

Engineering Industry and Technics

发动机的有害排放物及其控制

Industrie Mécanique et Technique

〔美〕D. J. 潘德生 N. A 韩纳英著

きかいこうぎょうぎじゅつとしょ

Industrie und Technologie

Промышленности и Технике

机械工业出版社

# 发动机的有害排放物及其控制

〔美〕 D. J. 潘德生 N. A. 韩纳英 著

陆孝宽 陆坤元 范国宝 译



机械工业出版社

**D. J. Patterson N. A. Henein**  
**Emissions From Combustion Engines and Their Control**  
Ann Arbor Science Publishers, Inc. 1972.

**发动机的有害排放物及其控制**

[美] D. J. 潘德生 N. A. 韩纳英 著  
陆孝宽 陆坤元 范国宝 译

机械工业出版社出版 (北京阜成门外百万庄南街一号)  
(北京市书刊出版业营业登记证出字第 117 号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 · 新华书店经售

开本  $787 \times 1092 \frac{1}{32}$  · 印张  $11 \frac{1}{4}$  · 字数 246 千字  
1980 年 9 月北京第一版 · 1980 年 9 月北京第一次印刷  
印数 0,001—4,000 · 定价 1.15 元

统一书号: 15033 · 4734

## 译 者 序

本书比较系统地介绍了汽车排气对大气污染的影响、美国为控制大气污染所采取的措施、汽油机及柴油机中有害排放物形成的机理及消除途径, 以及有害排放物检测仪器等方面的研究成果。对于我国环境保护工作者、汽车及发动机设计研究工作者有重要参考价值。

由于本书写成于 1972 年, 因此其内容不可能包括最近几年的新成就, 如电子控制汽油喷射泵、微程序控制、三元催化反应器、扰流发生罐 (TGP) 等等。但本书中所介绍的一些有害排放物控制方法至今还是国外汽车上采用的行之有效的办法。书中介绍的一些有害排放物形成机理及消除途径, 也是研究这方面问题所需的基本知识。因此译出供有关同志参考。

本书第一章至第三章为陆孝宽同志译; 第四章至第七章为陆坤元同志译; 第八章至第十章为范国宝同志译。全书由陆孝宽同志审校。

译 者

1978 年 8 月

## 序

发动机有害排放物及其控制的研究已历时二十余年。新一代低污染的发动机已研制成功并用作汽车动力。但关于环境保护的要求日趋严格,受法规约束的发动机及汽车的范围日益扩大,因此要求工程师在解决有害排放物控制问题时变得更精明一些。

本书阐明了在均质及非均质系统中燃烧和形成有害排放物的基本原理。重点是在汽油机及柴油机方面,但同一基本原理也可用于其他均质燃烧系统,如转子发动机,或非均质系统,如燃气轮机、蒸气机或斯梯灵发动机。这些基本原理被用来对控制烃、醛、一氧化碳、烟及氮氧化物等有害排放物行之有效的控制技术作了认真的考查。重点是阐明基本概念而不是推导数学公式。如需作深入的研究,读者可参考各章后列出的文献。

经验表明,有害排放物的控制需要根据每种发动机的类型而单独确定,本书并不提供现成的答案。我们的目标只是使读者了解基本原理和各种控制方法,使他能带着这些知识去解决自己的有害排放物问题。为了用图形描述关键问题,本书中汇集了大量图表。

本书可作为发动机有害排放物及其控制的初等教材。它是为从事有关发动机及车辆有害排放物控制理论及实践工作的工程师、研究人员和学生而编写的。设计工程师可从中找到如何应用理论以发展机器元件的详细说明。研究工作者可

从中获悉整个问题的概貌，研究这一问题所需的基本知识和在这一领域里业已公开发表的参考资料的一份完整的目录。教师会发现此书适于作大学高年级生或研究生的教科书，可用于一学期三学分的课程或工程教育进修课程。

第一章论述了汽车对大气污染的影响，制定有害排放物法规的过程，及近年来在控制汽车的有害排放物方面取得的进展。本章还包括对烟室试验结果和烃反应能力的讨论。

第二章着重介绍有关往复式发动机设计、运行、燃料及发动机和汽车性能的关系等方面的基本知识。本章是向不熟悉发动机及汽车理论的读者作初步介绍，特别注意了影响有害排放物的问题。

第三章论述了在封闭容器和发动机内的燃烧和火焰传播，考察了燃烧室内的温度分布。非均质混合气燃烧列入第八章中。

第四章详细阐明了均质混合气和汽油机中烃、醛、一氧化碳及氮氧化物的形成机理。谈到的问题包括燃烧室壁淬冷现象，稀释及点火时间对可燃极限的影响，以及氧化氮形成的机理等。

第五章论述了汽油机设计及运行参数对有害排放物形成及减少的影响。谈到的问题包括混合比、点火时间、充量稀释和面容比的影响等等。

第六章论述燃料成分及燃料系统设计对化油器及汽油箱蒸发排放损失的影响。并以几个有数值的例子对关键问题作了说明。

第七章详细描述了现行的汽油机有害排放物控制系统，并论述了充量稀释、排气的催化或非催化处理等先进系统的概念。

第八章论述直接喷射式及间接喷射式柴油机中燃烧和有害排放物形成的机理。谈到的问题包括燃料喷射、油注燃烧及有害排放物在旋流中的形成, 以及设计和运行参数对有害排放物的影响。对柴油机有害排放物的特征, 如臭味及烟尘, 作了研究。并对各种往复机的有害排放物作了比较。

第九章描述了各种排气检测仪器: 非扩散红外线、火焰离子化、气体色谱法及化学发光法等。

第十章描述了定容取样系统理论及其在汽车有害排放物测量中的应用, 并包括美国联邦 1975 及 1976 年试验规范的讨论。

D. J. 潘德生

N. A. 韩纳英

安娜堡 底特律

1972 年 6 月 4 日

# 目 录

|                                      |     |
|--------------------------------------|-----|
| 第一章 汽车的有害排放物及大气污染 .....              | 1   |
| 第一节 导言 .....                         | 1   |
| 第二节 光化学烟雾 .....                      | 18  |
| 第二章 发动机基本知识 .....                    | 39  |
| 第一节 循环分析 .....                       | 39  |
| 第二节 性能参数 .....                       | 45  |
| 第三节 燃料 .....                         | 47  |
| 第四节 发动机参数对性能的影响 .....                | 65  |
| 第五节 化油器原理 .....                      | 75  |
| 第六节 汽车发动机道路性能 .....                  | 89  |
| 第三章 均质混合气中的燃烧 .....                  | 95  |
| 第四章 均质混合气及汽油机中有害排放物的形成 .....         | 116 |
| 第一节 未燃烃 .....                        | 116 |
| 第二节 一氧化碳 .....                       | 132 |
| 第三节 氮氧化物 .....                       | 133 |
| 第四节 醛类 .....                         | 139 |
| 第五章 设计及运行参数对汽油机排气中有害排放物的<br>影响 ..... | 143 |
| 第一节 前言 .....                         | 143 |
| 第二节 对于未燃烃及一氧化碳的影响 .....              | 144 |
| 第三节 对氮氧化物的影响 .....                   | 168 |
| 第四节 对醛类的影响 .....                     | 175 |
| 第五节 总结, 设计及运行参数的影响 .....             | 178 |
| 第六章 烃的蒸发排放 .....                     | 181 |



## VIII

|      |                                                 |     |
|------|-------------------------------------------------|-----|
| 第一节  | 化油器蒸馏损失 .....                                   | 181 |
| 第二节  | 汽油箱蒸发损失 .....                                   | 187 |
| 第七章  | 汽油机有害排放物控制系统 .....                              | 197 |
| 第一节  | 汽油机设计 .....                                     | 197 |
| 第二节  | 燃料系统设计 .....                                    | 206 |
| 第三节  | 排气处理器件 .....                                    | 210 |
| 第四节  | 蒸发排放控制器件 .....                                  | 226 |
| 第八章  | 柴油机燃烧的有害排放物及其控制 .....                           | 231 |
| 第一节  | 引言 .....                                        | 231 |
| 第二节  | 喷注的形成 .....                                     | 232 |
| 第三节  | 直接喷射式柴油机中的滞燃 .....                              | 243 |
| 第四节  | 喷入直接喷射式柴油机旋转气流中的燃油喷注的燃<br>烧机理的模型及有害排放物的形成 ..... | 251 |
| 第五节  | 直接喷射式柴油机的放热速率 .....                             | 259 |
| 第六节  | 设计和运转参数对直接喷射式柴油机有害排放物的<br>影响 .....              | 261 |
| 第七节  | M 燃烧系统 .....                                    | 283 |
| 第八节  | 间接喷射式柴油机 .....                                  | 283 |
| 第九节  | 某些设计和运转参数对间接喷射式柴油机有害排放<br>物的影响 .....            | 284 |
| 第十节  | M 系统、直接和间接喷射式柴油机排放特性之间的<br>比较 .....             | 289 |
| 第十一节 | 柴油机和汽油机排放量的比较 .....                             | 292 |
| 第十二节 | NO 排放量的控制 .....                                 | 293 |
| 第九章  | 排放物检测仪器 .....                                   | 305 |
| 第一节  | 非扩散红外线分析仪 .....                                 | 305 |
| 第二节  | 火焰离子化检测器 .....                                  | 312 |
| 第三节  | 气相色谱仪 .....                                     | 317 |
| 第四节  | 氮氧化物的化学发光分析法 .....                              | 330 |
| 第十章  | 美国联邦汽车排气有害排放物试验程序 .....                         | 337 |

# 第一章 汽车的有害排放物 及大气污染

## 第一节 导 言

汽车排气中有害排放物与大气污染的关系主要是通过对美国加州洛杉矶市大气污染问题的研究而发现的。最初人们认为洛杉矶的问题可能与自中世纪以来伦敦所遇见的问题一样,是烟和雾的结合,或烟雾问题。但实际并非如此。

早在 1943 年洛杉矶地区就已测出严重的大气污染。这种大气污染使植物受损、眼睛及咽喉刺痛、受应力的橡胶件开裂、可见度降低。至 1947 年问题更趋严重,人民团体在新闻界支持下采取了措施。其结果于 1948 年州议会通过法律,准许成立大气污染控制区,并授权限制污染源。这一年在洛杉矶县成立了一个大气污染控制区。

最初的措施是控制诸如炼钢厂及炼油厂等工业和露天燃烧,目的为减少粉尘排放。这些措施使粉尘量减少了三分之二,恢复到烟雾成为严重问题以前的 1940 年的水平。这些措施改善了可见度,但对眼睛的刺激及其他特征依然存在。因此,就对这种显然是新的大气污染问题进行了研究,以确定其原因。

洛杉矶的烟雾与伦敦及纽约的烟雾的主要差别在于:洛杉矶的大气中臭氧含量高,常常具有很强的氧化力,其性质和通常从动力厂及家庭炉灶排出的含  $\text{SO}_2$  的还原空气恰好相反。在洛杉矶地区没有明显的向大气排放臭氧的工业,因此

就怀疑在空气中有某种反应。加州理工学院教授 J. 哈根斯密特 (J. Haagen-Smit) 于 1952 年 6 月在《工业及工程化学》杂志上发表的研究报告证明, 烃(即碳氢化合物)在遇到太阳光及  $\text{NO}_2$  时产生反应, 生成各种氧化剂产物, 其中之一是臭氧, 这可能就是产生上述各种现象的原因。

由于人们认为汽车可能是空气中烃的主要来源, 汽车制造厂协会于 1953 年成立了车辆燃烧产物委员会, 以进一步探明这个问题, 并寻求可能的解决汽车排气污染的办法。同时, 在加州集中了力量去减少从固定来源, 主要是洛杉矶地区的炼油厂排放的烃。这些炼油厂排出的烃在 1951 年为 400 吨/天, 至 1964 年下降至 85 吨/天<sup>[2]</sup>。但是在 1958 年烟雾问题仍然严重, 显然在洛杉矶地区对汽车的烃排放量需要加以限制。于是在 1959 年加州议会在健康与安全法规中增加了大气标准, 实行这种控制。加州大气质量标准见表 1.1。

表 1.1 大气质量标准①  
浓度 ppm, 延续 1 小时

| 污 染 物 | “不 良” 级            | “严 重” 级 | “危 险” 级 |
|-------|--------------------|---------|---------|
| 一氧化碳  |                    | 120     | 240     |
| 乙 烯   | 0.5                |         |         |
| 硫 化 氢 | 0.1                | 5       |         |
| 二氧化硫  | 1                  | 5       | 10      |
| 烃     | 0.15<br>以“氧化剂指数”计算 | 未定      | 未定      |
| 二氧化氮  |                    |         |         |
| 氧化剂   |                    |         |         |
| 臭 氧   |                    |         |         |
| 烟 雾 剂 |                    |         |         |

① 加州采用的大气质量标准将污染分为三级: 达到“不良”级时可感觉刺激, 蔬菜发生损坏; “严重”时有改变生理机能和引起慢性病的危险; “危险”时对敏感的人可引起急病或死亡<sup>[2]</sup>。

其中最重要的是氧化剂标准, 定为  $0.15 \text{ ppm}^{\ominus}$ 。达到这一级时, 有一半的人口眼睛流泪, 植物受损也很严重。标准中还规定延续 8 小时的 CO 最高允许浓度为  $30 \text{ ppm}$  (按容积计), 在此情况下, 5% 的红血球失去活力。此外还规定一年中达到此浓度的日子不得超过 4 天。制定这一标准的目的是将污染降低至 1940 年的水平, 即一般认为可以忍受的水平。(在洛杉矶从 1964 至 1966 年平均氧化剂浓度连续 1 小时超过  $0.15 \text{ ppm}$  的天数每年有 120 天。在纽约从 1964 至 1966 年平均一氧化碳浓度连续 8 小时超过  $15 \text{ ppm}$  的天数每年有 36 天)。

为执行空气质量标准, 1960 年成立了加州汽车污染控制局 (简称 CMVCB), 其职能为制定汽车排气及蒸发的有害排放物标准, 及对能达到该项标准的新汽车颁发允许在加州销售的证明。为满足 1970 年大气质量标准, 当时估计需要将烃减少 80%, 一氧化碳减少 60%。因而在汽车排气净化法规中除烃外加上了一氧化碳。

第一个汽车排放规定是针对曲轴箱窜气的, 汽车污染控制局的决定要求从 1963 年开始在加州出售的新车型均装备窜气控制器。从 1961 年开始, 汽车工业对在加州销售的小客车都装上曲轴箱强制通风系统 (PCV) 以控制窜气, 1963 年在全美国推广。

接着汽车污染控制局提出了 1966 年汽车排放要求。对发动机排量超过 140 英寸<sup>3</sup> 的车辆, 要求排气中的 HC 低于  $275 \text{ ppm}$ , CO 低于 1.5%。这一水平相当于将未控制排放的汽车排气中的 HC 减少 70%, CO 减少 57%。

---

$\ominus$   $1 \text{ ppm} = 1/1000000$ ;  $1 \text{ pphm} = 1/100000000$ ;  $1 \text{ ppb} = 1/1000000000$ .  
——译者注

美国政府于 1955 年开始介入大气污染控制问题, 授权卫生、教育福利部对有关大气污染的问题进行研究, 并提供技术援助。1963 年加强了这一行动, 为促进各州及地方的大气污染控制活动制定了清洁大气法案。1965 年又制定了清洁大气法案补充条文, 专门授权起草在美国销售的机动车辆有害排放物国家标准。结果要求全美国的汽车从 1968 年车型开始采用排气净化装置。

起初, 在加州及全美国排气中有害排放物的测量均以浓度为基础, 以百万分率 (ppm) 表示, 或以克分子量百分数表示。试验时车辆放在转鼓试验台上按预定的循环行驶。加州试验 1966 年以后新车型的试验循环及美国政府试验 1968~1971 年新车型的试验循环通常称为加州循环和联邦试验程序 (FTP)<sup>[15]</sup>。

因为大气的污染程度是由污染物排放浓度及体积两者决定的, 所以 1970 及 1971 年美国标准<sup>[16]</sup>以计算的有害排放物的质量为基础而不是单用浓度作基础。当用 FTP 循环试验时, 汽车的平均有害排放物浓度需乘以由计算得出的总的循环排气体积, 这一体积按预定的公式是随汽车重量而变化的。采用这一有害排放物估算质量是向真实质量测量演变的一个过渡步骤。在试验 1972 年以后新车型时采用了测定有害排放物真实质量的程序。这一新程序采用了稀释取样法, 通常称为定容取样法 (CVS), 和新的试验循环 (详见第十章)。对于 1972~1974 年车辆, 试验时采用一个取样袋, 试验循环称作 CVS-1<sup>[17]</sup>。对于 1975~1976 年车辆, 试验时用三个取样袋, 以便较准确地控制发动机冷车及热车运转时排放物的比例, 这一方法称为 CVS-3<sup>[18]</sup>。表 1.2 摘录了美国规定的汽车有害排放物标准。

表 1.2 美国汽车排气中有毒排放物标准

| 年 份       | HC                     | CO                 | NO <sub>x</sub>       | 粉 尘                   | 联 邦 登 记 号                               |
|-----------|------------------------|--------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------------------------|
| FTP 循环    |                        |                    |                       |                       |                                         |
| 1968      | 275 ppm<br>(3.2 克/英里)* | 1.5%<br>(33 克/英里)* | —                     | —                     | Vol. 21, No. 61<br>Pt II. 1966. 3. 30   |
| 1970      | 2.2 克/英里<br>(180 ppm)* | 23 克/英里<br>(1%)*   | —                     | —                     | Vol. 33, No. 108<br>Pt II. 1968. 6. 4   |
| 1971      | 2.2 克/英里               | 23 克/英里            | 1.0 克/英里 <sup>c</sup> | —                     |                                         |
| CVS-1 循环  |                        |                    |                       |                       |                                         |
| 1971      | 4.6 克/英里               | 47. 克/英里           |                       |                       |                                         |
| 1972      | 3.4 克/英里               | 39 克/英里            | 4.0 克/英里              |                       | Vol. 35, No. 219<br>Pt II. 1970. 11. 10 |
| 1973~1974 | 3.4 克/英里               | 39 克/英里            | 3.0 克/英里              |                       |                                         |
| CVS-3 循环  |                        |                    |                       |                       |                                         |
| 1975      | 0.41 克/英里              | 3.4 克/英里           | 3.0 克/英里              | 0.1 克/英里 <sup>p</sup> | Vol. 36, No. 128<br>Pt II. 1971. 7. 2   |
| 1976      | 0.41 克/英里              | 3.4 克/英里           | 0.4 克/英里              | 0.1 克/英里 <sup>p</sup> |                                         |

蒸发损失: 1970 年在加州定为 6 克, 1971 年全美推广。

1972 年开始全美国定为每次试验 2 克。

\* 相当于 4000 磅重汽车的标准。

<sup>c</sup>: 仅加州有此要求, <sup>p</sup>: 建议数字。

由于  $\text{NO}_2$  在光化学烟雾反应中的重要作用及其对健康的影响, 1971 年开始了对  $\text{NO}_2$  的控制。粉尘排放的控制于 1975 年提出, 主要是为了健康及美学的原因, 此外还因为粉尘排放减少后才可能使用更精致的排气控制系统, 如催化反应器等, 这是为达到 1975 年 HC、CO 标准及 1976 年  $\text{NO}_2$  标准所需要的。1970 年开始在加州出售的汽车上装用蒸发排放物控制系统, 1971 年普及到全美国。1972 年以前对蒸发排放的 HC 规定为每次试验 6 克, 1972 年以后改为每次试验 2 克。1975 年和 1976 年标准实际上等于美国商业部电动车辆处<sup>[3]</sup>提出的汽车有害排放物可能达到的最低数值。

### 1. 汽车有害排放物及其对大气的影响

汽车汽油机的有害排放物主要包括未燃烃(HC), 一氧化碳(CO), 氮氧化物( $\text{NO}_x$ ), 硫氧化物( $\text{SO}_x$ ), 及粉尘。一辆未控制排放的汽车排放的 HC 中, 20~25% 来自曲轴箱漏气,

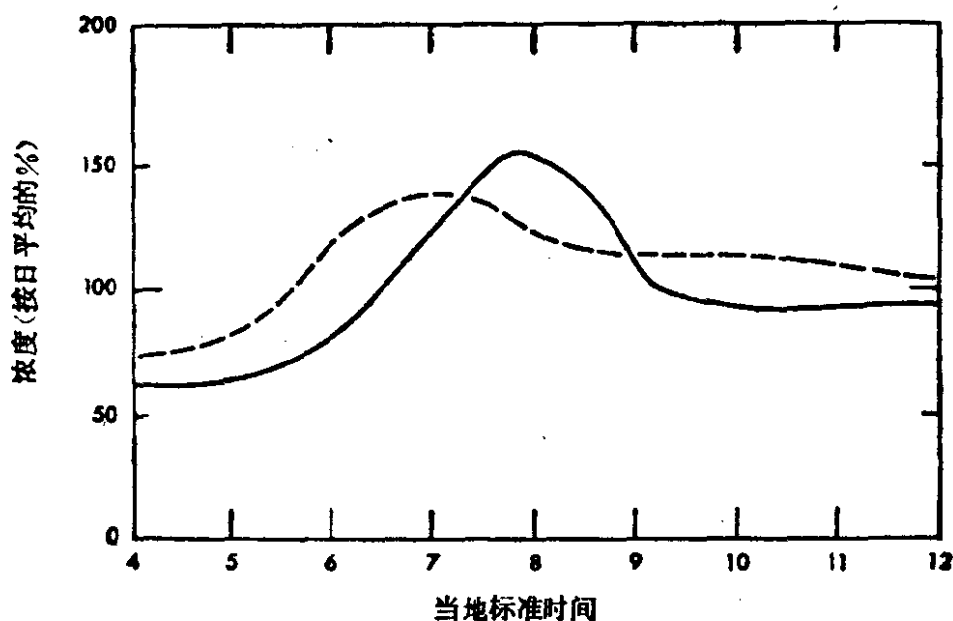


图 1.1 早晨 CO 峰值随作业时间的改变<sup>[8]</sup>

春季作业时间改变, 芝加哥(1963~1965)

实线——作业时间改变前 虚线——作业时间改变后

60% 来自排气, 其余来自化油器及燃料箱蒸发损失。在城市中心的直接测量说明了汽车对大气污染的影响。

图 1.1 表示城市中改变作业时间前后早晨的 CO 水平变化曲线。CO 峰值的出现时间与上下班交通最繁忙时间是一致的。

图 1.2 表示星期一至星期五的 HC, CO, 及  $\text{NO}_x$  浓度与星期六、星期日对比。上午 8:00 的高峰在星期日几乎消失。星期日下午的 CO 及 NO 高峰也比平时为低。主要是由机动车辆排出的非甲烷烃在星期日也同样减少。

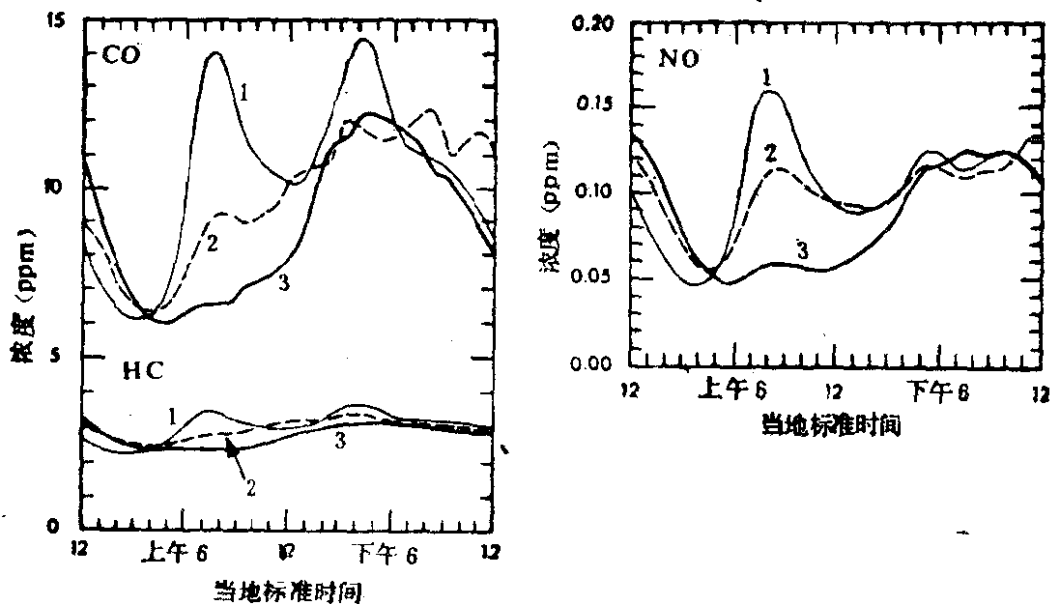


图 1.2 芝加哥工作日和周末的 HC, CO,  $\text{NO}_x$  浓度对比<sup>[8]</sup>

1—星期一~五 2—星期六 3—星期日

图 1.3 表示由 HC 及  $\text{NO}_2$  的光化学反应产生的氧化剂水平, 氧化剂高峰与最大阳光照射有密切关系。在星期日早晨汽车排放虽有明显减少, 但对大气浓度的影响尚不足以使当天生成的氧化剂减少。氧化剂浓度达到 0.15 ppm 就会使一半的人口眼睛流泪。

据美国卫生、教育福利部估计, 在全美范围内, 大气中



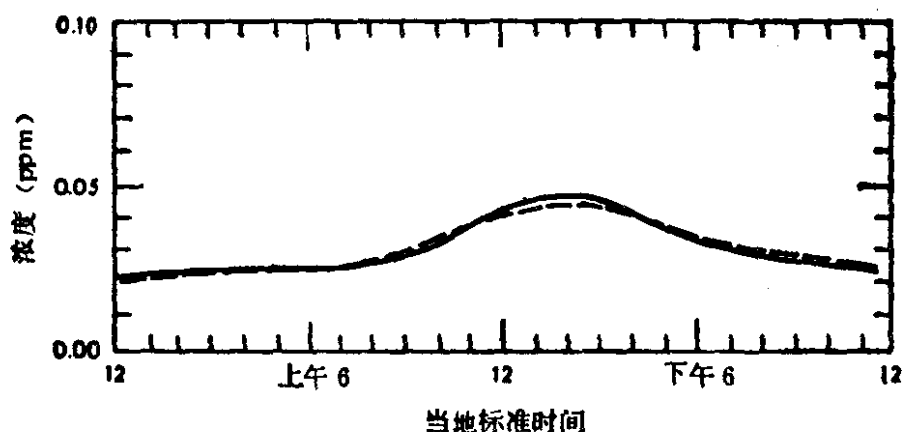


图 1.3 芝加哥(1964~1965)五月至十月中工作日及星期日  
氧化剂浓度对比<sup>[8]</sup>

实线——星期一~六 虚线——星期日

CO 的 48%，SO<sub>2</sub> 的 4%，NO<sub>x</sub> 的 32%，HC 的 59%，粉尘的 8% 是由汽车产生的。其数量见表 1.3。但必须指出，吨数并不反映污染的严重程度。例如，以对健康的影响而论，1 吨 SO<sub>2</sub> 比 25 吨 CO 更有害。如表 1.3 中的各项以污染大气的严重程度表示，而不是以吨数表示，则汽车污染的影响就可判断了。

## 2. 大气污染严重程度

表 1.3 列出了美国放入大气中的主要污染物的估计重量。从这些数字很容易得出结论，汽车是最大污染源，排出了 43% 重量的污染物。但是汽车排出的主要污染物是 CO，与其他污染物相比，CO 为害较轻。为衡量大气污染的严重程度可以根据污染物的有害影响，在排放重量之外，另取一个更有意义的指标，或对各种成分确定一个权衡系数。

巴布柯克(Babcock)建议以  $P$  指数<sup>[6]</sup> 来确定大气污染严重程度。这一方法考虑了粉尘，SO<sub>2</sub>，NO<sub>x</sub>，CO，HC，O<sub>3</sub>，日光辐射，粉尘与 SO<sub>2</sub> 的交互作用等各种因素对大气污染的影响。以大气质量标准为基础，对每一化合物确定一个权衡系