



曹军骥,中国科学院地球环境研究所研究员。现任中国科学院气溶胶化学与物理重点实验室主任,国际气溶胶学会(IARA)执委,中国颗粒学会副理事长。曾获国家自然科学奖二等奖,2016年IAFA奖,2013 Frank A. Chambers Excellence in Air Pollution Control Award,第十二届中国青年科技奖等。

中国大气PM_{2.5}污染的主要成因与控制对策

曹军骥

中国科学院地球环境研究所,西安 710061

摘要 2011年底以来,PM_{2.5}污染成为全国人民共同关心的环境问题。本文介绍PM_{2.5}的基本概念与污染和简要治理历史、梳理了中国PM_{2.5}污染现状,提出煤炭为主的能源结构是高浓度PM_{2.5}的直接原因、粗放型经济发展模式是雾霾频发的主要原因、污染物的跨界传输也容易形成区域性污染等3个共性原因,同时从不同区域的排放源差异、能源结构与经济发展水平不同及地形与气象条件不同等方面分析了PM_{2.5}污染的个性特征。从3个方面提出中国防治PM_{2.5}控制战略建议:大力调整能源结构,防治PM_{2.5}污染;以科技为核心构建新型的PM_{2.5}防治体系,实现科技治污;改革体制、法律和经济等管理制度,保障科技治污综合效益。

关键词 PM_{2.5};污染现状;污染共性与个性特征;控制战略

自2011年底以来,PM_{2.5}污染成为全国人民共同关心的环境问题,也受到海内外广泛关注。频发的雾霾事件更是牵动全国人民的神经,使大气污染问题受到前所未有的关注^[1]。中国政府已把防治空气污染作为最大的民生问题,列入近年来政府工作重点,如制定新环境质量标准、出台空气污染控制的十条、修订大气污染防治法等。国内学术界主要从20世纪初开始大气PM_{2.5}的研究^[2],特别是近年取得了显著进

展^[3-5]。本文简要综述中国PM_{2.5}的污染现状,并提出战略性的控制建议。

1 PM_{2.5}的基本概念与污染和简要治理历史

大气中悬浮的固态、液态物质称为颗粒物(particulate matter, PM),其粒径自几个纳米到100 μm不等,颗粒物按粒径可以分为总悬浮颗粒物(total suspended particles, TSP)、PM₁₀(粒径小于10 μm)、PM_{2.5}(粒径小于2.5 μm,又

称细颗粒物)和PM₁(粒径小于1 μm)^[6]。通过人体呼吸,粗颗粒物可沉积在气管和支气管,而细颗粒物可沉积在肺泡等部位,更小的颗粒物如PM₁可穿透肺泡进入血液循环,因而空气中高浓度颗粒物特别是细颗粒物对人体健康有显著损害。

大气颗粒物还具有显著的气候与环境效应,它可以吸收和散射太阳光,降低能见度,形成霾也叫灰霾^[7]。霾污染的本质是PM_{2.5}浓度过高,大量极细

收稿日期:2016-10-08;修回日期:2016-10-19

作者简介:曹军骥,研究员,研究方向为气溶胶与环境、PM_{2.5}研究与控制、古气溶胶循环,电子信箱:cao@loess.llqg.ac.cn

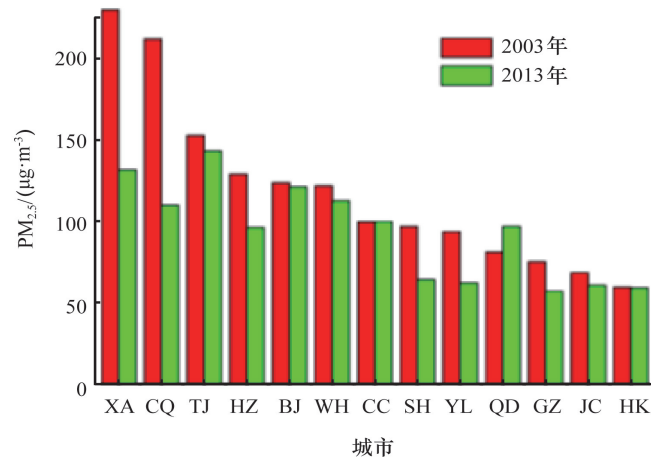
引用格式:曹军骥. 中国大气PM_{2.5}污染的主要成因与控制对策[J]. 科技导报, 2016, 34(20): 74-80; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2016.20.012

微的干气溶胶粒子悬浮在空气中,使水平能见度小于 10 km 的空气普遍混浊现象。当空气中水汽较多时,这些致霾粒子会吸水、长大成为雾滴,在地面形成雾,使能见度进一步降低,此时若相对湿度 >90%,则被定义为雾。当今中国许多地区特别是中东部不论是霾还是雾,已经不是一种完全的自然现象,其背后都有人类活动排放的污染物所形成的大量细粒子的参与(特别是 $PM_{2.5}$)^[8]。

中国历来重视大气环境质量和污染问题,宪法中有针对大气环境保护的概括性条款。早在 1956 年,为减少厂矿企业生产中粉尘对工人的危害,中国就制定了《关于防止厂矿企业中矽尘危害的决定》。而中国真正意义上的环境保护起始于第一次全国环境大会(1973 年),最初环境问题主要表现为水污染。20 世纪 80 年代由于工业和居民燃煤的急剧增多,北方许多城市出现煤烟型的大气污染。1983 年将环境保护定为一项基本国策,并于 1987 年由全国人民代表大会审议并通过了中国首部《大气污染防治法》,2000 年和 2014 年分别予以修改完善。80 年代以前很少有大气污染问题,20 世纪 80 年代出现的城市煤烟型污染主要以 TSP 为代表,90 年代表现为 PM_{10} 污染,2006 年第六次全国环境大会后,国家重视“两控区”建设,使 $PM_{10}/PM_{2.5}$ 浓度均有所下降,2009 年以后由于没有北京奥运会等环境压力,全国很多城市经济社会快速发展导致 $PM_{2.5}$ 和灰霾污染问题较为突出。

2 中国 $PM_{2.5}$ 污染现状与主要成因

中国是全球 $PM_{2.5}$ 污染高值区之一,约有 80% 的城市不能达到环境空气质量新标准(GB 3095—2012)。Cao 等^[9] 2003 年在全国 13 个城市同步观测获得的冬、夏季 $PM_{2.5}$ 平均质量浓度分别为 163.9、71.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,年平均质量浓度高达 117.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。2013 年在同样 13 个城市观测获得的 $PM_{2.5}$ 年平均质量浓



XA: 西安; CQ: 重庆; TJ: 天津; HZ: 杭州; BJ: 北京; WH: 武汉; CC: 长春; SH: 上海; YL: 榆林; QD: 青岛; GZ: 广州; JC: 金昌; HK: 香港

图 1 全国 13 个城市 2003 年和 2013 年 $PM_{2.5}$ 质量浓度对比
Fig. 1 Comparison of $PM_{2.5}$ concentrations in thirteen cities of China in 2003 and 2013

度为 90.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (图 1), 是中国 $PM_{2.5}$ 环境质量的 2.6 倍。因此, 经过 10 年环境治理, $PM_{2.5}$ 年平均质量浓度下降了 26.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 下降比例为 22.7%, 这表明中国城市 $PM_{2.5}$ 污染虽然有下降的趋势, 但离国家 $PM_{2.5}$ 年均标准 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 仍然任重道远。以每 10 年下降 26.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的速率测算, 中国城市 $PM_{2.5}$ 空气质量要达到新标准, 约需要 21 年, 即 2034 年达到新国标。

中国 $PM_{2.5}$ 以硫酸盐、硝酸盐和铵盐构成的无机盐类 (sulfate, nitrate and ammonium salt, SNA) 与有机物 (organic matter, OM) 以及粉尘为主要成分^[10]。最新研究表明, 北京、上海、广州和西安 $PM_{2.5}$ 中有机物占到 30%~48%, 二氧化硫 (SO_2)、氮氧化物 (NO_x) 和挥发性有机物 (VOCs) 经过化学转化形成的二次组分是 $PM_{2.5}$ 的主要组成^[10-11]。受降水、季风和采暖排放的影响, 中国不同地区 $PM_{2.5}$ 几乎均呈现冬季高、夏季低季节变化特征。在秋冬季特别是采暖期, 一旦出现适宜的气象条件, 如静风、低温、高湿度, $PM_{2.5}$ 浓度会急剧攀升, 形成严重灰霾, 往往表现为全国大范围区域性污染特征, 局地污

染物累积与区域输送是中国“三区十群”灰霾的共同成因。中国冬季大气重灰霾期间二次污染物的贡献显著, 二次有机气溶胶对 $PM_{2.5}$ 的贡献达到 27%, 这与燃煤、工业排放和生物质燃烧产生的大量 VOCs 密切相关 (图 2)^[4]。

燃煤、工业 (钢铁、重化工、建材和冶金等)、机动车及其他移动源、生物质燃烧和扬尘等污染源的高强度排放^[12], 是当前中国大气污染的 5 类主要来源, 其共性特征有以下 3 点。

1) 煤炭为主的能源结构是高浓度 $PM_{2.5}$ 的直接原因。

2012 年, 中国能源消费结构中, 煤炭占 68.5%、石油 17.7%、水能 7.1%、天然气 4.7% 等。以煤炭为主的能源消耗排放烟尘、 SO_2 、 NO_x 、CO、VOCs 等多种污染物, 给中国带来了严重的大气污染问题。以 $PM_{2.5}$ 为代表的各类空气污染物, 其主要来源是煤炭、石油等化石燃料燃烧的直接排放及其在大气中的化学转化。模拟估算表明, 煤炭消费对中国地区 $PM_{2.5}$ 污染的贡献夏季达到 46%, 冬季 35%^[13]。因此, 调整能源结构、控制煤炭消费总量对于改善中国空气质量至关重要。

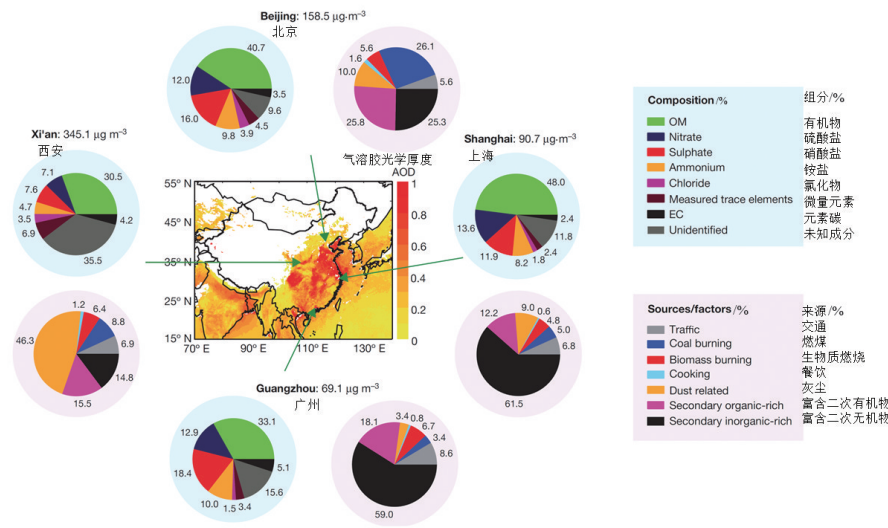


图2 2013年1月重霾期间北京、上海、广州、西安的PM_{2.5}化学组成与各排放来源的定量贡献

Fig. 2 Chemical composition and source apportionment of PM_{2.5} over Beijing, Shanghai, Guangzhou, and Xi'an during heavy haze in January 2013

2) 粗放型经济发展模式是雾霾频发的主要原因。

改革开放以来,中国经济持续高速增长,消耗了大量能源。2012年中国经济总量占世界的比重为11.6%,但消耗了全世界21.3%的能源、54%的水泥、45%的钢。单位GDP能耗是世界平均水平的2.5倍,美国的3.3倍,日本的7倍,同时高于巴西、墨西哥等发展中国家。整体来看,中国经济总量大,单位GDP能耗高,表明中国经济发展方式仍相对粗放,依靠增加生产要素量的投入来扩大生产规模,实现经济增长。这种情况下,中国大气污染物排放量接近甚至超过环境的可承受能力,再加上不利的气象条件,导致大范围、多区域的空气污染事件频发。

3) 污染物的跨界传输形成区域性污染。

PM_{2.5}污染已经不是单个城市和地区的独立问题,从目前中国PM_{2.5}污染的现状来看,特别是在冬季,京津冀、山东和河南基本为同一污染区,严重时可以和长三角连成一片,甚至被冬季风环流输送到三亚市^[14],形成整个东部大范围区域性污染,霾区面积占到中国国土面积的近1/3。因此应对目前PM_{2.5}污染问题,亟需建立区域大气污染联防联

控机制。

中国地域辽阔,各地发展阶段不一致,PM_{2.5}污染也呈现明显不同的个性特征。结合国家环境保护部发布的74个城市PM_{2.5}浓度,以及2013年1月和7月对全国20个城市PM_{2.5}观测,表明中国PM_{2.5}及其组分存在明显的区域差异,沿海低、内陆高,所以进行PM_{2.5}污染治理时,不能一刀切,要因地制宜,执

行区域化差别管理。主要个性特征表现如下。

(1) 区域排放源差异明显。不同区域存在自然背景和人为活动差异,导致PM_{2.5}在来源上及不同来源污染物之间的反应机制和过程上均存在显著差异。这种差异从PM_{2.5}化学组成可直观判断。根据中国20个城市PM_{2.5}化学组成计算结果,可以将20个城市分为3大类(图3):第一类为中国西部城市(金昌、榆林、乌鲁木齐和西宁),特征为地质尘组分比重较高,平均为16%,远高于其他城市5%的平均值。该类城市主要分布在中国西部经济发展相对滞后、降水较少的地区。第二类城市有机物组分比例较高,平均为36%,远高于其他城市25%的平均值。根据污染来源的不同,该类又可以分为2个亚类:I类有机物主要来自于工业生产和生物质燃烧的一次排放,该类区域主要包括东北地区和华北地区城市。II类有机物主要为VOCs在大气中经过化学反应生成的二次有机物,以珠三角和海峡西岸地区的广州、厦门和香港等城市为代表。第三类为长江流域和四川盆地,以杭州、青岛、天津、南京、上海、武汉和成都为代表,其PM_{2.5}中硫酸盐、硝酸盐和铵盐组分比例较高,平均值为48%,同

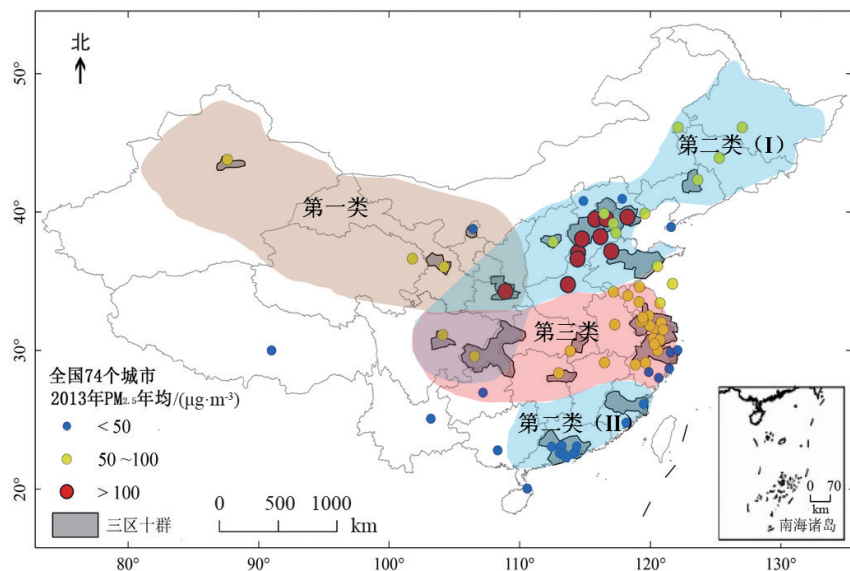


图3 2013年中国74个城市年均PM_{2.5}浓度分布及20个城市化学组分分区
Fig. 3 Zone chart of chemical composition of PM_{2.5} in 20 cities and annual averages of PM_{2.5} over 74 cities in 2013

样远高于其他城市 33% 的平均值。

(2) 能源结构与经济发展水平不同。能源结构不同,从源头上直接决定排放到空气中污染物的种类和数量;经济发展水平不均衡同样会在源头上导致各种污染源类型的组配存在差异。图 4 是部分城市 2013 年能源结构与经济发展水平的关系,据此把中国城市大致分为两大类:北京、上海和广州为中国经济发展水平最高的城市,第三与第二产业比例大于 1.5;同时在能源结构上,它们的煤与油气消费比例小于 1.5,表明其燃煤排放较低。值得注意的是乌鲁木齐也落在该类别中,这与乌鲁木齐推行煤改气,能源结构改变有关。其余城市所代表的区域为第二类别,能源结构方面,煤与油气消费比例高于 1.5,煤炭仍处于主导地位;经济发展水平方面,第三产业低于或者与第二产业基本持平,说明它们仍有相当规模的工业生产。

(3) 地形与气象条件不同。中国 $PM_{2.5}$ 浓度最高的区域出现在京津冀、华北平原和关中盆地(图 4)。除经济活动强度因素外,不利的地形条件也是形成高浓度 $PM_{2.5}$ 的重要原因。京津冀地区,西靠太行山脉,为中国第二阶梯与第三阶梯的分界处,该山系阻挡了京

津冀与太行山脉以西地区的气团交换,有助于静稳天气的形成,不利于空气污染物的扩散,导致污染物易于累积。关中平原为盆地地形,同样不利于污染物的扩散。四川盆地、兰州、乌鲁木齐等地区也同样出现较高的 $PM_{2.5}$ 浓度,均与它们所处的盆地和河谷地形条件有关。

$PM_{2.5}$ 浓度分布及重灰霾事件的强度、频率除了受排放影响外,还与当地气象因素、全球气候背景有密切关系,如超强厄尔尼诺气候事件^[15]。影响 $PM_{2.5}$ 的主要气象因素包括混合层高度、风(风速和风向)、相对湿度、温度、降水,它们会直接影响 $PM_{2.5}$ 的排放、化学反应速率、传输及气溶胶的干湿沉降等。混合层高度低会导致大气扩散能力减弱,使污染物停滞积累在近地面,加剧污染的程度;风速越大,越有利于 $PM_{2.5}$ 的扩散,其浓度越小,但中国东部人口密集区风速较小,不利于污染物扩散;相对湿度可以影响颗粒物的化学组成、混合状态、粒径分布、光学特性等;温度越高,对具有挥发性或半挥发性的硝酸盐或多环芳烃等的形成不利,但有利于二次转化过程;降水对 $PM_{2.5}$ 具有较强的清除作用,尤其是其中的水溶性成分。

总之, $PM_{2.5}$ 污染受人为污染物排放和自然条件的共同影响,来源复杂,影响因素较多。包括京津冀、山东和河南在内的华北平原以及关中盆地春季受沙尘,夏秋受秸秆燃烧,冬季受集中供暖影响,同时地形条件在一些地区不利于污染物的扩散,是中国污染严重的区域;以长三角为代表的长江流域地区,工业生产发达,同时夏季受秸秆燃烧影响;以珠三角和海峡西岸为代表的华南沿海地区,第三产业发达,但受其全年温度相对较高,太阳辐射较强的影响, $PM_{2.5}$ 与 O_3 的复合污染已经呈现。同时,上述区域是中国经济发展最为活跃的区域,在未来经济持续高速或中速发展的背景下, $PM_{2.5}$ 污染防治将是一个长期和持续的过程。

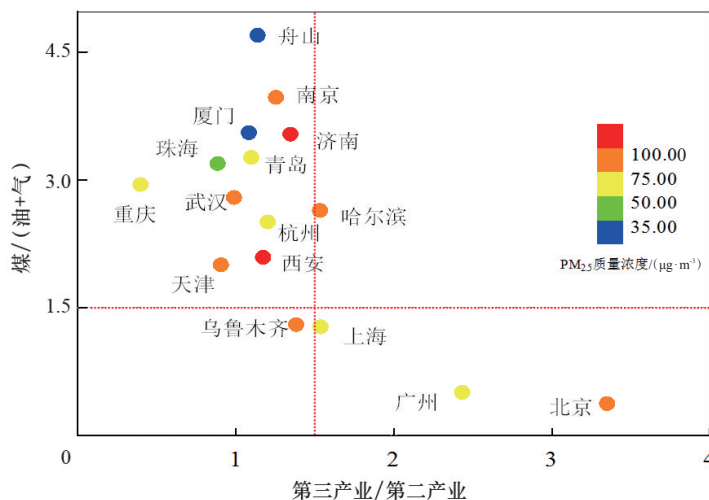
3 中国防治 $PM_{2.5}$ 控制战略建议

根据中国大气 $PM_{2.5}$ 的污染现状及主要成因,提出如下 3 点主要的战略性控制建议,以便各级部门更好地采取有效措施控制 $PM_{2.5}$ 污染。

1) 大力调整能源结构,防治 $PM_{2.5}$ 污染。

能源结构在相当程度上决定了 $PM_{2.5}$ 的污染状况,而 $PM_{2.5}$ 治理有利于促进能源结构调整和升级。根据国外先进经验,煤炭在能源消费中占 20%~25% 是较合理的结构比例,受其影响的 $PM_{2.5}$ 污染在可接受范围内。如美国 2013 年煤炭仅占 18.6%,与 20 世纪 50、60 年代超过 30% 的能源消费比率相比,煤炭利用的比重大幅下降。英国 1956 年煤炭占能源结构的 80% 以上,之后开始急剧下降,目前维持在 17% 左右,石油和天然气各占 1/3 左右,预计到 2020 年煤炭占能源消费的比重为 12%,2030 年缩减为仅占 5.5%。德国煤炭消费占比从 2000 年的 25.5% 微降至 2013 年的 25.0%。

中国能源生产和消费均是以煤炭为主,从 1952 年的 97% 下降到 1995 年的 76%。到 2014 年,尽管有所改善,但煤炭仍占能源消费的 66%。目前,中国城市 $PM_{2.5}$ 污染与能源结构密切相关。



图中不同颜色代表各市年均 $PM_{2.5}$ 质量浓度水平,经济数据来自各市统计年鉴

图 4 中国部分城市 2013 年经济发展水平与能源结构关系

Fig. 4 Relationship between energy structure and economic development level among some cities in 2013 in China

建议主要从压减煤炭使用、煤的清洁化利用、提高能效、加大可再生/清洁能源等使用方面减少各类污染物的产生。例如对于燃煤,应提高煤的集中燃烧与利用,采用超临界煤粉电站或整体煤气化联合循环电站等,产生电能输送到城市的千家万户(美国的城市居民采用电炉用于家庭烹饪、天然气只用于居民取暖),尽量减少居民民用散烧,提高燃煤的使用效率。此外,可以推广清洁煤,如陕西榆林的兰炭。

另外,根据中国未来发展的能源与环境巨大需求,建议从发展的眼光看核能未来的作用,特别是在科技创新基础上的战略性、替代性、竞争性、安全性提前布局,为今后10~20年从根本上解决中国当前紧迫的空气污染以及缓解未来气候变化的压力。核能在历史上解决能源危机时扮演过重要角色,如1973年世界第一次石油危机发生后,欧美国家大力发展核能(图5)^[6],如瑞典在1976—1986年间核电发展峰值时期每年增加约25 kW·h/千美元GDP,与现今风能和太阳能的发展趋势相比,当时核能发展更为迅速。与瑞典的面积及其当年的经济量测算,如要达到当时瑞典核电发展速度,中国未来20年平均每年要增加约35个反应堆(约158 TW·h/a)。因此,从近20年内中国大规模替代煤这种基础能源而言,发展核能比风能和太阳能更可行。

2) 以科技为核心构建新型的PM_{2.5}防治体系,实现科技治污。

现存治理途径为粗放型增长背景下制定的,并不符合未来产业调整和升级的新形势。健全的宏观防治体系是PM_{2.5}防治的根本因素,科技治污可为宏观防治提供科学支持。图6是科学家在总结近百年空气污染控制经验基础上建立的理想空气质量管理概念简图^[7]:根据环境空气质量标准和污染控制目标,遵照PM_{2.5}污染形成的自身规律,以科学的监测、分析、研究和技术开发等成果为基础,制订国家和地方的执行计划开展污染物削减与控制,并对减排效果进行追踪和科学评估,确保达到初始

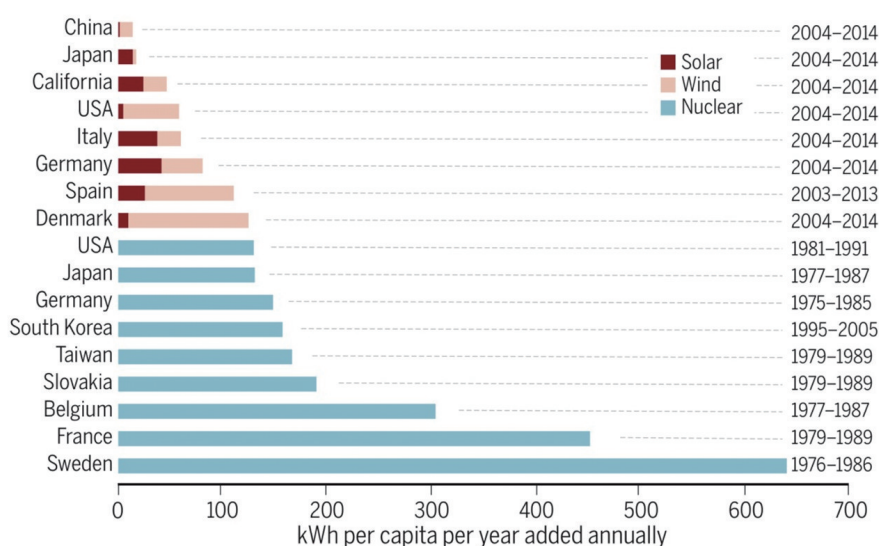


图5 世界各国历史时期无碳电力的10年均增长对比

Fig. 5 Average annual increase of carbon-free electricity per capita during of the peak scale-up decade

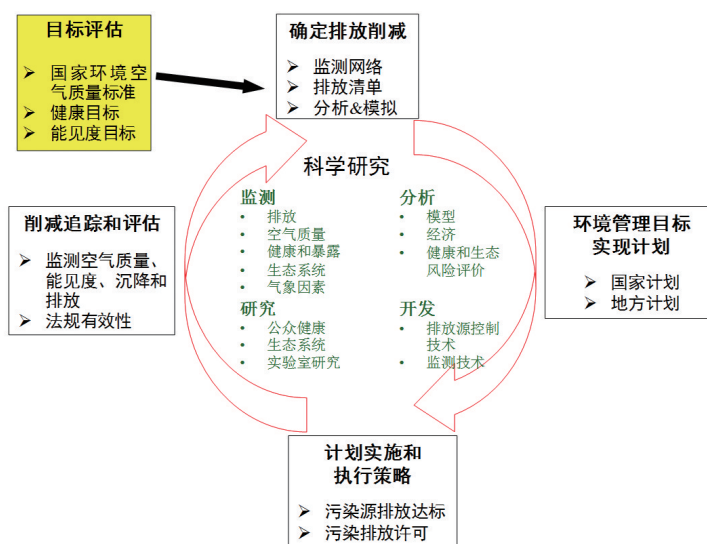


图6 理想的空气质量管理概念模型

Fig. 6 Ideal conceptual model of air quality management

标准和目标。然后进一步提高标准和目标,动态调整,通过多轮循环的持续努力,始终坚持将空气污染危害降至最低。简言之,就是坚持以科技支撑治污实践为核心,避免走弯路、做无用功,起到事半功倍的效果。建议尽快构建中国PM_{2.5}防治新体系,以科学指导中国大气治污实践。

在构建PM_{2.5}新型管理体系过程中,建议重点加强如下科技工作。

(1) 加强环境部门监测、分析和研究等能力建设,组建PM_{2.5}化学成分的国家观测网,加强源解析、重霾事件过程、二次污染物及其环境效应的定量研究;增强计算机数值模拟能力,加强天气过程与空气污染物相互作用的研究,提高空气污染预警预报水平。

(2) 推动PM_{2.5}及各类前体物监测、分析和研究等的标准化及设备与材料的国产化;面对复杂多变的污染形势,

加大高技术、新技术在污染治理中的应用,如开发纳米净化技术等新治理途径、开放大型太阳能控制新技术^[18]、利用移动互联网技术提供实时环境监管能力,利用车联网、智能汽车技术缓解尾气污染难题等。

(3) 定期综述并公开最新研究成果,加强科学普及,提高各级管理部门环境决策的科学水平,正确引导社会媒体与公众的舆论导向。

3) 改革体制、法律和经济等管理制度,保障科技治污综合效益。

以新型 PM_{2.5} 管理体系建设为引导,促进体制、法律和经济等管理制度改革,保障各项科技措施落到实处、达到污染治理的理想效果:

(1) 体制建设。中国当前空气污染的来源复杂、成因多样,诸多管理问题分属于不同的行政部门,尽管是环境问题,但远远不是环保部门一家能够解决的。相比于水体污染、土壤污染,大气污染问题更为复杂且多变。目前单靠环保部门已经无法单独解决现有的空气污染问题,对此应下大力气专门治理“九龙治水、多头管理”的分散局面。建议国家层面成立大气污染防治实施的领导小组和办公室,超越目前空气污

染治理的各个部门,统一领导,从体制上理顺当前多部门管理、效率欠高等问题。该机构可下设专门的咨询委员会,包括科技、经济、法律、区域管理、宣传等方面全国顶尖专家和管理干部参与到国家层面的政策制订、标准讨论、科技规划制定、管理体系建设等问题,做好顶层设计,有效指导全国的治污实践工作。委员会职责在于加强政界、产业界、学术界、公众、民间社团等的有效沟通与交流,形成一个全社会共同治污的交流与咨询平台,为政府有效决策、经费高效使用、资源配置等提供咨询建议。

(2) 法律保障。尽管 2014 年修订了大气污染防治法,但囿于已有的管理框架与治理思路,其对 PM_{2.5}、臭氧等新兴空气污染问题仍显不足。如各省市如何根据国家法律制定更有针对性的地方法律? 科技工作如何支撑法律的落实? 未达标区域怎么办? 等,缺乏精细化的管理条款。建议严格执行大气污染防治法,强化监管企业治污措施的正常运行,铁腕治污。尽快统一不同地区的污染排放标准和污染处罚标准,完善法律体系,以应对区域污染防治和中长期污染控制之需,保证法律有效

执行。

(3) 经济手段。推动 PM_{2.5} 防治所需的经济、财税和金融政策改革,特别关注重污染、经济发展较落后区域,发挥市场调控手段的作用,释放企业主动治污的潜力,构建绿色金融政策框架,促进绿色产业发展。

纵观近百年世界环境保护历史,空气污染伴随着工业化发展而出现^[19],其治理过程的紧迫性、长期性和复杂性需要引起高度重视。预测报告显示,伴随中国经济的持续发展,PM_{2.5} 污染将长期存在,不能排除可能出现的局部恶化趋势。因此,仅仅中央政府重视是远远不够的,各省、市和县级政府都应当高度重视,并与业绩挂钩,不能“嘴上讲环保,心想 GDP”,而要将大气污染防治贯彻到实际行动中。PM_{2.5} 污染等空气质量是环境治理的晴雨表,需要全社会共同努力,扎实工作推动大气环境质量的持续改善,为实现 2021 年全面建成小康社会贡献力量。

本文工作受到中国科学院地学部“我国大气 PM_{2.5} 污染现状与控制对策”咨询项目支持,特此感谢参与此项工作的人员。

参考文献 (References)

- [1] 白春礼. 中国科学院大气灰霾研究进展及展望[J]. 中国科学院院刊, 2014, 29: 275-281.
- [2] 曹军骥. PM_{2.5} 与环境[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [3] Zhang Q, He K B, Huo H. Cleaning China's air[J]. Nature, 2012, 484: 161-162.
- [4] Huang R J, Zhang Y L, Bozzetti C, et al. High secondary aerosol contribution to particulate pollution during haze events in China[J]. Nature, 2014, 514 (7521): 218-222.
- [5] Zhang R Y, Wang G H, Guo S, et al. Formation of urban fine particulate matter[J]. Chemical Reviews, 2015, 115(10): 3803-3855.
- [6] Chow J C, 曹军骥, 李顺诚, 等. PM_{2.5} 及其测量与影响研究简史[J]. 地球环境学报, 2012, 3(5): 1021-1029.
- [7] 张小曳, 孙俊英, 王亚强, 等. 我国雾-霾成因及其治理的思考[J]. 科学通报, 2013, 58(13): 1178-1187.
- [8] Zhang X Y, Wang Y Q, Niu T, et al. Atmospheric aerosol compositions in China: Spatial/temporal variability, chemical signature, regional haze distribution and comparisons with global aerosols[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2012, 12(2): 779-799.
- [9] Cao J J, Lee S C, Chow J C, et al. Spatial and seasonal distributions of carbonaceous aerosols over China[J]. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 2007, 112(D22S11). doi:10.1029/2006JD008205.
- [10] Cao J J, Shen Z X, Chow J C, et al. Winter and summer PM_{2.5} chemical compositions in fourteen Chinese cities[J]. Journal of Air & Waste Management Association, 2012, 62(10): 1214-1226.
- [11] Elser M, Huang R J, Wolf R, et al. New insights into PM_{2.5} chemical composition and sources in two major cities in China during extreme haze events using aerosol mass spectrometry[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2016, 16: 3207-3225.
- [12] Zhang R J, Jing J, Tao J, et al. Chemical characterization and source apportionment of PM_{2.5} in Beijing: Seasonal perspective[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2013, 13(4): 7053-7074.
- [13] Ma Q, Cai S Y, Wang S X, et al. Impacts of coal burning on ambient PM_{2.5} pollution in China[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2016. doi:10.5194/acp-2016-601.

- [14] Wang J Z, Ho S S H, Cao J J, et al. Characteristics and major sources of carbonaceous aerosols in PM_{2.5} from Sanya, China[J]. Science of the Total Environment, 2015, 530–531: 110–119.
- [15] Chang L Y, Xu J M, Tie X X, et al. Impact of the 2015 El Nino event on winter air quality in China[J]. Scientific Reports, 2016. doi: 10.1038/srep34275.
- [16] Cao J J, Cohen A, Hansen J, et al. China–US cooperation to advance nuclear power[J]. Science, 2016, 353: 547–548.
- [17] Bachmann J. Will the circle be unbroken: A history of the U.S. national ambient air quality standards[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2007, 57(6): 652–697.
- [18] Cao Q F, Pui D Y H, Lipiński W. A concept of a novel solar–assisted large–scale cleaning system (SALSCS) for urban air remediation[J]. Aerosol and Air Quality Research, 2015, 15: 1–10.
- [19] Pui D Y H, Chen S C, Zuo Z. PM_{2.5} in China: Measurements, sources, visibility and health effects, and mitigation[J]. Particuology, 2014, 13: 1–26.

Major causes and control strategies of the PM_{2.5} pollution in China

CAO Junji

Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China

Abstract The PM_{2.5} pollution has been the public concern in China since 2011. This paper reviews the fundamental concepts related to PM_{2.5} and the brief history of its mitigation, including the current situation of PM_{2.5} pollution in China and the three general causes for China's PM_{2.5} pollution. The coal-based energy structure leads to the high concentration of PM_{2.5} to a large degree in China, the extensive economy is the culprit for frequent haze breakouts, and the pollutant transportation very likely causes the regional pollutions. Also, this paper analyzes and summarizes the characteristics of PM_{2.5} pollution based on the divergence of different pollution sources, the difference of energy structure and economic level, topographical and meteorological conditions. On the basis of this analysis, some control strategies are proposed in the following three aspects: Restructuring the energy structure to control PM_{2.5} pollution, building up a new PM_{2.5} mitigation system based on scientific considerations, and reforming the management system including legislations to guarantee the overall effect.

Keywords PM_{2.5}; current situation of pollution; general and unique characteristics of pollution; control strategy

(责任编辑 王媛媛)