



沼气工程技术

农业部沼气科学研究所：颜丽



- 处理畜禽粪污的沼气工程概念

以厌氧消化为核心技术，集粪便处理、沼气生产、沼气和沼肥资源化利用为一体的系统工程。





解决重点区域畜禽粪污对周围环境的污染问题；改善项目实施区农业生产和人民生活环境质量。

沼气工程的作用

替代化石能源，降低温室气体排放；对提高国家能源供应安全性有积极作用。

带动相关产业发展：沼工程专业制造，沼肥加工与销售，社会化服务体系等。

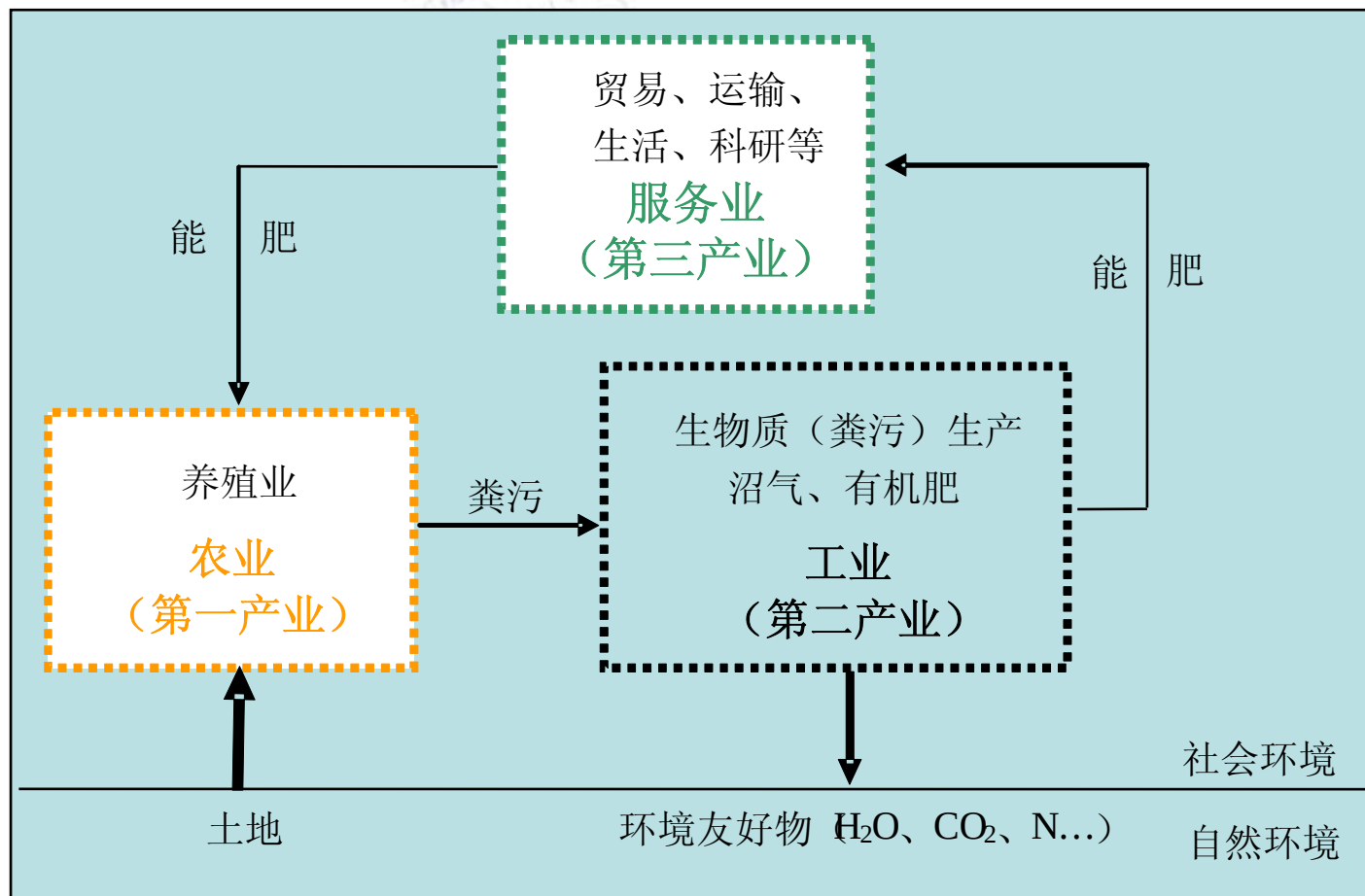


沼气工程建设内容（一池三建）：

- **“一池”**：沼气发酵池（也称厌氧消化器），即在厌氧条件下，利用厌氧微生物分解有机物并生产沼气的装置。
- **“三建”**：
 - ✓ 预处理系统，包括格栅、沉砂、调节水质和水量、计量、进料等设施；
 - ✓ 沼气利用系统，包括沼气净化、储存、输配和利用（发电、民用、烧锅炉）等设施；
 - ✓ 沼肥利用系统，包括沼渣、沼液的中转、调蓄、综合利用或进一步处理的设施。



❖ 产业链与循环经济









1 基础知识



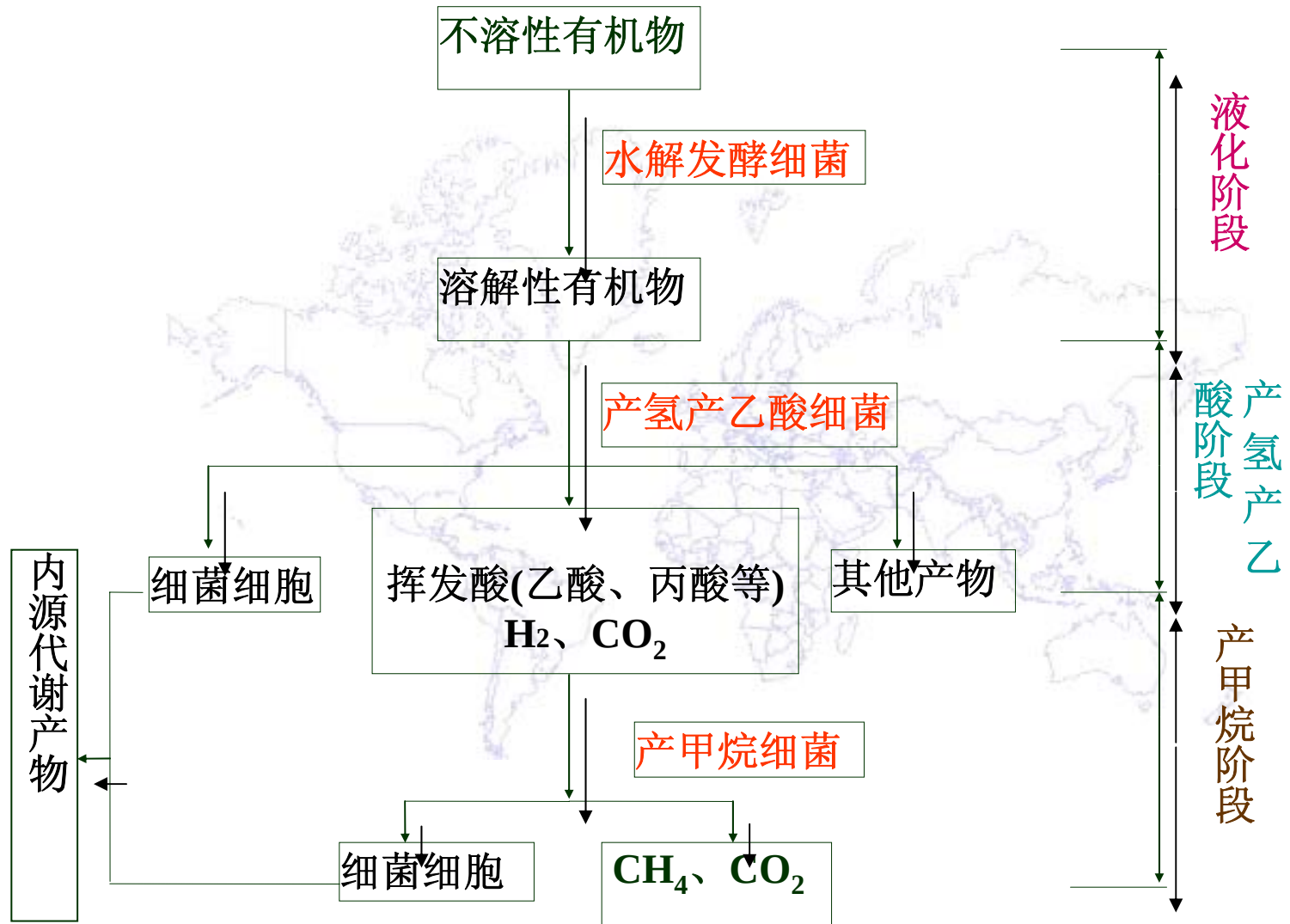
1.1 沼气发酵的生物作用

沼气发酵微生物是人工制取沼气的最重要因素，有了大量的沼气微生物，并使各种类群的微生物获得基本的生长条件，沼气发酵原料才能在微生物的作用下转化为沼气。

沼气发酵过程中主要有五大菌群（发酵性细菌、产氢产乙酸菌、耗氢产乙酸菌、产甲烷菌）参与活动。



1 基础知识



沼气发酵基本原理图



五大菌群：

- ①发酵性细菌：一些不溶性物质被发酵性细菌所分泌的胞外酶水解为可溶性糖、肽、氨基酸和脂酸，再将吸入细胞，发酵为乙酸、丙酸、丁酸等和醇类及一定量的 H_2 及 CO_2
- ②产氢产乙酸菌：除甲酸、乙酸和甲醇外的物质均不能被产甲烷菌所利用，所以必须由产氢产乙酸菌将其分解转化为乙酸、氢和二氧化碳



1 基础知识



五大菌群：

③耗氢产乙酸菌：

它们既能利用 $\text{H}_2 + \text{CO}_2$ 生成乙酸，也能代谢糖类生成乙酸。

④产甲烷菌（食氢、食乙酸）：

它们在厌氧条件下将前三群细菌代谢的终产物，在没有外源受氢体的情况下，把乙酸和 H_2 、 CO_2 转化成 $\text{CH}_4 + \text{CO}_2$ 。产甲烷菌广泛存在于水沉积物和动物消化道等极端厌氧的环境中。



1 基础知识



水解发酵细菌、产氢产乙酸细菌的作用

- **为甲烷菌提供营养**（将发酵原料的碳水化合物、蛋白质和脂肪等复杂有机物水解后形成可溶性的简单化合物，该类菌为产甲烷菌提供合成细胞的基质和能源。
- **为产甲烷菌创造适宜的厌氧生态环境**（该类菌群中的好氧和兼性厌氧菌的活动，使发酵液的氧化还原电位不断下降，逐步为产甲烷菌创造厌氧生态环境。
- **为产甲烷菌清除有毒物质。**
- **与甲烷菌共同维持环境中适宜的酸碱度**（氨化细菌进行氨化作用，产生的氨可以中和部分有机酸；产甲烷菌不断利用乙酸、氢和二氧化碳生成甲烷；通过这两类菌群的共同作用，使发酵液的pH值稳定在适宜范围。



1 基础知识



产甲烷菌（食氢、食乙酸菌）

将水解发酵细菌、产氢产乙酸细菌的产物（乙酸、氢气和二氧化碳等）发酵基质转化为甲烷。



1.2 沼气发酵的条件

沼气发酵就是培养和积累厌氧消化细菌，使细菌具有良好的生活条件；只有首先做到了这一点，才有可能获得较好的沼气产量或污水处理效率。

微生物的生命活动要求多种条件，其中主要条件包括**发酵原料**、**厌氧活性污泥**、**消化器负荷**、**发酵温度**、**pH值**、**碳氮比**、**有害物质的控制及均质**等。

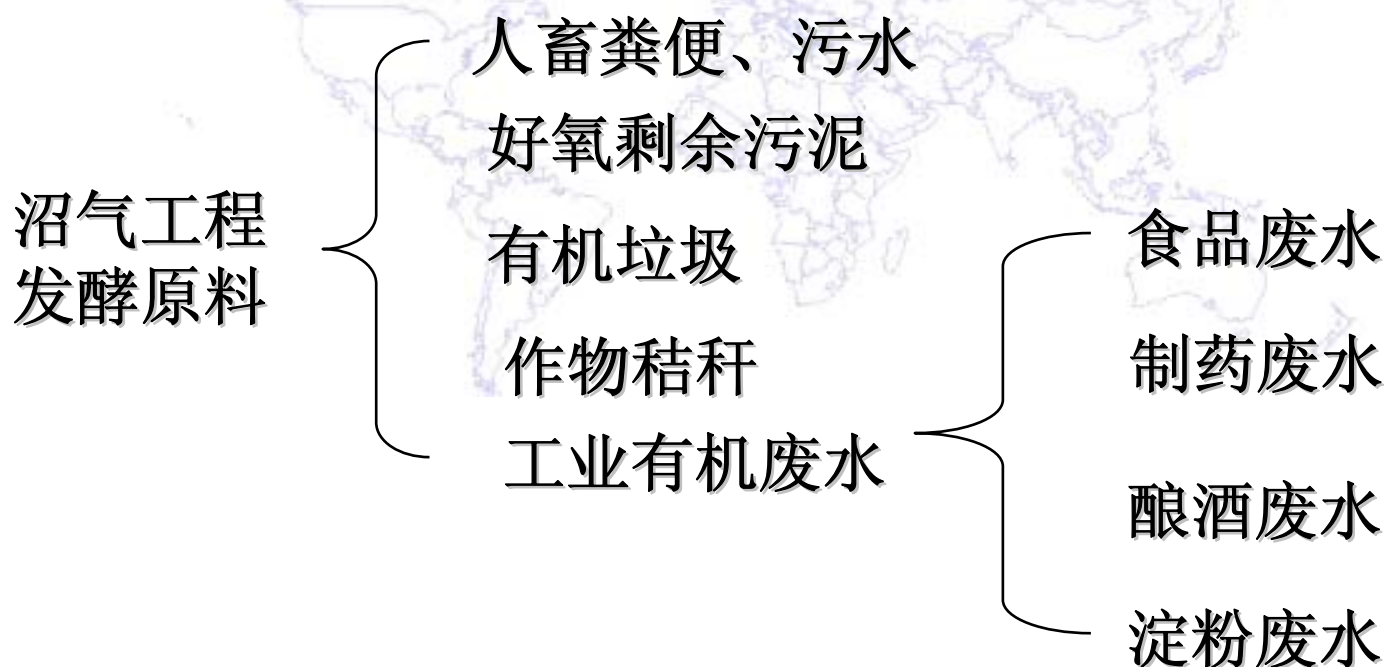


1 基础知识



(1) 发酵原料的种类及其碳、氮配比

发酵原料既是产生沼气的底物，又是沼气发酵细菌赖以生存的养料来源。





1 基础知识



发酵原料的C:N比：是指原料中有机碳素与氮素含量的比例关系，因为微生物生长对碳和氮有一定要求，其利用速度是20-30倍的关系，因此发酵原料的**碳氮比 20~30:1**，或者 $BOD_5:N:P = 200:5:1$ 为宜。



(2) 足够的接种物(微生物量)

厌氧活性污泥是由厌氧消化菌与悬浮物质和胶体物质结合在一起形成的具有很强分解有机物能力的凝絮体，颗粒体或附着膜。厌氧微生物(厌氧活性污泥)是沼气发酵的主体。

接种量一般为**发酵液10%~50%**；
当采用老沼气池发酵液体作为接种物时，接种量应占总发酵液的30%以上。



(3) 严格的厌氧环境

沼气微生物的核心菌群---产甲烷菌是一种厌氧性细菌，对氧特别敏感，这类菌群的生长、发育、繁殖、代谢等生命活动过程中都不需要空气。空气中的氧会使其生命活动受到抑制，甚至死亡。因此正常沼气发酵，其发酵液的氧化还原电位越低越好（不产甲烷阶段+100~-100mV，产甲烷阶段-150~-400mV），发酵环境处于无氧状态。



1 基础知识



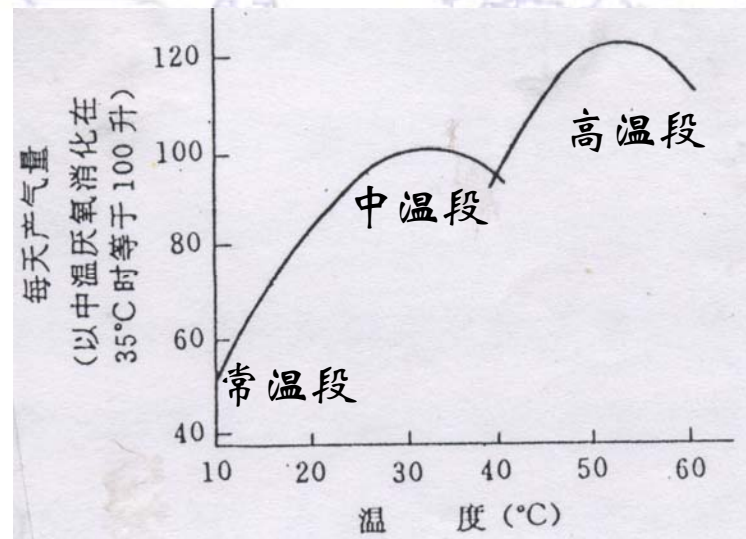
(4) 适宜的发酵温度

高温发酵：50-65℃，最适温度为 $55\pm 2^{\circ}\text{C}$ ；

中温发酵：20-45℃，最适温度为 $35\pm 2^{\circ}\text{C}$ ；

偏低温发酵：10-20℃；

常温发酵：随自然温度而变化的发酵。



温度对产气率的影响



(5) pH值与碱度

pH值：厌氧消化最适宜的pH值为6.8—7.4。

当pH值6.4以下或7.6以上，都会对厌氧微生物产生不同程度的抑制作用，导致产气减少或中止。

碱度：指消化液中含有能与强酸相作用的所有物质的含量。主要以重碳酸盐，碳酸盐，氢氧化物三种形式存在。

这些物质可与挥发酸发生反应，使pH值不会有太大变动。



(6) 毒性化合物

一般情况下，农作物秸秆中不会含有大量有毒物质，但畜禽养殖场和工厂中的有机废水中常含有消毒和防疫的药物或者重金属等有毒物质，这些有毒物质会抑制厌氧微生物的生长、代谢及繁殖等。

例如，有些有机氯（ CH_2Cl_2 ， CHCl_3 和 CCl_4 等）毒性很强，如氯甲烷浓度在 1mg/L 左右，常引起产甲烷菌的中毒而使发酵失败。



1.3 主要调控指标

(1) 固体物

总固体(TS)是悬浮固体(SS)和溶解固体(DS)的总和，以单位体积水样在 $103-105^{\circ}\text{C}$ 蒸发干后残留物的重量表示。

悬浮固体(悬浮物SS)，指水样经离心或过滤后得到的悬浮物经蒸发后所剩余固体物质的量。

挥发性固体(VS)，表示样品中悬浮物、胶体和溶解性物质中有机物的量。它是总固体(TS)在 600°C 灼烧2小时后损失的量。



(2) 化学需氧量(COD)

是指水样中能被化学氧化剂氧化的物质，在规定条件下进行化学氧化过程中所消耗的氧的数量，以每升水样中消耗氧的毫克数表示。

常用的化学氧化剂有重铬酸钾和高锰酸钾。



(3) 生化需氧量(BOD_5)

指水样中微生物分解有机物过程中所消耗的水中溶解氧的量，以每升水样消耗溶解氧的毫克数表示。一般都以 20°C 条件下，培养5天所消耗的氧来表示，记为 BOD_5 。



(4) 挥发性有机酸(VFA)

挥发性有机酸(VFA)是厌氧消化过程中重要的中间产物，**甲烷菌主要利用VFA生成甲烷**，只有少部分甲烷由 CO_2 和 H_2 生成，但 CO_2 和 H_2 的生成也经过高分子有机物形成VFA的中间过程。VFA在厌氧反应器中的积累能反映出甲烷菌的不活跃状态或反应器操作条件的恶化，较高的VFA(如乙酸)对甲烷菌有抑制作用。因此反应器运行中，出水VFA是重要的监控指标。



1 基础知识



(5) pH值

pH值是氢离子活度的负对数,

$$\text{pH} = -\log[\text{H}^+]$$

(6) 碱度

表示水样中能与强酸中的氢离子结合的物质的含量。包括：强碱、弱碱（如氨、苯胺、吡啶等）、弱酸阴离子（如 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 、 H_2PO_4^- 、 HPO_4^- 、 SO_3^{2-} 、 HSO_3^- 腐殖酸阴离子、 HS^- 、 S^{2-} ）等。



1 基础知识



(7) 水力停留时间

水力停留时间简写作**HRT**，指进入反应器的废水在反应器内的平均停留时间，如果反应器的有效容积为 $V(\text{m}^3)$ ，则：

$$\text{HRT} = V/Q$$

(8) 污泥停留时间

污泥停留时间简写作**SRT**，也称为泥龄。

$\text{SRT} = \text{反应器内污泥总量} / \text{排出反应器的污泥量}$ 。



(9) 微生物停留时间

微生物停留时间简写作**MRT**,指从微生物细胞的生成到被置换出消化器的平均时间。

采取可能的措施, 尽可能达到:

$$MRT > SRT > HRT$$



(10) 原料产气率

原料产气率是指单位原料在一定条件下的产气量。原料产气率是衡量原料分解好坏的一个重要指标。农村沼气原料产气率的单位通常用“ m^3/kg (TS)”原料产气率有理论值、实验值和生产运行值三类。



1 基础知识



表8 原料产气速率随时间变化

产气参数	各原料产气速率 (%)				
发酵天数	10	20	30	40	60
猪粪	74.2	86.3	97.6	98.0	100
人粪	40.7	81.5	94.2	98.2	100
马粪	63.7	80.2	89.0	94.5	100
牛粪	34.4	74.6	86.2	92.7	100
玉米秸	75.9	90.7	96.3	98.1	100
麦秸	48.2	71.8	85.9	91.8	100
稻草	46.2	69.2	84.6	91.0	100
青草	75.0	93.5	97.8	98.9	100



1 基础知识



(11) 反应器的有机负荷

反应器的有机负荷分为容积负荷 N_v 和污泥负荷 N_s 。

容积负荷 N_v ：单位反应器，在单位时间内要保证一定的处理效果所能承受的废水中有机物的量，其单位为 $\text{kgCOD}/\text{m}^3\cdot\text{d}$ 或 $\text{KgBOD}_5/\text{m}^3\cdot\text{d}$ ，则计算公式：

$$N_v = QS / V$$

式中：进料浓度 S (kgCOD/m^3 或 $\text{kgBOD}_5/\text{m}^3$),

流量 Q (m^3/d),

反应器有效容积 V (m^3) 。



1 基础知识



污泥负荷 N_s ：反应器的单位重量污泥，在单位时间内要保证一定的处理效果所能承受的废水中有机物的量，其单位为 $\text{kgCOD}/(\text{kg MLSS}\cdot\text{d})$ 或 $\text{KgBOD}_5/(\text{kg MLSS}\cdot\text{d})$ ，则计算公式：

$$N_s = QS / (V \rho_s)$$

式中：进料浓度 S (kgCOD/m^3 或 $\text{kgBOD}_5/\text{m}^3$)，

流量 Q (m^3/d)，

反应器体积 V (m^3)，

反应器污泥浓度 ρ_s (kgMLSS/m^3 或 $\text{kgMLVSS}/\text{m}^3$)



(12) 容积产气率

容积产气率是指在一定条件下，厌氧消化器单位容积的产气量，单位： $\text{m}^3/\text{m}^3.\text{d}$ 。

容积产气率是评价厌氧消化器反应效率的一个重要指标。它与发酵原料入池量、原料种类、厌氧消化器规模、消化时间、温度等有关。



1 基础知识



G_v: 池容产气率(m³/m³.d)

$$G_v = N_v \times M_r$$

式中: N_v—容积负荷 (kgCOD/m³. d)

M_r— 原料产气率 (m³/kgCOD)



II 厌氧消化工艺



生态型：粪便及其污水合流入沼气发酵系统；要求种、养科学规划、合理匹配建设；沼液首选还田利用。

综合利用型：热、电、肥联产，达到能量高效转化、资源循环利用，提高沼气工程常年运行的稳定性和财务生存能力。

环保型：清、浊分流治理，降低运行成本，寻求低成本的达标处理技术（湿地、氧化塘、SBR等）；



2 厌氧消化工艺



处理畜禽粪便沼气工程 通用工艺流程





2.1 能源生态型沼气工程工艺路线





2.1.1 常用的厌氧反应器

隧道式水压沼气池，或农村户用池的放大或组合；完全混合式厌氧反应器(CSTR)，厌氧接触工艺(AC)，生流式厌氧固体反应器(USR)，厌氧塞流式反应器(HCPF)等。



2.1.2 应用条件

- 远离城市，土地宽广，有足够农田消纳粪污或沼液的地区，特别适应种植常年需施肥的农作物，如蔬菜、经济类作物等。
- 要求养殖场规模不大，冲洗水量少，万头猪场排放的粪污总量控制在40t/d以下。



2.1 能源生态模式



塞流式厌氧消化工艺工程示范





2.1 能源生态模式



CSTR工艺示范工程





2.1 能源生态模式



USR工艺示范工程



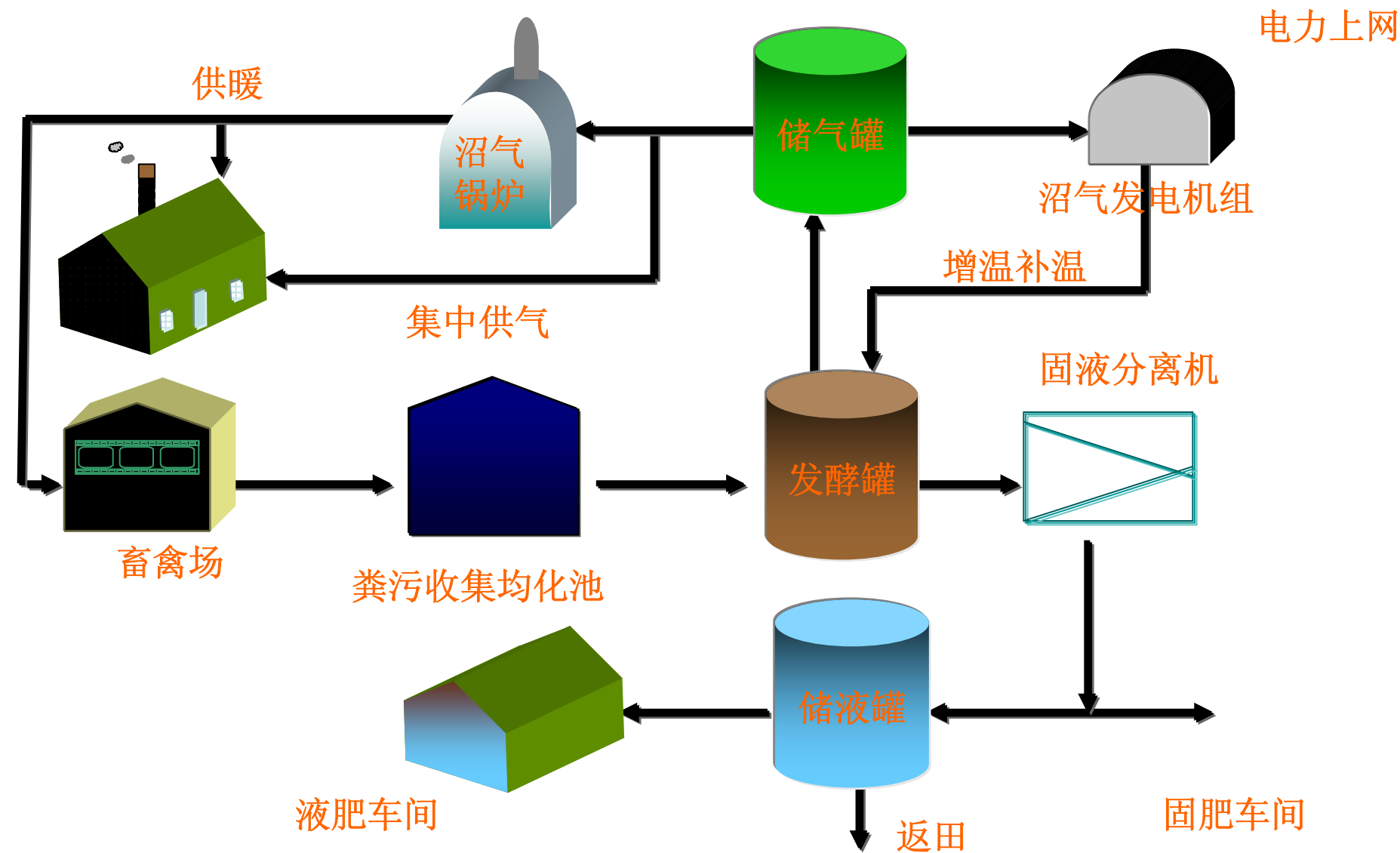
北京沼气
示范工程



四川彭州沼气工程



2.2 热、电、肥联产型工艺





2.2 热、电、肥联产模式



2.2.1 热电肥联产技术参数

- 进料浓度: TS 6%-12%;
- 发酵温度: 中温或高温;
- 装置容积产气率: 中温 $\geq 0.8\text{m}^3/\text{m}^3.\text{d}$,
高温 $\geq 2.0\text{m}^3/\text{m}^3.\text{d}$;
- 有机物去除率: 60%-80%;
- 发电余热利用:
 - TS 8%, 冬季发电余热100%用于增温;
 - TS 10%, 冬季发电余热70-80%用于增温;
 - TS 12%, 冬季发电余热50-60%用于增温。



2.2 热、电、肥联产模式



2.2.2 优缺点

优点：

- 该模式是最为经济、有效的处置方法。污染物基本达到**零排放**，最大限度实现资源多层次利用。在自然条件允许的状况下，应该是首选方案。
- 发电余热完全可以满足厌氧消化器的增温保温，不需要外加能源，保证沼气工程常年稳定运行。
- **充分利用沼气的共生产品(热、电、肥)**，增加收入，实现沼气工程的循环经济。



2.2 热、电、肥联产模式



缺点：

需要有大量土地。处理万头猪场的沼液至少需要1000亩土地消纳，应用受到限制；

雨季以及非用肥季节还须考虑**沼液的其它出路**；

系统比较复杂，运行管理要求较高。



2.2 热、电、肥联产模式



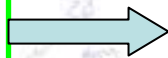
2.2.3 应用条件

- 远离城市，土地宽广，有足够农田消纳粪污或沼液的地区，特别适应种植常年需施肥的农作物，如蔬菜、经济类作物等。
- 适合养殖场规模大或工业沼气，产气量多，发电上网的项目。



2.3 能源环保型工艺路线

粪、污合流处理



以沼气技术为主/沼渣、沼液还田/适合中、小规模养殖场和专业养殖户/有足够的农田消纳。

清、浊分流处理



多项技术组合/能源、环保兼顾/热、电、肥联产/适合大中型养殖场。



清、浊分流处理最为经济

粪便及浓污水:

1 (鲜粪) : 0.5-1 (粪水) $\longrightarrow$ 高浓度(TS 8-12%) 中.高温厌氧消化 $\longrightarrow$ 高浓度沼肥还田

冲洗水:

冲洗粪水(TS 1-3%) $\longrightarrow$ 过筛粪水(TS $\leq 1\%$)
 $\longrightarrow$ 常温(UBF/UASB) $\longrightarrow$ 深度处理
(自然/强制性好氧)



2.3 能源环保模式



2.3.1 冲洗水“厌氧+好氧”工艺路线





2.3.2 低浓度废水常温厌氧消化工艺

- 常用：厌氧复合反应器(UBF)、上流式厌氧污泥床(UASB)、污泥膨胀床反应器(EGSB)、内循环厌氧反应器(IC)等。
- 温度对消化效果的影响更大。
- 厌氧处理出水水质较好，但是对 NH_4^+-N 处理无明显效果，需要进一步处理。



2.3 能源环保模式



自然处理法应用条件

氧化塘、人工湿地---适用于养殖场规模**中、小等级**，并且离城市较远，经济欠发达、**气温较高**（南方地区居多）、**土地宽广**、地价便宜、有滩涂、荒地、林地或低洼地都可作废水自然处理系统的地区。

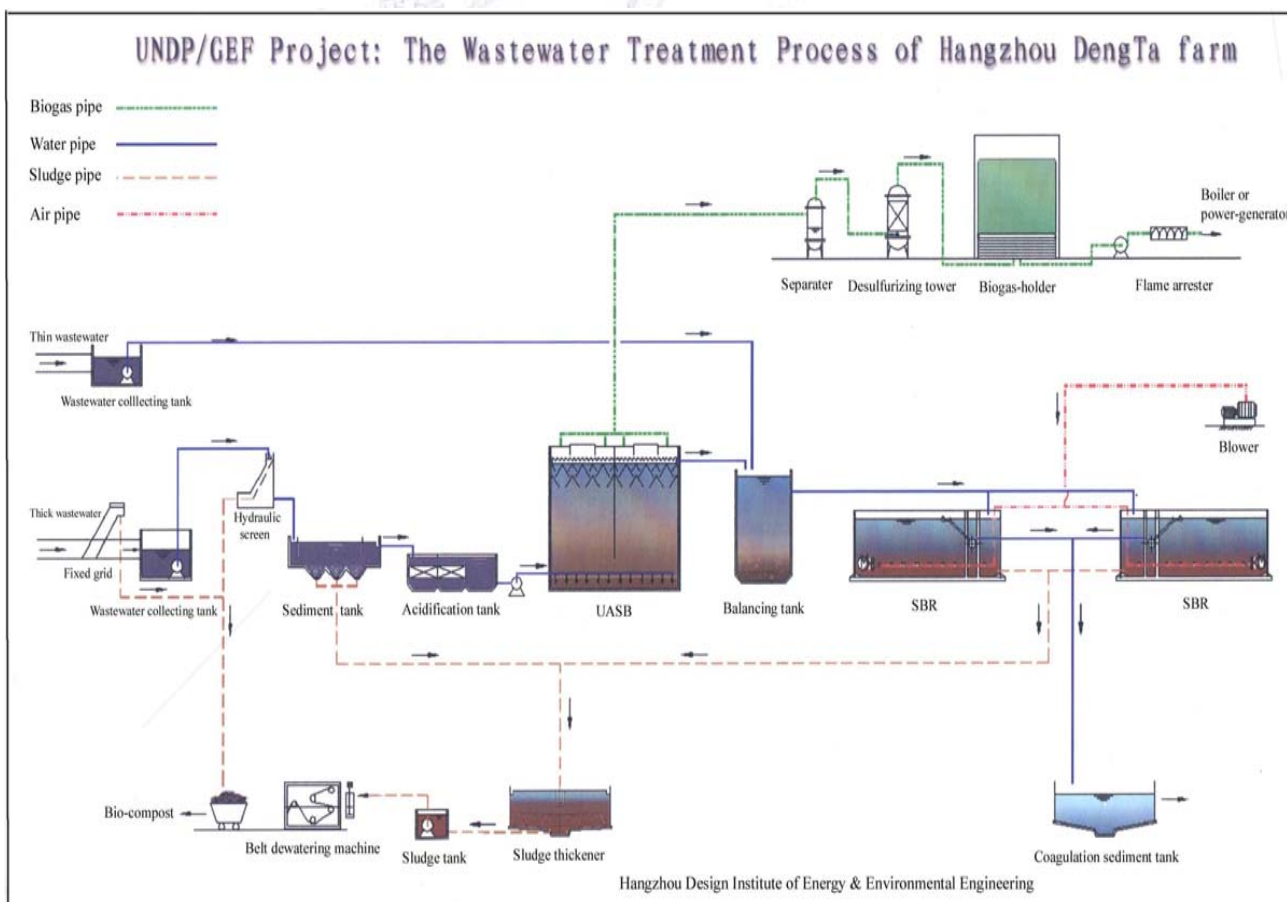




2.3 能源环保模式



沼液强制性好氧处理法





2.3 能源环保模式



应用条件（强制性好氧达标）

该技术适用于养殖规模大、地处大城市近郊，经济较发达，环保要求严格，没有足够的农田消纳沼液的集中处理。



应根据不同地区的自然、经济状况、养殖场规模和环境容量因地制宜地选择适宜的技术和处理模式，以达到粪污减量化、能源高效化、资源利用最大化、处理费用最小化。



III 厌氧消化器类型



3 厌氧消化器



厌氧消化器（俗称沼气池）是沼
气生产的核心装备。微生物的繁殖、
有机物的分解转化、沼气的生成都是
在厌氧消化器里进行。因此消化器的
结构与内部设施的配置是沼气工程设
计与建造的重点。



3 厌氧消化器



厌氧消化器类型

类 型	滞留期特征	消化器举例
常规型	$MRT = SRT = HRT$	常规消化器、连续搅拌罐、塞流式
污泥滞留型	$MRT \text{ 和 } SRT > HRT$	厌氧接触、UASB、USR、折流式IC
附着膜型	$MRT > SRT > HRT$	厌氧滤器、流化床、膨胀床



3 厌氧消化器



3.1 常规型厌氧消化器

农村户用沼气池的放大或连池；

推流式厌氧消化池；

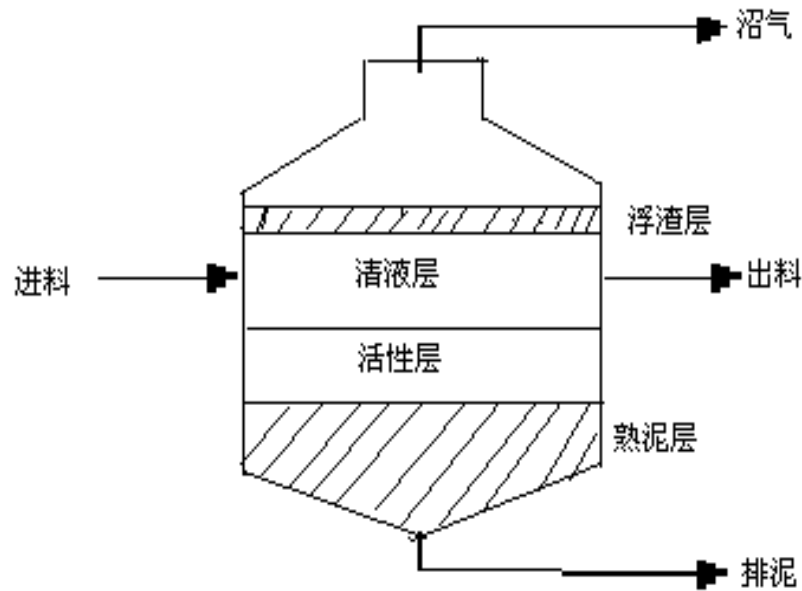
完全混合式厌氧消化池（CSTR）。



3 厌氧消化器



◆ 农村户用沼气池的放大或连池、 推流式厌氧消化池

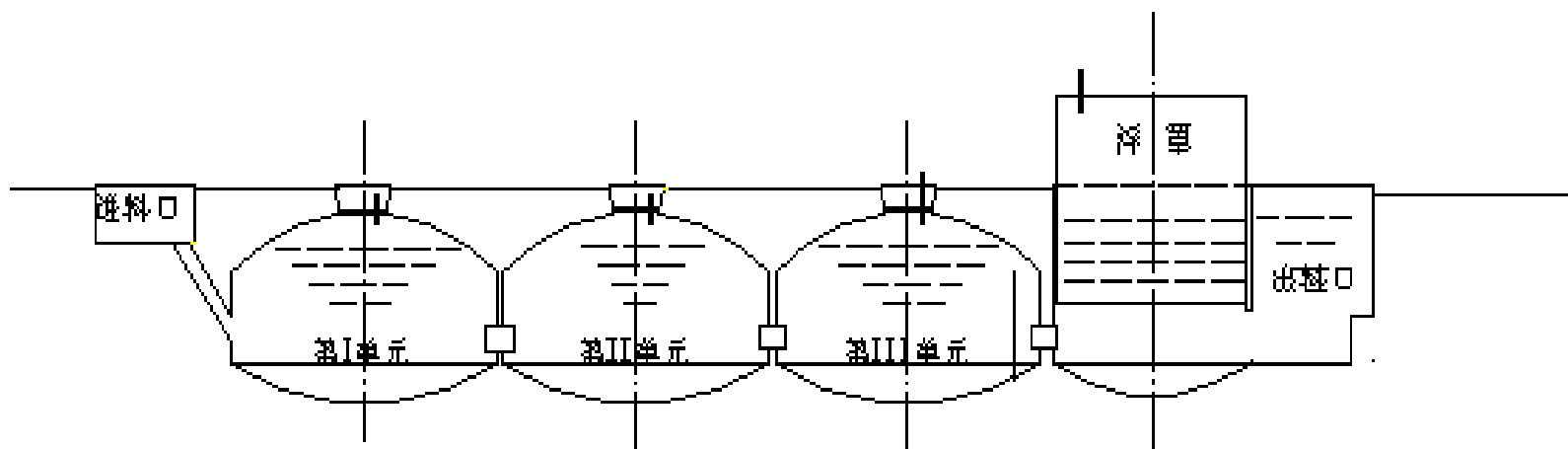




3 厌氧消化器



◆ 地埋式农村户用沼气组合池

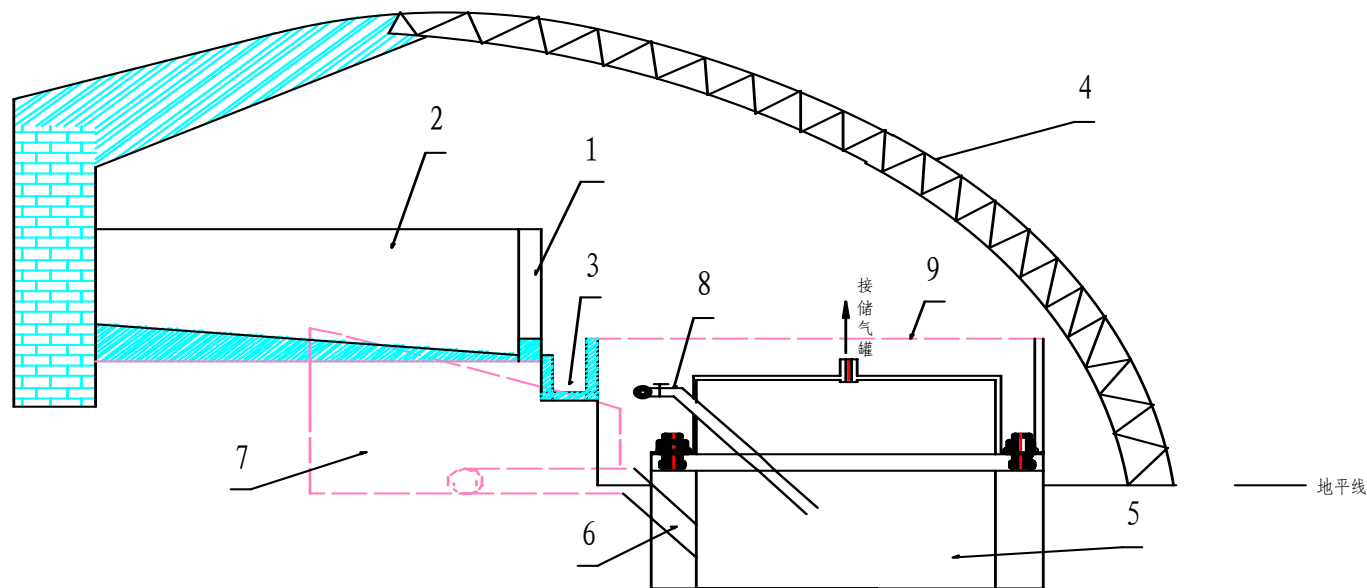




3 厌氧消化器



◆ 辅热集箱式沼气发酵池



1、猪圈前门 2、猪栏 3、排粪槽 4、塑料太阳能
温室大棚 5、发酵间 6、进料口 7、预加热发酵
池 8、沼液加入搅拌管 9、保温垫格板人行道

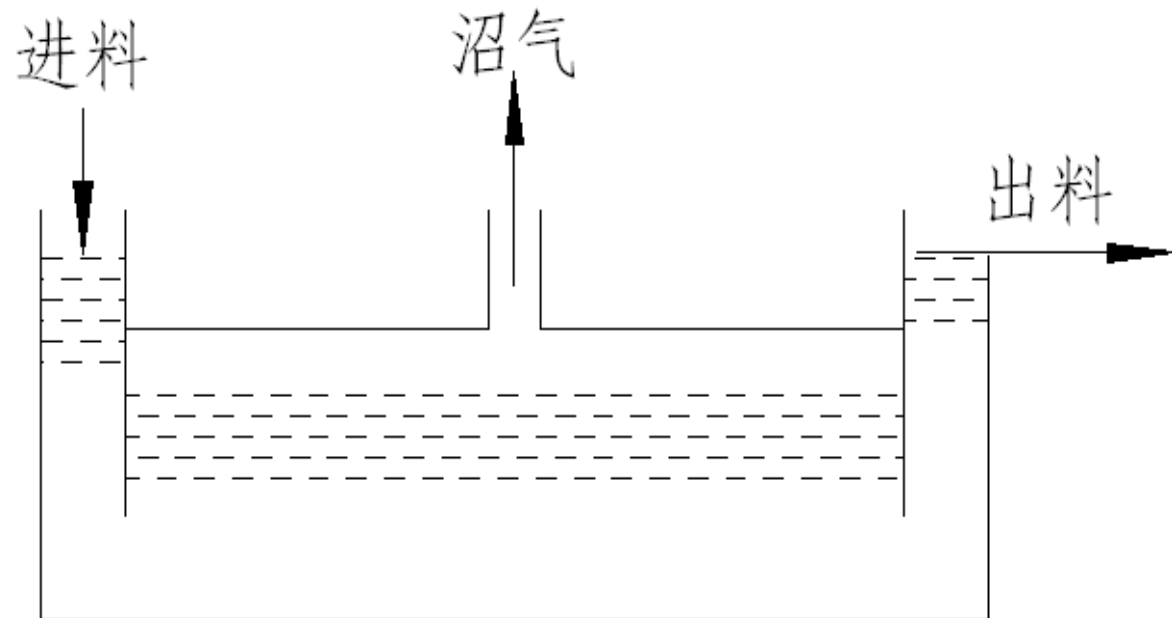
图1 辅助加热式沼气系统构成示意图



3 厌氧消化器



◆ 推流式厌氧消化池

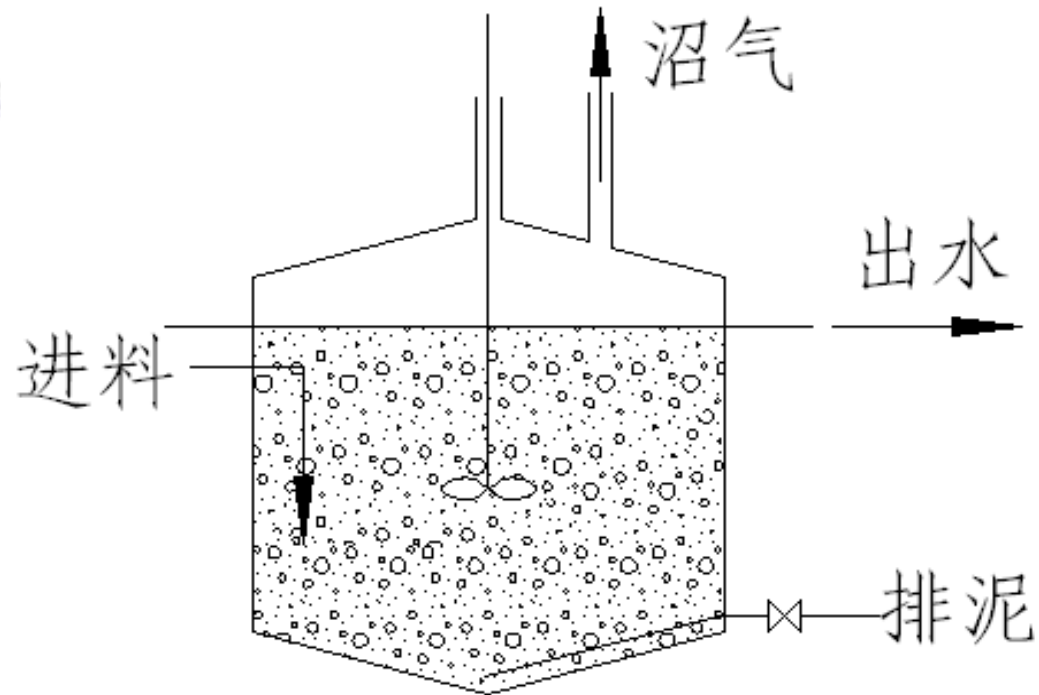




3 厌氧消化器



◆ 立式连续搅拌反应器 (CSTR)

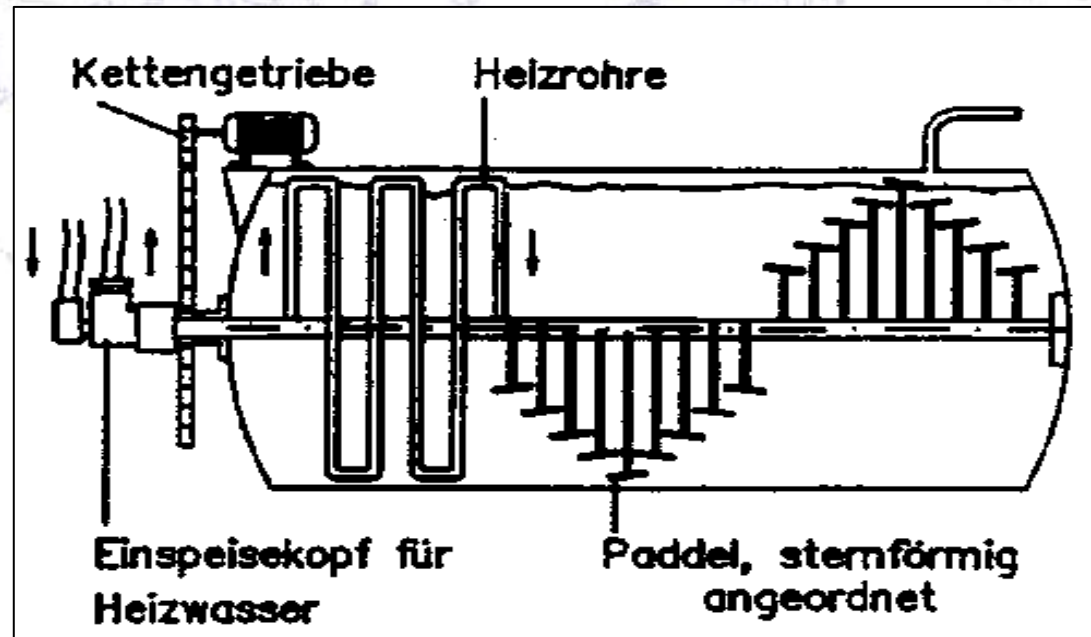




3 厌氧消化器



◆ 塞流式亦称推流式消化器（HCPF）

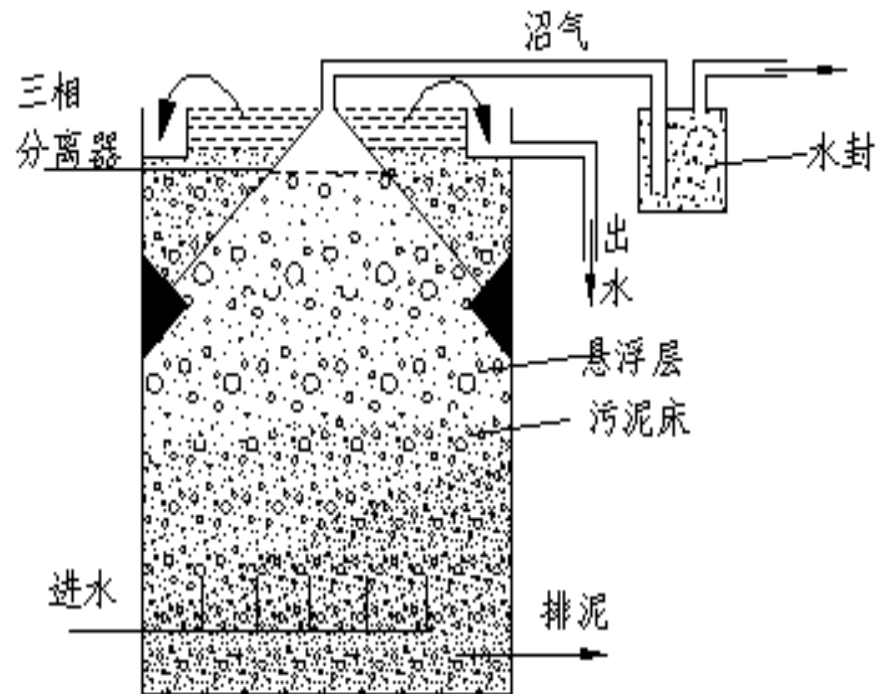




3 厌氧消化器



◆ 升流式厌氧污泥床 (UASB)

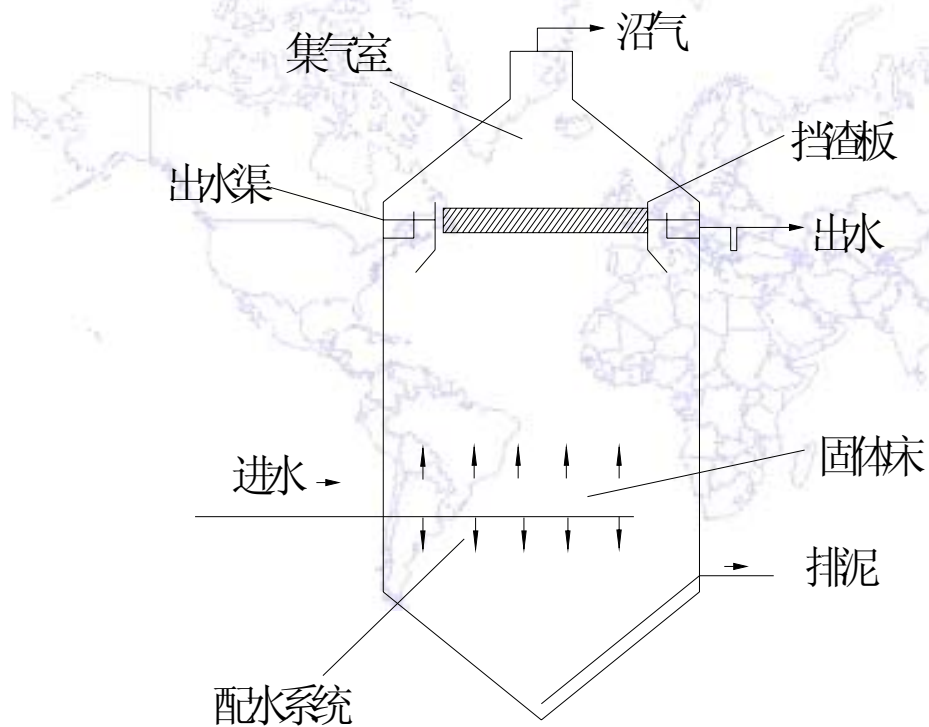




3 厌氧消化器



◆ 升流式固体床反应器(USR)

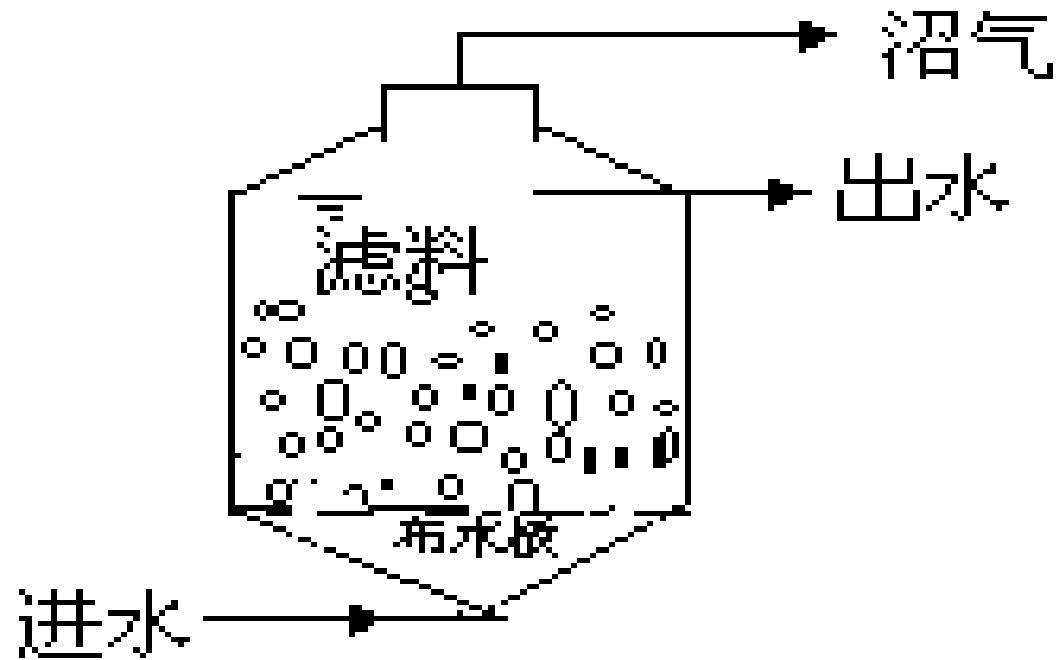




3 厌氧消化器



◆ 厌氧滤池 (AF)

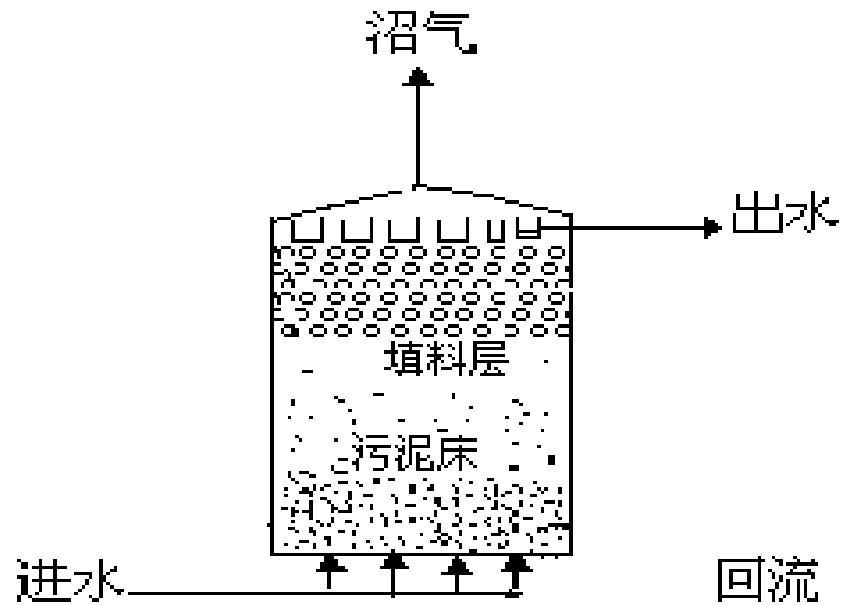




3 厌氧消化器



◆ 厌氧复合反应器(UBF)





- ☞ 提倡用简单的技术解决复杂的问题；
- ☞ 尽可能的降低工程投资和运行成本（通过技术创新、技术改造、应用新装备等）；
- ☞ 综合利用模式是最为经济、有效的工程模式（热电肥联产，太阳能利用，沼液还田处理等），应大力推广。



谢谢!



BIOMA[®]

颜 丽

总工程师
研究员

农业部沼气科学研究所

地址:成都市人民南路四段十三号

邮编:610041

电话/传真:028-85230699

手机:13183831886

E-mail:yanli@biogas.com.cn

brtcyanli@yahoo.com.cn

<http://www.biogas.cn>