

太岳山华北落叶松人工林林下植物变化及环境解释

陈 晶¹,康峰峰¹,程小琴¹,朱 江¹,纪文婧¹,韩海荣^{1*},赵灵爱²

(1.北京林业大学,北京 100083;2.山西省太岳山国有林管理局 绵山林场,山西 长治 046000)

摘 要:通过对山西太岳山好地方华北落叶松人工林林下植物群落进行调查,并通过典范对应分析(CCA),探讨了林下物种分布与环境因子之间的关系。结果表明,在调查的 21 个样地中,油松林下共出现植物物种 70 种,隶属 28 个科,56 个属;CCA 排序结果揭示了研究区内林下植物的分布格局与环境梯度的关系。林龄、坡向、土壤全氮等因素对林下草本层物种分布格局有重要影响;林龄、土壤全氮、坡位等因素是影响林下灌木层物种分布格局差异的主要环境因子;影响林下草本层和灌木层物种分布格局的变量中,生境因子和生物因子分别共同解释了草本层和灌木层 52%和 55%,生境因子分别解释了 25.9%和 22.5%,均高于生物因子的解释能力,表明生境因子在决定华北落叶松人工林林下植物分布格局变异中起着举足轻重的作用。

关键词:典范对应分析(CCA);华北落叶松人工林;生境因子;生物因子

中图分类号:S791.22 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2016)05-0043-06

Changes and Environmental Interpretation of Understory Plants of *Larix principis-rupprechtii* Plantation in Taiyue Mountain

CHEN Jing¹,KANG Feng-feng¹,CHENG Xiao-qin¹,ZHU Jiang¹,JI Wen-jing¹,
HAN Hai-rong^{1*},ZHAO Ling-ai²

(1. Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. Shanxi Mianshan Forestry Farm of Taiyue Forest Bureau, Changzhi, Shanxi 046000, China)

Abstract: To understand the relationship between the distribution of understory plants and environmental factors in *Larix principis-rupprechtii* plantation, an investigation on understory plants was conducted in 21 plots in Haodifang, Taiyue Mountain in Shanxi. The environmental factors controlling understory plant composition and diversity were quantitatively assessed by the method of canonical correspondence analysis (CCA). The results showed that 70 understory species were recorded in 21 plots belonging to 26 families and 55 genera. The results of CCA revealed the relationship between the distribution of understory plants and environmental gradients: stand age, slope, total nitrogen were important factors determining plant distribution in the herb layer, while stand age, total nitrogen and slope position were important in the shrub layer. Habitat and biotic factors together explained 52% of the variation in the distribution of herb layer, and 55% in the distribution of shrub layer. Pure habitat factors exhibited a stronger interpretation for understory species distribution, suggesting that habitat factors may play a significant role in the distribution variance of understory plants.

Key words: canonical correspondence analysis; *Larix principis-rupprechtii* plantation; habitat factor; biotic factor

收稿日期:2015-11-04 修回日期:2015-12-08

基金项目:林业公益性行业科研专项(201404213)。

作者简介:陈 晶,女,在读硕士,研究方向:森林生态学。E-mail:jingjingsparkle@163.com

* 通信作者:韩海荣,男,教授,研究方向:森林生态学。E-mail:hanhr@bifu.edu.cn

森林作为陆地生态系统的有机主体,在维持陆地生物多样性中发挥重要作用。然而,由于土地利用方式的变化,全球范围内天然林的面积以约 1 300 万 $\text{hm}^2 \cdot \text{a}^{-1}$ 的速度持续下降^[1]。世界范围的人工林集约栽培和更新弥补了一定损失,不足森林面积 5% 的人工林可以提供约 90% 的木材供给^[2]。人工林在商品林中成为不可替代的同时,更多的研究开始关注其在林下植被生物多样性以及生态功能发挥及可持续性^[3]。有研究表明,人工干扰能增加生境异质性,使群落环境条件得到改变,进而致使群落内物种组成发生变化,使得不同生态特性的物种在不同群落生境中进而成为优势种^[4-5]。人工林也可为乡土物种提供适宜的群落环境。研究发现,在新西兰,濒危植物矢车菊(*Centaurea cyanus*)、海桐(*Pittosporum tobira*)常常出现在辐射松人工林下^[6]。

林下植物是人工林生态系统的一个重要组成部分,对维持森林生物多样性和立地生产力方面起着重要作用^[7]。林下植物能积极维持林地养分循环畅通,保持土壤肥力,防止土壤酸化板结^[8]、在维护生态系统的多样性和稳定性^[9]以及揭示植被演替特征等方面具有举足轻重的作用^[10]。由于林下植物是由不同层次、不同生态适应型的植被构成,因此研究植物群落与生境间的相互作用是植被生态学的重点。分类和排序是研究群落生态关系的常用数量方法^[11-12]。运用排序与分类的环境解释方法可以客观定量地研究森林生态系统动态变化规律,解读群落演替与物种多样性间复杂关系^[13]。

山西省太岳山华北落叶松人工林在 20 世纪五十年代时开始大面积种植,至 20 世纪七、八十年代结束,栽植代数相对较少。长期以来人们一直以追求木材产量和降低经营成本为目标,没有进行科学的管理和先进的造林技术的实施,导致人工林生态系统生物多样性下降,限制了人工林的持续发展。因此,针对山西省太岳山好地方林场华北落叶松人工纯林进行综合分析林下植物与环境因子的关系,为今后华北地区植被恢复、充分发挥林分的生态效益和经济效益提供一定的科学依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于山西省长治市沁源县太岳山国有林管理局好地方林场,地理位置为 $111^{\circ}59' - 112^{\circ}05' \text{E}$, $36^{\circ}40' - 36^{\circ}47' \text{N}$ 。林区海拔为 2 037~2 294 m,平均海拔 2 165.5 m。该区气候属温带大陆性季风气候,四季分明,雨量集中在夏季,占全年降雨量的 60% 以上,年平均气温 6.2℃,年平均降雨量 600

mm,无霜期 120 d。土壤主要为褐土。

1.2 样地调查

于 2014 年 7—8 月在好地方林场按坡向、坡位及林龄等条件选择 21 块标准样地。每块样地大小为 20 m×30 m,同时记录每个样地的地理位置、海拔、坡向及坡位等指标,调查并记录样地内出现的全部乔木种,测量所有乔木胸径、树高、冠幅及坐标,并记录其存活状态。在每块样地的中心及四角分别设置 1 个 5 m×5 m 的小样方,对灌木进行调查(高度<4 m),分种计算盖度、频度、多度情况,于每块样地的中心和四角分别设置 1 个 1 m×1 m 的小样方,对草本进行调查调查,记录所有草本植物的种名、平均高度、盖度和多度等级^[14]。每个样地随机挖取 3 个 20 cm 深的土壤剖面,每个剖面分别于 0~10 cm 和 10~20 cm 处采集土壤样品,将每个样地的土样混匀后作为 1 个样品(约 500 g)。

1.3 环境指标的获取方法

环境数据包括 9 个环境因子,即林龄、郁闭度、坡向、坡位、有机碳、全氮、全磷、全钾及 pH 值。林龄、有机碳、全氮、全磷、全钾及 pH 值以实际观察记录值及测量值表示。林龄采用生长锥法进行确定。采用重铬酸钾容量—外加热法测定土壤有机碳含量;凯氏定氮法测定土壤全氮含量;钼锑抗比色法测定土壤全磷含量;火焰光度法测定土壤全钾含量;电位测定法测定土壤 pH 值。

为了便于建立环境数据矩阵,将坡向和坡位数据以等级制表示。坡向方位角的转换采用前人的转换方法^[15]。

$$TRASP = \{1 - \cos[(\pi/180)(aspect - 30)]\} / 2$$
式中,TRASP 为坡向指数;aspect 为坡向方向角度。通过转换,TRASP 值的变化范围为 0~1,0 代表北北东方向,1 代表南南西方向。对下坡位、中坡位、上坡位依次赋值 1、2、3^[16]。

利用 Winscanopy 林地冠层分析仪(V2010a, Regent Instruments, Quebec, Canada)对林冠结构进行分析,测定冠层开阔度等指标,郁闭度=1-开阔度^[17]。拍照时间为 8 月份。拍摄时利用三角架将相机放置于水平位置,将相机支撑于离地面 1.3 m 处。拍照时间选择在阴天多云时段,在每个样地四角及中间各重复拍摄 3 次。

1.4 数据分析方法

灌木和草本的重要值计算参考下列公式^[18]:
重要值(P_i)=(相对密度+相对频度+相对盖度)/3

文中所有数据利用 Excel 软件进行数据统计分析。物种多样性与环境因子之间的相关性采用

Spearman 相关分析。以群落灌草 2 层物种重要值矩阵($X_{11 \times 21}, Y_{104 \times 21}$)和样地环境矩阵($Z_{9 \times 21}$)为基础分层进行典范对应分析(canonical correspondence analysis, CCA), CCA 运用 CANOCO4.5 软件包实现。

2 结果与分析

2.1 落叶松人工林林下植物组成

在所调查的 21 个样方中,林冠下层共记录种子植物 70 种,分属于 28 科 56 个属(表 1),其中菊科 12 属 15 种,百合科 5 属 7 种,伞形科 4 属 4 种。3 大科合计 21 属 26 种,占全部种数的 41%,表明 3 大科植物在落叶松人工林林下植物生物多样性中所起的作用最大,而且在该地区的植物区系中也占据重要地位。优势树种为华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*),草本层常见的植物种类主要有大油芒(*Spodiopogon sibiricus*)、细叶苔草(*Carex rigescens*)和蛇莓(*Duchesnea indica*),小红菊(*Den-dranthema chaneltii*)等,灌木层常见的植物种类主

表 1 植物科属分配情况

Table 1 Family and genus distribution of species

科	属数	种数	占全部	占全部
			属数	种数
			百分比/%	百分比/%
菊科 Compositae	12	15	21.43	21.43
百合科 Liliaceae	5	7	8.93	10.00
伞形科 Umbelliferae	4	4	7.14	5.71
禾本科 Gramineae	3	3	5.36	4.29
蔷薇科 Rosaceae	3	3	5.36	4.29
石竹科 Caryophyllaceae	3	4	5.36	5.71
蔷薇科 Rosaceae	3	4	5.36	5.71
毛茛科 Ranunculaceae	2	2	3.57	2.86
茜草科 Rubiaceae	2	3	3.57	4.29
唇形科 Lamiaceae	1	1	1.79	1.43
大戟科 Euphorbiaceae	1	2	1.79	2.86
豆科 Leguminosae	1	2	1.79	2.86
虎耳草科 Saxifragaceae	1	1	1.79	1.43
卷柏科 Selaginellaceae	1	1	1.79	1.43
蕨科 Pteridiaceae	1	1	1.79	1.43
兰科 Orchidaceae	1	1	1.79	1.43
藜科 Chenopodiaceae	1	2	1.79	2.86
柳叶菜科 Onagraceae	1	1	1.79	1.43
牻牛儿苗科 Geraniaceae	1	1	1.79	1.43
木贼科 Equisetaceae	1	1	1.79	1.43
莎草科 Cyperaceae	1	1	1.79	1.43
十字花科 Cruciferae	1	2	1.79	2.86
玄参科 Scrophulariaceae	1	1	1.79	1.43
荨麻科 Urticaceae	1	1	1.79	1.43
紫草科 Boraginaceae	1	1	1.79	1.43
杜鹃花科 Ericaceae	1	1	1.79	1.43
桦木科 Betulaceae	1	1	1.79	1.43
忍冬科 Caprifoliaceae	1	3	1.79	4.29

要有土庄绣线菊(*Spiraea pubescens*)、忍冬(*Lonicera japonica*)和黄刺玫(*Rosa xanthina*),毛药忍冬(*Lonicera serreana*)等。

2.2 华北落叶松人工林下植物与环境因子的 CCA 排序

为避免冗余变量的共轭效应,在 CCA 分析中向前选择,并进行 Monte Carlo 检验。筛选出对物种分布影响显著的环境因子:草本层中林龄最先进入模型,是首选因子,其次是坡向因子,再次是 pH 值。灌木层中有 3 个变量首先进入模型,分别是林龄、坡位、土壤全氮。

CCA 排序的前 4 轴保留了草本层和灌木层物种数据总方差的 36%和 81.3%(表 2)。前 4 轴的物种与环境相关系数较高,草本层和灌木层分别解释了物种—环境关系总方差的 77.3%和 88.7%。

表 2 CCA 排序的特征值及累积解释量

Table 2 Marginal and conditional effects of environmental variable obtained from the forward selection of CCA

垂直层	排序轴	特征值	物种与 环境 相关性	累计百分比/%	
				物种 数据	物种-环境 关系
草本层	1	0.560	0.982	12.3	23.0
	2	0.488	0.991	23.0	43.0
	3	0.324	0.970	30.1	56.3
	4	0.268	0.913	36.0	77.3
灌木层	1	0.874	0.998	31.1	33.9
	2	0.774	0.985	58.6	63.9
	3	0.357	0.957	71.3	77.8
	4	0.281	0.996	81.3	88.7

草本层中,与 CCA 第 1 轴存在极显著正相关关系的环境因子为坡向,存在极显著负相关关系的环境因子为林龄、土壤全氮、和 pH 值,相关系数分别为 0.854、-0.633、-0.654、-0.521;与第 1 轴存在显著负相关关系的环境因子为有机碳和全磷,相关系数分别为 -0.464、-0.405,与第 1 轴存在显著正相关关系的为坡位,相关系数为 0.440;与 CCA 第 2 轴存在极显著负相关关系的环境因子为林龄和 pH 值,存在显著负相关关系的环境因子为坡向、土壤全磷和 pH 值,存在显著正相关关系的为郁闭度(表 3),表明林下草本层与环境的关系复杂性。所有因子中,林龄、土壤全氮、pH 值、坡向、全磷和郁闭度对林下草本层植物群落分布起决定性作用。灌木层中,与 CCA 第 1 轴存在极显著正相关关系的环境因子为林龄和土壤全氮,存在显著正先关关系的环境因子为郁闭度,存在负相关关系的环境因子为坡向和 pH 值;与 CCA 第 2 轴存在极显著负相关关系的环境因子为坡位,存在极显著正相关关系的环

境因子为全钾。第 1 轴基本上反映林下灌木层林龄和土壤全氮的变化趋势,第 1 轴与林龄和土壤全氮的相关系数分别为 0.934 和 0.644。第 2 轴基本上反映林下灌木层植物群落所在环境的坡位和土壤全钾的变化趋势,第 2 轴与坡位和全钾的相关系数分别为-0.833 和 0.540(表 3)。

环境因子的箭头所处象限表示与排序轴的正负关系(图 1),箭头连线与排序轴的夹角越小,相关性越大。同时,环境因子的箭头连线越长,说明相关性越大,能解释物种多度分布变化的比例也越多,2 个箭头之间夹角越小,表明环境因子之间的相关性越大。林龄的连线较长,与第 1 轴的方向相反,pH 值和全氮连线也较长,与第 1 轴方向相反,有机碳、全钾和全磷也与第 1 轴成锐角,坡向与坡位与第 1 轴

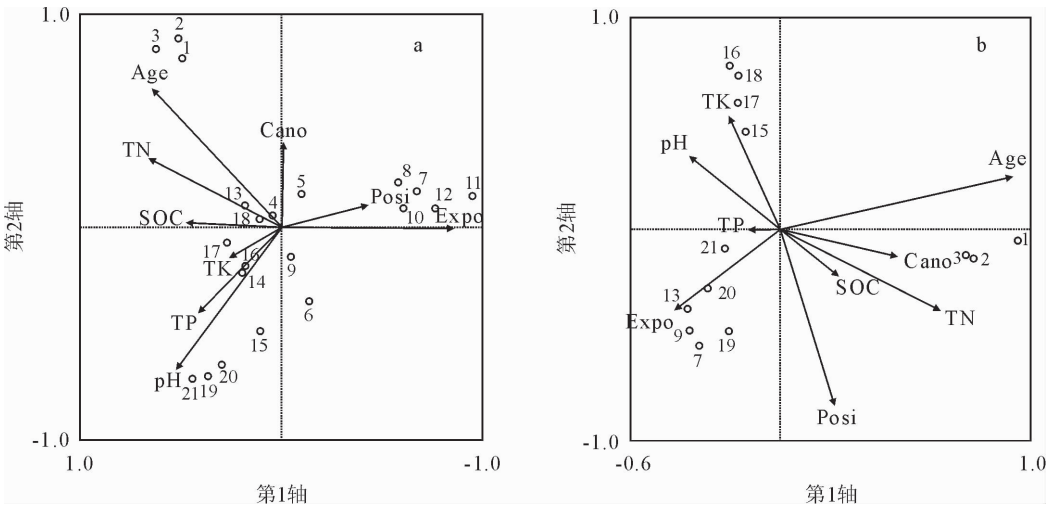
方向相同,且与第 1 轴方向相同(图 1a),表明沿第 1 轴从左向右,林龄变小,土壤肥力变差,全氮和有机碳之间夹角很小,表明这 2 个因子密切相关;林龄、pH 值的连线也较长,与第 2 轴的夹角较小,林龄、郁闭度连线方向与第 2 轴相同,pH 值与第 2 轴方向相反,表明随着林龄增长,林分郁闭度增大,土壤 pH 值变小。林龄的连线最长,土壤全氮的连线也较长,且都与第 1 轴方向相同,全磷与第 1 轴方向基本相反(图 1b),表明随着林龄增大,土壤肥力变好,但土壤全磷的含量变少;坡位与全钾的连线也较长,坡位与第 2 轴方向相反,土壤全钾和 pH 值与第 2 轴方向相同,表明沿着第 2 轴自下向上,坡位越接近下坡,土壤全钾的含量越高,土壤 pH 值升高。

表 3 CCA 排序轴与环境因子的相关系数

Table 3 Correlation coefficients of the CCA ordination axes and the environmental factors

变量		草本层				灌木层			
		1	2	3	4	1	2	3	4
生物因子	林龄	-0.633 **	-0.649 **	-0.243	0.136	0.934 **	0.253	-0.201	0.039
	郁闭度	0.011	0.399 *	-0.001	-0.059	0.468 *	-0.128	-0.487 *	-0.654 **
生境因子	坡向	0.854 **	0.002	0.015	-0.160	-0.427 *	-0.388 *	-0.011	-0.480 *
	坡位	0.440 *	0.111	-0.634 **	0.088	0.216	-0.833 **	0.440 *	0.201
	全钾	-0.249	-0.139	0.047	0.042	-0.210	0.540 **	-0.450 *	-0.342
	全磷	-0.405 *	-0.402 *	-0.573 **	-0.238	-0.129	-0.003	-0.071	-0.311
	全氮	-0.654 **	0.323	-0.197	0.070	0.644 **	-0.381 *	0.163	0.357
	有机碳	-0.464 *	0.022	-0.214	-0.122	0.232	-0.225	0.224	0.568 **
	pH	-0.521 **	-0.662 **	-0.133	-0.133	-0.362 *	0.343	0.152	-0.413

注: * $P<0.05$, ** $P<0.01$ 。



注:a. 草本层;b. 灌木层。4~30 为样地编号;林龄, Age;林冠郁闭度, Cnno;坡向, Expo;坡位, Posi;全钾, TK;全磷, TP;全氮, TN;有机碳, SOC。

图 1 21 个样地与环境因子的典范对应分析(CCA)排序

Fig. 1 Canonical correspondence analysis (CCA) ordination diagram of 26 survey plots and environmental factors

2.3 环境变量对油松人工林下植被分布格局影响的定量分离

华北落叶松人工林林下植被分布受环境因子影响,其中,草本层植被格局生境因子解释的部分占 25.9%,植被格局生物因子的解释部分占 19.4%,

生境因子与生物因子交互作用解释的部分为6.7%,未解释的部分占 30%。灌木层植被格局生境因子解释的部分占 22.5%,植物格局生物因子解释的部分占 14.7%,生物因子与生境因子交互作用解释的部分为 7.8%,未解释的部分占 33%(表 4)。

表 4 影响林下层物种分布的生境和生物因子的 变异分离				
Table 4 Variance partitioning of habitat and biotic factors in explaining understory species distribution				%
分层	a	b	c	d
草本层	25.9	19.4	6.7	48
灌木层	22.5	14.7	7.8	45

注:a:生境因子解释的部分;b:生物因子解释的部分;c:生境因子和生物因子交互作用解释的部分;d:生境因子和生物因子未能解释的部分。

3 讨论

环境因子共同决定了复杂的物种组成。林下植物的分布主要是由于环境因子在时间和空间尺度上的异质性引起的。许多研究表明,海拔、林分类型、冠上层结构、地形、土壤养分是影响林下植物种类分布的关键因子,并且这些环境因子随不同地区而变化。例如,海拔梯度是南岭国家级自然保护区林下植物分布地形首要控制因子,其次是坡向^[19];中条山混沟地区的物种分布的首控因子是海拔和土壤因子^[20];地形因子是东灵山辽东栎物种分布的主要环境因子^[21]。

本研究表明,对于林下不同层次植被,环境因子对其种类组成和结构的影响是不同的。林龄是形成油松人工林林下植物分布格局最重要的因素。光照通常直接影响群落温度和湿度,影响林下植物生长发育。在 31 年生华北落叶松林中,由于郁闭度小,林内透光较好,林下灌木主要为土庄绣线菊,灌木的种类少,而草本层发育良好,物种丰富,既有喜光草本,如毛南芥(*Arabis hirsuta*)等,也有耐阴草本如紫菀(*Aster tataricus*)、鹅肠菜(*Myosoton aquaticum*)等。但随着林龄增长,林内环境逐渐趋向稳定,灌木层物种由最初的种类单一、分布不均匀变为种类丰富、均匀度也趋向稳定的情况。由于群落郁闭度逐渐增大,其光环境不适于草本层的生长,而土壤 pH 值变小、土壤酸化,都致使草本层植物种类减少。

坡向和坡位等地形因子能决定局部生境的气候条件。地形因子控制了地表的太阳辐射、热、水等环境条件,所以能在一定程度上间接地反映土壤肥力的空间差异,指示局部生境的小气候。本研究表明,林龄、土壤全氮、坡向和 pH 值等是影响林下草本层物种分布最重要的因子;林龄、土壤全氮、坡位和土壤全钾等是影响林下灌木层物种分布最重要的因子。华北落叶松人工林林下植被分布受环境因子影响,生境因子分别解释草本层和灌木层 25.9%和 22.5%。生境因子和生物因子分别共同解释了草本层和灌木层 52%和 55%。环境的可解释程度与植被复杂度有关,

本研究环境因子解释能力位于中间位置,与杜丽侠^[22]等对八达岭地区 48%的解释能力基本一致,解释能力处于草原与亚热带森林植被之间^[23-24]。生境因子与生物因子未能解释的部分主要反映了植被之间相互作用及人类的干扰活动对林下植被物种分布的影响^[25-26],干扰和土地利用方式转变造成森林生态系统的格局发生变化,把森林生态系统转换成过渡态,其对森林生态系统的影响是深远的。

4 结论

研究结果证实了山西太岳山好地方林场林龄是物种分布格局的首要控制因子,并且林龄和地形因子通过影响林内光照和土壤性质等因素,进而影响林下灌木层和草本层多样性与分布格局。研究区的环境因子解释能力较好,表明林下植被的复杂程度良好,对环境具有适应性。依据不同层次的植物与环境关系的差异制定合理的空间布局,并依据所处的状态可对不同林龄的华北落叶松林进行适度人为调控与抚育,增加林下光照,改善草本层生长环境,促进华北落叶松林可持续发展。

参考文献:

[1] BREMER L L, FARLEY K A. Does plantation forestry restore biodiversity or create green deserts; a synthesis of the effects of land-use transitions on plant species richness[J]. Biodiversity Conservation, 2010, 19(14): 3893-3915.

[2] PARK A, WILSON E R. Beautiful plantation: can intensive silviculture help Canada to fulfill ecological and timber production objectives[J]. Forestry Chronicle, 2007, 83(6): 825-839.

[3] LOREAU M, NAEEM S, INCHAUSTI P, et al. Biodiversity and ecosystem functioning: current knowledge and future challenges[J]. Science, 2001, 294(5543): 804-808.

[4] 雷平, 邹思成, 兰文军. 不同干扰强度下江西武夷山河岸带阔叶林群落的结构与数量特征[J]. 植物科学学报, 2014, 32(5): 460-466.

LEI P, ZOU S C, LAN W J. Structural and quantity characteristics of riparian zone broad-leaved forest communities under different disturbance intensities in Jiangxi Wuyi Mountain[J]. Plant Science Journal, 2014, 32(5): 460-466. (in Chinese)

[5] Richard Pott, 刘鸿雁, 印轶. 人类影响下的生物多样性保护: 中欧的植被演化及其启示[J]. 生态学杂志, 2011, 30(3): 584-588.

RICHARD P, LIU H Y, YIN T. Conservation of biodiversity under impact of human activities: vegetation evolution in central Europe and its implication[J]. Chinese Journal of Ecology, 2011, 30(3): 584-588. (in Chinese)

[6] 孟庆繁. 人工林在生物多样性保护中的作用[J]. 世界林业研究, 2006, 34(2): 47-52.

[7] 李国雷, 刘勇, 于海群, 等. 油松人工林林下植被发育对油松生长节律的响应[J]. 生态学报, 2009, 29(3): 1264-1275.

LI G L,LIU Y,YU H Q. Response of the under growth development to the growth rhythm of Chinese pine plantation[J]. Acta Ecologica Sinica,2009,29(3):1264-1275. (in Chinese)

[8] 朱宏光,熊江波,尤业民,等. 不同更新方式巨尾桉林下植物群落变化及其环境解释[J]. 广西科学,2014,21(5):469-476.

[9] 张晓辉,周建云,何景峰,等. 黄龙山林区主要森林群落下物种多样性研究[J]. 西北林学院学报,2007,22(4):39-44.

ZHANG X H,ZHOU J Y,HE J F,*et al.* Species diversity of the main forest community undergrowths in the Huanglong Mountain[J]. Journal of Northwest Forestry University,2007,22(4):39-44. (in Chinese)

[10] 尹锴,崔胜辉,赵千钧,等. 基于冗余分析的城市森林林下层植物多样性预测[J]. 生态学报,2009,29(11):6085-6094.

YIN K,CUI S H,ZHAO Q J,*et al.* Understory diversity prediction of urban forest based on the redundancy analysis (RDA)[J]. Acta Ecologica Sinica,2009,29(11):6085-6094. (in Chinese)

[11] 张金屯. 模糊数学排序及其应用[J]. 生态学报,1992,12(4):325-331.

ZHANG J T. Fuzzy set ordination and its application[J]. Acta Ecologica Sinica,1992,12(4):325-331. (in Chinese)

[12] 王梦君,李俊清,张玉波,等. 地震干扰后恢复群落的数量分类与排序[J]. 西北林学院学报,2012,27(4):13-18.

WANG M J,LI J Q,ZHANG Y B,*et al.* Quantitative classification and ordination of restoration community after the earthquake[J]. Journal of Northwest Forestry University,2012,27(4):13-18. (in Chinese)

[13] 杨涛,王得祥,周金星,等. 陕北黄土丘陵沟壑区退耕地植物群落演替规律及物种多样性动态研究[J]. 西北林学院学报,2009,24(5):10-15.

YANG T,WANG D X,ZHOU J X,*et al.* Vegetation succession and species diversity dynamics of the plant communities in the loess hilly and gully region[J]. Journal of Northwest Forestry University,2009,24(5):10-15. (in Chinese)

[14] 于立忠,朱教君,史建伟,等. 辽东山区人工阔叶红松林植物多样性与生产力研究[J]. 应用生态学报,2005,16(12):2225-2230.

YU L Z,ZHU J J,SHI J W,*et al.* Productivity and species diversity of artificial broad-leaved korean pine forests in Eastern Liaoning mountainous areas[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2005,16(12):2225-2230. (in Chinese)

[15] ROBERTS D W,COOPER S V. Concepts and techniques of vegetation mapping [C]//FERGUSON D, MORGAN P, JOHNSON F D,eds. Land classifications based on vegetation applications for resource management,general technical report INF-257. USA:Department of Agriculture,Forest Service,Intermountain Research Station,1989:90-96.

[16] 邱扬,张金屯. DCCA 排序轴分类及其在关帝山八水沟植物群落生态梯度分析中的应用[J]. 生态学报,2000,20(2):199-206.

QIU Y,ZHANG J T. The ordination axes clustering based on detrended canonical correspondence analysis ordination and its application to the analysis of the ecological gradients of plant communities[J]. Acta Ecologica Sinica,2000,20(2):199-206. (in Chinese)

[17] 班宏娜,刘兆刚. 帽儿山林场樟子松人工林光辐射分布的研究[J]. 森林工程,2010,26(2):20-23.

[18] 田晓萍,马力,占玉芳,等. 祁连山北坡中段祁连圆柏群落学特征的研究[J]. 西北林学院学报,2015,30(2):77-83.

TIAN X P,MA L,ZHAN Y F,*et al.* Community characteristics of *Sabina przewalskii* in northern slope of Qilian Mountains[J]. Journal of Northwest Forestry University,2015,30(2):77-83. (in Chinese)

[19] 区余端,王华南,张璐,等. 南岭国家级自然保护区林下植物分布的地形相关性[J]. 武汉植物学研究,2009,27(1):41-46.

OU Y D,WANG H N,ZHANG L,*et al.* Topographic correlates of understory plant species distribution in Nanling national nature reserve, Guangdong[J]. Journal of Wuhan Botanical Research,2009,27(1):41-46. (in Chinese)

[20] 刘秋锋,康慕谊,刘全儒. 中条山混沟地区森林乔木种的数量分类与环境解释[J]. 植物生态学报,2006,30(3):383-391.

LIU Q F,KANG M Y,LIU Q R. Quantitative classification and environmental interpretation of forest tree species in Hungou,Zhongtiao Mountain[J]. Journal of Plant Ecology,2006,30(3):383-391. (in Chinese)

[21] 冯云,马克明,张育新,等. 辽东栎林不同层植物沿海拔梯度分布的 DCCA 分析[J]. 植物生态学报,2008,32(3):568-573.

FENG Y,MA K M,ZHANG Y X,*et al.* DCCA analysis of plant species distributions in different strata of Oak (*Quercus liaotungensis*) forest along an altitudinal gradient in Dongling Mountain,China[J]. Journal of Plant Ecology,2008,32(3):568-573. (in Chinese)

[22] 杜丽侠,邢绍华. 北京八达岭地区灌木群落空间分布格局与土壤环境因子的关系分析 [J]. 西北植物学报,2009,29(3):0601-0607.

DU L X,XING S H. Relationship between spatial distribution pattern of shrub community and environmental factors in Badaling of Beijing[J]. Acta Bot. Boreal,2009,29(3):0601-0607. (in Chinese)

[23] 辛晓平,高琼,李镇清,等. 松嫩平原碱化草地植物群落分布的空间和环境因素分析 [J]. 植物学报,1999,41(7):775-781.

XIN X P,GAO Q,LI Z Q,*et al.* Partitioning the spatial and environmental variations of plant community structure of alkaline grassland on Songnen plain[J]. Acta Botanica Sinica,1999,41(7):775-781. (in Chinese)

[24] 沈泽昊,张新时,金义兴. 地形对亚热带山地景观尺度植被格局影响的梯度分析 [J]. 植物生态学报,2000,24(4):430-435.

SHEN Z H,ZHANG X S,JIN Y X. Gradient analysis of the influence of mountain Topography on vegetation pattern[J]. Journal of Plant Ecology,2000,24(4):430-435. (in Chinese)

[25] 王国宏,杨利民. 祁连山北坡中段森林植被梯度分析及环境解释[J]. 植物生态学报,2001,25(6):733-740.

WANG G H,YANG L M. Gradient analysis and environmental interpretation of woody plant communities in the middle section of the northern slopes of Qilian Mountain,Gansu,China[J]. Journal of Plant Ecology,2001,25(6):733-740. (in Chinese)

[26] BOCARD D,LEGENDRE P,DRAPEAU P. Partialling out the spatial component of ecological variation [J]. Ecology,1992,73(3):1045-1055.