



碳中和背景下污泥厌氧消化与热化学处理的协同关系

戴晓虎 同济大学

2021年04月



报告提纲

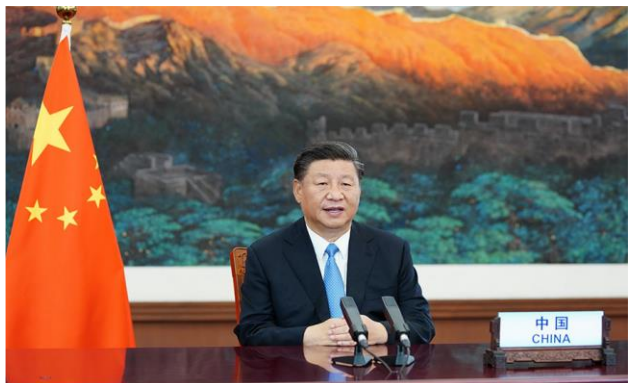
contents

- 一、时代背景
- 二、厌氧消化与干化焚烧技术分析
- 三、未来技术发展方向



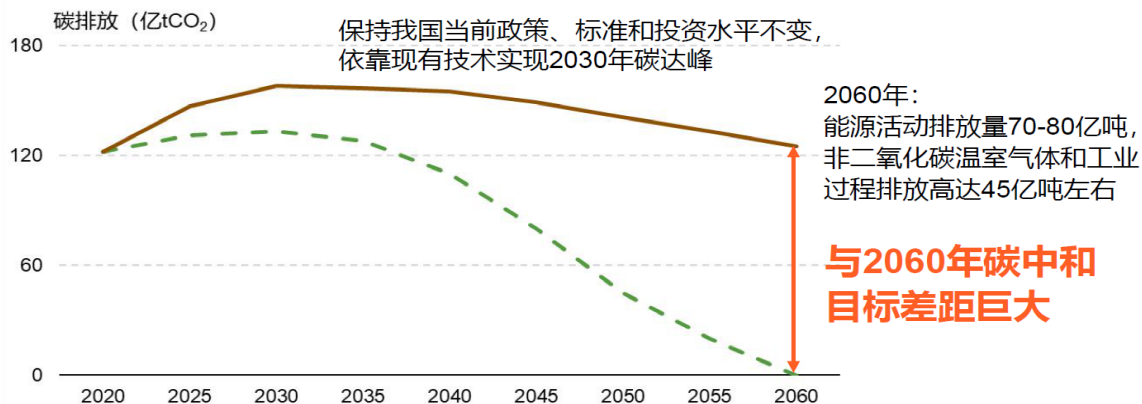
一、时代背景

我国碳中和目标的提出



- 2020年9月22日，在第七十五届联合国大会上发表重要讲话，提出我国“**二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值，努力争取2060年前实现碳中和**”
- 2020年12月12日，在气候雄心峰会上宣布，到2030年，中国单位国内生产总值**二氧化碳排放将比2005年下降65%以上**

- 2021年3月15日，习近平主持召开中央财经委员会第九次会议，研究和部署了中国实现碳达峰、碳中和的**基本思路和主要举措，提出要把碳达峰、碳中和纳入生态文明建设整体布局**



中国现有技术对碳达峰和碳中和贡献的预测

- **碳中和目标提出顺应全球可持续发展的潮流，但实现碳中和需要付出比发达国家更大的努力**
- **难度巨大，低碳指标涉及各行业**
- **科技创新是重要手段，低碳是未来新技术开发和核心技术竞争力的核心**

碳中和的国际发展趋势

- **欧盟**：2019年提出在**2050年实现碳中和目标**，并发布《**欧洲绿色新政**》，提出了重点领域关键政策与核心技术及相应详细计划
- **美国**：2020年公布《**解决气候危机：国会为建立清洁能源经济和一个健康、有弹性、公正的美国而制定的行动计划**》以帮助美国实现**2050年净零排放**
- **日本**：发布了《**绿色增长战略**》，明确了到**2050年实现碳中和的目标**，针对重点产业提出了具体的发展目标和重点发展任务



欧盟绿色新政架构

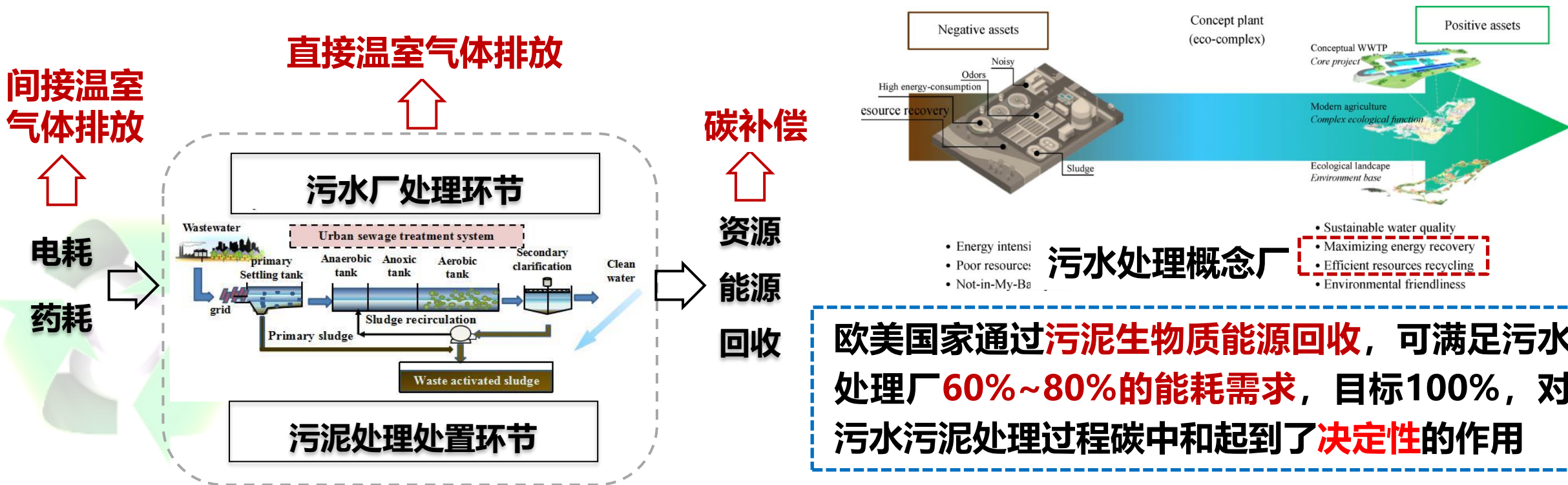
序号	国家/地区	2019年排放量		排放量全球占比	
		数值 (亿 tCO ₂)	增速	2019年	2010-2019年
1	中国	140	3.1%	26.7%	26%
2	美国	66	-1.7%	12.6%	13%
3	欧盟 (27国加英国)	43	-3.1%	8.2%	9.3%
4	印度	37	1.3%	7.1%	6.6%
5	俄罗斯	25	0.8%	4.8%	4.8%
6	日本	14	-1.6%	2.7%	2.8%

数据来源：联合国环境规划署-《2020年排放差距报告》-2020.1

- 我国碳排放量**110-140亿吨全球第一，占全球排放总量的26%**
- 为实现2015年《巴黎协定》设定的目标，**未来十年全球每年需减排2.7%**

污泥碳减排的必要性和意义

- 按照主要发达国家的统计，污水处理行业碳排放量占全社会总排放量的1-2%，位居前十大碳排放行业，虽然占比小，涉及民生、减排社会效益大，是不可忽视的减排领域
- 据欧洲统计办公室(Eurostat)2014年欧洲统计报告，污水处理与固体废弃物处理组成的废物处理行业是第五大碳排放行业，占全社会总碳排放量的3-4%

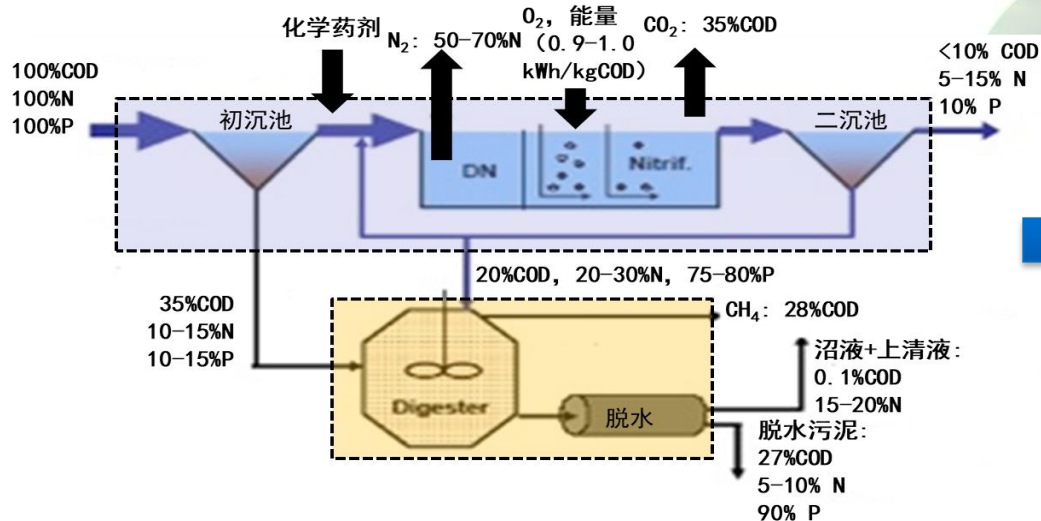




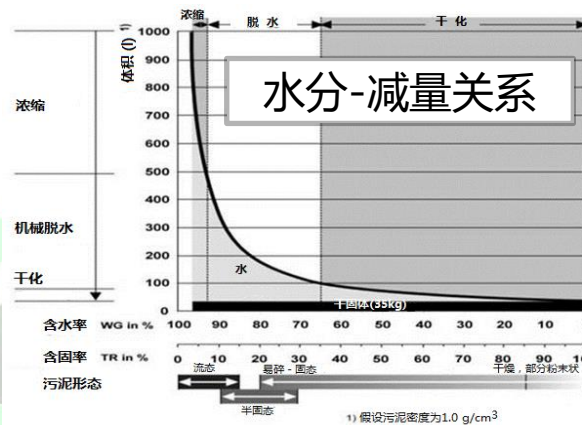
二、污泥厌氧消化的重要性

污泥“污染”与“资源”双重属性和处理处置“四化”原则

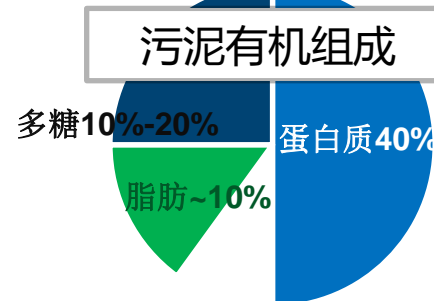
30-50%COD、30-45%N、90%P富集污泥中，
具有“污染物”和“资源”的双重属性



污泥无害化是污水污染物去除的延续
污泥资源化是污水能量回收的主要来源



其他有机质 20%-30%



减量化

水分

稳定化

易腐
有机物

无害化

病原菌

资源化

C/N/P

无害化和资源化是我国污泥处理处置的瓶颈问题

污泥处理处置碳排放核算清单

主流处理处置技术路线

① 厌氧消化+土地利用

② 好氧发酵+土地利用

③ 干化焚烧+建材利用

④ 深度脱水+应急填埋

⑤ 生物质利用+末端焚烧

技术路线选择依据



碳排放

经济成本

技术适用性

碳排放来源

一次能源：煤炭、天然气等

二次能源：电力、柴油等

化学品药剂

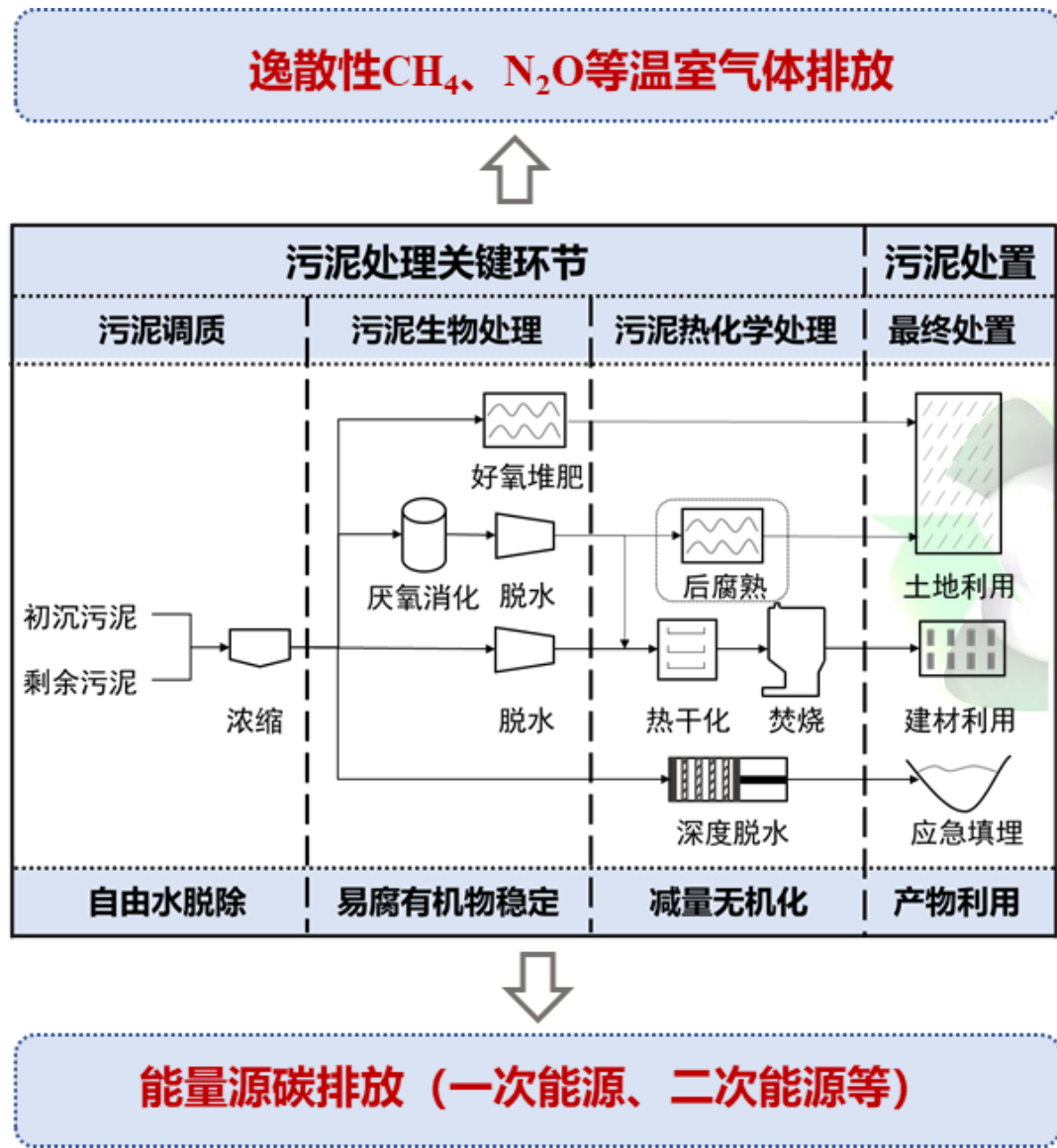
能量源碳排放

逸散性碳排放

碳补偿

污泥处理处置过程中产生的逸散性 CH_4 、 N_2O 等温室气体

污泥中能源或资源回收利用，替代化石类能源及化学品等，从而降低温室气体的排放



- 污泥处理处置技术路线：浓缩、脱水、稳定是污泥处理共性技术单元
- 污泥是高含水有机固废，80%污泥直接干化焚烧不是低碳技术
- 厌氧提取生物质能作为前处理+末端处置土地或焚烧建材是一种低碳技术

厌氧消化可以同时实现易腐有机物稳定、病原菌削减、污泥体积减量和生物质能源回收，是当前国内外污泥稳定化处理的主流技术。污泥富含有机质、氮、磷、钾等营养物质，污泥的土地利用可以改善土壤的性质，实现营养物质的循环利用。

碳排放来源	具体内容
能量源碳排放	<ul style="list-style-type: none">➤ 厌氧消化过程中加热能耗和搅拌电耗、脱水药剂；➤ 土地利用过程能源消耗；
逸散性碳排放	<ul style="list-style-type: none">➤ 厌氧消化过程逸散的少量沼气；➤ 土地利用过程释放的CH₄和N₂O等；
碳补偿	<ul style="list-style-type: none">➤ 厌氧消化产生的沼气替代化石燃料；➤ 消化产物土地利用替代氮磷与磷肥可实现碳补偿；

厌氧消化效率的提升（生物质能回收），高级厌氧消化技术的应用（降低系统能耗），沼渣脱水环节绿色药剂的替代，以及沼液氮磷资源高效回收是该工艺未来碳减排发展的重点方向。工程实践表明，考虑到厌氧消化产生的沼液资源回收利用和就地处理，建议厌氧消化工程依托污水处理厂建设。

当污泥土地利用受限时，污泥干化焚烧是一种有效的处理处置的方式。通过干化焚烧，将污泥化学能转化为热能并进行回收利用，同时实现有机物的矿化，以及大幅度减量，焚烧灰渣可以进行建材资源化利用。

碳排放来源	具体内容
能量源碳排放	<ul style="list-style-type: none">➤ 脱水过程药耗和能耗➤ 干化过程能耗➤ 焚烧过程燃料消耗
逸散性碳排放	<ul style="list-style-type: none">➤ 干化焚烧过程释放的CH_4和N_2O等会造成逸散性温室气体排放
碳补偿	<ul style="list-style-type: none">➤ 焚烧过程能量回收利用可替代干化过程能量消耗

污泥高含水干化焚烧属于中等碳排放水平，焚烧能源回收及低碳说法正确，和填埋比还是和厌氧土地利用及厌氧预处理+焚烧比，结论不同，主要是干化能耗。

重点在于开发**高效低耗深度脱水技术和环境友好型脱水药剂**，降低污泥干化的能耗，以及提升

从未来的发展来看，厌氧消化-干化焚烧工艺有望成为污泥处理处置的重要发展方向。2020年住房和城乡建设部和发改委联合发布的《补短板强弱项实施方案》提出：“鼓励采用**生物质利用+末端焚烧**的处置模式”，其中“生物质利用”主要包含污泥厌氧消化技术。

碳排放来源	具体内容
能量源碳排放	<ul style="list-style-type: none">➤ 厌氧消化过程中加热能耗和搅拌电耗；➤ 脱水过程药耗和能耗➤ 干化过程水分蒸发能耗➤ 焚烧过程燃料消耗
逸散性碳排放	<ul style="list-style-type: none">➤ 厌氧消化过程逸散的少量沼气；➤ 干化焚烧过程释放的CH_4和N_2O等会造成逸散性温室气体排放；
碳补偿	<ul style="list-style-type: none">➤ 厌氧消化产生的沼气替代化石燃料；➤ 焚烧过程能量回收利用可替代干化过程能量消耗



焚烧与厌氧消化+焚烧能量平衡分析

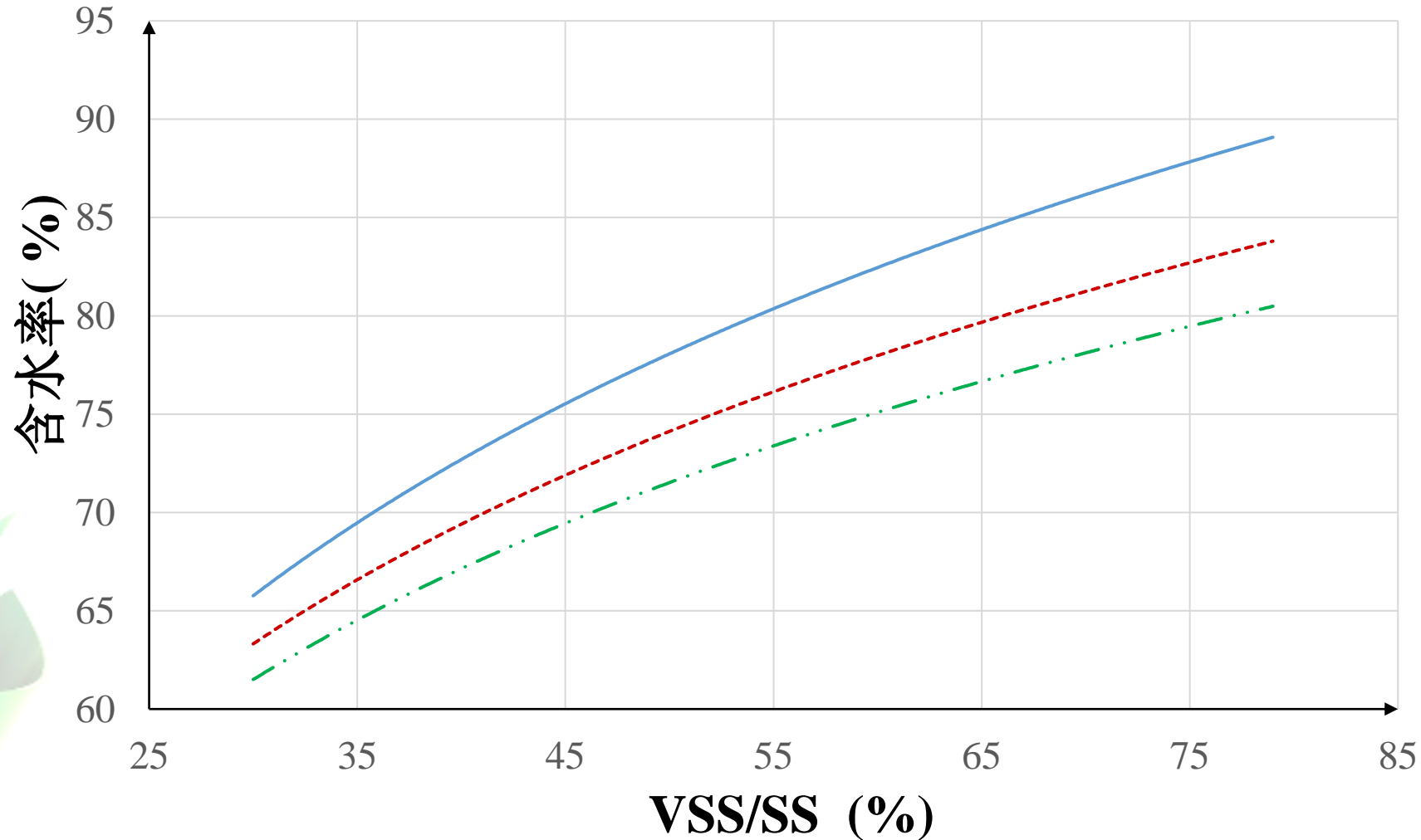
参数	干化焚烧			传统厌氧消化-干化焚烧			高级厌氧消化-干化焚烧		
	50	60	70	50	60	70	50	60	70
有机质含量VS (%)	50	60	70	50	60	70	50	60	70
热水解能耗 (kWh)	-	-	-	-	-	-	13260	13260	13260
厌氧消化加热能耗 (kWh)	-	-	-	10296	10296	10296	-	-	-
厌氧有机物降解率Vs _{re} (%)	-	-	-	40	45	50	50	55	60
厌氧消化沼气产能 (kWh)	-	-	-	20937	28265	36639	27710	36578	49140
消化污泥板框脱水泥饼含水率 (%)	-	-	-	70	72	75	65	68	70
消化污泥脱水能耗 (kWh)	-	-	-	960	876	780	900	804	696
干化能耗 (kWh)	64286	64286	64286	27429	28157	30086	19286	20459	19886
焚烧产能 (kWh)	39144	51707	64269	18751	24181	28587	13624	18062	21452
能量输出 (kWh)	-25142	-12579	-16	1004	13116	24065	7889	20117	36750

备注：以100吨含水率为80%的脱水污泥为基准；其中 Q_1 为热水解污泥量，进泥含水率为85%； T_1 为初始污泥温度，以年平均15℃计； k_1 为吨水加热1℃消耗热量，以kWh计； Q_2 为传统厌氧消化污泥量，含水率为95%； Y 为甲烷产率，传统厌氧消化为0.85m³/kg VS_{re}，热水解厌氧消化为0.9 m³/kg VS_{re}； CV_{CH_4} 为甲烷热值，为35.9 MJ/m³， k_2 为沼气综合利用效率，取0.95； DS 为脱水污泥的干基质量，以吨计； W 为污泥脱水能耗，以60kWh/吨干基计； m_1 为脱水污泥的含水量，以吨计； m_2 为干化污泥的含水量，以吨计； k_3 为干化过程蒸发1吨水消耗的热量，以900kWh/吨水计； $E_{\text{烟气}}$ 为焚烧过程产生烟气的热量，以kWh计； $E_{\text{尾气}}$ 为焚烧系统随尾气排放损失的热量，以kWh计。

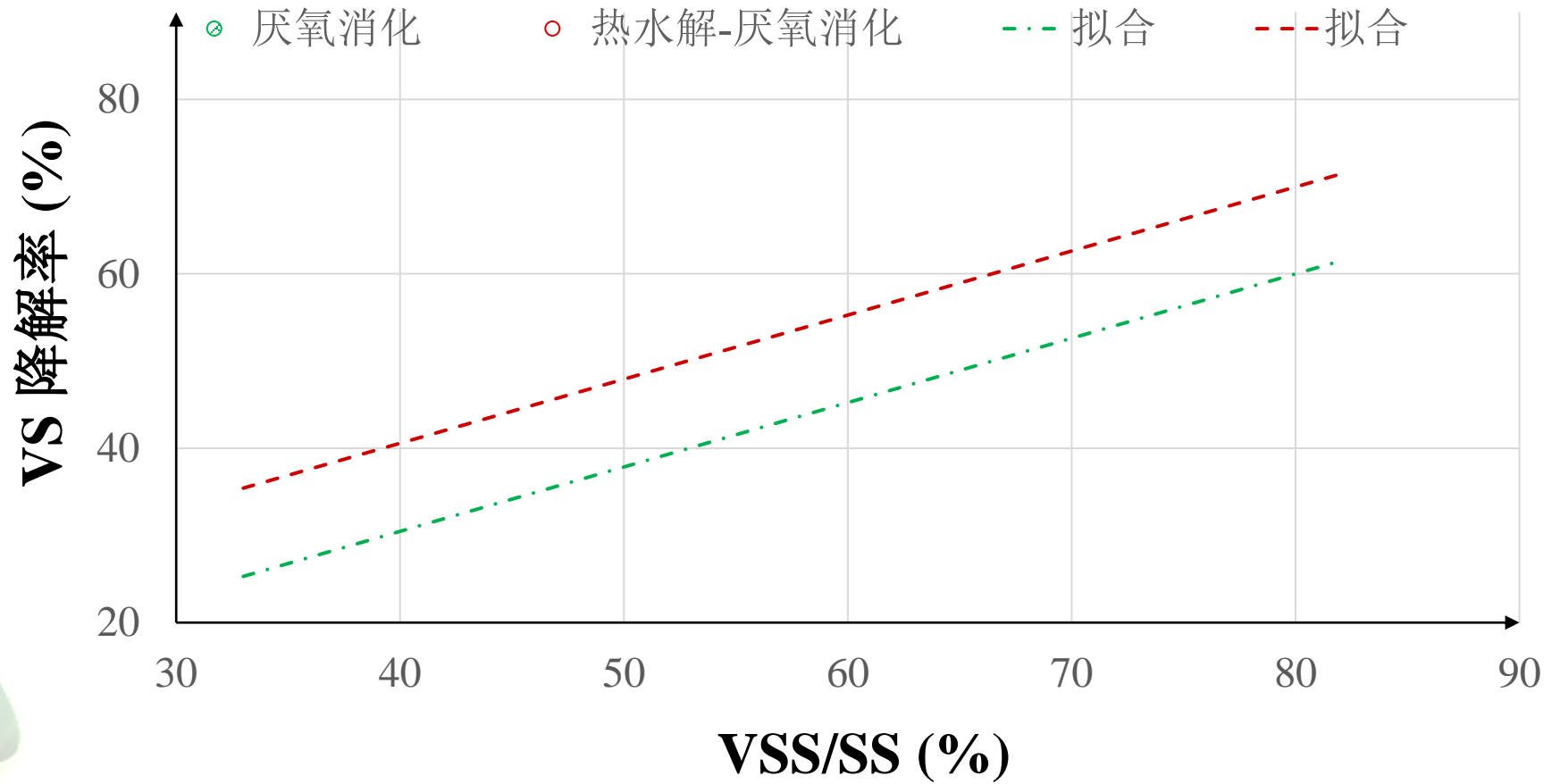
厌氧消化后脱水效率的提升



● 原污泥 ○ 厌氧消化 ⊕ 热水解-厌氧消化 — 拟合 - - - 拟合 - · - 拟合



厌氧消化有机物的降解率

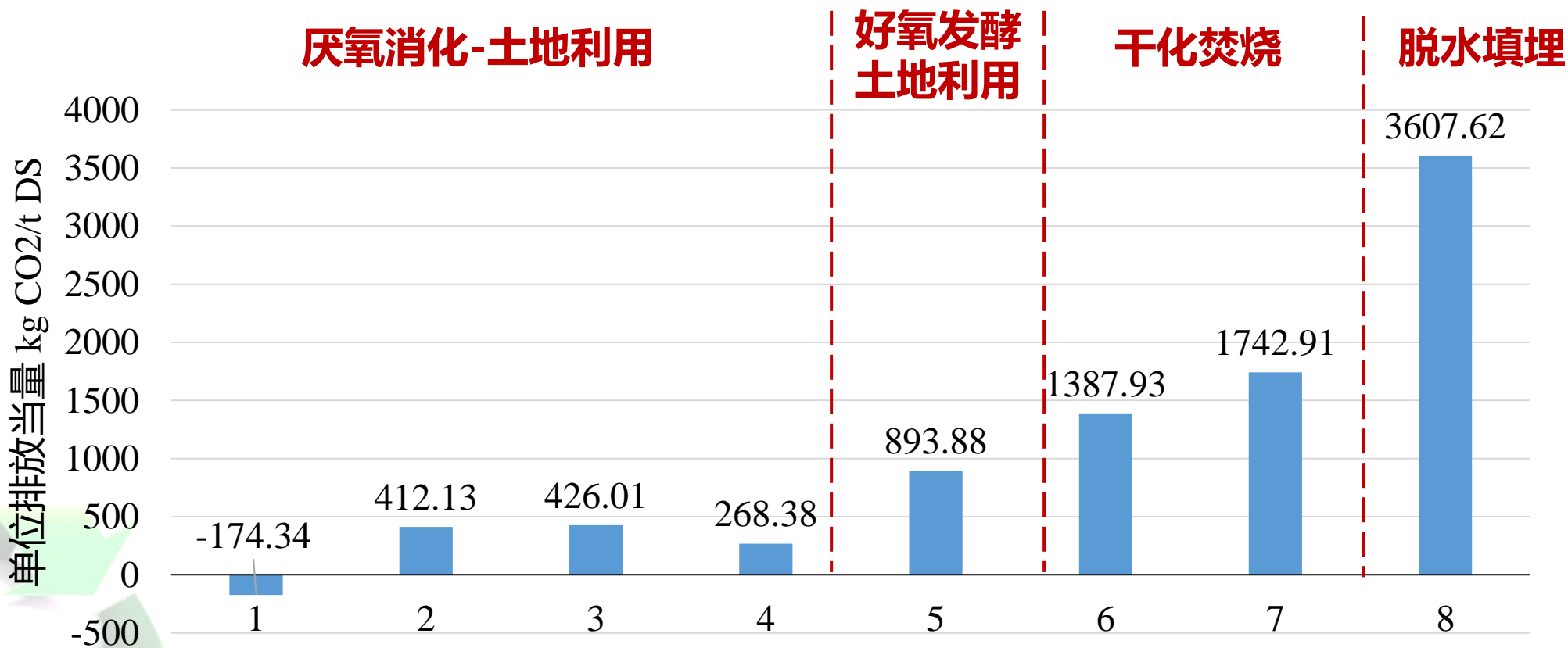


与污泥干化焚烧相比，**污泥厌氧消化-干化焚烧在系统能耗面具有明显的优势**：以100吨污泥（80%含水率计），当有机质含量为50%，污泥独立焚烧需外加能量25142kWh，传统厌氧消化-干化焚烧可产生能量1004kWh，热水解厌氧消化-干化焚烧产生热量可提升至7889kWh，其原因主要在于通过厌氧消化**回收生物质能**，并在同等条件下**改善了污泥的脱水性能**，大大**降低了干化的能耗**，使得生物质能回收的能量加上污泥干化系统节省的能量总和大于厌氧消化有机物降解损失的能量。

对于**传统厌氧消化-干化焚烧工艺**，适用于已建有污泥厌氧消化设施的提标改造工程，厌氧消化污泥经过脱水处理后，在厂区内利用沼气进行部分干化处理，再进行集中焚烧处置。

对于**污泥热水解厌氧消化-干化焚烧工艺**适用于新建或现有的集中式污泥处理处置工程，考虑沼液的处理，建议在有条件的情况下，污泥处理工程建设于污水处理厂区。另外，该工艺的另一个优势在于，对于满足土地利用条件的消化污泥，可以优先考虑土地利用，土地利用无法消纳的污泥再进行后续干化焚烧处置。

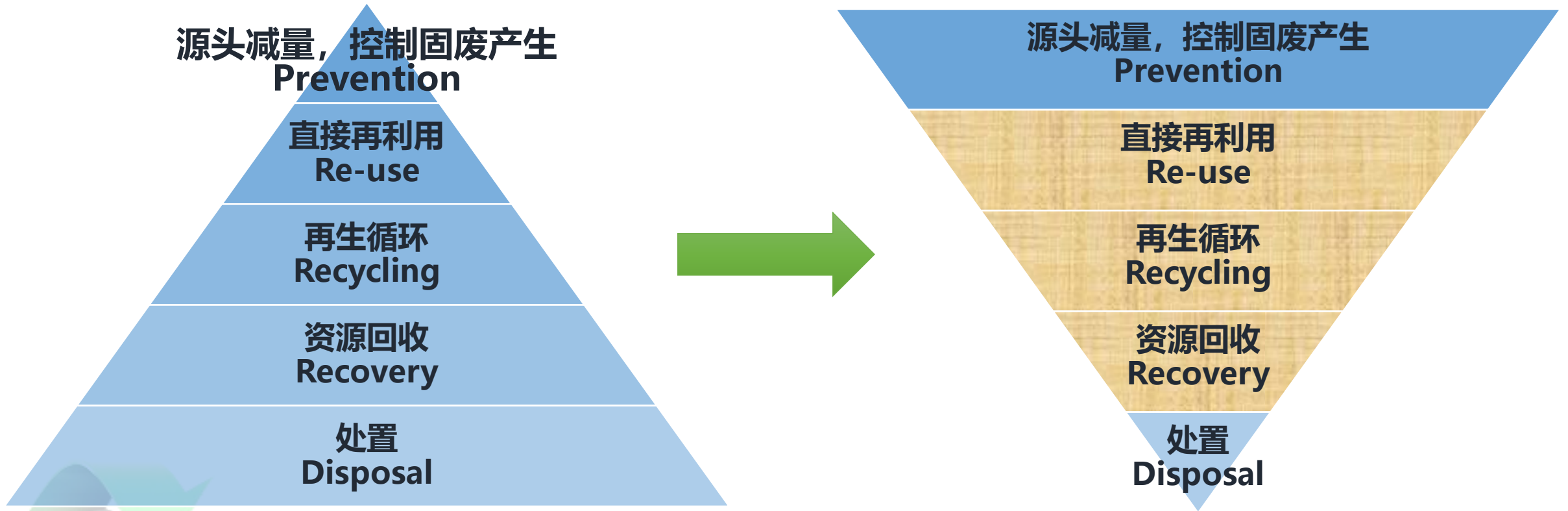
国内典型工程碳排放 (运行阶段)



国内不同技术路线典型工程碳排放情况



三、未来技术发展方向



- 高含水有机固废的技术路径：**源头减量+梯级利用+末端处置**
- 工艺路线需要全生命周期评估，**流程长短不是理由**
- 垃圾分类的核心是湿垃圾资源循环利用、**高含水污泥直接焚烧不是低碳**

未来污泥处理处置应以**节能降耗及能源资源回收**，**减污降碳**为目标

经济效益指标 (量化)

碳排放指标 (量化)

环境效益指标 (定性)

能量源碳排放



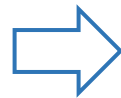
处理处置过程节能降耗

逸散性碳排放



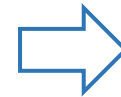
逸散性温室气体排放控制

碳补偿




能源资源回收和产物利用

药耗化学品碳排放



降低药剂投加、绿色药剂开发

- 
- 现有技术提升与绿色低碳技术开发
 - 过程能耗降低、逸散性温室气体控制
 - 生物质清洁能源回收、化学药剂替代

未来污泥处理处置技术主要发展方向

① 厌氧消化+土地利用

② 好氧发酵+土地利用

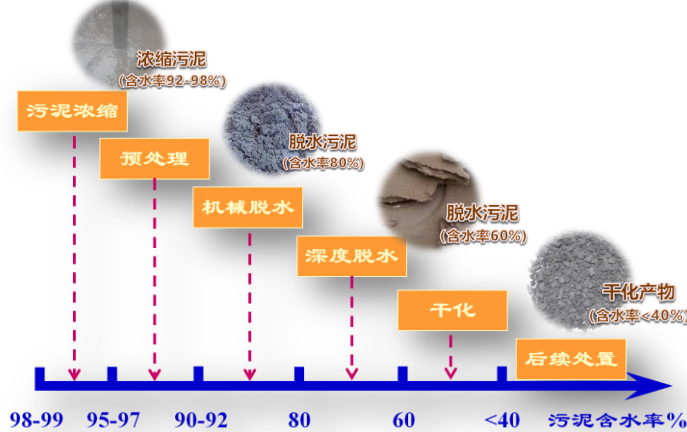
③ 干化焚烧+建材利用

④ 深度脱水+应急填埋

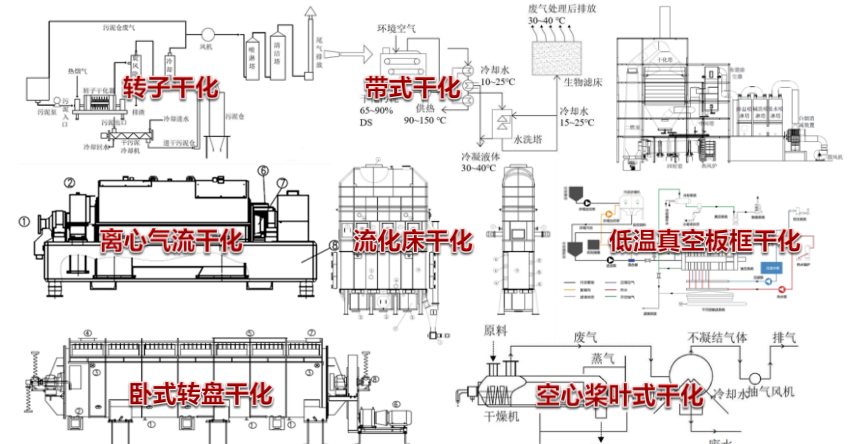
⑤ 生物质利用+末端焚烧



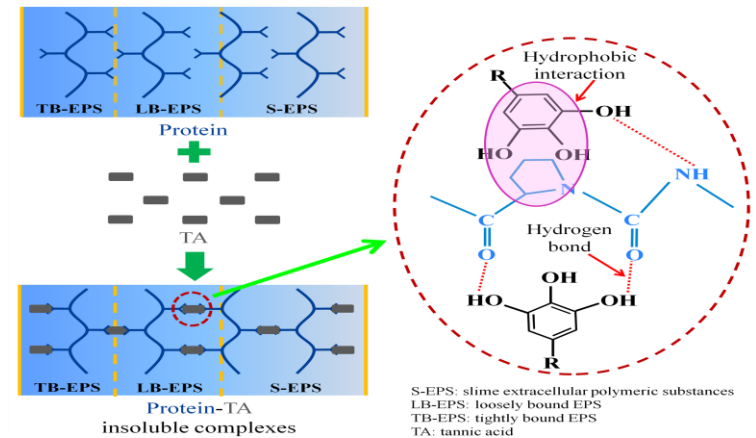
高含固/协同高级厌氧消化技术



污泥水分深度脱除



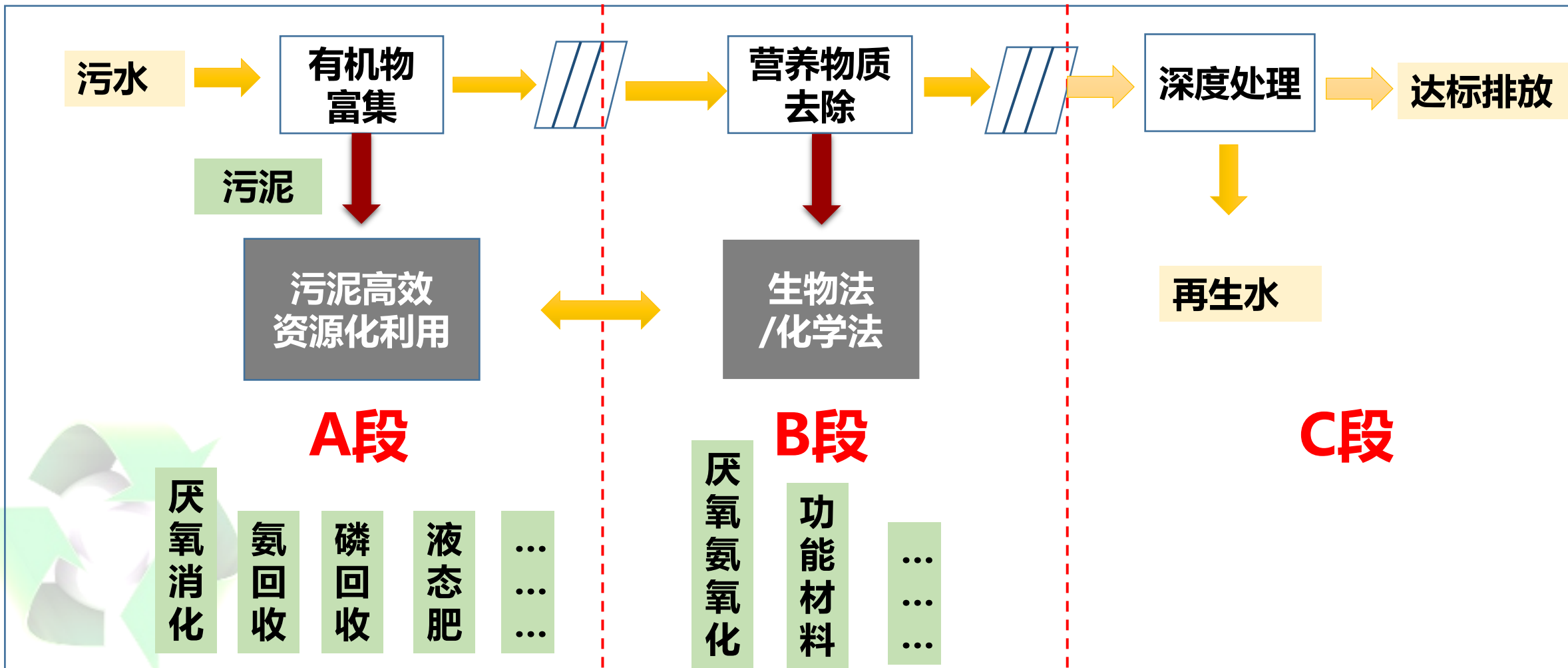
干化焚烧系统能量优化



环境友好型高效脱水药剂开发

未来技术发展方向

基于碳减排的污水处理方向——污泥碳减排技术创新是重要任务



未来污泥处理处置应以**节能降耗、能源资源回收、减污降碳**为目标

在全球应对气候变化和能源资源短缺的背景下，**污泥的能源高效回收及物质的高效循环利用实现碳减排**已成为国际的研究热点。

随着学科交叉和先进研发手段的应用，污泥处理处置的技术水平将会得到大幅提升，**前沿低碳技术的突破**将有望大大提升污泥处理处置的碳减排水平。

能源回收

- 产甲烷**：1kg COD理论上能转化成0.35m³甲烷，即12530 kJ/g COD
- 产氢**：最大能达到0.27 L H₂/g COD
- 燃料电池**：微生物燃料电池 (MFC)理论上1kg COD能转化成4 kWh电能
- 产热**：污泥干基热值约为12MJ/kg，相当于0.4kg标准煤，可通过焚烧或热解气化回收热能
- 生物柴油**：美国污水厂每年可产生大约1.4*10⁶ m³的生物柴油，相当于全美柴油需求量的1%

资源回收

- 脂肪酸**：作为污水除磷脱氮的碳源，氮和磷去除率平均提高约30%
- PHA**：合成生物可降解塑料-聚羟基脂肪酸酯 (PHA)，PHA转换效率达0.59 gPHA/gCOD
- 提取蛋白**：蛋白能最大化回收80-90%
- 制乳酸**：污泥制乳酸产量可达2.9 g/L/h，浓度可达73g/L
- 植物激素**：污泥堆肥产物中以干基计富集赤霉素2.75mg/kg，细胞分裂素1.05 mg/kg以及生长素3.80 mg/kg
- 氮回收**：干污泥中N含量3-4%，多为有机氮，若污水中的氮全部利用，可占氮肥产量的30%
- 磷回收**：污泥中的磷含量为2-3%，以鸟粪石、蓝铁矿等形式回收，可满足50%磷肥需求
- 金属提取**：据估算，可从全球污泥中回收的Au约为18吨，1吨污泥焚烧灰渣含Au、Ag约2kg
- 生物炭**：热解/水热制备生物炭，可作为土壤改良剂、生物炭基肥料或吸附剂
- 有机肥**：含植物生长所需微量，以及氮、磷、钾营养元素，经过生物稳定可作为有机营养土进行土地利用
- 材料化转化**：C、Si、金属制成多孔吸附材料，还可制备光催化材料和储电材料
- 建材利用**：污泥焚烧灰渣可代替5-20%的水泥矿物原材料

谢谢!



污泥独立焚烧与厌氧+焚烧投资比较

污泥厌氧消化生物处理+污泥干化焚烧/污泥热解气化

	脱水干化焚烧	厌氧消化+干化焚烧
生物泥量	1000 吨 (80%含水率)	1000 吨 (80%含水率)
厌氧消化后		300 吨 (70%含水率)
沼气回收		+ 40000 m ³ /d=2.6万kWh/d
干化能耗	- 800kWh/吨*1000吨=80万kWh	- 800kWh/吨*300吨=24万kWh
厌氧消化投资成本		50万元/吨*1000吨=5亿元
干化焚烧投资成本	100万元/吨*1000吨=10亿元	100万元/吨*300吨=3亿元
总投资	10亿元	8亿元

- 污泥厌氧消化生物处理：减量、降低含水率、稳定化
- 污泥干化焚烧处理：末端处理

未来技术发展方向

厌氧消化技术是实现污泥碳中和处理处置的重要途径

厌氧消化研究热点

① 提高转化效率

- 高级厌氧消化
- 协同厌氧消化

② 提高甲烷含量

③ 氮磷回收



污泥



厌氧消化

- 资源化 (CH₄ 60~65%)
- 减量化 (30%~35%)
- 稳定化 (VS降解~50%)
- 无害化 (杀灭病原菌)



农业秸秆



畜禽粪便



餐厨废弃物

沼气

C回收



甲烷制天然气

沼液

N回收



硫酸铵/碳酸氢铵

沼液

P回收



鸟粪石MAP

沼渣

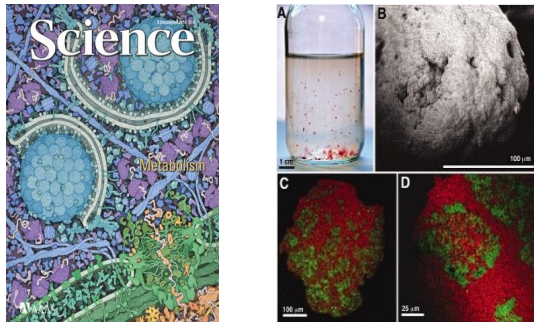
土地利用



生物碳土

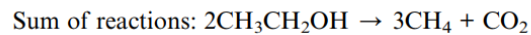
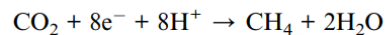
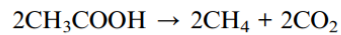
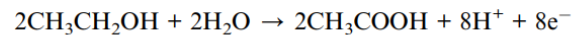
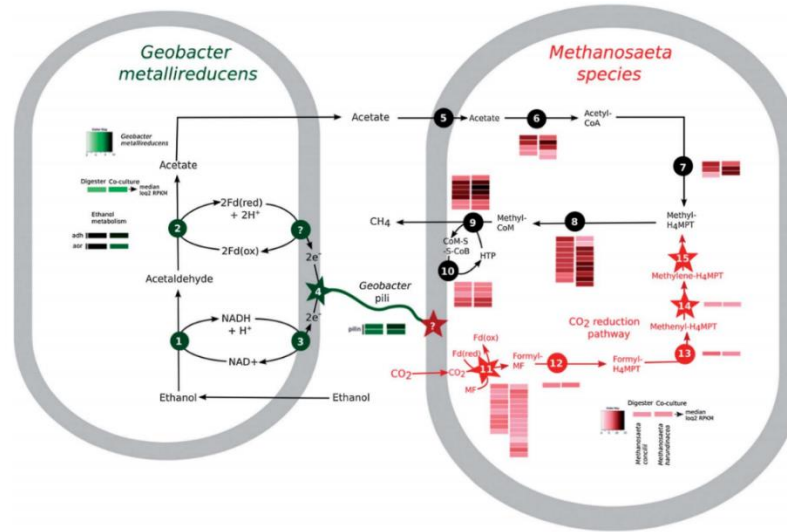
基于电子调控强化定向产甲烷——提高碳替代量

Direct Exchange of Electrons Within Aggregates of an Evolved Syntrophic Coculture of Anaerobic Bacteria

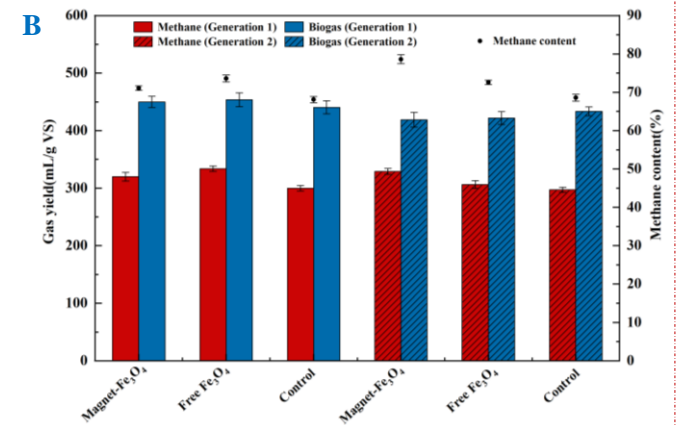
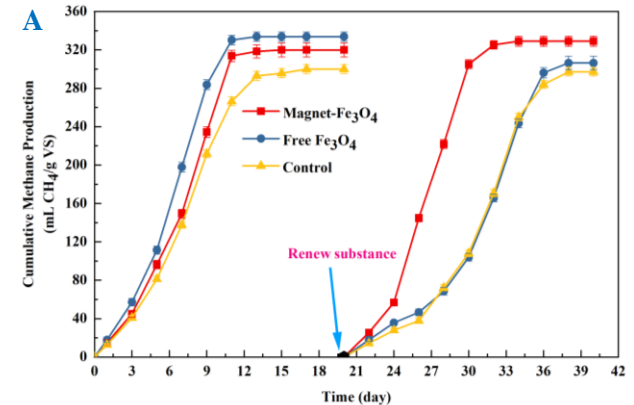


Science 2010, Vol. 330

厌氧体系电子传递的新机制



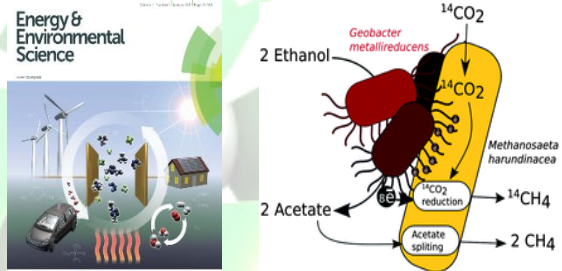
厌氧消化产甲烷的新途径



最大产甲烷速率提高50.1%

甲烷比例提高至78.6%

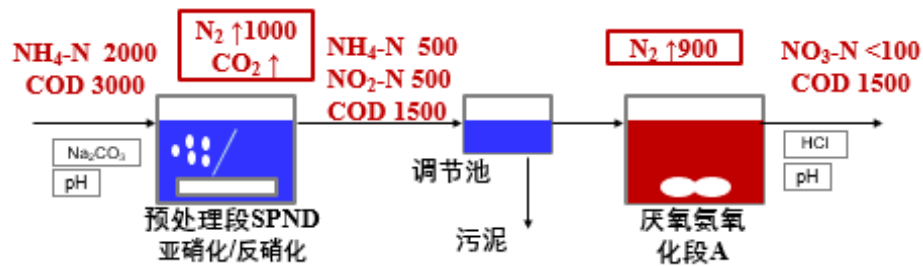
A new model for electron flow during anaerobic digestion: direct interspecies electron transfer to *Methanosaeta* for the reduction of carbon dioxide to methane



Energy Environ Sci, Vol. 7

厌氧氨氧化自养脱氮工艺—降低碳排放

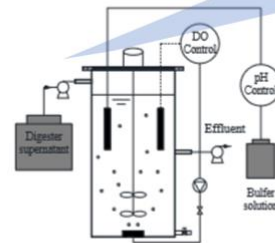
SPND/A (Simultaneous Partial Nitrification and Denitrification)



- 实现高效亚硝化
- 基于内碳源的反硝化脱氮
- 电活性细菌强化难降解有机物去除 (抑制组分)

- 实现高效自养脱氮
- K型厌氧氨氧化菌富集
- 严格厌氧环境利于颗粒化
- 脱氮负荷 > 0.5kg/m³d

小试 (反应器4L)



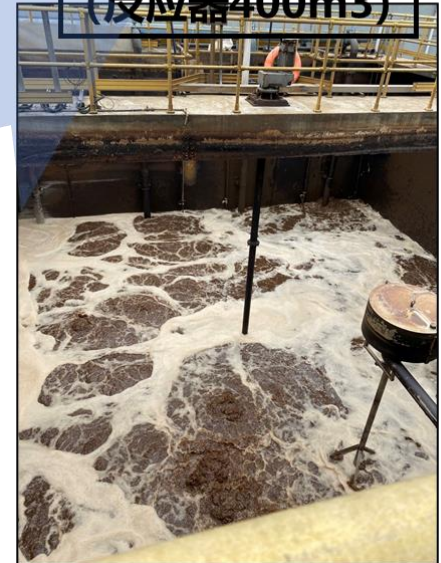
- 小试
- 上海、长沙
- 2016年之前至今

中试 (反应器60m³)



- 中试
- 长沙黑麋峰
- 2017年12月至今

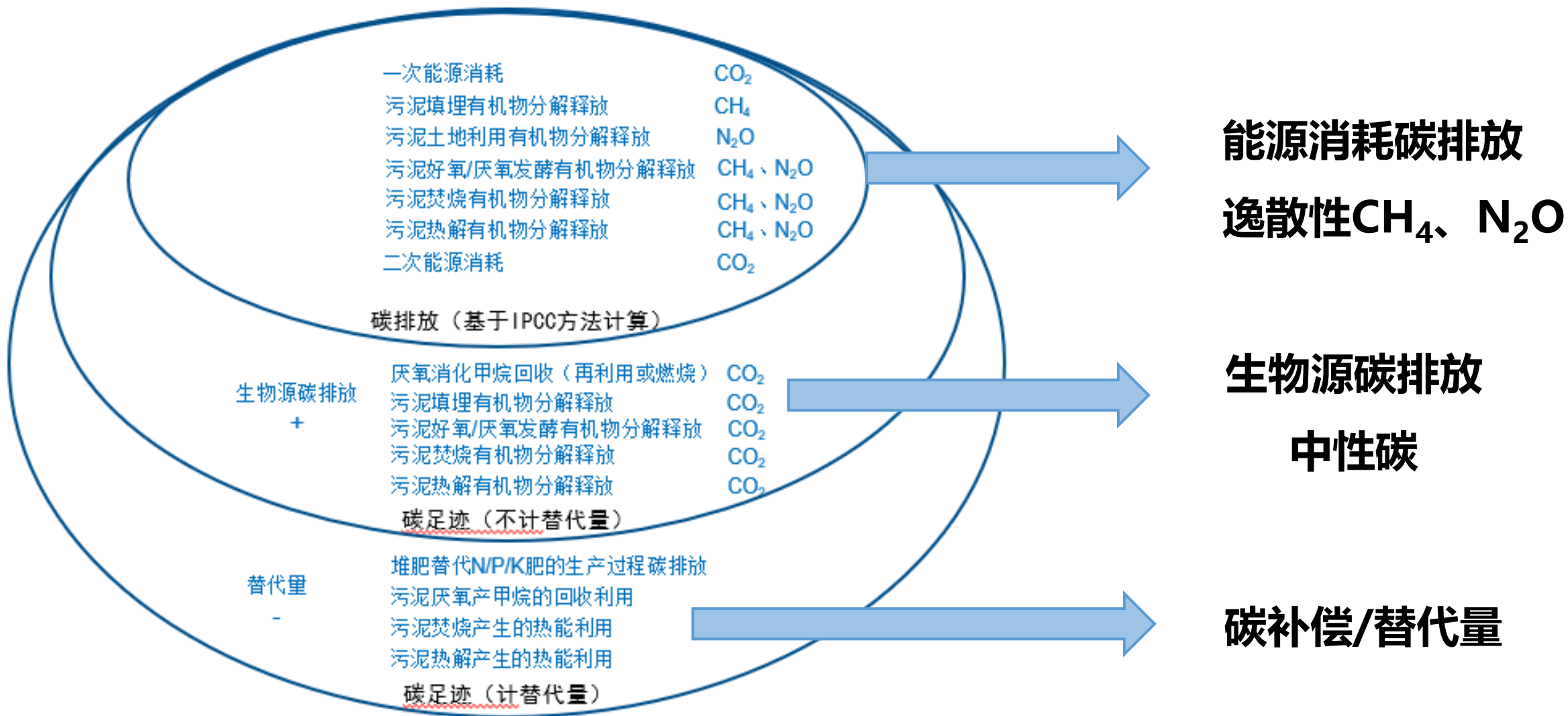
工程大试 (反应器400m³)



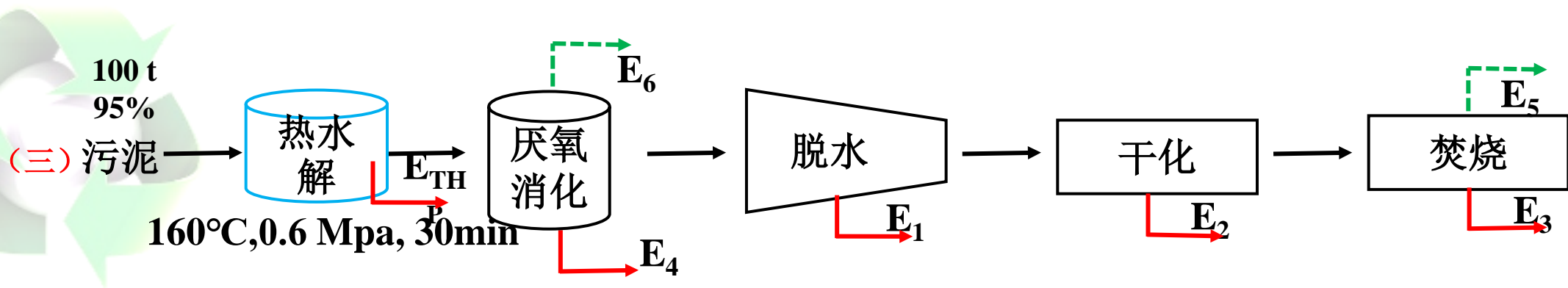
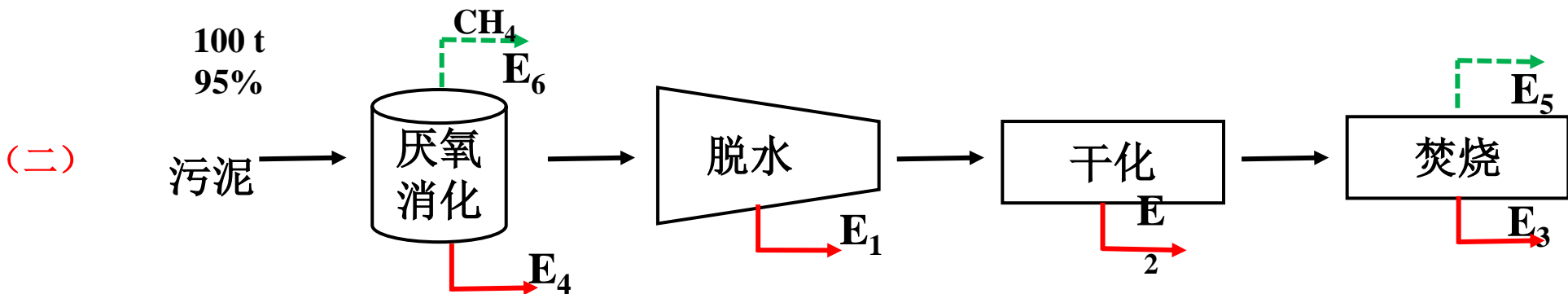
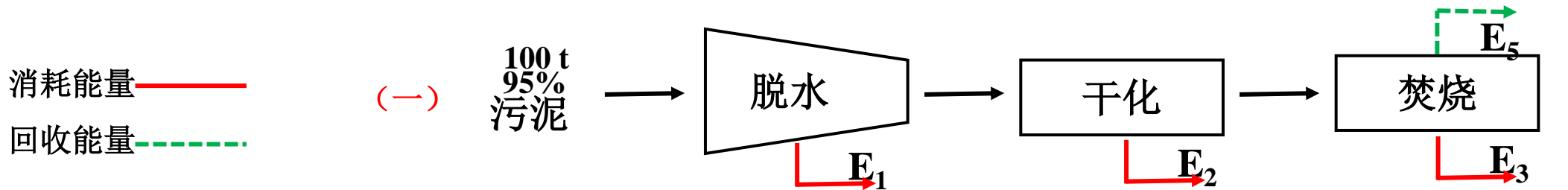
- 生产性验证试验
- 长沙黑麋峰
- 2019年11月至今

- 反硝化-厌氧氨氧化耦合驱动的两段式沼液脱氮工艺
- 实现高级厌氧消化液高效自养脱氮, 负荷稳定在0.5kg/m³d以上

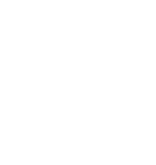
污泥处理处置碳排放核算边界 (IPCC)



污泥焚烧与污泥稳定化处理的关系



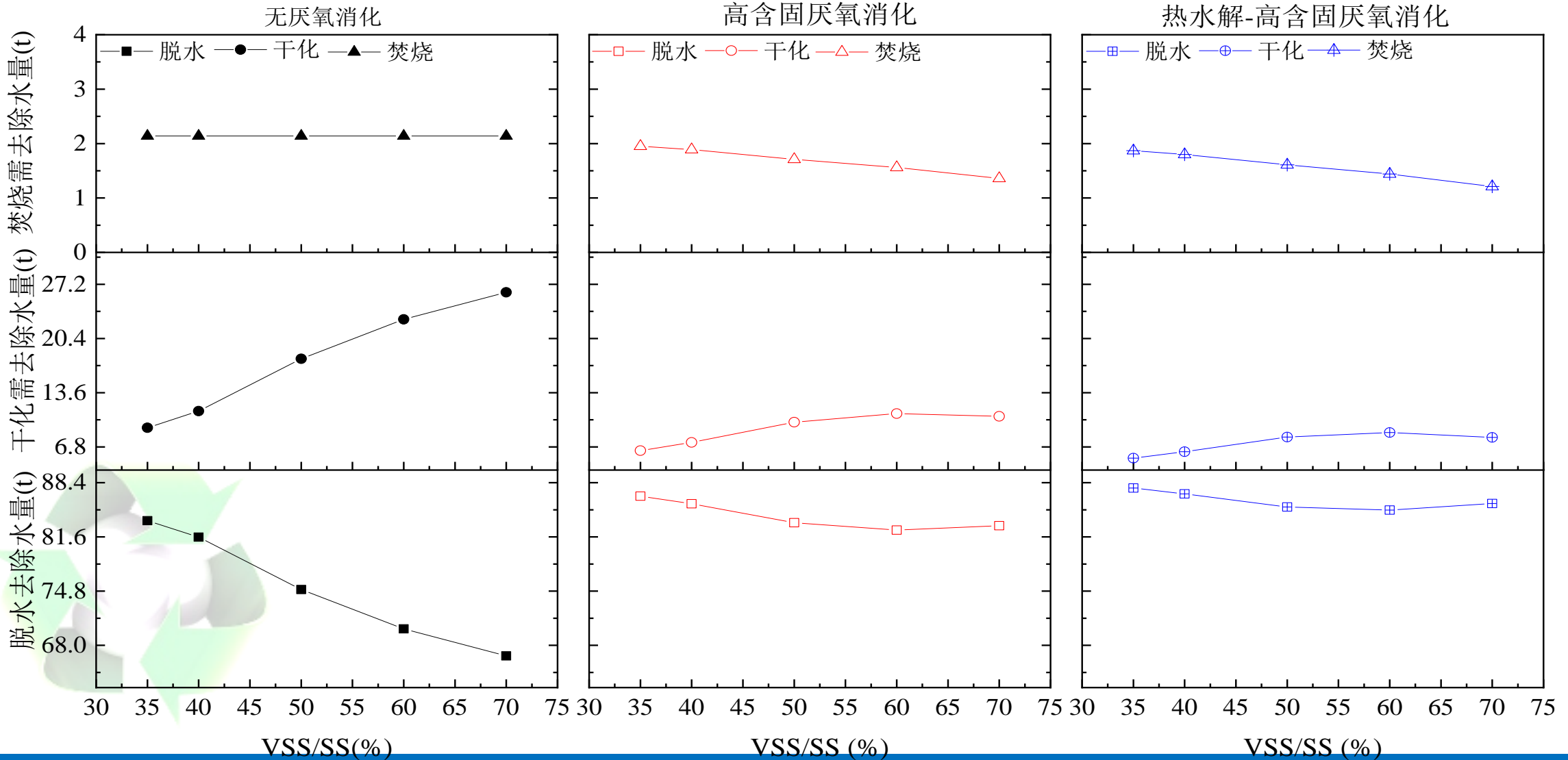
污泥焚烧与污泥稳定化处理的关系



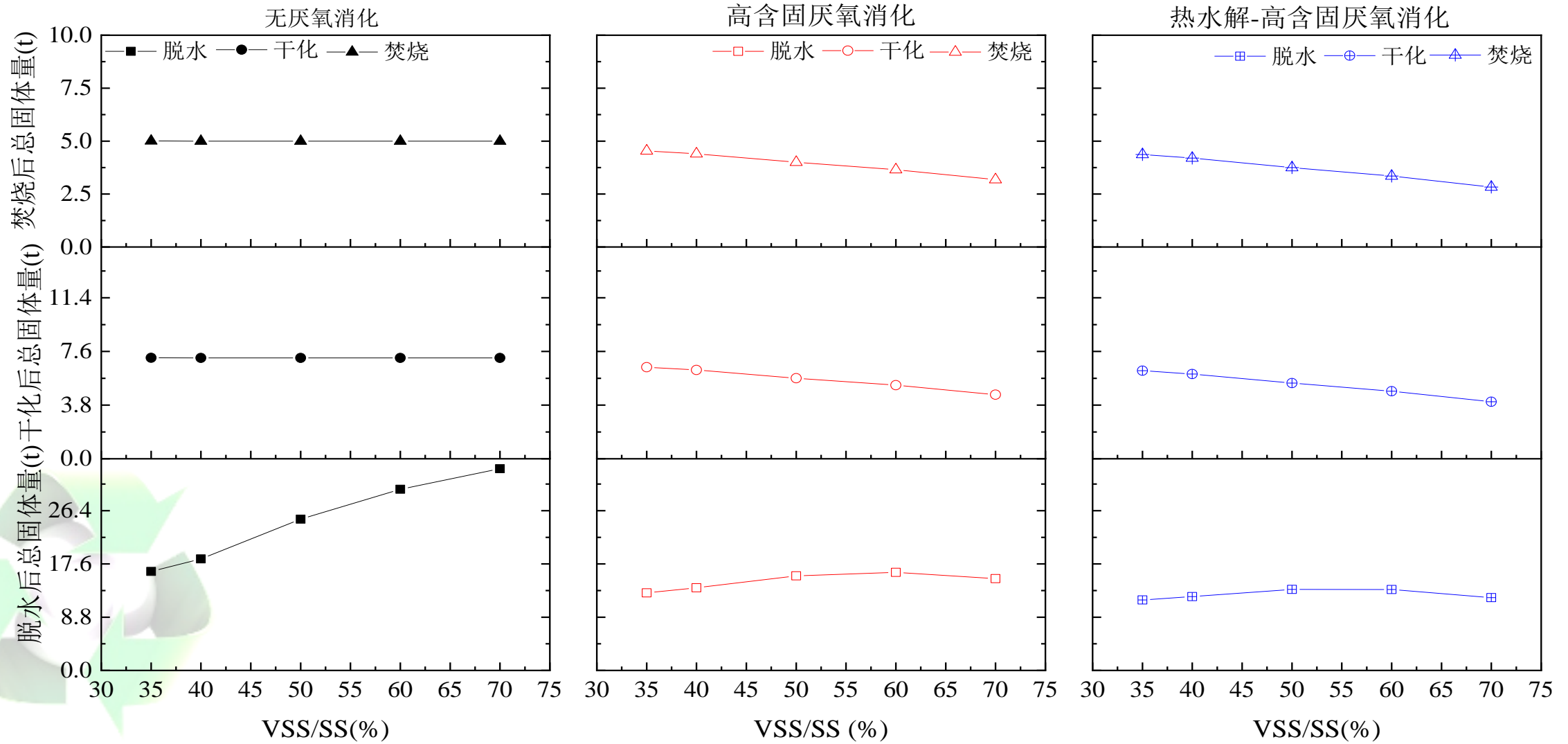
污泥焚烧与污泥稳定化处理的关系



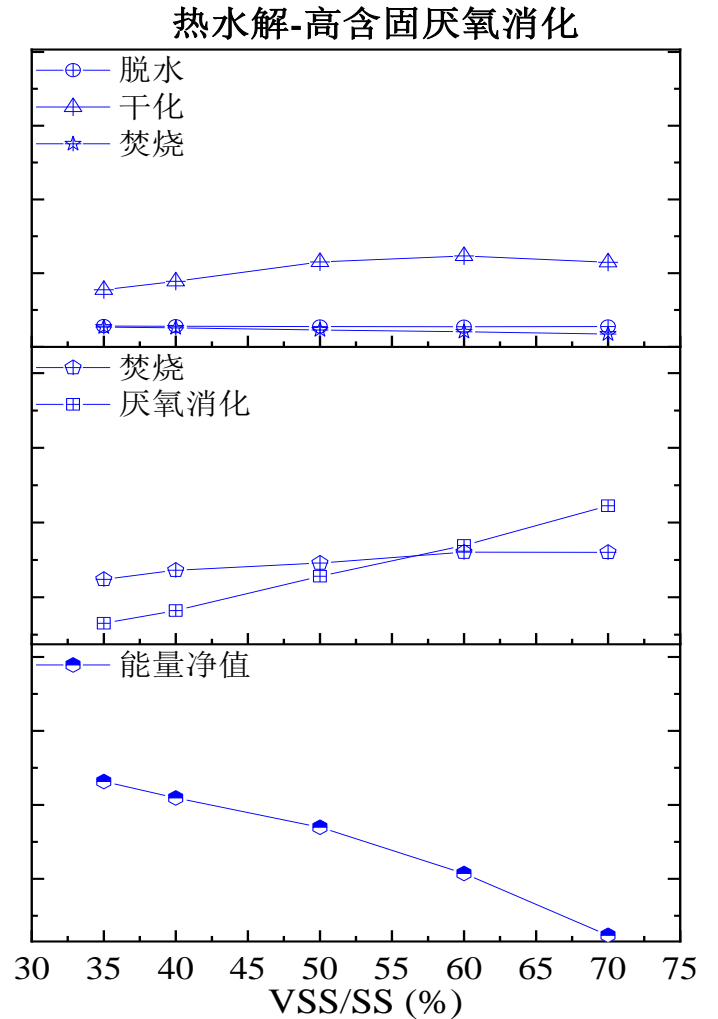
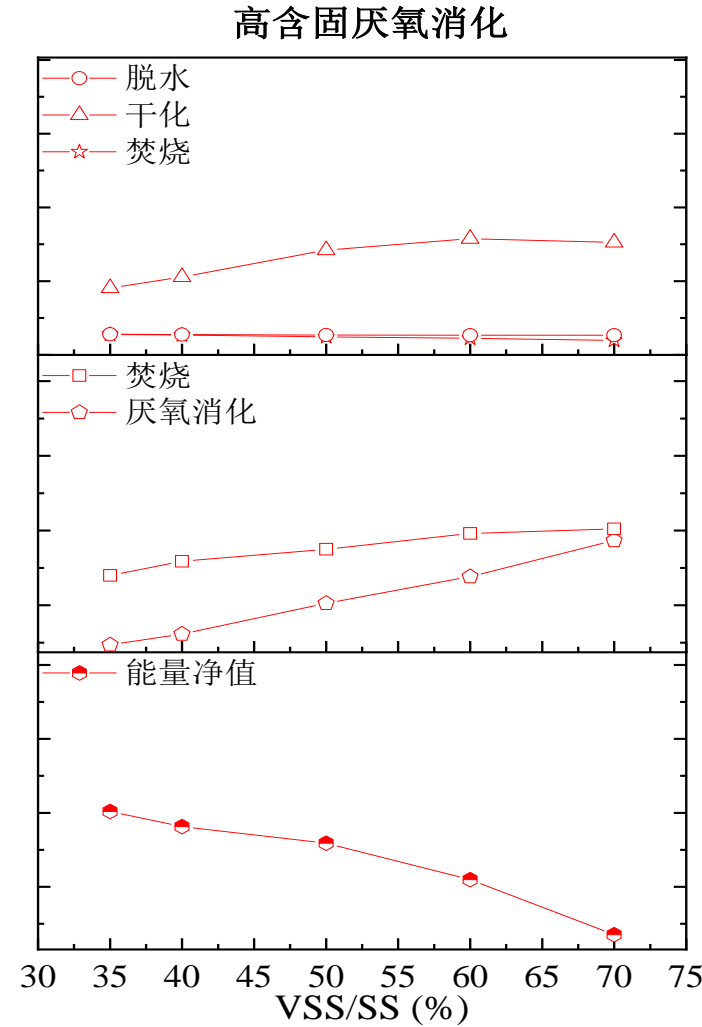
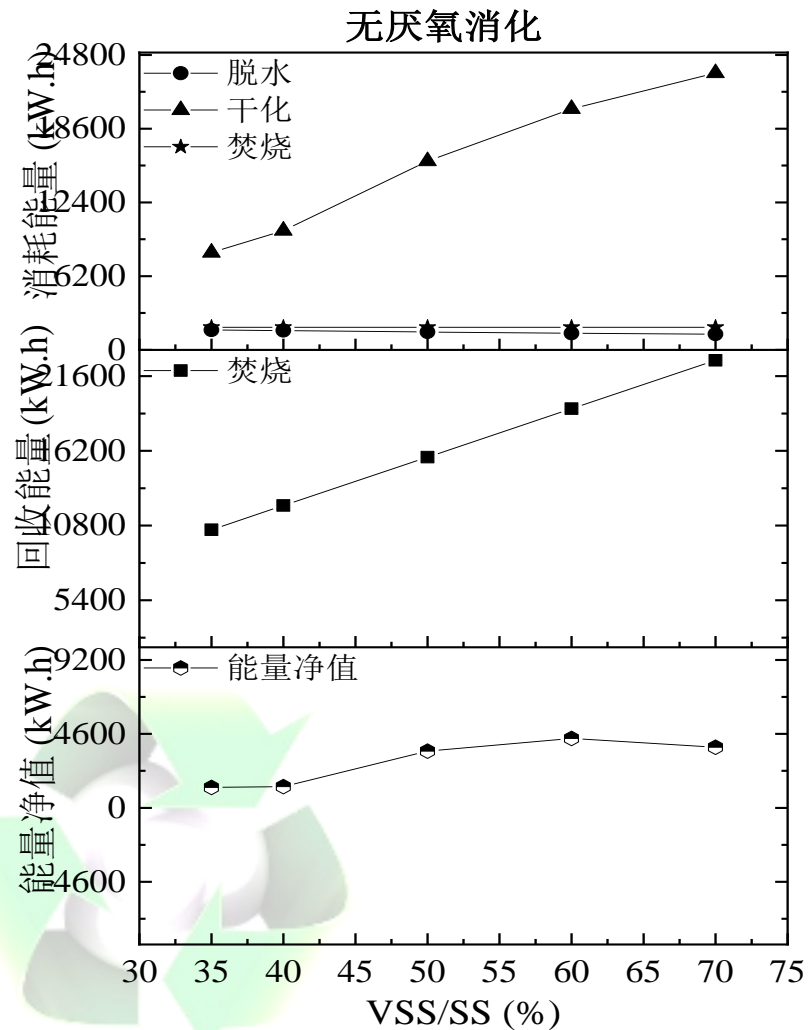
污泥焚烧与污泥稳定化处理的关系



污泥焚烧与污泥稳定化处理的关系

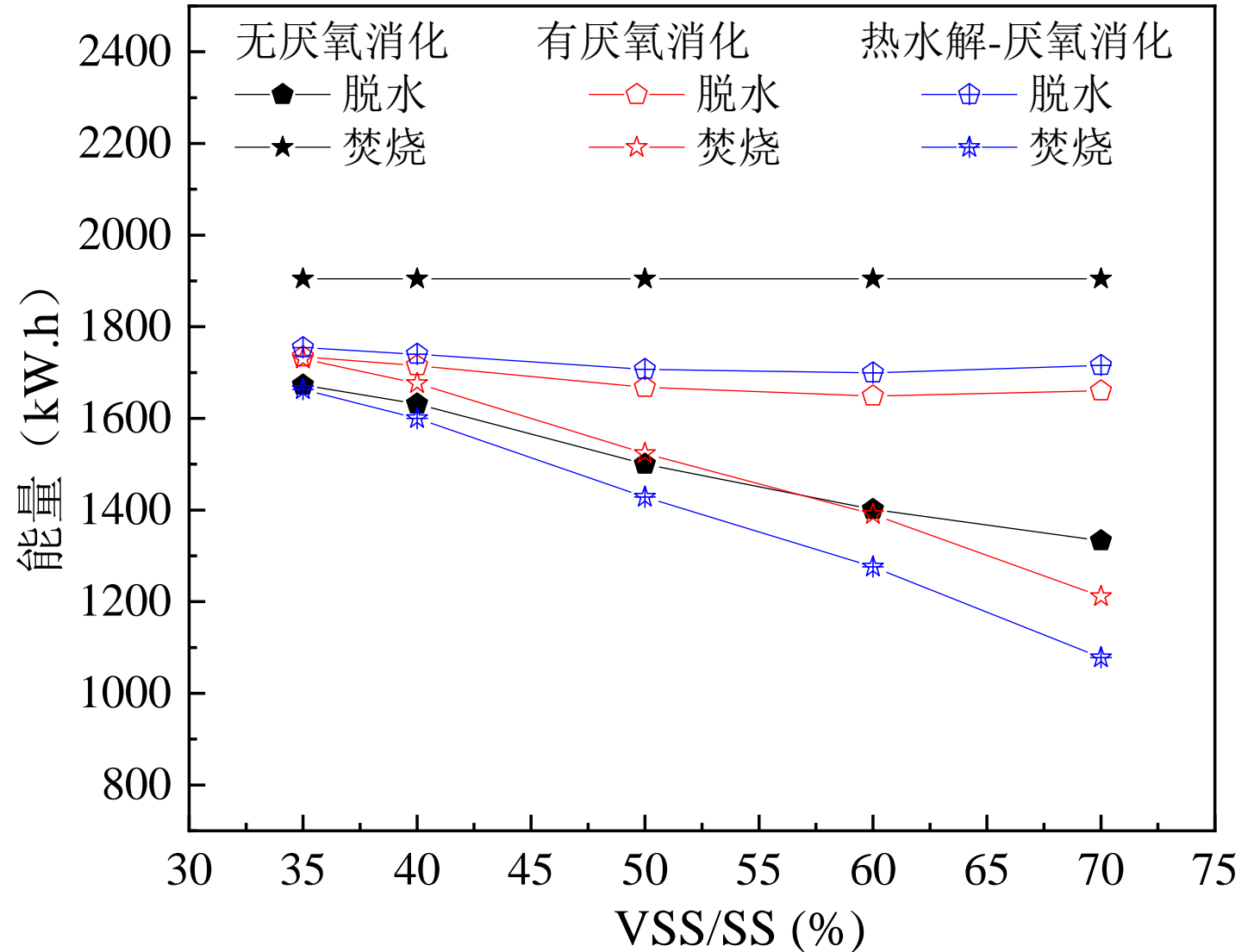


污泥焚烧与污泥稳定化处理的关系



注：能量净值 = 消耗能量 - 回收能量

脱水、焚烧能耗详图



污水收集力度加大： 全量收集处理

泥泥质： 无机组分量会下降或持平

有机物组分含量增加

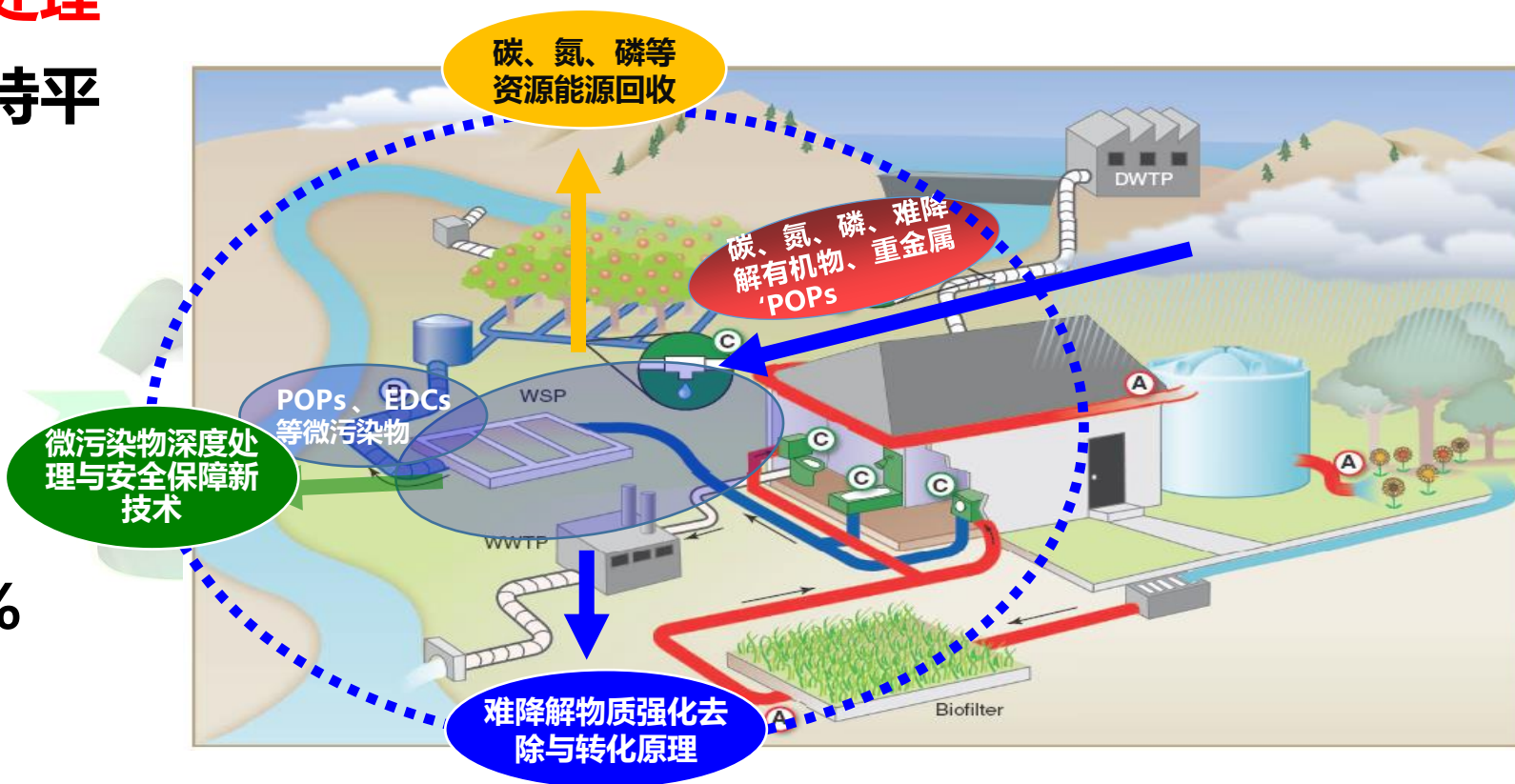
40% 提升60-70%

污泥量： 污水量持平或增加

和进水水质成正比

预计近期增加30-50%

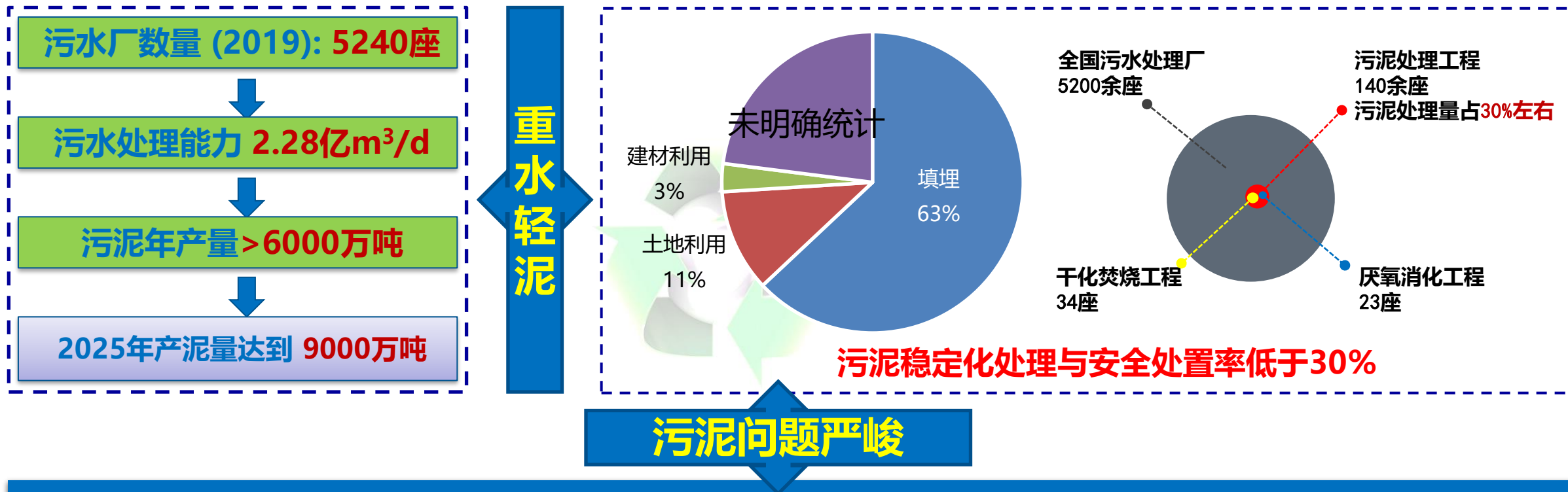
未来增加100%



污泥量增加、污泥有机物含量增加： 处理处置设施的建设影响？

污泥量大，复杂，形势严峻

国家需求：水污染治理成效显著，但污泥处理处置问题形势严峻



“水十条”和“十三五”全国城镇污水处理及再生利用设施建设规划均明确提出要推进污泥处理处置：

- 污泥应进行稳定化、无害化、资源化处理处置
- 地级及以上城市污泥无害化处理处置率应于2020年底前达到**90%以上**，**县城达到70%**

给水排水

2021会议活动预告



会议活动预告详情



《给水排水》官方微信
20万+专业粉丝共同关注

时间	地点	活动内容	人数	联系人
4月8-9日	义乌	2021自来水水表和阀门选型与管理研修班	150	路恒18811581764 杨 曦18410201827 侯培强13810395340
3月26-28日	北京	第十届中国水业院士论坛	1000	夏 韵18611516298
5月12-15日	长沙	2021给水大会（3个论坛、1个沙龙、1个培训班） 中国城市智慧水务高峰论坛 给水厂现代化技术改造论坛 二次供水与老旧小区给水系统改造论坛 供水优化营商环境沙龙 供水管网产销差控制研修班	1500	智慧：杨 曦18410201827 水厂：王 祺15600027982 二供：负金娟15201348767 培训：侯培强13810395340 备用：张 杰18500045167
5月26-28	广州	2021水环境大会（分设2个分论坛） 黑臭水体治理论坛海绵城市与排涝论坛	1000	海绵：王 祺15600027982 黑臭：李新鑫18428387942 备用：侯培强13810395340 夏 韵18611516298
6月23-25日	宜兴	2021中国农村污水治理与饮水安全提升高峰论坛（第五届）	500	李金龙18910635575 侯培强13810395340
9月2-3日	合肥	绿色工厂厂务大会	300	张美雪18810946466 张 杰18500045167
9月15-18日	重庆	2021中国城市垃圾渗沥液处理论坛（第八届）	600	王 祺15600027982 张 杰18500045167
9月下旬	上海	污泥处理处置特色案例参观活动——上海站 中国城市环境卫生协会 污泥专委会 年度活动	100	杨 曦18410201827 张 杰18500045167
10月13-16日	武汉	2021排水大会 （污水系统提质增效、污泥处理处置） 中国城市环境卫生协会 污泥专委会 年度活动	1000	污泥：杨 曦18410201827 污水：王 祺15600027982 备用：张 杰18500045167 夏 韵18611516298
11月	拟苏州	2021中国勘察设计协会水系统分会年会	400	杨 曦18410201827 负金娟15201348767
待定		国家污泥处理处置产业技术联盟 年度活动	--	夏 韵18611516298
待定		其他细分专业论坛与活动洽谈	--	张 杰18500045167