

# 黄龙山油松人工林结构与稳定性、生产力之间影响的关联分析

周晓曦,赵鹏祥\*,卜元坤,王博恒

(西北农林科技大学 林学院,陕西 杨陵 712000)

**摘要:**我国是人工林大国,人工林具有巨大的经济价值与生态效益,探究人工林内在影响关系具有重大意义。根据黄龙山林区野外业调查样地数据,通过典型相关分析(CCA)与结构方程模型(SEM)进行建模,构建了含有环境因子、林分结构因子、林分稳定性因子、林分生产力因子的结构方程模型。结果表明,环境因子对林分结构因子有0.338的正向直接影响,对林分生产力因子、林分稳定性因子之间有正向间接影响,影响系数分别为0.283、0.209。林分结构因子对林分生产力因子有正向影响,总影响系数为0.837,直接影响为0.764,间接影响为0.073。林分结构因子对林分稳定性因子有正向影响,影响系数为0.619。林分稳定性因子对林分生产力因子有着正向直接影响,影响系数为0.118。经检验各指标值均表明模型适配性较好,模型显示结构因子与稳定性因子、生产力因子之间的影响强烈,通过改良结构,调整稳定性与生产力的经营思路可行。

**关键词:**油松人工林;林分结构;林分稳定性;林分生产力;结构方程模型

中图分类号:S757.9

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2020)02-0178-08

Correlation Analysis of the Influence between Structure and Stability, Productivity of  
*Pinus tabulaeformis* Plantation in Huanglong Mountain

ZHOU Xiao-xi, ZHAO Peng-xiang\*, BU Yuan-kun, WANG Bo-heng

(College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling 712000, Shaanxi, China)

**Abstract:** There is a large plantation area in China, and plantation has huge economic values and ecological benefits. It is of great significance to explore the internal influence mechanism of plantation. Based on the data of field investigation of the plantations occurring in Huanglong Mountain, and by means of canonical correlation analysis and structural equation model, a structural equation model with environmental factors, stand structure factors, stand stability factors and stand productivity factors was established. The results showed that environmental factors had a positive direct influence on stand structure factors with the influence coefficient of 0.338, had a positive indirect influence on stand productivity factors and stand stability factors, with influence coefficients of 0.283 and 0.209, respectively. Stand structure factors had a positive impact on stand productivity factor, with a total influence coefficient of 0.837, a direct influence coefficient of 0.764 and an indirect influence coefficient of 0.073. Stand structure factors had a positive influence on stand stability factors with the influence coefficient of 0.619. Stand stability factors had a direct positive effect on stand productivity factor with the influence coefficient of 0.118. The test results showed that the model demonstrated satisfactory suitability. The structure factors, stability factors and productivity factors were connected strongly. It was feasible to adjust the stability factors and productivity factors through improving the structure factors.

**Key words:** *Pinus tabulaeformis* plantation; stand structure; stand stability; stand productivity; structural

收稿日期:2019-09-24 修回日期:2019-10-09

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFD0600203)。

作者简介:周晓曦,男,硕士在读,研究方向:“3S”技术在资源环境上的应用。E-mail:masterxee@163.com

\*通信作者:赵鹏祥,男,副教授,研究方向:“3S”技术在资源环境上的应用。E-mail:zpx666@yahoo.com.cn

equation model

森林资源是自然资源的重要组成部分, 人工林资源对人类社会发展以及生态环境的保护与恢复发挥了巨大作用。我国是人工林大国, 根据第八次全国森林清查报告, 我国人工林面积达到 6 933 万  $\text{hm}^2$ , 居世界第一位。但我国人工林普遍质量较差, 除了生产力不高外, 还会出现地力衰退、病虫害加剧、生物多样性和经济效益下降一系列生态问题<sup>[1]</sup>。油松(*Pinus tabulaeformis*) 是黄土丘陵区的主要造林树种, 分布范围广, 水土保持能力强, 且具有较好的经济效益<sup>[2]</sup>。

森林生态系统内在结构是复杂的, 各个组成部分关联密切, 森林经营是通过分析复杂现象, 讨论变量与变量的直接与间接关系<sup>[3]</sup>。J. Glatthorn 等<sup>[4]</sup>研究结构与生产力, 认为结构多样性(平均树的大小变化, 直径和树高)对生产力的影响比物种多样性更大, 物种多样性通过林分结构的变化间接影响生产力。V. Grimm 等<sup>[5]</sup>研究认为, 结构更为复杂的冠层会增加森林的碳固着, 增加森林的生产力, 林冠结构复杂性对木材 NPP 的影响程度与总叶面积和立地质量的影响相似。C. D. O'connor 等<sup>[6]</sup>研究结构与稳定性, 得出树种的种群结构对稳定性有显著影响, 可以作为未来稳定性的指标的结论。C. Carnaval 等<sup>[7]</sup>研究混交针叶林为主的中等生产力森林, 认为物种组成稳定性最差, 松林的组成稳定性随着立地生产力的增加而降低。前人多从单一角度讨论变量与变量的关系, 鲜有将森林所有组成部分放入一个整体分析讨论。结构方程模型作为一种多变量统计方法, 是回归和路径分析的一种扩展, 可以用来建模多元关系和评估多元假设<sup>[8]</sup>。相比传统的相关分析法, 结构方程模型基于现有理论的先验知识, 以及预先设定系统内各因子间的相互关系, 不仅能够判别各因子之间的影响强度, 还能对整体模型进行拟合和判断, 避免单一变量与单一变量的直接关系研究, 更好地揭示自然系统存在与发展过程的真实机理。目前已有学者将 SEM 方法引入林业相关研究, 得到了较为不错的结果<sup>[9-10]</sup>。

本研究以黄龙山油松人工林为研究对象, 应用典型相关分析与结构方程模型分析以及线性回归的方法, 借助与环境因子、林分结构因子、林分稳定性因子、林分生产力因子相关的多项观测变量, 分析林分结构因子、林分稳定性因子、林分生产力因子的耦合关系, 进行定性研究与定量研究, 目的在于确定环境因子、林分结构因子、林分稳定性因子、林分生产力因子之间直接影响与间接影响的大小; 探究环境因子、

林分结构因子、林分稳定性因子、林分生产力因子之间相互影响的具体观测变量的比重; 建立有关生产力、结构、稳定性的经验公式。以期今后我国油松人工林经营发展提供参考。

## 1 研究区概况

研究区位于陕西省黄龙山天然林保护区内, 地理位置为  $109^{\circ}38'49''-110^{\circ}12'47''\text{E}$ ,  $35^{\circ}28'46''-36^{\circ}02'01''\text{N}$ , 位于温带半湿润与半干旱气候的过渡地带, 属黄土高原丘陵沟壑区。年平均气温  $8.6^{\circ}\text{C}$ , 无霜期是 175 d, 年日照时数达 2 370 h, 研究区内的海拔为 1 100~1 300 m, 年平均降水量可达到 611.8 mm, 森林植被主要是暖温带落叶阔叶林。土壤主要是褐土, 地带性植被为暖温带落叶阔叶林带, 主要优势种包括油松(*Pinus tabulaeformis*)、辽东栎(*Quercus wutaishanica*)、白桦(*Betula platyphylloides*)等, 主要伴生种为茶条槭(*Acer ginnala*)等。

## 2 材料与方法

### 2.1 数据来源

本研究数据为 2017 年 7—8 月以及 2018 年 7—8 月于黄龙山林区石堡林场、虎门沟林场、蔡家川林场和官庄林场共布设 57 块  $20\text{ m}\times 30\text{ m}$  样地调查数据。调查内容为油松人工林, 记录胸径、树高、冠幅、X, Y 相对坐标、健康状况、郁闭度、样地海拔、坡向、坡度、枯落物厚度等信息。并进行灌草调查, 灌木随机选取 5 个  $5\text{ m}\times 5\text{ m}$  样方, 草方随机选取 5 个  $1\text{ m}\times 1\text{ m}$  样方, 记录相应灌、草种类、数量、高度以及盖度。土壤通过土钻、环刀, 进行取样, 样品带回实验室通过实验进行测算土壤含水量(SWC)、土壤酸碱度(pH)、土壤有机物(SOM)、测定有机物(OM)、土壤全 N 含量(TN)、土壤全 P 含量(TP)、土壤全 C 含量(TC)等。样地基本观测数据处理结果如表 1 所示。

表 1 数据调查分析

Table 1 Analysis of survey data

变量	最小值	最大值	均值	标准差
年龄/a	29	60	39	8.41
平均胸径/cm	8.29	32.02	15.34	5.32
平均树高/m	8.05	18.87	13.12	2.27
海拔/m	1 114	1 519	1 370.08	113.82
坡度/( $^{\circ}$ )	3	40	18.67	8.55
枯落物厚度/cm	3.41	16.1	7.32	2.82
株数/ $\text{hm}^2$	500	4 533	2 346	1 131.19
郁闭度	0.6	0.98	0.87	0.06
断面积/( $\text{m}^2\cdot\text{hm}^{-2}$ )	15.64	58.26	34.69	8.49

## 2.2 研究方法

2.2.1 观测变量与潜变量选取 结构方程模型(SEM)是基于变量协方差矩阵来分析多变量数据之间关系的综合性数据统计与分析的方法,包含测量模型和因果模型2部分,模型中包含观测变量和潜变量,其中可以直接测量的变量称作观测变量,不可以直接测量需要通过观测变量反映的变量来表达的称为潜变量。测量模型反映潜变量与观测变量的关系,因果模型中反映潜变量之间相关关系。

本研究环境因子、林分结构因子、林分稳定性因子和林分生产力因子为模型潜在变量。环境因子包含海拔(altitude)、坡度(slope)立地因子、枯落物厚度(litter)以及TN、TP、PH、TC、SOM与土壤状况有关的观测变量。林分结构因子选取了传统的林分结构变量树高(H)、胸径(DBH)、平均年龄(Age)、郁闭度(Canopy density)、胸径方差(DBH-D)、树高方差(H-D)、生长空间指数<sup>[11]</sup>(GSI)、生长空间竞争指数<sup>[11]</sup>(GSCI)等传统的林分结构指数,表征林分树木的生长、发育等基础数据的统计分布以及空间利用状况。也选取了角尺度<sup>[12]</sup>(W)、混交度<sup>[13]</sup>(M)、大小比数量<sup>[14]</sup>(U)、Hegyi竞争指数<sup>[15]</sup>、林分空间生产函数<sup>[16]</sup>(FSSI)等空间结构指数,表征林分的空间分布状态以及林木竞争的状况。

稳定性评价方式许多学者曾以不同角度与方法进行研究<sup>[17]</sup>,本研究借鉴惠刚盈等<sup>[18]</sup>基于林分内部状态评价稳定性的“ $\pi$ 值法则”。将林分稳定性定义为林分内部状态(FIS),即以森林的不同方面反映群落的稳定性。其中森林垂直结构用林层数表达<sup>[18]</sup>,森林水平结构通过角尺度的方法来分析<sup>[12]</sup>。年龄结构用树木的直径结构代替来分析种群的结构和动态<sup>[19]</sup>。树种多样性用Simpson指数<sup>[20]</sup>( $\lambda$ )来表达。森林密度用林分拥挤度<sup>[21-22]</sup>(K)描述。森林长势用林分疏密度(B)表达<sup>[18]</sup>。森林更新采用更新苗木与样地总株数的比值进行描述。健康林木用健康等级(stand condition) $\geq 4$ 的林木数量与样地总株数的比值进行描述。本研究在此添加了Pielou均匀度指数<sup>[23]</sup>以作为林下灌木的物种多样性指标,也作为森林内部状态的一个组成部分。

生产力因子中的样地生产力(plot productivity)用林分单木杆材的总出材量作为代表<sup>[24]</sup>。曾德惠等<sup>[25]</sup>将人工林生产力定义为:在一个世代的时间跨度内,在一定立地条件下一定大小面积的林分能够顺利完成其生命周期,并提供相应的初级生产量的能力。同时考虑不同样地平均年龄不同,引入年平均生产力(average annual productivity),消除年龄影响。且不同样地对生产力的影响中,株数密度

也是不可忽略的要素,株数密度既受林木生长后竞争、自疏、更新的影响,也与初始种植密度有很大关系,故引入样地单株生产力(single productivity),来反映样地的平均生产力,消除株数影响。

在潜变量与观测变量之间,箭头的方向由观测变量是模型中的潜变量的是由反映型(formative measurement)或形成型(reflective measurement)决定。形成型指潜变量是由各个观测变量所组成的,反映型则是各个观测变量都可以作为潜变量的某一个代表。本模型中,环境因子、林分结构因子、林分稳定性因子是形成型,生产力因子为反映型。

2.2.2 典型相关性分析 典型相关分析(canonical correlation analysis)是对协方差矩阵的一种理解,是利用综合变量对之间的相关关系来反映两组指标之间的整体相关性的多元统计分析方法<sup>[26]</sup>。与其它数理统计方法相比,典型相关分析将每组变量作为一个整体看待,通过典型相关系数的大小,可以显示不同因子对因变量的影响大小或对被解释变量的解释的贡献大小。而本研究中环境因子、结构因子、稳定性因子、生产力因子之间的连接关系,是通过现有的林学研究以及较为公认的林学知识人为设定的,其真实可靠程度需要通过典型相关分析检验。

2.2.3 初始模型的构建 结构方程其基本数学关系为:

$$X = \Delta X \xi + \delta \quad (1)$$

$$Y = \Delta Y \eta + \epsilon \quad (2)$$

式中, $X$ 为自变量的观测变量; $Y$ 为因变量的观测变量; $\Delta X$ 和 $\Delta Y$ 分别是 $X$ 和 $Y$ 的负荷矩阵。潜变量的因果关系模型为:

$$\eta = B \eta + \Gamma \xi + \zeta \quad (3)$$

式中, $B$ 是因变量的系数阵,表示因变量间的相互关系;矩阵 $\Gamma$ 表示自变量 $\xi$ 和因变量 $\eta$ 间的关系; $\zeta$ 是潜变量间的随机误差项。

初始模型构建时,潜变量之间的箭头方向,表示影响的因果关系。林分环境与林分的基本状态紧密相关,在林分生长的各个阶段有着客观、长久的影响<sup>[26]</sup>。环境状况良好的林分,更容易演替出林分结构好、稳定性强、生产力高的森林,因此初始模型中,设定环境因子影响结构因子、稳定性因子与生产力因子;林分结构是对林分发展演替过程如更新方式、竞争、自稀疏和经历的干扰活动的综合反映<sup>[27]</sup>,是客观存在的一种分布状态。结构决定功能,因此在初始模型中,设定结构因子影响稳定性因子与生产力因子;稳定性是林分的状态的一种体现,是群落具有受到轻度干扰后恢复其原来状态的一种性质,稳定性好的森林更新以及恢复能力强,进而生产力强,

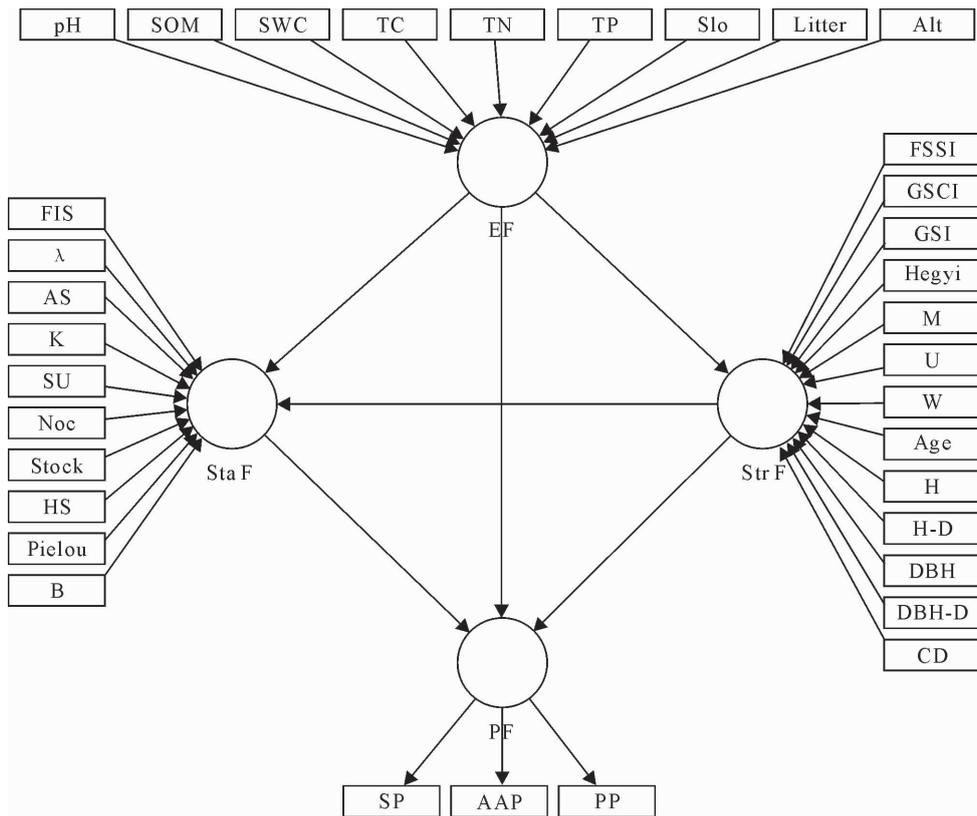
因此初始模型中,设定稳定性因子影响生产力因子。初始模型如图 1 所示。

### 2.3 模型配适性检验

模型构建之后需要进行模型的配适性检验,验证模型的可靠程度。

2.3.1 测量模型分析(measurement model analysis) 测量模型分析是指潜变量与观测变量之间的模型分析,验证理论中各观测变量能否正确反映其潜变量<sup>[28-29]</sup>,在模型中只对反映型进行信度分析以及区别效度分析。信度(reliability)检验是指对测量数据结果所显示的一致性、稳定性程度,也是对研

究结果一致性和稳定性的评价标准<sup>[30]</sup>。克朗巴哈信度(Cronbach's  $\alpha$ ),是较为流行的用来检测测量指标内在一致性<sup>[31]</sup>,值 $>0.6$ 可以接受。组合信度(composite reliability, CR)为多有观测变量的信度的组合<sup>[28]</sup>,CR 值应 $>0.7$ 。平均提取变异量(Average variance extracted, AVE)是计算潜变量对观测变量解释能力的平均,AVE 值应 $>0.5$ ,则结果较好<sup>[32]</sup>。区别效度为鉴定观测变量对于不同潜变量的区别效度<sup>[33]</sup>,结构因子与稳定性因子的相关系数要求小于稳定性 AVE 的平方根。



注:EF:环境因子;Sta F:稳定性因子;Str F:结构因子;PF:生产力因子;pH:土壤酸碱性;SOM:土壤有机质;SWC:土壤含水率;TC:土壤全碳;TN:土壤全N;TP:土壤全P;Slo:坡度;litter:枯落物厚度;Alt:海拔;FIS:林分内部状态; $\lambda$ :Simpson 指数;AS:年龄结构;K:林分拥挤度;SU:林分更新;Noc:林层数;SC:林分健康;HS:水平结构;Pielou: Pielou 均匀度指数;B:疏密度;FSSI:林分生产函数;GSCI:生长空间指数;GSI:生长空间竞争指数;Hegyi: Hegyi 竞争指数;M:混交度;U:大小比数;W:角尺度;Age:平均年龄;H:树高;H-D:树高方差;DBH:胸径;DBH-D:胸径方差;CD:郁闭度;SP:单株生产力;AAP 平均年生产力;PP:样地生产力。下同。

图 1 初始模型的构建

Fig. 1 Construction of the initial model

2.3.2 结构模型分析(structural model analysis) 预测决定系数( $R^2$ )表示线性回归模型的配适度<sup>[34]</sup>,  $R^2 > 0.67$  具有实际价值。Effect size ( $f^2$ )表示潜变量对观测变量的影响力, $f^2$  应 $>0.15$ 。标准化均方根残差(SRMWR)是观测到的协方差矩阵与假设协方差矩阵之间标准化残差平均值的指标<sup>[35-36]</sup>, SRMR 在产生 $<0.10$  的值时表示可接受的拟合。 $\chi^2$  是一个关于假设多元正态和样本大小敏感性的

绝对匹配指数<sup>[37]</sup>。 $\chi^2$  值越大,越接近假设之间的合适的模型和完美的模型。共线性统计量(VIF)表征不同观测变量之间的共线性<sup>[38]</sup>, VIF 应 $<10$ 。路径系数的  $P$  值 $<0.05$ ,影响显著,接受假设检验。

## 3 结果与分析

### 3.1 典型相关性分析

利用 R 语言对各潜变量之间进行典型相关性

分析。最终的分析结果中,环境因子与结构因子、结构因子与稳定性因子、稳定性因子与生产力因子之间典型相关系数较大, $P$  值 $<0.05$ ,接受假设检验,认为连接正确。环境因子与稳定性因子、生产力因子之间相关系数小, $P$  值 $>0.05$ ,不接受假设检验,认为连接不正确,给予修正,去除连线(表 2)。

表 2 典型相关性分析结果

Table 2 The results of Canonical correlation analysis

环境因子	结构因子	稳定性因子	生产力因子
环境因子	0.845**	0.637	0.486
结构因子	0.845**	0.95**	0.971**
稳定性因子	0.637	0.95**	0.739**
生产力因子	0.486	0.971**	0.739**

注: \*\* 表示相关极显著( $P<0.01$ )。

### 3.2 模型的修正与解释

通过典型相关分析的结果,将潜变量之间的连线修正,同时根据 CCA 的结果中每组潜变量下的观测变量都有具体的对整体的贡献系数,比较分析观测变量之间的重要程度。同时根据模型配适度结果的比较筛选,删除共线性强的、对整体贡献度小的

观测变量。并通过不断调整,使最终模型配适度与模型的复杂与解释力都较为合适。最终修改过的模型见图 2。

3.2.1 潜变量之间的关系 结果显示,环境因子、结构因子、稳定性因子、生产力因子都有正向、程度相差不大的影响。环境因子对结构因子有正向直接影响,影响系数为 0.338,对生产力因子、稳定性因子之间有正向间接影响,影响系数分别为 0.283、0.209。二者差异并不明显,从整体上看,环境因子对三者的正向影响差异较小。结构因子对生产力因子有正向影响,总影响系数为 0.837,直接影响为 0.764,间接影响为 0.073,影响集中于正向影响,通过稳定性的二次影响极弱。结构因子对稳定性因子有正向影响,影响系数为 0.619,影响较为强烈。稳定性因子对生产力因子有着正向直接影响,影响系数为 0.118,影响相对偏弱。在实践中,改善环境因子的整体状态,对林分的影响是全面且有效的。结构因子对稳定性因子以及生产力因子都有直接强烈的影响,以调整结构因子来进行人工林经营与调控是合理的。

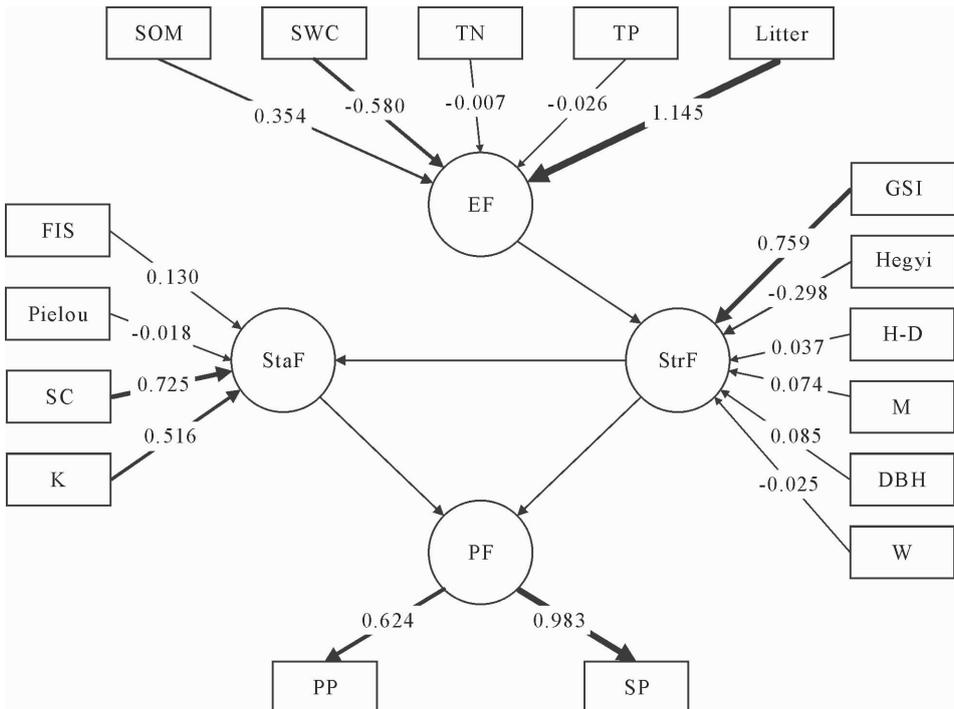


图 2 最终的结构方程模型

Fig. 2 Final Structural Equation Mode

3.2.2 观测变量与潜变量之间的关系 观测变量与潜变量之间的关系如图 2 所示。由图 2 可知,在环境因子的观测变量中,Litter、SOM 有正向影响,Litter 的影响极其强烈,SWC、TN、TP 有负向影响。在环境因子的潜变量中,GSI、H-D、M、DBH 有正向影响,GSI 影响程度远大于其他,W、Hegyi 竞争指

数有较小的负影响。在稳定性因子的潜变量中,FIS、SC、K 有正向影响,SC、K 影响强度大,灌木 Pielou 多样性指数为负。生产力因子指标中,SP 以及 PP 都可以反映生产力因子,影响程度大,PP 的反映效果更好。

### 3.3 适用性检验

最终所建立的结构模型,通过 500 次迭代的 PLS(偏最小二乘法)进行计算,同时再进行 10 000 次的 Bootstrapping 运算得到此结构方程模型的各项参数。结果显示,模型配适度结果 SRMR=0.099,  $\chi^2=161.135$ 。稳定性的效度检验中,Cronbach's  $\alpha=0.731$ , AVE=0.567, CR=0.831。全部变量 VIF<10,不具有共线性。相关性系数参数中,结构  $R^2=0.537$ ,稳定性  $R^2=0.379$ ,生产力  $R^2=0.884$ ,各路径系数假设检验结果全部显著。 $f^2$  结果见表 3。

表 3 模型效应量( $f^2$ )参数

Table 3 Model Effect Quantity Parameters

环境	生产力	稳定性	结构
环境			0.179
生产力			
稳定性	0.286		
结构	3.335	0.638	

## 4 结论与讨论

SEM 的方法已应用于自然科学中一些多变量耦合研究中,在森林生态系统的应用研究证明了该模型的科学性和可靠性<sup>[9-10]</sup>。其重要性在于,它允许检测环境因子、结构因子、稳定性因子、生产力因子的特征因素,这些因素负责结构和功能的变化。本研究通过黄龙山油松人工林 57 块样地野外调查数据,通过 R 语言以及 Smartpls 软件进行典型相关分析、结构方程模型建模,得到了环境因子与结构因子、稳定性因子、生产力因子之间的影响力大小的相关关系。

### 4.1 环境因子与结构因子、稳定性因子、生产力因子之间的关系

环境因子对结构因子、稳定性因子、生产力因子都有一定程度的正向全面的影响。在人工造林时,选取适合树种生长的环境,以及在经营中人为综合改善环境,是必不可少的措施。森林的环境因子包括立地因子、土壤因子、气候因子等所有对森林生长发育过程中产生影响的因素。不同的环境因素通过其各自的影响机制影响森林结构、稳定性、生产力等。Litter 是 SOM 的主要来源<sup>[39]</sup>,SOM 显著影响 DBH 和材积。研究显示,SOM、TN、TP 与林分生产力的关系呈显著或极显著水平,TK 与林分生产力关系不显著<sup>[40]</sup>。环境因子与结构因子之间的影响系数为 0.338,说明所选取的环境因子对结构因子的影响程度有限。在环境因子中,TP、TN 对环境因子的影响较弱,Litter、SWC、SOM 的影响较

强,其中 Litter 最强,因此在人工林生产经营过程中,维持合理的林下地表枯落物,是提高经营环境质量的有效方式。P 与 N 是植物生长的重要元素,但是土壤中的养分含量不等同于土壤中可被吸收的活性养分,S. Braun 等<sup>[41]</sup>曾在土壤中增加 N 含量进行对比试验,结果显示并没有引起明显的植株生长情况,这可能与土壤是否 N 饱和有关及其他养分有关。SWC 的影响为负,考虑数据调查时是 7—8 月,黄龙山地区夏季雨水充足,所以 SWC 较高。过高的 SWC 影响土壤的通气状况,使环境因子整体降低。A. Bauer 等<sup>[42]</sup>研究认为 SOM 对影响植物性能的环境特性的积极影响。人工林的结构受众多因素影响,如气候、立地、初始种植密度、初始种植相对位置、经营方式等,其中受人为影响的初始种植密度、初始种植相对位置、经营方式、是否抚育更为强烈,这可能是环境因子与结构因子影响系数中等的原因。环境因子与稳定性因子的间接影响系数为 0.209。环境因子与生产力因子的间接影响系数为 0.283,其中通过结构因子影响的系数为 0.21,占据主要部分,通过结构因子、稳定性因子影响生产力因子的系数为 0.073,影响较弱,原因在于生态过程是综合且复杂的,所经历路径越多,影响系数被稀释的越严重。

### 4.2 林分结构因子与稳定性因子之间的关系

结构因子与稳定性因子之间的影响系数为 0.619,影响较强。结构决定功能,由林分内部状态定义的稳定性是林分自身结构的一种表达。结构因子中的 GSI 与 Hegyi 竞争指数对稳定性因子的影响最大,表明调控人工林的种内竞争与个体树木的长势可以提高人工林的稳定性。本研究中的结构因子选取的非空间结构指数 DBH、H-D、GSI,DBH 与 H-D 都有正向影响,DBH 表征树木长势,H-D 反映树高的差异性的大小与林冠层的异质性。GSI 在非空间结构中是唯一有显著影响的观测变量,GSI 为 DBH 每生长 1 cm 并维持正常生命力所需要的树冠体积,是单株树木对于空间的利用情况,空间利用的越充分时林分生长发育越完全,结构越好。空间结构指数包括 W、M、Hegyi 竞争指数。W 对结构有正向影响,W 越大,林分分布越随机。在人工林中,适度的混交会对林分有结构促进作用,特别是混交树种为伴生树种时,但是也要考虑立地质量与混交比例。Hegyi 竞争指数对林分的结构有消极影响的,原因在于黄龙山的油松人工林初始种植时都是“一穴多苗”,目前的样地中,仍有许多未定株的树木,导致大部分竞争都是生长空间的极度压迫,而非在一定生长阶段后,良树与劣树的自然竞争。同穴

的极度竞争从人工林的初始阶段就开始出现,这种竞争严重的阻碍树木自然发育生长,使种群的结构与稳定性一直维持在较低水平。

#### 4.3 结构因子与生产力因子之间的关系

在生产实践中,应根据结构决定功能的原理以优化林分空间结构为手段,注重改善林分空间结构状况,按照森林的自然生长和演替过程安排经营措施<sup>[3]</sup>。本模型最终选取的生产力因子是 SP 和 PP。SP 的影响系数为 0.983,PP 的影响系数为 0.624,SP 在模型中影响系数更大。原因在于不同样地之间株数密度差异较大,密度过大时,样地内林分生长不充分。而密度过小时营养与空间没有被充分利用,此时 PP 较低,因此 SP 结果优于 PP。结构因子与生产力因子之间的影响系数中,总影响系数为 0.837,直接影响为 0.764,间接影响为 0.073,以直接影响为主。

#### 4.4 稳定性因子与生产力因子之间的关系

稳定性与生产力都为林分结构的一种体现,都受林分结构的直接影响,结构良好的天然林通常具有较高的稳定性与生产力。由于人工林经营状态不佳,结构较差,生产力与稳定性都处于较低水平。在低水平时,稳定性因子对生产力因子的影响有限,此时生产力因子受结构因子调控的影响更为明显。本研究中的稳定性因子包括 SC、K、FIS、灌木 Pielou 均匀度指数。SC 的影响较大,K 对稳定性因子有正向影响,K 值越大,林分越稀疏,林分稳定性越好。FIS 表现为正向影响。稳定性因子与生产力因子之间的影响系数为 0.118,影响偏低。

#### 4.5 不足与展望

在特定树种的实际生产实践中,坡位、坡向的选择,对林分有显著影响。在今后的研究中,如果样本数量允许,可以按照不同的立地类型,在所研究对象为同一树种时,分别建立其他潜变量与观测变量完全相同的结构方程模型,并比较模型与模型间的不同,便可以比较不同立地类型之间、各观测变量之间的影响程度是否发生变化。后续的这种探究具有较大的意义。

#### 参考文献:

- [1] 张昌顺,李昆. 人工林地力的衰退与维护研究综述[J]. 世界林业研究,2005,18(1):17-21.  
ZHANG C S, LI K. Advance in research on soil degradation and soil improvement of timber plantations[J]. World Forestry Research, 2005, 18 (1):17-21. (in Chinese)
- [2] 段高辉,赵鹏祥,周远博,等. 黄龙山林区油松人工林立地质量评价研究[J]. 西北林学院学报,2019,34(5):161-166,194.  
DUAN G H, ZHAO P X, ZHOU Y B, et al. On site quality

evaluation of *Pinus tabulaeformis* plantation in the forest region of Huanglong mountain[J]. Journal of Northwest Forestry College, 2019, 34(5):161-166,194. (in Chinese)

- [3] 惠刚盈,胡艳波,赵中华. 再论“结构化森林经营”[J]. 世界林业研究,2009,22(1):14-19.  
HUI G Y, HU Y B, ZHAO Z H. Further discussion on “structure-based” forest management[J]. World Forestry Research, 2009, 22 (1):14-19. (in Chinese)
- [4] GLATTHORN J, FELDMANN E, PICHLER V, et al. Biomass stock and productivity of primeval and production beech forests: greater canopy structural diversity promotes productivity[J]. Ecosystems, 2017:1-19.
- [5] GRIMM V, SCHMIDT E, WISSEL C. On the application of stability concepts in ecology[J]. Ecological Modelling, 1992, 63 (1-4):143-161.
- [6] OCONNOR C D, FALK D A, LYNCH A M, et al. Disturbance and productivity interactions mediate stability of forest composition and structure[J]. Ecological Applications A Publication of the Ecological Society of America, 2016, 27(3):900-915.
- [7] ANA CAROLINA C, HICKERSON M J, HADDAD C F B, et al. Stability predicts genetic diversity in the brazilian atlantic forest hotspot[J]. Science, 2009, 323(5915):785-789.
- [8] BOLLEN K. Structural equations with latent variables[J]. New York John Wiley & Sons, 1989, 35(7):289-308.
- [9] LAUGHLIN D C, ABELLA S R, COVINGTON W W, et al. Species richness and soil properties in *Pinus ponderosa* forests: a structural equation modeling analysis[J]. Journal of Vegetation Science, 2007, 18(2):231-242.
- [10] DĂNESCU A, ALBRECHT A T, BAUHUS J. Structural diversity promotes productivity of mixed, uneven-aged forests in Southwestern Germany [J]. Oecologia, 2016, 182 (2): 319-333.
- [11] 马履一,王希群. 生长空间竞争指数及其在油松、侧柏种内竞争中的应用研究[J]. 生态科学, 2006, 25(5):385-389.
- [12] 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. (in Chinese)
- [13] 惠刚盈,胡艳波. 混交林树种空间隔离程度表达方式的研究[J]. 林业科学研究, 2001, 14(1):23-27.  
HUI G Y, HU Y B. Measuring species spatial isolation in mixed forests[J]. Forestry Research, 2001, 14 (1):23-27. (in Chinese)
- [14] 惠刚盈, K V Gadow, M Albert. 一个新的林分空间结构参数——大小比数[J]. 林业科学研究, 1999, 12(1):1-6.  
HUI G Y, GADOW K V, ALBERT M. A new parameter for stand spatial structure neighbourhood comparison[J]. Forestry Research, 1999, 12(1):1-6. (in Chinese)
- [15] MARTIN G L, EK A R. A comparison of competition measures and growth models for predicting plantation red pine diameter and height growth[J]. Forest Science, 1984, 30(3):731-743.
- [16] 董灵波,刘兆刚,马妍,等. 天然林林分空间结构综合指数的研究[J]. 北京林业大学学报, 2013, 35(1):16-22.

- DONG L B, LIU Z G, MA Y, *et al.* A new composite index of stand spatial structure for natural forest[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2013, 35(1): 16-22. (in Chinese)
- [17] 丁惠萍, 张社奇, 钱克红, 等. 森林生态系统稳定性研究的现状分析[J]. 西北林学院学报, 2006, 21(4): 28-30.
- DING H P, ZHANG S Q, QIAN K H, *et al.* Analysis of present scientific research situation in stability of forest ecosystem [J] Journal of Northwest Forestry College, 2006, 21(4): 28-30. (in Chinese)
- [18] 惠刚盈, 张弓乔, 赵中华, 等. 天然混交林最优林分状态的  $\pi$  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  $\pi$  value of natural mixed forest optimal stand state[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2016, 52(5): 1-8. (in Chinese)
- [19] 岳天祥, 马世骏. 生态系统稳定性研究[J]. 生态学报, 1991, 11(4): 361-366.
- YUE T X, MA S J. Ecosystem stability and its analysing model[J]. Acta Ecologica Sinica, 1991, 11(4): 361-366. (in Chinese)
- [20] BELCHER P R, CONSULTANT. Measurement of myocardial contractility[J]. Journal of Cardiothoracic & Vascular Anesthesia, 1972, 27(2): 261. (in Chinese)
- [21] 惠刚盈, 张连金, 胡艳波, 等. 林分拥挤度及其应用[J]. 北京林业大学学报, 2016, 38(10): 1-6.
- HUI G Y, ZHANG L J, HU Y B, *et al.* Stand crowding degree and its application[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2016, 38(10): 1-6. (in Chinese)
- [22] 张连金, 惠刚盈, 孙长忠. 马尾松人工林首次间伐年龄的研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2011, 31(6): 22-27.
- ZHANG L J, HUI G Y, SUN C Z. The first thinning age of *Pinus massoniana* plantation[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2011, 31(6): 22-27. (in Chinese)
- [23] 马克平. 生物群落多样性的测度方法 I  $\alpha$  多样性的测度方法: 上[J]. 生物多样性, 1995, 3(1): 38-43.
- MA K P. Measuring methods of biodiversity I. measuring methods of alpha diversity (Part I) [J]. Chinese Bioversity, 1995, 3(1): 38-43. (in Chinese)
- [24] 刘灿然, 马克平. 生物群落多样性的测度方法[J]. 生态学报, 1997, 17(6): 601-610.
- LIU C R, MA K P. Measurement of biotic community diversity[J] Acta Ecologica Sinica, 1997, 17(6): 601-610. (in Chinese)
- [25] 姜凤岐, 曾德慧, 范志平, 等. 樟子松人工固沙林稳定性的研究[J]. 应用生态学报, 1996, 7(4): 337-343.
- JIANG F Q, ZENG D H, FANG Z P, *et al.* Stability of *Mongolian* pine plantations on sandy land[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 1996, 7(4): 337-343. (in Chinese)
- [26] PEARSON E S. Relations between two sets of variates [J]. Biometrika, 1936, 28(3/4): 321-377.
- [27] 雷相东, 唐守正. 林分结构多样性指标研究综述[J]. 林业科学, 2002, 38(3): 140-146.
- LEI X D, TANG S Z. Indicators on structural diversity within-stand: a review[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2002, 38(3): 140-146. (in Chinese)
- [28] 孙清芳, 刘滨凡, 马燕娥. 山河屯林业局红松阔叶混交林林分空间结构特征[J]. 森林工程, 2019, 35(6): 1-5.
- [29] ANDERSON J C, GERBING D W. Structural equation modeling in practice: a review of the two-step approach[J]. Psychological Bulletin, 1988, 103(3): 411-423.
- [30] CRONBACH L J. Coefficient alpha and the internal structure of tests[J]. Psychometrika, 1951, 16(3): 297-334.
- [31] FLAMER S. Assessment of the multitrait-multimethod matrix validity of likert scales via confirmatory factor analysis [J]. Multivariate Behavioral Research, 1983, 18(3): 275.
- [32] FORNELL C, LARCKER D F. Evaluating structural equation models with unobservable variables and measurement error [J]. Journal of Marketing Research, 1981, 18(1): 39-50.
- [33] SEGARS A H, GROVER V. Strategic information systems planning success: an investigation of the construct and its measurement[J]. Mis Quarterly, 1998, 22(2): 139-163.
- [34] 徐浩凯. 东北林区主要阔叶材密度近红外定标模型研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2015.
- [35] FONSECA M. Principles and practice of structural equation modeling, third edition by Rex B. Kline [J]. International Statistical Review, 2013, 81(1): 172-173.
- [36] CHEN F F. Sensitivity of goodness of fit indexes to lack of measurement invariance[J]. Structural Equation Modeling A Multidisciplinary Journal, 2007, 14(3): 464-504.
- [37] BOLLEN K A, STINE R A, BOLLEN K A, *et al.* Bootstrapping goodness-of-fit measures in structural equation models [J]. Sociological Methods & Research, 1993, 21(2): 205-229.
- [38] 刘明. 多重共线性的解决: 剔除变量的新标准[J]. 统计与决策, 2013(5): 82-83.
- LIU M. Solution of multiple collinearity: new criteria for eliminating variables[J]. Statistics and Decision-making, 2013(5): 82-83. (in Chinese)
- [39] MAISTO G, MARCO A D, MEOLA A, *et al.* Nutrient dynamics in litter mixtures of four mediterranean maquis species decomposing in situ[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2011, 43(3): 520-530.
- [40] 樊兰英, 闫丽娟. 省域尺度油松人工林生产力与土壤养分关系研究[J]. 林业科技, 2018, 43(6): 18-20.
- FAN L Y, YAN L J. Study on relationship of forest productivity and soil nutrients of *Pinus tabulaeformis* plantation in provincial scale[J]. Forestry Science & Technology, 2018, 43(6): 18-20. (in Chinese)
- [41] BRAUN S, THOMAS V F, QUIRING R, *et al.* Does nitrogen deposition increase forest production? The role of phosphorus [J]. Environmental Pollution, 2010, 158(6): 2043-2052.
- [42] BAUER A, BLACK A L. Quantification of the effect of soil organic matter content on soil productivity[J]. Soil Science Society of America Journal, 1994, 58(1): 185-193.