

重型柴油车对空气质量的影响及其排放的控制

周磊^{1,3,4}, 王伯光¹, 汤大钢²

(1. 暨南大学环境工程系, 广州 510632; 2. 环境保护部机动车排污监控中心, 北京 100012; 3. 中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002; 4. California Air Resources Board, El Monte, CA 91731, USA)

摘要: 通过对柴油车污染物排放的特征和机动车排放清单的分析, 探讨了重型柴油车对我国城市空气质量的影响及其排放的控制. 重型柴油车排放大量的氮氧化物和颗粒物, 其中氮氧化物为大气中产生二次细粒子以及臭氧的重要前体物之一, 导致区域性灰霾的形成, 而柴油颗粒物是影响健康的一个主要有毒空气污染物, 尤其是其中粒径为 30 ~ 100 nm 的超细粒子, 由于其粒径非常微小, 对人体健康有极大的危害性. 目前机动车已成为我国很多大城市和城市群地区的重要空气污染源, 而其中的重型柴油车则排放了很大部分的氮氧化物和细颗粒物. 因此, 控制重型柴油车的排放应当是今后我国城市空气质量中的一个关键部分, 一些与重型柴油车排放控制相关的问题需要引起重视.

关键词: 超细粒子; 氮氧化物; 重型柴油车; 机动车排放; 空气质量; 灰霾

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2011)08-2177-07

Impact of Heavy-Duty Diesel Vehicles on Air Quality and Control of Their Emissions

ZHOU Lei^{1,3,4}, WANG Bo-guang¹, TANG Da-gang²

(1. Department of Environmental Engineering, Jinan University, Guangzhou 510632, China; 2. Vehicle Emission Control Center, Ministry of Environmental Protection, Beijing 100012, China; 3. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China; 4. California Air Resources Board, El Monte, CA 91731, USA)

Abstract: Through an analysis of the characteristics of diesel vehicle emissions and motor vehicle emissions inventories, this paper examines the impact of heavy-duty diesel vehicles on air quality in China as well as issues related to the control of their emissions. Heavy-duty diesel vehicles emit large amounts of nitrogen oxides and particulate matter. Nitrogen oxides is one of the important precursors for the formation of secondary particles and ozone in the atmosphere, causing regional haze. Diesel particulate matter is a major toxic air pollutant with adverse effect on human health, and in particular, the ultrafine particles in 30-100 nm size range can pose great health risks because of its extremely small sizes. Motor vehicles have become a major source of air pollution in many metropolitan areas and city cluster in China, and among them the heavy-duty diesel vehicles are a dominant contributor of nitrogen oxides and particulate matter emissions. Hence, controlling heavy-duty diesel vehicle emissions should be a key component of an effective air quality management plan, and a number of issues related to heavy-duty diesel vehicle emissions need to be addressed.

Key words: ultrafine particles; nitrogen oxides; heavy-duty diesel vehicles; motor vehicle emissions; air quality; haze

长期以来我国大部分地区的空气以高浓度粉尘、煤烟和二氧化硫 (SO_2) 为特征, 但随着机动车数量的增长, 城市空气污染逐渐转变为煤烟和机动车排放为主的复合型污染^[1, 2], 空气中碳氢化合物 (HC)、氮氧化物 (NO_x) 和颗粒物 (PM) 含量大幅度增加, 细颗粒物 ($\text{PM}_{2.5}$) 成为许多城市中空气污染的突出问题之一^[3-5].

城市空气中的 PM 包括一次颗粒物和二次细粒子. 一次颗粒物通常由各种高温燃烧源 (如发电厂、机动车等) 直接排入大气, 二次细粒子在空气中由前体污染物通过物理、化学过程而形成. 二次细粒子主要前体污染物包括 HC、 SO_2 和 NO_x . 其中, HC 主要来源于机动车尾气, 也有相当一部分来源于工业

生产过程; SO_2 最大排放源是燃煤发电, 其它重要排放源则为工业生产过程; NO_x 主要的来源是机动车排放和火力发电, 二者占总排放量的 71%^[6]. 近年来国家对燃煤发电厂 SO_2 排放的控制取得了一定成效, 卫星监测发现 2006 年后我国大气环境 SO_2 浓度的降幅达 20% 左右^[7]. 国家也已开始加大对火力发电厂 NO_x 排放的控制力度, 以减少空气中 NO_x 的浓度.

总体上来看, $\text{PM}_{2.5}$ 目前已成为我国许多大城市

收稿日期: 2011-01-20; 修订日期: 2011-04-06

基金项目: 广东省科技攻关项目 (2007B030102004)

作者简介: 周磊 (1960 ~), 男, 教授, 主要研究方向为机动车排放控制和空气质量管理的法规和法规制定, E-mail: lzhou@arb. ca. gov

空气中的首要污染物,除了对人们视觉的影响,对人体健康也形成很大的危害.大量流行病学证据表明,PM_{2.5}可导致各种呼吸道病的发作,诱发和加重其它类型疾病^[8].因此,有效地减少城市空气中的PM_{2.5}已成为我国空气质量管理中的重要课题.

本研究从机动车对城市空气质量的影响出发,简略介绍了柴油机动车所排PM的特征及其对人体健康的危害,通过机动车排放清单分析重型柴油车对城市空气中PM和NO_x等污染物的贡献大小,研究重型柴油车排放控制对改善目前我国城市空气污染问题的重要作用,并借鉴国外重型柴油车减排方面的经验,探讨国内重型柴油车排放的控制对策.

1 柴油机动车排放的PM和NO_x正成为影响空气质量的主要污染物

1.1 机动车排放的空气污染物

近年来中国机动车保有量持续大幅度增长,机动车排放的空气污染物对城市空气质量的影响越来越大.虽然国家大力推行新的机动车排放标准,但由于很高的车辆保有量增长速度以及总体上来讲尚不完善的在用车监测系统,因此导致全国多数地区的机动车排放量将会持续增加,成为城市空气中PM和NO_x的重要来源.

机动车所排的主要污染物包括HC、CO、NO_x和PM,其中大部分的HC和CO来源于汽油小轿车和轻型卡车,而NO_x和PM则大部分来源于柴油车,尤其是柴油大卡车、柴油客车和柴油公交车等(以下统称为“重型柴油车”).机动车所排放的污染物在空气中经过各种物理过程和化学反应,在特定条件下产生光化学烟雾并参与灰霾的形成,影响空气质量和危害人体健康.

1.2 机动车排放的颗粒物

柴油车排放的PM远高于汽油车,尤其是重型柴油车. Kirchstetter等^[9]所作的一项测量显示,重型柴油车所排放的PM质量上为轻型汽油车的24倍;若仅用PM中的黑碳来作比较的话,前者比后者要高37倍.从颗粒数目上来看,若以单位燃油量为准,一辆重型柴油车所排的PM通常要比一辆汽油车高出1~2个数量级^[10, 11].

机动车所排PM的质量、表面积和数目与PM的粒径有密切关系.图1为柴油车PM质量浓度、表面积浓度和数浓度的典型分布曲线^[12].柴油车所排PM的质量大部分在粒径在50~700 nm之间,即所谓的积聚模态,而属于核模态的粒子则占极小的质

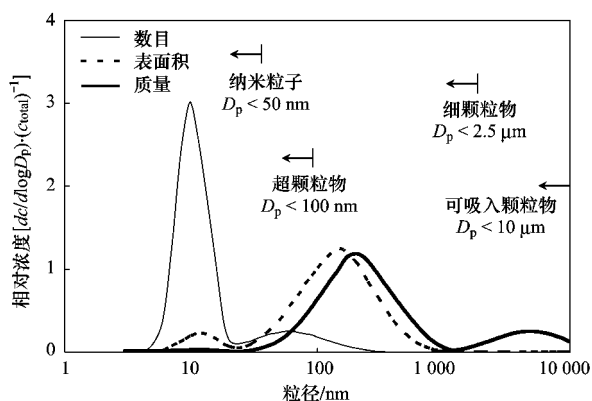


图1 柴油车PM的数目、表面积和质量随粒径的分布

Fig. 1 Diesel vehicle PM size distribution by number, surface area, and mass

量.但从PM的数浓度上来讲,大部分则为<20 nm左右的纳米粒子,另外一部分为30~100 nm的超细粒子.

汽油车排放的积聚模态PM在质量上相对于核模态粒子的优势要小很多,但核模态粒子的数目仍然远大于积聚模态.不过大多数保养或维修不善的汽油车所排PM质量、数目的分布则与柴油车较相似^[13].值得注意的是,近年来引入的直接喷射式汽油车较传统的点燃式汽油车的PM排放要高,但目前这方面的研究还不深入,对许多问题的了解尚不全面,需要进一步的工作.

积聚模态PM大部分是由各种固态的含碳物质混合而成,这些颗粒通常含有凝聚的或被吸附的HC和硫的化合物,也含有金属灰屑,其大多来源于润滑油添加剂及发动机磨屑^[14].核模态粒子则主要由HC和水合硫酸形成,这些粒子较容易通过挥发而转回为气态物质,也很容易通过自行集聚或通过被积聚模态颗粒物吸附的方式而消失,所以一般它们只能在主要交通干道附近可以被检测得到^[15, 16].

机动车所排放的纳米粒子虽然总的质量不大,但数目极多.不过这些粒子随机动车尾气排出后在环境中经历各种物理变化,其数目在较短的时间和距离内大量减少,而30~100 nm粒径的超细粒子的数目则相对较为稳定,在空气中存在的时间也相对比较久.

1.3 柴油颗粒物对人体健康的影响

柴油车排放的PM(柴油PM)绝大多数粒径<100 nm(图1),属于超细粒子.它们的表面积与质量比非常大,这一特性使得超细粒子成为极其有效的有机物和重金属的载体.

柴油PM含有40多个美国国家环境保护局和加州空气资源委员会标明的致癌物质,尤其富集多

环芳烃^[17]. 加州空气资源委员会的研究显示,加州空气中有毒物质总的潜在致癌风险中超过 70% 来自于柴油 PM^[18] (图 2). 由于柴油 PM 对健康的严重危害性,加州于 2000 年开始对柴油 PM 的控制和治理,颁布了一系列的法规和措施,大幅度降低空气中柴油 PM 的含量.

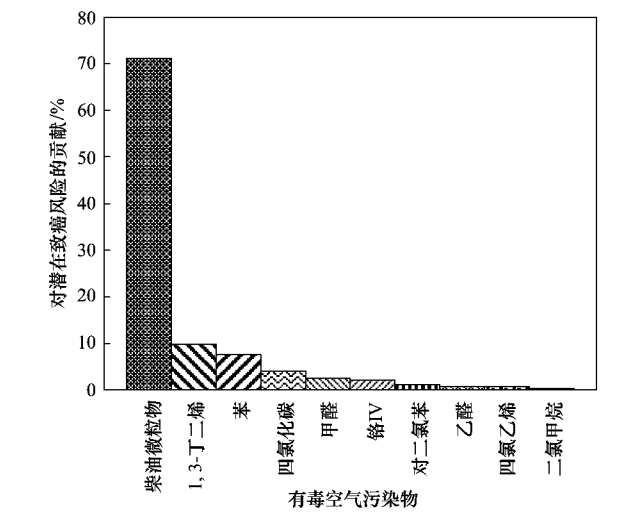


图 2 美国加州有毒空气污染物对潜在致癌风险的贡献

Fig. 2 Contributions to potential cancer risk of air toxic contaminants in California

国际上近年来的研究表明,超细粒子对人体健康的危害尤其为甚^[19]. 过去由于受实验手段限制,难以对 1 μm 以下的 PM 作更细致的区分和分析,只是发现多种疾病与 PM_{2.5} 浓度有关联. 从近年的研究结果来看,PM_{2.5} 对健康的危害性很可能主要是由其中的超细粒子所造成的. 当高浓度的超细粒子与人体细胞和亚细胞相互作用时,其毒性对人体产生重要的毒理学后果. 这些微小的颗粒可通过肺泡进入人体血液循环系统,诱发脑、心血管疾病,甚至进入人体细胞而与细胞器或亚细胞发生作用,干扰细胞的正常功能^[20~22].

2 控制和治理重型柴油车排放是改善城市空气质量的关键之一

2.1 重型柴油车排放大量颗粒物和氮氧化物

虽然重型柴油车占机动车总数的比例不大,但由于它们的年行车里程非常高,且单位里程的 PM 和 NO_x 排放因子很大,因而是机动车中 PM 和 NO_x 最大排放者. 图 3 为广州市 2009 年各类机动车 HC、PM 和 NO_x 的相对排放量^[23]. 从中可见,虽然以柴油为主的大型客车和货车只排放了不到 10% 的

HC,它们对 PM 和 NO_x 的贡献却分别高达 70% 和 46%. 上海市 2005 年的机动车排放清单显示,柴油大客车和大卡车排放了挥发性有机物总排放的 30% 左右,但所排的 PM 和 NO_x 则分别高达总排放的 75% 和 70% 左右^[24]. 2007 年全国范围机动车排放清单也表明,占机动车总数 15% 的重型卡车、大客车及公交车排放了机动车 NO_x 总排放量的 74%^[25].

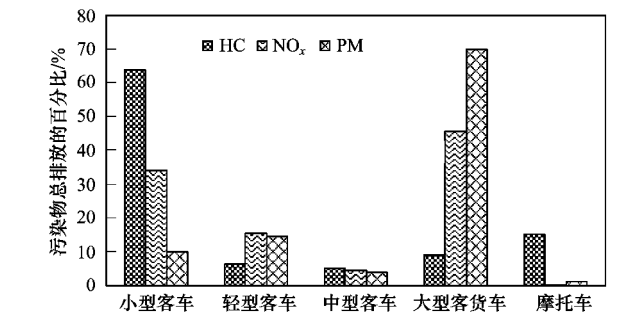


图 3 广州市各类机动车对 HC、NO_x 和 PM 排放的相对贡献量

Fig. 3 Relative Contributions of HC, NO_x and PM emissions by various motor vehicles in Guangzhou

图 4 是美国加州各类车种 HC、PM 和 NO_x 相对排放量的一个比较^[26]. 同我国的情况相似,加州重型柴油车所排的 HC 不到总排放量的 10%,但 PM 和 NO_x 排放量却远远超过了其它所有车种的总和.

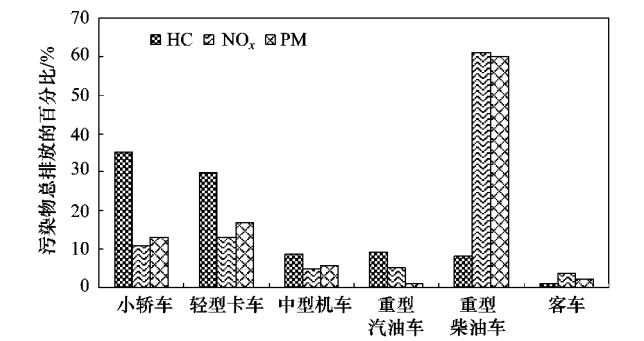


图 4 美国加州各类机动车对 HC、NO_x 和 PM 排放的相对贡献量

Fig. 4 Relative contributions of HC, NO_x and PM emissions by various motor vehicles in California, US

从上面的数据可以看出,重型柴油车每年至少排放 50% 以上机动车 PM 和 NO_x,成为影响城市空气质量的一个重要污染物排放源.

2.2 重型柴油车是城市空气中超细粒子的主要排放源

前面提到,机动车所排超细粒子的质量虽然不高,但数目巨大,成为城市居民主要的超细粒子摄入

源.最近一项在加州洛杉矶进行的研究显示^[27],虽然该地区居民平均每天在车内所花的时间只有6%,但在车内超细粒子暴露量却高达55%(表1).

表1 洛杉矶地区每日超细粒子的平均暴露量

Table 1 Average daily ultrafine particle exposure in Los Angeles		
活动地点	占每日时间 百分比/%	超细粒子暴露量 百分比/%
车内-市区	4	22
车内-高速公路	2	33
办公室	29	16
户外	4	9
住宅-傍晚	23	12
住宅-夜间	38	8

这一研究还显示,洛杉矶地区主要高速公路空气中超细粒子的数目浓度与重型柴油卡车的日流量成正比(图5),表明超细粒子暴露量与重型柴油车的尾气排放有着密切的对应关系.

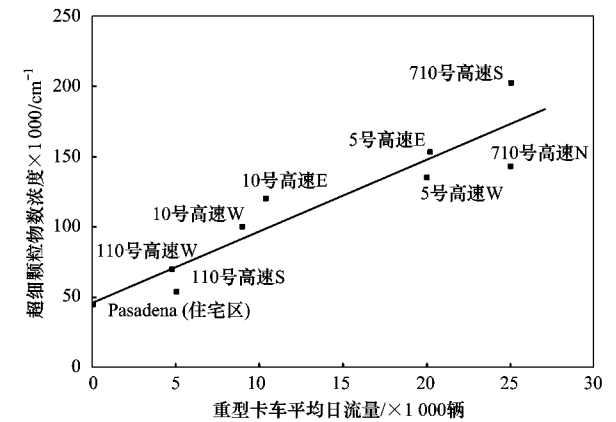


图5 超细粒子浓度与重型卡车流量

Fig. 5 Ultrafine particle concentration and daily heavy-duty truck flow

2.3 重型柴油车排放的控制和管理

随着我国经济的进一步发展,重型柴油车的保有量将会进一步增长,如果没有有效的减排和控制机制,可以预见城市空气中PM和NO_x的浓度将会显著升高.从3个方面来看,改善城市空气质量必需重视重型柴油车污染物的排放.第一,灰霾已成为我国城市居民日益关注的重要空气污染问题.大量研究表明,霾主要是由于空气中的SO₂、NO_x、有机物在一定的气象条件下所产生的二次细粒子而形成.虽然目前城市空气中大部分SO₂及一部分NO_x来源于燃煤发电,但重型柴油车也是重要的NO_x排放源.第二,我国许多城市的臭氧问题日趋严重,而NO_x是臭氧的主要前体物质之一.第三,城市中绝大部分的超细粒子来自于重型柴油车的排放,由于其

粒径非常微小,对人体健康危害极大.可以认为,作为PM(尤其是其中的超细粒子)和NO_x重要排放源,重型柴油车排放的控制和治理将是改善我国城市和城市群空气质量的关键之一.

目前对柴油车PM和NO_x排放的控制主要采用后处理技术,即颗粒物捕集器(DPF)和选择性催化还原(SCR)系统.这两项技术对少数柴油车减排非常有效,可分别减少90%以上的PM和大约90%的NO_x的排放^[28],但二者都要求含硫量很低的高品质柴油,尤其是DPF.高硫柴油使后处理系统很快失去功效,由于后处理技术对发动机本身的排控要求较低,因此失去后处理功效后可能比某些没有后处理技术的柴油车排放更高.

3 美国加州近年来控制和治理重型柴油车排放的经验

在大量的研究和咨询后,美国加州于1998年正式将柴油PM列为空气有害物质^[17].过去10年来,为了减少加州空气中的柴油PM,该州空气资源委员会制定和通过了一系列的法规来控制新车和在用柴油车PM的排放,并启动多个计划和项目以减低在用车的排放.以下是加州5个重要的柴油PM和NO_x减排法规和项目.

(1)2010排放标准 这是加州与美国国家环保局共同制定的目前国际上最低的重型柴油车PM和NO_x排放标准.2007车型年起,新车PM排放不能超过0.01 g·(bhp·h)⁻¹ [0.016 g·(kW·h)⁻¹];2010车型年起,新车NO_x排放不能超过0.2 g·(bhp·h)⁻¹ [0.32 g·(kW·h)⁻¹].图6为美国和加州重型柴油车的PM和NO_x排放标准与欧盟相应排放标准之间的比较.而加州则更进一步要求从2013车型年起,所有新重型柴油车必须装置车载诊断系统(OBD),以加强对车辆排放的监测^[29].

(2)卡尔莫耶空气质量达标计划 这是加州的一个重型卡车和其它重型柴燃机械的超前改造和更换计划,由各地区空气质量管理部和加州空气资源委员会共同合作来执行.该计划由州议会立法设立,每年提供款项鼓励车主购买超前于规定排放标准的发动机,从而达到加速减少空气污染的目的.卡尔莫耶计划是加州为确保如期达到法定的空气质量目标而采用的一个辅助减排手段,多年来成效很大.

(3)港口柴油卡车规定 加州各港口和铁路货物联运场之间的道路是柴油卡车高度集中的干道,是柴油PM高通量排放的线源,因此进出各港口的

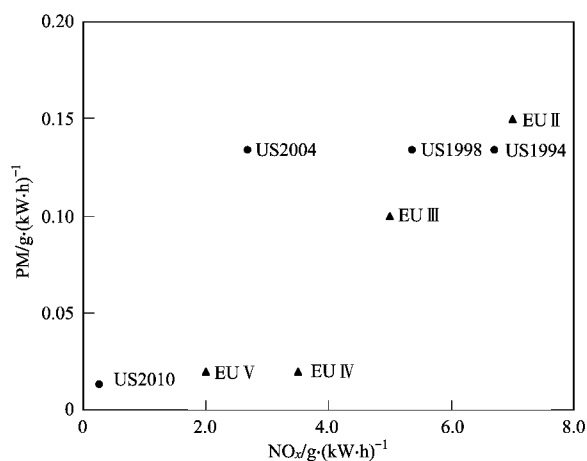


图6 美国与欧盟重型柴油发动机的排放标准

Fig. 6 US and EU heavy-duty diesel engine emission standards

柴油卡车必须达到特殊规定的排放标准方可准予运行,从而达到减少干道及周边空气中 PM 的浓度^[30]。

(4) 货物运输减排计划 该减排计划是加州空气资源委员会与地区空气质量管理部、港口和货物运输机构的一个合作项目,旨在迅速减少加州贸易走廊及周边由柴油卡车产生的污染以及污染所产生的健康风险。为此加州公民投票授权加州政府发行 10 亿美元债券,专用于完成这个计划^[31]。

(5) 柴油卡车和客车更新改造法规 这项法规规定,从 2011 年起 10 年内加州所有重型柴油车必须达到加州 2010 排放标准,同时规定凡达不到该标准的它州车辆则不许进入加州运行。法规准许车主采用各种途径来达到所规定的标准,如车主可购买 2010 排放标准的新车,可仅更换达到 2010 排放标准的发动机,或可在现有发动机上加装后处理装置使发动机达到规定的标准。该法规还设置多项经济资助项目,协助有困难的车主按期完成所拥有卡车的更新或改造^[32]。

4 关于我国重型柴油车排放控制及治理的几个问题

4.1 重型车国 IV 和国 V 标准以及排放控制技术

尾气后处理是目前达到国 IV 和国 V 标准(相当于欧盟的欧 IV 和欧 V 标准)的必须排控技术。国内柴油发动机制造业将主要采用 SCR 达到国 IV 及国 V 标准,而国 V 标准中对城市公交等特殊车辆则需要特别考虑同时使用 SCR 和 DPF,以有效实现 NO_x 和 PM 的减排。这对柴油品质以及润滑油的成分提出了很高的要求,大范围内实行这 2 个标准可能会

面临许多实际问题。

4.2 在用重型柴油车的改造、再动力以及加速淘汰 柴油发动机可靠、耐用,所以重型柴油车大多寿命很长。因此,需要有计划地对在用重型柴油车进行改造或再动力,同时需要制定方案以加速淘汰高龄、高排放车辆。美国加州这方面的经验值得参考和借鉴。

4.3 在用重型柴油车排放的监测和管理

国家和各地区需要加大对在用重型柴油车(特别是超高排放车)排放的监测和管理力度。监测方面目前可采纳的手段有遥感测量、烟度辨识、路边随机抽查以及定期检测等。尤其是遥感测量,虽然所测得的数值精确度较低,但该技术可以在实地环境下快速辨别出可能的高排放重型柴油车,以便对这些车辆进行进一步的测试和处理。最近的几项工作显示,遥感测量技术在重型柴油车排放监测的应用上潜力很大,目前可以较可靠地检测 NO_x、CO、PM、NH₃ 和 SO₂ 等空气污染物^[33,34]。

PM、SO₂ 和 NH₃ 这 3 种污染物对国 IV 和国 V 柴油车排放的监测极为重要。前面提到,由于后处理技术对发动机本身排控的要求较低,因此后处理失效后污染物排放将大幅度增加。PM 排放率可表明 DPF 是否被穿破或者被蓄意绕过,SO₂ 排放率则可用于判别车辆是否违法使用高硫柴油,而 NH₃ 排放率可指示 SCR 是否处于正常工作状态。值得一提的是,城市空气中由农业和牲畜养殖产生的 NH₃ 比例较小,而重型柴油车在后处理失效或低效工作时将排出大量的 NH₃,增加空气的 NH₃ 浓度,促进二次细粒子的形成。

4.4 区域性空气质量管理机构统一监管

由于各地区所实行的重型柴油车排放标准存在差异,所用柴油品质也会不同,而且重型柴油货车和客车多为跨区域运行,因而某地区空气中的 PM 和 NO_x 往往受到其它地区柴油车的影响。这一问题对经济发达但空气污染形势严峻的城市或地区尤为重要,如京津冀、长三角和珠三角等地区。因此各地区需要进行区域性协调,共同控制和管理重型柴油车的排放。例如美国加州制定了一些法规,要求进入加州的外州重型柴油车必须是达到加州标准的车辆。从长远来看,加州的这些规定整体上促进了美国全国重型柴油车排放的降低,所获的环境效益远不仅限于加州本身。

4.5 超细粒子的污染与健康

目前我国在超细粒子污染与健康方面的工作尚

处于开始阶段. 超细粒子成分和物理形态及其演化方面的研究需要加大力度,尤其是在国产重型柴油车和我国特有燃油所产生的超细粒子及其对人体健康的影响等方面需要开展系统的研究. 对新型燃油(如生物柴油、压缩天然气、液化石油气等)所产生的颗粒物需要加强重视,以了解其对健康的潜在风险.

5 结 论

重型柴油车排放大量的 PM 和 NO_x,为二次细粒子的形成提供了大量的前体物质. 此外柴油车所排放的超细粒子由于粒径极其微小,可进入人体内多种系统,对人体健康危害很大,因此对重型柴油车所排空气污染物的控制和管理是改善城市空气质量的关键之一. 近年来国外对重型柴油车排放的控制和管理十分重视,积累了大量经验,值得参考和借鉴. 我国在重型柴油车排放的控制、监测和管理等诸多方面还需要大量的工作,需要政府、科研单位以及各相关企业的共同努力.

致谢:感谢欧阳婵嫩和欧阳歆凌协助收集资料 and 图表制作.

参考文献:

[1] 张远航. 大气复合污染是灰霾内因[J]. 环境, 2008, (7): 32-33.

[2] 刘新翌, 张远航, 曾立民, 等. 广州市大气能见度影响因子的贡献研究[J]. 气候与环境研究, 2006, 11(6): 733-738.

[3] Chan C K, Yao X. Air pollution in megacities in China[J]. Atmospheric Environment, 2008, 42: 1-42.

[4] 傅家谟. 二次气溶胶对灰霾贡献大[J]. 环境, 2008, (7): 28-29.

[5] 张铁男, 向运荣, 张毅强, 等. 我国与国际空气污染指数系统的比较[J]. 环境科学学报, 2009, 29(8): 1604-1610.

[6] 第一次全国污染源普查公报[R]. 北京: 环境保护部等, 2010. 3-19.

[7] 王尔德, 方旭燕. “十二五”新添约束性指标 氮氮氧化物减排 10% [EB/OL]. <http://www.21cbh.com/android/news.php?id=208271>, 2010-11-30.

[8] Pope C A III, Dockery D W. Epidemiology of particle effects [A]. In: Holgate S T, Sammet J M, Koren H S, *et al.* Air Pollution and Health[C]. London: Academic Press, 1999. 673-705.

[9] Kirchstetter T W, Harley R A, Kreisberg N M, *et al.* On-road measurement of fine particle and nitrogen oxide emissions from light-and heavy-duty motor vehicles [J]. Atmospheric Environment, 1999, 33: 2955-2968.

[10] Morawska L, Jamriska M, Thoma S, *et al.* Quantification of particle number emission factors for motor vehicles from on-road measurements [J]. Environmental Science and Technology,

2005, 39: 9130-9139.

[11] Ristovski Z, Jayaratne E R, Lim M, *et al.* Influence of diesel fuel sulfur on the nanoparticle emissions from city buses [J]. Environmental Science and Technology, 2006, 40: 1314-1320.

[12] Kittelson D B, Watts W F, Johnson J P. Diesel Aerosol Sampling Methodology-CRC E-43 Final Report[R]. Alpharetta, Georgia: Coordinating Research Council, 2002.

[13] Kittelson D B, Watts W F, Johnson J P, *et al.* On-road and laboratory evaluation of combustion aerosols Part 2: Summary of spark ignition engine results [J]. Journal of Aerosol Science, 2006, 37: 931-949.

[14] Kittelson D B. Engines and nanoparticles: A review[J]. Journal of Aerosol Science, 1998, 29: 575-588.

[15] Zhu Y, Hinds W C, Kim S, *et al.* Study of ultrafine particles near a major highway with heavy-duty diesel traffic [J]. Atmospheric Environment, 2002, 36: 4323-4335.

[16] Zhu Y, Pudota J, Collins D, *et al.* Air pollutant concentrations near three Texas roadways, Part I: Ultrafine particles [J]. Atmospheric Environment, 2009, 43: 4513-4522.

[17] Proposed Identification of Diesel Exhaust as a Toxic Air Contaminant [R]. Sacramento, California: Air Resources Board, 1998. 1-8.

[18] Risk Reduction Plan to Reduce Particulate Matter Emissions from Diesel-Fueled Engines and Vehicles [R]. Sacramento, California: Air Resources Board, 2000. 1-34.

[19] Andre N. Air pollution-related illness: Effects of particles[J]. Science, 2005, 308: 804-806.

[20] Silbajoris R, Ghio A J, Samet J M, *et al.* In vivo and in vitro correlation of pulmonary map kinase activation following metallic exposure[J]. Inhalation Toxicology, 2000, 12(6): 453-468.

[21] Xiao G G, Wang M, Li N, *et al.* Use of proteomics to demonstrate a hierarchical oxidative stress response to diesel exhaust particle chemicals in a macrophage cell line[J]. Journal of Biological Chemistry, 2003, 278: 50781-50790.

[22] Li N, Alam J, Venkatesan M I, *et al.* Nrf2 is a key transcription factor that regulates antioxidant defense in macrophages and epithelial cells: protecting against the proinflammatory and oxidizing effects of diesel exhaust chemicals [J]. Journal of Immunology, 2004, 173: 3467-3481.

[23] 2009年度广州市环境质量报告书[R]. 广州: 广州市环境保护局, 2010.

[24] Huang C, Pan H, Lents J, *et al.* Shanghai Vehicle Activity Study [R]. La Habra, California: International Sustainable Systems Research Center, 2005. 1-40.

[25] Tang D, Yan D, Hang Y, *et al.* Developing a first-ever national mobile source emissions inventory for China [A]. Baltimore, Maryland: 18th Annual International Emissions Inventory Conference “Comprehensive Inventories-Leveraging Technology and Resources”, 2009.

[26] Statewide Motor Vehicle Emissions Inventory for Year 2010[R]. Sacramento, California: EMFAC2007-California On-Road Vehicle Emissions Inventory Model, 2007.

- [27] The importance of in-vehicle exposure [C]. Sacramento, California: Staff Presentation in December 9, 2004 Board Meeting, 2004.
- [28] Emission Control Technologies for Diesel-Powered Vehicles[R]. Washington, D C: Manufacturers of Emission Controls Association, 2007. 1-39.
- [29] Amendments adopting more stringent emission standards for 2007 and subsequent model year new heavy-duty diesel engines[R]. Sacramento, California: Air Resources Board, 2001. 1-53.
- [30] Proposed Regulation for Drayage Trucks [R]. Sacramento, California: Air Resources Board, 2007. 1-24.
- [31] Goods Movement Emission Reduction Program—Final Guidelines for Implementation[R]. Sacramento, California: Air Resources Board, 2008. 1-74.
- [32] Proposed Regulation for In-Use On-Road Diesel Vehicles[R]. Sacramento, California: Air Resources Board, 2008. 1-83.
- [33] Schuchmann B G, Bishop G A, Stedman D H. Remote Measurements of On-Road Emissions from Heavy-Duty Diesel Vehicles in California: Year 1, 2008[R]. Golden, Colorado: National Renewable Energy Laboratory, 2009. 1-30.
- [34] Schuchmann B G, Bishop G A, Stedman D H. Remote Measurements of On-Road Emissions from Heavy-Duty Diesel Vehicles in California: Year 2, 2009[R]. Golden, Colorado: National Renewable Energy Laboratory, 2010. 1-32.