

DOI: 10.5846/stxb201305241158

李荣丽, 陈志彪, 陈志强, 张晓云, 郑丽丹, 王秋云. 基于 BP 神经网络的流域生态恢复度计算——以福建长汀朱溪小流域为例. 生态学报, 2015, 35(6): 1973-1981.

Li R L, Chen Z B, Chen Z Q, Zhang X Y, Zheng L D, Wang Q Y. Calculation of ecological recovery based on bp neural network: a case study of Zhuxi Small Watershed in Changting County, Fujian Province. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(6): 1973-1981.

基于 BP 神经网络的流域生态恢复度计算 ——以福建长汀朱溪小流域为例

李荣丽, 陈志彪*, 陈志强, 张晓云, 郑丽丹, 王秋云

福建师范大学地理科学学院, 福州 350007

摘要:以福建省长汀县朱溪小流域为研究对象,通过野外调查、室内分析以及遥感影像提取相结合的方法获取数据。利用 Matlab7.0 软件建立 BP 神经网络生态恢复模型,定量评价退化生态系统的恢复程度。选择土壤理化性质(有机质、全 N、全 P、全 K、容重和 pH)、植被结构(植被盖度)、物种多样性指数(Shannon-Wiener 指数)和热环境(地表温度)等 4 个方面的 9 个指标建立退化生态系统评价体系,并作为生态恢复模型的输入层数据,生态恢复度作为输出层数据。使用 Matlab7.0 进行数据预处理、样本训练、样本检验并建立生态恢复模型。利用建立的生态恢复模型对整个朱溪小流域生态恢复度进行定量评价。结果表明,生态恢复模型预测结果与流域生态恢复的实际情况基本吻合,利用 BP 神经网络模型定量评价退化生态系统的恢复程度具有可行性。朱溪小流域内生态恢复程度极低的区域面积仅占 0.94%, 95.48% 区域为中等恢复程度,说明生态保护措施已初见成效;生态恢复程度高的区域面积仅占 3.62%,意味着未来仍需加强治理和保护工作。

关键词:BP 神经网络; 生态恢复; 模型; 朱溪小流域

Calculation of ecological recovery based on bp neural network: a case study of Zhuxi Small Watershed in Changting County, Fujian Province

LI Rongli, CHEN Zhibiao*, CHEN Zhiqiang, ZHANG Xiaoyun, ZHENG Lidan, WANG Qiuyun

College of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

Abstract: Environmental degeneration has seriously restricted the economic and social development of countries around the world. To tackle the problem, the projects of ecological restoration and reconstruction have been or are being carried out in many places. Under this background, many scholars try to assess the effects of ecological restoration through statistical method, comprehensive evaluation method, fuzzy evaluation method and grey evaluation method. However, it is difficult to discern the non-linear correlation between each assessment indicator and the degree of ecosystem restoration, as well as to decide the contribution ratio of each indicator. The methods mentioned above were complicated in assessing the contribution ratio of indicators; whereas, the back propagation neural network can solve the problems about non-linear model and contribution ratio of indicators effectively through adjusting the weight of each indicator automatically in the training process of this model. The research focuses on the small watershed of Zhuxi in Changting County, Fujian Province. The data was acquired from field investigation, lab analysis and remote sensing images which the features are extracted from. The ecosystem restoration model which can quantitatively evaluate the degree of the ecosystem restoration is built using back propagation neural network (BP-NN) by Matlab7.0 software. Firstly, four aspects covering nine indicators are chosen to

基金项目:国家自然科学基金(41171232; 40871141)

收稿日期:2013-05-24; 网络出版日期:2014-04-25

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: chenzhb408@vip.163.com

assess the restored ecosystem, including soil physicochemical properties (soil organic matter, soil total N, soil total P, soil total K, soil bulk density, pH), indices of species diversity (Shannon-Wiener), thermal environment (surface temperature) and vegetation structure (vegetation coverage). The nine indicators are the input variables and the values of ecological restoration are output of the BP-NN. Secondly, the ecosystem restoration model is built by data preprocessing, sample training and sample test using Matlab7.0 software. Lastly, the ecological restoration of Zhuxi small watershed is quantitatively evaluated by the model. The results show that the predicted values from ecosystem restoration model are in accordance with the real situation, which indicates BP-NN model is feasible in quantitative evaluation of restored ecosystem. The area of extremely low ecosystem restoration in Zhuxi small watershed occupies only 0.94% and the area of medium ecosystem restoration accounts for 95.48%, which indicates that the measures of ecological protection have achieved initial results. However, the area of high ecosystem restoration accounts for only 3.62%, suggesting more work should be done in managing and protecting environment in future. The selection of assessment indicators is another core for building the model. Based on former researches, we add thermal environment data (surface temperature) to the model in this study, which can make the assessment system more comprehensive, and achieve more ideal simulation result. In further research, more indicators including biomass, composition of litter, arbor density, and height and so on will be admitted to the assessment system for more accurate result. For direct perception of the output of the model, the dot data of model output was transformed into the surface data to create the map for the degree of ecosystem restoration.

Key Words: back propagation neural network; ecological restoration; model; Zhuxi small watershed

生态环境退化严重制约了世界各国的经济和社会发展进程,已成为全人类必须面对和亟待解决的重要课题^[1]。在此背景下,相关学者和各国政府部门积极开展退化生态系统恢复与重建工作^[2]。为了评估生态恢复与重建的成效,以及对未来工作的部署,均要求对退化生态系统恢复程度作出科学的评价。

目前,常见的评价方法多以统计学方法^[3-4]、综合评价法^[5-6]、模糊评价法^[7]、灰色评价法^[8]、主成分分析法^[9-10]等为基础,建立相应的指标体系进行定量评价^[11-12],但是,已有方法对指标贡献率的确定方面较复杂,而 BP 神经网络方法则通过网络训练不断调节权值,方便且精度高。另外,此方法适合于非线性模式识别和分类预测问题,可以通过学习逼近任何非线性函数^[13-14],适合类似本研究这样的非线性问题。

综上,本文选择具有代表性的土壤侵蚀极为严重的中国亚热带红壤地区,朱溪小流域为研究区域^[15],引入 BP 神经网络方法,采用 BP 算法建立生态恢复定量评价模型,评价朱溪小流域的生态恢复情况。这既是对生态恢复与重建评价方法的有益尝试和探索,也可对流域今后的治理工作提供决策依据,兼具理论和现实意义。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区自然概况

朱溪小流域位于福建西南部的长汀县河田镇(116°23′30″—116°30′30″E, 25°38′15″—25°42′55″N)(图1),属中亚热带季风性湿润气候,年平均气温 18.4℃,年平均降水量 1 730 mm,年平均径流量 950—1020 mm。地貌类型以低山丘陵为主,土壤主要为燕山晚期矿物晶粒粗大的黑云母花岗岩,在长期湿热气候条件下风化发育而成的红壤、侵蚀红壤。地带性植被为亚热带常绿阔叶林,但因长期严重的水土流失和人为破坏,地带植被遭到严重破坏,原始植被几乎全部被次生林所替代,主要植被类型为次生马尾林、幼林,树种单一,结构简单^[15]。

1.2 基础数据获取

本研究采用野外调查、室内分析及遥感影像提取相结合的方法获取相关数据。2009 年 7 月,采用典型 SOTER(Soil and Terrain Digital Database)单元和栅格结合法,选择朱溪小流域内涵盖研究区内各种土地覆被

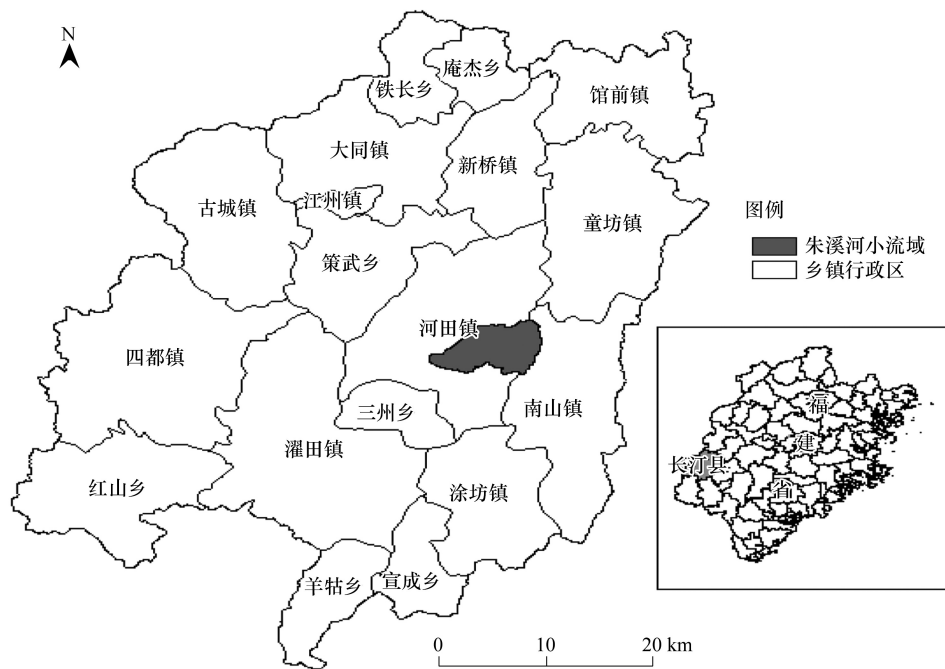


图 1 研究区地理位置图

Fig.1 The location of study region

利用类型的 118 个点作为研究样点(图 2)。依据不同植被类型布设 20 m×20 m 的标准样地 46 个,进行植物群落调查。同时随机挖取 3 个土壤剖面,取表层土 0—20 cm,挑去石砾与根系,带回实验室做相应处理,测定土壤养分指标。测定方法采用浓硫酸-重铬酸钾加热法测定土壤有机质;开氏定氮法测定土壤全 N;浓硫酸-高氯酸消煮-原子吸收法测定土壤全 K;浓硫酸-高氯酸消煮-钼锑抗比色法测定土壤全 P;室内风干水土电位法(水土比 5:1)测定土壤 pH 值。

植被盖度、地表温度数据通过软件 ENVI4.2、ArcGIS9.2 提取 SPOT5、ASTER 影像数据获取;Shannon-Wiener 多样性指数根据公式计算得到。

1.3 数据处理与研究方法

采用 Excel 软件对实测数据进行前期处理,基于 BP 算法,利用 Matlab7.0 软件建立生态恢复模型。以 118 个样点数据为基础,应用 ArcGIS9.2 软件地统计模块的克里格空间插值和 ENVI4.2 软件提取影像等获取流域内的 9 个评价指标的栅格数据,作为生态恢复评价模型应用的输入层数据,并将其输入已建立的评价模型,得到整个流域的生态恢复度值。最后借助 ArcGIS9.2 软件生成整个流域的生态恢复度结果图。

2 生态恢复度模型的构建

2.1 BP 网络结构和算法

典型的 BP 神经网络是一个由输入层、隐含层和输出层构成的三层前馈神经网络(图 3)。BP 网络的学习过程由信息的正向传播和误差的反向传播组成。当给定网络一组输入模式时,BP 网络将依次对这组输入模

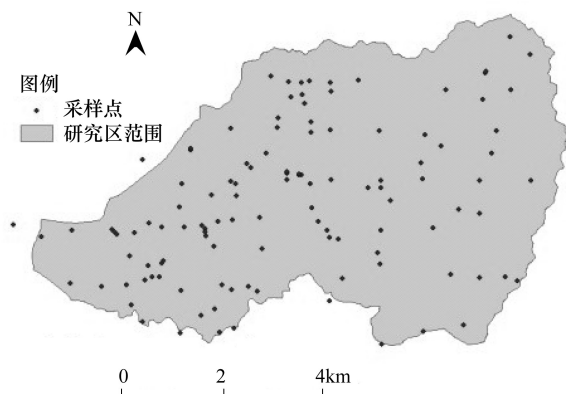


图 2 朱溪小流域土壤采样分布图

Fig.2 The distribution of sampling point in the small watershed of Zhuxi

式按如下方式学习:首先,把输入模式从输入层传输到隐含层单元,经隐含层单元逐层处理后,产生一个输入模式传送到输出层,这一过程称为正向传播;然后将输出结果和期待值进行比较,如果没有达到所预计的期望,则转变为误差的反向传播,将误差沿原路径返回,通过修改各层神经元的连接权值,使误差信号变小。这种正向传播和反向传播相互交替,看成一个“记忆训练”的过程。系统不断地循环这两个过程,重复学习,一直到输出值和期待值的误差减小到规定范围内,系统停止学习。此刻将新样本输入到已经训练好的网络,就可以得到相应的输出值^[16]。有研究表明,一个三层神经网络模型就可解决一般函数的拟合逼近问题,因此,三层人工神经网络能满足要求,即网络的拓扑结构由输入层、单隐含层和输出层组成^[17]。

2.2 设定生态恢复度值

根据中亚热带地区森林生态系统恢复进程,将裸地—草地—马尾松和灌丛—针阔混交林—常绿阔叶林 5 个不同恢复阶段分别用 0—0.2、0.2—0.4、0.4—0.6、0.6—0.8、0.8—1 等 5 个数值区间表示,定量表征退化生态系统恢复与重建程度。其中,常绿阔叶林生态恢复度最佳,设为恢复等级 1,针阔混交林、马尾松和灌丛、草地次之,依次设为恢复等级 2、恢复等级 3 和恢复等级 4,裸地的生态恢复度最低,设为恢复等级 5。

2.3 指标体系构建

关于退化生态系统评价指标,国际恢复生态学会提出了 9 个生态系统特征,相关学者在实践应用中将其归纳为:1)生态学过程(如,养分库、土壤有机质以及生物间的相互关系)^[18];2)植被结构(如,植被盖度、生物量、凋落物结构、乔木密度、高度等)^[19-20];3)物种多样性^[21-22]等三个方面^[23]。此外,鉴于环境因子(如温度、湿度、降水等微域小气候)与生态系统类型之间的联系,比如:炎热的环境严重制约着植物的生长,因此本研究增加了热环境数据,以进一步完善和丰富指标体系。

综上,本文从土壤理化性质(有机质、全 N、全 P、全 K、容重和 pH)、植被结构(植被盖度)、物种多样性(Shannon-Wiener 指数)以及热环境(地表温度)四个方面选择 9 个指标建立退化生态系统评价体系。

2.4 模型样本选取

118 个样地中,选择对植物群落做过调查的 46 个样地,因此,46 个不同恢复程度的样本作为模型建立的样本数据(表 1),其中包括常绿阔叶林样地 7 个,针阔混交林样地 6 个,马尾松和灌丛样地 21 个,草地样地 7 个,裸地样地 5 个。然后在样本数据中按 10% 的比例,随机抽取能够代表 5 个不同恢复程度(样地编号分别为 7、11、19、31、39 和 44)的 6 个样地,作为测试样本,其余 40 个样地为训练样本。

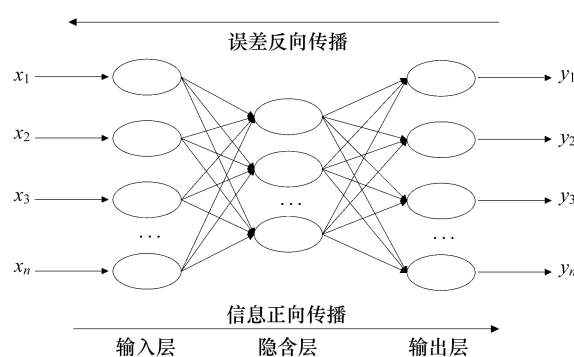


图 3 BP 神经网络结构图

Fig.3 The structure of BP neural network

表 1 模型样本数据

Table 1 The sample data of model

样地类型 Type of sample plot	编号 No.	有机质 Organic matter/ (g/kg)	全氮 Total N/ (g/kg)	全磷 Total P/ (g/kg)	全钾 Total K/ (g/kg)	容重 Bulk density/ (g/cm ³)	pH	植被盖度 Vegetation coverage/%	土壤温度 Soil temperature/ /°C	Shannon-Wiener 多样性指数
常绿阔叶林	1	62.05	0.86	0.15	4.50	1.00	4.62	1	17	1.905
Evergreen broad-leaf forest	2	53.24	0.76	0.15	5.73	1.02	4.64	1	20	1.905
	3	67.38	1.00	0.22	3.10	1.14	3.84	1	18	1.905
	4	58.28	0.77	0.17	3.78	0.93	3.97	1	20	1.881
	5	32.28	0.38	0.14	6.68	1.26	4.87	0.75	16	1.905
	6	67.38	1.03	0.19	7.35	0.99	4.60	0.88	17	1.905

续表

样地类型 Type of sample plot	编号 No.	有机质 Organic matter/ (g/kg)	全氮 Total N/ (g/kg)	全磷 Total P/ (g/kg)	全钾 Total K/ (g/kg)	容重 Bulk density/ (g/cm ³)	pH	植被盖度 Vegetation coverage/%	土壤温度 Soil temperature/ /℃	Shannon- Wiener 多样性指数
混交林 Mixed forest	7	54.65	0.97	0.16	8.89	0.98	4.37	0.80	19	1.905
	8	23.64	0.46	0.10	6.88	0.98	4.38	0.76	15	1.428
	9	42.18	0.40	0.11	2.20	0.99	4.01	1	18	1.428
	10	39.24	0.70	0.18	6.65	1.30	4.66	0.98	17	1.428
	11	32.80	0.48	0.12	7.15	0.99	4.39	1.00	16	1.428
	12	26.95	0.47	0.11	17.75	1.21	4.63	1	21	1.649
马尾松和灌丛 Pinus massoniana Lam and Shrup	13	38.11	0.37	0.15	16.93	1.32	4.71	0.97	22	1.428
	4	5.19	0.05	0.08	14.28	1.27	4.44	0.89	21	1.428
	15	10.77	0.16	0.13	3.80	1.40	4.61	0.68	19	1.428
	16	7.44	0.11	0.13	10.55	1.39	4.69	0.68	20	1.428
	17	4.02	0.06	0.07	9.95	1.55	4.73	0.65	18	1.428
	18	4.35	0.05	0.07	4.83	1.33	4.55	0.6	21	1.428
	19	8.45	0.19	0.08	19.88	1.24	4.68	0.95	17	1.428
	20	6.03	0.06	0.07	9.70	1.38	4.60	0.59	21	1.649
	21	11.13	0.14	0.12	9.00	1.28	4.41	0.77	19	1.881
	22	5.32	0.06	0.16	4.20	1.31	4.60	0.85	21	1.881
	23	10.85	0.16	0.08	4.48	1.18	4.56	0.95	21	1.649
	24	6.36	0.05	0.07	11.93	1.21	4.79	0.70	18	1.649
	25	12.66	0.19	0.15	8.43	1.14	4.58	0.76	22	1.428
	26	9.41	0.15	0.11	12.33	1.36	4.63	1	21	1.428
	27	9.77	0.18	0.11	8.33	1.15	4.69	0.53	23	1.428
	28	6.81	0.09	0.05	25.08	1.39	5.11	0.75	20	1.881
	29	7.62	0.14	0.16	7.25	1.25	4.85	0.84	21	1.881
	30	5.24	0.06	0.08	6.28	1.38	4.68	0.85	19	1.428
	31	12.69	0.18	0.08	14.63	1.28	4.36	0.95	19	1.428
	32	24.25	0.30	0.11	3.63	1.36	4.29	0.70	21	1.881
草地 Grass land	33	30.80	0.34	0.11	14.88	1.27	4.45	0.83	20	1.428
	34	20.05	0.39	0.14	12.63	1.10	4.49	1	18	1.428
	35	22.53	0.62	0.31	1.23	1.37	5.13	0.70	21	0.910
	36	15.06	0.34	0.12	6.15	1.07	4.34	0.90	16	0.910
	37	23.84	0.36	0.13	9.50	1.21	4.58	0.60	16	0.910
	38	12.35	0.18	0.10	15.13	1.44	4.55	0.80	19	0.910
	39	20.94	0.44	0.16	14.65	1.18	4.39	0.87	17	0.910
	40	15.09	0.39	0.46	5.40	1.48	5.03	0.90	24	0.910
裸地 Bare land	41	14.63	0.35	0.15	5.73	1.48	4.52	0.76	22	0.910
	42	.29	0.05	0.10	22.73	1.45	4.99	0.10	22	0.212
	43	2.51	0.04	0.11	4.35	1.44	4.77	0.30	20	0.212
	44	1.85	0.03	0.01	7.95	1.55	4.74	0.10	20	0.212
	45	1.72	0.03	0.10	8.45	1.58	4.64	0.10	21	0.212
	46	3.69	0.03	0.05	4.68	1.62	4.89	0.10	21	0.212

2.5 结果输出

在 BP 人工神经网络拓扑结构中,输入层神经元与输出层神经元个数是由问题的本身决定。本文中输入层神经元个数为选定的 9 个评价指标,输出层为生态恢复度等级,隐含层的神经元数采用逐步减少神经元个

数的删减法则和逐步增加神经元个数的扩张法则试算确定,经过反复比较各种隐含层神经元个数网络收敛情况,最后确定隐含层最优神经元个数为 9 个。为保证网络快速收敛,采用 Levenberg-Marquardt 反传算法,隐含层神经元采用的传递函数为双曲正切 S 型函数 tansig , 输出层神经元采用 S 型传输函数 logsig , 构建的生态恢复模型见图 4。

2.6 模型训练

为避免训练过程中出现过饱和状态,提高网络收敛速度,首先对训练样本(40 个)进行归一化处理,设定网络训练函数为 trainlm , 性能函数为 mse , 训练参数为默认值,网络训练 8 次后,达到设定的精度,网络收敛,训练结束。

2.7 模型检验

网络训练完成以后,利用检验样本(6 个)进行测试,检查模型输出值和真实值之间的误差。由表 2 可见,应用 BP 神经网络模型输出的生态恢复度值与真实值非常接近,绝对误差处于 ± 0.03 之间,相对误差低于 7%,不会产生分类歧义,所以网络对测试样本的分辨 100% 成功,由此可以认为网络的映射能力较高,完全能够进行正确分类,模型训练精度及检验结果可信度均较高,检验通过。

3 结果与分析

3.1 流域生态恢复度的计算

BP 神经网络生态恢复模型的应用原理,是将被评价对象的特征参数作为评价指标,由输入层输入模型,模型根据训练记忆作出判读,并输出对应的生态恢复度值。因此,在应用模型评价朱溪小流域生态恢复程度时,首先要提取整个流域的 9 个评价指标数据。

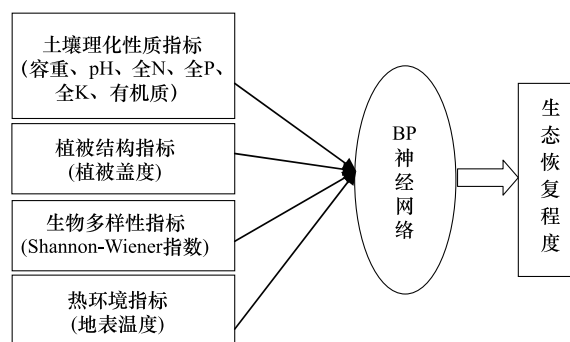


图 4 BP 网络生态恢复模型

Fig.4 BP network model of Ecological restoration

表 2 模型检验结果和期望输出对比

Table 2 Comparison of expected value and model test results

测试样本编号 No. of sample	7	11	19	31	39	44
模型输出值 Output value of model	0.9940	0.8289	0.6011	0.6257	0.3764	0.2131
期望输出值 Output value of expectation	1	0.8	0.6	0.6	0.4	0.2
绝对误差 Absolute error	-0.006	0.0289	0.0011	0.0257	-0.0236	0.0131
相对误差 Relative error/%	-0.60	3.49	0.18	4.11	6.27	6.15

本文中,通过 ENVI4.2 软件提取 SPOT5、ASTER 影像获取植被盖度、地表温度数据。其余指标获取途径如下:以 110 个样点数据为基础,应用 ArcGIS9.2 软件的地统计模块,采用普通克里格最优内插值法,得到整个朱溪小流域内土壤有机质、全 N、全 P、全 K、容重、pH 以及生物多样性指标(Shannon-Wiener 指数)的空间分布栅格图,部分图给出(图 5—图 10)。然后,借助 ArcGIS9.2 软件,将各个指标空间分布图的栅格单元转化成点数据,作为模型的输入样本。整个小流域共有 65 567 个输入样本。

将输入样本输入 BP 神经网络生态恢复模型,由模型计算得出 65 567 个生态恢复度值。然后,利用 ArcGIS9.2 软件剔除未治理区域的(耕地、交通用地、水域、园地、居住地与工矿用地等)数据(因本文主要对朱溪小流域内实施治理措施的林地、草地等作出评价),根据剩余数据生成朱溪小流域生态恢复度分布图(图 11),并统计不同恢复等级的分布面积(表 3)。

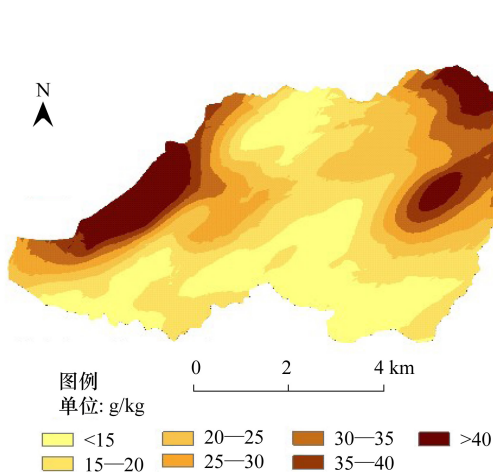


图 5 土壤有机质空间分布图

Fig.5 The spatial distribution of SOM

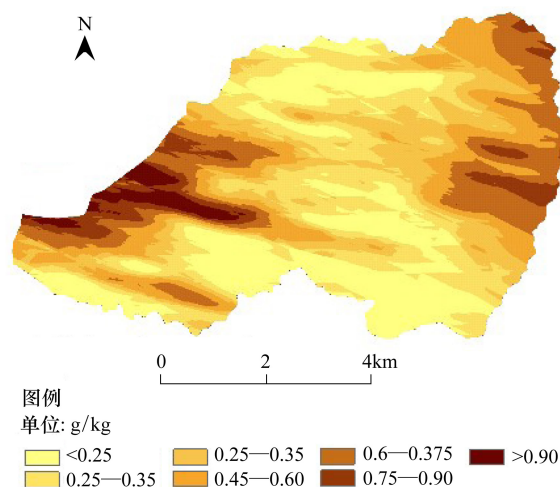


图 6 土壤全氮空间分布图

Fig.6 The spatial distribution of soil total N

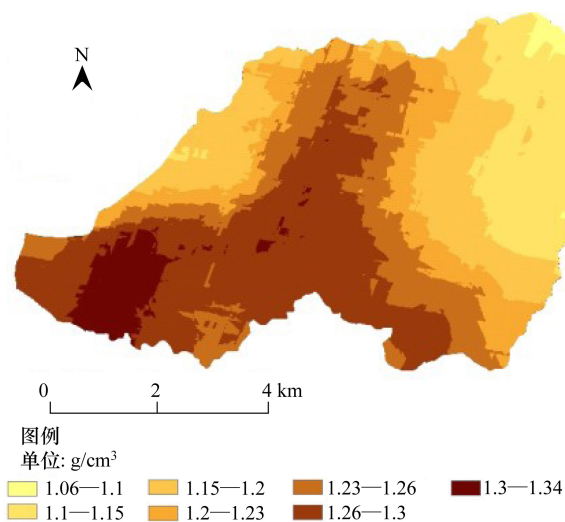


图 7 土壤容重空间分布图

Fig.7 The spatial distribution of soil bulk density

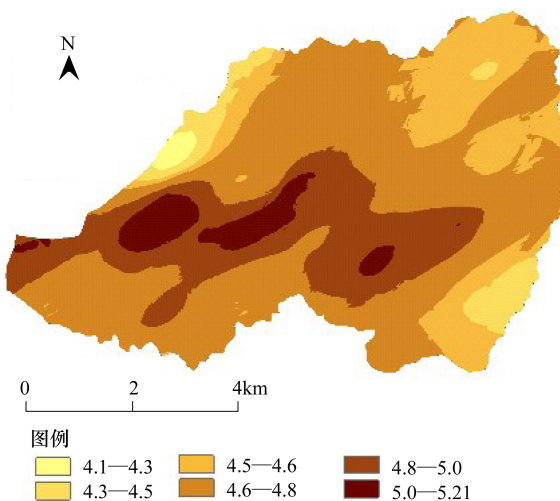


图 8 土壤 pH 空间分布图

Fig.8 The spatial distribution of soil pH

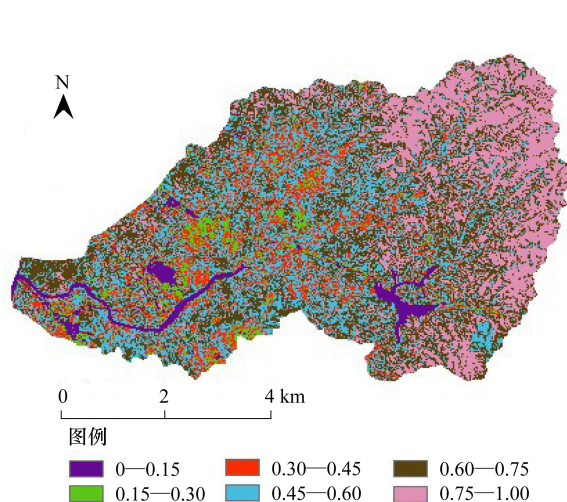


图 9 植被盖度图

Fig.9 The figure of vegetation coverage

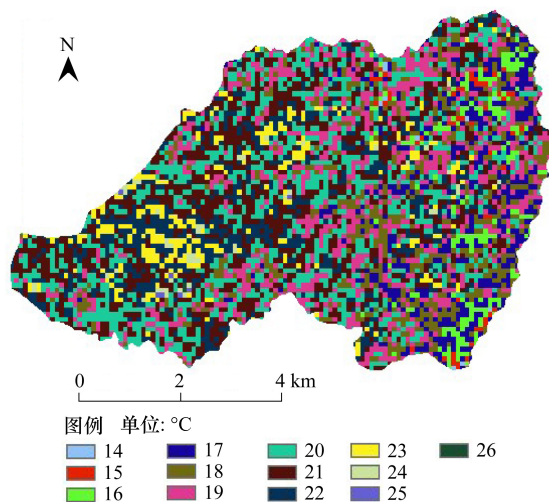


图 10 地表温度图

Fig.10 The figure of surface temperature

由图 11 和表 3 可以看出,朱溪小流域内 4 级、5 级地面积较小,仅占总面积的 8.04%,土地利用类型为居民用地与耕地,因受人为活动影响较大,其生态恢复程度较差。2 级地和 3 级地占地面积最大,分布最广,两者共占流域总面积的 88.35%。其中,3 级地占总面积的 44.11%,上、中、下游都有分布,且集中在流域东部;2 级地所占比例为 44.24%,主要分布在流域上游和中游;1 级地占地面积也较少,只有 3.62%,分布也比较零散,主要分布在流域东北部与中部,还有一部分零星分布在流域东部。

总体来看,朱溪小流域内生态恢复程度极低(等级 4 和等级 5)的区域面积较小,大部分区域为中等恢复程度(等级 2 和等级 3),说明生态保护措施发挥了一定作用。另一方面,研究区内生态恢复程度高的区域面积(等级 1)仍很小,这意味未来仍需加强治理和保护工作。

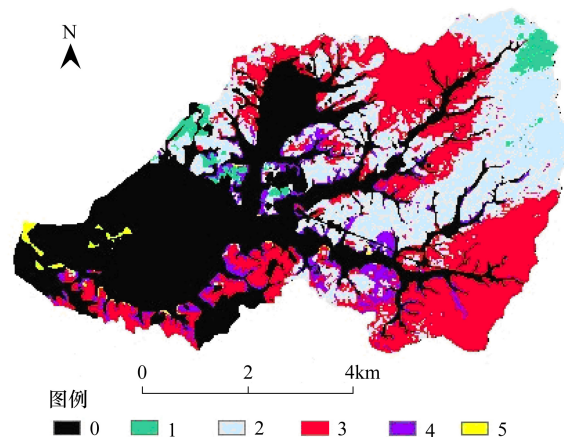


图 11 朱溪小流域生态恢复程度

Fig.11 Ecological restoration of the small watershed of Zhuxi

0: 被剔除的部分,此部分为耕地、交通用地、水域、园地、居住地与工矿用地,不参与评价;1: 生态恢复度为 0.8—1;2: 生态恢复度为 0.6—0.8;3: 生态恢复度为 0.4—0.6;4: 生态恢复度为 0.2—0.4;5: 生态恢复度为 0—0.2

表 3 朱溪小流域生态恢复度分级面积统计数据

Table 3 The statistic of ecological recovery degree grading area in the small watershed of Zhuxi

生态恢复度等级 Degree of ecological recovery	1	2	3	4	5
生态恢复度范围 Range of ecological recovery	1—0.8	0.8—0.6	0.6—0.4	0.4—0.2	0.2—0
面积 Area/hm ²	99.82	1 219.94	1 216.33	196.52	25.15
占总面积百分比 Percentage/%	3.62	44.24	44.11	7.13	0.91

4 讨论

生态恢复定量评价面临的难点,是各个评价指标与生态恢复度之间的非线性映射关系以及各指标贡献率的确定,克服难点的关键,在于如何处理非线性关系和贡献率的问题。BP 神经网络模型具有感知、记忆和思维、自组织、自适应、抗干扰和容错性强等优点,模型采用误差反向传播算法,通过调整隐含层节点数,提高网络学习能力,修正训练结果,实现任意精度无限逼近任何非线性函数,克服了传统方法在映射关系方面的不足。此外,在学习训练过程中,模型依据各指标对结果的影响程度,自动调整各指标的权值,解决了贡献率如何确定的问题。因此,BP 网络具备的先天优势恰好匹配了生态恢复评价的需要,采用 BP 神经网络建模,评价生态恢复程度,可行性较高。

评价指标体系的选取是建模的另一个核心部分,本文使用热环境(地表温度)数据,使得评价体系更为全面,并得到了较为理想的模拟结果。未来相关工作,可以将生物量、凋落物组成、乔木密度、高度等更多指示生态系统特征的指标融入评价体系,模型的评价结果将更为完善和精确。

基于 BP 算法建立的各种模型已经被广泛应用于各个领域,本文借助建立的 BP 神经网络模型,对朱溪小流域生态恢复程度做了定量评价,研究结果与实地情况基本相符,能够较好的反映当地的生态恢复现状,实践验证了 BP 神经网络在生态恢复评价领域同样具有可行性。

另外,为了直观的展示模型的输出结果,本研究借助 ArcGIS9.2 软件,将模型输出的点数据转换成面数据,生成整个朱溪小流域的生态恢复度分布图,更加直观。

参考文献 (References):

- [1] Freer-Smith P H. Do pollutant-related forest declines threaten the sustainability of forests? *Ambio*, 1998, 27(2): 123-131.
- [2] Li W H. Degradation and restoration of forest ecosystems in China. *Forest Ecology and Management*, 2004; 201(1): 33-41.
- [3] McKee K L, Faulkner P L. Restoration of biogeochemical function in mangrove forests. *Restoration Ecology*, 2000, 8(3): 247-259.
- [4] Watts C H, Gibbs G W. Revegetation and its effect on the ground-dwelling beetle fauna of Matiu-Somes Island, New Zealand. *Restoration Ecology*, 2002, 10(1): 96-106.
- [5] 高春风. 生态环境质量指标体系的建立与应用. *渤海大学学报: 自然科学版*, 2006, 27(3): 215-219.
- [6] 刘绮, 潘伟斌. 环境质量评价. 广州: 华南理工大学出版社, 2004.
- [7] 丁立仲, 卢剑波, 徐文荣. 浙西山区上梧溪小流域生态恢复工程效益评价研究. *中国生态农业学报*, 2006, 14(3): 202-205.
- [8] 於方, 周昊, 许申来. 生态恢复的环境效应评价研究进展. *生态环境学报*, 2009, 18(1): 374-379.
- [9] 李蕊, 邱微, 赵庆良, 刘正茂. 层次分析法应用于黑龙江省生态环境质量评价研究. *环境科学*, 2006, 27(5): 1031-1034.
- [10] Jollands N, Lermitt J, Patterson M. Aggregate eco-efficiency indices for New Zealand—a principal components analysis. *Journal of environmental Management*, 2004, 73(4): 293-305.
- [11] Palmer M, Bernhardt E, Allan J, Lake P, Alexander G, Brooks S, Carr J, Clayton S, Dahm C N, Follstad Shah J, Galat D L, Loss S G, Goodwin P, Hart D D, Hassett B, Jenkinson R, Kondolf G M, Lave R, Meyer J L, O'donnell T K, Pagano L, Sudduth E. Standards for ecologically successful river restoration. *Journal of Applied Ecology*, 2005, 42(2): 208-217.
- [12] 马姜明, 刘世荣, 史作民, 刘兴良, 缪宁. 退化森林生态系统恢复评价研究综述. *生态学报*, 2010, 30(12): 3297-3303.
- [13] 周开利, 康耀红. 神经网络模型及其 MATLAB 仿真程序设计. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [14] 高隽. 人工神经网络原理及仿真实例. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [15] 陈志彪. 花岗岩侵蚀山地生态重建及其生态环境效应 [D]. 福州: 福建师范大学, 2005.
- [16] Rhoades C C, Eckert G E, Coleman D C. Effect of pasture trees on soil nitrogen and organic matter: implications for tropical montane forest restoration. *Restoration Ecology*, 1998, 6(3): 262-270.
- [17] Parrotta J A, Knowles O H. Restoration of tropical moist forests on bauxite-mined lands in the Brazilian Amazon. *Restoration Ecology*, 1999, 7(2): 103-116.
- [18] 李洪义, 史舟, 沙晋明, 程街亮. 基于人工神经网络的生态环境质量遥感评价. *应用生态学报*, 2006, 17(8): 1475-1480.
- [19] 李湘梅, 周敬宣. 基于 BP 神经网络的城市总生态足迹预测研究——以武汉市为例. *环境科学与技术*, 2007, 30(8): 68-70.
- [20] Clewell A F. Restoration of riverine forest at Hall Branch on phosphate-mined land, Florida. *Restoration Ecology*, 1999, 7(1): 1-14.
- [21] Van Aarde R J, Ferreira S M, Kritzing J J. An evaluation of habitat rehabilitation on coastal dune forests in northern KwaZulu-Natal, South Africa. *Restoration Ecology*, 1996, 4(4): 334-345.
- [22] Reay S D, Norton D A. Assessing the success of restoration plantings in a temperate New Zealand forest. *Restoration Ecology*, 1999, 7(3): 298-308.
- [23] Ruiz-Jaen M C, Mitchell Aide T. Restoration success: How is it being measured? *Restoration Ecology*, 2005, 13(3): 569-577.