

文章编号: 1004 - 4574 (2009) 03 - 0032 - 05

黄土高原降雨径流调控利用潜力定量评价模型

赵西宁, 吴普特, 冯 浩, 王万忠

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

摘 要: 降雨径流的调控利用是缓解黄土高原干旱缺水与控制水土流失的有效手段, 研究区域降雨径流调控利用潜力的定量评价对黄土高原降雨径流合理利用的宏观决策与规划设计具有重要意义。以黄土高原为例, 将可以调控利用的最大降雨径流量作为资源化潜力值, 从宏观尺度上, 系统分析了影响该潜力的各个因素, 确定出黄土高原降雨径流调控利用潜力的各项评价指标, 利用 GIS 技术, 建立了降雨径流各个影响因素的专题图层, 提取出各个影响因素专题信息。在上述基础上, 引入人工神经网络建模方法, 建立了黄土高原降雨径流调控利用潜力 BP 网络模型, 并利用实际资料对网络模型进行了训练和预测, 取得了较好的结果。评价模型可供黄土高原降雨径流调控利用及其生态与环境保护工作参考。

关键词: 黄土高原; 降雨径流; 调控利用潜力; GIS; BP 网络模型

中图分类号: P426. 616

文献标识码: A

Quantitative potential assessment model of rainfall runoff regulation and utilization in the Loess Plateau of China

ZHAO Xi-ning, WU Pu-te, FENG Hao, WANG Wan-zhong

(Northwest A & F University, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, National Engineering Research Center for Water Saving Irrigation at Yangling, Yangling 712100, China)

Abstract: Rainfall runoff regulation and utilization is an effective way to alleviate drought and water shortage and control water and soil loss in the Loess Plateau of China. Quantitative assessment of regulation and utilization potential of rainfall runoff is very significant for macro decision-making and comprehensive planning of rainfall runoff. Taking the Loess Plateau as a sample region and maximum utilization capacity of rainfall runoff as potential, the influence factors of rainfall runoff regulation and utilization potential were analyzed systematically and macroscopically. Quantitative assessment indices of regional rainfall runoff regulation and utilization potential were defined. And the data with different origins, different scale and different types were integrated and the thematic maps data information of different indices was extracted using GIS technique. By way of assessment indices analysis, and based on the complex nonlinear characteristics of rainfall runoff, method of neural network was used, and three-layer feed-forward back-propagation network model for rainfall runoff regulation and utilization potential in the Loess Plat-

收稿日期: 2008 - 10 - 16; 修订日期: 2009 - 03 - 21

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40701092); 国家科技支撑计划课题 (2007BAD88B10, 2007BAD88B05); 教育部重点项目 (108182); 西北农林科技大学青年学术骨干支持计划资助

作者简介: 赵西宁 (1976 -), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事水土资源高效利用及其效益评价研究。E-mail: xiningzhao@yahoo.com.cn

通讯作者: 吴普特, 男, 博士。E-mail: gjwppt@vip.sina.com

eau was established. The network model was trained and predicted. The results show the back-propagation network model is reasonable and can be referred as an effective method for studying rainfall runoff laws. The assessment model plays an important role in sustainable and rational utilization of rainfall runoff and eco-environmental protection in the Loess Plateau of China.

Key words: Loess Plateau; rainfall runoff; regulation and utilization potential; GIS; back-propagation neural network

干旱缺水与水土流失并存是制约黄土高原经济发展的两大瓶颈。如何把除害与兴利巧妙结合,同步缓解干旱缺水与有效控制水土流失是多年来探索的一个重要方向。众多学者就水土流失成因所进行的大量定位观测试验和室内外人工模拟降雨试验,得出凡是有降雨且多以暴雨形式出现的区域,降雨径流是造成水土流失的主导因子,如果能科学调控坡面产生的降雨径流,消除水土流失的原动力,因地制宜地建设径流调控与利用体系,使降雨径流得到科学聚集与分散,即可达到控制水土流失和缓解干旱缺水的双重目标^[1-2]。以往研究多侧重于降雨径流调控的定性描述和具体调控利用技术,对降雨径流调控利用潜力定量研究仍相当薄弱,导致了调控利用技术的盲目发展和效益不高等问题^[3-5]。基于此,本文以黄土高原为例,以降雨产生的可调控利用的地表径流量作为资源化值,并将其最大值作为潜力,在对区域降雨径流影响因素分析基础上,确定降雨径流调控利用潜力定量评价的模型参数,并利用GIS技术和人工神经网络方法,建立降雨径流调控利用潜力定量评价模型,以为黄土高原降雨径流调控利用的宏观决策、规划设计提供重要借鉴。

1 模型基本思想

区域降雨径流调控利用潜力定量评价,是指在一个较大区域内分析影响降雨径流的各个因素,并根据各个因素的协同效应对可调控利用潜力进行评价,是一个多因素、多层次、多尺度、复杂的非线性系统问题。其实现主要是利用宏观分区的方法,将黄土高原大区域划分为若干个适于评价的小单元,并认为评价小单元内各影响因素一致。基本评价单元的划分有一个尺度上的概念,尽管一个大区域被划分为若干个小的评价单元,但实际上各评价单元仍然被控制在某一尺度上的“小区域”,反映区域信息,并服从区域整体评价需要^[5-6]。通过分析黄土高原区域层次上的降雨径流影响因素,确定各影响因素数理指标,利用GIS空间分析功能,集成多种来源、多种尺度以及多种类型数据,构建各个影响因素的专题图层,提取各建模参数相关专题信息。在上述基础上,利用具有较强自学习能力和处理非线性问题能力的人工神经网络(ANN)的BP模型^[7-8],建立以降雨径流调控利用潜力为输出变量,以降雨径流各个影响因素的数理指标为输入变量的评价模型。

2 结果与分析

2.1 黄土高原降雨径流影响因素分析

降雨是影响坡面径流的最基本因素。降雨特性(降雨量、降雨历时、降雨强度、降雨过程、降雨面积、暴雨中心移动方向)对降雨径流的发生具有重要作用。黄土高原降雨主要集中在汛期,6-9月份降雨量占到全年降雨量的60%~80%,与作物生长需水关键期错位,且多为频率相当集中的大到暴雨^[9]。土壤主要是通过影响土壤入渗速率来间接影响径流,由于黄土高原土壤类型、质地、肥力、利用方式不同,导致土壤入渗速率的水平变化具有明显的地域差异^[10]。在地形地貌因子中,坡度、坡长、分水岭与谷底及河面的相对高差都对降雨径流的产生具有很大影响。坡度直接影响径流汇流,坡度越大,产生汇流时间越短,径流能量越大,导致径流损失越大。在坡面和小流域层次上,对地形地貌条件的考虑可最终归结到坡面上,而对黄土高原区域尺度的研究,显然不可能顾及到某一具体坡面上,可以根据区域内部大地貌类型分异情况来宏观区分,选用一个能反映一定区域宏观地形状况的综合度量指标进行评价。植被因素对降雨径流具有积极的作用,良好的植被覆盖度可以显著减缓坡面降雨径流损失。人类活动对降雨径流的影响主要是通过工程措施(水平梯田、水平阶、集雨水窖等)、生物措施(植树种草等)和耕作措施对水循环产生影响,改变降雨径流平衡要素,改变蒸发与降雨径流的比例,改变降雨径流与入渗到土壤中水分的比例以及径流在时间与空间上的分布等^[11]。

2.2 模型输入变量与输出变量确定

利用 GIS空间分析功能,构建降雨径流各个影响因素的专题图层,提取各个影响因素相关的专题信息。所选取指标参数应具备以下特点:宏观性,即指标能反映区域影响因素宏观特征;计算方便性,即指标具有数量化概念,以适应定量评价要求;适于 GIS处理,即指标可直接或间接地由空间数据获得,同时适应于特定的 GIS工具软件处理^[5,12]。按照人工神经网络中 BP模型对评价指标的要求,同时参考相关研究成果^[5,12-14],经过反复比较和筛选,最后确定出黄土高原区域降雨径流调控利用潜力定量评价模型的各个输入变量和最终输出变量。在 BP网络模型中,采用多年平均汛期降雨量(6-9月)、土壤有机质含量、植被盖度、沟壑密度、治理度共计 5个指标作为模型输入变量,上述 5个指标分别反映影响径流的降雨因素、土壤因素、植被因素、地形地貌因素、人为影响因素。由于研究是以可调控利用的最大降雨径流量作为资源化潜力值。因此在反映区域降雨径流调控利用潜力大小特征的参数选取方面,选取了多年实测平均径流深度这一径流统计特征值作为模型的输出变量。

2.3 模型参数的空间集成与提取

根据模型输入变量和输出变量等数据处理的需要,模型所涉及的源数据主要包括:研究区边界图(1:50万黄土高原及其比邻地区图,地图出版社,1991)、黄土高原 6-9月多年平均降雨量数据(黄土高原 172个雨量站自 1955-2000年共计 45a的降雨资料及其经纬度坐标数据)、沟壑密度分布数据(相关文献和研究成果资料及其经纬度坐标数据)、黄土高原土壤类型分布图(1:100万,地图出版社,1988)及土壤有机质含量数据(《中国土壤》、《黄土高原土壤》等)、黄土高原植被数据和治理度数据(2000年黄土高原以县域为单元农业统计资料)、多年实测平均径流深度数据(黄土高原 1959-2000年 122个基本产流单元的产流数据及其经纬度坐标数据)^[15-17]。

上述数据具有典型的多类型、多比例尺和形态多样的特点。利用 ArcGIS分别数字化研究区域边界图和黄土高原土壤类型图;用图形分析软件 Surfer处理多年平均汛期降雨量(6-9月)、沟壑密度以及多年实测平均径流深度数据,生成相应等值线图,再建立 Surfer与 ArcGIS之间的数据交换接口,使 Surfer数据转换为 ArcGIS矢量数据。在上述基础上,利用 GIS的空间叠加功能,将携带各影响因素信息的空间数据依次与研究区边界图叠加。在叠加结果图中,以多边形编号来统计各专题图层参数值,使每个多边形具有包含降雨、土壤、地形、植被、人为影响以及径流在内的全部数据信息。将各个指标数据进行汇总,以各个指标数据为记录字段,一个多边形对应 6个字段的数据文件,它实际上构成了一个包括各个指标数据在内的数据矩阵。

表 1 黄土高原部分区域评价指标实际测定值

Table 1 Measurements of assessment indices in certain areas of the Loess Plateau

序号	汛期降雨 /mm	沟壑密度 / (km · km ⁻²)	有机质含量 /%	植被盖度 /%	治理度 /%	径流实测值 /mm	序号	汛期降雨 /mm	沟壑密度 / (km · km ⁻²)	有机质含量 /%	植被盖度 /%	治理度 /%	径流实测值 /mm
1	348.3	3.4	0.27	5.52	31.8	23.03	21	469	3.62	1.23	3.87	27.9	57.26
2	320.3	3.15	0.41	7.18	45.1	51.31	22	449.1	2.74	2.56	11.2	36.54	258.01
3	393	4.76	0.27	9.6	34.2	53.16	23	469.8	3.43	1.28	7.94	20.54	234.63
4	353.8	6.11	0.27	8.06	27.9	80.42	24	442.3	2.89	0.96	8.17	33.51	222.76
5	362.4	5.37	0.33	6.74	30.2	146.15	25	299.8	1.76	0.98	7.56	21.49	108.93
6	341.9	5.48	0.42	7.09	27.83	117.43	26	282.3	3.14	0.98	5.99	40.4	106.37
7	346.8	5.24	0.41	5.69	31.3	68.87	27	280.7	2.89	0.98	6.42	39.8	110.38
8	376.8	6.24	0.38	4.01	30.5	48.29	28	284.3	2.14	0.86	5.49	33.6	17.19
9	432.7	2.57	0.41	3.24	45.1	76.84	29	324.9	4.13	1.40	4.04	32.8	17.92
10	361	5.74	0.43	2.87	27.83	72.5	30	253.6	3.22	1.04	3.79	29.72	11.88
11	233.4	2.71	1.23	4.13	14.69	173.45	31	179.2	2.44	1.23	0.22	1.6	12.16
12	211.9	2.34	1.31	5.22	23.68	163.06	32	389.8	5.32	0.75	8.01	41.23	57.28
13	226.7	3.13	1.23	3.05	24.63	159.03	33*	288.5	4.79	0.75	7.09	9.64	15.39
14	469.8	2.57	1.23	2.13	53.1	152	34*	158.2	1.67	0.75	3.06	12.3	7.65
15	153.8	3.5	1.23	0.09	0.4	106.31	35*	398.6	3.74	0.67	4.58	15.3	34.42
16	349	4.82	0.27	3.95	32.4	59.52	36*	334.9	4.76	0.75	5.57	39.5	41.69
17	373	5.14	0.73	5.57	39.5	67.7	37*	298.9	2.69	0.96	3.27	21.4	39.41
18	389.6	4.2	1.23	3.45	35.8	65.32	38*	314.7	2.97	0.75	8.42	39.6	34.6
19	395.8	3.76	1.23	2.43	42.3	59.02	39*	331.1	3.82	1.04	6.72	41.64	43.9
20	441.7	4.76	1.23	4.53	31.28	58	40*	305	3.18	1.31	5.43	23.6	35

注:“*”代表预测样本

2.4 降雨径流调控利用潜力的 BP网络模型

根据上述分析, BP网络模型输入变量数 $n = 5$, 在数据矩阵中, 对应输入变量分别为多年平均汛期降雨量(6-9月)、土壤有机质含量、植被盖度、沟壑密度和治理度。输出变量数 $m = 1$, 对应指标为多年实测平均径流深。网络隐含层节点数与所研究问题复杂程度有关, 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, 由此可以得到黄土高原降雨径流调控利用潜力 BP网络模型的拓扑结构为(5, 5, 1)。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, 用下式对实测数据进行归一化处理^[8, 18]。

$$x_{\text{norm}} = 0.5 \left(\frac{x_0 - \bar{x}}{x_{\text{max}} - x_{\text{min}}} \right) + 0.5,$$

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

选择黄土高原部分区域, 以表 1 中所列出的各个输出变量实际值为例, 利用前 32 组作为训练样本, 取训练样本集误差为 0.005, 学习率为 0.30, 动量因子为 0.60, 最大学习次数为 15000, 利用归一化公式对实际值处理后, 应用 MATLAB 功能强大的神经网络工具箱编写程序^[19], 对上述网络进行训练, 学习到 12000 次后网络趋于收敛, 训练停止, 训练样本集误差达到 0.0032, 小于预设精度。从表 2 可看出, 前 32 组训练样本集的平均相对误差只有 9.86%, 最大相对误差也仅为 17.52%, 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。用表 1 所列出的后 8 组实际值作为预测样本进行预测, 从表 2 可以看出, 其预测样本集的平均相对误差为 11.50%, 预测样本最大相对误差也仅为 19.93%, 对于黄土高原宏观研究而言, 研究所建立的 BP网络模型训练精度较高, 预测结果较好。

选取与 BP网络模型完全一致的 5 个参数作为输入变量, 多年实测平均径流深度作为输出变量, 利用表 1 中所得到的实际值, 采用参考文献 [5] 中的建模思想, 利用 SPSS 的数据分析功能对上述数据进行回归分析, 建立降雨径流调控利用潜力统计模型见下列式(1)。并将统计模型计算结果与 BP网络模型计算结果和实际数据列成图 1。从图 1 可以看出, 降雨径流调控利用潜力 BP网络模型较统计模型模拟精度高, 预测结果较好。说明利用具有非线性映射功能的 BP网络模型能更好刻画黄土高原降雨径流的复杂特性, 科学预测黄土高原降雨径流可以调控利用的潜力。

$$W = 1.5133P^{0.8642} \times S^{-0.0893} \times T^{0.2641} \times Z^{0.0247Z} \times e^{-0.2451H}, \quad (1)$$

式中: W 为降雨径流调控利用潜力, mm; P 为多年平均汛期降雨量(6-9月), mm; S 为土壤有机质含量, %; T 为沟壑密度 km^2/km^2 ; Z 为植被盖度, %; H 为治理度, %。模型复相关系数 $r = 0.9022$, $F = 887$, $F_{0.01} = 2.25$, 相关性显著。

表 2 统计模型预测结果和 BP网络模型训练及预测结果

Table 2 Predicted results from statistical model and trained/predicted results from BP network model

样本序号	实测值/mm	BP计算值/mm	统计计算值/mm	BP模型误差/%	统计模型误差/%	样本序号	实测值/mm	BP计算值/mm	统计计算值/mm	BP模型误差/%	统计模型误差/%
1	23.03	20.91	21.82	9.20	5.25	21	57.26	61.28	64.3	7.02	12.30
2	51.31	56.72	57.68	10.54	12.41	22	258.01	235.41	224.36	8.76	8.56
3	53.16	52.18	54.65	1.84	2.80	23	234.63	217.52	214.54	7.30	15.03
4	80.42	73.42	71.28	8.70	11.36	24	222.76	197.63	189.27	11.28	17.17
5	146.15	140.13	137.82	4.12	5.70	25	108.93	119.71	127.63	9.89	5.48
6	117.43	110.24	109.64	6.13	6.64	26	106.37	114.52	100.54	7.66	7.20
7	68.87	77.69	79.87	12.81	15.97	27	110.38	117.28	102.43	6.25	23.80
8	48.29	51.28	54.32	6.19	12.49	28	17.19	19.76	21.28	14.95	24.49
9	76.84	88.34	98.71	14.96	28.46	29	17.92	21.06	22.31	17.52	31.65
10	72.5	79.25	88.65	9.31	22.28	30	11.88	12.69	15.64	6.81	29.69
11	173.45	158.75	135.74	8.47	21.74	31	12.16	13.64	15.77	12.17	6.84
12	163.06	136.94	129.78	16.02	20.40	32	57.28	59.28	61.2	3.49	19.29
13	159.03	132.3	123.23	16.81	22.51	33*	15.39	17.22	18.36	11.89	20.78
14	152	147.12	132	3.21	13.16	34*	7.65	8.14	9.24	6.41	16.12
15	106.31	93.42	91.04	12.13	14.37	35*	34.42	41.28	39.97	19.93	16.12
16	59.52	51.33	47.28	13.76	20.56	36*	41.69	49.2	48.62	18.01	16.62
17	67.7	71.28	52.99	5.29	21.72	37*	39.41	45.38	47.54	15.14	20.63
18	65.32	68.21	61.24	4.42	6.25	38*	34.6	37.24	36.2	7.63	4.62
19	59.02	51.33	43.06	13.76	27.04	39*	43.9	48.2	48.8	9.80	11.16
20	58	54.88	61.12	5.37	5.37	40*	35	33.86	32.23	3.26	7.91

注: “*” 代表预测样本

3 结论与讨论

本文以可调控利用的地表降雨径流量作为资源化值,并将其最大值作为降雨径流调控利用潜力,在对黄土高原降雨径流影响因素分析基础上,利用 GIS空间叠加和属性提取分析功能,对各个影响因素指标数据(多年平均汛期降雨量(6-9月)、沟壑密度、土壤有机质含量、植被盖度和治理度)进行有效的集成,建立降雨径流各个影响因素的专题图层。利用具有较强自学习能力和处理非线性问题能力的人工神经网络方法,建立了黄土高原降雨径流调控利用潜力的 BP网络模型,与建立的统计模型相比较,前者模拟精度较高,模拟结果基本上能较为准确地反映了区域降雨径流可调控利用潜力的分布趋势。

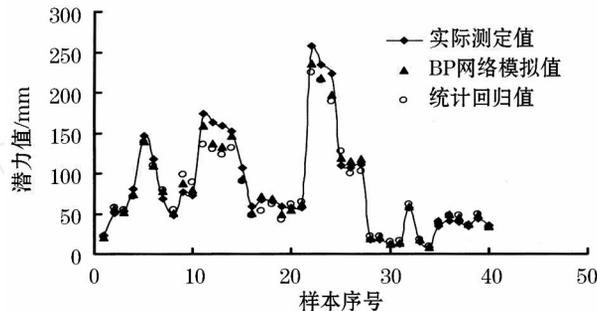


图 1 实际测定值与 BP网络模型和统计回归模型值比较

Fig 1 Comparison among actual measurements, the values from BP network model and that from statistical regression

由于研究条件等方面因素限制,要将该模型推广到更广大的区域,还要若干问题有待进一步探索。如模型所应用的数据指标在全面性和可信度上还有待于各项基础研究工作的积累;同时该模型所用的数据指标基本上都是经常处于变动中的参数,这从另一个侧面也反映了文中所建立的实际上是特定时段的潜力评价模型,有待对模型中所涉及的参数进一步进行不同的模拟配置,以反映潜力的合理变化;GIS的应用使评价效率大大提高,但由于GIS对数据类别的要求,又降低了对评价指标科学性的要求。由于研究是以整个黄土高原作为研究区域,其BP网络模型的输入参数主要考虑了黄土高原区域的具体特点和宏观性特点,具有一定的使用范围,当研究区域不同时,应具体问题具体分析,选择适宜的数据指标。

参考文献:

- [1] 郭廷辅,段巧甫.水土保持径流调控理论与实践[M].北京:中国水利水电出版社,2004.
- [2] 吴普特,汪有科,冯浩.21世纪中国水土保持科学的创新与发展[J].中国水土保持科学,2003,1(2):84-87.
- [3] 王志强,刘宝元,路炳军.黄土高原半干旱区土壤干层水分恢复研究[J].生态学报,2003,23(9):1944-1948.
- [4] IngnarMissing, Liding Chen, Rudi Hessel. Soil conditions in a small catchment on the Loess Plateau in China[J]. Catena, 2003, 54: 45-58.
- [5] 赵西宁,吴普特,冯浩.基于GIS的区域雨水资源化潜力评价模型研究[J].农业工程学报,2007,23(2):6-10.
- [6] 胡良军,张晓萍,杨勤科.黄土高原区域水土流失评价数据库的建立[J].水利学报,2002,(1):80-85.
- [7] 赵西宁,王万忠,吴普特.坡面入渗的人工神经网络模型研究[J].农业工程学报,2004,20(3):48-50.
- [8] 赵西宁,吴普特,冯浩.坡面土壤侵蚀产沙的神经网络模拟[J].土壤学报,2006,43(2):324-327.
- [9] 王万忠,焦菊英.黄土高原降雨侵蚀产沙与黄河输沙[M].北京:科学出版社,1996.
- [10] 杨文治,邵明安.黄土高原土壤水分研究[M].北京:科学出版社,2000.
- [11] 吴普特,高建恩.黄土高原水土保持新论[M].郑州:黄河水利出版社,2006.
- [12] 李锐,杨勤科.区域水土流失快速调查与管理信息系统研究[M].郑州:黄河水利出版社,2000.
- [13] Zheng Fen-Li. Effect of vegetation changes on soil erosion on the Loess Plateau[J]. Pedosphere, 2006, 16(4): 420-427.
- [14] Zhao Chuanyan, Nan Zhongren, Feng Zhaodong. GIS-assisted spatially distributed modeling of the potential evapotranspiration in semi-arid climate of the Chinese Loess Plateau[J]. Journal of Arid Environments, 2004, 58: 387-403.
- [15] 王万忠,焦菊英,郝小品.黄土高原降雨侵蚀产沙数据集[M].西安:地图出版社,1998.
- [16] 中国科学院黄土高原综合科学考察队.黄土高原地区土壤资源及其合理利用[M].北京:科学出版社,1991.
- [17] 王万忠,焦菊英.黄土高原水土保持减沙效益预测[M].郑州:黄河水利出版社,2002.
- [18] Wen C G, Lee C S. A neural network approach to multi objective optimization for water quality management in a riverbasin[J]. Water Resour Res, 1998, 34(3): 427-436.
- [19] 许东,吴铮.基于MATLAB6.X的系统分析与设计——神经网络[M].西安:西安电子科技大学出版社,2002:186-194.