

DOI: 10.5846/stxb202112143542

刘亚栋, 王晓霞, 和璐璐, 柳正元, 曾小莉, 沙海峰, 何宝华, 金莹杉, 李杰, 陈建梅, 郭桂凤, 段劼. 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. 生态学报, 2023, 43(5): 1959-1970.

Liu Y D, Wang X X, He L L, Liu Z Y, Zeng X L, Sha H F, He B H, Jin Y S, Li J, Chen J M, Guo G F, Duan J. Effects of spatial structure on understory vegetation and soil properties in *Pinus tabuliformis* plantation of different succession types in Beijing. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(5): 1959-1970.

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

刘亚栋¹, 王晓霞¹, 和璐璐¹, 柳正元¹, 曾小莉², 沙海峰², 何宝华³, 金莹杉³, 李杰⁴, 陈建梅⁵, 郭桂凤⁶, 段劼^{1,*}

1 北京林业大学林学院, 北京 100083

2 北京市园林绿化局, 北京 100007

3 北京市西山试验林场管理处, 北京 100093

4 北京市十三陵林场管理处, 北京 102200

5 首都绿色文化碑林管理处, 北京 100094

6 密云区园林绿化局, 北京 101500

摘要:以北京地区油松(*Pinus tabuliformis*)人工林不同演替类型林分为研究对象,研究油松纯林、油松-栓皮栎(*Quercus variabilis*)混交林和栓皮栎纯林三种不同演替类型林分的空间结构、林下植被和土壤水分的变化规律及其相互作用关系。结果表明:(1)林分水平及垂直空间结构、草本层物种多样性、更新幼树生长、土壤持水和透气性等指标在三种不同演替类型林分间差异显著($P<0.05$),林分空间结构参数中的角尺度、林层指数和开敞度显著影响了各类型林分的灌草多样性,混交度、林层指数和大小比数显著影响了更新幼树的生长,混交度和林层指数显著影响了土壤水分的变化($P<0.05$)。(2)松栎混交林灌草生物量、天然更新幼树的生长以及土壤水分物理状况均好于纯林,并主要受林分混交度和林层指数的共同作用。(3)各演替类型林分内均存在栓皮栎更新幼树,混交林栓皮栎更新幼树数量最多、长势最好,对林地资源的竞争最为激烈。因此,可以通过调整林分空间结构实现种间关系及林地资源的调控,以充分发挥森林生态系统的各项功能与价值。

关键词:油松人工林;演替;空间结构;林下植被;土壤水分

Effects of spatial structure on understory vegetation and soil properties in *Pinus tabuliformis* plantation of different succession types in Beijing

LIU Yadong¹, WANG Xiaoxia¹, HE Lulu¹, LIU Zhengyuan¹, ZENG Xiaoli², SHA Haifeng², HE Baohua³, JIN Yingshan³, LI Jie⁴, CHEN Jianmei⁵, GUO Guifeng⁶, DUAN Jie^{1,*}

1 School of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2 Beijing Municipal Forestry and Parks Bureau, Beijing 100007, China

3 Beijing Xishan Experimental Forest Farm, Beijing 100093, China

4 Beijing Ming Tombs Forest Farm, Beijing 102200, China

5 Capital Green Culture Stele Forest Management Office, Beijing 100094, China

6 Miyun Municipal Forestry and Parks Bureau, Beijing 101500, China

Abstract: Using different succession types of *Pinus tabuliformis* plantation in the Beijing area as the research object, this

基金项目:北京市园林绿化局项目“北京市国有林场精准提质”(20210618)

收稿日期:2021-12-14; 网络出版日期:2022-10-21

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: duanjie@bjfu.edu.cn

study investigated the change rules and interaction of stand spatial structure, understory vegetation, and soil water of three different succession types: *Pinus tabuliformis* pure forests, *Pine-Quercus* mixed forests, and *Quercus variabilis* pure forests. The results were as follows. (1) There were significant differences in horizontal and vertical stand spatial structure, species diversity of herbaceous layer, saplings growth, and soil water physical properties among the three different succession types ($P < 0.05$). In addition, the angle index, stand layer index and opening degree index of stand spatial structure parameters significantly affected the shrub and grass diversity of each type of stand ($P < 0.05$), while the mingling degree, stand layer index and neighborhood comparison significantly affected the growth of saplings ($P < 0.05$), and the mingling degree and stand layer index significantly affected the change of soil water ($P < 0.05$). (2) The biomass of shrub and grass, saplings growth, and the physical condition of soil water were all the better within the mixed forest than in the pure forest and were mostly influenced by the mingling degree and the stand layer index. (3) The natural regeneration saplings of *Quercus variabilis* were observed in all succession types, with mixed forest having the most saplings and the best growth and the most intensive competition for forest resources. Therefore, interspecific relationships and forest resources can be regulated by adjusting the spatial structure of stand, so as to give full play to the functions and values of forest ecosystem.

Key Words: *Pinus tabuliformis* plantation; succession; stand spatial structure; understory vegetation; soil water

森林空间结构是林木的分布格局及其属性在空间上的排列方式,是森林生长过程的驱动因子,也是森林经营过程中最容易调控的因子^[1]。森林空间结构决定林木间的竞争关系及其空间生态位,很大程度上决定了林木的生长状况和森林生态系统的稳定性^[2]。在森林经营中,充分考虑森林空间结构的影响是维持和改善森林质量的基本前提^[3]。有研究表明,林分空间结构与林分的功能相互影响,不同的林分结构会反映出不同的林分功能,林分功能的强弱也会间接的反映出林分结构的合理性^[4]。

林下植被作为森林生态系统的重要组成部分,在改善立地条件和维护生态系统多样性等方面具有重要作用^[5-7]。土壤是森林生态系统中物质和能量交换的重要参与者和载体,为植物生长提供所必需的矿质营养和水分,可以影响植物的萌发、生根等过程,从而影响森林结构与功能,进而影响森林生态系统的更新和演替^[8]。同时,森林生态系统中植被的群落组成、结构及多样性的变化又反过来影响土壤的形成、发育以及土壤养分的有效性^[9-10]。植被和土壤作为一个密不可分的整体,其协同变化维持着生态系统的动态平衡^[11]。

林分空间结构可随不同演替阶段和类型发生变化,并可显著影响林下植被和土壤状况^[12-13]。众多学者围绕森林不同演替阶段和类型的空间结构变化开展了大量研究,有关林分空间结构对林下植被影响的研究包括对林下物种多样性^[14]和生物量^[15]的影响,以及对林下更新幼树密度^[16]、生长状况^[17]、空间分布格局^[18]的影响。关于林分空间结构对土壤影响的研究多集中于其对土壤养分^[19]及土壤水分^[20]的影响。研究树种包括长白落叶松(*Larix olgensis*)、马尾松(*Pinus massoniana*)、红松(*Pinus koraiensis*)等。已上报道多是对同一演替阶段林分类型的研究,并未对不同演替阶段林分类型开展对比研究。本文以油松人工林不同演替类型林分为研究对象,重点开展各类型林分空间结构、林下植被和土壤状况的变化规律及相互作用的研究,以丰富完善人工林生态系统演替相关研究。

油松(*Pinus tabuliformis*)是我国北方重要的造林树种之一。20世纪六十年代,北京地区营造了大面积的油松人工纯林,为保护保障首都生态安全、改善环境质量起到了巨大作用^[21]。通过实地调查发现,北京地区油松人工林出现了局部衰退现象,部分油松人工林逐渐被栓皮栎(*Quercus variabilis*)取代,尤以阳坡最为显著。栓皮栎为喜光树种,深根性,根系发达,萌芽力强,幼苗耐荫^[22]。1978年,沈国舫^[23]在研究北京西山地区油松-栓皮栎混交林时发现,演替后期栓皮栎生长速度远超油松,并压制油松生长。宁金魁^[24]在研究该地区油松人工林时也提出油松复层异龄林、油松-栓皮栎混交林和栓皮栎-油松混交林是其演替发展的三个类型。

本研究以20世纪50年代在北京西山地区营造的油松人工纯林不同演替类型林分为研究对象,包括油松纯林、油松-栓皮栎混交林、栓皮栎纯林三类,系统研究了各类型林分空间结构、林下植被和土壤的变化规律,

试图揭示各演替类型林分林下植被和土壤对林分结构的响应机制。研究结果对了解该地区油松人工林演替动态,不同演替类型人工林生态系统林分结构、林下植被群落以及林地土壤特征等具有重要意义,同时可为类似地区油松、栓皮栎人工林林分结构调控及经营提供科学依据和理论参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究区域位于北京市西山国家森林公园(116°11'51.20"E,39°58'18.17"N)(图1),平均海拔300—400 m。土壤为山地褐色土,多石砾,保水能力差,土层厚度一般为30—50 cm。研究区域属暖温带半湿润大陆性季风气候,年平均气温11.6℃,年平均降水量600 mm左右,相对湿度43%—79%。公园有林地面积约5940 hm²,灌木林地面积约380 hm²,林木绿化率为98.67%,森林覆盖率为92.32%,共有植物250多种,分属73科。主要造林树种有油松、侧柏(*Platycladus orientalis*)、栓皮栎等。

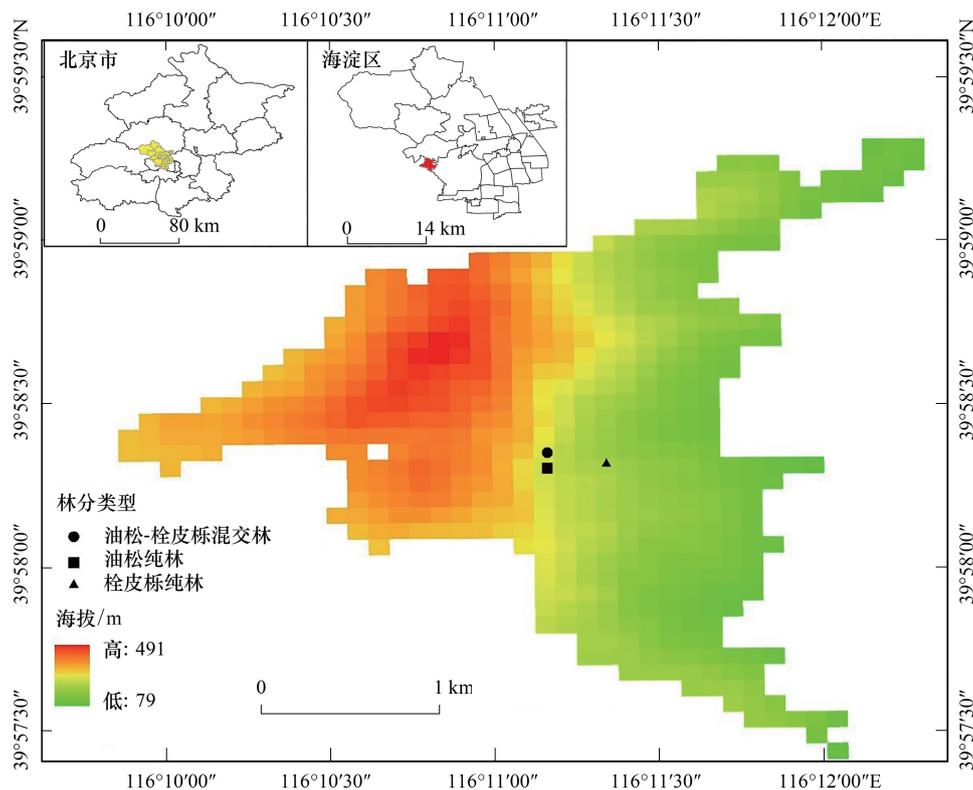


图1 研究区位置示意图

Fig.1 Schematic diagram of location of study area

1.2 样地设置及群落调查

本研究所选样地的初始造林树种均为油松,于1955年春季采用水平带状方式整地,1956年采用人工植苗方式营造,初植密度均为3975株/hm²,后期均未进行过人为干扰。2021年7月,在分析小班资料结合全面踏查的基础上,按纯林和混交林的划分标准^[25],选择了油松人工纯林(P)和由其演替形成的油松-栓皮栎混交林(PQ)和栓皮栎纯林(Q)进行研究,三种林分类型照片见图2。由于栓皮栎纯林是由油松纯林演替而来的异龄林,因此无法确定林分的具体年龄,油松和栓皮栎株数比例见表1。所选样地立地条件均为低山阳坡厚土。每个林分类型设置4个面积为25 m×25 m的样地,记录每个样地的海拔、坡度、坡向等地形因子,并进行每木检尺(表1)。林下植被分为灌木、草本及更新幼树三类,具体测定指标及方法为:



图2 三种林分演替类型照片

Fig.2 Photos of different succession types

表1 样地基本情况

Table 1 Basic information of sampling plots

林分类型 Stand types	株数比例 P:Q ratio	海拔 Elevation/ m	坡向 Slope aspect	坡度 Slope/(°)	坡位 Slope location	郁闭度 Canopy density	平均胸径 Mean DBH/cm	平均冠幅 Mean crown width/m	平均树高 Mean height/ m	密度 Density/ (株/hm ²)	更新密度 Regeneration density/ (株/hm ²)	年龄 Age/年
P	19:1	165	阳	17—22	下	0.82	17.76	4.52	8.26	812	828	65
PQ	7:3	183	阳	17—22	下	0.85	14.96	4.48	7.23	776	1372	65
Q	1:4	160	阳	17—23	下	0.90	19.14	5.19	9.69	616	736	—

P: 油松纯林 *Pinus tabulaeformis* pure forests; PQ: 松栎混交林 *Pine-Quercus* mixed forests; Q: 栓皮栎纯林 *Quercus variabilis* pure forests; DBH: 胸径 Diameter at breast height

灌木: 每个样地内按对角线法设置 5 个 5 m×5 m 的灌木样方, 记录每个样方内物种数量、高度等, 采用标准株结合标准枝法获取灌木地上部分生物量。

草本: 每个灌木样方内随机设置 1 个 1 m×1 m 的草本样方, 记录每个样方内物种的数量、高度、盖度、多度等, 采用收获法获取草地上部分生物量, 采用掘土块法获取草本地下部分生物量。

幼树: 记录样地内所有胸径 5 cm 以下栓皮栎更新幼树的地径和苗高。

本试验共设置 12 个乔木样地, 60 个灌木样方, 60 个草本样方。

1.3 空间结构参数的选取和计算

选取角尺度 (W_i)、混交度 (M_i)、大小比数 (U_i) 表征林分的水平空间结构; 选取开敞度 (OP_i)、林层指数 (SL_i) 表征林分的垂直空间结构; 选取竞争指数 (C_i) 表征林木竞争态势。各指标测定及计算方法如下。

在样地中随机挑选 1 株目标树及其周围最近的 4 株相邻木构成 1 个空间结构单元, 测量目标树到每株相邻木的水平距离以及目标树与任意 2 株最近相邻木构成的较小夹角 α ; 同时记录目标树与相邻木是否为同一物种, 是否处于同一林层, 树高一般相差 5 m 即可划分为不同的层次^[26]。各样地选取 20 个空间结构单元, 本试验共选取 240 个空间结构单元。

角尺度反映林木水平分布的均匀性, 计算公式为^[27]:

$$W_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n z_{ij} \quad (1)$$

式中: 当第 j 个 α 角小于标准角 α_0 , $z_{ij} = 1$; 否则 $z_{ij} = 0$ 。 n 为相邻木数量, 本研究取 n 值为 4。

混交度反映树种间的隔离程度, 计算公式为^[26]:

$$M_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n v_{ij} \quad (2)$$

式中: 当目标树 i 与相邻木 j 非同种, $v_{ij} = 1$; 否则 $v_{ij} = 0$ 。

大小比数反映林分中林木分化程度的大小, 计算公式为^[28]:

$$U_i = \sum_{j=1}^n k_{ij} \quad (3)$$

式中:当目标树 i 胸径小于相邻木 j 时, $k_{ij}=1$; 否则 $k_{ij}=0$ 。

开敞度反映目标树受相邻木遮蔽的程度, 计算公式为^[29]:

$$OP_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n t_{ij} \quad (4)$$

式中:当 $D_{ij} \geq h_j - h_i$, $t_{ij}=1$; 否则 $t_{ij}=0$ 。 h_i 为目标树 i 的树高; h_j 为相邻木 j 的树高; D_{ij} 为目标树 i 与相邻木 j 间的距离。

林层指数反映林层在垂直方向上的复杂性和多样性, 计算公式为^[26]:

$$SL_i = \frac{z_i}{3} \times \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n s_{ij} \quad (5)$$

式中, 当目标树 i 与相邻木 j 不属同层, $s_{ij}=1$; 否则 $s_{ij}=0$ 。 z_i 为目标树 i 所在空间结构单元中林层个数。

竞争指数反映林木所承受的竞争压力, 计算公式为^[26]:

$$C_i = \sum_{j=1}^n \frac{d_j}{d_i} \times \frac{1}{D_{ij}} \quad (6)$$

式中, C_i 为 Hegyi 竞争指数; d_i 为目标树 i 的胸径; d_j 为相邻木 j 的胸径。

1.4 物种多样性指数的计算

采用物种相对多度 (RA)、相对高度 (RH)、相对盖度 (RC) 计算物种的重要值 p_i , 进而计算林下灌草的 Simpson 指数 (D)、Shannon-Wiener (H')、Pielou 指数 (J_{sw}) 及 Patrick 指数 (S'), 计算公式如下^[14]:

$$P_i = (RA + RH + RC) / 3 \quad (7)$$

$$D = 1 - \sum_{i=1}^S p_i^2 \quad (8)$$

$$H' = - \sum_{i=1}^S p_i \ln p_i \quad (9)$$

$$J_{sw} = H' / \ln S \quad (10)$$

$$S' = S \quad (11)$$

式中, S 为物种数量。

1.5 土壤水分的测定

在样地内按五点取样法取样 (图 3), 去除表层植被后分别用环刀在 0—20 cm、20—40 cm、40—60 cm 土层取原状土壤, 采用环刀法和浸水法测定土壤容重、土壤含水量、总孔隙度、毛管孔隙度、饱和持水量和毛管持水量 6 项土壤水分指标^[30]。

1.6 数据处理

利用 Excel 2019 和 SPSS 25.0 整理和分析实验数据, 利用 Origin 2021 作图。采用单因素方差分析不同演替类型林分空间结构参数、林下植被情况以及土壤水分状况; 对不同演替类型林分空间结构参数与林下植被以及土壤水分的相互关系采用 Person 相关分析。

2 结果与分析

2.1 不同演替类型林分空间结构的变化

由表 2 可知, 不同演替类型空间结构参数存在差异的有林分混交度、开敞度和林层指数 ($P < 0.05$)。PQ 的混交度显著大于 P、Q ($P < 0.05$), P 与 Q 混交度无显著差异 ($P > 0.05$)。P 的开敞度显著大于 PQ ($P < 0.05$), P 与 Q、PQ 与 Q 的开敞度无显著差异 ($P > 0.05$)。PQ 的林层指数显著大于 Q ($P < 0.05$), P 与 PQ、Q 与 PQ 的

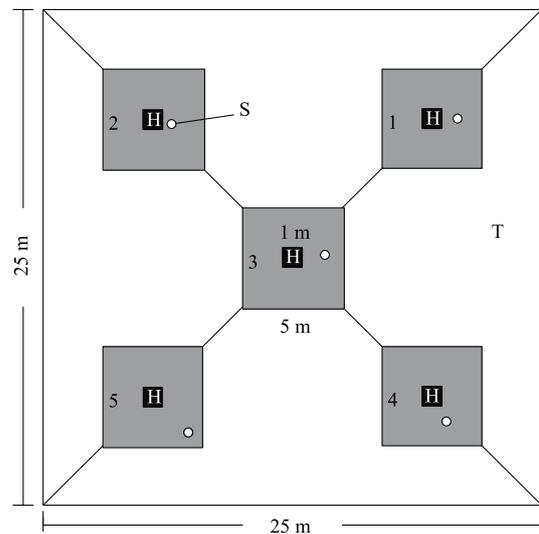


图 3 五点取样法示意图

Fig.3 Schematic diagram of five-point sampling method
T 为乔木样地; 1—5 为灌木样方; H 为草本样方; S 为取土点

林层指数无显著差异($P>0.05$)。整体来看,松栎混交林形成了较为复杂的复层垂直结构;油松纯林开敞度较大,林木互相遮蔽程度低,竞争程度也低;栓皮栎纯林林层指数最低,表明其乔木树冠生长垂直变化较小,基本在同一层次。

表 2 不同演替类型林分空间结构参数及方差检验

Table 2 Spatial structure parameter and variance test in different stand succession types

空间结构参数 Spatial structure parameters	演替类型 Succession types		
	P	PQ	Q
W_i	0.433±0.096a	0.461±0.109a	0.396±0.120a
M_i	0.094±0.045b	0.513±0.080a	0.214±0.091b
U_i	0.465±0.041a	0.334±0.096a	0.348±0.017a
OP_i	0.871±0.030a	0.728±0.078b	0.852±0.110ab
SL_i	0.297±0.103ab	0.407±0.094a	0.146±0.057b
C_i	0.356±0.029a	0.386±0.051a	0.401±0.078a

W_i :角尺度 Angle index; M_i :混交度 Mingling degree; U_i :大小比数 Neighborhood comparison; OP_i :开敞度 Opening degree index; SL_i :林层指数 Stand layer index; C_i :竞争指数 Competition index;不同小写字母表示不同演替类型林分间的数据差异显著($P<0.05$)

2.2 不同演替类型林分林下植被及土壤水分的变化

2.2.1 不同演替类型林分林下灌草多样性及生物量变化

由图 4 可知,不同演替类型林分灌木层物种多样性指数差异不显著($P>0.05$);P 林下草本层多样性显著大于 Q($P<0.05$),PQ 与 Q 林下草本层多样性指数差异不显著。由图 5 可知,不同演替类型林分灌木地上生物量和草本地地上及地下生物量差异均不显著($P>0.05$)。三个类型林分均未进行过人为干扰,林下灌草种类

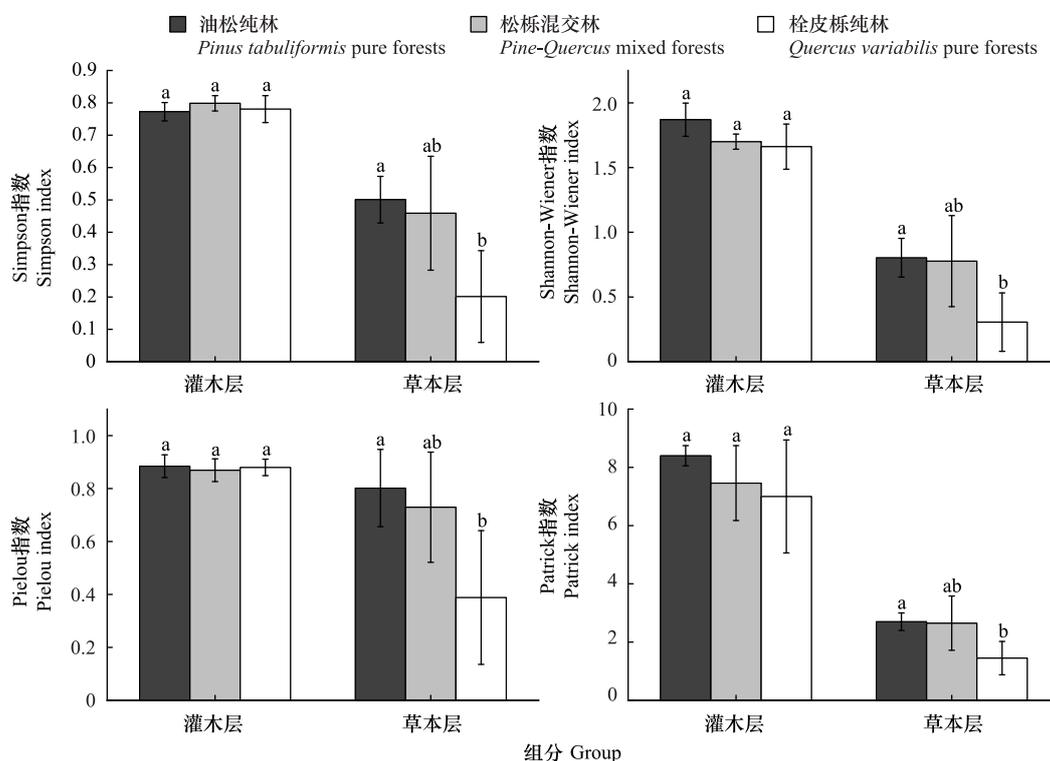


图 4 不同演替类型林分物种多样性指标

Fig.4 Biodiversity index in different stand succession types

P:油松纯林 *Pinus tabuliformis* pure forests;PQ:松栎混交林 *Pine-Quercus* mixed forests;Q:栓皮栎纯林 *Quercus variabilis* pure forests;不同小写字母表示不同演替类型林分间的数据差异显著($P<0.05$)

及长势基本一致。

2.2.2 不同演替类型林分林下更新幼树生长情况

由图 6 可知,PQ 与 Q 林分林下栓皮栎幼树除了在 0—1 地径级和高度级外,其余各地径级及高度级株数均存在显著差异($P<0.05$),且表现为 PQ 林分大于 Q 林分。P 和 PQ 林分林下栓皮栎幼树除了 0—1cm 和 4—5cm 地径级内 P 林分显著大于 PQ 林分外($P<0.05$),其余各地径级差异均不显著($P>0.05$);就高度级而言,除了 0—1m、2—3m、4—5m 高度级 PQ 林分显著大于 P 林分外($P<0.05$),其余各高度级均无显著差异($P>0.05$)。P 与 Q 林分相比,林下幼树在 0—1 地径级和高度级内 Q 林分均显著高于 P 林分($P<0.05$),在 2—3cm、3—4cm、4—5cm、6—7cm 地径级和 2—3m、3—4m 高度级内均表现为 P 林分显著大于 Q 林分($P<0.05$)。可见混交林林下幼树地径和树高生长较油松和栓皮栎纯林要好,油松纯林林下幼树的地径和树高生长要好于栓皮栎纯林。

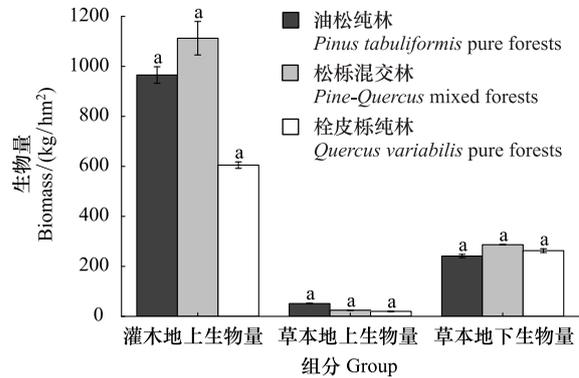


图 5 不同演替类型林分林下灌草生物量指标

Fig.5 Undergrowth biomass in different stand succession types

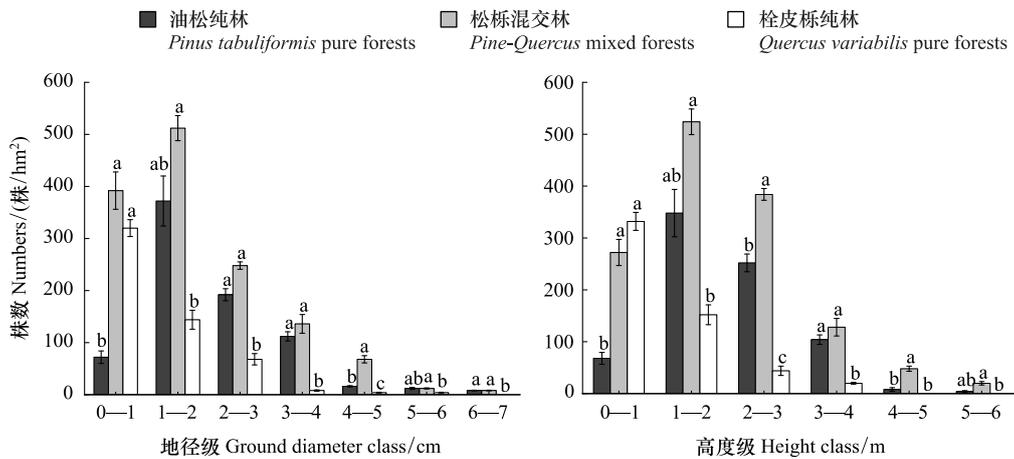


图 6 不同演替类型林分栓皮栎幼树地径级和高度级株数分布

Fig.6 Ground diameter and height of *Quercus variabilis* saplings in different stand succession types

2.2.3 不同演替类型林地土壤水分的变化

由图 7 可知,不同演替类型林地土壤各层容重无显著差异($P>0.05$);各林分类型林地土壤含水量在 0—20 cm 无显著差异($P>0.05$),PQ 林地土壤含水量在 20—40 cm 和 40—60 cm 均比 P 显著增加($P<0.05$),PQ 林地土壤含水量在 20—40 cm 比 P 显著增加($P<0.05$),在 40—60 cm 无差异显著($P>0.05$);各类型林分林地总孔隙度和毛管孔隙度变化规律一致,均是 P 和 PQ 在 0—20 cm 和 20—40 cm 土层深度显著高于 Q($P<0.05$),在 40—60 cm 无差异显著($P>0.05$);各类型林分林地饱和持水量和毛管持水量在 0—20 cm 和 40—60 cm 无显著差异($P>0.05$),PQ 饱和持水量在 20—40 cm 显著大于 Q($P<0.05$),但与 P 无显著差异($P>0.05$),PQ 和 P 在 20—40 cm 毛管持水量无显著差异($P>0.05$),但与 Q 差异显著($P<0.05$)。综合来看,松栎混交林的中层土壤持水能力和透气性要好与纯林,各类型林分浅层和深层土壤状况差异不大。

2.3 林分空间结构与林下植被及土壤水分的相关分析

2.3.1 林分空间结构与林下灌草生物多样性及生物量相关分析

由表 3 可知,不同演替类型林分空间结构参数中与林下灌草生物多样性显著相关的为角尺度、林层指数

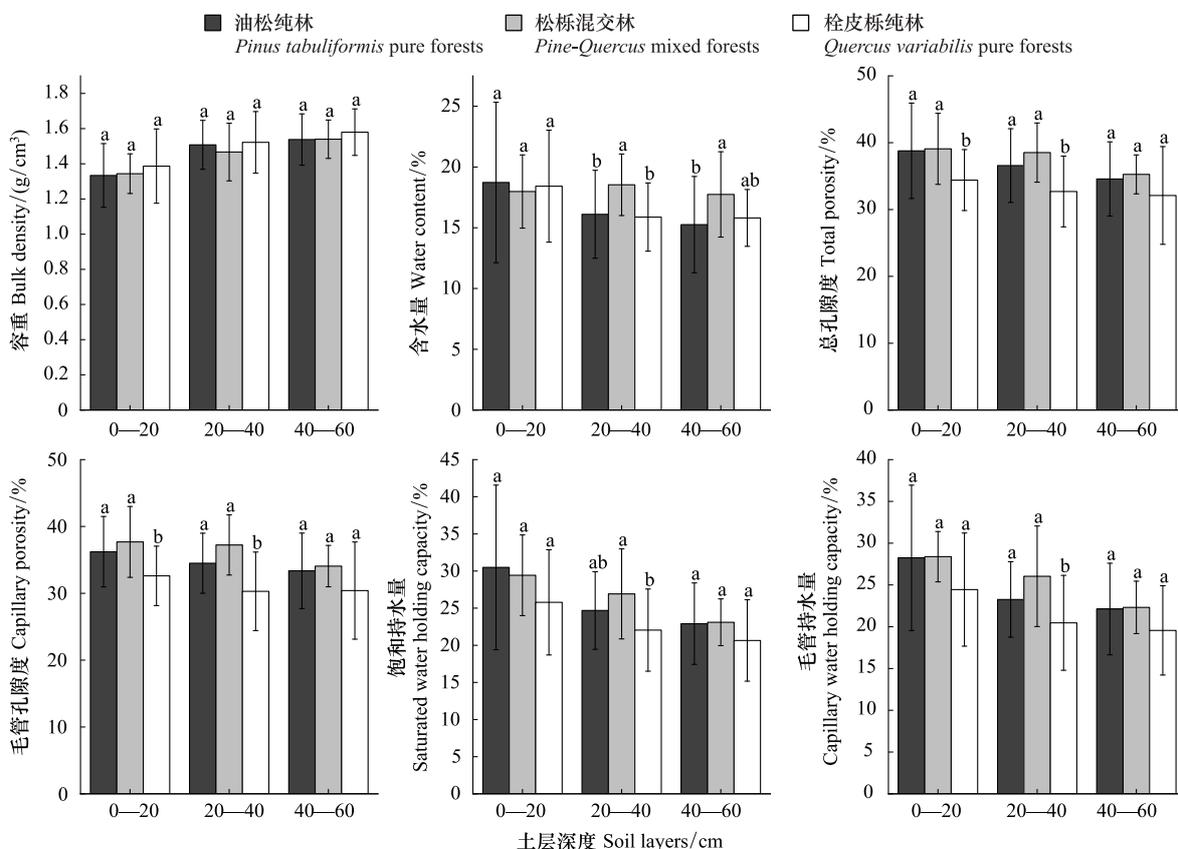


图7 不同演替类型林分土壤水分指标

Fig.7 Soil water properties in different stand succession types

和开敞度 ($P < 0.05$)。其中,角尺度与草本层 Pielou 指数为显著正相关 ($P < 0.05$);林层指数与草本层 Simpson 指数、Shannon-Wiener 指数为显著正相关 ($P < 0.05$),与草本层 Patrick 丰富度指数为极显著正相关 ($P < 0.01$)。开敞度与灌木层 Shannon-Wiener 指数为显著正相关,与灌木层 Patrick 丰富度指数为极显著正相关 ($P < 0.01$)。不同演替类型林分空间结构参数与灌木地上生物量和草本地上及地下生物量均无显著相关性 ($P > 0.05$)。

表3 林分空间结构与林下灌草多样性及生物量相关分析

Table 3 Correlation analysis between stand spatial structure and biodiversity index and undergrowth biomass

空间结构参数 Spatial structure parameters	灌木层 Shrub layer					草本层 Herb layer					
	<i>D</i>	<i>H'</i>	<i>J_{SW}</i>	<i>S'</i>	<i>Ab</i>	<i>D</i>	<i>H'</i>	<i>J_{SW}</i>	<i>S'</i>	<i>Ab</i>	<i>Ub</i>
<i>W_i</i>	-0.091	-0.305	0.381	-0.517	-0.049	0.769	0.808	0.836 *	0.639	-0.206	-0.187
<i>OP_i</i>	0.361	0.819 *	-0.241	0.918 **	0.025	-0.611	-0.613	-0.753	-0.377	0.221	0.153
<i>M_i</i>	0.303	-0.454	-0.317	-0.271	0.242	0.346	0.376	0.473	0.295	-0.394	0.388
<i>SL_i</i>	-0.227	-0.038	0.517	-0.336	0.186	0.909 *	0.909 *	0.806	0.952 **	0.197	-0.073
<i>U_i</i>	-0.198	0.577	0.328	0.354	-0.411	0.356	0.319	0.093	0.610	0.387	-0.293
<i>C_i</i>	-0.104	-0.565	-0.077	-0.516	-0.051	0.346	0.364	0.495	0.181	-0.220	-0.294

* 在 0.05 水平相关性显著; ** 在 0.01 水平相关性显著;*D*:Simpson 指数 Simpson index;*H'*:Shannon-Wiener 指数 Shannon-Wiener index;*J_{SW}*:Pielou 指数 Pielou index;*S'*:Patrick 指数 Patrick index;*Ab*:地上生物量 Above ground biomass;*Ub*:地下生物量 Under ground biomass

2.3.2 林分空间结构与林下更新幼树生长相关分析

由表 4 可知,不同演替类型林分空间结构参数与林下更新幼树显著相关的有混交度、林层指数、大小比数 ($P < 0.05$)。其中,混交度与 0—1cm 地径级栓皮栎幼树为显著正相关 ($P < 0.05$),与 4—5cm 地径级和 4—5m 高度级幼树为极显著正相关 ($P < 0.01$),与其余地径级和高度级幼树均无显著相关性 ($P > 0.05$);林层指数与

1—2cm 和 4—5cm 地径级和 1—2m、4—5m 高度级幼树为极显著正相关 ($P < 0.01$), 与 3—4cm 地径级幼树为显著正相关 ($P < 0.05$), 与 3—4m 高度级幼树为极显著正相关 ($P < 0.01$), 与 6—7cm 地径级和 2—3m 高度级幼树为显著正相关 ($P < 0.05$), 与其余地径级和高度级幼树均无显著相关性 ($P > 0.05$); 大小比数与 0—1cm 地径级和 0—1m 高度级幼树为极显著负相关 ($P < 0.01$), 与 5—6m 高度级幼树为显著负相关 ($P < 0.05$), 与其余地径级和高度级幼树均无显著相关性 ($P > 0.05$)。上述结果表明林分混交程度、林分垂直结构、林木分化程度是决定林下更新幼树生长的重要结构参数。其它林分空间结构参数与林下更新幼树均未达到显著相关关系 ($P > 0.05$)。

表 4 林分空间结构与林下更新幼树不同地径级及高度级株数分布相关分析

Table 4 Correlation analysis between stand spatial structure and ground diameter class and height class distribution of saplings

空间结构参数 Spatial structure parameters	地径级 Ground diameter class/cm							高度级 Height class/m					
	0—1	1—2	2—3	3—4	4—5	5—6	6—7	0—1	1—2	2—3	3—4	4—5	5—6
W_i	0.107	0.176	0.089	0.353	0.184	0.155	0.028	0.017	0.157	0.203	0.393	0.326	0.128
OP_i	-0.145	-0.282	-0.095	-0.014	-0.329	0.033	-0.198	0.017	-0.313	-0.251	-0.091	-0.394	-0.189
M_i	0.674 *	0.465	0.493	0.256	0.722 **	0.190	0.189	0.470	0.532	0.551	0.402	0.717 **	0.484
SL_i	0.115	0.615 *	0.568	0.689 *	0.609 *	0.538	0.668 *	-0.150	0.607 *	0.660 *	0.782 **	0.675 *	0.415
U_i	-0.869 **	-0.022	0.171	0.293	-0.571	-0.043	-0.065	-0.814 **	-0.086	0.109	0.155	-0.553	-0.586 *
C_i	0.251	-0.367	-0.355	0.030	0.018	-0.277	-0.150	0.261	-0.358	-0.228	0.152	0.095	0.121

2.3.3 林分空间结构与土壤水分相关分析

由表 5 可知,不同演替类型林分空间结构参数与土壤水分显著相关的为混交度和林层指数 ($P < 0.05$)。其中,混交度与土壤含水量为显著正相关 ($P < 0.05$),与其余土壤水分指标均无显著相关性 ($P > 0.05$); 林层指数与土壤总孔隙度和土壤饱和持水量为显著正相关 ($P < 0.05$),与土壤毛管孔隙度和土壤毛管持水量为极显著正相关 ($P < 0.01$),与其余土壤水分指标均无显著相关性 ($P > 0.05$)。可见混交林形成的复层结构对提高林地土壤水分状况具有重要的促进作用。其它林分空间结构参数与土壤水分均未达到显著相关关系 ($P > 0.05$)。

表 5 林分空间结构与土壤水分的相关分析

Table 5 Correlation analysis between stand spatial structure and soil water

空间结构参数 Spatial structure parameters	容重 Bulk density/ (g/cm^3)	含水量 Water content/%	总孔隙度 Total porosity/%	毛管孔隙度 Capillary porosity/%	饱和持水量 Saturated water holding capacity/%	毛管持水量 Capillary water holding capacity/%
W_i	0.266	-0.283	0.076	0.147	-0.122	0.054
OP_i	-0.119	-0.013	-0.400	-0.439	-0.227	-0.305
M_i	-0.422	0.584 *	0.345	0.457	0.424	0.503
SL_i	-0.450	0.321	0.695 *	0.765 **	0.681 *	0.762 **
U_i	-0.137	-0.362	0.107	0.047	0.099	0.129
C_i	0.495	-0.253	-0.208	-0.165	-0.392	-0.283

3 讨论

3.1 不同演替类型人工林空间结构特征

合理的林分结构不仅是提高森林生产力和森林生态系统服务功能的重要基础^[31-32],也是判断群落能否维持稳定发展的重要前提^[33]。本研究发现,油松纯林、松栎混交林和栓皮栎纯林林分的混交度、开敞度和林层指数存在显著差异。松栎混交林的混交度与林层指数最高,但其开敞度最低,表明其林分垂直与水平结构均较纯林更为复杂,林木相互遮蔽,种间竞争激烈^[34],且油松由于树高较矮(表 1),处于被压状态。相比而

言,油松人工林纯林由于具有相对较大的开敞空间,林木间竞争稍弱。栓皮栎纯林几乎完全郁闭,栓皮栎在冠层内处于绝对优势地位,油松数量及生长处于明显劣势(表1)。

3.2 不同演替类型林分空间结构对林下灌草的影响

物种多样性是生态系统功能维持和结构稳定的基础^[35]。本研究发现,三个演替类型林分灌木层物种多样性差异不显著,油松纯林的林下草本层多样性显著大于栓皮栎纯林。从相关性分析结果发现,角尺度和林层指数对林下草本层生物多样性具有显著影响,与黎芳^[12]、崔宁洁^[36]、樊雨时^[37]等研究结论一致。角尺度表征林分水平空间结构,反映林窗面积的大小和位置^[19];林层指数表征林分垂直空间结构,反映林内不同层次植被构成、光斑位置、林内蒸腾强度^[38-39]。此外,油松纯林的郁闭度也比栓皮栎林郁闭度低约10%。

生物量是评价森林群落物质生产及能量平衡的基础,是植物资源利用、生态位占有、种内种间竞争能力的体现^[39]。本研究发现不同演替类型林分灌草生物量差异均不显著,而且各类型林分空间结构参数对灌草生物量影响也均不显著。分析其原因可能是各演替类型林分林下栓皮栎更新幼树占据了较大空间,油松和栓皮栎纯林林下更新幼树数量与上层乔木数量接近,而松栎混交林林下更新幼树数量几乎是上层乔木数量的2倍(表1)。这表明林下幼树与灌草在生态位上互相抑制,对林内光照、热量、水分等资源竞争激烈,且混交林林下幼树与灌草竞争更为激烈^[40]。

可见,各演替类型林分林下灌草多样性受林分水平空间结构和垂直空间结构的共同调节,林下幼树也是影响林下灌草多样性及生长的重要因素之一。

3.3 不同演替类型林分空间结构对林下幼树生长的影响

如上节所述,三类演替林分内均有栓皮栎更新幼树出现。与纯林相比松栎混交林林下更新幼树生长势较强,体现在幼树数量最多、地径和树高生长比纯林要好,与前人研究结果一致^[41]。对各演替类型林分林下更新幼树生长具有显著影响的空间结构参数为混交度、大小比数和林层指数。混交度和大小比数体现了林分组成与林木分化程度等水平结构对林下更新幼树的影响^[40]。混交度主要影响高地径级和高度级林下幼树生长,而大小比数则显著影响低地径级和高度级林下幼树的生长。林层指数体现了林分垂直结构的丰富程度,与各演替类型林分多个林下更新幼树地径级和树高级均呈显著正相关,表现出复层结构对林内环境的显著作用,进而可影响林下幼树的生长^[42]。综上可知,各类型林分林下幼树的生长受林分垂直空间结构和水平空间结构的共同作用,混交林林下栓皮栎幼树生长势较纯林要好。

3.4 不同演替类型林分空间结构对土壤水分的影响

本研究发现,松栎混交林林分的土壤持水性和透气性比纯林高,与前人研究结论一致^[43]。相关分析结果表明,林分空间结构参数中混交度和林层指数与土壤水分指标最为相关,且多为正相关作用。与油松及栓皮栎纯林相比,松栎混交林的复层结构可增加林分降雨截留,提高林分涵养水源、拦蓄降水和维持土壤湿度的能力^[44]。同时,混交林中不同树种构成的纵横交错、深浅不一的根系系统可增强土壤养分的归还和循环能力^[45],改善土壤通气状况,增加土壤吸水及持水性能。由此可见,松栎混交林的复层结构有效改善了林地土壤水分状况。

4 结论

油松纯林、松栎混交林和栓皮栎纯林三种不同类型林分的水平及垂直林分空间结构存在显著差异,并影响了各类型林分林下灌草多样性、生物量、幼树生长以及土壤水分的变化。松栎混交林林下灌草生物量、更新幼树的生长以及土壤水分状况均好于纯林,而且是受林分水平空间结构和垂直空间结构的共同作用。林下栓皮栎更新幼树与灌草对林地资源的竞争在混交林中最为激烈。因此,可以通过调整林分空间结构实现种间关系及林地资源的调控,增强森林生态系统的恢复力、生产力和稳定性,以充分发挥森林生态系统的各项功能与价值。

参考文献(References):

- [1] Wu L C, Liu J, Takashima A, Ishigaki K, Watanabe S. Effect of selective logging on stand structure and tree species diversity in a subtropical evergreen broad-leaved forest. *Annals of Forest Science*, 2013, 70(5): 535-543.
- [2] Baskett E Z, Keles S. Spatial forest planning: a review. *Ecological Modelling*, 2005, 188(2/3/4): 145-173.
- [3] Aguirre O, Hui G Y, Gadow K V, Jiménez J. An analysis of spatial forest structure using neighbourhood-based variables. *Forest Ecology and Management*, 2003, 183(1/2/3): 137-145.
- [4] 邢海涛. 马尾松针阔混交人工林种间关系和作业法研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2017.
- [5] Carr C A, Krueger W C. Understory vegetation and ponderosa pine abundance in eastern Oregon. *Rangeland Ecology & Management*, 2011, 64(5): 533-542.
- [6] Arivin Rivaie A. The effects of understory vegetation on P availability in *Pinus radiata* forest stands: a review. *Journal of Forestry Research*, 2014, 25(3): 489-500.
- [7] 蒋有绪. 《中国人工林及其育林体系》. 林业科学, 2014, 50(11): 22.
- [8] Holmes P M. Shrubland restoration following woody alien invasion and mining: effects of topsoil depth, seed source, and fertilizer addition. *Restoration Ecology*, 2001, 9(1): 71-84.
- [9] Finn J, Erskine P D, Lamb D. Woody species diversity influences productivity and soil nutrient availability in tropical plantations. *Oecologia*, 2007, 154(3): 521-533.
- [10] Bloor J M G, Bardgett R D. Stability of above-ground and below-ground processes to extreme drought in model grassland ecosystems: interactions with plant species diversity and soil nitrogen availability. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 2012, 14(3): 193-204.
- [11] Pohl M, Alig D, Körner C, Rixen C. Higher plant diversity enhances soil stability in disturbed alpine ecosystems. *Plant and Soil*, 2009, 324(1/2): 91-102.
- [12] 黎芳, 潘萍, 宁金魁, 赖国桢, 欧阳勋志, 徐辉, 郭丽玲, 吴自荣, 易祖滨. 飞播马尾松林林分空间结构对林下植被多样性的影响. *东北林业大学学报*, 2016, 44(11): 31-35, 40.
- [13] 陶观护, 卜元坤, 薛卫鹏, 左明明, 陆瑞, 李卫忠. 不同密度油松飞播林灌草多样性与林分空间结构关系. *森林与环境学报*, 2020, 40(2): 171-177.
- [14] 曹小玉, 李际平, 赵文菲, 委霞, 庞一凡. 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. *生态学报*, 2020, 40(24): 9164-9173.
- [15] 汤孟平, 徐文兵, 陈永刚, 邓英英, 赵明水. 天目山近自然毛竹林空间结构与生物量的关系. *林业科学*, 2011, 47(8): 1-6.
- [16] 董灵波, 田栋元, 陈莹, 刘兆刚. 基于结构方程模型的兴安落叶松天然林更新影响因素. *应用生态学报*, 2021, 32(8): 2763-2772.
- [17] 董莉莉, 刘红民, 赵济川, 高英旭, 汪成成, 范俊岗. 林分结构对辽东山区蒙古栎林天然更新的影响. *林业科学研究*, 2021, 34(5): 104-110.
- [18] 殷正. 长白山阔叶红松林不同演替阶段乔木幼苗更新动态研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
- [19] 曹小玉, 李际平, 委霞. 中亚热带典型林分空间结构对土壤养分含量的影响. *林业科学*, 2020, 56(1): 20-28.
- [20] 袁秀锦, 肖文发, 潘磊, 王晓荣, 胡文杰, 崔鸿侠, 雷静品. 马尾松林分结构对枯落物层和土壤层水文效应的影响. *林业科学研究*, 2020, 33(4): 26-34.
- [21] 黄萍, 刘艳红. 北京松山油松林林分结构和地形对幼苗更新的影响. *生态学杂志*, 2018, 37(4): 1003-1009.
- [22] 雷静品, 肖文发, 刘建锋. 我国栓皮栎分布及其生态学研究. *世界林业研究*, 2013, 26(4): 57-62.
- [23] 沈国舫. 北京西山地区油松人工混交林的研究. *中国林业科学*, 1978, 14(3): 12-20.
- [24] 宁金魁. 北京西山地区典型植被类型森林发展类型设计研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2009.
- [25] 全国营造林标准化技术委员会. 造林技术规程: GB/T 15776—2016. 北京, 中国标准出版社, 2016.
- [26] 惠刚盈, 克劳斯·冯佳多. 森林空间结构量化分析方法: 北京: 中国林业出版社, 2003.
- [27] 惠刚盈. 角尺度——一个描述林木个体分布格局的结构参数. *林业科学*, 1999, 35(1): 37-42.
- [28] 惠刚盈, Klaus von Fadow, Matthias Albert. 一个新的林分空间结构参数——大小比数. *林业科学研究*, 1999, 12(1): 1-6.
- [29] 胡艳波. 基于结构化森林经营的天然异龄林空间优化经营模型研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2010.
- [30] 卫茂荣. 一次取样连续测定土壤物理性质的方法. *辽宁林业科技*, 1990(1): 56-57, 49.
- [31] Jactel H, Gritti E S, Drössler L, Forrester D I, Mason W L, Morin X, Pretsch H, Castagneyrol B. Positive biodiversity-productivity relationships in forests: climate matters. *Biology Letters*, 2018, 14(4): 20170747.
- [32] Zhang Y, Chen H Y H, Reich P B. Forest productivity increases with evenness, species richness and trait variation: a global meta-analysis. *Journal*

- of Ecology, 2012, 100(3): 742-749.
- [33] 汤孟平. 森林空间结构研究现状与发展趋势. 林业科学, 2010, 46(1): 117-122.
- [34] 李建, 李晓宇, 曹静, 谭凌照, 赵秀海. 长白山次生针阔混交林群落结构特征及群落动态. 生态学报, 2020, 40(4): 1195-1206.
- [35] 王世雄, 王孝安, 李国庆, 郭华, 朱志红. 陕西子午岭植物群落演替过程中物种多样性变化与环境解释. 生态学报, 2010, 30(6): 1638-1647.
- [36] 崔宁洁, 张丹桔, 刘洋, 张健, 欧江, 张捷, 邓超, 纪托未. 不同林龄马尾松人工林林下植物多样性与土壤理化性质. 生态学杂志, 2014, 33(10): 2610-2617.
- [37] 樊雨时. 青海典型人工林林分结构特征因子对林下植物多样性的影响[D]. 北京: 北京林业大学, 2019.
- [38] Kathke S, Bruehlheide H. Gap dynamics in a near-natural spruce forest at Mt. Brocken, Germany. Forest Ecology and Management, 2010, 259(3): 624-632.
- [49] Con T V, Thang N T, Ha D T T, Khiem C C, Quy T H, Lam V T, Do T V, Sato T. Relationship between aboveground biomass and measures of structure and species diversity in tropical forests of Vietnam. Forest Ecology and Management, 2013, 310: 213-218.
- [40] 雷相东, 唐守正, 李冬兰, 陈宝升, 张则路. 影响天然林下层植物物种多样性的林分因子的研究. 生态学杂志, 2003, 22(3): 18-22.
- [41] 张维伟, 赵忠, 刘金良, 邓平. 桥山林区 3 种麻栎群落类型的种群动态与幼苗特征. 林业科学, 2021, 57(7): 1-10.
- [42] Ediriweera S, Singhakumara B M P, Ashton M S. Variation in canopy structure, light and soil nutrition across elevation of a Sri Lankan tropical rain forest. Forest Ecology and Management, 2008, 256(6): 1339-1349.
- [43] 丁绍兰, 杨乔娟, 赵串串, 王湜, 杨宁贵, 董旭. 黄土丘陵区不同林分类型枯落物层及其林下土壤持水能力研究. 水土保持学报, 2009, 23(5): 104-108.
- [44] 耿琦, 王海燕, 张美娜, 郑永林. 森林枯落物持水特性影响因素研究进展. 生态科学, 2020, 39(5): 220-226.
- [45] Wan X H, Huang Z Q, He Z M, Yu Z P, Wang M H, Davis M R, Yang Y S. Soil C: N ratio is the major determinant of soil microbial community structure in subtropical coniferous and broadleaf forest plantations. Plant and Soil, 2015, 387(1/2): 103-116.