

县域农业系统资源综合利用的能值评价

——以广东梅县为例

陈建国, 罗晓燕, 罗文, 凌立文, 余平祥, 毛小娟, 曹咏

(华南农业大学 信息学院, 广东 广州 510642)

摘 要: 以广东梅县农业系统为研究对象, 以种植业与畜牧业之间的资源综合利用为核心约束, 构建农业结构优化模型、购买能值节约估算模型、货币能值增益估算模型, 对农业系统资源综合利用效果进行能值评价。结果表明: 2004—2008 年, 种养间资源综合利用能明显改变梅县的农业结构, 年均货币能值增加(2.15E+21)sej, 年均能值交换率从 2.57 增为 4.42, 年均环境负载率由 0.62 降为 0.17, 年均可持续发展指数从 9.27 增为 43.52。梅县农业资源综合利用既能降低环境负载率, 又能提高能值交换率, 促进农业可持续发展。

关 键 词: 农业资源; 能值评价; 农业结构优化; 广东梅县

中图分类号: F323.21

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2013)03-0304-06

Emergy evaluation on comprehensive utilization of resources in countywide agricultural system: A case study of Meixian county, Guangdong

CHEN Jian-guo, LUO Xiao-yan, LUO Wen, LING Li-wen, YU Ping-xiang, MAO Xiao-juan, CAO Yong

(College of Informatics, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: By taking the agricultural system in Meixian county of Guangdong province as research object, using the comprehensive utilization of planting and livestock husbandry resources as core constraint condition, constructing agricultural structure optimization model, estimation model of saved purchase emergy, estimation model of increased monetary emergy, the effect of resources comprehensive utilization was assessed based on emergy evaluation approach. The results showed that from 2004 to 2008 the agricultural structure of Meixian county was significantly changed by the comprehensive utilization of planting and livestock husbandry resources. The change of agricultural structure would increase (2.15E+21) sej annual mean monetary emergy. The annual mean emergy exchange ratio increased from 2.57 to 4.42 and the annual mean environment load ratio decreased from 0.62 to 0.17, and the annual mean emergy index for sustainable development increased from 9.27 to 43.52. In conclusion, implementing the comprehensive utilization of resources in Meixian county could decrease environment load ratio and increase emergy exchange ratio, so it could greatly promote agricultural sustainable development.

Key words: agricultural resources; emergy evaluation; agricultural structure optimization; Meixian in Guangdong

资源综合利用是农业生态化的题中之义。农业系统引入生产增益环能够改进能量利用效率, 促进物质循环, 降低环境的压力^[1-3], 为评估县域农业资源综合利用效果奠定基础。笔者以梅县农业系统

为研究对象, 以种植业与畜牧业之间的资源综合利用为主要约束, 运用数学规划和能值分析方法构建农业结构优化模型和相应的能值估算模型, 测算资源综合利用的效果, 现将结果报道如下。

收稿日期: 2013-02-10

基金项目: 教育部人文社科规划基金项目(11YJAZH010)

作者简介: 陈建国(1963—), 男, 湖南沅江人, 教授, 硕士生导师, 主要从事多功能农业价值分析与评价研究, cjq63@scau.edu.cn

1 研究对象与研究方法

1.1 研究对象

梅县位于广东省东北部，东经 115°47' ~ 116°33'，北纬 23°55' ~ 24°28'，全县面积 2 755.36 km²。梅县地处亚热带，属亚热带季风气候区，气候温和，光照充足，雨量充沛，四季宜耕宜牧，具有发展农、林、牧、渔等各业生产的有利条件。2008 年，梅县常用耕地面积 23 455.69 hm²，粮食产量 19.12 万 t，蔬菜产量 38.65 万 t，肉类产量 4.36 万 t，农业总产值为 39.69 亿元。

1.2 研究方法

首先分析资源综合利用对农业系统结构的影响，然后测算农业系统结构变动产生的购买能值和货币能值变化，在此基础上对农业系统的资源综合利用效果进行能值评价。

1.2.1 基于资源综合利用的农业结构优化模型

借鉴中国学者的研究成果^[4-8]，笔者提出如下基于资源综合利用的农业结构优化模型：

$$\max T = \sum_{i=1}^{10} P_i y_i S_i + \sum_{i=1}^{14} P_i y_i Y_i \quad (1)$$

s.t.

$$S_1 + S_2 + S_3 + S_4 + S_5 + S_6 \leq S_{\text{field}} \quad (2)$$

$$S_7 + S_8 + S_9 \leq S_{\text{orchard}} \quad (3)$$

$$S_{10} \leq S_{\text{fish}} \quad (4)$$

$$y_1 S_1 \leq k_1 N_{\text{people}} A_1 \quad (5)$$

$$y_2 S_2 C_1 + y_4 S_4 C_2 \leq k_2 N_{\text{people}} A_2 \quad (6)$$

$$y_6 S_6 \leq k_3 N_{\text{people}} A_3 \quad (7)$$

$$y_7 S_7 \leq k_4 N_{\text{people}} A_4 \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^{14} y_i Y_i \leq k_5 N_{\text{people}} A_5 \quad (9)$$

$$y_{14} Y_{14} \leq k_6 N_{\text{people}} A_6 \quad (10)$$

$$y_{10} Y_{10} \leq k_7 N_{\text{people}} A_7 \quad (11)$$

$$y_{11} Y_{11} \leq 0.50 k_5 N_{\text{people}} A_5 \quad (12)$$

$$y_{14} Y_{14} \leq 0.30 k_5 N_{\text{people}} A_5 \quad (13)$$

$$y_{12} Y_{12} \leq 0.05 k_5 N_{\text{people}} A_5 \quad (14)$$

$$y_{13} Y_{13} \leq 0.025 k_5 N_{\text{people}} A_5 \quad (15)$$

$$1 \frac{\sum_{i=1}^{14} (a_{i,\text{manure}} Y_i b_{i,\text{manure}}) + \sum_{i=1}^{12} (a_{i,\text{urine}} Y_i b_{i,\text{urine}})}{\sum_{i=1}^9 (f_i S_i)} \leq 1.5 \quad (16)$$

式(2~4)为资源约束；式(5~15)为消费需求约束；式(16)为农作物肥料需求对畜牧业规模的资源综合利用约束。式中：

T 为农业总产值(元)；

P_i 为第 i 类农产品或水产养殖、畜禽的单位价格(万元/hm² 或万元/t)；

y_i 为第 i 类农产品或水产养殖、畜禽的单位产量(t/hm² 或 kg/头)；

$S_i(i=1,2,3,\dots,10)$ 为第 i 种作物的年种植面积(hm²)，其中 1、2、3、4、5、6、7、8、9、10 分别代表水稻、大豆、甘蔗、花生、木薯、蔬菜、水果、桑、茶叶、渔业；

$Y_i(i=11,12,13,14)$ 为畜禽年养殖量(头)，其中 11、12、13、14 分别代表猪、牛、羊、家禽；

S_{field} 、 S_{orchard} 、 S_{fish} 分别为该地区年耕地、园地、淡水养鱼面积(包括复种，hm²)；

N_{people} 为该地区的总人口数(万人)；

$A_i(i=1,2,3,\dots,7)$ 为各类食物年均需求量(t/人)，其中 1、2、3、4、5、6、7 分别代表粮食、食用油、蔬菜、水果、肉、蛋和鱼；

$k_i(i=1,2,3,\dots,7)$ 为各类食物的需求量系数，其中 1、2、3、4、5、6、7 分别代表粮食、食用油、蔬菜、水果、肉、蛋和鱼；

C_1 和 C_2 分别为大豆、花生的单位出油率；

f_i 为种植业单位种植面积化肥需求量(kg/hm²)；

$b_{i,\text{manure}}$ 为养殖业饲养周期内产粪便总量(kg/头)；

$b_{i,\text{urine}}$ 为养殖业饲养周期内尿产量(kg/头)；

$a_{i,\text{manure}}$ 为养殖业单位粪便中的肥料含量；

$a_{i,\text{urine}}$ 为养殖业单位尿液中的肥料含量。

农业结构优化模型采用 Lingo 9.0 软件进行运算。

1.2.2 基于资源综合利用的购买能值节约估算模型

借鉴学者们的研究成果^[9-15]，笔者推导出资源

综合利用约束条件下饲料投入减少量和化肥投入减少量的估算模型：

$$F_{\text{feed}} = \frac{F_3}{Y_3} \times \left(0.0707 \times \sum_{i=1}^n Y_{1,i} C_{1,i} \right) \quad (17)$$

$$F_{\text{fertilizer}} = \left[\sum_{k=1}^n (Y_{3,k} \cdot C_{\text{manure},k} \cdot D_k) \cdot \beta_{\text{manure}} + \sum_{k=1}^n (Y_{3,k} \cdot C_{\text{urine},k} \cdot D_k) \cdot \beta_{\text{urine}} \right] \eta_{\text{fertilizer}} \quad (18)$$

式中， F_{feed} 为饲料投入减少的能值(sej)； F_3 为畜牧业生产系统不可更新购买能值的投入量(sej)； Y_3 为畜牧业生产系统肉类总产量(kg)； $Y_{1,i}$ 为种植业生产系统第 i 类产品产量(kg)； $C_{1,i}$ 为种植业生产系统第 i 类非目标产品比例； $F_{\text{fertilizer}}$ 为化肥投入减少的能值(sej)； $Y_{3,k}$ 为年内畜牧业生产系统第 k 种产品养殖量(头或只)； $C_{\text{manure},k}$ 和 $C_{\text{urine},k}$ 分别为畜牧业生产系统第 k 种产品每天的粪便和尿液产量(kg)； D_k 为畜牧业生产系统第 k 种产品养殖周期(d)； β_{manure} 和 β_{urine} 分别为粪便和尿液的营养物含量(折纯量)； $\eta_{\text{fertilizer}}$ 为肥料的能值转化率。

1.2.3 农业资源综合利用的货币能值增益估算模型

笔者建立农业资源综合利用的货币能值增益估算模型：

$$Z_{\text{economy}} = (F_{\text{feed}} + F_{\text{fertilizer}}) + (T - T_{\text{common}}) \quad (19)$$

式中， Z_{economy} 为农业资源综合利用的货币能值增益(sej)； T_{common} 为以当年农产品期望价格计算的农业结构优化前总产值的货币能值(sej)。

1.2.4 基于农业资源综合利用的能值评价模型

选取文献[16]的可持续发展指数测算梅县农业可持续发展水平。

$$EISD = (EYR \times EER) / ELR \quad (20)$$

式中， $EISD$ 为可持续发展指数(emergy index for sustainable development)； EYR 为能值产出率(emergy yield ratio)； EER 为能值交换率(emergy exchange ratio)； ELR 为环境负载率(environment load ratio)。

1.3 数据来源

环境资源总量、农作物种植面积、畜牧业养殖面积等原始数据来自 2005—2009 年《广东统计年鉴》和《广东农村统计年鉴》，以上来源缺失的少量数据从其他媒介引用或估算后补齐。

P_i 引自国泰安金融数据库和中国农产品价格网，少量缺失数据通过估算补齐； S_i 系数由梅县历年农作物单位产量的平均值估算得到； Y_i 系数源自文献[4]； A_1 、 A_2 和 A_4 通过查阅食品安全网，分别由人均 0.5 kg/d、0.75 kg/m 和 0.5 kg/d 估算获得； A_3 、 A_5 、 A_6 和 A_7 系数源自文献[6]； C_1 和 C_2 通过实际调查获得，分别为 0.15 和 0.225； $b_{i,\text{manure}}$ 、 $b_{i,\text{urine}}$ 、 $\alpha_{i,\text{manure}}$ 、 $\alpha_{i,\text{urine}}$ 系数源自文献[5]； f_i 系数由农作物资源网相应原始数据计算得到。

2 结果与分析

2.1 基于资源综合利用的梅县农业结构变动

依据公式(1~16)对 2004—2008 年梅县农业结构进行优化，将优化后的种植业、养殖业产量除以优化前的种植业、养殖业产量，其比值见表 1。从表 1 可看出，2004—2008 年，污染性强的生猪养殖和效益差的粮食种植规模下降了约 50%，效益好的蔬菜、花生等的种植规模和污染性较弱的羊、家禽等的养殖规模显著增加，梅县农业结构发生了明显改变。

表 1 2004—2008 年梅县农业产业结构优化后与优化前的比率

Table 1 Ratio of the production after and before agricultural industrial structure optimization during 2004—2008 in Meixian county %

项目	2004年	2005年	2006年	2007年	2008年	平均值
水稻	48.31	46.59	46.63	49.58	50.55	48.27
花生	332.00	314.00	307.00	310.00	306.00	313.00
木薯	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
蔬菜	208.00	208.00	213.00	241.00	220.00	218.00
水果	104.00	104.00	106.00	113.00	112.00	108.00
茶叶	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
渔业	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
猪	54.14	54.06	51.92	54.08	53.84	53.60
牛	89.15	89.03	84.93	140.00	128.00	101.00
羊	167.00	167.00	166.00	170.00	181.00	170.00
家禽	692.00	694.00	696.00	790.00	833.00	737.00

2.2 基于资源综合利用的梅县农业货币能值增益

根据梅县农业结构优化后的种植业和养殖业产量和公式(17~19), 得到梅县农业资源综合利用的货币能值增益估算结果(表 2)。5 年间梅县农业资源综合利用后年均农业产出增加值为(2.02E+21)

sej, 年均减少饲料投入(4.62E+19) sej, 年均减少肥料投入(8.13E+19) sej, 资源综合利用年均货币能值增益为(2.15E+21) sej, 是梅县农业年均总产值货币能值的 1.29 倍。这表明通过资源综合利用后梅县农业系统购买能值减少, 货币能值增加。

表 2 2004—2008 年梅县农业资源综合利用的货币能值增益估算

年份	$T-T_{common}$	F_{feed}	$F_{fertile}$	总产值货币能值	$Z_{economy}$	$Z_{economy}$ 与总产值货币能值的比率/%
2004	1.91E+21	4.68E+19	8.55E+19	1.67E+21	2.04E+21	122
2005	1.86E+21	4.30E+19	8.12E+19	1.63E+21	1.99E+21	122
2006	2.03E+21	3.66E+19	8.13E+19	1.84E+21	2.15E+21	117
2007	2.14E+21	5.02E+19	7.92E+19	1.51E+21	2.27E+21	150
2008	2.15E+21	5.42E+19	7.91E+19	1.66E+21	2.28E+21	137
平均	2.02E+21	4.62E+19	8.13E+19	1.66E+21	2.15E+21	129

2.3 基于资源综合利用的梅县农业能值评价

2.3.1 梅县农业系统的能值流量

假定劳动力、种子、农药、薄膜投入不变, 根

据 Odum 的能值分析方法和农业结构优化结果, 得到 2004—2008 年优化前、后梅县农业系统能值流量(表 3)。

表 3 2004—2008 年梅县农业结构优化前、后的农业系统能值流量

项目	优化前的农业系统能值流量					
	2004 年	2005 年	2006 年	2007 年	2008 年	平均值
太阳能	8.25E+19	8.25E+19	8.25E+19	8.26E+19	8.25E+19	8.25E+19
风能	2.31E+19	2.31E+19	2.32E+19	2.32E+19	2.32E+19	2.32E+19
雨水势能	7.25E+18	8.57E+18	1.32E+19	7.80E+18	1.12E+19	9.59E+18
雨水化学能	1.81E+20	2.15E+20	3.30E+20	1.95E+20	2.79E+20	2.40E+20
地球旋转能	7.97E+19	7.97E+19	7.98E+19	7.98E+19	7.98E+19	7.98E+19
合计(R)	1.81E+20	2.15E+20	3.30E+20	1.95E+20	2.79E+20	2.40E+20
表土净损失	9.57E+19	9.58E+19	9.64E+19	9.67E+19	9.63E+19	9.62E+19
合计(N)	9.57E+19	9.58E+19	9.64E+19	9.67E+19	9.63E+19	9.62E+19
氮肥	1.05E+20	3.78E+19	4.35E+19	4.93E+19	1.02E+20	6.76E+19
磷肥	1.65E+19	1.17E+19	1.16E+19	1.15E+19	1.16E+19	1.26E+19
钾肥	7.72E+18	7.83E+18	7.80E+18	7.77E+18	8.16E+18	7.85E+18
复合肥	3.28E+19	3.34E+19	3.40E+19	3.46E+19	3.48E+19	3.39E+19
农药	2.16E+18	2.09E+18	2.15E+18	2.21E+18	2.25E+18	2.17E+18
农膜	1.33E+17	1.40E+17	1.45E+17	1.50E+17	1.53E+17	1.44E+17
渔业中间消耗	2.65E+19	2.62E+19	2.37E+19	2.20E+19	2.40E+19	2.45E+19
小计(F)	1.91E+20	1.19E+20	1.23E+20	1.28E+20	1.83E+20	1.49E+20
畜禽业饲料消耗	1.17E+20	1.19E+20	1.11E+20	1.53E+20	1.70E+20	1.34E+20
劳动力	4.68E+18	4.71E+18	4.71E+18	4.71E+18	4.72E+18	4.71E+18
种子	2.43E+19	2.63E+19	3.14E+19	3.00E+19	2.77E+19	2.80E+19
合计(R _i)	1.46E+20	1.50E+20	1.47E+20	1.88E+20	2.02E+20	1.67E+20
总计(R+N+F+R _i)	6.15E+20	5.79E+20	6.97E+20	6.07E+20	7.61E+20	6.52E+20
收入货币能值	1.67E+21	1.63E+21	1.84E+21	1.51E+21	1.66E+21	1.66E+21
太阳能	8.25E+19	8.25E+19	8.25E+19	8.26E+19	8.25E+19	8.25E+19
风能	2.31E+19	2.31E+19	2.32E+19	2.32E+19	2.32E+19	2.32E+19
雨水势能	7.25E+18	8.57E+18	1.32E+19	7.80E+18	1.12E+19	9.59E+18

续表

项目	优化后的农业系统能值流量					
	2004年	2005年	2006年	2007年	2008年	平均值
雨水化学能	1.81E+20	2.15E+20	3.30E+20	1.95E+20	2.79E+20	2.40E+20
地球旋转能	7.97E+19	7.97E+19	7.98E+19	7.98E+19	7.98E+19	7.98E+19
合计(R)	1.81E+20	2.15E+20	3.30E+20	1.95E+20	2.79E+20	2.40E+20
表土净损失	9.57E+19	9.58E+19	9.64E+19	9.67E+19	9.63E+19	9.62E+19
合计(N)	9.57E+19	9.58E+19	9.64E+19	9.67E+19	9.63E+19	9.62E+19
氮肥	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
磷肥	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
钾肥	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
复合肥	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
农药	2.16E+18	2.09E+18	2.15E+18	2.21E+18	2.25E+18	2.17E+18
农膜	1.33E+17	1.40E+17	1.45E+17	1.50E+17	1.53E+17	1.44E+17
渔业中间消耗	2.65E+19	2.62E+19	2.37E+19	2.20E+19	2.40E+19	2.45E+19
小计(F)	2.88E+19	2.84E+19	2.60E+19	2.44E+19	2.64E+19	2.68E+19
畜禽业饲料消耗	3.67E+20	3.72E+20	3.52E+20	5.58E+20	5.98E+20	4.50E+20
劳动力	4.68E+18	4.71E+18	4.71E+18	4.71E+18	4.72E+18	4.71E+18
种子	2.43E+19	2.63E+19	3.14E+19	3.00E+19	2.77E+19	2.80E+19
合计(R _i)	3.96E+20	4.03E+20	3.89E+20	5.92E+20	6.31E+20	4.82E+20
总计(R+N+F+R _i)	7.02E+20	7.42E+20	8.15E+20	8.84E+20	7.27E+20	7.74E+20
收入货币能值	3.58E+21	3.50E+21	3.87E+21	3.66E+21	3.81E+21	3.68E+21

从表3可看出,5年间梅县农业系统不可更新的经济能值(F)投入由(1.49E+20) sej减少到(2.68E+19) sej,减幅为81.97%,其中氮肥、磷肥、钾肥、复合肥投入量降为0,说明基于资源综合利用的畜牧业非目标产品可完全满足种植业所需肥料的需要;种植业非目标产品充分利用后可节约(8.30E+19) sej的饲料,占畜牧业饲料投入的15.61%,说明通过资源综合利用后梅县农业系统购买能值减少。农业系

统获得的收入货币能值从(1.66E+21) sej增加至(3.68E+21) sej,增幅121.32%,说明通过资源综合利用后梅县农业系统货币能值增加。

2.3.2 梅县农业系统的能值指标

由表3结果得到优化前、后梅县农业系统环境负载率、能值产出率、能值交换率和可持续发展指数(表4)。

表4 2004—2008年梅县农业结构优化前、后的环境负载率、能值产出率、能值交换率和可持续发展指数

Table 4 ELR, EYR, EER and EISD for sustainable development before and after structure optimization during 2004—2008 in Meixian county's agriculture

项目	环境负载率						项目	能值产出率					
	2004年	2005年	2006年	2007年	2008年	平均值		2004年	2005年	2006年	2007年	2008年	平均值
优化前	0.88	0.59	0.46	0.59	0.58	0.62	优化前	1.82	2.15	2.58	1.93	1.98	2.09
优化后	0.22	0.20	0.17	0.15	0.13	0.17	优化后	1.65	1.72	2.03	1.47	1.57	1.69
增量	-0.66	-0.39	-0.29	-0.44	-0.45	-0.45	增量	-0.17	-0.43	-0.55	-0.46	-0.41	-0.40

项目	能值交换率						项目	可持续发展指数					
	2004年	2005年	2006年	2007年	2008年	平均值		2004年	2005年	2006年	2007年	2008年	平均值
优化前	2.72	2.82	2.64	2.49	2.19	2.57	优化前	5.63	10.28	14.81	8.15	7.48	9.27
优化后	5.09	4.71	4.60	4.02	3.69	4.42	优化后	38.18	40.51	54.93	39.40	44.56	43.52
增量	2.37	1.89	1.96	1.53	1.50	1.85	增量	32.55	30.23	40.12	31.25	37.08	34.25

从表4可看出,5年间梅县农业系统的年均环境负载率(ELR)由0.62减少到0.17。ELR用以评价系统的环境压力,其值越低,表明环境的可持续发展越好。表4中的结果表明:通过资源综合利用后

梅县农业结构的变动和农业系统的环境压力降低。年均可能值产出率(EYR)从2.09减少到1.69,这是由于优化后养殖业的结构得以调整,资源综合利用后饲料的净需求量增大。年均可能值交换率(EER)从2.57

增加到 4.42。 EYR 与 EER 的乘积从 5.37 增加到 7.47，说明通过资源综合利用，梅县农业系统能值产出的社会利益增加。农业系统年均可持续发展指数($EISD$)从 9.27 增加到 43.52，平均增加了 34.25，增长了 369.47%，说明资源综合利用的农业模式可产生显著的环境效益，可使梅县农业可持续发展水平倍增。

3 结论与讨论

a. 建立了基于资源综合利用的农业结构优化模型、购买能值节约估算模型和货币能值增益估算模型，提供了评价农业系统资源综合利用的分析方法。

b. 2004—2008 年，梅县农业种养间资源综合利用可明显改变农业系统结构，使梅县农业系统的年均购买能值减少(12.75E+19) sej，年均货币能值增加(2.15E+21) sej，年均环境负载率由 0.62 减少到 0.17，年均可持续发展指数从 2.09 减少到 1.69，年均可持续发展指数从 2.57 增加到 4.42，最终导致年均可持续发展指数从 9.27 增加到 43.52。以上结果表明，梅县农业资源综合利用既可降低环境负载率，又可提高能值交换率，促进农业可持续发展。

c. 根据文献[17]中的环境可持续性评价指标 $ESI(EYR/ELR)$ 进行计算，梅县农业系统加入资源综合利用约束后 ESI 从 3.60 增长到 9.98。在 ESI 基础上引入参数 EER 计算 $EISD$ ，弥补了 ESI 在产业维度的不足。然而，无论是 ESI 还是 $EISD$ 都无法直接显现农业系统的可持续发展水平，还需要借助其他的指标对 $EISD$ 或 ESI 科学客观地进行标定。

参考文献:

- [1] Zhang L X, Ulgiati S, Yang Z F, et al. Emergy evaluation and economic analysis of three wetland fish farming systems in Nansi Lake area[J]. Journal of Environmental Management, 2010, 92(3): 683–694.
- [2] 刘小燕, 刘大志, 陈艳芬, 等. 稻—鸭—鱼共栖生态系统中水稻根系特性及经济效益[J]. 湖南农业大学学报: 自然科学版, 2005, 31(3): 314–316.
- [3] 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.
- [4] 彭里, 王定勇. 重庆市畜禽粪便年排放量的估算研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(1): 288–292.
- [5] 李萍萍, 刘继展. 太湖流域农业结构多目标优化设计[J]. 农业工程学报, 2009, 25(10): 198–203.
- [6] 陈玉香, 周道玮, 张玉芬. 东北农牧交错带农业生态系统结构优化生产模式[J]. 农业工程学报, 2004, 20(2): 250–254.
- [7] 梁美社, 王正中. 基于虚拟水战略的农业种植结构优化模型[J]. 农业工程学报, 2010, 26(增刊1): 130–133.
- [8] 张领先, 傅泽田, 张小栓. 基于农民增收的我国农业国内支持的结构优化[J]. 系统工程理论与实践, 2007(4): 9–18.
- [9] 韩鲁佳, 闫巧娟, 刘向阳, 等. 中国农作物秸秆资源及其利用现状[J]. 农业工程学报, 2002, 18(3): 87–91.
- [10] 钟华平, 岳燕珍, 樊江文. 中国作物秸秆资源及其利用[J]. 资源科学, 2003, 25(4): 62–67.
- [11] 郭力, 赵云, 范艳. 驻马店市农村有机废弃物资源量概算及沼气潜力分析[J]. 河南农业, 2009(8): 18–19.
- [12] Krausmann F, Erb K H, Gingrich S, et al. Global patterns of socioeconomic biomass flows in the year 2000: A comprehensive assessment of supply, consumption and constraints[J]. Ecological Economics, 2008, 66: 471–487.
- [13] 刘艳枝. 饲料转化率的控制[J]. 国外畜牧学(猪与禽), 2010(3): 59–61.
- [14] 冯仰康. 反刍动物能量转化规律及营养调控总结报告[C]//莫放. 反刍动物营养需要及饲料营养价值评定与应用. 北京: 中国农业大学出版社, 2011: 144–168.
- [15] 张满昌, 田培育, 王洪亮, 等. 不同处理粗饲料对育肥羊生长性能的影响[J]. 饲料博览, 2005(3): 35–37.
- [16] 蓝盛芳, 钦佩, 陆宏芳. 生态经济系统能值分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- [17] Ulgiati S, Brown M T. Quantifying the environmental support for dilution and abatement of process emissions: The case of electricity production[J]. Journal of Cleaner Production, 2002(10): 335–348.

责任编辑: 王赛群

英文编辑: 王 库