

# 陕西秦岭西段典型森林群落数量分类与排序及多样性特征

崔雨昕, 胡宁宁, 王 丹, 孙 萌, 康 冰\*

(西北农林科技大学 生命科学学院, 陕西 杨陵 712100)

**摘 要:**为探究陕西秦岭西段典型森林群落的空间分布格局及其与环境因子的关系,为研究区域森林群落物种多样性保护提供理论依据。分别对摩天岭自然保护区和紫柏山自然保护区进行全面踏查,共选取了 20 个具有典型植被特征的群落作为样地,通过多元回归树(multivariate regression trees, MRT)对 20 个样地进行数量分类,使用典范对应分析(canonical correspondence analysis, CCA)进行排序,并对分类得到的森林群落总体多样性进行分析。结果表明,1)对 20 个样地进行 MRT 分类,得出陕西秦岭西段典型森林群落可以分为 3 类,分别为油松-白刺花-野棉花群落、辽东栎-覆盆子-蛇莓群落和华山松-巴山木竹-野青茅群落。2)CCA 排序揭示了陕西秦岭西段典型森林群落分布与环境因子的关系,表明海拔是影响研究区域森林群落分布最主要的环境因子,其次是坡向和坡度。3)研究区域森林群落各层次的物种丰富度和 Shannon-Wiener 多样性指数以及乔木层的 Pielou 均匀度指数总体上呈沿海拔梯度上升的趋势,而灌木层和草本层的 Pielou 均匀度指数随海拔梯度波动不大。综上,海拔是影响陕西秦岭西段森林群落组成和分布的主要环境因子,研究结果可为深入探究陕西秦岭西段森林群落的空间分布格局及其物种多样性的保护提供了理论依据。

**关键词:**多元回归树;典范对应分析;物种多样性;群落分类;秦岭西段

中图分类号:Q948

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2024)02-0173-09

## Quantitative Classification, Sorting and Diversity Characteristics of Typical Forest Communities in Western Section of the Qinling Mountains, Shaanxi Province

CUI Yu-xin, HU Ning-ning, WANG Dan, SUN Meng, KANG Bing\*

(College of Life Sciences, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China)

**Abstract:** In order to investigate the spatial distribution patterns of typical forest communities in the western part of the Qinling Mountains in Shaanxi and their relationships with environmental factors, and to provide a theoretical basis for studying the conservation of species diversity in regional forest communities, a comprehensive survey was carried out in the Motianling Nature Reserve and Zibaishan Nature Reserve. Twenty communities with typical vegetation characteristics were selected as sample plots, which were quantitatively classified by multivariate regression trees (MRT), ranked by canonical correspondence analysis (CCA), and the overall diversity of forest communities obtained by classification was analyzed. The results showed that 1) MRT classification of 20 plots showed that the typical forest communities of the western section of the Qinling Mountains could be divided into three categories, namely *Pinus tabulaeformis*-*Sophora davidii*-*Anemone vitifolia* community, *Quercus mongolica*-*Rubus idaeus*-*Duchesnea indica* community and *P. armandii*-*Arundinaria fargesii*-*Deyeuxia pyramidalis* community. 2) CCA ranking revealed the relationship between typical forest community distribution and environmental factors, and the

收稿日期:2023-01-20 修回日期:2023-04-27

基金项目:2019 年医疗服务与保障能力提升补助资金项目(中医药事业传承与发展部分第四次全国中药资源普查项目)(财社[2019]39 号)。

第一作者:崔雨昕。研究方向:植物资源保护。E-mail: cuiyuxinaa@163.com

\* 通信作者:康 冰, 硕士生导师。研究方向:森林生态系统管理。E-mail: yl-kangbing@163.com

results showed that elevation was the most important environmental factor affecting the distribution of forest communities in the study area, followed by slope aspect and slope gradient. 3) The species richness and Shannon-Wiener diversity indices of all levels of the forest communities in the study area and the Pielou evenness index of the tree layer generally showed an increasing trend along the elevation gradient, while the Pielou evenness index of the shrub and herb layers did not fluctuate much with the elevation gradient. In summary, elevation is the main environmental factor affecting the distribution and composition of forest communities in the western part of the Qinling Mountains in Shaanxi, and the results of the study provide a theoretical basis for an in-depth investigation of the spatial distribution patterns of forest communities and the conservation of their species diversity in the western part of the Qinling Mountains in Shaanxi.

**Key words:** multiple regression tree; canonical correspondence analysis; species diversity; community classification; western section of the Qinling Mountains

在植被生态学研究,数量分类与排序是一种可以阐明植物种类、植物群落与环境因子之间关系的常用方法<sup>[1-3]</sup>。多元回归树(multivariate regression trees, MRT)是一种约束聚类方法<sup>[4]</sup>,可用于描述和预测两个变量矩阵间的关系,其响应变量可以通过解释变量进行解释,并且可以通过解释变量进行预测,经过交叉验证等一系列筛选过程,起到良好的预测作用<sup>[5]</sup>。排序是一种分析群落间连续分布关系,进而确定植被与环境间关系的方法<sup>[6]</sup>。典范对应分析(canonical correspondence analysis, CCA)是生态学研究较常用的一种排序方法<sup>[7]</sup>,它涉及2个数据矩阵,即响应变量矩阵(物种多度数据集)以及解释变量矩阵(环境变量数据集)<sup>[8]</sup>,因此CCA能够更好地反映群落与环境的关系,从而揭示环境因子对群落组成及其分布格局的影响<sup>[9]</sup>。利用MRT和CCA相结合的方法,可以兼顾分类的间断性和排序的连贯性,更深刻全面的揭示群落与环境之间的生态关系。物种多样性可以在一定程度上反映群落的结构组成、生境差异及其稳定性<sup>[9]</sup>,是群落生物组成结构的重要指标<sup>[10]</sup>。森林群落的物种多样性会受到多种环境因子的影响,其中最显著的影响因子就是海拔,海拔会对植物生长所需的光照、水分、温度和土壤等条件产生影响,从而制约植物的生长分布。探究群落物种多样性与海拔间的关系,能够揭示群落组成结构产生差异的原因,对群落的演替发展趋势形成更全面的认识,同时对于将来保护区植被多样性的恢复和濒危物种的保护有着重要意义<sup>[11]</sup>。

秦岭山脉拥有得天独厚的地理位置,是中国地理上最重要的南北分界山脉。秦岭可分为西、中、东3段,其中西段分为3支,包括北支南岐山、中支凤岭、南支紫柏山,秦岭西段在陕西境内的山岭主要有紫柏山、摩天岭、宝峰山等。秦岭西段是我国目前保有最原始森林生态系统的地区之一,具有极其重要

的生态地位,境内地理环境条件复杂多变,植被类型典型丰富<sup>[12]</sup>。但近年来人工林扩张迅速,同时由于秦岭西段复杂的地形地貌及多变的气候环境,泥石流、山体滑坡等自然灾害频发<sup>[13]</sup>,对秦岭西段森林群落的物种多样性造成了一定程度的威胁。因此探究森林群落的分布特征、物种多样性垂直格局对秦岭西段森林的保护及可持续发展具有十分重要的意义。目前针对秦岭西段森林群落分类排序的研究主要采用的是TWINSpan和DCA方法<sup>[14]</sup>,但使用MRT和CCA方法的相关研究仍为空白。TWINSpan分类方法是以指示种为分类依据,而MRT将物种和环境因子同时作为分类依据,包含的信息更全面,分类结果更客观可信;DCA排序方法主要反映的是群落之间的关系<sup>[15]</sup>,而CCA能更好地反映物种与环境之间的关系。因此本研究选取陕西秦岭西段的摩天岭自然保护区和紫柏山自然保护区的典型森林群落为研究对象,共选取20个具有典型植被特征的样地进行全面踏查,运用MRT和CCA方法对群落进行分类排序并探究其组成分布与环境因子之间的关系,对群落物种多样性格局进行分析,从而揭示群落分布对海拔梯度的响应机制,为陕西秦岭西段森林群落的恢复发展及生物多样性保护提供一定的科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

摩天岭自然保护区位于秦岭西段(106°55'10"—107°10'06"E, 33°30'12"—33°45'11"N),地处陕西省留坝县境内,东西长50 km,南北宽18.6 km,总面积8 520 hm<sup>2</sup>。保护区属典型的暖温带湿润季风山地气候,气候季节性变化和垂直梯度变化差异明显,年平均气温11.5℃,无霜期200 d,年均降水量约886.3 mm。该区属典型的剥蚀地貌,土壤以有机质含量较高的棕壤和黄棕壤为主<sup>[12]</sup>。区内森林覆盖

率高,动植物资源丰富,生境条件复杂,植物种类丰富多样,有高等植物 181 科 655 属 1 330 种,国家重点保护植物 9 种。其中苔藓植物 114 种,蕨类植物 71 种,种子植物 1 145 种,种子植物包括裸子植物 18 种,主要有华山松(*Pinus armandii*)、白皮松(*Pinus bungeana*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)等,被子植物 1 127 种,主要有锐齿槲栎(*Quercus aliena* var. *acutiserrata*)、白桦(*Betula platyphylla*)、辽东栎(*Quercus wutaishansea*)、白刺花(*Sophora davidii*)、甘肃山楂(*Crataegus kansuensis*)、覆盆子(*Rubus idaeus*)、细叶薹草(*Carex duriuscula* subsp. *stenophylloides*)、蛇莓(*Duchesnea indica*)、活血丹(*Glechoma longituba*)等。保护区植物区系成分具有明显的过渡性,主要分布区类型为温带分布型及世界分布型,少数为热带分布型及东亚分布型。

紫柏山自然保护区位于秦岭西段(106°28′50″—106°46′04″E,33°39′45″—33°45′31″N),地处陕西省凤县境内,总面积 17 472 hm<sup>2</sup>。保护区属暖温带半湿润山地气候,年平均气温 12.1℃,年降水量 578.8 mm,土壤以棕壤和黄棕壤为主<sup>[15]</sup>。区内植物资源丰富多样,森林覆盖率达 95.3%,有种子植物 1 300 多种,植被分布受地形、气候和海拔的影响,形成典型的森林垂直带谱,自上而下依次形成落叶阔叶林带、针阔混交林带、针叶林带、亚高山灌丛和草甸。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置与信息记录 2021 年 7—8 月在摩天岭自然保护区和紫柏山自然保护区内进行全面踏查,依据森林植被的典型性和代表性并参照海拔梯度变化在 2 个研究区域共选取 20 个样地,其中摩天岭自然保护区 10 个、紫柏山自然保护区 10 个(表 1)。每个样地设置 1 个 25 m×25 m 的乔木层样方,按照五点取样法在样地的中心及 4 个角分别设置 1 个 2 m×2 m 的灌木层样方以及 1 个 1 m×1 m 的草本层样方<sup>[16]</sup>。共获得乔木层样方 20 个,灌木层样方 100 个,草本层样方 100 个。详细调查各个样方内所有植物的种名、株数、株高、胸径、冠幅和盖度等信息并进行记录<sup>[9]</sup>。利用手持 GPS 仪记录各样地的经纬度和海拔,同时记录坡度、坡向、枯落物厚度、干扰程度、地形地貌及土壤类型等信息<sup>[16]</sup>。其中海拔及坡度用实际记录值表示。坡向按其方向不同分为 8 种,分别用罗马数字表示:北坡为 1,东北坡为 2,西北坡为 3,东坡为 4,西坡为 5,东南坡为 6,西南坡为 7,南坡为 8,数字越小,表示坡向越背阴,光照条件越差,热量越低<sup>[18]</sup>。干扰情况按程度高低分为 4 个等级,以动物踩踏情况和人为采伐强度为判定标准,用数字表示各等级:无干扰为 1 级,样地内没有乔木被砍伐现且灌木层和草本层保存完整;轻微干扰为 2 级,样地内留有 1~5 株乔木伐桩且灌木层和草本层保存基本完整;中度干扰为 3 级,样地内留有 5~10 株乔木伐桩且灌木层

表 1 样地基本概况  
Table 1 Basic information of sample plots

样地号	地名	经度	纬度	海拔/m	坡度/(°)	坡向	群落盖度(%)
1	摩天岭	106°56.595' E	33°31.337' N	1 354	33	东北坡	80
2	摩天岭	106°56.580' E	33°31.323' N	1 391	28	东北坡	75
3	摩天岭	106°57.590' E	33°32.323' N	1 391	30	西南坡	70
4	摩天岭	106°59.423' E	33°32.705' N	1 537	21	东北坡	80
5	摩天岭	107°01.433' E	33°33.751' N	1 538	10	东北坡	90
6	摩天岭	107°01.281' E	33°33.742' N	1 468	12	东南坡	85
7	摩天岭	107°02.263' E	33°33.736' N	1 468	20	东南坡	80
8	摩天岭	107°04.275' E	33°35.179' N	1 457	32	西北坡	80
9	摩天岭	107°07.366' E	33°36.216' N	1 466	30	西北坡	75
10	摩天岭	107°09.016' E	33°37.905' N	1 934	23	西北坡	70
11	紫柏山	106°29.326' E	33°40.068' N	2 080	20	西南坡	75
12	紫柏山	106°30.405' E	33°40.096' N	2 164	22	西南坡	65
13	紫柏山	106°30.987' E	33°41.671' N	1 895	10	西南坡	80
14	紫柏山	106°32.178' E	33°41.435' N	1 877	10	西南坡	70
15	紫柏山	106°34.002' E	33°41.845' N	1 877	18	西北坡	75
16	紫柏山	106°35.167' E	33°43.445' N	1 845	5	西南坡	80
17	紫柏山	106°38.212' E	33°43.657' N	1 910	5	西南坡	65
18	紫柏山	106°40.034' E	33°44.090' N	1 197	36	东北坡	80
19	紫柏山	106°41.060' E	33°45.083' N	1 211	36	东北坡	80
20	紫柏山	106°42.134' E	33°45.124' N	1 191	15	西北坡	80

和草本层有动物踩踏或人为破坏现象;强度干扰为4级,样地内留有10株以上乔木伐桩且灌木层和草本层破坏十分严重<sup>[19]</sup>;共计4种环境因子。

1.2.2 多元回归树 多元回归树(MRT)是一种约束聚类方法,可用于描述和预测2个变量之间的关系。MRT由2步程序组成,即数据的约束划分和分类结果的交叉验证。将环境因子作为分类阈值,利用递归划分法将样地划分为不同的组别<sup>[9]</sup>,基于交叉验证相对误差值(CVRE)最小代表预测能力最好的原则对回归树剪裁<sup>[20]</sup>,获得最优树。

1.2.3 典范对应分析 典范对应分析(CCA)是一种对应分析与多元回归结合的单峰约束排序方法<sup>[21]</sup>,涉及物种数据矩阵和环境数据矩阵2个数据矩阵<sup>[24]</sup>。首先计算出一组样方排序值和种类排序值,然后将样方排序值与环境因子用回归分析方法结合起来,再用样方排序值加权平均求种类排序值,这样得到的排序图可以同时反映样方、物种和环境因子之间的关系。

1.2.4 物种多样性指数的计算 计算群落乔木层、灌木层和草本层的多样性指数,公式<sup>[17]</sup>如下

物种丰富度(S)

$$S = \text{物种数} \quad (1)$$

Shannon-wiener 多样性指数( $H'$ )

$$H' = -\sum P_i \ln P_i \quad (2)$$

Pielou 均匀度指数( $J$ )

$$J = H' / \ln S \quad (3)$$

式中: $P_i$ 为物种*i*的相对重要值。

### 1.3 数据处理

利用EXCEL软件对调查记录的数据进行初步的处理与计算。将20个样地中的4种环境因子作为划分节点,218种植物的重要值作为响应变量,利用R语言的mvpart程序包进行群落分类<sup>[22]</sup>。将物种重要值矩阵(20×218)与环境因子矩阵(20×4)相结合利用R软件中的Vegan软件包进行CCA排序<sup>[15]</sup>,使用蒙特卡罗显著检验对CCA结果进行显著性分析<sup>[23]</sup>,研究影响群落分布的主要环境因子。

## 2 结果与分析

### 2.1 多元回归树群落数量分类

如图1所示,根据CVRE值最小代表预测能力最好的原则,最终选择“A”点作为回归树规模。如图2所示,经过交叉验证,20个样地以海拔为节点被划分为3类群落。根据中国植物群落分类和命名原则以及MRT划分的各群落乔木层、灌木层和草本层的优势种对3类群落类型进行命名。

群落I 油松-白刺花-野棉花(*Anemone vitifo-*

*lia*)群落。该群落包括18、19、20共3个样地,海拔在1283 m以下,该群落类型面积占研究区域森林群落总面积的15%。乔木层优势种为油松,伴生种为青榨槭(*Acer davidii*)、鹅耳枥(*Carpinus turczaninowii*)、白桦等;灌木层优势种为白刺花,伴生种为苦糖果(*Lonicera fragrantissima* var. *lanceifolia*)、毛樱桃(*Prunus tomentosa*)、多花胡枝子(*Lespedeza floribunda*)、卫矛(*Euonymus alatus*)等;草本层优势种为野棉花,伴生种为披碱草(*Elymus dahuricus*)、细叶薹草、牡蒿(*Artemisia japonica*)、紫花地丁(*Viola philippica*)等。

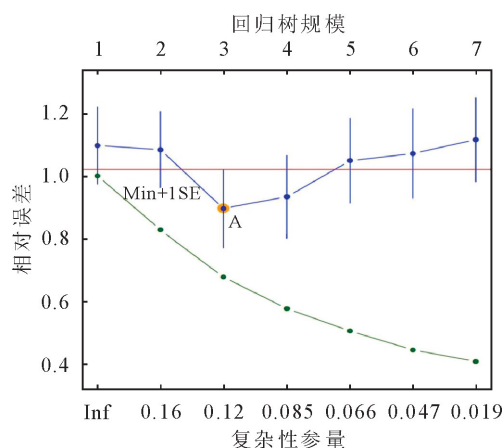


图1 陕西秦岭西段森林群落分类相对误差和交叉验证相对误差变化

Fig. 1 Changes in relative error and cross-validation relative error of forest community classification in western section of the Qinling Mountains, Shaanxi

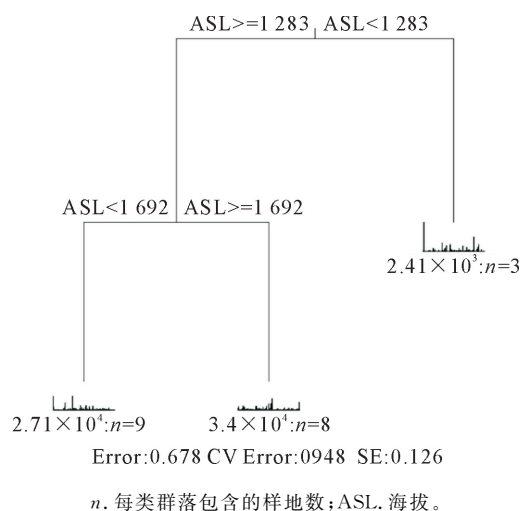


图2 陕西秦岭西段森林群落的多元回归树分类

Fig. 2 Multiple regression tree classification diagram of forest community in western section of the Qinling Mountains, Shaanxi

群落II 辽东栎-覆盆子-蛇莓群落。该群落包括1、2、3、4、5、6、7、8、9共9个样地,海拔在1283~1692 m,该群落类型面积占研究区域森林群落总面积的45%。乔木层优势种为辽东栎,伴生种为千金



榆(*Carpinus cordata*)、水榆花楸(*Sorbus alnifolia*)、青榨槭、华山松等;灌木层优势种为覆盆子,伴生种为光叶高丛珍珠梅(*Sorbaria arborea* var. *glabrata*)、膀胱果(*Staphylea holocarpa*)、绣线菊(*Spiraea salicifolia*)、土庄绣线菊(*Spiraea pubescens*)、山梅花(*Philadelphus incanus*)等;草本层优势种为蛇莓,伴生种为细叶薹草、活血丹、淫羊藿(*Epimedium brevicornu*)、雀麦(*Bromus japonicus*)、披针薹草(*Carex lancifolia*)等。

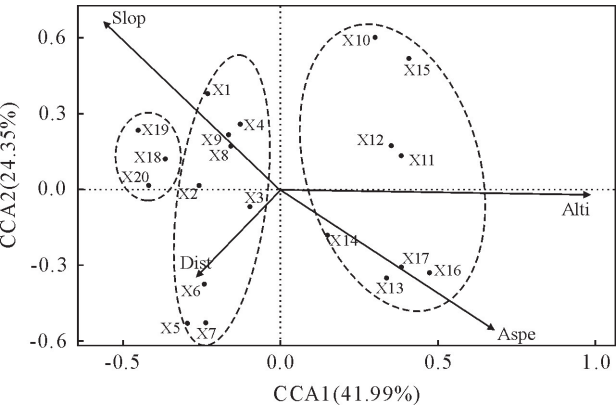
群落Ⅲ 华山松-巴山木竹(*Arundinaria fargesii*)-野青茅(*Deyeuxia pyramidalis*)群落。该群落包括 10、11、12、13、14、15、16、17 共 8 个样地,海拔在 1 692 m 以上,该群落类型面积占研究区域森林群落总面积的 40%。乔木层优势种为华山松,伴生种为锐齿槲栎、陕甘花楸(*Sorbus koehneana*)、水榆花楸、唐棣(*Amelanchier sinica*)、四照花(*Cornus kousa* subsp. *chinensis*)、刺叶高山栎(*Quercus spinosa*)等;灌木层优势种为巴山木竹,伴生种为桦叶荚蒾(*Viburnum betulifolium*)、刚毛忍冬(*Lonicera hispida*)、峨眉蔷薇(*Rosa omeiensis*)、华榛(*Corylus chinensis*)、冰川茶藨子(*Ribes glaciale*)等;草本层优势种为野青茅,伴生种为披针薹草、沿阶草(*Ophiopogon bodinieri*)、野菊(*Chrysanthemum indicum*)、华蟹甲(*Sinacalia tangutica*)、东亚唐松草(*Thalictrum minus* var. *hypoleucum*)、苎草(*Arthraxon hispidus*)等。

2.2 群落分布与环境因子关系

通过使用典范对应分析(CCA)对调查区域的 20 个样地进行分析,得到二维排序图(图 3),图中箭头代表环境因子,箭头的长短表示该环境因子与群落分布的相关程度的大小,箭头与排序轴的夹角表示该环境因子与排序轴的相关性<sup>[17]</sup>。4 个环境因子对群落分布的解释量为 25.1%,前 4 个排序轴特征值分别为 0.525、0.304、0.233、0.188,第一轴与第二轴特征值的总和占排序轴总特征值的 66.32%,因此采用前两轴来解释群落分布与环境因子的关系。

结合表 2 和图 3 可以看出,决定 CCA 第一排序轴的环境因子依次为海拔、坡向和坡度。其中海拔和坡向与第一轴呈极显著正相关,相关系数分别为 0.986 和 0.679;坡度与第一轴呈极显著负相关,相关系数为 0.565,干扰情况也呈负相关,这说明第一轴排序主要受到了海拔、坡向和坡度的影响,即 CCA 排序第一轴从左至右海拔逐渐升高,坡向由阴坡向阳坡过渡,坡度由陡坡向缓坡过渡。决定 CCA 第二排序轴的主要环境因子为坡度和坡向。其中坡

度与第二轴呈极显著正相关,相关系数为 0.667,干扰情况也呈正相关,相关系数为 0.348;坡向和海拔与第二轴呈负相关,相关系数分别为 0.558 和 0.024。这表明第二轴排序主要反映了坡度和坡向的变化,即沿第二轴从下至上坡度由缓坡向陡坡过渡,坡向由阳坡向阴坡过渡。综合 1、2 轴可见海拔、坡向和坡度对研究区域森林群落的分布有显著的影响。同时在 CCA 排序图中海拔所代表的箭头长度最长,且与第一排序轴的夹角很小,这表明海拔可能是影响研究区域森林群落分布最重要的环境因子。



Alti. 海拔; Aspe. 坡向; Slop. 坡度; Dist. 干扰情况; X1—X20. 样方号。

图 3 陕西秦岭西段森林群落 20 个样方的典范对应分析(CCA)二维排序

Fig. 3 Two dimensional CCA ordination diagram of 20 plots of forest community in western section of the Qinling Mountains

表 2 环境因子的显著性检验				
Table 2 Significance test of environmental factors				
环境因子	环境因子与排序轴的相关系数		决定系数	显著性检验
	CCA1	CCA2		
海拔	0.986	-0.024	0.885	0.001 **
坡度	-0.565	0.667	0.694	0.001 **
坡向	0.679	-0.558	0.706	0.001 **
干扰情况	-0.268	0.348	0.170	0.211

注: \*\* 表示在 0.01 水平下显著。

各样地在 CCA 排序图上的分布与 MRT 分类结果基本一致,综合 MRT 和 CCA 结果可以探明 3 类群落的分布规律。群落Ⅰ分布在海拔较低的阴坡区域,位于排序图的最左边;群落Ⅱ分布在中海拔区域,位于排序图的中部;群落Ⅲ分布在海拔较高的阳坡,位于排序图的右部。

2.3 群落多样性

将 MRT 分类得到的 3 类群落内的各层次物种多样性进行计算,结果显示,调查区域森林群落总体的物种丰富度及 Shannon-Wiener 多样性指数整体上呈现沿海拔梯度单调上升的趋势,而草本层的

Shannon-Wiener 多样性指数则在海拔 1 283 ~ 1 692 m 达到峰值,之后海拔再升高指数下降。如图 4A 所示,物种丰富度在海拔 1 191~2 164 m 均表现为草本层大于灌木层、灌木层大于乔木层。如图 4B 所示,Shannon-Wiener 多样性指数在海拔 1 191~2 164 m 基本表现为草本层大于灌木层、灌木层大于乔木层。其中乔木层多样性指数沿海拔梯度差异显著;灌木层和草本层多样性指数沿海拔梯度差异较小。如图 4C 所示,Pielou 均匀度指数在海拔 1 191~2 164 m 基本表现为灌木层大于草本层、草本层大于乔木层。其中乔木层均匀度指数沿海拔梯度差异显著;而草本层和灌木层的均匀度指数沿海拔梯度无显著差异。

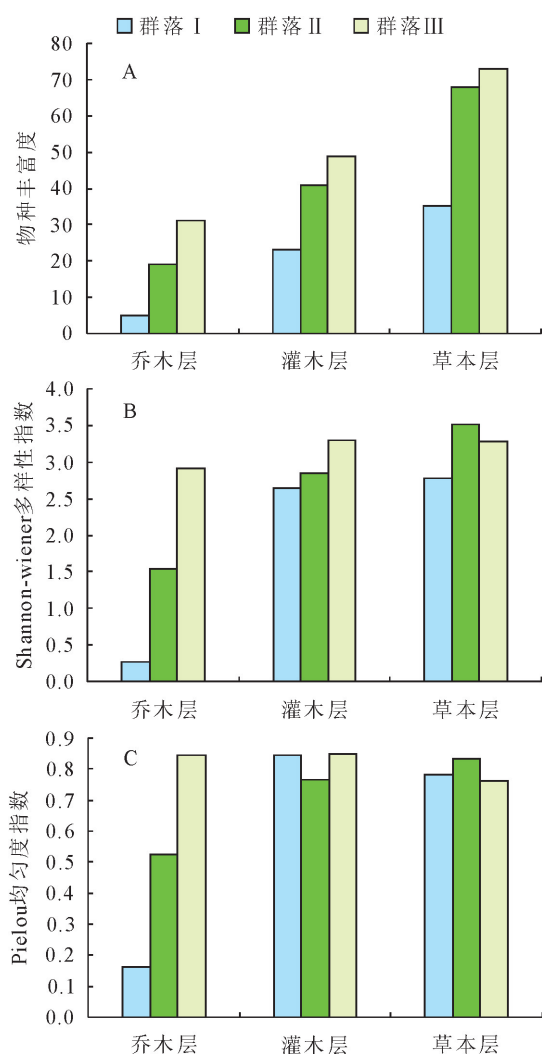


图 4 不同森林群落乔木层、灌木层和草本层物种多样性的比较

Fig. 4 Comparison of species diversity in the tree, shrub and herb layers in different forest communities

### 3 讨论

#### 3.1 典型森林群落类型划分

森林群落的组成和分布格局与环境因子有着密

不可分的联系,本研究使用多元回归树(MRT)将研究区域的 20 个样地根据海拔划分为 3 种群落类型。群落 I 分布在平缓地带,海拔较低,水分、热量充足,多生长毛樱桃、牡蒿等喜温喜湿的物种。群落 II 和群落 III 位于中高海拔地区,温度较低但光照充足,多生长辽东栎、华山松、青榨槭等耐寒耐旱的物种。森林群落的组成随着海拔梯度的变化表现出较显著的差异,由此可知海拔对群落的组成有着很重要的影响。有研究表明,海拔较低的地带,温度较高,多生长喜暖物种;而海拔较高的地带,由于空气稀薄,大气保温较差,导致热量散失,温度较低,多生长耐寒的物种<sup>[24]</sup>,这与本研究结果一致。此前巨天珍等<sup>[14]</sup>曾采用 TWINSpan 分类方法对秦岭西段小陇山自然保护区的次生林群落进行分类,TWINSpan 的分类依据是几个指示种,而 MRT 将环境因子纳入了分类分析中,包含了更丰富的信息量,更加具有可信性。同时 TWINSpan 在结果判断时需要人为划分分类等级<sup>[25]</sup>,而 MRT 则是通过多次交叉验证和剪枝来确定误差最小的分类方案,分类结果更为客观。因此本研究采用 MRT 分类方法对陕西秦岭西段典型森林群落进行分类,以期得到一个更为客观的分类结果。

#### 3.2 典型森林群落分布与环境因子关系

根据典范对应分析可知海拔、坡向和坡度 3 种环境因子对陕西秦岭西段森林群落分布格局有着显著影响,其中海拔是影响群落分布最重要的因素,这与郑天义等<sup>[17]</sup>对太白山森林群落排序的结果一致。海拔对植被分布的影响不是独立的,其变化同时会影响温度、水分等环境因子。低海拔地区水热条件良好,一般生长喜暖喜湿植物,中海拔地区由于光照条件良好且温度湿度适宜,地形地势也相对较为平缓,更适合植被的生长<sup>[26]</sup>,而高海拔地区温度较低,空气湿度较小,多生长耐寒耐旱的植物。植被对海拔梯度变化的响应本质上反映了其对温度和水分需求的差异,这也与其他相关研究结论一致<sup>[27]</sup>。坡向也会影响植物群落的组成分布,坡向本质上是对光照条件不同的体现,阳坡光照充足获得的太阳辐射也高,而阴坡太阳辐射则相对较低,坡向的变化代表着热量和水分等环境因素的综合梯度变化<sup>[28]</sup>。坡度会影响土壤的保水能力<sup>[29]</sup>,具有一定坡度的斜坡拥有良好的排水能力,土壤透气性好,有利于植被的生长,而坡度过大的陡坡则水土流失严重,土壤贫瘠,从而限制植物生长发育<sup>[30]</sup>。本研究的 4 种环境因子的解释量仅为 25.1%,对剩余 74.9% 的森林群落的分布未能做出解释,这表明还存在许多本研究未调查的环境因子对该地区森林群落的分布有着影

响,在后续的研究中应该考虑更多的环境因子。

### 3.3 典型森林群落物种多样性格局

在影响物种多样性格局的诸多因素中,海拔是最主要的因子之一<sup>[31-32]</sup>。研究区域森林群落的物种丰富度和 Shannon-Wiener 多样性指数总体上呈随海拔升高而上升的趋势,这可能是由于低海拔地区光照不足<sup>[33]</sup>,同时人为干扰较为严重,随着海拔的升高人畜活动逐渐减少,且光照增强,温度和水分条件都相对适宜<sup>[34]</sup>,形成了较高的物种丰富度。群落中不同层次的物种多样性对海拔梯度的响应也不同。乔木层的3种多样性指数均明显小于同海拔的灌木层和草本层,这可能是由于乔木层群落建群种的生长势较强,对其他植被的生长发育有明显的抑制作用,导致乔木层优势种现象突出<sup>[35-36]</sup>。乔木层的 Pielou 均匀度呈沿海拔升高单调上升的趋势,这说明随着海拔的升高乔木层的稳定性增加,中高海拔地区的光照和温度更适宜乔木的生长,因此乔木层会形成物种分布更均匀、更稳定的群落;而灌木层和草本层的 Pielou 均匀度则随海拔波动较小,这可能是由于林下小生境随海拔的变化不大,这也与巫翠华等<sup>[15]</sup>关于紫柏山植物多样性的研究结果基本一致。在一些研究中,物种丰富度和 Shannon-Wiener 多样性指数沿海拔梯度呈单峰格局<sup>[37]</sup>,而在本研究则呈单调上升的趋势,这可能是由于本研究选取的样地海拔范围较小,在进行样地设置时主要考虑的因素是具有典型植被特征的群落,且陕西秦岭西段地形复杂,多陡峭山坡,许多高海拔地区难以进行样地调查。在以后的研究中可以适当调整样地的海拔范围,选择一些高海拔地区的森林群落进行调查。

### 3.4 群落保护与发展策略

通过对陕西秦岭西段典型森林群落进行分类和排序,并对其群落物种多样性与海拔的关系进行分析,初步揭示了群落空间分布格局及其物种多样性与环境因子之间的关系。研究区域群落的空间分布格局主要与海拔、坡向、坡度等环境因子有关,这表明该区域受到人类活动影响较小,森林生态保存较为原始,森林群落的结构和分布主要受到了气候环境和地形地貌的影响。因此在对陕西秦岭西段森林群落进行保护与恢复时应当尽量减少人为干扰,实行植被自然恢复的原则,维持和保护环境异质性,为植被的生长提供多样的生境类型,提高森林群落的物种多样性,从而促进整个森林群落的持续发展。

## 4 结论

本研究采用多元回归树(MRT)对陕西秦岭西

段典型森林群落进行数量分类,用典范对应分析(CCA)进行排序,并对分类得到的群落的物种多样性进行计算和分析。得到如下结论。

1)陕西秦岭西段典型森林群落可以分为3类:群落Ⅰ,油松-白刺花-野棉花群落,该群落类型面积占研究区域森林群落总面积的15%;群落Ⅱ,辽东栎-覆盆子-蛇莓群落,该群落类型面积占研究区域森林群落总面积的45%;群落Ⅲ,华山松-巴山木竹-野青茅群落,该群落类型面积占研究区域森林群落总面积的45%。

2)CCA排序揭示了陕西秦岭西段典型森林群落与环境因子的关系,结果表明,海拔、坡度和坡向对研究区域森林群落的分布有显著影响。

3)研究区域森林群落各层次的物种丰富度和 Shannon-Wiener 多样性指数以及乔木层的 Pielou 均匀度指数总体上均呈沿海拔梯度上升的趋势,而灌木层和草本层的 Pielou 均匀度指数则随海拔梯度波动不大。

### 参考文献:

- [1] 平凡,郭道宇,徐建英,等.基于数量分类与排序的雾灵山亚高山草甸群落生态关系分析[J].首都师范大学学报:自然科学版,2014,35(6):56-63.
- [2] 宋爱云,刘世荣,史作民,等.卧龙自然保护区亚高山草甸的数量分类与排序[J].应用生态学报,2006(7):1174-1178.  
SONG A Y, LIU X R, SHI Z M, *et al.* Quantitative classification and ordination of subalpine meadow in Wolong Nature Reserve[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006(7): 1174-1178. (in Chinese)
- [3] 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.  
WANG M, ZHOU C P. Research progress on quantitative classification and ordination of mountain plant communities[J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition, 2011, 35(4): 126-130. (in Chinese)
- [4] 张文静,张钦弟,王晶,等.多元回归树与双向指示种分析在群落分类中的应用比较[J].植物生态学报,2015,39(6):586-592.  
ZHANG W J, ZHANG Q D, WANG J, *et al.* A comparison of multivariate regression tree and two-way indicator species analysis in plant community classification[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2015, 39(6): 586-592. (in Chinese)
- [5] 韩军旺,王进,张旭,等.小秦岭国家级自然保护区植物群落数量分类与排序[J].河南科学,2015,33(4):547-552.
- [6] 郑超超,伊力塔,张超,等.浙江江山公益林物种间关系及CCA排序[J].生态学报,2015,35(22):7511-7521.  
ZHENG C C, YI L T, ZHANG C, *et al.* Interspecific relationship and canonical correspondence analysis of the dominant species in ecological service forest of Jiangshan city in Zhejiang Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(22): 7511-7521. (in Chinese)



- [7] 温超男,黄蔚,陈开宁,等.太湖滨岸带浮游动物群落结构特征与环境因子的典范对应分析[J].水生生态学杂志,2020,41(2):36-44.
- [8] 王景升,姚师臣,普穷,等.藏北高原草地群落数量分类与排序[J].生态学报,2016,36(21):6889-6896.  
WANG J S,YAO S C,PU Q,*et al.* Quantitative classification and ordination of grassland communities on the Northern Tibetan Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica,2016,36(21):6889-6896. (in Chinese)
- [9] 钟娇娇,陈杰,陈倩,等.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[J].生态学报,2019,39(1):277-285.  
ZHONG J J,CHEN J,CHEN Q,*et al.* Quantitative classification of MRT,CCA ordination, and species diversity along elevation gradients of a natural secondary forest in the Qinling Mountains[J]. Acta Ecologica Sinica,2019,39(1):277-285. (in Chinese)
- [10] 张晓娟,罗大庆. 急尖长苞冷杉林线附近群落结构与物种多样性[J].西北林学院学报,2013,28(2):1-7.  
ZHANG X J,LUO D Q. Community structure and species diversity of *Abies georgei* var. *smithii* forest near the timberline [J]. Journal of Northwest Forestry University,2013,28(2):1-7. (in Chinese)
- [11] 李霞,朱万泽,孙守琴,等.大渡河中游干暖河谷区生境对植物群落分布格局和多样性的影响[J].生物多样性,2020,28(2):117-127.  
LI X,ZHU W Z,SUN S Q,*et al.* Influence of habitat on the distribution pattern and diversity of plant community in dry and warm valleys of the middle reaches of the Dadu River,China[J]. Biodiversity Science,2020,28(2):117-127. (in Chinese)
- [12] 陈永剑. 陕西摩天岭自然保护区百合科野生植物资源调查[J].陕西农业科学,2013,59(2):151-153.
- [13] 朱红燕,王得祥,柴宗政,等.秦岭西段日本落叶松人工林生长规律研究[J].西北林学院学报,2015,30(1):1-7.  
ZHU H Y,WANG D X,CHAI Z Z,*et al.* Growth law of *Larix kaempferi* plantations in western Qinling[J]. Journal of Northwest Forestry University,2013,59(2):151-153. (in Chinese)
- [14] 巨天珍,王彦,任海峰,等.小陇山国家级自然保护区次生林分类、排序及演替[J].生态学报,2012,31(1):23-29.
- [15] 巫翠华,张利利,乔卫国,等.紫柏山自然保护区植物多样性垂直分布格局及其影响因素[J].福建农林大学学报:自然科学版,2021,50(5):630-635.  
WU C H,ZHANG L L,QIAO W G,*et al.* Vertical distribution pattern and impact factor of species diversity in Zibai Mountain Nature Reserve[J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University: Natural Science Edition,2021,50(5):630-635. (in Chinese)
- [16] 贾晓妮,程积民,万惠娥. DCA、CCA 和 DCCA 三种排序方法在中国草地植被群落中的应用现状[J]. 中国农学通报,2007, No. 162(12):391-395.
- [17] 郑天义,王丹,姬柳婷,等.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[J].生态学报,2020,40(20):7353-7361.  
ZHENG T Y,WANG D,JI L T,*et al.* Classification, ordination and diversity pattern of typical forest communities in Taibai Mountain Nature Reserve[J]. Acta Ecologica Sinica,2020,40(20):7353-7361. (in Chinese)
- [18] 苏日古嘎,张金屯,张斌,等.松山自然保护区森林群落数量分类和排序[J].生态学报,2010,30(10):2621-2629.  
SU R G G,ZHANG J T,ZHANG B,*et al.* Numerical classification and ordination of forest communities in the Songshan National Nature Reserve[J]. Acta Ecologica Sinica,2010,30(10):2621-2629. (in Chinese)
- [19] 白晓航,张金屯,曹科,等.河北小五台山国家级自然保护区森林群落与环境的关系[J].生态学报,2017,37(11):3683-3696.  
BAI X H,ZHANG J T,CAO K,*et al.* Relationship between forest communities and the environment in the Xiaowutai Mountain National Nature Reserve,Hebei[J]. Acta Ecologica Sinica,2017,37(11):3683-3696. (in Chinese)
- [20] 胡源,邓云,王波,等.地形和历史干扰对西双版纳勐仑地区热带森林林冠高度结构的影响[J].应用生态学报,2023,34(3):597-604.  
HU Y,DENG Y,WANG B,*et al.* Effects of topography and historical disturbance on canopy height structure of tropical forests in Menglun,Xishuangbanna,China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2023,34(3):597-604. (in Chinese)
- [21] 吴昊,张梦,姬秋博,等.湍河河岸带草本群落数量分类、排序及物种多样性[J].信阳师范学院学报:自然科学版,2021,34(2):216-224.  
WU H,ZHANG M,JI Q B,*et al.* Classification, ordination and species diversity of herbal community in Shihe river riparian[J]. Journal of Xinyang Normal University: Natural Science Edition,2021,34(2):216-224. (in Chinese)
- [22] 刘润红,涂洪润,李娇凤,等.桂林岩溶石山青冈群落数量分类与排序[J].生态学报,2019,39(22):8595-8605.
- [23] 赵嘉玮,杨海龙,曲梦雨.黄土高原-青藏高原过渡带人工林植被数量分类及环境解释[J].中南林业科技大学学报,2021,41(9):117-126.  
ZHAO J W,YANG H L,QU M Y. Quantitative classification and environmental interpretation of afforestation in transitional zone between Loess Plateau and Qinghai Tibet Plateau [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2021,41(9):117-126. (in Chinese)
- [24] 李巧玉,陈娟,张小晶,等.川西亚高山彩叶林群落数量分类、排序与物种多样性[J].应用与环境生物学报,2021,27(3):519-528.  
LI Q Y,CHEN J,ZHANG X J,*et al.* Quantitative classification, ordination, and species diversity of subalpine colored-leaf forest communities in Western Sichuan,China[J]. Chin J Appl Environ Biol,2021,27(3):519-528. (in Chinese)
- [25] 牛莉芹,程占红,季洪伟.五台山景区湿地植被的数量分类和排序[J].西北林学院学报,2013,28(4):16-20.  
NIU L Q,CHENG Z H,JI H W. Quantitative classification and ordination of the wetland vegetation in Wutai Mountain [J]. Journal of Northwest Forestry University,2013,28(4):16-20. (in Chinese)
- [26] 张先平,王孟本,余波,等.庞泉沟自然保护区森林群落数量分类和排序[J].生态学报,2006(3):754-761.



- [27] 姚帅臣,王景升,丁陆彬,等. 拉萨河谷草地群落数量分类与排序[J]. 生态学报, 2018, 38(13): 4779-4788.
- [28] 刘玉祯,刘文亨,冯斌,等. 坡向和海拔对高寒山地草甸植被分布格局特征的影响[J]. 草地学报, 2021, 29(6): 1166-1173.  
LIU Y Z, LIU W T, FENG B, *et al.* Effects of slope aspect and elevation on vegetation distribution pattern of alpine mountain meadow[J]. Acta Agrestia Sinica, 2021, 29(6): 1166-1173. (in Chinese)
- [29] 赵婷婷,赵成章,康满萍,等. 祁连山北坡灌木群落数量分类与排序[J]. 生态学杂志, 2021, 40(3): 731-739.  
ZHAO T T, ZHAO C Z, KANG M P, *et al.* Numerical classification and ordination of shrub communities on the north slope of Qilian Mountains[J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(3): 731-739. (in Chinese)
- [30] 罗建武,韵晋琦,朱彦鹏,等. 太白山太白红杉林数量分类[J]. 西北林学院学报, 2015, 30(4): 1-7, 38.  
LUO J W, YUN J Q, ZHU Y P, *et al.* Classification and ordination of *Larix chinensis* communities in Mt. Taibai[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2015, 30(4): 1-7, 38. (in Chinese)
- [31] 王德君,韩国君,高智辉,等. 甘肃莲花山植物群落物种多样性对海拔梯度的响应[J]. 西北林学院学报, 2020, 35(6): 96-102.  
WANG D J, HAN G J, GAO Z H, *et al.* Response of community species diversity elevation gradient in the Lianhuashan Nature Reserve[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2020, 35(6): 96-102. (in Chinese)
- [32] 孙双红,朱宾宾,鲁海涛,等. 林窗对呼伦贝尔沙地樟子松人工林物种多样性的影响[J]. 森林工程, 2023, 39(2): 47-56.
- [33] 王超,樊琳琳,杨健,等. 不同经营措施对冀北山地油松林分水源涵养功能的影响[J]. 林业与生态科学, 2023, 38(1): 1-7.  
Wang C, Fan L L, YANG J, *et al.* Study on the influence of forest management on the water conservation capacity of *Pinus tabulaeformis* in mountain area of northern Hebei Province[J]. Forestry and Ecological Sciences, 2023, 38(1): 1-7. (in Chinese)
- [34] 曲波,苗艳明,张钦弟,等. 山西五鹿山植物物种多样性及其海拔梯度格局[J]. 植物分类与资源学报, 2012, 34(4): 376-382.  
QU B, MIAO Y M, ZHANG Q D, *et al.* Plant diversity and its elevational gradient patterns in Wulu Mountain, Shanxi, China[J]. Plant Diversity and Resources, 2012, 34(4): 376-382. (in Chinese)
- [35] 朱源,康慕谊,江源,等. 贺兰山木本植物群落物种多样性的海拔格局[J]. 植物生态学报, 2008(3): 574-581.  
ZHU Y, KANG M Y, JIANG Y, *et al.* Altitudinal pattern of species diversity in woody plant communities of mountain Helan, Northwestern China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2008(3): 574-581. (in Chinese)
- [36] 周成军,巫志龙,周新年,等. 择伐强度对杉阔混交人工林生长及林下植被物种多样性的影响[J]. 森林工程, 2023, 39(1): 46-53, 62.
- [37] 陈云,王海亮,韩军旺,等. 小秦岭森林群落数量分类、排序及多样性垂直格局[J]. 生态学报, 2014, 34(8): 2068-2075.  
CHEN Y, WANG H L, HAN J W, *et al.* Numerical classification, ordination and species diversity along elevation gradients of the forest community in Xiaoqinling[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(8): 2068-2075. (in Chinese)

#### (上接第 90 页)

- [17] Ortega-Albero N, González-Orenga S, Vicente O, *et al.* Responses to salt stress of the interspecific hybrid *Solanum in-sanum* × *Solanum melongena* and its parental species[J]. Plants, 2023, 12(2): 295.
- [18] NGUEMA NDOUTOUMOU P, TOUSSAINT A, BAUDOIN J P. Embryo abortion and histological features in the interspecific cross between *Phaseolus vulgaris* L. and *P. coccineus* L. [J]. Plant Cell, Tissue and Organ Culture, 2007, 88(3): 329-332.
- [19] 魏永忠. 板栗花粉活力测定方法比较[J]. 四川林业科技, 2017, 38(3): 100-101.
- [20] 郭娟,邱帅,刘华红,等. 4 种冬青属植物花粉离体培养基筛选和贮藏条件的研究[J]. 西北林学院学报, 2018, 33(6): 118-126.  
GUO J, QIU S, LIU H H, *et al.* Research on medium screening for *in Vitro* germination and storage conditions of 4 *Ilex* species[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2018, 33(6): 118-126. (in Chinese)
- [21] 陈亚兵. 花椒不同品种物候规律比较及花粉特性研究[D]. 杨陵:西北农林科技大学, 2022.
- [22] 张海霞. 藤椒花器结构及无融合生殖特性[D]. 雅安:四川农业大学, 2017.
- [23] 王梦,康永祥,王富,等. 黄帝陵古侧柏花粉生活力及其保存方法的研究[J]. 西北林学院学报, 2016, 31(6): 133-139.  
WANG M, KANG Y X, WANG F, *et al.* Viability and storage methods of ancient *Platycladus orientalis* pollen in Huangdi Mausoleum[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2016, 31(6): 133-139. (in Chinese)
- [24] 王翔,刘庆华,王奎玲,等. 耐冬山茶(*Camellia japonica* L.) 花粉活力和柱头可授性研究[J]. 西南农业学报, 2008(4): 1078-1080.
- [25] 毕君,赵京献,王春荣,等. 国内外花椒研究概况[J]. 经济林研究, 2002(1): 46-48.
- [26] 杜忠席. 竹叶花椒花粉活力及授粉成效研究[D]. 雅安:四川农业大学, 2020.
- [27] 王兵益,王伟,丁开宇. 滇牡丹花粉贮存方法的探索[J]. 云南大学学报:自然科学版, 2001, 23(Supp. 1): 109-110, 112.  
WANG B Y, WANG W, DING K Y. Tissue culture of *Lilium nepalense* D. Don[J]. Journal of Yunnan University: Natural Science Edition, 2001, 23(Supp. 1): 109-110, 112. (in Chinese)
- [28] 毕君. 山椒栽培机理及关键技术研究[D]. 南京:南京林业大学, 2009.
- [29] 李梦钗,赵京献,秦素洁,等. 人工授粉对不同花椒品种座果率的影响[J]. 陕西农业科学, 2022, 68(10): 25-27.