

坡面土壤侵蚀产沙的神经网络模拟*

赵西宁 吴普特[†] 冯浩 王万忠 吴发启

(中国科学院水利部水土保持研究所,西北农林科技大学,国家节水灌溉杨凌工程技术研究中心,陕西杨凌 712100)

ARTIFICIAL NEURAL NETWORK MODEL FOR SLOPE SOIL EROSION

Zhao Xining Wu Pute[†] Feng Hao Wang Wanzhong Wu Faqi

(Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, National Engineering Yangling Research Center of Engineering Techniques for Water Saving Irrigation, Yangling, Shaanxi 712100, China)

关键词 坡面土壤侵蚀;侵蚀产沙量;BP神经网络

中图分类号 S157 文献标识码 A

土壤侵蚀预报是进行水土流失监测、指导水土保持措施合理配置、优化水土资源高效利用的重要工具,自 20 世纪 60 年代以来,国内外学者对此进行大量研究,建立一系列经验统计模型^[1,2]和物理成因模型等^[3,4]。以上模型复杂性及适用性各异:如经验统计模型主要从侵蚀产沙因子角度入手,建立径流产沙与降雨、植被、土壤、土地利用、耕作方式、水保措施等之间的多元回归因子关系式,一般比较简单,便于应用,但模型中经验参数适用范围有限,模拟精度难以控制;物理机理模型主要以土壤侵蚀物理过程为基础,利用水文学、水力学、土壤学及其他相关学科基本原理,根据降雨、径流条件来描述土壤侵蚀过程,预报给定时段内的土壤侵蚀量,具有一定的通用性,但其限制因素较多,应用不便^[5];人工神经网络(ANN)中的 BP 网络模型具有较强的自学习能力和处理非线性问题能力,近年来已在有关工程领域得到广泛应用^[6~9]。本文以土壤侵蚀较为严重的陕西淳化县泥河沟流域坡耕地为例,引入 BP 网络模型这一新的定量研究方法对坡面土壤侵蚀产沙规律进行研究。

1 研究区概况

泥河沟流域地处黄土高原沟壑区,面积为 9.48

km²,流域北高南低,呈长条状。坡塬占 59.2%,平均坡度在 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℃,1 月均温 4.3℃,7 月均温 23.1℃,无霜期 183 d,10℃活动积温 3 281℃,太阳年辐射总量 504.3 kJ cm⁻²。多年平均降水量 600.6 mm,7~9 月降水量占 50%以上,暴雨频率高,强度大,产生强烈水土流失,侵蚀模数为 4 000~5 000 t km⁻² a⁻¹,尤以坡地为主。土壤为黄土母质上发育的幼年侵蚀土壤黄壤土和呈点状分布的地带性黑垆土,自然植被存在于沟坡,多为草本和灌木,塬面基本为人工植被。

2 研究内容及方法

采用有压给水针头式人工降雨装置^[10]进行坡面模拟降雨试验。降雨量观测、产流量和产沙量收集均按文献^[11]要求进行;土壤含水量和土壤容重采用烘干法测定。坡度参数设计分别为 5°、10°和 15°;降雨强度参数设计分别为 0.5 mm min⁻¹、1.0 mm min⁻¹和 1.5 mm min⁻¹,降雨历时为 40 min;按照当地农耕习惯,布设等高耕作、人工掏挖、人工锄耕和直线坡面等 4 个常见耕作措施,措施地具体设计

* 中国科学院水土保持研究所知识创新领域前沿项目(SW05503)资助

[†] 通讯作者:吴普特(1963~),男,陕西武功人,研究员,博士生导师,主要从事水土保持与节水农业等方面的研究工作。E-mail: Qjzupt@vip.sina.com

作者简介:赵西宁(1976~),男,陕西渭南人,博士,主要从事水土资源高效利用及其效益评价方面的研究。E-mail: zxnshs@yahoo.com.cn

收稿日期:2004-08-01;收到修改稿日期:2004-11-16

为,等高耕作是在坡面上沿等高线,垂直于坡面走向,进行横向耕作,形成沟和垄,垄高 10 cm,垄距 33 cm;人工掏挖是在选定的样地上,用锄头挖地,并使地面保持掏挖后的原始状态;人工锄耕是用锄头以常规方式对坡耕地进行锄挖;直线坡面是为耙平的平整坡面。共计 $3 \times 3 \times 4 = 36$ 场降雨。

BP 网络模型学习过程实质是一个反复迭代过程,首先给网络赋一组随机初始权值和阈值,然后输入一个样本通过激活函数来计算其输出值,如果实际输出值和期望输出值差值与预先确定的误差值差异较大,则通过一定方法来修改各层神经节点的权值和阈值,以达到减小该差值目的,反复执行该过程直至该差值小于预先确定的值为止。本文采用典型三层前馈型 BP 网络模型对坡面土壤侵蚀产沙进行模拟,设输入层节点数为 n ,隐含层节点数为 q ,输出层节点数为 m ,具体网络模型结构参考文献[12]。在网络训练过程中,为便于计算及防止部分神经元节点达到过饱和状态^[13],用(1)式对实测试验数据进行归一化处理。

$$x_{norm} = 0.5 \left[\frac{x_0 - \bar{x}}{x_{max} - x_{min}} \right] + 0.5 \quad (1)$$

式中, x_0 和 x_{norm} 分别为归一化前后变量; \bar{x} 为平均值; x_{max} 和 x_{min} 分别为变量的最大和最小值。

3 结果与分析

3.1 输入变量及输出变量确定

坡面侵蚀产沙影响因素众多,主要有降雨、地

形、土壤、植被和水土保持措施等 5 个方面,其中植被和水土保持措施与人类活动密切相关,人类活动对坡面土壤侵蚀产沙影响可通过植被和水土保持措施因素来实现。由于试验在休闲地上进行,植被因素对坡面侵蚀产沙影响可不予考虑,对于等高耕作、人工掏挖、人工锄耕和直线坡面等常见耕作措施,引入地表糙度概念,以对其进行量化,具体测量方法参考文献[14]。降雨、地形和土壤因素是自然因素,目前人力尚难大规模改变。降雨因素对坡面侵蚀产沙影响与降雨量、降雨强度和降雨动能等因子有关,由于试验条件等因素限制,在此仅用降雨强度来反映降雨因素;用坡度来反映地形因素;土壤因素用土壤前期含水率和土壤容重来反映;基于上述分析,在 BP 网络模型中,可采用地表糙度、降雨强度、坡度、土壤前期含水率和土壤容重这 5 个因子作为模型输入变量,土壤侵蚀产沙量作为模型的输出变量进行建模。

3.2 坡面土壤侵蚀产沙的 BP 网络模型

根据上述分析,网络输入变量数 $n = 5$,对应指标分别为地表糙度、降雨强度、坡度、土壤前期含水率和土壤容重。输出变量数 $m = 1$,对应指标为次降雨坡面土壤侵蚀产沙量。隐含层节点数与所研究问题复杂程度有关,目前尚无统一的确定方法,根据网络收敛速度及稳定性等情况,在此选用隐含层节点数 $q = 5$ 来进行训练,由此可得到坡面土壤侵蚀产沙 BP 网络模型拓扑结构为(5,5,1)。

利用模拟降雨试验所得到的 36 组实测数据中的前 30 组作为训练样本(见表 1),取训练样本集误

表 1 坡面侵蚀产沙 BP 网络模型的训练及预测结果

样本序号	实测值(g)	计算值(g)	误差(%)	样本序号	实测值(g)	计算值(g)	误差(%)	样本序号	实测值(g)	计算值(g)	误差(%)
1	135.68	140.17	3.31	13	97.28	102.21	5.06	25	112.48	111.94	0.48
2	96.13	92.31	3.97	14	51.81	52.34	1.02	26	79.14	81.24	2.65
3	65.32	67.24	2.93	15	27.96	28.41	1.60	27	47.63	46.93	1.46
4	44.28	47.04	6.23	16	194.22	187.40	3.51	28	246.38	257.84	4.65
5	79.83	78.32	1.89	17	78.54	81.36	3.59	29	36.25	36.25	0.00
6	15.68	16.42	4.71	18	37.28	37.28	0.00	30	84.38	81.62	3.27
7	173.26	164.68	4.95	19	234.51	244.21	4.13	31 ¹⁾	178.20	169.34	4.97
8	81.65	82.60	1.31	20	51.27	54.28	5.87	32 ¹⁾	54.26	57.61	6.17
9	63.28	64.17	1.41	21	19.28	19.28	0.00	33 ¹⁾	110.81	116.34	4.98
10	161.74	166.30	2.81	22	87.65	89.34	1.93	34 ¹⁾	89.28	84.63	5.21
11	55.36	54.28	1.95	23	130.25	127.28	2.28	35 ¹⁾	27.64	25.39	8.14
12	27.64	26.37	4.59	24	26.27	27.53	4.79	36 ¹⁾	90.28	88.64	1.81

1) 代表预测样本

差为 0.001,学习率为 0.20,动量因子为 0.60,最大学习次数为 10 000,用(1)式对实测数据归一化处理后,应用 MATLAB 功能强大的神经网络工具箱^[15]编写程序,对上述网络进行训练,学习到 7 600 次后网络趋于收敛,训练停止,训练样本集误差达到 0.000 93,小于预设误差。表 1 可看出,前 30 组训练样本集平均相对误差只有 2.87%,训练样本最大相对误差仅为 6.23%,故拟合情况良好。由于训练过的网络已模拟并记忆了输入变量和输出变量间的函数关系,因而可以用训练好的网络进行预测。以表 1 所列出后 6 组实测数据作为预测样本进行预测,预测样本集平均相对误差为 5.21%,预测样本最大相对误差也仅为 8.14%,说明所建立的 BP 网络模

型训练精度较高,预测结果较好。

根据上述试验所得的 36 组实测试验数据,同样取地表糙度、降雨强度、坡度、土壤前期含水率和土壤容重这 5 个变量作为输入变量,坡面土壤侵蚀产沙量作为输出变量,建立坡面土壤侵蚀产沙量的回归模型。并将回归模型计算结果与 BP 网络模型计算结果和人工模拟降雨试验实测数据列成图 1,从图 1 可看出,坡面土壤侵蚀产沙量 BP 网络模型较回归模型模拟精度高,预测结果较好。这说明对于复杂的坡面土壤侵蚀系统,利用具有非线性映射功能的 BP 网络模型能更好刻画坡面土壤侵蚀产沙的复杂特性,为坡面土壤侵蚀产沙规律研究提供了新方法。

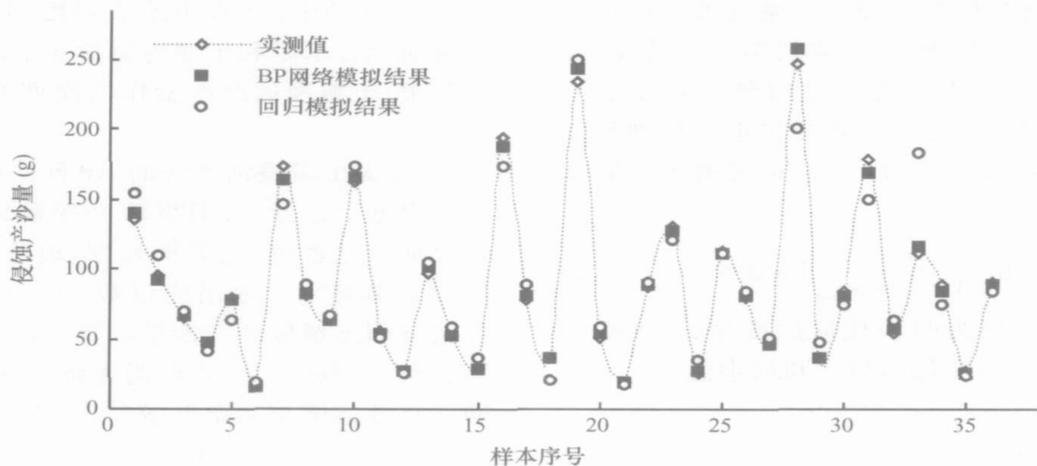


图 1 试验实测数据与 BP 网络模型和回归模型结果比较

4 结论

1) 利用 BP 网络模型预测坡面土壤侵蚀产沙规律效果较好,模型输入变量中,地表糙度、降雨强度、坡度、土壤前期含水率和土壤容重比较容易测定,模型便于利用,与传统回归模型相比较,该模型能更好刻画坡面土壤侵蚀产沙的复杂非线性特性,为土壤侵蚀规律的研究提供了新方法。

2) 该 BP 网络模型的输入参数是在一定试验条件下建立的,具有一定的使用范围,影响坡面土壤侵蚀产沙因素众多,如降雨动能、土壤质地、植被以及坡长坡向等因素都会影响到坡面土壤侵蚀产沙,在今后研究中仍需深入探讨。

参考文献

[1] 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. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1996, 1(2): 1~9

- [2] 郑粉莉,刘峰,杨勤科,等. 土壤侵蚀预报模型研究进展. 水土保持通报, 2001, 21(6): 16~18
- [3] 王礼先,吴长文. 陡坡林地坡面保土作用的机理. 北京林业大学学报, 1994, 16(4): 1~7
- [4] 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拟. 地理学报, 1996, 51(2): 108~117
- [5] 蔡强国,刘纪根. 关于我国土壤侵蚀模型研究进展. 地理科学进展, 2003, 22(3): 242~249
- [6] Dawson C W, Wilby R. An artificial neural network approach to rainfall-runoff modeling. Hydrol. Sci. J., 1998, 43(1): 47~66
- [7] French M N, Krajewski W F, Cuykendall R R. Rainfall forecasting in space and time using a neural network. J. Hydrol., 1992, 137: 1~3
- [8] Wen C G, Lee C S. A neural network approach to multi objective optimization for water quality management in a river basin. Water Resour. Res., 1998, 34(3): 427~436
- [9] 刘金福,洪伟. 闽南山地巨尾桉生产的土壤主导因子调控模型研究. 土壤学报, 2001, 38(4): 514~521
- [10] 袁建平,张索丽. 黄土丘陵区小流域土壤稳定入渗速率空间变

- 异. 土壤学报, 2001, 38(4): 579 ~ 583
- [11] 张增哲主编. 流域水文学. 北京: 中国林业出版社, 1994. 123 ~ 156
- [12] 赵西宁, 王万忠, 吴普特, 等. 坡面入渗的人工神经网络模型研究. 农业工程学报, 2004, 20(3): 48 ~ 50
- [13] Maier H R, Dandy G C. The use of artificial neural networks for the prediction of water quality parameters. Water Resour. Res., 1996, 32(4): 1 013 ~ 1 022
- [14] 郑子成, 何淑勤, 吴发启. 坡耕地地表糙度的初探. 西北林学院学报, 2004, 19(1): 39 ~ 41
- [15] 许东, 吴铮. 基于 MATLAB6. X 的系统分析与设计——神经网络. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2002. 186 ~ 194