

基于 Lotka-Volterra 模型的云南少数民族地区生态经济系统协调度研究^{*1}

杨红娟 胡峻豪

(昆明理工大学管理与经济学院, 云南昆明 650093)

【摘要】: 云南少数民族地区在急于发展经济的过程中, 必须关注生态经济系统协调度的变化。文章在综述相关文献的基础上, 根据少数民族地区特点选择生态经济系统评价指标, 运用熵权法确定生态经济系统的指标权重, 采用 Lotka-Volterra 模型测算 2011—2015 年少数民族地区生态经济系统协调度, 通过神经网络模型分析影响生态经济系统协调度的主要因素, 得到: (1) 少数民族地区基本符合生态与经济互促模式, 但也存在单边抑制和双边抑制现象; (2) 生态环境变化对生态经济系统协调度的影响占比约 70%, 远大于经济发展对于协调度的影响; (3) 人均绿地面积、工业用水重复利用率、人均造林面积对生态经济系统协调度影响权重分列前三位。

【关键词】: 少数民族地区; 生态经济系统; Lotka-Volterra 模型; 神经网络模型; 协调度

【中图分类号】: F205 **【文献标识码】**: A **【文章编号】**: 1671-4407(2018)05-060-06

党的十八大提出把生态文明纳入中国特色社会主义五位一体的总体布局中, 将生态文明建设融入政治、经济和社会建设各方面和全过程。生态经济系统是由生态系统与经济系统通过繁杂、庞大且自由交织的方式复合而成的一种组合系统, 生态经济系统协调度是直观判断生态和经济是否正向互促发展的重要指标。云南是多民族的边疆省份, 根据《2000 年中国可持续发展战略报告》显示, 云南地区的生态水平总指数接近 60, 列全国第 25 位, 地理脆弱指数为 11.03, 居全国末位, 显示出云南面临的环境脆弱压力远比其他地区要大得多。尤其少数民族地区资源丰富, 但生态脆弱, 经济发展相对落后, 云南贫困县数量位列全国之首, 共计 73 个, 少数民族地区占 51 个。在云南少数民族地区发展经济的同时又需要保护生态环境, 面临的压力更为严峻, 因此, 必须培养人与自然的友好关系, 促进生态系统与经济系统的良性循环, 实现少数民族地区可持续发展^[1]。

1 文献综述

国外研究方面, 在生态经济系统的研究早期, 1996 年 Panayotou 提出环境库兹涅茨曲线 (EKC) 之后, Grossman & Krueger^[2] 提出经济增长通过规模效应产生对环境的影响, 经济增长主要从两方面对环境质量产生负面影响: 一方面经济增长要增加投入; 另一方面更多产出也带来污染排放的增加。但在该文中也提出了: 当人均收入达到 8000 美元后, 经济增长不一定会对环境带来负面影响。根据这一研究结论另一些学者进行了一系列拓展性质的研究^[3-4], 所采用的方法逐渐以定量为主, 模型大多采用的是生态足迹模型、能值分析、耦合协调度模型、弹性系数和系统演化模型^[5-6]。国内对于生态经济系统的研究主要运用三种研究方法: 第一是能值分析或者进行改进的能值分析法, 主要特点是将复杂的生态流通过能值转换成统一的能量进行输入和输出的对比。如蓝盛芳和钦佩^[7]运用能值对生态系统的分析; 高阳等^[8]利用小波变换结合能值分析对深圳市的研究; 孙玥等^[9]运用各研究

¹ **基金项目**: 国家自然科学基金项目“云南少数民族贫困地区生态文明建设关键因素和有效路径研究”(71463034); 国家自然科学基金项目“基于生态文明的少数民族农户低碳行为模式研究——以云南为例”(71263030); 云南省省院省校合作项目“碳排放交易市场机制下云南企业碳减排效率研究”(SYSX201702)

第一作者简介: 杨红娟(1966—), 女(白族), 云南大理人, 教授, 博导, 研究方向为可持续发展管理。E-mail: 939738277@qq.com

指标转换为太阳能值的思想来统一能量进行分析比对。第二种是运用生态足迹模型对生态经济系统进行探究。张志强等^[10]将各种资源和能源转换为以耕地为主的六种生物生产面积，之后再计算出生态承载力和基于生物对能量消耗的生态足迹之差做出评价；高阳等^[11]学者基于能值改进生态足迹模型对生态经济系统进行分析，优化了之前生态足迹模型没有考虑到人类活动等相关生态价值的不足；赵先贵等^[12]将生态足迹扩充为足迹家族——生态足迹、碳足迹、水足迹等进行生态经济系统计算，生态足迹计算内容更加全面。第三种方法是运用耦合模型对生态和经济两个方面的互促发展进行评价^[13-15]。随着研究的深入和研究的领域不断扩展，Kitchen & Marsden^[16]运用操作化框架研究通过生态与经济的互相促进，推动农村经济的发展；Marsden^[17-18]在研究乡村区域发展的文献中，运用生态经济系统说明农产品从生态方面可以推动经济发展，因此，把这些区域作为生态经济系统发展的重要地区，并运用生态风险的概念研究生态经济系统地区，提出了对于生态风险较高地区应该加强进行生态与经济发展矛盾的管控，减少经济发展对生态环境的损失。综上，生态经济系统的运用范围较广，尤其需要对生态比较敏感地区进行研究，因此，对云南少数民族地区的生态经济系统进行研究具有重要价值。

生态经济系统研究运用的研究方法主要分成两种：一种是运用非协调度进行是否协调的判断，非协调度来评价生态经济系统的方法主要有能值分析和生态足迹的研究方法。存在测定生态经济系统协调性不直观，而且由于较难确定转化系数，导致生态流向能源量纲的转化存在一定的转化误差。另一种是用协调度来评价生态经济系统是否属于协调可持续发展，协调度对生态经济系统是否协调发展的判定较为直观。运用协调度的大小来测定系统是否协调的方法主要有：耦合模型以及 Lotka-Volterra 模型（后文称 L-V 模型），耦合模型存在生态与经济指标的权重取决于主观判断，有一定的误差；L-V 模型运用灰色理论的灰导数和偶对数的映射关系，相对来说只产生数学的估计偏差，可以较广地运用到研究两种因素之间的协调关系中。如学者 Soloveichik 等^[19]将其运用至研究化学分子之间的协调关系，从而构成一个完整的化学系统。SzoInoki 等^[20]从石头剪刀布这个简单的游戏出发，运用 L-V 模型研究了生物种群之间的协调和竞争，并运用 RP 模型与金斯堡郎道方程去构建一个大型的生态系统。Lauro 等^[21]运用 L-V 模型构建了湖中微生物的协调度，突出种群中的协调度关系，为湖中的生态环境系统研究做出自己的贡献。Bao 等^[22]运用 L-V 模型研究了人口动态之间的协调度关系。也有国内学者将 L-V 模型运用于更广泛的研究领域^[23-26]。本文拟从生态经济系统的视角，运用 L-V 模型的优势，探究云南少数民族地区生态与经济之间的协调程度。

2 云南少数民族地区生态经济系统评价体系构建

2.1 生态经济系统指标选择

根据云南少数民族地区实际情况，指标选取遵循可操作性、普遍性与典型性，结合之前相关文献^[13-14, 27-28]，确定生态经济系统由生态环境和经济发展两个一级指标构成，生态环境由生态基础和生态保护两个二级指标组成，生态基础代表了一个地区固有的生态环境的水平，是一个起始生态水平，生态基础由人均造林面积、人均种粮作物面积、人均绿地面积、森林覆盖率和森林资源增长率组成；生态保护指的是这个地区对于生态环境保护手段强度的测度水平，由工业固废综合利用率、城市污水处理率、工业用水重复利用率、工业废气处理率构成。经济发展由经济规模和经济结构两个二级指标构成。经济规模反映了少数民族地区总体的经济水平，由 GDP、人均 GDP 以及 GDP 增长率构成；经济结构表现的是少数民族地区可持续发展的潜在实力，由第三产业占 GDP 比重、环保投资占 GDP 比重、第二产业增加值、第一产业增加值组成。

2.2 研究区域与数据来源

选取云南的 8 个少数民族自治州：怒江傈僳族自治州、大理白族自治州、红河哈尼族彝族自治州、西双版纳傣族自治州、文山壮族苗族自治州、楚雄彝族自治州、德宏傣族景颇族自治州、迪庆藏族自治州作为研究对象，分析少数民族地区的生态经济系统协调度。生态环境指标数据与经济发展指标数据大部分来自于 2012—2015 年《云南统计年鉴》的环境保护板块、人口板块与经济板块。城市污水处理率、工业用水重复利用率、工业废气处理率等指标来源于 2012—2015 年云南地方政府发表的《国民经济和社会发展统计公报》。

2.3 熵权法确定指标权重

熵权法是一种利用某个指标的信息熵，计算指标权重的一种方法，此种方法可以避免类似专家打分法等需要主观判断而决定权重所造成的误差。首先将生态经济系统指标进行标准化处理之后计算出信息熵并求其权重（具体计算方法因为篇幅不予赘述）。各个指标的权重见表 1。

表 1 生态经济系统指标权重表

一级指标	二级指标	三级指标	权重
生态环境	生态基础	人均造林面积（正）	8.43%
		人均种粮作物面积（正）	5.47%
		人均绿地面积（正）	11.78%
		森林覆盖率（正）	4.45%
		森林资源增长率（正）	1.24%
	生态保护	工业固废综合利用率（正）	5.09%
		城市污水处理率（正）	3.00%
		工业用水重复利用率（正）	8.55%
工业废气处理率（正）		4.00%	
经济发展	经济规模	GDP（正）	6.07%
		人均 GDP（正）	4.27%
		GDP 增长率（正）	10.97%
	经济结构	第三产业占 GDP 比重（正）	7.80%
		环保投资占 GDP 比重（正）	4.55%
		第一产业增加值（正）	6.78%
		第二产业增加值（正）	7.54%

注：通过计算 8 个少数民族自治州的原始数据得到。

从表 1 中可以看出，人均绿地面积与 GDP 增长率两个指标的权重最高，代表了生态环境与经济发展中最重要的两个因素。在生态环境方面权重最小的是森林资源增长率，在经济发展中权重较小的是人均 GDP。根据生态经济系统指标权重系数，通过原始数据标准化，计算 8 个少数民族自治州 2011—2015 年的生态环境发展指标与经济发展指标，见表 2。

表 2 少数民族自治州生态环境发展指标与经济发展指标

自治州	生态环境					经济发展				
	2011	2012	2013	2014	2015	2011	2012	2013	2014	2015
楚雄	0.235	0.245	0.232	0.252	0.265	0.216	0.186	0.200	0.205	0.222
大理	0.150	0.118	0.137	0.160	0.170	0.242	0.232	0.186	0.229	0.230
红河	0.147	0.150	0.168	0.167	0.176	0.264	0.275	0.277	0.293	0.300
文山	0.147	0.171	0.157	0.162	0.169	0.207	0.214	0.167	0.165	0.193
西双版纳	0.223	0.234	0.241	0.247	0.255	0.178	0.184	0.147	0.134	0.110
德宏	0.265	0.270	0.302	0.272	0.273	0.204	0.181	0.121	0.213	0.151
怒江	0.239	0.225	0.199	0.228	0.151	0.211	0.200	0.205	0.173	0.129
迪庆	0.187	0.212	0.196	0.183	0.181	0.353	0.230	0.234	0.201	0.221

注：2015 年的 GDP 增长率指标由于需要 2016 年的 GDP 数据，但 2016 年的 GDP 只公布了上半年的数据，采用预计值（半年增长率×2）代替全年增长率。数据来源原始数据及表 1 数据。

从表 2 的数据可以得出，云南少数民族地区的生态环境指标虽然有一定波动，但总体随着时间的进程在不断增加。只有少部分自治州的生态环境指标在降低，怒江州从 2011—2015 年下降达到 36.8%。结合生态经济系统中经济发展指标来看，2011—2012 年楚雄、大理、德宏、迪庆有一定程度下滑，2012—2015 年经济指标除德宏、西双版纳、怒江外，其他自治州呈上升趋势。从上述分析可以看出，不同少数民族地区，生态环境与经济协调度的差距较大。同一个州在不同时间段协调度也会有变化，并非一致性的发展。各州 2011—2015 年平均生态环境与经济协调度的情况见图 1。

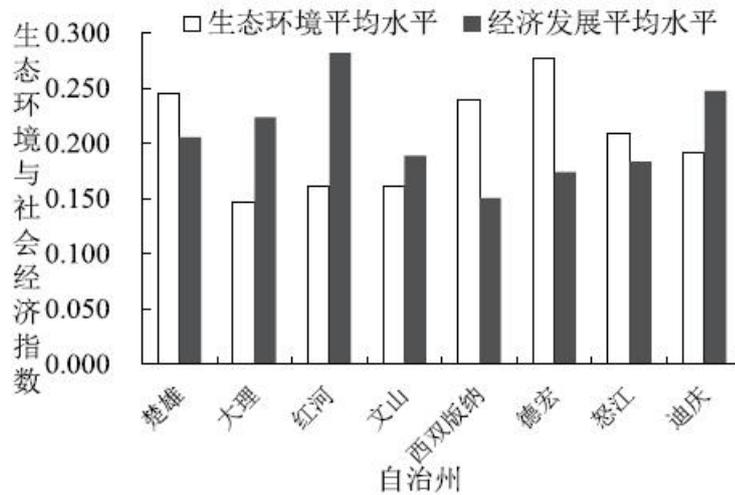


图1 2011—2015年各自治州生态环境与经济发展

根据图1数据。各少数民族地区的平均生态环境指标与平均经济发展指标总体均衡性不高，出现一高一低的情况。采用L-V模型分析生态环境与经济发展之间的协调度，从生态环境与经济发展两个方面的相互影响来分析，这样协调度的评价会更为全面。协调度高，说明生态经济系统中生态环境与经济发展之间比较协调。

3 生态经济系统协调度模型的构建

将生态环境与经济发展两个方面运用于L-V模型得到如下公式。

$$\frac{dE}{dt} = F_1(E, M) = \alpha E \left(\frac{T_1 - E + \theta_1 M}{T_1} \right) \quad (1)$$

$$\frac{dM}{dt} = F_2(E, M) = \beta M \left(\frac{T_2 - M + \theta_2 E}{T_2} \right) \quad (2)$$

其中：E、M分别代表生态环境水平和经济发展水平； α 代表生态环境的增长率， β 代表经济的增长率。 T_1 代表生态环境的最高水平； T_2 代表经济发展的最高水平。 θ_1 与 θ_2 表示生态环境对经济发展和经济发展对生态环境相互影响的作用率。若 θ_i ($i=1, 2$) > 0 则表示两者有相互促进影响，反之代表有相互抑制的影响。

对于协调性函数 $\varepsilon = f(\theta_1, \theta_2)$ 我们将其定义为：

$$\varepsilon = \frac{\theta_1 + \theta_2}{\sqrt{\theta_1^2 + \theta_2^2}} \quad (-1 \leq \theta_1 \leq 1; -1 \leq \theta_2 \leq 1 \text{ 且不同时为 } 0) \quad [29]$$

从协调性函数我们不难看出 $-1.414 \leq \varepsilon \leq 1.414$ 。根据两者作用率定义可知，当 $-1.414 \leq \varepsilon \leq 1$ 时，两者呈相互抑制；当 $1 \leq \varepsilon \leq 1.414$ 时两者呈相互促进而当 $1 \leq \varepsilon \leq 1$ 时两者呈单方面的抑制或是促进。当 $\theta_1 + \theta_2 \leq 0$ 且 $-1 \leq \varepsilon \leq 0$ 两者的抑制较严重，反之 $\theta_1 + \theta_2 \geq 0$ 且 $0 \leq \varepsilon \leq 1$ 两者则有互补性。将公式(1)、(2)表示成一般形式公式(3)、(4)。

$$\frac{dE}{dt} = F_1(E, M) = E(i_0 + i_1 E + i_2 M) \quad (3)$$

$$\frac{dM}{dt} = F_2(E, M) = M(j_0 + j_1 E + j_2 M) \quad (4)$$

运用灰色理论的灰导数和偶对数的映射关系将公式(3)、(4)进行离散化处理^[30]以方便研究和操作。首先 $d(E)/d(t)$ 与 $d(M)/d(t)$ 分别与偶对数 (E_{t+1}, E_t) 、 (M_{t+1}, M_t) 构成一个映射。然后将 E 与 M 用 t 时刻背景值 $(E_{t+1} + E_t)/2$ 和 $(M_{t+1} + M_t)/2$ 来替代, 相当于用 $E_{t+1} - E_t$ 在式子离散化后代替 $d(E)/d(t)$ 。离散化后的公式如下:

$$E_{t+1} - E_t = \frac{E_{t+1} + E_t}{2} (i_0 + i_1 \frac{E_{t+1} + E_t}{2} + i_2 \frac{M_{t+1} + M_t}{2}) \quad (5)$$

$$M_{t+1} - M_t = \frac{M_{t+1} + M_t}{2} (j_0 + j_1 \frac{E_{t+1} + E_t}{2} + j_2 \frac{M_{t+1} + M_t}{2}) \quad (6)$$

将 E 与 M 对应的数值带入, 求解出 $\alpha = i_0$, $T_1 = -i_0/i_1$, $\theta_1 = i_2/i_1$ 以及 $\beta = j_0$, $T_2 = -j_0/j_2$, $\theta_2 = j_1/j_2$, 最后观察 θ_1 与 θ_2 的正负性, 求出协调度 ε 。

4 生态经济系统协调度分析

根据上述理论, 结合表2数据, 计算得出各州的生态环境与经济相关系数以及协调度, 见表3。

表3 各自治州生态经济系统协调度

自治州	θ_1	θ_2	协调度 ε
楚雄	1.332 3	1.066 0	1.405 6
大理	-17.708 9	0.811 1	-0.953 2
红河	0.512 1	1.824 0	1.233 1
文山	0.422 9	3.347 0	1.1175
西双版纳	-0.313 1	-3.191 4	-1.092 8
德宏	-0.607 3	-2.192 0	-1.230 7
怒江	0.314 7	1.203 2	1.220 5
迪庆	1.007 3	0.966 4	1.413 9

根据 θ_1 、 θ_2 和 ε 的定义，将各州的生态经济系统分成以下三类。

(1) 生态环境与经济发展是互利共生的关系，这种关系对应 θ_1 与 θ_2 皆为正值。属于互利共生关系的州市有楚雄、红河、文山、怒江、迪庆。属于只要两者同时发展，生态经济系统协调度就会不断地上升，从而符合满足生态环境标准前提下经济发展模式。

(2) 生态环境与经济发展是偏利共生的关系，偏利共生指的是 θ_1 或 θ_2 只有一个是正值。对应的含义是生态环境改善会对经济发展起到正向促进，而经济发展会对生态环境起到破坏效果（或情况相反）。这样关系的州市只有大理州，此时经济的发展有利于生态环境的发展，但生态环境水平的保持却需要牺牲经济的发展。这种情况是以牺牲单方面为代价而发展另一方面，是一种发展过程中的过渡，应该朝着互利共生的关系去引导。

(3) 生态环境与经济发展是竞争的关系，这种关系对应 θ_1 与 θ_2 皆为负值。西双版纳、德宏州属于生态环境与经济发展之间呈现出互相抑制的模式。在这种竞争关系下发展，必定会导致一强一弱的格局，这种模式下的发展将会使生态经济系统越来越严峻。

从表 3 中可以看出，生态环境与经济发展关系较好的是互利共生的模式，不管是生态环境对于经济发展或相反，都处于一种正向促进，这种生态环境与经济发展的关系属于互利型发展，协调度从低水平向高水平移动。

5L-V 协调度的神经网络模型设计与指标因子贡献度计算

研究生态经济系统的相关文献中较少有从生态环境与经济发展两者中的具体因素来测算对于协调度影响程度的文献，而具体指标对于协调度的影响大小，决定着今后相关政策的调整，需要进一步讨论生态经济系统中具体指标对于协调度影响程度的测算，影响程度的大小可以根据权重确定，以得出提高协调度的发展模式。本文运用神经网络模型进行权重的计算，选取神经网络模型的原因在于神经网络可以通过数据逼近任意非线性连续性的函数，符合生态经济系统协调度为复杂非线性连续性函数的特性。输入层具体指标对输出层的生态经济系统协调度的影响必定包括了输入层对隐含层，隐含层至输出层两个部分。对于权重的计算需要结合两个部分互相的影响来计算。具体计算步骤如下。

(1) 计算输入层中各个指标对于隐含层中变量的影响程度，假设每个输入层指标对每个隐含层变量都有影响，输入层作用到隐含层的权重计算式为：

$$a_0 = \sum_i^n \sum_j^m |w_{ij}| \quad (7)$$

$$a_{ij} = \frac{\sum_j^n |w_{ij}|}{a_0} \quad (8)$$

其中： a_{ij} 为输入层中单个指标对于隐含层中单个变量的权重， i 为输入层节点， j 为隐含层节点。 $\sum_j^n |w_{ij}| (i=1, 2, \dots, n)$ 为单个输入层节点对所有隐含层变量影响大小求和， a_0 为所有单个输入层指标对隐含层影响权重求和。

(2) 在计算出第一部分输入层对隐含层的影响程度之后，计算第二部分，隐含层对输出层的影响力，由于输出层只有生态经济系统的协调度一个指标，所以隐含层对于输出层的影响权重即为各个隐含层变量对输出层节点的权重比例。

$$b_0 = \sum_k^m b_k \quad (9)$$

$$b_{kl} = \frac{|b_k|}{b_0} \quad (10)$$

其中： b_{kl} 为隐含层对输出层的影响权重比例， k 为隐含层节点， l 为输出层节点。而 $|b_k|$ 则为单个隐含层变量对输出层的权重。
 $\sum_k^m b_k (k=1, 2, \dots, m)$ 为所有隐含层变量对输出层权重和。

(3) 计算输入层具体单个指标作用到输出层的影响权重。

$$S_i = a_{ij} \times b_{kl} \quad (11)$$

其中： $S_i (i=1, 2, \dots, n)$ 为单个输入层指标对于输出层的影响权重。

(4) 算出单个输出层指标对于输出层影响大小比例。

$$p_0 = \sum_i^n S_i \quad (12)$$

$$p_i = \frac{S_i}{p_0} \quad (13)$$

其中： p_0 为所有单个输入层指标权重之和， p_i 为输入层单个指标对输出层影响占比。

根据试算达到满意误差，将输入层个数设置为15，隐含层层数设置为1，隐含层节点为10，输出层为1的时候误差达到满意程度，误差表见表4。

在确定计算结果满足误差范围后，计算出具体三级指标对于协调度的影响权重，见图2。

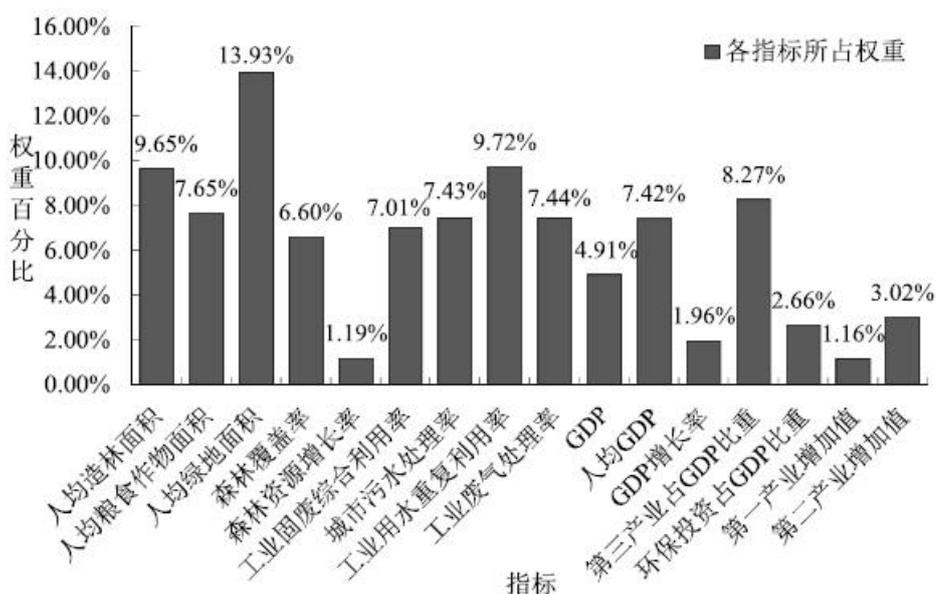


图2 生态环境与经济发展具体指标对协调度影响程度

从图2可以看出，以生态经济系统协调度为输出层的情况下，所有经济发展指标总的贡献度为29.39%，远不及所有生态环境指标对协调度变化的贡献程度。这说明生态环境指标对协调度的影响起主要作用，同时展现生态环境指标与协调度有较好的互动性，只有保护好或者修复生态环境的前提下发展经济，才能达到生态环境与经济发展互促提升模式，也说明云南少数民族地区要可持续发展，生态环境与经济发展需要共同发展。从单个指标来看，对协调度影响最大的是人均绿地面积，达到13.93%。对协调度的影响程度排名前三的分别是：人均绿地面积、工业用水重复利用率和人均造林面积。

表4 神经网络检验及误差

自治州		楚雄	大理	红河	文山	西双版纳	德宏	怒江	迪庆
协调度	样本值	1.4056	-0.9532	1.2331	1.1175	-1.0928	-1.2307	1.2205	1.4139
	拟合值	1.4077	-0.9527	1.2319	1.1178	-1.0907	-1.2308	1.2213	1.4143
	误差	-0.0021	-0.0005	0.0012	-0.0003	-0.0021	0.0001	-0.0005	-0.0004

6 结论

(1) 生态经济系统由生态环境与经济发展两个方面构成，从数据分析来看，大部分州的生态经济关系符合互利共生，但是从2011—2015年来看，除了文山、楚雄、怒江州的生态环境发展指标与经济发展指标相近外，其余的州都是“单条腿”走路，生态环境或者经济发展呈现单边高的情况。

(2) 从2011—2015年的生态经济系统协调度来看，大多数州的协调度较好，基本能够达到生态环境与经济发展互利共生的关系。但是也有在保证生态环境的前提下会抑制经济发展的大理州，这是需要改善的。更有急需改善生态环境与经济发展相互关系的德宏与西双版纳州，这两州生态环境与经济发展出现相互抑制，可持续发展更为艰难。

(3) 运用神经网络模型, 以生态经济系统协调度为输出目标, 得出生态环境指标对协调度起到主要的调节作用, 同时表明生态环境指标与协调度有较好的互动性, 说明只有在保证生态环境的前提下, 才能够与经济发展形成互动上升的模式, 从而促进协调度的提升。

(4) 从单个指标来看, 人均绿地面积、工业用水重复利用率、人均造林面积对于协调度的贡献度最高, 是最需要重点保持和发展的方面, 也是在经济发展中需要首要考虑的要素。

综上所述, 在少数民族地区必须具备保护生态环境的前提下发展经济的理念。充分利用少数民族地区文化资源、生物多样性资源和自然资源, 发挥自身优势提升生态经济系统协调度, 大力发展特色产业, 达到生态与经济协调发展, 形成生态环境与经济发展良性循环模式, 推动少数民族地区的可持续发展。

参考文献:

- [1]李泉. 不发达地区产业经济生态化发展初论——以青海省为例[J]. 中国人口·资源与环境, 2004(2): 112-116.
- [2]Grossman G M, Krueger A B, Economic growth and the environment [J]. The Quarterly Journal of Economics, 1995, 110(2): 353-377.
- [3]Stern D I, Common M S, Barbier E B. Economic growth and environmental degradation: The environmental Kuznets curve and sustainable development [J]. World Development, 1996, 24(7): 1151-1160.
- [4]Cole M A, Rayner A J, Bates J M. The environmental Kuznets curve: An empirical analysis [J]. Environment and Development Economics, 1997, 2(4): 401- 416.
- [5]Wang Z B, Fang C L, Cheng S W, et al. Evolution of coordination degree of eco-economic system and early-warning in the Yangtze River delta [J]. Journal of Geographical Sciences, 2013, 23(1): 147-162.
- [6]Ma L, Jin F J, Song Z Y, et al. Spatial coupling analysis of regional economic development and environmental pollution in China [J]. Journal of Geographical Sciences, 2013, 23(3): 525-537.
- [7]蓝盛芳, 钦佩. 生态系统的能值分析[J]. 应用生态学报, 2001(1): 129-131.
- [8]高阳, 黄姣, 王羊, 等. 基于能值分析及小波变换的城市生态经济系统研究——以深圳市为例[J]. 资源科学, 2011(4): 781-788.
- [9]孙玥, 程全国, 李晔, 等. 基于能值分析的辽宁省生态经济系统可持续发展评价[J]. 应用生态学报, 2014(1): 188-194.
- [10]张志强, 徐中民, 程国栋, 等. 中国西部 12 省(区市)的生态足迹[J]. 地理学报, 2001(5): 599-610.
- [11]高阳, 冯喆, 王羊, 等. 基于能值改进生态足迹模型的全国省区生态经济系统分析[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2011(6): 1089-1096.
- [12]赵先贵, 赵晶, 马彩虹, 等. 基于足迹家族的云南省资源与环境压力评价[J]. 生态学报, 2016(12): 3714-3722.

-
- [13]陈端吕, 彭保发, 熊建新. 环洞庭湖区生态经济系统的耦合特征研究[J]. 地理科学, 2013 (11): 1338-1346.
- [14]王琦, 汤放华. 洞庭湖区生态—经济—社会系统耦合协调发展的时空分异[J]. 经济地理, 2015 (12): 161-167.
- [15]苏鑫, 王继军, 郭满才, 等. 基于结构方程模型的吴起县农业生态经济系统耦合关系[J]. 应用生态学报, 2010 (4): 937-944.
- [16]Kitchen L, Marsden T. Creating sustainable rural development through stimulating the eco-economy: Beyond the eco-economic paradox? [J]. Sociologia Ruralis, 2009, 49(3): 273-294.
- [17]Marsden T. Mobilizing the regional eco-economy: Evolving webs of agri-food and rural development in the UK [J]. Cambridge Journal of Regions Economy & Society, 2010, 3(2): 225-244.
- [18]Marsden T. Towards areal sustainable agri-food security and food policy: Beyond the ecological fallacies? [J]. Political Quarterly, 2012, 83(1): 139-145.
- [19]Soloveichik D, Seelig G, Winfree E. DNA as a universal substrate for chemical kinetics [J]. Proceedings of The National Academy of Sciences, 2010, 107(12): 5393-5398.
- [20]Szolnoki A, Mobilia M, Jiang L L, et al. Cyclic dominance in evolutionary games: A review [EB/OL]. (2014-09-17). <http://rsif.royalsocietypublishing.org/content/11/100/20140735>.
- [21]Lauro F M, Demaere M Z, Yau S, et al. An integrative study of a meromictic lake ecosystem in Antarctica [J]. Isme Journal, 2011, 5(5): 879-895.
- [22]Bao J, Mao X, Yin G, et al. Competitive Lotka-Volterra population dynamics with jumps [J]. Nonlinear Analysis Theory Methods & Applications, 2011, 74(17): 6601-6616.
- [23]钟琪, 戚巍, 张乐. Lotka-Volterra 系统下的社会型危机信息扩散模型[J]. 系统工程理论与实践, 2012 (1): 104-110.
- [24]周甜甜, 王文平. 基于 Lotka-Volterra 模型的省域产业生态经济系统协调性研究[J]. 中国管理科学, 2014 (S1): 240-246.
- [25]温涛, 白继山, 王小华. 基于 Lotka-Volterra 模型的中国农村金融市场竞争关系分析[J]. 中国农村经济, 2015 (10): 42-54.
- [26]郭燕子, 武忠. 基于 Lotka-Volterra 模型的产业技术创新网络知识创造机理研究[J]. 情报杂志, 2012 (6): 139-143.
- [27]王介勇, 吴建寨. 黄河三角洲区域生态经济系统动态耦合过程及趋势[J]. 生态学报, 2012 (15): 4861-4868.
- [28]黄和平, 彭小琳, 孔凡斌, 等. 鄱阳湖生态经济区生态经济指数评价[J]. 生态学报, 2014 (11): 3107-3114.
- [29]谢媪. 林业生态与产业共生协调度评价模型及其应用研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2009.

[30]李兴莉, 申虎兰, 冯玉广. Logistic 和 Lotka-Volterra 模型参数的灰色估计方法研究[J]. 大学数学, 2004(6): 82-87.