

黄土高原南部坡地土地生产力 衰退过程和恢复途径研究

李光录

(西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: 使用 PI 模型对黄土高原坡地生产力的自然衰退过程, 以及在水土保持和施肥管理措施下土地生产力的变化趋势进行了模拟, 结果显示: 在自然侵蚀环境中, 土地生产力的衰退速度很快, 平均每年以 0.25% 到 0.5% 的速度衰减, 若采取水土保持措施则其衰退速度较自然侵蚀下年均减缓 0.07% (水平梯田)、0.15% (坡式梯田) 和 0.21% (等高带状种植), 而采用水土保持措施并结合施肥管理措施则可使土地生产力得到明显恢复; 水土保持措施可以减缓土地生产力衰退的速度, 但不能使其生产力得到有效恢复, 只有采用水土保持措施并结合合理的施肥管理措施才能使土地生产力水平得到恢复和提高。

关键词: 模型; 土壤侵蚀; 土地生产力; 黄土高原
中图分类号: F301.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2007)01-0006-05

侵蚀导致土地生产力的衰退是一个长期的自然和历史过程。在人类活动强烈且自然环境脆弱的区域, 这种衰退可能呈现出加速的过程, 相反, 在人类活动少, 自然环境相对较好的区域, 其衰退速度慢, 或者无明显的衰退。水土流失所导致的土地生产力的退化问题一直是国际水土保持界关注的重点, 自 20 世纪 70 年代全球粮食危机以来, 人们对水土流失所造成的坡耕地土地生产力的损失给予了极大的关注^[1~4]。全球土地退化评价的数字显示, 由于人类的生产活动已使近 20 亿 hm^2 的土地退化, 其中, 11 亿 hm^2 的土地退化是由于土壤侵蚀造成; 全世界可耕地由于土壤侵蚀每年损失 50~70 万 hm^2 , 到 20 世纪末, 这个数字已达 100 万 hm^2 ^[1]。黄土高原是我国土壤侵蚀最严重地区, 严重侵蚀面积 23.5 万 km^2 , 高强度的土壤流失不仅导致土壤肥力急剧下降, 也导致土地生产力严重丧失。目前, 黄土高原土壤侵蚀与土地生产力的关系研究还处于探索阶段, 多数研究都是定性的评价^[5~7], 量化结果很少, 尤其是对土地生产力的衰退过程和趋势的研究。

本文使用 PI 模型对黄土高原侵蚀环境下坡地土地生产力的自然衰退过程进行了模拟, 探讨了采用水土保持和施肥管理措施下土地生产力的变化趋势, 其结果对该区坡耕地综合治理、对于改善和提高

区域土地生产力水平具有现实指导意义。

1 土地生产力评价模型

生产力指数模型 (PI) 最初由 Neil 提出, 后经 Pierce 等增加根系限制因子修订完成^[8], 用来评价侵蚀对土地生产力的长期影响, 其优点是可进行连续性计算, 精度高, 尤其适合于没有充足的气象、土壤、侵蚀等数据积累的地区。生产力指数模型把根系生长的适宜作为限制因子, 其形式为:

$$PI = \sum_{i=1}^n (A_i \times B_i \times C_i \cdots \times WF_i) (1)$$

式中: PI 是土地生产力指数; A 、 B 、 C ……是根系生长限制因子; WF 是权重因子; n 是土层序号。土地生产力指数 (PI) 变化范围从 0 到 1。权重因子 (WF) 表达了在理想状态下作物根系在 50 cm 土层的分布, 用下面的方程表达:

$$WF = 0.304 - 0.152 \times \log [D + (D^2 + 1.61)^{0.5}] \quad (2)$$

式中: WF 是根系分布数量; D 是计算土层深度 (cm)。将该模型积分, 计算各层根系含量在整个土层的百分比, 以此作为根系权重因子^[8]。

在黄土高原, 土层深厚, 侵蚀强烈, 土壤水和养分极其缺乏, 因此, 土壤侵蚀量、土壤养分含量 (有机质、氮和磷)、土壤有效持水能力、土壤粘粒含量被作为限制作物生长的主要因子, 而 pH 值在该区域变

化很小,可以不考虑。各限制因子的计算模型如下:

1) 土壤侵蚀:在一个区域内,气候、土壤和管理措施类似的条件下,地形条件和植被状况是影响土壤侵蚀的主要因子,尤其在坡耕地。因此,耕地的坡度、坡长和植被盖度因子被作为侵蚀强度的函数,可用如下关系表达:

$$M_p = M_s \times V \times LS \tag{3}$$

式中: M_p 是预测土壤流失量(t/km^2); M_s 是裸地多年平均土壤流失量(t/km^2); V 是作物覆盖因子,它是不同季节生长作物土地与连续休闲地之间流失量的比值^[9]; LS 是坡长坡度因子,采用如下方程计算:

$$LS = (L/22)^m \times (65.41\sin^2s + 4.56\sin s + 0.065) \tag{4}$$

式中: L 是坡长(m); s 是坡度($^\circ$); m 是坡长系数,随坡度变化,见表 1^[9]。

表 1 坡度(s)与坡长系数(m)的关系

Table 1 Relationship land slopes (s) with coefficients of slope length (m)

项目 Item	坡度 Gradient (s)				
	$\leq 0.5^\circ$	$0.6^\circ \sim 1^\circ$	$1.1^\circ \sim 3.4^\circ$	$3.5^\circ \sim 4.9^\circ$	$\geq 5^\circ$
坡长系数 Coefficients(m)	0.15	0.2	10.3	0.4	0.5

2) 土壤养分:黄土高原地区土层深厚,耕作层本质上是处在连续的侵蚀和成土的动态变化过程中。当表层土壤流失后,底层土壤将会通过人类的耕作活动而不断地补充到耕作层,若表层土壤养分得不到有效地补充,其养分含量将会逐渐减少,最终接近黄土母质的养分含量。土壤养分含量使用下式表达:

$$SN_{t+1} = SN_t + k_2 \times M_{st} - k_1 \times M_{st} \times ER_{sn} \tag{5}$$

式中: SN 是土壤养分在某一土层的总量; k_1 和 k_2 是土壤养分在上层和下层含量($\%$); M_{st} 是土壤流失总量; ER_{sn} 是土壤养分在泥沙中的富集率; t 和 $t+1$ 是预测年。养分平衡关系中, $k_1 \times M_{st} \times ER_{sn}$ 表达了表层土壤养分流失的总量, $k_2 \times M_{st}$ 是下层土壤向上层补充的养分总量。

3) 土壤粘粒含量:粘粒含量的多少直接影响着土壤物理化学过程,随着土壤侵蚀的发生和发展,土壤中粘粒颗粒的含量也在不断变化,其变化用下式表达:

$$CC_{t+1} = CC_t + k_2 \times M_{st} - k_1 \times M_{st} \times ER_{sc} \tag{6}$$

式中: CC 是粘粒含量总量; k_1 和 k_2 是在上层和下层的土壤中粘粒含量; M_{st} 是土壤流失量; ER_{sc} 是流失泥沙中粘粒含量的比例; t 和 $t+1$ 是预测年。

4) 可利用水的储存能力:可利用水的储存能力是土壤深度和土壤保水能力的组合,可使用土壤有机质和粘粒在各土层中含量来估算^[10],其形式如下:

$$AWC = 7.7 \times OM - 0.26 \times Clay + 11.19 \tag{7}$$

$$R^2 = 0.79$$

式中: AWC 是某一土层有效土壤储水量($\%$); OM 是该层土壤有机质含量($\%$); $Clay$ 是该层土壤中粘粒含量($\%$)。

2 研究区概况与模拟场景

研究区位于陕西省淳化县泥河沟流域(东经: $108^\circ30'$, 北纬: $35^\circ03'$), 面积 9.48 km^2 , 流域北高南低, 海拔 $1\,193\sim712\text{ m}$ 之间, 呈长条状。塬面占 59.2% , 平均坡度 5° 以上, 沟壑占 40.8% , 坡度多在 25° 以上。流域多年平均气温 9.8°C , $\geq 10^\circ\text{C}$ 活动积温 $3\,281^\circ\text{C}$, 多年平均降水量 600.6 mm , 7、8、9 三个月降水量超过 50% 以上, 暴雨强度高, 年平均侵蚀模数在 $4\,000\sim5\,000\text{ t}$ 。土壤为黄土母质上发育的侵蚀性黄绵土。

研究选用典型样地, 调查土壤、地形地貌以及作物生长状况等指标, 每个样地 X 型采集 $0\sim10$ 、 $10\sim20$ 、 $20\sim30$ 、 $30\sim40$ 和 $40\sim50\text{ cm}$ 混合土样 5 个, 带回室内风干, 过 2 mm 土壤筛, 装瓶保存。测定土壤颗粒组成、有机质、全氮和全磷, 测定方法见《土壤理化分析》^[11], 测定结果见表 2。根系权重因子由方程 4, 依据根系在 50 cm 的分布曲线, 积分计算 $0\sim10$ 、 $10\sim20$ 、 $20\sim30$ 、 $30\sim40$ 和 $40\sim50\text{ cm}$ 各土层根系重量占总根系的百分比分别为: 0.51 、 0.25 、 0.15 、 0.07 和 0.02 。裸地多年平均土壤流失量(M_s)采用淳化县泥河沟流域 1987~2000 年不同坡度径流小区测定值。

模拟场景为自然侵蚀、水土保持措施和施肥管理状况下, 土地生产力的衰退过程。水土保持措施分别为水平梯田、坡式梯田和带状种植。施肥管理是模拟坡式梯田使用保水、保土措施后, 每年施入高有机肥(225 t/km^2)和低有机肥(112 t/km^2)下土地生产力的动态变化过程。

表 2 模拟耕地土壤流失量与主要初始参数
Table 2 Soil loss amount and main modeled parameters

耕地 Farmland	坡度 Gradient (°)	粘粒 Silt (%)	有机质 Organic matter (%)	全氮 Total nitrogen (%)	全磷 Total phosphorus (%)	年均侵蚀量 Annual average erosion (t/km ²)
无侵蚀 No erosion	0	28.57	1.28	0.092	0.122	0
轻度 Mild erosion	6	32.43	1.10	0.079	0.120	598.5
中度 Moderate erosion	12	31.68	0.97	0.057	0.076	1711.3
强度 Intensive erosion	25	29.17	0.93	0.070	0.080	3159.04

3 土地生产力的自然衰退过程

土地生产力的衰退是一个自然的历史过程,其衰退的速度除了受到自然侵蚀过程影响外,还与人类的生产活动所导致的加速侵蚀具有密切的关系。为了能够反映土地生产力在自然侵蚀状态下的衰减趋势,选择不同侵蚀强度的坡耕地,对其生产力衰退过程进行模拟。表 2 给出了典型地块主要初始参数。从给出的主要土壤物理化学指标、年平均侵蚀量能够看出,各参数间具有较大差异,基本反映目前该地区不同侵蚀强度下土地生产力的状况。

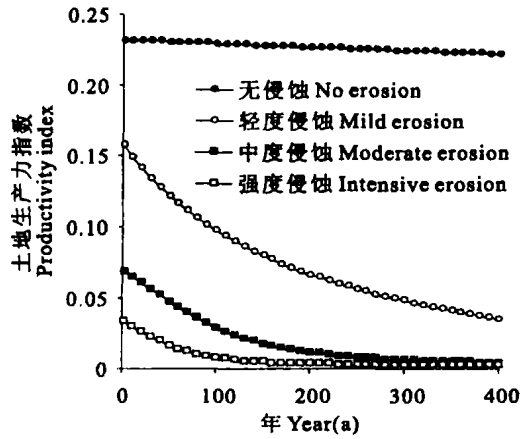


图 1 土地生产力随时间的衰退趋势

Fig. 1 Decline of soil productivity with the time horizon

图 1 显示了四块坡地在不同侵蚀强度下生产力的自然衰退过程。从图中能够看出,土地生产力在无侵蚀耕地衰退相当缓慢,在模拟的 400 年间仅衰退 4.4%,平均每年衰退 0.01%;而侵蚀耕地生产力衰退相当快,尤其在模拟的前 200 年中,轻度侵蚀耕地土地生产力衰减 57.6%,中度侵蚀耕地衰减

83.3%,强度侵蚀耕地衰减 89.9%,可以认为,轻度、中度和强度侵蚀耕地生产力平均每年分别衰减 0.29%、0.42%和 0.45%,最终衰减到一个稳定值,即黄土母质自身的生产力水平。土地生产力指数的这种变化规律与其自身的土壤状况和养分流失规律是一致的。

从上述分析也能看出,泥河沟流域土地生产力水平极低,若无有效的水土保持措施和合理土地投入,就目前该流域土壤侵蚀现状,其生产力平均将以每年 0.25%~0.50%的速度衰减;若将这一结论推广到整个黄土高原,由于土壤流失,土地生产力年平均衰减的上限可达到 1%以上。

4 水土保持措施对土地生产力衰退的影响

水土保持措施能够减缓土地的退化速度和提高土壤质量。为了显示水土保持措施对土地生产力衰退的抑止作用,选择中度侵蚀坡耕地(坡度 12°,年平均土壤流失量:1 700 t/km²)作为模拟样地,对其在采用水土保持措施 A(水平梯田,年平均土壤流失量:0 t/km²)、水土保持措施 B(坡式梯田,年平均土壤流失量:425 t/km²)和水土保持措施 C(等高带状种植,年平均土壤流失量:850 t/km²)后,坡地生产力的衰退过程进行了模拟。从图 2 显示的结果可以看出,三种保持措施下,土地生产力的衰退速度较自然侵蚀下的衰退速度均有一定程度的减缓。采用水土保持措施 A、B 和 C 年均衰退速度为 0.07%、0.15%和 0.21%,较自然状况下土地生产力衰退速度 0.24%,分别减小 0.17%、0.09%和 0.03%,反映出水土保持措施具有明显的减缓土地生产力衰退的作用。

5 施肥管理对坡地土地生产力恢复功能模拟

众所周知,土壤侵蚀改变土壤的物理和化学性质,从而影响土地生产力。而使用水土保持措施能够减缓土地的退化过程,减缓土地生产力的衰退速度,但并不能从根本上改善土地生产力衰退的趋势。要恢复土地生产力,单靠采用有效的保土措施是不够的,还必须从改善土壤的物理和化学性质入手。为了达到此目的,采用中度侵蚀强度坡耕地(坡度12°,年均土壤流失量:1 700 t/km²)作为模拟对象,初始参数见表 2,对其采用水土保持措施 B(坡式梯田,年均土壤流失量:420 t/km²)和连续施入高有机肥 225 t/km² 和低有机肥 112 t/km² 后,土地生产力的变化趋势进行了模拟。

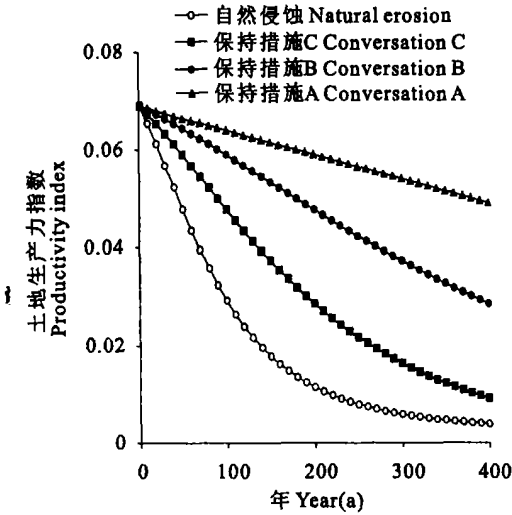


图 2 不同保持措施下土地生产力衰退过程
Fig. 2 Decline of land productivity under different conservation measure

上述分析结果也再一次说明,水土流失区耕地土地生产力的保持和恢复依赖于两个方面的因素,即:有效的水土保持措施和合理的肥力投入,而有效的水土保持措施则是耕地土壤生产力保持的关键,合理的肥力投入则是恢复耕地土地生产力的保障,二者相辅相成,缺一不可,只有达到二者的有机结合,才能达到标本兼治之功效。

6 结论

在土壤流失状况下,泥河沟流域土地生产力衰退速度极快,从轻度侵蚀到强度侵蚀的耕地上,土地生产力年均衰退速度从 0.25%到 0.50%变化,最终衰退到黄土母质土地生产力的水平。可以预知黄土高原土地生产力衰退速率的最高上限可达 1%左右。

图 3 显示了采用保持措施和施用有机肥后土地生产力的变化趋势。图中显示,使用有机肥后土地生产力状况较自然侵蚀过程得到了提高,在高有机肥投入情况下,土地生产力提高速度极快,特别是在前 100 年,土地生产力提高 58%,而低有机肥输入时,土地生产力虽然得到一定的提高,提高幅度相当小,但能够保持现有的土地生产力水平。在 100 年后,无论高有机肥输入还是低有机肥输入土地生产力均呈衰减趋势,分别以年均 0.010%和 0.013%的速度衰减。这是由于,随着土壤的不断流失,表层肥沃土壤逐渐变薄,而表层流失土壤从底土补充土壤中养分含量低,使其总体土壤肥力水平降低,尽管有较高有机肥投入,但仍不能补充其流失养分。同时也说明,在高肥力投入的过程中也造成了更高养分流失的必然结果。

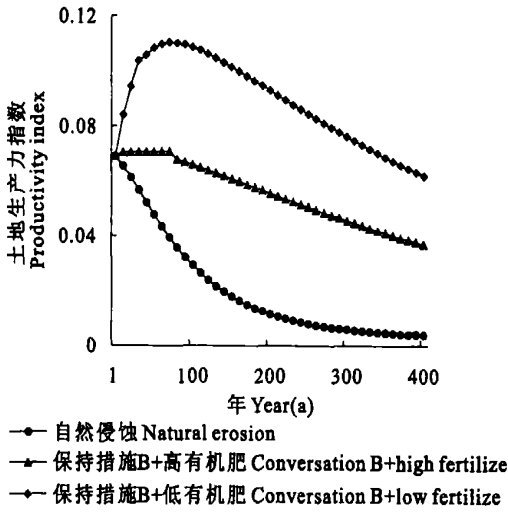


图 3 水土保持措施和施用有机肥条件下土地生产力变化过程
Fig. 3 The variation of land productivity under the condition of used conservation and managements

水土保持措施对土地生产力衰退具有明显的抑制作用,水土保持措施效果越好,对土地生产力衰退的抑制作用就越强,这是保持土地生产力的关键。采用保持措施和合理的施肥能够在一定程度上恢复土地生产力,但这种恢复取决于耕地自身的内在性质和土壤的质量,高肥力土壤其生产力比低肥力土壤对肥料的投入更敏感,高肥料的输入也造成了更高的养分流失。土地生产力的预测对于我们了解侵蚀和生产力变化的关系具有极其重要的意义。但由于土壤的成土过程受到许多因素的影响,尤其是人为活动的参与使成土过程变的极为复杂,而预测结果本身又具有许多不确定性,许多重要的土地生产力的评价价值仍是很难预知,故,模型预测结果仅为理论值,可能与实际土地生产力存在一定的差距,还需

今后进行不断地研究和探索。

7 问题与讨论

预测侵蚀对土地生产力影响的前提条件是要了解侵蚀和土地生产力关系的本质。由于受目前研究技术和手段的限制,人们很难给出一个全面地反映侵蚀和土地生产力关系变化趋势,但这个关系对于制定有效的保持措施、土地资源使用和管理具有极为重要的指导意义。本文给出的侵蚀耕地土地生产力随时间变化的理论曲线,尽管这样的曲线对于任何给定的坡地都有其自身的变化规律,每种土壤、每块耕地生产力变化都不尽相同,甚至许多耕地是无法预知其变化,但它对我们了解侵蚀和生产力变化的关系是极为重要的。

目前,人们对过去的土地生产力水平或它们与土壤发育和退化过程随时间变化的知识了解很少,因此,在加速侵蚀过程中土地生产力的衰减速率只有通过现在的生产力水平来推测。这个过程有两个内在的问题:其一,虽然土地生产力决定于土地的使用和管理效率,但土壤发育和退化过程决定了土壤的内在特征;其二,过去生产力的评价要求人们了解过去土壤侵蚀的知识和与之相关的生产力的变化。加速侵蚀土地生产力初始值的确定对于我们评价过去和现在土地生产力随时间的变化都是极其必要的。

在现代土地生产力评价研究中,人们使用较多的方法是实验和模型模拟,无论是增加或者是减少表土,还是模型模拟法都是建立在一定前提条件之下的,而实际土地生产力的衰减过程与其土地的退化过程是很难分离的,特别是在有人为活动时其变

化就更加复杂。土地生产力的实际衰减比率、加速衰减比率和其经济产量临界值的预测就存在着很大的不确定性。如何客观地、符合实际地确定这些值,就显得极为重要。

参考文献:

- [1] Lal R. Soil erosion and land degradation[J]. The Global Risks. Adv. Soil Science, 1990, 11, 130—172.
- [2] Olson T C. Restoring the productivity of a glacial till soil after topsoil removal[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1997, 32, 130—132.
- [3] Mielke L N, Schepers J S. Plant response to topsoil thickness and to fertilizer on an eroded loess soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1986, 41, 59—63.
- [4] 陈奇伯, 齐 实, 孙立达, 等. 黄土丘陵区坡耕地土地退化研究[J]. 水土保持通报, 2004, 24(1), 12—15.
- [5] 李鹏, 赵 忠, 李占斌. 黄土高原沟坡土地生产力评价的指标体系与评价方法[J]. 土壤与环境, 2001, 10(4), 301—306.
- [6] 陈奇伯, 齐 实, 孙立达, 等. 半干旱黄土丘陵区坡耕地径流损失对土地生产力的影响研究[J]. 水土保持通报, 2001, 21(5), 6—9.
- [7] 陈奇伯, 齐 实, 孙立达, 等. 宁南黄土丘陵区坡耕地土壤侵蚀对土地生产力影响研究[J]. 北京林业大学学报, 2001, 23(1), 24—37.
- [8] Pierce F J, Larson W E, Dowdy R H, et al. Productivity of soils: assessing long-term changes due to erosion[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1983, 38, 39—44.
- [9] Renard G K, Foster G R, Weesies G A, et al. RUSLE revised universal soil loss equations[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1991, 46(1), 30—33.
- [10] Kern J S. Geographic patterns of soil water-holding capacity in the contiguous United States[J]. Soil Science Society American Journal, 1995, 59, 1126—1133.
- [11] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1978.

Study on the decline process and instauration path of land productivity on the sloping land in the Southern Loess Plateau

LI Guang-lu

(College of Resources Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Using the PI model this paper simulates the changing trend of the land productivity under the natural process, soil conservation and fertilization on the sloping lands in the southern Loess Plateau. The results show as follows: the decline speed of the sloping land productivity under the nature process is very quick, the productivity annually reduces averagely by 0.25% to 0.5%; the decline speed under the soil conservation decreases by 0.07% (level terrace), 0.15% (sloping terrace) and 0.21% (contour plant), compared with the nature erosion; the land productivity get obvious instauration as the measures of soil conservation and fertilizer are applied; The soil conservation measure can decrease the decline speed of the land productivity, but can't effectively recover the productivity; only application of the soil conservation measure along with fertilization can retrieve and enhance the land productivity.

Keywords: model; soil erosion; land productivity; Loess Plateau