

DOI: 10.5846/stxb202008312265

陈立新, 哈雪梅, 段文标, 韩冬荟, 李常准, 刘玉萍, 沈海龙, 张鹏. 红松人工林优势木竞争指数影响因子. 生态学报, 2022, 42(5): 1777-1787.

Chen L X, Ha X M, Duan W B, Han D H, Li C Z, Liu Y P, Shen H L, Zhang P. Analysis on influencing factors of competitive index of dominant trees in *Pinus koraiensis* plantation. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(5): 1777-1787.

红松人工林优势木竞争指数影响因子

陈立新, 哈雪梅, 段文标*, 韩冬荟, 李常准, 刘玉萍, 沈海龙, 张 鹏

东北林业大学林学院, 哈尔滨 150040

摘要:在温带湿润气候区东段不同立地条件下的红松人工林内设置面积为 600 m²(20 m×30 m)的 70 块矩形固定样地。在每个样地内,选取 5 颗最高且长势较好的优势木作为研究的对象木,用 Voronoi 图确定优势木相应的竞争木,测定每一块样地内优势木与竞争木之间的距离。采用 Hegyi 单木竞争指数模型,分析优势木在不同样地水平上的种内竞争强度,探讨林分生长因子、地形因子、土壤养分因子对优势木竞争指数的影响,并对这 3 类因子与优势木竞争指数进行相应的拟合和相关性分析。结果表明:红松人工林优势木竞争强度随着优势木胸径的增大而变小,并且两者之间的关系服从幂函数;红松优势木的竞争指数与其树高、胸径、冠幅呈极显著的相关关系($P<0.01$);坡向、坡位、海拔对竞争指数影响极显著($P<0.01$);红松人工林优势木竞争指数的大小与土壤氮磷钾含量均呈极显著的相关关系($P<0.01$);pH 值对优势木竞争指数的影响不显著。当红松人工林优势木平均胸径达到 45cm,优势木平均树高和冠幅大于周围竞争木时,其对周围资源的利用程度增大,林木会发生自然稀疏现象,其所受的竞争压力减小。红松喜光性强,对水分的要求高,导致其在阴坡的竞争指数无论上坡还是下坡都较大,红松人工林的生长从上坡到下坡逐渐转好。综上,半阴半阳坡的中坡或下坡因其土壤肥沃和通透性良好适用于红松人工林大径材的培育。

关键词:红松人工林; 优势木; 种内竞争; 影响因子

Analysis on influencing factors of competitive index of dominant trees in *Pinus koraiensis* plantation

CHEN Lixin, HA Xuemei, DUAN Wenbiao*, HAN Donghui, LI Changzhun, LIU Yuping, SHEN Hailong, ZHANG Peng

Northeast Forestry University, Harbin 150040, China

Abstract: In this paper, 70 fixed plots of 20 m×30 m were setting in the eastern section of *Pinus koraiensis* plantations under different site conditions in the temperate humid climate zone. In addition, the tree height, diameter at breast height, crown width and forest nutrients of the trees in the sample area were measured. In each sample plot, 5 dominant trees with the highest and better growth were selected as the object trees. The corresponding competitive trees of the object trees were determined by Voronoi diagram, and the distance between the dominant trees and the competitive trees in each plot was measured. Using Hegyi single-tree competition index model, we analyzed the dominant trees in different levels of intraspecific competition intensity, and explored the growth factors, terrain factors, and soil nutrient factors on the influence of the dominant tree competition index. In addition, stand growth factors, topographic factors, soil nutrient factors, and the competitive index of dominant trees were fitted and the correlation was analyzed. The results showed that the competition intensity of *Pinus koraiensis* decreased with the increase of the diameter at breast height of the dominant trees, and the relationship between them followed a power function. Moreover, the competitive index of dominant trees of *Pinus koraiensis*

基金项目:国家重点研发计划重点专项(2017YFD0600601-03);国家自然科学基金项目(31770656)

收稿日期:2020-08-31; 网络出版日期:2021-11-17

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: dwbiao88@163.com

was significantly correlated with height, diameter at breast height and crown width ($P < 0.01$). Slope aspect, slope position and altitude had significant effects on the competition index ($P < 0.01$). The competitive index of dominant trees in *Pinus koraiensis* forest was significantly correlated with soil N, P and K content ($P < 0.01$). The influence of pH value on the competitive index of dominant trees was not significant. When the diameter at breast height of *Pinus koraiensis* forest reached 45 cm, the tree height was higher than that of the surrounding competitive trees, and the crown width was larger than that of the surrounding competitive trees. With the increased of the utilization of surrounding resources, the natural thinning of trees would occur and the competitive pressure would decrease. *Pinus koraiensis* liked light and water, which led to its competition index in the shady slope was bigger either uphill or downhill, and the growth of *Pinus koraiensis* forest was better from top to bottom. By reason of the foregoing, large diameter timber cultivation of *Pinus koraiensis* plantations should be planted on the middle or lower slopes of semi-shady and semi-sunny slopes, with fertile soil and good permeability.

Key Words: *Pinus koraiensis*; dominant tree; intraspecific competition; site conditions

竞争是森林生态系统中普遍存在的一种现象,其结果是一个有机体阻碍另一个有机体的正常生长和发育^[1]。树木之间普遍存在的竞争关系影响着树木的存活、生长和发育,决定树种的分布并推动着群落的演替,是森林动态变化的内在驱动因子,树木生长存在种间差异且受到内在和外在因素的影响^[2]。树种的生长差异不仅表现在年季生长速率的不同^[3],而且不同树种树木的生长对各影响因子的响应机制也有差异^[4]。影响树木生长的主要因素包括树木自身特征和外界环境因子^[5],如初始胸径^[7]、年龄^[8]、气候^[9]、土壤营养水平^[10]、邻体竞争等^[11]。研究植物的竞争关系不仅有助于掌握森林结构和动态的演变趋势,揭示群落的发育与演替进程,对森林的可持续经营、林分的改造以及退化生态系统的恢复与重建具有重要指导意义。

林木竞争是林木生长过程中对其所需空间资源的竞争,目前国内外的研究中主要用竞争指数来描述林木之间的竞争关系。随着对竞争关系的长期研究,林木竞争指数也有了一定的改进^[12],国内外对竞争关系的研究也有了一定的进步^[13]。林木在生长过程中产生的竞争主要有以下几个原因:林木竞争的范围^[14]、林木竞争的激烈程度、林木个体在竞争中的反应和竞争产生的结果等^[15]。目前对于竞争指数的研究主要使用以下3个模型:(1)Hegyi 单木竞争指数模型^[16]; (2)单木竞争指数的改进模型^[17]; (3)Latka-volterra 竞争模型^[18]。其中,Hegyi 单木竞争指数模型包括了树木大小、距离和空间分布等多方面的信息,并且简单直观,测算容易^[19],而且此模型能有效地描述林木生长与生存空间的关系,并得到了广泛的应用^[20]。因此,本文用 Hegyi 单木竞争指数模型来研究红松优势木与立地条件的关系,旨在充分了解红松优势树种生长的适宜条件,为红松优质大径材的培育技术提供理论依据。

1 研究区概况

研究区位于中国温带湿润气候区东段,北与吉林毗连,南与白山市隔鸭绿江相望,地理坐标为 125°17'—127°51'E,41°20'—42°12'N,位于长白山腹地,是红松自然生长的原生地,属于北温带大陆性季风气候,气温-38.7—36.1℃,海拔 310—1220m,冬季积雪厚度可达 50cm,降水量可达 1120 mm,最大日降水量 105 mm,每年 7—8 月份雨量较为集中,约占全年的 45%,土壤以暗棕壤为主,土层厚度 42 cm 以上,辖区内森林资源丰富。主要树种有红松(*Pinus koraiensis*)、云杉(*Picea asperata*)、樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)等。

2 研究方法

2.1 样地设置与林分调查

通过对当地森林资源档案的查证和实地考察,决定该项研究在吉林省通化市三棚林场和临江市闹枝林场进行。首先在以上两个林场的典型地段分别设置面积为 600 m² (20 m×30 m) 的矩形样地各 33 块和 37 块,共计 70 块。确定好样地的位置后,用 GPS 测量其海拔、经度和纬度,用罗盘仪测量样地坡度和坡向,用抬头法

测定郁闭度,用超声测高器测量样地中每一株林木的高度和第一活枝高,用胸径尺测定林木的胸径,用卷尺测定每棵树的坐标、东西冠幅和南北冠幅,优势木是样地中树高最高且长势较好的树木,选取 5 颗优势木作为本次研究的对象木。样地基本概况见表 1。

表 1 样地基本概况

Table 1 Basic situation of sample plots

坡向 Slope aspect	坡位 Slope position	株数 Number	样地号 Sample no.	优势木竞争 指数 Competition index of dominant tree	优势木平均 胸径/cm Mean diameter at breast height of dominant tree	优势木平均 树高/m Mean height of dominant tree	优势木东西 平均冠幅/m Mean east- west crown width of dominant tree	优势木南北 平均冠幅/m Mean North- south crown width of dominant tree
阳坡 Sunny slope	上坡	35	16、18、28、37、 39、48、51	2.71±0.18Aa	39.99±3.63Aa	19.09±2.85ABb	7.12±1.68Aa	6.01±2.23Aa
	中坡	15	3、32、35	2.58±0.06Aab	39.70±0.99Aa	21.32±1.81Aa	7.03±1.68BCa	6.85±1.49BCa
	下坡	15	17、33、34	2.57±0.31Bb	39.59±3.70Ba	20.51±1.97Aa	7.78±2.25Aa	6.94±2.40Ba
半阳坡 Half-sunny slope	上坡	50	2、4、8、11、31、 47、49、50、 61、63	2.46±0.17ABa	37.61±2.63Ab	19.74±2.39Ba	7.42±1.20Aa	7.59±1.31Aa
	中坡	10	9、38	2.44±0.20ABa	39.47±2.69Aa	19.56±2.78Aa	7.77±1.36ABa	7.61±1.59ABa
	下坡	25	10、12、60、 64、70	2.39±0.16Aa	39.96±2.48Ba	20.46±2.94Aa	7.72±0.98Aa	7.81±1.12Aa
阴坡 Cloudy slope	上坡	55	5、7、15、21、40、 41、42、44、45、 58、68	2.71±0.31BCa	39.39±3.64Aa	19.08±2.19Ab	7.10±1.49Ab	6.94±1.86Ab
	中坡	35	14、22、43、46、 56、59、69	2.58±0.39Bab	39.99±3.85Aa	21.32±2.40Aa	7.03±1.69Ab	6.85±1.64Ab
	下坡	45	6、13、23、52、 53、54、55、 57、67	2.56±0.30Bb	39.23±3.59Ca	20.98±1.56Aa	7.78±0.93Ab	6.01±1.051Ab
半阴坡 Half-cloudy slope	上坡	35	1、19、25、26、 29、62、65	2.70±0.28Ca	36.27±3.67Ab	19.14±5.41ABa	7.47±1.65Aa	7.50±1.67Ab
	中坡	15	20、36、66	2.33±0.41ABb	38.44±3.90Bab	21.34±2.56Aa	8.48±1.36Ca	6.97±0.66Cc
	下坡	15	24、27、30	2.42±0.20Ab	40.41±0.81Aa	20.88±1.79Aa	6.11±1.52Ab	8.60±1.71Aa

不同大写字母表示同一坡位不同坡向林分因子差异显著;不同小写字母表示同一坡向不同坡位林分因子差异显著($P<0.05$)。表中数据均为平均值±标准差

2.2 样品采集

在样地内的典型地段,挖掘深度约 1m 的土壤剖面,深至底层土位置,记录土壤类型、各层厚度以及土壤质地并拍照。采用烘干法测定土壤含水率,环刀法测定土壤容重,并采集土壤样品,同一地形的取样点至少重复三次,采集部分样品带回实验室,待样地的各层土壤风干后,按实验所需土样数量,将研磨后的土样分别过孔径为 0.149mm 和 2mm 的土壤筛,然后对过筛后的样品进行土壤化学指标的测定。本项研究测定的土壤化学指标有:土壤 pH 值、全磷、全氮、全钾、总有机碳、有效磷、水解氮和速效钾等的含量。

2.3 优势木选择

依据红松人工林林木的胸径、树高、单株材积为生长指标,在每个样地内,选取 5 棵优势木作为对象木,其余林木只选作竞争木。本项研究设置了 70 块样地,一共选择 350 株优势木。

2.4 确定优势木的竞争木

2.4.1 样地边缘矫正

用 Excel 2010 对研究数据进行初步处理,根据样地内各树木的相对坐标,分别将树木迁移到 8 个邻近区域,并确定迁移后树木的坐标,最后将所有树木信息数据导入 Arcgis 10.2 中,根据树木的相对坐标信息,形成点层,即树木的空间分布(图 1),并根据每个样地点的坐标形成泰森多边形,根据泰森多边形的竞争单元及其

边数确定相应的竞争树(图 2)。

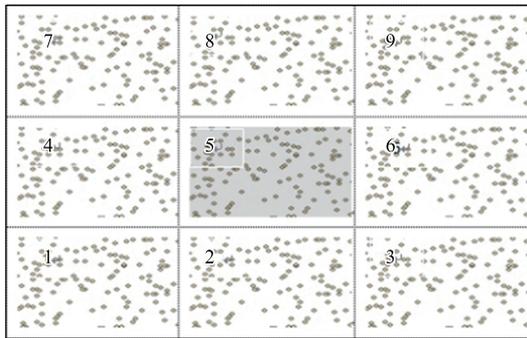


图1 样地边缘矫正示意图

Fig.1 Schematic Diagram of standard ground edge correction

图1中的数字5为实测样地,1、2、3、4、6、7、8、9为平移后的样地

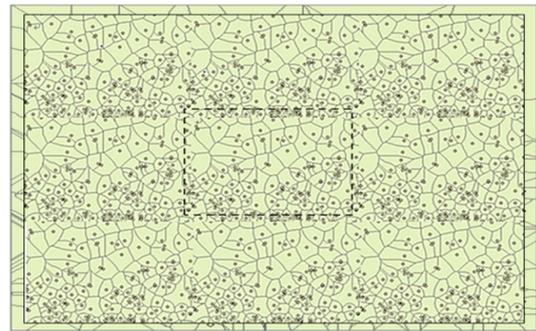


图2 林木 Voronoi 多边形示意图

Fig.2 Schematic diagram of Tree Voronoi polygon

2.4.2 边界木的处理

为了保证样地边缘优势木竞争关系的研究,用偏移法即八邻域平移法消除边缘效应,以原样地为中心,把样地向上、下、左、右、左上、左下、右上、右下八个方向偏移,偏移后的样地视为与原样地一致,偏移后共形成9个区域,样地内的所有优势木作为对象木^[21]。

2.4.3 竞争木的确定

根据泰森多边形的竞争单元及其边数,确定了相应的竞争木^[22](图3)。

2.4.4 对象木与竞争木之间距离的确定

使用 Arc-gis10.2 欧氏距离分析工具^[23],测得对象木与竞争木之间的距离。欧式距离的算法为:求得每个源像元到每个像元之间的距离,然后取源像元到像元之间的最短距离。

2.5 竞争指数模型的构建

选取 Hegyi 的单木竞争指数模型,表征研究区森林样地的竞争状况,公式如下^[24]:

$$CI_i = \sum_{j=1}^n (D_j D_i^{-1} L_{ij}^{-1})$$

式中, i 表示对象木(优势木), j 表示竞争木, CI_i 为优势木 i 的竞争指数; D_i 、 D_j 分别为优势木 i 和竞争木 j 的胸径; L_{ij} 表示优势木与竞争木之间距离; n 为竞争木数量。竞争指数大小代表着竞争的激烈程度,竞争指数越大,竞争越激烈,样地内所有优势木竞争指数的总和,即为样地竞争指数:

$$CI = \sum_{i=1}^n CI_i$$

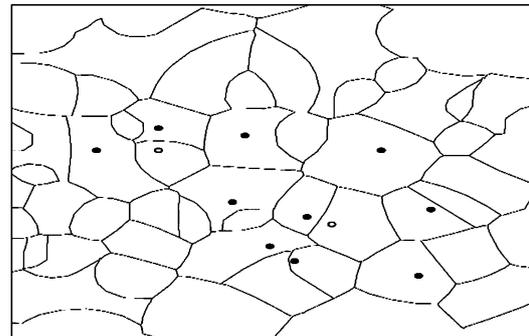
式中, CI 为样地内优势木竞争指数的总和; n 为优势木个数。

3 结果与分析

3.1 林分生长因子对优势木竞争指数的影响

3.1.1 优势木竞争指数与林分生长因子关系的拟合

由图4、图5可知,本研究中优势木的胸径大小主要为30—40cm,树高主要为15—25m,随着优势树木的增长,胸径变大,树高变高,对样地内空间资源的需求增大,导致其竞争指数急剧变大,因此,优势木竞争指数



○ 对象木 ● 竞争木

图3 Voronoi 竞争单元图

Fig.3 Voronoi diagram of the competition unit

与其胸径和树高均呈极显著的相关关系($R^2=0.73, R^2=0.82, P<0.05$)。由图 6 和图 7 可知,优势树种的竞争指数随树冠大小的增加而出现减小的趋势,当林木的冠幅大于 10m 时,林木之间的竞争相对减弱,竞争指数下降速度趋于平缓。

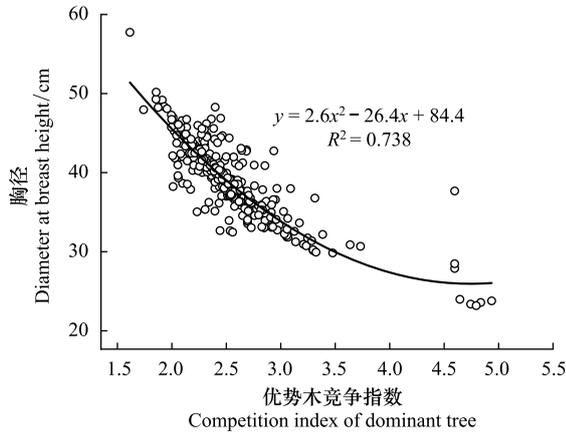


图 4 优势木竞争指数和胸径的拟合结果

Fig.4 The fitting result of dominant tree competition index with

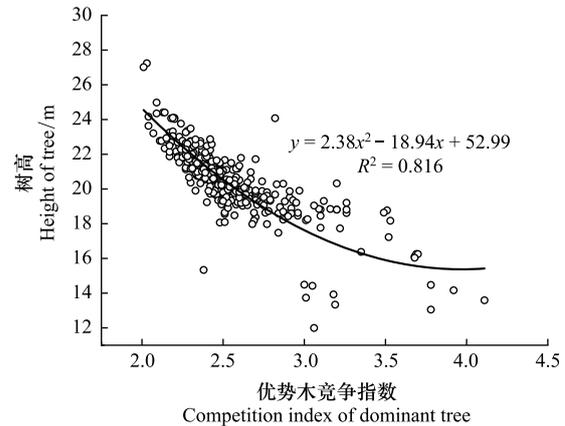


图 5 优势木竞争指数和树高的拟合结果

Fig.5 The fitting result of dominant tree competition index with tree height diameter at breast height

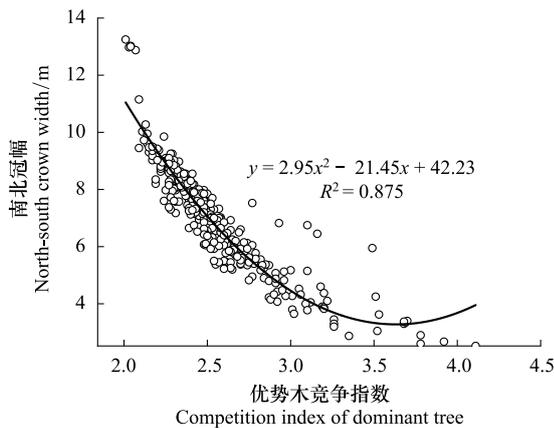


图 6 优势木竞争指数和南北冠幅的拟合结果

Fig.6 The fitting results of dominant tree competition index with north-south crown width

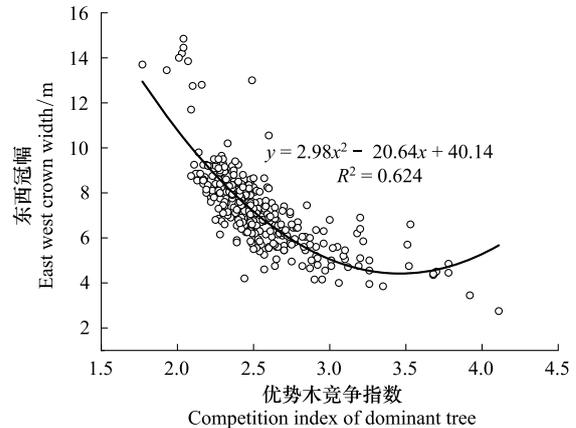


图 7 优势木竞争指数和东西冠幅的拟合结果

Fig.7 Fitting results of dominant tree competition index with east-west crown width

3.1.2 优势木竞争指数与林分生长因子的相关性分析

由表 2 可知,优势木竞争指数与胸径、树高、东西冠幅和南北冠幅均呈极显著的相关关系。其中优势木竞争指数与树高之间的关系最为显著($r=-0.806^{**}, P<0.01$),其次是胸径对优势木竞争指数的影响($r=-0.685^{**}, P<0.01$)仅次于树高,胸径和树高对优势木竞争指数的影响均大于冠幅,东西冠幅对优势木竞争指数的影响($r=-0.573^{**}, P<0.01$)略高于南北冠幅对优势木竞争指数的影响($r=-0.454^{**}, P<0.01$)。

3.2 地形因子对优势木竞争指数的影响

3.2.1 优势木竞争指数与地形因子关系的拟合

将优势木竞争指数、坡向、坡位三个因素放到三维空间进行分析,得到优势木竞争指数和坡向、坡位的三维空间分布图(图 8)。由图 8 可知,在优势木竞争指数和坡向、坡位的关系中,上坡的优势木竞争指数明显高

于中坡和下坡,阳坡和阴坡的优势木竞争指数高于半阴坡和半阳坡,由此看来,阳坡和阴坡上坡的优势木竞争尤为激烈,阴坡上坡、阳坡上坡的优势木竞争指数明显高于半阳坡、半阴坡下坡。由图 9 可知,优势木竞争指数随着海拔的升高而增大,林木主要集中分布在海拔为 500—800m 范围内。随着海拔的升高,竞争指数也随之增大,当海拔>800m 后,林木竞争指数增大的速度趋于平缓。

表 2 优势木竞争指数与林分因子的相关性分析

Table 2 Correlation analysis of dominant tree competition index and stand factor

项目 Project	优势木 竞争指数	胸径/cm	树高/m	东西冠 幅/m	南北冠 幅/m
优势木竞争指数 Competition index of dominant tree	1	-0.685 **	-0.806 **	-0.573 **	-0.454 **
胸径 Diameter at breast height/cm		1	0.788 **	0.622 **	0.723 **
树高 Height of tree/m			1	-0.111 *	-0.103
东西冠幅 East-west crown width/m				1	0.845 **
南北冠幅 North-south crown width/m					1

* 表示相关性达显著水平 ($P < 0.05$); ** 表示相关性达极显著水平 ($P < 0.01$)

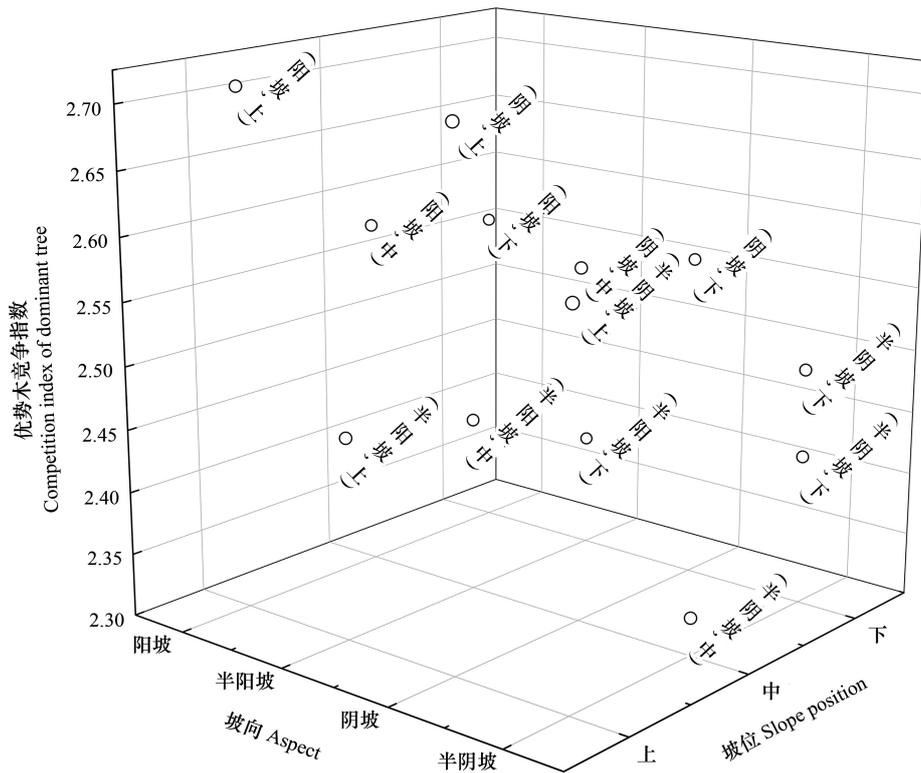


图 8 优势木竞争指数与坡向、坡位的三维空间分布图

Fig.8 Three-dimensional distribution of dominant tree competition index and slope aspect-to-slope position

3.2.2 优势木竞争指数与地形因子的相关性分析

从不同坡向的分析(表 1)可知,在半阳坡和半阴坡的红松优势木生长较好,其平均树高、平均胸径均高于阴坡和阳坡,红松冠幅与坡向不存在显著差异,阳坡、阴坡竞争指数高于半阳坡、半阴坡,平均值为 2.5—2.7。红松人工林优势木竞争指数与海拔、坡位、坡向 3 个地形因子变量的 Spearman 相关分析(表 3)表明,坡向、坡位与优势木竞争指数均呈显著相关($r = 0.521 **$, $r = 0.681 **$, $P < 0.01$),红松人工林优势木竞争指数与海拔呈极显著相关($r = 0.955 **$, $P < 0.01$),综上,地形因子对优势木竞争指数的影响的大小依次为海拔>坡位>坡向。

表 3 优势木竞争指数与地形因子的相关性分析

Table 3 Correlation analysis between competitive tree index and topographic factors

项目 Project	优势木竞争指数	坡向	坡位	海拔/m
优势木竞争指数 Competition index of dominant tree	1	0.521 **	0.681 **	0.955 **
坡向 Slope aspect		1	0.111 *	0.234 **
坡位 Slope position			1	0.169 **
海拔/m Altitude				1

3.3 土壤养分因子对优势木竞争指数的影响

3.3.1 优势木竞争指数与土壤养分因子关系的拟合

由图 10、11、12 和 13 可以看出,全氮、全磷、全钾和总有机碳含量与优势树种竞争指数呈负相关关系,优势树种竞争指数随着全氮、全磷、全钾和总有机碳含量的增大而减小,但是当增大到一定的值之后都会出现转折点,动态变化服从二次函数的变化规律。由图 14、15、16、17 可以看出,水解氮、有效磷、速效钾含量随着竞争指数的增大而减小,但是减小到一定的值之后又会出现上升的趋势,说明优势木竞争指数与土壤氮磷钾含量之间存在周期性的变化规律,pH 与优势木竞争指数没有显著的相关关系。

3.3.2 优势木竞争指数与土壤养分因子的相关性分析

优势木竞争指数与土壤养分因子的相关性分析(表 4)表明,土壤中全氮、全磷、全钾、总有机碳、水解氮、有效磷和速效钾的含量与优势木竞争指数均呈显著相关关系($r = -0.829^{**}$, $r = -0.831^{**}$, $r = -0.361^{**}$, $r = -0.680^{**}$, $r = -0.529^{**}$, $r = -0.500^{**}$, $r = -0.460^{**}$, $P < 0.01$), pH 与竞争指数没有相关性,相关系数的大小表明,全氮、全磷、总有机碳含量对优势木竞争指数的影响最为显著其次是水解氮、有效磷和速效钾对优势木竞争指数的影响较为显著。

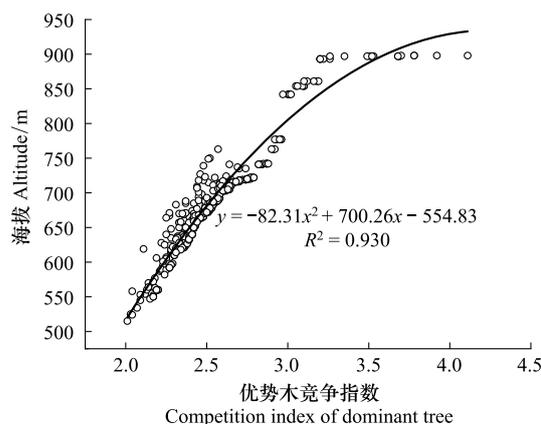


图 9 优势木竞争指数和海拔的拟合结果图

Fig.9 The fitting results of competition index of dominant tree with altitude

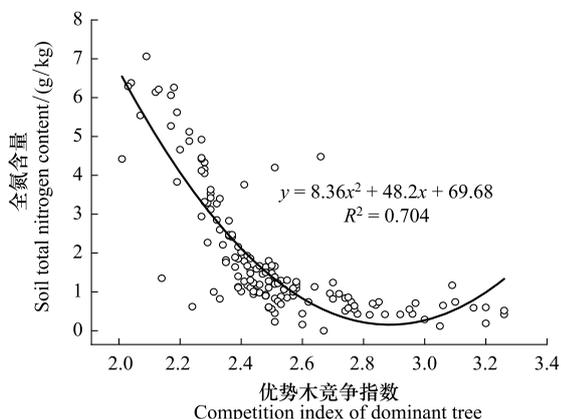


图 10 优势木竞争指数与土壤全氮含量的拟合结果

Fig.10 The fitting result of dominant tree competition index and soil total nitrogen content

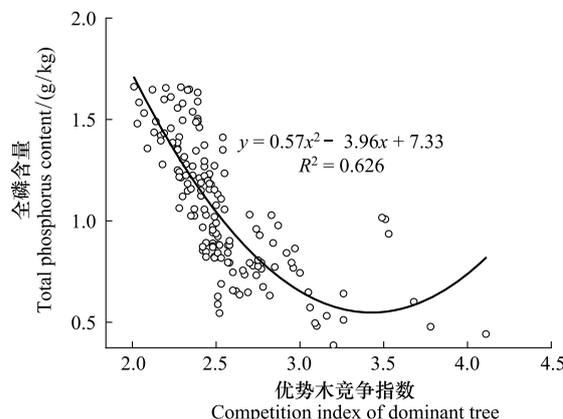


图 11 优势木竞争指数与土壤全磷含量的拟合结果

Fig.11 The fitting result of dominant tree competition index and soil total phosphorus content

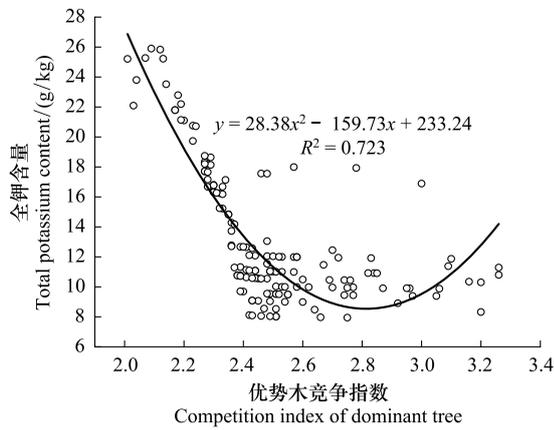


图 12 优势木竞争指数与全钾含量的拟合结果

Fig.12 The fitting result of dominant tree competition index with potassium

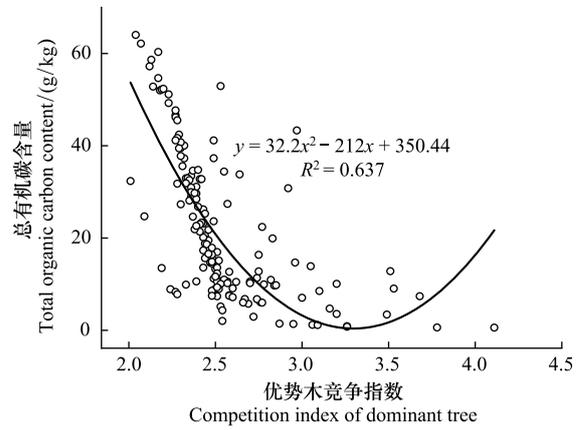


图 13 优势木竞争指数与总有机碳含量的拟合结果

Fig.13 The fitting result of dominant tree competition index with total content organic carbon content

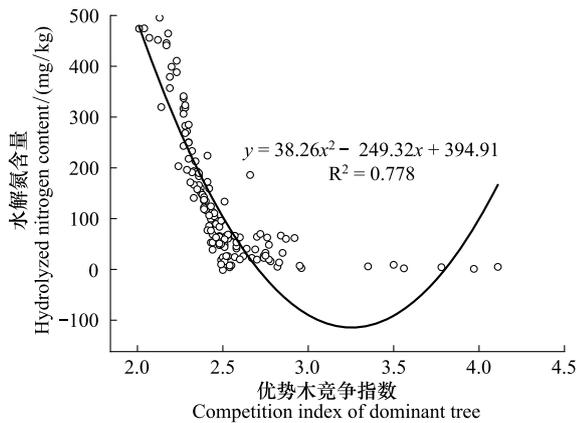


图 14 优势木竞争指数与水解氮含量的拟合结果

Fig.14 The fitting result of dominant tree competition index and total potassium content

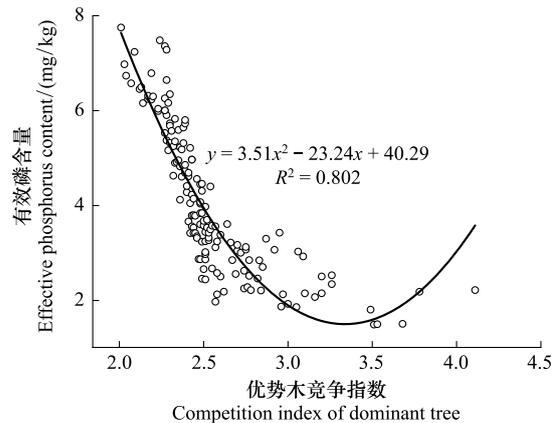


图 15 优势木竞争指数与有效磷含量的拟合结果

Fig.15 The fitting result of dominant tree competition index and available phosphorus content

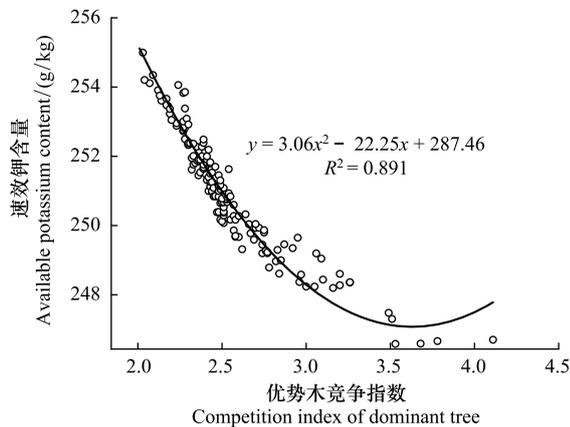


图 16 优势木竞争指数与速效钾含量的拟合结果

Fig.16 The fitting result of dominant tree competition index with hydrolyzable nitrogen content

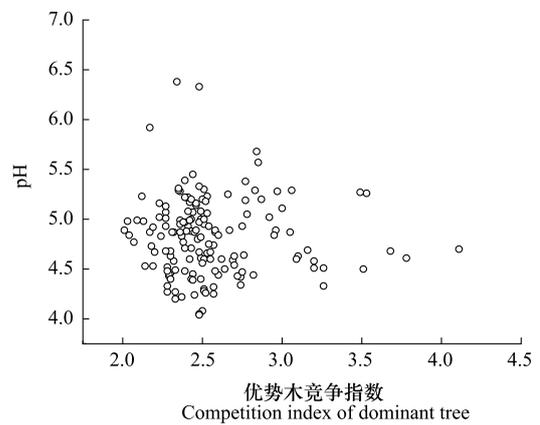


图 17 优势木竞争指数与 pH 的拟合结果

Fig.17 The fitting result of dominant tree competition index with pH

表 4 优势木竞争指数与土壤因子相关性分析

Table 4 Correlation analysis of dominant tree competition index and soil factors

项目 Item	优势木竞争指数	全氮含量/ (g/kg)	全磷含量/ (g/kg)	全钾含量/ (g/kg)	总有机碳含量/ (g/kg)	水解氮含量/ (mg/kg)	有效磷含量/ (mg/kg)	速效钾含量/ (mg/kg)	pH
优势木竞争指数 Competition index of dominant tree	1	-0.829**	-0.831**	-0.361**	-0.680**	-0.529**	-0.500**	-0.460**	0.046
全氮含量/(g/kg) Total nitrogen content		1	0.691**	0.0289	0.0635	0.445**	0.0420	0.385	-0.011
全磷含量/(g/kg) Total phosphorus content			1	0.0332	0.0620	0.450**	0.425**	0.0391	-0.107
全钾含量/(g/kg) Total potassium content				1	0.238**	0.0668	0.0651	0.470**	0.016
总有机碳含量/(g/kg) Total organic carbon content					1	0.252	0.240	0.391	-0.028
水解氮含量/(mg/kg) Hydrolyzed nitrogen content						1	0.0987	0.692**	0.025
有效磷含量/(mg/kg) Available phosphorus content							1	0.667**	0.028
速效钾含量/(mg/kg) Available potassium content								1	0.089
pH									1

4 讨论与结论

4.1 林分生长因子与优势木竞争指数的关系

通过对红松人工林优势木竞争指数的特征及影响因素的分析发现,目标树越小,竞争压力越大。直径 20—45 cm 的幼树容易受到环境的影响,其获取资源的能力取决于环境的供给,立地条件好竞争压力小的林分生长最优^[25]。红松胸径小于 25 cm 时,所承受的竞争压力较大;胸径大于 25 cm 以后,竞争指数变化不大,并维持较低的水平。胸径为 40—50cm 树木的树冠和树根发育的较为成熟,竞争力趋于稳定,受到环境的影响并不显著,这与项小燕等对大别山五针松的种内竞争和李际平等对福寿山林场杉木林的竞争状况的研究结果比较相似^[26]。相关分析表明,优势木胸径与竞争指数强度呈负相关,绝对值大于 0.5,胸径对优势树种的竞争有较大影响,其次,从对林分因子的相关性分析中可知,林木的竞争指数与胸径、树高、冠幅均呈显著的相关关系,说明林木的胸径越大,树高越高,其冠幅也越大,树木对土壤养分、水分的吸收能力越强^[27],能够进行更多的光合作用,所以较大的树木拥有较强的生存能力,较小的树木拥有较弱的生存能力,当小树的竞争能力减弱到一定程度,并且吸收的养分不能够维持自身生存时会发生自然稀疏现象。

4.2 地形因子与优势木竞争指数的关系

通过对不同坡位优势木竞争指数的大小分析可知,由于重力侵蚀的作用,红松林上坡土壤中养分容易流失,下坡中土壤的养分含量高于上坡,林木的生长条件自上而下得到改善,优势木竞争指数自下而上也呈现出递增趋势。坡向和坡位对优势木竞争指数影响极显著,结论和天目山常绿阔叶林空间结构与地形因子关系的结论一致^[28],由于红松喜光性强,对土壤水分要求较高,导致其在阴坡的竞争指数无论上坡还是下坡都较大,红松林的生长状况由上而下逐渐转好,生长在阴坡和阳坡上坡的红松林之间的竞争较为激烈,在半阴半阳坡生长较好^[29],红松优势木竞争指数与海拔呈显著的正相关关系,说明海拔较低时有利于红松的生长^[30]。红松人工林优势木竞争指数的大小往往是地理分布、地形、气候、土壤、林分、外界干扰及其他随机性因素共同作用的结果。此次研究发现,地形因子可在一定程度上解释红松人工林优势木竞争指数大小与空间分布的关系,但还有一部分红松优势木竞争指数特性未被解释,今后可以增加其他与优势木竞争指数有关的因子进行分析,例如气温、郁闭度、生物量、降水及林分密度等,以进一步提高结果的解释程度^[31]。

4.3 土壤因子与优势木竞争指数的关系

红松人工林优势木竞争指数与氮磷钾都呈极显著的关系,其与土壤速效矿质元素的供应情况存在明显关联,速效矿质养分可以通过参与红松的生理生化活动,间接对红松竞争产生影响。竞争指数与土壤养分因子存在显著相关或者极显著相关^[32]。林木竞争越大,对全钾和全磷吸收加大。土壤 pH 值对优势木的竞争指数并无显著影响,这一结果与韩大校的环境和竞争对典型阔叶红松林不同生长阶段树木胸径生长的影响不一致^[33],由于研究区样地的 pH 值并无太大波动,导致了 pH 值对优势木的竞争指数并无显著影响,说明该地区土壤酸碱性适宜红松的生长。

红松人工林优势木竞争关系的强弱往往是地理分布、地形、气候、土壤、林分、外界干扰及其他随机性因素共同作用的结果。培育大径材的红松人工林应栽植于阴坡或半阴半阳坡、坡度较小、土层厚度较大、土壤肥沃和通透性良好的地区,为防止生理干旱发生,应避免风口栽植。此外,本研究过程中虽考虑了林分生长因子、地形因子以及土壤养分因子对单木竞争指数的影响,但由于林分水平的竞争难以量化,故评价效果有限。未来可以通过研究林分空间结构,量化林分竞争,从而更近一步的研究优势木竞争指数与影响因子的关系。

参考文献 (References):

- [1] 闫东锋, 黄家荣. 宝天曼自然保护区主要树种竞争数量关系. 中国农学通报, 2008, 24(11): 165-168.
- [2] Strauss-Debenedetti S, Bazzaz FA. Plasticity and acclimation to light in tropical moraceae of different successional positions. *Oecologia*, 1991, 87(3): 377-387.
- [3] Kai Chen, John R. Olson, Jacob J. Charles P. Hawkins. Improving the performance of ecological indices by balancing reference site quality and representativeness[J]. *Hydrobiologia*, 2019, 837
- [4] Cornelissen J H C, Diez P C, Hunt R. Seedling growth, allocation and leaf attributes in a wide range of woody plant species and types. *Journal of Ecology*, 1996, 84(5): 755-765.
- [5] Baker T R, Burslem D F R P, Swaine M D. Associations between tree growth, soil fertility and water availability at local and regional scales in Ghanaian tropical rain forest. *Journal of Tropical Ecology*, 2003, 19(2): 109-125.
- [6] 李秧秧, 石辉, 张安邦, 谭红朝. 黄土丘陵区几种林木茎干径向生长的日变化及其对环境因素的响应. 水土保持学报, 2007, 21(6): 170-173, 196-196.
- [7] Worbes M. Annual growth rings, rainfall-dependent growth and long-term growth patterns of tropical trees from the Caparo Forest Reserve in Venezuela. *Journal of Ecology*, 1999, 87(3): 391-403.
- [8] Drew D M, Downes G M, Grzeskowiak V, Naidoo T. Differences in daily stem size variation and growth in two hybrid eucalypt clones. *Trees*, 2009, 23(3): 585.
- [9] Enquist B J, West G B, Charnov E L, Brown J H. Allometric scaling of production and life-history variation in vascular plants. *Nature*, 1999, 401(6756): 907-911.
- [10] Taylor J E, Ellis M V, Rayner L. Growth, recruitment and attrition of Eucalyptus tree species in semi-arid temperate woodland. *Forest Ecology and Management*, 2014, 331: 25-34.
- [11] Lebrija-Trejos E, Wright S J, Hernández A, Reich P B. Does relatedness matter? Phylogenetic density-dependent survival of seedlings in a tropical forest. *Ecology*, 2014, 95(4): 940-951.
- [12] Daniels R F. Simple competition indices and their correlation with annual loblolly pine tree growth. *Forest Science*, 1976, 22(4): 454-456.
- [13] Weigelt A, Jolliffe P. Indices of plant competition. *Journal of Ecology*, 2003, 91(5): 707-720.
- [14] 张莉, 陆畅, 李晓红, 王磊, 张小平. 皇藏峪自然保护区青檀种群年龄结构及种内、种间竞争. 上海交通大学学报: 农业科学版, 2012, 30(1): 34-40.
- [15] 刘平, 马履一, 贾黎明, 王玉涛. 油松林木枯损率模型研究. 林业资源管理, 2008, (2): 51-56.
- [16] 师静, 李任波, 卢萍. 昆明地区针叶混交林林木竞争指标研究. 内蒙古林业调查设计, 2010, 33(1): 26-28, 89-89.
- [17] Hegyi P, Rakonczay Jr Z, Sári R, Góg C, Lonovics J, Takács T, Czákó L. L-arginine-induced experimental pancreatitis. *World Journal of Gastroenterology*, 2004, 10(14): 2003-2009.
- [18] 江希钿. 单木模型的研制及优化的研究. 中南林业调查规划, 1996, 15(1): 1-4.
- [19] 杨惠滨, 国庆喜. 地形与竞争因子对红松胸径与年龄关系的影响. 生态学报, 2016, 36(20): 6487-6495.
- [20] 殷鸣放, 薛娟, 宁良智, 何影, 陈晓非. 基于近自然林业经营的不同密度林木竞争关系比较分析. 西北林学院学报, 2013, 28(5): 149-

153, 199-199.

- [21] Hrinca I. An optimal control problem for the lotka-volterra system with delay. *Nonlinear Analysis: Theory, Methods & Applications*, 1997, 28(2): 247-262.
- [22] 褚欣, 潘萍, 欧阳勋志, 臧颖, 吴自荣, 汪清, 单凯丽. 闽楠天然次生林林木综合竞争指数研究. *西北林学院学报*, 2019, 34(4): 199-205.
- [23] 刘青. 基于流形学习和参数优化的 SVM 入侵检测算法[D]. 石家庄: 河北师范大学, 2015.
- [24] 刘怡青, 田育红, 宋含章, 黄薇霖. 胸径和林分密度决定内蒙古东部落叶松林种内竞争. *生态学杂志*, 2018, 37(3): 847-853.
- [25] 闵志强, 胡云云, 王得军, 孙景梅, 李宏韬, 李卫忠. 基于哑变量的秦巴山区天然栎类林胸径和树高生长模型研究. *林业资源管理*, 2020, (5): 89-99.
- [26] 李学东, 杨玥, 杨波, 赵涛, 宇振荣. 基于耕作半径分析的山区农村居民点布局优化. *农业工程学报*, 2018, 34(12): 267-273.
- [27] 龙俊松, 汤孟平. 天目山常绿阔叶林空间结构与地形因子的关系. *浙江农林大学学报*, 2021, 38(1): 47-57.
- [28] 董利虎, 李凤日, 贾炜玮. 林木竞争对红松人工林立木生物量影响及模型研究. *北京林业大学学报*, 2013, 35(6): 15-22.
- [29] 陈乃全, 王政权. 勃力县红松、落叶松人工林生长与立地因子关系的研究. *东北林业大学学报*, 1987, (1): 13-22.
- [30] 张凡兵, 龙婷, 金文斌, 李景文. 红松林天然更新对连续小梯度海拔变化的响应. *东北林业大学学报*, 2017, 45(5): 1-10.
- [31] 李程, 罗鹏, 李志清. 红松天然林胸径生长的空间异质性及其与地形的关系. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2017, 41(1): 129-135.
- [32] 孙宇, 李际平, 曹小玉, 颜佳睿. 基于通径分析的杉木林空间结构与土壤养分关系研究. *中南林业科技大学学报*, 2020, 40(7): 41-47.
- [33] 韩大校. 环境和竞争对典型阔叶红松林不同生长阶段树木胸径生长的影响[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2017.