

广东惠阳水稻种植中耕牛与小型拖拉机使用的能值比较

白 瑜^{1,2}, 陆宏芳¹, 何江华³, 任 海^{1*}

(1. 中国科学院华南植物园, 广州 510650; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 3. 广东省生态环境与土壤研究所, 广州 510650)

摘 要: 以能值理论方法为手段, 从资源的投入和输出结构角度, 对广东省惠州市惠阳区典型水稻种植户的耕牛和小型拖拉机这两种典型的农业驱动力产出系统的转化与生产效率, 环境负载和可持续性进行比较分析与评价。研究表明: 耕牛系统在单位面积水稻田上消耗的不可更新资源量是拖拉机系统的 4.57 倍; 人力能值消耗是拖拉机系统的 6.14 倍。相对于拖拉机动力, 耕牛产出动力处于较低的能量等级, 其环境负载率 (ELR) 仅是拖拉机系统的 24%, 可持续能值指标 (ESI) 是拖拉机系统的 4.25 倍, 但有巨大的优化空间和可能。而广东小型拖拉机系统产出驱动力的使用效率则稍高于典型 65 kW 拖拉机系统。从提高能值效率角度分析, 减少耕牛系统生产过程中过多的人力投入, 着力提高耕牛系统产出驱动力的利用效率比发展小型拖拉机系统更有潜力。生产过程中的人力投入和使用过程中的维护投入是农机驱动力产出系统不可忽视的能值投入项。

关键词: 可持续性; 能值等级; 能值密度; 能量效率

中图分类号: S34

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2007)5-0105-06

白 瑜, 陆宏芳, 何江华, 等. 广东惠阳水稻种植中耕牛与小型拖拉机使用的能值比较[J]. 农业工程学报, 2007, 23(5): 105-110.

Bai Yu, Lu Hongfang, He Jianghua, et al. Emergy based comparison of farm cattle and tractor system on rice planting in Guangdong: A case study of the typical famers in Huiyang District[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(5): 105-110. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

自 1990 年以来, 随着中国农村改革的深入和土地承包制的稳固, 农业生产得到了巨大提升, 生产方式也发生了重大的转变。以广东省为例, 平均每百户年末拥有小型拖拉机数量从 1990 年的 5.90 台上升到 2003 年的 7.89 台。而同期的平均每百户年末拥有役畜数量则从 82.53 头下降到 50.12 头^[1], 也即从每 1.5 个农户拥有一头耕牛下降到平均 2 户拥有 1 头。小型拖拉机和役畜 (主要是耕牛) 是广东最普遍和最具有代表性的两种农业生产驱动力的产出方式。它们各自的产出效率、对资源的消耗和对当地环境系统的影响, 以及各自的可持续性都是值得关注的问题。如何定量地对上述问题进行分析 and 评价, 是农业生态系统研究中一个重要问题。

农业生产活动日益依赖化石燃料, 人类不得不开始

考虑化石燃料资源有限性所带来的问题。为此, Pimentel 等, Leach, Fluck 和 Uhlin^[2-5] 曾对农业生产中直接或间接投入的化石燃料进行了定量化的计算和评价。但他们的研究是将各种不同性质和来源的能量做简单、直接的数量研究, 没有考虑到不同形式或种类的能量在质量上的差别^[6]。以美国生态学家 H. T. Odum 为首的研究先驱们于 20 世纪 80 年代创立了能值理论方法。该方法将系统分析建立在“太阳能值”这一共同的生态经济价值度量基准之上^[7], 实现了各种不同质量和能量的统一度量、加减和比较, 弥补了传统能量分析的缺陷。

本研究运用能值整合理论方法, 以广东省惠州市惠阳区的 23 个中等经营水平的典型农户为研究对象, 对其代表性生产工具 (耕牛与小型拖拉机) 的资源消耗结构、生产效率与产出影响进行调研和系统分析, 以实现上述两种农业驱动力生产方式间生态经济效益的量化比较。

1 研究区域

广东惠州市惠阳区正处于以传统农业为主, 逐渐向现代农业转型的阶段。这主要表现在以下 2 个方面:

1) 耕作器具, 从原来的主要依靠人力和畜力 (耕牛) 向拖拉机特别是小型 (手扶) 拖拉机转变。在解放初

收稿日期: 2006-08-15 修订日期: 2007-03-28

基金项目: 国家自然科学基金项目 (30600072); 广东省自然科学基金项目 (04002319, 05006766)

作者简介: 白 瑜 (1980-), 男, 广东肇庆市人, 主要研究方向为生态经济。广州 中国科学院华南植物园, 510650。

Email: fishwhite@126.com

*通讯作者: 任 海 (1970-), 男, 湖北人, 博士, 研究员, 主要研究方向为系统生态学与景观生态学。广州 中国科学院华南植物园, 510650。Email: renhai@scbg.ac.cn

期,当地的农业机械除排灌机械外,基本是空白。当时农户使用的基本是传统农具及原始驱动力(人力和畜力)。自 20 世纪 60 年代初方使用半机械化农具和机械化农具。到 1994 年底,全县(当时还未撤县设区)拥有大中型农用拖拉机 378 台,共 5727 kW;小型(手扶)拖拉机 3304 台,共 36427 kW^[8]。

2) 农户耕作面积。本次调研的 23 个农户的耕作面积从 1/7 hm² 到 2.5 hm² 不等。既有传统自给自足模式下的生产者,也有逐步向规模化、专业化生产转变的农户。大量地利用不可更新能源(化石燃料)已成为当地农业生产的发展趋势,正经历着与其他发达国家(如瑞典)^[9]相似的农业发展历程。

以惠阳区为研究区域,开展耕牛和小型拖拉机两种农业趋势生产方式生态经济效益与影响的定量比较研究,不仅对于当地的农业生产实践有直接的现实意义,同时可为广东省乃至全国其他类似地区的农业生产实践提供参考。

2 研究方法

Rydberg 和 Jansén^[10]运用能值整合理论,对比分析了瑞典农役马与拖拉机两个驱动力产出系统的可持续性。其中所运用的农机能值计算公式如下。

单位面积耗费的农机能值

$$= Tr_{\text{钢铁}} \times \text{农机总质量} / \text{年耕作面积} / \text{使用年限} \quad (1)$$

此计算公式忽略了以下 2 个方面:

1) 忽视了农机组装中耗费的人力能值计量。公式(1)中的 $Tr_{\text{钢铁}}$ 只是钢铁的能值转换率。由于以往的积累中并没有计算农机的能值转换率,因而在已往的研究中不得已采用了钢铁的转换率,并用钢铁的折旧量代替了农机的折旧量。本研究补充考虑了农机组装过程所耗的人力投入,以求更准确地计量农机能值。

2) 在农机使用寿命期间须进行必要的维护和零配件更换,但公式(1)中显然也没有计入这部分的能值投入。根据 Doering^[11]的研究结果,这部分投入的经济价值高达农机价格的 89.10%,显然是不容忽略。本研究把它们作为投入项加以计算评价,并根据结构分析,须将这部分的能值投入分为两类: a) 零配件的原料能值; b) 日常维护和零配件更换所耗费的人力能值。

基于以上考虑,本研究基于 Doering^[11]总结的农机能量成本组成参数,对 Odum^[7]有关农业机械能值投入的计量公式进行如下补充,力图使农业机械的投入能值计算更趋合理和贴近现实:

将农机耕作单位面积水稻田所需的能值成本分为 3 类: a) 制造农机所用的原料能值; b) 原材料加工组装

成农机所耗人力能值; c) 农机使用期间所需的维护人力能值及其零配件能值。a 部分的计算公式与公式(1)相同,下面主要介绍 b 和 c 的计算。

$$\begin{aligned} \text{加工制造所耗人力能值} &= Tr_{\text{人力}} \times \text{生产单位质量} \\ &\text{农机所耗人力} \times \text{耕作单位面积水稻田折旧农机质量} \\ &= Tr_{\text{人力}} \times 3494 \text{ kcal} \cdot \text{kg}^{-1} \times \text{农机质量} \times 4186 \\ &\text{J} \cdot \text{kcal}^{-1} \times (1 - 17.90\%) / \text{使用年限} / \text{耕作面积} \end{aligned} \quad (2)$$

根据 Doering 的研究结果,农业机械使用期间所需零配件和维护人力成本是原机械售价的 89.10%,其中 1/3 为零配件的原材料能值,其余为维护的劳力及其他维护能值损耗^[11],本研究用农机能值取代农机售价,得到如下计算公式:

$$\text{零配件的原材料能值} = \text{农机能值} \times 89.10\% \times 1/3 \quad (3)$$

$$\text{维护的人力及其他能值损耗} = \text{农机能值} \times 89.10\% \times 2/3 \quad (4)$$

本研究以 2005 年在当地调研的数据,结合《农业生态系统能流的研究方法(一)》^[12]和 *Account for energy in farm machinery and building*^[11] 畜力劳动和农机使用的能量消耗计算方法,对水稻种植中耕牛和拖拉机的可持续性进行定量计算和比较。在人力资源的计算中,基于 Ulgiati 等的研究结果,根据人力资源再生中所消耗可更新与不可更新资源的比率,将人力资源的 10% 计入可更新资源,90% 计入不可更新资源^[13]。

在所调查的 23 个农户中,耕牛的平均体重为 400 ~ 500 kg/头,耕作面积为 1 hm²/a,可劳役寿命为 15a,年均劳役时间 47 d(合 281 h,6 h/d),饲喂稻草为 3656 kg/a,产出驱动力 1.82 × 10¹⁰ J/a^[14],产牛肉 5.22 × 10⁸ J/a^[10],喂养照料耕牛消耗的人力 182.50 h/a^[15],驾驭消耗人力 281 h/a。

惠阳区一台小型两轮驱动拖拉机(以东方红 110 为例,发动机功率 11 kW)的平均价格约为人民币 4500 元(2000 年)。耕作面积为 1 hm²/a 时,其使用寿命为 15a,年均消耗柴油 74.40 L,润滑油 1.65 L,冷却水 19 L,单位面积耕作时间 50 h/a,需要一个驾驶员的人力投入,产出驱动力 5.61 × 10⁸ J/(hm² · a)^[15]。

3 结果与分析

由惠阳区耕牛系统和小型拖拉机系统各自的输入-输出能值流表(表 1),归并、简化可得到两个驱动力产出系统的能值流量图(图 1、2)和能值指标比较表(表 2)。图 1 与图 2 分别表明两个系统能值流的流动方向及流量。图 1 的可更新资源 R 代表耕牛的饮用水消耗,而图 2 中的 R 则为拖拉机水箱用水。

表 1 耕牛与拖拉机系统每年每公顷的能值分析

Table 1 Emery analysis of farm cattle and tractor system on rice planting for every hectare per year

项 目	原始数据	单 位	能值转换率	能值 /sej
耕牛系统				
可更新物质投入				
水分输入	16451.1	kg	$8.99E+07^{[16]}$	$1.48E+12$
小计 R				$1.48E+12$
木制牛舍	183.75	kg	$5.54E+13^{[17]}$	$1.02E+16$
摄食稻草	3655.8	kg	$6.72E+09^{[18]}$	$2.46E+13$
木制牛具	2	kg	$5.54E+13^{[17]}$	$1.11E+14$
可更新投入小计				$1.03E+16$
人力投入 L (合计)	$6.82E+09$	J	$7.38E+06^{[13]}$	$5.04E+16$
$R_1 =$ 可更新投入 + $0.1L$				$1.54E+16$
不可更新工业辅助能投入				
铁制牛具	5	kg	$3.00E+12^{[17]}$	$1.50E+13$
工业辅助能投入小计				$1.50E+13$
$F_1 =$ 工业辅助能 + $0.9L$				$4.54E+16$
总计投入 $Y = R + R_1 + F_1$				$6.07E+16$
产出				
驱动力	$1.82E+10$	J	$3.34E+06$	
牛肉	$5.22E+08$	J	$1.16E+08$	
拖拉机系统				
可更新自然资源投入				
冷却用水	19	L	$8.99E+07^{[16]}$	$1.71E+09$
小计 R				$1.71E+09$
人力投入 L (合计)	$1.34E+09$	J	$7.38E+06^{[13]}$	$8.21E+15$
可更新有机能 $R_1 = 0.1L$				$8.21E+14$
不可更新工业辅助能投入				
柴油油耗	$3.76E+09$	J	$5.61E+04^{[7]}$	$2.11E+14$
润滑油使用	$1.22E+08$	J	$6.60E+04^{[7]}$	$8.05E+12$
钢铁	53.3	kg	$6.70E+12^{[9]}$	$3.57E+14$
耗材				$1.51E+15$
车房	$1.50E+02$	kg	$3.00E+12^{[10]}$	$4.50E+12$
工业辅助能小计				$2.54E+15$
$F_1 =$ 工业辅助能 + $0.9L$				$9.93E+15$
总计投入 $Y = R + R_1 + F_1$				$1.07E+16$
产出				
驱动力	$5.61E+08$	J	$1.92E+07$	

表 2 耕牛系统与拖拉机系统的能值指标比较

Table 2 Comparison among the emery ideces for farm cattle and tractor systems

能值比率	单 位	耕牛系统	拖拉机系统
能值功率密度 (能值投入 Y /单位面积)	$sej \cdot hm^{-2}$	6.07×10^{16}	1.07×10^{16}
能值投入/单位面积 (除去 驾驶员投入)	$sej \cdot hm^{-2}$	3.02×10^{16}	1.03×10^{16}
驾驶员投入能值/单位面积	$sej \cdot hm^{-2}$	3.05×10^{16}	4.65×10^{14}
驱动力产出	$J \cdot hm^{-2}$	1.82×10^{10}	5.61×10^8
能值转换率 (能值投入/产出 单位驱动力)	$sej \cdot J^{-1}$	3.34×10^6	1.92×10^7
能值投入/产出单位驱动力 (除去驾驶员投入)	$sej \cdot J^{-1}$	1.66×10^6	1.83×10^7
驾驶员投入能值/产出单位 驱动力	$sej \cdot J^{-1}$	1.67×10^6	8.29×10^5
能值投入/单位时间	$sej \cdot h^{-1}$	2.16×10^{14}	2.15×10^{14}
驾驶员能值投入/单位时间	$sej \cdot h^{-1}$	1.08×10^{14}	9.30×10^{12}
人力能值投入 (驾驶员投入 + 其他辅助人力投入)	$sej \cdot hm^{-2}$	5.04×10^{16}	8.21×10^{15}
能值指标			
可更新能值投入 ($R + R_1$)	$sej \cdot hm^{-2}$	1.54×10^{16}	8.21×10^{14}
可更新能值投入/总投入能 值 ($(R + R_1)/Y$)	%	25.30	7.64
不可更新能值投入 (F_1)	$sej \cdot hm^{-2}$	4.54×10^{16}	9.93×10^{15}
不可更新能值投入 / 总投 入能值 (F_1/Y)	%	74.70	92.40
能值产出率 ($EYR = Y/(F_1 + R_1)$)		1	1
环境负载率 ($ELR = F_1/(R + R_1)$)		2.95	12.10
可持续发展指标 ($ESI = EYR/ELR$)		0.34	0.08

注: 表中, Y 表示总产出 (投入) 能值; F_1 表示工业辅助能值 (不可更新 能值); R 为可更新自然资源能值; R_1 可更新有机能值。

3.1 耕牛与拖拉机的能值投入产出

由表 2 可见, 单位面积 (1 hm^2) 水稻田, 耕牛系统年 均耗费能值总量为 $6.07 \times 10^{16} \text{ sej}$, 其能值转换率为 $3.34 \times 10^6 \text{ sej/J}$ 。其中, 可更新资源 (如水、水稻秸秆、牛 舍等) 占 25.30%, 而不可更新性资源则主要来自人力 投入的不可更新部分。耕牛除了提供农业生产所需的驱 动力外, 还产出其他有机复合产品与服务, 如有机粪肥、 食用肉和皮革等 (图 1)。由于有机粪肥、皮革和牛肉与 耕牛驱动力是同一生产过程产生的复合产品, 消耗相同 的生态经济成本, 具有相同的能值, 为避免重复计算, 在 此不加以计入。

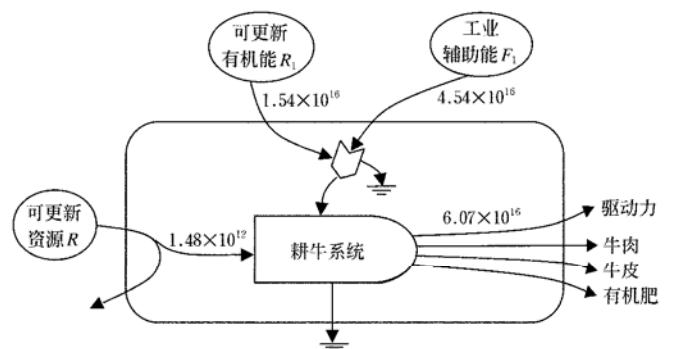


图 1 耕牛系统能值流系统图 (单位: sej)

Fig. 1 Emery system diagram of farm cattle system (Unit: sej)

机耕单位面积水稻消耗的能值总投入是 $1.07 \times 10^{16} \text{ sej/a}$, 所产出驱动力的能值转换率是 $1.92 \times 10^7 \text{ sej/J}$ 。其中, 柴油、润滑油和钢铁等不可更新资源能值

占总量的 92.40%。从能值投入总量分析,在相同的效用和耕作面积下,拖拉机系统的能值密度较耕牛系统更低。但若考虑各自耗费资源的性质后,情况则有所变化。拖拉机系统的不可更新能值投入比例(即表 2 中的 F_i/Y 指标)是耕牛系统的 1.24 倍。并且不仅没有具有正效益的副产品(如农业所需的有机肥料、肉类和皮革等),还对系统环境造成负面影响,如各种废气、噪音和机械报废处理等环境问题(图 2)。

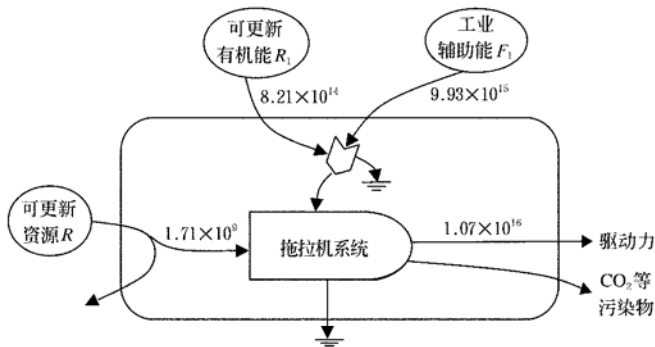


图 2 拖拉机系统能值流系统图(单位: sej)

Fig. 2 Energy system diagram of tractor system (Unit: sej)

耕牛系统的单位面积投入人力能值 (5.04×10^{16} sej/hm²) 是拖拉机系统 (8.21×10^{15} sej/hm²) 的 6.14 倍,表示耕牛需要更多的人力时间去维持和照顾。如果在人力资源短缺的地区,耕牛系统人力投入的边际成本将上升,但在中国农村人力资源相对丰富,农村隐性失业人口较多的现状下,使其存在具有现实基础。

较之于拖拉机驱动力,耕牛驱动力处于较低的能量等级。支持耕牛系统运转的可更新资源能值比例 (25.30%) 远比拖拉机系统对应的比例 (7.64%) 高 3.31 倍。而相反,支持拖拉机系统的能值投入中有 92.40% 是不可更新资源投入。因此,两个驱动力产出系统运行所需要的资源性质差别是两者最大的不同之处。

能值产出率 (EYR) 表达的是系统能值投资效率,即单位购入性投入所能带来产出能值^[7]。对于高度人为系统而言,主要投入是来自社会经济系统的购入性投入,系统对于自然资源的信赖性很低,能值产出率接近于 1。大量人为投入性资源的消耗使得耕牛系统的能值产出率与拖拉机系统一样接近于 1,另一个最广为使用的能值指标是环境承载率 (ELR),用于衡量系统能值投入结构差异对环境的影响,即单位可更新自然资源所承受的不可更新资源环境压力^[7]。由表 2 可知,主要由不可更新资源支撑的拖拉机系统的资源投入端环境压力是耕牛系统的 4.10 倍。能值可持续指数 (ESI),即 EYR/ELR ,是单位环境压力下系统能值产出效率表征系统可持续发展能力^[20]。由表 2 可知,耕牛系统的可持

续发展性指标 ESI 是拖拉机系统 ESI 值的 4.25 倍。显然,ELR 的差异,即系统能值投入结构的差异是导致两系统 ESI 巨大差异的主要原因。

以上 3 个指标均是系统投入结构端的矢量评价,并没有考虑到能值流(库)量的强度差异和系统产出的具体使用效果、环境影响和市场价格等情况。因此,单用这 3 个指标来进行系统分析与评价是不全面的,还需要结合流量等因子进行综合分析。以本研究为例,落实到单位面积水稻田上的比较结果表明,使用耕牛系统消耗的可更新资源量和不可更新资源量分别是拖拉机系统的 18.70 倍和 4.57 倍。这是因为,耕牛系统消耗的 83% 能值来自人力 (5.04×10^{16} sej/hm²),而人力资源的更新消耗中有 10% 为可更新资源,90% 属于不可更新资源(如电力、石化产品等)^[13]。同时,这表明耕牛系统对人力能值的耗费大且利用效率低下,急待改进。拖拉机系统产出驱动力具有更高的做功能力,在水稻田的耕作中其能值转换率是耕牛驱动力的 5.74 倍(含驾驶者投入),而耕牛驱动力的利用效率则具有极大的提升空间。

3.2 与瑞典同类研究的比较

广东水稻田耕牛驱动力的能值转换率为瑞典农役马^[10]驱动力的 1.79 倍。虽然其产出的驱动力能量 (1.82×10^{10} J/hm²) 是后者 (3.60×10^8 J/hm²) 的 50.56 倍,但前者的能值功率密度高达后者的 90.60 倍。这表明广东水稻系统耕牛驱动力利用效率过低,有极大的优化空间和可能。同时,如前所述,因单位面积人力能值的利用效率较低,所以提高人力资源利用效率是提高系统能值利用效率和降低耕牛驱动力能值转换率的主要途径。

表 3 瑞典农役马和拖拉机系统的主要能值与能量指标
Table 2 Main energy and energy indices for farm horse and tractor systems in Sweden

项 目	单 位	农 役 马	拖 拉 机
能值功率密度(能值投入/单位面积)	sej · hm ⁻²	6.70×10^{14}	7.20×10^{14}
能值转换率(能值投入/产出单位驱动力)	sej · J ⁻¹	1.87×10^6	1.20×10^6
人力能值投入	sej · hm ⁻²	3.87×10^{13}	7.67×10^{13}
驱动力产出	J · hm ⁻²	3.60×10^8	5.95×10^8

东方红 110 系列拖拉机驱动力的能值转换率高达瑞典 65 kW 拖拉机系统的 16 倍,而驱动力产出则仅为后者的 0.94 倍,表明目前广东水稻种植中普遍使用的东方红 110 拖拉机驱动力产出系统产出动力在耕作中的利用效率较高,拖拉机生产过程中的人力投入和使用过程中的维护投入是拖拉机驱动力产出系统的重要能值投入组分,不可忽略。

4 结论与讨论

Odum^[21]和Hall^[22]的研究表明, 经济发展与能源的消耗之间存在很强的相关性。农业也不例外: 随着化石燃料和其他不可更新资源(如钢铁)的大量使用, 农业生产能力也得到了提升。随着机械化程度的提高, 人类越来越少地受到自身体力和可更新资源的制约, 如美国1978年稻米生产人力投入仅需20~30 h/(hm²·a)^[23]。相对于拖拉机动力, 广东水稻生产中耕牛驱动力产出系统处于较低的能量等级, 其环境负载率(ELR)仅是拖拉机系统的24%, 而可持续能值指标(ESI)是拖拉机系统的4.25倍。但耕牛系统驱动力目前的利用效率太低, 仅是拖拉机驱动力利用效率的0.03, 有很大的优化空间; 而与瑞典农役马和65 kW拖拉机系统的比较结果进一步表明耕牛驱动力利用率具有大幅提高的可能性, 并有可能超过小型拖拉机系统, 而小型拖拉机系统驱动力利用提高的可能性则很小。随着不可更新资源的大量使用和化石燃料的有限性, 化石燃料价格的不断上涨; 加上广东省仍以小面积(2003年广东省农村居民主要农作物种植面积为0.446 hm²/户^[1])耕作农户为主的农业特点, 减少耕牛系统生产过程中过多的人力投入, 着力提高耕牛系统产出驱动力的利用效率比发展小型拖拉机系统更有潜力。

虽然本研究在农机系统的能值分析计算中补充考虑了农机生产过程中的人力投入和农机使用过程中的维护投入, 但仍然忽视两个动力系统的复合产出和副产品的生态经济影响。耕牛除了产出驱动力外, 还生产其他有机复合产品与服务, 如有机粪肥、食用肉和皮革等。这些产出都具有巨大使用价值。相反, 在拖拉机的生产和使用过程中非但缺乏类似有益的复合产品产出, 而且还排放出大量对人体和自然环境有负面影响的污染物。如何将这些有益或有害的复合产出或副产品的生态经济影响纳入能值系统分析与评价是未来的能值研究中需要解决的问题。

致谢: 感谢惠州市惠阳区良井镇、镇隆镇农技站曾其新主任、张思伟主任, 及惠阳区农业局叶玉平科长和邓焕兵先生等有关部门的同志在调研中给予的大力支持。

[参 考 文 献]

- [1] 广东省统计局. 广东统计年鉴[Z]. 北京: 中国统计出版社, 2004.
- [2] Pimental D, Hurd L E, Bellotti A C, et al. Food production and energy crises[J]. Science, 1973, 182: 443- 449.
- [3] Leach G. Energy and food production[M]. Guildford, Great Britain: IPC Science and Technology Press, 1976.
- [4] Fluck R C. Energy in farm production[A]. Stout B A. Energy in World Agriculture[C]. Amsterdam: Elsevier Science Publishers BV, 1992.
- [5] Uhlin H E. Energy productivity of technological agriculture-lessons from the transition of Swedish agriculture[J]. Agr Ecosyste Environ, 1999, 73: 63- 81.
- [6] Cleveland C J. Energy quality and energy surplus in the extraction of fossil fuels in the US[J]. Ecol Econ, 1992, 6: 139- 162.
- [7] Odum H T. Environmental accounting: emergy and environmental decision making[M]. New York: Wiley, 1996: 304- 311.
- [8] 惠阳农业志编委会. 惠阳农业志[Z]. 2001.
- [9] Jansén J. Energy analysis of early, mid and late 20th century Swedish farming systems: a local case study[J]. J Sustain Agric, 2001, 17(4): 9- 25.
- [10] Rydberg T, Jansén J. Comparison of horse and tractor traction using emergy analysis[J]. Ecological Engineering, 2002, (19): 13- 28.
- [11] Doering O C. Account for energy in farm machinery and building[A]. Pimentel D. Handbook of Energy Utilization in Agriculture[C]. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 1980: 9- 14.
- [12] 闻大中. 农业生态系统能流的研究方法(一)[J]. 农村生态环境, 1985, (4): 47- 52.
- [13] Uligati S, Odum H T, Bastianoni S. Emergy use environmental loading and sustainability: an emergy analysis of Italy[J]. Ecological Modelling, 1994, 73: 215- 268.
- [14] 吉田武纪. 耕牛的使役与饲养[M]. 刘 恒(译). 北京: 农业出版社, 1964: 10, 34, 40- 46.
- [15] 朱秉兰. 简明农机手册[M]. 郑州: 河南科学技术出版社, 2001: 183- 184.
- [16] Bastianoni S, Marchettini N, Panzieri M, et al. Sustainability assessment of a farm in the Chianti area(Italy)[J]. Journal of Cleaner Production, 2001, (9): 365- 373.
- [17] Odum H T, Odum E C. Energy analysis overview of nations[A]. International Institute of Applied Systems Analysis[C]. Laxenburg, Austria (WP- 83- 82), 1983: 469.
- [18] 白 瑜. 惠阳地区宽谷冲积土田不同生产方式可持续性的能值评价[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2006: 72.
- [19] Brown M T, Arding J. Transformities[A]. Gainesville, USA: Center for Wetlands[C]. University of Florida, 1991.
- [20] Brown M T, Uligati S. Emergy-based indices and ratios to evaluate sustainability: monitoring economies and technology toward environmentally sound innovation[J].

- Ecological Engineering, 1997, 9: 51– 69.
- [21] Odum H T. Environmental, power and society[M]. New York, USA: Wiley, 1971: 331.
- [22] Hall C A S, Cleveland C J, Kaufmann R. Energy and resource quality—the ecology of the economic process[M]. New York, USA: Wiley, 1986: 577.
- [23] Rutger J N, Grant W R. Energy use in rice production [A]. Pimentel D. Handbook of Energy Utilization in Agriculture [C]. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 1980: 93– 98.

Emergy based comparison of farm cattle and tractor system on rice planting in Guangdong: A case study of the typical famers in Huiyang District

Bai Yu^{1,2}, Lu Hongfang¹, He Jianghua³, Ren Hai^{1*}

(1. South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China;

2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Guangdong Institute of Eco-environment and Soil Sciences, Guangzhou 510650, China)

Abstract: Based on emergy theory and synthesis method, and investigation data of typical rice planting farmers in Huiyang District, Huizhou City of Guangdong Province as the case, an ecological economic evaluation and comparison was made on farm cattle system and pint-size tractor system which are two kinds of typical agro-traction system in China, from resources structure, transfer and production efficiency, environment loading and sustainability. The emergy based accounting function of mechanical motivity was optimized, and a new emergy transformity of tractor motivity was given out based on this study. Some of their emergy indices were compared with those of horse and tractor in Swedish agricultural system. The result shows that farm cattle system consumes 4.57 times' non-renewable resources and 6.14 times' labor resource that of tractor system on unit rice paddy. Compared with tractor traction, the output impetus of farm cattle is on a lower level in the energy hierarchy. The *ELR* of cattle traction is only 24% of the tractor system, and its *ESI* is 4.25 times that of tractor system, while the current energy efficiency of cattle traction in plough production is only 3% that of tractor impetus, and 1.98% that of horse system in Swedish agricultural system. That means there is large room to improve the efficiency of farm cattle traction. The efficiency of use pint tractor traction in Guangdong rice paddy is higher than that of 65 kW tractor system in Swedish agricultural system. To improve emergy efficiency, there is much more space to optimize farm cattle traction system than pint tractor traction system, by decreasing extra labor cost and increasing the use efficiency of its tractor output. Labor and maintenance cost during the production and use process of tractor were unneglectable emergy input of tractor system.

Key words: sustainability; energy hierarchy; emergy density; energy efficiency