生态学杂志 Chinese Journal of Ecology 2016,35(5):1182-1187 DOI: 10.13292/j.1000-4890.201605.001

# 青海云杉不同龄级立木的点格局分析

张 华[1,2*] 黄 琴[1] 赵传燕[2] 张 兰[1] 徐春华[1] 康雅茸[1]

([1]西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070; [2]兰州大学草地农业系统国家重点实验室, 兰州 730000)

**摘 要** 本文以祁连山优势种群青海云杉作为研究对象,在天老池小流域典型地段设置一个 100 m×70 m 的样地,采用点格局分析法分析其不同龄级的空间分布格局和空间关联性。结果表明:(1)青海云杉的年龄结构相对比较稳定,呈弱增长型;(2)龄级Ⅰ个体在不同空间尺度下都表现出明显的集群分布;龄级Ⅱ个体,在 0~31 m 尺度内呈集群分布,在大于 31 m的范围内趋于随机分布;龄级Ⅲ个体,除在 6~24 m 范围内呈集群分布外,在其余空间尺度都表现为随机分布。随着青海云杉龄级的增大,其空间分布格局逐渐趋向于随机分布。(3)龄级Ⅰ和龄级Ⅱ个体,在 0~20 m 呈显著的负关联,在 20~23 m 其关联性减弱,大于 23 m 时趋于正关联;龄级Ⅰ和龄级Ⅲ个体,在所有尺度下均呈显著负关联;龄级Ⅱ和龄级Ⅲ个体,在所有尺度内都表现出负关联性。基于低龄级个体数量多且在小尺度上呈聚集分布的现状,从长远角度考虑,应适当对其进行疏伐,以此来扩大其生存空间,减小生存压力。

**关键词** 青海云杉; 点格局; 年龄结构; 空间分布格局; 空间关联性

**Spatial pattern analysis of individuals in different age-classes of *Picea crassifolia*.**

ZHANG Hua[1,2*], HUANG Qin[1], ZHAO Chuan-yan[2], ZHANG Lan[1], XU Chun-hua[1], KANG Ya-rong[1] ([1]*College of Geographic and Environmental Sciences*, *Northwest Normal University*, *Lanzhou* 730070, *China*; [2]*State Key Laboratory of Grassland Agricultural System*, *Lanzhou University*, *Lanzhou* 730000, *China*).

**Abstract**: A plot (100 m×70 m) of *Picea crassifolia* stand was set up in Tianlaochi catchment of the Qilian Mountains, to analyze the spatial distribution pattern of different age classes and the spatial correlation based on point pattern analysis. The results showed that: (1) The age structure of *P. crassifolia* was relatively stable, being in a slight growing trend. (2) The age-class Ⅰ showed aggregated distribution at different spatial scales; the age-class Ⅱ showed aggregated distribution within 0-31 m, while showed the random distribution at >31 m scale. An aggregation distribution pattern was found at scales from 6-24 m, and random distribution patterns at the other scales for the age-class Ⅲ individuals. On the whole, the spatial pattern showed random distribution with the increase of *P. crassifolia*'s age. (3) The correlation between the age-class Ⅰ and the age-class Ⅱ was significantly negative at 0-20 m spatial scale, gradually weakened at 20-23 m, but became positive over 23 m. The age-class Ⅰ and age-class Ⅲ individuals presented significantly negative correlations at all spatial scales. Age-class Ⅱ and age-class Ⅲ individuals showed negative correlations at any scale. Based on the large number and gathered distribution of young individuals at a small scale, we should take thinning to reduce the survival pressure and expand living space of remaining individuals, from a long-term perspective.

**Key words**: *Picea crassifolia*; spatial pattern analysis; age structure; spatial distribution pattern; spatial correlation.

国家自然科学基金项目(41461011,41361010)资助。
收稿日期: 2015-08-10 接受日期: 2016-01-29
* 通讯作者 E-mail: zhanghua@nwnu.edu.cn

空间分布格局是指种群个体在水平空间上的分布状况,是由种群本身生物学特征、种间关系和环境条件综合作用的结果,是植物种群生物学特征对环境长期适应和选择的结果,也是影响种群发展的重要因素(郭忠玲等,2004)。种群的空间格局分析是研究种群特征、种间相互作用、种群与环境关系的重要手段,是生态学研究的热点之一(张金屯,1998)。种群的空间格局主要研究种群的空间分布类型和空间关联性。种群的空间分布类型主要有 3 种:随机分布、均匀分布和集群分布,空间分布类型可以反映种群对环境资源的利用状况,是其在群落中地位与生存能力的外在表现(Dale, 1999; Condit *et al.*, 2000;张金屯等,2004);种群的空间关联性有空间正关联、空间无关联和空间负关联 3 种基本方式。依靠单一尺度(固定大小)的若干样方研究植物种群的空间分布格局,只能得到特定空间尺度上的分布格局的具体认识(张金屯,2004;Brisson *et al.*,2004;杨洪晓等,2006),而空间格局对空间尺度具有很强的依赖性,植物种群在某些尺度上可能服从集群分布,在其他尺度上却可能变为随机分布或均匀分布(Greig-Smith, 1983; 孙伟中等, 1997)。Ripley(1997)提出的点格局分析方法能够分析各种尺度下的种群分布格局和种间关系,并在拟合分析的过程中最大限度利用坐标图的信息,检验能力较强,在种群点格局研究中得到了很好应用。

青海云杉(*Picea crassifolia*)是祁连山山地森林的主要建群种,多以纯林形式存在,呈带状或斑块状分布于海拔 2700~3300 m 的阴坡、半阴坡。青海云杉林面积占祁连山水源涵养林面积的 24.74%,占乔木林面积的 75.72%(田风霞等,2012)。青海云杉具有耐寒、耐旱、耐贫瘠的特点,对于维系林区的生物多样性、涵养水源、保持水土起着非常重要的生态作用,由于自然、人类活动的干扰,祁连山区的原始森林林线不断上升,使其生态系统服务功能不断下降(李效雄等,2012)。目前对于青海云杉的研究主要集中于种群生物多样性(刘建泉,2009)、生物学特征(刘有军等,2013;康建军等,2014)、水文生态效应(张学龙等,2007;田风霞等,2012)等方面,对其种群的结构和格局的研究(刘建泉,2004;张立杰等,2008;刘建泉等,2009;金铭等,2012)很少使用点格局分析方法。而分析优势种不同尺度下的空间格局及其关联性,有助于认识群落结构的形成与演替维持机制(李立等,2010)。因此,本文通过野外观测与室内实验分析,采用空间点格局方法,旨在从空间格局角度揭示以下问题:(1)祁连山中段天老池小流域青海云杉种群不同龄级立木空间分布格局及关联性如何随着空间尺度进行变化;(2)不同龄级立木的空间分布格局及关联性形成的潜在生态学过程与机理。进而为青海云杉种群的配置、种植与管理提供合理的科学依据。

## 1　研究区概况

研究区位于祁连山中段天老池小流域(图 1)(38°20′ N—38°30′ N,99°45′ E—100°00′ E),海拔 1900~4445 m,面积约 13 $km^2$,属于高寒半干旱、半湿润山地森林草原气候。年平均气温 0.6 ℃,1 月平均气温-13.1 ℃,7 月平均气温 10~14 ℃;年降水量 435.5 mm,降水主要集中在 5—9 月,占全年降水的 89.2%;年蒸发量 1051.7 mm。水热组合随着海拔的变化而表现出明显垂直地带性分异。海拔从低到高,土壤类型依次为山地灰褐土、山地栗钙土、高山草甸土和高山荒漠土等。森林类型主要有两种,青海云杉(*Picea crassifolia*)和祁连圆柏(*Sabina przewalskii*);灌丛主要有金露梅(*Potentilla fruticasa*)、鬼箭锦鸡儿(*Caragana jubata*)、吉拉柳(*Salix gilashanica*)和高山绣线菊(*Spiraea alpina*);草本植物主要有珠芽蓼(*Polygonum viviparum*)、苔草(*Carex* spp.)、鹅绒委陵菜(*Potentilla anserina*)、二裂委陵菜(*Potentilla bifurca*)和车前草(*Plantago asiatica*)等。区域内自然环境复杂多变,生物种类丰富多样,是我国重要的水源涵养林区。

## 2　研究方法

### 2.1　野外调查和室内分析

点格局分析取样要求样地面积要适当大,以

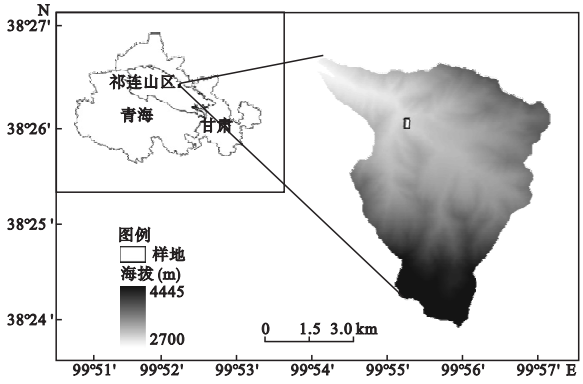


**图 1　天老池流域地理位置示意图**

**Fig.1　Geographical position of the study area**

便使种群的各种分布格局都能出现。样地以长方形或正方形为好(何艳华等,2011)。在森林群落格局研究中,样地的边长应在50 m以上,因为小于50 m大尺度的分布格局可能被忽略(张金屯,1998)。研究区天老池小流域位于祁连山深处,植被几乎未受人工干扰,均为自然植被。2013年7月在其中选择典型的青海云杉自然林,进行实地调查,在其北坡布设大小为100 m×70 m的样地(38°26′29.992″N、99°55′20.285″E,平均海拔2760 m,坡向北,平均坡度30°),采用相邻格子法将样地划分为70个10 m×10 m的样方,将每个样方的东南角作为原点,东西方向为$X$轴,南北方向为$Y$轴,测量每棵青海云杉到$X$轴、$Y$轴的距离,将其转换成大样地的坐标值,以确定每株青海云杉的空间坐标。以每个样方为调查单元,将写有序号的小旗插到每株树的基部确定序号,用罗盘获取坡度和坡向,用激光测距仪Tru-Pulse 200测量树高和枝下高,用卷尺测量每株树的胸径和空间坐标。

为建立胸径和树龄关系模型,在样地内随机选择青海云杉120株。然后选择其中胸径足够大(胸径≥44 cm)易钻取树芯的青海云杉70株,利用树木生长锥采集140根树芯,样品带回实验室后,经自然干燥、固定、打磨后,在测量精度为0.001的Velmex宽度测量仪上精确测量每一轮的宽度,按照树木年代学的技术方法将样本交叉定年,以此来确定每株树的年龄,用Cofecha程序(Holmes,1983)对定年的准确性进行进一步检验修正,采用Arstan年表研制程序(Cook,1990),以负指数或线性函数拟合树木的生长趋势,去除与树龄相关的生长趋势,再对去除趋势序列以双权重平均法进行合成,最终得到70棵青海云杉树轮宽度年表。

## 2.2 龄级划分

**2.2.1** 青海云杉树龄建模 在70株青海云杉胸径和树龄数据中,随机选择46株建立胸径与树龄模型,其余24株用于模型验证,采用$F$值检验模型的有效性。

建立中、老龄青海云杉树龄($y$)与胸径($x$)模型。选择二次线性模型进行模拟(图2),得到拟合模型为:

$$y=-0.0179x^2+2.3829x+40.24$$
$$(R^2=0.756, F=127.79) \quad (1)$$

其中:$y$表示树龄(年),$x$表示胸径(cm)。

用其余的24株树龄数据对式(1)进行验证,实测值与1∶1线比较接近。

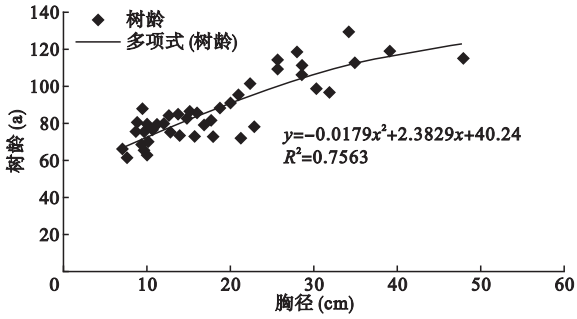


**图2 青海云杉树龄与胸径关系模型**

**Fig.2 Fitted model of age and diameter at breast height of *Picea crassifolia***

**2.2.2** 划分龄级 将样地内测得的青海云杉胸径数据代入公式(1)得到的树龄为51~108 a,故以50 a为一个年龄级(Wiegand *et al.*,2004),将其整体划分为3个龄级:龄级Ⅰ(幼树与小树,胸径<4.5 cm)(0~50 a)、龄级Ⅱ(中树)(50~100 a)、龄级Ⅲ(大树)(100~150 a)。

## 2.3 点格局分析

**2.3.1** 空间分布格局分析 以植物个体在样地内的坐标为基础,每个个体都可以被视做二维空间的一个点,这样所有个体就组成了空间分布的点图,然后以点图为基础进行格局分析。Ripley $K$函数已广泛运用于点格局分析方法中,该方法可以描述不同空间尺度下种群的分布格局,其计算公式如下:

$$K(t)=\frac{A}{n^2}\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\frac{I_t(u_{ij})}{w_{ij}} \quad (i\neq j) \quad (2)$$

式中:$A$为样地面积;$n$为植物个体总数;$u_{ij}$为点$i$和$j$之间的距离;$t$为大于零的任何值,当$u_{ij}\leqslant t$时,$I_t(u_{ij})=1$,当$u_{ij}>t$时,$I_t(u_{ij})=0$,$w_{ij}$是以点$i$为圆心$u_{ij}$为半径的圆,落在面积$A$中的弧长和整个圆周长的比值,在这里为权重,用于消除边界效应。

在计算中,$K(t)/\pi$的平方根更有用,能够在随机分布下保持方差的稳定并且与$t$间有线性关系,于是将其改进为$L(t)$函数,用此函数来判定相应尺度下的种群分布类型。其计算式如下:

$$L(t)=\sqrt{K(t)/\pi-t} \quad (3)$$

$L(t)=0$时,表示随机分布;$L(t)>0$时,表示集群分布;$L(t)<0$时,表示均匀分布。

**2.3.2** 空间关联性分析 为分析不同龄级在空间距离内的关联性,可将Ripley $K$函数推广至双变量,用下式进行估计:

$$K_{12}(t)=\frac{A}{n_1 n_2}\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\frac{I_t(u_{ij})}{w_{ij}}\quad(i\neq j)\qquad(4)$$

式中:$n_1$和$n_2$分别代表种1和种2的个体数,其他参数与式(2)相同,也将其改进为:

$$L_{12}(t)=\sqrt{K_{12}(t)/\pi-t}\qquad(5)$$

当$L_{12}(t)>0$时,说明龄级1、2在空间尺度$t$上表现为正关联;当$L_{12}(t)=0$时,说明龄级1、2在空间尺度$t$上表现为无关联;当$L_{12}(t)<0$时龄级1、2在空间尺度$t$上表现为负关联。

用Monte-Carlo方法求$L(t)$和$L_{12}(t)$的置信区间。通过对种群实际分布数据的计算得到不同尺度下的$L(t)$、$L_{12}(t)$值。对于单个种群的分布格局,$L(t)$值落在包迹线之间为随机分布,在包迹线之上呈聚集分布,在包迹线之下为均匀分布。对于单个种群2个龄级间的空间关联,$L_{12}(t)$的值在包迹线之间表明无关联性,在包迹线之上表明正关联,在包迹线之下表明负关联。

将空间尺度设置为样地最小边长的一半(即35 m),步长为1 m,然后采Monte-Carlo随机模拟99次,获得99%置信区间。用Programita软件完成数据分析过程。

## 3　结果与分析

### 3.1　青海云杉种群的年龄结构

青海云杉种群低龄级个体数量较多,而高龄级个体的数量较少(图3、图4)。其中,龄级Ⅰ个体占总体数的45%,龄级Ⅱ个体占总数的53%,龄级Ⅲ个体占2%,以龄级Ⅱ个体为主,天然更新能力相对比较强,说明青海云杉种群的发展基本处在稳定状态,表现为弱增长型种群,与李效雄等(2012)对祁连山大野口流域青海云杉种群结构和空间分布格局的研究结果一致。

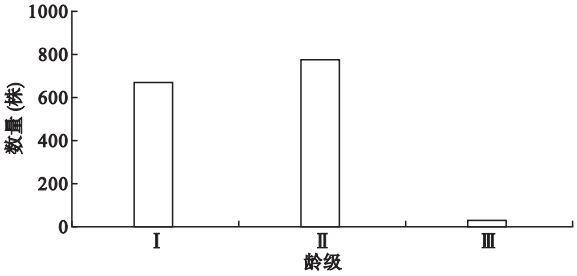


**图3　青海云杉龄级结构**
**Fig.3　Age class structure of *Picea crassifolia* population**

### 3.2　青海云杉不同龄级的空间分布格局

龄级Ⅰ个体(图5a)在不同的空间尺度下都表现出明显的集群分布,在0~11 m聚集程度逐渐增强,在11 m处达到最大值,之后随着空间尺度的增大逐渐减弱;龄级Ⅱ个体(图5b)在0~31 m尺度内呈集群分布,在大于31 m的空间范围内呈随机分布;而龄级Ⅲ(图5c)个体,除在6~24 m范围内呈集群分布外,在0~6和24~35 m空间尺度下都表现为随机分布。总体来看,随着青海云杉龄级的不断增大,其空间分布格局逐渐趋向于随机分布。

### 3.3　青海云杉不同龄级间的空间关联性

龄级Ⅰ和龄级Ⅱ个体(图6a),在0~20 m呈显著的负关联,在20~23 m之间其关联性减弱,大于23 m时趋于正关联;龄级Ⅰ和龄级Ⅲ个体(图6b),在所有尺度下均呈显著负关联;龄级Ⅱ和龄级Ⅲ个体(图6c),在所有尺度内都呈负关联性。总体上,青海云杉龄级Ⅰ和龄级Ⅱ个体间空间关联性随着尺度的增大而减弱,而龄级Ⅰ和龄级Ⅲ、龄级Ⅱ和龄级Ⅲ个体间却存在着负关联的关系。

## 4　讨　论

从青海云杉的种群结构来看,龄级Ⅱ个体的数量最多,其次是龄级Ⅰ个体,最少的是龄级Ⅲ个体,

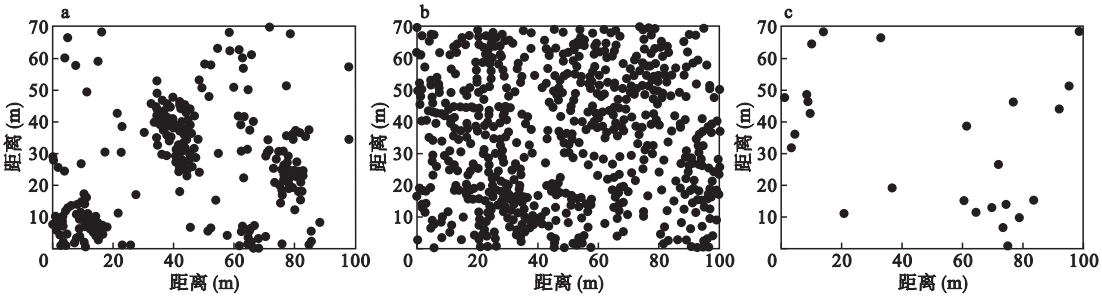


**图4　各龄级个体的空间分布点图**
**Fig.4　Distributions of different age-class individuals of *Picea crassifolia* in plot**
a.龄级Ⅰ;b.龄级Ⅱ;c.龄级Ⅲ。

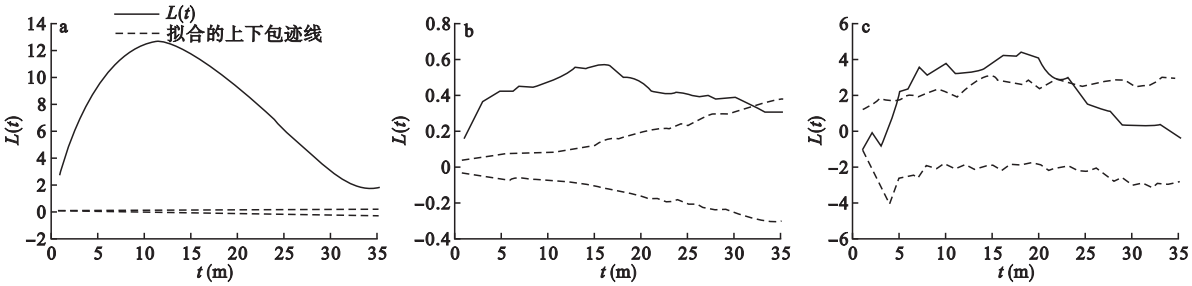


**图5 青海云杉不同龄级的空间分布格局**

**Fig.5 Spatial patterns of different age-classes of *Picea crassifolia***

a.龄级Ⅰ；b.龄级Ⅱ；c.龄级Ⅲ。

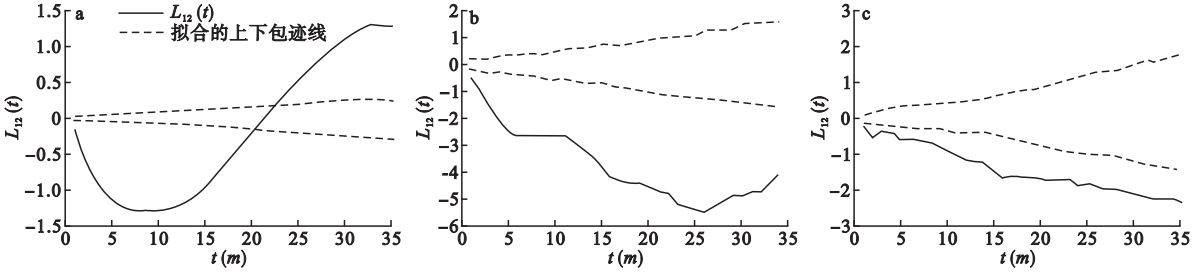


**图6 青海云杉不同龄级的空间关联性**

**Fig.6 Spatial association between different age-classes of *Picea crassifolia***

a.龄级Ⅰ和龄级Ⅱ；b.龄级Ⅰ和龄级Ⅲ；c.龄级Ⅱ和龄级Ⅲ。

种群基本处于稳定发展状态，属于弱增长型的发展模式。

在低龄级群体中，物种一般会表现出明显的集群分布，而在较高的龄级群体中，物种的空间分布格局则会表现出随机分布或均匀分布（Wiegand *et al.*, 2004）。从研究结果来看，青海云杉的空间分布格局遵循此规律。随着种群龄级的增大，其聚集度相应降低，之所以引起这种变化主要是受到生物学特征、竞争（蒋智林等，2008）、森林群落的自然稀疏过程、干扰格局及环境变化等（张金屯等，2004；王光华等，2006；吴建国等，2007；常宗强等，2008）共同作用的影响。龄级Ⅰ与龄级Ⅱ这类低龄级群体基本呈聚集分布，这主要是由于：（1）青海云杉的种子靠风传播，种子大部分散播于母株周围；（2）低龄级种群个体较小，处在群落的下层，在光、热、水和土壤等生态因子的竞争中处于劣势地位，为了争夺有利的生存地位，聚集可以提高其竞争能力和对不良环境的抵御能力，提高成活率；（3）小生境的异质作用导致幼树与小树的不均匀分布，如局部的土壤、植被、地形等环境因子的差异，采伐、自然灾害等造成的林窗，都为低龄级种群的大量繁殖、生长创造了条件。随着年龄等级的增加，龄级Ⅲ这类龄级群体以呈随机分布为主，这是因为此时树冠基本定型，树高较周围数木高，根系也伸展到一定程度，种内竞争作用转化为种间竞争。自疏效应使种群的聚集分布被打破，由聚集分布向随机分布转变，这样有利于满足个体对不断增加的空间和营养需求。

空间正关联体现了种群内部正向（相互有利）的生态关系；空间负关联反映了种群内部负向（相互排斥）的生态关系；空间无关联则意味着种群内部没有明确的生态关系（张金屯，1998）。种群不同龄级立木的空间关联性是不同龄级的同一物种在空间分布上的相互联系，描述了某一特定的时间内构成整个种群的个体间的空间分布关系及功能关系，反映该种群的生存状况（李博等，2013）。青海云杉龄级Ⅰ和龄级Ⅱ个体间空间关联性随着尺度的增大而减小，在23 m处逐渐转变为正关联。这主要是由于在采样地区随着海拔的升高，水热条件、土壤性质不断发生变化，此外由于在2700~3100 m的海拔带内青海云杉占据空间的能力很强（刘铮等，2013），生长茂盛，导致林内林窗面积比较小，光照条件有限。而青海云杉在生长初期对这些资源的需求旺盛，因此为了争夺生存空间龄级Ⅰ和龄级Ⅱ个体间存在着相互排斥的生态关系，但这种负关联性往往保持在一定范围内。说明不同龄级个体在空间的分布上是相互独立的，同种不同龄级个体之间虽然存

在着竞争关系但对环境的要求是一致的,所以关联性会逐渐减小,这样的交错分布有利于充分利用周围的环境资源从而促进整个种群的发展。龄级Ⅰ和龄级Ⅲ、龄级Ⅱ和龄级Ⅲ之间却存在着负关联的关系,这主要是由于龄级Ⅲ个体对土壤中营养元素、水分、光等资源的需求量比较大,内部存在着激烈的竞争,必然会排斥较低龄级个体的介入,因而使得其周围龄级Ⅰ和龄级Ⅱ个体的分布密度非常小。

综上,青海云杉种群点格局分布受到多种因素的影响,不仅与种群本身的生物学特性有关,而且也受到周围环境和同种(不同)种群个体间相互作用的影响。在今后的研究中,有必要进一步研究不同生态系统及人为因素影响下青海云杉的空间分布类型,以更好地掌握青海云杉种群的动态变化规律。并针对本文中对其种群的生物学特征的研究,由于龄级Ⅰ个体数量相对多且在小尺度上呈聚集分布,在生长过程中面对巨大的竞争压力,应该适当对其进行伐疏,以此来扩大其生存空间,减小龄级Ⅰ个体的生存压力。保持研究区内青海云杉种群的稳定,能够更好地发挥其涵养水源、保持水土、调节小气候、保护生物多样性等生态效应。

## 参考文献


常宗强, 冯　起, 司建华, 等. 2008. 祁连山不同植被类型土壤碳贮量和碳通量. 生态学杂志, **27**(5): 681-688.

郭忠玲, 马元丹, 郑金萍, 等. 2004. 长白山落叶阔叶混交林的物种多样性、种群空间分布格局及种间关联性研究. 应用生态学报, **15**(11): 2013-2018.

何艳华, 闫　明, 武丽君, 等. 2011. 山西霍山白桦种群不同龄级立木的点格局分析. 植物科学学报, **29**(6): 662-667.

金　铭, 李　毅, 刘贤德, 等. 2012. 祁连山青海云杉林空间结构分析. 干旱区地理, **35**(4): 587-593.

蒋智林, 刘万学, 万方浩, 等. 2008. 植物竞争能力测度方法及其应用评价. 生态学杂志, **27**(6): 985-992.

康建军, 朱　丽, 张志胜, 等. 2014. 祁连山青海云杉扦插繁殖技术及其生根机理研究. 防护林科技, (5): 8-12.

李效雄, 刘贤德, 赵维俊. 2012. 祁连山大野口流域青海云杉种群结构和空间分布格局. 干旱区地理, **35**(6): 960-967.

李　立, 陈建华, 任海保, 等. 2010. 古田山常绿阔叶林优势树种甜槠和木荷的空间格局分析. 植物生态学报, **34**(3): 241-252.

李　博, 刘合霞. 2013. 猫儿山鹅掌楸种群不同龄级立木的点格局分析. 北方园艺, (**21**): 81-85.

刘　铮, 赵传燕, 白　英, 等. 2013. 祁连山区小流域青海云杉材积生长差异性. 兰州大学学报: 自然科学版, **49**(6): 747-751.

刘建泉. 2009. 祁连山北坡青海云杉群落β多样性垂直分布格局. 南京林业大学学报: 自然科学版, **33**(3): 41-45.

刘建泉. 2004. 祁连山保护区青海云杉种群分布格局的研究. 西北林学院学报, **19**(2): 152-155.

刘建泉, 屈永才, 王学福, 等. 2009. 青海云杉群落空间结构特征研究.干旱区资源与环境, **23**(7): 121-125.

刘有军, 刘世增, 康才周, 等. 2013. 青海云杉种子萌发特性. 干旱区研究, **30**(5): 877-881.

孙伟中, 赵士洞. 1997. 长白山北坡椴树阔叶红松林群落主要树种分布格局的研究. 应用生态学报, **8**(2): 119-122.

田风霞, 赵传燕, 冯兆东, 等. 2012. 祁连山青海云杉林冠生态水文效应及其影响因素. 生态学报, **32**(4): 1066-1076.

王光华, 金　剑, 徐美娜, 等. 2006. 植物、土壤及土壤管理对土壤微生物群落结构的影响. 生态学杂志, **25**(5): 550-556.

吴建国, 艾　丽, 苌　伟. 2007. 祁连山中部四种典型生态系统土壤有机碳矿化及其影响因素. 生态学杂志, **26**(11): 1703-1711.

杨洪晓, 张金屯, 吴　波, 等. 2006. 毛乌素沙地油蒿种群点格局分析. 植物生态学报, **30**(4): 563-570.

张金屯. 1998. 植物种群空间分布的点格局分析. 植物生态学报, **22**(4): 344-349.

张金屯, 孟东平. 2004. 芦芽山华北落叶松林不同龄级立木的点格局分析. 生态学报, **24**(1): 35-40.

张金屯. 2004. 数量生态学. 北京: 科学出版社.

张学龙, 罗龙发, 敬文茂, 等. 2007. 祁连山青海云杉林截留对降水的分配效应. 山地学报, **25**(6): 678-683.

张立杰, 赵文智, 何志斌. 2008. 青海云杉种群格局的分形特征及其影响因素. 生态学报, **28**(4): 1383-1389.

Brisson J, Reynolds JF. 2004. The effects of neighbors on root distribution in a creosotebush (*Larrea tridentata*) population. *Ecology*, **75**: 1693-1702.

Condit R, Ashton PS, Baker P. 2000. Spatial patterns in the distribution of tropical tree species. *Science*, **288**: 1414-1418.

Cook ER. 1990. Methods of Dendrology. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers: 1-200.

Dale MRT. 1999. Spatial Patterns Analysis in Plant Ecology. Cambridge: Cambridge University Press.

Greig-Smith P. 1983. Quantitative Plant Ecology. 3rd ed. London: Blackwell Scientific Publications.

Holmes RL. 1983. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin*, **43**: 69-75.

Ripley BD. 1997. Modeling spatial patterns. *Journal of the Royal Statistical Society*, *Series B*, **39**: 172-212.

Wiegand T. Moloney KA. 2004. Circles and null-models for point pattern analysis in ecology. *Oikos*, **34**: 209-229.


**作者简介**　张　华,女,1978年生,副教授,硕士生导师,博士后,研究方向为干旱区生态恢复。E-mail: zhanghua@nwnu.edu.cn

**责任编辑**　张　敏