

DOI: 10.5846/stxb201304240796

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. 生态学报, 2015, 35(4): 1258-1266.

Xu Y, Dang L J, Tang Q, Gao Y. Ecological-economic coupling effects of transforming slope farmland to terraces in the hilly-gully region of Loess Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(4): 1258-1266.

## 黄土丘陵区坡改梯生态经济耦合效应

徐 勇<sup>1</sup>, 党丽娟<sup>1,2</sup>, 汤 青<sup>1,\*</sup>, 高 雅<sup>1,2</sup>

1 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101

2 中国科学院大学, 北京 100039

**摘要:**坡改梯是黄土丘陵区提高农作物单产和控制水土流失的有效措施。基于坡改梯内生和外延效应的学术思路, 构建了能定量刻画坡改梯生态经济耦合状况的数学模型; 以位于黄土丘陵区腹地的延安燕沟流域为例, 利用土地利用和数字地形等空间数据、作物产量和土壤侵蚀模拟数据以及监测和调查数据, 定量评价分析了燕沟流域坡改梯的生态经济耦合效应。结果表明: 地形坡度越大, 坡改梯的生态经济耦合效应越显著; 地形坡度 5° 和 15° 是两个重要阈值, 5° 以下不必进行坡改梯, 5°—15° 之间应作为坡改梯的重点对象, 15° 以上宜退耕还林还草。坡改梯使燕沟流域农耕地的生态经济耦合程度得到了显著提高, 坡改梯前生态经济耦合指数为 1.805/100 元, 坡改梯后下降为 0.853/100 元, 下降幅度达 52.73%。随着坡改梯和植被覆盖率的提高, 流域的洪水径流量和输沙模数均大幅度下降。

**关键词:**坡改梯; 生态经济耦合; 评价模型; 燕沟流域; 黄土丘陵区

## Ecological-economic coupling effects of transforming slope farmland to terraces in the hilly-gully region of Loess Plateau

XU Yong<sup>1</sup>, DANG Lijuan<sup>1,2</sup>, TANG Qing<sup>1,\*</sup>, GAO Ya<sup>1,2</sup>

1 Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

**Abstract:** Transforming slope farmland to terraces has been an effective measure to improve crop yield per unit and control soil and water loss. Based on the theory of internal and external effects of transforming slope farmland to terraces, this paper constructs the mathematical model for quantitatively evaluating ecological-economic coupling status. Taking the Yangou watershed of Yan'an city which is located in the core area of the hilly-gully region of Loess Plateau as a case, using spatial data of land use and DEM, crop yield and soil erosion modeling data, and monitoring and survey data, this paper quantitatively assesses and analyzes ecological-economic coupling effects of transforming slope farmland to terraces. The results show that: (1) it is feasible to evaluate ecological-economic coupling effects of transforming slope farmland to terraces from the internal and external aspects. Soil erosion cost per economic yield unit (Ecological-economic coupling index) can quantitatively and effectively reflects ecological-economic coupling level. (2) Assuming beans and corn are cultivated on the slope farmland, the changing trend of ecological-economic coupling index shows that it ascends as the topographic gradient rises. This indicates that the higher topographic gradient, the more soil erosion cost of per economic yield unit. Topographic gradient 5° and 15° are two important thresholds. There is no need to transform slope farmland below 5°. However, slope farmland between 5° and 15° should be the key object of transformation to terraces. Slope farmland above 15° needs to be converted to forest and grassland. (3) Transforming slope farmland to terraces has dramatically

**基金项目:**国家自然科学基金项目(41171449); 中国科学院重点部署项目(KZZD-EW-06-01)

**收稿日期:**2013-04-24; **网络出版日期:**2014-04-11

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: tangq@igsrr.ac.cn

enhanced ecological-economic coupling level of cultivated land in the Yangou watershed. Before and after transforming slope farmland to terraces, the ecological-economic coupling index is 1.805 t/100 yuan, 0.853 t/100 yuan, respectively, decreased by 52.73%. As the transformation from slope farmland to terraces and the enhancement of vegetation coverage rate, the flood runoff and sediment transport modulus have sharply declined, and the soil and water loss situation has been obviously improved.

**Key Words:** Transforming slope farmland to terraces; ecological-economic coupling; evaluation model; Yangou watershed; the hilly-gully region of Loess Plateau

黄土丘陵区先天脆弱的自然生态系统与人类长期不适当的活动叠加导致的水土流失和生态环境恶化问题一直受到有关政府部门及学术机构的广泛关注<sup>[1-4]</sup>。20 世纪 50 年代末以来,随着多角度研究工作的开展和不断深入,许多学者认识到退耕坡地应是黄土丘陵区水土流失控制和生态环境恢复的关键着力点<sup>[5-7]</sup>。与此同时,实践方面以退耕坡地为主旨的诸如“梯田退耕<sup>[8]</sup>”、“坝系退耕<sup>[9]</sup>”、“集雨工程<sup>[10]</sup>”、“生态移民<sup>[11]</sup>”等各种生态退耕模式陆续涌现,并都不同程度地取得了一定成效。尤其是针对我国大江大河下游地区出现的断流或洪涝成灾问题<sup>[12-13]</sup>,中央于 1999 年提出在黄土高原和长江上游等地区实施“退耕还林(草)、封山绿化、个体承包、以粮代赈”的生态退耕政策,经过十多年的不间断努力,已使黄土高原的生态环境在全局上得到了显著改善<sup>[14-16]</sup>。但自 2007 年以来,随着我国耕地面积逼近 1.2 亿  $\text{hm}^2$  的红线和粮食价格的持续上涨,我国的粮食安全问题再次成为全社会关注的焦点<sup>[17-18]</sup>,一些学者开始呼吁:国家应对“退耕还林(草)”政策进行“囤粮于田”的战略调整,宜及早采取规模性坡改梯和淤地坝建设的举措。基此,本文试以位于黄土丘陵区腹地的延安燕沟流域为例,针对坡改梯在控制水土流失和提高经济产出方面的双效性特点,通过构建生态经济耦合评价数学模型,从内生和外延两个方面定量对比分析坡改梯的生态经济耦合效应,希望能为黄土丘陵区实施坡改梯战略提供一些科学依据。

## 1 研究地域、方法及数据

### 1.1 研究地域

燕沟流域位于  $36^{\circ}28'00''\text{N}$ — $36^{\circ}32'00''\text{N}$ ,  $109^{\circ}20'00''\text{E}$ — $109^{\circ}35'00''\text{E}$ , 沟口距延安市 3km, 属延河二级支流, 主沟长 8.6km, 呈东南—西北流向, 流域面积约  $48\text{km}^2$ 。流域东南高、西北低, 海拔在 986—1425m 之间。主沟比降为 2.41‰, 沟壑密度  $4.8\text{km}/\text{km}^2$ , 属于典型的黄土丘陵沟壑区。流域地形坡度构成以陡坡地为主, 坡度大于  $25^{\circ}$  占 51.91%,  $15^{\circ}$ — $25^{\circ}$  占 28.75%,  $15^{\circ}$  以下为 19.34%。气候具有明显的由半湿润向半干旱过渡特征。多年平均气温  $9.8^{\circ}\text{C}$ , 无霜期约 170d, 大于  $10^{\circ}\text{C}$  积温  $3268^{\circ}\text{C}$ , 多年平均降雨量 558.4mm。天然植被为次生梢林, 破坏严重, 人工林主要由刺槐 (*Robinia pseudoacacia* L.)、杨树 (*Populus bonatii* Levl) 以及柠条 (*Caragana korshinskii*) 等灌丛组成。土壤以黄绵土(沙性黄土)为主, 占 90% 以上, 基本处于半熟化状态, 肥力低下。从 1997 年开始, 随着世行贷款项目和国家科技攻关计划项目的实施, 燕沟流域通过坡地改建梯田, 土地利用结构发生了巨大的变化<sup>[19]</sup>, 生态环境得到了显著改善。据实测资料<sup>[20-21]</sup>, 1998 年燕沟河道常流水流量为  $0.0025\text{m}^3/\text{s}$ , 年径流总量为  $37.83\times 10^4\text{m}^3$ , 其中洪水径流量占 79.3%, 1998 年沟口泥沙总量为 133950t, 流域输沙模数为  $2856\text{t km}^{-2}\text{a}^{-1}$ ; 2007 年燕沟年径流总量为  $5.134\times 10^4\text{m}^3$ , 产生泥沙总量为 1556.587t, 侵蚀模数为  $33.12\text{t km}^{-2}\text{a}^{-1}$ 。流域有 14 个行政村和一个隶属于柳林街道的沟口区。14 个行政村 2011 年总人口 3459 人, 人口密度为  $72.1\text{人}/\text{km}^2$ 。农村经济以种植业为主体, 农果并举。2011 年流域农村经济总收入 1938.24 万元, 其中种植业占 71.25%, 农民人均收入为 3564 元/人。

### 1.2 方法及模型

坡耕地改建梯田能带来内生和外延两个方面的效应, 内生效应是针对改建为梯田的坡耕地而言, 坡改梯后, 梯田比原坡耕地具有较高的水土保持能力和提高作物单产的效果; 因梯田单产的提高, 部分坡耕地改建梯

田即可保持作物总产量不变,未改建梯田的坡耕地通过退耕还林还草,进而增加区域(或流域)的植被覆盖率和减少水土流失,这部分效益即指坡改梯的外延效应。内生效应是本研生态经济耦合评价的重点,外延效应则可通过分析区域(或流域)的植被覆盖率和水土流失的变化得到表征。黄土丘陵区坡改梯生态经济耦合效应评价的架构思路如图 1 所示。

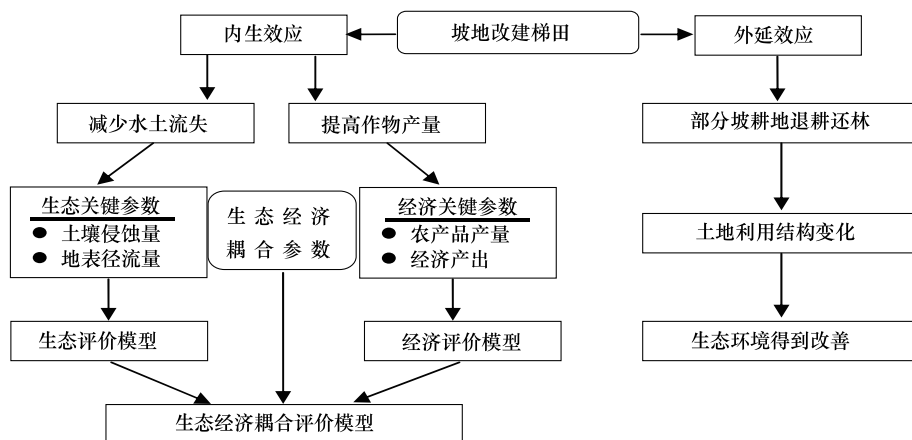


图 1 黄土丘陵区坡改梯生态经济耦合效应评价框架

Fig.1 The frame of eco-economic coupling benefit evaluation of transforming slope farmland to terrace in the Loess Hilly-gully region

评判坡改梯内生效应的生态关键参数为土壤侵蚀量或地表径流量,经济关键参数为经济产出或农产品产量。以土壤侵蚀量为目标函数构建生态评价数学模型,土壤侵蚀量越小,生态效益越好;以经济产出为目标函数构建经济评价数学模型,经济产出越高,则经济效果越好。构建生态经济耦合效应评价模型的实质是将生态评价模型和经济评价模型有机地结合在一起,其结果可以有效地表征坡改梯的生态经济耦合程度。这里所说的生态经济耦合程度是一个相对的概念,可进行同地域不同时间或不同地域同时间的对比。构建生态经济耦合效益评价模型一是要求模型的物理含义清晰,二是要求模型所含变量或参数的数据容易获得。本研究试图通过建立生态经济耦合指数来解决两者的有机结合问题。

不失一般性,对于黄土丘陵区任何一块具有同质特性的耕地而言,经济产出越高且土壤侵蚀量越小,说明其生态经济耦合的程度越好,反之亦然。基于生态经济耦合程度与经济产出、土壤侵蚀量之间的这种关系,土壤侵蚀量与经济产出的比值即可定义为生态经济耦合指数。换句话说,生态经济耦合指数就是指单位经济产出所付出的土壤侵蚀代价。经济产出可以是货币形式,也可以是实物产量。另外,根据有关学者的建议,也可以将生态经济耦合指数定义为单位土壤侵蚀量所带来的经济产出。事实上两种定义所表达的含义是一致的,不同之处仅在于两者互为倒数。若用 EEC 代表生态经济耦合指数, $Q$  代表土壤侵蚀量, $I$  代表经济产出,则对于同质的耕地,其生态经济耦合指数的数学表达式为:

$$EEC = Q/I \quad (\text{或 } EEC = I/Q) \quad (1)$$

黄土丘陵区一定区域的耕地存在地形(高程、坡度等)、地貌类型(梁峁、塬坡、沟坡等)及土壤属性等自然条件分异,也存在作物品种的差异。因此,在将生态经济耦合指数应用在实际评价区域时,首先需要对研究区域的耕地进行同质性地块单元划分。若研究区域的耕地可被划分为  $n$  个同质性地块单元,且种植的作物品种是相同的,则该区域耕地的生态经济耦合指数可通过下列算式获得:

$$EEC = \frac{Q}{I} \quad (\text{或 } EEC = \frac{I}{Q}) \quad (2)$$

$$Q = \sum_{i=1}^n (S_i \cdot L_i) \quad (3)$$

$$I = \sum_{i=1}^n (S_i \cdot P_i) \quad (4)$$

式中, EEC 为生态经济耦合指数的平均值;  $Q$  为土壤侵蚀总量;  $I$  为经济产出总量;  $S_i$  为第  $i$  个地块的面积;  $L_i$  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。

### 1.3 数据及来源

#### (1) 空间分析图件

研究中涉及到图件包括数字地形图、土地利用图和行政村界图。数字地形图来源于 1966 年版的 1:1 万地形图。土地利用图包括 1997 年、2003 年和 2010 年 3 期, 1997 年未成图, 土地利用数据来源于世界银行贷款延河项目区四岔铺治理片资料; 2003 年土地利用图根据航空照片结合实地调查编制而成(1:1 万); 2010 年土地利用图是在 2003 年的基础上利用遥感影像(来源于 Google earth, 从海拔 2000m 高空采集, 分辨率 < 2.5m) 更新获得。行政村界图来源于 1:1 万地形图。

#### (2) 作物产量和水土流失模拟基础数据

涉及到的数据和参数主要包括气象数据、作物数据、地块单元数据以及土壤属性参数、地貌类型参数等, 供模拟作物产量、农田水文特征、泥沙流失的 WIN-YIELD 软件之用, 模拟方法及参数选择参见相关文献<sup>[22-23]</sup>。气象数据为延安气象站(距燕沟流域中心点的直线距离约 5km) 逐日平均气温、降水、降水历时、云量、平均相对湿度、最小相对湿度、白天和夜间风速 8 个指标; 作物为玉米和豆类; 地块单元数据为高程、坡度和坡向; 土壤属性为沙性黄土; 地貌类型为峁坡、沟坡和梯田。考虑到黄土丘陵区气候及降水情况的年际差异性, 作物产量和水土流失数据采用 2004、2005 和 2006 年模拟数据的平均值。

#### (3) 调查和监测数据

各行政村人口、农产品价格为 2011 年实地调查数据。燕沟沟口径流总量和泥沙总量来源于中国科学院水利部水土保持研究所的监测数据<sup>[21]</sup>。

## 2 结果分析

### 2.1 坡改梯内生效应

采用 Win-Yield 软件对燕沟流域 2004、2005 和 2006 年坡耕地分别种植玉米和豆类的模拟结果显示, 地形高程和坡向对作物产量和泥沙流失的影响微弱, 高程对玉米产量的影响幅度为  $\pm 0.1\%$ , 相应产生泥沙流失的变化幅度为  $\pm 0.49\%$ ; 对豆类产量的影响幅度为  $\pm 0.06\%$ , 产生泥沙流失的变化幅度为  $\pm 0.1\%$ 。坡向对玉米产量的影响幅度为  $\pm 0.48\%$ , 产生泥沙流失的变化幅度为  $\pm 0.54\%$ ; 对豆类产量的影响幅度为  $\pm 0.34\%$ , 产生泥沙流失的变化幅度为  $\pm 0.12\%$ 。故在下面 EEC 的计算和分析中忽略了地形

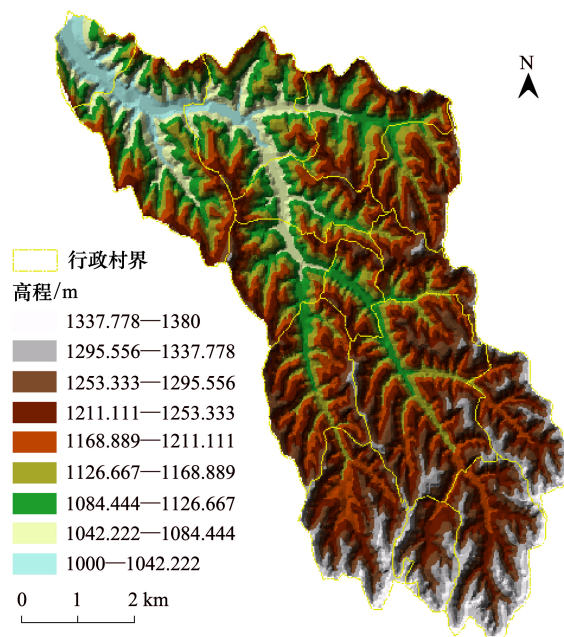


图 2 燕沟流域数字地形图

Fig.2 Digital topographic map of Yangou watershed

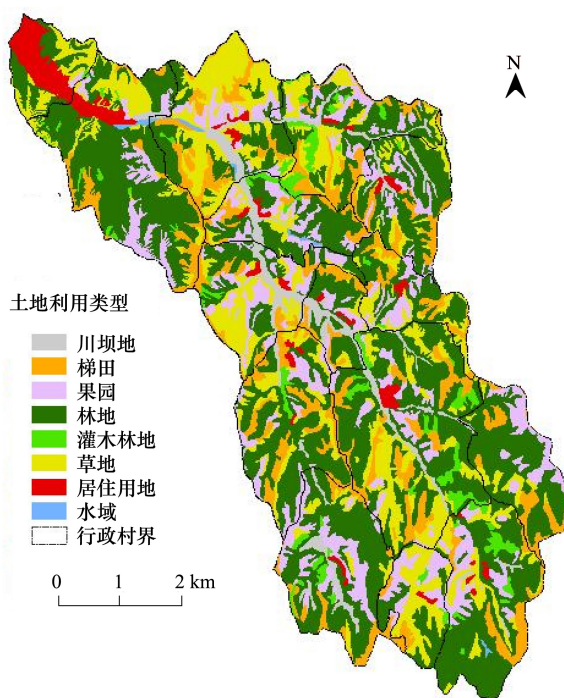


图 3 燕沟流域 2010 年土地利用图

Fig.3 The land use of Yangou watershed in 2010

高程和坡向因素。2004、2005 和 2006 年燕沟流域高程 1100m 处、坡向为正南向时,不同坡度条件下坡耕地种植豆类、玉米的平均产量和土壤侵蚀量变化情况如表 1;豆类和玉米市场收购价分别按 2.5 元/kg 和 1.5 元/kg 计(2007 年价),相应的 EEC 值随地形坡度的变化如图 4 所示;若用  $EEC_T$  代表梯田的 EEC 值, $EEC_P$  代表尚未被改造成梯田的原坡耕地的 EEC 值,则前者与后者的差值( $EEC_T - EEC_P$ )可更清楚地反映坡改梯后单位经济产出少付出的土壤侵蚀代价(图 5)。

表 1 2004—2006 年燕沟流域不同坡度条件下坡耕地作物产量及土壤侵蚀量平均值

Table 1 Average crop yield and soil erosion under different gradients on the slope farmland of Yangou watershed in 2004—2006

| 地形坡度<br>Gradient/(°) | 种植豆类 Planting bean                        |                                   |                                           | 种植玉米 Planting corn                        |                                   |                                           |
|----------------------|-------------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------------|
|                      | 单产/(kg/hm <sup>2</sup> )<br>Yield per uni | 秸秆/(kg/hm <sup>2</sup> )<br>Straw | 土壤侵蚀/(t/hm <sup>2</sup> )<br>Soil erosion | 单产/(kg/hm <sup>2</sup> )<br>Yield per uni | 秸秆/(kg/hm <sup>2</sup> )<br>Straw | 土壤侵蚀/(t/hm <sup>2</sup> )<br>Soil erosion |
| 0                    | 1245.90                                   | 3500.33                           | 17.72                                     | 2790.50                                   | 8929.33                           | 34.12                                     |
| 2.5                  | 1243.17                                   | 3492.67                           | 18.27                                     | 2776.67                                   | 8886.00                           | 34.17                                     |
| 5                    | 1239.13                                   | 3481.67                           | 18.93                                     | 2760.50                                   | 8833.33                           | 34.23                                     |
| 7.5                  | 1233.97                                   | 3466.67                           | 21.61                                     | 2735.67                                   | 8754.00                           | 37.53                                     |
| 10                   | 1227.10                                   | 3447.67                           | 22.79                                     | 2705.00                                   | 8655.33                           | 37.62                                     |
| 12.5                 | 1220.93                                   | 3431.67                           | 23.37                                     | 2674.17                                   | 8557.33                           | 41.65                                     |
| 15                   | 1212.40                                   | 3407.67                           | 24.25                                     | 2636.17                                   | 8436.00                           | 41.78                                     |
| 17.5                 | 1204.30                                   | 3385.00                           | 25.19                                     | 2592.33                                   | 8295.67                           | 48.48                                     |
| 20                   | 1194.93                                   | 3357.67                           | 25.60                                     | 2542.67                                   | 8136.67                           | 52.98                                     |
| 22.5                 | 1186.93                                   | 3336.67                           | 25.98                                     | 2490.17                                   | 7969.00                           | 57.11                                     |
| 25                   | 1176.43                                   | 3307.33                           | 25.97                                     | 2435.00                                   | 7792.00                           | 57.36                                     |
| 27.5                 | 1163.83                                   | 3272.00                           | 25.97                                     | 2378.33                                   | 7610.67                           | 59.31                                     |
| 30                   | 1151.07                                   | 3237.33                           | 26.13                                     | 2317.00                                   | 7414.67                           | 59.62                                     |

由图 4 可知,坡耕地种植豆类和玉米,两者的 EEC 值变化的总体趋势是随地形坡度的增大而增大,表明坡度越大,单位经济收入所付出的土壤侵蚀代价亦越大;两种作物的不同之处在于玉米的 EEC 值显著高于豆类,且两者的差值随着坡度的增大而增大,0°时差值为 0.25 t/100 元,30°时达到 0.81 t/100 元,表明坡耕地种植玉米所付出的土壤侵蚀代价远大于豆类。豆类在 0°—5°区间,EEC 值变化不大,5°较 0°仅增加 0.04 t/100 元;在 5°—7.5°区间,EEC 值升幅相对较大,7.5°较 5°增加了 0.09 t/100 元;7.5°后,EEC 值呈平缓上升趋势,30°时 EEC 值为 0.91 t/100 元,较 7.5°增加了 0.21 t/100 元。玉米在 0°—5°区间,EEC 值变化也不大,5°较 0°仅增加 0.01 t/100 元;在 5°—15°区间,EEC 值升幅相对平缓,15°时 EEC 值为 1.06 t/100 元,较 5°增加了 0.23 t/100 元;15°后,EEC 值呈较快上升趋势,30°时 EEC 值为 1.72 t/100 元,较 15°增加了 0.66 t/100 元。

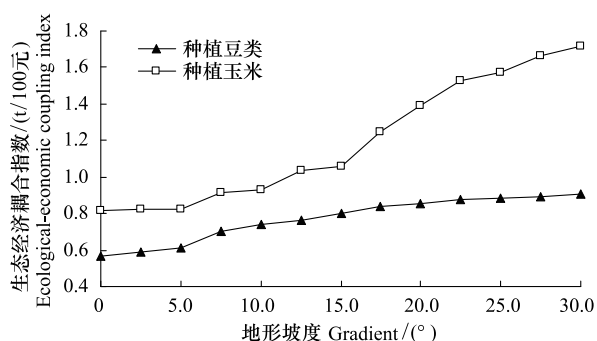


图 4 燕沟流域坡耕地 EEC (2004—2006 年平均值) 随地形坡度的变化

Fig.4 The change of EEC (average in 2004—2006) following gradient on the slope farmland for bean and corn of Yangou watershed

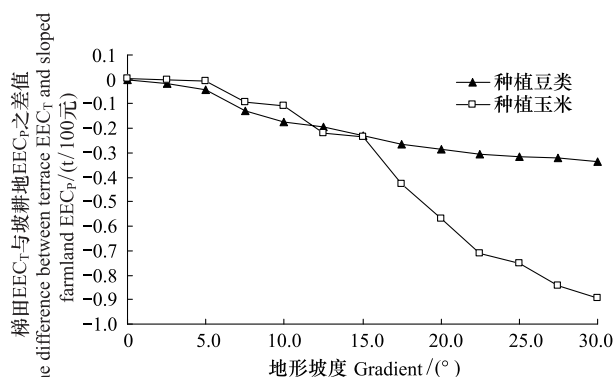


图 5 燕沟流域梯田  $EEC_T$  与坡耕地  $EEC_P$  之差值随地形坡度的变化 (2004—2006 年的平均值)

Fig.5 The gap between  $EEC_T$  of terrace and  $EEC_P$  of slope farmland according to gradient in Yangou watershed (average in 2004—2006)

从图 5 可以看出,豆类的梯田  $EEC_T$  与坡耕地  $EEC_P$  之差值随地形坡度增大的变化趋势较为平缓,  $5^\circ$  坡改梯两者的差值为  $-0.04t/100$  元,  $15^\circ$  坡改梯差值为  $-0.23t/100$  元,  $30^\circ$  的差值为  $-0.34t/100$  元, 即同样得到 100 元的经济产出, 但对  $30^\circ$  坡耕地实施坡改梯可减少  $0.34t$  的土壤侵蚀量。玉米的  $EEC_T$  与  $EEC_P$  之差值随地形坡度增大的变化趋势在  $0^\circ-15^\circ$  区间与豆类基本一致, 但在大于  $15^\circ$  以后呈现出快速下降趋势。  $15^\circ$  坡改梯两者的差值为  $-0.24t/100$  元, 到  $30^\circ$  时差值达到了  $-0.9t/100$  元。从坡改梯与坡耕地  $EEC$  值的对比分析看, 随着地形坡度的增大, 坡改梯的生态经济耦合程度越高。

## 2.2 坡改梯前后的流域农耕地 EEC 对比分析

为了对比燕沟流域坡改梯前后农耕地经济产出、土壤侵蚀量及其生态经济耦合程度的变化情况, 将 1997 年和 2010 年分别设定为坡改梯前后的起始和终止年份, 以 1997 年的坡耕地及其地形坡度分级数据和 2010 年的梯田数据为基础, 按照坡耕地种植豆类、梯田种植玉米, 采用前面随地形坡度变化的坡耕地作物单产和土壤侵蚀数据 ( $0-3^\circ$  取  $2.5^\circ$  的值,  $3-10^\circ$  取  $7.5^\circ$  的值,  $10-15^\circ$  取  $12.5^\circ$  的值,  $15-20^\circ$  取  $17.5^\circ$  的值,  $20-25^\circ$  取  $22.5^\circ$  的值,  $25^\circ$  以上取  $27.5^\circ$  的值), 则在 2005 年的年景条件下, 计算得到的燕沟流域坡改梯前后各村 (不包括沟口区) 农耕地产值、土壤侵蚀量以及  $EEC$  值对比情况如图 6—图 8 所示。

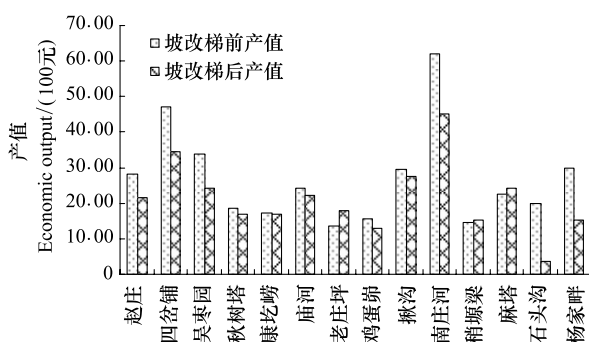


图 6 燕沟流域坡改梯前后各村农耕地产值对比

Fig.6 The output contrast between the slope farmland and terrace in villages of Yangou watershed

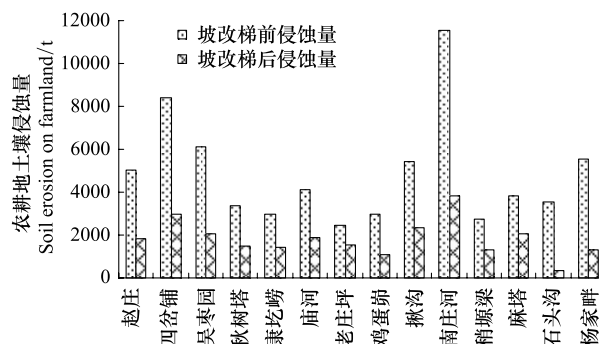


图 7 燕沟流域坡改梯前后各村农耕地土壤侵蚀量对比

Fig.7 The contrast of soil erosion between the slope farmland and terrace in villages of Yangou watershed

从坡改梯前后农耕地经济产出总体情况看, 14 个村合计坡改梯前产值为 377.52 万元, 坡改梯后下降为 298.57 万元, 下降幅度达 20.91%。但从 14 个村的情况看, 有升有降, 各村之间存在着显著差异。坡改梯后较坡改梯前产值有所上升的村包括老庄坪、麻塔和稍塬梁, 上升幅度分别为 31.64%、7.81% 和 2.48%; 其余各村均有所下降, 下降幅度最大的是石头沟村 (80.82%) 和杨家畔 (49.4%), 其它依次为吴枣园 (28.44%)、南庄河 (27.2%)、四岔铺 (26.76%)、赵庄 (23.8%)、鸡蛋崂 (17.77%)、秋树塔 (8.36%)、庙河 (8.2%)、揪沟 (6.42%) 和康圪崂 (2.76%)。

从坡改梯前后农耕地土壤侵蚀量对比看, 坡改梯后较坡改梯前均呈现为大幅度下降。14 个村合计坡改梯前土壤侵蚀总量为 68136.75t, 坡改梯后下降为 25475.74t, 下降幅度达 62.61%。14 个村中, 除老庄坪 (38.23%) 和麻塔 (46.04%) 下降幅度相对较低外, 其它各村都在 50% 以上, 最高的石头沟村达 90.88%, 杨家畔村达 76.71%。表明实施坡改梯后减沙效益极为显著。

从坡改梯前后农耕地的  $EEC$  值对比看, 坡改梯后农耕地的生态经济耦合度显著高于坡改梯前。14 个村

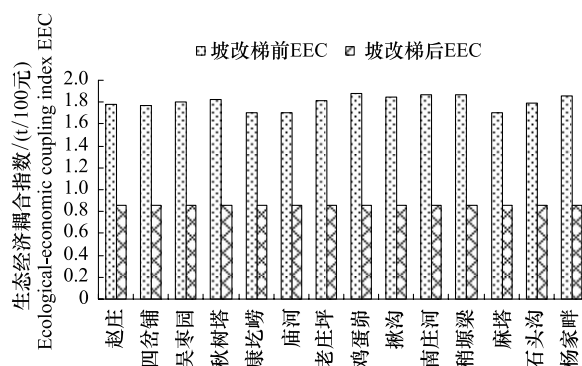


图 8 燕沟流域坡改梯前后各村农耕地 EEC 值对比

Fig.8 The EEC contrast between the slope farmland and terrace in villages of Yangou watershed

合计坡改梯前 EEC 值为 1.805t/100 元,坡改梯后下降为 0.853t/100 元,下降幅度达 52.73%。坡改梯 EEC 值的下降在 14 个村之间的差异不显著,下降幅度都维持在 49%—55%之间。表明实施坡改梯使燕沟流域农耕地的生态经济耦合度提高了 1 倍。

### 2.3 坡改梯外延效应

燕沟流域坡改梯的外延效应主要体现在土地利用结构变化、林草植被覆盖率提高和水土流失显著下降等方面。据有关研究成果<sup>[19]</sup>,从 1949 年到 2010 年,燕沟流域土地利用变化可大致以 20 世纪 80 年代中期和 1997 年为界划分成 3 个不同的时期。前期以土地的空间规模性扩垦和天然次生林向南减缩为主要特征,1966 年土地开垦率为 68.02%,天然次生林面积尚有 1507.74hm<sup>2</sup>,占流域土地总面积 31.98%,到 1988 年土地开垦率已达 91.95%,天然次生林分布退缩南部一隅,面积仅 379.54 hm<sup>2</sup>,是 1966 年的 25.17%,已垦土地多为粗放利用。中期土地利用结构变化不大,出现了合理调整的迹象。后期从 1997 年开始,随着世行贷款项目和国家科技攻关计划项目的实施,燕沟流域的土地利用结构发生了巨大的变化(表 2)。1997 年流域有耕地 1831.1hm<sup>2</sup>,占流域面积的 38.4%,其中坡耕地为 1617.6hm<sup>2</sup>,占耕地的比重高达 88.34%,梯田面积 66.32hm<sup>2</sup>,占流域面积的比例仅 1.39%;到 2003 年,耕地面积下降为 798.19hm<sup>2</sup>,占流域面积的比例下降为 16.72%,其中梯田面积增加到了 582.3hm<sup>2</sup>,占流域面积的比例达到了 12.2%,坡耕地实现了全部退耕。园地从 1997 年的 174.1 hm<sup>2</sup>上升到了 2003 年的 651.48 hm<sup>2</sup>,增加了 10 个百分点。林地 1997 年为 1458.2 hm<sup>2</sup>,2003 年达 2149.64 hm<sup>2</sup>,增加近 15 个百分点。荒沟坡草地 1997 年为 1224 hm<sup>2</sup>,2003 年下降为 764.24hm<sup>2</sup>,6 年间下降了近 10 个百分点。2003 年至 2010 年期间,燕沟流域的土地利用结构基本上保持了相对稳定的状态,较小的变化主要体现为荒沟坡草地已演化为灌丛草地,人工乔灌林地增加了 3 个百分点,川坝地和水域因居住用地扩展而有所减少。

表 2 1997—2010 年燕沟流域土地利用变化

Table 2 Land use change of Yangou watershed from 1997 to 2010

| 土地利用类型<br>Land use type |        | 1997                       |                 | 2003                       |                 | 2010                       |                 |
|-------------------------|--------|----------------------------|-----------------|----------------------------|-----------------|----------------------------|-----------------|
|                         |        | 面积/hm <sup>2</sup><br>Area | 比例/%<br>Percent | 面积/hm <sup>2</sup><br>Area | 比例/%<br>Percent | 面积/hm <sup>2</sup><br>Area | 比例/%<br>Percent |
| 耕地 Farmland             | 川坝地    | 147.18                     | 3.09            | 215.89                     | 4.52            | 200.41                     | 4.17            |
|                         | 梯田     | 66.32                      | 1.39            | 582.3                      | 12.2            | 594.74                     | 12.38           |
|                         | 坡耕地    | 1617.6                     | 33.92           | 0                          | 0               | 0                          | 0               |
| 园地 Garden plots         | 果园     | 174.1                      | 3.65            | 651.48                     | 13.64           | 653.03                     | 13.60           |
| 林地 Forests              | 天然次生林地 | 379.54                     | 7.96            | 379.54                     | 7.95            | 379.54                     | 7.90            |
|                         | 人工乔灌林地 | 1078.66                    | 22.62           | 1770.1                     | 37.07           | 1929.02                    | 40.17           |
| 草地 Grassland            | 灌丛草地   | —                          | —               | —                          | —               | 881.29                     | 18.35           |
|                         | 人工草地   | 0                          | 0               | 16.79                      | 0.35            | 0                          | 0               |
|                         | 荒沟坡草地  | 1224                       | 25.67           | 764.24                     | 16.01           | 0                          | 0               |
| 居住用地 Residential land   |        | 81.13                      | 1.70            | 116.05                     | 2.43            | 151.18                     | 3.15            |
| 水域 Water body           |        | —                          | —               | 18.78                      | 0.39            | 13.04                      | 0.27            |
| 难利用地 Unused land        |        | —                          | —               | 259.55                     | 5.44            | —                          | —               |
| 合计 Total                |        | 4768.53                    | 100             | 4774.72                    | 100             | 4802.26                    | 100             |

在林草植被方面,2010 年与 1997 年相比,乔灌林覆盖率提高了 17.69%;若加上果园和草地,流域的永久性植被覆盖率超过 80.02%,较 1997 年增加了 20.12%。随着坡改梯和植被覆盖率的提高,流域的水土流失状况得到了明显的改善。根据燕沟沟口的监测数据,从 1998 年到 2007 年,流域的洪水径流量和输沙模数均呈现为显著下降趋势(图 9),前 2 年的下降幅度尤为突出,这与流域坡改梯和退耕坡地的进程是一致的。1998 年流域的洪水径流量为  $37.83 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,输沙模数为  $2850 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ;到 2000 年洪水径流量和输沙模数都快速下降,分别为  $22.70 \times 10^4 \text{ m}^3$  和  $581 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ,较 1998 年下降幅度为 39.99% 和 79.61%。后 7 年的洪水径流量都在

$18 \times 10^4 \text{ m}^3$  以下,最低者出现在 2003 年和 2006 年,分别为  $4.63 \times 10^4 \text{ m}^3$  和  $3.31 \times 10^4 \text{ m}^3$ ;输沙模数基本都在  $600 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$  以下,最低者出现在 2006 年,仅  $0.068 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。

### 3 讨论和结论

#### 3.1 讨论

从坡耕地和梯田种植豆类或玉米的生态经济耦合指数对比看,地形坡度  $5^\circ$  和  $15^\circ$  是两个坡耕地是否进行梯田改造的相对“质变点”,表明  $5^\circ$  以下可以不进行梯田改造,  $5^\circ$ — $15^\circ$  之间是进行坡改梯的最佳区间,  $15^\circ$  以上宜退耕还林(草)。关于坡耕地退耕还林的界限,有的学者认为地形坡度  $25^\circ$  是陡坡地的下限,  $25^\circ$  应该作为坡耕地退耕的界限;而另一些学者则认为将  $25^\circ$  作为退耕界限缺乏科学依据。唐克丽等根据实验模拟结果<sup>[5]</sup>,认为退耕界限应设定在  $17^\circ$ — $18^\circ$  之间。从近年黄土丘陵区梯田建设的标准要求看,宽度不小于 10m、梯坎高度不超过 3m 的梯田,对应的地形坡度应在  $17^\circ$  以下。因此,理论上的合理退耕下限应在  $15^\circ$  至  $17^\circ$  之间。

另外,需要特别提出的是采用 Win-yield 软件模拟豆类作物产量与实际调查值较为一致,但玉米的模拟值普遍低于实地调查值,模拟值多在  $2600$ — $3400 \text{ kg/hm}^2$  之间,调查值在  $3200$ — $4500 \text{ kg/hm}^2$  之间,表明梯田玉米的实际生态经济耦合程度高于本研究的结果。经研究分析,导致两者差异的主要原因在于 Win-yield 软件的作物产量模型是基于 20 世纪 80 年代末和 90 年代初的作物种植条件构建的<sup>[24]</sup>,未考虑 90 年代后期在黄土丘陵区梯田玉米种植中普遍采取的大垄沟种植、密植和地膜覆盖等技术措施。未来,Win-yield 软件尚需要做进一步的修改和订正。

另外,需要特别提出的是采用 Win-yield 软件模拟豆类作物产量与实际调查值较为一致,但玉米的模拟值普遍低于实地调查值,模拟值多在  $2600$ — $3400 \text{ kg/hm}^2$  之间,调查值在  $3200$ — $4500 \text{ kg/hm}^2$  之间,表明梯田玉米的实际生态经济耦合程度高于本研究的结果。经研究分析,导致两者差异的主要原因在于 Win-yield 软件的作物产量模型是基于 20 世纪 80 年代末和 90 年代初的作物种植条件构建的<sup>[24]</sup>,未考虑 90 年代后期在黄土丘陵区梯田玉米种植中普遍采取的大垄沟种植、密植和地膜覆盖等技术措施。未来,Win-yield 软件尚需要做进一步的修改和订正。

#### 3.2 结论

(1) 燕沟流域坡改梯实证研究表明,从内生和外延两个方面进行坡改梯生态经济耦合效应评价的学术思路是可行的,采用单位经济产出所付出的土壤侵蚀代价(即生态经济耦合指数)可定量且有效刻画坡改梯的生态经济耦合程度。

(2) 随着地形坡度的增大,坡改梯的生态经济耦合程度越高。地形坡度  $5^\circ$  和  $15^\circ$  是两个重要阈值,  $5^\circ$  以下不必进行坡改梯,  $5^\circ$ — $15^\circ$  之间应作为坡改梯的重点对象,  $15^\circ$  以上宜退耕还林还草。

(3) 坡改梯使燕沟流域农耕地的生态经济耦合程度得到了显著提高,坡改梯前生态经济耦合指数为  $1.805 \text{ t}/100 \text{ 元}$ ,坡改梯后下降为  $0.853 \text{ t}/100 \text{ 元}$ ,下降幅度达  $52.73\%$ 。随着坡改梯和植被覆盖率的提高,流域的洪水径流量和输沙模数均大幅度下降,水土流失状况得到了明显的改善。

#### 参考文献(References):

- [1] 李凤民,徐进章,孙国钧. 半干旱黄土高原退化生态系统的修复与生态农业发展. 生态学报, 2003, 23(9): 1901-1909.
- [2] 陈奇伯,王克勤,齐实,孙立达. 黄土丘陵区坡耕地水土流失与土地生产力的关系. 生态学报, 2003, 23(8): 1463-1469.
- [3] 周德翼,杨海娟. 黄土高原治理中中央、地方、农民间的博弈分析. 水土保持通报, 2002, 22(3): 35-38.
- [4] Lu C H, Van Ittersum M K. A trade-off analysis of policy objectives for Ansai, the Loess Plateau of China. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2004, 102(3): 235-246.
- [5] 唐克丽,张科利,雷阿林. 黄土丘陵区退耕上限坡度的研究论证. 科学通报, 1998, 43(2): 200-203.
- [6] 胡世雄,靳长兴. 坡面土壤侵蚀临界坡度问题的理论与实验研究. 地理学报, 1999, 54(4): 347-356.
- [7] 蔡强国,陆兆熊,王贵平. 黄土丘陵沟壑区典型小流域侵蚀产沙过程模型. 地理学报, 1996, 51(2): 108-117.
- [8] 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. 自然资源学报, 2004, 19(5): 637-645.
- [9] 康晓光. 坝系农业——治黄之本. 科技导报, 1993, 62(8): 3-6.
- [10] 肖国举,王静. 黄土高原集水农业研究进展. 生态学报, 2003, 23(5): 1901-1909.

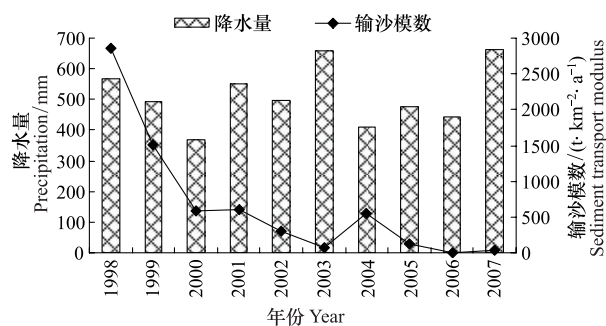


图9 1998—2007年燕沟流域年降水量和输沙模数监测数据

Fig.9 The observation data of rainfall and soil loss modulus in Yangou watershed from 1998 to 2007

- [11] 李继翠, 程默. 西北农村人口对生态环境的压力与生态移民的战略选择. 哈尔滨工业大学学报: 社会科学版, 2007, 9(1): 85-88.
- [12] 刘昌明, 成立. 黄河干流下游的断流的径流序列分析. 地理学报, 2000, 55(3): 257-264.
- [13] 周成虎, 万庆, 黄诗峰, 陈德清. 基于 GIS 的洪水灾害风险区划研究. 地理学报, 2000, 55(1): 15-24.
- [14] 景可, 焦菊英. 黄土丘陵沟壑区水土流失治理模式、治理成本及效益分析——以米脂县高西沟流域为例. 中国水土保持科学, 2009, 7(4): 20-25.
- [15] Hu S X, Jin C X. Theoretical analysis and experimental study on the critical slope of erosion. *Acta Geographica Sinica*, 1999, 54(4): 347-356.
- [16] Cai Q G, Luk S, Wang G P. Process-based soil erosion and sediment yield model in a small basin in the Hilly Loess Region. *Acta Geographica Sinica*, 1996, 51(2): 108-117.
- [17] 吴文斌, 唐华俊, 杨鹏, 周清波, 陈仲新, Shibasaki R. 基于空间模型的全球粮食安全评价. 地理学报, 2010, 65(8): 907-918.
- [18] 胡文海. 我国中部地区粮食生产特征及其对我国粮食安全的影响. 地理研究, 2008, 27(4): 885-896.
- [19] Kang X G. Dam system agriculture is the basis of harnessing the Yellow River. *Science & Technology Review*, 1993, 62(8): 3-6.
- [20] 琚彤军, 刘普灵, 郑世清, 冯秉琦. 燕儿沟流域泥沙监测初报. 水土保持研究, 2000, 7(2): 176-178.
- [21] 刘普灵, 郑世清, 琚彤军, 王栓全, 徐勇. 黄土高原燕儿沟流域生态环境建设模式及效益研究. 中国生态农业学报, 2007, 15(3): 175-178.
- [22] 刘高焕, 朱会义, 蔡强国, 甘国辉, Csillag F, Maclaren V. 小流域综合管理信息系统集成研究. 地理研究, 2002, 21(1): 25-33.
- [23] Li J C, Cheng M. Ecology environmental pressure by northwest rural population and strategy choice of eco-migration. *Journal of Harbin Institute of Technology (Social Sciences Edition)*, 2007, 9(1): 85-88.
- [24] 徐勇, 甘国辉, 王志强. 基于 WIN-YIELD 软件的黄土丘陵区作物产量地形分异模拟. 农业工程学报, 2005, 21(7): 61-64.
- [25] Zhou C H, Wan Q, Huang S F, Chen D Q. A GIS-based approach to flood risk zonation. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(1): 15-24.
- [26] Jing K, Jiao J Y. Mode, cost and benefit of soil and water conservation on the Loess Plateau: A case study in Gaoxigou watershed in Mizhi County. *Science of Soil and Water Conservation*, 2009, 7(4): 20-25.
- [27] Xu Y, Tang Q, Zhang T S, Yang Q K. Influence of ecological defarming scenarios on agriculture in Ansai county, Loess Plateau, China. *Mountain Research and Development*, 2009, 29(1): 36-45.
- [28] Liu J G, Li S X, Ouyang Z Y, Tam C, Chen X D. Ecological and socioeconomic effects of China's policies for ecosystem services. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, 105(28): 9477-9482.
- [29] Wu W B, Tang H J, Yang P, Zhou Q B, Chen Z X, Shibasaki R. Scenario-based assessment of future food security. *Journal of Geographical Sciences*, 2010, 65(8): 907-918.
- [30] Hu W H. Characteristics of grain production in Central China and its influence on national grain safety. *Geographical Research*, 2008, 27(4): 885-896.
- [31] Xu Y, Tang Q. Land use optimization at small watershed scale on the Loess Plateau. *Journal of Geographical Sciences*, 2009, 19(5): 577-586.
- [32] Ju T J, Liu P L, Zheng S Q, Feng B Q. Primary Report on Monitoring Sediment in Yan'er Gully Valley. *Research of Soil and Water Conservation*, 2000, 7(2): 176-178.
- [33] Liu P L, Zheng S Q, Ju T J, Wang S Q, Xu Y. Eco-environment construction in Yangou Basin of Loess Plateau: Modes and benefits. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2007, 15(3): 175-178.
- [34] Liu G H, Zhu H Y, Cai Q G, Gan G H, Csillag F, Maclaren V. A land-unit based integration method of geographic information system for small watershed management. *Geographical Research*, 2002, 21(1): 25-33.
- [35] Xu Y, Yang B, Liu G B, Liu P L. Topographic differentiation simulation of crop yield and soil and water loss on the Loess Plateau. *Journal of Geographical Sciences*, 2009, 19(3): 331-339.
- [36] Xu Y, Gan G H, Wang Z Q. Topographic differentiation simulation of crop yield based on WIN-YIELD software in the loess hilly-gully region. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2005, 21(7): 61-64.