

土壤侵蚀模拟的高维指数非线性模型及 参数辨识方法研究

李娜¹, 魏永霞¹, 严昌荣², 张忠学¹

(1. 东北农业大学 水利与建筑学院, 哈尔滨 150030; 2. 中国农业科学院 农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081)

摘要:针对常规土壤侵蚀经验统计模型适用性不强、模拟精度不佳等问题,对灰色离散序列高阶动态模型进行合理扩展,建立了多变量高维指数非线性模型,通过 MATLAB 寻优,实现了非线性模型中参数的搜索——辨识。该模型具有信息包容量丰富、信息开发利用潜力大、适用范围广等特点。人工降雨条件下的坡耕地土壤侵蚀模拟结果表明:模型有效系数 > 0.91 , 平均误差率 $< 6.2\%$, 模拟精度较高。

关键词:土壤侵蚀; 模型; 参数辨识; 人工降雨; 模拟精度

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2009)02-0038-04

Study on the Soil Erosion Simulation Model of the High-dimension Non-linear Index Model GWS and Its Parameters Identification Method

LI Na¹, WEI Yong-xia¹, YAN Chang-rong², ZHANG Zhong-xue¹

(1. Water and Civil Engineering College, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China; 2. Institute of Environment and Sustainable Development on Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Science, Beijing 100081, China)

Abstract: Aiming at the problems of applicability and simulation precision of the routine experienced statistical soil erosion models, based on the reasonable extension of the high-order grey dispersed array dynamic model, a multivariable high-dimension non-linear index model was established. Through the optimization by MATLAB, the searching and identification of the parameters in the non-linear model was come true. There are many characters of rich volume of information, huge potential for development and utilization and wide application scope on this model. In the case of artificial rainfall, the simulation results of soil erosion in sloping farmland indicated that the valid coefficient of the model > 0.91 , the average error rate $< 6.2\%$, the stimulation precision is fairly high.

Key words: soil erosion; model; parameter identification; artificial rainfall; simulation precision

土壤侵蚀是导致土地资源退化乃至彻底破坏的主要原因,作为可持续发展中的重要环节,土壤侵蚀已成为恶化生态环境、制约农业生产的重要因素^[1]。土壤侵蚀预报是有效监测土壤侵蚀和评估水土保持措施效益的手段,土壤侵蚀模型则是进行土壤流失监测和预报的重要工具^[2]。根据土壤侵蚀模型建模手段和方法的不同,一般可分为经验统计模型和物理成因模型。

经验统计模型主要从侵蚀因子角度入手,通过观测资料和统计技术,研究侵蚀量与降雨、植被、土

壤、地形、水土保持措施等因子之间的关系式,经验模型关系式简单,计算方便,具有可靠的精度。经验统计模型以美国通用土壤流失方程(Universal soil loss equation)^[3]和修正的通用土壤流失方程(Revised universal soil loss equation)为典型代表^[4]。物理成因模型以土壤侵蚀的物理过程为基础,利用水文学、力学、土壤学、河流泥沙动力学以及其他相关学科的基本理论,根据已知降雨及径流条件来描述土壤侵蚀产沙过程,预报在给定时段内的土壤侵

* 收稿日期: 2008-09-08

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2006BAD29B01、2007BAD88B01); 黑龙江省重点科技攻关项目(GB06B106-3); 东北农业大学科技创新团队项目(CXT003-2-3)

作者简介: 李娜(1984-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水土保持理论与技术。E-mail: linaks2008@126.com

通信作者: 魏永霞(1961-), 女, 教授, 主要从事水土保持理论与技术、农业节水与水资源可持续利用研究。E-mail: wyx0915@163.com

蚀量,它是微观上的土壤侵蚀模型。理论上来说,物理成因模型的计算精度更高,但由于我国坡面物理过程研究尚处于起步阶段,研究力量薄弱。使得模型在实用性及通用性方面很受限制,且预报模型的精度也不高。所以继续强化对经验模型的研究,无疑可以进一步满足水土流失定量评价及水土保持决策等不同生产实践的迫切要求。

1947 年马斯格雷夫 (Musgrave) 综合分析降雨、坡度、坡长、土壤可蚀性以及植被对土壤侵蚀的影响,建立了最早的多变量降雨产沙量经验统计模型^[5]。

$$A = R^1 S^2 L^3 C^P$$

(1)

式(1)的一般柯布 - 道格拉斯形式为

$$A = \prod_{i=1}^{m_1} X_{1i} \cdot \prod_{i=m+1}^m X_{2i}^i$$

(2)

式中: A ——年土壤侵蚀模数; R ——降雨侵蚀力因子; S ——坡度因子; L ——坡长因子; C ——土壤可蚀性因子; P ——植被因子。 $1、2、3、$ 为待定参数, $\{X_{1i}\}、\{X_{2i}\}$ 为降雨侵蚀影响因子集,侵蚀因子集 $\{X_{1i}\}$ 中各因子的弹性系数为 1,侵蚀因子集 $\{X_{2i}\}$ 中第 i 个因子的弹性系数为 i ,即

$$\begin{cases} \frac{\partial A}{\partial X_{1i}} \cdot \frac{X_{1i}}{A} = 1 \\ \frac{\partial A}{\partial X_{2i}} \cdot \frac{X_{2i}}{A} = i \end{cases}$$

(3)

由于降雨侵蚀过程的复杂性,土壤侵蚀模数随侵蚀影响因子的变化一般具有高维、非线性、非正态分布特征,建立柯布 - 道格拉斯函数模型及各种常规统计模型一般很难获得良好效果^[6],这是由模型本身的结构、功能与适应性决定的。即使在严格控制的试验条件下,常规柯布 - 道格拉斯函数型统计模型的模拟优度、精度往往并不理想。而通用土壤流失方程及其各种改进模型,也因需要大量的参数信息,求出修正值而导致模型通用性差、预报效果不佳乃至误差很大。本试验在黑龙江省齐齐哈尔市甘南县兴隆乡东兴村径流小区进行,基于灰色离散序列高阶动态^[7-8]模型的扩展,建立了高维指数非线性模型。既可用于单变量系统建模,也可用于多变量系统建模。

1 高维指数非线性 GWS (n , m) 模型构建及参数辨识

1.1 模型构建

对单自变量非正态、非线性系统输出观测数据序列 $\{X\} = [\{x_1\}, \{x_2\}, \dots, \{x_m\}]$,按其变动特征作变量变换 $y(x) = f\{E(x)\}$,当 $\{y(x)\}$ 序列具有单指数或多单指数复合衰减特征时,可采用孙全敏等在文献^[7-8]中提出的灰色离散序列高阶动态 GMS

(n , 1) 模型进行灰色参数反馈辨识。

$$\hat{y}(x) = B_0 + \sum_{k=1}^n B_k e^{-kx}$$

(4)

式中: $B_0、\{B_k\}、\{a_k\}$ 为待定系数。

式(4)适用于增量呈多指数复合衰减的有限增长特征。令 $a_k = -ku$,可将(4)式变形为单变量高维指数非线性 GWS (n , 1) 模型。

$$y(x) = B_0 + \sum_{k=1}^n B_k e^{-kux}$$

(5)

式中: $B_0、\{B_k\}$ ——待定系数; u ——待搜索参数; n ——广义维数。

即单变量模型可扩展为广义 n 维指数线性组合模型。由(5)式得:

$$\frac{dy(x)}{dx} = - \sum_{k=1}^n k B_k e^{-kux}$$

$$a_x = \frac{dy(x)}{dx} \cdot \frac{x}{y(x)} = - \sum_{k=1}^n k B_k e^{-kux} / [B_0 + \sum_{k=1}^n B_k e^{-kux}]$$

(6)

当 $u > 0$ 时, $\lim_{x \rightarrow \infty} y(x) = B_0; \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{dy(x)}{dx} = 0; \lim_{x \rightarrow \infty} a_x = 0$ 。即 $\frac{dy(x)}{dx}、a_x$ 都具有振荡递减变化特征。因此,式(5)具有振荡递减非线性、非正态行为特征。

对自变量系统: $\{X\} = [\{x_1\}, \{x_2\}, \dots, \{x_m\}]$,其输出观测数据序列为 $\{E(x)\}$,按式(5)进行单变量高维非线性模拟,取复相关系数平方 $\{R_k^2\}$ 为最大值的自变量作为主变量,其余自变量为辅助变量,多变量高维指数非线性 GWS (n , m) 模型的一般形式如式(7)。

$$y(x) = B_0 + \sum_{k=1}^n B_k e^{-kux_1} + \sum_{k=1i=2}^{n-m} C_{ki} \cdot X_i^{k u} \cdot e^{-kux_1}$$

(7)

式中: $\{x_1\}$ ——主变量数据序列; $\{x_2\} \dots \{x_m\}$ ——辅助变量数据序列, ——选择参数,一般情况下取 $= 1$ 或 $= 1/n$,式(7)中第二项为主变量作用项,第三项为辅助变量作用项。

高维指数非线性模型仍以误差平方和极小化作为判别准则,采用最小二乘法进行参数搜索与辨识。

1.2 参数辨识

对于单自变量高维指数非线性 GWS (n , 1) 模型(4)式,先取高维阶数 j ,任意给出待搜索参数初始值 u_0 ,设中间变量为

$$G_k(x, u_0) = e^{-ku_0 x} \quad k = 1, 2, 3, \dots, j$$

(8)

则(4)式变形为

$$y(x) = B_0 + \sum_{k=1}^j B_k G_k(x, u_0)$$

(9)

对于既定的维数 j ,通过 MATLAB 语言可搜索出误差平方和 Q 极小化条件下待搜索参数的优化值 $u(j)$,改变阶数 j 的取值,搜索出对应的 $u(j)$ 值,取 $u = \max\{u(j)\}$ 作为最终的待搜索参数优化

值,相应的维数 n 随之固定。

对于多变量高维指数组合非线性 GWS(n, m), 模型式(7), 先采用式(8), (9) 搜索出各自变量的维数及待搜索参数的优化值, 找出主变量和辅助变量。设主变量作用项的中间变量 $G_k(x_1, u_0) = e^{-kux_1}$ 、辅助变量作用项的中间变量 $U_{ki}(x_i)$ 分别为

$$\begin{cases} G_k(x_1, u) = e^{-kux_1} \\ U_{ki}(x_i) = x_i^{ku} \cdot G_k(x_1, u) = x_i^{ku} \cdot e^{-kux_1} \end{cases} \quad (10)$$

则(7)式可简化为

$$y(x) = B_0 + \sum_{k=1}^n B_k G_k(x_1) + \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^m C_{ki} U_{ki}(x_i) \quad (11)$$

以主变量维数作为式(11)的基本维数, 重新给出待搜索参数的初始值 u_0 , 生成式(10)中各作用项中间变量序列, 搜索出式(11)在误差平方和 Q 极小化条件下待搜索参数的优化值 u_{\max} 。

2 GWS(n, m) 模型应用

2.1 试验设计

采用人工降雨试验获取观测数据。试验在黑龙江省齐齐哈尔市甘南县兴隆乡东兴村径流小区进行。人工降雨径流小区长 4 m, 宽 2 m, 以当地主要大田作物大豆为供试作物, 水土保持耕作措施包括免耕覆盖和少耕两种, 以常规耕作为对照, 以研究两种措施的水土保持效应。同时设不同坡度的裸地和 大豆地小区, 以研究耕地植被、坡度对土壤侵蚀的影响。小区布置如图 1 所示:

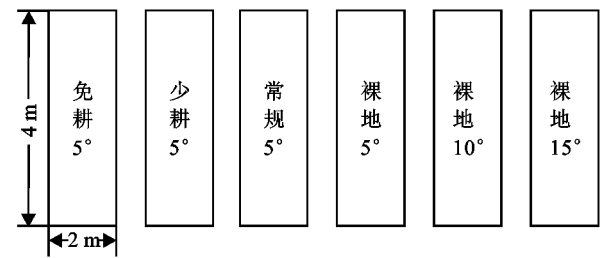


图 1 小区布置图

试验 1: 降雨强度、坡度 - 累积土壤侵蚀量组合试验。该试验在 3 个裸地径流小区中进行, 试验前

表 1 土壤侵蚀 GWS(4, 2) 模型参数搜索 - 辨识结果

方程	参 数									
	u	B_0	B_1	B_2	B_3	B_4	C_{11}	C_{12}	C_{31}	C_{41}
13	0.82	- 2.12	216.44	- 543.34	37.19	545.44	4.89	- 11.26	- 5.33	19.69
14	0.3297	77.21	102.75	59.57	- 43.96	- 201.72	- 425.50	- 176.91	48.71	252.99

$$E_f = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n [(R_{dsi} - R_{cali})]^2}{\sum_{i=1}^n (R_{dsi} - \bar{R}_{ds})^2} \quad (15)$$

式中: E_f ——模型有效系数(无量纲); R_{ds} ——实测土壤侵蚀量的平均值; R_{dsi} ——第 i 场降雨的计算降

利用便携式时域反射仪 TDR(Time domain reflectometry), 采用长 25 cm 的探针, 测量土壤前期含水量, 待土壤前期含水量基本一致时, 即准备降雨试验。坡度设为 5°、10°、15° 三个水平。雨强为 0.667, 1, 1.5, 2 mm/min 4 个水平。降雨历时在 0 ~ 60 min 内分 14 个间隔点。共 4 场试验, 得到 56 组试验数据。

试验 2: 土壤前期含水量、糙率 - 累积土壤侵蚀量组合试验。该试验在图 1 中坡度为 5° 的 4 个径流小区进行, 固定雨强为 0.667 mm/min, 降雨历时为 60 min, 共 3 场试验, 得到 126 个数据。试验前在每个径流小区中利用便携式时域反射仪 TDR(Time domain reflectometry), 采用长 25 cm 的探针随机采点测量土壤前期含水量, 计算出 0 - 25 cm 土壤的平均含水量; 糙率采用野外实地冲刷水槽法测定。

2.2 模型参数搜索 - 辨识结果

经过变量变换形式筛选, 选取式(12):

$$y(x_1, x_2) = [E(x_1, x_2)]^{1/2} \quad (12)$$

应用式(11)可分别建立 E 随雨强 I 和坡度 S 、土壤前期含水量 w 和糙率 n 而变的二个 GWS(4, 2) 模型为。

$$E(I, S) = [B_0 + \sum_{k=1}^4 B_k E^{-k u I} + \sum_{k=1}^4 C_{k1} S e^{-k u I}]^2 \quad (13)$$

$$E(w, n) = [B_0 + \sum_{k=1}^4 B_k E^{-k u w} + \sum_{k=1}^4 C_{k1} n e^{-k u w}]^2 \quad (14)$$

式中: $E(I, S)$ 、 $E(w, n)$ ——径流池的土壤侵蚀量(g); u 、 B_0 、 B_1 、 B_2 、 B_3 、 B_4 、 C_{11} 、 C_{12} 、 C_{31} 、 C_{41} ——待定参数。

2.3 结果与分析

2.3.1 模型参数辨识结果 式(13) - (14) 的辨识结果如表 1 所示:

2.3.2 模型效果分析 对于土壤侵蚀高维指数非线性模型式(13)、(14), 其模拟效果以模拟优度与精度进行评价。模拟优度用有效系数 E_f (无量纲)、平均误差率(百分数)作为评判指标, 见表 2。

雨侵蚀量; R_{cali} ——第 i 场降雨的实测侵蚀量; n ——降雨次数。

$$= \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N [(1 - E/E_i)^2] \times 100 \% \quad (16)$$

式中: ——平均误差率(%) ; E ——第 i 场降雨侵蚀

量的计算; E_i ——第 i 降雨侵蚀量的实测值; N ——试验观测样本量。

表 2 模拟精度与评价

模型	模型有效系数	平均误差率/ %
$E(I, S)$	0.99	1 %
$E(w, n)$	0.91	6.18 %

常规柯布 - 道格拉斯函数型等土壤侵蚀统计模型的有效系数 E_f 大多在 0.65 ~ 0.85 之间,平均误差率 多在 25 % ~ 40 % 之间^[9],大多不能满足工程应用对模拟精度的要求。本文两个二因子高维指数非线性模型的模型有效系数 $E_f > 0.91$,平均误差率 $< 6.2\%$,模拟精度较高。

4 结 论

(1) 基于单变量高维指数非线性 $GWS(n, 1)$ 模型的扩展,构建了多变量高维指数非线性模型 $GWS(n, m)$, $GWS(n, m)$ 模型具有非周期、非线性、非正态振荡递减特征,各自变量的弹性系数呈振荡递减并趋于零。这是 $GWS(n, m)$ 模型于常规模型的显著差别。经过 MATLAB 寻优,实现了模型参数搜索 —— 辨识。人工降雨条件下的坡耕地土壤侵蚀模拟结果表明:模型有效系数 $E_f > 0.91$,平均误差率 $< 6.2\%$,模拟精度较高。

(2) 应用 $GWS(n, m)$ 模型,通过对影响坡面土壤侵蚀的四大因子 (I, S, w, n) 进行系统研究,揭示了复杂信息的内在规律,有望建立具有广泛适用性的土壤侵蚀多变量高维指数非线性模型。为非线性

动力学研究提供新的建模思路,在生物、生态、资源等自然社会经济领域具有泛适用性,应用前景广阔。

参考文献:

[1] 罗志军,张俊. 土壤侵蚀模型的研究现状与展望[J]. 安徽农业科学,2007,35(27):574-576.

[2] 蔡强国,刘纪根. 关于我国土壤侵蚀模型研究进展[J]. 地理科学进展,2003,22(3):242-250.

[3] Wischemier W H,Smith D D. Predicating rain fall dro-sion losses[R]. USDA Agriculture Handbook . U. S. Department of Agriculture,1978.

[4] Renard K G,Foster G R ,Weesies G A ,et al. Predic-ting soil erosion by water :A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss E2 equation (RUSLE) [M]. Washington: USDA Hand-book,1997:537.

[5] 陈永宝,陈志伟,郭志民. USLE 在我国的应用和发展[J]. 中国水土保持,2003(10):11-12

[6] 李世玲. 基于投影寻踪和遗传算法的一种非线性系统建模方法[J]. 系统工程理论与实践,2005,25(4):22-28.

[7] 孙全敏,王占礼,邵明安. 生物种群 Logistic 扩展模型灰色增量生成参数辨识方法及应用[J]. 系统工程理论与实践,2000,20(8):105-113.

[8] 孙全敏,王占礼,邵明安. 灰色非线性增量动态模型在农药残留量模拟中的应用[J]. 系统工程理论与实践,2000,20(9):125-129.

[9] 江忠善,王志强,刘志. 黄土丘陵区小流域土壤侵蚀空间变化定量研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报,1996,1(2):1-9.

(上接第 37 页)

(2) 延安地区降雨侵蚀力的季节分布明显,主要集中在 6 - 9 月,占全年降雨侵蚀力总量的85.6%,月降雨侵蚀力的频率分布与月雨量的频率分布趋势相吻合,但又不完全一致,它还受到雨强等其他降雨特征因子的影响。

(3) 在 1951 - 2005 年间,延安地区的年降雨侵蚀力在 492.14 ~ 4 716.41 MJ · mm/ (hm² · h) 之间,平均值为 1 765.73 MJ · mm/ (hm² · h),最大值为平均值的 2.67 倍,为最小值的 9.58 倍。年降雨侵蚀力的变异程度适中,其离差系数 C_v 为 0.41,变化趋势系数 r 为 - 0.071,在研究时段内整体上基本无变化。

参考文献:

[1] 章文波,谢云,刘宝元. 用雨量和雨强计算次降雨侵蚀力[J]. 地理研究,2002,21(3):384-390.

[2] 唐克丽. 中国水土保持[M]. 北京:科学出版社,2004:

310-337.

[3] 卜兆宏,董勤瑞,周伏建,等. 降雨侵蚀力因子新算法的初步研究[J]. 土壤学报,1992,29(4):408-417.

[4] 王万忠,焦菊英,郝小品,等. 中国降雨侵蚀力 R 值的计算和分布() [J]. 土壤侵蚀与水土保持学报,1996,2(1):29-39.

[5] 吴素业. 安徽大别山区降雨侵蚀力简化算法与时空规律[J]. 中国水土保持,1994(4):12-13.

[6] 周伏建,陈明华,林福兴,等. 福建省降雨侵蚀力指标 R 值[J]. 水土保持学报,1995,9(1):12-18.

[7] 章文波,谢云,刘宝元. 利用日雨量计算降雨侵蚀力的方法研究[J]. 地理科学,2002,22(6):705-711.

[8] 谢云,刘宝元,章文波. 侵蚀性降雨标准的研究[J]. 水土保持学报,2000,14(4):6-11.

[9] 缪驰远,徐霞,魏欣,等. 重庆市主城区降雨侵蚀力特征分析[J]. 资源科学,2007,29(4):54-60.

[10] 谢云,章文波,刘宝元. 用日雨量和雨强计算降雨侵蚀力[J]. 水土保持通报,2001,21(6):53-56.