

泥沙对人工湿地水流结构影响的实验研究

李君宁¹, 杨具瑞², 周燕红¹

(1. 南昌工程学院, 水利工程学院, 南昌330029 2. 昆明理工大学 农业工程学院 云南 昆明 650051)

摘要: 利用昆明理工大学水利水电系水力学实验室内平坡矩形玻璃水槽实验, 研究三种流量

采伐强度对马尾松中龄林林分状态的影响

涂静¹ 柴宗政^{1*} 赵中文²

(1. 贵州大学林学院 贵州 贵阳 550025; 2. 贵州省织金县国有桂花林场 贵州 织金 552100)

摘 要: 【目的】对比分析不同采伐强度对马尾松中龄林林分状态的影响, 旨在为马尾松人工林的科学经营提供理论依据。【方法】本研究以中龄阶段马尾松人工林为研究对象, 设置了5种采伐强度(0%、10%、20%、30%、40%), 从结构、活力和多样性3个方面选取9个典型指标构建林分状态评价体系, 并利用单位圆方法检验了采伐强度对马尾松中龄林林分状态的短期影响。【结果】(1) 林分密度、林木健康、树种组成和树种多样性这4个林分状态指标对采伐强度响应相对敏感, 采伐后短期内可以显著改善($P<0.05$); 而树种均匀度、胸径分布、树高分布、林木优势度和林分长势等林分状态指标对采伐强度的响应相对较差, 需要更长时间的恢复。(2) 马尾松中龄林林分状态综合评价指数随采伐强度呈先增加后降低的趋势, 约30%采伐强度下林分状态最理想。(3) 单位圆方法与主成分分析对林分状态评价结果呈极显著线性相关($R^2=0.909$, $P<0.001$), 但单位圆方法较主成分分析更为直观且反应更敏感。【结论】采伐强度显著影响马尾松中龄林的林分状态, 中度采伐(约30%采伐强度)有助于改善林分状态。单位圆方法能够科学有效地反映采伐强度对马尾松中龄林林分状态的短期影响, 并对具体森林经营措施制定具有较高的指导意义。

关键词: 人工林; 采伐强度; 林分状态; 单位圆方法; 主成分分析

The impact of logging intensity on the stand state of middle-aged *Pinus massoniana* plantations

Tu Jing¹ Chai Zongzheng^{1,*} Zhao Zhongwen²

(1. College of Forestry, Guizhou University Guiyang 550025, Guizhou, China; 2. Guizhou Province Zhijin County State-owned Guihua Forest Farm Zhijin 552100, Guizhou, China)

Abstract: 【Objective】 This investigation aimed to secure a theoretical foundation on which to inform the judicious management of *Pinus massoniana* plantations by assessing the repercussions that varied logging intensities have on the stand state of middle-aged *P. massoniana* plantations and provide invaluable guidance for the formulation of specific forest management strategies. 【Method】 Five distinct logging intensity categories were delineated (0%, 10%, 20%, 30%, 40%). To construct a robust stand state evaluation framework, nine representative indicators across the three dimensions of structure, vitality, and diversity were selected. Employing the unit circle method first, we scrutinized the short-term ramifications of logging intensity. 【Result】 The findings revealed that: (1) Four

indicators—stand density, tree health, species composition, and species diversity—exhibited pronounced sensitivity to logging intensity. These four exhibited significant improvement in the short-term post-logging ($P<0.05$). Conversely, the indicators of species evenness, diameter distribution, height distribution, tree dominance, and stand growth exhibited a more subdued response to logging intensity. These five necessitated an extended period to begin to improve. (2) The comprehensive evaluation index values measuring the stand state of middle-aged *P. massoniana* plantations initially ascended, but then subsequently descended, as logging intensity escalated. The stand state zenith was pinpointed at an approximate 30% logging intensity. (3) A highly significant linear correlation emerged between the unit circle method results and the principal component analysis results in evaluating stand state ($R^2=0.909$, $P<0.001$), although the unit circle method proved to be more intuitive and responsive. 【Conclusion】 In summation, logging intensity exerted a substantial influence on the stand state of middle-aged *P. massoniana* plantations, with moderate logging (circa 30% logging intensity) enhancing the stand state the most. The unit circle method proficiently and effectively illuminated the short-term effects of logging intensity on the stand dynamics of middle-aged *P. massoniana* plantations.

Keywords: plantation, logging intensity, stand state, unit circle method, principal component analysis

在全球生态环境变化和人类活动影响日益加剧的背景下，人工林的经营管理显得尤为重要。人工林作为缓解气候变化、保护生物多样性、提供木材及其他林产品的重要资源，其健康发展直接关系到生态平衡和可持续发展。然而，现有的人工林经营模式往往无法充分考虑林分状态对森林生态系统功能的影响，这导致人工林普遍出现密度过大、生长不良、结构单一、生态服务功能减弱等问题。深入探讨森林经营措施对人工林林分状态的具体影响，不仅有助于理解森林生态系统的动态过程，而且能够为人工林的可持续经营提供科学依据。近年来，众多研究者对森林经营中的林分状态评价进行了深入探讨，形成了一系列理论框架和实践指南。然而，现有研究中仍存在一些不足，如缺乏统一的评价标准、综合考虑因素不足以及对不同区域和森林类型的适应性较差等，这些都对人工林可持续经营与发展构成了挑战。

马尾松 (*Pinus massoniana*) 作为我国南方主要用材树种和造林先锋树种，其分布广泛、适应性强以及经济价值高，在林业生产和森林生态系统中起着至关重要的作用。然而，由于长期实行单一树种的人工纯林经营模式，马尾松人工林呈现出树种组成单一、林分密度过大和物种多样性较低的问题，导致其林地生产力低下、土壤退化，使得生态系统较为脆弱，易遭受病虫害的侵袭，从而严重影响林木的发育和繁殖环境，对林地的可持续发展构成威胁。采伐强度作为一种关键的森林经营技术要素，直接影响马尾松人工林的结构、功能和动态。以往的研究表明，不同的采伐强度对森林生态系统具有复杂而多样的影响，适度的采伐可以改善林分环境，促进林木的更新和生长，维持和改善生态系统功能；然而，过度的采伐可能导致生境破坏、生物多样性丧失以及土壤侵蚀等严重问题。目前，关于采伐强度对人工林具体影响的研究仍存在不足和争议。尤其是在不同地区、不同树种、不同生长阶段和不同生境条件下，采伐强度对林分动态响应的差异性及其机制尚未得到深入探讨。

本研究以中龄阶段的马尾松人工林为研究对象，通过选择结构、活力和多样性三个方面的典型指标，构建了林分状态评价指标体系。研究旨在系统评估不同采伐强度对马尾松人工林林分状态的影响，揭示马尾松中龄林在不同采伐强度下的生态响应机制，从而为优化森林经营管理策略提供科学依据。期望通过本研究深入理解采伐强度调控对森林生态系统影响的规律，为森林质量精准提升与可持续发展提供新的理论支撑和实践指导。

1 研究区概况

研究区位于贵州省织金县国有桂花林场(26°38'21"—26°39'18"N, 105°44'55"—105°45'5"E)，平均海拔1310m，年均降雨量1200~1500mm，全年日照1170h左右，无霜期240~290d，年平均气温11.6~15℃，气候属亚热带东南季风气候。境内岩溶发育，喀斯特地貌特征突出，主要地貌类型为山地及丘陵，地形地势

起伏较大，峰丛、槽谷、洼地相攘其间，土壤母质以石灰岩为主，土壤类型以石灰土、黄棕壤、黄壤为主。林场内马尾松林面积为 439.490hm²，大多为人工林，面积较大且分布广泛。该林场为“国有林场 GEF 项目首批试点林场”、“马尾松国家长期科学试验基地”、“贵州大学教学科研实践基地”，具有悠久的森林可持续经营历史和基础，具有完善的森林经营监测样地和生态服务功能监测体系，为本研究的开展提供了理想场所。以桂花林场马厂工区为研究区域，该区域有较大面积且分布集中的马尾松中龄林。该林地于 2004 年栽植，株行距为 1.5×1.5m，自栽植以来未进行过任何抚育措施，且人为干扰较少。然而，该区域马尾松中龄林普遍存在密度过大、干形不良、树种单一、更新不良、生产力低下等问题。为解决这些问题，拟采取目标树单株择伐作业体系，逐步营建针阔混交异龄复层林分结构，加快群落演替进程，提高林分生产力，实现大径级木材利用。

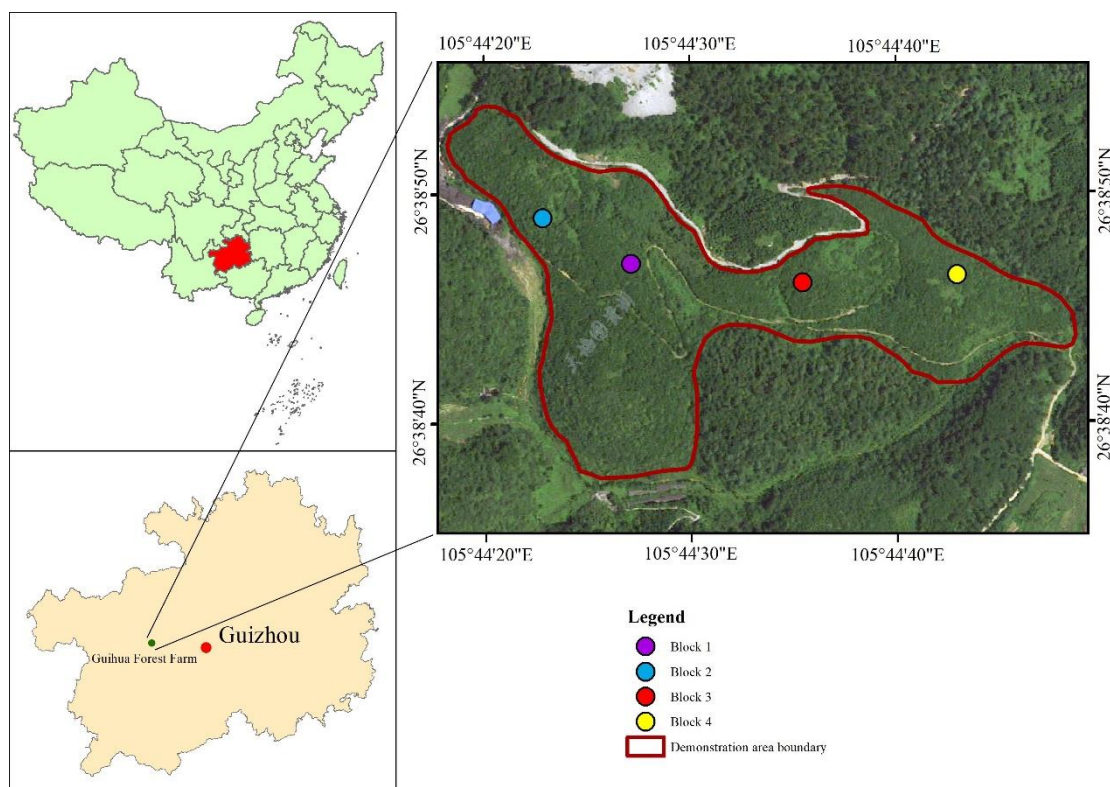


图 1 研究区地理位置及样地分布

Fig. 1 Geographical Location and sample plot distribution of the study area

2 研究方法

2.1 样地设置与调查

在 2021 年 4 月，经过充分踏查，选取了林分条件基本一致且具有代表性地块，建立了马尾松中龄林近自然抚育技术试验示范区，示范区共设置了 4 个样区，每个样区设置 5 个方形样地，样地面积为 32×32 m，对应 5 个采伐梯度，分别为 CK（对照组）、T1（约 10%的采伐强度）、T2（约 20%的采伐强度）、T3（约 30%的采伐强度）、T4（约 40%的采伐强度）。在采伐前，对样地内胸径≥5cm 的乔木进行每木检尺，并用铁牌编号永久标记，同时测量并记录乔木个体的胸径、树高、冠幅和枝下高等因子，并完成林下植被及土壤的调查与取样。

根据每个样地内胸高断面积总量确定采伐强度，采用“目标树择伐+全林经营”的作业方式，在伐除影响目标树生长的干扰树的基础上，对样地干形不良，生活力弱及没有培育前途的林木个体进行伐除，每个样地选取 11 株目标树，采伐对象主要为马尾松林木个体，但保留了其他生长良好且具有发展潜力的阔叶树种。在 2023 年 7 月对试验样地进行复测，调查因子与采伐前一致。

表 1 研究区域在不同采伐强度下 2 年后的林分总体状况
Tab. 1 General situation of stand in studied area 2 years after different cutting intensities

项目 Item	CK	T1	T2	T3	T4
平均胸径 Mean DBH (cm)	13.5±0.753	14.225±0.991	13.5±1.798	14.275±1.434	14.575±1.431
平均树高 Mean Height (m)	11.45±0.493	11.425±0.506	10.875±1.489	12.1±2.132	12.4±2.008
林分密度 Stand density (No. of tree·hm ⁻²)	1651.25±215.75	1331±187.768	1318.75±194.854	1028.25±183.832	801.25±158.916
郁闭度 Canopy cover	0.887±0.025	0.838±0.025	0.788±0.025	0.688±0.025	0.575±0.029
胸高断面积 Basal area (m ² ·hm ⁻²)	2.45±0.374	2.35±0.374	2.202±0.289	1.861±0.142	1.551±0.095
蓄积 Volume (m ³ ·hm ⁻²)	19.057±2.172	16.29±3.232	14.168±2.678	12.99±2.483	10.905±1.004

注：CK、T1、T2、T3、T4 分别表示采伐强度对照、10%、20%、30%、40%，下同。

2.2 林分状态评价体系

根据全面性、科学性和可操作性的林分状态指标筛选原则。本研究从林分结构、活力和多样性 3 个方面选取 9 个典型林分状态指标对马尾松中龄林林分状态进行评价，计算不同采伐强度下马尾松中龄林结构特征胸径分布（H）、树高分布（V）和林分密度（K）；活力特征林分优势度（U）、林分长势（B）和林木健康（Q）；多样性特征树种组成（Z）、树种多样性（D）和树种均匀度（P），具体定义及计算见表 2：

表 2 林分状态评价指标及公式
Tab. 2 Indicators and formulas for evaluating forest stand condition

项目 Item	林分特征 Stand characteristics	指标 Index	公式或定义 Formula or definition
结构	胸径分布（H）	q 值	将林木胸径以 2cm 为径阶距进行划分，按 Meyer 负指数分布表示 $N = ke^{-ad}$ ，式中：N 为株数；e 为自然对数的底；d 为胸径；a 为负指数分布结构常数，k 为常数。 $q = e^{ah}$ ，式中，h 表示径阶距为 2cm。若 q 值落在 1.2~1.7，表示处在合理的异龄林径阶分布范围内。
	树高分布（V）	基尼系数	$H = 1 - \sum(2Q_i - W_i) / n$ ，式中，n 为林木个体数， W_i 为第 i 个个体树高占树高综合的比例， Q_i 为 W_i 的累加值。
	林分密度（K）	林木拥挤度	$K = \frac{100}{N^{0.5}} / \overline{cw}$ ，式中，N 为公顷株数， $\overline{cw}$ 为平均冠幅。若 K 值落在 0.6~0.8，表示处在合理林分密度。该指标也可以用郁闭度来表示，若郁闭度 K 值落在 0.6~0.8，表示处在合理林分密度。
活力	林木优势度（U）	优势层林木占比	优势层林木株数占林分总株数的比例。
	林分长势（B）	潜在疏密度	$B = \frac{\bar{G}}{G_{max}}$ ，式中， $\bar{G}$ 为林分断面积， G_{max} 为林分潜在最大断面积，这里将其定义为林分中 50%较大个体的平均断面积与林木株数的乘积。
	林木健康（Q）	健康林木占比	健康林木（无病虫害且非断梢、弯曲、空心等）株数

占林分总株数的比例。		
树种组成 (Z)	树种组成指数	$Z = -\sum_{i=1}^S p_i \ln p_i$, 式中, p_i 为第 i 树种的蓄积比例; S 为样方中出现的树种数。注: 树种组成按十分法表示。
多样性	树种多样性 (D)	$D = 1 - \sum_{i=1}^S p_i^2$, 式中, p_i 为第 i 树种的个体数比例; S 为样方中出现的树种数。
	树种均匀度 (P)	$P = -\sum_{i=1}^S p_i \ln p_i / \ln S$, 式中, S 为样方中出现的树种数。

对于上述九个指标,除了胸径分布 (H) 和林分密度 (K) 这两个中间指标外,值越大越好,其值的范围在 0 到 1 之间。胸径分布 (H) 和林分密度 (K) 这两个中间指标使用公式 (1) 进行标准化,以适应其他指标 0 到 1 的范围。同样,值越大越好。

$$f(x) = \begin{cases} 0.1 & X \leq L, X \geq U \\ 0.1 + 0.9(X-L)/(O_1-L) & L < X < O_1 \\ 1.0 & O_1 \leq X \leq O_2 \\ 0.1 + 0.9(X-O_2)/(U-O_2) & O_2 < X < U \end{cases} \quad (1)$$

公式中, X 代表指标的观测值, $f(X)$ 代表评分函数值, U 代表指标的上限值 (胸径分布 (H) 的 U 值为 2.7, 林分密度的 U 值为 1.0), L 代表指标的下限值 (胸径分布 (H) 和林分密度 (K) 的 U 值均为 0), O_1 和 O_2 代表指标的最优值 (胸径分布 (H) 的 O_1 和 O_2 值分别为 1.2 和 1.7; 林分密度 (K) 的 O_1 和 O_2 值分别为 0.6 和 0.8)。

采用单位圆法对不同采伐强度下马尾松中龄林林分状态进行综合评价, 计算公式如下:

$$\omega = \frac{\sum_{k=1}^m \frac{\pi R_k^2}{m}}{m R^2} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m R_k^2 \quad (2)$$

式中: ω 为林分状态综合评价值, m 为林分状态指标个数, R_k 为第 k 个林分状态指标。

2.4 数据处理与分析

所有数据利用 Excel 2019、R 语言进行初步整理、计算, 并使用 R 语言对数据进行可视化处理。

3 结果与分析

3.1 不同采伐强度的马尾松中龄林林分状态指标的影响

不同采伐强度马尾松中龄林林分状态指标的差异影响结果如下 (表3), 林分密度 (K)、树种组成 (Z)、树种多样性 (D) 和树种均匀度 (P) 分布趋势较为一致, 即随着采伐强度的增大先增加后减小的趋势, 且均在 30% 采伐强度时达到转折点, 方差分析结果表明对照林分林分密度 (K)、树种多样性 (D) 要显著低于各采伐强度处理林分 ($P < 0.05$); 树种组成 (Z) 10%, 20%, 30% 采伐强度林分显著高于对照林分 ($P < 0.05$), 而 40% 采伐强度林分与对照林分差异不显著 ($P > 0.05$); 树种均匀度 (P) 20%, 30% 采伐强度林分要显著高于对照林分 ($P < 0.05$); 林木健康 (Q) 随着采伐强度的增大而增加, 其值依次为 0.79、0.87、0.90、0.96、1.00, 且对照显著低于各采伐强度 ($P < 0.05$); 而树高分布 (V)、胸径分布 (H)、林木优势度 (U) 和林分长势 (B) 对照林分与各采伐强度处理林分之间虽然存在一定差异, 但差异并不显著 ($P > 0.05$)。

表 3 采伐强度对马尾松林分状态指标的影响

Tab. 3 The Impact of Harvesting Intensity on the Stand Condition Indicators of Masson Pine Forests

林分指标 Indicators	CK	T1	T2	T3	T4
H	0.219±0.03a	0.201±0.024a	0.198±0.009a	0.222±0.042a	0.206±0.032a
V	0.119±0.037a	0.135±0.025a	0.117±0.014a	0.13±0.04a	0.097±0.044a
K	0.55±0c	1±0a	1±0a	1±0a	0.85±0b
U	0.046±0.048a	0.091±0.173a	0.028±0.05a	0.17±0.333a	0.182±0.348a
B	0.639±0.033a	0.658±0.03a	0.642±0.023a	0.641±0.045a	0.648±0.055a
Q	0.788±0.038d	0.868±0.07c	0.9±0.071bc	0.96±0.045ab	1±0a
Z	0.187±0.122b	0.422±0.128a	0.475±0.105a	0.494±0.211a	0.401±0.144ab
D	0.214±0.144b	0.452±0.147a	0.512±0.097a	0.537±0.218a	0.455±0.143a
P	0.138±0.079b	0.219±0.061ab	0.235±0.038a	0.269±0.072a	0.224±0.043ab

注：表中不同小写字母表示不同采伐强度之间差异显著（ $P<0.05$ ）

3.2 基于单位圆方法的马尾松中龄林林分状态综合评价

基于单位圆的林分状态评价方法对不同采伐强度马尾松中龄林林分状态进行综合分析评价，结果表明（图 2）。不同采伐强度下马尾松中龄林林分状态具有相同的变化趋势，即 4 个样区的林分状态均随着采伐强度的增大先增加后减小，且均在 30%采伐强度时达到转折点，同时各样区采伐样地的整体林分状态都要优于对照样地林分状态；4 个样区对照林分的林分状态 ω 值均小于 0.25，林分状态极差，不同采伐强度处理林分状态 ω 值均处于[0.25, 0.4) 范围内，林分状态较差。对照，10%，20%，30%，40%采伐强度林分状态综合评价 ω 值分别为 0.170，0.305，0.316，0.355，0.308，对照林分的林分状态极差，10%，20%，30%，40%采伐强度林分的林分状态较差，方差分析结果表明各采伐强度总体林分的综合评价结果（ ω ）要显著高于对照林分（ $P<0.05$ ），且 30%采伐强度的林分状态综合评价结果（ ω ）要显著高于其它 4 个处理（ $P<0.05$ ），分别是对照、10%、20%、40%采伐强度的 2.09 倍、1.16 倍、1.12 倍、1.15 倍。马尾松中龄林经过采伐后其林分状态都要比未采伐林分有所改善，说明不同采伐强度均能够一定程度提高马尾松中龄林林分状态，其中，以 30%采伐强度对林分状态的影响最明显。

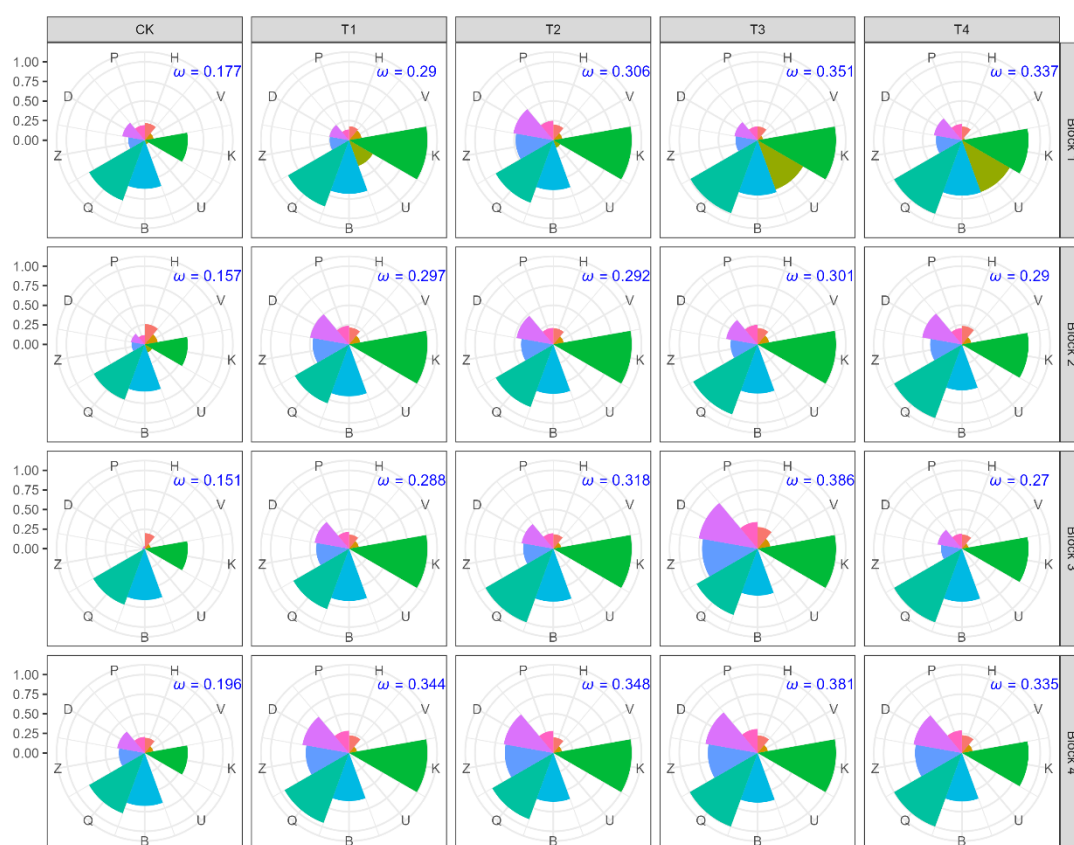


图2 基于单位圆方法的马尾松中龄林林分状态评价

Fig. 2 Evaluation of Masson Pine Mid-Aged Stand Conditions Based on the Unit Circle Method

3.3 基于主成分分析的马尾松中龄林林分状态评价

对不同采伐强度下马尾松中龄林林分状态指标进行主成分分析（表3和图2），样本数据通过了KMO和Bartlett球形检验，结果显示，前2个主成分累积贡献率达到87.546%，因而选用前2个主成分对不同采伐强度下马尾松中龄林林分状态进行综合评价。第一主成分的方差贡献率为56.677%，载荷值较高的性状是树种多样性（D）、树种组成（Z）和树种均匀度（P），表征多样性的特点，可以将第一主成分作为近似反映多样性状况的综合评价；第二主成分的方差贡献率为30.869%，载荷值较高的性状是林分优势度（U）、林分密度（K）、林木健康（Q）、林分长势（B）、胸径分布（H）、树高分布（V），表征活力和结构的特点，可以将第二主成分作为近似反映生长状况的综合评价。此外，对照林分CK与T1、T2、T3、T4经过采伐的林分具有明显差异，说明采伐能够有效提升马尾松中龄林的林分状态，但是T1、T2、T3、T4不同采伐强度下林分状态重叠度较高，表明不同采伐强度下林分状态存在一定差异，但差异不明显。

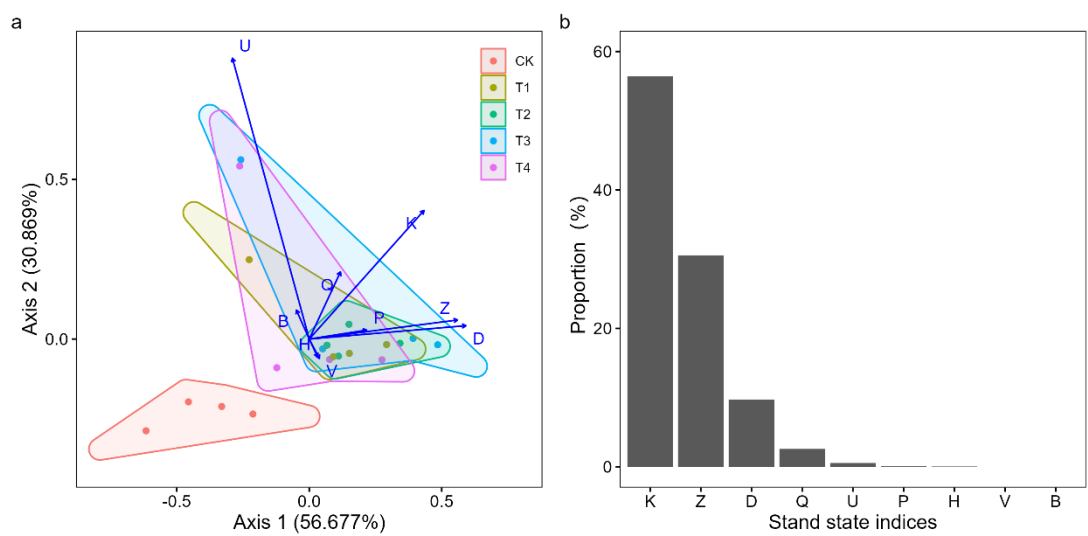


图3 基于主成分分析的马尾松中龄林林分状态评价

Fig. 3 Evaluation of Masson Pine Mid-Aged Stand Conditions Based on Principal Component Analysis

基于主成分分析计算各性状权重排序为：林分密度（ K ，56.411%）>树种组成（ Z ，30.543%）>树种多样性（ D ，9.744%）>林木健康（ Q ，2.591%）>林分优势度（ U ，0.556%）>树种均匀度（ P ，0.091%）>胸径分布（ H ，0.050%）>树高分布（ V ，0.011%）>林分长势（ B ，0.003%）。林分密度（ K ，56.411%）、树种组成（ Z ，30.543%）、树种多样性（ D ，9.744%）、林木健康（ Q ，2.591%）4个指标的权重占比为87.146%且每个指标的权重均大于1%，是表征马尾松中龄林林分状态的关键指标。此外，不同采伐强度下马尾松中龄林林分状态综合评价 $T1$ 、 $T2$ 、 $T3$ 、 $T4$ 不同采伐处理间无显著差异但均显著大于对照林分 CK （图4和表4）。

3.4 单位圆方法与主成分分析对林分状态评价对比分析

单位圆方法评价结果和主成分分析评价结果具有极显著线性相关关系（ $R^2=0.909$ ， $P<0.001$ ），表明两种方法在总体趋势上具有高度一致性。然而，通过多重比较分析，我们发现单位圆方法表现出了更高的敏感性。在不同处理间，单位圆方法能够更精准地区分细微差异。

表4 单位圆方法与主成分分析对马尾松中龄林林分状态评价

Tab. 4 Evaluation of Mid-Aged Masson Pine Stand Conditions Using the Unit Circle Method and Principal Component Analysis

评价方法 Method	CK	T1	T2	T3	T4
单位圆方法	0.170±0.020c	0.305±0.026b	0.316±0.024ab	0.355±0.039a	0.308±0.033b
主成分分析	0.194±0.149b	0.695±0.124a	0.749±0.101a	0.810±0.184a	0.648±0.134a

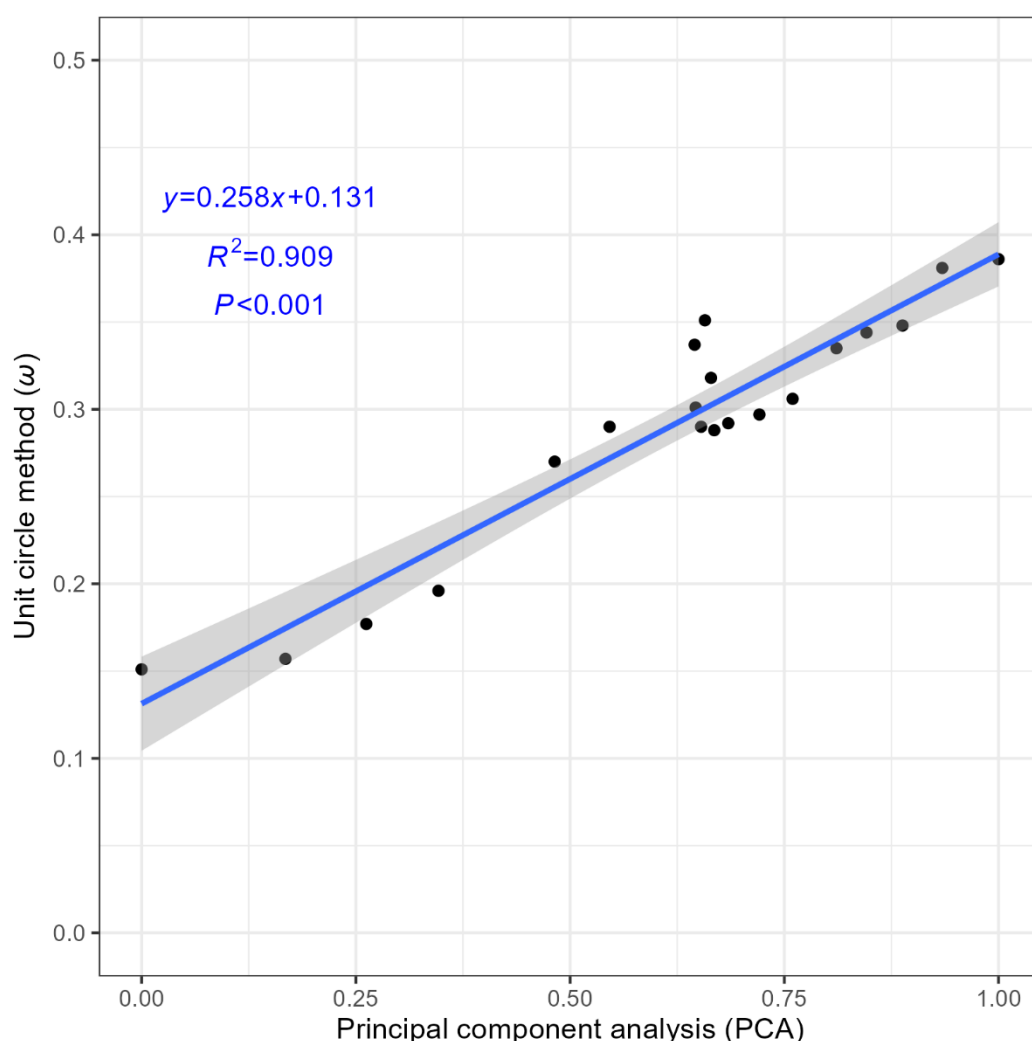


图4 基于单位圆方法与主成分对林分状态评价结果相关性分析

Fig. 4 Correlation Analysis of Stand Condition Evaluation Results Based on the Unit Circle Method and Principal Component Analysis

4 讨论与结论

4.1 讨论

基于单位圆方法对比分析不同采伐强度下林分状态,结果显示,对于林分密度过大且郁闭度过高的马尾松中龄林,采伐有助于改善其林分状态,其中,30%左右的采伐强度下林分状态最理想。采伐通过释放林木的生长和营养空间,降低了林木间的竞争,从而促进了林木的生长。合理的采伐强度对优化森林结构具有正向作用,通过伐除一定数量的树木,将森林结构调整至最优状态,从而最大化生态功能。常陈豪等在研究间伐对黄山松人工林空间结构并提高稳定性,中度(30.4%)间伐强度对林分状态影响最为明显。采伐为森林群落中开辟了新的生态位,减轻树木间的竞争强度,促进了演替,并提高了森林的健康状况。可见,间伐作为一种科学有效的森林经营技术措施,不同于传统的皆伐,其核心在于保留优良树种和健康有活力的林木,通过合理调整森林结构,从而维持森林的生产力和稳定性,只有健康稳定的森林生态系统才能充分发挥其生态、社会和经济功能。

本研究基于单位圆方法和主成分分析评价了采伐强度对马尾松中龄林林分状态的影响。结果均显示,林分密度、林木健康、树种组成、树种多样性这四个林分状态指标对采伐反应较为敏感。采伐两年后,这

些指标表现出显著改善。这主要归因于采伐去除了林内生长密集、长势不良，缺乏培育前途及遭受病虫害的树木。此外，由于马尾松中龄林树种单一且纯林化程度高，采伐过程中优先去除马尾松和保留其它生长良好的阔叶树种，从而改变了马尾松人工林树种组成和林分密度，并在一定程度上提升了保留林木的健康与活力。然而，胸径分布、树高分布、林木优势度、林分长势、树种均匀度对采伐的响应相对较差，短期采伐难以实现这些指标的提升。这可能是由于采伐时间较短，导致林木胸径和树高增长量变化不显著。此外，林木和林分对间伐的响应是随时间而变化的，间伐引起的林木大小不均衡和生长分配变化在不同的间伐间隔时间上表现不同，因此，这些指标的提升可能需要更长期的观测和更精细的经营策略。

本研究提出的基于单位圆方法评价林分状态的方法，能够实现林分状态科学评价，反映林分实际状态，对具体森林经营措施的制定具有较强的指导意义。相较于其他传统评价方法，至少具有三个优点，（1）评价体系更加科学，从结构、活力和多样性三个方面选取典型指标构建林分状态指标体系，具有统一的指标构建方法和取值范围，理论基础更可靠，生物学意义更明确。（2）数据呈现更加直观，单位圆的结果呈现方式极大地提升了我们对林分状态综合评价信息的理解和接受度；（3）评价结果更加精准，我们的研究显示，单位圆方法和主成分分析对林分状态评价结果在总体趋势上具有高度一致性，但单位圆方法相较主成分分析对采伐处理的响应更加敏感。这可能是由于单位圆方法充分利用了几何特性，使得数据变换后更易于捕捉变化趋势。此外，单位圆方法的几何变换过程可以有效减少噪音干扰，提高数据的解析力。主成分分析虽然在降维和数据简化方面具有优势，但在不同处理对比分析时可能由于对某些主成分的过度依赖，导致对细微差异的敏感性不足。因此，在需要高精度区分不同处理效果的情境下，单位圆方法更具优势。可见，单位圆方法对林分状态评价结果更加精准，且对森林质量提升具有较强的指示作用。

4.2 结论

理解采伐对林分结构和状态的影响，对于科学管理森林资源至关重要。本研究结果表明，对于林分密度过大且郁闭度过高的马尾松中龄林，采伐强度影响着林分状态。具体而言，中度采伐（采伐强度约 30%）更有利于改善林分状态。运用单位圆方法能够科学有效地反映采伐强度对马尾松中龄林林分状态的短期影响，并对提升森林质量具有较强的指示作用。这一方法在林业生产实践中具有推广潜力，可用于有效指导森林经营工作。