

黄土丘陵区县南沟流域生态恢复的生态经济耦合过程及可持续性分析

党小虎^{1,2}, 刘国彬¹, 赵晓光²

(1. 中国科学院水利部水土保持研究所, 杨凌 712100; 2. 西安科技大学地质与环境学院, 西安 710054)

摘要:生态恢复不但是自然和技术过程,更重要的是经济过程,生态经济耦合是生态恢复成败及能否持续的关键。综合应用经济学、能值和生态足迹分析工具,系统研究了黄土丘陵区县南沟流域生态恢复过程中的生态经济系统演变过程及其特征,旨在探索生态可持续发展的经济社会发展机制。结果表明,2000~2005年流域产业结构及其多样性显著改善,生产力显著提高并跨越低水平进入高水平发展阶段,农民的生活状况已经由温饱逐步迈向小康水平。基于能值的生态经济耦合分析结果显示2002~2005年流域环境负载率(ELR)下降,持续性指数(ESI)增加。生态足迹结果显示流域2000年和2005年的生态盈余分别为0.03 hm²和0.239 hm²,新指标万元产值生态足迹(EF_{prod})分别为53.5 hm²/万\$和33.6 hm²/万\$,生态压力指数(EFPI)分别为0.980和0.838,流域处于弱可持续状态。上述结果显示生态恢复提高了流域资源利用和转换效率,环境负载率下降,人类经济活动对生态生产性有效空间的占用减少,可持续性提高。研究结果表明生态恢复是黄土丘陵区实现生态经济良性耦合、协调发展的基本途径。

关键词:生态恢复;生态经济耦合;能值;生态足迹;黄土丘陵区

文章编号:1000-0933(2008)12-6321-13 中图分类号:Q143 文献标识码:A

Ecological-economic coupling process and sustainability for ecological rehabilitation of Xiannangou Catchment in the Loess Hilly Region

DANG Xiao-Hu^{1,2}, LIU Guo-Bin¹, ZHAO Xiao-Guang²

1 Institute of Soil and Water Conservation, CAS and MWR, Yangling 712100, China

2 School of Geology and Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(12): 6321 ~ 6333.

Abstract: Successful and sustainable ecological rehabilitation activities depend heavily on ecological-economic coupling, since these activities are not only a natural and technical process, but an economic process. Evolution and characteristics of the ecological-economic system of Xiannangou Catchment in the Loess Hilly Region were analyzed with attempt to explore mechanisms for sustainable development by synthetically using economics, energy and ecological footprint tools. The results showed as follows: over the period 2000 - 2005, the structure and diversity of the catchment's industries were notably improved, and also its productivity was significantly enhanced, exceeding low-level towards high-level phase. Based on energy accounting, the result of ecological-economic coupling analysis suggested that environmental loading ratio (ELR)

基金项目:中国科学院西部行动计划资助项目(KZCX2-XB2-05);国家自然科学基金重点资助项目(90502007)

收稿日期:2007-09-11; 修订日期:2008-03-25

作者简介:党小虎(1968~),男,宁夏隆德人,博士,高级工程师,主要从事生态恢复与环境保护及可持续发展研究. E-mail: xiaohud2004@163.com

Foundation item: The project was financially supported by West action project of Chinese Academy of Sciences "An experiment and demonstration research on soil and water conservation and sustainable rehabilitation on the Loess Plateau"(No. KZCX2-XB2-05); National Sciences Foundation "The Impact of Eco-rehabilitation on Environment in Loess Hilly Region (No. 90502007)"

Received date: 2007-09-11; **Accepted date:** 2008-03-25

Biography: DANG Xiao-Hu, Ph.D., Senior engineer, mainly engaged in eco-rehabilitation and its assessment. E-mail: xiaohud2004@163.com

<http://www.ecologica.cn>

decreased, meanwhile energy-based sustainability index (*ESI*) increased during the period 2002 - 2005. The result of ecological footprint accounting indicated that, in 2000 and 2005, Xiannangou Catchment displayed 0.03 hectare and 0.239 hectare of ecological surplus respectively, in the meantime a new indicator-ecological footprint per 10000 \$ was 53.5 and 33.6 hectare and its ecological footprint pressure index (*EFPI*) was 0.980 and 0.838 respectively, which showed a weak sustainability of this catchment. Results presented above suggest that ecological rehabilitation contributes to the improvement of resource use and conversion efficiency, as well as to the decreases in environmental loading ratio, the appropriation of biological productive area for economic activities and the increase in sustainability of the catchment. This study suggests that ecological restoration is an essential pathway to the ecological and economic coupling and harmonization in the Loess Hilly Region.

Key Words: ecological rehabilitation; ecological-economic coupling; energy; ecological footprint; the Loess Hilly Region

生态恢复不但是自然的、技术的过程,更重要的是经济过程,因为农民是生态建设的主体,他们的生存和收入是第一位的。很多研究表明^[1-7],在贫困的状态下,保护生态的社会公德和政策法规在农民生存压力面前往往苍白无力,此时的农民只重视短期直接经济利益,倾向于采取短期行为,而这种短期性与生态效益的滞后性之间存在着尖锐的矛盾,从而造成生态破坏,使生态经济系统陷入生态破坏与贫困的恶性循环之中。生态恢复的目的就是要打破这种恶性循环,在恢复退化生态系统的同时建立与生态结构相适应的经济结构即生态结构与经济结构相互协调,探索实现生态可持续发展的经济社会发展模式及生态经济耦合的基本途径。在现有的相关研究中,多见单独应用经济学、能值(energy)或生态足迹(ecological footprint)分析工具进行生态经济过程研究的报道^[8-12],而将三者结合进行生态经济耦合研究的目前鲜有报道。本文以延安 707 km²的中尺度水土保持与可持续生态建设试验示范区的县南沟农-经济林果型生态经济建设模式为研究对象,从产业结构、经济收入、社会发展水平、生态经济系统生产力以及生态与经济之间的相互关系入手,综合应用经济学、能值和生态足迹分析工具,研究生态恢复过程中的生态经济系统演变过程及其特征,旨在揭示经济发展与生态保护的相互关系,为确立生态可持续发展的经济社会发展机制和生态经济耦合提供理论依据和借鉴模式,同时希望为同类地区和相似问题的研究探索一种新方法。

1 研究区概况

延安中尺度水土保持与可持续生态建设试验示范区地处陕西省延安市,属于延河流域,在黄土丘陵区有典型性,总面积 707 km²,包括安塞县、宝塔区的沿河湾、高桥、楼坪、河庄坪、枣园、万花山、柳林、桥沟、川口等 9 个乡镇,134 个行政村,农业人口 4.53 万人,农业劳动力 1.51 万人。研究人员在示范区内针对性地选择了 5 个不同的小区开展不同模式的示范研究(图 1),县南沟流域是其中的一个“农-经济林果”型示范模式,该流域地处安塞县的沿河湾镇,总面积 59 km²,包括 5 个行政村,截止 2005 年有 3 000 人,人均耕地 0.129 hm²,人均年收入为 2996 元(现价),该模式以综合发展农业和经济林果业为主导方向,探索在生态恢复的同时发展经济的生态经济耦合途径,为生态可持续发展的经济社会发展提供可供借鉴的模式。

一个区域的产业结构与其土地利用结构和资源禀赋有着十分密切的关系。该流域实施生态恢复试验之

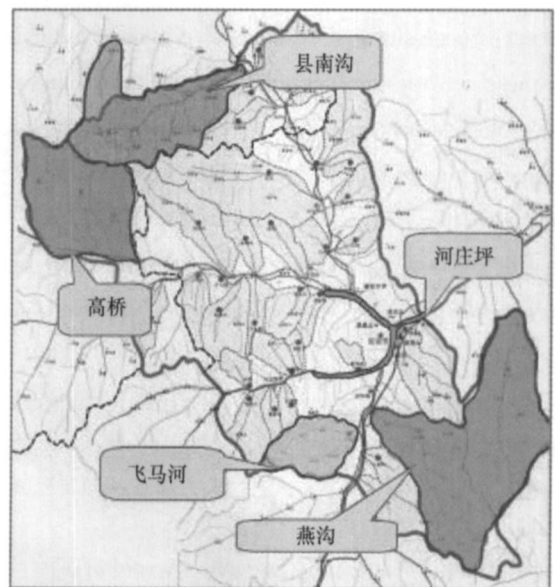


图 1 县南沟流域位置示意图

Fig 1 The sketch map of Xiannangou Catchment location

前,产业结构是建立在以坡耕地为主及其较低的生产力基础上的“饭碗型”结构,倚重于农业尤其是种植业,而正是这种不合理的生产结构与本来脆弱的生态系统的不良结合导致了植被破坏、水土流失、生态失衡等生态问题。1998年随着退耕还林(草)政策的实施,流域从调整土地利用结构入手,重新建立了与土地利用格局相适应的、充分利用了区位优势和资源禀赋的产业结构,突出基本特色,2000年全流域耕地 534hm²,林地 1375hm²,草地 2709hm²,分别占土地面积的 9.1%、23.2%、45.9%,其中坡耕地 267hm²,占耕地面积的 50%,结构初步得到改善。到 2005年耕地面积减少到 387hm²,并且全部梯台化,林地增加到 1854hm²,草地 3021hm²,农林牧用地比例分别为 6.6%、31.4%和 51.2%,结构进一步改善。流域产业链条已经发生了根本性的转变,产业发展模式表现为以下 4 方面的基本特点:

(1)特色经济林果业 经济林果业发展是基于大规模的退耕还林和适宜的光、热、水、气及土壤等环境资源建立的,重点发展苹果、梨、枣等全国闻名的特色经果林,2005年,试区果园面积 276hm²,占总土地面积的 4.7%,占有林地的 14.9%。由于果实独特的品质,产品畅销延安市及周边地区,同时也达到了以(经济)林养(生态)林的目的。

(2)特色种植业 由于耕地面积减少,流域在加强基本农田建设、改善土地生产力状况的同时,改变过去广种薄收的生产方式,着力发展以陕北小杂粮为重点的特色种植业,依托得天独厚的区位优势和延安市的辐射作用,大力发展蔬菜和瓜类种植,成为小有名气的“菜篮子”。

(3)特色养殖业 实施土地利用结构调整、封山禁牧和退耕还草后,以丰富的草场资源为基础,适度发展以草食、舍饲为特点的畜牧养殖业。养殖业的发展不但提高了农民的收入,增强了农业抵御风险的能力,而且可以提高农副产品的利用效率,增加系统物质循环途径,有利于耕地土壤肥力的保持与提高,与种植业相辅相成、相互促进,形成一种良性循环。

(4)以小城镇建设为依托、以农村劳动力转移为纽带的非农产业 伴随着农业结构调整,大量的农村剩余劳动力成了发展非农产业的坚实基础,当前以延安市为中心城市、以县城为依托、以周围乡镇级城镇建设为重点的辐射状小城镇网络,为流域产业结构调整 and 农村剩余劳动力转移提供了机会,也为农产品流通提供了广阔的市场。非农产业的发展,极大地缓解了农业对生态系统的巨大压力,有利于生态恢复与保护。

2 研究方法

2.1 基础数据来源

社会经济数据的获取采用查阅与分析相关统计资料以及农户调查与村干部及年长者等访谈相结合的方法。其中相关统计资料包括 1999~2005年安塞县的社会经济统计年鉴、沿河湾镇的统计报表,农户调查及相关人员访谈采用问卷的形式,在各村支部书记或村主任的引导下,按经济状况将 5个村分上中下 3个层次,每个层次又按多年人均收入状况分上、中、下各抽取 3~4户,共计抽取 31户农户,调查了该流域 2005年的生产和社会经济基本情况,31份调查结果均有效。生态数据均为中国科学院安塞水土保持试验站以及延安示范区的相关研究课题的实际试验观测资料,气象数据为安塞站的观测数据,其它引用的数据在论文中均标注了文献来源。

2.2 分析方法

2.2.1 经济学方法

应用经济学方法,从产业发展状况和人类发展水平出发,分析流域实施生态恢复后的社会经济效应,评估生态保护与经济发展的协调性。

(1)产业多样性与系统生产力

生态系统多样性有利于稳定性的提高,而且与效率、生产力和产量的提高有关,在经济系统中也有相似的趋势^[13,14]。多样性是一个度量经济系统演变和持续性趋势的有用指标^[15],在黄土丘陵区农村产业发展长期以来以农业为主的一元化结构向三次产业均衡发展转变、农业生产以粮食和种植业为主的单一结构向以农林牧副多元结构转变的形势下,有必要对系统的多样性(协调性)进行评价^[16],本文采用香农多样性指数^[17~19]:

$$D = - \sum A_i \cdot \ln A_i \quad (1)$$

式中, D 为多样性指数, A_i 为系统各部门产值 (或从业人员) 所占总产值 (或总人口) 的比重, 当 D 大于 1 时各部门发展均衡。

系统生产力的高低反映了经济系统与其所依赖的生态系统的协调能力高低^[20]。本文选取经济产投比 (%)、粮食单产 (kg/hm^2)、劳动生产率 (万元/劳力)、土地生产率 (万元/ hm^2) 4 个要素生产率指标, 用线性加权法将 4 类指标合并为综合生产力指数, 便于反映生产力动态。由于各类指标的量纲不同, 故采用极值法对各指标进行标准化处理:

$$Z_i = \begin{cases} \frac{C_i - C_{\max}}{C_{\max} - C_{\min}} & (\text{正作用指标}) \\ \frac{C_{\max} - C_i}{C_{\max} - C_{\min}} & (\text{负作用指标}) \end{cases} \quad (2)$$

式中, Z_i 为各指标标准化值 (无量纲); C_i 为第 i 指标的观测值; C_{\min} 为该指标的最小值; C_{\max} 为该指标最大值, $i = 1, \dots, 4$ 。本文所选 4 类指标均为正作用指标, 系统综合生产力指数为:

$$PI = \sum_{i=1}^4 w_i Z_i \quad (3)$$

式中, $w_i = \frac{SD_i}{\sum_{i=1}^4 SD_i}$ 为各指标权重^[21], SD_i 为第 i 指标标准差, 且 $\sum_{i=1}^4 w_i = 1$ 。

为进一步探索产业多样化与生产力变化之间的相互关系, 对产业多样性指数与综合生产力指数进行曲线拟合。

(2) 流域人类发展水平

为了揭示生态恢复过程中人类发展水平的变化, 选择研究期人均收入动态、恩格尔系数与基尼系数以及贫困指数等几个指标进行分析。其中基尼系数的计算比较复杂, 这里采用一个普遍使用的、比较简单的方程^[22~24]:

$$G = \frac{2 \text{covar}(y, r_y)}{N \bar{y}} \quad (4)$$

式中, $\text{covar}(y, r_y)$ 是收入 y 与个人收入由小到大排列的序列号 r_y 间的协方差, 在排序时最穷为 1, 最富为 N , N 是总人数, \bar{y} 平均收入。

贫困指数采用 Sen 指数表示^[24~27]:

$$P = H [I + (1 - I) G_q] \quad (5)$$

式中, H 为贫困发生率, I 为收入缺口率, G_q 为贫困人口基尼系数。贫困指数是个相对概念, 即是相对于某个确定的收入水平而言的, 本文采用相对收入法, 确定调查年份 (2005 年) 延安市农民年人均纯收入 2195 元为贫困线, 以相对较高的现阶段全市人均纯收入作为对照来研究贫困问题, 比以现阶段的国定贫困线 (882 元) 为对照能更加合理有效地反映当前流域的社会经济发展真实水平, 据此所作的判断及决策更具有现实意义。

2.2.2 能值分析方法

能值分析方法由美国著名系统生态学家 H. T. Odum 在系统生态、能量生态、生态经济的理论基础于 20 世纪 80 年代创立的系统分析新方法, 用能值转换率 (transformity) 可将生态经济系统内流动和储存的各种不同类别的能量和物质转换为统一标准的能值, 定量分析生态经济系统结构、功能、自然资源和系统可持续能力、人类与自然和谐共存、资源环境与经济活动的真实价值以及他们之间的关系^[28]。Odum^[28] 把能值

(emergy)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。

Odum将转换率定义为形成单位物质或能量所含有的另一种能量之量;能值分析中常用太阳能值转换率,即形成单位物质或能量所含的太阳能之量。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 joules, 简称为 se_j 。根据 Lotka-Odum 的最大能量原理,能值转换率可以作为一个属性指标^[28]。

应用能值分析原理,计算可更新资源比率、能值/货币比 (energy/money ratio)与能值/货币价值 (EM/\$)、能值产出率 (energy yield ratio, EYR)、能值投资比率 (energy investment ratio, EIR)、环境负载率 (environment loading ratio, ELR)以及能值可持续性指数 (emergy-based sustainability index, ESI)等指标,以揭示流域生态经济系统的资源利用状况、生态经济耦合程度及系统持续性,评价生态恢复对流域可更新资源与不可更新资源平衡利用及其利用效率的贡献。涉及到的产值折合为美元,便于同国际国内以往的研究进行比较,汇率采用 2002 年的官方汇率 8.277 元人民币/\$。

2.2.3 生态足迹分析方法

英国哥伦比亚大学人口生态学家 William E. Rees 在 20 世纪 90 年代初首次应用了生态足迹,并初步做了概念性的描述^[29]。而 Wackemagel 和 Rees 于 1996 出版的《我们的生态足迹——减少人类对地球的影响》一书^[30]使生态足迹的概念得以迅速推广。Wackemagel 和 Rees^[30]、Rees^[31]定义生态足迹 (ecological footprint) 为以可持续的方式支撑某些特定人口消费以及吸纳他们所产生的废弃物所需的生态生产性土地面积。

生态足迹是一种基于面积的可持续发展观,它从需求层面计算人类对生态空间占用 (appropriation of ecological space),从供给层面计算生态承载力 (ecological capacity),通过两者之间的比较,评价全球、国家、地区等不同尺度的生态可持续发展状况。本文利用生态足迹的概念,计算流域人口的生态足迹和流域承载力,进而计算其生态盈余(赤字),并用生态压力指数反映生态恢复对提高流域生态承载力、减少生态足迹从而增加流域可持续性的巨大作用。在计算时采用生态足迹分析中常用的土地类型分类方法,分为能源用地、建设用地、耕地、草地、林地和水域六类,其中能源用地是将流域所需的所有燃料换算成该地区农村常用的薪柴量,进而计算能够提供这些薪柴所需的林地面积;因流域需水量小而忽略水足迹,实际水域只有一条小溪流而未计入承载力。生态足迹及生态承载力的计算模型可以参照相关文献^[32~37],此次计算只引入均衡因子,没有用产量因子,而用当地产量,同时考虑了地球上其它物种的生存需求,必须为保护生物多样性保留生态生产性面积,采用普遍接受的 12%^[38]。“生态足迹/生态承载力”可以用以判断某个特定的人口或经济对资源的利用程度及将来可能的持续程度,本文借用“生态压力指数 (eco-footprint pressure index, EFPI) 这个术语^[39]:

$$EFPI = EF/EC \text{ 或 } ef/ec \quad (6)$$

式中,EFPI 为研究区生态压力指数,EF (ef) 为生态足迹 (人均生态足迹),EC (ec) 为承载力 (人均承载力)。

3 结果分析

3.1 产业多样性与生产力

(1) 本文从传统的产业经济学角度,研究 2000~2005 年间流域产业结构随着生态恢复进程的演变过程。在研究期内农业产值显著上升 (表 1),而其所占总产值比重显著下降 (表 2),农业内部的结构也明显改善,2000 年粮食播种面积占总耕地面积的 80.1%,2005 年下降到了 65.8%。由于经济作物的增加和经营方式的转变使种植业产值均呈上升态势,种植业产值所占比重却有所下降,工副业显著增加 (表 2),这种趋势符合产业高级化发展的基本方向。

当香农产业多样性指数低于 1 时表明产业结构向某一两个部门倾斜,而大于 1 时表明各部门均衡发展,流域 2000~2005 年产业结构香农多样性指数均大于 1,并且逐年增加 (表 2)。

上述结果表明在实施退耕还林(草)等战略性生态恢复措施的前提下,通过积极的产业结构调整政策,流域产业得到较快发展,结构明显改善。

表 1 县南沟农村产业状况 (1990年不变价)

Table 1 Rural industrial structure in Xiannangou Catchment

年份 Year	总产值 (万元) Gross product ($\times 10^4$ yuan)	农业产值 (万元) Agriculture gross product($\times 10^4$ yuan)			工副业 (万元) Sideline($\times 10^4$ yuan)
		种植业	林果业	畜牧业	
		Cropping	Forestry and orchard	Animal husbandry	
2000	604	313	92	16	183
2001	739	358	125	21	235
2002	816	383	137	24	272
2003	827	390	140	24	273
2004	880	415	140	30	295
2005	914	432	152	32	298

表 2 县南沟流域农村产业多样性

Table 2 Diversity of rural industrial structure in Xiannangou Catchment

年份 Year	种植业 Cropping (%)	林业 Forestry (%)	畜牧 Animal husbandry (%)	工副业 Sideline (%)	香农指数 Shannon-Weaver index
2000	51.8	15.2	2.6	30.3	1.085
2001	48.4	16.9	2.8	31.8	1.117
2002	46.9	16.8	2.9	33.3	1.125
2003	47.2	16.9	2.9	33.0	1.124
2004	47.2	15.9	3.4	33.5	1.128
2005	47.3	16.6	3.5	32.6	1.135

(2)综合生产力指数理论值在 0~1 之间,并且在 0~0.5 之间时为低水平生产力,但指数为 0 时并不意味着生产力为 0,而是表示生产力水平非常低;在 0.5~1 之间时为高水平生产力。从综合生产力指数可以得出,随着生态恢复的推进,2000~2005 年流域生产力显著增加,从 2002 年流域生产力进入了高水平发展期(表 3 和表 4)。

表 3 县南沟流域经济系统要素生产率

Table 3 Instrumental productivities in Xiannangou Catchment

年份 Year	经济产投比 Input-output ratio (%)	粮食单产 Food yield per hectare (kg/hm^2)	劳动生产率 (元/劳力) Laboring productivity (yuan/labor)	土地生产率 (元/ hm^2) Land productivity (yuan/ hm^2)
2000	2.12	2715	6004	5864
2001	2.01	2682	7259	8276
2002	2.00	3451	8259	9538
2003	2.11	3554	9387	10805
2004	2.60	3690	9026	11505
2005	2.60	3669	9242	11170

表 4 县南沟流域标准化要素生产率及综合生产力

Table 4 Standard productivities and integrated productivity in Xiannangou Catchment

年份 Year	经济产投比 Input-output ratio	粮食单产 Food yield per hectare	劳动生产率 Laboring productivity	土地生产率 Land productivity	综合生产力 Integrated productivity
2000	0.25	0.03	0.00	0.00	0.075
2001	0.00	0.00	0.43	0.30	0.168
2002	0.06	0.76	0.67	0.57	0.509
2003	0.23	0.86	1.00	0.89	0.734
2004	1.00	1.00	0.89	1.00	0.976
2005	1.00	0.98	0.96	0.98	0.979
权重 Weighting	0.266	0.271	0.225	0.238	

<http://www.ecologica.cn>

(3) 产业多样性指数与综合生产力指数拟合结果表明,随着产业多样性的增加,系统生产力明显增加,综合生产力指数与多样性指数之间存在显著的正相关性(图2),也就是说多样性的提高增加了系统生产力。事实表明,不论生态系统或是根植于其中的经济系统,多样性高的系统本身就是一个高产系统,组分单一的系统(如种植单一作物的系统)都无法实现同多样性较高的系统一样的效率,因为组分单一的系统不能有效地利用资源,无论系统管理者如何选择,这与 Timan 和 Templet“多样性与效率、生产力和产量的提高有关”^[13-15]的结论是一致的。因此说,通过产业结构调整,使经济产出能力提高的同时,更有效地利用了自然资源。

3.2 流域人类发展水平

(1) 2000~2005年间,县南沟流域人均纯收入显著的增长(图3),按1990年的不变价计算,由1168元增加到1876元,增长率60.6%。收入结构变化明显,2005年农民年均收入中,非农产业收入所占比重为72.5%。收入结构的这种变化表明生态恢复实践带动了农业劳动力迅速转移和农村产业结构的调整,使农民人均纯收入大幅度增长,产业重心开始由农业向非农产业转移。这种转变减轻了对农业生态系统所造成的压力,有利于促进生态经济系统的良性循环。

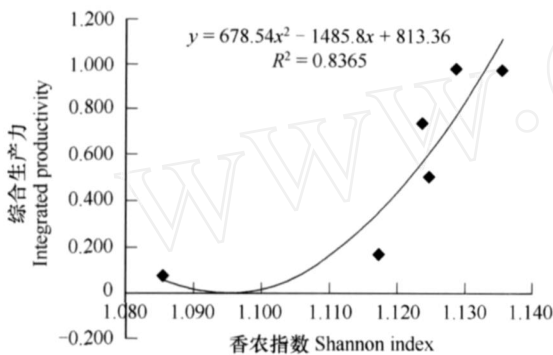


图2 县南沟试点香农指数与综合生产力的关系

Fig. 2 Correlation between Shannon index and integrated productivity in Xiannangou

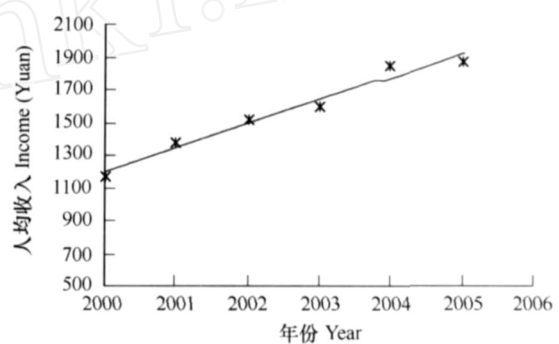


图3 县南沟流域农民人均收入变化

Fig. 3 The variety in farmers income per capita in Xiannangou catchment

(2) 为了分析生态建设试验示范项目实施后流域农民生活所发生的变化,在农户调查的基础上,分别计算恩格尔系数、基尼系数以及贫困指数,评估农民的生活现状。结果显示2005年流域消费性支出和食品消费支出分别为1268元和756元,恩格尔系数为45%,达到了联合国提出的小康标准(40%~50%)^[40];流域基尼系数为0.17,根据钱纳利等经济学家^[41]在20世纪70年代的计算,基尼系数在0.5~0.7之间为收入分配高度不公平,在0.2~0.35之间为收入分配相对平等,0.4为收入不公平警戒线,可见流域属于收入相对公平的地区,这也同流域的实际情况吻合,因为84%的家庭主要收入来源为经济作物经营和外出务工所得,因而收入变异性比较小;Sen指数和FGT指数均在0到1之间变动,贫困指数越低表明社会越进步。2005年流域Sen指数为0.03,FGT指数(=2)为0.01(表5),由贫困发生率与FGT指数可以看出流域贫困线以下的人口比例较小,贫困程度低,收入分配相对公平,这个结果同基尼系数的结论是一致的。

3.3 基于能值的生态经济耦合分析

绘制能值流解析图(图4),分析生态-经济系统间的资源组成及流向,计算系统生态和经济能流、物流、价值流及信息流,以便于进行生态经济耦合分析。

(1) 可更新资源(R)与不可更新资源(N)

生态系统可更新资源均来源于太阳能,为了避免重复计算,以最大输入项为可更新资源量^[42-44],即降雨化学能。从长远看,有较高的可更新资源比率的系统在经济压力下更能够生存,经济对环境的压力相对比使用不可更新资源比率高的系统小,更具备可持续性条件和竞争力。2002~2005年流域可更新资源输入量(包括环境系统的降雨化学能和经济系统输入的有机能,即 $R + F_R$)年际总体上保持稳定,年均均为 5.19×10^{15} sej/hm²;不可更新资源仅计算土壤侵蚀,2002~2005年间不可更新资源输入总体上呈减少趋势,年均均为 $3.99 \times$

10^{13} sej/hm² (表 6),这主要是由于生态恢复使得植被逐渐得以恢复、覆盖度增加,土壤侵蚀模数逐渐降低的缘故,这也是提高系统可持续性的重要方面。

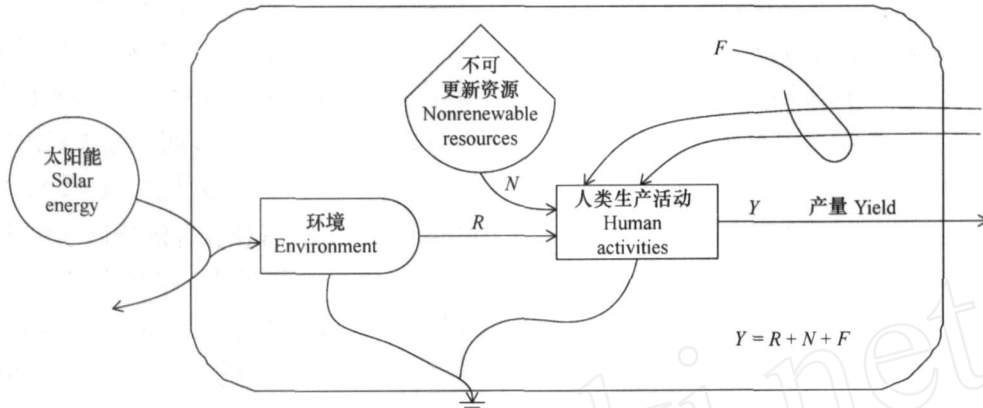


图 4 县南沟流域能值解析图

Fig 4 Energy flows in Xiannangou Catchment

表 5 流域贫困指数计算表

Table 5 The table for calculation of poverty index in the catchment

年份 Year	贫困户 The number of poverty doors (q)	贫困户人均 年收入(元/人) Poverty door income per capita per year	贫困发生率 Poverty incidence (H)	收入缺口 Income gap (g)	收入缺口率 Income gap ratio (I)	贫困人口 基尼系数 of poverty population (G_q)	Sen指数 Sen poverty index	FGT (=2)
2005	3	1680	0.097	1544	0.234	0.12	0.03	0.01

表 6 流域能值分析指标

Table 6 Indices of energy analysis in the catchment

年份 Year	能值流 Energy flow (sej/(hm ² ·a))			
	生态系统可更新资源 Renewable resources input from ecosystem (R)	生态系统不可更新资源 Nonrenewable resources input from ecosystem (N)	经济系统不可更新资源 Nonrenewable resources input from economy (FN)	经济系统可更新资源 Renewable resources input from economy (FR)
1	2	3	4	5
2002	4.81×10^{14}	5.96×10^{13}	2.84×10^{15}	4.86×10^{15}
2003	6.33×10^{14}	6.99×10^{12}	3.38×10^{15}	4.62×10^{15}
2004	3.52×10^{14}	5.26×10^{13}	3.24×10^{15}	4.80×10^{15}
2005	3.92×10^{14}	4.04×10^{13}	3.00×10^{15}	4.66×10^{15}
平均 Average	4.64×10^{14}	3.99×10^{13}	3.12×10^{15}	4.73×10^{15}

能值指标 Energy incators

年份 Year	可更新资源百分率 Renewable resources ratio (%)	EIR	EYR	ELR	ESI	能值/货币比率 Energy/money ratio (sej/\$)	能值/货币价值 EM \$ (\$/hm ²)	能值转换率 Transformity (sej/J)
	$(2+5)/(2+3+4+5)$	$(4+5)/(2+3)$	$(2+3+4+5)/(4+5)$	$(3+4)/(2+5)$	EYR/ELR			$(2+3+4+5)/$ 产品产出 能量 Output
2002	64.8	14.24	1.070	0.543	1.971	4.93×10^{13}	167.10	1.48×10^6
2003	60.8	12.51	1.080	0.646	1.672	5.10×10^{13}	169.35	9.65×10^5
2004	61.0	19.89	1.050	0.640	1.642	4.69×10^{13}	180.20	8.75×10^5
2005	62.5	17.70	1.056	0.600	1.760	4.32×10^{13}	187.16	8.33×10^5
平均 Average	62.3	16.08	1.064	0.607	1.761	4.75×10^{13}	175.95	1.04×10^6

(2)经济系统输入分析

在分析经济系统的资源利用状况对生态系统的影响时,为了使结果更加接近农村实际情况,所以又将经济系统资源分为可更新和不可更新两类,这样划分是合理的,因为在流域内的人力、畜力、种子和有机肥的投入基本不需要农民从外面购买。这类能值实际上是另外形式的可更新资源投入,只是来自于经济系统。

2002~2005年经济系统输入的可更新资源年际变化不大,而不可更新资源主要是化肥、农药、农膜、机械和燃料的投入,这部分的投入大小直接影响流域的农业生态系统长远的可持续性。该部分资源年平均输入为 3.12×10^{15} sej/hm² (表 6),占经济系统总投入 39.7%,不可更新资源投入比重相对较低,流域未来具备可持续性基本条件。

(3)系统产出及能值转换率

尽管能值转换率不属于系统能值分析指标之一,但它的确可以反映系统生产效率,具体到某个产品的转换率可以反映该产品在系统能级中所处的位置即能质,如果一个系统某产品(子系统)的转换率较低,那么就意味着该生产过程(子系统)的生产效率较高,产品在生物圈中所处的能级位置就相对较低,这实际上同生态系统食物链金字塔结构和能量转换十分之一定律是一致的。2002~2005年间流域转换率动态有所下降,年均产出(包括粮食、油料、蔬菜、水果、林地薪柴量及草地生物量年增量)为 8.47×10^9 J/(hm²·a),相应的年均能值转换率为 1038259 sej/J (表 6),能值转换率高于意大利(1994年)平均 159000 sej/J^[45],意大利大豆生产系统 40000 sej/J^[46]和瑞典饲草生产系统 14000 sej/J^[47],与 2004年尼加拉瓜的绿咖啡生产转换率 1770000 sej/J相当^[48],以上结果表明随着生态恢复的进程流域资源利用效率在逐步提高,但相对于发达国家和地区仍然处于较低水平。

(4)能值指标计算

用于能值分析的指标比较多,根据本文研究尺度和实际需要,选择能值/货币比率(energy/money ratio)与能值/货币价值(EM\$)、能值产出率(EYR)、能值投资比率(EIR)、环境负荷率(ELR)和能值持续性指数(ESI)6个指标来对流域生态恢复过程中的能流进行计算,以量化该过程的生态经济耦合状况,评价生态恢复与经济协调程度。其中能值/货币比率与两个指标是用来评价生态资源对经济贡献的,能值/货币比率同单位GDP能耗相似,能值/货币价值则是虚拟价格;EYR是度量生态系统在经济系统能流辅助下利用其自身资源能力的一个指标^[42,49,50],理论最低值为1;实际上 $EYR = 1 + \frac{1}{EIR}$,即 EYR和 EIR是书写形式不同的同一个指标,但表达的意义不同,在分析时两者配合使用;ELR是一个用来评估经济活动对生态系统压力的指标^[49,51],ELR=2表示相对较低的环境影响,在3~10之间表示比较适中的生态压力,而大于10表示生产活动产生了比较大的环境压力^[50];ESI在1~10之间表示该经济系统正在发展而相对具有活力^[52]。结果显示,2002~2005年,流域能值/货币比率随时间而有所下降(表 6),年均均为 4.75×10^{13} sej/\$,同20世纪90年代前后的中国(1983年) 1.912×10^{13} sej/\$、新几内亚(1992年) 4.677×10^{13} sej/\$、利比亚(1983年) 3.47×10^{13} sej/\$和巴西(1983年) 0.833×10^{13} sej/\$^[42,45,53]接近,但同澳大利亚(1996/1997年) 2.71×10^{12} sej/\$、瑞典(1991年) 2.57×10^{12} sej/\$、美国(1983年) 2.55×10^{12} sej/\$、荷兰(1983年) 2.23×10^{12} sej/\$、日本(1983年) 2.14×10^{12} sej/\$、意大利(1992年) 1.46×10^{12} sej/\$和瑞士(1983年) 0.72×10^{12} sej/\$^[42,45,53,54]等发达国家比较高很多。这表明资源利用效率在不断提高,单位产值的资源能值使用量在减少,生态恢复对系统资源的利用率有很大的改善作用,但同发达国家和地区比较仍然处于较低水平。相应的能值/货币价值呈增加态势(表 6),这也是生态恢复的生态经济效应之一。2002~2005年间流域 EYR、EIR、ELR和 ESI年均值分别为 1.064、16.083、0.607和 1.761,上述结果表明,该流域仍然是消费型经济,过多地利用了不可更新资源(主要是由于水土流失造成的),但经济系统对生态系统的压力相对较小,是个经济发展相对活跃的系统,具备了可持续发展条件。但仍需要进一步加强生态建设,保护环境,提高土地产出,如减少土壤侵蚀,增加有机肥以培肥地力,增加物种多样性以更充分利用自然资源等。尤其是 EYR非常接近1,表明生态系统还不能很好地支持其经济系统,尽管来自经济系统的投入在缓慢增加,但其生态系统还是不能很好地利用这些辅助能投入,

更多地转换自然资源以提高资源的利用效率,这正是必须进一步加强生态建设、保护生态环境的基本理由。

3.4 基于生态足迹的流域可持续性分析

3.4.1 生态足迹与承载力

流域 2000年和 2005年的生态足迹分别为 1.431 hm^2 和 1.238 hm^2 ,相应的承载力(扣除 12%的生物多样性保护面积)分别为 1.461 hm^2 和 1.477 hm^2 ,生态足迹与承载力比较,两年的生态盈余分别为 0.03 hm^2 和 0.239 hm^2 (表 7),表明人类对生态生产性空间的占用尚在其承载力范围内。

表 7 县南沟流域生态足迹计算结果

Table 7 The result of calculation for eco-footprints in Xiannangou Catchment

年份 Year	人均生态足迹 Eco-footprint per capita			人均承载力 Ecological carrying capacity per capita			生态压力指数 Eco-footprint pressure index (EFPI)
	类型 Type	占用面积 (hm^2 /人) Appropriated areas per person	均衡因子 Equivalent factor	调整面积 (hm^2 /人) Adjusted areas per person	实际面积 (hm^2 /人) Available areas per person	调整面积 (hm^2 /人) Adjusted areas per person	
2000	能源用地 Energy land	0.655	1.35	0.884	0	0	
	建设用地 Construction land	0.047	2.11	0.099	0.047	0.099	
	耕地 Arable land	0.129	2.11	0.272	0.196	0.414	
	草地 Pasture	0.327	0.47	0.154	0.993	0.467	
	林地 Forest	0.016	1.35	0.022	0.504	0.680	
	水域 Water area		0.35	0	0	0	
	合计 Summation			1.431		1.660	
	扣除 12%的保护生物多样性面积 Subtract areas for biodiversity protection					1.461	0.980
2005	能源用地 Energy land	0.608	1.35	0.821	0	0	
	建设用地 Construction land	0.047	2.11	0.099	0.047	0.099	
	耕地 Arable Land	0.104	2.11	0.220	0.129	0.272	
	草地 Pasture	0.327	0.47	0.154	1.007	0.473	
	林地 Forest	0.023	1.35	0.031	0.618	0.834	
	水域 Water area		0.35		0	0	
	合计 Summation			1.238		1.679	
	扣除 12%的保护生物多样性面积 Subtract areas for biodiversity protection					1.477	0.838

3.4.2 一个新指标——万元产值(美元)生态足迹 EF_{prod}

为了将经济产出与生态足迹联系起来,评估每产生单位数量的经济产值所占用的生态生产性土地资源,与能值分析中的指标“能值/货币比率”相对应,本研究建立了一个新指标“万元产值(美元)生态足迹 EF_{prod} ”,其数学表达式为:

$$EF_{prod} (\text{hm}^2/\text{万}\text{美元}) = EF/\text{总产值}(\text{万}\text{美元}) \quad (7)$$

式(7)中, EF 为各流域总生态足迹。用美元作为货币单位为的是同能值分析统一起来并且便于今后同类指标的国际比较。 EF_{prod} 值越低,单位产值所需的生态生产性土地越少,表明系统生产效率越高,越具备可持续性条件。

结果显示,县南沟流域 2000年和 2005年 EF_{prod} 分别为 53.5 $\text{hm}^2/\text{万}\text{美元}$ 和 33.6 $\text{hm}^2/\text{万}\text{美元}$,这个表明生态生产性土地作为一种稀缺资源,生态恢复提高了其在经济利用中的效率,但 EF_{prod} 仍然偏高,如果要降低单位产

值的生态占用(生态足迹),就必须在提高单位面积的土地产出能力的同时降低生产成本。

3.4.3 流域可持续发展能力评价

为了进行基于生态足迹的流域可持续能力评价,本研究参照 Huang等^[39]的划分标准,依据生态压力指数(EFPI),将可持续发展能力划分为4个级别,即强可持续、可持续、弱可持续和不可持续,具体见表8。结果显示,县南沟流域2000年和2005年EFPI分别为0.980和0.838,经济活动的生态压力因生态恢复而降低,依据上述可持续性等级划分标准属于弱可持续性模式。

4 结论与讨论

本研究结果表明,在小流域尺度上,生态恢复明显改善了产业结构及其多样性,提高了系统生产力,农民的生活状况已经由温饱逐步迈向小康水平。基于能值的生态经济耦合分析结果显示生态恢复提高了资源利用和转换效率,环境负载率下降,可持续性提高。基于生态足迹的可持续能力评价结果表明流域尚有生态盈余,处于弱可持续状态,结论与流域实际情况是吻合的。一方面,生态恢复使流域粮食生产和农民收入的大幅度提高、农民生活水平的显著改善以及农民受教育程度的提高,经济和社会发展能力显著提高,流域经济系统运行得到显著改善;各项生态恢复与保护措施使流域的生态足迹与生态承载力处于平衡状态并略有生态赢余,同时森林覆盖率的提高使水土流失得到控制、能物流输入结构以及土壤质量的改善,使得资源与环境承载力整体上有提高,因而产生了生态经济协调发展的耦合效应。另一方面,由于人口的过度增长、土地生产力仍处于中低水平、能物流输入结构未达到最优、资源利用效率仍然较低等因素的影响,流域目前尚未达到最佳的生态经济耦合状态。因此在今后的工作应侧重于土地生产力改造、控制人口过快增长以降低生态足迹,提高生态承载力;进一步调整产业结构和能源结构,增加流域生态系统对外部反馈投入(F)的转换能力,提高资源利用效率,增强流域生态经济发展的可持续性。

该研究所采用的方法是将经济和其它生态系统分析工具结合起来,这种结合难免会产生一定的不足,如在本研究中能值和生态足迹指标之间桥梁性的指标有待于在今后的工作中进一步探索,其次是生态经济耦合驱动力问题需要进一步研究解决。至于能值与生态足迹这两个工具的应用,正如它们本身仍然存在不完善之处一样,仍需在今后的研究中进一步加以完善。

References:

- [1] Li Z, Song R M. A study on pertinence between ecologically sensitive zones and poverty-stricken areas. *Rural Economy and Society*, 1994, (5): 49 - 56.
- [2] Zhao Y L, Liu Y H. Distribution of vulnerable environment and its relationship with poverty in China. *Anthropogeography*, 1996, 11(2): 1 - 7.
- [3] Tong Y Q, Long H L. Study on sustainable development in the poor areas coupled with vulnerable environment. *China Population, Resources and Environment*, 2003, 13(2): 47 - 51.
- [4] Wang L C, Xie Y C. Feature and mechanism of the socioeconomic system in poverty-stricken areas characterized by ecological frailties——Taking Longnan District as a case. *Journal of Northwest Normal University (Natural science)*, 2004, 40(1): 76 - 80.
- [5] Li R, Liu G B, Mu X M. Thinking of ecological improvement and farmers-richening as focus on eco-reconstruction of the Loess Plateau. *Journal of Chinese Academy of Sciences*, 2000, 3: 193 - 196.
- [6] Ruitenbeek H J. Distribution of ecological entitlements: implications for economic security and population movement. *Ecological Economics*, 1996, 17: 49 - 64.
- [7] Rees W E. An Ecological Economics Perspective on Sustainability and Prospects for Ending Poverty. *Population and Environment*, 2002, 24: 15 -

表 8 基于生态足迹的可持续发展指标及等级划分

Table 8 The index and grade of sustainable development based on eco-footprint

等级 Grade	表征状态 State	指标特征 Index threshold
1	强可持续 Strong sustainability	$EFPI < 0.5$
2	可持续 Sustainability	$EFPI 0.5 \sim 0.8$
3	弱可持续 Weak sustainability	$EFPI 0.8 \sim 1$
4	不可持续 Non-sustainability	$EFPI > 1$

46

- [8] Ren J Z, He H D, Wang N. Models of coupling agra-grassland systems in desert-oasis region. *Acta Prataculturae Sinica*, 1995, 4(2): 11 - 19.
- [9] Fang C L. Discrepancy laws of the eco-economic zone in Heihe drainage area and its coupling development pattern. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(5): 699 - 708.
- [10] Lin H L, Xiao J Y, Hou F J. Coupling pattern of the meta-ecosystem of mountain, desert and oasis its endollars analysis in the Hexi Corridor, Gansu, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(5): 956 - 971.
- [11] Dong X B, Gao W S, Yan M C. Energy evaluation of the coupling effects of ecological economic systems of two selected counties in the eco-tone between agriculture and pasture in the North China. *Transactions of the CSAE*, 2005, 21(11): 1 - 6.
- [12] Dang X H, Liu G B, Li X L, *et al*. Analysis on small watershed Eco-economic system in Loess Hilly Area——A case study in Litaiping Small Watershed of Longde County. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(10): 3516 - 3525.
- [13] Ulanowicz R E. *Growth and Development, Ecosystems Phenomenology*. Springer-Verlag, New York, NY, 1986.
- [14] Tilman D, Polasky S, Lehman C. Diversity, productivity and temporal stability in the economics of humans and nature. *Journal of Environmental Economics and Management*, 2005, 49: 405 - 426.
- [15] Temple P H. Energy, diversity and development in economic systems: an empirical analysis. *Ecological Economics*, 1999, 30: 223 - 233.
- [16] Yuan C W. A discussion on sustainable agriculture. In: Zhang Xianwan ed. *See in Research advance of soil fertility*. Beijing: China Science and Technology Press, 1991. 61 - 66.
- [17] Temple P H. The energy transition in international economic systems: an empirical analysis of change during development. *International Journal of Sustainable Development and World Ecology*, 1996, 3: 1 - 18.
- [18] Temple, P. H. Energy, Economic Diversity and Development. 17th Congress of World Energy Council, Sept 13 - 18, Houston, TX, published in proceedings, 1998.
- [19] Zhou J L. A study on pattern for comprehensively sustainable development of fishing, animal husbandry and agriculture. *Rural Environment*, 1986, 2(1): 1 - 5.
- [20] Guo D H. Criterion on productivity and ecology of economic development. *History of Culture and Philosophy*, 2003, (1): 71 - 74.
- [21] Wang Y M, Zhang J K. A method based on standard and mean deviations for determining the weight coefficients of multiple attributes and its applications. *Symbolic Statistics and Management*, 2003, 22(3): 22 - 27.
- [22] Milannovic B. A simple way to calculate the Gini coefficient, and some implications. *Economic Letters*, 1997, 56: 45 - 49.
- [23] Lemman R L, Yitzhaki S. A note on calculation and interpretation of the Gini Index. *Economic Letters*, 1984, 15: 363 - 368.
- [24] Yitzhaki S. Economic distance and overlapping of distributions. *Journal of Economics and Statistics*, 1994, 107 - 115.
- [25] Li X Y, Li Z, Tang L X. Development and validation of participatory poverty index. *China Rural Economy*, 2005, 5: 39 - 46.
- [26] Yang D M, Wei W. Comparative study on several issues of poverty theory and revelation of practice on poverty reduction in West region. *Exploration of Economic Issue*, 2005, (1): 4 - 7.
- [27] Sen A K. Poverty: An ordinal approach to measurement. *Econometrica*, 1976, 44: 219 - 231.
- [28] Odum H T. *Environmental Accounting: Energy and Environmental Decision making*. New York: John Wiley, 1996.
- [29] Costanza R, Daly Y H. National capital and sustainable development. *Conservation Biology*, 1992, 6(1): 37 - 38.
- [30] Wackemage I M, Rees W E. *Our Ecological Footprint: Reducing human impact on the Earth*. New Society Publishers, Philadelphia, 1996.
- [31] Rees W E. Eco-footprint analysis: merits and brickbats. *Ecological Economics*, 2000, 32: 371 - 374.
- [32] Wackemage I M, Lewan L, Hansson C B. Evaluating the use of natural capital with the footprint. *AMBIO*, 1999, 28: 604 - 612.
- [33] Wackemage I M, Richardson D. How to calculate a household's ecological footprint. Anahuac University of Xalapa and University of Texas, 1998.
- [34] van Vuuren D P, Smeets E M W. Ecological footprints of Benin, Bhutan, Costa Rica and the Netherlands. *Ecological Economics*, 2000, 34: 115 - 130.
- [35] Feng J J. Using composition of land multiplier to estimate ecological footprints associated with population activity. *Ecological Economics*, 2001, 37: 159 - 172.
- [36] Gossling S, Hansson C B, Horstmeier O, *et al*. Ecological footprint analysis as a tool to assess tourism sustainability. *Ecological Economics*, 2002, 43: 199 - 211.
- [37] Monfreda C, Wackemage I M, Deumling D. Establishing national natural capital accounts based on detailed ecological footprint and biological capacity assessment. *Land Use Policy*, 2004, 21: 231 - 264.
- [38] WECD. *Our Common Future*. Oxford University Press, New York, 1987.
- [39] Huang Q, Wang R H, Ren Z Y, *et al*. Regional ecological security assessment based on long period of ecological footprint analysis. *Resources, Conservation and Recycling*, 2007, 51: 24 - 41.
- [40] Li H Y. A discussion on calculation of Engel coefficient. *Statistics and Prediction*, 1999, 3: 29 - 30.

- [41] Zhang Y. Gini coefficient and income distribution. Shanghai Corporation, 2004, 5: 42 - 44.
- [42] Zhang L X, Yang Z F, Chen G Q. Energy analysis of cropping-grazing system in Inner Mongolia Autonomous Region, China. Energy Policy, 2007, 35: 3843 - 3855.
- [43] Brown M T, Herendeen R A. Embodied energy analysis and energy analysis: a comparative view. Ecological Economics, 1996, 19: 219 - 235.
- [44] Lu H F, Lan S F, Chen F P, *et al*. Energy study on dike-pond eco-agricultural engineering models. Transitions of CSAE, 2002, 18(5): 145 - 150.
- [45] Ulgiati S, Odum H T, Bastianoni S. Energy use, environment loading and sustainability: an energy analysis of Italy. Ecological Modelling, 1994, 73: 215 - 268.
- [46] Panzieri M, Marchettini N, Hallam T G. Importance of the *Bradyrhizobium japonicum* symbiosis for the sustainability of a soybean cultivation. Ecological Modelling, 2000, 135: 301 - 310.
- [47] Rydberg T, Jans \acute{a} J. Comparison of horse and tractor traction using energy analysis. Ecological Engineering, 2002, 19: 13 - 28.
- [48] Cuadra M, Rydberg T. Energy evaluation on the production, processing and export of coffee in Nicaragua. Ecological Modelling, 2006, 196: 421 - 433.
- [49] 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.
- [50] Cavalett O, de Queiroz J F, Ortega E. Energy assessment of integrated production systems of grains, pig and fish in small farms in the South Brazil. Ecological Modelling, 2006, 193: 205 - 224.
- [51] Brown M T, Ulgiati S. Energy evaluations and Environmental loading of electricity production systems. Journal of Cleaner Production, 2002, 10: 321 - 334.
- [52] Ulgiati S, Brown M T. Monitoring patterns of sustainability in natural and man-made ecosystems. Ecological Modelling, 1998, 108: 23 - 36.
- [53] Doherty S J. Policy perspective on resources utilization in Papua New Guinea using techniques of energy analysis. Master project paper, Department of Urban and region planning, University of Florida, Gainesvil. Center for Wetlands, 1990. 72.
- [54] Lefroy E, Rydberg T. Energy evaluation of three cropping systems in southwestern Australia. Ecological Modelling, 2003, 161: 195 - 211.

参考文献:

- [1] 李周,孙若梅.生态敏感地带与贫困地区的相关性研究.农村经济与社会,1994,(5):49~56.
- [2] 赵跃龙,刘燕华.中国脆弱生态环境分布及其与贫困的关系.人文地理,1996,11(2):1~7.
- [3] 佟玉权,龙花楼.脆弱生态环境耦合下的贫困地区可持续发展研究.中国人口.资源与环境,2003,13(2):47~51.
- [4] 王录仓,谢永成.生态脆弱型贫困区社会经济地域系统的特征与作用机制——以陇南地区为例.西北师范大学学报(自然科学版),2004,40(1):76~80.
- [5] 李锐,刘国彬,穆兴民.改善生态与富民增收是黄土高原生态建设的中心.中国科学院院刊,2000,3:193~196.
- [8] 任继周,贺汉达,王宁.荒漠-绿洲草地农业系统的耦合与模型.草业学报,1995,4(2):11~19.
- [9] 方创琳.黑河流域生态经济带分异协调规律与耦合发展模式.生态学报,2002,22(5):699~708.
- [10] 林慧龙,肖金玉,候扶江.河西走廊山地-荒漠-绿洲复合生态系统耦合模式及耦合宏观经济价值分析——以肃南山地-张掖北山地区荒漠-临泽绿洲为例.生态学报,2004,24(5):956~971.
- [11] 董孝斌,高旺盛,严茂超.基于能值理论的农牧交错带两个典型县域生态经济系统的耦合效应分析.农业工程学报,2005,21(11):1~5.
- [12] 党小虎,刘国彬,李小利,等.黄土丘陵区小流域生态经济要素分析.生态学报,2006,26(10):3516~3525.
- [16] 袁从祯.关于持续农业的探讨.见:张先婉主编.土壤肥力研究进展.北京:中国科学技术出版社,1991,61~66.
- [19] 周纪纶.渔牧农综合经营持续发展模式研究——上海南汇县养殖场的发展.农村生态环境,1986,2(1):1~5.
- [20] 郭东海.经济发展的生产力标准与生态标准.文哲史,2003,(1):71~74.
- [21] 王应明,张军奎.基于标准差和平均差的权系数确定方法及其应用.数理统计与管理,2003,22(3):22~27.
- [25] 李小红,李周,唐丽霞.参与式贫困指数的开发与验证.中国农村经济,2005,5:39~46.
- [26] 杨冬民,韦苇.贫困理论中若干问题的比较研究及对西部反贫困实践的启示.经济问题探索,2005,(1):4~7.
- [40] 李华宇.也论恩格尔系数的计算方法.统计与预测,1999,(3):29~30.
- [41] 张英.基尼系数与收入分配.上海企业,2004,5:42~44.