

市政污泥特性与 再生利用引论

SHIZHENG WUNI TEXING YU
ZAISHENG LIYONG YINLUN

雍 毅 吴香尧 主编

中国环境出版社

市政污泥特性与再生利用引论

雍 毅 吴香尧 主编



中国环境出版社·北京

图书在版编目(CIP)数据

市政污泥特性与再生利用引论/雍毅, 吴香尧主编. —北京:
中国环境出版社, 2016.3

ISBN 978-7-5111-2728-0

I. ①市… II. ①雍… ②吴… III. ①市政工程—污
泥利用 IV. ①X703

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第044572号

出 版 人 王新程
责任编辑 杨吉林
责任校对 尹 芳
封面设计 岳 帅

出版发行 中国环境出版社
(100062 北京市东城区广渠门内大街16号)
网 址: <http://www.cesp.com.cn>
电子邮箱: bjgl@cesp.com.cn
联系电话: 010-67112765 (编辑管理部)
发行热线: 010-67125803, 010-67113405 (传真)

印 刷 北京市联华印刷厂
经 销 各地新华书店
版 次 2016年5月第1版
印 次 2016年5月第1次印刷
开 本 787×960 1/16
印 张 11.25
字 数 170千字
定 价 45.00元

【版权所有。未经许可, 请勿翻印、转载, 违者必究。】
如有缺页、破损、倒装等印装质量问题, 请寄回本社更换。

前 言

21 世纪初以来,我国在城市生活污水处理上仅政府投资已近万亿元,表面上成绩斐然,实际上生活污水处理达标了,但污染物大都还在,原生活污水中各种污染物却大部分遗留在污泥中,污泥成了污水中各种污染物的“收容所”。以普通活性污泥法处理城市生活污水为例,原污水中 BOD 经生化处理过程约 42%被氧化分解为 H_2O 和 CO_2 , 约 48%转入污泥中, 10%随尾水排入环境;原污水中的重金属在生化处理过程有 70%~90%转入污泥中;而原污水中病原菌及寄生虫卵 90%以上转入污泥中。至于原污水中的多氯联苯、邻苯二甲酸等也大部分转到污泥中。可见城市生活污水处理厂只把污水处理到位,缺少污泥处理处置环节,不像欧美国家那样,将生活污水处理和污泥处理处置作为一个整体工程予以统一规划、统一设计、统一核算,形成一个完善成套的处理工艺体系。可是我国城镇生活污水处理系统没有配备污泥处理处置设施,未能成为一个完善成套的处理工艺体系,随着我国城镇污水处理厂不断建设,污泥不断产出,污泥处理处置却未及时跟上,据统计目前我国城镇生活污水处理厂每年污泥产生 2 500 多万吨(含水率 80%),其中大部分(80%以上)污泥未做稳定化、无害化处理而随意堆放,仅 10%进行安全填埋,少量做焚烧处理,大量污泥存在二次污染的环境风险,造成环境污染问题逐渐凸显,给环境带来长期的生态隐患,已引起社会各界关注和政府部门的重视,为此四川省环境保护厅科技标准处特拨专款设立“四川省生活污水处理厂污泥特性及实用处置技术研究”项目,试图在了解市政污泥特性的基础上,开展行之有效的实用的市政污泥处理处置工艺技术的探索和研究,包括市政污泥高温好氧堆肥试验和蚯蚓立体养殖处理污泥的试验。本书是该项目研究成果的结晶。

四川省固体废物处理专业委员会意识到市政污泥既是污染源,又是可再生资源(包括生物质能源和土地利用的肥料源),只要把握市政污泥的特性,根据污泥所具有的特性和所在城市的社会经济条件,选择技术可行、经济合理、市场允许的污泥再生利用工艺技术,可以将市政污泥变成非常有活力的再生资源。于是

在四川省环境科学研究院和四川省环境科学学会的关怀下，在专委会主任雍毅研究员领导下，组织以吴香尧教授为主的 11 人研究团队（其中包括成都理工大学李文博、安米基两位硕士研究生），开展本项目研究。本书由雍毅、吴香尧主编，由吴香尧执笔，书中若有不当之词或不妥学术观点，概由执笔者负责。参加本书编写工作的还有吴怡、薛嘉、梁荫、尹朝阳、黄洁、许禄钟、辜祖谈。

书中着重介绍市政污泥静态高温好氧堆肥和蚯蚓养殖处理脱水污泥的土地利用工艺技术，强调热水解预处理加高固率厌氧消化加沼气提纯的生物质能源利用新工艺技术，也详细介绍市政污泥制砖和生产水泥的工艺技术，但愿在学术界目前正处于摸索和研发市政污泥处理和再生利用各种工艺技术之际，对从事市政污泥再生利用的同行有参考价值。

本书出版得到了四川省环境保护厅科技标准与产业发展处的大力支持，特此致谢！

吴香尧

2015 年 11 月于成都

目 录

1	市政污泥的种类	1
1.1	初沉污泥	1
1.2	二沉污泥（生物处理污泥）	1
1.3	化学污泥	2
1.4	混合污泥	2
1.5	消化污泥	2
2	市政污泥产生量	3
2.1	制约污泥产生量的因素	3
2.1.1	污水进/出水的水质	3
2.1.2	污水处理工艺及运行状况	3
2.1.3	运行条件	8
2.1.4	管道系统	8
2.1.5	絮凝剂添加量	9
2.2	市政污泥产生量计算方法	9
2.2.1	按单位污水处理量的污泥产生率进行计算	9
2.2.2	根据生活污水净化过程 COD_{Cr} 削减量计算污泥产生量	14
2.2.3	根据污水处理工艺及运行条件计算污泥产生量	15
2.3	四川省城镇生活污水处理厂污泥产生量汇总	18
2.4	市政污泥产生量规模等级的划分	20
3	市政污泥的特性	22
3.1	市政污泥的含水率	22
3.1.1	不同污水处理工艺的各种污泥含水率	22
3.1.2	不同含水率的污泥状态	23

3.1.3	污泥不同含水率的相对密度	23
3.1.4	市政污泥不同含水率的体积差异	24
3.2	市政污泥的脱水性能	24
3.2.1	污泥中水分的存在形式	25
3.2.2	市政污泥的比阻值和压缩系数	26
3.3	市政污泥的化学成分	28
3.3.1	市政污泥中的挥发性固体	28
3.3.2	植物营养成分	28
3.3.3	市政污泥中重金属元素含量、化学态及其活性控制	30
3.4	污泥的热值	43
3.4.1	不同种类市政污泥的热值	43
3.4.2	市政污泥含水率与热值的关系	44
3.4.3	我国市政污泥的低位热值	44
3.4.4	成都市主城区生活污水处理厂污泥的热值	44
3.4.5	四川省主要城镇生活污水处理厂污泥低位热值(干基)	45
3.4.6	市政污泥不同含水率的热值计算	47
4	市政污泥的处理与处置	48
4.1	何谓市政污泥处理与处置	48
4.1.1	何谓“污泥处理”	48
4.1.2	何谓“污泥处置”	49
4.1.3	污泥处理与处置关系	49
4.1.4	市政污泥处理处置应遵循的原则	49
4.1.5	市政污泥处置技术路线	50
4.2	市政污泥处置分类及其要求	51
4.2.1	市政污泥处置分类	51
4.2.2	市政污泥处置的基本要求	51
4.2.3	市政污泥各种处置方法的优缺点	52
4.3	市政污泥处理处置国内外动态	53
4.3.1	国外市政污泥处理处置现状和发展趋势	53
4.3.2	国内市政污泥处理处置现状和发展趋势	54

4.4 污泥处理工艺.....	56
4.4.1 污泥浓缩.....	57
4.4.2 污泥脱水.....	57
4.4.3 污泥干化.....	62
5 市政污泥再生利用	66
5.1 市政污泥土地利用.....	66
5.1.1 市政污泥土地利用的准入条件.....	67
5.1.2 市政污泥静态高温好氧堆肥工艺技术.....	68
5.1.3 市政污泥蚯蚓养殖处理工艺技术.....	99
5.2 市政污泥的生物质能源再生利用.....	122
5.2.1 市政污泥新型高效厌氧消化制生物天然气工艺技术.....	122
5.2.2 新型高效厌氧消化工程的优势.....	132
5.2.3 市政污泥焚烧发电.....	134
5.2.4 市政污泥热解气化.....	143
5.3 市政污泥建材利用.....	145
5.3.1 水泥窑协同焚烧市政污泥生产水泥.....	145
5.3.2 污泥制砖.....	147
6 促进市政污泥再生利用产业实现专业化、市场化发展的建议.....	151
7 市政污泥处理处置专项规划编制.....	153
7.1 规划编制的指导思想和编制原则.....	153
7.1.1 指导思想.....	153
7.1.2 编制原则.....	153
7.1.3 编制依据.....	153
7.2 现有市政污泥处置技术实用性分析.....	154
7.2.1 市政污泥土地利用的实用性分析.....	154
7.2.2 市政污泥焚烧处置实用性分析.....	155
7.2.3 污泥建材利用的实用性分析.....	156
7.2.4 市政污泥填埋的实用性分析.....	156

7.3 市政污泥处置方式选择.....	157
7.3.1 市政污泥处置方式选择的依据和原则.....	157
7.3.2 市政污泥处置方式选择的案例 ——以成都市和广安市污泥处置方案选择为例.....	158
8 建议与结语	169
8.1 建 议.....	169
8.2 结 语.....	170
参考文献	171

1 市政污泥的种类

市政污泥又称生活污水污泥，是指城镇生活污水处理厂在污水净化过程中产生的含水率不同的半固态或固态物（不包括栅渣、浮渣和沉砂），是一种含大量容易腐化发臭的有机物微粒为主的悬浮物与水相混合形成的呈胶体悬浊液状态的水合物，具胶体特性，组成极其复杂，含水率高，体积庞大，常含病原菌、寄生卵、重金属等有害物质；它主要由亲水性超胶体颗粒（ $\phi 1 \sim 100 \mu\text{m}$ ）和大颗粒（亲水性胶体聚集而成大颗粒）组成的凝聚体。因此可以说对市政污泥的研究在很大程度上是对污泥中胶体的研究，在探讨污泥脱水机理时必然涉及胶体化学理论与胶体界面理论。

市政污泥的种类根据生活污水处理过程的来源不同而分为如下几类。

1.1 初沉污泥

初沉污泥是指来自沉砂池和初沉池中沉降下来的悬浮物质和底泥，而沉砂池的沉渣与格栅池的栅渣一道外运清除。初沉池的污泥含固量在 2%~4%，即初沉污泥含水率达 96%~98%。

1.2 二沉污泥（生物处理污泥）

二沉污泥，又称生物处理污泥，是指污水中有机胶体和溶解性有机污染物经微生物降解作用而形成的悬浮固体，其中又分为如下两类：

（1）剩余污泥

这是指二沉池中采用活性污泥法处理过程产生的污泥，含固量仅 0.5%~1.0%，即含水率为 99%~99.5%。

（2）腐败污泥

这是指二沉池中由生物膜法处理过程产生的污泥，含固量达 1.0%~3.0%，即

含水率为 97%~99%。

1.3 化学污泥

这是指采用混凝沉淀工艺过程等化学处理法产生的污泥，其性质取决于选用的混凝剂种类[如选用聚丙烯酰胺（PAM）、硫酸铝（MC）等]，选用的混凝剂不同，所产生的污泥性质便有所不同。

1.4 混合污泥

这是指生活污水经二级处理后产生的各种污泥所混合的产物，即上述各种污泥混合的产物，含固率达 2.5%~7.0%。本书采集的污泥样品都是初沉污泥和剩余污泥相混合的污泥，其中初沉污泥占 60%~70%，剩余污泥占 30%~40%。

1.5 消化污泥

这是指初沉污泥和剩余污泥经消化处理后（主要是厌氧消化工艺）产出的污泥。由于消化处理使原污泥中大部分有机物被消化分解而不易腐败；又由于原污泥中的病原菌和寄生虫卵被杀灭而无害化，因此消化污泥已成为稳定化、无害化的污泥，其中厌氧消化污泥含固率一般为 2.5%~7.0%；好氧消化污泥含固率一般为 1.5%~4.0%。

2 市政污泥产生量

市政污泥产生量是指城市生活污水净化处理过程产生的污泥量，它占进行处理的污水体积总量的 0.3%~0.5%，或者占处理的污水质量总量的 1%~2%；如果污水进行深度处理，污泥产生量将可能增加 0.5~1.0 倍。

2.1 制约污泥产生量的因素

一座城市生活污水处理厂在一定的污水处理规模下，由于水质和采用的处理工艺不同、处理程度的差异、泥龄大小、运行管理水平高低等都可能造成污泥产生量的不同，可见污泥产生量受到诸多因素制约，现分别阐述如下。

2.1.1 污水进/出水的水质

污水进水水质（指污水中溶解性有机物和悬浮固体浓度，即污水中 COD 和 BOD 浓度）和净化后排出水的水质之差是标志污水净化处理程度，净化处理程度越高，污泥产生量也就越少，可见生活污水的进水水质及其处理程度是影响污泥产生量的主要因素。

2.1.2 污水处理工艺及运行状况

生活污水处理工艺类型不仅决定污水净化效果，也决定污水净化过程的污泥产生量以及污泥处理方式。可是不同污水处理工艺类型的选择依据和处理效果是不同的。

（1）城镇生活污水处理工艺类型选择依据及其处理效果

城镇生活污水处理工艺类型的选用必须综合考虑、优化选择，其选择依据主要有如下几个方面。

1) 生活污水处理规模

生活污水二级处理工艺主要是生物法,其目的是大幅度去除污水中呈胶体和溶解态有机物,至于采用何种工艺类型,则需根据生活污水处理规模,选用恰当的处理工艺类型:

①污水处理规模大于 20 万 t/d,则污水二级处理常选用常规活性污泥法,产生的污泥宜用厌氧消化工艺进行处理。

②污水处理规模 10 万~20 万 t/d,则污水二级处理可选用如下某一种工艺类型:常规活性污泥法/氧化沟法(连环反应活性污泥法)/SBR 法(序批式活性污泥法)/AB 法(生物吸附氧化法)。

③污水处理规模小于 10 万 t/d,则污水二级处理可选用如下一种工艺类型:氧化沟法/SBR 法/AB 法/水解好氧法/生物滤池法。

2) 受纳水体的环境功能

受纳水体计有水资源保护区、封闭或半封闭水体以及非水资源保护区等三种,不同受纳水体,城镇生活污水处理级别及其处理工艺是不同的,如果只是非水资源保护区的水体,采用一级沉淀法和二级生物法处理即可,否则必须进行三级深化处理,包括生物脱氮法和化学凝聚法,当然产生的污泥量也就不同。

3) 通过技术经济全面比较,选择合适的污水处理工艺,这包括处理单位污水量的电耗、成本及其它投资;削减污水中单位污染物的电耗、成本及其它投资。

(2) 生活污水处理工艺类型

四川省县级以上城市生活污水处理厂计有 155 座,其中设市城市 60 座,县城 95 座,它们采用 A^2/O 工艺(厌氧/缺氧/好氧工艺)的有 29 座,污水处理规模 189.9 万 m^3/d ;采用氧化沟工艺的有 52 座,污水处理规模 119.83 万 m^3/d ;采用 CASS 工艺(循环式活性污泥法)的有 21 座,污水处理规模 52.75 万 m^3/d ;采用 SBR 工艺(序批式活性污泥法)的有 16 座,污水处理规模 51.2 万 m^3/d ;采用 BAF 工艺(曝气生物滤池)的有 17 座,污水处理规模 25.7 万 m^3/d ;采用其它工艺的有 19 座,污水处理规模 51.1 万 m^3/d ;采用 UNITANK 工艺(UNITANK——将生化池和沉淀池合二为一的技术)有 1 座,污水处理规模 5 万 m^3/d 。现将四川省县级以上生活污水处理厂污水处理工艺及其规模列于表 2-1;我国城市生活污水处理厂污水处理工艺调查统计结果列于表 2-2。

表 2-1 四川省县级以上污水处理厂污水处理工艺及其规模

城市级别	处理工艺	污水厂座数	污水处理规模/ (万 m ³ /d)	工艺所占比例/%
设市城市 (60 座)	A ² /O	15	161.9	25.0
	氧化沟	13	54.0	21.7
	CASS	7	26.0	11.7
	SBR	9	34.5	15.0
	BAF	5	19.0	8.3
	UNITANK	1	5.0	1.7
	其它工艺	10	45.2	16.7
县城 (95 座)	A ² /O	14	28.0	14.74
	氧化沟	39	65.83	41.05
	CASS	14	26.75	14.74
	SBR	7	16.7	7.37
	BAF	12	6.7	12.63
	其它工艺	9	5.9	9.47

注：（1）设市城市包括省级市、地级市和县级市；

（2）统计数据截止日期 2010 年 5 月。

表 2-2 我国城市污水处理厂处理工艺调查统计

污水处理工艺	污水厂数/座	所占比例/%
常规活性污泥法	61	29.05
氧化沟	52	24.76
A ² /O	19	9.05
A/O*	22	10.48
AB	8	3.81
SBR	19	9.05
自然净化	21	10
其它	8	3.8

*A/O 指厌氧/好氧的单极治理污泥脱盐法。

本书为了利于四川同行的参考和引用,特将四川省 60 座设市城市的生活污水处理厂数量、工艺及处理规模列于表 2-3;将四川省 91 座县城生活污水处理厂污水处理工艺及其处理规模列于表 2-4。

表 2-3 四川省 60 座设市城市的污水厂数量、工艺及规模

城市	数量	工艺	规模/ (万 m ³ /d)	城市	数量	工艺	规模/ (万 m ³ /d)
成都主城区	9	一厂 A/O/E	134	都江堰市	1	氧化沟	4
		二厂~八厂 A ² /O 高新区 SBR		彭州市	2	SBR, 其它	6
自贡市	2	氧化沟	10	邛崃市	1	氧化沟	2
攀枝花市	5	CASS, BAF, 传统活性污泥	9.4	崇州市	1	氧化沟	2
泸州市	2	UNITANK, CASS	9	广汉市	1	BAF	5
德阳市	2	氧化沟, 改良型氧化 沟	15	绵竹市	1	CASS	2.5
绵阳市	4	A/O/E, 氧化沟	27.5	什邡市	1	SBR	3
广元市	1	CASS	5	江油市	1	传统活性污 泥法	5
遂宁市	3	CASS (1), SBR (2)	13	峨眉市	2	其它	5
内江市	1	CASS	10	眉山市	1	BAF	4
乐山市	2	氧化沟, 改良 SBR	8	资阳市	1	氧化沟	5
南充市	3	CASS, 其它	15	西昌市	2	DE/BAF	6
宜宾市	2	A ² /O 等	17	阆中市	1	BAF	3
广安市	2	其它	5	华蓥山市	1	传统活性污 泥法	1
达州市	1	其它	4	万源市	1	其它	2.5
巴中市	1	SBR	8	简阳市	1	氧化沟	2.5
雅安市	1	BAF	5				

注:绵阳市塔子坝污水厂一期采用氧化沟,二期采用 A/O/E+LIER-POOLK 工艺。

表 2-4 四川省 91 座县城生活污水处理厂处理工艺及其规模

县城		污水处理工艺	规模/ (万 m ³ /d)	县城		污水处理工艺	规模/ (万 m ³ /d)
成都市	温江区	氧化沟, SBR	6+8	南充市	蓬安县	BAF	1.5
	青白江区	氧化沟	10		营山县	改良型氧化沟	1.5
	龙泉驿区	SBR	2		仪陇县	氧化沟+厌氧池	1
	新都区	氧化沟, A ² /O	6+1.5		南部县	氧化沟	3.5
	金堂县	氧化沟	1.98		西充县	氧化沟	1
	郫县	其它	5	宜宾市	宜宾县	CASS	2
	大邑县	氧化沟	1.9		江安县	BAF	1
	新津县	SBR, 活性污泥法	1+1		高 县	BFBR	0.3
	双流县	SBR	5		筠连县	氧化沟	0.5
	蒲江县	氧化沟	1		南溪县	CASS	1
自贡市	贡井区	BAF	1.5		长宁县	CASS	1.5
	富顺县	SBR	1.5		兴文县	SBR	1
	荣 县	BAF	1.5		珙 县	CASS+BAF	2
攀枝花	盐边县	改良型氧化沟	0.5	达州市	宣汉县	ICEAS	2.5
	米易县	氧化沟	1		大竹县	CASS	4
泸州市	纳溪区	CASS	0.75		渠 县	A ² /O	3
	泸 县	SBR	1.2		开江县	CRBAL	4.5
	合江县	CASS	2	巴中市	南江县	一体化氧化沟	1
	叙永县	CASS	2		平昌县	BAF	2
	古蔺县	氧化沟	0.75		通江县	CASS	3
德阳	中江县	氧化沟	1.5	雅安市	名山县	氧化沟	0.5
	安 县	A ² /O	0.7		天全县	BAF	0.8
绵阳市	北川县	A ² /O	2.4		芦山县	改良型氧化沟	0.7
	三台县	CASS	2.5		宝兴县	A ² /O	0.3
	盐亭县	氧化沟	1.5		石棉县	氧化沟	1
	平武县	改良型 A ² /O	0.8	眉山市	彭山县	其它	2
	梓潼县	氧化沟	1.5		丹棱县	氧化沟	0.5
广元市	元坝区	BAF	1		青神县	氧化沟	1
	剑阁县	氧化沟	2		洪雅县	氧化沟	2
	青川县	氧化沟	0.5		仁寿县	BAF	3
	苍溪县	BAF	1	资阳市	安岳县	传统活性污泥法	2
	旺苍县	氧化沟	3		乐至县	氧化沟	1

县城		污水处理工艺	规模/ (万 m ³ /d)	县城		污水处理工艺	规模/ (万 m ³ /d)
遂宁市	大英县	CASS	2	乐山市	沐川县	氧化沟	0.5
	苍溪县	其它	0.5		犍为县	CASS+深度处理	1.5
	射洪县	传统活性污泥法	6		马边县	氧化沟	1
内江市	资中县	生物流化床	2	阿坝州	马尔康县	传统活性污泥法	1
	威远县	传统活性污泥法	2		九寨沟县	氧化沟	2
	隆昌县	其它	3		松潘县	BAF	1
乐山市	金口河区	氧化沟	0.5		小金县	氧化沟	0.3
	沙湾区	CASS	1.5		汶川县	氧化沟	1.2
	五通桥区	CASS+滤池	1		茂县	生物脱氮除磷	1.2
	夹江县	SBR	2	甘孜州	康定县	氧化沟	1
	峨边县	氧化沟+BAF	0.4		泸定县	微爆氧化	0.6
	井研县	氧化沟	1		稻城县	A/O	0.3

注：(1) 凉山州冕宁县、会理县、米易县、德昌县、盐源县缺项；

(2) 氧化沟也称循环曝气池，属改良的活性污泥法；

(3) 附着微生物的载体处于流化床状态的工艺。

2.1.3 运行条件

一种污水处理工艺的运行条件（包括污水负荷率、溶解氧浓度及泥龄等）也是影响污泥产生量的重要因素，比如污水负荷率；任何一种污水处理工艺，只要污水高负荷率，污泥产生率也就高（见表 2-5）。至于泥龄长短，其必然影响污水中有机污染物的生物降解效果，也就影响污水净化过程的污泥产生量。

表 2-5 各种污水处理工艺的不同负荷率污泥产生率

	负荷率	A ² /O	氧化沟	MBR
污泥产生率/ [kg (干) /m ³ (污水)]	高负荷	0.203	0.146	0.106
	中负荷	0.163	0.114	0.089
	低负荷	0.122	0.081	0.065

2.1.4 管道系统

在城市基础设施建设中，如果做到排污管道与雨水疏通管道分开，达到雨污分流，则进水的有机污染物浓度高，污水净化过程单位时间的污泥产生量也就大。