

DOI: 10.20103/j.stxb.202403270644

王佳生, 赵红蕊, 孟庆繁, 刘生冬, 李燕, 李明锐, 佟佳琦. 天然阔叶混交林-人工红松幼龄林交错区地表甲虫多样性. 生态学报, 2024, 44(22): 10287-10299.

Wang J S, Zhao H R, Meng Q F, Liu S D, Li Y, Li M R, Tong J Q. Diversity of ground-dwelling beetles in natural broad-leaved mixed forest-young *Pinus koraiensis* plantation forest ecotone. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(22): 10287-10299.

天然阔叶混交林-人工红松幼龄林交错区地表甲虫多样性

王佳生^{1,2}, 赵红蕊^{1,2,*}, 孟庆繁^{1,2}, 刘生冬^{1,2}, 李燕^{1,2}, 李明锐^{1,2}, 佟佳琦^{1,2}

1 北华大学吉林省长白山区昆虫生物多样性与生态系统功能重点实验室, 吉林 132013

2 北华大学林学院, 吉林 132013

摘要: 为明确天然林及其毗邻退耕还林地的地表甲虫群落结构及多样性特征, 验证交错区边缘效应是否存在及其强弱, 确定人工林在保护生物多样性方面的作用, 为森林近自然经营提供指导。在 2017—2018 年的 4—9 月, 以天然阔叶混交林(简称“阔叶混交林”)及其毗邻人工红松幼龄林(简称“红松人工林”)交界处为中心, 向两侧延伸 120m, 并每隔 30m 设置 1 个样点, 交错区为中心处样点及 30m 处样点, 共设置 3 条样带, 采用巴氏罐诱捕法持续诱捕地表甲虫。共采集地表甲虫 6990 头, 隶属于 30 科 124 属 178 种, 其中, 阔叶混交林 113 种, 交错区 125 种, 红松人工林 134 种, 3 种生境共有物种 79 种。Hill 多样性指数表明, 3 种生境的物种数、常见物种数和优势物种数均表现为红松人工林>交错区>阔叶混交林。步甲科 Carabidae 和花金龟科 Cetoniidae 个体数与物种数在不同生境中均差异显著 ($P<0.05$), 埋葬甲科 Silphidae 个体数在不同生境中差异显著 ($P<0.05$), 在同一生境内不同优势科个体数与物种数均差异显著 ($P<0.05$)。达乌里干葬甲 *Aclypea daurica*、沟步甲 *Carabus canaliculatus*、黑圆喙蜣螂 *Onthophagus ater*、黑斑锥胸叩甲 *Ampedus sanguinolentus*、圆角梨须步甲 *Synuchus orbicollis* 个体数在不同生境中差异显著 ($P<0.05$)。Margalef 指数和 Shannon 指数表现为红松人工林显著高于阔叶混交林 ($P<0.05$)。置换多元方差分析和非度量多维尺度分析结果表明, 3 种生境群落结构间差异显著 ($P<0.05$), 相似性百分比结果表明, 阔叶混交林和红松人工林平均相异度最高, 其次为红松人工林和交错区, 阔叶混交林和交错区最低, 贡献大于 0.01 物种分别解释其 48.18%、43.16%、39.64% 的异质性。Jaccard 相似性系数表明 3 种生境间地表甲虫物种组成均为中等相似。边缘效应指数表明研究区地表甲虫表现出较弱的正效应。天然阔叶混交林-人工红松幼龄林交错区内不同生境群落结构存在异质性, 红松人工林地地表甲虫多样性方面接近于阔叶混交林, 说明人工经营林分可具有良好的生态效益, 但群落组成上的差异表明红松人工林无法取代阔叶混交林。

关键词: 地表甲虫; 多样性; 边缘效应; 阔叶混交林; 交错区; 红松人工林

Diversity of ground-dwelling beetles in natural broad-leaved mixed forest-young *Pinus koraiensis* plantation forest ecotone

WANG Jiasheng^{1,2}, ZHAO Hongrui^{1,2,*}, MENG Qingfan^{1,2}, LIU Shengdong^{1,2}, LI Yan^{1,2}, LI Mingrui^{1,2}, TONG Jiaqi^{1,2}

1 Jilin Provincial Key Laboratory of Insect Biodiversity and Ecosystem Function of Changbai Mountains of Beihua University, Jilin 132013, China

2 Forestry College of Beihua University, Jilin 132013, China

Abstract: This study seeks to identify the community structure and diversity of ground-dwelling beetles in natural forests and adjacent restored farmland, examine the presence and intensity of the edge effect in the ecotone, and assess the contribution of plantation forests to the protection of biological diversity. The results will provide guidance for forest

基金项目: 吉林省科技厅自然科学基金项目 (YDZJ202301ZYTS504); 长白山区昆虫生物多样性与生态系统功能重点实验室项目 (YDZJ202102CXJD032); 吉林省科技发展计划项目 (20240303095NC)

收稿日期: 2024-03-27; 网络出版日期: 2024-08-16

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: 421733800@qq.com

management that aligns closely with nature. From April to September in 2017 and 2018, the research was focused on the boundary between the natural broad-leaved mixed forest and the young *Pinus koraiensis* plantation forest, extending 120 meters on both sides, with sampling points established every 30 meters. The ecotone is marked by the central sampling point and another 30 meters away, with three transects in total where ground-dwelling beetles were continuously captured using the pitfall trapping method. A total of 6,990 ground-dwelling beetles were collected, representing 30 families, 124 genera, and 178 species. The species counts were 113 in the broad-leaved mixed forest, 125 in the ecotone, and 134 in the *P. koraiensis* plantation forest, with 79 species shared across all three habitats. Hill diversity indexes indicated that the number of species, common species, and dominant species in the three habitats were ranked as follows: *P. koraiensis* plantation forest > ecotone > broad-leaved mixed forest. Significant differences were observed in both the number of individuals and species of Carabidae and Cetoniidae across the habitats ($P < 0.05$), as well as in the number of individuals of Silphidae ($P < 0.05$). There were notable variations in the number of individuals and species of dominant families within the same habitat ($P < 0.05$). The individual counts of *Aclypea daurica*, *Carabus canaliculatus*, *Onthophagus ater*, *Ampedus sanguinolentus*, and *Synuchus orbicollis* significantly differed across habitats ($P < 0.05$). The Margalef and Shannon indexes indicated that the *P. koraiensis* plantation forests have significantly higher diversity than the broad-leaved mixed forests ($P < 0.05$). The results from PERMANOVA and NMDS showed significant differences in community structure across the three habitats ($P < 0.05$), and SIMPER analysis reveals the highest mean dissimilarity between the broad-leaved mixed forest and the *P. koraiensis* plantation forest, followed by the dissimilarity between the *P. koraiensis* plantation forest and the ecotone, and the lowest between the broad-leaved mixed forest and the ecotone. Species contributing more than 0.01 accounted for 48.18%, 43.16%, and 39.64% of the heterogeneity in each respective habitat. The Jaccard similarity coefficient indicated moderate similarity in species composition of ground-dwelling beetles across the three habitats. The edge effect index revealed a slight positive effect among the ground-dwelling beetles in the study area. The community structure demonstrated heterogeneity in the ecotone between the natural broad-leaved mixed forest and the *P. koraiensis* plantation forest. The diversity of ground-dwelling beetles in the *P. koraiensis* plantation forest was similar to that in the broad-leaved mixed forest, suggesting a beneficial ecological impact on the plantation. However, the differences in community composition indicated that the *P. koraiensis* plantation forest cannot substitute the broad-leaved mixed forest.

Key Words: ground-dwelling beetles; diversity; edge effect; broad-leaved mixed forest; ecotone; *Pinus koraiensis* plantation forests

为解决过去社会发展对森林生态系统造成的严重破坏,进而导致生物多样性降低这一问题^[1],生态恢复便显得极为重要,其旨在通过人为设计干扰使生物多样性得到改善^[2]。国内生态恢复手段主要包括天保工程及退耕还林等^[3],伴随着退耕还林展开,人工林面积迅速增加,形成众多森林交错区,交错区是指天然林与毗邻人工林之间形成的过渡区域^[4],同时也是生态群落结构和生物多样性研究的理想场所^[5]。已有研究表明,一些特定物种在森林边缘地区存在明显的聚集分布,另外物种在相邻栖息地的扩散现象,会导致森林边缘物种多样性短期提高^[6-7],例如在被砍伐过后的森林内,步甲 Caribidae 表现出了极强的边缘效应^[8-9],并且交错区形成时间长短也会导致步甲物种多样性具有明显差异^[10-11]。同时人工林在维护生物多样性方面历来是一个具有争议的问题^[12-13],主要观点有两种,一是认为其无法提供良好生境,会造成物种多样性下降^[14-15],二是认为人工林能为一些特定物种提供有效生境^[16]。

在东北地区,红松 *Pinus koraiensis* 不仅是主要退耕还林树种之一^[17],其种子每年也为东北地区创造了巨大的经济与生态效益^[18-19]。同时阔叶红松林作为东北地区顶级植被类型,在维护森林生态系统稳定方面也扮演着十分重要的角色^[20-21]。

地表甲虫是指栖息于地表的鞘翅目 Coleoptera 昆虫^[22],同时也是鞘翅目中种类与数量占比最大类群之

一^[23],在维护森林生态系统方面具有极其重要的作用^[22,24]。已有研究表明,地表甲虫群落结构受温度、海拔、土壤、降雨等环境因子影响明显^[25-27]。此外,郁闭度、林龄、草本盖度、灌木盖度、枯落物厚度、树种组成等林分因子对地表甲虫空间分布格局影响也极为显著^[22,28-31]。由于地表甲虫对生境选择极为敏感,具有生物学探针与生物地理学功能^[32-33],因此常被用于监测不同生境内的生物多样性变化^[34]。

在现有研究中,有关天然林与毗邻退耕还林地的地表甲虫多样性研究较少,尚不清楚天然林及其毗邻人工林植被类型变化对地表甲虫群落结构有什么影响。因此,本研究选取天然阔叶混交林-人工红松幼龄林交错区作为研究样地,以地表甲虫为研究对象,比较天然阔叶混交林内部、阔叶混交林与人工红松幼龄林交错区以及人工红松幼龄林地地表甲虫多样性特征及边缘效应,为评价人工红松林生态恢复效果和在保护生物多样性中的作用以及指导森林经营和保护提供参考。

1 研究区概况

研究区位于吉林省吉林市丰满区前二道乡(43°26'34"—43°51'42"N,126°21'38"—126°56'22"E),地处长白山区向松嫩平原过渡地带,土壤类型为暗棕壤,属寒温带季风型大陆性气候,年平均气温4.4℃,年平均降水量674mm,累年平均日照时数2438h,累年平均日照百分率55%,无霜期平均130d。

2 研究方法

2.1 样地设置

选取天然阔叶混交林(简称为“阔叶混交林”“TRL”)与毗邻人工红松幼龄林(简称为“红松人工林”“HSL”)为研究对象,参照于晓东、杨贵军、Heliölä 和 Meiners 等实验设计,按距离梯度进行设置样点,以便研究阔叶混交林内部、阔叶混交林与红松人工林交错区(简称为“交错区”“JCQ”)和红松人工林的差异。以阔叶混交林与红松人工林边界处为中心并设置1个研究样点,分别向阔叶混交林和红松人工林各延伸120m,期间每隔30m设置1个研究样点,共计9个研究样点,阔叶混交林、交错区和红松人工林各3个样点,交错区为中心样点及向两侧林型延伸30m的样点^[7,11,35-36]。共设置3条重复样带,样带间距大于50m以确保采样独立性^[37-38]。在每个样点内布设3个平行于边界且间隔为1m的诱杯,共计81个诱杯。样地设置如图1所示。

不同生境基本信息如下:阔叶混交林海拔304.66m,面积约30ha,坐标126°43'48"E,43°73'99"N,平均树高3.67m,草本平均高31.67cm,灌草盖度46.67%,树种组成为蒙古栎 *Quercus mongolica*:水曲柳 *Fraxinus mandshurica*:山楂 *Crataegus pinnatifida*:旱柳 *Salix matsudana*:山杨 *Populus davidiana*:糠椴 *Tilia mandshurica* = 3:2:2:1:1:1,主要草本有玉竹 *Polygonatum odoratum*、老鹳草 *Geranium wilfordii*、蝙蝠葛 *Menispermum dauricum*、狗尾草 *Setaria viridis*、牛叠肚 *Rubus crataegifolius*、玉簪 *Hosta plantaginea* 等;交错区海拔299.06m,坐标126°43'54"E,43°73'99"N,平均树高2.33m,草本平均高16.67cm,灌草盖度43.33%,树种组成为红松:蒙古栎:水曲柳:旱柳:山杨 = 4:2:2:1:1,主要草本有活血丹 *Glechoma longituba*、紫菀 *Aster tataricus*、老鹳草、龙芽草 *Agrimonia pilosa*、白车轴草 *Trifolium repens*、玉竹、还阳参 *Crepis rigescens* 等;红松人工林为退耕还林后造林时间9年人工林,海拔296.39m,面积约3ha,坐标126°43'57"E,43°73'99"N,平均树高1.17m,草本平均高53.33cm,灌草盖度66.67%,树种组成为红松纯林,主要草本有狗尾草、猪毛蒿 *Artemisia scoparia*、茵陈蒿 *Artemisia capillaris*、野芝麻 *Lamium barbatum*、蒲公英 *Taraxacum mongolicum*、还阳参 *Crepis rigescens*、刺菜 *Cirsium setosum*、鸭趾草 *Commelina communis* 等。

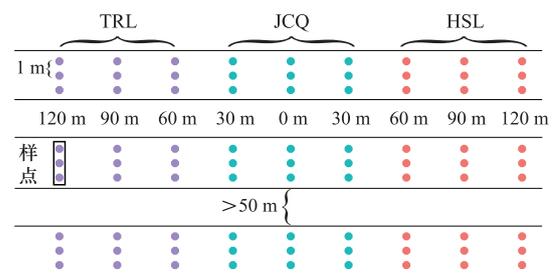


图1 样地示意图

Fig.1 Schematic diagram of the sample plots

TRL:天然阔叶混交林;JCQ:天然阔叶混交林与人工红松幼龄林交错区;HSL:人工红松幼龄林

2.2 调查及鉴定

采用巴氏罐诱捕法诱捕地表甲虫,诱杯采用一次性塑料杯,高9cm,口径7cm,在接近杯口处均匀打4个直径为2mm的小孔,以防止雨水过大导致标本丢失,将诱杯埋入地下并使杯口与地面平齐,诱杯内放入清水150mL,并滴入少许无味洗涤剂以降低水面张力,利于标本沉入杯底,诱杯上方支撑1个塑料板,以减少杂物以及雨水干扰实验,陷阱设置如图2所示。调查时间为2017—2018年,每年4月末首次进行布设,9月末结束,涵盖地表甲虫整个活跃期,期间每隔半个月左右进行1次标本回收,标本在带回实验室后制成针插标本,并根据形态学进行统计分类鉴定,部分步甲由北京林业大学史宏亮博士帮助鉴定,标本现存放于北华大学林学院昆虫实验室标本室内。

2.3 数据处理

地表甲虫等级划分:利用 Hill 多样性(²Hill)确定优势科,并基于实际个体数与物种数进行内插外推分析以比较不同生境中物种数、常见物种数与优势物种数差异,⁰Hill = S 、¹Hill = $\exp(-\sum_{i=1}^S P_i \ln P_i)$ 、²Hill = $(\sum_{i=1}^S P_i^2)^{-1}$ 分别代表物种(科)数、常见物种(科)数及优势物种(科)有效数量^[39]。此外,将在研究区整体内相对多度大于3%的物种作为分析在不同生境中个体数差异的主要物种^[40]。

地表甲虫 α 多样性:采用个体数 N 、物种数 S 、Margalef 丰富度指数 $D = (S - 1) / \ln N$ 、Shannon 多样性指数 $H = -\sum_{i=1}^S P_i \ln P_i$ 、Simpson 多样性指数 $\lambda = 1 - \sum_{i=1}^S P_i^2$ 、Pielou 均匀度指数 $J = H / \ln S$ 、Chao1 指数 $Chao1 = S + \frac{F_1(F_1 - 1)}{2(F_2 + 1)}$ 和 ACE 指数 $ACE = S_{abund} + \frac{S_{rare}}{C_{ACE}} + \frac{F_1}{C_{ACE}} \gamma_{ACE}^2$ 进行地表甲虫多样性分析。其中 $P_i = n_i / N$, $\gamma_{ACE}^2 = \max\left[\frac{S_{rare} \sum_{i=1}^{10} i(i-1) F_i}{C_{ACE} N_{rare} (N_{rare} - 1)} - 1, 0\right]$, $C_{ACE} = 1 - \frac{F_1}{N_{rare}}$, $N_{rare} = \sum_{i=1}^{10} i F_i$, n_i 为种 i 个体数, F_1 为 $n_i = 1$ 物种数、 F_2 为 $n_i = 2$ 物种数、 S_{abund} 为 $n_i > 10$ 物种数、 S_{rare} 为 $0 < n_i \leq 10$ 物种数^[41-43]。并利用相关系数(Pearson)判断 α 多样性指数之间相关性。

地表甲虫 β 多样性:基于各物种相对多度并采用置换多元方差分析(PERMANOVA)和利用 Bray-Curtis 距离的非度量多维尺度分析(NMDS)检验不同生境间地表甲虫群落结构差异是否显著^[44],并利用相似性百分比(SIMPER)确定对不同生境间平均相异度及对群落结构差异贡献较大物种(贡献 > 0.01)^[45-46]。利用 Jaccard 相似性系数 $I = A + B - C$ 判断不同生境间物种相似性,其中 A 、 B 为 2 种生境中各有物种数, C 为 2 种生境中共有物种数, I 介于 0—0.25 为极不相似、介于 0.25—0.5 为中等不相似、介于 0.5—0.75 为中等相似、介于 0.75—1 为极相似^[47]。

边缘效应:利用边缘效应指数衡量边缘效应正负及强度,当 $E_H = mH / \sum_{i=1}^m H_i$ 大于 1 为正效应,反之为负效应; $E_\lambda = m(1 - \lambda) / \sum_{i=1}^m (1 - \lambda_i)$ 值越低代表效应越强,反之则弱。其中 H 与 λ 分别代表交错区 Shannon 与 Simpson 指数, H_i 与 λ_i 分别代表各生境的 Shannon 与 Simpson 指数^[48]。

数据分析及处理:利用单因素方差分析(One-way ANOVA)和多重比较(LSD)检验不同生境中地表甲虫优势科、主要物种及 α 多样性指数差异,若单因素方差分析表明结果无显著差异则不进行多重比较,显著性水平设置为 $P < 0.05$ 。本实验数据整理在 Excel 2021 中进行,数据分析与绘图均在 R4.3.3 中进行,其中 Hill 多样性内插外推采用“iNEXT”包、热图采用“pheatmap”包、柱状图采用“ggplot2”包、 α 多样性指数计算采用“vegan”包、山脊图采用“ggridges”包、相关性计算采用“GGally”包、置换多元方差分析和非度量多维尺度分析

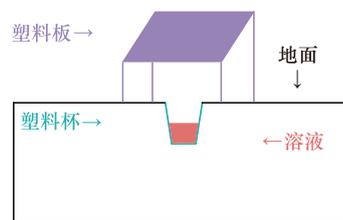


图2 陷阱示意图

Fig.2 Schematic diagram of the traps

以及相似性百分比均采用“vegan”包、相似性图采用“corrplot”包。

3 结果与分析

3.1 不同生境地表甲虫群落结构

共采集地表甲虫 30 科 124 属 178 种 6990 头,阔叶混交林中采集 20 科 78 属 113 种 2281 头,交错区中采集 24 科 86 属 125 种 2515 头,红松人工林中采集 25 科 93 属 134 种 2194 头;阔叶混交林中单属单种的科为 6 种,红松人工林与交错区中单属单种的科均为 9 种,研究区整体中单属单种的科为 11 种;阔叶混交林、交错区和红松人工林中仅有 1 头的科分别为 4 种、5 种和 3 种,研究区整体中仅有 1 头的科为 2 种;阔叶混交林和交错区特有物种均为 18 种,红松人工林特有物种为 27 种;阔叶混交林与交错区和红松人工林共有物种均为 8 种,红松人工林与交错区共有物种为 20 种,3 种生境共有物种为 79 种,不同生境地表甲虫群落结构详见表 1。

表 1 不同生境地表甲虫群落结构

Table 1 Community structure of ground-dwelling beetles in different habitats

科 Family	TRL			JCQ			HSL			总计 Total		
	G	S	N	G	S	N	G	S	N	G	S	N
步甲科 Carabidae	15	32	1075	16	38	1643	14	34	1037	16	41	3755
金龟科 Scarabaeidae	5	12	410	6	14	298	6	14	445	9	17	1153
叩甲科 Elateridae	4	5	352	7	8	234	5	8	141	9	12	727
埋葬甲科 Silphidae	7	8	251	5	7	95	5	6	71	7	10	417
花金龟科 Cetoniidae	2	3	12	4	5	12	4	5	230	5	6	254
叶甲科 Chrysomelidae	5	5	12	6	8	26	12	14	50	13	15	88
鳃金龟科 Melolonthidae	4	4	25	5	5	22	7	7	29	7	7	76
隐翅虫科 Staphylinidae	11	15	29	8	9	15	9	11	27	13	19	71
虎甲科 Cicindelidae	1	2	3	1	2	30	1	3	36	1	3	69
阎甲科 Histeridae	3	5	32	3	4	19	3	3	18	3	5	69
拟步甲科 Tenebrionidae	3	3	7	2	2	21	4	4	30	4	4	58
天牛科 Cerambycidae	5	5	21	5	5	16	4	4	19	6	6	56
负泥虫科 Crioceridae	1	1	35	1	1	1	1	1	6	1	1	42
象甲科 Curculionidae	5	6	9	4	4	18	5	6	13	8	9	40
露尾甲科 Nitidulidae	0	0	0	3	3	19	2	2	4	3	3	23
吉丁虫科 Buprestidae	0	0	0	1	1	20	0	0	0	1	1	20
瓢虫科 Coccinellidae	1	1	1	1	1	13	1	1	4	1	1	18
花萤科 Cantharidae	1	1	1	2	2	3	2	2	10	2	2	14
蜉金龟科 Aphodiidae	0	0	0	0	0	0	1	2	9	1	2	9
花蚤科 Mordellidae	0	0	0	1	1	1	1	1	6	2	2	7
谷盗科 Trogossitidae	0	0	0	1	1	3	1	1	1	1	1	4
皮金龟科 Trogidae	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	4
郭公虫科 Cleridae	1	1	1	0	0	0	1	1	2	1	1	3
球蕈甲科 Leiodidae	0	0	0	1	1	3	0	0	0	1	1	3
皮蠹科 Dermestidae	0	0	0	0	0	0	1	1	2	1	1	2
锹甲科 Lucanidae	2	2	2	0	0	0	0	0	0	2	2	2
溪泥甲科 Elmidae	0	0	0	0	0	0	1	1	2	1	1	2
朽木甲科 Alleculidae	1	1	1	0	0	0	1	1	1	2	2	2
伪瓢虫科 Endomychidae	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1
芫菁科 Meloidae	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1
总计 Total	78	113	2281	86	125	2515	93	134	2194	124	178	6990

G:属数 The number of genera;S:物种数 The number of species;N:个体数 The number of individuals;TRL:天然阔叶混交林 Natural broad-leaved mixed forest;JCQ:天然阔叶混交林与人工红松幼龄林交错区 Ecotone of natural broad-leaved mixed forest and young *Pinus koraiensis* plantation forest;HSL:人工红松幼龄林 Young *Pinus koraiensis* plantation forest ecotone

3.2 不同生境地表甲虫 Hill 多样性

基于实际个体数与物种数并利用 Hill 多样性进行内插外推,其结果能够良好反映出不同生境中物种数、常见物种数和优势物种数随个体数变化趋势,从图 3 可以看出 3 种生境内物种数、常见物种数和优势物种数从始至终均表现为红松人工林>交错区>阔叶混交林。若继续诱捕,物种数会有小幅度增加,但常见物种数和优势物种数趋于不变,当 3 种生境中个体数均达到 4000 时,物种数 3 者差异较小,但红松人工林中常见物种数和优势物种数约为交错区 1.5 倍、阔叶混交林 2 倍。

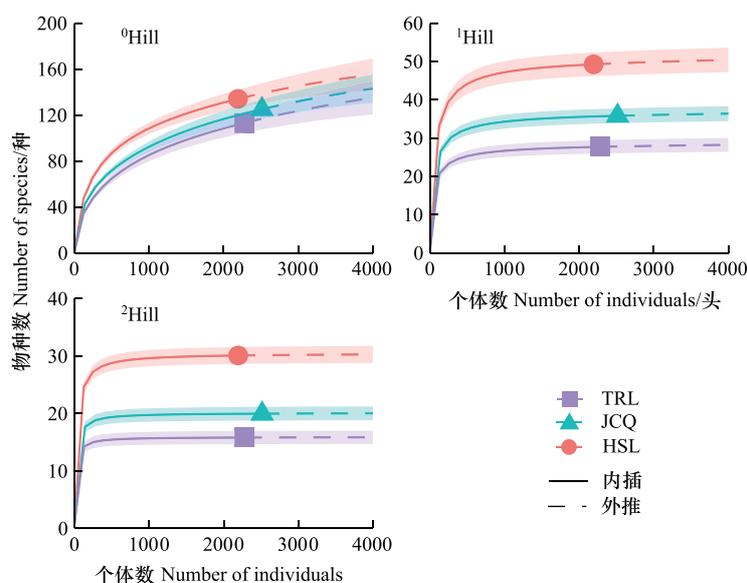


图 3 不同生境地表甲虫 Hill 多样性指数

Fig.3 Hill diversity index of ground-dwelling beetles in different habitats

⁰Hill 为物种数, ¹Hill 为常见物种数, ²Hill 为优势物种数, 阴影部分为 95% 置信区间

3.3 不同生境地表甲虫优势科差异

在全部采集到的地表甲虫中,根据 Hill 多样性指数(²Hill)确定研究区整体优势科有 4 种,分别为步甲科、金龟科 Scarabaeidae、叩甲科 Elateridae 和埋葬甲科 Silphidae。不同生境中优势科不同,其中步甲科、金龟科和叩甲科为 3 种生境共有优势科,埋葬甲科为阔叶混交林特有优势科,花金龟科 Cetoniidae 为红松人工林特有优势科,优势科相对多度详见图 4。

步甲科 Carabidae	0.47	0.65	0.47	0.54	相对多度 0.6 0.5 0.4 0.3 0.2 0.1
花金龟科 Cetoniidae	0.01	0.00	0.10	0.04	
金龟科 Scarabaeidae	0.18	0.12	0.20	0.16	
叩甲科 Elateridae	0.15	0.09	0.06	0.10	
埋葬甲科 Silphidae	0.11	0.04	0.03	0.06	
	TRL	JCQ	HSL	总计	

图 4 不同生境地表甲虫优势科相对多度

Fig.4 Relative abundance of dominant families of ground-dwelling beetles in different habitats

优势科个体数在不同生境中差异见图 5,步甲科($F_{(2,24)} = 4.888, P = 0.017$)、花金龟科($F_{(2,24)} = 5.439, P = 0.011$)和埋葬甲科($F_{(2,24)} = 3.957, P = 0.033$)个体数在不同生境间差异显著,其中步甲科个体数在交错区中显著高于其他生境、花金龟科个体数在红松人工林中显著高于其他生境、埋葬甲科个体数在阔叶混交林中显著高于其他生境。叩甲科($F_{(2,24)} = 1.105, P = 0.348$)和金龟科($F_{(2,24)} = 2.859, P = 0.075$)个体数在不同生境间无

显著差异。

阔叶混交林 ($F_{(4,40)} = 29.39, P < 0.001$)、交错区 ($F_{(4,40)} = 95.12, P < 0.001$) 和红松人工林 ($F_{(4,40)} = 11.98, P < 0.001$) 中不同优势科个体数差异显著。3 种生境间个体数最高均为步甲科,且显著高于其他科,阔叶混交林和交错区中个体数最低的均为花金龟科,阔叶混交林中显著低于其他科,交错区中显著低于除埋葬甲科外其他科,红松人工林中个体数最低的为埋葬甲科,且显著低于步甲科和金龟科。

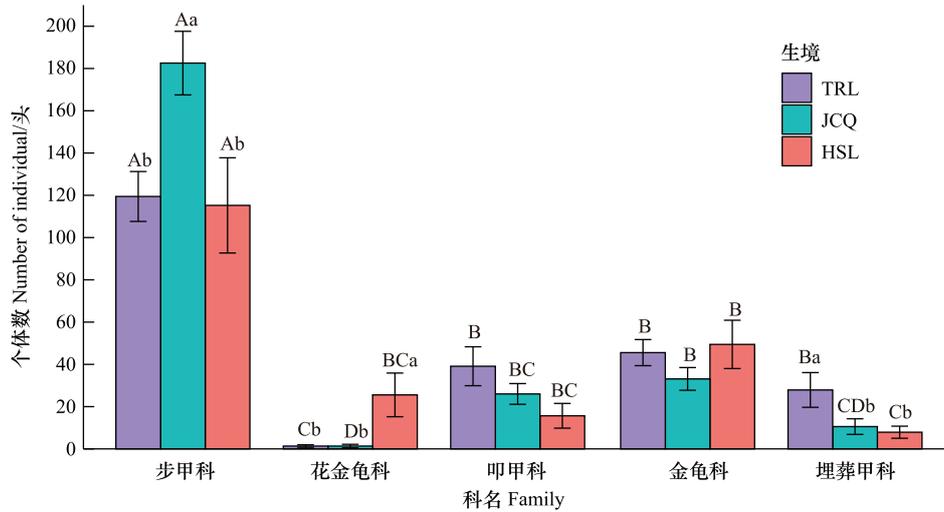


图 5 不同生境地表甲虫优势科个体数(平均值±标准误)

Fig.5 Number of individual of dominant families of ground-dwelling beetles in different habitats (Mean ± SE)

不同大写字母表示同一生境不同科个体数在 0.05 水平上差异显著,不同小写字母表示不同生境同一科个体数在 0.05 水平上差异显著

优势科物种数在不同生境中差异见图 6,步甲科 ($F_{(2,24)} = 5.010, P = 0.015$)、花金龟科 ($F_{(2,24)} = 8.914, P = 0.001$) 物种数在不同生境间差异显著,其中步甲科物种数在交错区中显著高于阔叶混交林、花金龟科物种数在红松人工林中显著高于其他生境。叩甲科 ($F_{(2,24)} = 0.547, P = 0.586$)、金龟科 ($F_{(2,24)} = 1.101, P = 0.349$) 和埋葬甲科 ($F_{(2,24)} = 1.411, P = 0.264$) 物种数在不同生境间无显著差异。

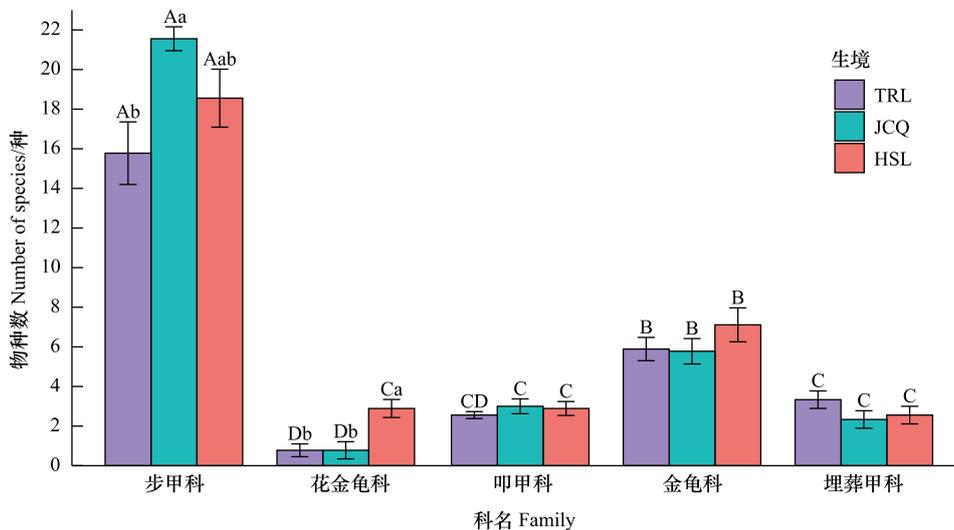


图 6 不同生境地表甲虫优势科物种数(平均值±标准误)

Fig.6 Number of species of dominant families of ground-dwelling beetles in different habitats (Mean ± SE)

不同大写字母表示同一生境不同科物种数在 0.05 水平上差异显著,不同小写字母表示不同生境同一科物种数在 0.05 水平上差异显著

阔叶混交林 ($F_{(4,40)} = 55.73, P < 0.001$)、交错区 ($F_{(4,40)} = 279, P < 0.001$) 和红松人工林 ($F_{(4,40)} = 68.63, P < 0.001$) 中不同优势科物种数差异显著。3 种生境间物种数最高均为步甲科且显著高于其他科, 阔叶混交林和交错区中物种数最低的均为花金龟科, 阔叶混交林中显著低于除叩甲科外其他科, 交错区中显著低于其他科, 红松人工林中物种数最低的为埋葬甲科, 且显著低于步甲科和金龟科。

3.4 不同生境主要地表甲虫种类差异

在整个研究区内, 相对多度大于 3% 被确定为主要物种的地表甲虫共有 9 种, 主要物种个体数在不同生境分布见图 7, 其中达乌里干葬甲 *Aclypea daurica* ($F_{(2,24)} = 4.022, P = 0.031$) 与沟步甲 *Carabus canaliculatus* ($F_{(2,24)} = 30.02, P < 0.001$) 个体数在阔叶混交林中显著高于其他生境, 黑圆喙蛭螂 *Onthophagus ater* ($F_{(2,24)} = 4.008, P = 0.032$) 个体数在红松人工林中显著低于其他生境, 黑斑锥胸叩甲 *Ampedus sanguinolentus* ($F_{(2,24)} = 4.866, P = 0.017$) 个体数在阔叶混交林中显著高于红松人工林, 圆角梨须步甲 *Synuchus orbicollis* ($F_{(2,24)} = 7.714, P = 0.003$) 个体数在交错区中显著高于其他生境, 步甲 *Amara orienticola* ($F_{(2,24)} = 1.009, P = 0.379$)、苏沃青步甲 *Chlaenius sworovi* ($F_{(2,24)} = 2.352, P = 0.117$)、掘喙蛭螂 *Onthophagus fodiens* ($F_{(2,24)} = 1.301, P = 0.291$) 和步甲 *Poecilus coreanus* ($F_{(2,24)} = 2.093, P = 0.145$) 个体数在不同生境中无显著差异。

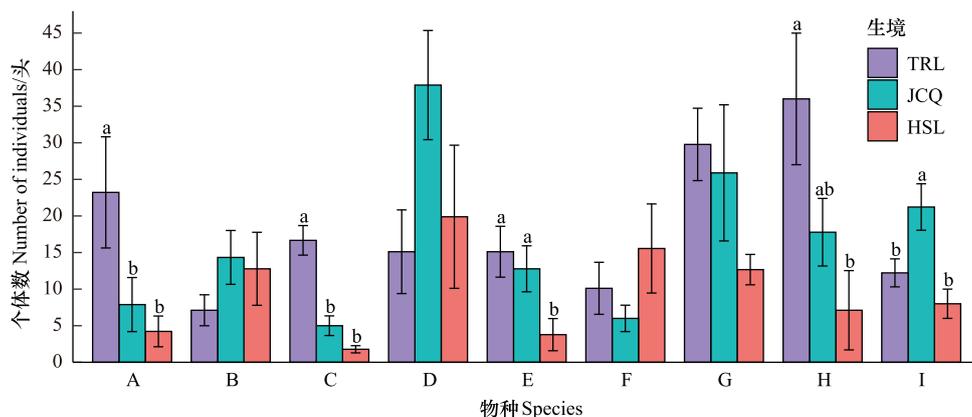


图 7 不同生境主要地表甲虫个体数 (平均值±标准误)

Fig.7 Number of individual of main species of ground-dwelling beetles in different habitats (Mean±SE)

A: 达乌里干葬甲 *Aclypea daurica*; B: 步甲 *Amara orienticola*; C: 沟步甲 *Carabus canaliculatus*; D: 苏沃青步甲 *Chlaenius sworovi*; E: 黑圆喙蛭螂 *Onthophagus ater*; F: 掘喙蛭螂 *Onthophagus fodiens*; G: 步甲 *Poecilus coreanus*; H: 黑斑锥胸叩甲 *Ampedus sanguinolentus*; I: 圆角梨须步甲 *Synuchus orbicollis*; 不同小写字母表示不同生境同一物种个体数在 0.05 水平上差异显著

3.5 不同生境地表甲虫 α 多样性

不同生境 α 多样性指数见图 8, 在 3 种生境间个体数 ($F_{(2,24)} = 0.464, P = 0.634$)、物种数 ($F_{(2,24)} = 2.514, P = 0.102$)、Simpson 指数 ($F_{(2,24)} = 2.379, P = 0.114$)、Pielou 指数 ($F_{(2,24)} = 2.412, P = 0.111$)、Chao1 指数 ($F_{(2,24)} = 2.754, P = 0.084$) 和 ACE 指数 ($F_{(2,24)} = 0.794, P = 0.464$) 均无显著差异; Margalef 指数 ($F_{(2,24)} = 4.489, P = 0.022$) 和 Shannon 指数 ($F_{(2,24)} = 4.663, P = 0.02$) 差异显著, 具体表现为红松人工林 Margalef 指数和 Shannon 指数显著高于阔叶混交林。

根据 Pearson 相关系数计算出 3 种生境及研究区整体 α 多样性指数相关系数见图 9, 其中物种数与 Margalef 指数、Margalef 指数与 Shannon 指数、Shannon 指数与 Simpson 指数、Simpson 指数与 Pielou 指数在 3 种生境及研究区整体中均表现出显著相关性; 个体数与 Margalef 指数仅在红松人工林中表现出显著相关性, 物种数与 Simpson 指数、Margalef 指数与 Simpson 指数、Shannon 指数与 Chao1 指数仅在研究区整体中表现出显著相关性; 物种数与 Shannon 指数仅未在阔叶混交林中表现出显著相关性, 物种数与 ACE 指数、Margalef 指数与 ACE 指数仅未在交错区中表现出显著相关性, Shannon 指数与 Pielou 指数、Chao1 指数与 ACE 指数仅未在

红松人工林中表现出显著相关性。

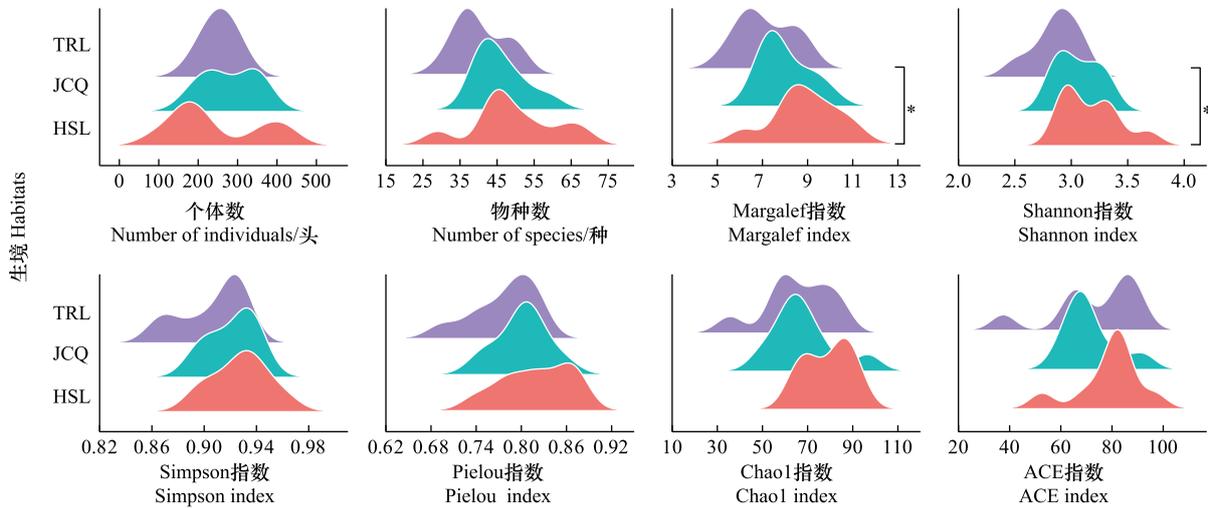


图 8 不同生境地表甲虫 α 多样性指数

Fig.8 α diversity index of ground-dwelling beetles in different habitats

* 表示不同生境同一指数在 0.05 水平上差异显著

个体数	Total: 0.615*** TRL: 0.024 JCQ: 0.467 HSL: 0.919***	Total: 0.366 TRL: -0.132 JCQ: 0.159 HSL: 0.801**	Total: 0.226 TRL: -0.387 JCQ: 0.063 HSL: 0.559	Total: 0.072 TRL: -0.415 JCQ: 0.051 HSL: 0.290	Total: -0.258 TRL: -0.494 JCQ: -0.294 HSL: -0.237	Total: 0.134 TRL: -0.240 JCQ: 0.414 HSL: 0.341	Total: 0.293 TRL: -0.162 JCQ: 0.440 HSL: 0.662
物种数	Total: 0.958*** TRL: 0.988*** JCQ: 0.946*** HSL: 0.972***	Total: 0.782*** TRL: 0.655 JCQ: 0.762* HSL: 0.761*	Total: 0.490** TRL: 0.287 JCQ: 0.491 HSL: 0.446	Total: 0.181 TRL: -0.005 JCQ: 0.289 HSL: -0.085	Total: 0.533** TRL: 0.815** JCQ: 0.449 HSL: 0.270	Total: 0.660*** TRL: 0.816** JCQ: 0.495 HSL: 0.776*	
Margalef指数	Total: 0.847*** TRL: 0.706* JCQ: 0.841** HSL: 0.825**	Total: 0.556** TRL: 0.342 JCQ: 0.547 HSL: 0.507	Total: 0.315 TRL: 0.066 JCQ: 0.447 HSL: 0.019	Total: 0.587** TRL: 0.850** JCQ: 0.361 HSL: 0.214	Total: 0.670*** TRL: 0.839** JCQ: 0.407 HSL: 0.773*		
Shannon指数	Total: 0.892*** TRL: 0.883*** JCQ: 0.908*** HSL: 0.884**	Total: 0.748*** TRL: 0.750* JCQ: 0.839** HSL: 0.570	Total: 0.402* TRL: 0.476 JCQ: -0.085 HSL: 0.397	Total: 0.313 TRL: 0.358 JCQ: -0.015 HSL: 0.431			
Simpson指数	Total: 0.894*** TRL: 0.922*** JCQ: 0.933*** HSL: 0.808**	Total: 0.240 TRL: 0.175 JCQ: -0.368 HSL: 0.541	Total: 0.057 TRL: 0.027 JCQ: -0.280 HSL: 0.176				
Pielou指数	Total: 0.102 TRL: -0.110 JCQ: -0.518 HSL: 0.390	Total: -0.231 TRL: -0.267 JCQ: -0.450 HSL: -0.370					
Chao1指数	Total: 0.757*** TRL: 0.979*** JCQ: 0.980*** HSL: 0.120						
ACE指数							

图 9 不同生境地表甲虫 α 多样性指数相关性

Fig.9 Correlation coefficient of α diversity index of ground-dwelling beetles in different habitats

右上方为 Pearson 相关系数及 P 值,左下方为拟合线, * 代表在 0.05 水平上显著相关, ** 代表在 0.01 水平上显著相关, *** 在 0.001 水平上显著相关

3.6 不同生境地表甲虫 β 多样性

3.6.1 不同生境地表甲虫群落结构差异

由图 10 可知,根据 NMDS (Stress = 0.1748) 结果显示,阔叶混交林和红松人工林形成明显分离,说明 2 者群落结构存在明显差异,而交错区与 2 者存在部分重叠,说明交错区同时具有 2 者的部分群落特征,其物种来

源于周边生境的扩散,这也一定程度上证明了研究区边缘效应的存在。PERMANOVA ($F = 4.111, R^2 = 0.255, P = 0.001$) 结果显示,3种生境在群落结构方面存在显著差异。在进行两两比较时,阔叶混交林和交错区 ($F = 3.53, R^2 = 0.2181, P = 0.005$)、阔叶混交林和红松人工林 ($F = 5.634, R^2 = 0.26, P = 0.003$)、红松人工林和交错区 ($F = 3.142, R^2 = 0.164, P = 0.005$) 同样表现出显著差异。

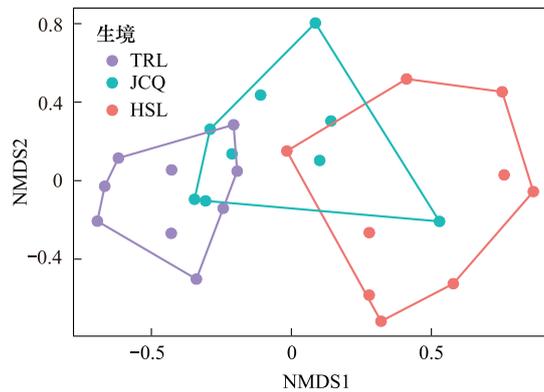


图 10 不同生境地表甲虫群落结构非度量多维尺度分析

Fig.10 NMDS of community structure of ground-dwelling beetles in different habitats

SIMPER 结果表明阔叶混交林和交错区、阔叶混交林和红松人工林、红松人工林和交错区平均相异度分别为 58.72%、70.87%、66.02%,表 2 中对群落结构差异贡献较大物种(贡献>0.01)分别解释了阔叶混交林和交错区、阔叶混交林和红松人工林、红松人工林和交错区群落结构组成 39.64%、48.18%、43.16%的异质性。

表 2 不同生境地表甲虫群落结构差异物种及贡献(贡献>0.01)

Table 2 Species and contribution to differences of community structure of ground-dwelling in different habitats(contribution>0.01)

科 Family	物种 Species	贡献 Contribution			相对多度 Relative abundance			
		TRL-JCQ	TRL-HSL	HSL-JCQ	TRL	JCQ	HSL	合计 Total
步甲科 Carabidae	苏沃青步甲 <i>Chlaenius sworovi</i>	0.05204	0.03418	0.05359	0.0596	0.1356	0.0816	0.0938
	步甲 <i>Poecilus coreanus</i>	0.03964	0.03386	0.02913	0.1175	0.0926	0.052	0.088
	圆角梨须步甲 <i>Synuchus orbicollis</i>	0.01911	0.01853	0.02939	0.0482	0.0759	0.0328	0.0534
	步甲 <i>Amara orienticola</i>	0.02076	0.03021	0.03285	0.0281	0.0513	0.0524	0.0441
	沟步甲 <i>Carabus canaliculatus</i>	0.02394	0.02956	<0.01	0.0658	0.0179	0.0073	0.0302
	步甲 <i>Nibria coreica</i>	0.01697	0.01492	0.02082	0.0044	0.0354	0.0415	0.0272
	步甲 <i>Pterostichus procax</i>	0.01203	<0.01	0.01164	0.0149	0.0274	0.021	0.0213
	圆胸畸颚步甲 <i>Licinus setosus</i>	<0.01	<0.01	0.01167	0.0114	0.0274	0.021	0.0202
	步甲 <i>Carabus wulffiusi</i>	0.01131	0.0113	0.01129	0.0254	0.0247	0.0055	0.0189
	小头长婪步甲 <i>Pterostichus microcephalus</i>	0.01168	<0.01	<0.01	0.0158	0.0207	0.0087	0.0153
	淡足青步甲 <i>Chlaenius pallipes</i>	0.01137	<0.01	0.01166	0.0066	0.0211	0.0164	0.0149
	强婪步甲 <i>Harpalus crates</i>	<0.01	0.01129	0.0112	0.0088	0.006	0.0196	0.0112
	小瘤步甲 <i>Carabus tuberculatus</i>	0.01039	<0.01	0.01	0.0018	0.0219	0.0068	0.0106
	库步甲 <i>Carabus kruberi</i>	0.01224	0.01138	<0.01	0.0254	0.0012	0.0032	0.0097
金龟科 Scarabaeidae	黑圆喙蛻螂 <i>Onthophagus ater</i>	0.01853	0.02499	0.01738	0.0596	0.0457	0.0155	0.0408
	掘喙蛻螂 <i>Onthophagus fodiens</i>	0.01791	0.03075	0.0289	0.0399	0.0215	0.0638	0.0408
	中华喙蛻螂 <i>Onthophagus sinicus</i>	0.01044	0.02525	0.02612	0.0114	0.0163	0.0529	0.0262
	婪喙蛻螂 <i>Onthophagus lenzi</i>	<0.01	0.01886	0.01923	0.0145	0.0119	0.0392	0.0213
	瘤圆喙蛻螂 <i>Onthophagus atripennis</i>	0.01693	0.01935	<0.01	0.0399	0.0127	0.0032	0.0186
叩甲科 Elateridae	黑斑锥胸叩甲 <i>Ampedus sanguinolentus</i>	0.04778	0.06069	0.03048	0.142	0.0636	0.0292	0.0784
埋葬甲科 Silphidae	双瘤槽缝叩甲 <i>Agrypnus bipapulatus</i>	<0.01	0.01225	0.01218	0.0101	0.0207	0.0242	0.0183
	达乌里干葬甲 <i>Aclypea daurica</i>	0.04334	0.04436	0.01387	0.0916	0.0282	0.0173	0.0455
花金龟科 Cetoniidae	白星花金龟 <i>Protaetia brevitarsis</i>	<0.01	0.02735	0.02762	0.0039	0.0028	0.0488	0.0176
	小青花金龟 <i>Oxycetonia jucunda</i>	<0.01	0.02274	0.02262	0	0.0004	0.046	0.0146

3.6.2 不同生境地表甲虫物种相似性

根据 Jaccard 相似性系数计算出不同生境间物种相似性见图 11,图中相似性系数均介于 0.5—0.75,为中等相似,其中红松人工林和交错区物种相似性最高,阔叶混交林和红松人工林物种相似性最低。

3.7 地表甲虫边缘效应

阔叶混交林-人工红松幼龄林交错区地表甲虫边缘效应指数见图 12,其中边缘效应指数 E_{λ} 值接近 1 表明边缘效应强度较弱, E_H 值大于 1 表明边缘效应为正效应,因此边缘区表现出较弱的正边缘效应,表明交错区边缘环境的复杂性和生境的异质性比临近的阔叶混交林和人工红松幼龄林略高。

4 讨论

在历来研究中,对于人工林能否维护生物多样性的争议一直存在,其中普遍研究认为人工林由于树种组成单一,且人为干扰极为频繁,无法对生物多样性提供有效保护^[14-15]。但也有研究表明,人工林的特殊生境对一些特定物种起到明显保护作用^[16]。而本研究利用地表甲虫对生境选择极为敏感的特性,在天然阔叶混交林-人工红松幼龄林交错区内进行为期 2 年的多样性研究,能够在一定程度上说明人工林在维护生物多样性方面是否一定作用。

Hill 多样性结果表明,无论从始至终或是继续诱捕至每种生境内个体数均达到 4000 头时,红松人工林中物种数、常见物种数和优势物种数均为最多,交错区次之,阔叶混交林最少。当个体数相同时,3 种生境内的物种数虽较为接近,但红松人工林中常见物种数和优势物种数几乎为阔叶混交林的 2 倍、交错区的 1.5 倍,这说明红松人工林内稀有种数量远不如阔叶混交林,只能为部分种类提供适合生境,同时也表明红松人工林虽能在保护生物多样性方面起到一定作用,但效果远不如阔叶混交林。

在对优势科进行分析时发现不同科对于生境倾向性极为明显,其中步甲科大多数为捕食性^[38],而地表甲虫个体数在交错区中最高,进而导致步甲科食物来源较多,这是造成其对交错区有明显倾向性原因之一;埋葬甲科对于阔叶混交林倾向性较高原因同样与取食有关,在阔叶混交林中,枯落物厚度较高,环境较为湿润,这就造成其能够取食腐烂物较多^[22];花金龟科对温度感知较为敏感,喜欢温度较高的环境,同时其大多数为访花昆虫^[49],而红松人工林相对于阔叶混交林和交错区来说郁闭度较低、光照较强、温度较高、草本植物茂密,是造成花金龟科对红松人工林倾向性较强的主要原因。

在主要地表甲虫种类中,一半以上物种表现出了对于不同生境的倾向性,这些物种对生境变化极为敏感且数量较多,可以考虑作为生境变化的指示物种进行进一步深入研究。此外,这些物种内对于阔叶混交林具有明显倾向性的较多,交错区次之,而暂未发现对于红松人工林具有明显倾向性的物种,这同样说明了红松人工林在保护生物多样性方面作用无法取代天然林。

Jaccard 相似性系数表明不同生境间物种组成均为中等相似,但在群落结构差异方面,无论是 NMDS 还是 PERMANOVA 均表明不同生境群落结构存在一定差异,这与生境内林分因子与环境因子均存在一定关系。

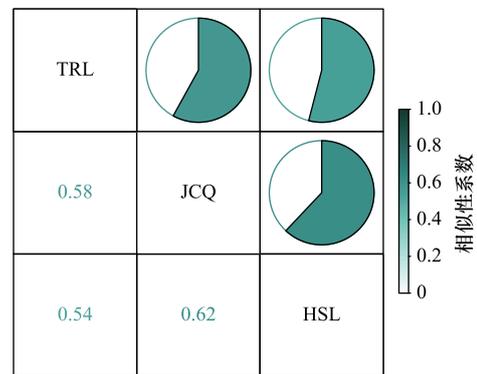


图 11 不同生境地表甲虫物种相似性系数

Fig. 11 Similarity coefficients of species of ground-dwelling beetles in different habitats

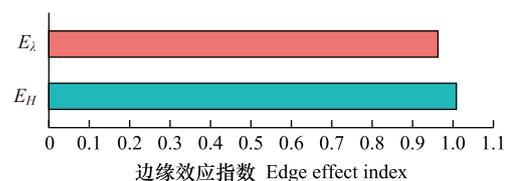


图 12 研究区地表甲虫边缘效应指数

Fig. 12 Edge effect index of ground-dwelling beetles in study area
 E_H : 边缘效应正负指数 The index of positive and negative of edge effect; E_{λ} : 边缘效应强度指数 The index of the strength of edge effect

根据已有研究表明,温度和郁闭度均为地表甲虫多样性重要影响因素^[22,27],在本次研究中,阔叶混交林中树种组成较为复杂,林龄相对较大,郁闭度和枯落物厚度较高,进而造成生境内光照较低,蓄水量较高,是阔叶混交林个体数高于红松人工林的主要原因,这一点与刘生冬的研究结论较为相似^[22]。而地表甲虫个体数在交错区中最高,这表明了其在研究区中存在边缘效应,这一点与一些研究结论较为相似^[8-9]。在众多 α 多样性指数中,有多个指数大小表现为红松人工林>交错区>阔叶混交林,但无显著差异,这与刘欢欢的研究结论较为相似^[46]。同时边缘效应表现为较弱正效应也符合历来传统对边缘效应的认知。

本研究虽可为人工林在维护生物多样性方面具有一定作用的观点提供理论支撑,但由于对部分地表甲虫种类生活习性尚未完全掌握,进而导致对不同生境间地表甲虫组成差异产生机制尚不明确,因此日后仍需针对此项问题进行深入研究。

5 结论

实验共计采集地表甲虫 30 科 124 属 178 种 6990 头,不同生境群落结构存在一定异质性,叩甲科和金龟科受生境影响较弱,步甲科、花金龟科和埋葬甲科受生境影响明显,其中步甲科个体数和物种数在不同生境中均存在优势,主要物种多数在阔叶混交林中个体数最高,红松人工林中稀有物种数较少。红松人工林地地表甲虫多样性方面接近于阔叶混交林,说明人工经营林分可具有良好的生态效益,但群落组成上的差异表明红松人工林无法取代阔叶混交林,研究区地表甲虫存在较弱的正边缘效应。

参考文献 (References):

- [1] Runting R K, Bryan B A, Dee L E, Maseyk F J F, Mandle L, Hamel P, Wilson K A, Yetka K, Possingham H P, Rhodes J R. Incorporating climate change into ecosystem service assessments and decisions; a review. *Global Change Biology*, 2017, 23(1): 28-41.
- [2] Rey Benayas J M, Newton A C, Diaz A, Bullock J M. Enhancement of biodiversity and ecosystem services by ecological restoration: a meta-analysis. *Science*, 2009, 325(5944): 1121-1124.
- [3] 邵全琴,樊江文,刘纪远,杨帆,刘华,杨秀春,许明祥,侯鹏,郭兴健,黄麟,李愈哲. 重大生态工程生态效益监测与评估研究. *地球科学进展*, 2017, 32(11): 1174-1182.
- [4] Saunders D A, Hobbs R J, Margules C R. Biological consequences of ecosystem fragmentation: a review. *Conservation Biology*, 1991, 5(1): 18-32.
- [5] Zhao H R, Meng Q F, Li Y, Liu S D, Liu S M, Cheng Y. Community diversity of ground-dwelling beetles in secondary oak Forest and its adjacent restored poplar Forest. *Phytoparasitica*, 2020, 48(5): 727-742.
- [6] Máthé I. Forest edge and carabid diversity in a Carpathian beech forest. *Community Ecology*, 2006, 7(1): 91-97.
- [7] 于晓东,罗天宏,周红章,杨建. 边缘效应对卧龙自然保护区森林-草地群落交错带地表甲虫多样性的影响. *昆虫学报*, 2006, 49(2): 277-286.
- [8] Magura T. Carabids and forest edge: spatial pattern and edge effect. *Forest Ecology and Management*, 2002, 157(1/2/3): 23-37.
- [9] Yu X D, Luo T H, Zhou H Z, Yang J. Distribution of carabid beetles (Coleoptera: Carabidae) across a forest-grassland ecotone in southwestern China. *Environmental Entomology*, 2007, 36(2): 348-355.
- [10] Kotze D J, Samways M J. Invertebrate conservation at the interface between the grassland matrix and natural Afromontane forest fragments. *Biodiversity & Conservation*, 1999, 8(10): 1339-1363.
- [11] Heliölä J, Koivula M, Niemelä J. Distribution of carabid beetles (Coleoptera, Carabidae) across a boreal forest-clearcut ecotone. *Conservation Biology*, 2001, 15(2): 370-377.
- [12] 孟庆繁. 人工林在生物多样性保护中的作用. *世界林业研究*, 2006, 19(5): 1-6.
- [13] Brockerhoff E G, Jactel H, Parrotta J A, Quine C P, Sayer J. Plantation forests and biodiversity: oxymoron or opportunity? *Biodiversity and Conservation*, 2008, 17(5): 925-951.
- [14] Calviño-Cancela M, Rubido-Bará M, van Etten E J B. Do eucalypt plantations provide habitat for native forest biodiversity? *Forest Ecology and Management*, 2012, 270: 153-162.
- [15] Liu J J, Coomes D A, Gibson L, Hu G, Liu J L, Luo Y Q, Wu C P, Yu M J. Forest fragmentation in China and its effect on biodiversity. *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society*, 2019, 94(5): 1636-1657.
- [16] Berndt L A, Brockerhoff E G, Jactel H. Relevance of exotic pine plantations as a surrogate habitat for ground beetles (Carabidae) where native forest is rare. *Biodiversity and Conservation*, 2008, 17(5): 1171-1185.
- [17] 陈光志,赵洪雁. 湾沟林业局退耕还林工程实施情况及几点做法. *吉林林业科技*, 2004, 33(5): 18-20.
- [18] 刘明睿,贾炜玮. 基于地基雷达数据构建红松人工林树高、枝下高及接触高模型. *森林工程*, 2024, 40(1): 26-36.

- [19] 李占君, 马珂, 徐宜彬, 王岩, 杨逢建. 表面活性剂诱导红松种鳞油脂和原花青素超声提取工艺. 森林工程, 2024, 40(1): 160-170.
- [20] 谭凌照, 范春雨, 范秀华. 吉林蛟河阔叶红松林木本植物物种多样性及群落结构与生产力的关系. 植物生态学报, 2017, 41(11): 1149-1156.
- [21] 魏亚伟, 张彤, 刘静, 韩叙, 秦胜金, 杜天雨, 周永斌. 红松叶片与土壤有机碳、氮、磷、钙的空间分布及其化学计量学特征. 沈阳农业大学学报, 2021, 52(4): 419-427.
- [22] 刘生冬, 孟昕, 孟庆繁, 李燕, 赵红蕊, 高文韬. 阔叶红松林不同林分对地表甲虫群落的影响. 林业科学, 2018, 54(2): 110-118.
- [23] 李丹春, 付作霖, 罗子渝, 林媛, 蔡建华, 唐明代. 白龙江林区地表甲虫沿海拔梯度的群落结构及动态分析. 应用昆虫学报, 2022, 59(1): 193-202.
- [24] 颜铮明, 阮宏华, 廖家辉, 石珂, 倪娟平, 曹国华, 沈彩芹, 丁学农, 赵小龙, 庄鑫. 不同林龄杨树人工林地地表甲虫群落多样性特征. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2023, 47(6): 236-242.
- [25] 王敏, 李欣芸, 杨益春, 杨贵军. 贺兰山地地表甲虫群落多样性及其与环境因子的相关性. 干旱区资源与环境, 2020, 34(4): 154-161.
- [26] 刘继亮, 巴义彬, 牛瑞雪, 李锋瑞, 赵文智. 河西走廊天然固沙植被区地表甲虫多样性及其对沙漠化的指示作用. 生态学报, 2021, 41(13): 5435-5445.
- [27] 林永一, 王永珍, 冯怡琳, 赵文智, 高俊伟, 刘继亮. 河西走廊中部戈壁地表甲虫群落动态变化及其影响因素. 生物多样性, 2022, 30(12): 76-87.
- [28] 顾伟, 马玲, 刘哲强, 焦玥, 王利东, 张琛. 凉水自然保护区不同林型地表甲虫物种多样性. 东北林业大学学报, 2014, 42(1): 131-135.
- [29] 刘继亮, 赵文智, 李锋瑞, 巴义彬. 天然和人工固沙灌木林蜘蛛和甲虫分布与环境因子的关系. 生态学报, 2020, 40(21): 7987-7996.
- [30] 马美轩, 宋悦心, 桑卫国, Jan Axmacher. 大兴安岭地区兴安落叶松林步甲群落多样性时间动态分析. 生态学报, 2021, 41(24): 9910-9919.
- [31] Rischen T, Kaffenberger M, Plath E, Wolff J, Fischer K. Configurational landscape heterogeneity: crop-fallow boundaries enhance the taxonomic diversity of carabid beetles and spiders. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2023, 341: 108194.
- [32] Hodkinson I D. Terrestrial insects along elevation gradients: species and community responses to altitude. Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society, 2005, 80(3): 489-513.
- [33] Rahbek C. The role of spatial scale and the perception of large-scale species-richness patterns. Ecology Letters, 2005, 8(2): 224-239.
- [34] Rainio J, Niemelä J. Ground beetles (Coleoptera: Carabidae) as bioindicators. Biodiversity & Conservation, 2003, 12(3): 487-506.
- [35] Meiners S J, Pickett S T A. Changes in community and population responses across a forest-field gradient. Ecography, 1999, 22(3): 261-267.
- [36] 杨贵军, 王新谱, 贾彦霞, 张大治. 人工柠条-荒漠草地交错带拟步甲昆虫群落多样性. 生态学报, 2016, 36(3): 608-619.
- [37] Digweed S C, Currie C R, Cárcamo H A, Spence J R. Digging out the "digging-in effect" of pitfall traps: influences of depletion and disturbance on catches of ground beetles (Coleoptera: Carabidae). Pedobiologia, 1995, 39(6): 561-576.
- [38] 周红章, 于晓东, 罗天宏, 李晓燕, 王凤艳, 李德娥, 周毓灵子, 赵彩云. 土壤步甲和隐翅虫的采集与田间调查取样技术. 应用昆虫学报, 2014, 51(5): 1367-1375.
- [39] Hsieh T C, Ma K H, Chao A. iNEXT: an R package for rarefaction and extrapolation of species diversity (Hill numbers). Methods in Ecology and Evolution, 2016, 7(12): 1451-1456.
- [40] 刘生冬, 高文韬, 李燕, 施莹, 孟庆繁. 张广才岭南段不同林分天牛科昆虫物种多样性比较. 北京林业大学学报, 2015, 37(5): 110-118.
- [41] Chao A. Nonparametric estimation of the number of classes in a population. Scandinavian Journal of Statistics, 1984, 11: 265-270.
- [42] Chao A, Lee S M. Estimating the number of classes via sample coverage. Journal of the American Statistical Association, 1992, 87(417): 210-217.
- [43] 韩艺茹, 薛琪琪, 宋厚娟, 祁靖宇, 高瑞贺, 崔绍朋, 门丽娜, 张志伟. 燕山地区访花昆虫多样性及其影响因子. 生物多样性, 2022, 30(3): 48-59.
- [44] Abbas S, Nichol J E, Zhang J L, Fischer G A. The accumulation of species and recovery of species composition along a 70 year succession in a tropical secondary forest. Ecological Indicators, 2019, 106: 105524.
- [45] 董六文, 韩佳龙, 赵文智, 刘继亮, 巴义彬. 黑河流域湖泊湿地及毗邻沙丘地表节肢动物群落结构比较. 中国沙漠, 2020, 40(6): 250-258.
- [46] 刘欢欢, 李晨阳, 李梦莉, 蒙凤群. 广西马尾松人工林与毗邻天然林昆虫群落组成及多样性研究. 西南林业大学学报: 自然科学, 2024, 44(2): 144-154.
- [47] Jaccard P. The distribution of the flora in the alpine zone. New Phytologist, 1912, 11(2): 37-50.
- [48] 段曼微, 李香, 周阳, 赵敏欣, 孙秀玲, 韩冰, 张刚, 权子豪, 李凯. 基于蛾类多样性研究人工林斑块的边缘效应. 生物多样性, 2023, 31(5): 69-79.
- [49] 闫子晗, 路园园, 刘宁, 李静, 佟一杰, 杨海东, 孙志斌, 白明. 金龟子飞行时鞘翅开合状态与后翅腋片形态的相关性研究. 昆虫学报, 2023, 66(3): 399-408.