

# 黄土高原水土保持措施强化降雨入渗分析及灰色预测

张升堂<sup>1</sup>, 拜存有<sup>1</sup>, 万三强<sup>2</sup>

(1. 杨凌职业技术学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 延安市宝塔区延惠渠管理处, 陕西 延安 716000)

**摘要:** 黄土高原水土流失综合治理是以强化降雨入渗, 减少地表径流, 阻止土壤侵蚀为目的。因此, 治理区降雨入渗量的大小是衡量水土流失治理效果的关键指标之一。目前入渗量的计算多利用年总降雨量, 由于在黄土地区小雨量或小强度的降雨具有与水土流失治理的零相关性, 因而会导致对水土流失综合治理强化入渗作用估计的较大误差。提出用 1<sub>a</sub> 中产生径流的次降雨总量 (产流降雨总量) 计算入渗量。以西川河流域为例, 采用 1997—2001 年的降雨径流资料, 分别用年降雨总量与产流降雨总量推求降雨入渗系数, 对比分析了入渗量随流域水土流失治理度的变化, 结果表明: 利用产流降雨总量能比较清晰地反映流域治理程度对降雨入渗的影响。在此基础上, 采用 GM(1, 1) 灰色动态模型预测西川河流域降雨入渗量随水土流失治理度的变化趋势。结果表明, GM(1, 1) 灰色模型能够合理地预测黄土高原水土保持措施对自然流域入渗量影响的变化趋势。

**关键词:** 水土保持; 降雨入渗量; 灰色动态模型

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2004)02-0029-05

中图分类号: S157.1

## Analyses and Prediction on Soil and Water Conservation Measure's Intensifying Infiltration in the Loess Plateau of China

ZHANG Sheng-tang<sup>1</sup>, BAI Cun-you<sup>1</sup>, WAN San-qiang<sup>2</sup>

(1. Yangling Vocational and Technical College, Yangling 712100, Shaanxi Province, China;

2. Yanhui Channel Management Bureau of Yan'an City, Yan'an 716000, Shaanxi Province, China)

**Abstract** Soil and water conservation measures (SWCM) of the Loess Plateau could control soil erosion by intensifying the infiltration and weakening the runoff. Therefore, the infiltration quantity is one of the important indexes that scale the effect of the soil and water conservation. The infiltration quantity was often calculated by the annual rainfall which products runoff. However, the little quantity rain or low intensity rain in the year has nothing to do with the conservation in the Loess Plateau. It could lead to the estimation error about the change of infiltration with SWCM. The infiltration varying with the catchment SWCM level incensement is studied based on the data of rainfall and runoff of the Xichuan catchment during 1997 to 2001. A gray dynamic model is put forward to the infiltration quantity tendency in the Xichuan catchment was predicted by a gray dynamic model, GM(1, 1). The result indicates that the annual rainfall which can product runoff shows the effect of SWCM on infiltration more clearly than the total annual rainfall. The gray dynamic model can be used to predicat the tendency of infiltration.

**Keywords** soil and water conservation; infiltration; the gray dynamic model

### 1 前言

黄土高原是一个干旱缺水的地区,同时也是我国水土流失最为严重的地区。水土流失严重制约该地区社会经济发展和人民生活水平的提高。近十几年来,由于认识到水土流失的严重危害,该地区投入大量人力、物力行了大规模的流域水土保持综合治理,从多年的流域治理经验看,水力侵蚀是引起该地区水土流

失的主要因素,设法纳蓄降水,强化入渗,从而减少地表径流一直是流域水土治理的关键。因此,有必要对黄土高原水土治理的强化入渗量进行分析研究,其分析研究对流域综合治理具有重要意义。

在水土保持治理效益分析中,目前多以年降雨总量及年径流量推求径流系数,根据径流系数变化趋势分析衡量流域水土治理的减水效益<sup>[1]</sup>;或是以单项措施下试验径流场的产流分析确定其减水效益<sup>[2-4]</sup>,从

而确定水土保持的强化入渗作用。由于年降雨总量中包括许多场次在黄土高原地区一般不产生径流,而是全部入渗的小雨量或小强度降雨,如果将这部分降雨计入水土保持措施的拦蓄量,这样势必夸大了水土保持的强化入渗效果,同时实际流域的治理不及试验径流场完善,水土保持措施在实际流域上的降雨强化入渗作用不同于试验径流场。因此,以何种方式计算入渗量能明确反映水土保持对入渗的强化作用,如何预测以天然流域为单元的水土保持作用下入渗量的变化趋势等问题日益引人关注。

本文利用天然流域的降雨、径流资料对水土保持的强化入渗效果进行了对比和分析,并且通过建立 GM(1, 1)灰色动态模型,对强化入渗量的变化趋势进行了预测<sup>[5-6]</sup>。

## 2 流域简介

西川河属于黄河的 2 级支流,主河道长为 65.3 km,年平均径流量为  $2.90 \times 10^7 \text{ m}^3$ 。西川河流域面积为  $801.10 \text{ km}^2$ ,海拔在 800~1600 m 之间,地处延安市、安塞县、志丹县交汇之处,流域地貌类型有黄土梁峁状丘陵沟谷地貌及河谷阶地地貌,分别占总面积的 70% 和 30%。流域内支流、支沟交错,使流域地貌呈现支离破碎、梁峁起伏、沟道密布的形状。多年平均水面蒸发量为 898~1068 mm,多年平均降水量为 547~552 mm。

西川河流域属强度土壤侵蚀区,年土壤侵蚀模数在  $5000 \sim 10000 \text{ t/km}^2$ 。严重的水土流失导致生态环境恶化,已成为制约该地区经济发展和人民生活水平提高的主要因素,于是近 10 a 来,该流域开展禁止陡坡开荒,进行陡坡退耕还林还草,增加林草植被覆盖率等水土保持治理措施,特别是 1997~2001 年林草面积增长 1 倍多,林草面积变化见表 1。

表 1 西川河流域 1997—2001 年林草面积变化 %

年份	1997	1998	1999	2000	2001
林草面积	32.6	37.4	41.9	63.0	71.0

## 3 材料与方法

### 3.1 降雨入渗量推求

由于黄土高原土层深厚,一般入渗水量难以到达地下水,形成地下径流,故可以建立黄土高原地区流域水量平衡模型:

$$P = I + R + E + C \quad (1)$$

式中:  $P$ ——降雨量;  $I$ ——入渗量;  $R$ ——径流量,

实际仅有地表径流部分;  $E$ ——蒸散发量;  $C$ ——植被截留量。

由于该地区植被覆盖率较低,植被截流量  $C$  可以忽略,同时黄土地区降雨一般历时较短,且降雨过程地表水汽近于饱和,故雨期蒸发量  $E$  也可忽略不计,非雨期蒸散发实际消耗的是雨期的降雨入渗水量。因此,黄土高原降雨在流域面的水量分配为 2 部分:入渗量  $I$  及径流量  $R$ , 则黄土高原地区流域水量平衡模型简化为:

$$P = I + R \quad (2)$$

$$I/P + R/P = 1 \quad (3)$$

$$T + U = 1 \quad (4)$$

式中:  $T$ ——降雨径流系数;  $U$ ——为降雨入渗系数。

西川河流域有 6 个雨量站,1 个水文站,具有长期降雨与径流资料,分别利用 1997 年该地区大规模植树种草以来的各年降雨总量与产流降雨总量,求径流系数进行比较分析。该流域雨量站及水文站均属国家基本网站,降雨与径流资料可靠且满足研究要求。

### 3.2 GM(1, 1)灰色预测模型

由于该流域农业属旱区雨养农业,这样大规模水土治理情况下入渗量的变化趋势将决定该地区农业结构调整和今后的发展方向。因此有必要对水土治理的强化入渗量变化趋势进行预测。

建立 GM(1, 1)灰色预测模型,预测随流域治理程度的逐年提高降雨入渗系数的变化趋势。利用逐年下渗系数构造原始统计数据序列:

$$U^{(0)} = \{U^{(0)}(1), U^{(0)}(2), \dots, U^{(0)}(n)\} \quad (5)$$

作一阶累加生成新的数据序列  $U^{(1)}$ :

$$U^{(1)} = \{U^{(1)}(1), U^{(1)}(2), \dots, U^{(1)}(n)\} \quad (6)$$

$$\text{式中: } U^{(1)}(i) = \sum_{k=1}^i U^{(0)}(k)$$

相应的灰微分方程为:

$$\frac{dU^{(1)}}{dt} + aU^{(1)} = u \quad (7)$$

式中:  $a, u$ ——待辨识参数。

GM(1, 1)灰色预测模型系数参量:

$$\hat{a} = \begin{bmatrix} a \\ u \end{bmatrix} \quad (8)$$

用最小二乘法对  $\hat{a}$  求解得:

$$\hat{a} = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (9)$$

式中:  $X$ ——累加生成矩阵;  $Y$ ——数据向量。  $X, Y$  值计算见下式:

$$X = \begin{Bmatrix} -1/2[U^{(1)}(2) + U^{(1)}(1)] & 1 \\ -1/2[U^{(1)}(3) + U^{(1)}(2)] & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -1/2[U^{(1)}(n) + U^{(1)}(n-1)] & 1 \end{Bmatrix} \quad (10)$$

$$Y = [B^{(0)}(2), B^{(0)}(3), \dots, B^{(0)}(n)]^T \quad (11)$$

时间响应函数离散化得 GM(1, 1)灰色模型为:

$$\hat{U}^{(1)}(t+1) = (U^{(0)}(1) - \frac{u}{a})e^{-at} + \frac{u}{a} \quad (12)$$

对  $U^{(1)}$  还原得到  $U^{(0)}(t+1)$  的估算值  $\hat{U}^{(0)}(t+1)$

$$\hat{U}^{(0)}(t+1) = \hat{U}^{(1)}(t+1) - \hat{U}^{(1)}(t) \quad (13)$$

### 3.3 精度检验

对模型预测精度分别采用 3 种方法进行检验

(1) 残差检验 模型残差序列如下:

$$X^{(0)} = \{\hat{X}(1), \hat{X}(2), \dots, \hat{X}(n)\} = \{U^{(0)}(1) - \hat{U}^{(0)}(1), U^{(0)}(2), \hat{U}^{(0)}(2), \dots, U^{(0)}(n) - \hat{U}^{(0)}(n)\} \quad (14)$$

则有相对误差序列:

$$\Delta = \left\{ \left| \frac{\hat{X}(1)}{U^{(0)}(1)} \right|, \left| \frac{\hat{X}(2)}{U^{(0)}(2)} \right|, \dots, \left| \frac{\hat{X}(n)}{U^{(0)}(n)} \right| \right\} = \{\Delta_k | (k = 1, 2, \dots, n)\} \quad (15)$$

平均模拟相对误差:

$$\Delta = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \Delta_k \quad (16)$$

(2) 后验差检验  $U^{(0)}$  均值:

$$\bar{U} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n U^{(0)}(t) \quad (17)$$

方差:

$$s_1^2 = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n [U^{(0)}(t) - \bar{U}]^2 \quad (18)$$

残差均值:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n X^{(0)}(t) \quad (19)$$

残差方差:

$$s_2^2 = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n [X^{(0)}(t) - \bar{X}]^2 \quad (20)$$

后验差比值:

$$C = s_2 / s_1 \quad (21)$$

(3) 小误差概率  $p$  检验 小误差概率:

$$p = P(|X^{(0)}(t) - \bar{X}| < 0.6745s_1) \quad (22)$$

对以上 3 种检验,有分级标准见表 2

## 4 结果与分析

分别利用年降雨总量及产流降雨总量计算 1997—2001 年该流域  $U$  值及  $T$  值,结果见表 3

表 2 检验指标的分级标准

精度	$\Delta$ 及 $\Delta_n$	$C$	$P$	等级
良好	$\Delta, \Delta_n \leq 0.01$	$C \leq 0.35$	$0.95 \leq p$	1
合格	$0.01 < \Delta, \Delta_n \leq 0.05$	$0.35 < C \leq 0.50$	$0.80 \leq p < 0.95$	2
勉强	$0.05 < \Delta, \Delta_n \leq 0.10$	$0.50 < C \leq 0.65$	$0.7 \leq p < 0.80$	3
不合格	$0.10 < \Delta, \Delta_n$	$0.65 < C$	$p < 0.70$	4

表 3 西川河流域 1997—2001 年入渗系数计算

年份	径流量 / $m^3$	年降雨总量 / mm	产流降雨总量 / mm	径流深 / mm	$T_1$	$T_2$	$U_1$	$U_2$
1997	2506933	303.80	44.80	3.13	0.0103	0.0699	0.9897	0.9301
1998	4125665	561.40	93.64	5.15	0.0092	0.0550	0.9908	0.9450
1999	3217311	417.70	85.98	4.02	0.0096	0.0468	0.9904	0.9532
2000	5834936	399.10	161.11	7.28	0.0182	0.0452	0.9818	0.9548
2001	7257939	527.90	219.30	9.06	0.0172	0.0413	0.9828	0.9587

表 3 中  $T_1, U_1$  为用年降雨总量推求的径流系数及入渗系数,  $T_2, U_2$  为用产流降雨总量计算的径流系数及入渗系数, 作  $U_1, U_2$  的 1997—2001 逐年变化图, 见图 1, 2

由图 1 可以看出, 利用年降雨总量推求的入渗系数  $U$  年际变化趋势不明显, 甚至会出现随治理程度逐年提高而入渗系数  $U$  反而降低。例如: 该流域 1999 年到 2000 年林草面积提高 21.1%, 而入渗系数  $U$  反而降低。这是因为  $U_1$  的推求采用年降雨总量, 年降雨总量包括 1a 中许多场次的小雨量或小强度降雨, 这种降雨无论流域下垫面是否治理均不产生径流, 而是

全部入渗, 这样的降雨在黄土高原年降雨总量中占相当大比例。它的计入使得由年降雨总量推求的入渗量  $U_1$  远大于由产流降雨总量推求的入渗量  $U_2$  (见表 3), 实际上夸大了水土保持的强化入渗效果。例如: 1997 年降雨总量为 303.8 mm, 产流降雨总量仅 44.8 mm, 其余 259 mm 降雨则是全部入渗不产生径流。这部分全部入渗降雨中包括 2 类: 第 1 类是小雨量降雨, 无论下垫面治理与否均不产生径流, 具有与水土保持零相关性; 第 2 类是由于水土保持治理作用, 流域下垫面拦蓄降雨的能力提高, 由原来可能产生径流的降雨转换为无径流产生的降雨。正是由于全部入渗降雨中

第 1类降雨的与流域治理零相关性,它的存在遮掩了水土保持治理措施对降雨的真实强化入渗作用,结果导致由年降雨总量推求的入渗量  $U_1$  随年际水土治理水平的提高无明显变化规律。可见如果以  $U_1$  作为衡量水土保持治理的减水效益指标将产生很大的误差,甚至导致错误。

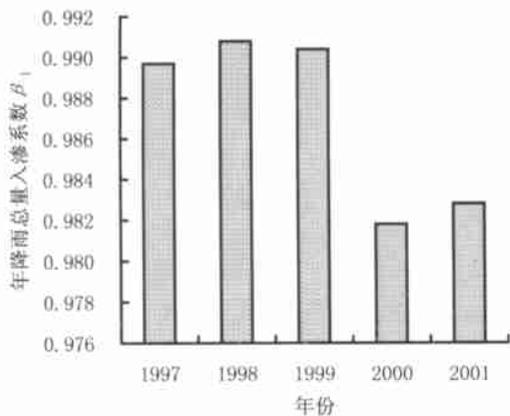


图 1 1997—2001年  $\beta_1$  系数变化

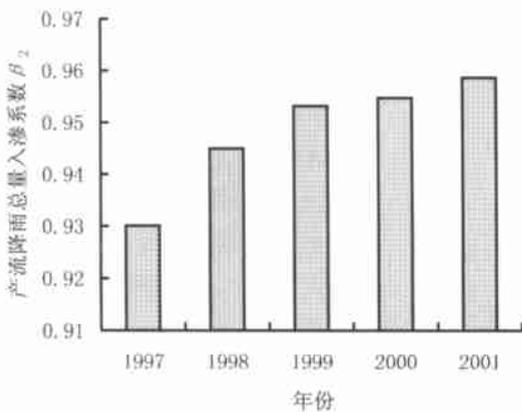


图 2 1997—2001年  $\beta_2$  系数变化

而  $U_2$  采用的降雨量为产流降雨量之和,去掉了不产生径流的次降雨量,这样就能明确地反映流域水土保持对降雨的强化入渗作用。作林草面积  $A$  (%) 及入渗系数  $U_2$  逐年变化图(图 3),可以看出入渗系数  $U_2$  与林草面积  $A$  均逐年递增,两者有明显的相关性,

利用回归分析建立  $U_2$  与同期流域林草治理面积的相关关系:

$$U_2 = 0.0287 \ln A + 0.8381 \quad R^2 = 0.7236 \quad (23)$$

由式 (23) 可以明显看出  $U_2$  与水土保持治理面积  $A$  的自然对数成一次正相关关系,且相关程度高,能够较好地反映流域水土保持治理程度的逐年提高对流域降雨入渗量的影响。

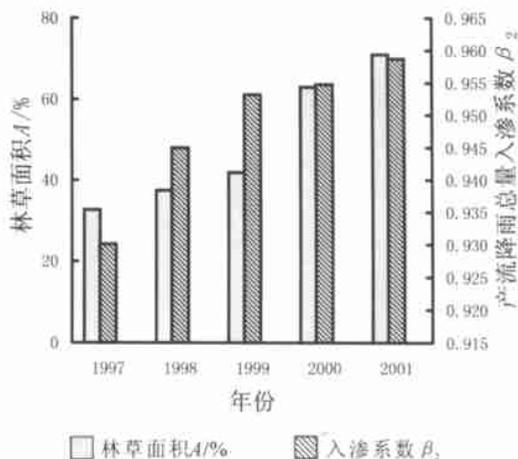


图 3 1997—2001年  $A, \beta_2$  逐年变化

利用上述  $U_2$  计算成果,建立  $GM(1, 1)$  灰色预测模型,预测该流域水土保持强化入渗量的变化趋势。则有原始数据序列  $U^{(0)}$

$$U^{(0)} = \{0.9301, 0.9450, 0.9532, 0.9548, 0.9587\}$$

得  $GM(1, 1)$  灰色模型为

$$\hat{U}^{(1)}(t+1) = (U^{(0)}(1) - \frac{u}{a})e^{-at} + \frac{u}{a} = 191.18921e^{0.00494t} - 190.25911$$

利用  $\hat{U}^{(0)}(t+1) = \hat{U}^{(1)}(t+1) - \hat{U}^{(1)}(t)$  计算逐年下渗系数估计数列  $\hat{U}^{(0)}(i)$  成果见表 4

由于  $\Delta = 1.51E - 3 < 0.01$  且  $\Delta_5 = 2.40E - 3 < 0.01$  残差检验精度为一级。

方差  $s_1^2$  和残差方差  $s_2^2$  分别为  $1.0331E - 4, 2.0984E - 6$ , 则后验差比值  $C = \frac{S_2}{S_1} = 0.143 < 0.350$ , 则后验差检验精度为 1 级。

表 4  $GM(1, 1)$  统计量计算

年份	$U^{(0)}(t)$	$\hat{U}^{(0)}(t)$	$X^{(0)}(t)$	$\Delta t$	$ X^{(0)}(t) - \bar{X} $
1997	0.9301	0.9301	0.00E - 3	0.00E - 3	0.76E - 3
1998	0.9450	0.9468	- 1.80E - 3	1.90E - 3	1.04E - 3
1999	0.9532	0.9515	1.70E - 3	1.78E - 3	2.46E - 3
2000	0.9548	0.9562	- 1.40E - 3	1.47E - 3	0.64E - 3
2001	0.9587	0.9610	- 2.30E - 3	2.40E - 3	1.54E - 3
均值	0.9484	0.9491	- 0.76E - 3	1.51E - 3	—

## [参 考 文 献]

$|X^0(t) - \bar{X}| < 0.6745s_1 = 6.839E - 3$ , 则小误差概率  $p = p(|X^0(t) - \bar{X}| < 0.6745s_1) = 1 > 0.95$ , 小误差概率检验精度为 1 级。模型经 3 种检验均为 1 级, 这样理论上就可用该模型预测 1997 年后任意年的降雨入渗量, 从而指导流域农业结构调整及发展方向, 但应指出预测年份愈远其误差会愈大。

在黄土高原降雨入渗量会随流域水土保持治理程度的逐年提高而增加, 传统的采用年降雨总量推求入渗系数的方法难以明确体现水土保持治理措施强化入渗, 减少地表径流的趋势, 而利用产流降雨总量推求的入渗系数与流域水土保持治理面积有较高相关程度, 其径流系数随治理程度提高而增大, 可以反映水土保持对入渗量的强化作用。并利用 GM(1, 1) 灰色动态预测模型预测了该流域维持当前水土保持逐年提高水平下, 入渗量的变化趋势。利用 3 种方法检验模型精度均为 1 级, 所以可以用该模型预测流域的入渗量, 指导流域农业结构调整及发展方向。

- [1] 王兴中. 低效防护林改造的水文效益 [J]. 水土保持通报, 1997, 17(4): 1-7.
- [2] Ingrid Takken. Effects of tillage on runoff and erosion patterns [J], Soil & Tillage Research, 2001, 61: 55-60.
- [3] 焦菊英, 王万忠, 等. 黄土高原不同降雨条件下水平梯田的减水减沙效益分析 [J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999, 9(3): 59-63.
- [4] Jalota S K. Straw management and tillage effects on soil water storage under field conditions [J]. Soil use and Management, 2001, 17: 282-287.
- [5] 聂相田, 邱林, 等. 水资源可持续利用管理不确定性分析方法及应用 [M]. 郑州: 黄河水利出版社, 1999. 68-80.
- [6] 李如忠, 汪家权, 等. 基于灰色动态模型群法的河流水质预测研究 [J]. 水土保持通报, 2002, 22(4): 10-12.
- [7] 朱显谟, 田积莹. 强化黄土高原土壤渗透及抗冲性的研究 [J]. 水土保持学报, 1993, 7(3): 1-10.
- [8] 吴钦孝, 赵鸿雁. 黄土高原森林水文生态效应和林草适宜覆盖指标 [J]. 水土保持通报, 2000, 20(5): 32-34.

## 《黄土高原植被建设》一书出版发行

由梁一民研究员主编的《黄土高原植被建设》一书已于 2003 年 10 月由黄河水利出版社出版发行。

本书通过大量黄土高原植被、地貌等实景图片, 全面而客观地反映了黄土高原主要天然植被类型及其地带性分布规律, 各种植被类型的外貌特征及内部结构, 同时结合实际论述了该区人工建设林草植被必须遵循的基本原则与途径。

本书图片与文字相结合, 既具有较强的科学性和系统性, 又给人以清晰、直观的感觉, 对于从事水土保持和生态环境建设的广大科技人员、教学人员、研究生及领导干部均有一定的参考价值 and 收藏价值。

本书全书采用铜版纸彩色印刷, 印制精美, 定价 80 元, 需要购买者请与吕惠明先生联系。

联系地址: 陕西省杨陵区中国科学院水利部水土保持研究所

联系电话: (029) 87012872

邮政编码: 712100