

流域次降雨侵蚀产沙的 BP 神经网络模拟

侯建才¹, 李占斌^{1,3}, 李 勉², 王 民¹

(1. 西安理工大学, 陕西 西安 710048; 2. 黄河水利委员会 黄河水利科学研究院,

河南 郑州 450003; 3. 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: 在分析黄土高原非园沟流域多年观测资料的基础上, 应用 BP 神经网络建模方法, 建立了流域次降雨侵蚀产沙的神经网络模型。通过输入模型变量流域次降雨量、平均降雨强度、径流深和洪峰流量模数, 对流域次降雨侵蚀产沙量进行了训练和预测。预测结果表明, 所建 BP 神经网络模型预测精度较高, 可近似揭示复杂非线性流域次降雨侵蚀产沙系统的产沙规律, 为建立较高预报精度的黄土高原流域次降雨侵蚀产沙预报模型提供了依据。

关键词: 次降雨; BP 神经网络; 侵蚀产沙; 模拟

文献标识码: A

文章编号: 1000—288X(2007)03—0079—05

中图分类号: S157.1

Back Propagation Neural Network Simulation on Sediment Yield of Watershed Under Single Rainfall

HOU Jian-cai¹, LI Zhan-bin^{1,3}, LI Mian², WANG Min¹

(1. Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China; 2. Yellow River Institute of

Hydraulic Research, Yellow River Conservancy Commission, Zhengzhou, He'nan 450003, China;

3. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dry Farming on Loess Plateau, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: On the basis of the analyses of twenty year data observed in Jiuyuanguou watershed on the Loess Plateau, a model of sediment yield of watershed under single rainfall is propounded through the application of back propagation artificial neural network. The network model is trained and predicted by input rainfall, average rainfall intensity, runoff depth and flood peak modulus. The predicted results show that the network model has good precision and accurately reflects the laws of nonlinear sediment yield of watershed under single rainfall. It provides a new foundation to establish the predicted model of sediment yield of watershed under single rainfall on the Loess Plateau.

Keywords: single rainfall; back propagation neural network; soil erosion and sediment yield; simulation

黄土高原是世界上水土流失最严重的地区之一, 剧烈的水土流失不仅给该地区自然环境、经济和社会带来了极大危害, 也给黄河中下游人民群众的生命财产安全带来极大的隐患。黄土高原地区流域降雨侵蚀产沙模型研究尤其是流域次降雨侵蚀产沙模型研究, 对该地区进行水土流失监测和预报, 指导水土保持措施合理配置, 优化水土资源高效利用都具有重要意义。流域次降雨侵蚀产沙是一个极其复杂的非线性系统, 但究其根本是降雨与流域下垫面因子相互作用的结果。

多年来国内外学者对此进行了大量研究, 建立了一系列经验性统计模型、物理成因性理论模型^[1-11], 然而经验性统计模型虽简单易用, 但模型中经验参数

的适用范围有限, 模拟精度难以控制; 物理成因性理论模型, 虽具有一定的通用性, 但其限制因素较多, 应用不便。

人工神经网络 ANN (Artificial Neural Network) 是对人脑或自然的神经网络若干基本特性的抽象和模拟, 是一种非线性的动力学系统, 它具有大规模的并行处理和分布式的信息存储能力、良好的自适应性、自组织性及很强的学习、联想、容错及抗干扰能力。它能解决具有一定的内在规律, 且不是很明确, 有一定的模糊性的问题。人工神经网络(ANN)中的 BP 网络模型, 近年来已在有关领域得到广泛应用^[12-15]。本文以黄土高原典型流域为研究对象, 研究了流域降雨量、平均降雨强度、径流深、洪峰流量和

流域输沙模数的关系, 引用 3 层前馈型 BP 网络建模方法, 对流域次降雨侵蚀产沙规律进行研究。

1 研究区概况

韭园沟为无定河中游左岸的一条支沟, 位于东经 $110^{\circ}16' - 110^{\circ}26'$, 北纬 $37^{\circ}33' - 37^{\circ}38'$ 之间, 自然地理区划属于黄土高原丘陵沟壑区第 I 副区, 是黄河水利委员会绥德水土保持科学试验站的试验性治理小流域之一, 也是我国最早的治理试验小流域之一。流域面积 70.7 km^2 , 流域海拔高度 $820 \sim 1\,180 \text{ m}$, 流域长度 18 km , 不对称系数 1.2 , 沟底比降 1.15% , 沟壑密度 5.34 km/km^2 。流域地面形态主要为梁、峁及分割的沟谷组成, 梁、峁坡的坡度一般在 $20^{\circ} \sim 35^{\circ}$ 之间; 沟谷坡度极陡, 一般均在 35° 以上。流域的梁、峁面积约占总面积的 52.3% , 沟谷面积约占 47.7% 。流域属于干燥少雨的大陆性气候, 雨量稀少, 年均降雨量 475.9 mm , 年平均气温为 10.2°C , 降雨的 72.5% 集中于 $6-9$ 月。流域内由于降雨强度极大, 土质疏松, 地形破碎, 植被较差, 坡度很陡, 土壤侵蚀极其严重, 治理前多年平均侵蚀模数为 $18\,120 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$; 输沙量在年内分配也不均匀, $7-9$ 月份的输沙量占流域年总输沙量的 90% 以上。

1953 年该流域被黄委会绥德水土保持试验站选为试验研究基地, 开展了以坝系建设为中心的流域综合治理工作, 到 2001 年底已完成治理面积 $4\,747 \text{ hm}^2$, 占流域总面积的 67.1% , 其中工程措施面积有 $1\,954 \text{ hm}^2$, 占已完成治理面积的 41.2% ; 生物措施面积 $2\,793 \text{ hm}^2$, 占已完成治理面积的 58.8% 。韭园沟流域 2001 年底共有坝库 263 座, 其中骨干坝 13 座, 大中型淤地坝 8 座, 水库 2 座, 小型淤地坝 235 座, 塘坝 5 座, 已淤地 278.46 hm^2 , 已生产利用 219.76 hm^2 。

2 研究方法

人工神经网络源于 20 世纪 40 年代, 是涉及生物学、医学、脑科学、认知学、信息论、计算机、数学、物理学等多学科的交叉学科, 它在某种程度上模拟了人脑功能的若干基本特征, 如大规模并行处理、分布式存储、自适应过程等。目前这一方法在信号处理、模式识别、自动控制、最优化等方面得到广泛的应用。其中应用最广泛的人工神经网络模型是前馈误差反向传播(back propagation-BP)模型, 即 BP 模型。

BP 网络是指在具有非线性传递函数神经元构成的前馈型网络中采用误差反传算法作为学习算法的前馈网络。BP 网络通常由输入层、输出层和若干个隐含层构成。层与层之间的神经元之间采用全互联

的连接方式, 而同层内的神经元之间没有连接。BP 网络工作思想是对网络权值 (ω_{ij} , T_{li}) 与阈值 (θ_i) 进行修正, 使误差函数 (E) 沿负梯度方向下降。设输入节点为 x_j , 隐节点为 y_i , 输出节点为 o_l , 输入节点与隐节点间的权值为 ω_{ij} , 隐节点与输出节点间的网络权值为 T_{li} , 输出节点的期望为 t_l , 隐含层和输出层间的神经元传递函数为 S 型函数, 即:

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (1)$$

(1) 正向传播。输入信号由输入层向输出层正向传播的过程包括如下 2 个阶段。

① 隐节点的输出:

$$y_i = f(\sum_j \omega_{ij} x_j - \theta_i) = f(\text{net}_i) \quad (2)$$

② 输出节点的计算输出:

$$o_l = f(\sum_i T_{li} y_i - \theta_l) = f(\text{net}_l) \quad (3)$$

(2) 反向传播。输入样本中的输入向量经由三层前馈网络传递所产生的输出向量 o_l 与样本中所期望输出 t_l 之间存在着误差, 其平方型误差函数为:

$$E = \frac{1}{2} \sum_l (t_l - o_l)^2 \quad (4)$$

反向传播过程就是通过修正网络中的连接权值和阈值, 使 E 达到最小。

BP 算法所采用的 Sigmoid 函数输出值是在 $0 \sim 1$ 之间变化, 且函数随着 $|x|$ 的增大, 梯度下降, 并趋于 0, 不利于权值的调整。因此, 希望 x 工作在较小的区域, 实际计算时限制网络的输入 $x < 1$ 。除此之外, 由于网络的输入数据是密集型的, 数据之间的差别太小, 直接将数据输入网络训练会引起混淆。因此, 应对学习样本按式(5)进行归一化处理, 其目标是将所有样本均处理成其绝对值在 $0 \sim 1$ 之间的数据。

$$T_i = \frac{Z_i - Z_{\min}}{Z_{\max} - Z_{\min}} \quad (5)$$

式中: Z_i , T_i —— 分别是变换前后的变量; Z_{\min} , Z_{\max} —— 分别为输入样本中第 i 个节点中的最小值和最大值。

3 结果与讨论

3.1 输入变量及输出变量确定

流域次降雨侵蚀产沙影响因素众多, 降雨特征及其分布和流域下垫面特征是造成不同流域侵蚀产沙特征千差万别的内在因素。对某一特定的流域而言, 其下垫面条件可认为是不变的, 于是影响降雨产流产沙的主要因素是降雨因子和径流因子。降雨对土壤侵蚀的影响作用是最直接、最敏感的。降雨因素对土

壤侵蚀具有双重作用: 一方面, 降雨是引起土壤侵蚀的主要驱动因素, 雨滴击溅以及形成径流后的冲刷作用是产生水力侵蚀的根本原因; 另一方面, 在土层深厚、地下水位很低的黄土高原地区, 降雨又是植被生长的主要水分来源, 而植被在防治水土流失方面具有特殊的功效。国内外大量的观测资料表明, 流域产沙不仅取决于降雨量, 更重要的是取决于降雨过程(即降雨强度、降雨分布情况和集中程度)。对某一特定的流域而言, 它的产沙情况主要取决于该次降雨量以及降雨过程。在此, 用降雨量和平均降雨强度来表征降雨特征。

流域出口处洪水特征是降雨和流域下垫面相互作用的结果, 并且流域内侵蚀物质要随洪水一并输送出去, 因此流域出口处洪水特征就是流域内降雨、土壤、地形、植被、人类活动相互作用结果的最终体现。径流深和洪峰流量模数是反映流域次降雨洪水特征的重要参数, 径流深代表次降雨在流域上产生的洪水总量的多少, 间接反映了降雨量的大小以及流域下垫面对降雨的再分配作用的强弱; 洪峰流量模数代表洪水的强度, 间接反映了降雨的时空分布特征和流域下垫面对径流汇流过程的影响。洪峰流量模数在径流的冲刷和输运泥沙的过程中起着非常重要的作用, 尤

其是在黄土高原地区, 洪水多数以单峰形式出现, 陡涨陡落, 因而在进行流域次降雨水沙关系分析时, 应充分考虑洪峰流量模数在流域侵蚀产沙中的重要作用。基于上述分析, 在 BP 网络模型中, 可采用降雨量、降雨强度、径流深和洪峰流量模数这 4 个因子作为模型输入变量, 流域次降雨土壤侵蚀输沙量作为模型的输出变量进行建模。

3.2 流域次降雨侵蚀产沙的 BP 网络模型

上述分析, 网络输入变量数 $n=4$, 对应指标分别为降雨量、降雨强度、径流深和洪峰流量模数。输出变量数 $m=1$, 对应指标为次降雨流域土壤侵蚀输沙量。选用 3 个隐含层 4 个节点的模型来进行训练。

利用韭园沟流域及其支沟想她沟、王家沟、桑坪则沟、团园沟小流域的 58 场降雨观测的降雨、径流数据作为训练样本, 取训练样本集误差为 0.001, 学习率 η 为 0.10, 动量因子 α 为 0.70, 最大学习次数为 10 000, 应用 MATLAB 功能强大的神经网络工具箱编写程序, 对上述网络进行训练, 学习到 5 400 次后网络趋于收敛, 训练停止, 训练样本集误差达到了 0.000 98, 小于预设误差。训练结果详见图 1。由图 1 可以看出, 韭园沟流域及其支沟小流域的模拟情况较好。

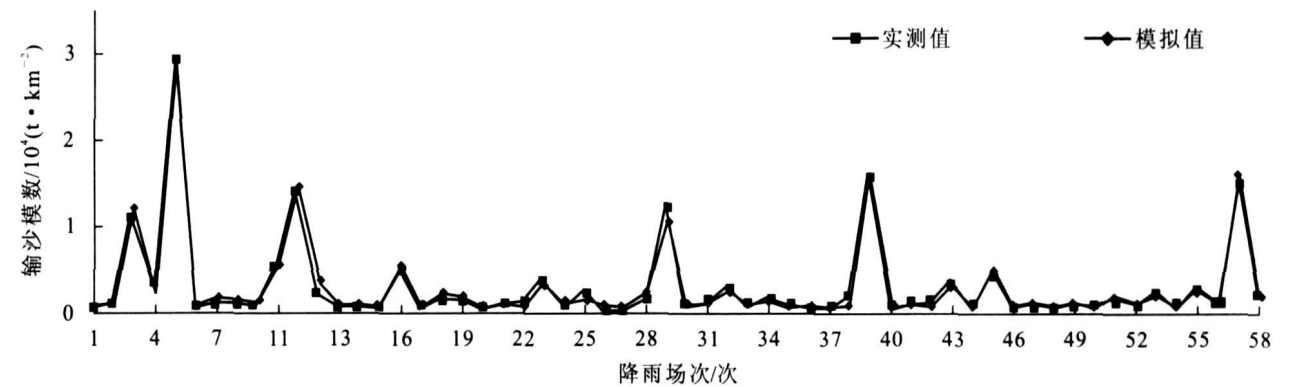


图 1 韭园沟流域 58 次降雨侵蚀输沙模数实测值与模拟值比较

3.3 流域次降雨侵蚀产沙预测

为检验上文所建立的韭园沟流域次降雨侵蚀产沙 BP 神经网络预报模型的精度和可靠性, 利用训练好的网络模型对该流域内的以沟道工程为重点治理流域王茂沟(5.97 km²) 和治理程度低的对比流域李家寨沟(4.92 km²) 21 场侵蚀性降雨的输沙模数进行了预测(见表 1—2)。

从表 1—2 可以看出, 无论是治理程度高的王茂沟还是治理程度低的李家寨沟, 预测值和实测值均非常相近, 模型精度较高。为进一步验证模型的适用性, 利用训练好的网络模型对距韭园沟 6.0 km、面积

41.5 km²(测站控制面积 41.2 km²)、非治理的裴家峁沟流域(治理程度低, 尚属非治理沟) 1960—1979 年的 39 次侵蚀性降雨的输沙模数进行了预测, 预测结果见表 3。

由表 3 可以知道, 预测结果较好。本文所建立的 BP 网络预测模型精度较高, 对黄土高原丘陵沟壑区治理和丘陵沟壑区非治理的流域均适用。这说明对于复杂的流域次降雨侵蚀产沙系统, 利用具有非线性映射功能的 BP 网络模型能近似刻画流域次降雨侵蚀产沙的非线性特性, 可为流域次降雨侵蚀产沙规律的研究提供依据。

表 1 王茂沟小流域次降雨输沙模数的 BP 神经网络预测结果

洪 号	雨 量/ mm	平均雨强/ (mm·h ⁻¹)	洪峰流 量模数/ (m ³ ·s ⁻¹ ·km ⁻²)	径流深/ mm	实测输 沙模数/ (t·km ⁻²)	预测输沙 模数/ (t·km ⁻²)	相对误差/ %
19610705	49.93	6.8	0.2514	1.951	103	137	33.0
19610801	70.43	18.0	3.5194	38.530	24 520	23 210	5.3
19610813	47.73	3.1	0.0637	0.857	490	607	23.9
19610927	69.21	3.8	0.3553	3.174	780	940	20.5
19620715	30.49	3.4	0.3183	1.269	687	788	14.7
19630523	70.10	6.0	0.3151	3.687	889	1 140	28.2
19630803	22.86	6.9	0.1391	0.953	636	340	46.5
19630829	32.97	4.5	0.2480	1.736	1 029	1 225	19.0
19630831	16.34	3.7	0.2312	1.681	1 453	1 634	12.5
19640705	131.80	3.9	1.1849	8.317	5 377	4 890	9.1
19640712	24.30	1.9	0.2732	0.550	254	187	26.4
19640714	13.10	25.0	1.1798	2.750	2 132	2 462	15.5
19640721	32.80	2.3	0.1776	1.646	1 159	1 330	14.8
19640911	49.70	4.1	0.3050	1.383	402	306	23.9

表 2 李家寨沟小流域次降雨输沙模数的 BP 神经网络预测结果

洪 号	雨 量/ mm	平均雨强/ (mm·h ⁻¹)	洪峰流 量模数/ (m ³ ·s ⁻¹ ·km ⁻²)	径流深/ mm	实测输 沙模数/ (t·km ⁻²)	预测输沙 模数/ (t·km ⁻²)	相对误差/ %
19620714	29.57	4.0	0.6931	1.387	1 322	1 140	13.8
19630523	70.10	6.0	2.5203	4.140	3 986	3 556	10.8
19630615	24.50	1.5	0.7825	1.184	1 083	1 282	18.4
19630705	65.36	5.7	0.8841	3.010	1 738	1 440	17.1
19630807	9.17	46.0	1.6646	0.903	939	835	11.1
19630828	18.50	1.5	0.0854	0.318	101	58	42.6
19630929	9.56	1.3	0.2744	0.524	382	274	28.3

表 3 裴家峁流域次降雨侵蚀产沙 BP 神经网络模型预测结果

洪 号	雨 量/ mm	平均雨强/ (mm·h ⁻¹)	洪峰流 量模数/ (m ³ ·s ⁻¹ ·km ⁻²)	径流深/ mm	实测输 沙模数/ (t·km ⁻²)	预测输沙 模数/ (t·km ⁻²)	相对误差/ %
19600705	15.9	7.6	1.5920	2.816	2 513	2 565	2.1
19600726	15.2	5.8	0.3471	1.021	600	648	8.0
19600727	14.9	5.2	0.4029	1.489	974	862	11.5
19600728	7.7	4.2	0.9466	1.292	942	1 268	34.6
19610705	35.3	4.6	0.2791	1.365	509	674	32.4
19610722	10.3	9.5	0.1432	0.307	222	209	5.9
19610801	24.5	7.1	4.9272	4.592	5 010	6 171	23.2
19610927	75.3	2.2	0.4248	2.971	724	890	22.9
19620714	39.3	1.3	1.0121	3.476	3 354	2 249	32.9
19630523	70.7	2.0	0.3277	3.439	2 672	2 013	24.7
19630601	13.4	5.4	0.3034	1.511	1 230	745	39.4
19630803	18.4	5.9	0.7767	1.879	1 451	1 396	3.8
19630826	15.1	6.2	0.9927	1.575	1 198	1 449	20.9
19630829	28.5	6.9	1.3033	3.192	3 024	2 463	18.5

续表 3							
19640705	137.0	4.8	3.203 9	23.040	21 580	20 718	4.0
19640714	15.5	25.8	2.165 0	5.784	5 083	4 478	11.9
19640721	31.2	2.1	0.796 1	2.444	1 665	1 631	2.0
19640805	10.4	8.3	0.291 3	1.453	982	713	27.4
19640911	46.6	4.2	0.429 6	3.951	1 993	1 515	24.0
19640916	11.0	3.4	0.390 8	1.557	1 014	868	14.4
19650707	21.2	2.0	2.475 7	4.095	4 507	3 993	11.4
19660717	58.5	10.8	2.694 1	11.860	9 323	7 441	20.2
19660719	21.1	2.5	1.274 3	2.278	1 713	2 026	18.3
19660829	18.5	7.0	0.618 9	1.496	900	1 091	21.2
19670521	12.9	12.1	0.839 8	1.768	1 811	1 409	22.2
19670705	21.1	19.7	4.514 6	5.755	4 330	6 652	53.6
19670706	15.9	19.3	1.946 6	4.415	2 735	3 651	33.5
19670717	59.9	7.7	2.082 5	11.900	7 301	6 483	11.2
19670810	21.6	3.6	1.201 5	3.335	2 192	2 414	10.1
19670822	55.1	1.9	4.805 8	12.200	8 024	10 342	28.9
19670830	23.6	3.9	0.395 6	1.896	972	973	0.1
19670913	30.9	1.5	0.531 6	1.520	854	1 013	18.6
19680726	56.5	18.1	10.461 1	17.05	17 050	18 909	10.9
19680803	18.7	3.5	1.216 0	2.410	1 751	2 037	16.3
19680817	22.7	4.8	1.531 6	3.709	2 401	2 917	21.5
19680910	13.8	1.7	0.837 4	1.693	1 029	1 374	33.57
19690703	13.1	16.4	0.276 7	0.577	363	420	15.8
19690705	22.2	2.2	0.230 6	0.984	432	509	17.7
19690831	20.4	3.4	0.621 4	1.635	1 101	1 147	4.2

4 结 论

(1) 流域次降雨土壤侵蚀产沙过程是复杂的非线性映射系统。本文对黄土高原丘陵沟壑区韭园沟流域的次降雨侵蚀产沙规律进行了研究,建立了 BP 网络模型。经验证该模型具有较高的精度和一定的适用性。在黄土高原地区,降雨量、降雨强度、径流深和洪峰流量模数有长系列的观测资料,模型使用简便。该模型能较好刻画流域次降雨土壤侵蚀产沙的复杂非线性特性,为黄土高原流域次降雨土壤侵蚀规律的研究提供了依据。

(2) 该 BP 网络模型是在特定流域上建立的,具有一定的使用范围。另外降雨量、降雨强度、径流深和洪峰流量模数只是影响流域次降雨侵蚀产沙的主要因素,降雨动能、土壤质地、植被等因素都会影响到流域次降雨侵蚀产沙过程,因此今后应对流域次降雨侵蚀产沙的各种影响因素进行综合分析并引入所建立的模型中;应利用更多不同尺度流域的降雨、径流资料对本文所建立的流域次降雨水沙响应关系进行验证,为模型在更多流域的应用奠定基础。

[参 考 文 献]

[1] Dragoun F J. Rainfall energy as related to sediment yield [J]. Journal of Geophysical Research, 1962, 67 (4): 1495—1506.

[2] Williams J R, Berndt H D. Sediment yield prediction based on watershed hydrology [J]. Transaction of the ASAE, 1977, 20(6):1100—1104.

[3] 王孟楼,张仁. 陕北岔巴沟流域次暴雨产沙模型的研究 [J]. 水土保持学报, 1990, 4(1): 11—18.

[4] 王治华,黄联捷. 降雨与流域产沙——黄土高原产沙模型研究之一 [J]. 中国科学 (B 辑), 1992(9): 1987—1993.

[5] 曹文洪,张启舜,姜乃森. 黄土地区一次暴雨产沙数学模型的研究 [J]. 泥沙研究, 1993(1): 1—13.

[6] 王治华,杜明亮,姚宁,等. 下垫面与侵蚀强度及其产沙量——黄土高原产沙模型研究之二 [J]. 中国科学 (B 辑), 1992(10): 1094—1100.

[7] 李占斌,靳顶,符素华. 窟野河暴雨洪水泥沙特性 [J]. 西安理工大学学报, 1997, 13(1): 12—18.

[8] 李怀恩,沈冰,樊尔兰. 黑河流域水沙模型及其应用 [J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999, 5(4): 62—65.

[9] 蔡强国,刘纪根,刘前进. 岔巴沟流域次暴雨产沙统计模型 [J]. 地理研究, 2004, 23(4): 434—439.

(部分参考文献略)