



清华大学环境学院
SCHOOL OF ENVIRONMENT, TSINGHUA UNIVERSITY

“无废城市”建设

生活固体废物领域污染防治技术

刘建国
教授

清华大学环境学院

“无废城市”建设试点推进会，三亚，2019.12.10

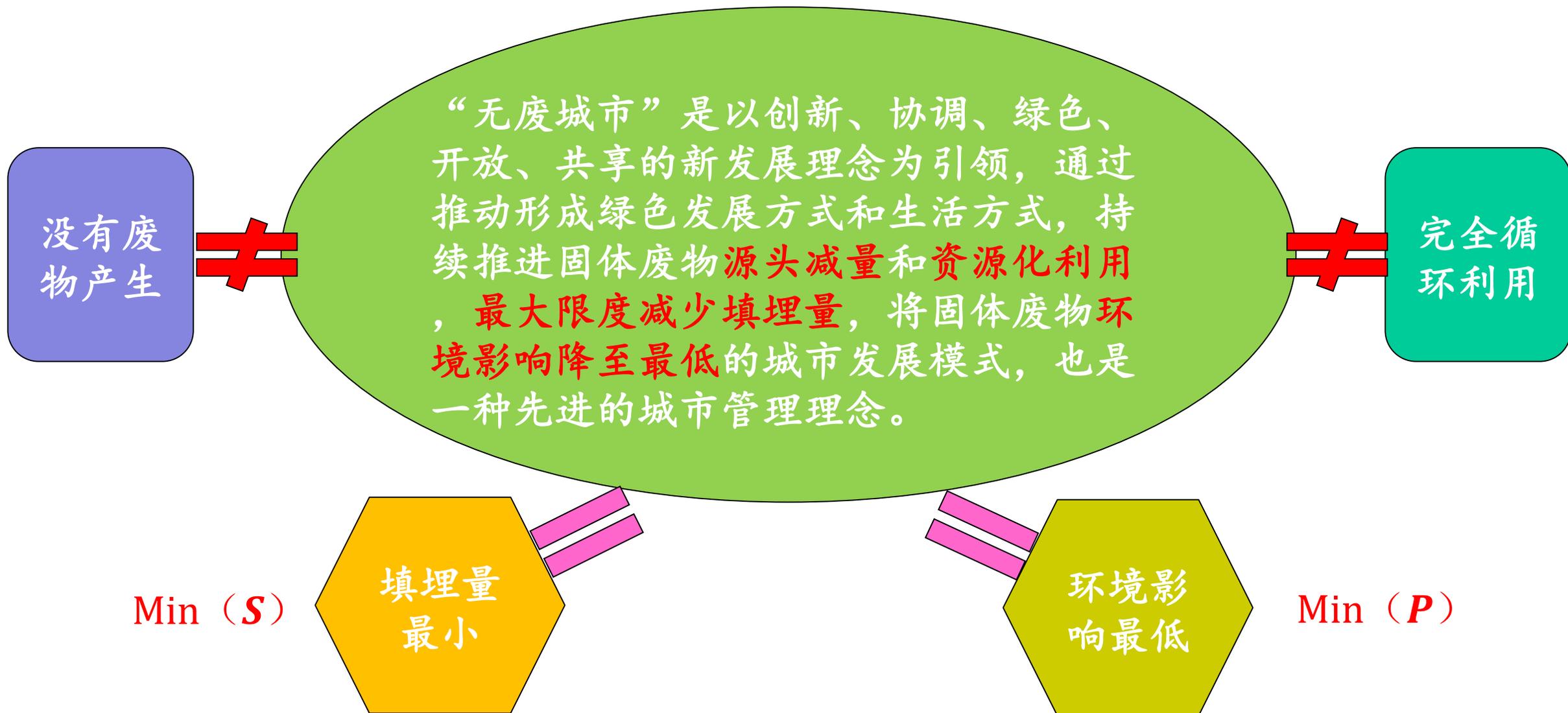
主要内容

- “无废城市” 构建技术路径
- “无废城市” 技术选择依据
- 生活垃圾处理经验总结展望
- 生活固废领域技术清单分析

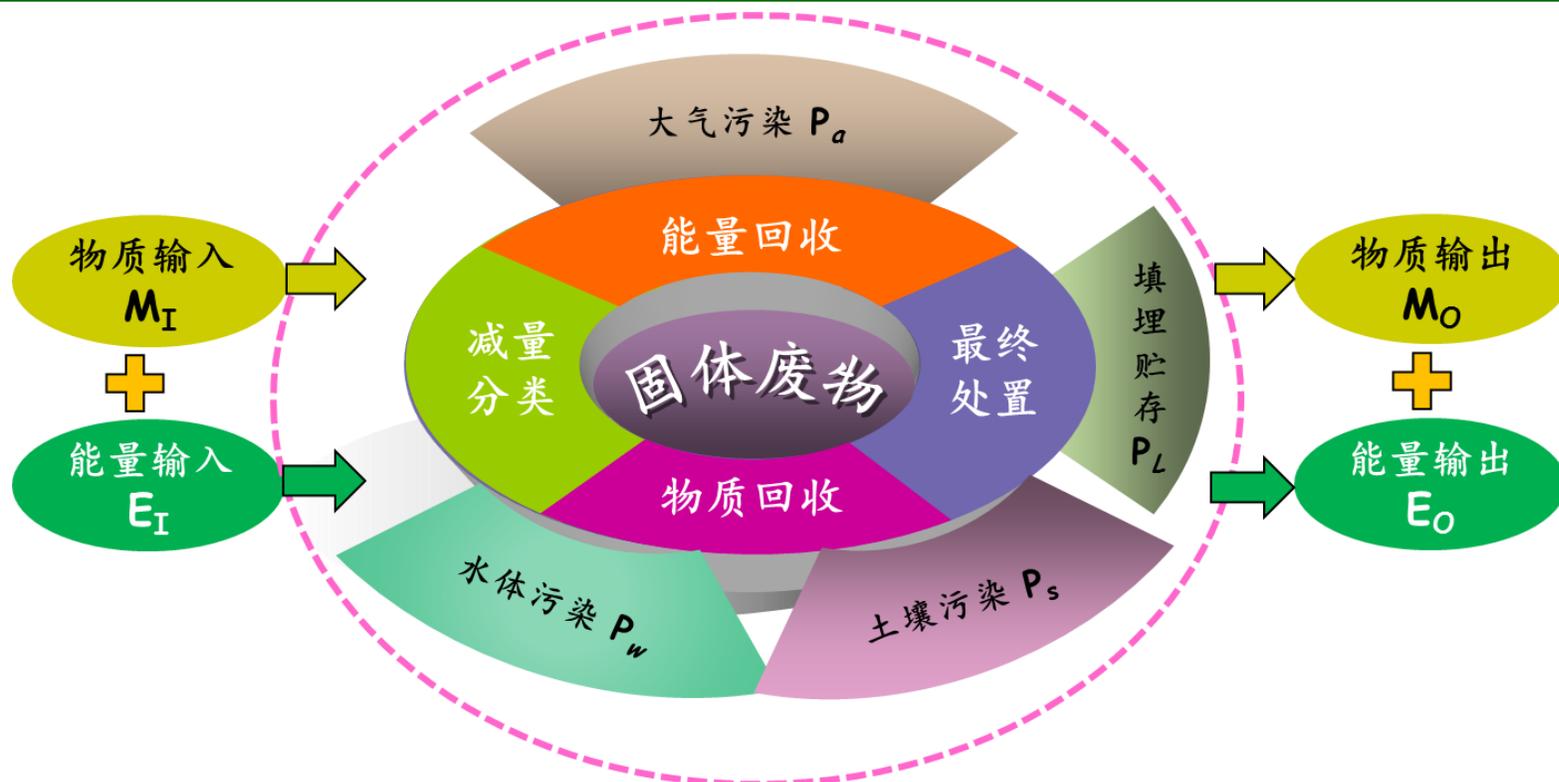
主要内容

- “无废城市” 构建技术路径
- “无废城市” 技术选择依据
- 生活垃圾处理经验总结展望
- 生活固废领域技术清单分析

“无废城市”系统构建：科学内涵



“无废城市”系统构建：基本原理



$$SW + M_I + E_I = M_O + E_O + S + P$$

$$P = P_a + P_w + P_s = \underbrace{SW}_{\text{减量减毒}} - \underbrace{(M_I - M_O)}_{\text{物质回收}} - \underbrace{(E_I - E_O)}_{\text{能量回收}} - \underbrace{S}_{\text{填埋封存}}$$

减量减毒

物质回收

能量回收

填埋封存

“无废城市”系统构建：传统模式

$$P = P_a + P_w + P_s = SW - (M_I - M_o) - (E_I - E_o) - S$$

减量减毒

物质回收

能量回收

填埋封存



“无废城市”系统构建：新型模式

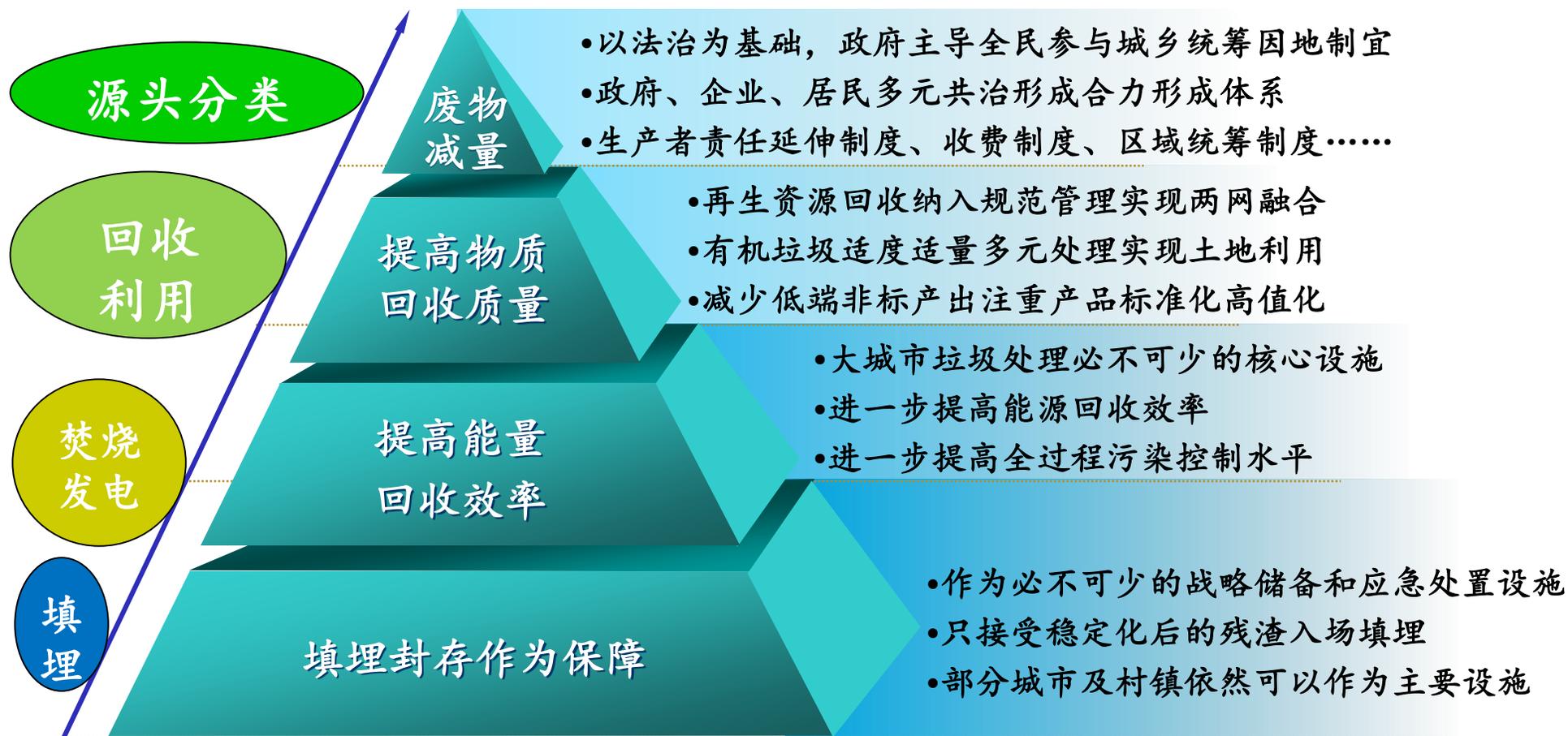
$$P = P_a + P_w + P_s = SW - (M_I - M_o) - (E_I - E_o) - S$$

减量减毒

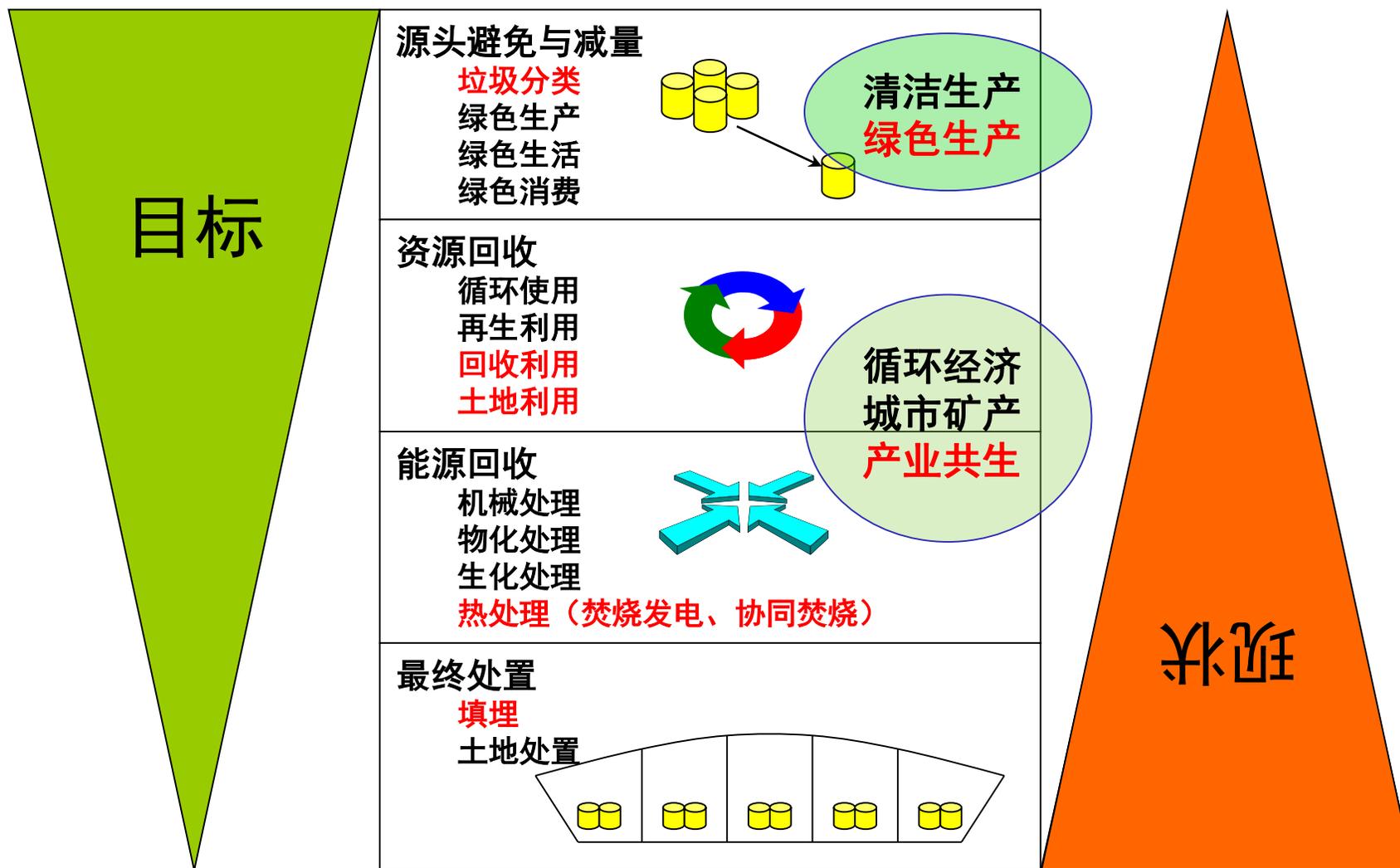
物质回收

能量回收

填埋封存



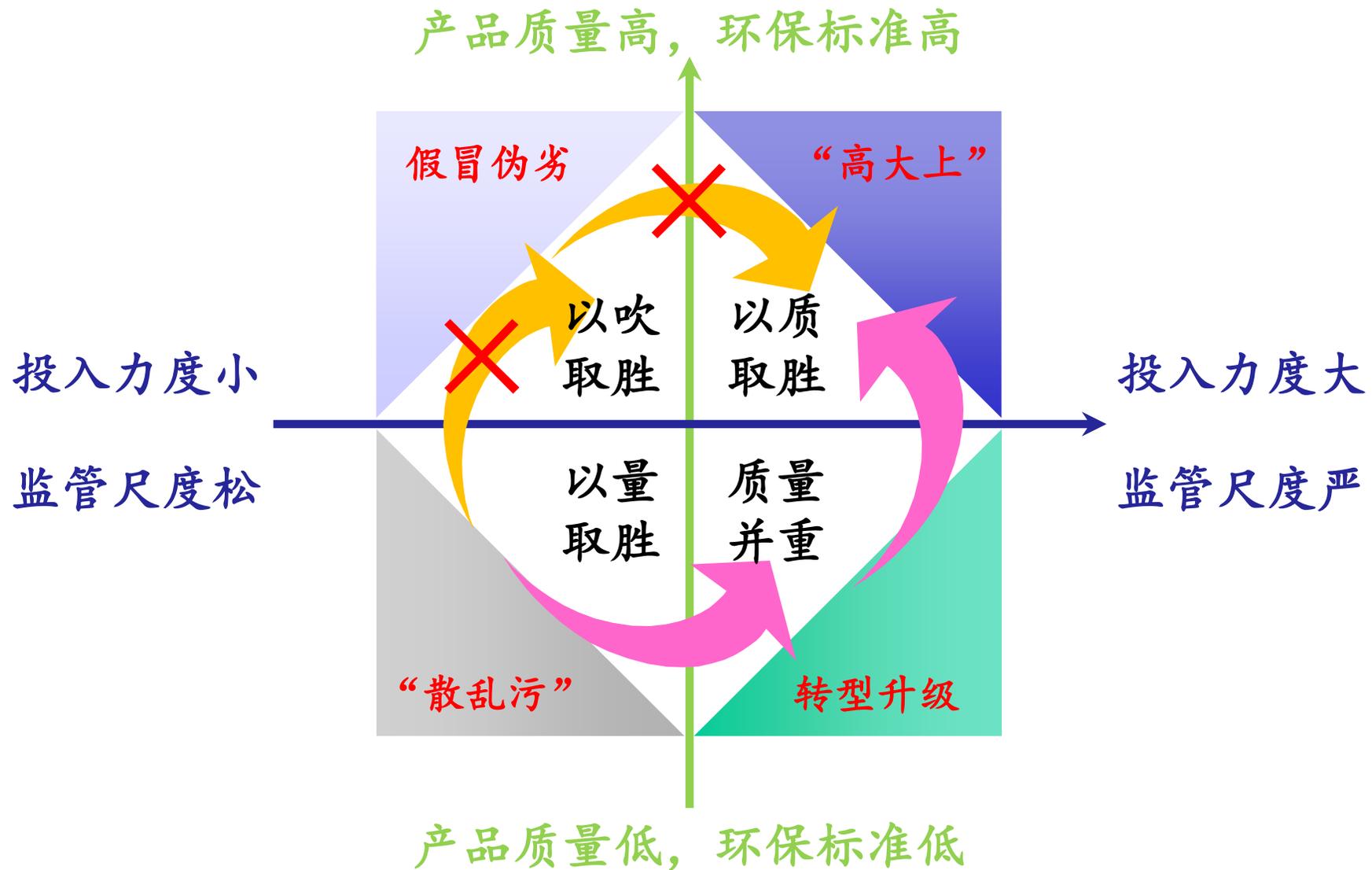
“无废城市”系统构建：层次架构



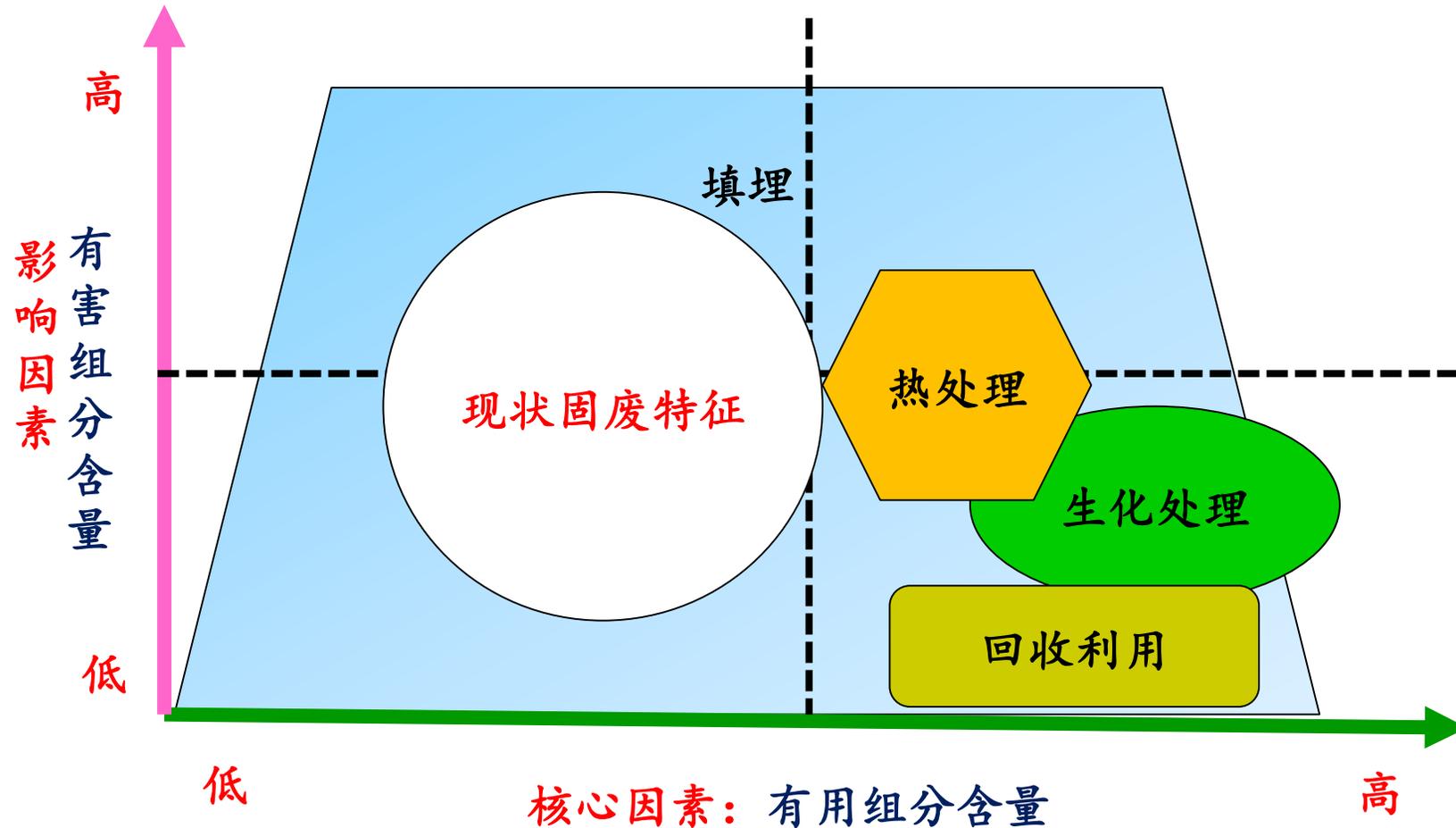
主要内容

- “无废城市” 构建技术路径
- “无废城市” 技术选择依据
- 生活垃圾处理经验总结展望
- 生活固废领域技术清单分析

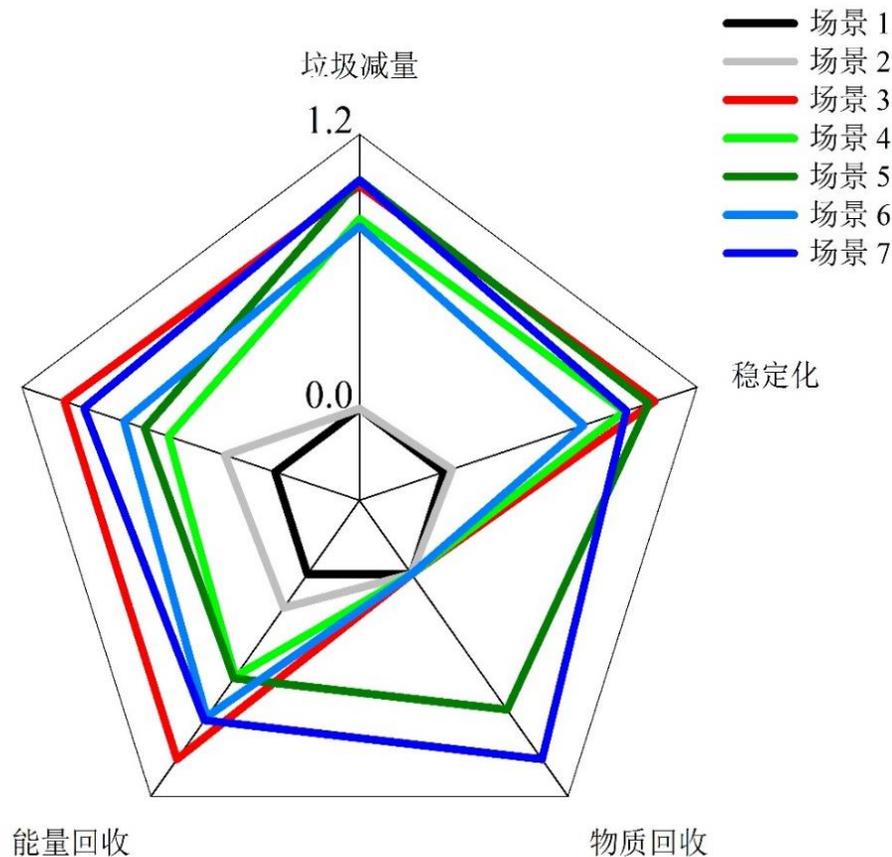
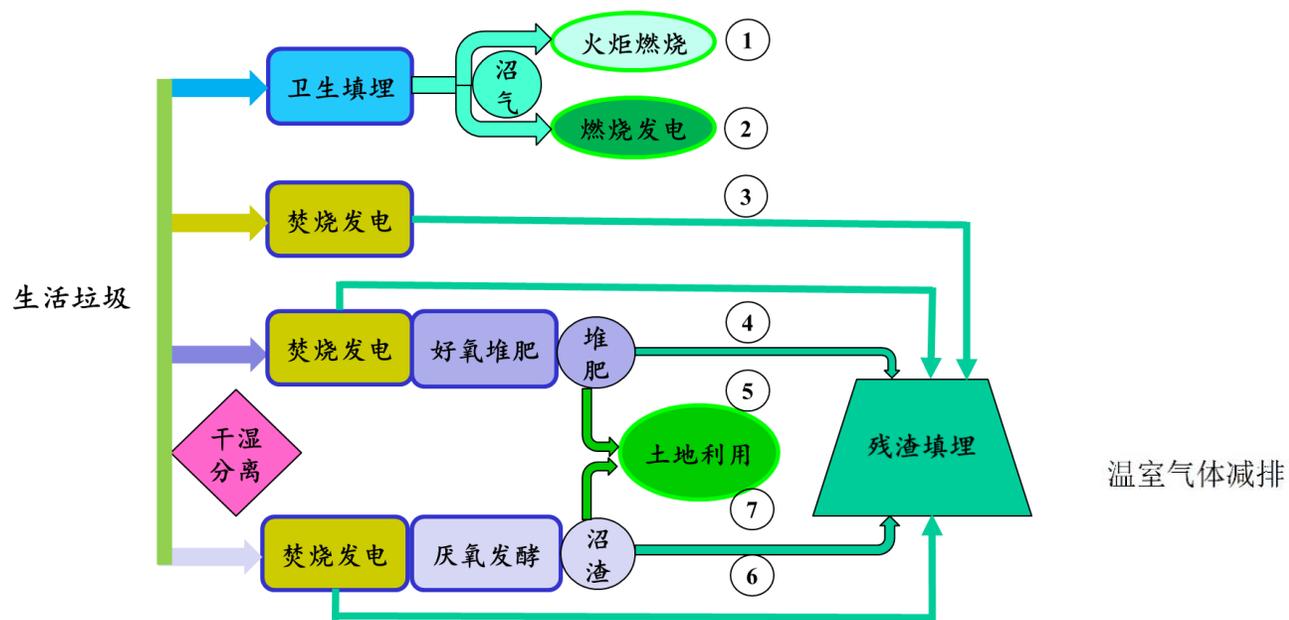
“无废城市” 技术选择依据：面向高质量发展



“无废城市” 技术选择依据：适应固体废物特点



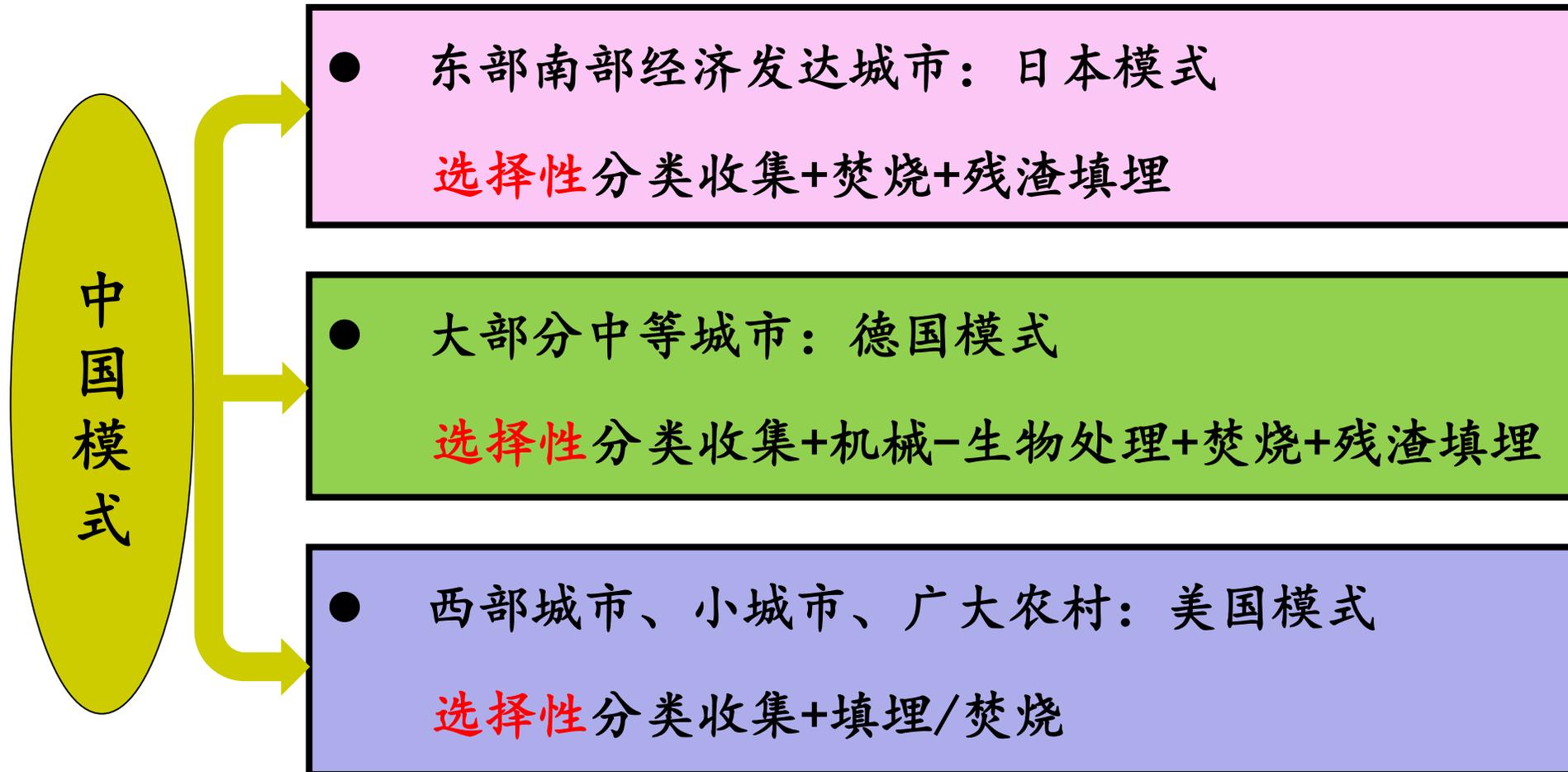
“无废城市” 技术选择依据：综合环境绩效最优



生活垃圾干湿分离+干垃圾焚烧发电+湿垃圾厌氧发酵的优化组合模式是否具有显著比较

优势取决于发酵产物能否实现安全土地利用。

“无废城市” 技术选择依据：因地制宜量力而行



主要内容

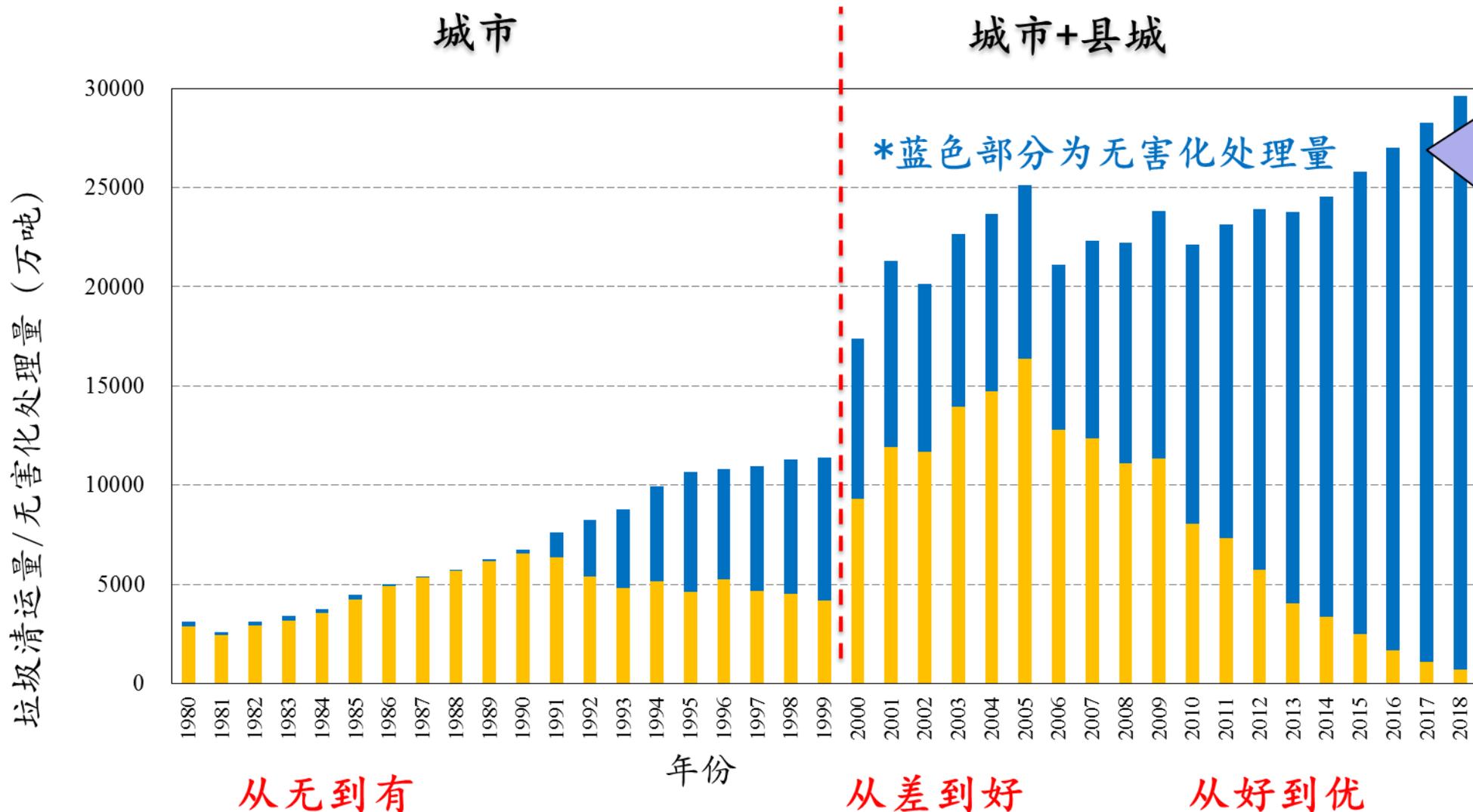
- “无废城市” 构建技术路径
- “无废城市” 技术选择依据
- 生活垃圾处理经验总结展望
- 生活固废领域技术清单分析

生活固体废物主要范围

- 生活垃圾
- 餐厨垃圾
- 污水处理厂污泥
- 可回收物（再生资源）
- 建筑垃圾
-

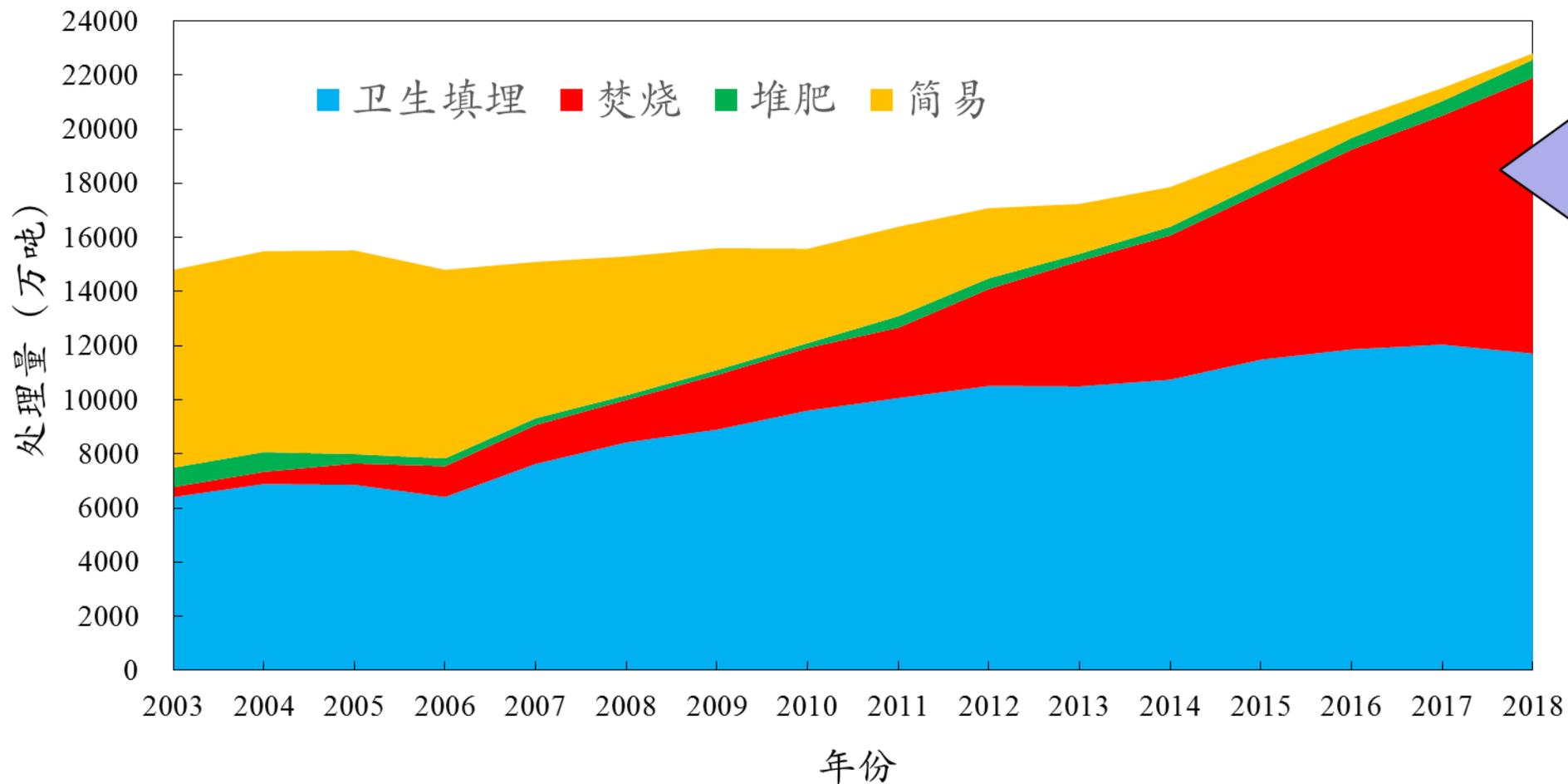


生活垃圾处理：能力持续提升



2016/2017/2018年，
中国城市生活垃圾无害化处理率分别达到
96.6%、97.1%、
98.2%。

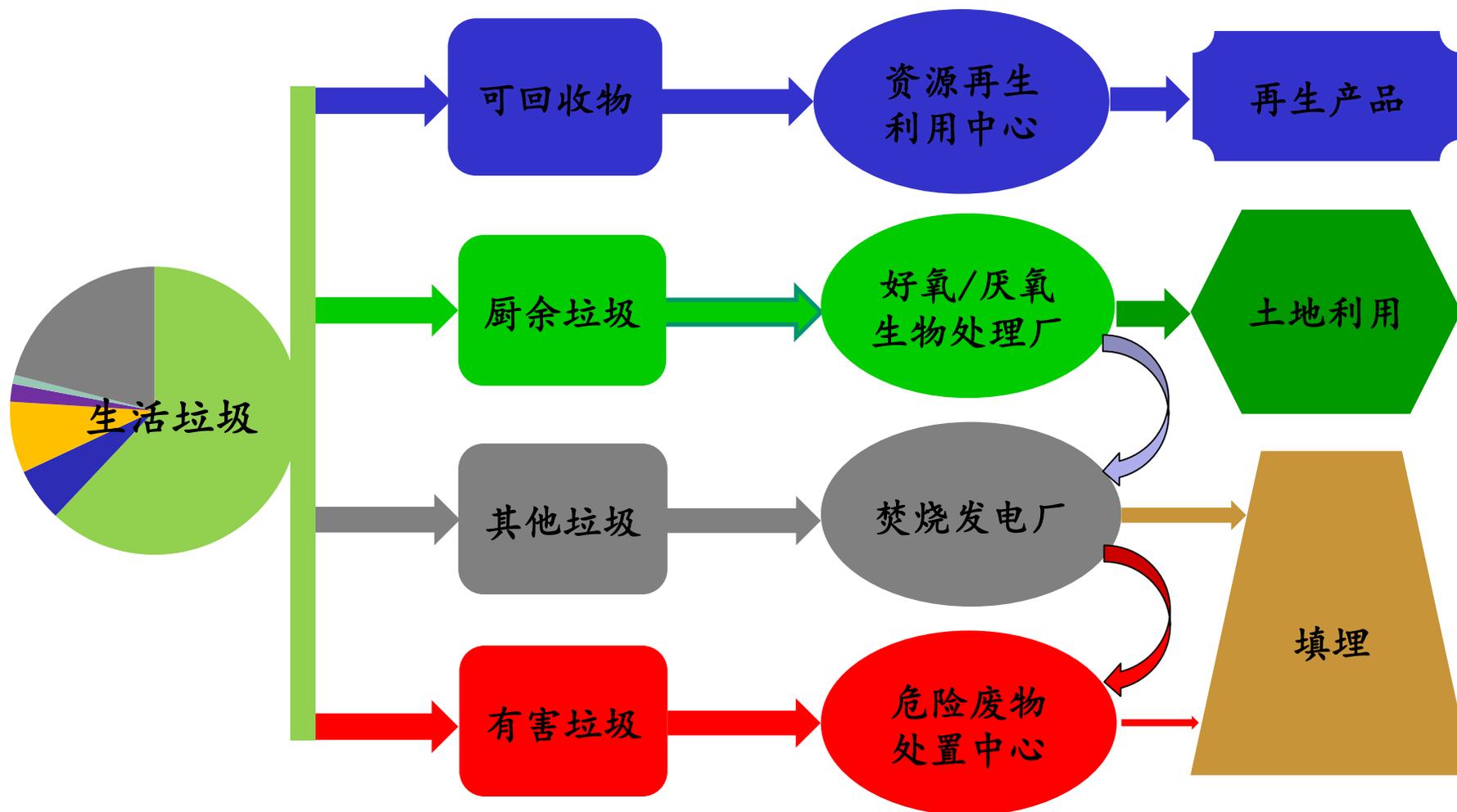
生活垃圾处理：结构持续优化



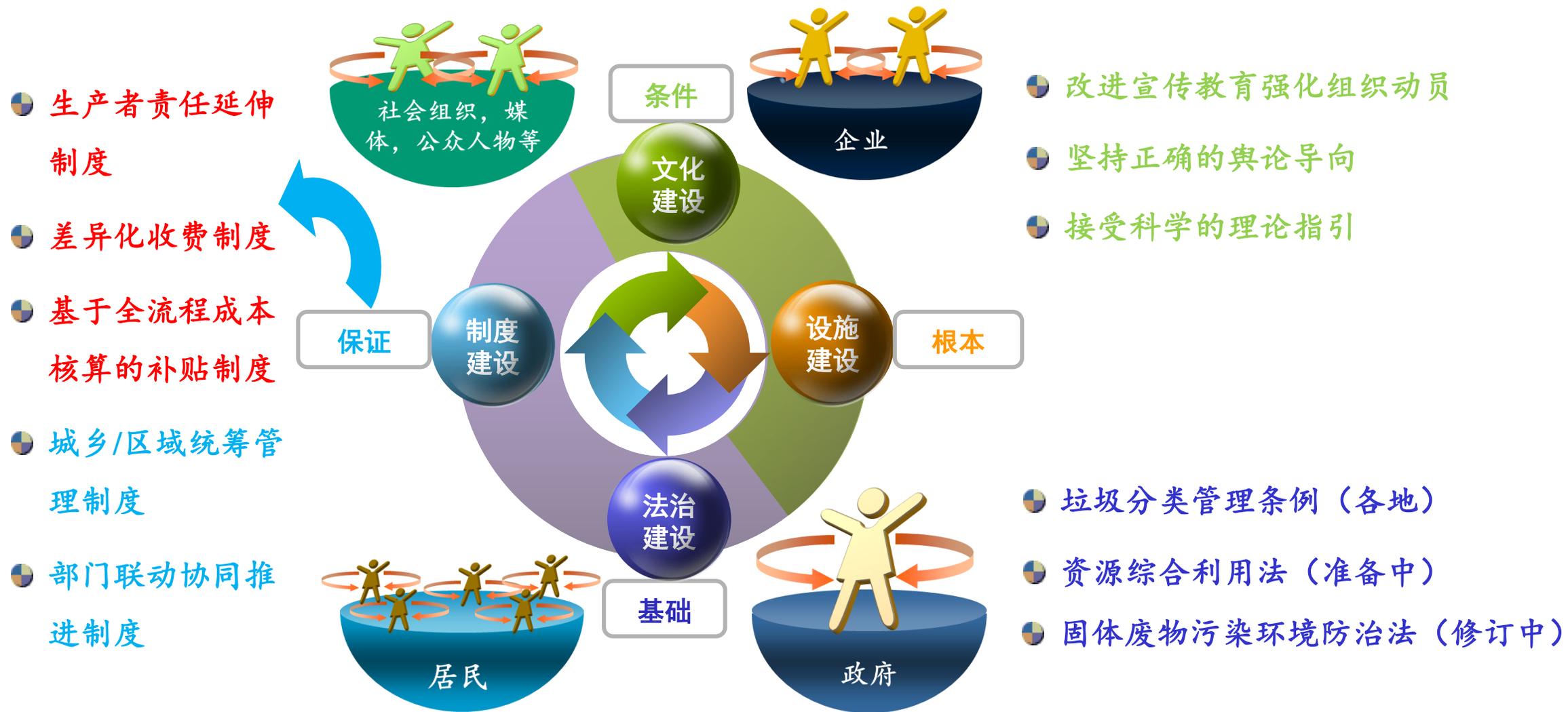
2017/2018年，中国城市生活垃圾焚烧占比分别达到**40.2%**和**45.1%**，2020年将超过**50%**，东部城市将超过**60%**。

中国垃圾处理技术格局演变

生活垃圾处理：以“分类”促“无废”



生活垃圾处理：多元共治多管齐下



主要内容

- “无废城市” 构建技术路径
- “无废城市” 技术选择依据
- 生活垃圾处理经验总结展望
- 生活固废领域技术清单分析

生活固废领域“无废城市”技术需求清单

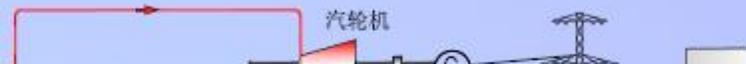
类别	序号	具体需求
生活固体 废物领域	1	偏远地区生活垃圾就地就近处置技术及装备
	2	工业化处理工程渣土技术、优化工程渣土泥砂分离技术、小型高效工程泥浆施工现场脱水干化装置、高效工程渣土处理装置
	3	有机垃圾（餐厨垃圾、绿化垃圾、城市污泥、粪渣污泥等）小型化协同处理技术及装备
	4	废弃渔具、贝壳等典型固废高值化利用技术
	5	沿海餐厨垃圾资源化利用技术
	6	旧沥青路面混合料再生利用技术
	7	餐厨垃圾油、水、渣源头分质分流处理设备
	8	建筑垃圾移动式资源化处置设备
	9	可回收物（塑料制品）回收利用技术工艺
	10	废塑料、电子废物、废旧衣服、废家电拆解设备
	11	污泥资源化利用技术
	12	生活垃圾分类-资源化-处置综合处理技术

生活固废领域“无废城市”污染防治入选技术清单

序号	技术名称
1	偏远地区生活垃圾好氧发酵就地就近处置技术及装备
2	城乡混合有机垃圾共发酵技术及装备
3	城镇有机废弃物生物强化腐殖化技术
4	餐厨垃圾资源化利用、无害化处理工艺技术
5	有机垃圾机械强化高温好氧发酵小型化协同处理技术及装备
6	循环流化床锅炉固废及生物质直燃耦合发电技术
7	有机废弃物干式厌氧发酵技术及装备
8	有机垃圾（餐厨垃圾、绿化垃圾、城市污泥、粪渣污泥等） 小型化协同处理技术及装备
9	沿海餐厨垃圾好氧发酵资源化利用技术
10	利用河湖底泥及农业固废制备高性能蓄水材料
11	工程弃土快速多级原位分离及高效资源化利用技术
12	环保土体稳定技术
13	工程渣土多相分级处理成套技术及装备
14	预润式泡沫沥青冷再生绿色循环利用技术
15	建筑废弃物综合回收利用关键技术
16	建筑垃圾原位处置成套工艺技术

序号	技术名称
17	建筑垃圾小型模块化处理工艺及设备
18	大型多级液压往复翻动式炉排生活垃圾焚烧技术
19	铝塑复合包装废物湿法连续分离技术
20	纸塑铝复合包装材料精准分质再生利用技术
21	生活垃圾机械生物预处理和水泥窑协同处置技术
22	污泥低成本原位无害化处理和建材资源化利用技术
23	污泥深度脱水一体化系统工艺技术与成套装备
24	污泥闪蒸干化耦合热解气化技术
25	污染底泥原位治理与修复方法
26	污泥资源化处理技术
27	污泥热水解资源化处置成套技术
28	城市活性污泥原位减量工艺技术
29	新型高效市政污泥圆盘式蒸汽干化设备
30	市政污泥与餐厨垃圾分质分相高效协同厌氧消化技术
31	污泥低温物理深度减量化技术

生活垃圾：大型焚烧发电为主体



成功案例

光大吴江项目 - 2×750t/d生活垃圾焚烧炉运行数据

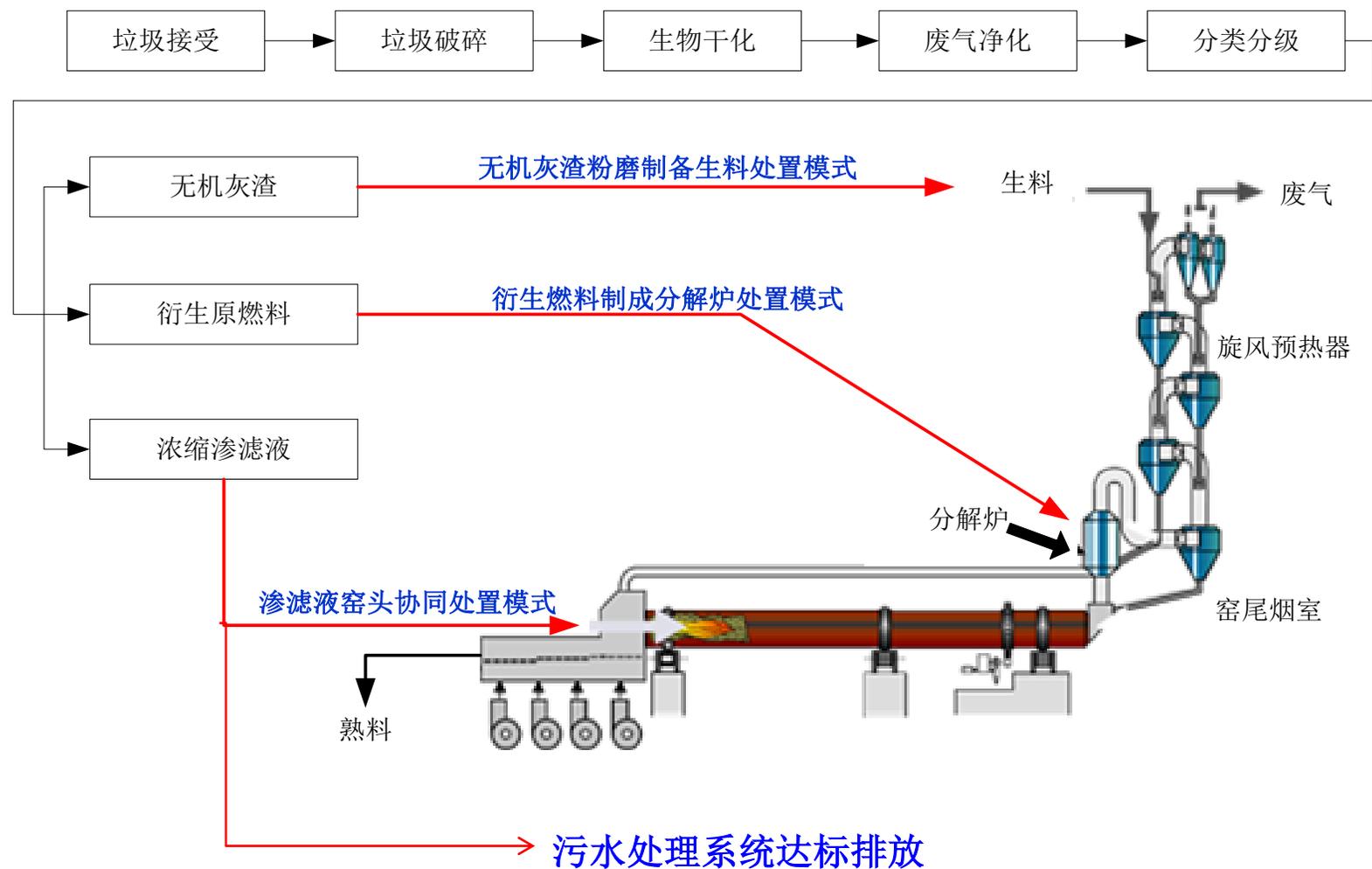
- 建设周期： 2015年5月23日至 2016年8月20日共 15个月
- 运行数据：
 - 1) 设计热值： **1800 Kcal/Kg**
 - 2) 日处理量： **750t/d**
最大日处理量： **800T/d**
 - 3) MCR蒸发量： **73T/h**
最大蒸发量： **80T/h**
 - 4) 热渣灼减率： **< 2%**
 - 5) 吨垃圾发电量： **510Kwh/T垃圾**
 - 6) 烟气进化：
 - 7) 耗量
厂用电率： **12.6%**
熟石灰耗量： **11.8Kg/T垃圾**
活性炭耗量： **0.39Kg/T垃圾**
尿素耗量： **1.79kg/T垃圾**
 - 8) 年运行时间： **8500小时**

烟气指标

	单位	设计值	实际值
粉尘	mg/Nm ³	10	3.33
HCL	mg/Nm ³	10	3.34
HF	mg/Nm ³	1	0.1
SO ₂	mg/Nm ³	50	14.00
NO _x	mg/Nm ³	200	80
二噁英	ngTEQ/Nm ³	0.1	0.00091

生活垃圾：水泥窑协同处置为补充

- 生物干化将垃圾水分降至**40%**以下；
- 经破碎、分选，有效提取生活垃圾中的可燃物质，湿基低位热值达到**1500~3500kcal/kg**；
- 在保持水泥熟料正常生产的情况下，RDF从分解炉喂料，喂料量最大可达到30t/h时，分解炉用煤可降低约12t/h，每吨RDF可替代约**0.3**吨标煤。
- 垃圾预处理的渗滤液、臭气排放，RDF协同处置的窑尾烟气排放均优于国家标准；
- 生活垃圾吨处理成本**150~180元**



厨余/餐厨：以厌氧为核心的集中处理为主体



名称	指标	备注
一期投资	2.2亿	
折旧年限	18年	运行年限20年含建设期
吨垃圾政府补贴	188.5元/t	
粗油脂产量	8t/d	产油2~3%，粗油脂售价年均3500元/t
沼气外售量	18000m ³ /d	采用阶梯价格，0~7000Nm ³ /d，售价1.26元/m ³ ；7000~18000Nm ³ /d，售价0.5元/m ³
运行成本	~267.5元/t	包括水、电、人工、维修维护、污水处理费、外运杂物焚烧费、设备折旧，贷款利息等费用
运营收益率	8~10%	运营收益率年均8~10%

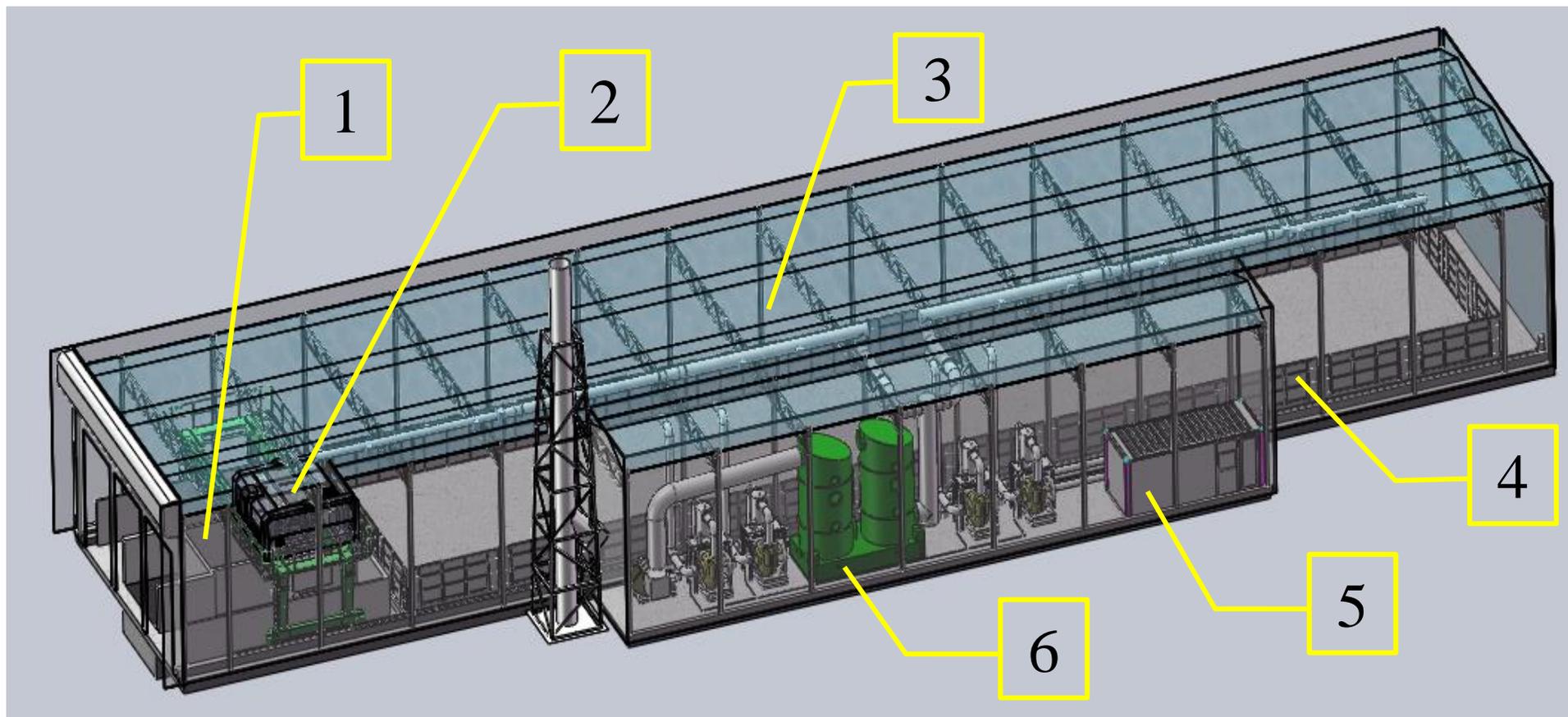
餐厨/污泥：以厌氧为核心的集中处理为主体



- ❑ 总投资：25000万元
- ❑ 设备投资：18000万元
- ❑ 基础设施建费用：2000万元
- ❑ 环保投资：1200万元
- ❑ 吨运行成本：180元

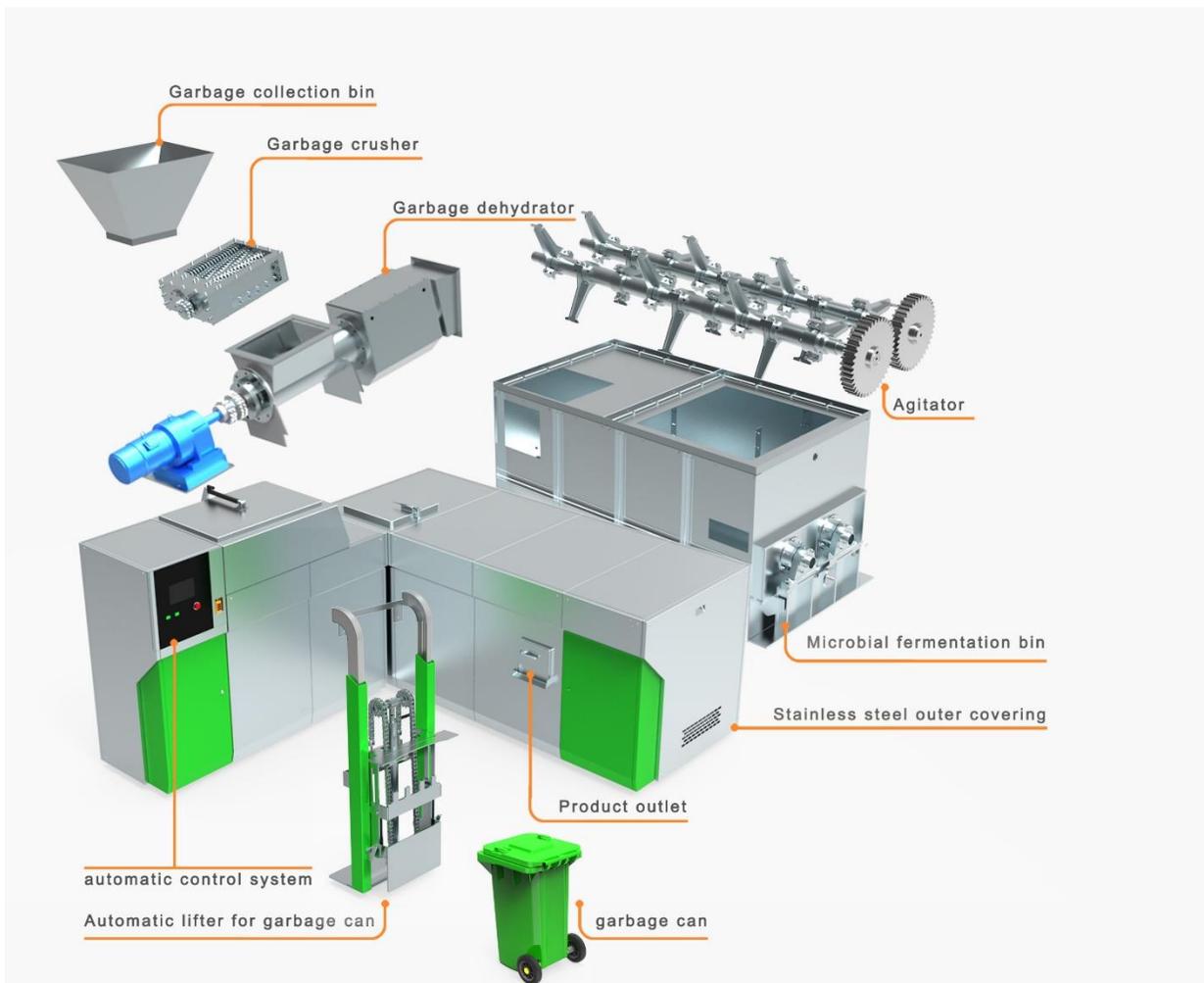
- ❑ 生物质有机废物处理18.25万吨/年
- ❑ 回收工业油脂3000余吨/年
- ❑ 并网电量超过800万度/年
- ❑ 有机物转化率约 $\geq 70\%$
- ❑ 综合利用率 $> 80\%$

污泥/厨余：好氧发酵有赖于源头质控与产品出路



- 1、进出料区 2、多功能机器人 3、发酵舱
4、微生物反应器 5、智能中心 6、净化中心

厨余/餐厨：小型分散式就地减量处理为补充

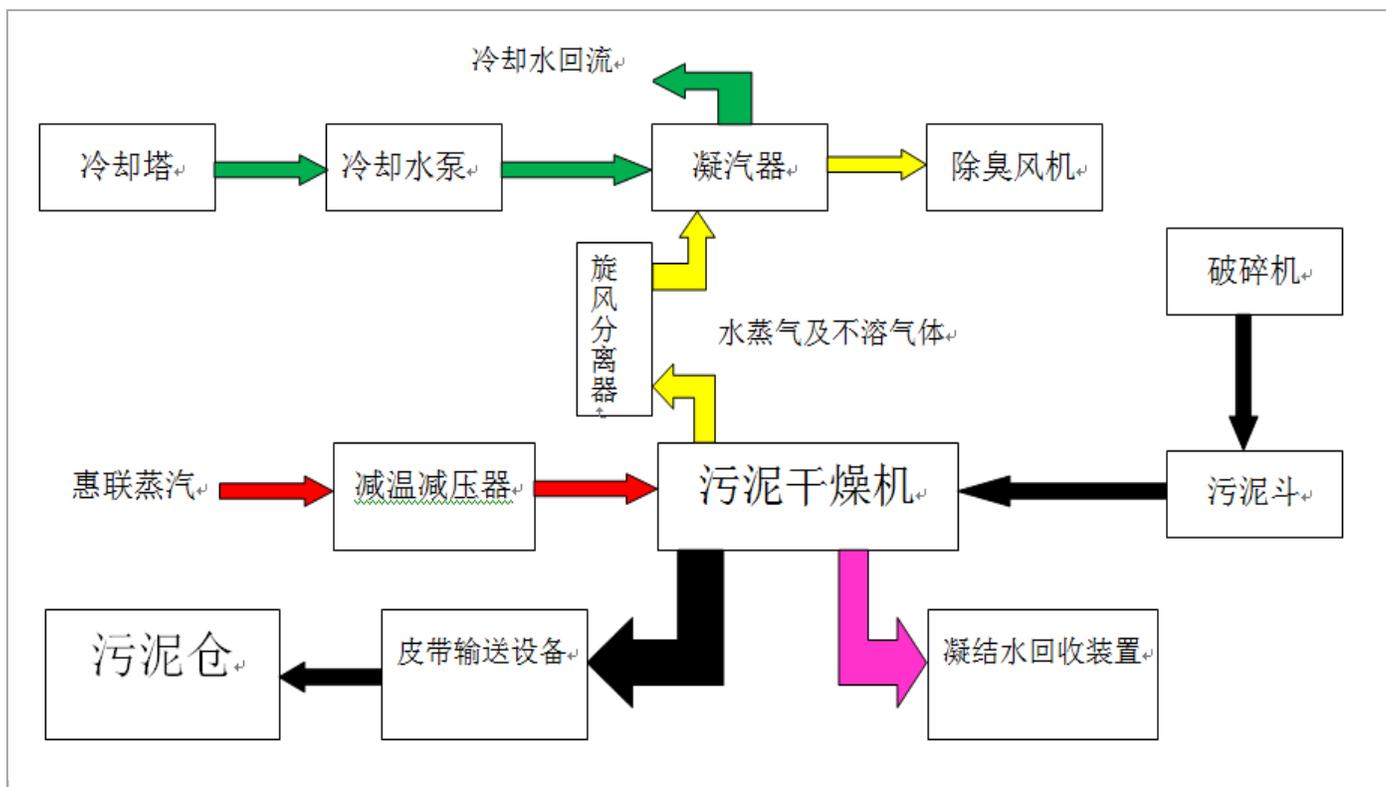


技术经济指标

	3吨以下	3-10吨	10-30吨
1、厂房面积	< 60m ²	< 276m ²	< 500m ²
2、人员配备	2人	< 3人	< 5人
3、设备投资		40万元/吨	
4、建设周期		< 3个月	
5、运行费用		150-200元/吨	
6、单位电耗		80-100度/吨	
7、减量化率		> 90%	

*备注：污水处理设施不包含在内

污泥：深度脱水+热干化+焚烧适合经济发达城市



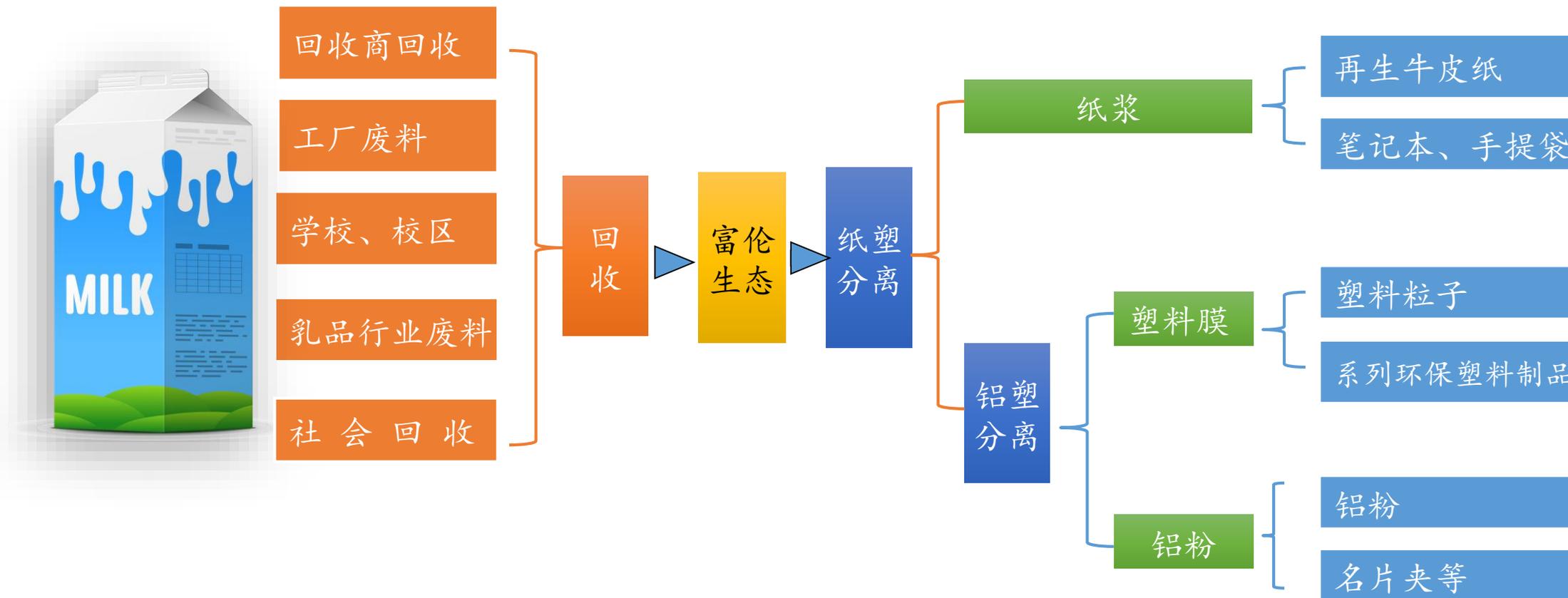
投资费用：

土建部分投资	500万元
设备及安装部分投资	2500万元
污泥蒸汽烘干项目总投资约	3000万元

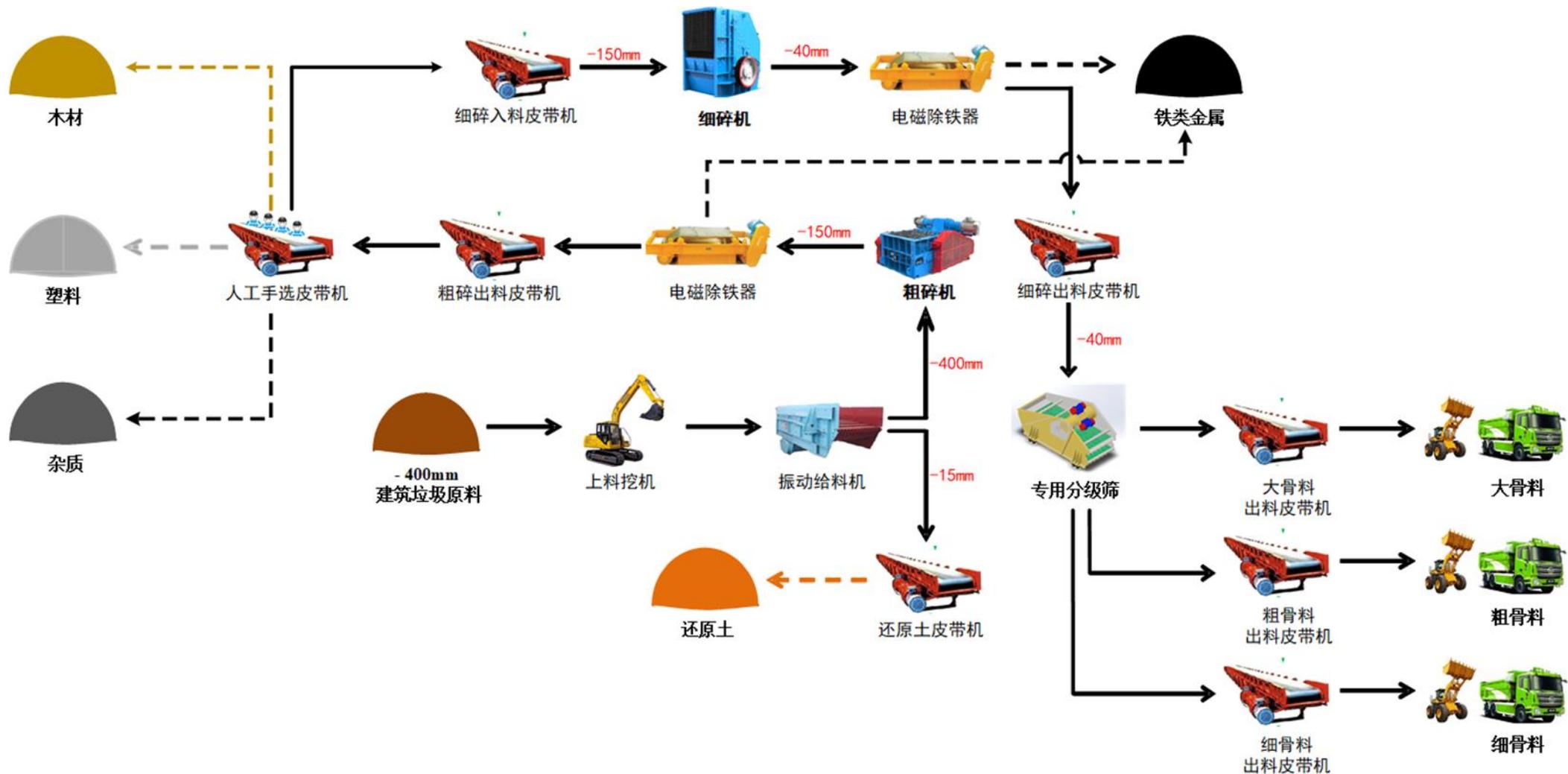
运行费用：

电耗	10.20元/t
蒸汽耗量	84.50元/t
人工成本	13.70元/t
维修费用	4.10 元/t
折旧费	22.80元/t
财务成本（利息按6%）	8.00 元/t
合计	143.3元/t

低值可回收物：瓶颈在于回收模式



建筑垃圾：瓶颈在于再生建材出路





清华大学环境学院
SCHOOL OF ENVIRONMENT, TSINGHUA UNIVERSITY

谢谢大家，欢迎交流

电话：13910569582

邮箱：jgliu@tsinghua.edu.cn

微信公众号：环境论评

