

DOI: 10.5846/stxb201802080339

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): - .

Li T T, Ji L Z, Yu D P, Zhou L, Zhou W M, Mao Y X, Dai L M. Forest community classification, ordination, and comparison of species diversity in broadleaved-Korean pine mixed forests of Northeast China. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(2): - .

东北阔叶红松林群落分类、排序及物种多样性比较

李婷婷^{1,2}, 姬兰柱¹, 于大炮¹, 周莉¹, 周旺明¹, 毛沂新³, 代力民^{1,*}

1 中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 辽宁省林业科学研究院, 沈阳 110032

摘要: 植物群落是植物与环境相互作用的产物, 探讨森林群落的分布格局、多样性变化规律及其与环境因子的关系, 有助于该区森林群落稳定性的维持和生物多样性保护。在东北阔叶红松林区, 沿纬度梯度在典型区域选择未受干扰的原始阔叶红松林进行群落调查, 并运用多元回归树 (MRT)、物种多样性指数比较和典范对应分析 (CCA) 方法, 对森林群落进行分类、比较和排序。结果表明: 东北阔叶红松林森林群落可分为 4 个类型, 不同群落类型间物种组成及多样性差异显著。物种丰富度及多样性指数均为低纬度区的千金榆-枫桦-红松林显著高于高纬度地区的冷杉-红松林群落。CCA 排序结果较好地反映了各群落类型的分布范围及其与环境因子的关系, 其变化格局主要受温度和降水的影响, 其次是土壤养分。该结果为气候变化下阔叶红松林的管理和保护提供了相应的理论依据。

关键词: 阔叶红松林; 纬度梯度; MRT; 物种多样性; CCA

Forest community classification, ordination, and comparison of species diversity in broadleaved-Korean pine mixed forests of Northeast China

LI Tingting^{1,2}, JI Lanzhu¹, YU Dapao¹, ZHOU Li¹, ZHOU Wangming¹, MAO Yixin³, DAI Limin^{1,*}

1 Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Liaoning Academy of forestry, Shenyang 110032, China

Abstract: The plant community is the product of the interaction between plants and the environment, and the interaction process is associated with changes in community structure and species diversity. Exploring the distribution of forest communities, species diversity patterns, and their relationship with environmental factors is important for protecting forest stability and biodiversity. Quantitative analysis is an important approach in research on community classification and sorting and can profoundly reveal the ecological relationship between plant communities and environmental factors. The study of species diversity patterns can reflect the ecological characteristics of plant communities and their adaptability to environment change. The Korean pine broadleaved forest (KBF) is the local climax vegetation and mainly distributed in northeast China. It has a complex forest structure and rich biodiversity and is very important in maintaining the regional biodiversity. Therefore, it is vital to conduct a case study regarding community classification, ordination, and species diversity patterns in broadleaved Korean pine forests. In recent years, many studies regarding KBF have been conducted from various perspectives, but forest community classification, sorting, and comparison research using quantitative ecology is still lacking. Along a latitudinal gradient, we investigated the forest community structure with 40 plots (20 m × 20 m). Then,

基金项目: 科技基础性工作专项资助项目 (2015FY210200-9)

收稿日期: 2018-02-08; 网络出版日期: 2017-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lmdai@iae.ac.cn

forest community classification, ordination, and comparison of species diversity were conducted using the methods of MRT (multiple regression tree), CCA (correspondence analysis), and comparison of species diversity indexes. The results showed that the MRT classified the forest communities into four types by relating different aspects of species composition to environmental data: (I) *Abies fabri-Pinus koraiensis* Association, (II) *Quercus mongolica-Acer mono-Pinus koraiensis* Association, (III) *Fraxinus mandshurica-Acer tegmentosum-Pinus koraiensis* Association, (IV) *Carpinus cordata-Betula costata-Pinus koraiensis* Association. Species composition and diversity of forest communities differed greatly among the four types. The richness and species diversity index of *Carpinus cordata-Betula costata-Pinus koraiensis* Association were significantly higher than that of the *Abies fabri Craib-Pinus koraiensis* Association. The results of CCA were consistent with the forest community classification from MRT. It clearly reflected the distribution range of various community types and the relationships between community distribution and environmental factors. The *Abies fabri-Pinus koraiensis* Association corresponded to colder habitat, whereas the *Carpinus cordata-Betula costata-Pinus koraiensis* Association corresponded to warmer and wetter habitat. The *Quercus mongolica-Acer mono-Pinus koraiensis* Association tended to be in habitats with fertile soil. The distribution of the *Fraxinus mandshurica-Acer tegmentosum-Pinus koraiensis* Association had no special preference for environmental conditions. Temperature and precipitation were the main environmental factors affecting the distribution pattern of forest communities, whereas soil nutrients had smaller effects. These results help to more thoroughly understand the space distribution pattern and ecological characteristics of the forest community. They also provide the corresponding theoretical basis for the management and protection of broadleaved Korean pine forests in the future.

Key Words: broadleaved-Korean pine mixed forest; latitude gradient; MRT; species diversity; CCA

植物群落是植物与环境相互作用的产物,其相互作用过程中伴随着群落结构及物种多样性的变化^[1-2]。探究森林群落结构及其物种多样性与环境的关系,有助于揭示制约森林群落分布的环境因子,并有利于该区森林群落稳定性的维持和生物多样性保护^[3-5],而关于植物群落的空间分布及其与环境因子之间的关系可用植物群落数量分类和排序研究来解释^[2,6-8]。其中分类能够在一定程度上揭示植物群落类型的形成、演替及其与环境条件的关系,是确定植被间断性的重要方法。目前,常用的植被数量分类方法有聚类、双向指示种分析(TWINSPAN)等,但这些方法均需人为判别;多元回归树(Multivariate regression trees, MRT)是一种较新的数量分类法,同时以物种和环境信息为依据,无需人为确定分类结果,较以往的数量分类方法更客观,对有过渡性质的样方划分更为可靠^[9]。排序是研究植被连续变化的方法,是指用数学的方法将样方或植物种排列在一定的空间,使得排序轴反映一定的环境梯度,从而解释植物物种及植物群落的分布与环境之间的关系^[10-11]。而森林群落的存在既有连续性的一面,又有间断性一面,两种方法结合使用,可以更好地揭示森林群落的空间分布格局及其影响因子^[12]。此外,森林群落的物种多样性指数是表征植物群落结构的重要参数,能客观反映群落内物种组成的变化。因此,对森林群落物种多样性的纬度梯度格局进行研究,可以更深入反映其生态学特性及其对环境变化的适应性。

阔叶红松林是我国东北东部地区的地带性森林植被^[13],具有复杂的群落结构和丰富的生物多样性,作为北温带地区特有的森林类型,其在维护全球生物多样性中的作用是不可忽略的^[14]。我国东北地区分布着保存较好的天然阔叶红松林,区内生物多样性丰富,具有重要的保护价值^[15-16]。近些年来,大气中温室气体的迅速增加导致气候变暖,气候变化可能已经对阔叶红松林产生一定影响^[14]。因此,研究阔叶红松林分布格局及其与环境因子关系意义重大,不仅可以揭示影响其分布的关键因子,而且可以为气候变化下阔叶红松林的管理和保护提供相应的理论依据。目前,有诸多学者对阔叶红松林群落进行了分类、排序研究^[17-18],但其分类方法均基于人为分类或传统的双向指示种分析,运用多元回归树方法对阔叶红松林群落进行分类比较的研究还较少。本研究在东北阔叶红松林分布区,沿纬度梯度选择具有地域代表性的样点、样方,收集环境数据和森林群落数据,并运用多元回归树法对其进行分类,进而探讨该区域森林群落的分布格局、多样性变化规律

及其与环境因子的关系,以期为阔叶红松林的保护提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

阔叶红松林主要分布在我国东北东部山区的小兴安岭山地和长白山地,是我国东北地区典型顶级地带性植被,是生物多样性最丰富的植被类型之一^[13]。本研究根据阔叶红松林分布情况,从南到北沿纬度梯度设置 8 个调查样点,分别选择丹东白石砬子自然保护区、长白山露水河林业局、东京城林业局、柴河林业局、东方红林业局、凉水自然保护区、金山屯林业局和丰林自然保护区(图 1)。南北跨度大约 700 km,基本包括阔叶红松林分布的大部分区域,包括北界与南界。该地区年均降水量 600—1000 mm,主要集中在 6—8 月,整个分布区年均温相差约 7℃,由北向南呈逐渐升高的趋势。 $\geq 10^\circ\text{C}$ 的年积温为 1900—2800℃,1 月均温在 -10°C 以下,7 月均温在 20°C 以上,冬、夏季温差大,冬季一般在 5 个月以上,最低气温通常在 -30 — -35°C ,土壤为暗棕色森林土^[17]。

1.2 样地调查

2016 年 7—9 月在每个样点选取人为干扰较小的成熟老龄林,进行典型随机抽样调查^[19],设置 4—6 个临时样方。每个样方 20 m×20 m,共设置 40 个样方。在每个样方内记录胸径 ≥ 4 cm 的乔木树种名称、胸径及树高,同时每个样方内分别选取 3 个点,去除表层凋落物,采集 0—20 cm 深土样进行混合,带回实验室测定土壤全氮(Soil N)、全磷含量(Soil P)。土壤样品带回实验室,自然晾干、去除杂质,过 0.15 mm 筛,凯式定氮法测量土壤全氮含量,钼锑钒比色法测量土壤全磷含量。此外,记录每个取样点经纬度和海拔等环境特征(表 1)。各采样地点的气候数据通过最近气象站获取。

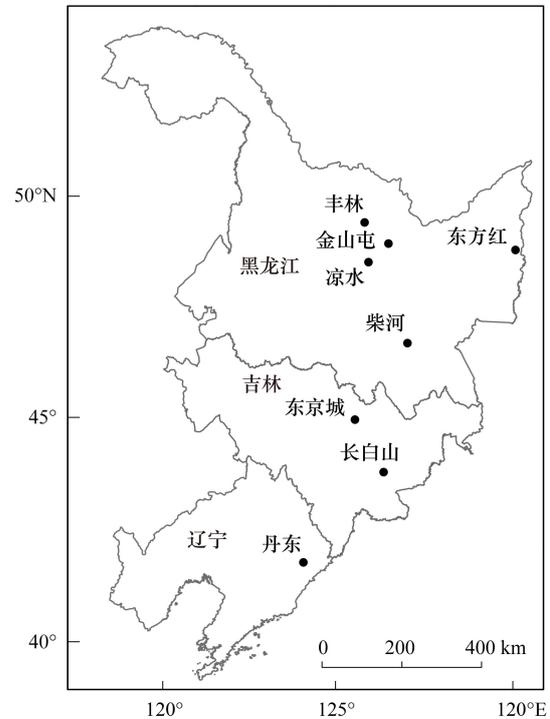


图 1 阔叶红松林沿纬度梯度 8 个采样点分布图

Fig. 1 The distribution of eight study sites along latitudinal gradient in broadleaved-Korean pine mixed forest

表 1 阔叶红松林沿纬度梯度各采样点基本特征

Table 1 Characteristics of the study region along latitudinal gradient in broadleaved-Korean pine mixed forest

采样点 Site	纬度 Latitude/ $^\circ\text{N}$	经度 Longitude/ $^\circ\text{E}$	海拔 Altitude/m	年均温 MAT/ $^\circ\text{C}$	降水 MAP/mm	日照率 SP/%	土壤氮含量 Soil N/%	土壤磷含量 Soil P/%
丰林	48.2	129.1	303—417	0.93	769.8	40.0	0.56±0.16	0.11±0.03
金山屯	47.5	129.7	366—438	0.96	620.15	39.5	0.58±0.18	0.08±0.02
凉水保护区	47.2	128.9	332—425	2.09	746.7	49.8	0.78±0.14	0.13±0.02
东方红	46.6	133.7	157—244	3.27	738.03	42.3	0.55±0.07	0.10±0.01
柴河	45.2	129.5	365—575	3.63	690.03	34.3	0.56±0.13	0.11±0.02
东京城	43.8	127.3	580—721	4.47	568.13	43.3	0.58±0.16	0.13±0.02
长白山	42.5	127.8	709—840	4.18	732.44	53.7	0.36±0.05	0.08±0.02
丹东	40.9	124.8	764—919	7.67	933.28	53.6	0.37±0.09	0.05±0.01

MAT: mean annual temperature; MAP: mean annual precipitation; SP: percentage of sunshine; Soil N: soil total nitrogen content; Soil P: soil total phosphorus content, 表中给出土壤氮、磷含量均值±标准差

1.3 数据处理

1.3.1 多元回归树

多元回归树(Multivariate regression trees, MRT)是一种较新的研究物种分布与环境因子之间关系的数量分类方法。它将环境因子作为分类节点,利用递归划分法,将样地划分为尽可能同质的类别,然后采用交叉验证法来确定分类结果,能很好地反映异质环境下群落的结构特征。其同时以物种和环境信息为依据,无需人为确定分类结果,较以往的数量分类方法更客观,对有过渡性质的样方划分更为可靠^[9,20-21]。MRT分析采用R语言mvpart程序包进行运算,为了比较不同组内物种差异,使用indval()函数寻找特征种或指示种^[22]。

1.3.2 物种多样性测度

本文选用物种丰富度指数、多样性指数、均匀度指数和生态优势度4个群落物种多样性指数^[19],测度指标是各物种在群落中的重要值,其计算公式^[12]如下:

重要值计算:树种的重要值=(相对多度+相对显著度+相对频度)/3

物种丰富度: Species richness = 出现在样地内的物种数;

Shannon-Wiener 多样性指数: $H' = - \sum_{i=1}^s P_i \ln P_i$

Pielou 指数: $E = H' / \ln S$

Simpson 指数: $P = 1 - \sum_{i=1}^s P_i^2$, P_i 为种 i 的重要值

用单因素方差分析比较不同纬度的群落物种多样性差异。

1.3.3 CCA 典范对应分析

典范对应分析(Canonical correspondence analysis, CCA),将对应分析与多元回归分析相结合,在对应分析的迭代过程中,每次得到的样方排序坐标值均与环境因子进行多元线性回归^[22],从而对群落类型分布和环境因子间的关系做出合理解释^[11,23-24]。本研究以群落物种矩阵和样地环境矩阵,为基础进行CCA排序,分析群落分布与环境因子间的关系。通过R语言vegan程序包实现,并绘制样方—环境因子二维排序图及物种—环境因子二维排序图。

2 结果与分析

2.1 多元回归树分类

在40个样方中,共记录到乔木29种,以松科、槭树科、木犀科、椴树科等科的植物为主。对40个样方进行MRT分类,经交叉验证并依据植物群落分类和命名原则,将本区植物群落分为以下4类(图2)

1)群落A为冷杉—红松林群落(*Abies fabri*—*Pinus koraiensis* Association),包括五营样方P1—6及金山屯样方P7—10,共10个样方。指示树种为冷杉(*Abies fabri*),主要树种有红松(*Pinus koraiensis*)、冷杉、白桦(*Betula platyphylla*)、紫椴(*Tilia amurensis*)、青楷槭(*Acer tegmentosum*)等。该群落分布在年均温较低小于1.52℃,年降水量小于851.5 mm的地区。

2)群落B为蒙古栎—色木槭—红松林群落(*Quercus mongolica*—*Acer mono*—*Pinus koraiensis* Association),包括凉水样方P13,东方红样方P17—21,柴河样方P22、P24、P25、P26,东京城样方P27、P28及长白山露水河样方P31—P35,共17个样方,指示树种为蒙古栎(*Quercus mongolica*),主要树种有红松、紫椴、蒙古栎、春榆(*Ulmus davidiana*)、色木槭(*Acer mono*)。该群落分布于年均温较高(MAT>=1.523℃),且土壤氮含量较低(Soil N<0.66)的地区。

3)群落C为水曲柳—青楷槭—红松林群落(*Fraxinus mandshurica*—*Acer tegmentosum*—*Pinus koraiensis* Association),包括凉水样方P11、P12、P14、P15、P16,柴河样方P23及东京城样方P29、P30,共8个样方,指示树种为水曲柳(*Fraxinus mandshurica*)、青楷槭,常见树种有红松、水曲柳、紫椴、青楷槭等。该群落分布区年均温较高,土壤氮含量较高(Soil N>0.66)。

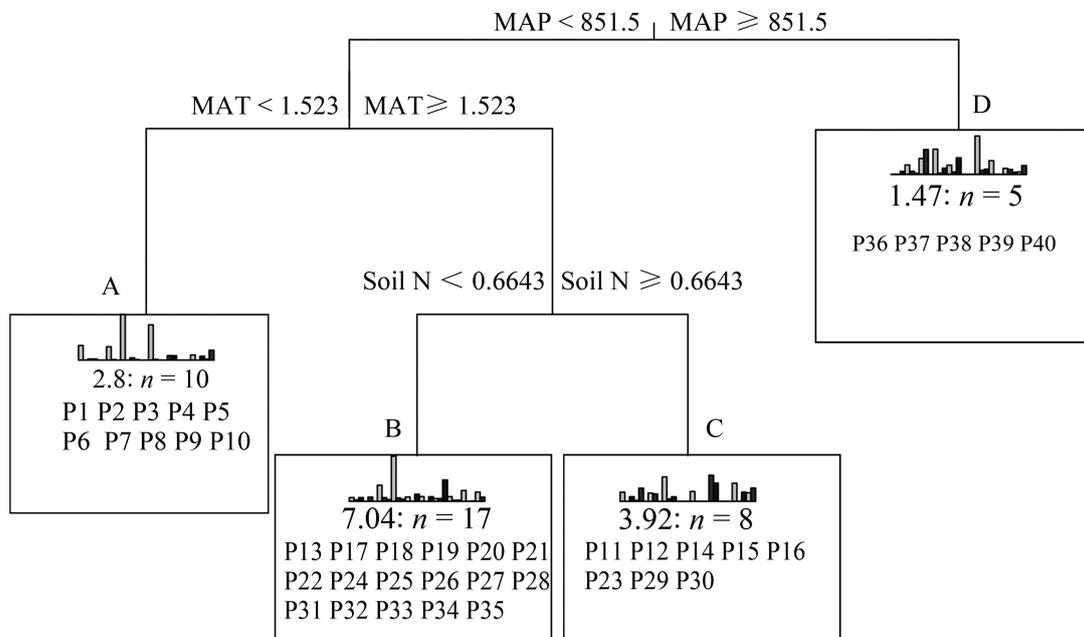


图2 阔叶红松林 40 个样方多元回归树分类树状图

Fig.2 Dendrogram of the multivariate regression trees classification of 40 plots in broadleaved-Korean pine mixed forest

MAT: mean annual temperature; MAP: mean annual precipitation; SP: percentage of sunshine; Soil N: soil total nitrogen content; Soil P: soil total phosphorus content, n = 样方个体数; P 代表样方标号

4) 群落 D 为千金榆—枫桦—红松林 (*Carpinus cordata*—*Betula costata*—*Pinus koraiensis* Association), 包括丹东白石砬子保护区 5 个样方 P36—40, 指示树种为枫桦 (*Betula costata*)、千金榆 (*Carpinus cordata*)、斑叶稠李 (*Padus maackii*)、小楷槭 (*Acer komarovii*), 主要树种有红松、沙松 (*Abies holophylla*)、枫桦、千金榆、假色槭 (*Acer pseudo-sieboldianum*) 等。该群落分布区年降水量最大 (MAP ≥ 851.5mm)。

2.2 物种多样性格局

对 MRT 分类所得的四个群落类型物种多样性进行比较, 发现四个群落类型间差异显著。其中物种丰富度 (Species richness) 和群落物种均匀度 (Pielou 指数) 均为: 千金榆—枫桦—红松林 (群落 D) 显著高于冷杉—红松林群落 (群落 A), 其余群落类型间差异不显著; 而多样性指数 (Shannon 指数与 Simpson 指数) 变化趋势一致, 均为千金榆—枫桦—红松林 (群落 D) 显著高于冷杉—红松林 (群落 A) 和蒙古栎—色木槭—红松林 (群落 B), 同时水曲柳—青楷槭—红松林 (群落 C) 显著高于冷杉—红松林 (群落 A) (图 3)。

2.3 植被典范对应分析

CCA 排序结果表明, 物种 CCA 排序轴第一轴和第二轴与环境因子极显著相关, 特征值为 0.32 和 0.15。第一排序轴的特征值最大, 第二轴次之。前四轴物种—环境关系方差累计贡献率为 93.45%, 其中前两轴就达到 62.34%。采用前两轴绘制样方—环境因子的二维空间排序图 (图 4)。第一排序轴 (横轴) 基本上反映了温度、降水及土壤养分变化梯度。其中温度 (MAT)、降水 (MAP) 及日照 (SP) 与第一排序轴呈极显著正相关, 相关系数分别为 0.88、0.74、0.54; 而土壤氮含量 (Soil N) 及磷含量 (Soil P) 与第一排序轴极显著负相关, 相关系数分别为 -0.53、-0.64 (表 2)。沿第一排序轴从左到右, 温度逐渐升高、降水及日照逐渐增加, 而土壤养分含量逐渐降低。排序图中箭头表示环境因子, 箭头所指的方向表示该环境因子的变化趋势, 箭头连线的长短表示群落的分布于环境因子相关性的大小, 越长, 相关性越大。由图 4 可见, 其中温度和降水与第一轴的相关性最大, 是影响森林群落分布格局的主要环境因子。而 CCA 第二轴与日照极显著负相关, 相关系数为 -0.69, 即沿 CCA 第二轴从下到上, 日照百分率逐渐降低。

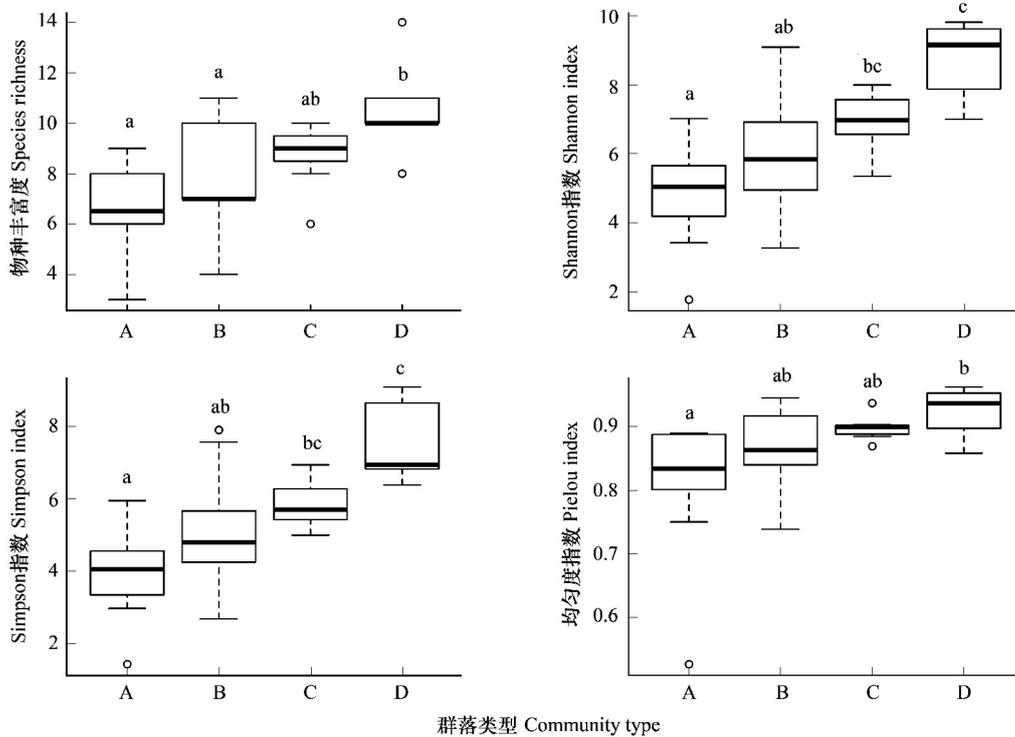


图3 阔叶红松林不同群落类型间物种多样性指数变化规律

Fig.3 Changes of species diversity index among different community types of broadleaved-Korean pine mixed forest

图中数据为平均值±标准差,A(冷杉—红松林)、B(蒙古栎—色木槭—红松林)、C(水曲柳—青楷槭—红松林)、D(千金榆—枫桦—红松林)代表4个不同群落类型,a、b、c不同字母表示不同群落类型间物种多样性指数差异显著

表2 阔叶红松林森林群落 CCA 排序轴与环境因子的相关性

Table 2 Correlations between environmental variables and CCA ordination axes of forest communities in the broadleaved-Korean pine mixed forest

环境因子 Environmental factors	CCA 排序轴 CCA Axes			
	CCA1	CCA2	CCA3	CCA4
年均温 MAT	0.88 ***	-0.18	-0.15	0.22
降水 MAP	0.74 ***	-0.03	0.17	-0.19
日照率 SP	0.54 ***	-0.69 ***	0.1	-0.37 *
土壤氮含量 Soil N	-0.53 ***	-0.2	0.76 ***	0.36 *
土壤磷含量 Soil P	-0.64 ***	-0.14	0.48 ***	0.4 **

* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$

MRT 分类所得的 4 个群落类型在排序图上呈现有规律的分布,表明 CCA 双序图较好地反应了植物群落与环境因子之间的相互关系。沿着第一排序轴从左到右,冷杉—红松林群落(群落 A)位于最左边,与低温、少降水区域关系密切(图 4),指示物种有冷杉、落叶松、白桦等(图 5);而千金榆—枫桦—红松林群落(群落 D)位于第一排序轴最右端,与年均温相对较高、降水丰富的区域关系密切,指示物种包括:千金榆、枫桦、沙松、假色槭等。此外,蒙古栎—色木槭—红松林群落(群落 B)对应土壤养分含量比较丰富的区域,而水曲柳—青楷槭—红松林群落(群落 C)接近多个环境变量的质心,主要树种为红松、紫椴、蒙古栎、水曲柳等。

3 讨论

3.1 阔叶红松林不同群落类型划分

本文采用基于环境因子和物种组成数据的 MRT 技术将阔叶红松林 40 块样地分成了 4 类,分别为冷杉—

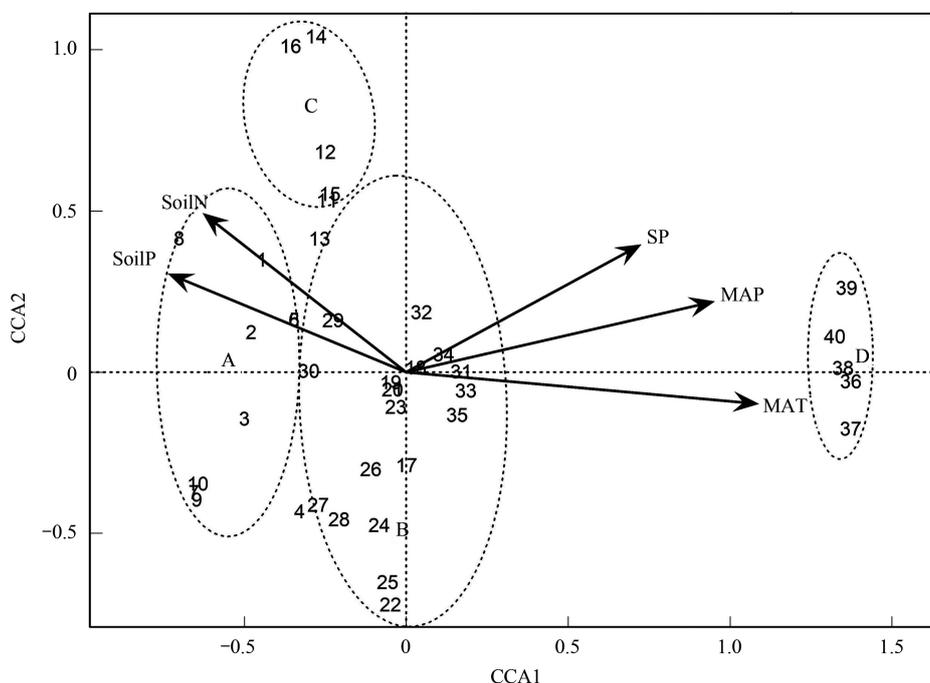


图 4 40 个群落样地与环境 CCA 排序图

Fig.4 Two-dimensional CCA ordination diagram of 40 plots

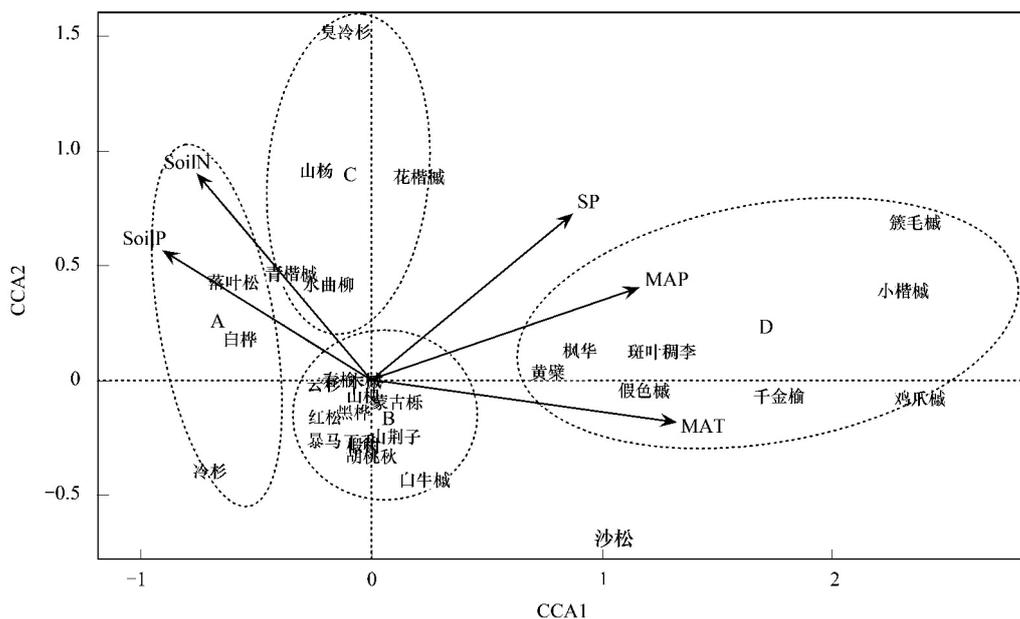


图 5 乔木层树种的 CCA 排序图

Fig.5 Two-dimensional CCA ordination diagram of species of tree layer

红松林、蒙古栎—色木槭—红松林、水曲柳—青楷槭—红松林和千金榆—枫桦—红松林(图 2)。每个群落类型都有各自的物种组成和群落特征,并占据着不同的生境。周以良将东北阔叶红松林划分为 3 大群系组,分别为以紫椴、蒙古栎等阔叶树为主要伴生树种的红松混交林、以沙松为主的红松混交林群系组和以云冷杉为主的红松混交林群系组^[25],与本文群落类型分组基本一致。本研究 MRT 分类过程中,由于生境温度和降水条件优先被分离出来的冷杉—红松林与千金榆—枫桦—红松林,与周以良划分的以沙松为主的红松混交林群系组和以云冷杉为主的红松混交林群系组相吻合。但本文分类结果将以紫椴、蒙古栎等阔叶树为主要伴生树

种的红松混交林进一步依据土壤养分差异分为了蒙古栎—色木槭—红松林、水曲柳—青楷槭—红松林。可能由于这两群落组位于群落的交错区域,属于过渡样方。由此可见,在群落组成基础上将生境作为界线的 MRT 群落划分法,对具有过渡性质样方更具有优势,所得的分类结果也更加客观。本文应用 MRT 方法划分的群落类型与传统双向指示种分析 TWINSpan 方法结果基本一致性,同时对具有过渡性质样方更具有优势。群落分类不仅要求种类组成和结构相对一致,占据的生境也是重要的特征^[26],基于环境因子的 MRT 群落类型划分法能够较好地揭示阔叶红松林的群落组成及分布规律。

3.2 阔叶红松林物种多样性格局

阔叶红松林群落组成呈现一定的分异格局,同时物种多样性也呈现一定的梯度变化。Shannon 多样性指数综合了植物群落的均匀度和丰富度,是表述物种多样性最好的指数;Simpson 指数把群落作为一个整体,各个种的重要性总结为一个合适的度量值,以表征群落的生态优势度^[27]。本研究中物种多样性指数及丰富度,均为千金榆—枫桦—红松林显著高于冷杉—红松林(图 3),可能由于千金榆—枫桦—红松林位于丹东低纬度地区,温度较高、降水充足,因此,群落物种丰富、结构复杂且优势种明显,物种多样性高;而冷杉—红松林位于五营高纬度地区,群落组成简单、结构单一,群落物种多样性低。该森林群落物种多样性的特征,与 Gentry 利用全球范围 74 个样方的研究结果一致,即从高纬度到低纬度植物群落物种多样性和丰富度明显增加^[28]。在我国南、中、北部温带森林植物群落和亚热带森林群落的物种多样性研究也证明了这一规律^[29]。由于野外调查时条件有限,本文未包括灌木层和草本层的群落组成及物种多样性分析。仅考虑乔木不能全面反映群落的整体结构特征,未来研究中应尽可能结合灌木层及草本层群落数据全面分析。

3.3 阔叶红松林群落分布及多样性格局环境解释

我国东北阔叶红松林分布区环境条件复杂多样,必然导致森林群落分布及物种多样性格局的分异。MRT 分类所得的 4 个群落类型在 CCA 排序图上沿第一排序轴(横轴)规律分布,第一排序轴主要反映了温度和降水的变化梯度,进一步反映了温度、降水对森林群落分布的重要性(图 4)。MRT 分类和 CCA 典范对应分析均表明,温度和降水是影响植物群落分布的最主要环境因子,其次才是土壤养分。该结果与 Gentry 在新热带的研究结果一致,决定植物群落物种多样性的首先是生物地理因子或年降雨量,其次才是土壤养分^[30]。

沿纬度梯度,森林群落分布及多样性呈现出一定的梯度变化,同时群落中的优势种也表现出一定的差异。各群落组成树种在 CCA 物种—环境排序图(图 5)上规律分布,每个树种都有自己的分布中心。冷杉、落叶松、白桦等寒温性的树种,趋向于生长在寒冷的生境中,而千金榆、枫桦、沙松等树种,多生长在温暖湿润的生境条件中。红松、紫椴、水曲柳、胡桃楸等树种分布,接近多个环境变量的质心(图 5),表明这些植物分布对环境没有特别的偏好,对研究区自然环境具有广泛的适应性,空间分布广,因此成为广布种。

阔叶红松林的树种组成中,既有耐冷湿的冷杉、落叶松等针叶树种,又有喜温湿千金榆、枫桦等阔叶树种和沙松冷杉。分布区内由北往南随温度的升高,阔叶树种逐渐增加,进而形成由北向南的冷杉—红松林、水曲柳—青楷槭—红松林、蒙古栎—色木槭—红松林和千金榆—枫桦—红松林等地带性森林群落。因此推测,未来气候变暖条件下,阔叶红松林的组成结构可能会发生变化,冷杉阔叶红松林可能逐渐向千金榆枫桦红松林演变,甚至可能演变为阔叶林,阔叶红松林的保护刻不容缓。

综上所述,基于环境因子的 MRT 群落类型划分法结合 CCA 典范对应分析,能够较好地揭示阔叶红松林的群落组成差异及其分布与环境因子的关系。其中温度、降水是引起阔叶红松林群落空间分布及多样性差异的主要环境因子,其次是土壤养分。该结果有助于深入理解森林群落的空间分布格局及其与环境的关系,对揭示生物多样性环境梯度变化规律具有重要意义,并为今后阔叶红松林管理和保护提供相应的理论依据。

参考文献(References):

- [1] 王世雄,王孝安,李国庆,郭华,朱志红. 陕西子午岭植物群落演替过程中物种多样性变化与环境解释. 生态学报, 2010, 30(6): 1638-1647.
- [2] 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.

- [3] 田永强, 俞超超, 王磊, 黄邦钦. 福建九龙江北溪浮游植物群落分布特征及其影响因子. *应用生态学报*, 2012, 23(9): 2559-2565.
- [4] 武春华. 黄土丘陵区典型植物群落特征及其与环境因子的关系[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2008.
- [5] 赵从举, 康慕谊, 雷加强. 准噶尔盆地典型地段植物群落及其与环境因子的关系. *生态学报*, 2011, 31(10): 2669-2677.
- [6] 袁铁象, 张合平, 欧芷阳, 谭一波. 地形对桂西南喀斯特山地森林地表植物多样性及分布格局的影响. *应用生态学报*, 2014, 25(10): 2803-2810.
- [7] 任萍. 黄土高原马栏林区植物群落物种多度研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2010.
- [8] 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的数量分类和排序. *生态学报*, 2010, 30(10): 2621-2629.
- [9] 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.
- [10] 张金屯. 数量生态学. 北京: 科学出版社, 2011: 123-127.
- [11] Virtanen R, Luoto M, Rämä T, Mikkola K, Hjort 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.
- [12] 李博. 生态学. 北京: 高等教育出版社, 2000: 168-172.
- [13] 代力民, 谷会岩, 邵国凡, 王庆礼. 中国长白山阔叶红松林. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2004: 5-11.
- [14] 吴正方, 邓慧平. 东北阔叶红松林全球气候变化响应研究. *地理学报*, 1996, 51(增刊): 81-91.
- [15] 吴正方. 东北阔叶红松林分布区生态气候适宜性及全球气候变化影响评价. *应用生态学报*, 2003, 14(5): 771-775.
- [16] 贾翔, 马芳芳, 周旺明, 周莉, 于大炮, 秦静, 代力民. 气候变化对阔叶红松林潜在地理分布区的影响. *生态学报*, 2017, 37(2): 464-473.
- [17] 曹伟, 李岩, 王树良, 于兴华, 朱彩霞, 刘童燕. 东北阔叶红松林群落类型划分及物种多样性. *应用生态学报*, 2007, 18(11): 2406-2411.
- [18] 吴晓蕾, 朱彪, 赵淑清, 朴世龙, 方精云. 东北地区阔叶红松林的群落结构及其物种多样性比较. *生物多样性*, 2004, 12(1): 174-181.
- [19] 方精云, 王襄平, 沈泽昊, 唐志尧, 贺金生, 于丹, 江源, 王志恒, 郑成洋, 朱江玲, 郭兆迪. 植物群落清查的主要内容、方法和技术规范. *生物多样性*, 2009, 17(6): 533-548.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] Borcard D, Gillet F, Legendre P. 数量生态学——R 语言的应用. 赖江山, 译. 北京: 高等教育出版社, 2014: 90-97.
- [23] Vittoz 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.
- [24] 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.
- [25] 周以良. 中国东北植被地理. 北京: 科学出版社, 1997: 16-78.
- [26] 吴征镒. 中国植被. 北京: 科学出版社, 1980: 1-1375.
- [27] 王世雄. 黄土高原子午岭植物群落物种多样性的时空格局与过程[D]. 西安: 陕西师范大学, 2013.
- [28] 贺金生, 陈伟烈. 陆地植物群落物种多样性的梯度变化特征. *生态学报*, 1997, 17(1): 91-99.
- [29] 尚文艳, 吴钢, 付晓, 刘阳. 陆地植物群落物种多样性维持机制. *应用生态学报*, 2005, 16(3): 573-578.
- [30] Gentry A H. Changes in plant community diversity and floristic composition on environmental and geographical gradients. *Annals of the Missouri Botanical Garden*, 1988, 75(1): 1-34.