

地下水名著译丛



Contaminant Hydrogeology
(Second Edition)

污染水文地质学 (第二版)

[美] C. W. Fetter 著

周念清 黄勇 译

周志芳 校



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

地下水名著译丛

Contaminant Hydrogeology

(Second Edition)

污染水文地质学

(第二版)

Wuran Shuiwen Dizhixue

[美] C. W. Fetter 著

周念清 黄 勇 译
周志芳 校



高等教育出版社·北京
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

图字：01-2010-3259 号

Contaminant Hydrogeology, Second Edition

Copyright © 1999, 1993 by C. W. Fetter

2008 reissued by Waveland Press, Inc.

The English language edition of this book is published by
Waveland Press, Inc.

4180 IL Route 83, Suite 101, Long Grove, Illinois 60047
United States of America

图书在版编目(CIP)数据

污染水文地质学：第2版 / (美) 费特 (Fetter, C. W.) 著；周念清，黄勇译. — 北京：高等教育出版社，2011.9

书名原文：Contaminant Hydrogeology

ISBN 978 - 7 - 04 - 032454 - 9

I. ①污… II. ①费…②周…③黄… III. ①水污染 - 水文地质学 IV. ①X143

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 181056 号

策划编辑 陈正雄 责任编辑 陈正雄 封面设计 张楠 版式设计 范晓红
责任绘图 尹莉 责任校对 刘莉 责任印制 韩刚

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100120
印 刷 高等教育出版社印刷厂
开 本 787 × 1092 1/16
印 张 28
字 数 620 000
购书热线 010 - 58581118

咨询电话 400 - 810 - 0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
版 次 2011 年 9 月第 1 版
印 次 2011 年 9 月第 1 次印刷
定 价 59.00 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题，请到所购图书销售部门联系调换

版权所有 侵权必究

物 料 号 32454 - 00

译者序

随着工农业生产的迅速发展和社会人口的不断增长,环境污染特别是地下水的污染日趋严重,各种施加在地表的污染物随下渗的水经过非饱和带进入地下水中,因此,地下水中的污染物迁移问题已引起人们的高度重视。《污染水文地质学(第二版)》(*Contaminant Hydrogeology (Second Edition)*, C. W. Fetter著)是一部在国际上具有很大影响的专业著作,许多知名大学都使用该书作为研究生教学参考书。鉴于本书知识的系统性、理论的完整性和案例的实用性,我们将本书翻译成中文,便于国内水文地质和环境等方面的相关专业人士参考。

本书对有机和无机污染物在土壤和地下水中的迁移规律进行了研究和探讨,特别是多相流问题,涉及当前石油类产品的污染,如对轻非水相液体(LNAPLs)和重非水相液体(DNAPLs)在饱和-非饱和带中迁移规律的研究,是当今环境水文地质研究的热门和难点课题。同时,该书还对地下水和土壤受到污染后的修复技术进行了阐述,为地下水资源的可持续利用和环境保护提供了相关的理论和方法。

本书共分为9章:第1章主要介绍地下水污染物的类型和来源;第2章主要阐述饱和介质中的物质迁移,包括对流-弥散方程的推导和求解、弥散度的实验确定、弥散的尺度效应和分形理论等;第3章介绍溶质的转化、阻滞、衰减和吸附反应;第4章详细地介绍了非饱和带中的水流和物质迁移规律;第5章阐述了多相流中物质迁移的基本概念和基本理论,重点研究LNAPLs和DNAPLs污染物的迁移和分解;第6章和第7章分别介绍地下水中的无机污染物和有机污染物的一些基本性质;第8章探讨了地下水取样和土壤监测时的观测孔设计、施工和监测仪器的安装等问题;第9章介绍地下水和土壤受到污染后的场地修复技术。其中第3章、第4章、第6章、第7章、第8章、第9章和附录由同济大学的周念清翻译;第1章、第2章、第5章由河海大学的黄勇翻译;全书由周念清统稿,河海大学的周志芳译校。

本书是译者在两年多的时间中陆续翻译完成的,在书稿翻译整理过程中,同济大学的硕士研究生杨文君、魏诚寅做了大量的工作;书稿中的插图初稿是由研究生徐小朋和河海大学的汤俣周等制作完成的。在此,一并表示感谢。同时,本书的编辑整理和出版工作得到了同济大学教学改革项目(编号:0200104231)的支持,使得这项工作得以顺利实施,在此也特别致谢。

译者

2011年3月

《污染水文地质学》(*Contaminant Hydrogeology*) 第一版自 1993 年出版以来, 场地污染水文地质学的受关注程度和重要性日益增加。第一版中已经涵盖了许多重要的实用性内容, 但是, 第二版增加了更多的已解决的问题 (15 个) 和研究实例 (8 个), 并首次在章末给出了习题。同时在书后的 CD-ROM 中还附有免费的污染物迁移软件学生版本——含有 MODPATH 和 MT3D 的可视化 MODFLOW。该版本的编排结构与第一版一致。在现有章节的基础上对材料和章节进行了扩充, 并附有可供教师使用的习题参考答案。

《污染水文地质学 (第二版)》可作为研究生学习质量迁移和污染水文学的教材, 主要用于地质学、土木工程、地质工程或农业工程等专业。为了能更好地理解本书, 学生应该先完成水文地质学、化学、微积分和物理学这些基础课程的学习。除了作为教科书以外, 本书对从事水文地质工作的专家们也是很有价值的参考书。

第二版和第一版一样应用了很多变量, 远不止 26 个英文字母及 24 个希腊字母所能表示的。每个变量在每章初次出现时给出了定义, 同时在每章的末尾也有注释。一些符号在不同的章节所表示的含义不同, 因此在每章末尾确定符号所表示的含义十分重要。大多数情况下, 正文里用到的符号与原参考文献中的符号不同, 是为了保持书中的一致性。文中的测量单位都为缩写, 在附件 E 中可以找到这些缩写的标识。

我衷心感谢那些帮助我的工作的人员。蒙大拿州立大学的 Al Cunningham、明尼苏达大学的 Walter J. Maier、犹他州立大学的 Jagath J. Klauararchchi、新墨西哥矿业理工学院的 Michael Whitworth、西密歇根大学的 Alan E. Kehew、加利福尼亚大学伯克利分校的 Brian Schroth 以及弗吉尼亚理工大学的 Mark A. Widdowson 都为第一版提出了修改建议。包括佐治亚理工学院的 Dennis Grubb 在内的一些人士指出了第一版中错误的地方。普林斯顿地下水联营公司 (Princeton Groundwater Associates) 的 Robert Cleary、Friedman 和 Bruya 公司 (Friedman & Bruya, Inc.) 的 James Bruya 审核了文中的章节。滑铁卢水文地质公司 (Waterloo Hydrogeologic Inc.) 的 Nielson Gruiger 提供了含有 MODPATH 和 MT3D 的可视化 MODFLOW 学生版本。美国地质调查局的 Donald Vroblosky 和 Friedman 和 Bruya 公司的 James Bruya 提供了插图材料。最后, 我要感谢过去 8 年来 Prentice Hall 出版社的编辑 Robert McConnin 的努力工作, 是他的不断引导和适时催促才使我完成了几本书的写作 (编辑注: 本书译自 Waveland 出版公司的新版, 与 Prentice-Hall 版有些差异)。

C. W. Fetter, Jr.

第 1 章 绪论	1
1.1 地下水资源	1
1.2 地下水污染物类型	2
1.3 饮用水标准	12
1.4 风险与饮用水	15
1.5 地下水污染物来源	17
1.5.1 类别 I: 排放设施	18
1.5.2 类别 II: 储存、处理或处置设施	19
1.5.3 类别 III: 物料传输设备	24
1.5.4 类别 IV: 其他有计划作业的排放后果	25
1.5.5 类别 V: 为受污染的水进入含水层提供管道	26
1.5.6 类别 VI: 因人类活动导致或加速的天然排放	27
1.6 地下水污染源的相对排序	27
1.7 地下水污染的长期性问题	30
1.8 数学和流体运动方程回顾	31
1.8.1 导数	31
1.8.2 达西定律	32
1.8.3 水头和渗透系数的标量、矢量和张量特性	32
1.8.4 变形介质中流体运动方程的推导	34
1.8.5 数学符号	35
参考文献	36
习题	38
第 2 章 饱和介质中的物质迁移	39
2.1 引言	39
2.2 浓度梯度作用下的迁移	39
2.3 对流迁移	42

2.4 机械弥散	44
2.5 水动力弥散	45
2.6 溶质迁移的对流 - 弥散方程的推导	46
2.7 扩散与弥散	48
2.8 对流 - 弥散方程的解析解	49
2.8.1 求解方法	49
2.8.2 边界条件和初始条件	50
2.8.3 浓度的一维阶跃变化 (第一类边界)	51
2.8.4 一维连续注入流场 (第二类边界)	51
2.8.5 第三类边界条件	54
2.8.6 一维段塞注入流场	55
2.8.7 连续注入均匀二维流场	55
2.8.8 段塞注入均匀二维流场	59
2.9 横向弥散作用	62
2.10 试验确定弥散度	63
2.10.1 实验室试验	63
2.10.2 野外试验	66
2.10.3 单井示踪剂试验	67
2.11 弥散的尺度效应	69
2.12 溶质迁移的随机模型	73
2.12.1 简介	73
2.12.2 非均质性的随机描述	73
2.12.3 溶质迁移的随机方法	75
2.13 野外尺度弥散的分形几何理论	80
2.13.1 简介	80
2.13.2 分形数学	80
2.13.3 分形几何和弥散	80
2.13.4 渗透系数的分形标度	82
2.14 表观纵向弥散度和野外尺度关系的回归分析	84
2.15 溶质迁移的确定型模型	84
案例研究: 加拿大安大略省 Bordon 垃圾填埋场污染羽	87
2.16 裂隙介质中的溶质迁移	93
2.17 小结	97
本章符号	98
参考文献	99
习题	103

第 3 章 溶质转化、阻滞和衰减	105
3.1 引言	105
3.2 化学反应类型	105
3.3 吸附过程	106
3.4 表面反应平衡	107
3.4.1 线性吸附等温线	107
3.4.2 Freundlich 吸附等温线	109
3.4.3 Langmuir 吸附等温线	110
3.4.4 平衡阻滞对溶质迁移的影响	111
3.5 非平衡 (动力) 吸附模型	114
3.6 疏水 (有机) 化合物的吸附作用	116
3.6.1 简介	116
3.6.2 土壤或含水层有机碳上的分配	117
3.6.3 由 K_{ow} 估计 K_{oc}	118
3.6.4 由溶解度估计 K_{oc}	120
3.6.5 由分子结构估计 K_{oc}	122
3.6.6 多溶质效应	124
案例研究: 木馏油在水中的溶解	124
3.7 均相反应	126
3.7.1 简介	126
3.7.2 化学平衡	126
3.7.3 化学动力学	127
3.7.4 化学反应中的 Tenads	127
3.8 放射性衰变	129
3.9 生物降解	130
3.10 胶体迁移	134
案例研究: 加拿大安大略省 Borden 砂质含水层在天然地下水梯度下反应 性和非反应性溶质的大尺度野外试验	135
3.11 小结	140
本章符号	140
参考文献	141
习题	145
第 4 章 包气带中的水流和物质迁移	147
4.1 引言	147
4.2 作为多孔介质的土壤	147
4.3 土壤胶体	148
4.4 双电层	148
4.5 盐度对土壤渗透系数的影响	150

4.6 包气带水流	151
4.6.1 土水势	151
4.6.2 土壤水分特征曲线	152
4.6.3 滞后现象	156
4.6.4 土壤水分特征曲线绘制	158
4.6.5 土水势的测量	158
4.6.6 包气带的渗透系数	160
4.6.7 Buckingham 流动定律	163
4.6.8 Richards 方程	163
4.6.9 气相迁移	164
4.7 包气带中的物质迁移	164
4.8 物质迁移平衡模型	165
4.9 物质迁移非平衡模型	167
4.10 阴离子排斥	168
案例研究: 溶质和湿润锋面的相对运动	170
4.11 包气带优势流动路径	172
4.12 小结	174
本章符号	175
参考文献	175
习题	177

第 5 章 多相流 178

5.1 引言	178
5.2 基本概念	179
5.2.1 饱和度	179
5.2.2 表面张力和湿润性	179
5.2.3 毛管压力	180
5.2.4 相对渗透率	182
5.2.5 两相流的达西定律	185
5.2.6 流体势和水头	186
5.3 轻非水相液体 (LNAPLs) 的迁移	189
5.4 NAPLs 的挥发	194
5.5 漂浮物厚度的测量	198
5.6 潜水面升降对 LNAPLs 分布的影响	205
案例研究: 喷气燃料的泄漏 —— 潜水面下降对产物回收的影响	206
5.7 重非水相液体 (DNAPLs) 的迁移	208
5.7.1 相对迁移率	208
5.7.2 包气带中的迁移	209
5.7.3 饱和带中的垂直运动	210

5.7.4 饱和带中的水平运动	211
案例研究: 潜水面以下一个储存罐泄漏的四氯乙烯的移动	213
5.7.5 裂隙中的 DNAPL 流	215
5.7.6 DNAPL 的溶解	218
5.8 LNAPLs 和 DNAPLs 的监测	218
5.9 小结	221
本章符号	221
参考文献	222
习题	225
第 6 章 地下水中的无机化学物质	226
6.1 引言	226
6.2 浓度单位和活度	226
6.3 化学平衡和质量作用定律	227
6.4 氧化 - 还原反应	230
6.5 pH 和 Eh 的关系	234
6.5.1 pH	234
6.5.2 Eh 和 pH 的关系	235
6.5.3 Eh - pH 图	235
6.5.4 Eh-pH 图的绘制实例	238
6.6 金属络合物	247
6.6.1 阳离子的水合作用	247
6.6.2 络合作用	248
6.6.3 有机络合剂	248
6.7 非金属无机污染物的化学性质	249
6.7.1 氟化物	249
6.7.2 氯和溴	250
6.7.3 硫	250
6.7.4 氮	252
6.7.5 砷	252
6.7.6 硒	254
6.7.7 磷	254
6.8 金属的化学性质	254
6.8.1 铍	254
6.8.2 锆	255
6.8.3 钡	255
6.8.4 钒	255
6.8.5 铬	255
案例历史: 美国得克萨斯州 Odessa 地下水的六价铬污染	256

6.8.6 钴	258
6.8.7 镍	258
6.8.8 钼	258
6.8.9 铜	259
6.8.10 银	259
6.8.11 锌	259
6.8.12 镉	259
6.8.13 汞	259
6.8.14 铅	260
6.9 放射性同位素	261
6.9.1 简介	261
6.9.2 放射性核素阳离子的吸附	262
6.9.3 铀	262
案例历史: 美国俄亥俄州 Fernald 地下水的铀污染	265
6.9.4 钍	267
6.9.5 镭	268
6.9.6 氡	269
6.9.7 氟	269
6.10 地球化学分带	270
6.11 小结	272
本章符号	272
参考文献	273
习题	275

第 7 章 地下水中的有机化合物 277

7.1 引言	277
7.2 有机化合物的物理性质	277
7.3 有机化合物的分子结构与命名	278
7.3.1 烃类	278
7.3.2 芳香烃	282
7.4 石油和煤焦油	285
7.4.1 石油馏分	285
7.4.2 煤焦油	287
7.4.3 与石油产品和煤焦油有关的地下水污染	288
7.5 官能团	289
7.5.1 有机卤化物	289
7.5.2 醇	291
7.5.3 醚	292
7.5.4 醛和酮	292

7.5.5 羧酸	293
7.5.6 酯.	293
7.5.7 酚.	295
7.5.8 含氮有机化合物	296
7.5.9 含硫含磷有机化合物.	297
7.6 有机化合物的降解.	298
7.6.1 简介	298
7.6.2 烃类的降解.	299
7.6.3 氯代烃类的降解	302
7.6.4 有机农药的降解	305
7.7 有机分子生物降解实例	306
7.7.1 简介	306
7.7.2 氯代乙烷和氯代乙烯.	306
7.7.3 芳族化合物.	308
7.8 地下水中的有机物分析	309
7.9 指纹法分析石油馏分和煤焦油	314
7.10 小结.	321
参考文献	322
习题	326
第 8 章 地下水和土壤监测	328
8.1 引言	328
8.2 监测孔设计	328
8.2.1 一般原则.	328
8.2.2 监测孔套管.	329
8.2.3 监测孔过滤器	333
8.2.4 自然井和滤层填充井.	334
8.2.5 环形封孔.	335
8.2.6 保护性套管.	336
8.2.7 过滤器的长度和位置.	336
8.2.8 监测孔设计小结	338
8.3 监测孔的安装设施.	339
8.3.1 污染净化措施	339
8.3.2 钻探方法.	340
8.3.3 在污染土层中钻探.	344
8.4 样品采集.	344
8.5 监测孔的安装	346
8.6 监测孔成孔	350
8.7 监测孔施工中的记录工作	352

8.8 监测孔和钻孔的废弃	354
8.9 地下水监测多层采样装置	354
8.10 无钻井情况下的地下水取样方法	356
8.11 井孔取样	359
8.11.1 简介	359
8.11.2 洗井	359
8.11.3 取样设备	360
8.12 监测孔的低流量净化	362
8.13 土壤蒸气监测	363
8.13.1 简介	363
8.13.2 土壤蒸气监测方法	364
8.14 土壤水取样	365
8.14.1 简介	365
8.14.2 空吸渗透仪	365
8.14.3 空吸渗透仪的安装	365
8.15 小结	367
参考文献	368
第 9 章 场地修复	371
9.1 引言	371
9.2 控制污染源的方法	372
9.2.1 固体废物	372
9.2.2 清除与处置	372
9.2.3 包围	373
9.2.4 水动力隔离	376
9.3 抽出 - 处理系统	377
9.3.1 概述	377
9.3.2 捕获带	380
9.3.3 捕获带的计算	382
9.3.4 优化抽水 - 注水系统	388
9.3.5 污染羽的永久稳定化	389
9.4 抽出地下水的后处理系统	389
9.4.1 概述	389
9.4.2 无机污染物的处理	390
9.4.3 溶解有机物的处理	390
9.5 非水相液体的回收	391
9.6 泄漏地下储存罐的清除	395
9.7 土壤蒸气抽提	396
9.8 曝气法和生物漱洗法	399

9.9 生物修复	400
9.9.1 简介	400
9.9.2 烃类的内在生物降解	401
9.9.3 烃类的增强式生物修复	402
9.9.4 有机氯化物的生物修复	404
案例研究: 氯代乙烯的强化生物降解	404
9.10 组合方法	405
案例研究: 在地下水盆地上采用抽出 - 处理地下水修复方法的有效性	408
案例研究: 回收地下水位以下的池化 DNAPL	409
案例研究: 在汽车制造厂油库场地内的土壤和地下水修复	411
9.11 小结	413
本章符号	414
参考文献	414
 附录 A 误差函数值	 418
附录 B Bessel 函数	419
附录 C $W(t_D, B)$ 值	422
附录 D 指数积分	424
附录 E 单位缩写	425
附录 F Visual MODFLOW 软件说明 (自斯伦贝谢水务)	426
索引	428

1.1 地下水资源

地下水是全世界许多人的饮用水源,尤其是在农村。在美国,公共给水设施服务的人中有 42.1% 依靠地下水供给。事实上,所有自供水的家庭都拥有水井,通过它们使用地下水。总的来说,美国一半以上的人口 (51.7%) 的饮用水依靠地下水源(Solley, Pierce 和Perlman, 1993)。

表 1.1 给出了 1990 年美国不同用途的地下水抽取量以及各用途地下水供给占用水总量的百分比。表 1.1 中的公用水是由公共给水事业或私人给水公司提供,用于生活、商业、工业、电厂冷却和市政 (如消防)。其他用途都是自供给,所有者拥有自己的给水系统。许多自供水系统依赖于水井。1980—1984 年间,美国平均每年挖 37 万口水井 (Hindall 和 Eberle, 1989)。

表 1.1 1990 年美国的地下水使用情况

类别	地下水用水量($\times 10^6$ gal/d)	地下水用水量占总用水量的比例 (%)
公用水	15 100	39.2
自给用水 (民用)	3 260	96.2
自给用水 (商业)	908	38.0
灌溉	57 200	37.4
畜牧	1 220	54.2
工业自给式 (淡水)	3 950	20.5
工业自给式 (海水)	9.7	2.9
采矿业 (淡水)	2 020	61.2
采矿业 (咸水)	1 210	71.5
电厂冷却用水	525	2.7

来源: Solley, Pierce 和 Perlman, 1993。

因为地下水为这么多的人口提供饮用水, 所以其水质是至关重要的。美国公共

给水者受 1986 年通过的《安全饮用水法》的约束, 为消费者供应达到特定水质标准的饮用水。如果从源头抽取的水的水质不符合标准, 就要对它进行处理。地下水有可能不符合标准, 因为它可能含有来自天然来源的溶解组分。常见的天然溶解组分包括总溶解性固体、硫酸盐和氯化物。另外, 地下水达不到标准还有可能是因为含有有机液体、溶解态有机和无机成分以及人类病菌。在这些情况下, 地下水已经由于人类活动而受到了污染。

对于自供水系统, 未污染的水源尤为重要。这些系统一般只是在打井之初在一个非常有限的范围内进行典型组分的化验, 如大肠杆菌、硝酸盐、氯化物和铁等。在多数情况下, 地下水的污染是不能通过味道察觉的。因此, 仅通过这些有限的化验, 用水者可能无法意识到拥有的是一个被污染的水源。此外, 除了水质软化和可能的铁质去除, 自供水系统很少进行水质处理。对于想要处理地下水以使其适合饮用的家庭用户来说, 没有多少可靠的选择。

除了维持人类生活, 地下水还有重要的生态功能。许多淡水栖息地依靠泉水补给。一旦补给这些泉水的地下水受到污染, 淡水栖息地的生态功能就会受到损害。

1.2 地下水污染物类型

已经有许多种物质被确认为地下水污染物, 包括合成有机化学品、烃类、无机阳离子、无机阴离子、病菌以及放射性核素等, 相关化合物列于表 1.2。这些物质中的大多数不同程度地溶于水。有些有机化合物是微溶的, 同时以溶解态或不溶性非水相的形式存在, 并在地下迁移。表 1.2 也给出了这些物质的部分用途。如果在地下水中发现某化合物, 这些用途有助于确定污染源的位置。无机阴离子和阳离子在自然界中有赋存, 地下水中的这些物质可来源于天然污染源和人为污染源。一些放射性核素在自然界中也有赋存, 地下水中的放射性核素可来源于天然污染源和采矿、铀削加工、矿石加工、工业应用、放射性废物处置等, 其他人造的放射性核素来源于核武器的生产和试验。

表 1.2 地下水中已发现的物质

污染物	用途
芳香烃	
萘	煤焦油副产品
萘烯	煤焦油副产品
乙酰苯胺 (退热冰)	中间制造、药物、染料
烷基苯磺酸盐	洗涤剂
苯胺	染料、中间物、显影剂、药物、除草剂、杀真菌剂、炼油和炸药
蒽	染料、中间物、煤焦油副产品、半导体研究
苯	洗涤剂、中间物、溶剂、汽油和煤焦油副产品
联苯胺	染料、试剂、橡胶硬化剂
苯并 [a] 蒽	煤焦油副产品

续表

污染物	用途
苯并 [a] 芘	煤焦油副产品
苯并 [b] 荧蒽	煤焦油副产品
苯并 [g,h,i] 芘	煤焦油副产品
苯并 [k] 荧蒽	煤焦油副产品
苯甲醇	溶剂、香料、显影剂、染料和中间物
丁氧基甲苯	NA ^a
蒎	有机合成、煤焦油副产品
木馏油合剂	木材防腐剂、消毒剂
二苯并 [a, h] 蒽	NA
二丁基对苯醌	NA
二氢三甲基咪啉	橡胶抗老剂
4, 4' - 二亚硝基二苯胺	NA
乙苯	中间物、溶剂、汽油、煤焦油副产品
荧蒽	煤焦油副产品
芴	树脂产品、染料、杀虫剂、煤焦油副产品
荧光素	染料
异丙苯	溶剂、化学品制造
4, 4' - 亚甲基 - 双 (2 - 氯苯胺) (MOCA)	聚氨酯、环氧树脂的固化剂
甲基萘	煤焦油副产品、柴油
甲基硫代苯并噻唑	NA
萘	溶剂、润滑剂、炸药、防腐剂、中间物、杀真菌剂、防蛀剂、煤焦油副产品和汽油
邻硝基苯胺	染料、中间物、内墙涂料、化学品制造
硝基苯	溶剂、上光剂、化学品制造
4 - 硝基酚	化学品制造
N - 亚硝基二苯胺	农药、橡胶抗硫化剂
菲	染料、炸药、麻药合成、生化研究
正丙苯	染料、溶剂
芘	生化研究、煤焦油副产品
苯乙烯	塑料、树脂、保护膜、中间物、汽油、
甲苯	塑料胶黏剂、溶剂、航空高辛烷值汽油调和料、稀释剂、化学品、炸药、洗涤剂、汽油和煤焦油副产品
1, 2, 4 - 三甲基苯	染料制造、药物、化学品制造、汽油
二甲苯 (邻、间、对)	航空汽油、保护膜、溶剂、有机合成、汽油和煤焦油副产品
氧化烃	
乙酸	食品添加剂、塑料、染料、药物、显影剂和杀虫剂
丙酮	染料、溶剂、化学品制造、精密仪器清洗剂和干燥剂
二苯甲酮	有机合成、臭味固定剂、调味剂、药物