

**吴 静**

清华大学环境学院副研究员  
 1997年,获清华大学学士学位  
 2001年,获清华大学硕士和博士学位  
 2001年至今,清华大学环境系/学院教师  
 2003-2004年,法国科学研究中心博士后  
 2009年,法国科学研究中心外国研究员  
 主要研究方向: **高效生物反应器和水质预警**



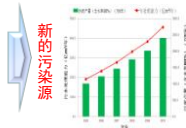
**提 纲**

- 我国污泥处理现状
- 国外污泥处理现状
- 国内外污泥厌氧消化的现状
- 污泥消化的技术瓶颈及解决办法
- 结语

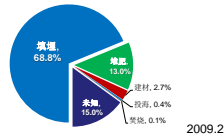
**我国污泥处理现状**

- 2011年底,已建成了**3000余**座城市污水处理厂。
- 城镇污水处理率已经超过**82%**。
- 大约产生**3000万吨湿泥/年**(80%含水率)。

- > 含水率高, 体积大
- > 有机质含量高, 易腐败
- > 病菌、寄生虫(卵)富集
- > 含有重金属
- > 含有二噁英等多环芳烃等



**我国污泥处理现状**



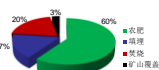
**污泥处理处置已经成为我国最紧迫的环境问题之一。**

**国外污泥处理现状**

- 欧洲:**
- 污泥处理始于上个世纪50、60年代, 主要方式是填埋和土地利用。
- 上世纪90年代中期之前, **污泥厌氧消化→干化→农肥或者填埋**
- 90年代后, **污泥厌氧消化→干化→焚烧**
- **目前重新重视土地利用**, 德国、英国和法国每年产生的污泥分别为(干重)220万吨、120万吨和85万吨, 污泥土地利用的比例分别已达到**40%、60%和60%**。

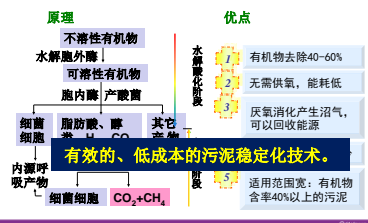
**国外污泥处理现状**

**美国:**  
一直是农业为主。



**日本:**  
 • 70%以上的污泥被焚烧后建材利用  
**厌氧消化→干化→焚烧→精滤**  
 • 近年来, 重视到污泥资源化利用, 污泥资源化比例, 体现了污泥稳定化、无害化和资源化的处理处置原则。  
 • “污泥厌氧消化+干化+土地利用”是各国的主要污泥处理处置工艺。  
 • 污泥厌氧消化可以与干化和焚烧组合使用。

**国外污泥厌氧消化现状**



**国外污泥厌氧消化现状**

**欧美各国大规模采用污泥厌氧消化技术**

- 美国68%、英国96.7%、瑞士95.1%、德国86.7%、荷兰66.2%、瑞典55.6%、丹麦52.3%、法国39%
- 德国: 大于3万人口当量的污水厂
- 法国: 规模大于10万人口当量的污水厂
- 瑞士: 5000人口当量以上的污水厂



### 国外污泥厌氧消化的现状

**·厌氧消化+干化+焚烧工艺**

图1 德国汉堡污泥处理工艺

图2 德国 KA Ischmstedt 污水处理厂污泥处理工艺

图3 法国 SIAAP Seine-Amont 污水厂的污泥处理工艺

### 国外污泥厌氧消化的现状

**厌氧消化+焚烧工艺**

- 德国 **Botrop 污水处理厂**：按134万当量人口设计。  
重力浓缩/浮选 → 预酸化池 → 厌氧消化 → 焚烧
- 奥地利 **Dokhaven 城市污水厂**  
浓缩 → 厌氧消化 → 焚烧

**优点：**

- ✓ 缩小干化和焚烧规模
- ✓ 干化和焚烧的规模可减少40%以上
- ✓ 增加污泥脱水的效率
- ✓ 污泥量和性质都更稳定，可减少甚至不建干化和焚烧的备用系统，进一步减小规模
- 干化和焚烧的运行费显著降低

### 我国的污泥处理技术路线的思考

1. 稳定化是污泥处理必不可少的工艺环节。  
相关技术包括厌氧消化、好氧堆肥和焚烧。
2. 资源化将成为我国主流的污泥处置工艺路线，而含水率降到50%是污泥资源化的关键。

· 国情（地少人多污泥多）决定**资源化**是污泥的**首选最终处置方式**。

· 资源化是发展循环经济的需要，是大趋势。

· 2011年国家发展改革委、住房城乡建设部联合出台的《关于进一步加强污泥处理处置工作的通知》中提出：“我国大部分地区可以采用“厌氧消化+（干化）+土地利用”

· 发达地区污泥和含重金属等污染物的污泥可考虑“厌氧消化+干化+焚烧”工艺。

### 我国污泥厌氧消化现状

**我国污泥厌氧产气的优势：**

- 原料充足，廉价
- 不受地域限制
- 不受季节限制
- 历史悠久，有成功经验可以借鉴

### 我国污泥厌氧消化现状

《城镇污水处理厂污泥处理处置技术指南(试行)》：  
(1) 厌氧消化后进行土地利用  
厌氧消化→脱水→自然干化(或好氧发酵)→土地利用  
脱水→厌氧消化→脱水→自然干化(或好氧发酵)→土地利用  
厌氧消化(或脱水后厌氧消化)→罐车运输→直接注入土壤

《“十二五”期间污泥处置建议》：大中型厂宜**优先选用厌氧消化污泥处理工艺**

**国家政策大力鼓励污泥厌氧消化!**

《城镇污水处理厂污染物排放标准(2002)》：城镇污水处理厂的污泥应进行**稳定化处理**，并规定了厌氧消化的指标。

### 我国污泥厌氧消化现状

- 全国大约仅有**50家**左右污水厂建有污泥厌氧消化系统。
- 经过厌氧消化的污泥不足**2%**。

### 我国污泥厌氧消化现状

- 新建了浙江宁海、北京小红门、上海白龙港、武汉三金潭、海口白沙门、杭州四堡、济宁市、重庆唐家沱等污水厂的污泥消化工程和大连夏家河污水厂等集中式污泥消化项目。

**污泥厌氧消化的发展与污泥问题的紧迫性相比，仍然显得过慢！**

**为什么？建设成本与消化效率！**

### 污泥消化的技术瓶颈及解决办法

**厌氧消化推广的瓶颈：**

**第一、厌氧消化反应慢，产气少**

### 污泥消化的技术瓶颈及解决办法

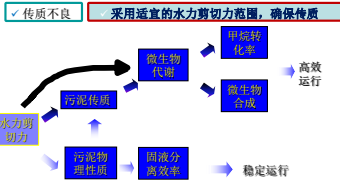
**污泥消化速率低的主要原因**

✓ 反应速率低

能否找到廉价的污水

污泥消化的技术瓶颈及解决办法

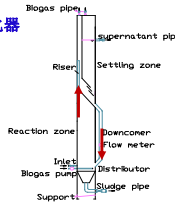
污泥消化速率低的主要原因



污泥消化的技术瓶颈及解决办法

内循环污泥厌氧消化器

- 升流式反应器
- 沼气回流强化传质
- 较强的抗冲击负荷能力, 运行稳定



污泥消化的技术瓶颈及解决办法



+预处理: 60°C, 40L  
 +反应器: 55°C, 210L  
 +接种污泥:  
 无锡卢村污水厂中温厌氧消化污泥  
 SS=10.4g/L VSS/SS = 0.36  
 +处理污泥:  
 昆山某污水厂A/A/O工艺剩余污泥  
 VSS/SS = 0.4-0.65

HRT=2+10.5d, VSS  
 降解率为60.0%。

污泥消化的技术瓶颈及解决办法



ICAD: 35度, 6.5m<sup>3</sup>  
 热水解温度55度  
 种泥: 22.3 gSS/L  
 VSS/SS = 0.56  
 昆山某污水厂A/A/O工艺的剩  
 余污泥, VSS/SS = 0.40-0.55

预处理 HRT (d)	消化HRT (d)	VSS去除率 (%)
1	27	72.8
1	20	54.8
1	12	56.3
1	10	37.3

污泥消化的技术瓶颈及解决办法

厌氧消化推广的瓶颈:  
**第二、厌氧消化加热能耗高**

污泥消化的技术瓶颈及解决办法

- 加热能耗高
- 廉价热源 (热泵)
- 高固消化 (含固率8%以上)



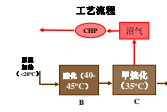
高固污泥厌氧消化中试 (含固率8-15%)



• 三套工艺:  
 40度热水解+中温消化  
 70度热水解+高温消化  
 70度热水解+高温消化+中温消化  
 HRT=25d, 含固率9%, 反应器容积-传统消化HRT为15.6d的容积, 需热仅6%左右;  
 HRT=25d, 含固率15%, 反应器容积-传统消化HRT为8.63d的容积, 需热仅33%左右。  
**显著降低了投资和运行成本。**

- 反应温度高的, 有机物去除率要高。
- 在相同HRT下, 两级工艺的有机物去除率高于单级的去除率。

高固污泥厌氧消化示范工程 (浙江宁海)



示范工程的能量平衡

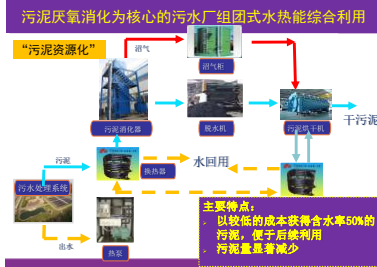
输入能量(kJ/h)	固体热值(kJ/h)	沼气的能量(kJ/h)	需热冷气的(kJ/h)
冬季 1.21 × 10 <sup>6</sup>	0.35 × 10 <sup>6</sup>	1.27 × 10 <sup>6</sup>	0.41 × 10 <sup>6</sup>
夏季 0.88 × 10 <sup>6</sup>	0.35 × 10 <sup>6</sup>	1.08 × 10 <sup>6</sup>	0.55 × 10 <sup>6</sup>

能量完全能够自足!

(清华和中特)

污泥消化的技术瓶颈及解决办法

厌氧消化的瓶颈:  
**第三、厌氧消化后污泥含水率高, 还需进行处理处置**



### 污泥消化的技术瓶颈及解决办法

**厌氧消化推广的瓶颈：  
第四、运行管理难度大**

### 污泥消化的技术瓶颈及解决办法

• 现场人员  
一个硕士生 + 一个水电工

**管对了，运行很简单！！**

### 结语

综上所述，

- “污泥厌氧消化+(干化)+土地利用”有可能成为我国的主要污泥工艺路线
- 厌氧消化可作为预处理工艺与干化焚烧组合使用
- 当前已具备了厌氧消化推广的经济、技术、政策等各方面的条件。

**厌氧消化推广的时刻到来了。**

**THANKS!**  
欢迎批评指正!

吴静  
wu\_jing@tsinghua.edu.cn  
010-62789121  
13801353077