



我国油品对机动车尾气排放的影响及升级经济性分析*

文 / 王新明¹ 田志坚² 张艳利¹

1 中国科学院广州地球化学研究所 广州 510640

2 中国科学院大连化学物理研究所 大连 116023

【摘要】提升油品质量、降低机动车污染物排放,对改善我国空气质量至关重要。通过隧道试验测试了道路机动车污染物排放水平,从我国8大城市加油站收集的汽柴油样品实测了其硫含量和烃类组成等指标,用先进的烟雾箱系统模拟了汽油车和柴油车尾气直接排放和二次反应生成的颗粒物,并探讨了机动车尾气对细颗粒物($PM_{2.5}$)的综合贡献与油品之间的关系。在分析我国油品升级所需的脱硫、重整、加氢等技术需求的基础上,初步估算了我国汽柴油全面升级的直接投资需求。文章也揭示了突破柴油发动机和柴油深加工技术对我国机动车减排的重要意义。

【关键词】油品,机动车尾气,细颗粒物($PM_{2.5}$),臭氧,油品升级,经济性分析

DOI 10.16418/j.issn.1000-3045.2015.04.013

我国当前面临的两大空气质量难题, $PM_{2.5}$ (灰霾)污染和臭氧(O_3)污染,都与机动车尾气排放密切相关。前期我国重点城市源解析结果表明,机动车尾气通过一次排放和二次生成对 $PM_{2.5}$ 有重要贡献^[1],而机动车排放的氮氧化物(NO_x)和挥发性有机物(VOCs)是生成臭氧的关键前体物^[2,3]。随着我国城市化的发展和机动车数量的激增,机动车尾气控制对城市群地区空气质量的改

善日益重要。然而,机动车尾气控制是一个系统工程,既涉及“车品”、“油品”等技术问题,更涉及监管和交通规划等方面的管理举措。我们必须首先从技术层面回答:中国机动车尾气排放水平如何?“症结”何在?油品对机动车尾气排放有何直接、间接影响?我国的油品到底有什么问题?技术改造的关键环节在哪里?要花多大代价?

依托中科院B类战略性先导科技专项

* 基金项目:中科院重点部署项目(KJZD-EW-TZ-G06-03)、中科院B类战略性先导科技专项课题(XDB05010200)

修改稿收到日期:2015年7月15日



中国科学院

“大气灰霾追因与控制”，对我国机动车污染物排放水平及车用油品质量开展了测试分析，利用先进的烟雾箱平台对机动车尾气生成颗粒物的过程进行了模拟研究。在此基础上，对我国油品升级的经济性进行了探讨，提出了有关政策建议。

1 油品对机动车尾气污染的影响

1.1 机动车尾气对PM_{2.5}和臭氧污染贡献大

机动车排气管直接排放的污染物称为“一次污染物”，主要有细颗粒物、氮氧化物(NO_x)和挥发性有机物(VOC)。这些一次排放污染物经大气化学反应生成的产物被称为“二次污染物”，其中NO_x经过大气转化可生成PM_{2.5}中的硝酸盐，VOC经过大气氧化可生成PM_{2.5}中的二次有机气溶胶(SOA)^[4,5]。在我国重点城市群，机动车尾气对PM_{2.5}的一次排放和二次生成总贡献率达30%左右^[6,7]。机动车尾气排放的NO_x和VOC经光化学反应会形成以臭氧为特征污染物的“光化学烟雾”，这种污染因而常被称为“尾气型污染”。因此，在我国机动车数量激增的情况下，要解决我国两大空气质量难题，必须加强机动车尾气控制。

1.2 我国单辆车平均排放高于欧美10年前水平

国际上通常用隧道实验反映机动车的真实排放水平。城区隧道车流量大，是机动车尾气排放占绝对优势的相对封闭环境。广州市城区的珠江隧道，单侧平均车流量每天达4万辆以上，在这一代表性隧道的3期测试表明，与澳大利亚布里斯班2014年同期的隧道测试结果比较，珠江隧道PM_{2.5}排放水平约是其2倍左右；即使相对欧美10余年前在隧道的测定结果，广州市平均每公里每辆车PM_{2.5}排放水平为国外报道的1.2—5.0倍^[8,9]，碳气溶胶排放水平则为其1.3—4.2倍^[10,11]，芳烃排放水平是其2—3倍^[12]。因为芳烃是生成臭氧和二次有机气溶胶最重要的人为源前体物^[13,14]，导致我国当前机动车尾气排放对直接排放和二次生成的污染物贡献均较大。对尾气污染控制而言，发动机、油品(燃料油和润滑油)和尾气净化多个环节相互影

响和制约，而油品是其中的核心环节。必须指出的是，广州机动车和油品的状况在全国处于较好水平，因此全国整体状况可能更不容乐观。

1.3 车用油品已成为我国机动车减排的瓶颈

改进发动机设计和尾气净化，是实现机动车尾气减排的关键，但前提是要有品质与之相应的车用油。如果油中的硫含量过高，会使尾气净化装置中的催化剂中毒，严重影响净化效果；汽油中烯烃如果含量过高，燃烧过程中易在发动机缸内和进气系统中造成积碳，影响发动机性能和尾气排放。因此，如果车用油品不能与时俱进，先进的发动机技术和尾气净化装置难以正常发挥其作用与优势，机动车减排则无法从源头得到根本性好转。油品升级是大势所趋。

2 我国油品与国外油品之间的品质差别及存在的问题

2.1 中国当前油品标准与欧美差异大

我国油品标准在硫含量限值方面与国外对应的标准并无差异甚至更为严格，主要差别在于烃类组成和添加剂方面。

我国汽油标准与欧美主要差别为：国IV标准中烯烃限值为28%，即使是国V标准，烯烃也仅降至24%，而国外最高上限为18%，美国加州这一限值更是低至4%；芳烃标准限值为40%也偏高；美国已不用含锰、铅的添加剂，而我国标准中仍允许使用。高含量烯烃不仅易造成结碳，影响发动机性能，而且因烯烃的高反应活性，不仅对PM_{2.5}二次生成有间接影响，且对区域臭氧生成贡献较大。研究团队在广州抽取6个加油站和2个大型油库，测定了加油过程中挥发的油蒸汽的组成，发现其烯烃所占比例是加州10倍以上，苯系物是其2倍以上，通过计算发现，中国汽油蒸汽的臭氧生成潜势约为美国10多年前报道值的2倍^[15]，高含量的烯烃不利于区域臭氧污染控制^[16]；另一方面，苯系物是重要的人为源二次有机气溶胶前体物^[17]。

我国柴油标准与欧美主要差别为：我国多环芳烃限值为11%，而芳烃则没限值。多环芳烃对

一氧化碳、碳氢化合物和一次排放颗粒物的影响显著,多环芳香烃含量越高,十六烷值越低,发动机的燃烧和排放性能越差,燃烧过程中易产生碳烟颗粒排放,同时易导致较高的一氧化碳和未燃碳氢化合物排放;此外,由于芳香烃含碳原子数多,氢原子数少,会使发动机燃烧温度提高,在一定程度上会使氮氧化物(NO_x)排放增加。

2.2 炼油工艺技术是油品差异的根本原因

我国当前油品标准之所以与国外呈现上述差异,主要是受限于当前我国炼油工艺技术现状。目前我国汽油池中催化裂化汽油比例高达73.5%,重整汽油、烷基化汽油和异构化汽油比例低。造成我国汽油组成结构不合理,烯烃含量偏高,占汽油烃组成30%以上,远高于目前欧盟标准限值18%和美国限值10%;烷烃含量偏低,占汽油烃组成40%以下,而欧盟和美国在50%以上。油品升级的主要目标在于降低硫含量,并在不降低辛烷值的前提下提高异构烷烃含量,减少烯烃芳烃含量。重要技术需求包括:催化裂化原料预处理加氢、催化裂化汽油改质、清洁高辛烷值汽油组分生产技术等。

同样由于我国原油加工催化裂化装置比例大,加氢精制装置比例小,造成柴油中多环芳烃含量高,占11%以上,远高于《世界燃油规范》中规定的2%标准(第四阶段)。目前我国柴油以国III柴油为主,硫含量普遍高于100 ppm。我国柴油油品升级的主要方向为:降低芳烃含量,降低硫含量。重要技术需求包括:加氢脱硫、加氢脱芳、加氢改质、清洁十六烷值柴油组分生产技术等。目前,我国自主柴油超深度加氢脱硫技术薄弱,尚未得到规模化应用。

2.3 实测油品品质参差不齐

2013年在全国8大代表性城市(北京、上海、广州、重庆、西安、武汉、长春、乌鲁木

齐)抽检了180个油样,测定了汽油和柴油主要环保指标,并与美国加州22个油样进行对比。结果发现,我国8城市汽油的平均硫含量为61 ppm,远高于加州汽油的平均含硫量(12 ppm);我国柴油的平均含硫量为93 ppm,约为加州(12 ppm)的8倍。因执行标准不同,城市间油品含硫量存在明显差异。北京当时执行京V标准,油品含硫量最低,汽油和柴油的平均含硫量均低于10 ppm,达到了国V标准,也低于美国加州标准限值;上海汽油和柴油的平均含硫量分别为16 ppm和14 ppm,达到了国IV标准;广州汽油达到国IV标准,而柴油只有部分达到国IV标准。其他城市油品均未达到国IV标准。值得注意的是,在长春非中石油、中石化的小型加油站,采集的汽油样品中硫含量偏高,最高超过1 500 ppm,表明我国油品质量监控存在问题。

烃类组成方面,汽油中烯烃含量普遍高于30%,最高可到50%以上,远高于美国加州汽油中4%的烯烃限值。柴油中多环芳烃可高达20%以上,同样远高于美国加州1.4%的限值。这主要与上述我国的炼油技术和油品标准有关。

2.4 中国机动车尾气问题症结

通过大型烟雾箱平台,可直接观测与模拟机动车尾气排放与二次成粒过程。结果发现,我国汽油车二次有机气溶胶(SOA)生成量是尾气排放的一次有机气溶胶(POA)的12—259倍^[18],而前期美国和瑞士烟雾箱模拟报道值仅为1—15倍^[19],表明我国汽油车尾气的主要问题不是其直接排放的颗粒物太多,而是排放后二次生成的颗粒物太多,其核心问题是如何降低尾气中生成SOA的前体物,而这与我国汽油中烯烃和芳烃含量高有关;柴油车SOA则仅为POA的0.5—1.3倍,与国外SOA/POA平均3左右



中国科学院

相比偏低^[20],原因是我国柴油车一次排放颗粒物偏高,二次生成的SOA少。因此柴油车尾气控制的关键问题是如何降低一次颗粒物排放,而这又与柴油中芳烃特别是多环芳烃含量高密切相关。同样怠速行驶,欧洲3个厂家柴油车每千克燃油一次排放POA平均只有我国3个厂家的1/10左右,生成SOA量只有我国1/4左右,一次和二次总和只有我国1/6左右。

3 我国油品升级的经济性分析

3.1 当前是油品升级的有利时机

油品升级既然无路可退,我国应利用当前国际油价在低位徘徊的有利时机,加快油品升级的步伐。即使比照美国的情形,炼油成本在油价总构成中不超过10%,我国因油品升级带来的油价影响应该在企业和消费者能够承受的范围之内。下面的分析也可以看出,油品升级所需的直接投资约2 000亿,仅相当于中石油和中石化两大公司一年营业收入的4%左右。应该看到,油品升级不仅可以促进我国石油炼化行业的升级改造,而且可以助推多个行业发展,给产业链相关领域带来投资机会,直接受益的化工、环保等方面的上市公司可达10余家。

2014年6月,国家能源局制定了《大气污染防治成品油质量升级行动计划》(以下简称“计划”),其中列出2条时间“红线”——2015年底前,京津冀、长三角、珠三角等区域内重点城市全面供应国V标准的车用汽、柴油;2017年底前,全国供应符合国V标准的车用汽、柴油,同时停止生产销售国IV标准车用汽、柴油。

预计到2017年,全国汽、柴油总需求将达到31 390万吨,平均柴、汽油比将从2013年的1.81:1降至1.53:1。届时6家主要炼油企业每年可供供应国V车用汽、柴油10 582万吨和17 146万吨,覆盖全国90%左右的市场需求。与之相对应的企业指标是,2015年10月底前,三大重点区域主要保供企业具备生产国V标准车用汽柴油的能力;2017年10月底前,全国炼油企业具备生产国V标

准车用汽柴油能力。具体到炼能,计划预计改造完成后,全国将增加汽油脱硫精制能力4 480万吨/年,高辛烷值组分生产能力3 200万吨/年,柴油加氢能力8 260万吨/年,到2017年将实现二氧化硫直接减排11.2万吨/年。据能源局估算,2014—2017年,全国主要炼油企业将共投入1 926亿元进行油品质量升级改造。

3.2 油品升级的成本估算

油品质量升级成本主要包括固定资产投资成本和实际运行成本。初步估计,我国汽柴油全面升级至国IV尚需投资500亿—600亿元。目前中石化旗下大型炼厂生产国IV及以上汽油能力较强,约占其总炼能的64%;中石油较弱,仅23%左右的炼能可以生产;地方炼油厂则较落后,山东地炼目前具备生产国IV汽油能力的仅占一次总炼能的34%。根据洛阳石化经验数据,汽油脱硫能力由国III升级到国IV,150万吨/年吸附脱硫装置需投资2.7亿元,折合每万吨投资180万元。以此估算,我国汽油全部升级至国IV尚缺投资约115亿元。柴油方面,以中石化供应京沪的国IV产能占总产能30%,中石油及其他炼厂占自身总产能10%计算,全部升级为国IV约需321亿元。汽柴油所需投资之和约为436亿元。考虑到目前地炼尚有大量国II产能存在,山东地炼当前仅20%柴油、65%汽油达到国III标准,其实现全面国III化尚需投资约100亿元。因此,不考虑中石油、中石化的国II产能,全国汽柴油升级至国IV需投资在500亿—600亿元之间。

我国汽柴油全面升级至国V新增投资将超千亿元。以汽油脱硫技术S-Zorb为例,按150万吨的处理能力,将硫含量控制在10 ppm以下,总投资需约3.5亿元,折合每万吨约230万元。以此估算,我国汽柴油升级至国V需投资1 000亿—1 200亿元。也就是说,即便按2018年全面实行国V标准,石化企业需每年投资500亿—600亿元,中石油和中石化各自投资约300亿元/年直接用于技术升级和设备改造。

实际运行成本增加包括物耗、能耗和产品结构变化带来的成本。技术升级之后,炼油过程工序增加,氢气、水等物耗以及燃料、动力等能耗将增加;同时,还将导致产品结构发生变化,副产物如干气等产量增加,主产物汽柴油产量降低。此外,新技术的应用还可能影响油品主要性能,需要其他措施补充。以汽油为例,车用汽油升级至国IV标准后,硫含量、蒸汽压和锰含量的降低都将造成辛烷值损失,损失的辛烷值需要添加剂或者再加工弥补。上述方面将使油品升级实际运行成本增加,具体经济性还有待进一步研究和核算。

4 提升油品控制污染的政策建议

4.1 重视油品升级的技术研发

对尾气污染控制而言,发动机、油品和尾气净化多个环节相互影响和制约^[21],而油品是其中的关键环节。根据我国汽柴油的特点,可以明确升级的目标以及技术需求,在当前油价低位徘徊的有利时机加快我国炼油厂升级改造,同时带动产业链相关行业发展。

汽油油品升级的主要目标在于降低硫含量,并在不降低辛烷值的前提下提高异构烷烃含量,减少烯烃芳烃含量。重要技术需求包括:催化裂化原料预处理加氢、催化裂化汽油改质、清洁高辛烷值汽油组分生产技术等。

我国柴油油品升级的主要目标为:降低芳烃含量、降低硫含量。重要技术需求包括:加氢脱硫、加氢脱芳、加氢改质、清洁十六烷值柴油组分生产技术等。

建议加强关键技术的研发和攻关,这对于实现控制目标至关重要。以柴油为例,目前我国自主柴油超深度加氢脱硫技术薄弱,尚未得到规模化应用。与此同时,目前我国尚无自主技术生产适用于国

IV、国V排放标准的柴油发动机,即高压共轨柴油发动机。如果不能在油品和发动机的关键技术取得突破,达到第四、五阶段机动车排放减排目标的难度很大。

4.2 加大对柴油车排放的研究和控制

我国一直把限制柴油车特定时段进入核心区,作为城区空气污染防治的重要手段。值得注意的是,由于汽油车“一次少、二次多”,柴油车“一次多、二次少”,柴油车如果能把一次颗粒物排放降到比较低的水平,又能克服汽油车二次生成多、排放VOC对臭氧贡献大的缺点,从综合控制PM_{2.5}和臭氧来说,倒不失为一个“清洁”的选择。国外特别是欧洲柴油车的比例比我国要高很多,但我国受柴油发动机技术水平等因素限制,同标准级柴油车排放对PM_{2.5}的综合贡献达到欧洲6倍以上。柴油机车品和油品目前升级难度可能更大,但一旦获得突破,在空气质量改善方面意义重大。

致谢 感谢中科院丁仲礼副院长、前沿科学与教育局段晓男副处长等对本文提出的宝贵意见。

参考文献

- Huang R J, Zhang Y, Bozzetti C, et al. High secondary aerosol contribution to particulate pollution during haze events in China. *Nature*, 2014, 514(7521): 218-222.
- 张远航, 邵可声, 唐孝炎, 等. 中国城市光化学烟雾污染研究. *北京大学学报(自然科学版)*, 1998, 34(223): 392-400.
- 唐孝炎, 张远航, 邵敏. *大气环境化学*. 北京: 高等教育出版社(第二版), 2006.
- Seinfeld J H, Pandis S N. *Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change*. New Jersey: John Wiley & Sons, 1986.
- Finlayson-Pitts B J, Pitts J N Jr. *Chemistry of the upper and lower atmosphere: theory, experiments, and applica-*



中国科学院

- tions. San Diego: Academic Press, 2000.
- 6 北京市环境保护局. “北京市PM_{2.5}来源解析结果”. <http://www.bjepb.gov.cn/bjepb/323474/331443/331937/333896/396191/index.html>
 - 7 广州市环境保护局. “广州市PM_{2.5}来源解析结果”. http://www.gzepb.gov.cn/yhwx/201502/t20150205_78984.htm
 - 8 Allen J O, Mayo P R, Hughes L S, et al. Emissions of size-segregated aerosols from on-road vehicles in the Caldecott Tunnel. *Environmental Science & Technology*, 2001, 35(21): 4189-4197.
 - 9 Imhof D, Weingartner E, Prevot A S H, et al. Aerosol and NO_x emission factors and submicron particle number size distributions in two road tunnels with different traffic regimes. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2006, 6: 2215-2230.
 - 10 Handler M, Puls C, Zbiral J, et al. Size and composition of particulate emissions from motor vehicles in the Kaisermuhlen-Tunnel, Vienna. *Atmospheric Environment*, 2008, 42(9): 2173-2186.
 - 11 Lough G C, Schauer J J, Lonneman W A, et al. Summer and winter nonmethane hydrocarbon emissions from on-road motor vehicles in the Midwestern United States. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2005, 55(5): 629-646.
 - 12 Legreid G, Reimann S, Steinbacher M, et al. Measurements of OVOCs and NMHCs in a swiss highway tunnel for estimation of road transport emissions. *Environmental Science & Technology*, 2007, 41(20): 7060-7066.
 - 13 Zhang Y L, Wang X M, Blake D R, et al. Aromatic hydrocarbons as ozone precursors before and after outbreak of the 2008 financial crisis in the Pearl River Delta region, south China. *Journal of Geophysical Research*, 2012, 117: D15306. DOI: 10.1029/2011JD017356.
 - 14 Zhang Y L, Wang X M, Barletta B, et al. Source attributions of hazardous aromatic hydrocarbons in urban, suburban and rural areas in the Pearl River Delta (PRD) region. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, 250: 403-411.
 - 15 Zhang Y L, Wang X M, Zhang Z, et al. Species profiles and normalized reactivity of volatile organic compounds from gasoline evaporation in China. *Atmospheric Environment*, 2013, 79, 110-118. DOI:10.1016/j.atmosenv.2013.06.029.
 - 16 Zhang Y L, Wang X M, Zhang Z, et al. Sources of C₂-C₄ alkenes, the most important ozone nonmethane hydrocarbon precursors in the Pearl River Delta region. *Science of the Total Environment*, 2015, 502: 236-245.
 - 17 Ding X, Wang X M, Gao B, et al. Tracer based estimation of secondary organic carbon in the Pearl River Delta, south China. *Journal of Geophysics Research-Atmosphere*, 2012, DOI:10.1029/2011JD016596.
 - 18 Liu T, Wang X M, Deng W, et al. Secondary organic aerosol formation from photochemical aging of light-duty gasoline vehicle exhausts in a smog chamber. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, 15:10553-10592. DOI:10.5194/acpd-15-10553-2015.
 - 19 Gordon T D, Presto A A, May A A, et al. Secondary organic aerosol formation exceeds primary particulate matter emissions for light-duty gasoline vehicles. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, 14: 4661-4678. DOI:10.5194/acp-14-4661-2014.
 - 20 Chirico R, DeCarlo P F, Heringa M F, et al. Impact of aftertreatment devices on primary emissions and secondary organic aerosol formation potential from in-use diesel vehicles: results from smog chamber experiments. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, 10: 11545-11563. DOI:10.5194/acp-10-11545-2010.
 - 21 郝吉明, 马广大. 大气污染控制工程. 北京: 高等教育出版社(第二版), 2002.

Influence of Fuel Quality on Vehicle Emission and Economic Analysis of Upgrading Fuel Quality in China

Wang Xinming¹ Tian Zhijian² Zhang Yanli¹

(1 Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;

2 Dalian Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Dalian 116023, China)

Abstract Upgrading fuel quality to lower vehicle emission is vital to improve air quality in China. We conducted tunnel tests to evaluate emission of air pollutants from on-road vehicles, collected gasoline and diesel oil samples from gas station in China's eight large cities and analyzed their quality index including sulfur contents and composition of hydrocarbons, studied primarily emitted and secondarily formed aerosols from vehicle exhausts by smog chamber simulation, and further explored the relationship between fuel quality and vehicle's overall contribution to PM_{2.5}. Based on the analysis of the technical requirements of desulfurization, reforming and hydrogenation for upgrading fuel quality, the costs of upgrading gasoline and diesel oil quality in China was preliminarily estimated. The technological breakthrough in diesel engine manufacturing and diesel oil deep-processing is also of great importance in cutting China's vehicle emission.

Keywords fuel quality, vehicle exhausts, fine particles (PM_{2.5}), ozone, fuel quality upgrades, economic analysis

王新明 中科院广州地球化学所研究员,有机地球化学国家重点实验室副主任,广东省环境资源利用与保护重点实验室主任。2010年获国家杰出青年科学基金,2013年入选科技部中青年科技创新领军人才。长期致力于有机污染物大气化学演化、生物地球化学过程及其环境效应研究。作为主要完成人曾获国家自然科学奖二等奖1项、广东省科学技术奖一等奖2项、环保部环境科技奖二等奖1项。发表SCI论文160余篇。现任*Biogeosciences*副主编。E-mail: wangxm@gig.ac.cn

Wang Xinming, Professor of the Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, deputy director of the State Key Laboratory of Organic Geochemistry, director of Guangdong Key Laboratory of Environmental Protection and Resources Utilization. He won the National Science Fund for Distinguish Young Scholars of China in 2010, and selected as Middle-aged and Young Scientific and Technological innovation leader of MOST in 2013. He has long been engaged in the study of atmospheric chemical evolution and biogeochemical cycling of organic pollutants and their environmental endpoints. He has won 1 State Natural Science Award (class 2), 2 Provincial Science and Technology Award (class 1) and 1 MEP Science and Technology Award (class 2). He has published over 160 papers in *SCI* journals. He is currently the associate director of EGU' *Biogeosciences*. E-mail: wangxm@gig.ac.cn



中国科学院