

JIDONGCHE NENGYUAN XIAOHAO  
JI WURANWU PAIFANG YU KONGZHI

# 机动车能源消耗 及污染物排放与控制

姚志良 主编 王岐东 申现宝 副主编



化学工业出版社

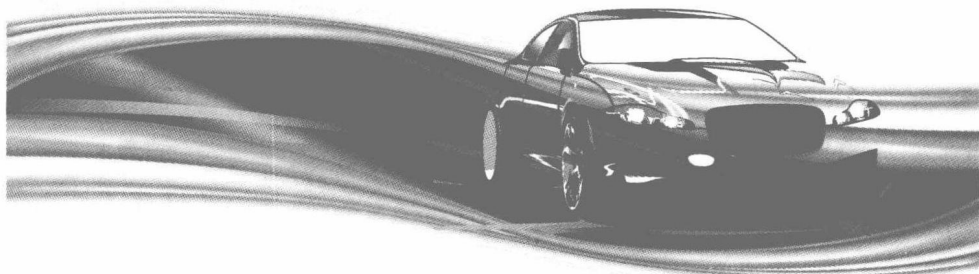
# 机动车能源消耗 及污染物排放与控制

姚志良 主编 王岐东 申现宝 副主编



化学工业出版社

· 北京 ·



## 前 言

机动车污染已成为我国城市大气污染的主要来源，机动车污染控制已成为人们关注的热点话题。

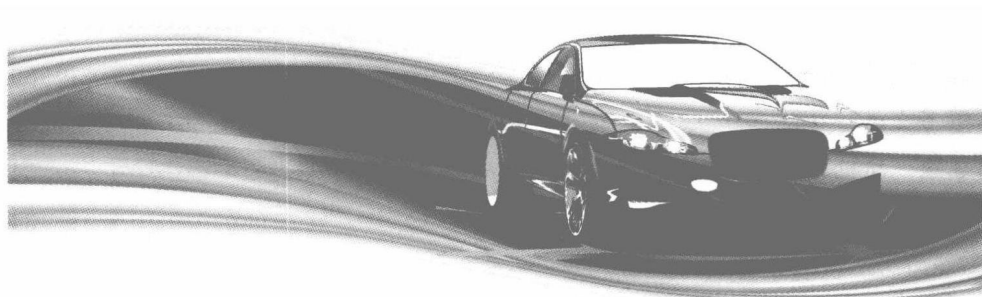
本书在总结国内外最新研究成果的基础上，系统地讲述了机动车能源消耗、机动车污染物生成机理和排放、机动车排放法规、机动车污染物排放确定方法、机动车排放控制技术和对策以及新能源汽车等方面的基础知识。全书共分为 8 章，第 1 章为能源与大气污染，第 2 章为机动车能源消耗，第 3 章为机动车污染物排放及生成机理，第 4 章为机动车排放法规历程，第 5 章为机动车排放测试和模型模拟技术，第 6 章为机动车排放控制技术和政策，第 7 章为替代燃料，第 8 章为电动汽车。本书根据我国机动车污染控制的实际需要，力求从机动车的能源消耗、排放的生成机理、排放污染的确定方法到机动车排放微观和宏观控制对策全过程进行解析，以尽可能简洁和通俗易懂的文字呈现给读者，使读者能够对机动车污染控制涉及的全方位的知识有所了解。

本书由北京工商大学姚志良副教授主编，国家自然科学基金委王岐东研究员和清华大学申现宝博士为副主编。在本书的编写过程中，北京工商大学的张宁、刘荣和刘丽莉等硕士研究生在资料的收集和整理方面做了大量工作，在此表示衷心的感谢。

由于本书涉及面较广，内容较多，加之作者水平有限，使得本书中难免存在不足和疏漏之处，敬请各位读者批评指正。

**编者**

**2012 年 4 月**



## 目 录

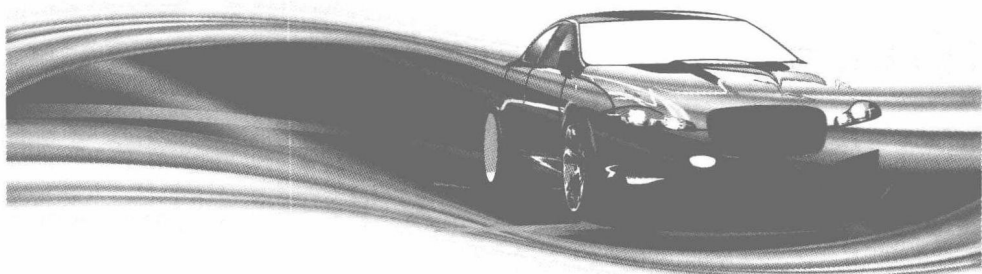
|                            |           |
|----------------------------|-----------|
| <b>第 1 章 能源与大气污染 .....</b> | <b>1</b>  |
| 1.1 能源种类及其性质 .....         | 1         |
| 1.1.1 煤炭 .....             | 2         |
| 1.1.2 石油 .....             | 3         |
| 1.1.3 天然气 .....            | 3         |
| 1.2 世界能源和利用现状 .....        | 5         |
| 1.2.1 探明储量状况 .....         | 5         |
| 1.2.2 产量状况 .....           | 7         |
| 1.2.3 消费状况 .....           | 9         |
| 1.3 我国能源和利用现状 .....        | 12        |
| 1.4 能源燃烧产生的主要污染物 .....     | 16        |
| 1.5 我国大气污染概况 .....         | 17        |
| 参考文献 .....                 | 18        |
| <b>第 2 章 机动车能源消耗 .....</b> | <b>19</b> |
| 2.1 世界交通能源消耗概述 .....       | 19        |
| 2.2 我国交通能源消耗现状 .....       | 20        |
| 2.3 国外机动车燃油经济性标准 .....     | 24        |
| 2.3.1 美国 .....             | 24        |
| 2.3.2 日本 .....             | 26        |
| 2.3.3 欧盟 .....             | 27        |

|                                 |           |
|---------------------------------|-----------|
| 2.3.4 加拿大 .....                 | 29        |
| 2.3.5 澳大利亚 .....                | 29        |
| 2.4 我国机动车燃油经济性标准 .....          | 30        |
| 参考文献 .....                      | 32        |
| <b>第3章 机动车污染物排放及生成机理 .....</b>  | <b>34</b> |
| 3.1 机动车排放污染 .....               | 34        |
| 3.1.1 机动车排放污染物 .....            | 34        |
| 3.1.2 我国机动车污染现状 .....           | 38        |
| 3.2 汽油机污染物的生成机理及其影响因素 .....     | 46        |
| 3.2.1 汽油机污染物的生成机理 .....         | 46        |
| 3.2.2 影响汽油机污染物生成的因素 .....       | 50        |
| 3.3 柴油机排放污染物的生成机理及其影响因素 .....   | 54        |
| 3.3.1 柴油机污染物生成机理 .....          | 54        |
| 3.3.2 影响柴油机污染物生成的主要因素 .....     | 56        |
| 参考文献 .....                      | 58        |
| <b>第4章 机动车排放法规历程 .....</b>      | <b>60</b> |
| 4.1 世界机动车排放法规历程 .....           | 60        |
| 4.1.1 美国 .....                  | 61        |
| 4.1.2 欧洲 .....                  | 62        |
| 4.1.3 日本 .....                  | 64        |
| 4.2 我国机动车排放法规历程 .....           | 65        |
| 4.2.1 轻型车 .....                 | 65        |
| 4.2.2 重型车 .....                 | 67        |
| 4.2.3 摩托车 .....                 | 68        |
| 4.2.4 油品 .....                  | 68        |
| 参考文献 .....                      | 70        |
| <b>第5章 机动车排放测试和模型模拟技术 .....</b> | <b>71</b> |
| 5.1 机动车排放测试技术 .....             | 71        |
| 5.1.1 台架实验 .....                | 71        |
| 5.1.2 隧道实验 .....                | 72        |
| 5.1.3 遥感测试 .....                | 73        |

|              |                           |            |
|--------------|---------------------------|------------|
| 5.1.4        | PEMS 技术 .....             | 73         |
| 5.2          | 机动车排放模型 .....             | 75         |
| 5.2.1        | 概述 .....                  | 75         |
| 5.2.2        | 常用模型 .....                | 77         |
|              | 参考文献 .....                | 87         |
| <b>第 6 章</b> | <b>机动车排放控制技术和政策 .....</b> | <b>90</b>  |
| 6.1          | 机动车排放微观控制技术 .....         | 90         |
| 6.1.1        | 汽油车机内净化技术 .....           | 90         |
| 6.1.2        | 柴油车机内净化技术 .....           | 94         |
| 6.1.3        | 机动车污染物的机外净化技术 .....       | 96         |
| 6.2          | 机动车排放控制政策 .....           | 103        |
| 6.2.1        | 新车污染控制管理体系 .....          | 103        |
| 6.2.2        | 在用车污染控制管理体系分析 .....       | 106        |
| 6.2.3        | 排放标志管理 .....              | 111        |
| 6.2.4        | 其他机动车排放控制管理办法 .....       | 115        |
|              | 参考文献 .....                | 117        |
| <b>第 7 章</b> | <b>替代燃料 .....</b>         | <b>119</b> |
| 7.1          | 压缩天然气 .....               | 119        |
| 7.1.1        | 天然气的燃料性质 .....            | 120        |
| 7.1.2        | CNG 汽车的发展优势 .....         | 120        |
| 7.1.3        | CNG 汽车发展概况 .....          | 121        |
| 7.1.4        | CNG 汽车的技术发展 .....         | 124        |
| 7.1.5        | 发展 CNG 汽车需要注意的问题 .....    | 126        |
| 7.2          | 液化石油气 .....               | 127        |
| 7.2.1        | 液化石油气燃料特性 .....           | 127        |
| 7.2.2        | LPG 作为汽车燃料的优点 .....       | 128        |
| 7.2.3        | LPG 汽车发展现状 .....          | 130        |
| 7.2.4        | LPG 汽车技术的发展 .....         | 132        |
| 7.2.5        | LPG 汽车发展需要注意的问题 .....     | 135        |
| 7.3          | 氢燃料 .....                 | 136        |
| 7.3.1        | 概述 .....                  | 136        |

|            |                           |            |
|------------|---------------------------|------------|
| 7.3.2      | 氢能源的应用现状 .....            | 137        |
| 7.3.3      | 氢在清洁汽车中的应用 .....          | 141        |
| 7.3.4      | 氢作为汽车能源发展的制约因素 .....      | 142        |
| 7.3.5      | 氢能源在汽车工业中的发展前景及发展战略 ..... | 143        |
| 7.4        | 生物柴油 .....                | 144        |
| 7.4.1      | 生物柴油的主要特性 .....           | 145        |
| 7.4.2      | 生物柴油发展现状 .....            | 146        |
| 7.4.3      | 生物柴油制备技术 .....            | 147        |
| 7.4.4      | 使用生物柴油需要注意的问题 .....       | 150        |
| 7.4.5      | 国外发展生物柴油的政策 .....         | 152        |
| 7.4.6      | 我国生物柴油的发展前景 .....         | 154        |
| 7.5        | 乙醇 .....                  | 155        |
| 7.5.1      | 乙醇作为车用燃料的主要特性 .....       | 156        |
| 7.5.2      | 乙醇汽油作为车用燃料的应用现状 .....     | 158        |
| 7.5.3      | 我国推广车用乙醇汽油应注意的问题 .....    | 159        |
| 7.6        | 甲醇 .....                  | 160        |
| 7.6.1      | 甲醇作为车用燃料的特性 .....         | 161        |
| 7.6.2      | 甲醇燃料的应用现状及发展前景 .....      | 162        |
| 7.7        | 二甲醚 .....                 | 163        |
| 7.7.1      | 二甲醚的特性 .....              | 163        |
| 7.7.2      | 二甲醚的研究应用现状和发展前景 .....     | 164        |
|            | 参考文献 .....                | 166        |
| <b>第8章</b> | <b>电动汽车 .....</b>         | <b>169</b> |
| 8.1        | 概述 .....                  | 169        |
| 8.2        | 纯电动汽车 .....               | 171        |
| 8.2.1      | 纯电动汽车的结构原理 .....          | 171        |
| 8.2.2      | 纯电动汽车的关键技术 .....          | 172        |
| 8.2.3      | 纯电动汽车发展现状及趋势 .....        | 173        |
| 8.3        | 燃料电池汽车 .....              | 175        |
| 8.3.1      | 燃料电池的原理和特点 .....          | 175        |
| 8.3.2      | 燃料电池汽车的关键技术 .....         | 176        |

|                                                                         |     |
|-------------------------------------------------------------------------|-----|
| 8.3.3 燃料电池汽车的发展现状和趋势 .....                                              | 178 |
| 8.4 混合动力汽车 .....                                                        | 180 |
| 8.4.1 混合动力汽车的特点 .....                                                   | 180 |
| 8.4.2 混合动力汽车的关键技术 .....                                                 | 182 |
| 8.4.3 混合动力汽车的发展现状及趋势 .....                                              | 184 |
| 参考文献 .....                                                              | 186 |
| 附录 .....                                                                | 188 |
| 附录一 轻型汽车污染物排放限值（中国Ⅲ、Ⅳ阶段）(GB 18352.3—2005)<br>.....                      | 188 |
| 附录二 车用压燃式、气体燃料点燃式发动机与汽车排气污染物排放<br>限值及测量方法（中国Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ阶段）(GB 17691—2005) ... | 191 |
| 附录三 重型车用汽油发动机与汽车排气污染物排放限值（中国Ⅲ、<br>Ⅳ阶段）(GB 14762—2008) .....             | 194 |
| 附录四 摩托车污染物排放限值（工况法，中国第Ⅲ阶段）<br>(GB 14622—2007) .....                     | 195 |



## 第1章 能源与大气污染

### 1.1 能源种类及其性质

所谓能源，是指能够直接或经过转换而间接获取得到某种能量的自然资源，如煤炭、石油、天然气、太阳能、风能、水能、地热能、核能等<sup>[1~5]</sup>。

从获取途径上来说，能源可分为一次能源和二次能源。可以直接从自然界获取，不需加工转换的能源称为一次能源；由一次能源加工转换得到的能源称为二次能源。例如，原煤、原油、天然气、太阳能、风能、潮汐、地热等都是\*\*一次能源\*\*；电力、汽油、酒精、沼气、氢气、焦炭等都是\*\*二次能源\*\*。

对于一次能源，根据它们是否能够再生，可将其分为\*\*可再生能源\*\*和\*\*不可再生能源\*\*。这里“再生”是一个时间范畴，“可再生”通常是指短时间内可以不断形成或重复使用。例如，太阳能、风能、水能、生物质能等可以不断产生，供人类重复使用且不会枯竭的能源即为\*\*可再生能源\*\*；煤、石油、天然气等生成周期极长，往往需要数百万年之久，产生速率远远小于人类的消耗速率，总有一天会枯竭的能源，被看做是\*\*不可再生能源\*\*。

按能量的来源不同，可将能源分为三大类。第一类是来自地球以外天体的能量，主要是太阳辐射能，此外，还有其他恒星或天体发射到地球上的各种宇宙射线的能量。太阳辐射能是地球上能量的最主要来源，它除了直接向地球提供光和热外，还是其他一次能源的来源。例如，植物燃料、

煤炭、石油、天然气、油页岩等化石燃料，以及水能、风能和海洋能等归根到底都源于太阳辐射能。第二类是地球自身蕴藏的能量，主要有地热能和原子核能。第三类能源来自地球与其他天体间的相互作用，如潮汐能。

### 1.1.1 煤炭

煤，俗称煤炭，主要由碳、氢、氧、氮、硫和磷等元素组成，是非常重要的能源，也是冶金、化学工业的重要原料。

煤炭是埋在地壳中亿万年以上的树木等古代植物遗体，在一定的地理环境下，经过复杂的物理和化学作用形成的含碳量很高的固体可燃性矿物，也称作原煤。按煤炭的挥发物含量不同，可以分为泥煤、褐煤、烟煤和无烟煤等类型。

植物变成煤的过程大致可分为泥炭化和煤化两个阶段。泥炭化阶段是被泥沙覆盖的植物在厌氧菌作用下，有机质分解而生成泥炭，植物遗体中氢、氧成分逐渐减少，碳的成分逐渐增加，泥煤即生成于泥炭化阶段，其质地疏松、褐色无光泽、密度小，可以看出有机质残体，用火柴可以引燃，烟浓灰多。泥煤的工业价值不大，不适于长途运输，通常作为地方性燃料在产地附近使用。煤化阶段包括成岩作用和变质作用，泥炭在沉积物的压力作用下被压紧、脱水而胶结，碳含量进一步增加，称为煤的成岩作用。褐煤即生成于此阶段，其质地较泥煤致密，颜色为褐色或接近黑色，光泽暗淡，基本看不见有机物残体，用火柴可以引燃，有烟。褐煤黏结性弱，易风化和破碎，不利于长途运输，易氧化和自燃，也不利于长期储存，通常只作为地方性燃料使用。当褐煤埋在地下较深的位置时，受到高温高压的作用，使水分和挥发分减少，碳含量相对增加，密度、光泽和硬度也随之提高，称为煤的变质作用。褐煤经过变质作用即形成烟煤，烟煤为黑色、有光泽、质地致密，用蜡烛可以引燃，火焰明亮，有烟。其最大特点是具有黏结性，可以长途运输和长期存储，容易燃烧，是冶金工业和动力工业主要燃料之一，也是炼焦等化学工业的重要原料。烟煤进一步变质即形成无烟煤，无烟煤质地坚硬、黑色有光泽、用蜡烛不能引燃，燃烧无烟。其含碳量高，密度大，组织致密而坚硬，挥发分极少，吸水性小，适于长途运输和长期存储，但受热易碎，可燃性较差，

不易着火。

### 1.1.2 石油

石油是由各种烷烃、环烷烃、芳香烃混合而成的，具有特殊气味、有色的可燃性油质液体。石油有三个特性：一是呈油脂状胶体；二是绝大多数比水轻；三是具有可凝聚性。石油的密度一般在  $0.75 \sim 1.08 \text{g/cm}^3$  之间，颜色以棕褐色、黑褐色、黑绿色为主，少数为淡黄色、白色，通常沥青质和胶质含量越高，颜色也就越深。

关于石油的形成理论有多种，但主要由两种观点，即有机成油理论和无机成油理论。有机成油理论认为，海洋中大量的古生物遗体沉积于海底并被泥沙覆盖，在缺氧环境下，经细菌作用，将碳水化合物中的氧逐渐消耗掉，形成烃类化合物。随着时间的流逝和地壳的变迁，有机物越埋越深，在地层深处的高温高压环境中，逐渐受热裂解成为石油和天然气。无机成油理论认为，在石油的形成过程中，率先上涌的岩浆由于在地壳裂缝中所受的压强极小而大幅度地发生热膨胀，形成大量的岩浆气，并按照一定的组分组成气体分子，如乙炔、水等。大量的气体使裂缝中的压力增强、温度升高，进而导致气体分子内聚力增强，当气体浓度和裂缝内压力升高到一定程度时，会使低碳烃聚合为高碳烃烷，从而发生相态变化，即从气态的烃类变成液态的烃类——石油。迄今为止，世界上的大型油气田都是以有机成油理论为指导勘探找到的，然而，随着石油勘探难度的增加和人类对油田认识的加深，无机成油理论也慢慢得到人们重视。

### 1.1.3 天然气

天然气是地下岩层中以烃类化合物为主要成分的气体混合物的总称。主要由甲烷、乙烷、丙烷和丁烷等烃类气体和硫化氢、氨气、氢气、二氧化碳等非烃类气体和其他一些杂质综合而成，其中甲烷约占  $80\% \sim 90\%$ 。天然气的密度比空气小，约为空气的  $0.65$  倍，天然气与空气的燃烧混合比约为  $4.5\% \sim 15\%$ ，燃烧性良好，但到达燃烧浓度时遇火会爆炸。液态的天然气比水的密度小，约为水的  $0.45$  倍。

天然气的形成与石油的形成在成因、聚集和保存上具有共性，也可分为有机成因和无机成因。有机成因即认为，古代生物遗体混合泥沙一起沉积在低洼的湖泊、浅海或海湾中，随着时间的推移和温度、压力、细菌等环境的综合作用，最开始形成的有机淤泥被压缩成泥岩，而其中的有机物质逐渐转变为烃类化合物，形成石油和天然气。油气形成后处于分散状态，随着沉积岩的增厚和压力的加大，泥岩在生油、生气过程中被压缩，油气逐渐转移到附近有缝隙孔洞的砂岩或其他岩体中。生成石油的岩层叫生油岩，砂岩、石灰岩等多孔的岩层能够储存石油称为储油层，储油层上面是不透油、不透水、不透气的盖层，起到密封作用，盖层下面即形成的油气田。天然气的形成条件较石油宽泛得多，当生油岩埋藏较浅，地温低于  $70^{\circ}\text{C}$  时，有机质则在细菌和温度的作用下形成干气（甲烷）；当埋藏深度在  $1300\sim 2100\text{m}$ ，地温为  $70\sim 110^{\circ}\text{C}$  时，有机质主要转化为石油，同时生成部分天然气；当埋藏深度超过  $2100\text{m}$ ，地温超过  $110^{\circ}\text{C}$  时，有机质继续转化为天然气。同时，在  $90\sim 110^{\circ}\text{C}$  时，石油也开始裂解为天然气，温度越高，裂解的石油越多，且干气在天然气中的比例也越大，超过  $145^{\circ}\text{C}$  时，全部转化为干气。天然气的生成贯穿了整个有机质演化的过程。无机成因即认为，天然气并非在  $1000\sim 2000\text{m}$  深处形成，而是由深部地核的脱气作用形成。无机成因又可分为变质成因和岩浆成因。变质成因是碳酸盐热分解生成二氧化碳，与深部区域变质作用有关，或与岩浆及其热液的接触变质作用有关；岩浆成因是伴随岩浆形成过程生成的二氧化碳，它源于地壳深部或地幔，随岩浆的分异作用而富集。上述生成的二氧化碳在地核的极高温下与氢气发生反应生成甲烷。

目前人们发现并利用的天然气主要有以下 6 大类。

① 油成气 有机质在成油过程中产生天然气，其资源量大致与石油量相当，即  $1\text{t}$  石油储量相当于有  $1000\text{m}^3$  的天然气。这也是目前被开发利用的最主要的一类。

② 煤成气 有机质在成煤过程中产生的天然气。一般认为  $1\text{t}$  煤伴生  $38\sim 68\text{m}^3$  的天然气。

③ 生物成气 是未成熟的有机质在低温（ $70^{\circ}\text{C}$ ）下由厌氧生物分解生成的甲烷气体，约占天然气储量的  $20\%$ 。

④ 水合物气 是低温或高温条件下，甲烷渗入地层深处的水分子晶隙中而被水缔合成气体水合物，估计储量为  $50 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

⑤ 深海圈闭气 存在于深海，类似冰一样的水和甲烷混合物所圈闭的天然气，至今尚未探究。

⑥ 无机成因气 深源气，只限于与地核或地幔有关的无机成因天然气，是在地核的极高温下，二氧化碳与氢气反应生成的甲烷。

## 1.2 世界能源和利用现状

### 1.2.1 探明储量状况

#### (1) 石油

到 2008 年末，世界石油剩余可开采储量为  $170.8 \times 10^9 \text{ t}$ ，其中中东地区为  $102.0 \times 10^9 \text{ t}$ ，约占世界总量的 60%。其他地区均不足 12% 左右，依次为欧洲及欧亚大陆，非洲、中南美、北美和亚太，见表 1.1。

表 1.1 2008 年世界石油、天然气和煤炭储量地区分布

| 地区      | 石油                                 |           | 天然气                                     |           | 煤炭                                 |           |
|---------|------------------------------------|-----------|-----------------------------------------|-----------|------------------------------------|-----------|
|         | 储量<br>/( $\times 10^9 \text{ t}$ ) | 占世界<br>/% | 储量<br>/( $\times 10^{12} \text{ m}^3$ ) | 占世界<br>/% | 储量<br>/( $\times 10^6 \text{ t}$ ) | 占世界<br>/% |
| 中东      | 102                                | 59.72     | 75.91                                   | 41.03     | 1386                               | 0.17      |
| 欧洲及欧亚大陆 | 19.2                               | 11.24     | 62.89                                   | 33.99     | 272246                             | 32.9      |
| 中南美     | 17.6                               | 10.3      | 7.31                                    | 3.95      | 15006                              | 1.82      |
| 非洲      | 16.6                               | 9.72      | 14.65                                   | 7.92      | 32013                              | 3.88      |
| 北美      | 9.7                                | 5.68      | 8.87                                    | 4.79      | 246097                             | 29.7      |
| 亚太      | 5.6                                | 3.28      | 15.39                                   | 8.32      | 259253                             | 31.39     |
| 世界总计    | 170.8                              | 100.0     | 185.02                                  | 100.0     | 826001                             | 100.0     |

石油剩余可采储量世界排名前 10 位的国家分别是沙特阿拉伯、伊朗、伊拉克、委内瑞拉、科威特、阿联酋、俄罗斯、利比亚、哈萨克斯坦、尼日利亚，它们的储量共计为  $138.7 \times 10^9 \text{ t}$ ，占世界的 81.2%。石油剩余可采储量最多的是沙特阿拉伯，它的石油剩余可采储量约占世界总量的 1/5，其次为伊朗，占世界的 11.1%，见表 1.2。

表 1.2 2008 年世界石油、天然气和煤炭剩余可采储量前 10 名国家

| 石 油   |                           |           | 天 然 气 |                                            |           | 煤 炭  |                           |           |
|-------|---------------------------|-----------|-------|--------------------------------------------|-----------|------|---------------------------|-----------|
| 国家    | 储量<br>/( $\times 10^9$ t) | 占世界<br>/% | 国家    | 储量<br>/( $\times 10^{12}$ m <sup>3</sup> ) | 占世界<br>/% | 国家   | 储量<br>/( $\times 10^6$ t) | 占世界<br>/% |
| 沙特阿拉伯 | 36.3                      | 21.2      | 俄罗斯   | 43.3                                       | 23.4      | 美国   | 238308                    | 28.9      |
| 伊朗    | 18.9                      | 11.1      | 伊朗    | 29.61                                      | 16.0      | 俄罗斯  | 157010                    | 19.0      |
| 伊拉克   | 15.5                      | 9.1       | 卡塔尔   | 25.46                                      | 13.8      | 中国   | 114500                    | 13.9      |
| 委内瑞拉  | 14.3                      | 8.4       | 土库曼斯坦 | 7.94                                       | 4.3       | 澳大利亚 | 76200                     | 9.2       |
| 科威特   | 14                        | 8.2       | 沙特阿拉伯 | 7.57                                       | 4.1       | 印度   | 58600                     | 7.1       |
| 阿联酋   | 13                        | 7.6       | 美国    | 6.73                                       | 3.6       | 乌克兰  | 33873                     | 4.1       |
| 俄罗斯   | 10.8                      | 6.3       | 阿联酋   | 6.43                                       | 3.5       | 哈萨克  | 31300                     | 3.8       |
| 利比亚   | 5.7                       | 3.3       | 尼日利亚  | 5.22                                       | 2.8       | 南非   | 30408                     | 3.9       |
| 哈萨克   | 5.3                       | 3.1       | 委内瑞拉  | 4.84                                       | 2.6       | 波兰   | 7502                      | 0.9       |
| 尼日利亚  | 4.9                       | 2.9       | 阿尔及利亚 | 4.5                                        | 2.4       | 巴西   | 7059                      | 0.9       |
| 世界总计  | 170.8                     | 100       | 世界总计  | 185.02                                     | 100       | 世界总计 | 826001                    | 100       |

## (2) 天然气

到 2008 年末,世界天然气剩余可开采储量为  $185.02 \times 10^{12} \text{ m}^3$ , 主要分布在中东地区和欧洲及欧亚大陆, 剩余可开采储量分别为  $75.91 \times 10^{12} \text{ m}^3$  和  $62.89 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。这两个地区的储量占世界总量的 3/4 以上, 其他地区均不足 10%, 依次为亚太、非洲、北美和中南美, 见表 1.1。

天然气剩余可采储量世界排名前 10 位的国家分别是俄罗斯、伊朗、卡塔尔、土库曼斯坦、沙特阿拉伯、美国、阿联酋、尼日利亚、委内瑞拉、阿尔及利亚。它们的储量累计为  $141.6 \times 10^{12} \text{ m}^3$ , 占世界的 76.5%。俄罗斯排名世界第一, 它的剩余可开采储量占世界总量的 20% 以上, 其次为伊朗, 它的储量占世界 16%, 然后是卡塔尔, 占世界 13.8%, 其他国家储量均不足世界总量的 10%, 见表 1.2。

## (3) 煤炭

到 2008 年末,世界煤炭剩余可采储量为  $826001 \times 10^6 \text{ t}$ , 主要分布在欧洲及欧亚大陆、亚太、北美地区, 分别为  $272246 \times 10^6 \text{ t}$ 、 $259253 \times 10^6 \text{ t}$ 、 $246097 \times 10^6 \text{ t}$ , 这三个地区剩余可开采储量约占世界总量的 94%, 其他地区均不足 5%, 见表 1.1。

煤炭剩余可开采储量世界排名前 10 位的国家分别是美国、俄罗斯、中

国、澳大利亚、印度、乌克兰、哈萨克斯坦、南非、波兰和巴西，它们的储量为  $754760 \times 10^6 \text{t}$ ，占世界的 91.7%。排名第一的是美国，它的剩余可开采储量占世界总量的 1/4。其次为俄罗斯，占世界总量的 19%，中国煤炭剩余可开采储量为  $114500 \times 10^6 \text{t}$ ，占世界的 13.9%，排在世界第 3 位，见表 1.2。

从剩余可开采储量来看，石油、天然气和煤炭储量地理分布存在明显的不均衡性，主要集中在部分地区和少数国家。世界石油剩余可采储量中有将近 3/5 分布在中东地区，其中仅沙特阿拉伯一国的石油储量就占世界的 1/5；天然气储量主要分布在俄罗斯和中东地区，这两个地区的储量占世界的 60% 以上，其中俄罗斯的储量占世界的近 1/4；煤炭剩余可采储量以亚太、北美占优势，其中美国、俄罗斯和中国储量的总和超过了世界总量的一半。这种分布格局主要受油气资源富集程度和开发程度的制约，在油气资源丰富、开发程度较低的地区和国家，其剩余可采储量相对也多。

1.2.2 产量状况

(1) 石油

2008 年，世界石油（包括原油、沥青砂及天然气液）产量为  $3928.8 \times 10^6 \text{t}$ ，其中中东地区最多，为  $1253.7 \times 10^6 \text{t}$ ，占世界总产量的 1/3，其次为欧洲及欧亚大陆地区，为  $851 \times 10^6 \text{t}$ ，占世界总产量的 21.7%，北美地区为 15.8%，其他地区基本相当，均在 10% 左右，依次为非洲、亚太和中南美，见表 1.3。

表 1.3 2008 年世界石油、天然气和煤炭产量地区分布

| 地区      | 石油                                |           | 天然气                                 |           | 煤炭                                |           |
|---------|-----------------------------------|-----------|-------------------------------------|-----------|-----------------------------------|-----------|
|         | 产量<br>/( $\times 10^6 \text{t}$ ) | 占世界<br>/% | 产量<br>/( $\times 10^9 \text{m}^3$ ) | 占世界<br>/% | 产量<br>/( $\times 10^6 \text{t}$ ) | 占世界<br>/% |
| 中东      | 1253.7                            | 31.9      | 381.1                               | 12.4      | 0.5                               | 0.02      |
| 欧洲及欧亚大陆 | 851                               | 21.7      | 1087.3                              | 35.5      | 456.4                             | 13.7      |
| 中南美     | 335.6                             | 8.5       | 158.9                               | 5.2       | 55.5                              | 1.7       |
| 非洲      | 488.1                             | 12.4      | 14.65                               | 7.9       | 143.4                             | 3.88      |
| 北美      | 619.2                             | 15.8      | 812.3                               | 26.5      | 638.4                             | 19.2      |
| 亚太      | 381.2                             | 9.7       | 411.2                               | 13.4      | 2030.7                            | 61.1      |
| 世界总计    | 3928.8                            | 100.0     | 3065.6                              | 100.0     | 826001                            | 100.0     |

注：煤炭产量单位为油当量，1t 油当量=1.5t 硬煤或 3t 褐煤，下同。

石油产量排名前 10 位的国家分别是沙特阿拉伯、俄罗斯、美国、伊朗、中国、墨西哥、加拿大、阿联酋、科威特和委内瑞拉，它们的产量为  $2430.9 \times 10^6 \text{ t}$ ，占世界的 61.8%。其中产量最高的是沙特阿拉伯，它的产量占世界的 13.1%，中国的石油产量是  $189.7 \times 10^6 \text{ t}$ ，占世界的 4.8%，排在世界第 5，如表 1.4 所列。

表 1.4 2008 年世界石油、天然气和煤炭产量前 10 名国家

| 石 油   |                                    |           | 天 然 气 |                                      |           | 煤 炭   |                                    |           |
|-------|------------------------------------|-----------|-------|--------------------------------------|-----------|-------|------------------------------------|-----------|
| 国家    | 储量<br>/( $\times 10^6 \text{ t}$ ) | 占世界<br>/% | 国家    | 储量<br>/( $\times 10^9 \text{ m}^3$ ) | 占世界<br>/% | 国家    | 储量<br>/( $\times 10^6 \text{ t}$ ) | 占世界<br>/% |
| 沙特阿拉伯 | 515.3                              | 13.1      | 俄罗斯   | 601.7                                | 19.6      | 中国    | 1414.5                             | 42.5      |
| 俄罗斯   | 488.5                              | 12.4      | 美国    | 582.2                                | 19.0      | 美国    | 596.9                              | 18.0      |
| 美国    | 305.1                              | 7.8       | 加拿大   | 175.2                                | 5.7       | 澳大利亚  | 219.9                              | 6.6       |
| 伊朗    | 209.8                              | 5.3       | 伊朗    | 116.3                                | 3.8       | 印度    | 194.3                              | 5.8       |
| 中国    | 189.7                              | 4.8       | 挪威    | 99.2                                 | 3.2       | 俄罗斯   | 152.8                              | 4.6       |
| 墨西哥   | 157.4                              | 4.0       | 阿尔及利亚 | 86.5                                 | 2.8       | 南非    | 141.1                              | 4.2       |
| 加拿大   | 156.7                              | 4.0       | 沙特阿拉伯 | 78.1                                 | 2.5       | 印度尼西亚 | 141.1                              | 4.2       |
| 阿联酋   | 139.5                              | 3.6       | 卡塔尔   | 76.6                                 | 2.5       | 波兰    | 60.5                               | 1.8       |
| 科威特   | 137.3                              | 3.5       | 中国    | 76.1                                 | 2.5       | 哈萨克   | 58.8                               | 1.8       |
| 委内瑞拉  | 131.6                              | 3.3       | 印度尼西亚 | 69.7                                 | 2.3       | 哥伦比亚  | 47.8                               | 1.4       |
| 世界总计  | 3928.8                             | 100       | 世界总计  | 3065.6                               | 100       | 世界总计  | 3324.9                             | 100       |

### (2) 天然气

2008 年世界天然气产量为  $3065.6 \times 10^9 \text{ m}^3$ ，主要产自欧洲及欧亚大陆地区和北美，分别为  $1087.3 \times 10^9 \text{ m}^3$  和  $812.3 \times 10^9 \text{ m}^3$ ，这两个地区的产量占世界的 62%。接下来依次为亚太、中东和非洲，中南美地区产量最少，不足世界的 5%，见表 1.3。

天然气产量世界排名前 10 位的国家是俄罗斯、美国、加拿大、伊朗、挪威、阿尔及利亚、沙特阿拉伯、卡塔尔、中国、印度尼西亚，它们的总产量为  $1961.6 \times 10^9 \text{ m}^3$ ，占世界的 63.9%。美国和俄罗斯是世界产气大国，产量分别为  $601.7 \times 10^9 \text{ m}^3$ 、 $582.2 \times 10^9 \text{ m}^3$ ，它们的天然气产量均接近世界的 40%。其他国家均不足世界的 6%。中国天然气产量为  $76.1 \times 10^9 \text{ m}^3$ ，占世界的 2.5%，排在世界第 9 位，见表 1.4。

### (3) 煤炭

2008 年世界煤炭产量为  $3324.9 \times 10^6 \text{ t}$ ，主要分布在亚太和北美地区，分别为  $2030.7 \times 10^6 \text{ t}$  和  $638.4 \times 10^6 \text{ t}$ 。两地区产量共计占世界总量的 80%