

基于能值理论的农田—畜禽 生产系统可持续动态

黄黄¹, 时宇¹, 冉珊珊¹, 苏海蓉¹, 刘金娥^{1,2}

(1. 南京师范大学环境学院, 南京 210023; 2. 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 南京 210023)

摘要: 为了解我国东南丘陵山区农业生产动态及其可持续性, 以福建典型山区德化县为例, 构建废弃物能值比例、环境污染能值负产出等指标, 运用能值理论定量分析德化县 2007—2016 年农田—畜禽生产系统投入产出、环境负荷及可持续性的变化。结果表明: 德化县农田—畜禽生产系统能值投入以购买能值为主, 占能值总投入的 68%~79%, 水资源能值约占 21%~31%; 畜禽子系统能值产出占 72% 以上; 能值密度在 $2.68 \times 10^{12} \sim 3.33 \times 10^{12}$ sej·m⁻² 之间波动上升, 净能值产出率下降 40%, 环境负荷明显加重, 2015 年以来有所减轻; 可持续发展指数在 2007—2010 年短暂上升后快速下降, 由 1.14 降至 0.42。从构建的指标来看, 系统废弃物能值比例有所下降, 环境污染能值产出减少约 22%, 综合经济效益和废弃物利用情况, 近年来可持续发展状况逐渐好转。德化县目前正处于农田—畜禽系统产出结构调整期, 应增加系统内部反馈能值用量, 控制化肥、饲料投入, 提高废弃物利用率, 以实现可持续发展。

关键词: 能值分析; 丘陵山区; 农业生产系统; 发展动态; 环境负荷; 可持续性

党的十八大提出生态文明建设以来, 全面推进传统农业向现代生态农业转型已得到社会的广泛认可和关注^[1]。现代生态农业的核心是农业的可持续发展^[2]。传统高强度的农业耕作使土壤质量下降, 养分流失严重, 而工业化肥、农药的大量使用进一步加剧了温室气体排放、水体富营养化等环境问题。有研究表明, 我国农田化肥养分的利用率仅为 30% 左右^[3], 其余大部分则进入水体、土壤。随着我国畜禽养殖业的快速发展, 畜禽生产导致的污染问题日益凸出, 尤其是我国东南地区的福建、广东等省是畜禽粪便污染较重的区域^[4]。农田与畜禽生产作为我国农业活动的主要污染源, 在区域农业生产中往往不是单独进行的, 而是通过物质循环与能量流动紧密联系在一起。将农田生产与畜禽养殖系统整合起来研究, 一方面可以更为客观地反映区域农业生产的实际情况, 在分析地区农业生产可持续性方面更具说服力; 另一方面也为定量剖析农田与畜禽生产系统之间的物质与能量流动提供必要的条件。能值理论由美国著名的生态学家 Odum^[5] 于 20 世纪 80 年代创立, 他认为能值是某种流动或储存的能量所包含的另一种类别能量的数量。能值理论能够将人类生产活动的经济反馈和自然资源的“无偿”投入纳入到统一的核算体系, 允许对系统内外的物质流、能量流、货币流等进行综合分析, 通过量化系统间能值流的大小, 在反映系统的相互作用方面具有巨大的优势。目前能值理论在农田可持续发展研

收稿日期: 2018-11-30; 修订日期: 2020-01-15

基金项目: 国家重大科学研究计划项目 (2014CB953800); 国家自然科学基金项目 (41773077, 40973053); 江苏省环保课题 (2017021)

作者简介: 黄黄 (1993-), 男, 安徽蚌埠人, 硕士, 主要从事系统生态学研究。E-mail: 2451577273@qq.com

通讯作者: 刘金娥 (1973-), 女, 河南社旗人, 博士, 教授, 主要从事湿地生态学方面研究。

E-mail: liujine@njnu.edu.cn

究方面已得到较为广泛的应用^[6-11], 针对整个农业系统的能值研究也相对较多^[12-15], 但涉及到系统之间相互作用的研究则偏少。本研究针对农田与畜禽养殖系统, 定量分析两者之间的物质循环与能量流动过程, 以期揭示农田生产与畜禽养殖之间的相互作用, 为优化农业科学管理提供参考。

我国东南地区因其复杂的地形因素以及独特的气候条件, 农业生产特征表现出一定的差异, 同时也面临着更多的问题^[16]。研究东南丘陵山区的农业生产状况、可持续性对保护山区生态环境、促进山区经济长远发展有着重要的意义。本文以福建典型山区德化县为例, 运用能值理论定量分析德化县农田—畜禽生产系统投入产出, 结合生产过程中废弃物利用情况以及环境污染能值产出, 揭示东南山区农业生产现状、环境负荷及可持续性变化, 为推动地区农业发展转型提供依据。

1 研究方法与数据来源

1.1 研究区概况

德化县地处中亚热带季风区, 117°55′~118°32′E、25°33′~25°56′N之间, 平均气温19.5℃, 年均无霜期260天, 年均降水量1800mm左右。境内河流以戴云山为中心, 呈叶脉状向四周分布, 除降雨外, 河流水是德化农业灌溉用水的主要来源。德化山地众多, 海拔500~800m的山地占德化土地总面积的46.5%, 800~1856m的山地占总面积的39.3%, 最高点戴云山主峰位于戴云山国家级自然保护区内, 海拔1856m, 有“闽中屋脊”之称。全县耕地面积偏少, 约占总面积的7%左右。种植业和畜牧业是德化县农业系统的主要产业, 两者产值约占农业总产值的90%左右, 主要农作物为稻谷、薯类、水果、蔬菜、茶叶等; 德化县畜禽养殖数量较多, 且多为农户型散养, 规模化养殖程度低。2016年, 德化县实现地区生产总值194.83亿元, 农业总产值19.69亿元, 其中农田—畜禽生产系统产值为16.36亿元, 约占农业总产值的89.5%, 农民人均纯收入为13528元, 年均增长率达9.76%。

1.2 研究方法

1.2.1 能值分析理论基础

能值理论从地球生物圈能量运动角度出发, 以太阳能值来表达某种资源或产品在形成或生产过程中所消耗的能量。它是建立在能量系统学的基础上, 将各种不同形式的能量、物质通过能值转换率转化成可以相互比较的能值, 为环境负载计算带来极大的便利。能值转换率是能值理论中的重要概念, 能够反映不同形式能量的能质与能量等级的差别。地理生物圈能值基准是能值核算的重要基础, 也是能值转换率计算的依据。伴随能值分析的发展成熟, 能值基准已经过多次更新^[17], 采用更新的能值基准能够较好地保证能值计算的精确性, 便于各系统产出的比较研究^[18]。能值分析一方面克服了不同形式能量难以相互比较和综合的问题, 另一方面也避免了市场价格波动对物质价值的影响。农业生产的能量来源主要有两类: 一类来自于本地“无偿”使用的自然资源投入, 根据资源的可更新性可分为可更新自然资源和不可更新自然资源, 前者即阳光、风、雨水等, 后者主要是土壤有机质的损失; 另外一类主要来自于人类经济活动的反馈, 包括购买的物质、能量以及服务等, 反映当地农业的经济投入。农田与畜禽系统之间的相互作用主要体现在系统反馈能值方面, 德化县农田—畜禽生产系统内部反馈能值主要包括饲

料粮、畜力、秸秆还田、畜禽粪便作有机肥还田以及秸秆作饲料等形式（图1），其中农田子系统以饲料粮、秸秆作饲料的形式作用于畜禽子系统，畜禽子系统则通过畜力、粪尿还田的形式反作用于农田生产系统。

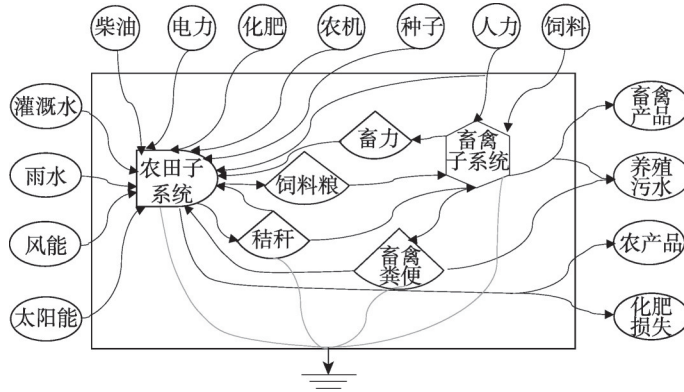


图1 德化县农田—畜禽生产系统能量流动分析

Fig. 1 Energy flow diagram of farmland-livestock production system in Dehua county

1.2.2 农田—畜禽生产系统能值指标体系

(1) 系统投入产出指标。将德化县农田—畜禽生产系统能值投入 (U) 分为可更新环境资源能值 (R)、不可更新环境资源能值 (N)、购买能值投入 (F)。其中，购买能值包括购买的物质 (M)、能量 (E)、人力及服务 ($L&S$) 等。系统能值产出 (Y) 按类型划分为农田系统产出 (Y_1)、畜禽系统产出 (Y_2)。

(2) 系统能值综合指标体系。本文引入能值理论中能值投资率 (EIR)、能值密度 (ED)、人均能值用量 (EPP)、净能值产出率 (EYR)、环境负载率 (ELR)、可持续发展指数 (ESI)、可持续发展综合指数 ($EISD$) 等评价指标，其中能值投资率和环境负载率是反映系统环境负荷的重要指标，能值密度与人均能值用量反映的是能值投入的多少，净能值产出率反映系统在一定资源投入下的生产效率，可持续发展指数则为衡量系统可持续发展能力的重要指标，各指标具体含义及计算公式如表1所示。同时根据德化县农田—畜禽系统生产特点，构建系统废弃物能值比例 (WER)、环境污染能值产出等指标，以反映系统废弃物的利用情况以及环境污染产出情况。废弃物能值主要为农田—畜禽生产系统未被利用的农作物秸秆和畜禽粪尿；环境污染能值产出是农田—畜禽系统生产过程中产生的环境成本，包括农田系统流失的化肥、农药污染，畜禽养殖对水体的污染等，其表达式为：

$$Y^* = \sum(1 - \mu_i) \times m_i \times Tr_i + \sum Q_i \times p_i \times Tr \tag{1}$$

式中： Y^* 是环境污染能值产出 (sej)； μ_i 为化肥、农药利用率 (%)； m_i 为化肥、农药使用量 (g)； Tr_i 为化肥、农药的能值转化率 (sej/g)； Q_i 为畜禽养殖产生的某种水污染物的实物量 (t)，包括COD、BOD和氨氮； p_i 是某种水污染物单位治理成本 (¥/t)； Tr 是能值货币比率 (sej/¥)。本文未考虑温室气体排放对环境的影响。

1.3 数据来源

德化县农田—畜禽生产系统投入产出数据主要来源于2008—2017年《德化统计年鉴》

表1 德化县农田—畜禽生产系统综合指标体系

Table 1 Comprehensive indicator system of farmland-livestock production system in Dehua county

评价指标	表达式	指标含义
可更新环境资源	R	反映本地无偿使用的可更新自然资源投入
不可更新环境资源	N	反映本地无偿使用的不可更新自然资源投入
购买资源能值	F	反映来自系统外部的经济投入
能值转换率 (UEV)	U/I	反映系统对资源的利用效率
净能值产出率 (EYR)	$(Y-Y')/F$	反映系统的生产效率和市场竞争力
能值投资率 (EIR)	$F/(R+N)$	反映系统购买资源所占比例和自给程度
人均能值用量 (EPP)	U/P	反映人民生活水平
能值密度 (ED)	U/A	反映资源投入的大小和利用强度
环境负载率 (ELR)	$(N+F)/R$	衡量系统环境压力的大小
可持续发展指数 (ESI)	EYR/ELR	衡量系统生产的可持续发展能力
可持续发展综合指数 ($EISD$)	$EYR \times EER/ELR$	反映系统的可持续发展综合效益
改进的可持续发展综合指数	$EYR \times EER/(ELR \times WER)$	兼顾经济效益和环境影响的可持续发展指标

注：(1) $F=M+E+L+S$ ；(2) $U=R+N+M+E+L+S$ ；(3) I 是系统产出的总能量；(4) A 为德化县农作物播种面积；(5) P 是农业从业人口；(6) EER 为农产品交易中的能值受益率，是产品产值相当的能值与产出能值的比率；(7) WER 为系统废弃物能值比例，是未利用的秸秆和畜禽粪尿能值与系统产生的秸秆和畜禽粪尿能值总量的比例。

《泉州水土保持志》《福建省水资源公报》、泉州统计信息网；各种投入产出能量折算系数参考朱玉林等^[19,20]；能值转换率主要参考Odum^[5]、Chen等^[21-23]、Lou等^[24]、Zhang等^[25]以及谢花林等^[26]、税伟等^[27]的研究成果。农作物秸秆、畜禽粪尿还田比例来源于刘晓永^[28]及农户调查数据；畜禽污水产生量及单位治理费用参考宾幕容等^[29]（表2~表5）。本文

表2 农田—畜禽生产系统主要投入产出能量折算系数及能值转换率

Table 2 Main input-output energy conversion coefficient and transformity of farmland-livestock production system

类型	能量折算系数/(J/kg)	能值转换率/(seJ/J或sej/g)	类型	能量折算系数/(J/kg)	能值转换率/(seJ/J或sej/g)
灌溉水	4.94E+03	2.19E+05	饲料	—	8.61E+11
土壤有机质	2.09E+04	9.40E+04	稻谷	1.51E+07	1.06E+05
氮肥	—	5.87E+09	甘薯	4.20E+06	1.06E+05
磷肥	—	2.26E+10	马铃薯	3.80E+06	1.06E+05
钾肥	—	2.21E+09	茶叶	1.63E+07	2.54E+05
复合肥	—	3.56E+09	水果	3.30E+06	6.74E+05
农药	—	2.06E+09	蔬菜	2.50E+06	3.43E+04
农膜	—	4.83E+08	瓜果	2.46E+06	3.13E+05
农机	—	8.57E+09	食用菌	2.50E+06	3.43E+04
柴油	4.40E+07	8.39E+04	猪肉	2.00E+07	2.16E+06
电力	3.60E+06	2.02E+05	牛肉	9.00E+06	5.08E+06
人力	3.50E+09	4.83E+05	羊肉	1.28E+07	2.54E+06
畜力	1.89E+09	1.86E+05	禽肉	5.50E+06	2.54E+06
有机肥	1.35E+07	3.43E+04	兔肉	5.20E+06	5.08E+06
种子	/	8.61E+11	禽蛋	8.40E+06	2.17E+06

注：电力能量折算系数单位为J/(kw·h)；人力、畜力能量折算系数单位为J/人、J/头；种子、饲料能值根据能值货币比率进行计算。

表3 主要农作物生产消费相关参数

Table 3 Main crop production and consumption related parameters

主要农作物类型	稻谷	甘薯	马铃薯	蔬菜
秸秆籽粒比	0.93	0.86	0.46	0.10
籽粒作饲料比例/%	30.70	67.50	28.30	23.30
秸秆还田比例/%	39.88	44.07	44.07	44.07

注：秸秆作饲料部分的数据来源于《德化统计年鉴》，根据能值货币比率进行计算。

表4 畜禽子系统粪尿还田相关参数

Table 4 Relevant parameters of feces and urine returning from livestock and poultry subsystems

畜禽养殖类型	猪	牛	羊	兔	鸡	鸭
粪便年排泄量/kg	730	7300	547.5	100.58	18.25	54.75
尿液年排泄量/kg	1100	3650	274	—	—	—
粪便有机质含量/%	15.0	14.5	28.0	28.0	25.5	26.2
尿液有机质含量/%	2.5	3.0	7.2	—	—	—
粪尿还田比例/%	18.0	27.0	11.5	27.0	11.0	11.0

表5 农田生产与畜禽养殖污染主要计算参数

Table 5 Main calculation parameters of farmland production and livestock and poultry farming pollution

参数类型	数值	参数类型	数值
化肥利用率/%	35.20	养殖污水排放系数/(kg/头/天)	15.38
养殖污水COD含量/(mg/L)	17808	COD单位治理成本/(元/t)	1875.60
养殖污水BOD含量/(mg/L)	4000	BOD单位治理成本/(元/t)	385
养殖污水氨氮含量/(mg/L)	524	氨氮单位治理成本/(元/t)	468.90

采用目前最新的全球能值基线 $12.0E+24 \text{ seJ} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[18]作为能值核算的基础。

2 结果分析

2.1 农田—畜禽生产系统投入产出能值流分析

2007—2016年德化县农田—畜禽生产系统能值投入在 $2.68 \times 10^{16} \sim 3.33 \times 10^{16} \text{ seJ} \cdot \text{hm}^{-2}$ 之间，来自经济反馈的购买能值占能值总投入的68%~79%。德化县农田—畜禽生产系统能值自给程度较低，本地环境资源能值占能值总投入的26%左右，其中雨水、灌溉水能值约占环境能值投入的98%。究其原因，德化县是福建多雨区之一，降水量相对丰富，雨水在当地农业生产中发挥着重要作用。由图2可知，研究期间德化县降水量波动较大，灌溉水用量自2012年以来有所减少，可更新资源能值投入总体有所下降；不可更新环境资源能值投入偏少，仅占环境资源能值的2%左右，自2013年以来耕地面积逐渐增加，土壤损失量有扩大的趋势。购买能值投入由 $2.21 \times 10^{16} \text{ seJ} \cdot \text{hm}^{-2}$ 增至 $2.54 \times 10^{16} \text{ seJ} \cdot \text{hm}^{-2}$ ，化肥、种子、饲料、人力及服务是购买能值投入的主要来源，约占购买能值的94%。德化县饲料能值投入比例较大，占购买能值投入的31%~44%，主要与当地畜禽养殖数量较多有关。2007—2016年种子能值用量快速增加，由 $1.09 \times 10^{15} \text{ seJ} \cdot \text{hm}^{-2}$ 增至 $5.93 \times 10^{15} \text{ seJ} \cdot \text{hm}^{-2}$ ，年均增长率达24.2%。由图3可知，种子能值用量与农民人均纯收入呈显著正相关关系 ($P < 0.01$)，表明当地农民收入水平的提高进一步刺激种子用量。人力能值是德化县农田—

畜禽系统生产投入的重要来源之一，占购买能值的17%左右，2007—2016年人力投入下降明显，尤其是2014年降幅达15.8%。近年来德化县从事农业生产的劳动力资源趋于减少，外出务工人员数量逐渐增多，呈现出向陶瓷工业转移的趋势。与之相反的是，农业机械能值增加较快，由 4.92×10^{14} sej · hm⁻²上升到 9.33×10^{14} sej · hm⁻²，增幅高达89.7%，说明德化县农业正处于传统人力耕作向机械化生产发展的过渡阶段。系统反馈能值方面，农田子系统对畜禽养殖系统的作用相对较大，在 1.33×10^{15} ~ 1.82×10^{15} sej · hm⁻²之间，约为畜禽子系统对农田生产系统作用的2.63倍。研究期间农田与畜禽子系统之间的相互作用能值均呈下降趋势，主要受畜禽养殖数量减少的影响。

从产出来看，2007—2013年系统产出能值波动较小，基本处于持平状态；2014年之后则快速降低，仅2015年降幅就高达23.4%。由图4可知，畜禽子系统能值产出的急剧减少是导致农田—畜禽生产系统能值产出快速下降的主要原因。研究期间德化县农田子系统能值产出相对稳定，但农产品产出结构有较为明显的变化，以稻谷、薯类为主的粮食作物产出比例不断降低，水果、蔬菜、茶叶等经济作物能值产出比例快速增大，占农田子系统产出的比例由59%增至73%，以经济作物为主的特点更加明显。德化县畜禽子系统产出约占农田—畜禽生产系统能值总产出的80%，2014年之后比例降至72%左右，且以猪肉能值产出为主。自2014年以来，德化县进一步加强对生猪养殖污染的防治，关闭了大量的生猪养殖场，导致猪肉能值快速减少，占畜禽产出比例由85%降至74%，在减少环境污染能值产出的同时，系统净能值产出急剧下降（图5）。

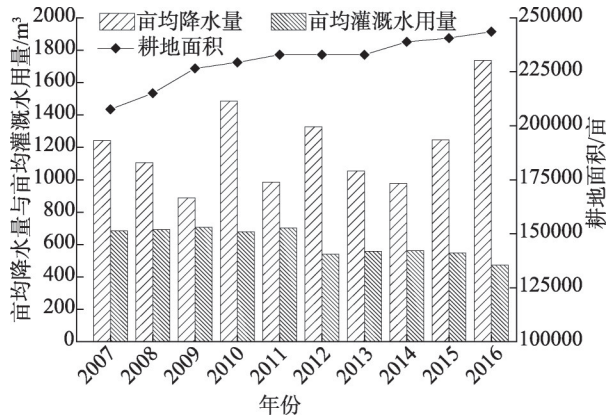


图2 2007—2016年德化县农田用水量及耕地面积变化情况

Fig. 2 Changes in farmland water use and cultivated land area in Dehua county from 2007 to 2016

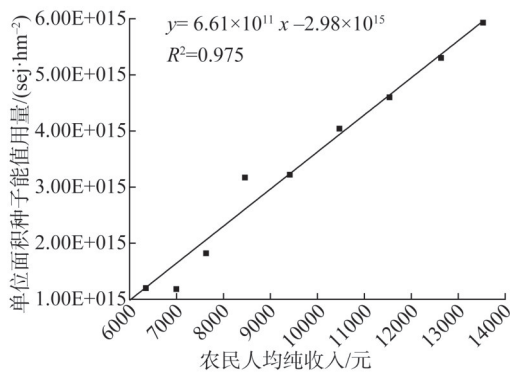


图3 种子能值用量与德化县农民人均纯收入之间的关系

Fig. 3 Relationship between seed energy input and per capita net income of farmers in Dehua county

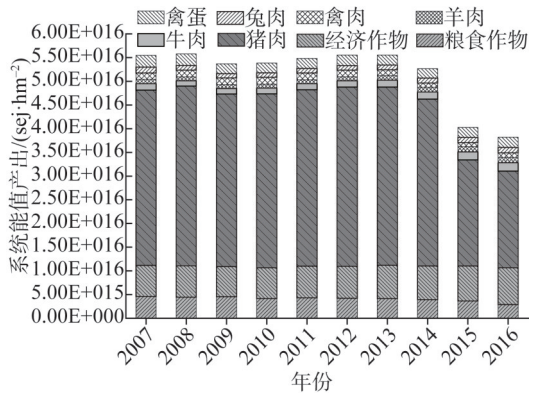


图4 2007—2016年德化县农田—畜禽生产系统产出结构变化

Fig. 4 Changes in output structure of farmland-livestock production system in Dehua county from 2007 to 2016

2.2 德化县农田—畜禽生产系统能值指标分析

2.2.1 能值投入指标

能值密度和人均能值用量可以反映系统能值投入强度。2007—2016年德化县农田—畜禽生产系统能值密度总体波动上升(图6a); 2007—2009年能值密度逐年下降, 其中购买能值贡献率达72%; 2010—2016年随着系统能值投入的增加, 能值密度波动上升, 由 $2.92 \times 10^{12} \text{ sej} \cdot \text{m}^{-2}$ 增至 $3.33 \times 10^{12} \text{ sej} \cdot \text{m}^{-2}$ 。与能值密度变化趋势相似, 2007—2016年德化县农田—畜禽系统人均能值用量快速增加, 由 $1.06 \times 10^{16} \text{ sej}$ 增至 $1.57 \times 10^{16} \text{ sej}$, 增幅约为48%。2007—2013年人均能值用量增幅较小, 2014—2016年受能值投入增加和农业从业人口数量快速减少的共同影响, 人均能值用量大幅提高。研究期间德化县农田—畜禽生产系统单位面积能值投入增加, 环境压力有所增大。

2.2.2 生产效率指标

净能值产出率和能值转换率是反映系统生产效率的重要指标。2007—2016年德化县农田—畜禽生产系统产品的能值转换率明显上升, 由 $3.56 \times 10^5 \text{ sej} \cdot \text{j}^{-1}$ 增至 $5.00 \times 10^5 \text{ sej} \cdot \text{j}^{-1}$; 净能值产出率由2.32降至1.38, 降幅达41%(图6b), 说明德化县农田—畜禽系统对资源的利用效率快速下降, 生产单位能量的产品需要投入更多的太阳能值。2007—2009年农田—

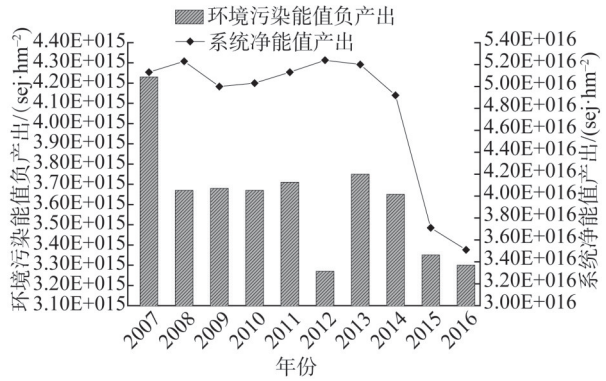


图5 2007—2016年德化县农田—畜禽生产系统环境污染负产出及净产出变化

Fig. 5 Environmental pollution negative output and net output change of farmland-livestock production system in Dehua county from 2007 to 2016

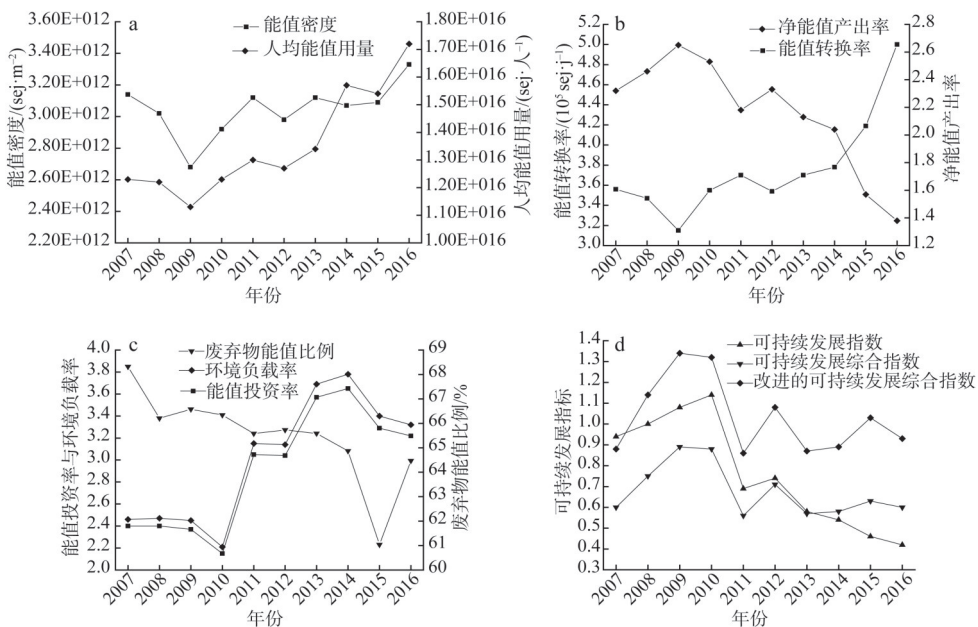


图6 2007—2016年德化县农田—畜禽生产系统能值综合指标变化

Fig. 6 Changes of energy comprehensive index of farmland-livestock production system in Dehua county from 2007 to 2016

畜禽系统能值转换率不断下降,净能值产出率逐年上升,这一时期系统的生产效率较高,产品竞争力较强;2010—2013年因系统能值投入增加,系统生产效率波动降低;2014—2016年由于能值产出大量减少,能值转换率快速增加,净能值产出率大幅下降,由2.04降至1.38,降幅高达32%,低于福建(1.58)和中国(2.08)的平均水平。相关性分析表明,净能值产出率与系统能值投入呈显著负相关关系($P < 0.01$),系统生产效率随能值投入的增加而下降。

2.2.3 环境负荷指标

能值投资率和环境负载率可以反映系统的环境负荷。由图6c可知,能值投资率与环境负载率变化趋势一致,均呈快速上升趋势,分为三个阶段:2007—2010年农田—畜禽系统能值投资率和环境负载率逐年下降,能值投资率保持在2.15~2.40之间,环境负载率由2.46降至2.21,由表6可知,这一时期饲料能值投入明显减少,环境资源能值投入下降后开始回升,系统环境压力较轻。2011—2014年随着饲料、种子用量增加和环境资源能值的持续减少,能值投资率明显上升,2014年达到了3.65,约为中国平均水平的3倍;同时环境负载率明显增大,由2.21增至3.78,超过湖南省(3.56),增幅达71%。2015—2016年受雨水能值快速增加的影响,系统的能值投资率和环境负荷逐渐降低。研究期间德化县农田—畜禽系统环境负荷明显加重,但从废弃物利用情况来看,农田—畜禽系统废弃物利用率有所提高,损失到环境中的废弃物比例逐渐减少(表7)。

2.2.4 可持续性指标

可持续发展是地区农业生产的关键问题。由图6d可知,德化县农田—畜禽生产系统可持续发展指数总体下降较快,由0.94降至0.42,约为福建省(0.84)的一半。2007—2010年可持续发展指数逐年上升,系统产出效率明显提高,环境负荷处于偏低水平,且2010年下降约10%,可持续状况较好;2011—2013年随着环境负荷的快速增大,系统产出效率下降,可持续发展指数快速降低,仅2011年降幅就高达39%;2014—2016年系统可持续发展指数下降速度放缓,年均下降10%。但从可持续发展综合指数(EISD)以及改进的可持续发展指标来看,可持续性下降趋势却相对缓和,仅在2007—2011年波动较大,2012—2016年系统可持续性相对稳定,说明德化县农田—畜禽系统产品经济效益较高,系统废弃物能值比例下降,综合经济效益和环境影响,可持续发展状况逐渐好转。总体来看,德化县农田—畜禽生产系统可持续性较差,为消费驱动型经济系统,德化县应加快畜禽产出结构调整,合理控制购买能值用量,提高资源利用效率。

由表8^[30-36]可知,德化县农田—畜禽生产系统能值利用强度较大,可持续发展指数偏低,低于我国平均水平(0.77),略高于沂蒙山区的蒙阴县和甘肃省,各指标基本与我国农业大省湖南省接近。受丘陵山区地形因素的影响,德化县农田—畜禽系统耕地面积偏少,畜禽养殖规模较大,对化肥、饲料为代表的经济反馈的依赖是导致山区农业环境负荷较大的重要原因;此外丘陵山地不适合开展大规模的机械作业,生产率不高,农业产出不足,也是德化县农业可持续发展能力偏低的原因之一。

3 结论与讨论

3.1 结论

(1) 2007—2016年德化县农田—畜禽生产系统能值投入以购买能值为主,且研究期间

表6 2007—2016年德化县农田—畜禽生产系统投入能值流分析
Table 6 Analysis of input emergy flow of farmland-livestock production system in

项目	Dehua county from 2007 to 2016									
	2007年	2008年	2009年	2010年	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年
太阳能	8.40E+13	9.16E+13	1.00E+14	9.10E+13	9.79E+13	8.99E+13	1.07E+14	1.06E+14	9.29E+13	8.59E+13
风能	1.25E+15	1.25E+15	1.25E+15	1.25E+15	1.25E+15	1.25E+15	1.25E+15	1.25E+15	1.25E+15	1.25E+15
雨水势能	3.10E+15	2.76E+15	2.22E+15	3.71E+15	2.46E+15	3.32E+15	2.63E+15	2.44E+15	3.11E+15	4.34E+15
雨水化学能	2.13E+15	1.89E+15	1.52E+15	2.55E+15	1.69E+15	2.28E+15	1.81E+15	1.68E+15	2.14E+15	2.98E+15
地球旋转能	4.37E+14	4.37E+14	4.37E+14	4.37E+14	4.37E+14	4.37E+14	4.37E+14	4.37E+14	4.37E+14	4.37E+14
灌溉水	5.96E+15	5.94E+15	5.55E+15	5.36E+15	5.06E+15	3.88E+15	4.02E+15	3.98E+15	3.92E+15	3.38E+15
可更新资源合计	9.06E+15	8.70E+15	7.77E+15	9.08E+15	7.52E+15	7.20E+15	6.65E+15	6.42E+15	7.04E+15	7.72E+15
表土损失能	1.74E+14	1.74E+14	1.74E+14	1.74E+14	1.74E+14	1.74E+14	1.74E+14	1.74E+14	1.74E+14	1.74E+14
不可更新资源	1.74E+14	1.74E+14	1.74E+14	1.74E+14	1.74E+14	1.74E+14	1.74E+14	1.74E+14	1.74E+14	1.74E+14
合计										
氮肥	1.82E+15	1.48E+15	1.41E+15	1.33E+15	1.33E+15	6.34E+14	1.34E+15	1.31E+15	1.34E+15	1.33E+15
磷肥	2.56E+15	2.06E+15	2.20E+15	2.26E+15	2.27E+15	2.27E+15	2.32E+15	2.28E+15	2.33E+15	2.36E+15
钾肥	1.91E+14	1.70E+14	1.71E+14	1.63E+14	1.64E+14	1.64E+14	1.70E+14	1.65E+14	1.69E+14	1.73E+14
复合肥	4.55E+14	3.66E+14	3.71E+14	3.70E+14	3.71E+14	3.71E+14	3.86E+14	3.80E+14	3.88E+14	3.87E+14
农药	2.86E+13	2.64E+13	2.48E+13	2.43E+13	2.42E+13	2.40E+13	2.42E+13	2.30E+13	2.39E+13	2.37E+13
农膜	3.03E+12	3.07E+12	3.08E+12	2.98E+12	2.98E+12	3.01E+12	3.26E+12	3.36E+12	3.45E+12	3.45E+12
柴油	7.33E+13	7.25E+13	7.07E+13	7.08E+13	7.13E+13	7.43E+13	7.36E+13	7.45E+13	7.70E+13	8.02E+13
机械	4.92E+14	5.05E+14	5.21E+14	5.68E+14	5.68E+14	6.70E+14	6.71E+14	6.39E+14	9.00E+14	9.33E+14
电力	1.21E+14	1.27E+14	1.16E+14	8.53E+14	8.25E+14	6.53E+14	7.69E+14	7.05E+14	6.35E+14	6.51E+14
种子	1.09E+15	1.20E+15	1.18E+15	1.82E+15	3.17E+15	3.22E+15	4.04E+15	4.60E+15	5.30E+15	5.93E+15
饲料	9.29E+15	9.45E+15	7.28E+15	6.83E+15	8.89E+15	8.65E+15	9.08E+15	9.00E+15	7.44E+15	8.36E+15
人力	4.31E+15	4.17E+15	4.02E+15	4.00E+15	4.07E+15	3.98E+15	3.92E+15	3.30E+15	3.39E+15	3.28E+15
服务	1.69E+15	1.64E+15	1.50E+15	1.62E+15	1.74E+15	1.74E+15	1.55E+15	1.59E+15	1.73E+15	1.91E+15
购买能值合计	2.21E+16	2.13E+16	1.89E+16	1.99E+16	2.35E+16	2.25E+16	2.43E+16	2.41E+16	2.37E+16	2.54E+16
能值投入合计	3.14E+16	3.02E+16	2.68E+16	2.92E+16	3.12E+16	2.98E+16	3.12E+16	3.07E+16	3.09E+16	3.33E+16
系统反馈能值	2.75E+15	2.80E+15	2.71E+15	2.65E+15	2.72E+15	2.68E+15	2.66E+15	2.57E+15	2.54E+15	2.15E+15
饲料粮	1.60E+15	1.55E+15	1.56E+15	1.46E+15	1.50E+15	1.47E+15	1.45E+15	1.40E+15	1.32E+15	1.09E+15
秸秆作饲料	1.97E+14	2.70E+14	2.47E+14	2.58E+14	2.84E+14	2.74E+14	2.76E+14	2.70E+14	3.47E+14	2.44E+14
农田对畜禽的作用	1.80E+15	1.82E+15	1.81E+15	1.71E+15	1.79E+15	1.75E+15	1.73E+15	1.67E+15	1.66E+15	1.33E+15
畜力	1.71E+14	1.50E+14	1.14E+14	1.41E+14	1.37E+14	1.32E+14	1.30E+14	1.28E+14	1.37E+14	1.14E+14
畜禽粪尿还田	5.10E+14	5.54E+14	5.19E+14	5.27E+14	5.31E+14	5.35E+14	5.34E+14	5.03E+14	4.69E+14	4.53E+14
畜禽对农田的作用	6.81E+14	7.04E+14	6.33E+14	6.68E+14	6.69E+14	6.67E+14	6.64E+14	6.31E+14	6.06E+14	5.67E+14

注：为避免重复计算，可更新环境资源能值取最大值雨水势能与灌溉水能值之和；种子、饲料、服务能值转换率单位为sej/Y。

比例明显上升，饲料、化肥、种子、人力是购买能值的主要来源；德化县畜禽产品产出比例较大，约为农田产出的3~4倍。

(2) 农田—畜禽系统生产效率较高，但随着能值投入强度的增大，系统对资源的利用效率快速降低，环境负荷明显加重，尤其在2011—2014年间，增幅高达71%；可持续发

表7 2007—2016年德化县农田—畜禽生产系统产出能值流分析

Table 7 Analysis of output emery flow of farmland-livestock production system in

Dehua county from 2007 to 2016

(sej·hm⁻²·a⁻¹)

项目	2007年	2008年	2009年	2010年	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年
稻谷	4.24E+15	4.00E+15	4.10E+15	3.70E+15	3.87E+15	3.76E+15	3.67E+15	3.44E+15	3.14E+15	2.37E+15
甘薯	1.94E+14	2.10E+14	1.93E+14	2.18E+14	2.11E+14	2.11E+14	2.16E+14	2.33E+14	2.38E+14	2.40E+14
马铃薯	1.87E+14	2.17E+14	2.38E+14	2.32E+14	2.35E+14	2.38E+14	2.48E+14	2.58E+14	2.77E+14	2.79E+14
茶叶	9.08E+13	1.02E+14	1.04E+14	1.06E+14	1.19E+14	1.22E+14	1.28E+14	1.28E+14	1.35E+14	1.53E+14
水果	5.90E+15	6.03E+15	5.78E+15	5.84E+15	6.01E+15	6.11E+15	6.39E+15	6.44E+15	6.68E+15	7.03E+15
蔬菜	4.93E+14	5.01E+14	4.46E+14	4.53E+14	4.54E+14	4.65E+14	4.75E+14	4.76E+14	4.97E+14	5.06E+14
瓜果	2.89E+13	2.82E+13	4.28E+13	8.31E+13	8.94E+13	6.22E+13	6.36E+13	6.56E+13	6.70E+13	6.91E+13
其他	4.25E+13	3.80E+13	3.48E+13	3.89E+13	3.94E+13	4.69E+13	5.62E+13	5.99E+13	6.25E+13	5.90E+13
农田系统产出	1.12E+16	1.11E+16	1.09E+16	1.07E+16	1.10E+16	1.10E+16	1.12E+16	1.11E+16	1.11E+16	1.07E+16
猪肉	3.70E+16	3.79E+16	3.64E+16	3.67E+16	3.72E+16	3.78E+16	3.76E+16	3.52E+16	2.24E+16	2.04E+16
牛肉	1.35E+15	1.11E+15	1.21E+15	1.22E+15	1.29E+15	1.33E+15	1.46E+15	1.50E+15	1.68E+15	1.77E+15
羊肉	9.25E+14	8.07E+14	7.71E+14	8.19E+14	8.19E+14	8.53E+14	9.59E+14	9.90E+14	1.08E+15	1.11E+15
禽肉	1.32E+15	1.43E+15	1.41E+15	1.46E+15	1.46E+15	1.40E+15	1.20E+15	8.99E+14	8.79E+14	1.00E+15
兔肉	1.27E+15	1.02E+15	9.29E+14	9.39E+14	9.37E+14	9.67E+14	1.01E+15	1.04E+15	1.11E+15	1.15E+15
禽蛋	2.44E+15	2.42E+15	2.05E+15	2.08E+15	2.14E+15	2.21E+15	2.12E+15	2.01E+15	2.10E+15	2.14E+15
蜂蜜	7.21E+13	1.02E+14	6.51E+13	7.88E+13	1.01E+14	1.01E+14	1.02E+14	1.13E+14	1.21E+14	1.19E+14
畜禽系统产出	4.44E+16	4.48E+16	4.28E+16	4.33E+16	4.40E+16	4.46E+16	4.45E+16	4.18E+16	2.94E+16	2.77E+16
能值产出合计	5.56E+16	5.60E+16	5.37E+16	5.40E+16	5.50E+16	5.56E+16	5.57E+16	5.29E+16	4.05E+16	3.84E+16
污染能值产出	4.23E+15	3.67E+15	3.68E+15	3.67E+15	3.71E+15	3.27E+15	3.75E+15	3.65E+15	3.35E+15	3.30E+15
系统净能值产出	5.13E+16	5.23E+16	5.00E+16	5.03E+16	5.13E+16	5.24E+16	5.20E+16	4.92E+16	3.71E+16	3.51E+16

表8 2016年德化县农田—畜禽生产系统能值指标与其他地区比较

Table 8 Emery index of farmland-livestock production system in Dehua county in 2016 compared with other regions

地区	能值密度 (10 ¹² sej·m ⁻²)	人均能值 用量/10 ¹⁶ sej	能值 投资率	净能值 产出率	环境 负载率	可持续 发展指数
德化县(2016年)	3.33	1.72	3.22	1.38	3.32	0.42
蒙阴县(2010年)	0.82	0.24	11.68*	2.58*	11.87*	0.22
恭城县(2009年)	1.33	1.13	1.21*	0.94	1.27	0.74
盐城市(2010年)	0.68	0.14	4.78	11.12	4.92	0.97
榆林市(2008年)	0.07	0.97	0.78	2.28	0.83	2.76
唐山市(2012年)	—	0.42	35.50*	4.14	21.48	0.19
福建省(2004年)	0.51	0.29	1.73	1.58	1.89	0.84*
湖南省(2012年)	1.15	0.34	3.47	1.50	3.56	0.42
甘肃省(2010年)	0.14	—	2.30	0.92	2.52	0.34
中国(2000年)	0.54	—	1.11	2.08	2.72	0.77
日本(2005年)	6.47	—	11.3	1.09*	13.8	0.08*
坎帕尼亚(2010年)	0.74	—	6.08	1.16	7.39	0.16

注：*表示通过相关文献数据计算得出。

展指数自2011年以来快速下降，系统可持续发展能力偏低，属于消费型经济系统。

(3) 德化县农田—畜禽系统产出结构目前正处于调整阶段, 近年来因防治畜禽污染, 畜禽产出大量减少, 废弃物能值比例和环境污染能值产出均有所下降, 综合经济效益和环境效应来看, 系统可持续发展状况逐渐好转。

3.2 讨论

(1) 当前我国农业环境污染已经相当严重, 化肥、农药、地膜以及畜禽养殖污染直接威胁着农业的可持续发展^[37]。本研究中化肥是德化县农田生产最主要的污染源, 约占环境污染能值的75%左右, 且随着农业从业人口数量的下降, 化肥污染有进一步加重的趋势, 这与史常亮等^[38]的研究结果一致。化肥投入量大而利用率低是造成化肥污染的主要原因, 因此控制化肥用量, 提高化肥利用率是减轻化肥污染的关键。已有研究表明, 通过有机无机配合施用, 能够提高氮素的当季利用率^[39,40]; 其次王火焰等^[41]认为推行根区施肥有利于提高化肥利用率和减少面源污染。德化县农田子系统有机肥能值用量约为化肥能值用量的22%, 仍有较大的潜力来提高有机肥施用比例, 取代部分化肥投入, 达到削减化肥用量, 提高化肥利用率的目的^[42]。另据福建省出台的耕地质量保护与提升方案, 到2020年主要农作物肥料利用率将达到40%, 畜禽粪便和农作物养分还田率达到60%以上, 则化肥能值用量可削减至少30%, 有机肥用量增加近一倍, 废弃物能值比例由65%左右降至40%, 环境污染能值产出减少14%。畜禽养殖污染是农业生产的又一重要污染源^[43], 德化县畜禽养殖数量较多, 产生大量的畜禽粪便和养殖污水。畜禽粪便作为一种重要的有机废弃物, 若不加以循环利用, 不仅造成资源浪费, 还会对环境造成重大威胁。因此促进农业废弃物的资源化利用是减少畜禽污染的重要方向^[44]。农田生产与畜禽养殖之间的相互作用是循环农业关注的重要内容之一。本研究中农田对畜禽的作用主要体现在农田产出的部分粮食作物以及秸秆以饲料形式进入到畜禽养殖系统^[45], 而在实际生产中农田为家庭消费系统提供的口粮也有一部分作为畜禽饲料; 畜禽养殖系统可以为农田生产提供必要的畜力, 从而减少人力投入, 同时养殖产生的部分畜禽粪尿以有机肥的形式还田到土壤, 增加农田肥力。考虑到畜禽粪便对土壤污染的潜在风险, 除少量的直接还田外, 大部分的畜禽粪尿经过沼气处理后将沼液和沼渣还田至土壤, 一方面提高了畜禽粪尿等有机废弃物的利用率, 同时也减轻了农田土壤可能的环境污染。目前德化县农村沼气建设工程尚处于试点阶段, 畜禽粪尿还田比例在11%~27%之间, 有较大的潜力开展沼气建设, 从而提高有机肥还田比例, 减少化肥用量。

(2) 能值理论通过分析系统的投入产出, 得到一系列反映系统生产状态的评价指标, 在农业研究领域有着广泛的应用, 但同时也存在一定的不足。受气候、生产过程和系统生产水平等因素的影响, 地区间的能值转换率可能存在一定的偏差; 可持续发展指数仅考虑产出与环境负荷之间的关系。陆宏芳等^[46]结合能值受益率构建了可持续发展综合指数(EISD), 综合考虑了系统的经济效益、生产效率及环境负荷。本文认为系统废弃物对环境的影响亦不容忽视, 将废弃物能值比例纳入到可持续发展指数的计算中, 能够更为全面地反映系统的可持续性。

参考文献(References):

- [1] 骆世明. 农业生态转型态势与中国生态农业建设路径. 中国生态农业学报, 2017, 25(1): 1-7. [LUO S M. Agroecology transition and suitable pathway for eco-agricultural development in China. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(1): 1-7.]

- [2] 赵其国. 现代生态农业与农业安全. 生态环境, 2003, 12(3): 253-259. [ZHAO Q G. Modern ecological agriculture and agricultural safety. Ecology and Environment, 2003, 12(3): 253-259.]
- [3] 闫湘, 金继运, 梁鸣早. 我国主要粮食作物化肥增产效应与肥料利用效率. 土壤, 2017, 49(6): 1067-1077. [YAN X, JIN J Y, LIANG M Z. Fertilizer use efficiencies and yield-increasing rates of grain crops in China. Soils, 2017, 49(6): 1067-1077.]
- [4] 仇焕广, 廖绍攀, 井月, 等. 我国畜禽粪便污染的区域差异与发展趋势分析. 环境科学, 2013, 34(7): 2766-2774. [QIU H G, LIAO S P, JING Y, et al. Regional differences and development tendency of livestock manure pollution in China. Environmental Science, 2013, 34(7): 2766-2774.]
- [5] ODUM H T. Environmental accounting: Emery and environmental decision making. Wiley, 1996, Doi: 10.2307/1127803.
- [6] LIU Z, LIU L, ZHANG S, et al. Comparison of emery efficiency and sustainable development capability between different agricultural circulation modes with straw utilization. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(15): 4739-4750.
- [7] 邓健, 赵发珠, 韩新辉, 等. 黄土高原典型流域种植业发展模式的能值分析. 应用生态学报, 2016, 27(5): 1576-1584. [DENG J, ZHAO F Z, HAN X H, et al. Emery analysis on different planting patterns of typical watersheds in Loess Plateau. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(5): 1576-1584.]
- [8] 高雪松, 邓良基, 张世熔. 基于能值方法的成都平原农田生态系统秸秆循环利用模式研究. 中国生态农业学报, 2014, 22(6): 729-736. [GAO X S, DENG L J, ZHANG S R. Comparison of different straw cycling modes in farmland ecosystems in Chengdu Plain based on emery theory. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2014, 22(6): 729-736.]
- [9] 刘水琴, 王万雄, 张洁琼. 基于能值分析的高台县农田生态系统可持续发展评价. 干旱地区农业研究, 2016, 34(4): 259-265. [LIU S, WANG W X, ZHANG J Q. Evaluation of sustainability for farmland ecosystem of Gaotai county based on emery analysis. Agricultural Research in the Arid Areas, 2016, 34(4): 259-265.]
- [10] 王千, 金晓斌, 周寅康. 粮食主产区种植业生态经济系统投入产出能值空间差异与态势研究: 以河北省为例. 自然资源学报, 2012, 27(1): 62-73. [WANG Q, JIN X B, ZHOU Y K. Spatial differences and trend of emery input and output indices of planting eco-economic system in major grain producing area: A case of Hebei province. Journal of Natural Resources, 2012, 27(1): 62-73.]
- [11] 赵桂慎, 姜浩如, 吴文良. 高产粮区农田生态系统可持续性的能值分析. 农业工程学报, 2011, 27(8): 318-323. [ZHAO G S, JIANG H R, WU W L. Sustainability of farmland ecosystem with high yield based on emery analysis method. Transactions of the CSAE, 2011, 27(8): 318-323.]
- [12] 郭力娜, 张梦华, 王海南. 基于能值理论的唐山市农业生态系统评价. 水土保持研究, 2017, 24(2): 300-306. [GUO L N, ZHANG M H, WANG H N. Evaluation of agricultural ecosystems in Tangshan city based on energy theory. Research of Soil and Water Conservation, 2017, 24(2): 300-306.]
- [13] 王旭熙, 彭立, 苏春江, 等. 四川省农业生态系统能值分析与可持续性评估: 基于五大经济区差异分析. 地域研究与开发, 2015, 34(5): 128-132. [WANG X X, PENG L, SU C J, et al. Emery analysis and sustainable development of agriculture ecosystems in Sichuan province: Analysis based on the five different economic regions. Areal Research and Development, 2015, 34(5): 128-132.]
- [14] 周科平, 王明球, 李斌, 等. 2012年湖南省农业生态系统的能值分析. 水土保持通报, 2015, 35(1): 297-302. [ZHOU K P, WANG M Q, LI B, et al. Emery analysis for agro-ecosystem of Hunan province in 2012. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2015, 35(1): 297-302.]
- [15] 周淑梅, 韩景元, 刘力军. 基于相图法的河北省农业生态经济系统可持续发展对策研究. 生态与农村环境学报, 2018, 34(12): 1074-1081. [ZHOU S M, HAN J Y, LIU L J. Countermeasures of Sustainable development for agricultural eco-economic system in Hebei province based on ternary diagram. Journal of Ecology and Rural Environment, 2018, 34(12): 1074-1081.]
- [16] 黄国勤. 中国南方农业生态系统可持续发展面临的问题及对策. 中国生态农业学报, 2017, 25(1): 13-18. [HUANG G Q. Problems and countermeasures of sustainable development of agricultural ecosystem in Southern China. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(1): 13-18.]

- [17] 刘耕源. 生态系统服务功能非货币量核算研究. 生态学报, 2018, 38(4): 1487-1499. [LIU G Y. A review of a non-monetary valuation of ecosystem services. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(4): 1487-1499.]
- [18] BROWN M T, CAMPBELL D E, VILBISS C D, et al. The geobiosphere emergy baseline: A synthesis. *Ecological Modelling*, 2016, 339: 92-95.
- [19] 杨灿, 朱玉林, 李明杰. 洞庭湖平原区农业生态系统的能值分析与可持续发展. 经济地理, 2014, 34(12): 161-166. [YANG C, ZHU Y L, LI M J. Economic system emergy analysis and sustainability development of agro-ecosystem of Dongting Lake District in Hunan province. *Economic Geography*, 2014, 34(12): 161-166.]
- [20] 朱玉林, 李明杰. 湖南省农业生态系统能值演变与趋势. 应用生态学报, 2012, 23(2): 499-505. [ZHU Y L, LI M J. Emery of agro-ecosystem in Hunan province: Evolution and trend. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(2): 499-505.]
- [21] CHEN D, LUO Z H, CHEN J, et al. Emery evaluation of a production and utilization process of irrigation water in China. *The Scientific World Journal*, 2013, 2013(1): 1-12.
- [22] CHEN W, GENG Y, DONG H J, et al. An emery accounting based regional sustainability evaluation: A case of Qinghai in China. *Ecological Indicators*, 2018, 88: 152-160.
- [23] CHEN W, ZHONG S, GENG Y, et al. Emery based sustainability evaluation for Yunnan province, China. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 162: 1388-1397.
- [24] LOU B, ULGIATI S. Identifying the environmental support and constraints to the Chinese economic growth: An application of the emery accounting method. *Energy Policy*, 2013, 55(249): 217-233.
- [25] ZHANG L X, TANG S J, HAO Y, et al. Integrated emery and economic evaluation of a case tidal power plant in China. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 182: 38-45.
- [26] 谢花林, 邹金浪, 彭小琳. 基于能值的鄱阳湖生态经济区耕地利用集约度时空差异分析. 地理学报, 2012, 67(7): 889-902. [XIE H L, ZOU J L, PENG X L. Spatial-temporal difference analysis of cultivated land use intensity based on emery in Poyang Lake Eco-economic Zone. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(7): 889-902.]
- [27] 税伟, 陈毅萍, 苏正安, 等. 基于能值的专业化茶叶种植农业生态系统分析: 以福建省安溪县为例. 中国生态农业学报, 2016, 24(12): 1703-1713. [SHUI W, CHEN Y P, SU Z A, et al. Emery-based agricultural ecosystem analysis for specialized tea planting: A case study of Anxi county, Fujian province. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2016, 24(12): 1703-1713.]
- [28] 刘晓永. 中国农业生产中的养分平衡与需求研究. 北京: 中国农业科学院, 2018. [LIU X Y. Study on nutrients balance and requirement in agricultural production in China. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences Dissertation, 2018.]
- [29] 宾慕容, 覃一枝, 周发明. 湖南省生猪规模养殖环境成本评估. 农业现代化研究, 2017, 38(6): 1044-1051. [BIN M R, QIN Y Z, ZHOU F M. Environmental cost assessment of hog scale production in Hunan province. *Research of Agricultural Modernization*, 2017, 38(6): 1044-1051.]
- [30] GASPARATOS A. Resource consumption in Japanese agriculture and its link to food security. *Energy Policy*, 2011, 39(3): 1101-1112.
- [31] GHISELLINI P, ZUCARO A, VIGLIA S, et al. Monitoring and evaluating the sustainability of Italian agricultural system. An emery decomposition analysis. *Ecological Modelling*, 2014, 271(271): 132-148.
- [32] SUN H H, SHI P J, PAN J H, et al. Emery evolution and trends analysis on agricultural ecological system in Gansu province. *Journal of Desert Research*, 2013, 33(4): 1273-1280.
- [33] 陈磊, 李海涛, 朱璐平. 基于能值的山区农业生态系统发展评价: 以蒙阴县为例. 干旱区资源与环境, 2014, 28(1): 66-71. [CHEN L, LI H T, ZHU L P. Emery assessment of mountain agricultural ecosystem: A case of Mengyin county. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2014, 28(1): 66-71.]
- [34] 李俊莉, 曹明明. 生态脆弱区资源型城市农业生态系统的能值分析: 以榆林市为例. 中国农业科学, 2012, 45(12): 2552-2560. [LI J L, CAO M M. Emery analysis of agro-ecosystem of resource-based city in vulnerable eco-regions: A case of Yulin city. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(12): 2552-2560.]

- [35] 杨谨, 陈彬, 刘耕源. 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. 生态学报, 2012, 32(13): 4007-4016. [YANG J, CHEN B, LIU G Y. Emergy evaluation for sustainability of biogas-linked agriculture ecosystem: A case study of Gongcheng county. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(13): 4007-4016.]
- [36] 杨志平. 基于能值理论的盐城市农业生态系统动态分析. 水土保持研究, 2013, 20(6): 311-315. [YANG Z P. Dynamic analysis on agri-ecological system of Yancheng city based on emergy theory. *Research of Soil and Water Conservation*, 2013, 20(6): 311-315.]
- [37] 窦营, 邓远建, 陈胜. 中国农业环境污染现状及治理的科技创新路径. 科学管理研究, 2016, (4): 76-79. [DOU Y, DENG Y J, CHEN S. China's agricultural environment pollution present situation and the technological innovation path. *Scientific Management Research*, 2016, (4): 76-79.]
- [38] 史常亮, 李赞, 朱俊峰. 劳动力转移、化肥过度使用与面源污染. 中国农业大学学报, 2016, 21(5): 169-180. [SHI C L, LI E, ZHU J F. Rural labor transfer, excessive fertilizer use and agricultural non-point source pollution. *Journal of China Agricultural University*, 2016, 21(5): 169-180.]
- [39] 马臣, 刘艳妮, 梁路, 等. 有机无机肥配施对旱地冬小麦产量和硝态氮残留淋失的影响. 应用生态学报, 2018, 29(4): 1240-1248. [MA C, LIU Y N, LIANG L, et al. Effects of combined application of chemical fertilizer and organic manure on wheat yield and leaching of residual nitrate-N in dryland soil. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(4): 1240-1248.]
- [40] 周建斌. 作物营养从有机肥到化肥的变化与反思. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(6): 1686-1693. [ZHOU J B. Reconsideration of the changes of plant nutrition from organic fertilizers to chemical fertilizers. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(6): 1686-1693.]
- [41] 王火焰, 周健民. 根区施肥: 提高肥料养分利用率和减少面源污染的关键和必需措施. 土壤, 2013, 45(5): 785-790. [WANG H Y, ZHOU J M. Root-zone fertilization: A key and necessary approach to improve fertilizer use efficiency and reduce non-point source pollution from the cropland. *Soils*, 2013, 45(5): 785-790.]
- [42] 刘红江, 蒋华伟, 孙国峰, 等. 有机—无机肥不同配施比例对水稻氮素吸收利用率的影响. 中国土壤与肥料, 2017, (5): 61-66. [LIU H J, JIANG H W, SUN G F, et al. Effect of different organic-inorganic fertilizers combination ratio on nitrogen use efficiency of rice. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2017, (5): 61-66.]
- [43] 鞠昌华, 芮菡艺, 朱琳, 等. 我国畜禽养殖污染分区治理研究. 中国农业资源与区划, 2016, 37(12): 62-69. [JU C H, RUI H Y, ZHU L, et al. Partition control of livestock and poultry breeding pollution in China. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2016, 37(12): 62-69.]
- [44] 邱乐丰, 龙文莉, 方豪, 等. 基于种养平衡的杭州市畜禽养殖环境承载力研究. 自然资源学报, 2016, 31(8): 1410-1419. [QIU L F, LONG W L, FANG H, et al. Regional environmental carrying capacity for livestock and poultry breeding based on planting-breeding balance in Hangzhou city. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(8): 1410-1419.]
- [45] 张晓萌, 王寅, 焉莉, 等. 长春地区食物链氮素养分流动趋势与特征分析. 自然资源学报, 2017, 32(2): 255-265. [ZHANG X M, WANG Y, YAN L, et al. The trend and characteristics of nitrogen nutrition in the food chain in Changchun. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(2): 255-265.]
- [46] 陆宏芳, 彭少麟, 蓝盛芳, 等. 基塘农业生态工程模式的能值评估. 应用生态学报, 2003, 14(10): 1622-1626. [LU H F, PENG S L, LAN S F, et al. Energy value evaluation of dike-pond agro-ecological engineering modes. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(10): 1622-1626.]

Dynamic research on sustainable development of farmland-livestock production system based on emergy theory

HUANG Huang¹, SHI Yu¹, RAN Shan-shan¹, SU Hai-rong¹, LIU Jin-e^{1,2}

(1. School of Environment, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China; 2. Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing 210023, China)

Abstract: To understand the agricultural production dynamics and sustainability in the hilly areas of southeast China, this paper took Dehua county, a typical mountainous area in Fujian province, as an example to quantitatively analyze the changes of input, output, environmental load and sustainability of farmland-livestock systems from 2007 to 2016, and constructed the indicators of waste emergy ratio and environmental pollution emergy negative output. The results showed that the input of the farmland-livestock system in the study area was mainly based on the purchasing emergy, accounting for 68%-79% of the total emergy input, and the emergy of water resources accounted for 21%-31%. The emergy output of livestock systems accounted for more than 72% of the total output. And the emergy density fluctuated between 2.68×10^{12} and 3.33×10^{12} sej \cdot m⁻², and emergy per person increased from 1.23×10^{16} sej to 1.72×10^{16} sej. The net emergy yield ratio decreased by 40%, and the environmental load increased significantly, which could have been maintained since 2015. The emergy sustainability index fell rapidly from 1.14 to 0.42 after a brief rise in 2007-2010. From the indicators of construction, the proportion of system waste emergy decreased, and environmental pollution emergy output decreased by about 22%. In terms of comprehensive economic benefits and waste utilization, the sustainable development of Dehua county has gradually improved in recent years. Dehua county is currently adjusting its output structure of farmland-livestock system. It should increase the amount of feedback emergy in the system, control fertilizer and feed input, and improve waste utilization to achieve sustainable development.

Keywords: emergy analysis; hilly areas; agricultural system; development dynamics; environmental load; sustainability