

DOI: 10.11931/guihaia.gxzw201610025

引文格式: 李远发, 叶绍明, 王宏翔, 等. 黄土高原油松天然纯林结构特征的研究 [J]. 广西植物, 2017, 37(7): 868-880

LI YF, YE SM, WANG HX, et al. Structural properties of natural Loess Plateau forest stands dominated by *Pinus tabulaeformis* [J]. Guihaia, 2017, 37(7): 868-880

黄土高原油松天然纯林结构特征的研究

李远发¹, 叶绍明¹, 王宏翔², 胡艳波², 赵中华², 惠刚盈^{2*}

(1. 广西大学 林学院, 南宁 530004; 2. 中国林业科学研究院 林业研究所, 国家林业局林木培育重点实验室, 北京 100091)

摘 要: 结构是森林群落的基本特征, 决定着群落的功能和发展方向。该研究采用结构参数角尺度 (W)、混交度 (M)、大小比数 (U) 以及样地纵剖面图分析了两块长宽均为 60 m × 60 m 的油松天然林的空间结构特征, 同时采用胸径 (DBH)、树高 (TH) 和冠幅面积 (CA) 分布的直方图以及 Shannon-Wiener 多样性指数分析了它的非空间结构特征。结果表明: 油松天然林种间隔离程度很低 ($\bar{M}=0.019$), 几乎为油松纯林, 个体大小分化均匀 ($\bar{U}=0.478$), 整体呈随机分布 ($\bar{W}=0.485$)。小树 (TH ≤ 5 m) 个体相对较少, 而大树 (TH > 10 m) 占多数且其树高分布集中。平均树高多样性 THD = 2.35, 胸径集中分布在 14~34 cm, 58.4%~62.8% 的树冠面积分布在 20~40 m²。林下油松幼苗更新丰富, 但分布不均。这些特征表明成熟的油松天然林群落结构不稳定, 可能趋向衰退并将逐渐被其他阔叶树种代替。

关键词: 油松, 天然林, 空间结构, 非空间结构, 角尺度, 混交度, 大小比数

中图分类号: Q948.15 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3142(2017)07-0868-13

Structural properties of natural Loess Plateau forest stands dominated by *Pinus tabulaeformis*

LI Yuan-Fa¹, YE Shao-Ming¹, WANG Hong-Xiang², HU Yan-Bo²,
ZHAO Zhong-Hua², HUI Gang-Ying^{2*}

(1. College of Forestry, Guangxi University, Nanning 530004, China; 2. Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation, State Forestry Administration, Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: The structure of vegetation strongly regulates community function and the future direction of successional processes. In this study, we deployed two sampling plots measuring 60 m × 60 m in natural vegetation dominated by *Pinus tabulaeformis*, and measured stand spatial properties by calculating uniform angle (W), mingling (M), and dominance (U) indices and by constructing elevation plots. Concurrently, we explored non-spatial attributes of the stands using frequency distribution plots of diameter at breast height (DBH), tree height (TH), and crown area (CA); we al-

收稿日期: 2016-11-22 修回日期: 2017-01-05

基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划项目 (2012BAD22B03); 国家自然科学基金 (31400542) [Supported by National Sci-Tech Support Plan of China (2012BAD22B03); the National Natural Science Foundation of China (31400542)]。

作者简介: 李远发 (1982-), 男, 广西河池人, 博士, 副研究员, 主要从事天然林经营及模拟研究, (E-mail) xianggelilalyf@sina.com。

*通信作者: 惠刚盈, 博士, 研究员, 主要从事天然林经营及模拟研究, (E-mail) 43294659@qq.com。

so calculated Shannon-Wiener tree height diversity indices. Both vegetation plots were dominated by *P. tabulaeformis*, which accounted for > 98% of trees in the area. Trees of different dimensions were spatially differentiated in a regular manner ($\bar{U}=0.478$) with low species segregation ($\bar{M}=0.019$). Tree dispersions in both plots were random in the horizontal plane ($\bar{W}=0.485$). We found few small trees (TH ≤ 5 m) in the plots. Large trees (TH > 10 m) made up the greatest proportion of the population (66.9%–84.1%), and their height distribution was clumped. The mean TH diversity index (THD) was 2.35. Most DBH values fell within the 14–34 cm range, and most (58.4%–62.8%) dimensionless CA indices were within the range of 20–40 m². Recruitment of *P. tabulaeformis* was dense and unevenly dispersed, suggesting that these populations of mature natural stands were (i) unstable, (ii) tracking a declining trajectory, and (iii) destined for replacement by other species.

Key words: *Pinus tabulaeformis*, natural forest, spatial structure, non-spatial structure, uniform angle index, mingling, dominance

中国是世界上人工林面积最大的国家,在广袤的人工林土地上,造林树种主要由杨树、桉树、松树、杉木等少数树种组成。大面积的单纯同龄人工林带来巨大经济效益的同时也面临诸多严峻的考验,如平均生产力逐年降低、立地衰退、生物多样性减少、病虫害肆虐等,人工林经营是否可持续受到一定程度的质疑(Tiao et al, 2016)。相反,天然林在资源可持续利用和环境友好方面展现出诸多显著优点,包括维持森林生态系统稳定和物种多样性,消减用户的种植费用,为经营实体赢取更多的收获效益和提供更加频繁的周期性采伐现金流,保持林地连续覆盖,避免土壤遭受侵蚀,并提供良好的艺术景观和减少因森林破碎化带来的潜在负面影响(Schulte & Buongiorno, 1998)。模拟长期未受干扰的天然林或原始林结构,最大化地利用自然过程加速森林自我发展或是激发新的发展,被视为人工林异龄混交化培育的有效途径(Kint et al, 2006; 亢新刚, 2011; Li et al, 2014a)。深度解析天然林结构特征成了这项技术的前提。然而,到现在为止,人们对天然林结构的认知仍未彻底清楚(Li et al, 2012; 李远发等, 2016)。

油松(*Pinus tabulaeformis*)是中国北方重要的用材和造林树种,分布于 101° 30' ~ 124° 25' E, 31° 00' ~ 44° 00' N 的广阔地带(吴刚和冯宗炜, 1994),横跨陕西、山西、甘肃等 14 个省区,生态适应区达 300 万 hm²。由于油松有较强的适应性和抗逆性,生长速度快,萌蘖能力强,根系发达等特性,被广泛应用于西北、华北地区的生态建设和木材生产,尤其是黄土高原的水土流失的治理和生态环境

的改善,其在陕西境内的分布约占全国面积的 45% (夏富才等, 2010)。由于大面积油松人工林不合理的种植以及后期经营管理粗放等诸多原因,许多油松人工林长势衰弱,生态功能不高,正面临着严峻的生存考验(李裕元和邵明安, 2004; 李裕元等, 2005; 张希彪等, 2006a; Lu et al, 2006; 张光灿等, 2007; 李登武等, 2010; 刘平等, 2011)。一些黄土高原区高密度油松人工林在过度地消耗土壤水分后,导致土壤形成低湿层或利用性干层,随之出现死亡或是形成“小老头”低产林(孙长忠等, 1998; 何福红等, 2003; 王志强等, 2003; 王力等, 2004),最终可能引发系列生态和环境安全隐患。如何更好地经营和管理油松人工林已成为当务之急(高甲荣和肖斌, 2001)。尽管前人对油松人工林的人为干扰(张希彪和上官周平, 2006b; 马履一等, 2007)、生长节律(李国雷等, 2009)、群落演替(石丽丽等, 2013)、生长动态(刘平等, 2010)等多方面进行了广泛研究,但未能有效地解决油松人工林改造的难题。

在天然林中,油松常常形成单优种(张希彪等, 2009; 夏富才等, 2010; 赵娜等, 2011),群落内保持较高的物种多样性、生产力和维持良好的结构和系统稳定性,其生物量、水土保持及水源涵养功能大大高于大部分人工林,很少在短期内出现衰败的现象(李裕元等, 2005; 陈云明等, 2002),即使出现土壤干层,其干燥程度亦远低于人工林(王志强等, 2003)。鉴于油松天然林这些优点,模拟其结构特征可能有助于油松人工林的改造和利用。但如今油松天然林的保存数量和面积很少,其中多数为伴

生有其他乡土树种的混交林,只有极少部分在树种组成上接近纯林(刘文桢等,2011)。油松天然混交林的种群结构、分布格局、种子雨和土壤种子库、物种多样性等已经有了少量研究(高宝嘉等,1999;李裕元等,2005;牛丽丽等,2008;张希彪等,2009;黄三祥等,2009;张笑菁等,2010),而油松天然纯林的群落结构特征尚未引起足够的重视(李苗等,2010;刘平等,2011)。由于油松天然纯林在物种组成上与油松人工纯林十分接近,因此研究油松天然纯林可能更好地为油松人工林模式的构建和已有人工林群落结构的调整提供参考。同时也有助于阐明油松天然林生态系统的形成与维持、群落的稳定性与演替规律以及种群的生态特征和更新。

本研究以黄土高原典型的油松天然纯林为例,研究其群落的空间结构、非空间结构特征以及林下幼苗更新状况,目的是探索:(1)油松天然纯林群落的结构特征;(2)成熟的油松天然纯林的结构能否稳定发展。

1 材料与方法

1.1 样地概况

研究区域位于黄土高原中部的子午岭南端,属暖温带半湿润季风气候区,年均温 8.6~13.5℃,极端最低气温-28℃,零度以上积温 3 000~4 400℃,无霜期 140~160 d,年降水量 455~710 mm。冬季干燥而寒冷,雨雪稀少,夏季温暖而雨水充沛,最大降雨量 and 高温均出现在 7—9 月。该区域是黄土高原植被覆盖最大的林区,也是黄土高原保存比较完整的天然次生林区。植被类型属于暖温带落叶阔叶林,栎林、油松林和侧柏林是本地区最普遍的地带性植被,森林由南向北逐渐减少并过渡为低矮疏林和广袤的温带草原区。

具体试验地点位于陕西省铜川市玉华自然风景保护区(108°53′~108°54′ E,35°18′~35°19′ N),海拔 1 360~1 470 m,为典型黄土丘陵地貌,相对高差约 200 m,坡度由缓坡向中度缓坡逐渐过渡(18~25°),坡面略带起伏。土层厚度一般在 50 cm 以上,结构疏松,机械组成多为中壤,富含钙质,pH 值 7~8,腐殖质厚度约 1~3 cm。试验林分是以油松种

群占据绝对优势的天然次生林,优势树种年龄约 50 a,郁闭度 0.85,胸高断面面积 30.8 m³·hm⁻²,每公顷 680 株。林内主要散生有青桐(*Firmiana platanifolia*)、野漆树(*Toxicodendron succedaneum*)、甘肃山楂(*Cartaegus kansuensis*)和辽东栎(*Quercus liaotungensis*)等 4 种阔叶树,起测径(H=1.3 m, DBH=5 cm)以上的个体数量极少。林分垂直结构分层明显,上层是以油松为主的单优种,下层是 2 m 以下的低矮灌木丛和杂草。灌木层主要种类为胡枝子(*Lespedeza bicolor*)、单瓣黄刺玫(*Rosa xanthina* form. *normalis*)、樱草蔷薇(*Rosa primula*)、几种忍冬(*Lonicera* spp.)、毛樱桃(*Cerasus tomentosa*)、土庄绣线菊(*Spiraea pubescens*)、几种荚蒾(*Viburnum* spp)、卫矛(*Euonymus alatus*)、北京丁香(*Syringa pekinensis*)等。草本层主要有披针苔草(*Carex lanceolata*)、茜草(*Rubia cordifolia*)、穿龙薯蓣(*Dioscorea nipponica*)、瓣蕊唐松草(*Thalictrum petaliodium*)、山酢酱草(*Oxalis griffithii*)、蒿类(*Artemisia*)、卷叶黄精(*Polygonatum mcirrhiifolium*)、三褶脉紫菀(*Aster ageratoides*)等。

1.2 数据获取

2014 年 9 月 22—28 日,选择具有典型性的油松天然林,沿着东村的西北坡和南坡的水平方向建立了 2 块面积均为 60 m × 60 m 的标准固定样地,分别标记为 a, b。利用全站仪(TOPCON-GTS-602AF)定位每株胸径(DBH ≥ 5 cm) N-GTS-的树木(分布格局见图 1),并进行全林每木测径、测高、测冠幅、树号挂牌、记录树种名称以及每株树木的健康状况。为了调查林下幼苗的更新状况,沿样地 a、b 的左对角线设置了 3 个 10 m × 10 m 的小样方,并记录每个小样方中的幼苗株数及树种。

1.3 数据分析

林分结构包括空间和非空间两个部分,空间结构指林木个体在水平面上的分布格局及其属性在空间上的分布,通常包含林木在林地上的位置关系、树种和个体大小的混合状况。非空间结构指林分属性的数量统计学特征即林分密度、树种组成、直径分布、树高分布、树种多样性及林分活力等。目前已有可描述林分的这些结构特征的指标或方法(Kint et al, 2000; Kint et al, 2003; Li et al, 2012)。

在刻画林分空间结构方面,一组基于最近相邻

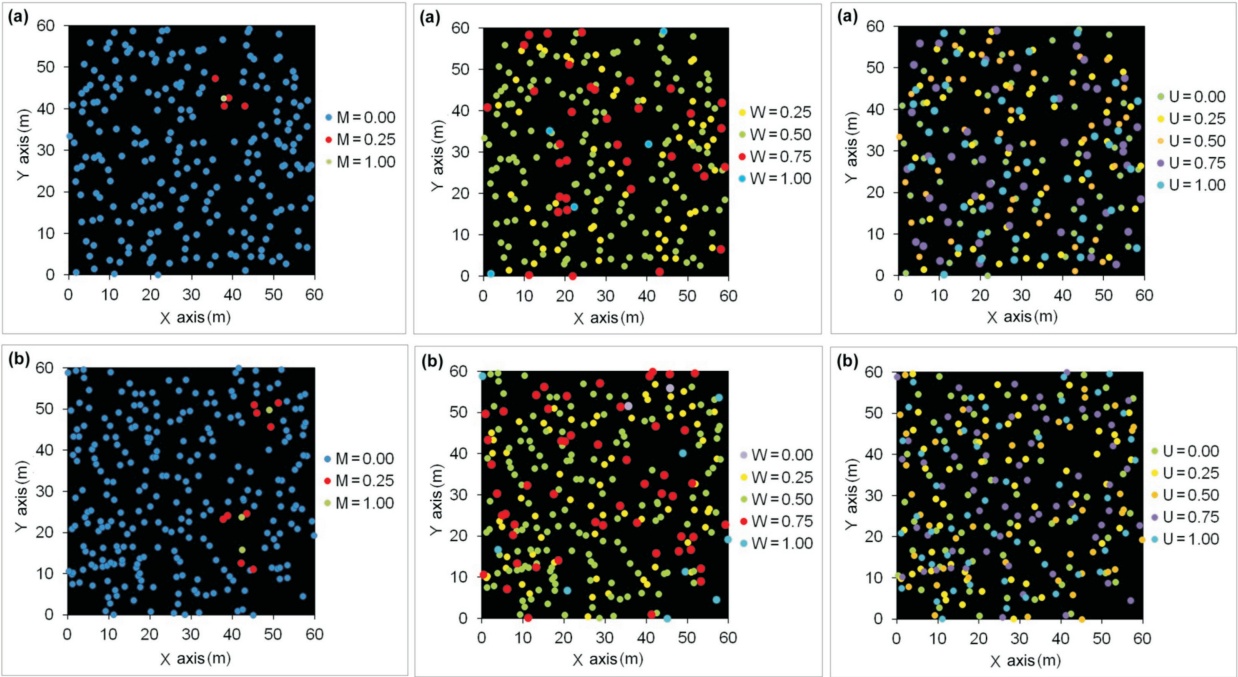


图 1 黄土高原油松天然林的树种混交状况、邻体位置关系以及个体大小分化的点格局图 点图表示一棵树*i*及其相对位置。*M*=0.00 表示 4 株最近相邻木与它同种；*M*=0.25 表示有 1 株相邻木与*i*不同种；*M*=0.50 表示有 2 株相邻木与*i*不同种；*M*=0.75 表示有 3 株相邻木与*i*不同种；*M*=1.00 表示有 4 株相邻木与*i*不同种。*W*=0.00 表示 4 株最近相邻木很均匀的分布在*i*周围；*W*=0.25 表示 4 株最近相邻木均匀的分布在*i*周围；*W*=0.50 表示 4 株最近相邻木随机的分布在它周围；*W*=0.75 表示 4 株最近相邻木聚集在*i*周围。*U*=0.00 表示 4 株最近相邻木均小于*i*；*U*=0.25 表示有 3 株最近相邻木均小于*i*；*U*=0.50 表示 2 株最近相邻木均小于*i*；*U*=0.75 表示 1 株最近相邻木均小于*i*；*U*=1.00 表示 4 株最近相邻木均大于*i*。

Fig. 1 Tree species mixtures, pattern regularity status and dominant degrees of natural *Pinus tabulaeformis* community in Loess Plateau Each dot represents the spatial location of a tree in the plot. *M* denotes the species diversity of trees' four nearest neighbors. *M*=0.00 indicates that all neighbors are of the same species; *M*=0.25, 0.75, and 1.00 indicate one, two, and three heterospecific neighbors, respectively. *W* values indicate the random or regular arrangement of focal trees' four nearest neighbors. *W*=0.00 indicates a uniform distribution of neighbors, *W*=0.25 indicates a regular distribution, *W*=0.50 indicates random distribution, *W*=0.75 indicates more random distribution, and *W*=1.00 indicates a highly irregular distribution. *U* represents the sizes of the four nearest neighboring trees in relation to each focal tree. *U*=0.00 indicates that all four neighbors are smaller than the focal tree, and *U*=0.25, 0.50, 0.75, and 1.00 indicate that one, two, three, and four trees, respectively, are larger than the focal tree.

木空间结构关系的结构参数角尺度 (uniform angle index, *W*)、混交度 (mingling, *M*) 和大小比数 (dominance, *U*) 在表达方式上表现出独特的频率优势 (Pommerening, 2002)。角尺度描述了参照树周围 4 株最近相邻木围绕参照树的分布规则程度,被定义为 α 角小于标准角 α_0 ($=72^\circ$) 个数占考察的最近相邻木的比例 (Hui et al, 1998; Aguirre et al, 2003)。其表达式:

$$W_i = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 z_{ij} \tag{1.1}$$

式中, $z_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{当第 } j \text{ 个 } \alpha \text{ 角小于标准角 } \alpha_0 \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$

混交度表达了混交林中树种的空间隔离程度或者说是林分树种组成和空间配置状况,被定义为参照树*i*的 4 株最近相邻木*j*与参照树不属同种的个体所占的比例 (Gadow, 1993; Fuldner, 1995; Hui et al, 2011)。其表达式:

$$M_i = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 v_{ij} \tag{1.2}$$

式中, $v_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{当对照树 } i \text{ 与第 } j \text{ 株相邻非同种时} \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$

大小比数指相邻树木之间的分化程度,被定义为大于参照树的相邻木占所考察的 4 株最近相邻木的比例 (Hui et al, 1998; Li et al, 2014a; Li et al, 2014b)。

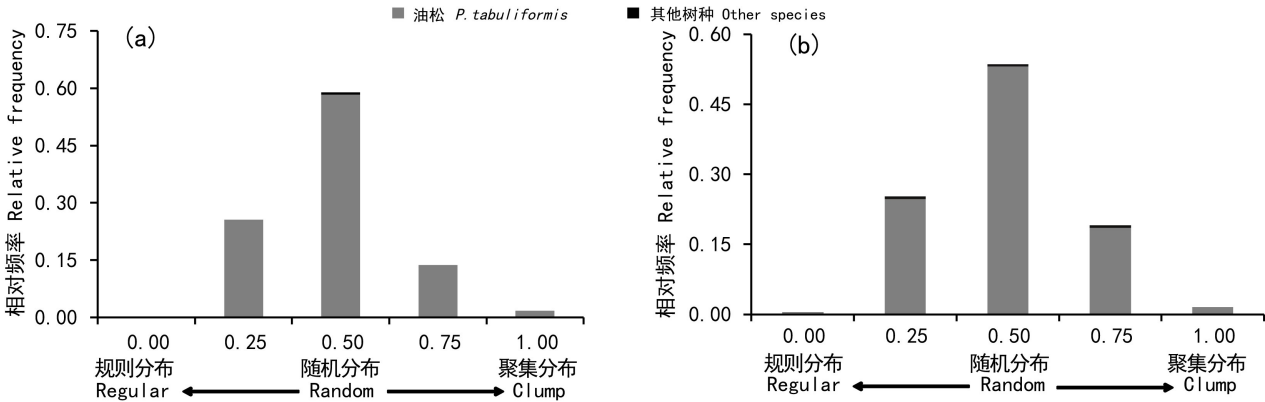


图 2 黄土高原油松天然林的水平结构
Fig. 2 Horizontal structure of natural *Pinus tabulaeformis* forest in Loess Plateau

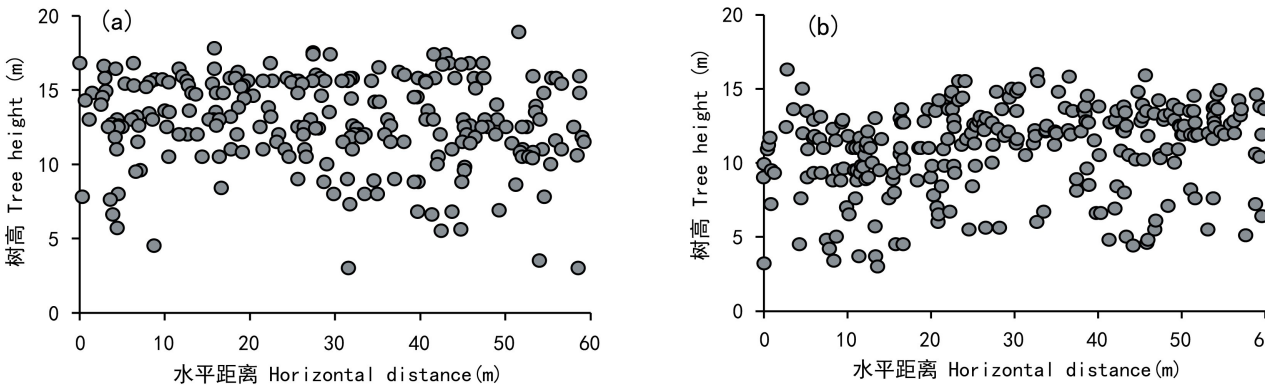


图 3 黄土高原油松天然林的垂直结构
Fig. 3 Vertical structure of natural *Pinus tabulaeformis* forest in Loess Plateau

其表达式:

$$U_i = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 k_{ij} \quad (1.3)$$

式中, $k_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{如果相邻木 } j \text{ 比对照树 } i \text{ 小} \\ 1, & \text{否则} \end{cases}$

它们各自的取值及其具体意义见图 1。本研究采用这组结构参数描述油松天然林的分布格局、种间及大小混交。结构参数的计算采用专门分析软件 Winkelamass, 详细的计算过程参见惠刚盈等 (惠刚盈等, 2010)。对于寄居在林冠内的生物来说, 植被表面积或生物量在垂直方向上分布的复杂程度可能是最重要的, 因为它提供了垂直方向上的微型气候环境和食物来源以及筑巢和交配的场所 (Kuu-

luvainen et al, 1996)。由于植被数量在垂直方向难以直接测量, 沿样方的垂直轴向作树高的点分布图不失为一种简洁、直观的分析方法。本研究采用这种侧立面图分析油松天然林的垂直空间结构特征。

在林分非空间结构的描述上, 以 2 cm 为标准径阶、1 m 为标准高度和 4 m² 为标准面积分别作径阶分布、树高分布和树冠面积分布的直方图。同时, 用树高多样性 (Tree Height Diversity, THD) 分析林分垂直结构上的多样性变化。树高多样性使用 Shannon-Wiener index (Spellerberg & Fedor, 2003), 以水平方向上的 1 m (0~1 m, 1~2 m, ...) 为固定尺寸向上划分为若干层次。计算公式如下:

$$THD = \sum_i^n p_i \ln p_i$$

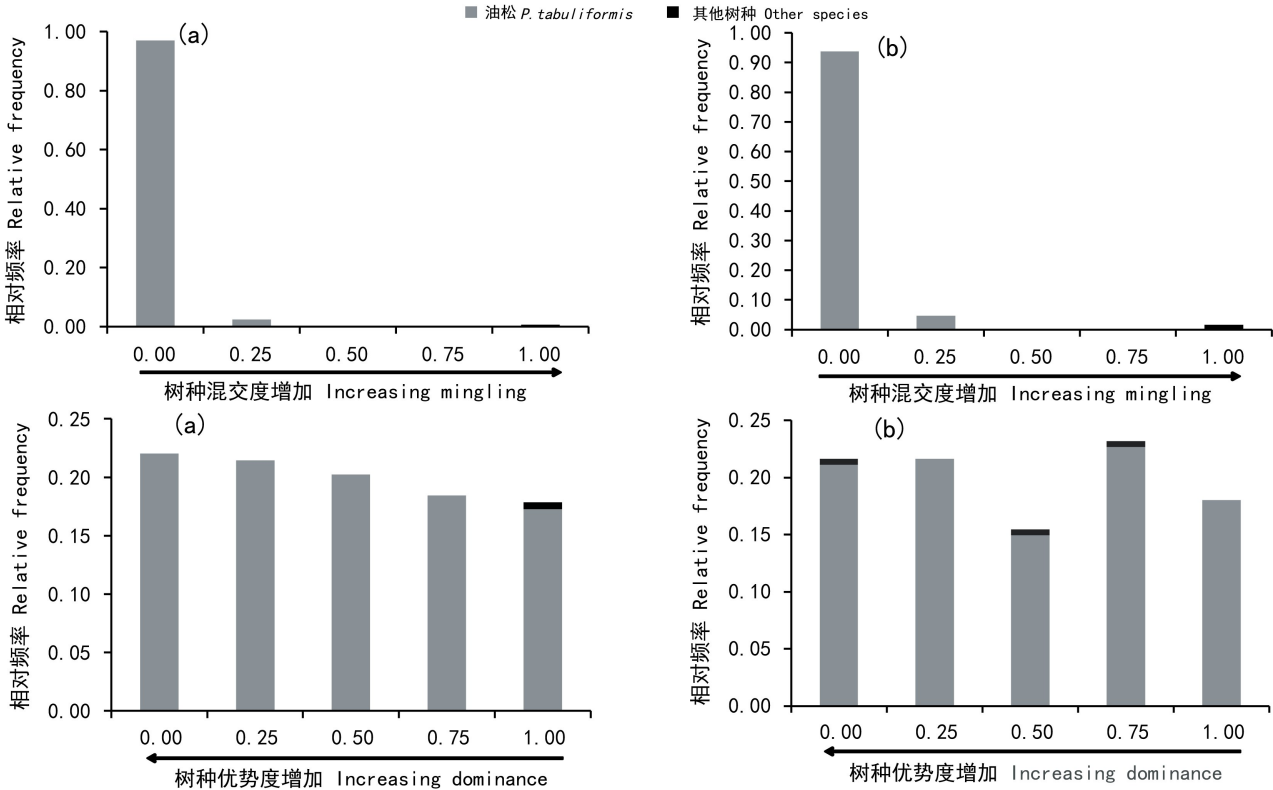


图 4 黄土高原油松天然林的种间及大小混交状况
Fig. 4 Mixture of species and sizes of natural *Pinus tabulaeformis* forest in Loess Plateau

式中, p_i 为第 i 个树高层树木株数所占全部层次树木株数的比值。林下幼苗数量采用直方图分析。

2 结果与分析

2.1 油松天然林的空间结构特征

图 2 展示了油松天然林样地 a, b 的水平分布格局,角尺度均值 $\overline{W_a}=0.479$, $\overline{W_b}=0.489$,均落入随机分布区间 $[0.475, 0.517]$ (惠刚盈等, 2010),整体属于随机分布。其中,处于完全随机分布 ($W=0.50$) 的林木占 53.6%~58.9%,偏规则分布的 ($W=0.25$) 占 25.2%~25.6%,偏聚集分布 ($W=0.75$) 的占 13.7%~19.1%,完全聚集分布的 ($W=1.00$) 占 1.5%~1.7%,而处于绝对规则 ($W=0.00$) 的林木最少,仅占 0.00%~1.5%。

侧面图直观地反映出油松天然林样地 a, b 树高 (Tree Height, TH) 在垂直方向上的空间结构变化 (图 3)。可见,两块样地的小树 ($TH<5$ m) 小

树个体很少 ($N_a=4, N_b=16$),仅占全林分的 1.7%~6.0%,中等大小树木 ($5\text{ m}<TH\leq 10\text{ m}$) 占油松天然林的少部分 (14.1%~27.1%),而大树 ($TH>10\text{ m}$) 则占有最大份额 66.9%~84.1%,并且分布相对集中。

树种混交度反映出油松天然林中油松种群和其他树种的混交比例 (图 4),由于起测径以上的其他树种在样地中的个体数量极少 ($N_a=1, N_b=3$),它们的周围都是其他树种 ($M=1.00$),因而 93.8%~97.0% 的油松周围都是它的同种 ($M=0.00$)。林木直径大小的混交程度反映出个体大小在空间上的混合状况,两块样地不同直径大小比数等级上 ($D=0.00$ 混交程度反映出的频率值均分布在 15.5%~23.2% 之间,其中样地 a 的频率分布更均匀 [变异系数 (Coefficient of Variation, $CV_a=0.097, CV_b=0.158$)]。样地 a 中其他树种 (1 株) 完全处于劣势,而样地 b 中的 3 株其他树种分别处于优势 ($U=0.00$)、中庸 ($U=0.50$) 和劣势 ($U=0.75$) (图 4)。

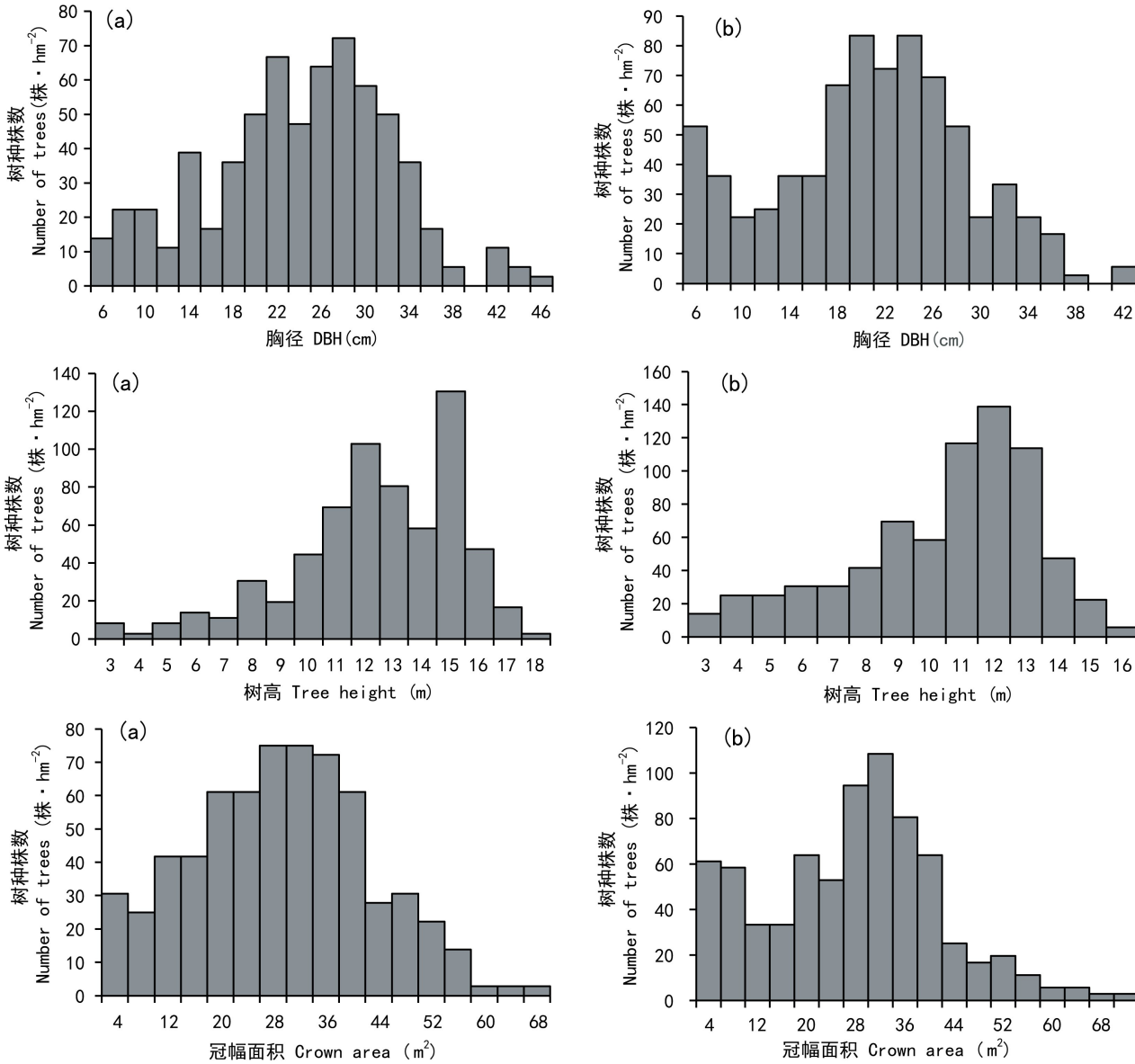


图 5 黄土高原油松天然林的胸径、树高和冠幅面积分布

Fig. 5 Distribution of DBH, TH and CA, in natural *Pinu tabulaeformis* forest in Loess Plateau

2.2 油松天然林的非空间结构特征

个体大小是林分的基本因子,综合地反映了林分受到干扰的历史以及自我发展的历程。图 5 展示了样地 a, b 的胸径、树高和冠幅面积的分布特征。样地 a 的胸径分布呈单峰型,而样地 b 的胸径分布略呈双峰型,但它们的多数个体 (78.2%~82.8%) 都集中在 14~34 cm 之间。类似于树高垂直结构分布 (图 3),样地 a, b 的树高分布亦表现出相似性,均呈左侧分布 (单峰)。样地 a 中多数林木分布在 10~16

m 之间,而样地 b 中多数个体分布在 9~14 m 之间 [偏度系数 (*Skewness*), $Sk_a = -0.864$, $Sk_b = -0.749$]。图 6 进一步展示了两块样地树高分布的相似性 [$r = 0.499$ (中度相关), $P = 0.035 < 0.05$],它们的树高多样性指数 ($THD_a = 2.48$, $THD_b = 2.315$) 亦很接近 (表 1)。对应于树高分布,两块样地的冠幅面积 (CA) 亦集中 (58.4%~62.8%) 分布在 20~40 m² 内。

树高和直径之间的关系是林木最重要的属性,也是森林资源监测、建立林分生长模型以及衡量林

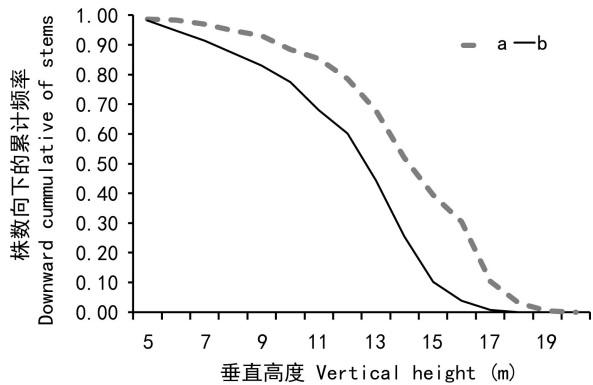


图 6 垂直方向上个体数量分布特征
Fig. 6 Quantitive characteristics of individual on vertical layers

表 1 油松天然林样地 a, b 的树高多样性 (THD) 及标准差

Table 1 Shannon-Wiener index (H) for tree height diversity (THD) and its standard deviation for THD			
项目 Item	样地 a Plot a	样地 b Plot b	
树高多样性指数 Shannon-Wiener index (THD)	2.48	2.315	
树高多样性指数的标准差 Standard deviation of THD	0.083	0.094	

分经济收入和森林生态系统稳定性的重要指标。图 7 展示了油松天然林样地 a, b 的树高 (TH) 和胸径 (DBH) 之间均可用指数函数拟合 ($R_a^2 = 0.455$, $R_b^2 = 0.648$) 的关系。

2.3 油松种群更新状况

林下更新幼苗的种类、数量和格局是判断种群稳定性和群落发展方向的重要依据。图 8 展示了油松天然林林下主要乔、灌木树种的更新状况。可见,辽东栎在样地 a, b 中的更新幼苗最多,每公顷分别为 5 556 株和 4 733 株,其次是油松的每公顷 52 787 株和 2 800 株。漆树幼苗在样地 a 中每公顷为 1 667 株,而在样地 b 中极少,每公顷仅有 34 株;青桐的更新状况与漆树相似,即它在样地 a, b 中每公顷分别为 1 112 株和 34 株。但鹅耳枥的更新数量与油松、青桐截然相反,它在样地 a 中的更新很少 (每公顷 139 株),而在样地 b 中的数量是样地 a 的 22 倍。

3 讨论与结论

3.1 油松天然群落的结构特征

子午岭林区是黄土高原目前保存较好的一块天然植被区,油松群落是其中典型的植被类型,是各物种与环境因子长期相互融合的结果,其组成和结构可能是黄土高原地区植被恢复和建设的一种理想模式(王彬等, 2009)。尤其是在雨水资源十分珍贵的干旱、半干旱地区,合理的植被结构利于减少土壤水分蒸发,恢复土壤利用性干层和减少水土流失(孙长忠等, 1998;李裕元等, 2005)。这对于黄土高原生态环境的建设、土地资源的持续利用甚为重要。

本研究样地中起测径以上的油松占全部定位林木的数量在 98% 以上,几乎属于油松纯林。也就是说,群落的空间结构和非空间结构几乎全由油松种群决定。在水平方向上,无论是油松种群还是其他伴生树种的分布格局都呈随机分布。这与张希彪等 (2006a) 和刘平等 (2011) 的研究结果一致,也与其他原始林或长期未受到干扰的天然林的分布格局相同 (Pommerening, 2002; Petritan et al, 2012)。本研究在垂直方向上,两块样地的林木数量随着个体大小增加逐渐增加,并表现出很大的相似性,其多样性介于相邻纬度的原始针叶林和经常受干扰的针叶林之间 (Kuuluvainen et al, 1996)。本研究中,它们的大小比数频率值亦几乎均匀地分布在五个分化等级中即均值接近 0.2。反应出不同大小林木均衡地散布在水平空间上,与天然大头茶林 (*Polyspora specios* H.T.Chang) 和栲树林 (*Castanopsis fargesii*) 的分化特征相似(赵洋毅等, 2012)。

本研究中,油松天然群落 a 的径阶分布整体呈正态分布,这与山西太岳山油松天然林 (黄三祥等, 2009; 张笑菁等, 2010) 和甘肃小陇山油松天然林的径阶特征极其相似 (刘文桢等, 2010),但与所谓的天然林理想型倒 J 径阶分布不同 (Westphal et al, 2006; Gadow et al, 2012; Li et al, 2014a)。这可能暗示了油松种群正处于衰退阶段。本研究中,群落 b 的径阶分布略呈双峰行。这与北京松山国家级自然保护区的油松天然林的径阶结构完全一致 (张贇等, 2009),表明该群落中幼树在数量上占据稍高比

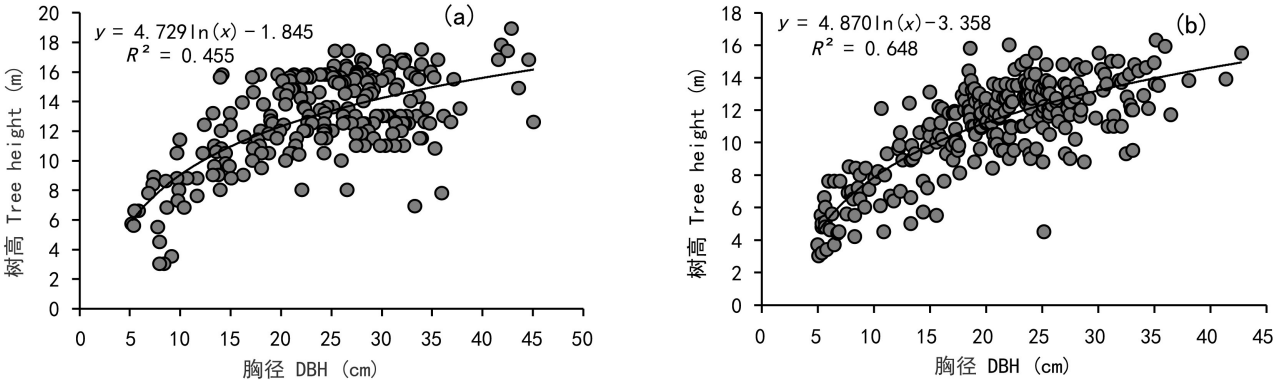


图 7 胸径与树高之间的关系
Fig. 7 Relationships between DBH and TH

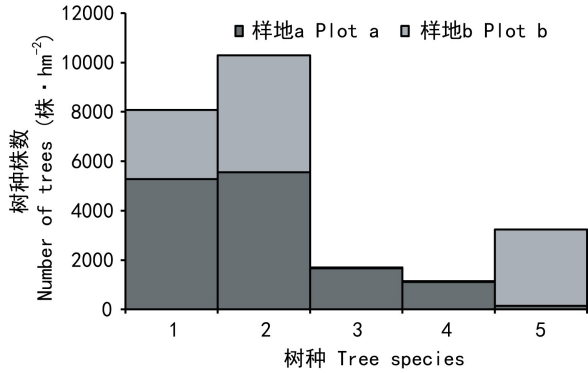


图 8 林下更新的主要树种数量 1. 油松;
2. 辽东栎; 3. 野漆树; 4. 青桐; 5. 甘肃山楂。
Fig. 8 Generation of main species found in understory
1. *Pinus. tabulaeformis*; 2. *Quercus liaotungensis*;
3. *Txicodendron succedaneum*; 4. *Firmiana platanifolia*; 5. *Cartaeus kansuensis*.

例。但这并不意味着其群落结构正处于稳定阶段，毕竟在这两块油松天然林群落中无论是径阶分布、树高分布还是树冠分布都表明大树占多数比例，其次是中庸木，数量最小的仍是小树。油松群落径阶结构可能易受生境的影响。如刘平（2011）报道北京低山油松人工林在 4 种不同坡向上有不同的径阶分布规律和林下生物多样性。张光灿等（2007）发现不同坡向的油松人工林的径阶完全不同。张希彪等（2006a）亦认为子午岭地区油松天然林的分布明显受到坡度的影响并且整个群落处于较弱的

生境异质性变化状态中。在沟壑交错的黄土高原区,径阶分布特征可能对环境变化更加敏感,这可能也是两个油松天然群落不同的重要原因。

3.2 油松天然群落的更新特征

天然情况下,大多数针叶树种依靠种子更新,油松作为黄土高原的主要森林类型,已进入繁殖期,其自然更新能力的大小是决定该区针叶林群落演替方向和维持针叶林大面积存在的基础,也是衡量生态功能能否顺利恢复的关键（张希彪等, 2009）。本研究中,油松种群幼苗的数量均保持在每公顷 2800 株以上,基本能够满足其更新需求。王梅和张文辉（2009）认为陕北黄土高原半干旱、半湿润地区油松人工林的更新主要限制因子为水分,满足油松人工林更新标准的降水量需求在 550 mm 左右。无论是研究区域的降雨量还是幼苗更新状况均与他们的研究相符。然而,这些幼苗的分布极不均匀,多数呈团块状分布,可能暗示油松群落将产生不稳定的变化。

油松种群的更新特征可能与林地的生态环境有关,也可能与油松自毒作用（Autotoxicity）、种子的物理特性和寿命、林分结构状况以及演替阶段有关。样地地形的不平衡可能使得下落的油松种子聚集到地面的凹处,因此更新的幼苗也只能成聚集状况。油松种子的质量较大,下落时仅能散落到母树的周围,十分不利于油松依靠林窗或林隙的更新来维持群落结构（张希彪等, 2009）。同时子午岭地区油松种子从开始下落到完全失去活力整个时

间间隔还不到 1 a,种子库持续时间较短,进一步限制了幼苗的繁殖和扩展(张希彪等,2009)。种内自毒作用也可能是影响油松林天然更新成败的关键因素,它不但限制了自身幼苗的生长,对其林分更新也有一定的阻碍作用(李登武等,2010),这种现象也广泛存在与其他针叶林中(王强等,2007; Fernandez et al, 2008; 潘存德等,2009)。再者,高郁闭度的林分不利于阳性树种油松的幼苗和幼树的生长(王彬等,2009)。

一定程度上种内聚集有利于幼苗数量的保存和抵御外来不良环境的干扰,常被认为是种群自我保护的一种生存策略。但随着演替的进行,种内竞争逐渐加强,油松幼苗数量将随着年龄增长迅速减少(黄三祥等,2009; 王彬等,2009)。本研究中,辽东栎(*Quercus liaotungensis*)作为子午岭地区地带性顶级植被,其幼苗的更新数量多于油松种群,分布格局亦相对均匀,已形成了稳定的林下更新层。它们将来可能与油松一道形成地带性顶级植被群落—松栎混交林(李师翁和刘立品,2004)或是将油松彻底取代。此外,本研究一些稍耐阴的树种,如鹅耳枥(*Carpinus turczaninowii*)、青桐、野漆树等开始在群落中大量出现,还有些偶见种如甘肃山楂。这些特征都反映了子午岭油松天然群落正处于树种更替阶段,与其他人的研究结果一致(苗艳明等,2008; 王彬等,2009)。

3.3 油松天然林的群落结构对其人工林调整的启示

群落稳定性是黄土高原植被恢复与人工植被建设中的关键问题之一,而物种组成与结构是群落稳定性的客观体现(李裕元等,2005)。相比之下(天然林每公顷仅为 680 株),油松人工林密度普遍偏高(徐扬等,2008; 王梅 & 张文辉,2009; 修勤绪等,2009; Wang & Liu, 2011),需适当择伐部分林木,降低林分密度,调控生理需水和生态需水在土壤水分植被承载力的许可范围之内。油松天然群落的水平格局呈随机分布,而人工林通常采用固定的株、行距栽种模式(王梅和张文辉,2009),林下生境普遍一致,不利于幼苗更新和生长。采用单株或小团块状择伐可能是一种合适的改造方式。不仅有助于将油松人工林分布格局调向随机分布,增加林下环境的异质性,为油松和其他物种的更新和生长提供适宜的生存微环境,亦符合油松天然群

落演替的规律(张希彪等,2006a)。这类改造在实践中取得了一定成功(修勤绪等,2009; 曹旭平等,2010; Wang & Liu, 2011; 周建云等,2013),但要在立地条件十分复杂的黄土高原区域广泛地推进相应的改造技术仍需更加广泛而深入的探究,毕竟如何建设好黄土高原植被仍处于争论阶段。

参考文献:

- AGUIRRE O, HUI G, GADOW KV, et al, 2003. An analysis of spatial forest structure using neighborhood-based variables [J]. For Ecol & Manag, 183: 37–145.
- CAO XP, GUO QQ, ZHANG WH, 2010. Species compositions and preponderant population dynamic of the *Pinus tabulaeformis* forest and *Pinus tabulaeformis* + *Quercus liaotungensis* forest in Huanglong Mountain [J]. Acta Bot Boreal-Occident Sin, 30(5): 1012–1019. [曹旭平, 郭其强, 张文辉, 2010. 黄龙山油松林和油松+辽东栎混交林物种组成及优势种群动态 [J]. 西北植物学报, 30(5): 1012–1019.]
- CHEN YM, LIANG YM, CHENG JM, et al, 2002. The zonal character of vegetation construction on Loess Plateau [J]. Acta Phytoecol Sin, 26(3): 339–345. [陈云明, 梁一民, 程积民, 2002. 黄土高原林草植被建设的地带性特征 [J]. 植物生态学报, 26(3): 339–345.]
- FERNANDEZ C, VOIRIOT S, MéVY JP, et al, 2008. Regeneration failure of *Pinus halepensis* Mill.: The role of autotoxicity and some abiotic environmental parameters [J]. For Ecol & Manag, 255: 2928–2936.
- FÜLDNER K, 1995. Strukturbeschreibung von Buchen-Edellaubholz-Mischwäldern [D]. Göttingen: University of Göttingen.
- GADOW KV, 1993. Zur Bestandesbeschreibung in der Forsteinrichtung [J]. For Holz, 48: 602–606.
- GADOW KV, ZHANG C WEHENKEL C, et al, 2012. Forest structure and diversity [M]. Berlin: Springer.
- GAO BJ, LI DY, CAI WB, et al, 1999. Community characteristics of degraded Chinese pine stands and their biodiversity restoration [J]. Acta Ecol Sin, 19(5): 674–653. [高宝嘉, 李东义, 蔡万坡, 等. 1999. 残次油松林群落特征与生物多样性恢复 [J]. 生态学报, 19(5): 674–653.]
- GAO JR, XIAO B, 2001. Nutrient distribution and accumulation pattern of Chinese pine plantations in Qiaoshan forested region [J]. Chin J Appl Ecol, 12(5): 667–671. [高甲荣, 肖斌, 2001. 桥山林区油松人工林营养元素分配与积累的研究 [J]. 应用生态学报, 12(5): 667–671.]
- HE HF, HUANG MB, DANG TH, 2003. Distribution characteristic of dries soil layer in Wongdonggou watershed in gully region of the Loess Plateau [J]. J Nat Res, 18(1): 30–36. [何福红, 黄明斌, 党廷辉, 2003. 黄土高原沟壑区小流域土壤干层的分布特征 [J]. 自然资源学报, 18(1): 30–36.]

- HUANG SX, ZHANG Y, ZHAO XH, 2009. Spatial distribution pattern of *Pinus tabulaeformis* population in Taiyue Mountain, Shanxi Province [J]. J Jujian Coll For, 29(3): 269–273. [黄三祥, 张赞, 赵秀海, 2009. 山西太岳山油松种群的空间分布格局 [J]. 福建林学院学报, 29(3): 269–273.]
- HUI G, ALBERT M, GADWO KV, 1998. Das Umgebungsmaß als parameter zur Nachbildung von bestandesstrukturen [J]. Forstw Cbl, 117: 258–266.
- HUI G, ZHAO X, ZHAO Z, et al, 2011. Evaluating tree species diversity based on neighborhood relationships [J]. For Sci, 57: 292–300.
- HUI G, ZHAO Z, HU Y, et al, 2010. Structure-based forest management [M]. Beijing: Chinese Forestry Publishing House. [惠刚盈, 赵中华, 胡艳波, 等, 2010. 结构化森林经营技术指南 [M]. 北京: 中国林业出版社]
- KANG X, 2011. Forest management [M]. Beijing: Chinese Forestry Publishing House. [亢新刚, 2011. 森林经理学 [M]. 北京: 中国林业出版社.]
- KINT V, GEUDENS G, MOHREN GMJ, 2006. Silvicultural interpretation of natural vegetation dynamics in ageing Scots pine stands for their conversion into mixed broadleaved stands [J]. For Ecol & Manag, 223: 363–370.
- KINT V, LUST N, FERRIS R, et al, 2000. Quantification of forest stand structure applied to Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) forests [M]. Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales, 19: 147–164.
- KINT V, MEIRVENNE MV, NACHTERGALE L, et al, 2003. Spatial methods for quantifying forest stand structure development: a comparison between nearest-neighbor indices and variogram analysis [J]. For Sci, 49: 36–49.
- KUULUVAINEN T, PENTTINEN A, LEINONEN K, et al, 1996. Statistical opportunities for comparing stand structural heterogeneity in managed and primeval forests: an example from boreal spruce forests in Southern Finland [J]. Silv Fenn, 30: 315–328.
- LI DW, WANG DM, YAO WX, 2010. Autotoxicity of *Pinus tabulaeformis* and its ecology significance [J]. Sci Silv Sin, 46(11): 174–178. [李登武, 王冬梅, 姚文旭, 2010. 油松的自毒作用及其生态学意义 [J]. 林业科学, 46(11): 174–178.]
- LI GL, LIU Y, YU HQ, et al, 2009. Resposse of undergrowth development to the growth rhythm of Chinese Pine plantation [J]. Acta Ecol Sin, 29(3): 1264–1275. [李国雷, 刘勇, 于海群, 等, 2009. 油松 (*Pinus tabulaeformis*) 人工林林下植被发育对油松生长节律的响应. 生态学报, 29(3): 1264–1275.]
- LI M, LI KR, YANG XY, et al, 2010. Study on structure and plant diversity of *Pinus tabulaeformis* stands in Chunhua county [J]. Res Soil Water Conserv, 17(6): 142–147. [李苗, 李凯荣, 杨晓毅, 等, 2010. 淳化县人工油松林林分结构及林下植物多样性研究 [J]. 水土保持研究, 17(6): 142–147.]
- LI SW, LIU LP, 2004. Studies on types and community characters of forest and thicket vegetations in Ziwu Mountain [J]. Acta Bot Boreal-Occident Sin, 24(2): 275–280. [李师翁, 刘立品, 2004. 子午岭森林与灌丛植被的主要类型及特征的研究 V. 西北植物学, 24(2): 275–280.]
- LI YF, WANG L, YU SF, et al, 2016. Spatial structure of *Syzygium hancei* community along coastline of Guangxi [J]. Chin J Appl Ecol, 35(3): 726–732. [李远发, 王磊, 喻素芳, 等, 2016. 广西滨海过渡区红鳞蒲桃群落的空间结构特征 [J]. 生态学杂志, 35(3): 726–732.]
- LI YY, SHAO MA, 2004. The change of plant diversity during natural recovery process of vegetation in Ziwuling area [J]. Acta Ecol Sin, 24(2): 252–260. [李裕元, 邵明安, 2004. 子午岭植被自然恢复过程中植物多样性的变化 [J]. 生态学报, 24(2): 252–260.]
- LI YY, ZHENG JY, SHAO MA, 2005. Comparison of the attributes of natural forests and plantations in Ziwuling Mountain [J]. Acta Bot Boreal-Occidental Sin, 25(12): 2447–2456. [李裕元, 郑纪勇, 邵明安, 2005. 子午岭天然林与人工林群落特征比较研究 [J]. 西北植物学报, 25(12): 2447–2456.]
- LI Y, HUI G, ZHAO Z, et al, 2012. The bivariate distribution characteristics of spatial structure in natural Korean pine broad-leaved forest [J]. J Veg Sci, 23(6): 1180–1190.
- LI Y, HUI G, ZHAO Z, et al, 2014. Spatial structural characteristics of three hardwood species in Korean pine broad-leaved forest—Validating the bivariate distribution of structural parameters from the point of treepopulation [J]. For Ecol Manag, 314: 17–25.
- LI Y, YE S, HUI G, et al, 2014. Spatial structure of timber harvested according to structure-based forest management [J]. For Ecol Manag, 322: 106–116.
- LIU P, MA LY, JIA LM, et al, 2011. Diameter structure and understory diversity in Chinese pine plantations in Beijing low mountain areas [J]. J Beijing For Univ, 33(3): 57–63. [刘平, 马履一, 贾黎明, 等, 2011. 北京低山油松人工林径阶结构及林下植物多样性特征 [J]. 北京林业大学学报, 33(3): 57–63.]
- LIU P, WANG YT, MA LY, et al, 2010. Dynamic prediction and verification of growth process of *Pinus tabulaeformis* plantation in mountainous region of Beijing [J]. J NE For Univ, 38(1): 10–43. [刘平, 王玉涛, 马履一, 等, 2010. 油松人工林林分生长过程动态预测及检验 [J]. 东北林业大学学报, 38(1): 10–43.]
- LIU WZ, ZHAO ZH, HUI GY, et al, 2011. Structure characters of *Pinus tabulaeformis* natural forest on Xiaolong Mountain [J]. For Res, 24(4): 437–442. [刘文桢, 赵中华, 惠刚盈, 等, 2011. 小陇山油松天然林结构特征 [J]. 林业科学研究, 24(4): 437–442.]
- LU Q, DECOCK C, ZHANG X, et al, 2009. *Ophiostomatoid fungi* (Ascomycota) associated with *Pinus tabulaeformis* infes-

- ted by *Dendroctonus valens* (Coleoptera) in northern China and an assessment of their pathogenicity on mature trees [J]. *Antonie van Leeuwenhoek*, 96: 275–293.
- MA LY, LI CY, WANG XQ, et al, 2007. Effects of Thinning on the growth and the diversity of undergrowth of *Pinus tabulaeformis* plantation in Beijing mountainous areas [J]. *Sci Silv Sin*, 43(5): 1–13. [马履一, 李春义, 王希群, 等. 2007. 不同强度间伐对北京山区油松生长及其林下植物多样性的影响 [J]. 林业科学, 43(5): 1–13.]
- MIAO YM, LIU RT, BI RC, et al, 2008. Population structure and dynamics of *Pinus tabulaeformis* in Huoshan Mountain of Shanxi Province [J]. *J Wuhan Bot Res*, 26(3): 288–293. [苗艳明, 刘任涛, 毕润成, 等. 2008. 山西霍山油松种群结构和动态研究 [J]. 武汉植物学研究, 26(3): 288–293.]
- NIU LL, YU XX, YUE YJ, 2008. Spatial patterns of different age-class individuals in *Pinus tabulaeformis* forest in Songshan Nature Reserve of Beijing, China [J]. *Chin J Appl Ecol*, 19(7): 1414–1418. [牛丽丽, 余新晓, 岳永杰, 2008. 北京松山自然保护区天然油松林不同龄级立木的空间点格局 [J]. 应用生态学报, 19(7): 1414–1418.]
- PAN CD, WANG Q, RUAN X, et al, 2009. Biological activity and quantification of potential autotoxins from the leaves of *Picea schrenkiana* [J]. *Chin J Plant Ecol*, 33(1): 186–196. [潘存德, 王强, 阮晓, 等. 2009. 天山云杉针叶水提取物自毒效应及自毒物质的分离鉴定 [J]. 植物生态学报, 33(1): 186–196.]
- PETRITAN AM, BIRIS IA, MERCE O, et al, 2012. Structure and diversity of a natural temperate sessile oak (*Quercus petraea* L.) —European Beech (*Fagus sylvatica* L.) forest [J]. *For Ecol Manag*, 280: 140–149.
- POMMERENING A, 2002. Approaches to quantifying forest structures [J]. *Forestry*, 75(3): 305–324.
- SCHULTE BJ, BUONGIORNO J, 1998. Effects of uneven-aged silviculture on the stand structure, species composition, and economic returns of loblolly pine stands [J]. *For Ecol Manag*, 111: 83–101.
- SHI LL, WANG XB, XU LC, 2013. Effects of thinning on succession trend of *Pinus tabulaeformis* plantation in North Hebei mountain area [J]. *J NE For Univ*, 41(4): 43–45, 58. [石丽丽, 王雄宾, 徐成立, 2013. 间伐干扰对冀北山地油松人工林群落演替趋势影响 [J]. 东北林业大学学报, 41(4): 43–45, 58.]
- SPELLERBERG IF, FEDOR PJ, 2003. A tribute to Claude Shannon (1916–2001) and plea for more rigorous use of species richness, species diversity and the ‘Shannon-Wiener’ index [J]. *Global Ecol & Biodivers*, 12: 177–179.
- SUN CZ, HUANG BL, CHEN HB, et al, 1998. Interaction between soil water conditions and different kinds of artificial plant cover in the Loess Plateau [J]. *J Beijing For Univ*, 20(3): 7–14. [孙长忠, 黄宝龙, 陈海滨, 等. 1998. 黄土高原人工植被与其水分环境相互作用关系研究 [J]. 北京林业大学学报, 20(3): 7–14.]
- TIAO D, LI Y, LU D, et al, 2016. The essential oil components of *Cinnamomum cassia*: an analysis under different thinning models of plantation *Pinus massoniana* [J]. *J For Res*, (3): 707–717.
- WANG B, WANG H, YANG JL, 2009. Study on the regeneration characteristics under *Pinus tabulaeformis* forests in Ziwu mountains [J]. *J NW For Univ*, 24(5): 58–60. [王彬, 王辉, 杨君珑, 2009. 子午岭油松林更新特征研究 [J]. 西北林学院学报, 24(5): 58–60.]
- WANG G, LIU F, 2011. The influence of gap creation on the regeneration of *Pinus tabuliformis* planted forest and its role in the near-natural cultivation strategy for planted forest management [J]. *For Ecol Manag*, 262: 413–423.
- WANG L, SHAO MA, ZHANG QF, 2004. Distribution and characters of soil dry layer in north Shaanxi Loess Plateau [J]. *Chin J Appl Ecol*, 15(3): 436–442. [王力, 邵明安, 张青峰, 2004. 陕北黄土高原土壤干层的分布和分异特征 [J]. 应用生态学报, 15(3): 436–442.]
- WANG M, ZHANG WH, 2009. Regeneration and fruiting of *Pinus tabulaeformis* Carr. artificial forest in Loess Plateau of northern Shanxi [J]. *J Lanzhou Univ (Nat Sci Ed)*, 45(5): 88–93. [王梅, 张文辉, 2009. 陕北黄土高原油松人工种群结实与更新 [J]. 兰州大学学报 (自然科学版), 45(5): 88–93.]
- WANG Q, RUAN X, LI ZH, et al, 2007. Autotoxicity of plants and research of Coniferous forest autotoxicity [J]. *Sci Silv Sin*, 46(3): 134–142. [王强, 阮晓, 李兆慧, 等. 2007. 植物自毒作用及针叶林自毒研究进展 [J]. 林业科学, 46(3): 134–142.]
- WANG ZQ, LIU BY, LU BJ, 2003. A study on water restoration of dry soil layers in the semi-arid area of Loess Plateau [J]. *Acta Ecol Sin*, 23(9): 1144–1150. [王志强, 刘宝元, 路炳军, 2003. 黄土高原半干旱区土壤干层水分恢复研究 [J]. 生态学报, 23(9): 1144–1150.]
- WESTPHAL C, TREMER N, OHEIMB GV, et al, 2006. Is the reverse J-shaped diameter distribution universally applicable in European virgin beech forests? [J]. *For Ecol Manag*, 223: 75–83.
- WU G, FENG ZW, 1994. Study on the social characteristics and biomass of the *Pinus tabulaeformis* forest systems in China [J]. *Acta Ecol Sin*, 14(4): 415–422. [吴刚, 冯宗炜, 1994. 中国油松林群落群落特征及生物量的研究 [J]. 生态学报, 14(4): 415–422.]
- XIA FC, ZHAO XH, YANG ZG, et al, 2010. Stand structure of *Pinus tabulaeformis* forest on Eastern Hunshandake sandy land, inner Mongolia Plateau [J]. *J NE For Univ*, 38(11): 7–9. [夏富才, 赵秀海, 杨志国, 等. 2010. 浑善达克沙地天然油松林分结构 [J]. 东北林业大学学报, 38(11): 7–9.]
- XIU QX, LU YC, CAO XP, et al, 2009. Effect of target tree stand management on natural regeneration of *Pinus tabulae-*

- formis* plantations on Loess Plateau area [J]. J SW For Coll, 29(2):13–19. [修勤绪, 陆元昌, 曹旭平, 等. 2009. 目标树林分作业对黄土高原油松人工林天然更新的影响 [J]. 西南林学院学报, 29(2):13–19.]
- XU Y, LIU Y, LI GL, et al, 2008. Effects of the thinning intensity on the diversity of undergrowth vegetation in *Pinus tabulaeformis* plantations [J]. J Nangjing For Univ (Nat Sci Ed), 32(3): 135–138. [徐 扬, 刘 勇, 李国雷, 等. 2008. 间伐强度对油松中龄人工林林下植被多样性的影响 [J]. 南京林业大学学报 (自然科学版), 32(3): 135–138.]
- ZHANG GC, LIU X, ZHOU ZF, et al, 2007. Growth process and diameter structure of *Pinus tabulaeformis* forests for soil and water conservation in Loess Plateau hilly regions [J]. Chin J Appl Ecol, 18(4): 728–734. [张光灿, 刘 霞, 周泽福, 等. 2007. 黄土丘陵区油松水土保持林生长过程与直径结构 [J]. 应用生态学报, 18(4): 728–734.]
- ZHANG XB, GUO XQ, SHANGGUAN ZP, et al, 2006. Communities characteristics of natural *Pinus tabulaeformis* forests in Hilly Loess Regions [J]. Bull Bot Res, 26(2): 169–75. [张希彪, 郭小强, 上官周平, 等. 2006a. 黄土丘陵区子午岭油松天然林群落特征研究 [J]. 植物研究, 26(2): 169–75.]
- ZHANG XB, SHANG-GUAN ZP, 2006b. Effect of human-induced disturbance on physical properties of soil in artificial *Pinus tabulaeformis* Carr. forests of the Loess Plateau [J]. Acta Ecol Sin, 26(11): 3685–3695. [张希彪, 上官周平, 2006b. 人为干扰对黄土高原子午岭油松人工林土壤物理性质的影响 [J]. 生态学报, 26(11): 3685–3695.]
- ZHANG XB, WANG RJ, SHANG-GUAN ZP, 2009. Dynamics of seed rain and soil seed bank in *Pinus tabulaeformis* Carr. forests in eroded hilly loess regions of the Loess Plateau in China [J]. Acta Ecol Sin, 20(4): 1877–18884. [张希彪, 王瑞娟, 上官周平, 2009. 黄土高原子午岭油松林的种子雨和土壤种子库动态 [J]. 生态学报, 20(4): 1877–18884.]
- ZHANG XJ, ZHAO XH, KANG FF, et al, 2010. Spatial pattern of the trees in a natural *Pinus tabulaeformis* forest in Taiyue Mountain [J]. Acta Ecol Sin, 30(18): 4821–4827. [张笑菁, 赵秀海, 康峰峰, 等. 2010. 太岳山油松天然林林木的空间格局 [J]. 生态学报, 30(18): 4821–4827.]
- ZHANG Y, ZHAO YZ, ZHANG CY, et al, 2009. Structure and spatial distribution of *Pinus tabulaeformis* population in the Songshan Nature Reserve, Beijing, China [J]. Chin J Appl Environ Biology, 15(2): 175–179. [张 贲, 张春雨, 赵秀海, 2009. 内蒙古黑里河天然油松林主要树种的空间分布格局 [J]. 西北植物学报, 29(1): 167–173.]
- ZHAO N, LI YL, ZHANG JS, et al, 2011. Plant species diversity of natural forests and plantations of Mountainous land in north-Hebei [J]. J NW For Univ, 26(2): 15–21. [赵 娜, 李玉灵, 张劲松, 等. 2011. 冀北山地天然林与人工林植被物种多样性研究 [J]. 西北林学院学报, 26(2): 15–21.]
- ZHAO YY, WANG KQ, CHEN QB, et al, 2012. Spatial structural characteristics of typical natural evergreen broad-leaved forest features of southwest subtropical area, China [J]. Acta Bot Boreal-Occidental Sin, 32(1): 187–192. [赵洋毅, 王克勤, 陈奇伯, 等. 2012. 西南亚热带典型天然常绿阔叶林的空间结构特征 [J]. 西北植物学报, 32(1): 187–192.]
- ZHOU JY, LI R, HE JF, et al, 2013. Regeneration of the dominant arbors after close-to-natural management of *Quercus wutaishanica* Forest [J]. Sci Silv Sin, 49(8): 15–20. [周建云, 李 荣, 何景峰, 张文辉, 2013. 近自然经营对辽东栎林优势乔木更新的影响 [J]. 林业科学, 49(8): 15–20.]