

# 风蚀水蚀交错区生态经济耦合效应

于坤霞<sup>1,2</sup>, 蒋凯鑫<sup>1,2</sup>, 孙倩<sup>1,2</sup>, 李鹏<sup>1,2</sup>, 李占斌<sup>1,2,3</sup>, 张翔<sup>3,4</sup>

(1.西安理工大学 省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 西安 710048; 2.西安理工大学

旱区生态水文与灾害防治国家林业局重点实验室, 西安 710048; 3.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, 陕西 杨凌 712100; 4.沪灞生态区管委会博士后工作站, 西安 710024)

**摘要:**研究风蚀水蚀交错区退耕还林还草、坡改梯和淤地坝建设等综合土地利用变化的生态经济耦合效应,为保障生态经济协调发展提供一定的理论基础。以位于陕北风蚀水蚀区的府谷县为研究对象,采用生态经济耦合指数分析了土地利用变化的内生效应,通过土地利用结构及景观指数的变化分析土地利用变化的外延效应,从内生和外延两方面定量对比分析陕北风蚀水蚀交错区生态经济耦合效应。研究表明府谷县从 2000—2013 年实现了耕地向林地和草地的转化,景观类型的丰富程度和均匀程度上升,土壤侵蚀量明显减少,生态经济耦合指数从 2000 年的 215.88 t/万元减少到 2013 年的 130.59 t/万元。生态经济耦合指数敏感性分析表明府谷县梯田和坡耕地的变化对生态经济耦合指数的影响显著大于水浇地与坝地的影响。退耕还林还草、坡改梯和淤地坝建设等政策的执行不仅让府谷县生态环境得到改善,还使其经济耦合内部呈现增益。

**关键词:**生态经济耦合; 土地利用变化; 内生效应; 外延效应; 风蚀水蚀交错区

中图分类号: F301.24

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2019)05-0034-05

## Eco-economic Coupling Effect in the Water-Wind Erosion Crisscross Region

YU Kunxia<sup>1,2</sup>, JIANG Kaixin<sup>1,2</sup>, SUN Qian<sup>1,2</sup>, LI Peng<sup>1,2</sup>, LI Zhanbin<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Xiang<sup>3,4</sup>

(1.State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an

University of Technology, Xi'an 710048, China; 2.Key Laboratory of Ecological Hydrology and Disaster

Prevention in Arid Regions, National Forestry Administration, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048,

China; 3.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Yangling, Shaanxi

712100, China; 4.Postdoctoral Research Station of Xi'an Chanba National Ecological District, Xi'an 710024, China)

**Abstract:** Eco-economic coupling effects of grain for green, transforming slope farmlands to terraces, and check-dam constriction in the water-wind erosion crisscross region can provide theoretical guidance to the coordinated development between ecological environment and economy growth. Fugu County is taken as the study area, endogenous effects of land use change are calculated using the eco-economic coupling index, and the exo-effects are estimated by analyzing the land-use change matrix and the landscape index to study the eco-economic coupling effect in the water-wind erosion crisscross region. It is indicated that the area of farmland in the Fugu County decreased greatly from 2000 to 2013, the decreased farmland mainly changed into forestland and grassland, and the degrees of richness and evenness of landscape types in Fugu County increased. The soil erosion amount and environment cost of the economy in Fugu County significantly reduced, the eco-economic coupling index in Fugu County reduced from 215.88 tons per ten thousand yuan in 2000 to 130.59 tons per ten thousand yuan in 2013. The eco-economic coupling index is found to be more sensitive to the variations of terrace and farmland than those of check-dam land and irrigable land. Both endogenous effect and exo-effect of land use change indicate the ecological environment has improved and the environment cost of the economy decreased after implementing the grain for green strategy.

收稿日期: 2019-01-11

修回日期: 2019-03-06

资助项目: 国家重点研发计划(2016YFC0402404, 2016YFC0402407)

第一作者: 于坤霞(1989—), 女, 河南新乡人, 讲师, 博士, 研究方向为水文学及水资源。E-mail: yukunxia@126.com

通信作者: 李鹏(1974—), 男, 山东烟台人, 教授, 博士, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: lipeng74@163.com

**Keywords:** eco-economic coupling; land use change; endogenous effect; exo-effect; water-wind erosion criss-cross region

社会经济发 展的无限性和生态环境的有限性是客观存在的矛盾。随着社会经济的发展,生态方面的问题越来越突出,因此建立社会经济和生态环境之间有效的协调机制,是实现区域经济和生态环境良好耦合、经济可持续发展的基础<sup>[1]</sup>。

在国内最先对生态经济系统耦合进行研究的是任继周先生,在 20 世纪 80 年代末提出草地和农业生态系统的耦合问题,在 20 世纪 90 年代对系统耦合的生态与经济意义进行了进一步的系统研究<sup>[2]</sup>。吴长文和陈法扬论述了由于水土流失在我国造成的生态环境危害和对经济发展的限制,提出应以生态经济系统调控理论为基础进行系统性的研究<sup>[3]</sup>。徐勇提出了生态经济系统耦合理论和耦合机制,构建在系统耦合理论的基础上,以提高生态经济系统耦合的质量和运行的效率,从而实现了生态经济系统的可持续发展目标<sup>[4]</sup>。Grasso 等构建了红树林与渔业生产之间的生态经济模型,主要采用的方法是动态优化模型以及模拟模型研究<sup>[5]</sup>。Dong 等通过对数据耦合进行分析,建立了林业方面产业经济效益的评价指标体系,对森林生态学与林业产业这一关系进行了定量分析<sup>[6]</sup>。徐勇等以位于黄土丘陵区腹地的延安燕沟流域为例,基于坡改梯内生和外延效应的学术思路,定量评价分析了燕沟流域坡改梯的生态经济耦合效应<sup>[7]</sup>。

目前关于生态经济耦合关系的研究也多集中在流域尺度,对风蚀水蚀交错区退耕还林还草、坡改梯和淤地坝建设等综合土地利用变化的生态经济耦合效应研究较少。

府谷县处于风水复合动力侵蚀区,因风水复合区水土流失的特殊性和棘手性,生态环境特别脆弱,侵蚀的动因复杂,侵蚀量大,故该县积极响应退耕还林、坡改梯和淤地坝建设等政策举措。随着这些政策举措的实施,府谷县生态环境得到改善,且生态资源配置结构发生重要变化,但生态环境在恢复过程中面临着经济和粮食安全问题。基于此,从内生和外延两个方面定量对比分析退耕还林还草、坡改梯和淤地坝建设的生态经济耦合效应,建立生态与经济的良性耦合机制,为实现黄土高原生态经济协调与可持续发展提供一些科学依据<sup>[1,8]</sup>。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区概况

府谷县位于陕西省最北边,处于北纬 38°42′—39°35′

和东经 110°22′—111°14′,府谷县总面积为 3 229 km<sup>2</sup>。2013 年末府谷县总人口约为 26.05 万人,工业总产值 693 亿元。冬春季节,气候干燥且风沙较大,易发生风力侵蚀;夏秋季节,降水集中,易发生暴雨,且常伴有泥石流等自然灾害发生,以水力侵蚀为主。年均降水量为 453.5 mm,年均气温为 9.1℃<sup>[9]</sup>。

府谷县地处黄河中游,是全国 138 个水土流失重点县之一。全县水土流失面积 3 200 km<sup>2</sup>,占总面积的 99%,年均土壤侵蚀模数为 2.47 万 t/km<sup>2</sup>,相当于每年表土层被剥蚀 20 mm 左右。年输沙量高达 7 905 万 t,属强度水土流失区。

### 1.2 数据来源

文中涉及的种植作物及土壤侵蚀基本数据主要包括作物产量、土壤特性、土地类型、土壤侵蚀模数,其中作物和土地类型的数据来自于水土保持统计年鉴,土壤侵蚀模数根据 RUSLE 模型估算,农产品价格以 2013 年当地调查值为准。土地利用结构和景观指数分析依据 2000 年和 2013 年土地利用图。

### 1.3 研究方法

内生外延效应从内生和外延两个方面定量对比分析陕北风蚀水蚀交错区生态经济耦合效应,内生效应的定义是指通过内部生境的组合或调整而使得系统内部得到增益或损耗的一种现象。外延效应的定义是指通过内部生境的组合或调整,在保证系统内部维持稳定的情况下,还使得和之相关的系统得到增益或损耗的一种现象。内生效应主要通过生态经济耦合指数反映,外延效应主要通过土地利用结构的变化、林草覆盖率的变化以及景观格局指数的变化来进行分析。

对于本研究构建的生态经济耦合数学模型则是用生态经济耦合指数来表示的。在此把土壤侵蚀量与经济产出的比值称为生态经济耦合指数(Ecological Economy Coupling Index)<sup>[7]</sup>。换言之,生态经济耦合指数是指单位经济产出耕地所要付出的土壤侵蚀代价。根据一些学者的建议,也可将生态经济耦合指数定义为每一单位的土壤侵蚀量所能带来的经济产出。实际上二者的表述是一样的,区别在于二者的值互为倒数。用 EECI 表示生态经济耦合指数;用  $Q$  表示土壤侵蚀量; $E$  表示经济产出,对于同种质地的耕地,生态经济耦合指数采用以下表达式表示:

$$EECI=Q/E \quad (1)$$

对于不同质地耕地生态经济耦合指数的数学表达式如下所示:

$$Q = \sum_{i=1}^n (A_i \times M_i) \quad (2)$$

$$E = \sum_{i=1}^n (A_i \times P_i) \quad (3)$$

式中:  $Q$  为土壤侵蚀总量;  $E$  为经济产出总量;  $A_i$  为第  $i$  个地块的面积;  $M_i$  为第  $i$  个地块的土壤侵蚀模数;  $P_i$  为第  $i$  个地块的单位面积经济产出;  $i$  为同质性地块单元,  $i \in \{1, 2, \dots, n\}$ ;  $n$  为同质性地块单元总数。

为了分析不同质地耕地对于生态经济耦合指数的敏感性, 引入敏感性指数(The coefficient of sensitivity, CS)这一指标来描述某质地耕地单位 EECI 变动引起的总 EECI 变动。

$$CS_i = \left| \frac{(EECI_b - EECI_a) / EECI_a}{(EECI_{ib} - EECI_{ia}) / EECI_{ia}} \right| \times 100\% \quad (4)$$

式中:  $CS_i$  为敏感性指数;  $EECI_a$  为初始生态经济耦合指数;  $EECI_b$  为调整后生态经济耦合指数;  $EECI_{ia}$  为研究区第  $i$  种用地类型的初始生态经济耦合指数;

表 1 府谷县生态经济耦合指数的计算

年份	土地类型	面积/ hm <sup>2</sup>	单产/ (kg · hm <sup>-2</sup> )	单价/ (元 · kg <sup>-1</sup> )	土壤侵蚀模数/ (t · km <sup>-2</sup> · a <sup>-1</sup> )	经济产出/ 万元	土壤 侵蚀量/t	EECI/ (t/万元)
2000	水浇地	3263.6	5118	2.0	20	3340.62	652.72	0.20
	坝地	3970	3543	2.0	88	2813.14	3493.60	1.24
	梯田	14560	1654	2.5	1560	6020.56	227136.00	37.73
	坡耕地	28842	827	2.0	13397	4770.47	3426738.25	718.32
2013	水浇地	3263.6	6214	2.0	20	4056.00	652.72	0.16
	坝地	4400	4639	2.0	88	4082.32	3872	0.95
	梯田	15920	2138	2.5	1560	8509.24	248352	29.19
	坡耕地	22940	1923	2.0	13397	8822.72	3073271.8	348.34

由表 1 可以看出。不同土地类型对比表明 2000 年和 2013 年水浇地万元经济产出的土壤侵蚀量 EECI 均最小, 坝地次之, 坡耕地最大。2000—2013 年府谷县水浇地、坝地、梯田以及坡耕地的生态经济耦合指数均有不同程度的减少。坡耕地的生态经济耦合指数 2000—2013 年减少尤为明显, 减少了 369.99 t/万元。水浇地和坝地的生态经济耦合指数变化甚小与该种土地类型受到侵蚀小有关。2000—2013 年总的生态经济耦合指数减少了 85.29 t/万元, 表示 2000—2013 年每万元经济产出土壤侵蚀量减少了 85.29 t, 说明府谷县的水土流失得到了较好的改善。

生态经济耦合指数敏感性分析见表 2, 由表 2 可知生态经济耦合指数对各土地类型的敏感性指数依次为梯田 > 坡耕地 > 坝地 > 水浇地。梯田和坡耕地敏感性指数显著高于坝地和水浇地, 表明梯田和坡耕地的变化对生态经济耦合指数的影响大于坝地和水

EECI<sub>ib</sub> 为研究区第  $i$  种用地类型调整后的生态经济耦合指数。

分析外延效应时, 为了定量表达一定时间范围内某种土地利用类型的数量变化情况, 采用土地利用类型动态度<sup>[9]</sup>这一指标来描述土地使用频率的变动。公式具体如下所示:

$$K = \frac{U_b - U_a}{U_a} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (5)$$

式中:  $K$  表示研究时段内土地利用类型的变化率(%);  $U_a, U_b$  表示研究初期和研究末期某土地利用类型的数量(km<sup>2</sup>);  $T$  表示研究时段长度。

## 2 结果与分析

### 2.1 土地利用变化的内生效应分析

府谷县水浇地、坝地、坡耕地主要种植作物是玉米, 梯田主要种植作物为苹果。府谷县坡耕地的土壤侵蚀量最大, 用生态经济耦合指数对这 4 类地形进行生态经济耦合评价。具体计算结果见表 1。

浇地的影响, 因此建议在今后发展过程中应加大坡耕地向梯田的转换, 来实现府谷县生态和经济更好的耦合。

表 2 生态经济耦合指数敏感性分析

土地类型	EECI <sub>a</sub>	EECI <sub>b</sub>	EECI <sub>a</sub>	EECI <sub>b</sub>	CS <sub>i</sub>
水浇地	0.20	0.16	215.88	207.13	0.23
坝地	1.24	0.95	215.88	200.86	0.29
梯田	37.73	29.19	215.88	189.32	0.54
坡耕地	718.32	348.34	215.88	157.38	0.53

### 2.2 土地利用变化的外延效应分析

府谷县的外延效应主要从土地利用结构变化和景观指数的变化等方面进行反映。

2.2.1 土地利用结构变化 府谷县的外延效应主要表现在土地利用结构的变化、林草植被覆盖率提高等方面。府谷县 2000 年以及 2013 年的土地利用图如图 1 所示。

2000—2013 年府谷县各种土地利用类型面积的变化见表 3。土地利用格局变化显著,耕地面积、草地和水域面积减少,其中耕地以年均 0.66% 的速度减少了 94.81 km<sup>2</sup>;林地、建设用地和未利用地呈增长态势;其中林地用地面积增加最多,共增加了 55.99 km<sup>2</sup>, 年均增长 5.60%。

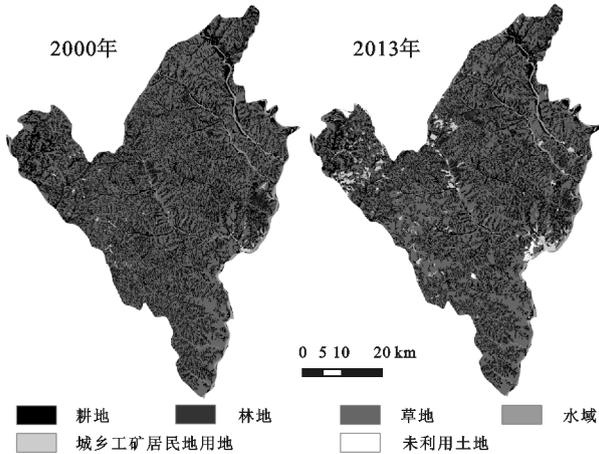


图 1 2000 年、2013 年土地利用图

土地利用转移矩阵见表 4。耕地和草地存在相互转化的关系,但耕地向草地转化面积较大,耕地和草地的相互转化使耕地的面积减少了 52.18 km<sup>2</sup>。林地增加的面积主要来自于耕地和草地,增加的面积

分别为 22.25 km<sup>2</sup>, 41.30 km<sup>2</sup>。这主要与 1999 年提倡的退耕还林还草的政策有关,随着经济的发展,人们的生态环境意识增强,实现了真正意义上的退耕还林还草。

2.2.2 景观指数分析 景观指数的选取包括类型水平和景观水平上的指数<sup>[10-12]</sup>,本研究选取的类型水平指数有斑块所占景观面积的比例(PLAND)、斑块个数(NP)、斑块密度(PD)、最大斑块指数(LPI)、斑块形状指数(LSI)。景观水平上选取的指数为香农均匀度指数(SHEI)和多样性指数(SHDI)。

不同类型级别指数分析结果表明,斑块所占景观面积的比例(图 2A)和最大斑块指数(图 2B)最大的均是草地,说明府谷县主要由草地组成,草地是该地区的优势景观。斑块个数(图 2C)、斑块密度指标值(图 2D)和斑块形状指数(图 2E)最大值均为耕地,说明耕地的破碎度最大,受人类活动干扰最大。府谷县 2000 年、2013 年的景观水平指数对比分析显示(图 2F),多样性指数和均匀度指数从 2000—2013 年均是在增加的,分别增加了 0.116, 0.065, 多样性指数和香农均匀度指数的变化表明府谷县景观类型的丰富程度和均匀程度在上升。

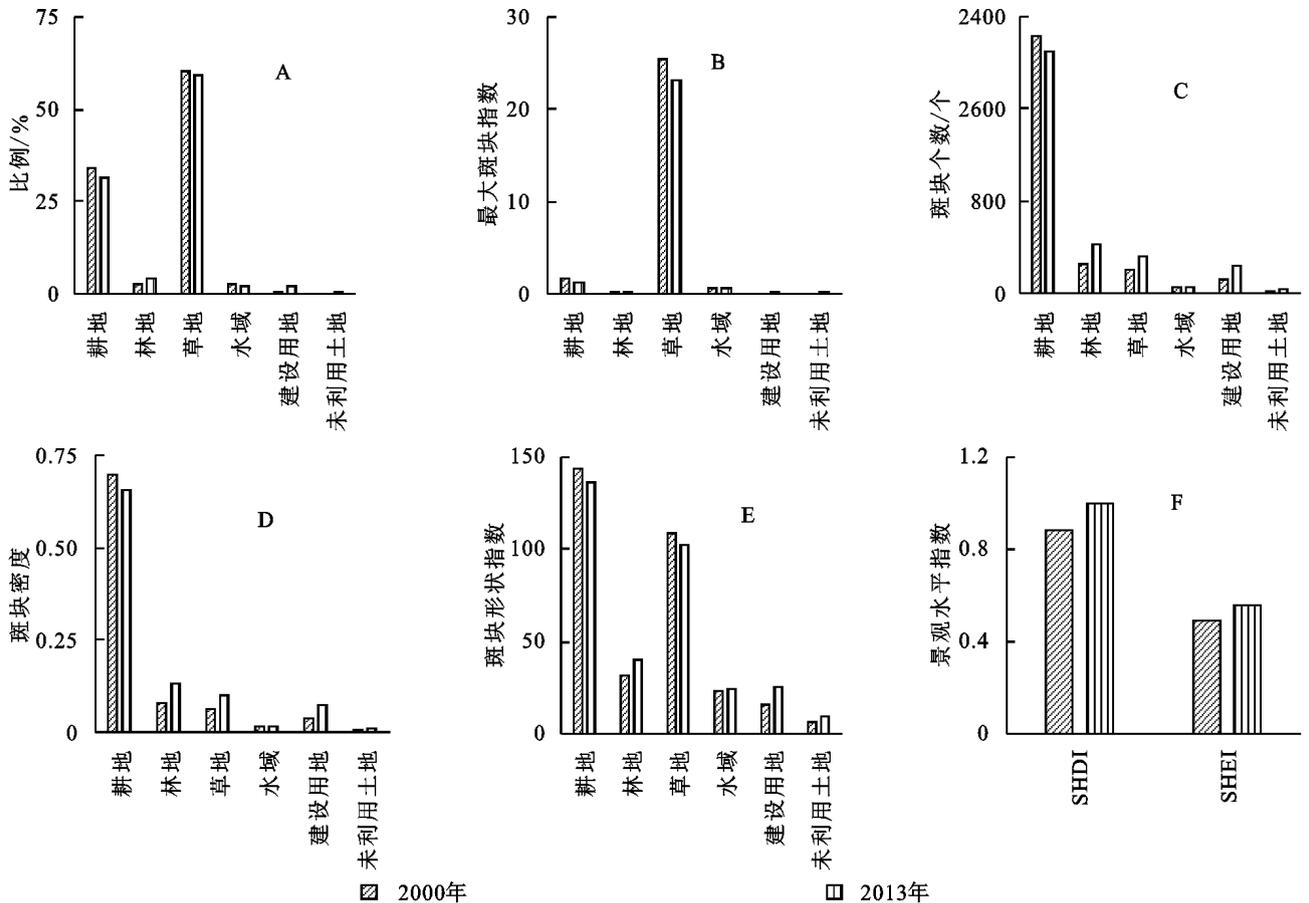


图 2 府谷县 2000 年和 2013 年景观指数对比

表3 2000—2013年府谷县土地利用变化

土地利用类型	2000年		2013年		土地利用动态度/%
	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	
耕地	1097.93	34.31	1003.12	31.35	-0.66
林地	76.84	2.40	132.83	4.15	5.60
草地	1930.00	60.32	1904.27	59.51	-0.10
水域	77.84	2.43	74.26	2.32	-0.35
建设用地	15.25	0.48	73.21	2.29	29.23
未利用土地	1.92	0.06	12.10	0.38	40.74

表4 2000—2013年府谷县土地利用转移矩阵 km<sup>2</sup>

动态转移矩阵	2013年					
	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用土地
2000年 耕地	984.43	22.25	68.27	1.42	19.24	2.32
林地	0.94	68.89	3.23	0.05	3.73	0.00
草地	16.08	41.30	1827.82	0.70	35.92	8.16
水域	1.19	0.40	3.57	71.96	0.72	0.00
建设用地	0.40	0.00	1.37	0.12	13.29	0.06
未利用土地	0.07	0.00	0.00	0.00	0.29	1.55

### 3 结论

(1) 内生效应分析表明退耕还林还草、坡改梯和淤地坝建设等综合土地利用变化政策使位于风蚀水蚀交错区的府谷县从2000—2013年土壤侵蚀量明显减少,生态经济耦合指数从2000年的215.88 t/万元减少到2013年的130.59 t/万元,其中梯田和坡耕地的变化对生态经济耦合指数的影响显著大于水浇地和坝地的影响。

(2) 外延效应分析表明府谷县从2000—2013年实现了耕地向林地和草地的转化,且府谷县景观类型的丰富程度和均匀程度在上升。

(3) 退耕还林还草、坡改梯和淤地坝建设等政策的执行不仅让府谷县生态环境得到改善,还使其经济耦合内部呈现增益,在今后发展过程中应加大坡耕地向梯田的转换,以实现府谷县生态和经济更好的耦合。

#### 参考文献:

- [1] 江红莉,何建敏.区域经济与生态环境系统动态耦合协调发展研究[J].软科学,2010,24(3):63-68.
- [2] 朱海娟,姚顺波.宁夏荒漠化治理生态经济系统耦合效应研究[J].统计与信息论坛,2014,29(11):71-76.
- [3] 吴长文,陈法扬.水土流失引起的生态经济失调及其系统调控[J].水土保持研究,1995,2(1):80-84.
- [4] 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:以燕沟流域为例[J].自然资源学报,2004,19(5):637-645,689.
- [5] 杨红,董耀武,尹新哲.欠发达地区产业结构调整的新路径:生态农业生态旅游耦合产业发展模式[J].云南财经大学学报,2013,29(1):149-152.
- [6] Dong P W, Zhuang S Y, Lin X H, et al. Economic evaluation of forestry industry based on ecosystem coupling [J]. Mathematical and Computer Modelling, 2013, 58(5/6):1010-1017.
- [7] 徐勇,党丽娟,汤青,高雅.黄土丘陵区坡改梯生态经济耦合效应[J].生态学报,2015,35(4):1258-1266.
- [8] 傅威,林涛.区域社会经济发展与生态环境耦合关系研究模型的比较分析[J].四川环境,2010,29(3):102-109.
- [9] 李琰,刘晓琼,赵昕奕,等.陕西省榆林市气候变化特征分析[J].干旱区资源与环境,2011,25(1):157-161.
- [10] 邬建国.景观生态学概念与理论[J].生态学杂志,2000,19(1):42-52.
- [11] 闫志鹏.基于景观生态学的周至县土地利用格局研究[D].西安:长安大学,2014.
- [12] 李雪莹,王方雄,薛忠跃,等.滨海湿地景观的变化特征及其驱动力分析:以辽宁省东港市为例[J].安徽农业科学,2013,41(19):8233-8235.