

张丛光, 邱凌, 王飞, 等. 基于 LCA 的黄土高原沼气生态果园环境影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(4): 833–840.

ZHANG Cong-guang, QIU Ling, WANG Fei, et al. Environmental effects of the Loess Plateau biogas eco-orchard based on life cycle assessment (LCA)[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(4): 833–840.

基于 LCA 的黄土高原沼气生态果园环境影响研究

张丛光^{1,2}, 邱凌^{1,2*}, 王飞¹, 邓媛方¹, 韩建聪¹

(1.西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西 杨凌 712100; 2.农业部农村可再生能源开发利用西部科学观测实验站, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 为了综合评估黄土高原沼气生态果园的生命周期环境影响, 基于陕北黄土高原地区实际工程案例, 利用生命周期评价(LCA)方法计算出黄土高原沼气生态果园系统的能源消耗和污染物排放潜值, 并分析了系统在不同功能阶段的环境和经济表现。结果表明: 在系统完整生命周期中, 环境排放发生在建设阶段和果园生产阶段, 沼气利用阶段则创造了显著的生态减排效益, 基础设施、田间管理、果园建设及生产是带来环境负荷的主要因素, 其中田间管理过程对温室效应、环境酸化、富营养化及能源耗竭潜势分别造成高达 83%、55%、43% 及 59% 的排放量, 果园生产过程也导致了较高比率的富营养化(40%)、人体毒性(41%)、光化学氧化(66%)及能源耗竭(26%)问题; 沼肥还田、沼气发酵及由沼气利用引起的燃煤替代是节能减排的贡献因素, 系统的温室效应、环境酸化及富营养化等环境潜值均为负值, 相比单一的苹果种植模式具有更强的环境可持续性。此外, 利用开发的综合经济效益指标进行核算得到系统的集合经济效益(IBE)为\$2 544.25, 在建设期、生产期和利用期分别为\$-255.11、\$2 447.67 及\$351.47, 表明系统前期处于亏损状态, 但后期经济效益可观, 具有整体上的生命周期经济可持续性。

关键词: 生态果园; 生命周期评价; 环境排放; 沼气发酵

中图分类号: S181 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2018)04-0833-08 doi:10.11654/jaes.2017-1641

Environmental effects of the Loess Plateau biogas eco-orchard based on life cycle assessment(LCA)

ZHANG Cong-guang^{1,2}, QIU Ling^{1,2*}, WANG Fei¹, DENG Yuan-fang¹, HAN Jian-cong¹

(1.College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2.Western Scientific Observation and Experiment Station of Development and Utilization of Rural Renewable Energy, Ministry of Agriculture, Yangling 712100, China)

Abstract: This study, based on the demonstration project on biogas-linked ecological orchard system in Loess Plateau district, north of Shaanxi Province, calculated the energy consumption and pollutant discharge by this project in the Loess Plateau district. It used the life cycle assessment(LCA) method and analyzed the environmental effects during the different life cycles of the system. The results showed that emissions happened during the construction and production phase, whereas the utilization period created favorable ecological benefits; e.g., biogas can be used as renewable energy that can substitute a certain amount of traditional fuels, such as coal and electricity. Infrastructure construction, field management, orchard construction, and production lead to heavy environmental load. Particularly, field management process constituted 83%, 55%, 43%, and 59% of the global warming, acidification, eutrophication, and energy depletion potentials, respectively. The production process also caused serious environmental problems like eutrophication(40%), human toxicity(41%), photochemical oxidation(66%), and energy depletion(26%). Biogas slurry and residue utilization, biogas fermentation, and biogas combustion were the main factors determining energy saving and emission reduction of the studied system. Moreover, global warming, acidification, and eutrophication potential of the system were negative, which showed a stronger sustainability than that of the single apple-planting model. Moreover,

收稿日期: 2017-11-29 录用日期: 2018-01-02

作者简介: 张丛光(1992—), 男, 山东东平人, 博士研究生, 主要从事生物能源工程技术研究。 E-mail: qaulxj@hotmail.com

*通信作者: 邱凌 E-mail: xbgzzh@163.com

基金项目: 农业部农业生态环境财政专项(2110402-7); 国家自然科学基金项目(51576167); 陕西省农业专项(2017-136)

Project supported: Special Financial Program for Agricultural Eco-environment of Ministry of Agriculture(2110402-7); The National Natural Science Foundation of China(51576167); Special Agricultural Program of Shaanxi Province(2017-136)

economic analysis showed that the integrated economic benefit (IBE) was \$2 544.25, and the value of IBE in the construction phase, production phase, and utilization phase were -\$255.11, \$2 447.67, and \$351.47, respectively, which showed a strong economic sustainability of the integrated system.

Keywords: ecological orchard; life cycle assessment(LCA); environmental emissions; biogas fermentation

黄土高原沼气生态果园扎根于我国西北干旱半干旱地区,是一种典型的沼气循环农业模式,它通过沼气发酵技术处理大量的农业有机副产物(畜禽粪尿、农作物秸秆、农产品加工副产物等)^[1],将种植业、养殖业和加工业紧密结合起来,实现了农业副产物的循环利用,有效地减少了农业生产的环境污染,多年来为我国在生态农业领域的清洁生产实践提供了宝贵的素材^[2]。对于各类沼气系统的环境影响研究,目前国内外的报道已相对丰富^[3-7],但往往局限于评估单一的沼气生产模块,而以沼气为纽带的生态农业系统强调完整性和可持续性,因此全面系统地分析沼气生态农业模式具有重要的实践意义。生命周期评价(Life cycle assessment, LCA)是一种广为应用的环境影响评估方法,用于分析产品、工艺或活动从原材料获取到产品生产、贮存、运输、使用、维护、回收和最终处置整个生命周期阶段有关的环境负荷,近年来国内外学者已将 LCA 方法广泛应用于各类产品和系统的环境、能源评估^[8]。

LCA 作为一种产品环境特征分析和决策支持工具已得到较广泛的应用^[9-13],如 Canals 等^[10]于 2006 年对新西兰的五类商用苹果种植园进行了全面的环境排放及能耗分析, Mouron 等^[9]研究了管理方式对瑞士典型苹果生产系统的环境影响。针对苹果种植园的生命周期评价有大量报道^[14-17],包括以生长阶段、果树品种和密集程度等为对象的评估案例,然而此类研究多数集中于单一苹果种植园的环境影响评价,而针对典型的以沼气为纽带的生态果园模式却鲜有报道。为了科学评估黄土高原沼气生态果园模式的环境友好及可持续发展能力,本文基于陕北黄土高原地区实际工程案例,应用 LCA 方法,结合技术经济分析(Techno-economic analysis, TEA) 综合评估该模式的环境与经济可持续性发展性能,以期为“果-沼-畜”“猪-沼-粮”等生态农业模式的优化研究与应用推广提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 研究目标与系统边界

LCA 通过对收集到的投入产出排放数据进行分

析,实现对某一系统的环境表现综合评估,通常以 ISO 14040 作为标准评价框架^[18],该标准提供了 LCA 的原则与程序。本研究通过计算黄土高原沼气生态果园系统全生命周期的环境负荷,确定主要的环境排放因子,采用 Ecoinvent 3.0 数据库^[19]及中国本土基础数据库(CLCD)^[20],对各个时期的环境影响进行对比分析,研究系统的内部协作规律及其运行给环境带来的各类影响,促进以沼气为纽带的农业复合系统良性发展。

本文所研究的黄土高原沼气生态果园系统,位于延川县文安驿镇白家塬村,该系统利用沼气的纽带作用,将养猪和苹果种植有机联结起来,将养殖产生的畜禽粪便通过沼气发酵的方式转化为有机肥料,再返回到果园进行利用,以实现物质和能量在系统内的合理流动。据调查,该系统以一个面积 0.33 hm² 的苹果种植园为基础,就近配套日产沼气体积 8 m³ 的沼气池,一座 12 m² 的太阳能暖圈,其中该暖圈包括年出栏 6 头生猪的养殖圈舍,一座 5 m³ 的卫生户厕及一间沼气灶房,附近还配套有集雨水窖、气肥储存设施、沼液滴灌装置等附属工程。为便于按照时间尺度的生命周期分析,将系统分为建设阶段、生产阶段和利用阶段。建设初期,即果树未挂果阶段和沼气池、养殖系统建设期,认为系统无任何农产品产出;生产阶段为沼气系统正常运转及果园正常挂果时期,一般为果园开发第 4~5 年;利用阶段即系统所产生的沼气、沼肥等产物的利用时期以及由此带来的能源替代时期。需要说明的是,化肥、农药、农具等系统原材料的生产过程与使用过程保持同步计算,即按照 3 个不同的阶段进行划分,其环境污染物排放量根据在每一阶段的使用量独立核算。

图 1 是本研究的系统边界示意图,即以建设阶段、生产阶段和利用阶段为界限进行划分,从原料、农资的生产到生态果园系统的建设(包括沼气池、太阳能暖圈及果园基础设施),再到沼气池的运行、苹果生产,最后到沼气、沼肥等系统产物的利用,以及由此过程引起的能源替代。环境排放因子根据各自的功能划分为基础设施(IC)、田间管理(FM)、果园建设(OC)、沼气发酵(AF)、果园生产(OP)、沼气利用(BU)、燃煤

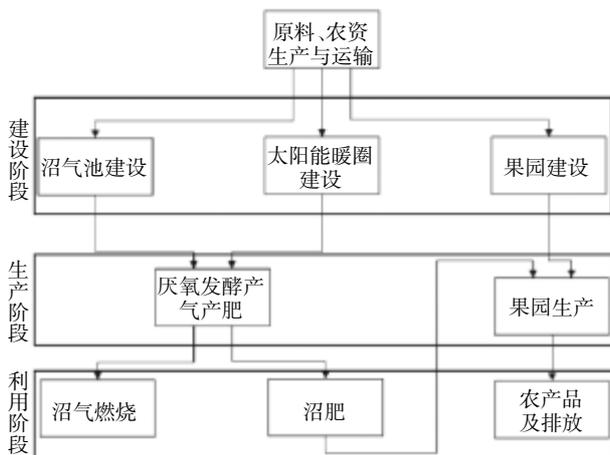


图1 LCA系统边界示意图

Figure 1 The scope of the LCA system

替代(CS)及沼肥利用(BF) 8个类别。为便于对比分析,本研究将黄土高原沼气生态果园系统正常运行1年作为功能单位。

1.2 研究区概况和基本假设

本研究的黄土高原沼气生态果园系统,其研究区位于陕西省延川县(35°15'N, 109°57'E),该区域属于典型的黄土高原沟壑区,该地区平均海拔为721 m,年平均气温11.5℃,年降雨量553 mm,昼夜温差大,是国家级生态示范县和无公害水果生产基地县,盛产苹果、奶畜、红薯、生猪等农产品。

清单分析是LCA的关键步骤,本研究采用由Cerutti等^[14]提出的多年生植物通用的影响分类和清单计算方法,并考虑到LCA对全面性和可靠性的要求,根据研究区的实际情况,需在执行LCA之前对生态果园系统作必要的假设和限定。由于所涉及到的系统边界相对较广,且农业LCA有其固有的不平衡性(如不同农户间对劳动力、运输和生产资料的需求量等),本研究作如下基本假设:(1)根据实地调研及农户问卷调查,黄土高原沼气生态果园系统以15年为

平均寿命;(2)研究区内各农户之间化肥、农药及农具等的年均使用量相同,且因缺乏可靠的历史监测数据,暂不考虑重金属排放;(3)沼气燃烧及沼肥利用中,除本文所进行的核算以外无其他泄露或浪费,且产物就近利用,故不考虑运输问题;(4)研究区内普遍使用沼肥,且沼肥和化肥的施肥基于测土配肥原则,总量上保持历年一致。

在计算黄土高原生态果园系统环境影响潜值时,本文根据CML 2001评价规则^[21]选取了常用的环境酸化(AP)、富营养化(EP)、光化学氧化(POCP)、人体毒性(HTP)、温室效应(GWP)和能源耗竭(FDP) 6大环境效应,分别以SO₂、PO₄³⁻、C₂H₄、1,4-DCB、CO₂和能量作为参照排放物质,不同排放物质间的转换系数可参照文献^[22]。为便于不同苹果生产模式的标准化对比,本文采用2000年世界人均环境排放量作为基准值^[21],能源耗竭、温室效应、环境酸化、富营养化、光化学氧化和人体毒性的标准环境影响潜值分别为56 877.88 MJ、7 192.98 kg CO₂-eq、56.14 kg SO₂-eq、10.70 kg PO₄³⁻-eq、34.72 kg C₂H₄-eq和20.14 kg 1,4-DCB-eq。

1.3 LCA清单分析

黄土高原沼气生态果园系统建设阶段涉及沼气池及附属养殖工程的建设、果树培育营养输入、病虫害管理以及整地、运输等田间作业,具体投入则包括水泥、黏土砖、钢筋、肥料、农药、电力与柴油等原材料,除此之外系统还包括沙子、石块及部分薄膜、导气管等,但由于这些原材料主要采用人工运输且调查样本间农户用量不均,故不再逐一核算。不同材料的输入量与环境排放可见表1,每种材料对CO₂、N₂O、SO₂等排放物的当量系数均可参考对应的来源文献。系统投入产出清单的确定,是通过实地入户调查和查阅报表年鉴的方式获取原始数据,向农户、村委工作人员填写清单调查问卷,通过对获取的数据进行汇总、分析并以户为单位整理核算,得到最终的系统基本情况、

表1 系统建设阶段清单数据

Table 1 Inventory data of the construction period

项目	基准情景数据	主要环境排放物质	文献来源
水泥	425# 硅酸盐水泥, 80 kg	CO ₂ 、CO、SO ₂ 、NO _x 、COD	[23]
黏土砖	强度为 MU7.5 或 MU10, 70 标块	CO ₂ 、CO、SO ₂ 、NO _x 、PM ₁₀	[24]
钢筋	I 级强度, 0.67 kg	CO ₂ 、CO、SO ₂ 、CH ₄ 、NO _x	[25]
电力	47.02 kWh	CO ₂ 、CH ₄ 、NO ₂ 、PM ₁₀	[26]
除草剂	草甘膦等, 0.75 kg	COD、NH ₃ 、Cl ₂ 、CH ₃ Cl	[11]
杀虫剂	氯氰菊酯等, 0.049 kg	COD、N(CH ₂ COOH) ₃ 、C ₂ H ₅ ClO ₂	[11]
化肥	氮肥 50 kg、磷肥 50 kg、钾肥 25 kg	CO ₂ 、CO、SO ₂ 、CH ₄ 、NH ₃ 、NO _x 、VOC	[27]
柴油	农用旋耕机整地 3 次, 27 L	CO、SO ₂ 、NO _x 、VOC、PM ₁₀ 、SO _x	[28]

畜禽养殖、沼气池和农资等的投入产出清单结果。此外,系统运行期间的气象数据通过当地气象局、农业局等部门获得,利用 Excel 等软件进行数据的核算及图表的绘制。

表 2 为生态果园系统生产阶段的清单数据,包含田间管理、果园生产和沼气发酵等引起的环境排放。系统的生产阶段需维持果树的营养与农药供应,还需保证沼气池及其附属养殖工程的正常运行,因此化肥、农药、发酵原料、农具及柴油是主要的环境排放来源,其中柴油主要用于每年 2 次的拖拉机犁地和各类农资的运输,旋地作业以 74 kW 的东方红 904 型拖拉机为标准计算,耗油量为 27 L·hm⁻²;农具用于蔬果、修剪等田间管理工作。

黄土高原沼气生态果园的利用阶段是主要的减排效益来源,沼气的利用和沼肥的还田,均可替代或避免一部分能源的投入。黄土高原沼气生态果园系统中,沼气池年均产沼渣 4.9 t、沼液 11 t,相当于氮肥 59.2 kg、磷肥 10.16 kg、钾肥 43.39 kg,其元素损失率及排放因子参考文献[29]。根据能源热值及实地调研数据,系统运行一年生产的沼气体积为 390 m³,其燃烧利用将替代 278.46 kg 标准煤。

1.4 生命周期经济分析

根据对系统经济核算可行性的分析,本研究仅考虑将温室效应与能源耗竭潜值引入到经济效益评价中。引入净能源收益(NEB)与净能源产出率(NER)两个指标作为综合能源效益表现,其定义见方程式(1)和(2)。

$$NEB = E_o - E_i \quad (1)$$

$$NER = E_o / E_i \quad (2)$$

式中: E_i 表示总能量输入; E_o 表示总能量输出。

为了权衡该系统的整体效益,本研究引入了一个新的指标——集合经济效益(IBE),该指标融合了系统在能源、环境与经济方面的综合表现,其定义为:

$$IBE = \mu \cdot NEB - \vartheta \cdot GWP + CB \quad (3)$$

式中: μ 表示由能源到货币的转换系数,净能源产量是根据等量经济价值的煤炭替代计算得到的,其市场价采用 2011 年中国煤炭市场价格($\$0.06 \text{ kg}^{-1}$ 或 $\$2.30 \times 10^{-3} \text{ MJ}^{-1}$);GMP 表示温室气体减排量,其经济效益根据碳交易价格进行核算,即采用联合国气候变化框架公约 CDM 项目数据库制定的标准价格($\$1.27 \times 10^{-2} \text{ kg}^{-1}$),记为 ϑ ;CB 表示货币收益。

系统的可持续性要求经济、环境和社会的全面可持续,因此综合可持续评价应考虑将它们结合,故将综合可持续指标定义为如下方程:

$$ISI = IBE / EMI \quad (4)$$

式中:IBE 是集合经济指标;EMI 是环境排放指数。

2 结果与讨论

2.1 不同阶段的环境影响潜势

图 2 显示了黄土高原生态果园系统在建设期、生产期和利用期 3 个不同阶段的环境排放情况。根据计算结果可知,建设期与生产期的能源耗竭潜值分别是 4608 MJ 和 8226 MJ(图 2a),主要耗能项为田间管理和果园生产,这表明能源投入侧重于果园而非沼气环节,利用期的能耗是 -8425 MJ,表明这一阶段为系统创造了可观的节能减排效益。对于温室效应(图 2b),建设期、生产期和利用期的环境排放潜值分别为 585、716、-1800 kg CO₂-eq,主要排放仍来自田间管理,沼气池建设及沼气燃烧也略有影响。根据图 2c 和图 2d 中的数据,可以发现各阶段对环境酸化与富营养化的影响潜势类似,两者的环境减排效益均来源于生产期和利用期,且以沼气发酵为主要减排项。同样,系统对光化学氧化与人体毒性的影响潜势也具有相似性(图 2e 和图 2f),其中光化学氧化在各阶段的影响潜值分别为 0.23、1.41、-0.26 kg C₂H₄-eq,果园生产过程造成的光化学氧化影响最为严重;人体毒性影响潜值在 3 个阶段分别为 0.28、0.83、-1.58 kg 1,4-DCB-eq,田间管理和果园生产为主要排放来源。

表 2 系统生产阶段清单数据

Table 2 Inventory data of the production period

项目	基准情景数据	主要环境排放物质	文献来源
化肥	施用氮肥 95.2 kg、磷肥 90.65 kg、钾肥 7.91 kg	CO ₂ 、CO、SO ₂ 、CH ₄ 、NH ₃ 、NO _x 、VOC	[26]
杀虫剂	氯氰菊酯, 0.075 kg	COD、N(CH ₂ COOH) ₃ 、C ₂ H ₅ ClO ₂	[11]
除草剂	草甘膦, 0.45 kg	COD、NH ₃ 、Cl ₂ 、CH ₃ Cl	[11]
发酵原料	避免猪粪直接堆积, 干物质 1460 kg	CH ₄ 、NH ₃ 、TN、TP、COD	[28]
柴油	犁地及肥料运输, 73 L	CO、SO ₂ 、NO _x 、VOC、PM ₁₀ 、SO _x	[27]
农具	炼制钢铁, 4.77 kg	CO ₂ 、CO、SO ₂ 、CH ₄ 、NO _x	[24]

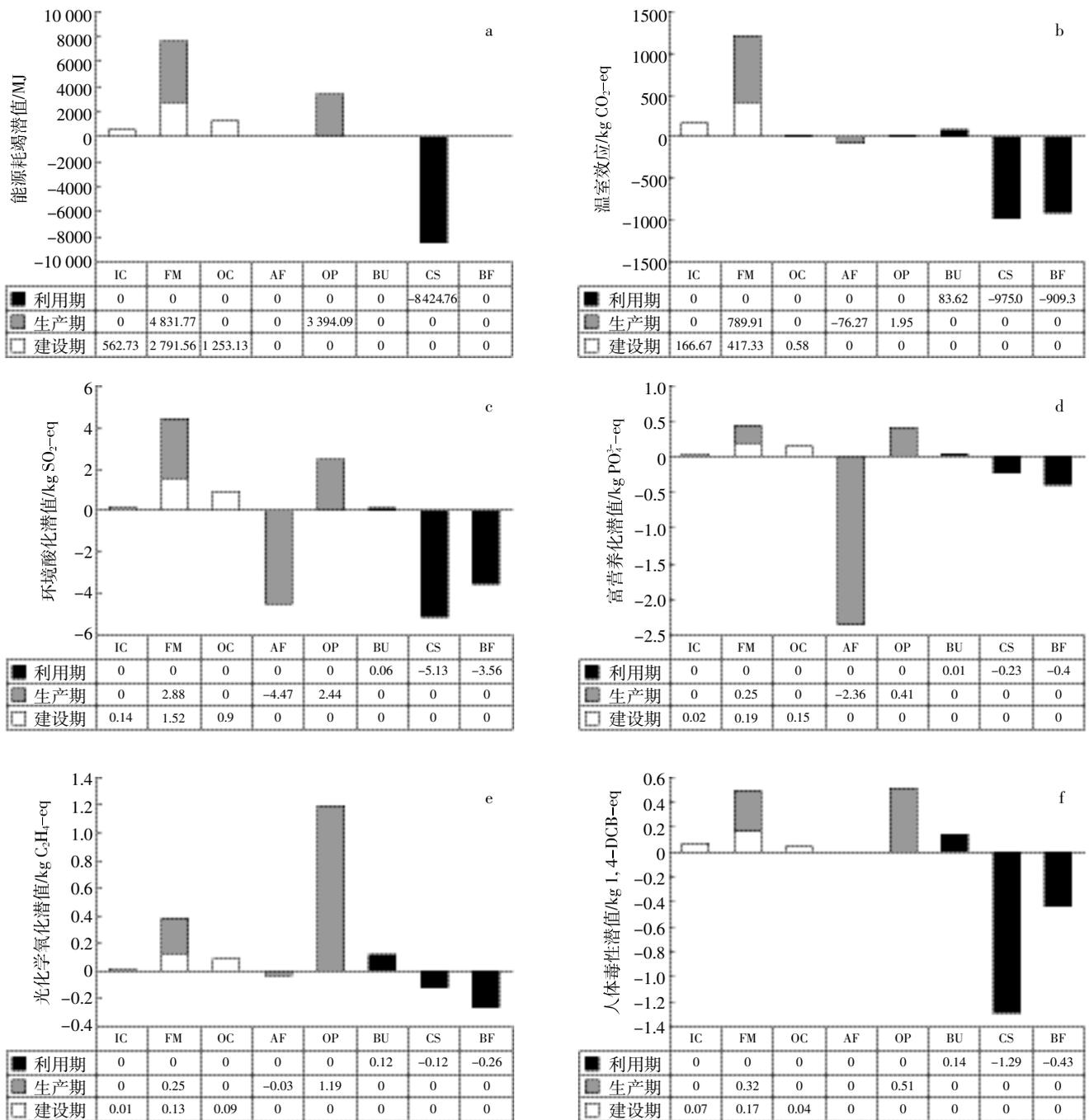


图2 不同功能阶段的环境效应潜值

Figure 2 Environmental impact potential of the different functional period

2.2 系统环境排放来源分析

表3揭示了各类环境影响的主要来源,本研究将黄土高原沼气生态果园系统的主要排放过程共划分为8项。六大环境效应中,温室效应、环境酸化、富营养化的生命周期影响潜值为负,光化学氧化、人体毒性和能源耗竭影响潜值为正,前者表明该系统的运行对环境产生了良好的减排效益,而后者对环境造成了一定的消极影响。根据表中的数据,可以发现沼气发

酵、燃煤替代与沼肥利用对6类环境效应的潜值均为非负数,是主要的环境减排效益来源。

在各类环境排放中,田间管理是造成GWP、AP、EP及FDP潜势的最显著过程,其造成4种环境潜势总排放量的比例分别达到83%、55%、43%及59%,而化肥和农药的生产与使用是田间管理过程的主要内容,因此大力推行“有机肥替代化肥”“果-沼-畜循环发展”“两减一增”等政策举措,逐步实现化肥、农药的

表3 生命周期全过程环境效应潜值

Table 3 Potential environmental impacts of the life cycle processes

系统过程	GWP/kg CO ₂ -eq	AP/kg SO ₂ -eq	EP/kg PO ₄ ³⁻ -eq	POCP/kg C ₂ H ₄ -eq	HTP/kg 1,4-DCB-eq	FDP/MJ
基础设施	166.67	0.14	0.02	0.01	0.07	562.73
田间管理	1 207.29	4.4	0.44	0.38	0.49	7 623.33
果园建设	0.58	0.9	0.15	0.09	0.04	1 253.13
沼气发酵	-76.27	-4.47	-2.36	-0.03	0	0
果园生产	1.95	2.44	0.41	1.19	0.51	3 394.09
沼气利用	83.62	0.06	0.01	0.12	0.14	0
燃煤替代	-975.03	-5.13	-0.23	-0.12	-1.29	-8 424.76
沼肥利用	-909.35	-3.56	-0.40	-0.26	-0.43	0
合计	-501.75	-5.22	-1.96	1.38	0.85	4 408.52

减量化意义重大。果园生产主要包括肥料运输、旋地整地及农具生产,31%的环境酸化效应由此过程产生,同时还造成了严重的富营养化(40%)、光化学氧化(66%)、人体毒性(41%)及能源耗竭(26%)等环境效应。

对于环境减排效益,由沼气燃烧带来的燃煤替代与沼肥还田分别占温室效应潜值的50%与46%,占光化学氧化潜值的29%与63%,是主要的环境效益来源。燃煤替代、沼气发酵及沼肥利用三者对环境酸化的贡献率基本相当,而沼气发酵对富营养化潜势的贡献率高达79%;燃煤替代对人体毒性潜势的贡献率达75%,并贡献了全部的能量减排效益。由此可见,沼气燃烧及其引起的燃煤替代,对整个生态果园系统的环境减排具有不可替代的作用。

2.3 技术经济评价

如表4所示,系统在不同阶段的经济表现差异较大,其中经济效益主要集中于生产期和利用期,两个阶段的货币收益分别为\$2 449.53和\$348.66,生产期的收益最高,这是由于该阶段的种植养殖产物(苹果、生猪等)具有较高的价值量。建设阶段与生产阶段的NEB均为负值,表明这一时期相比利用期的能源输入较大,GWP具有类似特征,但系统在整个生命周期的NEB与GWP分别为-297.06 MJ与-33.73 kg CO₂-eq,说明系统整体上消耗能源但具有温室气体减排的效能。系统的集合经济效益IBE为\$2 544.25,在建设

期、生产期和利用期分别为\$-255.11,\$2 447.67及\$351.47,表明系统在生产期和利用期的集合经济效益>0,这与系统在货币收益方面的表现一致,具有较强的推广示范性。

2.4 综合可持续性能分析

为了对比黄土高原生态果园模式与普通苹果种植模式之间的差异,本文核算了两种模式的环境排放影响潜值及环境排放指数(表5)。相关数据表明,单一苹果种植系统与生态果园系统具有明显的不同,单一苹果种植系统对环境的排放潜值均为正值,而生态果园系统的GWP、AP与EP为负值,值得一提的是,同等果园规模下两种苹果生产方式对GWP效应的排放量与减排量相当,均占世界人均GWP排放量的7%左右。除环境减排效应外,生态果园系统POCP和FDP效应的环境排放指数也明显低于单一苹果种植系统,而HTP指数(4%)略高于普通苹果种植系统(1%),这可能是由于沼气燃烧和沼肥还田导致了更多NO₂的排放。沼气作为联结种植业与养殖业的纽带,其引入能够为整个复合系统创造显著的环境减排效益,应在不断探索中加强系统优化和生产推广。

黄土高原沼气生态果园系统的经济表现是被当地居民广泛关注的,其投资主要体现在基础设施、田间管理、沼气系统等方面,其经济效益则体现在沼气、沼肥的利用及由此带来的各类能源物资替代。基于方程(4)的计算可知,本研究中的黄土高原沼气生态果

表4 系统生命周期内集合经济效益核算表

Table 4 Integrated economic benefit of the life cycle processes

阶段	投入	产出	CB	NEB/MJ	GWP/kg CO ₂ -eq	IBE
建设期	\$274.79	\$20.88	\$-253.91	-307.13	38.97	\$-255.11
生产期	\$556.38	\$3 005.91	\$2 449.53	-548.33	47.71	\$2 447.67
利用期	\$56.56	\$405.22	\$348.66	561.60	-120.05	\$351.47
合计	\$887.73	\$3 432.01	\$2 544.20	-297.06	-33.73	\$2 544.25

表5 两类苹果生产模式的环境影响潜值和环境排放指数

Table 5 Potential environment impacts and environmental emissions index of the two apple production modes

项目	沼气生态果园		普通苹果种植		标准潜值 ^[30]
	环境影响潜值	环境排放指数	环境影响潜值	环境排放指数	
GWP	-501.75 kg CO ₂ -eq	-0.07	505.75 kg CO ₂ -eq	0.07	7 192.98 kg CO ₂ -eq
AP	-5.22 kg SO ₂ -eq	-0.09	11.60 kg SO ₂ -eq	0.21	56.14 kg SO ₂ -eq
EP	-1.96 kg PO ₄ ³⁻ -eq	-0.18	2.21 kg PO ₄ ³⁻ -eq	0.21	10.70 kg PO ₄ ³⁻ -eq
POCP	1.38 kg C ₂ H ₄ -eq	0.04	4.61 kg C ₂ H ₄ -eq	0.13	34.72 kg C ₂ H ₄ -eq
HTP	0.85 kg 1,4-DCB-eq	0.04	0.26 kg 1,4-DCB-eq	0.01	20.14 kg 1,4-DCB-eq
FDP	4 408.52 MJ	0.08	8679 MJ	0.15	56 877.88 MJ

注:传统果园同样以 0.33 hm² 果园运行 1 年作为对照,其苹果产量约为 7.89 t^[11];环境排放指数=系统的环境影响潜值/标准环境影响潜值,比值越高,表示环境影响效应越严重^[9]。

园系统 ISI 绝对值为 1.41×10^5 ,且根据方程(2)可以得出系统的净能量产出率高达 65.65%,因此认为系统具有较强的可持续发展性能,且经济效益越高,环境排放指数越小,系统的可持续性越强。

3 结论

(1)建设期、生产期与利用期的能源耗竭潜值分别是 4608、8226 MJ 和-8425 MJ,系统主要能耗集中于田间管理和果园生产等过程,且侧重于果园子系统而非沼气子系统,利用期避免了大量的能源投入,为生态果园系统创造了良好的节能效益。

(2)生态果园系统的 6 种环境效应中,温室效应、环境酸化、富营养化的生命周期影响潜值为负,光化学氧化、人体毒性和能源耗竭影响潜值为正,沼气发酵、燃煤替代与沼肥利用对 6 类环境效应的潜值均为非负值,是主要的减排效益来源。

(3)系统田间管理包括化肥、农药的生产与施用过程,是温室效应、环境酸化、富营养化和能源耗竭 4 类效应的主要排放来源,因此大力推行“有机肥替代化肥”“两减一增”等措施将有效缓解农业生态系统的环境问题。生态果园的生产过程主要包括肥料运输、旋地整地及农具生产,31%的环境酸化效应由此导致,且该过程还造成了严重的富营养化(40%)、光化学氧化(66%)、人体毒性(41%)及能源耗竭(26%)等问题。

(4)根据标准化分析结果,单一苹果种植系统的全部环境排放潜值均为正值,而生态果园系统的温室效应、环境酸化和富营养化的环境影响潜值为负值。沼气燃烧及其引起的燃煤替代,对整个生态果园系统的环境减排具有不可替代的作用,除环境减排效益外,延川县黄土高原沼气生态果园系统的光化学氧化和能源耗竭效应也明显低于单一苹果种植系统,表明

生态果园系统具有更优的环境可持续发展能力。

(5)系统的集合经济效益 IBE 为\$2 544.25,在建设期、生产期和利用期分别为\$-255.11、\$2 447.67 及 \$351.47,且其综合可持续指标 ISI 的绝对值为 1.41×10^5 ,表明系统具有整体上的经济可持续性,今后应更加注重集环境、社会与经济于一体的综合评价指标研究。

参考文献:

- [1] 李荣标,吴发启,王红红,等.黄土高原南部丘陵沟壑区果畜沼复合经营模式生态经济效益分析[J].水土保持通报,2008,28(3):178-181.
LI Rong-biao, WU Fa-qi, WANG Hong-hong, et al. Ecological economic benefit evaluation of fruit-pig-methane compound management mode in Southern Loess Hilly Gully Region[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2008, 28(3): 178-181.
- [2] 钟珍梅,黄勤楼,翁伯琦,等.以沼气为纽带的种养结合循环农业系统能值分析[J].农业工程学报,2012,28(14):196-200.
ZHONG Zhen-mei, HUANG Qin-lou, WENG Bo-qi, et al. Energy analysis on planting-breeding circulating agriculture ecosystem linked by biogas[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(14): 196-200.
- [3] 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 Ming-xin, XIA Xun-feng, CHAI Yu-hong, et al. Life cycle energy conservation and emissions reduction benefits of rural household biogas project[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(11): 245-250.
- [4] 陈绍晴,宋丹,杨谨,等.户用沼气模式生命周期减排清单与环境效益分析[J].中国人口·资源与环境,2012,22(8):76-83.
CHEN Shao-qing, SONG Dan, YANG Jin, et al. Life-cycle emission mitigation inventory and environmental benefit of household biogas mode[J]. *China Population Resources and Environment*, 2012, 22(8): 76-83.
- [5] Hou J, Zhang W F, Wang P, et al. Greenhouse gas mitigation of rural household biogas systems in China: A life cycle assessment[J]. *Energies*, 2017, 10(2): 239-239.

- [6] 张艳丽, 任昌山, 王爱华, 等. 基于 LCA 原理的国内典型沼气工程能效和经济评价[J]. 可再生能源, 2011, 29(2): 119-124.
ZHANG Yan-li, REN Chang-shan, WANG Ai-hua, et al. Energy efficiency and economic assessment based on life-cycle methodology for China's large-medium biogas project[J]. *Renewable Energy*, 2011, 29(2): 119-124.
- [7] 刘畅, 涂国平. 农村沼气工程能源消耗及环境影响的 LCA 分析[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2017, 42(6): 47-53.
LIU Chang, TU Guo-ping. On LCA analysis of environmental impact and energy consumption of biogas project in rural areas of China[J]. *Journal of Southwest China Normal University(Natural Science Edition)*, 2017, 42(6): 47-53.
- [8] 王效琴, 梁东丽, 王旭东, 等. 运用生命周期评价方法评估奶牛养殖系统温室气体排放量[J]. 农业工程学报, 2012, 28(13): 179-184.
WANG Xiao-qin, LIANG Dong-li, WANG Xu-dong, et al. Estimation of greenhouse gas emissions from dairy farming systems based on LCA[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(13): 179-184.
- [9] Mouron P, Nemecek T, Scholz R W, et al. Management influence on environmental impacts in an apple production system on Swiss fruit farms: Combining life cycle assessment with statistical risk assessment[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2006, 114(2/3/4): 311-322.
- [10] Canals L M I, Burnip G M, Cowell S J. Evaluation of the environmental impacts of apple production using life cycle assessment (LCA): Case study in New Zealand[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2006, 114(2/3/4): 226-238.
- [11] Keyes S, Tyedmers P, Beazley K. Evaluating the environmental impacts of conventional and organic apple production in Nova Scotia, Canada, through life cycle assessment[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 104: 40-51.
- [12] Longo S, Mistretta M, Guarino F, et al. Life cycle assessment of organic and conventional apple supply chains in the North of Italy[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 140: 654-663.
- [13] Blanke M M. Life cycle assessment(LCA) and food miles: An energy balance for fruit imports versus home-grown apples[J]. *Acta Horticulturae*, 2008, 78(767): 59-64.
- [14] Cerutti A K, Bruun S, Donno D, et al. Environmental sustainability of traditional foods: The case of ancient apple cultivars in Northern Italy assessed by multifunctional LCA[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2013, 52(4): 245-252.
- [15] Alaphilippe A, Boissy J, Simon S, et al. Environmental impact of intensive versus semi-extensive apple orchards: Use of a specific methodological framework for life cycle assessments(LCA) in perennial crops[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 127: 555-561.
- [16] Vinyes E, Asin L, Alegre S, et al. Life cycle assessment of apple and peach production, distribution and consumption in Mediterranean fruit sector[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 149: 313-320.
- [17] Goossens Y, Annaert B, De Tavernier J, et al. Life cycle assessment (LCA) for apple orchard production systems including low and high productive years in conventional, integrated and organic farms[J]. *Agricultural Systems*, 2017, 153: 81-93.
- [18] Consoli F, Allen D, Boustead I, et al. Guidelines for life-cycle assessment: A "code of practice" [R]. Pensacola: Society of Environmental Toxicology and Chemistry(SETAC), 1993: 1-3.
- [19] Frischknecht R, Jungbluth N, Althaus H J, et al. The ecoinvent database: Overview and methodological framework[J]. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 2004, 10(1): 3-9.
- [20] Liu X Z, Wang H, Chen J, et al. Method and basic model for development of Chinese reference life cycle database[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, 30(10): 2136-2144.
- [21] 尹娟, 费良军, 田军仓, 等. 水稻田中氮肥损失研究进展[J]. 农业工程学报, 2005, 21(6): 189-191.
YIN Juan, FEI Liang-jun, TIAN Jun-cang, et al. Research advance of nitrogen fertilizer losses from paddy field[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2005, 21(6): 189-191.
- [22] Sleeswijk A W, Oers L F C M V, Guinée J B, et al. Normalisation 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.
- [23] 龚志起, 张智慧. 水泥生命期中物化环境状况的研究[J]. 土木工程学报, 2004, 37(5): 86-91.
GONG Zhi-qi, ZHANG Zhi-hui. A study on embodied environmental profile during the life cycle of cement[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2004, 37(5): 86-91.
- [24] 罗楠. 中国烧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.
- [25] 许海川, 张春霞. LCA 在钢铁生产中的应用研究[J]. 中国冶金, 2007, 17(10): 33-36.
XU Hai-chuan, ZHANG Chun-xia. Research of LCA application in steelmaking[J]. *China Metallurgy*, 2007, 17(10): 33-36.
- [26] 邢爱华, 马捷, 张英皓, 等. 生物柴油环境影响的全生命周期评价[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2010, 50(6): 917-922.
XING Ai-hua, MA Jie, ZHANG Ying-hao, et al. Biodiesel full life cycle environmental impact assessment[J]. *Tsinghua University: Natural Science Edition*, 2010, 50(6): 917-922.
- [27] 邓南圣, 王小兵. 生命周期评价[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003: 134-149.
DENG Nan-sheng, WANG Xiao-bing. Life cycle assessment[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2003: 134-149.
- [28] Ge Y S, Zhang S Y, Hao L J. On the application of bio-diesel fuel in a diesel engine[J]. *Combustion Engine Engineering*, 2004, 25(2): 12-14.
- [29] 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 Pei-dong, LI Xin-rong, YANG Yan-li, et al. Greenhouse gas mitigation benefits of large and middle-scale biogas project in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24(9): 239-243.
- [30] Guinée J B, Gorrée M, Heijungs R, et al. Life cycle assessment: An operational guide to the ISO standards[M]. The Netherlands: Spatial Planning and Environment (VROM) and Centre of Environmental Science (CML), Den Haag and Leiden, 2001.