

基于耗散结构理论的黄土丘陵区耕地利用变化分析*

郝仕龙^{1,2} 曹连海¹ 李春静¹

(1. 华北水利水电学院资源与环境学院 郑州 450011; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所
黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室 杨凌 712100)

摘要 耕地利用和保护是关系我国国民经济和社会可持续发展的全局性战略问题。针对黄土高原耕地利用和保护面临的问题,根据耗散结构理论,以黄土丘陵区耕地资源为研究对象,通过分析黄土丘陵区耕地资源利用的特点,构建了耕地系统的熵流模型,耕地利用效益、光合转化效益及生态效益是影响该区域耕地系统有序性的关键。以上黄试验区为例,分析了该试验区不同时期耕地系统熵流变化的规律。结果表明,从“六五”时期至“十五”时期,通过对该试验区耕地系统进行综合治理,耕地系统的熵值逐步减少,其不同时期的熵变值分别为-0.652 4、-0.198 8、-0.342 1、-0.266 4 和-0.290 0,表明耕地系统的有序性、稳定性逐步提高。

关键词 耕地利用 耗散结构理论 熵流变化 黄土丘陵区

中图分类号: F301.24 文献标识码: A 文章编号: 1671-3990(2010)01-0170-05

Analysis of cultivated land utilization change in Loess Hilly and Gully regions based on dissipative structure theory

HAO Shi-Long^{1,2}, CAO Lian-Hai¹, LI Chun-Jing¹

(1. School of Resources and Environment, North China University of Water Conservancy and Electric Power, Zhengzhou 450011, China; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Water and Soil Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China)

Abstract Cultivated land protection plays an important role on sustainable social-economic development in China. For the severe situation of land use and protection in the Loess Hilly and Gully region, a dissipative structure theory was used to set up an entropy change model in accordance with the characteristics of cultivated land utilization. Three factors including changes in benefits of cultivated land utilization, photosynthetic transformation and environment play key role in orderliness of cultivated land. Shanghuang experimental area was used to analyze the entropy change rules of cultivated lands in different periods. Results show a gradual decrease in entropy from the “sixth five-year plan” to the “tenth five-year plan” period. The individual entropy change value flow is -0.652 4, -0.198 8, -0.342 1, -0.266 4 and -0.290 0 respectively. This indicates a gradual increase in the orderliness and stability of cultivated lands in the study area.

Key words Cultivated land utilization, Dissipative structure theory, Entropy change, Loess Hilly and Gully region

(Received Feb. 10, 2009; accepted May 18, 2009)

黄土丘陵区根深蒂固的滥垦、滥伐、滥牧的经营方式和广种薄收的农业生产传统使该地区成为中国土地利用/土地覆盖变化最剧烈的地区之一,同时也是生态环境的脆弱区^[1-5],综合治理黄土高原水土流失、改善生态环境和发展当地农业经济是一项复杂而艰巨的任务^[6-11],其深层次原因主要表现为土地资源的不合理利用,特别是对坡耕地采取掠夺式的经营模式。据统计,黄土丘陵区坡耕地面积占

耕地总面积的 70%以上,由于长期利用过程中缺乏应有的耕地补偿措施,造成坡耕地土壤贫瘠,水土流失加重,耕地质量总体呈下降趋势。耕地的数量及质量变化是引起该区域生态环境变化的重要原因,因此黄土丘陵区耕地的质量和生态环境等方面的变化成为许多学者的研究对象^[12-17]。在已往的研究过程中,许多学者通过直接构建一些评价指标来动态描述某区域耕地质量变化情况,本文把耕地作为一

* 华北水利水电学院高层次人才科研启动项目、中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室开放基金(10501-232)资助

郝仕龙(1972~),男,博士,副教授,主要研究方向为土地利用/土地覆盖变化及“3S”应用研究。E-mail: haoshilong24@163.com

收稿日期: 2009-02-10 接受日期: 2009-05-18

个动态、开放的系统, 根据耗散理论, 通过熵变化的形势来描述耕地质量变化。

1 耗散结构理论与耕地资源系统

1.1 耗散结构理论

耗散结构论认为, 一个远离均衡态的开放系统, 在外界条件变化达到某一特定阈值时, 量变可以引起质变; 系统通过与外界不断交换物质能量, 可以从原来的无序状态变化为一种时间、空间或功能上的有序状态, 这种非均衡状态下的新有序结构, 即耗散结构^[18-20]。耗散结构要求不断地与外界交换物质和能量才能维持, 所以它是一种“活”的有序结构。“耗散”的含义正在于这种结构的产生、维持和发展的根源是物质和能量的耗散。这也正是自然资源开发利用过程中的本质, 开发利用即自然资源的消“耗”, 开发利用后果随之扩“散”。

系统状态的变化是通过体系状态函数“熵”来表达的。根据耗散结构理论, 系统只有不断与外界进行物质、能量交换, 增加系统的负熵, 使总熵减小, 才能使系统逐步向新的有序方面发展。

1.2 耕地资源系统中的耗散结构

耕地资源系统是在一定时间和地区内, 人类从事农业生产, 利用耕地生物与非生物环境之间以及与生物种群之间的关系, 在人工调节和控制下, 建立起来的各种形式和不同发展水平的耕地生产体系。与自然生态系统一样, 耕地资源系统也是由耕地环境因素、绿色植物、动物和微生物构成的物质循环和能量转化系统, 耕地资源系统是农业生态系统中最基本的亚系统, 它以栽培作物种群为主体, 以农田气候、土壤环境为基础, 在人工辅助能量和科学技术的作用下, 进行着能量和物质的转化、固定、分配和贮藏, 因此, 耕地资源系统是一个开放的系统, 符合耗散结构理论的基本要求。耕地资源是一种可更新的资源, 在对耕地资源利用的过程中, 若其负熵的耗散超过负熵的补充, 将使耕地资源系统走向无序和退化, 耕地资源将产生退化现象。

1.3 黄土丘陵区耕地系统的耗散结构特征

根据耗散结构理论, 系统熵值变化与影响系统结构与稳定的因素有关, 可通过公式来表示, 即:

$$d_s = d_{is} + d_{es} \quad (1)$$

开放系统熵的改变 d_s 由两部分组成: 一部分是系统内本身不可逆过程所引起的熵增加, 也称为熵产生(d_{is}); 另一部分是系统与外界交换能量与物质引起的熵变化, 称为熵流(d_{es})。 d_s 的大小取决于 d_{is} 和 d_{es} 的代数和。如果系统中总熵流为正值, 即 $d_s > 0$, 则系统的无序程度将增加; 如果系统中总熵流为负值, 即 $d_s < 0$, 则系统的有序程度将增加。在黄

土丘陵区, 对于耕地系统负熵流 d_{es} , 主要表现在 3 方面: 一是耕地利用效益变化引起耕地系统的负熵流, 指对耕地合理追加了劳动力、资金和技术等投入, 其结果表现为系统与外界进行的物质和能量交换的提高, 耕地利用产出效果良好, 用 d_{es1} 表示; 二是耕地转化效益, 指在耕地上通过农作物品种的改良、种植结构的调整及复种指数的提高, 耕地在生育期间内单位面积上获得了更多的太阳能的负熵的补充, 使单位面积耕地的总产量增加, 用 d_{es2} 表示; 三是耕地的环境效益, 指耕地系统环境改善表现出来的生态系统服务功能, 对于人类的生产和生活具有重要作用。如退耕还林(草)表现出来的气候调节、涵养水源、生物多样性控制、水土流失控制等生态功能处于良好状态, 则耕地系统处于负熵状态, 用 d_{es3} 表示, 因此, 耕地系统的负熵流公式为:

$$d_{es} = d_{es1} + d_{es2} + d_{es3} \quad (2)$$

对于耕地系统的熵产生 d_{is} 而言, 它是系统内本身不可逆过程所引起的熵增加, 系统的熵值总是自发地朝着增加的方面进行, 一直到熵值最大的平衡态。为便于量化分析, 将其具体表示为 3 个部分: 一是由于自然或人为因素使耕地质量下降, 耕地生产力降低, 导致耕地投入产出比不断下降, 耕地利用效益低下的熵增, 表示为 d_{is1} ; 二是耕地上农作物品种的退化、种植结构的改变或复种指数的降低使耕地在整个生育期间内单位面积上获得太阳能的负熵补充减少, 用 d_{is2} 表示; 三是人类不合理耕作使耕地受到污染, 水土流失加重, 耕地系统生态系统功能下降, 耕地系统环境状况脆弱, 引起耕地的熵增, 用 d_{is3} 表示, 故总熵增加公式为:

$$d_{is} = d_{is1} + d_{is2} + d_{is3} \quad (3)$$

因此, 要保证耕地系统向着有序方面发展, 必须使 $|d_{es}| \geq d_{is}$, 即满足:

$$|d_{es1} + d_{es2} + d_{es3}| \geq |d_{is1} + d_{is2} + d_{is3}| \quad (4)$$

由以上分析可知, 黄土丘陵区耕地系统的熵变主要通过耕地资源利用的生产力状况、光合作用效果以及耕地环境状况来体现。本文用“ Q ”表示耕地系统利用效益情况, 耕地作物光合效益用“ P ”表示, 耕地系统环境状态用“ E ”表示。因此, 耕地系统熵变的数学函数可表示为: $d_s = f(Q, P, E)$ 。

1.4 计算方法

耕地系统熵变化的影响因素不断变化会引起耕地系统熵值的变化。因此, 设 t 年耕地的系统熵变的参量分别为: 耕地利用效益 Q_t , 耕地的利用效益主要通过单位面积投入与产出效益来进行分析; 耕地转化效益 P_t , 通过作物品种改良后, 单位面积产量变化进行分析; 耕地环境效益 E_t , 通过不同时期水

土流失量的变化进行分析。结合公式(2)和(3), 耕地系统在 t 年各因素引起的熵变分别为:

$$d_s1 = d_{e1} + d_{f1} = f(Q_{t-1}, Q_t) \quad (5)$$

$$d_s2 = d_{e2} + d_{f2} = f(P_{t-1}, P_t) \quad (6)$$

$$d_s3 = d_{e3} + d_{f3} = f(E_{t-1}, E_t) \quad (7)$$

式中, d_s1 、 d_s2 和 d_s3 分别为耕地利用效益变化引起的熵变、耕地转化效益改变所引起的耕地系统熵值变化和耕地环境效益变化引起的熵变。系统在 t 年的总熵变为: $d_s = d_s1 + d_s2 + d_s3 = f(Q, P, E)$ 。根据以上分析, 构建耕地系统熵变的系统熵流模型, 用以分析耕地系统的健康状态。熵流模型可表达为:

$$d_s = \sum_{i=1}^3 w_i s_i = (-1)^n \frac{|Q_t - Q_{t-1}|}{Q_{t-1}} w_1 + (-1)^n \frac{|P_t - P_{t-1}|}{P_{t-1}} w_2 + (-1)^n \frac{|E_t - E_{t-1}|}{E_{t-1}} w_3 \quad (8)$$

式中, w_i 为影响耕地系统状态的因子的权重; s_i 为各因子引起耕地系统的熵变; $(-1)^n$ 为符号函数, Q_t 及 E_t 好于初始状态时, n 取 1, 否则取 2。

2 研究区概况、数据来源

2.1 研究区概况

固原市上黄试验区位于宁夏南部黄土丘陵沟壑区的河川乡上黄村, 地处黄土高原西部宽谷丘陵沟壑区, 地理位置在 $106^{\circ}26' \sim 106^{\circ}30'E$, $35^{\circ}59' \sim 36^{\circ}02'N$, 总土地面积 7.61 km^2 , 属暖温带半干旱区。海拔 $1534 \sim 1822 \text{ m}$, 年平均降水 415.1 mm , 干燥度 1.55, 年日照时数 2518 h , 年总辐射量 $5342.4 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$, 年平均气温 6.9°C , 大于 10°C 积温 2350°C , 无霜期 155 d。治理前粮食平均单产为 $510 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 耕作区土壤侵蚀模数达 $6000 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 坡耕地利用率达 83.1%, 耕地基本无氮肥及磷肥投入, 有机肥投入量仅为 $22.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 耕地水资源保证率低。

2.2 数据来源

土地利用数据。1982 年由宁夏测绘局绘制的 $1:1$ 万地形图, 主要是农地规划和农田基本建设用图, 农、林、草地等地类界线在图中都已标明, 是比较理想的地理底图。本研究以此图为基础, 并通过查阅试验区“六五”前期资料和农户调查, 核对了土地利用历史, 编制了 1982 年土地利用图, 以此作为试验区建点时和“六五”前期的工作基础。“七五”期间, 开展了航空遥感监测试验研究, 分别于 1987 年和 1990 年进行了彩红外摄影, 并编制了土地利用图等专题图件。“八五”又进行了地面补充调查, 编制了试验区土地利用图件, 制图比例尺为 $1:1$ 万。2000 年利用 1995 年彩红外航空摄影像片为信息源, 采用 4D 技术, 编制了试验区彩红外 $1:5000$ 正射影像图,

以正射影像图为基础, 对试验区进行了土地利用现状的调查, 编绘了土地利用现状图。2008 年在“十五”的基础上, 对该试验区退耕后土地利用进行了全面调查, 掌握了土地利用动态变化情况。

农村社会经济数据。在研究期间, 上黄试验区不同时期的社会经济数据主要来源于参与式农村评估方法(Participatory rural appraisal, PRA), 获得不同时期该试验区家庭经济状况、人口数量、粮食生产、投入与产出变化等相关数据。

综合治理措施。根据上黄试验区不同时期的综合治理研究报告, 主要有不同时期的综合治理措施, 及这些措施的生态、经济及社会效益的变化(表 1)。

3 结果与分析

3.1 耕地系统熵流变化分析

为便于计算和分析, 文本选取具有代表性的资金投产比、粮食单产及土壤侵蚀模数分别作为耕地利用变化负熵流、耕地作物光合效益及耕地系统环境状态指标。权重值采用特尔菲法确定, w_1 、 w_2 及 w_3 的权重值分别为 0.35、0.35 及 0.30。根据公式(8)计算不同时期耕地系统熵流变化(表 2)。治理期间, “六五”至“十五”时期, 耕地系统在不同时期内输入的总的负熵流分别为 -0.6524 、 -0.1988 、 -0.3421 、 -0.2664 、 -0.2900 , 耕地系统总的熵流都为负值, 表明在整个治理期间内, 耕地质量不断提高, 进而体现了耕地系统的有序性、稳定性逐步提高。

3.2 耕地系统熵流变化原因分析

上黄试验区经过近 5 个“五年”计划的综合治理, 试验区生态效益、经济效益(其中人均纯收入指标为消除物价上涨因素后数据)及社会效益协调发展。耕地系统的生产力、农作物良种利用及生态环境在治理期间均不同程度地给耕地系统输入负熵, 使耕地系统总熵值降低, 耕地系统的稳定性增加。这与该试验区多年来耕地系统的优化调控措施密不可分。

“六五”期间以生物措施为主, 试验区采取了一先行(草灌先行)、二侧重(侧重抓人工种草, 侧重抓旱作农业与化肥深施)、三同步(退耕种草、提高粮食单产与发展牧业同步)的技术路线, 收到了良好效果, 粮食单产提高 91%, 投入产出比由治理前的 $1:3.6$ 提高到 $1:6.9$, 土壤侵蚀模数也由治理前的 $6000 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 降低到 $5000 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 其中人工林草面积率已达 45%。耕地系统总熵流为 -0.6524 , 耕地系统的稳定性增强。

“七五”期间遇到了 1987 年的特大干旱和 1986~1989 年的连续干旱, 4 年平均降雨量 351 mm , 占多年平均降雨量的 73.4%, 人工草地面积随之减

表1 上黄试区不同阶段生态、经济及社会效益变化

Tab. 1 Changes of ecological, economical and social benefits in different periods in Shanghuang experimental area

项目 Item	1982前 Before 1982	“六五”期间 “Sixth five-year plan” period	“七五”期间 “Seventh five-year plan” period	“八五”期间 “Eighth five-year plan” period	“九五”期间 “Ninth five-year plan” period	“十五”期间 “Tenth five-year plan” period
经济效益 Economic benefit	人均纯收入 Net income per cap. (Yuan · a ⁻¹)	94.4	418.9	572.7	1 127.8	1 846
	人均粮食 Food occupy per cap. (kg · a ⁻¹)	230	366	410	500	550
	粮食单产 Grain production (kg · hm ⁻²)	510	922	1 330	1 627	2 250
	资金投产比 Ratio of investment to income	1 3.6	1 6.9	1 5.4	1 8.7	1 10.5
生态效益 Ecological benefit	林草覆盖度 Vegetation coverage (%)	1.87	24.5	18.4	22.9	32.0
	侵蚀模数 Soil erosion modulus (t · km ⁻² · a ⁻¹)	6 000	5 000	3 000	2 500	2 000
	坡耕地利用率 Ratio of used slope land (%)	83.1	76.9	70.5	72.5	71.2
	治理度 Ratio of harness (%)	2	35	18	37	56
社会效益 Social benefit	文盲率 Ratio of illiteracy (%)	60	46	25	10	5
	家庭耐用品价值 Value of household durable goods (Yuan)	49	980	1 210	3 500	6 000
	居住面积 Living space (m ²)	13	15	17	20	25
	脱贫率 Poverty-eradication ratio (%)	40	60	70	85	95
	农机械保有率 Hold proportion of agricultural machinery (%)	2	8	15	36	48
						55.8

表2 不同时期上黄试区耕地系统的熵流变化

Tab. 2 Entropy change of the cultivated land system in different periods in Shanghuang experimental area

项目 Item	“六五”期间 “Sixth five-year plan” period	“七五”期间 “Seventh five-year plan” period	“八五”期间 “Eighth five-year plan” period	“九五”期间 “Ninth five-year plan” period	“十五”期间 “Tenth five-year plan” period
生产质量变化引起的熵变 Entropy change caused by the production conditions	-0.320 8	0.076 1	-0.213 9	-0.072 4	-0.170 0
光合效益变化引起的熵变 Entropy change caused by the change of photosynthetic efficiency	-0.281 6	-0.154 9	-0.078 2	-0.134 0	0.000 0
环境变化引起的熵变 Entropy change caused by environmental change	-0.050 0	-0.120 0	-0.050 0	-0.060 0	-0.120 0
耕地系统总熵变 Total entropy change of cultivated land	-0.652 4	-0.198 8	-0.342 1	-0.266 4	-0.290 0

少, 植被覆盖度从“六五”末期的24.5%减少到18.4%。为增强耕地系统的稳定性, 该时期具体做法一是为提高耕地系统抗御干旱的能力, 从改善土地质量上进行调控, 即将坡耕地的34.2%改建成水平梯田, 将近水源的河滩地与台地建成喷灌与节水抽灌地, 共40 hm², 仅这两项两年即为上黄试区增产粮食2.9万kg; 二是应用已有的技术贮备, 从引进品种、增加施肥量、扩大模式栽培与地膜覆盖等方面促进大面积均衡增产, 使在干旱条件下, 粮食单产达到1 330.5 kg · hm⁻², 较类似年型1 110 kg · hm⁻²提高20%, 其中仅小麦良种一项即增产3.9万kg。

在各种措施综合作用下, 耕地系统总熵流为-0.198 8, 耕地系统的稳定性进一步增强。

“八五”期间主要技术方案为狠抓突破口, 一环带多环。抓耕地系统潜势开发, 农作物良种普及率达90%以上。在此基础上, 针对试区持续干旱, 在总结利用窑窖等节水微灌抗旱夺丰收经验的基础上, 及时展开大规模井窖工程建设。粮食产量由“七五”时期的1 330.5 kg · hm⁻²增长到1 627.5 kg · hm⁻², 人均纯收入达1 127.8元。耕地系统总熵流为-0.342 1, 耕地系统的稳定性进一步增强。

“九五”时期试区根据宁南气候变暖和春旱加剧

的趋势, 及时示范推广小麦改制与高产栽培模式, “扩种冬麦”变成政府行为而大面积推广, 到 2000 年累计推广 6 万多 hm^2 , 已成为宁南干旱山区粮食上台阶和稳定解决温饱的重大战略措施。同时试验研究出“果菜型”、“果苗型”、“果畜型”农业生产模式, 大力发展蔬菜大棚等多种庭园经济模式, 闯出一条“以庭园经济为突破口, 着力提高农民经济收入, 加快生态环境建设”的新路子, 创造了干旱山区庭园经济每公顷收入 15 万元的奇迹, 农户经济收入达到 1 846 元, 人均粮食及粮食单产分别由“八五”时期的 500 kg 、 $1\,627.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 增长到 550 kg 、 $2\,250 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。耕地系统总熵流为 -0.266 4, 耕地系统的稳定性进一步增强。

“十五”时期的主要任务是推广试验区经验, 大面积推广庭园经济模式, 形成规模优势, 为当地的果业、蔬菜走向市场打下了坚实基础。与此同时, 试验区对大部分坡耕地实施了退耕措施, 坡耕地人工种草, 土地适宜性较好的耕地种植经济效益更高的饲料玉米, 发展舍饲养牛、舍饲养羊, 土地适宜性最好的耕地大力发展果业。在上述措施下, 当地农户经济收入大幅度增长, 人均纯收入达 2 093.2 元, 人均粮食占有量在退耕补助的基础上增加到 684.6 kg , 生态效益进一步提高, 土壤侵蚀模数也由“九五”时期的 $2\,000 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 降低到 $1\,200 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。耕地系统总熵流为 -0.290 0, 耕地系统的稳定性进一步增强。

4 结论

根据耗散结构理论, 耕地资源的利用过程符合耗散理论的结构特征。因此, 耕地系统要想稳定、有序地发展, 必须从外界不断吸收物质与能量, 并且使耕地系统由此产生的负熵流大于本身不可逆过程引起的“熵的增加”, 这时“总熵”逐步减少, 无序程度降低, 耕地系统总熵减少, 耕地系统向更高的有序发展。

通过分析上黄试验区耕地系统的熵流变化情况, 根据黄土丘陵区耕地系统的资源特点, 构建了耕地系统的熵流模型, 影响耕地系统熵变的因素主要有: 耕地的利用效益, 主要反映耕地本身生产潜力对投入产出的关系, 本文以投入产出比进行分析; 耕地转化效益, 指作物接受太阳能并将其用作各种转化的能力, 本文以因作物品种改良引起粮食单位面积的产量变化指标进行分析; 耕地环境效益, 指耕地利用过程中表现出来的生态系统服务功能, 本文以土壤侵蚀模数的变化进行分析。

上黄试验区从“六五”时期至“十五”时期, 耕地系统的“总熵”逐步减少, 其熵变分别为 -0.652 4、 $-0.198\,8$ 、 $-0.342\,1$ 、 $-0.266\,4$ 和 $-0.290\,0$ 。治理时期,

耕地系统处于健康、有序的状态。耕地系统利用效益稳步提高, 耕地系统的生产效益总体得到提高, 不同时期耕地系统利用效益的熵变分别为 $-0.320\,8$ 、 $+0.076\,1$ 、 $-0.213\,9$ 、 $-0.072\,4$ 和 $-0.170\,0$ 。通过引进良种耕地系统的光合作用效果明显增强, 不同时期其熵变分别为 $-0.281\,6$ 、 $-0.154\,9$ 、 $-0.078\,2$ 、 $-0.134\,0$ 和 $0.000\,0$ 。耕地系统的生态环境逐步改善, 水土流失逐步得到控制, 土壤侵蚀因素引起耕地系统环境的熵变在不同时期分别为 $-0.050\,0$ 、 $-0.120\,0$ 、 $-0.050\,0$ 、 $-0.060\,0$ 和 $-0.120\,0$ 。

参考文献

- [1] 王青. 黄土高原丘陵沟壑区农业结构战略性调整的思路与对策[J]. 农业现代化研究, 2002, 23(1): 17–20
- [2] 姚顺波, 张雅丽, 周庆生. 黄土高原生态经济治理的几个问题[J]. 生态经济, 2001(5): 24–26
- [3] 高旺盛, 陈源泉, 董孝斌. 黄土高原生态系统服务功能的重要性与恢复对策探讨[J]. 水土保持学报, 2003, 17(3): 59–61
- [4] 查轩, 黄少燕. 黄土高原土地资源可持续利用途径研究[J]. 中国土地科学, 2000, 14(4): 35–38
- [5] 王海英, 刘桂环, 董锁成. 黄土高原丘陵沟壑区小流域生态环境综合治理开发模式研究[J]. 自然资源学报, 2004, 19(2): 207–216
- [6] 徐勇, 韩国义, 朱会义. 黄土高原生态重建与区域可持续发展研究范式探讨[J]. 水土保持研究, 2003, 10(4): 10–14
- [7] 陈利顶, 傅伯杰, Messing I. 黄土丘陵沟壑区典型小流域土地持续利用案例研究[J]. 地理研究, 2001, 20(6): 713–721
- [8] 陈利顶, 傅伯杰, 王军. 黄土丘陵区典型小流域土地利用变化研究[J]. 地理科学, 2001, 21(1): 46–51
- [9] 徐勇, 田均良, 刘普灵. 黄土丘陵区“梯田退耕”生态重建规划方法[J]. 自然资源学报, 2004, 19(5): 637–645
- [10] 徐勇, 韩国义. 黄土丘陵区生态农业建设效益评价指标体系初步研究[J]. 水土保持研究, 2002, 9(4): 139–143
- [11] 王闰平, 高志强, 苗果园, 等. 黄土丘陵沟壑区实施退耕还林还草战略资源条件与对策[J]. 中国生态农业学报, 2001, 9(3): 43–44
- [12] 徐学选, 高鹏, 王炜. 延安农林牧土地结构阶段优化模式研究[J]. 中国生态农业学报, 2002, 10(3): 112–115
- [13] 肖玲, 赵先贵. 陕西省生态农业发展模式研究[J]. 中国生态农业学报, 2003, 11(2): 162–164
- [14] 王莉, 张强, 牛西午, 等. 黄土高原丘陵区不同土地利用方式对土壤理化性质的影响[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(4): 53–56
- [15] 郝仕龙, 孟凡玲, 柯俊. 黄土丘陵区耕地变化与农户经济行为响应[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(3): 172–174
- [16] 史纪安, 陈利顶, 史俊通, 等. 榆林地区土地利用/覆盖变化区域特征及其驱动机制分析[J]. 地理科学, 2003, 23(4): 493–498
- [17] 张秋菊, 傅伯杰, 陈利顶, 等. 黄土丘陵沟壑区县域耕地变化驱动要素研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17(4): 146–148
- [18] 荀文会, 刘友兆, 吴冠岑. 基于耗散结构理论的耕地资源利用与保护[J]. 经济地理, 2007, 27(1): 141–144
- [19] 李春化, 李宁, 史培军, 等. 基于信息熵的江苏省耕地安全系统演化分析[J]. 资源科学, 2008, 30(1): 43–51
- [20] 蔡运龙. 自然资源学原理[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 136–139