

文章编号: 0253-2468(2004)05-0915-07

中图分类号: X171.4

文献标识码: A

海南制糖-酒精-能源-农业生态产业模式设计

欧阳志云, 赵同谦, 苗 鸿, 王如松, 王效科 (中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085)

摘要: 运用产业生态学原理, 结合研究区的产业特点, 通过设计物质多级利用的生态工艺与相关生产过程的整合, 将农业生产、甘蔗制糖、制糖废液生产酒精、酒精废液生产沼气、沼气发电、沼液作为有机肥灌溉农田、电厂固体废弃物生产建材等生产过程有机链接起来, 一方面解决了海南制糖废液的环境污染问题, 另一方面也使得 12×10^4 t 糖蜜废液、 40×10^4 t 废糟液、 2.13×10^4 t 炉渣、 22.38×10^4 t 粉煤灰、 2400×10^4 m³ 沼气、以及大量沼液、余热等外排废弃物因资源化而得到充分利用, 提高了资源利用效率, 与此同时也产生了显著的环境效益和经济效益。

关键词: 生态产业; 模式; 设计

Design for ecological industrial chain for sugar refining, alcohol distillation, energy provision and agriculture in Hainan

OUYANG Zhiyun, ZHAO Tongqian, MIAO Hong, WANG Rusong, WANG Xiaoke (Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085)

Abstract: Sugar-refining industry is one of the important industries in Hainan province. Sugar-refining waste liquid has become the key problem that prevents the development of sugar-refining industry in Hainan because of its high organic concentration, immediate drainage, difficult treatment and high cost. In this paper, based on industrial ecology principles and the local conditions, a design for ecological pattern of multi-utilization of materials has been proposed. In this design, six kinds of industries including the agricultural production, sugar refining, alcohol distillation, methane production, electricity generation, and the production of building materials have been integrated into an industrial chain. Sugar-refining waste liquid is designed to produce alcohol through distillation and fermentation. The molasses silage from alcohol production will be treated by anaerobic reactor. As the byproducts of anaerobic reactor, methane will be used for electricity generation and the methane slurry will be taken to land system for irrigation. Otherwise, the fly ash of electricity plant can be used to produce building materials and the waste heat be used for alcohol distillation and anaerobic reactor. As a result, on the one hand, the negative influence of sugar-refining waste liquid to local environment will be eliminated; on the other hand, 12×10^4 t sugar-refining waste liquid, 40×10^4 t molasses silage, 2.13×10^4 t slurry, 22.38×10^4 t fly ash, 2400×10^4 m³ methane, much waste liquid of methane production and remaining heat from electricity plant has been fully utilized. The remarkable environmental and economical benefits can be produced through the multi-utilization of sugar-refining waste liquid in Hainan. Meanwhile, this paper also provides a case study for the development of industrial ecology in China.

Keywords: ecological industry; pattern; design

生态产业是按生态经济原理和知识经济规律组织起来的基于生态系统承载能力、具有高效的经济过程及和谐的生态功能的网络型、进化型产业^[1-3]。它通过 2 个或 2 个以上的生产体系或环节之间的系统耦合, 使物质、能量能够多级利用, 高效产出与持续利用。企业发展的多样性与优势度、开发度与自主度、力度与柔度、速度与稳度达到有机的结合, 形成互利共生网络, 达到资源、能量的最大利用, 转变污染负效益为经济正效益。生态产业彻底改变了传统环境工

收稿日期: 2003-10-14; 修订日期: 2003-12-29

基金项目: 中科院知识创新方向性项目 (KZCX3-SW-424); 欧盟 SUSDEV-CHINA 项目 (ICA4-CT-2002-10004)

作者简介: 欧阳志云 (1962—), 男, 研究员, zyouyang@mail.reces.ac.cn

程的末端治理方法,是清洁生产技术的系统组装和延伸^[4-8].

甘蔗制糖生产是海南省的支柱产业之一.海南省糖蔗种植面积 $79.09 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 占全省播种面积的 8.43%, 全省糖蔗产量 $347.84 \times 10^4 \text{ t}$, 蔗糖产量 $30.18 \times 10^4 \text{ t}$, 产值 11.07×10^8 元, 占全省工业总产值的 6%. 制糖废液, 尤其是糖蜜废液, 具有有机物浓度高、排放时段集中的特点, 因而治理难度大、处理设备维护和运行成本高, 已成为影响海南省制糖及其相关产业发展的首要问题. 本研究尝试运用产业生态学原理, 通过设计物质多级利用的生态工艺与相关生产过程的整合, 将农业生产、甘蔗制糖、制糖废液生产酒精、酒精废液生产沼气、沼气发电、沼液作为有机肥灌溉农田、电厂固体废弃物生产建材等生产过程有机链接起来, 充分发挥物质资源的生产潜力, 寓制糖废液处理于生产过程之中. 以期生态产业模式探索提供案例研究.

1 研究区概况

1.1 自然概况

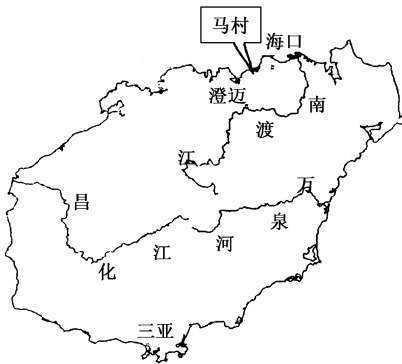


图1 马村地理位置示意图

Fig. 1 Position of Macun in Hainan

马村地区位于海口市西南 20 km, 澄迈县境内, 澄迈湾、琼州海峡的南端, 总面积约 20 km^2 (图 1). 该地区属热带海洋性季风气候, 温和湿润, 光照充足, 年平均气温 23.8, 极端最高气温 38.9, 最低气温 1.1, 多年平均降水量 1762 mm. 该地区位于海域半岛附近, 地势平坦开阔, 四周以坡地、丘陵为主, 海拔 2~45 m, 表层土壤为黄色砖红壤、红褐壤, 厚度 1 m 以上. 区域内无河流, 雨水自然分流渗透, 汇于低洼地带. 地下水平均埋深 20~30 m, 水质较差. 地表植被以农业植被、人工林与灌丛草地为主, 植物种类单一, 树木主要为木麻黄、椰子等, 灌木和草本有马樱丹、飞机草、虎尾草、仙人掌、白茅、含羞草、野菠萝及刺灌木等.

1.2 产业概况

(1) 制糖业 海南省共有制糖厂 28 家, 每年产生糖蜜废液 $12 \times 10^4 \text{ t}$ 、制糖废水 $3\,481 \times 10^4 \text{ t}$, 约占全省工业废水排放总量的 50% 以上, COD_{Cr} 的排放量约 $3.5 \times 10^4 \text{ t}$, 超过全省 COD_{Cr} 总排放量的 70%. 制糖生产周期由于受到甘蔗生产的限制, 每年的榨季仅有 40~60 d, 产生废液也集中在短短的 2 个月内排放, 制糖废液处理设备维护成本高, 进一步增加了废液处理的难度. 高浓度制糖废液已成为海南省实现工业污染达标排放的重点和难点.

(2) 海南电厂 海南电厂是海南省最大的火力发电厂, 总装机容量 $30 \times 10^4 \text{ kW}$, 年生产能力 $20 \times 10^8 \text{ kWh}$. 电厂共有 20 台工业锅炉, 以煤为燃料, 年耗煤量 $110 \times 10^4 \text{ t}$, 主要工业废物包括燃烧废气和粉煤灰, 冷却水实现全部回用. 2000 年, 海南电厂工业废气排放总量 $102.5 \times 10^8 \text{ m}^3$, SO_2 、烟尘排放量达到 $1.48 \times 10^4 \text{ t}$ 和 $1.47 \times 10^4 \text{ t}$, 分别占全省排放量的 73% 和 81%; 工业固体废弃物中, 粉煤灰产生量 $22.38 \times 10^4 \text{ t}$, 炉渣 $2.13 \times 10^4 \text{ t}$, 占全省工业固体废弃物总量的 26%.

(3) 华侨农场 海南省澄迈华侨农场地处澄迈县境内, 农场南北长 12 km, 东西宽 12.5 km, 海岸线长 16.1 km. 全场土地总面积 104 km^2 , 其中耕地 $4\,114.4 \text{ hm}^2$, 园地 $1\,682.5 \text{ hm}^2$, 林地 $1\,935.7 \text{ hm}^2$, 城镇、工矿建设用地及交通用地 790.1 hm^2 , 水域(含沿海滩涂) 812.5 hm^2 , 未利用

荒草原地 1 267.5 hm². 农场水系以河沟为主,地下水资源丰富,全省最大的松涛水库的主干渠从场域经过,场内山塘水库 5 座,总容量 160 ×10⁴ m³.

(4)其它企业 工业园区内还包括一些小型企业,如无纺布厂、正大饲料厂、欣安制药厂、中平木业合板厂、粉末水泥厂、砖厂等,基本为乡镇企业,生产规模较小.

2 生态产业模式设计

2.1 设计原则与方法

根据生态学原理与产业生态学方法,提出适合当地产业特点的生态产业设计方案,建设一个产业横向耦合的、资源利用链网式结构的生态产业园^[9,10],为海南省及全国生态产业的发展提供典型示范.本设计主要遵循如下原则:(1)污染治理与资源综合利用相结合原则:以海南制糖业糖蜜废液处理为出发点,以资源综合利用为目标,结合现有产业特点,设计生产环节,对生产系统的各个生产工艺进行逐级耦合,实现生产系统的经济效益、资源利用效率最大和环境影响最小;(2)系统规划、分步实施原则:在生态产业总体规划的基础上,根据马村现状产业特点,优先建设产业链的关键产业与主要生产过程,实施滚动发展,逐渐扩大产业链的总体规模;在建设和运行过程中,不断发现并解决生产中出现的新问题,逐步修正设计模式,健全生态产业链.

2.2 生态产业模式总体设计

结合研究区产业特点,在研究区原有产业基础上通过新建、改扩建生产企业构成生态产业链(图 2).其中,主要新建产业包括酒精生产、沼气生产以及农田污水灌溉系统,需改扩建的产业主要为建材产业.

2.3 生态产业链

(1)制糖业 制糖业是马村生态产业的龙头.根据当前制糖业的特点,在产业链中可作为虚拟环节,其生产场所分布于海南各地,但其主要副产品—糖蜜则集中到马村酒精生产基地进行综合利用.

(2)酒精生产 糖蜜酒

精厂生产原料为糖蜜废液,设计年产酒精 5 ×10⁴ t,年利用糖蜜废液 13 ×10⁴ t~22 ×10⁴ t,可以实现海南省绝大多数糖厂糖蜜废液的集中处理与综合利用,是制糖业清洁生产和废弃物资源化的关键环节.其生产工艺如下(图 3).

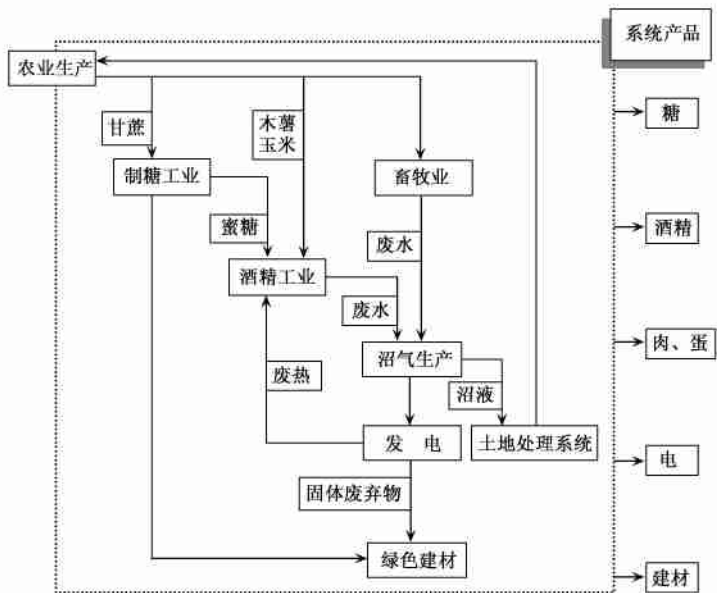


图 2 生态产业模式系统流程

Fig. 2 Flowchart of ecological industrial chain

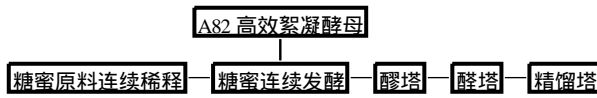


图3 糖蜜酒精生产工艺

Fig. 3 Flowchart of techniques of alcohol production

生产过程中利用电厂余热提供蒸馏酒精能源. 每生产 1 t 糖蜜酒精要产生 $12 \times 10^4 \text{ t} \sim 15 \times 10^4 \text{ t}$ 废糟液, 年总量约 $40 \times 10^4 \text{ t}$. 废糟液是一种有害无毒并有肥效性的液体 (表

1), 有害是指废液酸性较强, SO_4^{2-} 浓度较高, 并含有大量低分子有机物, 外排后会对水体、土壤及生态系统造成损害; 无毒、有肥效性是指重金属含量低于安全水平并含有较丰富的有机物质和氮、磷、钾、钙、镁等植物生长所需的营养元素. 本设计中, 酒精废糟液作为沼气生产的原料进入生态产业链的下一环节.

表 1 酒精生产过程中废糟液的主要成份

Table 1 Components of molasses silage

废液成份/%							废液水质监测结果 (g L^{-1})				
固形物	有机物	全糖份	灰份	氧化钾	总酸	氮	pH	SS	COD_{Cr}	BOD_5	SO_4^{2-}
9~13	7~9	1.0~2.2	3.2~4.0	1.3	1.08	0.42	3.5~5.0	4~6	80~180	30~80	5~8

(3) 沼气生产 采用厌氧发酵法处理和利用酒精废糟液 (图 4、表 2), 年生产沼气 $2400 \times 10^4 \text{ m}^3$, 经脱硫处理后可提供电厂作为能源, 代替部分燃煤; 剩余的沼液量在 $1000 \sim 1200 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ 左右, 首先排至生物稳定塘沉淀、氧化、稳定水质, 然后根据农田灌溉需要进入土地处理系统.

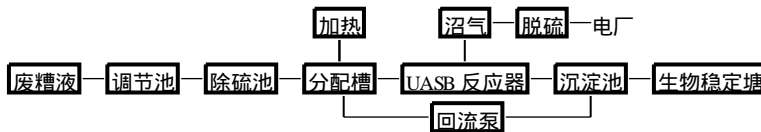


图 4 沼气生产流程图

Fig. 4 Flowchart of techniques of methane production

表 2 主要处理构筑物及其设计参数

Table 2 Major treatment equipments and their parameters in design

构筑物	个数	设计参数或设计说明
调节池	2	有效容积 400 m^3 , 水力停留时间 8 h
除硫池	2	采用 F 菌株除硫或铁屑还原法除硫
UASB 反应器	4	单个有效容积 600 m^3 , 单级厌氧消化, 水力停留时间 48 h, 反应温度 $55 \text{ }^\circ\text{C}$, 回流比 1:1, 去除率 90% (以 COD_{Cr} 计), 设计容积负荷为 $27 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \text{ d})^{-1}$
生物稳定塘	2	兼性氧化塘, 有效容积 $2 \times 10^4 \text{ m}^3 \times 2$, 有效水深 1.5 m, 水力停留时间 33.3 d, 去除率 50% (以 COD_{Cr} 计)

(4) 农业与土地开发 在生态产业模式中, 土地开发与农业发展子系统是将农业灌溉要求与废水土地处理系统原理相结合, 通过利用土壤-微生物-农作物组成的生态系统的净化能力, 将沼液的利用与环境净化通过农业生产耦合于一体, 沼液的农业利用的同时, 可实现废水中残余有机污染物质的降解和营养物质的循环再生. 结合当地的气候条件特征和土壤情况, 选择慢速渗滤模式作为稳定塘出水的土地处理方式. 该地区气候特点分为明显的雨季和旱季, 雨季降雨量大, 土壤渗水性能较差, 因此土地处理系统只能在旱季 (每年的 11 月到次年的 4 月) 正常

运行,其余时间废水在稳定塘暂存.综合水力负荷和污染负荷两方面考虑,规划土地处理系统的面积 期为 200 hm^2 ,基本满足现有的废水处理量和有机污染物的处理要求,但出水中 S 的含量将超过国家标准; 期土地处理系统的面积可以扩大到 500 余 hm^2 ,以降低污染负荷,解决污染问题.为便于管理,可以将全部处理土地划分成若干块独立的处理系统,每块子系统面积约 $1 \sim 2 \text{ hm}^2$, $10 \sim 20$ 块为一个管理组,采用表面布水的进水方式,可以漫灌,也可以沟灌或渠灌,每个管理组依地形设集水沟和集水塘,每组统一投配废水(图 5),投配时间 $8 \sim 14 \text{ h d}^{-1}$,布水期可采用 $3 \sim 6 \text{ d}$,干化期为 $10 \sim 25 \text{ d}$.

慢速渗滤系统对作物的选择十分重要.当系统以处理废水为目标时,可以选择多年生牧草,其生长期长,对 N、P、K、S 的利用率高,水力负荷能力强.也可以选择一些速生树种,例如海南生长普遍的木麻黄和小叶桉等,其优点是水分需求量大,耐冲击负荷能力强,管理简便.如果为了寻求经济上的收益,则可以选择一些作物,例如甘蔗和香蕉,但在作物种植和生长过程中,应科学地调配废水的投配量,使之与作物的需水与营养吸收要求一致,同时还要考虑在不同的生长期营养元素的配比,增加部分人工施肥.

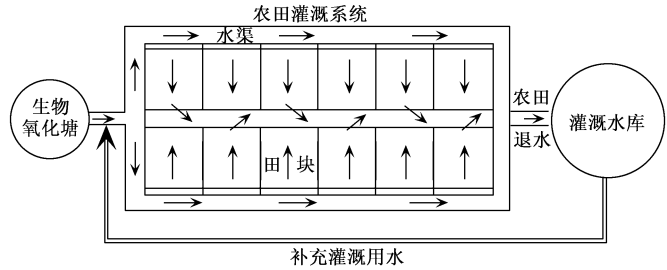


图 5 土地处理系统示意图
Fig. 5 Sketch map of land treatment system

(5)发电 利用酒精废糟液生产的沼气供电厂利用,相当于 $3.19 \times 10^4 \text{ t}$ 标煤的清洁能源,占电厂原煤消耗量的 4% . 每年可以减少烟尘排放 588 t , SO_2 约 592 t . 中期规划可达到年产沼气约 $5000 \times 10^4 \text{ m}^3$,相当于 $9.31 \times 10^4 \text{ t}$ 原煤,达到电厂原煤消耗量的 8.5% ,每年减少烟尘排放 1225 t ,减少 SO_2 排放 1233 t .

(6)建材业 电厂的固体废弃物可用于生产建材,目前,海南电厂年排放固体废弃物 $24.67 \times 10^4 \text{ t}$,其中 $2.13 \times 10^4 \text{ t}$ 炉渣可利用生产建筑用砖, $22.38 \times 10^4 \text{ t}$ 粉煤灰可以用来生产水泥;此外,制糖业产生的大量蔗渣可用于生产各种复合板材.

3 环境与经济效益分析

3.1 资源利用率

通过生态产业的有机整合,使产业链的资源利用效率得到大幅度提升.制糖业的副产品成为酒精生产的原料,电厂余热可以提供酒精蒸馏生产的能源,而酒精生产的废糟液又可以用于生产沼气,沼气经处理后可做为清洁能源供给电厂,沼液经沉淀氧化稳定后做为液体有机肥料用于农业生产系统,此外,电厂的固体废弃物粉煤灰、炉渣则可以用于生产建材等等.整个生态产业链条中, $12 \times 10^4 \text{ t}$ 糖蜜废液、 $40 \times 10^4 \text{ t}$ 废糟液、 $2.13 \times 10^4 \text{ t}$ 炉渣、 $22.38 \times 10^4 \text{ t}$ 粉煤灰、 $2400 \times 10^4 \text{ m}^3$ 沼气、以及大量沼液、余热等外排废弃物因资源化而得到充分利用,与此同时,也大大减轻了工业废物对环境的压力.

3.2 环境效益分析

资源利用过程同时也是环境污染物净化的过程,最终目标要实现整个系统污染物的最小排放,并对环境的影响减至最小.本设计的环境效益是非常显著的,主要集中在有机废水

废液的有效治理、大气污染物及工业固体废弃物的减排 3 个方面。

(1) 有机废水废液的有效治理 通过生态产业和生态工程的有机结合,使得各产业生产末端的有机废水废液得到了有效的控制(表 3、表 4),尤其是解决了有机污染物浓度高、排放集中、处理设备维护及运行成本高昂的制糖废液的处理问题,为海南省实现工业污染达标排放奠定了良好的基础。

表 3 正常运行条件下主要设施污染物净化效果

Table 3 The effect of main treatment equipments under normal conditions

设施	项目	pH	SS/ (mg L^{-1})	COD _{Cr} / (mg L^{-1})	BOD ₅ / (mg L^{-1})	SO ₄ ²⁻ / (mg L^{-1})
调节沉淀池	进水	3.5~5.0	4000	80000	30000	5000
	出水	3.5~5.0	1200	40000	24000	4000
F 菌株除硫池	进水	3.5~5.0	1200	40000	24000	4000
	出水	6.0~7.0	1200	40000	24000	800
UASB	进水	6.0~6.5	1200	40000	24000	800
	出水	6.5~7.5	480	10000	6000	400
稳定塘	进水	6.5~7.5	480	10000	6000	400
	出水	6.5~7.5	240	3000	1200	400
农业系统	进水	6.5~7.5	240	3000	1200	400
	出水	6.5~7.5	10	300	120	300
全流程	进水	3.5~5.0	4000	80000	30000	5000
	出水	6.5~7.5	10	300	120	300

(2) 大气污染物减排 每年分别减少烟尘和 SO₂ 排放 588 t 和 592 t.

(3) 工业固废综合利用 通过热电厂粉煤灰、炉渣的综合利用,减少固体废弃物排放 24.51 × 10⁴ t.

3.3 经济效益分析

解决了影响海南省制糖业及其相关产业发展的首要问题,由此产生的经济效益和社会效益目前还难以进行估算,只能通过部分产业的资源化产生的直接经济效益和减少环境治理成本两个方面进行不完全衡量. 据初步估算,由资源化和资源利用效率提高所产生的直接经济收益预计可达到每年 1.5 × 10⁸ 元左右,而减少环境治理成本(设备设施折旧、运行成本)达到每年 0.02 × 10⁸ 元,总的直接经济效益约为每年 1.52 × 10⁸ 元.

解决了影响海南省制糖业及其相关产业发展的首要问题,由此产生的经济效益和社会效益目前还难以进行估算,只能通过部分产业的资源化产生的直接经济效益和减少环境治理成本两个方面进行不完全衡量. 据初步估算,由资源化和资源利用效率提高所产生的直接经济收益预计可达到每年 1.5 × 10⁸ 元左右,而减少环境治理成本(设备设施折旧、运行成本)达到每年 0.02 × 10⁸ 元,总的直接经济效益约为每年 1.52 × 10⁸ 元.

4 问题与讨论

生态产业与生态产业园建设是当前国际上产业发展的新方向,通过模拟自然系统的结构与过程建立的生产系统,通过资源的互利共生关系,将多个产业组合起来,实现物质的循环、能量多级利用以及对环境影响的最小化^[6,7,10]. 本文运用生态工程原理,通过实现物质多级利用的生态工艺设计与相关生产过程的整合,提出了一种新的生态产业模式,由制糖业、酒精生产、沼气、农业、发电及建材业等部分构成,这 6 个部分在资源利用关系与功能上形成了一个生态经济整体,可以更加充分地发挥资源的生态效益. 本研究提出的产业生态模式设计内容已被海

表 4 主要设施污染物去除率

Table 4 Pollutant removal efficiency of main treatment equipments

设施	SS/ %	COD _{Cr} / %	BOD ₅ / %	SO ₄ ²⁻ / %
调节沉淀池	70.0	50.0	20.0	20.0
F 菌株除硫池	-	-	-	80.0
UASB	60.0	75.0	75.0	50.0
稳定塘	50.0	70.0	80.0	0
土地处理系统	96.0	90.0	90.0	25.0
全流程	99.8	99.6	99.7	94.0

南省所采用,目前该生态园已建成酒精厂、厌氧处理和农业土地处理系统等设施,加上原有的海南电厂及一些小型建材生产企业,组成生态产业链的产业要素已经初步具备,但运行调试过程中存在一些问题,主要表现在以下几个方面:(1)在沼气生产和利用上,由于产生的沼气 S 含量偏高,电厂不能直接利用,需要进行脱硫处理,从而增加了运行的成本;(2)在沼液灌溉上,虽然废液对改良土壤结构、增加土壤养分含量,尤其是有机质和速效钾的含量方面具有明显的效果,但沼液存储和灌溉过程中仍存在着二次污染问题。例如,生物稳定塘管理不善易对周围环境形成不良影响;废水灌入土壤后,局部地区将会形成厌氧环境,在厌氧菌的作用下也会产生异味,尤其是硫酸还原菌的代谢产物 H_2S ,对人的感官刺激比较大;沼液 SO_4^{2-} 污染负荷过高,超过土地处理系统的吸收降解能力,造成土壤渗滤液 SO_4^{2-} 的浓度较高;同时,土地处理系统渗出液残留部分有机物,会增加浅层地下水和地表水的有机物含量。

针对上述问题,应在以下几个方面开展研究并采取行之有效的措施加以解决。(1)研究造成沼气生产中 S 含量过高的原因,从生产过程入手探索最优的解决方法(包括除硫、厌氧微生物遴选、气体脱硫等);(2)探索沼液储存和灌溉前期处理的生态工程方法,针对沼液的合理灌溉方法开展实验研究,以减少二次污染的产生;(3)加强灌溉管理与监测,根据作物品种、生长发育期、土壤干旱程度和灌溉季节制定灌溉制度,制定严格的管理制度和沼液溢漏应急处理方案,开展对沼液以及灌区地下水、土壤和空气的常规监测,发现问题及时解决;(4)开展废糟液、沼液的深层次利用可行性研究,例如,利用废糟液生产饲料酵母、利用废糟液生产苏云金芽孢杆菌生物农药、利用沼液生产液体生态肥料、利用废水养殖凤眼莲等。

参考文献:

- [1] 王如松. 转型期城市生态学前沿研究进展[J]. 生态学报, 2000, 20(5): 830—840
- [2] 卢兵友, 赵景柱. 生态产业园区: 持续发展的一种理想模式[J]. 环境科学, 2001, 22(2): 1—6
- [3] Ehrenfeld J, Gertler N. Industrial ecology in practice: the evolution of interdependence at Kalundborg[J]. *Industrial Ecology*, 1997, 1(1): 3—5
- [4] 薛东峰, 罗宏, 周哲. 南海生态工业园区的生态规划[J]. 环境科学学报, 2003, 23(2): 285—288
- [5] 吴峰, 徐栋, 邓南圣. 生态工业园规划设计与实施[J]. 环境科学学报, 2002, 22(6): 802—803
- [6] 杨建新, 王如松. 产业生态学基本理论探讨[J]. 城市环境与城市生态, 1998, 11(2): 56—60
- [7] Gaedel T E, Allephy B R. *Industrial Ecology*[M]. New York: Prentice Hall Press, 1995
- [8] 张秋根, 王桃云, 李明俊. 生态工业园区及其建设[J]. 环境污染治理技术与设备, 2003, 4(3): 59—62
- [9] 肖焰恒, 陈艳. 生态工业理论及其模式实现途径探讨[J]. 中国人口、资源与环境, 2001, 11(3): 100—103
- [10] 王如松, 蒋菊生. 从生态农业到生态产业——论中国农业的生态转型[J]. 中国农业科技导报, 1991, 3(5): 7—12