美国大气光化学监测点位布设的经验和启示

崔虎雄[1],柴文轩[2],赵 月[1],张国涵[3]
1. 上海市环境监测中心,上海 200235
2. 中国环境监测总站,国家环境保护环境监测质量控制重点实验室,北京 100012
3. 云南省生态环境厅驻昆明市生态环境监测站,云南 昆明 650228

摘 要:我国大气光化学污染问题仍然形势严峻,逐渐成为影响我国环境空气质量的重要因素之一。光化学监测点位的科学布设,有助于准确反映我国光化学污染状况,为研究光化学污染的形成机制、污染成因及控制策略提供技术支持。在总结美国光化学监测点位布设技术方法步骤和要求、点位布设发展历程基础上,结合我国光化学监测点位布设现状,探讨了我国光化学监测点位布设存在的问题,并提出了若干关于我国光化学监测点位布设的建议。

关键词:大气;光化学监测;点位布设
中图分类号:X84 **文献标志码**:A **文章编号**:1002-6002(2024)05-0001-08
DOI:10.19316/j.issn.1002-6002.2024.05.01

Experience and Illumination of Atmospheric Photochemical Monitoring Sites Selection in United States

CUI Huxiong[1],CHAI Wenxuan[2],ZHAO Yue[1],ZHANG Guohan[3]
1. Shanghai Environmental Monitoring Center,Shanghai 200235,China
2. State Environmental Protection Key Laboratory of Quality Control in Environmental Monitoring,China National Environmental Monitoring Centre,Beijing 100012,China
3. Ecological and Environmental Mnitoring Station of DEEY in Kunming,Kunming 650228,China

Abstract:The situation of atmospheric photochemical pollution in China remains serious,and it has gradually become an important factor affecting the air quality in China. The scientific layout of photochemical monitoring sites is crucial for accurately assessing the situation of photochemical pollution in China,and provides technical support for studying its formation mechanism,causes and methods of control. On the basis of summarizing the technique,procedure,requirement and development course of the photochemical monitoring point layout in America and combining with the current situation of the photochemical monitoring point layout in China,the existing problems of the photochemical monitoring point layout in China are discussed,and some thoughts and suggestions on the photochemical monitoring point layout in China are put forward.

Keywords:atmosphere;photochemical monitoring;site selection

光化学污染主要是指汽车尾气和工业废气等各种污染源排放的碳氢化合物和氮氧化物排放到大气中后,在强烈的阳光紫外线照射下,这些物质的分子会发生光化学反应,生成臭氧(O_3)及其他多种复杂的光化学氧化产物。我国的 O_3 污染呈现区域连片性、来源多样性和区域传输性等特征,污染具有全国性特点,O_3 污染高发情况集中在京津冀、长三角和珠三角等人为影响大的地区,且具有辐射周边地区的特点[1]。与 2021 年相比,2022 年全国 339 个地级及以上城市 O_3 平均质量浓度为 145 μg/m^3,同比上升 5.8%[2]。粤港澳大湾区[3]2021 年 O_3 年平均质量浓度相比 2006 年上升了 34%;2017—2021 年,珠三角 9 个城市首要污染物均为 O_3,且占比逐年增加,从 46.5%上升到 71.4%。

光化学监测作为光化学污染防控中越来越重要的一环,需建立一个全面的、长期的、专业的全国光化学监测网络开展例行性监测工作,才能有的放矢地开展全国的光化学污染防治工作[1]。另外,由于光化学污染具有与传统污染

收稿日期:2023-04-07;**修订日期**:2024-01-29
基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFC3700200)
第一作者简介:崔虎雄(1986-),男,山西长治人,硕士,高级工程师。
通讯作者:柴文轩

不同的时空分布规律,各地必须因地制宜,科学布设光化学污染监测点位[4]。

美国开展大气光化学监测点位布设和监测工作起步较早,不仅建立了比较科学的 O_3[5]、光化学监测点位[6]布设规范,还于 20 世纪 90 年代启动了全球最早的光化学监测网络(PAMS)的点位建设工作。进入 21 世纪后,墨西哥[7]、韩国[8]、中国台湾地区[9]等也开展了针对光化学监测网络的点位布设工作,基本以美国大气光化学监测点位布设的方法为基础,结合本地污染水平、城市发展规模、预算等情况进行。

2018 年,中国全国层面系统性的光化学监测工作开始启动,至今已初步建立了全国范围内的大气挥发性有机物(VOCs)监测网络[10]。《2023 年国家生态环境监测方案》(环办监测函〔2023〕120 号)要求每个城市应至少在人口密集区内的 O_3 高值区域布设 1 个监测点位;O_3 污染超标的城市还应在 VOCs 高浓度区增设监测点位;有条件的城市结合本地区 VOCs 和 O_3 污染情况,在城市上风向或者背景点、地区影响边缘(下风向)增设点位,形成完整的光化学监测网络。但光化学监测点位在技术层面通过什么方法或步骤科学布设,目前仍处于起步发展阶段,尚没有详细的规范要求。本文通过总结美国光化学监测点位布设方法步骤、光化学点位布设要求、光化学监测点位发展历程等,为中国大气光化学监测点位的科学布设提供借鉴。

1 美国大气光化学监测点位布设方法步骤和数据来源

美国光化学监测点位布设方法主要遵循美国环保局(USEPA)1994 年[11]推荐的方法,即选择最具有代表性的位置布设点位;美国光化学监测网络包括 4 个类型的光化学监测点位:点位 1#,上风向和背景浓度点;点位 2#,O_3 前体物最高浓度排放影响点;点位 3#,O_3 最高浓度点;点位 4#,下风向点。

1.1 空气质量分析

选择该区域内常规空气质量监测点位内的 O_3、NO_x 和 CO 等监测数据进行分析,判断该区域内光化学监测网络是否需要布设。选择最高浓度 O_3 的年份对以上空气污染物浓度的日变化和空间分布进行分析,以确定和评估空气质量的达标程度。

1.2 主导风向确定

选择分析时段内该区域的气象数据进行风玫瑰图的绘制和分析。分析应聚焦以下 2 个时段:一年中 O_3 最高浓度时段;一天中 O_3 前体物最高浓度排放时段和 O_3 次高浓度时段(O_3 转化前)。基于以上时段的风玫瑰图,确定主导风向。

1.3 O_3 前体物最高浓度排放区域质心位置确定

通过对 O_3 前体物(NO_x、CO、VOCs)源清单和污染源空间分布信息来获得 O_3 前体物最高浓度排放区域质心位置。质心通过地理统计方法来确定,即使用 GIS 系统来对 O_3 前体物排放清单(一个网格 1 km^2)进行绘制。每个网格 i 的中心坐标和这些网格的质心(X_c,Y_c)通过式(1)~式(2)计算获得。

$$X_c = \frac{\sum x}{n} \tag{1}$$

$$Y_c = \frac{\sum y}{n} \tag{2}$$

式中:x 代表网格 i 质心的 x 轴;y 代表网格 i 质心的 y 轴;n 代表参与计算的所有网格数。

当源清单信息(如工业源、道路交通源、人口密集区排放源)缺失时,质心应选择沿着早晨主导风向且轻微位于城市主要活动区下风向的位置处。

1.4 监测点位选择

选择监测点位时,使用扇形分析法确定 O_3 前体物最高浓度排放的上风向和下风向扇形区域。上风向扇形区域基于早晨主导风向的风玫瑰图确定,具体方法:从质心位置处画一个夹角为 45°的区域,主导风向轴线为该 45°夹角线的中间线;下风向扇形区域是以下午主导风向所在方向轴线为中间线,向两边所画夹角为 45°的扇形区域。

确定点位之间距离时,根据监测目标和点位空间代表性,点位之间距离应能以独立监测到代表性前体物源排放样品为最佳距离。点位 1#、3#和 4#应以监测范围为城市尺度,点位 2#应以街区尺度为监测范围。点位之间的代表性应基于点位之间没有重合为目标进行评价。

2 美国大气光化学监测点位布设要求

2.1 单城市光化学点位布设要求

20 世纪 70—90 年代,USEPA 对外发布了《Site Selection for the Monitoring of Photochemical Air pollutants》[5]、《Guideline on ozone monitoring site selection》[6] 和《Photochemical assessment monitoring station implementation manual》[11] 等技术文件。这些文件基于 O_3 作为光化学反应生成的二次污染物原理,提出了以 O_3 及其前体物监测为目标的光化学监测网络需求,具体包括 O_3 生成最高浓度区域监测、高人口密度代表性区域监测、源代表性排放区域监测、背景本底区域及传输监测等目标。基于以上监测目标需求,USEPA 明确提出了光化学监测网络(图 1)应包括 4 个不同测量目标点位:上风向和背景浓度点;O_3 前体物最高浓度排放影响点;O_3 最高浓度点;下风向点。

点位 1#(上风向和背景浓度点):位于城市边缘地区,并处于该区域主要 O_3 前体物排放污染源的上风向处,主要用于说清通过传输进入该区域的上风向背景 O_3 及其前体物浓度水平。该点位一般布设在白天主导风向 O_3 前体物排放主要区域的上风向位置。

在主导风向明确时,采用扇形布点法,利用历史 O_3 超标或高浓度日上午的主导风向确定该点位在该城市区域的方位,详见图 2 中的点位 1#;在主导风向不易识别或者稳定层结天气出现较多的地方,监测点宜沿着主要城市人口密集分布或城市内主要污染源分布的轴线布设[12],详见图 3 中的点位 1#。另外,点位具体位置应与本地区主要污染源有足够的距离,以免受到局地污染源排放的影响。若受到海/湖-陆风影响,该监测点位应位于影响的混合均匀区。

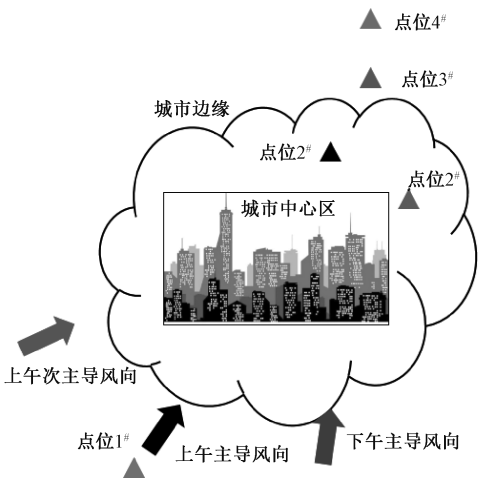

图 1 美国 PAMS 点位布设示意图

Fig. 1 PAMS network design in the United States

点位 2#(O_3 前体物最高浓度排放影响点):用于监测代表性城市密集区的 O_3 前体物最高浓度排放的水平。该类型点位一般应位于城市建成区内,并位于城市人口密集区下风向的边界或污染源排放混合的主要代表性区域。

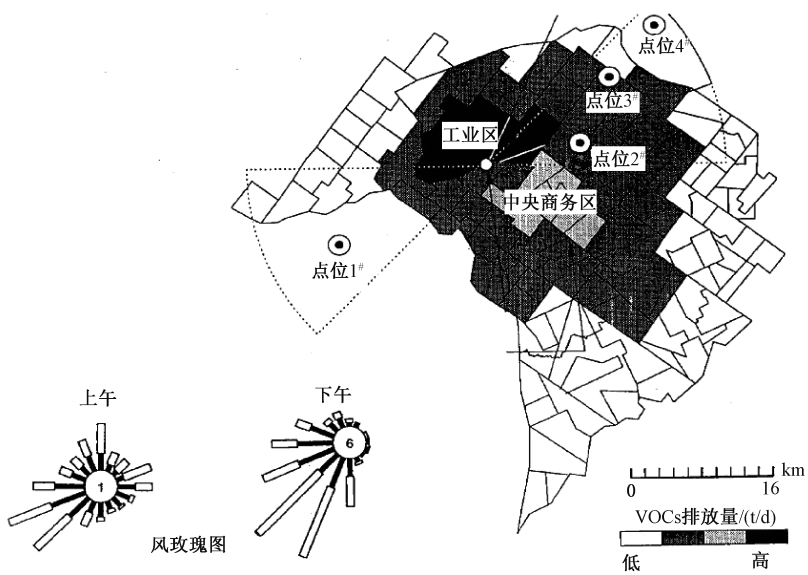

图 2 主导风向明确时 PAMS 点位布设示意图

Fig. 2 PAMS network design in the prevailing wind patterns

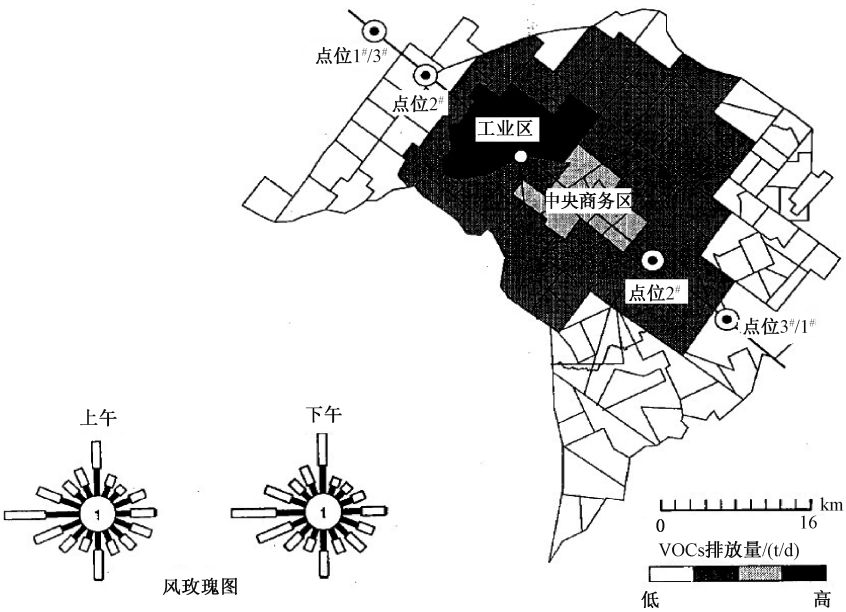

图 3 主导风向不明确或静稳时 PAMS 点位布设示意图

Fig. 3 PAMS network design in the light wind patterns or no well-defined primary wind direction

若主导风向明确且城市区域受到多种主要污染源排放影响,该点位原则上应设置在主导风向和第二主导风向(一般采用 O_3 污染最重季节的主导风向)的下风向,并位于各污染源排放影响的最佳混合区域,详见图 2 中的点位 2#;在主导风向不易识别或者稳定层结天气出现较多的地方,位于污染源轴线上的前体物排放浓度相对最高,监测点宜沿着主要污染源分布的轴线布设[12],详见图 3 中的点位 2#。

点位 3#(O_3 最高浓度点):用于监测 O_3 前体物最高浓度排放区域下风向的 O_3 最高浓度水平。该类型点位一般位于 O_3 前体物最高浓度排放区域的下风向,且处于城市密集区 O_3 前体物排放区域约 15~45 km 的城市边界区域处。

在主导风向明确时,采用扇形布点法,利用历史 O_3 超标或高浓度日下午的主导风向确定该类型点位在该城市区域的方位,详见图 2 中的点位 3#;在主导风向不易识别或者稳定层结天气出现较多的地方,监测点宜沿着主要城市人口密集分布或城市内主要污染源分布的轴线布设[12],详见图 3 中的点位 3#。

点位 4#(下风向点):用于监测 O_3 前体物传输的影响及 O_3 传输对边远地区的影响。该类型点位一般应位于城市密集区 O_3 前体物排放区域的下午主导风向的下风向轨迹上,且位于距离城市较远并靠近所研究区域的交界处。

在主导风向明确时,采用扇形布点法,利用历史 O_3 超标或高浓度日下午的主导风向确定该类型点位在该城市区域的方位,详见图 2 中的点位 4#;在主导风向不易识别或者稳定层结天气出现较多的地方,该点位类型可不考虑设置。

2.2 多城市光化学点位布设要求

当多个城市相连时,光化学点位布设可以采取图 4 的方法开展,比如一个城市的点位类型 3#可以作为另一个城市的点位类型 1#,点位类型 4#仅需在最靠近下风向的城市布设。

3 美国大气光化学监测点位发展历程

从 20 世纪 90 年代至今,美国建设光化学监测点位已超过 30 年,美国光化学监测点位在实际运行过程中如何布设、调整和应用,对于我国光化学网络的点位布设具有重要参考意义。

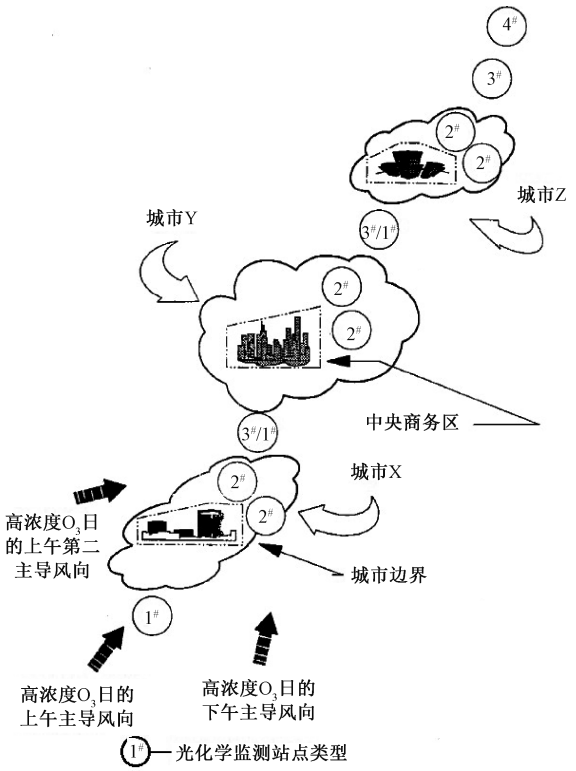

图 4 多个城市区域 PAMS 布设示意图

Fig. 4 PAMS network design among more than one cities

20 世纪 90 年代,综合考虑 O_3 非达标和人口规模等因素,美国按照 4 类光化学点位布设的方法进行光化学点位布设[11],即全美共布设 90 个光化学监测点位(表 1)。具体布设过程:首先,根据美国联邦法规(Title 40, Code of Federal Regulations, Part 58)的要求,筛选 O_3 非达标区域且 O_3 浓度等级(质量分数,ω)在"Serious($0.16\times10^{-6}<\omega\leqslant0.18\times10^{-6}$), Severe ($0.18\times10^{-6}<\omega\leqslant0.28\times10^{-6}$), Extreme ($\omega>0.28\times10^{-6}$)"的区域设置 PAMS 监测点位。其次,设置 PAMS 监测点位的数量需要结合区域内人口数量确定,不同人口规模对应不同的点位数量,最大点位数量应为 5 个,最少的点位数量应为 2 个(表 2)。布设点位顺序依次为点位 2#、点位 3#、点位 1#、点位 4#,然后是第二个点位 2#。

21 世纪以来,基于各个光化学点位的实际成效及空气质量管理需求的变动,USEPA 对光化学网络开展了点位价值评价、点位类型及数量优化、监测网络方案调整等,以更好地满足国家和地方管理需求。

表 1 20 世纪 90 年代美国设定的光化学监测区域及点位

Table 1 PAMS requirements for the United States in 1990s.

区域	人口数量/万	非达标区域分类等级	最少点位数量/个
Beaumont-Port Arthur, TX	<50	Serious	2
Portsmouth-Dover-Rochester, NH-ME	<50	Serious	2
Southeast Desert Modified AQMA, CA	<50	Severe	2
Baton Rouge, LA	[50,100)	Serious	3
EI Paso, TX	[50,100)	Serious	3
Springfield, MA	[50,100)	Serious	3
Ventura County, CA	[50,100)	Severe	3
Milwaukee-Racine, WI	[100,200)	Severe	4
Providence-Pawtucket-Fall River, RI-MA	[100,200)	Serious	4
Sacramento, CA	[100,200)	Serious	4
	[100,200)		
Atlanta, GA	≥200	Serious	5
Baltimore, MD	≥200	Severe	5
Boston-Lawrence-Worcester, MA-NH	≥200	Serious	5
Chicago-Gary-Lake Country(IL), IL-IN-WI	≥200	Severe	5
Greater Connecticut, CT	≥200	Serious	5
Houston-Galveston-Brazoria, TX	≥200	Severe	5
Los Angeles-South Coast Air Basin, CA	≥200	Extreme	5
New York-New Jersey-Long Island, NY-NJ-CT	≥200	Severe	5
Philadelphia-Wilmington-Trenton, PA-NJ-DE-MD	≥200	Severe	5
San Diego, CA	≥200	Severe	5
San Joaquin Valley, CA	≥200	Serious	5
Washington, DC-MD-VA	≥200	Serious	5
合计		22	90

表 2 美国 PAMS 监测网络设置最小点位数与城市人口数量
Table 2 Minimum PAMS network requirements in United States

人口规模/万	最少监测点位数量/个	光化学监测点位类型及数量/个			
		上风向和背景点	最高 O_3 前体物排放影响点	最高 O_3 浓度点	下风向点
<50	2	1	1	0	0
[50,100)	3	1	1	1	0
[100,200)	4	1	2	1	0
≥200	5	1	2	1	1

1)点位价值评价中明确提出点位 2#和 3#具有高价值等级。许多 PAMS 点位在经过 10~15 年的运行后,点位类型发生了变化。为了评估这些 PAMS 点位是否还能满足当初设立的监测目标,USEPA 开展了等级评估:根据 PAMS 目标,对 4 个点位类型满足管理需求的等级(低、中和高价值)进行了评价。评价结果表明[13],点位 2#和 3#在支持多个环境管理目标方面获得了高价值等级,而点位 1#和 4#在支持多个环境管理目标方面仅获得了中或低价值等级。

2)点位类型及数量优化中明确提出点位 2#均需配置,点位 1#或 3#根据需要配置,点位 4#无必须配置要求。2006 年 10 月 17 日,USEPA 结合当时美国实际情况提出了 PAMS 监测点位需修订的要求。该修订要求极大地减少了最小 PAMS 点位数量的需求,即每一个区域仅有一个 2#点位(无论人口规模多少),根据需要布设一个 1#和/或 3#点位,4#不是必须布设的点位。

3)PAMS 调整为 2 个部分[14-15]:①PAMS 必需点位监测网络,用以支持 O_3 模型发展和重要 O_3 前体物浓度趋势追踪分析,这些点位的范围扩展至全美所有人口大于 100 万的 43 个城市,覆盖范围扩展至美国中部地区。②加强监测计划(EMPs),位于 O_3 传输区域、O_3 中度及以上污染的州或区域,需开展 O_3 及其前体物和气象条件等的加强监测计划,这些加强监测计划可以灵活开展,且为特定区域的 O_3 研究提供帮助。

4 我国大气光化学监测点位布设现状和问题

我国大气光化学监测起步较晚,国家层面的大气光化学监测网络布设仍处于发展和应用的初级阶段[16]。2018 年起,我国才逐步建立了全国范围内与光化学污染相关的大气 VOCs 监测网络[10]。截至 2023 年 2 月 9 日,全国共计 159 个城市 170 个点位开展 VOCs 自动监测且与中国环境监测总站联网。目前,结合我国 O_3、VOCs 污染特征和分布特点,布点思路主要为每个城市应至少在城市人口密集区内的 O_3 高值区域设置 1 个监测点位;有条件的城市可以结合本地区 VOCs 污染情况及 O_3 污染防治实际需求,在城市上风向或者背景点、VOCs 高浓度点、O_3 高浓度点与地区影响边缘监测点(下风向点位)增设监测点位,形成完整的光化学监测网络[1]。

4.1 监测点位布设类型单一

全国现有大气 VOCs 自动监测点位以位于人口密集区内的 O_3 高值区域点为主(占比 69.3%),其他功能点位较为欠缺[16]。目前,仅有京津冀、长三角、珠三角等地区的部分城市开展了针对 VOCs 高浓度点(交通源和工业源监测)、上下风向点位(背景点、传输通道点等)建设工作。

4.2 监测点位布设协同考虑薄弱

大部分城市的光化学监测点位布设主要考虑本城市的 O_3 管控需求,光化学点位布设在区域间的相互影响和关联性、与其他监测网络的协同考虑方面相对较为薄弱。首先,处于相似气候和气象条件下相邻城市的空气污染物变化规律往往具有较大的相似性,且存在明显的相互影响[1],相互影响的城市/区域可作为一个整体来统筹考虑光化学点位的布设。其次,VOCs 作为 O_3 和 $PM_{2.5}$ 共同的前体物,光化学监测点位的选址建议与常规国家空气质量监测网络、颗粒物组分网等协同考虑和推进,优化监测网络功能定位[17]。

4.3 监测点位代表性缺乏定期论证评估

鉴于中国许多城市建设速度和规模发展迅速,部分城市的居民生活区、商务区、工业园区等功能区划分不够清晰;VOCs 作为 O_3 的主要前体物,组分众多且来源广泛;点位 2#(O_3 前体物最高浓度排放影响点)极易受到局地排放源的影响,从而干扰监测数据的准确性。因此,定期评估已有光化学点位类型及代表性对于光化学监测数据的准确性和代表性至关重要。对于新建的光化学点位,点位建设部门应在点位选择方面进行充分

的数据分析和科学论证,以确保监测的有效性和可靠性。

5 我国大气光化学监测点位布设的思考与建议

目前,我国虽然已初步形成了全国范围内的大气 VOCs 监测点位,并且京津冀、长三角、珠三角等地区的部分城市已经布设了不同功能类型的 VOCs 点位,但我国尚未形成涵盖 O_3 及其前体物(VOCs、NO_x 等)光化学污染全要素的光化学监测网络,各地建设的大气 VOCs 监测点位的科学性、合理性和代表性尚缺乏有效验证,部分监测点位的监测数据无法有效支撑光化学污染的评估和研究,结合我国现有光化学监测工作,建议在以下方面进一步推动和完善:

1)针对光化学污染日益严峻的污染形势,国家层面应尽快结合中国本地的实际情况,着手建立覆盖多点位类型且适用于中国国情的光化学监测布点技术方法和要求,以指导地方规范开展光化学监测点位的布设工作。

2)光化学监测因子方面应建立覆盖 O_3 及其前体物(VOCs、NO_x 等)和影响光化学污染的气象要素等监测因子的光化学污染监测网络。

3)针对全国范围内 O_3 污染程度和等级不同,建议对光化学点位布设提出不同的监测要求。对仅出现 O_3 污染且 O_3 传输影响不严重的区域,可以考虑仅设立点位 2#和/或 3#;对于污染传输占比较高的城市和区域,可以考虑增设点位 1#;对于污染连片的跨城市区域,在具体点位布设时,可以参考美国多个城市点位布设的方法,在城市之间可以将上个城市的点位 3#设定为下个城市的点位 1#,仅在最后城市的下风向布设点位 4#。

4)中国城市人口规模远远高于美国城市人口规模,而设置光化学监测点位的数量需要结合区域内的人口数量来确定,不同人口规模的城市设置不同数量的功能点位,建议建立与中国城市人口规模相匹配的光化学监测点位数量。

5)京津冀、长三角、珠三角等地区和部分城市不仅布设了不同功能类型的光化学监测点位,还专门布设了工业区、交通等 O_3 前体物最高浓度排放影响点(点位 2#),实现对大气光化学前体物更为全面、系统的监测;另外,以上区域借助于重大活动保障等契机,实现了大气光化学监测点位监测数据的跨区域实时共享,可为光化学污染区域传输的分析和研究等提供非常有力的数据支撑;但以上重点区域光化学监测点位布设仍然以行政/功能区为主,不同行政区/功能区光化学监测点位的布设建议进一步协同考虑。

6)鉴于 $PM_{2.5}$ 和 O_3 仍然是我国当前大气污染面临的 2 种重要污染物,在光化学监测点位布设时,建议结合我国国情加强 $PM_{2.5}$ 和 O_3 布点的协同考虑,对科学高效地、有针对性地制定光化学污染监测网络具有积极意义。

6 结语

提高大气光化学监测点位布设的科学性和合理性是一个具有挑战性的科学和技术难题。美国在过去 30 多年的光化学监测点位布设工作中积累了许多宝贵的思路和经验。当前,中国大气光化学监测工作正处于起步发展阶段,因此应该从长远和现实经济发展水平等多个角度考虑和统筹规划。我们可以广泛借鉴国内外的经验和教训,在探索过程中逐步建立起适合中国国情的光化学监测网络,为中国的大气污染防治工作提供更准确和可靠的大气光化学监测数据。

参考文献(References):

[1] 柴文轩,李健军,唐桂刚,等. 全国光化学监测网络建设面临的问题分析及策略初探[J]. 中国环境监测,2021,37(3):35-39.
CHAI Wenxuan, LI Jianjun, TANG Guigang, et al. Problems and Strategies in the Construction of National Photochemical Monitoring Network [J]. Environmental Monitoring in China, 2021, 37(3): 35-39.

[2] 生态环境部. 生态环境部通报 2022 年 12 月和 1—12 月全国环境空气质量状况[EB/OL]. (2023-01-28)[2023-04-06]. https://www.mee.gov.cn/ywdt/xwfb/202301/t20230128101 4006.shtml.

[3] 范绍佳,王海潮,卢骁,等. 20 世纪 90 年代以来粤港澳大湾区臭氧污染研究进展[J]. 环境科学学报,2023,43(1):1-18.
FAN Shaojia, WANG Haichao, LU Xiao, et al. Progresses on Ozone Pollution in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area Since 1990s [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2023, 43(1): 1-18.

[4] 李莉娜,赵长民,潘本锋,等. 我国大气光化学烟雾

污染现状与监测网络构建建议[J]. 中国环境监测,2018,34(5):81-87.
LI Lina, ZHAO Changmin, PAN Benfeng, et al. Photochemical Smog Pollution Status and Proposal for Its Monitoring Network Construction in China[J]. Environmental Monitoring in China,2018,34(5):81-87.

[5] US Environmental Protection Agency. Guideline on Ozone Monitoring Site Selection [EB/OL]. [2023-04-06]. https://nepis. epa. gov/Exe/ZyPURL. cgi? Dockey=2000D45M. txt.

[6] US Environmental Protection Agency. Site Selection for the Monitoring of Photochemical Air Pollutants [EB/OL]. [2023-04-06]. https://nepis. epa. gov/Exe/ZyPURL. cgi? Dockey=00001Y6C. txt.

[7] MÓNICA J P, HUMBERTO B A, RODOLFO S E, et al. Photochemical Assessment Monitoring Stations Program Adapted for Ozone Precursors Monitoring Network in Mexico City[J]. Atmosfera,2016,29(2):169-188.

[8] YOO E C, PARK O H. A Study on the Formation of Photochemical Air Pollution and the Allocation of a Monitoring Network in Busan[J]. Korean Journal of Chemical Engineering,2010,27(2):494-503.

[9] WU E M Y, KUO S L. Characteristics of Photochemical Reactions with VOCs Using Multivariate Statistical Techniques on Data from Photochemical Assessment Monitoring Stations[J]. Atmosphere 2022,13(1489):1-13.

[10] 王超,柴文轩,师耀龙,等. 欧洲大气挥发性有机物大尺度监测进展及启示[J]. 中国环境监测,2021,37(5):1-7.
WANG Chao, CHAI Wenxuan, SHI Yaolong, et al. Progress and Enlightenment of Large-Scale Monitoring of Atmospheric Volatile Organic Compounds in Europe[J]. Environmental Monitoring in China, 2021,37(5):1-7.

[11] US Environmental Protection Agency. Photochemical Assessment Monitoring Stations Implementation Manual [EB/OL]. [2023-04-06]. https://nepis. epa. gov/Exe/ZyPURL. cgi? Dockey= 20011ZFW. txt.

[12] CHU S H. Meteorological Considerations in Siting Photochemical Pollutant Monitors[J]. Atmospheric Environment,1995,29(21):2 905-2 913.

[13] MCCARTHY M C, FUNK T H, HAFNER H R, et al. Network Assessment for the National Photochemical Assessment Monitoring Stations (PAMS) Program (DRAFT FINAL REPORT)[R]. North Carolina: US Environmental Protection Agency,2008.

[14] US Environmental Protection Agency. Photochemical Assessment Monitoring Stations (PAMS) [EB/OL]. [2023-04-06]. https://www. epa. gov/amtic/photochemical-assessment-monitoring-stations-pams.

[15] US Environmental Protection Agency. Guidance for Photochemical Assessment Monitoring Stations (PAMS) Required Network Implementation Plans and Enhanced Monitoring Plans (EMPs) [EB/OL]. [2023-04-06]. https://nepis. epa. gov/Exe/ZyPURL. cgi? Dockey=P100ZZBY. txt.

[16] 李跃武,柴文轩,赵月,等. 我国重点区域环境大气VOCs监测体系现状及发展方向[J]. 环境科学研究,2023,36(5):857-865.
LI Yuewu, CHAI Wenxuan, ZHAO Yue, et al. VOCs Monitoring System Status and Development Direction in Key Regions of China[J]. Research of Environmental Sciences,2023,36(5):857-865.

[17] 瞿淼,陈传忠,吴坚,等. 细颗粒物和臭氧协同监测现状与建议[J]. 中国环境监测,2022,38(2):8-12.
QU Miao, CHEN Chuanzhong, WU Jian, et al. Status and Recommendations for Synergic Monitoring of Fine Particles and Ozone[J]. Environmental Monitoring in China,2022,38(2):8-12.