

DOI: 10.5846/stxb201912252787

郑天义,王丹,姬柳婷,康冰. 太白山自然保护区典型森林群落数量分类、排序及多样性格局. 生态学报, 2020, 40(20): 7353-7361.

Zheng T Y, Wang D, Ji L T, Kang B. Classification, ordination and diversity pattern of typical forest communities in Taibai Mountain Nature Reserve. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(20): 7353-7361.

太白山自然保护区典型森林群落数量分类、排序及多样性格局

郑天义, 王 丹, 姬柳婷, 康 冰*

西北农林科技大学生命科学学院, 杨凌 712100

摘要:通过多元回归树(MRT, multivariate regression trees)对太白山自然保护区典型森林群落进行数量分类, 采用典范对应分析(CCA, canonical correspondence analysis)进行排序, 并对分类得到的森林群落总体多样性进行分析。研究表明:(1)对 30 个样地进行 MRT 分类, 经交叉验证得出太白山自然保护区典型森林群落可以分为 6 类。(2)CCA 排序揭示了群落的生境分布范围, 并反映了太白山森林群落与环境因子的关系, 研究表明, 海拔、坡度、枯落物厚度和干扰情况 4 个变量对本研究区群落分布有显著影响。(3)位于中海拔区域森林群落的 3 种总体多样性指数均较高, 而位于高海拔和低海拔区域森林群落的 3 种总体多样性指数相对较低。

关键词:多元回归树; 典范对应分析; 群落总体多样性; 太白山自然保护区; 森林群落

Classification, ordination and diversity pattern of typical forest communities in Taibai Mountain Nature Reserve

ZHENG Tianyi, WANG Dan, JI Liuting, KANG Bing*

College of Life Sciences, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China

Abstract: The plant community is the product of the interaction between plants and the environment. The quantitative classification and ordination can objectively and accurately reveal the complex ecological relationships between plant communities and the environment. Exploring the distribution law of forest communities, the pattern of species diversity and its relationship with environmental factors is of great significance for protecting forest species and species diversity. Taibai Mountain Nature Reserve located in the middle of the Qinling Mountains is renowned for its abundant animals and plant resource as well as the obvious vertical zoning of vegetation. In view of superior environment for vegetation growth in the lower and middle altitude areas, there are undoubtedly more opportunities for the stable breed and survival of rich species. On account of the difficulty resulted from the complex species distribution in classifying communities, this study conducts sample plot survey of typical forest communities in the reserve, and attempts to carry out community classification research by combining multivariate regression tree (MRT) and canonical correspondence analysis (CCA). The discontinuity of classification and the continuity of ordination could be considered as the reasonable evidence to reveal the relationship between community distribution and the environment. Besides, the comparison of three overall diversity indexes in different communities and the further study regarding the change pattern of forest community diversity at altitude levels are of great significance to better reveal the change law of environmental gradients in the biodiversity of Taibai Mountain Nature Reserve. The results revealed that (1) the typical forest communities in Taibai Mountain Nature Reserve can be divided into 6 types

基金项目: 2018 年公共卫生服务补助资金专项“全国中药资源普查项目”(财社[2018]43 号)

收稿日期: 2019-12-25; 网络出版日期: 2020-08-27

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yl-kangbing@163.com

through cross-validation after performing MRT classification on 30 plots. The specific parts are as follows: I *Quercus variabilis* + *Viburnum mongolicum* + *Anemone vitifolia*, II *Pinus tabulaeformis* + *Coriaria nepalensis* + *Lithospermum erythrorhizon*, III *Pinus armandii* + *Bashania fargesii* + *Dryopteris rosthornii*, IV *Quercus aliena* var. *acutiserrata* + *Cerasus tomentosa* + *Sinacalia tangutica*, V *Abies fargesii* + *Rhododendron purdomii* + *Ligularia sibirica*, and VI *Larix chinensis* + *Lonicera stephanocarpa* + *Deyeuxia arundinacea*. (2) Based on the ordination of CCA, it not only can reveal the habitat distribution range of the community, but also the relationship between forest communities and environmental factors in Taibai Mountain Nature Reserve. Furthermore, studies indicated that four environmental factors including altitude, slope, litter thickness, as well as disturbance could exert significant effects on community distribution in the study area. The first sorting axis is mainly related to altitude. While the second sorting axis is mainly relevant to slope, litter thickness, and interference intensity. (3) The three diversity indexes of community IV are the highest, the species richness and Pielou evenness of community I are at the lowest level. Moreover, the Shannon-Wiener diversity index of community VI is the lowest. In addition, in terms of the aspect of altitude, the three total diversity index of communities located at middle altitude is usually higher, while there is a relatively low total diversity index of the communities located at high and low altitudes. This study aims at comprehensively and systematically exploring the division of forest communities, impact factors as well as community diversity patterns in the Taibai Mountain Nature Reserve, and meanwhile providing a theoretical basis for further understanding of the forest vegetation pattern and management and protection of forest resources in the Nature Reserve.

Key Words: multivariate regression trees (MRT); canonical correspondence analysis (CCA); total community diversity; Taibai Mountain Nature Reserve; forest community

群落分类是揭示植被间断性的有效方法,而排序是揭示植被连续性的方法^[1],因而将分类与排序方法相结合使用,有利于了解该研究区域的群落特征,进而更为全面和透彻地了解植被的分布及其成因,揭示植物群落间以及植物与环境因子的生态关系,这对研究区域的植物保护提供一定的理论指导^[2-5]。目前,在群落分类研究上通常使用的方法包括聚类分析(Cluster analysis)、双向指示种分析(Two-way indicator species analysis, TWINSpan)和多元回归树(Multivariate regression trees, MRT)等^[6]。其中多元回归树是一种将响应变量和解释变量相结合的分类方法,每次划分的分割点取自解释变量,并且保留具有最大预测能力的回归树^[7]。排序是将某一区域内调查的样方或植物物种排列在一定的空间,使得排序轴反映一定的生态梯度,从而解释植被分布与环境之间的关系^[8-9]。目前,常用的排序方法有两类:一类是基于线性模型的主成分分析(Principal components analysis, PCA)及其衍生出来的冗余分析(Redundancy analysis, RDA),另一类是基于非线性模型的对应分析(Correspondence analysis, CA)及其直接梯度分析版本“典范对应分析”(Canonical correspondence analysis, CCA)^[10]。CCA虽与CA共享一套基础算法,但在排序迭代过程中加入环境变量的加权回归分析,因而可以揭示环境因子对物种组成和群落分布格局的影响,从而更加直观和合理地对群落、物种的分布做出生态解释^[11]。物种多样性是群落结构和功能复杂性的量度^[12-13],对物种多样性的研究可以评价群落的组成结构及变化,对于保护濒危物种有着重要意义^[2]。

太白山是秦岭主峰,为中国青藏高原以东大陆第一高峰。其自然地理位置特殊,居暖温带之南缘、亚热带之北界,独特的地势和气候孕育了丰富的生物资源,是一个保存完好的自然综合体和自然生态系统^[14],因此有利于森林群落和物种多样性研究的开展。对太白山植被群落的数量分类研究虽有许多,但都是运用聚类分析和双向指示种的分类方法^[15-16],而运用多元回归树方法的研究尚为空白。因此本研究以太白山自然保护区的典型森林群落为研究对象,尝试运用多元回归树的方法对森林植被进行分类,并且使用CCA排序来验证分类结果,最后通过群落的多样性来进一步探究太白山自然保护区森林群落分布特征。本研究旨在全面系统地探讨太白山自然保护区的森林群落分类、影响因子和群落多样性格局,可为深入了解研究区域的森林植被

格局和管理保护该区森林资源提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

太白山国家级自然保护区(33°49′—34°5′ N, 107°22′—107°51′ E)位于秦岭山脉中段,地处太白县、眉县和周至县三县交界处,保护区东西长 45 km,南北宽 34.5 km,总面积 56325 hm²,海拔 3767 m。由于受山地条件及大气环流的影响,保护区内南、北气候差异明显,具典型的亚高山气候特点,并形成明晰的垂直变化和气候带。区内动植物资源丰富,植被垂直分带明显。优势树种有巴山冷杉(*Abies fargesii*)、太白红杉(*Larix chinensis*)、红桦(*Betula albosinensis*)、栎类等,国家一级重点保护植物有独叶草(*Kingdonia uniflora*)、红豆杉(*Taxus chinensis*)等。太白山南北坡的土壤有明显的差异,其中南坡地带性土壤为黄棕壤,北坡则为褐土。

1.2 研究方法^[17]

2019 年 7—8 月在太白山国家级自然保护区内进行样地调查,调查样点选择相对典型的森林群落。从 1190 m 到 3391 m 沿海拔设置样地,海拔每升高 100 m 调查 1—2 个 25 m×25 m 的乔木样方、每个乔木样方设置 5 个 2 m×2 m 的灌木样方和 5 个 1 m×1 m 的草本样方,共设置 30 个乔木样方。调查记录乔木样方的物种名称、数量、高度、胸径、冠幅,灌木、草本样方的物种名称、高度、数量、盖度。利用 GPS 测定地理坐标和海拔,罗盘测定坡向、坡度,同时调查地貌类型、土壤类型、枯落物厚度、干扰情况等因子。

1.3 数据处理

1.3.1 重要值

分别计算每个样地乔木、灌木和草本的重要值,其公式如下^[1]:

$$\text{乔木层重要值} = (\text{相对密度} + \text{相对高度} + \text{相对显著度}) / 3$$

$$\text{灌木层、草本层重要值} = (\text{相对高度} + \text{相对盖度}) / 2$$

1.3.2 多样性指数

计算不同群落各层次的多样性指数,分别为物种丰富度(S)、Shannon-Wiener 多样性指数(H')、Pielou 均匀度指数(J)和群落总体多样性指数(D)^[18-19]。

$$S = \text{物种数}; H' = - \sum P_i \ln P_i; J = H' / \ln S; D = W_1 D_1 + W_2 D_2 + W_3 D_3;$$

式中, P_i 为物种 i 的相对重要值; D_1 、 D_2 、 D_3 分别为各层的多样性指数;参数 W_1 、 W_2 、 W_3 分别为 0.5、0.25、0.25。

1.3.3 环境数据

坡向以数字等级表示,具体方法如下,以正北为 0°,将坡向按照 45°的夹角,顺时针方向旋转分为 8 个坡向等级,以数字表示各等级:北坡用 1 表示(0°—22.5°,337.5°—360°),东北坡用 2 表示(22.5°—67.5°),西北坡用 3 表示(292.5°—337.5°),东坡用 4 表示(67.5°—112.5°),西坡用 5 表示(247.5°—292.5°),东南坡用 6 表示(112.5°—157.5°),西南坡用 7 表示(202.5°—247.5°),南坡用 8 表示(157.5°—202.5°),数字越大,表示坡向越向阳,光照条件越好^[20]。干扰包括人类活动和动物活动,干扰情况分为 4 个等级:无干扰为 1 级,轻微干扰为 2 级,中度干扰为 3 级,强度干扰为 4 级。海拔、坡度和枯落物厚度使用实际记录值,共计 5 种环境因子^[8]。

1.4 数据分析

MRT 以环境因子梯度作为划分节点,将样地划分为尽可能同质的类别,同时采用交叉验证来确定分类结果,因而能够很好地反映异质环境下群落的结构特征^[7,21]。MRT 采用 R 语言 mvpart 程序包进行运算,本研究的 30 个样地共有 311 种植物,其中有 45 种乔木或灌木由于生长周期不同而分别记入乔木层和灌木层,因而假设响应变量为 356 个。

本研究将物种重要值矩阵(356×30)与环境因子矩阵(5×30)相结合来进行分析,同时采用蒙特卡罗置换检验对 CCA 结果进行显著性分析,包括 CCA 分析的有效性和环境因子影响的显著度^[22]。CCA 排序采用 R

软件中的 Vegan 软件包进行分析。

2 结果与分析

2.1 MRT 数量分类

如图 1 所示,根据 1-SE(1-标准误差)规则:在保证通过交叉验证误差(CVRE,通过交叉验证获得)尽量小的范围内,选取规模最小的树,最终把“A”点作为回归树规模^[23-24]。依据植物群落分类和命名原则,将 30 个样地划分为 6 类群落。由图 2 可知,6 类群落基本以海拔梯度为节点划分,因而群落顺序以海拔梯度从低到高排列,群落 II 和群落 III 处于相同梯度,因而以枯落物厚度从低到高依次排列。

群落 I 栓皮栎 (*Quercus variabilis*) + 蒙古荚蒾 (*Viburnum mongolicum*) + 野棉花 (*Anemone vitifolia*) 群落。包括样地:1、2、5 共 3 个样地。乔木层优势种为栓皮栎,重要值 64.83%,伴生种为华山松 (*Pinus armandii*)、君迁子 (*Diospyros lotus*) 等;灌木层优势种为蒙古荚蒾,重要值 15.39%,伴生种为桦叶荚蒾 (*Viburnum betulifolium*)、黄栌 (*Cotinus coggygria*)、木姜子 (*Litsea pungens*) 等;草本层优势种为野棉花,重要值 13.82%,伴生种为唐松草 (*Thalictrum aquilegifolium* var. *sibiricum*)、披针藁草 (*Carex lancifolia*)、野青茅 (*Deyeuxia arundinacea*) 等。

群落 II 油松 (*Pinus tabulaeformis*) + 马桑 (*Coriaria nepalensis*) + 紫草 (*Lithospermum erythrorhizon*) 群落。包括样地:10、11、12、13 共 4 个样地。乔木层优势种为油松,重要值 50.59%,伴生种为盐肤木 (*Rhus chinensis*)、漆 (*Toxicodendron vernicifluum*)、刺楸 (*Kalopanax septemlobus*) 等;灌木层优势种为马桑,重要值 13.46%,伴生种为栓翅卫矛 (*Euonymus phellomanus*)、蒙古荚蒾、木姜子等;草本层优势种为紫草,重要值 7.98%,伴生种为唐松草、荻 (*Triarrhena sacchariflora*)、野青茅等。枯落物厚度约为 2 cm。

群落 III 华山松+巴山木竹 (*Bashania fargesii*) + 川西鳞毛蕨 (*Dryopteris rosthornii*) 群落。包括样地:16、18、19、20 共 4 个样地。乔木层优势种为华山松,重要值 53.9%,伴生种为油松、锐齿槲栎 (*Quercus aliena* var. *acutiserrata*) 等;灌木层优势种为巴山木竹,重要值 8.95%,伴生种为二翅六道木 (*Abelia macrotera*)、唐棣 (*Amelanchier sinica*)、粘毛忍冬 (*Lonicera fargesii*) 等;草本层优势种为川西鳞毛蕨,重要值 9.71%,伴生种为羽节蕨 (*Gymnocarpium jessoense*)、糙苏 (*Phlomis umbrosa*)、野棉花等。枯落物厚度约为 4 cm。

群落 IV 锐齿槲栎+毛樱桃 (*Cerasus tomentosa*) + 华蟹甲 (*Sinacalia tangutica*) 群落。包括 3、4、6、14、17、7、8、9 共 8 个样地。乔木层优势种为锐齿槲栎,重要值 17.38%,伴生种为辽东栎 (*Quercus wutaishanica*)、青杨 (*Populus cathayana*)、华山松等;灌木层优势种为毛樱桃,重要值 6.71%,伴生种为米面蓊 (*Buckleya lanceolata*)、巴山木竹、野山楂 (*Crataegus cuneata*) 等。草本层优势种为华蟹甲,重要值 9.65%,伴生种为翼柄翅果菊 (*Pterocypsela triangulata*)、蟹甲草 (*Parasenecio forrestii*)、升麻 (*Cimicifuga foetida*) 等。

群落 V 巴山冷杉+太白杜鹃 (*Rhododendron purdomii*) + 橐吾 (*Ligularia sibirica*) 群落。包括样地:21、22、

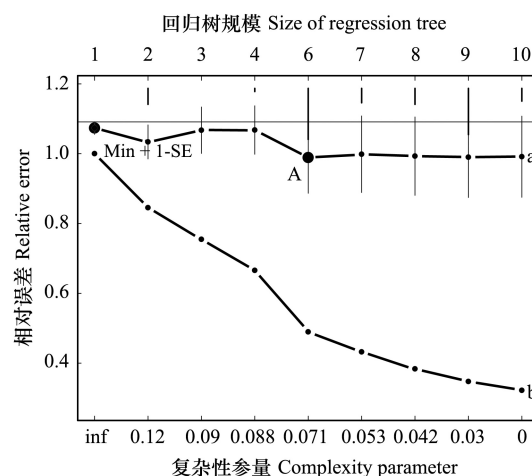


图 1 太白山自然保护区森林群落分类相对误差和交叉验证相对误差变化图

Fig.1 Resubstitution and cross-validation relative error for the multivariate regression tree of forest community in Taibai Mountain Nature Reserve

a: 交叉验证相对误差变化趋势, Change trend of cross-validated relative error; b: 相对误差变化趋势, Change trend of relative error; | : 标准误差, Standard error; A: 根据“1-SE”规则确定的分类树规模点, The tree size suggested by “1-SE”; Min + 1SE: 交叉验证相对误差最小值加上一个标准误差线, One standard error above the minimum cross-validated relative error; Inf: 无穷大, Infinity

29、15、23、24 共 6 个样地。乔木层优势种为巴山冷杉,重要值 45.21%,伴生种为红桦、川柳(*Salix hylonoma*)等;灌木层优势种为太白杜鹃,重要值 10.26%,伴生种为豪猪刺(*Berberis julianae*)、叉子圆柏(*Sabina vulgaris*)、渐尖茶藨子(*Ribes takare*)等;草本层优势种为橐吾,重要值 7.39%,伴生种为艾(*Artemisia argyi*)、蕨(*Pteridium aquilinum* var. *latiusculum*)、陕西蛾眉蕨(*Lunathyrium giraldii*)等。

群落 VI 太白红杉 + 冠果忍冬(*Lonicera stephanocarpa*) + 野青茅群落。包括样地:25、26、27、28、30 共 5 个样地。乔木层优势种为太白红杉,重要值 p51.35%,伴生种为巴山冷杉、红桦等;灌木层优势种为冠果忍冬,重要值 45.84%,伴生种为香柏(*Juniperus pingii* var. *wilsonii*)、太白杜鹃、红脉忍冬(*Lonicera nervosa*)等;草本层优势种为野青茅,重要值 14.91%,伴生种为披针藁草、千里光(*Senecio scandens*)、独叶草等。

2.2 群落分布与环境因子关系

通过对研究区域的 30 个样地进行典范对应分析,5 个环境因子的解释量为 24.11%,前 4 个排序轴的特征值分别为 0.8234、0.5240、0.3899、0.3474,CCA 排序结果有效性的蒙特卡罗置换检验结果表明在 0.001 水平上显著,因此本次 CCA 排序在一定程度上能很好地解释植物群落的分布格局与环境因子的关系。

由表 2 可知,与第一排序轴正相关的环境因子依次为:海拔、坡向、干扰情况和枯落物厚度,与第一排序轴负相关的环境因子为坡度;与第二排序轴正相关的环境因子依次为:枯落物厚度、干扰情况、坡向和海拔,与第二排序轴负相关的环境因子依次为坡度。从显著性检验来看,第一排序轴基本是海拔主导的,第二排序轴是坡度、枯落物厚度和干扰情况主导的。

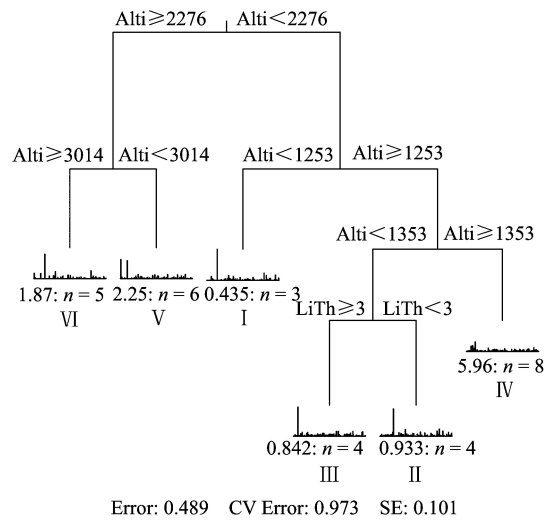


图 2 太白山自然保护区森林的多元回归树分类树状图

Fig.2 Dendrogram of multivariate regression trees classification in Taibai Mountain Nature Reserve forest community

Error: 相对误差, Relative error; CV Error: 交叉检验相对误差, Relative error of cross validation; SE: 标准差, Standard error; Alti: 海拔, Altitude; LiTh: 枯落物厚度, Litter thickness; I—VI: 群落类型, Community types; I: 栓皮栎 + 蒙古荚蒾 + 野棉花群落, *Quercus variabilis* + *Viburnum mongolicum* + *Anemone vitifolia* community; II: 油松 + 马桑 + 紫草群落, *Pinus tabuliformis* + *Coriaria nepalensis* + *Lithospermum erythrorhizon* community; III: 华山松 + 巴山木竹 + 川西鳞毛蕨群落, *Pinus armandii* + *Bashania fargesii* + *Dryopteris rosthornii* community; IV: 锐齿槲栎 + 毛樱桃 + 华蟹甲群落, *Quercus aliena* var. *acutiserrata* + *Cerasus tomentosa* + *Sinacalia tangutica* community; V: 巴山冷杉 + 太白杜鹃 + 橐吾群落, *Abies fargesii* + *Rhododendron purdomii* + *Ligularia sibirica* community; VI: 太白红杉 + 冠果忍冬 + 野青茅群落, *Larix chinensis* + *Lonicera stephanocarpa* + *Deyeuxia arundinacea* community; n 代表每个群落包含的样地数

表 1 太白山自然保护区森林群落多元回归树(MRT, multivariate regression trees)分类的基本特征

Table 1 Basic characteristics of MRT classification of forest communities in the Taibai Mountain Nature Reserve

群落类型 Community types	海拔/m Altitude	坡度/(°) Slope	坡向 Aspect	样地 Sample plots
I	1190—1200	37—43	东北坡、西北坡	1、2、5
II	1306—1350	18—35	西北坡、西南坡	10、11、12、13
III	1310—1352	34—40	东北坡、东南坡、西北坡、西坡	16、18、19、20
IV	1353—2126	20—32	西北坡、东北坡、西南坡、北坡、东南坡	3、4、6、14、17、7、8、9
V	2425—2886	24—36	西北坡、东南坡、西南坡	21、22、29、15、23、24
VI	3141—3391	26—34	东南坡、东北坡、西北坡	25、26、27、28、30

结合群落分类和排序结果可以分析 6 个群落的分布规律。其中,栓皮栎 + 蒙古荚蒾 + 野棉花群落(群落 I)分布在海拔低,坡度大的区域,位于排序图的左下方;油松 + 马桑 + 紫草群落(群落 II)和华山松 + 巴山木竹 + 川西鳞毛蕨群落(群落 III)均分布在海拔低且坡度平缓的区域,位于排序图的左方,群落 III 的枯落物厚度大

于群落Ⅱ;锐齿槲栎+毛樱桃+华蟹甲群落(群落Ⅳ)分布在海拔中等,坡度平缓且干扰强度适中的区域,位于排序图的上中部和左下部;巴山冷杉+太白杜鹃+橐吾群落(群落Ⅴ)分布在海拔较高、坡度平缓、干扰较大的区域,位于排序图的右方中部;太白红杉+冠果忍冬+野青茅群落(群落Ⅵ)分布在海拔高,坡度较陡且干扰较大的区域,位于排序图的右方中部。

表 2 环境因子的显著性检验
Table 2 Significance test of environmental factors

环境因子 Environmental factors	环境因子与排序轴的相关系数 Correlation coefficient between environmental factors and sorting axis		决定系数 R^2 Coefficient of determination	显著性检验 ($Pr(>r)$) Significance test
	CCA1	CCA2		
海拔 Altitude	0.99835	0.05747	0.9880	0.000999 ***
坡向 Aspect	0.87122	0.49089	0.1175	0.171828
枯落物厚度 Litter thickness	0.24733	0.96893	0.3004	0.010989 *
干扰情况 Disturbance	0.25882	0.96593	0.2323	0.025974 *
坡度 Slope	-0.29387	-0.95585	0.5321	0.000999 ***

*** 表示在 0.001 水平上显著, ** 表示在 0.01 水平上显著, * 表示在 0.05 水平上显著

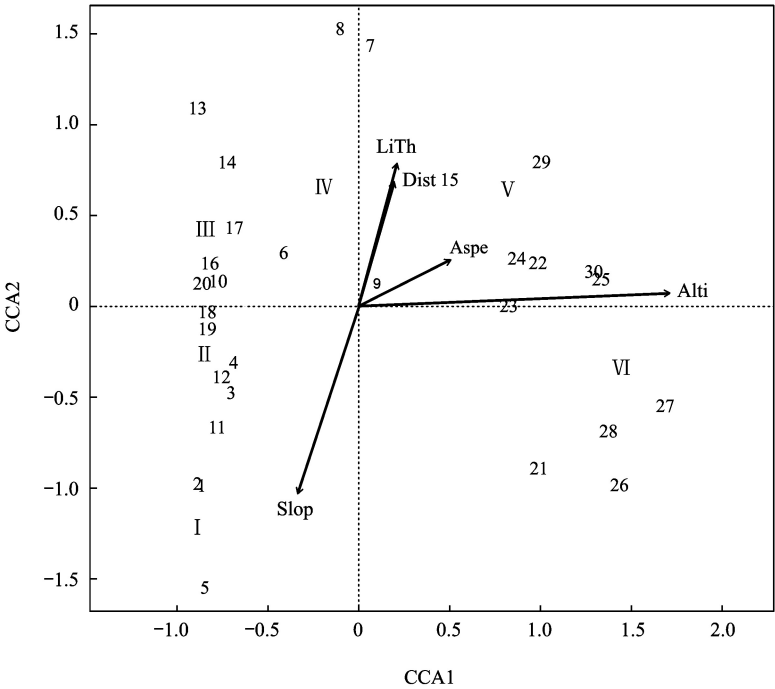


图 3 太白山自然保护区森林群落 30 个样方的典范对应分析 (CCA, canonical correspondence analysis) 二维排序图

Fig.3 Two-dimensional CCA ordination diagram of 30 plots of Taibai Mountain Nature Reserve forest community

Alti:海拔 Altitude; Aspe:坡向 Aspect; LiTh:枯落物厚度 Litter thickness; Dist:干扰情况 Disturbance; Slop:坡度 Slope; 1—30 代表样方号; I—VI:群落类型, Community types

2.3 群落总体多样性

结果由图 4、5、6 表明,群落Ⅳ的三种多样性指数均为最高,群落Ⅰ的物种丰富度和 Pielou 均匀度最低,群落Ⅵ的 Shannon-Wiener 多样性指数最低。群落Ⅱ和群落Ⅲ处于同一海拔,但群落Ⅱ的三种多样性指数均较高于群落Ⅲ。除了群落Ⅱ和群落Ⅲ处于同一梯度海拔以外,其余森林群落基本以海拔梯度分布,因而可以看出位于中海拔区域森林群落的三种总体多样性指数均较高,而位于高海拔和低海拔区域森林群落的三种总体多样性指数均较低。

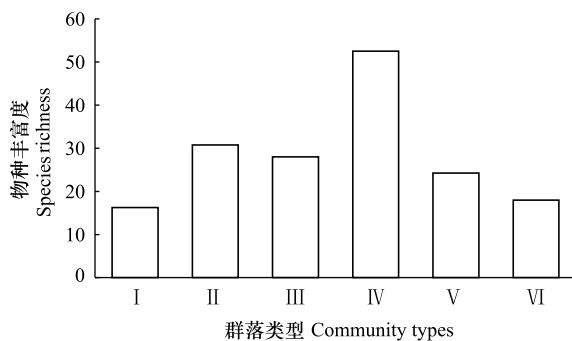


图4 太白山自然保护区森林群落的物种丰富度差异

Fig.4 Differences in species richness of forest community Taibai Mountain Nature Reserve

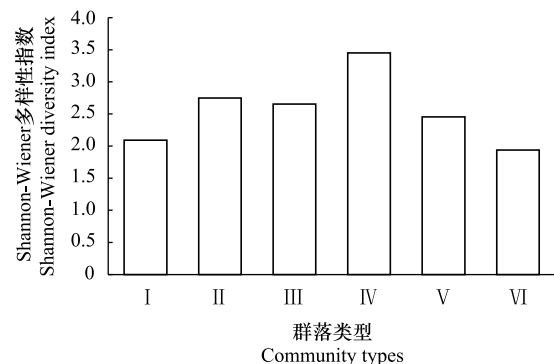


图5 太白山自然保护区森林群落的多样性指数差异

Fig.5 Differences in diversity index of forest community Taibai Mountain Nature Reserve

3 讨论

本次研究使用多元回归树 (MRT) 将研究区域的 30 个样地分为 6 个森林群落。从图 2 可以看出群落 II 和群落 III 由枯落物厚度差异来划分, 而其余群落均由海拔差异来划分, 因而在一定程度上反应了生境条件的梯度变化。其中群落 II 和群落 III、群落 V 和群落 VI 的物种组成相似度分别较高。群落 IV 中包含着较多的样地和物种, 但由于样地的生境和物种组成结构相似度高, 因而将其归为一个群落, 而有些样地虽地理位置距离较远, 但仍被划为一个群落, 这可能是由于太白山地形复杂而产生的小气候导致的。群落 I、II 位于低海拔区域,

热量充足, 而栓皮栎喜暖, 因此在两个群落中均有出现。群落 VI 位于高海拔区域, 温度低, 因而存在许多耐寒的植物, 如太白红杉、银露梅 (*Potentilla glabra*)、秦岭沙参 (*Adenophora petiolata*)、金莲花 (*Trollius chinensis*)、独叶草等。在其他关于太白山森林群落的分类研究中, 唐志尧等^[15]使用 TWINSpan 将太白山植被分为锐齿槲栎林、辽东栎林、红桦林、糙皮桦 (*Betula utilis*) 林、巴山冷杉林、太白落叶松 (太白红杉) 林和高山灌丛 7 种类型, 并且沿海拔从下至上依次分布, 而张善红等^[25]则采用了地理信息系统将太白山植被分为灌丛草甸、太白红杉、巴山冷杉、桦林、栎林和非林地六种植被类型。可以看出, 位于较高海拔区域的植被群落分类结果与本研究一致, 而位于中低海拔区域植被复杂, 不同的样地设置和研究方法可能导致分类结果与本研究略有不同。

通过对 5 个解释因子进行蒙特卡罗置换检验, 得出海拔、枯落物厚度、坡度和干扰情况 4 种因子对太白山自然保护区的植被分布格局有着显著影响。MRT 分类和 CCA 排序的结果均反映了海拔是影响太白山森林群落分布的最主要的原因, 6 个群落基本在 CCA 排序图上沿着第一排序轴规律分布。第一排序轴主要与海拔高度有关, 这与其他相关研究结论一致^[26-27], 海拔高度属于综合性的因子, 其变化会影响水分、温度等环境因子^[28]。第二排序轴主要与坡度、枯落物厚度、干扰情况有关。坡度会影响土壤的持水能力, 从而限制了植物生长发育所需的水分^[29], 枯落物厚度越大土壤养分越丰富^[30]。不同的干扰强度也会影响植物的分布^[8, 31]。群落 IV 虽位于中部海拔区域, 地势平缓且物种多样性高, 但有着中等干扰, 这可能与附近居民采草药和旅游等活动有关; 群落 V、VI 虽处于高海拔区域, 但依旧有部分干扰, 这可能与当地旅游业开发有关, 因此在

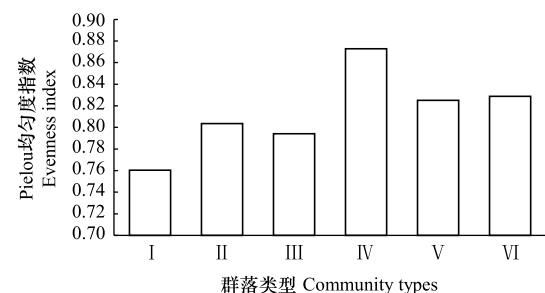


图6 太白山自然保护区森林群落的均匀度指数差异

Fig.6 Differences in evenness index of forest community Taibai Mountain Nature Reserve

进行旅游业开发的同时,应注重对植被的保护和管理,防止过度开发对太白山植被的破坏。在一些研究中,坡向对植被群落的分布有着显著影响^[2,32],而本次研究中坡向对森林群落的分布的影响虽表现为与第一排序轴的相关系数较高,但是并不显著,这可能是研究范围不一致所导致的。在解释量方面,本次研究所使用的环境因子未对剩余的 75.89% 做出解释,尽管在群落研究中环境解释量允许较低^[33],但在以后的研究中应考虑更多的环境因子,如土壤的理化性质、土壤厚度和岩石暴露率等。

通过对不同群落的总体多样性指数进行分析,得出位于中海拔地区的群落Ⅳ的物种丰富度、Shannon-Wiener 多样性和 Pielou 均匀度指数均为最高,这可能与中海拔地区的温度、光照、水分都相对适中,并且坡度较为平缓有关;而位于低海拔的群落Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ的总体多样性偏低,这可能是由于该区域虽热量充足,但缺乏充足的光照和水分导致的。而群落Ⅴ、Ⅵ的总体多样性随着海拔的继续升高而逐渐减少,这与高海拔区域温度较低有关,许多植物因耐寒能力不足而无法生存。从物种丰富度、Shannon-Wiener 多样性上看,群落总体多样性在海拔高度层面呈现出单峰模型,这之前学者的研究一致^[17],而 Pielou 均匀度指数在海拔高度层面所呈现的规律不明显。本次研究群落总体多样性是通过经验加权的方式进行计算,并将加权和未加权的多样性指数进行相关性分析检验,结果表明两种方法所得到的群体多样性指数在 0.01 水平上显著,因而本次研究所使用的加权系数是合理的。张峰等^[18]认为经验权重系数是比较合理的,它没有影响客观生态意义反映,同时参数值也突出体现了群落中不同结构、不同层次对于群落总体多样性具有不同的贡献的特点。

太白山植物种类丰富,有着明显的植被垂直分带,而中低部海拔区域生境优越,孕育着丰富的物种,复杂的物种分布使得群落的划分较为困难,因而本次研究尝试将 MRT 分类和 CCA 排序相结合的方法对其进行研究,将分类的间断性和排序的连续性相结合,能够更合理地探究群落组成、揭示群落分布和环境的关系。通过对比不同群落的总体多样性差异,进一步研究森林群落多样性在海拔水平的变化格局,这对揭示太白山生物多样性环境梯度变化规律具有重要意义。本次研究有助于深入了该保护区森林群落的空间分布规律,掌握不同物种的生活习性,保护珍稀物种,为今后保护区森林的管理、利用和保护提供一定的理论依据。

4 结论

本研究通过多元回归树 (MRT) 对太白山自然保护区典型森林群落进行数量分类,采用典范对应分析 (CCA) 进行排序,并对分类得到的森林群落的总体多样性进行分析。主要结论如下:

(1) 将太白山自然保护区典型森林群落分为 6 类:栓皮栎+蒙古莢蒾+野棉花群落(群落Ⅰ)、油松+马桑+紫草群落(群落Ⅱ)、华山松+巴山木竹+川西鳞毛蕨群落(群落Ⅲ)、锐齿槲栎+毛樱桃+华蟹甲群落(群落Ⅳ)、巴山冷杉+太白杜鹃+橐吾群落(群落Ⅴ)和太白红杉+冠果忍冬+野青茅群落(群落Ⅵ)。

(2) CCA 排序反映了太白山森林群落与环境因子的关系,结果表明:海拔、坡度、枯落物厚度和干扰情况 4 个变量对本研究区群落分布有显著影响。

(3) 位于中海拔区域森林群落的 3 种总体多样性指数(物种丰富度、Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数)均较高,而位于高海拔和低海拔区域森林群落的 3 种总体多样性指数相对较低。

参考文献 (References):

- [1] 张金屯. 数量生态学(第二版). 北京: 科学出版社, 2011.
- [2] 钟娇娇, 陈杰, 陈倩, 姬柳婷, 康冰. 秦岭山地天然次生林群落 MRT 数量分类、CCA 排序及多样性垂直格局. 生态学报, 2019, 39(1): 277-285.
- [3] 李婷婷, 姬兰柱, 于大炮, 周莉, 周旺明, 毛沂新, 代力民. 东北阔叶红松林群落分类、排序及物种多样性比较. 生态学报, 2019, 39(2): 620-628.
- [4] 秦朋遥, 杨会娟, 蒋凤玲, 张树彬, 田晓敏, 黄选瑞, 张志东. 河北省塞罕坝保护区天然植物群落数量分类. 应用生态学报, 2016, 27(5): 1383-1392.
- [5] Burke A. Classification and ordination of plant communities of the Naukluft Mountains, Namibia. Journal of Vegetation Science, 2001, 12(1): 53-60.

- [6] 刘润红, 涂洪润, 李娇凤, 梁士楚, 姜勇, 荣春艳, 李月娟. 桂林岩溶石山青冈群落数量分类与排序. 生态学报, 2019, 39(22): 8595-8605.
- [7] De'ath G. Multivariate regression trees: a new technique for modeling species-environment relationships. Ecology, 2002, 83(4): 1105-1117.
- [8] 白晓航, 张金屯, 曹科, 王云泉, Sadia S, 曹格. 河北小五台山国家级自然保护区森林群落与环境的关系. 生态学报, 2017, 37(11): 3683-3696.
- [9] Virtanen R, Luoto M, Rämä T, Mikkola K, Hjørt J, Grytnes J A, Birks H J B. Recent vegetation changes at the high-latitude tree line ecotone are controlled by geomorphological disturbance, productivity and diversity. Global Ecology and Biogeography, 2010, 19(6): 810-821.
- [10] 赖江山, 米湘成. 基于 Vegan 软件包的生态学数据排序分析//第九届全国生物多样性保护与持续利用研讨会论文集. 厦门: 国际生物多样性计划中国委员会, 中国科学院生命科学与生物技术局, 2010.
- [11] Vitzto P, Bayfield N, Brooker R, Elston D A, Duff E I, Theurillat J P, Guisan A. Reproducibility of species lists, visual cover estimates and frequency methods for recording high-mountain vegetation. Journal of Vegetation Science, 2010, 21(6): 1035-1047.
- [12] Leendertse P C, Roozen A J M, Rozema J. Long-term changes (1953-1990) in the salt marsh vegetation at the Boschplaat on Terschelling in relation to sedimentation and flooding. Plant Ecology, 1997, 132(1): 49-58.
- [13] Otto R, Krüsi B O, Burga C A, Fernández-Palacios J M. Old-field succession along a precipitation gradient in the semi-arid coastal region of Tenerife. Journal of Arid Environments, 2006, 65(1): 156-178.
- [14] 张莹, 董国华, 杜焰玲, 刘璞, 康冰. 太白山典型植被类型区药用植物的区系特征. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2013, 41(11): 51-57, 66-66.
- [15] 唐志尧, 方精云, 张玲. 秦岭太白山木本植物物种多样性的梯度格局及环境解释. 生物多样性, 2004, 12(1): 115-122.
- [16] 任学敏. 太白山主要植物群落数量分类及其物种组成和丰富度的环境解释[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2012.
- [17] 陈云, 王海亮, 韩军旺, 韦博良, 贾宏汝, 叶永忠, 袁志良. 小秦岭森林群落数量分类、排序及多样性垂直格局. 生态学报, 2014, 34(8): 2068-2075.
- [18] 郭华, 张桂萍, 铁军, 李燕芬. 太行山南段油松群落物种多样性研究. 植物科学学报, 2015, 33(2): 151-157.
- [19] 张峰, 张金屯, 上官铁梁. 历山自然保护区猪尾沟森林群落植物多样性研究. 植物生态学报, 2002, 26(S1): 46-51.
- [20] Zhang J T, Xu B, Li M. Vegetation patterns and species diversity along elevational and disturbance gradients in the Baihua Mountain Reserve, Beijing, China. Mountain Research and Development, 2013, 33(2): 170-178.
- [21] 赖江山, 米湘成, 任海保, 马克平. 基于多元回归树的常绿阔叶林群丛数量分类——以古田山 24 公顷森林样地为例. 植物生态学报, 2010, 34(7): 761-769.
- [22] 郭水良, 于晶, 陈国奇. 生态学数据分析——方法、程序与软件. 北京: 科学出版社, 2015.
- [23] Borcard D, Gillet F, Legendre P. Numerical Ecology with R. New York: Springer, 2011.
- [24] 张文静, 张钦弟, 王晶, 冯飞, 毕润成. 多元回归树与双向指示种分析在群落分类中的应用比较. 植物生态学报, 2015, 39(6): 586-592.
- [25] 张善红, 张孝存. 基于 GIS 的太白山植被与环境梯度关系分析. 商洛学院学报, 2014, 28(4): 19-24.
- [26] 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. 植物生态学报, 2006, 30(3): 383-391.
- [27] 苏日古嘎, 张金屯, 张斌, 程佳佳, 田世广, 张钦弟, 刘素军. 松山自然保护区森林群落数量分类和排序. 生态学报, 2010, 30(10): 2621-2629.
- [28] Sim-Si M, Lopes T, Ruas S, Stech M. Does altitude shape molecular diversity and richness of bryophytes in Madeira's natural forest? A case study with four bryophyte species at two altitudinal levels. Plant Ecology and Evolution, 2015, 148(2): 171-180.
- [29] 陈瑶, 胥晓, 张德然, 魏勇. 四川龙门山西北部植被分布与地形因子的相关性. 生态学杂志, 2006, 25(9): 1052-1055.
- [30] Moriyama A, Yonemura S, Kawashima S, Du M Y, Tang Y H. Environmental indicators for estimating the potential soil respiration rate in alpine zone. Ecological Indicators, 2013, 32: 245-252.
- [31] 廉凯敏, 吴应建, 张丽, 赵璐璐, 张峰. 太宽河自然保护区板栗群落数量分类与排序. 生态学杂志, 2015, 34(1): 33-39.
- [32] 姚帅臣, 王景升, 丁陆彬, 包小婷, 李超, 王彤, 刘文婧, 李妍妍. 拉萨河谷草地群落数量分类与排序. 生态学报, 2018, 38(13): 4779-4788.
- [33] 包小婷, 丁陆彬, 姚帅臣, 王景升, 石培礼, 王彤, 李超, 刘文婧. 拉萨河流域植物群落数量分类与排序. 生态学报, 2019, 39(3): 779-786.