

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.05.019.

靳姗姗, 夏霁晖, 谢沛铮, 等. 太行山南麓 3 种典型人工林健康评价[J]. 水土保持研究, 2024, 31(5): 295-303.

Jin Shanshan, Xia Jihui, Xie Peizheng, et al. Assessment of Health of Three Forest Plantations in the Southern Foot of Taihang Mountain[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(5): 295-303.

太行山南麓 3 种典型人工林健康评价

靳姗姗¹, 夏霁晖¹, 谢沛铮¹, 陈晓蔚², 王群星¹, 周梦丽¹, 闫东锋¹

(1. 河南农业大学 林学院, 郑州 450046; 2. 河南省林业生态建设发展中心, 郑州 450002)

摘要: [目的] 森林健康评价是进行森林管理的依据, 开展森林健康评价能够实现森林可持续经营目标提供一定理论基础。[方法] 以太行山南麓广泛分布的侧柏人工林、栓皮栎人工林和刺槐人工林为研究对象, 综合使用主成分分析法、聚类分析法和判别分析法 3 种多元统计分析方法, 选择林分生产力、立地条件、群落结构、稳定性与可持续能力 4 个一级指标和 21 个二级指标构成森林健康评价体系, 对其森林健康状态进行评价。[结果] 树高、胸径、土壤全 K 含量、森林火险指数是影响研究区森林健康的主要因子, 其主成分因子载荷均大于 0.6; 在所调查的 17 块样地中, 8 个样地森林健康等级为“健康”或“亚健康”(占比和为 47.0%), 侧柏、栓皮栎和刺槐人工林相应森林健康等级占比和分别是 60.0%, 33.4% 和 50.0%, 9 块样地森林等级为“中健康”或“不健康”(占比和为 53.0%), 侧柏、栓皮栎和刺槐人工林相应森林健康等级占比和分别是 40.0%, 66.7% 和 50.0%。[结论] 整体上看, 研究区侧柏和刺槐人工林林分健康状况良好, 栓皮栎人工林健康状况较差。

关键词: 人工林; 森林健康评价; 主成分分析; 聚类分析; 判别分析

中图分类号: S750

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)05-0295-09

Assessment of Health of Three Forest Plantations in the Southern Foot of Taihang Mountain

Jin Shanshan¹, Xia Jihui¹, Xie Peizheng¹, Chen Xiaowei²,

Wang Qunxing¹, Zhou Mengli¹, Yan Dongfeng¹

(1. College of Forestry, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China;

2. Henan Forestry Ecological Construction Development Center, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: [Objective] Forest health assessment is the basis for forest management. The aims of this study are to conduct forest health assessment, and to provide a certain theoretical basis for achieving sustainable forest management goals. [Methods] This study focused on the widely distributed plantations of *Platycladus orientalis*, *Quercus variabilis*, and *Robinia pseudoacacia* in the southern foothills of the Taihang Mountains. Principal component analysis, cluster analysis, and discriminant analysis were used. Stand productivity, site conditions, community organizational structure, stability and sustainability were selected to evaluate the forest health status, which composed of 21 secondary indicators. [Results] Tree height, diameter at breast height, total soil K content and forest fire risk index were the main factors affecting forest health in the study area. Their principal component factor loadings were all greater than 0.6. Among the 17 surveyed plots, 8 plots had a forest health level of ‘healthy’ or ‘sub healthy’ (accounting for 47.0% of the total), while the corresponding forest health levels of *Platycladus orientalis*, *Quercus variabilis*, and *Robinia pseudoacacia* plantations were 60.0%, 33.4%, and 50.0%, respectively. The forest health levels of 9 plots were ‘medium

收稿日期: 2023-10-31

修回日期: 2023-11-06

资助项目: 河南省科技攻关项目(222102110418); 河南省重大科技专项(201300111400)

第一作者: 靳姗姗(1990—), 女, 河南新乡人, 博士, 讲师, 主要从事森林可持续经营研究。E-mail: jinshanshanzzz@126.com

通信作者: 闫东锋(1979—), 男, 河南平舆人, 博士, 教授, 主要从事森林可持续经营研究。E-mail: ydflix@henau.edu.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

healthy' or 'unhealthy' (accounting for 53.0% of the total), and the corresponding forest health levels of *Platycladus orientalis*, *Quercus variabilis*, and *Robinia pseudoacacia* plantations were 40.0%, 66.7%, and 50.0%, respectively. [Conclusion] Overall, the health status of *Platycladus orientalis* and *Robinia pseudoacacia* plantations in the research area is good, while the health status of *Quercus variabilis* plantations is poor.

Keywords: plantation; forest health assessment; principal component analysis; cluster analysis; discriminant analysis

森林健康是森林发挥生态系统功能的基础,也是维持森林可持续发展的重要环节,健康的森林不仅为人类提供能源、建筑材料和食物,还提供如储存碳、承载生物多样性和调节气候等服务^[1-2],同时维持着生态系统稳定和生物多样性,有利于实现人与自然和谐发展^[3]。森林健康评价是对森林进行管理的最有效手段,开展森林健康评价可为制定科学合理的经营措施提供科学依据。

国内外学者针对森林健康问题已展开大量研究,涵盖生态系统功能演变、生态系统结构变化、生物多样性保护和森林可持续经营管理等多个方面^[4]。由于森林健康评价的目的差异和林分类型区别,研究学者在选取评价指标时各有侧重点,故目前没有广泛认可统一的标准^[5]。整体上看,综合评价仍不完善,大多局限于评价森林结构或环境^[6],评价目的相对单一,综合评价研究不够充分。郑学良等^[7]为评价辽东防护林的水源涵养功能,从“系统活力—组织结构—系统恢复力—水源涵养”4个方面使用综合指数法进行了研究分析。徐来仙^[8]以群落稳定性、群落持续性和群落结构功能完备性为评价标准,对马尾松天然次生林的健康状况进行评价。随着对森林健康评价研究的不断加深,汲取其他相关学科、领域的成果,关于森林健康评价的方法得到了进一步的拓展和开发,如曹小玉等^[9]利用结构方程模型法构建的森林健康评价模型;于鹏跃^[4]、Barka^[10]等通过遥感数据对森林健康进行评价;其他还包括了人工神经网络法、主成分分析法、模糊综合评价法、层次分析法等^[11-13]在森林健康评价的应用。

根据河南省 2018 年第九次全国森林资源连续清查数据,河南省林地总面积 520.74 万 hm^2 ,其中森林面积 403.18 万 hm^2 ,森林蓄积量 20 719.12 万 m^3 ,森林覆盖率 24.14%,人工林面积占比较大,且人工林平均每 hm^2 蓄积量低于天然林,亟需改善。河南省济源市太行山南麓存在着大量的人工林,目前已发现多个林种的人工林均出现退化现象,但少有学者开展相关科学研究进行量化分析,因此对该地区人工林开展森林健康评价,对后续人工林的健康经营和可持续发展

具有重要的指导意义^[1,14-15]。

基于此,本研究以济源市太行山南麓常见的侧柏人工林、栓皮栎人工林和刺槐人工林 3 种林分为研究对象,在科学选择指标的基础上,先通过主成分分析法对多个指标进行降维处理,将其转化为数量较少且互不相关的几个主成分,然后通过聚类分析将多方面属性之间的相似性进行分类,最后通过判别分析对聚类分析结果进行验证^[3,12-13],以此对几种林分类型的森林健康状况进行评价。

1 研究区概况

研究区域位于济源市太行山南麓的大沟河林场和愚公林场,该地区属于暖温带大陆性季风型气候,海拔在 300~700 m,年平均气温 13.1 $^{\circ}\text{C}$,年降水量 700 mm 左右;土壤主要为在花岗片麻岩的土壤母质上发育而来的山地褐土,砾石含量大,土层平均厚度为 50~60 cm,水土流失严重。研究区主要植被类型是阔叶林破坏后发育的次生旱生灌草丛,以及人工栽培植被。人工林植被乔木树种主要为侧柏(*Platycladus orientalis* L. Franco)、栓皮栎(*Quercus variabilis* Blume.)、刺槐(*Robinia pseudoacacia* L.);灌木植物主要为荆条(*Vitex negundo* var. *heterophylla*)、酸枣(*Ziziphus jujuba* var. *spinosa* (Bunge) Hu)、胡枝子(*Leapedeza bicolor*. Turcz)和连翘(*Forsythia suspensa* (Thunb.) vahl)等;草本植物主要有荩草(*Arthraxon hispidus*)、狗尾草(*Setaria viridis*)、隐子草(*Cleistogenes chinensis*)和茜草(*Rubia cordifolia*)等。研究区域及样地位置见图 1。

1.1 研究方法

1.1.1 样地设置与调查 2020 年 5—10 月,在研究区设置 17 块 20 m \times 20 m 具有代表性的乔木样地(侧柏人工林 5 个、栓皮栎人工林 6 个和刺槐人工林 6 个)。对各样地中的乔木进行每木检尺,并记录树种、胸径、树高、枝下高、冠幅以及林下更新情况等;样地的内部四角分别设置 4 个 2 m \times 2 m 的灌木样方和 4 个 1 m \times 1 m 的草本样方进行灌木和草本的调查(物种名、数量、盖度、高度等);在每个样地内挖取 2 个土壤

剖面,记录土壤厚度并在剖面上分 0—10 cm 和 10—20 cm 两层对土壤进行取样,用于土壤理化性质的测定;调查并记录每块样地的海拔、坡度、坡向和坡位等环境因子信息,同时使用手持 GPS 记录样地的经纬度信息。样地基本情况见表 1。

1.1.2 试验指标的测定与计算方法

土壤理化性质的测定:土壤样品在采集时,每个土层用环刀分别采集原状土,用于土壤容重的测定,另外在每个土层取散土 1 kg 左右,并将每个样地的 2 个采样点同一土层的土进行混合,带回实验室自然风干后,剔除杂质,用于土壤有机质、土壤全 N 含量,土壤全 P 含量和土壤全 K 含量的测定。其中,土壤有机质采用重铬酸钾外加热氧化法测定,土壤全 N 含量采用凯氏定氮法测定,土壤全 P 含量采用钼锑抗比色法测定,土壤全 K 含量采用火焰光度法测定。

森林火险指数:森林火险指数由坡向、坡度、主要树种、林下地被物覆盖度及林木平均枝下高 5 个指标计算得出^[6]。

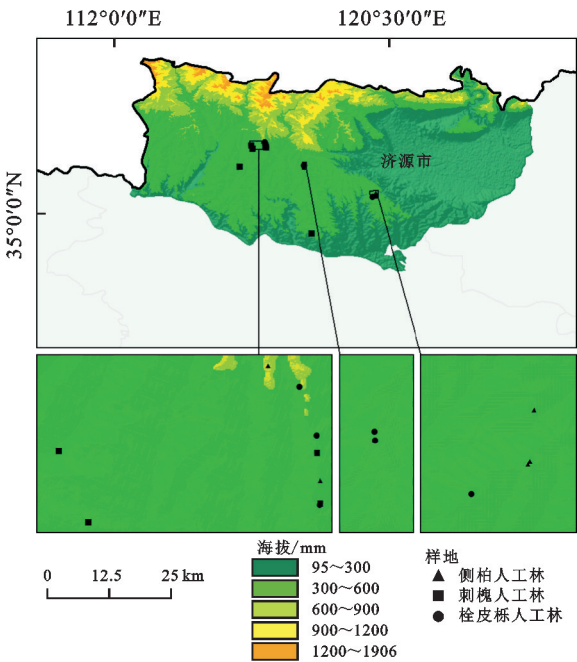


图 1 研究区及样地位置

Fig. 1 Location map of study area and the plots

表 1 林分基本情况

Table 1 Basic situation of the stands

林分 类型	样地 数量	林龄/ a	平均 胸径/cm	平均 树高/m	林分密度/ (株·hm ⁻²)	林下主要植物种类
侧柏人工林	5	30~52	7.22~13.37	5.88~9.35	2100~3500	荆条(<i>Vitex negundo</i> var. <i>heterophylla</i>)、胡枝子(<i>Leapedeza bicolor</i> , Turcz)、荩草(<i>Arthraxon hispidus</i>)
栓皮栎人工林	6	30~55	7.59~11.79	6.68~8.82	1700~3300	荆条(<i>Vitex negundo</i> var. <i>heterophylla</i>)、茜草(<i>Rubia cordifolia</i>)
刺槐人工林	6	20~50	7.76~11.96	7.34~11.41	2300~3400	荆条(<i>Vitex negundo</i> var. <i>heterophylla</i>)、酸枣(<i>Ziziphus jujuba</i> var. <i>spinosa</i> (Bunge) Hu)、荩草(<i>Arthraxon hispidus</i>)、隐子草(<i>Cleistogenes chinensis</i>)

物种多样性指数:Simpson 指数:

$$D=1-\sum\left(\frac{N_i}{N}\right)^2$$

(1)

Shannon-wiener 多样性指数:

$$H'=-\sum_{i=1}^SP_i\ln P_i$$

(2)

$$P_i=\frac{n_i}{N}$$

(3)

式中: N_i 表示第 i 个物种的个数; N 表示所有物种的总个体数; P_i 表示第 i 个物种相对于所有物种的丰富度(即个体数/总个体数); S 代表样本中物种的种类数。

1.2 森林健康评价指标体系建立

综合以往研究可知,森林健康受多种指标影响,包括林木个体胸径、树高、单位面积蓄积量等林分生产力指标,土壤因子(土壤水分、土壤孔隙度、土壤养分等)、地形因子(坡度、坡向、海拔等)、环境因子(大气温度、湿度、太阳辐射等)等立地条件指标,林分郁闭度、灌木层和草本层多样性等群落结构指标,以及

森林火险等级、更新层多样性和森林病虫害程度等稳定性与可持续能力指标^[3,6,13,16-19]。其中,林分生产力指标代表了林木个体生长状况,立地条件因子指标反映了当前林木的生长环境,群落结构指标体现了森林对环境的适应性,而稳定性与可持续能力指标直接代表了当前森林的健康状况。但考虑到研究区 3 种人工林土壤水分条件、地形因子和环境因子类似,且均无病虫害等,因此本着科学性、可操作性、系统性与层次性相结合、主导要素的原则,共选取了上述 4 个一级指标和 21 个二级指标构成森林健康评价体系(表 2)。其中,更新等级结合实际林下更新状况将更新密度进行划分得到,将每公顷更新株数大于等于 3 000 株、大于等于 1 000 株且小于 3 000 株和 1 000 株以下分别赋值 1,2,3。

1.3 森林健康评价模型

本研究的健康评价模型参考张顺祥等^[3]使用的方法,通过主成分分析法得出各样地的主成分得分,使用 K-均值聚类对各样地的主成分得分进行聚类分

析,并使用判别分析对聚类分析进行验证。为了消除量纲,进行主成分分析前需进行标准化处理。对标准化数据进行主成分分析,确定选取主成分的个数 i (选取的主成分特征值 >1.000 ,累计贡献率 $>80.00\%$),然后计算各参评因子的主成分特征向量(公式 4),通过各个主成分特征向量可以对每个样地分别建立 i 个主成分方程,进而可以得出各样地的 i 个主成分得分值(公式

5)。然后根据所有样地主成分的平均值和每个主成分的贡献率作为权重构造的综合评价函数,以综合评价函数确定各分类的森林健康等级。本文将森林健康划分为 4 个等级,为“健康”“亚健康”“中健康”和“不健康”。最后,基于各主成分得分值建立判别函数(公式 6),利用判别函数对样地进行归类,通过归类结果对聚类分析结果进行评判^[3,12]。

表 2 健康评价指标体系

Table 2 Index system of health evaluation

一级指标	二级指标	指标编号	平均值	最大值	最小值	变异系数/%
林分生产力	胸径/cm	X_1	9.89	13.37	7.22	18.68
	树高/m	X_2	8.21	11.41	5.88	15.52
	枝下高/m	X_3	2.61	4.92	1.29	36.85
	单位面积蓄积量/($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)	X_4	99.52	192.57	54.38	42.05
	株数密度/(株 $\cdot \text{hm}^{-2}$)	X_5	2829	3500	1700	18.27
立地条件	土壤有机质/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	X_6	23.92	32.52	7.48	26.91
	土壤全 N 含量/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	X_7	0.36	0.69	0.08	41.73
	土壤全 P 含量/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	X_8	0.53	1.28	0.31	45.57
	土壤全 K 含量/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	X_9	34.33	47.58	23.50	22.35
	土壤容重/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	X_{10}	1.27	1.46	1.01	10.82
群落结构	郁闭度	X_{11}	0.73	0.90	0.40	18.32
	灌木层 Simpson 指数	X_{12}	0.50	0.95	0.25	39.06
	灌木层 Shannon-Wiener 指数	X_{13}	0.66	1.42	0.12	51.49
	草本层 Simpson 指数	X_{14}	1.09	1.23	1.00	7.01
	草本层 Shannon-Wiener 指数	X_{15}	1.39	2.61	0.23	48.00
稳定性与可持续能力	森林火险指数	X_{16}	3.0	3.6	2.4	10.99
	灌木盖度/%	X_{17}	23	67	5	85.79
	草本盖度/%	X_{18}	12	32	2	65.89
	更新等级	X_{19}	1.59	3.00	1.00	44.85
	更新层 Simpson 指数	X_{20}	0.60	0.95	0.30	40.04
	更新层 Shannon-Wiener 指数	X_{21}	0.68	1.27	0.12	57.25

主成分特征向量及得分计算公式:

$$\beta_{ij} = \frac{X_{ij}}{\sqrt{a_i}} \quad (i=1,2,3,\dots,8; j=1,2,3,\dots,21) \quad (4)$$

$$F_i = \sum_{j=1}^{21} \beta_{ij} Z X_j \quad (i=1,2,3,\dots,8; j=1,2,3,\dots,21) \quad (5)$$

式中: β_{ij} 为第 i 个主成分第 j 个指标的特征向量; X_{ij} 表示第 i 个主成分第 j 个指标的因子载荷量,因子载荷值反映了该指标与该主成分的相关程度,其为正值则表明为正相关,为负值则为负相关,其绝对值与 1 越近,说明相关性越高; a_i 表示第 i 个主成分的特征根; $Z X_j$ 表示各指标标准化后的数值; F_i 为第 i 个主成分得分。

判别函数计算公式:

$$g_k = b_{0k} + b_{ik} f_i \quad (6)$$

式中: g_k 为第 k 个判别函数; b_{0k} 为第 k 个判别函数的

常数项; b_{ik} 为第 k 个判别函数第 i 个主成分系数。

1.4 数据处理

物种多样性指数使用软件 RStudio(R4.0.3),主成分分析、聚类分析和判别分析数据使用 SPSS 26.0。其他计算使用软件 Excel 2021 完成。

2 结果与分析

2.1 主成分分析结果

2.1.1 主成分特征根及方差贡献率 对调查得到的原始数据做标准化处理(Z-score 法),缺失值使用与其同树种该指标平均值代替。然后对标准化后的数据进行 Bartlett 检验。检验结果表明,Bartlett 检验卡方值为 1 315.930,且达到极其显著水平($p < 0.01$),表明该样本满足进行主成分分析的条件。

主成分分析结果显示:第 1 个主成分的特征值为 4.649,解释了总变异的 22.138%;第 2 个主成分的特征根为 4.007,解释了总变异的 19.079%;第 3 个主成

分的特征根为 2.481,解释了总变异的 11.813%;其余变量依次类推。其中前 8 个主成分的特征值均>1.000,且其累积贡献率已达 89.815% > 80.00%,可以认为前 8 个主成分包含了原始数据的绝大部分信息,符合主成分分析的条件(表 3)。

表 3 主成分的特征根及方差贡献率
Table 3 Characteristic root and contribution rate of principal components

主成分	特征值	贡献率/%	累积贡献率/%
1	4.649	22.138	22.138
2	4.007	19.079	41.217
3	2.481	11.813	53.030
4	2.121	10.099	63.129
5	1.757	8.369	71.498
6	1.597	7.603	79.101
7	1.204	5.732	84.833
8	1.046	4.983	89.815

2.1.2 因子载荷矩阵及得分 因子载荷值反映了指标与主成分的相关程度,其为正值则表明为正相关,为负值则为负相关,其绝对值与 1 越近,说明相关性越高。由 21 个指标的因子载荷矩阵可知,与第 1 至 8 个

主成分正效应最大的分别是 X_2 (树高), X_{21} (更新层 Shannon-Wiener 指数), X_{12} (灌木层 Simpson 指数), X_{18} (草本盖度), X_{11} (林分郁闭度), X_3 (枝下高), X_{10} (土壤容重), X_{17} (灌木盖度),负效应最大的分别是 X_{13} (灌木层 Shannon-Wiener 指数), X_{20} (更新层 Simpson 指数), X_{13} (灌木层 Shannon-Wiener 指数), X_5 (株数密度), X_{15} (草本层 Shannon-Wiener 指数), X_{14} (草本层 Shannon 指数), X_8 (土壤全 P 含量)和 X_7 (土壤全 N 含量)(表 4),可以看出林分生产力、土壤因子、群落结构、群落稳定性与可持续能力 4 个方面的指标共同反映了林分的森林健康状况。其中,从对整体影响最大的第 1 主成分因子载荷量可以看出,对森林健康正向影响较大的因子分别为 X_2 (树高), X_1 (胸径), X_9 (土壤全 K 含量), X_{16} (森林火险指数),这说明森林群落中树木个体良好的生长状况以及土壤养分中 K 含量能够促进林分整体趋于稳定性。对森林健康负向影响较大的因子分别为 X_{13} (灌木层 Shannon-Wiener 指数), X_6 (土壤有机质)和 X_5 (株数密度),说明灌木层的物种多少,土壤养分中有机质含量以及林木的种植密度对森林健康的潜在负影响较大。

表 4 21 个指标的因子载荷矩阵
Table 4 Factor loading matrix of 21 indicators

指标	主成分因子载荷量							
	1	2	3	4	5	6	7	8
X_1	0.729	0.506	-0.379	0.031	0.122	0.103	0.056	0.023
X_2	<u>0.787</u>	0.086	-0.323	-0.167	0.015	0.077	0.179	-0.269
X_3	0.034	0.534	-0.019	0.390	0.149	<u>0.651</u>	0.187	-0.203
X_4	0.612	0.375	-0.383	-0.280	0.279	0.299	0.244	0.088
X_5	-0.502	-0.461	0.166	<u>-0.425</u>	0.243	0.304	0.162	0.304
X_6	-0.556	0.370	0.417	-0.320	0.160	0.238	-0.133	-0.120
X_7	-0.453	-0.001	0.305	-0.171	0.663	0.197	-0.014	<u>-0.404</u>
X_8	0.552	0.229	0.180	0.466	0.131	-0.011	<u>-0.479</u>	0.122
X_9	0.666	-0.368	0.365	0.047	-0.047	0.053	-0.290	-0.149
X_{10}	0.467	-0.392	0.416	0.318	0.010	-0.142	<u>0.395</u>	-0.259
X_{11}	0.264	-0.141	0.127	0.177	<u>0.699</u>	0.237	-0.202	0.389
X_{12}	0.236	0.160	<u>0.789</u>	-0.172	-0.270	0.126	0.187	0.134
X_{13}	<u>-0.557</u>	-0.357	<u>-0.525</u>	0.162	0.243	-0.125	-0.311	-0.142
X_{14}	-0.200	0.319	0.387	0.223	0.316	<u>-0.513</u>	0.377	0.271
X_{15}	0.024	0.622	0.481	0.231	<u>-0.314</u>	0.266	-0.323	0.060
X_{16}	0.615	-0.446	0.170	-0.324	0.118	0.042	0.111	0.090
X_{17}	-0.398	0.494	-0.352	0.113	-0.252	0.221	0.156	<u>0.425</u>
X_{18}	-0.288	0.200	0.012	<u>0.810</u>	0.249	-0.137	0.273	-0.085
X_{19}	-0.493	0.548	0.038	-0.147	-0.216	0.095	0.078	-0.291
X_{20}	-0.170	<u>-0.760</u>	-0.047	0.356	-0.205	0.416	0.093	0.047
X_{21}	0.144	<u>0.776</u>	0.033	-0.340	0.226	-0.427	-0.125	-0.017

注:表中标有下划线的数字表示对各对应主成分影响最大的相关指标。

表 5 各样地的 8 个主成分得分
Table 5 Eight principal component scores of each plot

林分 类型	样地 编号	主成分							
		1	2	3	4	5	6	7	8
侧柏人工林	1	0.338	0.253	-0.241	0.021	0.092	0.082	0.051	0.023
	2	0.365	0.043	-0.205	-0.115	0.011	0.061	0.163	-0.263
	3	0.016	0.267	-0.012	0.268	0.112	0.515	0.171	-0.198
	4	0.284	0.187	-0.243	-0.192	0.210	0.237	0.222	0.086
	5	-0.233	-0.230	0.105	-0.292	0.184	0.241	0.147	0.297
	6	-0.258	0.185	0.264	-0.220	0.121	0.189	-0.122	-0.117
栓皮栎人工林	7	-0.210	0.000	0.194	-0.117	0.500	0.156	-0.013	-0.395
	8	0.256	0.114	0.114	0.320	0.099	-0.009	-0.436	0.120
	9	0.309	-0.184	0.232	0.032	-0.036	0.042	-0.264	-0.146
	10	0.217	-0.196	0.264	0.218	0.008	-0.112	0.360	-0.253
	11	0.122	-0.070	0.081	0.121	0.528	0.188	-0.184	0.380
刺槐人工林	12	0.109	0.080	0.501	-0.118	-0.203	0.100	0.170	0.131
	13	-0.258	-0.178	-0.333	0.111	0.183	-0.099	-0.284	-0.139
	14	-0.093	0.160	0.246	0.153	0.238	-0.406	0.343	0.265
	15	0.011	0.311	0.305	0.159	-0.237	0.210	-0.294	0.059
	16	0.285	-0.223	0.108	-0.222	0.089	0.033	0.102	0.088
	17	-0.185	0.247	-0.223	0.078	-0.190	0.175	0.142	0.416

根据公式(4),(5),(6)以及表 4,可以计算出主成分各因子的得分(表 5)。

2.2 基于聚类分析的森林健康评价

基于对样地主成分的各因子得分进行 K-均值聚类,分类数设置为 4,根据各分类的最终聚类中心判断出,类别 1,2,3,4 分别表示森林健康等级的“中健康”“不健康”“健康”和“亚健康”,分类结果见表 6。由此可知,在调查的 17 块样地中森林健康等级处于“健康”等级的样地有 5 块,占总样地数的 29.4%,处于“亚健康”等级的样地有 3 块,占总样地数的 17.6%,处于“中健康”状态的等级有 1 块,占总样地数的 5.9%,处于“不健康”等级的样地有 8 块,占总样地数的 47.1%。在本次调查的样地中,不同树种人工林的森林健康状况呈现出较大差异(图 2),侧柏人工林样地中“健康”和“亚健康”等级占比为 60.0%，“中健康”和“不健康”等级占比为 40.0%，侧柏人工林整体健康程度良好;栓皮栎人工林样地“健康”等级占比 16.7%，“亚健康”等级占比为 16.7%，“不健康”等级占比为 66.7%，栓皮栎人工林整体健康程度较差;刺槐人工林“健康”和“不健康”等级占比均为 50.0%，刺槐人工林整体健康程度一般。

表 6 样地的聚类分析结果

Table 6 The clustering analysis results of the sample plots					
样地号	分类	样地号	分类	样地号	分类
侧柏 1	1	栓皮栎 1	2	刺槐 1	2
侧柏 2	2	栓皮栎 2	2	刺槐 2	2
侧柏 3	4	栓皮栎 3	4	刺槐 3	2
侧柏 4	4	栓皮栎 4	2	刺槐 4	3
侧柏 5	3	栓皮栎 5	2	刺槐 5	3
		栓皮栎 6	3	刺槐 6	3

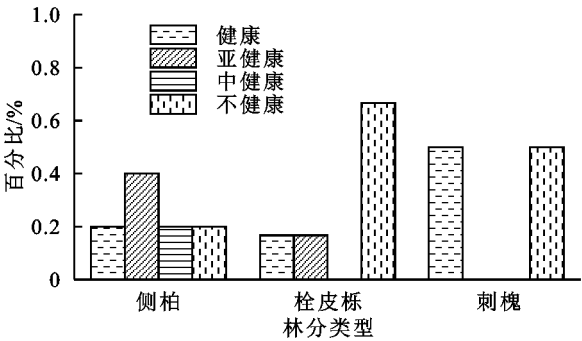


图 2 不同林分类型森林健康评价等级
Fig. 2 Forest health assessment levels for different forest stand types

2.3 基于判别分析的森林健康评价

根据各样地 8 个主成分得分和聚类分析结果,采用 Fisher 线性判别以检验聚类分析的结果。结果显示,判别分析共建立了 3 个判别函数,分别为:

$$\begin{aligned} g_1 &= -1.762f_1 + 0.460f_2 + 1.227f_3 - 0.892f_4 - \\ &\quad 0.978f_5 + 0.079f_6 + 0.414f_7 + 1.655f_8 \\ g_2 &= -0.452f_1 - 1.110f_2 + 0.535f_3 + 0.284f_4 + \\ &\quad 1.135f_5 + 0.115f_6 - 0.242f_7 + 0.203f_8 \\ g_3 &= 0.577f_1 + 0.661f_2 + 0.952f_3 - 0.818f_4 + \\ &\quad 0.417f_5 - 0.772f_6 - 0.203f_7 + 0.005f_8 \end{aligned}$$

通过 Wilks' Lambda 对两个判别函数的显著性检验可知,3 个判别函数在 0.05 的显著水平上都是显著的(表 7)。此外,表 8 显示第一判别函数解释了 63.9% 的方差,与因变量具有较强的相关性,相关系数为 0.973,说明第一判别函数是十分重要的分类维度,第二判别函数解释了 19.9% 的方差,与因变量也具有较强的相关性,相关系

数为 0.920,说明也是重要的分类维度,第 3 个判别函数解释了 16.2%的方差,与因变量也具有较强的相关性,相关系数为 0.904,说明也是重要的分类维度,3 个判别式能够较好地地区分各类。

表 7 Wilks' Lambda
Table 7 Test of Wilks' Lambda

函数检验	Lambda	卡方	自由度	显著性
1 至 3	0.002	64.933	24	0.000
2 至 3	0.028	35.684	14	0.001
3	0.183	16.975	6	0.009

表 8 Fisher 判别函数特征值
Table 8 Fisher discriminant function eigenvalues

函数	特征值	方差比/%	累计比/%	相关性
第一判别函数	17.633	63.9	63.9	0.973
第二判别函数	5.494	19.9	83.8	0.920
第三判别函数	4.460	16.2	100.0	0.904

基于以上分析结果,将各样地的 8 个主成分得分值分别前代入 3 个判别函数中,可得到各样地的判别分析分类结果。结果显示判别分析对各样地的健康状况分类结果和聚类分析一致,准确率为 100%(表 9),表明聚类分析对各样地健康状况的分类判断是准确的。

表 9 不同林分健康等级验证结果
Table 9 Verification results of different forest lands

参数	健康等级	预测组				合计
		健康	亚健康	中健康	不健康	
计数	健康	5	0	0	0	5
	亚健康	0	3	0	0	3
	中健康	0	0	1	0	1
	不健康	0	0	0	8	8
占比/%	健康	100.0	0	0	0	100.0
	亚健康	0	100.0	0	0	100.0
	中健康	0	0	100.0	0	100.0
	不健康	0	0	0	100.0	100.0

3 讨论

森林健康评价是进行森林可持续经营的前提,因此科学的森林健康评价方法对整个森林后续发展具有重要意义。森林健康评价的指标体系最早由 Costanza 等^[20]提出,包含生态系统结构、活力和恢复能力。经过发展,美国提出了更全面的评价指标,但以经济效益为最终追求^[21-22]。我国学者在该领域也有重大突破,但仍存在指标分类和权重问题^[8,12,23]。总体来说,目前关于森林健康评价的研究较多,但森林评价指标体系尚未形成,同时森林本身具有复杂性、动态性的特点,导致部分指标数据测定较为困难,这也导致森林健康的评价结果出现一定的差异性。

本研究在参考以往森林健康评价的方法基础上,

根据试验地实际情况选取了林分生产力、立地条件、群落结构和稳定性与可持续能力 4 个一级指标和 21 个二级指标构成更加全面的森林健康评价体系,并综合使用主成分分析法、聚类分析法和判别分析法等 3 种多元统计方法对研究区几种典型人工林健康状况进行定量分析和评价。但在以往研究中,如赵勇钧等^[24]选取森林生产力、土壤条件和生态系统稳定性 3 个方面的 13 个指标对马尾松人工林进行评价,刘恩田等^[25]选择林分结构、植物多样性和林分稳定性 3 个方面的 7 个指标对刺槐林进行评价,黄国胜等^[26]从林分活力、林分结构、森林恢复力抵抗力 3 个方面的 9 个指标对整个三峡库区进行森林健康评价等,仅考虑了不同方面中的 3~4 个二级指标,而森林健康状况受多种因素影响,如土壤因子中土壤物理性质及化学性质,植物多样性指标中灌木层、草本层和更新层物种多样性和均匀度,稳定性指标中森林防火等级等都是影响森林健康水平的潜在因子,因此应尽可能多地考虑相关各因子的共同作用。从本研究主成分因子载荷量分析中也可以看出,3 种林型人工林森林健康受多种因素的综合影响,这与张顺祥^[3]、罗鹏飞^[12]等研究结论均一致。

在调查的样地中,森林健康等级处于“健康”“亚健康”“健康”和“不健康”等级的样地分别占总样地数的 29.4%,17.6%,5.9%,47.1%。其中,刺槐人工林样地一半处于健康状态,一半处于不健康状态,栓皮栎人工林中有 66.7%的样地处于不健康状态,而侧柏人工林中只有 20%样地处于不健康状况,80.0%样地处于中健康或亚健康或健康状态,这说明目前该研究区中侧柏人工林健康程度最优,其次为刺槐人工林,栓皮栎人工林最差。有研究学者表明,刺槐蒸腾耗水量大于侧柏,在干旱半干旱地区常因耗损深层地下水而导致土壤出现严重的干燥化现象^[27-29],这与本研究结论稍有差异。尽管该研究区属于半干旱区,但可能受树种的林龄、种植密度、地形条件等条件差异而导致林分生长状况出现不同。目前,研究区刺槐人工并未全部出现退化现象,但考虑其较高的耗水特性,需要继续动态观测。尽管栓皮栎是当地的乡土树种,当前出现大面积不健康状况,可考虑增强人工抚育强度,通过控制林分密度、间伐采伐、选择优良树种、人工促进天然、林地清理、土壤保育等森林经营关键技术来改善林分结构,提高森林质量。侧柏人工林大部分处于良好状态,但也应适当采取间伐、卫生伐等人工森林抚育措施,提高森林的稳定性。

4 结论

(1) 从对整体影响最大的第 1 主成分因子载荷

量可以看出,对森林健康正向影响较大的因子分别为树高、胸径、土壤全 K 含量,对森林健康负向影响较大的因子分别为灌木层 Shannon-Wiener 指数、土壤有机质和株数密度。

(2) 在调查样地中森林健康等级处于“健康”“亚健康”“中健康”和“不健康”等级的样地分别占总样地数的 29.4%,17.6%,5.9%,47.1%,说明目前研究区森林健康状况一般。

(3) 侧柏人工林样地中有 20%处于不健康状态,80.0%处于中健康或亚健康或健康状态,栓皮栎人工林中有 66.7%的样地处于不健康状态,刺槐人工林中有一半样地处于健康状态,一半处于不健康状态,说明目前研究区侧柏人工林健康程度最优,其次为刺槐人工林,栓皮栎人工林最差。

参考文献(References):

- [1] Trumbore S, Brando P, Hartmann H. Forest health and global change[J]. Science, 2015,349(6250):814-818.
- [2] 姚慧芳,卢杰,屈兴乐,等.藏东南华山松林下灌草主要植物的生态位特征[J].林业资源管理,2021(6):69-75.
Yao H F, Lu J, Qu X L, et al. Niche characteristics of main shrub and grass plants under *Pinus armandii* forest in southeast Tibet[J]. Forest Resources Management, 2021(6):69-75.
- [3] 张顺祥,刘金良,赵忠.基于多元统计分析的永寿县刺槐人工林健康评价研究[J].西北林学院学报,2016,31(2):109-114.
Zhang S X, Liu J L, Zhao Z. Health assessment on black locust plantations in Yongshou County based on multivariate statistical analysis[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2016,31(2):109-114.
- [4] 于鹏跃,魏江生,包亮,等.基于 Landsat8 OLI 的内蒙古大兴安岭森林健康评价遥感模型研究[J].内蒙古农业大学学报:自然科学版,2021,42(6):15-22.
Yu P Y, Wei J S, Bao L, et al. Remote sensing model of forest health assessment in Greater Khingan Range, Inner Mongolia based on Landsat8 OLI[J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University(Natural Science Edition), 2021,42(6):15-22.
- [5] Payn T, Carnus J M, Freer-Smith P, et al. Changes in planted forests and future global implications[J]. Forest Ecology and Management, 2015,352:57-67.
- [6] 徐梅,关庆伟.徐州侧柏人工林健康评价研究[J].西南林业大学学报,2014,34(2):39-43,54.
Xu M, Guan Q W. Health assessment of *Platycladus orientalis* plantation in Xuzhou[J]. Journal of Southwest Forestry University, 2014,34(2):39-43,54.
- [7] 郑学良,陈丽华,李洪洋,等.基于水源涵养功能的辽东防护林体系健康评价[J].中国水土保持科学,2020,18(2):102-110.
Zheng X L, Chen L H, Li H Y, et al. Health assessment of Liaodong shelterbelt system based on water conservation[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2020,18(2):102-110.
- [8] 徐来仙,姚兰,郭秋菊,等.鄂西南利中盆地马尾松天然次生林森林健康评价[J].西南林业大学学报:自然科学,2021,41(3):69-77.
Xu L X, Yao L, Guo Q J, et al. Forest health assessment of *Pinus massoniana* natural secondary forest in Lizhong Basin in southwestern Hubei[J]. Journal of Southwest Forestry University: Natural Science, 2021, 41(3):69-77.
- [9] 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.
- [10] Barka I, Lukes P, Bucha T, et al. Remote sensing-based forest health monitoring systems-case studies from Czechia and Slovakia [J]. Central European Forestry Journal, 2018,64(3/4):259-275.
- [11] 刘晓农,宋亚斌,邢元军.基于 SOM 神经网络的新化县森林健康评价[J].中南林业科技大学学报,2017,37(4):21-26.
Liu X N, Song Y B, Xing Y J. Forest health assessment of Xinhua County based on SOM neural network [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2017,37(4):21-26.
- [12] 罗鹏飞,江海斌,谭尹豪,等.基于主成分分析与系统聚类的森林健康评价研究[J].林业与环境科学,2021,37(5):69-75.
Luo P F, Jiang H B, Tan Y H, et al. Forest health evaluation based on principal component analysis and system clustering [J]. Forestry and Environmental Science, 2021,37(5):69-75.
- [13] 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.
- [14] Ramsfield T D, Bentz B J, Faccoli M, et al. Forest health in a changing world: Effects of globalization and climate change on forest insect and pathogen impacts

- [J]. *Forestry*, 2016, 89(3): 245-252.
- [15] 骆有庆, 刘宇杰, 黄华国, 等. 应用遥感技术评价森林健康的途径和方法[J]. *北京林业大学学报*, 2021, 43(9): 1-13.
- Luo Y Q, Liu Y J, Huang H G, et al. Pathway and method of forest health assessment using remote sensing technology[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2021, 43(9): 1-13.
- [16] 朱柱, 杨海龙, 黄乾, 等. 青海高寒黄土区典型水源涵养林健康评价[J]. *浙江农林大学学报*, 2019, 36(6): 1166-1173.
- Zhu Z, Yang H L, Huang Q, et al. Health evaluation of typical water conservation forests in the alpine loess area of Qinghai[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2019, 36(6): 1166-1173.
- [17] 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.
- [18] 王雄宾, 余新晓, 谷建才, 等. 华北土石山区油松林生态系统健康评价[J]. *中国水土保持科学*, 2009, 7(1): 97-102.
- Wang X B, Yu X X, Gu J C, et al. Ecosystem health assessment of the *Pinus tabulaeformis* forest in earch-rocky mountain area of North China[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2009, 7(1): 97-102.
- [19] 闫晋升, 王永东, 姜泊远, 等. 哈萨克斯坦首都努尔苏丹人工林健康评价[J]. *干旱区研究*, 2021, 38(5): 1474-1483.
- Yan J S, Wang Y D, Lou B Y, et al. Health assessment of plantations in Nursultan, capital of Kazakhstan[J]. *Arid Zone Research*, 2021, 38(5): 1474-1483.
- [20] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. *Nature*, 1997, 387(6630): 253-260.
- [21] Bennett D D, Tkacz B M. Forest health monitoring in the United States: A program overview[J]. *Australian Forestry*, 2008, 71(3): 223-228.
- [22] Bal T L. Forest health detectives[J]. *The American Biology Teacher*, 2014, 76(8): 536-541.
- [23] 周泉, 叶茂, 赵凡凡. 基于 VOR 模型的阿尔泰山林区森林生态系统健康评价[J]. *甘肃农业大学学报*, 2021, 56(3): 137-148.
- Zhou Q, Ye M, Zhao F F. Ecosystem health assessment based on the VOR model analysis in forest area of Altai Mountains[J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2021, 56(3): 137-148.
- [24] 赵勇钧, 谢阳生, 王建军, 等. 基于多元统计分析的马尾松人工林健康评价研究: 以广西热带林业实验中心为例[J]. *中南林业科技大学学报*, 2019, 39(7): 100-107.
- Zhao Y J, Xie Y S, Wang J J, et al. Health assessment of *Pinus massoniana* plantation on multivariate statistical analysis: A case study of Guangxi tropical forestry experimental center[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2019, 39(7): 100-107.
- [25] 刘恩田, 赵忠, 宋西德, 等. 渭北黄土高原刺槐林健康评价指标体系的构建[J]. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2010, 38(10): 67-75.
- Liu E T, Zhao Z, Song X D, et al. Construction of index system for stand health assessment of locust forest in the Weibei Loess Plateau[J]. *Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition*, 2010, 38(10): 67-75.
- [26] 黄国胜, 王雪军, 李晓靖. 三峡库区森林健康评价[J]. *江西农业大学学报*, 2017, 39(2): 334-341.
- Huang G S, Wang X J, Li X J. Health assessment of forests in three-gorge reservoir region[J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2017, 39(2): 334-341.
- [27] 杨良辰, 张健强, 杨新兵, 等. 华北土石山区 7 种优势乔木树种耗水分析[J]. *中南林业科技大学学报*, 2019, 39(3): 69-75.
- Yang L C, Zhang J Q, Yang X B, et al. Water consumption analysis on seven dominant arbor tree species in earth and rock mountains in northern China[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2019, 39(3): 69-75.
- [28] 李蓝君, 宋孝玉, 夏露, 等. 黄土高原沟壑区典型造林树种蒸散发对气候变化的响应[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(20): 148-159.
- Li L J, Song X Y, Xia L, et al. Response of evaporation and transpiration of typical afforestation tree species to climate changes in gully region of Loess Plateau[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(20): 148-159.
- [29] 杨磊, 卫伟, 莫保儒, 等. 半干旱黄土丘陵区不同人工植被恢复土壤水分的相对亏缺[J]. *生态学报*, 2011, 31(11): 3060-3068.
- Yang L, Wei W, Mo B R, et al. Soil water deficit under different artificial vegetation restoration in the semi-arid hilly region of the Loess Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(11): 3060-3068.