

# 长江中游低丘黄壤坡面地表产流产沙规律初探<sup>\*</sup>

刘 艳<sup>1,2,3</sup>, 刘学全<sup>2</sup>, 崔鸿侠<sup>2</sup>, 周金星<sup>3</sup>, 何丙辉<sup>1</sup>

(1. 西南大学 资源环境学院, 重庆 400716; 2. 湖北省林业科学研究院, 武汉 430079; 3. 中国林业科学 研究院, 北京 100091)

**摘 要:**通过野外人工模拟降雨试验,得出湖北省象鼻嘴小流域内 2 个板栗林梯地、2 个花生农地(梯地、坡地各 1 个)径流小区在同等雨强条件下的产流产沙过程变化特征。结果显示:在水热状况、土壤、小地形等条件较一致的前提下,4 个径流小区的初损雨量、历时表现为板栗梯地 1 > 板栗梯地 2 > 花生梯地 > 花生坡地;结合各径流小区产流产沙强度及累计过程线分析得出,梯地的水土保持效果明显优于坡地,坡地的产流产沙过程更为复杂;林地在拦蓄径流、增加入渗方面要明显优于农地;板栗梯地 1、2 的水沙流失特征差异显示出植被盖度、物种多样性等对地表产流产沙过程也有较大影响;各场雨的累计产流、产沙量与降雨历时之间符合  $Y = ax^2 + bx + c$  的多项式相关方程。

**关键词:**模拟降雨; 低丘黄壤坡面; 产流产沙过程; 降雨历时

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2010)01-0149-05

## A Preliminary Study on Law of Runoff and Sand Yield on Yellow Soil Slope Surface in Low Hilly of the Middle Reaches of the Yangtze River

LIU Yan<sup>1,2,3</sup>, LIU Xue-quan<sup>2</sup>, CUI Hong-xia<sup>2</sup>, ZHOU Jin-xing<sup>3</sup>, HE Bing-hui<sup>1</sup>

(1. Institute of Resource and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China; 2. Hubei Academy of Forestry, Wuhan 430079, China; 3. Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

**Abstract:** It obtains the change characteristics of runoff and sand yield process of 2 chestnut terrace and 2 peanut agricultural land (one terrace and one slope land) under the same rainfall intensity condition of Xiangbizui small watershed in Hubei Province, which from field of artificial simulated rainfall experiments. The results showed that: Under the premise of some conditions (water and heat status, soil, small terrain, and so on) are comparatively consistent, initial losses and initial yield duration of the 4 runoff plots manifest as chestnut terrace 1 > chestnut terrace 2 > peanut terrace > peanut slope land; Analytical results combine with runoff and sand yielding intensity process line and cumulative runoff and sand yield process line in different runoff plots showed that the terrace's effect of soil and water conservation is markedly better than slope land's, the runoff and sand yield process of slope land is more complex; About blocking runoff and increasing infiltration forestland are clearly better than the agricultural land; The differences of water and soil loss characteristics between chestnut terrace 1 and chestnut terrace 2 showed that vegetation cover, species diversity have a great impact on runoff and sand yield process on the land surface; The relevant polynomial equation of cumulative runoff, sand yield and rainfall duration of each simulated rainfall meet " $Y = ax^2 + bx + c$ " form.

**Key words:** simulated rainfall; yellow soil slope in low hilly; runoff and sand yield process; rainfall duration

我国长江中下游地区低山丘陵分布广,面积占该区域国土面积的 60 % 左右。低山丘陵区基本上

都处于农林业结合的边缘地带,立地条件复杂多样,人口密度大,易发生水力侵蚀,土壤侵蚀不可避免

<sup>\*</sup> 收稿日期:2009-08-18

基金项目:国家“十一五”科技支撑项目(2006BAD-03A16-03)

作者简介:刘艳(1984-),女,云南楚雄人,硕士研究生,主要研究方向为水土保持生态修复。E-mail:liuyan1984213@163.com

通信作者:周金星(1972-),男,湖南常德人,博士,副研究员,硕士生导师,主要从事小流域综合治理。E-mail:zjx9277@126.com



导致了土壤退化和面源污染,是长江水系泥沙淤积、江河污染的重要来源及长江中下游水土流失的主要源地。通过科学试验掌握该区黄壤坡面地表水土流失的基本规律,是提出长江中游低丘区水土流失综合治理模式的关键前提。

土壤侵蚀规律研究、水土保持措施效益分析与评价、土壤侵蚀预报模型的建立等都依赖于大量科学数据的观测、积累和分析,室内模拟和径流小区为上述数据的获取提供了技术平台。然而,依靠天然降雨收集相关数据具有很大的局限性,试验设置的产流小区类型也比较单一,严重影响了数据的实用性,制约着水土保持科研的快速发展<sup>[1]</sup>。利用人工模拟降雨,可以进行各种下垫面土壤侵蚀规律研究,亦可解决设站观测几十年一遇的大暴雨问题,从而大大缩短了试验研究周期<sup>[2]</sup>,已成为室内与野外试验的重要技术手段,可加速土壤侵蚀、降雨产流及入渗等试验,避免自然因素的影响,在既定时间内迅速获得试验所需数据,顺利完成研究目标<sup>[3]</sup>。

目前国内外相关研究领域较多涉及到黄土高原丘陵沟壑区的黄土坡面侵蚀特征,南方紫色土、红壤丘陵区的水土流失机理及预测预报模型等,而对于长江流域低丘黄壤坡地水土流失,相关研究多限于治理对策、综合治理模式探讨等方面,通过野外典型样地试验,尤其是坡地与梯地人工模拟降雨对比探索其水土流失规律的研究还比较少见。本研究选择项目区典型样地进行野外人工模拟降雨试验,研究长江中游低丘黄壤坡面的地表产流产沙过程特征,探讨降雨侵蚀引起的水土流失规律,为今后提出适宜推广的综合治理模式及植被恢复措施奠定基础。

## 1 试验区概况

试验区位于湖北省东部的浠水县清泉镇象鼻嘴村小流域,在地理上属于浠水、蕲春两县交界的界岭低山丘陵区,即低山与丘陵过渡地带。气候属亚热带湿润区之东部夏热冬暖亚区,阳光充足,四季分明,雨量充沛。年平均气温 16.9℃,大于 10℃ 活动积温为 5 059~5 398℃。年平均日照时数 1 919 h,无霜期平均为 250 d 左右。年降雨量为 1 200~1 300 mm,主要集中在 4~8 月,雨热同季。土壤类型主要是黄壤,具有易侵蚀性,若遇强度大且时段集中的降雨会导致大量水土流失。植被属于中亚热带常绿阔叶林地带之青冈栎、落叶栎类,马尾松林。优势树种主要是马尾松、杉木、毛竹、樟、白栎、青冈栎等。主要经济树种为板栗、桃、李、梨、桔、毛竹。2006 年底,象鼻嘴村总人口达 240 户,890 人,耕地

面积 69.67 hm<sup>2</sup>,农业产值 94 万元,人均纯收入 1 711 元。流域内除天然林地、水田及少量较缓坡地外,其余人工林地及坡地均已实行坡改梯,这种情况在长江中游低丘黄壤区也具有普遍代表性。

## 2 试验方法

### 2.1 野外植被调查

于 2009 年 7 月在试验区内根据实地踏查情况及试验需要,选择具有地带性特征的调查点进行植被调查。由于本试验中成片板栗林地及花生农地的面积均达不到设置标准样方的规模,故先设置水平投影面积为 10 m × 10 m 的样方,按常规野外调查方法分别对每个样方进行乔、灌木调查,再在每个样方中设置 3~5 个 1 m × 1 m 的小样方对草本层进行调查。调查的基本内容包括:样方的地理状况,如海拔、坡度等;乔木的名称、高度、枝下高、胸径、冠幅等;灌草的名称、平均高度、盖度、株(丛)数、地径等。密度和盖度调查均用估测法,丛生植物按丛数计算其个体数量,盖度用估测法测定其投影盖度。

### 2.2 野外人工模拟降雨试验

2.2.1 人工降雨模拟装置 本试验采用中国科学院水利部水土保持研究所研制的组合侧喷式野外人工模拟降雨装置,两侧座架之间距离为 7 m,即喷头立杆坐标(距轴线)3.5 m,喷头高 6 m,出水高度 1.5 m,降雨雨滴终点速度近似达到天然降雨的速度。供水压力由立杆底部的进水阀门及汽油抽水泵的油门控制,降雨强度通过挡水板孔径来调节。

2.2.2 降雨样地选择 根据试验需要,在小流域内选择 2 个 5 a 生板栗林地(均为梯地)和 2 个当季花生农地(梯地、坡地各一个)用于人工模拟降雨。4 个样地均分布于同一坡向(西南向,半阴坡)、坡位(中坡位)、坡度(梯地指原地面坡度)为 30°~33° 的临近地块。土壤类型都属黄壤,用 JL-19 土壤水分速测仪测得各样地的前期土壤湿度均在 5.2% 左右。各梯地规格也相差不大,梯面宽 2~2.5 m,梯坎高 1 m 左右,均为土坎。样地选择基本保证了水热状况、土壤、小地形变化等条件的一致性,使试验数据基本具备了可比性。根据野外植被群落调查情况,花生农地(分梯地、坡地)的调查结果一致;板栗梯地 1 的植被盖度、丰富度指数、多样性指数、均匀度指数等各项指标均大于板栗梯地 2;板栗林地表均无枯落物覆盖,但其各项指标均大于花生农地。同时本试验需水量较大,选样地时要考虑尽量离水源近的地方,便于引水,试验下方 60 m 左右有一个小型水库刚好被利用上。



2.2.3 径流小区的设置 由于野外试验受环境的影响较大,降雨不能全部覆盖人工模拟降雨机的室内降雨范围,根据实际情况,在选定样地内设置水平面积为 2 m ×4 m 的矩形径流小区,内部植被及下垫面状况尽量保持原状,小区两边及上端用薄铁皮板围成,铁皮板埋入土中 15 cm,高出地面 20 cm,小区下端设置可嵌入地表的三角形铁皮集流槽,以保证小区内的地表径流全部汇入放置于出水口处的收集桶中。在径流小区周围按规定间距及要求架起降雨器,并安装好水泵、引水管等,做好准备工作。

2.2.4 降雨器率定 为保证径流小区内雨滴降落的均匀性,在开始降雨前用塑料布覆盖住整个小区,小区周围设置 4~6 个自制雨量筒作为测点,根据降雨器压力表调节进水阀门及水泵油门,保证各样地雨强的一致性,进行 5~10 min 的降雨率定。率定后根据各测点的降雨量,采用均匀性公式计算雨滴降落的均匀性,公式如下:

$$k = 1 - \frac{n}{i=1} \frac{|x_i - \bar{x}|}{n\bar{x}}$$

式中:k——均匀系数; $x_i$ ——测点雨量; $\bar{x}$ ——各测点平均雨量; $n$ ——测点数。

经计算若  $k > 0.8$  则可开始进行模拟降雨,  $k < 0.8$  则要对降雨器进行再调试,并避开风等不利因素再次率定,直到均匀度达到要求。

2.2.5 模拟降雨及样品采集处理 本试验以长江中游地区常见暴雨雨强 100 mm/h (1.67 mm/min) 作为降雨雨强,即选择孔径为 12 mm 的挡水板,于 2009 年 7 月 20-22 日无风或稍有微风晴好天气的晨间及傍晚,在设置好的径流小区进行模拟降雨试验,模拟整个降雨产流、产沙直至稳定并呈一定规律性的过程。记录降雨的开始、停止时间及产流的开始、结束时间,为了比较精确地反映整个降雨产流过程,每场雨开始产流后以 5 min 为时间间隔对小区地表径流和泥沙混合样进行全部收集,每个时段更换一次收集桶,带回静置 12 h 后滤出泥沙,测量径流体积,泥沙干后称重。整个降雨产流过程完成后测量雨量筒中的雨量,用于计算降雨量、雨强、均匀度系数等。

3 结果与分析

3.1 初损雨量与初损历时特征分析

从降雨开始到产流这一时段内的降雨量称为初损雨量,这段时间称为初损历时<sup>[4]</sup>。径流的产生不仅必须满足降雨强度大于土壤渗透速率的基本条件,且降雨量必须大于林冠草及其枯落物的截留量,

坡度和前期含水量也对径流产生的时间有一定的影响<sup>[5]</sup>,一般情况下坡度接近的林草地的初损雨量要明显高于农地,但也有例外情况,翻耕后的农地,由于土壤疏松,土壤孔隙大,致使初损雨量可能会超过林草地。表 1 显示的是同等雨强下 4 个样地径流小区的初损雨量和初损历时试验结果。从表中可以发现,结果表现为板栗梯地 1 > 板栗梯地 2 > 花生梯地 > 花生坡地。可见在水热状况、土壤、小地形变化等条件较一致的前提下,林地下方虽无枯落物覆盖,但由于植被盖度等指标值均大于农地,其群落结构在延缓径流产生上要优于纯草本群落单层结构的农地,所以初损雨量、历时明显大于农地。而在同等降雨条件下的花生农地,梯地的初损雨量、历时明显大于坡地,这是由于坡改梯延缓了径流产生,更多地被梯地土层逐级入渗吸收,从而减少了地表水土流失,山丘区实行坡改梯措施的水土保持效果是显而易见的。

表 1 同等雨强下不同径流小区的初损雨量和初损历时

项 目	板栗 梯地 1	花生 梯地	花生 坡地	板栗 梯地 2
雨强/(mm·min <sup>-1</sup> )	1.739	1.697	1.732	1.728
初损雨量/mm	15.333	8.599	6.466	11.894
初损历时/min	8.817	5.067	3.733	6.883

3.2 产流产沙特征分析

3.2.1 产流过程特征分析 径流是养分流失的主要动力之一,也是泥沙流失的主要载体<sup>[6]</sup>。坡面径流可以挟带泥沙造成土壤侵蚀,尤其是在降雨强度较大的情况下,产流增大,携带的泥沙也逐渐增大,所以坡面径流的研究是坡面植被减沙效益研究的前提。图 1,2 分别是同等雨强下各径流小区的产流强度过程线和产流累计过程线。图 1 显示,花生农地的产流强度峰值出现在降雨后的 37 min 左右,板栗梯地的峰值则出现在降雨后 45 min 左右,各径流小区的产流强度达到峰值之后均趋于较平稳状态。板栗梯地 1 的产流强度变化较板栗梯地 2 平缓,但二者的总体变化趋势较一致(梯地 2 少一个降雨时段),各时段产流强度均低于花生农地。花生梯地与坡地在开始产流至降雨后约 15 min 时段内的产流强度较接近,此后坡地的产流强度增加曲线较梯地更陡,降雨后 15~25 min 时段变化表现最为剧烈。图 2 显示,各径流小区产流强度变化的差别反映在累计产流上,表现也比较一致。

3.2.2 产沙过程特征分析 图 3,4 分别是同等雨强下各径流小区的产沙强度过程线和产沙累计过程线,可以看出,产沙过程所表现出的规律比起产流过程稍显复杂,产沙强度出现峰值的时段与产流强度



一致,不过板栗梯地 1,2 的产沙强度、累计产沙量变化更平缓,也更接近,而花生农地的产沙强度、累计产沙量变化表现更为剧烈,较之板栗梯地差距更大。另外,花生梯地与坡地从产流开始后产流强度差距明显,变化趋势不太一致。

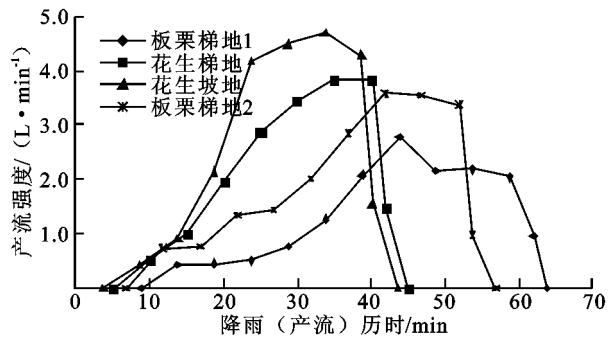


图 1 各径流小区产流强度过程线

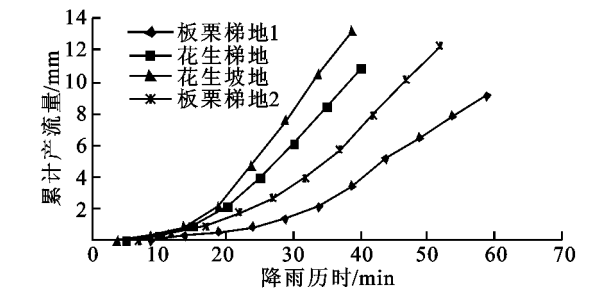


图 2 各径流小区产流累计过程线

从以上分析来看,总体来说板栗梯地的产流、产沙强度随降雨时段的变化均比农地更平缓,其累计产流、产沙量均明显小于花生农地,可见林地 in 拦蓄径流、降低土壤可蚀性、增加入渗方面要明显优于农

地。同等条件下梯地的水土保持效果明显优于坡地,而植被盖度、物种多样性等指标也影响着各模式的地表径流流失,随之影响泥沙、养分的流失。

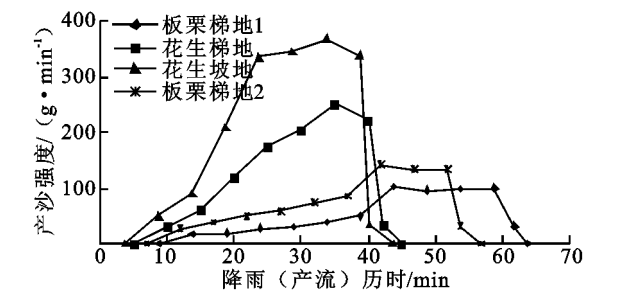


图 3 各径流小区产沙强度过程线

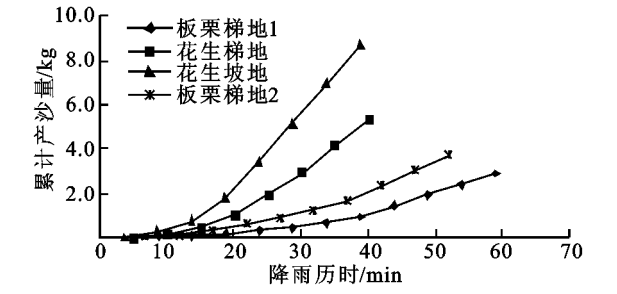


图 4 各径流小区产沙累计过程线

3.2.3 累计产流产沙过程相关方程 对各径流小区在同等暴雨雨强下的产流产沙过程试验结果进行回归分析,拟合出各模式累计产流、产沙量与降雨历时之间的相关方程,便于探讨该区地表径流、泥沙的流失规律。回归分析结果发现各径流小区累计产流、产沙量与降雨历时之间符合  $Y = ax^2 + bx + c$  ( $a, b, c$  为常数) 的多项式相关方程,具体情况详见表 2 - 3。

表 2 同等雨强下各径流小区累计产流过程相关方程

径流小区类型	雨强/ $(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	回归方程	相关系数 $R^2$
板栗梯地 1	1.739	$Y = 0.0037x^2 - 0.0582x + 0.235$	0.9935
花生梯地	1.697	$Y = 0.0079x^2 - 0.0376x - 0.1119$	0.9984
花生坡地	1.732	$Y = 0.0103x^2 - 0.0408x - 0.2055$	0.9945
板栗梯地 2	1.728	$Y = 0.0056x^2 - 0.0556x + 0.2129$	0.9987

注:Y 为累计产流量(mm),x 为降雨历时(min)。

表 3 同等雨强下各径流小区累计产沙过程相关方程

径流小区类型	雨强/ $(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	回归方程	相关系数 $R^2$
板栗梯地 1	1.739	$S = 1.2434t^2 - 27.159t + 197.04$	0.9968
花生梯地	1.697	$S = 3.8802t^2 - 18.846t - 53.327$	0.998
花生坡地	1.732	$S = 5.8174t^2 + 13.015t - 299.63$	0.9951
板栗梯地 2	1.728	$S = 1.6396t^2 - 14.8t + 66.549$	0.9985

注:S 为累计产沙量(g);t 为降雨历时(min)。

4 讨论

(1) 本试验采用野外人工模拟降雨方法,可以控制各项降雨特征,在短时间内获得径流小区产流产

沙过程的试验数据来揭示土壤侵蚀规律,以弥补天然降雨观测周期长、降雨特征难以控制等不足。人工模拟降雨是人们进行坡面产流产沙研究时应用的主要方法之一,主要分为室内和室外模拟降雨两种。



室内模拟降雨虽然具有容易控制、操作方便等诸多优点,但野外模拟降雨却更能接近真实情况,所以也更具有说服力。

(2) 本试验 4 场模拟降雨的率定时间为 5 ~ 6 min,雨滴均匀度系数均达到 0.8 以上,模拟降雨时间为 40 ~ 60 min,雨滴均匀度系数均达到 0.9 以上,这与降雨时排除了刮风等不利因素的影响有关,野外试验受外界因素的影响较大。另外,在无风或少风的良好试验条件下,降雨持续时间越长,则雨滴降落的均匀度系数越高。试想,在风雨交加的自然状态下,由于降雨范围大,刮风使得一片雨滴偏离了它们原定的降落区域,但又会带来另一片雨滴补充到这块区域,而小范围的模拟降雨,只有在排除了刮风等不利因素影响后得出的结果,才能减小误差,从而更接近自然状态。

(3) 通过模拟降雨试验结果分析发现,在水热状况、土壤、小地形、植被状况等条件都较一致的前提下,梯地的水土保持效果要明显优于坡地,坡地的水沙流失过程更为复杂。而在水热状况、土壤、小地形等条件较一致的前提下,林地在拦蓄径流、降低土壤可蚀性、增加入渗方面要明显优于农地。同时植被盖度、物种多样性等指标对地表产流产沙过程变化也有较大影响,具体影响程度还有待于进一步研究。

(4) 本文中各径流小区累计产流产沙过程相关方程,是在同等暴雨雨强条件下通过较短历时、较小范围内的模拟降雨试验数据得出的,虽然在一定程度上揭示了研究区黄壤坡面地表产流产沙过程规律,但是研究还不够透彻。水土流失包括水的损失

和土壤侵蚀两部分。此外,由于径流和土壤侵蚀中携带着大量的养分流失,因此具体来讲应包含土壤侵蚀、径流流失和养分流失三部分<sup>[7-8]</sup>。本试验由于受野外条件的诸多限制,并未涉及养分流失方面的特征分析,希望在以后不断改进试验条件的同时更多地涉足其中,使试验数据更具说服力与实用性,更全面地研究长江中游低丘黄壤区的坡面水土流失规律。

参考文献:

[1] 袁爱萍. 美国人工降雨模拟设备的引进与应用[J]. 北京水利, 2004(6): 36-37.

[2] 范荣生, 李占斌. 用于降雨侵蚀的人工模拟降雨装置实验研究[J]. 水土保持学报, 1991 5(2): 38-45.

[3] 王洁, 胡少伟, 周跃. 人工模拟降雨装置在水土保持方面的应用[J]. 水土保持研究, 2005, 12(4): 188-190, 194.

[4] Schmitt T J, Dosskey M G, Hoagland K D. Filter strip performance and processes for different vegetation, widths, and contaminants [J]. Environ Qual., 1999, 28: 1479-1489.

[5] Harmel R D, Richchardson C W, King K W, et al. Runoff and soil loss relationships for the Texas Blackland Prairies ecoregion [J]. Journal of Hydrology, 2006, 331(3/4): 471-483.

[6] 傅涛. 坡耕地土壤侵蚀研究进展[J]. 水土保持学报, 2001, 15(3): 125-128.

[7] 王汉存. 水土保持原理[M]. 北京: 水利电力出版社, 1992.

[8] 解明曙, 庞薇. 关于中国土壤侵蚀类型与侵蚀类型区的划分[J]. 中国水土保持, 1993(5): 8-10.

(上接第 148 页)

[8] 欧阳志云, 赵同谦, 赵景柱. 海南岛生态系统生态调节功能及其生态经济价值研究[J]. 应用生态学报, 1999, 15(8): 1395-1402.

[9] 焦峰, 温仲明, 李锐. 黄土高原退耕还林(草)环境效应分析[J]. 水土保持研究, 2005, 12(1): 26-29.

[10] 杨光, 丁国栋, 孙保平, 等. 黄土丘陵沟壑区退耕还林工程对植被恢复影响的研究: 以陕西吴旗县为例[J]. 水土保持研究, 2005, 26(2): 76-78.

[11] 赖亚飞, 朱清科, 张宇清, 等. 吴旗县退耕还林生态效益价值评估[J]. 水土保持学报, 2006, 20(3): 83-87.

[12] 秦伟, 朱清科, 赖亚飞. 退耕还林工程生态价值评估与检验: 以陕西吴起县为例[J]. 北京林业大学学报, 2008, 30(5): 62-65.

[13] 贾晓娟, 常庆瑞, 薛阿亮, 等. 黄土高原丘陵沟壑区退耕还林生态效应评价[J]. 水土保持通报, 2008, 28(3): 182-185.

[14] 申强, 姜志德, 王继军. 吴起县不同退耕阶段农地资源生态服务价值评估分析[J]. 陕西师范大学学报, 2009, 37(1): 98-102.

[15] 王秀兰, 包玉海. 土地利用动态变化研究方法探讨[J]. 地理科学进展, 1999, 18(1): 81-87.

[16] 吴旗县土地资源管理局土地资源调查办公室. 陕西省吴旗县土地资源[M]. 1990, 79-80.

[17] 王宗明, 张柏, 张树清. 吉林省生态系统服务价值变化研究[J]. 自然资源学报, 2004, 19(1): 56-61.

[18] Kreuter U, Harris H, Matlock M, et al. Change in ecosystem service values in the San Antonio area, Texas[J]. Ecological Economics, 2001, 39: 333-346.

[19] 谢高地, 肖玉, 甄霖, 等. 我国粮食生产的生态服务价值研究[J]. 中国生态农业学报, 2005, 13(3): 10-13.

[20] 李文楷, 李天宏, 钱征寒. 深圳市土地利用变化对生态服务功能的影响[J]. 自然资源学报, 2008, 23(3): 440-446.