

DOI: 10.5846/stxb202101290310

兰洁,雷相东,何潇,高文强,李玉堂.吉林省天然阔叶混交林生态系统多功能性及驱动因素.生态学报,2021,41(13):5128-5141.

Lan J, Lei X D, He X, Gao W Q, Li Y T. Multi-functionality of natural mixed broad-leaved forests and driving forces in Jilin Province. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(13): 5128-5141.

吉林省天然阔叶混交林生态系统多功能性及驱动因素

兰 洁¹, 雷相东^{2,*}, 何 潇², 高文强², 李玉堂³

1 北京林业大学林学院, 北京 100083

2 国家林草局森林经营与生长模拟重点实验室, 中国林业科学研究院资源信息研究所, 北京 100091

3 吉林省林业调查规划院, 长春 130022

摘要: 量化天然林生态系统的多功能性, 分析不同功能间的权衡-协同关系及驱动因子, 对于天然林保护及修复具有重要的意义。基于吉林省第 8 次森林资源清查天然阔叶混交林固定样地调查数据、土壤及气候数据, 选取土壤保持、涵养水源、碳储量、气候调节、土壤肥力维持、生物多样性、生产力和木材生产 8 个生态系统功能来表征生态系统多功能性。利用平均值法中的最大值转换法计算多功能性指数。结果表明: (1) 8 个功能间权衡、协同和中性关系均存在, 但以协同关系为主。生物多样性除与气候调节为权衡关系外, 与其他功能均为协同关系; 碳储量-木材生产协同关系最强 ($r=0.960, P<0.01$), 气候调节-涵养水源间权衡关系最强 ($r=-0.934, P<0.01$); (2) 吉林省天然阔叶混交林的多功能性指数在 0.31—0.89 之间, 且生物多样性和气候调节为主导功能; (3) 多功能性与驱动因子的结构方程模型确定系数为 $R^2=0.795$, 多功能性的驱动因子的总路径系数依次为: 林分密度指数 (0.752) > 平均年龄 (0.375) > 年降雨量 (0.365) > 树种丰富度 (0.101) > 土壤 pH (0.064) > 结构多样性 (-0.037) > 年均温 (-0.105), 林分密度是最重要的驱动因子。结果对理解天然阔叶混交林的多功能形成及经营调控有一定的意义。

关键词: 多功能性; 结构方程模型; 天然阔叶混交林; 权衡; 协同; 驱动因子

Multi-functionality of natural mixed broad-leaved forests and driving forces in Jilin Province

LAN Jie¹, LEI Xiangdong^{2,*}, HE Xiao², GAO Wenqiang², LI Yutang³

1 College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2 Key Laboratory of Forest Management and Growth Modelling, National Forestry and Grassland Administration, Institute of Forest Resources Information Techniques, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

3 Jilin Forestry Investigation and Planning Institute, Changchun 130022, China

Abstract: Quantifying the multifunctionality of natural forest ecosystem, and analyzing the trade-off and synergy between different functions and driving factors are of great significance for natural forest protection and restoration. The data of the study include permanent sample plots from the eighth national forest inventory in Jilin Province, soil data and climate data of natural mixed broad-leaved forest. To characterize the ecosystem multifunctionality, eight ecosystem functions were selected, including soil conservation, water conservation, carbon storage, climate regulation, soil fertility maintenance, biodiversity, productivity and wood production. The Ecosystem Multifunctional Index is calculated by using standardization of a maximum observed value in the average method. The results show that: (1) There are trade-offs, synergies and neutrals among the eight functions, but the synergy is dominant. In addition to the trade-off between biodiversity and climate regulation, it has a synergy with other functions. The synergy between carbon storage and wood production is the strongest

基金项目: 国家自然科学基金 (31870623); 林业公益性行业科研项目 (201504303)

收稿日期: 2021-01-29; **修订日期:** 2021-07-04

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xdlei@ifrit.ac.cn

($r=0.960$, $P<0.01$). The trade-off between climate regulation and water conservation is the strongest ($r=-0.934$, $P<0.01$). (2) The multifunctional index of natural mixed broad-leaved forest in Jilin Province is between 0.31 and 0.89, and biodiversity and climate regulation are the leading functions. (3) The coefficient of determination by structural equation model of multifunctionality and driving factors is 0.795. The total path coefficients of the driving factors of multifunctionality are as follows: stand density index (0.752) > average age (0.375) > annual precipitation (0.365) > tree species richness (0.101) > soil pH (0.064) > structural diversity (-0.037) > annual average temperature (-0.105), and stand density is the most important driving factor. The results are of great significance to understand the formation and management of natural mixed broad-leaved forest multifunctionality.

Key Words: multifunctionality; structural equation model; mixed broad-leaved forest; trade-off; synergy; driving factor

生态系统同时提供调节、供给、文化和支持等多种功能或服务的能力称为生态系统多功能性(ecosystem multifunctionality, EMF)^[1]。森林生态系统具有多种功能,这些功能间存在复杂的关系,包含权衡(负向关系)、协同(正向关系)和中性(无显著关系)等多个表现类型^[2]。如 Van der Plas 等^[3]利用样地数据对欧洲的森林生态系统服务研究发现不同功能间的消长并不多,通过森林经营可实现功能之间的双赢;Su 等^[4]的研究表明,产水量、泥沙控制和净初级生产力之间存在权衡关系。一对生态系统服务之间的关系在不同的尺度和生态系统中可能是不同的^[5],如有研究表明碳储量和生物多样性之间的关系在全球尺度上是协同的,但当在一个更小的研究区域时,生物多样性和碳储量也可能存在权衡关系^[6]。研究多功能性的驱动因子有助于理解这些关系。生物多样性现在被广泛认为是生态系统功能的主要驱动力^[3, 7],但气候、土壤和林分因子等生物和非生物因素也会影响这些功能。如 Jucker^[8]等发现土壤理化性质和气候随着地形因子(如海拔和坡度)的变化可直接或间接调节森林多样性和功能。Yuan 等人^[9]研究发现,随着林分结构复杂性的降低,生态系统多功能性水平也随之降低。Jönsson 等人^[10]发现,森林多功能性随着林龄和树种丰富度的增加而增加。但国内关于森林多功能性的研究较少,仅有的如対云南省金沙江流域亚热带针叶林、亚热带常绿硬叶林和亚热带常绿阔叶林等不同植被类型进行的多功能性研究^[11]、対太阳河自然保护区亚热带针叶林的相关研究^[12];以及天然次生林生态系统多功能指数驱动因素进行的研究^[13]、不同择伐强度下多功能性的变化及其驱动因素的探讨^[14];黄河三角洲自然保护区中植物多样性与生态系统多功能性之间的关系等^[15]。这些都是在局部尺度开展的研究,森林多功能性及其驱动因素具有空间效应,在大尺度上的森林多功能性研究国内尚未发现报道。

在多功能性的驱动因子研究方法方面,结构方程模型应用较多。它是一种多变量的统计方法,可同时研究多个因子之间的相互关系^[16]。相比传统的统计法,结构方程模型基于研究者的先验知识预先设定系统内因子间的依赖关系,不仅能够判别各因子之间的关系强度,还能对整体模型进行拟合和判断,反映自变量因素与因变量之间的直接关系与间接关系^[17],是研究耦合关系的好方法。如 Jing 等人^[18]构建了年均温、年降水量、土壤 pH、植物物种丰富度、土壤生物多样性、土壤水分与多功能性的结构方程。Sanaei 等^[19]构建了林龄、坡度、树种多样性等变量与森林多功能性及单个功能的结构方程,来探究不同驱动因子对多功能性的影响。

吉林省作为我国重点国有林区和天然林区,在维护国家生态安全和木材安全中具有十分重要的地位。由于以往对森林资源的过度开发,使其出现了可采森林资源危机,随着天然林保护工程的实施,吉林省的森林资源得到了有效恢复。但当前对森林多功能性及其与生物因素和非生物因素的相关关系研究尤为缺乏,限制了人们对生态系统多功能性的认识,不利于生态系统管理和生态服务的发挥。因此,本研究以吉林省阔叶混交林为对象,利用森林资源清查固定样地数据,量化森林的多功能性,并基于结构方程模型分析林分、土壤及气候因素与多功能性间的耦合关系,为吉林省天然林修复和多功能经营提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况和数据来源

吉林省(40°50′—46°19′N,121°38′—131°19′E)位于我国东北的中部,属温带大陆性季风气候,受海陆分布、大气环流以及地貌形态等差异影响,自东南向西北由湿润气候过渡到半湿润气候再到半干旱气候。多年平均气温 2—6℃;气温年较差在 35—42℃,年平均降水量在 350—1000 mm 之间,多年平均日照时数 2259—3016 h;全年无霜期 100—160 d。吉林省地貌和土壤类型众多,森林资源丰富、类型多样。森林多集中分布在东部山区和中东部低山丘陵区,其中阔叶混交林中树种主要包括水曲柳(*Fraxinus mandshurica*)、胡桃楸(*Juglans mandshurica*)、黄檗(*Phellodendron amurense*)、紫椴(*Tilia amurensis*)、蒙古栎(*Quercus mongolica*)、白桦(*Betula platyphylla*)和山杨(*Populus davidiana*)等。

本研究利用的主要数据包括:①固定样地数据:2009 年吉林省第八次森林资源连续清查固定样地数据,包含筛选后阔叶混交林样地 1389 块(图 1),样地面积为 0.06 hm²。②土壤属性数据:由全球数字土壤制图系统(<https://www.soilgrids.org/>)获取^[20],包含土壤 pH、土壤有机碳含量等 11 个土壤理化性质变量(表 1),分辨率 250 m×250 m。③气象数据:根据样地位置和海拔,利用亚太地区气候数据软件 ClimateAP 生成各样地的气候数据^[21],共 16 个气候变量(表 2)。

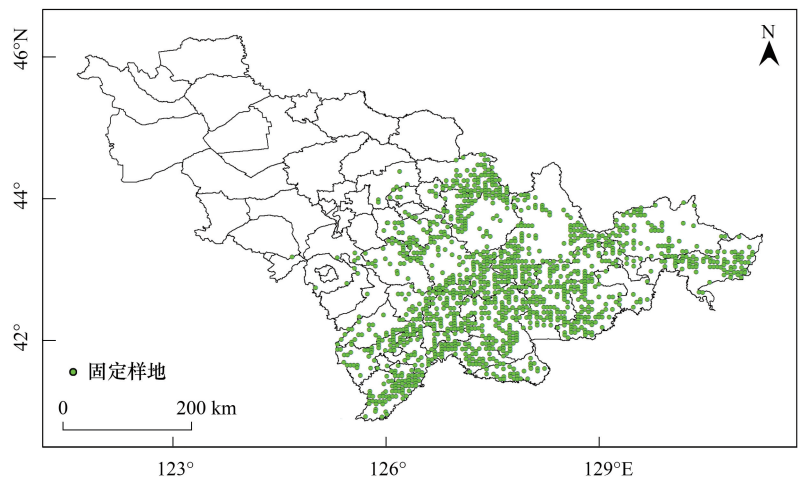


图 1 吉林省阔叶混交林固定样地分布图

Fig.1 Geospatial distribution of sample plots of mixed broad-leaved forests in Jilin Province

表 1 土壤理化性质变量

Table 1 Summary of soil physical and chemical property variables

类别 Category	代码 Code	变量名称 Variable name
物理性质 Physical property	bdod	细土粒的容重 Bulk density of the fine earth fraction
	cfvo	粗碎片的体积分数 Volumetric fraction of coarse fragments (>2mm)
	clay	粘土粒在细土颗粒中的比例 Proportion of clay particles(<0.002mm) in the fine earth fraction
	sand	细土粒中砂土的比例 Proportion of sand particles(>0.05mm) in the fine earth fraction
	silt	细土粒中粉砂粒的比例 Proportion of silt particles(0.002—0.05mm) in the fine earth fraction
化学性质 Chemical property	pH	土壤 pH Soil pH
	cec	土壤的阳离子交换能力 Cation Exchange Capacity of the soil
	SOC	细土粒中土壤有机碳含量 Soil organic carbon content in the fine earth fraction
	Nitrogen	全氮 Total nitrogen(N)
派生属性 Derived variables	ocd	有机碳密度 Organic carbon density
	ocs	有机碳储量 Organic carbon stocks

表 2 气候变量
Table 2 Summary of climate variables

来源 Source	代码 Code	变量名称 Variable name
直接计算的变量 Directly calculated variables	MAT	年平均温度 mean annual temperature (℃)
	MWMT	最热月的平均温度 mean warmest month temperature (℃)
	MCMT	最冷月的平均温度 mean coldest month temperature (℃)
	TD	MWMT 和 MCMT 之间的温差,或大陆性 temperature difference between MWMT and MCMT, or continentality (℃)
	MAP	年降水量 mean annual precipitation (mm)
派生变量 Derived variables	AHM	年热;湿指数 annual heat; moisture index (MAT+10)/(MAP/1000))
	DD_0	零度以下的低温日,低温日 degree-days below 0℃, chilling degree-days
	DD5	摄氏 5 度以上的天数,生长的天数 degree-days above 5℃, growing degree-days
	DD_18	18 摄氏度以下的高温日,加热高温日 degree-days below 18℃, heating degree-days
	DD18	18 摄氏度以上,冷却天数 degree-days above 18℃, cooling degree-days
	NFFD	无霜天数 the number of frost-free days
	PAS	前一年 8 月至当年 7 月的降雪降水量(毫米)precipitation as snow (mm) between August in previous year and July in current year
	EMT	超过 30 年的极端最低温度 extreme minimum temperature over 30 years
	EXT	超过 30 年的极端最高温度 extreme maximum temperature over 30 years
	Eref	哈格里夫斯参考蒸发 Hargreaves reference evaporation
	CMD	哈格里夫斯气候水分亏缺 Hargreaves climatic moisture deficit

1.2 生态系统服务计算

本研究共选取 8 种与生态系统功能相关的指标来量化生态系统多功能性,包括调节、支持和供给 3 类服务(表 3)。

表 3 生态系统服务量化指标
Table 3 Quantitative indicators of ecosystem services

类别		指标	代码	平均值	最大值	最小值	标准差	单位
Category		Indicator	Code	Average	Maximum	Minimum	Standard deviation	Unit
调节服务 Regulation services	土壤保持	土壤保持量	SC	760.09	3759.39	2.78	634.59	t hm ⁻² a ⁻¹
	涵养水源	蓄水量	WC	2511.46	5817.86	398.69	1004.95	t hm ⁻² a ⁻¹
	碳储量	林分碳储量	CS	62.20	261.50	3.51	33.69	t/hm ²
	气候调节	年热:湿指数	AHM	18.39	28.10	11.20	3.01	/
支持服务 Support services	土壤肥力维持	土壤有机碳含量	SOC	27.42	51.01	13.91	5.09	g/kg
	生物多样性	香浓多样性指数	H	1.84	2.61	0.48	0.34	/
供给服务	生产力	年平均生物量生长量	ABG	2.15	9.13	0.35	0.87	t hm ⁻² a ⁻¹
Supply services	木材生产	公顷蓄积量	V	142.34	512.37	9.26	70.94	m ³ /hm ²

1.2.1 土壤保持

土壤保持是生态系统通过其结构与过程减少由于降水所导致的土壤侵蚀的作用,是生态系统重要调节服务之一^[22]。本研究采用通用土壤流失方程计算。

土壤保持量:

$$SC = SC_{\text{潜在}} - SC_{\text{实际}}$$
 (1)

实际土壤侵蚀量:

$$SC_{\text{实际}} = R \times K \times L \times S \times C$$
 (2)

潜在土壤侵蚀量:

$$SC_{\text{潜在}} = R \times K \times L \times S \quad (3)$$

式中, SC 为单位面积年土壤保持量, $\text{t hm}^{-2} \text{a}^{-1}$; $SC_{\text{实际}}$ 为单位面积实际土壤侵蚀量, $\text{t hm}^{-2} \text{a}^{-1}$; $SC_{\text{潜在}}$ 为单位面积潜在土壤侵蚀量, $\text{t hm}^{-2} \text{a}^{-1}$; R 为降雨侵蚀力因子; K 为土壤可蚀性因子; L 为坡长因子; S 为坡度因子; C 为植被覆盖因子。

降雨侵蚀力因子 R 采用 Wischmeier 等^[23] 提出的月尺度计算方法(公式 4):

$$R = \sum_{j=1}^{12} [1.735 \times 10^{(1.51g \frac{Y_j^2}{Y} - 0.8188)}] \quad (4)$$

式中, Y_j 为月降水量, mm ; Y 为年降水量, mm ; j ($1, 2, \dots, 12$) 为月份。由于公式中 R 的单位是英制单位, $1000\text{ft} \cdot \text{t} \cdot \text{in}/(\text{ac} \cdot \text{h} \cdot \text{a})$, 该单位需乘以系数 17.02 转换成国际单位, $\text{MJ} \cdot \text{mm hm}^{-2} \text{h}^{-1} \text{a}^{-1}$ ^[23]。

土壤可蚀性因子 K 采用 Williams 等^[24] 提出的利用土壤有机碳和土壤颗粒组成进行计算(公式 5):

$$K = \{0.2 + 0.3 \exp[-0.0256m_s(1 - m_{\text{silt}}/100)]\} \times [m_{\text{silt}}/(m_c + m_{\text{silt}})]^{0.3} \\ \times \{1 - 0.25 \text{orgC}/[\text{orgC} + \exp(3.72 - 2.95 \text{orgC})]\} \\ \times \{1 - 0.7(1 - m_s/100)/\{(1 - m_s/100) + \exp[-5.51 + 22.9(1 - m_s/100)]\}\} \quad (5)$$

式中, K 为土壤可蚀性因子, $\text{t} \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h hm}^{-2} \text{MJ}^{-1} \text{mm}^{-1}$ 。 m_c 、 m_{silt} 、 m_s 和 orgC 分别为粘粒($<0.002\text{mm}$)、粉粒($0.002-0.05\text{mm}$)、砂粒($0.05-2\text{mm}$)和有机碳含量(%)。

坡长因子 L 、坡度因子 S 计算方法如下(公式 6—9):

$$L = \left(\frac{\lambda}{22.13}\right)^m \quad (6)$$

$$m = \beta/(1 + \beta) \quad (7)$$

$$\beta = (\sin\theta/0.089)/[3.0 \times (\sin\theta)^{0.8} + 0.56] \quad (8)$$

$$S = \begin{cases} 10.8\sin\theta + 0.03 & \theta < 5.14^\circ \\ 16.8\sin\theta - 0.5 & 5.14^\circ \leq \theta < 10.20^\circ \\ 21.91\sin\theta - 0.96 & 10.20^\circ \leq \theta < 28.81^\circ \\ 9.5988 & \theta > 28.81^\circ \end{cases} \quad (9)$$

式中, L 为坡长因子; S 为坡度因子; m 为坡长指数; λ 为坡长(m); θ 为坡度($^\circ$)。

植被因子 C 计算如下:

$$C = e^{a_i(sc)} \quad (10)$$

式中, SC 为植被覆盖度(%), 以 NDVI 值代替, 其值采用 2000—2009 年中国年度植被指数(NDVI)空间分布数据集^[25], 来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>); a_i 为不同植被类型的系数, 林地取值为 -0.1535 ^[26]。

1.2.2 涵养水源

水源涵养数据通过水量平衡方程(The Water Balance Equation)计算。水量平衡原理是指在一定的时空内, 水分的运动保持着质量守恒, 或输入的水量和输出的水量之间的差额等于系统内蓄水的变化量。

$$WC = (P_i - R_i - ET_i) \cdot A_i \cdot 10^{-3} \quad (11)$$

式中, WC 为水源涵养量(m^3); P_i 为降雨量(mm); R_i 为暴雨径流量(mm), 由公式 $R_i = 0.0053 \times P_i + 0.256$ 推导可得^[27]; A_i 为第 i 块样地的面积(m^2); ET_i 为蒸散发量(mm), 来自 Niu 等^[28] 发表的文章“1981—2015 年中国陆地生态系统蒸腾蒸散比数据集”, 由国家生态科学数据中心(<http://rs.cern.ac.cn/>)下载。

1.2.3 碳储量

首先基于固定样地中每木检尺的胸径数据, 和行业标准《生物量模型及碳计量参数》、《中国森林植被生物量和碳储量评估》^[29] 中不同树种、不同组分的生物量模型估算单木地上、地下部分的生物量; 然后基于生物

量的计算结果和各树种不同组分的含碳系数,估算出单木碳储量(式 12),再通过累加得到林分碳储量。

$$CS = B_{above} \times P_{above} + B_{below} \times P_{below} \quad (12)$$

式中, CS 为单木碳储量; B_{above} 、 B_{below} 分别为单木地上生物量、地下生物量; P_{above} 、 P_{below} 分别为单木地上部分和地下部分的含碳系数。

1.2.4 生物多样性

采用 Shannon-Wiener 多样性指数计算树种多样性(式 13):

$$H = - \sum_{i=1}^n P_i \ln(P_i) \quad (13)$$

式中, H 为物种多样性指数; n 为样地中树种个数; P_i 为第 i 树种比例。

1.2.5 生产力

采用固定样地活立木每公顷总生物量 W 除以林龄 A 的方法计算林分生产力 ABG ^[30](式 14)。

$$ABG = W/A \quad (14)$$

1.2.6 木材生产

基于固定样地数据中每木检尺胸径数据,通过一元材积方程得到每木材积,累加得林分公顷蓄积量 V 。

1.2.7 土壤肥力维持

森林土壤是影响林木生长发育重要的环境因子,它参与森林生态系统碳、氮循环过程,是森林生态系统养分的主要来源。本研究将土壤有机碳含量(Soil organic carbon, SOC)作为量化森林土壤肥力的指标。数据来源于全球数字土壤制图系统(<https://www.soilgrids.org/>)^[20]。

1.2.8 气候调节

森林群落在进行光合及蒸腾作用时,可调节区域的温度及水分。本研究采用年热湿指数(AHM)作为量化气候调节的指标。AHM 越大,意味着越干燥,否则越湿润。来源于软件 ClimateAP 生成的各样地气候数据。

$$AHM = (MAT + 10) / (MAP / 1000) \quad (15)$$

式中, MAT 为年均温($^{\circ}C$); MAP 为年降水量(mm)。

1.3 生态系统功能间权衡协调关系

利用相关分析研究不同功能间的权衡协同关系,若两项功能间为显著正相关($r > 0, P < 0.05$),则表明两者为协同关系;若两项功能间为显著负相关($r < 0, P < 0.05$),则表明两者为权衡关系;若两者不相关,则为中性关系。利用双变量线性回归分析多功能性与各驱动因子间的关系,说明各因子对多功能性的解释率。

1.4 生态系统多功能的计算

因平均值法可简单、直观地反映群落维持生态系统多功能性的能力^[31-34],故本研究利用平均法计算吉林省阔叶林生态系统多功能性指数,各功能采用最大值转化法进行数据标准化^[31,33,35-36],将每个功能排名前 5% 的观测值取平均值后作为该功能的最大值(式 16)。

$$EMF_i = \frac{1}{F} \sum_{j=1}^F \sum_{i=1}^N \frac{x_{ij}}{\max_i} \quad (16)$$

式中, EMF_i 表示第 i 个样地的多功能性指数; F 表示测定的功能数,本研究中取 8; N 表示研究区样地数; x_{ij} 为第 j 块样地第 i 项功能值; $\max_i$ 为第 i 项功能排名前 5% 观测值的平均值。

1.5 结构方程模型的构建

采用结构方程来分析森林多功能性的驱动因子及其相互关系。它包括测量模型和结构模型两部分^[37]。测量模型是建立潜在变量与观测变量之间关系的模型,其表达式如下:

$$X = \Lambda x \xi + \delta \quad (17)$$

$$Y = \Lambda y \eta + \varepsilon \quad (18)$$

式中, X 为外生显性变量向量, Y 为内生显性变量向量, Λ_x 和 Λ_y 为指标变量 X 、 Y 的因素负荷量, δ 、 ε 为外生显性变量向量与内生显性变量向量的测量误差, ξ 为外生潜在变量向量, η 为内生潜在变量向量。

结构模型可反映各潜在变量之间的关系, 公式如下:

$$\eta = B\eta + \Gamma\xi + \zeta$$

(19)

式中, B 为内生潜在变量之间关系的结构系数矩阵, Γ 为内生潜在变量与外生潜在变量之间关系的结构系数矩阵, ζ 为结构模型中干扰因素或残差值。

由于本研究中变量较多, 构建结构方程模型前, 利用方差膨胀因子 (VIF) 检验法删去存在多重共线性的变量。最终确定林分密度指数、树种丰富度、林分结构多样性、林分平均年龄、年均温、年降雨量和土壤 pH 7 个因子构建影响吉林省阔叶混交林多功能性 (EMF) 的结构方程模型 (表 4)。为确定最佳结构方程模型, 本研究采用卡方检验、近似均方根误差 (RMSEA)、绝对适配度指数 (GFI) 和规准适配指数 (NFI) 等评价指标判断结构方程模型的拟合优度。结构方程模型构建及检验均在 AMOS 24.0 完成^[38]。

表 4 吉林省阔叶混交林多功能性驱动因子说明

Table 4 Description of driving factors of mixed broad-leaved forests multifunctionality in Jilin Province

驱动因子 Driving factors	量化指标 Quantitative index	代码 Code	数据来源及计算方法 Data sources and calculation methods	单位 Unit
土壤因素 Soil factor	土壤 pH	pH	全球数字土壤制图系统中获取	/
气候因素 Climate factors	年均温	MAT	Climate AP 软件中获得	℃
	年降雨量	MAP		mm
林分因子 Stand factors	林分年龄	Age	林分平均年龄	a
	树种丰富度	SR	样地内树种个数	个
	林分密度指数	ASDI	$ASDI = \sum_j^M N_{s_j} \left(\frac{D_j}{D_0} \right)^{1.605}$ M : 径阶数; N_{s_j} : 第 j 径阶林木每公顷株数; D_j : 第 j 径阶的径阶中值; D_0 : 标准平均胸径, 这里取 20cm。	株/hm ²
	结构多样性	H_{size}	$H_{size} = - \sum_{i=1}^n p_i \ln p_i$ p_i : 为第 i 个径级林木株数占林分总株数的比例, n 为径级数。	/

2 结果与分析

2.1 森林多功能间权衡协调分析

从 3 大服务类别来看 (表 5): 供给服务与支持服务间, 除生产力-土壤保持不相关外, 均为正相关协同关系; 调节服务与支持服务间, 权衡、协同和中性关系均存在; 调节服务与供给服务间, 多为权衡关系。

8 个功能间 28 组功能对中, 权衡、协同和中性关系均存在, 分别为 7 对、14 对、7 对, 表明吉林省阔叶混交林生态系统功能多以协同关系为主。权衡关系中, 气候调节除与土壤肥力维持不相关外, 与涵养水源、土壤保持、木材生产、生物多样性、碳储量、生产力均为负相关即权衡关系, 相关系数 (r) 值在 -0.094 — -0.934 之间 ($P < 0.05$); 土壤保持-土壤肥力维持为弱权衡关系 ($r = -0.094, P < 0.01$), 其中权衡关系最强的功能为气候调节-涵养水源 ($r = -0.934, P < 0.01$)。协同关系中, 正相关系数由强到弱的功能为: 碳储量-木材生产、碳储量-生产力、木材生产-生产力、土壤保持-涵养水源、生物多样性-木材生产、涵养水源-木材生产、土壤肥力维持-木材生产、土壤有机碳-碳储量、生物多样性-碳储量、生物多样性-涵养水源、碳储量-涵养水源、生物多样性-生产力、土壤保持-碳储量和生产力-涵养水源, 它们的 r 值在 0.054 — 0.960 之间 ($P < 0.05$)。其余功能对不相关, 即为中性关系 ($P > 0.05$)。

表 5 吉林省阔叶混交林单一功能相关分析

Table 5 Correlation analysis on individual ecosystem function of mixed broad-leaved forests in Jilin Province

服务类别及指标 Service categories and indicators		调节服务 Regulation services				支持服务 Support services		供给服务 Supply services	
		土壤保持 Soil conservation	涵养水源 Water conservation	碳储量 Carbon storage	气候调节 Climate regulation	土壤肥力维持 Soil fertility maintenance	生物多样性 Biodiversity	生产力 Productivity	木材生产 Wood production
调节服务	土壤保持	1							
Regulation services	涵养水源	0.458 **	1						
	碳储量	0.054 *	0.118 **	1					
	气候调节	-0.359 **	-0.934 **	-0.201 **	1				
支持服务	土壤肥力维持	-0.094 **	-0.042	0.139 **	-0.034	1			
Support services	生物多样性	0.029	0.124 **	0.134 **	-0.207 **	0.037	1		
	生产力	0.015	0.065 *	0.498 **	-0.106 **	0.033	0.048 *	1	
供给服务	木材生产	0.025	0.153 **	0.960 **	-0.251 **	0.141 **	0.192 **	0.492 **	1
Supply services									

**. 在 0.01 级别(双尾),相关性显著;*. 在 0.05 级别(双尾),相关性显著

2.2 森林多功能性分析

吉林省阔叶混交林的多功能性指数(EMF)分布在 0.31—0.89 之间,中值为 0.5415。气候调节(AHM)、土壤肥力维持(SOC)、生物多样性(H)、生产力(ABG)、涵养水源(WC)、碳储量(CS)、土壤保持(SC)和木材生产(V)利用最大值转换法计算得到的功能值的分布存在差异,其中值分别为 0.7519、0.6897、0.7725、0.4714、0.4742、0.3676、0.2712 和 0.4145(图 2)。多功能性 EMF 及单一功能 AHM、SOC、H、ABG、WC、CS、SC 和 V 平均值分别为:0.5462、0.7473、0.6959、0.7574、0.5022、0.5162、0.3988、0.3151、0.4368(图 3)。生物多样性(H)对多功能性贡献度最大,气候调节(AHM)次之,土壤保持(SC)最小。

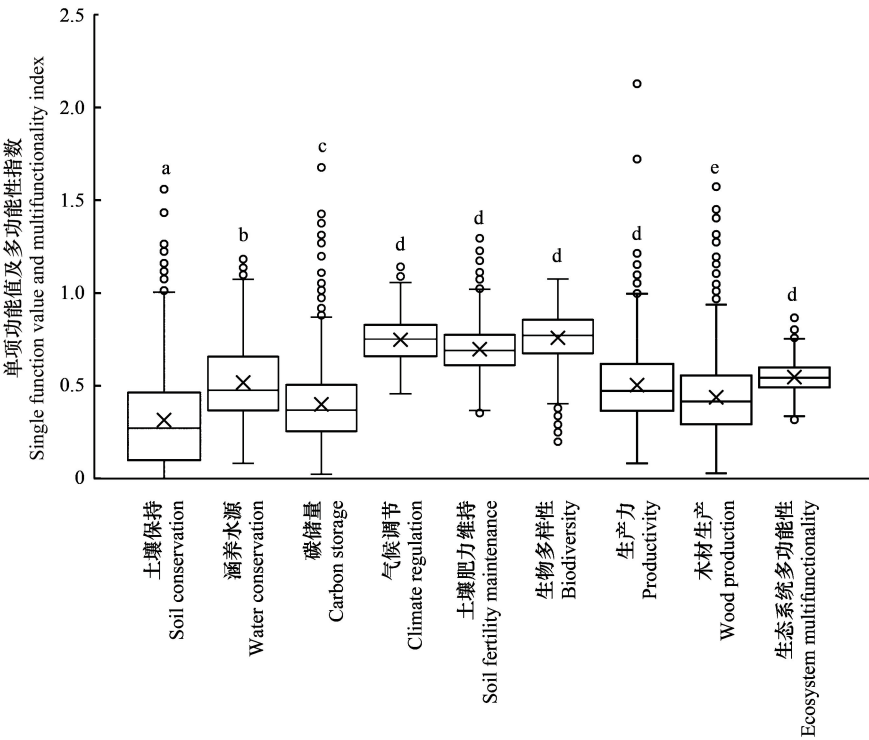


图 2 吉林省阔叶混交林多功能指数及单一功能分布箱线图

Fig.2 Box plot on ecosystem multifunctionality index and single function of mixed broad-leaved forest in Jilin Province

不同的字母表示功能间存在显著差异($P<0.05$)

EMF 与林分及环境因子的双变量线性回归结果如表 6 所示。吉林省阔叶混交林多功能性指数与林分密度指数、林分平均年龄、年降雨量、年均温、树种丰富度、结构多样性以及土壤 pH 均呈极显著的相关关系,且它们对多功能性指数的解释量分别为 66%、18%、16%、9%、8%、6%、5%,其中林分密度指数对吉林省阔叶混交林多功能性指数的解释量最高。

2.3 吉林省阔叶混交林生态系统多功能性的驱动因子

结构方程模型拟合结果很好(表 7),整体适配度的卡方自由度比值为 1.320, χ^2 的显著性概率 $P>0.05$,未达显著水平,接受虚无假设。RMSEA 值为 0.015, GFI 值为 0.999,且其余适配指标均达到模型适配标准,表示假设模型与观察数据能适配。因此,可以使用该模型的结果探究吉林省阔叶混交林生态系统多功能性的驱动因素。

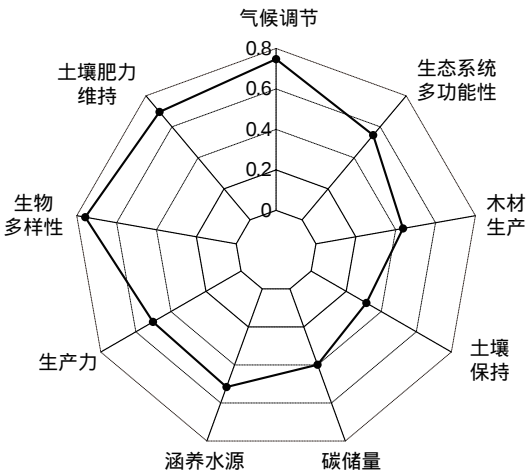


图 3 吉林省阔叶混交林多功能指数及单一功能平均值雷达图
Fig. 3 Radar map on ecosystem multifunctionality index and single function of mixed broad-leaved forests in Jilin Province

表 6 多功能性指数与驱动因子的关系

Table 6 Regression relationships between ecosystem multifunctionality and driving factors					
功能指标 Function parameters	多功能性指数 Ecosystem multifunctionality index		功能指标 Function parameters	多功能性指数 Ecosystem multifunctionality index	
	R^2	P		R^2	P
林分密度指数 Stand density index	0.66	<0.001	树种丰富度 Tree species richness	0.08	<0.001
林分平均年龄 Stand average age	0.18	<0.001	林分结构多样性 Stand structural diversity	0.06	<0.001
年降雨量 Mean annual precipitation	0.16	<0.001	土壤 pH Soil pH	0.05	<0.001
年均温 Mean annual temperature	0.09	<0.001			

表 7 结构方程模型评价结果

Table 7 Evaluated results of structural equation model			
统计量 Statistics	参考指标 Index	适配标准 Evaluation standard	拟合结果 Fitting results
绝对适配度指数 Absolute fitness statistics	χ^2 显著性概率(P)	$P>0.05$	0.252
增值适配度指数 Value-added fitness statistics	渐进残差均方和平方根(RMSEA)	<0.05(适配良好) <0.08(适配合理)	0.015
	适配度指数(GFI)	>0.9	0.999
	规准适配指数(NFI)	>0.9	0.998
简约适配统计量 Simple fitness statistics	NC 值(卡方自由度比值)	1<NC<3, 模型有简约适配程度; NC>5, 模型需要修正	1.320

结构方程模型的结果反映了生物和非生物因子对阔叶混交林多功能性的关系(图 4),多功能性模型的确定系数为 $R^2 = 0.795$ 。模型结果包括各驱动因子对多功能性的直接影响、间接影响和总影响(图 4 和图 5)。从直接影响来看,ASDI、MAP、Age、SR、MAT 和 pH 对多功能性均有显著的正影响,其影响路径系数分别为 0.726、0.358、0.134、0.107、0.077 和 0.064, H_{size} 对多功能性具有极弱的负影响,其路径系数为 -0.037。其中,ASDI 对多功能性作用最强,MAP 次之。从间接影响来看,Age 和 MAT 主要通过影响林分的多样性和密度来影响多功能性,其间接影响系数分别为 0.241、-0.182;ASDI 通过影响树种丰富度和结构多样性间接影响多功能性,路径系数为 0.026;SR 则通过影响林分结构对生态系统多功能性产生一定的作用。其中,Age 对多功能性的间接作用最强。

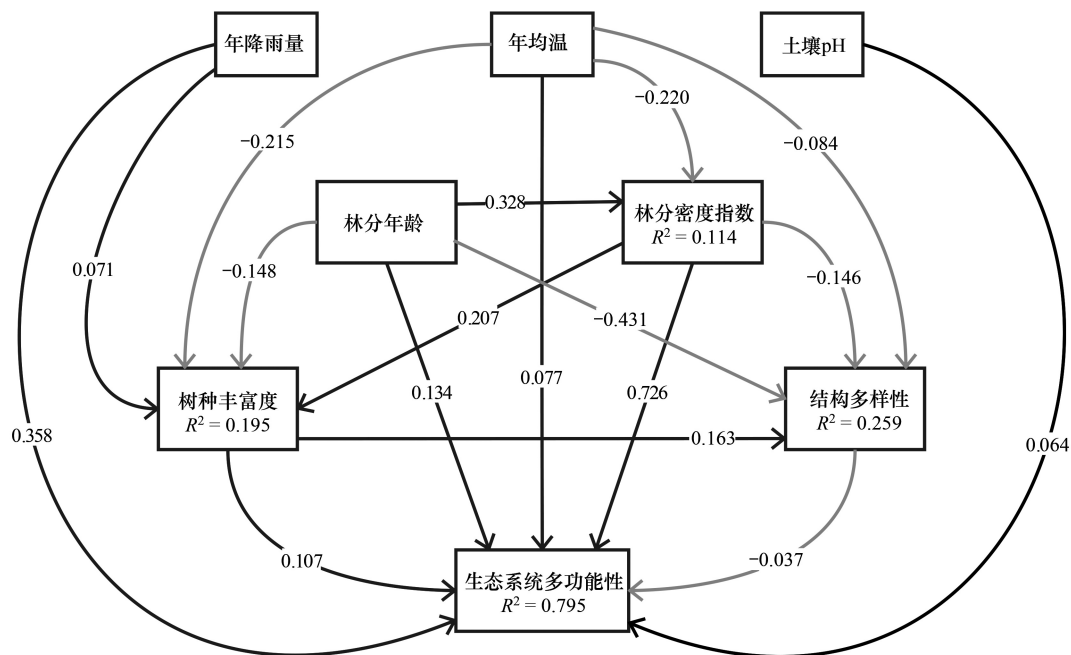


图4 吉林省阔叶混交林生态系统多功能指数结构方程模型路径图

Fig.4 Path diagram of structural equation model for multifunctionality index of broad-leaved mixed forests ecosystem in Jilin Province

黑色箭头(带标准化路径系数)表示显著正向效应($P < 0.05$);灰色箭头表示显著负向效应($P < 0.05$); R^2 表示外生变量或其它内生变量对该内生变量的解释量

3 讨论

3.1 阔叶混交林生态系统功能间的权衡与协调关系

土壤保持(SC)、涵养水源(WC)、碳储量(CS)、气候调节(AHM)、土壤有机碳(SOC)、生物多样性(H)、生产力(AGB)和木材生产(V) 8个功能间权衡、协同和中性关系均存在,但以协同关系为主。AHM除与SOC不相关外,与SC、WC、CS、H、AGB、V均具有此消彼长的权衡关系,其中AHM-WC间权衡关系最强,这是因为本文表征气候调节的指标为年热:湿指数(AHM),AHM越大,意味着越干燥,而干旱是森林植被生长和发育主要的胁迫因子之一,它可能造成大量树木死亡,并且增加引发森林火灾的机会。存在协同关系的功能间相关系数在0.054—0.960之间($P < 0.05$),其中碳储量-木材生产的协同关系最强,这是因为蓄积量和生物量间存在较强的相关关系。生物多样性除与气候调节具有权衡关系外,与其它功能多为协调关系,可能原因是由于每个具有特定功能属性的物种对生态系统的各功能贡献度是不同的^[39],可以用互补效应和选择效应来解释。

在针对东北森林带生态系统碳储量、产水和土壤保持的权衡协同研究中,发现碳储量-产水、碳储量-水土保持和产水-水土保持均为协同关系^[40];兰洁等对天山雪岭云杉林的生产力、涵养水源、生物多样性和固碳间的权衡关系研究中发现,4个功能间均为协同关系。这些与本研究结果一致。这是因为当随着生物多样性增

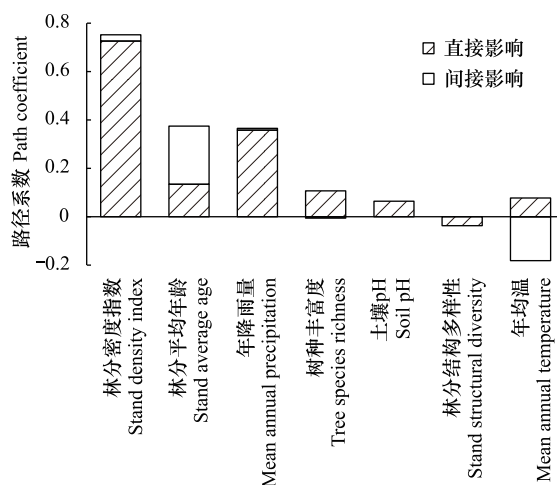


图5 驱动因子对多功能性的直接及间接影响系数

Fig.5 Direct and indirect path coefficients of driving factors of ecosystem multifunctionality

加,物种间的互补效应增强,可提高森林生产力^[41];同时,多树种可促进土壤的分解和营养循环,增加固碳、生产力等功能;枯落物可影响土壤结构和质地,增强土壤持水能力,且枯落物本身也具有一定持水能力,可为种子萌发和植被生长提供条件,增加林地涵养水源、固碳和生产力等功能。在对中亚热带地区不同演替阶段次生林生态系统功能的权衡协同关系研究中^[42],发现物种多样性与土壤有机碳(SOC)为权衡关系,但在本研究中土壤有机碳与生物多样性不相关,这是由于群落结构和物种组成对土壤有机碳的影响较为复杂,受到其他影响因素的交互作用较多,如研究区域经纬度、海拔高度、气候类型、土壤类型和土壤结构等,这可能是造成不同研究区结果存在差异的主要原因^[43]。Biber等^[44]对欧洲的瑞典、立陶宛、斯洛伐克、土耳其、爱尔兰和荷兰6个地区森林生态系统的生物多样性、碳储量和木材生产展开了权衡协同研究,发现在6个地区中,生物多样性-碳储量既存在负相关关系,也有不相关关系,与本研究结果不同,这可能是研究区域、指标计算方法的不同造成的。

3.2 阔叶混交林生态系统多功能性及驱动因素

吉林省阔叶混交林的多功能性指数在0.31—0.89之间。由图2多功能指数值及单一功能值的箱线图可看出,对多功能性指数贡献度由强到弱依次为:生物多样性(H)、气候调节(AHM)、土壤有机碳(SOC)、涵养水源(WC)、生产力(AGB)、木材生产(V)、碳储量(CS)和土壤保持(SC)。生物多样性对其贡献度最大,这与Zeng等^[45]对次生林不同恢复时期的生态系统功能研究结果一致。本研究中阔叶混交林样地的树种数分布范围为3—18个,平均值为10个,说明吉林省阔叶混交林有较为丰富的物种多样性,且绝大部分接近最大值,故其最大;SC最小,是因为该功能在样地的值跨度较大,为2.78—3759.39 t/hm²,而且低值较多。

由结构方程的总影响路径系数来看,影响多功能性的驱动因子重要性从大到小依次为ASDI(0.752)>Age(0.375)>MAP(0.365)>SR(0.101)>pH(0.064)> H_{size} (-0.037)>MAT(-0.105)。其中,林分密度指数(ASDI)对多功能性的正向作用效应最大,即ASDI越大,多功能性指数越大。ASDI主要是由林分内胸径和林木株数决定(表4),其不仅能反映林分内林木的数量,还能反映林木的生长状况^[46]。一般来说,胸径随年龄的增加而增长,林分内林木株数随林分年龄的增加而减少,因此,随着天然林的演替,林分密度指数在后期的增长主要为胸径的增长。由图6可发现:EMF随林分密度指数、断面积和平均胸径均呈现线性增加趋势;但随着株数密度的增加,EMF的增加逐渐平缓,因此可猜测,林分的多功能性在某个林分密度范围内会最大,但需要进一步的研究。Li等^[12]对亚热带针叶林的研究中也发现胸径对多功能性指数为正相关关系。Bradford等^[47]采用生态系统服务的价值总和标准差来对比美国明尼苏达州5种森林管理方案对生态系统服务的影响,结果表明林分密度提高有利于提升生态系统服务价值,并减少各项服务间的冲突关系。Age对ASDI具有显著的正相关影响,直接效用为0.328,说明随着年龄的增长,林分密度指数增大,林分年龄(Age)对多功能性的正向作用次之,即随着森林不断发育,多功能性指数增大。这与Jonsson等^[47]利用对瑞典森林的研究结果一致。可能是因为随着林龄的增加,树木的死亡率和凋落物产量逐渐增大,这对涵养水源、土壤保持和土壤肥力维持等功能具有一定的积极作用。年均温(MAT)对多功能性为负效应,即随着温度的升高,森林的多功能性也会随之减少,Jonsson等^[48]研究中有相同的结论。在结构方程模型中(图4),可看出,随着温度升高,树种丰富度(SR)和ASDI会随之降低,则造成生态系统的多功能性降低,而SR对多功能性的正向作用与Jing等^[18]、熊定鹏等^[32]、黄小波等^[49]的研究结论一致。

3.3 研究局限

受大尺度数据获取局限,本研究中存在以下不足:①部分功能采用二手数据和模型计算获得,如涵养水源、水土保持、气候调节、土壤肥力维持等指标,数据的获取和精度可能会影响功能间权衡-协同关系和多功能性;②本研究中多功能性的量化采用了各功能权重相同的平均值法,虽然其可衡量生态系统同时维持多个功能的能力,但是该方法在计算多功能性指数时默认一种功能的降低可以由另一种功能来弥补,会影响生态系统多功能性的度量。因此,在未来研究中,可以使用不同的多功能性量化方法来进行比较分析。(3)多功能性的影响因子众多,因子间的关系复杂,本研究建立的结构方程只选取了部分因子,模型仅解释了79.5%的

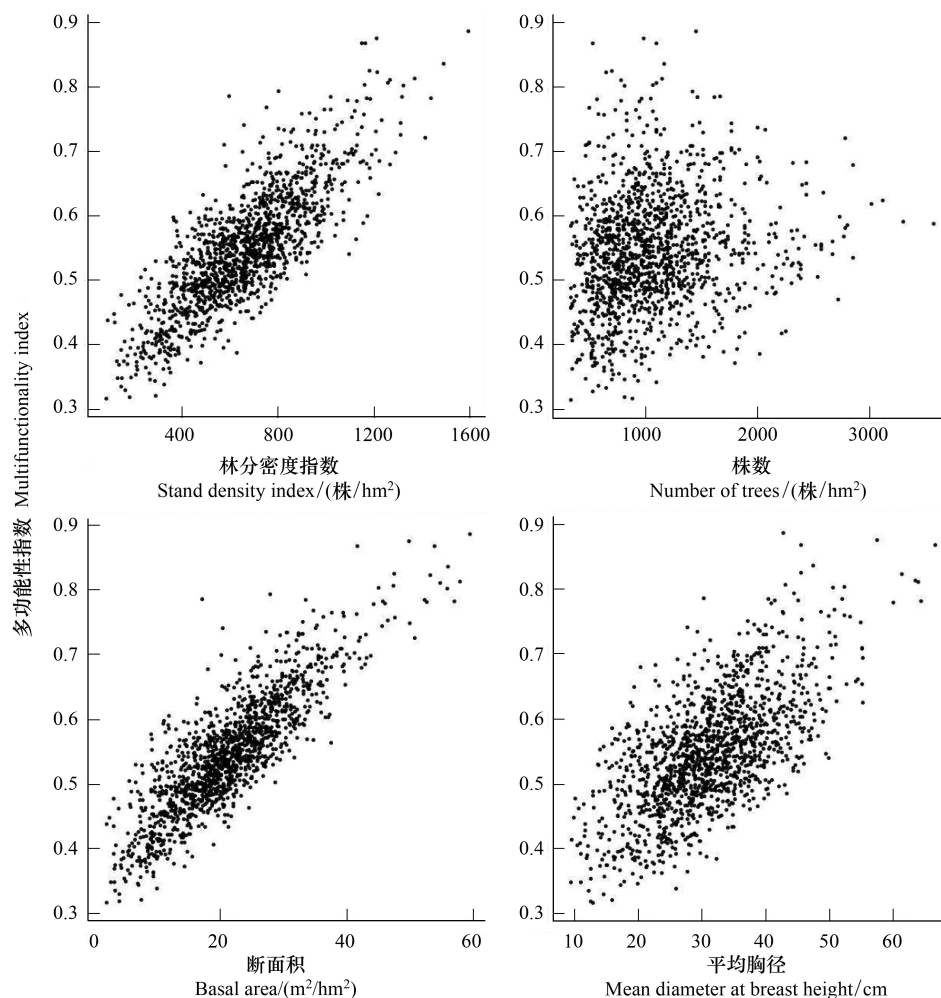


图 6 吉林省阔叶混交林多功能性指数与不同林分密度指标的散点图

Fig.6 Scatter plot of multifunctionality index and different stand density indicators of mixed broad-leaved forests in Jilin Province

多功能性的变异,需要进一步的分析和验证。

4 结论

本研究首次在区域尺度研究了东北天然阔叶混交林生态系统多功能性及驱动因子,结果可有利于理解森林的多功能形成及经营调控。

(1)气候调节、土壤肥力维持、生物多样性、生产力、涵养水源、碳储量、土壤保持和木材生产等 8 个功能间权衡、协同和中性关系均存在,但以协同关系为主。其中生物多样性除与气候调节具有权衡关系外,与其它功能均为协调关系;气候调节除与土壤肥力维持不相关外,与其它功能均为权衡关系;气候调节-涵养水源间的权衡关系最强。因此,维持生物多样性可有利于实现阔叶混交林的多功能性。

(2)吉林省阔叶混交林的多功能性指数在 0.31—0.89 之间,平均值为 0.5462。其中生物多样性对多功能性的贡献度最大,平均值为 0.7574;气候调节次之,为 0.7473;土壤保持最小,为 0.3151。

(3)多功能性及驱动因子的结构方程模型确定系数为 $R^2=0.797$,可以较好的描述影响阔叶混交林多功能性的生物和非生物因子,具有一定的生物合理性。从影响程度看,各驱动因子总路径系数依次为林分密度指数(ASDI)>平均年龄(Age)>年降水(MAP)>物种丰富度(SR)>土壤 pH(pH)>结构多样性(H_{size})>年均温(MAT)。因此,在本研究范围内,通过增加林分密度可增加阔叶混交林的多功能性。

参考文献 (References):

- [1] Hector A, Bagchi R. Biodiversity and ecosystem multifunctionality. *Nature*, 2007, 448(7150): 188-190.
- [2] Willemen L, Hein L, van Mensvoort M E F, Verburg P H. Space for people, plants, and livestock? Quantifying interactions among multiple landscape functions in a Dutch rural region. *Ecological Indicators*, 2010, 10(1): 62-73.
- [3] Van der Plas F, Ratchliffe S, Ruiz-Benito P, Scherer-Lorenzen M, Verheyen K, Wirth C, Zavala M A, Ampoorter E, Baeten L, Barbaro L, Bastias C C, Bauhus J, Benavides R, Benneter A, Bonal D, Bouriaud O, Bruelheide H, Bussotti F, Carnol M, Castagneyrol B, Charbonnier Y, Cornelissen J H C, Dahlgren J, Checko E, Coppi A, Dawud S M, Deconchat M, De Smedt P, De Wandeler H, Domisch T, Finer L, Fotelli M, Gessler A, Granier A, Grossiord C, Guyot V, Haase J, Hattenschwiler S, Jactel H, Jaroszewicz B, Joly F X, Jucker T, Kambach S, Kaendler G, Kattge J, Koricheva J, Kunstler G, Lehtonen A, Liebergesell M, Manning P, Milligan H, Muller S, Muys B, Nguyen D, Nock C, Ohse B, Paquette A, Penuelas J, Pollastrini M, Radoglou K, Raulund-Rasmussen K, Roger F, Seidl R, Selvi F, Stenlid J, Valladares F, van Keer J, Vesterdal L, Fischer M, Gamfeldt L, Allan E. Continental mapping of forest ecosystem functions reveals a high but unrealised potential for forest multifunctionality. *Ecology Letters*, 2018, 21(1): 31-42.
- [4] Su C, Fu B. Evolution of ecosystem services in the Chinese Loess Plateau under climatic and land use changes. *Global and Planetary Change*, 2013, 101: 119-128.
- [5] Hein L, van Koppen K, de Groot R S, van Ierland E C. Spatial scales, stakeholders and the valuation of ecosystem services. *Ecological Economics*, 2006, 57(2): 209-228.
- [6] Cimon-Morin J, Darveau M, Poulin M. Fostering synergies between ecosystem services and biodiversity in conservation planning: A review. *Biological Conservation*, 2013, 166: 144-154.
- [7] Duncan C, Thompson J R, Pettorelli N. The quest for a mechanistic understanding of biodiversity-ecosystem services relationships. *Proceedings of the Royal Society B Biological Sciences*, 2015, 282(1817): 20151348.
- [8] Jucker T, Bongalov B, Burslem D, Nilus R, Dalponte M, Lewis S L, Phillips O L, Qie L, Coomes D A. Topography shapes the structure, composition and function of tropical forest landscapes. *Ecology Letters*, 2018, 21(7): 989-1000.
- [9] Yuan Z, Ali A, Ruiz-Benito P, Jucker T, Mori A S, Wang S, Zhang X, Li H, Hao Z, Wang X, Loreau M, Allan E. Above- and below-ground biodiversity jointly regulate temperate forest multifunctionality along a local-scale environmental gradient. *Journal of Ecology*, 2020, 108(5): 2012-2024.
- [10] Jönsson M, Snäll T, Leverkus A B. Ecosystem service multifunctionality of low-productivity forests and implications for conservation and management. *Journal of Applied Ecology*, 2020, 57(4): 695-706.
- [11] Li S, Huang X, Lang X, Shen J, Xu F, Su J. Cumulative effects of multiple biodiversity attributes and abiotic factors on ecosystem multifunctionality in the Jinsha River valley of southwestern China. *Forest Ecology and Management*, 2020, 472.
- [12] Li S, Liu W, Lang X, Huang X, Su J. Species richness, not abundance, drives ecosystem multifunctionality in a subtropical coniferous forest. *Ecological Indicators*, 2021, 120:106911.
- [13] Huang X, Su J, Li S, Liu W, Lang X. Functional diversity drives ecosystem multifunctionality in a *Pinus yunnanensis* natural secondary forest. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 6979.
- [14] Huang X, Li S, Su J. Selective logging enhances ecosystem multifunctionality via increase of functional diversity in a *Pinus yunnanensis* forest in Southwest China. *Forest Ecosystems*, 2020, 7(1): s40663.
- [15] 张文馨, 范小莉, 王强, 房用, 梁玉. 黄河三角洲植物多样性与生态系统多功能性间的关系. *山东大学学报(理学版)*, 2020, 55(01): 110-116.
- [16] 王酉石, 储诚进. 结构方程模型及其在生态学中的应用. *植物生态学报*, 2011, 35(3): 337-344.
- [17] 王树力, 周健平. 基于结构方程模型的林分生长与影响因子耦合关系分析. *北京林业大学学报*, 2014, 36(5): 7-12.
- [18] Jing X, Sanders N J, Shi Y, Chu H, Classen A T, Zhao K, Chen L, Shi Y, Jiang Y, He J S. The links between ecosystem multifunctionality and above- and belowground biodiversity are mediated by climate. *Nature Communications*, 2015, 6: 8159.
- [19] Sanaei A, Ali A, Yuan Z, Liu S, Lin F, Fang S, Ye J, Hao Z, Loreau M, Bai E, Wang X. Context-dependency of tree species diversity, trait composition and stand structural attributes regulate temperate forest multifunctionality. *Science of the Total Environment*, 2021, 757: 143724.
- [20] Hengl T, Mendes de Jesus J, Heuvelink G B, Ruiperez Gonzalez M, Kilibarda M, Blagotic A, Shangguan W, Wright M N, Geng X, Bauer-Marschallinger B, Guevara M A, Vargas R, MacMillan R A, Batjes N H, Leenaars J G, Ribeiro E, Wheeler I, Mantel S, Kempen B. SoilGrids250m: Global gridded soil information based on machine learning. *PLoS One*, 2017, 12(2): e0169748.
- [21] Wang T, Hamann A, Spittlehouse D L, Murdock T Q. ClimateWNA—High-Resolution Spatial Climate Data for Western North America. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2012, 51(1): 16-29.
- [22] 饶恩明. 中国生态系统土壤保持功能变化及其影响因素. 中国科学院大学, 2015.
- [23] Wischmeier W H, Smith D W D. Rainfall energy and its relationship to soil loss. *Transactions American Geophysical Union*, 1958, 39(2): 285-291.
- [24] Williams J R, Arnold J G. A system of erosion: Sediment yield models. *Soil Technology*, 1997, 11(1): 43-55.
- [25] 徐新良. 中国年度植被指数 (NDVI) 空间分布数据集. 中国科学院资源环境科学数据中心数据注册与出版系统 (<http://www.resdc.cn/>)

- DOI), 2018.
- [26] 张路, 肖隼, 郑华, 徐卫华, 逯非, 江凌, 饶恩明, 肖洋, 吴炳方, 曾源, 欧阳志云. 2010 年中国生态系统服务空间数据集. 中国科学数据, 2018, 3(4): 11-23.
- [27] 龚诗涵, 肖洋, 方瑜, 郑华, 肖隼, 欧阳志云. 中国森林生态系统地表径流调节特征. 生态学报, 2016, 36(22): 7472-7478.
- [28] Niu Z, He H, Zhu G, Ren X, Zhang L, Zhang K, Yu G, Ge R, Li P, Zeng N, Zhu X. An increasing trend in the ratio of transpiration to total terrestrial evapotranspiration in China from 1982 to 2015 caused by greening and warming. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, 279/:107701.
- [29] 李海奎, 雷渊才. 中国森林植被生物量和碳储量评估. 北京: 中国林业出版社, 2010.
- [30] 黄小荣. 广西马尾松林植物功能多样性与生产力的关系. 生物多样性, 2018, 26(7): 690-700.
- [31] 徐炜, 井新, 马志远, 贺金生. 生态系统多功能性的测度方法. 生物多样性, 2016, 24(01): 72-84.
- [32] 熊定鹏, 赵广帅, 武建双, 石培礼, 张宪洲. 羌塘高寒草地物种多样性与生态系统多功能关系格局. 生态学报, 2016, 36(11): 3362-3371.
- [33] Maestre F T, Quero J L, Gotelli N J, Escudero A, Ochoa V, Delgado-Baquerizo M, Garcia-Gomez M, Bowker M A, Soliveres S, Escolar C, Garcia-Palacios P, Berdugo M, Valencia E, Gozalo B, Gallardo A, Aguilera L, Arredondo T, Blones J, Boeken B, Bran D, Conceicao A A, Cabrera O, Chaieb M, Derak M, Eldridge D J, Espinosa C I, Florentino A, Gaitan J, Gatica M G, Ghiloufi W, Gomez-Gonzalez S, Gutierrez J R, Hernandez R M, Huang X, Huber-Sannwald E, Jankju M, Miriti M, Moneris J, Mau R L, Morici E, Naseri K, Ospina A, Polo V, Prina A, Pucheta E, Ramirez-Collantes D A, Romao R, Tighe M, Torres-Diaz C, Val J, Veiga J P, Wang D, Zaady E. Plant species richness and ecosystem multifunctionality in global drylands. *Science*, 2012, 335(6065): 214-218.
- [34] Byrnes J E K, Gamfeldt L, Isbell F, Lefcheck J S, Griffin J N, Hector A, Cardinale B J, Hooper D U, Dee L E, Emmett Duffy J, Freckleton R. Investigating the relationship between biodiversity and ecosystem multifunctionality: challenges and solutions. *Methods in Ecology and Evolution*, 2014, 5(2): 111-124.
- [35] Maestre F T, Castillo-Monroy A P, Bowker M A, Ochoa-Hueso R. Species richness effects on ecosystem multifunctionality depend on evenness, composition and spatial pattern. *Journal of Ecology*, 2012, 100(2): 317-330.
- [36] Hooper D U, Vitousek P M. Effects of plant composition and diversity on nutrient cycling. *Ecological Monographs*, 1998, 68(1): 121-149.
- [37] 吴明隆. 结构方程模型—AMOS 的操作与应用. 重庆: 重庆大学出版社, 2010: 8-25.
- [38] 何潇, 李海奎, 曹磊, 徐胜林, 刘晓彤. 退化森林生态系统中林分碳储量的驱动因素—以内蒙古大兴安岭为例. 林业科学研究, 2020, 33(2): 69-76.
- [39] Lohbeck M, Bongers F, Martinez-Ramos M, Poorter L. The importance of biodiversity and dominance for multiple ecosystem functions in a human-modified tropical landscape. *Ecology*, 2016, 97: 2772-2779.
- [40] 尹礼唱, 王晓峰, 张琨, 肖飞艳, 程昌武, 张欣蓉. 国家屏障区生态系统服务权衡与协同. 地理研究, 2019, 38(9): 2162-2172.
- [41] 兰洁, 雷相东, 张毓涛. 天山中部雪岭云杉林多功能权衡与协同关系. 林业科学, 2019, 55(11): 9-18.
- [42] 吴炜, 项文化, 勾蒙蒙, 徐传洪, 欧阳帅, 方晰. 中亚热带 3 种次生林生态系统服务权衡与协同. 森林与环境学报, 2019, 39(3): 256-264.
- [43] 王琼, 荣湘民, 李法云, 范志平. 辽东山地水源林土壤的有机碳与植被生物多样性关系. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2018, 44(4): 406-411.
- [44] Biber P, Felton A, Nieuwenhuis M, Lindbladh M, Black K, Bahyl J, Bingöl Ö, Borges J G, Botequim B, Brukas V, Bugalho M N, Corradini G, Eriksson L O, Forsell N, Hengeveld G M, Hoogstra-Klein M A, Kadioullari A I, Karahalil U, Lodin I, Lundholm A, Makrickienė E, Masiero M, Mozgeris G, Pivoriūnas N, Poschenrieder W, Pretzsch H, Sedmák R, Tuček J. Forest Biodiversity, Carbon Sequestration, and Wood Production: Modeling Synergies and Trade-Offs for Ten Forest Landscapes Across Europe. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2020, 8: 291.
- [45] Zeng Y, Gou M, Ouyang S, Chen L, Fang X, Zhao L, Li J, Peng C, Xiang W. The impact of secondary forest restoration on multiple ecosystem services and their trade-offs. *Ecological Indicators*, 2019, 104: 248-258.
- [46] 程贵文. 林分密度指数研究现状. 林业科技通讯, 2020, 3: 29-31.
- [47] Bradford, JB, D 'Amato. Recognizing trade-offs in multi-objective land management. *Frontiers in Ecology and The Environment*, 2012, 10(4): 210-216.
- [48] Jonsson M, Bengtsson J, Moen J, Gamfeldt L, Snäll T. Stand age and climate influence forest ecosystem service delivery and multifunctionality. *Environmental Research Letters*, 2020, 15(9):0940a8.
- [49] 黄小波, 李帅锋, 苏建荣, 刘万德, 郎学东. 云南松天然次生林物种丰富度与生态系统多功能性的关系. 生物多样性, 2017, 25(11): 1182-1191.