北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

基于多维多样性的干旱半干旱区森林健康评价及驱动因子分析

张子童 李春霞 郭邵华 徐雪蕾

Assessment of forest health and analysis of driving factors in arid and semi-arid regions based on multidimensional diversity

Zhang Zitong, Li Chunxia, Guo Shaohua, Xu Xuelei

引用本文:
张子童, 李春霞, 郭邵华, 徐雪蕾. 基于多维多样性的干旱半干旱区森林健康评价及驱动因子分析[J]. 北京林业大学学报, 2026, 48(10):196–208. doi: 10.12171/j.1000–1522.20260251
Zhang Zitong, Li Chunxia, Guo Shaohua, Xu Xuelei. Assessment of forest health and analysis of driving factors in arid and semi-arid regions based on multidimensional diversity[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(10):196–208. doi: 10.12171/j.1000–1522.20260251

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20260251

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

宁夏罗山5种典型林型多维度植物多样性及群落构建过程
Multidimensional plant diversity and community construction process of five typical forest types in Luo Mountain, Ningxia of northwestern China
北京林业大学学报, 2025, 47(9): 46–56. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250202

基于ChatGPT的科尔沁沙地杨树人工林健康评价
Health assessment of poplar plantations in the Horqin Sandy Land, Inner Mongolia of northern China based on ChatGPT
北京林业大学学报, 2025, 47(7): 117–128. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250014

基于Landsat TM数据的大兴安岭盘古林场森林健康评价
Forest health assessment of Pangu Forest Farm based on Landsat TM in Great Xing’an Mountains of northeastern China
北京林业大学学报, 2021, 43(4): 87–99. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200067

应用遥感技术评价森林健康的路径和方法
Pathway and method of forest health assessment using remote sensing technology
北京林业大学学报, 2021, 43(9): 1–13. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210107

青海省东北部森林林下物种多样性的驱动因素
Driving factors of understory species diversity in forest on the northeastern Qinghai Province of northwestern China
北京林业大学学报, 2024, 46(6): 28–37. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220334

黄土高原生态系统健康时空演变格局及水文循环驱动分析
Spatiotemporal evolution of ecosystem health and its hydrological driving mechanisms in the Loess Plateau
北京林业大学学报, 2026, 48(5): 123–134. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250325

DOI:10.12171/j.1000−1522.20260251

基于多维多样性的干旱半干旱区森林健康评价及驱动因子分析

张子童 李春霞 郭邵华 徐雪蕾
（宁夏大学林业与草业学院林木资源高效生产全国重点实验室，宁夏 银川 750021）

摘要:【目的】为评价宁夏罗山的森林健康状况，解析干旱半干旱地区森林健康的驱动机制，本文构建了森林健康评价指标体系并识别主要驱动因素，以期为该区域森林资源保护与生态修复提供科学依据。**【方法】**本研究以罗山 5 种主要森林类型（青海云杉纯林、青海云杉油松混交林、油松纯林、油松山杨混交林、山杨纯林）为研究对象，整合物种多样性、系统发育多样性与功能多样性指标，基于林分生产力、生物多样性、立地条件和稳定性 4 个方面，构建森林健康评价指标体系，运用主成分分析法计算森林健康指数、聚类分析法划分森林健康等级，并通过回归分析和弹性网络分析探究影响健康指数的关键驱动因子。**【结果】**(1)研究区森林约 26.67% 处于“健康”状态，33.33% 处于“亚健康”状态，“中健康”和“不健康”状态均占 20.00%；(2)混交林的健康指数显著高于纯林($P < 0.05$)；(3)单位面积蓄积量、物种多样性指数、系统发育多样性指数、功能多样性指数是影响森林健康程度的最主要因素；(4)单位面积蓄积量、物种多样性指数、系统发育多样性指数的标准化系数值排序较高。**【结论】**罗山森林健康是生产力与多维多样性协同作用的结果。在干旱半干旱区森林健康评价中，引入多维多样性指标有助于提升评价体系对生态系统稳定性的表征能力。

关键词：宁夏罗山；森林健康评价；多维多样性；森林健康驱动因子；干旱半干旱区；生态系统
中图分类号：S731 **文献标志码：**A **文章编号：**1000−1522(2026)10−0196−13
引文格式：张子童，李春霞，郭邵华，等. 基于多维多样性的干旱半干旱区森林健康评价及驱动因子分析［J］. 北京林业大学学报，2026，48(10)：196−208. Zhang Zitong, Li Chunxia, Guo Shaohua, et al. Assessment of forest health and analysis of driving factors in arid and semi-arid regions based on multidimensional diversity[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(10): 196−208.

Assessment of forest health and analysis of driving factors in arid and semi-arid regions based on multidimensional diversity

Zhang Zitong Li Chunxia Guo Shaohua Xu Xuelei
(College of Forestry and Prataculture, Ningxia University, State Key Laboratory of Efficient Production of Forest Resources, Yinchuan 750021, Ningxia, China)

Abstract:［**Objective**］To assess the forest health of Luoshan Mountain, Ningxia of northwestern China, and analyze the driving mechanisms of forest health in arid and semi-arid regions, this paper constructs an indicator system for forest health assessment and identifies the key driving factors, with a view to providing a scientific basis for the conservation of forest resources and ecological restoration in this region.［**Method**］This study took five major forest types in Luoshan Mountain (*Picea crassifolia* pure forest, *Picea crassifolia* × *Pinus tabuliformis* mixed forest, *Pinus tabuliformis* pure forest, *Pinus tabuliformis* × *Populus davidiana* mixed forest, and *Populus davidiana* pure forest) as the study subjects. By integrating indicators

收稿日期: 2026−05−20 **修回日期:** 2026−07−01
基金项目: 国家自然科学基金项目(32260421)，宁夏青年科技托举人才培养项目。
第一作者: 张子童。主要研究方向：森林生态。Email: 1365034685@qq.com 地址：750021 宁夏回族自治区银川市西夏区文萃北街 216 号宁夏大学林业与草业学院。
责任作者: 徐雪蕾，副教授。主要研究方向：植物群落生态学、森林植被恢复。Email: xuxuelei@nxu.edu.cn 地址：同上。
本刊网址: https://j.bjfu.edu.cn; https://journal.bjfu.edu.cn

of species diversity, phylogenetic diversity and functional diversity, a forest health evaluation index system was constructed based on four aspects: stand productivity, biodiversity, site conditions and stability. Principal component analysis was employed to calculate the forest health index, and cluster analysis was used to classify forest health levels. Furthermore, regression analysis and elastic network analysis were conducted to investigate the key drivers influencing the health index. [**Result**] (1) Approximately 26.67% of the forests in the study area was in a 'healthy' state, 33.33% was 'sub-healthy', whilst 'moderately healthy' and 'unhealthy' each accounted for almost 20.00%; (2) The health index of mixed forests was significantly higher than that of pure stands ($P < 0.05$); (3) Standing volume per unit area, species diversity index, phylogenetic diversity index and functional diversity index were the most significant factors influencing forest health; (4) The standardized coefficient values of standing volume per unit area, species diversity index and phylogenetic diversity index were relatively high. [**Conclusion**] Forest health in Luoshan Mountain is the result of synergistic interaction between productivity and multidimensional diversity. In the evaluation of forest health in arid and semi-arid regions, the introduction of multidimensional diversity indices helps to enhance the evaluation system's ability to characterize ecosystem stability and resistance to disturbance.

Key words: Luoshan Mountain in Ningxia; forest health assessment; multidimensional diversity; forest health driving factors; arid and semi-arid regions; ecosystem

森林健康是维持森林结构稳定、保障生物多样性及发挥生态系统功能的重要基础[1]，但在全球气候变化与人为干扰的共同作用下，我国各地区尤其是西北干旱区的森林结构与功能正遭受严重破坏，健康水平与自我修复能力明显下降[2−3]。鉴于此，科学评价干旱区森林健康状况对开展生态修复和保障区域生态安全具有重要意义[4−5]。森林健康评价是兼具科学性与系统性的研究方法，能够通过定量分析从整体上反映森林结构与功能的变化，为区域森林经营决策提供理论依据和实践指导[6−7]。近年来，针对森林健康评价体系的研究已取得显著进展，鉴于区域间研究目的和研究对象差异显著，评价指标与评价方法也呈现出多样化，尚未形成统一标准[8]。目前，评价指标主要包括森林活力、结构、抗逆性、恢复力、生态功能和环境等方面[9]；评价方法主要有层次分析法、主成分分析和聚类分析法、灰色关联度法、模糊综合评价法等多种统计模型，并逐步向人工智能和遥感技术拓展。例如申小娟等[10]、赵金满等[11]分别以甘肃省和塞罕坝自然保护区的人工林为研究对象，运用主成分分析和聚类分析法计算了森林健康指数；郭艳荣等[12]在评价内蒙古中部油松(*Pinus tabuliformis*)人工林时采用了模糊综合评价法，并根据 ChatGPT 大语言模型构建新型评价框架，实现了科尔沁沙地杨树(*Populus* spp.)人工林健康评价方法的优化[13]。但现有研究多侧重于森林健康评价方法的优化和应用研究，而对其形成机制的解析相对不足。

生物多样性作为调控生态系统结构与功能的关键因素，在维持森林生态系统健康和稳定方面具有核心作用[14]。近年来，多维多样性研究逐渐发展，生物多样性体系已由传统单一维度转向物种多样性、系统发育多样性与功能多样性等多维度[15]。物种多样性通过资源分配与生态位互补机制调控群落生产力与结构稳定性[16]；系统发育多样性依托于物种进化谱系，通过物种在系统发育树中的位置及分支长度表征群落物种间进化分化与潜在功能差异[17]；功能多样性则从性状层面揭示竞争排斥、生境胁迫等因素对群落结构及生态系统功能的驱动作用[18]。因此，整合分析 3 个维度的生物多样性有助于全面阐释生态系统结构特征与功能格局。然而，现有森林健康评价研究多局限于物种多样性指数，而缺乏对系统发育和功能多样性方面的综合考量，导致评价体系中缺少物种功能分化及进化信息，难以充分反映森林生态系统的健康程度。此外，森林健康不仅受内部结构特征的影响，还受到外部干扰与环境约束的共同调控。基于此，本研究将物种、系统发育和功能多样性统一纳入森林健康评价指标体系，同时结合生产力、立地条件及稳定性多视角构建指标体系，系统解析干旱半干旱地区森林健康的驱动机制，对于完善区域森林健康评价理论框架具有重要意义。

宁夏罗山国家级自然保护区地处鄂尔多斯高原西部与黄土高原北部的交汇地带，是宁夏 3 大天然次生林区之一[19]。作为宁夏中部干旱带仅存的生态安全屏障，罗山在区域内承担着重要的水源涵养与生物多样性保护功能[20]。然而，受气候持续干旱化、人为不合理资源开发的双重胁迫，保护区森林生态系统退化趋势显著，整体生态脆弱性突出，亟需开展

系统的森林健康评价及形成机制研究[21]。为此，本研究以罗山 5 种主要森林类型为研究对象，整合物种多样性、系统发育多样性与功能多样性指标，从林分生产力、生物多样性、立地条件及稳定性 4 个方面构建森林健康评价指标体系，通过主成分分析和聚类分析进行森林健康评价，并结合健康指数与评价指标的关系探明森林健康的驱动因素。本研究旨在揭示以下科学问题：干旱半干旱区森林健康的核心驱动因素是什么？多维多样性能否更全面表征森林健康程度，不同维度的多样性在森林健康形成中的相对贡献是否存在差异。研究结果有助于深化对森林健康形成机制的理解，为干旱半干旱区森林健康评估与生态修复实践提供科学支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

宁夏罗山国家级自然保护区（37°11′～37°25′N，106°04′～106°24′E）位于宁夏吴忠市同心县与红寺堡区境内，地处草原与荒漠的过渡区，同时横跨鄂尔多斯高原西部与黄土高原北部两大地貌单元，属于典型的生态交错带，也是宁夏中部区域的最高峰。保护区呈南北条带状延展，全域总面积达 33 710 hm^2，海拔梯度介于 1 560.0～2 624.5 m 之间；该区属温带大陆性气候，四季分明、日照充足、昼夜温差大，年均降水量约 259 mm，蒸发量超过 2 325 mm，干旱缺水是其核心自然特征[22]。区域内土壤以灰褐土和灰钙土为主，森林覆盖率 9.6%；植被类型包含森林、灌丛、草甸、草原，垂直分异特征显著，海拔 2 000 m 以下的阳坡及山麓属暖温带荒漠草原，群落优势物种为锦鸡儿（*Caragana korshinskii*）、红砂（*Reaumuria soongarica*）、猪毛菜（*Salsola collina*）等耐旱矮灌木和草本植物；森林主要集中在阴坡 2 000～2 450 m 海拔区间，油松、山杨（*Populus davidiana*）等为优势建群树种；海拔 2 450 m 以上的高海拔地带则以青海云杉（*Picea crassifolia*）[23]为主。

1.2 样地布设和数据获取

结合保护区植被分布特征，本研究选取区域内 5 种主要的森林类型作为研究对象，包括青海云杉纯林、青海云杉 × 油松混交林、油松纯林、油松 × 山杨混交林以及山杨纯林。为保证试验数据的可靠性，于每种林型设置 3 个 20 m × 20 m 的标准样地，样地间距 ⩾ 20 m，共计 15 个样地。所选样地均远离道路、林缘，具典型性和代表性，海拔、坡度、土壤类型等基本信息见表 1。

在各样地内沿对角线布设 5 个灌木样方（5 m × 5 m），并于每个灌木样方中心设置 1 个草本样方（1 m × 1 m），累计布设灌木、草本样方各 75 个。乔木层调查记录全部树种的株数、树高（m）、胸径（cm）及冠幅（m）；灌木层记录各样方内物种种类、株数、株高（m）、基径（cm）、冠幅（m）及盖度（%）；草本层记录各样方内物种种类、株数、株高（m）及盖度（%）。

在各样地优势物种群落中，随机挑选 5～7 株长势良好、无明显机械损伤与病虫害侵染的个体作为标准植株。每株植株采集 5～7 片形态完整、发育成

表 1 样地基本信息

Tab. 1 Basic information of sample plots

林型	样地编号	海拔/m	坡度/(°)	坡向	郁闭度	灌草盖度/%	土壤类型
青海云杉纯林	YS1	2 546.18	28	阴坡	0.47	32.42	灰褐土
青海云杉纯林	YS2	2 538.03	33	阴坡	0.71	44.92	灰褐土
青海云杉纯林	YS3	2 525.21	35	阴坡	0.61	60.90	灰褐土
青海云杉 × 油松混交林	YS × P1	2 335.17	19	阴坡	0.97	60.68	灰褐土
青海云杉 × 油松混交林	YS × P2	2 327.85	25	阴坡	0.98	45.30	灰褐土
青海云杉 × 油松混交林	YS × P3	2 307.57	29	阴坡	0.94	69.54	灰褐土
油松纯林	P1	2 244.97	6	阴坡	0.96	36.54	灰褐土
油松纯林	P2	2 242.18	27	阴坡	0.88	77.78	灰褐土
油松纯林	P3	2 240.53	6	阴坡	0.75	58.30	灰褐土
油松 × 山杨混交林	SY × P1	2 219.27	14	阴坡	0.97	64.13	灰褐土
油松 × 山杨混交林	SY × P2	2 143.09	6	阴坡	0.91	71.44	灰褐土
油松 × 山杨混交林	SY × P3	2 124.04	6	阴坡	0.97	51.64	灰褐土
山杨纯林	SY1	2 113.04	21	阴坡	0.99	69.70	灰褐土
山杨纯林	SY2	2 111.21	20	阴坡	0.90	83.23	灰褐土
山杨纯林	SY3	2 023.56	15	阴坡	0.99	85.06	灰褐土

熟的健康叶片并平整保存，用于测定 7 项叶功能性状：叶面积、比叶面积、比叶重、叶干物质含量、叶片有机碳、叶片全氮、叶片全磷。其中，叶面积利用叶面积仪测定；比叶面积定义为叶片单面面积与其干质量之比；比叶重为单位叶面积的叶片干质量；叶片干物质含量由叶片干质量与鲜质量的比值计算得出；叶有机碳与叶氮含量采用碳氮元素分析仪测定；叶磷含量采用钼锑抗比色法测定。同时，乔木标准木于不同冠层、不同方位剪取 4 ~ 5 根健壮枝条；灌木标准植株采集 3 根冠层外侧向阳、生长一致的木质化枝条，截取无节疤、无破损的完整茎段用于测定木材密度。采用排水法测定木质部体积，随后置于 65 ℃烘箱中烘干至恒重并称量干重，木材密度为干重与体积的比值。

在每个样地的对角线两端及中心布设 5 个采样点，使用土钻采集 0 ~ 30 cm 土层土样，同一样地土样充分混合后，封装带回实验室，经风干、除杂、研磨、过筛处理后测定土壤理化性质。采用环刀法测定各样方土壤容重与土壤含水量；参照王丽君等[24]的土壤农化分析方法进行土壤有机碳、全氮、全磷的测定。

1.3　评价指标体系构建

森林健康评价体系构建时，应选择兼具全面性与实用性、易于获取且数量精简的指标，以便于管理实践[25]。本研究选取了林分生产力、生物多样性、立地条件、稳定性 4 个方面作为评价指标。

1.3.1　蓄积量

采用二元立木材积方程计算不同树种的材积[26]，将各样地的材积合计后除以样地面积得到该林分单位面积蓄积量（m^3/hm^2），公式如下。

$$V_{YS} = 0.000\,058\,364 D^{1.855\,64} H^{1.085\,06} \tag{1}$$

$$V_{P} = 0.000\,087\,356 D^{1.896\,14} H^{0.964\,73} \tag{2}$$

$$V_{SY} = 0.000\,065\,821 D^{1.931\,70} H^{0.923\,45} \tag{3}$$

式中：D 为单木胸径（cm），H 为单木树高（m），YS 代表青海云杉，P 代表油松，SY 代表山杨。

1.3.2　多样性指数

物种多样性选用 Margalef 丰富度指数（M）、Simpson 指数（D）、Shannon-Wiener 指数（H）、Pielou 均匀度指数（J）来衡量[27]，公式如下：

$$M = (S-1)/\ln N \tag{4}$$

$$D = 1 - \sum P_i^2 \tag{5}$$

$$H = -\sum_{i=1}^{S} (P_i \ln P_i) \tag{6}$$

$$J = -\sum P_i \ln P_i / \ln S \tag{7}$$

式中：S 为样方内的总物种数；N 为样方中观察到的个体数；P_i 为物种 i 的个体数目占总个体数的百分比。

系统发育多样性选择平均谱系距离（MPD）、系统发育物种均匀度（PSE）和谱系多样性（PD）度量[28]。基于研究区内调查记录的 38 种植物，用 R 的“plantlist”和“V.PhyloMaker2”包构建系统发育树，再用“picante”包计算系统发育多样性指数。

功能多样性选取 RaoQ 二次熵指数（RaoQ）、功能均匀度指数（FEve）、功能丰富度指数（FRic）和木材密度（WD）衡量[29]。基于本研究选取的 7 个叶功能性状使用 R 软件中的“FD”包计算 RaoQ、FEve、FRic。木材密度以群落加权平均值表示。

1.3.3　稳定性指标

稳定性选择枯立木比例（L）和森林火险系数（FRC）2 个指标衡量。枯立木比例为样地内枯立木的株数与总株数的比值。森林火险系数由主要树种、郁闭度、海拔、灌草盖度 4 个亚指标计算得出。首先对各亚指标进行火险等级赋值（表 2），其中主要树种依据《全国森林火险区划等级》LY/T 1063—2025[30]标准，按照燃烧的难易程度划分等级：易燃类包括松属树种（*Pinus* spp.）、针叶混交林等，可燃类包括云杉属树种（*Picea* spp.）、杨属树种（*Populus* spp.）、针阔混交林等，难燃类包括桤木属树种（*Alnus* spp.）、阔叶混交林等，因此本研究区内青海云杉 × 油松混交林、油松纯林为易燃类，青海云杉纯林、油松 × 山杨混交林和山杨纯林为可燃类。然后根据下列计算公式和指标权重计算森林火险系数[11]：

表 2　森林火险等级

Tab. 2　Forest fire risk coefficient (FRC) levels

指标	等级				
	5	4	3	2	1
燃烧难易程度			易燃类	可燃类	难燃类
郁闭度	< 0.6	0.6 ~ 0.7	0.7 ~ 0.8	0.8 ~ 0.9	> 0.9
海拔/m	< 2 200	2 200 ~ 2 300	2 300 ~ 2 400	2 400 ~ 2 500	> 2 500
灌草盖度/%	< 45	45 ~ 55	55 ~ 65	65 ~ 75	> 75

$$FRC = \sum_{i=1}^{n} m_i w_i \tag{8}$$

式中：n 为亚指标个数；m_i 为亚指标 i 的火险等级赋值数；w_i 为权重（灌草盖度为 0.4，其余亚指标为 0.2）。

综上，本研究最终构建了涵盖 4 个方面 22 个指标在内的森林健康评价指标体系，各评价指标的基本分布规律如表 3 所示。

1.4 森林健康综合评价与等级划分

1.4.1 数据标准化及检验

对原始数据采用 Z-score 法进行标准化[31]，随后用 R 的“psych”包对标准化后的指标数据进行 Bartlett 检验，检验得到的 $P < 0.001$，表明各检验量相关性够小，适用于该分析方法。

1.4.2 主成分提取及健康指数计算

使用 R 的“prcomp”函数对各样地的标准化指标数据进行主成分分析，筛选出累积贡献率 > 85% 的主成分因子，各样地的主成分得分以及森林健康指数计算公式如下。

$$F_{jm} = \sum_{i=1}^{n} D_{mi} Z_{ij} \tag{9}$$

$$W_m = C_m / \sum_{m=1}^{n} C_m \tag{10}$$

$$F = F_{jm} \times W_m \tag{11}$$

式中：F_{jm} 代表第 j 个样地第 m 个主成分的得分；D_{mi} 为第 i 个指标的第 m 个主成分的得分系数；Z_{ij} 为第 i 个指标的第 j 个样地观测值经标准化后的数据；W_m 为第 m 个主成分的权重系数；C_m 为主成分分析后得到的各主成分贡献率；F 为各样地的森林健康指数值。

1.4.3 健康等级划分与结果验证

依据计算所得的健康指数对所评价的林分进行 K-means 聚类分析和绘图[32−33]，分类数设置为 4，将森林健康指数分为 4 类，分别对应 4 个健康等级：健康、亚健康、中健康和不健康，利用 R 中的“ggplot2”包完成。同时在 SPSS 中采用 Fisher 判别法建立判别函数，以此来验证聚类分析结果的准确性。

1.4.4 健康指数的驱动因子分析

对健康指数评价指标和健康指数进行非线性回归分析，用于识别对罗山森林健康状况影响较为显著的因子。以健康指数为响应变量，各评价指标为

表 3 森林健康评价指标体系

Tab. 3 Assessment indicator system for forest health

指标分类	评价指标	平均值 ± 标准差	最大值	最小值	变异系数/%
林分生产力	平均胸径（DBH）/cm	13.19 ± 3.54	17.28	6.14	26.82
	平均树高（SH）/m	8.00 ± 0.82	9.40	6.51	10.19
	平均冠幅（CW）/m	2.57 ± 0.58	3.59	1.58	22.64
	单位面积蓄积量（V）/（$m^3 \cdot hm^{-2}$）	213.08 ± 96.70	379.12	70.11	45.38
生物多样性	丰富度指数（M）	15.14 ± 5.29	21.83	1.53	34.95
	Simpson指数（D）	0.87 ± 0.05	0.95	0.79	5.18
	Shannon-Wiener指数（H）	2.35 ± 0.26	2.73	1.83	10.88
	均匀度指数（J）	0.84 ± 0.04	0.90	0.74	4.71
	平均谱系距离（MPD）	283.79 ± 67.66	384.83	168.94	23.84
	系统发育物种均匀度（PSE）	0.52 ± 0.09	0.65	0.32	17.76
	谱系多样性（PD）	1 585.70 ± 203.10	1 803.40	1 025.38	12.81
	RaoQ二次熵指数（RaoQ）	6.19 ± 2.72	10.16	0.49	43.90
	功能均匀度指数（FEve）	0.57 ± 0.22	0.86	0.08	38.36
	功能丰富度指数（FRic）	11.73 ± 6.33	24.94	0.98	53.98
	木材密度（WD）	0.01 ± 0.00	0.01	0.00	18.10
立地条件	土壤含水量（SWC）/%	12.39 ± 2.26	17.06	6.70	18.21
	土壤容重（SBD）/（$g \cdot cm^{-3}$）	0.79 ± 0.15	1.09	0.63	18.57
	土壤有机碳（SOC）/（$g \cdot kg^{-1}$）	51.38 ± 18.46	76.76	23.62	35.93
	土壤全氮（STN）/（$g \cdot kg^{-1}$）	2.70 ± 0.66	4.26	1.75	24.51
	土壤全磷（STP）/（$g \cdot kg^{-1}$）	0.66 ± 0.09	0.88	0.51	14.12
稳定性	枯立木比例（L）/%	0.24 ± 0.16	0.63	0.00	66.45
	森林火险系数（FRC）	2.77 ± 0.57	3.80	2.00	20.37

预测变量,进行弹性网络分析,并对标准化系数进行排序,进一步明确驱动罗山森林健康状况变化的关键因子,借助 SPSS 完成。

2　结果与分析

2.1　主成分分析

本研究中主成分分析共提取了 6 个主成分,累计贡献率为 86.78%,总体上可以反映原始数据的大部分信息。第 1 主成分贡献率达到了 26.29%,主要包含了 RaoQ 二次熵指数、Shannon-Wiener 指数、功能丰富度指数和均匀度指数的信息,可解释为生物多样性指标;第 2 主成分贡献率达到 19.02%,包含单位面积蓄积量、平均胸径、平均树高,主要反映林分生产力;第 3 主成分贡献率 15.07%,包含土壤容重、土壤全氮、土壤全磷,代表了立地环境条件;前 3 个主成分累计贡献率高达 60.38%,第 4、5、6 主成分贡献率分别是 13.59%、7.66%、5.15%,主要反映林分稳定性(表 4)。

根据式(9)~(11)和表 4,计算出各样地的前 6 个主成分因子得分值,如表 5 所示。

2.2　基于聚类分析的森林健康评价

对各样地主成分因子得分进行 K-means 聚类分析,将森林健康等级分为“健康”(0.83 ~ 1.24)、“亚健康”(0.12 ~ 0.63)、“中健康”(−0.64 ~ −0.46)和“不健康”(−1.98 ~ −1.09)。由图 1 可知,在调查的 15 块样地中,森林健康等级处于“不健康”的样地有 3 块,占总样地数的 20.00%;处于“中健康”等级的样地有 3 块,占总样地数的 20.00%;处于“亚健康”状态的样地有 5 块,占总样地数的 33.33%;处于“健康”等级的样地有 4 块,占总样地数的 26.67%。

由图 2 可知,罗山 5 种林型的森林健康指数存在显著差异($P < 0.05$),其中,青海云杉 × 油松混交林和油松 × 山杨混交林的健康指数显著高于青海云杉纯林和山杨纯林。不同林型平均健康指数为:油松 ×

表 4　各指标因子载荷矩阵

Tab. 4　Factor loading matrix of each index

指标	主成分					
	1	2	3	4	5	6
平均胸径(DBH)	0.067	0.394	0.173	0.123	0.003	0.011
平均树高(SH)	−0.142	0.305	−0.203	0.139	−0.002	0.179
平均冠幅(CW)	−0.114	0.126	0.348	0.214	0.099	0.070
单位面积蓄积量(V)	−0.197	0.402	0.001	0.069	−0.004	−0.174
丰富度指数(M)	−0.261	−0.081	0.145	−0.336	−0.016	−0.119
Simpson指数(D)	−0.284	0.097	0.317	0.022	0.097	−0.012
Shannon-Wiener指数(H)	−0.362	0.073	0.094	−0.166	0.110	0.010
均匀度指数(J)	−0.309	0.134	0.116	0.221	0.163	0.075
平均谱系距离(MPD)	−0.168	0.104	−0.042	−0.365	−0.145	0.432
系统发育物种均匀度(PSE)	0.018	0.299	0.285	−0.234	−0.126	−0.144
谱系多样性(PD)	−0.248	−0.173	0.233	−0.258	−0.166	0.141
RaoQ二次熵指数(RaoQ)	−0.367	−0.100	−0.014	0.152	−0.148	−0.025
功能均匀度指数(FEve)	−0.221	−0.266	−0.012	0.223	−0.123	−0.108
功能丰富度指数(Fric)	−0.359	−0.108	−0.042	0.093	−0.070	0.166
木材密度(WD)	−0.146	0.002	−0.058	0.293	0.503	−0.057
土壤含水量(SWC)	−0.025	0.172	−0.095	−0.244	0.588	−0.024
土壤容重(SBD)	0.081	−0.259	0.369	0.203	0.122	−0.028
土壤有机碳(SOC)	−0.077	−0.172	−0.209	−0.313	0.361	0.250
土壤全氮(STN)	−0.168	0.169	−0.354	0.010	−0.053	−0.353
土壤全磷(STP)	−0.231	−0.048	−0.328	−0.136	−0.043	−0.483
枯立木比例(L)	−0.054	0.175	−0.295	0.355	0.021	0.468
森林火险系数(FRC)	0.166	0.248	0.107	−0.157	0.294	−0.037
方差贡献率/%(VCR)	26.290	19.020	15.070	13.590	7.660	5.150

表 5 各样地主成分得分

Tab. 5 Principal component scores of sample plots

样地编号	主成分					
	1	2	3	4	5	6
YS1	4.437	1.354	−0.129	−3.993	−1.525	0.982
YS2	1.645	3.032	−1.555	−0.848	2.049	−0.294
YS3	2.941	0.690	−3.405	3.927	0.202	0.800
YS × P1	−3.084	1.118	0.390	0.657	−1.538	1.079
YS × P2	−1.172	1.144	0.736	1.015	−1.002	0.949
YS × P3	−2.016	0.224	0.627	−0.232	1.279	1.572
P1	2.070	0.698	4.305	1.383	0.370	−0.574
P2	1.751	−1.453	2.649	1.592	−0.118	−0.674
P3	0.296	2.671	−0.152	−0.065	0.224	−1.864
SY × P1	−1.854	−1.109	0.776	−0.719	1.651	1.454
SY × P2	−3.665	0.663	−1.572	−0.072	−0.565	−1.417
SY × P3	−2.791	0.747	0.112	−1.291	−0.482	−0.866
SY1	1.313	−3.836	−0.704	−0.991	0.975	−0.568
SY2	−0.689	−3.238	−1.052	−0.715	1.033	−0.407
SY3	0.818	−2.706	−1.027	0.353	−2.554	−0.174

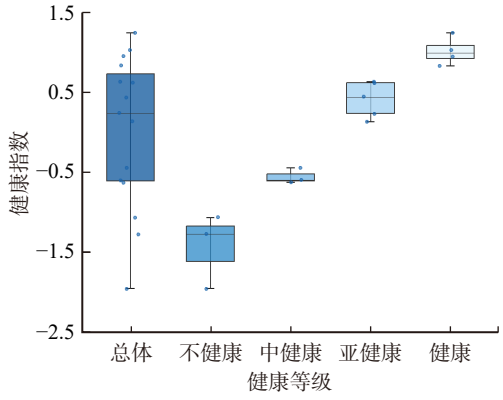
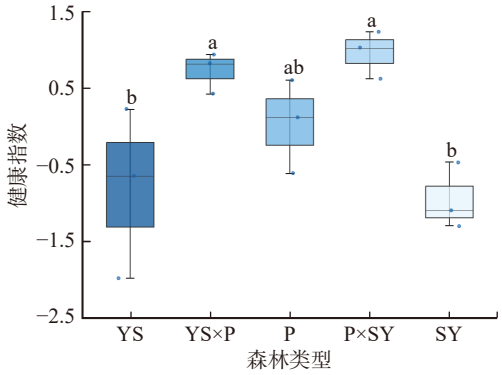


图 1 森林整体健康状况

Fig. 1 Overall health conditions of forests



不同小写字母表示组间差异显著（$P<0.05$）。

图 2 各林型健康状况

Fig. 2 Health conditions of each forest type

山杨混交林(0.96) > 青海云杉 × 油松混交林(0.73) > 油松纯林(0.04) > 青海云杉纯林(−0.80) > 山杨纯林(−0.94)。

2.3 判别分析

基于各样地前 6 项主成分得分(表 5)及聚类结果(图 1)，采用 Fisher 线性判别法检验聚类分析的可靠性。判别分析共建立了 3 个判别函数，分别为式(12)～(14)。

$$g_1 = -4.139f_1 + 4.895f_2 + 3.090f_3 - 1.333f_4 + 1.699f_5 + 0.103f_6 \quad (12)$$

$$g_2 = 0.539f_1 + 0.241f_2 + 0.645f_3 - 0.256f_4 + 0.531f_5 - 0.117f_6 \quad (13)$$

$$g_3 = 0.073f_1 + 0.289f_2 - 0.255f_3 + 0.823f_4 + 0.396f_5 - 0.039f_6 \quad (14)$$

式中：g_1、g_2、g_3 分别为第一、第二、第三判别函数的得分值；f_1 至 f_6 分别为提取的第 1 至第 6 个主成分得分。

由表 6 可见，第一判别函数解释了 98.9% 的方差，第二、第三判别函数依次解释了 0.8%、0.2% 的方差。第一判别函数与响应变量具有很强的相关性，相关系数为 0.995，第二、三判别函数对应的相关系数分别为 0.692 和 0.450，证明第一判别函数为核心分类维度，利用这 3 个判别式能够有效区分各组别。Wilks' Lambda 检验结果显示，前 2 个判别函数在 $P<0.05$ 水平下表现为显著(表 7)。

表 6　Fisher 判别函数特征值

Tab. 6　Eigenvalues for Fisher discriminant functions

函数	特征值	方差比/%	累计比/%	相关性系数
第一判别函数	108.224	98.9	98.9	0.995
第二判别函数	0.921	0.8	99.8	0.692
第三判别函数	0.254	0.2	100.0	0.450

表 7　Wilks' Lambda 检验

Tab. 7　Test of Wilks' Lambda

函数检验	Lambda	卡方	自由度	显著性
1 ~ 2	0.004	50.157	18	0.000
2 ~ 3	0.415	7.916	10	0.637
3	0.797	2.041	4	0.728

将各样地的 6 个主成分得分值分别代入 3 个判别函数中，得到各样地判别分类结果(表 8)。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，自身验证法对不同健康等级的判断正确率均为 100%，交互验证下各等级的判断正确率分别为 100%、100%、80.0%、100.0%，平均为 95.0%。综合两类验证方法，总体平均判断正确率可达 97.5%，表明聚类分析结果较为准确。

2.4　森林健康驱动因素分析

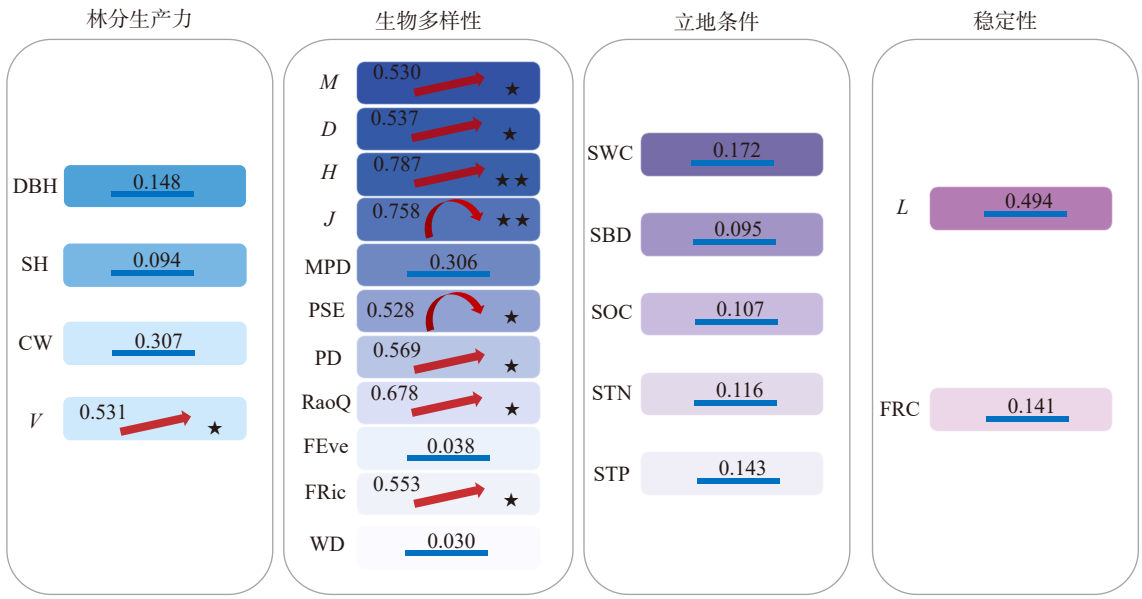
由图 3 可知，林分生产力指标中，单位面积蓄积量与森林健康指数显著正相关(0.531，$P < 0.05$)；生物多样性指标与森林健康指数的关系多表现为显著正相关：Shannon-Wiener 指数(0.787，$P < 0.001$) > RaoQ 二次熵指数(0.678，$P < 0.05$) > 谱系多样性(0.569，$P < 0.05$) > 功能丰富度指数(0.553，$P < 0.05$) > Simpson 指数(0.537，$P < 0.01$) > 丰富度指数(0.530，$P < 0.05$),而均匀度指数(0.758，$P < 0.001$)和系统发育物种均匀度(0.528，$P < 0.05$)与森林健康指数的非线性关系显著，随均匀度指数升高，森林健康指数先上升后下降；立地条件指标、稳定性指标与森林健康指数相关性不显著。

综合来看，单位面积蓄积量、Shannon-Wiener 指

表 8　不同林型健康等级验证结果

Tab. 8　Verification results of health levels for different forest types

项目		健康等级	预测组				合计
			不健康	中健康	亚健康	健康	
自身验证	计数	不健康	1	0	0	0	3
		中健康	0	4	0	0	3
		亚健康	0	0	6	0	5
		健康	0	0	0	4	4
	占比/%	不健康	100.0	0.0	0.0	0.0	100.0
		中健康	0.0	100.0	0.0	0.0	100.0
		亚健康	0.0	0.0	100.0	0.0	100.0
		健康	0.0	0.0	0.0	100.0	100.0
交叉验证	计数	不健康	0	1	0	0	1
		中健康	0	4	0	0	4
		亚健康	0	2	4	0	6
		健康	0	0	1	3	4
	占比/%	不健康	100.0	0	0	0	100.0
		中健康	0	100.0	0	0	100.0
		亚健康	0	0	80.0	20.0	100.0
		健康	0	0	0	100.0	100.0



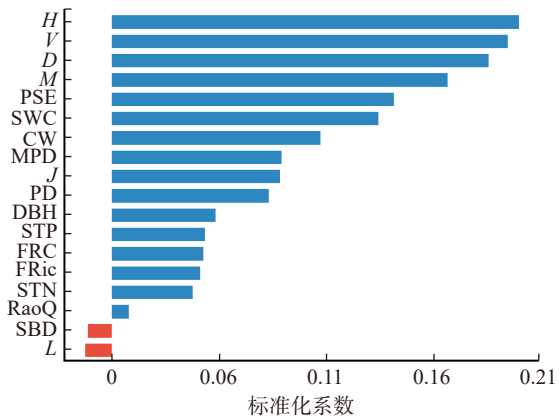
红色直线箭头表示指标与健康指数间为显著线性相关，红色曲线箭头表示指标与健康指数间为显著非线性相关；蓝色直线表示线性/非线性关系不显著。★★、★分别表示在 0.001、0.05 水平上显著相关。

图 3 健康指数与各指标间的相关性

Fig. 3 Correlations between health index and each indicator

数、均匀度指数、RaoQ 二次熵指数、谱系多样性、功能丰富度指数、Simpson 指数、丰富度指数和系统发育物种均匀度是影响森林健康程度的主要因子，表明林分生产力及多样性均对森林健康具有重要影响。

基于弹性网络回归的定量筛选，采用交叉验证确定最优惩罚参数后，仅保留回归系数不为 0 的指标(剔除 4 个)作为影响森林健康指数的核心驱动因子。由图 4 知，Shannon-Wiener 指数、单位面积蓄积量、Simpson 指数被识别为关键变量，主要反映了生物多样性的核心贡献。其次为系统发育物种均匀度、土壤含水量和平均冠幅，说明它们对生态系统的健康状况也具有较高的重要性。平均谱系距离、均匀度指数、谱系多样性的贡献程度中等，表明它们对森林健康评估具有次要但不可忽略的调控作用。平均胸径、土壤全磷、森林火险系数、功能丰富度指数、



蓝色代表正向促进作用，红色代表负向抑制作用。

图 4 各指标的标准化系数排序(前 18 个)

Fig. 4 Standardized coefficient ranking of each indicator (top 18)

土壤全氮、RaoQ 二次熵指数、土壤容重和枯立木比例的系数值较低，在森林健康预测中贡献相对有限。不同维度多样性对森林健康的贡献程度存在差异，物种多样性(0.642) > 系统发育多样性(0.303) > 功能多样性(0.052)。

3 讨 论

3.1 不同林型森林健康状况的差异分析

本研究整合了物种、系统发育和功能 3 个维度的多样性指标，从林分生产力、生物多样性、立地条件和稳定性 4 个方面对宁夏罗山的森林健康状况进行定量分析和评价。结果表明，研究区仅有 26.67% 的样地处于“健康”等级，罗山森林整体健康水平仍有待提升；不同林型间健康状况差异显著：油松 × 山杨混交林 > 青海云杉 × 油松混交林 > 油松纯林 > 青海云杉纯林 > 山杨纯林，健康指数总体表现为混交林优于纯林。这主要是因为混交林较纯林具有更高的物种丰富程度和更为复杂的群落结构，一方面，不同树种在空间结构与资源利用方式上的差异有助于增强群落整体的资源利用效率，符合生态位互补效应[34]；另一方面，复杂的群落结构能够降低单一干扰对群落的影响，从而提高生态系统的抗干扰能力[35]。这一结果印证了生物多样性在森林健康形成中具有的基础性作用。

3.2 各指标与森林健康间的相关关系

本研究中非线性回归分析用于反映单一指标与森林健康之间的相关关系。结果显示，单位面积蓄积量、多维多样性指标与森林健康的相关性显著。

其中，物种多样性（Shannon-Wiener 指数、Simpson 指数、丰富度指数）、系统发育多样性（谱系多样性）和功能多样性（RaoQ 二次熵指数、功能丰富度指数）均与健康指数呈显著正相关关系，表明生物多样性在森林健康形成中发挥关键作用。物种多样性和丰富度反映了群落物种组成及个体分布格局，较高的物种多样性有助于提高资源利用效率以缓解种间竞争[36]，并降低生态系统的脆弱性，在改善森林健康方面具有重要意义。谱系多样性同样表现出显著正向作用，说明引入进化信息有助于深化对森林健康的认识。谱系多样性较高的群落通常物种间进化与遗传差异更为显著，生态位分化更充分，资源利用重叠度更低，所以伴随着更强的生态位互补效应以及更高的稳定性[37]，有利于维持森林群落的结构与长期健康演替，本研究结果亦印证了以上结论。均匀度指数和系统发育物种均匀度与森林健康指数呈非单调性关系，随均匀度指数升高，森林健康指数先上升后下降，说明过高或过低的均匀度均不利于维持森林较高健康水平。此结果与郭梦昭等[38]的物种均匀度随林分发育阶段呈单峰型变化这一观点存在一致性。同时，系统发育均匀度过高意味着环境过滤在筛选特定谱系，过低则意味着群落对特定威胁的抵抗力较弱，进一步表明 2 种极端对森林健康的不利影响[39]。本研究中功能多样性与健康指数的相关性显著，这是因为功能性状差异驱动了生态位的分化，该过程可有效缓解种间竞争、优化资源利用，进而提升群落生产力与稳定性[40]。综上所述，多维多样性的纳入有助于更全面地反映森林生态系统的健康状况[41]。

单位面积蓄积量反映了林分生长状况及资源利用效率，是森林生产力的重要表征。本研究中，单位面积蓄积量是衡量森林健康状况的关键正向因子，这与王建军等[42]的研究结果类似，表明较高的蓄积量或生产力能够维持更稳定的物质循环与能量流动，为生态系统健康提供物质保障[43]。此外，立地条件指标与健康指数的相关性不显著，可能是由于研究区内样地间土壤理化性质差异较小，表明在区域尺度上，立地条件对森林健康的影响相对稳定，其解释作用弱于多样性与生产力等因子[44]。稳定性指标的权重不高，但枯立木比例通常意味着林分受到的胁迫程度，在立木尺度上是评判森林健康的核心标准之一[45]。同时，森林火险能直接破坏森林植被和林分结构，还可能通过影响土壤养分循环对生态系统生产力和稳定供给功能产生长期作用，在健康评价体系中也不可或缺[46]。结合聚类和相关性分析结果可得，森林的健康状态主要体现为植被类型丰富、群落结构完整，兼具出色生产力的同时，还要拥有强大的恢复力和抗干扰能力。

3.3　多变量的综合驱动作用

本研究进一步采用弹性网络回归评估多变量共同作用时各指标的相对贡献。结果表明，Shannon-Wiener 指数、单位面积蓄积量、Simpson 指数、丰富度指数的标准化系数值较高，与非线性回归分析结果类似，说明生物多样性和单位面积蓄积量对森林健康具有核心表征作用。功能丰富度指数和 RaoQ 二次熵指数与森林健康指数呈显著相关，但在弹性网络回归中的贡献较低，可能是由于功能丰富度指数与 RaoQ 二次熵指数本质上都是在衡量物种间的功能差异，弹性网络的正则化会倾向于将系数压缩，导致二者的独立贡献降低[47]。这表明，在多维多样性框架下，单一物种多样性指标将不足以独立解释森林健康状况。此外，系统发育物种均匀度、土壤含水量和平均冠幅在弹性网络中贡献系数也较高，说明当在模型中控制住其他具有协同效应的混杂因子后，系统发育物种均匀度、土壤含水量和平均冠幅对森林健康依然表现出不可忽视的正向独立贡献，这与李晓宇等[48]、李梦仙等[49]和张思琦等[50]的研究一致。

本研究存在样本量偏小的问题，导致研究结果的普适性和代表性方面尚有不足。尽管如此，本研究的标准样地选取具有代表性，并采用了适合高维度小样本的弹性网络回归法以降低统计风险。因此，研究结果仍然能够在一定程度上代表罗山主要森林类型的健康状况，并提供了在干旱半干旱区森林健康评价中引入多维多样性指标的新视角，可为区域森林健康评价与经营提供参考，在后续的研究中，可以在更广范围内增加样本量进行研究。

综上所述，宁夏罗山森林健康主要由生产力和多维多样性共同驱动，生产力提供基础供给，多维多样性增强生态系统的稳定性。为此，保护区可通过合理调整林分密度、加强混交林构建、促进林下灌草发育等措施，持续优化林分结构，增加生物多样性，同时强化火险防控措施，以降低森林火灾风险，提升森林健康水平，从而推动森林可持续健康经营。

4　结　　论

本研究基于林分生产力、多维生物多样性、立地条件及稳定性 4 个方面构建森林健康评价指标体系，对宁夏罗山 5 种主要森林类型的健康状况进行了评价与驱动机制分析。结果表明，调查样地 60% 处于“亚健康”和“健康”状态，40% 处于“中健康”和“不健康”状态，研究区整体健康状况仍有待改善；混交林健康状况显著优于纯林。森林健康主要受生产力

及多样性的共同驱动，其中单位面积蓄积量、物种多样性指数、系统发育多样性指数、功能多样性指数是影响森林健康的核心驱动因子。物种、系统发育、功能多样性均与森林健康显著相关，表明多维多样性较单一维度多样性能够更全面表征森林健康状态；但不同维度多样性对森林健康的贡献程度存在差异，物种多样性和系统发育多样性的贡献大于功能多样性。综上，宁夏罗山森林健康是生产力与多维多样性共同作用的结果。在干旱半干旱区森林健康评价中，引入多维多样性指标有助于提升评价体系对生态系统稳定性的表征能力，可为区域森林健康评价与可持续经营提供参考。

参 考 文 献

[1] 靳姗姗, 夏雱晖, 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 S S, Xia J H, Xie P Z, et al. Health evaluation of three typical plantations at the southern foot of Taihang Mountain [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(5): 295−303.

[2] 崔传登, 师庆东, 李想, 等. 沙漠腹地达里雅布依绿洲胡杨林健康评价 [J]. 浙江农林大学学报, 2024, 41(6): 1134−1141.
Cui C D, Shi Q D, Li X, et al. Health evaluation of *Populus euphratica* forest in Daliyabuyi Oasis in the hinterland of desert [J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2024, 41(6): 1134−1141.

[3] Hartmann H, Bastos A, Das A J, et al. Climate change risks to global forest health: emergence of unexpected events of elevated tree mortality worldwide [J]. Annual Review of Plant Biology, 2022, 73: 673−702.

[4] 王彦辉, 于澎涛, 田奥, 等. 黄土高原和六盘山区的林水协调多功能管理 [J]. 林业科学, 2023, 59(4): 1−17.
Wang Y H, Yu P T, Tian A, et al. Coordinated multi-functional management of forest and water resources in the Loess Plateau and Liupan Mountain area [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2023, 59(4): 1−17.

[5] 李愿会, 路秋玲. 我国旱区造林绿化的战略思考 [J]. 林业资源管理, 2020(4): 1−6.
Li Y H, Lu Q L. Strategic thinking on afforestation and greening in arid areas of China [J]. Forest Resources Management, 2020(4): 1−6.

[6] 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 evaluation of shelterbelt system in eastern Liaoning based on water conservation function [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2020, 18(2): 102−110.

[7] 高佳文, 左亚凡, 鲁雅雯, 等. 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 [J]. 生态学报, 2025, 45(12): 5941−5954.
Gao J W, Zuo Y F, Lu Y W, et al. Health evaluation of *Betula platyphylla* secondary forest based on structural equation model: a case study of Baoku River Basin in Datong County [J]. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(12): 5941−5954.

[8] 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 for forest health evaluation in Daxing'anling, Inner Mongolia based on Landsat8 OLI [J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition), 2021, 42(6): 15−22.

[9] Pan Z, He J, Liu D, et al. Ecosystem health assessment based on ecological integrity and ecosystem services demand in the middle reaches of the Yangtze River Economic Belt, China [J]. Science of the Total Environment, 2021, 774: 144837.

[10] 申小娟, 杜盛. 甘肃省 5 种典型人工林健康状况 [J]. 水土保持研究, 2023, 30(3): 295−300.
Shen X J, Du S. Health status of five typical plantations in Gansu Province [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(3): 295−300.

[11] 赵金满, 韩馨悦, 程瑞明, 等. 塞罕坝自然保护区华北落叶松和樟子松人工林健康评价 [J]. 南京林业大学学报 (自然科学版), 2024, 48(3): 199−206.
Zhao J M, Han X Y, Cheng R M, et al. Health assessment of *Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii* and *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations in Saihanba Nature Reserve [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 2024, 48(3): 199−206.

[12] 郭艳荣, 铁牛, 张秋良, 等. 内蒙古中部山地油松人工林健康评价研究——以蛮汉山油松人工林为例 [J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(2): 145−150.
Guo Y R, Tie N, Zhang Q L, et al. Health evaluation of *Pinus tabuliformis* plantation in central Inner Mongolia mountains: a case study of Manhan Mountain [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2012, 26(2): 145−150.

[13] 郭艳荣, 王懿祥, 海龙, 等. 基于 ChatGPT 的科尔沁沙地杨树人工林健康评价 [J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(7): 117−128.
Guo Y R, Wang Y X, Hai L, et al. Health evaluation of poplar plantation in Horqin Sandy Land based on ChatGPT [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(7): 117−128.

[14] 李欣冉, 姚杰, 曾璠, 等. 霸王岭自然保护区森林木本植物多维生物多样性空间格局与保护优先性 [J]. 北京林业大学学报, 2026, 48(3): 1−12.
Li X R, Yao J, Zeng F, et al. Spatial patterns and conservation priorities of multidimensional biodiversity of forest woody plants in Bawangling Nature Reserve [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(3): 1−12.

[15] le Bagousse-Pinguet Y, Soliveres S, Gross N, et al. Phylogenetic, functional, and taxonomic richness have both positive and negative effects on ecosystem multifunctionality [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2019, 116(17): 8419−8424.

[16] 余臻, 秦娇, 金则新, 等. 濒危植物夏蜡梅 3 种林型的群落特征比较 [J]. 森林与环境学报, 2026, 46(1): 82−90.
Yu Z, Qin J, Jin Z X, et al. Comparison of community

characteristics of three forest types of endangered plant *Calycanthus praecox* [J]. Journal of Forest and Environment, 2026, 46(1): 82−90.

[17] 于琦胧, 郝珉辉, 何怀江, 等. 长白山森林不同演替阶段生物多样性与生产力的关系: 基于物种、性状和系统发育的视角 [J]. 生物多样性, 2025, 33(8): 171−182.
Yu Q L, Hao M H, He H J, et al. Relationship between biodiversity and productivity in different successional stages of Changbai Mountain forests: from the perspectives of species, traits and phylogeny [J]. Biodiversity Science, 2025, 33(8): 171−182.

[18] Pakeman R J. Functional trait metrics are sensitive to the completeness of the species' trait data? [J]. Methods in Ecology and Evolution, 2014, 5(1): 9−15.

[19] 陈晶亮, 谭松伟, 刘超, 等. 宁夏罗山典型林分土壤养分特征与凋落物质量的关系 [J]. 中国沙漠, 2025, 45(3): 326−336.
Chen J L, Tan S W, Liu C, et al. Relationship between soil nutrient characteristics and litter quality in typical forest stands in Luoshan, Ningxia [J]. Journal of Desert Research, 2025, 45(3): 326−336.

[20] 郭邵华, 杨天宇, 兰少伟, 等. 宁夏罗山 5 种典型林型多维度植物多样性及群落构建过程 [J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(9): 46−56.
Guo S H, Yang T Y, Lan S W, et al. Multidimensional plant diversity and community assembly processes of five typical forest types in Luoshan, Ningxia [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(9): 46−56.

[21] 刘清, 徐雪蕾. 宁夏罗山不同森林群落叶功能性状及其环境响应机制 [J]. 西北林学院学报, 2025, 40(1): 70−82.
Liu Q, Xu X L. Leaf functional traits and their environmental response mechanisms of different forest communities in Luoshan, Ningxia [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2025, 40(1): 70−82.

[22] 龚昕, 霍新茹, 李雯, 等. 宁夏罗山山地草原植被群落特征及其空间分异 [J]. 草业学报, 2025, 34(2): 1−15.
Gong X, Huo X R, Li W, et al. Vegetation community characteristics and spatial differentiation in mountain grassland in Luoshan, Ningxia [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(2): 1−15.

[23] 余雅尧, 徐雪蕾, 刘超, 等. 宁夏罗山 4 种典型森林群落植物−凋落物−土壤生态化学计量特征 [J]. 南京林业大学学报 (自然科学版), 2024, 48(4): 227−234.
Yu Y Y, Xu X L, Liu C, et al. Ecological stoichiometry differences in plant-litter-soil across four typical forests of the Luoshan Mountains in Ningxia [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2024, 48(4): 227−234.

[24] 王丽君, 程瑞梅, 肖文发, 等. 氮添加对三峡库区马尾松−栓皮栎混交林土壤微生物生物量和酶活性的影响 [J]. 应用生态学报, 2022, 33(1): 42−50.
Wang L J, Cheng R M, Xiao W F, et al. Effects of nitrogen addition on soil microbial biomass and enzyme activities in *Pinus massoniana-Quercus variabilis* mixed forest in the Three Gorges Reservoir Area [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(1): 42−50.

[25] 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 evaluation of natural secondary *Pinus massoniana* forest in Lizhong Basin, southwestern Hubei [J]. Journal of Southwest Forestry University (Natural Sciences), 2021, 41(3): 69−77.

[26] 刘琪璟. 中国立木材积表 [G]. 北京: 中国林业出版社, 2017.
Liu Q J. China tree volume table[G]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2017.

[27] 邓逸飞, 王郅臻, 段文标, 等. 小兴安岭地区不同演替阶段林下植物多样性及其优势种生态位特征 [J]. 生态学报, 2025, 45(12): 6000−6011.
Deng Y F, Wang Z Z, Duan W B, et al. Understory plant diversity and niche characteristics of dominant species in different successional stages in Xiaoxing'anling region [J]. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(12): 6000−6011.

[28] Group TAP. An update of the angiosperm phylogeny group classification for the orders and families of flowering plants: apg iii [J]. Botanical Journal of the Linnean Society, 2009, 161(2): 105−121.

[29] 李非凡, 陈淼, 刘顺, 等. 青藏高原东缘亚高山森林群落的多维度生物多样性 [J]. 应用生态学报, 2024, 35(6): 1447−1454.
Li F F, Chen M, Liu S, et al. Multidimensional biodiversity of subalpine forest communities on the eastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2024, 35(6): 1447−1454.

[30] 国家林业和草原局. 全国森林火险区划等级: LY/T 1063—2025[S]. 北京, 中国标准出版社, 2025.
National Forestry and Grassland Administration. National forest fire danger zoning classification: LY/T 1063−2025[S]. Beijing: Standards Press of China, 2025.

[31] 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 evaluation of *Robinia pseudoacacia* plantation in Yongshou County based on multivariate statistical analysis [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2016, 31(2): 109−114.

[32] 刘建泉, 孙建忠. 东大河林区青海云杉林健康评价 [J]. 草业科学, 2012, 29(4): 624−628.
Liu J Q, Sun J Z. Health assessment of *Picea crassifolia* forest in Dongdahe Forest Region [J]. Pratacultural Science, 2012, 29(4): 624−628.

[33] 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 assessment based on principal component analysis and systematic clustering [J]. Forestry and Environmental Science, 2021, 37(5): 69−75.

[34] 楼一恺, 范忆, 戴其林, 等. 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 [J]. 生态学报, 2021, 41(21):

8568−8577.
Lou Y K, Fan Y, Dai Q L, et al. Relationship between vertical structure and overall species diversity of evergreen deciduous broad-leaved forest community in Tianmu Mountain [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(21): 8568−8577.

[35] 冯梦琪, 龙翠玲, 袁荣利, 等. 茂兰保护区不同森林群落林分结构与植物多样性的关系 [J]. 西北林学院学报, 2026, 35(6): 909−921.
Feng M Q, Long C L, Yuan R L, et al. Relationship between stand structure and plant diversity in different forest communities in Maolan Nature Reserve [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2026, 35(6): 909−921.

[36] Barron S, Sheppard S, Condon P M. Urban forest indicators for planning and designing future forests [J]. Forests, 2016, 7(9): 208−224.

[37] 梁月佳, 曾勇, 古力米拉·努尔买买提, 等. 古尔班通古特沙漠植物多样性与生产力的关系及其驱动因素 [J]. 生态学报, 2026, 46(1): 555−567.
Liang Y J, Zeng Y, Gulimila·Nuermaimaiti, et al. Relationship between plant diversity and productivity and its driving factors in the Gurbantunggut Desert [J]. Acta Ecologica Sinica, 2026, 46(1): 555−567.

[38] 郭梦昭, 高露双, 范春雨. 物种多样性与生产力研究进展 [J]. 世界林业研究, 2019, 32(3): 18−23.
Guo M Z, Gao L S, Fan C Y. Species diversity and productivity: research progress [J]. World Forestry Research, 2019, 32(3): 18−23.

[39] Potter K M, Koch F H. Patterns of forest phylogenetic community structure across the united states and their possible forest health implications [J]. Forest Science, 2014, 60(5): 851−861.

[40] 周彦君, 宋沼鹏, 李博文, 等. 森林生物多样性及多功能性与生态系统稳定性关系研究进展 [J]. 中南林业科技大学学报, 2026, 46(5): 114−126.
Zhou Y J, Song Z P, Li B W, et al. Research progress on the relationship between forest biodiversity, multifunctionality, and ecosystem stability [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2026, 46(5): 114−126.

[41] 陈雯妍, 慈秀芹, 陈筠灵, 等. 云南樟科植物的多维多样性格局及其环境驱动因子 [J]. 生物多样性, 2025, 33(6): 5−23.
Chen W Y, Ci X Q, Chen Y L, et al. Multidimensional diversity patterns of Lauraceae plants in Yunnan and their environmental drivers [J]. Biodiversity Science, 2025, 33(6): 5−23.

[42] 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.
Wang J J, An B. Comprehensive evaluation of forest health of Guangxi State-owned Paiyangshan Forest Farm based on analytic hierarchy process [J]. Journal of West China Forestry Science, 2022, 51(3): 114−117.

[43] Meng J H, Li S M, Wang W, et al. Mapping forest health using spectral and textural information extracted from spot-5 satellite images [J]. Remote Sensing, 2016, 8(9): 719−735.

[44] McWilliams W, Roesch F A. Monitoring across borders: 2010 joint meeting of the Forest Inventory and Analysis (FIA) Symposium and the Southern Mensurationists[R]. Asheville: US Department of Agriculture, 2012.

[45] 张连金, 王天罡, 封焕英, 等. 京西油松混交林枯立木空间结构特征 [J]. 生态学杂志, 2019, 38(4): 937−944.
Zhang L J, Wang T G, Feng H Y, et al. Spatial structure characteristics of dead standing trees in *Pinus tabuliformis* mixed forest in western Beijing [J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, 38(4): 937−944.

[46] 莫凡, 郭慧, 裴顺祥, 等. 野外−城市界域森林火险时空演变趋势及火险等级划分 [J]. 生态学报, 2024, 44(14): 6232−6242.
Mo F, Guo H, Pei S X, et al. Spatiotemporal evolution trend and fire danger rating of forest fire risk in wildland-urban interface [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(14): 6232−6242.

[47] Li L, Wen Z F, Wei S G, et al. Functional diversity and its influencing factors in a subtropical forest community in china [J]. Forests, 2022, 13(7): 966−983.

[48] 李晓宇, 廖嘉星, 侯嫚嫚, 等. 不同尺度下长白山次生杨桦林群落系统发育结构研究 [J]. 北京林业大学学报, 2016, 38(12): 14−20.
Li X Y, Liao J X, Hou M M, et al. Phylogenetic structure of secondary *Populus davidiana-Betula platyphylla* forest communities in Changbai Mountain at different scales [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2016, 38(12): 14−20.

[49] 李梦仙, 晏媛, 黄飞, 等. 杉木人工林树冠特征与生长形质的动态关系 [J]. 林业与环境科学, 2024, 40(6): 18−25.
Li M X, Yan Y, Huang F, et al. Dynamic relationship between crown characteristics and growth-form quality of *Cunninghamia lanceolata* plantation [J]. Forestry and Environmental Science, 2024, 40(6): 18−25.

[50] 张思琦, 兰荣光, 刘宇, 等. 土壤水分变化对树木群落和土壤微生物群落多样性的影响 [J]. 福建林业科技, 2025, 52(1): 17−27.
Zhang S Q, Lan R G, Liu Y, et al. Effects of soil moisture variation on diversity of tree community and soil microbial community [J]. Journal of Fujian Forestry Science and Technology, 2025, 52(1): 17−27.

（责任编辑 李 契
责任编委 卢孟柱）