

ISSN 1000-0933  
CN 11-2031/Q

# 生态学报

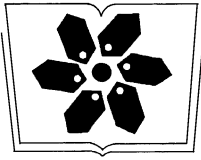
## Acta Ecologica Sinica



第32卷 第13期 Vol.32 No.13 **2012**

中国生态学学会  
中国科学院生态环境研究中心  
科学出版社

主办  
出版



# 生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 32 卷 第 13 期 2012 年 7 月 (半月刊)

中国科学院科学出版基金资助出版

## 目 次

砂质潮间带自由生活海洋线虫对缺氧的响应——微型受控生态系研究.....	华尔, 李佳, 董洁, 等 (3975)
植物种群自疏过程中构件生物量与密度的关系.....	黎磊, 周道玮, 盛连喜 (3987)
基于景观感知敏感度的生态旅游地观光线路自动选址.....	李继峰, 李仁杰 (3998)
基于能值的沼气农业生态系统可持续发展水平综合评价——以恭城县为例.....	杨谨, 陈彬, 刘耕源 (4007)
内蒙古荒漠草原植被盖度的空间异质性动态分析.....	颜亮, 周广胜, 张峰, 等 (4017)
典型草地的土壤保持价值流量过程比较.....	裴厦, 谢高地, 李士美, 等 (4025)
长沙市区马尾松人工林生态系统碳储量及其空间分布.....	巫涛, 彭重华, 田大伦, 等 (4034)
厦门市七种药用植物根围 AM 真菌的侵染率和多样性.....	姜攀, 王明元 (4043)
Cd、低 Pb/Cd 下冬小麦幼苗根系分泌物酚酸、糖类及与根际土壤微生物活性的关系.....	贾夏, 董岁明, 周春娟 (4052)
凉水保护区土壤产类漆酶-多铜氧化酶细菌群落结构.....	赵丹, 谷惠琦, 崔岱宗, 等 (4062)
盐渍化土壤根际微生物群落及土壤因子对 AM 真菌的影响.....	卢鑫萍, 杜茜, 闫永利, 等 (4071)
菌丝室接种解磷细菌 <i>Bacillus megaterium</i> C4 对土壤有机磷矿化和植物吸收的影响.....	张林, 丁效东, 王菲, 等 (4079)
闽江河口不同河段芦苇湿地土壤碳氮磷生态化学计量学特征.....	王维奇, 王纯, 曾从盛, 等 (4087)
高山森林三种细根分解初期微生物生物量动态.....	武志超, 吴福忠, 杨万勤, 等 (4094)
模拟降水对古尔班通古特沙漠生物结皮表观土壤碳通量的影响.....	吴林, 苏延桂, 张元明 (4103)
铁皮石斛组培苗移栽驯化过程中叶片光合特性、超微结构及根系活力的变化.....	濮晓珍, 尹春英, 周晓波, 等 (4114)
不同产量水平旱地冬小麦品种干物质累积和转移的差异分析.....	周玲, 王朝辉, 李富翠, 等 (4123)
基于作物模型的低温冷害对我国东北三省玉米产量影响评估.....	张建平, 王春乙, 赵艳霞, 等 (4132)
黄土高原 1961—2009 年参考作物蒸散量的时空变异.....	李志 (4139)
莫莫格湿地芦苇对水盐变化的生理生态响应.....	邓春暖, 章光新, 李红艳, 等 (4146)
不同蚯蚓采样方法对比研究.....	范如芹, 张晓平, 梁爱珍, 等 (4154)
亚洲玉米螟成虫寿命与繁殖力的地理差异.....	涂小云, 陈元生, 夏勤雯, 等 (4160)
黑河上游天然草地蝗虫空间异质性与分布格局.....	赵成章, 李丽丽, 王大为, 等 (4166)
苦瓜叶乙酸乙酯提取物对斜纹夜蛾实验种群的抑制作用.....	骆颖, 凌冰, 谢杰锋, 等 (4173)
长江口中国花鲈食性分析.....	洪巧巧, 庄平, 杨刚, 等 (4181)
基于线粒体控制区序列的黄河上游厚唇裸重唇鱼种群遗传结构.....	苏军虎, 张艳萍, 娄忠玉, 等 (4191)
镉暴露对黑斑蛙精巢 ROS 的诱导及其蛋白质氧化损伤作用机理.....	曹慧, 施蔡雷, 贾秀英 (4199)
北方草地牛粪中金龟子的多样性.....	樊三龙, 方红, 高传部, 等 (4207)
合肥秋冬季茶园天敌对假眼小绿叶蝉和茶蚜的空间跟随关系.....	杨林, 郭骅, 毕守东, 等 (4215)
植被、海拔、人为干扰对大中型野生动物分布的影响——以九寨沟自然保护区为例.....	张跃, 雷开明, 张语克, 等 (4228)
基于社会网络分析法的生态工业园典型案例研究.....	杨丽花, 佟连军 (4236)
基于生命周期的户用沼气系统可用能核算——以广西恭城瑶族自治县为例.....	齐静, 陈彬, 戴婧, 等 (4246)
<b>专论与综述</b>	
水文情势与盐分变化对湿地植被的影响研究综述.....	章光新 (4254)
松嫩碱化草甸土壤种子库格局、动态研究进展.....	马红媛, 梁正伟, 吕丙盛, 等 (4261)
一种新的景观扩张指数的定义与实现.....	武鹏飞, 周德民, 官辉力 (4270)
<b>研究简报</b>	
华山新麦草光合特性对干旱胁迫的响应.....	李倩, 王明, 王雯雯, 等 (4278)
美丽海绵提取物防污损作用.....	曹文浩, 严涛, 刘永宏, 等 (4285)

封面图说: 涵养水源——在长白山南坡的峭壁上, 生长在坡面上的森林所涵养的水源还在汨汨地往下流个不停, 深红色的落叶掉在了苔藓上, 这里已经是长白山的深秋了。虽然雨季已经过去了很久, 但是林下厚厚的枯枝落叶层、腐殖质层、苔藓草本层所涵养的水分还在不间断地流淌, 细细的水线在壁下汇成了溪、汇成了河。涵养水源是森林的主要生态功能之一。

彩图提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201106120776

齐静, 陈彬, 戴婧, 张洁茹, 陈绍晴, 杨谨. 基于生命周期的户用沼气系统可用能核算——以广西恭城瑶族自治县为例. 生态学报, 2012, 32(13): 4246-4253.

Qi J, Chen B, Dai J, Zhang J R, Chen S Q, Yang J. Exergy-based life cycle accounting of household biogas system: a case study of Gongcheng, Guangxi. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(13): 4246-4253.

## 基于生命周期的户用沼气系统可用能核算 ——以广西恭城瑶族自治县为例

齐 静, 陈 彬\*, 戴 婧, 张洁茹, 陈绍晴, 杨 谨

(北京师范大学环境学院, 环境模拟与污染控制国家重点实验室, 北京 100875)

**摘要:** 发展沼气生态农业可以实现资源的综合利用, 带来经济效益与生态效益, 同时解决我国农村地区能源短缺和环境污染问题。明确沼气系统内部的物质能量转化利用情况, 可为沼气农业系统优化和效益提升提供科学依据。提出基于生命周期的户用沼气系统可用能核算方法, 并以全国生态农业示范县——广西恭城瑶族自治县为例, 核算了该县典型户用沼气系统建设、运行和利用单元投入产出的可用能流, 分析了整个系统的可用能转化与利用效率。结果表明: 系统的可用能投入为  $(1.06 \times 10^8)$  kJ/a, 可用能产出为  $(5.00 \times 10^7)$  kJ/a, 主要产出形式为沼渣; 可用能转化率为 48.82%, 利用率为 21.60%, 其中沼气利用效率最高; 系统产生的环境排放为  $(3.42 \times 10^5)$  kJ/a, 主要形式为系统利用单元沼气燃烧产生的  $\text{CO}_2$ 。由此可见, 沼气生态农业可通过增加转化环节实现农业废弃物的再利用, 系统可用能效率具备极大的提升空间, 系统可持续性有待加强。可以考虑从改进工艺技术和改善发酵环境两方面提高户用沼气系统能量转化的能力, 通过沼渣沼液综合利用技术方面的创新提高户用沼气系统的可用能利用效率。生命周期可用能核算方法可以更全面的反映系统的能量利用效率, 便于诊断薄弱环节, 为系统优化提供依据。

**关键词:** 户用沼气系统; 生命周期分析; 可用能

## Exergy-based life cycle accounting of household biogas system: a case study of Gongcheng, Guangxi

QI Jing, CHEN Bin\*, DAI Jing, ZHANG Jieru, CHEN Shaoqing, YANG Jin

State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

**Abstract:** Biogas-linked agro-ecosystem can bring in economic and environmental benefits via integrated resource utilization, which provides an energy consuming pattern that has prominent advantages in relieving energy shortage and reducing environmental pollution. It is important to make clear how materials and energy convert in the agro-ecosystem, because the facts could suggest us how to improve the performance of the agro-ecosystem and get more benefits. Exergy of a system in a certain environment is defined as the amount of work that can be extracted from the system, which can be regarded as a uniform measure for different forms of energy and different states of matter. This paper presents an exergy-based life cycle accounting method for household biogas system. The proposed method is applied to a case study of Gongcheng as a "National Eco-agriculture Demonstration County" due to its demonstration status of biogas-linked agro-ecosystem in China. It has a high popularization rate of household biogas system. The typical household biogas system of Gongcheng is supposed to have three stages, i. e., construction, operation and utilization. We calculate the exergy input -

**基金项目:** 世界银行贷款中国新农村生态家园富民工程项目; 国家高技术研究发展计划(863 计划)重点项目(2009AA06A419); 教育部新世纪优秀人才(NCET-09-0226)

收稿日期: 2011-06-12; 修订日期: 2011-10-31

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: chenb@bnu.edu.cn

output of each subsystem and hereby analyze the exergy efficiency of the whole agro-ecosystem. The results show that, the exergy input of the system is  $1.06 \times 10^8$  kJ/a while the exergy output (mainly in the form of biogas residue) is  $5.00 \times 10^7$  kJ/a, with the exergy conversion rate being 48.82%. The exergy utilization rate is 21.60%, and biogas contributes more than biogas residue and biogas slurry. The exergy of system emission reaches  $3.42 \times 10^5$  kJ/a, which mainly comes from the biogas combustion. Major conclusions are as follows: (1) Compared with the traditional agro-ecosystem, biogas-linked agro-ecosystem has a longer utilization chain for agricultural wastes, which takes in nonrenewable resources and outputs renewable resources. Therefore, household biogas system is an effective measure in relieving energy shortage and reducing environmental pollution in rural area and realizing the sustainable development. (2) The exergy efficiency of the household biogas system is at a low level, and still needs to be promoted. Improving the process technology and optimizing the fermentation condition may be a choice to increase the exergy conversion rate. Meanwhile, technological innovation in the multi-purpose use of biogas residue and biogas slurry can increase the exergy utilization rate. (3) The exergy-based life cycle accounting method of household biogas system in this paper extends the application of exergy accounting, and fills in the gap of household biogas research field. The method may help us understand the household biogas system more clearly and directly in energy conversion and utilization mode. As a result, it is convenient to find out the weak points of the agro-ecosystem that waste more energy and seek for optimal solutions accordingly.

**Key Words:** household biogas system; life cycle analysis; exergy

20 世纪 80 年代以来,户用沼气系统由于具有缓解能源紧张、减少环境污染、保护生态环境等优点,在我国农村地区得到了一定程度的推广<sup>[1]</sup>。目前,我国已建立了多种沼气生态农业模式,如北方的“四位一体”、南方的“猪-沼-果”和西北的“五配套”等。这些模式以户用沼气池为纽带,将农村清洁能源建设与农业生产有机结合,实现沼气、沼液、沼渣的综合利用,节约了农村地区常规燃料能源,同时减少农药化肥使用和禽畜粪便污染,带来了良好的经济效益和生态效益<sup>[2]</sup>。

近年来,针对沼气生态农业模式和户用沼气系统的研究主要集中在经济效益分析<sup>[3-6]</sup>、减排效益分析<sup>[7-10]</sup>、能源替代效益分析<sup>[11-13]</sup>等方面。这些研究通常采用全生命周期分析和清单分析的方法,旨在评价单个沼气工程或某种沼气生态农业模式对所在区域的经济或生态环境产生的影响。而户用沼气系统作为沼气生态农业的核心,其物质能量转化过程和利用效率直接影响到沼气生态农业整体经济效益和生态效益。因此对户用沼气系统进行基于生命周期的能量核算有助于明确生态农业系统物质能量转化利用情况,为系统优化和效益提升提供科学依据。

可用能的概念由 Z. Rant 提出,主要用于测度系统在与参考环境达到平衡的过程中所能做的最大功<sup>[14]</sup>。可用能为不同物质形式的能量提供了统一的衡量标准,而且能够度量不同物质形式的能量在质上的差异,因此在各种化学物理过程研究、自然资源核算、农业工业生态系统分析和环境影响评价等方面都得到了一定应用<sup>[15]</sup>。在农业生态系统方面,B. Chen 和 G. Q. Chen 从可用能的角度核算了 1980—2002 年间中国社会的农副产品投入量,并结合核算结果讨论了农业相关政策的演变及影响<sup>[16-17]</sup>,此后又按照农林牧渔的部门分类对中国农业系统多年的可更新投入、不可更新投入以及产出、环境排放进行可用能核算,并通过一系列生态经济学指标评价农业系统的转换效率和环境压力<sup>[18]</sup>。Hoang 将可用能与环境效率分析方法相结合,提出了可持续效率模型,并应用于 OECD 组织 29 个国家的农业系统进行实证分析<sup>[19]</sup>。在生物能源方面,Banerjee 和 Tierney 从可用能的角度对沼气灶等 10 种在发展中国家农村地区广泛应用的能源设备进行了全生命周期环境影响评价及比较<sup>[20]</sup>。Yang 等对中国玉米生物乙醇生产过程的可用能消耗进行了核算,并提出修正指标来反映该生产过程的环境成本<sup>[21]</sup>。但对户用沼气系统可用能核算的研究仍然较少。

本文提出基于生命周期的户用沼气系统可用能核算方法,并选取广西恭城瑶族自治县典型户用沼气系统为案例,核算了该系统建设、运行和利用单元投入产出的可用能流,分析了整个系统的可用能转化与利用

效率。

## 1 研究方法

### 1.1 核算框架

通过对户用沼气系统投入产出全生命过程的分析,将典型户用沼气系统划分为建设、运行和利用3个单元,其整体核算框架如图1。

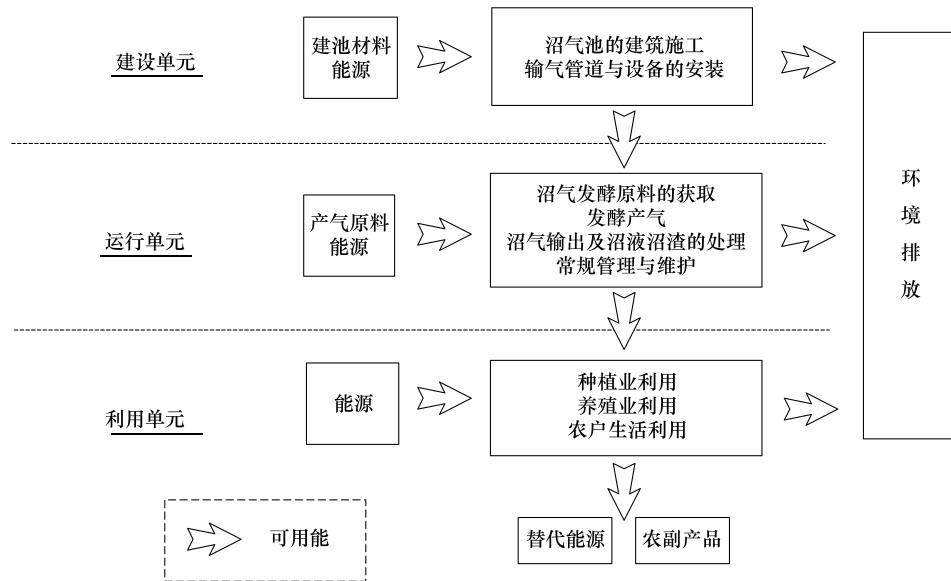


图1 户用沼气系统可用能核算框架

Fig.1 Accounting framework for household biogas system

系统建设单元包括沼气池的建筑施工和输气管道与设备的安装,可用能投入的主要形式是物质材料和能源。沼气池建设一般需要投入的有建筑材料(如水泥、砖、沙子、卵石、钢筋、塑料薄膜等)、输气管道、管道配件、其他常见沼气设备(如沼气灯、沼气灶等)。能源则考虑物质材料运输过程的能耗以及建筑过程中使用机械设备的能耗。在系统建设单元,物质材料运输过程的能源消耗会产生尾气,施工过程主要会产生粉尘等环境排放。

系统运行单元包括沼气发酵原料的获取、发酵产气、沼气输出及沼液沼渣的处理,以及沼气池的常规管理和维护。这一单元的可用能投入包括发酵原料和能源。自然界中沼气发酵原料十分广泛,几乎所有的有机物都可以作为沼气发酵原料,例如农作物秸秆,人、畜和家禽粪便、生活污水,工业和生活有机废物等。我国农村户用沼气系统的发酵原料主要是人畜粪便。部分地区由于禽畜养殖由家庭经营向大规模集约化发展造成户用发酵原料不足,同时也出于产气效率的考虑,会在发酵原料中加入秸秆、树叶、杂草等。为保证沼气池产气正常而持久,需要不断地补充新鲜的发酵原料、更换部分旧料,每年还会进行1—2次的大换料。系统运行单元发酵原料的获取及沼液沼渣的运输可能存在能源消耗。在系统运行单元,环境排放主要包括发酵原料的获取和沼液沼渣运输过程产生的尾气,以及发酵产气过程的气体逸散。

系统利用单元是可用能产出利用的主要环节,系统内部发酵的产物沼气、沼液和沼渣都可以在农业系统中发挥其效用,其中沼液沼渣可以通过在种植业和养殖业多种途径的利用帮助农户实现增收增产,沼气则可以满足农户日常生活用能。该单元的可用能投入主要是沼气、沼液和沼渣利用过程中的辅助设施能源投入,环境排放主要存在于辅助设施能源消耗、沼气燃烧、沼液沼渣挥发等过程。

### 1.2 可用能核算

可用能代表着蕴含在各种载体中真正可以被利用的那部分能量。由于不同形式能量之间的转换受到热力学第二定律的限制,能量的可用能可以理解为该种形式的能量转化为其他形式能量的能力。物质的可用能

包括物理可用能和化学可用能,物理可用能是由物质的物理状态(如温度、压力、速度和高程等)与环境存在差异而产生,化学可用能是由于物质本身与环境存在化学组成上的差异所产生。可用能转换系数指单位物质或能量所蕴含的可用能,反映了不同形式的能量在质量上的差异。户用沼气系统各单元都存在着物质与能量的投入与输出,可用能由于为全生命周期分析中不同形式的能量、不同状态的物质提供了统一的标尺,所以满足对整个系统投入产出进行加和与比较的评价要求。

本文进行可用能核算的具体方法为:(1)明确核算框架中每个单元各环节的物质与能量投入或产出量,将每一项物质与能量的投入或产出量乘以相对应的可用能转换系数,得到各自蕴含的可用能。本文采用的可用能转换系数来源于文献<sup>[22-25]</sup>;(2)分别加和各单元投入产出可用能,得出户用沼气系统内部可用能流动情况;(3)从整个生命过程的角度分析系统的可用能转化与利用效率。其中,系统产出的沼气、沼渣和沼液的可用能总量与系统投入的可用能总量的比值为可用能转化率,主要表征了沼气系统在运行单元进行能量转化的能力。沼气、沼渣和沼液可用能得到利用的比例为可用能利用率,表征了沼气系统在利用单元可用能利用的充分程度。系统可用能转化率与系统可用能利用率的乘积为系统可用能效率,显示了沼气系统整个生命过程对可用能的利用效率,可作为系统可持续性的衡量指标。

## 2 案例分析

### 2.1 案例对象

恭城瑶族自治县(简称恭城县),位于广西壮族自治区东北部,面积 2049 km<sup>2</sup>,人口 29 万人。该县自 1984 年起将沼气池建设与扶贫攻坚相结合,持续实施“沼气扶贫”工程。20 世纪 90 年代中后期以来,恭城县构建了“养殖-沼气-种植”三位一体模式,以沼气为纽带,以养殖业为龙头,以种植业为重点,大力发展生态农业。截至 2009 年底,该县境内农村户用沼气池总量 6.36 万座,普及率达 91.6%。

研究选取恭城县境内广泛使用的 8 m<sup>3</sup> 户用沼气池,平均使用寿命 15 a,按照最佳使用期限,本文仅对前 10a 的使用情况进行核算。当地年平均气温高于沼气常温发酵区的最低温度 10℃,全年均能产气,扣除大出料的时间,年产气时间按 300 d 计,每口沼气池年产气量按 450 m<sup>3</sup> 计,排出沼渣沼液按 25 t 计。

图 2 为恭城县典型户用沼气系统示意图。

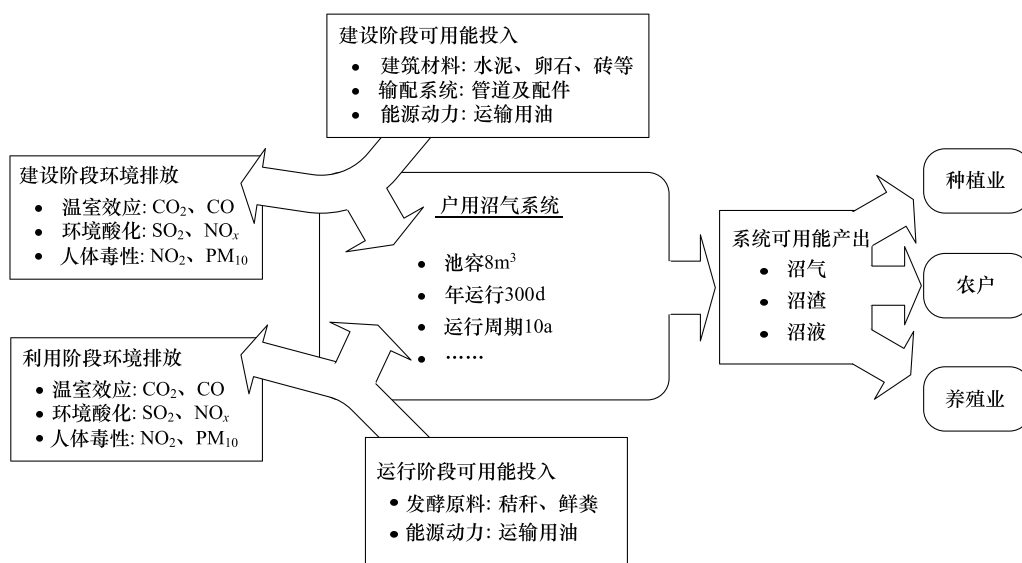


图 2 恭城县典型户用沼气系统示意图

Fig. 2 Diagram of household biogas system in Gongcheng

各单元物质与能量的投入产出原始数据为恭城县的平均值,其中系统建设单元数据为建设阶段的一次性投入,进行分析比较时需要除以 10a。

## 2.2 恭城县户用沼气系统可用能核算

### 2.2.1 系统建设单元核算

恭城县户用沼气系统实行“三结合”布局,即沼气池、猪圈、厕所连通建造,以便粪便自流入池。池旁建猪舍和厕所,人和禽畜粪便在沼气池发酵,产生的沼气作为家庭燃料,沼液和沼渣则作为果树、蔬菜等的肥料。当地推行“一池三改”模式,即进行农村户用沼气建设之外进行厨房、厕所和猪圈的同步改造。所以本案例的系统建设单元不仅指沼气池的建设,还包括厨房、厕所的改建、猪圈和果园的配套设计与建设等。核算中,按黏土砖尺寸 0.24 m×0.115 m×0.053 m、密度 1700 kg/m<sup>3</sup> 计算黏土砖质量<sup>[26]</sup>;按年平均运输距离 100 km,耗油量 0.1 L/km 计算汽油消耗量。系统建设单元可用能总投入如表 1。

表 1 户用沼气系统建设单元可用能总投入

Table 1 Exergy input of household biogas system construction unit

项目 Item	数据 Data	可用能转换系数 Exergy coefficient /(kJ/unit)	可用能 Exergy /kJ
黏土砖 Clay brick	800 块	$2.49 \times 10^3$	$1.99 \times 10^6$
卵石 Grait	2200kg	$3.30 \times 10^1$	$7.26 \times 10^4$
粗砂 Grit	2000kg	$3.30 \times 10^1$	$6.60 \times 10^4$
细沙 Sand	1300kg	$3.30 \times 10^1$	$4.29 \times 10^4$
水泥 Cement	1000kg	$1.50 \times 10^3$	$1.50 \times 10^6$
钢筋 Rebar	10kg	$6.80 \times 10^3$	$6.80 \times 10^4$
水 Water	500kg	5.00	$2.50 \times 10^3$
塑料薄膜 Plastic Film	32m <sup>2</sup>	$6.09 \times 10^2$	$1.95 \times 10^4$
塑料管 Plastic Pipe	20m	$2.03 \times 10^3$	$4.06 \times 10^4$
汽油 Petrol	10L	$3.47 \times 10^4$	$3.47 \times 10^5$
总计 Total			$4.15 \times 10^6$

### 2.2.2 系统运行单元核算

恭城县户用沼气系统的发酵原料中由于含有秸秆,日常进料换料之外每年还要进行 2 次大换料。恭城县采用“三结合”布局,粪便自流入池,因此案例分析中不考虑获取发酵原料环节的可用能投入。沼气池运行期间,日常沼液沼渣换料清理不需要机动车运输,能源投入仅考虑每年大换料时沼液沼渣的运输。核算中,按年平均运输距离 10 km,耗油量 0.1 L/km 计算汽油消耗量;按每户年产沼渣、沼液 25 t,沼渣沼液质量比为 1.15 :7.79 计算二者的产生量。系统运行单元的可用能投入如表 2,可用能产出如表 3。

表 2 户用沼气系统运行单元可用能投入

Table 2 Exergy input of household biogas system operation unit

项目 Item	数据 Data	可用能转换系数 Exergy coefficient/(kJ/unit)	可用能 Exergy/(kJ/a)
鲜粪 Fresh Dung	5700kg/a	$1.25 \times 10^4$	$7.15 \times 10^7$
秸秆 Straw	3000kg/a	$1.02 \times 10^4$	$0.06 \times 10^7$
汽油 Petrol	1L/a	$4.69 \times 10^4$	$3.47 \times 10^4$
总计 Total			$1.02 \times 10^8$

表 3 户用沼气系统运行单元可用能产出

Table 3 Exergy output of household biogas system operation unit

项目 Item	数据 Data	可用能转换系数 Exergy coefficient/(kJ/unit)	可用能 Exergy/(kJ/a)
沼气 Biogas	450m <sup>3</sup> /a	$4.13 \times 10^4$	$1.8 \times 10^7$
沼渣 Biogas residue	3216kg/a	$9.28 \times 10^3$	$2.98 \times 10^7$
沼液 Biogas slurry	21784kg/a	$7.70 \times 10^1$	$1.68 \times 10^6$
总计 Total			$5.00 \times 10^7$

### 2.2.3 系统利用单元核算

恭城县户用沼气系统产生的沼气主要用于农户日常生活的炊事和照明用能,基本可以满足一个3—5人农户80%以上的生活燃料及家用生活照明的需求。沼渣沼液用作果园和稻田的有机肥料以及猪饲料。根据调查,恭城县户用沼气系统利用单元的可用能投入可以忽略。核算中,按沼气热值 $20930 \text{ kJ/m}^3$ ,沼气灶热效率60%计算农户炊事利用的可用能;按平均每户有两盏15 W照明灯由沼气供电,每天平均使用4 h计算农户照明利用的可用能。典型户用沼气系统的可用能利用情况如表4。

表4 户用沼气系统利用单元可用能利用

Table 4 Exergy utilization of household biogas system utilization unit

项目 Item	数据 Data	可用能转换系数 Exergy coefficient/(kJ/unit)	可用能 Exergy/(kJ/a)
炊事能耗 Energy consumption for cooking	$9.42 \times 10^6 \text{ kJ/a}$	$6.00 \times 10^{-1}$	$5.65 \times 10^6$
照明能耗 Energy consumption for lighting	45kWh/a	$3.60 \times 10^3$	$1.62 \times 10^5$
稻谷增产 Increased crops	200kg/a	$1.58 \times 10^4$	$3.16 \times 10^6$
水果增产 Increased fruits	900kg/a	$1.90 \times 10^3$	$1.71 \times 10^6$
牲畜增产 Increased livestock	24kg/a	$4.50 \times 10^3$	$1.08 \times 10^5$
总计 Total			$1.08 \times 10^7$

### 2.2.4 户用沼气系统环境排放核算

对于恭城县典型户用沼气系统的环境排放数据,本文参考了王明新等进行农村户用沼气工程生命周期节能减排效益研究所采用的清单分析方法<sup>[7]</sup>,并结合恭城县户用沼气系统建设、运行与利用过程的实际情况进行估算,结果如表5。

表5 恭城县户用沼气系统环境排放

Table 5 Emission of household biogas system in Gongcheng

项目 Item	可用能转换系数 Exergy coefficient /(kJ/kg)	建设单元 Construction unit		运行单元 Operation unit		利用单元 Utilization unit	
		数据 Data	可用能 Exergy	数据 Data	可用能 Exergy	数据 Data	可用能 Exergy
		/(kg/a)	/(kJ/a)	/(kg/a)	/(kJ/a)	/(kg/a)	/(kJ/a)
CO <sub>2</sub>	$4.50 \times 10^2$	89.5	$4.03 \times 10^4$	9.91	$4.46 \times 10^3$	530	$2.39 \times 10^5$
CO	$9.80 \times 10^3$	0.10	$9.80 \times 10^2$	0.01	$9.80 \times 10^1$	0.16	$1.57 \times 10^3$
SO <sub>2</sub>	$4.90 \times 10^3$	8.34	$4.09 \times 10^4$	0.83	$4.07 \times 10^3$	0.83	$4.07 \times 10^3$
NO <sub>x</sub>	$3.60 \times 10^3$	0.46	$1.66 \times 10^3$	0.05	$1.80 \times 10^2$	0.12	$4.32 \times 10^2$
NO <sub>2</sub>	$1.21 \times 10^3$	0.35	$4.23 \times 10^1$	0.04	$4.83 \times 10^1$	0.09	$1.09 \times 10^2$
PM10	$1.50 \times 10^3$	2.65	$3.98 \times 10^3$	—	—	—	—
总计 Total			$8.82 \times 10^4$		$8.85 \times 10^3$		$2.45 \times 10^5$

## 2.3 核算结果分析

### 2.3.1 系统可用能投入产出分析

恭城县户用沼气系统整个生命过程的可用能转化与利用情况如图3。可以看出,系统可用能转化率为48.82%,可用能利用率为21.60%,整个户用沼气系统的可用能效率为10.52%。系统运行一年产生的环境影响以可用能表示为 $3.42 \times 10^5 \text{ kJ}$ 。

恭城县户用沼气系统的可用能产出与利用比例如图4所示。沼渣中蕴含的可用能最多,占整个系统可用能产出的69.39%,其次为沼气,占整个系统可用能产出的26.71%。但系统中真正被人类利用的可用能一多半来自于沼气。通过计算,系统产生沼气的可用能利用率为50.6%,沼渣沼液的可用能利用率仅为15.8%。

### 2.3.2 系统环境排放分析

从可用能的角度来看,恭城县户用沼气系统的环境排放主要发生在系统利用单元。该单元的主要排放物



为沼气燃烧产生的  $\text{CO}_2$ , 达到单元总排放的 97.55%。系统建设单元的主要排放物为材料运输过程汽油燃烧产生的  $\text{CO}_2$  和  $\text{SO}_2$ , 分别占单元总排放的 45.69% 和 46.37%。

### 3 结论

(1) 从全过程的可用能流动来看, 蕴含在发酵原料中的可用能, 经过沼气池发酵, 转化为沼气、沼液和沼渣中的可用能, 最终在农户、种植业和养殖业得到不同形式的利用。与传统农业模式相比, 沼气农业系统通过增加转化利用环节延长了秸秆、粪便等农业废弃物的利用链条, 减少了对非可再生资源的耗竭性使用的同时也减少了环境污染和对生态的破坏, 实现了农业生态系统的可持续发展。

(2) 从可用能的转化与利用来看, 可用能转化主要发生在沼气池的发酵过程, 该过程可用能损失了 51.18%, 可以考虑从改进工艺技术和改善发酵环境两方面提高户用沼气系统能量转化的能力; 转化后的可用能有 73.29% 蕴含在沼液和沼渣中, 但这一部分可用能没有得到充分的利用, 系统可用能利用率仅为 21.60%, 亟须在沼渣沼液综合利用技术方面进行创新; 而系统可用能效率仅为 10.52%, 具备极大的提升空间, 系统可持续性有待加强。

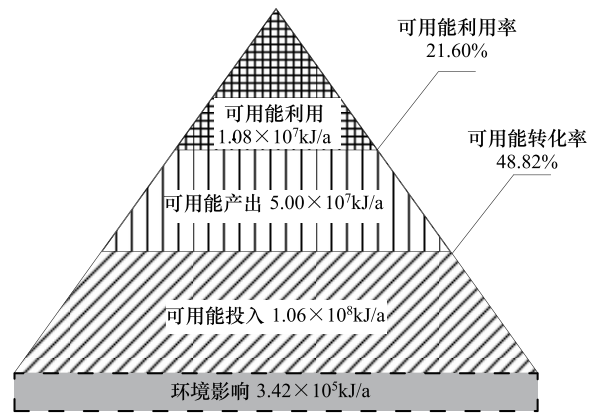


图3 恭城县户用沼气系统可用能转化与利用

Fig. 3 Exergy conversion and utilization of household biogas system in Gongcheng

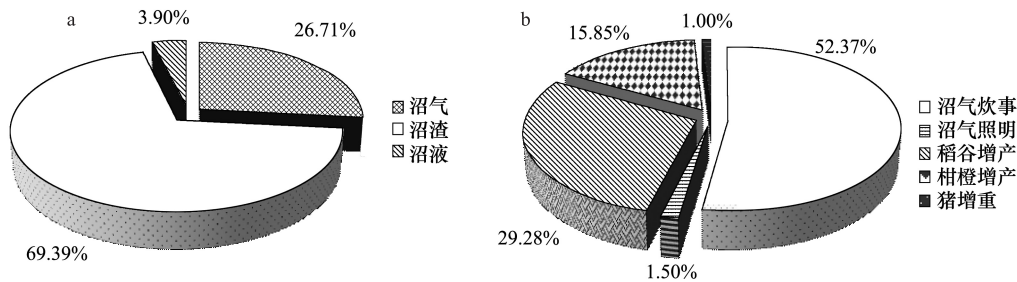


图4 户用沼气系统可用能产出比例(a)和可用能利用比例(b)

Fig. 4 Exergy output (a) and Exergy utilization (b) of household biogas system

(3) 本文综合考虑了户用沼气系统建设、运行与利用的整个生命过程, 采用可用能作为统一的度量来表示各环节物质与能量的投入产出。一方面可以更为全面地反映户用沼气系统各单元的能量利用效率, 便于诊断出能量转化利用的薄弱环节, 为系统优化提供依据; 另一方面核算结果建立在可用能为共同标准的基础上, 与其他系统具有可比性。

### References:

- [1] Zhou M J, Zhang R L, Lin J Y. The Practical Technology of Biogas. 2nd ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2009: 2-3.
- [2] Liu D S. A Methodological Study of EIA on the Rural Renewable Energy Projects and Case Study [D]. Beijing: China Agricultural University, 2004.
- [3] Zhang P D, Yang Y L, Li X R. Present situation and potentiality of biogas comprehensive utilization in China. China Biogas, 2007, 25(5): 32-34, 37-37.
- [4] Li S J, Hu H L. Economic evaluation of biogas comprehensive utilization in Gongcheng. China Biogas, 1997, 15(2): 42-44.
- [5] Berglund M, Börjesson P. Assessment of energy performance in the life-cycle of biogas production. Biomass and Bioenergy, 2006, 30(3): 254-266.
- [6] Tsagarakis K P, Papadogiannis C. Technical and economic evaluation of the biogas utilization for energy production at Iraklio municipality, Greece. Energy Conversion and Management, 2006, 47(7/8): 844-57.

- [ 7 ] Wang M X, Xia X F, Chai Y H, Liu J G. Life cycle energy conservation and emissions reduction benefits of rural household biogas project. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(11): 245-250.
- [ 8 ] Liu Y Z. Environmental benefits evaluation of energy greenhouse gas emission reduction of using household biogas. *Journal of Yangtze University: Natural Science Edition*, 2009, 6(1): 81-84.
- [ 9 ] Liu Y, Kuang Y Q, Huang N S. Rural biogas development and greenhouse gas emission mitigation. *China Population, Resources and Environment*, 2008, 18(3): 48-53.
- [ 10 ] Yin Z M, Liu L H, Cao A H, Jin P L. Utility and development countermeasures of biogas technology in the energy saving and emission reduction of new rural construction. *Agro-Environment & Development*, 2007, 24(6): 74-76.
- [ 11 ] Yan W W. Study on the Influence of Biogas Project Based Household on Rural Ecosystem [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2008.
- [ 12 ] Liu L N, Wang X H. Life cycle assessment of biogas eco-agricultural mode. *China Biogas*, 2008, 26(2): 17-20, 24-24.
- [ 13 ] Chen J L. Life Cycle Assessment of Large and Medium Scale Biogas Plant [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2009.
- [ 14 ] Rant Z. Exergie, ein neues Wort für technische Arbeitsfähigkeit. *Forschung auf dem Gebiete des Ingenieurwesens*, 1956, 22(1): 36-37.
- [ 15 ] Sciubba E, Wall G. A brief commented history of exergy from the beginnings to 2004. *International Journal of Thermodynamics*, 2007, 10(1): 1-26.
- [ 16 ] Chen B, Chen G Q. Resource analysis of the Chinese society 1980—2002 based on exergy-Part 3: Agricultural products. *Energy Policy*, 2007, 35(4): 2065-2078.
- [ 17 ] Chen B, Chen G Q. Resource analysis of the Chinese society 1980—2002 based on exergy-Part 4: Fishery and rangeland. *Energy Policy*, 2007, 35(4): 2079-2086.
- [ 18 ] Chen G Q, Jiang M M, Yang Z F, Chen B, Ji X, Zhou J B. Exergetic assessment for ecological economic system: Chinese agriculture. *Ecological Modelling*, 2009, 220(3): 397-410.
- [ 19 ] Hoang V N, Rao D S P. Measuring and decomposing sustainable efficiency in agricultural production: a cumulative exergy balance approach. *Ecological Economics*, 2010, 69(9): 1765-1776.
- [ 20 ] Banerjee A, Tierney M. Comparison of five exergoenvironmental methods applied to candidate energy systems for rural villages in developing countries. *Energy*, 2011, 36(5): 2650-2661.
- [ 21 ] Yang Q, Chen B, Ji X, He Y F, Chen G Q. Exergetic evaluation of corn-ethanol production in China. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2009, 14(5): 2450-2461.
- [ 22 ] Renaldi, Kellens K, Dewulf W, Duflou J R. Exergy efficiency definitions for manufacturing processes. *Glocalized Solutions for Sustainability in Manufacturing: Proceedings of the 18th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering*. Braunschweig: Technische Universität Braunschweig, 2011: 329-334.
- [ 23 ] Chen B, Chen G Q. Exergy analysis for resource conversion of the Chinese society 1993 under the material product system. *Energy*, 2006, 31(8/9): 1115-1150.
- [ 24 ] Chen G Q, Qi Z H. Systems account of societal exergy utilization: China 2003. *Ecological Modelling*, 2007, 208(2/4): 102-118.
- [ 25 ] Liu M, Li B Z, Yao R M. A generic model of exergy assessment for the environmental impact of building lifecycle. *Energy and Buildings*, 2010, 42(9): 1482-1490.
- [ 26 ] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China (AQSIQ). GB13545—2003 Fired hollow bricks and blocks. Beijing: Standards Press of China, 2004.

#### 参考文献:

- [ 1 ] 周孟津, 张榕林, 蒯金印. 沼气实用技术 (第二版). 北京: 化学工业出版社, 2009: 2-3.
- [ 2 ] 刘东生. 农村可再生能源建设项目环境影响评价方法及案例研究 [D]. 北京: 中国农业大学, 2004.
- [ 3 ] 张培栋, 杨艳丽, 李新荣. 中国沼气综合利用潜力. *中国沼气*, 2007, 25(5): 32-34, 37-37.
- [ 4 ] 李书军, 胡海良. 恭城县开展“三沼”综合利用的经济评价. *中国沼气*, 1997, 15(2): 42-44.
- [ 7 ] 王明新, 夏训峰, 柴育红, 刘建国. 农村户用沼气工程生命周期节能减排效益. *农业工程学报*, 2010, 26(11): 245-250.
- [ 8 ] 刘叶志. 户用沼气能源温室气体减排的环境效益评价. *长江大学学报: 自然科学版*, 2009, 6(1): 81-84.
- [ 9 ] 刘宇, 匡耀求, 黄宇生. 农村沼气开发与温室气体减排. *中国人口·资源与环境*, 2008, 18(3): 48-53.
- [ 10 ] 殷志明, 刘涟淮, 曹安辉, 金佩兰. 沼气技术在新农村节能减排中的效用和发展对策. *农业环境与发展*, 2007, 24(6): 74-76.
- [ 11 ] 颜卫卫. 户用沼气工程对农村生态系统的影响 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2008.
- [ 12 ] 刘黎娜, 王效华. 沼气生态农业模式的生命周期评价. *中国沼气*, 2008, 26(2): 17-20, 24-24.
- [ 13 ] 陈佳澜. 大中型沼气综合利用系统生命周期评价 [D]. 北京: 北京林业大学, 2009.
- [ 26 ] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB13545—2003 烧结空心砖和空心砌块. 北京: 中国标准出版社, 2004.

CONTENTS

Responses of sandy beach nematodes to oxygen deficiency: microcosm experiments ..... HUA Er, LI Jia, DONG Jie, et al (3975)

Allometric relationship between mean component biomass and density during the course of self-thinning for *Fagopyrum esculentum* populations ..... LI Lei, ZHOU Daowei, SHENG Lianxi (3987)

Automatic site selection of sight-seeing route in ecotourism destinations based on landscape perception sensitivity ..... LI Jifeng, LI Renjie (3998)

Emergy evaluation for sustainability of Biogas-linked agriculture ecosystem; a case study of Gongcheng county ..... YANG Jin, CHEN Bin, LIU Gengyuan (4007)

Spatial heterogeneity of vegetation coverage and its temporal dynamics in desert steppe, Inner Mongolia ..... YAN Liang, ZHOU Guangsheng, ZHANG Feng, et al (4017)

Soil conservation value flow processes of two typical grasslands ..... PEI Sha, XIE Gaodi, LI Shimei, et al (4025)

Spatial distribution of carbon storage in a 13-year-old *Pinus massoniana* forest ecosystem in Changsha City, China ..... WU Tao, PENG Chonghua, TIAN Dalun, et al (4034)

Colonization rate and diversity of AM fungi in the rhizosphere of seven medicinal plants in Xiamen ..... JIANG Pan, WANG Mingyuan (4043)

Effects of Cd, Low Concentration Pb/Cd on the contents of phenolic acid and simple glucides exuding from winter wheat seedlings root and the relationship between them and rhizosphere soil microbial activity ..... JIA Xia, DONG Suiming, ZHOU Chunjuan (4052)

The community structure of laccase-like multicopper oxidase-producing bacteria in soil of Liangshui Nature Reserve ..... ZHAO Dan, GU Huiqi, CUI Daizong, et al (4062)

Effects of soil rhizosphere microbial community and soil factors on arbuscular mycorrhizal fungi in different salinized soils ..... LU Xinping, DU Qian, YAN Yongli, et al (4071)

The effects of inoculation with phosphate solubilizing bacteria *Bacillus megaterium* C4 in the AM fungal hyphosphere on soil organic phosphorus mineralization and plant uptake ..... ZHANG Lin, DING Xiaodong, WANG Fei, et al (4079)

Soil carbon, nitrogen and phosphorus ecological stoichiometry of *Phragmites australis* wetlands in different reaches in Minjiang River estuary ..... WANG Weiqi, WANG Chun, ZENG Congsheng, et al (4087)

Dynamics of soil microbial biomass during early fine roots decomposition of three species in alpine region ..... WU Zhichao, WU Fuzhong, YANG Wanqin, et al (4094)

Effects of simulated precipitation on apparent carbon flux of biologically crusted soils in the Gurbantunggut Desert in Xinjiang, Northwestern China ..... WU Lin, SU Yangui, ZHANG Yuanming (4103)

Changes in photosynthetic properties, ultrastructure and root vigor of *Dendrobium candidum* tissue culture seedlings during transplantation ..... PU Xiaozhen, YIN Chunying, ZHOU Xiaobo, et al (4114)

Analysis of dry matter accumulation and translocation for winter wheat cultivars with different yields on dryland ..... ZHOU Ling, WANG Zhaohui, LI Fucui, et al (4123)

Impact evaluation of low temperature to yields of maize in Northeast China based on crop growth model ..... ZHANG Jianping, WANG Chunyi, ZHAO Yanxia, et al (4132)

Spatiotemporal variations in the reference crop evapotranspiration on the Loess Plateau during 1961—2009 ..... LI Zhi (4139)

Eco-physiological responses of *Phragmites australis* to different water-salt conditions in Momoge Wetland ..... DENG Chunnuan, ZHANG Guangxin, LI Hongyan, et al (4146)

Comparative study of different earthworm sampling methods ..... FAN Ruqin, ZHANG Xiaoping, LIANG Aizhen, et al (4154)

Geographic variation in longevity and fecundity of the Asian corn borer, *Ostrinia furnacalis* Guenée (Lepidoptera: Crambidae) ..... TU Xiaoyun, CHEN Yuansheng, XIA Qinwen, et al (4160)

Analysis on grasshopper spatial heterogeneity and pattern of natural grass in upper reaches of Heihe ..... ZHAO Chengzhang, LI Lili, WANG Dawei, et al (4166)

Inhibition effects of ethyl acetate extracts of *Momordica charantia* leaves on the experimental population of *Spodoptera litura* ..... LOU Ying, LING Bing, XIE Jiefeng, et al (4173)

Feeding habits of *Lateolabrax maculatus* in Yangtze River estuary ..... HONG Qiaoqiao, ZHUANG Ping, YANG Gang, et al (4181)

Genetic structure of *Gymnodiptychus pachycheilus* from the upper reaches of the Yellow River as inferred from mtDNA control region ..... SU Junhu, ZHANG Yanping, LOU Zhongyu, et al (4191)

Toxicity mechanism of Cadmium-induced reactive oxygen species and protein oxidation in testes of the frog *Rana nigromaculata* ..... CAO Hui, SHI Cailei, JIA Xiuying (4199)

The diversity of scarab beetles in grassland cattle dung from North China ..... FAN Sanlong, FANG Hong, GAO Chuanbu, et al (4207)

Spatial relationships among *Empoasca vitis* (Gothe) and *Toxoptera aurantii* (Boyer) and natural enemies in tea gardens of autumn-winter season in Hefei suburban ..... YANG Lin, GUO Hua, BI Shoudong, et al (4215)

Effects of vegetation, elevation and human disturbance on the distribution of large- and medium-sized wildlife: a case study in Jiuzhaigou Nature Reserve ..... ZHANG Yue, LEI Kaiming, ZHANG Yuke, et al (4228)

Research of typical EIPs based on the social network analysis ..... YANG Lihua, TONG Lianjun (4236)

Exergy-based life cycle accounting of household biogas system: a case study of Gongcheng, Guangxi ..... QI Jing, CHEN Bin, DAI Jing, et al (4246)

**Review and Monograph**

The effects of changes in hydrological regimes and salinity on wetland vegetation: a review ..... ZHANG Guangxin (4254)

Advances in research on the seed bank of a saline-alkali meadow in the Songnen Plain ..... MA Hongyuan, LIANG Zhengwei, LÜ Bingsheng, et al (4261)

A new landscape expansion index: definition and quantification ..... WU Pengfei, ZHOU Demin, GONG Huili (4270)

**Scientific Note**

Response of photosynthetic characteristics of *Psathyrostachys huashanica* Keng to drought stress ..... LI Qian, WANG Ming, WANG Wenwen, et al (4278)

The antifouling activities of *Callyspongia* sponge extracts ..... CAO Wenhao, YAN Tao, LIU Yonghong, et al (4285)

# 《生态学报》2012 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的自然科学高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 70 元/册,全年定价 1680 元。

国内邮发代号:82-7 国外邮发代号:M670 标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 32 卷 第 13 期 (2012 年 7 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 13 (July, 2012)

**编 辑** 《生态学报》编辑部  
地址:北京海淀区双清路 18 号  
邮政编码:100085  
电话:(010)62941099  
www.ecologica.cn  
shengtaixuebao@rcees.ac.cn

**主 编** 冯宗炜

**主 管** 中国科学技术协会

**主 办** 中国生态学学会  
中国科学院生态环境研究中心  
地址:北京海淀区双清路 18 号  
邮政编码:100085

**出 版** 科 学 出 版 社  
地址:北京东黄城根北街 16 号  
邮政编码:100071

**印 刷** 北京北林印刷厂

**发 行** 科 学 出 版 社  
地址:东黄城根北街 16 号  
邮政编码:100071  
电话:(010)64034563  
E-mail: journal@cspg.net

**订 购** 全国各地邮局

**国外发行** 中国国际图书贸易总公司  
地址:北京 399 信箱  
邮政编码:100044

**广告经营** 京海工商广字第 8013 号  
**许 可 证**

**Edited** by Editorial board of  
ACTA ECOLOGICA SINICA  
Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China  
Tel: (010)62941099  
www.ecologica.cn  
Shengtaixuebao@rcees.ac.cn

**Editor-in-chief** FENG Zong-Wei

**Supervised** by China Association for Science and Technology

**Sponsored** by Ecological Society of China  
Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS  
Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China

**Published** by Science Press  
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,  
Beijing 100717, China

**Printed** by Beijing Bei Lin Printing House,  
Beijing 100083, China

**Distributed** by Science Press  
Add: 16 Donghuangchenggen North  
Street, Beijing 100717, China  
Tel: (010)64034563  
E-mail: journal@cspg.net

**Domestic** All Local Post Offices in China

**Foreign** China International Book Trading  
Corporation  
Add: P. O. Box 399 Beijing 100044, China



ISSN 1000-0933  
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元