

亚洲主要城市PM_{2.5}贡献来源

《大气中国》系列报告专题篇

作者：Philip K. Hopke 教授 美国克拉克森大学

翻译：王思 环境研究员 亚洲清洁空气中心

目录

简介.....	3
中国.....	3
北京.....	3
成都.....	4
香港.....	4
武汉.....	5
西安.....	5
上海.....	6
南京.....	6
广州.....	6
深圳.....	6
蒙古—乌兰巴托.....	6
韩国—首尔.....	6
马来西亚—吉隆坡.....	7
新加坡.....	7
越南—河内.....	7
菲律宾—马尼拉.....	8
印度尼西亚—雅加达.....	8
孟加拉—达卡.....	8
印度—德里.....	9
印度—孟买.....	9
巴基斯坦—卡拉奇.....	9
参考文献.....	10

简介

本报告总结了近年来全球主要城市最新的 PM_{2.5} 来源解析结果 (2015 年或之后的采样)。2014-2019 年间, 由于排放控制政策的实施, 众多国家的污染物排放量大幅下降。值得一提的是, 中国先后发布了《大气污染防治行动计划》和《北方地区冬季清洁取暖规划 (2017-2021 年)》, 并实施了全面的治理措施, 比如将北方地区的燃煤取暖改为燃烧天然气取暖。美国等其他国家也在实施相关控制政策, 如从 2017 年 1 月 1 日起把二级轻型车辆标准升级到三级标准等。因此, 对 2015 年前采集的 PM 样本进行的分析研究不能准确反映这些来源对当前 PM_{2.5} 浓度的贡献, 所以, 本报告侧重对最新开展的研究进行分析。从 2020 年开始, 新冠疫情的爆发导致空气质量系统发生了许多变化, 在强制减少活动期间, 污染物的排放量也相应减少 (Amouei Torkmahalleh et al., 2021)。然而, 持续的新冠疫情使得收集数据变得困难, 而且目前的源解析结果对新冠肺炎疫情后空气质量系统的适用性尚不清楚。因此, 本报告的发现适用于新冠疫情前的情景。

我们查询了全球 31 个大城市的 PM 源解析情况, 城市范围如表 1。然而, 在 Google、Google Scholar、Scopus 和 Web of Science 上搜索 PM_{2.5} 和“源解析”, 只发现其中 20 个城市有可用的源解析研究论文。基于此, 本报告对 20 个城市逐一进行了分析。

表 1 31 城市 PM_{2.5} 源解析结果发布情况

曼谷(无研究)	伊斯兰堡(无研究)	新德里
北京	雅加达	金边(无研究)
柏林(无研究)	卡拉奇(年份太老)	首尔
成都	加德满都(无研究)	上海
科伦坡(无研究)	吉隆坡	深圳
达卡	伦敦(无研究)	新加坡(无具体信息)
广州	洛杉矶(无研究)	东京(无研究)
杭州(无研究)	马尼拉	乌兰巴托
河内	孟买	万象(无研究)
香港	南京	武汉
西安		

中国

北京

自 2013 年启动《大气污染防治行动计划》以来, 北京的细颗粒物 (PM_{2.5}) 来源发生了重大变化。Li 等人 (2019a) 分析了 2012 年 6 月-2013 年 4 月的 PM_{2.5} 数据, 包括

了 2013 年 1 月的重污染时期。确定的来源包括：交通、生物质燃烧、硝酸盐和硫酸盐、焚烧、硫酸盐、煤炭燃烧、取暖和炊事、道路扬尘和土壤扬尘，以上来源对 PM_{2.5} 的贡献分别为 10.4%、8.9%、22.4%、7.2%、24.5%、6.2%、15.4%和 5.0%。

Du 等人 (2022) 分析了 2013-2018 年在朝阳区一个地点采集的 PM_{2.5} 成分数据，共解析了六种来源类型：道路扬尘、车辆尾气、煤炭燃烧、生物质燃烧、二次硝酸盐和二次硫酸盐。这些来源对 PM_{2.5} 的平均贡献分别为 3.12%、19.47%、11.04%、5.47%、28.23%和 30.07%。

Park 等人 (2022) 采用 DN_PMF 方法，对 2019 年在中国环境科学研究院收集的 224 个过滤样本进行了分析，具体源解析结果见表 2。

表 2 2019 年北京 PM_{2.5} 源解析结果(Park et al., 2022)

来源	浓度($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	贡献百分比
二次硝酸盐	13.063	31.7%
二次硫酸盐	7.225	17.6%
交通	4.717	11.5%
燃油	2.310	5.6%
燃煤	2.642	6.4%
土壤扬尘	2.807	6.8%
焚烧炉+工业	4.208	10.2%
生物质燃烧	3.599	8.7%
海盐粒子	0.593	1.4%

成都

Kong 等人 (2020) 分析了成都市环境保护科学研究院距地面 25 米处的 PM_{2.5} 小时浓度和化学成分。该区域包括道路、商业区和住宅区，建筑物高度都不超过 200 米。结果展示了六个来源及其贡献占比，分别为机动车排放 (8%)、生物质燃烧 (11.7%)、工业排放 (3.1%)、二次气溶胶 (35.9%)、煤炭燃烧 (27.3%) 和粉尘 (13.9%)。

Xue 等人 (2022) 发表了一项基于 2018 年采集的 80 个过滤样本的研究结果。他们应用 PMF 方法确定了六个来源及其贡献占比，包括二次源 (28%)、扬尘 (15%)、建筑粉尘 (4%)、煤炭燃烧 (13%)、汽油车排放 (12%) 和柴油车排放 (10%)。

香港

Chow 等人 (2022) 分析了 2015 年在香港六个监测站点采集的 PM_{2.5} 样本数据。他们使用 PMF 方法明确了九个来源，分别是：二次硫酸盐、二次硝酸盐、煤炭燃烧、生物质燃烧、一次天然源颗粒、汽车排放、残油燃烧、扬尘和海盐粒子。具体的源解析结果见表 3。

表 3 2015 年香港六个监测点的源解析结果(Chow et al., 2022)

来源	路边站(MK)	城市(YL)	城市(TW)	城市(TC)	乡村(HKUST)	乡村(HT)
二次硫酸盐	31%	40%	35%	46%	46%	49%
二次硝酸盐	13%	15%	10%	10%	6%	6%
煤炭燃烧	12%	20%	14%	18%	16%	16%
生物质燃烧	5%	3%	13%	3%	8%	2%
一次天然源颗粒	2%	0%	3%	0%	1%	0%
汽车排放	24%	7%	9%	6%	2%	2%
残油燃烧	2%	2%	4%	2%	2%	4%
扬尘	4%	6%	5%	5%	6%	8%
海盐粒子	7%	7%	9%	9%	12%	12%

武汉

Zhang 等人 (2022b) 基于 2019 年 12 月-2020 年 11 月的监测数据, 使用主成分分析法 (PCA) 和随机森林模型的组合来量化武汉的 PM_{2.5} 来源。结果包括五个来源及其贡献占比, 分别为: 燃煤和二次源 (45%)、汽车排放 (25%)、工业排放 (16%)、扬尘 (8%) 和生物质燃烧 (8%)。

西安

Dai 等人 (2018) 于 2014 年 12 月-2015 年 11 月在西安及其周边的 6 个地点采集了 PM_{2.5} 过滤样本, 并利用 PMF 方法分析确定了七个来源: 煤炭燃烧、道路交通、土壤扬尘、生物质燃烧、硫酸盐、硝酸盐和冶金工业。具体的源解析结果见表 4。

表 4 2014-2015 年西安 PM_{2.5} 的源解析结果(Dai et al., 2020b)

站点	贡献 (%)							PM _{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
	交通	生物质燃烧	硫酸盐	硝酸盐	土壤扬尘	燃煤	冶金工业	
城市	16.3	6.2	18.5	31.4	5.6	17.7	4.3	115.4
工业区	11.0	5.8	23.0	28.7	5.7	17.3	8.5	117.8
乡村	11.0	7.2	26.3	25.8	4.8	23.1	1.7	113.3
CA	9.9	19.9	15.0	31.0	6.4	17.8	--	110.8
SS	14.2	14.1	11.1	45.0	3.9	11.8	--	106.0

上海

Li 等人 (2020a) 使用了 2018 年 11 月 9 日-12 月 3 日期间采集的样本数据。他们在上海市区进行了为期三周的实地调查, 每隔一个小时测量一次 $PM_{2.5}$ 浓度及其化学成分, 确定了 11 个来源及其贡献占比, 分别为: 二次硝酸盐 (30.4%)、二次硫酸盐 (15.3%)、汽车尾气 (12.6%)、工业排放和轮胎磨损 (3.8%)、工业排放 2 (2.0%)、残油燃烧 (2.0%), 扬尘 (4.2%)、煤炭燃烧 (5.3%)、生物质燃烧 (4.8%)、炊事 (2.8%)。

南京

Yu 等人 (2020) 从 2017 年 1 月 1 日-2017 年 12 月 31 日对 $PM_{2.5}$ 样本进行采集, 并使用 PMF 方法确定了来源, 包括: 二次硝酸盐 (37.4%)、二次硫酸盐 (30.8%)、道路交通 (15.1%)、煤炭燃烧 (7.48%)、地壳扬尘 (3.47%)、残油燃烧 (2.76%) 和金属冶炼 (2.94%)。

广州

Li 等人 (2020b) 从 2013 年 10 月 16 日-2014 年 7 月 18 日期间采集了广州的 $PM_{2.5}$ 样本, 对采集到的 92 个过滤样本进行了 PMF 分析, 最终得到了六个主要来源及其贡献占比, 分别为: 交通排放 (30.6%)、生物质燃烧 (23.1%)、煤炭燃烧 (17.7%)、船舶排放 (14.0%)、生物质锅炉 (9.9%) 和工业排放 (4.7%)。

深圳

Sun 等人 (2019) 于 2014 年 3 月、6 月、9 月和 12 月在深圳的五个地点采集了 $PM_{2.5}$ 过滤样本, 结果显示汽车排放、二次硫酸盐、二次有机气溶胶和二次硝酸盐是 $PM_{2.5}$ 的主要来源, 分别占 27%、21%、12% 和 10%, 其他来源还包括工业排放 (8%)、海盐 (3%)、建筑扬尘和燃煤 (7%), 扬尘、生物质燃烧和船舶排放这三个来源贡献了剩下的 11%。

蒙古—乌兰巴托

Gunchin 等人 (2019) 使用 PMF 方法对 2014-2016 年乌兰巴托 $PM_{2.5}$ 和 $PM_{2.5-10}$ 进行了源解析, 确定的 $PM_{2.5}$ 的来源及其贡献占比分别为交通 (30.7%)、土壤扬尘 (33.1%)、煤炭燃烧 (26.0%)、石油燃烧 (10.2%), $PM_{2.5-10}$ 的来源和占比分别为交通 (41.9%)、土壤扬尘 (34.4%)、煤炭燃烧 (15.6%)、石油燃烧 (8.1%)。

韩国—首尔

韩国一直在实施污染物监管控制措施, 以减少空气污染和改善公众健康。2017 年, 政府出台了《细颗粒物行动计划》, 其目标是到 2022 年, $PM_{2.5}$ 排放量相比 2014 年减

少 30%，并将首尔的 PM_{2.5} 年均浓度降至 17–18 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Lee, 2018)。

Park 等人 (2022) 采用 PMF 分析方法对首尔的 PM_{2.5} 样本进行了分析，共解析出九个来源及其贡献占比，分别是：二次硝酸盐 (25.5%)、二次硫酸盐 (20.5%)、生物质燃烧 (11.3%)、焚烧炉 (10.5%)、移动源 (10.0%)、残油燃烧 (10.0%)、燃煤和工业 (5.9%)、土壤扬尘 (5.1%)、海盐粒子 (1.4%)。

Kim 等人 (2022) 基于首尔国家环境研究所 (NIER) 提供的 2019 年和 2020 年 1-3 月的 PM_{2.5} 数据，应用 DN-PMF 方法解析了十个来源及其贡献占比，分别为：硫酸盐 (25.9%)、二次硝酸盐 (24.5%)、生物质燃烧 (21.3%)、交通 (9.2%)、采矿业 (4.2%)、区域供暖 (3.8%)、土壤和道路扬尘 (2.5%)、冶金业 (1.8%)、残油燃烧 (1.2%)。

马来西亚—吉隆坡

Jamhari 等人 (2022) 报告了吉隆坡 PM 的组成、浓度和源解析结果。他们在 2017 年 2 月 17 日-12 月 3 日期间在石英过滤器上采集了多个尺寸的样本，然后使用 EPA PMF V5 方法进行分析，结果包含五个来源及其贡献占比，分别为：海盐粒子 (18.6%)、矿物和道路扬尘 (4.7%)、生物质燃烧和二次无机气溶胶 (38.5%)、交通排放 (22.4%)。

新加坡

Yan 等人对 2015 年 7 月-2016 年 1 月在新加坡采集的 114 个 PM_{2.5} 过滤样本进行解析，最终确定八个来源，分别是：地壳扬尘、生物质燃烧、航运排放、海盐粒子 1、海盐粒子 2、废物焚烧、磨料/冶金和汽车排放。然而，这篇研究中没有关于来源对 PM_{2.5} 贡献占比的具体信息。

越南—河内

Hien 等人 (2021) 报告了在河内新城区进行的 PM 源解析结果。他们从 2015 年 11 月-2016 年 6 月采集样本，使用 EPA PMF V5 方法解析了 PM_{1.0} 和 PM_{2.5} 的七个来源，具体的源解析结果如表 5。

表 5 河内 PM_{1.0} 和 PM_{2.5} 的源解析结果

来源	PM _{1.0}	PM _{2.5}
煤炭燃烧	15.4%	3.0%
汽车排放	10.7%	8.0%
道路扬尘	5.5%	26.9%
海盐粒子	5.1%	7.0%
生物质燃烧	4.3%	9.1%
建筑扬尘	1.0%	4.0%
区域传输	32.2%	24.1%
未能解释	25.7%	17.9%

菲律宾—马尼拉

Pabroa 等人 (2022) 于 2016 年 6-11 月的周三和周日在马尼拉的三个地点 (NAMRIA、MMDA 和 Valenzuela) 采集了 PM 样本, 每个地点提供了至少 75 个 PM_{2.5} 和 PM_{2.5-10} 的样本。三个站点的源解析结果如表 6。

表 6 马尼拉三个站点 PM_{2.5} 源解析结果(Pabroa et al., 2022)

来源	Valenzuela	MMDA	NAMRIA
土壤扬尘	9.2%	11.0%	13.5%
汽车排放	35.2%	20.0%	32.5%
海盐粒子	8.5%	13.3%	14.5%
工业排放	14.1%	30.7%	6.7%
生物质燃烧	27.6%	--	24.9%
二次硫酸盐	--	21.2%	7.9%
工业(锌)	--	3.9%	--
工业(锌-铅)	5.4%	--	--

印度尼西亚—雅加达

在雅加达, 该研究收集了三个地点 (Gelora Bung Karno (GBK)、Kebon Jeruk (KJ) 和 Lubang Buaya (LB)) 的 PM_{2.5} 过滤样本, 并采用 CMB 方法对样本数据进行了解析 (Vital Strategies, 2022), 具体的源解析结果见表 7。

表 7 雅加达三个地点的 PM_{2.5} 源解析结果(Vital Strategies, 2022)

来源	雨季			旱季		
	GBK	KJ	LB	GBK	KJ	LB
未能确定	31%	26%	22%	17%	0%	10%
二次气溶胶	11%	16%	6%	7%	2%	1%
汽车尾气	41%	32%	38%	42%	57%	43%
道路扬尘	6%	1%	0%	0%	9%	0%
建筑	0%	13%	0%	0%	0%	0%
土壤	1%	0%	1%	12%	10%	18%
露天焚烧	0%	11%	11%	0%	--	9%
海盐粒子	10%	0%	9%	22%	22%	19%
燃煤	0%	0%	14%	0%	0%	0%

孟加拉—达卡

Begum 和 Hopke (2019) 报告了达卡 PM_{2.5} 的最新源解析情况。他们分析了 1997-2015 年采集的 PM 样本, 最终确定了八种来源 (生物质燃烧、土壤扬尘、砖窑、扬尘、道路扬尘、镀锌厂、机动车排放和海盐粒子)。然而, 该研究中没有关于来源对 PM_{2.5} 贡

献占比的具体信息。

印度—德里

德里已成为世界上污染最严重的城市之一，尤其是在秋冬季污染问题特别显著，这在很大程度上是由于恒河平原的农业燃烧以及周边地区使用固体生物质燃料进行取暖。尤其是在排灯节等节日期间，大量燃放烟花爆竹会使空气质量下降 (Manchanda 等人, 2022)。

Shivani Gadi 等人 (2019) 在 2016 年 12 月-2017 年 12 月期间，每周两次或三次在 3 个地点进行 PM_{2.5} 过滤采样。他们应用 PMF 方法解析了五个来源及其贡献占比，分别为：汽车排放 (34.6%)、生物质燃烧 (26.8%)、炊事 (15.7%)、塑料和废物燃烧 (13.5%) 和二次有机碳 (9.5%)。

Jain 等人 (2020) 于 2013 年 1 月-2016 年 12 月在印度德里 CSIR 国家物理实验室收集 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 样本，使用 EPA PMF V5 解析了八种来源：二次硝酸盐、二次硫酸盐、汽车排放、生物质燃烧、土壤扬尘、化石燃料燃烧、钠盐和镁盐以及工业排放，它们对 PM_{2.5} 的年均贡献率分别为：11.7%、9.0%、16%、23%、13%、10%、6%和 10.3%。

印度—孟买

Police 等人 (2018) 报告了 2010 年和 2011 年在孟买采集的 PM_{2.5} 和 PM_{2.5-10} 的源解析结果。他们使用 EPA PMF V5 方法解析出六个来源，分别为：燃油、煤炭和生物质燃烧、道路交通、海盐粒子、地壳扬尘和金属工业。具体的源解析结果如表 8。

表 8 孟买 PM_{2.5} 和 PM_{2.5-10} 源解析结果(Police et al., 2018)

来源	PM _{2.5}	PM _{2.5-10}
地壳扬尘	8.7%	8.7%
海盐粒子	6.1%	15.0%
燃煤和生物质燃烧	25.5%	13.8%
道路交通	17.7%	12.6%
燃油	19.0%	11.2%
金属工业	10.6%	7.9%
未知源	12.4%	15.0%

巴基斯坦—卡拉奇

Shahid 等人 (2018) 和 Lurie 等人 (2019) 分别发表了卡拉奇的 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 的源解析结果。然而，Shahid 等人的研究分析了 2009 年 3-4 月采集的九个样本数据，Lurie 等人的研究分析了 2008 年 8 月-2009 年 8 月采集的样本数据。因此，目前尚未发现卡拉奇最近的 PM 源解析的相关研究结果。

参考文献

1. Amouei Torkmahalleh, M., Akhmetvaliyeva, Z., Omran, A.D., Darvish Omran, F., Kazemitabar, M., Naseri, M., Naseri, M., Sharifi, H., Malekipirbazari, M., Kwasi Adotey, E., Gorjinezhad, S., Eghtesadi, N., Sabanov, S., Alastuey, A., de Fátima Andrade, M., Buonanno, G., Carbone, S., Cárdenas-Fuentes, D.E., Cassee, F.R., Dai, Q., Henríquez, A., Hopke, P.K., Keronen, P., Khwaja, H.A., Kim, J., Kulmala, M., Kumar, P., Kushta, J., Kuula, J., Massagué, J., Mitchell, T., Mooibroek, D., Morawska, L., Niemi, J.V., Ngagine, S.H., Norman, M., Oyama, B., Oyola, P., Öztürk, F., Petäjä, T., Querol, X., Rashidi, Y., Reyes, F., Ross-Jones, M., Salthammer, T., Sawides, C., Stabile, L., Sjöberg, K., Söderlund, K., Sunder Raman, R., Timonen, H., Umezawa, M., Viana, M., Xie, S., 2021. Global Air Quality and COVID-19 Pandemic: Do We Breathe Cleaner Air? *Aerosol Air Qual. Res.* 21, 200567.
2. Baldauf, R.W., Lane, D.D., Marotz, G.A., 2001. Ambient air quality monitoring network design for assessing human health impacts from exposures to airborne contaminants. *Environ. Monitoring Assess.* 66, 63–76. doi:10.1023/A:1026428214799.
3. Begum, B.A., Hopke, P.K., 2019. Identification of sources from chemical characterization of fine particulate matter and assessment of ambient air quality in Dhaka, Bangladesh. *Aerosol Air Qual. Res.* 19, 118–128.
4. Bi, X.H., Simoneit, B.R.T., Sheng, G.Y., Fu, J.M., 2008. Characterization of molecular markers in smoke from residential coal combustion in China. *Fuel* 87, 112–119. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2007.03.047>.
5. Chen, Y., Rich, D.Q., Hopke, P.K., 2022. Long-term PM_{2.5} source analyses in New York City from the perspective of dispersion normalized PMF. *Atmospheric Environment* 272, 118949.
6. Choi, J.K., Ban, S.J., Kim, Y.P., Kim, Y.H., Yi, S.M., Zoh, K.D., 2015. Molecular marker characterization and source appointment of particulate matter and its organic aerosols. *Chemosphere* 134, 482–491. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.04.093>.
7. Chow, W. S., Huang, X. H. H., Leung, K. F., Huang, L., Wu, X., and Yu, J. Z., 2022. Molecular and elemental marker-based source apportionment of fine particulate matter at six sites in Hong Kong, China. *Sci. Total Environ.*, 813, 152652, <https://doi:10.1016/j.scitotenv.2021.152652>.
8. Dai, Q., Bi, X., Liu, B., Li, L., Ding, J., Song, W., Bi, S., Schulze, B., Song, C., Wu, J., Zhang, Y., Feng, Y., Hopke, P., 2018. Chemical nature of PM_{2.5} and PM₁₀ in Xi'an, China: insights into primary emissions and secondary particle formation. *Environ. Pollut.* 240, 155–166.
9. Dai, Q.L., Bi, X.H., Song, W.B., Li, T.K., Liu, B.S., Ding, J., Xu, J., Song, C.B., Yang, N.W., Schulze, B.C., Zhang, Y.F., Feng, Y.C., Hopke, P.K., 2019. Residential coal combustion as a source of primary sulfate in Xi'an, China. *Atmos. Environ.* 196, 66–76.

10. Dai, Q., Liu, B., Bi, X., Wu, J., Liang, D., Zhang, Y., Feng, Y., Hopke, P.K., 2020a. Dispersion normalized PMF provides insights into the significant changes in source contributions to PM_{2.5} after the COVID-19 outbreak. *Environ Sci. Technol.* 54, 9917-9927.
11. Dai, Q.L., Hopke, P.K., Bi, X.H., Feng, Y.C., 2020b. Improving apportionment of PM_{2.5} using multisite PMF by constraining G-values with a priori information. *Sci. Total Environ.* 736, 139657. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139657>.
12. Feng, X., Feng, Y., Chen, Y., Cai, J., Li, Q., Chen, J., 2022. Source apportionment of PM_{2.5} during haze episodes in Shanghai by the PMF model with PAHs. *J. Clean. Prod.* 330, 129850. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129850>.
13. Gunchin, G., Manousakas, M., Osan, J., Karydas, A.G., Eleftheriadis, K., Lodoysamba, S., Shagjjamba, D., Migliori, A., Padilla-Alvarez, R., Strelis, C. and Darby, I. (2019). Three-Year Long Source Apportionment Study of Airborne Particles in Ulaanbaatar Using X-Ray Fluorescence and Positive Matrix Factorization. *Aerosol Air Qual. Res.* 19: 1056-1067. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2018.09.0351>.
14. Han, Y.M., Cao, J.J., Chow, J.C., Watson, J.G., Fung, K., Jin, Z.D., Liu, S.X., An, Z.S., 2007. Evaluation of the thermal/optical reflectance method for discrimination between soot- and char-EC. *Chemosphere* 69, 569–574.
15. Heo, J.B., Hopke, P.K., Yi, S.M., 2009. Source apportionment of PM_{2.5} in Seoul, Korea. *Atmos. Chem. Phys.* 9, 4957–4971. <https://doi.org/10.5194/acp-9-4957-2009>.
16. Hopke, P.K., 2016. Review of receptor modeling methods for source apportionment. *J. Air Waste Manag. Assoc.* 66, 237–259.
17. Hopke, P.K., Ramadan, Z., Paatero, P., Norris, G.A., Landis, M.S., Williams, R.W., Lewis, C.W., 2003. Receptor modeling of ambient and personal exposure samples: 1998 Baltimore Particulate Matter Epidemiology-Exposure Study. *Atmospheric Environment* 37, 3289–3302.
18. Hopke, P.K., Xie, Y., Raunemaa, T., Biegalski, S., Landsberger, S., Maenhaut, W., Artaxo, P., Cohen, D., 1997. Characterization of the gent stacked filter unit PM₁₀ sampler. *Aerosol Sci. Technol.* 27, 726–735. doi:10.1080/02786829708965507.
19. Jain, S., Sharma, S.K., Vijayan, N., Mandal, T.K., 2020. Seasonal characteristics of aerosols (PM_{2.5} and PM₁₀) and their source apportionment using PMF: A four year study over Delhi, India. *Environmental Pollution* 262, 114337. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114337>.
20. Jamhari, A.A., Latif, M.T., Wahab, M.I.A., Hassan, H., Othman, M., Abd Hamid, H.H., Tekasakul, P., Phairuang, W., Furuuchi, M., Hata, M., Rajab, N.F., 2022. Seasonal variation and size distribution of inorganic and carbonaceous components, source identification of size-fractionated urban air particles in Kuala Lumpur, Malaysia. *Chemosphere* 287, 132309.

21. Joint Research Centre, (JRC), 2014. Institute for Environment and Sustainability, Viana, M., Belis, C., Vecchi, R., et al., European guide on air pollution source apportionment with receptor models, Publications Office, <https://data.europa.eu/doi/10.2788/9307>.
22. Kim, E., Hopke, P.K., Edgerton, E.S., 2004. Improving source identification of Atlanta aerosol using temperature resolved carbon fractions in Positive Matrix Factorization. *Atmospheric Environment* 38, 3349–3362.
23. Kong, L.D., Yang, Y.W., Zhang, S.Q., Zhao, X., Du, H.H., Fu, H.B., Zhang, S.C., Cheng, T.T., Yang, X., Chen, J.M., Wu, D., Shen, J.D., Hong, S.M., Jiao, L., 2014. Observations of linear dependence between sulfate and nitrate in atmospheric particles. *J. Geophys. Res. Atmos.* 119, 341–361.
24. Kong, L., Tan, Q., Feng, M., Qu, Y., An, J., Liu, X., Cheng, N., Deng, Y., Zhai, R., Wang, Z., 2020. Investigating the characteristics and source analyses of PM_{2.5} seasonal variations in Chengdu, Southwest China. *Chemosphere* 243, 125267. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125267>.
25. Lawson, C.L., and R.J. Hanson. 1974. *Solving Least Squares Problems*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.
26. Lee, S., 2018. Korea's new comprehensive plan on fine dust and its implications for policy and research. *Res. Brief* 29, 1–7.
27. Li, X., Yang, K., Han, J., Ying, Q., Hopke, P. K., 2019a. Sources of humic-like substances (HULIS) in PM_{2.5} in Beijing: Receptor modeling approach. *Sci. Total Environ.* 671, 765–775.
28. Li, X., Han, J., Hopke, P.K., Hu, J., Shu, Q., Chang, Q., Ying, Q., 2019b. Quantifying primary and secondary humic-like substances in urban aerosol based on emission source characterization and a source-oriented air quality model. *Atmos. Chem. Phys.* 19 (4), 2327–2341.
29. Li, R., Wang, Q., He, X., Zhu, S., Zhang, K., Duan, Y., Fu, Q., Qiao, L., Wang, Y., Huang, L., Li, L., and Yu, J. Z., 2020a. Source apportionment of PM_{2.5} in Shanghai based on hourly organic molecular markers and other source tracers, *Atmos. Chem. Phys.*, 20, 12047–12061, <https://doi.org/10.5194/acp-20-12047-2020>.
30. Li, T., Li, J., Jiang, H., Chen, D., Zong, Z., Tian, C., Zhang, G., 2020b. Source Apportionment of PM_{2.5} in Guangzhou Based on an Approach of Combining Positive Matrix Factorization with the Bayesian Mixing Model and Radiocarbon, *Atmosphere* 11, 512. <https://doi.org/10.3390/atmos11050512>.
31. Lin, L., Lee, M.L., Eatough, D.J., 2010. Review of recent advances in detection of organic markers in fine particulate matter and their use for source apportionment. *J Air Waste Manage Assoc* 60, 3–25. <https://doi.org/10.3155/1047-3289.60.1.3>.
32. Lurie, K., Nayebare, S.R., Fatmi, Z., Carpenter, D.O., Siddique, A., Malashock, D.,

- Khan, K., Zeb, J., Hussain, M.M., Khatib, F., 2019. PM_{2.5} in a megacity of Asia (Karachi): source apportionment and health effects. *Atmos. Environ.* 202, 223–233.
33. Malinowski, E.R. 2002. *Factor Analysis in Factor Analysis*, 3rd ed. Hoboken, NJ: Wiley.
- Manchanda, C., Kumar, M., Singh, V., Hazarika, N., Faisal, M., Lalchandani, V., Shukla, A., Dave, J., Rastogi, N., Tripathi, S.N., 2022. Chemical speciation and source apportionment of ambient PM_{2.5} in New Delhi before, during, and after the Diwali fireworks, *Atmos. Pollut. Res.* 13, 101428. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2022.101428>.
34. Oros, D.R., Simoneit, B.R.T., 2000. Identification and emission rates of molecular tracers in coal smoke particulate matter. *Fuel* 79, 515–536. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(99\)00153-2](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(99)00153-2).
35. Paatero, P., Hopke, P.K., 2003. Discarding or downweighting high-noise variables in factor analytic models. *Anal. Chim. Acta* 490, 277–289.
36. Park, E.H., Heo, J., Kim, H., Yi, S.M., 2020. Long term trends of chemical constituents and source contributions of PM_{2.5} in Seoul. *Chemosphere* 251, 126371. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126371>.
37. Park, J., Kim, H., Kim, Y., Heo, J., Kim, S.W., Jeon, K., Yi, S.M., Hopke, P.K., 2022. Source apportionment of PM_{2.5} in Seoul, South Korea and Beijing, China using dispersion normalized PMF. *Sci. Total Environ.* 833, 155056.
38. Police, S., Sahu, S.K., Tiwari, M., Pandit, G.G., 2018. Chemical composition and source apportionment of PM_{2.5} and PM_{2.5-10} in Trombay (Mumbai, India), a coastal industrial area. *Particuology* 37, 143–153. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2017.09.006>.
39. Rahman, M.M., Begum, B.A., Hopke, P.K., Nahar, K., Thurston, G. D., 2020. Assessing the PM_{2.5} impact of biomass combustion in megacity Dhaka, Bangladesh. *Environ Pollut* 264, 114798.
40. Rahman, M.M., Begum, B.A., Hopke, P.K., Nahar, K., Newman, J., Thurston, G.D., 2021. Cardiovascular morbidity and mortality associations with biomass- and fossil-fuel combustion fine-particulate-matter exposures in Dhaka, Bangladesh. *Int. J. Epidemiol.* 50, 1172–1183.
41. Rahman MM, Nahar K Begum BA, Hopke PK, Thurston GD (2022) Respiratory emergency department visits associations with exposures to PM_{2.5} mass, constituents, and sources in Dhaka, Bangladesh air pollution. *Ann Am Thorac Soc.* 19, 28-38, <https://doi.org/10.1513/AnnalsATS.202103-252OC>.
42. Santoso, M., Hopke, P.K., Hidayat, A., Dwiana, L.D., 2008. Sources identification of the atmospheric aerosol at urban and suburban sites in Indonesia by positive matrix factorization. *Sci Total Environ.* 397, 229–238. doi: 10.1016/j.scitotenv.2008.01.057.
43. Schauer, J.J., Rogge, W.F., Hildemann, L.M., Mazurek, M.A., Cass, G.R., Simoneit, B.R.T., 1996. Source apportionment of airborne particulate matter using organic

- compounds as tracers. *Atmospheric Environment* 30, 3837–3855.
44. Shahid, I., Alvi, M.U., Shahid, M.Z., Alam, K., Chishtie, F., 2018. Source Apportionment of PM₁₀ at an Urban Site of a South Asian Mega City. *Aerosol Air Qual. Res.* 18: 2498–2509. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2017.07.0237>.
45. Shivani Gadi, R., Sharma, S.K., Mandal, T.K., 2019. Seasonal variation, source apportionment and source attributed health risk of fine carbonaceous aerosols over National Capital Region, India. *Chemosphere* 237, 124500. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124500>.
46. Subramanian, R., Donahue, N.M., Bernardo-Bricker, A., Rogge, W.F., Robinson, A.L., 2006. Contribution of motor vehicle emissions to organic carbon and fine particle mass in Pittsburgh, Pennsylvania: effects of varying source profiles and seasonal trends in ambient marker concentrations. *Atmos. Environ.* 40, 8002–8019. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.06.055>.
47. Sun, T.-L., Zou, B.-B., Huang, X.-F., Shen, H.-Y., Dai, J., He, Ling-Y., 2019. Source apportionment of PM_{2.5} in Shenzhen. *China Environmental Science* 39, 13–20.
48. Tian, Y.Z.; Liu, X.; Huo, R.Q.; Shi, Z.B.; Sun, Y.M.; Feng, Y.C.; Harrison, R.M. 2021. Organic compound source profiles of PM_{2.5} from traffic emissions, coal combustion, industrial processes and dust. *Chemosphere* 278, 130429. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130429>.
49. Turpin, B.J., Lim, H.J., 2001. Species contributions to PM_{2.5} mass concentrations: revisiting common assumptions for estimating organic mass. *Aerosol. Sci. Technol.* 35, 602–610. <https://doi.org/10.1080/02786820119445>.
50. Vital Strategies, 2022. Main Sources of Air Pollution in Jakarta, available from: www.vitalstrategies.org/source-apportionment-report.
51. Wang, G., Kawamura, K., Xie, M., Hu, S., Gao, S., Cao, J., An, Z., Wang, Z., 2009. Size-distributions of n-alkanes, PAHs and hopanes and their sources in the urban, mountain and marine atmospheres over East Asia. *Atmos Chem Phys* 9, 8869–8882. <https://doi.org/10.5194/acp-9-8869-2009>.
52. Wang, Q.Q., Huang, X.H.H., Zhang, T., Zhang, Q., Feng, Y., Yuan, Z., Wu, D., Lau, A.K.H., Yu, J.Z., 2015. Organic tracer-based source analysis of PM_{2.5} organic and elemental carbon: a case study at Dongguan in the Pearl River Delta. *China Atmos Environ* 118, 164–175. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.07.033>.
53. Wang, Y., Zhang, Y., Li, X., Cao, J. (2021). Refined Source Apportionment of Atmospheric PM_{2.5} in a Typical City in Northwest China. *Aerosol Air Qual. Res.* 21, 200146. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2020.04.014>.
54. World Health Organization (WHO), 2021. WHO global air quality guidelines. Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. Geneva: World Health Organization.

55. Xue, Q., Tian, Y., Wei, Y., Song, D., Huang, F., Tian, S., Feng, Y., 2022. Seasonal variation and source apportionment of inorganic and organic components in PM_{2.5}: influence of organic markers application on PMF source apportionment. *Environ Sci Pollut Res* (2022). <https://doi.org/10.1007/s11356-022-21332-5>.
56. Yan, M., Yang, X., Hang, W., Xia, Y., 2019. Determining the number of factors for nonnegative matrix and its application in source apportionment of air pollution in Singapore. *Stoch. Env. Res. Risk A*. 33, 1175–1186.
57. Yu, L., Wang, G., Zhang, R., Zhang, L., Song, Y., Wu, B., Li, X., An, K., Chu, J., 2013. Characterization and source apportionment of PM_{2.5} in an urban environment in Beijing. *Aerosol Air Qual. Res.* 13, 574–583.
58. Yu, Y., Ding, F., Mu, Y., Xie, M., Wang, Q.G., 2020. High time-resolved PM_{2.5} composition and sources at an urban site in Yangtze River Delta, China after the implementation of the APPCAP. *Chemosphere* 261, 127746.
59. Zhang, X., Ji, G., Peng, X., Kong, L., Zhao, X., Ying, R., Yin, W., Xu, T., Cheng, J., Wang, L., 2022a. Characteristics of the chemical composition and source apportionment of PM_{2.5} for a one-year period in Wuhan, China. *J Atmos Chem* 79, 101–115. <https://doi.org/10.1007/s10874-022-09431-6>.
60. Zhang, Z.-H., Chen, N., Zhu, Bo, Tao, H.-T, Cheng, H.-R., 2022b, Source Analysis of Ambient PM_{2.5} in Wuhan City Based on Random Forest Model, *Environ. Sci.* 43, 1151–1158.