

城镇污水处理厂 污泥生物处理及稳定化

Sludge Biological Treatment and Stabilization of
Municipal Wastewater Treatment Plant

戴晓虎 主编



K_z Q_{\max} V



化学工业出版社

城镇污水处理厂

污泥生物处理及稳定化

Sludge Biological Treatment and Stabilization
of Municipal Wastewater Treatment Plant

戴晓虎 主编



化学工业出版社

·北京·

本书共5章,主要介绍了城镇污水处理厂污泥来源、产量及组成,我国污泥泥质特性及影响因素,污泥的环境风险评估,污泥稳定化指标及技术评估,污泥生物稳定化指标体系研究。

本书内容系统全面,有针对性地对污泥厌氧消化和好氧堆肥两种生物稳定化过程的评价指标和方法进行了探索,可供污水处理领域科研人员、工程技术人员和管理人员参考,也可供高等学校市政工程、环境工程及相关专业师生参阅。

图书在版编目(CIP)数据

城镇污水处理厂污泥生物处理及稳定化 / 戴晓虎主编. —北京: 化学工业出版社, 2018. 6
ISBN 978-7-122-31964-7

I. ①城… II. ①戴… III. ①城镇-污水处理厂-污泥处理-生物处理 IV. ①X703

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第074362号

责任编辑: 刘兴春 刘 婧 装帧设计: 尹琳琳
责任校对: 宋 夏

出版发行: 化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码 100011)
印 装: 河北鹏润印刷有限公司
710mm×1000mm 1/16 印张12 $\frac{1}{4}$ 彩插3 字数185千字 2018年11月北京第1版第1次印刷

购书咨询: 010-64518888 售后服务: 010-64518899
网 址: <http://www.cip.com.cn>
凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 68.00 元

版权所有 违者必究



前言

FOREWORD

随着我国经济的发展和环保要求的提高，污水处理设施建设获得高速发展，为实现国家减排目标和污染控制做出了巨大贡献，但伴随污水处理设施的建设投运产生了大量的污泥，污泥汇聚了污水中大部分难以生物降解的污染物，包括重金属、持久性有机物、寄生虫卵等，污染负荷也占污水处理厂进水的 $1/3 \sim 1/2$ 。前期由于我国污水处理厂建设存在严重的“重水轻泥”现象，污泥处理处置设施严重滞后，大量的污泥未经过稳定化处理就进入环境，导致近年来国内不断爆发污泥环境污染公共事件，二次污染严重。污泥的稳定化是实现污泥的资源化和无害化，降低污泥在后续处理处置过程中二次污染的重要环节，在污泥的处理处置全链条中非常关键，因此国家颁布的“水十条”特别对污泥稳定化处理提出了明确的要求。由于我国污泥在该方面研究起步较晚，泥质及处理观念和国外的差距大，目前还未形成稳定化程度的指标和评价体系。

鉴于此，本书紧紧围绕污泥生物稳定化核心内容，全面、系统地展开了阐述，重点对影响污泥稳定化因素的泥质特征、污泥环境风险评估、稳定化指标体系分类、现行的国内外稳定化指标等进行了详细的说明。在此基础上，有针对性地对污泥厌氧消化和好氧堆肥两种生物稳定化过程的评价指标和方法进行了探索，并提出了相对应的判断限值，为《城镇污水处理厂污泥稳定化标准》的实施提供了新的思路和方法，为污泥稳定化标准体系建立奠定基础。

本书由戴晓虎主编，参加编写的有吴冰、刘志刚、戴翎翎、李小伟、董滨、孟祥周、段妮娜、周晓婷等，全书最后由戴晓虎统稿、定稿。本书

主要内容基于中国市政华北设计研究总院牵头的水专项“城市污水处理系统运行特性与工艺设计技术研究”课题的子课题“城市污水处理厂污泥稳定化指标体系及理化性能研究”成果，感谢中国市政华北设计研究总院总工程师郑兴灿对本书编写的大力支持。

限于编者水平和编写时间，书中不足和疏漏之处在所难免，敬请同行和读者批评指正。

编 者

2018年5月



第1章 城镇污水处理厂污泥来源、产量及组成.....	1
1.1 污泥来源和分类.....	1
1.2 污泥的产量.....	2
1.3 污泥的组分.....	6
1.3.1 微生物群体.....	6
1.3.2 难降解惰性有机物质.....	7
1.3.3 无机组成部分.....	8
1.4 污泥的性质和指标.....	8
1.4.1 物理指标.....	9
1.4.2 化学指标.....	17
1.4.3 卫生学指标.....	20
1.4.4 养分指标.....	20
第2章 我国污泥泥质特性及影响因素.....	21
2.1 调研污水厂概况及样品测试.....	22
2.1.1 调研污水处理厂概况.....	22
2.1.2 污泥样品测试说明.....	22
2.2 污泥泥质特性.....	25
2.2.1 基本指标特征.....	25

2.2.2	营养元素	28
2.2.3	重金属	31
2.2.4	含砂量	34
2.2.5	微量有机污染物	38
第 3 章	污泥的环境风险评估	57
3.1	基本概念及发展	57
3.1.1	风险	57
3.1.2	环境风险	58
3.1.3	环境风险评价	58
3.1.4	环境风险评价发展过程	58
3.2	主要内容和研究方法	60
3.2.1	源项分析	60
3.2.2	危害判定	61
3.2.3	剂量 - 反应评价	61
3.2.4	暴露评价	62
3.2.5	风险表征	62
3.3	污泥环境风险评价研究	62
3.3.1	污泥土地利用的环境风险	63
3.3.2	污泥干化焚烧的环境风险	75
3.3.3	污泥建材利用的环境风险	78
3.3.4	污泥填埋的环境风险	78
3.3.5	污泥偷排对水体的环境风险	80
3.4	污泥环境风险评估方法	81
3.4.1	重金属环境风险评价方法	81
3.4.2	污泥土地利用生态风险评价方法	83
3.5	我国控制污泥环境风险的泥质标准	86
3.5.1	农用泥质标准	87
3.5.2	土地改良用泥质标准	87

3.5.3	污泥园林绿化用泥质标准	88
3.5.4	污泥单独焚烧用泥质标准	89
3.5.5	制砖用泥质标准	89
3.5.6	水泥熟料生产用泥质标准	90
3.5.7	混合填埋用泥质标准	90
3.6	污泥环境风险控制	91
3.6.1	堆肥	91
3.6.2	碱性稳定	91
3.6.3	生物浸沥	92
3.6.4	完善相关标准和法律法规	92
第4章	污泥稳定化指标及技术评估	93
4.1	污泥稳定化含义和目标	93
4.1.1	污泥稳定化含义	93
4.1.2	污泥稳定化目标	94
4.2	国内外污泥稳定化发展	94
4.2.1	国外污泥稳定化的发展	94
4.2.2	我国的污泥稳定化发展	96
4.3	污泥稳定化评价指标体系	99
4.3.1	污泥稳定化程度的评价	99
4.3.2	生物学评价指标	100
4.3.3	有机质理化指标	102
4.3.4	光谱学指标	104
4.3.5	其他指标	107
4.4	污泥稳定化技术	108
4.4.1	物理化学稳定化技术	108
4.4.2	污泥生物稳定化技术	109
4.5	污泥稳定化技术发展的未来趋势	118

第 5 章 污泥生物稳定化指标体系研究	121
5.1 污泥生物稳定化技术的发展研究趋势	121
5.2 污泥厌氧消化稳定化指标体系的研究现状	122
5.2.1 利用有机物降解和产气规律曲线	123
5.2.2 通过 BMP 试验评价厌氧可生化性	124
5.2.3 BMP 的替代方法	125
5.3 污泥厌氧消化稳定化指标体系探索研究	128
5.3.1 实验材料和装置	129
5.3.2 污泥厌氧稳定化评价方法初步建立——BAP 实验	131
5.3.3 液相理化指标体系探索	148
5.3.4 污泥厌氧稳定化指标体系提出	156
5.4 污泥好氧稳定化指标体系探索研究	157
5.4.1 实验方法	159
5.4.2 生污泥好氧堆肥的稳定化评价方法	162
5.4.3 厌氧消化污泥好氧堆肥稳定化指标	172
参考文献	182

城镇污水处理厂污泥来源、产量及组成

1.1 污泥来源和分类

污水处理是通过物理、生物和化学等作用把污染物从水中去除的过程，被去除的污染物，如悬浮物（SS）、化学需氧量（COD）、氮、磷、胶体、重金属、病原微生物等，或者通过沉淀、离心、过滤、吸附（化学/生物）、气浮等作用直接与水分离，或者通过微生物同化作用转化为生物体后再与水分离，或者通过混凝沉淀作用与化学沉淀剂同时沉淀分离。这些分离后的污染物可以统称为污泥（图 1-1），其中初沉污泥和剩余污泥是我们最为熟悉的；此外，随着污水排放标准的提高，化学沉淀污泥也逐渐增多。

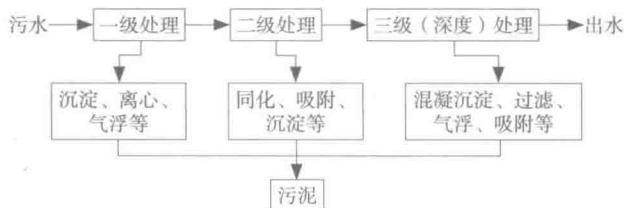


图 1-1 污泥来源

由此可以看出，污泥是一种由有机物、细菌菌体、无机颗粒、胶体、水等组成的极其复杂的非均质体，其中未经任何处理的污泥含水率高达

95%~99%，如初沉污泥含水率一般为95%~96%，而二沉污泥含水率高达99%以上。因此，污泥是一种呈胶状液体、介于液体和固体之间的浓稠物，具有密度较小、有机物含量高、易腐化发臭、可以用泵运输等特点。

可以根据污泥来源、处理过程、成分差别等对污泥进行分类。

(1) 按污水的处理方法或污泥从污水中分离的过程分类

可以分为4类：a. 直接通过沉降作用从初沉池排放的初沉污泥；b. 由微生物代谢和生物合成，并结合污水中胶体、悬浮物等从二沉池排放的剩余污泥；c. 来自生物膜法工艺排出的腐殖污泥，主要是脱落的生物膜；d. 采用混凝、化学沉淀等产生的化学污泥。

(2) 按污泥在污水厂处理过程的不同产生阶段分类

可以分为生污泥、消化污泥、浓缩污泥、脱水污泥和干化污泥5类。

1) 生污泥 也叫新鲜污泥，是指没有经过任何处理的污泥，如上述4种都是生污泥。

2) 消化污泥 也叫熟污泥，通常指将生污泥经过厌氧消化处理后得到的比较稳定的污泥，故也可以叫消化污泥。

3) 浓缩污泥 指经过气浮、浓缩池等浓缩后的污泥，其含水率一般在95%~97%之间。

4) 脱水污泥 经过压滤、离心等手段获得的含水率为80%左右的污泥。但随着技术的发展，目前压滤可以获得含水率为60%~70%的污泥。

5) 干化污泥 一般指经过热干化处理得到的污泥，其含水率一般低于50%。

(3) 按污泥成分及性质分类

可分为有机污泥和无机污泥两类。其中有机污泥有机物含量高、容易腐化发臭、颗粒较细、密度较小、含水率高且不易脱水。城镇污水处理厂产生的污泥多为有机污泥。而无机污泥颗粒粗大、密度较高、疏水性强、含水率较低且易于脱水，但不易用管道输送。沉砂池以及某些工业废水物理、化学处理过程中的沉淀物均属无机污泥。

1.2 污泥的产量

污泥的产量和污水水质（污水有机物含量及无机固体含量）直接相

关,此外,还与污水处理工艺、污水处理要求、温度等因素有关。一般进水水质浓度越高、处理要求越高、温度越低,其产泥量也越大,而具有厌氧工艺、延时曝气等的工艺污泥产量相对较低。按照统计,城镇污水处理过程中污泥产量通常占污水量体积的0.3%~0.5%,或1~3t干污泥/10⁴t污水。如果污水处理采用深度处理,污泥量会增加0.5~1倍。初沉池污泥的人日均量(以SS计)为35~50g/d,与水中的悬浮颗粒物和停留时间有关。活性污泥法和生物膜法的剩余污泥泥量(以SS计)分别为45~80g/d和20~40g/d,与初沉池的效率、水中有机物含量、温度和污泥泥龄有关。研究发现,污水原水中大约55%COD、30%~45%N以及90%P进入污泥中(图1-2),这表明污水处理过程中部分有机质未得到充分降解,存留在污泥中,且其中的有机质、N、P营养物质含量高。若经厌氧消化处理,28%COD可以CH₄的形式得到资源化利用,15%~20%N会以NH₄⁺-N等形式存在的沼液中,27%COD、5%~10%N和90%P仍留在脱水污泥沼渣中。

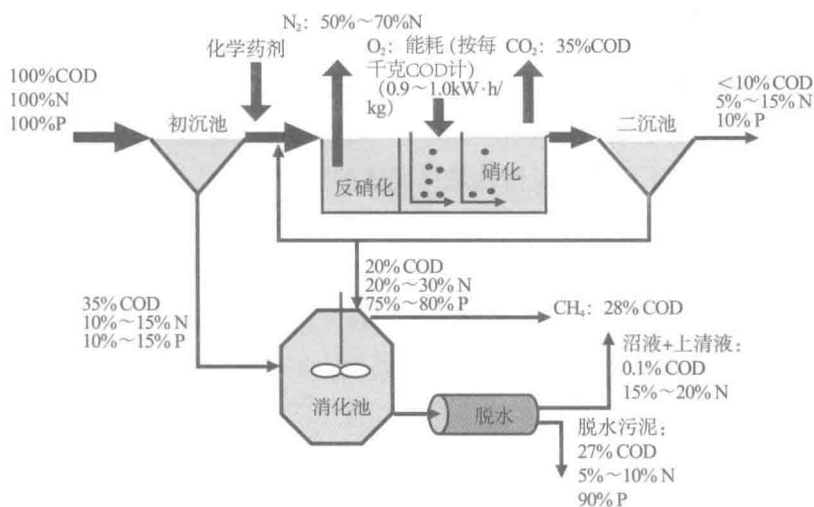


图 1-2 污水处理厂污水中 COD、N、P 等的物料平衡关系

污泥产量可采用如下计算公式。

(1) 初沉池污泥量计算

$$V = \frac{Q_{\max}(C_1 - C_2)T}{K_2\gamma(1-p)} \quad (1-1)$$

式中 V ——初沉池污泥产生量, m^3 ;
 Q_{\max} ——最大时设计流量, m^3/d ;
 C_1 ——进水悬浮物浓度, mg/L ;
 C_2 ——出水悬浮物浓度, mg/L ;
 K_z ——生活污水量总变化系数;
 γ ——污泥密度, mg/L , 约为 $1000\text{mg}/\text{L}$;
 p ——污泥含水率, %;
 T ——两次排泥时间间隔, d 。

初沉池污泥也可按照式 (1-2) 计算:

$$V = \frac{1000Q_{\text{平}}(C_1 - C_2)\eta_{\text{SS}}}{X_0} \quad (1-2)$$

式中 $Q_{\text{平}}$ ——平均日污水量, m^3/d ;
 η_{SS} ——初沉池 SS 去除率, %, 一般为 $40\% \sim 60\%$, 取决于停留时间;
 X_0 ——初沉污泥浓度, mg/L , 一般为 $20 \sim 50\text{mg}/\text{L}$ 。

(2) 剩余污泥量计算

剩余污泥量主要由两部分构成: 一是由降解有机物所产生的污泥增殖; 二是进水中不可降解及惰性悬浮固体的沉积。因此, 剩余干污泥量可以用式 (1-3) 计算:

$$\Delta X = YQ(S_0 - S_c) + (C_1 - C_2) \times fQ - k_d VX_v \quad (1-3)$$

式中 ΔX ——系统每日产生的剩余污泥量 (以 SS 计), kg/d ;

Y ——污泥产率, $\text{kg VSS}/\text{kg BOD}_5$;

k_d ——衰减系数, d^{-1} ;

Q ——污水流量, m^3/d ;

S_0 、 S_c ——进、出水中 BOD_5 浓度, kg/m^3 ;

f ——SS 的污泥转换率, $\text{g MLSS}/\text{g SS}$ 。

德国水协 (DWA) 修订的单级活性污泥污水处理厂设计规范 (DWA-A 131) 中给出了剩余污泥量的计算表达式 (1-4)。该公式同时考虑了活性污泥代谢过程中惰性残余物及温度修正:

$$\Delta X = Q \cdot \frac{\frac{X_{\text{COD, inert}}}{1.33} + X_{\text{COD, BM}} \frac{1 + 0.2t_{\text{TS}} b F_{\text{T}}}{0.92 \times 1.42} + f_{\text{B}} X_{\text{SS}}}{1000} \quad (1-4)$$

式中 F_{T} ——温度修正系数；

X_{SS} ——进水 SS 浓度，mg/L；

t_{TS} ——污泥泥龄，d；

b ——衰减系数， d^{-1} ，一般取值 0.17 d^{-1} ；

f_{B} ——SS 中无机物的比例（灼灼残渣），无初沉池建议取值 0.3，有初沉池建议取值 0.2；

$X_{\text{COD, inert}}$ ——进水中惰性颗粒性 COD 浓度，mg/L；

$X_{\text{COD, BM}}$ ——生物质中 COD 浓度，mg/L。

温度修正系数 F_{T} 的计算公式为：

$$F_{\text{T}} = 1.072^{(T-15)} \quad (1-5)$$

$$X_{\text{COD, inert}} = f_{\text{A}} X_{\text{COD}} = f_{\text{A}} X_{\text{SS}} \times 1.6(1 - f_{\text{B}}) \quad (1-6)$$

$$X_{\text{COD, BM}} = \frac{C_{\text{COD, abb}} Y}{1 + b t_{\text{TS}} F_{\text{T}}} \quad (1-7)$$

$$C_{\text{COD, abb}} = C_{\text{COD}} - S_{\text{CSB, inert, AN}} - X_{\text{COD, inert}} = C_{\text{COD}}(1 - f_{\text{S}}) - X_{\text{COD, inert}} \quad (1-8)$$

式中 T ——曝气池温度， $^{\circ}\text{C}$ ；

f_{A} ——颗粒性 COD 中惰性组分的比例，建议取值 0.3；

Y ——污泥产率，g/g（每克可生物降解的 COD 产生的生物质克数），取值 0.67 g/g ；

$C_{\text{COD, abb}}$ ——进水中可生物降解的 COD 浓度，mg/L；

f_{S} ——COD 中惰性溶解性组分的比例，建议取值 0.05；

C_{COD} ——进水 COD 浓度，mg/L。

(3) 化学污泥产量计算

化学污泥产生量主要包括投加的化学药剂以及所结合的悬浮物、胶体等，受化学剂种类繁多、水质差别等影响，目前没有统一的计算方法。为了比较准确地计算化学污泥产量，建议采用文献法和实验法。

1) 文献法 就是通过理论添加药量和单位药量产泥量来确定相关的产率系数,如报道的铁盐和铝盐的产泥系数分别为 $4 \sim 5\text{g SS/g Fe}$ 和 $6 \sim 7\text{g SS/g Al}$ 。当文献所报道的水质与待计算的水质相近时,该法可以获得比较准确的污泥产量,但因文献所提供的数据一般为范围值,有时计算结果差距较大。

2) 实验法 通过实验投加化学药剂并计量、计算实际产泥量为实验法,实验法所计算的污泥产量一般较准确,但需要多次重复实验统计,甚至在水质变化较大的场合要通过长时间实验。此外,对一些现阶段难以取到水样的场合此法难以应用。

1.3 污泥的组分

污泥组成非常复杂,含有碳、氮、磷、钾等营养物质,也含有 Ca、Fe、Zn 等金属离子以及一些微量元素。宏观上看,污泥组分由 5 个部分组成: a. 由原废水带入的颗粒物 M_o ; b. 栖息在污泥上有活性的微生物群体 M_a ; c. 微生物内源代谢、自身氧化残留物,如细胞膜、细胞壁等,为难降解惰性有机物质 M_e ; d. 由原废水带入的微生物难降解的惰性有机物质 M_i ; e. 污泥的无机组成组分 M_{ii} ,包括从原废水带入的无机物和微生物体内存在的无机盐类。

1.3.1 微生物群体

微生物群体由细菌、真菌、原生动物、后生动物等组成,其中主要为细菌。污泥微生物群体中影响污泥特性的主要物质为胞外聚合物(Extracellular Polymeric Substances, EPS)。EPS 是由微生物分泌并包围在微生物周围的一大类高分子聚合物的总称,是污泥絮体的主要组成部分,占有机质总量的 $50\% \sim 60\%$,而细胞仅占有机质总量的 $2\% \sim 20\%$ 。EPS 主要包括了微生物絮体、微生物水解及衰亡产物,以及附着在微生物絮体上的污水中有机物等,该类物质主要以 C 和 O 元素组成的高分子多糖、蛋白质、核酸、腐殖酸类复杂有机化合物及油脂等形式存在,其中蛋白质和多糖占 EPS 总量的 $70\% \sim 80\%$ 。EPS 的来源可能有两种:一种是活性污泥在代谢环境基质的过程中产生,这类 EPS 的数量和组成受环境中所

含物质种类的影响；另一种则来源于细胞本身的新陈代谢和自溶。

在结构上 EPS 可以分为 2 种类型（见图 1-3）。

① 微生物絮体最外层，结构松散，可向周围环境扩散，无明显边缘且具有明显流动性的部分称为松散附着的外层，又称黏性聚合物（Loosely Bound EPS, LB-EPS）。

② 位于 LB-EPS 内层和细胞体表面之间，各种大分子排列紧密且与细胞壁结合牢固，不宜脱落的称为紧密黏附的内层，又称胞囊聚合物（Tightly Bound EPS, TB-EPS）。

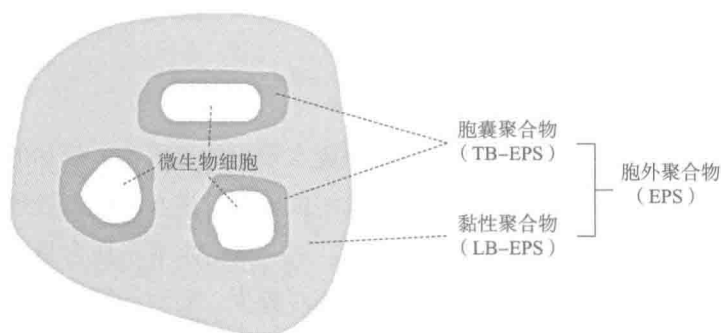


图 1-3 微生物细胞和胞外聚合物示意

1.3.2 难降解惰性有机物质

污泥中难降解惰性有机物质包含两部分：一部分是溶解性微生物产物，包括微生物内源代谢产物、自身氧化残留物等，如细胞膜、细胞壁等，这些物质是污泥中难降解惰性有机物质的主要组分；另一部分为污泥吸附的来自污水中自身携带的大分子物质，如有机磷农药、芳香族化合物、有机氯化物以及一些长链有机化合物等，这部分物质含量很少，但在一定程度上影响污泥的资源化利用。

溶解性微生物产物（SMP），即可溶态物质，是指微生物在降解污染物的同时通过细胞裂解、细胞膜扩散、合成代谢损失等方式向周围环境中释放的溶解态物质。有些文献将 SMP 定义为微生物在降解污染物时利用基质、进行内源呼吸或者应对环境压力的过程中所产生的溶解态有机物，该物质能够在不破坏微生物细胞的情况下与微生物分离，而且微生物细胞离开该物质仍能存活。

从生物学角度可将 SMP 分为两类。

1) 与微生物有关型产物 (Biomass Associated Products, BAP) BAP 是微生物在内源呼吸过程中, 伴随细胞解体释放出来, 与微生物的增殖无关, 只与细胞内源呼吸 (如细胞裂解、细胞衰亡等) 有关, 生成速率与生物量水平成正比。

2) 与基质利用相关型产物 (Utilization Associated Products, UAP) UAP 是微生物在分解基质产生能量、进行自身生长繁殖时释放出的产物, 与基质降解、微生物代谢或细胞生长有关, 其生长速率与基质的分解速度成正比。

1.3.3 无机组成部分

污泥中无机组成部分主要包括从原废水带入的无机物、投加的无机物和微生物体内存在的无机盐类等。无机组成比例与进水水质和处理工艺等直接相关, 因此不同污泥之间差别较大。对一些进水有机质含量高、含砂量少的污水处理厂, 其污泥中无机组成相对较少。而对于那些进水无机物含量高、具有深度处理、化学除磷等工艺的污水处理厂, 其污泥中无机组分明显很高, 甚至高达 70%。污泥中无机组分直接影响污泥处理处置的选择, 如无机组分过高, 难以采用厌氧消化、焚烧等工艺, 无机组分中重金属浓度高则不能采用土地利用等方式。

1.4 污泥的性质和指标

污泥是水处理过程中的副产物, 它的产量和性质受很多因素影响。从水的来源、用途以及成为废水之后的收集、运输, 直到废水处理, 都影响着污泥的性质。因此, 污泥是一种复杂产物, 每个污水厂的污泥性质大不相同。只有了解了污泥的特性, 才能更好地处理处置和利用污泥。为了更好地体现不同污泥的特性差别, 人们提出了诸如物理指标、化学指标、生物指标等多个表征污泥性质的指标。

① 物理指标参数提供了污泥可加工性和可操作性的一般信息。

② 化学指标参数与污泥中的营养元素以及有毒化合物等有关, 为污泥的能源、资源化利用提供依据。