

DOI: 10.20103/j.stxb.202409112193

高佳文, 左亚凡, 鲁雅雯, 贺康宁. 基于结构方程模型的白桦次生林健康评价——以大通县宝库河流域为例. 生态学报, 2025, 45(12): - - .
Gao J W, Zuo Y F, Lu Y W, He K N. Health assessment of secondary forests of *Betula platyphylla* based on structural equation model: the example of Baoku River Basin in Datong County. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(12): - - .

基于结构方程模型的白桦次生林健康评价 ——以大通县宝库河流域为例

高佳文^{1,2}, 左亚凡³, 鲁雅雯^{1,2}, 贺康宁^{1,2,*}

1 北京林业大学水土保持学院水土保持国家林业局重点实验室, 北京 100083

2 北京市水土保持工程技术研究中心, 北京 100083

3 山西农业大学林学院, 太原 030801

摘要: 青海省大通县位于青藏高原和黄土高原的过渡地带, 生态地位显著。在该地区维持主要先锋树种白桦的次生林良好健康状况, 利于充分发挥其水源涵养功能, 对维护区域水资源安全具有重要意义。本研究旨在评价青海大通县不同密度白桦次生林的健康状况并明确其主要影响因素, 从而为退化天然林的恢复和重建提供科学依据。为此, 选择生产力、土壤质量、林分结构和系统稳定性四个潜变量及变量下的 18 项观测变量作为森林健康评价指标, 利用验证性因子分析(CFA)计算各项评价指标的权重, 基于此计算不同密度林分的健康综合得分。结果显示, 四个潜变量对森林健康的标准化路径系数分别为 0.74、0.90、0.09 和 0.70, 均达显著水平。权重分析显示, 土壤质量的综合权重最高(0.3704), 其次是生产力(0.3045)和系统稳定性(0.2880), 林分结构的权重相对较低(0.0371)。通过分析不同密度林分的森林健康综合得分, 林龄为 40—50 年的白桦次生林中, 密度在 300—500 株/hm²范围的样地综合得分最高, 显著优于其它密度区间; 密度过高(800 株/hm²以上)会导致健康得分降低。综合来看, 白桦次生林维持适中的合理林分密度(300—500 株/hm²)能有效维持其土壤质量和生产力, 从而维持较好的林分健康水平。

关键词: 森林健康评价; 结构方程模型; 验证性因子分析; 白桦次生林

Health assessment of secondary forests of *Betula platyphylla* based on structural equation model: the example of Baoku River Basin in Datong County

GAO Jiawen^{1,2}, ZUO Yafan³, LU Yawen^{1,2}, HE Kangning^{1,2,*}

1 Key Laboratory of Soil and Water Conservation State Forestry Administration, Soil and Water Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2 Beijing Engineering Research Center of Soil and Water Conservation, Beijing 100083, China

3 College of Forestry, Shanxi Agricultural University, Taiyuan 030801, China

Abstract: Datong County in Qinghai Province is located in the transition zone between the Qinghai-Tibet Plateau and the Loess Plateau, this area is known as the “Water Tower of Xining”, holding a significant ecological status. Maintaining the good health status of the secondary forest of the main pioneer tree species *Betula platyphylla* in this area is conducive to giving full play to its water conservation function and is of great significance for maintaining regional water resource security. Given the complexity and multi-factorial nature of the degradation phenomena in this region. The purpose of this study was to evaluate the health status of *Betula platyphylla* secondary forests with varying densities in Datong County, Qinghai Province, and to reveal the main influencing factors, thereby provide a scientific basis for the restoration and reconstruction of degraded natural forests. To this end, the four latent variables-productivity, soil quality, stand structure, and system

基金项目: 青海省科技厅重点研发与转化项目(2022-SF-160); “十四五”国家重点研发计划(2022YFF1302604); “十三五”国家重点研发计划(2017YFC0504604)

收稿日期: 2024-09-11; 网络出版日期: 2025-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hkn@bjfu.edu.cn

stability - as well as 18 observable variables were selected as forest health assessment indicators, and the weights of the assessment indicators were calculated using validated factor analysis (CFA), based on which the composite scores of the health of stands with different densities were calculated. The results showed that the standardized path coefficients of the four latent variables on forest health were 0.74, 0.90, 0.09, and 0.70, respectively, and all reached the significant level. The weight analysis showed that soil quality had the highest combined weight (0.3704), followed by productivity (0.3045) and system stability (0.2880), while stand structure had a relatively low weight (0.0371). The study shows that soil quality directly affects the water and nutrient absorption capacity of the stand, and it is the foundation for maintaining stand stability and productivity. By analyzing the forest health composite scores of stands with different densities, it was found that the composite scores of sample plots with densities in the range of 300—500 plant/hm² were the highest, which were significantly better than those of other density intervals; too high density (more than 800 plants/hm²) resulted in lower health scores, mainly due to intensified resource competition, which restricted tree growth and contributed to an increase in forest pests and diseases. Overall, maintaining a moderate and reasonable stand density (300—500 plants/hm²) in the secondary forest of *Betula platyphylla* can effectively maintain its soil quality and productivity, and thus maintain a better level of stand health. This provides an important reference for future forest management and ecological restoration work, especially in terms of forest restoration and density control.

Key Words: forest health assessment; structural equation model; confirmatory factor analysis; *Betula platyphylla* Suk secondary forest

森林是地球上最重要的生态系统之一^[1],能够提供水土保持、涵养水源、维持生物多样性等多种服务功能^[2-3],但是,只有健康的森林生态系统才能保证充分发挥其多种服务功能。我国水资源短缺,尤其是西北干旱与半干旱地区^[4],非常需要水源涵养林发挥水源供给、土壤保持、防治荒漠化等重要价值^[5-6]。因此,评估和改善水源涵养林健康状况具有重要意义。

森林健康评价在应对这些挑战中起到了关键作用。它作为一种高度科学性和系统性的方法^[7],可为林业管理者提供定量分析工具,客观评估森林健康状况,识别潜在的问题,帮助制定合理经营计划,优化林分结构,促进森林可持续管理。

近年来,结构方程模型(SEM)因其综合分析能力日益受到学术界的青睐^[8-11]。本研究中,SEM不仅是解决白桦次生林健康评价问题的关键工具,也是构建评价体系的核心方法。它能够清晰揭示观测变量与潜在变量之间的因果关系,并处理多变量间复杂的交互作用,克服传统方法在主观赋权 and 多重共线性处理上的不足^[12-13]。传统的森林健康评价方法,如层次分析法^[14]和主成分分析法^[15],尽管为评价体系的发展提供了基础支持,但在应对复杂生态系统时存在明显局限性。这些方法依赖专家经验对指标赋权,存在主观性强的问题,同时容易忽略指标间的相互影响,无法全面反映生态系统的动态特征^[16]。SEM的引入,为克服这些问题提供了科学的解决方案。与传统方法相比,它在处理多因子综合分析、挖掘变量间逻辑关系以及验证因果模型方面展现出独特优势,并在允许数据存在测量误差的情况下优化模型设计,使指标权重的确定更具系统性和客观性^[17]。SEM在本研究中的应用,突出其在复杂生态系统评价中的潜力,为后续相关研究提供参考框架和技术思路。

青海省大通县境内的宝库流域地处青藏高原与黄土高原的过渡地带,生态地位显著,具有“西宁水塔”的称号。白桦(*Betula platyphylla* (Carl.) Suk.)纯林为该地区主要的天然次生林,是区域内水源涵养功能发挥的主要林分类型。人类活动导致该地区景观破碎程度加剧,白桦纯林无法自然更新,出现演替停滞甚至退化。退化现象的复杂性和多因素交织,传统的森林健康评价方法难以全面和深入地分析主要影响因素及其相互关系。因此,应对白桦纯林退化现象,本文采用结构方程模型方法,评价青海省大通县的白桦次生林健康,综合考虑各种因素^[18],揭示不同密度梯度下白桦纯林的健康状况,为制定科学的管理和保护策略提供有力的依据^[19]。

1 研究区概况

本研究的样地位于青海省西宁市大通县宝库河流域(图 1),地理坐标为东经 $100^{\circ}51'$ — $101^{\circ}56'$,北纬 $36^{\circ}43'$ — $37^{\circ}23'$ 。该县位于青藏高原和黄土高原的过渡地带,地势复杂,海拔在 2280—4622 m,平均降水量达 506 mm/a 左右,年均气温 $0-6^{\circ}\text{C}$ 。大通县的土壤类型丰富多样,包括高山草甸土、山地棕褐土、黑钙土、栗钙土、潮砂土、垫淤土和沼泽土等。气候属高原大陆性气候,这里植被类型丰富,主要乔木树种包括青海云杉(*Picea crassifolia* Kom)、白桦、青杨(*Populus cathayana* Rehder)、祁连圆柏(*Juniperus przewalskii* Carrière)和华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii* Mayr)。灌木层主要由小檗(*Berberis* L.)、金露梅(*Dasiphora fruticosa* (L.) Rydb.)等组成。草本层主要植物有披碱草(*Elymus dahuricus* Turcz.)和野草莓(*Fragaria vesca* L.)等。

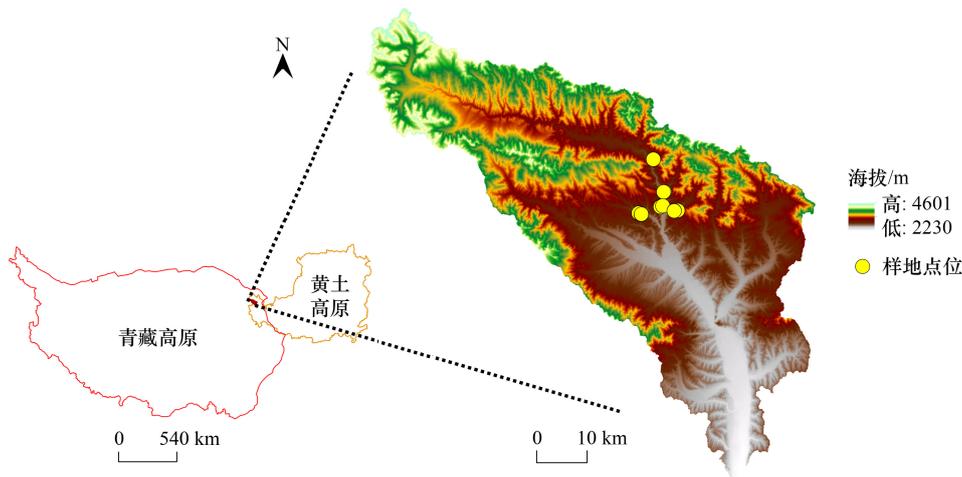


图 1 研究区概况图

Fig.1 Study area

2 数据来源及方法

2.1 样地设置与调查

野外作业于 2023 年 5 月—8 月在青海省大通县宝库乡祁连山东部宝库林场开展调查。选择具有代表性的白桦纯林样地 19 块,确保立地环境条件(地形、土壤、水分等)相对一致且受人类活动影响较小(表 1),设置 $24\text{ m}\times 24\text{ m}$ 的标准样地,记录其海拔、坡度、坡向等基本信息。然后测量并记录各样地内每株乔木的坐标、树高、胸径、枝下高和冠幅等每木检尺信息,并调查林木的损伤类型、干形质量和优势度。基于五点取样法原则,布设土壤剖面,将土层分为 0—20、20—40、40—60 cm 三层,利用环刀原状土取样,测定土壤密度;同时,在环刀附近,利用土钻分别取得每层的扰动土样品,将五个点位的土壤样品装入塑封袋充分混合后带回实验室,测定化学性质。

2.2 评价方法

2.2.1 森林健康评价指标及其权重的确定方法

森林健康评价中,结构方程模型(SEM)^[20]是一种重要的统计工具,能够同时处理多个变量间的复杂关系。SEM 结合了因子分析和路径分析的优点,适用于构建和验证理论模型。通过 SEM,可以确定各评价指标的权重,从而综合评价森林健康状况。结构方程模型由两个部分组成,测量模型描述潜在变量与观测变量之间的关系,结构模型描述潜在变量之间的关系。

表 1 样地基本情况表

Table 1 Basic situation table of sample plot

样地编号 Plot No.	海拔 Elevation/m	平均林龄 Mean tree age/a	郁闭度 Crown density/%	林分密度 Density/ (株/hm ²)	平均树高 Mean tree height/m	平均胸径 Mean tree DBH/cm	坡向 Slope aspect/(°)	坡度 Slope gradient/(°)
1	2826	46	0.45	138.89	20.97	31.03	38.21	27.23
2	2974	45	0.44	190.97	9.59	28.76	335.21	36.33
3	3009	43	0.47	208.33	7.76	19.48	320.89	24.14
4	2890	44	0.41	277.78	16.91	32.93	358.36	23.64
5	2843	43	0.44	295.14	14.84	18.26	6.53	28.78
6	2855	47	0.48	312.50	15.93	28.59	337.83	25.92
7	2870	48	0.53	312.50	14.88	29.50	16.26	22.62
8	2840	46	0.63	347.22	20.55	25.98	43.53	24.69
9	2847	48	0.52	381.94	14.71	29.81	343.30	31.34
10	2819	47	0.57	416.67	15.85	23.53	2.53	29.56
11	2756	45	0.54	520.83	13.48	21.11	14.34	18.25
12	2796	46	0.4	572.92	17.58	19.99	7.56	31.35
13	2780	44	0.54	572.92	13.03	17.48	315.47	28.73
14	2840	47	0.5	729.17	16.97	20.23	357.61	11.32
15	2796	48	0.6	746.53	16.37	20.09	3.52	28.49
16	2797	41	0.63	885.42	10.77	11.86	340.04	30.78
17	2901	46	0.64	1024.31	16.49	18.16	330.66	30.79
18	2850	43	0.63	1788.19	14.77	10.59	14.93	17.71
19	2869	42	0.67	2343.75	9.43	8.17	23.82	16.01

坡向 0° 为正北, 顺时针旋转; DBH: Diameter at Breast Height

对于因子分析部分, 测量模型可以表示为:

$$X = \Lambda_x \xi + \delta \quad (1)$$

$$Y = \Lambda_y \eta + \epsilon \quad (2)$$

式中, X 和 Y 分别是观测变量的向量, Λ_x 和 Λ_y 分别是因子负荷矩阵, ξ 和 η 分别是潜在变量的向量, δ 和 ϵ 是误差项。

结构模型可以表示为:

$$\eta = B_\eta + \Gamma \xi + \zeta \quad (3)$$

式中, B 是潜在因子之间的路径系数矩阵, Γ 是外生因子对内生因子的影响系数矩阵, ζ 是结构误差项。

1) 构建理论模型

① 森林健康评价理论模型构建

本研究在查阅相关文献和咨询专家意见的基础上^[21-22], 根据大通县白桦次生林健康评价的研究目标和区域特征并结合课题组以往研究经验, 选定森林健康作为二阶因子, 将生产力、土壤质量、林分结构和系统稳定性作为其第一阶自变量。进一步选取 18 个观察变量, 如平均树高、土壤有机质、群落层次结构等作为因变量, 全面覆盖白桦次生林的健康表现指标。设计结构方程模型的初步框架, 明确潜变量之间的路径关系, 构成了森林健康评价的理论模型(图 2)。

② 森林健康评价指标值的测定

结构方程模型(SEM)评价指标的测定是确保模型构建和实证分析的科学性和准确性的重要步骤。具体计算及确定标准如下:

在每个标准样地利用 GPS 和指南针等仪器, 记录海拔、坡度、经纬度、坡向。郁闭度是指林分内乔木树冠投影与林地面积之比, 值域范围为[0, 1]。本研究利用样点法计算标准样地的郁闭度, 具体计算公式如下: 郁

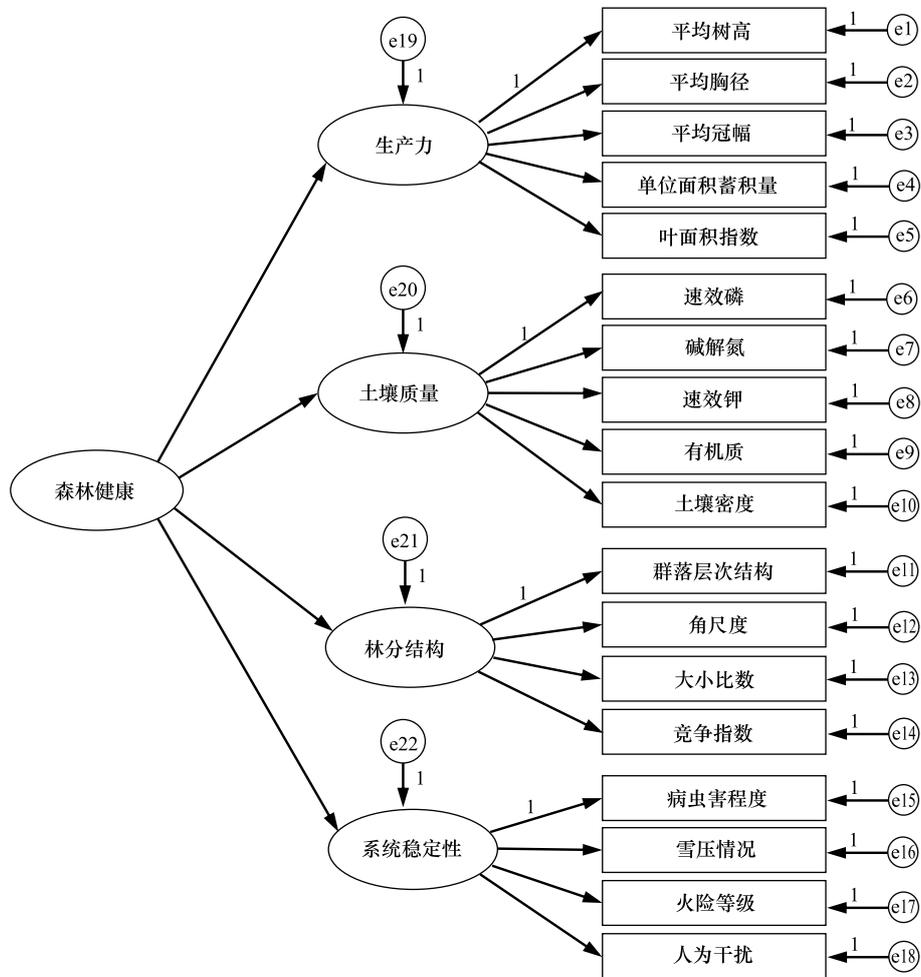


图2 森林健康评价理论模型

Fig.2 Theoretical model of forest health assessment

闭度 = 乔木树冠覆盖点数 / 100。为获取树木生长年表,使用生长锥从树干基部钻取树芯,经过风干和打磨后,利用 LINTAB 仪器测量年轮宽度,并用 COFECHA 软件交叉定年确定林龄及生长动态。

(1) 生产力指标

在标准样地内,通过“S”型路线对乔木逐木检尺,记录树高、胸径、冠幅、枝下高等指标,平均树高或平均胸径是各株树木的胸径、冠幅的平方平均数。冠层参数的获取采用五点法拍摄冠层照片,并通过 HemiView 软件分析叶面积指数指标。

本研究利用刘琪璟等^[23]发布的《中国立木材积表》中不同树种的二元材积计算公式,计算得出标准样地的单位面积蓄积量。

$$V_{\text{白桦}} = 0.000052286055D^{1.8593621}H^{1.01407150} \quad (4)$$

式中, V 为树种的单木材积量 (m^3); D 为单木胸径 (cm); H 为单木树高 (m)。

(2) 抵抗力相关指标

包括火险等级、病虫害和雪压情况。病虫害程度根据受害林木株数占样地总株数的比例计算;雪压程度以积雪对地面的压强比例范围分为五级。

火险等级的评定需综合考虑坡向、坡度、海拔高度等因素,以提供一个全面的火灾风险系统评估(表2)。一般而言,随着海拔的上升,温度下降,湿度相应增大,有利于减缓植被的干燥过程,以降低火灾发生的危险性。

表 2 火险等级的评定方法

Table 2 Evaluation method of fire danger rating

分值 Point	海拔 Elevation/m	坡度/(°) Slope gradient	坡向/(°) Slope aspect	分值 Point	海拔 Elevation/m	坡度/(°) Slope gradient	坡向/(°) Slope aspect
1	<2800	>30	(145,215)	4	(2900,2950)	(15,20)	(37,72);(288,323)
2	(2800,2850)	(25,30)	(109,144);(216,251)	5	>2950	(10,15)	(0,36);(324,359)
3	(2850,2900)	(20,25)	(73,108);(252,287)				

(3) 土壤理化性质的测定

土壤样品的采集工作严格遵循了肖珊美(2012)主编的《土壤检验技术》中的相关标准和程序,利用浸泡法和烘干法测定土壤密度,并进行了有机质、氮磷钾等关键指标的精确测定与分析。

$$\rho = \frac{W}{V} \quad (5)$$

式中, ρ 为土壤密度; W 为烘干后土样的质量, V 为环刀体积,为 $100/\text{cm}^3$ 。

土壤的有机质含量(g/kg)使用重铬酸钾氧化法;碱解氮含量(mg/kg)通过碱解法提取土壤中的氨态氮和部分有机态氮,然后通过蒸馏和滴定测定;土壤的速效磷含量(mg/kg)常采用摩尔—普利查德法;速效钾含量(mg/kg)使用火焰光度计测定法。

(4) 林分结构的测定

群落层次结构依据其完整性可分为三类:完整结构包含乔灌草地衣四个层次,较好结构至少具备其中三个层次,而不完整结构则仅包含两个层次。

运用 ArcGIS 10.6 的“邻域分析”模块中“构建泰森多边形”工具,生成标准样区(20 m×20 m)的 Voronoi 图。随后利用“近邻分析”工具确立中心木与邻近木的关联关系。在此过程中,将样地内的树木视为对象木,计算空间结构参数;而缓冲区内的树木仅作为邻近木处理,以避免边缘效应对分析结果的干扰。

Voronoi 角尺度记为 W_{ij} ,其定义为 α 角小于标准角 α_0 的个数占所考察的 n 个 α 角的比例。 W_{ij} 用公式(6)表示^[24]:

$$W_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n Z_{ij} \quad (6)$$

式中, W_{ij} 为中心木 i 点的 Voronoi 角尺度; n 为邻近木株数; $Z_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{当第 } j \text{ 个 } \alpha \text{ 角小于标准角 } \alpha_0 \\ 0 & \text{否则} \end{cases}$ 。

使用经过改进的 Hegyi 指数分析邻木竞争指数^[25],公式如下:

$$CI_i = \sum_{j=1}^n \frac{d_j}{d_i \times L_{ij}} \quad (7)$$

式中, CI_i 为竞争指数; d_i 为对象木 i 的胸径; d_j 为竞争木 j 的胸径; L_{ij} 为竞争木 j 与对象木 i 之间的距离。

大小比数表示基于位置的中心木和邻近木每木测定指标的相对大小被定义为大于参照树的相邻木数占所有邻近木的比例,公式如下^[26]:

$$U_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n K_{ij} \quad (8)$$

式中, U_{ij} 为中心木 i 的大小比数;当相邻木 j 比参照树 i 小, $K_{ij} = 0$;否则 $K_{ij} = 1$ 。

2) 模型假设

在具体模型分析之前,需对结构方程模型进行结果假设(表 3)。

3) 测量数据信度和效度检验

本研究采用 SPSS 23.0 软件对数据的信度和效度进行检验。具体方法如下:

表 3 森林健康评价结构方程模型假设

Table 3 Structural equation model hypothesis of forest health assessment

假设编号 Assumption number	假设内容 Hypothesis content	假设编号 Assumption number	假设内容 Hypothesis content
H1	生产力各观察指标对森林健康的影响(正向)	H3	林分结构各观察指标对森林健康的影响(正向)
H2	土壤质量各观察指标对森林健康的影响(正向)	H4	系统稳定性各观察指标对森林健康的影响(正向)

信度检验:通过测量指标内部一致性的检验来评估,常用的统计指标包括克隆巴赫(Cronbach's alpha)系数,一般认为当 Cronbach's alpha 系数 >0.8 时,数据信度良好,介于 $0.5—0.8$ 时,数据信度可接受;效度检验:通过测量指标与其理论潜变量之间的关联来评估,常用的方法包括结构效度和收敛效度。

本文建立了 18 个因变量的总量表,为了保证表的内部一致性,进行探索性因子分析之前,首先利用样本数据,计算量表的内部一致性信度系数 Cronbach's α 值进行内部一致性检验。随之进行 KMO 和巴特利球形检验,以验证量表的结构效度和确定潜在的因子结构。

4) 测量模型的信效度检验

为了进一步检验探索性因子分析结果中各观测变量的因子负荷量在结构方程模型中的参数估计是否显著,以及检验潜在变量的测量模型信度和效度,本研究采用 AMOS23.0 对测量模型进行验证性因子分析(CFA)确认了模型的结构有效性,通过拟合指标(如 X^2/df)、绝对适配度指数(GFI)、增值适配度指数(IFI、CFI)、均方根误差逼近度(RMSEA)等量化指标来评估模型与观察数据的拟合程度。

5) 模型修正

通过评估模型的拟合指数,初步判断模型的拟合情况。结果得知,GFI、NFI 拟合指数未达到适配标准,需要进行模型修正。依据 AMOS 输出报告中提供的修改指数(Modification Indices, M.I.),增加观测变量误差项 e5、e17 之间的相关,修正后的模型应作为新的基础模型,需再次进行评估和验证。这个过程应不断重复,直到构建出一个理论依据充分、符合实际情况且具有最佳解释力的模型为止。

2.2.2 森林健康评价指标评分标准的确定方法

在建立并修正森林健康评价模型之后,确定各项指标的评分标准是确保评价结果科学、合理和可比的重要步骤。涵盖生产力、土壤质量、林分结构和系统稳定性四个方面,根据样地实际数据情况对各类观测指标进行赋值。生产力指标通过实地测量和利用标准木法结合区域立木材积表计算评分。土壤质量指标严格按照《土壤检验技术》进行样品采集和实验室检测分析。林分结构指标评估采用定性和定量相结合的方法,通过现场调查和 GIS 数据分析确定评分标准。系统稳定性指标通过综合评估坡向、坡度、主要树种、枯落物覆盖度、林木枝下高、病虫害程度和人为活动强度,采用分级标准进行评分^[13]。

本研究采用分值从 5 到 1 的赋值方法。对稳定性准则层中的反向指标,评分从低到高依次赋值 1、2、3、4、5。表 4 是各观测指标的具体赋值分值。

3 结果与分析

3.1 森林健康评价结构方程模型

表 5 所示,生产力、土壤质量、林分结构、系统稳定性的 Cronbach's α 系数达到 $0.8—0.9$ 之间,说明森林健康数据内部具有相当的信度,在允许的范围内。KMO 度量值为 0.807,大于 0.8,说明森林健康各潜变量数据非常适合进行因子分析。巴特利球形检验近似卡方值为 724.529,自由度为 153,显著性水平为 $0.000 < 0.01$,通过显著性检验(图 3)。说明该因子适合进行效度分析。

运行软件 AMOS 23.0 后,对森林健康评价体系模型进行适配度检验。表 6 表明,统计检验量 X^2/df 为 1.094,介于 $1—3$ 之间,符合模型检验要求。绝对适配度指数 RMSEA 为 0.044,小于 0.08,符合相关统计量临界值要求。在增值适配度指数中,CFI、TLI、NFI 的值分别为 0.982、0.983、0.83,其值部分未大于 0.9,因此需要

对模型修正。修正后的模型各路径系数均通过了显著性检验,模型的适配度进一步提升。具体来说,修正后的 GFI 值提升至 0.796, NFI 值提升至 0.837, 虽然仍略低于 0.9, 但整体适配度已经显著改善, 其它简约适配度指数 PNFI、PCFI 和 PGFI 也在合理范围内(分别为 0.711、0.841、0.606), 进一步验证了模型的合理性。综上所述, 修正后的模型在森林健康评价方面具有较强解释力和可靠性。

表 4 森林健康评价指标评分等级
Table 4 Forest health evaluation index score grade

潜变量 Latent variable	观察变量 Observation variable	等级分值 Grade score				
		5	4	3	2	1
生产力 Productivity	平均树高/m	≥19	[16,19)	[13,16)	[10,13)	<10
	平均胸径/cm	≥28	[23,28)	[18,23)	[13,18)	<13
	平均冠幅/m	≥46	[37,46)	[28,37)	[19,28)	[10,19)
	单位面积蓄积量/m ³	≥165	[129,165)	[93,129)	[57,93)	[21,57)
	叶面积指数	≥3.14	[2.98,3.14)	[2.82,2.98)	[2.66,2.82)	[2.5,2.66)
土壤质量 Soil quality	速效磷/(mg/kg)	≥28	[21,28)	[14,21)	[7,14)	<7
	碱解氮(mg/kg)	≥818	[683,818)	[548,683)	[413,548)	[278,413)
	速效钾(mg/kg)	≥260	[227,260)	[194,227)	[161,194)	[128,161)
	有机质(g/kg)	≥173	[141,173)	[109,141)	[77,109)	[45,77)
	土壤密度(g/cm ³)	<0.78	[0.78,0.91)	[0.91,1.04)	[1.04,1.17)	1.17
林分结构 Stand structure	群落层次结构	完整	—	较复杂	—	简单
	角尺度	[0.37,0.39)	[0.39,0.41)	[0.41,0.43)	[0.43,0.45)	>0.45
	大小比数	≥0.55	[0.52,0.55)	[0.49,0.52)	[0.46,0.49)	[0.43,0.46)
系统稳定性 System stability	竞争指数	<2.5	[4.7,2.5)	[6.9,4.7)	[9.1,6.9)	>9.1
	病虫害程度	≤5	(5,10]	(10,15]	(15,20]	>20
	雪压程度	≤5	(5,10]	(10,15]	(15,20]	>20
	火险等级	极难燃	难燃	可燃	易燃	极易燃
	人为干扰	极轻	轻度	中度	重度	极重

表 5 可靠性统计

Table 5 Reliability Statistics

潜变量 Latent variable	克隆巴赫 Alpha Cronbach's a	KMO	项数 Number of terms	潜变量 Latent variable	克隆巴赫 Alpha Cronbach's a	KMO	项数 Number of terms
森林健康 Forest health	0.893	0.807	18	林分结构 Stand structure	0.688	0.674	4
土壤质量 Soil quality	0.861	0.812	5	系统稳定性	0.734	0.774	4
生产力 Productivity	0.834	0.794	5	System stability			

KMO : 检验统计量 Kaiser-meyer-olkin

表 6 修正后的测量结构效度(模型适配度)参数

Table 6 Revised measurement construct validity (model fit) parameters

统计检验量 Statistical testw	绝对适配度指数 Absolute consistency index			增值适配度指数 Value-added consistency index			简约适配度指数 Simple consistency index		
	X ² /df	RMSEA	GFI	NFI	IFI	CFI	PNFI	PCFI	PGFI
适配标准 Adaptation standard	<3	<0.05	>0.9	>0.9	>0.9	>0.9	>0.5	>0.5	>0.5
本模型参数 Parameters of this model	1.094	0.034	0.790→ 0.796	0.830→ 0.837	0.983	0.982	0.711	0.841	0.606

X²/df : 卡方比自由度 Chi-square/degree of freedom; RMSEA: 均方根误差近似 Root Mean Square Error of Approximation; GFI: 适配度检验 Goodness-of-fit index; NFI: 标准拟合指数 Normed Fit Index; IFI: 增值拟合指数 Incremental Fit Index; CFI: 比较适配度指数 Comparative Fit Index; PNFI: 简约性标准拟合指数 Parsimony Normed Fit Index; PCFI: 简约性比较适配度指数 Parsimony Comparative Fit Index ; PGFI: 简约性拟合优度指数 Parsimony Goodness-of-fit index

根据表 7 中数据,系统稳定性、土壤质量和生产力之间均表现出显著的相关性($P < 0.01$)。尽管总体上各变量间的相关性显著,但在某些具体指标上,如林分结构中的竞争指数,其显著性水平略有差异, P 值为 0.033,稍高于 0.01。这一差异可能源于白桦纯林作为单一树种森林的特性,其竞争指数可能受到限制,因树木间竞争强度和方式相对均匀,导致竞争指数差异不大。尽管其显著性水平略低,竞争指数在白桦纯林研究中仍然具有重要意义,因为它反映了树木间的资源竞争关系,对于理解森林结构和生态动态至关重要。另外,表 8 中的相关性系数绝对值均小于 0.7,且均小于所对应的 AVE 的平方根,即说明各潜变量之间有一定的相关性,且彼此之间又具有一定的区分度,即说明数据的区分效度理想。

表 7 样本数据收敛效度和区分效度检验统计量(路径系数分析)

Table 7 Sample data convergent validity test statistics (path coefficient analysis)

潜在变量 Potential variables	观察变量 Observation variables	标准化 负荷量 std.	非标准化 负荷量 Unstd.	S.E.	C.R. (t-value)	P	SMC	C.R.	AVE
生产力 Productivity	平均树高/m	0.802	1				0.643	0.937	0.749
	平均胸径/cm	0.878	0.930	0.127	7.300	***	0.770		
	平均冠幅/m	0.804	0.877	0.135	6.502	***	0.646		
	单位面积蓄积量/m ³	0.894	0.932	0.122	7.626	***	0.799		
	叶面积指数	0.943	0.939	0.115	8.185	***	0.889		
土壤质量 Soil quality	速效磷/(mg/kg)	0.912	1				0.831	0.962	0.838
	碱解氮(mg/kg)	0.872	0.903	0.095	9.498	***	0.760		
	速效钾(mg/kg)	0.906	1.115	0.105	10.580	***	0.820		
	有机质(g/kg)	0.928	0.896	0.079	11.358	***	0.861		
	土壤密度(g/cm ³)	0.958	1.082	0.087	12.469	***	0.917		
林分结构 Stand structure	群落层次结构	0.827	1				0.683	0.727	0.416
	角尺度	0.725	0.674	0.221	3.053	***	0.525		
	大小比数	0.548	0.682	0.2	3.403	***	0.300		
系统稳定性 System stability	竞争指数	0.396	0.424	0.199	2.127	0.033	0.156		
	病虫害程度	0.815	1				0.664	0.841	0.588
	雪压程度	0.996	1.199	0.152	7.869	***	0.992		
	火险等级	0.716	0.854	0.145	5.884	***	0.512		
	人为干扰	0.429	0.565	0.180	3.139	***	0.184		

*** 代表 P 值小于 0.01; S.E.: 标准误差 Standard Error; C.R.: 临界比率 Critical Ratio; P: 显著性水平 P-value; SMC: 平方多重相关系数 Squared Multiple Correlation; AVE: 平均方差提取量 Average Variance Extracted

表 8 样本数据区分效度检验统计量(路径系数分析)

Table 8 Sample data discriminant validity test statistics (path coefficient analysis)

变量 Variables	AVE	森林健康 Forest health	系统稳定性 System stability	林分结构 Stand structure	土壤质量 Soil quality	生产力 Productivity
森林健康 Forest health		1				
系统稳定性 System stability	0.588	0.695	0.766			
林分结构 Stand structure	0.416	0.094	0.065	0.644		
土壤质量 Soil quality	0.838	0.901	0.627	0.085	0.915	
生产力 Productivity	0.749	0.740	0.514	0.070	0.667	0.865

对角线为 AVE 评价方差变异抽取量

Chi-square 值为 137.473, $df = 130$, $Chi/DF = 1.057$, 表明模型拟合度良好。绝对拟合度指数(GFI)为 0.796, 调整拟合指数(AGFI)为 0.731, 略低于理想标准(> 0.90), 但仍在可接受范围内。均方根误差近似(RMSEA)为 0.034, 低于 0.05, 说明模型具有良好的拟合度。

修正后的模型路径图如图 3 所示, 内生潜在变量生产力、土壤质量、林分结构和系统稳定性对森林健康二

阶因子的标准化路径系数分别为 0.74、0.90、0.09 和 0.70,表明这四个要素与森林健康之间均存在显著的正向因果关系,符合模型假设。具体而言,生产力要素中的观测变量的因子负荷量分别为 0.80、0.88、0.80、0.89 和 0.94,显示出其显著性。土壤质量要素中观测变量的因子负荷量分别为 0.91、0.87、0.91、0.93 和 0.96,表明这些变量对土壤质量潜变量具有较强的解释力。林分结构要素中观测变量的因子负荷量分别为 0.83、0.73、0.55 和 0.40,尽管整体负荷量较低,但仍能说明其在描述林分结构方面的作用。系统稳定性要素中观测变量的因子负荷量分别为 0.82、0.99、0.72 和 0.43,表明系统稳定性潜变量与这些观测变量之间的关系显著。所有一阶因子对森林健康二阶因子的载荷及各观测变量的因子负荷量均达到统计显著水平,验证了模型的合理性和有效性,为森林健康评价提供了科学依据。

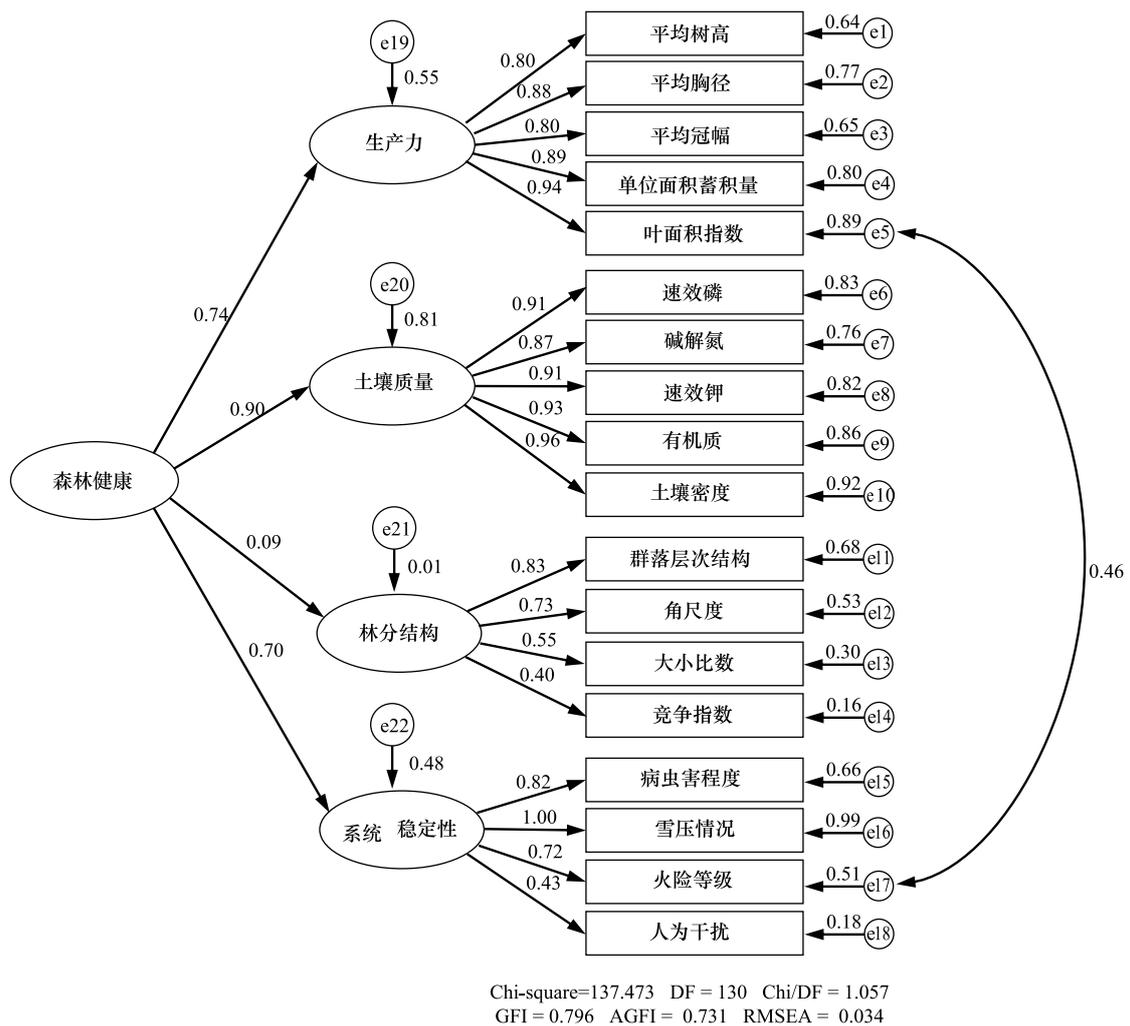


图3 结构方程模型修正路径图

Fig.3 Structural equation model correction path diagram

Chi-square: 卡方; DF: 自由度; AGFI: 调整拟合优度指数

3.2 森林健康评价指标权重确定结果

通过分析表 9 中的各路径系数,并采用归一化等量变换计算相关变量的权重系数,得出了森林健康各指标的权重结果。结果显示,综合权重中土壤质量的数值最大,为 0.3704,表明土壤质量在森林健康中起着至关重要的作用。白桦纯林的土壤总孔隙度较大,有助于根系生长和水分保持。直接影响到林木的生长和存活,是森林生态系统的核心组成部分。在研究样地中,土壤肥力和结构对森林健康的影响尤为显著,成为制约林分健康生长的关键因素。

生产力的综合权重为 0.3045,在生产力要素中,叶面积指数和单位面积蓄积量的权重最高,分别为 0.2181 和 0.2064。这两个指标直接反映了林木生长状况和白桦纯林生产力水平。

林分结构的综合权重相对较低,仅为 0.0371。但在具体指标中,群落层次结构的权重最高,为 0.3307。这表明,尽管整体权重较低,群落层次结构在描述林分结构方面仍具有显著作用。层次丰富的白桦林通常具有多样的生物种群和更为复杂的生态关系,有助于森林的稳定和健康。

系统稳定性的综合权重为 0.2880,其中,雪压程度的单个因子权重占比最高,为 0.3367。究其原因可能源于青海大通县位于高寒地区,冬季降雪频繁且积雪较厚,导致白桦林的弯曲、折断,甚至死亡等,进而干扰了白桦林的正常生长过程。病虫害和火险等级的权重分别为 0.2761 和 0.2425,这些指标共同决定了森林系统的稳定性。综上所述,尽管土壤质量在综合权重中占据首位,群落层次结构和雪压程度在其各自领域中也起着关键作用。

表 9 森林健康指标权重计算结果

Table 9 Calculation results of forest health index weight

目标层 Target layer	准则层 Criterion layer	权重 Weight	指标层 Index layer	权重 Weight	最终权重 Final weight
森林健康 Forest health	生产力	0.3045	平均树高	0.1856	0.0565
			平均胸径	0.2042	0.0622
			平均冠幅	0.1856	0.0565
			单位面积蓄积量	0.2065	0.0629
			叶面积指数	0.2181	0.0664
	土壤质量	0.3704	速效磷	0.1987	0.0736
			碱解氮	0.1899	0.0703
			速效钾	0.1987	0.0736
			有机质	0.2031	0.0753
			土壤密度	0.2096	0.0776
	林分结构	0.0371	群落层次结构	0.3307	0.0123
			角尺度	0.2908	0.0108
			大小比数	0.2192	0.0082
			竞争指数	0.1593	0.0059
			病虫害程度	0.2761	0.0795
	系统稳定性	0.2880	雪压程度	0.3367	0.0969
			火险等级	0.2425	0.0698
			人为干扰	0.1447	0.0417

3.3 白桦典型森林的健康评价结果

通过对表 10 中白桦纯林各样地的林分密度和森林健康综合得分的详细分析,发现林分密度在 300—500 株/hm² 区间内的样地综合得分最高,样地 6、7、8、9 和 10 的综合得分分别为 0.5906、0.6396、0.5332、0.5009 和 0.6171,这些样地表现出较高的生产力和系统稳定性。对林分密度在 100—300 株/hm² 和 500—800 株/hm² 的区间内的样地,综合得分相对接近,但都略低于 300—500 株/hm²。对密度超过 800 株/hm² 的样地,综合得分最低,尤其是样地为 16、18 和 19,其综合得分分别为 0.2544、0.3054 和 0.3467。生产力指标从 0.1655 到 0.7555 之间,林分结构得分从 0.1967 到 0.7554,系统稳定性得分从 0.2176 到 0.7013,土壤质量得分从 0.1842 到 0.6442。整体来看,较高得分的样地大多都集中在中等密度范围。

根据图 4 中四个不同林分密度区间的森林健康综合得分,和其显著性差异分析(邓肯检验)可以得出林分密度在 300—500 株/hm² 的森林健康综合得分最高,为 0.5773±0.0563,显著性标记为 a,表明此密度区间的健康状况显著优于其他密度区间。林分密度为 800 株/hm² 以上的森林健康综合得分最低,为 0.3488±0.1005,显著性标记为 b,表明其健康状况显著低于其它三个密度区间。此外,林分密度为 100—300 株/hm² 和 500—

800 株/hm²的森林健康综合得分为 0.4758±0.0739 和 0.4655±0.0893, 显著性标记为 ab, 表示两个密度区间的森林健康得分在统计上没有显著差异, 但与 800 株/hm²以上 (b) 区间存在显著差异。通过邓肯检验可以看出, 森林健康综合得分随林分密度的变化呈现出先增后减的明显趋势: 在中等密度 (300—500 株/hm²) 区间内的森林健康综合得分最高, 过高 (800 株/hm²以上) 或过低 (100—300 株/hm²) 的林分密度会导致健康综合得分下降。在林分密度为 300—500 株/hm²时, 森林健康综合得分显著提升。

表 10 白桦典型森林健康评价综合得分值

Table 10 Comprehensive score of typical forest health evaluation of *Betula platyphylla*

样地编号 Sample plot number	林分密度 Stand density/ (株/hm ²)	生产力 Productivity	林分结构 Stand structure	系统稳定性 System stability	土壤质量 Soil quality	综合得分 Composite score
1	100—300	0.6068	0.1967	0.4208	0.3488	0.4425
2		0.3740	0.5655	0.6087	0.3977	0.4577
3		0.2112	0.4670	0.6895	0.4614	0.4512
4		0.7555	0.4188	0.7013	0.4270	0.6058
5		0.3888	0.5879	0.6205	0.2781	0.4219
6	300—500	0.7535	0.4795	0.7013	0.3815	0.5906
7		0.6272	0.7516	0.6323	0.6442	0.6396
8		0.6347	0.4095	0.4129	0.5557	0.5332
9		0.6635	0.5934	0.5134	0.3625	0.5059
10		0.6726	0.7554	0.7013	0.4921	0.6171
11	500—800	0.5107	0.6136	0.5318	0.5455	0.5335
12		0.5413	0.6478	0.5055	0.5223	0.5279
13		0.4473	0.6660	0.2748	0.2946	0.3492
14		0.6597	0.5146	0.4444	0.4870	0.5284
15		0.6624	0.5854	0.2176	0.2768	0.3887
16	>800	0.3049	0.6904	0.4056	0.0516	0.2544
17		0.6247	0.3308	0.5555	0.3399	0.4885
18		0.2792	0.2622	0.4942	0.1842	0.3054
19		0.1655	0.3582	0.5751	0.3168	0.3467

4 讨论

森林健康评价作为诊断森林生态系统结构与功能状态的重要手段, 众多学者在这一领域取得了显著的研究进展。但是传统的森林健康评价方法以定性分析为主, 指标体系片面且权重分配依赖主观判断, 难以揭示指标间的内在联系与生态系统的复杂机理^[27—28]。进一步采用新颖的思路与方法深化森林健康评价的研究, 已成为当前有待解决的重要科学问题, 以准确反映森林生态系统的健康状态。

本文以青海大通地区白桦纯林为研究对象, 将生产力、土壤质量、林分结构和系统稳定性作为一阶因子, 森林健康作为二阶因子, 采用结构方程模型 (SEM) 对指

标权重进行量化分析, 构建适用于青海大通县地区的森林健康评价模型, 并综合分析不同林分密度对白桦林健康状态的影响。在森林健康评估的具体分析中, 土壤质量的权重为 0.3704, 是影响森林健康综合得分的最

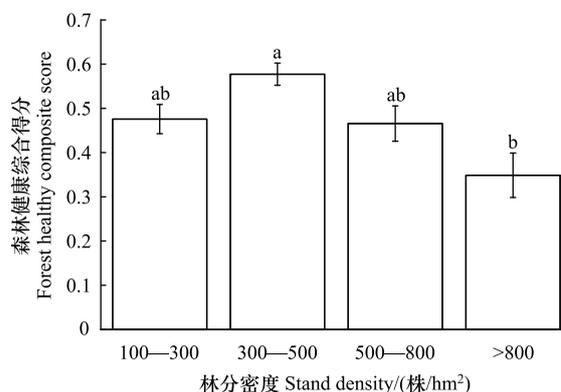


图 4 显著性差异分析 (邓肯检验)

Fig.4 Significant difference analysis (Duncan test)

重要因素。研究表明,土壤理化特性直接影响植物生长及生态系统的稳定性^[29],尤其是土壤有机质在白桦纯林中的作用不可或缺。土壤有机质显著提高了植物根系的生长能力和呼吸效率,增强了林分对水分和养分的吸收能力,同时通过促进土壤团聚体的形成改善了土壤的透气性、透水性和保水性,有效防止了水土流失^[30]。坡度和坡向作为影响土壤厚度和养分分布的重要因素,在陡坡条件下,土壤侵蚀加剧,进一步降低了养分利用效率,而坡向则通过调节太阳辐射和水分分布等对植物生长产生了深远的影响^[31]。

生产力方面,模型的权重为 0.3045,单位面积蓄积量和叶面积指数是衡量白桦纯林生产力的重要指标。健康的白桦纯林通常表现出较高的蓄积量和郁闭度,这不仅优化了光资源的利用,还通过林冠覆盖减少了土壤蒸发,提高了生态系统的稳定性。研究表明,当林分密度控制在 300—500 株/hm²时,单位面积蓄积量达到最佳状态,表明密度的适当控制对林分生产力至关重要。超出该密度范围,林木生长受到资源竞争的制约,导致生产力显著下降,验证了过高密度对森林健康的负面影响。

虽然林分结构的权重较低,但其在维持生态系统复杂性和稳定性方面的作用同样不容忽视^[32-33]。群落层次结构丰富的林分能够维持较高的物种多样性和稳定的生态关系,显著增强了生态系统的抗干扰能力。与纯林相比,混交林在光资源利用和养分分配方面具有明显优势,而纯林则容易受到病虫害、火灾等自然灾害的威胁,其适应能力和稳定性较差^[34]。群落层次结构的高权重揭示了其在维持系统功能和健康状态中的核心地位,尤其是在应对外部干扰时,群落层次结构的复杂性和多样性提供了更好的适应性。

在系统稳定性方面,权重为 0.2880,表明白桦纯林在对外界干扰时的适应能力是健康评价的重要组成部分。高密度可能导致资源竞争加剧,限制树木生长,增加病虫害风险,进而削弱森林健康水平。雪压作为高寒地区的主要自然灾害,对森林健康的影响尤为突出,过高密度的林分更容易因积雪超载而出现树木倒伏或树枝断裂,破坏群落层次结构,降低生产力并影响林分的整体健康状态。尽管火险等级权重较低,但其潜在破坏力巨大,直接影响林分、植被、土壤及生态系统服务功能,且恢复周期长,是评价中不可或缺的重要因素^[35]。

本研究采用结构方程模型对白桦林森林健康进行权重分析,数据表明, X^2/df 为 1.094,介于 1—3 之间,符合模型检验要求。绝对适配度指数 RMSEA 为 0.044,小于 0.08,符合相关统计量临界值要求。结果显示模型具有良好的适配度,具有处理复杂因果关系和测量误差的能力。研究通过因子载荷估计揭示了各观测变量对森林健康潜在变量的贡献程度。尽管某些指标(如火险等级)权重较低,但是其潜在影响力在模型中得到有效体现。这种权重分布不仅明确了各因子的相对重要性,还反映了森林健康评价中多维因素的综合作用。研究基于现有数据构建适用于青海大通县地区的白桦次生林健康评价模型,但模型的进一步优化还需持续的数据积累,提升其准确性和广泛适用性,为森林健康的管理与决策提供支持。

5 结论

林分密度对白桦林的健康评分影响显著。生产力、土壤质量指标均在中等林分密度(300—500 株/hm²)出现峰值,且平均胸径、叶面积指数、有机质等都在密度 300—500 株/hm²达最大。表明在这个密度范围内,白桦林的光合作用效率、养分吸收和转化能力等可能达到最佳状态;在综合权重分析中,土壤质量为影响该区域白桦健康的主要因子,占据首位,生产力的综合权重为第二,尤其是叶面积指数和单位面积蓄积量,反映了生长生产力与森林健康之间的紧密联系。

对于林龄为 40—50 年的林分,中等林分密度(300—500 株/hm²)维持了较高的土壤质量、较强的生态稳定性和良好的林分结构。因而可作为最适密度,为该地白桦林健康可持续经营和稳定发展提供参考。另外,随着 3S 技术的发展,运用新技术对森林健康各种尺度评价是一个具有更现实意义的方向,未来应结合长时间序列动态研究和综合生态评估^[36],进一步揭示天然林健康与生态功能之间的复杂关系,为森林可持续经营提供科学支持。

参考文献(References):

- [1] 赵金龙,王添鑫,韩海荣,康峰峰,张彦雷.森林生态系统服务功能价值评估研究进展与趋势.生态学杂志,2013,32(8):2229-2237.

- [2] Nelson E, Mendoza G, Regetz J, Polasky S, Tallis H, Cameron D, Chan K M, Daily G C, Goldstein J, Kareiva P M, Lonsdorf E, Naidoo R, Ricketts T H, Shaw M. Modeling multiple ecosystem services, biodiversity conservation, commodity production, and tradeoffs at landscape scales. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2009, 7(1): 4-11.
- [3] 王兵, 任晓旭, 胡文. 中国森林生态系统服务功能及其价值评估. *林业科学*, 2011, 47(2): 145-153.
- [4] 李正, 赵林. 西北干旱区山水林田湖草沙系统治理研究实践——以塔里木河重要源流区为例. *中国国土资源经济*, 2022, 35(12): 13-18, 63.
- [5] 陈东立, 余新晓, 廖邦洪. 中国森林生态系统水源涵养功能分析. *世界林业研究*, 2005, 18(1): 49-54.
- [6] 刘效东, 张卫强, 冯英杰, 赵新宇, 甘先华, 周庆. 森林生态系统水源涵养功能研究进展与展望. *生态学杂志*, 2022, 41(4): 784-791.
- [7] 高均凯. 森林健康基本理论及评价方法研究[D].北京:北京林业大学, 2007.
- [8] 王群星. 基于健康评价的不同生长阶段栎林林分结构优化研究[D].郑州:河南农业大学, 2023.
- [9] Woodall C W, Amacher M C, Bechtold W A, Coulston J W, Jovan S, Perry C H, Randolph K C, Schulz B K, Smith G C, Tkacz B, Will-Wolf S. Status and future of the forest health indicators program of the USA. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2011, 177(1/2/3/4): 419-436.
- [10] 荣婧, 冯仲科. 基于 GIS 的森林健康风险源识别和管理技术研究. *北京林业大学学报*, 2005, (S2): 208-212.
- [11] 袁雪君. 我国森林健康评价研究现状分析. *陕西林业科技*, 2023, 51(5): 79-85, 92.
- [12] 曹小玉, 李际平, 赵文菲, 委霞, 庞一凡. 基于结构方程模型分析林分空间结构对草本物种多样性的影响. *生态学报*, 2020, 40(24): 9164-9173.
- [13] 曹小玉, 委霞, 赵文菲, 李际平. 基于结构方程模型的森林健康评价. *生态学杂志*, 2021, 40(8): 2635-2647.
- [14] 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. *西部林业科学*, 2022, 51(3): 114-117, 137.
- [15] 赵小亮, 周国娜, 高宝嘉, 赵永梅, 高飞. 主成分分析法在承德县森林生态系统健康评价中的应用. *中国农学通报*, 2008, 24(6): 400-403.
- [16] 郑学良, 陈丽华, 李洪洋, 涂志华, 弓文艳, 张雪琪. 基于水源涵养功能的辽东防护林体系健康评价. *中国水土保持科学*, 2020, 18(2): 102-110.
- [17] Capmourteres V, Anand M. Assessing ecological integrity: a multi-scale structural and functional approach using Structural Equation Modeling. *Ecological Indicators*, 2016, 71: 258-269.
- [18] 董灵波, 刘兆刚. 森林健康评价及其多尺度转换方法. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2021, 45(3): 206-216.
- [19] Jia H H, Luo P, Yang H, Luo C, Li H L, Cheng Y, Huang Y. Constructing an indices system for evaluating the ecological integrity of forests in western Sichuan, China based on structural equation modeling. *Ecological Indicators*, 2023, 146: 109745.
- [20] Amini A, Alimohammadlou M. Toward equation structural modeling: an integration of interpretive structural modeling and structural equation modeling. *Journal of Management Analytics*, 2021, 8(4): 693-714.
- [21] Dale V H, Beyeler S C. Challenges in the development and use of ecological indicators. *Ecological Indicators*, 2001, 1(1): 3-10.
- [22] Noss R F. Assessing and monitoring forest biodiversity: a suggested framework and indicators. *Forest Ecology and Management*, 1999, 115(2/3): 135-146.
- [23] 刘琪璟. 中国立木材积表. 北京:中国林业出版社, 2017.
- [24] 李际平, 封尧, 赵春燕, 张彩彩, 曹小玉. 基于 Voronoi 图的角尺度分析方法探讨——以湖南省平江县福寿林场为例. *林业资源管理*, 2015(4): 33-38, 68.
- [25] 王芳. 基于 ArcGIS 林分空间结构的研究[D].南京:南京林业大学, 2013.
- [26] 刘帅, 吴舒辞, 王红, 张江, 李建军, 王传立. 基于 Voronoi 图的林分空间模型及分布格局研究. *生态学报*, 2014, 34(6): 1436-1443.
- [27] Meng Y, Cao B H, Dong C, Dong X F. Mount Taishan forest ecosystem health assessment based on forest inventory data. *Forests*, 2019, 10(8): 657.
- [28] 潘磊, 王晓荣, 唐万鹏, 崔鸿侠, 庞宏东. 森林生态系统健康评价研究进展. *湖北林业科技*, 2015, 44(6): 35-39.
- [29] 李浩, 何静, 王理德, 宋达成, 刘光武, 王梁浩然, 李诗涵. 祁连山东段高寒草地修复过程中植物物种多样性及土壤理化性质. *水土保持研究*, 2025, 32(1): 110-120.
- [30] 刘亚博, 冯天骄, 王平, 卫伟. 黄土丘陵区典型小流域不同植被恢复方式土壤理化性质差异及其影响因素. *生态学报*, 2024, 44(15): 6652-6666.
- [31] 张玉琴, 李丽纯, 彭继达, 廖廓, 刘桐恺. 武夷山自然保护区 NDVI 对坡度的响应. *生态环境学报*, 2020, 29(7): 1310-1317.
- [32] Xiao R, Liu Y, Fei X F, Yu W X, Zhang Z H, Meng Q X. Ecosystem health assessment: a comprehensive and detailed analysis of the case study in coastal metropolitan region, Eastern China. *Ecological Indicators*, 2019, 98: 363-376.
- [33] 董灵波, 马榕, 田栋元, 王涛, 刘兆刚. 大兴安岭天然林不同演替阶段共优势种群结构与动态. *应用生态学报*, 2022, 33(8): 2077-2087.
- [34] 楼一恺, 范忆, 戴其林, 王铮屹, 库伟鹏, 赵明水, 余树全. 天目山常绿落叶阔叶林群落垂直结构与群落整体物种多样性的关系. *生态学报*, 2021, 41(21): 8568-8577.
- [35] 莫凡, 郭慧, 裴顺祥, 吴迪, 吴莎, 辛学兵. 野外-城市界域森林火险时空演变趋势及火险等级划分. *生态学报*, 2024, 44(14): 6232-6242.
- [36] 高广磊, 信忠保, 丁国栋, 李丛丛, 张佳音, 梁文俊, 安云, 贺宇, 肖萌. 基于遥感技术的森林健康研究综述. *生态学报*, 2013, 33(6): 1675-1689.