

蒋建国 编著

# 固体废物 处理处置工程



Chemical Industry Press



化学工业出版社  
环境·能源出版中心

# 固体废物处理处置工程

蒋建国 编著



化学工业出版社  
环境·能源出版中心

·北京·

(京)新登字 039 号

**图书在版编目 (CIP) 数据**

固体废物处理处置工程/蒋建国编著. —北京:化学  
工业出版社, 2005. 6  
ISBN 7-5025-7405-0

I. 固… II. 蒋… III. 固体废物-废物处理  
IV. X705

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 070861 号

---

**固体废物处理处置工程**

蒋建国 编著

责任编辑:董琳

责任校对:陈静边涛

封面设计:鲍萌

\*

化学工业出版社 出版发行  
环境·能源出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

购书咨询:(010) 64982530

(010) 64918013

购书传真:(010) 64982630

<http://www.cip.com.cn>

\*

新华书店北京发行所经销  
北京市兴顺印刷厂印装

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 18 字数 448 千字

2005 年 8 月第 1 版 2005 年 8 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-7405-0

定价:38.00 元

---

**版权所有 违者必究**

该书如有缺页、倒页、脱页者,本社发行部负责退换

# 前 言

固体废物处理处置工程是环境工程的一个重要领域，随着固体废物产生量的增加和对环境污染的日益严重，国家对固体废物的污染控制也越来越重视。我国于1995年颁布实施《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》，使固体废物处理处置工作纳入了法制化的管理轨道。此后，我国一些大中城市相继建设和投产了部分固体废物处理处置设施，特别是在工业固体废物的再生利用、城市垃圾的清运、处置以及危险废物的区域性集中管理方面有了较大的进展。与此同时，我们也应该清醒地意识到与我国的工业化、城市化发展速度以及人民生活的需求相比，目前的固体废物管理水平还只是处于起步阶段，固体废物污染问题依然非常突出，固体废物污染环境的形势仍然严峻。随着我国经济的发展、社会的进步、人民生活水平以及环境意识的提高，人们对固体废物的处理、处置已经有了更高的要求，2005年我国再次颁布了修订后的《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》，为今后固体废物管理和处理处置技术的发展奠定了更具权威性的基础。

我国大中专院校大部分开设有环境系或专业一百多个，作为专业基础课程之一，固体废物处理处置工程在环境工程专业课程教学中占有重要的地位。固体废物处理处置工程涉及城市垃圾、工业固体废物、农业废物和危险废物的处理、处置和资源化，是一门多学科的综合课程。目前国内尚无完善的教材和教学体系，已有的部分教材和参考书还不能满足专业课程建设和教学的需要，也不能满足国内固体废物污染控制的需求和培养高层次专业人员的需要。因此，编者根据多年教学、科研和工程实践中所积累的知识，借鉴发达国家在固体废物处理处置领域的先进技术和经验，参考清华大学环境科学与工程系《固体废物处理处置工程》课程讲义以及国内兄弟院校和科研单位等的宝贵成果，并结合我国固体废物管理和处理处置的实际情况以及相关的法规和标准的要求，完成了本书的编写工作。

本书在编写过程中基本遵循固体废物减量化、资源化和无害化的“三化原则”以及对固体废物的产生、收集、运输、利用、贮存、处理和处置的全过程管理原则安排章节，在内容设置上充分体现基础理论和工程实践相结合的特点，以在满足高等院校本科生和研究生教学需要的前提下，同时兼顾科研、工程和管理人员作为参考资料的需要，并且尽量纳入国际上先进的和前瞻性的技术内容。

本书的编写得到清华大学环境科学与工程系固体废物处理处置及资源化研究所的大力支持，李国鼎、聂永丰、白庆中、王伟、王洪涛、袁光钰、李金惠等教授为本书编写提供了许多宝贵资料，钟丽锦、岳东北、邓舟、张妍、王军、隋继超、杨国栋、张群芳、许鑫、赵振振、黄云峰、杜雪娟等参加了部分章节的文字整理及图片绘制工作，在此谨向他们致以诚挚谢意。

由于编著水平有限，书中定有不当和疏漏之处，敬请读者同行不吝赐教。

编著者

2005年5月于清华园

# 目 录

<b>1 固体废物的环境问题及其管理</b> ..... 1	3.1.2 国外城市垃圾分类收集概况..... 48
1.1 固体废物及其污染特点..... 1	3.1.3 我国城市垃圾分类收集概况..... 50
1.1.1 固体废物的产生和处理现状..... 1	3.2 废物收集系统及其分析方法..... 51
1.1.2 固体废物对环境潜在污染的特点..... 3	3.2.1 废物收集系统分类..... 51
1.1.3 固体废物对环境的影响..... 4	3.2.2 拖曳容器系统分析方法..... 52
1.1.4 固体废物对人体健康的影响..... 6	3.2.3 固定容器系统分析方法..... 55
1.2 固体废物的定义及分类..... 7	3.3 固体废物收集路线及规划设计..... 59
1.2.1 固体废物的定义..... 7	3.3.1 固体废物收集路线的规划..... 59
1.2.2 固体废物分类..... 8	3.3.2 固体废物收集路线的设计..... 60
1.3 固体废物的管理原则..... 12	3.4 固体废物的运输..... 65
1.3.1 “三化”基本原则..... 12	3.4.1 运输方式..... 65
1.3.2 全过程管理原则..... 13	3.4.2 危险废物的运输..... 67
1.3.3 循环经济理念下的固体废物管理原则..... 14	3.5 固体废物转运系统..... 67
1.4 固体废物管理体系..... 16	3.5.1 垃圾转运的必要性..... 67
1.4.1 固体废物环境管理制度..... 16	3.5.2 转运站的类型..... 69
1.4.2 我国固体废物管理系统..... 19	3.5.3 转运站选址及设计要求..... 75
1.5 我国固体废物环境管理标准体系..... 19	3.6 固体废物收运系统的优化..... 78
1.5.1 固体废物分类标准..... 20	<b>4 固体废物的预处理技术</b> ..... 83
1.5.2 固体废物监测标准..... 20	4.1 概述..... 83
1.5.3 固体废物污染控制标准..... 21	4.2 固体废物的压实技术..... 83
1.5.4 固体废物综合利用标准..... 22	4.2.1 压实原理..... 83
<b>2 固体废物的产生、特征及采样方法</b> ..... 23	4.2.2 压实机械..... 85
2.1 固体废物产生量及预测..... 23	4.2.3 压实器的选择..... 86
2.1.1 城市生活垃圾产生量及预测..... 23	4.2.4 填埋场中的压实机械..... 87
2.1.2 工业固体废物产生量及预测..... 26	4.3 固体废物的破碎技术..... 87
2.2 固体废物的物理及化学特性..... 28	4.3.1 概述..... 87
2.2.1 固体废物的物理特性..... 28	4.3.2 破碎机械..... 89
2.2.2 固体废物的化学特性..... 31	4.3.3 特殊破碎技术..... 91
2.2.3 危险废物特性及鉴别试验方法..... 36	4.4 固体废物的分选技术..... 93
2.3 固体废物的采样..... 40	4.4.1 概述..... 93
2.3.1 采样统计方法..... 40	4.4.2 筛分..... 94
2.3.2 固体废物采样方法..... 42	4.4.3 重力分选..... 97
2.3.3 不同废物贮存形态的取样方法..... 44	4.4.4 磁选技术..... 101
2.3.4 我国垃圾采样标准..... 46	4.4.5 浮选技术..... 103
<b>3 固体废物收集运输系统及系统分析</b> ..... 47	4.4.6 半湿式破碎分选技术..... 104
3.1 固体废物的收集..... 47	<b>5 危险废物的固化/稳定化处理技术</b> ..... 107
3.1.1 收集方式..... 47	5.1 概述..... 107
	5.1.1 固化/稳定化的定义..... 107

5.1.2	固化/稳定化技术特点	107	7.2.3	固体废物的焚烧特性	184
5.1.3	固化/稳定化技术的应用	107	7.2.4	固体废物焚烧效果的评价及影响因素	186
5.1.4	固化/稳定化技术对不同危险废物的适应性	109	7.2.5	焚烧主要参数及热平衡计算	189
5.2	固化/稳定化技术综述	110	7.2.6	固体废物典型焚烧系统及工作原理	196
5.2.1	水泥固化技术	110	7.2.7	焚烧产生的大气污染物及其控制	208
5.2.2	石灰固化技术	114	7.2.8	焚烧产生的灰渣及其控制	219
5.2.3	塑性材料包容技术	115	7.3	固体废物热解技术	221
5.2.4	熔融固化技术	117	7.3.1	热解技术及其发展概况	221
5.2.5	自胶结固化技术	123	7.3.2	热解过程及其影响因素	222
5.3	化学稳定化处理技术	124	7.3.3	热解工艺分类	225
5.3.1	pH值控制技术	124	7.3.4	固体废物的热解处理技术	226
5.3.2	氧化/还原电势控制技术	124	<b>8</b>	<b>固体废物填埋处置技术</b>	231
5.3.3	沉淀技术	124	8.1	概述	231
5.3.4	吸附技术	126	8.1.1	处置的定义	231
5.3.5	离子交换技术	127	8.1.2	固体废物处置原则	231
5.3.6	化学稳定化技术的重要应用	127	8.2	填埋处置技术及其分类	232
5.4	固化/稳定化产物性能的评价方法	127	8.2.1	填埋处置技术的回顾与发展	232
5.4.1	概述	127	8.2.2	填埋处置技术分类及意义	234
5.4.2	固化/稳定化处理效果的评价指标	128	8.3	填埋场总体规划及场址选择	240
5.4.3	浸出机理与浸出试验方法	129	8.3.1	填埋场总体规划	240
5.4.4	典型的固体废物浸出毒性方法及其应用	134	8.3.2	填埋场场址选择	241
<b>6</b>	<b>固体废物生物处理技术</b>	137	8.3.3	填埋场库容和规模	243
6.1	概述	137	8.4	填埋场防渗系统	243
6.2	堆肥化	137	8.4.1	填埋场防渗技术类型	243
6.2.1	堆肥化的基本概念与发展过程	137	8.4.2	填埋场防渗层典型结构	244
6.2.2	堆肥化原理及其生物动力学基础	139	8.4.3	填埋场防渗层铺装及质量控制	247
6.2.3	堆肥化的影响因素及其控制	143	8.5	地表水和地下水控制系统	248
6.2.4	堆肥化工艺	151	8.5.1	地表水控制系统	248
6.2.5	堆肥产品及其腐熟度评价指标	152	8.5.2	地下水控制系统	252
6.3	固体废物厌氧消化技术	157	8.6	填埋气体产生、迁移及控制	253
6.3.1	厌氧消化技术的特点	157	8.6.1	废物稳定化基本原理	253
6.3.2	厌氧消化的生物化学过程	158	8.6.2	填埋气体的组成特性	255
6.3.3	厌氧消化处理工艺	160	8.6.3	填埋气体产生量计算	257
6.3.4	厌氧消化反应器	165	8.6.4	填埋场气体的迁移	260
6.3.5	厌氧消化的影响因素	178	8.6.5	填埋气体的收集和处理	263
<b>7</b>	<b>固体废物热处理技术</b>	181	8.7	渗滤液的产生及控制	267
7.1	概述	181	8.7.1	渗滤液产生量计算	267
7.2	焚烧技术	182	8.7.2	渗滤液特性	269
7.2.1	焚烧技术的定义及特点	182	8.7.3	渗滤液处理技术	272
7.2.2	焚烧技术的发展	182	8.7.4	填埋场中水及污染物的迁移	273

8.8 填埋场终场覆盖与场址修复 ..... 274  
8.9 填埋场环境保护和监测 ..... 276  
    8.9.1 填埋场环境保护措施 ..... 276  
    8.9.2 填埋场环境监测 ..... 277  
附表 1 298K 时各主要物质的生成热 ..... 278

附表 2 各种气体的平均定压比热容 (标准  
    状态下) ..... 278

附表 3 填埋场中 12 种微量气体成分的  
    物理特性参数 ..... 279

参考文献 ..... 280

# 1 固体废物的环境问题及其管理

如果说人类的历史是一部能与质转换应用的历史，那么自有人类活动以来，这种能与质的转换过程便有固体废物产生。只是由于在过去的社会里，固体废物的产生量不多且性质单纯，因此过去人类活动的历史并没有出现所谓的固体废物与环境污染的问题，然而，随着今天社会的高度工业化、劳动密集、人口过度集中以及城市化进程的加快，致使固体废物产生量逐日递增，且其性质日益复杂。因此，目前我们所面临的固体废物问题，已不再是单纯的“何来处理”，且要作到“如何处理”，才能避免其对环境造成公害。

## 1.1 固体废物及其污染特点

### 1.1.1 固体废物的产生和处理现状

所谓废物是人类在生活和生产活动中对自然界的原材料进行加工、利用后，不再需要而废弃的东西，由于废物多数以固体或半固体状态存在，通常又称为固体废物。固体废物处理的问题从人类社会形成之初就已经存在。只是早期由于人口少、资源消耗低、环境的自然净化能力远远大于废物的污染负荷，其所造成的环境污染问题并没有显现出来。到了近代，随着社会经济和工业生产的迅速发展，固体废物的问题也愈加严重。

在我国，随着社会、工业和经济的高速发展，固体废物的环境污染控制问题也已成为环境保护领域的突出问题之一。由于生产技术和管理水平不能满足国民经济急速发展的要求，相当一部分资源没有得到充分、合理的利用，而变成了固体废物。

(1) 我国城市垃圾的产生和处理现状 随着我国城市化进程的加快和人民生活水平的不断提高，城市生活垃圾产生量平均以每年 4.8% 的速度持续增长（见图 1-1 和图 1-2）。据统计，到 1999 年底全国 668 个城市生活垃圾清运量达到  $1.144 \times 10^8 \text{t}$ （按车吨位计，装载系数按 0.5~0.7 折算，实产垃圾约  $6864 \times 10^4 \text{t}$ ），已建各类生活垃圾处理场（厂）695 座，全年生活垃圾处理量为  $7241.1 \times 10^4 \text{t}$ ，处理率为 63% 左右。根据目前已建成的垃圾处理设施数量和处理能力测算，真正达到无害化处理的约为 15%。大量城市生活垃圾露天堆放或简易填埋，对环境造成巨大危害。城市生活垃圾处理已成为影响人们生存环境和可持续发展的重要因素。

受经济发展水平的限制和认识的局限，我国城市生活垃圾处理起步晚、起点低，经历了一个曲折的发展过程。我国城市生活垃圾处理起步于 20 世纪 80 年代，在 1990 年前，全国

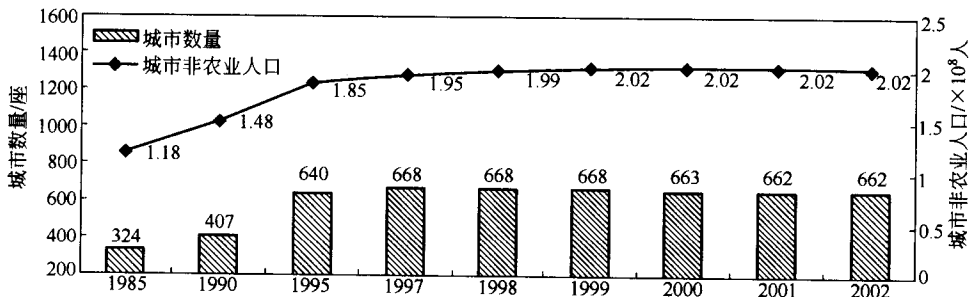


图 1-1 1985~2002 年我国城市数量及城市非农业人口



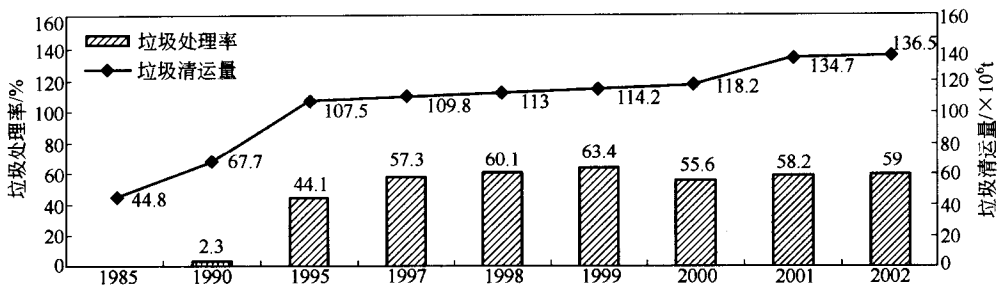


图 1-2 1985~2002 年我国城市垃圾清运量及处理率

城市生活垃圾处理率还不足 2%。第一批垃圾处理设施始建于 20 世纪 80 年代中后期，处理技术以堆肥为主。20 世纪 80 年代末期，针对我国垃圾亟待处理的实际情况，垃圾处理技术改为卫生填埋为主。90 年代以来，卫生填埋处理技术水平和建设标准不断提高。并且随着我国国民经济和城市建设的发展，垃圾焚烧处理也开始受到重视。一些沿海经济比较发达的城市，通过利用外国政府贷款，引进国外技术和设备建设垃圾焚烧厂，国内众多企业和科研院所也纷纷投入到 100t/d 以下小规模垃圾焚烧设备的开发中，并建设了一批小型垃圾焚烧厂，但其中大多数已建的焚烧设备技术不成熟，问题较多，烟气处理不能满足新的排放标准，难于正常运行。90 年代后期，由于国家实行基础设施投资倾斜政策，我国城市生活垃圾处理事业得到了迅速发展，全国垃圾处理设施数量和规模增长很快。

从目前情况看，我国的垃圾处理由于起步较晚，加上投入不足，垃圾处理的水平还很低，从总体上讲，我国的垃圾处理还处于由堆放到处理的发展阶段。主要表现为垃圾堆放现象普遍存在，垃圾处理场的二次污染相当普遍。据不完全统计，我国各种垃圾处理方式中，填埋处理约占 90% 以上，其次是堆肥处理，焚烧处理总规模还不足 1%，处于刚起步阶段。在填埋处理场中，约有 80% 以上的处理场为简易填埋处理场。这些填埋场不能做到及时覆盖；不具备完善的垃圾渗滤液收集、导排和处理设施；没有完善的填埋气体导排和处理设施。堆肥处理大都为静态露天堆肥，臭气和污水没有得到严格的处理，堆肥质量也较差。小型垃圾焚烧厂焚烧烟气排放控制还没有严格落实。

(2) 我国工业固体废物的产生及处理现状 表 1-1 列出了 1985~2002 年我国的工业固体废物产生及处理处置状况。

表 1-1 1985~2002 年我国的工业固体废物产生及处理处置状况

年度	产生量 / × 10 <sup>4</sup> t	综合利用量 / × 10 <sup>4</sup> t	综合利用率 / %	贮存量 / × 10 <sup>4</sup> t	处置量 / × 10 <sup>4</sup> t	排放量 / × 10 <sup>4</sup> t	累积贮存量 / × 10 <sup>4</sup> t	当年工业增长百分比 / %
1985	52309	12186	23.3	—	15497	—	—	—
1990	57797	16943	29.3	—	32026	4767	—	—
1992	61884	25554	41.3	26836	13986	2587	—	—
1995	64474	28511	44.2	24779	14204	2242	660000	—
1996	65898	28365	43	26364	11491	1690	649000	12.60
1997	105849	42777	45.6	29912	19461	18412	658309	11.10
1998	80068	33387	48.3	27546	10527	7048	678817	8.90
1999	78442	35756	51.2	26295	10764	3880	637624	8.50
2000	81608	37451	51.8	28921	9152	3183	633631	9.90
2001	88746	47285	52.1	30166	14489	2894	—	8.90
2002	94509	50061	52	30040	16618	2635	—	10.20

注：1. 1998 年、1999 年的工业废物综合利用率为县级以上工业固体废物综合利用率；

2. 1998 年固体废物排放量中，县以上工业 1821 × 10<sup>4</sup> t，乡镇工业 5227 × 10<sup>4</sup> t；1997 年工业固体废物排放量中，县以上工业 1549 × 10<sup>4</sup> t，乡镇工业 16863 × 10<sup>4</sup> t。

由此可见，随着工业生产规模的扩大，工业固体废物的产生量逐年递增，20世纪90年代后年产量超过 $6 \times 10^8 \text{t}$ 。除了1997年和1998年，我国的工业固体废物量基本上以一个比较稳定的趋势增加，年平均增长约10%。而我国1996~2000年的平均工业产值增长率约为10%，固体废物产生量的增长率与工业产值的增加相接近。

尽管近年来我国加强了对工业固体废物的管理，但仍有40%左右的废物没有得到妥善的处理，只是在企业内部临时贮存。据国家环保局统计，到1995年止，全国累积堆存的工业固体废物已达 $66 \times 10^8 \text{t}$ ，占地约 $5.5 \times 10^4 \text{ha}$ <sup>①</sup>。有些大型企业虽然建起了填埋场，但由于没有采取严格的防渗措施和缺乏科学的管理，仍存在污染地下水的情况。此外，每年还有超过 $2000 \times 10^4 \text{t}$ 的工业固体废物排入环境，其中约有1/3直接排入天然水体，成为地表水和地下水的主要污染源之一。据不完全统计，全国每年由固体废物造成的环境污染事故约100起左右，由此造成的环境纠纷也时有发生。

20世纪90年代以后，国家对固体废物的管理越来越重视，对固体废物的再生利用得到了较大的发展。在90年代以前，工业固体废物的综合利用率不足30%，90年代后，工业固体废物的综合利用率在逐年提高，到20世纪末期，我国工业固体废物的综合利用率已经超过了50%，同时，历年堆存的工业固体废物量从1995以后便开始呈现逐年降低的趋势，虽然历年堆积量的降低率还不足1%，但已遏制住工业固体废物堆积量逐年增加的趋势。

我国的固体废物管理和处理处置工作起步较晚，与水污染控制和大气污染控制相比，其对环境的污染控制问题在相当一段时间内没有得到应有的重视，存在着管理法规不健全、资金投入不足、缺少成套的处理处置技术以及足够数量的管理和技术人员等问题。在现有处理处置技术中，普遍技术水平偏低，远远不能满足固体废物污染控制的需要。

从这个意义上来说，为了保护、改善和提高我国的环境质量，实现可持续发展的社会经济，对固体和危险废物实行全面管理和安全处理处置已成为当务之急。自20世纪90年代初开始，固体废物管理问题逐渐受到重视，国家也逐步加大了对固体废物管理和处理处置技术研究开发的投资力度，并于1995年颁布实施了《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》（以下简称《固体法》），使固体废物处理处置工作纳入了法制化管理的轨道。该法的实施对我国固体废物污染防治工作起到了积极的推进作用，不仅使我国固体废物的污染控制从无到有逐步形成一系列覆盖范围较广、涉及内容较全的管理制度，同时也使我国工业固体废物的综合利用水平、城市垃圾和危险废物无害化处置水平逐年得以提高。与此同时，与我国的工业化、城市化发展速度以及人民生活的需求相比，目前的固体废物管理水平还只是处于起步阶段，固体废物污染问题依然非常突出，固体废物污染环境的形势仍然严峻。随着我国经济的发展、社会的进步、人民生活水平以及环境意识的提高，人们对固体废物的处理、处置已经有了更高的要求，迫切需要针对这些新的需要对《固体法》进行补充和修订，并于2005年颁布了修订后的《固体法》，为今后固体废物管理和处理处置技术的发展奠定了很好的基础。

### 1.1.2 固体废物对环境潜在污染的特点

固体废物的固有特性及其对环境的潜在污染危害决定了对其进行管理和污染控制的管理方法和管理体制。概括地讲，固体废物对环境潜在污染的特点具有以下几个方面。

(1) 数量巨大、种类繁多、成分复杂 如前所述，我国的固体废物污染控制已成为环境

①  $1 \text{ha} = 10^4 \text{m}^2$ ，下同。

保护领域的突出问题之一。随着工业生产规模的扩大、人口的增加和居民生活水平的提高，各类固体废物的产生量也逐年增加。据统计，全国工业固体废物的产生量在 2002 年已经达到  $9.4 \times 10^8 \text{t}$  以上，而且还以每年 10% 的速度在增加。随着我国城市化进程和居民生活水平的逐步提高，城市生活垃圾产生量仍以每年 4.8% 的速度递增，2002 年全国城市垃圾清运量已经超过  $1.36 \times 10^8 \text{t}$ ，而城市垃圾有效处理率还不足 70%（图 1-2）。城市人均日产垃圾量超过 1.0kg，接近工业发达国家的水平，在这个意义上说，我国已经处在超前污染的状态。

固体废物的来源十分广泛，例如，工业固体废物包括了工业生产、加工；燃料燃烧；矿物采、选；交通运输等行业以及环境治理过程所产生和丢弃的固体和半固体的物质。另外，从固体废物的分类，我们可以大致了解固体废物组成的复杂状态。除在城市垃圾中包含了几乎所有日常生活中接触到的物质以外，危险废物的种类将随着科学技术的发展而难以做出超前的划定。

(2) 滞留期久、危害性强 固体废物除直接占用土地和空间外，其对环境的危害影响需要通过水、气或土壤等介质方能进行。以固态形式存在的有害物质向环境中的扩散速率相对比较缓慢，例如渗滤液中的有机物和重金属在黏土层中的迁移速率，大约在每年数厘米的数量级上，其对地下水和土壤的污染需要经过数年甚至数十年后才能显现出来。与废水、废气污染环境的特点相比，固体废物污染环境的滞后性非常强，但一旦发生了固体废物对环境的污染，其后果将非常严重，因此，固体废物对环境的影响具有长期性、潜在性和不可恢复性。

(3) 处理过程的终态，污染环境的源头 在废气的治理过程中，利用洗气、吸附或除尘等技术将存在于气相中的粉尘或可溶性污染物（如酸性气体）转移或转化为固体物质。同样，在水处理工艺中，无论是采用物化处理技术（如混凝、沉淀、超滤等）还是生物处理技术（如好氧生物处理、厌氧生物处理等），在水得到净化的同时，总是将水体中的无机和有机污染物以固相的形态分离出来，因而产生大量的污泥或残渣。从这个意义上讲，可以认为废气治理或水处理的过程，实际上都是将环境中的污染物转化为比较难于扩散的形式，将液态或气态的污染物转变为固态的污染物，降低污染物向环境迁移的速率。由于固体废物对环境的危害影响需通过水、气或土壤等介质方能进行，因此，固体废物既是污染水、大气、土壤等的“源头”，又是废水和废气处理过程的“终态”，也正是由于这一特点，对固体废物的管理既要尽量避免和减少其产生，又要力求避免和减少其向水体、大气以及土壤环境的排放。最终处置需要解决的就是废物中有害组分的最终归宿问题，也是控制环境污染的最后步骤。最终处置对于具有永久危险性的物质，即使在人工设置的隔离功能到达预定工作年限以后，处置场地的天然屏障也应该保证有害物质向生态圈中的迁移速率不致引起对环境和人类健康的威胁。

### 1.1.3 固体废物对环境的影响

正是由于固体废物如上的诸多特点，一旦对环境的潜在污染变为现实，而要消除这些污染往往需要耗费较大的代价。具体来说，固体废物对环境介质可能造成的污染危害表现在以下几个方面。

(1) 对土地的影响 固体废物的堆放需要占用土地，据估计，每堆积  $1 \times 10^4 \text{t}$  废渣约需占用土地 0.067ha。我国 1995 年全国工业固体废物的产生量约为  $6.4 \times 10^8 \text{t}$ ，历年累积堆存的工业固体废物量已达  $66 \times 10^8 \text{t}$ ，堆存占地约  $5.5 \times 10^4 \text{ha}$ 。我国许多城市的近郊也常常是城市垃圾的堆放场所，形成垃圾围城的状况。固体废物的任意露天堆放，不但占用一定土

地，而且其累积的存放量越多，所需的面积也越大，如此一来，势必使可耕地面积短缺的矛盾加剧。

随着我国经济发展和人们生活水平的提高，固体废物的产生量会越来越大，如不加以妥善管理，固体废物侵占土地的问题会变得更加严重。即使是固体废物的填埋处置，若不着眼于场地的选择评定以及场基的工程处理和封场后的科学管理，废物中的有害物质还会通过不同途径而释放入环境中，乃至对生物包括人类产生危害。

(2) 对水体的影响 固体废物对水体的污染途径有直接污染和间接污染两种：前者是把水体作为固体废物的接纳体，向水体直接倾倒废物，从而导致水体的直接污染；而后者是固体废物在堆积过程中，经过自身分解和雨水浸淋产生的渗滤液流入江河、湖泊和渗入地下而导致地表和地下水的污染。

历史上，世界范围内有不少国家直接将固体废物倾倒入河流、湖泊或海洋，甚至以后者当成处置固体废物的场所之一。例如，美国仅在 1968 年就向太平洋、大西洋和墨西哥湾倾倒固体废物  $4800 \times 10^4 \text{t}$  以上。到 2002 年，我国每年仍有超过  $2000 \times 10^4 \text{t}$  的工业固体废物排入环境（表 1-1），其中约有 1/3 直接排入天然水体，成为地表水和地下水的主要污染源之一。固体废物弃置于水体，将使水质直接受到污染，严重危害水生生物的生存条件，并影响水资源的充分利用。此外，堆积的固体废物经过雨水的浸渍和废物本身的分解，其渗滤液和有害化学物质的转化和迁移，将对附近地区的河流及地下水系和资源造成污染。

水俣病是国际上最著名的公害病之一，它是由甲基汞引起的神经系统疾病。由于这种病最初发生在日本熊本县的水俣市，由此而得名“水俣病”。最初关于水俣病的报道是在 1956 年 5 月，据调查，从 1953 年前后开始就有此类患者出现，1962 年首先从该工厂的废渣中检测出了甲基汞。1966 年 7 月该工厂停止生产有机汞，1968 年废除了乙醛生产线。据调查，汞在鱼贝类体内的富集浓度最高为 1966 年的  $80 \text{mg/kg}$ ，1971 年降低为  $4 \text{mg/kg}$ 。1991 年 3 月止，被确认水俣病患者的人数达 2248 人，死亡 1004 人。1974~1989 年共处理总汞含量超过  $25 \text{mg/kg}$  的底泥  $151 \times 10^4 \text{m}^3$ ，清除后总汞浓度降低到平均  $4.65 \text{mg/kg}$ 。

(3) 对大气的污染 固体废物在堆存和处理处置过程中会产生有害气体，若不加以妥善处理将对大气环境造成不同程度的影响。例如，露天堆放和填埋的固体废物会由于有机组分的分解而产生沼气，一方面沼气中的氨气、硫化氢、甲硫醇等的扩散会造成恶臭的影响；另一方面沼气的主要成分甲烷气体是一种温室气体，其温室效应是二氧化碳的 21 倍，而甲烷在空气中含量达到 5%~15% 时很容易发生爆炸，对生命安全造成很大威胁。固体废物在焚烧过程中会产生粉尘、酸性气体、二噁英等，也会对大气环境造成污染。

1995 年 10 月 27 日位于北京市昌平区阳坊镇的某公司员工宿舍发生了剧烈爆炸，造成 3 人严重烧伤，其中 1 人烧伤面积达 95%，3 度烧伤面积达 65%。究其原因是该员工宿舍紧靠一垃圾堆放场，该堆放场是利用一个废弃的砂坑对城市生活垃圾进行简易处置，垃圾中的有机物经过一段时间的腐化，产生大量的沼气，由于填埋场没有进行防渗处理，四周土质疏松，透气性好，造成沼气通过土层进入室内并富集，遇明火发生爆炸。

另外，堆放的固体废物中的细微颗粒、粉尘等可随风飞扬，从而对大气环境造成污染。据研究表明：当发生 4 级以上的风力时，在粉煤灰或尾矿堆表层的粒径为 1~1.5cm 以上的粉末将出现剥离，其飘扬的高度可达 20~50m 以上。在季风期间可使平均视程降低 30%~70%。

(4) 对土壤和生物群落的影响 固体废物及其渗滤液中所含有害物质会改变土壤的性质

和土壤结构，并将对土壤中微生物的活动产生影响。这些有害成分的存在，不仅有碍植物根系的发育和生长，而且还会在植物有机体内积蓄，通过食物链危及人体健康。

1943~1953年，在美国纽约州尼加拉市的一段废弃运河的河床上，两家化学公司填埋处置了大约21000t、80余种化学废物。从1976年开始，当地居民家中的地下室发现了有害物质的浸出，同时还发现在当地居民中有癌症、呼吸道疾病、流产等多发现象。当地政府对约900户居民采取紧急避难措施，并对处置场地实施了污染修复工程，前后共耗资约 $1.4 \times 10^8$ 美元。腊芙运河事件是国际上危险废物污染环境的典型案例，它不仅带来了美国危险废物管理政策上的重大变化，而且给世界各国在危险废物最终处置问题上敲响了警钟。

后来，又据美国EPA调查，到1977年为止，美国全国约有75万个企业将其所产生的 $6000 \times 10^4$ t危险废物分别在5万多个填埋场进行了处置，随时都有可能发生第二个“腊芙运河”事件。针对这种状况，美国国会于1980年通过了“全面环境响应、赔偿及责任法”，即“超基金法”，又于1984年颁布了“危险及固体废物修正案”，在该修正案中规定，危险废物不能直接进行陆地处置，并要求新建安全填埋场必须采取双衬层防渗措施。

痛痛病是由镉污染造成的公害病。这种病的患者感到全身各部位剧烈疼痛，严重者稍一活动就会造成全身骨折。由于难以忍受剧烈的疼痛，患者常发出“痛、痛”的悲鸣，因此，得名“痛痛病”。该症病因主要是镉，其来源是神冈矿山的废物和废水。1971~1976年对当地环境开展调查的结果表明，土壤中镉的浓度最高达到4.85mg/kg，平均值为1.12mg/kg，而当地的土壤背景值仅为0.34mg/kg。当地生产的糙米中镉的浓度最高达到4.23mg/kg，平均值为0.99mg/kg。1991年3月底止，被确认为公害病患者的人数达到129人，死亡116人。为了消除污染，1974~1977年指定1500ha土地为土壤净化区域，到1992年共完成547公顷的净化工程（占计划区域面积的36%）。净化后土壤中镉浓度平均为0.14mg/kg，糙米中镉浓度平均为0.11mg/kg。

此外，生物群落特别是一些水生动物的休克死亡，可以认为是固体废物处置场释出污染物质的前兆。例如在雨季，填埋场产生的渗滤液会通过地表径流或地下水进入江河湖泊引起大量鱼群死亡。这类危害效应可从个体发展到种群，直到生物链，并将导致受影响地区营养物循环的改变或产量降低。

#### 1.1.4 固体废物对人体健康的影响

固体废物，特别是有害固体废物，在露天存放、处理或处置过程中，其中的有害成分在物理、化学和生物的作用下会发生浸出，含有害成分的浸出液可通过地表水、地下水、大气和土壤等环境介质直接或间接被人体吸收，从而对人体健康造成威胁。图1-3表示出固体废物致人疾病的途径。

根据物质的化学特性，当某些不相容物相混时，可能发生不良反应，包括热反应（燃烧或爆炸）、产生有毒气体（砷化氢、氰化氢、氯气等）和产生可燃性气体（氢气、乙炔等）。若人体皮肤与废强酸或废强碱接触，将发生烧灼性腐蚀作用。若误吸收一定量农药，能引起急性中毒，出现呕吐、头晕等症状。贮存化学物品的空容器，若未经适当处理或管理不善，能引起严重中毒事件。化学废物的长期暴露会产生对人类健康有不良影响的恶性物质。

1993年8月5日，深圳市清水河危险品仓库发生了震惊中外的爆炸事件，造成15人死亡，数十人受伤，仓库区十余座库房受损，经济损失严重。事故的原因主要是由于不同化学品的混合堆放贮存，该事故暴露了我国危险品管理的严重缺陷，同时，爆炸产生的20000t以上危险废物也给深圳市造成了潜在的环境危害。

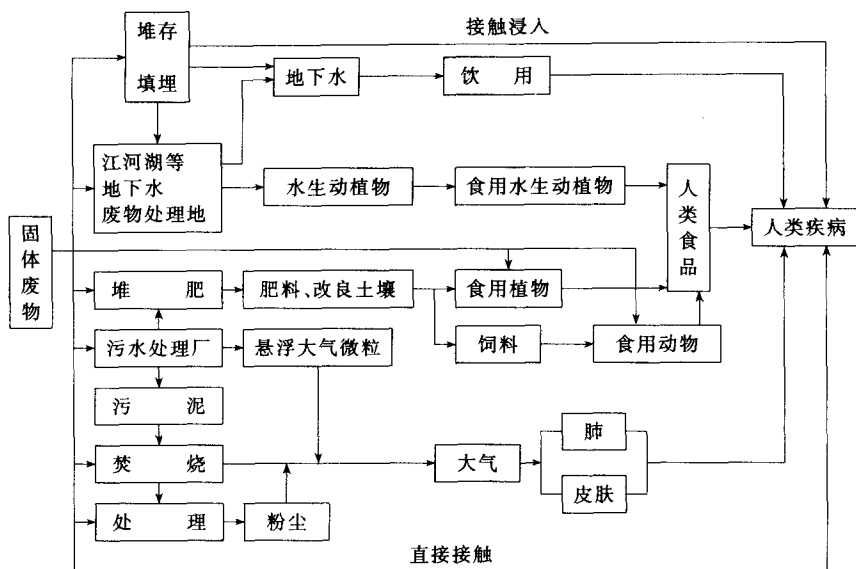


图 1-3 固体废物致人疾病的途径

20 世纪 30~70 年代，国内外不乏因工业废渣处理不当，其中毒性物质在环境中扩散而引起祸及居民的公害事件。如前面已经提及的含镉废渣排入土壤引起日本富山县痛痛病事件；美国纽约州拉夫运河河谷土壤污染事件；我国发生在 50 年代的锦州铅渣露天堆积污染井水事件等。不难看出，这些公害事件已给人类带来灾难性后果。尽管近 10 多年来，严重的污染事件发生较少，但固体废物污染环境对人类健康将会遭受的潜在危害和影响是难以估量的。

## 1.2 固体废物的定义及分类

### 1.2.1 固体废物的定义

1995 年制定的《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》中明确提出“固体废物”的法律定义：是指生产建设、日常生活和其他活动中产生的污染环境的固态、半固态废物。2005 年修改后的《固体法》对“固体废物”的定义进行了明确：是指在生产、生活和其他活动中产生的丧失原有利用价值或者虽未丧失利用价值但被抛弃或者放弃的固态、半固态和置于容器中的气态的物品、物质以及法律、行政法规规定纳入固体废物管理的物品、物质。由此可见，除了半固态废物的污染防治外，液态废物和置于容器中的气态废物的污染防治同样适用《固体法》。

固体废物具有鲜明的时间和空间特征。从时间方面讲，它仅仅相对于目前的科学技术和经济条件，随着科学技术的飞速发展，矿物资源的日趋枯竭，生物资源滞后于人类需求，昨天的废物势必又将成为明天的资源。从空间角度看，废物仅仅相对于某一过程或某一方面没有使用价值，而并非在一切过程或一切方面都没有使用价值，某一过程的废物，往往是另一过程的原料。例如，高炉渣可以作为水泥生产的原料、电镀污泥可以回收高附加值的重金属产品、城市垃圾中的可燃性部分经焚烧后可以发电、废旧塑料通过热解可以制油等。所以固体废物又有“放错地方的资源”之称。

固体废物主要来源于人类的生产和消费活动，人们在开发资源和制造产品的过程中，必

然产生废物；任何产品经过使用和消耗后，最终将变成废物。物质和能源消耗量越多，废物产生量就越大。进入经济体系中的物质，仅有10%~15%以建筑物、工厂、装置、器具等形式积累起来，其余都变成了废物。以美国为例，投入使用的食品罐头盒、饮料瓶等，平均几个星期就变成了废物，家用电器和小汽车平均7~10年变成废物，建筑物使用期限最长，但经过数十年至数百年后也将变成废物。

### 1.2.2 固体废物分类

固体废物有多种分类方法，既可根据其组分、形态、来源区分，也可就其危险性、燃烧性等分别区分。

- (1) 根据其来源分为工业固体废物、农业废物、生活垃圾等；
- (2) 按其化学组成可分为有机废物和无机废物；
- (3) 按其形态可分为固体废物（例如玻璃瓶、报纸、塑料袋、木屑等）、半固体废物（如污泥、油泥、粪便等）和液态（气态）废物（如废酸、废油与有机溶剂等）；
- (4) 按其污染特性可分为危险废物和一般废物；
- (5) 按其燃烧特性可分为可燃废物（通常指1000℃以下可燃性者，如废纸、废塑料、废机油等）和不可燃废物（通常在1000℃焚烧炉内仍无法燃烧者，例如金属、玻璃、砖石等）。

依据《固体法》对固体废物的分类，将其分为生活垃圾、工业固体废物和危险废物三类进行管理，本节除介绍这三类废物外，同时还简要介绍农业废物及放射性废物。

#### 1.2.2.1 生活垃圾

生活垃圾（municipal solid waste）是指在日常生活中或者为日常生活提供服务的活动中产生的固体废物以及法律、行政法规规定视为生活垃圾的固体废物。在该定义中，生活垃圾包括了城市生活垃圾和农村生活垃圾。《固体法》规定：城市生活垃圾应当按照环境卫生行政主管部门的规定，在指定的地点放置，不得随意倾倒、抛撒或者堆放，农村生活垃圾污染环境防治的具体办法，由地方性法规规定。

根据目前我国环卫部门的工作范围，城市生活垃圾包括居民生活垃圾、园林废物、机关单位排放的办公垃圾等。此外，在实际收集到的生活垃圾中，还可能包括有部分小型企业产生的工业固体废物和少量危险废物（如废打火机、废油漆、废电池、废日光灯管等），由于后者具潜在危害，需要在相应的法规特别是管理工作中逐步制定和采取有效措施对之进行分类收集和进行适当的处理处置。

生活垃圾包括的废物种类很多，以下以美国为例对其进行介绍。

(1) 街道垃圾（street refuse） 街道垃圾是经由人工从街道、人行道或公共场所（如公园、车站、码头）等地所扫集的废物，其最普遍的组成物是落叶、泥沙与纸张。

(2) 一般垃圾（rubbish） 一般垃圾泛指城市垃圾中含水分少的固体废物，分为可燃性与不可燃性垃圾，大部分来自商店、学校、家庭、办公或机关，其一般组成见表1-2。

① 可燃组分 组成大都为纸张、木材、木屑、破木、橡胶类、塑料类、花草、树叶等含有机化学成分（organic compound）的废物。此种废物虽为有机物但因水分少且稳定性高，故不易腐化可闲置较长时间，另其发热值较高，通常不需其他辅助燃料即可燃烧，此二点是该类垃圾有别于厨余垃圾。

② 不可燃组分 组成大都为金属类、空铁罐、陶瓷、玻璃等，在普通焚烧炉（小于1000℃）无法燃烧，其成分大都为无机物（nonorganics）。

表 1-2 一般垃圾的典型组成

组 成	重 量 百 分 比				组 成	重 量 百 分 比			
	范围	典型代表	美国加州	美国麻里兰		范围	典型代表	美国加州	美国麻里兰
食物类	2~26	14	8.3	27.4	皮革	0~2	0.5	0.7	1.3
纸类	15~45	34	35.8	15.5	玻璃	4~16	8	7.5	10.3
木板	3~15	7	10.9	13.0	空罐	2~8	6	5.1	8.3
塑料	2~8	5	6.9	4.6	金属类	1~4	2	2.2	1.2
纤维	0~4	2	2.5	2.3	陶器	1~3	1.5	0.8	1.1
橡胶	0~2	0.5	2.5	0.4	砖石	0~5	3	2.1	3.2

(3) 厨余垃圾 (garbage, kitchen waste) 组成物大都为菜肴与馊水等易于腐败之有机物, 其主要来源为家庭厨房、餐厅、饭店、食堂、市场及其他与食品加工有关的行业。由于厨余垃圾含有极高水分与有机物, 故很容易腐坏而产生恶臭, 通常不做久存而于隔天即清除运走。

(4) 废弃车辆 (abandoned vehicles) 组成物大都为不可燃的金属类或玻璃物, 另有少部分为塑料与橡胶类。该类废物清除常需靠政府有关单位负责, 因其体积过于庞大且来源极为分散。

(5) 工程拆除垃圾 (demolition wastes) 组成主要为工程或建筑物拆除之废料, 如混凝土块、废木材、废管道、砖石等。

(6) 建筑垃圾 (construction wastes) 指住宅、大厦、铺路等施工过程中产生的残余废料, 包括泥土、石子、混凝土、砖块、瓦片与电线等。

#### 1.2.2.2 工业固体废物

工业固体废物 (industrial solid waste) 是指在工业、交通等生产过程中产生的固体废物。工业固体废物按行业主要包括以下几类。

(1) 冶金工业固体废物 冶金工业固体废物主要包括各种金属冶炼或加工过程中所产生的废渣, 如高炉炼铁产生的高炉渣、平炉转炉电炉炼钢产生的钢渣、铜镍铅锌等有色金属冶炼过程产生的有色金属渣、铁合金渣及提炼氧化铝时产生的赤泥等。

(2) 能源工业固体废物 能源工业固体废物主要包括燃煤电厂产生的粉煤灰、炉渣、烟道灰、采煤及洗煤过程中产生的煤矸石等。

(3) 石油化学工业固体废物 石油化学工业固体废物主要包括石油及加工工业产生的油泥、焦油页岩渣、废催化剂、废有机溶剂等, 化学工业生产过程中产生的硫铁矿渣、酸渣碱渣、盐泥、釜底泥、精(蒸)馏残渣以及医药和农药生产过程中产生的医药废物、废药品、废农药等。

(4) 矿业固体废物 矿业固体废物主要包括采矿废石和尾矿, 废石是指各种金属、非金属矿山开采过程中从主矿上剥离下来的各种围岩; 尾矿是指在选矿过程中提取精矿以后剩下的尾渣。

(5) 轻工业固体废物 轻工业固体废物主要包括食品工业、造纸印刷工业、纺织印染工业、皮革工业等工业加工过程中产生的污泥、废酸、废碱以及其他废物。

(6) 其他工业固体废物 主要包括机加工过程产生的金属碎屑、电镀污泥、建筑废料以及其他工业加工过程产生的废渣等。



### 1.2.2.3 危险废物

危险废物 (hazardous waste) 的特性通常包括急性毒性、易燃性、反应性、腐蚀性、浸出毒性和疾病传染性。危险废物的术语是在 20 世纪 70 年代初得到社会认可的。70 年代中期以后这一术语广为流行。但是, 这时对危险废物的定义仍然不明确。美国 EPA 于 1976 年国会通过“资源保护和回收法 (RCRA)”后, 又花了四年的时间, 对危险废物做出如下的定义: “危险废物是固体废物, 由于不适当的处理、贮存、运输、处置或其他管理方面, 它能引起或明显地影响各种疾病和死亡, 或对人体健康或环境造成显著的威胁。”这也是最广为引用的定义之一。

联合国环境规划署 (UNEP) 在 1985 年 12 月举行的危险废物环境管理专家工作组会议上, 对危险废物做出了如下的定义: “危险废物是指除放射性以外的那些废物 (固体、污泥、液体和用容器装的气体), 由于它们的化学反应性、毒性、易爆性、腐蚀性或其他特性引起或可能引起对人类健康或环境的危害。不管它是单独的或与其他废物混在一起, 不管是产生的或是被处置的或正在运输中的, 在法律上都称为危险废物。”

我国《固体法》中规定: “危险废物是指列入国家危险废物名录或者根据国家规定的危险废物鉴别标准和鉴别方法认定的具有危险特性的废物。”

危险废物由于其特有的性质对环境的污染严重, 危害显著, 因此, 对它的严格管理具有特殊意义。如前所述, 20 世纪 50 年代和 70 年代发生在日本的“水俣病”和“痛痛病”事件以及 70 年代末发生在美国的“腊夫运河事件”都曾震惊世界。类似对危险废物管理不当造成的严重教训在国内外均有不少。因而, 1984 年 UNEP 把危险废物的污染危害列为全球性环境问题之一。

由于处置危险废物在征地、投资、技术、环保等方面的困难, 有不法厂商千方百计将自己的危险废物向其他国家转移, 致使接受国深受其害。1976 年 7 月 10 日, 意大利北部小城 SEVESO 一家生产 2,4,5-三氯苯酚 (TCP) 的工厂发生了爆炸事故。这个事故在几年后成为了引起一场关于二噁英问题和危险废物越境迁移问题国际论争的导火索。该化学工厂爆炸产生了约 2.0kg 的二噁英, 造成了周围 1810ha 土地的污染。在现场清理过程中, 收集了  $20 \times 10^4 \text{ m}^3$  污染严重的土壤和 41 罐反应残渣, 这些污染土壤和反应残渣的净化, 约需耗资 2 亿美元。1 年后废物被转移到法国, 1985 年又被转移到瑞士的巴塞尔, 并以 250 万美元的价格进行了焚烧处理。

这一事件引起了国际社会的高度重视, 1989 年 3 月 UNEP 颁布了《关于控制危险废物越境迁移及其处置的巴塞尔公约》, 并于 1992 年 5 月 5 日正式生效。到 1995 年 9 月的第三次缔约国会议, 缔约国达到 92 个。

《控制危险废物越境转移及其处置巴塞尔公约》列出了“应加控制的废物类别”共 45 类, “须加特别考虑的废物类别”共 2 类。根据 1998 年 1 月 4 日由国家环境保护总局、国家经济贸易委员会、对外贸易经济合作部和公安部联合颁布、并于 1998 年 7 月 1 日实施的《国家危险废物名录 (环发 [1998] 89 号)》(以下简称《名录》), 我国危险废物共分为 47 类 (见表 1-3), 《名录》除列出废物编号和废物类别外, 还详细明确了废物来源以及常见危害组分或废物名称。

根据《名录》的规定: 凡列入《名录》的废物类别都属于危险废物, 列入国家危险废物管理范围; 未列入《名录》的废物类别需进行鉴别, 高于鉴别标准的属危险废物, 列入国家危险废物管理范围; 低于鉴别标准的, 不列入国家危险废物管理。具体鉴别标准参见 2.2.3