

空气细颗粒物污染的来源、危害及控制对策

赵顺征, 易红宏, 唐晓龙, 高凤雨, 左嫣然

北京科技大学土木与环境工程学院, 北京 100083

摘要 近年来由空气细颗粒物(PM_{2.5})引起的大气污染现象频发,成为全社会广泛关注的环境问题。结合国内外研究,综述了PM_{2.5}污染的来源、危害及控制对策的相关研究进展。研究表明,人类活动排入大气中的一次颗粒物、一次颗粒物与大气中的气态污染物相互作用形成的二次颗粒物是PM_{2.5}的主要来源。长期暴露在PM_{2.5}环境中,会对人体的呼吸系统、心脑血管系统、神经系统及免疫系统的健康造成伤害。PM_{2.5}还会导致大气能见度下降,影响正常的生产、生活。针对中国PM_{2.5}的污染现状,提出了PM_{2.5}污染的控制对策及建议。

关键词 大气污染;细颗粒物;污染控制

中图分类号 X513

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.33.008

Source and Harm of Air Fine Particulate Matter Pollution and Control Strategies

ZHAO Shunzheng, YI Honghong, TANG Xiaolong, GAO Fengyu, ZUO Yanran

College of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

Abstract In recent years, atmospheric pollution caused by air fine particulate matter (PM_{2.5}) happens frequently in most areas of China, which has seriously affected the human body health and industrial production and thus received extensive concern from the whole society. This paper reviews the research progress on the source and harm of air fine particulate matter pollution and control strategies. The primary particulate matter and secondary particulate matters, largely produced by human activity, are the main sources of PM_{2.5}. When people are constantly exposed to air polluted by PM_{2.5}, the human respiratory system, cardiovascular system, nervous system and immune system are jeopardized badly. In addition, PM_{2.5} could cause a decline in the atmospheric visibility, which will affect the normal production and life. According to the current status of PM_{2.5} pollution, comprehensive suggestions for China's PM_{2.5} pollution control are put forward.

Keywords air pollution; fine particulate matter; pollution control

随着经济社会的快速发展,大气污染形势日趋严重,污染特征呈现出多污染物高浓度同时存在的复合型污染类型。以工业尾气和汽车尾气排放为主的废气污染已经严重影响正常生活、生产,其中具有代表性的空气细颗粒物(PM_{2.5})污染的危害更为严重^[1-3]。

PM_{2.5}是分散在大气中的固态或液态颗粒物的一种,其空气动力学直径小于或等于2.5 μm。PM_{2.5}来源多、地区特性强、随季节变化性大,是大气中化学组成最复杂、危害最大的

污染物之一^[2,4,5]。由于PM_{2.5}比表面积大,因此易携带大量有毒有害物质,经呼吸道进入人体肺部深处及血液循环,对人体产生严重危害。此外,PM_{2.5}还会对气候和大气能见度造成影响。因此,有必要加强对PM_{2.5}的关注和研究。美国、英国、澳大利亚、日本等非常重视这方面的研究,其中部分研究成果已被用作制定政策的依据。目前中国也开展了相关工作。本文着重综述空气细颗粒物的来源、危害及控制的最新研究进展。

收稿日期:2014-07-17;修回日期:2014-10-27

作者简介:赵顺征,博士研究生,研究方向为大气污染控制技术,电子信箱:zhaoshunzheng86@126.com;易红宏(通信作者),教授,研究方向为大气污染控制技术、环境与能源、环境功能材料等,电子信箱:yihonghong@tsinghua.org.cn

引用格式:赵顺征,易红宏,唐晓龙,等.空气细颗粒物污染的来源、危害及控制对策[J].科技导报,2014,32(33):61-66.

1 PM_{2.5} 污染的来源

PM_{2.5} 污染的排放源种类复杂, 根据其生成机理可以分为两大类, 即一次细颗粒物排放源类和二次细颗粒物排放源类。其中一次细颗粒物的排放源包括自然源和人为源, 二次细颗粒物则是由大气中某些污染组分之间, 或这些组分与大气成分之间发生反应而产生的细颗粒物。王跃思等^[6]指出, 约 10% 的 PM_{2.5} 来自自然排放, 近 90% 来自人为排放。对北京 2013 年 1 月 5 次霾污染分析得出, PM_{2.5} 的主要化学组成包括有机碳、元素碳、硫酸盐、硝酸盐、铵盐、扬尘等(图 1)^[6]。硫酸盐、硝酸盐和铵盐是基于一次排放的二氧化硫(SO₂)、氮氧化物(NO_x)、氨气(NH₃)气体经过化学反应形成。挥发性有机物在大量二氧化硫和氮氧化物的作用下发生反应, 向二次有机气溶胶转化, 产生更加具毒性的细颗粒污染物。不同化学物质进入大气颗粒物的路线如图 2^[7]所示。

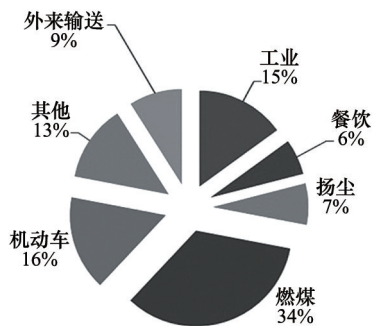


图 1 京津冀区域 PM_{2.5} 来源

Fig. 1 Source apportionment of PM_{2.5} in Beijing-Tianjin-Hebei district

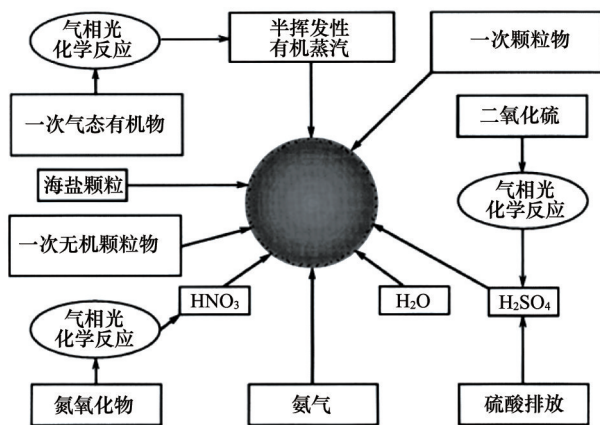


图 2 不同化学物质进入大气颗粒物的路线
Fig. 2 Routes of incorporation of chemical species into atmospheric particulate matter

1.1 一次细颗粒物的排放源

PM_{2.5} 的自然源主要指由于自然原因向空气中释放的颗粒物, 如自然活动导致的地面扬尘、海浪溅出的浪沫和盐粒、火山爆发所释放出来的火山灰、森林火灾的燃烧物、宇宙陨

星尘、土壤岩石风化及植物的花粉、孢子、细菌等。

人为源指人类生活和生产活动所排放的颗粒物, 主要包括人类活动导致的地面扬尘、燃料燃烧过程产生的烟尘和飞灰、工业源排放、机动车尾气等^[8]。地面扬尘指地表松散物质在人力作用下进入到环境空气中形成的大气颗粒物, 主要包括道路扬尘、建筑水泥尘等。扬尘源的化学组分含量与尘源和地域有密切关系。总体来讲, Si、Al、Ca 等地壳元素在 3 种源中含量都很高, 其中建筑水泥尘的 Ca 元素比例显著高于其他两种源, 而道路扬尘中会存在更多的有机物。燃料燃烧过程产生的颗粒物类型主要受燃料种类和燃烧条件的影响, 燃料包括煤、石油、天然气及生物质燃料。受能源结构影响, 煤烟尘是中国 PM_{2.5} 浓度提高的重要因素。不完全燃烧过程将产生煤烟尘、CO 和挥发性有机物(VOC)等不完全氧化产物。含有硫的煤在高温燃烧过程中, 会产生 SO₂ 和 NO_x 等。在中国, 火力发电厂、钢铁厂的大型锅炉, 城市采暖季节使用的供暖锅炉, 生活用的小炉灶等都是煤烟尘的主要来源。此外, 在中国很多区域生物质燃料的燃烧因素不容忽视, 由于燃烧条件非常简单, 这些生物质的燃烧会产生大量颗粒态与气态污染物^[9,10]。工业生产种类繁多, 生产过程都会产生种类不同的大气颗粒物, 并且对于不同的工业类型, 污染源排放的颗粒物的特征组分也不尽相同。机动车排放主要源于燃料在汽缸中的不完全燃烧而产生的有机物、碳黑、CO 等污染物, 以及由于大气中的氮气在汽缸中被氧化而成的 NO_x^[11,12]。

1.2 二次细颗粒物的排放源

二次细颗粒物指大气中某些气态污染物经过一系列化学转化或物理过程而生成的固态或液态细颗粒物, 它是大气细颗粒物 PM_{2.5} 的主要组成部分。形成二次颗粒物的气态污染物主要包括 SO₂、NO_x、氨气及 VOC 等^[13,14], 其化学组分主要为硫酸盐、硝酸盐、铵盐及有机物。莫华等^[15]研究了中国火电行业大气污染物排放对 PM_{2.5} 的贡献, 结果表明 2010 年中国 PM_{2.5} 排放总量为 2278.4 万 t, 其中, 火电行业排放的一次细颗粒物 PM_{2.5} 为 100.8 万 t, 由火电行业排放的 SO₂、NO_x、SO₃ 转化的二次细颗粒物 PM_{2.5} 分别为 350 万 t、265.5 万 t 和 107.3 万 t, 合计占 PM_{2.5} 排放总量的 36.1%。

Meng 等^[7]指出, 有关 PM_{2.5} 形成的化学过程十分复杂, 如 NO_x 和 SO₂ 通过氧化反应分别生成硝酸盐和硫酸盐二次细颗粒物, VOC 与 NO_x 通过 NO、O₃、卤素原子参与反应生成过氧乙酰硝酸酯(PAN)等二次细颗粒物等(图 3)^[7]。

大气中的 NO_x、SO₂ 会与大气中的自由基、水、固态颗粒物发生多相催化反应, 最终生成硝酸盐和硫酸盐。Laskin 等^[18]研究发现, 在海洋边界层, 海盐多相反应非常重要。碱性的海盐颗粒不仅增强了 SO₂ 在海盐表面溶液中的吸收, 并且促进了硫酸盐颗粒物的形成。海盐在大气传输过程中与 NO₂ 及 HNO₃ 发生反应形成 NaNO₃, 部分 NaNO₃ 进一步光解生成 NaNO₂。

Sengelov 等^[19]研究了生物质燃烧过程中二次细颗粒物的生成, 结果表明 SO₂ 与碱金属氯化盐之间的反应对颗粒物的

形成有重要作用。在生物质燃烧过程中,氯化钾会被排入到空气中,继而会被硫化生成硫酸盐,经过一系列冷凝成核作用生成PM_{2.5}。

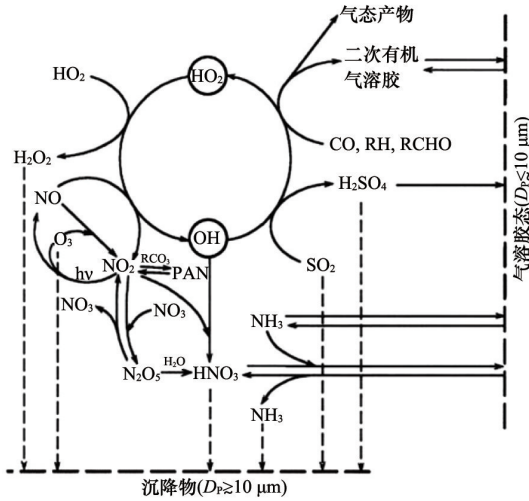


图3 气体、颗粒物与液滴之间的化学耦合作用机理

Fig. 3 Chemical coupling mechanism of atmospheric gas, particle, and droplet phases

Atkinson 等^[16,17]对大气中 VOC 的化学性质及沉降过程做了系统综述,指出由于人类活动和自然因素排入大气中的 VOC 种类繁多、性质各异,这些 VOC 与大气中的自由基(OH·、NO₃·)及臭氧(O₃)相互作用,对 PM_{2.5} 的形成有很大贡献。尽管各种 VOC 的大气化学过程不尽相同,但可简单地归纳为图4^[16,17]所示:1) VOC在自由基和臭氧的作用下形成烷基自由基(R·);2) R·在氧气的作用下生成过氧化烷基自由基(RO₂·);3) RO₂·与NO、NO₂、HO₂的反应。

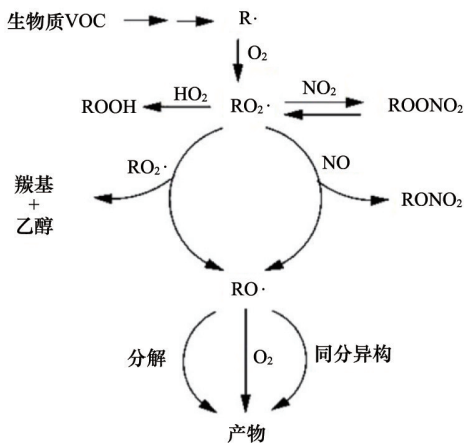


图4 挥发性有机物在空气中的化学反应机理

Fig. 4 Chemical reaction mechanism of volatile organic compounds in the air

排入到大气中的有机硫与大气颗粒物之间的多相反应是PM_{2.5}的一个重要来源。贺泓等^[20-22]利用原位漫反射红外光谱(in situ-DRIFTS)、离子色谱(IC)、程序升温脱附(TPD)、X射线衍射(XRD)、比表面积分析(BET)及烟雾箱模拟等手段,

研究了羰基硫(COS)在大气颗粒物中较常见的矿质氧化物成分SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃、CaO、MgO、ZnO、TiO₂等上的非均相氧化反应,指出矿质氧化物是大气中COS的一个值得考虑的汇。

2 PM_{2.5} 污染的危害

2.1 对人体健康的危害

与PM₁₀和TSP相比,PM_{2.5}比表面积大,更容易成为其他有毒有害成分(如多环芳烃、重金属、酸性颗粒物等)的载体,或成为反应体。颗粒物自身对机体能造成物理性的损伤,由于其巨大的比表面积,它还能携带大量有害的物质进入体内造成新的损伤。

呼吸系统是颗粒物进入人体的门户器官,颗粒物沉积于呼吸道和肺泡,引起肺内组织损伤,降低心肺功能,导致慢性支气管炎发病增加、长期或短期死亡率上升等。殷永文等^[23]对上海市霾期间PM_{2.5}污染与呼吸科、儿呼吸科门诊人数的相关性进行了分析,结果表明在霾发生当日,PM_{2.5}日均浓度每增加34 μg/m³,呼吸科、儿呼吸科日均门诊人数分别增加3.2%和1.9%。杨维等^[24]对北京城区可吸入颗粒物分布与呼吸系统疾病相关性分析表明:呼吸系统疾病与可吸入颗粒物浓度有一定关联,采暖期是呼吸系统疾病的高发期,可吸入颗粒物在采暖期对呼吸系统疾病的发病率影响相对较高。无论在采暖期还是非采暖期,细颗粒物的浓度均高于粗颗粒物,且细颗粒物对呼吸系统疾病影响较大。Saravia 等^[25]综述了颗粒物对儿童呼吸系统健康的影响,指出含有环境持久性自由基的细颗粒物对新生儿和儿童的身体健康有重要影响。

PM_{2.5}除会对呼吸系统造成直接损害外,还可以穿过肺部毛细血管屏障进入心血管系统,一方面,通过影响交感/副交感的平衡或通过产生细胞因子、自由基等而影响心血管系统^[26,27],另一方面,其进入血液循环中的多种成分如金属离子、自由基等可对心脑血管系统造成直接损害^[28,29](图5)^[33]。Koton 等^[30]研究了长期暴露在PM_{2.5}环境中的人群心肌梗死复发的情况,结果表明长时间暴露在PM_{2.5}污染环境中的病人,心肌梗死复发的概率大大增加。

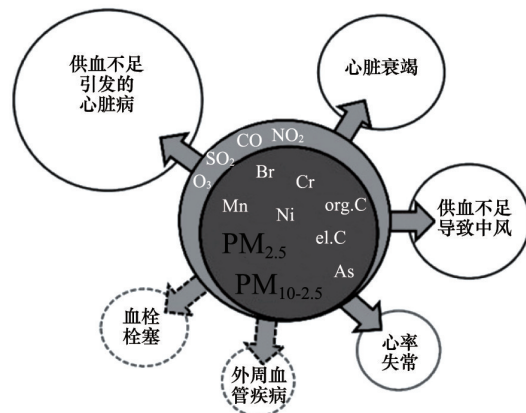


图5 颗粒物污染诱发心血管疾病示意

Fig. 5 Simplified graphic representation of the relationships between air pollution and cardiovascular diseases

Leiva^[31]通过研究PM_{2.5}浓度和脑血管疾病的关系发现:PM_{2.5}浓度每升高10 μg/m³,因脑血管疾病导致入院的风险就增加1.29%。

Bell等^[32]综述了短期暴露在PM_{2.5}环境中的健康风险,分析1995年至今发表的108篇相关文献得出:PM_{2.5}对老年人具有很高的健康风险,入院率和死亡率较高。PM_{2.5}风险的性别差异并不明显,而低收入、低学历等特定人群存在一定的健康风险。

2.2 影响大气能见度

能见度的降低主要是由于气体分子与颗粒物对光的吸收和散射减弱了光信号,并由于散射作用减小了目标物与天空背景之间的对比度^[34-36]。

杨复沫等^[37]综述了大气颗粒对能见度的影响,指出大气颗粒物对能见度的影响与其粒径、成分及其吸湿性、混合状态等性质有关。在大气中主要是粒径为0.1~2.0 μm的颗粒物通过对光的散射而降低物体与背景之间的对比度,从而降低能见度。二次硫酸盐和硝酸盐最容易散射可见光,矿物尘的消光效率较低。大气颗粒物对光的吸收效应几乎全部是由黑炭和含有黑炭的颗粒物造成的。高湿度与二次颗粒物尤其是吸湿性颗粒物的增加有关;空气湿度的增加导致这些二次颗粒物迅速长大到对光散射效率更高的尺寸,从而引起能见度降低。

Zhao等^[38]研究了中国沈阳2010—2012年大气能见度与颗粒物之间的数据关系,指出细颗粒物是影响城市能见度的重要因素,受到人类活动的巨大影响。大气能见度与颗粒物浓度之间存在正相关性,夏天空气中水蒸气含量较高会导致颗粒物浓度上升,且阳光照射强烈,空气中的光化学反应较强,这也是导致二次细颗粒物浓度上升的原因。冬季大气能见度降低的原因主要是由于燃煤量上升导致颗粒物浓度上升。

3 PM_{2.5}污染的控制对策

为了减少PM_{2.5}污染,发达国家和发展中国家已经成功采取了多种措施,包括对车辆进行技术改进、提高交通和能源效率及使用清洁燃料和过滤器等。20世纪50—60年代,发达国家城市地区颗粒物水平开始急剧下降,发展中国家的清洁技术在减排方面也取得了一定的成功。中国地域辽阔,自然状况、资源条件、产业结构、社会发展和经济水平差异显著,造成了大气颗粒物的来源比例不尽相同。因此在制订PM_{2.5}污染控制方案时需要既考虑到所在地区的共同特征,又要因地制宜,考虑各个地区的个性特征。

针对中国目前PM_{2.5}污染的特点,众多学者提出许多积极建议,包括宏观战略控制对策和基本污染控制措施^[6,39-41]。

3.1 优化能源结构,提高能源利用率,开发利用清洁燃料

中国是世界上少数几个能源以煤为主的国家之一,这种能源消费结构会导致能源利用率低、运输紧张、环境污染严重。PM_{2.5}形成的原因较为复杂,但各类污染源尤其是燃煤、机动车尾气排放大,是造成雾霾天气严重污染的重要原因。因此,控制燃煤和机动车油耗,优化能源品种结构,是改善空

气质量最为重要和有效的措施^[41]。

3.2 加快推进产业结构优化升级

由于不同城市工业结构不同,工业粉尘对颗粒物污染的贡献也有很大差异。调整产业结构是从源头解决污染排放最为有效的措施和手段,通过调整产业结构,不仅能够有效控制颗粒物排放,而且能够大幅度降低二氧化硫、氮氧化物等污染物的排放量^[40,45,46]。

3.3 发展公共交通,控制机动车数量

机动车尾气排放与交通道路扬尘是PM_{2.5}污染的重要源,因此控制机动车数量,减少尾气排放对PM_{2.5}污染的控制具有重要的意义^[47]。大力发展公共交通,尽量减少小汽车的使用,不仅有利于减少城市交通拥堵,还可以降低机动车尾气的排放量,减少道路扬尘,有利于PM_{2.5}污染的控制。

3.4 控制人口增长及城市规模

中国城市发展面临拥堵、污染、人口过快增长等问题,实质是人口与资源环境间的矛盾。环境问题的实质是人类索取超过资源本身,排污超过环境自净能力,自然资源耗竭超过极限便不可逆转。控制人口规模、提高国民素质是实现社会可持续发展的重要手段^[48]。

3.5 加快科技创新

科技创新是解决人类面临的能源资源、生态环境、自然灾害、人口健康等全球性的重要途径。

王淑兰等^[49]指出,为了在“十二五”期间及中国中长期发展中使PM_{2.5}污染得到遏制并持续缓解和改善,国家需在以下方面进行科技储备:1)亟需全国层面上的PM_{2.5}控制区域划分技术与区划方案、国家PM_{2.5}污染分区控制策略与路径;2)亟需开展典型区域PM_{2.5}污染综合防治研究,开展区域光化学污染前体物排放与大气颗粒物来源解析研究,识别灰霾、光化学烟雾和区域高浓度重污染的形成机制;3)亟需区域PM_{2.5}污染控制技术体系;4)亟需区域环境空气质量管理关键技术,完善区域PM_{2.5}污染监测技术方法和污染源监控方案;5)亟需环境与社会经济协调发展的技术途径和国家方案,以及PM_{2.5}污染物的人群健康和生态风险评估方法。

建立完善的PM_{2.5}污染监控体系。李培等^[40]指出,应当根据中国区域污染特点和不同地区的经济发展水平,在“十二五”期间,以现有SO₂、NO₂、PM₁₀3项指标为基础,逐步增加O₃、PM_{2.5}、CO监测。建议制订相应的监测规划,健全颗粒物监控体系,逐步建立全国细颗粒物监测网络,以准确详实的数据为政策制订、污染控制方法选择提供科学依据。

大力发展颗粒物、气态污染物的减排技术,为减少一次污染物排放提供技术支撑是治理PM_{2.5}污染的重要方面。目前,除尘技术主要分为机械式除尘技术、电除尘技术、湿式除尘技术和过滤除尘技术:

1)旋风除尘是使含尘气体作旋转运动,利用离心力作用将尘粒从气流中分离并捕集下来。机械式除尘技术包括重力沉降室、惯性除尘器、旋风除尘器等。该种除尘器历史悠久,应用广泛,型式繁多,结构简单,没有运动部件,造价低

廉,维护管理方便,但脱除效率不高。

2) 电除尘是烟气中灰尘尘粒通过高压静电场时,与电极间的正负离子和电子发生碰撞,带上电子和离子的尘粒在电场力的作用下向异性电极运动并积附在异性电极上,使电极上的灰尘落入收集灰斗中,使通过电除尘器的烟气得到净化,达到保护大气、保护环境的目的。电除尘具有除尘效率高、阻力损失小、处理烟量大、能捕集腐蚀性很强的物质等优点,但不易适应操作条件的变化、应用范围受粉尘比电阻的限制、钢材消耗量大,占地面积大。

3) 湿式除尘器的机理是含尘气流通过水或其他液体,利用惯性碰撞、拦截和扩散等,尘粒留在水或其他液体中,而干净气体则通过水或其他液体。该脱硫除尘器工艺新,流程简单,运行可靠,管理方便。

4) 过滤除尘是利用多孔介质进行的。惯性碰撞、拦截、扩散、重力和静电作用等粉尘粒子的沉降机理是分析过滤式除尘器滤尘机理的理论基础。当含尘气流通过多孔介质时,粒子黏附在介质上,而与气体分离。在过滤式除尘器中,袋式除尘器的除尘效率最高,捕集粒径范围最大,能适应高温、高湿、高浓度、微细粉尘、吸湿性粉尘、易燃易爆粉尘等不利工况条件。因此,它的应用范围也最为广泛。

在实际的除尘过程中,并不是单一的一种除尘技术就能够完成除尘效果,这就需要将各种除尘技术结合起来,开发出复合式除尘器。

3.6 建立完善的法律、法规以及标准,健全环境执法监督体系

王跃思等^[6]指出,仅靠政府部门、工厂企业和居民团体自觉自律地维护大气环境显然不够,要逐步制定落实相应的法律规章,依法治污才有长治久安的可能。李培等^[40]指出,《中华人民共和国大气污染防治法》中的一些条款不适应大气颗粒物污染控制目标,操作性不强,实施难度很大,尤其是大气颗粒物污染条款需要修订。因此建议在立法目标、行为规范、法律实施程序、法律责任等方面做出比较明确、具体的规定,进一步丰富大气法内容,加强其可操作性;加强执法力度,提高违法成本。张楚莹等^[40]指出,有效控制PM_{2.5}污染首先要保证执法力度,确保各排放标准充分执行;通过严格排放标准,推广高效除尘装置的应用。

3.7 鼓励公众积极参与环境保护工作

国务院2013年9月10日发布的《大气污染防治行动计划》要求,树立全社会“同呼吸、共奋斗”的行为准则,倡导节约、绿色消费方式和生活习惯,动员全民参与环境保护和监督。每一个人都是大气污染的制造者,也是大气污染的受害者,因此也应该成为治理大气污染的参与者。在这场变革中,需要政府、舆论引导每个人变更消费观念,积极参与到大气污染治理当中。

参考文献(References)

[1] Cheng Z, Wang S X, Jiang J K, et al. Long-term trend of haze pollution and impact of particulate matter in the Yangtze River Delta, China[J].

Environmental Pollution, 2013, 182: 101-110.

- [2] Yin H, Mu S Y, Zhao L, et al. Microscopic morphology and elemental composition of size distributed atmospheric particulate matter in Urumqi, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2013, 69: 2139-2150.
- [3] Tian Y Z, Wu J H, Shi G L, et al. Long-term variation of the levels, compositions and sources of size-resolved particulate matter in a megacity in China[J]. Science of the Total Environment, 2013, 463: 462-468.
- [4] Sun Y L, Wang Z F, Fu P Q, et al. Aerosol composition, sources and processes during wintertime in Beijing, China[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2013, 13: 4577-4592.
- [5] Sun Y L, Wang Z F, Dong H B, et al. Characterization of summer organic and inorganic aerosols in Beijing, China with an Aerosol Chemical Speciation Monitor[J]. Atmospheric Environment, 2012, 51: 250-259.
- [6] 王跃思,姚利,刘子锐,等.京津冀大气霾污染及控制策略思考[J].中国科学院院刊, 2013, 28: 353-363.
Wang Yuesi, Yao Li, Liu Zirui, et al. Formation of haze pollution in Beijing-Tianjin-Hebei region and their control strategies[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2013, 28: 353-363.
- [7] Meng Z, Dabdub D, Seinfeld J H. Chemical coupling between atmospheric ozone and particulate matter[J]. Science, 1997, 277: 116-119.
- [8] Abdullahi K L, Delgado-Saborit J M, Harrison R M. Emissions and indoor concentrations of particulate matter and its specific chemical components from cooking: A review[J]. Atmospheric Environment, 2013, 71: 260-294.
- [9] Just B, Rogak S, Kandlikar M. Characterization of ultrafine particulate matter from traditional and improved biomass cookstoves[J]. Environmental Science & Technology, 2013, 47: 3506-3512.
- [10] Shen G F, Wei S Y, Wei W, et al. Emission factors, size distributions, and emission inventories of carbonaceous particulate matter from residential wood combustion in rural China[J]. Environmental Science & Technology, 2012, 46: 4207-4214.
- [11] Pant P, Harrison R M. Estimation of the contribution of road traffic emissions to particulate matter concentrations from field measurements: A review[J]. Atmospheric Environment, 2013, 77: 78-97.
- [12] Oh C, Cha G. Influence of oxygenate content on particulate matter emission in gasoline direct injection engine[J]. International Journal of Automotive Technology, 2013, 14: 829-836.
- [13] Campos V P, Couto E R, Miranda J P, et al. Chemical speciation and phase fractionation of N, S and Cl compounds in the atmosphere of Reconcavo, Bahia, Brazil[J]. Microchemical Journal, 2013, 109: 58-67.
- [14] Pekey H, Pekey B, Arslanbas D, et al. Source apportionment of personal exposure to fine particulate matter and volatile organic compounds using positive matrix factorization[J]. Water Air and Soil Pollution, 2013, 224 (1): 1403.1-1403.11.
- [15] 莫华,朱法华,王圣. 火电行业大气污染物排放对PM_{2.5}的贡献及减排对策[J]. 中国电力, 2013, 46: 1-6.
Mo Hua, Zhu Fahua, Wang Sheng. Contribution to PM_{2.5} of atmospheric pollutant emission from thermal power sector and emission reduction countermeasures[J]. Electric Power, 2013, 46: 1-6.
- [16] Atkinson R, Arey J. Atmospheric degradation of volatile organic compounds [J]. Chemical Reviews, 2003, 103: 4605-4638.
- [17] Atkinson R, Arey J. Gas-phase tropospheric chemistry of biogenic volatile organic compounds: A review[J]. Atmospheric Environment, 2003, 37: S197-S219.
- [18] Laskin A, Gaspar D J, Wang W H, et al. Reactions at interfaces as a source of sulfate formation in sea-salt particles[J]. Science, 2003, 301: 340-344.
- [19] Sengelov L W, Hansen T B, Bartolome C, et al. Sulfation of condensed potassium chloride by SO₂[J]. Energy & Fuels, 2013, 27: 3283-3289.
- [20] Liu Y C, Ma J Z, Liu C, et al. Heterogeneous uptake of carbonyl sulfide onto kaolinite within a temperature range of 220-330 K[J]. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 2010, 115: D24311.

- [21] Liu Y, Ma J, He H. Heterogeneous reactions of carbonyl sulfide on mineral oxides: Mechanism and kinetics study[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2010(10): 10335-10344.
- [22] Liu Y, Ma Q, He H. Comparative study of the effect of water on the heterogeneous reactions of carbonyl sulfide on the surface of α - Al_2O_3 and MgO [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2009(9): 6273-6286.
- [23] 殷水文, 程金平, 段玉森, 等. 上海市霾期间 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 污染与呼吸科、儿呼吸科门诊人数的相关分析[J]. 环境科学, 2011, 32: 1894-1898.
Yin Yongwen, Cheng Jinping, Duan Yusen, et al. Correlation analysis between the $\text{PM}_{2.5}$, PM_{10} which were taken in the hazy day and the number of outpatient about breathing sections, breathing sections of pediatrics in Shanghai[J]. Environmental Science, 2011, 32: 1894-1898.
- [24] 杨维, 赵文吉, 宫兆宁, 等. 北京城区可吸入颗粒物分布与呼吸系统疾病相关分析[J]. 环境科学, 2013, 34: 237-243.
Yang Wei, Zhao Wenji, Gong Zhaoning, et al. Spatial distribution of inhalable particulate and association with respiratory disease in Beijing city[J]. Environmental Science, 2013, 34: 237-243.
- [25] Saravia J, Lee G I, Lomnicki S, et al. Particulate matter containing environmentally persistent free radicals and adverse infant respiratory health effects: A review[J]. Journal of Biochemical and Molecular Toxicology, 2013, 27: 56-68.
- [26] Kroll A, Gietl J K, Wiesmuller G A, et al. In vitro toxicology of ambient particulate matter: Correlation of cellular effects with particle size and components[J]. Environmental Toxicology, 2013, 28: 76-86.
- [27] Marchini T, Magnani N, D'Annunzio V, et al. Impaired cardiac mitochondrial function and contractile reserve following an acute exposure to environmental particulate matter[J]. Biochimica Et Biophysica Acta-General Subjects, 2013, 1830: 2545-2552.
- [28] Tankersley C G, Georgakopoulos D, Tang W Y, et al. Effects of ozone and particulate matter on cardiac mechanics: Role of the atrial natriuretic peptide gene[J]. Toxicological Sciences, 2013, 131: 95-107.
- [29] Guerra R, Vera-Aguilar E, Uribe-Ramirez M, et al. Exposure to inhaled particulate matter activates early markers of oxidative stress, inflammation and unfolded protein response in rat striatum[J]. Toxicology Letters, 2013, 222: 146-154.
- [30] Koton S, Molshatzki N, Yuval, et al. Cumulative exposure to particulate matter air pollution and long-term post-myocardial infarction outcomes [J]. Preventive Medicine, 2013, 57: 339-344.
- [31] Leiva M A, Santibanez D A, Ibarra S, et al. A five-year study of particulate matter ($\text{PM}_{2.5}$) and cerebrovascular diseases[J]. Environmental Pollution, 2013, 181: 1-6.
- [32] Bell M L, Zanobetti A, Dominici F. Evidence on vulnerability and susceptibility to health risks associated with short-term exposure to particulate matter: A systematic review and meta-analysis[J]. American Journal of Epidemiology, 2013, 178: 865-876.
- [33] Martinelli N, Olivieri O, Girelli D. Air particulate matter and cardiovascular disease: A narrative review[J]. European Journal of Internal Medicine, 2013(24): 295-302.
- [34] Vajanapoom N, Shy C M, Neas L M, et al. Estimation of particulate matter from visibility in Bangkok, Thailand[J]. Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology, 2001(11): 97-102.
- [35] Cheung H C, Wang T, Baumann K, et al. Influence of regional pollution outflow on the concentrations of fine particulate matter and visibility in the coastal area of southern China[J]. Atmospheric Environment, 2005, 39: 6463-6474.
- [36] Kim Y J, Kim K W, Kim S D, et al. Fine particulate matter characteristics and its impact on visibility impairment at two urban sites in Korea: Seoul and Incheon[J]. Atmospheric Environment, 2006, 40: S593-S605.
- [37] 杨复沫, 欧阳文娟, 刘源, 等. 大气颗粒物对能见度影响的研究进展 [J]. 工程研究, 2013(5): 252-258.
Yang Fumo, Ouyang Wenjuan, Liu Yuan, et al. Recent progress in research on impact of atmospheric particulate matters on visibility[J]. Journal of Engineering Studies, 2013(5): 252-258.
- [38] Zhao H J, Che H Z, Zhang X Y, et al. Characteristics of visibility and particulate matter (PM) in an urban area of Northeast China[J]. Atmospheric Pollution Research, 2013(4): 427-434.
- [39] 杨新兴, 尉鹏, 冯丽华. 大气颗粒物 $\text{PM}_{2.5}$ 及其控制对策与措施[J]. 前沿科学, 2013(2): 20-29.
Yang Xinxing, Wei Peng, Feng Lihua. Atmospheric particulate matter $\text{PM}_{2.5}$ and its controlling countermeasures and measures[J]. Frontier Science, 2013(2): 20-29.
- [40] 李培, 王新, 柴发合, 等. 我国城市大气污染控制综合管理对策[J]. 环境与可持续发展, 2011(5): 8-14.
Li Pei, Wang Xin, Cai Fahe, et al. Recommendation and suggestion on policy and measures for air pollution control integrated management in China[J]. Environment and Sustainable Development, 2011(5): 8-14.
- [41] 方秀玉. 优化能源结构改善空气质量——从大气污染治理角度看北京市能源结构调整[J]. 节能与环保, 2013(6): 52-54.
Fang Xiuyu. Optimize the energy structure to improve air quality[J]. Energy Conservation and Environmental Protection, 2013(6): 52-54.
- [42] 王淑兰, 柴发合, 高健. 我国中长期 $\text{PM}_{2.5}$ 污染控制战略及对策[J]. 环境与可持续发展, 2013(4): 10-13.
Wang Shulan, Chai Fahe, Gao Jian, et al. Study on long-term strategies and countermeasures of $\text{PM}_{2.5}$ pollution control in China[J]. Environment and Sustainable Development, 2013(4): 10-13.
- [43] 朱增银, 李冰, 赵秋月, 等. 对国内外 $\text{PM}_{2.5}$ 研究及控制对策的回顾与展望[J]. 环境科技, 2013, 26(1): 70-74.
Zhu Zengyin, Li Bing, Zhao Qiuyue, et al. A review and outlook of the research and pollution control on $\text{PM}_{2.5}$ in domestic and overseas[J]. Environmental Science and Technology, 2013, 26(1): 70-74.
- [44] 贺泓, 王新明, 王跃思, 等. 大气灰霾成因与控制[J]. 中国科学院院刊, 2013, 28: 344-352.
He Hong, Wang Xinming, Wang Yuesi, et al. Formation mechanism and control strategies of haze in China[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2013, 28: 344-352.
- [45] 杨晓东, 张玲, 姜德旺, 等. 钢铁工业废气及 $\text{PM}_{2.5}$ 排放特性与污染控制对策[J]. 工程研究, 2013(5): 240-251.
Yang Xiaodong, Zhang Ling, Jiang Dewang, et al. Exhaust gas of iron & steel industry and emission characteristics of $\text{PM}_{2.5}$ and pollution control measures[J]. Journal of Engineering Studies, 2013(5): 240-251.
- [46] 张楚莹, 王书肖, 赵瑜, 等. 中国人为源颗粒物排放现状与趋势分析 [J]. 环境科学, 2009, 30: 1881-1887.
Zhang Chuying, Wang Shuxiao, Zhao Yu, et al. Current status and future prospects of anthropogenic particulate matter emissions in China[J]. Environmental Science, 2009, 30: 1881-1887.
- [47] 罗娜娜, 赵文吉, 晏星, 等. 交通与气象因子对不同粒径大气颗粒物的影响机制研究[J]. 环境科学, 2013, 34: 3741-3748.
Luo Nana, Zhao Wenji, Yan Xing, et al. Study on influence of traffic and meteorological factors on inhalable particle matters of different size[J]. Environmental Science, 2013, 34: 3741-3748.
- [48] 周毅. 人口与环境可持续发展[J]. 武汉科技大学学报: 社会科学版, 2003(5): 1-6.
Zhou Yi. The sustainable development of population and environment [J]. Journal of Wuhan University of Science & Technology: Social Science Edition, 2003(5): 1-6.

(责任编辑 陈广仁)