

基于信息熵的砒砂岩区典型人工林生态系统稳定性研究

孙 成¹, 秦富仓¹, 杨振奇², 董晓宇¹, 台 辉¹, 任小同¹

(1.内蒙古农业大学 沙漠治理学院 荒漠生态系统保护与修复国家林业和草原局重点实验室, 呼和浩特 010018; 2.水利部 牧区水利科学研究所, 呼和浩特 010020)

摘 要:为探究砒砂岩区不同人工林生态系统稳定性,以该地区油松、山杏、沙棘、油松×山杏、油松×沙棘 5 种植被类型为研究对象,采用信息熵理论与模糊数学分析相结合的方法,对该区人工林生态系统稳定性进行了评价。通过分析砒砂岩区人工林生态系统对稳定性因素的响应,从人工林结构和功能角度出发,以人工林林分结构、林下物种多样性和土壤理化性质为评价主体,建立评价体系,结合信息熵理论构建了多级模糊评价模型。结果表明:(1) 生态系统稳定性水平最优的是油松纯林,其次是山杏纯林、沙棘纯林、油松山杏混交林、油松沙棘混交林。(2) 各一级指标的权重依次为土壤理化性质(0.3772)、物种多样性(0.320 1)、林分结构(0.302 7)。(3) 二级指标中,郁闭度(权重为 0.326 3)、林分密度(权重为 0.312 6)、草本均匀度(权重为 0.250 7)、草本优势度(权重为 0.345 4)、土壤容重(权重为 0.251 8)、凋落物蓄积量(权重为 0.210 5)等评价指标影响较大。研究表明土壤理化性质是影响砒砂岩区人工林生态系统稳定性的重要因素;3 个一级指标权重数值相对均衡,反映出该地生态治理制约因素均衡,非单一性生态脆弱;油松林整体评价稳定,适宜作为该地植被建设树种。

关键词:砒砂岩; 多级模糊评价模型; 人工林生态系统稳定性; 信息熵

中图分类号:Q146

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)06-0090-08

Research on Stability of Typical Plantation Ecosystems in Feldspathic Sandstone Area Based on Information Entropy

SUN Cheng¹, QIN Fucang¹, YANG Zhenqi², DONG Xiaoyu¹, TAI Hui¹, REN Xiaotong¹

(1.Key Laboratory of Desert Ecosystem Protection and Restoration of State Forest and Grassland Administration, College of Desert Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China;

2.Institute of Water Resources for Pastoral Area, Ministry of Water Resources, Hohhot 010020, China)

Abstract:In order to explore the stability of different plantation ecosystems in the feldspathic sandstone area, 5 planting types of *Pinus tabulaeformis*, *Armeniaca sibirica*, *Hippophae rhamnoides*, *P. tabulaeformis* × *A. sibirica*, *P. tabulaeformis* × *H. rhamnoides* were selected as the research objects, and information entropy theory and fuzzy mathematical analysis were adopted. The combined method was used to evaluate the stability of the plantation ecosystems in this area. By analyzing the response of the plantation ecosystem in the feldspathic sandstone area to stability factors, from the perspective of the structure and function of the plantation, the structure of the plantation, the species diversity under the plantation, and the physical and chemical properties of the soil were selected as the main evaluation subjects to establish an evaluation system, a multi-level fuzzy evaluation model was constructed by combining information entropy theory. The results showed that: (1) the level of ecosystem stability of pure *P. tabulaeformis* forest was the best, followed by pure *A. sibirica* forest, pure *H. rhamnoides* forest, *P. tabulaeformis* and *A. sibirica* mixed forest, and *P. tabulaeformis* and *H. rhamnoides* mixed forest; (2) the weights of the first-level indicators were soil physical and chemical properties (0.377 2), species diversity (0.320 1), forest stand structure

收稿日期:2020-11-23

修回日期:2020-12-21

资助项目:内蒙古科技计划项目“黄河粗沙集中来源区典型流域生态修复技术体系研究”(201802106)

第一作者:孙成(1994—),男,四川达州人,硕士研究生,研究方向为水土保持。E-mail:1047597300@qq.com

通信作者:秦富仓(1966—),男,内蒙古呼和浩特人,教授,博士生导师,主要从事水土保持与荒漠化防治、林业教学与研究。E-mail:qinf@126.com

(0.302 7); (3) among the secondary indicators, canopy density (weight 0.326 3), stand density (weight 0.312 6), herb uniformity (weight 0.250 7), herb dominance (weight 0.345 4), soil bulk density (weight 0.251 8), litter accumulation (weight 0.210 5) and other evaluation indicators had the greater response. It was suggested that soil physical and chemical properties were the important factor affecting the stability of the plantation ecosystems in the feldspathic sandstone; the weights of the three first-level indicators were relatively balanced, reflecting the balance of constraints on ecological governance in this area, and the non-unity ecological fragility; overall evaluation on the *P. tabulaeformis* forest was stable, and *P. tabulaeformis* forest was the suitable tree species for vegetation construction in this area.

Keywords: feldspathic sandstone; multi-level fuzzy evaluation model; stability of plantation ecosystem; information entropy

生态系统稳定性理论最初由植物生态学家 MacArthur^[1]和动物生态学家 Elton^[2]提出,自提出后,该邻域一直是研究热点,其定义包括生态系统所具有的抗外界干扰和外界干扰去除后恢复到自身结构和功能相对稳定状态的能力^[3-4]。由于系统涉及因素广泛,层次关联复杂,生态系统稳定性的研究一直未能达成共识,国内外许多研究者多就其内涵与外延^[5],以多样性理论^[6]、冗余理论^[7]为出发点,采用 Shannon-Wiener 指数、物种丰富度等作为稳定性度量因子^[6,8-9],主要围绕森林^[10-11]、湖泊^[12]等自然生态系统和城市^[13]、农田^[14-15]、矿区^[16-17]等具有人工与自然复合特点的生态系统进行稳定性评价,从生态系统结构和功能、物种多样性、遗传多样性、种群间的关系等方面进行探讨与研究。当前针对生态系统稳定性的评价方法总体有两大类。一类是通过专家对筛选的指标进行打分以确定权重,然后就确定的评价指标进行野外实地调查,以此来评价人工林生态系统稳定性。这类方法可操作性强,但对专家要求高,往往不同的专家对指标的确认权重差异很大。另一类是构建数字模型,采用概率统计的方法对生态系统稳定性进行研究,如生态环境指数模型^[18]、动态测算模型^[19]、Lyapunov 函数模型等^[20],但此类方法在建模时要量化某些特定因子比较困难。由于各研究者对于生态系统稳定性的概念和内涵莫衷一是,进而研究所建立的评价指标及体系也各有不同。目前,大多研究者主要针对天然林生态系统稳定性开展研究^[21],较少涉及人工林,但随着我国人工造林面积逐渐增大,其生态系统能否达到理想抗性以及生物与非生物各要素间的动态平衡,有待进一步的探索研究^[22]。

人工林生态系统是一个宏观、开放的系统,是由自然、经济、社会组成的多层次、多因素的复杂系统。它是由“森林自然子系统”和“森林社会经济子系统”共同构成,其中,森林自然系统是森林社会经济系统的载体,为森林社会经济系统提供生存和发展空间;

而“森林社会经济系统”中的“人”是整个森林自然系统的主体,决定着从“森林自然系统”获取资源的速度和数量,并通过发展规划、技术进步、因地制宜等来协调各子系统之间的关系;在人为因素的干预下,系统内外因素经过变化、耦合,可能导致某些微小因素被放大,从而推动系统的演化发展,形成新的空间结构^[23]。人工林这一结构特征符合耗散结构的特点,因此,可以借用耗散结构系统熵变来表征人工林生态系统稳定性强弱^[24]。

熵理论是表征系统无序和混乱程度的一个定量参数,熵值越高,系统混乱程度越大,反之越低^[25]。系统中各因子的离散程度可借助熵值来表征,熵值越小,某因子离散程度越小,确定性越高,信息效用越大,则该因子的权重就越大。与传统确权方法相比,熵值法能有效避免主观因素对权重计算带来的干扰^[26],随着近几年熵理论量化算法运用成熟,使其在设计风险管理分析^[27]、电力异常检测^[28]、水结构时空变化演变^[29]、城市生态演化发展等领域都取得了不错的效果。本研究将利用信息熵理论,结合多级模糊评价模型,从人工林生态功能及结构出发,通过建立符合当地情况的评价体系,开展对砒砂岩区典型人工林生态系统稳定性的评价研究,从而为砒砂岩区人工林生态系统保护及人工营林提供科学依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于鄂尔多斯市准格尔旗鲍家沟流域,地理坐标为 110°31′—110°35′E, 39°46′—39°48′N,海拔 1 100~1 300 m。流域地形北高南低,属温带大陆性气候,年均气温 7.2℃,年降雨量 400 mm,冬季干燥且漫长,夏季温热且短暂,主要以栗钙土及风沙土为主^[30]。研究区主要乔木有山杏(*Armeniaca sibirica*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)等,灌木主要有沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、柠条(*Caragana*

korshinskii)等,草本主要有羊草(*Leymus chinensis*)、猪毛菜(*Salsola nitraria*)和阿尔泰狗娃花(*Heteropappus altaicus*)等。

1.2 植被调查与土样采集

经实地勘察,依据流域地形和人工林分布特点,选取典型地段且长势良好的同林龄沙棘、油松、山杏、油松×山杏、油松×沙棘 5 种植被类型为研究对象,于 2019 年 7 月分别在每种植被类型中设置 4 个 20 m×20 m 的大样地,并记录其相关地理信息,如海拔、坡向等。把每个大样地划分成 16 个 5 m×5 m 的样方,对每个样方的乔灌木进行大小比数、郁闭度、冠幅等信息调查;用环刀等工具分别按 0—10,10—20,20—30 cm 采集土样,装入密封袋中,带回室内进行土壤容重、速效氮磷钾、有机质含量等指标测定。并在每个 5 m×5 m 样方内按中心及四角划分 5 个 1 m×1 m 的草本样方,记录草本物种类型及数量,并计算平均值。研究样地基本概况见表 1。

1.3 研究方法

1.3.1 评价指标的筛选与确立 人工林生态系统作为人工与自然的复合系统,是通过人工调节来达到既定的营林目标,其稳定性的表现于系统对外在干扰的响应程度^[31]。虽然对人工林生态系统稳定性评价

尚未有公认的指标体系及操作框架,但学者们的研究发现还是有共识之处,如认为物种多样性是森林生态系统稳定性及发展演变可持续性的标准,且与生态系统稳定性呈正相关关系^[32-35];而土壤环境的特征反映了所在区域生态系统的基本特征^[36],在受到内外影响因素的干扰时必然也会对森林生态系统的稳定性做出不同程度的反馈。基于此,本文依据客观性、代表性、系统性、排他性及可测性等原则,在考虑可操作性的基础上,结合毕慈芬^[37]、姚文艺^[38]等学者对砬砂岩区的研究成果,经实地勘察,以人工林林分结构、林下物种多样性和土壤理化性质作为评价主体,选取大小比数、林分密度、平均冠幅等 15 个实地测量的定量指标作为具体的评价指标。计算方法见表 2 说明部分,各指标基本数据值见表 3。

表 1 样地基本概况

林分	林龄/a	海拔/m	坡度/ (°)	平均密度/ (株·km ⁻²)	坡向
油松纯林	10	1153	15	833	南
山杏纯林	10	1240	15	833	东南
沙棘纯林	10	1255	19	1667	南
油松山杏混交林	10	1198	17	1250	东南
油松沙棘混交林	10	1203	16	1250	南

表 2 各生态系统稳定性评价指标及说明

准则层	一级指标	二级指标	说明
结构指标	U ₁ 林分结构	U ₁₁ 大小比数	$U_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n k_{ij}$ <p>式中:当最近相邻木 j 比参照树 i 大时, $k_{ij} = 0$;否则 $k_{ij} = 1$。n 为所考察的全部最近相邻木数</p>
		U ₁₂ 郁闭度	林冠层在阳光直射下在地面的总投影面积与此林地总面积的比
		U ₁₃ 林分密度	单位面积上的活林木株数
		U ₁₄ 冠幅	树木的东南西北交叉宽度的平均值
		U ₂₁ 草本层物种丰富度	单位面积草本层中物种数目的多少
	U ₂ 物种多样性	U ₂₂ 草本层 Shannon-Wiener 指数	$H = - \sum_{i=1}^S (N_i / N) \lg(N_i / N)$ <p>式中:S 为每一样方中物种总数;N 为 S 个物种全部重要值之和;N_i 为第 i 个种的重要值。重要值=(相对高度+相对盖度+相对多度)/3</p>
功能指标	U ₃ 土壤理化性质	U ₂₃ 草本层 Pielou 均匀度指数	$E = H / H_{\max}$ <p>式中:H 为实际观察的物种多样性指数;H_{\max} 为最大的 Shannon-Wiener 指数, $H_{\max} = \ln S$ (S 为群落中总物种数)</p>
		U ₂₄ 草本层 Simpson 优势度指数	$C = \sum P_i^2$ <p>式中:P_i^2 为第 i 类群的个体数在总体中的比值</p>
		U ₃₁ 有机质含量	单位体积土壤中含有的有机物质的数量
		U ₃₂ 速效氮含量	单位体积土壤中所含能被植物根系吸收的氮的含量
	U ₃ 土壤理化性质	U ₃₃ 速效磷含量	单位体积土壤中所含能被植物根系吸收的磷的含量
		U ₃₄ 速效钾含量	单位体积土壤中所含能被植物根系吸收的钾的含量
		U ₃₅ 枯落物重量	单位面积上散落的死亡和分解的植物枯枝落叶的质量
		U ₃₆ 土壤容重	单位容积的烘干土体与其湿土体的比值
		U ₃₇ 土壤孔隙度	土壤孔隙容积占土体容积的百分比

表 3 各人工林生态系统稳定性评价选取指标数值

类别	林分类型 评价指标	油松纯林	山杏纯林	沙棘纯林	油松山杏 混交林	油松沙棘 混交林
林分结构	大小比数	0.49	0.51	0.46	0.50	0.48
	郁闭度	0.41	0.40	0.68	0.38	0.52
	林分密度	833.00	833.00	1667.00	1250.00	1250.00
	冠幅	2.19	2.25	1.50	2.35	1.59
草本多样性	草本丰富度	10.00	22.00	8.00	8.00	6.00
	草本 Shannon-Wiener 指数	1.65	2.30	1.82	1.94	1.86
	草本 Pielou 均匀度指数	1.77	1.78	1.68	1.70	1.53
	草本 Simpson 优势度指数	0.81	0.78	0.80	0.77	0.76
土壤理化性质	有机质含量	5.28	6.23	2.46	4.97	3.57
	速效氮含量	4.82	5.80	3.38	3.52	1.11
	速效磷含量	0.53	1.33	0.74	1.57	0.46
	速效钾含量	22.59	35.96	47.83	24.19	46.29
	枯落物蓄积量	0.75	0.62	0.36	0.37	0.51
	土壤容重	1.46	1.47	1.73	1.63	1.53
	土壤孔隙度	43.55	40.04	32.38	28.07	33.95

1.3.2 评价模型的构建 利用信息熵理论与多级模糊评价模型建立评价方法^[24]:(1)利用信息熵确定所选指标的权重。(2)建立评价等级标准,确定评价隶属矩阵。(3)进行多级模糊运算,得出评价结果。

1.3.3 熵值法计算指标权重 根据所选评价指标,构建人工林生态系统稳定性评价一级影响因素集 $U=\{U_1,U_2,U_3,\cdots,U_n\}$ 。按一级指标属性,确定二级评价影响因素集 $U_i=\{U_{i1},U_{i2},U_{i3},\cdots,U_{in}\}(i=1,2,3,\cdots,n)$,其中 U_{in} 表示第 i 级评价的第 n 个指标。

(1) 假设有 m 个人工林样本, n 项评价指标。由此可建立稳定性评价的原始矩阵 $X'=[X'_{ij}]_{nm}$ 如下:

$$X'=\begin{bmatrix}x'_{11} & x'_{12} & \cdots & x'_{1n} \\ x'_{21} & x'_{22} & \cdots & x'_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x'_{m1} & x'_{m2} & \cdots & x'_{mn}\end{bmatrix}$$

(1)

式中: x'_{ij} 为第 i 个人工林样本中的第 j 项评价指标值。

(2) 数据标准化处理。对样本矩阵 X' 的数据进行无量纲化处理,本文采用极值法处理^[22]。

当指标数据反应为正效应时:

$$x_{ij}=\frac{x'_{ij}-\min(x'_{ij})}{\max(x'_{ij})-\min(x'_{ij})}$$

(2)

当指标数据反应为负效应时:

$$x_{ij}=\frac{\max(x'_{ij})-x'_{ij}}{\max(x'_{ij})-\min(x'_{ij})}$$

(3)

式中: x_{ij} 为已标准化的值,其中 $1\leq i\leq m,i$ 为整数。 $\max(x'_{ij})$ 和 $\min(x'_{ij})$ 分别是矩阵 X' 中第 i 行中的极大值和极小值。

数据标准化后的矩阵 X 为:

$$X=\begin{bmatrix}x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn}\end{bmatrix}$$

(4)

(3) 计算第 j 项评价指标的熵值。计算各评价指标的熵值公式^[23]为

$$E_j=-\frac{\sum_{i=1}^m f_{ij} \ln f_{ij}}{\ln m}$$

(5)

$$f_{ij}=\frac{x_{ij}}{\sum_{j=1}^n x_{ij}}$$

(6)

式中: E_j 为熵值, $E_j\geq 0$; f_{ij} 为评价指标 j 在第 i 个样本中出现的频率, $0\leq f_{ij}\leq 1$ 。

(4) 计算评价指标的权重,计算公式为:

$$W_j=\frac{1-E_j}{\sum_{j=1}^n (1-E_j)}-\frac{1-E_j}{n-\sum_{j=1}^n E_j}$$

(7)

式中: $0\leq w_j\leq 1,\sum_{j=1}^n w_j=1$ 。计算出每一项指标权重后,先确定二级评价指标的熵权矩阵 $W_i=\{w_{i1},w_{i2},\cdots,w_{ij}\}$,再确定一级评价指标的熵权矩阵 $W=\{w_1,w_2,\cdots,w_n\}$ 。

1.3.4 评价集的建立 根据已有的研究结果及评价对象的性质和具体情况,对一、二级评价指标建立评价集 $V=\{V_1,V_2,\cdots,V_k\}$,其中 k 为评价等级级数, $k=5$ 。划分为Ⅰ级、Ⅱ级、Ⅲ级、Ⅳ级和Ⅴ级,对应优、良、一般、差、极差。部分评价指标未有统一划分标准,本文根据实际测量结果,采用极差法进行划分。评价集见表 4。

表 4 评价指标标准分级

指标层	等级标准					参考依据
	I	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	V	
U_{11}	0.8~1	0.6~0.8	0.4~0.6	0.2~0.4	0~0.2	一个新的林分空间结构参数——大小比数 ^[39]
U_{12}	0~0.2	0.2~0.4	0.4~0.6	0.6~0.8	0.8~1	现代森林测定法 ^[40]
$U_{13}/(\text{株}\cdot\text{km}^{-2})$	800~980	980~1160	1160~1340	1340~1520	1520~1700	实地类型
U_{14}/m	2.00~2.50	1.5~2.0	1~1.5	0.5~1	<0.5	小陇山油松人工林林冠指标相关性 ^[41]
U_{21}	21~25	17~21	13~17	9~13	5~9	实地类型
U_{22}	2.36~2.60	2.11~2.36	1.87~2.11	1.62~1.87	1.38~1.62	实地类型
U_{23}	1.87~2.10	1.64~1.87	1.40~1.64	1.17~1.40	0.94~1.17	实地类型
U_{24}	0.83~0.85	0.81~0.83	0.79~0.81	0.77~0.79	0.75~0.77	实地类型
$U_{31}/(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$	>4	3~4	2~3	1~2	0.6~1	全国土壤普查办公室中国土壤 ^[42]
$U_{32}/(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$	4.99~6.02	3.96~4.99	2.93~3.96	1.90~2.93	0.87~1.90	实地类型
$U_{33}/(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$	1.61~1.93	1.29~1.61	0.97~1.29	0.65~0.97	0.33~0.65	实地类型
$U_{34}/(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$	44.14~49.85	38.43~44.14	32.72~38.43	27.01~32.72	21.30~27.01	实地类型
$U_{35}/(\text{t}\cdot\text{hm}^{-2})$	0.72~0.82	0.62~0.72	0.52~0.62	0.42~0.52	0.32~0.42	实地类型
$U_{36}/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	1~1.25	1.25~1.35	1.35~1.45	1.45~1.55	>1.55	全国土壤普查办公室中国土壤 ^[42]
$U_{37}/\%$	55~65	45~55	35~45	25~35	15~25	全国土壤普查办公室中国土壤 ^[42]

1.3.5 模糊矩阵的建立 根据已建立的评价集 V 来区别各评价因素 U_i 所属评价集的隶属度 r_{ij} ($0\leqslant r_{ij}\leqslant 1$)。采用降半梯形隶属函数计算负效应指标隶属度;采用升半梯形隶属函数计算正效应指标隶属度。根据所建立的隶属函数得到模糊关系矩阵 R (即隶属度矩阵)。

$$R=\begin{bmatrix}r_{11}&r_{12}&\cdots&r_{1k}\\r_{21}&r_{22}&\cdots&r_{2k}\\\vdots&\vdots&\vdots&\vdots\\r_{n1}&r_{n2}&\cdots&r_{nk}\end{bmatrix}\tag{8}$$

式中: r_{ij} 为第 i 个评价指标所属第 j 个评价等级的隶属度。

1.3.6 综合评价 先对二级指标进行模糊综合评价;得到二级指标模糊评价向量 S_i :

$$S_i=W_i\cdot R_i=\{\omega_{i1},\omega_{i2},\cdots,\omega_{ij}\}\cdot\begin{bmatrix}r_{11}&r_{12}&\cdots&r_{1k}\\r_{21}&r_{22}&\cdots&r_{2k}\\\vdots&\vdots&\vdots&\vdots\\r_{n1}&r_{n2}&\cdots&r_{nk}\end{bmatrix}\tag{9}$$

式中: S_i 为二级评价因子 U_i 所属于评价集 V 的隶属向量, $1\leqslant i\leqslant 3,i$ 为整数。然后对一级指标进行模糊综合评价计算:

$$A=W\cdot S\tag{10}$$

式中: W 为一级指标权重向量; S 为一级评价因子 U 所属于评价集 V 的隶属向量; A 为研究区域人工林

生态系统的稳定性所属于评价集 V 的隶属向量。根据最大隶属原则,即可确定 A 的隶属等级。

2 结果与分析

对选取的评价指标采用公式(2)—(3)进行数据正、负效应标准化变换,将表 3 中的数据按公式(5)—(7)运算,得到各级评价指标的权重(表 5)。

表 5 各级指标的权重

一级指标			二级指标		
序号	指标名称	权重	序号	指标名称	权重
1	U_1	0.3027	1	U_{11}	0.1238
			2	U_{12}	0.3263
			3	U_{13}	0.3126
			4	U_{14}	0.2373
2	U_2	0.3201	5	U_{21}	0.2385
			6	U_{22}	0.1654
			7	U_{23}	0.2507
			8	U_{24}	0.3454
			9	U_{31}	0.1005
			10	U_{32}	0.1332
			11	U_{33}	0.1011
3	U_3	0.3772	12	U_{34}	0.1006
			13	U_{35}	0.2105
			14	U_{36}	0.2518
			15	U_{37}	0.1023

依据评价集,确定评价指标集合 U_i 对评价集合 V 的评价隶属矩阵 R 。待评价隶属矩阵 R 的建立

后,根据评价指标的不同效应,分别代入上述隶属函数公式,即可得出影响 5 个样地人工林生态系统稳定性的模糊关系矩阵。

根据建立的模糊关系矩阵和二级评价指标的权重值(表 5),利用公式(9)先进行二级模糊评价,得到 1 号样地的一级模糊评价矩阵 S_1 为:

$$S_1 = \begin{bmatrix} 0.293568 & 0.591077 & 0.084405 & 0.030950 & 0.000000 \\ 0.000000 & 0.422673 & 0.252900 & 0.324427 & 0.000000 \\ 0.170920 & 0.083514 & 0.287091 & 0.157157 & 0.301318 \end{bmatrix}$$

同理可得 2—5 号样地的一级模糊评价矩阵为:

$$S_2 = \begin{bmatrix} 0.162552 & 0.202051 & 0.265767 & 0.369630 & 0.000000 \\ 0.178875 & 0.338256 & 0.310169 & 0.172700 & 0.000000 \\ 0.140604 & 0.194196 & 0.443705 & 0.221495 & 0.000000 \end{bmatrix}$$

$$S_3 = \begin{bmatrix} 0.000000 & 0.000000 & 0.323960 & 0.489252 & 0.186788 \\ 0.000000 & 0.208081 & 0.215319 & 0.483895 & 0.092705 \\ 0.136825 & 0.073675 & 0.128862 & 0.249088 & 0.411550 \end{bmatrix}$$

$$S_4 = \begin{bmatrix} 0.166110 & 0.364860 & 0.250830 & 0.218200 & 0.000000 \\ 0.000000 & 0.065182 & 0.302952 & 0.572241 & 0.059625 \\ 0.100500 & 0.013143 & 0.145233 & 0.445682 & 0.295442 \end{bmatrix}$$

$$S_5 = \begin{bmatrix} 0.000000 & 0.189840 & 0.473820 & 0.336340 & 0.000000 \\ 0.000000 & 0.000000 & 0.135378 & 0.506431 & 0.358191 \\ 0.130510 & 0.123205 & 0.057285 & 0.456137 & 0.232863 \end{bmatrix}$$

利用公式(10),结合二级模糊评价矩阵 S 和一级评价指标权重值 W (表 5),计算隶属程度 A 的值,依据最大隶属度原则即可确定人工林生态系统稳定性所属等级,结果见表 6。

表 6 5 种人工林生态系统稳定性评价结果

林分	评价等级					所属级别
	I	II	III	IV	V	
油松纯林	0.153334	0.345718	0.214793	0.172497	0.113657	II
山杏纯林	0.159498	0.242687	0.347098	0.250716	0.000000	III
沙棘纯林	0.051610	0.094397	0.215593	0.396947	0.241452	IV
油松山杏混交林	0.088190	0.136265	0.227683	0.417335	0.130527	IV
油松沙棘混交林	0.049228	0.103937	0.208368	0.435974	0.202493	IV

由表 6 可知,油松纯林对应评价等级 II 的隶属度(0.345 718)最大,所属级别为良;山杏纯林对应评价等级 III 的隶属度(0.347 098)最大,所属级别为一般;沙棘纯林对应评价等级 IV 的隶属度(0.396 947)最大,所属级别为差;油松山杏混交林、油松沙棘混交林对应评价等级均为 IV 级,其隶属度分别为(0.417 335,0.435 974)。油松林的生态系统稳定性相对最优,沙棘纯林及两种混交林的生态系统稳定性相对较差。可以看出,砒砂岩区 5 种人工林生态系统(油松、山杏、沙棘、油松×山杏、油松×沙棘)的稳定性所属等级依次为:II 级、III 级、IV 级、IV 级、IV 级,对应评价结果依次为:良、一般、差、差、差。通过对砒砂岩区 5 种人工林相互对照,我们得到油松纯林的生态系统稳定性最好,沙棘纯林和油松山杏混交林、油松沙棘混交林稳定性较差。

3 讨论与结论

3.1 讨论

总体来看,砒砂岩区人工林生态系统稳定性水平整体处于中等偏差的状态,这与该区整体生态脆弱有关。通过研究发现,一级指标林分结构权重为 0.302 7,物种多样性权重为 0.320 1,土壤理化性质权重为 0.377 2,土壤理化性质贡献率最大。3 个一级指标权重数值相近,表现相对均衡,反映出该地生态治理制

约因素均衡,非单一性生态脆弱。

研究得出郁闭度和林分密度是影响一级指标林分结构的重要因子,这与人工林树种和砒砂岩区地理条件有关,袁勤等^[43]的研究也得出类似结果。与其他的 research 结果不同,本研究中影响一级指标物种多样性的重要因子为草本均匀度及优势度,这与砒砂岩区处于生态修复阶段有关^[44],同时也说明选取优势物种对治理砒砂岩区尤为重要^[45]。二级指标枯落物重量是影响土壤理化性质的重要因子,这与枯落物能显著改善土壤理化性质有关,由于砒砂岩区枯落物的输入量受不同树种及生长周期限制,因此不同树种枯落物蓄积能力有所差异^[46-47]。本研究中得出油松纯林生态稳定性显著,说明砒砂岩区适宜栽植利于枯落物积累的针叶树种以改良土壤^[48]。

与天然林相比,人工林是由人工调控来实现既定的营林目标,且承担着一定的生态服务功能(防风林、护岸林、固沙林等)。砒砂岩区属于我国水土流失严重的区域之一,本文的 5 种人工林相应承担着抗蚀固土的功能,经过几十年的生态修复,该区的生态环境已大为改观^[49-50];现阶段的人工林在完成特殊生态服务功能的同时,还需考虑其自生的生态稳定性,一方面能维持当前生态服务功能现状,另一方面向更稳定的状态正向演化^[22],这既是对该区生态补偿机制的

反馈,也是经济与生态效益完美转化的体现^[51]。

采用信息熵理论方法有效地消除了主观因素对评价指标权重的影响,通过对实测数据的统计计算,定量分析各指标因素的权重,既能降低评价时主观因素带来的干扰,也使评价更符合数学理论^[52]。因此,对于人工林生态稳定性研究,采用基于信息熵的多级模糊的评价模型是可以进行的。

固持水土、涵养水源是砒砂岩区生态修复及营林工作的核心内容,人工林生态系统的稳定性能直观反映生态修复的状态。本文的评价体系是建立在生态效益的基础之上进行的,未对宏观生态系统特性进行分析,生态系统稳定性评价指标还需加入大气环境等因子进行综合分析,进一步全面系统评价各因素之间的模糊关系。

3.2 结论

(1) 土壤理化性质是影响砒砂岩区人工林生态系统稳定性的重要因素;3个一级指标权重数值相近,表现相对均衡,反映出该地现在生态治理制约因素均衡,非单一性生态脆弱;

(2) 在砒砂岩区独特的立地条件下,人工林生态系统稳定性评价为油松纯林>山杏纯林>沙棘纯林>油松山杏混交林>油松沙棘混交林,整体处于中等偏差的状态。建议对土壤养分贫瘠及养分恢复缓慢的区域继续实施封育禁牧,以天然牧草为主;对营林区域,减少乔灌混交比例,适当降低林分密度。

(3) 利用信息熵理论对人工林生态系统稳定性定量研究,不仅可以最大效果地克服一些主观因素,同时使得研究结果更具准确性。通过对砒砂岩区几种典型人工林生态系统多级模糊评判,可以明确现阶段各人工林生态系统稳定状态,为该区生态修复提供科学依据。

参考文献:

- [1] MacArthur R. Fluctuations of animal populations and a measure of community stability[J]. *Ecology*, 1955, 36(3):533-536.
- [2] Elton S C. The ecology of invasions by animals and plants [M]. Chicago, USA: University of Chicago Press, 1958.
- [3] 柳新伟,周厚诚,李萍,等.生态系统稳定性定义剖析[J]. *生态学报*, 2004, 24(11):2635-2640.
- [4] Tylianakis J M, Tscharntke T, Klein A M. Diversity, ecosystem function, and stability of parasitoid-host interactions across a tropical habitat gradient[J]. *Ecology*, 2006, 87(12): 3047-3057.
- [5] 任平,洪步庭,程武学,等.长江上游森林生态系统稳定性评价与空间分异特征[J]. *地理研究*, 2013, 32(6): 1017-1024.
- [6] Tilman D, Downing J A. Biodiversity and stability in grasslands[J]. *Nature*, 1994, 367(6461):363-365.
- [7] Lawton J H, Brown V K. Redundancy in Ecosystems [M] // Schulze E D, Mooney H A. Biodiversity and Ecosystem Function. Berlin: Springer, 1993.
- [8] 宋启亮,董希斌.大兴安岭不同类型低质林群落稳定性的综合评价[J]. *林业科学*, 2014, 50(6):10-17.
- [9] 彭少麟.森林群落物种多样性变因及与生态效益和经济效益的关系[J]. *生态学杂志*, 1987, 6(3):35-38.
- [10] 刘增文,王乃江,李雅素,等.森林生态系统稳定性的养分原理[J]. *西北农林科技大学学报:自然科学版*, 2006, 34(12):129-134.
- [11] 梁军,孙志强,乔杰,等.天然林生态系统稳定性与病虫害干扰:调控与被调控[J]. *生态学报*, 2010, 30(9): 2454-2464.
- [12] 冯剑丰,谭建国,陈威,等.随机干扰下湖泊生态系统的稳定性与稳态转换[J]. *海洋技术*, 2010, 29(2):72-75.
- [13] 仇方道,佟连军,姜萌.东北地区矿业城市产业生态系统适应性评价[J]. *地理研究*, 2011, 30(2):243-255.
- [14] 李新旺,门明新,王树涛,等.基于过程的河北平原农田生态系统稳定性评价[J]. *自然资源学报*, 2008, 23(3): 430-439.
- [15] 赵志轩,金鑫,王凌河,等.基于动态因子的农田生态系统稳定性评价[J]. *华南农业大学学报*, 2010, 31(4):22-26.
- [16] 孙顺利,周科平,胡小龙.基于分形理论的矿区生态系统稳定性评价[J]. *安全与环境工程*, 2007, 14(4):1-4.
- [17] 王广成,闫旭鸾.分形理论在矿区生态系统稳定性评价中的应用[J]. *煤炭学报*, 2008, 33(4):427-430.
- [18] Qin Z B, Liu Z H, Li Y Z. Preliminary study on road-region ecosystem stability evaluation [J]. *Journal of Environmental Science and Engineering*, 2008, 2(5): 48-54.
- [19] 任志远,黄青.陕西关中地区生态安全定量评价与动态分析[J]. *水土保持学报*, 2005, 19(4):169-172.
- [20] 黄志伟,贺国峰,黄刚.一类考虑外来有机物的湖泊生态系统的数学模型及稳定性分析[J]. *应用数学*, 2020, 33(1):36-44.
- [21] 梁燕,葛忠强,马安宝,等.森林生态系统稳定性研究进展[J]. *山西林业科技*, 2018, 47(4):32-34, 60.
- [22] 江大勇,付晓燕.人工林生态系统稳定性研究进展[J]. *河北林业科技*, 2013, 40(6):75-76.
- [23] Wellbrock N, Riek W, Wolff B. Characterisation of and changes in the atmospheric deposition situation in German forest ecosystems using multivariate statistics [J]. *European Journal of Forest Research*, 2005, 124

- (4): 261-271.
- [24] 张磊,李绍才,缪宁,等.基于信息熵的四川盆周山地杉木生态系统稳定性评价[J].中南林业科技大学学报,2020,40(7):79-88.
- [25] Shannon C E. A mathematical theory of communication[J]. The Bell System Technical Journal, 1948,27(3):379-423.
- [26] 郭显光.熵值法及其在综合评价中的应用[J].财贸研究,1994,14(6):56-60.
- [27] 邹锐.青岛深蓝广场建设项目施工风险管理研究[D].山东青岛:中国海洋大学,2015.
- [28] 安勤,吴蕊,张挺.基于信息熵的异常检测算法[J].上海电力大学学报,2020,36(4):386-390.
- [29] 陈美琳,陈磊,夏琳琳,等.广东省生产用水结构时空变化及影响因素[J].南水北调与水利科技,2021,19(1):92-102.
- [30] 杨振奇,秦富仓,李旻宇,等.砒砂岩区不同土地利用类型土壤入渗性能及其影响因素研究[J].生态环境学报,2020,29(4):733-739.
- [31] 朱殿珍,初磊,马帅,等.青藏高原生态屏障区生态系统服务权衡与协同关系[J].水土保持研究,2021,28(4):308-315.
- [32] Glowka L, Burhenne-Guilmin F, Synge H. A Guide to the Convention on Biological Diversity[M]. IUCN, 1994.
- [33] 岳天祥.生物多样性研究及其问题[J].生态学报,2001,21(3):462-467.
- [34] 陈梦.对生态系统及生物多样性等理论问题的探讨[J].南京林业大学学报:自然科学版,2003,27(5):30-34.
- [35] 张真,李典谟,张培义,等.自然种群中混沌的检测及其在种群动态研究中的意义[J].生态学报,2003,23(10):1951-1962.
- [36] 丘君,陈利顶,高启晨,等.施工干扰下的生态系统稳定性评价:以西气东输管道工程沿线新疆干旱荒漠区为例[J].干旱区地理,2003,26(4):316-322.
- [37] 毕慈芬,左仲国,冉大川,等.黄河中游淤地坝淤积泥沙级配组成分析[J].人民黄河,2011,33(1):90-92.
- [38] 姚文艺,肖培青,王愿昌,等.砒砂岩区侵蚀治理技术研究进展[J].水利水电科技进展,2019,39(5):1-9,15.
- [39] 惠刚盈, Klausvon Gadow, Matthias Albert.一个新的林分空间结构参数:大小比数[J].林业科学研究,1999,12(1):4-9.
- [40] 王雪峰,陆元昌.现代森林测定法[M].北京:中国林业出版社,2013.
- [41] 石小龙,杜彦昌,王鹏,等.小陇山油松人工林林冠指标相关性研究[J].西北林学院学报,2018,33(3):67-73.
- [42] 全国土壤普查办公室.中国土壤[M].北京:中国农业出版社,1998.
- [43] 袁勤,崔向新,乔荣.砒砂岩区不同人工林对土壤理化性质的影响[J].北方园艺,2013,36(18):52-55.
- [44] 毕慈芬,邵源林,王富贵,等.防止砒砂岩地区土壤侵蚀的水土保持综合技术探讨[J].泥沙研究,2003,47(3):63-65.
- [45] 林占熿,苏德伟,林辉,等.黄河茵草生态安全屏障建设的研究与应用[J].福建农林大学学报:自然科学版,2019,48(6):803-812.
- [46] 吴晓光,刘龙,张宏飞,等.砒砂岩区主要造林树种枯落物持水性能及土壤物理性质[J].水土保持学报,2020,34(4):137-144.
- [47] 李强,周道玮,陈笑莹.地上枯落物的累积、分解及其在陆地生态系统中的作用[J].生态学报,2014,34(14):3807-3819.
- [48] 杨振奇,秦富仓,李晓琴,等.砒砂岩区主要造林树种枯落物及林下土壤持水特性[J].水土保持学报,2017,31(3):118-122.
- [49] 王举位,邹伟,林积泉,等.砒砂岩区沙棘人工林生态系统服务功能变化探究[J].水土保持研究,2013,20(5):203-209.
- [50] 姚俊娜,秦奋.基于GIS和RS的砒砂岩区生态环境质量综合评价[J].水土保持研究,2014,21(6):193-197,345.
- [51] 高磊,杨现坤,胡海珠,等.重庆市退耕还林工程实施的生态和经济效益分析[J].水土保持研究,2019,26(6):353-358.
- [52] 陶晓燕.基于模糊物元和熵权法的土地生态安全评价[J].统计与决策,2012,27(6):55-57.