

浙江省德清县农田生态系统能量投入的优化

叶旭君, 王兆骞

(浙江大学华家池校区农业生态研究所, 杭州 310029)

摘要:在实地调查研究的基础上,分析了 1984~1994 年浙江省德清县农田生态系统的能量投入和产出的动态变化趋势,根据农田生态系统的能量转化规律,建立了该县农田生态系统的能量投入产出模型,利用边际平衡理论和分析方法确定了该县农田生态系统的能量投入合理范围、最优投能量和最优投能结构。结果表明,德清县农田生态系统的平均单位面积能量投入和产出总量差异不大,但从其投能结构来看,差异却极其显著,表现为投入的有机能迅速减少,而投入的无机能大幅度增加。能量产投比虽有波动,但差异不甚明显。经优化确定,该县高产、中产和低产农田生态系统的能量投入合理范围分别为 $49.80 \sim 291.16 \times 10^3 \text{ J/hm}^2$ 、 $34.85 \sim 221.59 \times 10^3 \text{ J/hm}^2$ 和 $19.62 \sim 144.19 \times 10^3 \text{ J/hm}^2$;最优投能量分别为 $166.08 \times 10^3 \text{ J/hm}^2$ 、 $122.83 \times 10^3 \text{ J/hm}^2$ 和 $74.08 \times 10^3 \text{ J/hm}^2$;最优投能结构分别为 1.9019、3.7188 和 6.6225。表明为提高有限资源的利用效率,对该县不同类型的农田生态系统,应采取不同的投能策略。

关键词:农田生态系统;能量投入产出模型;能量投入合理范围;最优投能量;最优投能结构

Optimizing the external energy input into farmland ecosystems of Deqing County, Zhejiang Province

YE Xu-Jun, WANG Zhao-Qian (Agroecology Institute, Zhejiang University, Huajiaochi Campus, Hangzhou 310029, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(12): 2081~2088.

Abstract: This paper seeks to discuss the methodology to optimize the external energy input into farmland ecosystems, with an aim to providing realistic guidance to agricultural production. Since the 1960s a large number of studies on energy use in farmland ecosystems have been carried out and it has been shown that energy productivity and efficiency appears to be closely linked to specific characteristics of the land. Experimental work further revealed the sigmoidal relationship between energy input and output under given production conditions, showing that system energy output is positively related to input up to a certain point, after which system energy output asymptotically approaches a plateau level. This sigmoidal relationship is analogous with the ecological Logistic function of the population growth curve under limited spatial and resource conditions. Hence, the Logistic function was utilized to plot the relationship between energy input and productivity in farmland ecosystems. Using collected data from a specific farmland ecosystem, it is possible to calculate the potential maximum energy output, K_m , and the estimated coefficients, r and C , in the Logistic model. According to this model the theoretical energy output of the agroecosystem at any given energy input level could be calculated. The marginal energy productivity (MEP), the average energy productivity (AEP) and the elasticity of energy input (EEI) were utilized to characterize the energy use efficiency of agroecosystems. According to the characteristics of Logistic function, the dynamics of MEP, AEP and EEI in agroecosystems were thoroughly analyzed. It was concluded that the rational range of energy input may be calculated by setting EEI within the inequality $0 \leq \text{EEI} \leq 1$. In addition, it is theoretically possible to identify the optimum amount of energy input to the system where the optimal input represents the input that meets a balance between the output of the system and

基金项目:浙江省自然科学基金(698003)资助项目

收稿日期:2000-06-14; **修订日期:**2000-12-06

作者简介:叶旭君(1971~),男,浙江建德人,硕士,讲师。主要从事农田生态系统和农作制度方面的研究。

万方数据
WANFANG DATA

economic profit. The optimal input can be calculated from the principle of marginal equilibrium, which suggests that the optimal energy input should be the point where the marginal return per unit of input applied is equal to the marginal cost of the input. Given that energy efficiency is related to the pattern of energy inputs represented by a parabolic function as reported by Yang (1985), the optimal pattern of energy inputs, at which maximum energy efficiency is achieved, can be calculated by setting the first derivative of the parabolic function equal to zero. A case study in Deqing County, Zhejiang Province is presented to demonstrate the application of the above methodology. Time-series data (1984~1994) were collected from the local Yearbook of Deqing Agricultural Statistics, and an extensive on-site survey was also carried out to supplement the sources of data. Results indicated that the average total amount of energy inputs and outputs per unit area over the period showed little change, while the pattern of energy inputs changed greatly with significant increase in total energy from inorganic sources and dramatic decrease in that from organic sources.

The study area's farmland ecosystems in Deqing County were classified into three agroecosystems, namely the high-yielding agroecosystems, the medium yielding agroecosystems and the lower yielding agroecosystems. Three energy input and output databases were created, and then utilized to calculate K_m , r and C for the energy input and output models by setting the Logistic function in non-linear regression interface and running the programme in SPSS 8.0 software. The estimated values of K_m , r and C were utilized to establish the energy input and output models for the three agroecosystems. Using the above methodology, the rational ranges of energy inputs for the three agroecosystems were calculated and these are $49.80 \sim 291.16 \times 10^9 \text{ J/hm}^2$ for the high yielding agroecosystems, $34.85 \sim 221.59 \times 10^9 \text{ J/hm}^2$ for the medium agroecosystems and $19.62 \sim 144.19 \times 10^9 \text{ J/hm}^2$ for the lower agroecosystems; and the optimal amounts of energy inputs are $166.08 \times 10^9 \text{ J/hm}^2$, $122.83 \times 10^9 \text{ J/hm}^2$ and $74.08 \times 10^9 \text{ J/hm}^2$, respectively. Likewise, the coefficients of the parabolic function for the relationship between the pattern of energy inputs and efficiency were calculated, thereafter the optimal patterns of energy inputs for the three agroecosystems were identified as being 1.9019, 3.7188 and 6.6225, respectively. Due to similarity in the adopted farming practices for the region's agroecosystems, the total energy input levels for all the three agroecosystems are approximately the same. It is evident that the average total energy input into the farmland ecosystems in Deqing County is $150.0 \times 10^9 \text{ J/hm}^2$, which falls within the rational range of energy inputs for the high-yielding and medium yielding agroecosystems but is a little higher for the lower yielding agroecosystems. From the point of view of the optimum amounts of energy inputs, the input for the high-yielding agroecosystems was lower than the optimum amount, while it was higher than the energy input for the medium and lower yielding agroecosystems. The patterns of energy inputs of the three agroecosystems over the study period all showed a trend of decreasing due to the increasing proportions of the energy inputs from inorganic sources in the total energy inputs. According to this study the energy input to agroecosystems could be improved either in terms of the actual amount supplied, or in the pattern of that supply. As far as Deqing County is concerned, in order to increase output from all the three agroecosystems, total energy inputs must be increased to the high-yielding agroecosystems but be reduced to the medium and lower yielding agroecosystems, whilst the pattern of energy inputs should be more closely matched to the requirements of the three areas. In order to improve overall agricultural production, it was recommended that some land transformation measures be undertaken to improve land fertility in the medium and lower yielding agroecosystems. This would improve the potential energy productivity of these farmland ecosystems, and the ultimate increase in the system energy productivity would be realized by means of increasing external energy inputs into the farmland ecosystems. Otherwise, uninformed increases

in external energy inputs would not contribute to any increase in energy output and it could even do harm to the normal growth of crops. Therefore, adoption of the proposed energy strategies would contribute to the optimum allocation of limited resources, and help to realize the maximum resource utilization efficiency and agricultural productivity.

Key words: external energy; farmland ecosystems; energy input-output model; rational range of energy input; optimal amount of energy input; optimal pattern of energy input

文章编号:1000-0933(2001)12-2081-08 中图分类号:QS181 文献标识码:

在农业生产中,农田生态系统是一个能量投入与产出的开放性系统。自 20 世纪 60 年代以来国内外许多学者对农田生态系统的能量投入和产出进行了研究^[1]。结果表明,农田生态系统的能量生产力及能量效率与农田的土地特征密切相关^[1,2]。在同等能量投入水平下,高产地区的农田生态系统能量生产力较高,而低产地区的农田生态系统能量生产力则相对较低^[1,3]。从能量效率来看,在高产地区,由于当地能量投入已经达到较高水平,进一步增加投入,农田的边际能量净生产力反而开始下降,而在低产地区,由于传统较低的能量投入方式,增加能量投入在一定范围内其边际能量净生产力仍会继续提高^[4,5]。田间试验进一步表明在特定生产条件下农田生态系统的能量投入与产出呈 S 型关系^[1,3,6],即在达到一定能量投入水平之前,系统的能量产出随着能量投入的增加而增加,而超过这一投入水平之后,系统的能量产出不再继续增加,甚至出现下降趋势。此外,在一定的能量总投入水平下,不同的能量投入形式及其数量比例对农田生态系统的能量产出水平也有很大影响^[2,7]。杨怀森调查研究了河南省农田生态系统的投能结构(有机能与无机能之比)与能量效率之间的关系,结果表明投能结构与能量效率呈抛物线函数相关^[7]。本文试图从理论上对农田生态系统能量投入产出规律进行分析和探讨,探索对农田生态系统能量投入进行优化的方法,以期对农业生产提供指导。

1 农田生态系统的能量转化及其模型

合理的辅助能投入能使农田生态系统捕获更多的太阳能^[8],提高光合效率和光合作用量,进而促进系统生产力水平的提高。国内外许多研究表明^[1,3,6],农田生态系统投入与产出之间的关系呈 S 型,即在达到一定投入水平之前,系统边际生产力与投入呈正相关,而超过这一投入水平之后,便开始下降。由于几乎农田生态系统的各种投入都可以采用能量的形式加以表示^[9,10],因此可以得出结论,系统的能量投入与产出也同样呈 S 型关系。

农田生态系统能量投入与产出的这种 S 型关系符合生态学有限空间种群增长的 Logistic 方程,其数学模型可表示如下:

$$Y = \frac{K_m}{1 + e^{C-rX}} \quad (1)$$

其中, Y 为农田生态系统的能量产出; X 为农田生态系统的能量投入; r 为估算系数,表示能量产出的变化率; K_m 为在能量投入的各生产要素均为合理的条件下农田生态系统能够达到的潜在最大能量产出; C 为估算系数。

根据能量投入和产出的统计数据,即可拟合能量投入产出的 Logistic 曲线,求得给定农田生态系统的潜在最大能量产出 K_m 及方程的估算系数 r 和 C 。根据此拟合方程便可计算出任一能量投入水平下系统的理论能量产出。

2 农田生态系统能量合理投入范围的确定

除了常用的能量产投比外,农田生态系统的能量转化效率还可以用边际能量生产力(MEP)、平均能量生产力(AEP)和能量投入弹性(EEI)3 项指标来进行评价^[4,6,10]。

边际能量生产力(MEP)指在任一能量投入水平增加或减少单位能量投入而引起的能量产出变化量。对(1)式求导,可推出其表达式为:

$$MEP = \frac{dy}{dx} = \frac{K_m \cdot r \cdot e^{C-rX}}{(1 + e^{C-rX})^2} \quad (2)$$

由于自然生态系统也有一定的能量产出,因此,评价辅助能效率应该只考虑辅助能投入后产生的能量产出的增加量。平均能量生产力(AEP)指农田生态系统单位辅助能量投入所产生的能量产出的增加量,其表达式为:

$$AEP = \frac{(y - y^0)}{x} \quad (3)$$

其中, y^0 指在没有任何辅助能量投入的情况下系统的能量产出。

能量投入弹性(EET)指单位能量投入变化率所引起的能量产出变化率的大小,即能量投入变化 1% 引起能量产出变化的百分比。其表达式如下:

$$EEI = \frac{dy/(y - y^0)}{dx/x} = \frac{dy/dx}{(y - y^0)/x} = \frac{MEP}{AEP} \quad (4)$$

由(4)式可见,能量投入弹性也可以表示为单位平均能量生产力变化引起的边际能量生产力的变化量,并可根据(2)、(3)式计算获得。

根据 Logistic 方程的数学特征,农田生态系统的边际能量生产力(MEP)、平均能量生产力(AEP)和能量投入弹性(EET)曲线如图 1 所示。

如图 1 所见,在初始阶段,边际能量生产力大于平均能量生产力,能量投入弹性大于 1 且呈上升趋势,但当增加一定值后,能量投入弹性开始下降。当能量投入弹性降至 P 点,边际能量生产力等于平均能量生产力,能量投入弹性等于 1。由此可见,在低于 P 点的能量投入水平的情况下系统有较大的能量投入弹性,完全可以通过增加辅助能投入来获得更高的能量产出,因此可以认为低于 P 点的能量投入水平是不合理的。当能量投入水平高于 P 点的投入量,系统追加的单位能量投入获得的产出呈下降趋势,但能量总产出仍继续增加。此时,边际能量生产力和平均能量生产力都随着能量投入的增加而递减。并且在高投入水平,边际能量生产力趋向于 0,能量投入弹性也趋为 0,这表明在这样高的能量投入水平下,通过增加辅助能投入已不可能提高系统的能量产出,相反,还可能会降低系统的产出。

根据以上分析可以得出,能量投入弹性在 $0 \leq 1$ 范围内的能量投入水平是合理的能量投入范围。

3 最优投能量的确定

除了确定能量投入的合理范围外,理论上还可以确定系统能量投入的最优量。在此,最优投入量指能满足系统产出和经济效益平衡的能量投入水平。它并非指使系统获得最大能量产出或者使生产成本最小化的能量投入,也不是指获得最大效率的投入水平。根据边际平衡原理,最优投能量应该是使单位投入的边际产出等于该投入的边际成本的能量投入水平。也就是说,投入价格与产出价格之比等于边际能量生产力(MEP),即:

$$p_x \Delta Y = p_y \Delta X \quad (4)$$

或

$$p_x/p_y = \Delta Y/\Delta X = \lim_{\Delta X \rightarrow 0} (\Delta Y/\Delta X) \cong dY/dX = MEP \quad (5)$$

式(5)中, p_x 和 p_y 分别是能量投入和产出的价格。将(2)式代入(5)式,得方程如下:

$$p_x/p_y = (K_m \cdot r \cdot e^{C-rX})/(1 + e^{C-rX})^2 \quad (6)$$

假设(6)式中 $p_x/p_y = b$,经化简,求得此方程的解为:

$$X = (C - \ln \left[\frac{K_m \cdot r - 2b - \sqrt{(2b - K_m \cdot r)^2 - 4b^2}}{2b} \right]) / r \quad (7)$$

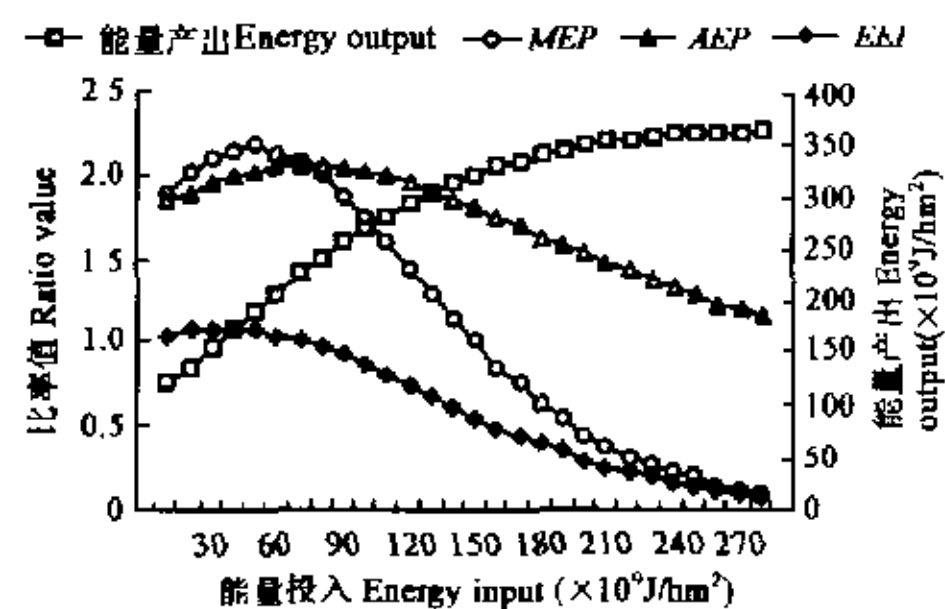


图 1 农田生态系统能量投入与能量产出(1)、MEP(2)、AEP(3)和 EEI(4)的关系

Fig. 1 Relationships between energy input and energy output (1), MEP (2), AEP (3), and EEI (4) in farmland ecosystems

上式中 K_m 、 C 和 r 为能量投入产出模型系数,可通过数学估算获得。 b 为能量投入和产出的价格比,可通过调查计算获得。此时求得的 X 值即为农田生态系统的最优投能量。

4 最优投能结构的确定

除了总投入量以外,不同的能量投入形式及其数量比例对农田生态系统的能量产出水平也有很大影响^[2,3]。一般而言,投入农田生态系统的能量形式可分为两类,即有机能和无机能。投入农田生态系统的有机能与无机能的数量比例则称为农田生态系统的投能结构。杨怀森调查研究了河南省农田生态系统的投能结构与能量效率之间的关系,结果表明投能结构与能量效率呈抛物线函数相关^[2]。其数学表达式为:

$$Y = a + bx - cx^2 \quad (8)$$

其中, Y 为能量效率,指能量产出与能量投入之比; X 为投能结构,指有机能投入与无机能投入之比; a 、 b 和 c 为估算系数,可通过数据进行数学估算。

根据抛物线函数的数学特征,取上式的一阶导数并设定其值等于 0(式 9),

$$\frac{dy}{dx} = b - 2cx = 0 \quad (9)$$

得

$$x = b/2c \quad (10)$$

此时求得的 x 值即为获得最大能量效率的最优投能结构。

5 浙江省德清县农田生态系统能量投入的优化

德清县位于长江下游太湖之南,是浙江省杭嘉湖地区农业发展较全面、生产水平较高和农业生态系统综合功能较佳的一个县。为获取资料方便,本文收集了该县 1984~1994 年的有关统计资料,并进行了较详细的实地调查研究,确保获得的资料和数据真实、可靠。经过对各种投入和产出的折能转换^[10],计算出了该县农田生态系统的能量投入和产出。

5.1 能量产投和效率趋势

为了能看出能量产投和效率的动态发展变化,本文把 1984~1994 年划分为 1984~1987、1988~1991 年和 1992~1994 年等 3 个年段,并以各年段的平均值来进行分析。从表 1 可知,这 3 个年段中,每公顷的能量投入和产出总量差异不大,但从其构成来看,差异却甚大。表现为 3 个年段中投入的有机能迅速减少,而投入的无机能大幅度增加。有机能的减少,主要是有机肥料能的减少,其次是劳动力投入的减少。无机能的增加,除了化学料肥增加外,还有农业机械和电力消耗的增加。从无机能增加的情况来看,不仅绝对数增加,在总投入量中所占的百分比也增加甚多,从而造成该县农田生态系统投能结构的大幅度降低。从能量产投比来看,3 个年段中 1988~1991 年段相对较小,其余两个年段相近,但总体差异不显著。

表 1 德清县农田生态系统能量的投入和产出比较

Table 1 Comparison between energy input and output in farmland ecosystems of Deqing County

能量总投入 Total energy input ($10^9\text{J}/\text{hm}^2$)	劳动力 Labor input		有机肥 Organic fertilizer		无机肥 Inorganic fertilizer		电力 Electricity		农业机械 Machinery		其它 Miscellany				
	折能 Energy	占总投 能比例	折能 Energy	占总投 能比例	折能 Energy	占总投 能比例	折能 Energy	占总投 能比例	折能 Energy	占总投 能比例	折能 Energy	占总投 能比例			
	($10^9\text{J}/\text{hm}^2$)	(%)	($10^9\text{J}/\text{hm}^2$)	(%)	($10^9\text{J}/\text{hm}^2$)	(%)	($10^9\text{J}/\text{hm}^2$)	(%)	($10^9\text{J}/\text{hm}^2$)	(%)	($10^9\text{J}/\text{hm}^2$)	(%)			
1984~ 1987	146.6	19.2	13.10	70.4	48.02	27.9	19.03	5.7	3.89	11.1	7.57	12.3	8.37		
1988~ 1991	154.2	13.2	8.56	40.5	26.26	41.1	26.65	22.1	14.33	24.5	15.89	12.9	8.37		
1992~ 1994	152.8	5.8	3.80	20.4	13.35	58.3	38.15	25.6	16.75	28.0	18.32	14.7	9.62		
能量总产出															
Total energy output ($10^9\text{J}/\text{hm}^2$)				投能结构				能量产投比							
Pattern of energy input				Ratio of energy output to input											
1984~1987				347.7				2.04				2.37			
1988~1991				318.8				0.68				2.07			
1992~1994				358.3				0.29				2.35			

5.2 能量投入产出模型的建立

为分析和比较不同土地类型农田生态系统能量产投关系和能量生产潜力的差异,本文计算了所有受调查农田生态系统的能量投入和产出,并参照刘巽浩的不同生产力水平农田生态系统的划分标准^[1]和德清县的实际生产情况把该县农田生态系统分为高产、中产和低产 3 种类型(其中高产类型产量 $>6000\text{kg}/\text{hm}^2$,中产 $4125\sim 6000\text{kg}/\text{hm}^2$,低产 $<4125\text{kg}/\text{hm}^2$)。将计算获得的 3 类农田生态系统的能量投入和产出数据输入 SPSS 8.0 统计软件^[11],在非线性方程回程序界面下建立能量投入产出的 Logistic 方程,运行回归程序,求得高产农田生态系统能量投入产出模型的 K_m 、 r 和 C 分别为 $388.46 \times 10^3\text{J}/\text{hm}^2$ 、1.0074 和 0.0301,中产农田生态系统的 K_m 、 r 和 C 分别为 $254.17 \times 10^3\text{J}/\text{hm}^2$ 、0.8941 和 0.0382,低产农田生态系统的 K_m 、 r 和 C 分别为 $112.32 \times 10^3\text{J}/\text{hm}^2$ 、0.7120 和 0.0542。把经拟合获得的 K_m 及估算系数 r 和 C 代入能量投入产出模型(1)式,建立德清县 3 类农田生态系统的能量投入产出模型(表 2)。

5.3 能量投入合理范围、最优投能量和最优投能结构的确定

在建立德清县 3 类农田生态系统能量投入产出模型的基础上,根据上文(2)、(3)和(4)式便可求得这 3 类农田生态系统的边际能量生产力、平均能量生产力和能量投入弹性(图 2~图 4)。

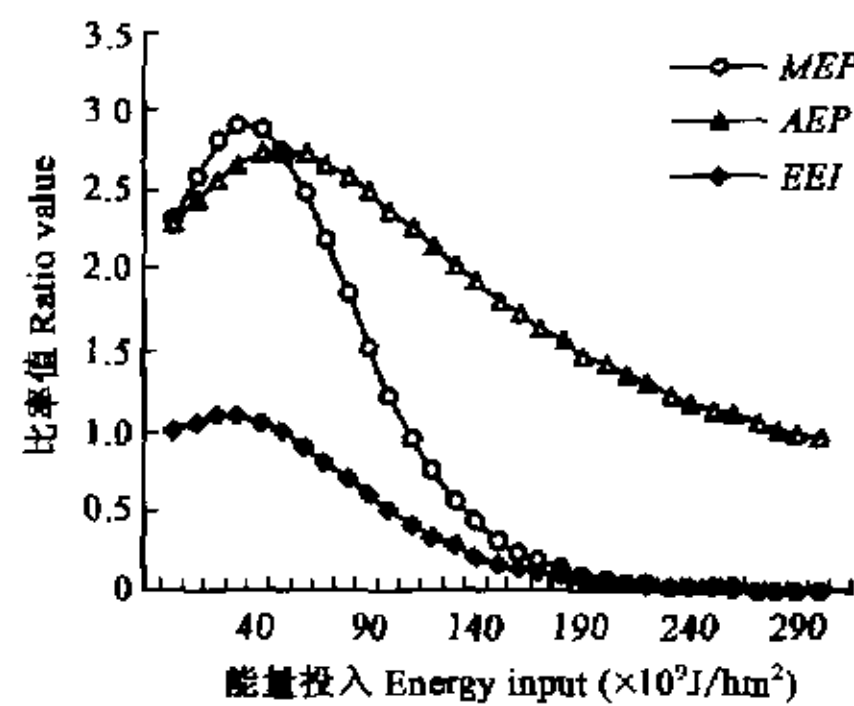


图 2 德清县高产农田生态系统的 MEP、AEP 和 EEI

Fig. 2 MEP, AEP and EEI in high-yielding farmland ecosystems of Deqing County

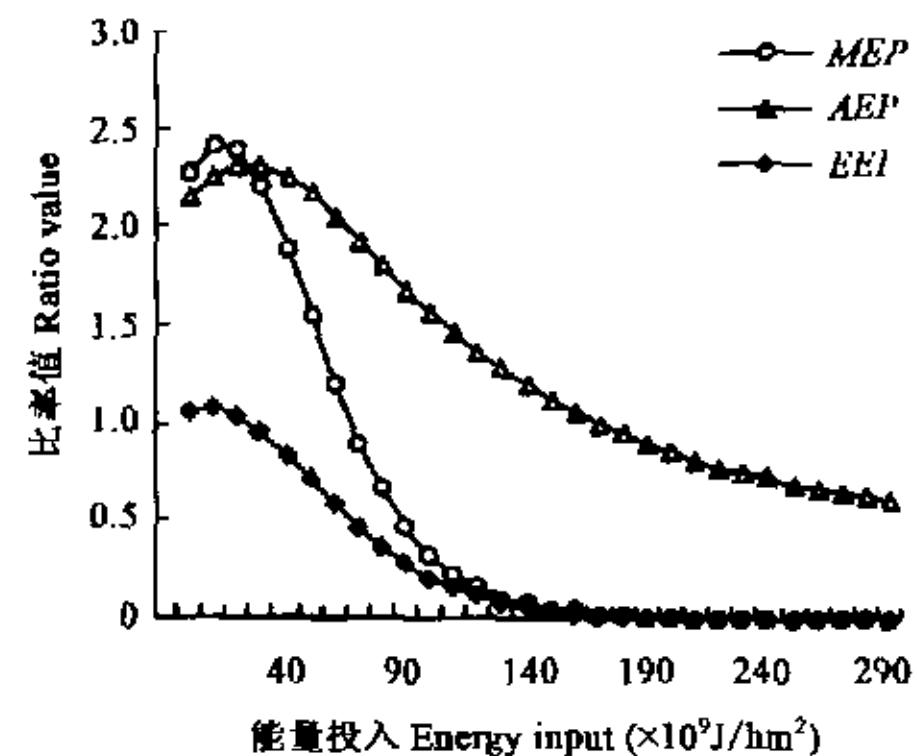


图 3 德清县中产农田生态系统的 MEP、AEP 和 EEI

Fig. 3 MEP, AEP and EEI in medium-yielding farmland ecosystems of Deqing County

设定能量投入弹性 $EEI=1$, 即当 $MEP=AEP$ 时,求得能量合理投入范围的下限;取 $EEI=0$, 即当 $MEP=0$ 时,求得能量合理投入范围的上限,从而获得 3 类农田生态系统的能量投入合理范围(表 2)。

根据德清县统计资料,计算得到该县平均单位面积的能量投入和产出的价格比 p_r/p_p , 即 $b=0.2082$ 。将模型参数 K_m 、 r 、 C 和 b 的值代入公式(7),求得高产、中产和低产农田生态系统的最佳投能量分别为 $166.08 \times 10^3\text{J}/\text{hm}^2$ 、 $122.83 \times 10^3\text{J}/\text{hm}^2$ 和 $74.08 \times 10^3\text{J}/\text{hm}^2$ 。

在统计资料的基础上,结合实地调查结果,采用 SPSS 8.0 统计软件^[11],在非线性方程回归程序界面下建立能量效率与投能结构的抛物线函数方程,运行回归程序,求得高产农田生态系统的能量效率函数方程系数 a 、 b 和 c 分别为 0.7451、0.5542 和 0.1457,中产农

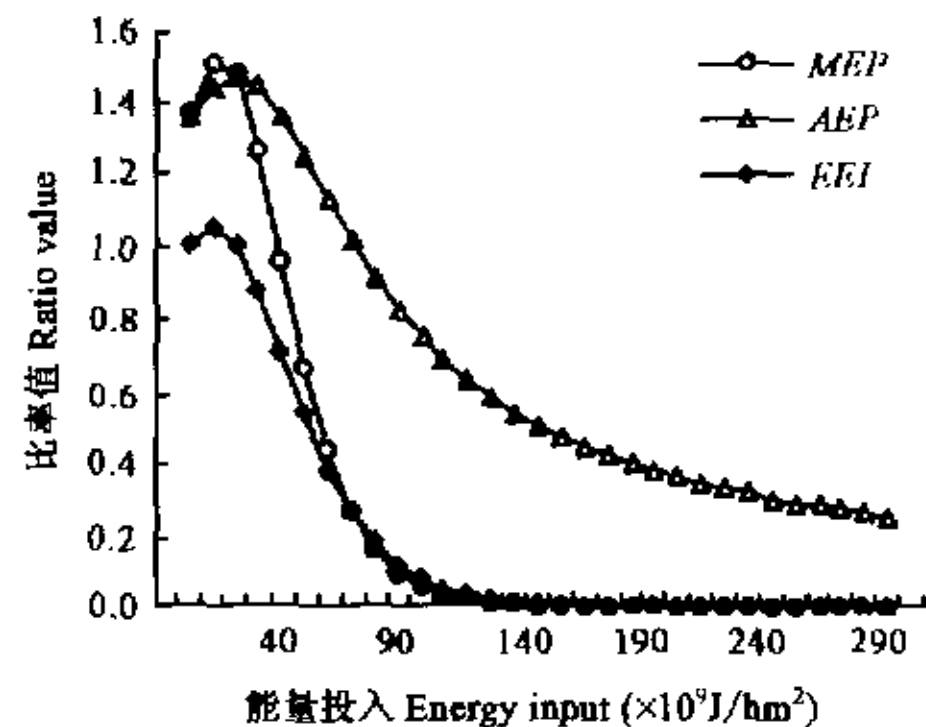


图 4 德清县低产农田生态系统的 MEP、AEP 和 EEI

Fig. 4 MEP, AEP and EEI in low-yielding farmland ecosystems of Deqing County

田生态系统的系数分别为 0.6745、0.4232 和 0.0569,低产农田生态系统的系数分别为 0.3478、0.3947 和 0.0298。由(10)式求得 3 类农田生态系统的最优投能结构分别为 1.9019、3.7188 和 6.6225。

表 2 德清县农田生态系统能量投入产出模型、能量投入合理范围、最优投能量和最优投能结构

Table 2 Energy input-output model, rational range of energy input, optimal energy input and optimal energy input pattern in farmland ecosystems of Deqing County

农田生态系统类型 Types of agroecosystems	高产农田生态系统 High-yielding agroecosystems	中产农田生态系统 Medium-yielding agroecosystems	低产农田生态系统 Low yielding agroecosystems
能量投入产出模型 Energy input-output models	$Y = 388.46 / (1 + e^{10.739 - 0.351X})$	$Y = 254.17 / (1 + e^{0.8941 - 0.0382X})$	$Y = 112.32 / (1 + e^{0.7120 - 0.011X})$
能量投入合理范围($10^5 \text{J}/\text{hm}^2$) Rational ranges of energy input	49.80~291.16	34.85~221.59	19.62~144.19
最优投能量($10^5 \text{J}/\text{hm}^2$) Optimal amounts of energy input	166.08	122.83	74.08
能量效率模型 Energy efficiency models	$Y = 0.7451 + 0.5542x - 0.1457x^2$	$Y = 0.6745 + 0.4232x - 0.0569x^2$	$Y = 0.3478 + 0.3947x - 0.0298x^2$
最优投能结构 Optimal patterns of energy input	1.9019	3.7188	6.6225

由于德清县高产、中产和低产农田生态系统的农作措施相似,系统各种投入因素差异不大,因此 3 类系统实际总辅助能投入相近。由表 1 可知,该县农田生态系统的平均能量投入水平在 $150.0 \times 10^5 \text{J}/\text{hm}^2$ 左右,这一能量投入水平对高产和中产农田生态系统是合理的,而对低产农田生态系统略显偏高。因此,该县高产和中产农田生态系统可以通过增加辅助能投入进一步提高能量产出,而低产农田生态系统则不应继续增加辅助能投入。从 3 类农田生态系统的最优投入量来看,高产农田生态系统的投能水平还略可提高,而中产和低产农田生态系统的投能水平均已超过各自的最优投能量,因此,从经济效益角度来看,应降低目前中产和低产农田生态系统的投能水平,这样才能达到生态效益和经济效益的最佳耦合。为提高该县农业的总体生产水平,应当对中产和低产农田生态系统进行改造以提高土壤肥力,进而提高系统的能量生产潜力,在此基础上再通过增加系统辅助能投入以提高系统的生产力水平。

在合理的能量投入水平下,还应选择合理的投能结构。由表 2 可见,德清县高产、中产和低产农田生态系统的最优投能结构分别为 1.9019、3.7188 和 6.6225,而从 1984~1994 年间的投能结构及其变化趋势来看,3 类农田生态系统的投能结构普遍偏低且呈下降的趋势,这是由于无机能投入占总投入量的比例过大并且不断增加的结果(表 1)。比较 3 类农田生态系统的最优投能结构可见,高产、中产和低产农田生态系统的投能结构依次提高,表明这 3 类农田生态系统对有机能投入在各自系统总能量投入中的比例需求也依次提高。由此可见,3 类农田生态系统特别是低产和中产农田生态系统,对增加有机肥投入都有一种潜在的需求。表明在一定的能量总投入水平下,增加有机肥在农田生态系统中的投入比例可以提高系统的能量生产力和能量效率。

6 讨论

本文建立了德清县农田生态系统的能量投入产出模型,并确定了能量投入的合理范围、最优投入量和最优投能结构。采用这种投能方案可以优化在一定生态条件和管理技术水平下该县农田生态系统的能量生产力和能量效率,达到生态效益和经济效益的最佳耦合。根据上文分析,农田生态系统可以通过调节实际能量投入水平或改善投能结构来提高能量产出和能量效率。对德清县而言,为了提高农田生态系统的产出,实际生产中必需适当增加高产农田生态系统的总能量投入,降低低产和中产农田生态系统的总能量投入,同时还应改善投能结构,增加有机肥在能量总投入中的比例,特别是低产和中产农田生态系统。为提高该县的总体农业生产水平,建议对该县的低产和中产农田生态系统进行改造以提高土壤肥力,进而提高系统的能量生产力。只有这样才能通过增加对中、低产田的投入达到提高产出的目的。否则,在目前的地力水平及其所具有的能量生产力水平下,一味的增加能量投入对系统产出无济于事,反而会造成资源的浪费。由此可见,采用优化的投能方案对不同类型农田生态系统采取不同的投能策略,对优化有限资源的合

理配置,最大限度的提高资源利用效率和农业生产力有一定的应用参考价值。

参考文献

- [1] 刘巽浩. 我国不同地区农田生态系统能量转化效率的初步研究. 北京农业大学学报, 1982, 8(1): 47~53.
- [2] de Wit C T. Resource use efficiency in agriculture. *Agric. Sys.*, 1992, 40: 125~151.
- [3] 韩纯儒. 农业生态系统的能流结构及效率. 农村生态环境, 1998, 1: 6~9.
- [4] Ma Z Y, Edwards-Jones G. Optimizing the external energy input into farmland ecosystems: A case study from Ningxia, China. *Agric. Sys.*, 1997, 53: 269~283.
- [5] Panesar B S, Fluck R C. Energy productivity of a production system: Analysis and measurement. *Agric. Sys.*, 1993, 43: 415~437.
- [6] Fluck R C. Energy productivity: a measure of energy utilization in agricultural systems. *Agric. Sys.*, 1979, 4: 29~37.
- [7] 杨怀森. 河南省农田能量投入与产出关系的初步研究. 耕作与栽培, 1985, 3: 12~14.
- [8] Jones M R. Analysis of energy use of energy in agriculture-Approaches and problems. *Agric. Sys.*, 1989, 29: 339~355.
- [9] Leach G, Slessor M. Energy Equivalents of Network Inputs to Food Production Process. Glasgow: University of Strathclyde. 1973. 56~78.
- [10] 刘巽浩. 能量投入产出研究在农业上的应用. 农业现代化研究, 1984, 4: 15~20.
- [11] 卢纹岱, 朱一力, 等. SPSS for Windows 从入门到精通. 北京: 电子工业出版社, 1997. 351~357.