

中国农业大学

---

硕士学位论文

---

北京市生活垃圾的物流设施分析和南宫隧道垃圾堆肥腐熟度的  
模糊评价

---

姓名：李彦富

---

申请学位级别：硕士

---

专业：环境工程

---

指导教师：李国学

---

20060701

## 摘 要

本论文共分三部分。第一部分通过对北京市生活垃圾的产生和处理现状点、线、面调查,分析了北京市生活垃圾的物流设施现状。第二部分是对北京市城八区及北京南城不同功能区垃圾的理化性质研究以及可堆肥利用性能评价。第三部分立足于南宫堆肥厂,研究了隧道仓不同区间垃圾堆肥腐熟度变化规律并进行了模糊评价,为改进垃圾堆肥工艺提供了科学的依据。

主要研究结果如下:

北京市八个城区的生活垃圾产量以朝阳区和海淀区所占的比例最高,石景山区所占的比例最少;人均每天产生垃圾最多的城区是丰台区和朝阳区,最少的城区是西城区;生活垃圾中可堆肥物质的比例逐渐增加;城八区的密闭式垃圾站的分布式比较均衡,但宣武区略显不足;每万人拥有密闭式垃圾站的数量的总体水平比较一致,差别不明显;密闭式垃圾站的服务效率最高的是丰台区和宣武区,最低的是石景山区和海淀区;朝阳区的密闭式垃圾站清运比例最高,石景山区最低;大屯转运站的转运承担率最高,其次是五路居垃圾转运站,衙门口垃圾转运站转运比例最少;北京市的垃圾卫生填埋场承担了北京市 90%以上的垃圾无害化处理量,但填埋场服务期大部分在 10 年甚至 10 年以下;北京市现阶段生活垃圾的处理方式以卫生填埋为主,综合利用为辅,2005 年北京市的垃圾处理中,卫生填埋所占的处理比例为 94.88%,垃圾堆肥所占的比例为 4.22%,垃圾焚烧所占的比例仅为 0.90%。从前端收集、中端清运、终端转运以及末端无害化处理的全物流设施过程中,北京市的生活垃圾并没有实现分类,而是以混合状态存在,垃圾中不仅含有厨余、木竹、草叶等可用于堆肥的成分,而且还含有金属、塑料、纸张、玻璃等可回收的物质以及炉灰砖瓦等。

北京市城八区生活垃圾的热值都达到了 3350kJ/kg 以上,即焚烧过程无需添加辅助燃料,均可实现自燃烧;以宣武区为例,北京南城不同功能区中的生活垃圾也都达到了 3350kJ/kg 以上;八个功能区中,以银行类写字楼的生活垃圾热值最高,为 18827.16kJ/kg;除双气区的生活垃圾热值(仅为 9794.1kJ/kg)未达到 10000kJ/kg 以上外,其他七个功能区的生活垃圾热值均达到了 10000kJ/kg 以上。

以  $6.0 < \text{pH} < 7.5$ 、含水率 50%~60%、有机物含量 >40%、C/N 在 20 以上、30 以下作为垃圾可堆肥聚类值进行聚类分析的结果表明:崇文区的生活垃圾最适宜于堆肥。

经过 14 天的高温静态发酵,南宫隧道仓 10 个不同区间的垃圾堆肥中:原垃圾中可降解组分比例明显降低;10 个区间的垃圾堆肥含水率在 22%~33%之间,均未达到堆肥成品含水率应在 40%~45%的要求;从电导率、pH、 $E_4/E_6$ 、固相 C/N、GI 等指标来看,10 个区间的垃圾堆肥均达到了基本腐熟;从模糊评价的结果来看,南宫堆肥厂的堆肥隧道仓各区间垃圾堆肥的腐熟程度并不一致:13.5~16.2m 区间的垃圾堆肥腐熟程度最好,等级为 1 级;0~2.7m 区间、2.7m~5.4m 区间、21.6~24.3m 和 24.3~27m 区间的垃圾堆肥腐熟程度最差,评价等级为 3 级;其他区间居中,评价等级为 2 级。

关键词:生活垃圾,物流设施,堆肥,腐熟度,隧道仓,区间,模糊数学,评价,

## Abstract

This paper had three parts. First was conducted to analyze the the generation and processing of the status of municipal solid waste (MSW) by investigating and evaluating status of generation, components, treatment and utilization of MSW in Beijing; Second was studied to find out the physical nature of MSW in different functional areas of Beijing; The third part is based on Nangong composting plant, examined different interval garbage composting tunnel for changes and the well-rotted compost vague assessment for the improvement of garbage composting techniques with a scientific basis.

The results obtained were as follows:

Beijing's eight urban life Chaoyang District and MSW to yield the highest proportion of Haidian District, the proportion of at least Shijingshan District; Per capita per day is a waste of Fengtai District and the City of Chaoyang District, the City is at least West City; May MSW life gradually increase the proportion of composting material; Chengbaqu the enclosed type garbage station distributed more balanced, but the lack of street lights; every million people have confined the number of RCPs overall level more consistent, clear differences; confined Type trash service is efficient and district Fengtai District, and Shijingshan District is the lowest Haidian District; Chaoyang District confined the highest proportion of trash removal. Shijingshan District minimum; Tatun Station transit assume the highest rate, followed by directions in MSW Transfer Station, the bureaucratic mouth of a garbage transfer station;

Beijing MSW to assume the Beijing Health landfill site more than 90% of the sound of garbage handling capacity, but the landfill site for a period of 10 years or even 10 years; Beijing MSW to live at the landfill-based approach to health, combining aid, the 2005 Beijing waste disposal, Health landfill disposal rate of 94.88% share, the proportion of waste composting for 4.22%, the proportion of waste incineration only 0.90%. From the front-end collection, China-removal, transit terminals and end sound handling of the entire logistics process, Beijing living garbage did not achieve classification, but with mixed state exists, MSW not only contain kitchen I, lumber, blade, etc. can be used for composting ingredients, but also contain metals, plastics, paper, glass and other recyclable material and ashes, tiling, Street sweeping and some territories from the heavy concrete construction.

Fengtai District and the district from the source of waste Majialou screening station after 15~60mm garbage for composting materials, food and other material to be piled more than 80% of body, well suited to high-temperature composting techniques for composting materials. But some do not degrade the material such as tile, plastic, glass, metal and scrap batteries material remain, in more than 12% of total content.

After 14 days of fermentation in the high temperature static, 10 spaces of MSW composting degradable group had reduced markedly:some food and a small amount of ash content, paper, fabrics, etc. After microbial role into reactor generated from the original garbage, food markedly lower proportion of interval ;10 the composting of wet garbage in 22%~33% rate between met at the rate of composting products wet 40%~45% requirements, so in due course reduce waste composting ventilation to reduce waste composting moisture loss and promote well-rotted compost and composting to reduce power consumption; Using fuzzy mathematics,the MSW compost maturities in 10 different spaces in 27 meters long static tunnel from Nangong compost plant were studied.After high temperature ferment of 14 days,10 spaces of MSW compost in static tunnel had different maturities:the ratios of water all missed the require of mature products.Assessing EC,pH,  $E_4/E_6$ ,C/N and GI as the index, 10 spaces of

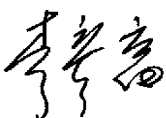
MSW composts all reached the primary maturities. Using fuzzy mathematics, the evaluation of MSW composts in static tunnel was that the best maturity of MSW composts in static tunnel was in the space of 13.5~16.2 meters and the worst were in the spaces of 0~2.7, 2.7m~5.4m, 21.6~24.3 and 24.3~27 meters.

**Key words:** MSW, Logistics Establishments, compost, maturity, tunnel, space, evaluate, fuzzy maths

# 独创性声明

本人声明所呈交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得中国农业大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

研究生签名：



时间：

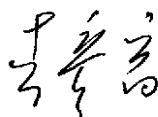
2007年6月16日

## 关于论文使用授权的说明

本人完全了解中国农业大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。同意中国农业大学可以用不同方式在不同媒体上发表、传播学位论文的全部或部分内容。

(保密的学位论文在解密后应遵守此协议)

研究生签名：



时间：

2007年6月16日

导师签名：



时间：

2007年6月16日

# 第一章 绪论

## 1.1 研究背景及意义

随着城市规模的不断扩大,城市人口的日益增长以及人民生活水平的不断提高,城市生活垃圾的产生量在逐渐增大<sup>[1]</sup>。目前,中国城市垃圾人均年产量达到 440 千克。早在 1996 年,中国的城市垃圾清运量就已经达到了 1 亿吨,而且每年以 8%~10% 的速度增长。垃圾的历年堆存量达到 60 多亿吨,全国有 200 多座城市陷入垃圾的包围之中,垃圾堆存侵占的土地面积多达 5 亿多平方米<sup>[2]</sup>。

根据资料统计,“八五”期间北京垃圾产生量增长率为 5% 左右,“九五”期间降至大约 3%,预计 2001 年到 2010 年增长率约为 2%<sup>[2]</sup>。2004 年北京垃圾年产量为 495 万吨,2005 年,北京垃圾年产量为 536 万吨。仅朝阳区、海淀区、丰台区三个区的垃圾产生量就约占北京市城八区垃圾产生量的 2/3。预计 2010 年北京市的垃圾量将达到 606 万吨<sup>[1][6]</sup>。在垃圾产生量急剧增加的同时,垃圾组成也发生着较大的变化,上世纪七、八十年代,北京城市生活垃圾的主要成分是灰土、煤渣、砖瓦等无机物。近 10 年来,随着城市的发展、燃料结构的改变和居民生活水平的提高,纸类、塑料、玻璃、金属等可分类回收利用物在垃圾中所占的比例越来越大。这种无机组分比例逐渐下降,有机垃圾成分不断增加的垃圾比例变化<sup>[1]</sup>,将对北京市生活垃圾处理与利用方式产生重要影响,传统地以垃圾填埋方式和简单堆放后再采用土地还原法处理垃圾的出路因土地的减少、运输费用的增长、环境污染和二次污染等问题日益严重而受到限制。近几年来,对于北京市城八区及其各功能区垃圾组成、垃圾物流设施及垃圾的理化性质和堆肥适用性等的特点还不甚了解。因此,有必要对北京市城市生活垃圾处理、利用及理化性质现状进行详细的调查和分析测试,探寻北京市垃圾产量、组成、性质和时空分布的关系;分析目前北京市垃圾产生量、组成、处理方式、堆肥适用性、燃烧适用性和堆肥腐熟度变化规律;正确评价目前北京市垃圾处理与利用现状并找出存在的问题,为指导北京市垃圾处理与利用提供科学依据。

北京市南宫垃圾堆肥厂是由德国政府赠款,是北京的五个城市生活垃圾处理设施之一,占地 6.6 hm<sup>2</sup>,日处理垃圾 400t。该垃圾堆肥厂与马家楼转运站、安定垃圾卫生填埋场构成城南区完整的现代化城市垃圾无害化、减量化、资源化的处理生产线,主要承担北京市宣武区及部分丰台区生活垃圾的处理任务。南宫堆肥厂于 1996 年动工,1998 年正式投入运营,到目前为止,堆肥工艺运转正常,但该生产工艺存在堆肥周期长、堆肥隧道利用率低、堆肥腐熟度不一致等问题<sup>[87]</sup>。由于对于导致垃圾堆肥腐熟的隧道空间变异的主要原因和关键指标还不甚了解,因此本研究通过调查、试验和评价,从垃圾性质、堆肥过程、垃圾堆肥在隧道仓内的空间变化和添加营养物质对堆肥腐熟的促进等全过程进行取样测定,使用模糊数学法对垃圾的燃烧和堆肥适用性进行评价、堆肥过程中的腐熟度指标及其物理化学性质变化,以期找出影响和控制堆肥质量的关键因素和调控的技术措施,为北京市新的垃圾堆肥厂的设计、建设及管理提供技术参数。

本论文通过对北京市城八区及北京南城不同功能区垃圾的物流设施现状点、线、面调查、北京市城八区及北京南城不同功能区垃圾的理化性质模糊评价以及南宫堆肥厂垃圾堆肥的空间腐熟度结构变化研究,了解北京市城八区生活垃圾状况及其时空分布,分析北京市生活垃圾的产生、分配、流动、消纳、可资源化利用的性质和规律,为实现北京市废物处理与资源化再利用、改善北京城八区生态环境质量和促进北京可持续发展提供可操作的生活垃圾处理决策。

## 1.2 垃圾处理的一般概念

固体废物和城市垃圾是两个不同的概念，可以认为城市生活垃圾是固体废物的一种<sup>[1]</sup>。

### 1.2.1 固体废物

固体废物是指在社会的生产、流通、消费等一系列活动中产生的、一般不再具有原使用价值而被丢弃的、以固态和泥状赋存的物质，或者是提取目的组分后弃之不用的剩余物质。主要包括工业废物和生活废物<sup>[2]</sup>。

#### 1.2.1.1 固体废物的来源

固体废弃物来自人的生产和生活过程的许多环节。表 1-1 中列出了从各类发生源产生的主要固体废物<sup>[4]</sup>。

表 1-1 从各类发生源产生的主要固体废物  
Table 1-1 All sorts of solid waste come form any taches

发生源	产生的主要固体废物
矿业	废石、尾矿、金属、废木、砖瓦、水泥、砂石等
冶金、金属结构、交通、机械等	金属、渣、砂石、模型、芯、陶瓷、管道、绝热和绝缘材料、黏结剂、无垢、废木、塑料、橡胶、纸、各种建筑材料、烟尘等
工业	金属、水泥、黏土、陶瓷、石膏、石棉、砂石、纸、纤维等
建筑材料工业	肉、谷物、蔬菜、硬果壳、水果、烟草等
食品加工业	橡胶、塑料、皮革、布、线、纤维、染料、金属等
橡胶、皮革、塑料等工业	化学药剂、金属、塑料、橡胶、陶瓷、沥青、污泥、油毡、石棉、涂料等
石油化工工业	金属、玻璃、木、橡胶、塑料、化学药剂、研磨料、陶瓷、绝缘材料等
电器、仪器、仪表等工业	布头、纤维、金属、橡胶、塑料等
纺织、服装工业	刨花、锯末、碎木、化学药剂、金属填料、塑料等
造纸、木材、印刷等工业	实物、垃圾、纸、木、布、庭院植物修剪物、金属、玻璃、塑料、陶瓷、燃料灰渣、脏土、碎砖瓦、废器具、粪便、杂品等
居民生活	同上，另有管道、碎砌体、沥青、其他建筑材料、含有易爆、易燃、腐蚀性、放射性废物以及废汽车、废电器等
商业机关	碎砖瓦、树叶、死畜禽、金属、锅炉灰渣、污泥等
市政维护、管理部门	秸秆、蔬菜、水果、果树枝条、糠秕、人及畜禽粪便、农药等
农业	金属、放射性废渣、粉尘、污泥、器具和建筑材料等
核工业和放射性医疗单位	

#### 1.2.1.2 固体废物的种类

固体废弃物按来源可分为：产业固体废物、生活消费固体废物和有毒有害固体废物等。

##### ① 产业固体废物：

产业固体废物是工农业企业再生产过程中未被利用的副产物。主要包括工业固体废物和农林固体废物。

## ② 生活消费固体废物:

生活消费固体废物是指居民生活、商业活动、市政建设与维护、机关办公等过程产生的固体废物。也叫生活垃圾或城市生活垃圾。

生活垃圾随着城市建设和发展以及人们生活水平的提高而发生性质和组成的变化。在家庭燃煤条件下,产生的垃圾主要是单气区垃圾,这种垃圾组成中主要是以无机成分为主;而在双气区(暖气和燃气),产生的垃圾主要以有机成分为主。目前只有部分有条件的大中城市采用袋装垃圾或垃圾分类收集的方法,而在绝大多数的城镇仍采取混合垃圾收集清运的办法。因此,这部分垃圾的主要成分是居民生活垃圾、城市建设的建筑垃圾、商业固体废弃物以及其他杂物的混合垃圾。

## ③ 有毒有害固体废物:

这类废物具有毒性、易燃性、反应性、腐蚀性、易爆性、传染性等,在国际上被称为危险固体废物。危险废弃物被列入专门管理类型。

## 1.2.2 城市生活垃圾

城市生活垃圾是指在城市日常生活中或者为城市日常生活提供服务的活动中产生的固体废物以及法律、行政法规规定视为城市生活垃圾的固体废物<sup>[5]</sup>。

人类在其生产过程、经济活动与生活当中无时不产生垃圾,而且数量在不断地增长。就城市垃圾而言,主要来源于居民生活、商业机关和市政维护、管理部门产生的固体废物。如今,随着资源开发和城市化进程的加快,无论是发达的工业国家还是正在逐步崛起的发展中国家,城市垃圾处理利用已成为一个不可避免、难以回避的现实问题。据有关方面的统计,2000年全世界城市人口已上升到世界人口总数的54.7%,发达国家城市人口更高达80%以上。城市人口的迅速增长,进一步加重了城市垃圾问题的严重性。近年来,我国城市垃圾的产生总量也在大幅度上涨,并且每年以8%~10%的速度增长,年产生垃圾量已超过1亿多t,占世界总量的1/4以上<sup>[5]</sup>。2000年我国663座城市产生的垃圾总量为11800kt,比1997年的25080kt增加了3.7倍,我国的城市垃圾已经处于超前污染状态<sup>[61]</sup>,城市垃圾已成为威胁着人们生存和发展的重要环境问题。

## 1.3 国内外城市生活垃圾现状

### 1.3.1 城市生活垃圾的产生量

随着城市规模不断扩大和城市人口的迅速增加,全球每年新增垃圾约100多亿t。美国1990年人均日产垃圾接近2kg;日本、英国、法国等日产0.8~1.7kg;中等收入国家和地区的开罗、马尼拉及香港约为0.5~0.85kg;在低收入国家的大城市,如加尔各答、卡拉奇、雅加达也有0.5~0.6kg;各国城市生活垃圾的产量总体上处于上升趋势,例如,美国的年增长率为3%~4%,日本为5%~9%,欧洲国家为4%~6%,发展中国家为3%~10%<sup>[6]</sup>。

值得注意的是,部分发达国家生活垃圾的人均日产量出现了负增长,如:英国、芬兰、瑞典、加拿大等。

发达国家生活垃圾人均垃圾日产量见下表<sup>[76]</sup>。



表 1-2 发达国家生活垃圾人均日产量 (kg/人)

Table 1-2 Daily output MSW in developed nations

国家	丹麦	法国	西德	奥地利	意大利	荷兰	英国	芬兰	瑞典	日本	美国	加拿大
1980年	1.09	0.79	0.95	0.61	0.69	1.36	0.95	1.71	1.02	1.13	1.98	1.65
1990年	1.30	0.90	0.91	0.89	0.95	1.36	0.85	1.40	0.83	1.03	1.65	1.44

与此同时,中国城镇垃圾的产生量和堆积量也在逐年增加。80年代,全国工业固体废物的产生量增长幅度较大,但在进入90年代后,其增长速度略有减缓,1991年和1995年,工业固体废物年产生量分别为5.88亿吨和6.45亿吨,但同期城镇生活垃圾量却在以10%左右的年增长率递增。到1995年,中国城市总数已达640座,垃圾清运量达10750万吨。城镇垃圾的增长和构成的变化,主要取决于城镇人口的增长、居民消费水平、消费结构的变化以及煤气普及率的提高、净菜上市和包装食品增加等因素。1998年我国668座城市的生活垃圾清运总量为1.13亿t,目前全国每年产生的生活垃圾已达1.3亿t,全世界每年产生4.9亿t,我国占全世界垃圾总量的27%。而且我国城市生活垃圾每年增长率为8%~11.5%,超过了欧美6%~10%的增长速度。预计到2010年,年产生量将达 $2.5 \times 10^8 \sim 5.5 \times 10^8$ t,将紧随美国之后排在第二位。对于北京、上海之类的特大城市,垃圾日产量更为可观。2001年北京市城市生活垃圾清运量302万t,无害化处理量254万t,按1300万人口计算,人均日产0.64kg<sup>[7]</sup>。2000年,上海市市区每天清运生活垃圾量约7000t,市区人口1480万,人均0.47kg<sup>[8]</sup>。2000年重庆市城市化水平达到28%,生活垃圾人均日产量增至1.06kg,年产量近140万t<sup>[9]</sup>。

我国1995年~2000年间产生的工业垃圾和城市生活垃圾统计见下表<sup>[77-79]</sup>。

表 1-3 我国1995年~2000年间产生的工业垃圾和城市生活垃圾统计

Table 1-3 Statistics output industry waste and MSW in China in 1995-2000

年份	1995	1996	1997	1998	1999	2000
工业垃圾(亿t)	6.5	6.6	10.6	8	7.8	8.2
生活垃圾(亿t)	1.3	1.4	1.4	1.4	1.4	1.5

### 1.3.2 城市生活垃圾成分

城市生活垃圾可分为有机物、无机物和可回收废品三类。属于有机物的主要是动植物性废弃物;属于无机物的主要为炉灰、庭院灰土、碎砖瓦等;可回收废品为金属、橡胶、塑料、废纸、玻璃等<sup>[10]</sup>。

城市生活垃圾的成分与生活水平、食品结构、能源结构有很大的关系。经济发达国家与发展中国家之间、国外各国之间、中国各地之间的垃圾成分都各不相同。

国家发达程度与垃圾密度、含水量及热值比较见下表<sup>[3]</sup>。

表 1-4 三种类型国家垃圾的密度、含水量及热值比较

Table 1-4 Compare of density, moisture and heat in three nations

国家类型	垃圾密度 (kg/m <sup>3</sup> )	含水率 (%)	垃圾热值 (kJ/kg)
发达国家	100~150	20~40	6300~10000
中等收入国家	200~400	40~60	4200 以下
低收入国家	250~500	40~70	

### 1.3.2.1 工业发达国家垃圾成分

工业发达国家其城市垃圾中的可燃物、有机成分均高于发展中国家城市垃圾中的含量。国外城市垃圾一般特性为：水分 40%~60%，可燃成分 30%~40%，灰分 10%~30%。例如，东京、纽约、伦敦、巴黎、柏林和莫斯科等大城市的垃圾中，有机物的成分达到 51%~83%，无机成分 49%~17%。近年来，随着科学技术的发展、人民消费水平的提高，国外城市垃圾成分发生了变化，烟尘和灰分含量已从原来的 80% 下降到 20%；废纸的含量增加，平均占垃圾总量的 30%~45%，金属的含量增加了近 1 倍，玻璃含量增加了近 2 倍，塑料含量也正在迅速增加<sup>[11]</sup>。

### 1.3.2.2 我国城市生活垃圾成分特点

我国是一个发展中国家，从以往数据看<sup>[3]</sup>，我国的城市生活垃圾成分有以下特点：

无机类物质含量高，可燃物质含量低；高热值物质少，垃圾热值普遍较低；有机类垃圾中主要以厨余为主体，因此有机垃圾含水量较高。

我国大多数城市，尤其是中小型城市仍以煤作主要燃料，因此煤渣、灰渣及砖石等无机物较多，约占 50% 左右；塑料、纸张、纤维、食品废物等有机物含量较少，约占 24.5%，且其中食品垃圾占较大比重，玻璃、金属、陶瓷等废品约占 15%；水分占 7.5%，其它废物占 3%<sup>[12, 13]</sup>。由于受消费水平、燃料结构、区域气候及季节变化等多种因素的影响，城市垃圾的成分不仅复杂，而且不同城市间垃圾组分差别比较大、随季节变化也比较明显<sup>[14]</sup>。但随着城市经济发达程度的提高和民用燃料向燃气化方向发展，城市垃圾中有机成分和可回收废品将逐渐增多，无机成分相应减少。近 10 年来大城市的生活垃圾成分发生了明显的变化，垃圾处理的方法有了新的要求，表现在厨余类有机物在垃圾中含量较大，利用潜力增加，但需要分类收集；垃圾中灰土含量下降，垃圾容重进一步降低，运输车辆需求增加，填埋作业难度加大；垃圾中可回收物增加；垃圾热值升高，为采用现代化焚烧处理创造了条件。一些南方现代化城市如深圳等生活垃圾的有机成分已达到 60.0%~95.0%，上海的垃圾有机成分也达 57.2%<sup>[15, 16]</sup>。

北京市的垃圾中无机物含量由 1986 年的 50.0% 下降到 1996 年的 30.0%，垃圾中可回收利用的物品由 1986 年的 12.5% 上升到 1996 年的 25.0%。其中塑料制品的含量变化最大，1986 年垃圾中的塑料制品为 1.6%，1995 年上升为 5.0%。垃圾容重由 1978 年的  $0.7\text{t}/\text{m}^3$  降低到 1996 年的  $0.3\text{t}/\text{m}^3$ <sup>[17]</sup>。

我国部分城市垃圾成分比较<sup>[62-71]</sup>见表 1-5。

表 1-5 我国部分城市垃圾成分比较 (%)

Table 1-5 Compare of MSW composition in part of China

城市	年份	厨余	纸类	塑料	纺织物	渣石	玻璃	金属	竹木
上海	1987	83.15	1.16	2.44	1.12	3.39	2.29	0.82	—
	1991	73.32	7.69	9.16	2.13	1.97	1.00	0.56	—
	1996	70.00	8.00	12.00	2.80	2.19	4.00	0.12	0.89
武汉	1981	15.75	2.12	0.21	0.62	77.61	0.60	1.55	—
	1991	35.50	4.33	3.91	1.33	13.98	2.60	0.69	—
	1996	39.16	4.33	7.50	1.33	32.74	6.55	0.69	3.20
宁波	1998	42.60	7.85	10.30	4.36	3.43	2.91	—	—
	2001	48.40	8.20	15.60	3.50	3.30	0.60	—	—
	2002	45.90	5.11	18.00	4.90	2.52	0.85	—	—
广州	1990	79.45	1.42	1.99	0.98	14.16	1.39	0.60	—
	1995	72.07	3.30	12.58	4.12	4.58	2.63	0.72	—
	1996	63.00	4.80	14.10	3.60	3.80	4.00	3.90	2.80
	2001	63.56	5.45	20.15	3.45	2.99	1.60	0.35	—
天津	1995	73.32	7.49	9.16	3.50	1.89	4.00	0.56	—
	1996	50.11	5.53	4.81	0.68	0.74	—	—	—
	1998	70.09	8.05	11.78	3.68	1.82	4.01	0.58	—
	1999	67.33	8.77	13.48	3.17	1.37	4.15	0.73	—
合肥	1996	44.97	3.57	10.22	2.98	28.40	4.24	0.80	2.52
	1997	48.64	2.55	1.15	43.65	2.23	—	—	—
	2002	66.48	3.78	1.88	1.90	0.91	—	—	—
北京	1996	39.00	18.18	10.35	3.56	10.93	13.02	2.96	—
	1997	54.24	10.78	13.15	3.09	9.54	4.51	0.77	—
长春	2002	43.00	4.09	15.00	2.70	4.60	2.60	0.50	—
济南	2000	48.91	3.65	7.26	1.48	31.66	0.48	0.16	—
重庆	1996	38.76	1.04	9.10	0.97	37.99	9.03	0.53	1.58
南京	1996	52.00	4.60	11.20	1.18	20.46	4.09	1.28	1.08
无锡	1996	41.00	2.90	9.83	4.98	25.29	9.47	0.90	3.05
西安		38.24	3.80	1.20	50.71	—	1.10	—	—
呼市	2001	32.00	6.50	9.20	0.30	1.15	0.50	—	—
大连	2000	83.55	3.70	5.60	1.60	2.56	0.50	—	—

### 1.3.3 影响垃圾产生量的因素

影响生活垃圾产量的因素很多,一般可以分为四类<sup>[60]</sup>:第一类为内在因素,即直接导致垃圾产生量及成分变化的因素。如城市人口、城市能源构成、经济发展和居民生活水平的提高等。第二类为自然因素,主要指地域(地理位置和气候等)、季节等因素。第三类为个体因素,主要指个体的行为习惯、生活方式、受教育程度等。第四类为社会因素,主要指社会行为准则、道德规范、法律规章制度等。

以北京市为例<sup>[75]</sup>,影响城市生活垃圾产量的各种因素可归纳为以下几项。

表 1-6 影响生活垃圾产量的因素  
Table 1-6 Factors influenced MSW output

年 份	人口/万人				产值/亿元			人均 消费 /元	燃 气 率 /%	住 宅 面 积/ m <sup>2</sup> · 人	面积/h m <sup>2</sup>		垃圾 产量/ 万 t
	常住	非农业	暂住	旅游	国内 生产 总值	工业 生产 总值	社会 商品 零售 总额				日 清 扫	供热 采暖	
1991	724.6	648.4	76.2	132.1	558.7	880.8	357.8	887	85.1	11.6	3330.0	5909.1	305.90
1992	736.2	656.3	79.9	174.8	709.1	915.9	430.4	1829	86.5	12.1	3552.0	6218.0	331.32
1993	754.2	668.2	86.0	202.7	863.5	1380.7	531.0	2333	86.6	12.5	3559.2	6407.1	343.64
1994	786.3	683.8	102.5	203.0	1084.0	1693.2	667.0	2928	89.8	12.9	3693.6	7056.1	359.83
1995	797.1	696.9	100.2	206.8	1394.9	1270.2	827.0	4303	91.7	13.3	3880.3	7537.3	372.16
1996	816.0	709.7	106.3	218.9	1615.7	1316.3	969.6	5106	92.7	13.8	3940.0	7838.2	372.47
1997	853.9	722.7	131.2	229.8	1810.1	1475.6	1051.5	5524	94.0	14.4	4126.0	8398.7	377.55
1998	865.6	733.7	131.9	220.1	2011.3	1926.7	1195.2	6240	95.4	15.0	4308.0	9102.1	381.47
1999	897.3	747.2	150.1	252.4	2174.5	2081.0	1313.3	7040	97.1	15.9	4705.0	9991.7	389.11
2000	931.2	760.7	170.5	282.1	2460.5	2292.3	1443.3	8494	99.3	16.2	6014.7	10500	396.64
平均	816.2	702.8	113.5	212.3	1468.2	1523.2	878.6	4468.4	91.8	13.8	4110.9	7895.8	363.01

### 1.3.3.1 人口的影响

人口参数是测算城市垃圾产生量的重要指标，主要包括城市非农业人口和流动人口两项指标。鉴于城市非农业人口的系统性和规范性，我国一直将其作为测算城市垃圾人均产生量及环境卫生有关指标的通用基本参数。一般来说，城市垃圾产量的直接影响因素是城市人口和人均日垃圾产量，因此城市垃圾产量公式表示：

$$G=Gi \times M$$

式中 G—城市垃圾日产量 (t/d)

Gi—城市垃圾人均日产量 (kg/人·d)

M—城市人口数

但是，城市垃圾排放主体并不仅仅是非农业人口，还包括流动人口(暂住人口和短期逗留人口)，他们约占城市非农业人口数的 30%左右。经济特区、沿海开放城市、风景旅游城市及其它经济发达、交通便利城市的流动人口比例更大。流动人口导致垃圾产生量的增加；其次，也在一定程度上影响垃圾构成。例如，短期逗留人口导致公共场合垃圾产生量增加，尤其是垃圾中各类松散垃圾(纸张、塑料等)的增加。

根据对 10 个城市抽样调查结果，我国城市中人均日产垃圾量超过 1 千克。近 20 年来，我国的城市化进程逐年加快，城市数量大幅度增加，城市规模不断扩大，城市非农业人口迅速增长。到 2000 年底，全国总人口已达 12.65 亿，668 座城市(不含镇)中市区人口约占全国总人口数的 36%。随着城市规模的扩大和城市化进程的加速，城市生活垃圾产生量逐年增加，1985~1995 年间增长率在 8~10%左右，1995 年之后，增长速度减缓，约为 2~3%。随着城市人口的日益增长，我国城市生活垃圾的产生量和堆积量将继续逐年增加。1981 年，我国城市生活垃圾清运量为 2606 万吨<sup>[52]</sup>，2002 年全国 660 个建制市，生活垃圾清运总量为 1.365 亿吨，比 1981 年增加了 4.24 倍，年平均增长率为 8.2%，高于同期城市人口增长率 4.35%。全国城市人口和城市生活垃圾清运

量增长比较见下表<sup>[52]</sup>。

表 1-7 全国城市人口和城市生活垃圾清运量增长比较

Table 1-7 Compare of MSW mount up in China

年度	1981	1985	1990	1995	2000	2001	2002	年均增长率/%
城市人口/万人	14400.5	20893.4	32530.2	37789.9	38823.7	35747.3	35219.6	4.35
垃圾清运量/万吨	2606	4477.3	6766.8	10671	11818.9	13470.4	13650	8.20
人均清运量/ (千克/人·日)	0.50	0.59	0.57	0.77	0.83	1.03	1.06	3.69

### 1.3.3.2 居民生活水平和消费水平

居民生活水平和消费水平的改变不仅影响城市生活垃圾的产生量，也是影响垃圾成分的重要因素。近 20 年来<sup>[80]</sup>，居民生活水平不断提高，从 1990~2000 年，城镇居民的消费水平提高了 5 倍左右。与此同时，城镇居民产生的垃圾成分也发生了相应的变化。其基本趋势是有机成分增加、可燃成分增加。抽样调查的结果表明，生活垃圾中煤渣含量持续下降，而易堆腐垃圾和废品的含量则持续增长。与 1985 年相比，1996 年，垃圾中废品的比例增加了 3.8 倍，易堆腐垃圾增加了 52%，而煤渣、灰土等无机组分却减少了 39%。

### 1.3.3.3 城市能源结构的影响

生活燃料结构发生变化，影响城市生活垃圾组分的另一个重要因素是燃料消费结构。我国是以煤为主要燃料的国家，一次性能源的 75% 是煤炭。煤炭不仅广泛用于工业生产，同时也是家庭燃料的重要组成部分，过去大部分家庭的做饭、取暖均以煤炭为主要燃料，造成城市生活垃圾中含有大量的煤灰，垃圾中有机物含量较少。近年来，随着城市集中供热和煤气化的普及，民用燃料的消费结构发生了重大变化，同时也带来了城市生活垃圾组分的变化。燃煤区垃圾中的无机组分明显高于燃气区，而燃气区垃圾中的有机组分和可回收废品的比例明显高于燃煤区，变化最大的组分就是垃圾中的煤灰量。另一方面，燃煤区居民的生活水平往往也低于燃气区。在燃气区，由于垃圾中煤灰量的减少，厨灰成为主要组分，因此，垃圾的含水量相对增加。哈尔滨、武汉等城市环卫部门分别对本市用气居民区和用煤居民区生活垃圾进行的统计分析表明，南方和北方都有以下基本特征：燃气区垃圾中易腐物比例都很高，一般为 70% 左右甚至更高，而灰渣比例很低，多在 10% 以下；燃煤区情况相反，易腐物约 20%，而灰渣比例可高达 70% 左右；燃气区可回收物比例较高，一般都大于 10%，而燃煤区则较低，多为 5% 左右；燃气区垃圾含水率通常为燃煤区垃圾的 1 倍，约为 50%；燃气区人均垃圾产量明显低于燃煤区，约为后者的 1/2。值得注意的是：常规统计得到的城市气化率这一指标并不一定能够反映城市居民生活能源结构实际情况。例如，北方城市中，气化率是一个广义的概念，它包括纯燃气区(饮食、取暖都用燃气)和单气区(饮食用气、取暖用煤)。这两种用气居民区的垃圾成分差异极大，沈阳、哈尔滨等城市进行的深入研究足以证明这一点<sup>[20]</sup>。

### 1.3.3.4 地域的影响

不同地理位置的城市，特别是南方与北方城市的气候不同，城市生活垃圾人均日产量也不同：

北方地区城市人均日产垃圾量明显高于全国平均值,南方城市则低于全国平均值。1991年至1994年北方地区城市人均日产垃圾量与南方城市人均垃圾产量比值分别为1.42, 1.44, 1.39, 1.28。产生这种差异的主要原因是<sup>[80]</sup>:

- ① 气候差异:北方城市能源中的燃煤比例及使用期均高于、长于南方城市。北方地区因取暖需要,生活能源耗用量大大高于南方,且现阶段仍以燃煤为主要生活能源,因此导致垃圾排放量和灰渣(炉灰为主)比例的增加。
- ② 饮食结构差异:南方城市居民的瓜果蔬菜的食用量和食用期大于和长于北方城市,因而垃圾中有机成分相对较高;
- ③ 经济水平差异:南方城市的经济水平高于北方,因此垃圾中的纸张、塑料等可燃物、可回收物的比例相对较大;

### 1.3.3.5 季节因素

季节因素对城市生活垃圾的产量和成分影响较显著:易腐有机物、不可燃物等随季节变化较明显,且易腐有机物最高值均分布在第三季度,容重最大值均分布在一、四季度。这与第三季度市民大量消费水果等食品有关。一、四季度容重达是因为居民耗煤取暖产生无机垃圾多的缘故。根据吴文伟等<sup>[81]</sup>对北京市1998年4个季度的居民生活垃圾调查证明:气候对垃圾的产生量有明显影响。

### 1.3.3.6 多种因素的交叉影响

一般情况下,如果只考虑用一种因素分析垃圾产量及成分特征是片面的。因为不同因素之间可能是相互制约或叠加的。如提高气化率可以降低排放量,但是另一方面明显地提高了垃圾中易腐物的含量和比例,而这其中往往又存在着流动人口大、经济发展快等多种因素的影响,比如北京市海淀区垃圾产量及成分就受这些因素的综合作用。经济特区也有同样的现象,因此,出现典型南方特区城市的人均日产垃圾量(非农业人口)高于全国平均值的特殊现象。

2000年北京市人口为1356.9万人<sup>[18]</sup>。人均日产量与经济水平有关,根据资料<sup>[19]</sup>,人均日产量与国民收入和人均工资收入两项指标有较好的线性关系,国民收入每增加100元,人均年垃圾产量增加4.08kg;人均年工资收入增加100元,人均年垃圾产量增加15.1kg。由此可见,人均收入的增加对垃圾产量增加的影响比国民经济收入增加对垃圾产量的影响要大得多。

另外,社会因素对城市生活垃圾的产生及成份的影响也不可忽视。社会因素包括社会行为准则、法律法规、社会道德规范以及居民饮食结构等。是一种间接的影响因素。可以通过宣传教育和建立规章制度实行垃圾的减量、回收及再利用措施<sup>[82]</sup>。

## 1.3.4 城市生活垃圾的危害

面广量大的垃圾堆放在城市周围,已成为一个非常严重的、普遍的环境问题,带来了直接的和潜在的污染危害。在污染问题较为突出的城市,已经阻碍了城市建设的进程,制约了经济的发展。主要表现在:

### 1.3.4.1 侵占土地，破坏农田

目前全国堆存垃圾侵占土地总面积已近 5 亿  $\text{m}^2$ ，折合耕地约为 75 万亩。据统计，我国的耕地面积有 20 亿亩，相当于全国每 1 万亩耕地就有 3.75 亩用来堆放垃圾。垃圾严重破坏着人类赖以生存的土地资源<sup>[53]</sup>。据航空摄影调查北京市近郊有可辨认的垃圾堆场近 500 个，占地约  $600\text{hm}^2$ <sup>[21]</sup>。由于城市化学品含量越来越高的垃圾被埋在地下数十年甚至上百年都不降解，加上有毒重金属如铅、镉等造成了土地污染，使土地失去了可利用的价值。如果将未经严格处理的城市生活垃圾直接用于农田，破坏土壤的团粒结构和理化性质，导致土壤保水、保肥能力降低<sup>[22, 23]</sup>。

### 1.3.4.2 污染空气

垃圾中含有大量有机物，这些物质在厌氧分解中会产生大量有害物质如硫化氢、氨气、甲烷等。尤其是夏季，露天垃圾散发有机物腐烂的恶臭、含有致癌、致畸、致突变等物质的气体等，随冒出的白色烟气散发于大气中<sup>[53]</sup>。

### 1.3.4.3 污染地表水和地下水源

垃圾在堆放腐败过程中产生大量酸性和碱性有机污染物，并溶解出垃圾中的重金属，形成有机物、重金属和病原微生物三位一体的污染源。任意堆放的垃圾或简易填埋的垃圾，经过雨水冲刷、地表径流和渗沥，产生的渗滤液对地表水体和地下水产生严重污染。垃圾渗出液中 COD 高达  $15680\text{mg/L}$ ， $\text{BOD}_5$  高达  $10000\text{mg/L}$ ，细菌总数超标 4.3 倍，大肠菌群超标 2410 倍<sup>[53]</sup>。一些已经建成的大型垃圾填埋场也存在严重污染地表水和地下水的现象，如广州大田山垃圾填埋场，上海老港废弃物处置场等都发生了污染地下水现象。

### 1.3.4.4 垃圾热能的温室效应

堆放的垃圾在腐化过程中产生大量的热能，携带者氨气、硫化氢、甲烷等有害气体形成恶臭污染空气的同时，散发热量，白色烟气包围城市，形成热岛温室效应<sup>[53]</sup>。

据报道，安徽省马鞍山市对垃圾产生的温室效应作了研究：每吨垃圾在厌氧分解的过程中产生甲烷气体  $4.4\text{m}^3$ 。一个占地面积  $5.3\text{hm}^2$ 、堆存 70 万吨垃圾的填埋场，每年向城市上空排放甲烷气提高达  $5000\text{万m}^3$ ，成为城市上空温室气体排放的主要因素。

### 1.3.4.5 引起垃圾爆炸事故

由于城市垃圾中有机物含量的增高和由露天堆放变为集中堆存时，虽然采用了简单覆盖，但在垃圾堆体中易造成产生甲烷气体的厌氧环境，使垃圾产生的沼气的量增加，危害日益突出，事故不断，造成重大损失。例如：1994 年 1 月 8 日，湖南省岳阳市发生羊角山垃圾场垃圾大爆炸；1994 年 7 月上旬，上海浦东区 120 吨装垃圾船因甲烷气爆炸，震波造成甲板上 3 名职工腿部骨折；北京市昌平境内的羊坊镇垃圾填埋场，1995 年发生了 3 次垃圾爆炸事故，造成 1 人重伤，3 人轻伤的事故<sup>[24]</sup>。

#### 1.3.4.6 影响环境卫生, 传播疾病

垃圾堆放场是滋生有害微生物的温床。含有大量致病菌, 由细菌、蠕虫、支原体、蚊蝇、蟑螂等。例外, 据全国 300 个城市的统计, 城市垃圾的清运量仅占产生量的 40%~50%, 无害化处理率很低, 大量的垃圾未经无害化处理进入环境, 既严重影响环境卫生, 又对人民健康构成潜在的威胁。垃圾堆放场是大量老鼠、蚊蝇、病原体的滋生传播源, 潜伏着爆发性时疫的危险<sup>[25]</sup>。

#### 1.3.4.7 形成白色污染

几乎在所有有人的地方, 都能看到随意丢弃的塑料食品袋、包装袋、饮料瓶、一次性快餐饭盒等。公路边、铁道旁、风景点, 无处不被废旧塑料困扰。塑料废物造成动物误吞噬死亡、堵塞下水道等, 形成城市白色污染的难点问题<sup>[54]</sup>。

#### 1.3.4.8 造成资源浪费

城市生活垃圾中一般含有 10~15%的可回收利用的物质。如金属、玻璃、塑料、橡胶和纸张等。随着全球资源短缺的加剧和科学技术的发展城市生活垃圾将成为具有可利用价值的资源。例如<sup>[55]</sup>利用废钢生产钢, 可以减少 86%的空气污染、92%的固体废物、40%的有害物质的处理处置。

### 1.3.5 城市生活垃圾的分类收集

垃圾的分类收集是指在垃圾产生源头按不同组分分类的一种收集方式<sup>[63]</sup>。垃圾分类收集有利于垃圾处理、资源回收和再生利用, 以实现垃圾减量化、资源化和无害化为最终目标。

分类收集方式的实施是城市生活垃圾处理体系中的一个关键环节, 是城市生活垃圾处理发展过程中的一个重要步骤。通过分类收集, 可有效实现废物的重新利用和最大程度的废品回收(根据吴国玺等人的调查<sup>[26]</sup>, 垃圾中塑料、纸张、金属等可回收物质占 38%), 为垃圾的卫生填埋、堆肥、焚烧发电、资源综合利用等先进的垃圾处理方式的应用奠定基础, 为垃圾处理实现减量化、资源化、无害化目标创造良好条件。目前, 国外发达国家都已全面实行垃圾分类收集, 国内许多城市也开始探索适合本城市的垃圾分类收集方式<sup>[56]</sup>。

#### 1.3.5.1 国外的垃圾分类收集状况

从 20 世纪 60 年代起, 发达国家由于资源紧张和环境恶化就开始重视和研究垃圾分类收集问题, 并于 70 年代逐步开始实施垃圾分类收集。“厨房是分选工厂, 双手是分拣机器”的分类收集方法简单易行, 被众多国家采用。瑞典、日本、美国、英国、法国、德国、瑞士、苏联等国家都先后实施这一分类收集方式。实践证明, 只要管理得当, 它确实是一种快捷、经济而卓有成效的垃圾分类收集方法, 所以近年来又有不少国家或城市采用此法, 并不断加以改进和提高。德国环保部门规定, 生活垃圾必须分类收集。在德国, 一般居民家里至少摆放有四五个垃圾桶, 分别装生态垃圾(蔬菜叶子、水果皮等)、化学垃圾(废电池等)、可回收垃圾(玻璃瓶、废旧纸张等)和普通垃圾(分可燃、不可燃两类)。公共场所放置的垃圾桶, 除了把这些垃圾分门别类地装进不同颜色的桶里, 还要进一步把不同颜色的玻璃瓶放入相应的桶内<sup>[27]</sup>。据报道, 1993 年德国的垃圾分类



收集量已占垃圾总量的 75.5%。在美国的旧金山,收集垃圾的容器由居民、单位自行购置或向收运公司租借。居民家中大多备有物料破碎机,可将果皮、厨余等有机垃圾破碎后冲入下水道,从而避免含水量大的有机垃圾直接倒入垃圾桶内腐烂发臭。由于垃圾容器由居民、单位自行保管,一般都比较干净,也没有垃圾桶随便推动现象<sup>[28]</sup>。加拿大蒙特利尔市从 1989 年起开始对生活垃圾进行分类收集和回收利用,计划到 2010 年,通过堆肥等资源再利用方式,使生活垃圾产量减少 50%。另外通过对纸张、玻璃、塑料和金属等进行分类收集和回收利用,可减少 30%的垃圾产量。

### 1.3.5.2 我国城市垃圾分类收集的现状

我国各城市目前普遍实施的是垃圾混合收集方式,不同性质、成分的垃圾混合在一起,如干电池、废油等未经分类直接进入垃圾,增加了无害化处理或处置的费用和难度,造成有用组分的资源损失。但分类收集对人们并不陌生。早在 50、60 年代,我国就有很多城市曾实行过煤灰与其他垃圾分开收集的制度。当前各地均设有废旧物资回收公司和收购网点,从居民手中回收那些准备抛弃,但又有一定再生利用价值的垃圾。这两种形式都应属分类收集范畴,只是前者简单且基本上已经中断,后者是一种没有制度约束的商业行为。近年来垃圾分类收集问题已日益得到重视,《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》和《中国 21 世纪议程》中都明确提出城市生活垃圾应逐步做到分类收集<sup>[27]</sup>。2000 年 4 月,建设部在全国范围内选定北京、上海、广州、南京、深圳、杭州、厦门、桂林 8 个城市作为垃圾分类收集的试点城市,这些试点城市在推行生活垃圾分类收集的实践过程中,结合本地实际,初步形成了一些具有地方特色的分类收集实施原则、指导思想和方法。如广州市,让市民先将生活垃圾粗分为可回收利用、不可回收利用和有毒有害 3 类,再由分拣中心进行细分类和加工,这样更有利于分类收集工作的开展。如北京市结合申办奥运会,把分类收集作为建设绿色北京的一项重要工作,提出了“政府推动、市场运作、公众参与、科技支撑”的指导方针,率先从全市党政机关、企事业单位实施废纸分类收集,推广使用再生纸办公。上海市积极营造“垃圾要分类,资源要利用”的社会氛围,根据不同的区域和不同的生活垃圾最终处理方式,设计分类收集类别和收集方式,仅 8 个月,城市生活垃圾分类收集率就达到了 20%。南京市逐步建立和完善由小区保洁员、居民、物业管理公司和市容环卫管理部门共同参与的“四位一体”的垃圾分类回收体系,全社会参与垃圾分类收集和综合利用。厦门市从 2001 年 6 月起在全市范围内建立了分类回收体系,并在鼓浪屿全区实行了分类回收。还有一些不是试点的城市也开展了垃圾分类收集工作<sup>[29]</sup>。

### 1.3.5.3 垃圾分类的类别划分

由于各国经济、社会发展水平不同,垃圾成分各异,导致垃圾分类复杂,处理和资源利用的方法众多。一般而言,可以按层次先分级再分类别,一般分成三级<sup>[84]</sup>:

第一级:  $A_1 \dots A_n$

第二级:  $B_1 \dots B_n \quad B_j \dots B_m$

第三级:  $C_1 \dots C_n \quad C_j \dots C_m \quad C_k \dots C_p \quad C_l \dots C_q$

第一级类别为多种物质的集合,具体指可采用同种处理和资源利用方法的物质集合,或具有某种同性质的物质集合。第一级类别主要有可燃垃圾、可堆肥垃圾、可回收垃圾、粗大垃圾和有害垃圾等。此类垃圾的分类有利于垃圾处理技术的进步。

第二级类别大多指具有相同理化性质的某类物质,如塑料、玻璃和金属类,少数是指具有相同使用功能的某类物质,如瓶罐类、电池等。

第三级类别是指垃圾中的典型物质,对象具体明确,分类后有利于选择适宜的技术进行资源回收和再生利用。

### 1.3.5.4 城市垃圾的分类方法

按照《城市居民生活垃圾成分调查统计规范》的地方标准规定,生活垃圾成分分类有十种:纸类、橡塑、竹木、布类、厨余、果类、金属、玻璃、灰渣及其它(指上述九类以外没有专项列出的其它废物)。该标准适合实验室的成分分析试验研究,从实际情况出发只能根据垃圾不同性质(可燃性或毒性)或利于后续处理来分类<sup>[30]</sup>。

- ① 将生活垃圾分为可燃物与不可燃物(也可按高热值与低热值垃圾来划分)及可回收废品来分类。此方法有利于对可燃垃圾进行焚烧处理,故比较适合以焚烧为主或焚烧填埋相结合的地区。
- ② 按有毒与无毒性分类。此方法有利于有毒物的无毒无害化特殊处理,但生活垃圾中有毒物质很少且没有将大部分生活垃圾分类,因此失去分类意义。
- ③ 按有机物与无机物分类。此方法有利于有机物后续处理,如堆肥等。
- ④ 按有机物(厨余、果类等)与无机物(纸类、橡塑、竹木、布类、金属)及有害有毒物(玻璃、灯管、药品、电池等)分类。此方法既有利于废物资源回收利用,又减轻生活垃圾后续处理负担并可按不同分类方法进行不同后续处理。如有机垃圾经预处理后可以焚烧或堆肥,无机垃圾可回收利用,有毒有害垃圾专项处理或填埋。
- ⑤ 按厨余、金属、可回收物(纸类、橡塑、布类、玻璃等)、花园垃圾(树叶等)多类来分类。此方法有利于资源回收及各类垃圾后续处理。但不足之处在于分类较繁杂,收集容器较多,需要居民有良好的环保意识 and 充分配合,目前情况下,几乎难以推广。

经过上述方法讨论比较,确定第④类即将垃圾按有机物、无机物、有害有毒物分成3类的方法,作为分类收集的首选方法。

### 1.3.5.5 北京市垃圾分类方法

北京市垃圾分类采取“大类粗分”的原则,主要把垃圾分成以下四类<sup>[85]</sup>:

- ① 可回收物:指宜于资源利用的垃圾,包括纸类、塑料类、橡胶、玻璃、金属和织物等;
- ② 厨余垃圾:指剩饭菜和瓜果皮等生物性垃圾;
- ③ 塑料:各种食物和食品的塑料包装物;
- ④ 其它垃圾:指除以上三种之外的垃圾,如扫尘土、专瓦陶器、卫生间废纸和烟头等。

### 1.3.6 城市生活垃圾的处理与利用现状

城市垃圾处理,已日益成为世界范围内一个普遍关注的问题,是一项十分艰巨的综合性、系统性的工程。如果垃圾不及时、合理处理,将会对城市及周边环境造成很大的污染,给人类带来极大的危害。因此,在对城市垃圾的处理问题上,世界各国已不再仅仅停留在如何控制和销毁这一传统的老观点上,而是采取积极态度和有力措施,进行最大限度的回收和综合利用,以创建具有良好经济效益的“垃圾产业”。总之,垃圾处理的目的就是净化城市生态环境,保持人与自然的和谐共处状态。

### 1.3.6.1 城市垃圾处理方法及其特点

目前,国内外城市垃圾处理通常采用填埋、焚烧、堆肥三种处理工艺,而这三种处理工艺各有利弊(见表 1-8)。应根据不同地区的垃圾成分、经济条件、自然条件、技术水平等诸因素综合分析、选择采用。

#### ① 填埋处理

填埋处理是城市生活垃圾最基本的处理方法,它是将残渣埋入地下,通过微生物长期的分解作用,使之分解为稳定的、无害的化合物。它分为简易填埋、卫生填埋、压缩填埋、破碎填埋 4 种方式。填埋必需满足以下要求:

- A 填埋的残渣应为惰性物质,或者能经过微生物分解而变成无害化的固体物质;
- B 填埋场地远离水源,不得穿入地下水层,填坑底土要充分压实,不得透水;
- C 填埋时,须将废物分层平铺,分层压实,当天用土掩盖;
- D 填埋后,要在场地树立标记,以便日后检查,将来可将填埋场地改造成公园、绿地或农田<sup>[31]</sup>。

在填埋的几种方式中,最理想的填埋方式是破碎填埋,破碎填埋是将废弃物破碎到尺寸小于 8cm 再填埋,其优点是不会发生由厌氧细菌分解而产生沼气等引起持续性燃烧,即使起火,碎片可自动下塌,将火压灭<sup>[32]</sup>。卫生填埋,是城市垃圾最常用的土地填埋方法是利用工程手段将垃圾减容至最小,填埋点的面积也最小,并在每天操作结束时或每隔一定时间都覆以土层,整个过程对公共卫生及安全均无污染或危险的一种垃圾处理方法。

填埋法是堆肥残渣和焚烧炉灰的归宿地,要综合考察填埋场的岩石、土质、地质构造与水文地质条件<sup>[33]</sup>。一般选用废矿坑、废黏土矿、废采石场等作为填埋场地。填埋法有投资少、技术要求不高、安全性较好、处理费用低和便于操作的特点,因而得以广泛推行。其中卫生填埋法是各国应用最普遍的方法,意、英、法、荷兰都广泛采用这种方法。我国 70%的城市垃圾也用卫生填埋法,如北京阿苏卫卫生填埋场垃圾消纳能力为 2000t/d,西安江村沟卫生填埋场容积为 228 万 m<sup>3</sup>,上海老港填埋场消纳生活垃圾能力为 5000 t/d,广州李坑填埋场消纳生活垃圾能力为 2000 t/d<sup>[34]</sup>。

填埋处理存在的主要缺点为:占用土地量大;造成周围环境、地表和地下水污染;填埋场一般都建在远郊,运输成本高;浪费可回收利用资源。由于存在这些缺点,特别是垃圾填埋产生的渗沥液污染治理难度大,国外正在逐步减少垃圾直接填埋量,尤其在欧盟各国,已强调垃圾填埋只能是最终处置的手段,并规定在 2005 年以后,有机物含量大于 5%的垃圾不能进入填埋场。瑞士和奥地利分别于 2000 年和 2004 年取消城市生活垃圾直接进行填埋处理。这些措施将有利于垃圾资源再生利用率的提高,同时也会对垃圾填埋场的污染控制和治理产生积极影响。

#### ② 焚烧处理

焚烧法是一种对垃圾进行高温热化学处理技术。垃圾在焚烧炉内 800~1000℃的高温条件下燃烧,垃圾中的可燃组分与空气中的氧进行剧烈的化学反应,释放出热量并转化为气体和性质稳定的残渣。燃烧产生的热量可回收利用,残渣可直接填埋。

国际上一般认为以下几类废弃物适用于焚烧处理:

- A 具有生物危险性的废弃物;
- B 难以生物降解及在环境中持久性存在的废弃物;
- C 易挥发和易扩散的废弃物;
- D 燃点低于 40℃的废弃物;
- E 不适于安全填埋处置的废弃物;
- F 含有卤素、铅、汞、铬、锌、氮、磷或硫的有机废弃物。

焚烧法的优点是可以大大减小废物的体积和重量,一般可缩小体积 90%。同时其处理量大,减容性好,无害化彻底,残渣性能稳定,能最大限度地减少二次污染,并能回收热能用以供热取暖或发电。近 20 年焚烧法在国外得到迅速发展,瑞士、丹麦、瑞典、法国、德国的垃圾用焚烧法处理的比率分别为 80.0%、72.8%、55.0%、38.0%和 32.0%<sup>[35]</sup>。美国用焚烧法处理垃圾的比例为 16.0%~20.0%,而在日本等可耕地奇缺的国家,焚烧处理的比例达 65.0%~80.0%,每年约焚烧垃圾 3000 万 t,日本的焚烧厂也是发电厂,利用焚烧的余热发电<sup>[35]</sup>。据专家预测,我国新型现代化城市如深圳、广州、上海、顺德、珠海等城市的垃圾也将以焚烧法处理为主。

焚烧法处理垃圾仍有一定局限性,主要是对垃圾的热值要求在 4127 kJ/kg 以上;设备一次性投资大,运转费用高;在焚烧过程中容易产生二次污染,排出 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、粉尘、HCl 和毒性极强的二恶英(PCDD/Fs)等<sup>[36]</sup>。

我国长期受经济水平和能源结构的限制,垃圾焚烧处理一直发展缓慢。由于人口多,垃圾量大,人均土地资源有限,填埋场地减少,使得填埋法投资及运转费用呈上升趋势,而焚烧法随着技术进步,其投资和运行费用呈逐年下降趋势。随着经济条件的改善,垃圾焚烧处理在我国将成为一种主要的处理方法<sup>[37]</sup>。

### ③ 堆肥处理

堆肥法是使垃圾中的有机物质,在微生物作用下发生生物化学反应,最后形成一种类似于腐殖质的物质,可以作为肥料或土壤改良剂。城市生活垃圾中可堆肥物主要是厨余以及落叶等植物类垃圾,国外用于堆肥的垃圾主要是分类后的有机垃圾、庭院园林垃圾等可堆腐物,只有部分国家采用混合垃圾堆肥。堆肥处理在城市生活垃圾的处理中所占比例仍很小(如荷兰 16.0%,瑞士 10.0%,法国 9.0%,中国 8.0%),它主要用于其它有机固体废物的处理。堆肥处理工艺可分为堆垛式堆肥(即长形料堆)和机械堆肥(即反应器或反应槽)两种。长形料堆占地面积大,且易散发恶臭,但可以通过人工通风或经常翻转使堆肥物料充分混合,防止恶臭扩散。机械堆肥采用分选、粉碎、精制等多道工序,在产品质量和环境效益上都优于土法堆肥。堆肥处理方式有好氧和厌氧两种,以用好氧方式居多。

现代堆肥技术是从 20 世纪初开始发展的。1920 年英国人埃·霍华德在印度把落叶、垃圾、动物及人的粪尿在土坑内堆成约 1.5m 高的土堆,隔数月翻堆一二次,共进行为期 6 个月的厌氧发酵,此法称为印多尔法<sup>[38]</sup>。1932 年荷兰开展大规模的堆肥工程;1940 年美国使用机械化发酵槽,并相继研制出了密闭发酵槽和箱型间歇堆肥等新工艺<sup>[39]</sup>。我国早在 1149 年的宋代《农书》中,就已详细记载了农村广为采用的堆肥技术。由于堆肥产品的市场等原因,垃圾堆肥处理特别城市生活垃圾的堆肥处理在发达国家曾一度处于停滞甚至萎缩状态。进入 20 世纪 90 年代以后,由于以下几方面因素,堆肥处理又呈上升的发展趋势。随着欧美发达国家焚烧处理和填埋处理成本的增加,垃圾分类收集的普遍推行为堆肥处理的发展提供了良好的基础条件。堆肥法是城市垃圾处理成本最低和垃圾资源化效果较好的处理技术之一,它在消纳城市垃圾的同时还能生产出很好的土壤改良剂,起到腐殖质源、向植物提供各种基本微量元素的作用,相应地减少了化肥使用量。堆肥主要用于公园、运动场的建设和公路的养护,如英国利物浦的国际花园,阿根廷布宜诺斯艾利斯的环境绿化带都是在垃圾堆上建立而成的<sup>[40、41]</sup>。堆肥还用于园艺栽培和农田建设,森林和树木的养护,填埋场等废场地的再开发,生物气体控制的过滤物料。

生活垃圾各种无害化处理方法的优缺点比较见下表<sup>[44]</sup>。

表 1-8 城市生活垃圾无害化处理方法比较

Table 1-8 Compare of techniques dealt with MSW

项 目	方 法		
	卫生填埋	焚 烧	高温堆肥
适用条件	适用范围广,对垃圾成分无严格要求	要求垃圾热值大于 4000kj/kg	垃圾中生物可降解有机物含量大于 40%
厂址选择	较困难,要考虑地理条件防止水体污染,一般远离市区	较困难,要考虑地理条件防止水体污染,一般远离市区	较容易、需避于住宅密集区气味影响半径小于 200m
运输距离	>20km	<10km	10~20km
占地面积	较大	较小	较小
能源利用	回收沼气可做燃料	可将热能转变为电能成其它能源	无
资源利用	恢复土地利用或再生土地资源	垃圾分选可回收部分物资	作农肥、回收部分物资
水	防渗措施不当可能影响地下水因雨水冲刷可能影响地面水	无	因雨水冲刷可能影响地面水
气	覆盖不严或厌氧发酵产生臭味或有害气体	产生烟尘 NO <sub>x</sub> 、HCl 和二恶英等污染	有轻微的气味
土壤	限于填埋场区域	无	需控制堆肥有害物质含量
处理成本*	4.31~12.95	64.77~75.56	21.59~32.38

\*: 处理成本以 2000 年的标准计算, 单位为: (元/t)。

由于堆肥法具有这些优点,而且近年来,由于大量施用化肥和缺少有机肥投入使农业环境日趋恶化,土壤肥力下降。我国城市垃圾中的可堆肥物质,随着城市燃料结构及生活水平的提高而不断增加。大量城市垃圾加上人粪尿,经堆肥无害化处理后,成为良好的有机肥,因此,发展垃圾堆肥是有一定潜力的。如按目前的垃圾产量推算,每年可得到上千万 t 的堆肥,这是我国增加土壤肥力的一个丰富的有机肥来源。所以,垃圾堆肥在我国有着良好的发展前景。垃圾堆肥处理不慎也会产生二次污染问题。堆肥的最终出路是用于农田施肥,由于堆肥过程中不可能完全去除金属离子,重金属会被土壤吸收,进入植物,并通过食物链最终影响到人体。因此,为了防止堆肥的二次污染,应设法避免重金属进入堆肥垃圾中,或尽量少地使用已有重金属污染的堆肥物。

我国将争取把堆肥技术处理城市垃圾的比例由目前的 8.0%提高到 30.0%<sup>[32]</sup>。堆肥市场潜力的预测是堆肥处理垃圾可行性研究中非常重要的一步。目前,由于受市场因素影响而使堆肥生产规模受到限制,此外还存在肥料质量差、占地面积大、生产周期长、工业化生产困难、产生渗出液、恶臭和沼气等缺点;而且堆肥中重金属含量较高,使得堆肥不宜直接施用农作物生产,这些因素都制约着堆肥生产规模的发展。如果采用有效的垃圾分选技术和发酵技术,在堆肥过程中注重提高堆肥有机质和养分含量,培养和使用优化菌种群落,同时注重解决堆肥生产过程中的环境问题,开发新的受市场欢迎的肥料,堆肥技术将会得到更快的发展<sup>[42、43]</sup>。

### 1.3.6.2 国外垃圾处理现状

由于生活垃圾成分复杂,又受经济发展水平、自然条件及传统习惯等因素的制约,因而各国对生活垃圾的处理一般是随国情而异,往往一个国家的不同地区也采取不同的处理方法,难有统一的模式,更无万全之策。就目前广泛应用的填埋、焚烧、堆肥等垃圾处理方式来看,各国采用这些方法的比例也因诸多因素而有着较大差别。在土地资源丰富的国家,以填埋法为主,土地资

源紧缺的国家地区，焚烧法占有较高比例并成为处理城市垃圾的主要手段。表 1-9 列出了部分国家城市生活垃圾处理方法的统计比例<sup>[56]</sup>。

表 1-9 部分国家城市生活垃圾处理方法的统计表  
Table 1-9 Statistics of techniques dealt with MSW in different nations

国家	年份(年)	产生量 (百万吨)	填埋(%)	焚烧(%)	堆肥(%)
比利时	1993	3.58	49	35	0
德国	1990	33.8	68.9	15.5	3.1
法国	1993	20	50	40	0
澳大利亚	1993	2.9	48	24	8
丹麦	1993	1.8	16	71	0
芬兰	1990	1.3	65	4	15
英国	1991	20	83	13	0
意大利	1990	20	90	6	0
卢森堡	1990	0.17	30	69	1
荷兰	1992	7.46	52	27	8
挪威	1990	2.2	76	16	0
葡萄牙	1993	3.4	90	-	10
瑞典	1988	2.7	38	55	7
瑞士	1993	2.8	11	76	13
西班牙	1990	12.5	75	5	20
日本	1991	49.7	22.5	72.8	1.6
加拿大	1990	17.6	82	8	0
美国	1991	177.3	67	16	2

### ① 国外垃圾填埋现状

由于国外垃圾填埋技术比较成熟，促使多数国家垃圾处理以填埋法为主（从表 1-5 可知）。例如：英国城市垃圾卫生填埋占 83%，美国占 67%，德国占 68.9%；虽然日本土地紧缺，没有大量的空余土地供垃圾卫生填埋用，但垃圾填埋比例仍占 23%。因为土地紧张原因造成的垃圾填埋应用较少的国家还有瑞士、瑞典、丹麦等国。可见，采取填埋方法处理垃圾首先要考虑土地面积问题，其次就是污染问题。

国外非常重视垃圾填埋技术的改进。早在 20 世纪 30 年代美国就开始对传统土地填埋进行改良，提出了一套系统化、科学化的填埋方法，称之为卫生填埋。目前，美国、欧共体、日本对垃圾卫生填埋的垃圾成份、场地选择及设计、卫生填埋作业规范及毒害控制标准有严格的规定。如美国特拉华州的固体废弃物填埋场为防止渗滤水与地下水相互渗透，在填埋场底层铺设了数层防水和过滤材料，填埋场附近还有两个人工池塘，用于蓄积渗滤水；而且入场的垃圾必须经过人工及机械分选，回收有用的物质并去除垃圾中的有机质<sup>[57]</sup>。

### ② 国外垃圾焚烧现状

早在 1870 年，世界上第一台垃圾焚烧炉就在英国投入运行。但因当时的垃圾水分与灰分比例大，热值低，因此该焚烧炉的运行状况不良，不久即停止运行。1895 年，德国汉堡建成了世界上首座固体废弃物发电厂；1905 年美国纽约又建成了第一座城市垃圾和煤混烧的发电厂。自 20 世纪 70 年代中期起，焚烧法处理垃圾在经济发达国家得到了较快地发展。瑞士、比利时、丹麦、法国、卢森堡、瑞典、新加坡等国焚烧的比例也都已接近或超过填埋。目前，美国已有 1500 余台焚烧设备，最大的垃圾发电厂日处理垃圾 4000t，发电容量 65MW，占垃圾处理量的 17%。德国目前

已有 50 余座从垃圾中提取能源的装置及 10 多家垃圾发电厂并用于热电联产,有效地对城市垃圾进行供暖或提供工业用气。法国共有 300 余台垃圾焚烧炉,可处理 40%的城市垃圾<sup>[58]</sup>。此外,日本、意大利<sup>[45]</sup>等国家均建造了上百座垃圾焚烧厂,日本的垃圾焚烧在 20 世纪 90 年代中期已达 75%,全国现有垃圾焚烧厂接近 1900 座。可见,焚烧处理在国外应用广泛。

表 1-10 国外生活垃圾的焚烧应用情况

Table 1-10 Applying of MSW incinerating in different nations

国家	时间(年)	垃圾产生量 (kt/a)	垃圾焚烧量 (kt/a)	垃圾焚烧率 (%)	焚烧设施 (座)	平均设备处 理量(t/d)
德国	1993	43500	11000	25	53	208
荷兰	1993	12000	2800	23	11	255
瑞典	1991	3200	1700	55	21	81
美国	1993	207000	32900	16	148	223
加拿大	1992	23200	1200	5	17	71
日本	1993	50300	38012	74	1854	20

### ③ 国外垃圾堆肥现状

近几年来,欧美发达国家把垃圾堆肥看作是可降解的有机物的再生利用以及垃圾减量和资源化利用的最佳途径。

以美国为例<sup>[59]</sup>,由于禁止庭院垃圾填埋处置条例的实施,庭院垃圾堆肥处理厂发展很快,1996 年庭院垃圾堆肥处理场达到 3400 座,比 1988 年增长了 4 倍以上<sup>[72]</sup>。由于欧洲推行“填埋税”,使得垃圾填埋处理的费用明显提高,加上限制进入填埋场的有机物含量的填埋标准实施等因素的影响,欧洲大陆大型垃圾堆肥场从 1990 年的 87 座增加到 1996 年的 684 座<sup>[73]</sup>;英国的垃圾堆肥场也从 1990 年的 4 座增加到 1996 年的 57 座;至 1999 年,德国共拥有垃圾堆肥场 550 家,堆肥设施年处理垃圾约为 650 万 t,处理能力约为 12330t/d<sup>[46]</sup>。在日本,札幌、岐阜等城市也相继进行堆肥<sup>[74]</sup>。

但是,从世界各国的生活垃圾处理状况分析,无论是发达国家,还是发展中国家,生活垃圾的无害化处理率都在不断增长,且都在围绕减量化、无害化、资源化的治理目标实施与展开,尤其是采用有效措施促进生活垃圾资源的开发利用,已经受到世界各国的普遍重视。因而,不仅实现生活垃圾无害化处理已经成为世界各国的共识,而且实现生活垃圾资源化也已成为世界各国拉动国民经济增长的重要举措之一,生活垃圾的回收利用率明显呈逐年上升的趋势。

### 1.3.6.3 我国垃圾处理现状

我国城市垃圾处理的水平一直很低,城市垃圾处理起步于 20 世纪 80 年代,在 1990 年以前,全国城市生活垃圾处理率还不足 2%。经过十几年的研究与开发,我国在生活垃圾处理技术上已经取得了许多成果,目前所采用的主要处理处置技术主要包括填埋、焚烧和堆肥三大方式。

#### ① 我国垃圾填埋现状

填埋是目前我国应用最为广泛的生活垃圾处置技术。20 世纪 80 年代初期<sup>[60]</sup>,我国生活垃圾处置开始由分散填坑、填沟、堆放向集中处置发展,各城市相继建设了一批生活垃圾集中堆放场,改变了生活垃圾随意堆放的状况。但是,这些集中堆放场没有采取任何防止二次污染的措施,垃圾严重污染了周边环境。1988 年,建设部颁布了《城市生活垃圾卫生填埋技术标准》,为提高填埋场的规划、设计、建设、运行和管理技术水平提供了依据。1991 年投入运行的杭州天子岭生活垃圾填埋场是国内首家按填埋技术设计和建造的人型山谷型生活垃圾卫生填埋场。随后,苏州、福州、成都、西安等城市为以此为参考,相继建成了一批生活垃圾填埋场<sup>[60]</sup>。到了 20 世纪 90 年

代后期,我国的生活垃圾填埋技术得到迅速发展,卫生填埋处理技术水平和建设标准不断提高<sup>[47]</sup>。全国各主要城市如杭州、广州、苏州、成都、北京、深圳、北海、中山等城市都相继建成了较为完善的垃圾卫生填埋场。1999年建成的深圳下坪生活垃圾卫生填埋场是我国第一个采用HDPE人工合成膜水平防渗技术的填埋场。此外北海垃圾填埋场、北京六里屯填埋等采用了进口的高密度聚乙烯衬层,达到了较高标准。这些卫生填埋场为各城市的垃圾处理发挥了有效的作用。

但是我国的垃圾填埋场在设计、建设和运营中仍存在很多问题,主要表现在:科技水平低、土地利用率低、缺乏防渗措施、填埋技术不规范、填埋气体处理处于无组织排放状态、填埋场封场一般都未进行生态恢复等<sup>[60]</sup>。

## ② 我国垃圾焚烧现状

随着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处理厂,如已建成的深圳清水河垃圾焚烧厂和龙岗垃圾焚烧厂<sup>[48]</sup>。上海、厦门、珠海、南海、北海、宁波、广州、北京等城市也都开展了垃圾焚烧发电工程的建设 and 准备工作。由于中小城市对垃圾焚烧厂的需求,建设了一批小型垃圾焚烧厂,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<sup>[46, 49, 50]</sup>。

## ③ 我国垃圾堆肥现状

鉴于我国生活垃圾中可降解有机物含量较高,我国在20世纪80年代初就开始研究机械化堆肥,并陆续建成20余处采用机械化堆肥和简易高温堆肥技术的堆肥场<sup>[51]</sup>,大部分规模在100t/d以下,只有北京石景山堆肥场和上海安亭堆肥场的日处理量为300t/d<sup>[60]</sup>。由于采用混合收集垃圾作为原料,导致成本高、产品肥效较低、质量较差、销路不好等问题,大部分企业难以维持运转,只有少数堆肥场坚持下来,如采用“三合一”的常州堆肥场。但从20世纪90年代后期开始,生活垃圾堆肥化又引起人们的注意,出现了“广汉模式”等。近年来由于国家加大投资力度和民营企业的参与,同时垃圾中有机物含量的增加等原因,堆肥技术有了新的发展和应用,大量堆肥场在建设之中,如北京引进了德国技术设备,建成了南宫堆肥厂,已投入运营。

我国城市生活垃圾的其他资源化利用技术也逐渐受到重视,并做了一些有益的尝试,例如:杭州天子岭垃圾填埋场建成了国内第一个填埋气体发电厂;北京市造纸厂成为再生纸定点生产企业<sup>[49]</sup>。“十一五”期间,我国城镇地区将建立合理的垃圾收运、处理处置体系,优化配置综合处理技术和设施,提高垃圾无害化处理水平,推进城市垃圾处理向减量化、资源化发展。为此,如北京市提出到2008年,生活垃圾分类收集率城区50%,资源综合利用率城区30%;垃圾无害化处理率城区98%,郊区65%。2010年垃圾无害化处理率城区99%,郊区80%;工艺比例科学合理,焚烧、堆肥和填埋的比率基本达到4:3:3。



## 第二章 北京市生活垃圾的产生及物流设施分析

### 2.1 北京市概况

#### 2.1.1 地理位置

北京市是历史悠久的世界著名古城，位于北纬 39°28'~41°05'，东经 115°24'~117°30'；地处内蒙古高原、黄土高原、华北平原的交接地带，地势西北高、东南低；西北毗临山西、内蒙古高原，南与华北大平原相接，东近渤海；西、北、东三面环山，西部属太行山脉，俗称西山，面积 1.68 万平方公里；北部和东北部属燕山山脉，总称军都山；山地占全市面积的 62%；市中心海拔 43.71m；总面积 16808 平方公里，市区面积 1040 平方公里。东南是永定河、潮白河等河流冲积而成的、缓缓向渤海倾斜的平原，境内贯穿五大河，主要是东部的沟河、潮白河、北运河，西部的永定河和拒马河等，多自西北部山地发源，穿过崇山峻岭，向东南蜿蜒流经平原地区，最后分别汇入渤海。

#### 2.1.2 气候概况

北京的气候为典型的暖温带半湿润大陆性季风气候，四季分明，春秋短促，冬夏较长。夏季炎热多雨，冬季寒冷干燥。年均太阳辐射量为 135 千卡/m<sup>2</sup>，热量从东南向西北逐渐降低。全年日照时数春季最多，每月日照 230~290h，冬季最少，每月日照不足 200h。年平均气温 13℃：1 月 -7~-4℃，7 月 25~26℃。极端最低 -27.4℃，极端最高 42℃ 以上。全年无霜期 180~200 天，西部山区较短。年平均降雨量 507.7 毫 m，为华北地区降雨最多的地区之一，山前迎风坡可达 700 毫 m 以上。降水季节分配很不均匀，全年降水的 75%集中在夏季，7、8 月常有暴雨。

#### 2.1.3 辖区土地面积

据北京市民政部门对 1992 年第一次土地详查勘界资料的更新调查数据，2001 年北京市辖区土地总面积为 24615805.5 亩，根据地形特征及行政区划将北京市划分为城区、近郊区、远郊平原区、远郊半山区、远郊山区等 5 个土地利用单元区，从分布的区域看，远郊山区的土地面积最大，占北京市总面积的 47.51%，几近一半。其次分别是远郊半山区、远郊平原区、近郊区和城区。

#### 2.1.4 人口概况

2000 年第五次人口普查结果显示北京市总人口为 1381.9 万，占全国总人口的 1.09%。其中，城镇人口 1072 万，仅次于上海市，居全国第二位。

#### 2.1.5 城镇概况

北京市分为 8 个城市建成区（东城区、西城区、崇文区、宣武区、朝阳区、海淀区、丰台区、

石景山区), 10个郊区区县(通州区、顺义区、大兴区、房山区、门头沟区、昌平区、怀柔区、平谷区、延庆县、密云县)。《北京城市总体规划(2004年—2020年)》确定了北京“两轴—两带—多中心”的城市空间结构,在此基础上形成中心城—新城—镇的市域城镇结构。中心城是北京政治、文化等核心职能和重要经济功能集中体现的地区;新城是在原有卫星城基础上,承担疏解中心城人口和功能、集聚新的产业,带动区域发展的规模化城市地区,具有相对独立性。规划新城11个,分别为通州、顺义、亦庄、大兴、房山、昌平、怀柔、密云、平谷、延庆、门头沟<sup>[90]</sup>。

## 2.2 北京市生活垃圾现状

随着北京市社会经济的迅速发展和城市化进程的加快,城市生活垃圾的产生量日益增加。城市生活垃圾的产量和组成是城市建设和管理的基础性资料,是生活垃圾处理工程的重要设计依据。垃圾产量不仅随经济发展水平而异,而且受能源、生活习惯、季节和气候等变化的影响。各个地区由于经济发展水平、居民的消费习惯等不同,其生活垃圾人均日产量有一定的差异。城市生活垃圾处理不仅有助于维护人们的身体健康,推进城市经济发展和精神文明建设,也是环境保护和社会可持续发展的重要内容。

### 2.2.1 北京市垃圾产生量

#### 2.2.1.1 北京平原地区垃圾产生量

由于城市规模扩大、人口的增多、自由市场的开放、农村剩余劳动力的进城及旅游事业的发展,大大增加了北京市生活垃圾的产量。从1996年到2001年<sup>[113]</sup>,北京市城市生活垃圾总产量呈明显增加趋势,到2001年达到402万t,环境压力逐年增大,现有已达到无害化处置标准的垃圾处置厂的数量和规模远远不能适应城市生活垃圾增长的要求。1996年至2001年北京市生活垃圾产生量见下表<sup>[88]</sup>。

表 2-1 1996年至2001年北京市生活垃圾产生量(万t)

Table 2-1 The quantity of MSW in Beijing in 1996-2001

年份	1996	1997	1998	1999	2000	2001
城市区域垃圾产生量	278	282	285	290	296	302
增长率(%)	1.70	1.44	1.06	1.75	2.07	2.03
城乡结合部垃圾产生量	91	92	94	96	98	100
城市生活垃圾产生量	369	374	379	386	394	402

根据北京市未来生活条件包括燃料结构变化以及消费水平继续提高的情况,可以得出结论:北京市垃圾产量在今后时间内将继续保持增加趋势,但增长的速度趋于缓慢,这主要是因为:根据北京市供气,供暖规划,2010年前无燃气户数和无集中供暖面积将大幅度下降,所以垃圾中容重较大的灰土产量将趋于降低。但随着居民消费水平的增长,垃圾中食品包装类、草木、纸类和塑料将继续上升,因此,垃圾总产量上升趋势趋于缓慢。这一点从表2-1也可以看出,在垃圾年增长率中,1996年到2001年增长率变幅为1.06%~2.07%,平均为1.68%(发达国家为2%~5%)。假设今后北京市垃圾产量按2%增长率增长,因此,以2001年垃圾产生量为基数,可预测未来垃圾产量。

虽然在2001年以前,城乡结合部垃圾未纳入北京市城市垃圾管理体系,但根据规划,城乡

结合部垃圾将在 2007 年以前全部纳入城市垃圾管理体系。为此，城市生活垃圾产生量预测中也应考虑城乡结合部垃圾量。设定未来几年内，城乡结合部垃圾年产量增长速率与城区相同，也为 2%。由此，可以预测出 2006~2010 年北京市生活垃圾产生量（见表 2-2）。

表 2-2 2006~2010 年北京市生活垃圾年产生量预测值（万 t）

Table 2-2 Forecasting quantity of MSW in Beijing in 2006-2010

年份	2006	2007	2008	2009	2010
城市区域垃圾产生量	333	340	347	354	361
城乡结合部垃圾产生量	110	113	115	117	120
城市生活垃圾产生量	444	453	462	471	480

### 2.2.1.2 北京市 13 年来垃圾清运量

1978 年至 2000 年北京市 13 年来垃圾清运量<sup>[88]</sup>见图 2-1。

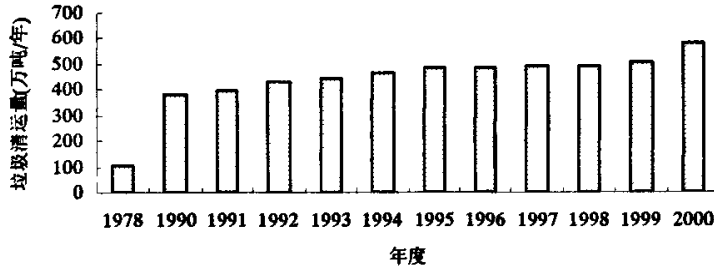


图 2-1 北京市 13 年垃圾清运量

Fig 2-1 The quantity of MSW in Beijing in 13 years

从图 2-1 可以看出：随着社会经济的迅速发展和城市化进程的加快，北京市的城市生活垃圾产生量显著增加。

### 2.2.1.3 北京市城八区五年垃圾产生量

北京市 1999 年以前的垃圾清运量是以清运车额定载重量和清运车次而确定的，由于垃圾容重低，所以清运量与实际有较大差距。2000 年以后是通过实际称重取得的。

北京市城八区 2001 年~2005 年的五年垃圾产生量<sup>[88]</sup>见下表。

表 2-3 北京市城八区十年垃圾产生量（万吨）

Table 2-3 The quantity of MSW in Beijing in ten years

	崇文区	朝阳区	西城区	东城区	宣武区	丰台区	海淀区	石景山区
2001	20.97	45.06	26.36	24.49	19.30	34.44	60.94	16.16
2002	20.74	46.35	27.19	26.73	20.91	46.29	56.06	15.69
2003	21.84	63.09	29.34	25.76	20.66	58.92	64.78	14.82
2004	21.33	97.90	30.60	30.93	22.48	61.63	76.99	14.71
2005	19.94	110.84	31.68	30.64	22.80	71.76	80.93	14.70
合计	104.82	363.25	145.17	138.55	106.15	273.04	339.70	76.08

从表 2-3 可以看出:在生活垃圾的年增长率中,2001 年到 2005 年的增长率变幅为 2.37%~6.1%,平均为 3.06% (发达国家为 2%~5%)。2003 年后,生活垃圾的增长速度有所下降,从 6%左右下降到 3%以下。北京城八区生活垃圾产生量比例的比较见下图。

从图 2-2 可以看出:2001 年到 2005 年,北京市的生活垃圾产量中,八个城区所占的比例不同:朝阳区和海淀区所占的比例最高,五年的垃圾产量占北京市垃圾总产量的比例分别是 23%和 22%;其次为丰台区,五年的垃圾产量占北京市垃圾总产量的 18%;石景山区最少,五年的垃圾产量只占北京市垃圾总产量的 5%左右。

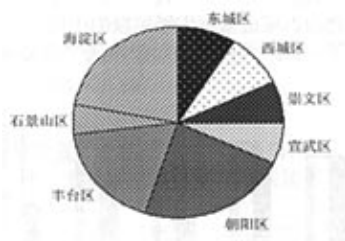


图 2-2 北京城八区垃圾产生量比例比较

Fig 2-2 The quantity of MSW in Beijing in ten years

#### 2.2.1.4 北京市城八区五年人均垃圾产生量

以 2005 年的垃圾产量<sup>[88]</sup>和人口数量<sup>[90]</sup>为例,可以计算出北京市八个城区每年的人均生活垃圾产生量和每天的人均生活垃圾产生量(见表 2-4)。

表 2-4 北京市城八区人均垃圾量

Table 2-4 The mean quantity of MSW in Beijing

	人口/万人	垃圾总量/万吨	年人均垃圾量 (kg/人·年)	天人均垃圾量 (kg/人·天)
崇文区	35.8	19.94	556.98	1.5
朝阳区	171.1	110.84	647.81	1.8
西城区	75.7	31.68	418.49	1.1
东城区	62.2	30.64	492.60	1.3
宣武区	53.0	22.80	430.19	1.2
丰台区	97.4	71.76	736.76	2.0
海淀区	191.8	80.93	421.95	1.2
石景山区	35.0	14.70	420.00	1.2
全市	722	383.29	530.87	1.5

从表 2-4 可以看出:北京市八个城区中,人均每天产生垃圾最多的城区是丰台区和朝阳区,分别是每人每天产生 2 kg 垃圾和 1.8kg 垃圾;其次是崇文区,为 1.5kg/人·天;人均每天产生生活垃圾最少的城区是西城区,仅为 1.1 kg/人·天;宣武区、海淀区和石景山区的垃圾产生量略高于西城区,每人每天产生 1.2kg 垃圾。

## 2.2.2 北京市近五年的生活垃圾组成变化

城市垃圾的构成特性与地理条件、经济发展水平、居民消费水平、消费结构以及城市居民燃气化率等因素有关。我国各大城市的垃圾在产量迅速增加的同时，垃圾的构成及特性也发生了很大的变化。近十年来，随着改革开放的进一步深化，居民收入不断增加，人民的生活水平不断提高，包装产品、废纸、塑料、玻璃以及金属等的消费量不断增加。尤其是随着包装业的快速发展，商品的包装形式越来越繁多，包装物的种类和数量越来越复杂，过分包装和豪华包装的产品比比皆是，这在大城市尤为突出。一次性的商品被广泛用于宾馆和餐饮业。一次性的商品完成消费后就作为废弃物，成为城市生活垃圾的一部分，不仅大大增加了垃圾的产量，而且改变了生活垃圾的性质。目前我国包装品废弃物约占城市家庭生活垃圾的10%以上，而其体积构成了家庭生活垃圾的30%以上。北京市2000年~2004年的生活垃圾组成<sup>[88]</sup>成分见下图。

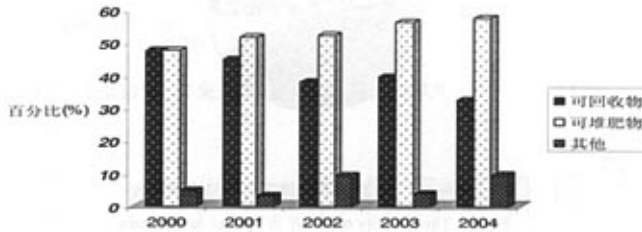


图 2-3 北京市 2000 年~2004 年生活垃圾组成

Fig 2-3 The composing of MSW in Beijing in 2000-2004

从图 2-3 可以看出：2000 年~2004 年，北京市的生活垃圾中可堆肥物质的比例逐渐增加，从 2000 年的 47.77%（湿基百分比）增加到 2004 年的 57.62%（湿基百分比）。所以在选择生活垃圾的处理方式方面，应着重考虑生活垃圾这种组成成分的变化。

## 2.3 北京市生活垃圾物流设施分析

北京市的生活垃圾的收集运输经历了一个手工作业向机械化、密闭化作业转变过程。九十年代后期至今，北京市的垃圾收集和运输基本实现密闭化，全市8个城区已建成密闭式清洁站近832座，城市建成区内服务半径为700m左右，覆盖率达97%，东城区、崇文区等部分地区采用后上式垃圾压缩车直接收集清运，后上式垃圾压缩车收集方式占18%。

### 2.3.1 北京市生活垃圾的收集和运输体系

北京市的城市生活垃圾处理的运作体系分为前端收集、中端清运、终端转运和末端处理四个环节。垃圾收集、运输及处理的主要流程为：各城区内的居住区和商业、街道的源头垃圾产生点将垃圾投放在指定地点的垃圾桶、垃圾箱或各种敞开式的垃圾收集设施，环卫清洁人员按照一定时间间隔用保洁三轮车等运输工具将垃圾收集送至密闭式垃圾收集站（俗称垃圾楼、垃圾房等），从各敞开式分散收集点收集的垃圾在密闭垃圾站得到进一步的集中，等待环卫专业运输车辆将垃圾运至大型垃圾中转站进行终端中转、压缩或者直接送往附近的垃圾处理设施进行末端处理。

从居住区和商业、街道的源头垃圾产生点到投放收集点,再从收集点运送到密闭式清洁站(又称垃圾楼)的过程为前端收集环节;从垃圾楼到各转运站的过程为中端清运环节;从垃圾转运站到垃圾填埋场、综合处理场的过程为终端转运环节;在各种垃圾处理场进行填埋、焚烧和综合利用等处理处置的为末端处理环节。

### 2.3.1.1 前端收集

垃圾前端收集主要是指人们在工作 and 居住场所产生垃圾后,投放到指定的收集点,由环卫工人集中收集后送到密闭式清洁站或垃圾房等收集设施的过程。

生活垃圾的收集和运输是城市垃圾治理系统的最初环节。

北京市的垃圾收集设施主要有以下几种:

#### ① 容器式

所谓容器式指的是收集容器放置于固定的地点,服务时间为一天中的全部或大部分时间。常见的收集容器有桶式和厢式两种。主要街道的两侧和公共场所设置果皮箱也属于容器式收集方式。

目前使用的收集容器材料多为钢或塑料制品。钢制容器结构强度大,可制成较大的容积,但也有易腐蚀,洗刷不便的缺点。塑料垃圾筒具有重量轻,耐腐蚀,易于保洁等优点,正在获得较多的应用。

#### ② 垃圾道收集

在已建成的多层和高层住宅楼中,通过垃圾道收集居民生活垃圾是最常见的收集方式。在居民生活垃圾产量高峰时如夏季,由于底层垃圾间贮料间容积有限,常会出现垃圾将门挤开使垃圾暴露;垃圾投放口密闭性差造成垃圾和臭味逸出,污染环境;特别是垃圾道收集方式不便于对垃圾收集的管理和控制以及推行分类收集等缺点,2003年“非典”之后,北京市对已建住宅楼的垃圾道封闭停用并规定新建住宅楼不设垃圾道。

#### ③ 构筑物式

垃圾定点构筑物式收集方式是以固定构筑物作为其收集容器的。构筑物一般为砖、水泥结构,样式各异,容器约 $5\sim 10\text{m}^3$ 。这种收集方式的特点是收集容器为半永久型故此容器使用寿命长,费用较低,但它具有容积固定,高峰季节会发生垃圾漫溢的情况,易造成周围卫生状况的恶化,保洁困难。

表 2-5 2001 年北京市不同功能区垃圾物理成分<sup>[19]</sup> (湿基%)

Table 2-5 The composing of MSW in different districts in Beijing in 2001

垃圾组分	平房	双气楼房	商业	事业	高级住宅	医院
灰分	23.19	0.00	0.31	4.99	0.00	0.00
砖瓦	0.26	0.07	0.15	1.49	1.32	0.00
纸类	7.83	10.35	37.05	16.39	29.56	31.30
塑料	8.57	10.50	22.67	12.13	11.78	18.43
织物	1.79	3.35	2.78	3.34	8.43	1.98
玻璃	1.05	2.09	5.09	8.65	1.57	12.65
金属	0.14	0.23	2.77	2.14	0.21	0.69
木竹	5.21	1.65	1.02	16.30	7.95	3.75
食品	51.91	71.71	28.13	34.41	38.83	31.10
其它	0.06	0.06	0.03	0.17	0.35	0.10

资料来源:李国学等<sup>[19]</sup>, 1999a.

北京市生活垃圾的收集服务行业运作主要有两种体系:城市生活垃圾主要由各城区环卫服务

中心、街道保洁队伍和物业公司收集到指定的垃圾站，再由专业作业队伍运送到垃圾处理厂进行处理；机关、企事业单位和社会团体的生活垃圾主要是以合同的形式委托环卫专业队伍进行收集。

北京市生活垃圾的收集方式主要有分类收集和混合收集两种收集方式。当前，北京市的生活垃圾收集约有 80% 以上的垃圾采取混合收集。2001 年，北京市垃圾收集点收集的生活垃圾的组成成分见表 2-5。

从表 2-5 可以看出：从北京市各个功能区的垃圾点收集到的生活垃圾全部都是混合垃圾，不仅含有厨余、木竹、草叶等可用于堆肥的成分，而且还含有金属、塑料、纸张、玻璃等可回收的物质以及炉灰、砖瓦、扫街土和部分来自建筑工地的混凝土重物等。混合收集的生活垃圾中不仅易腐有机物的含量很高，而且垃圾的含水率也很高，导致垃圾运输过程中沿途污染严重，同时，这种含有大量有机物和水分的垃圾直接进行填埋处理，不但增加了填埋作业的难度，而且将会对填埋堆体的稳定性带来极大的安全隐患。

从 1996 年开始，北京市开始试行垃圾源头分类收集，目前已有 1827 个居住小区、大厦和工业区实行不同程度的分类收集，城区的主要街道也放置了分类收集箱，垃圾分类收集从宣传到实施已有一定规模，城镇人口垃圾分类率达到了 43%，生活垃圾的回收利用量占其生活垃圾排放总量的 30.6% 以上；在分类收集基础上，已有安装了 604 台生物处理机，对分类收集的厨余垃圾实行就地处理，从而大大提高了分类收集的效果。但也有部分单位和小区由于对分类收集认识不足，或者是分类收运和处理系统未配套，从而使垃圾的分类收集流于形式。影响垃圾分类收集的主要因素在于：

- ① 公众的环保意识不高，随手乱扔垃圾的现象比较普遍；
- ② 分类收集设施不足，缺乏分类引导；

例如：居民区缺少设立收集危险废弃物如电池，灯泡、日光灯等的设施；在街道或小区设立的垃圾收集筒上虽然标明了“可回收物”字样，而没有具体指出什么是可回收物；另外在分类收集设施设计中缺少考虑引导公众分类投放的要求；例如要回收啤酒瓶或其它玻璃瓶，可设计瓶颈口的大肚容器。类似信箱的、方形侧口箱适合投入报纸、废纸类等，这样的容器易于识别，也不易混放。

(3) 分类运输、分类处理设施不足，致使本已分类收集的垃圾又混合起来；

由于垃圾分类运输以及分类处理设施的缺乏，造成一些已经分类的垃圾不得不重新混合起来集中运输进行统一处理。

### 2.3.1.2 中端清运

垃圾的中端清运是指将垃圾楼、垃圾房或垃圾压缩车收集到一定量的垃圾运输到垃圾转运站的过程。垃圾楼是适用于相对集中的城市市区一种清运生活垃圾的设施，一般服务半径为 800 至 1000m、大部分为集装箱式的集中清运设施，少量为压缩式的清运设施。

根据操作方法的不同，清运的运输方式分为“固定式”和“移动式”两种模式。固定式收运的容器始终在原地不动，收集车把垃圾装入车中运走，空垃圾容器留在原地。移动式收运是把装满垃圾容器整个运往转运站或处理场，卸空后再把容器拉回原处或其他地点。

北京市生活垃圾的收集运输经历了由手工作业向机械化、密闭化作业转变的过程。北京市的生活垃圾收运，大体经历了摇铃入户取垃圾—地面堆积转运（地撮站）—升降式垃圾台—垃圾桶站—密闭式清洁站五种方式，四次变革。解放初期至 60 年代，以地撮式或地下垃圾台收集方式为主，居民把垃圾倒入卧在地下的大垃圾箱中，垃圾箱通过提升将垃圾倒入自卸车运输。此方法在垃圾倾倒入时二次污染严重且易造成垃圾车偏载。80 年代初，生活垃圾大多采用桶式垃圾车进行收运。居民将垃圾倒在专门设置的垃圾桶中，由改装的侧装式垃圾车将垃圾桶提升侧翻倒入车箱

中进行收集运送。这种收运方式的缺点是垃圾桶周围成为垃圾污染源，装车过程中容易产生扬尘和造成交通堵塞，且垃圾车亏载严重，运输效率低。

北京市生活垃圾收运设施不仅在数量上逐年增加，并逐步向密闭、清洁和便于操作的方向发展。80年代后期，北京市城市生活垃圾的收集和运输基本实现了密闭化。密闭式清洁站取代垃圾桶站，是垃圾收运方式的第四次变革。密闭式垃圾处理系统分为固定和移动型两种。固定型的垃圾处理系统有一种类似于现在大多数地方采用的垃圾楼的形式，另一种则是地埋式。

到2003年底<sup>[89]</sup>，北京市已建成密闭式清洁站782座，全市共有各类环卫作业车辆4420部，其中垃圾和粪便清运车2300部，机扫车约250部，全年生活垃圾的清运量为361万吨。城市建成区内服务半径为700m左右，覆盖率达97%，基本上解决了垃圾暴露所造成的环境污染问题，但这种密闭式清洁站由于没有压缩装置，造成集装箱装载量亏载严重，所以，目前已有在密闭式清洁站内改装压缩装置的试点，东城区和崇文区的部分地区开始采用后上式垃圾压缩车进行垃圾清运。另外，这种密闭式清洁站的设计格局、平面划分和设备配制都是配合垃圾混合收运而规划的，随着垃圾分类收集、分类运输工作的全面开展，这些将会给垃圾的分类工作带来一定困难，需要进一步完善。总体上看，北京市目前的垃圾清运工作基本做到了日产日清和密闭化运输，但生活垃圾的收运体系还处于比较落后的阶段，只有少数密闭式清洁站具备分类收运功能。2005年北京市城八区的密闭式垃圾站垃圾清运量和数量分布<sup>[88、90]</sup>见下表和下图。

表 2-6 北京市城八区密闭式垃圾站数量(2005)

Table 2-6 The number of MSW collecting stations in different districts in Beijing

	崇文区	朝阳区	西城区	东城区	宣武区	丰台区	海淀区	石景山区
行政面积(km <sup>2</sup> )	16.52	455.08	31.62	25.34	18.91	305.80	430.73	84.32
总人口(万人)	35.8	171.1	75.7	61.2	53.0	97.4	191.8	35.0
人口密度(人/km <sup>2</sup> )	21774	4864	23556	21683	31887	4502	5259	5983
垃圾站(个)	30	152	69	59	38	68	230	66
垃圾站分布(个/km <sup>2</sup> )	1.8	0.3	2.2	2.3	2.0	0.2	0.5	0.8
人均垃圾站(个/万人)	0.84	0.89	0.91	0.96	0.72	0.70	1.20	1.89
垃圾站服务(万人/个)	1.19	1.13	1.10	1.04	1.39	1.43	0.83	0.53
进垃圾量(万吨/年)	19.94	110.84	31.68	30.64	22.80	66.28	67.80	14.70
垃圾清运比例(%)	5.5	30.4	8.7	8.4	6.2	18.2	18.6	4.0

从表 2-6 可知：从每平方千 m 的垃圾站分布数量并结合人口密度来看，北京市城八区的密闭式垃圾站的分布式比较均衡的：北京市城八区中，人口密度较大的城区依次是宣武区、西城区、崇文区和东城区，人口密度较小的城区依次是丰台区、朝阳区、海淀区和石景山区，每平方千 m 的垃圾站分布数量较少的城区依次是—丰台区、朝阳区、海淀区和石景山区；每平方千 m 的垃圾站分布数量较多的是东城区和西城区，分别是每平方千 m 2.3 个和每平方千 m 2.2 个，宣武区则略显不足，每平方千 m 的垃圾站分布数量仅为 2 个。北京市八个城区中，除石景山区为每万人拥有 1.89 个密闭式垃圾站外，每万人拥有密闭式垃圾站的数量的总体水平比较一致，相差不是很明显。从每个密闭式垃圾站所服务的人口来看，北京市城八区的密闭式垃圾站的服务效率最高的是丰台区和宣武区，每个密闭式垃圾站服务的人口数量为 1.43 和 1.39 万人；服务效率最低的是石景山区和海淀区，每个密闭式垃圾站服务的人口数量分别是 0.53 和 0.83 万人。



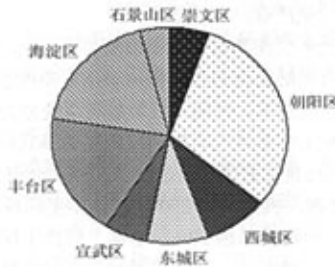


图 2-4 北京城八区密闭式垃圾站收集比例比较

Fig 2-4 The proportion of MSW collecting in different districts in Beijing

从图 2-4 可以看出：北京市八个城区的垃圾中端清运体系中，以朝阳区的密闭式垃圾站清运垃圾的比例最高，占 30.4%；其次是海淀区和丰台区，所占的比例分别是 18.6%、18.2%；以石景山区的密闭式垃圾站清运的比例最低，仅占 4%。

以丰台区为例，北京市 2001 年密闭式垃圾站清运的生活垃圾组成<sup>[18]</sup>见下表。

表 2-7 2001 年北京市丰台区不同功能区垃圾物理成分（湿基%）

Table 2-7 The composition of MSW in Fengtai in 2001

垃圾组分	平房	双气楼房	商业	事业	高级住宅	医院
可腐解部分	70.48	74.18	69.59	51.0	70.2	54.21
非腐解部分	29.52	25.82	30.41	49.0	29.8	45.79

从表 2-7 可知：在北京市丰台区各个功能区里，密闭式垃圾站清运的生活垃圾也全部都是混合垃圾，不仅可腐解的成分，而且也含有非腐解的成分；事业区的生活垃圾以纸张、塑料等成分为主，所以垃圾中含有的可腐解成份最少，湿基比例仅为 51%；住宅区的生活垃圾含有的可腐解成分较高，达到了 70%以上。

### 2.3.1.3 终端转运

由于北京各城区的生活垃圾收集站点与填埋场等末端最终处理设施的距离较远，因此北京城八区的生活垃圾在被运输至末端处理处置之前，需要经过一个称重、压缩的过程，称为垃圾转运。

北京的生活垃圾转运任务是由大屯转运站、马家楼转运站、小武基转运站、五路居转运站和衙门口转运站 5 座垃圾转运站承担的。其中：马家楼转运站和小武基转运站具备垃圾筛选分类功能，即经过滚筒筛、磁选机和振动筛的分选，垃圾被分成 0~15mm、15~60mm 和大于 60mm 三种粒径的垃圾和金属。大屯转运站、五路居转运站和衙门口转运站只具备垃圾压缩功能，前端收集的垃圾经过压缩后，可以提高垃圾转运车辆的运输效率，节约垃圾处理成本。

#### ① 5 座转运站概况

A 马家楼垃圾转运站：1997 年投入使用，设计日处理量 980 吨，年处理量 35.77 万吨，设计使用年限 20 年；服务范围：宣武区全部生活垃圾、丰台区部分生活垃圾、西客站生活垃圾；

B 小武基大型固废分选转运站：1997 年投入使用，设计日处理量 980 吨，年处理量 35.77 万吨，设计使用年限 20 年；服务范围：崇文区、部分朝阳区和通州区三个区的生活垃圾；

C 五路居垃圾转运站：1999 年投入使用，设计日处理量 1500 吨，年处理量 54.75 万吨，设计使用年限 8 年；服务范围：海淀区的生活垃圾；

D 大屯垃圾转运站：1994 年投入使用，设计日处理量 1500 吨，年处理量 54.75 万吨，设计使用年限 8 年；服务范围：东城区、西城区和中央各大机关、部委的垃圾转运，同时也承担着亚运村办事处、大屯办事处和来广营乡政府的垃圾转运任务；

E 衙门口垃圾转运站：2004 年投入使用，设计日处理量 500 吨，年处理量 18 万吨，设计使用年限 10 年；服务范围：石景山区的生活垃圾；

2004 年，小武基转运站完成了北京市首个大件破碎项目并投入运行，从而提高了垃圾转运站的运输效率，降低了运输成本；小武基转运站和马家楼转运站还完成了转运平台封闭工程并投入运行。垃圾转运平台由敞开式作业变成封闭式作业后，不仅可以免遭雨雪等恶劣天气的影响，而且垃圾车辆作业时产生的噪声、干垃圾在倾倒时产生的粉尘以及湿垃圾腐败引起的恶臭等环境危害因素得到了有效的控制。

## ② 5 座转运站垃圾转运能力比较

2005 年，北京市 5 座垃圾转运站的总转运能力为 2049104.07<sup>[88]</sup>。

从转运站概况中可知：大屯转运站担负着北京市东城区、西城区和中央各大机关、部委以及亚运村办事处等地的垃圾转运任务；但是大屯转运站的服务期早已超出了设计服务期限将近 4 年；

从表 2-8 可以看出：按照公式（运行负荷=实际量/设计量×100%）计算，马家楼转运站和大屯垃圾转运站都是超负荷运行，马家楼的运行负荷为 112.45%，大屯的运行负荷为 118.18%；而小武基转运站、五路居转运站和衙门口转运站都未达到设计负荷，衙门口垃圾转运站的运行负荷最小，仅为 82.74%。

表 2-8 北京市各垃圾转运站的转运能力比较

Table 2-8 The capacity of MSW transfer in Beijing

序号	转运站名称	设计转运量(t/d)	05 年日转运量(t/d)	05 年转运量(t/y)	所占比例/%
1	马家楼	980	1101.97	402218.87	19.63
2	小武基	980	961.05	350781.79	17.12
3	五路居	1500	1364.51	498046.00	24.30
4	大屯	1500	1772.74	647048.91	31.58
5	衙门口	500	413.72	151008.5	7.37
	合计	5460	5613.98	2049104.07	100

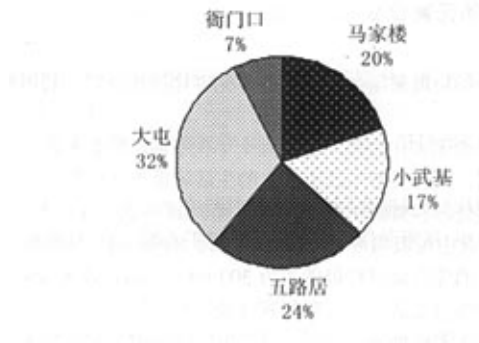


图 2-5 北京市各垃圾转运站的转运比例比较

Fig 2-5 The proportion of MSW transfer in Beijing

从图 2-5 可知：5 座垃圾转运站中，负责东城区和西城区的大屯转运站的转运承担率最高，将近 32%；其次是海淀区的五路居垃圾转运站，承担了约 24% 的垃圾转运任务；位于石景山区的衙门口垃圾转运站转运比例最少，才 7% 左右；

在 08 奥运会规划布局中，现在的亚运村周围已作为奥运的主会场纳入规划布局。届时，现在的亚运村周边势必会成为人口和物流设施的集中地区，因此，大屯垃圾转运站应尽快考虑扩建或新建，以满足东城区、西城区、中央各大机关以及 08 年奥运会等垃圾处理处置需求。

以马家楼转运站为例，经过垃圾转运站筛分后的生活垃圾的组成<sup>[19]</sup>如下：

表 2-9 2003 年北京市丰台区不同功能区垃圾物理成分（湿基%）

Table 2-9 The composition of MSW in Fengtai in 2003

垃圾粒径(mm)	占筛分比例(%)	含堆肥物比例(%)	含回收物比例(%)	其他(%)
0~15	30	49.60	27.30	23.10
15~60	30	51.50	33.30	15.20
大于 60	40	37.61	28.19	34.20

从表 2-9 可以得知：来自于宣武区和丰台区的源头垃圾在进入南宫堆肥厂前必须在马家楼转运站和小武基转运站经过筛分前处理。转运站筛分设备只有 15mm 和 60mm 筛孔的滚筒筛，因此通过筛分可以获得 <15mm、>60mm 和 15~60mm 三种粒径的生活垃圾，<15mm 的部分用作垃圾填埋的覆盖物，>60mm 的部分被运至填埋厂填埋，而 15~60mm 粒径的生活垃圾用于堆肥。由于生活垃圾仅采用筛分处理方法，只能够达到不同粒径垃圾分选的目的，所以 >60mm、<15mm 和 15~60mm 的部分中各种垃圾组分或多或少依然存在，只是粒径 >60mm 垃圾中大部分为废纸片、塑料包装物等轻质垃圾，容重比较小，为 0.2 t/m<sup>3</sup>；在粒径 <15mm 的垃圾中炉灰、砖瓦的比重比较高，两者之和几乎占 50% 以上，而且 <15mm 的垃圾中也含有大量的食物残渣，含量在 39.7%~63.8% 之间变化。所以仅采用机械的筛分办法不仅会丧失大量的有机物质，也会使一些颗粒较小的金属、玻璃等组分不能从垃圾堆肥原料中分选出来。粒径 >60mm 部分的垃圾中也会含有大块的有机垃圾，用于填埋处理也会造成一定的损失。建议在筛选前应积极使用垃圾破碎、重力分选和风力分选再结合筛分处理等联合处理新工艺，使垃圾中的硬物料包括石头、砖瓦和玻璃，轻物料塑料与食品类生物可降解组分达到充分分开的目的，提高堆肥有机质含量，把堆肥的危害降至最低。这样就会使大部分可堆腐的垃圾用于堆肥，而不是送入填埋场，可提高垃圾堆肥的质量。

### 2.3.2 北京市生活垃圾的无害化处理

垃圾末端处理主要是指垃圾采用何种方式进行无害化处理或综合利用的最终处理处置阶段，也叫垃圾无害化处理。

北京市城市生活垃圾的无害化处理起步于九十年代中期。随着北京市城市规模不断扩大、城市经济和社会的高速发展，人们日常生活所产生的生活垃圾也在逐年增加，迫使生活垃圾由露天堆放、简易填埋向无害化处理和资源化利用发展。到 2004 年底，北京市已建成 17 座无害化垃圾处理设施（见表 2-10），其中垃圾填埋场的填埋能力为 8380 t/d，垃圾堆肥厂的堆肥处理能力为 400 t/d，垃圾综合处理厂的综合处理垃圾能力为 300 t/d，总的垃圾无害化处理能力为 9700 t/d，可以承担北京市 80%~90% 的生活垃圾处理处置任务。

目前，北京市垃圾的无害化处理方式是：以卫生填埋为主，堆肥为辅，少量焚烧。2005 年北京市的垃圾处理中，卫生填埋所占的处理比例为 94.88%，垃圾堆肥所占的比例为 4.22%，垃圾焚烧所占的比例仅为 0.90%。

### 2.3.2.1 垃圾处理线路

北京市垃圾处理按照运行线路可分为东南、西南、西北、北线四条线：

- ① 东南线：小武基转运站至北神树填埋场。主要负责崇文区及部分朝阳区的垃圾处理；
  - ② 西南线：马家楼转运站至南宫堆肥场，堆肥余物及筛分的筛上物送安定填埋场。主要负责宣武区及部分丰台区的垃圾收集处理；
  - ③ 西北线：五路居转运站至六里屯填埋场。主要负责处理海淀区的垃圾收集处理；
  - ④ 北线：大屯转运站至阿苏卫垃圾卫生填埋场。主要负责东城、西城的垃圾处理；
- 其他还有 8 个垃圾处理设施分布在不同的区域，构成完整的垃圾处理系统<sup>[86]</sup>。

### 2.3.2.2 垃圾无害化处理设施及其服务范围

北京市垃圾无害化处理处置设施按照其承担的不同功能可分为垃圾卫生填埋场、垃圾堆肥厂和垃圾焚烧厂。

#### 1) 填埋场 13 座

**A 北神树垃圾卫生填埋场：**1997 年投入使用，设计日处理量 980 吨，设计容量 514 万立方米，设计使用年限 13 年；

服务范围为崇文区的全部生活垃圾和朝阳区的部分生活垃圾；

**B 安定垃圾卫生填埋场：**1997 年投入使用，设计日处理量 700 吨，设计容量 356.8 万立方米，设计使用年限 14 年；

服务范围为宣武区的全部生活垃圾及丰台区和大兴区的部分生活垃圾；

**C 阿苏卫垃圾卫生填埋场：**1994 年投入使用，设计日处理量 2000 吨，设计容量 1191 万立方米，设计使用年限 13.1 年；

服务范围为东城区、西城区和昌平周边城镇如小汤山、百善乡、北七家镇、东小口镇、沙河镇、兴寿镇、回龙观镇等的生活垃圾；

**D 六里屯垃圾卫生填埋场：**1999 年投入使用，设计日处理量 1500 吨，设计容量 1245 万立方米，设计使用年限 18 年；

服务范围为海淀区的生活垃圾；

**E 高安屯垃圾卫生填埋场：**2002 年投入使用，设计日处理量 1000 吨，设计容量 892 万立方米，设计使用年限 20 年；

服务范围为朝阳区环卫中心、使馆环卫处、南乡、管庄乡、常营乡、金盏乡、孙河地区办事处、南豆各庄乡、通州永顺地区；

**F 北天堂简易垃圾卫生填埋场：**2002 年投入使用，设计日处理量 2000 吨，设计容量 70 万立方米，设计使用年限 1.5 年；

服务范围为临时消纳丰台区的部分生活垃圾及丰台区粪便处理站处理后的残渣；

**G 西田阳垃圾卫生填埋场：**2000 年投入使用，设计日处理量 300 吨，设计容量 84 万立方米，设计使用年限 10 年；

服务范围为通州区卫星城内的生活垃圾；

**H 滨阳垃圾卫生填埋场：**2001 年投入使用，设计日处理量 200 吨，设计容量 40 万立方米，设计使用年限 20 年；

服务范围为密云县城及水库周边地区的部分生活垃圾；

**I 前芮营垃圾卫生填埋场：**2003 年投入使用，设计日处理量 100 吨，设计容量 16.5 万立方米，设计使用年限 3~5 年；

服务范围为平谷区的生活垃圾；

**J 焦家坡垃圾卫生填埋场：**2004 年投入使用，设计日处理量 600 吨，设计容量 195 万立方米，设计使用年限 8 年；

服务范围为门头沟区和石景山区的生活垃圾；

**K 小张家口垃圾卫生填埋场：**2004 年投入使用，设计日处理量 150 吨，设计容量 69 万立方米，设计使用年限 11 年；

服务范围为延庆县城、沈家营、康庄镇、八达岭镇、大榆树镇和井庄镇的生活垃圾；

**L 东南召垃圾卫生填埋场：**2005 年投入使用，设计日处理量 187 吨，设计容量 74 万立方米，设计使用年限 9 年；

**M 半壁店垃圾卫生填埋场：**2005 年投入使用，设计日处理量 69 吨，设计容量 38.1 万立方米，设计使用年限 10 年；

东南召垃圾卫生填埋场和半壁店垃圾卫生填埋场的服务范围为房山、良乡 2 小区、琉璃镇、建材工业学校、水泥厂、房山城关、房山石楼镇、窦店镇和长阳镇的生活垃圾；

## 2) 堆肥厂 2 座

**A 南宫堆肥厂：**1998 年投入使用，设计日处理量 400 吨，设计使用年限 20 年；

服务范围为接受来自马家楼转运站和小武基转运站的 15~60mm 的生活垃圾、绿色垃圾、污泥和树叶等；

**B 怀柔综合处理厂：**2004 年投入使用，设计日处理量 200 吨，设计使用年限 30 年；

服务范围为怀柔环卫中心和怀柔镇垃圾运输队清运的怀柔城区及农村的部分生活垃圾；

## 3) 焚烧厂 2 座

**A 昌平垃圾综合处理厂：**1996 年投入使用，设计日处理量 120 吨，设计使用年限 20 年；

服务范围为昌平区十一个乡镇和环卫、南口市政所、部队、工厂、小区等近 40 多家单位；

**B 顺义垃圾综合处理厂：**1998 年投入使用，设计日处理量 200 吨，设计使用年限 20 年；

服务范围为顺义城区和大龙地产和部分城乡接合部的生活垃圾。

北京市垃圾处理设施见下表<sup>[86]</sup>。

今后一段时间里，垃圾填埋将仍然作为北京市垃圾处置的主要方式。但垃圾填埋场缺乏规范化管理。北京平原区现有生活垃圾填埋场地 490 处，总占地面积 1007 万平方米，累计填埋量 3206 万吨。其中正在运营的生活垃圾填埋场 386 处，已封场的 104 处。但在正在运营的垃圾处理场地中，正规垃圾处理场只有 18 处，仅占总数的 5%，但垃圾处理量却达 73%；而非正规垃圾处理场及转运站共有 368 处，占正在运营的垃圾处理场地总数的 95%，垃圾处理量却只占 27%，占地面积达到了总占地面积的 51%。

从表 2-10 可以看出：北京市的垃圾卫生填埋场包括阿苏卫、六里屯、门头沟、平谷、密云、延庆、北神树、通州和安定等，到 2004 年底<sup>[86]</sup>，实际的日处理能力达到 10450t，约占垃圾处理量的 90%以上。但是从现有的垃圾处填埋场来看，填埋场服务期均在 20 年以下，而且大部分在 10 年甚至 10 年以下。

因此从长远来看，北京市垃圾填埋处理的形势是比较严峻的，面临着规范化管理、重新选址和确定可替代的处理处置方式的问题。

表 2-10 北京市垃圾无害化处理设施一览表(2004 年)

Table 2-10 The schedule of MSW establishments in Beijing in 2004

序号	处理设施名称	处理工艺	处理能力 (吨/日)	投产日期	设计使用年限	主要服务范围
1	北神树卫生填埋场	填埋	980	1997	13	崇文区、朝阳区部分
2	安定卫生填埋场	填埋	700	1997	14	宣武区、大兴区、房山区
3	阿苏卫卫生填埋场	填埋	2000	1994	13.1	东城区、西城区
4	朝阳高安屯卫生填埋场	填埋	1000	2002	20	朝阳区
5	海淀六里屯卫生填埋场	填埋	1500	1999	18	海淀区
6	焦家坡卫生填埋场	填埋	600	2004	8	石景山区、门头沟区
7	密云滨阳卫生填埋场	填埋	200	2001	20	密云城区
8	平谷前芮营卫生填埋场	填埋	200	2003	3~5	平谷城区
9	通州西田阳卫生填埋场	填埋	300	2000	10	通州城区
10	丰台北天堂卫生填埋场	填埋	1500	2002	1.5	丰台
11	房山东南召卫生填埋场	填埋	187	2005	11	房山区
12	房山半壁店卫生填埋场	填埋	69	2005	10	房山区
13	南宫堆肥厂	堆肥	400	1998	20	宣武区、崇文区
14	顺义综合处理厂	焚烧+堆肥	200	1998	20	顺义城区、首都机场
15	昌平综合处理厂	焚烧	120	1996	20	昌平区城区
16	怀柔综合处理厂	分选+堆肥	200	2004	30	怀柔区
17	小张家口卫生填埋场	填埋	150	2004	15	延庆县

### 2.3.2.3 生活垃圾的无害化处理量

截至 2005 年底,北京市各种生活垃圾无害化处理设施的设计能力共为 10206t/d,比 2004 年底的 10450 t/d 下降了 2.33%;但是各种无害化的生活垃圾处理设施的实际处理垃圾量却已经达到 12422.75 t/d,相比于 2004 年底的实际处理量 11021.99 t/d,垃圾的实际处理量增加了 12.71%。

北京市各种垃圾无害化处理设施的实际处理量<sup>[88]</sup>见下表。

表 2-11 北京市生活垃圾无害化处理设施实际处理量统计 (2005 年)

Table 2-11 The statistics of MSW managing in Beijing in 2005

设施类别	序号	设施名称	实际日处理量 t/d	实际年处理量 t/y	合计 t/y	处理率%
垃圾卫生 填埋场	1	北神树	1320.31	481914.38	4254502.42	94.88
	2	安定	1134.88	414229.38		
	3	阿苏卫	2094.38	764447.23		
	4	六里屯	1821.63	664895.18		
	5	高安屯	2352.33	858601.00		
	6	北天堂	1338.80	523000.00		
	7	西田阳	247.07	90179.47		
	8	滨阳	138.33	50488.64		
	9	前芮营	95.96	35025.51		
	10	焦家坡	566.53	206782.68		
垃圾堆肥厂	11	小张家口	112.10	40918.20	189432.18	4.22
	12	东南召	155.69	26000.00		
	13	半壁店	322.44	98020.75		
垃圾焚烧厂	14	南宫	386.00*	140889.01	40213.19	0.90
	15	怀柔	132.99	48543.17		
	16	昌平	71.82**	26213.19		
	17	顺义	131.51	14000.00		

\*为去除绿色垃圾 76.50t/d 计算所得

\*\*仅为日焚烧量

从表 2-11 可以看出：北京市现阶段生活垃圾的处理方式以卫生填埋为主，综合利用为辅。从表 2-9 中可以计算得出 2005 年北京市生活垃圾的各种无害化处理方式所占的比例（见图 2-6）。

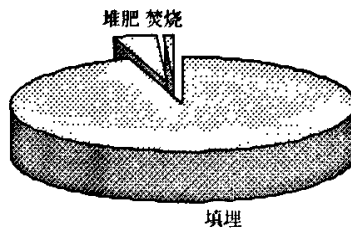


图 2-6 北京市生活垃圾的无害化处理率比较  
Fig 2-6 The ratio of MSW managing in Beijing

2005年北京市的垃圾处理中,卫生填埋所占的处理比例为94.88%,垃圾堆肥所占的比例为4.22%,垃圾焚烧所占的比例仅为0.90%。但在今后一段时间里,垃圾填埋将仍然作为北京市生活垃圾处置的主要方式。从长远来看,北京市的生活垃圾填埋处理必须尽快选择可替代的处理处置方式。

## 2.4 小结

### 2.4.1 北京市生活垃圾产生

北京市八个城区2001年~2005年的生活垃圾产量以朝阳区和海淀区所占的比例最高,石景山区所占的比例最少;人均每天产生垃圾最多的城区是丰台区和朝阳区,最少的城区是西城区;2000年~2004年,北京市的生活垃圾中可堆肥物质的比例逐渐增加,在选择生活垃圾的处理方式方面,应着重考虑生活垃圾这种组成成分的变化。

### 2.4.2 北京市生活垃圾物流设施分析

从每千平方m的垃圾站分布数量并结合人口密度来看,北京市城八区的密闭式垃圾站的分布式比较均衡,但宣武区则略显不足;除石景山区外,北京市八个城区中,每万人拥有密闭式垃圾站的数量的总体水平比较一致,差别不明显;北京市城八区的密闭式垃圾站的服务效率最高的是丰台区和宣武区,最低的是石景山区和海淀区;朝阳区的密闭式垃圾站清运的垃圾比例最高,其次是海淀区和丰台区,石景山区清运比例最低,仅占4%;5座垃圾转运站中,负责东城区和西城区的大屯转运站的转运承担率最高,约为32%;其次是海淀区的五路居垃圾转运站,承担了约24%的垃圾转运任务;位于石景山区的衙门口垃圾转运站转运比例最少;大屯转运站担负着北京市东城区、西城区和中央各大机关、部委以及亚运村办事处等地的垃圾转运任务,但大屯转运站的服务期早已超出了设计服务期限将近4年;北京市的垃圾卫生填埋场承担了北京市90%以上的垃圾无害化处理量,但填埋场服务期大部分在10年甚至10年以下;北京市现阶段生活垃圾的处理方式以卫生填埋为主,综合利用为辅,2005年北京市的垃圾处理中,卫生填埋所占的处理比例为94.88%,垃圾堆肥所占的比例为4.22%,垃圾焚烧所占的比例仅为0.90%。

从前端收集、中端清运、终端转运以及末端无害化处理的全物流设施过程中,北京市的生活垃圾并没有实现分类,而是全部以混合状态存在,垃圾中不仅含有厨余、木竹、草叶等可用于堆肥的成分,而且还含有金属、塑料、纸张、玻璃等可回收的物质以及炉灰、砖瓦、扫街土和部分来自建筑工地的混凝土重物等。混合收集的生活垃圾中不仅易腐有机物的含量很高,而且垃圾的含水率也很高,导致垃圾在清运和转运等运输过程中沿途污染严重,同时,这种含有大量有机物和水分的垃圾直接进行填埋处理,不但增加了填埋作业的难度,而且将会对填埋堆体的稳定性带来极大的安全隐患。

来自于宣武区和丰台区的源头垃圾在进入南宫堆肥厂前必须在马家楼转运站和小武基转运站经过筛分前处理。通过筛分可以获得<15mm、>60mm和15~60mm三种粒径的生活垃圾,<15mm的部分用作垃圾填埋的覆盖物,>60mm的部分被运至填埋厂填埋,而15~60mm粒径的生活垃圾用于堆肥。采用筛分处理方法只能够达到不同粒径垃圾分选的目的,一些颗粒较小的金属、玻璃等组分不仅不能从垃圾堆肥原料中分选出来,而且会造成大量的有机物质丧失。建议在筛选前应积极使用垃圾破碎、重力分选和风力分选再结合筛分处理等联合处理新工艺,使垃圾各种组分达到充分分开的目的。



### 第三章 北京市生活垃圾的理化性质分析

#### 3.1 北京市生活垃圾特征分析

近年来,随着城市经济发达程度的提高和民用燃料向燃气化方向发展,我国各大城市生活垃圾的构成相应地发生了变化。从1991~1996年,中国近百座城市垃圾中的塑料、纸类、织物、木竹类平均含量增加40%,其中以塑料的增加幅度最大,接近50%,因此,垃圾中的可燃物和可回收物明显增多,可利用价值增大<sup>[111, 112]</sup>。各城市生活垃圾的变化突出表现在:有机物增加;垃圾容重迅速下降、可燃物增多、垃圾的热值呈上升趋势;垃圾中可回收利用物(纸、塑料、玻璃、金属等)迅速增多;可利用价值增大;煤渣和灰土成分明显减少,但有毒有害物逐渐增多。

由于垃圾成分构成受垃圾产生源、居民生活习惯、生活水平和民用燃料结构等多种因素的影响,所以不同区域、不同人群所产生的垃圾成分差别较大。2004年北京市城八区、郊区新城和农村地区生活垃圾成分的调查结果<sup>[88]</sup>如表 3-1 所示。

表 3-1 北京平原区垃圾成分(湿基%)  
Table 3-1 The composition of MSW in Beijing Campagna

区域	纸类	塑料	织物	玻璃	金属	木竹	食品	砖瓦
城八区	22.55	15.26	7.03	2.51	3.04	2.14	45.55	1.92
郊区新城	21.23	17.03	7.93	1.37	2.87	3.39	36.57	9.61
郊区农村	13.47	5.81	5.04	2.51	1.32		32.16	39.69

从表 3-1 可以看出:北京市平原区各部分的生活垃圾组分相差很大:城市的八个城区中,生活垃圾的湿基百分比最高的组分依次是食品 45.55%、纸类 22.55%和塑料 15.26%;郊区新城的生活垃圾物理组成中,食品、纸类和塑料的湿基百分比均低于城八区,但砖瓦比例高于城中心八个区的 1.92%,达到了 9.61%;郊区农村的垃圾组成中,含量最多的是砖瓦灰土,湿基百分比高达 39.69%。

北京市近年来的生活垃圾成分特点是:有机物含量增大、灰土含量下降、容重降低、热值升高,为采用现代化焚烧处理技术创造了条件。根据北京市供气供暖规划,2010年前无燃气户数和无集中供暖面积将大幅度下降,所以未来几年,北京市城八区的生活垃圾中,容重较大的灰土产量将逐渐趋于降低;但垃圾中食品包装类、草木、纸类和塑料将继续上升,因此,目前以卫生填埋为主的生活垃圾处理处置方式将会逐渐加以调整。

## 3.2 材料与方法

### 3.2.1 试验材料

#### 3.2.1.1 城八区垃圾样品采样点

- ① 东城区和西城区的生活垃圾样品采自大屯垃圾转运站；
- ② 宣武区和丰台区的生活垃圾样品采自马家楼垃圾转运站；
- ③ 崇文区和朝阳区的生活垃圾样品采自小武基垃圾转运站；
- ④ 海淀区的生活垃圾样品采自五路居垃圾转运站；
- ⑤ 石景山区的生活垃圾样品采自衙门口垃圾转运站；

#### 3.2.1.2 南城功能区垃圾样品采样点

##### ① 宣武区的不同功能区采样点

表 3-2 宣武各功能区垃圾采样点

Table 3-2 The sampling cites of MSW in Xuanwu

	平房区	双气区	高档住宅区	事业区	商业区	交通站	广场区	医院
采样点	煤市街	红莲小区	西便门小区	大观园	德源	西客站	陶然亭	友谊

##### ② 丰台区的不同功能区采样点

表 3-3 丰台各功能区垃圾采样点

Table 3-3 The sampling cites of MSW in Fengtai

垃圾组分	平房区	双气区	高档住宅区	事业区	商业区	流动人口区	广场区	医院
玻璃	北马路	七里庄	紫芳园	文体路	大红门	西铁营村	万芳亭	东方

### 3.2.2 试验方法

从 2006 年 3 月至 2006 年 5 月，鲜垃圾样品按 CJ/T3039 标准在选定的各采样点进行多点混合采样，然后再进一步混合，取其中 2kg 样品用于实验室试验分析；共取样 3 次，分析结果取 3 次的平均值。

#### 3.2.2.1 垃圾物理组成的测定

- ① 将新鲜垃圾样品和垃圾堆肥样品按表 3-4 的分类方法进行手工分拣，记录各类成分的重量并计算其湿基重量百分比。

表 3-4 垃圾物理成分分类

Table 3-4 The classify of MSW composition

类别	食品	灰分	砖瓦	纸类	塑料	织物	玻璃	金属	木竹
----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

- ② 按下式即可确定各成分的含量：

$$C_i = W_i / W \times 100\%$$

式中  $C_i$ —湿基某成分含量, %

$W_i$ , 一某成分重量, kg

$W$ , 一样品总重量, kg

③ 垃圾含水率测定: 将垃圾自然风干后按下式计算含水量:

$$W_i\% = (M - M_f) / M \times 100\%$$

式中  $W_i$ —垃圾含水率, %

$M_f$ , 一垃圾干重, kg

$M$ , 一样品总重量, kg

### 3.2.2.2 测定指标

物理组分湿基百分比、容重、含水率、pH、TOC、TN、TP

### 3.2.2.3 测定方法

含水率采用风干法; 新鲜垃圾按 1: 10 (W (g): V (ml)) 浸提过滤后用 pH 计测 pH; 风干后的垃圾样品用植物粉碎机粉碎并 0.149mm 筛, 用于测定 TOC、TN 和 TP; TOC 采用重铬酸容量法—外加热法、TN 采用凯氏定氮法、TP 采用钼锑抗比色法 [92]。

## 3.3 北京市生活垃圾的物理组成

### 3.3.1 北京市生活垃圾组成

近年来, 在垃圾产量逐步增加的同时, 北京市的垃圾成分也在迅速变化, 如图 3-1 所示。主要表现在灰分、砖瓦呈明显的下降趋势, 但到了 1999 年后逐渐趋于稳定; 食品废物略有上升; 纸类、织物则呈缓慢增加趋势; 玻璃和木竹呈缓慢的降低趋势; 而金属含量 1998~2001 年基本保持不变, 2001 年后略有上升。

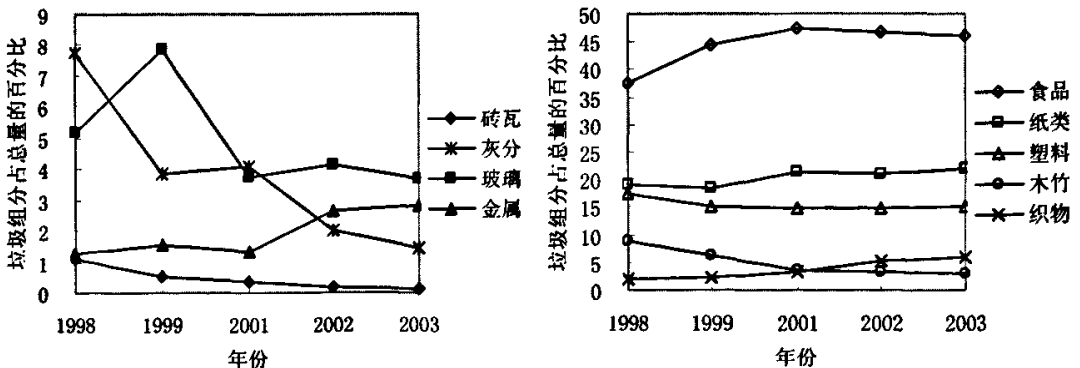


图 3-1 1998~2003 年北京市各垃圾组分占垃圾总量的比重

Fig 3-1 The ratio of all compositions in MSW in 1998-2003

根据图 3-1 中各垃圾组分占垃圾总量的百分比的变化,考虑到随着北京市人民生活水平的提高和消费习惯的改变,北京市生活垃圾的成分将会发生明显的变化。在预测时,除对现有的实测资料进行统计和分析外,还参考了国内外部分城市的生活垃圾变化特点,以及有关科研项目对北京市生活垃圾成分预测的研究结果,提出 2006~2010 年北京市垃圾成分的预测值(表 3-4)。

通过预测值可得如下结论:随着燃气化和集中供热的快速发展,城市生活垃圾中灰土将迅速减少,直至最小化。北京市气化率达到较高水平后,生活垃圾中食品的含量不再随之增长,反而有所下降。这主要是因为当气化率达到较高水平后,在双气楼区、高级住宅和商业区基本无灰土产生,垃圾中食品的含量更多地受垃圾中其它容重较大的组分的含量影响。而消费观念的改变,市民更愿意去超市购买净菜,这也会使垃圾中食品的含量下降。在北京市居民消费水平提高的同时,消费习惯在很大程度上决定了垃圾成分的变化。例如:目前居民对消费品要求是包装美观,使用便捷。这就造成包装成分在产品中所占的比重上升,而对于产品包装来讲一般都是废弃的对象,因此垃圾中纸张、织物、塑料和金属等成分必将增加。由于北京市民居住条件的改善,平房区越来越少,楼房区越来越多,传统的木门窗被铝合金或塑钢门窗所替代,所以玻璃和木竹类的废弃物含量越来越少。

表 3-4 2006~2010 年北京市垃圾成分预测值(湿基%)

Table 3-4 The forecast of MSWcompositions in Beijing in 2006-2010

垃圾组成	年份				
	2006	2007	2008	2009	2010
灰分	0.561	0.410	0.308	0.278	0.189
砖瓦	0.048	0.034	0.024	0.017	0.012
纸类	23.01	24.02	24.03	25.04	25.05
塑料	16.03	16.35	16.67	16.99	17.31
织物	7.677	8.551	9.156	9.396	9.953
玻璃	2.257	1.795	1.333	0.871	0.609
金属	3.444	3.648	3.847	4.046	4.249
木竹	1.767	1.376	0.985	0.594	0.204
食品	45.20	43.81	43.65	42.77	42.42

### 3.3.2 北京市城八区生活垃圾组成

从 2006 年 3 月至 2006 年 5 月,按 CJ/T3039 标准在北京市的五个垃圾转运站进行多点混合采样后,测定了北京城八区的生活垃圾湿基物理组成,测定结果见下表。

表 3-5 北京市城八区垃圾物理成分(湿基%)

Table 3-5 The MSWcompositions in Beijing

垃圾组分	崇文区	朝阳区	西城区	东城区	宣武区	丰台区	海淀区	石景山区
灰分	0.39	5.83	0.15	0.20	4.17	6.91	0.62	5.08
砖瓦	0.55	5.71	0.04	1.46	0.22	1.85	0.53	0.51
纸类	15.42	12.13	13.83	16.80	12.67	11.15	14.11	11.12
塑料	25.45	21.17	11.11	21.07	12.61	14.34	13.53	13.50
织物	1.49	0.09	6.71	8.61	0.18	0.12	2.50	1.52
玻璃	3.70	2.51	0.40	0.07	0.96	0.09	1.22	1.27
金属	0.28	0.26	0.38	0.12	0.29	0.07	0.09	0.14
木竹	0.23	2.21	0.42	1.01	1.61	2.08	2.24	1.71
食品	52.48	50.08	66.95	50.66	67.28	63.38	65.16	65.14

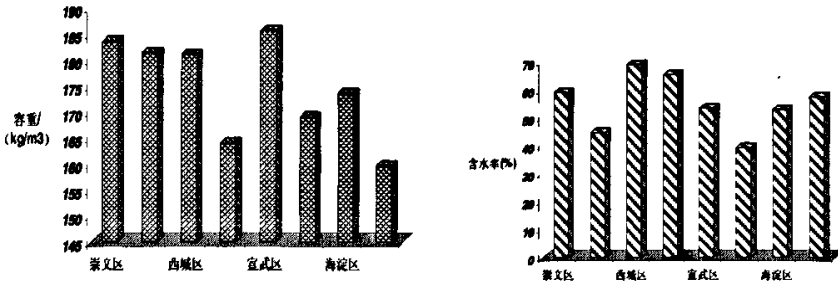


图 3-2 北京市城八区的生活垃圾容重和水分比较

Fig 3-2 The compare of MSWcompositions in Beijing

目前，北京市的生活垃圾以卫生填埋为主，堆肥为辅，少量焚烧，卫生填埋所占的处理比例为 94.88%，垃圾堆肥所占的比例为 4.22%，垃圾焚烧所占的比例仅为 0.90%。而从表 3-5 中可以看出：北京市城八区的生活垃圾中以食品所占的比例最大，分别为崇文区 52.48%、朝阳区 50.08%、西城区 66.95%、东城区 50.66%、宣武区 67.28%、丰台区 63.38%、海淀区 65.16%和石景山区 65.14%；其次为纸类和塑料类，二者合计分别占的百分比比例为崇文区 40.87、朝阳区 33.30、西城区 24.94、东城区 37.87、宣武区 25.28、丰台区 25.49、海淀区 27.64 和石景山区 24.62。八个城区的生活垃圾含水率均较高，以上数据表明：北京市的垃圾处理应以堆肥处理和焚烧处理为主，卫生填埋在北京市城八区的垃圾处理处置中应占最少比例。

从图 3-2 中可以看出：北京市城八区的生活垃圾中容重和水分差别较大，容重以宣武区最高，为  $185.72 \text{ kg/m}^3$ ，其次是崇文区、朝阳区和西城区，分别为  $183.56$ 、 $181.36$  和  $181.08 \text{ kg/m}^3$ ；东城区最低，为  $164.00 \text{ kg/m}^3$ 。以上数据表明：北京市的部分城区必须建立相应的垃圾转运站，如东城区和石景山区；垃圾在转运站压缩后再转运将大大节省垃圾处理处置过程中的物流设施成本。

### 3.3.3 北京南城不同功能区生活垃圾组成

一般来讲，城市生活垃圾成分与垃圾的来源有直接的关系，来自平房、双气楼房、商业、事业、高级住宅等不同功能区的垃圾组成是有明显区别的。

#### 3.3.3.1 宣武不同功能区生活垃圾的物理组成

从 2006 年 3 月至 2006 年 5 月，按 CJ/T3039 标准在北京市宣武区不同功能区的拟定采样点进行多点混合采样后，测定了宣武不同功能区的生活垃圾湿基物理组成，结果见表 3-6。

从表 3-6 中可以看出：北京市宣武区的不同功能区中生活垃圾中仍以食品、纸类和塑料所占的比例最大，医院与交通站（西客站）的垃圾中可焚烧垃圾所占比例较大；交通站的生活垃圾可回收物质比例最高，这些物质分别是易拉罐、啤酒瓶以及纸张等，因此交通站的垃圾以分类回收并焚烧处理最为理想；事业区与商业区生活垃圾含水率均较低，且成分多为塑料、纸类等，可优先考虑焚烧处理；

从图 3-3 中可以看出：宣武区不同功能区的生活垃圾中容重的差别较大，以平房区最高，为  $192.68 \text{ kg/m}^3$ ；处于闹市区的中心广场区、事业区和商业区，其垃圾容重较低，分别为  $108.75$ 、 $100.29$  和  $105.83 \text{ kg/m}^3$ ，所以，必须在市区中建立相应的垃圾转运站，垃圾在转运站压缩后再转

运将大大节省垃圾处理处置成本。

表 3-6 宣武各功能区垃圾物理成分(湿基%)

Table 3-6 The MSWcompositions in Xuanwu

垃圾组分	平房区	双气区	高档住宅区	事业区	商业区	交通站	广场区	医院
灰分	15.74	0	0	0	0	0	0	0
砖瓦	1.67	0.97	0	0	0	0	0	0
纸类	27.05	17.38	18.78	40.05	26.61	54.71	16.46	28.04
塑料	7.06	11.67	25.56	17.94	21.38	18.30	12.28	38.18
织物	0.74	0.58	0.72	0	0	4.81	0	0
玻璃	0	0.71	0.95	0	0	3.65	0.18	0
金属	0.07	0.29	0.42	0.48	0	1.07	1.39	0
木竹	0.25	0.31	0.10	2.80	1.56	0.10	18.42	0.89
食品	47.42	68.09	53.47	36.83	50.45	16.68	48.48	32.89
电池	0	0	0	1.90	0	0.67	2.78	0

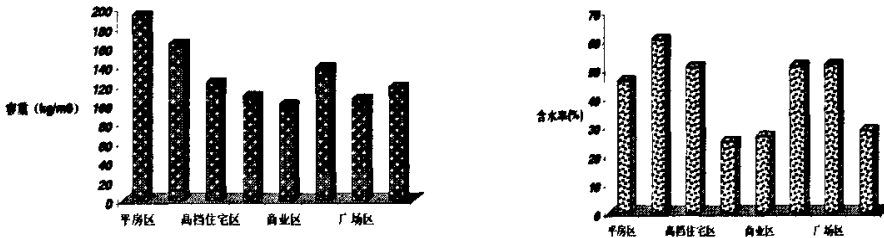


图 3-3 北京宣武不同功能区的生活垃圾容重和水分比较

Fig 3-3 The compare of MSWcompositions in Xuanwu

### 3.3.3.1 丰台不同功能区生活垃圾的物理组成

从 2006 年 3 月至 2006 年 5 月, 按 CJ/T3039 标准在北京市丰台区不同功能区的拟定采样点进行多点混合采样后, 测定了丰台不同功能区的生活垃圾湿基物理组成, 结果见下表。

表 3-7 丰台各功能区垃圾物理成分(湿基%)

Table 3-7 The MSWcompositions in Fengtai

垃圾组分	平房区	双气区	高档住宅区	事业区	商业区	流动人口区	广场区	医院
灰分	44.64	0	0	0	0	62.14	0	0
砖瓦	7.96	0	8.17	0	0	10.35	0	0
纸类	9.66	17.73	5.37	21.38	44.93	8.78	4.31	31.22
塑料	1.89	18.02	17.40	51.60	17.54	6.38	13.68	14.64
织物	0.43	1.64	0	0	0.51	0.77	1.03	1.59
玻璃	0	1.44	0	18.38	0	0.16	0	8.58
金属	0.23	0	1.62	0.28	0	0.16	17.06	0
木竹	0.63	0.20	0	5.58	1.92	4.20	21.93	0
食品	34.57	60.97	67.44	2.79	35.09	7.06	41.99	43.97
电池	0	0	0	0	0	0	0	0

从表 3-7 中可以看出: 北京市丰台区的不同功能区中生活垃圾中除食品、纸类和塑料所占的

比例较大外，灰分在平房区和流动人口区也占有相当大的比例。事业区与商业区的生活垃圾中可焚烧垃圾所占比例较大；事业区的生活垃圾可回收物质比例最高，这些物质分别是易拉罐、啤酒瓶以及纸张等，因此事业区的垃圾以分类回收且焚烧处理最为理想；事业区与商业区生活垃圾含水率均较低，且成分多为塑料、纸类等，可优先考虑焚烧处理；

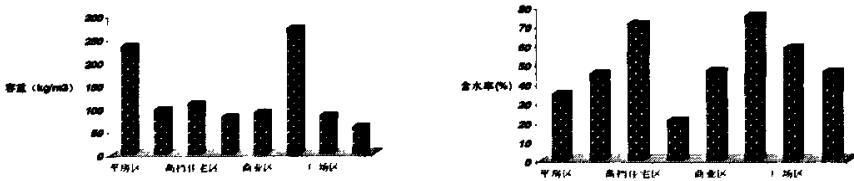


图 3-4 北京丰台不同功能区的生活垃圾容重和水分比较

Fig 3-4 The compare of MSWcompositions in Fengtai

从图 3-4 中可以看出：丰台区不同功能区的生活垃圾中容重的差别较大，以流动人口区和平房区最高，分别为 270.43 和 232.97kg/m<sup>3</sup>；而处于城区中心地带的中心广场区、事业区和商业区，其垃圾容重较低，所以必须在市区中建立相应的垃圾转运站，垃圾在转运站压缩后再转运将大大节省垃圾处理处置成本。

### 3.4 北京市生活垃圾的化学性质分析

#### 3.4.1 北京市生活垃圾热值分析

由于缺乏技术性较强的垃圾分检以及和垃圾分类收集相配套的垃圾清运、转运和处理处置技术，因此北京市的生活垃圾一直存在着成分复杂、堆肥质量和堆肥品质较低等问题，为后续的堆肥生产产生了不良的影响。主要表现在垃圾中含有较高的无机杂质，如玻璃、石头、瓦块、煤灰和其它杂质；另外垃圾中如电池、日光灯管一类废物造成垃圾堆肥中重金属含量较高；最后由于垃圾中混有涂料、塑料制品、农药和杀虫剂使用等有机组分，因此堆肥产品中各种有机污染物含量也较高。对生活垃圾化学性质进行分析，可为垃圾的末端处理提供科学的理论依据。

##### 3.4.1.1 北京城八区生活垃圾的热值分析

根据经验公式<sup>[113]</sup>和元素分析典型值表格可粗略计算出混合垃圾中的热值。

表 3-8 城市垃圾热值 (kJ/kg)

Table 3-8 The heat of MSWcompositions

	食品	灰分	砖瓦	废纸	废塑料	破布等	碎玻璃	铁金属	废木料
热值	4650	6980		16750	32570	7450	140	700	18610

北京市城八区生活垃圾的热值比较见下图。

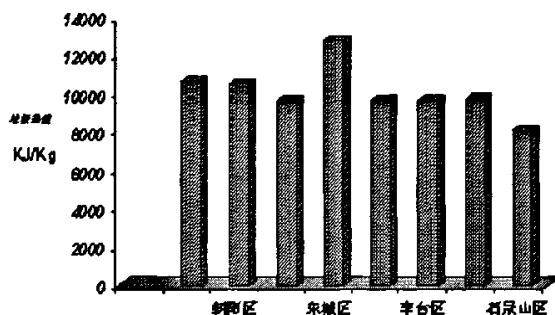


图 3-5 北京城八区生活垃圾的热值比较

Fig 3-5 The heat comparing of MSW in Beijing

从图 3-5 可以分析知道：如果不考虑垃圾水分的因素，则八个城区中的生活垃圾都达到了 3350kJ/kg 以上，即焚烧过程无需添加辅助燃料，均可实现自燃烧<sup>[113]</sup>。八个城区中，东城区的生活垃圾热值最高，为 12766.48kJ/kg；石景山区的生活垃圾热值最低，为 8059.9kJ/kg。热值达到 10000kJ/kg 以上的城区有东城区、崇文区和朝阳区。

#### 3.4.1.2 北京南城不同功能区生活垃圾热值分析

以宣武区为例，北京南城不同功能区生活垃圾的热值计算结果见下图。

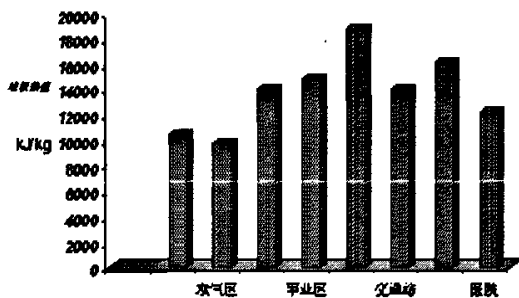


图 3-6 北京功能区生活垃圾的热值比较

Fig 3-6 The heat comparing of MSW in different functions

从图 3-5 可以分析知道：如果不考虑垃圾水分的因素，则北京南城不同功能区中的生活垃圾也都达到了 3350kJ/kg 以上，即焚烧过程无需添加辅助燃料，均可实现自燃烧<sup>[113]</sup>。八个功能区中，以银行类写字楼的生活垃圾热值最高，为 18827.16kJ/kg；除双气区的生活垃圾热值（仅为 9794.1kJ/kg）未达到 10000kJ/kg 以上外，其他七个功能区的生活垃圾热值均达到了 10000kJ/kg 以上。



### 3.4.2 北京市生活垃圾可堆肥性聚类分析

#### 3.4.2.1 北京市生活垃圾 pH 的聚类分析

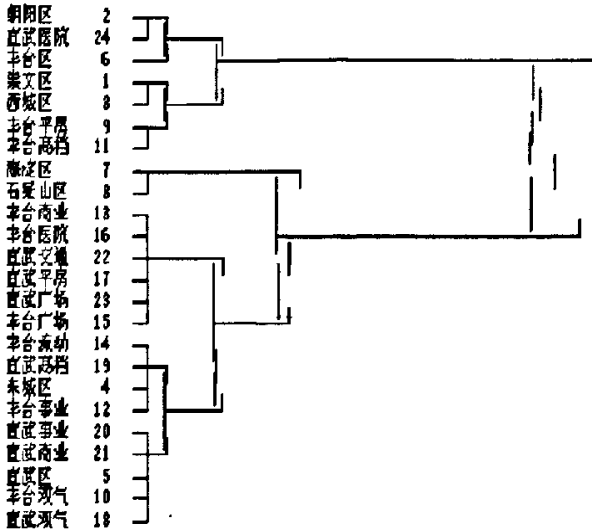


图 3-7 北京市生活垃圾 pH 值的聚类分析  
Fig 3-7 The clustering of MSW pH in Beijing

根据潘修疆、何晶晶等人报道<sup>[115]</sup>，在易腐有机垃圾水解过程中，pH=7时水解率最大。所以，以 $6.0 < \text{pH} < 7.5$ 作为垃圾可堆肥的聚类值进行聚类分析。结果（图3-7）表明：崇文区、朝阳区、西城区、丰台区、丰台平房区、丰台高档住宅区以及宣武医院的生活垃圾可归为宜堆肥水解类，剩下的17个采样点的垃圾可归为不宜堆肥水解类。

#### 3.4.2.2 北京市生活垃圾含水率的聚类分析

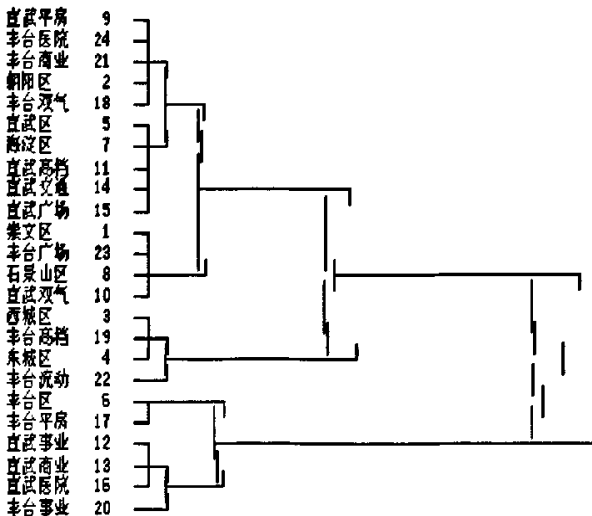


图 3-8 北京市生活垃圾含水率的聚类分析  
Fig 3-8 The clustering of MSW water ratio in Beijing

根据李国学等人的研究报道<sup>[4]</sup>，在有机物堆肥的影响因素中，按重量计算，50%~60%的含水率最有利于微生物分解。所以，选择含水率50%~60%作为垃圾可堆肥的聚类值进行聚类分析。结果（图3-8）表明：丰台区、宣武事业区、宣武商业区、宣武医院、丰台平房区和丰台事业区的生活垃圾可归为含水率低的不宜堆肥类垃圾，剩下的18个采样点的垃圾可归为含水率较适宜于堆肥类垃圾。

### 3.4.2.3 北京市生活垃圾有机物含量的聚类分析

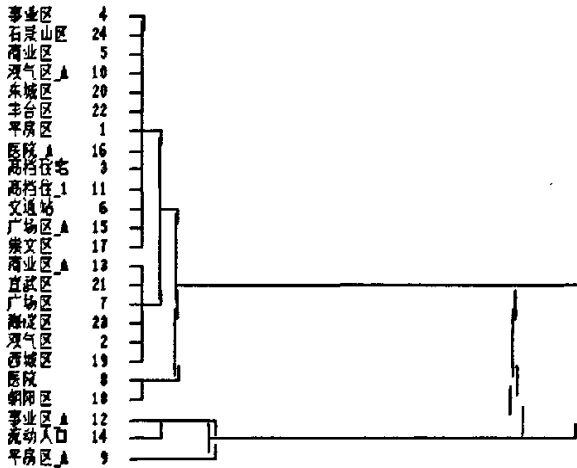


图 3-9 北京市生活垃圾有机物含量的聚类分析  
Fig 3-9 The clustering of organic content in MSW in Beijing

根据北京市垃圾渣土管理处下发的《生活垃圾堆肥场运行管理规范》中的要求，合适于堆肥的垃圾其有机物含量应在40%以上。所以，选择有机物含量>40%作为垃圾可堆肥的聚类值进行聚类分析。结果（图3-9）表明：除丰台平房区、丰台事业区和丰台流动人口区的生活垃圾中有有机物含量在40%以下，归为不宜堆肥类垃圾外，其他21个采样点的垃圾均可归为适宜于堆肥类生活垃圾。

### 3.4.2.4 北京市生活垃圾中 C/N 的聚类分析

根据北京市垃圾渣土管理处下发的《生活垃圾堆肥场运行管理规范》中的要求，合适于堆肥的生活垃圾的C/N应为20~30。所以，选择C/N在20以上、30以下作为垃圾可堆肥的聚类值进行聚类分析。聚类分析的结果见下图。

结果（图3-10）表明：北京市生活垃圾按C/N聚为三类：

- ① 朝阳区、西城区、东城区、宣武区、海淀区、宣武双气区、宣武高档住宅区、宣武广场区、丰台双气区和丰台高档住宅区可归为C/N较高的生活垃圾，在堆肥时必须人为添加部分氮素，否则会造成“氮饥饿”；
- ② 崇文区、丰台区、石景山区、宣武平房区、宣武医院、丰台商业区和丰台医院的生活垃圾中的C/N在20~30之间，是C/N含量最适合堆肥的生活垃圾；
- ③ 宣武事业区、宣武商业区、宣武交通站、丰台平房区、丰台事业区、丰台流动人口区和丰台广场区的生活垃圾C/N含量低于20，即可供消耗的碳素少，氮素相对过剩，在堆肥时会造成氮素的大量损失而影响堆肥成品的肥效。

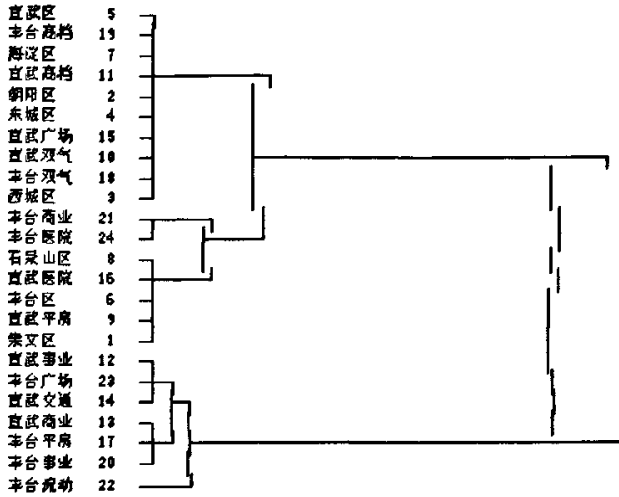


图 3-10 北京市生活垃圾中 C/N 的聚类分析  
Fig 3-10 The clustering of MSW C/N in Beijing

### 3.4.2.5 主成分因子分析

利用 SPSS 软件对影响垃圾堆肥的四个因子进行主成分分析，结果见表 3-9。

从因子所解释的变量程度与累计贡献率表和碎石图可以看出：在影响生活垃圾堆肥的 4 个因子中，垃圾的含水率和垃圾中的有机物含量是影响堆肥的 2 个主成分因子。

Table 3-9 Total Variance Explained

Component	Initial Eigenvalues			Extraction Sums of Squared			Rotation Sums of Squared		
	Total	% of Variance	Cumulative %	Loadings			Loadings		
				Total	% of Variance	Cumulative %	Total	% of Variance	Cumulative %
含水率	1.710	42.743	42.743	1.710	42.743	42.743	1.709	42.723	42.723
有机物	1.022	25.545	68.289	1.022	25.545	68.289	1.023	25.566	68.289
C/N	0.884	22.111	90.399						
pH	0.384	9.601	100.000						

Extraction Method: Principal Component Analysis.

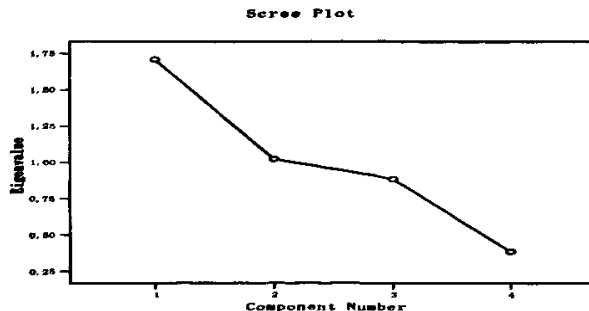


图 3-11 主成分因子分析的碎石图  
Fig 3-11 Scree of main element

## 3.4.2.6 以主成分因子筛选垃圾堆肥的适宜性

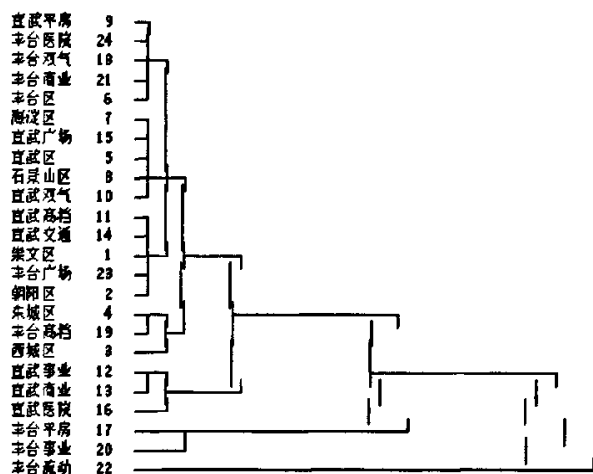


图 3-12 以主成分因子分析聚类图

Fig 3-12 The clustering of main element

主成分因子时对垃圾进行聚类分析的结果是：除丰台流动人口区的生活垃圾不适合堆肥外，其他的垃圾均适宜于堆肥处理，分析结果的判别分析中  $p=0.000$ ,  $<0.05$ , 显著。

## 3.5 小结

北京市城八区的生活垃圾中以食品、纸类和塑料所占的比例最大，所以在垃圾处理应考虑以堆肥处理和焚烧处理为主，卫生填埋应在垃圾处理处置中占最少比例。

北京市城八区生活垃圾的热值都达到了 3350kJ/kg 以上，以东城区的生活垃圾热值最高，石景山区的生活垃圾热值最低；北京南城不同功能区中的生活垃圾也都达到了 3350kJ/kg 以上。八个功能区中，以银行类写字楼的生活垃圾热值最高；除双气区的生活垃圾热值未达到 10000kJ/kg 以上外，其他七个功能区的生活垃圾热值均达到了 10000kJ/kg 以上。

以  $6.0 < \text{pH} < 7.5$  作为垃圾可堆肥聚类值进行聚类分析的结果表明：崇文区、朝阳区、西城区、丰台区、丰台平房区、丰台高档住宅区以及宣武医院的生活垃圾其 pH 值宜于堆肥。

以含水率 50%~60% 作为垃圾可堆肥聚类值进行聚类分析的结果表明：除丰台区、宣武事业区、宣武商业区、宣武医院、丰台平房区和丰台事业区的生活垃圾的含水率较低，不宜堆肥类垃圾外，其他城区及不同功能区的生活垃圾均的含水率均较适宜于堆肥。

选择有机物含量 >40% 作为垃圾可堆肥的聚类值进行聚类分析的结果表明：除丰台平房区、丰台事业区和丰台流动人口区的生活垃圾中有机物含量在 40% 以下，归为不宜堆肥类垃圾外，其他 21 个采样点的垃圾均可归为适宜于堆肥类生活垃圾。

选择 C/N 在 20 以上、30 以下作为垃圾可堆肥的聚类值进行聚类分析后的结果表明：崇文区、丰台区、石景山区、宣武平房区、宣武医院、丰台商业区和丰台医院的生活垃圾中的 C/N 在 20~30 之间，是 C/N 含量最适合堆肥的生活垃圾；

在影响生活垃圾堆肥的 4 个因子中，垃圾的含水率和垃圾中的有机物含量是影响堆肥的 2 个主成分因子。

只考虑主成分因子时对垃圾进行聚类分析的结果是：除丰台流动人口区的生活垃圾不适合堆肥外，其他的垃圾均适宜于堆肥处理，聚类分析的  $p < 0.05$ , 显著。

## 第四章 隧道仓不同区间垃圾堆肥腐熟度的模糊评价

### 4.1 垃圾堆肥的工艺流程

#### 4.1.1 地理位置

南宫堆肥厂位于北京市大兴区瀛海乡，总面积为 66hm<sup>2</sup>，海拔 23 到 24m。该厂址距黄村卫星城 11km、南三环玉泉营立交桥 22km，距马家楼垃圾转运站 21km、安定垃圾卫生填埋场 19km。该厂西侧 200m 为 104 国道，南侧距通黄公路 1km，交通便利。

#### 4.1.2 工艺流程

##### 4.1.2.1 进厂垃圾要求

南宫堆肥厂用于堆肥的垃圾是从马家楼转运站筛分后的中粒径（15~60mm）垃圾。进厂垃圾的要求密度一般为 350~650kg/m<sup>3</sup>、有机物含量在 20%~80%、含水率为 40%~60%。

##### 4.1.2.2 进料方法

转运站运来垃圾经地磅称重记录后倾卸到受料仓内，受料仓的末端设置布料滚筒，然后进入中央传送带，中央传送带通过布料机为空隧道布料。

##### 4.1.2.3 隧道发酵

在 2 周的高温好氧发酵期，原料的温度和湿度以及循环空气中氧含量(13%体积比)等最佳指标的控制是通过调整输入的空气与循环气体的比例及对物料加湿来实现的。发酵的前 3~5d 通过喷洒渗滤液达到 50%~60%含水率并强制通风。随后的 5d 通过调节通风量，控制温度保持在 55~65℃。最后 2~4d 停止添加渗滤液，通过风干作用使堆肥的含水量小于 45%。

##### 4.1.2.4 隧道出料

经过隧道发酵后，隧道垃圾经轮式装载机卸载到安装在中央传送带上的两个卸料斗内，经中央传送带将发酵后的垃圾从中央大厅传送到后熟化平台。

##### 4.1.2.5 后熟化

发酵平台由很多带有通风孔的混凝土盖板和风道组成。不同的风道都是由风阀(0~100%)与地下的通风管线相连的。通过调节通风阀可以控制通风强度的大小。后熟化结束后，垃圾由轮式装载机转运到中央传送带上，输送到滚筒筛内进行筛分。滚筒筛的筛孔为 25mm。筛上物运往安定垃圾卫生填埋场进行填埋；筛下物被输送到最终熟化 I 区。

4.1.2.6 最终熟化

筛下物由装载机输送到最终熟化 I 区，堆成 2.4m 高的发酵堆，强制通风发酵 21d。

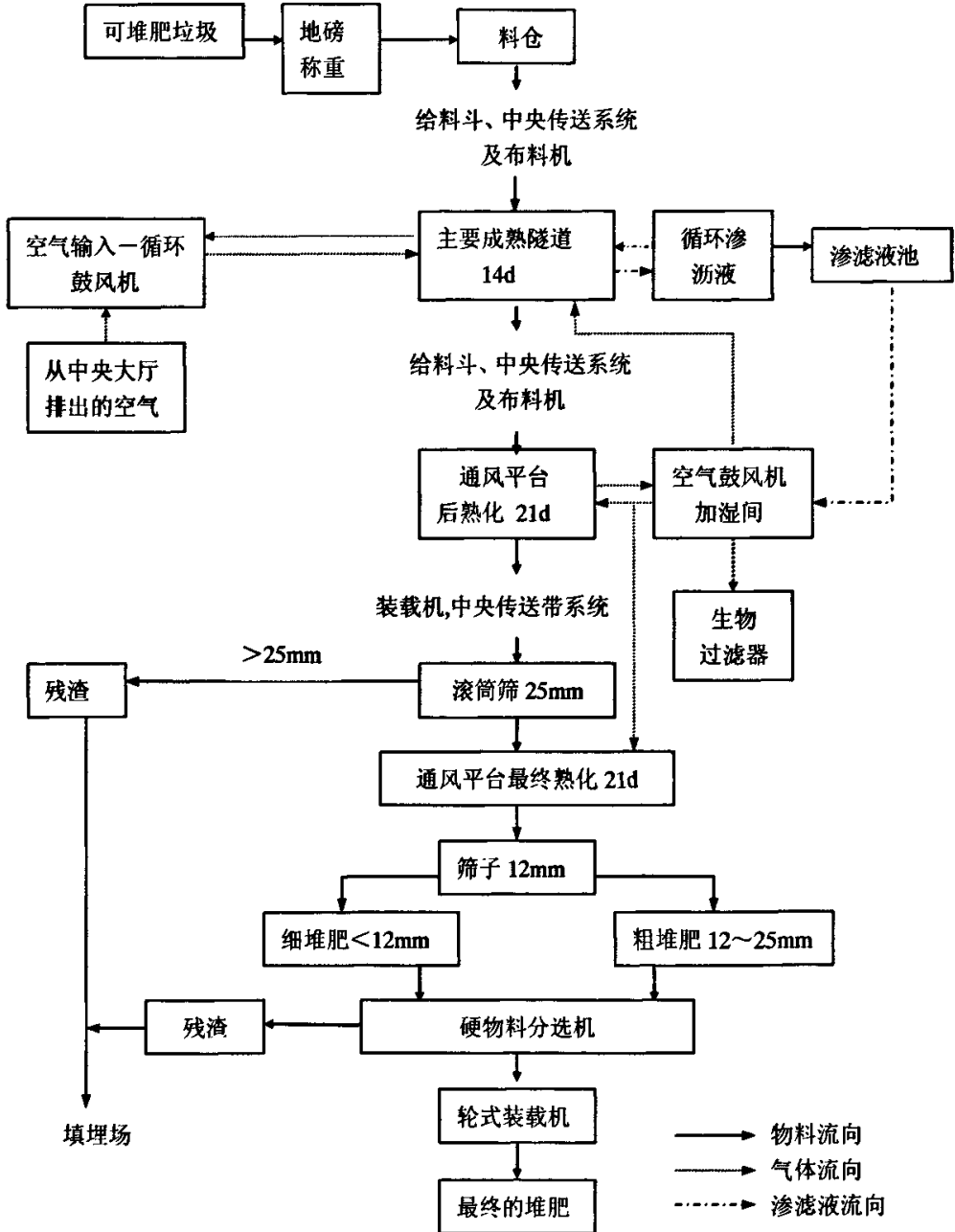


图 4-1 南宫堆肥厂工艺流程图

Fig 4-1 The flow chart of MSW composting in Nangong

## 4.2 材料与方法

### 4.2.1 试验材料

供试垃圾堆肥样品采自北京市大兴区南宫堆肥厂。南宫堆肥厂堆肥的原料来自于宣武区和丰台区。堆肥工艺为：高温隧道发酵 14d、后熟化 21d，最终熟化 21d，总计 8 周。

### 4.2.2 试验方法

从 2004 年 10 月至 2005 年 10 月，鲜垃圾样品和各工艺流程中的堆肥样品按 CJ/T3039 标准在南宫堆肥厂进行多点混合采样，然后再进一步混合，取其中 2kg 样品由实验室试验分析；隧道区间腐熟度变化试验的方法是按照 2.7m 一个间隔设置一个区间，即从隧道的底部依次向外选取 0~2.7m、2.7~5.4m、5.4~8.1m、8.1~10.8m、10.8~13.5m、13.5~16.2m、16.2~18.9m、18.9~21.6m、21.6~24.3m、24.3~27m 作为 10 个不同的区间，每个区间随机选取 9 个点，共选  $9 \times 10 = 90$  个布样点。测定结果取各区间 9 个点的平均值。为减少原料本身产生的差异，选取马家楼转运站同一筛分批次的 15~60mm 垃圾，分装在 90 个 2~3Kg 的尼龙袋中，在布料机为静态堆肥仓布料时，将 90 个装满垃圾的尼龙袋按已确定的点放入隧道仓中。14 天后于隧道高温发酵阶段结束时取出分析。

### 4.2.3 测定指标与方法

#### 4.2.3.1 垃圾物理组成的测定

同 3.2.2.1

#### 4.2.3.2 测定指标

湿基百分比、容重、含水率、pH、EC、 $E_4/E_6$ 、WSC、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、TOC、TN、GI

#### 4.2.3.3 测定方法

含水率采用风干法；新鲜垃圾和堆肥样品按 1: 10 (W (g): V (ml)) 浸提过滤后用 pH 计测 pH、用 DDS-11A 型电导率仪测定 EC、用 751 型紫外分光光度计测定  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、用 722 型分光光度计测  $E_4/E_6$ 、用重铬酸氧化法测 WSC、凯氏定氮法测  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ <sup>[91]</sup>；将 5ml 浸提液加入铺有滤纸的 9cm 培养皿内，点播 20 里饱满的小青菜种子，放置在 20℃ 培养箱中培养，第 48 小时测种子发芽率 GI，每个处理重复 3 次，对照为蒸馏水。GI (%) = (浸提液种子发芽率 × 根长 / 对照种子发芽率 × 根长) × 100%；风干后的样品用植物粉碎机粉碎并过 0.149mm 筛，用于测定 TOC 和 TN；TOC 采用重铬酸容量法—外加热法、TN 采用凯氏定氮法<sup>[92]</sup>。

## 4.3 结果与分析

### 4.3.1 垃圾堆肥过程中组成和腐熟度的变化

#### 4.3.1.1 堆肥过程中垃圾组成的变化

##### ① 物理组分的变化

由于北京市生活垃圾采用的是混合收集,因此从宣武区和丰台区各收集站点清运到马家楼转运站的垃圾是混合垃圾,是生活垃圾、炉灰、扫街土、商业垃圾和一部分来自建筑工地的混凝土重物的混合物。垃圾中不仅含有食品、纸类、织物、木棍等可堆腐物质,也含有砖瓦、塑料、玻璃和金属等不可堆腐物质,甚至还含有废电池等有害物。

从宣武区和丰台区各收集站点清运到马家楼转运站的混合垃圾在通过站内 15mm 和 60mm 筛孔的滚筒筛后,可以获得 <15mm、>60mm 和 15~60mm 三种粒径的生活垃圾,<15mm 的部分用作垃圾填埋的覆盖物,>60mm 的部分运至填埋厂被填埋,而 15~60mm 粒径的生活垃圾用于堆肥。利用筛分处理只能够达到不同粒径垃圾分选的目的,在 >60mm、<15mm 和 15~60mm 的三种粒径中,各种垃圾组分均或多或少依然存在。在粒径 >60mm 垃圾中,大部分为废纸片、塑料包装物等轻质垃圾,容重约为  $0.2 \text{ t/m}^3$ ;在粒径 <15mm 的垃圾中炉灰、砖瓦的比重比较高,两者之和几乎占 50% 以上,但是其中也含有大量的食物残渣,含量在 39.7%~63.8% 之间变化。粒径 >60mm 部分的垃圾中也会含有大块的有机垃圾,用于填埋处理会造成二次污染。所以,仅仅采用机械筛分的办法,不仅会丧失大量的有机物质,也会使一些颗粒较小的金属、玻璃等组分不能从垃圾堆肥原料中分选出来。建议在垃圾筛选前应积极使用垃圾破碎、重力分选和风力分选再结合筛分处理等联合处理新工艺,使垃圾中的硬物料包括石头、砖瓦和玻璃,轻物料塑料与食品类生物可降解组分达到充分分开的目的,提高堆肥有机质含量,把堆肥的危害降至最低。这样就会使大部分可堆腐的垃圾用于堆肥,提高了垃圾堆肥利用率。

南宫堆肥厂垃圾在堆肥过程中的湿基组成变化见下表。

表 4-1 用于堆肥的鲜垃圾组成(湿基%)

Table 4-1 The composition of composting MSW

项目	灰分	砖瓦	纸类	塑料	织物	玻璃	金属	木竹	食品
鲜垃圾	5.39	3.88	24.36	6.25	0.65	2.01	0.24	4.92	52.3

从表 4-1 中可以看出:源头垃圾经过马家楼筛分预处理后,用于堆肥原料的 15~60mm 垃圾中,食品等可堆腐物质为 80% 以上,完全适合于高温堆肥工艺对堆肥原料的要求。但是一些不能降解的物质如砖瓦、塑料、玻璃、金属和废电池物质仍然存在,总含量在 12% 以上。

##### ② 垃圾堆肥过程中不可降解组分的变化

从图 4-2 可以看出:随着堆肥时间的延长,不可降解物如砖瓦、塑料、玻璃、金属物质的百分含量呈上升趋势。在堆肥 8 周后,堆肥产品还要分别经过 25mm 和 12mm 筛进一步处理,其中 >12mm 的堆肥还可分辨出少量不可降解物质组分,而在 >12mm 的大粒径的堆肥中,砖瓦、塑料、玻璃类的百分含量比第 8 周要高,也比堆肥原料(15~60mm)要高,因此该堆肥产品不宜作为肥料施用于土壤。



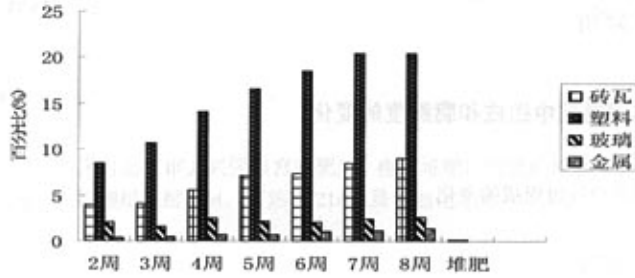


图 4-2 垃圾堆肥过程中不可降解组分的变化

Fig 4-2 The content variation of non-composted matter during MSW composting

③ 垃圾堆肥过程中可降解组分的变化

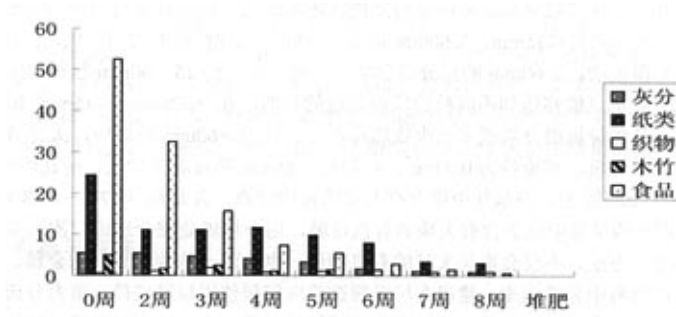


图 4-3 垃圾堆肥过程中不可降解组分的变化

Fig 4-3 The content variation of composted matter during MSW composting

从图 4-3 可以看出：随着堆肥时间的延长，可降解如纸类、织物、食品的比重呈下降趋势，基本上转化为腐熟堆肥。在堆肥 8 周后，堆肥产品还要分别经过 25mm 和 12mm 筛进一步处理，其中 <12mm 的堆肥，由于基本达到土壤团粒结构要求，这种初级堆肥产品直接作为肥料施用，因此可以看作腐熟堆肥。

④ 垃圾堆肥过程中堆肥成品比例的变化

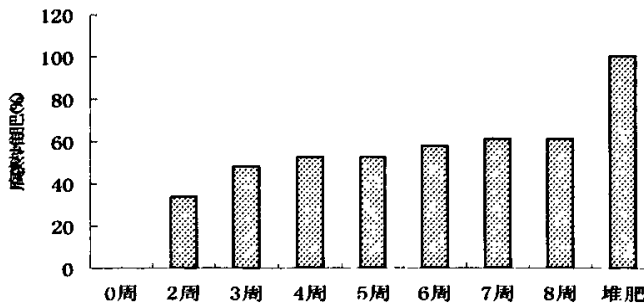


图 4-4 垃圾堆肥过程中堆肥的变化

Fig 4-4 The content variation of compost during MSW composting

从图 4-4 可以看出：随着堆肥时间的延长，堆肥成品的比例呈显著上升趋势，从原垃圾的 0%

增加到第 8 周的 60% 以上, 可降解物质基本上转化为腐熟堆肥。在堆肥 8 周后, 堆肥产品还要分别经过 25mm 和 12mm 筛进一步处理, 其中 <12mm 的堆肥, 可直接作为肥料施使用。经过后熟化和终熟化阶段后, 成品堆肥比例达到 99% 以上。

表 4-2 垃圾堆肥过程中容重的变化 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

Table 4-2 The content variation of bulk during MSW composting

项目	堆肥 0 周	堆肥 2 周	堆肥 3 周	堆肥 4 周	堆肥 5 周	堆肥 6 周	堆肥 7 周	堆肥 8 周	堆肥
容重	245.50	353.38	558.62	610.70	716.19	727.49	810.70	811.43	927.49

从表 4-2 可以看出: 随着堆肥时间的延长, 堆肥的容重逐渐增加, 从原垃圾的  $245.50\text{kg}/\text{m}^3$  增加到第 8 周的  $811.43\text{kg}/\text{m}^3$ , 成品堆肥的容重在  $900\text{kg}/\text{m}^3$  以上。

#### 4.3.1.2 垃圾堆肥过程堆肥腐熟度的变化

##### ① 垃圾堆肥过程中的 EC 变化

电导率 (EC) 值反映了堆肥溶液中的离子总浓度即可溶性盐的含量。堆肥中的可溶性盐主要是由有机酸盐类和无机盐等组成, 是对作物产生毒害作用的重要因素之一。在一定浓度范围内, 溶液的含盐量与电导率 (EC) 呈正相关。堆肥中的可溶性盐随着堆肥原料的不同而变化, 电导率可达到  $1.0 \times 10^4 \mu\text{S}/\text{cm}$  (饱和浸提液)<sup>[92]</sup>。一般, 堆肥施入土地或用作温床培养料时应当测量电导率。根据土壤浸出液的电导率与盐分含量和作物生长的关系, 得出作物抑制的限定电导率值为  $0.4 \times 10^4 \mu\text{S}/\text{cm}$ <sup>[92]</sup>。

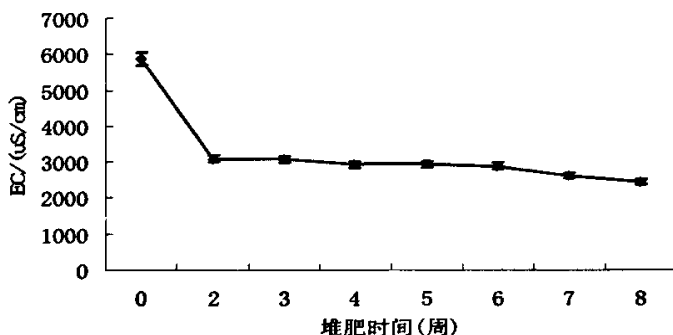


图 4-5 垃圾堆肥过程中的 EC 变化

Fig 4-5 The content variation of EC during MSW composting

如图 4-5 所示, 随着堆肥的进行, EC 值逐渐下降。这是由于随着  $\text{CO}_2$ 、 $\text{NH}_3$  的挥发, 以及胡敏酸物质含量的升高和阳离子交换量的升高, 使得 EC 值下降<sup>[94]</sup>。在堆制 5 周后, 垃圾堆肥的 EC 值就降到了作物抑制限定值以下, 所以最终堆肥产品施入土壤后, 不会产生盐分毒害问题。

##### ② 垃圾堆肥过程中 pH 的变化

许多研究者提出, pH 值可以作为评价堆肥腐熟度的一个指标<sup>[95]</sup>。适宜的 pH 值可使微生物有效地发挥作用, 而 pH 值太高或太低都会影响堆肥的效果。一般认为 pH 值在 7.5~8.5 时, 可获得最大堆肥速率<sup>[96]</sup>。堆肥初期, pH 值为弱酸到中性, 一般为 6.5~7.5, 腐熟的堆肥一般呈弱碱性, pH 值在 8~9 左右。但是 pH 值变化受堆肥原料和条件的影响<sup>[97]</sup>。

在堆肥过程中, pH 值的总体变化呈上升趋势。堆肥原垃圾或发酵初期, pH 值为弱酸性到中性, 一般为 5~7。随着堆肥的进行, 氨释放量减少, 同时有机质分解产生的有机酸又起中和作用,

使 pH 值增幅减少, 在后熟化 3 周后, 由于易分解有机物的分解趋近完全, 在堆肥结束时的 pH 值大致维持在 8.0 左右, 基本达到腐熟堆肥呈弱碱性的标准。

垃圾堆肥过程中的 pH 变化见图 4-6。

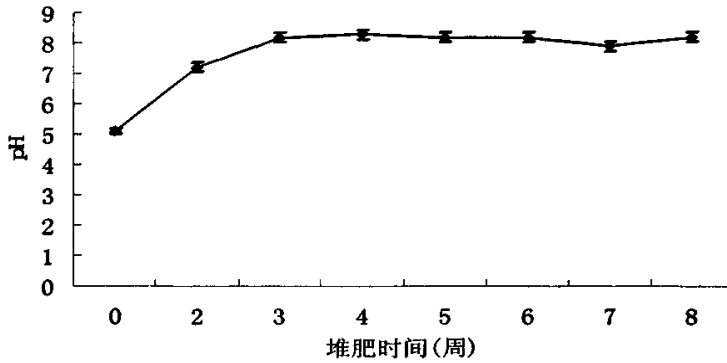


图 4-6 垃圾堆肥过程中的 pH 变化

Fig 4-6 The content variation of pH during MSW composting

③ 垃圾堆肥过程中 WSC 的变化

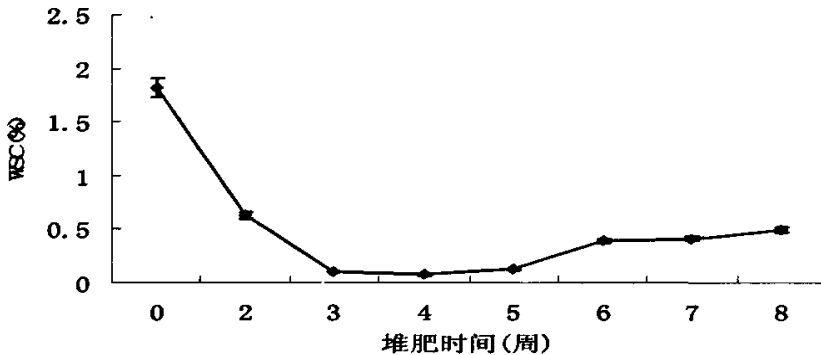


图 4-7 垃圾堆肥过程中的 WSC 变化

Fig 4-7 The content variation of WSC during MSW composting

从图 4-7 中可以看出, 在堆肥过程中, WSC 值的在堆肥开始呈现下降趋势, 这是因为微生物分解了垃圾中的小分子有机质, 开始繁殖。随着堆肥进行到 5 周以后, 大分子有机质分解产生为小分子的有机物, 使堆肥中的 WSC 值又逐渐增加, 呈现上升趋势。

④ 垃圾堆肥过程中的 E<sub>4</sub>/E<sub>6</sub> 变化

堆肥腐殖酸在波长 465 和 665 nm 处具有特异吸收峰值, 465 和 665 nm 的吸光度比值, 称为 E<sub>4</sub>/E<sub>6</sub> 比。E<sub>4</sub>/E<sub>6</sub> 比不与腐殖酸分子数量有关而与腐殖酸分子大小或分子的缩合度大小有直接关系, 通常随腐殖酸分子量的增加或缩合度增大而减小, 因此 E<sub>4</sub>/E<sub>6</sub> 比可用来作为堆肥腐殖化作用大小的重要指标<sup>[98]</sup>。堆肥腐殖酸通常随着堆肥腐熟度的提高和堆肥时间的延长而发生变化, 主要向着腐殖酸分子量越来越大或缩合度越来越高方向转化, 从堆肥腐殖化作用的本质来看, 主要是小分子腐殖酸向着大分子腐殖酸转化, 或者由小分子的富里酸向着大分子的胡敏酸甚至更大分子的胡敏素方向转化, 如果从 E<sub>4</sub>/E<sub>6</sub> 比值上来看, 表现为 E<sub>4</sub>/E<sub>6</sub> 比值从大到小的一个变化趋势。而一般来说堆肥过程中, 腐殖酸按照浸提液可以分成水浸提和碱浸提两种有机酸, 前者主要是指通过微生物生物化学作用新形成的小分子腐殖酸, 一般从性质上主要是呈富里酸特性, 溶于水和稀酸。后者主要是指结合态的大分子腐殖酸, 主要是指胡敏酸。二者随着堆肥进行, 前者不断通过生物化

学过程转化为后者，而又不断有新的小分子腐殖酸生成。

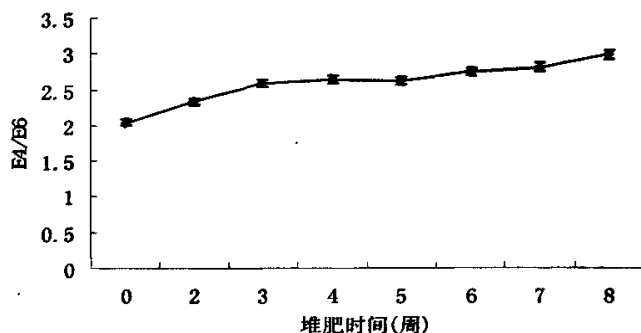


图 4-8 垃圾堆肥过程中的  $E_4/E_6$  变化

Fig 4-8 The content variation of  $E_4/E_6$  during MSW composting

从图 4-8 腐殖酸  $E_4/E_6$  比值变化可以看出，垃圾堆肥过程中水浸提液的  $E_4/E_6$  比值随着堆肥过程的进行，总体呈上升的趋势，这正说明了随着堆肥进行上述生物化学过程比较强烈，大量的小分子的有机酸不断生成，反过来更说明了堆肥过程在不断形成更大分子量的腐殖酸，从而堆肥得到腐熟。

#### ⑤ 垃圾堆肥过程中固相 C/N 的变化

碳是好氧堆肥过程中微生物所需能量的主要来源，氮是微生物合成蛋白质的必须成分，堆肥过程中氮含量会影响微生物的种群变化，因此碳和氮的比例是好氧堆肥过程中影响生物转化的一个重要控制因素。如果氮含量过多，则氮将变成氨态氮而挥发，导致氮元素大量损失而降低肥效，系统内就会有氨气等臭气产生。反之，如果碳含量过量，微生物会努力氧化多余的碳，以降低系统内的 C/N 比，这样便会延长处理时间；另外，微生物在氧化多余的碳的同时，还将从土壤中吸收氮以维持生存，从而导致与植物竞争氮肥的行为。

碳和氮的变化是堆肥的基本特征之一。C/N 比是最常用于评价腐熟度的参数，理论上 C/N 比在腐熟的堆肥产品中像腐殖质一样约为 10。Golueke 指出腐熟的堆肥 C/N 比小于 20<sup>[99]</sup>，Morel 等认为 C/N 比小于 20 只是堆肥腐熟的必要条件<sup>[100]</sup>，但许多堆肥原料的 C/N 比较低，如污泥、农用废弃物等，此时 C/N 比就不适于作腐熟度参数<sup>[101]</sup>。

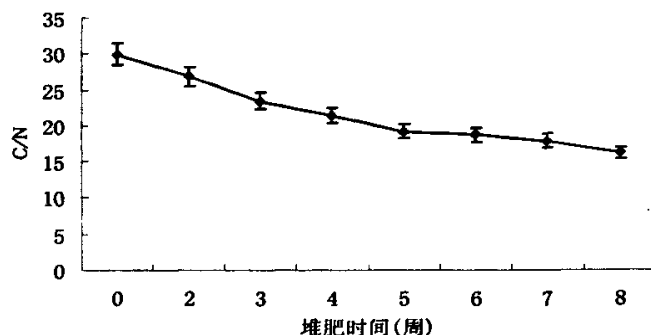


图 4-9 垃圾堆肥过程中固相 C/N 的变化

Fig 4-9 The content variation of C/N during MSW composting

从图 4-9 可以看出，在整个堆制过程中，垃圾堆肥的固相 C/N 比呈下降趋势，这是因为随着好氧堆肥过程的进行，碳和氮同时在减少，而碳的损失要比氮要高，因此导致体系中 C/N 比不断

减少，直到微生物对有机垃圾的降解反应完成为止。为了保证成品堆肥中一定的碳氮比（一般为10~20:1）和在堆肥过程中有理想的分解速度，必须调整好堆肥原料的碳氮比（生活垃圾碳氮比一般在25~35:1）。若城市生活垃圾的C/N太高，为了更适合于堆制，调整的方法是加入含氮高的人粪尿，牲畜粪以及城市污泥等；若城市生活垃圾的C/N太低，则要增加含碳废物，如草木叶、烂菜等。

⑥ 垃圾堆肥过程中发芽率指标变化

堆肥的腐熟度水平高低，通常意味着其使用时的正负效应，可以由植物生长的生物量表示。植物在未腐熟的堆肥中生长受到抑制，在腐熟的堆肥中生长得到促进<sup>[102, 103]</sup>，据此形成了生物分析法，如目前国外采用的水芹种子生长、水芹籽发芽、太阳花及黑麦草生长过程中的物理及生物学参数去评价堆肥的腐熟度。其中发芽率指数的方法是一种简便、准确、易行的方法，常用来检测堆肥的腐熟度，评价堆肥的质量。

一般来说，如果GI>50%，就可认为堆肥基本无毒性，当GI达到80%~85%时，这种堆肥就可以认为对植物没有毒性了。

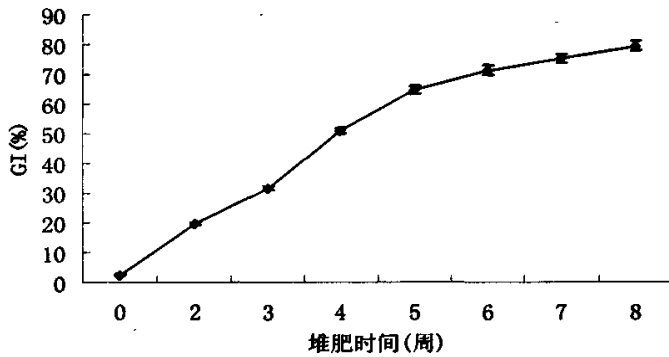


图 4-10 垃圾堆肥过程中 GI 的变化

Fig 4-10 The content variation of GI during MSW composting

从图 4-10 中可以看出：随着堆肥时间的延长，堆肥的 48hGI 值呈增加趋势，说明堆肥的生理毒性逐渐降低，抑制发芽的物质随着堆肥的进行已逐渐得到降解，堆肥逐渐达到腐熟。在堆制 8 周后，48h 的 GI 值已达 100% 以上，说明堆肥已无生理毒性。如果以 GI 值 50% 为限，垃圾堆肥在第 5 周时就达到此限，说明垃圾堆肥堆制 5 周就可满足堆肥腐熟度的要求。从 48h 的发芽率指数图中还可看出垃圾堆肥过程对发芽率指数的影响可分为三个阶段：第 1 个阶段是前期抑制发芽阶段，主要发生在高温期，从堆肥开始到堆肥的第 2 周，GI 从垃圾堆肥水浸液的 0%~10% 左右缓慢增长到 10%~20% 之间；第 2 个阶段是 GI 迅速上升阶段，发生在堆肥第 2 周到第 5 周内，GI 从垃圾堆肥水浸液的 20% 左右迅速增长到 50%~60% 之间；第 3 个阶段是 GI 缓慢上升至稳定阶段，GI 从垃圾堆肥水浸液的 50%~60% 增长到 70%~80% 之间。上述结果表明，抑制发芽的垃圾堆肥中毒性物质是在堆肥过程中逐渐消除的<sup>[104]</sup>，一些影响种子发芽的毒性物质，随着堆肥生物化学过程的进行被逐渐降解或被利用。堆肥初期垃圾堆肥浸出液对种子发芽的抑制作用非常明显，这是因为垃圾中的有机物质被微生物剧烈分解，生成大量的  $\text{NH}_4^+$  和低分子有机酸<sup>[105]</sup>。随着堆肥的进行，堆肥腐殖化作用明显，低分子有机酸转化为高分子腐殖酸，同时氨的挥发以及金属的固定等也使 EC 值降低，因此使 GI 值不断得到升高。

### 4.3.2 隧道仓区间垃圾堆肥腐熟度的变化

#### 4.3.2.1 不同区间垃圾物理组成的变化

从表 4-3 中可以看出：经过 14 天的高温静态发酵，10 个区间垃圾的可降解组分均发生了明显变化，部分食品及少量灰分、纸类、织物等经过微生物的作用变为堆腐物；原垃圾中食品的比例明显降低；堆腐物比例从原垃圾的 0 增加到 20% 以上，在 13.5~16.2m 的区间内堆腐物的百分比含量最高，达到 46.73%；在 0~2.7m、21.6~24.3m、24.3~27m 区间处堆腐物的百分比含量最低，分别为 30.05%、27.16% 和 26.04%。

#### 4.3.2.2 不同区间垃圾堆肥理化性质的变化

##### ① 不同区间的垃圾堆肥的含水率变化

好氧堆肥中，适宜的含水率有助于营养物质的转化，以便被微生物更好地利用。堆肥最佳的含水率一般为 50%~60%。

表 4-3 不同区间垃圾堆肥的物理成分（湿基%）

Table 4-3 The composition variation of MSW in different spaces

	灰分	砖瓦	纸类	塑料	织物	玻璃	金属	木竹	堆腐物	食品	电池
0d	3.35	2.12	16.30	2.72	0.44	2.89	0.51	1.22	0	70.17	0.28
0~2.7m	4.37	6.98	11.88	2.95	1.04	2.37	0.52	1.93	30.05	36.91	1.00
2.7~5.4m	2.71	3.89	14.92	4.91	0.55	2.77	0.36	1.41	36.47	31.85	0.16
5.4~8.1m	4.45	7.19	19.11	3.39	1.22	0.64	1.2	1.89	39.60	21.01	0.3
8.1~10.8m	2.68	4.75	10.04	4.78	0.51	2.90	0.98	2.05	42.87	27.86	0.58
10.8~13.5m	5.66	6.56	9.85	3.44	0.69	1.83	0.36	1.86	38.77	29.86	1.12
14d 13.5~16.2m	2.14	4.03	17.27	5.66	0.65	1.14	0.47	1.41	46.73	20.42	0.06
16.2~18.9m	3.56	7.59	13.55	5.41	0.43	2.31	0.45	1.00	37.45	28.09	0.16
18.9~21.6m	3.80	5.86	10.49	5.48	0.97	1.43	0.53	1.63	38.75	30.88	0.20
21.6~24.3m	8.52	4.66	15.76	7.48	1.01	2.76	0.53	1.74	27.16	30.38	0.00
24.3~27m	4.12	5.06	15.03	4.37	0.62	1.43	0.17	1.06	26.04	42.10	0.00

表 4-4 不同区间垃圾堆肥含水率的变化(%)

Table 4-4 The content variation of water in MSW composts in different spaces

	0d										14d									
	0~2.7m		2.7~5.4m		5.4~8.1m		8.1~10.8m		10.8~13.5m		13.5~16.2m		16.2~18.9m		18.9~21.6m		21.6~24.3m		24.3~27m	
水分	48.61	26.70	22.52	28.25	22.43	25.35	23.01	29.96	26.75	26.06	33.85									

从表 4-4 可知：原垃圾的含水率<50%，未达到堆肥的含水率要求。因此要通过从隧道仓顶部喷淋来补充水分的不足，使水分达到 60%左右。但是在高温发酵期间，为控制温度在 55℃~60℃，需要从隧道仓底部持续不断的强制通风，往往通风量是堆肥生化反应所需空气量的 8~9 倍，因此，过量通风和高温过程会造成大量的水分散失<sup>[106, 107]</sup>。从表 4-5 可以看出：经过 14 天的高温静态发酵，10 个区间的垃圾堆肥含水率在 22%~33%之间，均未达到高温发酵结束时含水率应在 40%~45%的要求。所以，整个发酵隧道仓的垃圾在堆肥过程中水分损失严重。

② 不同区间的垃圾堆肥 pH 和电导率变化

pH 在 7.5~8.5 时，可获得最大堆肥速率。腐熟的堆肥一般呈弱碱性，pH 在 8~9 左右，但因原料和堆肥条件的影响而变化很大。

电导率反映了堆肥浸体液中的离子浓度，即可溶性盐的含量。堆肥中的可溶性盐是堆肥对作物产生毒害作用的重要因素之一，主要有有机酸盐类和无机盐等组成。鲍士旦等认为抑制作物生长的限定电导率值为  $0.4 \times 10^4$  us/cm。

表 4-5 不同区间垃圾堆肥的 pH 和电导率变化(us/cm)

Table 4-5 The content variation of nutrition pH and EC in MSW composts in different spaces

	0d										14d									
	0~2.7m		2.7~5.4m		5.4~8.1m		8.1~10.8m		10.8~13.5m		13.5~16.2m		16.2~18.9m		18.9~21.6m		21.6~24.3m		24.3~27m	
pH	5.1	8.7	8.6	8.1	8.1	8.2	8.3	8.2	8.3	8.9	8.7									
EC	5317	2916	3141	3418	2777	2727	2615	2099	2371	3321	2923									

从表 4-5 可以看出：10 个区间的垃圾堆肥的电导率均降到  $0.4 \times 10^4$  us/cm 以下，施用于土壤后，基本不会对作物的生长产生毒害，按电导率的指标衡量，垃圾堆肥均达到了基本腐熟；

原垃圾 pH 为 5.1，垃圾呈酸性。经过 14 天的高温发酵，10 个区间的垃圾堆肥 PH 均在 8~9 之间，垃圾堆肥呈弱碱性，达到了基本腐熟，5.4~8.1m 区间、8.1~10.8m 区间、10.8~13.5m 区间、13.5~16.2m 区间、16.2~18.9m 区间和 18.9~21.6m 区间的垃圾堆肥  $8.0 < \text{pH} < 8.3$ ，其垃圾堆肥的腐熟程度优于 0~2.7m、2.7~5.4m、21.6~24.3m 和 24.3~27m 区间。

③ 不同区间的垃圾堆肥  $E_4/E_6$  变化

堆肥腐殖酸在 465 和 665nm 的吸光度的比值，称为  $E_4/E_6$ 。 $E_4/E_6$  不与腐殖酸分子数量有关而与腐殖酸的分子大小或分子的缩合度大小有直接的关系，通常随腐殖酸分子量的增加或缩合度增大而减小，因此  $E_4/E_6$  可以用来作为堆肥腐殖化作用大小的重要指标。

表 4-6 不同区间垃圾堆肥的  $E_4/E_6$  变化Table 4-6 The content variation of nutrition  $E_4/E_6$  in MSW composts in different spaces

	0d											14d										
	0~2.7m		2.7~5.4m		5.4~8.1m		8.1~10.8m		10.8~13.5m		13.5~16.2m		16.2~18.9m		18.9~21.6m		21.6~24.3m		24.3~27m			
$E_4/E_6$	1.54	2.7	2.3	2.9	2.2	2.4	2.2	2.4	2.2	2.4	2.2	2.1	2.2	2.1	2.2	2.1	2.2	2.1	2.2	2.2		

从表 4-6 可以看出：10 个区间的垃圾堆肥的  $E_4/E_6$  均高于原垃圾的 1.54，介于 2.1~2.9 之间。说明在堆肥过程中，形成了分子量较大的腐殖酸，按  $E_4/E_6$  的指标衡量，10 个区间的垃圾堆肥都达到了基本腐熟，但 10 个区间的垃圾堆肥  $E_4/E_6$  值相差不大；

#### ④ 不同区间的垃圾堆肥氮素含量变化

在垃圾堆肥过程中，随着  $NH_3$  的挥发和微生物的固定作用， $NH_4^+-N$  的含量不断下降；新鲜垃圾里几乎不含水溶性  $NO_3^-N$ ，随着堆肥的进行，硝化作用增强，大量的  $NH_4^+-N$  转化为  $NO_3^-N$ ， $NO_3^-N$  含量逐渐增高， $NH_4^+-N$  和  $NO_3^-N$  的这种明显的规律性变化成为堆肥的特征之一。

堆肥过程中，垃圾中的有机态氮通过微生物的分解转化铵态氮，其中一部分的铵态氮直接挥发，一部分的铵态氮转化为硝态氮，因此氮素在垃圾堆肥中损失严重。

表 4-7 不同区间垃圾堆肥的氮素含量变化

Table 4-7 The content variation of nutrition N in MSW composts in different spaces

	0d											14d										
	0~2.7m		2.7~5.4m		5.4~8.1m		8.1~10.8m		10.8~13.5m		13.5~16.2m		16.2~18.9m		18.9~21.6m		21.6~24.3m		24.3~27m			
$NH_4^+-N(mg/Kg)$	1090.8	450.2	488.1	467.6	393.0	454.4	380.9	479.4	401.0	480.2	409.4											
$NO_3^-N(mg/g)$	1.82	31.4	28.7	45.1	43.2	51.3	54.2	51.3	35.7	36.1	20.0											
TN(g/Kg)	61.90	9.79	10.74	11.53	11.15	11.09	9.83	10.65	10.63	10.48	9.76											

从表 4-7 可以看出：10 个区间的垃圾堆肥的  $NH_4^+-N$  从原垃圾的 1090.8mg/Kg 降为 380~480mg/Kg 之间；10 个区间的垃圾堆肥的  $NO_3^-N$  从原垃圾的 1.82g/Kg 经过微生物的硝化作用上升为 20~51ug/g；10 个区间的垃圾堆肥的 TN 从原垃圾的 61.90 减少为 9~11 g/Kg 之间。

#### ⑤ 不同区间的垃圾堆肥碳素含量变化

在堆肥的开始，垃圾中的不稳定物质和可溶性碳水化合物在微生物的作用下快速分解，转化为  $CO_2$ 、水和小分子物质。随着堆肥的进行，大分子的有机物质在微生物的作用下开始分解，转化为  $CO_2$ 、水和其他物质。因此，水溶性碳和总有机碳的含量均明显下降。

从表 4-8 可以看出：10 个区间的垃圾堆肥的 WSC 从原垃圾的 1.24%降为 0.1~0.3%之间；10 个区间的垃圾堆肥的 TOC 从原垃圾的 386.75g/Kg 经过微生物的分解利用后，下降为 120~140g/Kg 之间。



表 4-8 不同区间垃圾堆肥的碳素含量变化

Table 4-8 The content variation of nutrition C in MSW composts in different spaces

	0d										
	0~2.7m	2.7 ~ 5.4	5.4 ~ 8.1	8.1 ~ 10.8	10.8 ~ 13.5	13.5 ~ 16.2	16.2 ~ 18.9	18.9 ~ 21.6	21.6 ~ 24.3	24.3 ~ 27m	
WSC(%)	1.24	0.33	0.29	0.38	0.31	0.29	0.20	0.33	0.13	0.31	0.34
TOC(g/kg)	386.8	124.08	136.28	148.10	132.12	138.41	135.15	148.90	139.45	137.59	122.68

⑥ 不同区间的垃圾堆肥 C/N 的变化

固相 C/N 是最常用于评价腐熟度的参数，Golueke 指出腐熟的堆肥 C/N 应小于 20。邱瑞宗<sup>[106]</sup>等报道，对起始 C/N 为 25~30 的堆肥原料，当该值降到 16 左右时，则可认为堆肥基本腐熟。

表 4-9 不同区间垃圾堆肥 C/N 的变化

Table 4-9 The index of C/N in MSW composts in different spaces

	0d										
	0~2.7m	2.7 ~ 5.4	5.4 ~ 8.1	8.1 ~ 10.8	10.8 ~ 13.5	13.5 ~ 16.2	16.2 ~ 18.9	18.9 ~ 21.6	21.6 ~ 24.3	24.3 ~ 27m	
C/N	27.66	19.79	17.74	11.53	11.15	11.09	11.83	11.65	13.63	18.48	19.76

从表 4-9 可以看出：10 个区间的垃圾堆肥的固相 C/N 从原垃圾的 27.66 下降为 11~19 之间，达到了基本腐熟的要求。5.4~8.1m 区间、8.1~10.8m 区间、10.8~13.5m 区间、13.5~16.2m 区间、16.2~18.9m 区间和 18.9~21.6m 区间的垃圾堆肥的固相 C/N<16，垃圾堆肥的腐熟程度优于其他区间。

⑦ 不同区间的垃圾堆肥发芽率指标变化

植物在未腐熟的堆肥中生长受到抑制，在腐熟的堆肥中生长受到促进。Rittaldi 研究发现：如果发芽率指标 GI>50%，就可认为堆肥基本无毒性，当 GI>80%~85%时，这种堆肥就可以认为多植物完全没有毒性了。

表 4-10 不同区间垃圾堆肥的发芽率变化

Table 4-10 The index of GI in MSW composts in different spaces

	0d										
	0~2.7m	2.7 ~ 5.4	5.4 ~ 8.1	8.1 ~ 10.8	10.8 ~ 13.5	13.5 ~ 16.2	16.2 ~ 18.9	18.9 ~ 21.6	21.6 ~ 24.3	24.3 ~ 27m	
GI(%)	11.4	54.3	57.9	62.7	62.1	63.3	65.0	64.6	61.1	57.2	53.6

从表 4-10 可以看出：10 个区间的垃圾堆肥的 GI 从原垃圾的 11.4%增加到 50%以上，达到了基本腐熟的要求。5.4~8.1m 区间、8.1~10.8m 区间、10.8~13.5m 区间、13.5~16.2m 区间、16.2~18.9m 区间和 18.9~21.6m 区间的垃圾堆肥的 GI>60%，所以腐熟程度较 0~2.7m、2.7~5.4m、21.6~24.3m、24.3~27m 区间的垃圾堆肥好。

## 4.3.3 隧道仓区间垃圾堆肥腐熟度的模糊评价

## 4.3.3.1 确定评价因子

因 10 个区间的含水率均未达到要求、 $E_4/E_6$  变化不大、TN 与 TOC 指标即反映为固相 C/N，所以不列入垃圾堆肥腐熟程度的评价因子之中，而选取 pH、固相 C/N 降解率<sup>[109]</sup>、EC 变化率(%)、WSC 变化率(%)、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$  变化率(%)、 $\text{NO}_3^-\text{N}$ <sup>[110]</sup>、GI(%)为评价因子。各评价因子值见下表。

表 4-11 各评价的因子值(%)

Table 4-11 The value of all evaluating factors

评价因子	0~2.7m	2.7~5.4m	5.4~8.1m	8.1 ~ 10.8m	10.8 ~ 13.5m	13.5 ~ 16.2m	16.2 ~ 18.9m	18.9 ~ 21.6m	21.6 ~ 24.3m	24.3 ~ 27m
pH	8.7	8.6	8.1	8.1	8.2	8.3	8.2	8.3	8.9	8.7
EC 变化率	54.84	59.07	64.28	52.23	51.29	49.18	39.48	44.59	62.46	54.97
氨氮变化率	41.27	44.75	42.87	36.03	41.66	34.92	43.95	36.76	44.02	37.53
$\text{NO}_3^-\text{N}$ (mg/g)	31.4	28.7	45.1	43.2	51.3	54.2	51.3	35.7	36.1	20
WSC 变化率	26.61	23.39	30.65	25.00	23.39	16.13	26.61	10.48	25.00	27.06
固相 C/N 降解率	28.45	35.86	58.32	59.69	59.91	57.23	57.88	50.72	33.19	28.56
GI	54.3	57.9	62.7	62.1	63.3	65	64.6	61.1	57.2	53.6

## 4.3.3.2 统一函数模型

统一套用的函数模型为：

$$R_I(C_i) = \begin{cases} 1 & 0 \leq C_i \leq I \\ \frac{II-C_i}{II-I} & I < C_i < II \\ 0 & C_i \geq II \end{cases}$$

$$R_{II}(C_i) = \begin{cases} 0, & C_i \leq I \text{ 或 } C_i \geq III \\ \frac{C_i-I}{II-I}, & I < C_i < II \\ \frac{III-C_i}{III-II}, & II < C_i < III \end{cases}$$

$$R_{III}(C_i) = \begin{cases} 0, & C_i \leq II \text{ 或 } C_i \geq IV \\ \frac{C_i-II}{III-II}, & II < C_i < III \\ \frac{IV-C_i}{IV-III}, & III < C_i < IV \end{cases}$$

$$R_V(C_i) = \begin{cases} 0, & C_i \leq IV \\ \frac{C_i-IV}{V-IV}, & IV < C_i < V \\ 1, & C_i \geq V \end{cases}$$

4.3.3.3 确定评价因子隶属度

表 4-12 各评价因子的隶属度/%  
Table 4-12 The subjection of all evaluating factors

评价标准	pH*	EC 变化率	氨氮变化率	NO <sub>3</sub> -N**	WSC 变化率	固相 C/N 降解率	GI
1 级	8.3	40	30	60	15	60	80
2 级	8.6	50	40	50	20	50	60
3 级	8.9	60	50	40	25	30	50
4 级	9.2	70	70	30	30	12	30

\*pH 无单位

\*\*NO<sub>3</sub>-N 单位为 ug/g

4.3.3.4 评价因子权重

本文利用超标加权法计算各评价因子权重，其计算式为：

$$a_i = c_i / s_i$$

$$s_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n s_{ij}$$

其中：a<sub>i</sub>——第 i 种评价因子的权重；

c<sub>i</sub>——第 i 种评价因子实测值；

s<sub>i</sub>——第 i 种评价因子多级标准值的平均值；

s<sub>ij</sub>——第 i 种评价因子第 j 级的标准值；

n——分级数。

为了进行模糊复合运算，各单因子权重必须归一化，即

$$w_i = \frac{c_i}{s_i} / \sum_{i=1}^m \frac{c_i}{s_i}$$

其中 m 为评价因子个数，计算出各因子权重后，组成权重模糊矩阵 A={w<sub>1</sub>, w<sub>2</sub>, ..., w<sub>m</sub>}。

4.3.3.6 隶属度矩阵

m 个评价因子隶属于 n 个不同级别的隶属度组成隶属度矩阵 R (R 为 m×n 阶)。文中 m=8, n=4。

$$R = \begin{bmatrix} r_{1,1} & r_{1,2} & \dots & r_{1,n} \\ r_{2,1} & r_{2,2} & \dots & r_{2,n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{m,1} & r_{m,2} & \dots & r_{m,n} \end{bmatrix}$$



变化,部分食品及少量灰分、纸类、织物等经过微生物的作用变为堆腐物,原垃圾中食品的比例明显降低;10个区间的垃圾堆肥含水率在22%~33%之间,均未达到高温发酵结束时含水率应在40%~45%的要求,所以在垃圾堆肥过程中应适当减少通风量,以减少垃圾堆肥水分损失,促进堆肥尽快腐熟并可降低动力消耗;从电导率、pH、 $E_4/E_6$ 、固相C/N、GI等指标来看,10个区间的垃圾堆肥均达到了基本腐熟;选取pH、固相C/N降解率、EC变化率(%)、WSC变化率(%)、 $NH_4^+-N$ 变化率(%)、 $NO_3-N$ 、GI(%)为评价因子,从模糊评价的结果来看,南宫堆肥厂的堆肥隧道仓各区间垃圾堆肥的腐熟程度并不一致:13.5~16.2m区间的垃圾堆肥腐熟程度最好,等级为1级;0~2.7m区间、2.7m~5.4m区间、21.6~24.3m和24.3~27m区间的垃圾堆肥腐熟程度最差,评价等级为3级;其他区间居中,评价等级为2级。所以,在今后的垃圾堆肥过程中可通过倒仓或人工翻堆等方式,以促进垃圾堆肥腐熟度达到均匀、一致的水平。关于隧道仓内垃圾堆肥腐熟度的空间变异性仍需进一步研究和探讨。

#### 4.4 小结

来自丰台区和宣武区的源头垃圾经过马家楼筛分预处理后,在用于堆肥原料的15~60mm垃圾中,食品等可堆腐物质为80%以上,完全适合于高温堆肥工艺对堆肥原料的要求。但是一些不能降解的物质如砖瓦、塑料、玻璃、金属和废电池物质仍然存在,总含量在12%以上。随着堆肥时间的延长,不可降解物如砖瓦、塑料、玻璃、金属物质的百分含量呈上升趋势;可降解如纸类、织物、食品的比重下降,基本上转化为腐熟堆肥;堆肥成品的比例显著上升,从原垃圾的0增加到第8周的60%以上,可降解物质基本上转化为腐熟堆肥;堆肥的容重逐渐增加,从原垃圾的245.50%增加到第8周的811.43%,成品堆肥的容重在900%以上;随着堆肥的进行,垃圾堆肥的EC值逐渐下降;pH值的总体变化呈上升趋势,在堆肥结束时大致维持在8.0左右,基本达到腐熟堆肥呈弱碱性的标准;WSC值的在堆肥开始呈现下降趋势,在堆肥进行到5周以后,随着大分子有机质分解产生为小分子的有机物,堆肥中的WSC值又逐渐增加,呈现上升趋势; $E_4/E_6$ 比值总体呈上升的趋势;固相C/N比值呈下降趋势;在堆制8周后,48h的GI值已达100%以上,说明堆肥已无生理毒性。

经过14天的高温静态发酵,南宫隧道仓10个不同区间的垃圾堆肥中:可降解组分均发生了明显变化,部分食品及少量灰分、纸类、织物等经过微生物的作用变为堆腐物,原垃圾中食品的比例明显降低;10个区间的垃圾堆肥含水率在22%~33%之间,均未达到高温发酵阶段结束时含水率应在40%~45%的要求,所以在垃圾堆肥过程中应适当减少通风量,以减少垃圾堆肥水分损失,促进堆肥尽快腐熟并可降低动力消耗;从电导率、pH、 $E_4/E_6$ 、固相C/N、GI等指标来看,10个区间的垃圾堆肥均达到了基本腐熟;选取pH、固相C/N降解率、EC变化率(%)、WSC变化率(%)、 $NH_4^+-N$ 变化率(%)、 $NO_3-N$ 、GI(%)为评价因子,从模糊评价的结果来看,南宫堆肥厂的堆肥隧道仓各区间垃圾堆肥的腐熟程度并不一致:13.5~16.2m区间的垃圾堆肥腐熟程度最好,等级为1级;0~2.7m区间、2.7m~5.4m区间、21.6~24.3m和24.3~27m区间的垃圾堆肥腐熟程度最差,评价等级为3级;其他区间居中,评价等级为2级。所以,在今后的垃圾堆肥过程中可通过倒仓或人工翻堆等方式,以促进垃圾堆肥腐熟度达到均匀、一致的水平。

## 第五章 结论与展望

### 5.1 研究结论

通过以上的试验结果,可以得出如下结论:

- ① 北京市城八区的密闭式垃圾站的分布式比较均衡;密闭式垃圾站的服务效率最高的是丰台区和宣武区;朝阳区的密闭式垃圾站清运的垃圾比例最高,石景山区清运比例最低;5座垃圾转运站中,负责东城区和西城区的大屯转运站的转运承担率最高,其次是海淀区的五路居垃圾转运站,位于石景山区的衙门口垃圾转运站转运比例最少;大屯转运站的服务期早已超出了设计服务期限将近4年;
- ② 从前端收集、中端清运、终端转运以及末端无害化处理的全物流设施过程中,北京市的生活垃圾并没有实现分类,而是全部以混合状态存在,垃圾中不仅含有厨余、木竹、草叶等可用于堆肥的成分,而且还含有金属、塑料、纸张、玻璃等可回收的物质以及炉灰、砖瓦、扫街土和部分来自建筑工地的混凝土重物等。
- ③ 随着堆肥时间的延长,不可降解物如砖瓦、塑料、玻璃、金属物质的百分含量呈上升趋势;可降解如纸类、织物、食品的比重呈下降趋势,基本上转化为腐熟堆肥;堆肥成品的比例呈显著上升趋势,可降解物质基本上转化为腐熟堆肥;堆肥的容重逐渐增加;
- ④ 随着堆肥的进行,垃圾堆肥的EC值逐渐下降;pH值的总体变化呈上升趋势,WSC则先下降后上升; $E_4/E_6$ 比值总体呈上升的趋势;固相C/N比值呈下降趋势;48hGI值呈增加趋势;
- ⑤ 经过14天的高温静态发酵,南宫堆肥厂的堆肥隧道仓各区间垃圾堆肥的腐熟程度并不一致;13.5~16.2m区间的垃圾堆肥腐熟程度最好;0~2.7m区间、21.6~24.3m和24.3~27m区间的垃圾堆肥腐熟程度最差;其他区间居中。

### 5.2 研究展望

本论文是在垃圾混合收运条件下,对北京市垃圾处理与利用进行分析的。2006年5月,北京市开始广泛开展生活垃圾分类工作。在实行垃圾分类收集运输的条件下,进入垃圾填埋场的垃圾将基本上是惰性的,垃圾中有机物含量低于5%,而大量可生物降解垃圾尤其厨余垃圾将主要采用堆肥方法进行综合处理利用。这些高有机物含量和高水分含量的垃圾原料,对垃圾堆肥化技术设备、工艺控制都有更新的要求,需要对垃圾堆肥前处理工艺、堆肥设备、堆肥过程和技术参数控制等系列问题进行深入和广泛的研究。因此,今后的研究方向可立足于以下几个方面:

- ① 建立并完善生活垃圾分类准则、分类方法、分类标准及垃圾收费制度;
- ② 垃圾堆肥工艺流程和参数的进一步改进和优化;
- ③ 垃圾堆肥专用机械设备的开发和创新;
- ④ 垃圾堆肥技术有关的规范和标准;
- ⑤ 垃圾堆肥深加工;
- ⑥ 垃圾堆肥在非食物链土地的利用效应;

## 参考文献

1. 李玉春, 李彦富, 刘旭等.北京市生活垃圾堆肥现状及存在问题.环境工程, 2005, 13(4): 24~28
2. 刘建国, 聂永丰.京城垃圾处置问策.科技潮, 2004, 7: 32~35
3. 栾智慧, 王树国.垃圾卫生填埋实用技术[M].北京:化学工业出版社, 2004
4. 李国学, 张福锁.固体废物堆肥化与有机复混肥生产[M].北京:化学工业出版社, 2000
5. 张勇. 浅谈城市垃圾. 渝州大学学报(自然科学版), 2001, 18(3):76~79
6. 吴鸿钧. 城市垃圾处理技术及应用前景. 环境保护, 2000, 12: 14~16
7. 北京市环保局. 2001年北京市环境状况公报, 2002.6.1
8. 陆卫亚. 上海市区生活垃圾处理现状和对策. 环境工程, 2002, 10(1): 21~23
9. 段武亮, 秦岁民, 李成勇, 马祥. 重庆市主城区生活垃圾处理产业化的探索. 重庆交通学院学报(社科版), 2001, 3(1): 19~22
10. Allen V Baker. Composition and uses of compost. In: Tack E Rechcial, Herbert C Mackinnon, eds. Agriculture uses of By-products and Waste. American chemical society, 1997. 140~162
11. 李湘洲. 国内外城市垃圾处理的现状与趋势. 粉煤灰, 2000, 1: 31~35
12. 方创琳. 中国垃圾资源的综合利用. 自然资源学报, 1996, 11(4): 333~338
13. 张久根. 我国城市生活垃圾现状分析及未来削减的建议. 环境科学研究, 1994, 7(6): 42~45
14. 何晶晶, 邵立明. 城市垃圾资源利用前景的分析. 长江流域资源与环境, 1996, 5(2): 133~136
15. 张颖, 张小丹. 固体废物的资源化综合利用技术. 环境科学研究, 1998, 11(3): 49~52
16. 李俊峰, 时璟丽.城市垃圾管理国家行动方案. 环境导报, 1999, 4: 32~34
17. 施阳.北京市垃圾问题的现状及对策. 环境科学研究, 1998, 11(3): 40~41
18. 北京市市政管理委员会.北京市绿色奥运城市垃圾全程管理体系研究, 2002
19. 李国学, 黄斌.北京市生活垃圾处理与利用现状的调查和评价.中国农业大学学报, 1999a, 4: 103~108
20. 全晓宇, 孙亚芹, 张春华. 北方城市垃圾的回收和利用. 内蒙古环境保护, 1998, 10(2): 38~41
21. 张峰. 试论适合我国国情的城市垃圾处理技术和方法. 环境工程, 1997, 3: 18~21
22. 唐永良, 高坤林, 徐俊祥, 石华. 生活垃圾堆肥对花生和猕猴桃生产品质的影响及其改土效果. 应用与环境生物学报, 1995, 1(4): 364~370
23. 王建民, 程伟, 韩琅丰, 江荣凤. 垃圾堆肥在北方潮土地区的农用研究. 应用与环境生物学报, 1995, 1(4): 379~386
24. 刘京媛. 我国城市垃圾处理政策、趋向及市场化分析. 中国环保产业, 1999, 12: 14~15
25. 尚谦, 袁兴中. 城市生活垃圾的危害及特性分析. 黑龙江环境通报, 2001, 25(2): 27~31
26. 吴国玺.城市垃圾处理及开发利用研究.信阳师范学院学报, 2001, 21(6): 25~27
27. 生旭, 王晶. 谈城市生活垃圾分类收集. 山东环境, 2000, 5: 52~53
28. 上海市环卫局. 国外环境卫生考察报告专集(一), 1995
29. 卢英方, 孙向军. 中国城市生活垃圾分类收集对策探讨. 环境工程, 2002, 10(1): 15~17
30. 陆光立, 夏卫红, 杨始刚. 国内外垃圾处置现状及对策研究. 化学世界, 2002, 增刊: 133~137
31. 关坪. 环境保护管理与污染治理. 北京:国防工业出版社, 1995, 78
32. 洪翠宝. 国外环境科学技术. 北京:环境科学出版社, 1988, 136

33. 王光华. 垃圾填埋选址中应注意的地质情况及建议. 环境保护, 1999, 9: 17~18
34. 周北海. 中国垃圾填埋场的问题及改善方法. 环境科学研究, 1998, 11 (3): 22~24
35. 王伟, 袁光钰. 我国的固体废物处理处置现状与发展. 环境科学, 1997, 18(2): 87~89
36. PETTS J. Incineration as a waste management option In: Hester R E, Harriaron R M N, Eds. Waste Incineration and the Environment. Bath Press, 1994, 108
37. 冯立斌, 张衍国. 城市生活垃圾焚烧中的气体污染与防治. 环境保护, 1999, 2: 16~18
38. Haug R T. Compost Engineering: Principles and Practices. Ann Arbor Science Publishers Inc., Ann Arbor, MI, 1980
39. Stephen C Schwarz, Calvin R Brunner. Energy and Resource Recovery From Waste, 1983
40. 高吉喜. 城市垃圾生态工程处理及在我国的运用前景. 环境科学研究, 1994, 7 (4): 59~61
41. 田润浓. 城市生活垃圾的处理. 环境导报, 1990, 1: 23~25
42. 雍毅, 龙炳清, 孙倩云等. 城市生活垃圾堆肥技术与市场的协同发展. 四川环境, 1999, 18 (4): 22~24
43. 李国学. 用水芹菜种子发芽特性评价污泥堆肥的腐熟度和生理毒性. 中国农业大学学报, 1999b, 4: 109~116
44. 张益. 我国生活垃圾处理技术的现状和展望. 环境卫生工程, 2000, 8(2): 52~56
45. Toshihiko Matsuto et al. Residential Solid Waste Generation and Recycling in The U.S.A and Japan. Waste Management and Research, 1990, 8
46. 韩怀芬, 金漫彤, 迟春娟, 袁细宁. 适合我国国情的城市生活垃圾处理方法. 环境污染与防治, 2000, 22(6): 40~41
47. 陈海滨, 陶华, 冯其林等. 我国城市垃圾处理现状研究. 武汉城市建设学院学报, 1997, 14 (3): 40~44
48. 冯明谦. 城市生活垃圾处理现状及发展趋势. 环境卫生工程, 1999, 7 (4): 145~147
49. 高宗辉. 城市生活垃圾处理方法评述. 四川建筑, 2002, 22 (3): 82~83
50. 李国刚, 曹杰山, 汪志国. 我国城市生活垃圾处理处置的现状与问题. 环境保护, 2002, 4: 35~38
51. 李正华, 张全国. 城市生活垃圾处理处置及对策. 资源节约和综合利用, 2000, 12 (4): 29~32
52. 王琪. 我国城市生活垃圾处理现状与存在的问题. 环境经济杂志, 2005, 10 (22): 23~29
53. 李红, 高平. 城市生活垃圾污染危害防治及利用. 黑龙江环境通报, 2005, 5 (29): 81~82
54. 逢磊, 倪桂才, 闫光绪. 城市生活垃圾的危害及污染综合防治对策. 环境科学动态, 2004, 2: 15~16
55. 单习章. 城市垃圾污染防治对策探讨. 上海环境科学, 1999, 18 (5): 98~99
56. 白庆中, 钟丽锦. 城市生活垃圾处理技术及发展方向. 21 世纪【中国城市垃圾问题对策研讨会论文集】2000, 11: 224~237
57. 李晶, 华璐, 王学江. 国内外城市生活垃圾处理的分析与比较. 首都师范大学学报(自然科学版), 2004, 25 (3): 73~79
58. 管建春. 城市生活垃圾焚烧处理技术现状. 能源工程, 1999, (3): 15~18
59. 徐文龙. 发达国家城市垃圾处理技术现状与分析. 21 世纪【中国城市垃圾问题对策研讨会论文集】2000, 11: 110~128
60. 聂永丰. 我国生活垃圾处理技术现状及发展方向探讨. 环境经济杂志, 1999, (22): 30~35
61. 刘盛萍, 蔡敬民, 吴克, 金杰. 城市生活垃圾处理现状及对策探讨. 合肥学院学报(自然科学版), 2005, 15 (4): 53~57
62. 褚孔基, 辜祖谈. 城市生活垃圾处理现状及问题分析. 四川环境, 2000, 19 (3): 23~26
63. 高光, 董雅文, 金浩波. 城市生活垃圾处理与对策研究. 城市环境与城市生态, 2000, 13 (2):



39~41

64. 何东升, 张洁敏, 石燎然等.宁波市城区生活垃圾处置现状及对策.环境卫生工程, 2004, 12 (1): 45~48
65. 高永新.天津市生活垃圾收运车辆亏载问题探讨.环境卫生工程, 2000, 10 (1): 39~41
66. 吴克, 蔡敬民, 于志敏等.合肥市城市生活垃圾管理现状和采取措施.环境卫生工程, 2005, 13 (3): 4~6
67. 刘京媛, 徐海云.我国城市生活垃圾分类收集与收费方式探讨.环境卫生工程, 2004, 12 (1): 23~27
68. 段丽杰, 盛连喜, 王志平.长春市生活垃圾处理现状分析与对策探讨.环境卫生工程, 2004, 12 (3): 68~70
69. 高发车.济南市城市生活垃圾综合治理对策的探讨.环境卫生工程, 2002, 10 (3): 133~135
70. 赵吉, 孙卫国, 杨加利等.呼和浩特市城市生活垃圾组成及特性分析.内蒙古大学学报(自然科学版), 2005, 36 (1): 100~103
71. 王海岩, 李雪驼, 都绎瑛等.大连市生活垃圾分类收集探讨.环境保护科学, 2001, 27 (1): 27~29
72. Blook D.University and company team up for composting and recycling. Biocycle,1999,40(6):26~28
73. Border D.Batch tunnel composting in Europe.Biocycle,1998,10:60~62
74. Stentiford E.Composting:Right or Wrong?.Wastes Manag,1998,Jan:20~21
75. 北京市统计年鉴.1992~2001
76. 周翠红, 路迈西, 吴文伟, 白茹.北京市城市生活垃圾产量预测.中国矿业大学学报, 2003, 32 (2): 169~172
77. 郭广赛, 陆正明, 石峰.城市生活垃圾综合处置系统的选择.上海环境科学, 2001, 1: 37~40
78. 杨永乐.上海生活垃圾资源化产业的发展探讨.上海环境科学, 2001, 8: 384~385
79. 胡秀仁.城市生活垃圾处理方式的思考.上海环境科学, 2001, 3: 41~43
80. 何德文, 金艳, 柴立元等.国内大中城市生活垃圾产生量与成分的影响因素分析.环境卫生工程, 2005, 13 (4): 7~10
81. 吴文伟.北京市垃圾人均日产量分析及预测.环境卫生工程, 1998, 6 (4): 141~143
82. He Dewen,Chai Liyuan.Research on Reutilization Measures of MSW in Domestic Cities. Proceedings of 1st national symposium on pollution control and resource reuse[R].2004
83. 勾红英, 黄涛, 袁鹰.生活垃圾的分类收集与城市可持续发展.四川建筑, 2005, 25 (4): 15~16
84. 吴文伟.城市生活垃圾资源化[M].北京: 科学出版社, 2003
85. 北京市市政管理委员会, 北京市城市生活垃圾分类指导手册, 2006
86. 北京市垃圾渣土管理处年度报告.2004年.
87. 徐文龙, 章菁, 张健等.关于垃圾堆肥的作用及工艺优化的探讨—堆肥中氧、温度和湿度的控制.环境卫生工程, 2006, 24 (2): 50~56
88. 北京市垃圾渣土管理处年度报告.2005年.
89. 北京市垃圾渣土管理处年度报告.2003年.
90. 北京市统计年鉴.2005年.
91. 南京农业大学主编.土壤农化分析[M].北京:农业出版社.2000
92. 鲍士旦.土壤农化分析(第三版)[M].北京:中国农业出版社.2000
93. Allen V Baker. Composition and uses of compost. In:Tack E Rechcial,Herbert C Mackinnon, eds. Agriculture uses of By-products and Waste. American chemical society,1997. 140~162
94. Riffaldi R,Levi-Minzi R,Pera A,Bertoldi de M. Evaluation of compost maturity by means of

- chemical and microbial analyses[J]. *Waste Management and Research*,1986,4:387~396
95. USEPA. Compost of municipal wastewater sludge mixed with rice hulls[J]. *Soil Sci. and Plant Nutr.*,1981,27(4):477~486
96. 陈世和,张所明.城市垃圾堆肥管理与工艺[M].上海:复旦大学出版社,1990
97. Nakasaki K,Yaguchii H,Sasaki Y,Kubota H. Effect of pH control on composting of garbage[J]. *Waste Management & Research*,1993,11:117~125
98. Stevenson F J 著. 夏荣基译.腐殖质化学[M].北京:农业大学出版社,1994
99. Golueke C G. Principles of biological resource recovery[J]. *Biocycle*,1981,22:36~40
100. Morel T L,Colin F,Germon J C,Godin,et al. Methods for the evaluation of the maturity of municipal MSW compost. In:Gasser J K R,Elsevier,eds. *Composting of Agriculture and other wastes*. Applied Science publishers,London & New York.,1985. 56~72
101. Hirai M F,Chanyasak V,Kubota H. A standard measurement for maturity. *Biocycle*,1983,Nov/Dec:54~56
102. Hoitink H A J,Kuter G A. Effects of compost in growth on soilborne pathogens. In:Chen Y,Avnimelech Y,Eds. *The Role of Organic Matter in Modern Agriculture*. Martinus Nijhoff Publ., the Netherlands,1986. 289~306
103. Chefetz B,Hatcher P G,Hadar Y, chen Y. Chemical and biological characterization of organic matter during composting of municipal solid waste[J]. *J. Environ. Qual.*,1996,25:776~785
104. Hirai M F,Chanyasak V,Kubota H. A standard measurement for maturity. *Biocycle* , 1983,Nov/Dec:54~56
105. Baziramakenga R,Simard R R. Low molecular weight aliphatic acid contents of composted manures. *J. Environ. Qual.*,1998,27:557~561
106. Psarianos K M. Direction of ventilation in composting wastewater sludge[J]. *J. of water pollution Control*,1982,54:111
107. Sesay A A,Lasaridi K E,Stentiford E I,Budd T. Controlled composting of paper pulp sludge using the aerated static pile method[J]. *Compost Science and Utilization*,1997,5(1): 82~96
108. 邱瑞宗.以粒径分布、碳氮比、固态氮为树皮堆肥腐熟度指标的探讨[J].台湾:中华农业化学杂志.1991,29(4):445~448
109. 王敦球,潘盛.模糊综合评价法在评价堆肥腐熟度中的应用.农业环境科学学报,2005,24(增刊):212~215
110. 钱学玲,孙义,李道棠.模糊综合评价法判断堆肥腐熟度研究.上海环境科学,200120285~89
111. 王丰春,田新珊.城市垃圾处理方法综述[J]. 电力环境保护, 2003, 19 (1): 46~48
112. 黄昌熊. 城市垃圾处理: 放错了地方的资源[J]. 中国环境科学, 2003, 8: 13~15
113. 北京市市政管理委员会.北京市垃圾污染控制技术适用性研究, 2002
114. 李国学,周立祥,李彦明.固体废物处理与资源化[M].北京:中国环境科学出版社.2005
115. 潘修疆,何晶晶,吕凡,邵立明. pH 值与乙酸对易腐有机垃圾水解过程的抑制.环境化学, 2006, 25 (4): 449~453
116. 北京市市政管理委员会,北京市“十一五”时期环卫专业规划, 2006

## 致 谢

在读期间，得到了导师李国学教授的精心指导。李老师治学严谨，学识渊博，思想深邃，视野雄阔，为我营造了一种良好的精神氛围。“授人以鱼不如授人以渔”，置身其间，耳濡目染，潜移默化，使我不仅接受了全新的思想观念，领会了基本的思考方式，掌握了通用的研究方法，而且还明白了许多待人接物与为人处世的道理。其严以律己、宽以待人的崇高风范，朴实无华、平易近人的人格魅力与无微不至、感人至深的人文关怀，令人如沐春风，倍感温馨。一股暖意细水长流，源自内心而又淌遍全身，我把对导师的所有感谢之情化作一道虔诚的祝福：愿导师合家欢乐、一生平安！

感谢我同门的兄弟姐妹！你们不仅在实验中给了我许多帮助，而且那些开朗的笑容、热情的话语和乐观的生活态度带给我许多快乐和鼓励！。谢谢你们，我亲爱的师兄！师弟！师姐！师妹！

感谢我的父亲、母亲！古人云：“羊跪乳，鸦反哺。”今后我将竭尽所能，加倍补偿这份一辈子也还不清的深情。

最后，我要向我的妻子表达我心中无法言传的谢意！是你无怨无悔，用脆弱的双肩肩负起沉重的负担；是你任劳任怨，用纤细的双手操持着繁琐的家务；是你尽心尽力，用虔诚的孝心呵护着年迈的父母；是你有情有义，用温馨的语言慰藉着奋斗的丈夫。我为有这样的妻子而骄傲，我为有这样的内子而自豪。取妻若此，夫复何求？

时光如水，日月如梭，诗情画意中的学术之旅将结束。它短暂而充实，轻松而又惬意，犹如人生旅途划过的一颗璀璨靓丽的流星。无论怎样的不舍，却不得不面临分离。惟有掩卷长叹：“天下无不散之宴席！”

“长风破浪会有时，直挂云帆济沧海。”这是我少年时最喜欢的诗句。就用这话作为这篇论文的一个结尾，也作为这一段生活结束的告白。希望自己能够记取少年时的梦想，永不放弃！

## 作者简介

作者姓名: 李彦富      性别: 男      出生日期: 1973年12月30日      籍贯: 黑龙江  
 最后学历: 大学本科      毕业院校: 中国农业大学资源与环境学院  
 主要经历:

1993, 9—1997, 7      北京轻工业学院(现为北京工商大学)机械工程系工学学士;  
 1997, 7—至今      北京市垃圾渣土管理处 生活垃圾处理技术的研究  
 2002, 9      被聘为工程师  
 2004, 9月—10      瑞典 学习“固体废物管理”

获奖情况:

2000—2005,      连续六次被评为先进工作者和优秀党员。

发表过的文章:

1. 李彦富,李玉春,董卫江.生活垃圾堆肥处理技术发展的几点思考.中国资源综合利用.2006, 24(10): 14~17
2. 李彦富,董卫江.生活垃圾焚烧炉技术探析.城市管理与科技.2007, 9(2): 47~50
3. 李玉春,李彦富,董卫江.浅析垃圾处理设施建设和运营中应注意的若干问题.中国资源综合利用.2007, 25(1): 23~26
4. 李玉春,李彦富,荣波.北京市生活垃圾堆肥化现状及存在问题分析.环境卫生工程.2005, 13(4): 24~28
5. 李玉春,李彦富,王艳.关于提高南宫堆肥厂垃圾堆肥销售量的报告.第二届城市固体废物管理与处理技术国际研讨会.北京 2003, 中国城市环境卫生协会
6. 李玉春,李彦富,董卫江.浅谈意大利垃圾管理技术及政策.城市管理与科技.2006, 8(4): 163~165
7. 李国学,李玉春,李彦富.固体废物堆肥化及堆肥添加剂研究进展.农业环境科学学报.2003, 22(2): 252~256
8. 李彦富,王艳,李玉春.北京市南城垃圾处理策略.城市垃圾处理技术.2003, 19(2): 21~23
9. 卫潘明,李彦富.北京市垃圾分类收集系统浅谈.环境卫生工程.2001,9(2):72~73

参与制定 2 项地方标准:

主要制定完成了北京市地方标准-《生活垃圾堆肥厂运行管理规范》(DB11/T272-2005)  
 主要制定完成了北京市地方标准-《医疗废物焚烧厂运行管理规范》(审批中)

参与编写了《北京市市容环境卫生标准汇编》.化学工业出版社.2005