

环境科学与工程进展丛书

污泥处理处置 技术及装置

徐 强 主 编 ●

张春敏 副主编 ●
赵丽君



化学工业出版社
环境科学与工程出版中心

环境科学与工程进展丛书

污泥处理处置技术及装置

徐 强 主 编

张春敏 赵丽君 副主编

化 学 工 业 出 版 社

环境科学与工程出版中心

· 北 京 ·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

污泥处理处置技术及装置/徐强主编. —北京: 化学工业出版社, 2003. 7
(环境科学与工程进展丛书)
ISBN 7-5025-4668-5

I. 污… II. 徐… III. ①城市-污泥处理-技术②城市-污泥处理-设备 IV. X703

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 059385 号

环境科学与工程进展丛书
污泥处理处置技术及装置

徐强 主编

张春敏 赵丽君 副主编

责任编辑: 管德存 刘兴春

责任校对: 陶燕华

封面设计: 蒋艳君

*

化学工业出版社 出版发行
环境科学与工程出版中心

(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

聚鑫印刷有限责任公司印刷

三河市延风装订厂装订

开本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 28 字数 702 千字

2003 年 8 月第 1 版 2003 年 8 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-4668-5/X·317

定 价: 60.00 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

出版者的话

环境保护是我国的基本国策之一，近年来呈蓬勃发展之势。而环境科学与工程有许多热点和重点领域更是国内众多学者关注的对象。如环境化学、污泥处理及资源化技术、污水处理新技术、污水回用技术、生物脱氮除磷技术、生物修复技术、垃圾处理与资源化、烟气脱硫脱硝技术等。政府部门、高等院校及科研设计单位均投入了大量人力、物力从事这些方面的研究与开发工作，并不断有新成果出现。为方便学者之间技术交流，及时推广新的研究成果和工程经验，化学工业出版社环境科学与工程出版中心组织国内一批高水平的专家、学者精心编写了这套“环境科学与工程进展”丛书。

本套丛书具有以下特点。

(1) 针对性 丛书每个分册都只针对某一特定专业领域或某项专门技术，汇集国内众多专家、学者的成果与经验，针对性强，便于读者对这一专题研究进展情况进行全方位了解和比较。

(2) 先进性 丛书每个分册原则上只收录2000年以后各个作者新的研究成果，技术内容比较先进，使读者能够及时了解某个专题的前沿技术及今后的发展趋势。

多年来，化学工业出版社一直把环保图书作为主要出书方向之一。2000年6月、2001年6月、2002年6月我社成功地在全国各大、中城市举办了三届化工版环保图书展，2003年6月我社将举办第四届化工版环保书展。本套丛书将有部分分册参展，希望能得到广大读者的认可，也希望广大读者对我社环保图书出版多提宝贵建议与意见。

化学工业出版社
环境科学与工程出版中心
2003.3

前 言

随着我国国民经济的高速发展，城市化步伐的不断加快及公众对环境质量的要求日益提高，环保意识不断增强。大量的污水处理厂不断建成投入运行，随之而来的城市污泥产量（包括排水管道、泵站及污水处理厂的污泥）越来越大。给水方面，我国特别是北方地区可用作饮用水的水源减少，许多城市采取长距离引水，以解决水资源短缺问题，致使原水成本上升，水厂中大量的生产弃水的回收与处理被提上了日程，自来水厂的污泥处理也十分紧迫。

党中央、国务院非常重视城市环境质量问题，把城市污水和垃圾的综合治理工作纳入了我国国民经济和社会发展“十五”计划纲要。而污泥是一种特殊的垃圾，如果不及时处理将造成严重的二次污染。在此种情况下，使广大工程技术人员及建设单位及时了解、掌握当前国内外污泥处理处置技术是十分必要的。可根据无害化、减量化和资源化的原则，提出城市污泥处理与处置的多途径发展设想。选择多元化综合处理方案，以达到经济合理地处置和利用污泥。可根据本地区新建水厂、污水处理厂的大小、工艺特点等因素采用对应的污泥处理处置方法，以达到最佳处理效果。

本书共收集 84 篇文章，内容涉及国内外污泥产生处理及处置分析、污水处理厂污泥处理处置技术介绍、污泥处理处置的最新科研成果；污泥稳定化问题、多级厌氧消化技术、微生物淋滤技术、好氧消化技术及污泥农用中重金属生物有效性的研究等，一些城市对污泥处理处置方法的设想、问题研究、探讨、污泥资源化探讨，一级加强污水处理厂污泥好氧发酵堆肥技术试验研究；污泥处理处置技术的全面介绍、各种处置方法介绍；污泥的堆肥化与土地利用及应用实例，特别介绍污泥资源利用生产高效有机复合肥的成套技术与装置等；国内外污泥深度脱水技术及国外各种干化处理设备、污泥干化的安全意识及危险防范、国内外一体化处理设备、脱水污泥料仓存储与输送、污泥脱水絮凝剂的应用、污泥及处理过程中臭味气体处理的试验研究、净化技术介绍及其他等。

本书为我国污泥处理处置方法、思路起到指导作用，具有极高的参考应用价值。

排水委员会秘书组在人员少、工作量大的情况下，克服重重困难，对书稿中出现的问题积极与作者联系，甚至与国外作者联系，力求完善，达到最佳效果，如有不妥之处，请多指正。

本书审稿工作由邱慎初、赵丽君、郑兴灿、张悦、徐强、贾旭原、张春敏完成，书稿组织工作由张春敏、赵琳、屈颖完成，编辑排版校核工作由张春敏、屈颖完成。

中国土木工程学会
水工业分会 排水委员会 秘书组

2003. 3

内 容 提 要

本书是“环境科学与工程进展”丛书的一个分册。全书分城市污泥处理处置综述、城市污泥处理处置科技新成果、城市污泥稳定化与资源化、城市污泥脱水、干燥与减量化4章，共收录了84篇优秀论文，比较全面地介绍了国内外在城市污泥处理处置领域的最新研究成果及工程应用实例，并反映了21世纪城市污泥处理处置领域的发展方向和趋势，具有较强的理论性、实践性和可操作性。

本书适于环境工程专业、科研、设计、操作、技术人员及规划管理人员参阅，也适于高等院校相关专业师生参考。

目 录

第一章 城市污泥处理处置综述	1
一、国内外污水处理厂污泥产生、处理及处置分析.....	1
二、污水处理厂污泥处理处置技术介绍.....	11
三、城市污水污泥的处理和处置方法问题研究.....	33
四、污泥处置技术与污泥规划中的多元化处置设想.....	37
五、上海市城市污泥处理与处置方法探讨.....	41
六、论市政污水污泥处理和处置.....	47
七、城市污水污泥处理与处置.....	56
八、污泥的处理和处置——欧洲一些高效工艺的回顾.....	62
九、污泥流化床焚烧技术的研究及应用.....	70
十、污水处理厂污泥最终处置探索.....	76
十一、炼油厂含油污泥现状及处理对策.....	79
十二、污泥常温和高温好氧消化工艺概述.....	85
十三、深圳特区污泥处置规划.....	90
十四、污水处理厂产生的硫化氢对周围环境的影响研究.....	97
十五、某城市排污河对周围环境的恶臭污染研究.....	101
第二章 城市污泥处理处置科技新成果	106
一、污泥稳定化处理与资源化技术生产性研究.....	106
二、城市污水污泥稳定问题及多级厌氧处理工艺研究.....	112
三、污泥洁净化与再生利用新技术——微生物淋滤技术.....	121
四、城市污水处理厂优化污泥处理系统的研究.....	128
五、苏州河支流（新泾港）底泥生态生物修复应用效果再现性试验.....	132
六、一种节能高效的污泥好氧消化工艺.....	142
七、消化污泥农用中重金属生物有效性的研究.....	147
八、剩余污泥细胞破壁技术初探.....	150
九、脱水污泥制备聚合物合成“木材”的研究.....	154
十、智能化高效低耗堆肥及其复合肥生产成套技术.....	159
十一、污水厂污泥快速干化焚烧及制肥新工艺.....	165
十二、城市污水处理中污泥的肥料化应用.....	168
十三、Densadeg 高密度澄清池在给污水污泥处理中的应用.....	171
十四、污泥深度脱水研究.....	174
十五、污泥的深度处理.....	177
十六、城市污水厂污泥处理的清洁生产.....	182
十七、细菌与真菌复合作用处理臭味气体的试验研究.....	186
十八、堆肥场致臭气体去除试验研究.....	190

十九、污水、污泥处理过程中恶臭控制技术·····	192
二十、污水处理厂除臭技术与工程化研究·····	203
二十一、污水处理厂气态污染物治理站离子净化技术·····	208
二十二、污水处理厂污泥除臭除毒与利用·····	211
二十三、日本污水处理设施脱臭技术简介·····	216
二十四、制药行业污水处理厂对周围环境的恶臭污染调查分析研究·····	220
二十五、北碚污水处理厂紫外光消毒系统选型及应用·····	223
第三章 城市污泥稳定化与资源化 ·····	227
一、城市污水处理厂污泥资源化的探讨·····	227
二、一级加强污水处理厂污泥好氧发酵堆肥技术的试验研究·····	231
三、污泥资源化利用及生产高效有机复合肥成套技术与装置·····	237
四、污水处理厂污泥好氧动态堆肥生产有机肥·····	246
五、我国城市污泥的堆肥化与土地利用·····	251
六、成功启动加拿大多伦多大型污泥处理厂选择恰当的技术将市政污水处理厂 污泥变成适宜销售的肥料·····	256
七、污泥与垃圾混合堆肥处理技术·····	266
八、利用城市污水厂污泥制造有机肥技术应用实践·····	269
九、厦门市污水处理二厂污泥处理运行实践·····	273
十、污泥制肥前景广阔——浅谈唐山市西郊污水处理厂污泥制肥工程·····	276
十一、利用堆肥技术处理石化污泥·····	280
十二、活性污泥法中污泥产率的计算·····	284
十三、污泥厌氧消化池工艺设计概述·····	286
十四、卵形消化池设计与施工·····	292
第四章 城市污泥脱水、干燥与减量化 ·····	299
一、介绍几种污泥干化技术·····	299
二、城市污水处理厂污泥浓缩工艺的应用与研究进展·····	304
三、污泥干化的安全意识及危险防范·····	309
四、污泥直接干燥系统·····	312
五、国产与进口卧螺离心机的技术差异分析·····	319
六、新一代污泥脱水(浓缩脱水一体)成套设备在给排水中的应用·····	324
七、结构设计对带式压滤机处理能力影响的探析·····	330
八、LWD430W—II型浓缩脱水一体化挤压型卧螺离心式污泥脱水机组·····	334
九、污泥离心脱水强化与压榨型卧螺离心机·····	338
十、污泥热处理技术·····	345
十一、转盘式干燥机在污泥干化上的应用·····	357
十二、脱水污泥料仓存储与输送·····	365
十三、污泥干化及处置 ESCHER WYSS (爱雪维斯) 流化床技术在欧洲国家的 应用实例·····	373
十四、意大利迪芬巴赫公司及其压滤机技术特点·····	374
十五、热泵技术干化污泥的设备·····	381

十六、贝亚雷斯离心机的独特设计及其用于市政污泥浓缩脱水的优点·····	386
十七、离心浓缩/脱水机选型参数初论·····	388
十八、Seepex——西派克污泥处理中的新生力量——用于环保领域的 西派克单螺杆泵·····	390
十九、耐驰过滤技术·····	393
二十、市政污泥后处理中的设备与技术·····	397
二十一、安德里茨污泥干化焚烧技术简介·····	404
二十二、沉降式卧螺离心机技术在城市污水处理厂污泥浓缩、脱水和浓缩、 脱水一体化工艺中的应用·····	413
二十三、阳离子聚丙烯酰胺微胶乳与污泥脱水·····	415
二十四、改性 F-1 型絮凝剂使用情况小结·····	419
二十五、水厂污泥处理的脱水设备·····	421
二十六、离心式污泥浓缩脱水一体机在自来水厂的应用·····	424
二十七、西洲水厂排泥水处理工程污泥脱水工艺及设备选型设计介绍·····	426
二十八、沼气及回转式烘干机在污泥烘干中的应用·····	430
二十九、深圳市南山污水处理厂生污泥脱水实践——首台国产大型 LWY520×1924-N 压榨式螺旋卸料离心沉降机的应用·····	433
三十、转筒式离心机在含油污泥处理中的应用·····	437

第一章 城市污泥处理处置综述

一、国内外污水处理厂污泥产生、处理及处置分析^①

1. 国内外污泥产生量

随着我国社会经济和城市化的发展,城市污水的产生及其数量在不断增长。目前,全国已建成并运转的城市污水处理厂427余座,年处理能力为 $113.6 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。根据有关预测,我国城市污水量在未来20年还会有较大增长,2010年污水排放量将达到 $440 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{d}$;2020年污水排放量将达到 $536 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

污泥是污水处理后的副产品,是一种由有机残片、细菌菌体、无机颗粒、胶体等组成的极其复杂的非均质体。污泥量通常占污水量的0.3%~0.5%(体积)或者约为污水处理量的1%~2%(质量);如果属于深度处理,污泥量会增加0.5~1倍。污水处理效率的提高,必然导致污泥数量的增加。目前我国污水处理量和处理率虽然不高(4.5%),但城市污水处理厂每年排放干污泥大约 $30 \times 10^4 \text{ t}$,而且还以每年大约10%的速度增长。

西方发达国家由于工业化进程早,经济实力雄厚,所以污水处理技术先进、处理程度较高。但是,自从1875年英国伦敦建立世界上第一个污水处理厂以来,污泥处理问题便成为市政管理的重要问题之一。随着城市人口的增长、市政服务设施的不断完善、污水处理技术的不断提高,欧、美等发达国家的污泥产量每年大约以5%~10%的速度增长。影响污泥产生的因素来自多方面:污水、污泥处理技术的应用和改善以及人口增长是导致污泥质和量同步增加的主要因素;另外一些环境政策的实施,如禁止污泥陆地填埋、对填埋容量的关注、执行填埋法令后封闭填埋场、禁止填埋场填埋庭院垃圾等政策以及污泥处置费用高昂、污泥产品市场需求等地方经济发展要求也促进了污泥利用的增加。美国各州以及联邦法令,尤其是503污泥法令自1991年的实施已经部分地鼓励了污泥的循环利用而不仅仅是污泥处置。

据美国环保署估算,1998年全美干污泥产量为 $6.9 \times 10^6 \text{ t}$ 。在过去的20年,美国人口和开展市政污水处理的人口数量皆得到显著增加,而且自从1972年政府颁布水净化条例以来,污泥量得到了快速的增加。可以预计,随着人口水平的持续增加,污泥的产量还会增加,而且污泥产量的年增长速率会超过市政所能提供污水处理服务人口的增长速率。1986~1996年期间,美国只经过1级处理的污水流量减少了4%,而经过二级或更高级处理的污水流量增加了2%。假设这种趋势发展下去,根据市政所能提供污水处理服务人口的增长和污水二次处理以及污泥产量的轻微改变进行预测,到2005年美国干污泥产量将达到 $7.6 \times 10^6 \text{ t}$;2010年将达到 $8.2 \times 10^6 \text{ t}$ 。这就是说,从1998年到2010年,污泥产量将增加19%。表1-1是1998年以后美国污泥产量和处理状况及预测。

1990年欧洲干污泥产量为 $11.07 \times 10^6 \text{ t}$,到1999年干污泥产量达 $17.46 \times 10^6 \text{ t}$ 。到2005年,欧洲将建立许多新污水处理厂,一些国家污泥产量将几乎增加300%,污泥管理将是一个严峻挑战,选择污泥处理处置方法也将会具有更大的经济、环境内涵。由于城市污水处理

^① 作者为中国农业大学生态环境系李季、北京大学环境学院吴为中。

要求的日益严格，欧洲城市污泥产量预计将增加 50%。表 1-2 为欧洲国家污水处理厂污泥的处理和预测。

表 1-1 美国污泥产量及其预测^①

污泥利用及处置		年份/年	1998	2000	2005	2010
		有益利用 (干污泥)/×10 ⁶ t	土地利用	2.8	3.1	3.4
	先进处理	0.8	0.9	1	1.1	
	其他有益利用	0.5	0.5	0.6	0.7	
	小计	4.1	4.5	5	5.7	
处置(百万吨) (干污泥)	地表处置/陆地填埋	1.2	1	0.8	1.0	
	焚烧	1.5	1.6	1.5	1.5	
	其他	0.1	0.1	0.1	0.1	
	小计	2.8	7.1	7.6	8.2	
总计/×10 ⁶ t		6.9	7.1	7.6	8.2	

① 资料来源 U. S. EPA. Biosolids Generation, Use, and Disposal in the United States. September, 1999.

表 1-2 欧洲国家污水处理厂污泥的处理和预测 (干泥) (单位: 10³t/a)

年份/年	处置	比利时	丹麦	德国	希腊	法国	爱尔兰	卢森堡	荷兰	奥地利	葡萄牙	芬兰	瑞典	英国	合计
1992	水体消纳						14							282	296
	循环利用	17	110	1018	1	402	4	5	134	63	38	87		472	2351
	填埋	34	25	846	65	131	16	4	177	58	75	63		130	1624
	焚烧		40	274		110			12	66				90	592
	其他	8		70			3		1	3	13			24	122
	合计	59	175	2208	66	643	37	9	324	190	126	150	243	998	5228
1995	水体消纳						15							267	282
	循环利用	22	120	1151	1	489	7	7	95	63	44	86	120	648	2853
	填埋	39	25	857	65	114	14	3	192	58	88	72	106	114	1747
	焚烧		40	411		161			56	66				110	844
	其他	17		93			4		23	3	15		11	19	185
	合计	78	185	2512	66	764	40	10	366	190	147	158	236	1158	5910
1998	水体消纳													240	240
	循环利用	33	125	1270	4	572	25	9	100	68	74	85		672	3037
	填埋	37	25	744	82	92	17	1	108	58	147	65		118	1494
	焚烧	11	50	558		214		3	150	66				144	1196
	其他	32		89			1		23	4	25			19	193
	合计	113	200	2661	86	878	43	13	381	196	246	150		1193	6160
2000	水体消纳														0
	循环利用	40	125	1334	6	640	65	9	110	68	104	90		1014	3605
	填埋	43	25	608	90	71	35	1	68	58	209	60		111	1379
	焚烧	11	50	732		269		3	200	66				326	1657

续表

年份/年	处置	比利时	丹麦	德国	希腊	法国	爱尔兰	卢森堡	荷兰	奥地利	葡萄牙	芬兰	瑞典	英国	合计
2000	其他	37		62					23	4	35			19	180
	合计	131	200	2736	96	980	100	13	401	196	348	150		1470	6821
2005	水体消纳														0
	循环利用	47	125	1391	7	765	84	9	110	68	108	115		1118	3947
	填埋	40	25	500	92		29	1	68	58	215	45		114	1187
	焚烧	14	50	838		407		4	200	65				332	1910
	其他	58		58					23	4	36			19	198
	合计	159	200	2787	99	1172	113	14	401	195	359	160		1583	7242

到 2005 年，欧洲 15 个成员国干污泥产量预计可能由 1992 年的 $660 \times 10^4 \text{t}$ 上升到至少 $940 \times 10^4 \text{t}$ 。欧委会希望：到 2005 年污泥农用比例上升 73%，达到污泥总产量的 53%；污泥焚烧比例达到总产量的 25%，比目前增加大约 300%；到 2005 年填埋数量比目前下降 24%。

2. 污泥对环境的影响

(1) 污泥有机养分及其土地利用的有效性

污泥中含有大量的 N、P、K、Ca 及有机质，而且 N、P 以有机态为主，同时污泥中还有许多植物所必需的微量元素，可以缓慢释放，具有长效性。因此，污泥是有用的生物资源，是很好的土壤改良剂和肥料。

表 1-3 是我国沈阳、杭州、北京、广州、天津、苏州、香港、深圳、太原、无锡、常州、常熟、昆明等城市 21 个污水处理厂污泥营养成分的调查统计结果。

表 1-3 我国 21 个污水处理厂污泥中营养物质成分调查统计结果 (单位：%)

项 目	有机质	TN	TP	TK
平均值	37.18	3.03	1.52	0.69
最大值	62.00	7.03	5.13	1.78
最小值	9.2	0.78	0.13	0.23
中 值	35.58	2.9	1.3	0.49

由表 1-3 说明，我国污泥的有机质平均含量为 37.18%；总氮、总磷、总钾平均含量分别为 3.03%、1.52%、0.69%，均超过国家堆肥需要的养分标准，所以污泥是很好的有机肥源。另外，表 1-3 还说明：不同地区污水处理厂污泥的养分含量相差很大，经济不发达地区（如太原污水处理厂）有机质含量较低，而经济发达地区（如北京、深圳等）污水处理厂污泥中有机质含量较高。各地城市污泥氮含量没有明显的规律性。南方城市污水处理厂污泥中磷含量普遍比北方污水处理厂高；同一地区城市污泥中钾的含量变化并不大。

由于受到来源和生产日期影响，污泥成分差异较大，这与我国不同地区生活水平和生活习惯有关。从长远来看，我国污水厂污泥中氮、磷的含量将随着脱氮脱磷等二级污水处理工艺的增加而增加，这将有利于污泥土地利用和堆肥处理。

我国城市污泥中有机物（VSS）含量约为 55%~60%，而欧、美等国可达 70%~80%（均指初次沉淀池污泥）。一般来说，新鲜污泥中有机物含量越高，消化分解的程度越高。污泥中有机养分和微量元素可以明显改变土壤理化性质，增加氮、磷、钾含量，改善土壤结构，促进团粒结构的形成，调节土壤 pH 值和阳离子交换量，降低土壤容重，增加土壤孔隙和透气性和田间持水量和保肥能力等；城市污泥还可以增加土壤根际微生物群落生物量和代谢强度、抑制腐烂和病原菌。污泥用作肥料，可以减少化肥施用量，从而减少农业成本和化肥对环境的污染。

（2）污泥对环境的污染

尽管污泥含有丰富的养分，但也含有大量病原菌、寄生虫（卵），铜、锌、铬、汞等重金属，盐类以及多氯联苯、二噁英、放射性核素等难降解的有毒有害物。这些物质对环境和人类以及动物健康有可能造成较大的危害。

a. 污泥盐分污染 污泥含盐量较高，会明显提高土壤电导率、破坏植物养分平衡、抑制植物对养分的吸收，甚至对植物根系造成直接的伤害，而且离子间的拮抗作用会加速有效养分的淋失。

b. 病原微生物 污水中的病原体（病原微生物和寄生虫）经过处理还会进入污泥。新鲜污泥中检测得到的病原体多达千种，其中危害较大的是寄生虫。Polan 和 Jones（1992）认为污泥中病原体对人类或动物的污染途径大致有 4 条：（a）直接与污泥接触；（b）通过食物链与污泥直接接触而感染；（c）水源被病原体污染；（d）病原体首先污染了土壤，然后污染水体。污泥农用引起的潜在疾病的流行，被认为主要与沙门氏菌和绦虫卵有关。

c. 氮磷等养分的污染 在降雨量较大地区的土质疏松土地上大量施用富含 N、P 等的污泥之后，当有机物分解速度大于植物对 N、P 的吸收速度时，N、P 等养分就有可能随水流失而进入地表水体造成水体的富营养化；进入地下引起地下水的污染。所以 N、P 等养分迁移对环境影响是一个需长期监测、研究的工作。

d. 有机物高聚物污染 城市污泥中主要的有苯、氯酚等。尽管目前国内外对城市污泥中有机污染物的研究并不多，但是一些国家对农用城市污泥中有机污染物的特征及其在农业环境中的行为、生态效应和调控措施等方面进行了一定的研究。西方发达国家对污泥中有机污染物的浓度进行了一定的限制，并对 PCBs、PCDD/Fs 等提出了一些限量建议，但是除对苯并 [a] 芘制定了控制标准外，我国还未能制定出较完善的城市污泥有机污染物限制标准。迄今为止的试验研究表明，通过根部有效地吸收和在植物中转移的二噁英/呋喃及 6 种重要的 PCB 衍生物的量很少，即使土壤中 PCDD/PCDF 含量很高，污泥过量施用也不会显示出这些有机污染物的有害毒性。

e. 重金属污染 在污水处理过程中，70%~90% 的重金属元素通过吸附或沉淀而转移到污泥中。一些重金属元素主要来源于工业排放的废水，如镉、铬等一些重金属来源于家庭生活的管道系统，如铜、锌等重金属。重金属是限制污泥大规模土地利用的重要因素，因为污泥施用于土壤后，重金属将积累于地表层。另外，重金属一般溶解度很小，性质较稳定、难去除，所以其潜在毒性易于在作物和动物以及人类中积累。

表 1-4 为我国沈阳、杭州、北京、广州、南京、西安、兰州、天津、苏州、香港、武汉、黄石、佛山、深圳、太原、重庆、无锡、苏州、常州、常熟、昆明、桂林、上海、山东、浙江、湖南等省、市 44 个城市污水处理厂污泥中重金属含量统计结果。

表 1-4 我国 44 个城市污水处理厂污泥中重金属含量统计结果 (单位: mg/kg)

项 目	Cd	Cu	Pb	Zn	Cr	Ni	Hg	As
平均值	3.03	338.98	164.09	789.82	261.15	87.80	5.11	44.52
最大值	24.10	3068.40	2400.00	4205.00	1411.80	467.60	46.00	560.00
最小值	0.10	0.20	4.13	0.95	3.70	1.10	0.12	0.19
中值	1.67	179.00	104.12	944.00	101.70	40.85	1.90	14.60
中国污泥标准(GB 4284)	5/20	250/500	300/1000	500/1000	600/1000	100/200	5/15	75/75

统计结果说明:我国城市重金属污染主要以 Zn 和 Cu 为主,其他重金属含量较低。我国城市大量使用镀锌管道是生活污水污泥中 Zn 含量较高的原因之一。一些城市的生活污水与工业污水混合处理,导致 Cr (皮革业污水)、Cd (电镀污水)、Pb (冶炼污水)、Hg (塑料行业污水)的含量较高。

3. 世界各国污泥处理处置方法

(1) 卫生填埋

卫生填埋操作相对简单,投资费用较小,处理费用较低,适应性强,但是其侵占土地严重,如果防渗技术不够将导致潜在的土壤污染和地下水污染。污泥卫生填埋始于 20 世纪 60 年代,到目前为止已经发展成为一项比较成熟的污泥处置技术。污泥填埋是欧洲特别是希腊、德国、法国在前几年应用最广的处置工艺。由于渗滤液对地下水的潜在污染和城市用地的减少等,对处理技术标准要求越来越高(例如德国从 2000 年起,要求填埋污泥的有机物含量小于 5%),许多国家和地区甚至坚决反对新建填埋场。1992 年欧盟大约 40%的污泥采用填埋处置,近年来污泥填埋处置所占比例越来越小,例如英国污泥填埋比例由 1980 年的 27%下降到 1995 年的 10%,预计到 2005 年将继续下降到 6%。

据 Biocycle 杂志的调查表明:2000 年美国大部分污泥被有效利用,21 个州的 50%以上的污泥被循环利用,4 个州的 50%以上的污泥被填埋,5 个州的 50%以上的污泥被焚烧。调查的 40 个州中,有 5 个州没有污泥陆地填埋处置,17 个州没有污泥焚烧处理。由此表明:美国的污泥主要处置方法是循环利用,而污泥填埋的比例正逐步下降,美国许多地区甚至已经禁止污泥土地填埋。据美国环保局估计,今后几十年内美国 6500 个填埋场将有 5000 个被关闭,这意味着填埋并不能最终避免环境污染,而只是延缓了环境污染产生的时间。

另外,自从 1996 年 10 月,英国对污泥陆地填埋处理征收一定的税收,结果污泥农用重新引起了人们的兴趣,因为它是一种经济可行的方法。

(2) 污泥农用

污泥农用投资少、能耗低、运行费用低,其中有机部分可转化成土壤改良剂成分,因此污泥土地利用被认为是最有发展潜力的一种处置方式。这种处置方式是把污泥应用于农田、菜地、果园、林地、草地、市政绿化、育苗基质及严重扰动的土地修复与重建等。科学合理地土地利用,可减少污泥带来的负面效应。林地和市政绿化的利用是一条很有发展前途的利用方式,因为它不易造成食物链的污染。污泥还可以用于严重扰动的土地,如矿场土地、建筑排废深坑、森林采伐场、垃圾填埋场、地表严重破坏区等需要复垦的土地。这些污泥利用方式减少了污泥对人类生活的潜在威胁,既处置了污泥又恢复了生态环境。

影响污泥农用的主要因素是重金属污染、病原体、难降解有机物及 N、P 的流失对地表水和地下水的污染。目前对重金属污染研究较多,主要集中在污泥农用后土壤耕作层重金属

的变化、作物各部位富集量、存在形态及其影响等。大量的研究表明：近十几年来，城市污泥中重金属含量呈下降趋势，只要严格控制污泥堆肥质量，合理施用，一般不会造成重金属污染。

为提高污泥农用效率、减少有害物的含量可采取将污泥制成有机-无机复合肥料，适当添加钾肥以补充肥料中钾的不足；另外，在经济政策上应当给予生产污泥复合肥的单位和个人以优惠。

污泥农用正在成为世界各国主要的污泥处置方法，如英、美、法等许多国家城市污泥的农用率在70%以上，有的高达80%以上。表1-5为1998年世界主要国家污泥产量和处置状况。

表 1-5 1998 年世界主要国家污泥产量和处置状况

国 家	产量(干污泥) /[$\times 10^6$ t(固体)/a]	处置方法/%			
		土地利用	陆地填埋	焚烧	其他
奥地利	320	13	56	31	0
比利时	75	31	56	9	4
丹麦	130	37	33	28	2
法国	700	50	50	0	0
德国(西德)	2500	25	63	12	0
希腊	15	3	97	0	0
爱尔兰	24	28	18	0	54
意大利	800	34	55	11	0
卢森堡	15	81	18	0	1
荷兰	282	44	53	3	0
葡萄牙	200	80	13	0	7
西班牙	280	10	50	10	30
瑞典	180	45	55	0	0
瑞士	215	50	30	20	0
英国(1991年)	1107	55	8	7	30
美国	6900	41	17	22	20
日本 ^①	171	9	35	55	1

①资料来源：赵丽君等，污泥处理与处置技术的进展，中国给水排水，2001，17（6）：23~25。

由表1-5可以看出：大部分欧洲国家的污泥以填埋为主；美国和英国的污泥以农用为主；日本的污泥则以焚烧为主；而我国污泥处理处置大部分以农用、简易填埋处理为主。

总之，污泥农用和陆地填埋是大多数国家污泥处置的两种最主要方法，农用和陆地填埋方案的选择很大程度上取决于各国政府有关的法律、法规和污染控制状况；同时也与国家的大小和农业发展情况有关。

近年来，随着污泥农用标准（如合成有机物和重金属含量）日益严格的趋势，许多国家，如德国、意大利、丹麦等污泥农用的比例不断降低，而污泥填埋的比例有增加的趋势。但也有一些国家，如美国、英国和日本等污泥农用的比例呈增加趋势，填埋呈减少趋势。

(3) 污泥焚烧

以焚烧为核心的处理方法是最彻底的污泥处理方法，它能将有机物全部碳化，杀死病原体，可最大限度地减少污泥体积；但是其缺点在于处理设施投资大，处理费用高，有机物焚烧会产生二噁英等剧毒物质。自 1962 年德国率先建议并开始运行了欧洲第一座污泥焚烧厂以来的 40 多年中，焚烧的污泥量大幅度增加。在国外，特别是西欧和日本已得到了广泛的应用，在日本，污泥焚烧处理已经占污泥处理总量的 60% 以上，欧盟也在 10% 以上。

为防治污泥焚烧产生二噁英等有害气体，要求焚烧温度高于 850℃。焚烧后产生的焚烧灰可以改良土壤、筑路、制砖瓦、陶瓷、混凝土填料等。此外，已经有一些公司正在开发将脱水污泥制成燃料用以发电的新技术；在国内由于其一次性投资和成本大、焚烧烟气需进一步处理等问题而一直未得到应用。

(4) 污泥干化和热处理

污泥干化能使污泥显著减容，体积可以减少为原来的 $\frac{1}{2}$ ~ $\frac{1}{3}$ ，产品稳定，无臭且无病原体；干化处理后的污泥产品用途多，可以用作肥料、土壤改良剂、替代能源等。早在 20 世纪 40 年代，日本和欧美就已经用直接加热鼓式干燥器来干燥污泥，经过几十年的发展，污泥干化技术的优点正逐步显现出来。

由于污泥热干燥技术要求和处理成本较高，管理较复杂，所以这项技术直到 20 世纪 80 年代末期瑞典等国家的成功应用之后才在西方发达国家推广。污泥低温热处理技术无害化和减量化彻底，其地位已经逐渐增强。研究表明：低温热解是能量净输出过程，成本低于直接焚烧。

(5) 污泥堆肥

堆肥化技术是国际上从 20 世纪 60 年代迅速发展起来的一项新兴生物处理技术。20 世纪 70 年代以后，由于污泥产生的环境问题和填埋技术的缺点日益突出，污泥堆肥技术引起了世界各国的广泛重视，并成为环保领域的一个研究热点，这时人们开始考虑利用堆肥化技术取代部分传统的物理化学方法。进入 20 世纪 80 年代之后，日本、韩国以及欧美一些国家相继研究开发出封闭式发酵系统，以机械方式进料、通风和排料，虽然设备投资较高，但是由于自动化程度高、周期短、日处理量大、污泥处理后质量稳定、容易有效利用，而且可以有效控制臭气和其他污染环境的因素，所以综合效应好。日本神户、大阪等地已经开发出多种发酵仓工艺系统。

各种堆肥工艺各有优、缺点，都在不断地完善和发展。美国 20 世纪 80 年代初开发了比较完善的 Beltsville 好氧堆肥法。污泥连续发酵工艺是目前国际上较为先进也是较为普遍使用的处理方法，已在美国、日本、欧洲广泛采用。在美国、德国、荷兰等发达国家，污泥堆肥大多由污水处理厂出资、国家资助并交专业公司承包产业化经营，污泥处理和处置按照市场经济规律运转，发展趋势良好。日本于 1954 年建立第一座污泥堆肥中心，到 20 世纪 90 年代末已建成了 35 座堆肥厂，许多大型的堆肥厂的发酵仓和生产线以及袋装产品很具规模，且机械化、自动化程度较高。美国 1973 年只有几家污泥堆肥厂，到目前为止美国已经建成数以百计的污泥堆肥厂。虽然国外将污泥堆肥处理后制成复合肥已经相当普遍，但是国内污泥堆肥的商品化生产正在发展中。我国的深圳、太原、石家庄、西安等地已经出现了污泥堆肥产品。

污泥循环利用主要当作肥料用于农业或林业，但是，对食品的清洁生产和人类无污染食

品消费的关注可能会增加对污泥处理问题的争论：一方面，公众将鼓励循环利用计划；而另一方面，对洁净、健康食品的需求将会增加对污泥利用的限制。

(6) 海洋倾倒

海洋倾倒操作简单，对于沿海城市来说其处理费用较低，但是，随着生态环境意识的加强，人们越来越多地关注污泥海洋倾倒对海洋生态环境可能存在的影响。美国于1988年已禁止污泥海洋倾倒，并于1991年全面加以禁止；日本对污泥的海洋投弃做了严格的规定；中国政府于1994年初接受3项国际协议，承诺于1994年2月20日起不在海上处置工业废物和污水污泥。海洋倾倒在英国尤其流行，因为与其他方法相比，其费用相当低，但是从1998年底，欧共体城市废水处理法令（91/271/EC）已经禁止其成员国向海洋倾倒污泥。

(7) 污泥处理处置费用分析

污泥处理及处置费用是昂贵的，约占全部基建费用的20%~50%，甚至为70%。在我国城市污水处理厂中，传统的污泥处理工艺处理费用约占污水处理厂总运行费用的20%~50%，其投资占污水处理厂总投资的30%~40%。

欧洲国家花在污泥管理方面的费用超过100亿欧元，其中15亿欧元花在污水处理厂污泥以及数目不详的类似污水污泥的工业污泥处理上。由于污泥农业利用难度的增加，所以有必要建设一些污泥焚烧厂，从而使处理费用升高3~4倍。

限制污泥农用的经济后果是相当大的，如果依靠限制的可供选择的处理方法，处理成本将由农用的75欧元/t上升到焚烧的400欧元/t。据德国的数据显示：污泥热处理费用将达到600欧元/t。因此，排除有问题的化合物可能是经济的解决办法。

总之，各国应当根据自己的地理位置、环境状况、经济实力、交通等因素来综合确定哪一种处理方法较为适合。

4. 世界污泥处理处置标准

制定污泥利用标准应当根据土地利用情况、取样深度以及土壤pH值等因素进行调整。欧、美国家根据各自具体情况制定了城市污泥土地利用技术标准。

英国的标准主要包括污泥中各项有毒有害物质、pH值指标、污泥无害化、卫生化、稳定化处理各项指标值、土地类型及其性质的测定、处理后污泥的土地使用范围。

美国联邦政府对城市污泥土地利用有严格的规定，在《有机固体废弃物（污泥部分）处置规定》中，将污泥分为A和B两大类：经脱水、高温堆肥无菌化处理后，各项有毒有害物质指标达到环境允许标准的为A类，可作为肥料、园林植土、生活垃圾填埋覆盖土等；经脱水或部分脱水简单处理的为B类污泥，只能林业用土，不直接用于改良粮食作物耕地。自从1992年以来美国没有污泥倾倒入海洋，这是符合1988年制定的《禁止污泥海洋倾倒公约》的，结果许多将污泥倾倒入海洋的城市与其他城市联手将污泥制成土壤调理剂和肥料，以便用于农业土地和庭院。但是，为了避免污泥的负面效应，对应用于土地的污泥中化学物质进行了一些限制，这些限制源于化学物质从修复的土壤向植物、动物和人类迁移的14条途径的冗长的风险评价。As、Cd、Pb、Hg和Se的浓度是为防止直接吸入污泥的儿童患病而制定的。对于这些元素，其他到达人类的途径和对动物和植物的所有影响都作为这些化学物质的浓度上限；对Cr、Cu、Ni、Zn的浓度限制是为防止其对作物的毒性而制定的。部分有机物的限制也加以考虑，因为这些物质已经被美国禁用或者被调查监测到已经超过了接受限。国内外污泥利用标准（最大施用量）如表1-6所列。