空气质量有所改善,但污染物减排速度较慢,城市NO₂污染问题需要持续关注和重视。

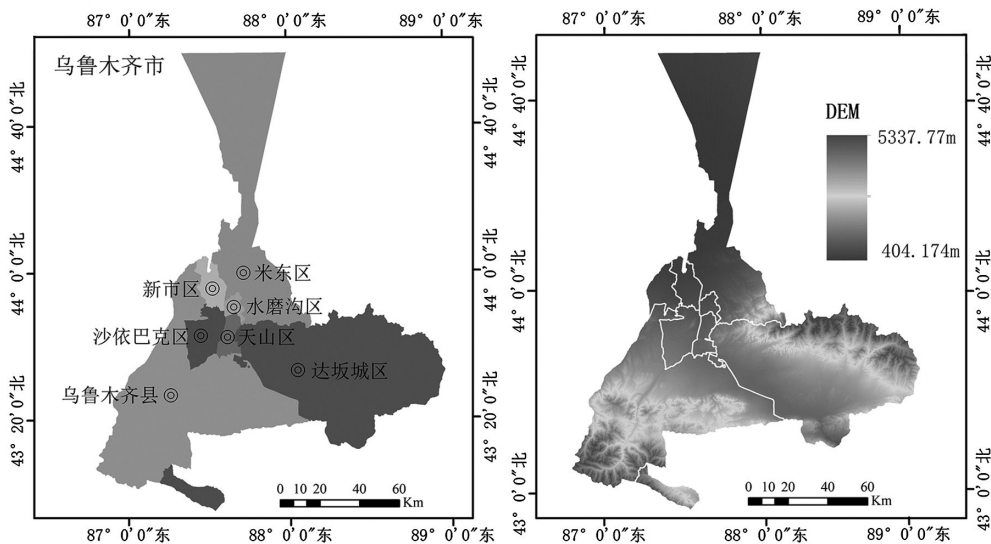


图1 研究区示意图

1.2 数据来源

文章选取了2017年、2019年、2020年和2022年臭氧检测仪(OMI)三级业务产品OMNO₂d (OMI-NO₂)的对流层NO₂VCD数据(<https://disc.sci.gsfc.nasa.gov/>),空间分辨率为0.25°×0.25°。研究范围包括乌鲁木齐市新市区、天山区、沙依巴克区、水磨沟区、米东区、达坂城区和乌鲁木齐县。该产品通过OMNO₂version3.0插值得到^[28],为了尽量减少云层对监测结果的影响,将云量低于30%、太阳天顶角小于85°作为主要的数据质量控制标准^[12]。OMI卫星传感器是Aura卫星上携带的高光谱大气环境监测传感器,振幅为2600 km,每天可覆盖全球一次^[29],乌鲁木齐市过境时间约为北京时间下午1点45分前后。

用于轨迹计算的存档气象数据从美国国家海洋和大气管理局(NOAA)提供的全球数据同化系统(GDAS)下载(<ftp://arlftp.arlhq.noaa.gov/pub/archives/gdas1>),包括大气温度、湿度、风场、气压等多种气象要素的分布和变化信息,水平分辨率为1°。另外,NO₂小时浓度数据来源于中国环境监测总站的全国城市空气质量实时发布平台,用于连接以乌鲁木齐市为终点的气流轨迹文件。

1.3 研究方法

1.3.1 混合单粒子拉格朗日轨迹模型

混合单粒子拉格朗日轨迹模型(HYSPLIT)是一个完整的扩散、输送和化学转化模型^[30],能够较全面地模拟大气污染物在不同气象条件和传播过程中的传输、扩散和沉降过程,被广泛地应用于单个区域或区域间污染物输送扩散、源汇问题的研究中^[31-32]。本研究基于2017—2022年GADS数据,选取43.838°N,87.599°E作为乌鲁木齐市的中心受点位置,使用MeteoInfo软件计算了从2017—2022年季节尺度上的48 h HYSPLIT后向轨迹^[33],高度为地面以上500 m^[34],空间分辨率为1°×1°。每日模拟时间为00:00—23:00(世界时)。利用MeteoInfoMap平台的潜在源区贡献分析(PSCF)和浓度权重轨迹分析(CWT)模块,根据欧式距离方法对不同季节的气团轨迹进行聚类。根据轨迹长短可判断气流移动速度,即相同时间内后向轨迹长表示气流移动速度快,轨迹短则表示移动速度慢。

1.3.2 潜在源区贡献分析方法(PSCF)

潜在源区贡献分析法(PSCF)又称滞留时间分析法,是以条件概率函数为基本原理,根据后向轨迹与污染物浓度分析潜在污染源区的方法^[35],该方法经常被用于确定影响研究区域污染物排放源的可能位置。具体而言,当通过格网(i, j)的气流轨迹所对应的气体浓度超过标准浓度限值时,该轨迹被视为污染轨迹,PSCF值就是通过计算污染轨迹的数量(m_{ij})占网格内所有轨迹条数(n_{ij})的比例来确定的。计算公式如下

$$PSCF_{ij} = \frac{m_{ij}}{n_{ij}} \quad (1)$$

PSCF值越高,区域成为NO₂潜在污染源区的可能性越大。由于距离较远的网格可能受到更多干扰,当距离增加时,PSCF的误差会逐渐增大,导致PSCF计算结果的不确定性增加。为了减少 n_{ij} 较少时可能引起的不确定性,将权重函数 W_{ij} 乘以PSCF的值,即 $WPSCF = W_{ij} \times PSCF$, W_{ij} 定义为

$$W_{ij} = \begin{cases} 1.00 & (80 < n_{ij}) \\ 0.70 & (20 < n_{ij} \leq 80) \\ 0.42 & (10 < n_{ij} \leq 20) \\ 0.05 & (n_{ij} \leq 10) \end{cases} \quad (2)$$

1.3.3 浓度权重轨迹分析(CWT)

由于PSCF只能反映每个网格污染轨迹的比例,当区域具有相同WPSCF值时,很难区分潜在源的污染贡献程度^[36]。为了克服这一限制,进一步采用CWT方法计算潜在污染源气流轨迹的数值权重,定量分析不同污染源区域的污染程度^[37]。CWT计算方法如下

$$C_{ij} = \frac{\sum_{l=1}^M C_l \cdot T_{ijl}}{\sum_{l=1}^M ij l} \cdot W(n_{ij}) \quad (3)$$

式中, C_{ij} 为单元网格(i, j)的平均权重浓度, l 代表轨迹, M 表示轨迹总数, C_l 为轨迹 l 经过网格时监测的NO₂浓度, T_{ijl} 为轨迹 l 在经过网格单元(i, j)过程中所花费的时间。与PSCF方法一样,CWT方法也采用权重函数 W_{ij} 来消除其不确定性。文章中高 C_{ij} 值表明网格单元中的潜在污染源会导致乌鲁木齐市的NO₂高污染值。

2 结果与分析

2.1 卫星反演对流层NO₂柱浓度数据适用性分析

为验证OMI反演污染物数据的可靠性,从中国环境监测总站获取2017—2022年乌鲁木齐市各监测点以每小时为单位的NO₂地面监测数据,选取14:00的污染物浓度平均观测值并统计为月均浓度,将该数据与对应时期的OMI资料进行线性拟合,结果如图2所示。乌鲁木齐市各区数据点均匀分布于拟合线两侧,相关系数 R 均大于0.50,且通过了显著性检验。其中沙依巴克区、新市区、天山区、水磨沟区、米东区呈现高度相关,

相关系数R高于0.80,表明OMI对流层NO₂VCD数据与地面实测数据具有良好的相关性,说明文章所使用的OMI反演数据能够比较准确地反映出大气NO₂浓度的分布及其变化特征。

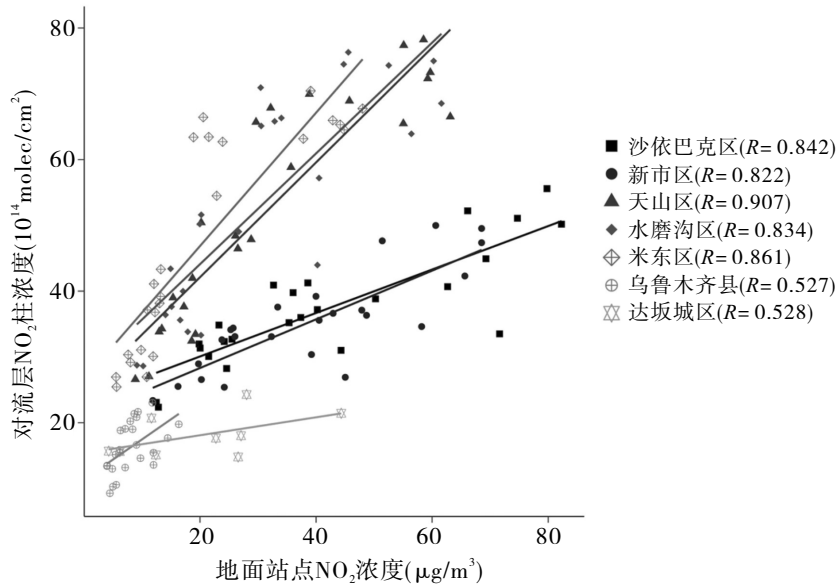


图2 2017—2022年乌鲁木齐市各区地面监测NO₂浓度与OMI反演对流层NO₂柱浓度线性拟合

2.2 大气污染物NO₂时空变化特征

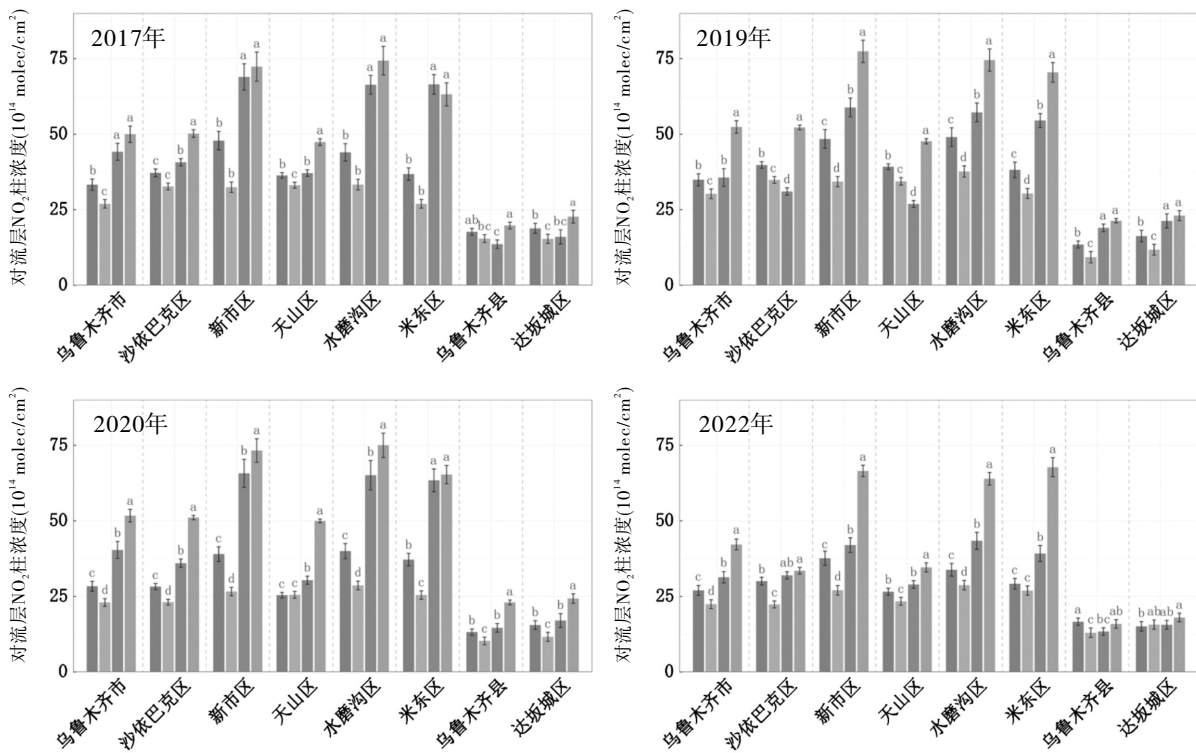


图3 2017—2022年乌鲁木齐市对流层NO₂垂直柱浓度的时间变化

注:小写字母代表同一区域各季节之间对流层NO₂柱浓度差异显著(P<0.05)。

由图3可知,从年际变化趋势来看,2017—2022年乌鲁木齐市NO₂VCD波动下降,年均降幅为3.38%。与2017年相比,天山区和沙依巴克区变化幅度最大,降幅均高于25%,而距离市区较远的乌鲁木齐县和达坂城区降幅较低,分别为11.64%和11.38%。经过检验,中心城区(新市区、水磨沟区、天山区和沙依巴克区)同达坂城区和乌鲁木齐县之间都具有显著性差异(P<0.05)。季节变化中,乌鲁木齐市各区对流层NO₂VCD季

节变化均表现为“冬季最大、春秋季次之、夏季最小”,冬季和夏季之间均存在显著性差异($P < 0.05$)。2017—2022年乌鲁木齐市各区NO₂ VCD在四季都呈持续下降趋势,其中春夏季变化最明显,尤其在2020年春夏季,各区NO₂ VCD变幅为整个研究期内最大,相对2019年同期降幅介于18.45%~35.25%之间。与2017年相比,秋冬季NO₂ VCD的变化以中心城区为主,在秋季变化最显著的是水磨沟区,降幅达41.02%;冬季变化显著的为沙依巴克区,降幅达33.20%。相比之下中心城区外围的达坂城区和乌鲁木齐县NO₂ VCD变化平缓。

为了进一步分析乌鲁木齐市NO₂ VCD空间变化趋势,本研究基于ArcGIS 10.8平台对2017—2022年乌鲁木齐市对流层NO₂ VCD进行空间插值分析,结果如图4所示。乌鲁木齐市NO₂ VCD空间分布差异显著,高值区主要分布于新市区、水磨沟区、天山区、沙依巴克区以及米东区中南部;而在乌鲁木齐县和达坂城区相

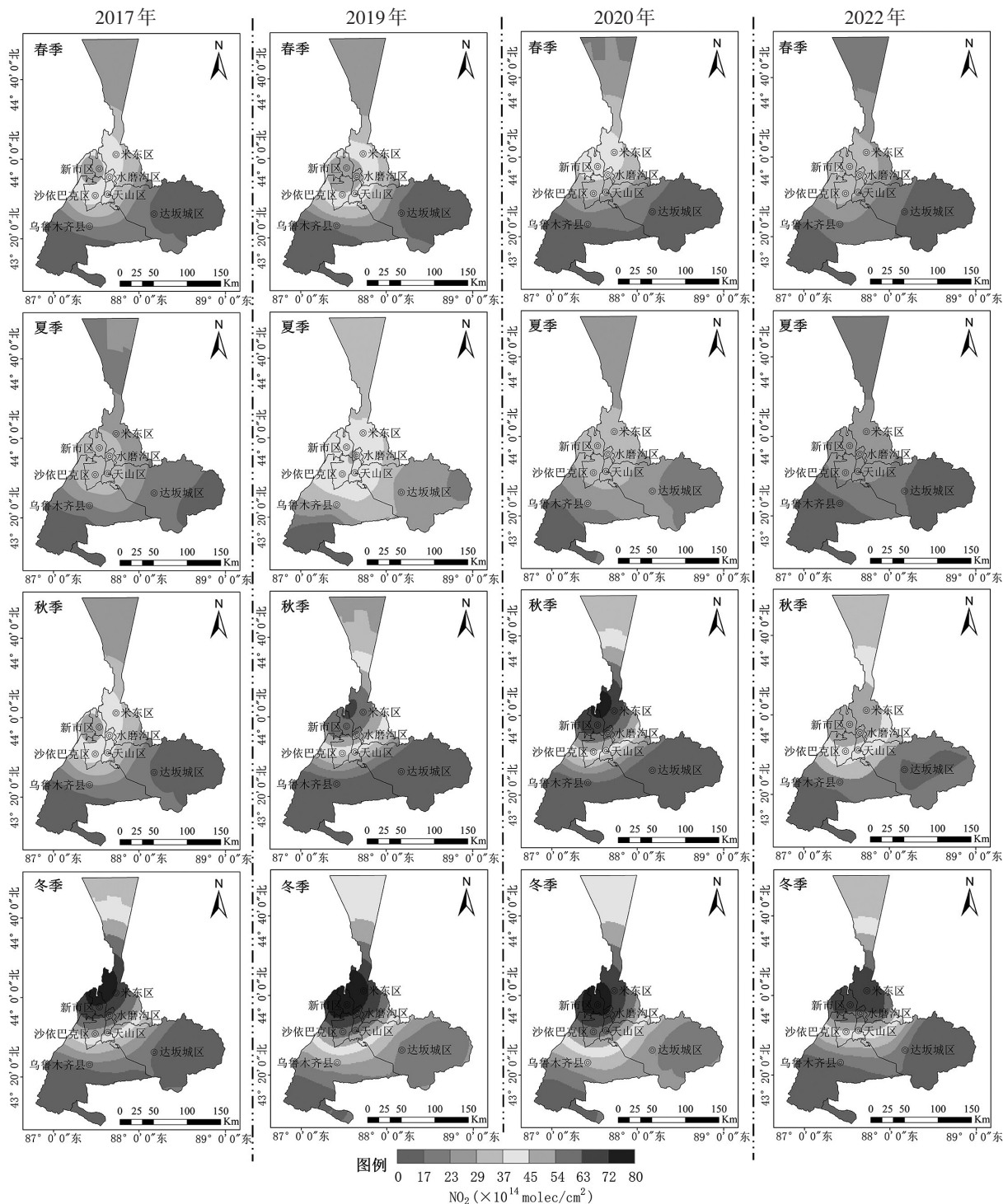


图4 2017—2022年乌鲁木齐市对流层NO₂垂直柱浓度的空间分布情况

对较低,常年低于 $20 \times 10^{14} \text{ molec/cm}^2$ 。NO₂ VCD在新市区、水磨沟区、天山区、沙依巴克区和米东区的季节变化最明显。具体而言,2017—2019年,各区NO₂ VCD在季节变化上均表现为增长趋势,且高值区范围有扩大趋势,向北扩展至米东区中部,向南至乌鲁木齐县东南部,其中冬季变化最为显著,NO₂ VCD在新市区和沙依巴克区达到近年来最高值,为 $79.22 \times 10^{14} \text{ molec/cm}^2$ 。随后在2019—2022年各区NO₂ VCD季节变化持续降低,同时高污染区范围缩小至人口基数较大的新市区、水磨沟区以及天山区和沙依巴克区北部。

2.3 NO₂污染源气团的轨迹动态变化特征

由图5可知,2017—2022年春季(3—5月),源于天山北坡的气流轨迹占比显著下降,由89.66%(2017年聚类I、聚类III、聚类IV)降至64.21%(2022年聚类I、聚类III),主要包含来自西北方向塔城地区和博尔塔拉蒙古自治州的气流,经克拉玛依市沿天山山脉到达乌鲁木齐市,其轨迹线短,运行速度较慢,受地形影响较大,气流由西南方向从高向低移动,污染物在垂直方向上易发生聚积。受主导风向影响,2022年春季各城市污染物向主城区西南部传输。另外,起源于哈萨克斯坦西部与中部的气团,占比由2017年的10.33%(聚类II)升至2022年25.74%(聚类II、聚类IV、聚类V),轨迹运动速度较快,有利于污染物在近地面水平方向的扩散。

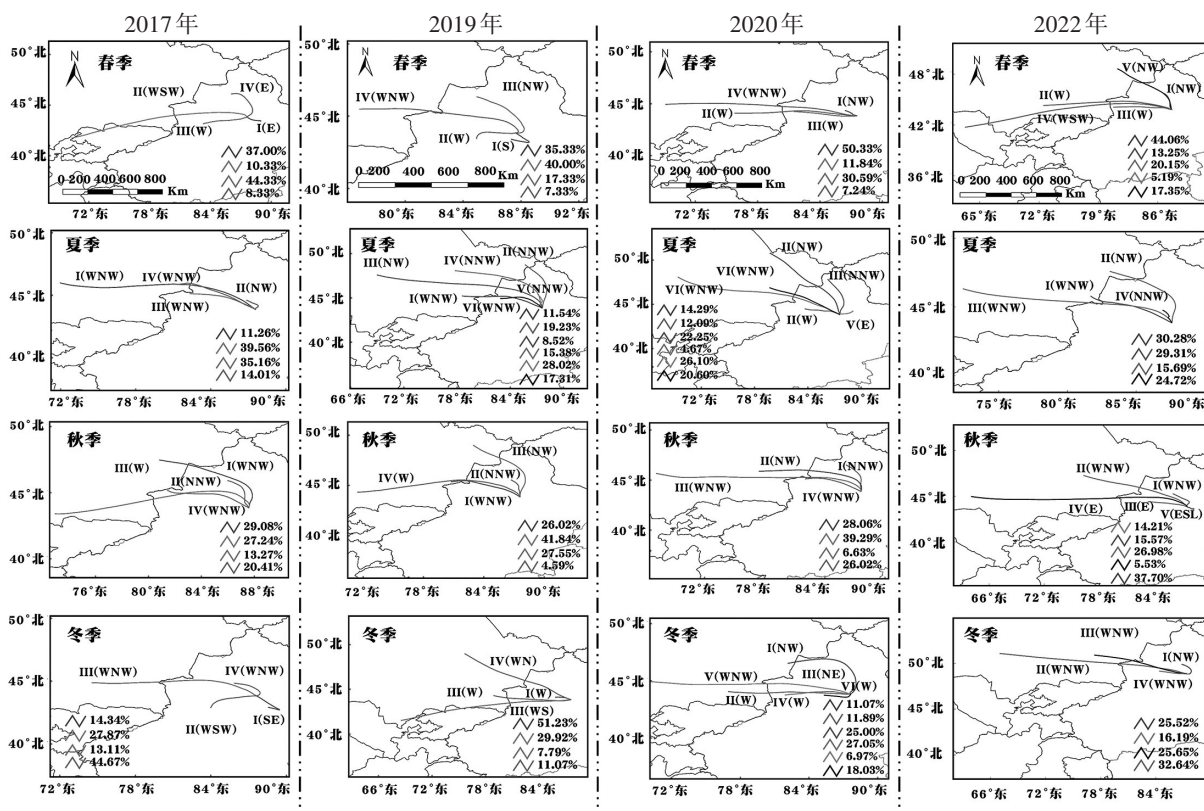


图5 2017—2022年乌鲁木齐市四季污染源气团后向轨迹聚类分布情况

2017—2022年夏季(6—8月),源于哈萨克斯坦东、中、西部的气流轨迹逐渐增多,在2022年占比分别为29.31%(聚类II)、30.28%(聚类I)、15.69%(聚类III),分别从伊犁哈萨克自治州、塔城地区、阿勒泰地区西北部进入,沿天山北坡输送到乌鲁木齐市,各方向气流轨迹运动速度较快,在近地面水平方向上促进污染物的扩散,使NO₂在夏季浓度最低。

2017—2022年秋季(9—11月)气流聚类轨迹短距离运输占比持续升高,由37.24%(2017年聚类II)升至78.89%(2022年聚类I、聚类III、聚类VI),2022年气流主要源于东南方向,经过吐鲁番过程中受博格达峰阻挡,最终到达乌鲁木齐市,气流运输速度慢,易导致污染物在各城区由东部向西部聚积。

与其他季节相比,冬季(12月—次年2月)气流运输轨迹最短,主要以短距离运输为主,受地形影响,大气污染物NO₂扩散有限,容易堆积。2022年气流主要来自于西北偏西方向,该方向气流轨迹出现的频率为58.17%(聚类I、聚类IV),与2017年相比,长距离气流运输占比逐年升高,气流速度快,对应地面风速也快,

对污染物搬运、稀释作用增强,使得污染物浓度降低。

综上所述,乌鲁木齐市气流轨迹受地形影响较大,起始气团沿天山北坡运输,主要从西南方向流入,运动走势与乌鲁木齐市都市圈区域地形走势相耦合,尤其是春冬季,气流运输以本地源短距离为主,运行速度慢,静稳天气偏多,不利于污染物稀释扩散,导致大气污染严重。

2.4 NO₂潜在源区动态变化特征

后向轨迹的聚类分析可以初步确定对乌鲁木齐市NO₂污染产生影响的气团主要方位,但无法精确判定潜在源区的相对贡献度。因此,基于MeteoInfoMap平台的PSCF模块对2017—2022年乌鲁木齐市NO₂污染进行潜在源区贡献因子分析。文章采用二级年均标准浓度限值(40ug/m³)作为NO₂浓度的标准值,计算不同季节NO₂潜在源区贡献因子。根据计算结果,将潜在源区按照WPSCF值划分为轻度(0.05~0.3)、中度(0.3~0.6)和重度(0.6~0.85)三个等级,其中,重度源区为主要潜在源区,表示该区域对乌鲁木齐市NO₂污染浓度的贡献度最大^[38]。

从图6可以看出,NO₂潜在源区具有明显的季节变化特征。四季中冬季NO₂潜在源区分布最广泛,且重度污染范围最广,呈片状集中分布于乌鲁木齐市本地源以及吐鲁番市、阜康市、昌吉市、石河子市、奎-独-乌地区,其中本地源的沙依巴克区、天山区、乌鲁木齐县和达坂城区WPSCF值均在0.75~0.85之间;另外,近年来重污染网格分布面积逐渐缩小,东部源区(以分布于鄯善县为主)收缩至高昌区中部和西北部,相比之下本地源对NO₂污染贡献增强。中度与轻度污染网格分布于重度网格四周,受地形影响主要向西北方向扩散。近年来秋季重污染范围有所缩减,重度污染网格分布范围和形态与冬季趋同,WPSCF值重度污染范围为0.6~0.8,潜在源区逐渐向阜康市、乌鲁木齐市水磨沟区和达坂城区聚集,相较于秋季,冬季高值区范围广而集中。

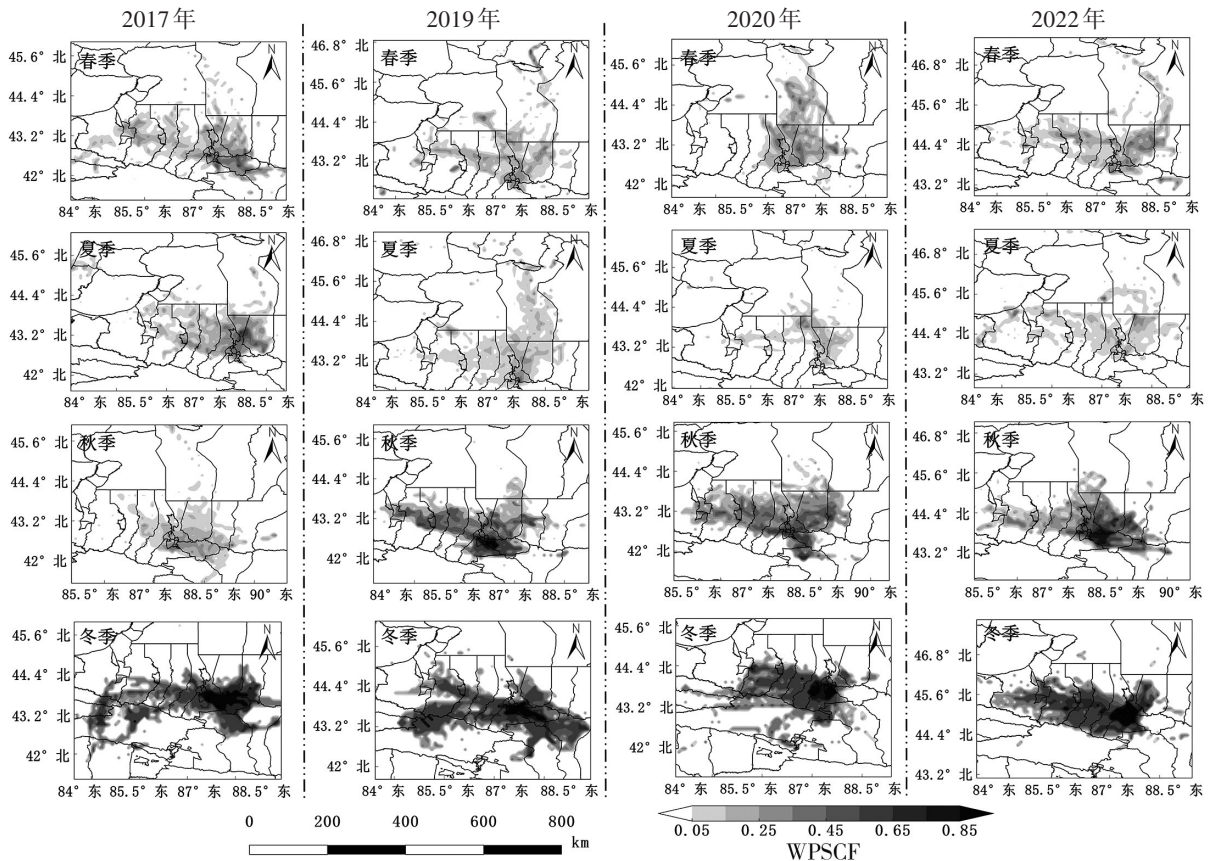


图6 2017—2022年乌鲁木齐市四季NO₂污染源区分布情况

2017—2022年春季WPSCF值均低于0.6,无重度污染网格,中度污染主要以点状分布于奎-独-乌地区、石河子市、乌鲁木齐市、阜康市,WPSCF小于0.3的轻度污染网格连成片状分布。夏季NO₂潜在源区范围为

四季最小,污染范围逐年收缩,WPSCF值最低(2019—2022年WPSCF都低于0.3),仅在乌鲁木齐市新市区、水磨沟区、米东区及阜康市、北屯市、奎-独-乌地区呈小团状零星分布,都为轻度潜在源区。2020年春夏季污染源区面积为近年来同期最小,西部源区范围大幅收缩,本地源分布也有所减弱,污染区向市区北部延伸。

综上所述,乌鲁木齐市NO₂的WPSCF值具有明显的季节性分布特征,NO₂污染的高值区范围表现为冬季>秋季>春季>夏季。春夏季WPSCF以轻度污染为主,呈条带状沿天山北坡方向分布于奎-独-乌地区、石河子市、阜康市等地,中度污染网格呈点状集中在乌鲁木齐市新市区、水磨沟区和米东区,污染源范围向本地源区收缩;秋冬季重度污染源区(0.7<WPSCF<0.85)都以本地源为主,主要集中在乌鲁木齐市中心城区南部。除本地源区影响,近年来西部源区对乌鲁木齐NO₂污染影响范围增大,冬季重度污染网格呈片状向西部扩展至奎-独-乌地区。

2.5 NO₂浓度权重轨迹动态变化特征

PSCF方法只能半量化出潜在源区网格对污染物浓度的贡献率^[39],无法体现污染网格的具体贡献浓度^[40],而CWT方法通过计算加权路径浓度来定量出每个网格的NO₂平均浓度^[23]。为更准确地评估潜在源区的污染程度,将区域分为数个大小为0.1°的网格,采用CWT法对2017—2022年乌鲁木齐市大气NO₂浓度进行浓度权重轨迹分析,WCWT值表示网格区域对乌鲁木齐市NO₂污染的贡献度。根据计算结果定义重度污染贡献区(WCWT>60 μg/cm³)、中度污染贡献区(40 μg/cm³<WCWT<60 μg/cm³)和轻度污染贡献区(WCWT<40 μg/cm³)。

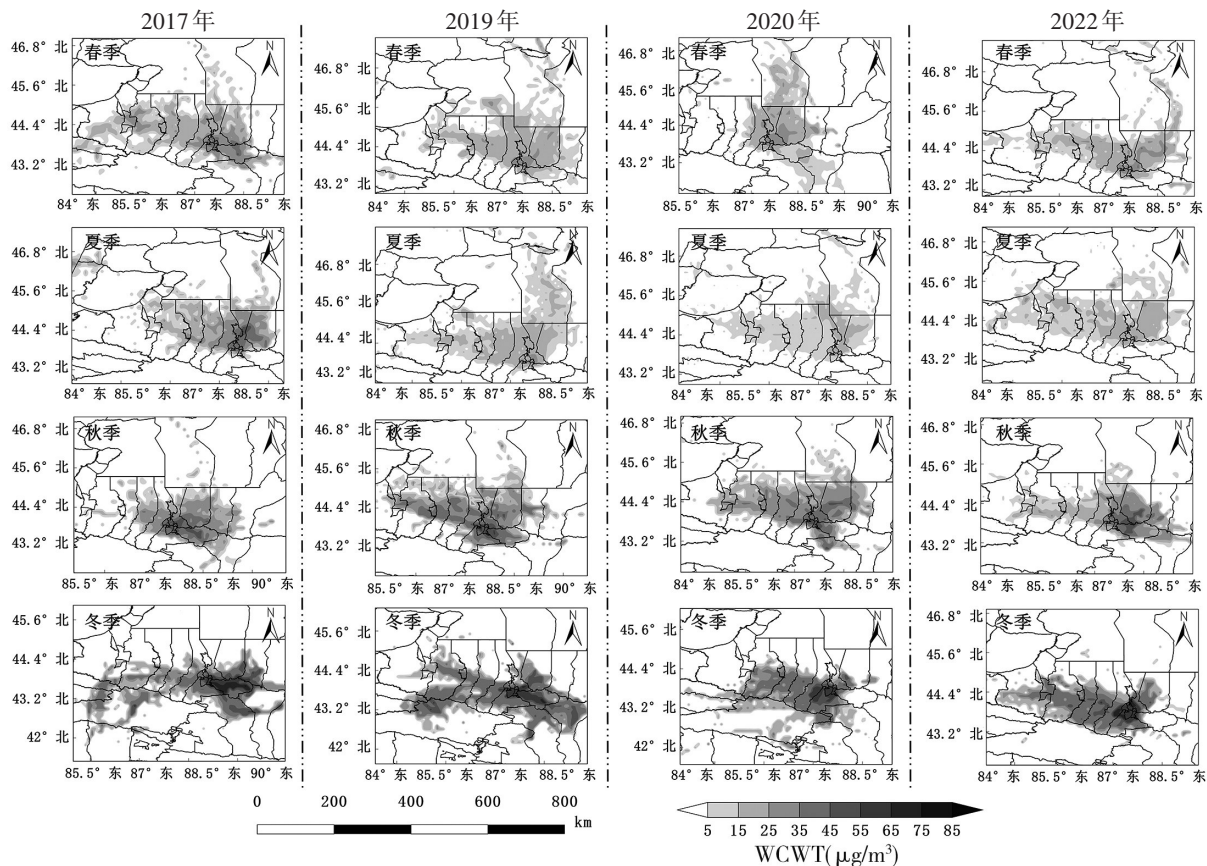


图7 2017—2022年乌鲁木齐市四季NO₂浓度权重轨迹分布情况

根据图7可知,乌鲁木齐市NO₂潜在源区浓度贡献值在冬季最高、春秋季节次之、夏季最低。2017—2022年四季NO₂浓度贡献都呈波动减小的趋势。春季和夏季WCWT基本低于40 μg/cm³,轻度污染源区大面积连片分布在昌吉市、阜康市、石河子市以及阿勒泰地区南部同乌鲁木齐市交界。2020年春夏两季NO₂浓度贡献

度均为近年同期最低,其中春季日均贡献值为 $5\sim 35\ \mu\text{g}/\text{m}^3$,夏季WCWT为四季最低,普遍低于 $25\ \mu\text{g}/\text{m}^3$,两季日均贡献值高于 $15\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 的区域主要分布在乌鲁木齐市新市区和米东区。近年来秋季中度和重度污染源区范围向乌鲁木齐市米东区和阜康市西南部缩小,来自西部源区的污染贡献范围明显向石河子市和奎-独-乌地区的市区方向收缩,而轻度污染贡献范围开始向阿勒泰地区的福海县扩散。与秋季相反,冬季潜在源区范围向西北及东部扩展,浓度权重轨迹分布范围最广,同时日均 NO_2 浓度贡献度最高。核心高值区($\text{WCWT}>65\ \mu\text{g}/\text{m}^3$)范围呈现缩小趋势,集中出现在乌鲁木齐市沙依巴克区和达坂城区;中度污染贡献源区以核心高值区为中心向四周扩散分布,近年来向西扩展,主要包含伊犁哈萨克自治州西南部、阿克苏地区以及巴音郭楞蒙古自治州。

因此,乌鲁木齐市 NO_2 浓度权重轨迹高值区主要集中分布的方向为本地源和西部源区。对于本地源,在春夏季以市区北部为主要贡献范围,秋冬季作为重度污染贡献区以市区南部和西南部为主要源区;西部源区沿天山北坡扩散分布,主要包括昌吉市、石河子市以及奎-独-乌地区。分析结果同PSCF方法相一致,这与乌鲁木齐市所处的天山—准噶尔盆地的山盆体系有密切联系。

3 讨论与结论

3.1 讨论

2017—2022年乌鲁木齐市对流层 NO_2 高浓度污染都出现在春冬季,季节变化差异显著。这与乌鲁木齐市特殊的地理位置和所处巨大山盆体系的地形条件密切相关,区域三面环山,地势由南向北倾斜,整体呈现出喇叭形状。夏、秋两季山谷风明显,大气对流层较厚,对流运动频繁,有利于污染物扩散^[14];春、冬季,来自准噶尔盆地的冷空气南下时,被天山山脉阻挡返折向下,积聚于山脚下的乌鲁木齐市,形成厚的逆温层,大气层结稳定,不利于污染物垂直扩散^[25]。同时,风速和风向影响着污染物扩散和集聚程度。乌鲁木齐市各季节以西风、西北风、西南风为主导风向,风的水平移动将上风向的污染物运移至下风向,使大气 NO_2 污染主要集中于新市区、水磨沟区和米东区南部。另外,近年来乌鲁木齐市冬季低风速($0\sim 8\text{m/s}$)在各季节中占比最高,而使 NO_2 易扩散的风速($8.1\sim 12\text{m/s}$)占比仅为5%,污染物难以在水平方向上扩散,导致冬季 NO_2 扩散能力最弱;夏季高于 8m/s 的风速占比达到90%以上^[39-40],有利于污染物大面积扩散,因此 NO_2 污染浓度为四季最低。

近年来 NO_2 浓度高值区范围逐渐向中心城区收缩,而其外围的乌鲁木齐县和达坂城区 NO_2 浓度相对较低,常年低于 $20\times 10^{14}\ \text{molec}/\text{cm}^2$ 。这是由于地形的差异形成不同的土地利用类型,城市下垫面多以水泥、沥青等覆盖,人口较多,商业、生活、交通等活动显著^[19,25]。居民聚集区位于中部平原区,工业区位于北部古尔班通古特沙漠边缘和东南部山前丘陵。西北部地势平坦,开发较早,建筑物较低,而东南部和中部开发较晚,建筑物普遍较高,且为繁华商业区,人类活动密集, NO_2 浓度相对较高。另外,市区和郊区间的热力环流作用进一步加剧了市区 NO_2 污染^[40]。

受大陆性气候的影响, NO_2 污染潜在源区以本地源为主,乌鲁木齐市中度和重度污染出现在秋冬季,且冬季漫长,这一季节核心高值区($\text{WCWT}>65\ \mu\text{g}/\text{m}^3$)主要分布于本地源区的沙依巴克区和天山区。这与冬季天气系统的强弱及移动路径有关,乌鲁木齐市的气候受高度密集的大陆性反气旋控制,垂直分布的冷暖气团无法形成对流,向下的气流加强了大气污染物的积累,在冬季地表温度急剧降低导致邻近空气强烈降温,进而容易形成地表逆温层,阻碍污染物扩散^[26,34]。受天山北坡影响,来源于哈萨克斯坦西南部的长距离运输、西部和东部的短距离运输气团均沿天山北坡移动,随着冬季长距离气流频率的增加,气团对工业型城市奎屯市和石河子市污染物水平运移作用增强,使重度污染网格呈片状向西部扩展至奎-独-乌地区。

3.2 结论

(1)2017—2022年,乌鲁木齐市 NO_2 VCD呈波动下降趋势,空气质量明显改善,各区 NO_2 VCD在2020年春夏季变幅最大,其中天山区降幅最高,达35.25%;空间上高污染区范围收缩至中心城区的新市区、水磨沟区以及天山区和沙依巴克区北部,而市区外围的达坂城区和乌鲁木齐县 NO_2 VCD变化相对平缓。

(2)影响乌鲁木齐市 NO_2 污染的气流轨迹季节差异显著,主要来源于本地源和西南方向的长距离运输。

本地源是大气NO₂污染高值主要分布区域,气流沿天山北坡经伊犁哈萨克自治州中部输送至乌鲁木齐市;NO₂浓度低值区主要是长距离气流运输区域,主要源于哈萨克斯坦境内,受地形影响较大。夏季以长距离气流为主,占比逐年升高(2022年达78.89%);春、秋、冬三季均以短距离气流运输为主,然而近年来长距离气流频率均有增加,对污染物搬运、稀释水平增强,从而使污染物浓度降低。

(3)乌鲁木齐市NO₂潜在源区分布季节变化特征明显,NO₂高值区范围表现为冬季>秋季>春季>夏季。具体来说,春夏季WPSCF以轻度污染网格(0.05~0.3)为主,呈条带状分布于奎-独-乌地区、石河子市、阜康市,中度污染网格呈点状集中在乌鲁木齐市新市区、水磨沟区和米东区;秋冬季重度污染源区(0.7<WPSCF<0.85)都以本地源为主,主要集中在乌鲁木齐市沙依巴克区、天山区。除本地源区影响,近年来冬季重度污染网格向西部扩展至奎-独-乌地区,呈片状分布。

(4)根据WCWT分析结果,春夏季均为轻度污染,而秋冬季出现中度和重度污染。乌鲁木齐市NO₂重污染源区主要分布于本地源区和西部源区,与WPSCF重度污染分布相一致。2017—2022年西部源区沿天山北坡扩散分布,秋季中度和重度污染范围明显向石河子市和奎-独-乌地区的市区方向收缩;冬季核心高值区(WCWT>65μg/m³)主要分布于本地源区,向乌鲁木齐市沙依巴克区和达坂城区方向收缩,中度污染贡献源区则向西扩展至伊犁哈萨克自治州西南部、阿克苏地区以及巴音郭楞蒙古自治州。

参考文献:

- [1] BORCK R, SCHRAUTH P. Population Density and Urban Air Quality[J]. *Regional Science and Urban Economics*, 2021, (86): 103596.
- [2] ANENBERG S C, MOHEGH A, GOLDBERG D L, et al. Long-term Trends In Urban NO₂ Concentrations and Associated Paediatric Asthma Incidence: Estimates from Global Datasets[J]. *Lancet Planet Health*, 2022, 6(01): 49–58.
- [3] LI X, WANG P, WANG W, et al. Mortality Burden due to Ambient Nitrogen Dioxide Pollution in China: Application of High-resolution Models[J]. *Environment International*, 2023, (176): 107967.
- [4] IQBAL W, TANG Y M, CHAU K Y, et al. Nexus between Air Pollution and Ncov-2019 in China: Application of Negative Binomial Regression Analysis[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2021, (150): 557–565.
- [5] LI X, HU Z, CAO J, et al. The Impact of Environmental Accountability on Air Pollution: A Public Attention Perspective[J]. *Energy Policy*, 2022, (161): 112733.
- [6] HAN H, LIU J, SHU L, et al. Local and Synoptic Meteorological Influences on Daily Variability in Summertime Surface Ozone In Eastern China[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2020, 20(01): 203–222.
- [7] NIEPSCH D, CLARKE L J, TZOULAS K, et al. Spatiotemporal Variability of Nitrogen Dioxide (NO₂) Pollution in Manchester (UK) City Centre (2017—2018) Using a Fine Spatial Scale Single-NO_x Diffusion Tube Network[J]. *Environ Geochem Health*, 2022, 44(11): 3907–3927.
- [8] LI B, SHI X F, LIU Y P, et al. Long-term Characteristics of Criteria Air Pollutants in Megacities of Harbin–Changchun Megalopolis, Northeast China: Spatiotemporal Variations, Source Analysis, and Meteorological Effects[J]. *Environ Pollut*, 2020, (267): 115441.
- [9] MENG X, LIU C, CHEN R, et al. Short Term Associations of Ambient Nitrogen Dioxide with Daily Total, Cardiovascular, and Respiratory Mortality: Multilocation Analysis in 398 Cities[J]. *Bmj*, 2021, (372): 534.
- [10] WHO. Ambient Air Pollution: A Global Assessment of Exposure and Burden of Disease[M]. World Health Organization: Geneva, Switzerland, 2016.
- [11] 巨天珍,李蒙,刘淑雅,等.汾渭平原NO₂柱浓度时空分布特征及其与O₃、HCHO相互关系研究[J]. *环境科学学报*, 2023, 43(06): 57–70.
- [12] 全泽鹏,李艳红,刘岩,等.天山南北绿洲城市重污染期对流层NO₂垂直柱浓度时空分布特征[J]. *环境污染与防治*, 2018, 40(07): 812–818.
- [13] 吴雅睿,王虎,王美景.基于OMI的陕甘宁地区NO₂时空分布及影响因素分析[J]. *大气与环境光学学报*, 2023, 18(06): 553–568.
- [14] 李艳红,王莉莉,赵晓蓉.奎屯市-独山子区-乌苏市区域大气对流层NO₂柱浓度时空变化分析[J]. *环境科学研究*,

- 2021, 34(09): 2122-2131.
- [15] 赵晓蓉, 李艳红, 马莹萍. 新疆“乌-昌-五”城市圈对流层 NO₂、SO₂时空变化特征[J]. 环境科学与技术, 2021, 44(06): 133-142.
- [16] 刘博涵, 袁金国, 李艳翠, 等. 基于 TROPOMI 的石家庄市 NO₂ 柱浓度时空分布及来源分析[J]. 环境科学与技术, 2023, 46(08): 77-89.
- [17] 王晓雯, 刘旻霞, 王扬, 等. 华东地区对流层 O₃ 和前体物 HCHO 及 NO₂ 的时空特征[J]. 环境科学, 2023, 44(09): 4809-4818.
- [18] 李美欣, 吴莹, 鲍艳松. OMI 和 TROPOMI 的中国对流层 NO₂ 污染数据的时空对比分析[J]. 海洋气象学报, 2023, 43(01): 75-86.
- [19] 曹扬, 李艳红. 新冠肺炎疫情防控下乌鲁木齐市 NO₂ 污染影响研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2023, 43(06): 1981-1987.
- [20] 王文丁, 陈焕盛, 吴其重, 等. 珠三角冬季 PM_{2.5} 重污染区域输送特征数值模拟研究[J]. 环境科学学报, 2016, 36(08): 2741-2751.
- [21] 余光明, 徐建中, 康世昌, 等. 祁连山老虎沟地区大气颗粒物输送轨迹及潜在源区[J]. 干旱区研究, 2020, 37(03): 671-679.
- [22] 蒋子瑶, 彭王敏子, 陈琦. 基于 PSCF 与 CWT 方法的赣江新区大气污染物潜在源区个例分析[J]. 气象与减灾研究, 2022, 45(03): 216-224.
- [23] 朱翠云, 何清, 赵竹君, 等. 乌鲁木齐市市区与南郊山区颗粒物污染特征对比分析[J]. 中国环境科学, 2022, 42(09): 4073-4085.
- [24] 赵克明, 李娜, 李霞, 等. 乌鲁木齐冬季焚风天气过程大气扩散条件特征分析[J]. 干旱区地理, 2021, 44(06): 1534-1544.
- [25] 赵晓蓉, 李艳红. 天山北坡绿洲城市车流量与对流层 NO₂ 垂直柱浓度关系研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2021, 41(02): 345-353.
- [26] ZHAO L, LI W, YANG G, et al. Moisture, Temperature, and Salinity of a Typical Desert Plant (Haloxylon Ammodendron) in an Arid Oasis of Northwest China[J]. Sustainability, 2021, 13(04): 1908.
- [27] LUO Y, XU L, LI Z, et al. Air Pollution in Heavy Industrial Cities along the Northern Slope of the Tianshan Mountains, Xinjiang: Characteristics, Meteorological Influence, and Sources[J]. Environ Sci Pollut Res Int, 2023, 30(19): 55092-55111.
- [28] 陈玲, 闫世明, 倪成诚, 等. 基于 OMI 的汾渭平原对流层 NO₂ 长期变化趋势[J]. 中国环境科学, 2022, 42(08): 3492-3501.
- [29] ANORUO C M. Validation of OMI Seasonal and Spatio-temporal Variations in Aerosol-cloud Interactions Over Banizoumbou Using Aeronet Data[J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2020, (211): 105457.
- [30] COHEN M D, STUNDER B J B, ROLPH G D, et al. NOAA's HYSPLIT Atmospheric Transport and Dispersion Modeling System[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2015, 96(12): 2059-2077.
- [31] DRAXLER R R, HESS G. An Overview of the HYSPLIT4 Modelling System for Trajectories[J]. Australian Meteorological Magazine, 1998, 47(04): 295-308.
- [32] FLEMING Z L, MONKS P S, MANNING A J. Review: Untangling the Influence of Air-mass History in Interpreting Observed Atmospheric Composition[J]. Atmospheric Research, 2012, 104-105: 1-39.
- [33] WANG Y Q, ZHANG X Y, DRAXLER R R. TrajStat: GIS-based Software that Uses Various Trajectory Statistical Analysis Methods to Identify Potential Sources from Longterm Air Pollution Measurement Data[J]. Environmental Modelling & Software, 2009, 24(08): 938-939.
- [34] ARA BEGUM B, KIM E, JEONG C H, et al. Evaluation of the Potential Source Contribution Function Using the 2002 Quebec Forest Fire Episode[J]. Atmospheric Environment, 2005, 39(20): 3719-3724.
- [35] 李锦超, 曹春, 方锋, 等. 基于卫星和地面监测的河西走廊 O₃ 浓度时空分布及潜在源区分析[J]. 环境科学, 2023, 44(09): 4785-4798.
- [36] 汪蕊, 丁建丽, 马雯, 等. 基于 PSCF 与 CWT 模型的乌鲁木齐市大气颗粒物源区分析[J]. 环境科学学报, 2021, 41(08): 3033-3042.
- [37] 方利江, 傅贤康, 谢立峰, 等. 舟山本岛大气污染输送过程的数值模拟分析[J]. 环境科学研究, 2014, 27(10): 1087-1094.
- [38] 玛依拉·热西丁, 丁建丽, 张喆, 等. 乌鲁木齐市气溶胶光学厚度时空分布特征及潜在来源分析[J]. 环境科学学报, 2020, 40(05): 1611-1620.
- [39] 魏漪梦. 西北五省(区)大气污染物特征及其影响因素研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2020.
- [40] 赵晓蓉. 乌鲁木齐一昌吉地区城乡结合部大气 NO₂ 时空动态变化研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆师范大学, 2022.

Analysis of the Transport Path and Potential Sources of NO₂ Atmospheric Pollutants in Urumqi City

WANG Bo^{1,2}, LI Yan-hong^{1,2*}

(1.College of Geography and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi, Xinjiang, 830054, China;
2.Laboratory of Lake Environment and Resources in Xinjiang Arid Area, Key Laboratory of Xinjiang Uygur
Autonomous Region, Urumqi, Xinjiang, 830054, China)

Abstract: To enhance the study of transport pathways and potential sources of atmospheric pollutant NO₂ in Urumqi, the atmospheric pollution characteristics of NO₂ concentration in Urumqi were analyzed using the OMI remote sensing monitoring tropospheric NO₂ vertical column concentration (VCD) data from 2017—2022. The study utilized the backward trajectory model, potential source area contribution analysis and concentration weighted trajectory to reveal the trends of potential source areas of NO₂ and their contribution to NO₂ VCD in the study area in different seasons. The results indicate that over the five-year period, the NO₂ VCD in Urumqi has shown a fluctuating downward trend. The largest decrease in NO₂ VCD occurred during the spring and summer of 2020, with a range between 18.45% and 35.25%. The spatial distribution of high-pollution areas has continuously narrowed down to the central urban areas with larger population bases. The trajectory of air masses affecting NO₂ pollution in Urumqi is greatly influenced by the topography of the mountain-basin system. During the spring, autumn, and winter, there has been an increasing frequency of long-distance airflow from Kazakhstan (accounting for 25.74%, 21.11%, and 41.83% respectively in 2022). The potential source areas of NO₂ pollution show significant seasonal variations. In the autumn and winter, the source areas are widely distributed and have high contributions, while in the spring and summer, the source areas are narrow and have low contributions. The potential source areas primarily include local sources and sources from the western regions. Local sources appear as severe pollution sources in the autumn and winter, gradually increasing their contribution to NO₂ pollution. The source areas have gradually contracted to the Shayibake District and Dabancheng District in Urumqi. The western source areas are mainly moderate pollution areas, and in recent years, they have expanded westward to regions such as southwestern Ili Kazakh Autonomous Prefecture, Aksu Region, and Bayingolin Mongolian Autonomous Prefecture.

Keywords: Urumqi; Tropospheric NO₂ Vertical Column Density (VCD); Backward trajectory; Potential source region contribution; Concentration weighting trajectory