

农村沼气工程能源消耗及环境影响的 LCA 分析^①

刘 畅¹, 涂国平^{1,2}

1. 南昌大学 管理学院, 南昌 330031; 2. 南昌大学 中国中部经济社会发展研究中心, 南昌 330031

摘要: 能源短缺和环境污染已经成为我国经济发展主要面对的问题; 以沼气工程为代表的生物质能源开发和应用在解决能源压力 and 环境污染的过程中具有较大的潜力; 然而, 近年来, 沼气工程的开发应用存在较大问题. 运用生命周期分析方法, 对沼气制造及使用整个过程的全生命周期进行建模仿真, 通过对能源积累需求算法综合评价生命周期内的各重要流程能源消耗情况进行计算, 同时对整个过程所有排放进行温室效应和水土富养化等环境影响进行评价. 根据评价结果, 得出我国农村沼气工程发展的可行路径分别为多种原料组合策略路径和大型沼气工程区域化路径.

关 键 词: 环境影响分析; 能源消耗; LCA 分析; 沼气能源

中图分类号: X171

文献标志码: A

文章编号: 1000-5471(2017)06-0047-07

习近平总书记在 2016 年 1 月 26 日中央财经领导小组第十二次会议上强调, 供给侧结构性改革的根本目的是提高社会生产力水平, 落实好以人民为中心的发展思想^[1]. 在过去的 1 年多时间里, 习总书记在不同会议、不同场合中一再强调供给侧经济改革的重要性和必要性. 近 10 年来, 由于生产力水平的持续提高, 我国经济模式已经逐渐从“需求决定型经济”向“供给决定型经济”转换. 可再生能源作为新型能源, 已经成为解决中国“资源—环境—能源”瓶颈的纽带^[2]. 其中, 以沼气能源为代表的生物质能源, 更是解决我国资源与环境冲突的关键能源. 其特点是: 按照生态经济学的原理, 运用系统工程方法, 以沼气为纽带, 把种植业、养殖业、沼气 3 个不同的子系统结合成一个物质循环系统^[3]; 在这个系统中, 各种资源都得到合理、有效的利用. 目前, 这种模式已经从小沼气池向大沼气池、从个人向以自然村为单位转变, 形成规模化的畜禽养殖区, 通过社区化的管理, 将肉类加工、生物制药、果蔬加工等环节联系起来, 形成了一个大的产业化生产系统. 但是研究数据显示, 沼气工程设施建设完成率低于 10%^[4], 养殖产业带来大量污染, 沼气工程还存在很多无形的阻碍.

本文通过运用生命周期评价法, 评价农村沼气工程生命周期中各重要流程能源消耗情况, 同时根据系统排放计算结果, 对温室效应、水土富养化、人体健康等环境影响指标进行评价, 得出: 首先, 生物质原料运输及污染处理环节中, 将会产生大量的能源消耗, 因此在未来的沼气工程实施路径设计的过程中, 需要考虑运输路径的设计, 以提高运输效率; 其次, 从环境影响的角度上看, 原材料运输储存以及废物二次利用等环节的环境影响较大, 因此在未来的路径设计中, 需要考虑如何减少沼气工程实施带来的环境污染.

① 收稿日期: 2016-09-07

基金项目: 教育部人文社会科学重点研究基地项目(13JJD30016); 国家自然科学基金项目(71163032); 江西省研究生创新专项资金项目(YC2014-B008).

作者简介: 刘 畅(1987-), 女, 黑龙江大庆人, 博士研究生, 主要从事系统工程与决策的研究.

1 农村沼气工程 LCA 模型的构建

本文所界定的沼气工程工艺为动物排泄物进行厌氧发酵，主要的生产环节及关键变量的设定均以经济、环境收益最优化为主要依据。农村沼气工程 LCA 系统的主要功能为原材料厌氧发酵后产生的沼气进一步进行供电供热，发酵过程中的废弃物进行循环利用以及作为农作物生物肥料等。

1.1 LCA 系统边界的确定及系统分析

农村沼气工程系统主要划分为 3 个主要的子系统：原料供应子系统、户用沼气制取子系统以及厌氧发酵管理子系统，系统的主要原料为动物排泄物；由于排泄物的产量不会对厌氧发酵的环节带来直接影响，因此该原料生产环节将不计入系统边界之内。现今阶段的农村沼气工程 LCA 模型是以动物排泄物作为主要原材料，通过养殖企业陆地运输，运送到农户的户用沼气池进行储备并进行厌氧发酵，发酵的产物沼气将通过发电上网以及直接热量加以消耗，该过程中产生的废弃物以及未参加沼气工程的原料将作为生物肥应用于农作物及鱼类养殖。

1.1.1 原料供应(储存)子系统

动物排泄物供应系统既包括在动物养殖企业处进行的动物排泄物收集环节以及其被运送到户用沼气生产的原料运输环节。由于动物排泄物是以每天运输到各农户的频率进行，因此户用沼气池处储藏这一环节对于环境的影响将不计入到本研究的系统当中；产品设备以及化石能源的生产加工工艺以及化石能源消耗所产生的排放等均被考虑到系统边界之内。

1.1.2 户用沼气制取子系统

该子系统涵盖了沼气厌氧发酵生产过程中全部的输入和输出；最终生成的沼气能源作为生物质能源发热和发电这个转换过程也将涵盖在系统中；动物排泄物通过管道输送到厌氧发酵池中；户用沼气池中，厌氧发酵将作为一个单独的过程，在这个过程中会不断地循环发酵，池中的温度将循环供热系统保持在 40℃左右^[5]；该子系统的输入为化石能源、水、氢氧化钠、润滑油、热能以及电能，同样这些系统输入的产物也将被纳入系统边界之内。同时，系统的主要产物以及基础设施也被考虑在边界之内。排放物的预测将基于化石能源消耗、厌氧发酵生成的沼气的消耗以及在沼气运输过程中的自然排放(最多 1.5%)进行分析。

1.1.3 厌氧发酵管理子系统

这个子系统包含发酵物的储存以及废弃物制取化肥环节。发酵物储存环节发生在户用沼气处，其衍生的储存排放将会被纳入系统边界之内。发酵物由于包含了天然的氮磷钾的元素，因此可以作为天然肥料而代替化肥^[6]，其作为有机肥运输和应用环节也被纳入到系统边界之内。所有的系统输入包括沼气、生产沼气的设备、化石能源的应用、衍生产物的排放以及有机肥料的使用等。具体系统边界如图 1。

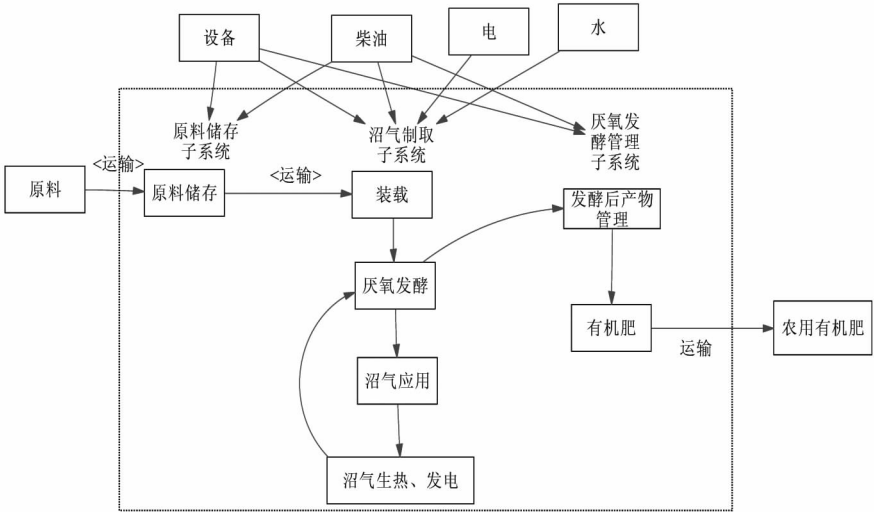


图 1 农村沼气工程 LCA 系统边界

1.2 LCA 模型构建

农村沼气工程的整个生命周期模型包括基础设施、能源使用及厌氧发酵环节中产生的排放等几个主要的环节. 整个过程的关键是动物排泄物进行厌氧发酵产生沼气, 其中排泄物包括液体和固体两种.

1.2.1 数据清单

本文数据的主要来源为中国农村统计年鉴及 Ecoinvent 数据库, 根据中国农村统计数据, 我国农村生物质资源, 包括农作物秸秆、薪柴和各种有机废物, 利用量约为 2.6 亿 t 标准煤, 占农村生活能源消费的 70%, 整个用能的 50%我国可用于生产生物燃气的资源总量约折合 2.5 亿 t 标准煤, 能转化当量天然气 1200 亿 m³. 截至 2014 年底, 户用沼气用户约 5 000 万户, 其年产沼气的量约为 158 亿 m³, 生活污水净化沼气池约 21 万个^[7]; 年处理工业有机废水达 3.75 亿 m³; 处理农业废弃物的沼气工程达 4 100 座, 年产沼气总量达 4.5 亿 m³, 相当 58 万 t 标准煤, 年处理粪便量达 1.23 亿 t; 家禽存栏 57 亿只^[8].

在这个沼气工程模型中, 我们将使用 2014 年的中国农村统计年鉴关于沼气工程的数据, LCA 系统户用沼气年产生 158 亿 m³ 沼气, 每立方米沼气可以产生 19.1 kg 沼液和 3.4 kg 沼渣, 其中在厌氧发酵的过程中 1 t 沼渣、沼液可以折算为含相同氮磷钾的氮肥、磷肥和钾肥量分别为 5.287, 2.164 和 1.847 kg^[9], 沼渣、沼液在农田施用后, 根据王朝辉对土壤氨挥发的测定结果确定, NH₃-N 的淋失率主要受降水、灌溉和施氮量等因素的影响为施氮量的 0~10%, 本模型将采取中值 5%. 假设需要运用卡车运输, 则装载为 16 t 的柴油机卡车, 在 25 km 左右的区域里, 消耗的能量为 6.7782×10⁻⁴ MJ/(kg·km)^[10].

1.2.2 环境影响清单

畜禽养殖业污染源主要为畜禽粪尿, 其带来的直接环境影响主要集中在水体污染、土壤污染、大气污染以及微生物污染和药物、添加剂污染等方面. 畜禽养殖跨介质污染体现于: 处理后的粪液用于农田浇灌, 导致废水中的污染物进入土壤; 粪液处理产生的污泥堆肥后施用于农田, 也导致了废水中的污染物迁移至土壤; 干粪及粪液处理产生的污泥通过堆肥施用于农田, 污染物可能通过地表径流的方式进入周边地表水体, 或通过土壤渗透的方式污染区域内的浅层地下水; 未经收集处理的畜禽粪液散发的臭气污染周边环境空气; 畜禽养殖规模的扩大导致上述问题的严重化; 电力消耗导致上游的电力生产企业排污量增加, 潜在的环境影响包括环境酸化、土地占用等形式.

2 农村沼气工程 LCA 生命周期评估

整个系统包括两个生命周期循环, 分别是沼气工程生命周期和厌氧发酵的生命周期, 同时包括了动物排泄物储存、厌氧发酵和环境处理情景 3 个进程. 环境处理情景是在进行生命周期模型构建过程中添加的一个进程, 这样就将沼液、沼渣和沼气的处理问题带入了系统边界之内, 作为主要产物的沼气将会应用于发电和供热两个环节. 产生的电能将直接介入国家电网, 发电同时产生的热能将会进一步保持发酵池的温度. 其余的热量消耗将作为废物排放到空气当中. 沼液、沼渣将作为农业肥料, 同时剩余的一部分将以生物肥的形式运出, 各个环节中的排放量如表 1, 表 2.

2.1 动物排泄物储存子系统

动物排泄物储存系统既包括在动物养殖企业处进行的动物排泄物收集环节以及其被运送到户用沼气生产者的原料运输环节, 整个过程包括了物料运输以及原料储存两个重要环节. 当动物排泄物储存在户用沼气参与者一方, 由于气温、设备、技术和人力等诸多问题, 导致一部分的动物排泄物直接参与到沼气厌氧发酵的环节中, 而另一部分将进行储存, 储存的过程中, 部分排泄物会自主进行发酵, 在发酵的过程中产生温室气体 CH₄ 约 31.72 t, 对水体的排放主要有铝, BOD, COD 和放射性物质, 数值分别为 98.655 839 kg, 33.707 419 kg, 1 103.027 3 kg, 76 503.949 52 kBq. 其中, COD 和放射性物质的排放量均非常大, 这两种物质均会对水质造成影响.

2.2 厌氧发酵子系统

由表 1 中生命周期计算结果可以看出,厌氧发酵这一过程的排放,环境污染比较大:首先,对于空气排放范畴而言,2014 年全国农村沼气工程反应过程产生大量的氨气,其数值为 163 840.65 kg,由于大部分的户用沼气用户在技术方面存在局限性,生成之后只通过除湿和脱硫两个环节,没有很好地处理其他对环境有害的气体,导致农村沼气工程实施处的空气质量下降,从而在一定程度上成为了农村沼气制造和使用 者农户在实施沼气工程一段时间后选择放弃的原因.同时,在这一过程中也会产生温室气体如 CO₂ 等,沼 气工程厌氧发酵环节产生的 CO₂ 为 103 358.21 kBq,由此可见,沼气工程在一定程度上可以完成节能减排 的目标.对于水体排放而言,厌氧发酵过程的污染还是比较严重的,其中 BOD,COD 和 DOC 的排放量分别 是 737 777.11 kg,2 237 885.9 kg 和 886 900.5 kg,超重氢和放射性物质的排放相对较高.

表 1 农村沼气工程 LCA 计算结果

	物质	单位	总计	排泄物储存	厌氧发酵
空气	NH ₄	kg	163 841.32	0.668 667 49	163 840.65
	CO ₂	kBq	103 358.21	0	103 358.21
	CH ₄	ton	1 932.064 39	31.727 450 4	1 900.336 94
	Xenon	kBq	1 021 328.791	0	1 021 328.791
水体	铝	kg	173 470.39	98.655 859	173 371.73
	BOD	kg	737 810.82	33.707 419	737 777.11
	COD	kg	2 238 988.9	1 103.027 3	2 237 885.9
	DOC	kg	886 900.68	0.177 443 52	886 900.5
	超重氢	kBq	33 694 226	0	33 694 226
	放射性物质	kBq	4 570 826.45	76 503.949 52	4 494 322.5
	镭元素	kBq	169 423.509	0	169 423.509
	2,4-D	kg	583.053 5	0	583.053 5
	硼	kg	874.689 44	0	874.689 44
	Fenpiclonil	kg	629.994 17	0	629.994 17
土壤	热量	GJ	668.477 1	0	668.477 1
	钼	kg	845.402 37	0	845.402 37
	硫酸	kg	760.547 27	0	760.547 27
	牧草胺	kg	819.936 96	0	819.936 96

3 农村沼气工程中煤炭和石油消耗及环境影响分析

3.1 能源消耗分析

同时,为了关注农村沼气工程每个程序的能源消耗情况,我们运用能源积累需求算法评价农村沼气工 程生命周期各重要流程的能源消耗情况,见表 2,图 2.

表 2 沼气工程各环节煤炭、石油能量消耗积累

各过程能量消耗/Pt	排泄物储存子系统	厌氧发酵子系统
总过程能源(A)	3.36E+08	1.56E+08
化石能源产热(B)	3.36E+08	0
废物处理(C)	0	9.3E+07
生物质废物厌氧发酵环节(D)	0	2.7E+07
运输(E)	0	1.8E+07
动物排泄物厌氧发酵(F)	0	1.6E+07

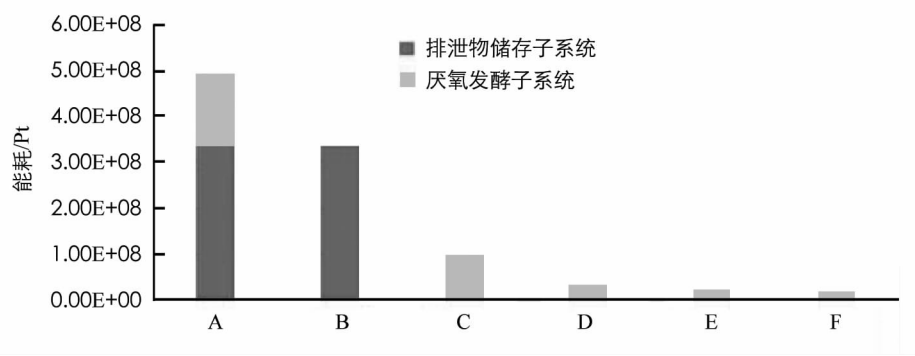


图 2 沼气工程各环节煤炭、石油能量消耗积累

由总过程能量消耗的结果可以看出，排泄物储存子系统的总能耗与厌氧发酵系统的总能耗，在数值上分别为 $3.36\text{E}+08\text{Pt}$ 和 $1.56\text{E}+08\text{Pt}$ ；在排泄物储存子系统中，主要的能源消耗为原材料的运输，因此在未来的沼气工程开发路径设计的过程中，需要对原材料的运输路线以及运输方式等问题进行综合的改善；对于厌氧发酵子系统而言，废物处理的环节能耗较高，其数值为 $9.3\text{E}+07\text{Pt}$ ，这一过程主要耗能来源于未能进行厌氧发酵的那部分原料重新运送到发酵池，以及剩余的未参加厌氧发酵的原料和厌氧发酵完成后剩余的沼渣和沼液以有机肥料的形式运输到农田、水塘等地进行二次利用的过程；由于未能更好地规划二次利用路径，该环节存在某关键节点的冗余，大量耗能；其次消耗能源较多的是原材料(生物质废弃物及动物排泄物)进行厌氧发酵的环节，由于沼气的生成受季节影响较大，需要对发酵池进行恒温化处理，因此为提高沼气的生产率，会消耗大量能源，其数值约为 $4.5\text{E}+07\text{Pt}$ ，较其他环节而言，这部分的能耗是不可避免的，但是在未来的路径重新设计时，可以考虑改进设备以及恒温功能的工序，提高能源利用率。

3.2 环境影响分析

分别对致癌物质、环境变化、臭氧层、有毒物质、富营养化和化石能源使用情况等因素进行评估，见表 3，图 3。

表 3 两个过程的影响评价

影响类别	单位	总计	排泄物储存子系统	厌氧发酵子系统
致癌物质	DALY	$1.02\text{E}+01$	$2.62\text{E}-01$	$9.91\text{E}+00$
环境变化	DALY	$-4.77\text{E}+00$	$5.37\text{E}+00$	$-1.01\text{E}+01$
臭氧层	DALY	$2.36\text{E}-02$	$2.25\text{E}-02$	$1.05\text{E}-03$
有毒物质	PAF * m2yr	$3.77\text{E}+06$	$1.34\text{E}+06$	$2.42\text{E}+06$
富营养化	PDF * m2yr	$5.38\text{E}+06$	$2.57\text{E}+06$	$2.81\text{E}+06$
化石能源	MJ surplus	$5.96\text{E}+07$	$4.78\text{E}+07$	$1.18\text{E}+07$

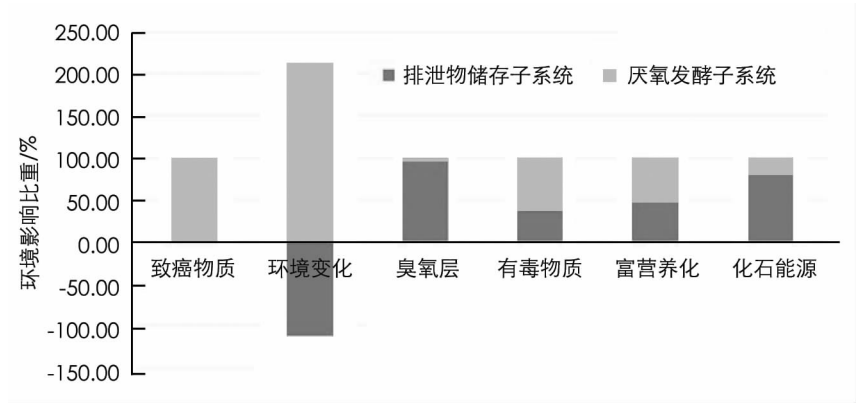


图 3 沼气工程主要过程环境影响评价

2014 年农村每天生产利用沼渣、沼液量在致癌物质、环境变化、臭氧层、有毒物质、富营养化及能量消耗方面的影响潜值分别为 $1.02\text{E}+01$, $-4.77\text{E}+00$, $2.36\text{E}-02$, $3.77\text{E}+06$, $5.38\text{E}+06$, $5.96\text{E}+07$. 由表 3 影响评价结果可以看出, 根据我国节能减排的规划, 沼气工程可以减少温室效应造成的影响, 其潜力值只有 $4.77\text{E}+00$, 与其他负面影响所占总影响的比重相差很大, 这就能解释近 5 年沼气工程发展的现象: 由于技术、操作人员受教育情况和设备等因素制约, 使得沼气工程未能按照清洁能源工程的期望值发展. 其中, 有毒物质和富营养化的问题相当严峻, 以富营养化为例, 其主要表现为: 在排泄物系统储存的环节, 由于运输以及储存方式方法的不当, 同时由于厌氧发酵技术水平和设备的缺失, 导致使得一部分动物排泄物未能成为沼气厌氧发酵, 形成污染. 其中, 对有毒物质和化石能源的影响, 厌氧发酵过程能源消耗较少; 但是在沼液、沼渣处理的过程中, 有条件的地区, 剩余物将会作为肥料储存起来, 肥料储存和运输过程消耗能源; 在排泄物储存子系统中, 原料从养殖企业运输到户用沼气池的过程则消耗较多能源; 排泄物储存子系统将主要影响臭氧层, 因为在这个环节中, 多数的户用沼气工程使用者对于储藏原材料这方面的技术支持度有限, 导致部分废弃物将自行发酵, 产生甲烷.

4 结论与展望

本文通过运用能源积累需求算法, 评价农村沼气工程全生命周期中各环节能源消耗情况, 同时运用 LCA 对于整个过程对土壤、水环境和大气环境进行环境影响评价, 得出: 首先, 生物质原料运输及污染处理环节中, 将会产生大量的能源消耗, 因此在未来的沼气工程实施路径设计的过程中, 需要考虑运输路径的设计, 以提高运输效率; 其次, 从环境影响的角度上看, 在生物质原材料运输储存以及废物二次利用环节, 对环境的影响较大, 因此在未来的路径设计中, 需要考虑如何减少沼气工程实施带来的环境污染. 因此我国农村沼气工程发展可以采取以下两种路径:

1) 多种原料组合策略路径: 该路径设计的依据是为了减少原料运输过程的污染情况以及运输成本, 多元化的原料组合将会根据各个省份地区沼气工程差异的不同, 设计运输成本和污染成本均较低的最佳原料组合, 沼气工程实施方依然是以户用沼气开发利用为主的形式.

2) 大型沼气工程区域化路径: 该路径设计的主要依据是提高沼气工程生产、应用以及减少废物排放. 由传统的户用沼气在近 20 年的发展显示, 这种小规模、小范围内的沼气工程建设的利用率随着时间的推移逐渐减少, 因此在此路径设计的过程中, 会考虑到以政府为主导作用, 建立大规模的沼气工程区域, 区域内部将有完善的生产应用子单元, 这样将有可能在减少污染的同时提高沼气的利用率.

参考文献:

- [1] 马 林, 汤云川, 张卫锋, 等. 基于 LCA 评价方法的中国沼气工程环境效应现状及前景分析 [C]//2008 农业生物环境与能源工程国际论坛论文集, 2008: 139—147.
- [2] 贾仁安, 章先华, 徐 兵, 等. 低碳生态能源经济循环农业系统工程典型模式及配套技术 [J]. 系统工程理论与实践, 2011, 31(1): 124—132.
- [3] 汪克亮, 杨宝臣, 杨 力. 基于环境效应的中国能源效率与节能减排潜力分析 [J]. 管理评论, 2012, 24(8): 40—50.
- [4] 张 强, 刘 巍, 何 勇, 等. 中国中部某市小规模畜禽养殖污染现状调查 [J]. 中国人口资源与环境, 2014(S3): 76—78.
- [5] 贾仁安, 胡 玲, 丁荣华, 等. SD 简化流率基本入树模型及其应用 [J]. 系统工程理论与实践, 2001, 21(10): 137—144.
- [6] 石敏俊, 周晟吕. 低碳技术发展对中国实现减排目标的作用 [J]. 管理评论, 2010, 22(6): 48—54.
- [7] PETER M S. The Fifth Discipline-The Art and Practice of the Learning Organization [M]. Copyright Peter M Senge: Century Business, 1993.
- [8] THOMAS R K. Why the Energy Policy Act is a Foundation for the Future [J]. Journal of the Electricity, 2005,

18(10): 22–30.

- [9] ASAFU-ADJAYE J. The Relationship Between Energy Consumption, Energy Prices and Economic Growth: Time Series Evidence from Asian Developing Countries [J]. *Journal of Energy Economics*, 2000, 22(6): 615–625.
- [10] GRUTTER J M, EGLER H P. From Cleaner Production to Sustainable Industrial Production Modes [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2004, 12(3): 249–256.

On LCA Analysis of Environmental Impact and Energy Consumption of Biogas Project in Rural Areas of China

LIU Chang¹, TU Guo-ping^{1,2}

1. School of Management, Nanchang University, Nanchang 330031, China;

2. Center for Central China Economic Development Research, Nanchang University, Nanchang 330031, China

Abstract: Energy shortage and environment pollution have already become one of the most serious problems for economy in China. Biogas project, one of biomass projects, shows its potentiality during the development. However, biogas project causes new problems due to insufficient utilization. A LCA model has been applied in the paper to evaluate from a cradle-to-gate approach the environmental impacts and energy consumption of biogas system in rural areas of China. Specific objectives include the identification of the most critical stages (environmental hotspots) in the system in order to identify opportunities to attain environmental benefits. This study shows that, firstly, in bio-materials transporting and waste managing sessions, more fossil resources are consumed which will provide an idea of re-evaluating transportation pathway in future pathway designing; and secondly, as for environmental impact, those two sessions mentioned above are devoting more environmental pollution than other sessions. In future pathway designing, methods of multi-materials strategy and regional biogas project strategy should be taken into account.

Key words: supply-side economy reform; coal and fossil resources; life cycle assessment; renewable energy

责任编辑 周仁惠