

引用格式:王坤,赵维俊.祁连山青海云杉林动态监测大样地幼苗幼树更新特征及其对地形因子的响应[J].山地学报,2024,42(5):623-639.

WANG Kun,ZHAO Weijun.Characteristics of seedling/sapling regeneration and their response to topographic factors in a large dynamic monitoring sample plot of *Picea crassifolia* forest in the Qilian Mountains,China [J]. Mountain Research, 2024, 42(5): 623-639.

# 祁连山青海云杉林动态监测大样地幼苗幼树更新特征及其对地形因子的响应

王坤<sup>1</sup>,赵维俊<sup>2\*</sup>

(1.北京理工大学珠海学院 中美国际学院,广东 珠海 519088;

2.甘肃省祁连山水源涵养林研究院 甘肃省祁连山森林生态系统国家定位观测研究站,甘肃 张掖 734000)

**摘要:**森林天然更新是生态恢复与重建的关键路径,对维持森林的动态稳定和可持续发展具有至关重要的作用。其中幼苗幼树阶段是决定森林天然更新质量和数量的关键时期。地形作为森林天然更新的主要环境驱动因子之一,对幼苗幼树生长具有显著影响。相关研究过去依赖在海拔梯度样地或样带的取样方法,取样强度相对较小,难以全面揭示反映更新苗的更新格局与分布特征。本文以祁连山中段大野口流域青海云杉动态监测大样地(340 m×300 m)内幼苗幼树为研究对象,采集幼苗幼树的密度、地径、株高、冠幅和 DEM(分辨率为 12.5 m)数据,基于 ArcGIS 构建数据库,分析坡向、坡度、坡位、高程对幼苗幼树更新特征的影响,探讨不同地形位指数下的幼苗幼树更新特征。同时,采用 K-means 聚类将研究区域划分为 6 种不同地形生境,分析不同生境下的更新特征。结果表明:(1)幼苗幼树的密度为北向坡高于西坡,幼苗幼树的地径、株高、冠幅为西坡高于北向坡;坡度较高区域,幼苗幼树的密度较高,幼苗幼树的地径、株高、冠幅较低;幼苗幼树的密度在中坡位最高,幼苗幼树的地径、株高、冠幅在上坡位最高;高程越低,幼苗幼树的密度越大,幼苗幼树的地径、株高、冠幅越小。(2)幼苗幼树的密度在高地形位阴坡、高地形位半阴坡、低地形位半阴坡较大,幼苗幼树的地径、株高、冠幅在高地形位半阳坡较大。(3)幼苗幼树均在东南角集聚密度最高,在同一地形因子下幼苗密度均高于幼树密度。(4)幼苗幼树的地径、株高、冠幅均与密度呈现出显著负相关,地径、株高、冠幅之间呈极显著正相关,与部分地形因子呈显著和极显著相关。本研究结果可为祁连山青海云杉林天然更新的评估提供理论依据,也为青海云杉林幼苗幼树的科学管理提供参考,为类似区域同类研究提供借鉴。

**关键词:**青海云杉;幼苗幼树;地形因子;大野口流域;祁连山

**中图分类号:** S718.5

**文献标志码:** A

森林天然更新是其自我修复和繁衍的方式,也是实现生态恢复与重建的关键路径之一。这一过程通过影响森林内部的生物多样性、群落结构的稳定性和繁衍的可持续性,确保森林生态系统的顺利演替与长期稳定,是森林资源再生产中维系生态平衡不可或缺的生物学环节<sup>[1-3]</sup>。在森林天然更新的整

个生命周期中,幼苗幼树期尤为关键,因其在个体生长发育过程中最为脆弱、数量变动最大,且对外界生态环境反应最为敏感,直接决定了天然更新的最终质量和数量<sup>[3-7]</sup>。

地形因子是森林天然更新的主要环境因素<sup>[8]</sup>,包括坡向、坡度、坡位、高程等<sup>[9]</sup>。这些地形因子通

收稿日期(Received date): 2024-08-07;改回日期(Accepted date): 2024-09-22

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金(32060247)。[National Natural Science Foundation of China (32060247)]

作者简介(Biography): 王坤(1990-),女,甘肃兰州人,博士,讲师,主要研究方向:生态经济。[WANG Kun (1990-), female, born in Lanzhou, Gansu Province, Ph. D., lecturer, research on ecological economics] E-mail: wangkundoris@outlook.com

\* 通讯作者(Corresponding author): 赵维俊(1981-),男,博士,研究员,主要研究方向:森林与土壤生态。[ZHAO Weijun (1981-), male, Ph. D., professor of research, research on forest and soil ecology] E-mail: zhaoweijun1019@126.com

过调节光照、温度、湿度等条件,重新分配水热资源,进而影响土壤质地、土壤养分和土层厚度<sup>[10]</sup>。大量研究表明,地形因子对森林天然更新中幼苗幼树的生长发育具有显著影响。例如,辽东栎更新幼苗和幼树主要分布在阴坡和半阴坡,在坡度  $20^{\circ} \sim 30^{\circ}$  分布密度最高<sup>[11]</sup>。湖南栎类天然次生林幼树密度与海拔呈显著正相关,树高和冠幅与坡位呈显著正相关,冠幅与坡度呈显著负相关<sup>[12]</sup>。武夷山南方铁杉在陡坡区域更新幼树密度最高,在缓坡幼树生长情况最优,在光照充足的微地形中幼树分布最为密集<sup>[13]</sup>。祁连山排露沟流域青海云杉林更新苗密度和株高在低海拔凹地最大,冠幅和基径在低海拔凸地最大<sup>[3]</sup>。金佛山方竹天然林,坡度显著影响幼竹生长,在  $45^{\circ}$  坡度时生长状况最优,但坡向和坡位的影响不显著,坡度、坡向、坡位与幼竹各生长指标分别为极显著正相关、显著负相关、相关性不显著<sup>[14]</sup>。在河北侧柏林,海拔对侧柏生长影响最大、坡向影响最小、坡度及土壤厚度影响居中,侧柏林生长的最优生境是阴坡、缓坡、厚土和低海拔<sup>[15]</sup>。

自 1980 年起,祁连山林区被划为国家重点水源涵养林区,1988 年经国务院批准被划为国家级自然保护区<sup>[16]</sup>。祁连山森林生态系统作为中国西北生态安全屏障<sup>[17]</sup>,发挥着涵养水源、调节气候、保持水土、净化水质的作用<sup>[16-17]</sup>,为西北地区乃至全国的碳中和目标的达成做出巨大贡献。青海云杉作为中国西北地区的特有树种<sup>[16]</sup>,是祁连山天然林的主要建群种,其分布占天然林的 20.49%,占乔木林的 55.79%<sup>[17]</sup>。

祁连山青海云杉的相关研究主要包括青海云杉林天然更新群落结构空间异质性和关联性、种群数量动态变化、叶面积指数的空间异质性、地形因子的响应以及与土壤水热关系<sup>[3, 16, 18-22]</sup>。然而,这些研究主要基于海拔梯度上的固定样地(例如  $20\text{ m} \times 20\text{ m}$ 、 $20\text{ m} \times 36\text{ m}$ )进行,虽然海拔梯度包含了温度、湿度、光照、土壤等环境因子的协同变化,但这类海拔梯度样地或样带取样强度较小,难以充分揭示更新苗的更新格局。不充分的取样容易导致诸如扩散限制、生境过滤等生态学过程对更新苗的贡献被低估。因此,建立动态监测大样地有助于了解其潜在的生态学过程,是现代群落生态学的合理研究手段。

本研究在祁连山大野口流域设置青海云杉林动

态监测大样地( $340\text{ m} \times 300\text{ m}$ ),以幼苗幼树的密度、地径、株高、冠幅和分辨率为  $12.5\text{ m}$  的数字高程模型(DEM)为数据源,基于 ArcGIS 构建数据库,分析探讨 3 个科学问题:(1)地形因子(坡向、坡度、坡位、高程、地形位)及不同地形生境如何影响青海云杉幼苗幼树更新指标;(2)不同地形因子下幼苗幼树的空间分布特征;(3)在大样地尺度上幼苗幼树随微地形变化的规律。研究结果以期祁连山青海云杉林天然更新的评估提供理论依据,也为祁连山大野口流域青海云杉林幼苗幼树科学管理提供参考,为类似区域同类研究提供借鉴<sup>[23]</sup>。

## 1 数据与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于祁连山中段西水林区大野口流域,流域面积  $73.32\text{ km}^2$ ,海拔  $2590 \sim 4645\text{ m}$ ,年均温  $-0.6^{\circ}\text{C} \sim 2.0^{\circ}\text{C}$ ,年均日照时数  $1893\text{ h}$ ,年均降水量  $433.6\text{ mm}$ ,年均蒸发量  $1081.7\text{ mm}$ ,属高寒半干旱山地森林草原气候,土壤类型为山地灰褐森林土<sup>[3, 20]</sup>。青海云杉林主要在海拔  $2600 \sim 3300\text{ m}$  的阴坡和半阴坡分布,群落中乔木有建群种青海云杉(*Picea crassifolia*)与少量的祁连圆柏(*Sabina przewalskii*),灌木有银露梅(*Potentilla glabra*)、金露梅(*P. fruticosa*)、高山绣线菊(*Spiraea alpina*)、箭叶锦鸡儿(*Caragana jubata*)、吉拉柳(*Salix gilashanica*)等,林下草本有藓生马先蒿(*Pedicularis muscicola*)、黑穗苔草(*Carex atrata*)、委陵菜(*P. chinensis*)、马蔺(*Iris lactea*)、珠芽蓼(*Polygonum viviparum*)、芨芨草(*Achnatherum splendens*)、狼毒(*Stellera chamaejasme*)等,林下苔藓有欧灰藓(*Hypnum cupressiforme*)、山羽藓(*Abietinella abietina*)、匐灯藓(*Plagiomnium cuspidatum*)等。植被类型以青海云杉为主,灌木数量较少,群落结构稳定<sup>[18-21]</sup>。

### 1.2 数据来源与研究方法

本研究以祁连山大野口流域青海云杉林动态监测大样地为研究基地,以 2021 年 7—9 月该样地调查样点(3450 株幼苗和 960 株幼树)的数据(相对坐标、地径、株高、东西冠幅、南北冠幅)和甘肃省分辨率为  $12.5\text{ m}$  的 DEM 数据(源于 <https://search.asf.alaska.edu/>)为数据来源,应用 ArcGIS10.2.2 软件

确定调查样地、调查样方、调查样点的空间坐标,将调查样点展点,并挂接调查样点的幼苗幼树更新指标(地径、株高、东西冠幅、南北冠幅、平均冠幅),使用 3D Analyst 工具、分析工具和数据管理工具,制作大样地地形因子系列栅格图(坡向图、坡度图、坡位图、高程图、地形位指数图),通过空间挂接获得调查样点的地形因子属性(坡向、坡度、坡位、高程、地形位指数、生境类型),形成大样地青海云杉林更新幼苗幼树数据库。应用 Excel、SPSS 26.0 软件进行各地形因子对幼苗幼树更新指标影响的统计分析,使用 ArcGIS 10.2.2 软件、Origin 2021 制图。

### 1.3 样地、样方设置与调查内容

2010—2011 年甘肃省祁连山森林生态系统国家定位观测研究站在大野口流域内建立青海云杉林动态监测大样地。使用全站仪将大样地划分为

255 个  $20\text{ m} \times 20\text{ m}$  样方(样方编号见图 1),再将每个样方分为 16 个  $5\text{ m} \times 5\text{ m}$  的小样方,共 4080 个小样方。大样地四个角点的经纬度分别为:西北角( $100^{\circ}15'0.40''\text{E}$ 、 $38^{\circ}32'1.70''\text{N}$ )、东北角( $100^{\circ}15'12.36''\text{E}$ 、 $38^{\circ}31'59.18''\text{N}$ )、西南角( $100^{\circ}14'56.77''\text{E}$ 、 $38^{\circ}31'51.05''\text{N}$ )、东南角( $100^{\circ}15'8.73''\text{E}$ 、 $38^{\circ}31'48.53''\text{N}$ )。从西北角到西南角的距离(称作长度)为 340 m,从西北角到东北角的距离(称作宽度)为 300 m。以西北角为原点,由北向南沿长边方向记  $x$  轴,由西向东沿短边方向记  $y$  轴。每隔 20 m 埋设石桩为界点,编号标在石桩上,编号前两位为  $x$  轴坐标、后两位为  $y$  轴坐标,并记录坐标及高程。在每个样方西北角的小样方内进行青海云杉幼苗幼树的每木实地调查,逐一编号挂牌。使用全站仪测量小样方内每株幼苗幼树的相对

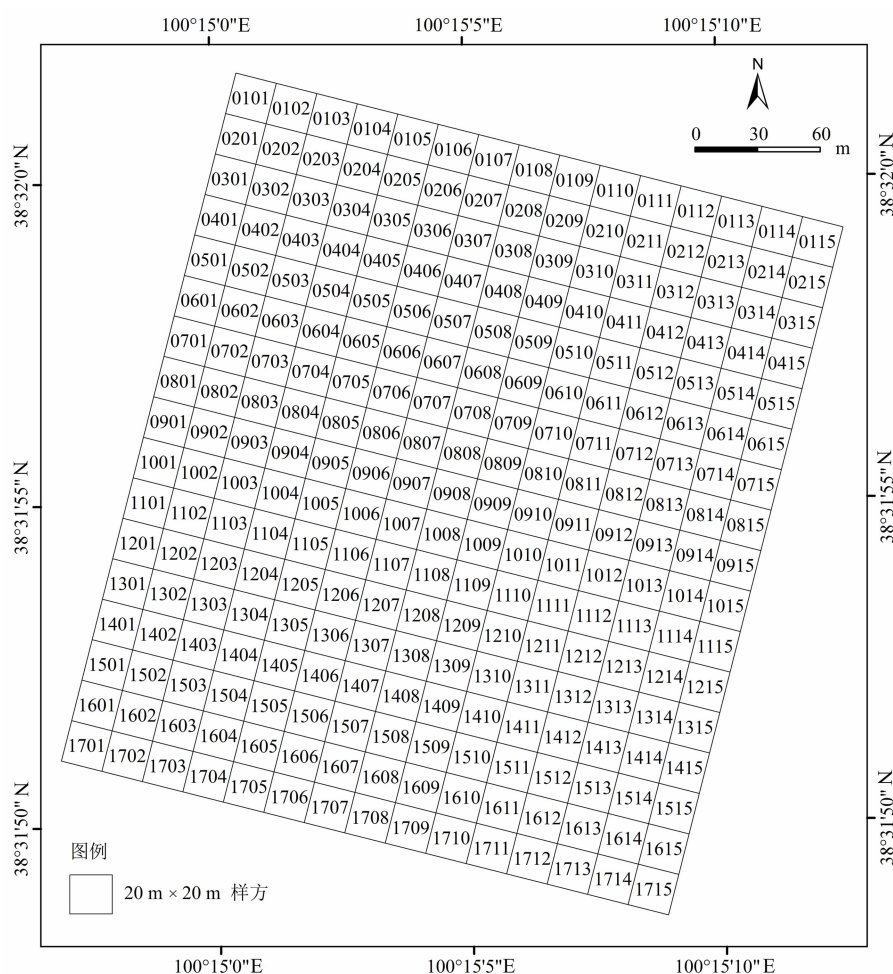


图 1 祁连山青海云杉动态监测大样地  $20\text{ m} \times 20\text{ m}$  样方分布图

Fig. 1 Distribution map of  $20\text{ m} \times 20\text{ m}$  quadrats in a large dynamic monitoring sample plot of

*Picea crassifolia* forest in the Qilian Mountains of China

坐标( $x, y$ )和高程,用游标卡尺测量幼苗幼树的地径,用钢卷尺测量幼苗幼树的株高、东西冠幅和南北冠幅。参考相关研究<sup>[3,21-22]</sup>,把地径小于1.0 cm和株高小于1.0 m的划分为幼苗,地径在1.0~5.0 cm和株高在1.0~1.5 m的划分为幼树。

#### 1.4 计算公式及方法

(1)地形位指数计算:

$$T = \lg[(E/\bar{E} + 1) \times (S/\bar{S} + 1)] \quad (1)$$

式中, $T$ 为地形位指数; $E, S$ 分别为研究区某点的高程和坡度; $\bar{E}, \bar{S}$ 分别为研究区的平均高程和平均坡度。地形位指数是综合反映高程和坡度的复合地形因子<sup>[24]</sup>,计算过程为:①应用 ArcGIS 软件,从 DEM 中提取研究范围内高程栅格图并获得每个栅格的高程 $E$ ;②利用 ArcGIS 坡度计算功能生成坡度栅格图并获得每个栅格的坡度 [ArcToolbox→3D Analyst 工具→栅格表面→坡度(双击)→输入栅格(DEM)→输出栅格(坡度图)];③计算研究范围内平均高程 $\bar{E}$ 和平均坡度 $\bar{S}$  [ArcToolbox→Spatial Analyst 工具→区域分析→分区统计];④按式(1)计算每个栅格的地形位指数并得到地形位指数图 [ArcToolbox→Spatial Analyst 工具→地图代数→栅格计算器]。本文通过 ArcGIS 软件栅格计算后,按自然断点法,将地形位指数分为9个等级。高程越高、坡度越陡的栅格地形位指数值越大,反之越小。地形位指数常被引入植被覆盖评价、生态风险评价中<sup>[24]</sup>,本研究引入该指标探讨不同地形位指数下的幼苗幼树更新特征。

(2)核密度估计:

$$\begin{aligned} f(x) &= \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left[\frac{1}{h}(x - x_i)\right] \\ &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{h} K\left[\frac{1}{h}(x - x_i)\right] \end{aligned} \quad (2)$$

式中, $f(x)$ 为核密度值; $n$ 为样本数; $h$ 为带宽,即点状要素对周边的最大影响距离,本文采用0.1 km 带宽; $(x - x_i)$ 为估值点 $x$ 到样本点 $x_i$ 的距离; $K(x, h)$ 为核函数<sup>[25]</sup>。核密度估计是反映要素点空间分布特征的方法,通过对研究区中每个要素点建立一个平滑的圆形表面,计算要素点之间的距离。本文将幼苗幼树作为要素点数据集,建立幼苗幼树的连续表面,表示幼苗幼树的空间分布疏密程度,按照核密度值大小划分幼苗幼树的疏密等级<sup>[32]</sup>。通

过 ArcGIS 软件核密度分析功能计算幼苗幼树核密度值,按照核密度值的大小划分核密度高低等级,共划为9个等级,并绘制核密度图以直观表达幼苗幼树空间集聚特征。核密度值越大的区域核密度等级越高,反映幼苗幼树空间集聚越明显,幼苗幼树空间分布密度越高;反之,幼苗幼树空间分布密度越低。

(3)K-means 聚类:

$$dis(X_i, C_j) = \sqrt{\sum_{i=1}^m (X_{it} - C_{jt})^2} \quad (3)$$

式中, $dis(X_i, C_j)$ 为每一个对象到每一个聚类中心的欧氏距离; $X$ 为数据样本,包含 $n$ 个对象,每个对象有 $m$ 个维度的属性, $X = \{X_1, X_2, X_3, \dots, X_n\}$ ,初始化 $k$ 个聚类中心为 $C = \{C_1, C_2, C_3, \dots, C_k\}$ 。

K-means 目标是将 $n$ 个对象依据相似性聚集到指定的 $k$ 个类簇中,且欧氏距离最小,通过多次迭代进行点的分配和类簇中心点的更新<sup>[22, 26]</sup>。K-means 聚类是一种迭代求解的聚类分析算法,本文通过 SPSS 软件依据坡向(半阳坡赋值1、半阴坡赋值2、阴坡赋值3)和地形位指数值,设置 $k=6$ 、迭代次数 $N=20$ 次,进行 K-means 聚类,幼苗实际迭代11次实现了收敛,幼树实际迭代13次实现了收敛,形成6类地形生境,即高地形位阴坡、低地形位阴坡、高地形位半阴坡、低地形位半阴坡、高地形位半阳坡、低地形位半阳坡,不同地形生境通过高程、坡度和坡向的不同组合,影响水分分配及幼苗幼树的生长。

(4)ArcGIS 提取坡位:

①打开 Arcmap;②导入 DEM 文件(分辨率为12.5 m);③利用 ArcGIS 坡向计算功能生成坡向栅格图 [ArcToolbox→3D Analyst 工具→栅格表面→坡向(双击)→输入栅格(DEM)→输出栅格(坡向图)];④利用 ArcGIS 重分类工具将坡向重分类为9个坡向 [Spatial Analyst 工具→重分类→重分类工具];⑤将重分类的坡向栅格图转化为坡向矢量图;⑥提取每个坡面的最大高程(demmax)和最小高程(demmin);⑦计算各坡面的坡位得到坡位图 [ArcToolbox→Spatial Analyst 工具→地图代数→栅格计算器],计算表达式为  $\text{Con}("dem" < (( "demmax" - "demmin")/3 + "demmin"), 3, \text{Con}("dem" > (( "demmax" - "demmin")/3 + "demmin") \& ("dem" < (( "demmax" - "demmin") *$

$2/3 + "demmin")$ ),  $2, Con( "dem" > = ( ( "demmax" - "demmin") * 2/3 + "demmin"), 1))$ ), 计算结果中, 1 代表上坡位、2 代表中坡位、3 代表下坡位; ⑧将坡位提取到幼苗幼树的属性表上。

## 2 结果与分析

### 2.1 祁连山青海云杉幼苗幼树在不同坡向、坡度、坡位的更新特征

#### (1) 幼苗幼树在不同坡向的更新特征

由表1、表2可见, 分布在阴坡、半阴坡、半阳坡的幼苗平均地径分别为0.903 cm、0.758 cm、0.926 cm, 平均株高分别为0.441 m、0.369 m、0.478 m, 平均冠幅分别为0.363 m、0.305 m、0.383 m, 平均密度分别为9785 株/hm<sup>2</sup>、11166 株/hm<sup>2</sup>、3250 株/hm<sup>2</sup>; 幼苗地径、株高、冠幅在坡向上由大到小依次为半阳坡、阴坡、半阴坡, 且半阳坡、阴坡与半阴坡差异显著; 幼苗平均密度在坡向上由大到小依次为半阴坡、阴坡、半阳坡, 且半阴坡、阴坡显著高于半阳坡。

分布在北坡、东北坡、西北坡、西坡的幼苗平均地径分别为0.903 cm、0.892 cm、0.687 cm、0.926 cm, 平均株高分别为0.441 m、0.429 m、0.336 m、0.478 m, 平均冠幅分别为0.363 m、0.368 m、0.272 m、0.383 m, 平均密度分别为9785 株/hm<sup>2</sup>、13350 株/hm<sup>2</sup>、10278 株/hm<sup>2</sup>、3250 株/hm<sup>2</sup>; 幼苗地径、株高、冠幅在坡向上由大到小依次为西坡、北坡、东北坡、西北坡, 且西坡、北坡、东北坡与西北坡差异显著; 幼苗地径在西坡、北坡、东北坡差异不显著, 幼苗株高在西坡、北坡与东北坡差异显著, 幼苗冠幅在西坡、北坡、东北坡差异不显著; 幼苗平均密度在坡向上由大到小依次为东北坡、西北坡、北坡、西坡, 且东北坡、西北坡、北坡显著高于西坡。

分布在阴坡、半阴坡、半阳坡的幼树平均地径分别为2.456 cm、2.338 cm、2.612 cm, 平均株高分别为1.520 m、1.488 m、1.574 m, 平均冠幅分别为0.989 m、0.940 m、0.965 m, 平均密度分别为3988 株/hm<sup>2</sup>、3271 株/hm<sup>2</sup>、1529 株/hm<sup>2</sup>; 幼树地径、株高、冠幅在坡向上由大到小依次为半阳坡、阴坡、半阴坡, 幼树地径半阳坡显著大于半阴坡, 幼树株高在三个坡向之间差异不显著, 幼树冠幅阴坡显著大于半阴坡、半阳坡与阴坡差异不显著; 幼树平均密度在坡向上由大到小依次为阴坡、半阴坡、半阳坡, 且阴坡、半阴坡显著高于

半阳坡。

分布在北坡、东北坡、西北坡、西坡的幼树平均地径分别为2.456 cm、2.345 cm、2.335 cm、2.612 cm, 平均株高分别为1.520 m、1.437 m、1.511 m、1.574 m, 平均冠幅分别为0.989 m、0.900 m、0.958 m、0.965 m, 平均密度分别为3988 株/hm<sup>2</sup>、3663 株/hm<sup>2</sup>、3118 株/hm<sup>2</sup>、1529 株/hm<sup>2</sup>; 幼树地径在坡向上由大到小依次为西坡、北坡、东北坡、西北坡, 且西坡显著大于西北坡, 幼树株高在坡向上由大到小依次为西坡、北坡、西北坡、东北坡, 且各个坡向差异不显著, 幼树冠幅在坡向上由大到小依次为北坡、西坡、西北坡、东北坡, 且北坡显著大于东北坡, 幼树平均密度在坡向上由大到小依次为北坡、东北坡、西北坡、西坡, 且北坡、东北坡、西北坡显著高于西坡。

#### (2) 幼苗幼树在不同坡度的更新特征

由表1、表2可见, 分布在坡度5°~10°、10°~15°、15°~20°、20°~25°的幼苗平均地径分别为0.901 cm、0.811 cm、0.752 cm、0.954 cm, 平均株高分别为0.464 m、0.409 m、0.345 m、0.464 m, 平均冠幅分别为0.353 m、0.330 m、0.301 m、0.387 m, 平均密度分别为5945 株/hm<sup>2</sup>、9739 株/hm<sup>2</sup>、11809 株/hm<sup>2</sup>、10850 株/hm<sup>2</sup>; 幼苗地径、株高、冠幅在坡度上由大到小依次为20°~25°、5°~10°、10°~15°、15°~20°, 且20°~25°、5°~10°、10°~15°与15°~20°差异显著, 20°~25°与10°~15°差异不显著, 5°~10°与10°~15°差异不显著; 幼苗平均密度在坡度上由大到小依次为15°~20°、20°~25°、10°~15°、5°~10°, 且各个坡度间差异不显著。

分布在坡度5°~10°、10°~15°、15°~20°、20°~25°的幼树平均地径分别为2.657 cm、2.342 cm、2.410 cm、2.054 cm, 平均株高分别为1.544 m、1.494 m、1.519 m、1.402 m, 平均冠幅分别为0.946 m、0.953 m、0.985 m、0.891 m, 平均密度分别为2838 株/hm<sup>2</sup>、3121 株/hm<sup>2</sup>、3638 株/hm<sup>2</sup>、3520 株/hm<sup>2</sup>; 幼树地径在坡度上由大到小依次为5°~10°、15°~20°、10°~15°、20°~25°, 且5°~10°显著大于15°~20°、10°~15°、20°~25°, 幼树株高在坡度上由大到小依次为5°~10°、15°~20°、10°~15°、20°~25°, 且各个坡度差异不显著, 幼树冠幅在坡度上由大到小依次为15°~20°、10°~15°、5°~10°、20°~25°, 且各个坡度差异不显著, 幼树平均密度在坡度上由大到小依次为15°~20°、20°~

25°、10°~15°、5°~10°,且各个坡度间差异不显著。  
(3)幼苗幼树在不同坡位的更新特征  
由表1、表2可见,分布在上坡位、中坡位、下坡位的幼苗平均地径分别为0.901 cm、0.792 cm、0.778 cm,平均株高分别为0.450 m、0.377 m、0.397 m,平均冠幅分别为0.377 m、0.319 m、0.304 m,平均密度分别为6400 株/hm<sup>2</sup>、11 617 株/hm<sup>2</sup>、9685 株/hm<sup>2</sup>;幼苗地径、株高、冠幅在坡位上由大到小依次为上坡位、中坡位、下坡位,上坡位与中坡位、下坡位差异显著,中坡位与下坡位

表 1 幼苗幼树在不同坡向、坡度、坡位的更新特征(密度)  
Tab 1 Density of seedlings/saplings regenerations at different slope aspect, slope gradient and slope position

地形因素		幼苗			幼树		
		样方/个	总株数/株	密度/(株/hm <sup>2</sup> )	样方/个	总株数/株	密度/(株/hm <sup>2</sup> )
坡向	阴坡	41	1003	9785 ± 11089a	34	339	3988 ± 5258a
	半阴坡	83	2317	11166 ± 17738a	68	556	3271 ± 3848a
	半阳坡	16	130	3250 ± 4195b	17	65	1529 ± 2041b
坡向	北	41	1003	9785 ± 11089ab	34	339	3988 ± 5258a
	东北	24	801	13350 ± 14403a	19	174	3663 ± 4007ab
	西北	59	1516	10278 ± 18969ab	49	382	3118 ± 3816ab
	西	16	130	3250 ± 4195b	17	65	1529 ± 2041b
坡度	5°~10°	22	327	5945 ± 5261a	21	149	2838 ± 4002a
	10°~15°	66	1607	9739 ± 12018a	61	476	3121 ± 4080a
	15°~20°	44	1299	11809 ± 20100a	32	291	3638 ± 4015a
	20°~25°	8	217	10850 ± 12840a	5	44	3520 ± 3315a
坡位	上坡位	35	560	6400 ± 9395b	31	250	3226 ± 4000a
	中坡位	72	2091	11617 ± 18098a	60	512	3413 ± 3960a
	下坡位	33	799	9685 ± 11320a	28	198	2829 ± 4970a

注:小写字母表示密度、地径、株高、冠幅在同一地形因子各类别或级别之间的差异显著性( $P < 0.05$ )。

表 2 幼苗幼树在不同坡向、坡度、坡位的更新特征(地径、株高、冠幅)  
Tab 2 Ground diameter, height and crown width of seedlings/saplings regenerations at different slope aspect, slope gradient and slope position

地形因素		幼苗			幼树		
		地径/cm	株高/m	冠幅/m	地径/cm	株高/m	冠幅/m
坡向	阴坡	0.903 ± 0.543a	0.441 ± 0.249a	0.363 ± 0.238a	2.456 ± 0.984ab	1.520 ± 0.463a	0.989 ± 0.347a
	半阴坡	0.758 ± 0.496b	0.369 ± 0.231b	0.305 ± 0.219b	2.338 ± 0.945b	1.488 ± 0.485a	0.940 ± 0.350b
	半阳坡	0.926 ± 0.532a	0.478 ± 0.235a	0.383 ± 0.230a	2.612 ± 0.934a	1.574 ± 0.539a	0.965 ± 0.371ab
坡向	北	0.903 ± 0.543a	0.441 ± 0.249ac	0.363 ± 0.238a	2.456 ± 0.984ab	1.520 ± 0.463a	0.989 ± 0.347a
	东北	0.892 ± 0.557a	0.429 ± 0.251a	0.368 ± 0.239a	2.345 ± 0.874ab	1.437 ± 0.411a	0.900 ± 0.338b
	西北	0.687 ± 0.444b	0.336 ± 0.212b	0.272 ± 0.200b	2.335 ± 0.975b	1.511 ± 0.514a	0.958 ± 0.354ab
	西	0.926 ± 0.532a	0.478 ± 0.235ac	0.383 ± 0.230a	2.612 ± 0.934a	1.574 ± 0.539a	0.965 ± 0.371ab
坡度	5°~10°	0.901 ± 0.538a	0.464 ± 0.237a	0.353 ± 0.218ac	2.657 ± 1.162a	1.544 ± 0.479a	0.946 ± 0.317a
	10°~15°	0.811 ± 0.504ab	0.409 ± 0.235ab	0.330 ± 0.222a	2.342 ± 0.912bc	1.494 ± 0.486a	0.953 ± 0.350a
	15°~20°	0.752 ± 0.514b	0.345 ± 0.236b	0.301 ± 0.232b	2.410 ± 0.923b	1.519 ± 0.483a	0.985 ± 0.366a
	20°~25°	0.954 ± 0.529a	0.464 ± 0.235a	0.387 ± 0.220ac	2.054 ± 0.753c	1.402 ± 0.409a	0.891 ± 0.357a
坡位	上坡位	0.901 ± 0.586a	0.450 ± 0.259a	0.377 ± 0.265a	2.343 ± 0.894a	1.530 ± 0.485a	1.007 ± 0.388a
	中坡位	0.792 ± 0.513b	0.377 ± 0.238b	0.319 ± 0.224b	2.390 ± 0.964a	1.517 ± 0.516a	0.942 ± 0.342b
	下坡位	0.778 ± 0.463b	0.397 ± 0.221b	0.304 ± 0.197b	2.490 ± 1.028a	1.443 ± 0.368a	0.943 ± 0.319ab

注:小写字母表示密度、地径、株高、冠幅在同一地形因子各类别或级别之间的差异显著性( $P < 0.05$ )。



差异不显著;幼苗平均密度在坡位上由大到小依次为中坡位、下坡位、上坡位,且中坡位、下坡位显著高于上坡位,中坡位与下坡位差异不显著。

分布在上坡位、中坡位、下坡位的幼树平均地径分别为 2.343 cm、2.390 cm、2.490 cm,平均株高分别为 1.530 m、1.517 m、1.443 m,平均冠幅分别为 1.007 m、0.942 m、0.943 m,平均密度分别为 3226 株/hm<sup>2</sup>、3413 株/hm<sup>2</sup>、2829 株/hm<sup>2</sup>;幼树地径、株高、冠幅在坡位上由大到小依次为上坡位、中坡位、下坡位,幼树地径、株高各坡位差异不显著,幼树冠幅上坡位与中坡位差异显著,幼树平均密度在坡位上由大到小依次为中坡位、上坡位、下坡位,且各个坡位间差异不显著。

## 2.2 祁连山青海云杉幼苗幼树在不同高程的更新特征

由图 2 可见,本研究将大样地高程划分为 9 个等级,分别为 2890 ~ 2880 m、2880 ~ 2870 m、2870 ~ 2860 m、2860 ~ 2850 m、2850 ~ 2840 m、2840 ~ 2830 m、2830 ~ 2820 m、2820 ~ 2810 m、2810 ~ 2800 m,每个高程等级对应的幼苗平均地径分别为 1.440 cm、1.026 cm、0.941 cm、0.811 cm、0.632 cm、1.023 cm、0.858 cm、0.726 cm、0.789 cm,平均株高分别为 0.492 m、0.482 m、0.445 m、0.429 m、0.288 m、0.507 m、0.417 m、0.356 m、0.411 m,平均冠幅分别为 0.501 m、0.511 m、0.382 m、0.331 m、0.241 m、0.419 m、0.349 m、0.300 m、0.291 m;幼苗地径在高程 2890 ~ 2880 m 最高、2850 ~ 2840 m 最低,株高在高程 2840 ~ 2830 m 最高、2850 ~ 2840 m

最低,冠幅在高程 2880 ~ 2870 m 最高、2850 ~ 2840 m 最低;上述各指标的最高值与最低值差异均显著;在高程 2890 ~ 2840 m 和 2840 ~ 2800 m 范围幼苗地径随高程降低有减小趋势,株高和冠幅也有相同的趋势。

每个高程范围对应的幼树平均地径分别为 3.056 cm、2.391 cm、2.398 cm、2.159 cm、2.506 cm、2.454 cm、2.463 cm、2.316 cm、2.531 cm,平均株高分别为 1.461 m、1.501 m、1.545 m、1.434 m、1.459 m、1.634 m、1.466 m、1.491 m、1.520 m,平均冠幅分别为 1.167 m、1.168 m、1.019 m、0.885 m、0.920 m、1.008 m、0.960 m、0.954 m、0.922 m;幼树地径在高程 2890 ~ 2880 m 最高、2860 ~ 2850 m 最低,株高在高程 2840 ~ 2830 m 最高、2860 ~ 2850 m 最低,冠幅在高程 2880 ~ 2870 m 最高、2860 ~ 2850 m 最低;上述各指标的最高值与最低值差异均显著;在高程 2890 ~ 2840 m 范围幼树地径随高程降低有减小趋势,株高和冠幅也有相同的趋势;在 2840 ~ 2800 m 范围,随高程降低幼树地径、株高、冠幅差异不显著。

## 2.3 祁连山青海云杉幼苗幼树在不同地形生境的更新特征

本研究通过 K-means 聚类将大样地分成 6 类地形生境,每一类地形生境的地形位指数和幼苗株数如下:高地形位阴坡,0.706 ~ 0.589、759 株;低地形位阴坡,0.589 ~ 0.478、244 株;高地形位半阴坡,0.720 ~ 0.607、1064 株;低地形位半阴坡,0.607 ~ 0.487、1253 株;高地形位半阳坡,0.691 ~ 0.606、37

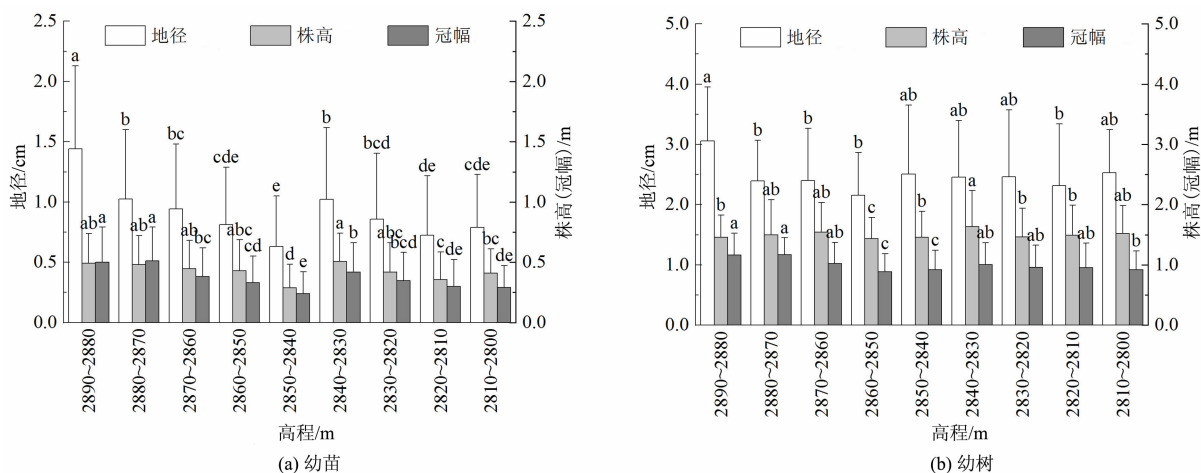


图 2 不同高程幼苗幼树更新特征图

Fig. 2 Characteristics map of seedlings/saplings regenerations at different altitudes

株;低地形位半阳坡,0.567~0.483、93 株。

由图 3 可见,以上 6 类地形生境对应的幼苗平均地径分别为 0.922 cm、0.844 cm、0.717 cm、0.793 cm、0.915 cm、0.931 cm,平均株高分别为 0.450 m、0.415 m、0.329 m、0.402 m、0.479 m、0.477 m,平均冠幅分别为 0.373 m、0.334 m、0.288 m、0.320 m、0.374 m、0.386 m;高地形位阴坡、低地形位半阳坡的幼苗地径显著大于低地形位阴坡、低地形位半阴坡、高地形位半阴坡;高地形位半阳坡、低地形位半阳坡、高地形位阴坡的幼苗株高显著大于低地形位阴坡、高地形位半阴坡、低地形位半阴坡;高地形位半阳坡、低地形位半阳坡、高地形位阴坡的幼苗冠幅显著大于高地形位半阴坡、低地形位半阴坡。

每一类地形生境的地形位指数和幼树株数如下:高地形位阴坡,0.706~0.589、251 株;低地形位阴坡,0.585~0.482、88 株;高地形位半阴坡,0.723~0.587、342 株;低地形位半阴坡,0.585~0.526、214 株;高地形位半阳坡,0.681~0.544、33 株;低地形位半阳坡,0.538~0.483、32 株。

以上 6 类地形生境对应的幼树平均地径分别为 2.311 cm、2.868 cm、2.296 cm、2.406 cm、2.696 cm、2.526 cm,平均株高分别为 1.500 m、1.579 m、1.521 m、1.435 m、1.488 m、1.662 m,平均冠幅分别为 0.956 m、1.083 m、0.944 m、0.933 m、1.036 m、0.893 m;低地形位阴坡的幼树地径显著大于高地形位阴坡、高地形位半阴坡,但与高地形位半阳坡、低地形位半阳坡差异不显著;低地形位半阳坡的幼树

株高显著大于低地形位半阴坡,但与低地形位阴坡、高地形位半阴坡差异不显著;低地形位阴坡的幼树冠幅显著大于高地形位阴坡、高地形位半阴坡、低地形位半阴坡、低地形位半阳坡,但与高地形位半阳坡差异不显著。

幼苗密度在不同地形生境上由大到小依次为高地形位阴坡、高地形位半阴坡、低地形位半阴坡、低地形位阴坡、高地形位半阳坡、低地形位半阳坡,幼树密度在不同地形生境上由大到小依次为高地形位阴坡、低地形位阴坡、高地形位半阴坡、低地形位半阴坡、低地形位半阳坡、高地形位半阳坡。

## 2.4 祁连山青海云杉幼苗幼树的空间分布特征

### (1) 幼苗幼树的核密度空间分布特征

按照核密度值将核密度由高到低划分为 9 个等级,高核密度一级为最高,低核密度三级为最低(图 4);核密度等级越高,空间集聚性越强。由图 4 可见,幼苗幼树具有明显的空间集聚特征。幼苗在东南角集聚密度最高,其次是东北角和西南角;幼树也在东南角集聚密度最高,其次是东北角。

### (2) 不同高程幼苗幼树的空间分布特征

由图 5 可见,幼苗密度可以分为三组,在高程 2870~2860 m、2860~2850 m、2850~2840 m、2810~2800 m 的密度较高,分别为 17 244 株/hm<sup>2</sup>、12 376 株/hm<sup>2</sup>、14 526 株/hm<sup>2</sup>、12 000 株/hm<sup>2</sup>;在高程 2830~2820 m、2820~2810 m 的密度中等,分别为 8412 株/hm<sup>2</sup>、7931 株/hm<sup>2</sup>;在高程 2890~2880 m、2880~2870 m、2840~2830 m 的密度较低,分别为 3600 株/hm<sup>2</sup>、3371 株/hm<sup>2</sup>、4522 株/hm<sup>2</sup>;幼

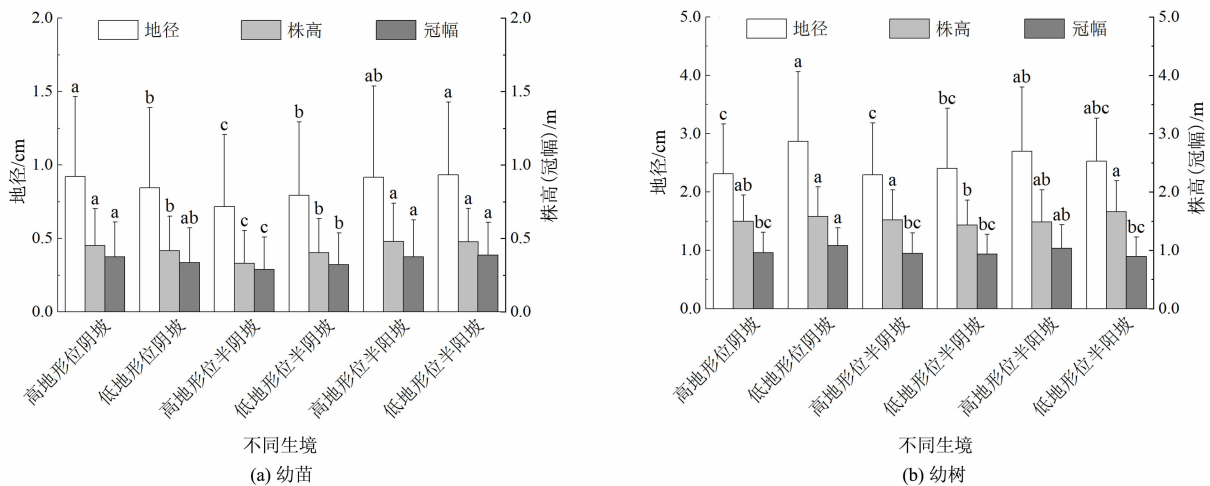


图 3 不同生境幼苗幼树更新特征图

Fig. 3 Characteristics map of seedlings/saplings regenerations at different habitats



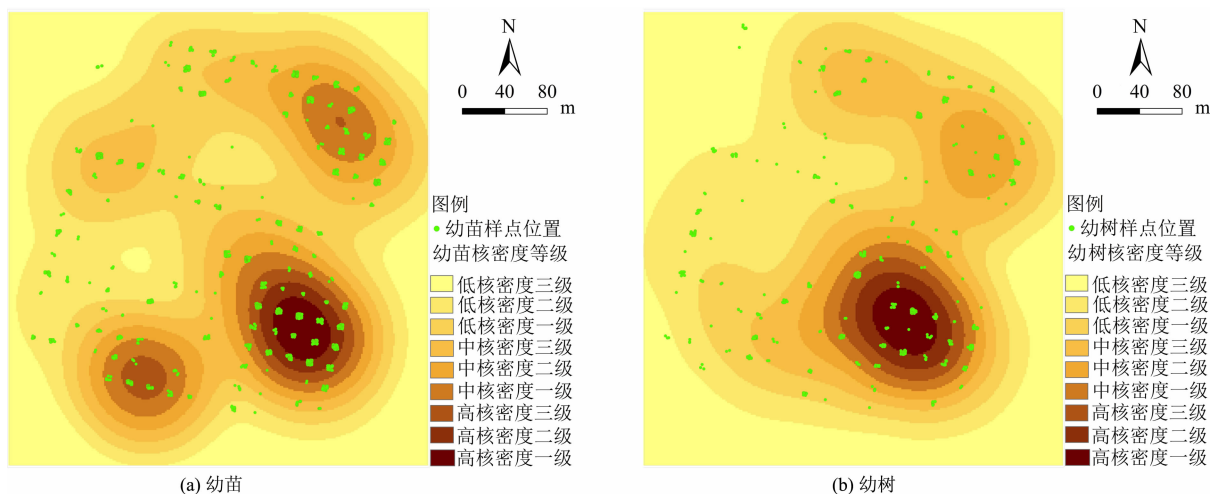


图4 幼苗幼树核密度图

Fig. 4 Kernel density map of seedlings/saplings

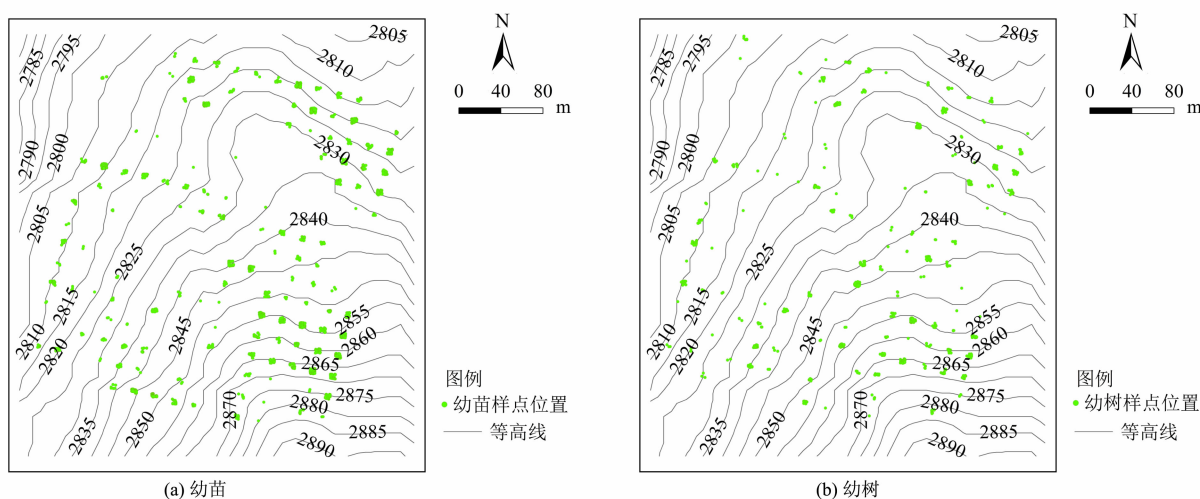


图5 不同高程幼苗幼树空间分布图

Fig. 5 Spatial distribution map of seedlings/saplings at different elevation

苗平均密度在组内差异不显著,组间只有较高组与较低组之间差异显著。

幼树密度分为三组,在高程 2890 ~ 2880 m、2870 ~ 2860 m、2860 ~ 2850 m 的密度较高,分别为 5600 株/hm<sup>2</sup>、5120 株/hm<sup>2</sup>、4971 株/hm<sup>2</sup>;在高程 2850 ~ 2840 m、2840 ~ 2830 m、2830 ~ 2820 m、2810 ~ 2800 m 的密度中等,分别为 3375 株/hm<sup>2</sup>、3181 株/hm<sup>2</sup>、2672 株/hm<sup>2</sup>、2444 株/hm<sup>2</sup>;在高程 2880 ~ 2870 m、2820 ~ 2810 m 的密度较低,分别为 1200 株/hm<sup>2</sup>、1850 株/hm<sup>2</sup>;幼树平均密度在组内差异不显著,组间只有较高组与较低组之间差异显著。

### (3) 不同坡向幼苗幼树的空间分布特征

由图 6 可见,分布在西北向的幼苗样方数、株数

分别为 59 个、1516 株,北向分别为 41 个、1003 株,东北向分别为 24 个、801 株,西向分别为 16 个、130 株;幼苗密度东北向最高、西北向和北向次之、西向最低,东北向与西向之间差异显著。西北向的幼树样方数、株数分别为 49 个、382 株,北向分别为 34 个、339 株,东北向位分别为 19 个、174 株,西向分别为 17 个、65 株;幼树密度北向最高、东北向和西北向次之、西向最低,北向与西向之间差异显著。

### (4) 不同坡度幼苗幼树的空间分布特征

由图 7 可见,幼苗样方数、株数分别在坡度 10° ~ 15° 为 66 个、1607 株,15° ~ 20° 为 44 个、1299 株,5° ~ 10° 为 22 个、327 株,20° ~ 25° 为 8 个、217 株。幼树样方数、株数分别在坡度 10° ~ 15° 为

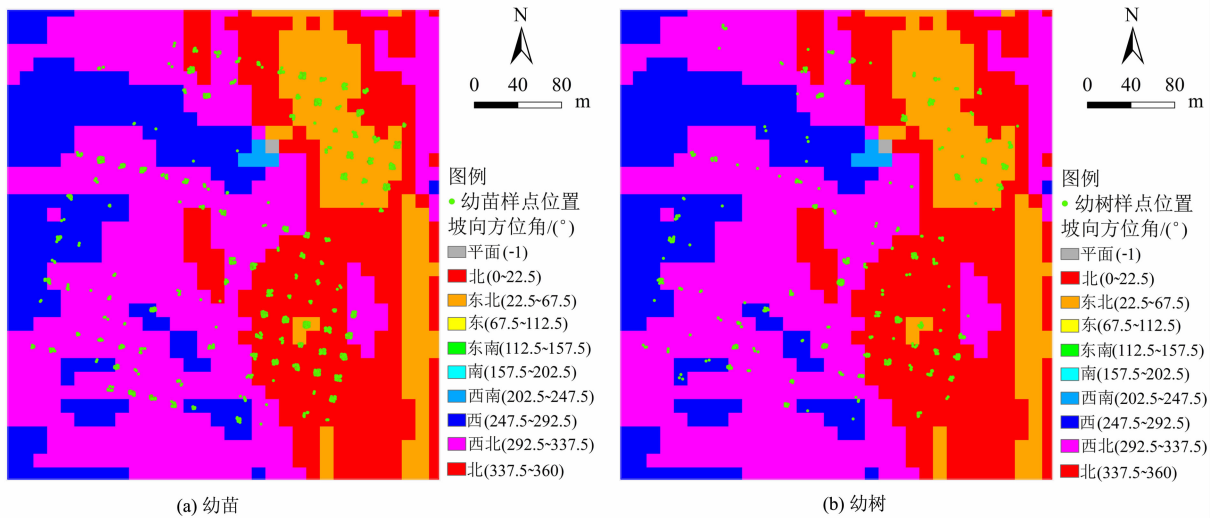


图6 不同坡向幼苗幼树空间分布图

Fig. 6 Spatial distribution map of seedlings/saplings at different slope aspect

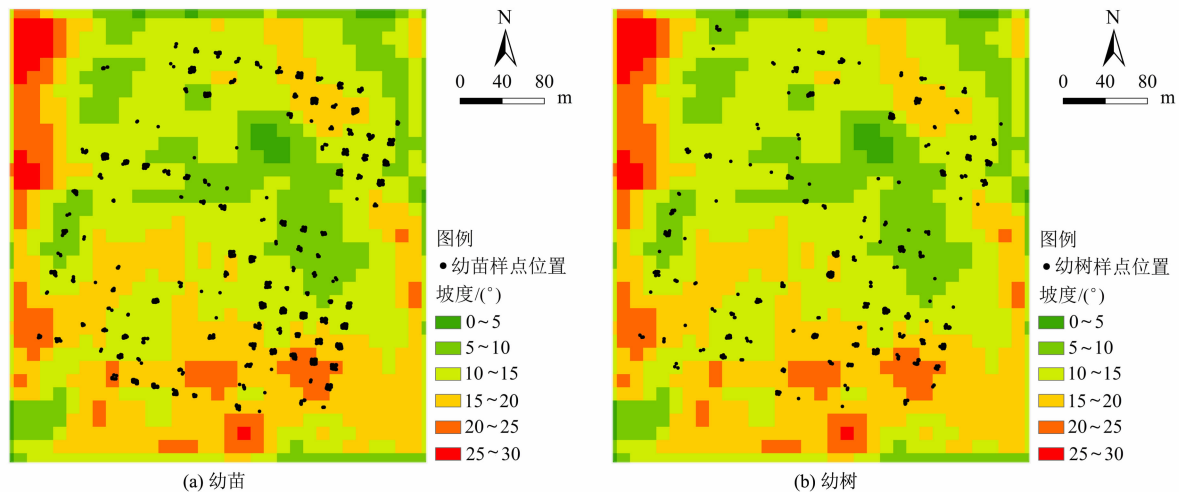


图7 不同坡度幼苗幼树空间分布图

Fig. 7 Spatial distribution map of seedlings/saplings at different slope gradient

61个、476株,  $15^{\circ} \sim 20^{\circ}$  为32个、291株,  $5^{\circ} \sim 10^{\circ}$  为21个、149株,  $20^{\circ} \sim 25^{\circ}$  为5个、44株。幼苗和幼树密度在各个坡度之间差异均不显著。

#### (5) 不同坡位幼苗幼树的空间分布特征

由图8可见,幼苗样方数、株数分别在中坡位为72个、2091株,下坡位为33个、799株,上坡位为35个、560株;幼苗密度在中坡位、下坡位显著高于上坡位。幼树样方数、株数分别在中坡位为60个、512株,上坡位为31个、250株,下坡位为28个、198株;幼树密度在各坡位之间差异不显著。

#### (6) 不同地形位幼苗幼树的空间分布特征

由图9可见,幼苗幼树在地形位分布上具有空间

差异特征,地形位指数分为2~8级,分别为0.456~0.511、0.511~0.550、0.551~0.585、0.585~0.617、0.617~0.648、0.648~0.682、0.682~0.732,各级地形位指数对应的幼苗样方数、株数分别为12个、151株,23个、405株,28个、654株,38个、865株,29个、494株,19个、625株,12个、256株;幼苗密度分别为5033株/hm<sup>2</sup>、7043株/hm<sup>2</sup>、9343株/hm<sup>2</sup>、9105株/hm<sup>2</sup>、6814株/hm<sup>2</sup>、13158株/hm<sup>2</sup>、8533株/hm<sup>2</sup>。以上对应地形位指数等级,幼树样方数、株数分别为9个、72株,24个、138株,22个、136株,33个、271株,18个、191株,14个、96株,9个、56株;幼树密度分别为3156株/hm<sup>2</sup>、

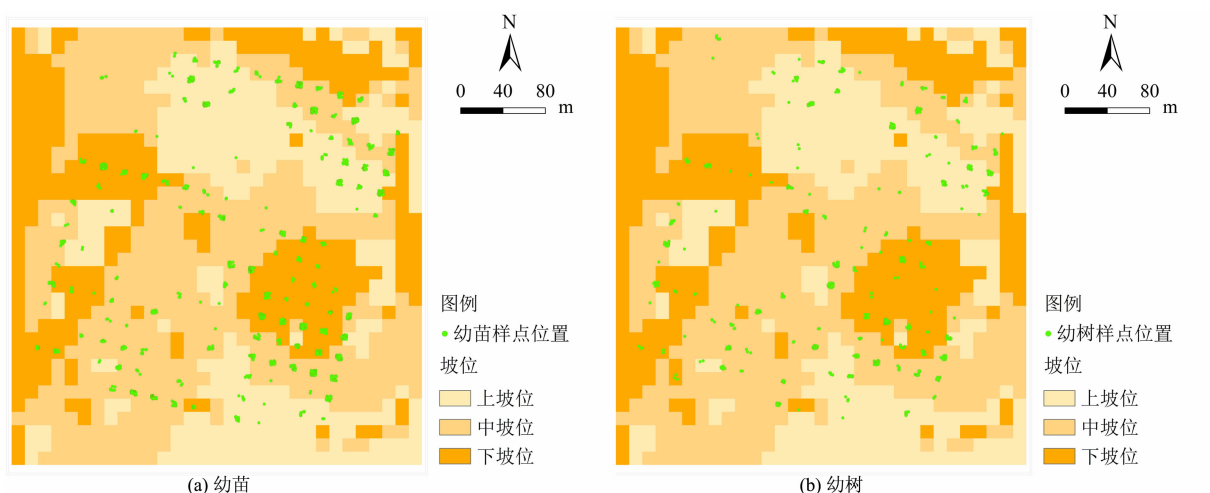


图8 不同坡位幼苗幼树空间分布图

Fig. 8 Spatial distribution map of seedlings/saplings at different slope position

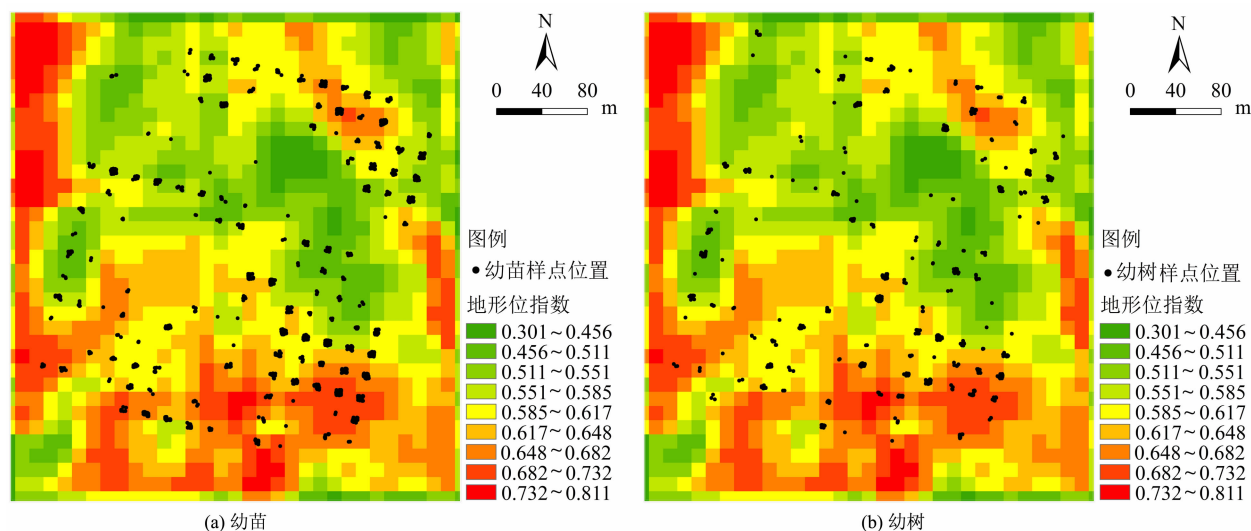


图9 不同地形位幼苗幼树空间分布图

Fig. 9 Spatial distribution map of seedlings/saplings at different topographic position

2300 株/hm<sup>2</sup>、2473 株/hm<sup>2</sup>、3285 株/hm<sup>2</sup>、4244 株/hm<sup>2</sup>、2743 株/hm<sup>2</sup>、4978 株/hm<sup>2</sup>。幼苗幼树密度在各地形位指数等级之间差异均不显著。

## 2.5 祁连山青海云杉幼苗幼树更新指标均值及地形因子均值的相关性分析

由图 10 可见,幼苗平均密度与平均地径、株高、冠幅、南北冠幅、东西冠幅呈极显著负相关,与地形因子呈正相关但不显著;幼苗平均地径、株高、冠幅、南北冠幅、东西冠幅两两之间均呈极显著正相关;幼苗平均地径、株高、冠幅、南北冠幅、东西冠幅与坡位呈显著或极显著负相关,与高程呈显著正相关,与坡度、地形位指数呈正相关性但不显著。

幼树平均密度与平均地径、冠幅、南北冠幅、东

西冠幅呈显著负相关,与株高相关性不显著,与高程呈显著正相关、与其他地形因子相关性不显著;幼树平均地径、株高、冠幅、南北冠幅、东西冠幅两两之间均呈极显著正相关;幼树平均地径、冠幅、东西冠幅与坡度呈显著负相关;幼树平均地径与地形位指数呈显著负相关。

## 3 讨论

### 3.1 幼苗幼树更新特征具有明显的地形差异性

(1) 幼苗幼树平均密度为阴坡高于阳坡。本研究表明,幼苗幼树平均密度为半阴坡、阴坡显著高于半阳坡。究其原因,坡向决定山地的热量状况,进一

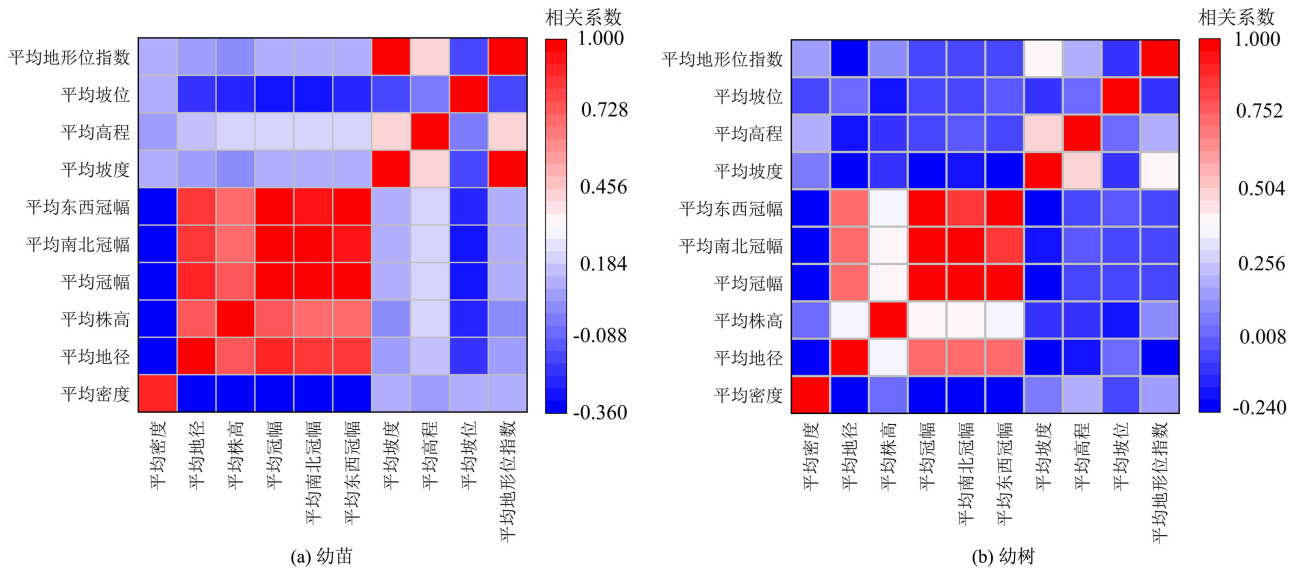


图 10 幼苗幼树更新特征均值及地形因子均值的相关性热图

Fig. 10 Correlation heat map of the mean of characteristics of seedlings/saplings regeneration and the mean of topographic factors

步影响温度、土壤水分、养分和微生物,从而影响幼苗幼树生长发育。在干旱地区水分是影响植物生长的决定性因素。阴坡的土壤含水率、土壤养分含量、土壤微生物活性较阳坡高,阴坡更加适合青海云杉生长发育<sup>[1, 13, 15]</sup>。阴坡土壤含水率高于阳坡的原因,是由于阴坡日照时间比阳坡短,获得的太阳辐射总量比阳坡小,温度比阳坡低,土壤蒸发量比阳坡小。因此,坡向成为青海云杉天然更新的主导因子<sup>[33]</sup>。汤雨宁<sup>[33]</sup>研究油松天然更新,发现幼苗幼树的平均密度由大到小依次为阴坡、半阴坡、半阳坡。赵传燕、高贤良<sup>[16, 29]</sup>认为不同坡向的光照、土壤水分和养分差异较大,青海云杉林对坡向有较高的依赖性,阴坡相比半阳坡通常较为阴凉,温度较低,适合喜阴、耐寒的树种生长,青海云杉适应阴坡分布,因此青海云杉林平均密度在阴坡和半阴坡分布占绝对优势。本研究结果与上述研究结果相同。

(2) 幼苗幼树平均密度为北向坡高于西坡,幼苗密度高于幼树密度。本研究结果表明,幼苗平均密度由高到低依次为东北坡、西北坡、北坡、西坡,幼树平均密度由高到低依次为北坡、东北坡、西北坡、西坡。北坡为阴坡,东北坡和西北坡为半阴坡,西坡为半阳坡。由于青海云杉是喜阴树种,在北向坡(北坡、东北坡和西北坡)分布较多,在西坡分布较少。幼苗平均密度为 13 350 ~ 3250 株/hm<sup>2</sup>,幼树平均密度为 3988 ~ 1529 株/hm<sup>2</sup>,幼苗平均密度高于幼

树平均密度。杨道虎<sup>[21]</sup>等的研究表明,大野口流域青海云杉动态监测大样地更新苗平均密度为 5762 株/hm<sup>2</sup>。芦雄英<sup>[3]</sup>等的研究表明,露沟流域青海云杉林幼苗幼树密度在坡向上由大到小依次为北坡、东北坡、西北坡,且各个坡向之间差异显著,幼苗密度为 237 656 ~ 10 635 株/hm<sup>2</sup>,幼树密度为 1 193 400 ~ 45 375 株/hm<sup>2</sup>,幼树平均密度高于幼苗平均密度。本研究幼苗幼树平均密度与杨道虎研究结果在一个数量级,而与芦雄英<sup>[3]</sup>等的区域为结果不在一个数量级上,究其原因:第一,样地大小及尺度不同,本研究是一个大样地(340 m × 300 m)内的 255 个样方,是大样地尺度,芦雄英<sup>[3]</sup>等的研究区域为海拔梯度上 15 个固定样地(20 m × 20 m、20 m × 36 m)256 个样方,是小样方尺度;第二,研究样本数不同,本研究中幼苗 3450 株、幼树 960 株,幼苗数量远大于幼树数量,幼苗数量/幼树数量比为 3.59:1,更新苗以幼苗为主;芦雄英<sup>[3]</sup>等的研究中幼苗 111 株、幼树 548 株,幼树数量远大于幼苗数量,幼苗数量/幼树数量比为 0.20:1,更新苗以幼树为主。

(3) 坡度较大区域,幼苗幼树平均密度较高。本研究结果表明,幼苗幼树平均密度在坡度 15° ~ 20°、20° ~ 25° 较高,10° ~ 15°、5° ~ 10° 较低,且各个坡度间差异不显著。本研究大样地坡度较平缓,土层较厚,土壤受侵蚀较小,土壤水分容易储存,适度的坡度有利于水分的自然流动,使土壤保持适当湿

度,促进青海云杉幼苗幼树生长,整体上青海云杉幼苗和幼树生长在坡度适中的区域。芦雄英<sup>[3]</sup>等的研究表明,祁连山排露沟流域幼苗幼树平均密度在坡度 $26^{\circ} \sim 35^{\circ}$ 最高, $16^{\circ} \sim 25^{\circ}$ 次之,大于 $36^{\circ}$ 较低,且各个坡度间差异显著。本研究与芦雄英<sup>[3]</sup>等的结论基本一致。

(4)幼苗幼树平均密度为中坡位最大。本研究结果表明发现,幼苗平均密度中坡位、下坡位显著高于上坡位,幼树平均密度中坡位最高,且各个坡位间差异不显著。在重力及淋溶作用下,土壤水分和养分随水流向下移动,导致不同坡位土壤水分和土壤养分有差异,影响幼苗幼树的分布与生长发育,中坡位的土壤水分可能更适合幼苗幼树生长<sup>[29,34]</sup>,因此幼苗幼树在中坡位平均密度最高。芦雄英<sup>[3]</sup>等的研究表明,幼苗幼树平均密度由大到小依次为中坡位、下坡位、上坡位,且各个坡位间差异显著。本研究与芦雄英<sup>[3]</sup>等的结论基本一致。

(5)高程越低,幼苗幼树平均密度越大。本研究结果表明,幼苗幼树随着高程增大,平均密度减小,平均地径、株高、冠幅增大。芦雄英<sup>[3]</sup>等的研究表明,随着海拔高度的提升,更新苗密度减少,高海拔陡坡生境的更新苗密度、冠幅、基径、株高较低;高泽威<sup>[15]</sup>研究结论为随着海拔升高,侧柏林平均胸径、树高、林分密度逐渐减小。本研究结果与芦雄英<sup>[3]</sup>等、高泽威<sup>[15]</sup>等的结论不完全一致。究其原因,芦雄英<sup>[3]</sup>等的研究在海拔梯度上最高海拔3200 m与最低海拔2684 m之间差516 m,海拔变化较大。高泽威<sup>[15]</sup>等的研究区域最高海拔1000 m与最低海拔200 m之间差800 m,海拔变化更大。在海拔差异比较大的研究中,随着海拔增加,更新苗平均胸径、树高、林分密度逐渐减小,原因是海拔差异影响水热再次分配,水分、温度分布的差异则影响更新苗生长差异。更新苗的生长在低海拔主要受降水量影响,高海拔主要受温度影响。随着海拔升高,更新苗生长的影响因素由降水变为积温,海拔越高温度越低,导致更新指标变小<sup>[3, 15, 34]</sup>。本研究大样地最高高程为2890 m,最低高程为2800 m,二者之间只差90 m,高程变化很小。在低高程区域,幼苗幼树平均密度较高,是由于幼苗幼树对光照、土壤水分和养分的竞争致使其平均地径、株高、冠幅变小。也进一步说明,在大样地尺度下,由于高程变幅小,高程不是影响幼苗幼树地径、株高、冠幅的决定因子,而密度

对地径、株高、冠幅的影响比高程的影响更大。

### 3.2 幼苗幼树空间集聚特征明显

用核密度图表达空间集聚,可更直观地看出幼苗比幼树空间集聚性更强。在大样地尺度上,幼苗幼树的空间分布具有聚集分布特征,而且部分微地形因子的变化对平均密度有显著影响。小生境的异质性导致幼苗幼树空间分布不均匀<sup>[22, 31]</sup>。这种空间聚集分布特征,一方面由生物学特性决定,成年树产生的具有种翅的青海云杉种子在风力、重力和流水的共同作用下传播,主要散落在母树周围一定范围内,种子萌发后的幼苗幼树多呈现聚集状态,大都集中分布于林窗之下,自然灾害形成的林窗提供了幼苗幼树大量繁殖和良好生长的条件;另一方面,幼苗幼树个体较小,对光、热、土壤水和土壤养分的竞争力较弱,通过高度的聚集模式和正相互作用营造良好的微环境,以提高其竞争能力并抵御外界环境风险,提高存活率<sup>[22, 30-31]</sup>。

### 3.3 幼苗幼树更新特征具有显著相关性

(1)幼苗幼树平均密度与平均地径、株高、冠幅的相关性。本研究表明,幼苗平均密度与平均地径、株高、冠幅呈极显著负相关,相关系数分别为 $-0.356$ 、 $-0.356$ 、 $-0.343$ ;幼树平均密度与平均地径、冠幅呈显著负相关,相关系数分别为 $-0.227$ 、 $-0.224$ ;幼树平均密度与平均株高呈正相关但不显著,相关系数为 $0.047$ 。根据负密度制约理论,当种群密度增加时,个体之间会争夺有限的资源(空间、水分、养分、光照等),这种竞争会导致部分个体生长受限,相比幼树这种相互制约在幼苗中更显著<sup>[30-31]</sup>。幼苗幼树密度与地径、株高、冠幅呈负相关,说明在大样地尺度下,幼苗幼树密度越大,个体之间对水分、养分、空气、热量的竞争越激烈,使得个体生长受到限制,导致地径、株高、冠幅也越小。通过相关系数的大小分析,发现青海云杉个体越小负密度制约越明显。生态学家一直关注和探讨负密度制约假说<sup>[35]</sup>,祁连山高寒山地青海云杉动态监测大样地的建立与每木调查分析,也为探索幼苗幼树阶段密度制约效应提供了实证。本研究结果与Hyatt<sup>[30]</sup>、赵长兴<sup>[31]</sup>等的研究结果一致。

(2)幼苗幼树平均地径、株高、冠幅之间的相关性。本研究表明,幼苗幼树的平均地径、株高、冠幅之间呈极显著正相关,幼苗平均地径与株高、冠幅相关系数分别为 $0.753$ 、 $0.866$ ,株高与冠幅相关系数



为0.738;幼树平均地径与株高、冠幅相关系数分别为0.376、0.746,平均株高与冠幅相关系数为0.386。通过相关系数的大小的分析,表明青海云杉个体越小,地径、株高、冠幅之间的相关性越高。

(3)幼苗幼树更新特征与地形因子的相关性。本研究表明,幼苗平均地径、株高、冠幅与坡位呈显著或极显著负相关,相关系数分别为-0.194、-0.226、-0.283;与高程呈不显著或显著正相关,相关系数分别为0.143、0.214、0.214;与坡度、地形位指数呈正相关性但不显著。幼树平均地径、冠幅与坡度呈显著负相关,相关系数分别为-0.235、-0.204。幼树平均地径与地形位指数呈显著负相关,相关系数为-0.207。

## 4 结论

(1)幼苗幼树的密度为北向坡(东北坡、西北坡、北坡)高于西坡,阴坡高于阳坡;地径、株高、冠幅为西坡高于北向坡(北坡、东北坡、西北坡),阳坡高于阴坡;坡度较大区域幼苗幼树的密度高,地径、株高、冠幅小;幼苗幼树的密度为中坡位最大,地径、株高、冠幅为上坡位最大;高程越低,幼苗幼树的密度越大,地径、株高、冠幅越小。

(2)幼苗幼树的密度为高地形位阴坡、高地形位半阴坡、低地形位半阴坡较大,地径、株高、冠幅为高地形位半阳坡较大;幼苗幼树为东南角集聚密度最高、其次是东北角,幼苗比幼树空间集聚性更强。在同一地形因子下幼苗密度均高于幼树密度。在大样地尺度下,密度对幼苗幼树生长的影响比高程的影响更大。密度在各坡度、各坡位、各地形位之间差异不显著。

(3)幼苗幼树的地径、株高、冠幅与密度呈显著负相关,而且幼苗比幼树负密度制约更明显;地径、株高、冠幅之间呈极显著正相关,地径、株高、冠幅之间的相关性幼苗比幼树更高;幼苗幼树更新特征与部分地形因子显著相关。

(4)幼苗平均密度远高于幼树平均密度,较高的幼苗幼树密度比有利于大野口流域青海云杉林天然更新和森林生态系统的动态稳定。

## 参考文献(References)

[1] 王娜,郝清玉.森林天然更新影响因子研究进展[J].广东农业

- 科学, 2012, **39**(6): 67-70. [WANG Na, HAO Qinyu. Research progress on influence factors of forest natural regeneration [J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2012, **39**(6): 67-70] DOI: 10.16768/j.issn.1004-874x.2012.06.065
- [2] 肖晨,田栋元,马榕,等.兴安落叶松天然林更新数量相容性预测模型[J].应用生态学报, 2023, **34**(9): 2345-2354. [XIAO Chen, TIAN Dongyuan, MA Rong, et al. Compatibility predictive model for regeneration quantities of *Larix gmelinii* natural forest in Daxing'anling Mountains, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023, **34**(9): 2345-2354] DOI: 10.13287/j.1001-9332.202309.001
- [3] 芦雄英,刘贤德,马瑞,等.祁连山排露沟流域青海云杉林更新特征对地形因子的响应[J].干旱区地理, 2023, **46**(4): 604-613. [LU Xiongying, LIU Xiande, MA Rui, et al. Response of *Picea crassifolia* forest regeneration characteristics to topographic factors in Pailugou watershed of Qilian Mountains [J]. Arid Land Geography, 2023, **46**(4): 604-613] DOI: 10.12118/j.issn.1000-6060.2022.350
- [4] MOKTAN M R, GRATZER G, RICHARDS W H, et al. Regeneration of mixed conifer forests under group tree selection harvest management in western Bhutan Himalayas [J]. Forest Ecology and Management, 2009, **257**: 2121-2132. DOI: 10.1016/j.foreco.2009.02.022
- [5] 葛晓雯,朱教君,卢德亮,等.红松天然更新幼苗、幼树年龄校正及生长阶段划分[J].生态学报, 2022, **41**(3): 417-426. [GE Xiaowen, ZHU Jiaojun, LU Deliang, et al. Age calibration and growth stage division for naturally regenerated seedlings and saplings of *Pinus koraiensis* Sieb. et Zucc [J]. Chinese Journal of Ecology, 2022, **41**(3): 417-426] DOI: 10.13292/j.1000-4890.202202.016
- [6] TINYA F, MÁRIALIGETI S, BIDLÓ A, et al. Environmental drivers of the forest regeneration in temperate mixed forests [J]. Forest Ecology and Management, 2019, **433**: 720-728. DOI: 10.1016/j.foreco.2018.11.051
- [7] ŠERÁ B. Tree regeneration by seeds in natural forests [J]. Forests, 2021, **12**: 1346-1349. DOI: 10.3390/f12101346
- [8] CANTO'N Y, DEL BARRIO G, SOLE'-BENET A, et al. Topographic controls on the spatial distribution of ground cover in the Tabernas badlands of SE Spain [J]. Catena, 2004, **55**(3): 341-365. DOI: 10.1016/S0341-8162(03)00108-5
- [9] 刘海丰,桑卫国,薛达元.暖温带森林优势种群的地形生境变异性[J].生态学报, 2013, **32**(4): 795-801. [LIU Haifeng, SANG Weiguo, XUE Dayuan. Topographical habitat variability of dominant species populations in a warm temperate forest [J]. Chinese Journal of Ecology, 2013, **32**(4): 795-801] DOI: 10.13292/j.1000-4890.2013.0181
- [10] 王博.基于立地因子影响的柠条生物量动态模型研究[D].银川:宁夏大学, 2023: 3-4. [WANG Bo. Dynamic model study of *Caragana korshinskii* biomass based on the influence of ground



- factors [D]. Yinchuan: Ningxia University, 2023: 3–4] DOI: 10.27257/d.cnki.gnxc.2023.000664
- [11] 董丽, 郭东罡, 段毅豪, 等. 灵空山辽东栎—油松林更新空间分布格局及其与地形因子的关系[J]. 应用与环境生物学报, 2013, **19**(6): 914–921. [DONG Li, GUO Donggang, DUAN Yihao, et al. Spatial distribution patterns of regenerating *Quercus wutaishanica*–*Pinus tabulaeformis* in relation to topographic factors in the Lingkong Mountain [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2013, **19**(6): 914–921] DOI: 10.3724/SP.J.1145.2013.00914
- [12] 黄朗, 朱光玉, 康立, 等. 湖南栎类天然次生林幼树更新特征及影响因素[J]. 生态学报, 2019, **39**(13): 4900–4909. [HUANG Lang, ZHU Guangyu, KANG Li, et al. Regeneration characteristics and related factors affecting saplings in *Quercus* spp. natural secondary forests in Hunan Province, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, **39**(13): 4900–4909] DOI: 10.5846/stxb201806061269
- [13] 赵家豪, 孙晓丹, 叶钰倩, 等. 微地形对江西武夷山南方铁杉针阔混交林幼树更新的影响[J]. 生态学报, 2022, **42**(6): 2357–2367. [ZHAO Jiahao, SUN Xiaodan, YE Yuchan, et al. Effect of micro-topography on the saplings regeneration in the coniferous (*Tsugachinensis* var. *tchekiangensis*) and broadleaf mixed forest in the Wuyishan, Jiangxi Province [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, **42**(6): 2357–2367] DOI: 10.5846/stxb202012173207
- [14] 贾呈鑫卓, 朱宇昊, 龙元丽, 等. 地形因子对金佛山方竹天然林幼竹生长的影响[J]. 世界竹藤通讯, 2023, **21**(4): 65–69. [JIA Chengxinzhao, ZHU Yuhao, LONG Yuanli, et al. Influence of terrain factors on young bamboo growth in natural *Chimonobabusa utilis* forest [J]. World Bamboo and Rattan, 2023, **21**(4): 65–69] DOI: 10.12168/sjztx.2023.06.20.001
- [15] 高泽威, 马晓云, 汤素青, 等. 地形因子对河北省侧柏林生长的影响[J]. 东北林业大学学报, 2024, **52**(8): 43–47. [GAO Zewei, MA Xiaoyun, TANG Suqing, et al. Effects of terrain factors on the growth of *Platycladus orientalis* forest in Hebei Province [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2024, **52**(8): 43–47] DOI: 10.13759/j.cnki.dlxb.2024.08.007
- [16] 赵传燕, 别强, 彭焕华. 祁连山北坡青海云杉林生境特征分析[J]. 地理学报, 2010, **65**(1): 113–121. [ZHAO Chuanyan, BIE Qiang, PENG Huanhua. Analysis of the niche space of *Picea crassifolia* on the northern slope of Qilian Mountains [J]. Acta Geographica Sinica, 2010, **65**(1): 113–121]
- [17] 刘济萌, 刘贤德, 马瑞, 等. 祁连山排露沟流域青海云杉天然更新与土壤水热的关系[J]. 生态学报, 2023, **43**(23): 9891–9899. [LIU Jimeng, LIU Xiande, MA Rui, et al. Relationship between natural regeneration of *Picea crassifolia* and soil moisture and temperature in Pailugou watershed of Qilian Mountains [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, **43**(23): 9891–9899] DOI: 10.20103/j.stxb.202209132611
- [18] 刘济萌, 刘贤德, 马瑞, 等. 祁连山排露沟流域青海云杉天然更新空间关联性研究[J]. 干旱区资源与环境, 2024, **38**(1): 161–170. [LIU Jimeng, LIU Xiande, MA Rui, et al. Spatial association of natural regeneration of *Picea crassifolia* in Pailugou watershed, Qilian Mountains [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2024, **38**(1): 161–170] DOI: 10.13448/j.cnki.jalre.2024.018
- [19] 赵维俊, 牛赞, 杜军, 等. 祁连山青海云杉林叶面积指数的空间异质性[J]. 山地学报, 2024, **42**(3): 312–319. [ZHAO Weijun, NIU Yun, DU Jun, et al. Spatial heterogeneity of leaf area index of *Picea crassifolia* forest in the Qilian Mountains, China [J]. Mountain Research, 2024, **42**(3): 312–319] DOI: 10.16089/j.cnki.1008–2786.000825
- [20] 赵维俊, 刘贤德, 敬文茂, 等. 祁连山青海云杉林群落结构的异质性[J]. 应用生态学报, 2015, **26**(9): 2591–2599. [ZHAO Weijun, LIU Xiande, JING Wenmao, et al. Spatial heterogeneity of community structure of *Picea crassifolia* forest in Qilian Mountains, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, **26**(9): 2591–2599] DOI: 10.13287/j.1001–9332.20150630.006
- [21] 杨道虎, 赵维俊, 闫春鸣, 等. 祁连山青海云杉林动态监测样地更新苗和成树格局的空间变异[J]. 中南林业科技大学学报, 2022, **42**(7): 85–95. [YANG Xiaohu, ZHAO Weijun, YAN Chunming, et al. Spatial variation of regeneration patterns in a dynamic monitoring plot of *Picea crassifolia* forest in the Qilian mountains [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2022, **42**(7): 85–95] DOI: 10.14067/j.cnki.1673–923X.2022.07.010
- [22] 拓锋, 刘贤德, 黄冬柳, 等. 祁连山大野口流域青海云杉种群数量动态[J]. 生态学报, 2021, **41**(17): 6871–6882. [TA Feng, LIU Xiande, HUANG Dongliu, et al. Quantitative dynamics of *Picea crassifolia* population in Dayekou basin of Qilian Mountains [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, **41**(17): 6871–6882] DOI: 10.5846/stxb202004010770
- [23] 石佳竹, 许涵, 李艳朋, 等. 海南尖峰岭热带山地雨林 60 hm<sup>2</sup> 大样地幼苗物种组成及数量特征[J]. 林业科学, 2024, **60**(9): 33–40. [SHI Jiazhu, XU Han, LI Yanpeng, et al. Species composition and quantitative characteristics of seedlings in a 60 hm<sup>2</sup> plot in the tropical mountain rainforest in Jianfengling, Hainan Island [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2024, **60**(9): 33–40] DOI: 10.11707/j.1001–7488.LYKX20230318
- [24] 巩杰, 高彦净, 张玲玲, 等. 基于地形梯度的景观生态风险空间分析——以甘肃省白龙江流域为例[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2014, **50**(5): 692–698. [GONG Jie, GAO Yanjing, ZHANG Lingling, et al. Distribution characteristics of ecological risks in land-use based on terrain gradient and landscape structure: Taking Bailongjiang Watershed as an example [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2014, **50**(5): 692–698] DOI: 10.13885/j.issn.0455–2059.2014.05.019

- [25] 张春英, 蒋丽明, 李新燕, 等. 植被景观斑块周长与面积比值分布的核密度研究[J]. 西北林学院学报, 2018, **33**(2): 224 – 230. [ZHANG Chunying, JIANG Liming, LI Xinyan, et al. Kernel density estimation on the distribution of perimeter – to-area ratios of vegetation patches [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2018, **33**(2): 224 – 230] DOI: 10.3969/j.issn.1001 – 7461.2018.02.37
- [26] 管箴, 印涌强, 张晓祥, 等. 基于 K-means 聚类与集成学习算法的小流域山洪灾害易发性评估[J]. 应用科学学报, 2024, **42**(3): 388 – 404. [GUAN Zheng, YIN Yongqiang, ZHANG Xiaoxiang, et al. Estimating flash flood disaster susceptibility based on K-means clustering and ensemble learning approaches [J]. Journal of Applied Sciences, 2024, **42**(3): 388 – 404] DOI: 10.3969/j.issn.0255 – 8297.2024.03.002
- [27] DODSON E K, ROOT H T. Conifer regeneration following stand-replacing wildfire varies along an elevation gradient in a ponderosa pine forest, Oregon, USA [J]. Forest Ecology and Management, 2013, **302**: 163 – 170. DOI: 10.1016/j.foreco.2013.03.050
- [28] FRANCIS D, EX S, HOFFMAN C. Stand composition and aspect are related to conifer regeneration densities following hazardous fuels treatments in Colorado, USA [J]. Forest Ecology and Management, 2018, **409**: 417 – 424. DOI: 10.1016/j.foreco.2017.11.053
- [29] 高贤良. 祁连圆柏和青海云杉坡向分布差异的生理生态适应机制[D]. 兰州: 兰州大学, 2011: 12 – 17. [GAO Xianliang. Ecophysiological adaptation of *Juniperus przewalskii* and *Picea crassifolia* to the different slopes [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2011: 12 – 17]
- [30] HYATT L A, ROSENBERG M S, HOWARD T G, et al. The distance dependence prediction of the Janzen-Connell hypothesis: A meta-analysis [J]. Oikos, 2003, **103**(3): 590 – 602. DOI: 10.1034/J.1600 – 0706.2003.12235.X
- [31] 赵长兴, 赵维俊, 张兴林, 等. 祁连山排露沟流域青海云杉种群内竞争与促进作用分析[J]. 植物生态学报, 2022, **46**(9): 1027 – 1037. [ZHAO Changxing, ZHAO Weijun, ZHANG Xinglin, et al. Analyses of intraspecific competition and facilitation of *Picea crassifolia* in Pailugou Watershed of Qilian Mountains, China [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2022, **46**(9): 1027 – 1037] DOI: 10.17521/cjpe.2022.0086
- [32] 陈志杰, 白永平, 周亮, 等. 高寒山地生态脆弱区聚落空间格局特征及成因识别——以天祝藏族自治县为例[J]. 生态学报, 2020, **40**(24): 9059 – 9069. [CHEN Zhijie, BAI Yongping, ZHOU Liang, et al. Spatial pattern characteristics and genetic identification of settlements in ecologically fragile areas of alpine mountains: A case study on the Tianzhu Tibetan Autonomous County [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, **40**(24): 9059 – 9069] DOI: 10.5846/stxb201912042629
- [33] 汤雨宁, 刘明国, 殷有, 等. 朝阳地区油松天然更新规律初探[J]. 辽宁林业科技, 2007(4): 41 – 43. [TANG Yuning, LIU Mingguo, YIN You, et al. A preliminary study on the natural regeneration law of *Pinus tabulaeformis* in Chaoyang area [J]. Journal of Liaoning Forestry Science and Technology, 2007(4): 41 – 43]
- [34] 宋贤芬, 赵各进, 严夏帆, 等. 土壤养分、林分结构和地形因子对毛竹更新的影响[J]. 东北林业大学学报, 2023, **51**(3): 7 – 12. [SONG Xianfen, ZHAO Gejin, YAN Xiafan, et al. Effects of soil nutrients, stand structure and topographic factors on the regeneration of *Phyllostachys pubescens* before strip harvesting [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2023, **51**(3): 7 – 12] DOI: 10.13759/j.cnki.dlxb.2023.03.020
- [35] 祝燕, 米湘成, 马克平. 植物群落物种共存机制: 负密度制约假说[J]. 生物多样性, 2009, **17**(6): 594 – 604. [ZHU Yan, MI Xiangcheng, MA Keping. A mechanism of plant species coexistence: The negative density-dependent hypothesis [J]. Biodiversity Science, 2009, **17**(6): 594 – 604] DOI: 10.3724/SP.J.1003.2009.09183

## Characteristics of Seedling/Sapling Regenerations and Their Response to Topographic Factors in a Large Dynamic Monitoring Sample Plot of *Picea Crassifolia* Forest in the Qilian Mountains, China

WANG Kun<sup>1</sup>, ZHAO Weijun<sup>2\*</sup>

(1. College of Global Talents, Beijing Institute of Technology, Zhuhai, Zhuhai 519088, Guangdong, China;  
2. State Positioning Observation and Research Station of Forest Ecosystem of the Qilian Mountain, Gansu Province  
Academy of Water Resources Conservation Forest of the Qilian Mountains, Zhangye 734000, Gansu, China )

**Abstract:** Forest natural regeneration is a pivotal course for ecological restoration and reconstruction, playing a

crucial role in maintaining dynamic stability and sustainable development of forests. The seedling/sapling stage is a critical period that determines the quality and quantity of forest natural regeneration. Topography, as one of the main environmental driving factors for forest natural regeneration, significantly influences the growth of saplings and seedlings. Previous studies, relying on sampling methods at elevation gradient plots or transects, had relatively low sampling intensities, making it difficult to comprehensively reveal the regeneration patterns and distribution characteristics of regenerating seedlings.

In this study, seedlings/saplings of *Picea crassifolia* (Qinghai spruce) in a large dynamic monitoring sample plot (340 m × 300 m) in the Dayekou watershed in the middle part of the Qilian Mountains were measured for evaluation of topography effects on natural regeneration. It collected data on the density, ground diameter, height, crown width of seedlings/saplings, and DEM (with a resolution of 12.5 m). A database was constructed using ArcGIS to analyze the impact of slope aspect, slope gradient, slope position, and elevation on the characteristics of seedling/sapling regenerations. The regeneration characteristics under different topographic position indices were also explored. Additionally, K-means clustering analysis was used to divide six topographic habitats with regeneration characteristics.

(1) The density of seedlings/saplings was higher on north-facing slopes than on west-facing slopes, while their ground diameter, height, and crown width were greater on west-facing slopes than on north-facing slopes. In areas with higher slopes, the density of seedlings/saplings was higher, but their ground diameter, height, and crown width were lower; the density of seedlings/saplings peaked at mid-slope positions, and their ground diameter, height, and crown width peaked at upper slope positions; the lower the elevation, the greater the density of seedlings/saplings were, and the smaller their ground diameter, height, and crown width were.

(2) The density of seedlings/saplings was greater on shaded slopes and semi-shaded slopes of high topographic position, and semi-shaded slopes of low topographic position; the ground diameter, plant height, and crown spread of seedlings/saplings were greater on semi-positive slopes of high topographic position.

(3) The density of seedlings/saplings is the highest in the southeast corner of the plot, with higher density of seedlings than that of saplings.

(4) The ground diameter, plant height and crown width were extremely significantly positively correlated with each other and they were significantly negatively correlated with density, while they were significantly or extremely significantly correlated with some topographic factors.

This study can provide a theoretical basis for evaluation of natural regeneration of *Picea crassifolia* forest in the Qilian Mountains, as well as a reference for the scientific management of seedlings/saplings of *Picea crassifolia* forest, or related studies in similar areas.

**Key words:** *Picea crassifolia*; seedling/sapling; topographic factor; the Dayekou basin; the Qilian Mountains

(责任编辑 钟雨倩)