

张桂芹,姜德超,李曼,等.城市大气挥发性有机物排放源及来源解析[J].环境科学与技术,2014,37(120):195-200.Zhang Guiqin,Jiang Dechao,Li Man,et al.Emission sources and analytical sources of volatile organic compounds in urban atmospheric[J].Environmental Science & Technology,2014,37(120):195-200.

城市大气挥发性有机物排放源及来源解析

张桂芹¹, 姜德超¹, 李曼², 魏征¹

(1. 山东建筑大学市政与环境工程学院, 山东 济南 250101; 2. 山东省核与辐射安全监测中心, 山东 济南 250012)

摘 要 城市大气挥发性有机物(VOCs)是二次有机气溶胶(SOA)的重要前体物,而 SOA 又是城市大气细粒子的重要组成部分,对大气细粒子 PM_{2.5} 的贡献不容忽视。文章综述了国内外城市大气中 VOCs 排放源以及来源解析的研究现状。研究结果表明,城市大气挥发性有机物(VOCs)排放源中人为源来自汽车尾气、燃料挥发、石油化工、涂料的使用和生物质燃料燃烧等,天然源来自植物排放,主要的排放源是汽车尾气、燃料挥发、涂料的使用。城市大气挥发性有机物(VOCs)来源解析方法主要为 PMF、PCA/APCS 受体模型。天然源主要来自于植物排放,其中排放量最大的 VOCs 是异戊二烯和单萜烯;人为源中最主要 VOCs 为苯和甲苯等芳香烃以及乙烯、异戊烷、异丁烷、丙烷、异丁烷、乙烷、正丁烷等低碳烷烃烯烃。这为进一步开展 VOCs 源解析研究提供参考。同时发现天然源中对 SOA 贡献最大的是异戊二烯和单萜烯,人为源中芳香烃(甲苯、乙苯、间/对二甲苯、甲苯、乙苯、1,2,4-三甲苯、邻二甲苯、1,3-二乙苯)、烯烃(蒽烯)、烷烃(正十一烷)对 SOA 的生成有着巨大的贡献。

关键词 城市大气挥发性有机物(VOCs); 排放源; 来源解析; SOA

中图分类号 X51 文献标志码 A doi:10.3969/j.issn.1003-6504.2014.120.039 文章编号 1003-6504(2014)120-0195-06

Emission Sources and Analytical Sources of Volatile Organic Compounds in Urban Atmospheric

ZHANG Guiqin¹, JIANG Dechao¹, Li Man², WEI Zheng¹

(1. Shandong Jianzhu University School of Municipal and Environmental Engineering, Jinan 250101, China;

2. Shandong Nuclear and Radiation Safety Monitoring Center, Jinan 250012, China)

Abstract : Urban atmospheric volatile organic compounds (VOCs) is an important precursor of secondary organic aerosol (SOA), while the SOA who has a huge contribution to atmospheric fine particles PM_{2.5} is an important component of fine particles in urban air. The results shows that Automobile exhaust, fuel evaporation, petrochemical, paint use, and biomass burning are the anthropogenic sources of urban atmospheric volatile organic compounds (VOCs), emissions from plant is the natural sources. In all of these sources, car exhaust, fuel evaporation, coating used are the main source of emissions. The main anthropogenic sources of VOCs are light alkanes alkenes such as benzene and toluene, and vinyl aromatic hydrocarbons, isopentane, isobutane, propane, isobutane, ethane, n-butane. This provides a reference for further analytical of VOCs source research. VOCs are also found as an important precursor secondary organic aerosol (SOA). While the SOA is an important component of urban air particles, who has a big contribution to PM_{2.5}. Isoprene and monoterpenes has the greatest contribution to SOA in natural sources. Aromatic hydrocarbons (toluene, ethylbenzene, m / p-xylene, toluene, ethylbenzene, 1,2,4-trimethylbenzene, o-xylene, 1,3-diethylbenzene), olefin (pinene), paraffins (n-undecane) have a huge contribution to SOA in anthropogenic sources.

Key words : volatile organic compounds (VOCs) in urban atmospheric; emission sources; analytical sources study; SOA

挥发性有机污染物 (volatile organic compounds, VOCs) 是大气中普遍存在的一类化合物,一般是指在标准状态下饱和蒸汽压较高 (标准状态下大于 13.33 Pa)、沸点较低、分子量小、常温状态下易挥发的有机化合物。VOCs 是大气对流层非常重要的痕量组分,在

大气化学过程中扮演极其重要的角色,对城市区域臭氧生成直至至关重要^[1],也是导致霾天气的重要前体物之一^[2-3],对人体健康方有着重要的影响。

二次有机气溶胶(second organic aerosols)是天然源或人为源排放的挥发性 (volatile organic com-

《环境科学与技术》编辑部 (网址)http://tjks.chinajournal.net.cn (电话)027-87643502 (电子信箱)hjkxyjs@126.com

收稿日期 2014-06-05; 修回 2014-08-26

作者简介 张桂芹(1969-)女,副教授,博士,研究方向为大气污染控制理论与技术 (电子信箱)zhangguiqin320@163.com。

pounds, VOCs)或半挥发性有机化合物(semi-volatile organic compounds, SVOCs)经氧化和气/粒分配等过程而形成的悬浮于大气中的固体或液体微粒^[4-6],是大气细粒子的重要组成部分^[7-9]。SOA 对人体健康、能见度和对流层化学产生重要的影响^[10-14]。因此关注 SOA,研究 VOCs 对 SOA 的转化过程是十分必要和紧迫的。

我国环境保护部颁布的首部大气污染防治综合性规划—《重点区域大气污染防治“十二五”规划》十分明确的指出,挥发性有机物(VOCs)为下一阶段大气污染防治的重点污染物之一。由此可见,VOCs 污染问题已经提上议程,了解 VOCs 的排放特征对控制 VOCs 污染是十分必要的。因此,本文基于国内外研究相调查现状,对 VOCs 的来源进行了详细论述,为 VOCs 的控制提供科学论据。

1 城市大气中 VOCs 排放源研究

VOCs 的排放源包括自然源和人为源,其中人为源贡献值大大超过了自然源。

1.1 VOCs 自然排放源研究

植物源作为 VOCs 天然源最重要的排放源国内外的研究主要包括植物 VOCs 排放速率排放量估算以及不同类型植被的 VOCs 排放特征等。池彦琪等^[15]发现 2003 年中国 BVOC 排放总量为 12.83 Tg,其中,异戊二烯是最主要组成部分,为 7.45 Tg,占当年总排放量的 58%,单萜烯和其他 VOC 为 2.23 Tg 和 3.14 Tg 分别只占 17%和 25%。就排放源来看,各类型植被排放贡献率为森林(61%)>灌丛(27%)>农作物(7%)>草地(5%),其中异戊二烯 95%以上来源于森林和灌丛,单萜烯和其他 VOC 的来源更为广泛;周崴^[16]总结归纳了常州地区自然植被和人工植被的季节变化情况,并通过调研相关植被类型的排放观测数据,估算得到常州地区植物源挥发性有机物的年排放量。常州市 2011 年全年的植物源异戊二烯排放总量约为 9.53×10^3 t,其排放主要集中在溧阳市和金坛市;单萜排放约为 1.73×10^3 t,其排放主要集中在人工植被上。王志辉等^[17]发现植物释放的挥发性有机化合物(VOCs)主要集中在异戊二烯和单萜烯上,这些种类的化合物占生物圈 VOCs 释放量 2/3。采用封闭式采样和气相色谱分析对北京地区 23 种典型植物异戊二烯和单萜烯排放速率进行测定和研究,发现阔叶树(如槐、垂柳等)主要释放异戊二烯,而针叶树(如油松)和果树主要释放单萜烯。同时发现植物异戊二烯的释放受光照和温度的影响,而单萜烯的释放则主要受温度的影响。谢扬颢等^[18]根据北京市 2000 年城市园林绿化普查结果,

对北京市园林绿地植被挥发性有机物(VOCs)的排放情况进行研究,建立了北京市园林绿地天然源 VOCs 排放清单。结果表明,2000 年北京市园林绿地 VOCs 的年总排放量(以 C 计)约为 3.85 万 t,其中异戊二烯为 3.09 万 t,单萜烯为 0.59 万 t,其他 VOCs (OVOC)为 0.16 万 t。排放具明显的季节依赖性,其中夏季排放量最大,为 2.49 万 t,占全年的 64.7%;冬季最少为 0.008 6 万 t,占全年的 0.2%。城八区总排放量比远郊区县高,排放量最高的是朝阳区,为 1.37 万 t,占全市的 36.0%,其次为海淀、丰台、石景山区,分别占 16.2%、13.8%、4.7%。Hai 等^[19]测算了日本 10 种植物的 VOC 排放速率和排放清单。

1.2 VOCs 人为排放源研究

目前,交通运输是全球最大的 VOCs 人为排放源。乔月珍等^[20]选取轻型汽油车、重型柴油车和摩托车等城市典型机动车种分别采用底盘测功机及实际道路实验,结合 SUMMA 罐采样的方法,获得了小轿车、出租车、公交车、卡车、摩托车和 LPG 助动车的尾气 VOC 样品,利用气相色谱-质谱分析了各车型机动车尾气 VOC 的浓度及其物种组成。结果表明,轻型汽油车尾气 VOCs 以甲苯、二甲苯等芳香烃为主,占 43.38%~44.54%;重型柴油车以丙烷、n-十二烷及 n-十一烷等烷烃组分为主,占 40.68%~48.75%,还有 13.28%~15.01%的丙酮等含氧特征组分;摩托车与 LPG 助动车的主要成分为乙炔,分别占 39.75%和 76.67%左右。各车型中,摩托车和轻型汽油车尾气 VOCs 的化学活性显著高于重型柴油车辆。高爽等^[21]为研究轻型汽油车尾气中 VOCs 的排放特征和排放因子,按照《轻型汽车污染物排放限值及测量方法》(中国、阶段)中要求,采用底盘测功机对国内现有不同品牌轻型汽车进行台架试验,并利用 3 级冷阱预浓缩 GC-MS 方法对尾气样品中 VOCs 物种进行定量分析。结果表明,尾气样品中共有 68 种 VOCs 被定量检出,其中芳香烃种类最多,占 38.7%,烷烃占 29.8%,烯烃(包含炔烃)占 27.1%。不同品牌轻型车源排放谱特征基本吻合。轻型汽车的总 VOCs 排放因子的 0.01~0.46 g/km。前 3 位物种分别为乙烯、甲苯和苯。陆思华等^[22]运用 CMB8.0 受体模型对受体点中关村大气进行了源解析,得到各人为污染源的年平均贡献率分别为:汽车尾气 61.7%,汽油挥发 9.2%,石油液化气 9.0%,涂料 6.1%,石油化工 6.3%,天然源 1.0%,未知源 6.4%。结合气象条件分析表明,汽车尾气排放和汽油挥发主要受周边交通的影响,石油化工的污染可能来自于受体点东部化工区的污染输送,结果表明环境大气中的乙烯、苯和甲苯等化合物主要来自于汽车尾气

的排放,异戊烷来自于汽油的挥发,石油液化气、涂料、石油化工分别对大气中的异丁烷、正己烷和 2,4-二甲基戊烷贡献量最大。Olson 等^[23]研究了美国高速公路周围的城市大气中 VOCs 的成分,研究发现高速公路周围的城市大气中 VOCs 的浓度远远高于远离高速公路的城市大气中的 VOCs 的浓度,主要成分为乙炔、丙烷、异丁烷、乙烷、异戊烷、甲苯、正丁烷。Hirototo 等^[24]发现日本神奈川县交通干道两侧大气 VOCs 中前 10 种物种依次为甲苯、乙烷、丙烷、异戊烷、正丁烷、乙炔、异丁烷、异丁烯、3-甲基戊烷和苯。

2 VOCs 的来源解析研究

城市大气中 VOCs 的来源污染源的排放量以及对城市大气的贡献研究是控制大气 VOCs 的基础性研究。VOCs 经采样分析后常采用受体模型来判断主要污染来源以及各污染源对大气 VOCs 污染的相对贡献,其中美国国家环保署 EPA 推荐的 PMF 模型和化学质量平衡受体 CMB 模型是应用最为广泛的源解析技术。

国外的 VOCs 源解析从 20 世纪 70 年代就开始了。当时美国 EPA 使用的是 CMB1.0 版本的模型。Vaga 等^[25]利用 CMB 受体模型发现墨西哥城市大气 VOC 来源于汽车尾气占 58.7%,液化石油气的使用占 24.2%,这 2 个占总量的 81.9%。Mahmoud 等^[26]发现 VOCs 来源主要来自于移动源,铅冶炼和石油液化气的使用。Steven G Brown 等^[27]运用 PMF 对洛杉矶的阿苏萨和霍索恩地区的进行了 VOCs 的源解析,结果显示阿苏萨地区的蒸发排放占 31%,机动车尾气占 22%,液体和未燃烧的汽油占 27%,衣料占 17%,生物排放占 3%,霍索恩地区的蒸发排放占 34%,机动车尾气占 24%,工业过程损失占 15%,天然气占 13%,液体和未燃烧的汽油占 13%,生物排放占 1%。Panwadee Suwattiga 等^[28]运用 PMF 模型对泰国曼谷城市大气进行了源解析,结果显示曼谷中汽油汽车尾气占 21%,柴油占车尾气 5%,燃料挥发 12%,燃油锅炉烟气 22%,溶剂挥发占 8%,生物质燃料燃烧占 19%,汽烹饪烟气占 2%,市政废物处置废气占 4%,来源不明的占 7%。Maryam Sarkhosh 等^[29]发现在伊朗德黑兰的 VOCs 有 5 个来源,分别为汽车尾气占 61%,燃油蒸发占 12%,城市天然气占 17%,生物源占 8%,工业溶剂源占 2%。

较国外的 VOCs 研究,我国起步较晚,20 世纪 80 年代才开始。刘金凤等^[30]通过排放因子法对中国人为源 VOC 排放情况的研究,建立了中国人为源 VOC 的排放清单。2000 年全国人为源 VOC 的排放总量为 8 273 Gg。流动源、溶剂使用、固定燃烧源、工业过程、

石油精炼及运储、混杂源的贡献率依次为 32.8%、26.0%、19.3%、14.4%、6.0%和 1.5%。韩萌等^[31]利用美国环保署 PMF 模型发现天津市有 5 个可能的 VOCs 来源,分别是汽车尾气汽油挥发工业排放源植物排放燃烧源,贡献率分别为 25.09%、26.92%、23.59%、13.60%和 10.80%,其中汽油挥发和汽车尾气是主要的排放源,分析结果显示的 VOCs 排放数据受居民上班早晚高峰影响较大。Changjie Cai 等^[32]用概率矩阵分解模型(PMF)发现上海市 VOC 的主要来源包括 7 个方面,分别是:(1)交通源 25%,(2)工业溶剂使用 17%,(3)燃油蒸发 15%,(4)涂料溶剂 15%,(5)钢铁工业 12%,(6)生物质燃料燃烧 9%,(7)煤炭炭烧 7%。另外还发现工作日的 VOC 浓度高于周末的浓度,这表明交通情况和人类活动对 VOC 的浓度有着重要的影响。蔡长杰等^[33]运用 PCA/APCS (principal component analysis/absolute principal component scores)受体模型对上海市夏季空气 VOC 进行了源解析,结果表明中心城区大气中 VOCs 主要有 5 个来源,分别为交通工具尾气排放、燃料挥发(液化石油气/天然气泄漏和汽油蒸发)、溶剂使用、工业生产和生物质/生物燃料燃烧和海洋源,其贡献率分别为 34%、24%、16%、14%、12%。其中,芳香烃主要来自于溶剂使用、交通工具尾气排放、工业生产和燃料挥发,其分担率分别为 35%、26%、22%、17%。烯烃主要来自于交通工具尾气排放和燃料挥发,其分担率为 49%和 40%。烷烃主要来自于交通工具尾气排放、燃料挥发和溶剂使用,其分担率分别为 45%、32%、12%。杨辉等^[34]运用 PMF(positive matrix factorization)受体模型和 CPF(conditional probability function)模型对南京市北郊 VOCs 进行了源解析,结果显示南京市北郊夏季 VOCs 主要来源有 5 个,分别是交通尾气燃料挥发工业排放有机溶剂挥发和植物排放源,各自对 TVOCs 贡献为 33.1%、25.8%、23.2%、8.1%和 9.7%。烷烃主要来源于汽车尾气排放工业排放和燃料挥发,贡献百分比分别为 23.7%、35.3%和 31.3%;烯烃主要来源于燃料挥发工业排放和汽车尾气排放,分别占 41.1%、18.4%和 24.3%;对芳香烃贡献最大的为汽车尾气排放,占到 49.2%,其次是有机溶剂挥发排放占 30.8%。

3 VOCs 对 SOA 的贡献率

众多研究表明,VOCs 是 SOA 形成的重要前体物^[35-39]。谢绍东等^[37]从光氧化机制、成河过程、凝结核气/粒分配机制以及非均相反应等方面综了 VOCs 对 SOA 的转化的机理。

在乡村和郊区,天然源是 VOCs 的主要来源。

Sjostedt 等^[38]2011 年在加拿大分别估测了在高、低 NO_x 2 种情况下夏季各种 VOCs 对 SOA 的生成贡献。结果表明,在这 2 种情况下 VOCs 对 SOA 的贡献率分别是 95.8%和 88.4%。其中异戊二烯占 36.6%和 16.7%,单萜烯占 57.8%和 70.4%。人为源中贡献率最高的是苯,分别为 1.9%和 4.7%。Lane 等^[39]基 VOCs 源清单的估算模型发现人为源中,芳香烃、烯烃、烷烃对于 SOA 的贡献分别占 36.0%、32.0%、32.0%。吕子峰等^[40]发现,在北京夏季,甲苯、二甲苯、萜烯、乙苯、正十一烷这 5 种 VOCs 的贡献率最高,占总贡献率的 69%,羟基化合物的贡献率不到 1%。王倩等^[41]发现上海夏季对 SOA 生成贡献最大的 6 种前体物是间/对二甲苯、甲苯、乙苯、1,2,4-三甲苯、邻二甲苯、1,3-二乙苯。它们的贡献率分别为 28.86%、22.45%、10.66%、8.63%、8.00%、4.94%。

4 结论

挥发性有机化合物(VOCs)已经成为了国内外学者十分关注的一类污染物。本文综述了国内外 VOCs 污染的研究现状,结果表明,天然源主要来自于植物排放,其中排放量最大 VOCs 的是异戊二烯和单萜烯;人为源来自汽车尾气、燃料挥发、石油化工、涂料的使用、和生物质燃料燃烧等;主要的排放源是汽车尾气、燃料挥发、涂料的使用。人为源中最主要 VOCs 为苯和甲苯等芳香烃以及乙烯、异戊烷、异丁烷、丙烷、异丁烷、乙烷、正丁烷等低碳烷烃烯烃。其中人由于地区差异个别排放源对城市大气的贡献值会有所不同。天然源中对 SOA 贡献最大的是异戊二烯和单萜烯,人为源中芳香烃(甲苯、乙苯、间/对二甲苯、甲苯、乙苯、1,2,4-三甲苯、邻二甲苯、1,3-二乙苯)、烯烃(萜烯)、烷烃(正十一烷)对 SOA 的生成有着巨大的贡献。

深入了解城市大气 VOCs 的排放源情况以及来源贡献对确定城市大气 VOCs 的重点防控行业以及提出完善的 VOCs 控制措施具有重要的指导意义。但是国内关于城市大气 VOCs 的研究主要集中在北京、天津、长江三角洲、珠江三角洲等经济技术较为发达的地区,其他城市和地区的研究成果相对较少,因此我国应加快城市大气 VOCs 来源研究的步伐为复合型大气污染的研究与控制提供科技支撑。

【参考文献】

- [1] Derwent R G, Jenkin M E, Saunders S M, et al. Photochemical ozone formation in north west Europe and its control[J]. Atmospheric Environment, 2004(37): 1983–1991.
- [2] Varutbangkul V, Brechtel F J, Bahreini R, et al. Hygroscopicity of secondary organic aerosols formed by oxidation of cycloalkenes, monoterpenes, sesquiterpenes, and related compounds[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2006, 6:2367–2388.
- [3] Hatfield, M L, Huff Hartz K E. Secondary organic aerosol from biogenic volatile organic compound mixtures[J]. Atmospheric Environment, 2011(10).
- [4] Pun B K, Griffin R J, Seigneur C, et al. Secondary organic aerosol 2. Thermodynamic model for gas/particle partitioning of molecular constituents[J]. J Geophysical Research, 2002, 107 (D17): art. No. 4333.
- [5] Atkinson R. Atmospheric chemistry of VOCs and NO_x [J]. Atmos. Environ, 2000, 34: 2063–2101.
- [6] Griffin R J, Dabdub D, Seinfeld J H. Secondary organic aerosol 1. Atmospheric chemical mechanism for production of molecular constituents[J]. J Geophys Res, 2002, 107 (D17): art. No. 4332.
- [7] Lim H J, Turpin B. Origins of primary and secondary organic aerosols in Atlanta: results of time-resolved measurements during the Atlanta supersite experiment[J]. J Environ Sci. Technol, 2002.
- [8] Odum J R, Jungkamp T P W, Griffin R J, et al. Aromatics, reformulated gasoline, and atmospheric organic aerosol formation[J]. Science, 1997, 276: 96–99.
- [9] Pandis S N, Harley R A, Cass G R, et al. Secondary organic aerosol formation and transport[J]. Atmos Environ, 1992, 26A (13): 2269–2282.
- [10] Kleindienst T E, Smith D F, Li W, et al. Secondary organic aerosol formation from the oxidation of aromatic hydrocarbons in the presence of dry submicron ammonium sulfate aerosol[J]. Atmos Environ, 1999, 33: 3669–3681.
- [11] Lim Y B, Ziemann P. Products and mechanism of secondary organic aerosol formation from reactions of n-alkanes with OH radicals in the presence of NO_x[J]. J Environ Sci. Technol, 2005, 39: 9229–9236.
- [12] Colville C J, Griffin R. The roles of individual oxidants in secondary organic aerosol formation from Delta (3)-carene: 2. SOA formation and oxidant contribution[J]. J Atmos Environ, 2004, 38: 4013–4023.
- [13] Takekawa H, Minoura H, Yamazaki S. Temperature dependence of secondary organic aerosol formation by photo-oxidation of hydrocarbons. [J] Atmos Environ, 2003, 37: 3413–3424.
- [14] Hao L Q, Wang Z Y, Huang M Q, et al. Size distribution of the Secondary Organic Aerosol Particles from the Photooxidation of Toluene. [J]. J Environ Sci, 2005, 17: 912–916.
- [15] 池彦琦, 谢绍东. 基于蓄积量和产量的中国天然源 VOC 排放清单及时空分布[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2012, 48 (3): 475–482.
Chi Yanqi, Xie Shaodong. Spatiotemporal Inventory of biogenic volatile organic compound emissions in China based on vegetation volume and production[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2012, 48 (3): 475–482. (in Chinese)

- nese)
- [16] 周巍. 常州地区植被排放 VOC 的估算研究[J]. 环境监测与技术, 2013, 25(4): 13–17.
Zhou Wei. Studies on estimate of vegetation VOC emission in changzhou area[J]. Environmental Monitoring Management and Technology, 2013, 25(4): 13–17. (in Chinese)
- [17] 王志辉, 张树宇, 陆思华, 等. 北京地区植物 VOCs 排放速率的测定[J]. 环境科学, 2003, 24(2): 7–12.
Wang Zhihui, Zhang Shuyu, Lu Sihua, et al. Screenings of 23 Plant species in Beijing for volatile organic compound emissions[J]. Environmental Science, 2003, 24(2): 7–12. (in Chinese)
- [18] 谢扬颢, 邵敏, 陆思华, 等. 北京园林绿地植被挥发性有机物排放的估算[J]. 中国环境科学, 2007, 27(4): 498–502.
Xie Yangyang, Shao Min, Lu Sihua, et al. The estimation of volatile organic compounds emission from landscape plants in Beijing [J]. China Environmental Science, 2007, 27 (4): 498–502. (in Chinese)
- [19] Hai B, Akira K, Akikazu K, et al. Biogenic volatile organic compound emission potential of forests and paddy fields in the Kinki region of Japan[J]. Environmental Research, 2008(106): 156–169.
- [20] 乔月珍, 王红丽, 黄成, 等. 机动车尾气排放 VOCs 源成分谱及其大气反应活性[J]. 环境科学, 2012, 33(4): 1071–1079.
Qiao Yuezhen, Wang Hongli, Huang Cheng, et al. Source profile and chemical reactivity of volatile compounds from vehicle exhaust[J]. Environmental Science, 2012, 33(4): 1071–1079. (in Chinese)
- [21] 高爽, 金亮茂, 史建武, 等. 轻型汽油车 VOCs 排放特征和排放因子拾价测试研究[J]. 中国环境科学, 2012, 32(3): 397–405.
Gao Shuang, Jin Liangmao, Shi Jianwu, et al. VOCs emission characteristics and emission factors of light-duty gasoline vehicles with bench test[J]. China Environmental Science, 2012, 32(3): 397–405. (in Chinese)
- [22] 陆思华, 白郁华, 张光山, 等. 大气中国挥发性有机化合物 (VOCs) 的人为源研究[J]. 环境科学学报, 2006, 26(5): 757–763.
Lu Sihua, Bai Yuhua, Zhang Guangshan, et al. Source apportionment of anthropogenic emissions of volatile organic compounds[J]. China Environmental Science, 2006, 26(5): 757–763. (in Chinese)
- [23] Atmospheric Environment, 2009(43): 5647–6030.
- [24] Hiroto K, Shigeki M, Volatile organic compound emission factors from roadside measurements[J]. Atmospheric Environment, 2006(40): 2301–2312.
- [25] Vaga E, Mugica V, Carmona R, et al. Hydrocarbon source apportionment in Mexico City using the chemical mass balance receptor mode[J]. Atmospheric Environment, 2000(34): 4121–4129.
- [26] Mahoumd A bu -Alla ban, Alan W. Gertler, Douglas H. Lowenthal, et al. A preliminary apportionment of the source of ambient PM₁₀, PM_{2.5} and VOCs in Cairo[J]. Atmospheric Environment, 2002(36): 5549–5557.
- [27] Steven G. Brown, Anna Framkei, Hilary R. Hafner, et al. Source apportionment of VOCs in the Los Angeles areas using positive matrix factorization[J]. Atmospheric Environment, 2007, 41: 227–237.
- [28] Panwadee Suwattiga, Wongpun Limpaseni, et al. Seasonal source apportionment of volatile organic compounds in Bangkok ambient air[J]. Science Asia, 2005, 31: 395–401
- [29] Maryam Sarkhosh, Amir Hossein Mahvi, Masud Yunesian, et al. Source apportionment of volatile organic compounds in Tehran, Iran[J]. Bull Environ Contam Toxicol, 2013, 90: 440–445.
- [30] 刘金凤, 赵静, 李涪涪, 等. 我国人为源挥发性有机物排放清单的建立[J]. 中国环境科学, 2008, 28(6): 496–500.
Liu Jinfeng, Zhao Jing, Li Tiantian, et al. Establishment of Chinese anthropogenic source volatile organic compounds emission inventory[J]. China Environmental Science, 2008, 28 (6): 496–500. (in Chinese)
- [31] 韩萌, 卢学强, 冉静, 等. 天津市夏季 VOCs 来源解析[J]. 环境科学与技术, 2011, 34(10): 76–80.
Han Meng, Lu Xueqiang, Ran Jing, et al. Source apportionment of volatile organic compounds in urban Tianjin in the summer[J]. Environmental Science & Technology, 2011, 34(10): 76–80. (in Chinese)
- [32] Changjie Cai, Fuhai Guo, Xuexi Tie, et al. Characteristics and source apportionment of VOC measured in Shanghai, China [J]. Atmospheric Environment, 2010, 44: 5005–5014.
- [33] 蔡长杰, 耿福海, 余琼, 等. 上海中心城区夏季挥发性有机物 (VOCs) 的源解析[J]. 环境科学学报, 30(5): 926–934.
Cai Changjie, Geng Fuhai, Yu Qiong, et al. Source apportionment of VOCs at city centre of Shanghai in summer[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 30(5): 926–934. (in Chinese)
- [34] 杨辉, 朱彬, 高普徽, 等. 南京市北郊夏季挥发性有机物的源解析[J]. 环境科学, 34(12): 4519–4528.
Yang Hui, Zhu Bin, Gao Puhui, et al. Source apportionment of VOCs in the northern suburb of Nanjing in summer[J]. Environmental Science, 34(12): 4519–4528. (in Chinese)
- [35] Claeys M, Bim G, Gyorgy V, et al. Formation of secondary organic aerosols through photooxidation of isoprene[J]. Science, 2004, 303: 1173–1176.
- [36] Hallquist M, Wenger J C, Baltensperger U, et al. The formation, properties and impact of secondary organic aerosol: current and emerging issues[J]. Atmos Chem Phys Discuss, 2009, 9: 3555–3762.
- [37] 谢绍东, 田晓雪. 挥发性和半挥发性有机物向二次有机气溶胶转化的机制[J]. 化学进展, 22, (4): 727–733.
Xie Shaocong, Tian Xiaoxue. Formation mechanism of secondary organic aerosols from the reaction of volatile and semi-volatile compounds[J]. Progress in Chemistry, 22(4): 727–733. (in Chinese)
- [38] Sjøstedt S J, Slowik J G, Brook J R, et al. Diurnally resolved particulate and VOC measurements at a rural site: indication of

- significant biogenic secondary organic aerosol formation [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2011, 11 (12): 5745–5760.
- [39] Lane T E, Donahue N M, Pandis S N. Effect of NO_3 on secondary organic aerosol concentrations[J]. Environmental Science and Technology, 2008, 42(16): 6022–6027.
- [40] 吕子峰, 郝吉明, 段菁春, 等. 北京市夏季二次有机气溶胶生成潜势的估算[J]. 环境科学, 2009, 30(4): 969–975.
- Lyv Zifeng, Hao Jimingn, Duan Jingchu, et al. Estimate of the formation potential of secondary organic aerosol in Beijing Summertime[J]. 2009, 30(4): 969–975. (in Chinese)
- [41] 王倩, 陈长虹, 王红丽, 等. 上海市秋季大气 VOCs 对二次有机气溶胶的生成贡献及来源研究[J]. 环境科学, 34(2): 424–433
- Wang Qian, Chen Changhong, Wang Hongli, et al. Forming potential of secondary organic aerosols and sources apportionment of VOCs in autumn of Shanghai, China[J]. Environmental Science, 34(2):424–433. (in Chinese)
-
- (上接第 65 页)
- [6] 骆永明. 金属污染土壤的植物修复[J]. 土壤, 1999, 31(5):261–265.
- Luo Yongming. Phytoremediation of heavy metal polluted soils[J]. Soils, 1999, 31(5): 261–265. (in Chinese)
- [7] 魏树和, 周启星, 王新, 等. 杂草中重金属超积累特征植物的筛选[J]. 自然科学进展, 2003, 13(12): 1259–1265.
- Wei Shuhe, Zhou Qixing, Wang Xin, et al. Screening the hyperaccumulators of heavy metal in weeds[J]. Progress in Natural Science, 2003, 13(12): 1259–1265. (in Chinese)
- [8] 蔡美芳, 党志, 文震, 等. 矿区周围土壤中重金属危害性评估研究[J]. 生态环境, 2004, 13(1): 6–8.
- Cai Meifang, Dang Zhi, Wei Zhen, et al. Risk assessment of heavy metals contamination of soils around mining area[J]. Ecology and Environment, 2004, 13(1): 6–8. (in Chinese)
- [9] 兰天水, 林健, 陈建安, 等. 公路旁土壤中重金属污染分布及潜在生态危害的研究[J]. 海峡预防医学杂志, 2003, 9(1): 4–6.
- Lan Tianshui, Lin Jian, Chen Jian'an, et al. Study on the heavy metal contamination in roadside soil and the ecological hazard [J]. Strait journal Preventive Medicine, 2003, 9 (1): 4–6. (in Chinese)
- [10] 颜文, 池继松, 古森昌, 等. 珠江三角洲工业区土壤沉积物重金属污染特征及防治对策: 以石龙和容桂工业区为例[J]. 土壤与环境, 2000, 9(3): 177–182.
- Yan Wei, Chi Jisong, Ji Senchang, et al. Characteristics and prevention countermeasures of heavy metal pollution of soils (sediments) in industrial areas of the Pearl River Delta[J]. Soil and Environmental Sciences, 2000, 9 (3): 177–182. (in Chinese)
- [11] 唐世荣. 编著. 污染环境植物修复的原理和方法[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 44–45, 79–80.
- Tang Shirong. The Theory and Method of Phytoremediation in Pollute Enviornment [M]. Beijing: Scence Press, 2006: 44–45, 79–80. (in Chinese)
- [12] 辉建春, 蒋小军, 杨远祥, 等. 四川汉源铅锌矿区铅锌富集植物筛选[J]. 水土保持研究, 2009, 16(5): 23–26.
- Hui Jianchui, Jiang Xiaojun, Yang Yuanxiang, et al. Screening of lead–zinc enrichment–plants from Hanyuan lead–zinc mine areas in Sichuan Province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2009, 16(5): 23–26. (in Chinese)
- [13] 徐卫红, 熊治庭, 王宏信, 等. 锌胁迫对重金属富集植物黑麦草养分吸收和锌积累的影响[J]. 水土保持学报, 2005, 19(4): 32–35.
- Xu Weihong, Xiong Zhiting, Wang Hongxin, et al. Effects of Zn stress on nutrient uptake and Zn accumulation in four varieties of ryegrass [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2005, 19(4): 32–35. (in Chinese)
- [14] 杨肖峨, 龙新宪, 倪吾钟, 等. 东南景天(*Sedum alfredii* H)一种新的锌超积累植物[J]. 科学通报, 2002, 47(13): 1003–1006.
- Yang Xiaoe, Long Xinxian, Ni Wuzhong, et al. A kind of hyperccumulator *Sedum alfredii*[J]. Science Bulletin, 2002, 47(13): 1003–1006. (in Chinese)
- [15] 毕君, 郭伟珍, 高红真. 9 种植物对镉的忍耐和富集能力研究[J]. 中国农学通报, 2013, 29(34): 12–16.
- Bi Jun, Guo Weizhen, Gao Hongzhen, Study on the accumulation and tolerance of 9 plants to heavy metal Cd in soil [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2013, 29(34):12–16. (in Chinese)