

DOI:10.13275/j.cnki.lykxyj.2020.03.005

晋西黄土区油松林分结构与水土保持功能的多因子复合关系

魏曦¹, 梁文俊^{1*}, 毕华兴^{2,3,4,5}, 侯贵荣^{2,3}

(1. 山西农业大学林学院, 山西 太谷 030801; 2. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 3. 水土保持国家林业和草原局重点实验室, 北京林业大学, 北京 100083; 4. 北京林果业生态环境功能提升协同创新中心, 北京 102206; 5. 山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站, 北京林业大学, 北京 100083)

摘要: [目的] 量化研究晋西黄土区的油松人工林林分结构与水土保持功能, 揭示二者的多因子复合关系, 为黄土高原植被建设提供借鉴。[方法] 选取蔡家川流域 16 块 20 m×20 m 林龄为 28 年的油松人工林标准样地, 并划分成 64 块 10 m×10 m 样方, 利用结构方程的方法构建地形-林分结构-水土保持功能的关系模型。其中将地形因子、水平结构、垂直结构、涵养水源和保育土壤、拦沙减沙作为潜变量, 调查实验获取的各项指标作为观测变量。[结果] 油松林的水平结构是对涵养水源和保育土壤、拦沙减沙两类水土保持功能影响最为显著的潜变量, 其路径系数分别为-0.93 和 0.79。而在其对应的观测变量中, 林分密度和林木竞争指数是主导水平结构的因子, 其路径系数分别为 0.98 和 0.97, 总影响系数分别为-0.987 和-0.956, 且较易调控。受结构因素影响较大的敏感功能因子为产流量、产沙量和林冠截留率, 其路径系数分别为 0.97、0.91 和 0.69, 总影响系数分别为 0.986、0.961 和 0.731。地形因子通过影响林分结构、在一定程度上影响水土保持功能。[结论] 提出黄土高原地区适宜的油松林分密度范围为 1 100~1 400 株·hm⁻², 据此来调整林分密度、林木竞争指数等结构指标, 将对地区涵养水源、保育土壤和拦沙减沙起到良好效益, 多因子协同调控将进一步提升黄土高原的植被质量, 发挥植被的水土保持效能。

关键词: 油松林; 林分结构; 水土保持功能; 结构方程模型

中图分类号: S727.22

文献标志码: A

文章编号: 1001-1498(2020)03-0039-09

黄土高原是世界上水土流失严重、生态环境最脆弱的区域之一, 水土保持造林植被已覆盖大面积的黄土地, 有效缓解该地区的水土流失, 生态环境逐步恢复和改善^[1-2]。但大规模植被建设引发径流减少、土壤干化等问题亦格外引人关注^[3], 植被结构与功能的多目标调控、植被从数量增加到质量提升的转变日益成为国内外研究的焦点。黄土残源沟壑区植被发挥的水土保持功能主要为涵养水源、保育土壤和拦蓄泥沙等 3 方面^[4]。林分结构与水土保持功能的研究重点从关注各自的特征, 逐渐过渡为

指标体系综合评价森林植被水土保持机理的阶段, 包括以林水平衡、植被承载力、结构化经营、生物多样性、景观等为对象, 探讨植被结构与径流、土壤流失的相关性^[5-7]。然而, 目前较全面反映林分结构和水土保持功能的多因子相互影响的研究较少。结构方程模型 (Structural Equation Model, SEM) 提出了量化多因子复杂关系的可行方案^[8], 其关键优势为有效解决因果关系、测试竞争模型和理论的能力^[9-10], 在生态恢复和水土保持领域逐步应用^[11-12], 为深入探索林分结构和功能的多因子关

收稿日期: 2019-08-27 修回日期: 2019-12-23

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目 (31901365); 国家自然科学基金面上项目 (31971644); 国家重点研发计划 (2016YFC0501704); 山西省优秀博士来晋工作奖励资金科研项目 (SXYBKY2018032); 山西农业大学科技创新基金资助 (2018YJ09)

* 通讯作者: 梁文俊. E-mail: liangwenjun123@163.com

系奠定了方法基础。

本研究以晋西黄土区成熟油松 (*Pinus tabulaeformis* Carr.) 人工林为对象, 采用结构方程模型, 以胸径、林分密度等表征林分的水平结构, 叶面积指数 (LAI)、林层指数等表征垂直结构, 林冠截留、枯落物持水等表征涵养水源功能, 有机质、氮、磷等表征保育土壤功能, 产流、产沙表征拦沙减沙功能, 探究多因子之间的复杂影响和程度, 揭示油松林水平和垂直结构对涵养水源、保育土壤、拦沙减沙等功能的作用机制, 提出适宜黄土高原坡面的林分结构调控因子组合, 为黄土高原油松人工植被建设提供借鉴。

1 研究方法

1.1 试验区域及材料

研究区位于山西吉县蔡家川流域 (地理坐标 $110^{\circ}27' \sim 111^{\circ}7' E$, $35^{\circ}53' \sim 36^{\circ}21' N$, 海拔范围 $904 \sim 1592 m$), 主要植被为不同时期的刺槐、油松人工林, 植被覆盖率 72%。区域年均气温 $10.2^{\circ}C$, 无霜期 172 d, 年均降水量 571 mm 且分配不均, 年潜在蒸发量 1724 mm。土壤主要为褐土。流域的林下灌木和草本情况详见前期研究报道^[12]。地被由松针等枯落物覆盖, 明显分为未分解层与半分解层, 厚度分别为 5~15 mm 和 5~40 mm。

1.2 样品采集

2017年4—10月对试验区林地调查分析, 选择不同坡度、坡向和海拔, 林龄约为28年的油松人工林开展研究, 共设置16块 $20 m \times 20 m$ 的标准样地, 用测绳将样地划分为4个 $10 m \times 10 m$ 的样方。样地的坡向分别为阴坡、半阴坡和半阳坡, 坡度 $26^{\circ} \sim 35^{\circ}$, 海拔 $1100 \sim 1200 m$ 。

样方内每木检尺, 调查林分及更新情况, 计算林分密度、角尺度、大小比数、林木竞争指数等指标。采用 LAI-2000 植被冠层分析仪测定样方的叶面积指数; 自记式雨量筒测定林内外降雨和树干流, 并基于水量平衡计算林冠截留率。采用环刀法分3层 (0~20、20~40、40~60 cm) 采集土壤样品并充分混合, 用烘干法测定土壤质量含水量, 浸润土壤法测定土壤最大持水率^[11]; 自然风干土壤过 0.25 mm 筛后, 用重铬酸钾稀释热法测定土壤有机质含量, 用 SmartChem200-全自动智能化学分析仪测定全氮 (TN)、全磷 (TP)、氨氮、硝氮、速

效磷等的含量。在样地上、中、下坡位处随机选取 $30 cm \times 30 cm$ 的样方调查枯落物层, 用室内浸泡法测定未分解层和半分解层的枯落物持水率。采用双环入渗法测定土壤入渗率^[13]。采用标准径流小区观测样地场降雨的产流量和产沙量。油松样地的基本情况如表1所示。

1.3 结构方程构建方法

结构方程模型包括测量模型和结构模型^[14-15], 用于探究生态系统中多个观测变量、潜变量以及残差之间的关系, 定量描述自变量对因变量的影响路径和程度, 包括直接影响、间接影响和总影响^[16]。基于以往研究成果及2017年生长季的野外调查数据, 构建表达油松人工林分结构与水土保持功能多因子复合关系的结构方程初始模型, 路径系数表示变量之间关联程度, 采用极大似然估计法计算^[9]。研究区内的气候、水文等环境条件基本一致, 地形因子 (ξ_1) 有显著差异。建模时主要考虑林分的水平结构 (ξ_2) 和垂直结构 (ξ_3), 涵养水源、保育土壤 (η_1)、拦沙减沙 (η_2) 等功能, 以及对应的观测变量和误差、潜变量的残差等。

1.4 模型检验与修正方法

模型构建前, 采用通用 Cronbach α 系数进行信度检验, 值越大表明信度越高; 采用 KMO 度量和 Bartlett 球形检验进行效度分析, KMO 值域为 0~1, 越接近 1, 变量效度越好; Bartlett 球形检验结果显著小于 1%, 效度越好。模型构建、运行后, 应检验卡方 (χ^2)、卡方自由度比 ($\chi^2/df \in [0,3]$)、显著性概率值 ($p > 0.05$)、绝对适配指数 (GFI)、规准适配指数 (NFI)、增值适配指数 (IFI)、比较适配指数 (CFI)、近似误差均方根 (RMSEA $\in [0,0.05]$)、赤池信息准则 (AIC, 越小越好)、贝叶斯准则 (BCC, 越小越好) 等参数。其中, 各适配指数值范围在 [0.9,1] 时模型适配程度高, 在 [0.7,0.9] 时模型适配程度也容许。

初始模型参数不适配时需修正模型, 方法如下: ①根据经验理论和路径系数值增减、调整变量; ②根据初始模型的参数显著性和修正指标 (Modification Index) 进行模型扩展 (Model Building), 释放部分限制路径或添加新路径来改善模型结构; ③根据初始模型的参数显著性和修正指标及临界比率 (Critical Ratio) 进行模型限制 (Model Trimming), 删除或限制部分路径以简化

表 1 蔡家川流域油松人工林样地基本情况

Table 1 Characteristics of *Pinus tabulaeformis* plantation in Caijiachuan watershed

| 林分和土壤特征 Stands and soil characteristics | 最大值 Maximum | 最小值 Minimum | 平均值 Average | 变异系数 Variable coefficient |
|--|----------------|----------------|----------------|------------------------------|
| 坡度 Slope/° | 35 | 26 | 30.6 | 0.10 |
| 海拔 Elevation/m | 1 200 | 1 100 | 1 148 | 0.02 |
| 胸径 Diameter at breast height/cm | 21.8 | 6.0 | 13.0 | 0.20 |
| 树高 Tree height /m | 10.7 | 3.0 | 7.1 | 0.20 |
| 冠幅面积 Crown area/m ² | 29.6 | 1.1 | 10.0 | 0.08 |
| 郁闭度 Canopy density | 0.87 | 0.54 | 0.69 | 0.14 |
| 林分密度 Stand density/(株·hm ⁻²) | 1 800 | 600 | 1 147 | 0.33 |
| 幼树更新 Seedling regeneration /株 | 7 | 1 | 4 | 0.43 |
| 叶面积指数 Leaf area index | 3.04 | 1.25 | 2.07 | 0.26 |
| 角尺度Uniform angle | 0.700 | 0.375 | 0.535 | 0.19 |
| 大小比数 Neighborhood comparison | 0.625 | 0.250 | 0.518 | 0.18 |
| 林木竞争指数 Tree competition index | 2.23 | 1.17 | 1.61 | 0.19 |
| 林层指数 Stand layer index | 0.50 | 0 | 0.20 | 0.87 |
| 林冠截留率 Canopy interception rate /% | 20.4 | 8.7 | 15.43 | 0.22 |
| 土壤质量含水量 Soil moisture content /% | 16.93 | 5.77 | 10.99 | 0.26 |
| 土壤最大持水率 Maximum water holding capacity/% | 61.00 | 25.54 | 46.76 | 0.18 |
| 土壤有机质Soil organic matter/(g·kg ⁻¹) | 18.97 | 3.49 | 9.85 | 0.41 |
| 全氮Total nitrogen/(g·kg ⁻¹) | 1.76 | 0.18 | 0.74 | 0.71 |
| 全磷Total phosphorus/(g·kg ⁻¹) | 1.81 | 0.47 | 0.76 | 0.45 |
| 氨氮Ammonia-nitrogen/(mg·kg ⁻¹) | 34.42 | 17.72 | 25.55 | 0.20 |
| 硝氮Nitrate-nitrogen/(mg·kg ⁻¹) | 13.33 | 1.56 | 6.99 | 0.42 |
| 速效磷Available phosphorus/(mg·kg ⁻¹) | 55.66 | 25.52 | 37.66 | 0.21 |
| 未分解层枯落物持水率 Water retention rate of litter in the undecomposed layer/% | 166.05 | 37.04 | 65.31 | 0.52 |
| 半分解层枯落物持水率 Water retention rate of litter in the semidecomposed layer /% | 235.92 | 23.84 | 80.63 | 0.68 |
| 土壤入渗率 Soil infiltration rate /(mm·h ⁻¹) | 277.05 | 219.30 | 233.43 | 0.10 |
| 产流量Average runoff yield/(mm·场 ⁻¹) | 78.02 | 65.42 | 72.38 | 0.04 |
| 产沙量 Average sediment yield/(t·km ⁻²) | 604 | 361 | 456 | 0.19 |

模型结构。

1.5 数据处理与分析

使用 SPSS19.0 软件分析数据基本特征、信度和效度等, 借助 Amos 22.0 软件完成结构方程模型构建, 部分图表在 Excel 2016 软件中完成。

2 结果与分析

2.1 林分结构和功能的主要特征

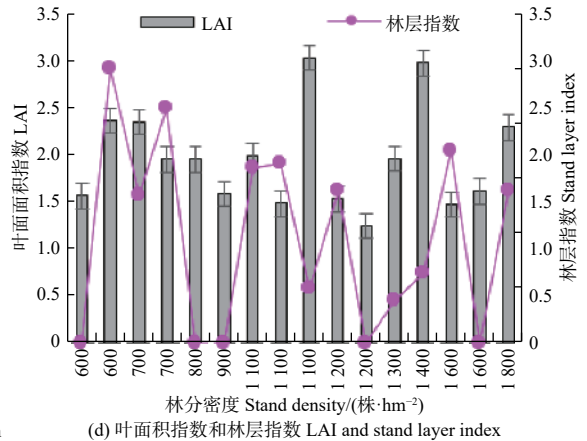
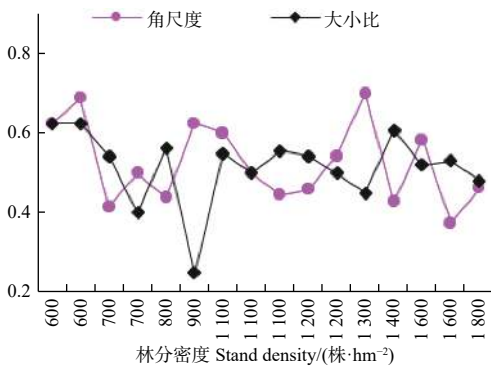
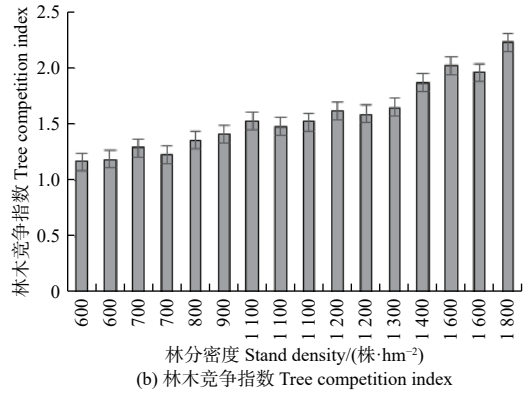
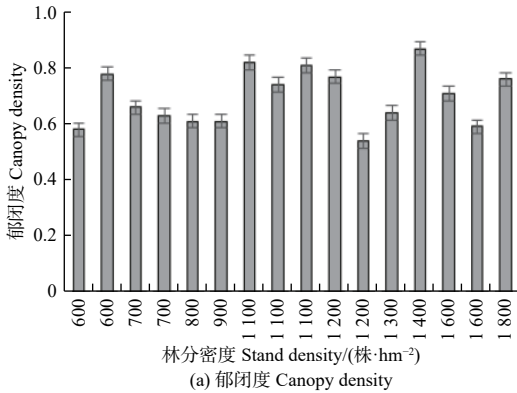
构建模型前分析油松林结构和功能的基本特征。水平结构方面, 油松林的郁闭度为 0.54~0.87, 与林分密度的关系呈双峰曲线, 其中郁闭度峰值出

现在林分密度 1 400 株·hm⁻² 处, 次大值分别出现在 1 100 株·hm⁻² 和 1 800 株·hm⁻² 处, 这可能受到微地形差异的影响, 致使本研究中郁闭度和林分密度相关性不强 (图 1.a)。林木竞争指数与林分密度存在较密切的正相关 (图 1.b)。角尺度为 0.375~0.700, 林木分布格局大多为均匀分布或团状分布, 与造林时均匀种植或呈一定角度种植的特点一致; 大小比数 ≥0.500 的林分占比 76%, 表明油松林的长势较均匀 (图 1.c)。垂直结构方面, 叶面积指数为 1.25~3.04, 与林分密度的关系呈多峰曲线, 峰值出现在林分密度 1 100 株·hm⁻² 处, 次大

值出现在 $1\ 400\ \text{株}\cdot\text{hm}^{-2}$ 处, 其值与林分密度不具有明显的线性相关。林层指数为 $0\sim 0.50$, 表明油松林的林木分层集中在 $1\sim 2$ 层, 反映其垂直成层分布格局 (图 1.d)。

水土保持功能特征主要体现在林冠截留和径流泥沙方面。林冠截留率与叶面积指数存在较密切的

正相关关系 (图 2.a)。油松林产流量和产沙量的总体趋势为随坡度增大而增大, 总体表明产流量和产沙量具有较强相关性, 但在 28° 处出现异常; 二者的峰值和次峰值均出现在坡度 28° 和 35° 处, 其中, 产流量分别为 78.02 和 $77.43\ \text{mm}\cdot\text{场}^{-1}$, 产沙量分别为 604 和 $595\ \text{t}\cdot\text{km}^{-2}$ (图 2.b)。

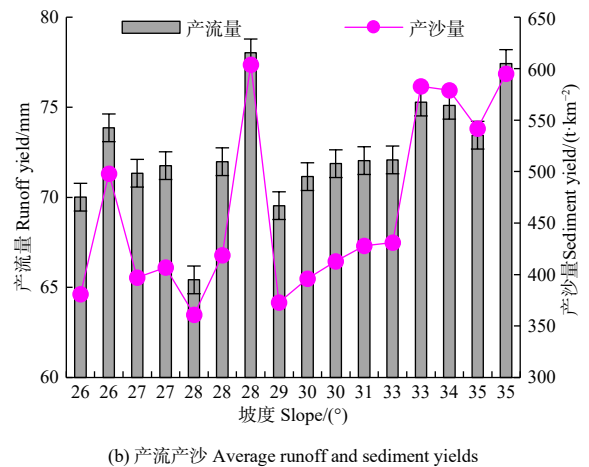
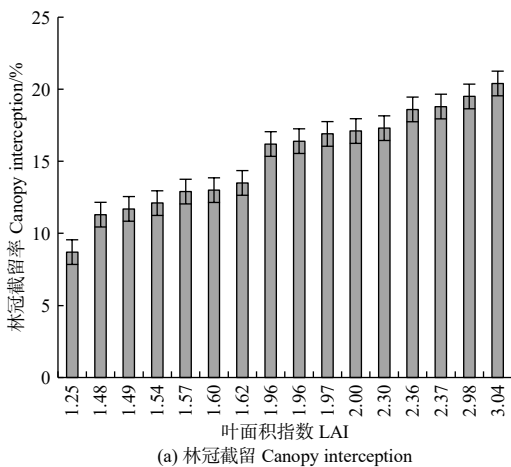


(c) 角尺度和大小比数 Uniform angle and neighborhood comparison

(d) 叶面积指数和林层指数 LAI and stand layer index

图 1 油松林林分结构的主要指标特性

Fig. 1 The main stand structure characteristics of *Pinus tabuliformis* plantation



(a) 林冠截留 Canopy interception

(b) 产流产沙 Average runoff and sediment yields

图 2 油松林水土保持功能的主要指标特性

Fig. 2 The soil and water conservation function characteristics of *Pinus tabuliformis* plantation

2.2 数据检验、模型构建与修正

按照前述方法进行数据检验, 确定通过检验的指标 ($\alpha \geq 0.9$ 、 $KMO \geq 0.8$ 、 $sig. < 1\%$)。将建模数据导入 Amos 22.0 软件构建标准化的结构方程, 计算判别模型适应性的参数值。初始模型的卡方 $\chi^2 = 63.743$, 自由度 $\chi^2/df = 3.642 > 3$, 显著性概率 $p = 0.001 < 0.05$, 与观测数据的适配性较差, 应进行修正。

修正时首先分析出各指标对于表征潜变量的作用不可或缺, 不考虑删减。其次, 考虑某潜变量的残差与其他潜变量相关的观测变量残差的相关性, 采用模型扩展方法逐一检验, 用双箭头连接有较强相关关系的指标组, 经反复调整、匹配后, 得到接受虚无假设、适配性高的油松林林分结构与水土保持功能多因子关系的结构方程模型 (图 3)。修正后的模型参数 ($\chi^2 = 46.359$, $\chi^2/df = 1.376$, $p = 0.101 > 0.05$ $RMSEA = 0.036 < 0.05$, $AIC = 232.913$, $BCC = 214.772$) 接受虚无假设, 且适配统计量的各项检

验指标 ($GFI = 0.912$, $NFI = 0.787$, $IFI = 0.805$, $CFI = 0.823$) 均大于 0.7, 表明模型与观测数据的适配性较好, 对理论假设和实际观测数据的拟合可行、适用。

2.3 作用路径和影响效应分析

2.3.1 潜变量之间的复合关系 地形因子与垂直结构、涵养水源和保育土壤、拦沙减沙之间都有正影响, 路径系数分别为 0.13、0.37 和 0.98 (图 3)。地形对于拦沙减沙的影响远大于对其他因子的影响, 而与水平结构之间没有直接的影响路径。水平结构与垂直结构、拦沙减沙之间有正影响, 其路径系数分别为 0.16 和 0.79; 对涵养水源和保育土壤有负影响, 路径系数为 -0.93。垂直结构对于涵养水源和保育土壤、拦沙减沙都有负影响, 其路径系数分别为 -0.08 和 -0.42。拦沙减沙与涵养水源和保育土壤之间也存在正影响, 路径系数为 0.35。结构方程计算的标准化影响系数也能表征潜变量之间的相互影响程度 (表 2)。其中, 影响较显著的有

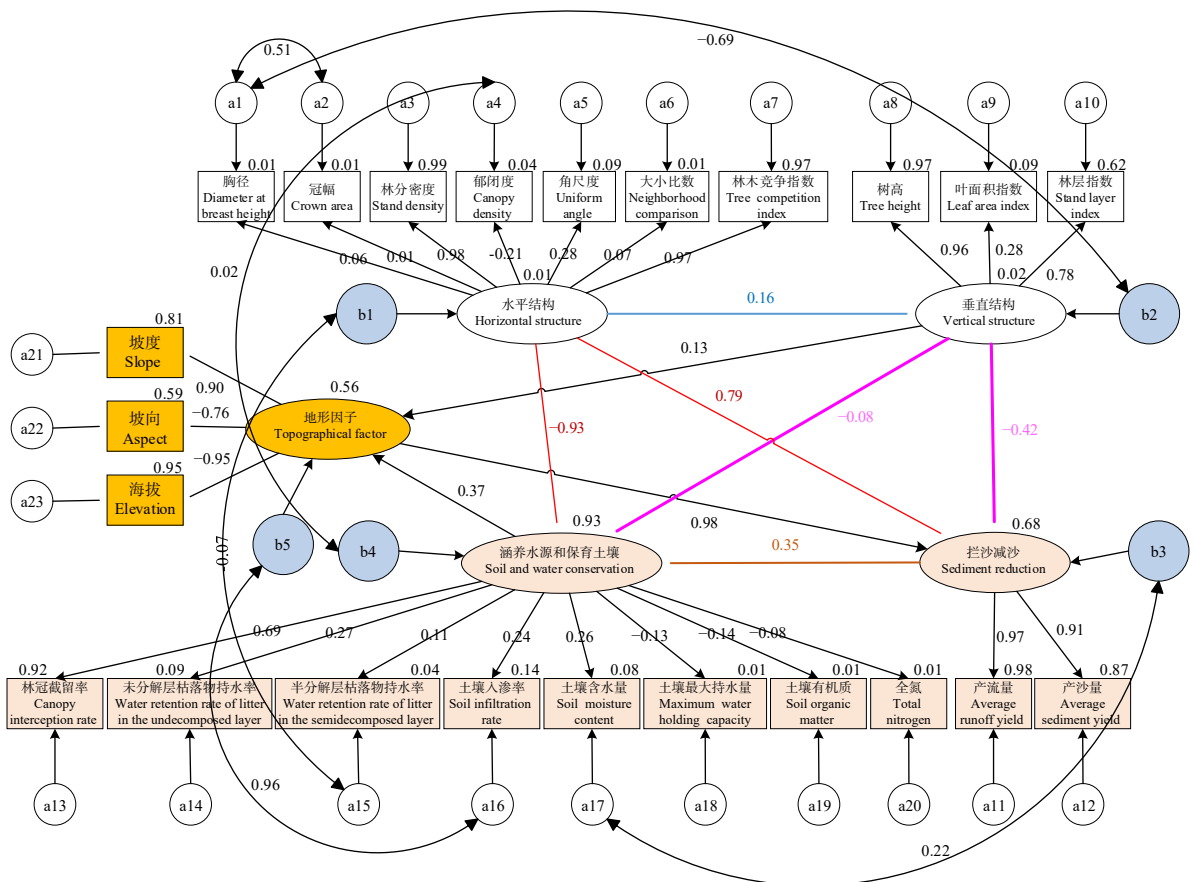


图 3 修正后的油松林分结构与水土保持功能耦合关系模型

Fig. 3 The modified model of coupling relationships between stand structure and soil and water conservation of *Pinus tabuliformis* plantation

表2 油松林结构方程模型中潜变量标准化影响系数

Table 2 The influence coefficients of latent variable standardization in the structure equation model of *Pinus tabuliformis* plantation

| 相互影响的潜变量 Effect latent variables | 标准化总影响 Standardized total impact | 标准化直接影响 Standardized direct impact | 标准化间接影响 Standardized indirect impact |
|---|-------------------------------------|---------------------------------------|---|
| 地形因子与水平结构 Horizontal structure and topography | -0.327 | 0 | -0.327 |
| 地形因子与垂直结构 Vertical structure and topography | 0.069 | 0.114 | -0.045 |
| 地形因子与涵养水源和保育土壤 Soil and water conservation and topography | 0.217 | 0 | 0.217 |
| 地形因子与拦沙减沙 Sediment reduction and topography | 0.822 | 0.734 | 0.088 |
| 水平结构与垂直结构 Vertical structure and horizontal structure | 0.154 | 0.154 | 0 |
| 水平结构与涵养水源和保育土壤 Soil and water conservation horizontal structure | -0.906 | -0.993 | 0.087 |
| 水平结构与拦沙减沙 Sediment reduction and horizontal structure | 0.663 | 0.784 | -0.121 |
| 垂直结构与涵养水源和保育土壤 Soil and water conservation and vertical structure | -0.109 | -0.041 | -0.068 |
| 垂直结构与拦沙减沙 Sediment reduction and vertical structure | -0.335 | -0.406 | 0.071 |
| 涵养水源和保育土壤与拦沙减沙 Soil and water conservation and Sediment reduction | 0.308 | 0.284 | 0.024 |

3组：地形因子对拦沙减沙的总影响系数为0.822，其中直接影响0.734，间接影响0.088；水平结构对涵养水源和保育土壤的总影响系数为-0.906，其中直接影响-0.993，间接影响0.087；对拦沙减沙的总影响系数为0.663，其中直接影响0.784，间接影响-0.121。

路径图和影响效应总体反映出潜变量之间的耦合机制和复杂关系。①地形因子对拦沙减沙功能的影响最为显著，即地形因子正向变化时，拦沙减沙因子的数值会增大，此时林分的拦沙减沙功能急剧削弱。②林分结构内部在水平和垂直方向上有较小程度的协同和促进。③水平结构正向变化对拦沙减沙有较显著的正效应、对涵养水源和保育土壤有显著的负效应；相对地，垂直结构对两个功能因子的影响较小，且呈负效应。④涵养水源和保育土壤、拦沙减沙两个功能因子之间具有一定的协同效应。

2.3.2 潜变量与观测变量之间的复合关系 潜变量与观测变量之间的直接影响由模型拟合的路径系数体现（图3）。影响地形因子的观测变量中，坡度表现为正影响，路径系数为0.90；坡向和海拔表现为负影响，路径系数分别为-0.76和-0.95。除郁闭度（路径系数为-0.21）以外，观测变量对水平结构的影响均为正；其中林分密度和林木竞争指数，路径系数分别为0.98和0.97，远大于其他因素。影响垂直结构的树高、叶面积指数、林层指数，均表现为正影响，路径系数分别为0.96、0.28和0.78。影响涵养水源和保育土壤的变量中，林冠截留、枯

落物持水、土壤入渗率和土壤含水量为正影响，土壤最大持水量、有机质和全氮为负影响；林冠截留率的路径系数为0.69，影响较显著。影响拦沙减沙的产流量、产沙量均为较强的正影响，路径系数分别为0.97和0.91。

模型计算得到的标准化影响系数表征潜变量与观测变量之间的直接或间接影响效果。①地形因子对坡度、坡向和海拔有较强的直接影响，总影响系数分别为0.971、-0.836和-0.764；对产流量和产沙量的间接影响效果也较显著，总影响系数分别为0.624和0.568。②水平结构对林分密度、林木竞争指数和林冠截留率的影响大，总影响系数分别为-0.987、-0.956和-0.715，对产流量、产沙量的间接影响也较大，影响系数分别为0.537和0.503。③垂直结构对树高、林层指数的影响效果显著，影响系数分别为-0.919和0.793，对产流量、产沙量和叶面积指数等有一定程度的影响。④拦沙减沙对产流量、产沙量的影响效果非常显著，分别达到0.986和0.961。⑤涵养水源和保育土壤对林冠截留的影响效果显著，达到0.731；对未分解层枯落物持水率、土壤入渗率、土壤含水量、海拔、坡向和坡度等也有一定程度的影响。

3 讨论

3.1 地形因子通过影响垂直结构间接影响功能

坡度、海拔等地形因素不同程度地影响胸径、树高、林分密度等结构因子及其动态变化。以往研

究大多未区分水平、垂直方向上林分结构的不同影响, 只提及地形对林分结构的影响存在显著交互或差异^[17], 其中包括森林能适应不同海拔的不同温度和其他条件等^[18]; 地形与垂直结构共同作用于幼树更新^[19]。而林分结构细分为水平结构和垂直结构后, 发现地形与垂直结构的关系更加密切, 直接作用的路径系数为 0.13, 与水平结构无直接作用。地形因子不仅直接影响水土保持功能, 还通过垂直结构间接影响该功能。地形改变(如坡度增大)对林分结构与水土保持功能的相互影响过程产生间接的负向效应。

3.2 水平结构和垂直结构具有协同作用

水平结构和垂直结构属于林分结构的两个维度, 但它们之间的关系很少量化。学者通过胸径-树高曲线研究二者复杂作用^[20], 也运用景观生态学理论探索林分内的空间异质性^[21]。在前人研究的基础上, 发现油松林的水平结构和垂直结构存在正影响, 路径系数为 0.16, 总影响效应为 0.154。水平结构对树高、林层指数和叶面积指数等指标有一定的间接影响, 影响系数分别为-0.152、0.144 和 0.043。可见油松林分的水平和垂直结构在影响水土保持功能的同时, 林分内部两个方向也存在一定的协同发展和相互促进。

3.3 水平结构显著影响水土保持功能

林分水平结构与功能的相互作用的研究较多, 如不同林冠类型的土壤氮、磷等存在差异^[22-23], 林分结构改造引起土壤水源涵养功能的动态变化等^[24], 主要关注单一或少数结构与功能变量的关系。本研究侧重于多因素复合作用, 发现水平结构对林冠截留、产流量和产沙量的影响最大, 其影响效应系数 >0.5 。其中, 林分密度和林木竞争指数的路径系数 >0.9 , 影响系数绝对值 >0.95 , 说明这两个因子主导水平结构, 重点影响水土保持功能, 调整二者之一, 可有效调控林分水平结构及其发挥的水土保持功能。

水平结构定向调整不同程度地影响涵养水源和保育土壤、拦沙减沙效果。林分密度和林木竞争减小, 其他水平结构指标增大, 以林冠截留为代表的涵养水源和保育土壤功能将有所增加, 但林下的产流量和产沙量会相应增加, 此时拦沙减沙功能有所削弱, 前者的改善效果大于后者的削弱效果; 反之, 林分密度和林木竞争增大, 其他水平结构指标

酌情改变, 以林冠截留为代表的涵养水源和保育土壤功能将减弱, 而林下的产流量和产沙量相应减少, 拦沙减沙功能提高, 前者的削弱效果大于后者的改善效果。这与以往优化水平结构可改善林冠截留的研究一致, 而林分密度减小后确实会增加油松林的产流产沙, 对其拦沙减沙功能产生不利影响, 凸显出结构方程研究水平结构与多项水土保持功能关系的优越性。

3.4 垂直结构对水土保持功能具有一定的负影响

林冠的组成和分层是典型的垂直结构指标, 不同程度地影响水土保持功能, 以林层指数、叶面积指数为代表^[24-25], 其对垂直结构的复合作用量化后发现, 树高、林层指数的影响较显著, 直接路径系数分别为 0.96 和 0.78。垂直结构与涵养水源和保育土壤、拦沙减沙之间的路径系数分别为-0.08 和 -0.42, 其中与产流量和产沙量的总影响效应系数相对较高, 分别为-0.318 和-0.274。可见, 叶面积指数或林层指数增大、垂直结构优化时, 产流量和产沙量相应减小、拦沙减沙功能增强, 但涵养水源和保育土壤功能略微削弱, 且拦沙减沙增强程度大于涵养水源和保育土壤削弱程度, 水土保持功能总体上有所提升。

3.5 功能导向的林分结构优化措施配置建议

林分结构优化方法颇为成熟, 如疏伐、优化结构^[26]、林分规划和微地形改造^[27]。而从精准管理角度改进以往的植被建设和抚育方法^[12], 找出对提高油松林的水土保持效果明显的林分密度、林木竞争指数和林层指数等因子, 设计量化、可操作的油松林分结构优化措施, 可定向、定量改善水土保持功能。

油松林的林分结构与水土保持功能的多因子作用过程中, 水平和垂直方向上的结构对功能作用显著, 其中水平结构对涵养水源和保育土壤的影响较强, 垂直结构则对拦沙减沙影响更为突出。研究结果区分了水平、垂直两个方向上的林分结构指标在功能上的不同影响力, 具有定向、定量的特点。对于需要改造的油松林, 针对上述敏感因素采用疏伐、密植等适度的森林管理技术进行定量调整, 将林分密度和郁闭度分别保持在 1 100~1 400 株·hm⁻² 和 0.7 左右的范围, 幼树更新、林下灌草多样性均较稳定, 枯落物丰富、易分解。适当补植刺槐树种增强混交度、将针阔比稳定在 7 : 3 至 6 : 4 之间,

形成结构适宜、功能优良的异龄复层混交林,使林分结构逐步稳定、优化,森林健康程度提升,充分发挥水土保持功能。

4 结论

本研究是结构方程在林业生态与水土保持领域的应用,研究发现油松林的水平结构是对涵养水源和保育土壤、拦沙减沙功能影响最为显著的潜变量,其对应的观测变量中,林分密度和林木竞争指数是主导水平结构的因子,且较易调控;受结构因素影响较大的敏感功能因子为产流量、产沙量和林冠截留率,为揭示油松林分结构和功能之间的多因子复合关系提供参考。研究提出黄土高原地区油松林的适宜因子组合及阈值,可用于指导林分结构的定量、定向优化措施配置,建成各类生态、经济和社会效益高效的、利于提高当地人民生活水平的水土保持林,实现长远可持续发展的森林经营。

参考文献:

- [1] 原翠萍,李淑芹,雷启祥,等.黄土丘陵沟壑区治理与非治理对比小流域侵蚀产流比较研究[J].中国农业大学学报,2010,15(6):95-101.
- [2] 王力,李裕元,李秧秧.黄土高原生态环境的恶化及其对策[J].自然资源学报,2004,19(2):263-271.
- [3] 张文辉,刘国彬.黄土高原植被生态恢复评价、问题与对策[J].林业科学,2007,43(1):102-106.
- [4] 张超,王治国,凌峰,等.水土保持功能评价及其在水土保持区划中的应用[J].中国水土保持科学,2016,14(5):90-99.
- [5] 洪宜聪,王启其,黄健韬,等.闽楠人工林土壤肥力及其涵养水源功能[J].东北林业大学学报,2019,47(3):68-73.
- [6] 惠刚盈,胡艳波,赵中华.结构化森林经营研究进展[J].林业科学研究,2018,31(1):85-93.
- [7] 毕华兴,李笑吟,李俊,等.黄土区基于土壤水平衡的林草覆被率研究[J].林业科学,2007,43(4):17-23.
- [8] Grace J B, Michael A T, Smith M D, et al. Does species diversity limit productivity in natural grassland communities?[J]. Ecology Letters, 2007, 10(8): 680-689.
- [9] Grace J B, Anderson T M, Olff H, et al. On the specification of structural equation models for ecological systems[J]. Ecological Monographs, 2010, 80(1): 67-87.
- [10] Mcleod E M, Banerjee S, Bork E W, et al. Structural equation modeling reveals complex relationships in mixed forage swards[J]. Crop Protection, 2015, 78: 106-113.
- [11] Capmourteres V, Anand M. Assessing ecological integrity: A multi-

scale structural and functional approach using Structural Equation Modeling[J]. Ecological Indicators, 2016, 71: 258-269.

- [12] Wei X, Bi H X, Liang W J, et al. Relationship between soil characteristics and stand structure of *Robinia pseudoacacia* L. and *Pinus tabulaeformis* Carr. mixed plantations in the Caijiachuan watershed: An application of structural equation modeling[J]. Forests, 2018, 9(3): 1-15.
- [13] 胡顺军,田长彦,宋郁东,等.土壤渗透系数测定与计算方法的探讨[J].农业工程学报,2011,27(5):68-72.
- [14] Bollen K A. Structural Equations with Latent Variables[M]. John Wiley & Sons, New York, 1989.
- [15] 侯杰泰,成子娟.结构方程模型的应用及分析策略[J].心理学探新,1999,19(69):54-59.
- [16] 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[J].北京林业大学学报,2014,36(5):7-12.
- [17] Eshetu Y, Mike S, Mesele N, et al. Influence of topographic aspect on floristic diversity, structure and treeline of afro-montane cloud forests in the Bale Mountains, Ethiopia[J]. Journal of Forestry Research, 2015, 26(4): 919-931.
- [18] Koichi T, Satomi M. Morphological variations of the *Solidia govirgaurea* L. complex along an elevational gradient on Mt Norikura, central Japan[J]. Plant Species Biology, 2017, 32(3): 238-246.
- [19] 黄萍,刘艳红.北京松山油松林分结构和地形对幼苗更新的影响[J].生态学杂志,2018,37(4):1003-1009.
- [20] 王千雪,万盼,刘灵,等.兴安落叶松天然林林木直径与树高分布的分层特征[J].林业科学研究,2018,31(5):82-90.
- [21] 刘奉强,张会儒,姜慧泉.林分空间结构异质质量化分析研究[J].林业资源管理,2010(1):33-38.
- [22] Ou Z Y, Cao J Z, Shen W H, et al. Understory flora in relation to canopy structure, soil nutrients, and gap light regime: A case study in southern China[J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2015, 24(6): 2559-2568.
- [23] 高成杰,唐国勇,刘方炎,等.林分结构调整对云南松次生林生长和土壤性质的影响[J].林业科学研究,2017,30(5):841-847.
- [24] 胡园杰,李际平,曹小玉,等.杉木林改造后空间结构与土壤水源涵养功能动态变化及其关系[J].中南林业科技大学学报,2018,38(11):103-109.
- [25] 刘泽彬,王彦辉,田奥,等.六盘山半湿润区坡面华北落叶松林冠层截留的时空变化及空间尺度效应[J].水土保持学报,2017,31(5):231-239.
- [26] Ahmad B, Wang Y H, Hao J, et al. Optimizing stand structure for trade-offs between overstory timber production and understory plant diversity: A case-study of a larch plantation in northwest China[J]. Land Degradation & Development, 2018, 29(9): 2998-3008.
- [27] Do T V, Sato T, Saito S, et al. Effects of micro-topographies on stand structure and tree species diversity in an old-growth evergreen broad-leaved forest, Southwestern Japan[J]. Global Ecology and Servation, 2015, 4(C): 185-196.

Multifactor Relationships between Stand Structure and Soil and Water Conservation Function of *Pinus tabulaeformis* Plantations in the Loess Plateau of Western Shanxi

WEI Xi¹, LIANG Wen-jun¹, BI Hua-xing^{2,3,4,5}, HOU Gui-rong^{2,3}

(1. College of Forestry, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, Shanxi, China; 2. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 3. Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration on Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 4. Beijing Collaborative Innovation Center for Eco-Environmental Improvement with Forestry and Fruit Trees, Beijing 102206, China; 5. Jixian Forest Ecosystem Studies of National Observation and Research Station, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: [Objective] To study quantitatively the multifactor relationships between the stand structure and soil and water conservation function of *Pinus tabulaeformis* plantation in the Loess Plateau of western Shanxi, so as to provide references for vegetation restoration in the Loess Plateau. [Method] Sixteen standard sample plots of 20 m×20 m, which were further divided into sixty-four 10 m×10 m quadrats, were established for a tree census in Caijiachuan watershed of the Loess Plateau, Shanxi Province, China. The age of these trees was about 18 years. Based on the observational and experimental data, a topography-structure-function model was built using a structural equation modeling (SEM) approach. The latent variables were the topographical factors, horizontal structure, vertical structure, soil and water conservation, and sediment reduction. [Result] The results indicated that the horizontal structure of the *P. tabulaeformis* stand was the most obvious latent variable, which was expressed in the path coefficients corresponding to soil and water conservation ($pc=-0.93$) and sediment reduction ($pc=0.79$), respectively; the stand density and tree competition index were the major drivers of the structure, with path coefficients of 0.98 and 0.97 and influence coefficients of -0.987 and -0.956 . These factors were easily regulated. The sensitive functional factors that were greatly affected by structural factors were the runoff yield, sediment yield and canopy interception rate. The path coefficients were 0.97, 0.91 and 0.69, respectively and the total impact coefficients were 0.986, 0.961 and 0.731, respectively. Otherwise, the topographic factor affected soil and water conservation function through affecting the stand structure. should be kept stable within the range from 1 100 to 1 400 trees/hm². Adjusting the stand density or tree competition index can effectively provide good benefits for soil and water conservation and sediment reduction. Multi-factor synergy can improve the vegetation quality and further promote the soil and water conservation efficiency in the ecologically significant loess area.

Keywords: *Pinus tabulaeformis*; stand structure; soil and water conservation; structural equation model

(责任编辑: 彭南轩)