

DOI: 10.5846/stxb201504140755

汪嘉杨, 宋培争, 张碧, 刘伟, 张菊. 社会-经济-自然复合生态系统生态位评价模型——以四川省为例. 生态学报, 2016, 36(20): - .

Wang J Y, Song P Z, Zhang B, Liu W, Zhang J. An ecological niche evaluation model of social, economic, and natural complex ecosystems: A case study in Sichuan Province. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(20): - .

## 社会-经济-自然复合生态系统生态位评价模型 ——以四川省为例

汪嘉杨\*, 宋培争, 张 碧, 刘 伟, 张 菊

成都信息工程大学资源环境学院, 成都 610041

**摘要:** 在深入分析区域资源、环境、社会、经济综合系统基础上, 建立了四川省 2001—2010 年社会-经济-自然复合生态系统生态位评价指标体系, 复合生态系统综合生态位包括资源、环境、经济和社会四个子系统生态位。将耦合投影寻踪模型应用于复合生态系统生态位评价, 其中, 采用并行模拟退火算法对评价模型参数进行优化。研究表明: 2001 年—2010 年四川省复合生态位呈现先降后升的趋势, 复合生态位评价价值从 2001 年 3.1325 下降到 2005 年的 2.8499, 从 2005 年开始, 复合生态位逐渐增加, 到 2010 年增加到 3.3304。表明环境重视程度的提高, 环保意识的加强, 促进了复合生态位的提高, 区域自然生态和环境得以改善。最佳投影方向各分量的大小反映了各评价指标对生态位评价等级的影响程度, 值越大则对应的评价指标对生态位评价等级的影响程度越大。区域生态位评价等级指标的影响程度最大的 10 项中有 4 项是环境生态位子系统指标, 表明环境生态位子系统对综合生态位影响最大。发展过程中经济生态位子系统和社会生态位子系统指标值相关系数为 0.9957, 表明两子系统基本上是保持同步发展。而经济生态位和环境生态位子系统指标值相关系数为 -0.9346, 呈现明显的负相关关系。资源子系统呈现上升趋势。模拟退火优化的投影寻踪耦合模型应用于复合生态位评价, 具有实用性和可行性, 为区域生态管理科学决策提供重要依据。

**关键词:** 复合生态系统; 生态位; 评价指标; 投影寻踪; 模拟退火

## An ecological niche evaluation model of social, economic, and natural complex ecosystems: A case study in Sichuan Province

WANG Jiayang\*, SONG Peizheng, ZHANG Bi, LIU Wei, ZHANG Ju

Department of Resources and Environment, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610041, China

**Abstract:** Human societies are essentially composed of three different systems: social, economic, and natural. Studies on the ecological niche of social, economic, and natural complex ecosystems has significant importance on the activities and lives of humans in a complex ecosystem and the sustainable development of land. In this study, a set of indicator systems were established to evaluate the ecological niche of a complex ecosystem in Sichuan Province from 2001 to 2010, based on the evaluation index theory of sustainable development, urban livability, and human development. The integrated ecological niche of the complex ecosystem included four sub-niches: natural resources, environment, economy, and society. These sub-niches comprised many single-item indicators. A coupling projection pursuit model, in which a parallel-simulated annealing algorithm was employed in parameters of optimization, was applied to quantitatively analyze and assess the ecological niche of the complex ecosystem and each sub-niche. Our results indicate that the ecological niche of the complex ecosystem in Sichuan Province first decreased from 3.1325 in 2001, to 2.8499 in 2005, and then increased to 3.3304 by

**基金项目:** 国家社会科学基金(13BGL009); 国家自然科学基金(51209024, 41101542); 四川省社会科学项目(SC14C007, SC15TJ019); 四川省教育厅项目(15ZA0192, 15ZA0189)

收稿日期: 2015-04-14; 网络出版日期: 2015-00-00

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wjj@cuit.edu.cn

2010. Our results indicate that, as public awareness of environmental protection increases, the regional ecological niche index also increases. Additionally, the ecological and environmental situation has improved. The correlation coefficient between the economic niche system and the social niche system was 0.9957, indicating that the two sub-niches develop in synchrony. In contrast, the correlation coefficient between the economic niche system and the environment niche system was -0.9346, suggesting an obvious negative correlation. In total, the resource sub-niche system displayed an upward trend. The best projection direction value reflects the impact of each regional ecological niche evaluation index in the projection pursuit model. The large index value of the ecological niche evaluation corresponds with a great impact on the ecological niche. Four indicators of the environmental-ecological sub-niche have significant impacts on the regional ecological niche. This can further influence the weight of the regional ecological niche evaluation index based on the value of the best projection direction. The ten most influential regional ecological niche evaluation indicators are (from most influential to least influential): Industrial soot emissions > industrial dust emissions > industrial sulfur dioxide emissions > per capita energy yield > total industrial waste water emissions > non-agricultural population accounts for the proportion of the total population > rate of plant coverage in urban areas > per capita revenue > population density > drought affected areas. Of these, four indicators belong to the environmental-ecological niche sub-system, which shows that this system has an essential influence on the entire ecological niche of the area. In comparison, the traditional polygon synthesis index method was used to evaluate the ecological niche in Sichuan Province. The results are in agreement with those calculated by the current projection pursuit algorithm, which verified the correctness of our improved algorithm. Furthermore, the projection pursuit algorithm may be used to discover the rules among data through automatic exploration, and thus has excellent potential in data analysis and processing applications. This algorithm may be used to avoid the subjective one-sidedness of the traditional evaluation method of weight determination. The projection pursuit model, optimized by simulated annealing, is practical and feasible in composite niche evaluation. This model is able to provide an important basis for scientific decision making in regional ecological management.

**Key Words:** complex ecosystem; ecological niche; evaluation index; projection pursuit; simulated annealing

生态位(niche)一词又称生态龛,最早由 Grinnell<sup>[1]</sup>于 1917 年提出,将生态位视为物种的要求及在一特定群落中与其他物种关系的地位,反映生物种群所占据的基本生活单位,主要指物理空间方面。1927 年 Elton<sup>[2]</sup>将生态位定义为有机体在与环境的相互关系中所处的功能地位。1957 年 Hutchinson<sup>[3]</sup>提出 n 维超体积分的生态位概念,将生态位定义为生物个体或物种不受限制生活的多维生态因子空间。1959 年,Odum<sup>[4]</sup>认为生态位是一个物种在其群落和生态系统中的地位和状况,而此地位和状况取决于该生物的生理反应、形态适应和特有的行为。至今,生态位的概念还在不断地补充和完善中,但其本质都是生物与环境之间关系的定性或定量描述,反映出生物在环境中所处的地位和发挥的功能。作为生态学重要的基础理论之一,生态位的概念、理论和模型逐步得到发展和完善,不仅越来越广泛地运用于生态学研究,而且逐渐渗透并运用于社会科学各个领域<sup>[5-9]</sup>,在社会生态系统研究方面同样具有重要的意义。

人类社会实质上是由社会、经济和自然三个不同性质的系统构成社会-经济-自然复合生态系统<sup>[10]</sup>。该系统反映了一个区域的现状对于人类各种经济活动和生活活动的适宜程度,以及一个区域的性质、功能、地位、作用及其人口、资源、环境的优劣势<sup>[10]</sup>。在该复合系统中,一个区域可以被视为一个“物种”,也具有相应的生态位。复合生态系统生态位反映了该区域在多个区域构成的大环境中所占据的地位和发挥的作用及其在资源环境方面的优劣势,体现出不同类型经济活动以及不同职业、年龄人群的吸引力和离心力<sup>[11]</sup>。区域的经济、社会发展水平和环境状况决定了它的吸引力,决定了它在对应的经济子系统、社会子系统和自然子系统中的地位 and 作用,进而决定了这个区域在经济、社会、自然复合生态系统中的生态位。社会-经济-自然复合生态系统的生态位研究,能够对人类在这个复杂生态系统中的活动和生活有一定的影响,对于省域可持续发展道

路有一定的促进作用<sup>[8-9]</sup>。

由于社会-经济-自然复合生态系统的生态位涉及到资源、环境、经济、社会等诸多方面,需要构建适应于区域实际情况的评价指标体系及评价模型。近年来,不同学者通过构建生态城市、生态位评价指标体系,对不同的区域进行了研究<sup>[12-15]</sup>。本文借鉴国内外有关可持续发展理论、宜居城市指标体系以及人类发展等评价指标的基础之上,构建了四川省复合生态系统生态位的指标体系和评价方法,分别从环境、资源、社会、经济等四个方面对社会-经济-自然复合生态系统进行生态位变化评价。

近年来,社会经济自然复合生态系统的生态位评价方法主要有全排列多边形综合指数法、生态足迹法、因子分析法,生态足迹法等<sup>[15-20]</sup>。文献[19]运用全排列多边形综合指数法计算徐州市生态位及复合生态系统综合生态位,文献[9]对2003年中国各省、自治区、直辖市的复合生态系统生态位做出定量评价。文献[10]采用因子分析法建立了福建省67个县级行政区综合生态位评价体系。其中,因子分析法属于传统统计分析方法,在计算因子得分时,采用的是最小二乘法,此法有时可能会失效。在实际应用中,对数据量和成分也有要求。全排列多边形无法计算简单,但无法反映出各指标对综合评价结果的贡献率大小。生态足迹分析法是一种基于静态指标的分析方法,参数取值具有人为主观性,分析结论需要结合生态足迹需求和供给比较得出,适用于全球、国家层次的评估,难以推广到较小地域范围,很难深入到地区发展的各个环节,所提出的政策建议也就无法做到丰富和具体。探索新的生态位评价方法,发展多种不确定性分析方法在复合生态系统生态位评价中的应用,是推动和丰富生态学发展的一个重要方向。

投影寻踪技术(Projection pursuit, PP)是用来处理和分析高维数据的一种探索性数据分析的有效方法,通过对数据本身进行挖掘,寻找反映高维数据本身特征的投影<sup>[21-22]</sup>,在低维空间上对数据结构进行分析,最大限度的反映数据自身特征,信息量不会丢失,避免了人为赋权的主观干扰,使评价结果合理、真实。同时,最优投影方向还可以反映出各评价指标对综合评价结果的影响程度,即各指标的贡献率的大小,为决策提供参考依据<sup>[21-22]</sup>。因此,本文采用投影寻踪模型模拟区域生态位变化过程,并采用并行模拟退火算法(Simulated Annealing, SA)对模型参数进行优化,耦合模型对复合生态系统和子系统的生态位和进行了定量分析和评价,为区域生态管理科学决策提供重要依据。

## 1 社会-经济-自然复合生态系统生态位评价指标体系的建立

根据四川省的实际情况,构建的社会-经济-自然复合生态位评价指标体系包括目标层、亚目标层和指标层三个层次,目标层是复合生态系统,亚目标层包括社会、经济、自然生态系统,自然生态系统分为资源和环境两个子生态系统,指标层数据来源于四川省统计年鉴,具体的指标和数据见表1。

资源生态位:资源生态位研究人口分布与自然资源承载能力之间的关系<sup>[10]</sup>,选用7个指标进行分析评价。人均耕地面积代表土地资源水平,人均水资源量代表水资源水平。森林覆盖率反映一个国家或地区森林面积占有情况或森林资源丰富程度及实现绿化程度的指标。人均林木蓄积量反映当前人均活立木的材积总量。森林覆盖率和人均林木蓄积量代表四川省森林资源,建成区绿化覆盖率反映了城市生态绿化情况,旱涝受灾面积表明区域受到旱灾和洪涝的程度,人均能源生产量用一次性能源生产总量与人口的比值计算得到,代表四川省能源利用情况。

环境生态位:选用6个指标进行分析计算。水土流失治理面积代表的是生态环境的抵御和抵抗灾害的能力,环境污染指标主要从经济发展造成的环境压力方面考虑,包括工业废水排放总量、工业烟尘排放量、工业粉尘排放量、工业二氧化硫排放量和工业固废产生量。

经济生态位:选用6个指标进行分析评价。人均GDP和人均财政收入,能够反映四川省的经济发展水平的高低;单位GDP能耗和单位GDP水耗能够反映经济发展能耗水平,单位GDP能耗用全省每年能耗值与每年GDP值的比值计算;人均进出口贸易总额反映对外经济的发展情况;人均货运量反映交通运输的能力。

表 1 社会-经济-自然复合生态系统评价指标体系  
Table 1 Complex ecosystem evaluation index system of the social, economic and nature

| 目标层<br>The target layer           | 亚目标层<br>The second target layer | 序号<br>Serial number | 指标层<br>Index layer             | 2001 年    | 2002 年    | 2003 年    | 2004 年    | 2005 年    | 2006 年    | 2007 年    | 2008 年    | 2009 年    | 2010 年   |
|-----------------------------------|---------------------------------|---------------------|--------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|
| 自然生态位<br>Natural ecological niche | 资源生态位<br>Resource niche         | $x_1$               | 人均耕地面积/hm <sup>2</sup>         | 0.0508    | 0.0479    | 0.0458    | 0.0454    | 0.0452    | 0.0449    | 0.0448    | 0.0445    | 0.0443    | 0.0446   |
|                                   |                                 | $x_2$               | 人均水资源量/m <sup>3</sup>          | 3019.58   | 3006      | 2986.73   | 2964      | 2948      | 3118      | 4189      | 2609      | 3062      | 3174     |
|                                   |                                 | $x_3$               | 森林覆盖率/%                        | 39.7      | 39.7      | 39.7      | 27.94     | 28.98     | 30.27     | 31.27     | 30.79     | 34.41     | 34.82    |
|                                   |                                 | $x_4$               | 人均林木总蓄积量/m <sup>3</sup>        | 17.36     | 17.29     | 17.17     | 18.41     | 18.92     | 18.85     | 18.98     | 19.1      | 19.14     | 19.26    |
|                                   | 环境生态位<br>Environmental niche    | $x_5$               | 旱涝受灾面积/(万公顷)                   | 418.9     | 183.1     | 218.3     | 100.5     | 119.3     | 119.4     | 227.9     | 31.3      | 239.3     | 213.6    |
|                                   |                                 | $x_6$               | 建成区绿化覆盖率                       | 22.39     | 25.76     | 28.53     | 31.04     | 33.54     | 34.20     | 35.30     | 36.40     | 37.88     | 38.21    |
|                                   |                                 | $x_7$               | 人均能源生产量(t 标准煤)                 | 1.1       | 1.3       | 1.3       | 1.3       | 1.3       | 1.5       | 1.6       | 1.7       | 1.7       | 1.8      |
|                                   |                                 | $x_8$               | 水土流失治理面积/(万 hm <sup>2</sup> )  | 420       | 448       | 476       | 503       | 527       | 551       | 571       | 588       | 610       | 633      |
|                                   |                                 | $x_9$               | 工业废水排放总量/万吨                    | 105118.98 | 108018.34 | 106878.90 | 106335.31 | 122590.22 | 187965.46 | 253340.70 | 108699.90 | 107096.10 | 93444.20 |
|                                   |                                 | $x_{10}$            | 工业烟尘排放量/万吨                     | 71.41     | 66.57     | 68.26     | 70.26     | 63.40     | 48.22     | 33.05     | 21.89     | 19.57     | 25.97    |
|                                   |                                 | $x_{11}$            | 工业粉尘排放量/万吨                     | 48.63     | 38.89     | 41.79     | 40.41     | 38.37     | 28.84     | 19.32     | 14.04     | 11.36     | 14.14    |
|                                   |                                 | $x_{12}$            | 工业二氧化硫排放量/万吨                   | 86.78     | 85.78     | 95.18     | 99.40     | 114.08    | 108.17    | 102.26    | 96.89     | 94.64     | 93.76    |
|                                   |                                 | $x_{13}$            | 工业固废产生量/万吨                     | 5055.53   | 5396.86   | 5738.19   | 6079.52   | 6420.87   | 8036.09   | 9651.30   | 9236.90   | 8596.90   | 11239.20 |
| 经济生态位<br>Economic niche           |                                 | $x_{14}$            | 人均 GDP/元                       | 5376      | 5890      | 6623      | 7895      | 9060      | 10613     | 12963     | 15495     | 17339     | 21182    |
|                                   |                                 | $x_{15}$            | 人均财政收入/元                       | 321.37    | 344.42    | 394.63    | 448.83    | 555.03    | 696.57    | 965.22    | 1169.38   | 1307.33   | 1734.94  |
|                                   |                                 | $x_{16}$            | 单位 GDP 能耗/(t 标准煤/万元)           | 1.9       | 1.88      | 1.76      | 1.68      | 1.6       | 1.55      | 1.48      | 1.42      | 1.34      | 1.28     |
|                                   |                                 | $x_{17}$            | 单位 GDP 水耗/(m <sup>3</sup> /万元) | 205       | 197       | 184       | 161       | 142       | 120       | 98        | 80        | 77        | 65       |
|                                   |                                 | $x_{18}$            | 人均进出口贸易总额/美元                   | 36.73     | 52.74     | 66.11     | 79.95     | 91.47     | 126.35    | 163.18    | 247.40    | 269.65    | 364.15   |
|                                   |                                 | $x_{19}$            | 人均货运量/t                        | 6.42      | 6.76      | 6.71      | 7.63      | 8.14      | 8.51      | 9.07      | 12.86     | 13.14     | 14.82    |
|                                   |                                 | $x_{20}$            | 农民人均纯收入/元                      | 1986.99   | 2107.66   | 2229.86   | 2580.28   | 2802.78   | 3002.38   | 3546.69   | 4121.21   | 4462.05   | 5139.52  |
|                                   |                                 | $x_{21}$            | 城镇居民人均可支配收入/元                  | 6360.47   | 6610.76   | 7041.51   | 7709.83   | 8385.96   | 9350.11   | 11098.28  | 12633     | 13839.4   | 15461    |
|                                   |                                 | $x_{22}$            | 人口密度/(人/平方公里)                  | 174       | 175       | 176       | 180       | 180       | 168       | 168       | 168       | 169       | 166      |
|                                   |                                 | $x_{23}$            | 非农业人口占总人口比重/%                  | 0.19      | 0.20      | 0.21      | 0.22      | 0.23      | 0.24      | 0.24      | 0.25      | 0.25      | 0.26     |
| 社会生态位<br>Social niche             |                                 | $x_{24}$            | 城镇居民恩格尔系数/%                    | 40.23     | 39.83     | 38.91     | 40.19     | 39.32     | 37.72     | 41.19     | 43.96     | 40.45     | 39.5     |
|                                   |                                 | $x_{25}$            | 教育经费投入占 GDP 比例/%               | 1.99      | 2.16      | 2.04      | 1.92      | 1.90      | 2.09      | 2.77      | 2.93      | 3.19      | 3.15     |
|                                   |                                 | $x_{26}$            | 每万人拥有教师数/人                     | 74.58     | 75.42     | 75.95     | 76.38     | 77.51     | 78.57     | 78.76     | 79.32     | 79.86     | 81.45    |
|                                   |                                 | $x_{27}$            | 每万人拥有医疗床位数/张                   | 23.00     | 22.09     | 22.01     | 22.28     | 22.56     | 23.14     | 24.31     | 27.41     | 30.67     | 33.56    |
|                                   |                                 | $x_{28}$            | 每千人拥有医疗技术人员/人                  | 2.96      | 2.93      | 2.88      | 2.82      | 2.83      | 2.93      | 3.00      | 3.11      | 3.37      | 3.60     |

社会生态位:选用 9 个指标作为代表性指标。城镇居民恩格尔系数是衡量一个家庭或一个国家富裕程度的主要标准之一;农民人均纯收入、城镇人均可支配性收入和城镇居民恩格尔系数反映人民生活水平;人口密度表示四川省人口分布情况;非农人口占总人口比重用来衡量城市化率;教育经费投入占 GDP 的比例和每万人拥有教师数就能够反映出教育保障的情况;每万人拥有医疗床位数和医疗技术人员数能够反映医疗保障的情况。

## 2 模拟退火投影寻踪(SA-PP)耦合评价模型

投影寻踪技术是用来处理和分析高维数据的一种探索性数据分析的有效方法,将其应用于社会-经济-自然复合生态系统评价的建模基本思路如下:

设有由  $m$  个指标确定的  $n$  个样本的数据  $X_{ij}^0 (i=1 \sim n; j=1 \sim m)$ :

### 2.1 综合特征值 $Z_i$ 的构造

综合特征值  $Z_i$  构造为:

$$Z_i = \sum_{j=1}^m X_{ij} \cdot a_j \quad (1)$$

式中,  $X_{ij}$  为样本指标值,  $a_j$  是投影方向参数,  $a_j \in [-1, 1]$ ; 确定综合特征值  $Z_i$  的关键是找到反映高维数据特征结构的最优投影方向  $a_j$ 。因此构造一个投影指标函数  $Q(a)$ , 作为优选投影方向的依据, 当指标函数达到极值时, 即可获得最优投影方向。

### 2.2 投影指标函数 $Q(a)$ 的构造

为了构造投影寻踪指标函数, 引入类间距离和类内密度两个概念:

类间距离:

$$s(a) = \left[ \sum_{i=1}^n (Z_i - \bar{Z})^2 / n \right]^{1/2} \quad (2)$$

类内密度:

$$d(a) = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n (R - r_{ik}) \cdot f(R - r_{ik}) \quad (3)$$

构造投影指标:

$$Q(a) = s(a) \cdot d(a) \quad (4)$$

式中,  $a$  为投影方向;  $\bar{Z}$  为  $n$  个  $Z_i$  的均值, 即  $\bar{Z} = \left( \sum_{i=1}^n Z_i \right) / n$ ;  $r_{ik}$  表示综合特征值  $Z_i$  与  $Z_k$  两两之间的距离,  $r_{ik} = \|Z_i - Z_k\| (i, k = 1 \sim n)$ ;  $R$  表示密度的窗宽, 通常取值范围为  $r_{\max} + \frac{m}{2} \leq R \leq 2m$ 。  $f(R - r_{ik})$  为随着  $r_{ik}$  增加而下降的单调密度函数, 当  $R > r_{ik}$  时,  $f(R - r_{ik}) = 1$ ; 反之则为 0。

### 2.3 优化投影方向

设定目标函数为:  $\max Q(a)$ ; 约束条件:  $\|a\| = 1$ 。目标函数含义为当类间距离最大时, 类与类之前达到最好的分离程度, 类内密度最大时, 本类中各点聚集性越好。此情况下, 达到最优分类效果, 从而得到更好的评价结果。在满足约束条件的情况下, 求解出  $Q(a)$  最大值, 也就同时找到了最优投影方向  $a$ 。优化投影方向的方法很多, 此处采用并行模拟退火算法(SA)进行优化, 建立耦合的 SAPP 模型。模拟退火算法原理见文献[23], 基于并行 SA 优化的 SAPP 模型实现过程为:

①在解空间内随机生成初始种群  $a_i$ , 给定初始温度、终止温度、退火形式、同一温度下内循环次数等;

②通过式(1)~(4)进行适应度计算, 令当前解为最优解:  $a_{i,best}^t$ , 当前适应度为最优值:  $Q(a_{i,best}^t)$ ;

③随机产生扰动, 得到新点  $a_i^{t+1}$ , 同样进行适应度计算, 若  $Q(a_i^{t+1}) > Q(a_{i,best}^t)$ , 则选定最优解为  $a_{i,best}^{t+1}$ ; 否则, 计算新点  $a_i^{t+1}$  的接受概率:  $p(\Delta f) = \exp(-\Delta f / (K \cdot T))$ , 产生  $[0, 1]$  区间上均匀分布的伪随机数  $rand$ ,

若  $p(\Delta f) > rand$ , 则接受新点  $a_i^{t+1}$  作为下一次模拟的初始点, 并选定最优解为  $a_{i,best}^{t+1}$ ; 否则仍取原来的点  $a_i$  作为下一次模拟退火的初始点, 最优个体仍为  $a_{i,best}^t$ ;

④退火: 退火形式:  $T(t+1) = \gamma \cdot T(t)$ ,  $\gamma$  为退火系数  $0 < \gamma < 1$ ;

⑤重复执行步骤②~④, 直至达到终止条件, 并输出最优解。

### 3 评价与结果分析

四川省 2001—2010 年社会-经济-自然复合生态系统评价的 TSPP 评价步骤及结果:

(1) 由于各指标评价标准单位不一致, 且在数量级上存在很大差异, 首先按下式将原始数据规格化处理:

$$\begin{cases} x_{ij} = x_{ij}^0 / x_{jmax}^0 & \text{对正向指标} \\ x_{ij} = x_{jmin}^0 / x_{ij}^0 & \text{对逆向指标} \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $x_{ij}$  为社会-经济-自然复合生态系统评价指标值,  $x_{ij}^0$  为第  $i$  个样本第  $j$  个指标的原始值,  $x_{jmax}^0$  为第  $j$  个指标的样本原始最大值。表 1 中, 旱涝受灾面积、工业废水排放总量、工业烟尘排放量、工业粉尘排放量、工业二氧化硫排放量、工业固废产生量、单位 GDP 能耗和单位 GDP 水耗为逆向指标, 其余均为正向指标。

(2) 四川省社会-经济-自然复合生态系统评价样本指标值代入 SAPP 模型中, 采用 Matlab7.0 语言编程实现。并行 SA 优化投影寻踪模型时参数设置如下: 种群规模 200; 退火形式:  $T(t+1) = \gamma \cdot T(t)$ ,  $\gamma = 0.9$ ,  $t$  为迭代次数; 初始温度  $T_0 = 1 \times 10^{10}$ , 终止温度  $T_f = 0$ ; 接受概率公式:  $\exp(-\Delta f / T) > rand$ , 其中  $rand$  为  $(0, 1)$  之间的随机数。投影指标用式(4)计算, 在满足目标函数  $\max Q(a)$  和约束条件  $\|a\| = 1$  下, 经过寻优运算, 输出最优的投影方向向量为:  $a = (0.0922, 0.0608, 0.0232, 0.1481, 0.1723, 0.2048, 0.3114, 0.0884, 0.2643, 0.379, 0.3639, 0.3318, 0.009, 0.1112, 0.1956, 0.1531, 0.1714, 0.1501, 0.0884, 0.1724, 0.0862, 0.1777, 0.2355, 0.0709, 0.1607, 0.1454, 0.1504, 0.0141)$ , 由此可根据式(1)确定四川省社会-经济-自然复合生态系统评价系统每年的综合特征值  $Z_i$ , 如图 1 所示。从图 1 可以看出, 2001 年开始, 复合生态迅速降低, 复合生态位评价价值从 2001 年 3.1325 下降到 2005 年的 2.8499, 在 2003 年和 2005 年最低, 表明 2001—2005 年随着经济发展而自然生态系统退化程度和环境质量问题较为严重。从 2005 年开始, 复合生态位逐渐增加, 到 2010 年增加到 3.3304, 又恢复到 2001 年的水平, 表明环境重视程度的提高, 环保意识的加强, 促进了复合生态位的提高, 区域自然生态和环境得以改善。

为了与本文的评价结果对比, 在式(5)的原始数据规格化基础上采用多边形综合指标法<sup>[9]</sup>计算四川省历年生态位评价价值, 评价结果图对比如图 1 所示。由图可以看出四川省 2001—2010 年两种评价方法的变化趋势是一致的。

投影寻踪模型中, 最佳投影方向各分量的大小实质上反映了各个区域评价指标对生态位评价等级的影响程度, 值越大则对应的评价指标对生态位评价等级的影响程度越大。据此, 可进一步建立区域生态位各个评价指标的权重。在本例中, 最佳投影方向  $a$  如图 2 所示。图 2 可以清晰地看出, 区域生态位评价等级指标的影响程度最大的 10 项依次为: 工业烟尘排放量 > 工业粉尘排放量 > 工业二氧化硫排放量 > 人均能源生产量 > 工业废水排放总量 > 非农人口占总人口比重 > 建成区绿化覆盖率 > 人均财政收入 > 人口密度 > 旱涝受灾面积, 表明环境生态位子系统对综合生态位影响最大。

(3) 将表 1 中四川省资源生态位、环境生态位、经

济生态位和社会生态位四个子系统指标值按式(5)标准化处理后, 运用耦合模拟退火投影寻踪评价模型

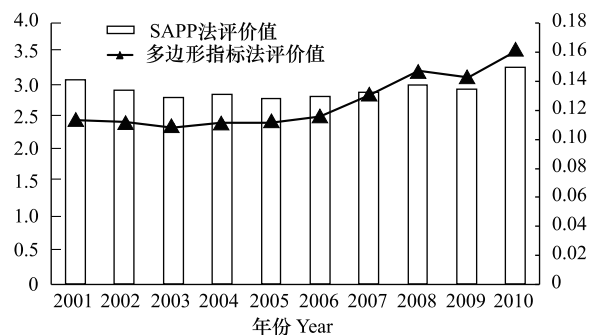


图 1 SAPP 法生态位综合特征值和 多边形指标法评价价值

Fig.1 The comprehensive evaluation value of ecological niche of SAPP and polygon index method

(SAPP)计算出各子系统特征值  $Z'_i$ , 各子系统特征值分布情况如图 3 所示。

资源生态位:2001—2010 年资源生态位呈上升的趋势,2008 年最大值,2009 年和 2010 年又逐渐减少。由于经济大力发展,需要很多资源消耗,加大了对资源的大力开发利用。环境生态位:环境生态位从 2001—2010 年间是呈稳定的下降趋势,环境污染日益严重。经济生态位:经济生态位也是逐渐呈稳定上升趋势,表明近 10 年四川省经济发展迅速,与此相对的是环境生态位的对应降低,表明经济发展的同时环境污染加重,四川省现在还处于经济发展破坏环境的阶段。四川省经济生态位和环境生态位在 2001—2010 年大体趋势上是负相关的,这 10 年间,随着经济发展环境污染问题严重的趋势比较明显。社会生态位:四川省 2001—2010 年社会生态位也是呈逐渐缓慢上升的趋势,说明随着经济发展水平的提高,人民的生活保障也在提高,社会保障体系在不断提高。经济生态位和社会生态位基本呈正相关关系,经济生态位高的地区通常情况下社会生态位也比较高,反之则较低,说明区域在发展过程中经济子系统和社会子系统基本上是保持同步发展。

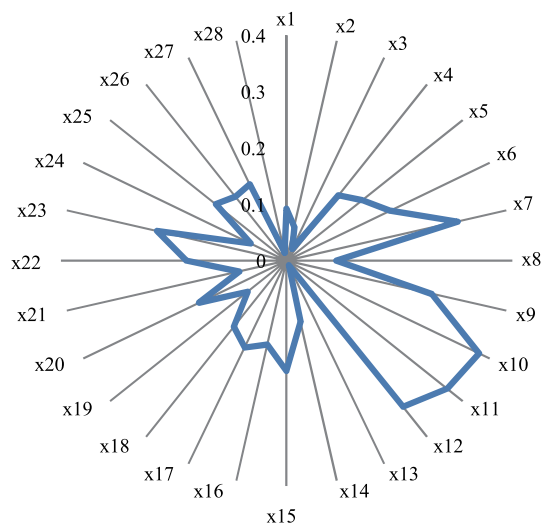


图 2 各指标最佳投影值

Fig.2 The best projection value of each index

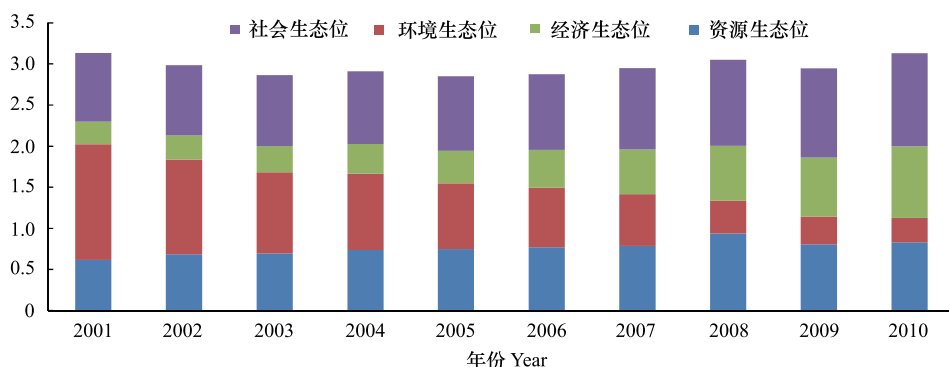


图 3 生态位各子系统生态位计算结果

Fig.3 Ecological niche results of each subsystem

#### 4 结论

(1) 投影寻踪算法具有良好的数据分析和处理能力,通过探索发现数据间的规律,得到较好的结果,并可以避免传统的评价方法在确定各指标权数时的主观片面性。因此,本文将模拟退火算法用于投影寻踪优化,构建耦合 SAPP 模型,并应用于四川省 2001—2010 年社会-经济-自然复合生态系统生态位以及各子系统生态位评价,表明了此模型具有实用性和可行性,为区域生态管理科学决策提供重要依据。

(2) 2001—2010 年四川省复合生态位呈现先降后升的趋势,复合生态位评价从 2001 年 3.1325 下降到 2005 年的 2.8499,从 2005 年开始,复合生态位逐渐增加,到 2010 年增加到 3.3304。表明环境重视程度的提高,环保意识的加强,促进了复合生态位的提高,区域自然生态和环境得以改善。经济生态位子系统和社会生态位子系统指标值相关系数为 0.9957,表明两子系统基本上是保持同步发展。而经济生态位和环境生态位子系统指标值相关系数为 -0.9346,呈现明显的负相关关系。资源子系统呈现上升趋势。

(3) 最佳投影方向各分量的大小反映了各评价指标对生态位评价等级的影响程度,值越大则对应的评价

指标对生态位评价等级的影响程度越大。区域生态位评价等级指标的影响程度最大的 10 项中有 4 项是环境生态位子系统指标,表明环境生态位子系统对综合生态位影响最大。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] Grinnell J. Field tests of theories concerning distributional control. *The American Naturalist*, 1917, 51(602): 115-128.
- [ 2 ] Elton C S. *Animal Ecology*. London: Sedgwick and Jackson, 1927.
- [ 3 ] Hutchinson G E. Concluding remarks; population studies animal ecology and demography. *Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology*, 1957, 22: 415-427.
- [ 4 ] Odum E P. *Fundamentals of Ecology*. Philadelphia: WB Saunders, 1959.
- [ 5 ] Han B L, Wang R S, Tao Y, Gao H. Urban population agglomeration in view of complex ecological niche: A case study on Chinese prefecture cities. *Ecological Indicators*, 2014, 47: 128-136.
- [ 6 ] Du H B, Xia Q Q, Ma X, Chai L H. A new statistical dynamic analysis of ecological niches for China's financial centres. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2014, 395: 476-486.
- [ 7 ] Funk A, Gschöpf C, Blaschke A P, Weigelhofer G, Reckendorfer W. Ecological niche models for the evaluation of management options in an urban floodplain—conservation vs. restoration purposes. *Environmental Science & Policy*, 2013, 34: 79-91.
- [ 8 ] 陈亮, 王如松, 王志理. 2003 年中国省域社会-经济-自然复合生态系统生态位评价. *应用生态学报*, 2007, 18(8): 1974-1800.
- [ 9 ] 李艳春, 王义祥, 黄毅斌. 1996—2006 年福建省社会-经济-自然复合生态系统生态位变化分析. *福建农业学报*, 2009, 24(2): 162-166.
- [ 10 ] 马世骏, 王如松. 社会-经济-自然复合生态系统. *生态学报*, 1984, 4(1): 1-9.
- [ 11 ] 陈亮, 李爱仙, 刘玫. 区域人口复合生态系统生态位评价. *城市发展研究*, 2008, 15(6): 33-36.
- [ 12 ] 毛齐正, 罗上华, 马克明, 邬建国, 唐荣莉, 张育新, 宝乐, 张田. 城市绿地生态评价研究进展. *生态学报*, 2012, 32(17): 5589-5600.
- [ 13 ] Chervinski A. Ecological evaluation of economic evaluation of environmental quality. *Procedia Economics and Finance*, 2014, 8: 150-156.
- [ 14 ] Dai J, Chen B, Hayat T, Alsaedi A, Ahmad B. Sustainability-based economic and ecological evaluation of a rural biogas-linked agro-ecosystem. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 41: 347-355.
- [ 15 ] Li X B, Tian M R, Wang H, Wang H, Yu J J. Development of an ecological security evaluation method based on the ecological footprint and application to a typical steppe region in China. *Ecological Indicators*, 2014, 39: 153-159.
- [ 16 ] 王健民, 王伟, 张毅, 胡梦春, 唐晓燕, 陈敏. 复合生态系统动态足迹分析. *生态学报*, 2004, 24(12): 3920-2926.
- [ 17 ] Salvo G, Simas M S, Pacca S A, Guilhoto J J M, Tomas A G R, Abramovay R. Estimating the human appropriation of land in Brazil by means of an Input-Output Economic Model and Ecological Footprint analysis. *Ecological Indicators*, 2015, 53: 78-94.
- [ 18 ] Wu X F, Yang Q, Xia X H, Wu T H, Wu X D, Shao L, Hayat T, Alsaedi A, Chen G Q. Sustainability of a typical biogas system in China: Energy-based ecological footprint assessment. *Ecological Informatics*, 2015, 26: 78-84.
- [ 19 ] 尤海梅, 王甜, 杨嘉伟, 孔西蓓, 程奕. 徐州市复合生态系统生态位的变化分析. *徐州师范大学学报: 自然科学版*, 2011, 29(3): 69-72.
- [ 20 ] 金书秦, 王军霞, 宋国君. 生态足迹法研究述评. *环境与可持续发展*, 2009, 34(4): 26-29.
- [ 21 ] Michael D S. *Statistical Modeling of High-Dimensional Nonlinear Systems: A Projection Pursuit Solution*. Atlanta: Georgia Institute of Technology Press, 2005: 13-88.
- [ 22 ] Zhang C, Dong S H. A new water quality assessment model based on projection pursuit technique. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, 21(S1): S154-S157.
- [ 23 ] Richards M, McDonald A J S, Aitkenhead M J. Optimisation of competition indices using simulated annealing and artificial neural networks. *Ecological Modelling*, 2008, 214(2/4): 375-384.