

网络出版时间:2020-01-20 13:40 DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2020.08.010  
网络出版地址:http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.s.20200119.0923.036.html

# 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

任毅华<sup>1a,2,3</sup>, 侯磊<sup>1b</sup>, 方江平<sup>1,2,3</sup>, 罗大庆<sup>1,2,3</sup>

(1 西藏农牧学院 a 高原生态研究所, b 资源与环境学院, 西藏 林芝 860000;

2 西藏林芝高山森林生态系统国家野外科学观测研究站, 西藏 林芝 860000;

3 西藏高原森林生态教育部重点实验室, 西藏 林芝 860000)

**[摘要]** 【目的】分析西藏色季拉山急尖长苞冷杉(*Abies georgei* var. *smithii*)原始林下倒木在不同时间尺度上的空间分布格局及其相关性,探讨该森林生态系统内倒木的分布规律。【方法】在研究区内设置 100 m×100 m 固定样地,采用相邻网格法对样地内倒木进行调查,获取倒木的大小头直径、长度、腐烂程度、植被覆盖状况、坐标等基本信息,用腐烂等级表征倒木的时间尺度,分析倒木在不同时间尺度上的空间分布格局。【结果】倒木总体空间分布格局随空间尺度的增大依次呈现集群分布、随机分布和均匀分布,且以随机分布为主要特征;在各个时间尺度上的倒木均呈现显著的集群分布;不同时间尺度上的倒木在空间分布上虽无显著关联,但时间尺度间隔越近,越趋于正关联,越远则越趋于负关联。【结论】色季拉山急尖长苞冷杉原始林下倒木在空间分布上具有明显的时间特征,这与当地异常气候密切相关。

**[关键词]** 急尖长苞冷杉林;倒木;空间格局;时间尺度;西藏;色季拉山

**[中图分类号]** S754.1

**[文献标志码]** A

**[文章编号]** 1671-9387(2020)08-0078-08

## Spatial pattern analysis of logs in *Abies georgei* var. *smithii* forests in the Sajila Mountains of Tibet at different time scales

REN Yihua<sup>1a,2,3</sup>, HOU Lei<sup>1b</sup>, FANG Jiangping<sup>1,2,3</sup>, LUO Daqing<sup>1,2,3</sup>

(1 a Research Institute of Tibet Plateau Ecology, b Department of Resources & Environment, Tibet Agriculture & Animal Husbandry University, Linzhi, Tibet 860000, China; 2 National Forest Ecosystem Observation & Research Station of Tibet Linzhi, Linzhi, Tibet 860000, China; 3 Tibet Key Laboratory of Forest Ecology in Plateau Area, Ministry of Education, Linzhi, Tibet 860000, China)

**Abstract:** 【Objective】 This study aimed to analyze the spatial distribution pattern and correlation of fallen logs in *Abies georgei* var. *smithii* virgin forests distributed in the Sejila Mountain of Southeastern Tibet on different time scales and understand the distribution mechanism of fallen logs in *Abies georgei* var. *smithii* forest ecosystem. 【Method】 Within a 100 m×100 m permanent sample plot, the fallen logs (*Abies georgei* var. *smithii*) were surveyed according to neighboring grid method. Information including diameter, length, decaying condition of logs, coordinates and plants coverage was gathered. The time scale was estimated by decaying class and the spatial distribution of fallen logs in different time scales was obtained. 【Result】 Fallen logs exhibited three distribution patterns in accordance with the size of land plots.

**[收稿日期]** 2019-07-04

**[基金项目]** 西藏自治区自然科学基金项目(XZ 2018 ZR G-17);西藏农牧学院研究生创新计划项目(YJS2019-23);国家自然科学基金项目(31060113);西藏特色农牧资源研发协同创新中心(高原生态项目)

**[作者简介]** 任毅华(1980-),男,陕西西安人,副教授,在读博士,主要从事森林生态学研究。Email: xz\_ryh@163.com

**[通信作者]** 方江平(1967-),男,安徽安庆人,教授,博士,主要从事森林生态学和恢复生态学研究。Email: xzfjp@sina.com

As the plot size increased, the logs exhibited aggregation distribution, random distribution and uniformly distribution, with random distribution being the most common distribution. All fallen logs across different time scales exhibited apparent aggregation distribution. Although there was no definitive correlation between spatial distribution patterns at different time scales, closer timing more likely showed positive correlation, while farther timing more likely showed negatively correlation. 【Conclusion】 The spatial distribution of fallen logs of *Abies georgei* var. *smithii* virgin forests on the Sejila Mountain strongly exhibited temporal characteristics and this feature was closely associated with the abnormal climate in the Sejila Mountain.

**Key words:** *Abies georgei* var. *smithii* forests; fallen logs; spatial pattern; time scale; Tibet; Sejila Mountain

林木的空间分布格局是森林群落结构的重要特征之一<sup>[1-3]</sup>,在一定程度上可反映群落的形成、干扰过程和环境异质性对森林群落的影响等生态过程<sup>[4-6]</sup>。因此分析林木的空间分布格局是研究群落结构、种间关系及种群与环境关系的重要手段<sup>[7]</sup>,是森林生态学研究的重点领域之一<sup>[8-11]</sup>。倒木泛指森林中的林木因生长竞争排斥、老龄自然死亡、自然干扰(风倒、雷电、雨淋、雪折、病虫害、泥石流灾害、真菌侵害等)、人为干扰(如伐木、砍樵)和动物啃食等死亡后所形成的基径、长度大于一定值,倾斜度超过45°的死木质残体,其与枯立木、大枯枝、树桩、粗根残体一起总称为粗木质残体(简称 CWD)<sup>[12-14]</sup>,是森林生态系统中重要的生态单元<sup>[15-17]</sup>。倒木处于森林植被与林地土壤之间,是二者水分交换、养分循环和能量流动的重要界面<sup>[18]</sup>,可通过对林内光、温、水、肥的再分配,影响林下植物群落结构,对维持森林生态系统的稳定性及生物多样性保育具有重要作用。近年来,倒木的空间分布格局逐渐引起学者关注<sup>[6,19-20]</sup>,但由于传统空间格局分析法受样地大小和林分密度限制,只能揭示某一固定空间尺度下的空间分布规律<sup>[19]</sup>,局限性较大,因而难以客观揭示倒木的发生规律。点格局分析法因不受种群密度影响,且能显示空间格局发生的所有尺度,近年来广泛应用于群落空间结构研究中,但该方法在死亡木的研究中较少应用,且对时间尺度考虑不足<sup>[6,20]</sup>。

倒木分解具有长期性和复杂性等特点<sup>[21-22]</sup>,对于没有人为干扰且结构稳定的森林生态系统而言,倒木的形成是种内种间竞争、自然灾害、生理死亡综合作用的结果<sup>[12,14]</sup>,其中种内种间竞争和生理死亡是一个相对均匀缓慢的过程<sup>[6,23]</sup>,只有自然灾害可在短时间内形成大量倒木。而自然灾害往往时隔多年才发生一次,因此,从不同时间尺度上研究倒木的空间分布格局,可为揭示倒木的形成机制提供基础数据,同时也可为研究林下灌木群落结构及幼苗更

新提供理论依据。

色季拉山急尖长苞冷杉(*Abies georgei* var. *smithii*)林是我国西藏东南林区暗针叶林的典型代表,且为成过熟原始林,人为干扰少,林内倒木资源丰富。本试验以色季拉山急尖长苞冷杉原始林为研究对象,对林内倒木进行调查,从不同时间尺度角度对倒木的空间分布特征进行点格局分析,以期为探究倒木的形成机制、分析林内植物群落结构特征提供理论依据。

## 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市巴宜区境内,属念青唐古拉山脉,与喜马拉雅山脉东端向北发展的山系相邻,是尼洋河流域和帕隆藏布江流域的分水岭,G318 国道横贯其中。色季拉山地理位置特殊,海拔高度落差大(2 100~5 300 m),属高山寒温带湿润气候区,植被类型丰富。研究区位于色季拉山东坡,海拔 3 800 m,年平均气温 2.0~4.5 °C,最暖月(7 月)平均气温 11.1 °C,最冷月(1 月)平均气温 -13.98 °C。年均降水量 1 134.1 mm,蒸发量 544.0 mm,年均相对湿度 78.83%。植被乔木层是单一的急尖长苞冷杉纯林,林下灌木主要有杜鹃(*Rhododendron* spp.)、蔷薇(*Rosa* spp.)、忍冬(*Lonicera* spp.)、花楸(*Sorbus* spp.)等。乔木层平均胸径 37.0 cm,平均树高 33.4 m,郁闭度 0.6~0.8,地形起伏较大,地表苔藓层发达,土壤为酸性棕壤土,石砾含量大。

### 1.2 研究方法

1.2.1 倒木基础特征调查 点格局分析要求样地面积要适当大,且以长方形和正方形为宜<sup>[3]</sup>。在森林群落点格局分析中,样地的边长应在 50 m 以上,若小于 50 m,大尺度上的格局则有可能被忽略<sup>[11]</sup>。鉴于此,2018 年 11 月在研究区海拔 3 800 m 处设置

一块 100 m×100 m 的固定样地,并将样地划分为 25 个 20 m×20 m 的小样方,采用相邻网格法对样地内倾斜度 $\geq 45^\circ$ 、大头直径 $\geq 10$  cm、长度 $\geq 1$  m 的倒木进行每木检尺并编号<sup>[12]</sup>,记录倒木的坐标、大小头直径、长度、腐烂等级、着地状况、植被覆盖等内容。

1.2.2 时间尺度的确定 在没有进行长期监测的情况下,要确定倒木形成的具体时间有一定难度。但倒木的腐烂程度与分解年龄具有很强的相关性。倒木主干粗壮,分解缓慢且状态稳定,在林内存在时间长<sup>[24-25]</sup>,因此不同腐烂等级可以反映倒木形成时间的长短,即代表不同的时间尺度。本研究采用 5 级分类系统对倒木腐烂程度进行等级划分<sup>[13]</sup>,并用腐烂等级来表征倒木的时间尺度(用 I~V 表征)<sup>[3]</sup>,分析倒木在不同时间尺度上的空间分布格局。

1.2.3 点格局分析 采用 Ripley 的  $L$  函数对倒木的空间分布进行点格局分析, $L$  函数由 Ripley 的  $K$  函数改进而来,详细数学原理见参考文献<sup>[3, 11, 26-28]</sup>。采用 Monte-Carlo 拟合检验计算上下包迹线,即置信区间。拟合检验 100 次,对应 99% 的置信水平。在点格局分析图中,观测值在上包迹线以上为集群分布,在上、下包迹线之间为随机分布,在下包

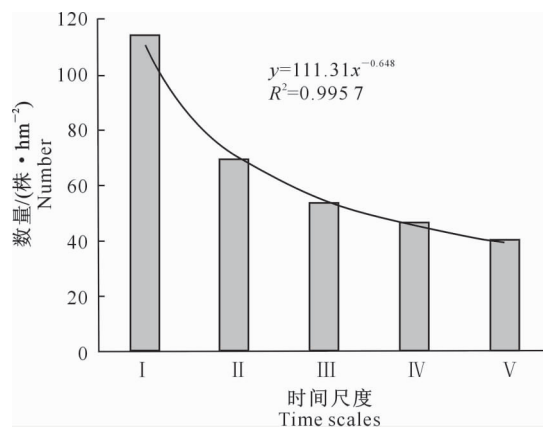


图 1 色季拉山急尖长苞冷杉林在不同时间尺度上倒木数量分布

Fig. 1 Number of fallen logs in *Abies georgeii* var. *smithii* forest of Sejila Mountain at different time scales

## 2.2 不同时间尺度上色季拉山急尖长苞冷杉林倒木的点格局

不同时间尺度上外界干扰的强弱差异,尤其是异常气候,造成倒木在不同时间尺度上的空间分布格局不同;而环境条件的异质性,又使同一时间尺度上的倒木在不同空间尺度上的分布格局有所变化,

迹线以下为均匀分布;在关联度分析图中,观测值在上包迹线以上为正关联,在上、下包迹线之间关联不显著,在下包迹线以下为负关联。

### 1.3 数据分析

本研究利用 ADE-4 点格局软件包分析倒木的空间分布格局。采用最大距离尺度为样地边长的一半,即 50 m,用随机模型 Monte-Carlo 模拟检验 100 次,得到 99% 置信区间。用 Excel 2016 软件绘制倒木的点格局分析图。

## 2 结果与分析

### 2.1 色季拉山急尖长苞冷杉林中倒木整体的点格局

样地内共有急尖长苞冷杉倒木 322 株,其在不同时间尺度上的分布数量随时间尺度的增大而减少,其变化趋势可用幂函数  $y=111.31x^{-0.648}$  ( $R^2=0.9957$ ) 拟合,具体数值为:尺度 I (112 株) $>$ 尺度 II (69 株) $>$ 尺度 III (53 株) $>$ 尺度 IV (46 株) $>$ 尺度 V (40 株)(图 1)。对 322 株倒木进行点格局分析,结果(图 2)发现倒木在 0~10 m 尺度内呈集群分布;在 10~31 m 尺度内为随机分布,之后随着空间尺度的继续增大转为均匀分布,总体以随机分布为主。

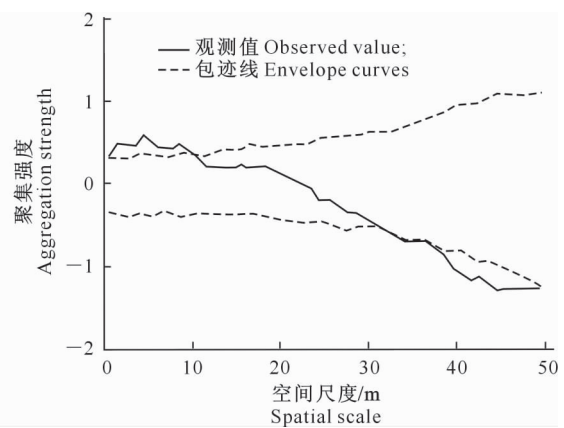


图 2 色季拉山急尖长苞冷杉林倒木点格局分析

Fig. 2 Analysis of overall point pattern of fallen logs in *Abies georgeii* var. *smithii* forest of Sejila Mountain

二者综合作用影响倒木的分布格局。图 3 表明,不同时间尺度上的倒木均呈显著的集群分布或以集群分布为主,只有时间尺度 II、III、IV 上的倒木在极窄的空间尺度上呈现随机分布。由图 3 还可知,5 个时间尺度上倒木的聚集强度随空间尺度的变化均表现为先增高后降低的趋势,且最高聚集强度均出现

在 24~32 m 尺度,即中尺度内。对各时间尺度上倒木的最大聚集强度进行比较,其大小顺序依次为尺

度 V (22.16) > 尺度 I (13.62) > 尺度 IV (12.30) > 尺度 II (10.13) > 尺度 III (9.56)。

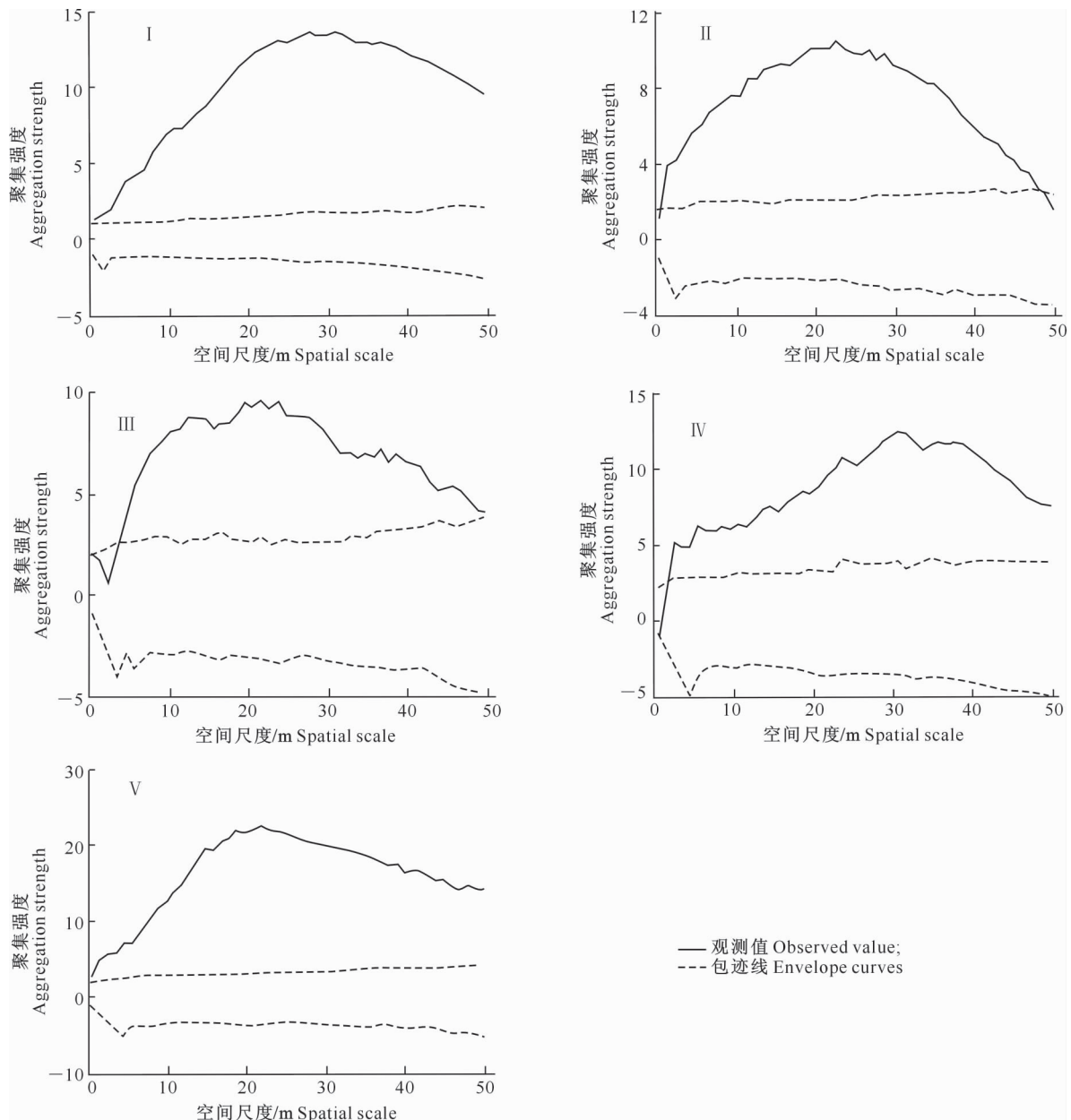


图 3 不同时间尺度上色季拉山急尖长苞冷杉林下倒木的点格局分析

Fig. 3 Point pattern analysis of fallen logs in *Abies georgei* var. *smithii* forest of Sejila Mountain at different time scales

### 2.3 不同时间尺度间色季拉山急尖长苞冷杉林下倒木空间分布格局的相关性

对不同时间尺度间色季拉山急尖长苞冷杉林林下倒木空间分布格局的相关性进行分析,结果如图 4 所示。图 4 表明,仅有时间尺度 I—IV 和 I—V 之间的倒木聚集强度观测值与下包迹线基本重合,说明其接近显著的负关联;其余时间尺度间的倒木在空间分布上并无显著关联,即相互之间无显著影响。但通过趋势图可以看出,时间尺度间隔越近,其关系越趋于正关联;间隔越远,越趋于负关联。

### 3 讨论

本研究中,倒木在不同时间尺度上呈现明显的集群分布,这可能与倒木的形成原因有关。倒木的形成是林木生长竞争排斥、老龄林内树木自然死亡、自然干扰、人为干扰和动物啃食综合作用的结果<sup>[12-14]</sup>。对于色季拉山急尖长苞冷杉林生态系统而言,首先其为成过熟原始林,林分结构复杂而稳定,人为干扰少,近年来也未见大面积病虫害及火灾报道;其次,本研究对倒木的定义标准是基径 $\geq 10$  cm,

这样的倒木在其存活时已经具备一定高度、胸径和冠幅,种内种间竞争对这一阶段活立木的影响力减弱,而树木的自然死亡又是一个缓慢且相对均匀的过程<sup>[6,14]</sup>。因此由上述因素造成的倒木,在不同时间尺度上可能不存在统计学意义上的差异。只有大风、暴雨、暴雪以及由此引起的泥石流等异常气候,才能在短时间造成大量倒木,而在这些倒木形成时,往往与周边活立木发生碰撞,从而形成以高度聚集为特征的空间分布格局。由于异常气候具有一定的周期,往往时隔多年发生一次,进而使倒木的空间分

布格局具有明显的时间尺度特征。因此,异常气候可能是色季拉山急尖长苞冷杉原始林倒木形成的主要驱动力。殷文杰等<sup>[29]</sup>曾对该研究区林线小气候特征进行研究,结果表明研究区内雨季较为集中,春夏季节降水总量达 1 175.8 mm,占全年降水总量的 79.4%;年平均风速为 1.77 m/s,最大极值风速为 12.19 m/s,这些特殊的气候条件为该森林生态系统内倒木的形成提供了有利条件。不同时间尺度上倒木的聚集强度有所不同,这可能与不同时间尺度上异常气候干扰强弱有关。

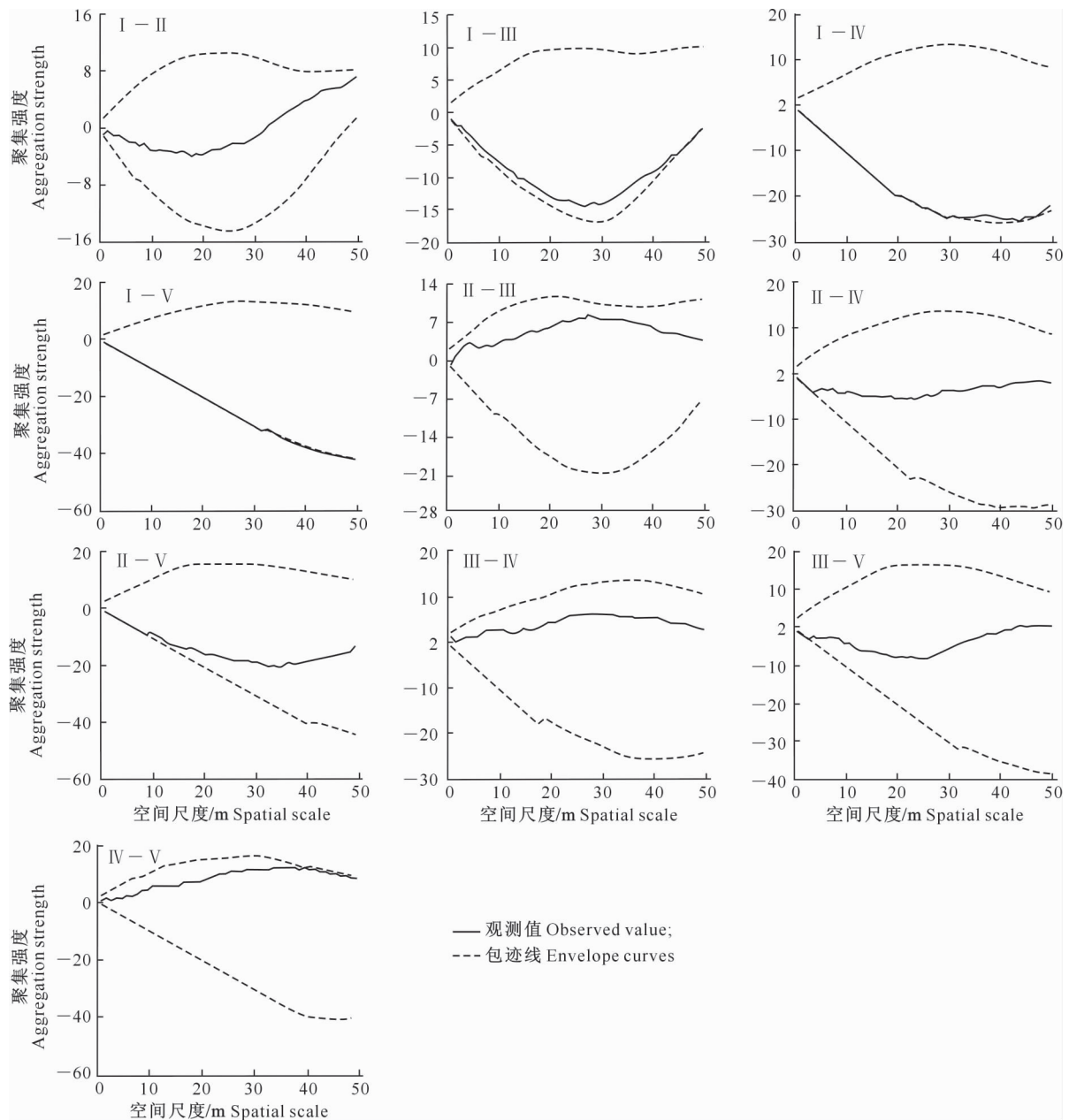


图 4 不同时间尺度间色季拉山急尖长苞冷杉林下倒木空间分布格局的相关性

Fig. 4 Relevance analysis of spatial distribution pattern of logs in *Abies georgei* var. *smithii* forest of Sejila Mountain at different time scales

本研究中,倒木总体随空间尺度的增大依次出现了集群分布、随机分布和均匀分布,但以随机分布为主要特征,这与每个时间尺度上所表现出的显著集群分布形成明显对比,这可能与不同时间尺度倒木在空间分布上的相关性有关。对不同时间尺度倒木空间分布的相关性进行分析发现,不同时间尺度倒木之间在 99% 置信水平下并无显著关联。虽然每个时间尺度上的倒木均呈显著的集群分布,但由于不同时间尺度倒木在形成过程中并无相互影响,因此叠加后削弱了这种集群分布,最终导致总体的随机分布。此外,本研究还发现,虽然不同时间尺度倒木相互之间影响不显著,但却存在一种趋势,即时间尺度间隔越近,越趋于正关联,越远则越趋于负关联,其具体原因还有待于进一步研究。

本研究结果与小兴安岭阔叶红松林生态系统和天山云杉林生态系统的粗木质残体分布格局既相似又不同<sup>[6,20]</sup>。相似是指在不同时间尺度上的倒木与这两个森林生态系统一样,均呈现显著的集群分布;不同是指本研究中倒木整体又以随机分布为主要特征。造成这种差异的原因可能与时间尺度有关。后两者在研究过程中虽然没有明确划分时间尺度,但在研究过程中均以 2 cm 作为界定粗木质残体的标准,而有关研究表明粗木质残体多集中在小径级上<sup>[30]</sup>,由此可以推算小兴安岭阔叶红松林和天山云杉林两个森林生态系统粗木质残体均以小径木为主,小径木因基径小、比表面积大,因此分解速度较快<sup>[31]</sup>,在林内存在时间短,所以对于小兴安岭阔叶红松林和天山云杉林这两个森林生态系统而言,其现存粗木质残体具备时间尺度上的一致性,因此呈现显著的集群分布。

本研究中,倒木无论是在总体上还是在各个不同时间尺度上,其分布格局均在空间尺度上发生了一定的变化。森林生态系统内活立木的空间分布格局是倒木分布格局形成的基础,而活立木分布所依赖的林内环境条件在不同空间尺度上又存在异质性<sup>[32-33]</sup>。因此,倒木的空间分布格局与空间尺度有着密切关系,表现为不同的空间尺度下呈现不同的分布格局。传统的空间格局分析法往往是在固定空间尺度上进行,由于受空间尺度限制,只能描述植物群落在某一固定空间尺度上的分布特点,无法全面反映其在不同空间尺度上的分布<sup>[19,34]</sup>,以此为基础所得到的结论难免出现较大的误差。本研究以色季拉山急尖长苞冷杉原始林 100 m×100 m 固定样地为基础,用点格局分析法分析林下倒木在不同时间

尺度上的空间格局,避免了传统方法对空间尺度依赖性的弊端,更能如实反映粗木质残体的空间分布特点。

倒木作为森林生态系统中重要的生态单元,研究其空间分布格局对于探究林下植物群落结构和生物多样性有着重要意义。点格局分析作为目前较为成熟的空间格局分析方法,可以分析不同空间尺度下群落的空间分布格局,相对于传统分析方法而言,具有明显优势,但其在倒木方面的应用还较少<sup>[6,20]</sup>,今后应进一步加强该方面的应用研究,以便更好地探索粗木质残体的生态功能发挥机制。

异常气候作为森林生态系统内倒木形成的主要驱动力之一<sup>[12,22]</sup>,对倒木的形成和分解过程都有重要影响,而这些过程又都是倒木生态功能发挥的基础。由于异常气候具有一定的周期性,致使倒木的空间分布具有明显的时间尺度特征。但由于倒木分解存在的长期性和复杂性<sup>[21-22]</sup>,因此在缺乏长期监测数据的情况下,空间代替时间法成为研究倒木基础特征的主要方法。但空间代替时间法是以当前现有的客观结果反推倒木的生态学过程,其结果往往因忽略了倒木的复杂性而难以准确揭示倒木的形成过程和生态功能发挥机制。尤其是在全球气候变暖、异常气候较以往更为频繁的大背景下,倒木的形成、分解、养分循环、碳循环等特征是否发生了变化,发生了哪些变化?这些都是目前亟待解决的问题。要从根本上解决这些问题,则必须在更大尺度上对各类森林类型的倒木进行长期监测研究,而这也正是目前倒木研究最为欠缺的部分。

#### [参考文献]

- [1] Busing R T, White P S. Effects of area on old-growth forest attributes: importance for the equilibrium landscape concept [J]. *Landscape Ecology*, 1993, 8(2): 119-126.
- [2] 徐化成, 范兆飞, 王 胜. 兴安落叶松原始林林木空间格局的研究 [J]. *生态学报*, 1994, 14(2): 155-160.  
Xu H C, Fan Z F, Wang S. A study in spatial patterns of trees in virgin *Larix gmelinii* forest [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1994, 14(2): 155-160.
- [3] 张金屯, 孟东平. 芦芽山华北落叶松林不同龄级立木的点格局分析 [J]. *生态学报*, 2004, 24(1): 35-40.  
Zhang J T, Meng D P. Spatial pattern analysis of individuals in different age-classes of *Larix principis-rupprechtii* in Luya mountain reserve, Shanxi, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(1): 35-40.
- [4] Beets P N, Hood I A, Kimberley M O. Coarse woody debris decay rates for seven indigenous tree species in the Central North Island of New Zealand [J]. *Forest Ecology and Management*,

- 2008,256(4):548-557.
- [5] Duncan R P, Stewart G H. The temporal and spatial analysis of tree age distributions [J]. Canadian Journal of Forest Research, 1991, 21(12): 1703-1710.
- [6] 刘妍妍, 金光泽. 小兴安岭阔叶红松林粗木质残体空间分布的点格局分析 [J]. 生态学报, 2010, 30(22): 6072-6081.  
Liu Y Y, Jin G Z. Spatial point pattern analysis for coarse woody debris in a mixed broadleaved-Korean pine forest in Xi-aoning'an Mountains, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(22): 6072-6081.
- [7] 张金屯. 植被数量生态学方法 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1995.  
Zhang J T. Methods in quantitative vegetation ecology [M]. Beijing: China Science and Technology Press, 1995.
- [8] 杨晓艳, 张世雄, 温 静, 等. 吕梁山森林群落草本层植物物种多样性的空间格局及其对模拟增温的响应 [J]. 生态学报, 2018, 38(18): 6642-6654.  
Yang X Y, Zhang S X, Wen J, et al. Spatial pattern of herbaceous plant species diversity and its changes due to simulated warming in the forest community of the Lüliang Mountains [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(18): 6642-6654.
- [9] 刘宪钊, 李卫珍, 王金龙, 等. 两种不同起源华北落叶松林空间点格局及植物多样性 [J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2017, 41(6): 102-108.  
Liu X Z, Li W Z, Wang J L, et al. Spatial distributions and species diversity of two types of *Larix principis-rupprechtii* [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2017, 41(6): 102-108.
- [10] 胡尔查, 王晓江, 张文军, 等. 乌拉山自然保护区白桦种群的年龄结构和点格局分析 [J]. 生态学报, 2013, 33(9): 2867-2876.  
Hu E C, Wang X J, Zhang W J, et al. Age structure and point pattern of *Butula platyphylla* in Wulashan Natural Reserve of Inner Mongolia [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(9): 2867-2876.
- [11] 张金屯. 植物种群空间分布的点格局分析 [J]. 植物生态学报, 1998, 22(4): 57-62.  
Zhang J T. Analysis of spatial point pattern for plant species [J]. Acta Phytocologica Sinica, 1998, 22(4): 57-62.
- [12] 袁 杰, 侯 琳, 张硕新. 森林粗木质残体研究进展 [J]. 西北林学院学报, 2011, 26(4): 90-98.  
Yuan J, Hou L, Zhang S X. Research progress in coarse woody debris [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2011, 26(4): 90-98.
- [13] 闫恩荣, 王希华, 黄建军. 森林粗死木质残体的概念及其分类 [J]. 生态学报, 2005, 25(1): 158-167.  
Yan E R, Wang X H, Huang J J. Concept and classification of coarse woody debris in forest ecosystems [J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(1): 158-167.
- [14] 马现永. 天山云杉粗木质残体生态功能特性研究 [D]. 合肥: 安徽农业大学, 2013.  
Ma X Y. Ecological functions of coarse woody debris of *Picea schrenkiana* var. *tianschanica* in the Tianshan Mountains [D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2013.
- [15] Woodall C W, Nagel L M. Downed woody fuel loading dynamics of a large-scale blow down in northern Minnesota, U. S. A [J]. Forest Ecology and Management, 2007, 247: 194-199.
- [16] 王文娟, 常 禹, 刘志华, 等. 大兴安岭呼中林区火烧迹地粗木质残体特征 [J]. 应用生态学报, 2009, 20(8): 1805-1810.  
Wang W J, Chang Y, Liu Z H, et al. Characteristics of coarse woody debris in Huzhong area of Great Xing'an Mountains [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(8): 1805-1810.
- [17] 任毅华, 侯 磊, 马豪霞, 等. 西藏色季拉山急尖长苞冷杉林粗木质残体的持水特性 [J]. 环境科学与技术, 2017, 40(3): 79-84.  
Ren Y H, Hou L, Ma H X, et al. Water holding characteristics of coarse woody debris in *Abies georgei* var. *smithii* forest of Sygera Mountains of Tibet [J]. Environmental Science & Technology, 2017, 40(3): 79-84.
- [18] 马豪霞, 任毅华, 侯 磊, 等. 西藏色季拉山急尖长苞冷杉林粗木质残体储量与倒木分解研究 [J]. 西北林学院学报, 2016, 31(5): 68-73.  
Ma H X, Ren Y H, Hou L, et al. Studies on the reserves of coarse woody debris and decomposition of fallen trees in *Abies georgei* var. *smithii* forest of Sygera Mountains in Tibet [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2016, 31(5): 68-73.
- [19] 罗大庆, 郭泉水, 黄 界, 等. 西藏色季拉原始冷杉林死亡木特征研究 [J]. 生态学报, 2004, 24(3): 635-639.  
Luo D Q, Guo Q S, Huang J, et al. A character study on the dead wood of primeval *Abies* of Sejila Mountain in Southeastern Tibet [J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(3): 635-639.
- [20] 李建贵. 天山云杉幼林死亡木的大小结构与空间分布格局 [J]. 新疆农业大学学报, 2003, 26(1): 5-9.  
Li J G. Study on character structure and distribution pattern of dead stems of *Picea schrenkiana* Fisch. et Mey. [J]. Journal of Xinjiang Agricultural University, 2003, 26(1): 5-9.
- [21] Laiho R, Prescott C E. The contribution of coarse woody debris to carbon, nitrogen, and phosphorus cycles in three Rocky Mountain coniferous forests [J]. Canadian Journal of Forest Research, 1999, 19: 1592-1603.
- [22] Garrett L, Davis M, Oliver G. Decomposition of coarse woody debris, and methods for determining decay rates [J]. New Zealand Journal of Forestry Science, 2007, 37(2): 227-240.
- [23] 卢 杰, 潘 刚, 罗大庆, 等. 濒危植物急尖长苞冷杉种群生命表分析 [J]. 水土保持研究, 2010, 17(5): 212-216, 221.  
Lu J, Pan G, Luo D Q, et al. Analysis to the life table of endangered population *Abies georgei* [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2010, 17(5): 212-216, 221.

(下转第 92 页)

- tion discrepancies during hospital admission in Jordan: prevalence and risk factors [J]. Saudi Pharmaceutical Journal, 2018, 26(1): 125-132.
- [27] Mandava K, Kadimcharla K, Keesara N R, et al. Batchu green synthesis of stable copper nanoparticles and synergistic activity with antibiotics [J]. Indian Journal of Pharmaceutical Sciences, 2017, 79(5): 695-700.
- [28] Frey S D. Encyclopedia of soils in the environment [M]. New York: Elsevier, 2005.
- [29] 张艺洁, 邵惠芳, 张珂, 等. 基于高通量测序研究施肥对连作植烟土壤环境及微生物的影响 [J]. 中国农业科技导报, 2018, 20(5): 16-25.  
Zhang Y J, Shao H F, Zhang K, et al. Influences of fertilization on soil environment and microorganism in continuous cropping based on high-throughput sequencing [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2018, 20(5): 16-25.
- [30] 王迪, 徐慧春, 杜志强, 等. 生防放线菌 Act12 对棚室连作甜瓜根域微生物的调整效应 [J]. 黑龙江农业科学, 2015(11): 55-59.  
Wang D, Xu H C, Du Z Q, et al. Adjusted effect of inoculating with biocontrol *Actinomyces* Act12 on microbial flora of melon rooting zone in continuous cropping greenhouse [J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2015(11): 55-59.
- [31] Li Y L, Guo Q, Li Y Z, et al. *Streptomyces* pactum Act12 controls tomato yellow leaf curl virus disease and alters rhizosphere microbial communities [J]. Biology and Fertility of Soils, 2019, 55(2): 149-169.
- [32] Liang Y, Jiang Y, Wang F, et al. Long-term soil transplant simulating climate change with latitude significantly alters microbial temporal turnover [J]. The ISME Journal, 2015, 9: 2561-2572.
- [33] 向德明, 张明发, 彭曙光, 等. 连年施用新型肥料对土壤真菌群落及烤烟产质量的影响 [J]. 作物杂志, 2019(2): 1-7.  
Xiang D M, Zhang M F, Peng S G, et al. Effects of consecutive applying different new type fertilizers on soil fungal communities and tobacco quality and yield [J]. Crops, 2019(2): 1-7.
- [34] Lauber C L, Strickland M S, Bradford M A, et al. The influence of soil properties on the structure of bacterial and fungal communities across land-use types [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2008, 40(9): 2407-2415.

## (上接第 84 页)

- [24] 袁杰, 蔡靖, 侯琳, 等. 秦岭火地塘天然次生油松林倒木储量与分解 [J]. 林业科学, 2012, 48(6): 141-146.  
Yuan J, Cai J, Hou L, et al. Storage and decomposition of fallen wood in a *Pinus tabulaeformis* secondary forest at Huoditang Forest region in the Qinling Mountains [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2012, 48(6): 141-146.
- [25] 王顺忠, 谷会岩, 桑卫国. 粗木质残体贮量和分解进展 [J]. 生态学杂志, 2014, 33(8): 2266-2273.  
Wang S Z, Gu H Y, Sang W G. Storage and decay of coarse woody debris [J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, 33(8): 2266-2273.
- [26] 康佳鹏, 马盈盈, 马淑琴, 等. 荒漠绿洲过渡带柽柳种群结构与空间格局动态 [J]. 生态学报, 2019, 39(1): 1-11.  
Kang J P, Ma Y Y, Ma S Q, et al. Dynamic changes of spatial pattern and structure of the *Tamarix ramosissima* population at the desert-oasis ecotone of the Tarim Basin [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(1): 1-11.
- [27] 刘旻霞, 连依明, 李文. 微地形对优势种群点格局和关联性的影响 [J]. 应用生态学报, 2018, 29(5): 1569-1575.  
Liu M X, Lian Y M, Li W. Effects of microtopography on the pattern and association of dominant population [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(5): 1569-1575.
- [28] 田慧霞, 李钧敏, 毕润成, 等. 山西太岳山白桦种群结构和空间分布格局 [J]. 生态学杂志, 2017, 36(1): 1-10.  
Tian H X, Li J M, Bi R C, et al. *Betula platyphylla* population structure and its spatial distribution pattern in Taiyue Mountain of Shanxi, China [J]. Chinese Journal of Ecology, 2017, 36(1): 1-10.
- [29] 殷文杰, 李江荣, 郭其强, 等. 西藏色季拉山急尖长苞冷杉林线小气候特征 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2016, 41(4): 69-75.  
Yin W J, Li J R, Guo Q Q, et al. On characteristics of microclimate at smith fir timberline in Sergyemla Mountains, Tibet of China [J]. Journal of Southwest China Normal University (Natural Science Edition), 2016, 41(4): 69-75.
- [30] 金光泽, 刘志理, 蔡慧颖, 等. 小兴安岭谷地云冷杉林粗木质残体的研究 [J]. 自然资源学报, 2009, 24(7): 1256-1266.  
Jin G Z, Liu Z L, Cai H Y, et al. Coarse woody debris(CWD) in a Spruce\_fir Valley Forest in Xiao Hingan Mountains, China [J]. Journal Natural Resources, 2009, 24(7): 1256-1266.
- [31] Stone J N, Mackinnon A, Parminter J V, et al. Coarse woody debris decomposition documented over 65 years on southern Vancouver Island [J]. Canadian Journal of Forest Research, 1998, 28(5): 788-793.
- [32] Wiegand T, Moloney K A. Rings, circles, and null-models for point pattern analysis in ecology [J]. Oikos, 2004, 104: 209-229.
- [33] Penttinen A. Recent applications of point process methods in forestry statistics [J]. Statistical Science, 2000, 15: 61-78.
- [34] Getis A, Franklin J. Second-order neighborhood analysis of mapped point patterns [J]. Ecology, 1987, 68(3): 473-477.