

基于结构方程模型的大兴安岭北部天然林林下草本物种多样性驱动力分析

王子瑞¹, 妙文豪³, 呼日查¹, 高明龙¹, 刘磊¹, 李岩², 付宇¹, 萨如拉^{1*}

(1. 内蒙古农业大学 林学院, 内蒙古 呼和浩特 010019; 2. 内蒙古农业大学 农学院, 内蒙古 呼和浩特 010019;

3. 北京林业大学 生态与自然保护学院, 北京 100083)

摘要: 林下草本层植物在森林群落结构稳定性的调节和生态功能的发挥上具有非常重要的作用, 是森林生态系统不可或缺的组成部分。以大兴安岭北部天然林为研究对象, 运用结构方程模型探究气候、土壤和林分空间结构等环境因子对林下草本物种多样性的相对重要性, 并探讨影响因子之间存在的复杂关系对林下草本物种多样性的影响机理。结果表明, 从整体上来看, 气候、土壤和林分空间结构对林下草本物种多样性均有较强的影响作用, 其中气候的影响强度最大, 土壤次之, 林分空间结构的影响作用最小。从中介效应上来看, 气候变化会导致土壤和林分空间结构发生变化, 进而影响林下草本物种多样性, 除此之外, 还发现林分空间结构的改变, 也会导致土壤性质发生变化, 进而影响林下草本物种多样性。从影响系数上来看, 影响林下草本物种多样性的驱动因子因各影响因素的不同而存在差异, 年均降水、有机碳含量、混交度是分别表征气候因子、土壤因子、林分空间结构影响林下草本物种多样性的主导因子。在大兴安岭林区开展林下草本物种多样性保护及修复工作时, 可适当调整混交度, 维持合理的林分结构, 并综合考虑改善土壤养分的森林经营方案。

关键词: 草本物种多样性; 结构方程模型; 驱动力分析; 林分空间结构; 大兴安岭北部

中图分类号: S757.9

文献标志码: A

文章编号: 1001-7461(2024)02-0013-08

Driving Forces of Herbaceous Species Diversity in Natural Forests in Northern Greater Khingan Mountains Based on Structural Equation Model

WANG Zi-rui¹, MIAO Wen-hao³, HU Ri-cha¹, GAO Ming-long¹, LIU Lei¹, LI Yan², FU Yu¹, SA Ru-la^{1*}

(1. College of Forestry, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010019, Inner Mongolia, China;

2. College of Agronomy, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010019, Inner Mongolia, China;

3. School of Ecology and Nature Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: Understory herbaceous plants play a very important role in the regulation of forest community structure stability and ecological function, and are an indispensable part of forest ecosystem. In this paper, the natural forests occurring in the northern Greater Khingan Mountains were taken as the research objects, the structural equation model was used to study the relative importance of factors such as climate, soil and stand spatial structure on the diversity of understory herbaceous species, and the complex relationship between the influencing factors was discussed. Climate factors, soil factors and stand spatial structure had a strong effect on the diversity of understory herbaceous species. Among them, the influence of climate factors was the largest, followed by soil factors, and the stand spatial structure. From the perspective of mediating effect, climate change will lead to changes in soil and stand spatial structure, which will affect the diversity of understory herbaceous species. In addition, changes in stand spatial structure will also lead to

收稿日期: 2023-03-23 修回日期: 2023-08-16

基金项目: 内蒙古自治区科技计划项目“大兴安岭白桦次生林生态修复关键技术研究” (2020GG0067)。

第一作者: 王子瑞。研究方向: 森林可持续经营。E-mail: 2607469995@qq.com

* 通信作者: 萨如拉, 副教授。研究方向: 森林可持续经营。E-mail: sarula213@163.com

changes in soil properties, which will affect the diversity of understory herbaceous species. From the perspective of influence coefficient, the dominant factors affecting the diversity of understory herbaceous species are different due to different influencing factors. Annual average precipitation, organic carbon content and mingling degree are the dominant factors that characterize the influence of climatic factors, soil factors and stand spatial structure on the diversity of understory herbaceous species. When carrying out the protection and restoration of understory herbaceous species diversity in the Greater Khingan Mountains forest area, the mingling degree can be appropriately adjusted to maintain a reasonable stand structure, and the forest management plan for improving soil nutrients can be comprehensively considered.

Key words: herbaceous species diversity; structural equation model; driving force analysis; stand spatial structure; northern Greater Khingan Mountains

物种多样性是植被群落最基本的特征,森林物种多样性能够直接影响森林生态系统的结构稳定性和复杂性,对维持森林生态系统功能和提高生态系统应对环境变化的能力具有重大意义^[1]。林下草本森林生态系统的重要组成部分,对森林生态系统保持水土、提高水源涵养能力和维护土壤养分循环等方面起着关键作用^[2]。然而林下草本物种多样性在很大程度上受环境因子和林分因子的影响^[3],这是因为环境因子和林分因子直接决定林分所处环境的水热因子、土壤养分和林下光照的综合差异,进而对林下草本物种多样性产生影响。但是环境因子和林分因子所包含的指标众多,无法确定哪一种影响因子对其影响最大,如何影响,目前还是不清楚,尚需进一步研究。因此研究环境因子和林分因子对林下草本物种多样性影响具有重要的理论意义。

目前有诸多学者已经针对影响林下植被物种多样性的影响因素和驱动力展开了研究,但大多数学者大都集中于单影响因子与林下植被的关系进行研究,没有考虑多个影响因子对林下植被物种多样性的相对重要性进行探究。杨崇曜等^[4]基于内蒙古西部自然植被为研究对象,利用 Pearson 相关性来确定不同环境因子和群落物种多样性之间关系和使用多元回归分析确定群落物种多样性的影响因子。黄润霞等^[5]利用 Spearman 非参数相关分析和随机森林分析方法分析和预测亚热带五种森林类型林下植物物种多样性与各环境因子的互相关系和重要性。这些方法无法考量自变量之间的关系以及他们对因变量整体的综合影响,没有一个直观的路径关系来表达指标之间的复杂关系^[6-7]。因此采用一个合理的科学方法对探讨林下植被与各环境因子之间的关系是至关重要的。本文采用结构方程模型,来研究多个影响因子对林下草本物种多样性之间的影响,并对其作用路径进行评估^[8]。另外,刘亚栋等^[9]基于北京地区油松人工林不同演替类型林分为研究对象,利用单因素方差分析和 Pearson 相关性分析来

研究 3 种不同演替类型林分空间结构、林下植被和土壤水分的变化规律及其互相作用关系。刘雄等^[10]基于华西雨屏区天然常绿阔叶林为研究对象,利用方差分析法和多元回归分析法得出了降雨量变化会通过影响土壤理化性质改变来土壤酶活性,进而影响土壤有机碳含量。前人研究多集中于影响因子对林下植被的直接影响,没有综合考量影响因子之间存在的复杂关系对林下植被物种多样性的影响。本研究以大兴安岭北部天然林为研究对象,探究气候因子、土壤因子和林分空间结构对林下草本物种多样性的相对重要性以及影响过程,为维持和改善林下草本物种多样性提供合理的建议和经营措施。

1 研究地概况

研究区位于大兴安岭北部原始林区,121°12′—127°00′E,50°10′—53°33′N,属于我国典型的寒温带季风气候,春季多风干燥,夏季短暂湿热,秋季降温有霜冻,冬季漫长严寒,年均气温-5.4℃,年均降水量 200~500 mm,海拔 500~900 m,坡度 5°~20°。大兴安岭地区主要土壤类型由棕色针叶林土、暗棕壤、草甸土、沼泽土、石灰土组成。该地主要的乔木树种为兴安落叶松(*Larix gmelinii*)、白桦(*Betula platyphylla*)、山杨(*Populus davidiana*)等,林下以越橘(*Vaccinium vitis-idaea*)、杜香(*Rhododendron tomentosum*)和草类为主。

2 研究方法 with 数据来源

2.1 样地设置与调查

在全面踏查的基础上,于 2017 年在大兴安岭林区选择典型林分,采用机械抽样和公里网格的方法设置样地 75 块,记录样地 GPS 坐标、坡度、坡向、坡位、海拔等因子。样地面积为 30 m×30 m,在样地范围内以 5 cm 为起测胸径,逐株测量其树种、胸径、树高、冠幅等。在样地对角处设置 2 个 10 m×10 m 的灌木样方,调查灌木的物种、株数、相对盖度、高度

和地径等。在灌木样方中的3个角分别布置3个1 m×1 m的草本样方对草本植物的物种、株数、相对盖度、高度等进行调查(图1)。

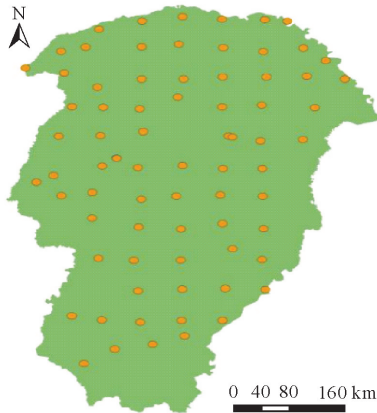


图1 样地分布

Fig. 1 Sample land distribution map

2.2 数据来源

2.2.1 土壤数据 土壤数通过对样地采集的土壤样本进行实验室分析获得。用环刀和小铝盒从布设样地内分层取土,采用常规方法测定土壤指标,包括铵态氮、速效钾、土壤pH、有机碳含量、土层深度。

2.2.2 气候数据 气候数据于世界气候数据库(www.worldclim.org)获取,利用样地经纬度坐标读取5个气候数据,包括年均温度、年均降水、蒸散量、湿度、最暖月均温。

2.2.3 林分空间结构数据 采用混交度、角尺度、开敞度来分析林分空间结构。以此来反映林分的隔离程度、分布格局和透光条件^[11-13]。

2.2.4 林下草本物种多样性数据 采用多样性指数、均匀度指数、物种丰富度(S)来分析林下草本物种多样性水平。

Shannon-winner 指数

$$H = -\sum_{i=1}^S p_i \ln p_i \quad (1)$$

Pielou 指数

$$J_H = (-\sum_{i=1}^S p_i \ln p_i) / \ln S \quad (2)$$

simpson 指数

$$J_D = (1 - \sum_{i=1}^S P_i^2) / (1 - \frac{1}{S}) \quad (3)$$

式中: P_i 为草本第*i*种的个体所占所有种的个体总数的比例; S 为所在样地内草本物种种类的总数。

2.2.5 研究方法 结构方程模型在结构上,可以根据变量之间的关系分为测量模型和结构模型2部分^[14-15]。

$$X = \Lambda_x \xi + \delta \quad (4)$$

$$Y = \Lambda_y \eta + \epsilon \quad (5)$$

$$\eta = B\gamma + \Gamma\xi + \zeta \quad (6)$$

式中: X 为外因测量变量向量; ξ 为外因潜变量; Λ_x 为 X 在 ξ 上的因子荷载矩阵^[16]。 Y 为内因测量变量; η 为内因潜变量; Λ_y 为 Y 在 η 上的因子荷载矩阵; δ, ϵ 为测量误差^[17]; B 为表示内生潜变量间的回归系数; Γ 表示外因潜变量对内因潜变量之间的回归系数; ζ 为随机干扰项^[18]。

为避免原始数据中存在多重共线性的变量,对气候因子、土壤因子、林分空间结构和林下草本物种多样性的数据进行Vif和Pearson相关性分析。

3 结果与分析

3.1 林下草本物种多样性的计算结果与分异特征

由表1可以看出,大兴安岭北部地区天然林95块样地中角尺度、开敞度和混交度的变异系数较小,分别为11.41、10.62和12.91,说明其数据离散程度较小。气候因子中蒸散量、土壤因子中有机碳含量和土层深度和林下草本物种多样性中草本多样性、草本优势度、草本丰富度的变化较大,变异系数分别为45.88、44.94、48.59、48.18、48.04和48.77,说明其数据离散程度较大,分布较不均匀。

3.2 建模数据信效度检验

如前文所述,本研究采用SPSS 23.0软件的克隆巴哈系数和KMO检验对数据进行信效度检验。由表2可知,气候变量、土壤变量、林分空间结构变量及林下草本物种多样性变量的克隆巴哈系数分别为0.927、0.968、0.961和0.926,KMO检验系数分别为0.791、0.677、0.768和0.720。4个变量的克隆巴哈系数和KMO检验系数高于可接受的最低值^[19],数据通过信效度检验,可进行后续研究使用^[20]。

3.3 模型适配度检验

本研究选取了卡方自由比 χ^2/df 、比较拟合指数CFI、非范拟合指数TLI、近似误差均方根RMSEA和标准化残差均方根SRMR等指标来衡量模型的拟合情况。根据孙连荣^[21]的建议,卡方自由比越低越好,CFI和TLI的适用标准为 >0.90 ,RMSEA与SRMR的最低接受标准为 <0.09 。采用Mplus 8.0软件构建了结构方程模型,通过表3可知,模型拟合良好,可继续下一步研究。

3.4 气候因子、土壤因子和林分空间结构对林下草本物种多样性的影响

由图2可知,气候因子、土壤因子和林分空间结构对林下草本物种多样性的路径系数分别为0.270、0.244和0.240, $P < 0.05$,可以明显地看出气候因子是影响林下草本物种多样性的主要影响因素,并且3个要素对林下草本物种多样性都存在显著的影响。

表 1 林下草本物种多样性影响因子基本情况

Table 1 Basic situation of understory herb species influencing factors						
影响因子	所有变量	均值±标准误差	最小值	最大值	标准差	变异系数
林分空间结构	角尺度	0.54±0.01	0.39	0.63	0.12	11.41
	开敞度	0.35±0.009	0.20	0.68	0.07	10.62
	混交度	0.34±0.020	0.00	0.64	0.17	12.91
气候因子	湿度	4.50±0.026	4.07	9.08	0.21	14.60
	年均降水	903.03±20.88	294.63	417.98	172.15	19.32
	蒸散量	527.06±23.23	416.89	660.30	191.65	45.88
土壤因子	土壤 pH	6.32±0.09	4.70	7.70	0.77	12.16
	铵态氮	23.66±0.75	1.54	35.27	6.15	27.40
	有机碳含量	1.53±0.08	0.56	2.45	0.69	44.94
	土层深度	57.93±4.31	20.00	130.00	35.54	48.59
	速效钾	118.14±5.28	30.45	264.10	43.56	35.41
林下草本物种多样性	草本多样性	0.58±0.06	0.35	1.76	0.49	48.18
	草本均匀度	0.35±0.02	0.17	0.91	0.18	39.20
	草本优势度	0.58±0.04	0.22	1.37	0.29	48.04
	草本丰富度	3.38±0.26	1.00	6.00	2.14	48.77

表 2 数据信效度检验

Table 2 Data reliability and validity test			
变量	可测变量 个数	克隆巴哈 系数	KMO 检验
气候因子	3	0.927	0.755
土壤因子	5	0.968	0.872
林分空间结构	3	0.961	0.745
林下草本物种多样性	4	0.926	0.852

表 3 模型适配度检验

Table 3 Model fit test		
拟合指标	临界值	当前值
χ^2		88.606
χ^2/df	<3	1.055
RMSEA	<0.09	0.028
SRMR	<0.09	0.041
TLI	>0.9	0.995
CFI	>0.9	0.996

3.5 驱动因素分析

为明确林下草本物种多样性的影响因素,本研究利用结构方程模型的路径系数来确定林下草本物种多样性的驱动因素。由表 4 可知,气候因子对林下草本物种多样性的载荷量最大,为 0.270,说明气候因子是影响林下草本物种多样性的主要因子。年均降水对气候因子的载荷量最大,为 0.962,说明年均降水是表征气候因子影响林下草本物种多样性的主导因子;有机碳含量对土壤因子的载荷量最大,为 0.940,说明有机碳含量是表征土壤因子影响林下草本物种多样性的主导因子;混交度对林分空间结构的载荷量最大,为 0.981,说明混交度是表征林分空间结构影响林下草本物种多样性的主导因子。

表 4 驱动因素分析

Table 4 Driving factors analysis			
二阶影响因子	影响系数	一阶影响因子	影响系数
气候因子	0.270	最暖月均温	0.853
		年均降水	0.962
		蒸散量	0.915
土壤因子	0.244	土层深度	0.922
		铵态氮	0.930
		速效钾	0.928
		有机碳含量	0.940
		土壤 pH	0.912
林分空间结构	0.240	角尺度	0.971
		混交度	0.981
		开敞度	0.907

由表 5 可知,根据 Edwards 等^[22]的建议,基于 Bootstrap 方法抽样 1 000 次,利用 Mplus 8.0 软件计算了矫正偏差的中介效应的 95%置信区间来检验中介效应。若置信区间不包含 0,则中介效应显著^[23]。说明土壤因子在气候因子与林下草本物种多样性的关系间的中介作用;林分空间结构变量在气候变量对林下草本物种多样性变量影响中起到中介作用;土壤变量和林分空间结构变量在气候变量对物种多样性变量影响中起到链式中介作用。

4 讨论

林下草本层植物在森林群落结构稳定性的调节和生态功能的发挥上具有非常重要的作用,是森林生态系统不可或缺的组成部分^[24]。因此,对林下草本物种多样性变化起主要影响的环境变量进行探究,有助于森林生态系统能够良好地发挥其生态功能和服务功能^[25]。大量研究表明,林分结构、气候

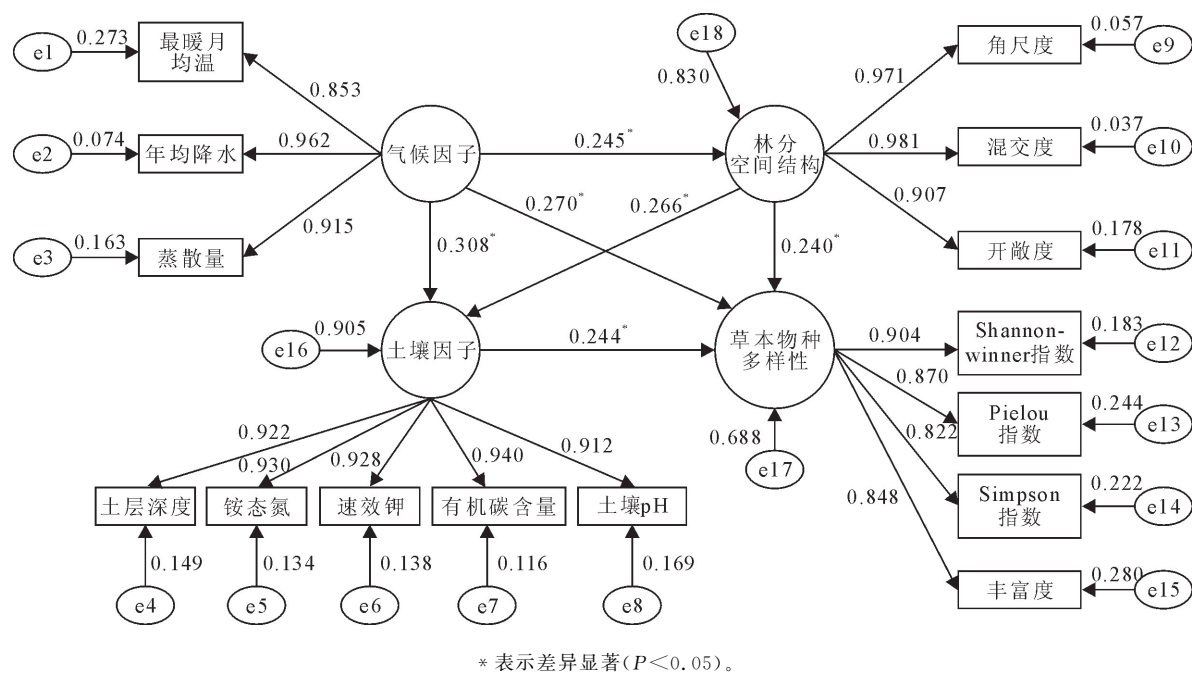


图 2 林下草本物种多样性路径

Fig. 2 Understory herb species diversity path diagram

表 5 基于 Bootstrap 方法 1 000 次抽样的中介效应检验

Table 5 Mediation effect test based on Bootstrap method 1 000 times sampling

中介路径	中介效应系数	标准差	95% 置信区间
气候因子-土壤因子-林下草本物种多样性	0.075 2	0.042	[0.009,0.197]
气候因子-林分空间结构-林下草本物种多样性	0.058 8	0.044	[0.000,0.197]
气候因子-林分空间结构-土壤因子-林下草本物种多样性	0.015 9	0.016	[0.000,0.080]

以及土壤特性等因素均会影响林下植被的生长,进而影响林下植被群落的多样性和空间分布^[26],因此,本研究以年均湿度、年均降水和蒸散量来表征气候;以土壤 pH、铵态氮、有机碳含量、土层深度和速效钾来表征土壤;以混交度、角尺度和开敞度来表征林分空间结构;探讨气候、土壤和林分空间结构对林下草本物种多样性的影响。

气候对林下草本物种多样性不仅存在直接影响,还通过影响土壤和林分空间结构进行间接影响。相关研究表明,锡林河流域^[27-28]物种丰富度和多样性与年降水量呈显著正相关关系,内蒙古西部地区^[4]研究发现蒸散量对群落物种多样性具有显著的影响。不同地区的研究结果共同表明,气候直接影响林下草本生长。一方面,林下植被随一定程度的降水增加可以进行更好的生长发育,能有效降低种间竞争,使得同一生境内可以存在更多的物种^[29]。然而也有相关研究发现了降水对林下植被产生了负

作用,如降水量过多时,会导致洪涝灾害发生,导致土壤缺氧和土壤退化,超过植被的生理受限极限,反而不利于林下植被的生长^[30]。另一方面,大兴安岭北部地区的蒸散量存在明显的纬向特征,表现出很大的地区差异性^[31],导致大兴安岭地区的物种分布存在很大的差异性,这是因为蒸散量反映的是植物所能获得的有效水分,在一定程度上限制了林下植被的热量和能量,进而影响着植被的生长和分布^[32]。进一步研究发现,气候变化会直接影响降水发生变化^[33],降水发生变化会影响土壤微生物活动所需的水分,影响土壤微生物活性,从而影响土壤呼吸速率^[34],进而影响土壤有机碳的生成^[35],土壤有机碳发生变化直接会影响土壤肥力进而影响林下草本物种多样性^[36]。

土壤因子对林下草本物种多样性具有显著的影响。沙威等^[37]研究发现植物群落的多样性指数与土壤中有机碳含量呈显著正相关,王蒙等^[38]研究发现自然植被的均匀性指数与土壤全氮元素呈显著相关,这些研究结果共同表示,土壤因子可以直接影响林下草本植被的生长和分布^[39-40]。一方面,土壤有机碳含量能够反映土壤肥力,可直接影响植物生长所必须的氮、磷元素的可利用率^[41],从而影响植物的生长和分布。另一方面,铵态氮作为植物可以直接从土壤吸收利用的有效氮^[42],研究中铵态氮作为土壤因子中可观测变量对林下物种多样性有影响,这与田佳歆^[43]提出土壤中存在适量的铵态氮会在一定程度上促进林下草本的生长的研究结论相一致^[44]。

但是有部分研究发现土壤有机碳和土壤氮元素与林下草本物种多样性无显著关系,这可能是由于地区之间的立地类型和树种存在差异所导致的^[45]。

林分空间结构对林下草本物种性存在直接影响和间接影响,董莉莉等^[45]研究发现林分混交度越大,垂直结构越复杂,更新幼苗的种类和 Shannon-winner 多样性越高,这些研究结果共同表示,林分空间结构能够引起林下草本植物生长的微环境和分布格局发生变化^[46-47]。一方面,多树种构成的混交林可以在一定程度上降低物种间生态位竞争,从而减少林木之间的竞争程度^[48],为林下草本植物提供良好的生长养分^[49]。另一方面,角尺度和开敞度能够直接影响林窗的大小和位置,而且还能够控制林下有效光的强度,对林内光、热、水、肥有再分配的作用,在一定程度上影响林下草本的种类、数量及其分布情况,特别是对喜光树种,随着光照强度的变化,其生长发育也会随之变化,进而影响林下草本的物种多样性^[50-52]。林分空间结构同时对土壤养分含量具有显著的影响^[53-54],这是由于多树种混交的林分树冠重叠,容易产生较多的地表凋落物,加快了枯落物分解的速度,更容易累积大量的有机质含量^[55]。除此之外,混交林分根系在土壤中错综复杂,互相穿插,这种情况大大促进了土壤通气性,使得土壤微生物活动加剧,促进了土壤养分的循环和利用,从而极大地促进了植被的生长^[56-57]。

5 结论

对于林下草本物种多样性而言,气候因子、土壤因子和林分空间结构对其有着显著的影响作用,但三者对林下草本物种多样性的影响程度存在一定的差异,从整体上来看,气候因子、土壤因子和林分空间结构对林下草本物种多样性均有较强的影响作用;其中气候因子的影响强度最大,土壤因子次之,林分空间结构的影响作用最小。从中介效应上来看,气候变化会导致土壤和林分空间结构发生变化,进而影响林下草本物种多样性,除此之外,还发现林分空间结构的改变也会通过土壤变量间接影响林下草本物种多样性。由于气候因子和土壤因子很难通过人为手段来进行调控,然而,改变林分空间结构是提高林下草本物种多样性的关键手段之一。在本研究中发现,混交度对林下草本物种多样性有较大的影响,因此日后在森林经营工作中可通过补植适当数量的阔叶树增加林分混交度,形成复杂的复层阔混交林,同时在选择树种时应科学选种,优先选择乡土树种,使得林下草本物种多样性整体水平更加稳定。

参考文献:

- [1] LOREAU M, NAEEM S, INCHAUSTI P, *et al.* Biodiversity and ecosystem functioning: current knowledge and future challenges[J]. *Science*, 2001, 294: 804-808.
- [2] GILLIAM F S, TURRIL N L, ADAMS M B. Herbaceous-layer and overstory species in clear-cut and mature central appalachian hardwood forests[J]. *Ecological Applications*, 1995, 5 (4): 947-955.
- [3] SANDER J, WARDELL-JOHNSON G. Impacts of soil fertility on species and phylogenetic turnover in the high-rainfall zone of the Southwest Australian global biodiversity hotspot[J]. *Plant Soil*, 2011, 345: 103-124.
- [4] 杨崇曜, 李恩贵, 陈惠颖, 等. 内蒙古西部自然植被的物种多样性及其影响因素[J]. *生物多样性*, 2017, 25(12): 1303-1312.
YANG C Y, LI A G, CHEN H Y, *et al.* Biodiversity of natural vegetation and influencing factors in western Inner Mongolia[J]. *Biodiversity Science*, 2017, 25(12): 1303-1312. (in Chinese)
- [5] 黄润霞, 徐明锋, 刘婷, 等. 亚热带 5 种森林类型林下植物物种多样性及其环境解释[J]. *西南林业大学学报*, 2020, 40(2): 53-62.
HUANG Y X, XU M F, LIU T, *et al.* Environmental interpretation and species diversity of understory vegetation in 5 subtropical forest types[J]. *Journal of Southwest Forestry University*, 2020, 40(2): 53-62. (in Chinese)
- [6] 袁帅, 付和平, 武晓东, 等. 基于结构方程模型分析荒漠啮齿动物优势种对不同放牧干扰的响应[J]. *生态学报*, 2017, 37(14): 4795-4806.
YUAN S, FU H P, WU X D, *et al.* Response of dominant desert rodent species to grazing disturbances: a structural equation modeling analysis[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(14): 4795-4806. (in Chinese)
- [7] 温纯, 金光泽. 功能多样性对典型阔叶红松林生产力的影响[J]. *植物生态学报*, 2019, 43(2): 94-106.
WEN C, JIN G Z. Effects of functional diversity on productivity in a typical mixed broadleaved-Korean pine forest[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2019, 43(2): 94-106. (in Chinese)
- [8] GRACE J B, ALLAIN L, ALLEN C. Factors associated with plant species richness in a coastal tall-grass prairie[J]. *Journal of Vegetation Science*, 2000, 11(3): 443-452.
- [9] 刘亚栋, 王晓霞, 和璐璐, 等. 北京地区油松人工林不同演替类型空间结构对林下植被及土壤的影响[J]. *生态学报*, 2023, 43(5): 1-12.
LIU Y D, WANG X X, HE L L, *et al.* Effects of spatial structure on understory vegetation and soil properties in *Pinus tabulaeformis* plantation of different succession types in Beijing[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(5): 1-12. (in Chinese)
- [10] 刘雄, 罗超, 向元彬, 等. 模拟降水量变化对华西雨屏区天然常绿阔叶林土壤酶活性的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2020, 26(3): 635-642.
LIU X, LUO C, XIANG Y B, *et al.* Effects of simulated precipitation changes on soil enzyme activities in a natural, evergreen, broad-leaf forest in the rainy area of Western China[J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2020, 26(3): 635-642. (in Chinese)
- [11] 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]. Forest Research, 2001(1): 23-27. (in Chinese)
- [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): 39-44.
- [13] 汪平, 贾黎明, 魏松坡, 等. 基于 Voronoi 图的侧柏游憩林空间结构分析[J]. 北京林业大学学报, 2013, 35(2): 39-44.
- WANG P, JIA L M, WEI S P, *et al.* Analysis of stand spatial structure of *Platycladus orientalis* recreational forest based on Voronoi diagram method[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2013, 35(2): 39-44. (in Chinese)
- [14] 俞立平, 潘云涛, 武夷山. 基于结构方程的学术期刊评价研究[J]. 情报学报, 2010, 29(1): 136-141.
- YU L P, PAN Y T, WU Y S. Research on academic journal evaluation based on structural equation modeling[J]. Journal of the China Society for Scientific, 2010, 29(1): 136-141. (in Chinese)
- [15] JONSSON M, WARDLE D A. Structural equation modelling reveals plant-community drivers of carbon storage in boreal forest ecosystems[J]. Biology Letters, 2010, 6: 116-119.
- [16] 吴嘉禹. 基于结构方程模型的私立医院消防安全绩效考核研究[D]. 成都: 西南科技大学, 2021.
- [17] 乌雅瀚, 铁牛, 刘洋. 气候变量对兴安落叶松林碳密度变化的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2022, 42(5): 133-142.
- WU Y H, TIE N, LIU Y. Effects of climate variables on carbon density in *Larix gmelinii* forests[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2022, 42(5): 133-142. (in Chinese)
- [18] 韩玉坤. 公共议题、转发行为与意识形态治理——基于 SEM 的微信用户实证研究[J]. 陕西行政学院学报, 2023, 37(1): 32-38.
- HAN Y K. Public issues, forwarding behavior and ideological governance——an empirical analysis of WeChat users based on SEM[J]. Journal of Shaanxi Academy of Governance, 2023, 37(1): 32-38. (in Chinese)
- [19] SUN W, CHOU C P, STACY A W, *et al.* SAS and SPSS macros to calculate standardized cronbach's alpha using the upper bound of the phi coefficient for dichotomous items[J]. Behavior Research Methods, 2007, 39(1): 71-81.
- [20] 王清麒, 袁文珊, 卿仕琦, 等. 国槐古树健康评价模型的构建及应用[J]. 西北林学院学报, 2023, 38(1): 115-122.
- WANG Q Q, YUAN W S, QING S Q, *et al.* Construction and application of health assessment model for old *Sophora japonica* Trees[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2023, 38(1): 115-122. (in Chinese)
- [21] 孙连荣. 结构方程模型(SEM)的原理与操作[J]. 宁波大学学报: 教育科学版, 2005, 27(2): 31-34.
- [22] EDWARDS J R, LAMBERT L S. Methods for integrating moderation and mediation: a general analytical framework using moderated path analysis[J]. Psychological Methods, 2007, 12: 1-22.
- [23] HAYES A. Introduction to mediation, moderation, and conditional process analysis[J]. Journal of Educational Measurement, 2013, 51(3): 335-337.
- [24] 杨玉凤, 武利玉, 马永林, 等. 不同类型侧柏人工林下草本层植物多样性及其生物量研究[J]. 西北林学院学报, 2023, 38(2): 61-68.
- YANG Y F, WU L Y, MA Y L, *et al.* Diversity and biomass of herbaceous layer plants under different types of *Platycladus orientalis* plantations[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2023, 38(2): 61-68. (in Chinese)
- [25] 朱光玉, 徐奇刚, 吕勇. 湖南栎类天然林林分空间结构对灌木物种多样性的影响[J]. 生态学报, 2018, 38(15): 5404-5412.
- ZHU G Y, XU Q G, LU Y. Effects of stand spatial structure on species diversity of shrubs in *Quercus* spp. natural secondary forests in Hunan Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(15): 5404-5412. (in Chinese)
- [26] SANDER J, WARDELL-JOHNSON G. Impacts of soil fertility on species and phylogenetic turnover in the high-rainfall zone of the Southwest Australian global biodiversity hotspot[J]. Plant Soil, 2011, 345: 103-124.
- [27] 刘先华, 李凌浩, 陈佐忠. 内蒙古锡林河流域植被多样性特点及其与气候因子的关系[J]. 植物生态学报, 1998, 22(5): 466-472.
- LIU X H, LI L H, CHEN Z Z. Characteristics of vegetation diversity in the Xilin River Basin and their responses to climatic factors[J]. Acta Phytocologica Sinica, 1998, 22, 466-472. (in Chinese)
- [28] 白永飞, 李凌浩, 王其兵, 等. 锡林河流域草原群落植物多样性和初级生产力沿水热梯度变化的样带研究[J]. 植物生态学报, 2000, 24(6): 667-673.
- BAI Y F, LI L H, WANG Q B, *et al.* Changes in plant species diversity and productivity along gradients of precipitation and elevation in the Xilin River Basin, Inner Mongolia[J]. Acta Phytocologica Sinica, 2000, 24, 667-673. (in Chinese)
- [29] 白春利, 阿拉塔, 陈海军, 等. 氮素和水分添加对短花针茅荒漠草原植物群落特征的影响[J]. 中国草地学报, 2013, 35(2): 69-75.
- BAI C L, A L T, CHEN H J, *et al.* Effects of addition of nitrogen and water on plant community characteristics of *Stipa breviflora* desert steppe[J]. Chinese Journal of Grassland, 2013, 35(2): 69-75. (in Chinese)
- [30] 张彬, 朱建军, 刘华民, 等. 极端降水和极端干旱事件对草原生态系统的影响[J]. 植物生态学报, 2014, 38(9): 1008-1018.
- ZHANG B, ZHU J J, LIU H M, *et al.* Effects of extreme rainfall and drought events on grassland ecosystems[J]. Acta Phytocologica Sinica, 2014, 38(9): 1008-1018. (in Chinese)
- [31] 王潇潇, 潘学标, 顾生浩, 等. 内蒙古地区参考作物蒸散变化特征及其气象影响因子[J]. 农业工程学报, 2015, 31(S1): 142-152.
- [32] O'BRIEN E M. Climatic gradients in woody plant species richness: towards an explanation based on an analysis of Southern Africa's woody flora[J]. Journal of Biogeography, 1993, 20, 181-198.
- [33] 张鹏翼, 梁宇, 马天啸, 等. 长白山区域森林主要树种迁移动态对气候变化的滞后响应[J]. 生态学杂志, 2022, 41(9): 1674-1682.
- [34] 马澜桐. 围封对沙地樟子松人工林土壤及其呼吸速率的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2019.
- [35] 周晓宇, 张称意, 郭广芬. 气候变化对森林土壤有机碳贮藏影

- 响的研究进展[J]. 应用生态学报, 2010, 21(7): 1867-1874.
- ZHOU X Y, ZHANG C Y, GOU G F. Effects of climate change on forest soil organic carbon storage[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(7): 1867-1874. (in Chinese)
- [36] DORAN J W, ELLIOTT E T, PAUSTIAN K. Soil microbial activity, nitrogen cycling, and long-term changes in organic carbon pools as related to fallow tillage management[J]. Soil & Tillage Research, 1998, 49, 3-18.
- [37] 沙威, 董世魁, 刘世梁, 等. 阿尔金山自然保护区植物群落生物量和物种多样性的空间格局及其影响因素[J]. 生态学报, 2016, 35(2): 330-337.
- [38] 王蒙, 董治宝, 逯军峰, 等. 巴丹吉林沙漠周植被特征和物种多样性[J]. 中国沙漠, 2015, 35(5): 1226-1233.
- WANG M, DONG Z B, LU J F, *et al.* Vegetation characteristics and species diversity around the Badain Jaran Desert[J]. Journal of Desert Research, 2015, 35(5): 1226-1233. (in Chinese)
- [39] 张瑞浩, 赵维俊, 王坤. 祁连山典型流域青海云杉林土壤氮磷钾空间变异性研究[J]. 西北林学院学报, 2023, 38(2): 17-24.
- ZHANG R H, ZHAO W J, WANG K. Spatial variability of soil nitrogen, phosphorus and potassium in *Picea crassifolia* forest in the typical watershed of the Oilian Mountains, Northwestern China[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2023, 38(2): 17-24. (in Chinese)
- [40] 王艳芬, 陈佐忠, Ties zen L T. 人类活动对锡林郭勒地区主要草原土壤有机碳分布的影响[J]. 植物生态学报, 1998, 22(6): 66-72.
- WANG Y F, CHEN Z Z, TIES ZEN L T. Distribution of soil organic carbon in the major grasslands of Xilinguole, Inner Mongolia, China[J]. Acta Phytocologica Sinica, 1998, 22(6): 66-72. (in Chinese)
- [41] 欧江, 刘洋, 张捷, 等. 长江上游马尾松人工林土壤铵态氮和硝态氮对采伐林窗的初期响应[J]. 应用与环境生物学报, 2015, 21(1): 147-154.
- OU J, LIU Y, ZHANG J, *et al.* Early responses of soil ammonium and nitrate nitrogen to forest gap harvesting of a *Pinus massoniana* plantation in the upper reaches of Yangtze River[J]. Chin. J. Environ. Biol., 2015, 21(1): 147-154. (in Chinese)
- [42] 杨婷, 钟全林, 李宝银, 等. 短期铵态氮与硝态氮配施对刨花楠幼苗生长及叶片性状的影响[J]. 应用生态学报, 2022, 31(1): 25-32.
- YANG T, ZHONG Q L, LI B Y, *et al.* Effects of short-term combined application of ammonium nitrogen and nitrate nitrogen on the growth and leaf traits of *Machilus pauhoi* seedlings[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 31(1): 25-32. (in Chinese)
- [43] 田佳歆. 采伐对长白落叶松人工林草本物种多样性和土壤化学性质的影响[D]. 太原: 北京大学, 2021.
- [44] 林丽, 代磊, 林泽北, 等. 黔中城市森林群落植物多样性及其与土壤理化性质的关系[J]. 生态环境学报, 2021, 30(11): 2130-2141.
- LIN L, DAI L, LIN Z B, *et al.* Plant diversity and its relationship with soil physicochemical properties of urban forest communities in central Guizhou[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2021, 30(11): 2130-2141. (in Chinese)
- [45] 董莉莉, 刘红民, 赵济川, 等. 林分结构对辽东山区蒙古栎林天然更新的影响[J]. 林业科学研究, 2021, 34(5): 104-110.
- DONG L L, LIU H M, ZHAO J C, *et al.* Effects of stand structure on natural regeneration of *Quercus mongolica* forest in mountainous area of Eastern Liaoning Province[J]. Forest Research, 2021, 34(5): 104-110. (in Chinese)
- [46] 储怡鑫, 薛凯喜, 冯国建, 等. 昆明市 3 种草本植物根系及茎秆的力学特性试验研究[J]. 森林工程, 2022, 38(1): 15-26.
- [47] 曹小玉, 李际平, 赵文菲, 等. 基于结构方程模型分析林分空间结构对草本物种多样性的影响[J]. 生态学报, 2020, 40(2): 9164-9173.
- CAO X Y, LI J P, ZHAO W F, *et al.* Effects of stand spatial structure on herbaceous species diversity in forests based on structural equation modeling[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(2): 9164-9173. (in Chinese)
- [48] 杨茂兴. 五台山林下草本植物对人为干扰的生态响应研究[D]. 太原: 山西财经大学, 2020.
- [49] 雷相东, 唐守正, 李冬兰, 等. 影响天然林下层植物物种多样性的林分因子的研究[J]. 生态学报, 2003, 22(3): 18-22.
- LEI X D, TANG S Z, LI D L, *et al.* Stand variables affecting understory plant species diversity in natural forests[J]. Chinese Journal of Ecology, 2003, 22(3): 18-22. (in Chinese)
- [50] 崔宁洁, 张丹桔, 刘洋, 等. 马尾松人工林不同大小林窗植物多样性及其季节动态[J]. 植物生态学报, 2004, 38(5): 477-490.
- CUI N H, ZHANG D J, LIU Y, *et al.* Plant diversity and seasonal dynamics in forest gaps varying sizes in *Pinus massoniana* plantations[J]. Acta Phytocologica Sinica, 2004, 38(5): 477-490. (in Chinese)
- [51] Alem S, Pavlis J, Urban J, *et al.* Pure and mixed plantations of *Eucalyptus camaldulensis* and *Cupressus lusitanica*: their interactions and affect on diversity and density of undergrowth woody plants in relation to light[J]. Open Journal of Forestry, 2015, 5(4): 375-386.
- [52] 陈发樑. 马尾松木荷枫香混交效应研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2019.
- [53] 张林, 齐实, 周飘, 等. 北京山区侧柏林下草本植物多样性的影响因素分析[J]. 草地学报, 2022, 30(8): 2199-2206.
- ZHANG L, QI S, ZHOU P, *et al.* Analysis of influencing factors on the understory herbaceous plant diversity of *Platcladus orientalis* forest in Beijing Mountainous Areas[J]. Acta Agresia Sinica, 2022, 30(8): 2199-2206. (in Chinese)
- [54] 郭诗宇, 徐自警, 宋德凯, 等. 目标树经营对松栎混交林天然更新的影响[J]. 森林工程, 2023, 39(1): 1-10.
- [55] 马玉华. 封育年限对落叶阔叶林生物多样性的影响及机理[M]. 合肥: 安徽农业大学, 2021.
- [56] 董灵波, 田栋元, 陈莹, 等. 基于结构方程模型的兴安落叶松天然林更新影响因素[J]. 应用生态学报, 2021, 32(8): 2763-2772.
- DONG L B, TIAN D Y, CHEN Y, *et al.* Clarifying the factors affecting *Larix gmelinii* forest regeneration based on structural equation model[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(8): 2763-2772. (in Chinese)
- [57] 曹小玉, 李际平, 委霞. 亚热带典型林分空间结构与林下草本物种多样性的差异特征分析及其关联度[J]. 草业科学, 2019, 36(10): 2466-2475.