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

不同经营措施对蒙古栎次生林韧性的影响

周超凡 雷相东 胡雪凡 赵阳 刘迪 李圣涛 丁易 卢军 张会儒

Effects of different management measures on resilience of *Quercus mongolica* secondary forests

Zhou Chaofan, Lei Xiangdong, Hu Xuefan, Zhao Yang, Liu Di, Li Shengtao, Ding Yi, Lu Jun, Zhang Huiru

引用本文:
周超凡, 雷相东, 胡雪凡, 赵阳, 刘迪, 李圣涛, 丁易, 卢军, 张会儒. 不同经营措施对蒙古栎次生林韧性的影响[J]. 北京林业大学学报, 2026, 48(2):103–113. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250521
Zhou Chaofan, Lei Xiangdong, Hu Xuefan, Zhao Yang, Liu Di, Li Shengtao, Ding Yi, Lu Jun, Zhang Huiru. Effects of different management measures on resilience of *Quercus mongolica* secondary forests[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(2):103–113. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250521

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250521

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

竞争对红松树木的干旱适应性及生长衰退影响
Effects of competition on drought adaptability and growth decline of *Pinus koraiensis* trees
北京林业大学学报, 2022, 44(6): 1–9. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210198

小陇山林区不同类型锐齿槲栎次生林乔木层多样性与碳储量研究
Arboreal layer diversity and carbon storage in secondary forests of *Quercus aliena* var. *acuteserrata* across different types in Xiaolongshan Mountain forest area, Gansu Province of northwestern China
北京林业大学学报, 2025, 47(9): 14–23. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250096

关于理想森林及其经营的遗传学思考
Genetic thinking on ideal forest and its management
北京林业大学学报, 2024, 46(6): 1–9. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240093

林窗对华北落叶松天然次生林林下物种多样性的影响
Effects of forest gaps on understory species diversity of *Larix principis–rupprechtii* natural secondary forest
北京林业大学学报, 2024, 46(6): 48–56. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220223

不同经营世代刺槐人工林多功能经营的密度管理图研建
Research and development of density management map for multifunctional management of *Robinia pseudoacacia* plantations with different generations of management
北京林业大学学报, 2024, 46(10): 11–21. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230213

不同经营方式对油松成熟人工林生长和植物多样性的影响
Effects of different management methods on growth and plant diversity in mature *Pinus tabuliformis* plantations
北京林业大学学报, 2023, 45(12): 1–10. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220302

DOI:10.12171/j.1000−1522.20250521

不同经营措施对蒙古栎次生林韧性的影响

周超凡[1]　雷相东[1]　胡雪凡[2]　赵　阳[3]　刘　迪[4]　李圣涛[5]
丁　易[6]　卢　军[1]　张会儒[1]

（1. 林木资源高效生产全国重点实验室，中国林业科学研究院资源信息研究所，北京 100091；2. 北京市园林绿化科学研究院，北京 100102；3. 吉林长白山森工汪清林业有限公司，吉林 汪清 133200；4. 中国林业科学研究院华北林业实验中心，北京 102300；5. 河北农业大学林学院，河北 保定 071000；6. 中国林业科学研究院森林生态环境与自然保护研究所，北京 100091）

摘要:【目的】揭示不同经营措施对东北地区蒙古栎次生林韧性的影响，为该区域森林适应性经营与生态修复提供科学依据。**【方法】**在长白山林区设置 12 个 1 hm^2 样地，采用随机区组设计，实施传统经营（TM）、目标树经营 1（CTR1，目标树 80 株/hm^2）、目标树经营 2（CTR2，目标树 120 株/hm^2）及对照（CK）4 种处理，并于 2013、2018 和 2023 年开展 3 期调查。依据森林韧性理论框架，从抵抗力（优势木胸径、加权高径比、角尺度）、恢复力（大小多样性、树种多样性、郁闭度）和适应性（树种组成和顶极种竞争力）3 个维度选取 8 项指标构建综合评价指标体系，采用主客观赋权相结合的单位圆法计算森林韧性综合指数，分析不同经营措施在短期（5 年后）及中期（10 年后）对森林韧性的影响。**【结果】**（1）所构建的指标体系在统计学与生态学上均具有合理性，各指标相关性较低、信息互补性较强，综合赋权法能够有效区分不同经营措施对森林韧性的影响。（2）目标树经营和传统经营均显著提高了林分大小多样性、加权高径比和郁闭度（$p < 0.05$）。此外，目标树经营还显著促进了优势木胸径增长。（3）伐后 5 年，CTR2 的韧性提升幅度最大且达到显著水平；伐后 10 年，两种目标树经营均显著提升了韧性，而传统经营与对照处理的森林韧性整体未见显著增强。（4）中短期内经营对森林韧性的提升主要来源于抵抗力和恢复力的增强。**【结论】**低强度的目标树经营，尤其是目标树密度为 120 株/hm^2 的处理（CTR2），在短期与中期效果上均表现最佳。该经营措施能够通过优化径级结构、改善优势木生长条件和增强功能冗余，协同提升蒙古栎次生林的抵抗力与恢复力，是增强温带次生林韧性的有效途径；而适应性的提升则更多依赖于长期的结构调整与演替过程。

关键词：森林韧性综合指数；抵抗力；恢复力；目标树经营；适应性管理
中图分类号：S753.7　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1000−1522(2026)02−0103−11
引文格式：周超凡，雷相东，胡雪凡，等. 不同经营措施对蒙古栎次生林韧性的影响［J］. 北京林业大学学报，2026，48(2)：103−113. Zhou Chaofan, Lei Xiangdong, Hu Xuefan, et al. Effects of different management measures on resilience of *Quercus mongolica* secondary forests［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(2): 103−113.

Effects of different management measures on resilience of *Quercus mongolica* secondary forests

Zhou Chaofan[1]　Lei Xiangdong[1]　Hu Xuefan[2]　Zhao Yang[3]　Liu Di[4]　Li Shengtao[5]
Ding Yi[6]　Lu Jun[1]　Zhang Huiru[1]

(1. State Key Laboratory of Efficient Production of Forest Resources, Institute of Forest Resource Information Techniques, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China;
2. Beijing Academy of Forestry and Landscape Architecture, Beijing 100102, China;
3. Wangqing Forestry Co., Ltd., Jilin Changbai Mountain Forest Industry Group, Wangqing 133200, Jilin, China;
4. Experimental Centre of Forestry in North China, Chinese Academy of Forestry, Beijing 102300, China;
5. College of Forestry, Hebei Agricultural University, Baoding 071000, Hebei, China;
6. Ecology and Nature Conservation Institute, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

收稿日期: 2025−12−29　**修回日期:** 2026−01−09
基金项目: 国家重点研发计划（2023YFE0105100-4），国家自然科学基金项目（32501645）。

第一作者: 周超凡，助理研究员。主要研究方向：森林可持续经营。Email: zhouchaofan@ifrit.ac.cn　地址：100091 北京市海淀区东小府 1 号中国林业科学研究院资源信息研究所。
责任作者: 雷相东，博士生导师，研究员。主要研究方向：森林生长模型与模拟。Email: xdlei@ifrit.ac.cn　地址：同上。

本刊网址: https://j.bjfu.edu.cn; https://journal.bjfu.edu.cn

Abstract: [**Objective**] To quantify the effects of different management measures on the resilience of Mongolian oak (*Quercus mongolica*) secondary forests in northeastern China, and to provide a scientific basis for adaptive forest management and ecological restoration in the region. [**Method**] Twelve permanent 1-ha plots were established in the Changbai Mountain area and arranged in a randomized block design with four treatments: traditional management (TM), crop-tree release with a target tree density of 80 trees per hectare (CTR1), crop-tree release with a target tree density of 120 trees per hectare (CTR2), and control (CK). Forest inventories were conducted in 2013, 2018, and 2023. Based on the theoretical framework of forest resilience, eight indicators were selected from three dimensions: Resistance (dominant tree diameter, weighted height–diameter ratio, uniform angle index), Recovery (size diversity, tree species diversity, canopy cover), and Adaptability (species composition, and competitiveness of climax species) to construct a comprehensive evaluation index system. A combined subjective–objective weighting approach and the unit-circle method were applied to calculate the resilience composite index (RCI) and to assess the effects of different management measures on forest resilience after 5 and 10 years. [**Result**] (1) The proposed indicator system was ecologically and statistically robust, with low inter-indicator correlations and strong information complementarity, and the combined weighting method effectively distinguished resilience responses among management treatments. (2) Both crop-tree release and traditional management significantly increased size diversity, weighted height–diameter ratio, and canopy cover ($p < 0.05$), while crop-tree release further promoted the diameter growth of dominant trees. (3) Five years after cutting, CTR2 showed the largest and significant increase in RCI; ten years after cutting, both crop-tree treatments exhibited significant improvement, whereas TM and CK showed no significant enhancement of resilience. (4) The improvement of forest resilience in the short and medium term mainly comes from the enhancement of resistance and recovery. [**Conclusion**] Low-intensity crop-tree release, particularly CTR2 with a crop-tree density of 120 trees per hectare, demonstrated optimal short-and medium-term effects. By optimizing size structure, improving the growth conditions of dominant trees, and enhancing functional redundancy, this approach simultaneously strengthens resistance and recovery of *Quercus mongolica* secondary forests and represents an effective approach to improve resilience in temperate secondary forests. Enhancement of adaptability, however, depends on longer-term structural adjustment and successional processes.

Key words: forest resilience composite index; resistance; recovery; crop-tree release; adaptive management

森林是维系国家生态安全与社会经济可持续发展的基础性自然资本，其功能不仅体现在木材等物质产品供给上，更在于固碳增汇、水源涵养、生物多样性保护及生态休闲等多重生态系统服务[1−2]。这些生态系统服务的持续供给依赖于森林在自然或人为扰动下维持关键结构与功能并实现恢复与适应的能力，即森林韧性(forest resilience)。结合在实际森林修复经营中的应用，森林韧性可分解为 3 个互相关联的维度：抵抗力(resistance)、恢复力(recovery)和适应性(adaptability)[3−4]，分别反映森林在扰动发生时维持结构稳定性的能力、扰动后恢复原有结构与功能的能力，以及在长期环境变化背景下通过结构与功能调整实现持续稳定的能力。

当前，全球温带森林正面临气候变化带来的严峻挑战。气温升高及极端气候事件(如干旱、热浪、暴雨和强风)频发，正深刻改变火灾、病虫害和风倒等扰动机制，使森林的抵抗力、恢复力和适应性受到前所未有的考验[5−7]。这些变化不仅增加了森林退化与功能衰减风险，也直接威胁森林持续提供关键生态系统服务的能力[8−9]，对森林经营与管理提出了更高要求。

在我国东北温带地区，历史上高强度采伐导致大面积原始阔叶红松(*Pinus koraiensis*)混交林退化为以蒙古栎(*Quercus mongolica*)为优势树种的次生林[10]。与原始林相比，这类次生林普遍存在林分结构简化、径级分化不足、树种组成不稳定以及天然更新能力低下等问题[11−12]，表现为抵抗力和恢复力相对较低。同时，在气候变化背景下，多重扰动叠加风险(干旱、风倒、火灾和虫害)可能进一步削弱其适应性，甚至导致生态系统退化或崩溃[13−14]。因此，通过

科学经营提升次生林的结构复杂性、功能多样性及群落稳定性，以增强森林整体韧性，已成为该区域森林可持续管理和生态修复的迫切需求。

近年来研究表明，模仿自然干扰、目标树经营、异龄混交林经营及气候智慧林业等适应性经营措施，能够在不同程度上提升森林的抵抗力、恢复力和适应性[15−16]。然而，针对东北温带次生林，尤其是蒙古栎次生林，不同经营措施对森林韧性 3 个维度的综合影响仍缺乏系统性定量评估，其协同增强效应或潜在权衡机制尚不清晰。

基于此，本研究以我国东北温带林区蒙古栎次生林为对象，在长期定位样地监测的基础上，围绕森林在扰动情景下的抵抗力、恢复力与适应性 3 个维度，构建森林韧性综合评价指标体系，评估不同经营措施对森林韧性的影响。具体目标包括：(1)分析不同经营措施对关键韧性指标的差异化影响；(2)比较不同时间尺度(5 年与 10 年)下森林韧性综合指数(resilience composite index，RCI)的动态变化规律；(3)揭示不同经营措施对次生林抵抗力、恢复力与适应性的综合效应及其内在机制。研究结果将为东北温带次生林的适应性经营与生态修复提供科学依据，并为提升温带森林韧性提供实践参考。

1　研究区概况

研究区位于吉林省延吉市汪清县境内的吉林长白山森工汪清林业有限公司。地处长白山北麓。海拔介于 300 ~ 1 200 m 之间，坡度一般为 5° ~ 25°。属温带大陆性季风气候，四季分明，雨热同期，年均气温约为 4 ~ 5 ℃，极端气温范围为−32 ~ 32 ℃，年降水量 600 ~ 700 mm。

森林植被类型多样，主要包括云冷杉(*Picea asperata-Abies fabri*)针阔混交林、蒙古栎林、杨桦(*Populus-Betula*)林及阔叶红松林等。乔木层以红皮云杉(*Picea koraiensis*)、鱼鳞云杉(*Picea jezoensis*)、红松、蒙古栎、枫桦(*Betula costata*)、白桦(*Betula platyphylla*)、黑桦(*Betula dahurica*)、大青杨(*Populus ussuriensis*)、色木槭(*Acer pictum*)、长白落叶松(*Larix olgensis*)、紫椴(*Tilia amurensis*)、春榆(*Ulmus davidiana* var. *japonica*)及水曲柳(*Fraxinus mandshurica*)等为主[17]。

灌木层以山葡萄(*Vitis amurensis*)、毛榛(*Corylus mandshurica*)、狗枣猕猴桃(*Actinidia kolomikta*)、暴马丁香(*Syringa reticulata* var. *amurensis*)、五味子(*Schisandra chinensis*)、忍冬(*Lonicera japonica*)及刺五加(*Eleutherococcus senticosus*)等为主[18]。

2　研究方法

2.1　样地设置和经营措施

以长白山地区蒙古栎次生林为对象，通过实施 4 种不同的经营措施，探讨其对森林韧性的综合影响。2013 年，在汪清林业局塔子沟林场 28 林班内选择生境条件、林分密度和蓄积量相对一致，具有代表性的蒙古栎中龄林林分，设置 12 个面积 1 hm^2 的固定大样地。对样地中所有胸径(DBH)≥5 cm 的林木进行挂牌编号，记录树号、树种、胸径、树高、冠幅及林木分级等信息，同时开展样地基本情况调查。

在本底调查基础上，采取完全随机区组设计(表 1)，在 12 块样地中设置传统经营(TM)、目标树经营 1(CTR1)、目标树经营 2(CTR2)及对照处理(CK)4 种经营措施，每种措施设置 3 个重复。各组样地的立地条件和主要林分特征差异均不显著[18]。分别于 2018 年和 2023 年对样地进行复测，记录林木胸径变化、死亡及进界等情况。

4 种经营措施具体如下。(1)传统经营(TM)：遵循“采劣留优、采密留稀、采小留大”的原则实施抚育采伐；现地执行中更多对胸径 5 cm 以下的劣势木进行清理(不计入采伐)，实际蓄积采伐强度为 1.7% ~ 4.6%。(2)目标树经营 1(CTR1)：以 80 株/hm^2 的目标树密度为标准，实施干扰树伐除；现地操作中主要伐除对目标树树冠有明显挤压和遮盖的干扰树，实际蓄积采伐强度为 3.2% ~ 6.8%。(3)目标树经营 2(CTR2)：以每 120 株的目标树密度为标准，实施干扰树伐除；现地操作与 CTR1 相同，主要伐除对目标树形成竞争压力的干扰树，实际蓄积采伐强度为 3.5% ~ 9.8%。(4)对照处理(CK)：不进行人为干预，作为自然演替对照。

目标树选择标准为树干通直、冠幅饱满、长势旺盛、健康无病虫害且位于主林层或亚优势层的优势木。优先选择蒙古栎及水曲柳、胡桃楸(*Juglans mandshurica*)、黄檗(*Phellodendron amurense*)、红松等珍贵树种。目标树密度按每 100 平方米 1 株的基准进行初选，并在实际选择过程中适当增减，以达到设计密度，在保证目标树数量的同时实现其空间分布的相对均匀。

以每株目标树为中心，通过目视判断其竞争关系，将与目标树冠层相交、对其生长产生明显竞争压力的个体界定为干扰树[19]。为防止采伐强度过大导致目标树因风倒、折干或失水而死亡，结合样地实际情况，每株目标树仅伐除 1 ~ 2 株相邻干扰树，以实现适度释放生长空间、稳定提升目标树的生长势[20]。

为保证不同经营措施具备充足的样本量，将 12

表 1 样地经营措施基本信息表

Tab. 1 Basic information of management measures in sample plots

样地号	经营措施	采伐强度/%	林分密度/（株·hm^{-2}）		平均胸径/cm		蓄积量/（m^3·hm^{-2}）		树种组成	
			伐前	伐后	伐前	伐后	伐前	伐后	伐前	伐后
ZH-01	TM	4.6	799	783	17.4	17.3	130.69	124.64	62蒙10白10杨8红6色3椴1黑	63蒙11杨8白8红6色3椴1黑
ZH-02	CTR1	6.8	901	844	16.2	16.2	130.12	121.25	40蒙20杨11椴10白8红8色2杂1黄	41蒙20杨10白10椴9色8红1黄1杂
ZH-03	CTR2	3.5	1 034	989	15.5	15.5	131.81	127.17	46蒙18白11色9椴8杨8红	47蒙16白11色10椴8杨8红
ZH-04	CTR1	3.2	988	965	16.2	16.2	141.08	136.51	45蒙15白13椴10红9色6杨2杂	45蒙15白13椴10红9色6杨2杂
ZH-05	CK	0.0	1 002	1 002	18	18	178.69	178.69	53蒙15红12椴8色7白5杨	53蒙15红12椴8色7白5杨
ZH-06	CK	0.0	560	560	17.2	17.2	89.84	89.84	36蒙25白16杂15落3黑3色2水	36蒙25白16杂15落3黑3色2水
ZH-07	TM	4.0	993	979	15.4	15.2	118.91	114.09	48蒙18杂10白10红7黑2杨2落1榆1色1水	49蒙18杂10红9白7黑2杨2落1榆1色1水
ZH-08	CTR2	9.8	1 058	1 025	15.7	15.3	138.71	125.17	47蒙21白10红8杂6黑5落1冷1色1水	49蒙18白11红8杂5黑5落2水1冷1色
ZH-09	TM	1.7	797	784	17.2	17.2	124.89	122.74	56蒙11杂7胡5杨5黑5水3白3椴2红2落1云	56蒙11杂7胡5杨5黑5水3白3椴2红2落1云
ZH-10	CTR2	3.6	939	904	17.1	17.1	147.39	142.01	61蒙15白5黑4杂3榆2杨2椴2红2冷2水1色1云	60蒙15白5黑4杂3榆3红2杨2椴2冷2水1色1云
ZH-11	CTR1	4.3	997	969	16.9	16.7	157.36	150.62	43蒙23白8杨5椴5红5冷5色3黑2杂1榆	44蒙22白8杨5椴5红5冷5色3黑2杂1榆
ZH-12	CK	0.0	678	678	19.1	19.1	137.02	137.02	48蒙22落10杂6水4白4色2榆2杨2黑	48蒙22落10杂6水4白4色2榆2杨2黑

注：TM表示传统经营，CTR1、CTR2分别表示目标树经营1和2，CK表示对照。蒙. 蒙古栎*Quercus mongolica*，红.红松*Pinus koraiensis*，白.白桦*Betula platyphylla*，落.落叶松*Larix olgensis*，水.水曲柳*Fraxinus mandshurica*，色.色木槭*Acer pictum*，杨.大青杨*Populus ussuriensis*，黑.黑桦*Betula dahurica*，椴.紫椴*Tilia amurensis*，榆.春榆*Ulmus davidiana* var. *japonica*，云.云杉*Picea jezoensis*，冷.冷杉*Abies nephrolepis*，黄.黄檗*Phellodendron amurense*，胡.胡桃楸*Juglans mandshurica*，杂.其他树种。

个大样地划分为 48 个 50 m × 50 m 小样地，筛选出初始条件相近的 42 个小样地作为研究对象。同时，为建立合理的恢复参照，选取研究区附近处于顶极群落阶段的阔叶红松老龄林作为次生林恢复的参照对象。该老龄林优势木年龄在 200 年以上，林分结构完整、稳定性高，树种组成（按断面积占比计）为红松（43%）、蒙古栎（17%）、紫椴（11%）、冷杉（9%）、水曲柳（8%）、杂木（8%）、色木槭（4%），其原生性和顶极群落特征可为次生林恢复目标提供科学依据。因此，在阔叶红松老龄林已建立的 6 hm^2 大样地中均匀抽取 6 个小样地，计算各评价指标值作为现实最优值。不同经营措施样地的基本属性信息见表 2。

2.2 森林韧性综合评价指标体系构建

根据生态系统韧性理论[3−4,21]，森林韧性可划分为抵抗力、恢复力与适应性 3 个功能互补的维度，分别对应扰动中维持稳定、扰动后实现恢复以及通过系统调整实现长期发展的核心能力。由于森林韧性本身难以在短时间内直接测度，通常需借助能够反映林分结构特征、群落组成及其演替状态的代理指标进行综合评价[4,22]。

本研究遵循“理论约束—生态针对性—统计独立性—实际可操作性”相结合的原则遴选指标。首先，基于森林韧性三维度理论框架，明确不同维度所对应的关键生态过程与功能内涵；其次，结合蒙古栎次生林普遍存在的结构简化、径级分化不足和演替受阻等问题，优先选择能够直接表征林分结构稳定性、恢复潜力及演替方向的指标；再次，通过相关性分析与生态学意义判断，避免选择信息高度重叠或解释功能相近的指标，确保各指标在统计上相对独立、在生态学上互为补充；最后，所选指标均可通过常规森林资源调查获取，具备良好的可操作性和推广应用潜力。

表 2 小样地基本属性

Tab. 2 Basic attributes of sample subplots

指标	目标树经营1	目标树经营2	传统经营	对照处理	老龄林
样地数量	12	12	12	6	6
林分密度/（株·hm^{-2}）	962 ± 205	1 010 ± 157	931 ± 122	863 ± 133	709 ± 105
平均胸径/cm	16.5 ± 1.2	16.2 ± 1.5	17.8 ± 1.1	16.68 ± 1.2	31.5 ± 3.3
断面积/（m^2·hm^{-2}）	20.45 ± 3.42	20.51 ± 2.32	23.21 ± 3.95	18.72 ± 2.00	54.92 ± 10.18
蓄积量/（m^3·hm^{-2}）	142.85 ± 26.36	139.31 ± 17.11	160.72 ± 30.24	124.83 ± 15.29	549.22 ± 109.31

基于上述原则，最终从抵抗力、恢复力和适应性 3 个维度选取优势木胸径、加权高径比、角尺度、大小多样性、树种多样性、郁闭度、树种组成和顶极种竞争力 8 项指标[23−29]，构建蒙古栎次生林森林韧性综合评价指标体系。各指标间的相关系数均低于 0.65，大部分低于 0.45，表明所选指标间不存在显著共线性，适合用于构建综合评价指标体系。各指标构成、生态学含义、计算方法及所属韧性维度见表 3。

2.3　综合评价方法

为实现森林韧性的综合定量评价，本研究依据理论最优值或老龄林参考值（中位数）对各指标进行 0 ~ 1 标准化处理（表 3）。在指标标准化处理的基础上，对各评价指标赋予综合权重，并采用单位圆法计算森林韧性综合指数[29]。

鉴于单一赋权方法难以同时兼顾生态学理论与样本数据特征，且易产生主观性或信息偏倚，本研究采用主观赋权与客观赋权相结合的综合赋权法确定各指标权重，以同时体现森林韧性不同维度在生态功能与演替过程中的作用差异。

主观赋权部分基于森林韧性三维度理论框架，结合蒙古栎次生林结构特征和经营调控重点，对抵抗力、恢复力和适应性 3 个一级维度赋予基础权重，以反映不同韧性维度在当前研究尺度和监测周期内的相对生态重要性。在此基础上，假定同一维度内各指标对该维度的贡献相对一致，维度内指标权重取相等值。客观赋权部分采用熵权法，根据各指标在样地间的离散程度确定其信息贡献度。指标变异程度越大，其所包含的信息量越高，在综合评价中的权重相应增大。最终，各指标的综合权重由其主观权重与客观权重加权求和获得，并进行归一化处理，以保证各指标权重之和为 1。

$$w_i = \frac{w_{si} + w_{oi}}{\sum_{i=1}^{m}(w_{si} + w_{oi})} \tag{1}$$

式中：w_i 为第 i 个指标的综合权重，w_{si} 和 w_{oi} 分别为主观和客观赋权结果，m 为指标个数（本研究为 8 个）。

在单位圆法中，以风玫瑰图形式展示各指标特征，每个指标对应图中的一片“花瓣”，其长度表示该指标的标准化值（0 表示最小值，1 表示最大值）。当所有指标取最大值时，花瓣完全填充圆形区域，$I_{Rj} = 1$；反之，当各指标取最小值时，圆形区域无花瓣填充，$I_{Rj} = 0$。

$$I_{Rj} = \frac{\sum_{i=1}^{m}\pi p_{ij}^2 w_i}{\pi} \tag{2}$$

式中：I_{Rj} 为第 j 样地的森林韧性综合指数值 RCI；w_i 为指标 i 综合权重；p_{ij} 为第 j 个样地第 i 个指标的标准化值；m 为指标个数。

表 3　森林韧性综合评价指标体系

Tab. 3　Comprehensive evaluation index system for forest resilience

维度	指标	生态学含义	计算公式	参数说明	标准化方法
抵抗力	优势木胸径（D_d）[23]	反映林分中资源占据能力最强个体的生长水平，指示抵御扰动能力	$D_d = \sum_{i=1}^{N_{bg}} D_{bgi}/N_{bg}$	N_{bg}为优势木的数量，与样地面积有关，设定为100株/hm²；D_{bgi}为样地中第i个优势木的胸径	$Z_s = Z_{plot\,j}/Z_{old}$，$Z_s$为标准化值，大于1时，赋值为1。$Z_{plot\,j}$为样地$j$指标值，$Z_{old}$为老龄林样地的指标中位数，后同
	加权高径比（R_{hdw}）[24]	表征林木力学稳定性，指示抗风倒、抗雪压能力	$R_{hdw} = \sum_i^N \frac{H_i}{D_i} \times w_i$	H_i、D_i和w_i分别为第i株林木的树高、胸径和断面积占比，N为样地内林木个数	$Z_s = \frac{150 - Z_{plot\,j}}{150 - Z_{old}}$，当比值大于1时，赋值为1
	角尺度（W）[25]	描述林木水平空间分布格局及其异质性，指示削弱扰动传播的能力	$W = \frac{1}{4}\sum_{k=1}^{4} z_k$	当中心木与其两个相邻木构成的第k个夹角大于72°时z_k= 1，否则 z_k= 0	$Z_s = 1 - \frac{\lvert Z_{plot\,j} - 0.496\rvert}{0.504}$，以随机分布的标准值0.496和最大绝对差值0.504为参考
恢复力	大小多样性（D_{sz}）[23]	反映径级分化与层次复杂性，指示功能冗余与恢复潜力	$D_{sz} = 1 - \sum_i^t (p_i)^2$	p_i 为样地中第i个径阶的占比，t为样地中以4 cm划分的径阶数	无需标准化
	树种多样性（H_{sp}）[26]	描述物种丰富度与均匀度，指示扰动后恢复能力	$H_{sp} = -\sum_{i=1}^{s} p_i \ln(p_i)$	p_i 为样地中第i个树种的占比，s为样地中的树种个数	$Z_s = Z_{plot\,j}/Z_{old}$，大于1时，赋值为1
	郁闭度（Y）[27]	表征光环境调控及微气候条件，指示天然更新与结构重建能力	$Y = N_y/N_t$	N_t和N_y为监测郁闭度的采样点总个数、被遮挡的采样点个数	$Z_s = Z_{plot\,j}/Z_{old}$，大于1时，赋值为1
适应性	树种组成（C_{sp}）[28]	表征研究林分与原始林参照系统之间的树种组成偏离程度，指示演替阶段与长期适应能力	$C_{sp} = 1 - D_{veg}$	D_{veg}为样地树种组成与参考样地树种组成的Bray-Curtis植被距离	无需标准化
	顶极种竞争力（R_{sp}）[29]	表征顶极种在群落中的竞争地位与资源控制能力，指示演替稳定性与长期适应潜力	$R_{sp} = \frac{(\overline{Rank_{sp}} - 1)}{(N - 1)}$	$\overline{Rank_{sp}}$为按胸径从小到大排名，顶极树种（红松、紫椴、水曲柳、黄檗、胡桃楸）在样地中的次序平均值	$Z_s = Z_{plot\,j}/Z_{old}$，大于1时，赋值为1

不同经营措施下森林韧性及其指标的动态变化及响应差异采用方差分析(ANOVA)与最小显著差异检验(LSD)进行显著性检验，并辅以多重比较以明确各处理间差异特征。

3 结果与分析

3.1 森林韧性指标的综合权重计算

本研究采用主观权重与客观权重相结合的综合赋权法确定各指标权重(表 4)。在蒙古栎次生林中，中短期内林分对扰动的稳定性维持(抵抗力)与结构恢复能力(恢复力)是韧性提升的主要驱动力，而适应性更多体现为长期演替过程。因此，在主观权重设置上对抵抗力和恢复力指标赋予略高权重，而适应性指标赋予略低权重。基于熵权法的客观赋权结果显示，优势木胸径、树种多样性、树种组成和顶极种竞争力等指标的信息贡献度较高，反映出这些指标在不同样地间离散程度较大；而角尺度和大小多样性的信息贡献度较低。综合权重结果表明，各指标权重总体差异不大，其中树种多样性权重最高(0.147)，大小多样性权重最低(0.103)，说明森林韧性受多维结构与多样性共同驱动，而单一指标难以产生主导性影响。

3.2 不同经营措施对森林韧性指标的影响

目标树经营和传统经营均显著提高了林分的大小多样性(D_{sz})、加权高径比(R_{hdw})和郁闭度(Y)($P < 0.05$，图 1)，表明适度干扰可促进林木大小分化，提高林分结构的稳定性与空间利用率。相比之下，目标树经营对优势木直径(D_d)的提升效果更为显著，而传统经营对该指标的影响不明显，说明目标树经营在促进优势木生长方面更具效率。

树种多样性(H_{sp})和角尺度(W)在各处理间差异不显著，但其恢复程度总体较高，说明林分物种多样性与空间格局在当前阶段已基本实现自然恢复，经营可优化的空间小。相比之下，经营措施对树种组成(C_{sp})和顶极种竞争力(R_{sp})的调控效果同样有限，且二者的恢复程度较低，表明群落物种构成以及演替优势树种地位的显著优化，仍然有赖于更长期的经营干预和演替推进过程。

3.3 不同经营措施对森林韧性的影响

经营措施对森林韧性综合指数的影响呈现显著的时间尺度依赖性(图 2)。经营处理后短期尺度内(2013—2018 年)CTR2 提升最显著(7.1%，$P < 0.05$)，其次为 TM(5.3%)、CTR1(4.4%)和 CK(3.6%)，表明高密度目标树经营的初期效应突出。第二个观测周期(2018—2023 年)各措施提升幅度均下降且未达显著水平，提升排序为 CTR1(3.6%) > CTR2(3.3%) > CK(2.7%) > TM(2.4%)，显示经营刺激效应随时间衰减。整体而言，经营处理后中期尺度内(2013—2023 年)，CTR2(10.7%)和 CTR1(8.2%)均显著优于 TM(7.9%)与 CK(6.4%)，证实目标树经营具有更强的韧性提升效应。

从韧性 3 个维度来看(图 2)，不同经营措施对森林韧性综合提升主要来源于抵抗力与恢复力维度的同步增强，而适应性维度响应相对滞后，各经营措施均未表现出显著提升。其中，CTR2 同时显著提升了抵抗力与恢复力；TM 主要提升抵抗力；CTR1 与 CK 对各维度提升均不显著，说明适应性调控对经营干预的响应具有更明显的时间滞后性。

4 讨 论

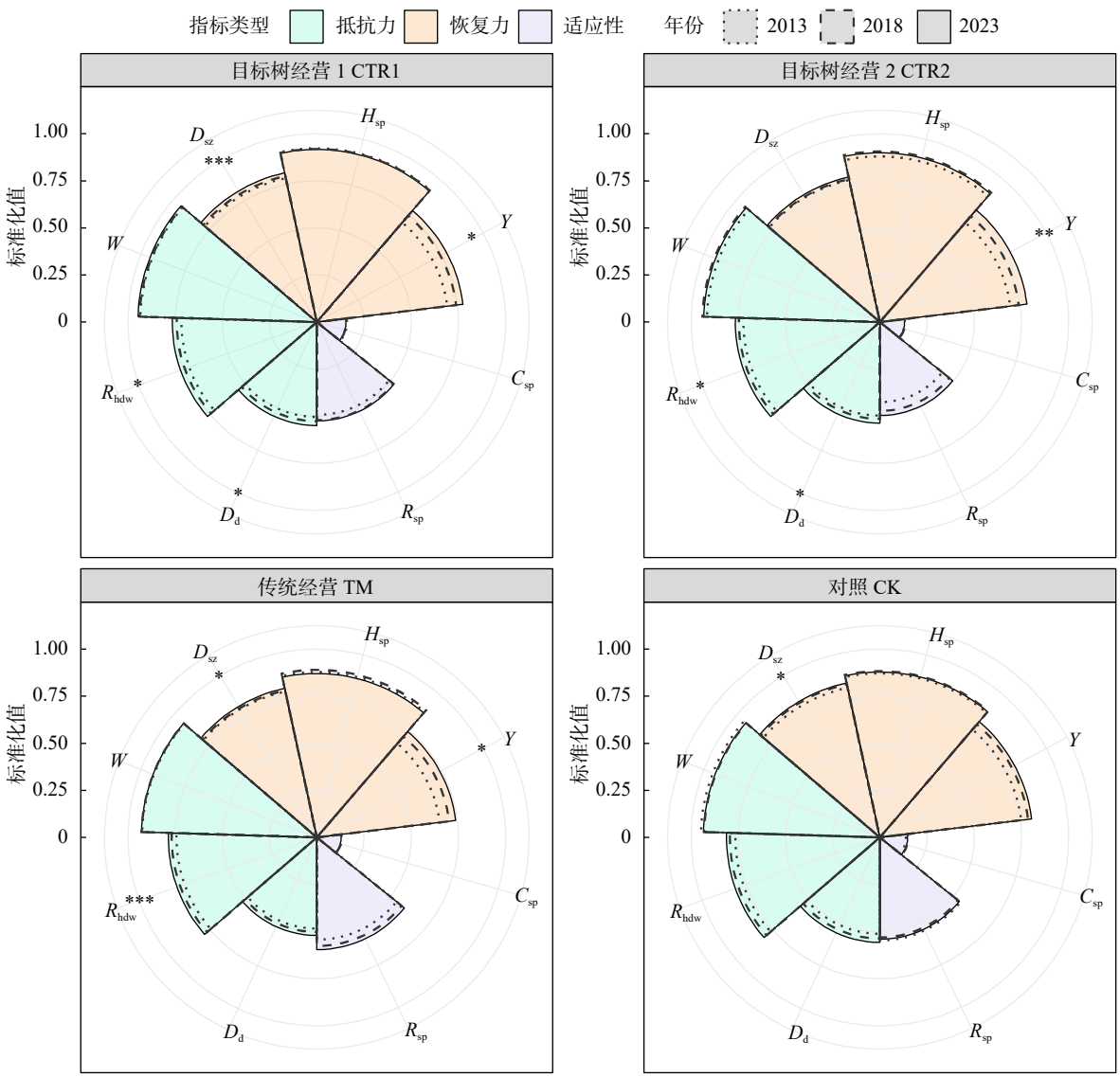
4.1 森林韧性综合评价指标体系的有效性

森林韧性是一个涵盖结构、过程与功能的多维生态属性，其核心在于生态系统在扰动下维持基本结构与功能，并通过调整实现长期适应的能力[3,21]。由于韧性本身难以直接量化，当前研究通常借助能够表征林分结构特征、群落组成及其动态过程的代理指标加以间接刻画[15]。基于这一理论背景，本研究从抵抗力、恢复力和适应性 3 个互补维度构建森

表 4 森林韧性指标的权重

Tab. 4 Weight of forest resilience indicators

维度	指标	主观权重	客观权重	综合权重
抵抗力	优势木胸径	0.130	0.143	0.137
	加权高径比	0.130	0.107	0.118
	角尺度	0.130	0.086	0.108
恢复力	大小多样性	0.130	0.077	0.103
	树种多样性	0.130	0.163	0.147
	郁闭度	0.130	0.106	0.118
适应性	树种组成	0.110	0.144	0.127
	顶极种竞争力	0.110	0.174	0.142



***、**、*分别表示该指标在不同年份间的差异达到 $p < 0.001$、$p < 0.01$、$p < 0.05$ 的显著水平，下同。D_d. 优势木胸径，R_{hdw}. 加权高径比，W. 角尺度，D_{sz}. 大小多样性，H_{sp}. 树种多样性，Y. 郁闭度，C_{sp}. 树种组成，R_{sp}. 顶极种竞争力。

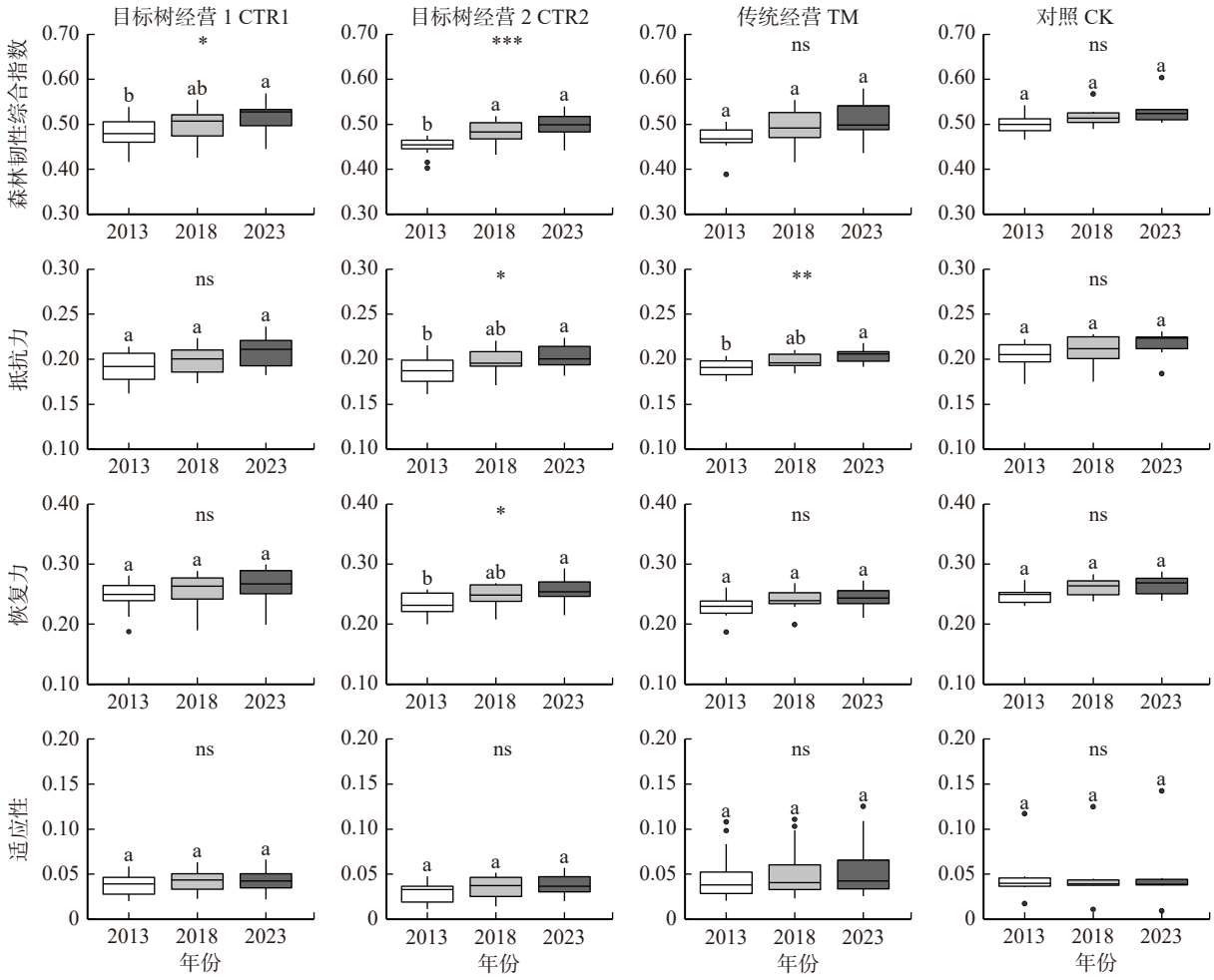
图 1　不同经营措施的森林韧性风玫瑰图动态

Fig. 1　Dynamic wind rose chart of forest resilience under different management measures

林韧性综合评价指标体系，既具有明确的理论基础，又具备清晰的生态学内涵。

在抵抗力维度，优势木胸径、加权高径比和角尺度分别从生长优势、力学稳定性和空间结构异质性等方面反映林分抵御外界扰动的能力[23]。既有研究表明，大径木在增强林分结构稳定性、缓冲极端气候事件方面发挥关键作用，而合理的空间配置有助于分散风险、降低系统对单一扰动因子的敏感性[16]。在恢复力维度，大小多样性、树种多样性和郁闭度综合反映林分径级分化程度、功能冗余及更新环境条件，对扰动后的结构重建和功能恢复具有重要意义[2,30]。这些指标能够从不同侧面揭示森林在受扰后重组结构与维持生态功能的潜力。在适应性维度，本研究引入以阔叶红松老龄林为参照的物种组成植被距离，量化研究林分在区域演替序列中的相对位置，并结合顶极种竞争力，从目标树种的竞争能力角度刻画林分演替稳定性与长期适应潜力。相关研究指出，演替导向型指标能够有效反映森林对长期环境变化的响应能力，是评估适应性的重要切入点[15−16]。

需要指出的是，韧性研究通常依赖生产力增量或死亡率等动态指标，前提是明确扰动情景且具备扰动前后长期连续监测数据[4,7]。然而在低强度经营背景下(如目标树经营)，这些条件难以满足，采伐更多是结构优化和稳定性提升措施，而非破坏性扰动。因此，本研究提出静态韧性框架，以结构—组成—演替程度为核心指标判别“韧性友好型”经营。短期生产力波动不是评价必要条件，而优势木生长改善、空间结构均匀化和演替稳定性增强，则反映韧性的渐进提升。未来可结合长期定位样地，引入动态指标，实现静态到动态韧性的拓展。



ns 表示该指标在不同年份间的差异不显著。不同小写字母表示两两年份间差异显著（$p < 0.05$）。

图 2 不同经营措施下的森林韧性综合指数变化

Fig. 2 Changes in the comprehensive index of forest resilience under different management measures

从指标体系整体来看，各指标相关性低，信息相对独立，避免冗余。在综合评价中，本研究采用主观（生态学理论）与客观（数据特征）相结合的综合赋权方法，以平衡理论认知与样本信息，降低单一方法带来的偏倚。与预试验等权评价相比，综合权重未改变不同经营措施韧性变化的总体趋势和相对排序，表明评价稳健性较高，也说明蒙古栎次生林韧性提升主要源于经营措施对林分结构与功能的整体调控，而非单一指标权重驱动。值得注意的是，客观权重具有研究对象依赖性，针对其他区域或林型，需基于实际数据重新确定其客观权重值。

总体而言，本研究构建的指标体系不仅与森林韧性的关键生态过程具有明确对应关系，而且各指标均可通过常规森林调查在较短时间内获取，具备良好的可操作性。基于该指标体系构建的森林韧性综合指数能够有效区分不同经营措施与对照林分在韧性水平上的差异，表明本研究提出的指标体系在表征经营措施对温带次生林韧性影响方面具有较高的敏感性和实用性。

4.2 不同经营措施对森林韧性的影响

不同经营措施通过调节干扰强度、空间尺度及结构调控方式，对森林韧性产生显著差异化影响。既有研究表明，高强度经营干扰（如皆伐）虽然可能在短期内提升生产力，但往往伴随结构简化和生态稳定性下降，呈现出明显的“高产—低韧性”权衡关系[15]。相比之下，中低强度干扰、结构导向型经营更有利于维持林分结构稳定性和长期功能表现[29,31]。此外，长期无干预或过度保护也可能因更新受限和竞争加剧而削弱森林的适应能力[14,32]。

本研究结果表明，目标树经营显著提升了森林韧性综合水平，而传统经营和对照处理林分韧性总体保持稳定。这说明，仅依靠自然发育或主要针对下层林木的传统抚育经营，对森林韧性的提升作用有限；相比之下，对上层林木进行适度人工干预并优化目标树生长空间，是促进温带次生林韧性提升的有效途径。其中，目标树密度为 120 株/hm^2 的经营措施（CTR2）在经营处理后的短期（5 年）和中期（10 年）尺度上均表现出最显著的韧性提升效果，表

明合理控制目标树密度能够改善优势木生长条件、促进径级分化和优化冠层结构，从而实现林分稳定性与综合功能的协同增强[17,20]。

相比之下，树种多样性和角尺度在经营处理前已处于较高恢复水平，且在不同经营措施下均未表现出显著变化(图 1)，表明在当前演替阶段，经营干预对这两项指标主要发挥的是维持与微调作用，而非结构性重塑作用[12,33]。从经营前后角尺度参数的均值变化来看(表 5)，各处理样地虽均呈现出由聚集分布向随机分布转变的趋势，但总体仍处于轻微聚集分布状态，尚未达到随机分布水平。鉴于随机分布通常被认为具有更高的结构稳定性，且“由聚集分布向随机分布转变并在较长时期内保持”可作为林分空间结构稳定性提升的重要判据[34]，上述结果表明蒙古栎次生林的水平空间格局尚未实现实质性重构，仍存在进一步优化空间。

表 5　不同经营措施的角尺度均值变化

Tab. 5　Changes in the mean values of the uniform angle index under different management measures

经营措施	2013年	伐后	2018年	2023年
目标树经营1	0.526 ± 0.013	0.522 ± 0.011	0.523 ± 0.010	0.522 ± 0.010
目标树经营2	0.537 ± 0.010	0.531 ± 0.009	0.524 ± 0.009	0.525 ± 0.008
传统经营	0.531 ± 0.015	0.529 ± 0.013	0.527 ± 0.011	0.526 ± 0.011
对照处理	0.520 ± 0.001	0.520 ± 0.001	0.520 ± 0.002	0.516 ± 0.007

与之不同的是，树种组成和顶极种竞争力在各类经营措施下虽同样未发生显著变化，但其恢复程度较低，这反映出群落树种构成及演替优势种地位的调整具有显著的滞后性。由于该类指标直接关联到演替方向与建群种更替，其优化依赖于长期尺度(10 年以上)上的结构调控与连续经营过程，在当前中短经营周期难以实现显著改变。

因此，在现有经营强度范围内，经营措施对林分结构层面的调节作用(径级分化、冠层结构)显著强于对树种组成与演替格局层面的重塑作用。未来经营中，有必要在维持适度干扰的基础上，进一步强化对树种组成和功能群配置的定向调控，以增强森林生态系统的功能完整性和长期韧性[22]。

4.3　对适应性森林管理的启示

本研究表明，相较于自然发育状态，适度干扰，尤其是低强度、近自然的结构导向型经营措施(如采伐干扰树)，能够显著提升温带次生林的抵抗力和恢复力，并为适应性提升奠定结构基础。短期内，这类经营通过优化径级结构、增强大小多样性和改善优势木生长条件，提高林分结构稳定性；长期来看，则可通过演替导向的结构调控，增强森林对气候变化与环境波动的适应能力[8]。

同时，本研究发现树种组成和演替状态的显著变化具有明显滞后性，提示适应性森林管理应建立在长期连续监测—阶段性调控—滚动修正目标的框架之上。通过树种补充、功能群优化配置及合理干扰组合，引导林分向结构复杂、功能互补且演替稳健的状态发展[13]。此外，将“森林韧性培育”明确纳入经营目标体系，有助于从被动应对气候变化转向主动提升生态系统自我调节能力和长期稳定性[35]。

综合来看，目标树密度为 120 株/hm^2 的经营措施在本研究区表现出最优的韧性提升效果，表明通过灵活设计间伐强度和目标树选择标准，可在改善林分短期结构与功能的同时，实现森林韧性的持续提升。鉴于第 2 个观测周期内韧性提升幅度有所下降，建议在维持当前目标树经营强度基础上，于上一次经营的 5 年后开展再次经营干预，以维持结构调控效果并持续提升韧性。未来还可将森林韧性指标体系系统纳入经营决策过程，为温带次生林的适应性经营提供科学、可量化的依据。

5　结　　论

本研究构建了涵盖抵抗力、恢复力与适应性的森林韧性综合评价指标体系，并评估了不同经营措施对蒙古栎次生林森林韧性的影响。结果表明，目标树经营显著提升森林韧性综合水平，其中目标树密度为 120 株/hm^2 的措施在 5 年和 10 年的中短尺度上均表现最优。森林韧性提升主要源于结构优化与优势木生长，而树种组成与演替导向指标的变化具有滞后性。建议在低强度、近自然经营原则下，结合 5 ~ 10 年周期的连续监测与动态调控，在长期尺度上逐步推进树种组成与功能群配置优化，以实现森林抵抗力、恢复力与适应性的协同提升。

参　考　文　献

[1] Pan Y, Birdsey R A, Fang J, et al. A large and persistent carbon sink in the world’s forests [J]. Science, 2011, 333: 988−993.

[2] Brockerhoff E G, Barbaro L, Castagneyrol B, et al. Forest biodiversity, ecosystem functioning and the provision of

ecosystem services [J]. Biodiversity and Conservation, 2017, 26(13): 3005−3035.

[3] Walker B, Carpenter S, Anderies J, et al. Resilience management in social-ecological systems: a working hypothesis for a participatory approach [J]. Conservation Ecology, 2002, 6(1): 14.

[4] Müller F, Bergmann M, Dannowski R, et al. Assessing resilience in long-term ecological data sets [J]. Ecological Indicators, 2016, 65: 10−43.

[5] Millar C I, Stephenson N L. Temperate forest health in an era of emerging megadisturbance [J]. Science, 2015, 349: 823−826.

[6] Senf C, Seidl R. Storm and fire disturbances in Europe: distribution and trends [J]. Global Change Biology, 2021, 27(15): 3605−3619.

[7] Forzieri G, Dakos V, McDowell N G, et al. Emerging signals of declining forest resilience under climate change [J]. Nature, 2022, 608: 534−539.

[8] Seidl R, Thom D, Kautz M, et al. Forest disturbances under climate change [J]. Nature Climate Change, 2017, 7(6): 395−402.

[9] Clark J S, Iverson L, Woodall C W, et al. The impacts of increasing drought on forest dynamics, structure, and biodiversity in the United States [J]. Global Change Biology, 2016, 22(7): 2329−2352.

[10] 张会儒, 杨传平, 刘兆刚, 等. 东北天然次生林抚育更新研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2022.
Zhang H R, Yang C P, Liu Y G, et al. Research on tending and regeneration of natural secondary forests in Northeast China[M]. Beijing: Science Press, 2022.

[11] 尤文忠, 赵刚, 张慧东, 等. 抚育间伐对蒙古栎次生林生长的影响 [J]. 生态学报, 2015, 35(1): 56−64.
You W Z, Zhao G, Zhang H D, et al. Effects of thinning on growth of Mongolian oak (*Quercus mongolica*) secondary forests [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(1): 56−64.

[12] 冯琦雅, 陈超凡, 覃林, 等. 不同经营模式对蒙古栎天然次生林林分结构和植物多样性的影响 [J]. 林业科学, 2018, 54(1): 12−21.
Feng Q Y, Chen C F, Qin L, et al. Effects of different management models on stand structure and plant diversity of natural secondary forests of *Quercus mongolica* [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2018, 54(1): 12−21.

[13] Wang X Y, Zhao C Y, Jia Q Y. Impacts of climate change on forest ecosystems in Northeast China [J]. Advances in Climate Change Research, 2013, 4(4): 230−241.

[14] McDowell N G, Allen C D, Anderson-Teixeira K, et al. Pervasive shifts in forest dynamics in a changing world [J]. Science, 2020, 368: eaaz9463.

[15] Puettmann K J, Wilson S M, Baker S C, et al. Silvicultural alternatives to conventional even-aged forest management - what limits global adoption? [J]. Forest Ecosystems, 2015, 2(1): 8.

[16] O'Hara K L. Multi-aged silviculture: managing for complex forest stand structures[M]. Oxford: Oxford University Press, 2014.

[17] 胡雪凡, 张会儒, 周超凡, 等. 不同抚育间伐方式对蒙古栎次生林空间结构的影响 [J]. 北京林业大学学报, 2019, 41(5): 137−147.
Hu X F, Zhang H R, Zhou C F, et al. Effects of different thinning patterns on the spatial structure of *Quercus mongolica* secondary forests [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2019, 41(5): 137−147.

[18] 胡雪凡, 段光爽, 张会儒, 等. 蒙古栎次生林林木竞争对不同抚育间伐方式的响应 [J]. 林业科学研究, 2021, 34(1): 1−9.
Hu X F, Duan G S, Zhang H R, et al. Response of tree competition in natural secondary *Quercus mongolica* forest to thinning treatment [J]. Forest Research, 2021, 34(1): 1−9.

[19] 周超凡, 冯林艳, 何潇, 等. 目标树经营对云冷杉针阔混交林单木生长的影响研究 [J]. 林业科学研究, 2022, 35(2): 19−27.
Zhou C F, Feng L Y, He X, et al. Study on effectiveness of crop tree management for individual tree growth in spruce-fir coniferous-broadleaved mixed forests [J]. Forest Research, 2022, 35(2): 19−27.

[20] 张晓红, 张会儒, 卢军, 等. 目标树抚育间伐对蒙古栎天然次生林生长的初期影响 [J]. 林业科学, 2020, 56(10): 83−92.
Zhang X H, Zhang H R, Lu J, et al. Early effects of crop tree release tending on growth of natural secondary *Quercus mongolica* forest [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2020, 56(10): 83−92.

[21] Holling C S. Resilience and stability of ecological systems [J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1973, 4: 1−23.

[22] Nikinmaa L, Lindner M, Cantarello E, et al. Reviewing the use of resilience concepts in forest sciences [J]. Current Forestry Reports, 2020, 6(2): 61−80.

[23] Pretzsch H. Forest dynamics, growth and yield[M]. Berlin/Heidelberg: Springer, 2009.

[24] Wonn H T, O'Hara K L. Height: diameter ratios and stability relationships for four northern rocky mountain tree species[J]. Western Journal of Applied Forestry, 2001, 16(2): 87−94.

[25] 惠刚盈. 角尺度: 一个描述林木个体分布格局的结构参数 [J]. 林业科学, 1999, 35(1): 37−42.
Hui G Y. The neighbourhood pattern: a new structure parameter for describing distribution of forest tree position [J]. Scientia Silvae Sinicae, 1999, 35(1): 37−42.

[26] Simpson E H. Measurement of diversity [J]. Nature, 1949, 163: 688.

[27] Montgomery R A, Chazdon R L. Forest structure, canopy architecture, and light transmittance in tropical wet forests [J]. Ecology, 2001, 82(10): 2707−2718.

[28] Poorter L, Craven D, Jakovac C C, et al. Multidimensional tropical forest recovery [J]. Science, 2021, 374: 1370−1376.

[29] 惠刚盈, 张弓乔, 赵中华, 等. 天然混交林最优林分状态的 π 值法则 [J]. 林业科学, 2016, 52(5): 1−8.

Hui G Y, Zhang G Q, Zhao Z H, et al. A new rule of π value of natural mixed forest optimal stand state [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2016, 52(5): 1−8.

[30] Messier C, Bauhus J, Sousa-Silva R, et al. For the sake of resilience and multifunctionality, let's diversify planted forests! [J]. Conservation Letters, 2022, 15(1): e12829.

[31] Nagel L M, Palik B J, Battaglia M A, et al. Adaptive silviculture for climate change: a national experiment in manager-scientist partnerships to apply an adaptation framework [J]. Journal of Forestry, 2017, 115(3): 167−178.

[32] 张晓红, 张会儒. 蒙古栎次生林垂直结构特征对目标树经营的响应 [J]. 北京林业大学学报, 2019, 41(5): 56−65.
Zhang X H, Zhang H R. Response of vertical structure characteristics of natural secondary *Quercus mongolica* forest to crop tree release [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2019, 41(5): 56−65.

[33] 张晓红, 张会儒, 卢军, 等. 长白山蒙古栎次生林群落结构特征及优势树种空间分布格局 [J]. 应用生态学报, 2019, 30(5): 1571−1579.
Zhang X H, Zhang H R, Lu J, et al. Community structure characteristics and spatial distribution of dominant species of secondary *Quercus mongolica* forest in Changbai Mountains, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(5): 1571−1579.

[34] 惠刚盈, 赵中华, 胡艳波, 等. 基于结构参数均值的林分空间结构综合评价研究 [J]. 林业科学研究, 2023, 36(2): 12−21.
Hui G Y, Zhao Z H, Hu Y B, et al. Comprehensive evaluation of forest spatial structure based on the mean values of structural parameters[J]. Forest Research, 2023, 36(2): 12−21.

[35] Albrich K, Rammer W, Turner M G, et al. Simulating forest resilience: a review [J]. Global Ecology and Biogeography, 2020, 29(12): 2082−2096.

（责任编辑　孟　瑶
责任编委　惠刚盈）