

辽东山区红松人工林生态系统多功能性研究

杨圆圆^{1,2}, 刘金义³, 战金伟⁴, 卜鹏图^{1,2}, 肖尧^{1,2}, 高慧淋⁵, 冯健^{1,2*}

(1. 辽宁省林业科学研究所, 辽宁 沈阳 110032; 2. 辽宁白石砬子森林生态系统国家定位观测研究站, 辽宁 丹东 118201;

3. 国有清原满族自治县大边沟林场, 辽宁 抚顺 113305; 4. 国有清原满族自治县大孤家林场, 辽宁 抚顺 113305;

5. 沈阳农业大学 林学院, 辽宁 沈阳 110161)

摘要:以辽东山区不同林龄红松人工林为对象, 设置 30 块不同立地条件样地, 调查分析红松生长、林下灌草和土壤养分水分等特性, 选取乔木层碳储量、土壤养分维持、土壤水源涵养、生物多样性维持、生产力和木材生产等生态功能, 利用平均值法量化其多功能性, 探讨不同功能间的协同-权衡关系和驱动多功能性的主要因子, 以期红松人工林的持续健康经营提供支撑。结果表明, 辽东山区红松人工林多功能性指数在 0.38~0.78, 随林龄增加而显著上升。不同功能间以权衡关系占据主导地位; 10 龄红松人工林乔木层碳储量、生产力和木材生产三者之间权衡度为 0、10、34 龄和 43 龄土壤养分维持功能与其他功能间权衡度最高。红松活枝下高、优势木高、坡度、坡位、土壤 C:N、C:K 和 N:K 是影响红松人工林多功能性指数的主要环境因子。为实现红松人工林的森林多功能性, 在造林时立地条件尽量选择小坡度、阴坡和低坡位, 营林过程中应避免高强度修枝, 注重林下生物多样性保育, 加强修枝剩余物和凋落物管理, 必要时进行林地施肥, 促进林分因子、地形因子和土壤养分间的协调发展, 推动红松人工林持续健康经营。

关键词:红松人工林; 森林多功能性; 平均值法; 协同-权衡

中图分类号: S791.247

文献标志码: A

文章编号: 1001-7461(2024)02-0051-09

Multifunctionality of *Pinus koraiensis* Plantation Ecosystem in Eastern Liaoning Mountainous Area

YANG Yuan-yuan^{1,2}, LIU Jin-yi³, ZHAN Jin-wei⁴, BU Peng-tu^{1,2}, XIAO Yao^{1,2}, GAO Hui-lin⁵, FENG Jian^{1,2*}

(1. Liaoning Academy of Forestry Science, Shenyang 110032, Liaoning, China; 2. Baishilazi National Forest Ecosystem

Observation and Research Station, Dandong 118201, Liaoning, China; 3. Dabiangou State-Owned Forestry Farm,

Fushun 113305, Liaoning, China; 4. Dagujia State-Owned Forestry Farm, Fushun 113305, Liaoning, China;

5. College of Forestry, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110161, Liaoning, China)

Abstract: Taking *Pinus koraiensis* plantations with different ages in the mountainous area of eastern Liaoning Province as the research objects, 30 plots with different site conditions were set up to investigate and analyze the characteristics of *P. koraiensis* growth, understory shrub and soil nutrients and water, and select the ecological functions of tree layer carbon storage, soil nutrient maintenance, soil water conservation, biodiversity maintenance, productivity and wood production. The average value method was used to quantify the multifunctionality, and the synergy-trade-off relationship between different functions and the main factors driving multi-functionality were discussed. The results showed that the multifunctional index of *P. koraiensis* plantation was 0.38—0.78, which increased significantly with plantation age. The trade-off relationship between different functions was dominant. Among them, the trade-off degree between tree layer

收稿日期: 2023-03-05 修回日期: 2023-09-11

基金项目: 国家重点研发计划“人工红松节子生物学特性及对木材质量的影响机制”(2022YFD2201800-02)。

第一作者: 杨圆圆, 硕士, 助理工程师。研究方向: 林木良种选育。E-mail: 1805932544@qq.com

* 通信作者: 冯健, 博士, 正高级工程师。研究方向: 林木育种。E-mail: lnkyfj@163.com

carbon storage, productivity and wood production in the tree layer of 10-year-old *P. koraiensis* plantation was 0. And the trade-off between soil nutrient maintenance function and other functions was the highest in 10-, 34- and 43-year-old *P. koraiensis* plantations. Under branch height, dominant tree height, slope, slope position, soil C : N, C : K and N : K were the main environmental factors affecting the multifunctionality index of *P. koraiensis* plantation. In order to realize the forest multifunction of *P. koraiensis* plantation, the site conditions should be selected as small slope, shady slope and low slope position as far as possible during afforestation. In the process of forest management, high-intensity pruning should be avoided, understorey biodiversity conservation should be paid attention to, pruning residues and litter management should be strengthened, and forest land fertilization should be carried out when necessary, so as to promote the coordinated development of stand factors, topographic factors and soil nutrients, and promote the sustainable and healthy management of *P. koraiensis* plantation.

Key words: *Pinus koraiensis* plantation; forest multifunction; mean value method; synergies-trade-offs

生态系统多功能性是指生态系统同时行使多个生态系统功能的能力或性质,是评价和认识生态系统性质的有效途径^[1]。近年来,利用生态系统多功能性指数(EMF)探究生态系统功能成为生态学研究热点问题,相关研究在草原、湿地和森林中相继开展,如兰洁等^[2]发现生物多样性和气候调节是吉林省天然阔叶混交林多功能性的主导功能。生态功能间往往存在不同步的复杂动态变化关系,即“此消彼长”的权衡和“相互增益”的协同关系^[3],权衡关系即生态系统功能间不同向的增加或减少,权衡度高说明某种生态系统功能的实现会抑制另一功能,而协同关系则是指生态系统服务间同向的变化^[4]。此外,生态系统功能受到结构多样化、空间异质性和干扰的影响,多功能性往往具有特定的驱动因子,物种多样性、林分结构复杂性和物种多样性等生物因素均显著影响森林生态系统多功能性,而非生物因素(降水、地形、土壤养分)会通过对生物因素调控作用从而间接影响生态系统多功能性,如土壤化学计量特征是温带森林演替阶段多功能性变化的主要驱动因子^[5]。

红松(*Pinus koraiensis*)人工林是东北地区人工林集约经营的主要模式之一,但长期着眼于林产品等经济效益获取的经营方式忽略了红松人工林生物多样性保育、养分固存等生态功能,而这些功能对于生态区保护和人工林持续健康经营具有重要作用,特别是在辽东山区等重要生态区尤为凸显。目前有关研究主要集中在红松林水源涵养、碳汇及物种多样性等单一功能^[6-8],而红松人工林多功能性研究鲜见报道。基于此,本研究利用平均值法量化辽东山区不同林龄红松人工林生态系统的多功能性,探讨不同功能间的协同-权衡关系并探寻驱动多功能性的主要因素,旨在促进红松人工林多功能性的实现和健康持续经营。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本研究试验地位于辽宁省抚顺市清原满族自治县,地理坐标为 124°20′—125°29′E, 41°48′—42°29′N,海拔 400~600 m。气候为中温带大陆性季风气候,年平均气温 5℃,年平均降水量 700~800 mm,无霜期 120 d。土壤多为山地棕色森林土。试验林集中分布在大边沟林场,该林场现有红松人工林达 40 hm²。造林苗木来源于当地红松良种基地,造林时采用穴状整地,规格为 50 cm×50 cm×30 cm。红松人工林管理精细,栽植前 5 a 进行 7 次幼龄抚育,10 龄时进行透光抚育,20 龄时进行间伐,强度根据林分生长情况和立地条件等因素确定。各林龄红松生长情况见表 1。

1.2 样地设置、植被调查与取样

试验设计 5 个林龄,每个林龄设置 6 块样地,共 30 块(表 1)。样地调查内容有:1)乔木层调查:对样地内红松进行每木检尺,记录胸径、树高、冠幅、活枝下高和郁闭度;2)灌木层调查:在每个样地内根据对角线法选取 3 个 5 m×5 m 的样方调查灌木,5 个 1 m×1 m 的样方调查草本,记录每种植物的种名,株数/丛数、高度和盖度等;3)土壤样品采集:在样地内草本植物调查样点采集 0~20 cm 土壤样品用于测定土壤理化性质,并用环刀采集剖面土壤。

1.3 生态系统功能选取及各指标测定结果

本研究参照 Garland 等^[9]的研究并结合红松人工林作用,选取 6 种生态系统功能量化红松人工林生态系统多功能性,乔木层碳储量和土壤水源涵养表征调节服务,土壤养分维持和生物多样性维持表征支持服务,而生产力和木材生产则表征供给服务。

1.3.1 乔木层碳储量(TCS) 巨大的碳汇功能是森林生态系统的主要功能之一,乔木作为森林植被

主体,能够贡献森林生态系统地上部分大部分的碳储量。依据生物量模型计算单株红松生物量 $W_s^{[10]}$,然后基于不同器官碳含量计算红松碳储量,累加得到林分乔木层碳储量^[2]。碳含量测定采用重铬酸钾-硫酸氧化法^[11]。

$$W_s=W_D+W_L+W_{si}+W_R \tag{1}$$

$$W_D=0.030\ 19D^{2.679\ 45} \tag{2}$$

$$W_L=0.016\ 37D^{2.045\ 18} \tag{3}$$

$$W_{si}=0.074\ 75D^{1.401\ 41} \tag{4}$$

$$W_R=0.034\ 59D^{1.967\ 85} \tag{5}$$

$$T_{CS}=\sum_1^n W_i \times T_{OCi} \tag{6}$$

式中: T_{CS} 为红松人工林乔木层碳储量($t \cdot hm^{-2}$); W_s 为红松单株生物量(kg); W_i 为红松干、枝、叶、根生物量(kg); T_{OCi} 为上述红松各器官的碳含量($g \cdot kg^{-1}$); D 为胸径(cm)。各指标测定结果见表 2。

1.3.2 土壤养分维持(SMF) 土壤养分维持是重要的森林生态系统功能。选取土壤 TN、TP、TK、速效磷、速效钾和有机碳等指标指示土壤维持^[12]。土壤 TN 含量用凯氏定氮法测定,TP 和速效磷用钼锑抗比色法测定,TK 和速效钾用原子吸收火焰光度法测定,土壤有机质用重铬酸钾氧化外加热法测定^[11]。具体测定结果见表 3。

表 1 红松人工林样地概况

Table 1 Summary table of *P. koraiensis* plantation plots

因子	10 龄	24 龄	34 龄	43 龄	54 龄
坡度/(°)	11~22	3~23	2~18	9~23	2~13
坡位	阳、半阳、阴	阳、半阳、阴	阳、半阳、阴	阳、半阳、阴	阳、半阳、阴
坡向	上、中、下	上、中、下	上、中、下	上、中、下	上、中、下
胸径/cm	3.4~4.1	11.7~15.8	16.5~20.0	27.4~29.8	30.9~36.3
树高/m	2.42~2.68	7.19~9.64	10.71~12.96	14.77~16.56	17.55~22.01
密度/(株·hm ⁻²)	1 783~4 117	867~1483	650~1167	300~417	233~400
冠幅/m	0.84~1.13	1.70~2.03	1.70~2.03	2.93~3.24	2.85~3.71
活枝下高/m	0.23~0.27	2.77~3.88	2.77~3.88	5.44~6.43	6.19~8.33
郁闭度	0.4~0.8	0.5~0.8	0.6~0.9	0.7~0.9	0.7~0.9

表 2 乔木层碳储量各指标测定结果

Table 2 Determination results of carbon storage indexes of tree layer

指标	10 龄	24 龄	34 龄	43 龄	54 龄
干生物量/(t·hm ⁻²)	2.95±1.18	43.40±14.59	59.62±11.72	85.01±7.55	106.47±15.40
枝生物量/(t·hm ⁻²)	0.54±0.20	3.99±1.21	4.78±1.04	5.51±0.48	6.28±0.96
叶生物量/(t·hm ⁻²)	0.84±0.29	3.07±0.83	3.22±0.80	2.93±0.26	3.04±0.52
根生物量/(t·hm ⁻²)	1.00±0.07	6.79±0.23	8.02±1.78	8.99±0.79	10.13±1.56
干碳含量/(g·kg ⁻¹)	340.25±15.30	351.06±4.65	348.36±2.21	372.43±1.56	396.43±8.52
枝碳含量/(g·kg ⁻¹)	402.68±3.65	395.25±6.32	410.29±5.30	418.29±6.32	389.85±3.64
叶碳含量/(g·kg ⁻¹)	365.54±25.32	354.23±8.79	341.59±15.31	372.59±4.65	403.86±1.89
根碳含量/(g·kg ⁻¹)	382.05±6.01	370.06±2.31	398.05±2.32	390.05±1.30	433.25±6.31
干碳储量/(t·hm ⁻²)	1.01±0.04	15.24±5.12	20.77±4.08	31.66±2.81	42.21±6.10
枝碳储量/(t·hm ⁻²)	0.22±0.08	1.58±0.48	1.96±0.43	2.31±0.20	2.45±0.37
叶碳储量/(t·hm ⁻²)	0.31±0.11	1.09±0.29	1.10±0.27	1.09±0.10	1.23±0.21
根碳储量/(t·hm ⁻²)	0.38±0.14	2.59±0.78	2.70±1.41	3.44±0.30	3.88±0.59
总碳储量/(t·hm ⁻²)	1.91±0.73	20.49±6.66	26.54±6.05	38.49±3.39	49.76±7.23

表 3 土壤养分维持各指标测定结果

Table 3 Determination results of soil nutrient maintenance indexes

指标	10 龄	24 龄	34 龄	43 龄	54 龄
TN/(g·kg ⁻¹)	3.46±0.47	3.34±0.81	2.69±0.68	2.23±0.26	2.65±0.31
TK/(g·kg ⁻¹)	13.75±1.45	15.48±0.48	14.70±1.36	17.47±0.12	17.63±1.93
TP/(g·kg ⁻¹)	0.59±0.11	0.85±0.24	0.62±0.21	0.46±0.06	1.57±0.76
速效钾/(g·kg ⁻¹)	103.18±15.58	66.35±14.73	60.25±15.87	70.75±16.66	72.88±13.05
有机质/(g·kg ⁻¹)	68.85±7.71	58.20±14.49	47.02±9.93	42.15±5.26	47.32±7.33
有效磷/(mg·kg ⁻¹)	6.73±1.28	15.42±9.62	9.10±1.62	6.31±1.32	21.6±68.83

1.3.3 土壤水源涵养(WC) 森林的水源涵养功能是陆地生态系统重要的服务功能之一,而土壤层的持水量占据最大的比重。选取土壤含水率和毛管孔隙度表征水源涵养功能^[12],毛管孔隙度采用环刀法测定。具体测定结果见表 4。

1.3.4 生物多样性维持(BM) 森林生物多样性的导致森林生态系统具有复杂的结构及生态过程的主要原因。选取灌草物种丰富度指数 S 、Simpson 多样性指数 D 、Shannon-Wiener 多样性指数 H 、Pielou 群落均匀度指数 J_D 和 J_H 等指标指示生物多样性维持^[8]。

$$D=1-\sum_{i=1}^s P_i^2 \quad (7)$$

表 4 土壤水源涵养各指标测定结果

Table 4 Determination results of soil water conservation indexes

指标	10 龄	24 龄	34 龄	43 龄	54 龄
土壤含水率(%)	12.87±0.31	12.97±0.41	12.42±0.37	12.18±0.15	12.37±0.23
毛管孔隙度(%)	43.18±1.20	39.93±1.01	44.3±0.91	46.13±0.66	43.75±0.58

表 5 生物多样性维持各指标测定结果

Table 5 Measurement results of biodiversity maintenance indexes

		10 龄	24 龄	34 龄	43 龄	54 龄
灌木	S	1.83±0.75	3.67±1.63	3.00±0.89	4.00±1.26	3.00±1.26
	D	0.30±0.24	0.54±0.17	0.61±0.12	0.57±0.19	0.50±0.17
	J_D	0.83±0.03	0.79±0.14	0.96±0.04	0.78±0.18	0.81±0.21
	H	0.45±0.38	0.99±0.45	1.02±0.3	1.08±0.40	0.86±0.39
	J_H	0.86±0.01	0.81±0.12	0.96±0.04	0.79±0.13	0.84±0.17
草本	S	9.00±2.28	11.33±2.88	13.17±3.43	11.50±2.26	15.83±3.31
	D	0.79±0.07	0.67±0.14	0.86±0.04	0.81±0.06	0.86±0.05
	J_D	0.90±0.05	0.74±0.16	0.93±0.03	0.89±0.04	0.93±0.05
	H	1.85±0.34	1.64±0.40	2.23±0.22	1.99±0.26	2.35±0.19
	J_H	0.85±0.06	0.68±0.13	0.88±0.04	0.82±0.04	0.86±0.06

表 6 生产力和木材生产测定结果

Table 6 Measurement results of productivity and wood production

指标	10 龄	24 龄	34 龄	43 龄	54 龄
总生物量/(t·hm ⁻²)	5.33±2.03	57.25±18.64	75.65±15.24	102.44±9.04	125.92±18.29
生产力/(t·hm ⁻² ·a ⁻¹)	0.53±0.20	2.39±0.78	2.23±0.44	2.38±0.21	2.33±0.34
材积/(m ³ ·hm ⁻²)	5.26±1.94	68.37±24.75	101.40±19.79	140.56±16.15	193.84±32.98

1.3.6 木材生产(V) 木材生产是红松人工林最重要的功能。通过材积方程得到红松每木材积 V_{hs} ^[13],累加为蓄积量 V 。具体测定结果见表 6。

$$V_{hs}=(H+3)g_{1.3}f \quad (12)$$

式中: V_{hs} 为红松单株材积; H 为树高; $g_{1.3}$ 为胸径断面积; f 为红松立木平均试验形数, $f=0.33$ 。

1.4 生态系统多功能性指数计算

首先对 1.3 中的各指标利用最小-最大标准化方法进行标准化。本文选用平均值法计算多功能性指数,该方法将多个生态系统过程运用一个综合指

$$H=-\sum_{i=1}^s P_i \ln P_i \quad (8)$$

$$J_D=(1-\sum_{i=1}^s P_i^2)/(1-1/S) \quad (9)$$

$$J_H=(1-\sum_{i=1}^s P_i \ln P_i)/\ln S \quad (10)$$

式中: S 为样方内物种数目; N 为样方内所有物种的个体总数; $P_i=n_i/N$, P_i 为物种 i 的相对多度; n_i 指样方中物种 i 的个体数,并且 $\sum n_i=N$ 。具体测定结果见表 5。

1.3.5 生产力(WBG) 用样地红松总生物量 W 除以林龄 A 来计算林分生产力^[2]。具体测定结果见表 6。

$$W_{BG}=W/A \quad (11)$$

数来量化表征,直观且易于数据处理,应用最为广泛。具体计算过程如下

$$E_{SI_i}=\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{x_i}{\max_i} \quad (13)$$

$$E_{MF_i}=\frac{1}{F} \sum_{i=1}^F \sum_{j=1}^N \frac{x_{ij}}{\max_i} \quad (14)$$

式中: E_{SI_i} 表示各单一功能指数; x_i 表示第 i 项指标值; E_{MF_i} 表示第 i 个样地的多功能性指数; F 表示测定的功能数,本研究中为 6; N 表示样地数,本研究中为 6; x_{ij} 为第 j 块样地第 i 项功能值; \max_i

为第 i 项功能的最大值^[12]。

1.5 生态系统功能权衡与协同分析

本研究选用均方根偏差(RMSD)^[14]来衡量生态系统功能的权衡与协同关系,该方法可以量化各功能间的权衡度,并将权衡的含义从传统意义上的负相关关系扩展到在相同方向变化的不均匀率。

$$E_{\text{std}} = \frac{E_{\text{ob}} - E_{\text{min}}}{E_{\text{max}} - E_{\text{min}}} \quad (15)$$

式中:表示将各项生态系统功能归一至 0~1 范围内, E_{std} 为某一生态功能 E_{ob} 归一化处理后的值; E_{ob} 为该项生态系统功能的观测值; E_{max} 和 E_{min} 分别为该项生态功能的最大值和最小值。

$$R_{\text{MSD}} = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (E_{\text{std}} - E_{\text{mean}})^2} \quad (16)$$

式中: R_{MSD} 为 m 种生态功能的均方根偏差; E_{mean} 为 m 个生态系统服务的平均值。

生态系统各功能间的权衡—协同关系可根据 RMSD 值划分为 5 个等级^[15]: (1) 当 $0.00 \leq \text{RMSD} < 0.01$ 时,生态功能间为零权衡或者协同关系; (2) 当 $0.01 \leq \text{RMSD} < 0.10$ 时,为低权衡关系; (3) 当 $0.10 \leq \text{RMSD} < 0.20$ 时,为中等权衡关系; (4) 当 $0.20 \leq \text{RMSD} < 0.30$ 时,为较高权衡关系; (5) $\text{RMSD} \geq 0.30$ 时,为高权衡关系。

2 种生态系统功能间的动态变化可由图 1 表示^[16],该图一是可以表示生态功能间权衡度大小;二是表示生态功能间的相对收益,即是指生态系统服务趋向服务价值更高的一方,可说明该生态服务的实现以损耗其他生态系统服务为前提。在此图中, A、B、C 和 D 点横纵坐标为参与比较的 2 种生态功能归一化的值, 2 种生态功能的权衡度可用点 $(x_{\text{ES1}}, y_{\text{ES2}})$ 到 $y=x$ 的距离表示,距离越远表明权衡度越高。例如,图中 D 点表示 2 种生态系统功能处于协同状态; B 和 C 点关于 $y=x$ 对称,此时 2 点的权衡度相同,但 B 点相对收益倾向于生态功能 1, C 点则倾向于生态功能 2。

2 结果与分析

2.1 红松人工林生态系统多功能性指数

不同林龄红松人工林多功能性指数平均值为 0.38~0.78,中值为 0.61,多功能性指数呈现随林龄增加而显著上升的趋势($P < 0.05$) (图 2、图 3),其中土壤水源涵养指数对多功能性贡献最大,生物多样性维持指数次之,木材生产指数则最小。各单一功能指数在 5 个林龄中表现各不相同,总体上差异显著($P < 0.05$),其中乔木层碳储量指数和木材生产指数均为 54 龄 > 43 龄 > 34 龄 > 24 龄 > 10 龄。

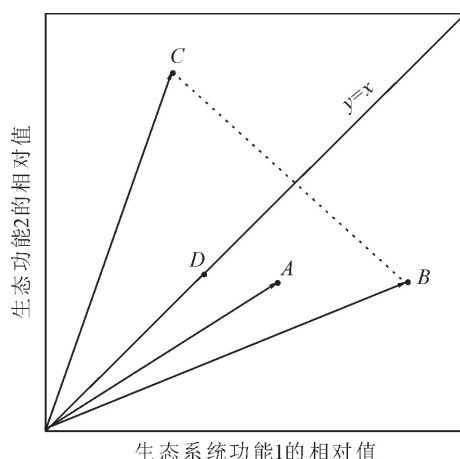


图 1 生态系统功能权衡及相对收益示意图

Fig. 1 Ecosystem function trade-off and relative income diagram

2.2 红松人工林生态系统功能间协同-权衡关系及相对收益分析

5 个林龄红松人工林 6 个功能间 75 组功能对中,除 10 龄中乔木层碳储量、生产力和木材生产三者之间为协同增进关系外,其余 72 组功能对均表现为不同程度的权衡关系。其中,高权衡关系共有 19 对,占比为 26.39%,在 43 龄中最多,有 5 对,主要集中在土壤养分维持与乔木层碳储量、生产力和木材生产等功能对中;较高权衡关系有 34 对,占比为 47.00%,在 54 龄中最多,共有 9 对,主要集中在生物多样性维持和土壤养分维持与其他功能对中;中等权衡关系有 18 对,低权衡关系则只有 1 对,为 54 龄乔木层碳储量和木材生产。红松人工林单一功能间的权衡度随林龄增加呈现先下降再上升最后下降的趋势,43 龄权衡度最高,而 54 龄最低(表 7)。

红松人工林各功能在不同林龄间相对收益均趋向于生产力,表明生产力的实现以损耗其他生态功能为前提;10 龄时各功能间相对收益均趋向于土壤水源涵养,34 龄时各功能间相对收益均趋向于生物多样性维持,其余功能对在各个林龄中相对收益则没有明显规律(图 4)。

2.3 红松人工林多功能性驱动因子

林分因子、地形因子和土壤化学计量比对红松人工林多功能性指数的解释率为 73.8%。随优势木高、冠幅、活枝下高和郁闭度增加,坡向由阳坡到阴坡,坡位由上坡到下坡,密度、坡度、土壤 C:N、C:P、C:K、N:P 和 N:K 减小,乔木层碳储量指数、生物多样性维持指数、木材生产指数、生产力指数和多功能性指数均增加(图 5)。蒙特卡罗置换检验结果表明红松活枝下高、优势木高、坡度、坡位、土壤 C:N、C:K 和 N:K 是影响红松人工林多功能性指数的主要环境因子(表 8)。由方差分解结果

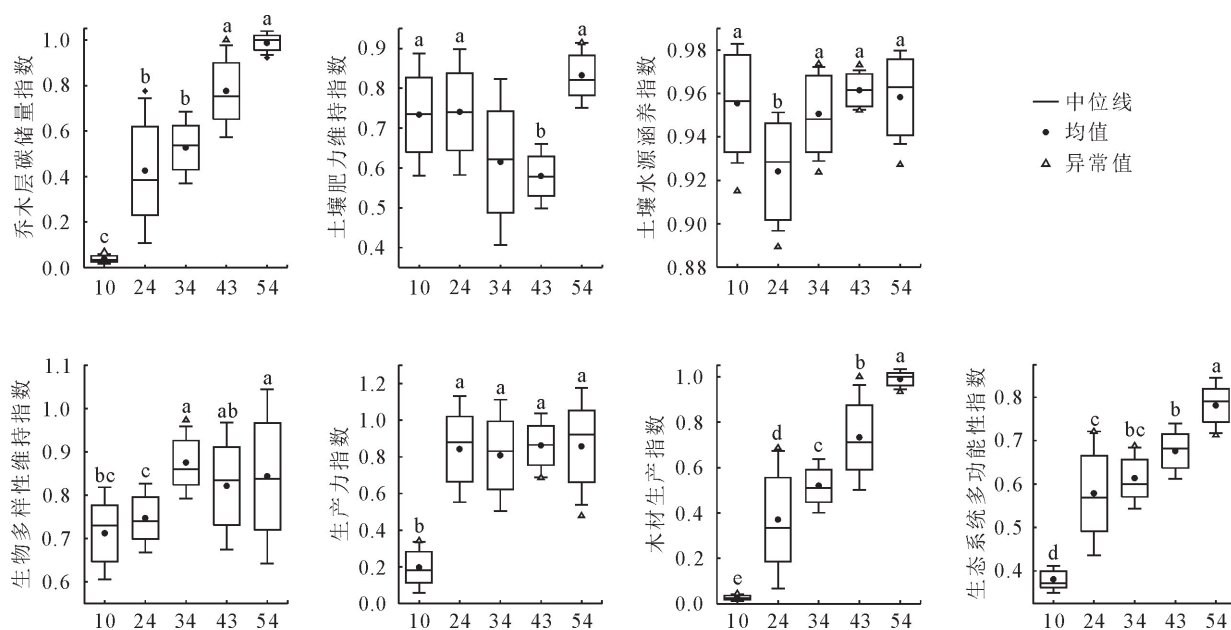


图2 不同林龄红松人工林多功能性指数

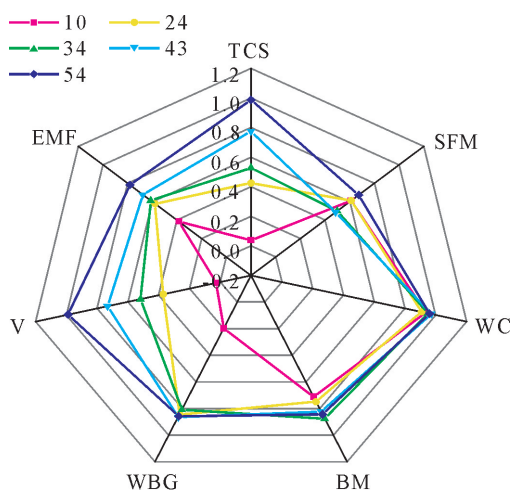
Fig. 2 Multifunctionality index of *P. koraiensis* plantation at different ages

图3 不同林龄红松人工林多功能性指数平均值雷达图

Fig. 3 Radar chart of average multifunctional index of *P. koraiensis* plantation at different forest ages

(图6)可知,林分因子和土壤化学计量比交互作用对红松人工林多功能性指数的解释率最高,达22.0%,林分因子次之,为18.5%。

3 讨论

辽东山区红松人工林土壤涵养水源指数和生物多样性维持指数分别在0.91~0.97、0.71~0.87,二者是红松人工林的主导功能,这是因为土壤含水率、孔隙度和灌草 S 、 D 、 H 、 J_D 、 J_H 等指标水平较高,且在不同林龄间差距不大。林龄显著影响物质生产、土壤养分保育和生物多样性维持等生态系统功能^[17-19]。本研究中,红松人工林多功能性指数随林龄增加而显著上升,这与兰洁等^[2]和 Jooson

等^[20]的研究结果一致,这是由于随着林龄增加,红松人工林林分结构(胸径、树高、活枝下高、密度、郁闭度)、凋落物产量和干扰强度改变,乔木层碳储量、生物多样性维持和木材生产等功能提升,从而导致多功能指数显著上升。

辽东山区红松人工林生态功能以权衡关系为主,各生态功能间矛盾较为突出。总体来看,红松人工林土壤养分维持功能与其他功能间权衡度较高,特别与生产力之间为高权衡关系,这是因为红松林发育过程中土壤养分含量呈现先降低后升高的格局,且土壤 C:N 较高,导致氮素释放效率和有效性较低^[21]。本研究中,红松人工林各功能间的权衡度随林龄增加呈现先下降再上升最后下降的趋势,43 龄权衡度最高,而 54 龄最低,这是红松林本身发育特征和人为干扰共同作用的结果:在不同生长发育阶段,林木种内、种间对资源的分配和竞争强度不同^[22],因获取木材和松子施加的人为干扰强度也有所变化,10 龄时红松林密度较大,对光照、水分和养分等资源的竞争激烈,但此时红松林生产力和木材生产能力较弱,各功能间的权衡度较高,43 龄时红松林生产力高,为获取林产品而进行高强度的间伐、修枝等活动导致植被生长与水分、养分的供需矛盾进一步激化,各功能间权衡关系加剧,经 10 a 的生长发育后,红松人工林趋于稳定,乔木层碳储量、生物多样性维持和生产力趋于较高水平,权衡度随之下降。在以林产品获取为主的辽东山区红松人工林经营过程中,各功能间的权衡度较高,不利于多功能性的实现,应对现有经营措施进行优化。

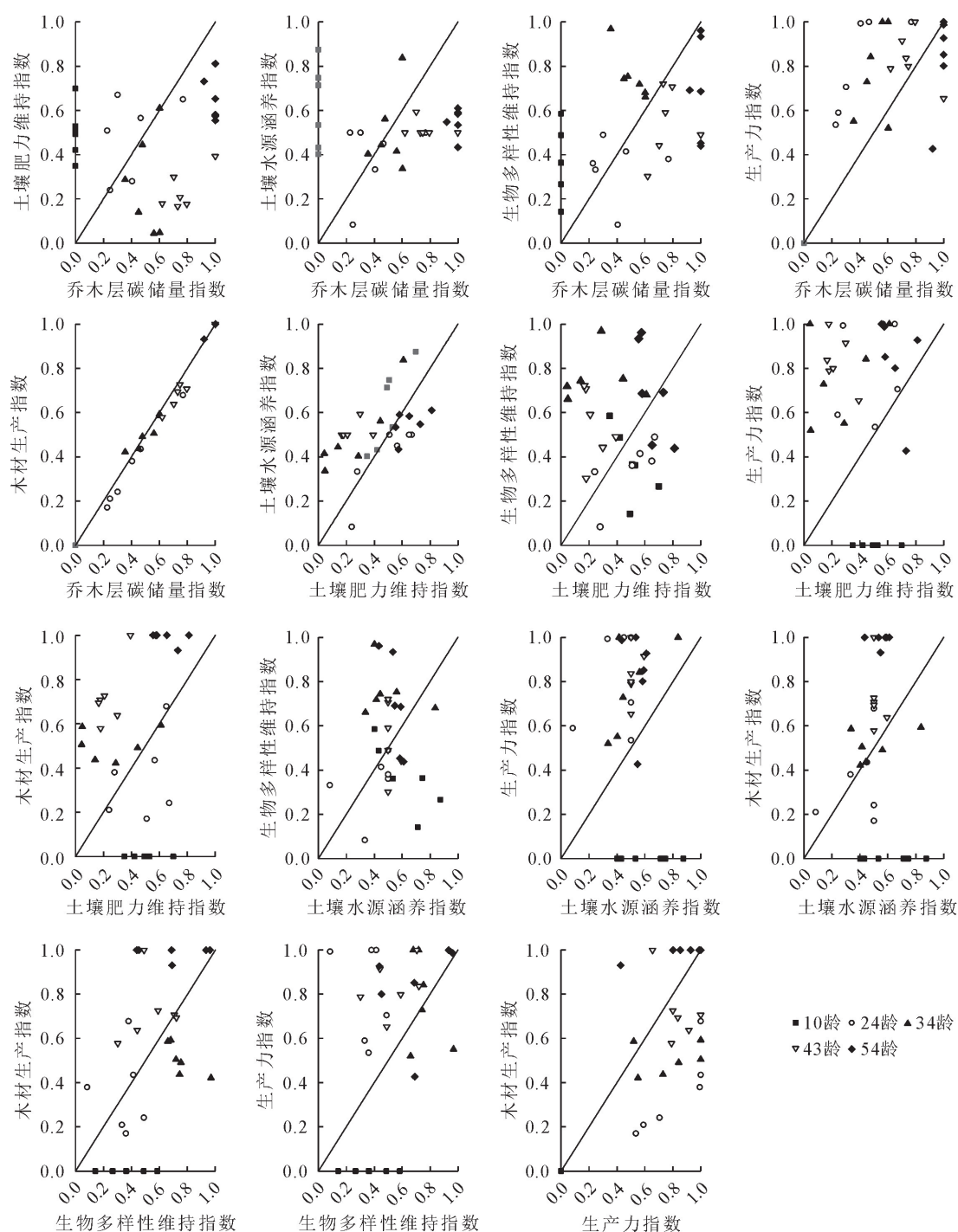


图4 不同林龄红松人工林生态系统功能权衡度及相对收益散点分布

Fig. 4 The ecosystem function trade-off degree and relative income scatter distribution of *P. koraiensis* plantation at different ages

林分因子中,冠幅、活枝下高、郁闭度与多功能性指数呈正相关,提示在红松人工林的经营过程中,可以结合抚育促进红松的生长,但要避免高强度修枝,保证林分郁闭度,增加蓄积量,以促进多功能性的实现。地形因子中,坡度与各功能指数呈负相关,这是由于林分条件、土壤养分、物种多样性等随坡度增大而出现负效应^[23];坡向由阳坡到阴坡、坡位由上到下,红松人工林多功能性指数增加,这与袁坤宇等^[16]的研究结果相符合,相对于阳坡和上坡位,阴

坡和下坡位土壤含水量高、蒸发量少^[24]、凋落物回归量大,物种多样性较高,因此具有更高的生态系统功能。本研究中,土壤C:P、C:N和N:P与各功能指数间呈现负相关,这主要与红松人工林植被生长受氮素限制和养分释放效率、有效性较低有关,可通过修枝剩余物和凋落物管理,促进林地养分回归,必要时可施用比例合理的肥料,缓解林地的养分限制。

表 7 不同林龄红松人工林生态功能均方根偏差

Table 7 Root mean square deviation of ecological function of *P. koraiensis* plantations at different ages

林龄		SFM	WC	BM	WBG	V
10 龄	TCS	0.36±0.08	0.42±0.07	0.28±0.10	0.00±0.00	0.00±0.00
	SFM		0.11±0.07	0.18±0.11	0.36±0.08	0.35±0.02
	WC			0.12±0.09	0.28±0.00	0.28±0.00
	BM				0.28±0.10	0.28±0.10
	WBG					0.00±0.00
24 龄	TCS	0.24±0.09	0.16±0.13	0.20±0.12	0.39±0.06	0.21±0.16
	SFM		0.21±0.11	0.22±0.09	0.29±0.12	0.25±0.08
	WC			0.18±0.08	0.35±0.17	0.21±0.12
	BM				0.36±0.19	0.16±0.10
	WBG					0.42±0.04
34 龄	TCS	0.26±0.13	0.19±0.11	0.18±0.14	0.27±0.09	0.10±0.05
	SFM		0.23±0.09	0.40±0.14	0.44±0.15	0.26±0.12
	WC			0.26±0.11	0.31±0.15	0.10±0.08
	BM				0.20±0.11	0.18±0.13
	WBG					0.26±0.09
43 龄	TCS	0.39±0.08	0.32±0.09	0.21±0.12	0.15±0.07	0.14±0.02
	SFM		0.17±0.02	0.25±0.13	0.43±0.13	0.36±0.09
	WC			0.16±0.12	0.32±0.09	0.26±0.11
	BM				0.26±0.11	0.21±0.13
	WBG					0.17±0.08
54 龄	TCS	0.23±0.08	0.40±0.12	0.28±0.12	0.19±0.05	0.03±0.01
	SFM		0.21±0.09	0.26±0.10	0.24±0.09	0.25±0.07
	WC			0.27±0.16	0.36±0.12	0.42±0.09
	BM				0.29±0.09	0.27±0.12
	WBG					0.18±0.06

表 8 红松人工林多功能性指数冗余分析与排序轴的相关性及置换检验

Table 8 Redundancy analysis of multifunctional index of *P. koraiensis* plantation and correlation and permutation test of ordination axis

变量		与轴的相关性		蒙特卡罗随机置换检验		
		RDA1	RDA2	F	解释率(%)	P
林分因子	密度	0.830 3	0.175 9	0.4	0.5	0.768
	优势木高	−0.927 7	0.045 1	3.0	3.0	0.025 *
	冠幅	−0.895 1	0.131 7	1.7	1.7	0.151
	活枝下高	−0.932 3	0.112 2	50.4	27.4	0.001 **
	郁闭度	−0.695 0	0.127 5	0.5	0.5	0.767
地形因子	坡度	0.356 2	0.073 2	4.5	3.2	0.018 *
	坡向	−0.358 5	−0.293 1	2.3	2.1	0.069
	坡位	−0.273 4	0.281 3	3.6	3	0.025 *
土壤化学计量比	土壤 C : N	0.244 5	0.060 7	2.5	2.9	0.023 *
	土壤 C : P	0.683 1	−0.169 0	0.9	1	0.411
	土壤 C : K	0.729 4	0.379 9	3.8	2.9	0.022 *
	土壤 N : P	0.688 1	−0.216 8	2.7	2.3	0.053
	土壤 N : K	0.674 1	0.381 3	9.5	6.2	0.001 **
特征参数						
RDA 排序概要		特征值			0.549 6	0.157 6
		物种—环境相关性			0.977 6	0.897 8
		典范轴显著性检验			F=7.06	P=0.001

注: ** 表示蒙特卡罗随机置换检验结果为极显著, * 为显著。

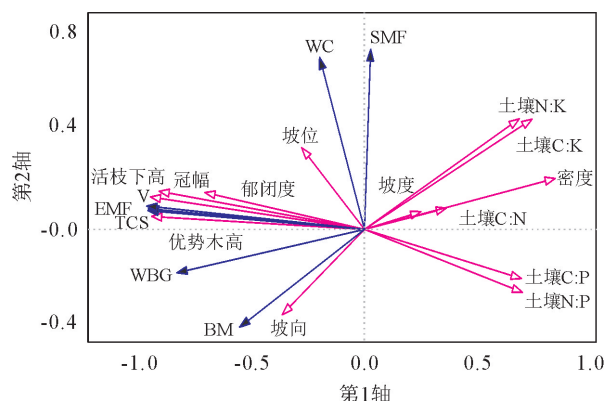


图5 红松人工林多功能性指数与驱动因子
冗余分析二维排序

Fig. 5 Redundant two-dimensional sorting of multifunctional index and driving factors of *P. koraiensis* plantation

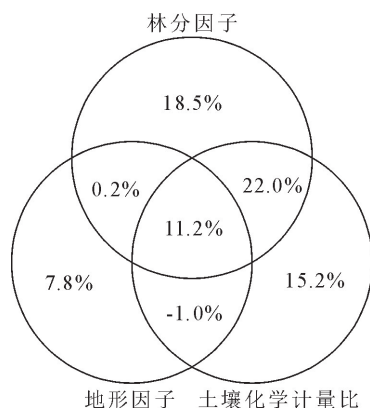


图6 红松人工林多功能性指数与环境因子方差分解

Fig. 6 Multifunctionality index of *P. koraiensis* plantation and variance decomposition of environmental factors

4 结论

辽东山区红松人工林多功能性指数在 0.38~0.78, 随林龄增加而显著上升。

辽东山区红松人工林各功能间以权衡关系为主。10 龄红松人工林乔木层碳储量、生产力和木材生产三者之间权衡度为 0, 为协同增进关系, 10、34、43 龄土壤养分维持功能与其他功能间权衡度最高, 平均均方根偏差分别为 0.272、0.318 和 0.306, 为较高权衡或高权衡关系; 24 龄红松人工林生产力、54 龄土壤水源涵养功能在同龄林分中与其他功能间则为高权衡关系。

林分因子、地形因子和土壤化学计量比对辽东山区红松人工林多功能性指数的解释率为 73.8%。可通过林分因子调整、适宜立地造林和土壤养分调节等措施优化经营措施, 在造林时立地条件尽量选择小坡度、阴坡和低坡位, 营林过程中应避免高强度修枝, 注重林下生物多样性保育, 加强修枝剩余物和凋落物管理, 必要时进行林地施肥, 在不降低林产品获取的前提下提高各生态功能间的协同关系, 以发

挥红松人工林的整体效益和持续健康经营。

参考文献:

- [1] 傅伯杰, 于丹丹. 生态系统服务权衡与集成方法[J]. 资源科学, 2016, 38(1): 1-9.
- [2] 兰洁, 雷相东, 何潇, 等. 吉林省天然阔叶混交林生态系统多功能性及驱动因素[J]. 生态学报, 2021, 41(13): 5128-5141.
LAN J, LEI X D, HE X, et al. Multifunctionality of natural mixed broad-leaved forests and driving forces in Jilin Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(13): 5128-5141. (in Chinese)
- [3] 杨凯, 曹银贵, 李胜鹏, 等. 晋北典型矿农城复合区生态系统服务价值权衡与协同[J]. 生态学报, 2022, 42(23): 9857-9870.
YANG K, CAO Y G, LI S P, et al. Trade-off and synergy of ecosystem service value in typical mine-agriculture-urban compound area: a case study in North Shanxi, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(23): 9857-9870. (in Chinese)
- [4] POWER A G. Ecosystem services and agriculture: trade offs and synergies[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 2010, 365(1554): 2595-2971.
- [5] LUCAS-BORJA M E, DELGADO-BAQUERIZO M. Plant diversity and soil stoichiometry regulates the changes in multifunctionality during pine temperate forest secondary succession[J]. The Science of the Total Environment, 2019, 697(20): 134204.
- [6] 刘畅, 满秀玲, 刘文勇, 等. 东北东部山地主要林分类型土壤特性及其水源涵养功能[J]. 水土保持学报, 2006(6): 30-33.
LIU C, MAN X L, LIU W Y, et al. Soil characteristics and water conservation function of forest types in Eastern Mountainous Region of Northeast China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2006(6): 30-33. (in Chinese)
- [7] 丁壮, 崔若光. 红松人工林生物量碳密度[J]. 东北林业大学学报, 2018, 46(2): 17-21.
DING Z, CUI R G. Biomass carbon density of Korean Pine plantations[J]. Journal of Northeast Forestry, 2018, 46(2): 17-21. (in Chinese)
- [8] 陆爱君, 高慧淋, 卜鹏图, 等. 辽东山区红松人工林不同林龄林下灌草多样性研究[J]. 西南林业大学学报: 自然科学, 2022, 42(6): 1-10.
LU A J, GAO H L, BU P T, et al. Species diversity of shrub and herb layers in *Pinus koraiensis* plantations with different forest ages in Eastern Liaoning Mountain Region[J]. Journal of Southwest Forestry, 2022, 42(6): 1-10. (in Chinese)
- [9] GARLAND G, BANERIJEE S, EDLINGER A, et al. A closer look at the functions behind ecosystem multifunctionality: a review[J]. Journal of Ecology, 2021, 109, 600-613.
- [10] 陈传国和朱俊凤[M]. 东北主要林木生物量手册. 北京: 中国林业出版社, 1989.
- [11] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [12] 杨智姣, 温晨, 杨磊, 等. 半干旱黄土小流域不同恢复方式对生态系统多功能性的影响[J]. 生态学报, 2020, 40(23): 8606-8617.
YANG Z J, WEN C, YANG L, et al. Effects of different restoration methods on ecosystem multifunctionality in the semi-arid loess small watershed[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(23): 8606-8617. (in Chinese)

- rientation and molecular deformation[J]. New Zealand Journal of Forestry Science, 2006, 36(1): 60-71.
- [16] 屠一锋. 现代仪器分析[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 195-200.
- [17] 夏之宁. 光分析化学[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2004: 150-152.
- [18] 腰希申, 李旸, 许煌灿, 等. 棕榈藤的电镜观察——I 藤基部分的电镜观察[J]. 林业科学, 1998, 34(3): 104-109.
YAO X S, LI Y, XU H C, *et al.* The observation with E. M. of rattan[J]. Scientia Silvae Sinicae, 1998, 34(3): 104-109. (in Chinese)
- [19] 张菲菲. 高地钩叶藤材构造和主要化学成分及微区分布[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2018.
- [20] AGARWAL U P. An overview of Raman spectroscopy as applied to lignocellulosic materials. In DS Argyropoulos, ed, Advances in Lignocellulosics Characterization [A]. TAPPI Press, Atlanta, pp 1999, 209-225.
- [21] AGARWAL U P, RALPH S. FT-Raman spectroscopy of wood: identifying contributions of lignin and carbohydrate polymers in the spectrum of black spruce (*Picea mariana*) [J]. Appl Spectrosc, 1997, 51: 1648-1655.
- [22] EDWARDS H G M, FARWELL D W, WEBSTER D. FT Raman microscopy of untreated natural plant fibres[A]. Spectrochim Acta, 1997, 53: 2383-2392.
- [23] SAARIAHO A M, JÄÄSKELÄINEN A S, NUOPPONEN M, *et al.* Ultra violet resonance Raman spectroscopy in lignin analysis: determination of characteristic vibrations of p-hydroxyphenyl, guaiacyl, and syringyl lignin structures[J]. Appl Spectrosc, 2003, 57: 58-66.
- [24] 张菲菲, 季必超, 汪佑宏, 等. 拉曼光谱对高地钩叶藤纤维 S₂ 层主要成分的预测[J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40(1): 179-183.
ZHANG F F, JI B C, WANG Y H, *et al.* Prediction of the main components in S₂ of *Plectocomia himalayana* fiber based on Raman spectra[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2020, 40(1): 179-183. (in Chinese)
- [25] 尹思慈. 木材学[M]. 北京: 中国林业出版社, 1996: 80.
- [26] 刘苍伟, 苏明垒, 周贤武, 等. FTIR 及 CLSM 对转基因杨木细胞壁木质素含量及微区分布研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2017, 37(11): 3404-3408.
LIU C W, SU M L, ZHOU X W, *et al.* Analysis of content and distribution of lignin in cell wall of transgenic poplar with fourier infrared spectrun (FTIR) and confocal laser scanning microscopy (CLSM) [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2017, 37(11): 3404-3408. (in Chinese)
- [27] 张菲菲, 李坦, 汪佑宏, 等. 棕榈藤材藤龄判断初探[J]. 东北林业大学学报, 2017, 45(6): 26-29.
ZHANG F F, LI D, WANG Y H, *et al.* Judgment of rattan age[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2017, 45(6): 26-29. (in Chinese)

(上接第 59 页)

- [13] 蒋路平, 王景源, 张鹏, 等. 170 个红松无性系生长及结实性状变异及选择[J]. 林业科学研究, 2019, 32(1): 58-64.
- [14] BRADFORD J B and DAMATO A W. Recognizing trade-offs in multi-objective land management[J]. Frontiers in Ecology and the Environment, 2012, 10(4): 210-216.
- [15] 张伟. 黄土丘陵区人工林草植被生态服务功能演变及其互作机制[D]. 杨陵: 西北农林科技大学, 2019.
- [16] 袁坤宇, 曹扬, 杨洁, 等. 黄土残塬沟壑区不同林龄与坡向人工刺槐林生态系统服务协同关系[J]. 水土保持通报, 2020, 40(5): 97-105.
- [17] 孙菲菲, 张增祥, 左丽君, 等. 冀西北水源涵养区不同类型人工针叶林生态功能差异性评估[J]. 自然资源学报, 2020, 35(6): 1348-1359.
SUN F F, ZHANG Z X, ZUO L J, *et al.* Difference assessment on ecological functions of artificial coniferous forests in water conservation area of Northwestern Hebei[J]. Journal of Natural Resources, 2020, 35(6): 1348-1359. (in Chinese)
- [18] 崔静, 黄佳健, 陈云明, 等. 黄土丘陵区人工柠条林下草本植物物种多样性研究[J]. 西北林学院学报, 2018, 33(3): 14-20.
CUI J, HUANG J J, CHEN Y M, *et al.* Biodiversity of herbaceous species under *Caragana microphylla* plantations in Loess Hilly Region[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2018, 33(3): 14-20. (in Chinese)
- [19] 李哲, 董宁宁, 侯琳, 等. 秦岭山地不同龄组锐齿栎林土壤和枯落物有机碳、全氮特征[J]. 中南林业科技大学学报, 2017, 37(12): 127-132, 138.
LI Z, DONG N N, HOU L, *et al.* Characteristics of soil and litter organic carbon and total nitrogen in different age groups of *Quercus aliena* var. *acuteserrata* forests in the Qinling Mountains[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2017, 37(12): 127-132, 138. (in Chinese)
- [20] JNSSON M, SNULLT, Leverkus A B. Ecosystem service multifunctionality of low-productivity forests and implications for conservation and management[J]. Journal of Applied Ecology, 2020, 57(4): 695-706.
- [21] 王绍强, 于贵瑞. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量特征[J]. 生态学报, 2008, 28(8): 3937-3947.
WANG S Q, YU G R. Ecological stoichiometry characteristics of ecosystem carbon, nitrogen and phosphorus elements[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(8): 3937-3947. (in Chinese)
- [22] 郭雯, 黄宏亮, 王锐, 等. 毛竹及其变种细根化学计量特征[J]. 生态学杂志, 2021, 40(3): 692-700.
- [23] 贾忠奎, 公宁宁, 姚凯, 等. 塞罕坝华北落叶松人工林生产力对坡向的响应[J]. 西北林学院学报, 2012, 27(4): 163-169.
JIA Z K, GONG N N, YAO K, *et al.* Response of *Larix principis-rupprechtii* plantation productivity on slope aspects[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2012, 27(4): 163-169. (in Chinese)
- [24] 周萍, 刘国彬, 侯喜禄, 等. 黄土丘陵区侵蚀环境不同坡面及坡位土壤理化特征研究[J]. 水土保持学报, 2008, 22(1): 7-12.
ZHOU P, LIU G B, HOU X L, *et al.* Study on soil physical and nutrients properties of different slope aspects and positions in Eroded Loess Hilly Region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2008, 22(1): 7-12. (in Chinese)