

# 污泥性质解析与厌氧消化技术定位

李 欢

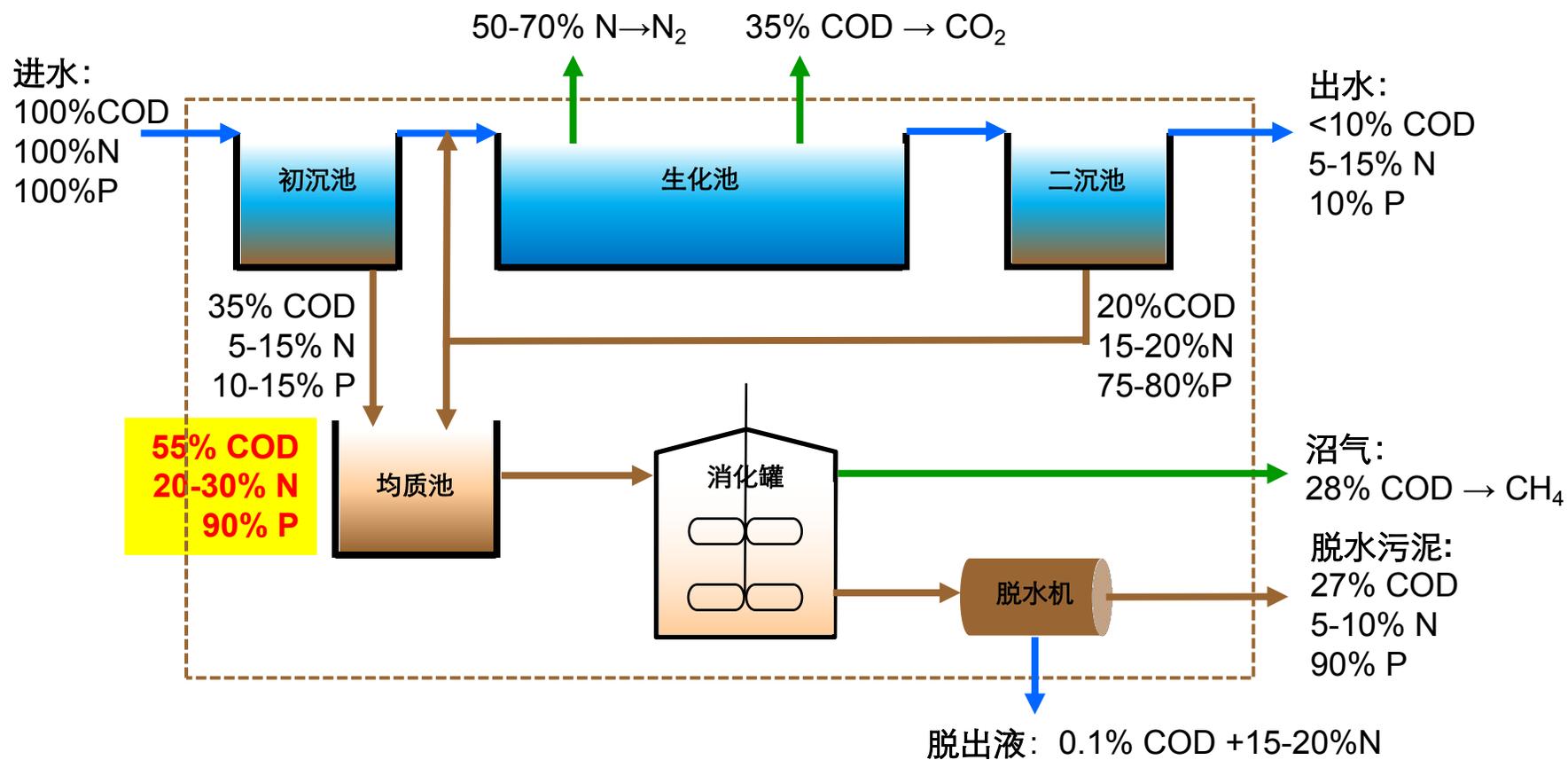
单 位: 清华大学, 深圳研究生院, 环境研究所

E-mail: [li.huan@sz.tsinghua.edu.cn](mailto:li.huan@sz.tsinghua.edu.cn)

- 污泥特性解析
- 污泥厌氧消化技术定位
- 污泥厌氧消化技术进展
- 污泥厌氧消化技术评估
- 污泥厌氧消化技术趋势

# 1. 污泥特性解析

## 1.1 污泥来源

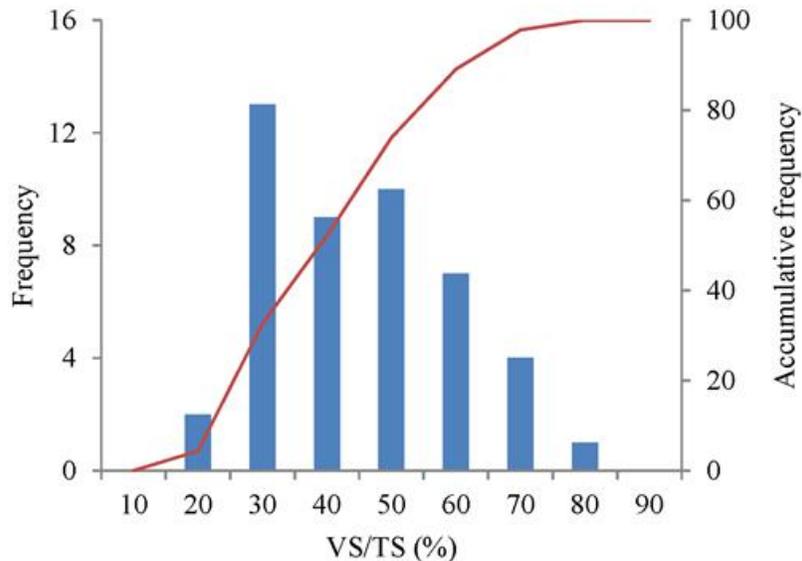
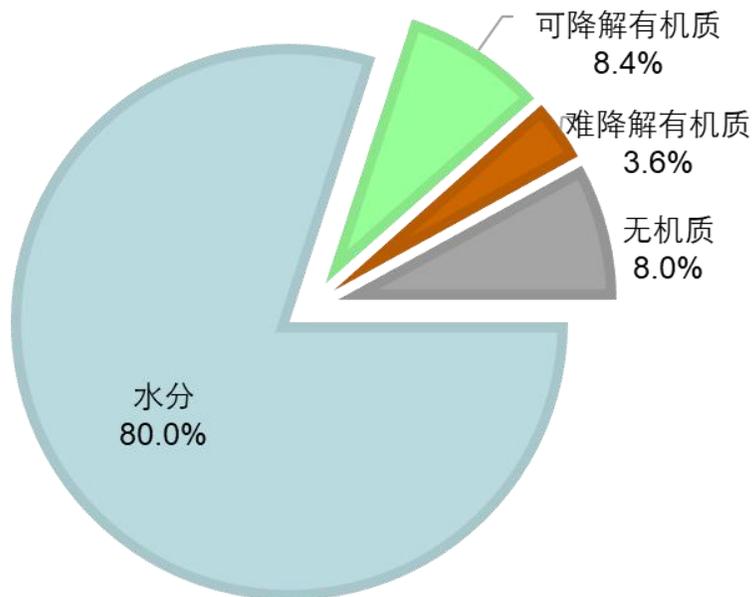




# 1. 污泥特性解析

## 1.2 污泥组分

- **寡资源**：主要是水分，其次才是约12%的有机质，微量的营养元素（2%）和低价值的无机质（8%），并含有多种污染物；
- 对单一低品位资源化产品（如生物炭、蛋白质、矿物成分、磷）的过度追求会导致系统处理成本和环境负荷的显著增加。

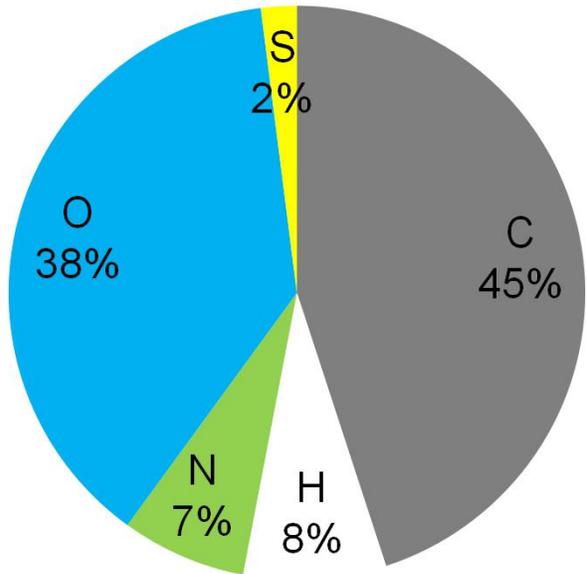




# 1. 污泥特性解析

## 1.2 污泥组分

- **寡资源：** 主要是水分，其次才是约12%的有机质，微量的营养元素（2%）和低价值的无机质（8%），并含有多种污染物；
- **对单一低品位资源化产品（如生物炭、蛋白质、矿物成分、磷）的过度追求会导致系统处理成本和环境负荷的显著增加。**



某地不同污水处理厂污泥有机质元素含量 (wt.%)

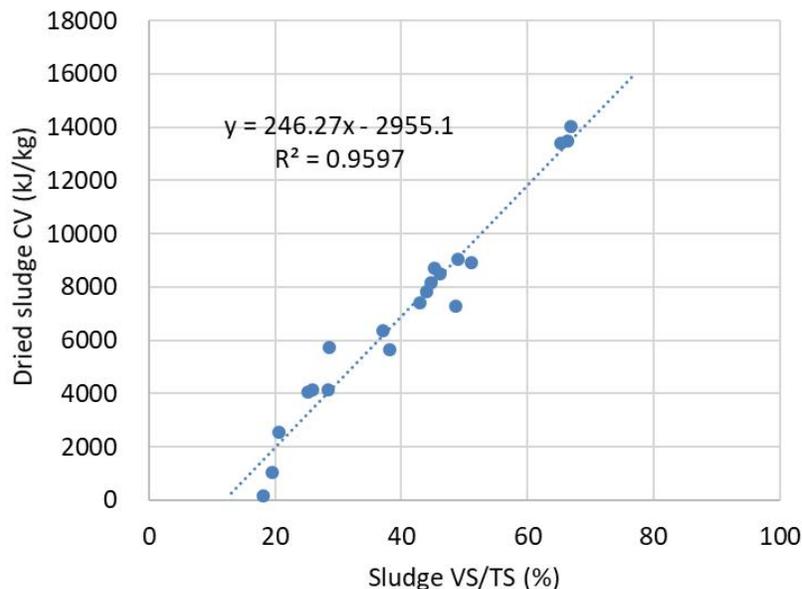
碳	氢	氧	硫	氮
46.39	8.29	36.49	1.49	7.34
46.39	7.78	37.36	1.55	6.92
44.87	7.61	39.61	1.52	6.39
44.08	7.58	40.03	1.4	6.91
44.63	7.53	39.85	1.3	6.69
44.79	7.14	39.59	1.45	7.04
38.08	6.05	49.32	1.3	5.25



# 1. 污泥特性解析

## 1.2 污泥组分

- **低热值**：污泥有机质含量60%时干基热值约12000 kJ/kg；1kg脱水污泥有机质热值约1440 kJ，低于水分蒸发所需的约2000 kJ；
- 污泥能源化本质是碳的利用，但其**碳含量低**，热化学转化过程，如**普通机械脱水+热干化+焚烧/混烧/热解/碳化**等不能实现能量净产出。
- 解决方法1：强化机械脱水
- **解决方法2：采用生物转化**  
液化、水热碳化

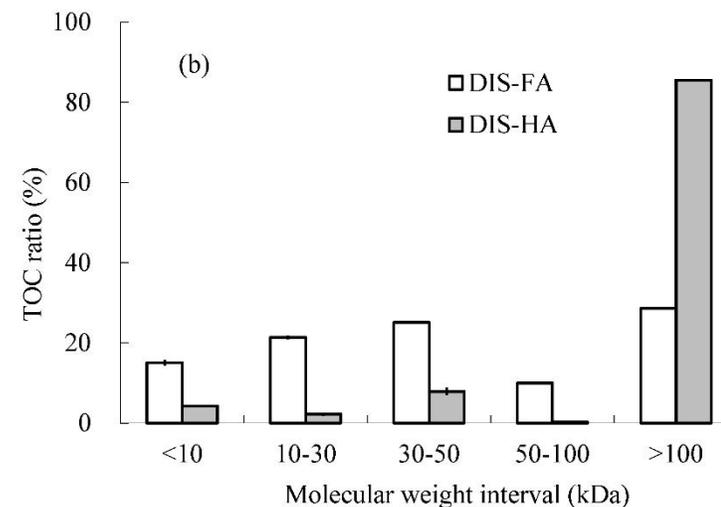
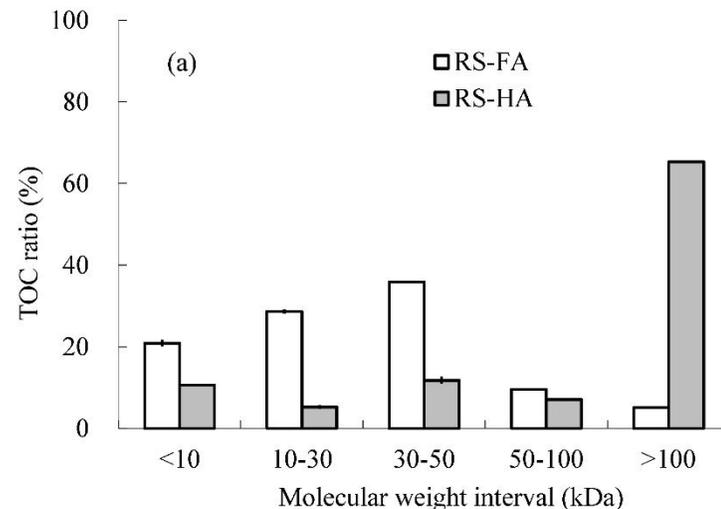
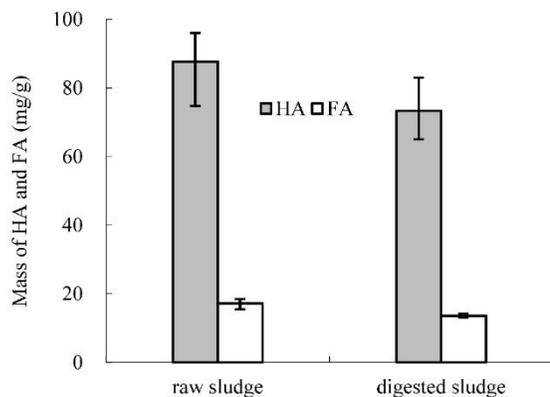




# 1. 污泥特性解析

## 1.2 污泥组分

- **生化转化难**：碳氮比失衡；有机质中难降解有机质占20~50%  
(木质纤维素8~38%；腐殖酸15~30%)
- 厌氧消化过程腐殖酸仅10%降解，且腐殖化程度加深

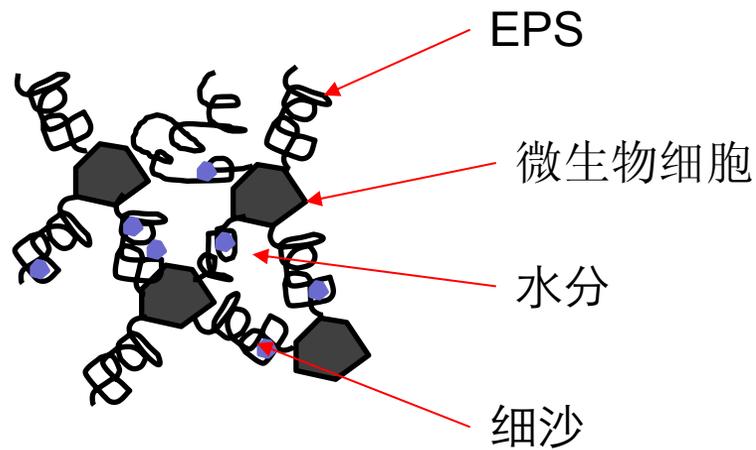




# 1. 污泥特性解析

## 1.3 污泥结构

- **絮体结构：**由微生物个体、胞外聚合物为骨架的絮体构成，二价金属离子起到链接EPS的作用，而水分、细小颗粒被裹挟在絮体内。
- 由于絮体和细胞壁的保护，污泥生物转化效率低





# 1. 污泥特性解析

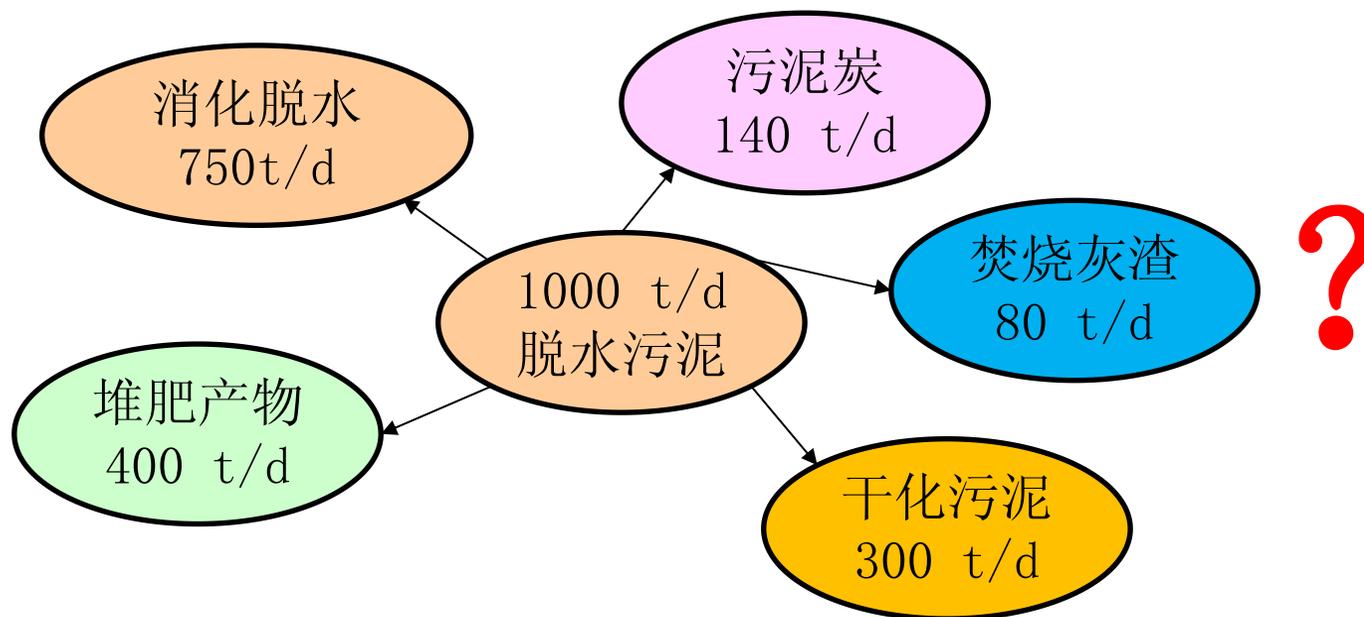
要进行科学的污泥处理处置，就必须充分认识污泥的**贫资源、低热值和絮体结构特性**，防止片面夸大污泥的资源属性，过度追求单一的资源化产品，而应在保证污泥无害化的前提下**采用综合的污泥处理处置系统**。



## 2. 污泥处理的逆向设计

### 2.1 为什么要逆向设计

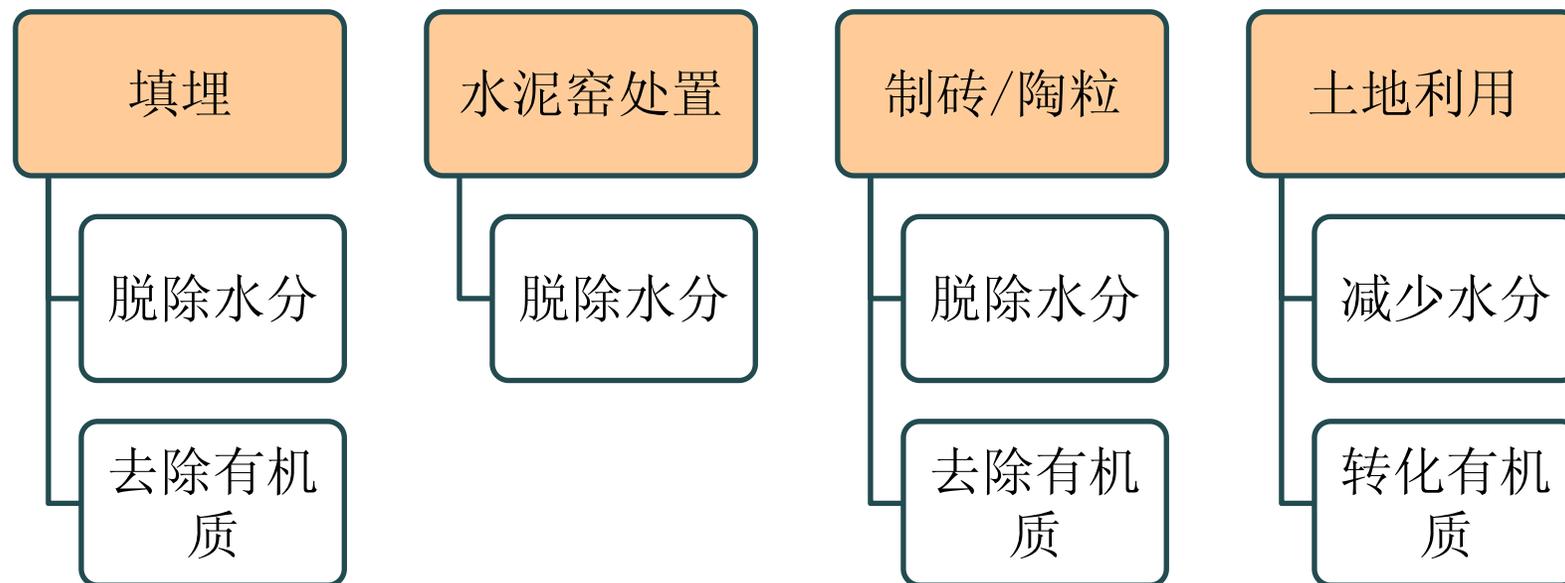
- 污泥的性质决定了不能依靠单一技术实现其安全消纳
- 传统流程正向设计的弊端：从处理到处置，（技术和经济上）忽视终端出口，很多项目实际上是半截工程，面临最终出路问题。





## 2. 污泥处理的逆向设计

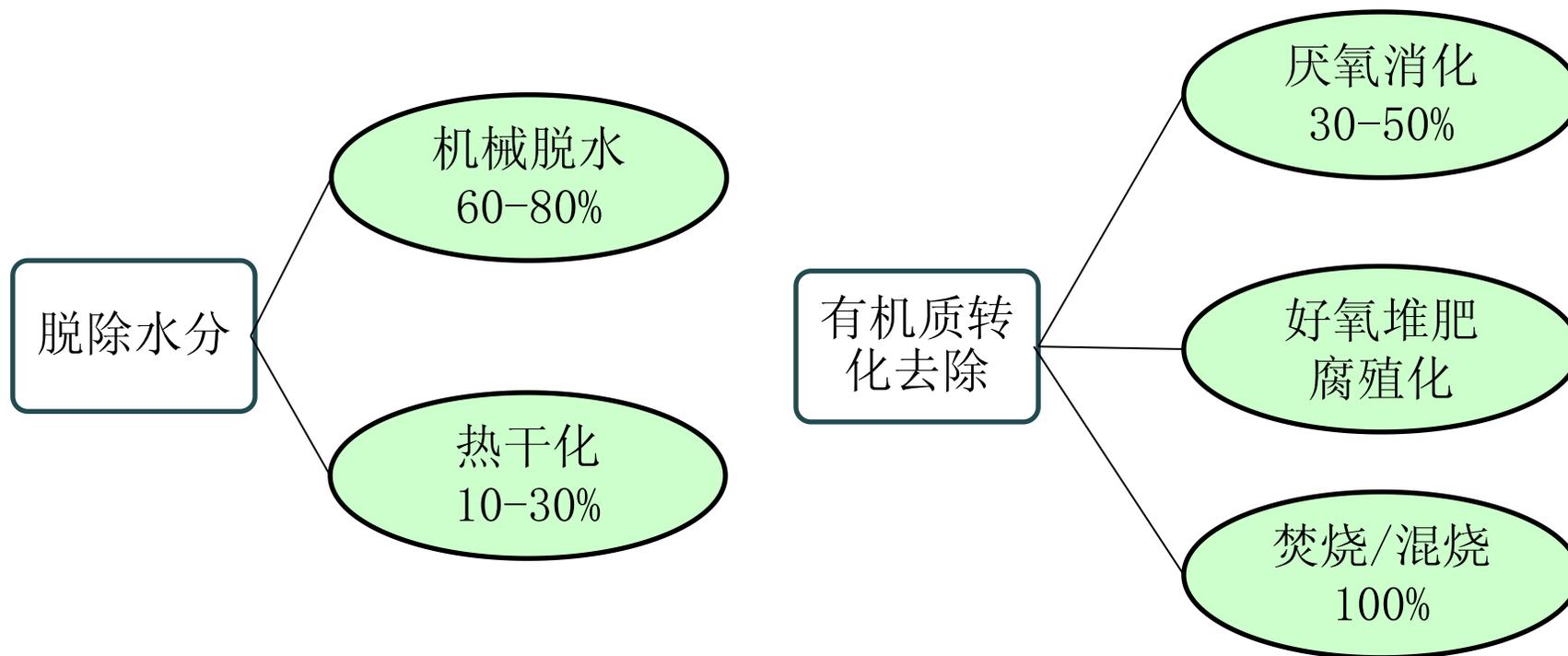
### 2.2 从最终处置看前处理需求





## 2. 污泥处理的逆向设计

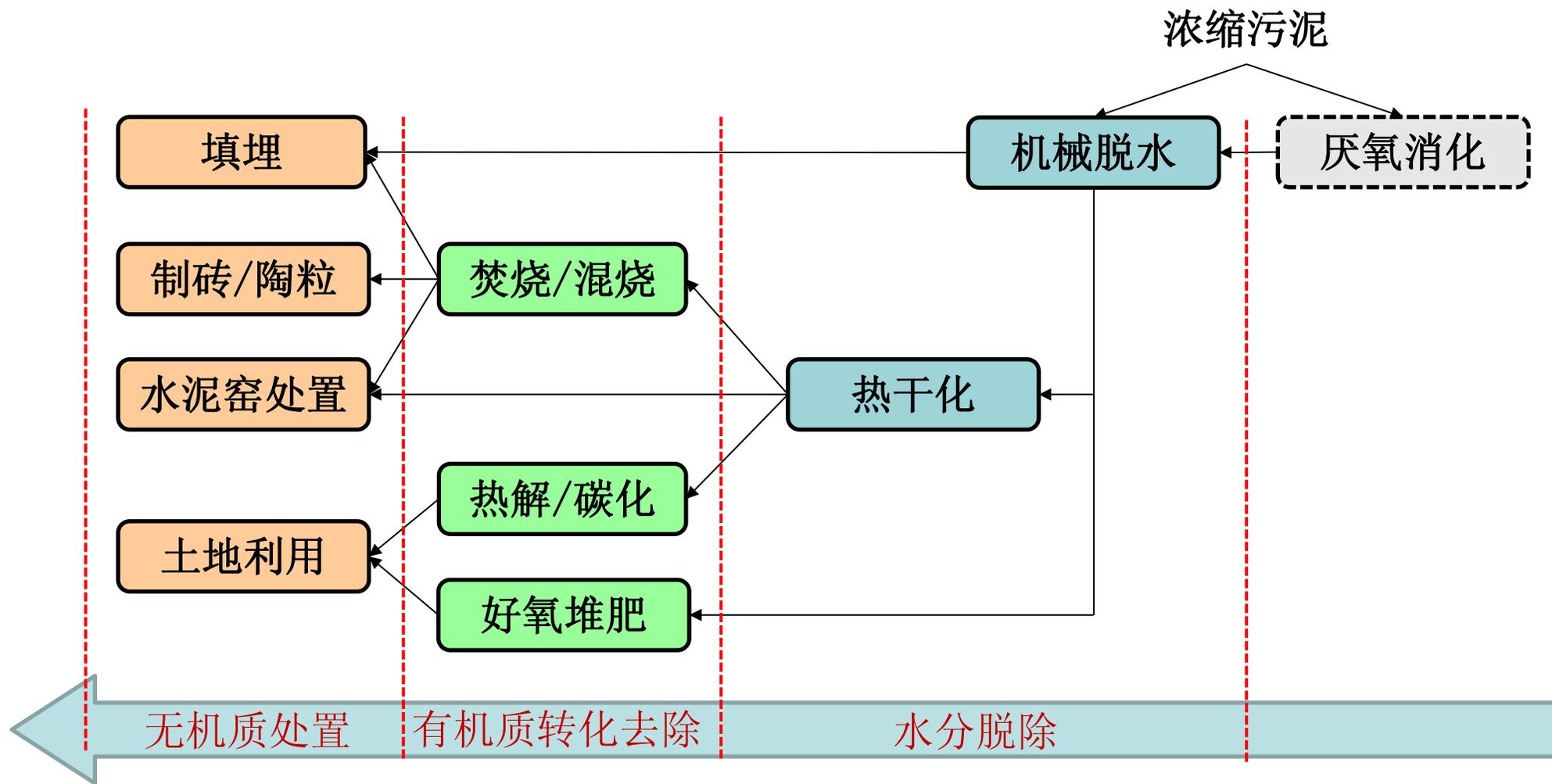
### 2.3 前处理的主要方式





## 2. 污泥处理的逆向设计

### 2.4 基于逆向设计的现有方案

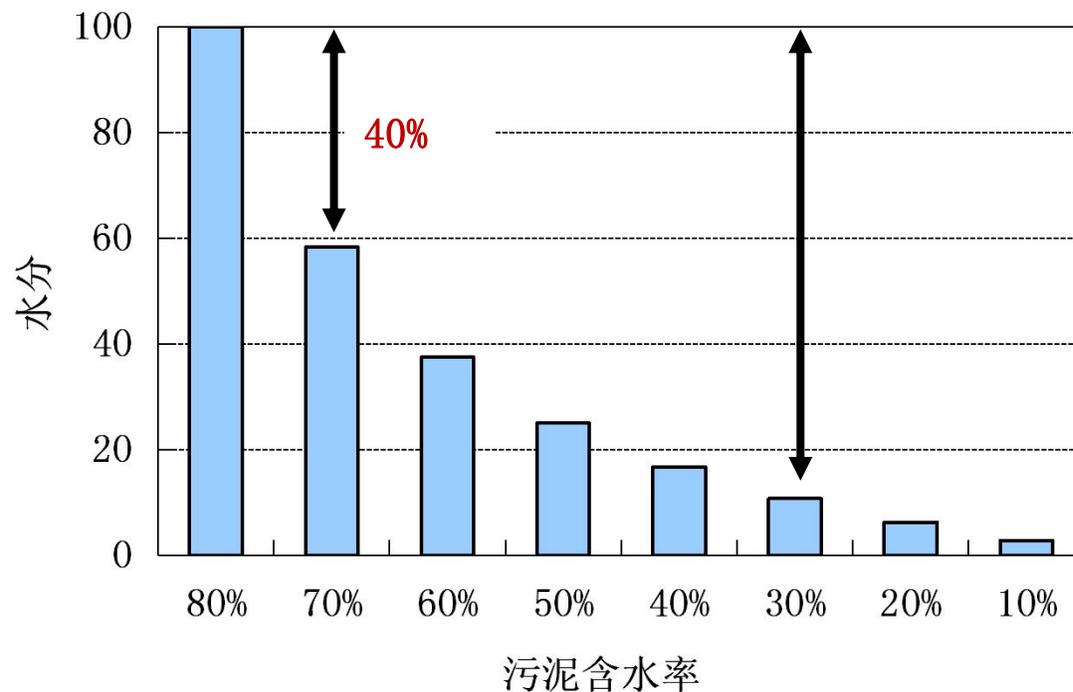




# 3. 污泥的分质处理思想

## 3.1 污泥脱水是所有流程的核心环节

- 污泥水分去除效率决定了整个工艺流程的效率、能耗和费用。
- 机械脱水相对热干化能耗更低，因此更为关键
- 影响污泥脱水效果的内在因素是其水分存在形态，而水分存在形态又取决于**污泥颗粒结构与有机质构成**





# 3. 污泥的分质处理思想

## 3.2 常用处理处置流程的弊端

- 在前述的常用流程中，污泥水分脱除环节一直位于有机质去除环节之前，**水分脱除受到有机质的干扰**，机械脱水效率低，消耗大量药剂
- **水分去除→有机质转化→无机质处置（有机质制约条件下的脱水）**
- 分质处理的思想：
- **有机质转化→水分去除→无机质处置（高水分条件下的有机质转化）**
- 要实现上述分质处理目标，就需要**在水分存在的条件下尽量实现有机质的去除或转化。**



## 3. 污泥的分质处理思想

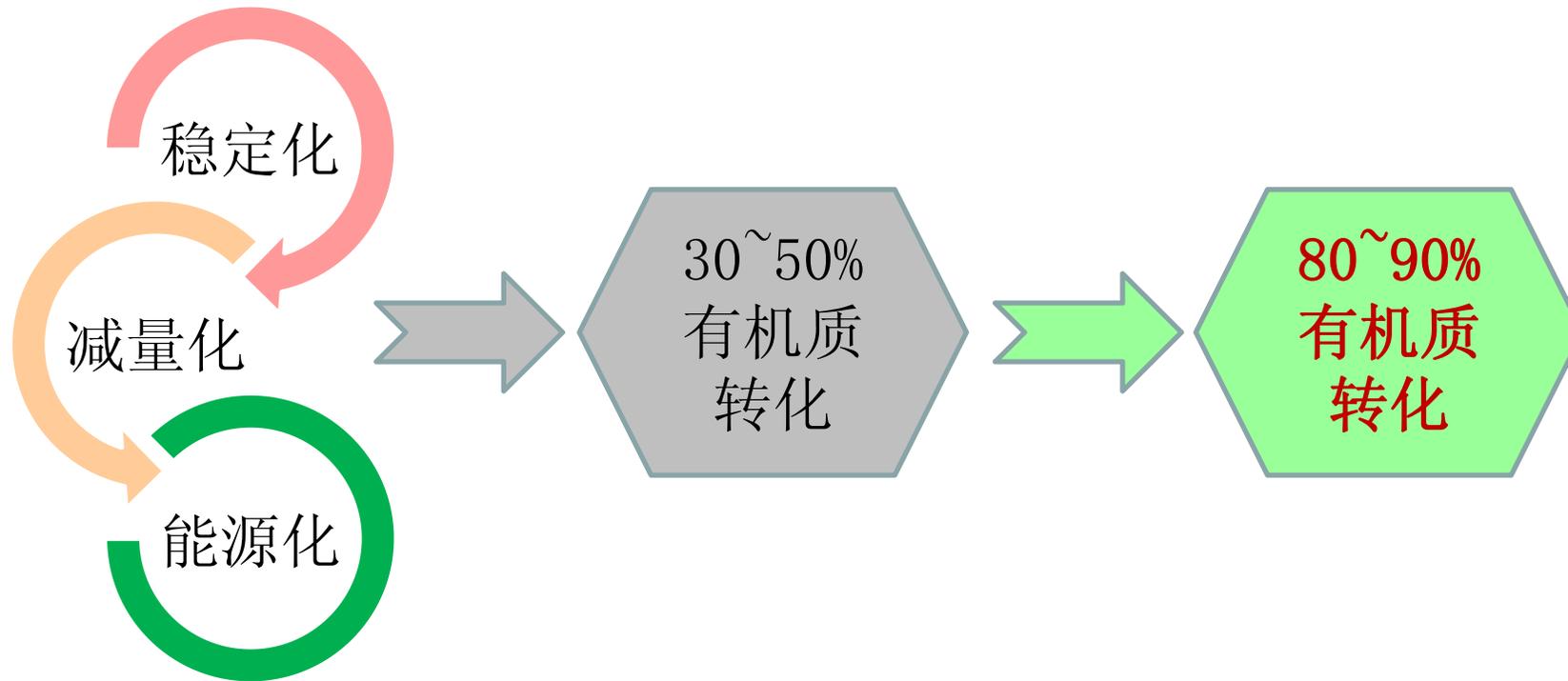
### 3.3 高水分存在条件下的有机质转化途径

- **厌氧消化：**成熟、经济、现有技术有机质转化率低
- 湿式氧化：
- 超临界水/次临界水氧化：
- 液化/水热碳化：



# 4. 污泥厌氧消化技术定位

## 4.1 厌氧消化的功能





## 4. 污泥厌氧消化技术定位

### (1) 厌氧消化作为污泥稳定化手段

- 易降解有机质部分转化，多数病原菌灭活；
- 难达到好氧堆肥的稳定化（腐殖化）水平，通常消化污泥需要经过再堆肥、晾晒或简短的好氧处理，进一步转化有机质和部分养分（如氨氮向硝态氮转化）；
- 由于土地利用（消化+土地利用）的限制，在整个前处理体系里，污泥稳定化要求逐渐弱化，很多污水厂不设置消化系统。



## 4. 污泥厌氧消化技术定位

### (2) 厌氧消化作为污泥减量化手段

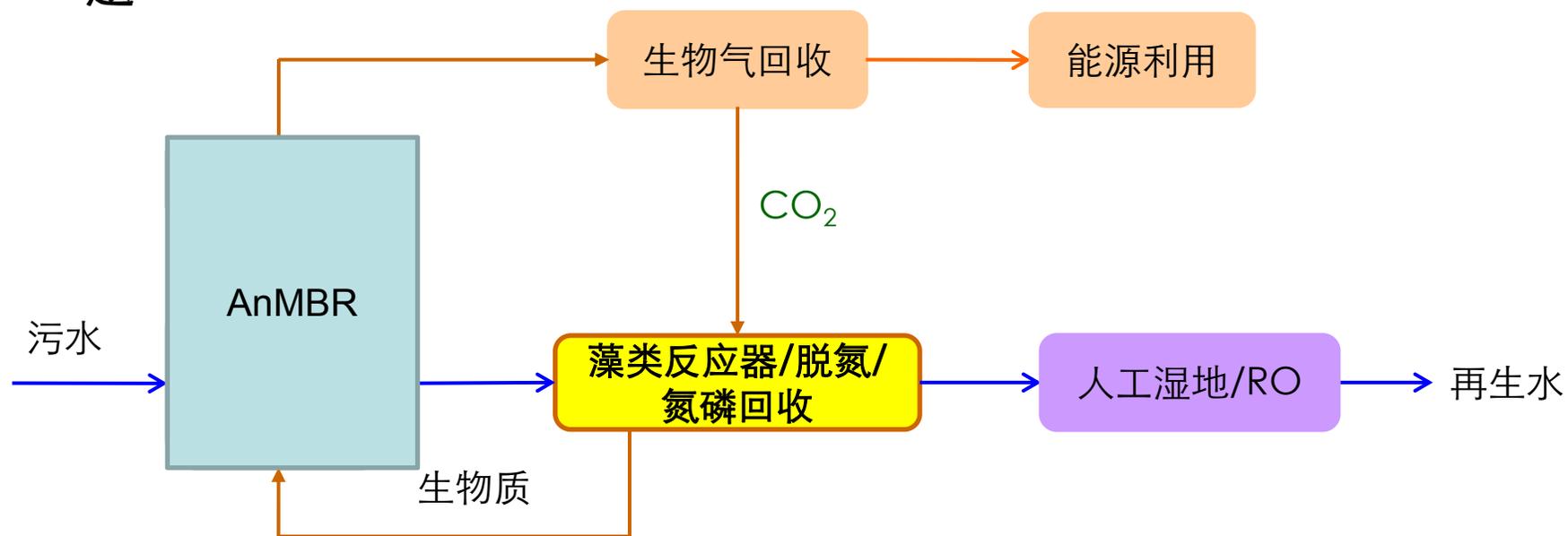
- 有机质降解率30~50%，按有机质含量60%计，则干固体减少18~30%；如达到同样脱水程度（消化污泥脱水性能和污泥性质与消化效果有关，有时略有改善，有时略有恶化），则脱水污泥**总质量减少18~30%**。
- 原位减量：污泥发酵后的发酵液直接回流污水处理系统作为碳源，同样实现减量化目的，但这一过程有机质转化率一般为18~30%。
- 作为减量化手段面临的问题：**减量化程度低，效果和重要性低于强化脱水、干化和焚烧。**



## 4. 污泥厌氧消化技术定位

### (3) 厌氧消化作为污泥资源化手段

- 部分转化为沼气，300~500 L/kg VS
- 从传统污水厂向生产型水厂转变的技术依托，但仍面临转化率低的问  
题





# 4. 污泥厌氧消化技术定位

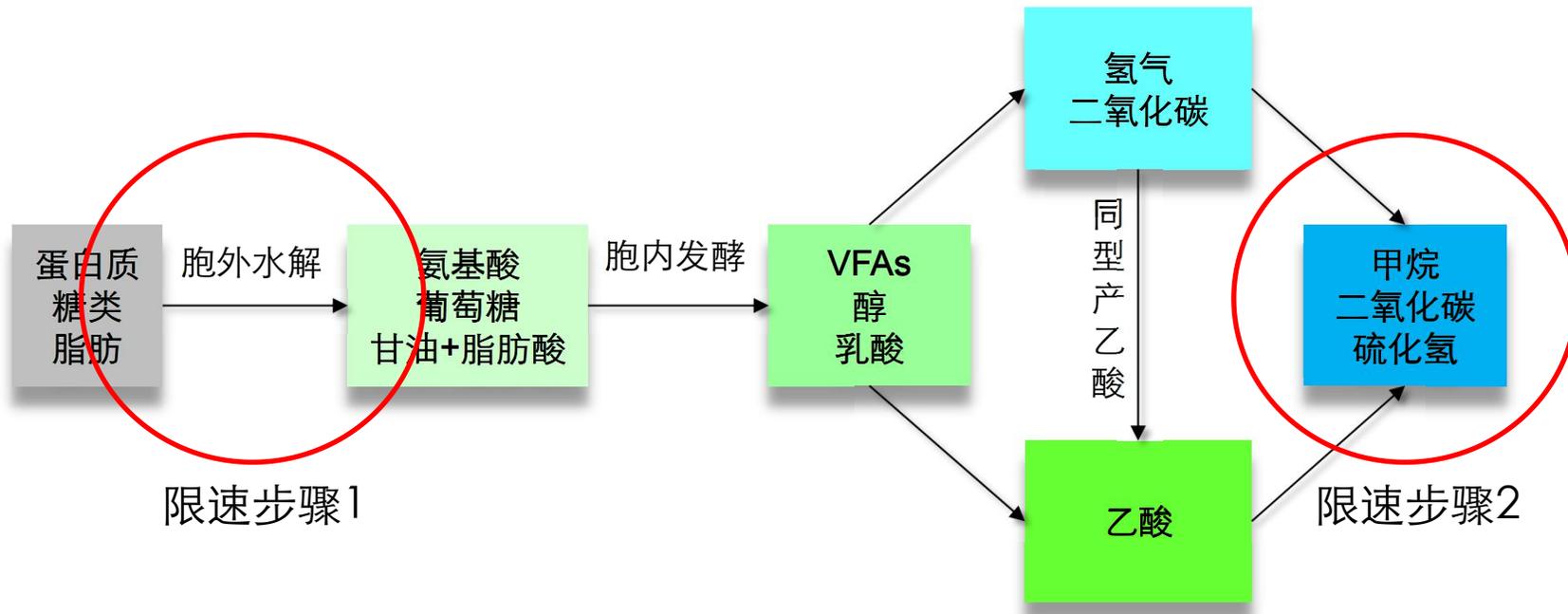
## 4.2 厌氧消化的新定位

- 传统定位面临的关键问题：污泥有机质转化率低；无法作为最终处置手段或最后处理手段。
- 改进核心方向：提高有机质转化率
- 新型污水厂的核心环节：产能单元、氮磷浓缩、碳减排
- 污泥处理流程中的有机质消纳环节：大幅改善水分去除和无机质处置效率
- 如何提高转化率？颗粒结构+低碳氮比+难降解有机质



# 4. 污泥厌氧消化技术定位

## 4.3 预处理解决污泥颗粒结构问题

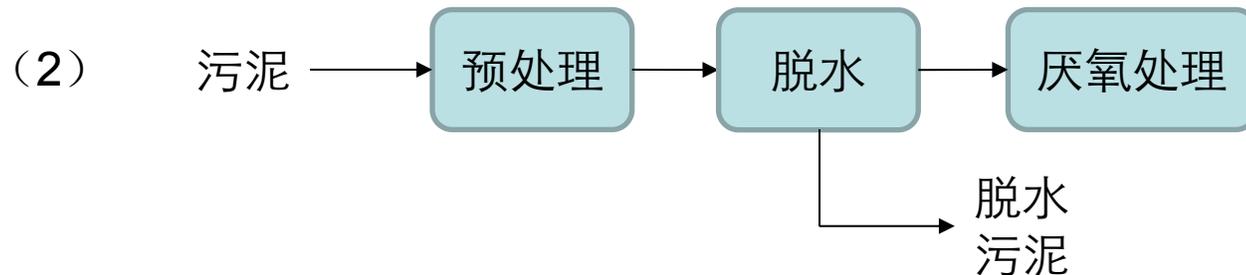
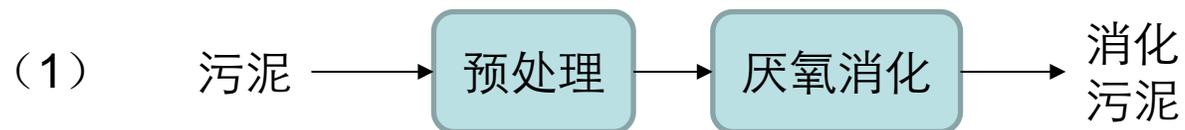




## 4. 污泥厌氧消化技术定位

### 4.3 预处理解决污泥颗粒结构问题

- 污泥破解技术相对成熟的有热水解（高温、低温、碱热水解）和超声处理，其次还有臭氧破解等。
- 破解技术与厌氧消化相结合，有不同的方式。

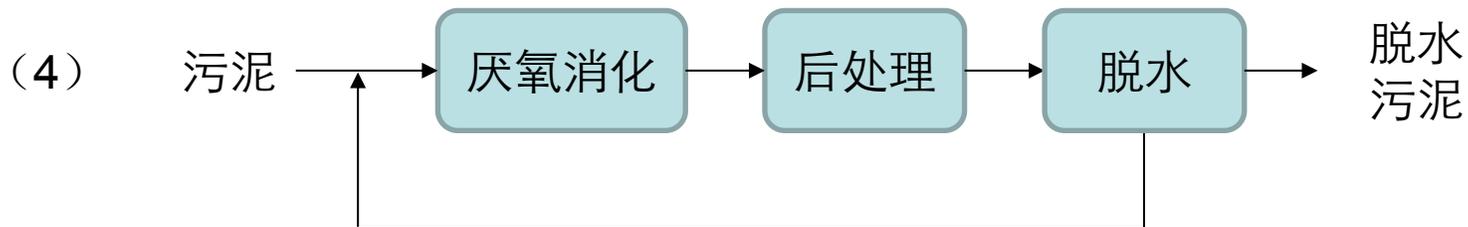
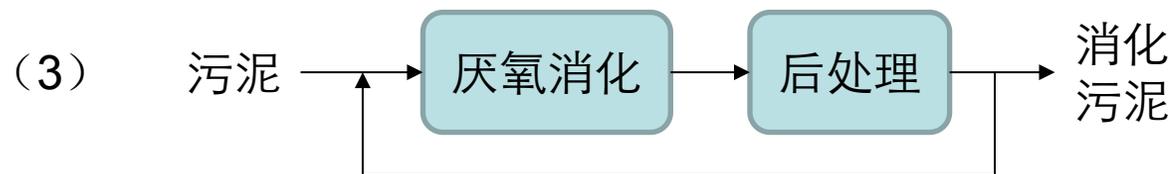




## 4. 污泥厌氧消化技术定位

### 4.3 预处理解决污泥颗粒结构问题

- 热水解预处理：产气量提高10~60%，平均约30%。
- 破解技术技术的主要趋势：降低成本、完善工艺；减少后续影响；提高极限。





## 4. 污泥厌氧消化技术定位

### 4.3 预处理解决污泥颗粒结构问题

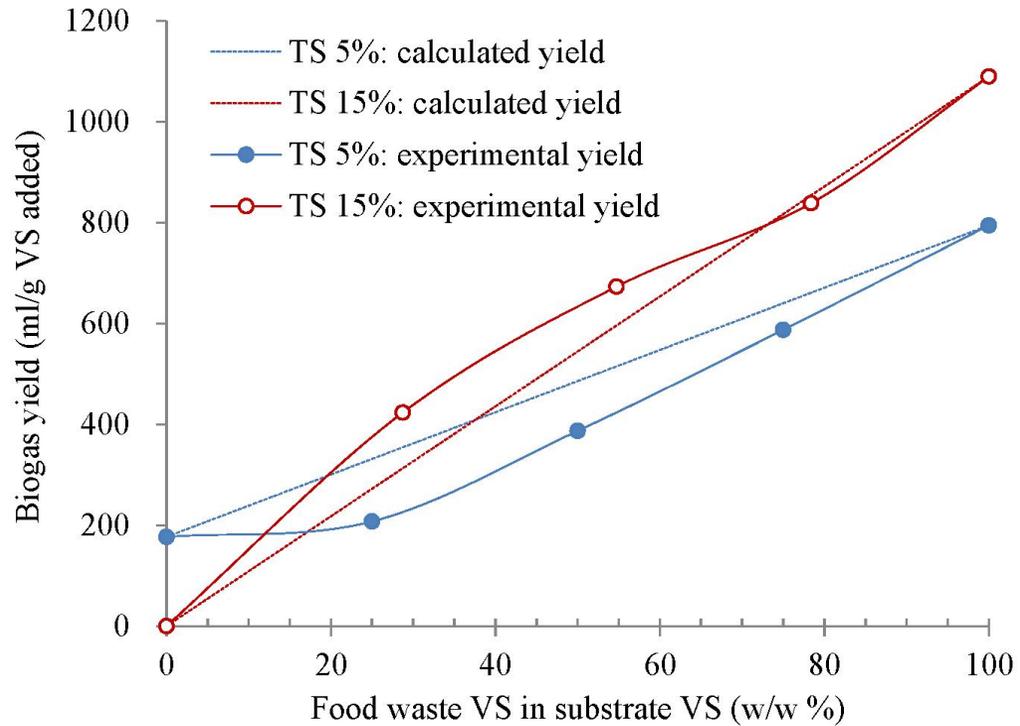
- 传统厌氧消化有机质降解率仅40%左右，消化污泥机械脱水后含水率约80%，脱水污泥总量减少24%（以污泥有机质含量60%计，下同）
- 污泥经热水解后，厌氧消化过程中有机质转化率最高达60%，消化污泥有机质含量降至37.5%，趋于无机污泥，其机械脱水后含水率可以低至50~60%，相对于未经上述处理的脱水污泥约减量70%，降低最终处置费用。
- 尚未到达分质处理的目标（碳氮比、难降解有机质的转化）

<b>VS/TS</b>	<b>40%</b>	<b>50%</b>	<b>60%</b>	<b>70%</b>
<b><u>Environmental performance</u></b>				
<b>CAD</b>	4	4	3	2
<b>HSAD</b>	2	2	2	1
<b>LTHPAD</b>	3	4	4	4
<b>HTHPAD</b>	1	1	1	4
<b><u>Energetic performance</u></b>				
<b>CAD</b>	3	1	1	1
<b>HSAD</b>	1	4	4	3
<b>LTHPAD</b>	4	2	2	2
<b>HTHPAD</b>	1	3	4	4
<b><u>Economic performance</u></b>				
<b>CAD</b>	2	2	1	1
<b>HSAD</b>	4	4	4	3
<b>LTHPAD</b>	3	3	3	3
<b>HTHPAD</b>	1	1	2	4
<b><u>Total scores by weighting</u></b>				
<b>CAD</b>	2.9	2.3	1.6	1.3
<b>HSAD</b>	2.5	3.4	3.4	2.4
<b>LTHPAD</b>	3.3	3.0	3.0	3.0
<b>HTHPAD</b>	1.0	1.6	2.3	4.0



# 4. 污泥厌氧消化技术定位

## 4.4 共消化/氮分离提高碳氮比

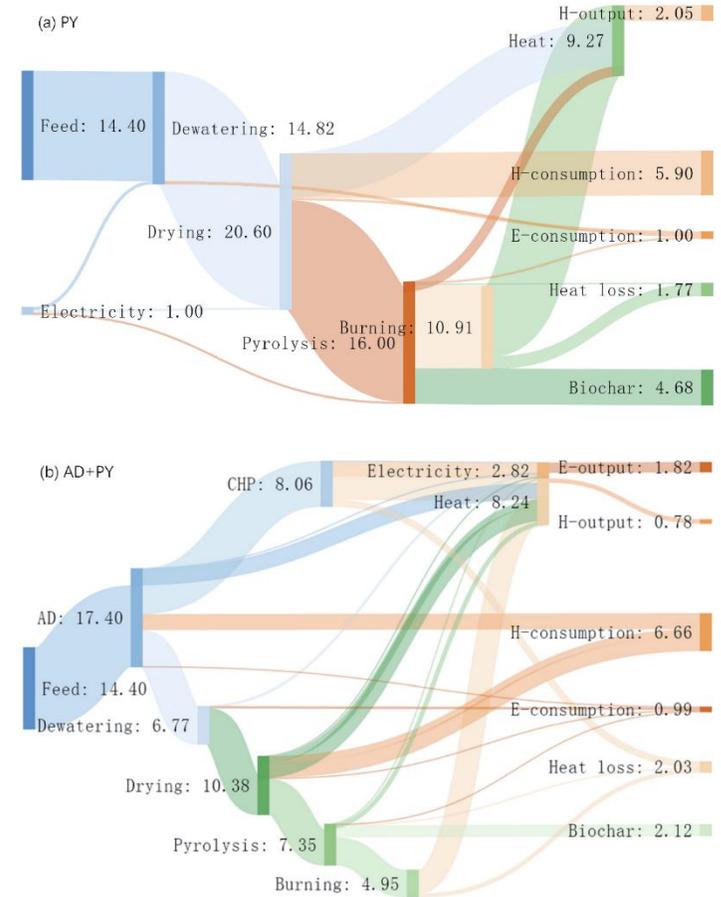
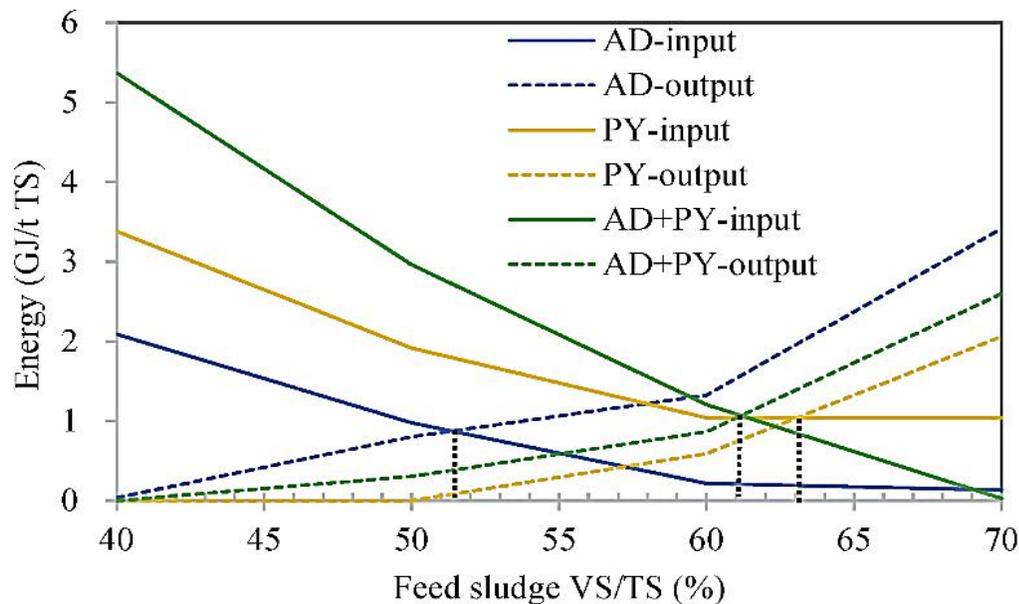


- 改善传质
- 无过酸化
- 平衡营养

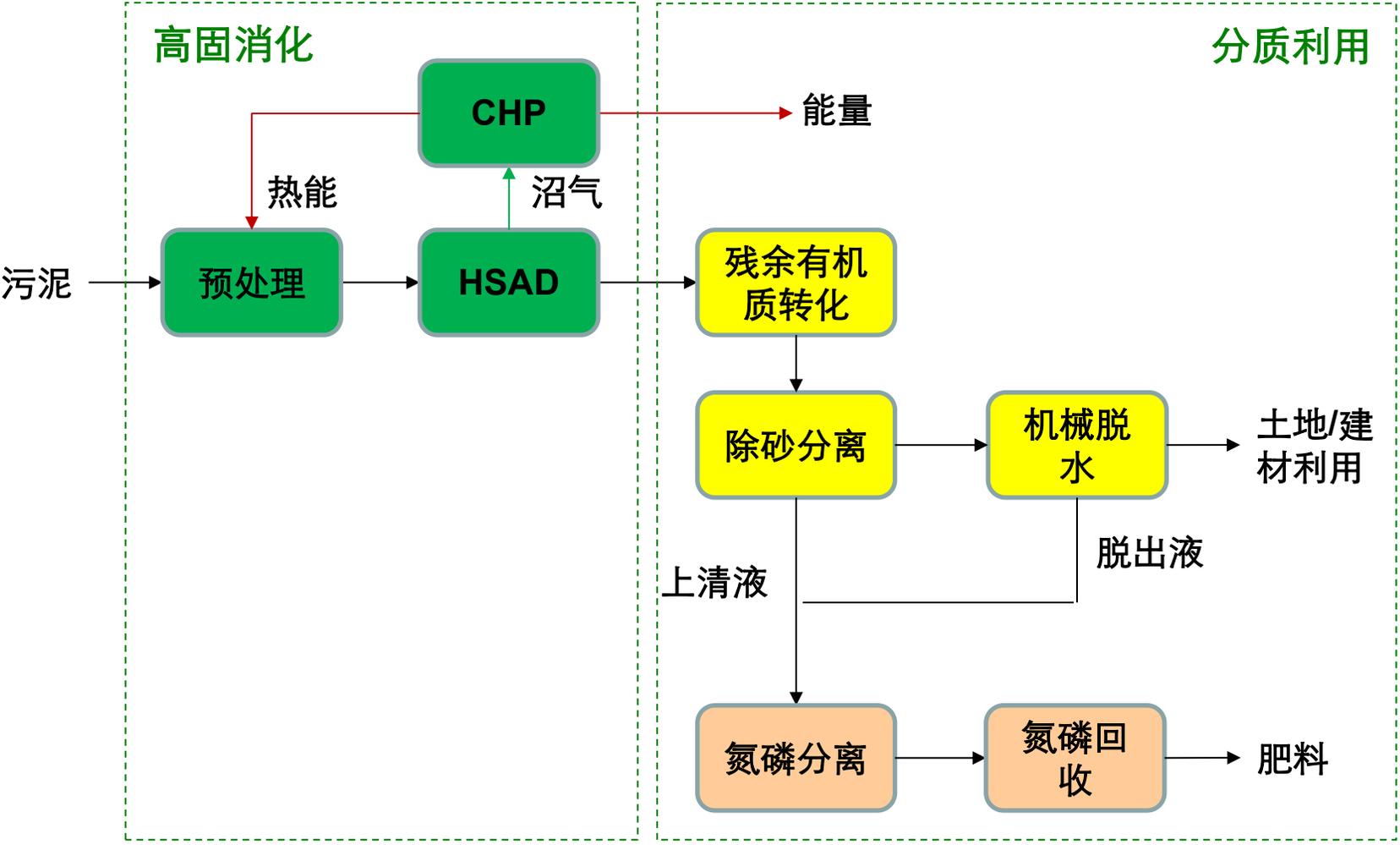
# 4. 污泥厌氧消化技术定位

## 4.5 化学转化/氧化难降解有机质

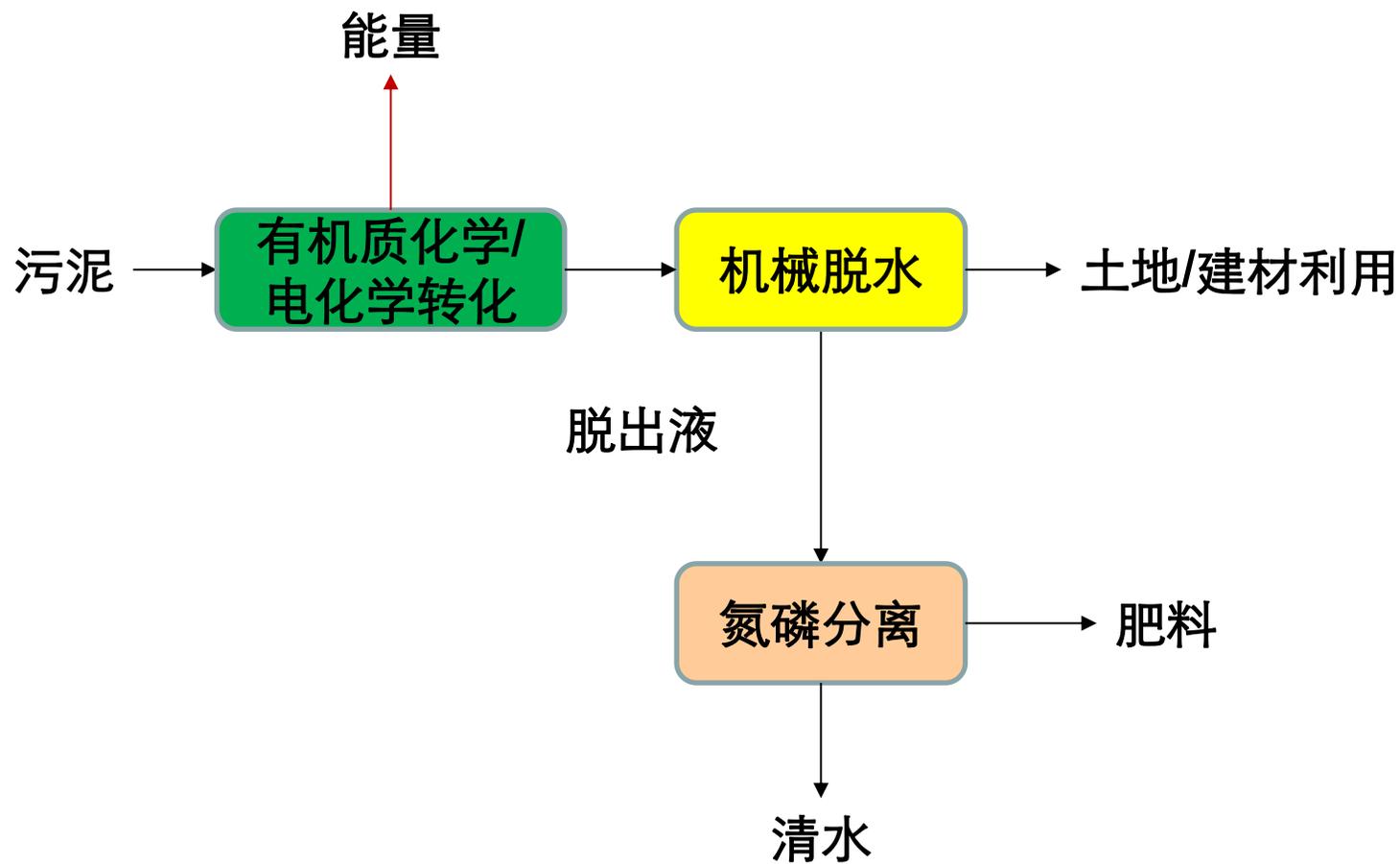
- 厌氧消化+热解/共热解? 仍面临脱水问题
- 高有机质污泥才适合热解
- 需要新的技术解决方案



# 5. 几种可能途经



## 5. 几种可能途经



感谢聆听

