

污泥处理处置技术 与工程实例

张辰 主编 王国华 孙晓 副主编



化学工业出版社
环境·能源出版中心

污泥处理处置技术 与工程实例

张 辰 主编
王国华 孙晓 副主编



化学工业出版社
环境·能源出版中心

· 北京 ·

本书是在“上海市污泥处理处置关键技术研究与应用”的基础性研究背景下完成的，同时编辑整理了上海市政工程设计研究总院近年来完成的部分污泥处理处置工程实践，力求体现污泥处理处置的“循环经济理念、协调发展理念、分类处置理念、市场运作政府监控理念”。

本书可供我国污泥处理处置工作人员参考，也可供有关研究人员和技术人员学习参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

污泥处理处置技术与工程实例/张辰主编. —北京:
化学工业出版社, 2006.5
ISBN 7-5025-8714-4

I. 污… II. 张… III. 污泥处理-研究 IV. X703

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 051812 号

污泥处理处置技术与工程实例

张 辰 主编

王国华 孙晓 副主编

责任编辑: 董 琳

责任校对: 战河红

封面设计: 胡艳玮

*

化学工业出版社 出版发行
环境·能源出版中心
(北京市朝阳区惠新里3号 邮政编码 100029)
购书咨询: (010)64982530
(010)64918013
购书传真: (010)64982630
<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销
北京市振南印刷有限责任公司印刷
三河市宇新装订厂装订

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 16 $\frac{3}{4}$ 字数 475 千字
2006 年 7 月第 1 版 2006 年 7 月北京第 1 次印刷
ISBN 7-5025-8714-4
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

前 言

2004 年末全国城市 661 个，城市污水日处理能力达 660 万立方米/天，全国城市污水处理量 162 亿立方米，污水处理率 45.6%。表明各级政府在树立科学发展观，构建和谐社会方面下了很大的决心，推出了一系列强有力的举措。改善环境，提高水环境质量，截污治污建设污水处理厂是重要的举措。随着污水处理率的不断提高，污水处理量将逐年大幅度提高，而随之产生的大量污水污泥的出路成为各级政府和技术人员日益关注的焦点。

相对于污水处理技术的日益成熟，污泥处理处置技术在我国尚在起步阶段，存在基础数据不足、工艺技术路线众多，设计施工管理经验缺乏等现象。在上海市科委和上海市建委的大力支持下，上海市水务局牵头组织众多大专院校和科研院所开展“上海市污泥处理处置关键技术研究与应用”的基础性研究，希望寻求一条适合上海市的污泥处理处置途径。本书就是在这一背景下完成的，书中一些工艺技术的试验参数即来自于该研究课题，同时编辑整理了上海市政工程设计研究总院近年来完成的部分污泥处理处置工程实践，这些工程实践包含了几十位工程技术人员多年的智慧和经验，力求体现污泥处理处置的“循环经济理念、协调发展理念、分类处置理念、市场运作政府监控理念”。

本书的编写过程中，特别要感谢上海市政工程设计研究总院和上海市排水有限公司在人力、物力、财力方面的大力支持，感谢日本石垣公司陈建湧博士提供的技术资料，感谢所有提供资料的同事和朋友们。

由于作者的水平所限，书中不妥之处请读者批评指正，以便再版时加以更正充实，期待着您的来函。E-mail: wanggh@vip.163.com; xiao_sun@126.com。

编者
2006.4

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 污泥的分类和性质	1
1.1.1 城镇污泥的分类	1
1.1.2 城镇污泥的成分	1
1.1.3 城镇污泥的性质指标	3
1.2 城镇污泥量的预测	10
1.2.1 水厂污泥	11
1.2.2 污水污泥	12
1.2.3 疏浚污泥	13
1.2.4 通沟污泥	14
1.3 污泥处理处置的基本方法	14
1.3.1 国内污泥处理处置的基本方法	14
1.3.2 日本污泥处理处置的基本方法	17
1.3.3 欧洲污泥处理处置的基本方法	18
1.3.4 美国污泥处理处置的基本方法	19
第 2 章 污泥及污泥气体的测定	21
2.1 污泥的理化特性测定	21
2.1.1 含水率的测定	21
2.1.2 挥发固体含量的测定	21
2.1.3 比阻的测定	21
2.2 污泥的重金属测定	22
2.2.1 污泥的预处理	22
2.2.2 重金属五步化学提取分离法	22
2.2.3 铜的测定	23
2.2.4 镉的测定	24
2.2.5 汞的测定	26
2.2.6 总铬的测定	27
2.2.7 铅的测定	28
2.2.8 锌的测定	30
2.2.9 砷的测定	30
2.3 污泥的消化气体测定	31
2.3.1 532 型气体分析仪分析	31
2.3.2 硫化氢的测定	31
第 3 章 污泥的浓缩和脱水技术	33
3.1 污泥的相态和水分存在形式	33
3.2 污泥浓缩技术	33
3.2.1 重力浓缩	33
3.2.2 气浮浓缩	36
3.2.3 机械浓缩	37
3.2.4 重力浓缩的工艺设计要点	38
3.2.5 离心浓缩的工艺设计要点	39

3.3	污泥脱水技术	40
3.3.1	污泥脱水性能的评价指标	40
3.3.2	影响污泥脱水性的因素	41
3.3.3	污泥的机械脱水	43
3.3.4	离心脱水的工艺设计要点	44
3.3.5	带式压滤脱水的工艺设计要点	45
3.3.6	板框压滤脱水的工艺设计要点	51
3.3.7	螺旋压榨式脱水的工艺设计要点	54
3.3.8	污泥的自然干化脱水	58
3.3.9	污泥脱水的经济性分析	59
3.4	浓缩和脱水技术应用实例	62
3.4.1	浓缩技术应用实例	62
3.4.2	脱水技术应用实例	64
3.5	污泥浓缩脱水新技术	67
3.5.1	膜污泥分离技术研究现状	67
3.5.2	膜污泥分离原理	68
3.6	浓缩脱水技术的发展趋势	69
第4章	污泥的稳定化技术	71
4.1	污泥稳定化技术综述	71
4.2	污泥厌氧消化技术	72
4.2.1	厌氧消化的原理及工艺分类	72
4.2.2	影响污泥消化效率的因素	77
4.2.3	厌氧消化的工艺设计要点	81
4.2.4	厌氧消化技术研究进展	94
4.2.5	厌氧消化经济性分析	97
4.3	污泥好氧消化技术	99
4.3.1	污泥好氧消化的优缺点	99
4.3.2	污泥的好氧消化机理	100
4.3.3	污泥好氧消化工艺	101
4.3.4	污泥好氧消化操作的控制参数	107
4.3.5	污泥好氧消化稳定性的评价指标	109
4.3.6	好氧消化的工艺设计要点	111
4.3.7	好氧消化费用分析	114
4.4	污泥的好氧堆肥技术	115
4.4.1	堆肥基本工艺	115
4.4.2	堆肥的操作原理	118
4.4.3	堆肥的工艺控制参数	119
4.4.4	堆肥化的控制指标	122
4.4.5	堆肥的工艺设计要点	123
4.4.6	堆肥的利用及其市场	124
4.5	污泥石灰稳定法技术	125
4.5.1	石灰稳定的工艺原理	125
4.5.2	石灰稳定的工艺控制参数	126
4.5.3	石灰稳定的基本工艺	126
4.5.4	石灰稳定的工艺设计要点	127
4.5.5	石灰稳定的费用分析	131
4.6	污泥稳定化技术应用实例	131

4.6.1	厌氧消化应用实例	131
4.6.2	好氧消化应用实例	132
4.6.3	好氧堆肥应用实例	132
第5章	污泥的热处理技术	137
5.1	污泥的干化技术	137
5.1.1	干化工艺及技术原理	137
5.1.2	干化设备的选择	141
5.1.3	污泥干化中的问题及其解决办法	141
5.2	污泥的焚烧技术	142
5.2.1	污泥焚烧的原理和影响因素	143
5.2.2	对环境的影响及解决方法	144
5.2.3	典型的污泥焚烧技术	145
5.2.4	工程及运行费用	147
5.2.5	污泥焚烧污染控制标准	148
5.3	湿式氧化技术	149
5.4	熔融技术	150
5.5	玻璃体骨料技术	151
5.6	污泥送火力发电厂与煤混烧技术	153
5.6.1	污泥在火力发电厂与煤混烧常用工艺及工程实例	153
5.6.2	污泥与煤的成分分析比较	156
5.6.3	污泥与煤混烧存在的技术问题	157
5.7	污泥热处理技术应用实例	159
5.7.1	污泥干化应用实例	159
5.7.2	污泥焚烧应用实例	161
第6章	污泥的土地利用技术	164
6.1	概述	164
6.1.1	污泥土地利用现状	164
6.1.2	污泥土地利用的利益	164
6.1.3	污泥土地利用的风险	166
6.2	污泥土地利用的标准规范	167
6.2.1	国外污泥土地利用标准规范	167
6.2.2	我国污泥土地利用标准规范	169
6.3	污泥土地消纳量研究	170
6.3.1	污泥用于制作农用肥料	170
6.3.2	污泥用于园林绿化	170
6.3.3	污泥用于盐碱地改良	171
6.4	污泥的土地利用技术	172
6.4.1	土地利用中污泥肥料的分类	172
6.4.2	土地利用中污泥的施用方法	172
6.4.3	污泥施用地点的选择	173
6.4.4	污泥施用年限和施用率	173
6.4.5	污泥土地利用的监测	176
6.4.6	污泥土地利用的存档和报告	177
6.5	污泥农田利用的操作要求	177
6.5.1	污泥农用的考虑事项	177
6.5.2	污泥农用方法和进度安排	178
6.5.3	污泥农用地点的施用率确定	178

6.5.4	污泥农用施用率计算的设计实例	183
6.6	污泥林用的操作规范	187
6.6.1	概要	187
6.6.2	控制要求及其他需要考虑的事项	187
6.6.3	污泥林用对树木生长和树木特性的影响	188
6.6.4	污泥林用的施用时段	188
6.6.5	时间安排	190
6.6.6	污泥林用的污泥施用率的确定	190
6.7	污泥土地利用的应用实例	193
第7章	污泥的建材利用技术	194
7.1	污泥建材利用概述	194
7.2	污泥建材利用的基本形式和工艺	194
7.2.1	污泥制砖	194
7.2.2	污泥制水泥	197
7.2.3	污泥制陶粒等轻质材料	200
7.2.4	污泥制生化纤维板	201
7.2.5	污泥作混凝土混料的细填料	202
7.3	污泥建材的标准规范	202
7.3.1	有害物质控制标准	202
7.3.2	理化性能标准	203
7.3.3	污泥建材利用的环境影响	205
7.4	污泥建材利用存在的问题	206
7.5	污泥制作建材应用实例	207
第8章	污泥的填埋处置技术	209
8.1	概述	209
8.2	填埋方法的分类	209
8.3	污泥单独填埋	210
8.3.1	技术和设计参数	210
8.3.2	污泥专用填埋场填埋工艺流程	212
8.3.3	污泥专用填埋场建设标准	212
8.3.4	填埋工艺和设备配制	213
8.4	生活垃圾卫生填埋场混合填埋	213
8.5	污泥作为生活垃圾填埋场覆盖材料	214
8.5.1	填埋场覆盖土源的缺乏现状	214
8.5.2	污泥作为填埋场覆盖替代材料的研究现状	214
8.6	污泥填埋标准规范内容	215
8.7	污泥填埋的工程及运行费用	216
8.7.1	美国污水污泥填埋场的相应费用分析	216
8.7.2	国内相应的污泥填埋处置分析	218
8.8	污泥填埋的应用实例	220
第9章	国内外污泥管理政策研究	221
9.1	欧洲污泥管理政策	221
9.1.1	欧盟	221
9.1.2	部分欧洲国家	222
9.2	美国污泥管理政策	224
9.3	亚洲污泥管理政策	225
9.3.1	日本	225

9.3.2	新加坡	226
9.4	大洋洲污泥管理政策	226
9.4.1	澳大利亚	226
9.4.2	新西兰	226
9.5	我国现有污泥管理政策	227
第10章	污泥处理处置工程实例	229
10.1	上海市石洞口污水处理厂污泥处理工程	229
10.1.1	工程概况	229
10.1.2	污泥处理规模	229
10.1.3	方案的论证和决策	229
10.1.4	污泥处理工艺流程	230
10.1.5	工程设计	230
10.2	上海市白龙港污水处理厂污泥专用填埋场工程	232
10.2.1	工程概况	232
10.2.2	污泥处理规模	232
10.2.3	方案的论证和决策	233
10.2.4	污泥处理工艺流程	234
10.2.5	工程设计	234
10.3	重庆鸡冠石污水处理厂污泥处理工程	235
10.3.1	工程概况	235
10.3.2	污泥处理规模	235
10.3.3	方案的论证和决策	236
10.3.4	污泥处理工艺流程	237
10.3.5	工程设计	237
10.4	厦门第二污水处理厂扩建工程	241
10.4.1	工程概况	241
10.4.2	污泥处理规模	241
10.4.3	方案的论证和决策	241
10.4.4	污泥处理工艺流程	243
10.4.5	工程设计	243
10.5	青岛市麦岛污水处理厂扩建工程	246
10.5.1	工程概况	246
10.5.2	污泥处理规模	246
10.5.3	污泥处理工艺流程	246
10.5.4	工程设计	246
10.6	上海市月浦水厂污泥处理工程	249
10.6.1	工程概况	249
10.6.2	污泥处理规模	249
10.6.3	方案的论证和决策	249
10.6.4	污泥处理工艺流程	250
10.6.5	工程设计	251
10.7	杭州市祥符水厂污泥处理工程	252
10.7.1	工程概况	252
10.7.2	污泥处理规模	253
10.7.3	方案的论证和决策	253
10.7.4	污泥处理工艺流程	254
10.7.5	工程设计	254
参考文献		257

第 1 章 概 述

1.1 污泥的分类和性质

1.1.1 城镇污泥的分类

污泥是一种固液混合的物质，在没有外力干预的情况下，其固液比相对稳定。在城镇市政、环保设施运行和维护过程中产生的污泥，称为城镇污泥，城镇污泥根据其产生源头及性质成分可有不同的分类。

(1) 按产生源头分类

城镇污泥按产生源头可分为自来水厂产生的污泥（简称水厂污泥）、污水处理厂产生的污泥（简称污水污泥）、水体疏浚产生的污泥（简称疏浚污泥）、市政排水系统通沟产生的污泥（简称通沟污泥）和泵站系统栅渣（简称栅渣）。

水厂污泥：水厂污泥是净水厂在净水过程中产生的污泥，主要包括原水中的悬浮物质、有机杂质和藻类等，以及处理过程中形成的化学沉析物。可细分为三种类型：含铝盐或铁盐混凝剂的沉淀污泥、滤池反冲洗水所含固体和软化产生的污泥。

污水污泥：污水污泥是污水净化过程的产物，按其产生于污水处理流程的不同阶段，可分为初沉污泥、剩余活性污泥和化学一级加强污泥等。

疏浚污泥：为维护城市水体景观、航运等正常功能，城镇水体需要进行定期的疏浚，以去除水体中的沉积物。疏浚过程的水体沉积物即为疏浚污泥。

通沟污泥：城镇污水中含有大量的悬浮物，由于输送过程中污水流速的变化，一部分悬浮物会沉淀下来，淤积在输送管道内，为维持城镇排水沟道的正常功能，需定期对沟道系统进行养护，此过程从沟道中清除的淤泥即为通沟污泥。

泵站系统栅渣：在城镇污水输送过程中，会混入一定量的生活垃圾，这些垃圾通过泵站、污水处理厂的格栅拦截而分离，分离物为栅渣。

(2) 按成分和性状分类

城镇污泥按其有机成分的含量可分为土质污泥和有机污泥。

土质污泥：包括水厂污泥、疏浚污泥和通沟污泥，其有机质含量较低，一般占其干基含量的40%以下。

有机污泥：主要指污水污泥，其有机质含量较高，一般占其干基含量的50%以上。

1.1.2 城镇污泥的成分

(1) 水厂污泥

水厂污泥与原水水源有较大关系，原水的浊度、藻类含量等都会影响污泥的成分。对于不同类型的水厂污泥来说，沉淀污泥主要由混凝剂形成的金属氢氧化物和泥沙、淤泥和无机、有机物等组成；用石灰或苏打软化产生的污泥主要含碳酸钙、硫酸钙、氢氧化镁、硅、氧化铁、氧化铝和未反应的石灰。

表 1-1-1 是上海闵行和福建九龙江水厂污泥中各种成分的含量。表 1-1-2 是福建九龙江水厂污泥的粒径分布。

(2) 污水污泥

污水污泥含有大量有机质和氮磷等营养物质，有机质含量占其干基质量的50%以上，使其具备了制造肥料和作为燃料的基本条件。

如果污水厂接纳工业废水，则污水污泥中含有一定比例的重金属离子和化学物质。此外，污

表 1-1-1 水厂污泥成分含量/(mg/L)

项 目	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	CaO	灼烧减重 ^① /%	其 他
上海闵行水厂	50	25.28	7.56	2.4	3.52	1.55	12~13	1.35
福建九龙江水厂	37.97	24.47	7.54	0.81	1.38	0.89	22.6	4.34

① 灼烧减重代表污泥的有机物及挥发性无机物含量，又称挥发性固体。

表 1-1-2 福建九龙江水厂污泥粒径分布

粒径范围/ μm	质量分数/%	粒径范围/ μm	质量分数/%
<0.2	5.7	<7.0	84.2
<0.4	21.1	<10.0	89.2
<0.7	39.7	<12.0	91.4
<1.0	48.7	<15.0	94.6
<2.0	65.0	<20.0	96.8
<4.0	76.0	<25.0	100.0

表 1-1-3 初沉污泥性质指标

项 目	浓度(干重)
总污泥	2.0~8.0
总挥发固体/TS%	60~80
油脂/TS%	5.0~8.0
磷/TS%	0.8~2.8
蛋白质/TS%	20~30
纤维素/TS%	8~15
氮/TS%	1.5~4.0
pH 值	5.0~8.0

表 1-1-4 剩余污泥性质指标

项 目	浓度(干重)
总污泥	0.4~1.2
总挥发固体/TS%	60~85
油脂/TS%	5~12
磷/TS%	1.5~3.0
蛋白质/TS%	32~41
氮/TS%	2.4~7.0
pH 值	5.0~8.0

泥中还会含有一定量的有害化学物质，如可吸附性有机卤素(AOX)、阴离子合成洗涤剂(LAS)、多氯联苯(PCB)等，不仅导致污泥处置前预处理费用的增高，也极大限制了污泥利用和处置的途径。

初沉污泥和剩余活性污泥是产生于污水处理不同阶段的污水污泥，其成分有所不同。表 1-1-3 和表 1-1-4 分别为初沉污泥和剩余污泥的性质指标。

(3) 疏浚污泥

疏浚污泥所含有的污染物随城镇区位、污染源种类的不同而各异。一般疏浚污泥的含固率为 10%~30%，污泥中有机物含量为 2.2%~38.4%，经污泥脱水后含固率可高达 70%~75%。以上海市苏州河的疏浚污泥为例，污泥的污染指标有：COD_{Cr}、NH₃-N、重金属和有机污染物四种。表 1-1-5 和表 1-1-6 分别是各取样地点污泥样品的化学分析和颗粒分析。

表 1-1-5 上海市苏州河各取样地点污泥样品的化学分析/(mg/L)

取 样 地 点	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	CaO	灼烧减量/%	Na ₂ O
浙江路桥(表层污泥)	60.32	9.05	3.95	2.06	2.54	5.72	11.31	1.75
浙江路桥(中层砂泥)	65.18	9.65	4.30	1.95	1.92	4.97	7.90	1.41
浙江路桥(下层砂泥)	86.65	2.65	1.05	1.02	1.25	1.61	2.52	1.04
盘湾里	60.12	10.59	4.68	2.25	6.51	4.97	11.97	1.96
古北路桥	50.92	8.50	4.43	1.94	2.55	11.72	14.79	1.75
第一丝绸厂	56.58	9.05	2.91	2.02	2.55	9.24	13.11	1.94
中山路桥	52.46	9.06	4.05	1.89	2.55	12.08	14.28	1.73
北新泾桥	53.0	9.0	3.16	1.94	2.81	10.66	15.18	1.08

表 1-1-6 上海市苏州河各取样地点污泥样品的颗粒分析/ μm

取样地点	颗 粒 粒 径						土样属性
	<5%	5%~10%	10%~25%	25%~50%	50%~100%	>100%	
浙江路桥(表层污泥)	10	4	31	20	15	20	砂质粉土
浙江路桥(中层砂泥)	8	2	9	18	46	17	砂质粉土
浙江路桥(下层砂泥)	5	1	2	9	19	64	粉砂
盘湾里	10	8	18	27	20	17	砂质粉土
古北路桥	11	7	18	19	20	25	砂质粉土
第一丝绸厂	9	5	16	22	24	24	砂质粉土
中山路桥	10	6	28	29	18	9	砂质粉土
北新泾桥	12	6	21	26	14	21	砂质粉土

(4) 通沟污泥

通沟污泥有机质含量较低,无机成分一般远多于挥发性成分。而且,越靠近管底的污泥挥发性成分浓度会越高,管底污泥可达17%~45%,顶部污泥4%~7%。表1-1-7为上海市区各区通沟污泥的成分抽样分析结果。

表 1-1-7 上海市区各区通沟污泥的成分抽样分析

地 区	成 分	pH 值	有机质(干)/%	灰分(干)/%	上清液 VSS/%	相对密度/(g/mL)
闸北区		7.5	24.35	75.65	9.44	2.4
杨浦区		6.7	18.28	81.72	8.88	2.4
虹口区		7.3	35.65	64.35	9.59	2.3
普陀区		6.7	19.41	80.59	9.11	2.3
静安区		7.2	24.85	75.15	7.80	2.4
卢湾区		6.5	40.99	59.01	12.01	2.2
南市区		7.1	16.92	83.08	8.03	2.5
黄浦区		7.0	24.48	71.52	9.39	2.3

1.1.3 城镇污泥的性质指标

污泥的性质指标主要包括:污泥的含水率、污泥的脱水性能、污泥的挥发性固体、污泥的可消化程度、湿污泥的相对密度与干污泥的相对密度、污泥的肥分、污泥的毒害物质含量和污泥的热值等。不同来源的污泥因其成分不同,各种性质也有所差异,以下分别叙述。

(1) 含水率

污泥含水率是单位重量的污泥所含水分的质量分数。污泥的含水率一般都很大,相对密度接近于1,所以在污泥浓缩过程中,体积、重量和干固体含量之间的关系,可用式(1-1-1)进行换算:

$$\frac{w_1}{w_2} = \frac{W_1}{W_2} = \frac{100 - p_2}{100 - p_1} = \frac{C_2}{C_1} \quad (1-1-1)$$

式中 p ——污泥含水率, %;

w_1, W_1, C_1 ——含水率为 p_1 时的污泥体积、重量和干固体含量(以污泥中干固体所占重量分数计);

w_2, W_2, C_2 ——含水率为 p_2 时的污泥体积、重量和干固体含量(以污泥中干固体所占重量分数计)。

式(1-1-1)适用于含水率在65%以上的污泥。当含水率低于65%,由于固体颗粒之间的孔隙不再被水填满,污泥的体积受固体颗粒弹性的限制,除了有些固结外,大体保持不变。

1) 水厂污泥 水厂污泥的含水率与原水水质、处理工艺和化学药剂的种类及用量有关。污

泥中原水悬浮固体所占的比例越高，污泥的含水率越低。一般，铁盐混凝而成的污泥含水率低于铝盐的含水率，软化污泥的含水率低于沉淀污泥的含水率。表 1-1-8 列出了美国密苏里州给水厂污泥的含水率范围。

表 1-1-8 美国密苏里州给水厂污泥的含水率范围/%

调 查 点	污 泥 种 类	沉淀池污泥含水率
希金斯维尔 Hillsville	铝盐污泥	96.9
马步里 Mulberry		93.7
杰斐逊市 Jefferson	石灰和铁盐污泥	80.9
圣路易斯 St Louis	铁盐污泥(初沉池)	80.7
圣路易斯县 St Louis	铁盐污泥(二沉池)	78.9
堪萨斯市 Kansas City	软化污泥	74.7
哥伦比亚 Columbia	石灰污泥	67.0

2) 污水污泥 污水污泥含水率与污泥的成分、非溶解性颗粒的大小有关，颗粒越小，有机物含量越高，污泥的含水率也越高。在污水处理过程不同阶段产生的污泥其含水率也不尽相同，如表 1-1-9 所示。

表 1-1-9 污水污泥含水率^①/%

污 泥 类 型	含 水 率	典 型 值
栅渣		80
无机固体颗粒		60
初次沉淀污泥	92~98	95
活性污泥	99~99.9	99.3
生物滤池污泥	97~99	98.5
好氧消化污泥	初沉污泥	93~97.5
	剩余活性污泥	97.5~99.25
	混合污泥	96~98.5
厌氧消化污泥	初沉污泥	90~95
	生物滤池污泥	
	活性污泥法	97
	混合污泥	97.5
	93~97.5	96.5

① 引自聂梅生，许泽美。水工业工程设计手册《废水处理及再用》。

3) 疏浚污泥 城镇水体疏浚污泥的含水率主要受疏浚方法的影响，不同疏浚方法产生的疏浚污泥含水率如表 1-1-10 所示。

表 1-1-10 常用疏浚机械产生的疏浚污泥含水率^①/%

疏浚机械	疏浚底泥含水率	疏浚机械	疏浚底泥含水率
抓斗	近似于底泥原地含固率	气提式挖泥船	25~40
吸扬式挖泥船	10~25	Dustpan ^②	10~20
铰轮式挖泥船	10~20	PNEUMA ^②	25~40
漏斗式挖泥船	10~20	Oozer ^②	25~40
水平钻式挖泥船	10~30	Clean-up ^②	30~40
反铲式挖泥船	近似于底泥原地含固率	Refresher ^②	30~40
火柴盒式挖泥船	5~15		

① 引自何品晶，顾国维，李笃中。《城市污泥处理与利用》。

② 均为国外疏浚机械的名称。

4) 通沟污泥 通沟污泥的含水率与疏浚污泥基本一致，主要受清理方式的影响，采用水力清理时，污泥含水率一般为 80%~95%，采用机械清捞时，污泥的含水率一般为 40%~60%，

另外，机械清捞污泥的含水率与清捞周期和排水体制也有关系。表 1-1-11 所列通沟污泥含水率为上海市各区统计的典型含水率。

表 1-1-11 上海市各区通沟污泥典型含水率/%

地区	闸北区	杨浦区	虹口区	普陀区	静安区	卢湾区	南市区	黄浦区
含水率	51.37	48.06	48.02	50.25	41.16	59.65	40.82	51.21

(2) 污泥的脱水性能、浓缩性能和可压缩性能

污泥由液体和固体两部分组成。污泥处理最重要的步骤就是分离污泥中的水分，减少污泥的体积，从而减轻后续处理的污泥体积负荷。

虽然不同污泥的含水率、脱水性能、浓缩性能和可压缩性能都不尽相同，但是污泥中水分的存在形式是基本一致的。根据污泥中所含水分与污泥结合的情况，污泥中所含的水分可分为自由水和结合水两大类。自由水 (free water or bulk water) 指的是不直接与污泥结合，也不受污泥颗粒影响的那部分水，这部分水可以通过浓缩去除，污泥中大部分水以这种形式存在。结合水可分为间隙水、毛细水、水合水。间隙水 (interstitial water) 存在于絮体或有机体的空隙之间，条件变化时 (如有絮体破坏时) 可变成自由水；毛细水 (vicinal water) 指的是结合力大、结合紧的多层水分子，重力浓缩时不能去除这部分水，必须用人工干化、机械脱水或热处理的方法去除；水合水 (water of hydration) 存在于细胞内，只有热处理才能去除这部分水。

不同污泥水的特性如表 1-1-12 所示。

表 1-1-12 污泥水的特性

项 目	间 隙 水	毛 细 水	水合水(含内部水)
含量/%	70~80	10~22	5~8
与污泥颗粒的结合力	弱	较强	强
与污泥颗粒分离方法	重力浓缩	机械脱水	干化或焚烧

对不同污泥而言，其各种水分的结合能力不同，其结合强度取决于单位水化合力和颗粒的大小。颗粒直径越小，污泥结构中细小絮体越多或者污泥含有越多的胶体颗粒，污泥越难脱水。

污泥在不同状态下去除水的能力可以用污泥的浓缩性能、脱水性能和可压缩性能三个指标来衡量。

污泥的浓缩性能表现在，当污泥长时间静置时，会或多或少地释放水分，主要是间隙水。缓慢的搅拌有助于水分的释放，而温度的变化以及伴随发生的生物化学反应，对污泥的浓缩和沉淀也有一定的影响。通过试验绘制污泥的沉淀、浓缩曲线，可评价污泥的浓缩性能。

污泥的脱水性能一般用污泥比阻来衡量，比阻越大的污泥越难脱水。比阻为单位过滤面积，滤饼单位干固体质量所受到的阻力，计算如式 (1-1-2) 所示。

$$r = \frac{2PA^2b}{\mu w} \quad (1-1-2)$$

式中 r ——比阻， m/kg ；

P ——过滤压力 (为滤饼上下表面间的压力差)， N/m^2 ；

A ——过滤面积， m^2 ；

b ——过滤时间/滤液体积与滤液体积的斜率， s/m^6 ；

μ ——滤液动力黏度， $N \cdot s/m^2$ ；

w ——滤液所产生的滤饼干质量， kg/m^3 。

不同的污泥其比阻差别较大，一般来说，比阻小于 $1 \times 10^{11} m/kg$ 的污泥易于脱水，大于 $1 \times 10^{13} m/kg$ 的污泥难以脱水。

污泥的可压缩性能可用压缩系数来衡量。将压力和比阻试验值绘制在双对数坐标上，压力为

横坐标，比阻为纵坐标，其直线的斜率即为污泥的压缩系数，计算如式（1-1-3）所示。

$$s = \ln \frac{r_2}{r_1} \times \left(\ln \frac{P_2}{P_1} \right)^{-1} \quad (1-1-3)$$

式中 s ——压缩系数；

r_1 ——过滤压力 P_1 时的比阻，m/kg；

r_2 ——过滤压力 P_2 时的比阻，m/kg。

污泥的压缩系数可用来评价污泥压滤脱水性能。压缩系数大的污泥宜采用真空过滤（负压过滤）或离心脱水的方法脱水，而压缩系数小的污泥宜采用板框或带式压滤机脱水。

1) 水厂污泥 不同类型的水厂污泥的脱水性能不同。

原水水质的季节性变化对水厂污泥的脱水性能有较大的影响。原水的浊度越高，产生的污泥的浓缩性能越强。一般情况下，铁盐混凝形成的污泥较铝盐更易浓缩。表 1-1-13 列出了美国密苏里州给水厂污泥的比阻值。

表 1-1-13 美国密苏里州给水厂污泥的比阻值/($\times 10^{10}$ m/kg)

调查点	污泥种类	比阻
马步里 Mulberry	铝盐污泥	160
杰斐逊市 Jefferson	石灰和铁盐污泥	2.1
圣路易斯 St Louis	石灰和铁盐污泥	21
圣路易斯县 St Louis	铁盐污泥	150
堪萨斯市 Kansas City	软化污泥	12

2) 污水污泥 污水污泥的比阻值一般高于给水污泥，机械脱水性能较给水污泥差。污水污泥为有机污泥，由亲水性带负电荷的胶体颗粒组成，颗粒的大小极不均匀，而且很细小，挥发固体含量高，比阻值也大，脱水性能较差。特别是活性污泥，有机分散系包括平均粒径小于 $0.1\mu\text{m}$ 的胶体颗粒， $1.0\sim 100\mu\text{m}$ 之间的超胶体颗粒和由胶体聚集的大颗粒所组成。通常有机物含量越高，污泥的比阻值越大，越难脱水，这一点从表 1-1-14 不同类型污水污泥的比阻值中也能看出。

表 1-1-14 不同类型污水污泥的比阻/($\times 10^{10}$ m/kg)

污泥类型	初沉污泥	剩余污泥	消化不好的污泥	消化一般的污泥	消化好的污泥	消化很好的污泥
污泥比阻/(m/kg)	10~1000	100~1000	50~5000	10~100	5~50	1~10

(3) 有毒有害物质含量

污泥中有毒有害物质主要是重金属和有机污染物，目前国内对于污泥中重金属的监测分析较为完善，而关于有机污染物的分析数据较少。

在污水处理过程中，70%~90%的重金属元素通过吸附或沉淀转移到污泥中。一些重金属元素主要来源于工业排放的废水，如镉、铬；一些重金属来源于家庭生活的管道系统，如铜、锌等。由于污泥施用于土壤后，重金属将积累于地表层，通过食物链，在作物、动物以及人类体内积累，因此重金属是限制污泥大规模土地利用的重要因素。

重金属污染物在污泥中的存在形态不同，其生物有效性也有较大的差异。国内外比较常见的是五态分类法，即将形态分为可交换态、碳酸盐结合态、铁、锰氧化物结合态、有机质结合态和残渣态。这主要是根据重金属结合的组分来划分的。

可交换态表示可交换吸附在固体颗粒物表面上的重金属。这部分重金属对水环境条件的变化最敏感，有效性强，是最易被生物吸收的部分。

碳酸盐结合态表示重金属被碳酸盐吸附、沉淀或共沉淀的部分，它们对 pH 值的变化最明显，也比较容易重新释放进入水相。

铁、锰氧化物结合态表示与水合氧化铁、氧化锰表面结合，形成配位化合物，或同晶置换铁锰氧化物中的 Mg^{2+} 和 Fe^{2+} 而存在于它们的晶格中的重金属。在数量上，氧化物结合态铜与有机

态铜几乎同等重要，但其对植物的有效性较低。

有机质结合态表示以不同形式进入或吸附在有机物颗粒上，同有机物发生螯合或离子交换的重金属，这部分结合态重金属相对较稳定，不易被生物所吸收。铜对有机质具有很高的亲和力，与有机质络合能力特强。土壤络合铜的能力和铜的可溶性主要取决于土壤有机质的种类和含量。铜可与土壤中的有机质络合形成各种可溶态或难溶态的络合物。

残渣态表示除以上几种形态以外，存在于固体颗粒矿物晶格中的重金属元素，它是稳定且对生物无效的。这种形态的重金属所占比例越高，其生物有效性越小。土壤中重金属的残渣态含量因土壤发育程度和类型而异。

污泥中的有机污染物主要来自工业废水，已确定的各类优先有机污染物均有在污泥中存在的报道，如可吸附性有机卤素（AOX）、阴离子合成洗涤剂（LAS）、多环芳烃（PAH）、多氯联苯（PCB）等。

1) 水厂污泥 水厂污泥中重金属含量较低，一般均能满足我国的污泥农用标准（GB 18918—2002）。表 1-1-15 列出了上海市某水厂污泥及其浸出液的重金属含量。

表 1-1-15 上海市某水厂污泥及其浸出液重金属含量/(mg/kg 干泥)

类 别 \ 指 标	Cr	Ni	Cu	Pb	Cd
污泥	114.0	41.10	61.21	26.76	0.0324
浸出液	0.0511	0.0298	0.0492	0.0293	0.0011
农用标准(pH<6.5)	600	100	800	300	5
农用标准(pH≥6.5)	1000	200	1500	1000	15

2) 污水污泥 污水中工业废水相对密度较大的污水污泥所含的重金属和有机污染物浓度较高。表 1-1-16 和表 1-1-17 列出了上海市和中国香港地区部分污水污泥重金属和有机物分析表，其中上海市石洞口污水处理厂的污水中工业废水占近 60%，因此石洞口污水污泥中各种重金属含量比较高，铜、锌、铬、镉、镍均高于污泥农用标准。而香港地区的数据来自其控制工业废水纳入市政管网的措施之后的污水处理厂，因此各重金属的含量较上海市的相关数值要低。比较欧盟和美国在执行工业废水分流和预处理制度前后的污泥中重金属含量，发现前后污泥中重金属含量降低了 1~2 个数量级，可见，工业废水的分流和预处理制度对于控制污泥的污染和处理有着积极的作用。

表 1-1-16 上海市部分污水处理厂污泥有毒有害成分分析/(mg/kg)

项 目	Cu	Zn	Pb	Cd	Cr	Ni	Hg	As	
曲阳	350	3740	9.95	0.85	15.77	34.8	1.22	5.68	
吴淞	226	149	7.27	0.097	3.74	65.2	1.12	2.32	
龙华	101	1370	0.95	0.19	1.13	17.3	0.19	1.51	
曹杨	146	147	129	5.55	70	42.9	6.04	15	
天山	426	1615	116	1.49	46.6	42.6	7.81	22	
闵行	119	1090	76	1.67	53.4	32.2	2.16	7.1	
北郊	158	2467	108	2.52	22	44.6	9.25	33.4	
竹园	341.5	1072.5	67.3	3.0	74.8	51.0	2.3	14.9	
白龙港	478.8	2356.2	46.5	2.4	265.1	70.5	2.8	12.9	
石洞口	1469.5	4021.4	155.03	38.24	854.04	164.79	4.78	11.06	
东区初沉污泥	211.9	995.4	36.06	3.35	67.07	44.21	0.118	9.25	
东区二沉污泥	445.8	2082.7	129.8	2.34	331.9	78.19	0.0019	13.9	
我国的污泥农用标准 (GB 18918—2002)	在酸性土壤上 (pH<6.5)	800	2000	300	5	600	100	5	75
	在碱性土壤上 (pH≥6.5)	1500	3000	1000	20	1000	200	15	75

注：1. 吴淞污水污泥有机物含量约为 70%。

2. 阴影部分是污泥农用的超标数据（GB 18918—2002）。

表 1-1-17 中国香港地区部分污水处理厂污泥有毒有害物质含量/(mg/kg)

厂名	Cu	Pb	Cd	Cr	Ni	Hg	As
Shek Wu Hui	565	68.2	1.9	42.5	49.5	4.1	8.2
Sha Tin	242.3	57.4	1	32.9	78.6	3.5	20
Sai Kung	277.3	62.3	1.5	34.2	37.2	4.4	7.4
Yuen Long	274	85.9	0.8	66.0	51.6	1.8	4.6
Tai Po	434.5	330.3	1.3	71.9	77.4	3.7	3.7
Stanley	154.2	58.6	1.6	33.5	24.5	2	6.2
Stone-cutters Island	223.4	54.4	1	75.6	63.1	2.9	1.7

注：阴影部分是污泥农用的超标数据（GB 18918—2002）。

3) 疏浚污泥 疏浚污泥中重金属的含量反应了水体受污染的历史及程度，因此不同水体疏浚污泥重金属浓度相差较大。表 1-1-18 显示了上海市苏州河疏浚污泥重金属含量和自然背景值。

表 1-1-18 上海市苏州河疏浚污泥重金属含量和自然背景值/(mg/kg)

项目	Cu	Pb	Cd	Cr	Ni	Hg	As
苏州河	20~200	10~30	0.1~4	30~100	30~50	0.1~0.4	6~20
自然背景	10~20	10~50	0.3~0.5	10~20	10~70	0.05~0.2	3~10

另外，颗粒物上重金属的生物有效性和迁移性与其存在的形态密切相关，Sa lim 等发现在污染程度比较高的沉积物中，Pb 和 Ni 主要以碳酸盐结合态的形式存在，Cd 主要以可交换态的形式存在。Pardo 等用 Tessier 连续提取法提取了 Pisuer ga 河沉积物上的重金属，结果表明 Cd、Pb 主要存在于可交换态和碳酸盐结合态中，Cu、Co 和 Ni 主要存在于铁锰氧化结合物和有机质结合态中。

4) 通沟污泥 通沟污泥的重金属和有机毒害物质含量从理论上应与污水处理厂污泥相似，表 1-1-19 列出了上海市通沟污泥重金属的含量。从表中可见，不同地区通沟污泥的重金属种类及含量均有差异。

表 1-1-19 上海市通沟污泥重金属含量/(mg/kg)

成分 地区	Cd	Mn	Pb	Cu	Zn	Cr
闸北区	4.99	110.8	128.5	103.4	149.5	32.1
杨浦区	5.36	248.0	68.6	738.0	155.7	71.6
虹口区	11.11	244.5	122.2	237.1	200.0	121.9
普陀区	17.75	212.1	48.6	162.0	155.3	46.2
静安区	9.16	155.5	48.9	185.1	156.2	6.3
卢湾区	16.36	230.2	68.6	295.1	174.3	93.4
南市区	5.38	177.6	284.1	592.0	187.3	53.5
黄浦区	11.05	203.4	114.9	280.0	161.7	42.6

不同排水体制对通沟污泥的性质也有影响，分流制排水系统的雨水管道通沟污泥的毒害物含量与当地地面沉积物类似，合流制排水系统的管道污泥的毒害物含量介于分流制污水管道和雨水管道之间，同时与雨天管道的水力条件有关。

(4) 湿污泥的相对密度与干污泥的相对密度

湿污泥的重量等于其中所含水分重量与固体物重量之和。湿污泥的重量与同体积水的重量之比，称为湿污泥的相对密度。计算如式 (1-1-4) 所示。

$$\gamma = \frac{p + (100 - p)}{p + \frac{100 - p}{\gamma_s}} = \frac{100\gamma_s}{p\gamma_s + (100 - p)} \quad (1-1-4)$$