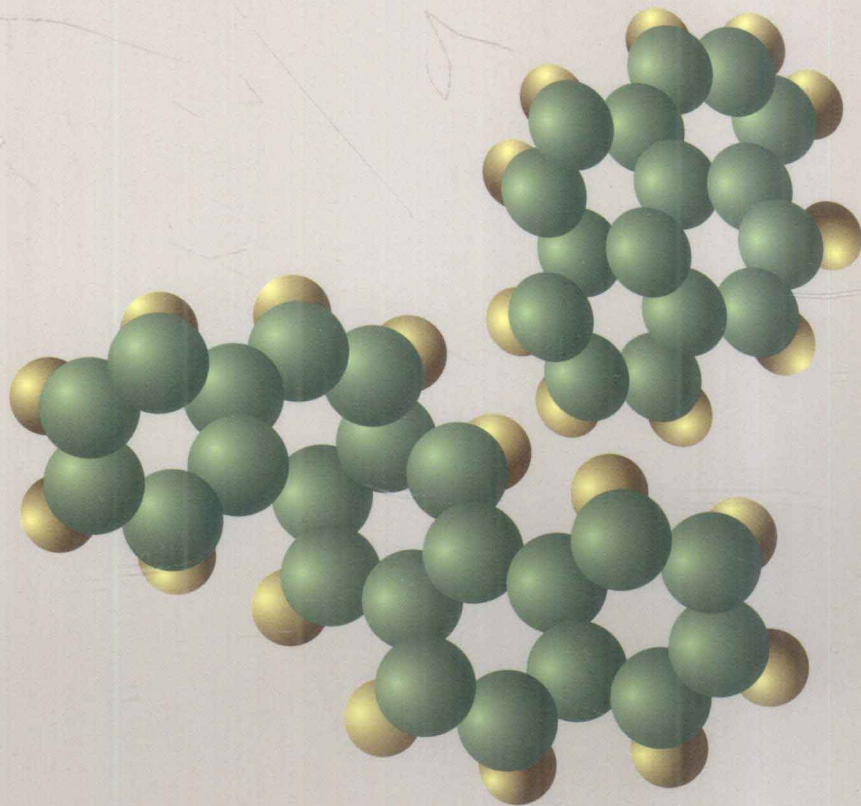


环保公益性行业科研专项经费项目系列丛书

多环芳烃污染的 人体暴露和健康风险 评价方法

EXPOSURE MEASUREMENT AND
HEALTH RISK ASSESSMENT OF HUMAN EXPOSURE TO
POLYCYCLIC AROMATIC HYDROCARBONS

段小丽 陶澍 徐东群 蒋秋静 编著



中国环境科学出版社

环境科学与健康

人体暴露环境健康风险 评价方法

中国疾病预防控制中心环境与健康风险评估所
环境与健康风险评估所 编

北京：中国疾病预防控制中心环境与健康风险评估所 编



环保公益性行业科研专项经费项目系列丛书

多环芳烃污染的人体暴露 和健康风险评价方法

段小丽 陶 澍 徐东群 蒋秋静 编著

中国环境科学出版社·北京

图书在版编目 (CIP) 数据

多环芳烃污染的人体暴露和健康风险评价方法/段小丽等编著.—北京:中国环境科学出版社,2011.10

ISBN 978-7-5111-0712-1

I. ①多… II. ①段… III. ①多环烃:芳香族烃—化学污染:环境污染—风险评价 IV. ①X783②X820.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 188484 号

责任编辑 孟亚莉
责任校对 扣志红
封面设计 玄石至上

出版发行 中国环境科学出版社
(100062 北京东城区广渠门内大街 16 号)
网 址: <http://www.cesp.com.cn>
联系电话: 010-67112765 (总编室)
发行热线: 010-67125803, 010-67113405 (传真)

印 刷 北京中科印刷有限公司
经 销 各地新华书店
版 次 2011 年 10 月第 1 版
印 次 2011 年 10 月第 1 次印刷
开 本 787×1092 1/16
印 张 15.5
字 数 360 千字
定 价 42.00 元

【版权所有。未经许可请勿翻印、转载,侵权必究】

如有缺页、破损、倒装等印装质量问题,请寄回本社更换

环保公益性行业科研专项经费项目系列丛书

编 著 委 员 会

顾 问：吴晓青

组 长：赵英民

副组长：刘志全

成 员：禹 军 王泽林 刘海波 陈 胜

本书编写组

主 编

- | | |
|-----|----------------------------|
| 段小丽 | 中国环境科学研究院 环境基准与风险评估国家重点实验室 |
| 陶 澍 | 北京大学城市与环境学院 |
| 徐东群 | 中国疾病预防控制中心 环境与健康相关产品安全所 |
| 蒋秋静 | 太原市环境科学研究设计院 |

编写组

- | | |
|-----|----------------------------|
| 王贝贝 | 中国环境科学研究院 环境基准与风险评估国家重点实验室 |
| 黄 楠 | 中国环境科学研究院 环境基准与风险评估国家重点实验室 |
| 夏忠欢 | 北京大学城市与环境学院 |
| 刘文新 | 北京大学城市与环境学院 |
| 汪宜龙 | 北京大学城市与环境学院 |
| 方建龙 | 中国疾病预防控制中心 环境与健康相关产品安全所 |
| 徐春雨 | 中国疾病预防控制中心 环境与健康相关产品安全所 |
| 卢 彬 | 太原市环境科学研究设计院 |
| 胡新新 | 太原市环境科学研究设计院 |
| 王叶晴 | 北京科技大学 |
| 汪翠萍 | 清华大学 |
| 石 晶 | 中国劳动关系学院 |
| 李天昕 | 北京科技大学 |
| 王宗爽 | 中国环境科学研究院 环境基准与风险评估国家重点实验室 |
| 张文杰 | 中国环境科学研究院 环境基准与风险评估国家重点实验室 |
| 张金良 | 中国环境科学研究院 环境基准与风险评估国家重点实验室 |
| 聂 静 | 中国环境科学研究院 环境基准与风险评估国家重点实验室 |
| 钱 岩 | 中国环境科学研究院 环境基准与风险评估国家重点实验室 |

王菲菲	中国环境科学研究院 环境基准与风险评估国家重点实验室
赵秀阁	中国环境科学研究院 环境基准与风险评估国家重点实验室
李 屹	中国环境科学研究院 环境基准与风险评估国家重点实验室
王先良	中国环境科学研究院 环境基准与风险评估国家重点实验室
刘 玲	中国环境科学研究院 环境基准与风险评估国家重点实验室
丁明玉	中国环境科学研究院 环境基准与风险评估国家重点实验室
刘 迪	北京大学城市与环境学院
邱炜珣	北京大学城市与环境学院
周慧霞	中国疾病预防控制中心 环境与健康相关产品安全所
何 怡	中国疾病预防控制中心 环境与健康相关产品安全所
李万伟	中国疾病预防控制中心 环境与健康相关产品安全所
王 秦	中国疾病预防控制中心 环境与健康相关产品安全所
施建华	太原市环境科学研究设计院
宋运学	太原市环境科学研究设计院
李 娟	太原市环境科学研究设计院
张开先	太原市环境科学研究设计院
刘晓璘	太原市环境科学研究设计院
王志强	太原市环境科学研究设计院

序

多环芳烃 (PAHs) 是世界上最早发现的对人类有致癌效应的一类污染物, 由于它可以诱发多种癌症而引起世界各国科学家的关注和深入研究。多环芳烃可在森林大火、火山爆发和生物合成中产生, 因此在环境介质中有一定的本底值。但它主要是工业化过程大量使用化石燃料 (煤、石油、天然气) 以及生物质燃料燃烧产生的副产物; 食品高温爆炒、油炸、熏烤加工也会产生。多环芳烃类有 400 余种单体化合物和取代衍生物, 其中以苯并(a)芘 (BaP) 致癌性最强, 其他的有一定的致癌性, 均以 BaP 当量毒性计, 大多数低环的化合物无致癌性。

随着我国工业和城镇化的快速发展, 改革开放 30 年, 化石能源消耗成倍增长, 环境中多环芳烃污染浓度不断增加, 与之相关的癌症, 特别是肺癌发病率和死亡率增加了数倍, 成为威胁群众健康的危险因素之一。人体摄入多环芳烃后会经代谢解毒, 也会形成环氧类化合物而成为直接致癌物, 如何监测、防治和评价多环芳烃的环境风险, 一直是一个研究热点问题。

在国家环保公益性行业科研专项“多环芳烃持久性有机污染物的健康风险评估方法研究”资助下, 中国环境科学研究院、北京大学、中国疾病预防控制中心和太原市环境科学研究设计院的科研人员经过三年多的摸索和实践, 完成了公益项目研究任务, 结合研究人员前期积累的研究成果, 并收集和总结了国内外最新的研究进展和成果, 编著出版了本书。因此本书既具有较高的理论深度, 又有他们自己多年的实践经验, 是进行多环芳烃污染调查、监测、风险评价的有益尝试。本书的出版对我国多环芳烃和其他化学品及其污染物的风险评价有积极的推动作用。

但是，危险化学品及其污染物的风险评价在我国起步较晚，研究报告和实际案例还不多，在国内外报告的数据资料和结论相差较大，尚有许多不完善之处。我们期待有更多的研究成果问世，共同推动此项研究，为风险评价和风险管理提供有力的科技支撑。

魏复成
2011.10.

前 言

当前我国经济高速发展，由于资源能源消耗量加剧而产生的环境污染问题也日益突出，其中，多环芳烃是典型的一类燃烧副产物。随着我国工业燃煤用量增加和城市机动车保有量的增加，多环芳烃的污染问题日益突出。空气中的多环芳烃主要来源于煤炭、石油、生物质等的燃烧，以苯并(a)芘为代表的高环多环芳烃具有致癌、致畸、致突变作用。美国环保局规定 16 种多环芳烃化合物为优先污染物，联合国欧洲经济委员会规定多环芳烃为《长距离越境空气污染物公约》(Convention on Long-range Transboundary Air Pollution) 污染物之一，联合国环境规划署化学品处 (UNEP Chemicals) 发布的《持久性有毒污染物区域评价报告》中特别指出，多环芳烃是包括中国在内的东北亚和中亚地区需要特别关注的污染物。

本书在国家环保公益性行业科研专项“多环芳烃类持久性有机污染物的健康风险评估方法研究”(编号：200809101)(2008—2011 年)资助下出版。集合了此次公益项目的研究结果、编者前期积累的部分研究成果，以及国内外最新的研究进展。

本书共分九章，以多环芳烃污染对人体健康影响的整个过程为主线，按照污染源、环境介质、人体暴露、健康风险的结构而设置。第一章是关于多环芳烃的简要介绍，第二章是多环芳烃的来源和排放；第三章是多环芳烃在环境介质中的分布；第四章是多环芳烃的暴露评价方法(外暴露)；第五章是多环芳烃生物标志物(内暴露)；第六章、第七章是多环芳烃的健康风险评价方法及典型案例；第八章是多环芳烃的样品采集和分析方法；第九章是多环芳烃的风险防范措施。

本书可作为环境健康、环境科学、环境化学、环境监测等领域科研人员、技术人员和管理人员开展多环芳烃的分析、监测、评价和污染控制方面的参考书。本书中提出的多环芳烃的暴露评价和健康风险评价方法对于其他污染物的暴露评价和健康风险

评价方法实施也具有一定的借鉴价值。

感谢国家环保公益性行业科研专项的资助，感谢编写组全体成员的共同努力，感谢对本书提供了指导和帮助的各位专家和领导。

由于编者经验所限，书籍中难免存在一些问题，敬请各位读者多提宝贵意见。

段小丽 陶 澍 徐东群 蒋秋静

2011 年 10 月

目 录

第一章 多环芳烃简介	1
第一节 多环芳烃的定义和分类.....	1
第二节 多环芳烃的理化性质.....	4
第三节 多环芳烃的人体暴露、吸收和代谢机理.....	6
第四节 多环芳烃对人体健康的影响.....	10
本章参考文献	18
第二章 环境中多环芳烃的来源和排放	20
第一节 来 源	20
第二节 排 放	26
本章参考文献	31
第三章 多环芳烃在环境介质中的分布及迁移转化	34
第一节 多环芳烃在空气中的分布.....	35
第二节 多环芳烃在水体和沉积物中的分布.....	41
第三节 多环芳烃在土壤中的分布.....	45
第四节 多环芳烃在食品中的分布.....	47
第五节 多环芳烃在环境中的迁移和转化.....	51
本章参考文献	60
第四章 多环芳烃的暴露评价方法	62
第一节 暴露评价的基本概念.....	62
第二节 多环芳烃呼吸暴露的评价方法.....	74
第三节 多环芳烃饮食暴露的评价方法.....	81
第四节 多环芳烃皮肤暴露的评价方法.....	88
第五节 多途径多介质暴露的多环芳烃综合评价方法.....	89
本章参考文献	92

第五章 多环芳烃暴露的生物标志物	95
第一节 生物标志物	95
第二节 多环芳烃的生物标志物	97
第三节 多环芳烃尿液中生物标志物的研究	99
第四节 多环芳烃血液中生物标志物的研究	108
第五节 实例分析	111
本章参考文献	119
第六章 多环芳烃的健康风险评估方法	124
第一节 环境健康风险评估概论	124
第二节 多环芳烃的危害和剂量—反应关系系数	132
第三节 多环芳烃健康风险评估中的常见暴露参数	136
第四节 多环芳烃健康风险评估的主要方法	147
本章参考文献	159
第七章 多环芳烃健康风险评估案例	164
第一节 多环芳烃呼吸暴露健康风险评估案例	165
第二节 多环芳烃饮食暴露健康风险评估案例	178
第三节 多环芳烃饮水暴露健康风险评估案例	182
第四节 多环芳烃皮肤暴露健康风险评估案例	183
第五节 基于多环芳烃生物标志物的健康风险评估案例	184
本章参考文献	188
第八章 多环芳烃的采集和分析方法	192
第一节 环境空气中多环芳烃的采集、前处理和分析方法	192
第二节 水中多环芳烃的采集、前处理和分析方法	206
第三节 沉积物中多环芳烃的采集、前处理和分析方法	211
第四节 土壤中多环芳烃的采集、前处理和分析方法	215
第五节 食品中多环芳烃的采集、前处理和分析方法	218
本章参考文献	222
第九章 多环芳烃的风险防范措施	226
本章参考文献	233

第一章 多环芳烃简介

第一节 多环芳烃的定义和分类

一、定义

多环芳烃 (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, PAHs) 是指两个或两个以上苯环或环戊二烯稠合而成的化合物。

两个以上的苯环连在一起可以有两种方式：一种是非稠环型的，即苯环与苯环之间各有一个碳原子相连，如图 1-1 中的联苯和三苯甲烷等；另一种是稠环型的，即两个碳原子为两个苯环所共有，如图 1-1 中的蒽、蒎等。多环芳烃一般是指稠环型化合物，所以确切地应叫做稠环烃。由于国内外很多文献都把它们叫做多环芳烃，所以本书也采用多环芳烃这个名称，该名称实际上已成为稠环芳烃的同义词，不再包括联苯类化合物。

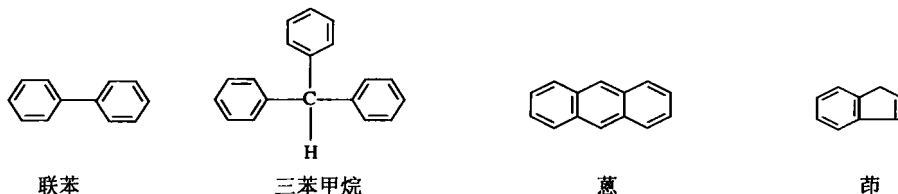


图 1-1 不同苯环连接方式的代表性芳香化合物

二、分类

目前已经发现的多环芳烃及其衍生物有几百种。根据不同的方式可以分为不同的种类。

(一) 按照污染控制优先顺序分类

由于多环芳烃数量众多，美国国家环境保护局 (USEPA) 根据其在环境中分布的普遍性、人群暴露和健康风险程度及其毒性，规定将萘、苊、二氢苊、芴、菲、蒽、荧蒽、芘、苯并(a)蒽、蒎、苯并(b)荧蒽、苯并(k)荧蒽、苯并(a)芘、二苯并(a,h)蒽、苯并(ghi)芘、茚并(1,2,3-cd)芘这 16 种多环芳烃作为优先控制污染物，结构如图 1-2 所示。这 16 种多环芳烃也是本书主要关注的化合物。

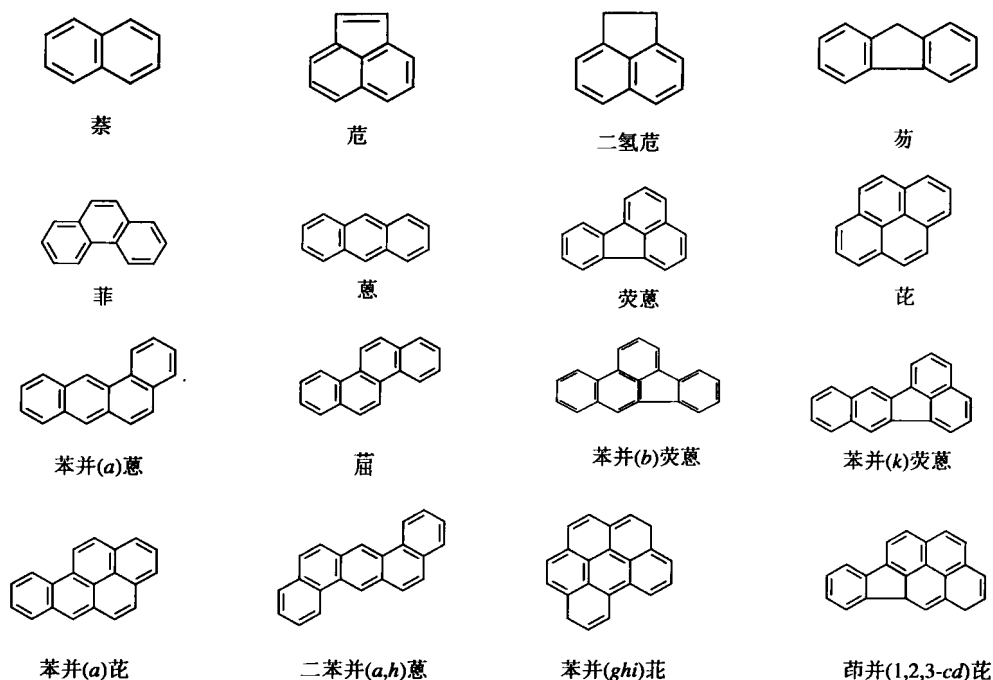


图 1-2 美国国家环境保护局规定的 16 种多环芳烃优先控制污染物

(二) 按照苯环中的碳原子是否被取代分类

按照苯环中碳原子是否被取代，多环芳烃可以分为杂环类多环芳烃和非杂环类多环芳烃。其中杂环类多环芳烃是指苯环上的某个或某些碳原子被氮、硫、氧等其他元素所取代的多环芳烃，其余均为非杂环类多环芳烃。若无特别说明，本书中所指的多环芳烃主要为非杂环类多环芳烃。

(三) 按照环数分类

多环芳烃按照苯环数目的多少可以分为双环芳烃（如萘）、三环芳烃（如蒽和菲）、四环芳烃（如芘、芘）、五环芳烃（如二苯并(a, h)蒽、苯并(a)芘）、六环芳烃（如苯并(ghi)芘）等（图 1-2）。

(四) 按照分子结构分类

按照多环芳烃的分子结构可将其分为直链多环芳烃和角状多环芳烃（图 1-3）。

(五) 按致癌性分类

按照致癌性与否，多环芳烃可分为致癌和非致癌两种类型。其中，致癌性多环芳烃包括苯并(a)芘、苯并(b)荧蒽、苯并(k)荧蒽和二苯并(a,h)蒽等；非致癌多环芳烃包括二氢蒽、芴、苯并(ghi)芘等。

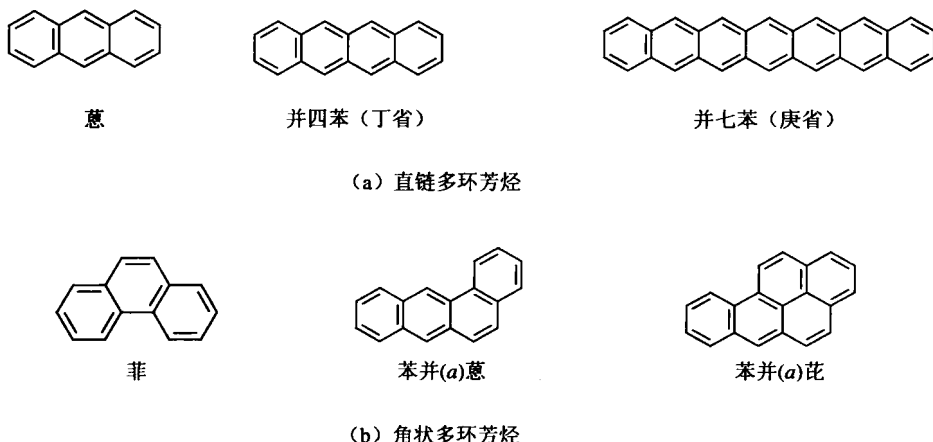


图 1-3 多环芳烃根据分子结构分类

三、命名

多环芳烃的命名应该遵循以下原则：

(1) 确定基本组分。首先选择一个尽可能多的环作为基本组分，这些基本组分参照下列名称：蒽、菲、芴、芘、苊、蒾、茚、晕苯、丁省、己省、庚省等。

(2) 定向。将基本组分的最多环数排成一横排，其他的组分尽可能多的环数放在水平横排的右上方。

(3) 碳原子编号。基本组分是一水平横排，在水平横排的上方，最右边的环，没有和其他环拼接的非共用碳原子为第一碳原子，然后按顺时针用数字依次编号（C1、C2、C3……）。

(4) 用字母编排“边”。第一碳原子与第二碳原子之间的键用“a”边表示，其他边按顺时针方向用字母依次编为 b、c、d……

(5) 凝聚物系统。在规则（1）中没有涉及的组分，可作为缩合产物，在缩合产物中较小的组分放在基本组分名称的前面作为前缀（如蔡芘）。这个较小的组分参与拼接的碳原子的位置，用字母表示，放在两个组分之间，于基本组分的前面，用括号括上，表示在基本组分上拼接的边，如果有几个小的组分与基本组分不相连的边拼接（如二苯并(a, h)蒽），这个边可用逗号分开。假如一个小的组分和基本组分几个相连的边拼接，则拼接的边不用逗号分开（如苯并(ghi)芘）。

例如：苯并(a)芘和苯并(e)芘。首先，根据规则（1）确定基本组分，它的基本组分是芘，再根据规则（2）将芘定向，也就是将基本组分的最多环数排成一横排，其他组分尽可能多的环数放在水平横排的右上方，见图 1-4（1）。再根据规则（3），给芘环碳原子编号，也就是从横排上方最右边的环编起，以最右边环上没有与其他环拼接的碳原子编为第一个碳原子，然后均用阿拉伯数字按顺时针方向给环上碳原子编号，如图 1-4（2）。按规则（4）用英文字母编排碳原子的边。第一碳原子与第二碳原子之间的键用字母“a”表示为 a 边；第二碳原子与第三碳原子间用“b”表示为 b 边，依次为 c、d、e……苯并(a)

蒽和苯并(e)蒽，是一个苯环和蒽的“a”边，和与蒽的“e”边拼接而成的，见图 1-4（3）和图 1-4（4）。

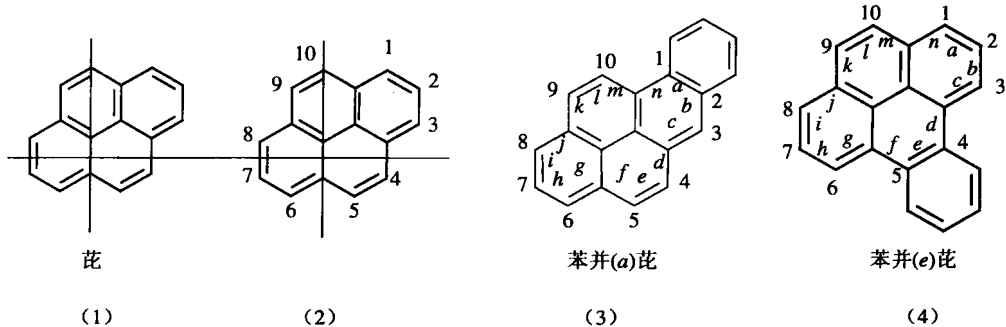


图 1-4 多环芳烃命名规则举例

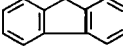
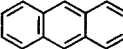
第二节 多环芳烃的理化性质

一、多环芳烃的物理性质

大多数多环芳烃在常温下都是固态，沸点比相同碳原子数目的正构直链烷烃高。三环以上多环芳烃都是无色或淡黄色晶体，个别颜色比较深。苯环数目比较少（如 2~3 个苯环）的多环芳烃蒸气压较高，在空气中主要分布在气相中，具有 5~6 个苯环的多环芳烃蒸气压较低，在空气中主要吸附于颗粒物表面上，介于两者之间的含有 3~4 个苯环的多环芳烃在空气中在气相和固相间均有分布。分子越大的多环芳烃挥发性、溶解度越低，对环境的影响越小。

一些常见多环芳烃的物理性质见表 1-1。

表 1-1 常见多环芳烃的主要物理参数

名称	英文缩写	分子量	分子式	分子结构	颜色晶形	熔点/℃	沸点/℃	相对密度	溶解性
茚 Indene	Ind	116.16	C ₉ H ₈		无色透明油状液体	-1.8	182.6	0.991 5	醇、醚、丙酮、苯、嘧啶
萘 Naphthalene	Nap	128.19	C ₁₀ H ₈		光亮的片状晶体	80.5	217.9	1.162	醇、醚、丙酮、苯
苈 Acenaphthylene	Ace	154.21	C ₁₂ H ₁₀		白色或略带黄色斜方针状结晶	92~93	279	1.0242	醇、醚、苯
芴 Fluorene	Flu	166.22	C ₁₃ H ₁₀		白色叶状至小片状结晶	116~117	295	1.202	醇、醚、苯
蒽 Anthracene	Ant	178.22	C ₁₄ H ₁₀		平片体或单斜晶	217	342	1.25	丙酮、苯