

黄土丘陵区小流域系统生态经济要素分析 ——以宁夏隆德县李太平小流域为例

党小虎^{1,2}, 刘国彬¹, 李小利^{1,2}, 薛 斌^{1,2}, 锁冠侠³

(1. 中国科学院、水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049;
3. 兰州资源环境职业技术学院, 兰州 730021)

摘要:以隆德县李太平小流域为例,对比分析了退化小流域系统恢复重建过程中系统的生态经济要素变化,揭示系统演变趋势。应用能值方法分析了投入产出的动态变化,评价治理的生态经济效益。结果显示:农、林、牧业用地比例由 1990 年的 6.2 : 2.0 : 1.0 变为 2003 年的 1.9 : 1.4 : 1.0,土地利用及种植结构趋于合理,农业产值所占比重由 79.6 % 下降为 54.8 %,林业、牧业、副业产值比例分别由 9.6 %、9.6 %、1.1 % 上升为 22.7 %、15.1 %、7.4 %,收入多样性指数也呈增加趋势,显示了流域收入构成的多元化,有利于生态经济系统的稳定。同时,恩格尔系数减小,表明人民生活水平日益提高。基于能值的流域生态经济系统投入产出效率动态研究结果表明在调整后的土地利用格局及种植结构下,净能值产出率由 1990 年的 2.5 增长到 2003 年的 3.41,资源利用效率逐年提高,环境负荷率在 1990、1995 和 2003 年分别为 2.55、2.44 和 2.11,呈减小趋势,能值持续性指数从 1990 年的 0.98 增加到 2003 年的 1.62,经济与生态环境的协调性不断提高。研究结果表明该治理模式是成功的。

关键词:生态经济系统;生态经济结构;能值;小流域

文章编号:1000-0933(2006)10-3516-10 中图分类号:Q146.148 文献标识码:A

Analysis on small watershed eco-economic system in Loess Hilly Area :A case studies in Litaiping Small Watershed of Longde County

DANG Xiao-Hu^{1,2}, LIU Guo-Bin¹, LI Xiao-Li^{1,2}, XUE Sha^{1,2}, SUO Guan-Xia³ (1. Institute of Soil and Water Conservation, CAS and MWR, Yangling Shaanxi 712100, China; 2: Graduate School of CAS, Beijing 100039, China; 3. Lanzhou Polytechnic College of Resources and Environment, Lanzhou 730021, China). Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(10) :3516~3525.

Abstract: Ecological degeneration on the Loess Plateau generally resulted from unreasonable land use and economic activities. To study economic process related to ecological degeneration, to restore the degenerated ecosystem are important issues for sustainable development of eco-economy on the Loess Plateau, and the loess hilly area is the key area to be cared on ecological restoration. Integrated small watershed management, as one of main action of ecological restoration, was used widely in this region and many achievements were made. In this study, Litaiping Small Watershed in Longde County was used as case study area, the eco-economic system structure and its dynamic during the restoration process were analyzed from ecoeconomic perspective, and the interactional approach and manner between economic and ecological in the system was explored. Based on emergy theory, an analysis on the dynamic variety of the transfer efficiency of energy flow and matter flow was also conducted to evaluate the eco-economic effect of the watershed management. The results showed that the pattern of cropland, woodland and pasture was improved from 6.2 : 2.0 : 1.0 in 1990 to 1.9 : 1.4 : 1.0 in 2003, and the land use structure and planting pattern became rational. The proportion of agricultural production in gross production value was decreased from 79.6 % in 1990 to 54.8 % in 2003, and the

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目;中国科学院重大资助项目;国家重点基础研究发展计划资助项目(2007CB407205)

收稿日期:2005-11-22; **修订日期:**2006-06-24

作者简介:党小虎(1968~),男,宁夏隆德县人,博士生,高级工程师,主要从事流域生态及生态经济研究。E-mail: xiaohud2004 @163. com

Foundation item: The project was supported by National Natural Science Foundation of China; knowledge innovation project of Chinese Academy of Sciences; National Key Basic Research Program of China (No. 2007CB407205)

Received date: 2005-11-22; **Accepted date:** 2006-06-24

Biography: DANG Xiao-Hu, Ph. D. candidate, senior engineer, mainly engaged in watershed ecology and eco-economics. E-mail: xiaohud2004 @163. com

proportions of forest and animal husbandry as well as sideline were improved from 9.6%, 9.6% and 1.1% in 1990, to 22.7%, 15.1% and 7.4% in 2003, respectively. The diversity index of the farmer's income tended to increase while a decrease was found in Engel's coefficient which indicated that the farmer's living standard was improved. Upon the result of emergy-based analysis, it was found that such land use change could increase net emergy yield ratio (ENYR) from 2.5 in 1990 to 3.41 in 2003. This means that the efficiency of resources utilization was improved. However, a decrease was observed on environment loading ratio (ELR) which was 2.55, 2.44 and 2.11 respectively in 1990, 1995 and 2003, and emergy-based sustainability index (ESI) was increased from 0.98 in 1990 to 1.62 in 2003. The results in this study indicated that harmony between economy and ecology in the study area was improved and the model of Litaiping small watershed management was successful.

Key words: eco-economic system; eco-economic structure; emergy; small watershed

黄土高原的生态退化是其自身的脆弱性叠加了不合理的人类社会经济活动的产物和必然结果。研究生态退化的经济过程,恢复重建退化的黄土高原生态系统,改善社会经济发展的生态基础,实现该区域生态经济可持续发展是我国今后的战略任务之一。黄土丘陵区是黄土高原的主体部分,自1980年在山西省召开小流域治理座谈会以来,我国初步确定以小流域为单元实施水土保持和生态建设的基本策略,此后以小流域为重点单元的生态恢复重建工作即小流域综合治理全面推开并取得了巨大成效。有关小流域综合治理的理论基础、实践及评价的论述比较多^[1~5],传统的评价方法和指标体系在诸多文献中均有报道^[6~9]。现代承载人类经济活动的小流域是一个生态经济系统,退化小流域的恢复重建是一个生态经济过程,评价其效果,仅仅局限于一些静态的指标,结果往往难以有很强的说服力,对比分析系统生态经济要素变化,判断系统的演变趋势,分析生态承载能力,可以比较好的评价治理效果。所谓生态经济系统是由生态系统和经济系统通过物质循环、能量流动和信息传递耦合而成的复合系统,在这个复合系统的运动和演化中,经济过程与生态过程相互影响,互为因果^[10],因此分析生态-经济的耦合过程,揭示生态系统与经济系统相互作用机理,是小流域综合治理的主要内容之一。

本文以宁夏隆德县李太平小流域(财政部、水利部命名的“十、百、千”治理示范流域)为例,分析小流域系统重建过程中经济系统和生态系统的演化过程及其结构的合理性,探索经济与生态相互作用的途径与方式,进行基于能值的投入产出动态研究,分析小流域系统能流、物流的转换效率,以评价生态经济效果。

1 小流域概况及研究方法

1.1 小流域概况

李太平小流域地处宁夏南部山区的隆德县,属渭河水系葫芦河的二级支流,为典型的黄土丘陵沟壑区地貌,总面积 11.6 km²,海拔 1725~2025 m,治理前土壤侵蚀模数为 4200 t/(km²·a)。流域多年平均降雨量 490.9 mm,蒸发量 1339.2 mm,是降雨量的 2.7 倍。人口密度 199 人/km²,人均耕地 0.19 hm²,人均有粮 500 kg。养殖初具规模,是全县主要的肉、禽、蛋供应地之一。按 1990 年不变价格计算,各业总产值达 305.3 万元,人均产值 1287 元,人均纯收入 902 元,高于全县平均水平(865 元)^①。

1.2 研究方法

该研究采用以往的研究成果^[11]、查阅研究年份内的相关资料和实地测量调查与农户访问相结合的方法,收集了李太平流域 1990 年至 2003 年的基础数据。查阅的相关资料有:①乡村两级诸年社会经济统计年表;②县统计部门的有关社会经济情况分析材料、统计年鉴;③小流域综合治理初步设计、项目实施期间的年报、项目竣工验收报告、后续追踪报告等;④县林业局、农牧局、农业技术推广中心等项目参加单位的测试资料;⑤县土壤普查报告、农业区划报告等。实地调查植被生长状况,分别在沟坡、梁峁坡、人工草地等随即布设样地,乔木层样地为 10 m × 10 m,灌木层为 5 m × 5 m,草地为 1 m × 1 m,分别进行植物种类、郁闭度、盖度、地上生物量

① 隆德县统计年鉴(2003 年)

(草地)调查。农户访问主要调查治理前后各年(1990~2003年)有关生态经济指标的变化情况,采用系统抽样与随机抽样结合,一般调查和重点调查结合的办法,根据农业人口、农田、收入等指标,确定一定数量的典型农户进行调查。这些农户一般占该村农户数量的20%,然后划富裕、中等和贫困三个层次,在每个层次上抽取农户进行重点调查。在原始数据基础上进行以下分析:

1.2.1 小流域系统结构要素分析 通过比较分析治理前后生态系统和经济系统结构变化,揭示小流域生态经济系统演化趋势,并借用描述生态系统的多样性指数和恩格尔系数分析收入结构的稳定性和消费结构的合理性。

1.2.2 小流域生态经济系统能值投入产出分析

(1)能值分析方法概述 能值分析由美国著名生态学家 H. T. Odum 提出,用以研究生计系统,定量分析资源环境与经济活动的真实价值以及他们之间的关系。Odum 把能值定义为:产品或服务形成过程中直接和间接消耗的一种能量总和^[12]。他认为任何一种形式的能都可以用同一形式的能来表示^[13~15],不同类型的能量具有不同的能级和能质,随着能量从低级的太阳能转化为较高质量的绿色植物的潜能,再传递和转化为更高级质量和更为密集的各级消费者的能量,能量数量的递减伴随着能质和能级的升高,各类能量之间具有特定的转换关系,即能值转换率(Energy transformity)^[12,16~19],通过能值转换率就可以把不同类型的能量转换为同一量纲的能值,多用太阳能焦耳表示,即 Solar energy joule, 简写为 sej。

(2)能值分析的主要指标

①净能值产出率(net energy yield ratio; NEYR) 净能值产出率(NEYR) = 产出能值/投入辅助能值

净能值产出率是评价基本能源利用的指标,它也可以用来说明经济生产利用能源的效率,表示经济活动的竞争力。净能值产出率愈高,说明经济效益愈好。

②能值投资比率(energy investment ratio; EIR) 能值投资比率(EIR) = 辅助投入能值/环境资源能值

能值投资比率反映了利用经济系统输入能值与环境能值的关系,经济输入能值越高,生产的经济成本就越高,能值投资比就越大。在环境能值投入产出一定的情况下,如果经济投入能值越少,该比值就越小,相应地其产品的经济成本就越低,从而增加产品在市场上的竞争力。

③能值货币比(energy /dollar ratio) 能值货币比 = 总能值使用量/国民生产总值(β)

能值货币比的大小可以看出该地区工业、农业发展程度,比值高,代表单位经济活动所换取的能值量高,显示生产过程中使用自然资源所占比重较大;比值小,其自然资源对经济的贡献较小,表示该地区的开发程度高。

④宏观经济价值(macroeconomic value; MV,也称 emdollar) 宏观经济价值(MV) = 可利用能值/能值货币比 是指某种资源或产品的能值相当于多少流动的货币,它可以被视作资源或产品本身的影子价格。某一资源或产品宏观经济价值较高时,表明它对经济的贡献率较大。

⑤环境负荷率(environment loading ratio; ELR) 环境负荷率(ELR) = 不可更新能值投入/可更新能值投入

⑥能值持续性指数(energy-based sustainability index, ESI)^[20,23] 能值持续性指数(ESI) = 净能值产出率(NEYR)/环境负荷率(ELR)

ESI 是对能值产出率与环境负载率的相对比较。很显然,如果一个国家或地区的经济系统能值产出率高而环境负载率又相对较低,则它是可持续的,反之是不可持续的。但并不是 ESI 值越大,可持续性越高。ESI 值在 1~10 之间表明经济系统富有活力和发展潜力。

2 结果分析

2.1 小流域生态经济系统结构要素分析

2.1.1 生态系统结构要素分析

(1)土地利用结构演变及资源质量

土地利用结构的合理性和土地资源的质量是小流域生态恢复重建的主要决定因素,揭示农林牧用地结构

的演变过程和未来发展趋势,分析其质量变化,可为评价生态恢复效果提供直观的判别依据。

①结构演变 1990 年与 2003 年的土地利用结构(各类土地利用占流域总面积的比例)演变情况如表 1 和图 1 所示。可以看出,流域治理前(1990 年)荒地面积偏大,林草地面积偏小,土地利用结构十分不合理。群众为了弥补土地生产力低下而一味扩大耕地面积,林牧业用地减少,造成燃料、饲料和肥料俱缺,农业生产条件恶化。在治理中进行结构调整,到 2003 年小流域耕地面积所占比例由 47.9%(556hm²)下降到 38.8%(450hm²);林地和草地面积分别由 12.9%(150hm²)和 7.7%(89hm²)增加到 27.6%(320hm²)和 20.0%(232hm²);流域植被总覆盖率由 20.6%增加到 47.6%,农、林、牧用地比例由 6.2∶2∶1 变为 1.9∶1.4∶1。

表 1 土地利用变化情况

Table 1 The variation of the landuse (hm ²)						
年份 Year	农业用地 Cropland	林业用地 Woodland	牧业用地 Pasture	荒地 Wasteland	非生产用地 Nonproductive land	合计 Aggregate
1990	556	150	89	207	158	1160
2003	450	320	232		158	1160

②资源质量变化 分析表 1、表 2,实施治理前(1990 年以前),由于人口的增加导致耕地短缺,耕地范围不断向陡坡延伸,加之缺乏科学的适宜性评价,各类用地格局不尽合理。耕地中<5°的占 8.1%,5~15°的占 72.1%,15~25°的占 19.8%。尽管 80.2%的耕地为宜农土地,但由于坡地比例大(占耕地总面积的 67.6%),用养不当,土壤质量呈逐年下降趋势,生产力低;92%的草地为草田轮作,而在 15~25°宜牧土地中,有 67.7%之多被撂荒,导致土壤质量下降;林地多为疏林,林分质量较差,基本没有下木。

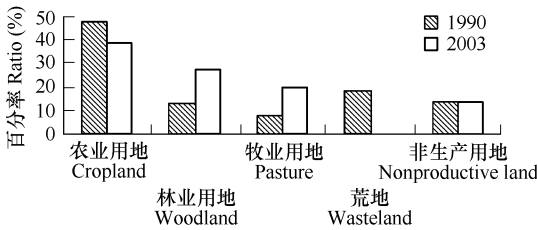


图 1 土地利用结构变化

Fig. 1 The change in landuse

表 2 土地资源现状

Table 2 The condition of landuse					
划分指标 Dividing indicator	划分等级 Dividing grade				
	1	2	3	4	5
地面坡度 Ground slope	<5°	5~15°	15~25°	25~35°	>35°
侵蚀程度 Erosion degree	微度	轻度	中度	强度	极强度
土层厚度 soil layer depth(cm)	>200	150~200	100~150	50~100	
土壤质地 Soil texture	轻壤-中壤	轻壤-中壤	中壤-重壤	重壤	红壤、母质
有机质 Organism(%)	1.0~1.2	0.8~1.0	0.5~0.8	0.3~0.5	
适宜性 Suitability	宜农	宜农、果、牧	宜农、林、牧	宜林、牧	暂难利用
面积 Area(hm ²)	45	401	399	228	87

在治理过程中,根据土地适宜性评价结果及生产规模,重新调整了各类用地格局。到 2003 年,99%耕地分布在 15°以下的土地上,经过梯田化改造后,由于用养适当,土壤质量逐渐改善,尽管耕地面积有所减少,但粮食及经济作物单产和总产持续稳定在较高水平,受气候波动影响减弱;草地主要布置在 15~25°的土地上,人工草地单产较治理前提高了 1.7 倍,封育草地单产提高了 3.2 倍,草地生产力呈上升趋势;林业用地中有 159hm²(占林地总面积的 50%)分布在沟坡,坡度在 25~28°之间,其余均布置在 15~25°的宜林地上,现已成林,郁闭度达 75%以上,其中果园面积占 5%,分布在庭院周围,果树处于盛果期。

(2)种植结构变化 流域一改治理前单一的粮食种植结构,农业生物结构简单的局面,初步形成了“粮食-经济作物-饲料”的三元化种植模式。目前粮食种植面积为 310hm²,占总面积的 26.7%;经济作物为 140hm²,占 12%;饲料作物为 232hm²,占 20%。作物种类主要包括小麦(*Triticum aestivum* L.)、玉米(*Zea mays* L.)、胡

麻 (*Unceria grandidieri* Stapf)、马铃薯 (*Solanum tuberosum*)、高粱 (*Sorghum bicolor* L.)、苜蓿 (*Medicago sativa* Linn.)、红豆草 (*Onobrychis viciae olia* Scop.) 以及各类蔬菜。这些作物可以在不同的时间范围内占据不同的生态位,达到充分地利用土地和光、热、水、气等资源,充实食物网。

(3) 植被结构变化 治理前,由于缺乏科学指导,在一定程度上违背了生态规律,忽略了群落演替进程,忽视乡土树种在植被恢复中的先锋种的作用,使植被恢复工作不尽人意。在造林实践中对立地条件和土地适宜性评价不够充分,树种选择随意性大,导致流域大部分是单一的杨树 (*Populus × beijingensis* W. Y. Hsu ex C. Wang et S. L.), 林分稀疏,郁闭度低,病虫害严重,根本达不到预期的生态效果,更谈不上经济效益。为了解决饲草问题,人工草紫花苜蓿比例过大,导致草地出现土壤干层,忽略对天然草地的抚育管理,致使出现严重的退化。

治理后,基于当地自然条件和群落演替规律,坚持“以草(本)灌(木)为主、辅以少量适宜的乔木林”的植被建设原则,实践证明这个思路的正确性。目前,流域林草总覆盖率达 47.6%,群落发育良好,沟坡植被主要以禾本科、豆科草本和沙棘 (*Hippophae rhamnoides* L. subsp. *sinensis* Rousi)、柠条 (*Caragana korshinskii* Kom.)、紫穗槐 (*Amorpha fruticosa*) 等灌木为主,群落的立体结构合理,生长良好,被覆率达到 85% 以上。梁、峁坡植被除饲草外,主要以仁用杏 (*Prunus armeniaca* L.)、花椒 (*Zanthoxylum bungeanum*) 以及臭椿 (*Ailanthus altissima* Swingle) 等乡土树种为主,既可以防风,又可以增加收入。

2.1.2 经济系统结构要素分析

(1) 农村产业结构分析 治理前(1990 年)流域一、二、三次产业比例严重失调,一次产业以种植业为主,由于作物单产偏低,为确保口粮,粮食播种面积超过农田面积的 77%,林牧业生产只是种植业的副业,处于从属地位,产值低,不成规模;二、三产业基本空白,经济发展水平低。

结构调整后,二、三产业有了不同程度的发展,一次产业内部各业比重趋于协调。按 1990 年不变价格计算,种植业、林果业、牧业生产性投入比例分别由 90.7%、3.5%、5.8% 转变为 82.4%、6.5%、11.1%,结构渐趋合理;农村各业产值呈逐年增加趋势,副业产值从无到有并逐年增加,经济成分趋向多元化,流域经济受自然因素的影响趋于减弱,其中:①种植业产值占总产值比例由 79.6% 下降为 54.8%,粮食和经济作物单产稳中有增。尤其是当地适生的油料作物胡麻,由于种植方式及技术的推广和新品种的引进,产量和品质均有不同程度的提高,同马铃薯一道成为该地的支柱产业;②林业产值由于林地面积的增加、结构调整和林分质量的提高而增幅较大,占总产值比例由 9.6% 增加到 22.7%;经济林果业的发展,使林业产值结构发生了根本改变,经果林从无到有,产值一路攀升,2003 年经济林果业产值达 43.6 万元,占林业总产值的 62.9%;③畜牧业平稳发展,饲料作物面积(包括人工)大幅提高,生猪存栏率和出栏率均较治理前大幅度提高,畜禽良种率达 73%;产值比重由 9.6% 增加到 15.1%。家禽养殖业已具规模,成为本县的禽肉、蛋供应地之一。

以上分析显示,流域各业结构趋于协调,达到了均衡发展(图 2、图 3)。

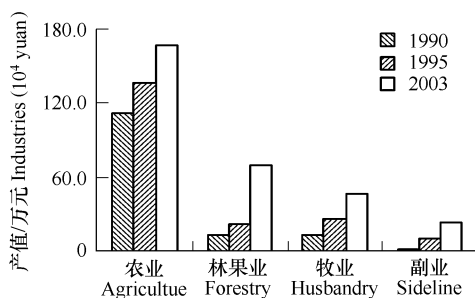


图2 小流域各业产值变化

Fig. 2 Variation of industries in the small watershed

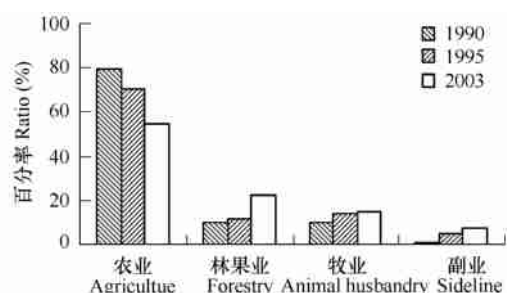


图3 小流域农业产值结构变化

Fig. 3 Variation of agricultural industries structue in the small watershed

(2) 收入结构分析 治理前后经济收入变化情况如表 3 所示,从中可得出治理后流域经济收入增加,收入

结构趋向多元化,其主要原因是由于农业产业结构的多元化。为了比较直观的反映收入结构,我们将描述生态系统稳定性的多样性指数借用到经济系统中,用多样性指数来计算收入的多元化程度,在一定意义上可以认为,经济收入途径越多,经济系统受外界干扰(如灾害等)的影响越小。用 Shannon-Weaver 公式^[21] 计算经济收入多元化指数:

$$D_e = - \sum P_i \ln (P_i)$$

式中, D_e 表示经济收入多元化指数; P_i 为各种经济来源所占百分比。

结果表明(表 3),流域在治理初期(1990~1995 年),当地的主要收入来源为种植业,这种收入结构单一;在治理后期的 8a 中,收入趋向多元化,收入多样化指数呈上升趋势。

表 3 李太平小流域经济收入变化情况

Table 3 The variation of income in Litaiping small watershed

年份 Year	农业 Agriculture		林果业 Forestry		牧业 Animal husbandry		副业 Sideline		合计 Aggregate	人均 Per capita /(yuan)	收入多样化 指数 Diversity index of incomes
	万元	(%)	万元	(%)	万元	(%)	万元	(%)	万元		
	10 ⁴ yuan		10 ⁴ yuan		10 ⁴ yuan		10 ⁴ yuan		10 ⁴ yuan		
1990	72.50	79.6	8.78	9.6	8.79	9.6	1.03	1.2	91.11	475	0.297
1995	83.31	70.2	13.28	11.2	16.34	13.8	5.82	4.9	118.75	531	0.397
2003	117.2	56.2	48.58	23.3	32.39	15.5	10.24	4.9	208.35	902	0.478

(3) 消费结构分析

①生活能源消费 治理前后生活能源消耗结构发生了较大变化,主要表现在:

治理前(1990 年)流域经济发展水平较低,燃料缺乏是当地植被遭到破坏的主要原因之一,以作物秸秆为主、煤炭等其它能源为辅的农村燃料消费结构,使得本来脆弱的生态环境趋于恶化。每年消费燃料折合标准煤为 136t,其中秸秆、薪柴占 81.9 %。每年因燃料短缺而要烧掉 109.9 万 kg 秸秆,占秸秆产出总量的 73 %,每年因此大约要损失氮素 5.4t,磷素 2.2t,钾素 6.6t(养分折算参数参照文献^[27])。

治理后流域经济逐步发展,薪炭林建设和“四位一体”生态型温棚(农村微生物能源生产生活藕合:牲畜-厕所-沼气-蔬菜)、太阳灶、节柴灶的推广,燃料结构趋向多元化并且转型。治理后的 8a 中,流域燃料由秸秆为主转变为以煤炭、薪柴为主,沼气、太阳能为辅的多元化消费结构。按每年人均实际消耗燃料折合标准煤 604kg 计算,其中人均外购燃料增加到 175kg 标准煤,可供薪柴人均折合 508 kg 标准煤,年可供燃料尚有剩余,无需秸秆补充。随着经济的不断发展,外购燃料逐年增加,沼气和太阳能的推广使用,燃料短缺对生态环境造成的压力会最终消除。

②粮油及副食品消耗 治理前(1990 年)人均粮油及副食品消耗折合热量为 $4.99 \times 10^9 J$,其中蔬菜和畜禽产品(肉、蛋、奶)为 $0.84 \times 10^9 J$,占总消耗的 16.8 %。治理后,农业生产势头稳中有增,1995 年人均粮食及副食品消耗为 $5.23 \times 10^9 J$,蔬菜和畜禽产品 $1.21 \times 10^9 J$,占 23.1 %;到 2003 年上升为 $6.24 \times 10^9 J$,蔬菜和畜禽产品为 $2.01 \times 10^9 J$,占 32.2 %。从中可以看出,消耗总体水平增幅不大,但副食品的消耗增长幅度比较大,人民的膳食结构显著改善。

③恩格尔系数 恩格尔系数是消费结构分析的一个重要指标,它是指食品消费支出在生活消费支出中所占份额^[22]。其表达式为:

恩格尔系数 = (食品消费支出额/生活消费支出总额) × 100 %

本文恩格尔系数是以能值为单位计算的,是以物质质量透过能值转换率计算的,计算过程同能值分析,由于篇幅所限在此省略。1990、1995 和 2003 年人均生活消费能值分别为 $2.79 \times 10^{15} \text{ sej}$ 、 $4.0 \times 10^{15} \text{ sej}$ 和 $6.68 \times 10^{15} \text{ sej}$,其中食品消费分别为 $1.85 \times 10^{15} \text{ sej}$ 、 $2.31 \times 10^{15} \text{ sej}$ 和 $3.34 \times 10^{15} \text{ sej}$,各年的恩格尔系数分别为 66 %、58 %和 50 %,虽然治理后有所下降,但按照联合国曾经确定的以恩格尔系数划分的标准^[22],该流域仍然处于温饱阶

段(如图 4)。

(4) 饲料平衡分析 治理前(1990 年),由于草地面积偏小,产草量低,加之大部分秸秆被燃烧,流域内饲料短缺。为了弥补这种短缺,人们继续破坏植被搜罗饲料,生态经济系统陷入恶性循环,饲料短缺成为限制畜牧业发展和生态环境恶化的关键因素之一。

治理后,由于土地利用结构的调整和草场改良,饲料供应得到满足,加之燃料得到稳定解决,上述现象得到遏制并趋向好转。2003 年,流域生猪和大家畜存栏折合羊单位 5 926 个,按一个羊单位年消耗干饲草 500kg 计算,草地提供 254kg/个羊单位,粮食秸秆提供 298kg/羊单位,年尚可剩余饲草 52kg/个羊单位,不但畜牧业发展了,植被还得到了有效保护。

2.2 小流域生态经济系统能值分析

李太平小流域生态经济系统的能值投入产出计算结果如表 4、表 5 所示。流域治理基础年(1990 年)、治理完成年(1995 年)和调查年(2003 年)各年的总能值使用量波动较小,其中化石能使用基本保持稳定,并且所占比例均在 60 %以上,环境能值比例逐年减小,有机能呈增加趋势。人均利用能值水平 2003 年为 2.6×10^{15} sej,低于我国 1996 年平均水平(4.38×10^{15} sej/人)^[23]和甘肃 2000 年水平(5.62×10^{15} sej/人)^[24],并且呈减少趋势,表明系统能值输入水平较低,尤其是农田生态系统的能值投入水平仍然较低,这显然不利于提高和保持土地生产力,人口增长速度高于能值使用的增长速度,对流域生态经济的发展十分不利。

表 4 李太平小流域生态经济系统能值投入产出(2003 年)^[17,18]

投入 Input					产出 Output			
项目 Item	能量 Energy (J)	能值转换率 Transformity (sej/J)	能值 Emergy (sej)	宏观经济 价值 emdollar (\$)	项目 Item	能量 Energy (j)	能值转换率 Transformityse (j/J)	能值 Emergy (sej)
可更新资源源 Renewable resources					粮食产量 Yield			
太阳能 Solar	3.32×10^{16}	1	3.32×10^{16}	3.52×10^3	小麦 Wheat	1.83×10^{13}	159000	2.91×10^{18}
降雨潜能 Precipitation	2.81×10^{13}	18199	5.12×10^{17}	5.44×10^4	其他作物 Others			
水资源 Water resources	2.62×10^{13}	10488	2.74×10^{17}	2.92×10^4	胡麻 Benne	1.79×10^{12}	6900000	1.23×10^{19}
当地不可更新资源 Local nonrenewable resources					马铃薯 Potato	1.05×10^{13}	2700	2.83×10^{16}
表土流失 Topsoil loss	3.80×10^{12}	62500	2.37×10^{17}	2.52×10^4	蔬菜 Vegetable	8.01×10^{11}	2700	2.16×10^{15}
工业品投入 Industrial input					果品 Fruit	8.84×10^{11}	287000	2.54×10^{17}
氮肥 Nitrogen *	8.10×10^7	4.62×10^9	3.74×10^{17}	3.98×10^4	干饲草 Forage	6.35×10^{12}	80000	5.08×10^{17}
磷肥 Phosphor *	1.93×10^8	1.78×10^{10}	3.44×10^{18}	3.65×10^5	畜产品 Animal products			
钾肥 Potassium *		2.96×10^9			猪肉 Pork	3.51×10^{11}	1710000	6.00×10^{17}
机械动力 Mechanical power	2.43×10^{11}	66000	1.60×10^{16}	1.70×10^3	鲜蛋 Egg	6.44×10^{10}	1710000	1.10×10^{17}
燃油 Fuel	1.28×10^{11}	66000	8.45×10^{15}	8.98×10^2	作物副产品 Crop byproducts			
可更新有机能源 Renewable organic energy					秸秆 Stalk	2.76×10^{13}	4420	1.22×10^{17}
劳力 Labor	8.45×10^{11}	380000	3.21×10^{17}	3.41×10^4				
畜力 Livestock	3.18×10^{11}	146000	4.64×10^{16}	4.94×10^3				
有机肥 Organism	2.28×10^{13}	27000	6.16×10^{17}	6.55×10^4				
种子 Seed	1.98×10^{12}	66000	1.31×10^{17}	1.39×10^4				

实物转换量和能值转换率参照文献^[17,18];带*的氮、磷、钾能量单位为 g;宏观经济价值以 1990 年不变价和 1990 年人民币兑美元汇率 4.78 元/\$ 计算;氮、磷、钾*者单位为 g;因缺少林木年蓄积量,玉米多与蔬菜套种且量少,粮食只计算小麦,可能会导致部分误差

净能值产出率(NEYR)由 1990 年的 2.5 增长到 2003 年的 3.41,如果一个系统的净能值产出率小于 1,表明系统经济生产资源利用率低,经济效益差,经济活动缺乏竞争力。由此可见该流域能值投入水平虽低,但治理后资源利用效率呈增加趋势,治理的经济效益是显著的。

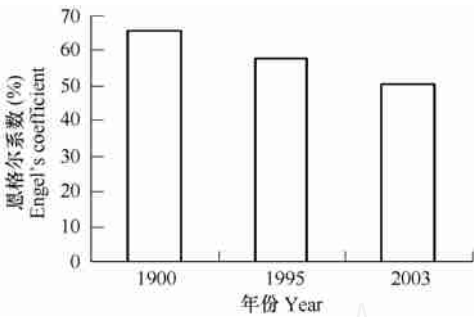


图 4 小流域恩格尔系数变化
Fig. 4 The variation of Engel's coefficient

表 5 小流域生态经济系统能值分析主要指标比较

Table 5 Comparisons indices based on emergy analysis in the watershed

指标 Index	年份 Year		
	1990	1995	2003
总投入能值 Total input emergy(sej)	6.23×10^{18}	5.89×10^{18}	6.01×10^{18}
环境资源 Environmental emergy(sej)	1.48×10^{18}	1.22×10^{18}	1.06×10^{18}
可更新环境资源 Renewable environment emergy(sej)	8.20×10^{17}	8.20×10^{17}	8.20×10^{17}
不可更新环境资源 Nonrenewable environment emergy(sej)	6.65×10^{17}	4.00×10^{17}	2.37×10^{17}
辅助能 Auxiliary emergy(sej)	4.75×10^{18}	4.67×10^{18}	4.95×10^{18}
可更新有机能 Renewable organic emergy(sej)	9.34×10^{17}	8.93×10^{17}	1.11×10^{18}
化石能 Fossil emergy(sej)	3.81×10^{18}	3.77×10^{18}	3.83×10^{18}
总产出能值 Total output emergy(sej)	1.19×10^{19}	1.31×10^{19}	1.69×10^{19}
农产品 Agricultural products emergy(sej)	1.17×10^{19}	1.24×10^{19}	1.62×10^{19}
畜产品 livestock products emergy(sej)	1.98×10^{17}	6.59×10^{17}	7.10×10^{17}
国内生产总值 GDP(¥)	292920	406564	638645
人均可用能值 Emergy per capita(sej/cap)	3.00×10^{15}	2.67×10^{15}	2.60×10^{15}
净能值产出率 Net emergy yield ratio	2.50	2.81	3.41
能值货币比 Emergy/money ratio	2.13×10^{13}	1.45×10^{13}	9.41×10^{12}
能值投资比 Emergy investment ratio	5.79	5.69	6.04
环境负荷率 Environment loading ratio	2.55	2.44	2.11
能值持续性指数 Emergy sustainable index	9.80×10^{-1}	1.15	1.62
环境投入占总投入 Ratio of environment to input(%)	2.38×10	2.07×10	1.76×10
化石能投入占总投入 Ratio of fossil to input(%)	6.12×10	6.41×10	6.38×10
可更新有机能占总投入 Ratio of organic to input(%)	1.50×10	1.52×10	1.86×10
可更新有机能占可更新能值比 Ratio of organic to renewable(%)	5.33×10	5.22×10	5.76×10

系统能值投资比率(EIR)在1990、1995、2003年分别为5.79、5.69和6.04,期间波动较小,高于我国1996年平均值(0.12)^[23]和甘肃2000年水平(3.87)^[24]。较高的能值投资率与该流域农业生产对化肥的依赖程度较高的事实是相符合的。

能值货币比率(emdollar)是当年总能值与国内生产总值的比率,发达国家或地区的能值货币比率远远低于发展中国家或地区^[19]。该流域1990年、1995年和2003年3a能值货币比率分别为 2.13×10^{13} sej/¥、 1.45×10^{13} sej/¥和 9.41×10^{12} sej/¥,呈下降趋势,2003年的能值货币比率略低于2000年的甘肃(11.88×10^{12} sej/¥)^[24],高于我国1996年平均值(6.54×10^{12} sej/¥)^[23],远高于2000年的浙江(2.82×10^{12} sej/¥)、江苏(3.02×10^{12} sej/¥)等发达省份^[25、26],这同系统能值低水平输入一样,流域开发程度较低,系统仍然具有一定的封闭性。

环境负荷率(ELR)在1990、1995和2003年间分别为2.55、2.44和2.11,治理后逐年减小,表明经过治理和经济结构调整,流域生态与经济发展逐步趋于协调,环境的压力有所缓解。同时低于2000年的甘肃(3.73)^[23],远低于2000年的浙江(11.25)和江苏(23.16)^[25、26]等发达地区,表明该流域的经济开发水平仍然较低,这与恩格尔系数分析结果是一致的。

流域生态经济系统的能值持续性指数(ESI)从1990年的0.98增加到2003年的1.62,高于我国1996年的平均值(0.91)^[23]。

总体上ESI从 $0.98 < 1$ 到 $1.6 > 1$,NEYR从2.5到3.41,表明该流域经综合治理后环境经历了从低产出、高环境负载到较高产出、低环境负载的质的变化,其发展是可持续的,经济与生态环境的协调性在不断提高。

3 结论与讨论

以上分析结果显示,治理后流域土地利用结构渐趋合理,农、林、牧土地资源质量有所改善。农业产业结

构、收入结构和消耗结构的演变过程及趋势显示农、林、牧各业产值比例趋向合理,收入多样性指数呈增加趋势,消耗结构趋向合理,饲料、燃料供需平衡,能值分析结果显示,净能值产出率(NEYR)和能值持续性指数(ESI)均呈增加趋势,环境负荷率(ELR)有所下降,流域生态环境的压力趋于减小,持续性增强,资源利用效率呈增加趋势,经济效益显著提高。生态经济系统结构明显有利于系统的进展演变,系统结构趋于稳定,系统功能协调,能、物流通畅,基本实现了生态和经济双赢的目标,表明该治理模式是成功的。

但通过对流域系统恢复重建过程的生态经济分析,仍然暴露了一定的问题,需要在流域今后的进一步治理及结构调整中给以重点关注:(1)人口增长过快,部分抵消了生态、社会经济发展成果,因此在今后的发展中必须将控制人口作为社会经济发展中的首要目标之一。(2)在产业培育中有地方主导产业,却没有形成规模。(3)与国内发达地区比较,整体经济水平实际上仍处于自然经济向半商品经济过渡期,农业发展实际上从有机阶段直接过渡到无机阶段,远未达到可持续农业的要求。群众生活仍然处于温饱阶段,远不及小康水平。能值分析结果显示该流域能值输入水平相对较低,对土地资源过渡依赖,利用强度高,整个系统仍然较封闭,因而必须加大与外界的交流,不断引入负熵流,促使能值的合理流动。

References:

- [1] Li H F. The theory and method of small watershed management. Beijing: China Conservancy and Electricity Press, 1989.
- [2] Sun L D. The theory and practice of small watershed management. Beijing: China Science and Technology Press, 1993.
- [3] Li Z K. Philosophical thinking for small watershed management. The Bulletin of Soil and Water Conservation, 1994, 14(1): 30~37.
- [4] Guan J W, Li Z K. Sustainable development is the heart of small watershed management. The Bulletin of Soil and Water Conservation, 1994, 14(2): 42~47.
- [5] Cheng L, Meng T CH, Zhang F M. The study on eco-economic effect of small watershed management. Small watershed management and development in the Loess plateau. Beijing: Science and Technology Literature Press, 1992. 132~140.
- [6] Wang B, Wu B, Li J L. The study on comprehensive evaluation model for the eco-economic effect of small watershed soil and water conservation. Journal of Soil and Water Conservation, 1994, 8(3): 59~63.
- [7] Li Z K. The study on the effect estimation of small watershed management and system evaluation in the Loess Plateau — A case study on Huangjiaercha watershed in Xiji county, Ningxia. Acta Ecologica Sinica, 1998, 18(3): 241~247.
- [8] Jin J L, Fu Q, Wei Y M. Benefit evaluation model of small watershed control based on projection pursuit. Journal of Northeast Agricultural University, 2001, 8(2): 128~132.
- [9] Kang L L, Wang Y ZH, Wang X. The index system and its application to the effect of small watershed management. Soil and Environmental Sciences, 2002, 11(3): 274~278.
- [10] Ma C D ed. Ecological economics. Jinan: Shandong People Press, 1986.
- [11] Zhang Zh Q, Luo X Sh, Dang X H. Enforcing agricultural infrastructure so as to rich local farmers — a research on the benefits of terrace in Zhangshi village. Ningxia Water Resources, 1993, 1: 33~35.
- [12] Odum H T. Environmental Accounting: Energy and Environmental Decision making. New York: John Wiley, 1996. 1~6.
- [13] Odum H T. Self-organization, transformity and information. Science, 1988, 242: 1131~1139.
- [14] Daniel Campbell. Energy analysis of human carrying capacity and regional sustainability: an example using the state of Maine. Environmental Monitoring and Assessment, 1998, 51: 531~569.
- [15] Yan M C, Odum H T. New Visual Angle to View Eco-economic System: Energy Evaluation case studies of Chinese Regional Economic system. Beijing: China Zhigong Publishing House, 2001.
- [16] Brown M T, Ulgiati S. Energy based indices and ratios to evaluate sustainability: monitoring economics and technology towards environmentally sound innovation. Ecological Engineering, 1997, 9: 51~69.
- [17] Ulgiati S, Odum H T, Bastianoni S. Energy use, environment loading and sustainability: an emergy analysis of Italy. Ecological Modelling, 1994, 73: 215~268.
- [18] Lan Sh F. Emergy analysis for ecosystem. Chinese Journal of Applied Ecology, 2001, 12(1): 129~131.
- [19] Yan M C. Introduction to New Ecological Economics. Beijing: China Zhigong Press, 2001.
- [20] Ulgiati S, Brown M T. Monitoring patterns of sustainability in natural and man-made ecosystems. Ecological Modelling, 1998, 108: 23~36.
- [21] Shannon C E, Weaver W. The Mathematical Theory of Communication. University of Illinois Press, Urbana, IL, 1949.

- [22] Wang L X ed. Watershed management. Beijing: China Forestry Publishing House, 1999. 26~96.
- [23] Li S C, Fu X F, Zhen D. Emery analysis for evaluating sustainability of Chinese economy. Journal of Natural Resources, 2001, 16(4): 297~304.
- [24] Zhao C, Li Z Z. Emery analysis for Gansu ecosystem. Acta Botanica Boreali-occidentalia Sinica, 2004, 24(3): 464~470.
- [25] Li J L, Gong H B, Xu J Q. Emery analysis for evaluating sustainability of Zhejiang environment-economic system. Areal Research and Development, 2003, 22(5): 33~37.
- [26] Li J L, Zhang Z L, Zeng Z P. Study on emery analysis and sustainable development of Jiangsu environmental-economic system. China Population, Resources and Environment, 2003, 13(2): 73~78.
- [27] Luo S M ed. Agricultural ecology. Beijing: China Agriculture Press, 2001.

参考文献:

- [1] 李怀甫编著. 小流域治理理论与方法. 北京: 水利电力出版社, 1989.
- [2] 孙立达编著. 小流域综合治理理论与实践. 北京: 中国科学技术出版社, 1993.
- [3] 李中魁. 小流域治理的哲学思考. 水土保持通报, 1994, 14(1): 30~37.
- [4] 关君蔚, 李中魁. 持续发展是小流域治理的主旨. 水土保持通报, 1994, 14(2): 42~47.
- [5] 程力, 孟庭春, 张复明. 小流域综合治理生态经济效益研究. 黄土高原小流域综合治理与发展. 北京: 科学技术文献出版社, 1992. 132~140.
- [6] 王兵, 吴斌, 李建牢. 小流域水土保持生态经济效益综合评价模型的研究. 水土保持学报, 1994, 8(3): 59~63.
- [7] 李中魁. 黄土高原小流域治理效益评价与系统评估研究——以宁夏西吉县黄家二岔为例. 生态学报, 1998, 18(3): 241~247.
- [9] 康玲玲, 王云璋, 王霞. 小流域水土保持综合治理效益指标体系及其应用. 土壤与环境, 2002, 11(3): 274~278.
- [10] 马传栋编著. 生态经济学. 济南: 山东人民出版社, 1986.
- [11] 张志勤, 雒旭升, 党小虎. 大搞农田基本建设, 走上致富道路——张时村水平梯田增产措施效益调查. 宁夏水利, 1993, 1: 33~35.
- [18] 蓝盛芳. 生态系统的能值分析. 应用生态学报, 2001, 12(1): 129~131.
- [19] 严茂超. 生态经济学新论. 北京: 中国致公出版社, 2001.
- [22] 王礼先主编. 流域管理学. 北京: 中国林业出版社, 1999: 26~96.
- [23] 李双成, 傅小锋, 郑度. 中国经济持续发展水平的能值分析. 自然资源学报, 2001, 16(4): 297~304.
- [24] 赵晨, 李自珍. 甘肃生态经济系统的能值分析. 西北植物学报, 2004, 24(3): 464~470.
- [25] 李加林, 龚虹波, 许继琴. 浙江环境经济系统发展水平的能值分析. 地域研究与开发, 2003, 22(5): 33~37.
- [26] 李加林, 张正龙, 曾昭鹏. 江苏环境经济系统的能值分析与可持续发展对策研究. 中国人口、资源与环境, 2003, 13(2): 73~78.
- [27] 骆世明编著. 农业生态学. 北京: 中国农业出版社, 2001.