

紫色土区不同农林复合模式的能值对比分析

——以梨农复合为例

靳雪艳¹, 朱首军¹, 周 涛¹, 高美荣²

(1 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2 中国科学院 成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041)

【摘 要】 【目的】对比分析紫色土区不同农林复合模式的结构功能特征和生态经济效益。【方法】采用能值分析理论和方法,以当地梨树林地及其林下不同作物形成的农林复合生态系统为研究对象,对紫色土区梨树-油菜-玉米(M1)、梨树-油菜-花生(M2)、梨树-小麦-玉米(M3)和梨树-小麦-甘薯(M4) 4 种农林复合模式的能值投入产出进行比较。【结果】M1、M2、M3 和 M4 4 种农林复合模式的能投结构相似,均以消耗不可更新资源为主,劳力和化肥能值占主导地位。M1 模式的生产效率最高,产品在价格竞争上最有优势,独自发展能力最强;M4 模式对自然可更新资源利用程度最低,自然环境负荷程度最小,能值可持续性指标最大;M2 和 M3 模式的净能值产出率和能值自给率相近,但 M2 模式对环境压力小,更具有发展潜力。【结论】紫色土区农林复合生态系统的科技水平低下,应加大有机能投入。梨树-油菜-玉米模式是当前最优的一种模式,梨树-小麦-甘薯模式最具发展潜力。

【关键词】 紫色土,农林复合,模式,能值对比分析

【中图分类号】 S181;F062.2

【文献标识码】 A

【文章编号】 1671-9387(2010)04-0107-08

Emergy comparative analysis of different agroforestry models in purple soil area: a case study in pear tree-crop Intercropping

JIN Xue-yan¹, ZHU Shou-jun¹, ZHOU Tao¹, GAO Mei-rong²

(1 College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2 Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610041, China)

Abstract: 【Objective】 This study was to make a comparative analysis of structure and function characteristics and ecological and economic benefits on different agroforestry models in purple soil area. 【Method】 The agroforestry ecosystem, formed by pear forest and different crops planted under the local forest, was taken as the research objective. Emergy analysis method was used to compare the emergy input and output of pear-rapeseed-corn system (model 1), pear-rapeseed-peanut system (model 2), pear-wheat-corn system (model 3) and pear-wheat-sweet potato system (model 4). 【Result】 The results showed that the energy input structure in four agroforestry models were similar. The investment of nonrenewable emergy took a main proportion in the systems. The human labor emergy and the fertilizer emergy played dominant roles. The pear-rapeseed-corn system (model 1) had the highest production efficiency, the most advantageous in price-competition, and the most powerful self-development. The pear-wheat-sweet potato system (model 4) had the lowest renewable resource utilization, the smallest environment load ratio and the biggest emergy sustainable indices. The net emergy yield ratio and emergy self-support ratio of the pear-rapeseed-peanut

* [收稿日期] 2009-11-02

[基金项目] 国家“973”项目专题“西南紫色土区水土流失综合调控原理与治理范式”(2007CB407207-01)

[作者简介] 靳雪艳(1984—),女,内蒙古五原人,在读硕士,主要从事林业生态工程研究。E-mail:jinxueyan1026@163.com

[通信作者] 朱首军(1965—),男,江苏沛县人,副教授,博士,硕士生导师,主要从事水土保持与荒漠化防治研究。

E-mail:zhushoujun@nwsuaf.edu.cn

system (model 2) were close to the pear-wheat-corn system (model 3). However, the pear-rapeseed-peanut system (model 2) had higher development potential because of its lower environment pressure. 【Conclusion】 The science and technology level of the agroforestry ecosystem in purple soil area was lower. The input of the organic manure should be raised. The pear-rapeseed-corn system (model 1) was the best model at present and the pear-wheat-sweet potato system (model 4) was the most potential model for development.

Key words: purple soil; agroforestry; model; emergy comparative analysis

紫色土集中分布于我国西南地区,是一种侵蚀型的高生产力岩性土^[1],若耕作经营管理不当,土层易完全流失或形成粗骨土,致使土地生产力极度下降。为了满足人口对粮食日趋增长的需求,当地出现了不合理的垦殖和土地利用方式,加速了土壤的强度侵蚀过程,导致土壤资源不可逆转地丧失^[2]。因此,如何改善土壤肥力状况、提高土地利用效率已成为急需解决的问题。农林复合生态系统作为一种合理开发利用土地资源的有效模式,能充分利用光热和地力,将农、林和土地利用有机结合起来,维持和改善土壤质量,其不仅是解决上述问题的有效途径,而且也是紫色土区实现可持续发展的重要手段和措施。分析不同农林复合模式的生态经济效益,并进行综合评价,以获得适合当地自然环境和社会发展的复合模式显得尤为重要。

我国学者对农林复合生态系统效益进行评价时,采用的方法有层次分析法^[3-5]、灰色关联度分析法^[6]、多级模糊综合评判-灰色关联优势分析法^[7]等,但应用能值分析方法对农林复合生态系统进行研究的报道还很鲜见。本试验以位于四川紫色土丘陵区董家坪流域内现存的农林复合生态系统为研究对象,应用能值分析方法,比较不同复合模式的资源投入和能量流动状况,揭示能量转化的差异,并借助于能值指标体系,对比分析不同模式的结构功能特征和生态经济效益,从能量角度研究不同农林复合模式在投入、生产等过程中的资源利用效率及其环境效益,旨在为优化当地的农林复合生态系统提供理论依据,为制定可持续发展战略提供指导性意见。

1 研究区概况

以四川盐亭农田生态系统国家野外科学观测研究站董家坪小流域为研究区,该区位于 105°27'E, 31°16'N,面积 0.38 km²;地形为中深丘,海拔 400~600 m,由于水平砂泥岩互层形成多级梯地,山顶为园丘、长岗状;沟谷切割较深,冲沟发育,相对高差 10~200 m,谷底宽 50~150 m,比降为 1/150,两侧

山坡较陡,平均坡比为 1:3~1:10。该区地处盆地西部春夏旱区与东部伏旱区的交错地带,年均温度 17.3℃,极端最高气温 40℃,极端最低气温 -5.1℃;多年平均降雨量 825 mm,分布不均,春季占 5.9%,夏季 65.5%,秋季 19.7%,冬季 8.9%,无霜期 294 d,年均太阳辐射约为 6.68×10⁸ J/m²^[8]。该区土壤为水稻土和石灰性紫色土,土层厚度一般为 20~70 cm,质地为中壤,土壤氮、磷含量偏低,耕层浅,地力贫瘠。自然植被以散生柏树(*Cupressus funebris*)为主,林下主要有马桑(*Coriaria intermedia*)、黄荆(*Premna fordii*)、白茅(*Imperata cylindrica*)和莎草(*Cyperus spp.*)等。大春作物主要有水稻(*Oryza sativa*)、玉米(*Zea mays* L.)、甘薯(*Lpomoea batatas*)、花生(*Arachis hypogaea*)等;越冬作物主要是小麦(*Triticum aestivum*)和油菜(*Gosypium nanking*)。

2 研究方法

2.1 流域内农林复合情况

流域的土地利用方式以农地(梯田)和林地(柏树)为主,林带处于旱地的地边或坡坎,林带间的旱地台地比较平坦,林带与旱地台地交错呈阶梯状,构成独具特色的坡地农林复合系统。此外,当地于 2002 年引进丰水梨,栽植于二台台地,株行距为 2 m×3 m。当地农作物一年两熟,梨树尚未郁闭前,林下可种植不同的作物,形成多种农林复合模式。本试验以当地梨树林地及其林下不同农作物形成的农林复合生态系统为研究对象,选择梨树-油菜-玉米(M1)、梨树-油菜-花生(M2)、梨树-小麦-玉米(M3)、梨树-小麦-甘薯(M4) 4 种农林复合模式进行能值对比分析。

2.2 能值分析的理论

能值(Emergy)分析是由美国著名生态学家 Odum H T 教授创立。他将能值定义为:一种流动或贮存的能量中所包含的另一种类别能量的数量^[9]。实际应用中,常用太阳能值(Solar emergy)

来衡量某一能量的能值大小。任何流动或储存的能量所包含的太阳能之量,即为该能量的太阳能值。能值转换率(Transformity)是每单位某种类别的能量(单位 J)或物质(单位 g)所含能值之量,实际使用的是太阳能值转换率(Solar transformity),即单位能量或物质所含太阳能值之量^[9]。

2.3 能值分析的步骤

- 1) 收集、调查所需的各种资料和数据,整理分类,输入计算机建立数据库;
- 2) 分析所得资料,确定农林复合生态系统的边界和内容,绘制系统能量图解;
- 3) 编制能值分析表和能值分析评价表;
- 4) 根据研究需要,选择建立能值分析指标;
- 5) 根据选定的能值指标,分析不同复合模式的差异。

2.4 数据来源及处理

于 2008-03 在董家坪流域通过典型农户调查的方法,获得农林复合生态系统的生产数据。以一个完整的生产年度为界限,收集 M1、M2、M3、M4 4 种农林复合模式的投入和产出数据,并以每 666.7 m² 为单位计算投入和产出项目,投入项目包括劳力、畜力、种子、有机肥、化肥和农药,产出项目包括油菜、玉米、花生、小麦、甘薯和梨。太阳辐射强度、平均降

雨量、土壤有机质含量参考项目合作单位中国科学院盐亭紫色土生态研究试验站的试验数据^[8]。单位面积土壤流失量参考花利忠等^[10]的研究结果。

基于收集的资料数据,将各种农业生产资料、要素及农产品的数据,乘以相应的能量折算系数得到单位为 J 或 g 的能值分析原始数据,再将各原始数据乘以相应的太阳能值转换率得到太阳能值,即得到了不同农林复合模式的能值投入和产出(表 1)。其中,能量折算系数参考骆世明^[11]、闻大中^[12] 和 Brandt-Williams^[13] 的研究结果;太阳能值转换率参考蓝盛芳等^[9] 和 Odum^[14] 的研究结果。

- 1) 环境资源的能量投入计算公式为^[9]:
太阳辐射能=面积×太阳辐射强度,
雨水势能=面积×平均海拔高度×平均降雨量×密度×重力加速度,
雨水化学能=面积×平均降雨量×雨水的吉布斯自由能×密度,

表层土壤净损失能=面积×单位面积土壤流失量×有机质含量×土壤有机质热值。

- 2) 不同要素的能值计算公式为^[14]:
 $M=\tau\times B$ 。
式中: M 为能值, τ 为能值转换率, B 为能量或物质的质量。

表 1 紫色土区 4 种农林复合模式的能值投入和产出

Table 1 Energy input and output of four agroforestry models in purple soil area										
项目 Item	能量/J Energy				能值转换率/ (sej · j ⁻¹) Emergy tran sformity	太阳能值/(×10 ¹³ sej) Solar emergy				
	M1	M2	M3	M4		M1	M2	M3	M4	
可更新自然资源能值投入(RE) Renewable resource input										
1 太阳辐射能 Solar energy	4.45×10 ¹¹	4.45×10 ¹¹	4.45×10 ¹¹	4.45×10 ¹¹	1	0.04	0.04	0.04	0.04	
2 雨水势能 Rainfall potential energy	2.70×10 ⁹	2.70×10 ⁹	2.70×10 ⁹	2.70×10 ⁹	8.89×10 ³	2.40	2.40	2.40	2.40	
3 雨水化学能 Rainfall chemical energy	2.72×10 ⁹	2.72×10 ⁹	2.72×10 ⁹	2.72×10 ⁹	1.82×10 ⁴	4.94	4.94	4.94	4.94	
小计(3) Total						4.94	4.94	4.94	4.94	
可更新有机能值投入(RS) Renewable organic emergy input										
4 劳力 Human labor	2.41×10 ⁸	2.62×10 ⁸	2.41×10 ⁸	3.14×10 ⁸	3.80×10 ⁵	9.15	9.94	9.15	11.93	
5 畜力 Animal work	1.61×10 ⁸	1.61×10 ⁸	1.61×10 ⁸	1.61×10 ⁸	1.46×10 ⁵	2.35	2.35	2.35	2.35	
6 种子 Seeds	5.17×10 ⁷	3.18×10 ⁸	1.86×10 ⁸	2.73×10 ⁸	2.00×10 ⁵	1.03	6.35	3.82	5.46	
7 有机肥 * Organic manure	2.24×10 ⁶	2.24×10 ⁶	2.24×10 ⁶	2.24×10 ⁶	2.70×10 ⁶	0.60	0.60	0.60	0.60	
小计(4~7) Total						13.13	19.25	15.82	20.34	
不可更新自然资源能值投入(NE) Non-renewable source input										
8 表层土壤净损失能 Top soil loss energy	4.96×10 ⁸	4.96×10 ⁸	4.96×10 ⁸	4.96×10 ⁸	6.25×10 ⁴	3.10	3.10	3.10	3.10	
小计(8) Total						3.10	3.10	3.10	3.10	
不可更新工业辅助能值投入(NS) Purchased supplemental emergy input										
9 氮肥 * Nitrogen fertilizer	6.83×10 ⁴	6.73×10 ⁴	6.83×10 ⁴	6.60×10 ⁴	3.80×10 ⁹	25.95	25.56	25.95	25.08	
10 磷肥 * Phosphate fertilizer	1.96×10 ⁴	1.96×10 ⁴	2.10×10 ⁴	2.10×10 ⁴	3.90×10 ⁹	7.64	7.64	8.19	8.19	
11 钾肥 * Potassium fertilizer	3.00×10 ³	3.00×10 ³	3.00×10 ⁴	9.00×10 ³	1.10×10 ⁹	0.33	0.33	0.33	0.99	

续表 1 Continued table 1

项目 Item	能量/J Energy				能值转换率/ (sej·j ⁻¹) Emergy tran sformity	太阳能值/(×10 ¹³ sej) Solar emergy			
	M1	M2	M3	M4		M1	M2	M3	M4
12 农药 * Pesticide	1.25×10 ³	1.15×10 ³	1.06×10 ³	1.06×10 ³	1.60×10 ⁹	0.20	0.18	0.17	0.17
小计 (9~12) Total						34.13	33.71	34.64	34.43
系统产出能值 (Y) Emergy output									
13 油菜 Rapeseeds	3.29×10 ⁹	3.29×10 ⁹	—	—	8.60×10 ⁴	28.34	28.34	—	—
14 玉米 Corn	5.95×10 ⁹	—	5.95×10 ⁹	—	2.70×10 ⁴	16.06	—	16.06	—
15 花生 Peanut	—	1.94×10 ⁹	—	—	8.60×10 ⁴	—	16.69	—	—
16 小麦 Wheat	—	—	4.10×10 ⁹	4.10×10 ⁹	6.80×10 ⁴	—	—	27.87	27.87
17 甘薯 Sweet potato	—	—	—	3.43×10 ⁹	2.70×10 ⁴	—	—	—	9.25
18 梨 Pear	1.85×10 ⁹	1.85×10 ⁹	1.85×10 ⁹	1.85×10 ⁹	5.30×10 ⁵	98.13	98.13	98.13	98.13
小计 (13~18) Total						142.53	143.16	142.06	135.25

注:标“*”项原始数据的单位为 g,太阳能值转换率的单位为 sej/g。

Note:The original data unit of“*”is“g”,the emergy transformity unit of“*”is“sej/g”.

2.5 主要能值指标的计算

- 1) 净能值产出率(EYR)=系统产出能值(Y)/经济反馈能值(RS+NS);
- 2) 能值投资率(EIR)=经济反馈能值(RS+NS)/环境无偿能值(RE+NE);
- 3) 能值自给率(ESR)=环境无偿能值(RE+NE)/总投入能值(T);
- 4) 环境负载率(ELR)=不可更新资源能值(NE+NS)/可更新资源能值(RE+RS);
- 5) 能值可持续性指标(ESI)=系统净能值产出率(NFY)/环境负载率(ELR)。

3 结果与分析

3.1 紫色土区不同农林复合模式能值投入的对比分析

由图 1 可以看出,农林复合生态系统的能值投入分为 2 类:一是可更新能值投入 R,包括直接来源于环境系统的可更新自然资源能值投入 RE 和来源于人类社会的可更新有机能值投入 RS,其中可更新自然资源能值投入 RE 均来源于太阳能,为了避免重复计算,以最大输入项为环境系统的可更新资源^[14-15],即雨水化学能;可更新有机能值投入 RS 主要包括劳力、畜力、种子、有机肥等。另一类是不可更新能值投入 N,包括来源于环境系统的不可更新自然资源能值投入 NE 和来源于人类社会的不可更新工业辅助能值投入 NS。在可以预见的时期内,土壤肥力的下降可看作是不可更新的资源消耗^[14]。因此,环境系统的不可更新自然资源能值投入 NE 仅计算流域内的表层土壤净损失能。不可更新工业辅助能值投入 NS 主要是化肥、农药等。

3.1.1 可更新能值投入 由表 2 可知,M1、M2、

M3、M4 4 种农林复合模式投入的可更新能值占总投入能值的比例分别为32.68%,39.66%,35.49%,40.25%,可更新资源利用率表现为 M4>M2>M3>M1。可更新自然资源能值占可更新能值的比例为 19.54%~27.34%;可更新有机能值占可更新能值的比例为 72.66%~80.46%,可见劳力、畜力、种子和有机肥等有机能值在农林复合的可更新资源中处于主导地位,当地的农业生产尚处于传统封闭式农业阶段,且劳力是主要的动力来源。M1、M2、M3、M4 4 种农林复合模式投入的劳力能值占可更新有机能值的比例分别为 69.69%,51.64%,57.84%和 58.65%,4 种农林复合模式的劳力能值投入强度为 M1>M4>M3>M2。

3.1.2 不可更新能值投入 由表 2 可知,M1、M2、M3、M4 4 种农林复合模式投入的不可更新能值占总投入能值的比例分别为 67.32%,60.34%,64.51%,59.75%,可见 4 种农林复合模式投入的不可更新能值比可更新能值高,在总投入能值中占主要地位;不可更新资源利用率表现为 M1>M3>M2>M4。不可更新自然资源能值主要是表层土壤净损失能,占不可更新能值的比例为 8.21%~8.42%,定量地说明了水土保持在紫色土区农林复合生态系统中具有不可低估的作用;不可更新工业辅助能值占不可更新能值的比例为 91.58%~91.79%,说明农林复合生态系统的运作主要依赖于来自人类社会的购买能值。M1、M2、M3、M4 4 种农林复合模式投入的化肥能值占不可更新工业辅助能值的比例分别为 99.41%,99.47%,99.51%和 99.51%,4 种农林复合模式的化肥能值投入强度为 M3>M4>M2>M1。

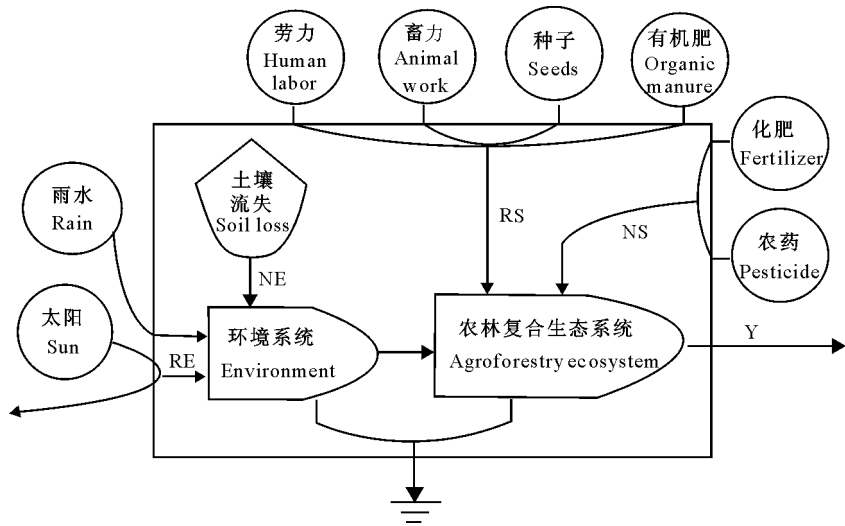


图 1 农林复合生态系统的能量图解

Fig.1 Diagram of energy flow of agroforestry system

表 2 紫色土区 4 种农林复合模式的能值投入对比

Table 2 Emergy input comparison of four agroforestry models in purple soil area

项目 Item	表达式 Expression	M1	M2	M3	M4
可更新能值/($\times 10^{13}$ sej)Renewable emery	$R=RE+RS$	18.07	24.19	20.76	25.28
不可更新能值/($\times 10^{13}$ sej)Non-renewable emery	$N=NE+NS$	37.23	36.81	37.74	37.53
总投入能值/($\times 10^{13}$ sej)Total emery input	$T=R+N$	55.30	61.00	58.50	62.81
(可更新能值/总投入能值)/%	R/T	32.68	39.66	35.49	40.25
(可更新自然资源能值/可更新能值)/%	RE/R	27.34	20.42	23.80	19.54
(可更新有机能值/可更新能值)/%	RS/R	72.66	79.58	76.20	80.46
(劳力能值/可更新有机能值)/%	—	69.69	51.64	57.84	58.65
(不可更新能值/总投入能值)/%	N/T	67.32	60.34	64.51	59.75
(不可更新自然资源能值/不可更新能值)/%	NE/N	8.33	8.42	8.21	8.26
(不可更新工业辅助能值/不可更新能值)/%	NS/N	91.67	91.58	91.79	91.74
(化肥能值/不可更新工业辅助能值)/%	—	99.41	99.47	99.51	99.51

3.2 紫色土区不同农林复合模式能值产出的对比分析

由表 1 可知,M1、M2、M3 和 M4 4 种农林复合模式的产出能值分别是 142.53×10^{13} , 143.16×10^{13} , 142.06×10^{13} , 135.25×10^{13} sej, $M2 > M1 > M3 > M4$ 。在 4 种农林复合模式中,梨树的产出能值相同,M2 模式的产出能值最大,是因为与小麦、玉米、甘薯相比,油菜和花生的太阳能值转换率高,形成单位能量所需的太阳能也越多,是高能值作物。

3.3 紫色土区不同农林复合模式能值指标的对比分析

能值指标是进行比较分析并得出结论的主要依据,用于能值分析的指标有很多,为评价自然环境与

辅助能对农林复合生态系统生产的贡献,分析系统生产所处水平,衡量系统产出对经济贡献的大小以及经济发展程度和环境负载程度等,根据本研究的目的和实际需要,选择 EYR、EIR、ESR、ELR 和 ESI 等 5 个指标,定量分析和比较不同农林复合模式的结构功能特征和生态经济效益,结果见表 3。

3.3.1 EYR EYR 是衡量系统生产效率的标准,反映了系统能值投资回报率的高低及产品是否具有价格竞争优势,其值越高表明系统获得一定的经济能值投入,生产出来的产品能值越高,即系统的生产效率越高。

由表 3 可以看出,4 种农林复合模式的 EYR 值均高于 2000 年中国农业系统($2.08^{[16]}$),低于 2003

年山东省农业系统(5.31^[17]),说明紫色土区农林复合生态系统的生产效率高于全国农业系统,但与发达地区相比尚有差距。4 种农林复合模式的 EYR 表现为 $M1>M3>M2>M4$,说明 M1 模式的生产效率最高,对经济反馈能值的利用效率最大,在同等条件下,农产品在价格上的竞争力最强。M4 模式

的生产效率最低,对经济反馈能值的利用效率最小,农产品在价格上的竞争力也最弱,这是因为 M1 模式每单位无偿环境资源投入的经济反馈能值比 M4 模式低,生产消耗无偿的自然环境资源高。M2 和 M3 模式生产效率相当,但 M3 模式的农产品在价格竞争力上略占优势。

表 3 紫色土区 4 种农林复合模式能值指标体系的对比

Table 3 Emergy indices of four agroforestry models in purple soil area

能值指标 Emergy index	表达式 Expression	M1	M2	M3	M4
净能值产出率(EYR) Net emergy yield ratio	$Y/(RS+NS)$	3.02	2.70	2.82	2.47
能值投资率(EIR) Emergy investment ratio	$(RS+NS)/(RE+NE)$	5.88	6.59	6.28	6.81
能值自给率(ESR) Emergy self-support ratio	$(RE+NE)/T$	0.145	0.132	0.137	0.128
环境负载率(ELR) Environment load ratio	$(NE+NS)/(RE+RS)$	2.06	1.52	1.82	1.48
能值可持续性指标(ESI) Emergy sustainable indices	EYR/ELR	1.46	1.78	1.55	1.66

3.3.2 EIR EIR 是衡量经济发展程度和环境负载程度的指标,其值越大表明系统经济发展水平越高,其值越小则说明系统经济发展水平越低,且对环境的依赖性强。

表 3 表明,4 种农林复合模式的 EIR 均高于 2000 年中国农业系统(1.11^[16])和 2003 年山东省农业系统(3.76^[17]),说明紫色土区农林复合生态系统的经济发展程度较高。4 种农林复合模式的 EIR 排序为 $M4>M2>M3>M1$,说明 M4 模式的经济发展水平最高,M1 模式的经济发展水平最低,对环境的依赖性最强。这是因为 M4 模式中每单位无偿环境资源利用相应投入的经济反馈能值最多,而 M1 模式对无偿环境资源没有达到最佳的利用效率,本地资源还有开发利用的空间,可以考虑适当增加购买能值的投入量,提高系统的能值投资率。与 M2 模式相比,M3 模式的经济发展程度略低,且对环境的依赖性较强。

3.3.3 ESR ESR 反映系统自给自足能力的大小,其值越大则该系统的自给自足能力越强,系统生产受市场影响越小,本地资源对生产的贡献越大,独立发展能力越强。

4 种农林复合模式中,M1 模式的 ESR 最大,M3 和 M2 模式次之,M4 模式最小,表明 M1 模式的自给能力最强,系统生产受市场的影响最小,独立发展能力最强,而 M4 模式的发展受市场影响最大(表 3)。

3.3.4 ELR ELR 反映了单位可更新能值所承担的不可更新能值量,用以衡量自然环境的负荷程度。较大的环境负载率表明在经济系统中存在高强度的能值利用,对环境系统的压力也较大。 $ELR\leq 2$ 表示对环境的影响较低; $3<ELR\leq 10$ 表示比较适中

的生态压力; $ELR>10$ 表示生产活动产生了比较大的环境压力^[18]。若系统长期处于较高的环境负载率下,系统功能将产生不可逆转的退化或丧失。

由表 3 可以看出,4 种农林复合模式的 ELR 均小于 2000 年中国农业系统(2.72^[16])和 2003 年山东省农业系统(6.42^[17]),可见紫色土区农林复合生态系统的生产对环境的影响较低。4 种农林复合模式的 ELR 排序为 $M1>M3>M2>M4$,说明 M1 模式中单位可更新能值所承担的不可更新能值量最大,对环境系统的压力也最大;M4 模式对自然可更新环境资源的利用程度最低,自然环境负荷程度最小,最具发展潜力,可以进一步加大能值投入,提高生产力水平。与 M3 模式相比,M2 模式对环境的压力较小,发展潜力更大。

3.3.5 ESI ESI 是评价系统可持续发展性能的指标,如果一个国家或地区的经济系统净能值产出率高而环境负载率又相对较低,则其发展是可持续的,反之则是不可持续的,但并不是 ESI 值越大越好。ESI 为 1~10 表示该经济系统正在发展而相对具有活力,ESI 大于 10 是经济不发达的象征,ESI 小于 1 时该系统为消费型经济系统^[19]。

表 3 表明,4 种农林复合模式的 ESI 均大于 1 而小于 10,说明 4 种农林复合生态系统的发展是可持续的,均具有发展潜力。ESI 表现为 $M2>M4>M3>M1$ 。表明 M2 模式最具有发展潜力,M1 模式的发展潜力最小。但从环境保护的角度考虑,4 种模式投入的化肥和农药能值占总投入能值的 54.82%~61.72%,所占比例较大,长期维持这种现状将以破坏环境为代价来换取农林复合生态系统的发展,必须注重对可更新有机能及生物资源的回收利用,通过秸秆还田及使用农家肥以减少化肥的用

量,防止生态环境恶化,提高能源、物质的利用效率,避免因资源浪费造成的环境污染,更好地保护自然资源和农业生态环境,真正实现可持续发展。

4 结 论

1) M1、M2、M3、M4 4 种农林复合模式的能投结构相似,不可更新能值在总投入能值中占主要地位,其中 M4 模式的可更新资源利用率最高,而 M1 模式的不可更新资源利用率最高。

2) 4 种农林复合模式均投入了大量的劳力能值和化肥能值,当地的农业仍处于传统的封闭式农业阶段,科技水平低下,劳力是主要的动力来源。大量化肥能值的投入将会成为威胁环境安全的隐患,不利于当地农林复合生态系统的长期发展,需改变此能投结构。以秸秆和农家肥等可更新能源代替化肥,能更好地保护自然环境,从而有利于实现人与环境的和谐共存。

3) 紫色土区农林复合生态系统的 EYR 高于 2000 年全国农业系统,但低于发达地区的农业系统,说明当地农林复合生态系统对经济反馈能值的利用程度还较小;EIR 高于全国农业系统和山东省农业系统,反映出农林复合生态系统中每单位无偿环境资源的利用投入的经济反馈能值较多;ELR 低于全国农业系统和发达地区农业系统,表明农林复合生态系统对环境的压力较小,环境资源尚具有开发潜力。

4) 与其他 3 种模式相比,M1 是当前最优的一种模式,具体表现为系统 EYR 最高,即其生产效率最高,产品在价格竞争上最有优势;此外,其 ESR 最高,表明生产受市场影响最小,独自发展能力最强,并有一定的可持续发展潜力。4 种模式中,M4 模式最具发展潜力,具体表现为 ELR 最小,即对自然可更新环境资源的利用程度最低,自然环境负荷程度最小。M2、M3 模式的 EYR 和 ESR 相近,但 M2 模式对环境的压力小,比 M3 模式更具有发展潜力。

5 讨 论

本研究运用能值分析理论和方法,将农林复合生态系统中投入的不同类别、不可比较的能量转换为统一标准的能值来衡量,有效地避免了因单位不统一而造成研究结果出现偏差,使获得的结论科学性相对较强。然而能值分析的最大难点是各种能量、物质的能值转换率的分析计算,不同生产水平和生产方式生产的同一种工农业产品的能值转换率是

有差别的,不同学者引用的数据多有差异,目前国内相关研究大都采用 Odum H T 提出的计算参数,这样能保持能值分析方法广泛的可比性,但这些参数更适合于大范围生态系统的能值分析,本研究直接将其在紫色土区不同农林复合模式中加以应用,可能导致计算上存在差异,最终影响评价结果的精确性。因此,建立基于农田范围等小尺度下的不同物质和能量的太阳能值转换率,是改进和完善能值分析方法的重要内容。

[参考文献]

- [1] 中国科学院成都分院土壤研究室. 中国紫色土: 上篇 [M]. 北京: 科学出版社, 1991.
Institute of Soil Research, Chengdu Branch, Chinese Academy of Science. Purple soil in China: Book one [M]. Beijing: Educational Science Publishing House, 1991. (in Chinese)
- [2] 余剑如, 刘载生. 长江上游的水土流失与河流泥沙 [J]. 水土保持学报, 1988, 2(1): 1-15.
Yu J R, Liu Z S. On soil and water loss and river sediments in the upper reaches of the Yangtze river [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1988, 2(1): 1-15. (in Chinese)
- [3] 彭鸿嘉, 莫保儒, 蔡国军, 等. 甘肃中部黄土丘陵沟壑区农林复合生态系统综合效益评价 [J]. 干旱区地理, 2004, 27(3): 367-372.
Peng H J, Mo B R, Cai G J, et al. Evaluation on the synthetic benefits of agro-forest compound ecosystem in the loess hilly-ravine region in the central part of Gansu Province [J]. Arid Land Geography, 2004, 27(3): 367-372. (in Chinese)
- [4] 蔡国军, 张仁陟, 莫保儒, 等. 定西安家沟流域 3 种典型农林复合模式的评价研究 [J]. 水土保持研究, 2008, 15(5): 120-124.
Cai G J, Zhang R D, Mo B R, et al. Evaluation of three typical agroforestry models in Anjiagou watershed of Dingxi city, Gansu Province [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2008, 15(5): 120-124. (in Chinese)
- [5] 吴 钢, 魏 晶, 张 萍, 等. 三峡库区农林复合生态系统的效益评价 [J]. 生态学报, 2002, 22(2): 233-239.
Wu G, Wei J, Zhang P, et al. Benefit assessment of agroforestry ecosystems in the three gorges reservoir area [J]. Acta Ecologica Sinica, 2002, 22(2): 233-239. (in Chinese)
- [6] 温熙胜, 何丙辉, 张洪江. 灰色关联度分析方法在三峡库区农林复合种植模式评价中的应用 [J]. 西南大学学报: 自然科学版, 2007, 29(7): 111-115.
Wen X S, He B H, Zhang H J. Application of grey correlation analysis in the evaluation of different agroforestry planting patterns in the three gorges reservoir area [J]. Journal of Southwest University: Natural Science Edition, 2007, 29(7): 111-115. (in Chinese)
- [7] 王丽梅, 邵明安, 郑纪勇, 等. 渭北旱塬两种类型农林复合经营生态系统环境效应评价 [J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(5): 940-944.

Wang L M, Shao M A, Zheng J Y, et al. Environmental influence assessment of two main types of agroforestry ecosystems in arid plateau of the north Weihe river in Shaanxi [J]. *Journal of Agro-environment Science*, 2005, 24(5): 940-944. (in Chinese)

[8] 朱 波, 彭 奎, 高美荣, 等. 川中丘陵区土地利用变化的生态环境效应——以中国科学院盐亭紫色土农业生态试验站集水区为例 [J]. *山地学报*, 2001, 19(增刊): 14-19.

Zhu B, Peng K, Gao M R, et al. Land use change and effects on eco-environment in hilly area of central Sichuan basin [J]. *Journal of Mountain Science*, 2001, 19(Suppl.): 14-19. (in Chinese)

[9] 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: 3-76.

Lan S F, Qin P, Lu H F. Emergy synthesis of ecological economic systems [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2002: 3-76. (in Chinese)

[10] 花利忠, 贺秀斌, 朱 波. 川中丘陵区小流域土壤侵蚀空间分异评价研究 [J]. *水土保持通报*, 2007, 27(3): 111-115.

Hua L Z, He X B, Zhu B. Soil erosion distribution of a small watershed in the hilly area of central Sichuan basin [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2007, 27(3): 111-115. (in Chinese)

[11] 骆世明. 农业生态学 [M]. 中国农业出版社, 2000: 447-453.

Luo S M. Agricultural ecology [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2001: 447-453. (in Chinese)

[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.

Wen D Z. Research method of energy flow in agro-ecosystem; I [J]. *Rural Eco-Environment*, 1985(4): 47-52. (in Chinese)

[13] Brandt-Williams S L. Handbook of emergy evaluation; A compendium of data for emergy computation issued in a series of Folios. Folio 4. emergy of Florida agriculture [EB/OL]. Center for Environmental Policy, University of Florida, Gainesville, FL, USA, 2002. <http://www.emergysystems.org/downloads/Folios/Folio 4. pdf>.

[14] Odum H T. Environmental accounting; Emergy and environmental decision making [M]. New York: John Wiley and Sons, 1996.

[15] Brown M T, Herendeen R A. Embodied energy analysis and emergy analysis; a comparative view [J]. *Ecological Economics*, 1996(19): 219-235.

[16] Chen G Q, Jiang M M, Chen B, et al. Emergy analysis of Chinese agriculture [J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2006, 115(1-4): 161-173.

[17] 王建源, 薛德强, 田晓萍, 等. 山东省农业生态系统能值分析 [J]. *生态学杂志*, 2007, 26(5): 718-722.

Wang J Y, Xue D Q, Tian X P, et al. Emergy anagysis of agro-ecosystem in Shangdong province of China [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(5): 718-722. (in Chinese)

[18] CavalettO, de Queiroz J F, Ortega E. Emergy assessment of integrated production systems of grains, pig and fish in small farms in the South Brazil [J]. *Ecological Modelling*, 2006, 193: 205-224.

[19] Ulgiati S, Brown M T. Monitoring patterns of sustainability in natural and man-made ecosystems [J]. *Ecological Modelling*, 1998, 108: 23-36.

(上接第 106 页)

[16] 廖顺宝, 李泽辉. 气温数据栅格化中的几个具体问题 [J]. *气象科技*, 2004, 32(5): 352-356.

Liao S B, Li Z H. Some practical problems related to rasterization of air temperature [J]. *Meteorological Science and Technology*, 2004, 32(5): 352-356. (in Chinese)

[17] 穆兴民, 陈国良. 黄土高原降水与地理因素的空间结构趋势面分析 [J]. *干旱区地理*, 1993, 16(2): 71-76.

Mu X M, Chen G L. Analysis on the space structure trend area of precipitation and geographical factors in the Loess Plateau [J]. *Arid Land Geography*, 1993, 16(2): 71-76. (in Chinese)

[18] 穆兴民, 陈国良, 徐学选. 黄土高原降水量与地理因素关系分析 [J]. *西北水土保持研究所集刊*, 1992, 16: 80-86.

Mu X M, Chen G L, Xu X X. Analysis of the relationship between precipitation and geographical factors in Loess Plateau [J]. *Memoir of NISWC, Academia Sinica and Ministry of Water Resources*, 1992, 16: 80-86. (in Chinese)