

doi:10.3969/j.issn.1671-3168.2024.01.019

香格里拉市高山松林碳密度与环境因子的关系研究

黄运荣, 徐婷婷, 施凯泽, 卢腾飞, 李泽, 郎晓雪, 罗胤, 冷鸿天

(云南省林业调查规划院, 云南 昆明 650051)

摘要:以香格里拉市高山松林为研究对象,依据前期构建的高山松单木碳储量模型,结合森林资源二类调查数据推算高山松林的碳密度,利用除趋势对应分析方法探讨高山松林碳密度与各环境因子之间的关系。结果表明,在林分因素中,平均树高对高山松林碳密度的影响最大;在地形因素中,坡度对高山松林碳密度的影响最大;在温度因素中,最热月均温和最冷月均温差对高山松林的碳密度影响最大;在降水因素中,最干季降水和最冷季降水对高山松林碳密度的影响最大。环境因子的综合作用对高山松林碳密度影响的综合分析表明,DCA 的第一排序轴与高山松林的碳密度相关性最大,可以很好地解释环境因子的综合作用对高山松林碳密度产生的影响,在 26 个环境因子中,有 20 个环境因子与 DCA 第一排序轴有极显著的相关性,其中,林分因子的相关性系数较大,说明高山松林的碳密度主要受林分因子共同作用的影响。

关键词:高山松林;碳密度;环境因子;DCA 分析法;香格里拉市

中图分类号:S758.5;S718.5;S791.2594 文献标识码:A 文章编号:1671-3168(2024)01-0108-07

引文格式:黄运荣,徐婷婷,施凯泽,等.香格里拉市高山松林碳密度与环境因子的关系研究[J].林业调查规划,2024,49(1):108-114. doi:10.3969/j.issn.1671-3168.2024.01.019

HUANG Yunrong, XU Tingting, SHI Kaize, et al. Relationship between *Pinus densata* Carbon Density and Environment Factors in Shangri-La[J]. Forest Inventory and Planning, 2024, 49(1): 108-114. doi:10.3969/j.issn.1671-3168.2024.01.019

Relationship between *Pinus densata* Carbon Density and Environment Factors in Shangri-La

HUANG Yunrong, XU Tingting, SHI Kaize, LU Tengfei, LI Ze, LANG Xiaoxue,
LUO Yin, LENG Hongtian

(Yunnan Institute of Forest Inventory and Planning, Kunming 650051, China)

Abstract: Taking the *Pinus densata* forest in Shangri-La as research object, based on the previously constructed *Pinus densata* carbon stock estimation, carbon density was calculated by using forest resource inventory data, and the relationship between *Pinus densata* carbon density and the various environment factors was studied by DCA analysis method. The study results showed that in stand factors, the influence of average tree height to *Pinus densata* forest carbon density was the largest; in topography factors, the influence of slope was the largest; in temperature factors, the average temperature difference between the hottest and coldest months was the largest; in precipitation factors, the influence of precipitation of driest

收稿日期:2022-07-12.

第一作者:黄运荣(1973-),男,云南宜良人,高级工程师.主要从事林业调查规划、碳汇计量监测、林草碳汇研究等工作.

Email:467338394@qq.com

责任作者:徐婷婷(1990-),女,云南曲靖人,工程师.主要从事森林经理学的相关工作. Email:459262257@qq.com

quarter and coldest quarter was the largest. The analysis for the comprehensive effect of environmental factors on *Pinus densata* forest carbon density showed that the first axis of DCA and *Pinus densata* forest carbon density had the largest correlation, which could well explained the comprehensive effect of environmental factors on the carbon density, and in 26 environmental factors, 20 environment factors with the first axis of DCA had the extremely significant correlation, among which the correlation coefficient of stand factors was larger, which could explain stand factors were the main influencing factors of *Pinus densata* forest carbon density.

Key words: *Pinus densata* forest; carbon density; environment factor; PCA analysis method; Shangri-La

温度、水分、光照、空气、土壤等是植被正常生长不可缺少的环境因子,任何植被群落的存在均与其存在的环境有着非常密切的关系。各式各样植物群落类型的出现及其表现出的不同分布特点均因环境的不同而呈现。为了深入认识环境与植物群落的分布状况,采用环境梯度分析方法研究环境因子之间以及环境与植物群落之间的相互关系,揭示环境对植物群落的影响,为人类更好地认识植物群落与生存环境的关系提供理论依据。

高山松 (*Pinus densata*) 起源于第三纪云南松 (*P. yunnanensis*) 和油松 (*P. tabulaeformis*) 的天然杂交种,高山松是分布在我国西部高山地区的一种特有树种,主要分布在青海南部高山地带、四川西部、云南西北部和西藏东南部^[1]。高山松是一种喜光深根性树种,喜光特性在幼树阶段特别明显,在幼树阶段生长比较迅速。其具有耐旱、耐寒、耐贫瘠特性,适应能力很强,上至森林,下至干旱河谷均有分布^[2]。高山松林常以纯林分布,主要生长在阳坡、海拔 2 600~3 500 m 的河流两岸区域^[3-5]。最近几年,国内大量学者先后对高山松展开了一系列研究,取得了一定成果。但有关高山松的研究主要集中在对其更新评价^[6]、林分直径结构^[7]、苗木培育^[8]、天然更新特性^[9]、火烧迹地更新^[10] 和地形条件对其天然更新的影响^[11] 等方面,但有关高山松林碳密度与环境因子的关系鲜见报道,为此,本文从这一视角对其进行探索研究。

1 研究区概况

香格里拉市是云南省迪庆藏族自治州的一个县,位于云南省西北部,迪庆州东北部,地处四川和云南两省交接地带^[12],地理坐标为 92°~104°E,27°~36°N。东部与四川省木里、稻城两县接壤,东南部、南部与丽江市玉龙县相对,西部以金沙江为界与

德钦、维西两县隔江相望,北部与四川省乡城、得荣两县接壤。金沙江环绕着香格里拉市东、西和南三面。香格里拉市南北两头窄,东西宽,长 218 km,宽 88 km。全县总面积 1 141 739 hm²。

2 数据采集

2.1 地形因子数据

地形数据来源于地理空间数据云平台 GDEM 的免费下载,数据分辨率为 30 m,主要包括海拔、坡度、坡向 3 个因子(表 1)。

表 1 地形因子属性
Tab. 1 Attribute data of topography factors

小班号	坡向/(°)	坡度/(°)	海拔/m
1	291	31	3450
2	12	29	3622
⋮	⋮	⋮	⋮
7222	69	13	3224
7223	115	35	3201

2.2 林分因子数据

林分因子数据来源于 2016 年香格里拉市的森林资源二类调查数据,主要包括年龄、郁闭度、平均胸径、平均树高 4 个因子(表 2)。

表 2 林分因子属性
Tab. 2 Attribute data of stand factors

小班号	年龄/a	郁闭度/%	树高/m	胸径/cm
1	31	50	8	14
2	35	60	10	16
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
7222	45	55	8	15
7223	45	60	8	15

2.3 温度因子数据

温度数据从环境气候网站 WORLDCLIM(<http://www.worldclim.org>) 获取,所有温度数据图层在 Arc-GIS 10.1 软件平台下,利用 Spatial Analyst Tools 中的 Extraction 工具,根据小班的经纬度坐标提取信息,

主要包括年均温、最热月均温与最冷月均温差、等温性、季节性温差、最热月最高温、最冷月最低温、气温年较差、最湿季均温、最干季均温、最热季均温、最冷季均温等 11 个因子(表 3)。

表 3 各样本点温度因子属性
Tab. 3 Attribute data of temperature factors

小班号	年均温	最热月均温与最冷月均温差	等温性	季节性温差	最热月最高温	最冷月最低温	气温年较差	最湿季均温	最干季均温	最热季均温	最冷季均温
1	5.2	13	4.5	56	17.2	-11.2	28.4	12.0	-2.4	12.0	-2.4
2	5.6	13	4.5	56	17.7	-10.7	28.4	12.3	-0.9	12.3	-2.0
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
7222	8.9	11.4	4.8	45	18.7	-5.0	23.7	14.3	2.8	14.3	2.8
7223	9.0	11.4	4.8	45	18.7	-5.0	23.7	14.3	2.8	14.3	2.8

2.4 降水因子数据

降水数据从环境气候网站 WORLDCLIM(<http://www.worldclim.org>) 获取,所有温度数据图层在 Arc-GIS 10.1 软件平台下,利用 Spatial Analyst Tools 中的 Extraction 工具,根据小班的经纬度坐标提取信息,主要包括年降水、最大月降水、最小月降水、季节降水变异系数、最湿季降水、最干季降水、最热季降水和最冷季降水等 8 个因子(表 4)。

表 4 各样本点降水因子属性
Tab. 4 Attribute data of precipitation factors

小班号	年降水	最大月降水	最小月降水	季节降水变异系数	最湿季降水	最干季降水	最热季降水	最冷季降水
1	620	157	3	101	398	13	398	13
2	621	155	4	100	394	15	394	15
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
7222	958	234	4	100	602	21	602	21
7223	962	234	5	99	603	22	603	22

3 研究方法

3.1 高山松林碳密度的计算

根据高山松单木碳储量模型乘以小班内高山松的株数即可求出每个小班内高山松林的总碳储量,总碳储量除以小班面积得到每个小班高山松林碳密度,计算公式为:

$$T = 0.034 \times \text{DBH}^{1.623} \times H^{0.952} \quad (1)$$

$$T_{\text{总}} = T \times N \quad (2)$$

$$\text{CD} = T_{\text{总}} / M \quad (3)$$

式中: T 为高山松单木碳储量; DBH 为胸径; H 为树高; $T_{\text{总}}$ 为高山松林总碳储量; N 为高山松株数; M 为小班面积; CD 为高山松林碳密度。

3.2 高山松林碳密度分布与环境因子的关系研究

3.2.1 高山松林碳密度与环境因子的相关性分析方法

相关性分析是研究两种现象之间是否存在某种相互依存的关系,并探讨这两种现象之间的相关程度,是研究两个相关变量之间相关性的一种统计方法。相关分析方法的基本原理为:首先对现象间是否有相关系数作定性判断,绘制相关图表,明确现象间相关关系的表现形式,通过计算相关系数来精确描述变量间的关系,其数学表达式为:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (4)$$

式中: X 和 Y 为两个待研究变量; (x_i, y_i) ($i=1, 2, \dots, n$) 是两个待研究变量的 n 对值; $\bar{x}$ 为 n 个 x 的平均值; $\bar{y}$ 为 n 个 y 的平均值。

由于存在样本抽样的随机性、样本数量等原因,为证明分别来自两个总体的样本是否具有显著相关性,要对两个样本的总体进行推断,先假设两个总体无显著相关性,即零假设为 H_0 ,然后再统计有多少个样本能通过假设,最后计算出相应的概率值。

3.2.2 高山松林碳密度与综合环境因子梯度分析方法-DCA 分析法

DCA(Detrended Correspondence Analysis) 分析也叫做除趋势对应分析, DCA 是以 CA/RA 为基础修改而成的一个特征向量排序, DCA 分析是把第一个轴分成一系列不同的区间, 每个区间求出一个平均数, 把这个平均数定为零, 再对第二轴的坐标值进行调整, 从而客服了弓形效应, 提高了排序精度。DCA 分析方法的一般原理为: 首先任意选定一组样方排序轴, 求出种类的排序值; 种类排序值为样方初始值的加权平均, 然后计算出样方的排序新值; 把种类排序值标准化后得到一个新的样方排序值, 以新的样方排序值为基础进行加权平均; 以第一排序轴同样的方法求出第二排序轴和第三排序轴的值, 计算过程不需要正交化, 方法是除趋势, 对经过除趋势处理过的样方排序值再进行加权平均来求算新的种类排序值。

所有涉及到的环境因子构成一个综合的排序梯度即为 DCA 排序轴, 把所有的环境因子和 DCA 排序轴进行相关性分析, 找出与 DCA 排序轴显著相关的环境因子, 这些环境因子就是对植物群落分布有较大影响的因子。在本研究中, 将所有环境因子(林分因子、地形因子、温度因子和降水因子) 进行 DCA 分析, 得到第一轴、第二轴和第三轴的排序值, 分别用第一轴、第二轴和第三轴的排序值与高山松林的碳密度进行拟合, 分析综合环境因子对高山松林碳密度的影响。

4 结果分析

4.1 高山松林碳密度与环境因子的关系

4.1.1 林分因素对高山松林碳密度的影响

高山松林碳密度随林分因素的变化呈明显的规律性(表 5)。

表 5 高山松林碳密度与林分因素的相关系数
Tab. 5 Correlation coefficient between *Pinus densata* forest carbon density and stand factors

林分因素	碳密度
林龄	0. 585 **
郁闭度	0. 572 **
平均树高	0. 663 **
平均胸径	0. 563 **

注: ** 表示在 0. 01 水平(双侧) 上显著相关(下同)。

由表 5 可见, 高山松林的碳密度与林龄、郁闭度、平均树高和平均胸径存在显著相关性($P < 0. 01$), 其中, 平均树高与高山松林的碳密度相关性最高, 相关系数为 0. 663, 说明在年龄、郁闭度、平均树高和平均胸径 4 个林分因素中, 平均树高对高山松林碳密度的影响最大。

4.1.2 地形因素对高山松林碳密度的影响

高山松林碳密度随地形因素的变化呈明显的规律性(表 6)。

表 6 高山松林碳密度与地形因素的相关系数
Tab. 6 Correlation coefficient between *Pinus densata* forest carbon density and topography factors

地形因素	碳密度
坡向	-0. 042 **
坡度	0. 159 **
海拔	-0. 057 **

由表 6 可见, 高山松林的碳密度与坡度呈显著正相关($P < 0. 01$), 与坡向和海拔呈显著负相关($P < 0. 01$), 其中, 坡度与高山松林的碳密度相关性最高, 相关系数为 -0. 159, 说明在坡向、坡度和海拔 3 个地形因素中, 坡度因素对高山松林碳密度的影响最大。

4.1.3 温度因素对高山松林碳密度的影响

高山松林碳密度随温度因素的变化呈明显的规律性(表 7)。

表 7 高山松林碳密度与温度因素的相关系数
Tab. 7 Correlation coefficient between *Pinus densata* forest carbon density and temperature factors

温度因素	碳密度	温度因素	碳密度
年均温	0. 055 **	最冷月最低温	0. 023
最热月均温与最冷月均温差	0. 114 **	气温年较差	0. 067 **
等温性	0. 075 **	最湿季均温	0. 061 **
季节性温差	0. 013	最干季均温	0. 040 **
最热月最高温	0. 069 **	最热季均温	0. 061 **
		最冷季均温	0. 047 **

由表 7 可见, 高山松林的碳密度与年均温、最热月均温和最冷月均温差、等温性、最热月最高温、气温年较差、最湿季均温、最干季均温、最热季均温和

最冷季均温呈显著正相关($P < 0.01$),与季节性温差和最冷月最低温无显著相关性(相关系数分别为 0.013 和 0.023),其中与最热月均温和最冷月均温差的相关性最高,相关系数为 0.114,说明对于年均温、最热月均温和最冷月均温差、等温性、季节性温差、最热月最高温、最冷月最低温、气温年较差、最湿季均温、最干季均温、最热季均温和最冷季均温这 11 个温度因子中,最热月均温与最冷月均温差对高山松林碳密度的影响最大。

4.1.4 降水因素对高山松林碳密度的影响

高山松林碳密度随降水因素的变化呈明显的规律性(表 8)。

表 8 高山松林碳密度与降水因素的相关系数
Tab. 8 Correlation coefficient between *Pinus densata* forest carbon density and precipitation factors

降水因素	碳密度	降水因素	碳密度
年降水	-0.008	最湿季降水	0.009
最大月降水	0.008	最干季降水	-0.123 **
最小月降水	-0.095 **	最热季降水	0.009
季节降水变异系数	0.066	最冷季降水	-0.123 **

由表 8 可见,高山松林的碳密度与季节降水变异系数呈显著正相关($P < 0.01$),与最小月降水、最干季降水和最冷季降水呈显著负相关($P < 0.01$),与年降水、最大月降水、最湿季降水和最热季降水无显著相关性,其中与最干季降水和最冷季降水的相

关性最大,相关系数为-0.123,说明在年降水量、降水最大月降水、降水最小月降水、季节降水变异系数、最湿季降水、最干季降水、最热季降水和最冷季降水 8 个降水因素中,最干季降水和最冷季降水对高山松林碳密度的影响最大。

4.1.5 环境因子对高山松林碳密度影响的综合分析

表 9 给出了研究区 26 个环境因子进行 DCA 排序后的各排序轴信息,其中 4 个轴的特征值分别为 0.122、0.007、0.003 和 0.003,总特征值为 0.134;各排序轴的环境梯度长分别为 1.458、0.516、0.833 和 0.782,其中第一排序轴的特征值较大,其包含了 91.4% 的信息量,且高山松林的碳密度与第一排序轴的相关系数 R^2 最高,曲线拟合效果最好(表 10),找出与 DCA 第一排序轴有相关性的环境因子,这些环境因子即是影响高山松林碳密度分布的主要因子。

表 9 环境因子 DCA 排序重要参数

Tab. 9 DCA ranking parameters of environmental factors

参数	坐标轴				TI
	AX1	AX2	AX3	AX4	
EI	0.122	0.007	0.003	0.003	0.134
LG	1.458	0.516	0.833	0.782	
CPVSD	91.400	96.300	98.700	100.000	

注:EI 表示特征值;LG 表示物种与环境关联系数;CPVSD 表示含物种数据变量信息占比;TI 表示变量值总和。

表 10 高山松林碳密度与环境因子排序轴曲线拟合状况检验

Tab. 10 Test of axis curve fitting of *Pinus densata* forest carbon density and environmental factor

变量	DCA 第一轴				DCA 第二轴				DCA 第三轴				
	t-value	Sig. t	R^2	相关性	t-value	Sig. t	R^2	相关性	t-value	Sig. t	R^2	相关性	
碳密度	A	49.96	0.000		28.00	0.000			4.82	0.000			
	B1	5.56	0.000	0.543	0.717 **	-7.52	0.000	0.208	0.423 **	-4.63	0.000	0.148	0.374 **
	B2	21.24	0.000		16.40	0.000			7.99	0.000			

注:回归方程为 $Y=A+B_1X+B_2X^2$ 。

环境因子与 DCA 第一排序轴的相关系数见表 11。

由表 11 可以看出,DCA 的第 1 排序轴与年龄、郁闭度、平均树高、平均胸径、坡度、海拔、年均温、最热月均温和最冷月均温差、等温性、最热月最高温、最冷月最低温、气温年较差、最湿季均温、最干季均

温、最热季均温、最冷季均温、最小月降水、季节降水变异系数、最干季降水、最冷季降水这 20 个环境因子存在显著相关性,其中,相关系数在 0.5 左右的有年龄、郁闭度、平均树高和平均胸径 4 个因子,说明高山松林的碳密度主要受年龄、郁闭度、平均树高和平均胸径共同作用的影响。

表 11 环境因子与 DCA 第一排序轴的相关系数

Tab. 11 Correlation coefficients between the first axis of DCA and environmental factors

环境因子	相关性	环境因子	相关性
年龄	0.494 **	气温年较差	0.058 **
郁闭度	0.517 **	最湿季均温	0.115 **
平均树高	0.587 **	最干季均温	0.104 **
平均胸径	0.534 **	最热季均温	0.115 **
坡向	-0.022	最冷季均温	0.096 **
坡度	0.215 **	年降水	0.001
海拔	-0.148 **	最大月降水	0.004
年均温	0.107 **	最小月降水	-0.114 **
最热月均温与 最冷月均温差	0.111 **	季节降水变 异系数	0.043 **
等温性	0.091 **	最湿季降水	0.011
季节性温差	0.004	最干季降水	-0.116 **
最热月最高温	0.126 **	最热季降水	0.011
最冷月最低温	0.074 **	最冷季降水	-0.113 **

5 结论与讨论

5.1 结论

高山松林的碳密度与年龄、郁闭度、平均树高和平均胸径 4 个因子呈显著正相关,其中,平均树高对高山松林碳密度的影响最大;高山松林的碳密度与地形因素中的坡向和海拔因素呈负相关,与坡度因素呈正相关,在地形因素中,坡度对高山松林碳密度的影响最大;高山松林的碳密度与年均温、最热月均温和最冷月均温差、等温性、最热月最高温、气温年较差、最湿季均温、最干季均温、最热季均温和最冷季均温呈显著正相关,其中,最热月均温和最冷月均温差对高山松林的碳密度影响最大;高山松林的碳密度与季节降水变异系数呈显著正相关,与最小月降水、最干季降水和最冷季降水呈显著负相关,其中,最干季降水和最冷季降水对高山松林碳密度的影响最大;DCA 的第一排序轴与高山松林的碳密度相关性最大,可以很好地解释高山松林碳密度是在环境因子的综合作用下对其产生影响,在 26 个环境因子中,有 20 个环境因子与 DCA 第一排序轴存在极显著相关性,其中,年龄、郁闭度、平均树高和平均胸径的相关性系数较大,说明高山松林的碳密度主要是受年龄、郁闭度、平均树高和平均胸径共同作用的影响。

5.2 讨论

1)对高山松林碳密度与林分因子的研究表明,高山松林碳密度与林龄呈显著正相关,与已研究发现的兴安落叶松^[13]和长白落叶松^[14]碳储量随林龄的变化规律基本一致,原因可能是随林龄的增大,生物量和碳储量增大,因此,高山松林的碳密度与林龄表现出正相关关系;高山松林的碳密度与郁闭度也呈显著正相关,与已研究发现的长白落叶松^[15]、马尾松^[16]和柳杉人工林^[17]碳储量随林分密度的变化规律基本一致,而林分密度是影响郁闭度的主要因素,因此高山松林碳密度与郁闭度呈显著正相关;高山松林的碳密度与平均树高和平均胸径也呈显著正相关,原因可能是随平均树高和平均胸径的增大,高山松林的生物量增大,因此碳密度也随之增大。

2)国内外学者从多个因子角度研究地形条件对森林植被碳储量影响的报道不多,目前有报道的影响因子主要是海拔、坡向和坡位以及其中两种的交互作用。于顺龙^[18]和王向荣^[19]的研究表明,坡向和坡位两个因子对东北林区水曲柳的生物量分配有非常重要的影响,何志斌等^[20]的研究表明,祁连山青海云杉林斑受到了地形因素的影响,地形因素中的坡向因子直接影响了植被分布,而在本研究中选取的海拔、坡向、坡度 3 个地形因子中,坡向和海拔因子对高山松林碳密度的影响较大,与上述研究结论不一致,可能的原因是研究区处于香格里拉市,地形起伏较大,因此海拔和坡度因子对高山松林的碳密度有显著影响。

3)温度和降水不仅影响植物生长,还对植被碳密度有较大影响,水热条件对植被生长影响越好的地方,植物的生物量就越大,植被碳密度越大^[21-22],在本研究中,温度和降水对高山松林的碳密度有一定的影响,但并不是影响高山松林碳密度的主要因子,原因可能是本研究的研究区域仅为香格里拉市,研究区域较小,温度和降水并无大的差异,因此,对高山松林的碳密度也无较大影响。

参考文献:

[1] 毛建丰,李悦,刘玉军,等. 高山松种实性状与生殖适应性[J]. 植物生态学报,2007,31(2):291-299.
[2] 王玉涛. 川西高山松林火烧迹地天然更新研究[D]. 北京:北京林业大学,2005.
[3] 吴中伦. 中国森林第 2 卷:针叶林[M]. 北京:中国林业出版社,1996:950-957.
[4] 杨玉波,李承彪. 四川森林[M]. 北京:中国林业出版社,1992:435-447.

- [5] 韩荣沛. 试谈雅江林区的高山松经营[J]. 四川林勘设计, 1993(4): 21-25.
- [6] 吴明山, 许彦红, 王俊峰, 等. 因子分析在林地更新评价中的应用: 以香格里拉高山松为例[J]. 西南林业大学学报, 2011, 31(6): 36-39.
- [7] 左政, 许彦红, 朱霖, 等. 香格里拉高山松林分直径结构分析[J]. 西南林业大学学报, 2011, 31(2): 29-32.
- [8] 何飞飞, 李永梅, 李翠萍, 滇西北生态公益林区高山松容器育苗基质配方研究[J]. 湖南农业大学学报, 2008, 34(6): 631-634.
- [9] 杨冬. 高山松天然更新特性[J]. 林业科技, 2005, 30(6): 15-17.
- [10] 王玉涛. 川西高山松林火烧迹地天然更新研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2005.
- [11] 张昆林, 钟蓉军. 地形条件对高山松天然更新和生长的影响[J]. 林业科技, 2000, 25(1): 22-23.
- [12] 胡宗华, 张正全. 云南省香格里拉市森林资源规划设计调查报告[R]. 大理: 云南省林业调查规划院大理分院, 2007: 13-15.
- [13] 齐光, 王庆礼, 王新闯, 等. 大兴安岭林区兴安落叶松人工林植被碳贮量[J]. 应用生态学报, 2011, 22(2): 273-279.
- [14] 马炜, 孙玉军, 王秀云, 等. 长白落叶松人工林固碳释氧效益评估方法[J]. 东北林业大学学报, 2011, 39(1): 58-61.
- [15] 王秀云. 不同年龄长白落叶松人工林碳储量分布特征[D]. 北京: 北京林业大学, 2011.
- [16] 张国庆, 黄从德, 郭恒, 等. 不同密度马尾松人工林生态系统碳储量空间分布格局[J]. 浙江林业科技, 2007, 27(6): 10-14.
- [17] 刘贤安, 彭培好, 王莉, 等. 不同林分密度下柳杉人工林立木生物量与碳储量研究[J]. 林业科技, 2013, 38(1): 31-34.
- [18] 于顺龙. 坡向、坡位对水曲柳中龄林生长与生物量分配的影响[J]. Inner Mongolia Forestry Investigation and Design, 2009, 32(1): 54-56.
- [19] 王向荣, 孙海龙, 余鑫, 等. 坡向和坡位对水曲柳中龄林生长的影响[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2011, 31(1): 30-34.
- [20] 何志斌, 赵文智, 刘鹄, 等. 祁连山青海云杉林斑表层土壤有机碳特征及其影响因素[J]. 生态学报, 2006, 26(8): 2572-2577.
- [21] 吕超群, 孙书存. 陆地生态系统碳密度格局研究概述[J]. 植物生态学报, 2004, 28(5): 692-703.
- [22] 于贵瑞. 全球变化与陆地生态系统碳循环和碳蓄积[M]. 北京: 气象出版社, 2003.

责任编辑: 许易琦

(上接第 81 页)

- [5] 刘淑霞. 云南省澜沧江流域耕地利用空间分布规律研究[D]. 昆明: 云南农业大学, 2009.
- [6] 张金屯, 邱杨, 郑凤英. 景观格局的数量研究方法[J]. 山地学报, 2000, 18(4): 346-352.
- [7] WOOD S N. mgcv: GAMs and generalized ridge regression for R[J]. R News, 2001, 1: 20-25.
- [8] LAI J S, MI X C, REN H B, et al. Species-habitat associations change in a subtropical forest of China[J]. Journal of Vegetation Science, 2009, 20: 415-423.
- [9] PUNCHI-MANAGE R, GETZIN S, WIEGAND T, et al. Effects of topography on structuring local species assemblages in a Sri Lankan mixed dipterocarp forest[J]. Journal of Ecology, 2013, 101: 149-160.
- [10] 王敏, 周才平. 山地植物群落数量分类和排序研究进展[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2011, 35(4): 126-130.
- [11] MASCARO J, ASNER G P, MULLER-LANDAU H C, et al. Controls over aboveground forest carbon density on Barro Colorado Island, Panama[J]. Biogeosciences, 2011, 8: 1615-1629.
- [12] 刘海丰, 薛达元, 桑卫国. 地形因子对暖温带森林群落物种丰富度-地上生物量关系的影响[J]. 生态环境学报, 2012, 21(8): 1403-1407.
- [13] JOHN R, DALLING J W, HARMS K E, et al. Soil nutrients influence spatial distributions of tropical tree species[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, USA, 2007, 104: 864-869.
- [14] 张峰, 张金屯. 历山自然保护区猪尾沟森林群落植被格局及环境解释[J]. 生态学报, 2003, 23(3): 421-427.
- [15] 余敏, 周志勇, 康峰峰, 等. 山西灵空山小蛇沟林下草本层植物群落梯度分析及环境解释[J]. 植物生态学报, 2013, 37(5): 373-383.

责任编辑: 许易琦