

砒砂岩区沙棘人工林生态系统服务功能变化探究

王举位¹, 邹伟¹, 林积泉¹, 张征², 安宝利³

(1. 海南省环境科学研究院, 海口 570206; 2. 北京林业大学

环境科学与工程学院, 北京 100083; 3. 水利部水土保持植物开发管理中心, 北京 100038)

摘 要:沙棘人工林是晋陕蒙砒砂岩区主要的退耕还林树种之一,在砒砂岩区生态环境治理中发挥着重要作用。通过理论分析、频度分析、专家咨询法构建了砒砂岩区沙棘人工林生态系统服务功能评价指标体系,应用博弈论综合赋权法将主、客观权重进行组合,得到综合权重。采用 AHP—模糊综合评价、TOPSIS 法、灰色关联投影法对砒砂岩区沙棘人工林生态系统服务功能进行了动态评价。结果表明:砒砂岩区沙棘人工林生态系统服务功能 2010 年、2007 年、2004 年、2001 年综合评价结果分别为良好、一般、较差、较差,砒砂岩区沙棘人工林生态系统服务功能呈逐年改善的趋势,退耕还林营造沙棘人工林生态措施的实施对砒砂岩区生态环境的改善起到了积极的促进作用。

关键词:生态系统服务功能; AHP—模糊综合评价; TOPSIS 法; 灰色关联投影法; 沙棘人工林

中图分类号:X821; S793.6

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2013)05-0203-07

Research for Dynamic Change of Seabuckthorn Plantation Ecosystem Services in the Soft Rock Area

WANG Ju-wei¹, ZOU Wei¹, LIN Ji-quan¹, ZHANG Zheng², AN Bao-li³

(1. Hainan Research Academy of Environmental Sciences, Haikou 570206, China; 2. College of Environmental Science and Engineering, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 3. Administration Center for Soil and Water Conservation Plant Development and Management, Ministry of Water Resources, Beijing 100038, China)

Abstract: Seabuckthorn plantation is one of the main plant species for returning farmland to forestland in the soft rock area in Shanxi, Shaanxi and Inner Mongolia. It plays an important role in the eco-environmental governance in the soft rock area. Through theoretical analysis, frequency statistics, expert consulting the ecosystem service evaluation index system of seabuckthorn plantation was established. Subjective and objective weights were combined to obtain the comprehensive weight by the application of Game Theory. We used the method of AHP-fuzzy comprehensive evaluation, Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution, Gray Relation Projection to evaluate the quality of seabuckthorn plantation ecosystem services in the soft rock area. The results showed that seabuckthorn plantation ecosystem services in 2010, 2007, 2004 and 2001 were good, general, relatively poor and relatively poor respectively. The quality trend of seabuckthorn plantation ecosystem services was improving year by year. The implementation of returning farmland to seabuckthorn plantation had played a positive role in promoting the improvement of the ecological environment in soft rock area.

Key words: ecosystem services; AHP-fuzzy comprehensive evaluation; TOPSIS; gray relation projection; seabuckthorn plantation

生态系统服务功能即生态系统与生态过程形成及所维系的人类赖以生存的自然环境条件与效用。生态系统不仅为人类提供食物、医药及其他工农业生

产原料,而且维持着人类赖以生存和发展的生命支持系统^[1-2]。随着全球气候变暖、土地退化、生物多样性锐减等全球性生态环境问题的加剧,生态系统服务功

能的退化已成为当今人类可持续发展的主要问题之一,因此,近年来生态系统服务功能的研究及评价越来越受到重视^[3-4]。关于生态系统服务功能的研究,国外主要从生态学、经济学角度探讨生态系统服务功能理论、方法及应用^[5-8]。国内主要集中于理论、评估方法及生态系统与可持续发展关系方面的研究^[9-11]。而关于生态系统服务功能方面的研究目前还较少,且评价研究多集中于静态模型得出的结论,对评估结果缺乏动态研究^[12]。

沙棘(*Hippophae rhamnoides*)是胡颓子科灌木或小乔木,具有耐旱、耐寒、耐瘠薄的特点,是干旱、半干旱地区的先锋树种和关键树种。位于晋陕蒙交界的砭砂岩区水蚀比较活跃,是我国水土流失严重地区,1998年国家实施的“晋陕蒙砭砂岩区沙棘生态工程”表明,种植沙棘是治理裸露砭砂岩的关键性措施^[13]。本文从“砭砂岩区沙棘生态工程”种植沙棘产生生态效益的2001年开始,对研究区内2001—2010年的人工沙棘林从不同角度对其生态系统服务功能及其动态变化进行评价与分析,以便直观地了解和掌握沙棘生态建设工程产生的效益,为科学营造和管理沙棘,充分发挥沙棘人工林的生态效益,加快砭砂岩区环境治理和区域生态经济的发展提供依据。

1 研究区概况

砭砂岩区位于晋陕蒙接壤地带,其分布区域东到黄河,西达杭锦旗的毛布拉孔兑,沿毛乌素沙地西北缘分布,南至陕西省神木县,北抵库布齐沙漠南缘,介于北纬 $38^{\circ}10'—40^{\circ}10'$,东经 $108^{\circ}45'—111^{\circ}31'$ 。根据地表覆盖物质,砭砂岩区可划分为裸露砭砂岩区、盖沙砭砂岩区、盖土砭砂岩区3个类型区面积约 3.2万 km^2 ^[14]。本区属暖温带北缘半干旱大陆性气候,年平均气温 $6\sim 9^{\circ}\text{C}$,年平均降水量 $280\sim 400\text{ mm}$,年平均蒸发量 $2\ 200\sim 2\ 600\text{ mm}$,年平均风速 $2\sim 4\text{ m/s}$ 。风蚀、水蚀现象严重,植被稀疏,天然植被以禾本科(*Poaceae*)、菊科(*Compositae*)、豆科(*Leguminosae*)等植物为主,人工植被主要有油松(*Pinus tabulaeformis*)、杨树(*Populus sp.*)为主的水土保持乔木林,沙棘、柠条(*Caragana korshinskii*)为主的水土保持灌木林,人工草地以沙打旺(*Astragalus adsurgens*)和紫花苜蓿(*Medicago sativa*)为主^[15]。

2 研究方法

2.1 评价指标体系构建

砭砂岩区地层为陆相碎屑岩系,由于覆岩层厚度小、压力低,形成成岩程度低、沙粒间胶结程度差、结

构强度低以及土壤土层薄、肥力低、干燥疏松、易受侵蚀等特点。根据砭砂岩区土壤覆盖情况,可划分为裸露区、盖土区、盖沙区3个亚区,这些区域是黄河多沙粗沙的主要来源地^[14]。根据砭砂岩区土壤特征及水土流失状况,种植沙棘已成为治理砭砂岩区坡地和沟道的主要树种,是植物措施治理砭砂岩的重要突破口。通过对沙棘的性状分析表明^[16],沙棘根系发达,具有适应性强、耐旱、耐寒、耐瘠薄等特点,是干旱、半干旱地区优良的水土保持树种,具有较好的保育土壤、涵养水源、积累营养物质、保护生物多样性及森林防护等作用。因此,在沙棘人工林生态系统服务功能评价指标的选取上充分考虑了砭砂岩区土壤特征、区域特点及沙棘特性等综合因素。

目前,评价指标的筛选方法主要有理论分析、频度分析和专家咨询法等^[17]。本文综合以上3种方法,首先采用理论分析法分析沙棘人工林生态系统服务功能机制的产生过程,对沙棘人工林生态系统服务功能要素进行识别与分析。运用频度分析统计指标出现的频度,选取目前本领域使用频度较高、针对性较强及评估方法比较成熟的指标;然后根据初步构建的指标体系咨询有关专家,征求意见,对指标进行修改调整,最后形成砭砂岩区沙棘人工林生态系统服务功能评价指标体系,如表1所示。

2.2 指标权重确定

本文应用组合赋权法来确定指标权重,采用AHP(Analytic Hierarchy Process)、G1法进行主观赋权,变异系数法进行客观赋权,最后运用博弈论法综合考虑3种权重,进行综合赋权,其结果见表2。本文采用博弈论综合权重计算结果进行评价。

2.3 评价方法

本文采用AHP—模糊评价法、TOPSIS(Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution)法、灰色关联投影法对沙棘人工林生态系统服务功能进行动态变化评价,以期得到客观合理的评价结果。评价等级分为5级:I级、II级、III级、IV级、V级,为了明确评价结果,对应的评价等级分别为:优、较优、良好、一般、较差。

2.3.1 AHP—模糊综合评价法 在复杂系统中,需要考虑的因素较多,各因素之间如存在一定的层次结构,则可采用多层次模糊综合评价方法,该法对复杂的综合评价问题有较好的应用性。其评价步骤如下^[18]:(1)计算隶属度,建立模糊关系矩阵;(2)AHP法计算权重,构成输入向量;(3)复合运算,获得模糊综合评价结果。

2.3.2 TOPSIS法 TOPSIS法适用于多项指标、

多个对象进行比较选择的分析方法,其根据评价对象与理想目标的靠近程度给出排序,然后根据距离的大小划定等级,进行评价。理想化目标有两个:正理想解和负理想解,采用欧式距离计算各方案到正理想解与负理想解的距离,与正理想解的距离最近,而与负理想解的距离最远者最优;反之,与正理想解的距离最远,而与负理想解的距离最近者为最差。TOPSIS 法步骤如下^[19]: (1) 构造多属性决策矩阵; (2) 构造加权归一化决策矩阵; (3) 确定正、负理想解; (4) 确定各方案到正、负理想解的距离值; (5) 确定各方案到理想解

的相对贴近度; (6) 排序、划分等级, 进行评价。

2.3.3 灰色关联投影法 灰色关联投影法是从矢量投影角度确定系统因素对系统主要目标贡献程度的方法。其依据各方案在理想方案上的投影值大小评判方案优劣,通过加权后能够合理反映决策方案与理想方案之间的贴进程度,该方法能够避免单向偏差,从而全面地分析和反映指标之间的关系^[20]。灰色关联投影法的求解步骤如下^[21]: (1) 建立评价样本矩阵; (2) 归一化矩阵元素; (3) 建立灰色关联度判断矩阵; (4) 划定等级, 确定评价结果。

表 1 砒砂岩区沙棘人工林生态系统服务功能评价指标体系

| 目标层 | 准则层 | 要素层 | 指标层 | 单位 |
|-------------------|------------------------|-----------------------|-------------------------|------------------------|
| 砒砂岩区沙棘人工林生态系统服务功能 | 保育土壤 A ₁ | 固土 B ₁ | 土壤侵蚀模数 C ₁ | t/(km ² ·a) |
| | | | 土壤有机质含量 C ₂ | t/(km ² ·a) |
| | | 保肥 B ₂ | 土壤固氮速率 C ₃ | t/(km ² ·a) |
| | | | 土壤固磷速率 C ₄ | t/(km ² ·a) |
| | | | 土壤固钾速率 C ₅ | t/(km ² ·a) |
| | 涵养水源 A ₂ | 调节水量 B ₃ | 枯枝落叶层蓄水量 C ₆ | t/(km ² ·a) |
| | | | 根系土壤层蓄水量 C ₇ | t/(km ² ·a) |
| | | 净化水质 B ₄ | 地表径流量 C ₈ | t/(km ² ·a) |
| | | | 土壤贮水量 C ₉ | t/(km ² ·a) |
| | 生物多样性保护 A ₃ | 物种保育 B ₅ | 动物物种丰富度 C ₁₀ | — |
| | | | 植物物种丰富度 C ₁₁ | — |
| | 营养物质积累 A ₆ | 林木积累营养 B ₆ | 林木固氮量 C ₁₂ | t/(km ² ·a) |
| | | | 林木固磷量 C ₁₃ | t/(km ² ·a) |
| | | | 林木固钾量 C ₁₄ | t/(km ² ·a) |
| | 森林防护 A ₇ | 防护效能 B ₇ | 风蚀减少率 C ₁₅ | % |

表 2 评价指标主客观权重及综合权重

| 指标 | AHP 权重 | G1 权重 | 变异系数 | 博弈论综合 |
|-----------------|--------|--------|--------|--------|
| | | | 权重 | 权重 |
| C ₁ | 0.0602 | 0.0860 | 0.0751 | 0.0734 |
| C ₂ | 0.0086 | 0.0537 | 0.0291 | 0.0301 |
| C ₃ | 0.2829 | 0.0806 | 0.1157 | 0.1633 |
| C ₄ | 0.0428 | 0.0538 | 0.0443 | 0.0469 |
| C ₅ | 0.1557 | 0.0753 | 0.0525 | 0.0967 |
| C ₆ | 0.0208 | 0.0560 | 0.0234 | 0.0334 |
| C ₇ | 0.1458 | 0.0896 | 0.0544 | 0.0986 |
| C ₈ | 0.0033 | 0.0371 | 0.0915 | 0.0421 |
| C ₉ | 0.0300 | 0.0669 | 0.0834 | 0.0590 |
| C ₁₀ | 0.0315 | 0.0908 | 0.0674 | 0.0625 |
| C ₁₁ | 0.0946 | 0.0756 | 0.0708 | 0.0809 |
| C ₁₂ | 0.0552 | 0.0536 | 0.0488 | 0.0527 |
| C ₁₃ | 0.0056 | 0.0298 | 0.0703 | 0.0338 |
| C ₁₄ | 0.0152 | 0.0446 | 0.1459 | 0.0658 |
| C ₁₅ | 0.0477 | 0.1067 | 0.0272 | 0.0610 |

3 结果与分析

3.1 AHP—模糊综合动态评价

目前沙棘人工林生态系统服务功能评价尚未有规

范与标准,为合理反映沙棘人工林生态服务功能特征,本文在评价指标分级过程中参照我国各地沙棘生态服务功能特征参数,引用其平均值、极值进行趋势内、外推,并结合专家咨询、经验公式计算等方法建立分级体系(表 3)。AHP—模糊综合评价的隶属度值可以由半梯形分布或梯形分布函数确定,计算公式如下^[22]:

$$\mu(x)=\begin{cases} 1 & x\leqslant\partial_1 \\ \frac{\partial_2-x}{\partial_2-\partial_1} & \partial_1< x\leqslant\partial_2 \\ 0 & x>\partial_2 \end{cases}$$

(1)

$$\mu(x)=\begin{cases} \frac{x}{\partial_1} & x\leqslant\partial_1 \\ 1 & \partial_1< x\leqslant\partial_2 \\ \frac{\partial_3-x}{\partial_3-\partial_2} & \partial_2< x\leqslant\partial_3 \end{cases}$$

(2)

$$\mu(x)=\begin{cases} 0 & x\leqslant\partial_1 \\ \frac{x-\partial_1}{\partial_2-\partial_1} & \partial_1< x\leqslant\partial_2 \\ 1 & x>\partial_2 \end{cases}$$

(3)

式中:x——评价指标的实测值;∂₁,∂₂,∂₃——相邻的

等级值; $\mu(x)$ ——评价指标的隶属度,值越大对生态系统服务功能负效益越大的指标采用降半梯形分布函数,见式(1);对于其值越大对生态系统服务功能正效益越大的指标采用升半梯形分布函数,见式(3);处于中间状态的,其隶属函数可采用梯形函数,见式

(2)。准则层隶属度计算结果见表 4。

由表 5 可以看出,2010 年砒砂岩区沙棘人工林生态系统服务功能达到Ⅲ级,2007 年达到Ⅳ级,2004 年和 2001 年都为Ⅴ级,可见砒砂岩区沙棘人工林生态服务功能状况有逐年改善和提高了的趋势。

表 3 沙棘人工林生态系统服务功能等级划分

| 指标层 | I 级 | Ⅱ级 | Ⅲ级 | Ⅳ级 | V 级 | 单位 |
|------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|------------------------|
| 土壤侵蚀模数 C_1 | ≤ 1000 | ≤ 2500 | ≤ 5000 | ≤ 8000 | ≤ 15000 | t/(km ² ·a) |
| 土壤有机质含量 C_2 | ≥ 90 | ≥ 80 | ≥ 70 | ≥ 60 | ≥ 50 | t/(km ² ·a) |
| 土壤固氮速率 C_3 | ≥ 20 | ≥ 15 | ≥ 10 | ≥ 5 | ≥ 0 | t/(km ² ·a) |
| 土壤固磷速率 C_4 | ≥ 15 | ≥ 12 | ≥ 9 | ≥ 6 | ≥ 3 | t/(km ² ·a) |
| 土壤固钾速率 C_5 | ≥ 25 | ≥ 20 | ≥ 15 | ≥ 10 | ≥ 5 | t/(km ² ·a) |
| 枯枝落叶层蓄水量 C_6 | ≥ 1000 | ≥ 900 | ≥ 800 | ≥ 700 | ≥ 600 | t/(km ² ·a) |
| 根系土壤层蓄水量 C_7 | ≥ 5500 | ≥ 4500 | ≥ 3500 | ≥ 2500 | ≥ 1500 | t/(km ² ·a) |
| 地表径流量 C_8 | ≥ 4500 | ≥ 3500 | ≥ 2500 | ≥ 1500 | ≥ 500 | t/(km ² ·a) |
| 土壤贮水量 C_9 | ≥ 50000 | ≥ 40000 | ≥ 30000 | ≥ 20000 | ≥ 10000 | t/(km ² ·a) |
| 动物物种丰富度 C_{10} | ≥ 6 | ≥ 4.5 | ≥ 3 | ≥ 1.5 | ≥ 0 | t/(km ² ·a) |
| 植物物种丰富度 C_{11} | ≥ 6 | ≥ 4.5 | ≥ 3 | ≥ 1.5 | ≥ 0 | t/(km ² ·a) |
| 林木固氮量 C_{12} | ≥ 6 | ≥ 5 | ≥ 4 | ≥ 3 | ≥ 2 | t/(km ² ·a) |
| 林木固磷量 C_{13} | ≥ 1 | ≥ 0.75 | ≥ 0.5 | ≥ 0.25 | ≥ 0 | t/(km ² ·a) |
| 林木固钾量 C_{14} | ≥ 2 | ≥ 1.5 | ≥ 1 | ≥ 0.5 | ≥ 0 | t/(km ² ·a) |
| 风蚀减少率 C_{15} | ≥ 90 | ≥ 80 | ≥ 70 | ≥ 60 | ≥ 50 | % |

表 4 准则层隶属度

| 年份 | 准则层 | I 级 | Ⅱ级 | Ⅲ级 | Ⅳ级 | V 级 | 级别 |
|------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|----|
| 2010 | 保育土壤 | 0.5199 | 0.6995 | 0.9473 | 0.9109 | 0.6488 | Ⅲ |
| | 涵养水源 | 0.6632 | 0.8045 | 0.9885 | 0.9292 | 0.6329 | Ⅲ |
| | 生物多样性保护 | 0.4605 | 0.6139 | 0.9208 | 1.0000 | 0.7195 | Ⅳ |
| | 营养物质积累 | 0.6566 | 0.8103 | 0.9916 | 0.9157 | 0.6160 | Ⅲ |
| | 森林防护 | 0.9611 | 1.0000 | 0.3500 | 0.1750 | 0.1167 | Ⅱ |
| 2007 | 保育土壤 | 0.3502 | 0.4697 | 0.6895 | 0.9745 | 0.8867 | Ⅳ |
| | 涵养水源 | 0.5149 | 0.6240 | 0.7951 | 0.9970 | 0.9168 | Ⅳ |
| | 生物多样性保护 | 0.3750 | 0.5000 | 0.7500 | 1.0000 | 0.8333 | Ⅳ |
| | 营养物质积累 | 0.5162 | 0.6326 | 0.8236 | 1.0000 | 0.8509 | Ⅳ |
| | 森林防护 | 0.8611 | 0.9688 | 1.0000 | 0.6250 | 0.4167 | Ⅲ |
| 2004 | 保育土壤 | 0.2838 | 0.3787 | 0.5509 | 0.9480 | 0.9959 | V |
| | 涵养水源 | 0.4250 | 0.5134 | 0.6514 | 0.9002 | 0.9998 | V |
| | 生物多样性保护 | 0.2792 | 0.3722 | 0.5583 | 0.9417 | 0.9417 | Ⅳ |
| | 营养物质积累 | 0.3770 | 0.4597 | 0.5928 | 0.8577 | 0.9980 | V |
| | 森林防护 | 0.7611 | 0.9786 | 0.9786 | 1.0000 | 0.7167 | Ⅳ |
| 2001 | 保育土壤 | 0.1533 | 0.2037 | 0.2921 | 0.4817 | 1.0000 | V |
| | 涵养水源 | 0.3213 | 0.3866 | 0.4879 | 0.5319 | 1.0000 | V |
| | 生物多样性保护 | 0.1708 | 0.2278 | 0.3417 | 0.6833 | 1.0000 | V |
| | 营养物质积累 | 0.2874 | 0.3485 | 0.4446 | 0.6288 | 1.0000 | V |
| | 森林防护 | 0.6756 | 0.7600 | 0.8686 | 1.0000 | 0.9733 | Ⅳ |

表 5 各年份 AHP—模糊综合评价结果

| 年份 | I 级 | Ⅱ级 | Ⅲ级 | Ⅳ级 | V 级 | 级别 |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|----|
| 2010 | 0.5725 | 0.7325 | 0.9271 | 0.8911 | 0.6266 | Ⅲ |
| 2007 | 0.4233 | 0.5406 | 0.7432 | 0.9675 | 0.8609 | Ⅳ |
| 2004 | 0.3413 | 0.4396 | 0.5955 | 0.9333 | 0.9767 | V |
| 2001 | 0.2242 | 0.2809 | 0.3766 | 0.5531 | 0.9987 | V |

3.2 TOPSIS 法动态评价

根据表 1 中博弈论综合赋权法得到的权重,构造加权的规范化决策矩阵 U 如下:

U=

| | | | |
|--------|--------|--------|--------|
| 0.0153 | 0.0233 | 0.0283 | 0.0426 |
| 0.0142 | 0.0118 | 0.0111 | 0.0097 |
| 0.0762 | 0.0486 | 0.0335 | 0.0112 |
| 0.0177 | 0.0150 | 0.0130 | 0.0096 |
| 0.0389 | 0.0333 | 0.0268 | 0.0189 |
| 0.0152 | 0.0131 | 0.0122 | 0.0112 |
| 0.0440 | 0.0349 | 0.0285 | 0.0211 |
| 0.0217 | 0.0146 | 0.0105 | 0.0059 |
| 0.0299 | 0.0206 | 0.0148 | 0.0096 |
| 0.0203 | 0.0152 | 0.0106 | 0.0088 |
| 0.0321 | 0.0267 | 0.0201 | 0.0144 |
| 0.0228 | 0.0203 | 0.0157 | 0.0127 |
| 0.0125 | 0.0102 | 0.0077 | 0.0045 |
| 0.0349 | 0.0186 | 0.0090 | 0.0041 |
| 0.0293 | 0.0262 | 0.0232 | 0.0206 |

加权后正理想解和负理想解分别为:
 $u_1^+ = (0.0030, 0.0163, 0.1313, 0.0368, 0.0737, 0.0179, 0.0703, 0.0305, 0.0421, 0.0554, 0.0653, 0.0354, 0.0284, 0.0516, 0.0305)$
 $u_1^- = (0.0446, 0.0090, 0, 0.0074, 0.0147, 0.0108, 0.0192, 0.0034, 0.0084, 0, 0, 0.0118, 0, 0, 0.0169)$ 各年份的正、负理想解距离值和贴近度如表 6 所示。

| 表 6 各年份正理想解、负理想解的距离值及相对贴近度 | | | |
|----------------------------|--------|--------|--------|
| 年份 | 正理想解距离 | 负理想解距离 | 相对贴近度 |
| 2010 | 0.0933 | 0.1092 | 0.5393 |
| 2007 | 0.1271 | 0.0729 | 0.3645 |
| 2004 | 0.1505 | 0.0496 | 0.2479 |
| 2001 | 0.1801 | 0.0205 | 0.1024 |

通过专家评分,运用集值统计法对指标等级进行量化,设指标逻辑评语等级为 $A=(\text{I 级}, \text{II 级}, \text{III 级}, \text{IV 级}, \text{V 级})$ 各指标的评语集映射在 $[0, 1]$ 区间,即赋值标准采用 $0 \sim 1$ 数值给出评定值。为了避免单一分值判断的困难,专家在评分时可给出一个分值区间。设第 k 个专家对第 j 个等级给出的评价区间为 $(a_{1j}^k, a_{2j}^k), k=(1, 2, \cdots, n)$,可以得到 n 个区间估计,从而形成一个集值样本。第 j 等级的量化值可用下面公式推导^[23]:

$$a_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^n [(a_{1j}^k)^2 - (a_{2j}^k)^2]}{2 \sum_{k=1}^n [(a_{1j}^k - a_{2j}^k)]} \quad (1)$$

式中, $k=(1, 2, \cdots, n), j=(1, 2, \cdots, 5)$

根据专家评分结果将其划分成以下 5 个等级(表 7),根据等级划分情况,得到各年份综合评价结果(表 8)。TOPSIS 综合评价结果表明,2010 年砒砂岩区沙棘人工林生态系统服务功能达到 III 级,2007 年达到 IV 级,2004 年和 2001 年都为 V 级,从评价结果来看,砒砂岩区种植沙棘后生态服务功能逐年得到改善。

| 表 7 TOPSIS 法评价等级划分 | | | | |
|--------------------|------------|------------|------------|------------|
| I 级 | II 级 | III 级 | IV 级 | V 级 |
| ≥ 0.9 | ≥ 0.7 | ≥ 0.5 | ≥ 0.3 | ≥ 0.1 |

| 表 8 各年份 TOPSIS 综合评价结果 | | | | |
|-----------------------|-------|------|------|------|
| 年份 | 2010 | 2007 | 2004 | 2001 |
| 等级 | III 级 | IV 级 | V 级 | V 级 |

3.3 灰色关联投影法动态评价

记 Y_j 为包含 m 个评价指标的评价样本, $Y_j = (y_{1j}, y_{2j}, \cdots, y_{mj})$, y_0 为理想样本, $y_0 = (y_{10}, y_{20}, \cdots, y_{m0})$ 。本文采用极差标准化法变换:当 Y_{ij} 为效益型指标时, $y_{ij}' = y_{ij} / y_{i0}$, 且当 $y_{ij} \geq y_{i0}$ 时, 取 y' 为 1; 当 y_{ij} 为成本型指标时, $y_{ij}' = y_{i0} / y_{ij}$, 且当 $y_{ij} \leq y_{i0}$ 时, 取 y_{ij}' 为 1。本文以 I 级(表 3)为理想样本:

$Y_0 = (1000, 90, 20, 15, 25, 1000, 5500, 4500, 50000, 6, 6, 6, 1, 2, 90)$

归一化矩阵为:

$Y_{ij}' =$

| | | | | |
|---|---------|--------|--------|--------|
| 1 | 0.1942 | 0.1279 | 0.1050 | 0.0699 |
| 1 | 0.8744 | 0.7267 | 0.6811 | 0.5956 |
| 1 | 0.5800 | 0.3700 | 0.2550 | 0.0850 |
| 1 | 0.4800 | 0.4067 | 0.3533 | 0.2600 |
| 1 | 0.5280 | 0.4520 | 0.3640 | 0.2560 |
| 1 | 0.8450 | 0.7300 | 0.6800 | 0.6250 |
| 1 | 0.6264 | 0.4973 | 0.4055 | 0.3000 |
| 1 | 0.7111 | 0.4778 | 0.3422 | 0.1933 |
| 1 | 0.7108 | 0.4900 | 0.3520 | 0.2280 |
| 1 | 0.3667 | 0.2750 | 0.1917 | 0.1583 |
| 1 | 0.4917 | 0.4083 | 0.3083 | 0.1750 |
| 1 | 0.6733 | 0.5750 | 0.4433 | 0.3583 |
| 1 | 0.4400 | 0.3600 | 0.2700 | 0.1600 |
| 1 | 0.6750 | 0.3600 | 0.1750 | 0.0800 |
| 1 | 0.09611 | 0.8611 | 0.7611 | 0.6756 |

记 r_{ij} 为归一化评价样本矩阵元素 $y_{ij}' (i=1, 2, \cdots, m; j=1, 2, \cdots, n)$ 与理想样本矩阵元素 y_{i0}' 的关联系数,则可以得到灰色关联度判断矩阵 R :

R=

| | | | | |
|---|--------|--------|--------|--------|
| 1 | 0.3965 | 0.3769 | 0.3705 | 0.3612 |
| 1 | 0.8533 | 0.6825 | 0.6428 | 0.5796 |
| 1 | 0.5694 | 0.4602 | 0.4165 | 0.3652 |
| 1 | 0.5116 | 0.4761 | 0.4533 | 0.4182 |
| 1 | 0.5378 | 0.4974 | 0.4577 | 0.4168 |
| 1 | 0.8127 | 0.6856 | 0.6419 | 0.5999 |
| 1 | 0.6009 | 0.5207 | 0.4756 | 0.4325 |
| 1 | 0.6684 | 0.5104 | 0.4488 | 0.3963 |
| 1 | 0.6681 | 0.5168 | 0.4527 | 0.4074 |
| 1 | 0.4588 | 0.4235 | 0.3957 | 0.3856 |
| 1 | 0.5177 | 0.4769 | 0.4357 | 0.3906 |
| 1 | 0.6365 | 0.5662 | 0.4932 | 0.4553 |
| 1 | 0.4916 | 0.4560 | 0.4217 | 0.3861 |
| 1 | 0.9246 | 0.6379 | 0.4560 | 0.3638 |
| 1 | 1.0000 | 0.8344 | 0.7159 | 0.6383 |

根据博弈论综合赋权法确定的权重,记 $\overline{w_i}$ 为灰色关联投影权值,归一化处理后,得到灰色关联投影权值:

$$\overline{w_i}=(0.0187,0.0031,0.0925,0.0077,0.0325,0.0039,0.0337,0.0062,0.0121,0.0136,0.0227,0.0096,0.0040,0.0150,0.0129)$$

灰色关联度判断矩阵及灰色关联投影权值得到灰色关联投影值结果(表 9)。通过专家评分,运用集值统计法对指标等级进行量化,将灰色关联投影值划分成 5 个等级(I 级 ≥ 0.25 ,II 级 ≥ 0.20 ,III 级 ≥ 0.15 ,IV 级 ≥ 0.10 ,V 级 ≥ 0.05)。从灰色关联投影评价结果来看,2010 年砭砂岩区沙棘人工林生态系统服务功能达到 III 级,2007 年达到 IV 级,2004 年和 2001 年都是 IV 级,由此得出,砭砂岩区种植沙棘后生态服务功能逐年得到改善和提高。

表 9 各年灰色关联投影值

| 项目 | 2010 年 | 2007 年 | 2004 年 | 2001 年 |
|---------|--------|--------|--------|--------|
| 灰色关联投影值 | 0.1726 | 0.1453 | 0.1303 | 0.1171 |
| 等级 | III 级 | IV 级 | IV 级 | IV 级 |

3.4 沙棘人工林生态系统服务功能综合评价结果对比

AHP—模糊综合评价、TOPSIS 法和灰色关联投影 3 种方法评价结果表明(表 10),3 种方法得出来的结果差别较小,2010 年和 2007 年评价结果一致,分别是 III 级和 IV 级,2004 年和 2001 年略有差别,其中 AHP—模糊综合评价、TOPSIS 法的结果都为 V 级,而灰色关联投影法的结果为 IV 级。综合以上分析,砭砂岩区沙棘人工林生态系统服务功能 2010 年、2007 年、2004 年、2001 年评价结果分别为良好、一般、较差、较差。

本文应用 3 种评价方法得到的结果基本一致,将

其应用于砭砂岩区沙棘人工林生态系统服务功能动态评价中,克服了单一评价过程中的主观性和不充分性,具有较好的适用性和针对性,在一定程度上保证了评价的准确性和客观性。通过评价结果的对比,能够进一步明确在生态环境工程建设综合效益评价过程中应该采用的评价尺度,为生态环境工程建设的评价提供了一条较为有效的途径。

表 10 3 种方法评价结果对比

| 方法 | 2010 年 | 2007 年 | 2004 年 | 2001 年 |
|------------|--------|--------|--------|--------|
| | III 级 | IV 级 | V 级 | V 级 |
| AHP-模糊综合评价 | III 级 | IV 级 | V 级 | V 级 |
| TOPSIS 法 | III 级 | IV 级 | IV 级 | IV 级 |
| 灰色关联投影法 | III 级 | IV 级 | IV 级 | IV 级 |

3.5 讨论

砭砂岩区人工沙棘林生态系统服务功能变化状况是国家生态政策、自然因素、经济因素等合力驱动的结果^[24]。退耕还林和营造沙棘防护林等生态措施的实施对砭砂岩区的生态环境起到了积极的促进作用。今后应该积极引进优良种质资源,运用各种林草技术手段,以小流域为治理单元,使之成为砭砂岩地区植被恢复的重要途径^[25]。

本文在指标体系构建、指标等级划分、权重确定及评价方法方面做了一些探究,但基于方法本身存在的一些局限性,如 TOPSIS 方法属于多属性决策方法,只能从已有的备选方案中选择其中的一个作为执行方案,即解决了“多选一”的问题,然而当备选方案不能完全反映实际情况所包含的信息时,决策者就会在信息不完备的情况下做出选择,从而导致不合理的决策^[26]。AHP—模糊综合评价法用到专家调查评分,受人为因素影响,评价结果的客观性受到一定的限制。灰色关联投影法一般用于处理信息不完全、不确定的灰对象,所得结果在信息的可靠性上有一定缺陷。因此,需要在进一步研究中优化沙棘人工林生态系统服务功能评价理论体系和方法体系,以期提高评价的精确度及可靠性。其次,在今后研究中应加强现场监测及利用遥感影像、土地利用/覆被数据深入分析研究,以对砭砂岩区沙棘人工林服务功能有更为精确及全面的评价。

4 结论

(1) 采用理论分析、频度分析、专家咨询法,构建了保育土壤、涵养水源、积累营养物质、生物多样性保护和森林防护 5 个准则;固土、保肥、调节水量、净化水质等 7 个要素;土壤侵蚀模数、土壤有机质含量、土壤固氮速率等 15 个指标的砭砂岩区沙棘人工林生态

系统服务功能的评价指标体系。

(2) 采用 AHP—模糊综合评价、TOPSIS 法、灰色关联投影法对砒砂岩区沙棘人工林生态系统服务功能进行评价,3 种评价方法结果表明,2010 年、2007 年沙棘人工林生态系统服务功能处于Ⅲ级和Ⅳ级水平,2004 年、2001 年沙棘人工林生态系统服务功能处于Ⅳ级或Ⅴ级水平;砒砂岩区沙棘人工林生态系统服务功能 2010 年、2007 年、2004 年、2001 年综合评价结果分别为良好、一般、较差、较差。

(3) 砒砂岩区人工沙棘林生态系统服务功能状况逐年得到改善,退耕还林和营造沙棘防护林等生态措施的实施对砒砂岩区的生态环境起到了积极的促进作用。

(4) 本文在沙棘人工林生态系统服务功能评价研究方法上做了一些探究,但在指标体系和评价方法方面尚有待在后续研究中进一步优化改善和深入探究。

参考文献:

- [1] Daily G E. Nature's Services : Societal Dependence on Natural Ecosystems [M]. Washington D C: Island Press,1997.
- [2] 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价[J]. 应用生态学报,1999,10(5):635-640.
- [3] 李小燕. 区域生态系统服务价值量与环境压力分析:以渭南市为例[J]. 干旱区研究,2008,25(5):729-734.
- [4] 张浩,赵智杰,谢金开. 近 20 年来乌鲁木齐河下游地区生态系统服务价值的动态变化[J]. 干旱区研究,2011,28(2):341-348.
- [5] Costanza R, Voinov A, Boumans R, et al. Integrated ecological economic modeling of the Patuxent River Watershed, Maryland [J]. Ecological Monographs, 2002,72(2):203-231.
- [6] Howarth R B, Farber S. Accounting for the value of ecosystem services[J]. Ecological Economics, 2002, 41(3):421-429.
- [7] 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.
- [8] Millennium Ecosystems Assessment. Ecosystems and Human Well-being Synthesis[M]. Washington D C: Island Press, 2005.
- [9] 赵景柱,肖寒,吴钢. 生态系统物与价值量评价方法的比较分析[J]. 应用生态学报, 2000, 11(2):290-292.
- [10] 赵军,杨凯. 生态系统服务价值评估研究进展[J]. 生态学报, 2007, 27(1):346-356.
- [11] 李文华. 生态系统服务功能价值评估的理论、方法与应用[M]. 北京:中国人民大学出版社, 2008.
- [12] 李文华,张彪,谢高地. 中国生态系统服务研究的回顾与展望[J]. 自然资源学报, 2009, 24(1):1-10.
- [13] 胡建忠. 砒砂岩沟谷种植沙棘林防止土壤重力侵蚀的实践[J]. 中国水土保持, 2011(5):36-39.
- [14] 王愿昌,吴永红,寇权,等. 砒砂岩分布范围界定与类型区划分[J]. 中国水土保持科学, 2007, 5(1):14-18.
- [15] 胡建忠. 砒砂岩区种植沙棘后景观格局变化预测[J]. 中国水土保持科学, 2011, 9(4):31-35.
- [16] 李代琼,梁一民,侯喜禄,等. 沙棘改善环境的生态功能及效益试验研究[J]. 国际沙棘研究与开发, 2004, 2(2):6-11.
- [17] 李少宁. 江西省暨大岗山森林生态系统服务功能研究[D]. 北京:中国林业科学研究院, 2007.
- [18] 苏永红,冯起,刘蔚,等. 应用模糊综合评判方法评价石羊河流域水资源承载力[J]. 干旱区研究, 2009, 26(2):169-174.
- [19] Liao H C. Using PCR-TOPSIS to optimise taguchi's multi-response problem[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2003, 22(9):649-655.
- [20] Taniguchi E, Noritake M, Yamada T, et al. Optimal size and location planning of public logistics terminals [J]. Transportation Research: Part E, 1999, 35(3):207-222.
- [21] 吕锋,崔晓辉. 多目标决策灰色关联投影法及其应用[J]. 系统工程理论与实践, 2002, 22(1):103-107.
- [22] 于相毅,尚金城,张研. 模糊关联分析法及其应用[J]. 中国环境监测, 2005, 21(1):68-72.
- [23] 钱家欢,殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 北京:中国水利水电出版社, 1996.
- [24] 莫宏伟,任志远,王欣. 植被生态系统防风固沙功能价值动态变化研究:以榆阳区为例[J]. 干旱区研究, 2006, 23(1):56-59.
- [25] 曹全意. 砒砂岩地区林草植被建设途径的研究[J]. 水土保持通报, 1997, 17(7):1-4.
- [26] 王颖. 基于 TOPSIS 法的多元质量特性优化方法研究[D]. 天津:天津大学, 2007.