

结构方程模型在兴安落叶松林生长中的应用

高羽 李静 刘洋* 乌雅瀚 巩家星 辛启睿

(内蒙古农业大学林学院 内蒙古 呼和浩特 010019)

摘要:【目的】通过结构方程模型,确定气候、土壤和海拔对兴安落叶松林生长指标的影响以及路径关系。【方法】选取年平均气温、年平均降水量、太阳辐射、土壤全氮含量、土壤有机碳密度和海拔作为影响因素,探究兴安落叶松地上生物量、地下生物量、树高与这些影响因素的关系,并利用AMOS 21.0软件构建衡量兴安落叶松生长的3个指标与气候、土壤和海拔的结构方程模型。【结果】兴安落叶松的地上生物量、地下生物量随着海拔、年平均降水量的增大呈现先增大后减少的趋势,树高随着海拔的增加而增加。地上和地下生物量随着土壤有机碳密度的增加而增加。海拔对兴安落叶松生长的总效应系数为0.200,且是正向效应,海拔对兴安落叶松生长的直接效应(0.224)大于间接效应(-0.024);气候因子对兴安落叶松林生长的总影响系数为-0.771,且是负向效应;土壤因子对兴安落叶松生长的总影响系数为-0.216,其对兴安落叶松林生长起到一定的抑制作用。【结论】根据结构方程模型的路径系数,气候因子的总影响系数绝对值最大,其次是土壤和海拔,兴安落叶松林静态生长主要受到气候因子的制约。

关键词:兴安落叶松;影响系数;气候因子;土壤因子;海拔;地上和地下生物量;树高;结构方程模型
中图分类号: S791.22 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):
文章编号: 1000-2006(2023)01-0038-09



Application of structural equation model in growth of *Larix gmelinii* stand

GAO Yu, LI Jing, LIU Yang*, WU Yahan, GONG Jiaying, XIN Qirui

(College of Forestry, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010019, China)

Abstract 【Objective】Structural equation modelling (SEM) was used to determine the effects of climate, soil, and altitude on growth indicators and pathway relationships in Xing'an larch (*Larix gmelinii*) forests. 【Method】The annual mean temperature, annual mean precipitation, solar radiation, soil total nitrogen content, soil organic carbon density, and altitude were selected as influencing factors to explore the relationships between aboveground biomass, underground biomass, and tree height and these underlying factors. A structural equation model of climate, soil, and altitude was constructed using AMOS 21.0 software to measure the growth of *Larix gmelinii* stand. 【Result】The aboveground and underground biomass of *Larix gmelinii* first increased and then decreased with an increase in altitude and annual mean precipitation, and the tree height increased with increasing altitude. The aboveground and underground biomass increased with an increase in soil organic carbon density. The total effect coefficient of altitude on the growth of *Larix gmelinii* was positive (0.200), and the direct effect (0.224) of altitude on the growth of *Larix gmelinii* was greater than the indirect effect (-0.024). The total effect coefficient of the climatic factors on the growth of *Larix gmelinii* was negative, at -0.771. The total influence coefficient of soil factors on the growth of *Larix gmelinii* was -0.216, which means these factors can slightly inhibit the growth of *Larix gmelinii*. 【Conclusion】According to the path coefficient of the structural equation model, the absolute value of the total influence coefficient of climate factors was the largest, followed by that of soil and altitude. The static growth of *Larix gmelinii* forest is mainly restricted by climatic factors, which has guiding significance for predicting and evaluating changes in forest growth at high latitudes under the condition of global climate change.

Keywords: *Larix gmelinii*; influence coefficient; climate factor; soil factor; elevation; aboveground and belowground biomass; tree height; structural equation model

收稿日期 Received: 2021-04-17

修回日期 Accepted: 2022-03-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(32160363); 内蒙古自治区自然科学基金项目(2021MS03096)。

第一作者: 高羽(gaoyu12020@163.com)。* 通信作者: 刘洋(liuyangvip@hotmail.com), 讲师。

引文格式: 高羽, 李静, 刘洋, 等. 结构方程模型在兴安落叶松林生长中的应用[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2023, 47(1): 38-46. GAO Y, LI J, LIU Y, et al. Application of structural equation model in growth of *Larix gmelinii* stand[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2023, 47(1): 38-46. DOI: 10.12302/j.issn.1000-2006.202104028.

结构方程模型(structural equation modeling, SEM)是验证自变量(一个或多个)与因变量(一个或多个)之间相互关系的多元分析方程^[1-2]。随着统计分析相关软件的发展,结构方程模型的数据分析方法被广泛应用。国内对于结构方程模型的理论研究虽晚于国外,但是近年结构方程模型作为统计分析方法,已运用于社会学、心理学、生态学、林业等多个领域。我国林业研究人员,利用结构方程模型所具备的特点,通过可以描述林分和林木生长状况、立地条件等的生物因子和非生物因子,探究林木大小多样性与立地条件、林分结构之间的关系,林分生长因子与立地条件的关系,林木生产力与环境因子、林分因子的作用关系等一系列森林自身条件与周边环境的相互关系^[3-6],为更好地经营森林和保护森林生态系统提供理论思路。应用结构方程模型探究人类活动、气候因素如何对草地生物量、草地生产力产生直接影响和间接影响^[7-8],分析土壤的形成因素之间的关系、土壤理化性质与立地条件的关系,可以更好地提高土壤肥力^[9-10]。国外林业研究者利用结构方程模型探究温度变化影响松树、菌根真菌和土壤线虫之间的多营养相互作用的关系,检验生态系统结构与功能之间的关系,分析佛罗里达灌木丛生境中火对昆虫食草动物群落聚焦的直接和间接影响^[11-14]。通过结构方程模型可以将多个变量之间的关系更直观地表现出来,为经验理论提供有力的数据支撑。

内蒙古大兴安岭地处寒温带地区,地带性植被是以兴安落叶松(*Larix gmelinii*)为主的明亮针叶林,兴安落叶松对维护东北地区的生态平衡是十分重要的,同时也是我国重要的针叶林资源。林木的生长除受其自身生物特性的影响,生长环境也对其有影响。兴安落叶松生长的影响因素历来是国内学者们研究的重点,土壤是兴安落叶松生长不可或缺的营养环境,海拔是各种生态因子的综合体现^[15]。

近年来王文杰等^[16]研究不同时间尺度下兴安落叶松树干液流密度与环境因子的关系研究,发现环境因子对树干液流密度有季节性影响,其中光照对其的影响较大,有助于了解林木个体在全球变暖的过程中的响应。台秉洋^[17]针对大兴安岭北部高山兴安落叶松生长与气候的关系研究,发现不同海拔下,温度对兴安落叶松生长的影响不同;降水对兴安落叶松生长的影响比温度的作用小很多,不是大兴安岭地区落叶松生长的主要限制因子。孙振静等^[18]发现在温度梯度下,温度升高会抑制大兴

安岭中部和南部树木的生长,降水会促进树木径向生长。高涛^[19]对根河及其附近地区未来30年气温做了模拟预估,预计未来根河地区气温将会上升,2021—2030年该地区年气温将比2001—2010年上升1.01℃,对未来30年根河地区兴安落叶松生长势预估结果显示,增温将对该树种的生长不利。Erdenebileg等^[20]通过紫外辐射正面和负面影响发现,紫外线增强会加速凋落物分解,而紫外线衰减对凋落物分解的影响随着分解时间的延长而减小。随着降水量的减少,紫外线衰减对凋落物分解的抑制作用增加,说明太阳辐射对地下生物量的积累产生一定的影响。Kujansuu等^[21]通过年轮宽度表研究了西伯利亚中部南北坡落叶松对气候变化的响应,得出春季的温度对落叶松的径向生长起着重要作用,降雪的低频波动对径向生长有负面影响。

国内有少数研究人员分析了兴安落叶松生长对单一气候因子的响应,也有学者分析了土壤理化性质对兴安落叶松林生长量的影响,而多个环境因子同时对兴安落叶松生长的影响相关分析较为少见,也没有确定这些因子与兴安落叶松生长的定量关系。在自然生态系统中,各影响因子本身都是相互作用、相互联系的。结构方程模型正是用于处理复杂的多变量研究数据,建立变量间的关系,特别是因果关系,这是过去相关研究难以达到的技术高度。

本研究利用结构方程模型可以解决多变量之间关系的特点,探索海拔、气候因子(平均年降水、年平均温度、太阳辐射)和土壤因子(土壤全氮、土壤有机碳密度)对兴安落叶松生长的影响,为更好地经营和管理兴安落叶松及探究其他因子对兴安落叶松生长的影响提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

大兴安岭林区是我国最北且面积最大的一个林区(121°12′~127°00′E,50°10′~53°33′N)。为寒温带大陆性季风气候,冬季寒冷漫长,夏季温暖短暂,年平均气温-5.4℃,年降水量300~500mm,并集中在7—8月份。年均日照时间2594h,年无霜期120d左右。海拔180~2029km。大兴安岭处于多年冻土带南部,土壤类型主要包括棕色针叶林土、沼泽土、草甸土及暗棕壤,土层厚度30~40cm,土壤呈酸性。主要的乔木树种有兴安落叶松(*Larix gmelinii*)、白桦(*Betula platyphylla*)、山杨(*Populus davidiana*)、樟子松(*Pinus sylvestris* var.

mongolica)等,林下灌木主要有越橘(*Vaccinium vitis-idaea*)、杜香(*Ledum palustre* var. *dilatatum*)和兴安杜鹃(*Rhododendron dauricum*)等。

1.2 数据收集

本研究所使用 165 株样木来源于:①原内蒙古林学院、北京林业大学、东北林业大学、河南农业大学和内蒙古大兴安岭林管局于 1985—1987 年在大兴安岭林区调查的 72 株兴安落叶松标准木;②1993—2015 年在大兴安岭的采伐工段上收集的 93 株兴安落叶松标准木。这些数据分布在整个大兴安岭(跨越内蒙古和黑龙江),所处样地包含各种立地条件、林分密度的树,树龄分布为 7~201 a。树高是样木伐倒后测量其基部到梢头的长度(H);将树皮、树枝和叶全部摘除,用称重法测定树干的鲜质量,对树干采样并在 85 °C 环境中烘干至质量恒定,得到样品干质量与鲜质量之比(P_w),从而计算样木树干的干质量=鲜质量 $\times P_w$;皮、枝和叶的干质量采取同样的方法测定,将干、皮、枝和叶的生物量累加得到整株样木的地上生物量(aboveground biomass, AGB)。地下生物量(below-ground biomass, BGB)的获取是将伐倒后的样木,采用全挖法挖取样木的全部根系,带回实验室冲洗根系表面的泥土后风干,将所有根系分为粗根($d \geq 5$ mm)和细根($d < 5$ mm)并分别称量其鲜质量,在粗根和细根中分别选择标准根,称鲜质量,置于烘箱中烘干至质量恒定,电子天平称量干质量,计算含水率,根据标准根的含水量推算整株样木的地下生物量。

首先根据基于中国常见树种胸径(D)和树高(H)所建立的落叶松二元生物量模型 [$W_a =$

$208.587 - 3 (D^2H)^{0.9446}$, $W_r = 59.162 - 5 (D^2H)^{0.5947}$] [22], 计算出所采伐的样木地上生物量(W_a)和地下生物量(W_r)与实际测量值做出比较,得到偏差值,之后计算出样地中的所有林木的地上和地下生物量,利用偏差值进行校正,计算出单位面积地上和地下生物量 Mg/hm^2 。

气候和海拔数据来源: WorldClim data (<https://www.worldclim.org>),空间分辨率为 2.5 m。根据样地坐标点和网站下载的采集数据年份的气候栅格数据,通过 Arcgis10.6 软件提取出样木所在样地的年平均气温(annual mean temperature, MAT),年平均降水量(annual mean precipitation, MAP)以及太阳辐射(solar radiation)。其中太阳辐射量、年平均气温和平均年降水量的统计数据为样木采集年份的平均值。

在样地的四角和中心分别采集土壤样本,然后带回实验室对土壤各项理化性质指标采用常规方法进行测定,并开展 3 次平行实验,其中土壤全氮含量(soil total nitrogen content, STNC)利用重铬酸钾-硫酸消化、凯式定氮法测定。土壤有机碳密度利用重铬酸钾容量法测定,土壤容重采用环刀法测定,土壤砾石含量采用排水法,利用公式(1)将上述 3 个指标换算为土壤有机碳密度(soil organic carbon density, SOCD),具体公式为:

$$\rho_{SOCD} = c_{SOC} \times r_{BD} \times d_o \times (1 - \theta) \times 10^{-1} \quad (1)$$

式中: ρ_{SOCD} 是土壤有机碳密度 Mg/hm^2 ; c_{SOC} 是土壤有机碳密度含量, g/kg ; r_{BD} 是土壤容重, g/cm^3 ; d_o 是土层厚度, cm ; θ 是直径 > 2 mm 的石砾所占的体积比例, %。样地数据统计结果见表 1。

表 1 样地数据统计

Table 1 Sample plot data statistics

统计值 statistics	地形因子 topographic factor		气候因子 climatic factor			土壤因子 soil factor				林分因子 stand factor				
	海拔/m altitude	坡度/ (°) slope	SR/ ($kJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$)	MAT/ °C	MAP/ mm	SOCD/ ($Mg \cdot hm^{-2}$)	STNC/ ($g \cdot kg^{-1}$)	CMF/%	d_o/cm	树高/m tree height	AGB/ ($Mg \cdot hm^{-2}$)	BGB/ ($Mg \cdot hm^{-2}$)	树龄/a tree age	疏密度 stocking degree
最小值 min	233.40	1.00	19 046	-0.57	563.02	70.26	2.68	6.00	20.00	10.00	0.26	1.36	7.00	0.08
最大值 max	1 087.70	26.00	20 569	6.57	973.03	269.14	21.50	28.00	150.00	29.00	369.10	106.00	201.00	0.65
平均值 mean	587.59	9.41	19 839.19	2.79	752.01	156.55	11.01	22.41	58.42	21.56	140.52	31.62	26.00	0.26
标准差 SD	212.15	6.90	441.67	2.74	122.14	60.29	5.06	4.64	23.09	4.51	79.56	21.64	32.00	0.12

注: SR 为太阳辐射量 solar radiation, MAT 为年平均气温 annual average temperature, MAP 为年平均降水量 annual average precipitation, SOCD 为土壤有机碳密度 soil organic carbon density, STNC 为土壤全氮量 soil total nitrogen content, CMF 为黏粒质量分数 clay mass fraction, d_o 为土层厚度 soil layer thickness, AGB 为地上生物量 aboveground biomass, BGB 为地下生物量 belowground biomass.

1.3 统计分析

选用兴安落叶松生长指标(树高、地上生物量和地下生物量)、气候因子(年平均气温、年平均降

水、太阳辐射)和土壤因子(土壤有机碳密度、土壤全氮)、海拔等环境变量与生长指标建立回归模型,并采用最小二乘法对各方程进行拟合优度检验,

探究这些变量对兴安落叶松生长指标的影响趋势。回归模型的构建使用了 R 软件的“lm”函数包完成。

结构方程模型是基于变量的相关系数或协方差矩阵来分析变量之间关系的一种统计方法,它将因素分析与路径分析整合为一,通过联立方程解析潜变量和观测变量之间的通径系数,进而获得自变量对因变量影响的直接效应、间接效应和总效应,其一般表达式为^[1, 23]

$$X = A_x \xi + \delta; \quad (2)$$

$$Y = A_y \eta + \varepsilon; \quad (3)$$

$$\eta = B\eta + \Gamma\xi + \zeta. \quad (4)$$

式中: X 表示显性外生观测变量(海拔); Y 表示显性内生观测变量(树高、地上生物量、地下生物量; 年平均气温、年平均降水、太阳辐射; 土壤有机碳密度、土壤全氮量); ξ 表示外源隐性变量向量(地形因子); η 表示内生隐性变量向量(生长指标、气候因子、土壤因子); A_x 、 A_y 均为因子载荷矩阵, δ 、 ε 均为误差向量矩阵; B 为内生隐性变量向量 η 的系数矩阵,也是内生隐性变量间的通径系数矩阵; Γ 为外源隐性变量向量 ξ 的系数矩阵,也是外源隐性变量对相应内生潜变量的通径系数矩阵; ζ 为残差向量矩阵。

应用 AMOS 21.0 建立结构方程模型,分析气候因子(年平均气温、年平均降水、太阳辐射),土壤因子(土壤有机碳密度、土壤全氮),海拔对地上生物量、地下生物量和树高的直接影响、间接影响和总影响,并绘制结构方程模型路径图。

路径图是路径分析的主要工具,它采用一条带箭头的线表示变量间预先设定的关系(单箭头表示变量间的因果关系,箭头表明变量间的关系是线性的,表示因果关系的发生)。箭头上标准化后的数据表示路径系数,路径系数反映自变量对因变量相对影响的大小。直接效应是:若变量 A(如气候因子)直接通过单向箭头对变量 B(如生长指标)具有因果影响,则称 A 对 B 有直接作用,若变量 A 对变量 B 的作用是间接地通过其他变量 C(如土壤因子)起作用的,则称 A 对 B 有间接作用,同时称 C 为中间变量。变量 A 对变量 B 的总效应是将变量 A 对变量 B 的直接作用和间接作用的通径系数相加^[24-25]。

结构方程模型的评价指标包含绝对适配统计量和增值适配统计量。①绝对适配统计量:指卡方自由度比,一般来说,比值越小说明假设模型的数据和模型的拟合度越好,当比值小于 1 时,表示模型过度拟合;当比值为 1~3 时,表示模型适配良

好;当比值大于 3 时,模型适配度差,需要进行修正和改进。适配度指数(GFI)越接近 1 表示模型的适配度越好,当 GFI>0.90 时,表示结构方程模型路径图能较好地适配实际数据。②增值适配统计量:包括非规准适配指数(TLI)、规准适配指数(NFI)、比较适配指数(CFI)、相对适配指数(RFI)、增值适配指数(IFI)。TLI 指标用来比较两个对立模型之间的适配度。TLI 修正了 NFI,而 NFI 值则是用来比较某个所提模型与虚无模型之间的卡方值差距。CFI 指标值是对 NFI 指标值的改进,它表示从最限制模型到最饱和模型时,非集中参数的改善情况,并且以非集中参数的卡方分布及其非集中参数来定义^[1, 26]。

2 结果与分析

2.1 环境因子对兴安落叶松生长的影响

2.1.1 环境因子对地上、地下生物量的影响

地上生物量与土壤有机碳密度的关系呈显著正相关($P < 0.05$),地上生物量随着土壤碳密度的增加而增加。地上生物量随着海拔、年平均降水量的升高呈现先增加后减少的趋势,随着土壤全氮的增加先减少后增加。年平均气温对地上生物量的影响呈现不显著的负相关($P > 0.05$),说明年平均气温对地上生物量的增加有微弱的负影响或者不产生影响。太阳辐射对地上生物量的增加表现出极显著的负影响($P < 0.001$)。海拔是这些变量中对地上生物量变异解释最多的变量(R^2 最大),说明海拔是地上生物量变化的主要影响因素,地上生物量随海拔的升高呈现先增加后减少的趋势,相反,年平均气温是这些变量中对地上生物量影响较小的变量(图 1)。

环境因子对地下生物量的影响与其对地上生物量影响趋势是一致的。年平均降水量和土壤有机碳密度与地下生物量的关系不显著($P > 0.05$)。地下生物量随着土壤有机碳密度的增加而增加,说明土壤有机碳密度对地下生物量的增加有促进作用但效果不明显。年平均气温和土壤全氮对地下生物量的影响有微弱的降低后又升高的趋势,年平均气温对地下生物量有显著的负向关系($P < 0.05$)。土壤全氮与地下生物量的关系是不显著的,说明增加土壤全氮的含量对地下生物量影响不明显。海拔与地下生物量模型的决定系数是这些变量与地下生物量模型中最大的,说明海拔对地下生物量的增加影响较大;土壤有机碳密度、年平均降水量对地下生物量的变化解释最少,说明这两个变量对地下生物量的影响较小(图 2)。

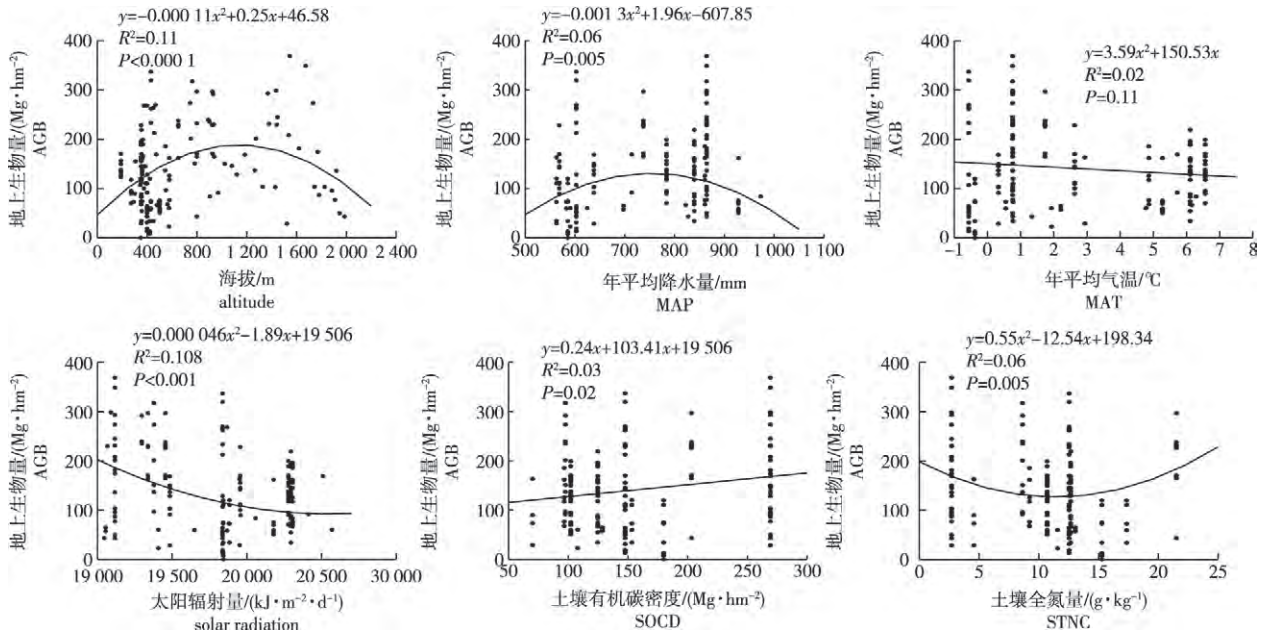


图1 环境因子与地上生物量的关系

Fig.1 Scatter plot of environmental factors and aboveground biomass

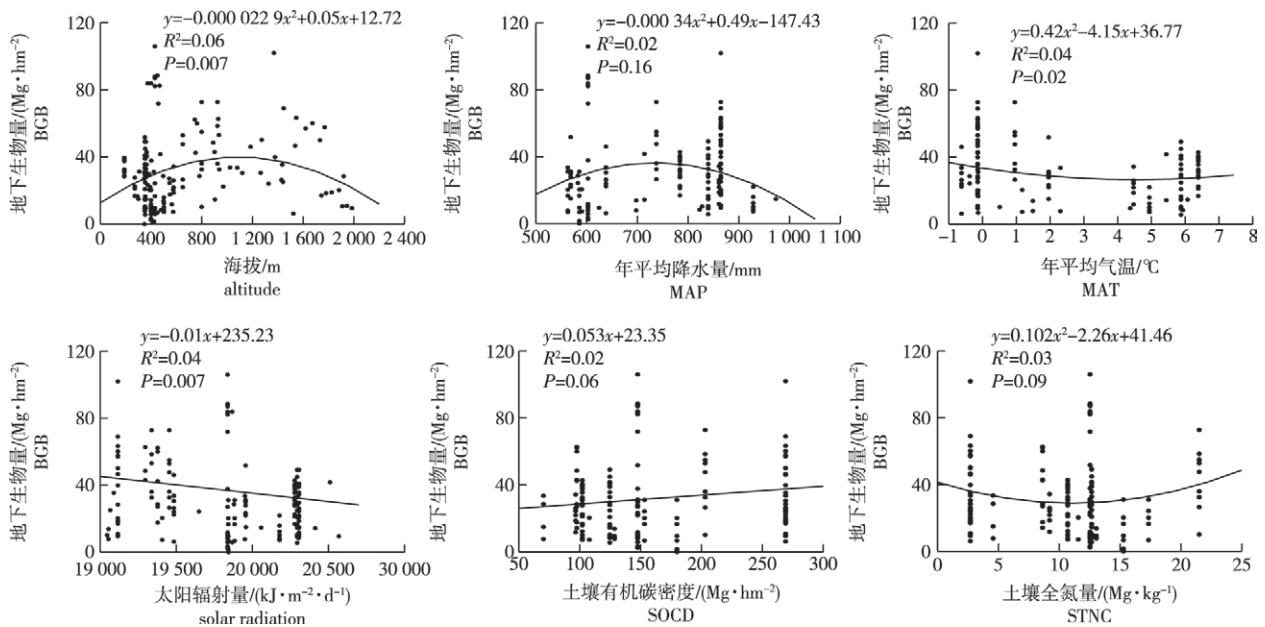


图2 环境因子与地下生物量的关系

Fig.2 Scatter plot of environmental factors and underground biomass

2.1.2 环境因子对树高的影响

环境因子与树高之间均呈现显著相关 ($P < 0.05$),说明树高的生长易受到这些因素的影响。海拔对树高的影响呈现极显著的正相关 ($P < 0.001$),说明海拔的升高对其生长起到促进作用。树高随着年平均气温、太阳辐射、土壤有机碳密度和土壤全氮的增加有先降低后增大的趋势,说明树

高的生长需要多种因素共同决定。土壤有机碳密度与树高模型的决定系数是这些变量与树高模型中最大的,说明土壤有机碳密度的变化对树高的生长影响较大;年平均气温对树高变动的解释是最少的,说明年平均气温的变化对树高的生长影响较小(图3)。

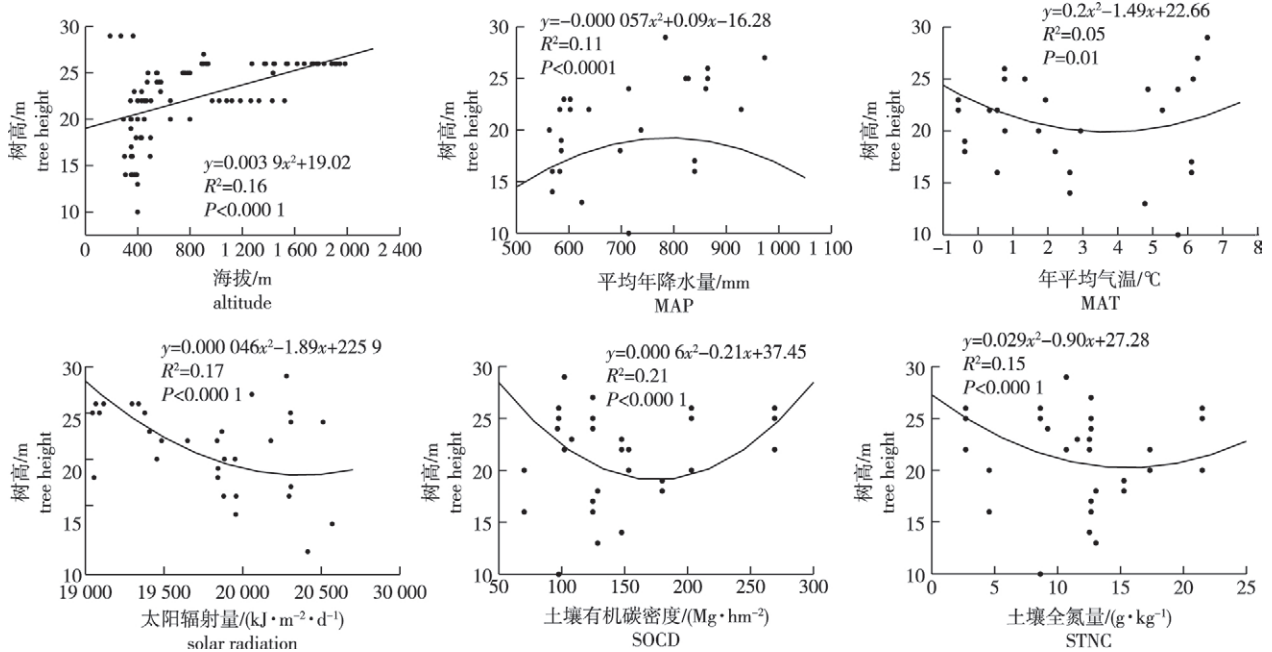


图 3 环境因子与树高的关系

Fig.3 Scatter plot of environmental factors and tree height

2.2 环境因子与兴安落叶松生长指标的关联特征

为了研究环境因子对兴安落叶松生长指标的影响,首先假设 3 个潜在变量(海拔、气候和土壤)都对落叶松的生长指标有直接影响;其次假设海拔影响气候因子会间接影响落叶松的生长指标,以及海拔通过影响土壤因子间接影响落叶松的生长指标,最后假设气候变化会影响土壤中营养元素的含量。环境因子与兴安落叶松生长指标的结构方程模型通过 AMOSS 21.0 (IBM 公司) 建立,在模型运算的过程中,根据 MI(modification indices) 修正指数对模型进行了修正,对因子之间的关系做出了调整,在优化的最终模型后,确认正态性和线性假设是有效的。使用卡方检验(χ^2)、均方根近似误差 (RMSEA) 和适配度指数 (GFI) 检验评估模型的适用性。无显著性 χ^2 值 ($P>0.05$, 即观察到的协方差矩阵与预期协方差矩阵之间无显著差异), RMSEA <3 和 $GFI \geq 0.90$ 表示模型拟合良好^[27](表 2),并随机抽取的 41 株树数据对模型进行检验,通过了统计量检验。

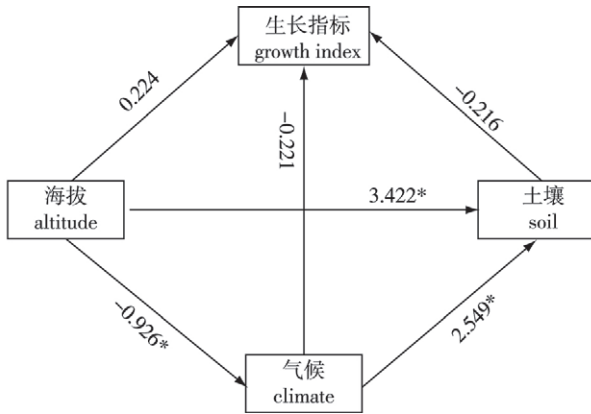
兴安落叶松林的生长指标(地上生物量、地下生物量和树高)与海拔、气候因子(太阳辐射、年平均气温、年平均降水量)、土壤因子(土壤有机碳密度、土壤全氮)的结构方程模型路径图是经过多次模型修正后,简单化的结构方程模型路径图。根据模型修正后的最终结构方程模型的标准影响系数见图 5。由图 4 和图 5 得到海拔对落叶松生长

产生不显著的正向直接影响,且海拔对兴安落叶松生长指标的直接影响(0.224)大于间接影响(-0.024);海拔对兴安落叶松生长指标起到的作用比通过气候因子、土壤因子间接作用到树木的影响大。气候和土壤因子对兴安落叶松生长指标的直接影响是不显著的负效应,气候因子对兴安落叶松生长指标的直接影响系数(-0.221)的绝对值大于土壤因子对兴安落叶松生长指标的直接影响系数(-0.216)的绝对值,与土壤因子相比,兴安落叶松静态生长主要受到气候因子的制约。气候因子对兴安落叶松生长指标的直接效应(-0.221)小于间接效应(-0.550),则气候因子主要是通过影响土壤因子的变化影响兴安落叶松的生长。

表 2 结构方程模型修正后拟合参数

Table 2 Fitting parameters of structural equation model after modification

评价指标 index	参数名称 parameter name	评价标准 evaluation criteria standard	模型参数 model parameters
绝对拟合指数 absolute fitting index	卡方自由度比(χ^2/df)	<3	1.513
	适配度指数(GFI)	>0.90	0.971
	显著性概率值(P)	>0.05	0.097
	近似误差均方根(RMSEA)	<0.08	0.056
相对拟合指数 relative fitting index	规范适配指数(NFI)	>0.90	0.983
	非规范适配指数(TLI)		0.985
	比较适配指数(CFI)		0.994
	增值适配指数(IFI)		0.994



* $P < 0.05$.

图4 环境因子与林木生长指标的结构方程模型路径

Fig.4 Path map of environmental factors and structural equation model of forest growth index

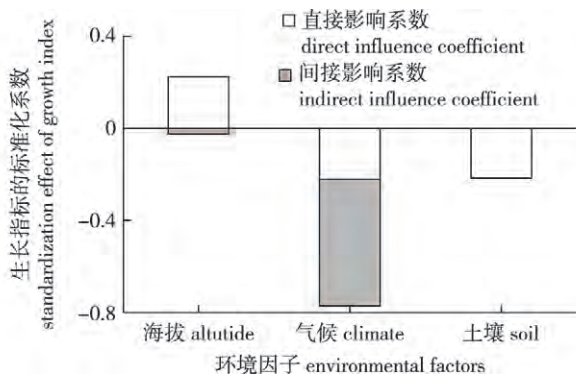


图5 环境因子与生长指标的标准化影响系数

Fig.5 Standardized influence coefficient of environmental factors and growth indicators

海拔对兴安落叶松生长量的总效应系数为0.200 且是正向效应,气候因子对其总效应系数是-0.771 且为负效应,则海拔的变化对兴安落叶松的生长起到促进作用,而气候变化对兴安落叶松的生长有一定的抑制作用。气候因子对兴安落叶松生长指标影响的总效应系数绝对值大于海拔对兴安落叶松生长影响的总效应系数,土壤因子对兴安落叶松生长影响的总效应系数与直接影响系数相同且为-0.216,其绝对值也大于海拔对兴安落叶松生长指标影响的总效应系数,说明兴安落叶松的生长主要受到气候因子的制约。从图4中可以看出,海拔对气候因子的直接影响系数为-0.926,对土壤因子的直接影响系数为3.422,其绝对值小于海拔对气候因子的直接影响系数,海拔对气候因子的影响大于对土壤因子的影响。

3 讨论

通过兴安落叶松林的地上生物量、地下生物量、树高与气候变量中年平均温度、年平均降水量以及太阳辐射和土壤养分中的有机碳密度、全氮含量的线性回归关系,发现海拔对兴安落叶松生长的3个指标均呈现显著相关关系,地上生物量和地下生物量随着海拔梯度的变化呈现先增加后减少的趋势,树高则是呈现逐渐增加的趋势。台秉洋^[17]在研究大兴安岭北部高山兴安落叶松树木生长与气候变化的关系中也发现海拔变化影响落叶松的高生长。气候因子中年平均降水量对衡量兴安落叶松生长的地上生物量和树高均有显著影响,树高和地下生物量随着年平均降水量的增加呈现先增大后减小的趋势。孟军贵等^[28]分析气温和降水对兴安落叶松生长的研究中提到在生长季降水会抑制其光合作用,从而影响通过光合作用积累养分。年平均气温和太阳辐射与兴安落叶松生长指标的关系是负向相关,两个变量对兴安落叶松生长都是负向影响,这可能是因为太阳辐射和气温的显著升高反而会减缓林木的光合作用,从而兴安落叶松生长速度有减缓的趋势。土壤因子中土壤有机碳密度与衡量兴安落叶松生长的地上生物量和地下生物量的关系都是呈正相关,这可能是土壤有机碳密度的增加,有利于改善土壤质量,提高土壤肥力,并促进落叶松林木生长。

线性回归关系得到的相关性和趋势,结构方程模型可以表现出环境因子与兴安落叶松生长指标线性回归关系的相关性和环境因子与生长指标之间的影响大小以及路径关系,不能够表现出具体曲线的影响趋势。海拔对兴安落叶松生长的总效应系数为0.200 且是正向效应,这与线性回归中在500~1200 m海拔范围内所得到的趋势相同,且海拔对兴安落叶松生长的直接效应(0.224)大于间接效应(-0.024)。结构方程模型中气候因子对兴安落叶松林生长的总影响系数是-0.771,起到的作用是负向的,且与海拔、土壤因子的总影响系数比较后,气候因子的总影响系数绝对值最大,所以兴安落叶松生长主要受到气候因子的制约。白学平^[29]分析海拔对大兴安岭落叶松径向生长与气候响应的影响中也发现气候对落叶松的生长是主要限制因子。在结构方程模型中土壤因子对兴安落叶松的生长起到一定的阻碍作用,与其他两个因子的总效应系数相比,土壤因子对兴安落叶松生长指标的影响次于气候因子对其的影响,这主要是因为

寒温带兴安落叶松的生长与气候关系更为密切,气候条件对其生长起着重要作用^[30]。

从环境因子与生长指标模型的决定系数角度和显著相关性角度来看,在结构方程模型中气候因子是兴安落叶松生长的主要影响因子^[30],但在线性回归方程中气候因子对兴安落叶松生长 3 个指标的影响并不是很突出,相反,海拔、土壤有机碳密度对这 3 个生长指标的影响更加显著。这可能是变量的综合性影响大于变量的独立影响,还可能是样本量较小,难以更好地拟合出与理论一致的模型,对于这一情况还需要进一步的研究和探讨。

结构方程模型是通过可测量的观察变量来推断不能测量的隐变量,是对经验理论结构进行数据验证的一种验证方法。本研究探究了环境因子对兴安落叶松静态生长的影响大小和作用方式,确定了气候条件对兴安落叶松生长的影响最大,这为预测气候变化对兴安落叶松生长及分布的影响提供了依据。但本研究是基于结构方程模型探究环境因子对兴安落叶松林静态生长的影响,所涉及的样本量和环境因子是有限的,尤其是气候因子和地形因子,气候因子是影响中国落叶松地理分布的主导因子,而在今后的研究中需要增加地形、土壤、林分调查因子等更多的生物和非生物因子,以及落叶松动态生长的相关指标,这样拟合出来的结构方程模型和路径图将会对环境因子对兴安落叶松生长的影响大小和作用路径的合理性做出更好的验证,同时为探究兴安落叶松林在气候背景下适宜生境的空间变化、迁移格局及驱动因子提供一种方法。

参考文献(reference):

- [1] 程开明. 结构方程模型的特点及应用[J]. 统计与决策, 2006(10): 22-25. CHENG K M. Characteristics and application of structural equation model[J]. Stat Decis, 2006(10): 22-25. DOI: 10.3969/j.issn.1002-6487.2006.10.008.
- [2] 张娅, 孙舒蕊, 张文会, 等. 基于结构方程模型的居住区停车位共享意愿研究[J]. 森林工程, 2021, 37(6): 143-150, 158. ZHANG Y, SUN S R, ZHANG W H, et al. Parking space sharing willingness research in a residential area based on structural equation model[J]. Forest Engineering, 2021, 37(6): 143-150, 158. DOI: 10.16270/j.cnki.slgc.2021.06.016.
- [3] 舒树森, 赵洋毅, 段旭, 等. 基于结构方程模型的云南松次生林林木多样性影响因子[J]. 东北林业大学学报, 2015, 43(10): 63-67. SHU S M, ZHAO Y Y, DUAN X, et al. Impact factors of forest diversity in Yunnan pine secondary forest based on structural equation model[J]. J Northeast For Univ, 2015, 43(10): 63-67. DOI: 10.13759/j.cnki.dlxb.2015.10.007.
- [4] 楚春晖, 余济云, 陈冬洋, 等. 大围山杉木林林分生长与影响因子耦合分析[J]. 西南林业大学学报, 2016, 36(2): 108-112. CHU C H, SHE J Y, CHEN D Y, et al. Coupling analysis of growth and influencing factors of *Cunninghamia lanceolata* [J]. J Southwest For Univ, 2016, 36(2): 108-112. DOI: 10.11929/j.issn.2095-1914.2016.02.018.
- [5] 黄兴召, 许崇华, 徐俊, 等. 利用结构方程解析杉木林生产力与环境因子及林分因子的关系[J]. 生态学报, 2017, 37(7): 2274-2281. HUANG X Z, XU C H, XU J, et al. Structural equation model analysis of the relationship between environmental and stand factors and net primary productivity in *Cunninghamia lanceolata* forests[J]. Acta Ecol Sin, 2017, 37(7): 2274-2281. DOI: 10.5846/stxb201512132482.
- [6] 王冬至, 张志东, 牟洪香, 等. 结构方程模型在落叶松林经营中的应用[J]. 北京林业大学学报, 2015, 37(3): 69-75. WANG D Z, ZHANG Z D, MU H X, et al. Applications of structural equation model in the management of *Larix principis-rupprechtii* plantations [J]. J Beijing For Univ, 2015, 37(3): 69-75. DOI: 10.13332/j.1000-1522.20140326.
- [7] KANG M Y, DAI C, JI W Y, et al. Biomass and its allocation in relation to temperature, precipitation, and soil nutrients in Inner Mongolia grasslands, China[J]. PLoS One, 2013, 8(7): e69561. DOI: 10.1371/journal.pone.0069561.
- [8] SHA Z Y, XIE Y C, TAN X C, et al. Assessing the impacts of human activities and climate variations on grassland productivity by partial least squares structural equation modeling (PLS-SEM) [J]. J Arid Land, 2017, 9(4): 473-488.
- [9] ZHONG Q M, ZHANG S R, CHEN H L, et al. The influence of climate, topography, parent material and vegetation on soil nitrogen fractions [J]. CATENA, 2019, 175: 329-338. DOI: 10.1016/j.catena.2018.12.027.
- [10] DAI L J, GE J S, WANG L Q, et al. Influence of soil properties, topography and land cover on soil organic carbon and total nitrogen concentration: a case study in Qinghai-Tibet Plateau based on random forest regression and structural equation modeling [J]. Sci Total Environ, 2022, 821: 153440. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.153440.
- [11] KITAGAMI Y, MATSUDA Y. Temperature changes affect multi-trophic interactions among pines, mycorrhizal fungi, and soil nematodes in a microcosm experiment [J]. Pedobiologia, 2020, 78: 150595. DOI: 10.1016/j.pedobi.2019.150595.
- [12] SUTTON-GRIER A E, KENNEY M A, RICHARDSON C J. Examining the relationship between ecosystem structure and function using structural equation modelling: a case study examining denitrification potential in restored wetland soils [J]. Ecol Model, 2010, 221(5): 761-768. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2009.11.015.
- [13] KIM T N, HOLT R D. The direct and indirect effects of fire on the assembly of insect herbivore communities: examples from the *Flor-ida* scrub habitat [J]. Oecologia, 2012, 168(4): 997-1012. DOI: 10.1007/s00442-011-2130-x.
- [14] 靳天恩, 马彦红, 李善文. 影响人工油松林生长的相关因子的研究[J]. 防护林科技, 1999(3): 12-14, 59. JIN T E, MA Y H, LI S W. Study on the related factors affecting the growth of artificial *Pinus tabulaeformis* forest [J]. Prot For Sci Technol, 1999(3): 12-14, 59. DOI: 10.13601/j.issn.1005-5215.1999.03.005.
- [15] 张长现. 不同生态条件下五脉绿绒蒿生物碱与黄酮成分研究[D]. 兰州: 中国科学院西北高原生物研究所, 2009. ZHANG C X. Studies on alkaloids and flavonoids of *Meconopsis pentaphylla* under different ecological conditions [D]. Lanzhou: Institute of Northwest Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, 2009.

- [16] 王文杰, 孙伟, 邱岭, 等. 不同时间尺度下兴安落叶松树干液流密度与环境因子的关系[J]. 林业科学, 2012, 48(1): 77-85. WANG W J, SUN W, QIU L, et al. Relations between stem sap flow density of *Larix gmelinii* and environmental factors under different temporal scale [J]. Sci Silvae Sin, 2012, 48(1): 77-85. DOI: 10.11707/j.1001-7488.20120113.
- [17] 台秉洋. 大兴安岭北部高山兴安落叶松树木生长与气候变化的关系[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2012. TAI B Y. The relationship between the growth of *Larix gmelinii* in the north alpine of great Khingan and the climate change [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2012.
- [18] 孙振静, 赵慧颖, 朱良军, 等. 大兴安岭北部不同降水梯度下兴安落叶松生长对升温的响应差异[J]. 北京林业大学学报, 2019, 41(6): 1-14. SUN Z J, ZHAO H Y, ZHU L J, et al. Differences in response of *Larix gmelinii* growth to rising temperature under different precipitation gradients in northern Daxing'an Mountains of northeastern China [J]. J Beijing For Univ, 2019, 41(6): 1-14. DOI: 10.13332/j.1000-1522.20190007.
- [19] 高涛. 大气环流和海温变化对兴安落叶松生长的气候影响: 以根河地区为例[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2013. GAO T. Climate influence of the atmospheric circulation and sea surface temperature on *Larix gmelinii* (rupr.) Rupr. growth-focus on Genhe region as an example [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2013.
- [20] ERDENEBILEG E, YE X H, WANG C W, et al. Positive and negative effects of UV irradiance explain interaction of litter position and UV exposure on litter decomposition and nutrient dynamics in a semi-arid dune ecosystem [J]. Soil Biol Biochem, 2018, 124: 245-254. DOI: 10.1016/j.soilbio.2018.06.013.
- [21] KUJANSUU J, YASUE K, KOIKE T, et al. Climatic responses of tree-ring widths of *Larix gmelinii* on contrasting north-facing and south-facing slopes in central Siberia [J]. J Wood Sci, 2007, 53(2): 87-93. DOI: 10.1007/s10086-006-0837-9.
- [22] 罗云建, 王效科, 逯非. 中国主要林木生物量模型手册[M]. 北京: 中国林业出版社, 2015. LUO Y J, WANG X K, LU F. Comprehensive database of biomass regressions for China's tree species [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2015.
- [23] 吴明隆. 结构方程模型: AMOS的操作与应用万卷方法 统计分析方法丛书[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2009. WU M L. Structural equation modeling: operation and application of AMOS: Series of 10,000 volumes of statistical analysis methods [M]. Chongqing: Chongqing University Press, 2009.
- [24] 何晓群. 多元统计分析[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2004. HE X Q. Multivariate statistical analysis [M]. Beijing: China Renmin University Press, 2004.
- [25] 侯杰泰. 结构方程模型及其应用[M]. 北京: 教育科学出版社, 2004. HOU J T. Structural equation model and its applications [M]. Beijing: Educational Science Publishing House, 2004.
- [26] 周健平. 基于结构方程模型的林分特征因子间耦合关系分析[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2015. ZHOU J P. An analysis of the coupling relationship of stand characteristic factors based on structural equation model [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2015.
- [27] HOOPER D, COUGHLAN J, MULLEN M R. Structural equation modelling: guidelines for determining model fit [J]. Electron J Bus Res Methods, 2008, 6(1): 53-60.
- [28] 孟军贵, 铁牛. 气温、降水对兴安落叶松生长的影响研究[J]. 科学技术创新, 2019(18): 143-144. MENG J G, TIE N. Effects of temperature and precipitation on growth of *Larix gmelinii* [J]. Sci Technol Innov, 2019(18): 143-144.
- [29] 白学平. 海拔对大兴安岭落叶松径向生长与气候响应的影响研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2019. BAI X P. The study of altitude effects on radial growth and climate response of *Larix gmelinii* in the great Xing'an Mountains [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2019.
- [30] 杨志香, 周广胜, 殷晓洁, 等. 中国兴安落叶松天然林地理分布及其气候适宜性[J]. 生态学杂志, 2014, 33(6): 1429-1436. YANG Z X, ZHOU G S, YIN X J, et al. Geographic distribution of *Larix gmelinii* natural forest in China and its climatic suitability [J]. Chin J Ecol, 2014, 33(6): 1429-1436. DOI: 10.13292/j.1000-4890.2014.0122.

(责任编辑 李燕文)