

DOI: 10.5846/stxb202203170651

朱文婷, 刘海坤, 何睿, 于东悦, 夏鹰, 党海山. 藏东南急尖长苞冷杉群落空间点格局分析及其时空动态. 生态学报, 2022, 42(22): 8977-8984.

Zhu W T, Liu H K, He R, Yu D Y, Xia Y, Dang H S. Spatial point pattern analysis and spatio-temporal dynamics of *Abies georgei* var. *smithii* forests in southeast Tibet. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(22): 8977-8984.

藏东南急尖长苞冷杉群落空间点格局分析及其时空动态

朱文婷^{1,2}, 刘海坤², 何睿², 于东悦², 夏鹰³, 党海山^{2,*}

1 西藏大学理学院, 拉萨 850000

2 中国科学院武汉植物园, 武汉 430074

3 重庆市武隆区林业局, 重庆 408500

摘要:为探究藏东南色季拉山急尖长苞冷杉(*Abies georgei* var. *smithii*)群落的空间分布格局及其时空动态,在急尖长苞冷杉纯林中设置 1 个 1 hm² 的固定样地,记录样地内所有高度>2 m 的急尖长苞冷杉的年龄、胸径、冠幅和坐标等指标。根据径级分布分析种群的径级结构,采用点格局分析方法对种群的空间格局进行分析。结果显示:(1)急尖长苞冷杉的径级分布为倒“J”型,结构稳定,自然更新良好。(2)成树在各个时期和不同尺度上都呈随机分布;幼树在 1891 年之后的各个时期在小尺度(2 m)上呈聚集分布,1981—2012 年在 1—41 m 尺度上陆续出现聚集分布;幼苗在 1861—1920 年在小尺度(1—2 m)上呈聚集分布,1951—1980 年出现聚集分布的尺度范围最大(1—35 m, 41 m 和 48 m)。(3)在不同时期中,不同年龄组树木之间几乎都呈正关联或无关联;成树和幼树随时间推移从无关联到在各个尺度上陆续出现正关联的变化;成树和幼苗随时间呈无关联、中大尺度(32—35 m, 44 m 和 49 m)正关联和无关联的变化;幼苗和幼树呈现从无关联转变为小尺度(8 m)正关联和小、中尺度(1—30 m)正关联的变化。研究结果表明:成树在小尺度上对幼龄树存在一定的抑制,但在较大尺度是促进的。1951—1980 年样地中的幼苗数量大量增加,随后 30 年幼树的数量因幼苗长大也有增加,这在一定程度上增大了竞争。但总体来看急尖长苞冷杉群落在演替过程中具有种内促进作用。

关键词:急尖长苞冷杉;色季拉山;点格局分析;群落构建

Spatial point pattern analysis and spatio-temporal dynamics of *Abies georgei* var. *smithii* forests in southeast Tibet

ZHU Wenting^{1,2}, LIU Haikun², HE Rui², YU Dongyue², XIA Ying³, DANG Haishan^{2,*}

1 College of Science, Tibet University, Lhasa 850000, China

2 Wuhan Botanical Garden of Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430074, China

3 Chongqing Wulong Forestry Bureau, Chongqing 408500, China

Abstract: In order to investigate the spatial pattern and spatiotemporal dynamics of *Abies georgei* var. *smithii* community in Sygera Mountains, the southeastern Tibet, China. A permanent plot of 1 hm² was set up in *Abies georgei* var. *smithii* stand. All the fir individuals were mapped in the plot and age, diameter at breast high (DBH), crown width and coordinates for each smith fir tree > 2 m were recorded. The diameter class structure was analyzed according to its distribution, and the spatial pattern of the population was analyzed by point pattern analysis. The results showed that (1) the diameter class distribution of *A. georgei* var. *smithii* was inverted “J” shape, indicating that the community had a stable structure and good

基金项目:国家自然科学基金项目(31971491, 31770517)

收稿日期:2022-03-17; 网络出版日期:2022-07-13

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: dangkey@wbcas.cn

natural regeneration. (2) The adult trees were almost randomly distributed in different periods and scales. The juveniles were aggregated at a small scale (2 m) in each period after 1891. Seedlings were aggregated at 1—41 m scale from 1981 to 2012 and at small scales (1—2 m) from 1861 to 1920. The largest scale range (1—35 m, 41 m, and 48 m) of seedlings aggregation was observed in 1951—1980. (3) In all the five periods, there was almost no or positive association between trees at different age groups. The association between adult and juveniles shifted from no association to positive association at all scales. Adults and seedlings showed no correlation at medium and large scales (32—35 m, 44 m, and 49 m), but the positive and or uncorrelated changes over time. Seedlings and juveniles showed a change from no association to positive association at small scale (8 m) and then positive association at small and medium scale (1—30 m). The number of seedlings in the plot increased greatly in 1951—1980, and the number of saplings in the following 30 years also increased as the seedlings grew up, which in part increased competition in the fir stand. In general, *Abies georgei* var. *smithii* community had an intraspecific promoting effect during its succession.

Key Words: *Abies georgei* var. *smithii*; Sygera Mountain; point pattern analysis; community organization

种群是构成群落的基本单位,植物种群内个体的空间分布与形成该种群的生态学过程有着紧密联系^[1],植物种群空间格局的研究在揭示种群结构及其生态学过程、种内和种间关系等方面具有重要作用,是生态学研究的热点之一^[2-4]。点格局分析是植物空间格局分析的一种常用方法,能将点与点之间的距离利用到最大限度,既可以反映植物的空间分布特点、种群利用资源的现状,又能揭示不同年龄级在种内的地位^[5],被广泛应用于种群的空间格局与种间关系的研究中^[6-9],目前绝大多数关于点格局分析的研究没有涉及到较大的时间尺度。近年来,有学者将点格局分析与树木年轮学方法相结合,在树线交错带重建过去上百年的森林动态变化^[10-11],这一方法将树木种群空间格局的研究拓展到时间尺度,是探究种群演替时空动态的有效方法。

急尖长苞冷杉是松科冷杉属长苞冷杉的变种,主要分布在我国藏东南、滇西北和川西南等地海拔 3600—4300 m 的高山地带。急尖长苞冷杉是藏东南亚高山暗针叶林的主要建群树种之一,在水源涵养、土壤保持和维系林区生物多样性等方面具有重要意义。由于之前的过度采伐和栖息地破坏,急尖长苞冷杉的自然分布区日益缩减,更新困难,被列为国家二级保护植物。目前已经有不少学者对急尖长苞冷杉群落进行了一系列研究,其中涉及点格局分析的研究包括对急尖长苞冷杉不同龄级立木、粗木质残体、林下倒木还有整个种群的空间格局分析^[4,12-14]。但这些研究大部分只对调查当年的群落空间格局进行分析,鲜有对急尖长苞冷杉群落在不同时空尺度上格局变化动态的报道。本研究利用点格局分析与树木年轮学相结合的方法,以 30 年为时间窗口,分析急尖长苞冷杉群落在 1861—2012 年的空间格局特征及其时空变化趋势,主要探讨以下两个问题:(1)急尖长苞冷杉种群不同年龄级个体的空间格局、关联性随时间的变化及其可能原因;(2)急尖长苞冷杉种群空间格局的形成与维持机制以及演替中更新与竞争情况的动态变化。以期对藏东南急尖长苞冷杉种群长期的动态变化与更新规律有更清晰的认识,也为该物种的保护和实践提供理论基础。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

色季拉山位于西藏东南部林芝县境内,主峰高达 5200 m,属于念青唐古拉山脉,是尼洋河流域与帕隆藏布江的分水岭,属亚高山寒温带湿润气候区,干湿分明,色季拉山地地形起伏较大,垂直谱带明显,植被类型丰富,人为干扰少,森林覆盖率达 55 %。研究地点位于色季拉山东坡海拔 4200 m 处,坡度 11°,坡向为西偏南 16°,盖度为 60 %—90 %。年平均气温 2.0—4.5 °C,7 月最暖,均温 9.8 °C;1 月最冷,均温 -13.8 °C,年平均降水量为 1134.1 mm,春夏季降水较多,年均相对湿度 78.8 %。土壤为酸性棕壤土,含石砾较多^[15]。该区植被乔木层主要是急尖长苞冷杉纯林,林下灌木层主要有薄毛海绵杜鹃 (*Rhododendron aganniphum* var. *schiaopeplum*)、雪层杜鹃 (*Rhododendron nivale* Hook. f.)、西南花楸 (*Sorbus rehderiana* Koehne)、方枝柏

(*Juniperus saltuaria* Rehder & E. H. Wilson)、长尾槭(*Acer caudatum* Wall.)、杯萼忍冬(*Lonicera tangutica* Maxim.)和腰果小檗(*Berberis johannis* Ahrendt)等植物。

1.2 研究方法

1.2.1 野外调查

2012年在色季拉山海拔4200 m的急尖长苞冷杉天然纯林中进行踏查,在无明显放牧或伐木、火灾等干扰的林分中设置1个100 m×100 m的固定样地,以面对山顶的左下角为原点(94°36.113'E, 29°36.182'N),东西向为纵轴,南北向为横轴,采用相邻格子样方法将大样方分成25个20 m×20 m的小样方。在小样方中进行调查,记录样方中所有高度>2 m的急尖长苞冷杉的树高、胸径、冠幅、坐标,并利用生长锥对样地内所有高度>2 m的树木在胸高位置钻取一个或两个直径为5.15 mm的树芯用于确定树龄。由于急尖长苞冷杉长到胸高位置需要的时间为30a^[16],因此对所有通过树芯确定的树木年龄再加上30a作为树木的实际年龄。

将收集的树芯在室内晾干,固定后用不同径级的砂纸进行逐级打磨,树芯样品出现明显的树木年轮边界后,用计算机COFFCHA程序对所有树芯样品进行交叉定年,少数树芯腐烂严重或结构不完整无法定年或定年结果出现明显错误的,用胸径与年龄的回归来确定年龄^[14]。

1.2.2 时期及年龄组划分

从调查时间往前推算时,样地中的树木数量越来越少,为保证结果的准确性,将从1861年到2012年的150年以30年为间隔划分为5个时期(即1861—1890年,1891—1920年,1921—1950年,1951—1980年,1981—2012年),分别对5个时期样地中的急尖长苞冷杉树进行空间格局及关联性分析。在每个时期再把急尖长苞冷杉分为三个年龄组:年龄≤30a的定义为幼苗,31a≤年龄≤100a的定义为幼树,年龄≥101a的定义为成树^[10]。该分组方式与按树高或胸径对树木进行分组的结果类似。例如树龄30a的树木通常为0.5 m高,通常将高度≤0.5 m的个体视为幼苗^[17];急尖长苞冷杉树龄在101a时,其胸径大致为17.5 cm,胸径大于17.5 cm过去通常被认为是成年树或是可繁殖的个体^[17]。

为了解释该样地中树木的更新动态,本研究假设这5个时间间隔中树木的死亡率是一致的。此假设依据以下原因提出:首先,根据对过去150年急尖长苞冷杉种群的重建,样地中的总个体数随时间的推移持续增加(图2),表明急尖长苞冷杉的更新率高于死亡率;成年个体数在最近的时期也增加,表明死亡率相对较低且没有随时间而增加。另外,在过去的200年,当地的年轮年表中并没有记录到会造成树木大量死亡的灾难性事件^[16],即1861—2012年间种群的死亡率没有出现较大的变动。

1.2.3 点格局分析

不同年龄组树木的空间分布格局用单样本的 $O_{11}(r)$ 统计函数进行分析^[18],零模型采用完全空间随机模型(CSR)。将观测值与199次蒙特卡洛模拟所得到的95%的置信区间进行比较,空间尺度为样地边长的一半,即50 m,本研究中将小、中和大尺度分别定义为1—15 m、16—35 m和36—50 m。当观测值位于置信区间之上,为聚集分布;在置信区间内,为随机分布;在置信区间之下,为均匀分布。

双样本的 $O_{12}(r)$ 统计函数用来分析急尖长苞冷杉两个年龄组之间的空间关联。通常认为成树会影响幼树和幼苗,所以在分析时保持成树或幼树的位置不动,改变幼树和幼苗的位置,使用的零模型也基于这一先验条件。同样,在1—50 m的距离内,若观测值在置信区间上方,则为正关联;若在下方,则为负关联;在置信区间之间为无显著空间联系。

用Programita软件(2014版)对急尖长苞冷杉进行空间点格局分析。用Excel软件对数据进行前期的基本处理及绘制点格局分析图。

2 结果与分析

2.1 急尖长苞冷杉的径级结构及各年龄组个体分布

经过调查,在样地中共记录了546棵急尖长苞冷杉。急尖长苞冷杉的径级分布呈倒“J”型(图1),其中最

大胸径为 107.59 cm,平均胸径为 21.78 cm。调查结果显示,胸径在 0—10 cm 的急尖长苞冷杉占调查总数的 44.9 %,胸径在 10—40 cm 范围的个体数随径级增加而逐渐减少;胸径大于 40 cm 的个体数稍有上升而后又迅速减少。从径级分布来看,样地中急尖长苞冷杉的老龄树较少,小径级植株所占比例较大,说明其种群具有较高的苗木更新储量。急尖长苞冷杉不同年龄组个体的种群空间分布见图 2,急尖长苞冷杉个体在样地中下部分布较密,在样地左上方稍稀疏。成树的分布较为分散,幼树与幼苗分布稍聚集。1951—1980 年幼苗的数量有明显增加。

2.2 急尖长苞冷杉种群空间分布格局

根据单样本的 $O_{11}(r)$ 统计函数的结果(图 3),成树在 1861—2012 年期间基本都呈随机分布。幼树从 1861 到 1950 年在 2 m 小尺度呈聚集分布,1951 年之后呈聚集分布的尺度开始扩大,1981—2012 年在 1—41 m 的范围陆续呈聚集分布。幼苗在所有时期的小尺度(1—2 m)上呈聚集分布,1921—1950 年在 2 m、6 m 小尺度和 26—35 m 中尺度陆续呈聚集分布,1951—1980 年在 1—48 m 的尺度陆续呈聚集分布,1981—2012 年观测值和下包际线的值大部分为 0。总体来看,所有年龄组的树木在各个时期均未出现明显的均匀分布。成树在各个时期和尺度随机分布,幼树在前 3 个时期只在小尺度上出现聚集,在最后 60 年呈聚集分布的尺度变大。幼苗在所有时期的小尺度上出现聚集,1951—1980 年在小、中、大尺度陆续出现明显聚集分布。

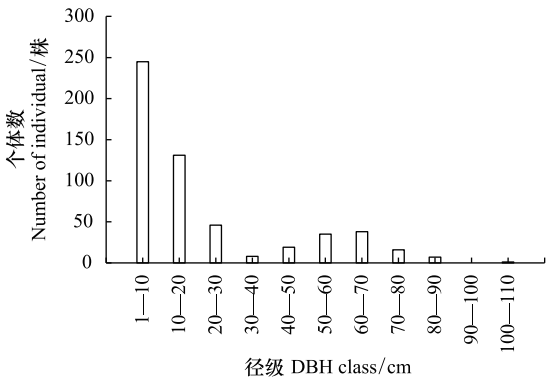


图 1 急尖长苞冷杉群落的径级分布
Fig.1 DBH class distribution of *Abies georgei* var. *smithii* population

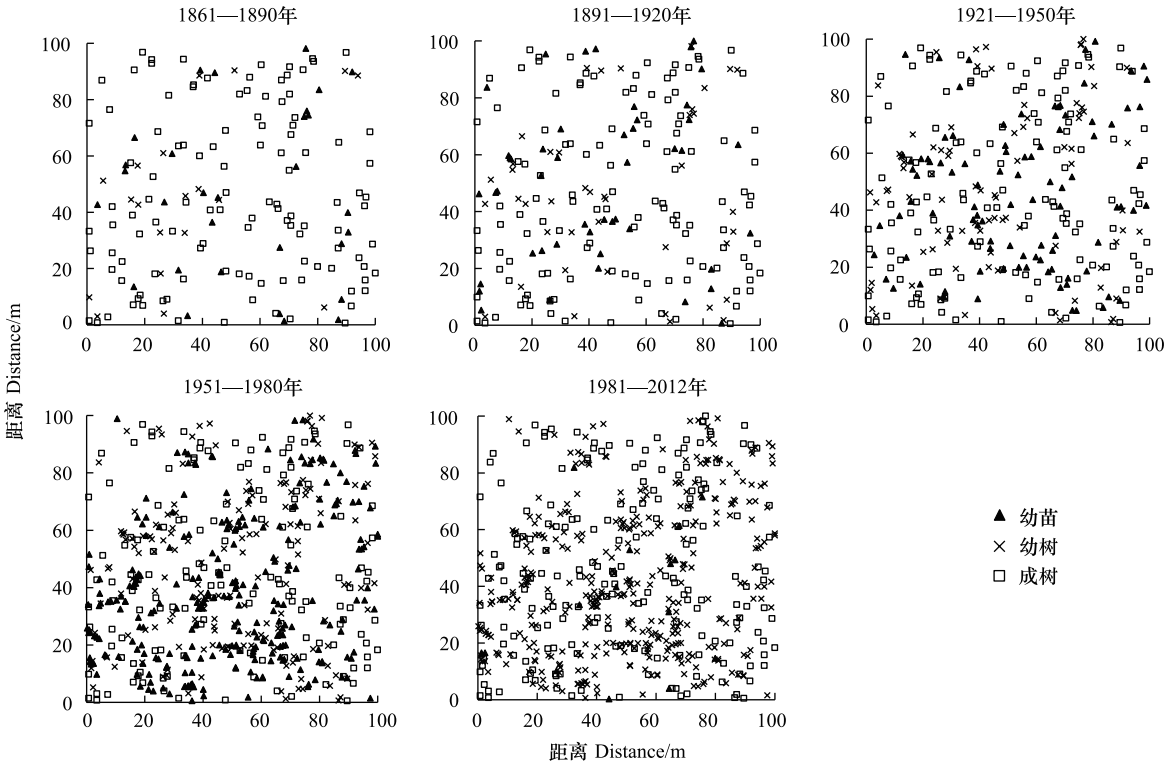


图 2 急尖长苞冷杉群落个体空间分布图
Fig.2 Spatial distribution of individuals of *Abies georgei* var. *smithii* population

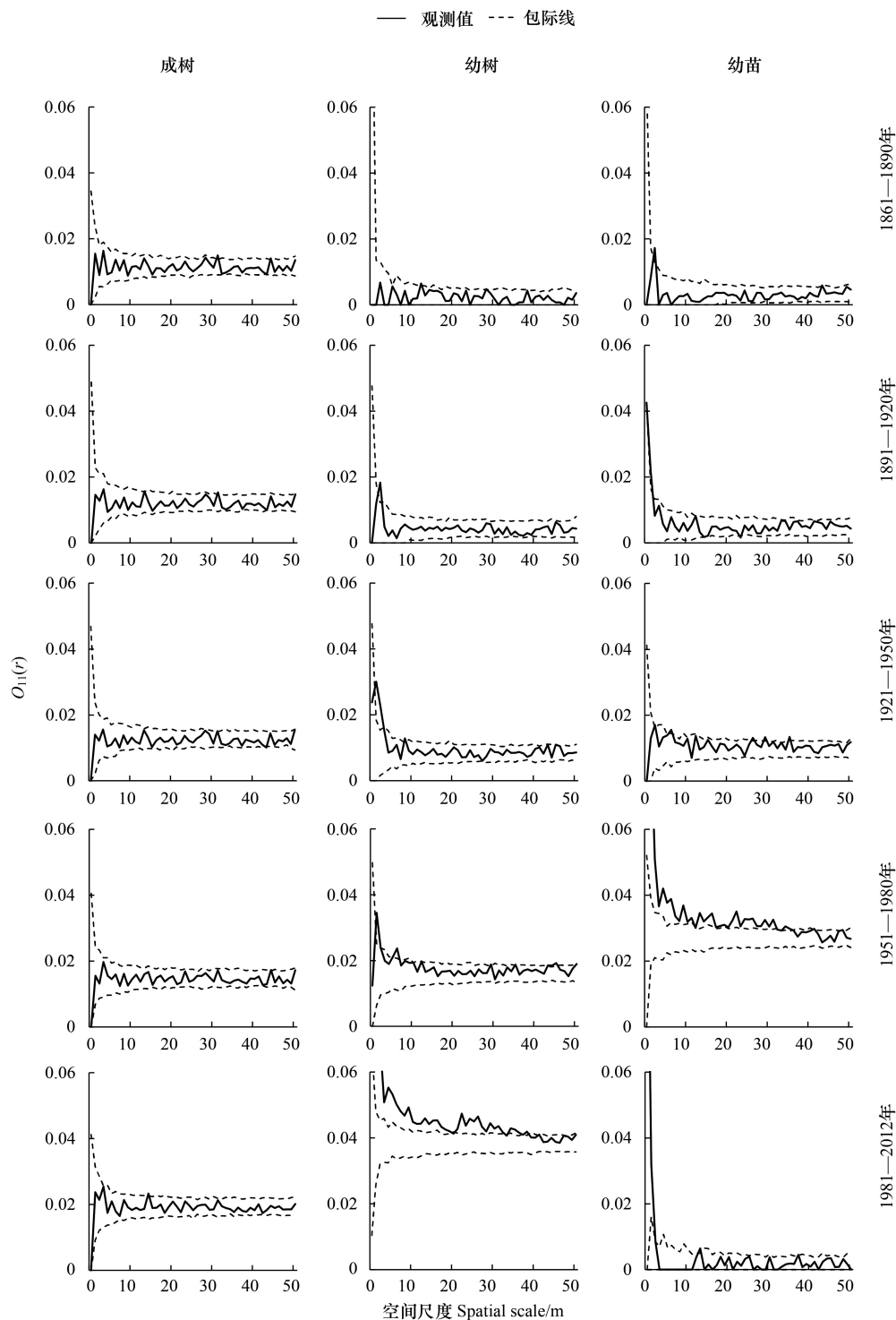


图3 急尖长苞冷杉在1861—2012年间的单变量空间点格局分析

Fig.3 Univariate spatial patterns of *Abies georgei* var. *smithii* population in 1861—2012

2.3 急尖长苞冷杉种群不同年龄组的空间关联性

根据双样本的 $O_{12}(r)$ 统计函数的结果(图4),1861—1890年急尖长苞冷杉的成树和幼树、幼苗之间几乎没有明显的空间关联。成树和幼树在1921—1980年的13 m尺度上呈负关联,1981—2012年在6—9 m、19—35 m、44 m和49 m的空间尺度均呈正关联。成树和幼苗1921—1950年在32—35 m、41 m和49 m尺度呈正关联,1951—1980年在各个尺度陆续呈正关联,在最后30年又转变为无关联。幼树和幼苗1921—2012年在

1—30 m 的尺度陆续呈正关联,其中在 1951—1980 年间出现正关联的尺度范围较大。总体来看,急尖长苞冷杉不同年龄组个体间大多呈正关联或无关联,成树与幼树在 1981—2012 年呈正关联的尺度区间最大,在小、中、大尺度陆续出现。成树和幼苗除 1921—1980 年呈正关联的尺度区间较长外,其余时间和尺度上几乎无明显空间关联。幼苗和幼树在 1951—1980 年呈正关联的尺度范围最大(1—9 m、22—29 m)。

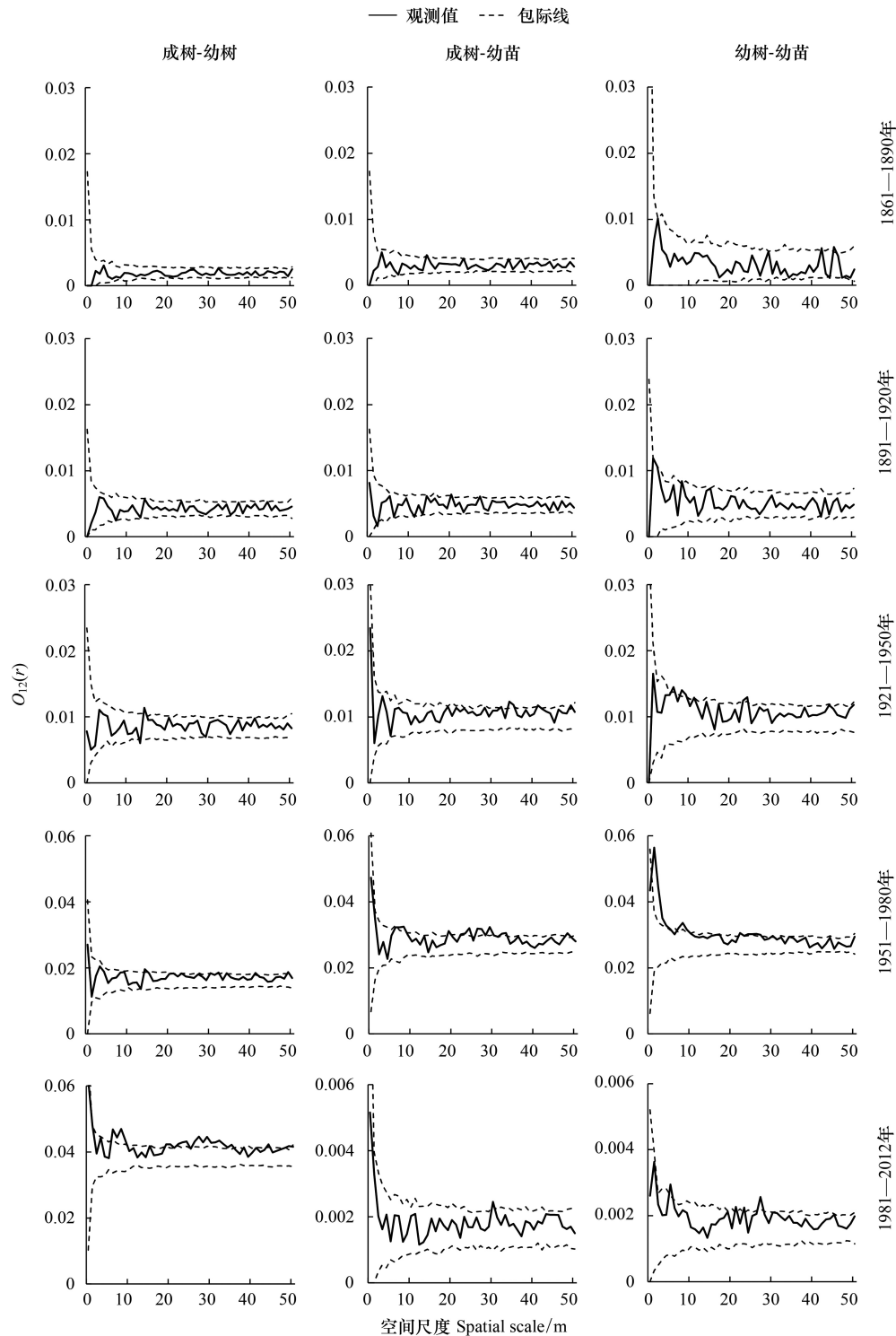


图 4 急尖长苞冷杉在 1861—2012 年间的双变量空间点格局分析

Fig.4 Bivariate spatial patterns of *Abies georgei* var. *smithii* population in 1861—2012

3 讨论

径级结构在一定程度上可以反映种群的结构现状与更新演替策略^[19]。从图 1 来看,急尖长苞冷杉的径级分布呈倒“J”型,由于在进行调查时没有将高度小于 2 m 的幼树与幼苗记录下来,胸径在 0—10 cm 之间的个体实际数量远远多于图 1 所示。在样地中小径级树木的数量在整个年龄结构中最多,个体数随着年龄的增长逐渐减少,说明急尖长苞冷杉种群属于稳定增长型,可以完成自我更新。

植物种群的空间分布格局受到种群自身的生物学特性、种内和种间关系以及环境条件的综合影响,并且与空间尺度密切相关^[4,20—22]。目前已经有许多研究表明,森林中树龄较大的个体,几乎在所有尺度下呈随机或均匀分布,而幼龄树种在小尺度会呈现出聚集分布的格局^[14,23—25]。本研究对急尖长苞冷杉进行的单变量点格局分析也出现了类似的现象。图 3 中可以看到在 150 年间几乎所有成树的空间分布为随机分布,说明树木在生长过程中随年龄的增长所需的资源增加,个体间对于光照、水分和养分的竞争越来越强,再加上自疏与他疏作用增强,导致植株大量死亡,所以成树最终会趋于随机或均匀分布^[26]。幼树和幼苗在一些时期的小尺度甚至中尺度上呈聚集分布的原因可能有以下几种:种子的扩散会影响种群早期的分布格局,急尖长苞冷杉的种子虽然有翅且质量小,易于扩散,但在林内风小的情况下,其落到地表上的位置会相对集中,所以种子萌发形成的幼苗在小尺度上也呈聚集分布^[27];集群分布有利于幼苗幼树个体间相互庇护,提高种间竞争能力^[28];激烈的竞争导致的大龄树木死亡或老龄树的自然死亡使森林上层出现林窗,林窗下空间和光照充足,有利于种子掉落在地面上萌发生长,这也会导致更新的幼苗呈聚集分布^[29]。

从时间尺度来看,幼苗在 1951—1980 年呈聚集分布的尺度突然扩大(图 3),图 2 中 1951—1980 年期间幼苗数量与前几个时期相比也有明显增加。对这一现象的合理解释可能是 1950 年以来的气候变暖促进了研究区急尖长苞冷杉的更新,这一结果与前人在色季拉山林线处进行研究得到的结果一致^[10]。幼苗在随后的 30 年转变为随机分布,且观测值与下包际线在 1 m 尺度之后几乎都为 0,这是由于 2012 年调查时 2 m 以下的幼苗没有记录,收集的数据中幼苗数量较少,位置也较分散。幼树在 1980 年在较广泛的尺度呈现聚集分布,原因可能是在幼苗阶段个体间的竞争相对较小,1950 年起大量产生的幼苗在 1980 年之后大部分长成幼树,幼树数量大量增加,呈聚集分布的尺度范围也大幅扩大。

对种群不同年龄阶段进行空间关联性分析能够揭示种群内部个体间的作用关系,在一定程度上能够反映种群的繁殖和扩散特性,还有助于描述种群的现状与动态^[30]。种间关联理论认为,正关联是由于物种间具有依赖性或对存在的环境有相同的适应而产生的;负关联则是物种间互相竞争或对环境需求的差异综合作用的结果^[31—32]。本研究中幼苗和幼树在小尺度上出现正关联,说明两者在小尺度上相互吸引,幼苗与幼树生长发育阶段相近,对生境的选择也具有一致性^[33]。解传奇和任毅华等的研究认为,色季拉山急尖长苞冷杉种群中大径级树木个体高大,冠幅发达,会抑制其下种子萌发和幼苗生长,因此成树与幼树、幼苗在小中尺度会呈现显著的负关联,而距离母树稍远的种子和幼苗受母树的抑制作用较弱,在大尺度上可能呈正关联^[4,14]。本研究中成树与幼苗在 1921—2012 年在中、大尺度出现正关联,与上述相符,说明急尖长苞冷杉的幼苗倾向于分布在距离大树较远的地方。但本研究中,除成树与幼树在 1921—1980 年的 13 m 尺度出现负关联外,其余各个时期和不同径级之间几乎未出现明显负关联。王亚峰等的研究中成树与幼苗、幼树在 1862—1951 年也均呈无关联,但他们的结果显示在 1951 年之后的小尺度上出现负关联,说明从 1951 年开始成树与幼树幼苗之间的抑制作用加剧,这与气候变暖导致的幼苗幼树的数量增加有关^[10]。本研究中成树与幼树、幼苗在小尺度上没有出现负关联的原因可能是急尖长苞冷杉群落在演替过程中的竞争和抑制作用小于种内促进作用。

通过对色季拉山急尖长苞冷杉群落的径级结构和空间格局的分析发现,此种群结构稳定,有良好的自然更新基础。急尖长苞冷杉不同年龄阶段的个体呈现不同的分布格局,年龄越大的急尖长苞冷杉的聚集强度越弱,最终变为随机分布,这说明随着年龄的增长,种内竞争加剧。1951—1980 年样地中产生了大量幼苗,1981 年后幼树的数量也大量增加。在 150 年间各个年龄组之间的空间关联性主要为正关联或无关联,说明此种群

在演替过程中各年龄级间的竞争作用不明显,此种群中存在着种内促进作用。综上所述,色季拉山的急尖长苞冷杉林属于单一乔木层的成过熟林,在无干扰的情况下应处于稳定状态^[34],而此种群具有增长型的径级结构和种内促进作用,说明色季拉山的环境适合急尖长苞冷杉种群的生长。在今后的一段时间,只需控制人为干扰,加强色季拉山的环境保护,此群落会持续进行自然更新。本研究阐明了藏东南急尖长苞冷杉种群的演替过程及竞争的动态变化,为预测该种群未来的发展趋势及其保护策略提供了理论和实践基础。

参考文献 (References):

- [1] Wiles L J. Spatial pattern analysis in plant ecology. *Weed Technology*, 2001, 15(1): 195-196.
- [2] Getzin S, Wiegand T, Wiegand K, He F L. Heterogeneity influences spatial patterns and demographics in forest stands. *Journal of Ecology*, 2008, 96(4): 807-820.
- [3] 缪宁, 刘世荣, 史作民, 喻泓, 刘兴良. 川西亚高山红桦-岷江冷杉林优势种群的空间格局分析. *应用生态学报*, 2009, 20(6): 1263-1270.
- [4] 任毅华, 周尧治, 侯磊, 方江平, 罗大庆. 色季拉山急尖长苞冷杉种群不同龄级立木的空间分布格局. *生态学报*, 2021, 41(13): 5417-5424.
- [5] 马志波, 肖文发, 黄清麟, 庄崇洋. 生态学中的点格局研究概况及其在国内的应用. *生态学报*, 2017, 37(19): 6624-6632.
- [6] 张金屯. 植物种群空间分布的点格局分析. *植物生态学报*, 1998, 22(4): 344-349.
- [7] 董雪, 杜昕, 孙志虎, 谷会岩, 陈祥伟. 生境梯度影响下的天然红松种群空间格局与种内关联. *生态学报*, 2020, 40(15): 5239-5246.
- [8] Hesselbarth M H K, Wiegand K, Dreber N, Kellner K, Esser D, Tsvuura Z. Density-dependent spatial patterning of woody plants differs between a semi-arid and a mesic savanna in South Africa. *Journal of Arid Environments*, 2018, 157: 103-112.
- [9] 杨华, 李艳丽, 沈林, 亢新刚, 岳刚, 王妍. 长白山云冷杉林幼苗幼树空间分布格局及其更新特征. *生态学报*, 2014, 34(24): 7311-7319.
- [10] Wang Y F, Pederson N, Ellison A M, Buckley H L, Case B S, Liang E Y, Camarero J J. Increased stem density and competition may diminish the positive effects of warming at alpine treeline. *Ecology*, 2016, 97(7): 1668-1679.
- [11] Shi H, Zhou Q, Xie F L, He N J, He R, Zhang K R, Zhang Q F, Dang H S. Disparity in elevational shifts of upper species limits in response to recent climate warming in the Qinling Mountains, North-central China. *Science of the Total Environment*, 2020, 706: 135718.
- [12] 任毅华, 罗大庆, 周尧治, 方江平, 卢杰. 西藏色季拉山急尖长苞冷杉原始林粗木质残体空间格局分析. *生态学报*, 2019, 39(21): 8048-8057.
- [13] 任毅华, 侯磊, 方江平, 罗大庆. 不同时间尺度上西藏色季拉山急尖长苞冷杉林下倒木空间格局分析. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2020, 48(8): 78-84, 92-92.
- [14] 解传奇, 田民霞, 赵忠瑞, 郑维列, 王国严. 西藏色季拉山急尖长苞冷杉种群点格局分析. *应用生态学报*, 2015, 26(6): 1617-1624.
- [15] 高郅, 李江荣, 卢杰, 郑维列, 陈甲瑞, 王建科, 段斐. 色季拉山急尖长苞冷杉林不同坡向土壤养分及肥力研究. *生态学报*, 2020, 40(4): 1331-1341.
- [16] Liang E Y, Wang Y F, Eckstein D, Luo T X. Little change in the fir tree-line position on the southeastern Tibetan Plateau after 200 years of warming. *New Phytologist*, 2011, 190(3): 760-769.
- [17] Camarero J J, Gutiérrez E. Pace and pattern of recent treeline dynamics: response of ecotones to climatic variability in the Spanish Pyrenees. *Climatic Change*, 2004, 63(1/2): 181-200.
- [18] Wiegand T, Moloney K A. Rings, circles, and null-models for point pattern analysis in ecology. *Oikos*, 2004, 104(2): 209-229.
- [19] 张兴旺, 张小平, 郭传友, 张强. 皖北石灰岩山地青檀种群不同发育阶段的点格局分析. *生态学杂志*, 2013, 32(3): 542-550.
- [20] 卢杰, 潘刚, 罗大庆, 罗建, 郑维列, 秦元丽. 濒危植物急尖长苞冷杉种群结构及空间分布格局. *林业资源管理*, 2009, (4): 48-53.
- [21] 马小丽, 赵成章, 张茜, 李钰, 侯兆疆. 退化草地甘肃臭草和冷蒿种群空间格局及关联性. *生态学杂志*, 2013, 32(2): 299-304.
- [22] 金鑫, 张钦弟, 许强, 吉颖, 毕润成. 山西灵空山刺五加种群空间分布格局及种间空间关联性. *植物科学学报*, 2018, 36(3): 327-335.
- [23] Salas C, LeMay V, Núñez P, Pacheco P, Espinosa A. Spatial patterns in an old-growth *Nothofagus obliqua* forest in south-central Chile. *Forest Ecology and Management*, 2006, 231(1/3): 38-46.
- [24] 张昊楠, 薛建辉. 贵州赤水常绿阔叶林不同层次树木空间分布格局和竞争的关系. *生态学报*, 2018, 38(20): 7381-7390.
- [25] 张笑菁, 赵秀海, 康峰峰, 王娟, 贺自书, 马钦彦, 卢文敏, 药占文. 太岳山油松天然林林木的空间格局. *生态学报*, 2010, 30(18): 4821-4827.
- [26] 闫海冰, 韩有志, 杨秀清, 王丽艳, 项小英. 华北山地典型天然次生林群落的树种空间分布格局及其关联性. *生态学报*, 2010, 30(9): 2311-2321.
- [27] 王瑞红, 向巴曲珍, 潘刚. 西藏色季拉山急尖长苞冷杉幼苗种群结构及空间格局研究. *山东林业科技*, 2013, 43(5): 1-5, 57-57.
- [28] Wang X T, Liang C Z, Wang W. Balance between facilitation and competition determines spatial patterns in a plant population. *Chinese Science Bulletin*, 2014, 59(13): 1405-1415.
- [29] Moravie M A, Robert A. A model to assess relationships between forest dynamics and spatial structure. *Journal of Vegetation Science*, 2003, 14(6): 823-834.
- [30] 黄小波, 李帅锋, 苏建荣, 刘万德, 郎学东. 云龙天池云南松自然种群分布格局分析. *林业科学研究*, 2018, 31(4): 47-52.
- [31] 刘旻霞. 亚高寒草甸不同坡向金露梅种群的空间分布格局及空间关联. *应用生态学报*, 2017, 28(6): 1817-1823.
- [32] 李国春, 宋华东, 李琦, 卜书海. 太白山山冷杉林主要树种与开花秦岭箭竹的空间点格局分析. *应用生态学报*, 2017, 28(11): 3487-3493.
- [33] 缪宁, 刘世荣, 史作民, 薛泽冰, 喻泓, 何飞. 青藏高原东缘林线杜鹃-岷江冷杉原始林的空间格局. *生态学报*, 2011, 31(1): 1-9.
- [34] 任毅华, 罗大庆, 方江平, 卢杰. 色季拉山东坡急尖长苞冷杉种群结构与动态. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2021, 49(7): 59-68.