小流域综合治理工程对生态服务价值的影响

胡淑萍[1]，尹忠东[2]，高国雄[3]

(1. 中国林业科学研究院 资源信息研究所，北京 100091；
2. 北京林业大学 水土保持学院，北京 100083；3. 西北农林科技大学 资源与环境学院，陕西 杨凌 712100)

摘　要：以第 5 期长江上游水土保持重点防治综合治理工程凉山州治理区为研究对象，参照中国陆地生态系统单位面积生态系统服务价值当量表，结合研究区粮食平均产量和收购价格，分析了研究区生态系统服务价值的变化情况，并构建了小流域综合治理措施与生态服务价值模型。研究结果表明，1999—2003 年治理区土地利用类型变化较大，其中未利用地和耕地分别减少 36 038.67 和 5 498.50 hm^2，林地和草地分别增加 35 614.30和 5 889.53 hm^2。通过实施治理工程，治理区生态服务总价值从 1999 年的 1.37×10^9 元增加到 2003 年的 1.85×10^9 元；单项生态服务功能除食物生产功能的价值量减少 3.31×10^5 元外，其余均有不同程度增长；各土地利用类型只有林地和草地对生态服务价值增量起到正效应，其中林地对生态服务价值变化的贡献率为 89.04%，是治理区生态服务价值变化的主要原因。小流域综合治理措施与生态服务价值的 PCA—RBF 模型表明，网络平均预测精度为 94.8%，可准确反映小流域治理措施对生态服务价值变化的影响。

关键词：生态服务价值；主成分分析；径向基函数神经网络；小流域；综合治理

文献标识码：A　　**文章编号**：1000-288X(2012)06-0286-06　　**中图分类号**：F301.24

Effect of Soil and Water Conservation on Ecosystem Service Value in Small Watersheds

HU Shu-ping[1], YIN Zhong-dong[2], GAO Guo-xiong[3]

(1. *Research Institute of Forest Resources Information Techniques, Chinese Academy of Forestry, Beijing* 100091, *China*; 2. *College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing* 100083, *China*; 3. *College of National Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: Taken Liangshan County, one of the key demonstration sites in the fifth initiative regarding soil and water conservation in upper Yangtze River as the study area, we analyzed the changes in ecosystem service values of Liangshan County, and developed comprehensive management practices and related models for assessing ecosystem service values in small watersheds, based on the published service values of Chinese terrestrial ecosystems and local grain yield and market price. The results showed that the land use type changed greatly from 1999 to 2003, as the areas of unused and cultivated lands decreased 36 038.67 hm^2 and 5 498.50 hm^2, and the areas of forest and pasture lands increased 35 614.30 hm^2 and 5 889.53 hm^2, respectively. Under the scenario that the proposed comprehensive management practices were carried out, the total ecosystem service value could increase from 1.37×10^9 to 1.85×10^9 Yuan. Except the value of food production decreased 3.31×10^5 Yuan, the other ecosystem service functions increased significantly but to various degrees. It was also found that only forest and pasture lands played positive roles in enhancing ecosystem service values, up to 89.4%. Their changes were the major reason for the increase of ecosystem service value. The average prediction accuracy of the principal component analysis(PCA)—radial basis function(RBF) model reached 94.8%, indicating that the model accurately reflected the influences of small watershed management measures on the ecosystem service values.

Keywords: ecosystem service value; principal component analysis(PCA); radial basis function(RBF) networks; small watershed; comprehensive management

收稿日期：2011-11-07　　**修回日期**：2012-01-10

资助项目：国家基础科学(973)重点发展计划项目"西南紫色土区水土流失综合调控原理与治理范式"(2007CB407207-01)

作者简介：胡淑萍(1980—)，女(汉族)，陕西省渭南市人，博士，助理研究员，主要从事水土保持与退化生态系统恢复方面的研究。E-mail: hshuping@163.com。

生态系统服务是指通过生态系统的结构、过程和功能直接或间接得到的生命支持产品和服务,这些产品和服务是人类生活的必需品和人类生活质量的保证[1]。

虽然人类从 20 世纪 70 年代就开始了对生态系统服务及其价值的研究,但直到 1997 年 Costanza 等人的研究[2]才使得生态系统服务价值评估的原理及方法从科学意义上得以明确。目前,生态系统服务经济价值的定量评估已成为当前生态学与资源经济学、环境经济学和生态经济学研究的交叉前沿领域[3-5]。小流域综合治理是按照水土流失的特点和规律,采取工程措施、植物措施和农业技术措施相结合,因地制宜,因害设防,形成以小流域为单元的综合防治体系[6]。由于在改善水土流失区生态环境、发展农村经济、促进经济社会可持续发展方面做出了显著的贡献,小流域综合治理已成为我国水土保持生态建设的一条重要技术路线[7]。由于小流域综合治理是一项复杂的系统工程,措施因子较多,如何将其与生态服务价值定量评估联系起来,解决水土流失治理和生态环境恢复中存在的问题,仍是当前和今后研究的重点。

凉山彝族自治州地处横断山区边缘,境内流域面积 500～1 000 km^2 的河流 22 条,100～500 km^2 的河流 160 余条,水量丰沛,落差大,水能资源占长江流域的 13.8%。然而该区地质构造复杂,雨季集中,加之不合理的开发利用,水土流失十分严重。对凉山州小流域综合治理工程进行生态服务价值的评估与模拟,不仅对生态环境的修复和实现区域生态社会经济可持续发展具有重要意义,对确保长江上游生态屏障的建设也具有重大作用。

1　研究方法和数据来源

1.1　生态服务价值计算方法

Costanza 等人[1]将全球生态系统类型划分为海洋、森林、草原、城市等 16 个大类,生态系统服务划分为气候调节、干扰调节、土壤形成、废物处理等 17 项功能。由于对某些生态系统单位面积的服务价值估计过高或过低,诸多学者都对其研究进行了讨论和批评[8-9],但该方法体系仍是目前为止应用最为广泛的。谢高地等人[10]以 Costanza 等人的研究为参考,结合对我国专业人士进行的生态问卷调查结果,制定了中国陆地生态系统单位面积生态服务价值当量表。生态系统服务价值当量因子指生态系统产生的生态服务的相对贡献大小的潜在能力,定义为 1 hm^2 全国平均产量的农田每年自然粮食产量的经济价值,1 个生态服务价值当量因子的经济价值等于当年全国平均粮食单产市场价值的 1/7。本研究根据凉山州 1999—2003 年水稻、小麦、豆类、玉米和薯类的产量及价格,计算出该区 1 个生态服务价值当量因子的生态服务价值为 622.97 元/hm^2(表 1),然后利用 Costanza 提出的 ESV 计算公式来计算,计算公式为:

$$ESV=\sum A_k VC_k \quad (1)$$

$$ESV_f=\sum A_k VC_{jk} \quad (2)$$

式中:ESV——研究区生态系统服务总价值(元);A_k——研究区内土地利用类型 k 的分布面积(hm^2);VC_k——土地利用类型 k 单位面积上生态系统服务价值系数[元/(hm^2·a)];ESV_f——生态系统单项服务功能价值(元);VC_{jk}——生态系统单项服务功能价值系数[元/(hm^2·a)];k——土地利用类型;f——生态系统单项服务功能类型。

表 1　研究区不同土地利用类型单位面积生态服务价值　　元/hm^2

生态服务功能	森林	草地	农田	湿地	水体	荒漠
气体调节	2 180.40	498.38	311.49	1 121.35	0.00	0.00
气候调节	1 682.02	560.67	554.44	10 652.80	286.57	0.00
水源涵养	1 993.51	498.38	373.78	9 656.05	12 696.14	18.69
土壤形成与保护	2 429.59	1 214.79	909.54	1 065.28	6.23	12.46
废物处理	816.09	816.09	1 021.67	11 325.61	11 325.61	6.23
生物多样性保护	2 030.88	679.04	442.31	1 557.43	1 551.20	211.81
食物生产	62.30	186.89	622.97	186.89	62.30	6.23
原材料	1 619.72	31.15	62.30	43.61	6.23	0.00

1.2　敏感性分析方法

为验证研究成果是否适合研究区每一类生态系统的生态服务功能,引入经济学中常用的弹性系数概念来计算价值系数的敏感性指数(CS)[11-12]以确定 ESV 随时间变化对 VC 变化的依赖程度,其含义为:因变量变化的百分比与自变量变化的百分比的比值,即指 VC 变动 1%引起 ESV 的变化情况。如果 CS>1,表明 ESV 对 VC 是富有弹性的;如果 CS<1,则说

明 ESV 对 VC 是缺乏弹性的，比值越大，表明 VC 的准确性越关键。本文通过分别调整 50%的生态系统服务价值系数来计算 CS，从而来说明 ESV 对 VC 的敏感程度。敏感性系数计算公式为：

$$CS=\left|\frac{(ESV_j-ESV_i)/ESV_i}{(VC_{jk}-VC_{ik})VC_{ik}}\right| \quad (3)$$

式中：ESV——生态系统服务总价值（元）；VC——生态服务价值系数〔元/(hm^2 · a)〕；i,j——表示生态服务价值系数调整前和调整后；k——土地利用类型。

1.3 PCA－RBF 神经网络模型

主成分分析—径向基函数（PCA—RBF）神经网络模型是由主成分分析和径向基函数神经网络所组成的。主成分分析处在原始变量集和径向基函数神经网络之间，它的作用是对将要输入径向基函数神经网络的变量进行筛选，把累计贡献率大的变量集作为网络的输入，然后利用径向基函数神经网络对样本进行训练和测试，从而得到精度更高，稳定性更好的预测值[13]。

1.3.1 主成分分析 主成分分析作为输入数据降维和揭示变量间线性相关关系的一种统计相关分析技术，从可观测的显示变量中提取信息，组成不可直接观测的隐含变量，保证信息数据丢失最少原则下对高维变量空间进行降维，使低维特征向量中的主成分变量保持原始变量的特征信息而消除冗余信息。

记 X 是一个有 n 个样本点和 p 个变量的数据表，即 $X=(x_{ij})_{n\times p}=(x_1,x_2,\cdots,x_p)$，其中 $x_j=(x_{1j},x_{2j},\cdots,x_{nj})^T\in R^n$ 对应第 j 个变量。

（1）对数据进行标准化处理，即

$$\tilde{x}=\frac{x_{ij}-\bar{x}_j}{s_j} \quad (i=1,2,\cdots,n;\ j=1,2,\cdots,p) \quad (4)$$

式中：$\bar{x}_j$——x_j 的样本平均值；s_j——x_j 的样本标准差。

（2）计算标准化数据矩阵 $\boldsymbol{X}$ 的协方差矩阵 $\boldsymbol{V}$。这时 $\boldsymbol{V}$ 又是 $\boldsymbol{X}$ 的相互关系矩阵。

（3）求 $\boldsymbol{V}$ 的前 m 个特征值 $\lambda_1\geqslant\lambda_2\geqslant,\cdots,\geqslant\lambda_m$，以及对应的特征向量 $a_1,a_2,\cdots,a_m$，要求它们是标准正交的。

（4）求第 h 个主成分 X_h'，

$$X_h'=Xa_h=\sum_{j=1}^{p}a_{hj}x_j \quad (5)$$

式中：a_{hj}——组合系数 a_h 的第 j 个分量。

（5）求 m 个主成分的累积贡献率

$$Q_m=\sum_{h=1}^{m}\lambda_h/\sum_{j=1}^{p}s_j^2 \quad (6)$$

经过主成分分析可以在保留主要信息的基础上降低神经网络的输入维数，缩小神经网络的规模，同时神经网络输入元素相关性的消除可以增强网络的泛化性能[13]。

1.3.2 径向基函数神经网络 径向基函数神经网络是一种具有单隐层的 3 层前馈网络，由输入层、隐层和输出层组成。能以任意精度逼近任意连续函数，是一种较理想的非线性计算工具。

经过主成分分析后，RBF 神经网络的输入为 m 维向量 $X'=\{X_1',X_2',\cdots,X_m'\}$，隐层为 l 维向量 $R=\{R_1,R_2,\cdots,R_l\}$，网络输出为一维向量 Y，对应神经网络的最终预测值。隐层作用函数采用径向基函数，采用高斯核函数，实现对输入层信息的非线性变换，公式为：

$$R_i(X')=\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\|X'-c_i\|}{\sigma_i}\right)^2\right] \quad (7)$$

式中：c_i——第 i 个径向基函数的中心（$c_i\in R^m$，$i=1,2,\cdots,l$）；σ_i——径向基函数的均方差或宽度，用来调节网络的灵敏度；$\|X'-c_i\|$——向量 $X'-c_i$ 的范数，表示 X' 与 c_i 的欧几里得距离；$R_i(X')$ 在 c_i 处由一个唯一的最大值，随着 $\|X'-c_i\|$ 的增大，$R_i(X')$ 迅速衰减到零。

RBF 神经网络的输出形式为线性函数：

$$f(X')=\sum_{i=1}^{l}W_iR_i(X') \quad (8)$$

式中：W_i——第 i 个隐层单元到输出单元 Y 的权值。

1.4 数据来源

本研究以第 5 期“长治”工程四川省小流域竣工验收表为基本数据。为了便于进行生态系统服务价值的分析，结合流域土地利用的特点，将研究区土地利用类型划分为耕地、林地、草地、水域、未利用地、非生产用地共 6 类，其中未利用地包括荒山荒地和难利用地。

2 结果与分析

2.1 土地利用变化分析

表 2 为治理区 1999—2003 年各土地利用类型的面积变化。从表 2 可以看出，1999—2003 年治理区土地利用类型变化较大，表现为未利用地和耕地面积减少，林地和草地面积大幅增加，其中未利用地累计减少 36 038.67 hm^2，林地累计增加了 43.74%。从各行政区看，会理县未利用地减少 6 132.80 hm^2，林地和草地分别增加了 57.87%和 46.95%；会东县未利用地减少了 96.74%，林地增加 5 992.93 hm^2，草地面积虽然只增加 144.47 hm^2，但其增加幅度却达到 222.03%；宁南县耕地未发生变化，但林地增加的面积和未利用地减少的面积分别达到 7 248.00 和

8 148.00 hm²;昭觉县耕地面积减少 2 425.63 hm²,变化幅度为 36.90%,非生产用地增加 33.33 hm²,幅度为 4.71%;金阳县未利用和草地面积均有较大幅度变化,分别为-86.24%和 74.21%;雷波县耕地和未利用地面积分别减少了 20.13%和 84.34%,但草地面积增加了 1 426.67 hm²,显著高于其他 5 县。

表 2　治理区 1999-2003 年各土地利用类型的面积变化

地 区	土地利用类型	耕地	林地	草地	水域	未利用地	非生产用地
会理县	变化面积/hm²	-8.33	5 179.80	961.33	0	-6 132.80	0.00
	变化比例/%	-0.19	57.87	46.95	0	-87.24	0.00
会东县	变化面积/hm²	-667.53	5 992.93	144.47	0	-5 469.87	0.00
	变化比例/%	-8.07	37.65	222.03	0	-96.74	0.00
宁南县	变化面积/hm²	0.00	7 248.00	900.00	0	-8 148.00	0.00
	变化比例/%	0.00	41.99	41.34	0	-99.62	0.00
昭觉县	变化面积/hm²	-2 425.63	5 093.43	1 152.47	0	-3 853.60	33.33
	变化比例/%	-36.90	52.48	39.44	0	-95.50	4.71
金阳县	变化面积/hm²	-1 532.93	4 994.00	1 304.60	0	-4 765.67	0.00
	变化比例/%	-40.57	53.34	74.21	0	-86.24	0.00
雷波县	变化面积/hm²	-864.07	7 106.13	1 426.67	0	-7 668.73	0.00
	变化比例/%	-20.13	35.13	74.25	0	-84.34	0.00
合 计	变化面积/hm²	-5 498.50	35 614.30	5 889.53	0	-36 038.67	33.33
	变化比例/%	-17.05	43.74	54.08	0	-91.20	1.03

2.2　土地利用变化的生态服务价值分析

2.2.1　生态服务价值空间变化　根据公式(1)—(2)计算出治理区的生态服务价值如表 3 所示,1999—2003 年治理区生态服务总价值从 137 256.87 万元增加到 185 081.19 万元,增幅达 34.84%。空间分布特征显示,治理区 6 县生态服务价值增幅在 29.41%～45.61% 之间,其中宁南县生态服务价值增加 10 058.65万元,达到 28 154.09 万元;昭觉县生态服务价值增加 6 307.94 万元,仅为宁南县增长量的 62.71%。生态服务价值空间变化表明,在 5 a 的治理期内,小流域综合治理对生态环境产生正效应,生态环境整体呈良性发展态势。

表 3　治理区 1999-2003 年生态服务总价值(ESV)变化

地 区	1999 年 ESV/万元	2003 年 ESV/万元	△ESV/万元	变化率/%
会理县	16 050.20	23 370.44	7 320.24	45.61
会东县	26 498.43	34 290.64	7 792.21	29.41
宁南县	28 154.09	38 212.73	10 058.65	35.73
昭觉县	18 545.68	24 853.62	6 307.94	34.01
金阳县	16 275.22	22 876.84	6 601.62	40.56
雷波县	31 733.25	41 476.92	9 743.67	30.70
合 计	137 256.87	185 081.19	47 824.32	34.84

2.2.2　单项生态服务功能价值变化　治理区单项生态服务功能价值变化如图 1 所示,除食物生产功能的价值量减少 33.05 万元外,其他 8 项生态服务功能价值均呈不同程度增长,其中土壤形成与保护功能、气体调节功能和水源涵养功能分别增加 8 823.24,7 887.58和 7 120.38 万元,原材料、气体调节和娱乐文化功能的价值增长幅度分别达到 42.85%,40.87%和 39.36%,治理区生态系统的服务功能远远大于生产性功能[14]。治理区土壤形成与保护、气体调节和水源涵养等功能的价值量大幅增加,主要是林地在土壤形成与保护、气体调节和水源涵养等功能方面的价值系数较高,而林地面积大量增加所致;食物生产功能价值量的减少则与该项功能价值系数最高的耕地减少有关。

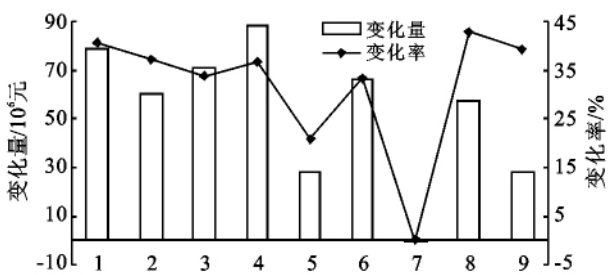


图 1　治理区 1999-2003 年不同生态服务功能价值变化

注:1 气体调节;2 气候调节;3 水源涵养;4 土壤形成与保护;5 废物处理;6 生物多样性保护;7 食物生产;8 原材料;9 娱乐文化

2.2.3　不同土地利用类型的生态服务价值变化　治理区不同土地利用类型的生态服务价值(表 4)显示,1999 年林地提供的生态服务功能价值占总价值的 80.75%,耕地次之,未利用地提供的生态服务功能价值最少,仅 1 033.97 万元。通过实施小流域综合治理,林地和草地的生态服务功能价值分别增加了 48 477.86和 2 656.36 万元,耕地和未利用地提供的

生态服务功能价值仅占总价值的 6.27%。从对治理区总体服务功能变化的贡献率看，林地对生态服务价值变化的贡献率为 89.04%，是治理区生态服务价值变化的主要原因。

表 4 治理区 1999－2003 年不同土地利用类型生态服务价值(ESV)变化

土地利用类型	1999 年		2003 年		△ESV/万元	变化率/%	贡献率/%
	ESV/万元	比例/%	ESV/万元	比例/%			
耕 地	13 882.83	10.11	11 515.88	6.22	－2 366.95	－17.05	4.35
林 地	110 834.52	80.75	159 312.38	86.08	48 477.86	43.74	89.04
草 地	4 912.24	3.58	7 568.60	4.09	2 656.36	54.08	4.88
水 域	6 593.32	4.80	6 593.32	3.56	0.00	0.00	0.00
未利用地	1 033.97	0.75	91.03	0.05	－942.94	－91.20	1.73
总 计	137 256.87	100.00	18 5081.19	100.00	47 824.32	－10.43	100.00

2.3 生态服务价值敏感性分析

根据公式(3)，将各土地利用类型的生态价值系数分别上下调整 50%，计算出治理区 1999 和 2003 年各土地利用类型的敏感性指数。结果表明，不同土地利用类型之间，生态服务价值对生态服务功能价值指数的敏感性变动较大，但各土地利用类型在不同年份之间变动较小，且均小于 1。其中林地的敏感性指数最高，为 0.807 和 0.861，说明当林地的 VC 增加 1% 时，ESV 增加 0.807%～0.861%。这表明治理区内 ESV 对 VC 是缺乏弹性的，研究结果可信。

2.4 基于 PCA－RBF 的小流域治理措施与生态服务价值模型

2.4.1 主成分分析 对 6 县 47 个小流域内实施的坡改梯、水土保持林、种草、封禁治理、保土耕作和包括塘堰、谷坊、拦沙坝、蓄水池、灌排水渠、水平沟、沉沙凼等 12 种治理措施的相关指标进行了主成分分析。结果表明，第 1 主成分可解释原来 12 个指标变量的 22.003%的信息量，第 2 主成分可解释原来 12 个指标变量的 19.138%的信息量，第 3、第 4、第 5 主成分可分别解释 15.060%，13.201%和 9.406%的信息量，说明前 5 个主成分可解释原来 12 个变量 78.808%的信息量，基本保留了原始指标变量所反映的信息。

表 5 给出的因子载荷矩阵对提取得到的 5 项主成分因子的理论意义进行了直观的反映。第 1 主成分与坡改梯、水保林、封禁治理和保土耕作等指标具有较大的相关性；第 2 主成分与种草有较大的相关性；第 3 主成分与灌排水渠和水平沟有较大的相关性；第 4 主成分与谷坊和拦沙坝有较大的相关性；第 5 主成分与塘堰和蓄水池有较大的相关性。

2.4.2 小流域治理措施与生态服务价值模型 将主元分析得到的 5 个指标作为新样本数据集，△ESV 作为网络输出值，可建立输入层为 5 个神经元、输出层为 1 个神经元的 RBF 神经网络。把三岔沟、车拉沟、坝心沟等 41 个小流域作为训练样本，利用 Matlab 的神经网络工具箱构建径向基函数网络。网络训练时，设置 GOAL 为 0.0001；经过试验，当 SPREAD 取 0.672 时，RBF 网络的误差最小，逼近效果最好。将铜厂沟、可河、水塘沟、谷曲、春江、落水湖 6 个小流域作为测试样本，用训练完成后的 PCA—RBF 神经网络模型预测其网络输出并进行反标准化处理得到的△ESV(表 6)。水塘沟小流域预测精度最低，为 91.3%，可河小流域预测精度最高，达 98.8%，网络平均预测精度 94.8%。模型能准确反映小流域治理措施对生态服务价值变化的影响。

表 5 主成分因子载荷矩阵

指 标	PC_1	PC_2	PC_3	PC_4	PC_5
坡改梯	0.670	0.243	0.436	0.162	0.195
水保林	0.590	0.495	－0.223	0.297	－0.154
种 草	0.321	0.647	－0.168	－0.259	0.068
封禁治理	0.680	0.162	0.121	0.370	0.006
保土耕作	0.573	0.382	－0.049	－0.140	0.126
塘 堰	0.289	－0.351	0.289	－0.196	－0.744
谷 坊	0.282	－0.412	0.101	0.713	－0.231
拦沙坝	－0.103	－0.469	0.038	0.604	0.376
蓄水池	0.373	－0.480	0.355	－0.352	0.538
灌排水渠	－0.445	0.413	0.754	0.170	－0.016
水平沟	－0.431	0.508	0.711	0.083	－0.029
沉沙凼	0.503	－0.480	0.477	－0.419	－0.077

注：PC_{1-5} 分别为第 1—5 主成分。

表 6 模型测试结果

测试样本	△ESV/万元	预测值/万元	预测精度/%
铜厂沟小流域	1 052.891	986.4	93.7
可河小流域	1 058.886	1 045.8	98.8
水塘沟小流域	1 119.245	1 022.1	91.3
谷曲小流域	936.099	986.1	94.7
春江小流域	995.139	981.2	98.6
落水湖小流域	1 032.069	1 116.6	91.8

3　结 论

(1) 1999—2003 年治理区土地利用类型变化较大,表现为未利用地和耕地面积减少,林地和草地面积大幅增加,其中未利用地和耕地分别减少了 36 038.67和 5 498.50 hm^2,林地和草地分别增加 35 614.30和 5 889.53 hm^2。

(2) 对生态服务功能价值变化的研究表明,通过实施小流域综合治理工程,治理区生态服务总价值从 1999 年的 137 256.87 万元增加到 2003 年的 185 081.19万元,增幅达 34.84%。空间分布特征显示,昭觉县生态服务总价值增加最少,仅 6 307.94 万元,宁南县生态服务总价值增加最多,达 10 058.65 万元。从单项生态服务功能类型看,除食物生产功能的价值量减少 33.05 万元外,其他 8 项生态服务功能价值均呈不同程度增长,其中土壤形成与保护功能、气体调节功能和水源涵养功能分别增加 8 823.24,7 887.58和 7 120.38 万元。从不同土地利用类型的生态服务价值变化幅度看,草地的生态服务功能价值增幅最大,为 54.08%,其次为林地,未利用地的生态服务价值降幅最大。从对治理区总体服务功能变化的贡献率看,林地对生态服务价值变化的贡献率为 89.04%,是治理区生态服务价值变化的主要原因。

(3) 敏感性分析结果表明,将各土地利用类型的生态价值系数分别上下调整 50%,不同土地利用类型之间生态服务价值对生态服务功能价值指数的敏感性变动较大,但各土地利用类型在不同年份之间变动较小,且均小于 1,这表明治理区内生态系统服务价值对生态服务功能价值指数是缺乏弹性的,研究结果可信。

(4) 主成分分析显示,第 1 主成分与坡改梯、水保林、封禁治理和保土耕作等指标具有较大的相关性;第 2 主成分与种草有较大的相关性;第 3 主成分与灌排水渠和水平沟有较大的相关性;第 4 主成分与谷坊和拦沙坝有较大的相关性;第 5 主成分与塘堰和蓄水池有较大的相关性。将主元分析得到的 5 个指标作为新样本数据集,将△ESV 作为网络输出值,建立输入层为 5 个神经元、输出层为 1 个神经元的 RBF 神经网络,网络平均预测精度为 94.8%,能准确反映小流域治理措施对生态服务价值变化的影响。

[参 考 文 献]

[1] 欧阳志云,王如松,赵景柱.生态系统服务功能及其生态经济价值评估[J].应用生态学报,1999,10(5):607-613.

[2] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. Nature, 1997,387(6630):253-260.

[3] 岳书平,张树文,闫业超.东北样带土地利用变化对生态服务价值的影响[J].地理学报,2007,62(8):879-886.

[4] Chee Y E. An ecological perspective on the valuation of ecosystem services[J]. Biological Conservation, 2004, 120(4):549-565.

[5] Turner R K, Paavola J, Cooper P, et al. Valuing nature: Lessons learned and future research directions[J]. Ecological Economics, 2003,46(3):493-510.

[6] 蔡国军,张仁陟,柴春山.安家沟小流域综合治理效益评价[J].草业学报,2009,18(6):23-30.

[7] 刘震.我国水土保持小流域综合治理的回顾与展望[J].中国水利, 2005(22):17-20.

[8] Howarth R B, Farber S. Accounting for the value of ecosystem services[J]. Ecological Economics, 2002, 41(3):421-429.

[9] Zhang Yaoqi, Li Yiqing. Valuing or pricing natural and environmental resources[J]. Environmental Science and Policy, 2005,8(2):179-186.

[10] 谢高地,鲁春霞,冷允法,等.青藏高原生态资产的价值评估[J].自然资源学报,2003,18(2):189-195.

[11] 王宗明,张柏,张树清.吉林省生态系统服务价值变化研究[J].自然资源学报,2004,19(1):55-61.

[12] Kreuter U P, Harris H G, Matlock M D, et al. Change in ecosystem service values in the San Antonio area, Texas[J]. Ecological Economics, 2001,39(3): 333-346.

[13] 关子明,常文兵.基于 PCA—RBF 神经网络模型的航空备件预测方法[J].北京工商大学学报:自然科学版, 2009,27(3):60-64.

[14] 孙慧兰,李卫红,陈亚鹏,等.新疆伊犁河流域生态服务价值对土地利用变化的响应[J].生态学报,2010,30(4):887-894.