

# 农村户用沼气工程生命周期节能减排效益

王明新<sup>1</sup>, 夏训峰<sup>2</sup>, 柴育红<sup>1</sup>, 刘建国<sup>1</sup>

(1. 常州大学环境与安全工程学院, 常州 213164; 2. 中国环境科学研究院, 北京 100012)

**摘要:** 评估农村户用沼气工程及其上下游环节的节能减排效益, 可为农村户用沼气工程生命周期全过程环境管理和农村可再生能源发展提供决策参考。以 8 m<sup>3</sup> 典型农村户用沼气工程为例, 应用生命周期评价方法进行了清单分析和节能减排效益评价。结果表明, 1 个典型 8 m<sup>3</sup> 户用沼气工程生命周期对富营养化、环境酸化、能源耗竭、温室效应、人体毒性和光化学氧化 6 类环境影响类型的减缓作用分别相当于 2000 年世界人均环境影响潜力的 84.84%、54.37%、39.16%、26.67%、19.35% 和 5.55%, 生命周期净节能减排效益显著。因此, 发展农村户用沼气工程对缓解中国化石能源紧缺的局面和控制农村面源污染均具有重要的促进作用。

**关键词:** 节能, 排放控制, 生命周期, 户用沼气工程, 清单分析

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2010.11.042

中图分类号: X820

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2010)-11-0245-06

王明新, 夏训峰, 柴育红, 等. 农村户用沼气工程生命周期节能减排效益[J]. 农业工程学报, 2010, 26(11): 245—250.

Wang Mingxin, Xia Xunfeng, Chai Yuhong, et al. Life cycle energy conservation and emissions reduction benefits of rural household biogas project[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(11): 245—250. (in Chinese with English abstract)

## 0 引言

长期以来, 中国农村许多地区家庭能源的供应基本上依赖于煤炭和当地的秸秆、薪柴, 这种传统低效高耗能模式对资源和生态环境产生了重大而长久的负面影响, 严重制约农村地区的社会进步和经济发展<sup>[1-2]</sup>。多年来, 对农村清洁替代能源的开发利用主要集中在沼气的利用上。沼气技术利用日常生活、生产中的有机废弃物进行厌氧发酵, 所产气体成分以甲烷为主, 使用方便, 清洁无污染, 其发酵残余物可用于农业生产, 是优质的饲料和肥料, 而且只要原料充足, 条件适宜, 就可以实现持续生产<sup>[3]</sup>。户用沼气池因具有投资成本低、收益大、技术简单、使用期长、原材料易取、成本低等优点而广受农民喜爱<sup>[4]</sup>。中国政府在近几年推行的“一池三改”(建沼气池, 改厕、改圈、改厨)和生态家园计划, 取得了明显的增收效应和技术进步效应<sup>[5]</sup>, 极大地推动了农村户用沼气的推广应用。

许多学者对户用沼气的节能减排效益进行了评价, 但多数研究侧重评价其能源效益或某些特定污染物的减排效益, 如 SO<sub>2</sub> 和温室气体<sup>[2-3,6]</sup>。然而, 从生命周期角度看, 通过沼气工程建设实现减排的污染物类型较多, 如避免秸秆焚烧而实现对可吸入颗粒物 (PM<sub>10</sub>)、氮氧化物 (NO<sub>x</sub>) 等污染物的减排, 通过畜禽粪便发酵利用而实

现对总氮 (TN)、总磷 (TP) 和化学需氧量 (COD) 等污染物的减排, 通过沼渣、沼液等副产品再利用可以替代化肥而减少化肥生产中的能源消耗与环境排放; 另一方面, 沼气使用过程也会排放诸如二氧化碳、氮氧化物、挥发性有机化合物 (VOC) 等, 建造沼气池使用的建材等上游生产环节也会消耗能源并排放污染物。因此, 科学评价农村户用沼气的节能减排效应需要综合考虑沼气自身及其上下游的能耗与污染物排放, 需综合考虑不同类型的资源环境影响, 设置合理的评价单元和边界条件, 从而进行系统的评价。

生命周期评价 (life cycle assessment, LCA) 为实现该目标提供了有力的工具, 它是对产品从“诞生到消亡”、“从摇篮至坟墓”整个生命周期过程中物质、能源和废弃物代谢规律及其环境压力进行辨识、量化和评价的过程, 目的在于评估能量和物质利用对资源和环境的影响, 寻求改善的机会。LCA 在工业品环境评价和管理中得到了广泛的应用<sup>[7-8]</sup>, 但对沼气工程 LCA 评价研究还不多<sup>[9-10]</sup>, 更鲜见以农村户用沼气工程为对象的 LCA 研究, 用于环境效益的评价研究也很少。本研究以中国农村常见的 8 m<sup>3</sup> 户用沼气工程为例, 应用 LCA 方法进行节能减排清单分析和效益评价, 以期为促进农村可再生能源持续发展和改善农村生态环境提供决策参考。

## 1 材料与方法

参考 ISO (世界标准化组织) 提出的 LCA 原则与框架<sup>[11]</sup>, 本文对户用沼气工程生命周期节能减排效益的评价由以下 3 个相互关联的步骤组成, 即: 目标定义与范围界定、清单分析和节能减排效益评价。

收稿日期: 2010-03-15 修订日期: 2010-05-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (70901035); 国家科技重大专项 (2009ZX07632-02-03)。

作者简介: 王明新 (1979—), 男, 福建莆田人, 博士, 副教授, 主要从事农村环境保护研究。常州 常州大学环境与安全工程学院, 213164。

Email: wmxcau@163.com

### 1.1 研究对象、目标定义与范围界定

研究对象为中国农村广泛推广应用的  $8\text{ m}^3$  户用沼气工程, 设计投入原料为风干玉米秸秆和育肥猪粪便, 二者投入干质量分别为 400 和 800 kg, 年产气量约  $300\text{ m}^3$ 。沼气池为砖混结构, 使用寿命 20 a, 沼气池的建造共约使用 2 000 块红砖和 600 kg 硅酸盐水泥。

研究的目标是识别农村户用沼气工程生命周期资源环境影响的主要类型并识别其产生的关键环节, 评价农村户用沼气工程生命周期的节能减排效益, 为改善农村户用沼气工程环境效益提供依据。

本研究综合考虑农村户用沼气工程自身的能耗与污染排放和由于农村户用沼气工程建设而在其上下游环节实现的节能减排效益。自身的能耗与污染排放包括: 1) 沼气池建造的能耗与环境排放; 2) 沼气使用过程的污染排放。上下游环节的节能减排效益主要来自 4 个方面: 1) 避免了由于秸秆处置不当而引起的污染排放, 假定玉米秸秆如果不用于沼气发酵则将被用于直燃供热或露天焚烧; 2) 避免了猪粪堆置过程的污染物排放或流失; 3) 减少了沼气替代的化石能源其生命周期的能耗与污染物排放, 本文假定替代的化石能源为煤; 4) 减少了由于沼渣、沼液还田而替代的化肥其生命周期的能耗与污染物排放。评价的功能单元为 1 个典型户用沼气池运行 1 a 时间。

### 1.2 清单分析

清单分析主要考虑户用沼气工程生命周期各阶段主要原材料的投入量和主要污染物的排放量。沼气池建造环节的生命周期能耗与污染排放主要来自建筑材料的影响, 本研究考虑了两种主要建筑材料即水泥和实心砖的生命周期能耗及污染排放, 排放因子分别采用龚志超等和罗楠等的研究结果<sup>[12-13]</sup>, 不考虑其他环节的影响。沼气使用过程主要考虑由于燃烧排放的污染物, 包括  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{NO}_x$  和  $\text{VOC}$ , 其排放因子分别为 20 700、500、400 和  $400\text{ mg/N}\cdot\text{m}^3$ <sup>[14]</sup>。秸秆和猪粪因作为沼气发酵原料而分别避免了直燃和流失, 秸秆焚烧的主要污染物有  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{NH}_3$ 、 $\text{NO}_x$ 、 $\text{VOC}$ 、 $\text{PM}_{10}$  等, 其排放系数采用曹国良等的调研结果<sup>[15]</sup>。猪粪沼气利用的节能减排效益以猪粪堆积为参照对象, 猪粪中的氮、磷、钾的质量分数分别以 0.6%、0.5% 和 0.4% 计, 堆积模式的 TN、TP 和 COD 的流失率分别取 5.25%、5.34% 和 5.58%<sup>[16]</sup>, 沼气利用则以零排放计; 堆积模式每头育肥猪的  $\text{CH}_4$  和  $\text{NH}_3$  的排放量分别为 3.48 kg 和 7.43 kg, 沼气利用则  $\text{NH}_3$  排放量降至 4.84 kg, 甲烷实现零排放<sup>[6,17]</sup>。因沼气的使用而减少的煤炭的使用量根据二者热值进行等量转换, 燃煤生命周期主要污染物的排放系数参见狄向华等的研究结果<sup>[18]</sup>。沼液和沼渣的氮、磷、钾含量依据发酵原料中氮、磷、钾含量和发酵过程养分损失率折算, 沼肥中氮、磷、钾 3 种养分在发酵过程中的损失率分别以 20%、5% 和 5% 计, 剩余的养分质量分数折算为可替代的化肥数量<sup>[16]</sup>。化肥生命周期能耗与排放系数采用苏洁的研究结果<sup>[19]</sup>。

### 1.3 影响评价

参照 ISO 的生命周期评价框架, 对沼气工程生命周期各种节能减排效益进行特征化、标准化和效益评价。

在特征化中, 把户用沼气工程生命周期相关环境影响类型分为能源耗竭、温室效应、环境酸化、光化学氧化、富营养化和人体毒性 6 种。同类污染物通过当量系数转换为参照物的环境影响潜力。其中, 温室效应以  $\text{CO}_2$  为参照物,  $\text{CH}_4$  和  $\text{CO}$  的当量系数分别为 21 和 2<sup>[20]</sup>;  $\text{NO}_x$  和  $\text{NH}_3$  同时具有环境酸化潜力和富营养化潜力, 环境酸化潜力以  $\text{SO}_2$  为参照物,  $\text{NO}_x$  和  $\text{NH}_3$  的当量系数分别为 0.7 和 1.89<sup>[21]</sup>; 富营养化潜力以  $\text{PO}_4^{3-}$  为参照物,  $\text{NH}_3$ 、 $\text{NO}_x$ 、TN、TP 和 COD 的当量系数分别为 0.35、0.13、0.42、3.06 和 0.10<sup>[21]</sup>; 光化学氧化潜力以  $\text{C}_2\text{H}_4$  为参照物,  $\text{VOC}$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{CH}_4$  的当量系数分别为 0.6、0.3 和 0.007<sup>[20]</sup>; 人体毒性以 1,4-DCB 为参照物,  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_2$  和  $\text{PM}_{10}$  的当量系数分别为 0.31、1.2 和 0.1<sup>[22]</sup>。

标准化过程主要是建立标准化基准作以参照值, 目的是对各种环境影响类型的相对大小提供一个可比较的评价标准。标准化处理一般是用特征化结果值去除环境影响基准值。为了将全球性、地区性以及局地性影响在同一水平上进行比较, 本研究采用 2000 年世界人均环境影响潜力作为环境影响基准值进行标准化处理(表 1)<sup>[23]</sup>。

表 1 户用沼气工程生命周期评价基准

Table 1 Reference value for life cycle assessment of household biogas project

| 环境影响类型 | 单位 | 基准值       |
|--------|----|-----------|
| 能源耗竭   | MJ | 56 877.88 |
| 温室效应   | kg | 7 192.98  |
| 环境酸化   | kg | 56.14     |
| 光化学氧化  | kg | 34.72     |
| 富营养化   | kg | 10.70     |
| 人体毒性   | kg | 20.14     |

最后进行节能减排效益评价, 节能减排效益以沼气工程实现的节能减排量与沼气工程自身生命周期能耗与污染物排放量之差来表示。

## 2 结果与分析

### 2.1 清单汇总

依据上文确定的研究范围与清单分析方法, 对典型户用  $8\text{ m}^3$  沼气工程运行 1 a 的能源消耗与环境排放进行清单分析和数据汇总(表 2)。从表 2 可以看出, 沼气池建造和沼气使用 2 个环节表现为污染物排放环节, 其他 4 个环节为污染物减排环节。从沼气工程自身排放量看, 除  $\text{CO}$  外, 其他气态污染物排放主要来自沼气池建造, 这是由于沼气池的主要建筑材料是高能耗、高排放的水泥和红砖, 因此其  $\text{SO}_2$  排放量相对较大。从净节能减排量看, 除  $\text{SO}_2$  外, 其他污染物净排放以及净能耗均为正数, 表明户用沼气工程生命周期的节能减排量超过了自身的能耗和大部分污染物的排放量, 其中对含碳化合物和 TN、TP 等水污染物的减排量较大。

表 2 8 m<sup>3</sup> 户用沼气工程生命周期能源消耗与环境排放清单

Table 2 Life cycle inventory of energy depletion and emissions for a 8 m<sup>3</sup> household biogas project

|                   |       | 环境排放/kg         |                 |      |                 |                 |                 |                 |      |                  |      |      |      | 能耗/<br>MJ |
|-------------------|-------|-----------------|-----------------|------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|------|------------------|------|------|------|-----------|
|                   |       | CO <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | CO   | SO <sub>2</sub> | NH <sub>3</sub> | NO <sub>x</sub> | NO <sub>2</sub> | VOC  | PM <sub>10</sub> | TN   | TP   | COD  |           |
| 能耗与污<br>染排放量      | 沼气池建造 | 99.10           | 0               | 0.10 | 8.34            | 0               | 0.46            | 0.35            | 0    | 2.65             | 0    | 0    | 0    | 970.47    |
|                   | 沼气使用  | 64.17           | 0               | 0.16 | 0               | 0               | 0.12            | 0.09            | 0.12 | 0                | 0    | 0    | 0    | 0         |
| 节能与<br>污染物<br>减排量 | 化肥替代  | 970.07          | 2.35            | 0.78 | 1.83            | 0.13            | 2.72            | 2.04            | 0.43 | 1.30             | 0    | 0    | 0    | 14 810.49 |
|                   | 能源替代  | 378.05          | 0               | 0.49 | 3.71            | 0               | 2.20            | 1.65            | 0.12 | 5.87             | 0    | 0    | 0    | 6 489.69  |
|                   | 秸秆利用  | 221.71          | 0.25            | 8.25 | 0.06            | 0.19            | 0.37            | 0.27            | 2.30 | 0.84             | 0    | 0    | 0    | 0         |
|                   | 猪粪利用  | 0               | 20.88           | 0    | 0               | 4.68            | 0               | 0               | 0    | 0                | 0.74 | 0.63 | 6.83 | 0         |
| 净节能减排量            |       | 1 406.56        | 23.48           | 9.26 | -2.74           | 5.00            | 4.70            | 3.53            | 2.72 | 5.37             | 0.74 | 0.63 | 6.83 | 22 270.65 |

注：NO<sub>x</sub> 为氮氧化物；VOC 为挥发性有机化合物；PM<sub>10</sub> 为可吸入颗粒物；TN 为总氮；TP 为总磷，COD 为化学需氧量。下同。

2.2 影响评价

2.2.1 节能效益

典型 8 m<sup>3</sup> 农村户用沼气工程生命周期能源消耗见表 2，从中可以看出，户用沼气工程生命周期能源消耗的主要环节是沼气池的建造，其主要建筑材料的能耗较高，但沼气对燃料的替代和沼肥对化肥的替代减少了对煤炭等直接能源的需求和化学肥料等间接能源的需求，其中因化肥替代而实现的节能量相对较高，这是因为中国能源结构以煤为主，化肥尤其是氮肥的生产多数以煤炭为基本原料，能耗很高。

2.2.2 减排效益

沼气工程生命周期排放的主要温室气体有 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 和 CO（表 3）。由表 3 可知，CO<sub>2</sub> 减排量最大，其次是 CH<sub>4</sub>。CO<sub>2</sub> 减排效应主要来自化肥替代和煤炭替代，其中沼肥对化肥的替代减少了对化肥的需求从而显著减少了化肥生产环节由于高能耗而排放的 CO<sub>2</sub>，一个 8 m<sup>3</sup> 户用沼气工程每年产生的沼肥可通过替代化肥而减少温室效应潜力达 1 020.98 kg；其次是替代煤炭，可实现温室气体减排 379.04 kg。猪粪的发酵利用则避免了 CH<sub>4</sub> 的大量直接排放。此外，沼气工程的建设还可以避免秸秆直接焚烧而减少温室气体的排放，进一步降低其生命周期温室效应潜力。通过户用沼气工程的建设而实现的温室效应减排潜力达 2 081.87 kg，抵销沼气工程建造与运行排放的 163.79 kg 后，一个 8 m<sup>3</sup> 户用沼气工程年可实现温室气体净减排 1 918.08 kg。

表 3 户用沼气工程生命周期温室效应减缓潜力

| Table 3 Life cycle greenhouse effect reduction potential of household biogas project |                 |                 |       | kg |
|--|-----------------|-----------------|-------|----|
|  | CO <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | CO    |    |
| 沼气池建造  | -99.10          | 0               | -0.21 |    |
| 沼气使用   | -64.17          | 0               | -0.31 |    |
| 化肥替代   | 970.07          | 49.35           | 1.55  |    |
| 煤炭替代   | 378.05          | 0               | 0.99  |    |
| 秸秆利用   | 221.71          | 5.16            | 16.51 |    |
| 猪粪利用   | 0               | 438.48          | 0     |    |
| 合 计  | 1 406.56        | 492.99          | 18.53 |    |

户用沼气工程生命周期环境酸化污染物包括 SO<sub>2</sub>、

NO<sub>x</sub> 和 NH<sub>3</sub>（表 4）。沼气池建造和沼气使用两个环节排放环境酸化污染物合计达 8.75 kg，其中沼气池建造环节的 SO<sub>2</sub> 排放量最大，占 95.31%。但户用沼气工程通过猪粪、秸秆再利用和化肥、能源替代等，显著减少了上下游相关环节环境酸化污染物的排放量，总量达 39.28 kg，其中猪粪利用和煤炭替代 2 个环节实现的减排量分别占 74.77% 和 13.38%。生命周期合计实现净减排量 30.52 kg，对环境酸化影响有着显著的减缓作用。

表 4 户用沼气工程生命周期环境酸化减缓潜力

| Table 4 Life cycle acidification effect reduction potential of household biogas project |                 |                 |                 | kg |
|---|-----------------|-----------------|-----------------|----|
|   | SO <sub>2</sub> | NO <sub>x</sub> | NH <sub>3</sub> |    |
| 沼气池建造   | -8.34           | -0.32           | 0               |    |
| 沼气使用  | 0               | -0.09           | 0               |    |
| 化肥替代  | 1.83            | 1.90            | 0.24            |    |
| 煤炭替代  | 3.71            | 1.54            | 0               |    |
| 秸秆利用  | 0.06            | 0.26            | 0.36            |    |
| 猪粪利用  | 0               | 0               | 29.37           |    |
| 合 计   | -2.74           | 3.29            | 29.97           |    |

户用沼气工程生命周期光化学氧化污染物主要包括 VOC、CO 和 CH<sub>4</sub>（表 5），沼气池建造和沼气使用的光化学氧化潜力合计 0.08 kg，其中沼气使用排放的 VOC 对光化学氧化潜力的贡献占 94.12%。通过户用沼气工程建设，上下游 4 个环节实现的光化学氧化污染物减排量达 2.16 kg，实现净减排 2.07 kg。秸秆利用实现的减排量最多，达 1.63 kg，其中 VOC 的减排占 84.68%。此外，化肥替代和煤炭替代实现的光化学氧化污染物减排潜力分别为 0.30 和 0.08 kg，对光化学氧化影响的减缓也起到了一定的作用。

户用沼气工程生命周期富营养化影响的主要污染物有 NH<sub>3</sub>、NO<sub>x</sub>、TN、TP 和 COD（表 6）。沼气池建造和沼气使用 2 个环节排放的富营养化污染物仅 0.08 kg，而其上下游环节实现的减排量却达 9.15 kg，实现净减排 9.08 kg，极为显著地减缓了富营养化影响。其中猪粪利用实现的富营养化污染物减排量最大，占 91.27%。各种富营养化污染物中，NH<sub>3</sub> 净减排量最大，占 61.14%；其次是 TP 和 COD，分别占 21.18% 和 7.52%。

表 5 户用沼气工程生命周期光化学氧化减缓潜力  
Table 5 Life cycle photochemical oxidation effect reduction potential of household biogas project

|       | kg    |      |                 |
|-------|-------|------|-----------------|
|       | VOC   | CO   | CH <sub>4</sub> |
| 沼气池建造 | 0     | 0    | 0               |
| 沼气使用  | -0.07 | 0    | 0               |
| 化肥替代  | 0.26  | 0.02 | 0.02            |
| 煤炭替代  | 0.07  | 0.01 | 0               |
| 秸秆利用  | 1.38  | 0.25 | 0               |
| 猪粪利用  | 0     | 0    | 0.15            |
| 合 计   | 1.63  | 0.28 | 0.16            |

表 6 户用沼气工程生命周期富营养化减缓潜力  
Tabel 6 Life cycle eutrophication effect reduction potential of household biogas project

|       | kg              |                 |      |      |      |
|-------|-----------------|-----------------|------|------|------|
|       | NH <sub>3</sub> | NO <sub>x</sub> | TN   | TP   | COD  |
| 沼气池建造 | 0               | -0.06           | 0    | 0    | 0    |
| 沼气使用  | 0               | -0.02           | 0    | 0    | 0    |
| 化肥替代  | 0.05            | 0.35            | 0    | 0    | 0    |
| 煤炭替代  | 0               | 0.29            | 0    | 0    | 0    |
| 秸秆利用  | 0.07            | 0.05            | 0    | 0    | 0    |
| 猪粪利用  | 5.44            | 0               | 0.31 | 1.92 | 0.68 |
| 合 计   | 5.55            | 0.61            | 0.31 | 1.92 | 0.68 |

户用沼气工程生命周期人体毒性影响的主要污染物有 SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub> 和 PM<sub>10</sub> (表 7)，沼气池建造和沼气使用 2 个环节生命周期共排放人体毒性污染物达 2.87 kg，其中 SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub> 和 PM<sub>10</sub> 分别占 90.24%、18.47% 和 8.71%。通过户用沼气工程建设，其上下游 4 个环节实现人体毒性污染物减排潜力合计达 7.27 kg，其中 SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub> 和 PM<sub>10</sub> 分别占 23.91%、65.49% 和 10.59%。煤炭替代和化肥替代实现的减排量最大，分别达 3.69 和 3.14 kg。通过上下游环节各种副产品的再利用，户用沼气工程生命周期实现人体毒性污染物净减排量达 3.90 kg。

表 7 户用沼气工程生命周期人体毒性减缓潜力  
Table 7 Life cycle human toxicity effect reduction potential of household biogas project

|       | kg              |                 |                  |
|-------|-----------------|-----------------|------------------|
|       | SO <sub>2</sub> | NO <sub>2</sub> | PM <sub>10</sub> |
| 沼气池建造 | -2.59           | -0.42           | 0.25             |
| 沼气使用  | 0               | -0.11           | 0                |
| 化肥替代  | 0.57            | 2.45            | 0.12             |
| 煤炭替代  | 1.15            | 1.98            | 0.56             |
| 秸秆利用  | 0.02            | 0.33            | 0.08             |
| 猪粪利用  | 0               | 0               | 0                |
| 合 计   | -0.85           | 4.23            | 0.52             |

2.2.3 标准化

采用 2000 年世界人均环境影响基准值对户用沼气工程生命周期净节能减排量进行标准化处理即得到各种节能减排指数。结果表明，能源耗竭、温室效应、环境酸化、光化学氧化、富营养化、人体毒性 6 种环境影响类

型的节能减排指数分别为 0.3916、0.2667、0.5437、0.0555、0.8484 和 0.1935，表示户用沼气工程生命周期的以上各类节能减排效益分别相当于该类环境影响潜力 2000 年世界人均水平的 39.16%、26.67%、54.37%、5.55%、84.84% 和 19.35%。可见，户用沼气工程生命周期对富营养化、环境酸化和能源耗竭影响的减缓作用极为显著，对温室效应和人体毒性等环境影响的减缓也起到积极的作用。

3 结论与讨论

本文以中国大规模推广应用的 8 m<sup>3</sup> 户用沼气工程为例，应用生命周期分析方法，对户用沼气工程生命周期自身能源消耗与污染物排放量以及由于户用沼气的建设而带来的上下游环节的节能减排量进行了进行了清单分析和效益评价。结果表明，户用沼气工程对上下游环节各种副产物的有效利用使得其生命周期实现的节能减排量超过了其自能的能耗和污染物排放量，表现出净节能减排效益。1 个典型 8 m<sup>3</sup> 农村户用沼气工程对富营养化、环境酸化、能源耗竭、温室效应、人体毒性和光化学氧化 6 种环境影响类型的减缓作用分别相当于该类环境影响潜力 2000 年世界人均水平的 84.84%、54.37%、39.16%、26.67%、19.35% 和 5.55%。

户用沼气工程生命周期对富营养化、环境酸化和能源耗竭等影响类型的减缓作用较为显著，对温室效应和人体毒性等环境影响的减缓也起到积极的作用。富营养化潜力的减少主要来自于畜禽粪便的资源化利用而显著减少了 NH<sub>3</sub> 挥发和氮、磷污染物排放；环境酸化潜力的减缓则主要来自猪粪沼气利用减少的 NH<sub>3</sub> 挥发与化肥、煤炭替代而减少的 SO<sub>2</sub> 排放；节能主要来自沼气对化石能源的替代和沼肥对氮、磷、钾等能源密集型化学肥料的替代，节能的同时显著减少了主要来自能源燃烧产生的温室效应、人体毒性和环境酸化等污染物的排放。

因此，发展户用沼气工程不但可以获得可再生清洁能源，减缓中国能源紧缺的局面，而且对于控制目前我国农村普遍存在的畜禽养殖污染和农田面源污染也具有积极的促进作用。

[参 考 文 献]

[1] Li Guozhu, Niu Shuwen, Ma Libang, et al. Assessment of environmental and economic costs of rural household energy consumption in Loess Hilly Region, Gansu Province, China[J]. Renewable Energy, 2009, 34(6): 1438—1444.

[2] 沈连峰, 王谦, 轩轶, 等. 户用沼气池建设的节能减排和农民增收效果[J]. 农业工程学报, 2009, 25(10): 220—225. Shen Lianfeng, Wang Qian, Xuan Zhan, et al. Effects of household biogas pond construction on energy-saving, emission-reducing and increase in farmers' income[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(10): 220—225. (in Chinese with English abstract)

[3] 张培栋, 王刚. 中国农村户用沼气工程建设对减排 CO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub> 的贡献: 分析与预测[J]. 农业工程学报, 2005, 21(12): 147—151.

- Zhang Peidong, Wang Lang. Contribution to reduction of CO<sub>2</sub> and SO<sub>2</sub> emission by household biogas construction in rural China: Analysis and prediction[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(12): 147—151. (in Chinese with English abstract)
- [4] 陆慧. 农村户用沼气对环境影响的指标体系与评价[J]. 太阳能学报, 2008, 28(3): 340—344.
- Lu Hui. Index system to environmental impact of family-used and appraising in the countryside[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2008, 28(3): 340—344. (in Chinese with English abstract)
- [5] 王飞, 王革华. “四位一体”户用沼气工程建设对农民种植行为影响的计量经济学分析[J]. 农业工程学报, 2006, 22(3): 116—120.
- Wang Fei, Wang Gehua. Econometric analysis of “Four-in-one” household biogas construction on farmers’ planting behaviors[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(3): 116—120. (in Chinese with English abstract)
- [6] 张培栋, 李新荣, 杨艳丽, 等. 中国大中型沼气工程温室气体减排效益分析[J]. 农业工程学报, 2008, 24(9): 239—243.
- Zhang Peidong, Li Xinrong, Yang Yanli, et al. Greenhouse gas mitigation benefits of large and middle-scale biogas project in China[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(9): 239—243. (in Chinese with English abstract)
- [7] Yang Jianxin, Lu Bin, Xu Cheng. WEEE flow and mitigating measures in China[J]. Waste Management, 2008, 28(9): 1589—1597.
- [8] 胡志远, 谭丕强, 楼狄明, 等. 不同原料制备生物柴油生命周期能耗和排放评价[J]. 农业工程学报, 2006, 22(11): 141—146.
- Hu Zhiyuan, Tan Piqiang, Lou Diming, et al. Assessment of life cycle energy consumption and emissions for several kinds of feedstock based biodiesel[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(11): 141—146. (in Chinese with English abstract)
- [9] Ishikawa S, Hoshiba S, Hinata T, et al. Evaluation of a biogas plant from life cycle assessment (LCA)[J]. International Congress Series, 2006, 1293: 230—233.
- [10] Francesco Cherubini, Silvia Bargigli, Sergio Ulgiati. Life cycle assessment (LCA) of waste management strategies: Landfilling, sorting plant and incineration[J]. Energy, 2009, 34(12): 2116—2123.
- [11] ISO 14040: 2006, Environmental Management - Life Cycle Assessment - Principles and Framework[S].
- [12] 龚志起, 张智慧. 水泥生命周期中物化环境状况的研究[J]. 土木工程学报, 2004, 37(5): 86—91.
- Gong Zhiqi, Zhang Zhihui. A study on embodied environmental profile during the life cycle of cement[J]. China Civil Engineering Journal, 2004, 37(5): 86—91. (in Chinese with English abstract)
- [13] 罗楠. 中国烧制砖制造过程环境负荷研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2009.
- Luo Nan. Research on Environmental Impact of Sintered Brick Production in China[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2009. (in Chinese with English abstract)
- [14] Colin Jury, Enrico Benetto, Daniel Koster, et al. Life Cycle Assessment of biogas production by monofermentation of energy crops and injection into the natural gas grid[J]. Biomass and Bioenergy, 2010, 34(1): 54—66.
- [15] 曹国良, 张小曳, 王丹, 等. 秸秆露天焚烧排放的 TSP 等污染物清单[J]. 农业环境科学学报. 2005, 24(4): 800—804.
- Cao Guoliang, Zhang Xiaoye, Wang Dan, et al. Inventory of emissions of pollutants from open burning crop residue[J]. Journal of Agro-environment Science, 2005, 24(4): 800—804. (in Chinese with English abstract)
- [16] 张全国. 沼气技术及其应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
- [17] 刘东, 马林, 王方浩, 等. 河北省猪粪尿氮产生量及氨挥发量的研究[J]. 河北农业大学学报, 2007, 30(6): 5—10.
- Liu Dong, Ma Lin, Wang Fanghao, et al. Rate of nitrogen excretion and ammonia emission from pig production: a case study of Hebei province[J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2007, 30(6): 5—10. (in Chinese with English abstract)
- [18] 狄向华, 聂祚仁, 左铁镛. 中国火力发电燃料消耗的生命周期排放清单[J]. 中国环境科学, 2005, 25(5): 632—635.
- Di Xianghua, Nie Zuoren, Zuo Tiejong. Life cycle emission inventories for the fuels consumed by thermal power in China [J]. China Environmental Science, 2005, 25(5): 632—635. (in Chinese with English abstract)
- [19] 苏洁. 中国生物质乙醇燃料生命周期分析[D]. 上海: 上海交通大学, 2005.
- Su Jie. Life-cycle Analysis of Biomass Ethanol Fuel in China [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2005. (in Chinese with English abstract)
- [20] 杨建新. 产品生命周期评价方法及应用[M]. 北京: 气象出版社, 2002.
- [21] Brentup F, Küsters J, Lammel J. Environmental impact assessment of agricultural production systems using the life cycle assessment (LCA) methodology I. Theoretical concept of a LCA method tailored to crop production[J]. European Journal of Agronomy, 2004, 20(3): 247—264.
- [22] Huijbregts M A J, Thissen U, Guinée J B, et al. Priority assessment of toxic substances in life cycle assessment. Part I: Calculation of toxicity potentials for 181 substances with the nested multi-media fate, exposure and effects model USESLCA[J]. Chemosphere, 2000, 41(4): 541—573.
- [23] Sleeswijk A W, Van Oers L, Guinée J B, et al. Normalization in product life cycle assessment: An LCA of the global and European economic systems in the year 2000[J]. Science of the Total Environment, 2008, 390(1): 227—240.

## Life cycle energy conservation and emissions reduction benefits of rural household biogas project

Wang Mingxin<sup>1</sup>, Xia Xunfeng<sup>2</sup>, Chai Yuhong<sup>1</sup>, Liu Jianguo<sup>1</sup>

(1.College of Environmental and Safety Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China;

2.China Environmental Science Research Institute, Beijing 100012, China)

**Abstract:** The calculation and evaluation of energy conservation and emissions reduction benefits of the rural household biogas project and its up stream and down stream sectors can provide decision making basis for whole process environmental management of the rural household biogas project and rural renewable energy development. In this paper, life cycle assessment method was established with inventory of a typical 8 m<sup>3</sup> rural household biogas project and then the net energy conservation and emission reduction benefits were calculated and evaluated. The results showed that the life cycle reduction potentials of eutrophication, acidification, energy depletion, greenhouse effect, human toxicity and photochemical oxidation impacts of a typical 8 m<sup>3</sup> household biogas project accounted for 84.84%, 54.37%, 39.16%, 27.67%, 19.35% and 5.55% of the relevant environmental impact potential per capita in the world in 2000, showing a significant net energy conservation and emissions reduction benefits. Therefore, the development of rural household biogas project plays a significant role in alleviating the fossil energy shortage situation and controlling the agricultural non-point source pollution in rural areas.

**Key words:** energy conservation, emission control, life cycle, household biogas project, inventory analysis