

2013年12月



# 中国车用燃料低硫化手册

“保护环境,支持中国车用燃料低硫化”项目

---

## 作者简介

---

### 迈克 - 沃尔什 (Michael P. Walsh)

---



迈克 - 沃尔什先生致力于世界各国机动车污染控制方面的工作。他曾先后任职于纽约市环保局和美国国家环境保护局 (USEPA)，分别担任机动车污染控制部门负责人。之后他一直以独立顾问身份为世界各国政府和企业提供交通节能减排方面的政策咨询和建议。沃尔什先生曾担任过 12 年美国国家环境保护局移动污染源技术顾问分委员会的联合主席，直接参与了多个国家的项目。他还是几个国家科学委员会的成员。沃尔什先生曾获得美国国家环境保护局授予的“终身成就奖”、美国加州空气资源委员会颁发的“哈根迈斯密特奖” (Haagen Smit Award)，并因其“无私奉献和非凡创新”获得“麦克阿瑟奖” (MacArthur Fellow)。2009 年沃尔什先生受聘为上海世博会环保顾问组专家，获得上海市“白玉兰纪念奖”，该奖项用于表彰长期以来为上海的经济和社会发展做出杰出贡献的外籍人士。2010 年沃尔什先生获得了中国政府授予来华工作外国专家的最高奖项——“国家友谊奖”。沃尔什先生是国际清洁交通委员会 (ICCT) 首任董事会主席，2012 年合作主持了中国环境与发展国际合作委员会 (CCICED) 关于中国区域大气污染防治的项目。

### 致谢

---

“保护环境，支持中国车用燃料低硫化”项目得到联合国环境署清洁燃料与车辆伙伴关系组织及美国环境保护局的资助，由环境保护部机动车排污监控中心、国际清洁交通委员会、亚洲清洁空气中心负责具体实施，本手册作为项目产出之一，特邀 Michael P. Walsh 先生进行撰写，在此表示衷心感谢。



---

# 目录

---

引言	2
汽油车与燃料	3
A. 汽油特性概述	3
B. 汽油组分对机动车尾气排放的影响	3
C. 两轮与三轮摩托车	3
柴油车与燃料	6
A. 柴油特性概述	6
B. 柴油组分对机动车尾气排放的影响	6
欧盟、美国和加州的燃料规格	8
为什么全世界都在追求低硫燃料?	10
A. 背景	10
B. 关于硫的关注点	10
a) 健康危害	10
b) 其他环境影响	14
c) 全球关注：气候变化	15
d) 硫对先进车辆污染控制技术的影响	16
中国汽车尾气排放标准路线图	21
A. 分析	21
B. 结果	22
结语	25
附注	26

---

# 引言

---

在过去大约 25 年间，大量的研究都围绕如何更好地处理燃料、车辆与车辆尾气排放之间的关系。其中一项名为“汽车 / 燃料空气质量改善研究项目”（AQIRP）于 1989 年在美国开展，涉及 14 家油品企业，3 家国内汽车制造商和 4 家合作机构。<sup>1</sup> 同样，欧洲汽车行业与石油行业之间也在 1993 年签订了一份合约——《欧盟排放、燃料与发动机技术项目》（EPEFE），实施共同检测。在亚洲，由石油能源中心发起、汽车行业（燃料使用者）和石油行业（燃料生产者）参与的一项研究——“日本清洁空气项目”（JCAP），受到了日本经济贸易产业省的支持。<sup>2</sup> 该项目的第二阶段主要聚焦于未来汽车与燃料技术，重点研究尾气中的颗粒物，旨在实现零排放，同时提高燃料效率。

这些研究都反复说明一点：要想解决车辆排放问题，就要把**车辆与燃料当成一个整体**来看待。例如，要想引入催化转化器技术减少汽油车大量排放的一氧化碳、碳氢化合物与氮氧化物，就要首先使用无铅汽油。为了使用先进的污染控制技术，汽油与柴油中的硫含量必须降低；事实上，只有当含硫量几乎为零的时候，当今最先进的内燃机技术才能**最大化**地发挥作用。

本手册主要依据以上研究及其他近期工作，总结燃料硫含量对车辆排放的影响，并对中国越来越严格的机动车排放标准的影响进行评估。下文概述了各种汽油与柴油特性对机动车排放的影响，作为相应车辆设计所需满足的排放标准。然后简要描述欧盟、美国和加州采用的车用燃料规格以及世界燃料宪章推荐的车用燃料规格。最后讨论低硫燃料对中国的重要性以及引入更严格机动车排放标准的影响。

---

# 汽油车与燃料

---

## A. 汽油特性概述

汽油是一种用于内燃机的挥发性复杂碳氢化合物混合物。来自汽油车的污染元凶主要是一氧化碳 (CO)、碳氢化合物 (HC)、氮氧化物 (NO<sub>x</sub>) 和某些有毒碳氢化合物, 比如: 苯、甲醛、乙醛、1,3-丁二烯。以上每一种污染物都受到车辆所用汽油组分的影响, 其中对尾气影响最大的是硫浓度、挥发性物质、芳香烃、烯烃、含氧化合物和苯。

## B. 汽油组分对机动车尾气排放的影响

表 1 根据尾气排放标准, 总结了各种品质的汽油对轻型汽油车排放的影响。

## C. 两轮与三轮摩托车

中国两轮与三轮摩托车的数量超过了其他任何国家。尽管这类车辆**也会受到燃料特性影响**, 但很少有人对其进行研究。基于有限的可用数据及该类车辆与其他内燃机车辆之间的燃烧共性, 表 2 显示了汽油组分对摩托车排放的相关影响。



表 1 汽油组分对轻型汽油车排放的影响

汽油	无催化剂	欧 1	欧 2	欧 3	欧 4	欧 5/6 <sup>3</sup>	评论
铅 ↑	Pb、HC ↑	当催化剂受到破坏时, CO、HC、NO <sub>x</sub> 都会明显 ↑					2000 年开始, 中国禁止使用含铅汽油
硫 ↑ (50–450 ppm)	SO <sub>2</sub> ↑	CO、HC、NO <sub>x</sub> 增加约 15-20% SO <sub>2</sub> 与 SO <sub>3</sub> ↑					车载诊断灯会错误亮起
烯烃 ↑	1,3- 丁二烯、HC 反应活性和 NO <sub>x</sub> ↑ 欧 3 及更高排放标准 HC 少量 ↑						可能增加沉积物
芳香烃 ↑	尾气中的苯含量 ↑						进气阀与燃烧室的沉淀物可能增加
	HC 和 NO <sub>x</sub> 可能 ↑	HC ↑ NO <sub>x</sub> ↓ CO ↑	HC、NO <sub>x</sub> 、CO ↑				
苯 ↑	尾气中的苯含量和蒸发排放 ↑						
乙醇 ↑ 氧达到 3.5%	CO 和 HC ↓ 少量 NO <sub>x</sub> (当氧含量超过 2%)、乙醛 ↑	对装有氧传感器和自适应学习系统的新车型影响最小					除非调整雷德蒸气压, 否则会增加蒸发性排放; 可能影响燃料系统组件并产生沉积, 燃料经济性变差
MTBE ↑ 氧达到 2.7%	CO 与 HC ↓ 乙醛 ↑	对装有氧传感器和自适应学习系统的新车型影响最小					可能会造成水污染
蒸馏特性 T50、T90 ↑	HC 可能 ↑	HC ↑					
MMT ↑	锰排放 ↑			可能堵塞催化剂	催化剂堵塞可能性较大		可能损害氧传感器和车载诊断系统, 故障指示灯会错误亮起
RVP ↑	蒸发性碳氢化合物排放 ↑						亚洲国家环境温度较高, 该特性最为关键
沉积物控制 添加剂 ↑		HC 与 NO <sub>x</sub> 排放可能 ↓					有利于减少喷油器、化油器、进气阀和燃烧室的沉积物

注: CO = 一氧化碳; HC = 碳氢化合物; Pb = 铅; RVP = 雷德蒸气压; MMT = 汽油抗爆剂; MTBE = 甲基叔丁基醚; NO<sub>x</sub> = 氮氧化合物; O<sub>2</sub> = 氧; SO<sub>2</sub> = 二氧化硫; T50 = 分馏 50% 汽油的温度; T90 = 分馏 90% 汽油的温度。



表 2 汽油组分对摩托车排放的影响

汽油	无催化剂	印度 2005 年	欧 3	印度 2008 年	国 III	评论
铅 ↑	Pb、HC ↑	当催化剂受到破坏时，CO、HC、NO <sub>x</sub> 都会明显 ↑				
硫 ↑ (50-450 ppm )	SO <sub>2</sub> ↑	CO、HC 和 NO <sub>x</sub> ↑ SO <sub>2</sub> 与 SO <sub>3</sub> ↑				
烯烃 ↑	1,3 丁二烯、HC 反应活性和 NO <sub>x</sub> ↑					可能增加沉积物
芳香烃 ↑	尾气中的苯含量 ↑					
苯 ↑	尾气中的苯含量和蒸发排放 ↑					
乙醇 ↑ 氧达到 3.5%	CO 和 HC ↓ 少量 NO <sub>x</sub> ↑	对装有氧传感器的车辆影响最小				除非调整雷德蒸气压，否则会增加蒸发排放；可能影响燃料系统组件并产生沉积，燃料经济性变差
MTBE ↑ 氧达到 2.7%	CO 和 HC ↓	对装有氧传感器的车辆影响最小				可能会造成水污染；燃料经济性变差
蒸馏特性 T50、T90 ↑	HC 可能 ↑	HC ↑				没有乘用车那样的可量化性
MMT ↑	锰排放 ↑	可能堵塞催化剂				单元密度低，催化剂堵塞的可能性似乎较小，但是有可能在燃烧室和火花塞上产生沉淀物
RVP ↑	挥发性碳氢化合物排放 ↑					
沉积物控制 添加剂 ↑		尾气排放可能 ↓				有利于减少喷油器和化油器的沉积物

注：CO = 一氧化碳；HC = 碳氢化合物；Pb = 铅；RVP = 雷德蒸气压；MMT = 汽油抗爆剂；MTBE = 甲基叔丁基醚；NO<sub>x</sub> = 氮氧化物；O<sub>2</sub> = 氧；SO<sub>2</sub> = 二氧化硫；T50 = 分馏 50% 汽油的温度；T90 = 分馏 90% 汽油的温度的温度；T90 = 分馏 90% 汽油的温度

目前在中国使用的大多数两轮或三轮摩托车都没有安装催化转化器控制排放，因此就燃料特性而言，其影响基本等同于低于欧 1 标准的汽车。但自从实施国 III 标准之后，硫和铅对机动车的影响类似于欧 1 与欧 2 标准的汽油车。对于安装了二冲程发动机的两轮和三轮摩托车来说，润滑油的用量和质量可能比燃料质量对排放的影响更重要，但该技术在中国正迅速被淘汰。

---

# 柴油车与燃料

---

## A. 柴油特性概述

柴油是一种复杂的碳氢化合物混合物，其主要成分是链烷烃、环烷烃和芳香烃，有机硫也是其自然组成成分。添加剂会影响柴油的流动、贮藏和燃烧特性。商业车用柴油的实际特性取决于它的提炼方法及其原油性质。柴油的质量与成分会极大地影响柴油机的排放。

柴油会产生大量氮氧化物和颗粒物。通过延迟燃料喷射时间并增加废气再循环装置可以有效控制氮氧化物。超高压、电脑控制燃料喷射也可以减少颗粒物排放。对一种污染物的优化设定往往会增加另一种污染物的排放量，所以改变发动机参数同时减少氮氧化物和颗粒物非常困难且效果有限。因此要想降低氮氧化物与颗粒物的排放必须进行尾气处理。稀燃氮氧化物催化剂、选择性催化还原（SCR）、带周期性还原的氮氧化物捕集器；周期再生的颗粒捕集器以及氧化催化剂再生技术都在不断发展，并在世界各地不同程度地推广应用。

新配方柴油可以有效减少柴油车的氮氧化物和颗粒物排放。该燃料类型减少了硫与芳香烃的含量，增加了十六烷值。减少柴油机氮氧化物和颗粒物排放的关键因素是硫含量，因为硫是颗粒物的主要组成部分，而且高硫量会阻止最有效颗粒物和氮氧化物控制技术的使用，或者会让该类技术的有效性大打折扣。

## B. 柴油组分对机动车排放的影响<sup>4</sup>

表 3 和表 4 归纳了各种品质的柴油分别对轻型柴油车和重型柴油车的影响。



表 3 燃料对轻型柴油车的影响

柴油特性	欧 1 前	欧 1	欧 2	欧 3	欧 4	欧 5/6 <sup>5</sup>	评论
硫 ↑	SO <sub>2</sub> , PM ↑		如果使用氧化催化剂, SO <sub>3</sub> , SO <sub>2</sub> 和 PM ↑		如果使用捕集器, 最高为 50 ppm, 10-15 ppm 更佳		如果使用 NO <sub>x</sub> 吸附器则要求硫含量几乎为零 (<10 ppm)。在低硫情况下, 可使用润滑添加剂
十六烷值 ↑	CO、HC、苯、1,3-丁二烯、甲醛和乙醛 ↓						使用低十六烷值燃料
密度 ↓	PM、HC、CO、甲醛、乙醛和苯 ↓ NO <sub>x</sub> ↑						
挥发性 (T95 从 370 到 325 C)	NO <sub>x</sub> 、HC ↑ PM、CO ↓						
多环芳香烃 ↓	NO <sub>x</sub> 、PM、甲醛和乙醛 ↓ HC、苯和 CO ↑						一些研究表明总芳香烃含量对尾气排放的重要性类似于多环芳香烃含量

注: CO= 一氧化碳; HC= 碳氢化合物; NO<sub>x</sub>= 氮氧化物; PM= 颗粒物; ppm= 百万分率; SO<sub>2</sub>= 二氧化硫; SO<sub>3</sub>= 三氧化硫, 一种中间化合物。

表 4 燃料对重型柴油车的影响

柴油特性	欧 I 前	欧 I	欧 II	欧 III	欧 IV	欧 V <sup>6</sup>	评论
硫 ↑	SO <sub>2</sub> , PM ↑		如果使用氧化催化剂, SO <sub>3</sub> , SO <sub>2</sub> 和 PM ↑		如果使用捕集器, 最高为 50 ppm, 10-15 ppm 更佳		如果使用 NO <sub>x</sub> 吸附器则要求硫含量几乎为零 (<10 ppm)。在低硫情况下, 可使用润滑添加剂
十六烷值 ↑	CO、HC、苯、1,3-丁二烯、甲醛和乙醛 ↓						使用低十六烷值燃料
密度 ↓	HC、CO ↑ NO <sub>x</sub> ↓						
挥发性 (T95 从 370 到 325C)	NO <sub>x</sub> 少量 ↓						很大一部分燃料在 370 C 不会挥发, 因此增加了烟量和 PM
多环芳香烃 ↓	NO <sub>x</sub> 、PM、HC ↓						一些研究表明总芳香烃含量对尾气排放的重要性类似于多环芳香烃含量

注: CO= 一氧化碳; HC= 碳氢化合物; NO<sub>x</sub>= 氮氧化物; PM= 颗粒物; ppm= 百万分率; SO<sub>2</sub>= 二氧化硫; SO<sub>3</sub>= 三氧化硫, 一种中间化合物。

# 欧盟、美国和加州 的燃料规格

根据机动车技术与燃料相关性的研究成果，各国都修改了燃料质量规格。表 5 归纳了欧盟、美国国家环境保护局（USEPA）与加州空气资源局的燃料规格以及世界燃料宪章的建议。

表 5 部分汽油规格

	欧 3	欧 4	欧 5	USEPA 新配方 汽油均值 (2005) <sup>7</sup>		USEPA 传统 汽油均值 (2005) <sup>8</sup>		加州空气资源局 <sup>9</sup> (CaRF3)			世界 燃料 宪章 类别 4 <sup>10</sup>
				夏	冬	夏	冬	下限	平均 限值	上限	
芳香烃, 比例不大于 (vol%)	42	35	35	20.7 <sup>11</sup>	19.5 <sup>11</sup>	27.7	24.7	25	22	35	35
烯烃, 比例不大于 (vol%)	18	18	18	11.9	11.2	12	11.6	6	4	10	10
苯, 比例不大于 (wt.%)	1	1	1	0.66 <sup>12</sup>	0.66 <sup>12</sup>	1.21 <sup>12</sup>	1.15 <sup>12</sup>	0.8	0.7	1.1	1
硫, 最大 ppm	150	50	10	71 <sup>13</sup>	81 <sup>13</sup>	106 <sup>13</sup>	97 <sup>13</sup>	20	15	30 20 <sup>14</sup>	10
雷德蒸汽压 kPa	60/70 最大 限值	60/70 最大 限值	60/70 最大限值	47.6 <sup>15</sup> (6.91 psi) 最大限 值	82.0 (11.89 psi) 最大限 值	57.2 (8.3 psi)	83.6 (12.12 psi)	48.2 or 47.6 <sup>17</sup> 最大限值 (7 或 6.9 psi)	NAP	44.1 - 49.6 (6.4-7.2 psi)	同中 国国 IV
锰,毫 克 / 升	NS	NS	汽油抗爆 剂 <6 (截至 2011 年) 汽油抗爆 剂 <2 (截至 2014 年)	NA <sup>18</sup>	NA <sup>19</sup>	NA	NA	ND	ND	ND	ND
氧, % m/m	2.7 (最 大限 值)	2.7 (最 大限 值)	2.7 (最大 限值)	2.49	2.37	0.95	1.08	1.8-2.2	NAP	0 - 3.5 1.8 <sup>20</sup> - 3.5	2.7

NS= 未规定；NA= 不提供；ND= 不能检测；NAP= 不适用

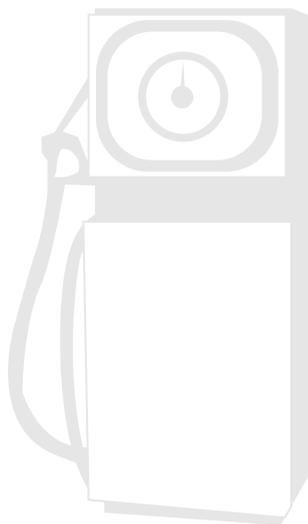
美国近期正式公布了进一步限制汽油硫含量并提高机动车排放标准的提案。一旦定案，硫含量将从目前的平均 30 ppm 降低到 10 ppm。

表 6 归纳了柴油的类似规格。

表 6 部分柴油规格

	欧 III	欧 IV	欧 V	USEPA	加州空气资源局		世界燃料 宪章 类别 4 21
				传统柴油	基准燃料 22	等效设计 限制 23	
多环芳香烃， 比例不大于 (vol%)	11	11	8	NS	1.4	3.5	2.0
硫，最大 ppm	350	50	10	15	15	15	10
最小十六烷值	51	51	51	十六烷值指数 ≥ 40 或芳香烃 ≤ 35% <sup>24</sup>	48	53	55
15°C 的最低密度， kg/m <sup>3</sup>	820 - 845	845	845	NS	NS	NS	820 <sup>25</sup>
最低闪点， °C	55	同欧 III	同欧 III	NS	54	NS	55
最大灰份， % m/m，	0.01	同欧 III	同欧 III	NS	NS	NS	0.001
40°C 的粘度， mm <sup>2</sup> /s	2 - 4.5	同欧 III	同欧 III	NS	2 - 4.1	NS	2.0 <sup>26</sup>

PP = 柴油倾点；NS= 未规定



---

# 为什么全世界都在追求低硫燃料？

---

## A. 背景



汽油与柴油都从原油加工而成，而原油的颜色与成分又因油田的不同而各异。原油的粘稠度从水状到焦油状不等，颜色也有的清亮，有的乌黑。“平均质量”的原油含碳 84%，含氢 14%，硫含量占 1%-3%，此外氮、氧、金属与盐分含量都不超过 1%。<sup>27</sup> 未经处理的原油用处不大，只有经过蒸馏转变为燃料、润滑油、蜡、沥青和石化产品，原油的价值才会得以体现。

硫是一种非金属物质，广泛存在于自然界中，其中也包括原油。原油含硫量从 100 ppm 到 33,000 ppm 不等。<sup>28</sup> 如果原油当中不含或几乎无硫，则被称为低硫原油（最高 7,000 ppm）；如果含硫量不大，则被称为“中等含硫原油”（介于 7,000 和 10,000 ppm 之间）；含硫量很大的原油叫做“高硫原油”（10,000 ppm 到 33,000 ppm 或更高）。硫也会以硫化氢、化合物（如：硫醇、硫化物、二硫化物、噻吩等）或元素硫的形式存在于原油当中。当原油在炼油厂被加工成汽油或柴油时，部分硫随之进入到燃料中。原油的浓度越高，去除硫的难度就越大。因原油种类和提炼工艺的不同，汽油含硫水平从 50 到 1000 ppm 不等，有的甚至更高。柴油的含硫量有的低于 15 ppm，有的高于 10,000 ppm，更多的介于二者之间。

## B. 关于硫的关注点

各国高度关注硫含量，主要出于以下四点原因：

- a) 健康危害
- b) 其他环境影响
- c) 全球关注：气候变化
- d) 硫对先进车辆污染控制技术的影响

### a) 健康危害

机动车在运转过程中会排放大量的一氧化碳、碳氢化合物、氮氧化物和有毒物质，比

如：苯、甲醛、乙醛、1,3-丁二烯和颗粒物。根据燃料成分的不同，机动车也会排放大量的硫氧化物和铅。这些排放物与二次污染物（如臭氧）会对健康和环境造成严重的不利影响。引起气候变化的温室气体也越来越多地来自于交通行业。与该行业息息相关的机动车尾气主要包括二氧化碳、一氧化二氮和甲烷，但其他与车辆相关的污染物也会引起全球变暖，其中最典型的的就是黑碳，因其对气候变化的影响的科学理解近期不断提升而引起极大关注。

长期接触大量空气污染物会对健康造成多种危害。根据现有数据，世界卫生组织制定了空气质量指导值，并对其进行定期更新。以下内容总结了世界卫生组织采用的最新空气质量指导值<sup>29</sup>以及美国国家环境保护局采用的空气质量标准。

### 颗粒物 (PM)

颗粒物包括了化学性质和物理性质各不相同的多种物质。它们的基本特征是以浓缩相（液体或固体）存在，大小跨度几个数量级。PM<sub>10</sub>指的是直径小于等于10微米的颗粒。可吸入颗粒物指直径大于2.5微米但小于10微米的颗粒。PM<sub>2.5</sub>指直径小于等于2.5微米的颗粒。超细颗粒物直径小于0.1微米。较大颗粒物可以被呼吸道清除机制排除在外（如咳嗽），但较小的颗粒则会进入肺部深处，甚至由肺部进入血液。

细颗粒主要在燃烧过程产生，也会由大气中的气体排放物（如硫氧化物、氮氧化物和挥发性有机化合物）转化而成。因此PM<sub>2.5</sub>是由硫酸盐、硝酸盐、有机化合物与元素碳和元素金属（包括有毒重金属）组成的复杂混合物。这些颗粒会在大气中停留几天甚至几周，并随着大气飘上几百或上千公里。

颗粒物的影响波及面很广，它会影响呼吸系统和心血管系统。不管是发达国家还是发展中国家的儿童、成人及大量易感人群都会成为它的受害者。长期接触含有颗粒物的空气会增加健康风险，而且到目前为止还没有可靠证据表明颗粒物在某一水平线下不会对健康造成不利影响。

世界卫生组织关于颗粒物的指导值为：

PM<sub>2.5</sub>：年平均 10 μg/m<sup>3</sup>，24 小时平均 25 μg/m<sup>3</sup>

PM<sub>10</sub>：年平均 20 μg/m<sup>3</sup>，24 小时平均 50 μg/m<sup>3</sup>

短期（几小时或几天）接触大气中的颗粒物可能会引起早死、增加住院人数、增加心脏病疾病与肺部疾病的患病率，导致咳嗽恶化和不良下呼吸系统症状、减弱肺部功能、改变心律节奏，及对心脏的其他影响。对接触不同级别空气污染的人们进行的多年研究表明，空气中的PM<sub>2.5</sub>会提高整体死亡率以及心血管和呼吸道疾病的死亡率。<sup>30,31</sup>此外美国癌症学会研究的一项分析结果表明**细颗粒、硫酸盐浓度与肺癌死亡率息息相关**。<sup>32</sup>

关于局部影响的研究也进一步记录了车行道或其附近测量到的PM<sub>2.5</sub>浓度对健康的影响。这类研究包括了汽油车和柴油车在内的所有污染源，结果表明长期接触由路面机动车排放的PM<sub>2.5</sub>会对健康造成潜在的严重影响。比如，最近有研究发现年轻健康警察的血液里存在的**心脏危险因素与车辆内部检测到的PM<sub>2.5</sub>浓度有关**。<sup>33</sup>同样也有研究发现，在居民区或学校周围由机动车辆排放的微小颗粒成分也会对呼吸道造成不良影响，比如在主要车行道附近居住的儿童普遍患有哮喘。<sup>34,35,36</sup>



除了  $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  之外，最近超细颗粒物 (UF) 也引起了科学界与医疗界的极大关注。这类颗粒物的直径都小于 0.1 微米，且以数浓度计。虽然有大量证据表明超细颗粒物会对人类健康带来潜在危害，但现有的流行病学证据还不足以让世界卫生组织得出结论，证明该类疾病与超细颗粒物有关。目前世界卫生组织还没有就超细颗粒物的浓度提供指导值。

2010 年全球疾病负担研究 (GBD, 2010) 是迄今为止对全球大量主要疾病、损伤与健康风险因素的分布及原因进行的最大规模的研究。<sup>37</sup> 其研究结果显示户外空气污染，主要是  $PM_{2.5}$ ，每年会引起 320 多万人早亡，其中 120 多万例发生在中国。显而易见，空气污染是一个极其严重且非常普遍的问题，需要采取强有力的手段。

### 臭氧 ( $O_3$ )

近地面臭氧污染主要由大气中的挥发性有机化合物与氮氧化物在光和热的作用下反应生成。

臭氧对人类健康福祉的影响是有据可查的。<sup>38,39</sup> 臭氧可刺激呼吸系统，引起咳嗽、咽喉疼痛和胸部不适。它会降低肺部功能，导致深呼吸困难，而且会使呼吸加快变浅，进而限制人的正常活动。臭氧还会加重哮喘，加剧哮喘发作，增加就医需求和额外用药。动物的毒理学证据表明，反复接触臭氧，会引起肺内层发炎并受到损害，进而导致肺组织的永久性变形和不可逆转的肺功能减退。易受臭氧影响的人群包括儿童、老年人和呼吸道疾病患者（如哮喘患者）。因进行户外活动而大量接触臭氧的人群（如儿童及户外工作者）令人担忧，即使是短时间内接触地面臭氧。<sup>40</sup> 目前的研究表明，致命的臭氧浓度限值可能会低于现有的公共卫生标准，而且该类研究还在继续。根据不同个体对周围臭氧浓度的不同反应，世界卫生组织建议空气质量指导值设为：

**臭氧：日最大 8 小时平均值  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$**

地面臭氧的背景浓度会因时间和空间的变化而变化，平均水平可达  $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$  左右。这些会由臭氧前体物的人为排放和生物排放以及平流层臭氧向下侵入到低水平大气层引起，因此，自然因素可能会导致地面臭氧的背景浓度偶尔高于世界卫生组织的建议指导值。

### 二氧化氮 ( $NO_2$ )

动物毒理学研究有证据表明，长期接触高于目前环境浓度的二氧化氮会对健康造成不利影响。在对人类的研究中发现，即使二氧化氮的年平均浓度符合 2000 年世界卫生组织  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$  的指导值，人类健康还是会受到不利影响。此外，一些室内研究发现，浓度低于  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$  的二氧化氮也会对婴儿呼吸系统造成不良影响。以上研究结果都证明世界卫生组织应该降低二氧化氮的年平均指导值。但是，在燃烧产生的空气污染中，二氧化氮是主要成分，而且与其他主要和次要的燃烧产物紧密相关。目前，流行病学研究还不能说

明二氧化氮本身及其相关污染物会对人体健康造成多大的不利影响，因此现有的科学文献还没有足够的证据来促使世界卫生组织改变 2000 年提出的二氧化氮浓度为  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$  的年均指导值。

短期的实验性人类毒理学研究显示，浓度超过  $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$  的二氧化氮对人类健康产生急性危害，甚至有综合分析表明，二氧化氮浓度超过  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$  就会对人体造成急性危害。现有的科学文献还没有足够的证据促使世界卫生组织改变 2000 年提出的每小时  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$  的浓度指导值。

世界卫生组织的二氧化氮指导值仍然保持在以下水平：

NO<sub>2</sub> 浓度： 年均  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ；  
NO<sub>2</sub> 浓度： 1 小时平均  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$  。

加州空气资源局批准了员工建议，将目前 1 小时平均  $0.25 \text{ ppm}$  的二氧化氮平均值降到了  $0.18 \text{ ppm}$ ，且不得超过该水平限值，同时还公布了新的年平均标准：不得超过  $0.030 \text{ ppm}$ 。

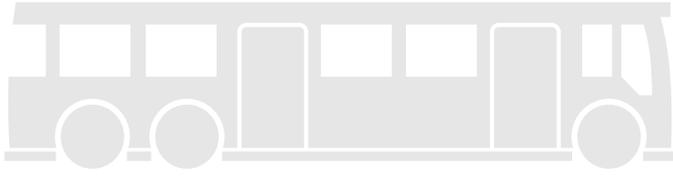
更多的研究“足以推断出”短期接触二氧化氮会对呼吸系统造成不良影响之间存在“可能的因果关系”。美国国家环境保护局危险评估草案提到，暴露在  $0.2 \text{ ppm}$  到  $0.3 \text{ ppm}$  之间的二氧化氮中 30 分钟，哮喘患者的呼吸道就会受到刺激。肺功能处在青春发育期的儿童和 65 岁以上的老年人都是二氧化氮的易感人群。该危险评估也将需要长期驾驶的个列入高危人群，因为车辆内部的二氧化氮浓度通常相当于室外的两到三倍。

## 二氧化硫 (SO<sub>2</sub>)

研究表明，哮喘患者接触二氧化硫 10 分钟之后，就会感觉到肺功能与呼吸道症状的变化。基于此，世界卫生组织建议平均每 10 分钟的二氧化硫浓度不得超过  $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。因为二氧化硫的峰值取决于当地的气体来源与气象条件，所以没有单一因素适用于该浓度来评估某个时间段（如 1 小时）的相应指导值。

目前观察到的不良影响到底是由长期接触二氧化硫引起的，还是由长期接触超细颗粒物或其他相关物质导致的，现在还尚无定论。比如，德国<sup>41</sup>与荷兰<sup>42</sup>的二氧化硫浓度在过去 10 年大幅降低，虽然死亡率也同时降低，但二氧化硫与死亡率之间被判断为非因果关系，死亡率的降低被归因于相应时间段内另一种污染物的减少（颗粒物）。考虑到：（1）目前仍然不能确定二氧化硫会导致死亡；（2）要想将二氧化硫浓度降到不产生任何影响的浓度非常困难；（3）需要提供的保护水平要高于世界卫生组织在 2000 年公布的指导值，并且假设减少二氧化硫浓度可以减少致命污染物和相关污染物，这就为调整二氧化硫在 24 小时内的平均浓度标准提供了依据，以下是世界卫生组织建议的谨慎预防指导值：





**二氧化硫：24 小时平均浓度为 20  $\mu\text{g}/\text{m}^3$   
10 分钟的平均浓度为 500  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ （未改变）**

世界卫生组织认为没有必要提出年均指导值，因为只要符合 24 小时内的平均水平，就能保证年度平均值保持在低水平状态。

### 一氧化碳 (CO)

一氧化碳——含碳燃料不完全燃烧时产生的一种无味、肉眼看不到气体，也严重威胁着人类的健康。胎儿及患有心脏疾病的人群是高危群体。关于人类和动物的许多研究已经证明，心脏衰弱的人血液含有过量一氧化碳时会有额外危险。临床健康研究已经表明，暴露在较高一氧化碳环境下会相应增加心绞痛患者的发病频率。<sup>43</sup>最近的一些流行病学研究发现一氧化碳与死亡率和发病率增加有关。<sup>44</sup>

健康人群也会受其影响，但只有在较高浓度水平下才发生。接触高浓度一氧化碳会损害视觉、工作能力、手灵活性；学习能力以及在复杂任务中的表现。

### 有毒空气污染物

接触空气中有毒物质会增加癌症和其它非癌症健康影响的风险。机动车尾气排放是毒性空气污染物的主要来源。据 1999 年美国国家空气有毒物质评估 (NATA)，44% 的户外有毒排放物来自于机动车；定量评估的 133 种污染物所增加的患癌风险有将近 50% 可归因于机动车尾气排放。苯是所有的评估污染物中增加癌症风险的最大元凶。1999 年，大约 68% 的苯排放量来源于机动车。

1999 年 NATA 检测结果显示，几乎整个美国的人口都暴露于空气有毒物质的平均水平，这些有毒物质会对呼吸系统造成非致癌的不良影响。<sup>45</sup>由室外有毒物质导致的潜在非致癌危险有 74% 归因于机动车。值得注意的是，NATA 的非致癌危险评估不包括与颗粒物相关的不良健康影响。

## b) 其他环境影响

空气中的臭氧和  $\text{PM}_{2.5}$  会对人类的很多公共利益造成影响，比如： $\text{PM}_{2.5}$  会影响能见度和材料性质，而臭氧会对植物造成影响，其中包括树木、农作物和城市观赏植物。

### 能见度

能见度可以理解为大气的透光度。能见度的降低体现在两个主要方面：局部能见度降低和区域性霾。<sup>46</sup>局部能见度降低由远高于地势上空的复杂局部气象条件引起，主要以局

部烟团、变色带或变色层的形式出现。另外，局部能见度降低也表现为城市霾。城市霾主要是由市区多个污染源造成，通常不只是由某一个附近污染源或远距离迁移造成的。第二种类型的能见度降低是区域性霾，通常来自于多个污染源，并分散在广阔的地理区域。区域性霾可以影响大片区域甚至整个国家的能见度。<sup>47,48</sup>

### 酸沉降

氮氧化物和二氧化硫在大气中与水、氧气和氧化剂发生反应就会形成各种酸性化合物，该类酸性化合物以降水或酸性颗粒沉降的形式落到地球上，就产生了众所周知的酸沉降或酸雨。它会损害高海拔地区的树木，在极端情况下甚至会使湖泊和溪流变成酸性，不再适合水生生物的正常生长。此外，酸沉降会加速建筑材料和油漆老化，其中包括很多珍贵的文化遗产，比如建筑物、雕像和雕塑等。

研究发现，氮氧化物也会造成海洋酸化，对气候变化产生有害影响。<sup>49</sup> 所有氮氧化物排放中约有三分之一最终会走向海洋。这些排放对某些脆弱地区造成了强烈的酸化影响，对某些地区的影响甚至相当于二氧化碳影响的 10% 到 50%。受灾最严重的地区很多都靠近污染物排放点，尤其是沿海水域及其周边地区。

### 富营养化

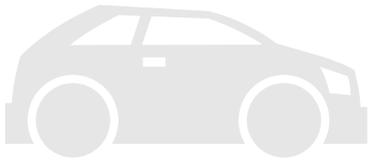
富营养化是指有机物，特别是藻类，在水体中的加速生长。氮沉降会引起水域富营养化，特别是在氮的大气沉降占总氮负荷很大一部分的水生系统中。这种加速生长会导致各种不良生态影响和经济影响，包括藻类大量繁殖、阻挡光线渗透导致水下植物枯死、以及有毒浮游生物的大量繁殖。藻类和浮游生物也可以降低溶氧水平，对鱼类和贝类造成不利影响。近几十年来，人类活动大大加快了富营养化影响，如氮、磷造成藻类的过度生长，导致水质退化，供人类使用的淡水和河口资源质量也相应降低。<sup>50</sup>

严重而持久的富营养化往往直接影响人类活动。例如，由溶氧降低和毒素骤增引起的鱼类死亡和赤潮会直接损害一个国家的渔业资源。低溶氧导致的有害气体和赤潮漂浮会影响美观，进而导致旅游人数下降。聚集在食用鱼和贝类中的赤潮毒素会增加对人类健康的威胁；进入空气中的毒素会引起呼吸问题。

## c) 全球关注：气候变化

在过去一个世纪，人类产生的温室气体（包括二氧化碳（CO<sub>2</sub>）、甲烷（CH<sub>4</sub>）和一氧化二氮（N<sub>2</sub>O））加速了全球变暖，这已是不争的科学事实。政府间气候变化专门委员会（IPCC）表示，“全球气候变暖已经毋庸置疑，全球气温和海洋温度的升高、冰雪大面





积融化，和全球海平面的不断上升都足以证明这一点。<sup>51</sup> 进入 20 世纪以来，观察到的全球平均气温上升很可能都是由人为排放温室气体浓度增加引起的。”世界领先的科学机构有 90% 的把握得出结论，温室气体排放会造成气候变化。除了以上提到的三种温室气体，黑碳作为颗粒物的组成部分也对气候变化产生显著影响。

### 黑碳 (Black Carbon)

黑碳是不完全燃烧的产物，也被称为烟灰，其中包括未完全燃烧的微小固体颗粒有机物。<sup>52</sup> 黑碳是一种强效“加热器”，不管是悬浮在大气中还是沉积在冰雪表面，都会对全球气候产生影响。事实上，据一项研究估计，一定量的黑碳对空气的暖化作用比等量二氧化碳高出 360,000 到 840,000 倍。<sup>53</sup> 虽然黑碳的定量结果不一，但近期大量关于黑碳的气候影响研究引起了全球的极大关注。<sup>54</sup> 从气候角度来看，黑碳最有害的特性是它的颜色深、相应的反射率也较低。正因为颜色深，黑碳才会吸收阳光热量。

前不久的一项研究<sup>55</sup> 发现，黑碳暖化大气的速度是科学家估计的两倍。<sup>56</sup> 最新的、认识更加深刻的观点提出黑碳应排在第二位，紧跟在全球变暖第一元凶二氧化碳 ( $1.66 \text{ W/m}^2$ ) 之后。黑碳对气候变暖的影响大致相当于的 2007 年 IPCC 估计的两倍。

## d) 硫对先进车辆污染控制技术的影响

尽管硫在许多方面对健康和环境造成不利影响，但就汽车尾气排放来说，最值得关注的是硫对污染控制技术的影响。引入低硫车用燃料主要原因是为使用排放控制装置，显著减少汽车尾气排放，充分实现其减排潜力。一些国家已经使用并不断改进了该类技术，进一步控制汽车尾气排放。然而，这些技术通常需要特定的燃料品质，通常包括低硫含量要求。

### i. 汽油中的硫

硫是原油的天然组成成分。成品汽油质量取决于原油的来源和炼制过程中的硫去除量。

现代汽油发动机采用计算机控制的进气口燃料喷射，通过氧传感器的反馈控制，精确测量燃料到发动机的传送量和传输时间。气缸内的混合控制与高能点火的应用使得燃料几乎完全燃烧。三元催化剂减少了超过 90% 的一氧化碳、碳氢化合物和氮氧化物。快速热车设计最大化地减少了冷启动排放。车载诊断系统 (OBD) 可以检测排放系统的性能并识别组件故障，其耐久性超过 16 万公里，维护量极小，这些现在都很常见。

早在人们充分了解硫对催化剂性能的影响之前，三元催化转换器就已在美国和日本汽车上应用了。现在我们知道汽油中的硫会降低催化剂的效率，并对高温尾气氧传感器

带来负面影响。硫含量高的汽油阻碍了采用脱硝催化剂的新型稀薄燃烧技术的引入，而低硫汽油则可以使未来新型的传统汽车技术充分发挥优势。如果硫含量得到降低，装有催化剂的现有车辆将大大提高排放性能。

对催化剂的实验室研究证明，在各种燃气比的条件下，硫含量越高效率则越低。若以百分数计算，其对低排放车辆比传统车辆的影响更大。研究已显示硫会对高温尾气氧气传感器造成负面影响；硫还会拖慢“稀转浓”的转变过程，从而导致尾气排放量事与愿违地富集起来；此外硫还会影响先进车载诊断系统（OBD）的耐久性。

EPEFE 的研究揭示出汽油硫含量下降与尾气排放量下降之间的关系。研究发现，降低燃料中硫含量可以减少烃类、一氧化碳和氮氧化物的排放量（当硫含量从 382 ppm 降低到 18 ppm 时，排放量降低约 8-10%）。<sup>57</sup> 研究结果还确认了燃料中的硫在已热模式下对催化剂效率产生最大影响。而有毒物质、苯和 C3-C12 烷基的排放也随着烃类物质的排放降低而降低，最明显的是甲烷和乙烷（18%）。

对那些不使用催化转换器的汽油汽车来说，降低硫含量不会对一氧化碳、烃类和氮氧化物等主要污染物的排放造成影响。尽管二氧化硫的排放量和燃料中的硫含量成正比，汽油汽车依然不是二氧化硫的主要排放者。但是，由于二氧化硫可在大气中转化为硫酸盐，因此二氧化硫的排放仍会提升大气中颗粒物的水平（PM<sub>10</sub> 和 PM<sub>2.5</sub>）——这些都是中国城市越来越担忧的问题。<sup>58</sup>

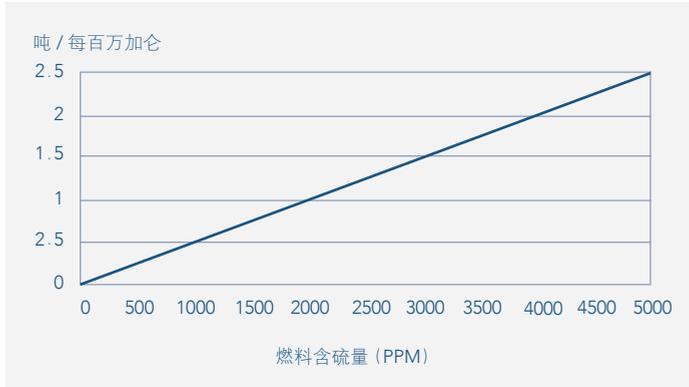
当汽车的设计必须符合更高的标准时，降低燃料硫含量的好处也会更多。日益严格的排放标准要求催化剂必须非常高效，且能够保持长久效力。欧洲和美国最近出台的法规则要求预热阶段的催化剂必须能够控制 98% 以上的烃类，直到车辆报废（欧洲 10 万公里，美国 10 万英里以上）。

**基于先进的汽油汽车排放控制经验，我们得出结论：符合欧 5 和欧 6 排放标准的汽车可以在使用最高含硫量为 50 ppm 的汽油情况下保持良好性能。如果使用最高 10 ppm 的汽油，性能将更好。**

## ii. 柴油中的硫

柴油中的硫含量和尾气颗粒物之间的关系基本为线性。图 1 是根据美国国家环境保护局提供的数据计算得出的两者间关系。（该图显示的仅为柴油发动机排出的与硫相关的颗粒，而非全部颗粒）。此外，排出的二氧化硫最终也将间接导致大气中硫酸盐颗粒的上升。<sup>59</sup>

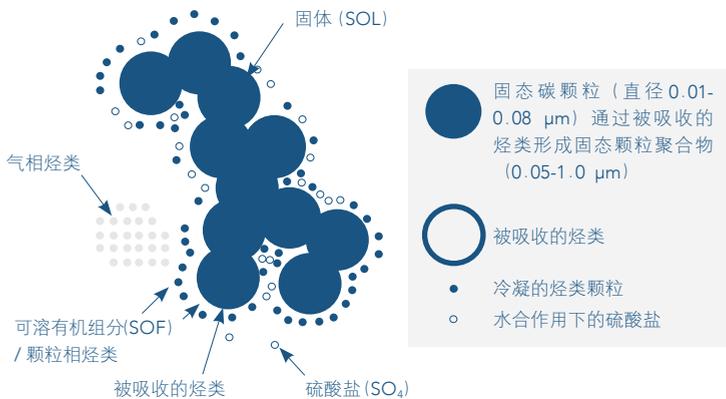




**图 1 柴油中直接排出的与硫相关的颗粒物吨数**

注：ppm = 百万分率。本图显示的仅为与硫相关的颗粒物，而非柴油发动机排放出的所有颗粒物。  
信息来源：根据美国国家环境保护局提供的数据计算得出。

对于没有排放控制装置的柴油车，燃料硫含量与二氧化硫和颗粒物排放量直接相关。图 2 表示的是燃料硫含量和颗粒物质量之间的关系；硫会附着在碳核的表面上，因而碳核与燃料中的硫成正比关系。



**图 2 一个典型柴油粒子的颗粒情况**

信息来源：美国健康影响研究所 (HEI)



二氧化硫的排放量也与燃料中的硫含量成正比关系。尾气中氧含量较高的柴油车上，燃烧生成的二氧化硫中的一部分会氧化生成三氧化硫，后者溶于水蒸气后形成硫酸 ( $H_2SO_4$ ) 蒸汽。硫酸蒸汽会在柴油尾气中形成非常小的颗粒（超细颗粒），由于可以渗入肺部深处，因此该颗粒非常有害。尽管硫酸盐颗粒只占总颗粒体积或质量的很小一部分，但它们的颗粒数量是巨大的。

美国国家环境保护局指出，柴油中约 2% 的硫会直接成为排放颗粒物。此外，二氧化硫的排放可以导致次级颗粒形成——在大气中形成的颗粒。美国国家环境保护局的模型预测城区排放的二氧化硫 12% 会在大气中转化成硫酸盐颗粒。由于城区聚集了大量二氧化硫向硫酸盐转化所需的催化剂，因而也是二氧化硫减排的最大受益者。鉴于城区的汽车保有量之大，即便不实施更多的污染控制，只要降低燃料硫含量就能对城区的初级和次级颗粒生成带来巨大影响。

#### 硫对柴油氧化催化剂造成的影响

轻型柴油发动机（汽车总重小于 3.5 吨，通常要求柴油氧化催化剂（DOC）符合欧 II 或更严格的汽车排放标准）。氧化催化剂可降低烃类、一氧化碳和颗粒物排放量，尤其可以通过氧化大量可溶有机馏分降低约 30% 的总颗粒质量。催化剂中发生反应的硫可降低催化剂表面上的活性位点，进而降低催化剂的效果。

然而 DOC 的效果会因柴油中的硫而大大折损，因此 DOC 只应在硫含量等于或低于 500 ppm 时使用。

#### 硫对柴油颗粒物捕集器造成的影响

在使用含硫量几乎为零的柴油时，柴油颗粒物捕集器（DPFs）可显示出高达 95% 以上的颗粒过滤效率。就颗粒数量而言，通过 DPFs 排放的颗粒物数量能够与汽油发动机排放的颗粒物数量相当，甚至更低，但是捕集器需要及时清洁，保障车辆性能与捕集器的效率，最好不要人工操作。

连续再生柴油颗粒物捕集器（CR-DPF）和催化柴油颗粒物捕集器（CDPF）是通过被动再生而非人工介入控制颗粒量的两大实例。在使用硫含量为 3 ppm 的燃料时，CR-DPF 和 CDPF 可实现 95% 的颗粒排放控制率。<sup>60</sup> 而当含量达到 150 ppm 时，控制率为零，并且颗粒物的排放是使用含 350 ppm 硫的燃料的排放基准量的两倍。颗粒质量的增加主要来自于与硫酸结合的水。硫含量高同样会导致烟尘排放量增加，但即便使用 350 ppm 的含硫燃料，DPFs 仍可控制约 50% 的非硫酸盐颗粒。当硫含量为 50 ppm 时，先进的 DPFs 运行良好——减少 75% 以上的  $PM_{2.5}$  和更小的颗粒。当然该效果无法媲美含硫量为 10 ppm 的柴油。只要换成含硫量接近零的柴油，这两个系统便能恢复原本的颗粒控制效率——95% 以上，然而由于催化剂上积累的硫酸盐，该恢复过程需要一定时间。

正如印度能源与资源研究所 (TERI) 在孟买的关于颗粒物捕集器和低硫燃料的研究中所指出, “在搭载了超低硫柴油发动机的 BS-II (接近欧 II) 公交车上进行的试验表明, 连续再生技术 (CRTM) 对降低颗粒物排放非常有效。”<sup>61</sup> 然而需要重点指出的是 CRT 对柴油中的硫含量非常敏感。据其制造商 Johnson Matthey 所述, CRT 只能在搭载硫含量低于 50 ppm 的现代柴油发动机上有效工作。

硫还会提高捕集器再生的所需温度, 这意味着为了再生捕集器需要更多的燃料。当硫含量从 3 ppm 升至 30 ppm 时, 再生所需的尾气温度就会上升约 25°C。CDPF 的工作需要温度不断上升, 但当硫含量升至 30 ppm 以上时, 所需温度则将维持在一定水平; 而 CR-DPF 则需要温度持续上升。

### 硫对选择性催化还原 (SCR) 技术和氮氧化物吸收器的影响

SCR 逐渐成为氮氧化物减排的龙头技术。SCR 通过在尾气催化前对其注入一种还原剂来实现富氧尾气中的氮氧化物高转化率。<sup>62</sup> 硫不会像其他先进控制技术中一样直接降低 SCR 系统的转化效率, 但是对于排放的影响是多渠道的。燃料中的硫会增加下游氧化催化剂中的颗粒排放量, 而且在基于尿素的 SCR 系统中的硫经过反应同样会形成硫酸氢铵 (一种呼吸道刺激物)。

氮氧化物吸收器也被称为氮氧化物储存催化剂或氮氧化物捕捉器。氮氧化物吸收器仍处于开发阶段; 目前已展示出高达 95% 的氮氧化物向氮气的转化率, 其过程需消耗 1.5% 的燃料, 然而长时间耐用问题仍未解决。此外由于仍未出现重大技术突破, 人们普遍认为该系统只能用于硫含量接近于零的燃料。

### 硫对发动机耐久性的影响

硫含量还会影响发动机的磨损和沉淀, 但其重要性会根据操作条件发生较大变化。高硫含量在低温或非连续运行时会对柴油发动机造成较大问题。在上述条件下会有更多冷凝水与硫化物合成酸, 进而造成发动机的腐蚀和过度磨损。总的来说, 硫含量越低, 发动机的磨损就越少。

柴油发动机拥有天然的润滑特性, 该特点来自于较重的烃类和有机硫等化合物。柴油泵 (特别是轻型汽车中的旋转喷射泵) 不具备外部润滑系统, 它只依赖柴油本身的润滑性来确保运行。去除硫和芳香烃的精制工艺也有可能降低具备天然润滑性的成分。除了泵的过度磨损和某些场合下的发动机故障之外, 喷射系统中的某些劣化方式也会影响燃烧过程, 进而影响排放。对于含硫量极低的燃料可以使用添加剂来提高润滑性, 而且应该用于任何含硫量等于或小于 50 ppm 的燃料。

**基于先进柴油汽车排放控制的经验, 我们得出结论: 同时符合欧洲 5 和欧洲 6 排放标准的轻型和重型汽车可以在使用最高含硫量为 50 ppm 的柴油的情况下保持良好的性能。如果使用最高 10 ppm 的柴油, 性能将更好。**

# 中国汽车尾气排放标准路线图

现在中国环境保护部(环保部)正全力解决汽车尾气排放标准路线图这一难题。一方面,环保部面临着最严重的空气污染问题。这一问题与人体健康息息相关。颗粒物和臭氧破坏均冲到了历史新高,导致每年有超过100万人因此早亡。与此同时,中国的汽车制造业规模跻身世界第一,成为经济增长的重要支柱。因此,近期的汽车排放标准政策决定将对中国的环境保护和经济发展产生重要影响。

做出这样一个决策的背景是中国正在面临着一个困境,需要达到“十二五”规划中的氮氧化物减排目标。但在2010至2012年间,来自于交通方面的氮氧化物非但没有降低,反而增加了7%。

## A. 分析

本部分将专注于从2015年至2021年七年间所有新型轿车、货车和客车(按十年的使用寿命计算)排放的PM<sub>2.5</sub>、氮氧化物和黑碳。就新的车辆标准而言,表7为研究的五种方案汇总:

表7 潜在的排放情景

	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
国 IV	国 IV	国 IV	国 IV	国 IV	国 IV	国 IV	国 IV
国 IV/V	国 IV	国 IV	国 IV	国 V	国 V	国 V	国 V
国 IV/V/VI	国 IV	国 IV	国 IV	国 V	国 V	国 V	国 VI
国 IV/VI	国 IV	国 IV	国 IV	国 VI	国 VI	国 VI	国 VI
国 V/VI	国 V	国 V	国 V	国 VI	国 VI	国 VI	国 VI

“国 IV”方案假定在2015至2021年间,当前国 IV 标准仍得以维持,没有进一步的收紧。“国 IV/V”方案假定在2018年推出国 V 前,国 IV 仍然有效。此时的假定条件是中国推迟推行国 V,直至全国的燃料含硫量标准实现10 ppm。“国 IV/V/VI”与国 V 一样,只不过在2018年国 V 生效三年后,国 VI<sup>63</sup>在全国强制执行。

“国 IV/VI”这一方案表示完全跳过国 V。一旦2017年底在全国执行10 ppm的含硫量标准,燃料质量将不再是问题,国 VI 将生效。最后一个方案的“国 V/VI”是最强硬的。该方案的先决条件是国 V 技术能够在2014年全国范围内强制实行的50 ppm的含硫量标准下高效适用。

每一个排放方案中，车型年份的新车销量及年度行驶里程保持恒定不变。所有方案中，车辆使用年限均不超过 10 年。

## B. 结果

每一个方案中，七年间所售新车的累计排放量<sup>64</sup>均不同，见表 8。

表 8 累计排放量：2015-2021 年新车排放量（公吨）

	国 IV	国 V	国 IV/V/VI	国 IV/VI	国 V/VI
PM <sub>2.5</sub>	1,092,579	757,641	687,967	568,630	333,125
氮氧化物	24,752,689	20,688,152	18,781,152	16,338,779	13,544,023
黑碳	481,632	330,770	282,144	210,685	100,853

若在现行的国 IV 基础上没有任何收紧，新车在其使用寿命中（2015-2021 年）预计将排放超过 100 万吨的 PM<sub>2.5</sub>、2500 万吨的氮氧化物以及超过 48 万吨的黑碳。若国 V 标准将于 2018 年实行，那么 PM<sub>2.5</sub>、氮氧化物、黑碳的排放量可能分别降至约 75 万吨、2000 万吨及 33 万吨。若国 VI 将于 2021 年推出，这些污染物的排放量可能分别降至大约 68.7 万吨、1880 万吨和 28 万吨。如果国 VI 标准直接跳过国 V 于 2018 年实施而非 2021 年，这些新车排放的 PM<sub>2.5</sub>、氮氧化物和和黑碳总量将降为 57 万吨、1600 万吨和 21 万吨左右。最后，考虑到最强硬的方案，即在 2015 年推行国 V 并在 2018 年推行国 VI，PM<sub>2.5</sub>、氮氧化物和黑碳的总排放量可能分别降至大约 33.3 万吨、1350 万吨和 10 万吨。

表 9 和表 10 以中国将继续维持国 IV 标准为基本情景，用于比对其他方案下七年可能实现的总体减排量，分别为总体减排量的绝对量和百分比汇总表。

表 9 每个方案与基础情景对比的减排量（公吨）

	国 V	国 IV/V/VI	国 IV/VI	国 V/VI
PM <sub>2.5</sub>	334,938	404,612	523,949	759,454
氮氧化物	4,064,537	5,971,537	8,413,911	11,208,666
黑碳	150,862	199,488	270,947	380,779

表 10 每个方案与基础情景对比的减排量 (%)

	国 V	国 IV/V/VI	国 IV/VI	国 V/VI
PM <sub>2.5</sub>	30.7%	37.0%	48.0%	69.5%
氮氧化物	16.4%	24.1%	34.0%	45.3%
黑碳	31.3%	41.4%	56.3%	79.1%

与基础情景对比，若在 2015 年实行国 V 并在 2018 年实行国 VI，那么 PM<sub>2.5</sub> 的排放量将降低 70%，黑碳的排放量将降低 80%；此外，与基础情景对比，氮氧化物的排放量将减少 1100 多万吨，降低幅度超过 45%。

相反，若维持国 IV 标准，2018 年之后仅实施国 V 标准，那么 PM<sub>2.5</sub> 的排放量降低幅度仅为 30%、碳氧化物的减排量仅为 4 百万吨。若在 2021 年实施国 VI 标准，PM<sub>2.5</sub> 和黑碳的排放量降低幅度将分别升至 37% 和 41%，同时氮氧化物的减排量将达到将近 600 万吨。

考虑到在燃料含硫量最大值为 50 ppm 时实施国 V 的技术可行性，完全跳过国 V 并直接在 2018 年实施国 VI 标准似乎最具吸引力。与基础情景相比，这一方案能降低接近 50% 的 PM<sub>2.5</sub>，超过 55% 的黑碳，并减少将近 850 万吨的氮氧化物。

换个方式来看，与最严格的情景相比，每一个方案都会排放更多的 PM<sub>2.5</sub>、氮氧化物和黑碳。例如，仅在 2018 年实施国 V，那么 PM<sub>2.5</sub>、黑碳和氮氧化物的超标排放量分别达到 75 万吨、33 万吨和 2000 多万吨。

表 11 与最严的情景相比超出的排放量 (国 v/vi) (公吨)

	国 IV	国 V	国 IV/V/VI	国 IV/VI
PM <sub>2.5</sub>	1,076,779	741,841	672,167	552,830
氮氧化物	24,752,679	20,688,142	18,781,142	16,338,769
黑碳	481,632	330,770	282,144	210,685



表 12 与最严的情景相比超出的排放量（国 V/VI）（%）

	国 IV	国 V	国 IV/V/VI	国 IV/VI
PM <sub>2.5</sub>	228%	127%	107%	71%
氮氧化物	83%	53%	39%	21%
黑碳	378%	228%	180%	109%

若跳过国 V 直接在 2018 年实施国 VI，那么颗粒物的超标排放量将降至 55 万吨、黑碳和氮氧化物的超标排放量将分别降至 21 万吨和 1600 万吨。这些数据仍然很大，但是大大低于其他方案。如表 13 和表 14 所示，其他方案会产生大量的超标排放量。

表 13 与中等情景相比超出的排放量（国 IV/VI）（公吨）

	国 IV	国 V	国 IV/V/VI
PM <sub>2.5</sub>	523,949	189,011	119,338
氮氧化物	8,413,911	4,349,374	2,442,374
黑碳	270,947	120,085	71,459

表 14 与中等情景相比超出的排放量（国 IV/VI）（%）

	国 IV	国 V	国 IV/V/VI
PM <sub>2.5</sub>	92%	33%	21%
氮氧化物	51%	27%	15%
黑碳	129%	57%	34%

通过本部分的分析得出——如果中国能够更快地实施国 VI 标准，对环境和国民健康将更有益处。考虑到燃料含硫量水平在 2017 年底要达到 10 ppm 的限值，没有任何理由将国 VI 排放标准的强制实施推迟至 2018 年之后。若在实现燃料含硫量达到 50 ppm 的限值之后，2015 年在全国范围内实施国 V 标准，额外的收益则更大。

---

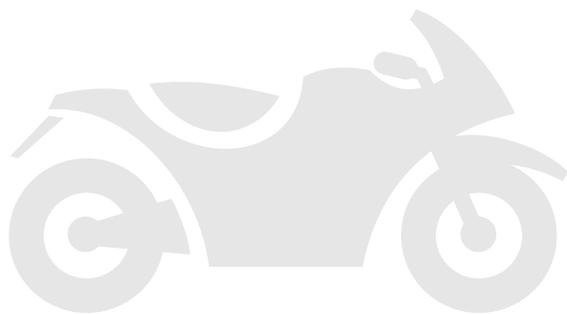
## 结语

---

全世界控制车辆尾气污染有长达 50 年的历史，最重要的教训之一就是治理车辆和燃料问题须同步进行。若想要实现车辆排放减少的重大突破，那么车辆和燃料的升级必须同步施行。仅仅针对车辆的计划注定是失败的，同样仅仅是旨在提升燃料质量的计划亦不会成功。

第二个重要的教训是同时专注于解决车辆和燃料问题的计划则会获得成功。中国正在按照欧盟的体系来解决车辆和燃料问题。欧盟体系已经绘制了清晰的路线图。这一路线图仔细地将车辆尾气排放标准和相关技术、优化排放绩效所需的恰当的燃料参数和规格联系起来。

鉴于中国正面临的严重空气污染问题，国务院也已经规划了清晰的燃料路线图，中国必须考虑以更快的速度实施新的车辆标准。



1. “汽车/油品空气质量改善研究项目，最终报告”1997年1月。
2. 该项目分两阶段：第一阶段叫做JCAP I（日本空气清洁项目），始于1997财年，终于2001财年，第二阶段叫做JCAP II，从2002财年开始一直到2007财年，为JCAP I阶段的研究提供进一步发展。
3. 欧洲5号排放标准自2010年起施行；欧洲6号标准将于2014/2015年施行。
4. 中国将机动车尾气控制项目同欧盟（EU）或欧洲经济委员会（ECE）的要求相结合，针对此的一系列讨论将会将燃油参数同符合欧盟标准的各项技术关联起来。
5. 欧盟于2010年起实施欧洲5号轻型柴油汽车排放标准；同时欧洲6号标准将于2015年执行。5号和6号标准都会强制所有轻型柴油汽车使用颗粒物捕集器。
6. 欧盟委员会对重型机车实施欧洲6号排放标准，同样也强制所有重型柴油车辆于2014年开始使用颗粒物捕集器。
7. 这里显示了全国2005年RFG调查数据平均值。虽然USEPA对新配方汽油中的硫、夏季蒸汽压（RVP）、芳香烃和苯都有限制，但是否遵从这一限制则取决于一个基本模型，其挥发性有机化合物、有毒和氮氧化合物的排放是相对1990年的基本汽油估算得来。
8. 此处是2005年基于传统汽油调查数据的全国平均值。USEPA对苯、硫的含量，以及夏季蒸汽压（RVP）都做了限制，但是并未对其他参数作出限制。个体生产商或进口商遵照传统汽油标准，其生产或进口的传统汽油燃烧所排放的挥发性有机化合物、一氧化碳、氮氧化物以及有毒空气污染物都不超过1990年所生产或进口的汽油的水平。若生产商或进口商无法获得足够的1990年的数据，那么就必须参照1990年美国标准汽油质量的“法定基准”。
9. 炼油商以及燃油进口商可以选择遵照最大（平）限度，或者是结合上限的平均限度。炼油商和进口商也可以通过预测模型演示来证明根据自己的油品得出的排放量与遵照最大限度或者结合上限的平均限度所得出的排放量相当。
10. 适用于实行欧洲4号标准、欧洲5号重型机车标准、USEPA 2级标准或重型公路用车2007/2010年标准或者其他执行相当的排放标准的市场。
11. 美国《清洁空气法》（CAA）中关于新配方汽油的条款将新配方汽油中的芳香烃含量限制在总体积的25%以内。
12. CAA将新配方汽油中的苯含量限制在总体积的1%以内；移动源空气有毒物的最终规定于2011年1月1日开始进一步将所有汽油（新配方汽油和传统汽油）的苯含量限制在年平均0.62%以内。虽然0.62%限度的要求可以通过取平均值、银行或者交易项目等途径满足，但从2012年7月开始，进口商或炼油商生产或进口的汽油中实际年平均含量不得超过总体积的1.3%。
13. 从2006年起生效，从所有汽油类型的含硫量来说，炼油厂年平均所炼油中含硫量上限是30 ppm，而所有生产汽油中含硫量的上限是80 ppm。
14. 2011年12月31日起施行。
15. 美国清洁空气法规定，在高臭氧季节（6月1日到9月15日）出售的任何汽油蒸汽压均不得超过62.1千帕（90磅/平方英尺）。对新配方汽油的挥发性要求更加严格（夏季雷德蒸汽压），且因地区和月份不同而各异，介于48.3千帕到62.1千帕之间（70-90磅/平方英尺）。美国国家环境保护局允许汽油在1.0磅/平方英尺雷德蒸汽压下含有9-10体积百分比的乙醇。

16. 美国清洁空气法规定，在高臭氧季节（6月1日到9月15日）出售的任何汽油蒸汽压均不得超过62.1千帕（90磅/平方英尺）。对新配方汽油的挥发性要求更加严格（夏季雷德蒸汽压），且因地区和月份不同而各异，介于48.3千帕到62.1千帕之间（70-90磅/平方英尺）。美国国家环境保护局允许汽油在1.0磅/平方英尺雷德蒸汽压下含有9-10体积百分比的乙醇。
17. 当生产商使用CaRFG3预测模型的挥发性排放时，47.6千帕（6.9磅/平方英尺）蒸汽压适用。汽油蒸汽压不得超过上限49.6千帕（7.2磅/平方英尺），否则将采用48.2千帕的限值（7.00磅/平方英尺）。
18. 美国清洁空气法要求新配方汽油不得含有铅和锰等重金属。
19. 美国清洁空气法要求新配方汽油不得含有铅和锰等重金属。
20. 1.8%的冬季下限在南海岸地区和因皮里尔县的适用时间是11月1日至2月29日。
21. 适用于要求欧IV、欧V重型柴油车、USEPA二级标准、2007/2010年高速公路重型柴油车或同等排放标准的市场。
22. 加州柴油质量规格在符合芳香烃限制方面比较灵活。生产商或进口商既可以生产符合指定同等限值的燃料，也可以证实某种燃料配方的尾气排放减少量等同于基准燃料；与基准燃料相比，“低排放”燃料的十六烷值较高、含硫量明显较低，但芳香烃、多环芳烃和氮含量更高。
23. 加州柴油质量规格在符合芳香烃限制方面比较灵活。生产商或进口商既可以生产符合指定同等限值的燃料，也可以证实某种燃料配方的尾气排放减少量等同于基准燃料；与基准燃料相比，“低排放”燃料的十六烷值较高、含硫量明显较低，但芳香烃、多环芳烃和氮含量更高。
24. USEPA要求十六烷值不得低于40或芳香烃含量不得高于35%。由美国国家标准与技术研究院（NIST）规定的高级柴油，十六烷值不得低于47。美国各州可自行决定是否采用NIST的柴油质量要求。
25. 当环境温度低于-30℃时，可放宽至800 kg/m<sup>3</sup>，在特定情景条件下也可接受815 kg/m<sup>3</sup>。
26. 当温度低于-30℃时，可放宽至1.5 mm<sup>2</sup>/s，低于-40℃时，可放宽至1.3 mm<sup>2</sup>/s。
27. [http://www.osha-slc.gov/dts/osta/otm/otm\\_iv/otm\\_iv\\_2.html](http://www.osha-slc.gov/dts/osta/otm/otm_iv/otm_iv_2.html)
28. 百万分数，测量燃料含硫量常用单位。可大致与百分数相互换算，例如10000ppm意味着含硫量为1%。
29. “世界卫生组织关于颗粒物、臭氧、二氧化氮和二氧化硫的空气质量准则风险评估概要（2005年全球更新版）”。
30. Pope CA, III; Thun, MJ; Namboodiri, MM; Docery, DW; Evans, JS; Speizer, FE; Heath, CW 1995年，“在美国成年人中用空气污染颗粒物预测死亡率的前瞻性研究”，《美国呼吸道与危重症监护医学杂志》151：669-674。
31. Dockery, DW; Pope, CA III; Xu, X 等，1993年，“美国六大城市中空气污染与死亡率之间的关联”，《新英格兰医学杂志》329：1753-1759。
32. Krewski D. 等，“重新分析哈佛六大城市以及美国癌症协会对空气污染颗粒物和死亡率的研究”，健康效应研究所特别报告，2000年7月。
33. Riekider, M.; Cascio, W.E.; Griggs, T.R.; Herbst, M.C.; Bromberg, P.A.; Neas, L.; Williams, R.W.; Devlin, R.B. (2003) “车内颗粒物与健康年轻男性患心血管疾病相关”，《美国呼吸道与危重症监护医学杂志》169：934-940。
34. Van Vliet, P.; Knape, M.; de Hartog, J.; Janssen, N.; Harssema, H.; Brunekreef, B. (1997) “机动车尾气与生活在高速公路附近儿童的慢性呼吸道疾病症状”，《环境研究》74：

122-132.

35. Brunekreef, B., Janssen, N.A.H.; de Hartog, J.; Harssema, H.; Knafe, M.; van Vliet, P. (1997) “交通运输引起的空气污染与生活在道路附近儿童的肺功能”, 《流行病学》8: 298-303.
36. Kim, J.J.; Smorodinsky, S.; Lipsett, M.; Singer, B.C.; Hodgson, A.T.; Ostro, B. (2004) “繁忙的道路附近与交通有关的空气污染: 东湾儿童的呼吸系统健康研究” 《美国呼吸道与危重症监护医学杂志》170: 520-526.
37. “2010 年全球疾病负担研究” 《柳叶刀》, 2012 年 12 月 13 日.
38. USEPA 臭氧及相关光化学氧化剂空气质量标准 (终稿), 华盛顿特区, USEPA, EPA 600/R-05/004aF-cF, 2006.
39. USEPA (2006) 针对臭氧全的国空气质量标准审查、科技信息政策评估。空气质量规划与标准办公室内部文件二稿, EPA- 452/D-05-002.
40. “控制臭氧空气污染对减少死亡率风险和获取经济收益的预测”, 国家学术出版社, 国家研究理事会, 地球与生命研究部, 环境研究和毒理学董事会, 减少对分层臭氧接触有益于死亡率风险降低之预测委员会, 芝加哥大学健康研究系荣誉教授 John C. Bailar III (主席)。
41. Wichmann, H.E. 等, “德国爱尔福特日死亡率与细颗粒 & 超细颗粒, 第一部分: 颗粒数与颗粒质量的作用。研究报告 98, 马萨诸塞州, 剑桥: 健康效应研究所 (2000)
42. Buringh E, Fischer P, Hoek G. 2000, “荷兰与悬浮颗粒物相关的死亡风险中二氧化硫是否是致病因素?” 《吸入毒理学》12 期 (增刊) 55-60.
43. “一氧化碳在慢性阻塞性肺疾病中对运动性能的影响” Aronow 等, 《美国呼吸道与危重症监护医学杂志》1997; “暴露在低水平的被控制空气中污染对健康的影响, 一份重要的评论”, Ferris, 《空气污染控制协会杂志》1978 年 5 月.
44. 美国国家环境保护局, “一氧化碳空气质量标准”, 华盛顿特区, 研发办公室, 2000 年 6 月 b.
45. 为了说清慢性非癌变危害, USEPA 把 RfC (吸入参考浓度) 作为危险商数 (HQ) 计算的一部分, 这个数字是一个人吸入的浓度与 RfC 的比例。(环保局定义 RfC 为: “人长期吸入值的预测, 包括敏感亚组, 其不确定性可能跨越一个数量级, 有可能一生都不会出现值得重视的有害的非癌变影响。”) HQ 值低于 1 就说明吸入值低于参考浓度, 不会产生有害健康的后果。综合非癌变危害通过危险指数 (HI) 计算, 该指数定义是, 影响同一个靶器官或系统的单个有毒空气化合物危险商数的总和。同 HQ 一样, 如果 HI 值小于等于 1.0, 那么终生吸入也不太可能产生有害后果。但是, HI 值如果大于 1.0 也不一定就说明会产生有害后果。而且, 不能把 HI 理解为有害后果可能发生的概率, 而且 HI 也不大可能与风险成正比。
46. 见 USEPA 的讨论, “国家颗粒物环境空气质量标准, 建议规则;” 2006 年 1 月 17 日, 71 卷 2676 页。
47. “USEPA (2004 年) 国家颗粒物环境空气质量标准 (2004 年 10 月)”, 第一卷文件号: EPA600/P-99/002aF, 第二卷文件号 EPA600/P-99/002bF.
48. USEPA (2005) 国家颗粒物环境空气质量标准审查、科技信息政策评估。空气质量规划与标准办公室内部文件 EPA- 452/R-05-005.
49. Doney, Scott C. 等, “大气中人为因素引起的氮和硫的沉积对海洋酸化和无机碳体系带来的影响” (2007), 《美国科学院院刊》104: 14580-14585, 第 14580 页。
50. “空气污染物沉积对大水域的影响” 递交国会第三份报告, 2000 年 6 月, EPA- 453/R-00-005.
51. 政府间气候变化专门委员会, 决策者摘要: 气候变化 2007: 自然科学基础。政府间气候变化专

门委员会第四次气候变化评估报告第一工作小组报告（2007年2月）5（以下简称为“第一工作小组摘要”）。

52. 参见 W. Chameides and M. Bergin “烟尘占据中央舞台” 297《科学》2214（2002年9月27日）（提到：黑碳（BC）是生物质、煤炭和柴油等不完全燃烧生成的）。
53. “控制化石燃料颗粒黑碳以及有机物质可能是减缓全球变暖最有效的方法” 107《地球物理研究杂志》4410（2002）10。
54. Bond TC, Sun H. 2005 “减少黑碳的排放能否减缓全球变暖？” 《环境科学与技术》39(16): 5921-5926; Delucchi MA. 2003. 附件 D: 二氧化碳当量因子。报告附件: “生命周期排放模型 (LEM): 交通燃料、机动车、交通模式、电力使用、取暖做饭用燃料以及其他材料的生命周期排放” 加利福尼亚, 戴维斯, 运输研究所; Forster P, Ramaswamy V, Artaxo P, Berntsen TK, Betts R, Fahey DW, Haywood J, Lean J, Lowe DC, Myrhe G 等, 2007 年, “大气成分和辐射强度的改变” 在: Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt KB, Tignor M, Miller HL, “气候变化 2007: 自然科学基础。政府间气候变化专门委员会第四次气候变化评估报告第一工作小组报告”。英国剑桥, 美国纽约, Fuglestedt JS, Berntsen TK, Godal O, Sausen R, Shine KP, Skodvin T, 2003 年, “气候变化度量: 辐射强度与排放指标评估” 《气候变化》58(3): 267-331; Hansen J, Sato M, Kharecha P, Russell G, Lea DW, Siddall M 2007 年, “气候变化与痕量气体” 《自然科学会报 A》365: 1925-1954; Hansen J, Sato M, Ruedy R, Lacis A, Oinas V 2000 年, “21 世纪全球变暖: 另一个景象” 美国国家科学院内刊 97(18): 9875-9880; Jacobson MZ 2007 年 “黑碳和全球变暖听证会上的证词” 国会政府改革及监督委员会第 110 届国会第一次会议, 华盛顿特区; Jacobson MZ 2002 年 “控制化石燃料颗粒黑碳以及有机物质可能是减缓全球变暖最有效的方法” 《地球物理研究杂志》107(D19): 16: 1-16; 22; Ramanathan V. 2007 年 “全球及地区气候变化中黑碳的作用” 国会政府改革及监督委员会第 110 届国会第一次会议, 华盛顿特区。
55. 《科学》2013 年 1 月 25 日 339 期 6118 号 382 页, DOI: 10.1126/science.339.6118.382
56. “约束黑碳在气候系统中的作用: 科学的评估” T.C.Bond, S.J.Doherty, D.W.Fahey, P.M.Forster, T.Berntsen, B.J.DeAngelo, M.G.Flanner, S.Ghan, B.Kärcher, D.Koch, S.Kinne, Y.Kondo, P.K.Quinn, M.C.Sarofim, M.G.Schultz, M.Schulz, C.Venkataraman, H.Zhang, S.Zhang, N.Bellouin, S.K.Guttikunda, P.K.Hopke, M.Z.Jacobson, J.W.Kaiser, Z.Klimont, U.Lohmann, J.P.Schwarz, D.Shindell, T.Storelvmo, S.G.Warren, C.S.Zender, DOI: 10.1002/jgrd.50171。
57. 该研究发现, 比起低速行驶, 高速行驶时效果会更强。
58. USEPA 的模型预测, 超过 12% 城市地区排放的二氧化硫会在大气中形成硫酸盐粒。
59. 类似于氮氧化物向硝酸盐的二次转化。
60. 美国能源部 1999 年, “柴油排放控制——硫的影响 (DECSE) 项目” 华盛顿特区, 美国能源部; 见: <http://www.ott.doe.gov/decse/>
61. 工作流程 1: “孟买公交车替代燃料与技术评估, 最终报告” TERI, 2004 年, 新德里, 能源与资源研究所 (TERI) 82 pp. [TERI 项目报告第 2001UT41 号]。
62. 如果不添加尿素试剂, 那么 SCR 系统就完全不起作用, 因此在使用和监控这一技术的过程中就要特别注意。欧洲监管机构在采取措施, 对于那些尿素罐不加满时车辆性能大打折扣的故障安全系统做出要求。
63. 认为国 VI 标准相当于欧 6/VI 标准。
64. 可能较为保守的假设是, 假定所有车辆固定的使用寿命是 10 年。