

## 库布齐沙漠柠条锦鸡儿灌木林健康评价

李 健<sup>1</sup>, 左合君<sup>1,2</sup>, 闫 敏<sup>1,2\*</sup>, 李 进<sup>3</sup>, 柴茵超<sup>1</sup>

(1. 内蒙古农业大学 沙漠治理学院, 内蒙古 呼和浩特 010018; 2. 内蒙古自治区风沙物理与防沙治沙工程重点实验室, 内蒙古 呼和浩特 010018; 3. 杭锦旗林业和草原局 自然保护区和天然林保护工作站, 内蒙古 鄂尔多斯 017400)

**摘 要:**随着灌木林的衰退老化,低质、低效等健康问题逐渐凸显,如何对灌木林健康状况作出评价已成为生态学领域和环境科学研究的热点之一。以库布齐沙漠柠条锦鸡儿灌木林为研究对象,通过生态学调查和等级评分方法,构建由4个一级指标,22个二级指标组成的柠条锦鸡儿健康评价指标体系,具有便捷性和适用性。采用专家打分法和AHP层次分析法确定各指标权重,并利用生态系统健康综合指数模型计算。结果表明,库布齐沙漠柠条锦鸡儿灌木林整体综合健康指数为0.5387,健康、轻度低质低效、中度低质低效、重度低质低效占比分别为7.69%、38.46%、46.16%与7.69%,整体处于中度低质低效健康状态,有向重度低质低效发展的趋势。林分活力、土壤条件、群落结构和枯落物条件等是影响柠条锦鸡儿灌木林健康主要因素。

**关键词:**柠条锦鸡儿;健康评价;层次分析法;库布齐沙漠

**中图分类号:**S793.3

**文献标志码:**A

**文章编号:**1001-7461(2024)01-0177-08

## Health Evaluation of *Caragana korshinskii* Shrub Forest in Kubuqi Desert

LI Jian<sup>1</sup>, ZUO He-jun<sup>1,2</sup>, YAN Min<sup>1,2\*</sup>, LI Jin<sup>3</sup>, CHAI Yin-chao<sup>1</sup>

(1. College of Desert Control Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, Inner Mongolia, China;

2. Key Laboratory of Aeolian Sand Physics and Sand Control Engineering in Inner Mongolia, Hohhot 010018, Inner Mongolia, China;

3. Nature Reserve and Natural Forest Protection Workstation, Forestry and Grassland Bureau of Hangjin Banner, Ordos 017400, Inner Mongolia, China)

**Abstract:** With the decline and aging of shrub forests, health related problems of low quality and low benefit (LQ&LB) gradually become prominent. How to evaluate the health status of shrub forests has become one of the hot spots in the field of ecology and environmental science. Taking *Caragana korshinskii* forest occurring in Kubuqi Desert of Inner Mongolia as the research object, an index system of health evaluation, consisting of 4 primary indexes and 22 secondary indexes, was established by ecological investigation and grading method to make the evaluation more convenient and applicable. Expert scoring method and AHP method were used to determine the weight of each index. The comprehensive health index of the shrub forests in Kubuqi Desert was calculated as 0.5387 by using the established model. The proportions of the shrub forests with different health levels of healthy, mild-, moderate-, and severe-LQ&LB were 7.69%, 38.46%, 46.16% and 7.69%, respectively. The overall health status was in a moderate health state of LQ&LB, and there was a trend of development to severe LQ&LB. The main factors affecting the health of *C. korshinskii* shrub forest were stand vitality, soil condition, community structure and litter condition.

**Key words:** *Caragana korshinskii*; health evaluation; AHP; Kubuqi Desert

收稿日期:2022-12-19 修回日期:2023-03-14

基金项目:“科技兴蒙”行动重点专项(KJXM-EEDS-202006)。

第一作者:李 健。研究方向:水土保持与荒漠化防治。E-mail:3109698131@qq.com

\* 通信作者:闫 敏,讲师,博士。研究方向:荒漠化防治及交通线路沙害、风吹雪害防治。E-mail:ym5233@126.com

柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii*)是豆科锦鸡儿属(*Caragana*)植物,多生长分布于荒漠草原及沙地。在库布齐沙漠地区也分布种植着大量的柠条锦鸡儿,其具有防风固沙、改良土壤养分等特点<sup>[1-2]</sup>,对当地生态环境保护起到了重要作用,但经过实地调查发现,库布齐沙漠地区的柠条锦鸡儿经过多年生长后,出现了低质低效等生态衰退现象,导致柠条锦鸡儿防风固沙效果降低以及土壤养分退化等森林健康问题出现。随着人们对森林的重视程度越来越高,森林健康问题也越来越受到关注,有关森林健康的研究也从单一分析扩展到系统研究<sup>[3-4]</sup>。

部分学者针对森林健康问题,提出了森林健康评价的研究方法<sup>[5]</sup>。健康评价是依据森林健康评价指标对森林健康状况做出诊断和评价的研究手段<sup>[6-7]</sup>,而以柠条锦鸡儿为代表的灌木林健康是森林健康的延续和拓展,灌木林健康具有与森林健康相同的属性。目前学者针对灌木林多采用模糊综合评价法、主成分分析法、指示物种法等进行评价<sup>[8-11]</sup>,但相比于乔木林,由于面积较小、在群落结构占比较低等特点,使得关于灌木林健康状况的评价研究相对较少,且灌木林生态系统由于本身的复杂程度,对林分健康的评价难度较大,导致目前尚未有统一的评价标准方法。针对灌木林健康评价过程中选取指标的数量较少、代表性不全面、评价方法操作难度高、研究方法使用不当<sup>[12-13]</sup>,使得评价结果出现差异<sup>[14]</sup>,因此对灌木林健康状况作出准确评价是十分必要的。

因此,本研究在借鉴国内外森林健康评价研究

成果的基础上,采用层次分析法(AHP)<sup>[15-16]</sup>对库布齐沙漠柠条锦鸡儿灌木林进行健康评价。以相关文献资料作为参考,结合相关领域专家和防护林管理者建议,优选评价指标、构建柠条锦鸡儿防护林健康评价指标体系,计算与分析柠条锦鸡儿灌木林健康指数,对柠条锦鸡儿灌木林健康状况作出准确的综合评价。研究结果可为库布齐沙漠地区柠条锦鸡儿的恢复提供基础数据,也可对其他沙生灌木林的健康评价提供参考。

## 1 研究区概况

### 1.1 森林和草地调查方法

选取库布齐沙漠柠条锦鸡儿灌木林作为研究对象,研究区位于内蒙古鄂尔多斯市杭锦旗西北部库布齐沙漠西缘(107°19′—107°34′E, 40°23′—40°33′N)。结合库布齐沙漠地区柠条锦鸡儿林的实际生长状况,依据各区域柠条锦鸡儿种植方式、分布状态、生态环境等特点,选取13个具有代表性的柠条锦鸡儿灌木林作为调查样地(图1)。

通过样地与样方相结合的方法,对柠条锦鸡儿开展综合性生态调查。首先在选定的各个样地分别设置3个间距50 m的20 m×20 m的柠条锦鸡儿样方,同时每个标准样方内沿对角线设置3个1 m×1 m的草本样方以及3个2 m×2 m的枯落物样方。对每个样方的全部柠条灌木个体进行每木检尺,记录样地基本信息(表1)以及样地内柠条植株的生态指标,整理收集土壤及枯落物样品。

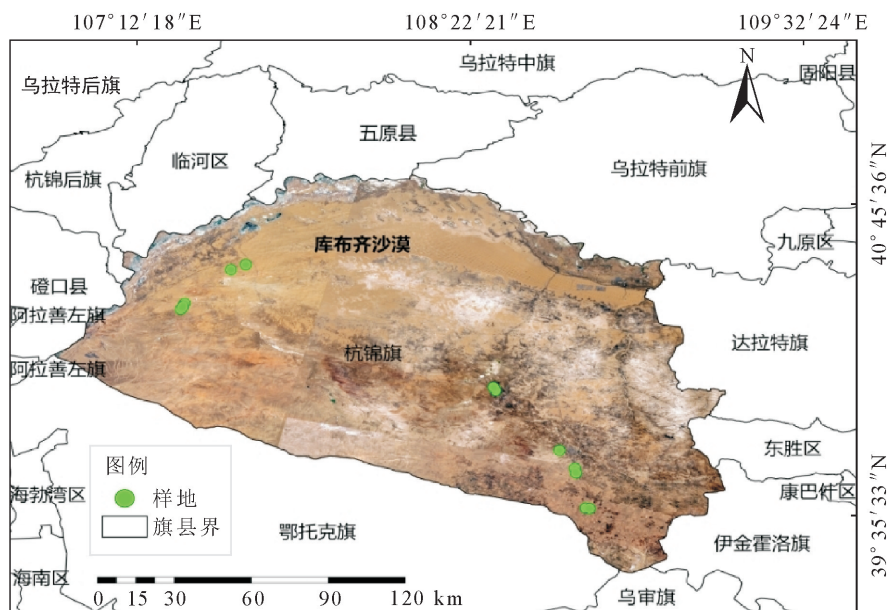


图1 样地示意

Fig. 1 Location of sample plots

### 1.2 指标测定

为选择植株生态指标(分生枝条数、植株基径、

植株冠幅、植株高度、植株结实数、植株新生枝条数、新生枝条粗度、新生枝条长度、密度、盖度、枝条长

度、枝条总数)、土壤理化性质(土壤全磷、全钾、土壤有机质、土壤 pH、土壤电导率)、枯落物理化性质(木质素、纤维素、磷、钾、碳含量)3 个方面共 22 个指标作为柠条锦鸡儿健康评价指标。

1.3 健康评价体系

健康的灌木防护林不仅具有稳定的形态结构,还应考虑对周边生境的影响。只要是影响到灌木防护林健康状况的因素都应考虑,然而目前还尚未有统一的评价指标体系。本试验采用定量分析和定性分析相结合的 AHP(analytic hierarchy process)层次分析法<sup>[17-19]</sup>,遵从科学性、层次性、实际性和易操作性原则,选取合适的指标建立层次结构模型。该模型结构分为 3 个层次,目标层用来衡量和反映林

分健康的合理程度,需要定性与定量指标来反映综合权重值;准则层作为评价的准则,措施层为准则层下属的单项指标。其中二、三层指标评选均通过文献资料整理法、专家评价法等,邀请专家对构建的评价指标体系的合理性进行评价,调整评价指标体系后请专家对健康评价指标做量化等级划分和权重设置。结合研究区实际情况,为保持评价指标的数据的一致性、可比较性,对测量指标的原始数据值进行科学的数据标准化处理(本研究采用极大值法)<sup>[20]</sup>。计算出综合健康评价指数,在森林生态系统健康评价模型基础上建立库布齐沙漠地区柠条锦鸡儿灌木林健康评价模型,评价体系构建流程见图 2。

表 1 样地基本信息

Table 1 Basic information of sample plots

样地编号	经纬度	样地植株分布状况	行带模式及带间距	样地林龄/a	土壤类型
1	108°41'12"E,39°49'59"N	人工种植散点式	2 行 1 带补植后为散点	20	棕钙土
2	108°44'27"E,39°45'56"N	人工种植行带式	2 行 1 带间距 4 m	20	棕钙土
3	108°44'41"E,39°44'54"N	人工种植行带式	2 行 1 带间距 6 m	30	棕钙土
4	108°46'43"E,39°37'2"N	人工种植行带式	2 行 1 带间距 6 m	20	棕钙土
5	108°47'32"E,39°36'55"N	人工种植行带式	2 行 1 带间距 4 m	20	棕钙土
6	108°27'46"E,40°3'30"N	人工种植行带式	单行种植	25	棕钙土
7	108°27'20"E,40°4'12"N	人工种植行带式	2 行 1 带间距 4 m	25	棕钙土
8	107°21'35"E,40°21'45"N	天然分布散点式	随机分布	30	灰漠土
9	107°21'58"E,40°22'15"N	天然分布散点式	随机分布	30	灰漠土
10	107°22'7"E,40°22'33"N	天然分布散点式	随机分布	30	灰漠土
11	107°22'24"E,40°23'6"N	人工种植散点式	2 行 1 带间距 3 m	20	灰漠土
12	107°32'6"E,40°30'39"N	天然分布散点式	随机分布	20	灰漠土
13	107°35'15"E,40°31'48"N	天然分布散点式	随机分布	50	灰漠土

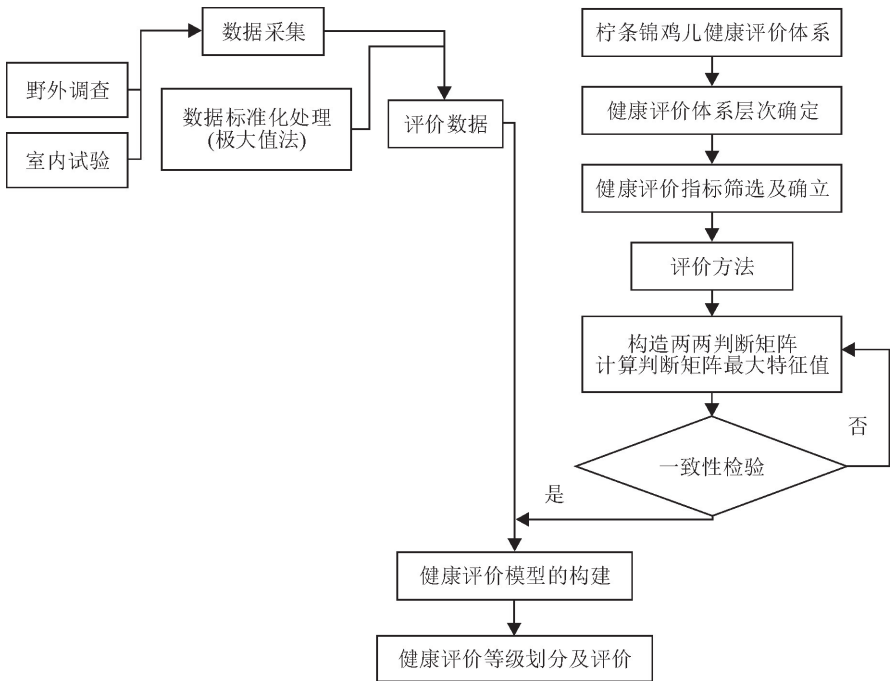


图 2 柠条锦鸡儿健康评价体系流程

Fig. 2 *C. korshinskii* health evaluation system process

## 2 结果与分析

### 2.1 柠条锦鸡儿健康评价体系

2.1.1 评价指标筛选及结构 结合库布齐沙漠地区实际生态环境状况,初步筛选确定柠条锦鸡儿灌木林健康评价指标,分别从植株的生长、更新、结构、功能等方面选取了 30 个健康评价指标。结合野外

实地调查数据对准则层和措施层指标进行筛选、评价和剔除,结合柠条锦鸡儿本身特性和其防护功能,最终建立柠条锦鸡儿健康评价结构。该健康评价结构共分为 3 个层次,目标层是柠条锦鸡儿灌木林健康评价综合结果;准则层主要包括林分活力、群落结构、土壤条件、枯落物条件 4 个一级指标;措施层选取 22 个二级指标,结构见图 3。

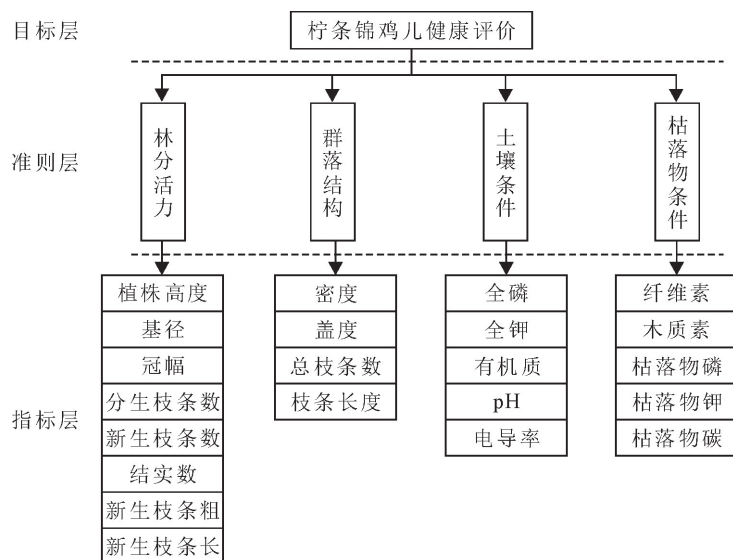


图 3 柠条锦鸡儿健康评价结构

Fig. 3 Health evaluation structure of *C. korshinskii*

2.1.2 指标权重的确定与计算 权重可以显示评价指标对结果影响的重要程度,从而利用其指标影响的大小程度进行评价,权重设置就是要从一系列评价指标中筛分出影响性较大的评价指标和影响性较小的评价指标<sup>[21-22]</sup>。对筛选的柠条锦鸡儿灌木林健康评价指标做量化等级划分和权重设置。构建评价指标的权重判断矩阵后,结合研究区实际情况,对原始数据进行标准化处理,计算最大特征根  $\lambda_{\max}$  所对应的特征向量 ( $C_R$ ),并进行判断矩阵的一致性检验,当  $0 < C_R < 0.1$  时,则表明判断矩阵的一致性检验合理,计算所得的各项指标权重值合理可用,指标一致性检验结果见表 2。

表 2 各指标层一致性检验

Table 2 Consistency test of each index layer

一致性检验	$\lambda_{\max}$	$C_R$	是否符合一致性检验
准则层评价指标	4.103 9	0.038 9	是
林分活力评价指标	8.646 4	0.065 5	是
群落结构评价指标	5.072 8	0.016 3	是
土壤条件评价指标	4.049 1	0.018 4	是
枯落物条件评价指标	5.039 6	0.008 8	是

结合库布齐沙漠地区的实际状况采用等级评分法,制定了相应的评价优劣等级表,在柠条锦鸡儿灌木林健康评价标准的界定方面,对所选取的指标进

行量化处理,将各指标分为好、中、差 3 个等级。采用黄金分割法<sup>[23]</sup>,分别对好、中、差 3 个等级赋值为:1.0、0.62、0.38,构建柠条锦鸡儿灌木林健康指标评价标准。计算准则层及指标层各评价指标的权重,将准则层与指标层指标相乘即可计算得出柠条锦鸡儿健康综合权重,柠条锦鸡儿健康评价各评价指标的权重值以及柠条锦鸡儿各指标评价优劣标准见表 3。

2.1.3 健康评价模型及健康等级划分 健康评价模型是灌木防护林健康评价的关键,在森林健康评价研究中,多数学者使用生态系统健康综合指数模型,并对其公式整理、延伸,扩大了模型在森林健康评价中的适用性和适用范围。根据评价指标数据的归一化处理与指标权重计算结果,结合本研究的实际情况,采用生态系统健康综合指数模型对柠条锦鸡儿灌木林健康状况进行评估,最终通过健康综合评价指数  $H_1$  的大小来反映柠条林质量状况。

$$H_1 = \sum_{i=1}^n w'_i C'_{ib} \quad (1)$$

式中: $H_1$  为柠条锦鸡儿健康综合指数; $w'_i$  为指标层各评价指标综合权重计算值; $C'_{ib}$  为指标层确定的样地测量中实际测量及实验原始数据值; $i=1,2,3,\dots,m,m$  为健康评价体系指标层评价指标数量的



总和; $b=1,2,3,\cdots,n,n$  为试验样地的数量。

结合柠条锦鸡儿实际发育状况及行业相关标准<sup>[24]</sup>,参考寇志伟<sup>[22]</sup>、鲁绍伟等<sup>[25]</sup>对森林健康等级划分依据和研究方法,将柠条锦鸡儿健康评价指数划分为 4 个等级,制定了柠条锦鸡儿健康评价的分级标准(表 4)。

2.2 柠条锦鸡儿灌木林健康状况分析

2.2.1 柠条锦鸡儿灌木林现状 柠条锦鸡儿灌木林样地一级健康指标值共 4 项指标,①林分活力:13 号样地状况最好,得分为 0.814,7 号样地状态最差,得分为 0.22。样地平均得分为 0.51。其余 7 个样

地为中等状态,得分均在 0.4~0.7,占总样地的 53.84%。②土壤条件:样地 3、4、11 土壤条件较好,得分最高为 0.89。而样地 8 条件得分为 0.4,条件较差的样地占比 15.38%,中等样地均值分布于 0.4~0.7,占总样地的 61.53%。样地土壤条件均分为 0.55。③群落结构:样地最高得分为 0.75,最低分为 0.30、分别为样地 8 和样地 2,中等样地占 61.53%。④枯落物状态:共 5 块样地得分高于 0.7,最高分 0.89,占比 38.46%,中等样地共 8 块,最低得分 0.45,占比 61.54%,样地均分为 0.64,一级健康指标值占比见图 4。

表 3 柠条锦鸡儿健康评价指标权重及评价标准

Table 3 Health evaluation index weight and evaluation standard of *C. korshinskii*

目标层	准则层		指标层		综合权重 ( $W_1$ )	评价优劣标准		
	准则	权重	指标	权重		差 (0.38)	中 (0.38~0.62)	好 (0.62~1.0)
柠条锦鸡儿 健康评价	林分活力(B1)	0.353 6	分生枝条数/根	0.053 7	0.021 1	<10	10~20	>20
			基径/cm	0.173 7	0.055 1	<10	10~16	>16
			冠幅/cm <sup>2</sup>	0.277 0	0.062 9	<190	190~310	>310
			植株高度/cm	0.187 1	0.086 7	<100	100~170	>170
			结实数/颗	0.037 2	0.013 1	<4	4~6	>6
			新生枝条数/根	0.128 7	0.059 0	<6	6~9	>9
			新生枝条粗/mm	0.098 8	0.035 6	<1.3	1.3~2.1	>2.1
			新生枝条长/cm	0.043 8	0.020 2	<10	10~17	>17
	土壤条件(B2)	0.295 9	全磷(%)	0.131 3	0.039 7	<0.4	0.4~0.5	>0.5
			全钾(%)	0.131 3	0.039 7	<1.2	1.2~1.5	>1.5
			有机质/(g·kg <sup>-1</sup> )	0.436 6	0.121 3	<3	3~6	>6
			pH	0.068 7	0.024 1	<8	8.3~8.6	>8.6
			电导率/(μS·cm <sup>-1</sup> )	0.232 2	0.071 0	<550	550~600	>600
	群落结构(B3)	0.251 8	密度(%)	0.187 3	0.037 5	<4	4~7	>7
			盖度(%)	0.534 2	0.077 0	<7	7~19	>19
			枝条长度/cm	0.159 5	0.040 3	<75	75~115	>115
			枝条总数/根	0.119 0	0.097 0	<4	4~6	>6
	枯落物(B4)	0.098 6	木质素(%)	0.112 9	0.011 1	<35	32~38	>36
			纤维素(%)	0.112 9	0.011 1	<17	17~20	>20
			枯落物 P(%)	0.265 5	0.026 2	<33	33~38	>38
			枯落物 K(%)	0.265 5	0.026 2	<0.03	0.03~0.08	>0.08
			枯落物 C(%)	0.243 2	0.024 0	<330	330~380	>380

表 4 柠条锦鸡儿健康评价分级标准

Table 4 Health evaluation grading standard of *C. korshinskii*

健康等级	重度低质低效	中度低质低效	轻度低质低效	健康
健康指数( $H_1$ )	≤0.45	(0.45,0.55]	(0.55,0.65)	≥0.65

2.2.2 柠条锦鸡儿灌木林健康评价 通过构建健康评价体系,结合样方实地调查基础数据、标准化后数据、指标权重值和健康评价模型可计算得到库布齐沙漠地区柠条锦鸡儿灌木林各样地健康指数。由

图 5 可见,健康状态的样地有 1 个,占比 7.69%,有 5 个样地处于轻度低质低效状况,占样地总数的 38.46%,有 6 块样地健康程度为中度低质低效,占比 46.16%。有 1 个重度低质低效样地,占比

7.69%。研究区灌木林样方健康指数最大值为 0.691 1, 最小值为 0.426 8, 相差 0.264 2; 样地 13 的柠条锦鸡儿健康质量最佳, 样地 2 最差, 柠条锦鸡儿灌木林健康指数平均值为 0.538 7, 样方健康指数标准差为 6.38%, 健康指数绝大部分位于 0.55~0.60。目前库布齐沙漠柠条锦鸡儿健康指数普遍较低, 中度退化的灌木林地占到 1/2 以上。库布齐沙漠地区大部分柠条锦鸡儿林分活力不足、防护效能较低, 当地生长生境条件较弱。从总体趋势上看, 库布齐沙漠地区柠条锦鸡儿整体处于中度低质低效状态。

2.2.3 柠条锦鸡儿林分健康因素的影响 由图 6 可见, 柠条锦鸡儿健康评价一级指标分别为: 林分活力 (0.353 6)、土壤条件 (0.295 9)、群落结构 (0.251 8)、枯落物条件 (0.098 6), 4 项一级指标分别占比 35.4%、29.6%、25.2%、9.9%。其中, 林分活力影响最大, 枯落物条件影响最小。在二级指标中: 土壤有机质含量、柠条锦鸡儿枝条总数、植株高度、盖度、冠幅等是柠条锦鸡儿健康状况重要影响因素。平茬、放牧等人为活动会影响柠条锦鸡儿灌木株高、冠幅、盖度等, 在一定程度上也降低了柠条锦鸡儿灌木林防护效能。

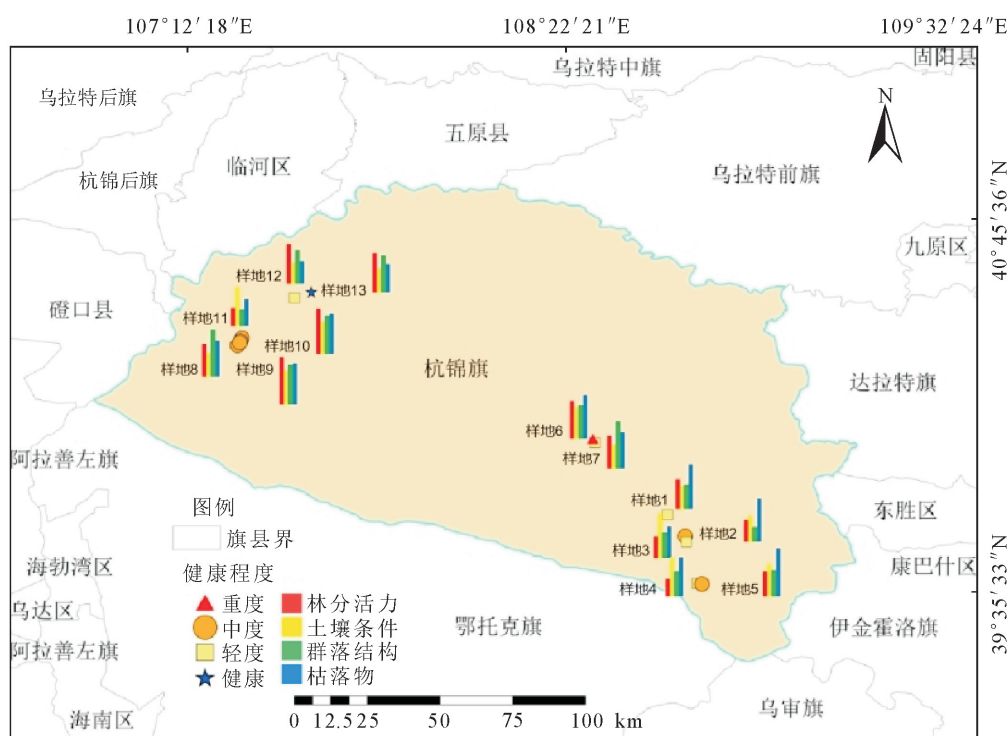


图 4 柠条锦鸡儿灌木林一级指标健康值及健康等级

Fig. 4 The first-level index health value and health grade of *C. korshinskii* shrub forests

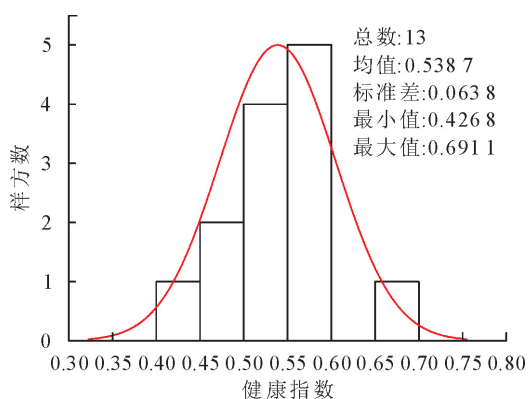


图 5 柠条锦鸡儿灌木林健康指数频率分布

Fig. 5 Frequency distribution of health index of *C. korshinskii* shrub forests

### 3 讨论

层次分析法在林木健康评价中的指标选择和指标权重确立的可操作性及完整性方面具备优势, 王建军等<sup>[26]</sup>、贾大鹏等<sup>[27]</sup>、张博等<sup>[28]</sup>都利用该方法对森林生态系统进行了健康评价。本研究基于 Delphi-AHP 法构建了柠条锦鸡儿灌木林健康评价体系, 提出了柠条锦鸡儿灌木林健康评价模型, 与寇志伟<sup>[22]</sup>、于金涛<sup>[29]</sup>对灌木及防护林健康影响主要因素的研究结果相比, 本模型选取柠条锦鸡儿生长、更新等功能指标的同时还结合柠条锦鸡儿的特点增加了土壤条件、枯落物条件等生态环境指标, 考虑到了植株生长环境等影响因素, 从多方面综合评价, 弥补了只根据灌木林形态特征进行健康评价的不足。相

比于前人针对某一区域的防护林健康状况评价,单一的评价客体使本评价体系主要针对较小尺度的评价研究,评价精确度较高,若将其用于范围较大的尺度评价时,则应充分考虑选取指标的适用性。

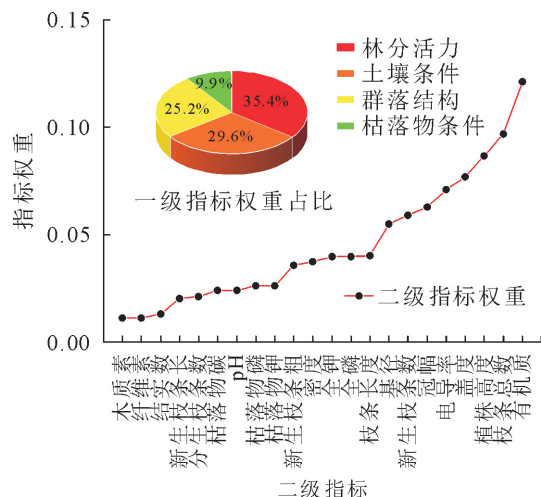


图6 健康评价指标权重占比

Fig. 6 Proportions of health evaluation index weigh

本研究参考行业标准、归纳防护林相关研究成果以及国内防护林的相关文献,进行防护林健康评价指标优劣等级划分,在一定程度上降低了采用专家打分获取指标及进行指标量化带来的主观性误差。健康评价显示库布齐沙漠柠条锦鸡儿灌木林整体处于中度低质低效状态,得到的健康等级评价结果与柠条锦鸡儿灌木林的实际生长状况一致,相比于传统的健康评价研究,专家打分及测量指标标准化相结合的方法使健康评价结果更具有实用性及科学性,因此同样可以应用于其他地区的柠条锦鸡儿健康评价。在评价体系实际应用过程中,应从植株林分活力、土壤条件、群落结构、枯落物条件4个方面对评价指标准确筛选和测量。

健康评价体系能够有效反映及评价柠条锦鸡儿灌木林目前的健康状态,但灌木林健康状态是一个动态发展的过程,未来的研究可以对整个区域柠条锦鸡儿健康状态进行长期的监测。

## 4 结论

1)利用层次分析法,基于4-22(4个一级指标和22个二级指标)系统化结构框架,构建了库布齐沙漠柠条锦鸡儿灌木林健康评价体系,其中土壤有机质、植株高度、植株枝条总数、植株新生枝条粗度、枝条长度等影响因素贡献度较大。

2)库布齐沙漠柠条锦鸡儿灌木林样地平均健康指数为0.5387,健康状态样地占比7.69%,处于轻度低质低效状态的样地占比38.46%,中度低质低

效状态的样地占比46.16%,重度低质低效的样地占比7.69%,柠条锦鸡儿灌木林整体处于中度低质低效状态,有进一步发展为重度低质低效的可能,研究得到的健康等级评价结果与柠条锦鸡儿灌木林的实际生长状况一致。

3)应用健康体系评价柠条锦鸡儿健康状态应结合林分活力(0.3536)、土壤条件(0.2959)、群落结构(0.2518)、枯落物条件(0.0986)4个层面综合判断。健康评价应用还需要结合不同地区生境划分健康指标评分阈值,考虑指标适用性,对应不同自然条件的地区的健康指数值。

## 参考文献:

- [1] 邓迪,赵泽斌,马媛.基于GIS的柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii*)分布模型[J].中国沙漠,2020,40(5):74-80.  
DENG D,ZHAO Z B,MA Y. Modeling of species distribution with GIS in arid regions; take *Caragana korshinskii* for example[J]. Journal of Desert Research, 2020, 40(5): 74-80. (in Chinese)
- [2] 刘任涛.沙地灌丛的“肥岛”和“虫岛”形成过程、特征及其与生态系统演替的关系[J].生态学杂志,2014,33(12):3463-3469.  
LIU R T. Formation process and characteristics of "Fertile island" and "Arthropod island" in de-sertified shrub land and their relations to ecosystem succession. [J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, 33(12): 3463-3469. (in Chinese)
- [3] AAMLID D, TORSETH K, VENN K, et al. Changes of forest health in Norwegian boreal forests during 15 years[J]. Forest Ecology and Management, 2000, 127(1): 103-118.
- [4] HARRY H. Canada's national ecological framework; an asset to reporting on the health of Canadian forests[J]. The Forestry Chronicle, 2001, 77(1): 111-115.
- [5] 于金涛,肖文发,王鹏程,等.防护林健康评价研究进展[J].世界林业研究,2013,26(1):31-36.  
YU J T, XIAO W F, WANG P C, et al. Research advances of health assessment of shelterbelts [J]. World Forestry Research, 2013, 26(1): 31-36. (in Chinese)
- [6] 刘红娟.油茶林健康评价指标体系与评估模型研究[D].长沙:中南林业科技大学,2010.
- [7] 王兵,郭浩,王燕,等.森林生态系统健康评估研究进展[J].中国水土保持科学,2007,5(3):114-121.  
WANG B, GUO H, WANG Y, et al. Review on the evaluation of forest ecosystem health[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2007, 5(3): 114-121. (in Chinese)
- [8] 赵小亮,周国娜,高宝嘉,等.主成分分析法在承德县森林生态系统健康评价中的应用[J].中国农学通报,2008(6):400-403.  
ZHAO X L, ZHOU G N, GAO B J, et al. The principal component analysis method in health evaluation for forest ecosystem of chengde county[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2008(6): 400-403. (in Chinese)
- [9] 王硕,安慧君,张智杰,等.基于模糊综合评价法的红花尔基森林健康质量评价[J].内蒙古农业大学学报:自然科学版,2018,39(1):22-28.

- WANG S, AN H J, ZHANG Z J, *et al.* Forest health quality assessment of Honghuaerji based on the fuzzy comprehensive evaluation method[J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University: Natural Science Edition, 2018, 39(1): 22-28. (in Chinese)
- [10] 曹小玉, 委霞, 赵文菲, 等. 基于结构方程模型的森林健康评价[J]. 生态学杂志, 2021, 40(8): 2635-2647.
- CAO X Y, WEI X, ZHAO W F, *et al.* Evaluation of forest health based on structural equation model. [J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(8): 2635-2647. (in Chinese)
- [11] 张晶晶, 赵忠, 宋西德, 等. 基于灰色关联投影法的森林生态系统健康评价[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2010, 38(8): 97-103.
- ZHANG J J, ZHAO Z, SONG X D, *et al.* Health assessment of forest ecosystem based on grey relation projection method [J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2010, 38(8): 97-103. (in Chinese)
- [12] 林帅. 毛乌素沙地公益林五种林型健康评价[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2019.
- [13] 钟霞, 钟怀军. 多指标综合评价方法及应用[J]. 内蒙古大学学报: 人文社会科学版, 2004(4): 107-111.
- ZHONG X, ZHONG H J. Multi-criteria estimation: its application as a method[J]. Journal of Inner Mongolia University: Philosophy and Social Sciences, 2004(4): 107-111. (in Chinese)
- [14] 沈剑波, 雷相东, 舒清志, 等. 国内外森林健康评价指标体系综述[J]. 科技导报, 2011, 29(33): 72-79.
- SHEN J B, LEI X D, SHU Q T, *et al.* Review on forest health evaluation index system[J]. Science & Technology Review, 2011, 29(33): 72-79. (in Chinese)
- [15] 王秋燕, 陈鹏飞, 李学东, 等. 森林健康评价方法综述[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2018, 42(2): 177-183.
- WANG Q Y, CHEN P F, LI X D, *et al.* Review of forest health assessment methods[J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition, 2018, 42(2): 177-183. (in Chinese)
- [16] 李恺. 层次分析法在生态环境综合评价中的应用[J]. 环境科学与技术, 2009, 32(2): 183-185.
- LI K. Application of analytical hierarchy process to integrate evaluation of eco-environment[J]. Environmental Science & Technology, 2009, 32(2): 183-185. (in Chinese)
- [17] WU J M. Comprehensive analysis of environmental ecological restoration effect of mining area under the planting of arbor and shrub plant landscape[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2021, (2021) 14: 871.
- [18] HOPHON K, LEWIS F. An optimization of model based on fuzzy multiple-criteria decision analysis for plants environment effects[J]. Journal of Bioinformatics and Intelligent Control, 2015, 4(2): 117-124.
- [19] 周洋, 郑小贤, 高祥, 等. 金沟岭林场落叶松人工林健康评价研究[J]. 西北林学院学报, 2014, 29(1): 134-137.
- ZHOU Y, ZHENG X X, GAO X, *et al.* Health assessment of larch plantation forests in Jingouling[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2014, 29(1): 134-137. (in Chinese)
- [20] 张立军, 袁能文. 线性综合评价模型中指标标准化方法的比较与选择[J]. 统计与信息论坛, 2010, 25(8): 10-15.
- ZHANG L J, YUAN N W. Comparison and selection of index standardization method in linear comprehensive evaluation model[J]. Journal of Statistics and Information, 2010, 25(8): 10-15. (in Chinese)
- [21] 赵姗姗. 县级土地利用总体规划环境影响评价研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2013.
- [22] 寇志伟. 毛乌素库布齐沙区灌木防护林健康评价[D]. 陕西杨陵: 西北农林科技大学, 2021.
- [23] 鲁少波, 杨晓菲, 鲁绍伟, 等. 河北省小五台山森林生态系统健康评价研究[J]. 林业资源管理, 2011(1): 106-110.
- LU S B, YANG X F, LU S W, *et al.* Study about health assessment of forest ecosystem of xiaowutai mountains in Hebei [J]. Forest Resources Management, 2011(1): 106-110. (in Chinese)
- [24] LY/T 1958-2011[S]. 森林可持续状况评价导则. 北京: 国家林业局, 2011.
- [25] 鲁绍伟, 刘凤芹, 余新晓, 等. 北京市八达岭林场森林生态系统健康性评价[J]. 水土保持学报, 2006(3): 79-82, 105.
- LU S W, LIU F Q, YU X X, *et al.* Health assessment of forest ecosystem in Badaling forest center[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2006(3): 79-82, 105.
- [26] 王建军, 安冰. 基于层次分析法的广西国有派阳山林场森林健康状况综合评价[J]. 西部林业科学, 2022, 51(3): 114-117, 137.
- WANG J J, AN B. Evaluation of forest health status in Paiyangshan forest farm based on analytic hierarchy process[J]. Journal of West China Forestry Science, 2022, 51(3): 114-117, 137. (in Chinese)
- [27] 贾大鹏, 王新杰, 刘雨. 金沟岭林场森林健康评价[J]. 东北林业大学学报, 2019, 47(8): 47-52, 57.
- JIA D P, WANG X J, LIU Y. Forest health assessment of Jingouling forest farm[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2019, 47(8): 47-52, 57. (in Chinese)
- [28] 张博, 王照利, 雷方隼. 基于层次分析法和物元分析法的森林资源质量评价—以延川县为例[J]. 西北林学院学报, 2022, 37(2): 208-215.
- ZHANG B, WANG Z L, LEI F J. Quality evaluation of forest resources based on analytic hierarchy process and matter element analysis—a case study of Yanchuan County[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2022, 37(2): 208-215. (in Chinese)
- [29] 于金涛. 柘归县防护林健康评价指标体系建立及应用研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2013.