城市固体废物渗滤液处理与处置

王宝贞　王　琳　主编

化学工业出版社
环境科学与工程出版中心
·北 京·

需要全本请访问 www.ertongbook.com

（京）新登字 039 号

图书在版编目（CIP）数据

城市固体废物渗滤液处理与处置/王宝贞，王琳主编．
北京：化学工业出版社，2004.11
ISBN 7-5025-6254-0

Ⅰ.城… Ⅱ.①王…②王… Ⅲ.①城市-固体废物-废物处理 Ⅳ.X705

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2004）第 109834 号

城市固体废物渗滤液处理与处置
王宝贞 王琳 主编
责任编辑：董 琳
文字编辑：丁建华
责任校对：王素芹
封面设计：蒋艳君
*
化学工业出版社
环境科学与工程出版中心 出版发行
（北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029）
发行电话：（010）64982530
http://www.cip.com.cn
*
新华书店北京发行所经销
北京云浩印刷有限责任公司印刷
三河市东柳装订厂装订
开本 787mm×1092mm 1/16 印张 21½ 字数 533 千字
2005 年 1 月第 1 版 2005 年 1 月北京第 1 次印刷
ISBN 7-5025-6254-0/X·551
定 价：48.00 元

版权所有 违者必究
该书如有缺页、倒页、脱页者，本社发行部负责退换

《城市固体废物渗滤液处理与处置》

编 写 人 员

主　编　王宝贞　王　琳

副主编　刘　硕　李　军　沈耀良

其他编写人员

王春荣　刘研萍　缪　佳　王建玲

常　颖　王　黛　王承武　王　进

计　冰　王　丽　蒋铁峰　王　正

前　言

在城市固体废物（垃圾）处理和处置中，无论是国内还是国外，尤其是国土面积较大的国家或地区，大都以卫生填埋为主，而采用焚烧和堆肥处理方法的较少。当然有些国家如日本，由于土地资源缺乏而多采用焚烧处理法，然后再将焚烧的灰渣或灰渣的玻璃熔块予以填埋。总之，无论是垃圾的直接填埋，或将垃圾首先予以分拣（如纸、塑料、玻璃、木材等）作为资源回收后将剩余的垃圾填埋，还是将垃圾首先焚烧然后将其灰渣予以填埋，其最后的处理方法大都是填埋。而在垃圾填埋中，主要产生两种反应产物：填埋气体（生物气）和渗滤液。前者经过去除水分、硫化氢等净化处理后，可就地用燃气发电机发电同时并入电网利用，也可直接作燃气利用。而渗滤液是一种含有多种污染物（包括有毒有害污染物）的高浓度废水，如果不加以处理或者处理不当，就会造成对周围环境，尤其是附近地下水和土壤的严重污染，因此应当认真对待。国内外在垃圾渗滤液处理方面做了大量的研究和工程实践，获得了丰富的经验。

我国正处在经济高速发展阶段，相应城市化在迅速发展，人民的生活水平在不断提高，城市固体废物也在不断增多，致使许多城市的垃圾填埋场不断地扩建和新建，以适应及时处理垃圾的需求。在垃圾填埋场的运行管理中最棘手的难题，就是垃圾渗滤液的污染和治理。目前我国一些垃圾填埋场已经建造了一批渗滤液处理设施，有的运行良好，有的则不够有效。总之仍处于初期探索阶段，今后需要不断地加以改进和完善。

本书的目的是，一方面总结我们试验研究的经验；另一方面归纳国内外有关垃圾渗滤液处理和处置的先进技术和经验，为水污染治理（尤其是渗滤液处理）领域的研究、教学、设计、工程技术和管理人员提供一些信息以供参考。本书着重介绍了垃圾渗滤液在性质上的与其他废水截然不同的特征：其成分和性质随填埋年龄变化，从年轻渗滤液易于生物降解到老龄渗滤液难以生物降解，必须相应地采用不同的工艺进行处理。为此，本书主要介绍了适于不同年龄渗滤液的处理技术，如能有效处理年轻和中等填埋年龄渗滤液的生物处理工艺、适于处理老龄填埋场渗滤液的反渗透和高级氧化处理工艺。此外，还对能够加速垃圾填埋场稳定化、增强填埋气产生和利用、能进行渗滤液自身处理或最后减少渗滤液排放量和处理量的渗滤液在填埋场中的就地循环处理技术，以及经济、节能和有效处理渗滤液的塘-湿地处理系统做了较多的阐述。希望本书的出版，能对我国的垃圾填埋场渗滤液的治理有所帮助。

非常感谢韩德民先生对本书撰写的大力支持，并提供有关盘管式反渗透（DT-RO）的技术资料，使本书在这方面大为充实。

本书难免存在失误和不妥之处，诚恳希望批评指正。联系 E-mail：王宝贞　baozhen@public.hr.hl.cn；王琳　lwang@mail.ouc.edu.cn。

编者

于哈尔滨、青岛，2004 年 10 月

目　　录

第 1 章　垃圾渗滤液的成分和性质 …… 1
1.1　城市垃圾的组成及垃圾填埋场的分类 …… 1
1.1.1　城市垃圾的组成及其变化趋势 …… 1
1.1.2　垃圾填埋场的分类 …… 2
1.2　垃圾渗滤液的来源及形成过程 …… 3
1.2.1　垃圾渗滤液的来源 …… 3
1.2.2　垃圾渗滤液的产生量 …… 3
1.2.3　垃圾填埋场中废弃物的降解过程 …… 4
1.2.4　垃圾填埋场中污染物的溶出分析 …… 4
1.2.5　垃圾渗滤液中污染物的衰减速率规律 …… 5
1.3　垃圾渗滤液成分和性质的评价 …… 6
1.3.1　垃圾渗滤液水质评价 …… 6
1.3.2　垃圾渗滤液的特性 …… 7
1.4　影响垃圾渗滤液成分和性质的因素 …… 9
1.4.1　垃圾成分对渗滤液性质的影响 …… 9
1.4.2　填埋场结构对渗滤液性质的影响 …… 10
1.4.3　垃圾填埋方法对渗滤液水质的影响 …… 11
1.4.4　垃圾填埋场年龄对渗滤液性质的影响 …… 11
1.4.5　降雨及雨水径流对渗滤液的影响 …… 17
1.5　国内外垃圾填埋场中渗滤液性质实例分析 …… 19
1.5.1　国内垃圾填埋场渗滤液的性质 …… 19
1.5.2　国外垃圾填埋场渗滤液的性质 …… 27
1.5.3　国内外垃圾填埋场渗滤液的成分一览 …… 30
参考文献 …… 32

第 2 章　垃圾渗滤液对地下水和土壤的污染 …… 34
2.1　垃圾渗滤液对地下水的污染 …… 34
2.1.1　垃圾渗滤液对地下水的危害 …… 34
2.1.2　受污染地下水的污染物成分和含量 …… 35
2.1.3　渗滤液下渗污染地下水的影响因素 …… 35
2.1.4　地下水的防护措施 …… 37
2.1.5　地下水的污染评价 …… 39
2.1.6　水文地质特性减轻渗滤液对地下水污染的影响 …… 44
2.2　渗滤液对地下水污染的理论模型 …… 46
2.2.1　1992 年模型——渗滤液渗透模型及其实践证明 …… 46

需要全本请访问 www.ertongbook.com

2.2.2 1994 年模型——带 VOC 相分离的渗滤液渗透模型及其实践证明 …… 46
2.2.3 1995 年模型——通过垃圾填埋场气体对流而实现 VOC 迁移的模型及其实践证明 …… 46
2.3 垃圾渗滤液对土壤的污染 …… 49
2.3.1 北京郊区某垃圾填埋场周围土壤的变化 …… 49
2.3.2 哈尔滨城市垃圾渗滤液对周围土壤的污染 …… 51
2.3.3 上海浦东黄浦江畔某生活垃圾填埋场对周围土壤的污染 …… 51
2.3.4 西安市江村沟垃圾填埋场对周围土壤的污染 …… 52
2.3.5 深圳盐田垃圾填埋场对周围土壤的污染 …… 53
2.3.6 克罗地亚扎格列布市城市垃圾填埋场污染物对其下部土壤的影响 …… 55
参考文献 …… 60

第 3 章 垃圾渗滤液的就地循环处理技术 …… 61
3.1 垃圾渗滤液就地循环处理技术概述 …… 61
3.1.1 垃圾渗滤液就地循环处理基本原理 …… 61
3.1.2 垃圾渗滤液循环处理的优点 …… 61
3.1.3 垃圾渗滤液循环对城市固体废物填埋场运行特性的影响 …… 62
3.1.4 垃圾渗滤液循环在模拟的填埋槽中对城市固体废物处理的影响 …… 66
3.2 垃圾渗滤液循环处理系统 …… 75
3.2.1 生物反应器技术 …… 75
3.2.2 循环式准好氧填埋技术 …… 94
3.2.3 Evapox 工艺：通过生物气的回收和回用处理渗滤液 …… 94
3.2.4 Evapox 工艺所产生的渗滤液浓缩液的循环回流 …… 99
3.3 垃圾渗滤液循环系统的设计和运行因素及分析方法 …… 101
3.3.1 设计和运行因素 …… 101
3.3.2 作用于内衬层上的水力水头 …… 102
3.3.3 废弃物的吸收能力和孔隙压力的增加 …… 102
3.3.4 投加构筑物的能力 …… 102
3.3.5 分析步骤 …… 102
3.4 渗滤液循环模型及应用验证 …… 106
3.4.1 渗滤液循环填埋场渗滤液循环路线的数学模型及应用验证 …… 106
3.4.2 渗滤液循环填埋场水动力学模型 …… 114
3.5 垃圾渗滤液循环处理应用实例 …… 118
3.5.1 加拿大 Keele Valley 垃圾填埋场的渗滤液处理 …… 118
3.5.2 渗滤液循环——全美城市固体废物土地填埋的运行经验一览 …… 123
参考文献 …… 125

第 4 章 垃圾渗滤液的生物处理技术 …… 128
4.1 好氧生物处理技术 …… 129
4.1.1 活性污泥法 …… 129

4.1.2 生物膜法 …… 130
4.1.3 优化好氧生物处理系统 …… 133
4.2 厌氧生物处理 …… 138
4.2.1 厌氧生物处理技术的发展 …… 138
4.2.2 厌氧生物处理的优点 …… 139
4.2.3 典型厌氧反应器及其应用 …… 139
4.3 厌氧（缺氧）-好氧生物处理 …… 156
4.3.1 厌氧（缺氧）-好氧生物处理工艺 …… 156
4.3.2 组合式处理系统 …… 159
4.3.3 低温条件下对城市垃圾渗滤液进行厌氧预处理的硝化过程 …… 179
4.3.4 固体废物填埋场渗滤液的生物处理——在反硝化过程中细菌群落的变化 … 188
参考文献 …… 193

第 5 章 垃圾渗滤液的反渗透处理技术 …… 196
5.1 膜技术概述 …… 196
5.1.1 膜技术的性能参数 …… 196
5.1.2 膜技术的基本理论 …… 199
5.1.3 膜污染 …… 203
5.2 反渗透分离技术概述 …… 208
5.2.1 反渗透过程 …… 208
5.2.2 反渗透的基本公式 …… 209
5.2.3 影响膜性能的因素 …… 209
5.2.4 反渗透的分离机理及分离规律 …… 210
5.2.5 决定反渗透膜渗流量的主要因素 …… 211
5.2.6 RO 系统的 NDP 计算 …… 213
5.3 反渗透膜组件的类型及其运行方式 …… 214
5.3.1 反渗透膜组件的类型 …… 214
5.3.2 德国 GWT 公司处理垃圾渗滤液的螺旋卷式膜成套设备 …… 215
5.3.3 反渗透膜组件的运行方式 …… 215
5.4 反渗透技术在垃圾渗滤液净化处理中的应用 …… 217
5.4.1 反渗透技术在垃圾渗滤液净化处理中的发展 …… 217
5.4.2 高压反渗透净化处理工艺 …… 217
5.4.3 纳滤膜净化处理工艺 …… 218
5.4.4 组合膜工艺 …… 219
5.5 反渗透浓缩液的处理 …… 220
5.5.1 反渗透浓缩液蒸发和烘干处理 …… 220
5.5.2 浓缩液的回灌处理 …… 220
5.5.3 浓缩液的其他处理方法 …… 221
5.6 盘管式反渗透垃圾渗滤液处理系统 …… 221
5.6.1 DT-RO 系统的原理 …… 222

5.6.2 DT-RO 垃圾渗滤液处理系统的构成及工艺流程 …… 223
5.6.3 DT-RO 系统的特点 …… 224
5.6.4 DT-RO 系统的操作界面 …… 225
5.6.5 DT 膜片的清洗和更换方法 …… 225
5.6.6 DT-RO 系统的影响因素 …… 226
5.6.7 DT-RO 系统处理垃圾渗滤液的示范试验 …… 227
5.7 盘管式反渗透系统工程应用实例 …… 232
5.7.1 德国 Ihlenberg 渗滤液 DT-RO 处理厂 …… 232
5.7.2 DT-RO 系统在中国处理垃圾渗滤液的试验研究 …… 235
5.7.3 DT-RO 系统在日本 Yachiyo 县垃圾填埋场渗滤液处理中的应用 …… 237
5.7.4 DT-RO 系统在纽约 Broome 县垃圾填埋场渗滤液处理中的应用 …… 241
参考文献 …… 246

第 6 章 垃圾渗滤液的高级氧化处理技术 …… 249
6.1 高级氧化处理技术概述 …… 249
6.1.1 高级氧化技术的发展 …… 249
6.1.2 渗滤液处理中常用高级氧化技术的基本原理 …… 249
6.1.3 高级氧化工艺的特点 …… 262
6.2 采用臭氧处理垃圾渗滤液的高级氧化工艺 …… 264
6.2.1 以臭氧为主的预氧化对提高生物降解性的作用 …… 264
6.2.2 固定床催化臭氧氧化法 …… 268
6.2.3 撞击式臭氧反应器 CHEMOX 工艺废水处理 …… 271
6.2.4 臭氧-活性污泥联用处理垃圾渗滤液的试验研究 …… 273
6.3 Fenton 法处理垃圾渗滤液 …… 276
6.3.1 Fenton 法在垃圾渗滤液预处理中的应用 …… 276
6.3.2 电子-Fenton 氧化与 SBR 的复合处理工艺 …… 276
6.3.3 Fenton 混凝反应对渗滤液中有机物的去除 …… 280
6.3.4 Fenton 法处理垃圾渗滤液的中试试验 …… 283
6.4 光催化氧化法在垃圾渗滤液处理中的应用 …… 285
6.4.1 光催化法深度处理垃圾渗滤液的影响因素 …… 285
6.4.2 利用薄膜光照反应器去除垃圾渗滤液的 TOC 和降解其中的污染物 …… 288
6.4.3 UV/H_2O_2 光化学法处理渗滤液 …… 293
6.5 垃圾渗滤液的电子辐射处理 …… 295
6.5.1 分子量分布和水溶性腐殖质的分析 …… 296
6.5.2 渗滤液和配制的有机溶液的电子束辐射处理 …… 296
6.5.3 原生渗滤液的生物降解性 …… 296
6.5.4 EB 辐射的反应特性 …… 297
6.5.5 pH 和剂量对 EB 辐射效率的影响 …… 298
6.5.6 渗滤液经活性污泥法和 EB 辐射后 MWD 的变化 …… 299
6.5.7 渗滤液经生物处理和 EB 辐射处理后 AHS 含量的变化 …… 300

6.6 活性炭-H_2O_2 催化氧化处理垃圾渗滤液 …… 300
6.6.1 渗滤液水质 …… 300
6.6.2 活性炭用量对处理效果的影响 …… 301
6.6.3 H_2O_2 用量对处理效果的影响 …… 301
6.6.4 pH 对 COD 和色度去除率的影响 …… 301
6.6.5 最佳条件下的出水水质 …… 301
参考文献 …… 301

第 7 章 垃圾渗滤液的塘-人工湿地联合处理技术 …… 305
7.1 垃圾渗滤液塘和人工湿地处理系统的应用现状 …… 305
7.1.1 塘处理系统 …… 305
7.1.2 人工湿地处理系统 …… 306
7.2 渗滤液人工湿地处理系统应用研究 …… 307
7.2.1 斯洛文尼亚 Dragonja 填埋场渗滤液人工湿地处理系统 …… 307
7.2.2 英国 Bedfordshire 郡 Silsoe 垃圾填埋场渗滤液土地处理系统 …… 310
7.2.3 美国明尼苏达州坎布里奇市 Isanti-Chisago 填埋场的渗滤液人工湿地处理系统 …… 315
7.3 渗滤液的厌氧-兼性塘处理系统 …… 316
7.3.1 Tre Monti 垃圾填埋场概况 …… 316
7.3.2 取样和分析方法 …… 317
7.3.3 水力平衡 …… 317
7.3.4 渗滤液的性质 …… 318
7.3.5 污染物在塘系统中的去除效率 …… 320
7.3.6 垃圾渗滤液污染潜势的评价 …… 321
7.3.7 结论 …… 322
7.4 垃圾渗滤液的塘-人工湿地联合处理系统 …… 322
7.4.1 塘-人工湿地联合处理工艺在挪威 Esval 垃圾填埋场的应用 …… 323
7.4.2 美国佛罗里达州 Escambia 市 Perdido 填埋场渗滤液塘-人工湿地联合处理系统 …… 326
7.4.3 渗滤液处理的塘-人工湿地联合处理系统优化设计和运行的考虑事项 …… 330
参考文献 …… 332

第 1 章　垃圾渗滤液的成分和性质

填埋作为一种城市固体废物（垃圾）处理方式已被国内外广泛应用，在我国目前有90％左右的城市固体废物是用填埋法处理的[1]。在城市垃圾（MSW）填埋过程中，由于压实和微生物的分解作用，垃圾中所含的污染物将随水分溶出，并与降雨、径流等一起形成垃圾渗滤液（浸出液）。渗滤液是一种污染很强的高浓度有机废水，其成分主要由垃圾种类和垃圾成分所决定，并随垃圾填埋场的“年龄”而变化。以往垃圾简单填埋处理所产生的渗滤液主要是依靠下层土地来净化，但随时间的延长和地质构造对污染物去除容量的有限性，渗滤液会对地下水、地表水及垃圾填埋场周围环境造成污染，使地表水体缺氧、水质恶化、富营养化，威胁饮用水和工农业用水水源，使地下水质污染而丧失利用价值。有机污染物进入食物链将直接威胁人类健康[2,3]。有资料显示[4]，至 1997 年美国共有 18500 座填埋场，几乎有一半对水体产生了污染。我国兰州东盆地雁滩水源地因垃圾渗滤液污染而废弃，西盆地马滩水源地部分水井报废。澳门与珠海市交界处的茂盛围因澳门垃圾渗滤液污染，使当地河流鱼虾绝迹、农田减产等。为了防止垃圾渗滤液污染水体，美、英国等国家对垃圾填埋提出了严格的技术要求[5]。我国也早在 1989 年颁布了《城市生活垃圾卫生填埋技术标准》（GJJ 17—88），1997 年颁布了《生活垃圾填埋污染控制标准》（GB 16889—1997），对垃圾渗滤液的排放极限值提出了要求[6]。因此，现代意义的垃圾卫生填埋处理已发展成底部密封型结构，或底部和四周都密封的结构，从而防止了渗滤液的流出和地下水的渗入，同时对渗滤液进行收集和处理，有效地保证了环境的安全。

垃圾渗滤液处理难度大，实现其经济有效处理是垃圾填埋处理技术中的一大难题，也是一个研究热点。为给垃圾渗滤液的处理提供可靠的理论依据，并指导处理工艺和技术参数的确定，防止垃圾渗滤液污染的加剧，首先要对渗滤液的危害、成分和性质有全面的了解。本章将对垃圾卫生填埋场渗滤液的来源、产生量、组成成分、水质特征、影响因素以及不同地区垃圾填埋场渗滤液特性进行调查研究和综合介绍。

1.1　城市垃圾的组成及垃圾填埋场的分类

随着现代化城市的迅速发展，城市垃圾已成为困扰城市的严重问题。据统计，目前我国城市垃圾年产量已超过 1.4 亿吨，且每年以 8％～10％的速度递增，人均日产垃圾量已超过 1kg，接近工业发达国家的水平[7,8]。

城市垃圾也称城市固体废弃物，它是指城市居民日常生活产生和丢弃的生活垃圾（包括有机物、无机物和危险品如干电池、荧光灯管等）、与人们生活有关的厨房有机垃圾（又称厨房剩余废物）、卫生间废弃物、居室清扫废物，以及公共场所垃圾，环卫部门道路清扫废物及部分建筑垃圾、工业垃圾等的总称。

1.1.1　城市垃圾的组成及其变化趋势

城市垃圾主要分为五类[9]。①生活垃圾。生活垃圾中包括食品垃圾和普通垃圾。食品垃圾是指人们在买卖、储藏、加工、食用各种食品的过程中所产生的垃圾。这类垃圾腐烂性

强、分解速度快，并会散发恶臭。普通垃圾包括废弃的纸制品、废塑料、破布及各种纺织品、废橡胶、破旧皮革制品、废木材及木制品、碎玻璃、废金属制品和尘土等。生活垃圾的组分见表 1-1，生活垃圾的物理性质见表 1-2[10]。②建筑垃圾。建筑垃圾是在老旧建筑物拆除和新建筑物兴建施工中产生的废弃物，包括泥土、石块、混凝土块、碎砖、废木材、废管道及电器废料等。这类垃圾一般由建设单位自行处理，但也有相当数量的建筑垃圾进入城市垃圾中。③工业垃圾。包括在工业生产过程中产生的废物、废渣。④危险垃圾或称有毒有害垃圾。包括干电池、日光灯管、温度计等各种来源于化工、制药以及医院和科研机构等的化学和生物危险品，易燃易爆物品以及含放射性物的废物。这类垃圾一般不能混入普通垃圾中，应另建有毒有害处理处置站进行单独处理和处置。⑤清扫垃圾。绿色植物残骸如草坪除草、树木剪枝、落叶、纸品、塑料制品和尘土等。

表 1-1　生活垃圾的组分/%

有机物							无机物				
动物	植物	纸张	塑料橡胶	织物	竹木	合计	玻璃	金属	灰土	砖瓦陶瓷	合计
1.9	43.1	2.6	5.7	2.0	0.7	55.6	2.5	0.4	40.0	1.5	44.4

表 1-2　生活垃圾的物理性质

含水量/%	压实密度/(t/m³)	可燃物/%	灰分/%	应用基低位发热值/(kJ/kg)
47.00	0.72	22.23	28.67	28.36

我国城市垃圾在产量迅速增加的同时，垃圾构成也相应地发生了很大变化。我国城市生活垃圾构成有以下变化趋势：①有机物增加；②可燃物增多；③可回收利用物增多；④可利用价值增大。

1.1.2　垃圾填埋场的分类

城市垃圾的处理方法有焚烧、堆肥和填埋等。其中垃圾卫生填埋法由于成本低、技术相对简单、处理迅速，是目前国内外应用最广泛的垃圾处置方式。我国城市垃圾处理中 90% 以上采用填埋法[1]。

根据所收集垃圾种类的不同，把垃圾填埋场分成如下的几类[11]：城市垃圾填埋场；乡村垃圾填埋场；工业垃圾填埋场和联合处置垃圾填埋场。其各自的特点如下。

(1) 城市垃圾填埋场　体积超过 100000m³ 的垃圾填埋场，且垃圾收进量高，包括城市生活垃圾（30%～50%）、焚烧灰渣（10%～30%）、城市污水处理厂产生的脱水剩余污泥（10%～20%）和破碎材料（20%～50%）。

(2) 乡村垃圾填埋场　体积较小的垃圾填埋场（小于 50000m³），主要有乡村生活垃圾（20%～30%）、破碎材料（30%～40%）和惰性材料（30%～50%）。

(3) 工业垃圾填埋场　主要收集石棉（10%～15%）、工业废渣（5%～10%）、焚烧灰渣（15%～20%）、污染的土壤（5%～10%）、各种工业废水处理中产生的脱水污泥（40%～50%）的垃圾填埋场。

(4) 联合处置垃圾填埋场　它们主要位于城郊，其组成中除了有生活垃圾以外，还含有工业垃圾和有害垃圾成分（2%～10%）。技术特征与城市垃圾场相同。

垃圾种类和成分决定着渗滤液的成分，因此了解垃圾的组成可以预测渗滤液的成分。表

需要全本请访问 www.ertongbook.com

1-3 为垃圾填埋场中主要污染物的成分。

表 1-3 垃圾填埋场中主要污染物成分

垃 圾 种 类	pH	COD	BOD_5	NH_3-N	SS	Fe，Mn	色度	*E. coli*	蒸发残物	臭气	重金属
一般废弃物、有机物、可生物降解的废物	√	√	√	√			√	√		√	√
燃渣、无机物的物化分解物						√					
厨余、燃渣	√	√	√		√		√	√	√	√	√
覆盖及周围土壤					√	√					

注：COD—化学需氧量；BOD_5—5d 内排水所消耗的生化需氧量；SS—悬浮固体（排水污染因素）；*E. coli*—大肠杆菌。

1.2 垃圾渗滤液的来源及形成过程

1.2.1 垃圾渗滤液的来源

垃圾渗滤液的产生受诸多因素影响，不仅水量变化大，而且变化无规律性。垃圾渗滤液的产生来自以下五个方面。

① 降水的渗入。降水包括降雨和降雪，降雨的淋溶作用是渗滤液产生的主要来源。

② 外部地表水的流入。包括地表径流和地表灌溉。

③ 地下水的渗入。当填埋场内渗滤液水位低于场外地下水水位，并没有设置防渗系统时，地下水就有可能渗入填埋场内。

④ 垃圾本身含有的水分。这包括垃圾本身携带的水分以及从大气和雨水中的吸附量。当垃圾含水为 47%时，每吨（t）垃圾可产生 0.0722t 渗滤液[2]。

⑤ 垃圾填埋后，微生物的厌氧分解产生的水。垃圾中的有机组分在填埋场内分解时会产生水分[12]。

1.2.2 垃圾渗滤液的产生量

渗滤液的产生量受诸多因素的影响，如降水量、蒸发量、地面流失、地下水渗入、垃圾的特性、地下层结构、表层覆土和下层排水设施情况等[12]。

① 降水量和蒸发量是影响渗滤液产生的重要因素，这可以从当地的气象资料来获得。

② 填埋场表面的坡度很重要，在平缓的地面上，水易于集结，因而渗滤液产量大，而在较陡的地面上，水容易流失，使进入垃圾填埋层中的水量减少。垃圾填埋场的最终覆土层一般做成中心高、四周低的拱形，保持 1%～2%的坡度，这样可使部分降雨沿地表流走。但当表面坡度大于 8%左右时，表面径流就有可能侵蚀垃圾堆的顶部覆土层，使填埋场暴露，因此，表面坡度不能过大以防表面径流侵蚀。

③ 填埋场表面的最终覆土层上长有植物，通过根系吸收水分，通过叶面蒸发作用减少渗滤液产生量。

④ 地下水的渗透，要根据场内渗滤液水位和场外地下水位来定，对于防渗措施良好的填埋场，可以不考虑渗滤液的渗出和外部地下水的渗入。

渗滤液产生量波动较大，但对于同一地区填埋场，其单位面积的年平均产生量是在一定范围内变化的。

1.2.3 垃圾填埋场中废弃物的降解过程

在垃圾填埋场中废弃物的降解主要是微生物作用的结果。垃圾气体与渗滤液这两种产物也与微生物的活性相关。对大多数城市垃圾填埋场的调查研究证明，填埋废物的稳定要依次经历 5 个阶段，而且从填埋场产生的渗滤液和生物气的产率和性质随各个阶段而不同，这反映了在填埋场内发生的微生物参与降解的过程。固体废物降解所经历的过程说明如下[13]。

阶段 1：最初调节阶段

这一阶段是填埋场内固体废物的放置和水分积累的过程。在达到能够为有活性的微生物群落提供足够的水分之前，可观测到有一个适应阶段（或是最初的滞留时期）。为了创造适宜的生化降解条件，填埋废物在成分和性质方面发生了初步的变化。

阶段 2：过渡阶段

在过渡阶段，有时运来和填埋的废物超过了该填埋场的容量，导致出现填埋废物中的氧气被消耗殆尽，从而发生从好氧往厌氧环境的转化。由于氧向硝酸盐和硫酸盐传递电子受体以及氧被二氧化碳取代而逐渐形成还原条件，在这一阶段的最后，渗滤液中可测出可计量的 COD 和挥发性有机酸（VOA）。

阶段 3：产酸阶段

在这一阶段中，填埋的固体废物的连续水解以及随后（或者同时进行的）微生物降解可生物降解的有机组分，导致产生高浓度的中间产物——挥发性有机酸。经常观测到 pH 降低，随之而来的是一些金属成分的溶出。这一阶段的主要特征是，由产酸菌构成的活性微生物体的增长以及底物和营养物质的快速消耗。

阶段 4：产甲烷阶段

在这一阶段，甲烷菌将挥发性有机酸代谢并转化为甲烷和二氧化碳，硫酸盐和硝酸盐分别被还原为硫化物和氨氮。pH 有所上升，重碳酸盐能对 pH 值的变化有所缓冲，保障了甲烷菌的增殖。一些重金属通过络合和化学沉淀而去除。

阶段 5：成熟阶段

在垃圾填埋最后的稳定阶段，可利用的营养物和底物数量都大为减少，限制微生物的活性，使其进入相对的休眠状态，生物气的产量急剧下降。慢慢地可以观测到氧气和氧化产物重新出现。但是，难降解有机组分的缓慢降解可能持续很长时间并产生腐殖质类物质。

在不同的阶段，垃圾渗滤液的成分变化相当大。如果不能很好地了解垃圾渗滤液中成分的化学变化和从产乙酸阶段到产甲烷阶段的时间范围，就很难设计出适宜的垃圾渗滤液处理系统[14]。

1.2.4 垃圾填埋场中污染物的溶出分析

垃圾中污染物的溶出是在厌氧微生物的作用下实现的。垃圾填埋层中厌氧微生物的作用特性与渗滤液的水质变化有紧密的联系。事实上，上述诸多影响渗滤液水质特性的因素中，大部分是通过对微生物生长特性的影响而体现的。由图 1-1 可见，直接与污染物溶出率有关的因素有垃圾特性、微生物生长特性、大气降水等，间接影响因素有垃圾填埋场温度、垃圾填埋深度、垃圾初期含水率等[15]。

垃圾填埋场本身是一个以微生物为中介体并受多种运行和环境条件影响的动态生物转化系统。Reinhart 等[13]于 1996 年报道了他们对垃圾稳定化过程中渗滤液中污染物溶出及生物

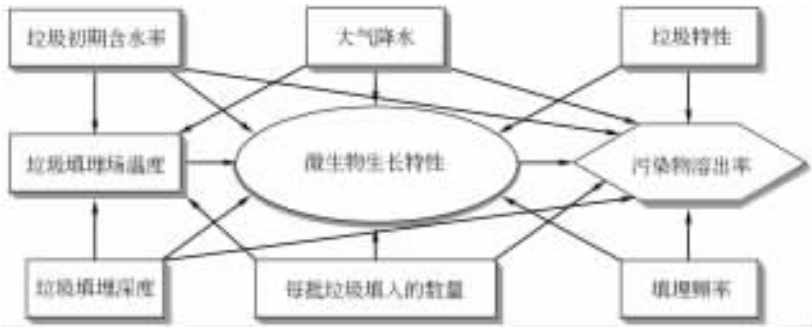


图 1-1　诸因素对垃圾中污染物溶出率的影响

转化的中试和生产性试验结果。在单批填埋的垃圾稳定化过程中，为易生物降解有机成分的溶出和转化为无机成分和难降解有机物的溶出和转化提供了良好的生物化学环境，由微生物作用所发生的氢（H_2）的转化，亚硝酸盐（NO_2^-）、硝酸盐（NO_3^-）以及硫酸盐的还原等，又为垃圾中其他组分的溶出或转化提供了有利的物理化学环境。实际上，这些转化过程与城市和工业废水的厌氧处理过程类似。而在垃圾填埋场内，由于大量的序批式基质的供给和较长的停留时间，其生物转化过程的特征更为明显。图 1-2 反映了在垃圾稳定化过程中，各污染物的溶出和有关指标的变化规律。

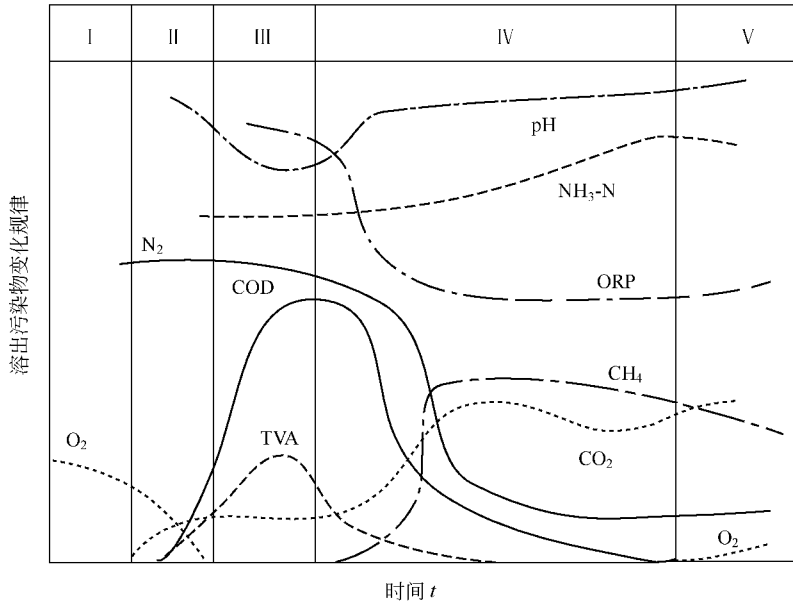


图 1-2　渗滤液中污染物随垃圾稳定化过程中各阶段的变化规律

ORP—氧化-还原电位；TVA—总挥发性有机酸

1.2.5　垃圾渗滤液中污染物的衰减速率规律

垃圾渗滤液中污染物浓度与填埋时间的关系可以用微生物代谢一级反应速率方程来描述。表 1-4 中的公式可用来预测垃圾填埋场渗滤液中污染物衰减速率规律。其中Ⅰ类为 James 等建立的垃圾填埋场渗滤液中 COD、氯化物一级反应速率方程；Ⅱ类为刘疆鹰等根据上海市老港垃圾填埋场现场试验建立的 COD、NH_3-N 一级反应速率方程[16,17]。

表 1-4　国内外垃圾填埋场渗滤液中污染物衰减速率规律

类别	一级反应速率方程	类别	一级反应速率方程
Ⅰ类	$\rho(\mathrm{COD})=89500\times10^{-0.0454t}$ $\rho(\mathrm{Cl^-})=4200\times10^{-0.050t}$	Ⅱ类	$\rho(\mathrm{COD})=9104.88\times0.99844^{t}$(145d≤$t$≤1227d) $\rho(\mathrm{COD})=1340\times0.99936^{t-A}$($A$=1168d,$t$≥1227d) $\rho(\mathrm{NH_3\text{-}N})=824.029\times0.9995^{t}$($t$≥500d)

1.3　垃圾渗滤液成分和性质的评价

尽管各填埋场的渗滤液不尽相同，但是总的来说，垃圾填埋场渗滤液的主要成分及其性质主要有以下几个方面。

1.3.1　垃圾渗滤液水质评价

（1）垃圾渗滤液的物理性质——色与嗅　渗滤液均具有很高的色度，其外观多呈茶色、暗褐色或黑色，色度可达 2000～4000 倍（稀释倍数），垃圾腐败臭味极其明显。

（2）pH　垃圾填埋初期，渗滤液的 pH 在 6～7 之间，随着填埋时间的推移和填埋场的稳定，pH 可提高至 7～8。

（3）BOD_5 值　随时间的变化及填埋场微生物的活动增强，渗滤液中 BOD_5 浓度发生变化。一般变化规律是垃圾填埋后的 6 个月至 2.5 年间渗滤液 BOD_5 逐步增至高峰，此时 BOD_5 多以溶解性为主，此后 BOD_5 的浓度开始下降，至 6～15 年填埋场完全稳定时为止，此时，BOD_5 浓度保持在某一低值范围内（≤100mg/L），且波动很小。因此，渗滤液 BOD_5 值的变化过程实质是填埋场稳定化的过程。通过定期测定渗滤液的 BOD_5 值，根据 BOD_5 值随时间的变化规律，可判断填埋场的稳定程度。

（4）COD 值　与 BOD_5 相似，但是随着填埋时间的推移，COD 值的降低较 BOD_5 值缓慢得多。

（5）BOD_5/COD　有机物种类的变化造成 BOD_5/COD 比值的变化。填埋初期 BOD_5/COD 比值较高，可达 0.5 以上，但随着时间的推移，由于 BOD_5 和 COD 的降低速率和幅度不同，BOD_5 急速下降而 COD 下降较缓慢，因此该比值逐渐下降。当填埋场完全稳定之后，该值最终在某一范围内（≤0.1），而且波动极小。

（6）溶解性固体总量　垃圾渗滤液中含有较高浓度的总溶解性固体。这些溶解性固体在渗滤液中的浓度通常随填埋时间而变化。填埋初期渗滤液溶解固体总量高，且有相当高的钠、钙、氯化物、硫酸盐等。一般在填埋后 6 个月至 2.5 年达到高峰值，此后随填埋时间的增加，无机物浓度下降，直至达到最终稳定。

（7）氨氮　垃圾渗滤液 NH_3-N 浓度含量高，是由于含氮可生化有机组分的厌氧水解和发酵所致，因 pH 接近中性值，它主要以 NH_3-N 形态存在于渗滤液中，很少以氨气形式释放，或以游离氨形式存在。

由于目前多采用厌氧填埋技术，因而渗滤液中的 NH_3-N 浓度在填埋场进入产甲烷阶段后不断上升，在达到高峰值后延续很长的时间并直至最后封场，甚至当垃圾填埋场稳定后仍可达到相当高的浓度（1000mg/L）[18]。Shiskowski 等[19]对加拿大 Burns Bog 垃圾填埋场渗滤液为期 160d 的研究表明，NH_3-N 浓度由 200mg/L 迅速增加至 1200mg/L，最高达 1500mg/L。此外，渗滤液中 NH_3-N 的含量常占总氮（TN）的 85%～90%。

渗滤液中高浓度的 NH_3-N 及其随时间的变化，不仅加重了其对受纳水体的污染程度，

也给其处理工艺的选择带来了困难，增加了复杂性。“中老年”填埋场渗滤液中，具有高浓度的 NH_3-N，这是垃圾渗滤液的重要水质特征之一，也是导致其处理难度增大的一个重要原因。

垃圾渗滤液中高浓度的 NH_3-N 含量，造成了过低的 C/N 比值，这也给其处理工艺的选择带来了困难。过高的 NH_3-N 需要进行脱氮处理，而过低的 C/N 比值则对常规的生物处理有抑制作用，而且因有机碳源缺乏，难以进行有效的反硝化。如广州市老虎窿垃圾填埋场渗滤液的 C/N 比仅为 4.0，而大田山填埋场渗滤液的 C/N 比更低，仅为 2.0。

（8）磷　垃圾渗滤液中的磷元素总是缺乏的，例如在北美几个垃圾填埋场，垃圾渗滤液中的 BOD_5/TP（BOD_5/总磷）都大于 300，此值与微生物生长所需要的碳磷比 100∶1 相差甚远。渗滤液中磷含量很小，特别是溶解性磷酸盐浓度更低。渗滤液中溶解性磷酸盐的含量主要由变磷灰石 $Ca_5OH(PO_4)_3$ 的产量控制，因此渗滤液中的溶解性磷酸盐含量受到钙离子浓度或碱度水平的影响，导致生物处理中的缺磷问题。在采用厌氧（ABR）-好氧工艺处理渗滤液与城市污水的混合废水的过程中发现，当渗滤液与城市污水的体积混合比达4∶6～4∶5时，仍发现了缺磷问题[20]。

（9）重金属　对于只填埋生活垃圾的填埋场，由于在垃圾填埋之前，一般已经多次挑拣，且生活垃圾中金属的溶出率低，在水溶液中为 0.05%～1.80%，在微酸性溶液中为 0.5%～5.0%。一般渗滤液中重金属含量较其他污染物低得多。

渗滤液中所含的重金属主要有：镉（Cd）、镍（Ni）、锌（Zn）、铜（Cu）、铬（Cr）和铅（Pb）等。在中等浓度的城市垃圾填埋场渗滤液中，这些重金属的浓度一般在下列范围：Cd 2～20μg/L，Ni 100～400μg/L，Zn 500～2000μg/L，Cu 20～100μg/L，Cr 100～500μg/L和 Pb 50～200μg/L，但在工业垃圾和生活垃圾混合填埋时，重金属溶出数量会明显增加。但由于固体废弃物的性质和填埋场所采用的技术不同，以及对渗滤液取样方法的不同，所得到的值会有一定的偏差[21]。我国各城市垃圾填埋场渗滤液中重金属含量比较见表 1-5。

表 1-5　各城市垃圾填埋场渗滤液中重金属含量比较/(mg/kg)

项　目	广州市老虎窿垃圾填埋场		香港 Jordan Velley 垃圾填埋场	香港 Gin Drinkers Bay 垃圾填埋场	杭州市天子岭垃圾填埋场
	运行期	关闭后			
Cd	0.454	0.002	<0.01	<0.01	0.012
Pb	49.98	0.061	0.04	0.6	0.196
Cu	0.224	0.019	0.02	0.04	0.207
Zn	0.445	0.07	1	0.21	0.462
Cr	0.588	0.185	0.12	0.22	0.049
Mn	13.012	3.611	未检出	0.91	未测
As	0.505	0.157	未检出	0.06	未测

通过对垃圾填埋场中新鲜垃圾和陈腐垃圾进行分析（见表 1-6），得出陈腐垃圾的重金属含量远高于新鲜垃圾，说明垃圾本身对重金属有较强的吸附能力[22]。

1.3.2　垃圾渗滤液的特性

通常，垃圾渗滤液中的有机物可分为 3 种：①低分子量的脂肪酸；②中等分子量的灰黄霉酸类物质；③高分子量的碳水化合物类物质、腐殖质类。渗滤液中的有机成分随填埋时间而变化。填埋初期，渗滤液中的有机物的可溶性有机碳约 90%是短链的可挥发性脂肪酸，其中以乙酸、丙酸和丁酸浓度最大。其次的成分是带有相对高密度的羟基和芳香族羟基的灰

表 1-6　新鲜垃圾、陈腐垃圾和垃圾渗滤液中重金属含量比较

项　目	新鲜垃圾		陈腐垃圾	垃圾渗滤液	
	含量/(mg/kg)	污染物总量/kg	含量/(mg/kg)	含量/(mg/L)	污染物累积量/kg
Cd	0.261	114.41	0.566	0.454①	248.45
Pb	48.16	21094.08	222.66	49.98①	27364.05
Cu	58.41	25584.89	229.43	0.224	122.42
Zn	107.15	46933.45	588.05	0.445	243.75
Cr	35.13	15387.82	57.19	0.588	321.88
Mn	257.10	112609.80	438.75	13.012	7123.85
As	28.13	12321.82	33.41	0.505	276.32

① 已确认受工业垃圾污染所致。

黄霉酸。随着填埋时间的增加，填埋场逐步趋于相对稳定，此时，渗滤液中挥发性脂肪酸含量减少，而灰黄霉酸和腐殖质类成分则增加。垃圾渗滤液的特性如下。

（1）有机污染物种类繁多，水质复杂　垃圾渗滤液中含有大量的有机物，含量较多的有烃类及其衍生物、酸酯类、醇酚类、酮醛类和酰胺类等。郑曼英等[22]对广州大田山垃圾渗滤液有机污染物的分析研究表明，渗滤液中含有主要有机物 77 种，其中有芳烃类 29 种，烷烃、烯烃类 18 种，酸类 8 种，酯类 5 种，醇、酚类 6 种，酮、醛类 4 种，酰胺类 2 种，其他 5 种。这 77 种有机物中，有可疑致癌物 1 种、辅致癌物 5 种，被列入我国环境优先污染物“黑名单”的有机物 5 种以上。上述 77 种有机化合物仅占该渗滤液中 COD 的 10%左右。张兰英等[23]采用 GC-MS-DS 联用技术测定出垃圾渗滤液中含有 93 种有机化合物，其中 22 种被列为我国和美国 EPA 环境优先控制污染物的黑名单。

美国环保局 1988 年公布了垃圾填埋场中检测到的 20 余种非甲烷类有毒有害挥发性有机化合物，如苯、二甲苯、含卤素化合物等，部分具有致癌作用，其浓度达 10^{-6}（ppm）级[24]。近年来，从渗滤液中还监测出含有致癌物卤代烃（AOX，为可吸附的有机卤化物）。工业部门使用的垃圾填埋场，其渗滤液中还会含有有毒有机物和无机物，水质更为复杂。

（2）污染物浓度高和变化范围大　垃圾渗滤液的这一特性是其他污水所无法比拟的，其中的 BOD_5 和 COD 浓度最高可达每升几万毫克，主要是在酸性发酵阶段产生，pH 达到或略低于 7，此时 BOD_5 与 COD 比值为 0.5～0.6。一般而言，COD、BOD_5、BOD_5/COD 随填埋场的“年龄”增长而降低，碱度则上升。表 1-7 所示为渗滤液中的污染物及其浓度变化范围[3]。

表 1-7　渗滤液中的污染物及其浓度变化范围

污 染 物	浓度范围	污 染 物	浓度范围	污 染 物	浓度范围
COD	100～90000	pH	5～8.6	Cu	0～9.9
BOD_5	40～73000	Cl^-	5～6420	Pb	0.002～2
TS	0～59200	SO_4^{2-}	1～1600	Mn	0.07～125
SS	10～7000	Ca^{2+}	23～7200	Zn	0.2～370
NH_3-N	6～10000	Fe	0.05～2820	TCr	0.01～8.7
NO_x^--N	0.2～124	Mg	17～1560	VFA	10～1702
TP	0～125	Cd	0.003～17	大肠菌群值/(cfu/L)	23000～(2.3×10^8)

注：除 pH 和大肠菌群值外，其他项目单位均为 mg/L；TS—总硫；TCr—总铬；VFA—挥发性脂肪酸。

需要全本请访问 www.ertongbook.com