

川西亚高山林牧交错区土壤动物多样性

黄旭, 张健*, 杨万勤, 刘洋, 闫帮国, 胡方洁, 苏江峰

(四川农业大学林学院/长江上游林业生态工程省级重点实验室, 四川雅安 625014)

摘要: 交错区复杂的生境常常导致相对较高的物种多样性。为探讨牧压条件形成的林牧交错区土壤动物多样性, 研究了川西亚高山典型林牧交错区的土壤动物群落结构与多样性。在交错区 5 种生境下, 共获得土壤动物 49837 只, 隶属 7 门 16 纲 33 目 126 类。从草甸到针叶林的过渡生境中, 土壤动物明显受到放牧干扰影响, 其个体密度随干扰的减弱呈逐步上升趋势, 而类群数则呈单峰型变化趋势; Shannon-Wiener、DG 多样性指数都呈现逐步上升趋势; Wilson-Shmida 多样性指数表明相邻干扰梯度下土壤动物类群替代率相近。大型土壤动物生物量在草甸最低, 阔叶林最高。CCA 排序显示凋落物厚度与中小型土壤动物存正相关, pH 与其存负相关, 不同类群对环境因子响应存在差异。这些结果表明农牧交错区不同干扰梯度下土壤动物群落结构和多样性存在明显差异。

关键词: 亚高山; 林牧交错区; 土壤动物; 多样性; 干扰梯度; 典范对应分析

Soil fauna diversity of the subalpine forest-pasture ecotone in western Sichuan

HUANG Xu, ZHANG Jian*, YANG Wanqin, LIU Yang, YAN Bangguo, HU Fangjie, SU Jiangfeng

Faculty of Forestry, Sichuan Agricultural University/Key Laboratory of Forestry Ecological Engineering of Upstream of the Yangtze River of Sichuan Province, Ya'an, Sichuan 625014, China

Abstract: Ecotone system often exhibits relative more complicated environment, which could provide relative more habitats for creatures, and displays relative higher biodiversity compared with the near ecosystems. Subalpine forest-pasture ecotone is an important ecotone system in western mountain area of upper Yangtze River, and does the crucial functions in regulating regional climate and conserving soil and water. Soil fauna, the key component in an ecosystem, plays an essential role in material cycling and energy flow in the ecosystem. To explore soil fauna diversity in pasture-forest ecotone disturbed by grazing, the structure and diversity of soil fauna communities were investigated in the typical subalpine forest-pasture ecotone of Miyaluo natural reserve in western Sichuan from August 2008 to August 2009. Five representative plots including coniferous forest, broadleaf forest, shrub land, dwarf shrub land and grassland were sampled along the disturbance gradient in the forest-pasture ecotone. There were 200 meters with horizontal distance between the two sampled plots. A total of 49837 individuals were detected under the five sampled micro-systems from meadow to forest system in the ecotone, which belonged to 7 phyla, 16 classes, 33 orders and 126 groups. Including others, there were 35688 individuals belonged to Nematoda, which accounted for 84.08% of the total individual density, indicating that Nematoda could be the only dominant group in these groups. The density of Enchytraeidae, Eutardigrada and Harpacticoida accounted for 4.14%, 2.47% and 5.52% of total individual density, respectively. These population could be defined as the common groups in this forest-pasture ecotone. The remaining 122 groups of soil macro, meso and micro fauna could be defined as the rare groups. From the meadow to the coniferous forest in this ecotone system, the diversity of soil fauna communities decreased with the increase of disturbance intense. In the disturbance conditions, individual density of soil fauna was gradually decreased with the increase of grazing intense while the group richness was highest in shrub land compared with the others.

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划资助项目(2006BAC01A11); 国家自然科学基金资助项目(30771702); 教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-07-0592)

收稿日期: 2010-01-18; **修订日期:** 2010-04-27

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

The individual densities of the dominant groups were lowest in grassland compared with the other sampled plots, although they gradually increased from grassland to forest regardless of soil fauna body size. There were obvious variations among the dominant groups of the soil fauna with different body size, especially in dominant groups of macrofauna. The Shannon-Wiener and density-group indices were also gradually increased from grassland to forest. The Wilson-Shmida index indicated that species replacement rate was not significant among the sampled plots, but the minimum biomass of soil macro-fauna was observed at grassland, the maximum at broad-leaf forest. The density, group and biomass of soil fauna showed an obvious seasonal dynamics pattern. CCA analysis indicated that there was a significant correlation between litter thickness, pH and soil meso-micro fauna, but the other investigated soil factors were slightly related to meso micro fauna. The results suggest that there was a high diversity of soil fauna in the subalpine Pasture-forest ecotone of Western Sichuan, and the structure and diversity of soil fauna community were varied under different grazing disturbances in this ecotone system.

Key Words: subalpine; forest-pasture ecotone; soil fauna; diversity; disturbances; canonical correspondence analysis

生态交错区拥有比相邻系统更高的生境复杂性和物种多样性以及能敏感反应环境的变化而备受关注^[1-3]。林牧交错区作为一种小尺度类型的景观梯度变化连续的生态交错区,其物种的组成、优势种、生活史以及土壤的营养条件除了受到环境影响外,还要受到放牧干扰的影响,且其生境的复杂性、多样性、异质性和脆弱性也与放牧干扰存在密切相关^[4]。而交错区生境的这些特性又与物种多样性存在紧密的相关性^[5]。但目前对小尺度交错区研究主要集中在植物、脊椎动物等方面^[5-8],而土壤动物则鲜有研究。土壤动物作为生态系统重要组成部分,在物质循环、能量储存和中转、土壤生态毒理诊断、环境变化、生态指示以及全球变化等方面有着重要的生态功能^[9],且能敏感响应干扰条件变化^[10-12],因此可以用来监测放牧干扰对生态系统的影响。

川西高海拔地区自然环境十分恶劣,当地居民生产方式仍然比较传统,多以放牧(牦牛等)为生,使得亚高山区域的草甸和森林受到不同程度的干扰,导致该区域草甸和森林的生境面积、连接度以及生境间植被类型发生了明显的变化,这种变化不仅影响到物种种群密度和种类丰度,也会对物种多样性造成明显的影响^[13-14]。野放牦牛的生活习性决定了其干扰强度从草甸到森林呈现逐步减弱,由此在高山牧场与原始林之间形成为数众多景观梯度变化连续的林牧交错区,这些交错区跨度在 1km 左右,属于中小型尺度交错区。

目前,川西地区已有草地和森林生态系统土壤动物的初步研究^[15-16],然而在该区域起着重要生态作用的林牧交错区还未见报道。为此本文研究了亚高山林牧交错区土壤动物群落结构、类群分布格局以及多样性,旨在了解干扰梯度下交错区土壤动物群落结构特征以及多样性变化规律,为进一步研究放牧干扰对该区域生态系统功能的影响奠定基础,也为此类交错区生物多样性保护提供依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 区域自然概况

研究地点位于四川省阿坝藏族、羌族自治州理县鹧鸪山高山牧场与米亚罗林区的过渡带(N31°51', E102°41'),处于岷江支流杂谷脑河上游地区。研究区海拔 3600—4000m,坡度 30°,受高原地形影响,属高山气候,降水次数多、强度小,寒冷干燥,年降水量 1000mm。在高山草甸牧场牦牛自由取食,而牧场到森林之间未设栅栏或栅栏高度不足以圈住牦牛,因此在草甸牧场出现食物不足、阳光强烈、大雪封山等情况时,牦牛会深入原始林进行取食、遮阴以及避寒等,由此导致牧场到原始林放牧之间出现不同程度干扰,从而在牧场到原始林之间形成了植被类型由草甸逐渐向针叶林过渡且木本植物高度与郁闭度逐渐提高的过渡区域—林牧交错区。交错区从牧场到原始林依次跨越了草甸、矮灌丛、灌丛、阔叶林及针叶林 5 种植被类型,跨度 1000m,海拔范围 3600—3950 m。由于牦牛的生活习性、灌木丛的阻挡等原因,使得草甸至原始林的放牧干扰强度逐渐降低,野外观察到牧群踩踏蹄印与粪便数量都逐渐降低。草甸受到极度干扰,其草本被严重啃食,踩踏严重,粪便随处可见,甚至部分区域出现裸地;矮灌丛受到重度干扰,其草本与小灌木都受到啃食,粪便出现频率较

低, 踩踏形成多条牦牛行走的通道; 灌木林受到中度干扰, 仅草本被取食, 踩踏形成通道较少, 凋落物厚度大; 阔叶林受到轻度干扰, 草本受到取食, 踩踏蹄印很少, 枯枝落叶保存很好; 针叶林未受干扰: 无牲畜践踏蹄印, 地表被生长旺盛的苔藓密盖。

1.2 样地设置

在林牧交错区水平中心位置(3780 m)设置一条样带, 根据样带法选取有代表性的样地(沿着样带在样带上或其附近选取有代表性的样地)。沿等高线按水平距离每隔 200m 左右设置一个样地, 共 5 个植被类型样地, 每个样地按海拔上中下随机设置 3 个样点, 每点相距 5 m 以上。不同景观植被下样地的地被物厚度不同, 草甸几无地被物; 矮灌丛很少凋落物; 灌木林有较厚凋落物; 阔叶林有很厚凋落物; 针叶林有很厚的苔鲜和凋落物, 样地自然环境条件见表 1。

表 1 林牧交错区 5 个样地自然环境条件
Table 1 Natural conditions of the five plots in Forest-pasture ecotone

样地 Plot	坡度/海拔/坡向 Slope/(°)/Altitude /m/Aspect/(°)	植被类型 Vegetation	郁闭度 Canopy density/%	凋落物厚度 Litter's thickness/cm	干扰程度 Disturbance of grading	植物优势种类 Dominant plant group
A	28/3771/ 西北 21	草甸	8	0.2	极度干扰	细芒羊茅、长稈早熟禾等 <i>Festuca stapfii</i> E. Alexeev., <i>Poa dolichachyra</i> Keng ex L. Liou, etc.
B	26/3776/ 西北 30	矮灌丛	50	0.6	重度干扰	杯腺柳、鹧鸪杜鹃等 <i>Salix cupularis</i> , <i>Rhododendron zheguense</i>
C	30/3793/ 西北 35	灌木林	60	4.7	中度干扰	华西花楸、细枝绣线菊等 <i>Sorbus wilsoniana</i> , <i>Spiraea myrtilloides</i> , etc.
D	28/3795/ 西北 30	阔叶林	70	8.4	轻度干扰	红桦、糙皮桦等 <i>Betula albo-sinensis</i> , <i>B. utilis</i> , etc.
E	32/3800/ 西北 28	冷杉林	85	11.9	未干扰	岷江冷杉、大理杜鹃等 <i>Abies faxoniana</i> , <i>R. taliense</i> , etc.

1.3 土壤动物样品采集

于 2008 年 8 月(夏季)、10 月(秋季)、2009 年 6 月(春季)和 8 月(夏季)进行 4 次采样。根据样地凋落物情况对 5 个样地设置了不同采样层次, 分别为: 草甸与矮灌丛为土层 0—5cm、>5—10cm、>10—15cm; 灌木林与阔叶林为凋落物层、土层 0—5cm、>5—10cm、>10—15cm; 针叶林为苔鲜层、凋落物层、土层 0—5cm、>5—10cm、>10—15cm。在每个样地的 3 个采样点上进行土壤动物的采集。大型土壤动物: 在每个取样点依照上述层次采用手拣法收集 50 cm × 50 cm 面积内的体长大于 2 mm 的大型土壤动物, 并将所得大型土壤动物放入盛有 75% 酒精的容器中带回分析; 中型干生动物: 在各取样点分别按土层 0—5 cm、>5—10 cm 和 >10—15 cm 用直径为 5 cm 体积 100 mL 圆形取样器分层取土样, 在灌木林各取样点收集面积 10 cm × 10 cm 的枯落物, 在阔叶林各取样点收集面积 10 cm × 10 cm 的枯落物, 在针叶林各取样点收集面积 10 cm × 10 cm 的苔藓并在苔藓层之下收集面积 10 cm × 10 cm 的枯落物, 以上收集苔藓、凋落物以及土壤样品用 Tullgren 干漏斗法分离; 小型湿生动物: 与中型干生动物取样层次完全一致, 但用直径为 3 cm 体积 25 mL 圆形取样器取样, 苔藓和枯落物的收集面积为 5 cm × 5 cm, 取回样品用 Baermann 湿漏斗法分离提取。本研究中凡手捡法获取的土壤动物均归纳为大型土壤动物, Tullgren 干漏斗收集的土壤动物均划入中型干生土壤动物, Baermann 湿漏斗分离的动物均划入小型湿生土壤动物。捕获到的土壤动物参考《中国土壤动物检索图鉴》^[17]、《昆虫分类检索》^[18]等进行鉴定, 除线虫等少数类群鉴定到纲或目, 其余鉴定到科或亚科。带回的大型土壤动物鉴定完后分大类称其生物量(干重)。凋落物厚度(本文中凋落物包括苔鲜层)现场采用卷尺测量。取适量土壤带回室内测定理化性质: 土壤 pH 值采用 PHS-3B 精密 pH 计测定; 土壤养分指标有机质、全氮、全磷以及全钾的含量分别用重铬酸钾氧化-外加热法、硒粉-硫酸铜-硫酸钾消煮-蒸馏法、氢氧化钠碱熔-钼锑抗比色法、氢氧化钠碱熔-原子吸收分光光度法测定。

1.4 数据处理与统计分析

根据研究目的,本文选用了 Shannon-Wiener 多样性指数 H' 、Wilson-Shmida 多样性指数 β 和密度-类群指数 DG 来描述土壤动物群落特征。各指数计算公式如下^[19-21]:

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

Wilson-Shmida 多样性指数 $\beta = [g(H) + 1(H)]/2S$ (2)

密度-类群指数 $DG = (g/G) \sum_{i=1}^g (D_i C_i / D_{imax} C)$ (3)

公式中, P_i 为第 i 类群的个体数比, $P_i = N_i/N$, N_i 为第 i 类群的个体数, N 为总个体数, S 为研究系统中总的类群数。 $g(H)$ 和 $l(H)$ 分别为沿生境梯度 H 类群增加和减少的数目, S 为研究的林牧交错区内样地间土壤动物平均类群数。 D_i 为第 i 类群的密度, D_{imax} 为各群落中第 i 类群的最大密度; g 为群落中类群数; G 为各群落所包含的总类群数, C_i/C 为相对次数,即在 C 个群落中第 i 个类群出现的比率。

由于大、中、小型土壤动物取样面积不一致,所以表 2 中密度数据均是 4 次捕获土壤动物个体数量换算成的平均密度(个 $\cdot$ m⁻²),是为便于土壤动物多样性指数 H' 和 DG 精确计算。

数据采用 SPSS11.5 软件进行 One-way-ANOVA 方差分析和 F -检验。利用软件 Canoco for windows 4.5 对中小型土壤动物与环境因子进行 CCA (canonical correspondence analysis) 排序分析^[22-24]。

2 结果与分析

2.1 交错区土壤动物群落组成

林牧交错区 5 个样地 4 次采样,共捕获土壤动物 49837 只,其中大型土壤动物 2807 只、中型干生土壤动物 4435 只以及小型湿生土壤动物 42595 只,隶属 7 门 16 纲 33 目 126 类。收集线虫纲 35688 只,平均密度为 1788509.22 个 $\cdot$ m⁻²,占总个体密度的 84.08%,是唯一的优势类群。线蚓科、真缓步纲及猛水蚤目为常见类群,分别占总个体密度的 4.14%、2.47% 和 5.52%,其余 122 类大、中、小型土壤动物为稀有类群(表 2)。

干扰梯度下,土壤动物个体密度随干扰强度减弱而逐步上升。从表 2 中看出,大、中、小型土壤动物的个体密度都在草甸最小然后逐步增大,到针叶林密度达到最大,呈曲线性上升;而土壤动物类群数与密度变化趋势存在差异,呈抛物线变化,其中灌木林类群数最大。交错区中大型土壤动物的优势类群为异蜚目 Spirostreptida(14.64%)、隐翅甲科 Staphylinidae(11.58%)和石蜈蚣目 Lithobiida(13.07%),中型土壤动物优势类群为等节跳科 Isotomidae(39.06%)、若甲螨科 Oribatuloidae(21.19%)和无爪螨科 Alicorhagiidae(13.32),小型土壤动物优势类群线虫纲(86.05%),不同体型的土壤动物优势类群的个体密度都在草甸最小然后呈逐步增大趋势。

不同干扰梯度下,3 类体型土壤动物优势类群存在较大差异,其中大型土壤动物优势类群变化最大。草甸中,大型土壤动物优势类群为蚁科 Formicidae、金龟甲科幼虫 Scarabaeidae、毛蚊科幼虫 Bibionidae;矮灌丛中,优势类群为异蜚目、蚁科、隐翅甲科、石蜈蚣目;灌木林中,优势类群为异蜚目、带马陆目 Polydesmida、隐翅甲科、石蜈蚣目、地蜈蚣目;阔叶林中,优势类群为异蜚目、隐翅甲科、石蜈蚣目、地蜈蚣目 Geophilomorpha;针叶林中,优势类群为异蜚目、石蜈蚣目、球体蛛科 Theridiosomatidae(表 2)。

表 2 林牧交错区 5 个样地土壤动物平均密度

Table 2 Average density of soil fauna in the five plots of Forest-pasture ecotone

土壤动物类群 Soil fauna groups	体型 Body size	各类群的平均密度 Average density of each soil fauna group/(个 $\cdot$ m ⁻²)					总密度/ (个 $\cdot$ m ⁻²) Totalling density
		A	B	C	D	D	
1 正蚓目 Lumbricida	大	1.67	5.67	7.00	12.33	0	26.67
2 异蜚目 Spirostreptida	大	0.33	13.33	23.67	57.00	42.67	137.00
3 带马陆目 Polydesmida	大	0	1.00	18.00	7.00	8.33	34.33

续表

土壤动物类群 Soil fauna groups	体型 Body size	各类群的平均密度 Average density of each soil fauna group/(个·m ⁻²)					总密度/ (个·m ⁻²) Totalling density
		A	B	C	D	D	
4 多板马陆目 Polyzonida	大	0	0.33	1.67	3.00	4.00	9.00
5 海蟑螂科 Ligiidae	大	0	0	0	1.67	0	1.67
6 树螺科 Helicinidae	大	0	0	0	0.33	0.33	0.67
7 蛞蝓科 Limacidae	大	0.33	0	0	0	0	0.33
8 巴蜗牛科 Bradybaenidae	大	0	0	0.33	0.33	0	0.67
9 斧蜗虫科 Bipaliidae	大	0	0	0	0.33	0	0.33
10 蚁科 Formicidae	大	23.00	15.33	0.33	0	0	38.67
11 茧蜂科 Braconidae	大	0.33	0	0	0	0.33	0.67
12 叶蜂科幼虫 Tenthredinidae	大	1.00	1.00	1.67	0.33	0.33	4.33
13 胡蜂科 Vespidae	大	0	0	0	0	0.33	0.33
14 蚜茧蜂科 Aphidiidae	大	0	0	0	0	0.33	0.33
15 乌叶蝉科 Pentimiidae	大	1.67	3.67	1.33	1.67	0	8.33
16 叶蝉科 Jassidae	大	2.33	1.00	1.33	1.67	0.67	7.00
17 长痣蚜科 Mindaridae	大	0.67	0	0.33	0	0	1.00
18 蚜科 Aphididae	大	0.67	2.67	1.00	0	0	4.33
19 阎甲科 Histeridae	大	0	0	0	0	0.33	0.33
20 小蕈甲科 Cantharidae	大	0	0	0	0	1.00	1.00
21 姬蕈甲科 Sphindidae	大	0	0	0	0	0.33	0.33
22 球蕈甲科 Anisotomidae	大	0	0	0.67	1.33	0	2.00
23 蕈坚甲科 Merycidae	大	0	0	0	0.33	0	0.33
24 圆蕈甲科 Cistidae	大	0	0	0.33	1.67	0	2.00
25 露尾甲科 Nitidulidae	大	0	0	0.67	0.33	0	1.00
26 坚甲科 Colydiidae	大	0	0.33	0	0	1.00	1.33
27 拟步甲科 Tenebrionidae	大	0	0	1.33	1.00	1.00	3.33
28 长朽木甲科 Melandryidae	大	0	1.00	0	0	0	1.00
29 出尾蕈甲科 Scaphidiidae	大	0	0	0.33	0.67	0	1.00
30 缨甲科 Ptiliidae	大	0	0	0	0.33	0	0.33
31 象甲科 Curculionidae	大	2.00	0.33	0.67	0	0	3.00
32 伪叶甲科 Lagriidae	大	0	0.33	0.33	0.67	0	1.33
33 长角象甲科 Anthribidae	大	0	0	0.33	0	0	0.33
34 长角泥甲科 Ptilodactylidae	大	0	0.33	0	0	0	0.33
35 伪蝶甲科 Ebdomychidae	大	0.33	0	0	0	0	0.33
36 蚁甲科 Pselaphidae	大	0	0	0.33	0.67	0.67	1.67
37 粪金龟科 Geotrupidae	大	0.33	0.33	0.33	0	0	1.00
38 隐翅甲科 Staphylinidae	大	5.00	14.00	34.33	48.00	7.00	108.33
39 隐食甲科 Cryptophagidae	大	0.67	1.67	0	0	0	2.33
40 步甲科 Carabidae	大	1.00	2.33	3.33	5.67	5.67	18.00
41 金龟甲科幼虫 Scarabaeidae	大	12.67	7.33	6.67	2.00	11.67	40.33
42 花萤科幼虫 Cantharidae	大	0.67	0	0.33	0	0	1.00
43 叩甲科幼虫 Elateridae	大	0.33	2.33	0.33	0	0	3.00
44 叶甲科幼虫 Chrysomelidae	大	0.67	0.33	1.33	0.33	0.33	3.00
45 郭公虫科幼虫 Cleridae	大	0	0	0.33	2.00	0	2.33
46 拟球甲科幼虫 Corylophidae	大	0	0.33	0	0	0.33	0.67
47 花蝽科 Anthocoridae	大	0	0.33	0	0	0	0.33
48 长蝽科 Lygaeidae	大	2.67	0	0	0	0	2.67

续表

土壤动物类群 Soil fauna groups	体型 Body size	各类群的平均密度 Average density of each soil fauna group/(个·m ⁻²)					总密度/ (个·m ⁻²) Totalling density
		A	B	C	D	D	
49 驼蟀科 Microphysidae	大	1.00	0	0	0	0	1.00
50 红蟋科 Phrrhcoridae	大	0.33	0	0	0	0	0.33
51 盲蟋科 Miridae	大	3.33	0	0	0.33	0.33	4.00
52 缘蟋科 Coreidae	大	0	0	0	0.33	0	0.33
53 拟盲蟋科 Isometopidae	大	0.33	0	0	0	0	0.33
54 斑腿蝗科 Catantopidae	大	0.33	0	0	0	0	0.33
55 夜蛾科幼虫 Noctuidae	大	0.67	0	0	0	0	0.67
56 蝙蝠蛾科幼虫 Hepialidae	大	0	0	0.33	0	0	0.33
57 长角毛蚊科幼虫 Hesperinidae	大	0	0	0	13.33	0	13.33
58 粗脉毛蚊科幼虫 Pachyneuridae	大	0	0	0	0.33	0	0.33
59 扁角蚊科幼虫 Ceroplatidae	大	0	0	0.67	0.33	2.33	3.33
60 粪蚊科幼虫 Scatopsidae	大	0.33	0	1.00	0.67	1.00	3.00
61 瘿蚊科幼虫 Cecidomyiidae	大	0.33	12.00	1.67	1.33	1.33	16.67
62 毛蚊科幼虫 Bibionidae	大	15.67	0	0.33	0	0	16.00
63 蜀大蚊科幼虫 Cylindrotomidae	大	0	0	1.00	0	0.33	1.33
64 沼大蚊科幼虫 Limoniidae	大	0	0.67	0.33	0.33	0	1.33
65 大蚊科幼虫 Tipulidae	大	0.67	4.67	1.33	1.33	2.67	10.67
66 冬大蚊科幼虫	大	0	0	0.33	1.33	0.33	2.00
67 尖眼蕈蚊科幼虫 Sciaridae	大	2.00	1.33	2.33	2.00	2.00	9.67
68 长足虻科幼虫 Dolichopodidae	大	0.33	2.67	0.67	1.00	0.33	5.00
69 毛蠓科幼虫 Psychodidae	大	0	0	1.00	0.67	0	1.67
70 蠓科幼虫 Ceratopogonidae	大	0	0	0	0	1.67	1.67
71 虻科幼虫 Tabanidae	大	0	0	0.67	1.33	0	2.00
72 橘虻科幼虫 Rhagionidae	大	0	1.00	0.67	0	0	1.67
73 食木虻科幼虫 Asilidae	大	2.67	0	0	0	0	2.67
74 水虻科幼虫 Stratiomyiidae	大	0.33	0	0.33	0.67	0.33	1.67
75 蝇科幼虫 Muscidae	大	0.33	1.33	1.67	0.67	0.67	4.67
76 厕蝇亚科幼虫 Fanniinae	大	0	0	1.00	0.67	0	1.67
77 小粪蝇科幼虫 Sphaeroceridae	大	0.33	0.33	0.33	0	0.33	1.33
78 实蝇科幼虫	大	0	0.33	0	0.33	0	0.67
79 石蜈蚣目 Lithobiida	大	0.33	15.00	18.00	37.67	51.33	122.33
80 地蜈蚣目 Geophilomorpha	大	0.33	7.67	18.33	31.00	9.67	67.00
81 长奇盲蛛科 Phalangiidae	大	0	0.67	0	1.00	0	1.67
82 蟹蛛科 Thomisidae	大	0	1.67	0	0	1.67	3.33
83 狼蛛科 Lycosidae	大	0	1.00	0.67	0	0	1.67
84 光盔蛛科 Liocranidae	大	0	0	0.33	2.00	7.33	9.67
85 园蛛科 Araneidae	大	0	0	0	1.00	2.33	3.33
86 皿蛛科 Linyphiidae	大	0.33	0.33	2.00	3.67	17.33	23.67
87 跳蛛科 Salticidae	大	0	0	0	0	2.33	2.33
88 幽灵蛛科 Pholcidae	大	0	0	0	0.67	1.67	2.33
89 逍遥蛛科 Philodromidae	大	0	0	0.33	2.00	7.33	9.67
90 球体蛛科 Theridiosomatidae	大	3.00	3.33	4.00	11.33	64.67	86.33
91 漏斗蛛科 Agelenidae	大	0	0.67	1.00	2.00	9.33	13.00
92 尾足螨科 Dropodidae	中	84.87	42.44	416.67	1301.54	927.31	2772.82
93 裸珠甲螨科 Gymnodamaeoidae	中	0	0	108.33	75.00	466.67	650

续表							
土壤动物类群 Soil fauna groups	体型 Body size	各类群的平均密度 Average density of each soil fauna group/(个·m ⁻²)					总密度/ (个·m ⁻²) Totalling density
		A	B	C	D	D	
94 若甲螨科 Oribatuloidae	中	551.67	551.67	862.18	2738.72	5381.15	10085.38
95 大翼甲螨科 Galumnoidae	中	42.44	0	108.33	91.67	233.33	475.77
96 懒甲螨科 Nothroid	中	0	42.44	50	100	175.00	367.44
97 三甲螨科 Oribotritiidae	中	0	0	0	16.67	58.33	75.00
98 奥甲螨科 Oppioidae	中	84.87	42.44	301.54	401.54	467.44	1297.82
99 隐颚螨科 Cryptognathidae	中	0	0	33.33	42.44	0	75.77
100 无爪螨科 Alicorhagiidae	中	339.49	509.23	1695.64	879.61	2917.44	6341.41
101 巨须螨科 Cunaxidae	中	0	0	25.00	16.67	0	41.67
102 微离螨科 Miccrodispidae	中	0	0	8.33	0	8.33	16.67
103 丽甲螨科 Liacaridae	中	0	0	16.67	0	0	16.67
104 缝颚螨科 Raphignathidae	中	0	0	50.77	8.33	0	59.10
105 土伪蝎科 Chthonidae	中	0	0	0	0	25.00	25.00
106 木伪蝎科 Neobisiidae	中	0	0	0	0	8.33	8.33
107 等节跳科 Isotomidae	中	1485.25	1909.61	5511.79	5548.07	4135.00	18589.73
108 棘跳科 Onychiuridae	中	169.74	254.61	243.20	586.41	393.97	1647.95
109 疣跳科 Neanridae	中	127.31	127.31	268.20	334.87	608.33	1466.02
110 短角跳科 Neelidae	中	0	42.44	250.77	100	416.67	809.87
111 圆跳科 Sminthuridae	中	0	0	91.67	25.00	216.67	333.33
112 球角跳科 Hypogastruridae	中	0	42.44	468.20	509.10	250	1269.74
113 鳞跳科 Tomoceridae	中	0	0	25.00	41.67	91.67	158.33
114 长角跳科 Entomobryidae	中	0	0	83.33	75.00	341.67	500
115 蛭蚰科 Scutigereillidae	中	0	0	0	16.67	25.00	41.67
116 原铗叭科 Projapygidae	中	0	0	25.00	16.67	25.00	66.67
117 重嗜科 Amphientomidae	中	84.87	84.87	59.10	42.44	0	271.28
118 球嗜科 Sphaeropsocidae	中	0	0	0	0	8.33	8.33
119 管蓟马科 Phlaeothripidae	中	42.44	0	33.33	50.77	0	126.54
120 线蚓科 Enchytraeidae	小	12730.74	22043.05	22897.41	18217.15	12195.36	88083.71
121 线虫纲 Nematoda	小	127778.96	340665.30	467111.48	397946.32	455007.16	1788509.22
122 真缓步纲 Eutardigrada	小	117.88	1650.28	13045.44	7763.32	29984.54	52561.46
123 猛水蚤目 Harpacticoida	小	0	235.75	8789.39	35127.20	73273.93	117426.27
124 蛭态目 Bdelloidea	小	471.51	1650.28	1453.63	1717.88	14133.33	19426.63
125 三肠目 Tricladida	小	0	0	66.67	217.88	166.67	451.21
126 摇蚊科幼虫 Chironomidae	小	117.88	1886.04	1420.30	3194.23	5438.18	12056.62
个体密度 Individuals density		144321.24	371910.18	525689.72	477472.81	607655.14	2127049.09
类群数 Number of groups		56	57	84	83	73	126

密度占总密度的 10% 以上为优势类群,密度占总密度的 1%—10% 为常见类群,密度占总密度的 1% 以下为稀有类群

2.2 交错区土壤动物多样性

Shannon-Wiener 多样性指数 H' 明显受到放牧干扰影响。从图 1 中可以看出,交错区土壤动物 Shannon-Wiener 多样性指数呈现略有下降然后逐步上升的趋势。在 4 次采样中,受干扰严重的草甸和较严重的矮灌丛土壤动物 H' 值都明显偏低,其矮灌丛的平均 H' 值最低(0.392),而针叶林林的平均 H' 值最高(0.994)。经方差分析显示 4 次采样下 5 个样地 H' 指数之间存在显著差异($F=3.85, P<0.05$),LSD 多重比较显示针叶林样地 H' 值极显著高于草甸和矮灌丛($P<0.01$),显著高于灌木林($P<0.05$),而与阔叶林差异不显著($P>0.1$)。

密度类群指数也随干扰梯度发生变化,随干扰强度减弱而增大,呈“S”型变化趋势。从图 2 看出,土壤动物 *DG* 指数在矮灌丛向灌木林过渡时迅速增大,之后变化幅度趋近平缓。方差分析表明不同样地的 *DG* 指数存在极显著差异 ($F = 14.39, P < 0.01$), LSD 多重比较显示草甸与矮灌丛都分别于其余 3 个样地存在极显著差异 ($P < 0.01$),而草甸与矮灌丛之间差异不显著 ($P > 0.1$),灌木林、阔叶林和针叶林之间差异也不显著 ($P > 0.1$)。这主要是草甸和矮灌丛受干扰程度较大,而灌木林受干扰强度迅速下降,阔叶林和针叶林几无干扰。

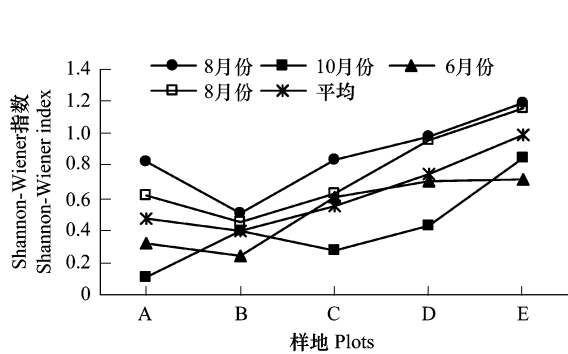


图 1 交错区土壤动物 Shannon-Wiener 指数的季节变化

Fig. 1 Seasonal variation of Shannon-Wiener index of soil fauna in Forest-pasture ecotone

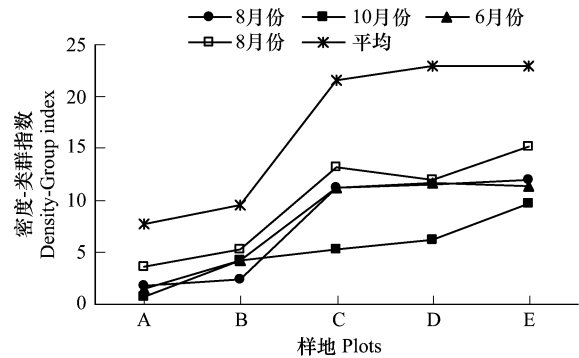


图 2 交错区土壤动物密度-类群指数的季节变化

Fig. 2 Seasonal variation of Density-Group index of soil fauna in Forest-pasture ecotone

Wilson-Shmida 多样性指数对交错区 4 次采样下 5 个样地的分析,显示在相邻干扰梯度下,类群的替代程度差异不大 ($P > 0.1$),而相隔几个梯度时,类群的替代程度加大,其中草甸与针叶之间干扰梯度最大其类群替代也呈最大趋势(图 3)。

2.3 交错区大型土壤动物生物量

林牧交错区大型土壤动物的生物量随干扰强度的减弱而发生一定的变化。如图 4 所示,从草甸到针叶林过渡中,受干扰严重的草甸大型土壤动物生物量最低,而在受干扰很少的红桦阔叶林其生物量最高,在未受干扰的冷杉针叶林其生物量却较低。不同类群的大型土壤动物生物量差异很大,其中蚯蚓生物量占整个交错区的大型土壤动物的 37.78%,明显高于其他类群的生物量。在 5 个样地中,蚯蚓生物量在矮灌丛最大,针叶林最小;鞘翅目和双翅目生物量随干扰强度的减弱呈先增大后减小的趋势,其中鞘翅目最大生物量出现在灌木

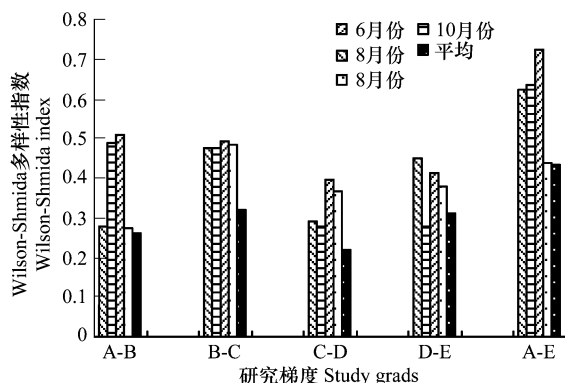


图 3 交错区土壤动物 Wilson-Shmida 指数的季节变化

Fig. 3 Seasonal variation of Wilson-Shmida index of soil fauna in Forest-pasture ecotone

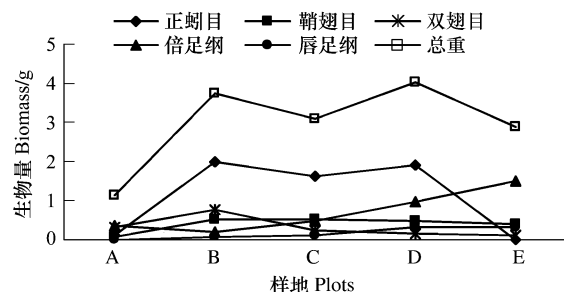


图 4 交错区大型土壤动物生物量

Fig. 4 Biomass of soil macro-fauna in Forest-pasture ecotone
正蚓目 Lumbricida, 鞘翅目 Coleoptera, 倍足纲 Diplopoda, 唇足纲 Chilopoda, 双翅目 Diptera

林,而双翅目最大生物量出现在矮灌丛;倍足纲生物量变化趋势与鞘翅目和双翅目刚好相反,呈先降低后逐步增加,到针叶林最大;唇足纲生物量则是从草甸到针叶林逐步增大。可见在林牧交错区中大型土壤动物的不同类群对干扰强度和条件变化的响应不尽相同。

2.4 交错区小型土壤动物与环境因子相关性分析

对交错区中小型干湿生土壤动物与 6 种环境因子进行了 CCA 排序,排序图与排序结果见表 3 和图 5(置换系数为 499)。结果经 Monte Carlo Test 检验,第 1 排序轴和其余所有排序轴均显著($P=0.016, P=0.004$),其中凋落物厚度与第 1 排序轴存在显著的正相关($r=0.7892$),pH 与其存在显著的负相关($r=-0.8493$),而其余土壤因子与第 1、2 排序轴之间相关性均不显著(表 3)。从图 5 中可以看出,交错区各土壤环境因子之间的相关性存在差异,土壤有机质与凋落物厚度之间正相关性较其他因子高,而凋落物厚度与 pH 值的负相关性也较高;且各因子对中小型土壤动物分布的影响也存在较大差异,pH 值对线虫影响最大;全 P 和全 K 对丽甲螨科 Liacaridae、线蚓等类群影响较为明显;而更多的类群则受土壤有机质和凋落物厚度的影响;全 N 对中

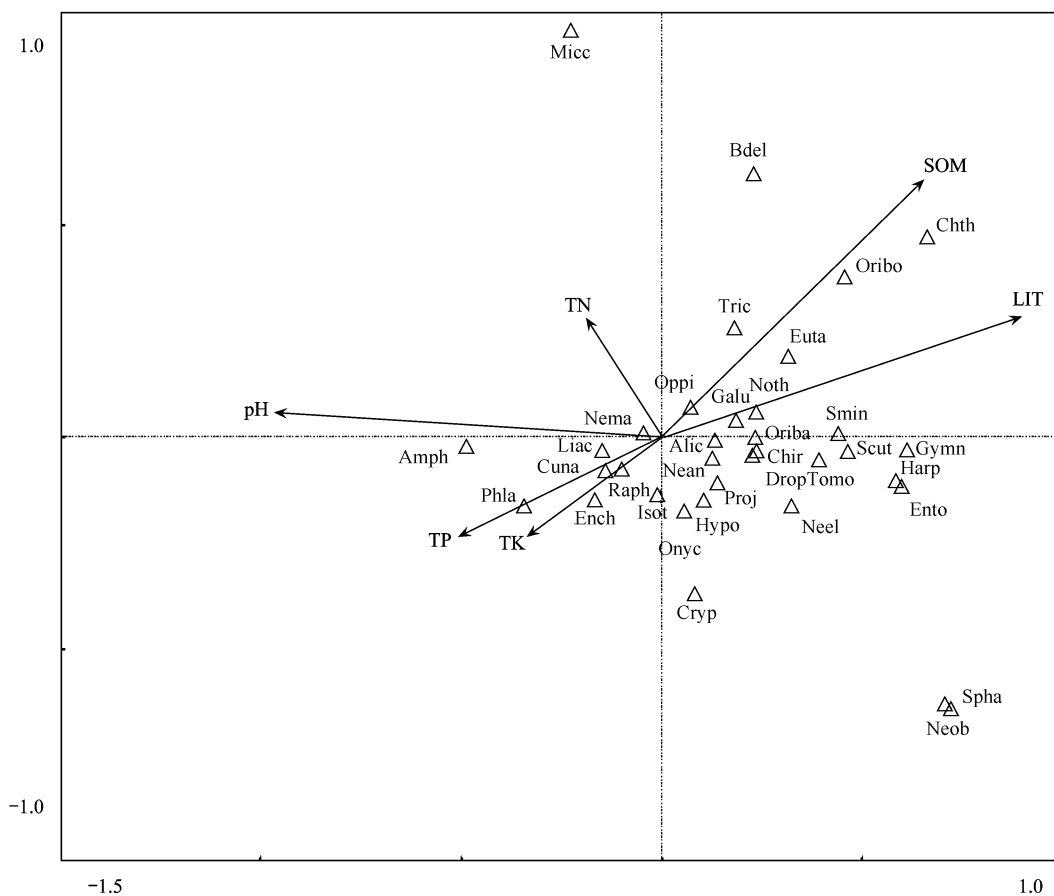


图 5 表示林牧交错区小型土壤动物类群(△)与环境变量(→)关系的 CCA 二维排序

Fig. 5 CCA two-dimensional scatter ordination diagram of soil microfauna groups and environmental variables in Forest-pasture ecotone

Ench: 线蚓科 Enchytraeidae; Nema: 线虫纲 Nematoda; Euta: 真缓步纲 Eutardigrada; Harp: 猛水蚤目 Harpacticoida; Bdel: 轮虫 Bdelloidea; Tric: 涡虫 Tricladida; Chir: 摇蚊科幼虫 Chironomidae larva; Drop: 尾足螨科 Dropodidae; Gymn: 裸珠甲螨科 Gymnodamaeidae; Oriba: 若甲螨科 Oribatuloidae; Galu: 大翼甲螨科 Galumnoidae; Noth: 懒甲螨科 Nothroid; Oriba: 三甲螨科 Oribotritidae; Oppi: 奥甲螨科 Oppiidae; Cryp: 隐颚螨科 Cryptognathidae; Alic: 无爪螨科 Alicorhagiidae; Cuna: 巨须螨科 Cunaxidae; Micc: 微离螨科 Miccerodispidae; Liac: 丽甲螨科 Liacaridae; Raph: 缝颚螨科 Raphignathidae; Chth: 土伪蝎科 Chthonidae; Neob: 木伪蝎科 Neobisidae; Isot: 等节跳科 Isotomidae; Onyc: 棘跳科 Onychiuridae; Nean: 疣跳科 Neanridae; Neel: 短角跳科 Neelidae; Smin: 圆跳科 Sminthuridae; Hypo: 球角跳科 Hypogastruridae; Tomo: 鳞跳科 Tomoceridae; Ento: 长角跳科 Entomobryidae; Scut: 螯蚰科 Scutigrellidae; Proj: 原铈叭科 Projapygidae; Amph: 重嗜科 Amphientomidae; Spha: 球嗜科 Sphaeropsocidae; Phla: 管蓟马科 Phlaeothripidae; LIT: 凋落物厚度 Litter's thickness; pH: pH 值 Soil pH value; SOM: 土壤有机质 Soil organic matter; TK: 全钾 Total potassium; TP: 全磷 Total phosphorus; TN: 全氮 Total nitrogen

小型土壤动物的影响最小;微离螨科 Miccrodispidae、球啮科 Sphaeropsocidae 及木伪蝎科 Neobisiidae 受土壤环境因子的影响最小。可见中小型土壤动物类群的分布与凋落物厚度、土壤有机质含量以及 pH 值存在较高的相关性,而与全氮、全磷和全钾的相关性较低。

3 结论与讨论

3.1 干扰梯度下土壤动物群落结构特征

川西亚高山林牧交错区土壤动物的群落分布与多数地区存在较大差异。该林牧交错区土壤动物密度大、类群数多(33 目 126 类)远高于内蒙古卓资山农牧交错区(18 目 83 类)^[23],但整个区域优势类群仅只有线虫类,这与多数生态系统土壤动物优势类群(线蚓类、线虫类、跳虫类、螨类等)存在较大的差异^[11,25-26],但也与部分生态系统的研究相类似^[15,23]。而常见类群都为小型湿生土壤动物。这主要是因为川西亚高山地区,土壤湿度大、降水量充沛、凋落物层和苔藓层很厚、土壤温度适中等条件有利于小型湿生动物生存。

很多研究表明,砍伐木材、挖药捡柴和放牧等人为干扰会明显影响物种的群落结构与多样性^[10,12,27]。在特定环境条件下土壤动物群落结构特征常是一定的,但当干扰使得环境发生变化时,土壤动物群落结构一般也发生相应的变化^[10,28]。在干扰梯度下,林牧交错区土壤动物群落结构随牧压强度减弱发生了明显的变化。个体密度随牧压强度降低呈现增大趋势;类群出现单峰型变化;能反映不同干扰程度、环境质量及其物质循环状况的生物量也表现出一定的规律,极度干扰下生物量最小,轻度干扰下生物量最大。处于极度干扰下的草甸,其土壤动物密度、类群、生物量都处于最低水平;中度干扰的灌木林类群数最大;轻度干扰的阔叶林生物量最大;未受干扰的针叶林密度最大。而对环境变化敏感的类群也呈现明显的变化规律,如能在一定程度上表征干扰强弱的蚂蚁,其数量从草甸向针叶林逐步减少;体现土壤腐殖质含量高低的马陆则逐步上升。这主要是牦牛从草甸到针叶林活动过程中,不同程度的影响了土壤理化性质、凋落物种类和厚度等环境因子,从而影响土壤动物的活动与生存。可见土壤动物个体密度、类群、生物量以及群落结构的变化与放牧干扰存在明显的关系。

3.2 干扰梯度下土壤动物多样性

川西亚高山林牧交错区具有较高水平的生物多样性,且具有明显的边缘效应^[29]。交错区出现了土壤动物 7 门 18 纲,在科级水平上捕获了上百个类群;个体密度十分庞大,除极度干扰的草甸外,其余植被类型下土壤动物平均个体密度每平方米高达 3.5×10^6 只以上。本研究中过渡区的灌木林和阔叶林的土壤动物类群数明显多于交错区两边的草甸和针叶林;过渡区样地的土壤动物密度则低于针叶林而高于草甸;3 种景观类型的大型土壤动物生物量都分别高于草甸和针叶林。

本研究中的 3 个多样性指数都能很好的表征放牧干扰下土壤动物多样性。交错区土壤动物 Shannon-Wiener 多样性指数值处于 0.1—1.2 之间,这主要是采用土壤动物密度来计算且小型土壤动物密度过大的原因造成 H' 值偏低。多样性指数 H' 和密度-类群指数 DG 的变化趋势皆能反应干扰梯度下土壤动物多样性的差异。 H' 指数最小值在重度干扰的矮灌丛, DG 最小值在极度干扰的草甸,但都随着干扰强度的减弱其值表现升高趋势,其中 DG 指数则能贴切反应不同牧压下土壤动物群落结构特征的变化。不同干扰梯度下的 H' 和 DG 值表明严重的放牧干扰会降低土壤动物多样性。本研究中也采用了 β 多样性 Wilson-Shmida 指数,因其已被证明能很好的用来测度在某环境梯度下物种的替代程度,还能很好的揭示一定尺度内的生境多样性和不同区域间生境多样性,并且能分析某一扰动因子对群落多样性的干扰程度等方面具有重要生态学意义^[21,30]。在干扰梯度下,林牧交错区不同植被的土壤动物类群出现了明显的替代,相邻梯度下 β 值都比较相近,土壤动

表 3 环境变量与排序轴的相关性

Table 3 Correlation of environmental variables with axes		
环境变量 Environmental variables	排序轴 Axis	
	Axis 1	Axis 2
凋落物厚度 Litter thickness	0.7892	0.2289
pH	-0.8493	0.0455
土壤有机质 Soil organic matter	0.5752	0.4880
全钾 Total potassium	-0.2972	-0.1895
全磷 Total phosphorus	-0.4451	-0.1908
全氮 Total nitrogen	-0.1677	0.2268

物类群替代率较低;而梯度相隔越大 β 值越大,其类群替代率越高。

3.3 环境因子对土壤动物影响

土壤动物的群落结构与多样性受外界环境的影响较大^[24,28],小生境差异是导致土壤动物区系变化的重要因素之一,而影响土壤动物组成的小生境因素很多,包括土壤理化性质(有机质含量、土壤容重、电导率、pH、含水量等)、人为干扰、地表植被状况等^[22-23,31]。本文通过对交错区中个体密度十分庞大的中、小型干湿生土壤动物与环境因子进行了 CCA 排序分析,结果表明不同类群的中小型土壤动物对不同的环境因子的响应不同。凋落物厚度与中小型土壤动物存在显著的正相关,凋落物从草甸到针叶林逐步加厚,而中小型土壤动物密度和种类也是逐步增加。这主要是因为凋落物越厚则越能为小型土壤动物提供充足的食物、水分及优良的生活场所,尤其对捕食性的猛水蚤目、真缓步纲和蛭态目影响最为明显。凋落物种类对中小型土壤动物也有影响,如在灌木林线蚓和线虫的个体密度最大,这主要是花楸、蔷薇、紫枝柳等软质阔叶凋落物易被线蚓和线虫取食消化;在红桦、糙皮桦等硬质阔叶凋落物的阔叶林样地跳虫类的个体密度最大。土壤 pH 值也明显影响中小型土壤动物的分布。而其余因子对中小型土壤动物分布的影响程度较低。

处于牧压干扰梯度下的林牧交错区,土壤动物多样性水平较高且群落结构受环境因子影响,而部分环境因子又是在干扰条件下形成的,干扰梯度使得环境因子也形成相应的梯度,从而形成景观植被变化连续的林牧交错区,土壤动物群落结构也随着环境因子、干扰强度的变化而表征着相应的规律。本研究仅从放牧干扰形成的景观植被梯度下来阐述土壤动物的多样性,未从牧压强度量化的角度来研究土壤动物多样性,因此不能确定怎样的放牧干扰强度有利于对维持川西亚高山交错区生态稳定。在今后林牧交错区的研究中,应从牧压强度量化的方向出发,比如确定单位面积内牲畜头数、蹄印、排泄物等,深入研究土壤动物对放牧干扰的响应机制。

References:

- [1] Odum E P. Basic Ecology. Philadelphia: Saunders College Publishing, 1983: 1-613.
- [2] Williams S E, Marsh H, Winter J. Spatial scale, species diversity, and habitat structure: Small mammals in Australian tropical rain forest. Ecology, 2002, 83(5): 1317-1329.
- [3] Gosz J R. Ecological functions in a biome transition zone; translating local responses to broad-scale dynamics // Hansen A J, Dicastri F eds. Landscape Boundaries. New York: Springer-Verlag, 1992, 56-74.
- [4] Zhu F M, An S Q, Guan B H, Liu Y H, Zhou C F, Wang Z S. A review of ecotone: concepts, attributes, theories and research advances. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(7): 3032-3042.
- [5] Xu X J, Lu J W, Xie Z L, Zhou S T, Ji S B, Zhang D Y, Wang C H, Shao S L. Effects of habitat complexity on species diversity of small mammals in pastures and forest interlaced regions. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(6): 2945-2952.
- [6] Yu X D, Luo T H, Zhou H Z, Yang J. Influence of edge effect on diversity of ground-dwelling beetles across a forest-grassland ecotone in Wolong Natural Reserve, Southwest China. Acta Entomologica Sinica, 2006, 49(2): 277-286.
- [7] Bider J R. Animal activities in uncontrolled terrestrial communities as determined by sand transect technique. Ecological Monographs, 1968, 38(1): 269-308.
- [8] Mu C C. Succession of Larix olgensis and Betula platyphlla-marsh ecotone communities in Changbai Mountain. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(11): 1813-1819.
- [9] Wu H T, Lu X G, Yang Q, Jiang M. Ecological characteristics and functions of soil fauna community. Acta Pedologica Sinica, 2006, 43(2): 314-323.
- [10] Chen X N, You W H, Wang X Y, Yi L. Community traits of soil animal under different ground cover treatments in evergreen broad-leaved forest. Biodiversity Science, 2009, 17(2): 160-167.
- [11] Xiao J J, Zhang J, Yang W Q, Huang Y M, Yang L, Li J W, Yan D. Short-term response of soil fauna community to harvesting disturbance in Eucalyptus garndis plantation. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(9): 4531-4539.
- [12] Schon N L, Mackay A D, Minor M A, Yeates G Y, Hedley M J. Soil fauna in grazed New Zealand hill country pastures at two management intensities. Applied Soil Ecology, 2008, 40: 218-228

- [13] Fahring L. Effects of habitat fragmentation on biodiversity. *Annual Review Ecology Evolution System*, 2003, 34: 487-515.
- [14] Kruess A, Tschamtk T. Species richness and parasitism in a fragmented landscape: Experiments and field studies with insects on *Vicia sepium*. *Oecologia*, 2000, 122: 129-137.
- [15] Wu P F, Liu X L, Liu S R. Comparisons of soil animal community characteristics of subalpine meadow between winter and spring in Miyaluo. *Acta Pratacul Turae Sinica*, 2009, 18(5): 123-129.
- [16] Huang X, Wen W Q, Zhang J, Yang W Q, Liu Y, Yan B G, Huang Y M. Soil fauna diversity of the typical alpine vegetations in western Sichuan. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(1): 181-190.
- [17] Yin W Y. *Illustrated Handbook of Soil Animals in China*. Beijing: Science Press, 1998: 1-756.
- [18] Li H X. *Insect Classification Search*. Beijing: Agriculture Press, 1987: 1-517.
- [19] Fu B Q, Chen W, Dong X H, Xing Z M, Gao W. The Composition and structure of the four soil macrofaunas in Songshan Mountain in Beijing. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(2): 215-223.
- [20] Liao C H, Li J X, Huang H T. Soil animal community diversity in the forest of the southern subtropical region. *Acta Ecologica Sinica*, 1997, 17(5): 549-555.
- [21] Ma K P, Liu C R, Liu Y M. Measurement of biotic community diversity II. β diversity. *Chinese Biodiversity*, 1995, 3(1): 38-43.
- [22] Qu Y D, Su Z Y, Li Z K, Tong F C, Liu Z X. Soil arthropod diversity following an ice storm in a montane evergreen broadleaved forest in Chebaling National Nature Reserve, China. *Biodiversity Science*, 2009, 17(5): 440-447.
- [23] Dong W H, Yin X Q, Gu W, Liu Y B, Yu H L, Zhang X G. Ecological characteristics of soil fauna in different soil types of agro-pasture ecotone: A case of Zhuozhi Mountain, InnerMongolia. *Arid Land Geography*, 2008, 31(5): 693-700.
- [24] Liu J L, Yin X Q, Qiu L L. Large-sized soil fauna and soil factors in zuojia nature reserve. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(1): 130-136.
- [25] Wu H T, Lu X G, Yang Q, Jiang M, Tong S Z. Characteristics and influencing factors of soil fauna community structure in an island forest in wetland, Sanjiang Plain. *Journal of Beijing Forestry University*, 2008, 30(2): 51-58.
- [26] Tang B A, Tang G, Tang M, Li C E. Study on the ecological characteristic of soil animal resources in Yunshan National Forest Park. *Journal of Natural Resources*, 2003, 18(4): 499-504.
- [27] Lu H R, Liu S S, Zhu J Y, Ye Y C, Chen H Y, Mo L J. Effects of human disturbance on understory woody species composition and diversity in fengshui forests. *Biodiversity Science*, 2009, 17(5): 458-467.
- [28] Ke X, Liang W Y, Yu W T, Xie R D, Weng C L, Yang Y M, Yi W Y. Community structure and seasonal change of soil microarthropodes in the lower reaches of Liaohe River Plain under different land utilizations. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(4): 600-604.
- [29] Magura T, Tóthmrtsz B, Molnár T. Forest edge and diversity: carabids along forest-grassland transects. *Biodivers Conservation*, 2001, 10: 287-300.
- [30] Gray J S. The measurement of marine species diversity, with an application to the benthic fauna of the Norwegian continental shelf. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2000, 250:23-49.
- [31] Lin Y H, Zhang F D, Zhang J Q, Ouyang X J, Mo D S, Zhou G Y. Preliminary investigation on temporal and spatial variation of structure of soil fauna community in different natural vegetations of Dinghushan. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(10): 2616-2622.

参考文献:

- [4] 朱芬萌,安树青,关保华,刘玉虹,周长芳,王中生.生态交错带及其研究进展. *生态学报*, 2007, 27(7): 3032-3042.
- [5] 许兴军,吕建伟,谢振丽,周双涛,计沈斌,张东月,王昌河,邵淑丽.寒温带牧林交错区生境复杂度对啮齿类物种多样性的影响. *生态学报*, 2009, 29(6): 2945-2952.
- [6] 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] 牟长城.长白山落叶松和白桦-沼泽生态交错带群落演替规律研究. *应用生态学报*, 2003, 14(11): 1813-1819.
- [9] 武海涛,吕宪国,杨青,姜明.土壤动物主要生态特征与生态功能研究进展. *土壤学报*, 2006, 43(2): 314-323.
- [10] 陈小鸟,由文辉,王向阳,易兰.常绿阔叶林不同砍伐处理下土壤动物的群落特征. *生物多样性*, 2009, 17(2): 160-167.
- [11] 肖玖金,张健,杨万勤,黄玉梅,杨鲁,李纪伟,严姐.巨桉(*Eucalyptus garndis*)人工林土壤动物群落对采伐干扰的初期响应. *生态学报*, 2008, 28(9): 4531-4539.
- [15] 吴鹏飞,刘兴良,刘世荣.米亚罗亚高山草甸冬春两季土壤动物群落特征的比较. *草业学报*, 2009, 18(5): 123-129.

- [16] 黄旭,文维全,张健,杨万勤,刘洋,闫邦国,黄玉梅. 川西高山典型自然植被土壤动物多样性. 应用生态学报,2010,21(1):181-190.
- [17] 尹文英. 中国土壤动物检索图鉴. 北京:北京科学出版社,1998:1-756.
- [18] 李鸿兴. 昆虫分类检索. 北京:农业出版社,1987:1-517.
- [19] 傅必谦,陈卫,董晓晖,邢忠民,高武. 北京松山四种大型土壤动物群落组成和结构. 生态学报,2002,22(2):215-223.
- [20] 廖崇惠,李健雄,黄海涛. 南亚热带森林土壤动物群落多样性研究. 生态学报,1997,17(5):549-555.
- [21] 马克平,刘灿然,刘玉明. 生物群落多样性的测度方法 II. β 多样性的测度方法. 生物多样性,1995,3(1):38-43.
- [22] 区余端,苏志尧,李镇魁,佟富春,柳泽鑫. 车八岭山地常绿阔叶林冰灾后土壤节肢动物群落的多样性. 生物多样性,2009,17(5):440-447.
- [23] 董炜华,殷秀琴,顾卫,刘永兵,余海龙,张晓光. 农牧交错带不同土地类型土壤动物生态特征研究——以内蒙古卓资山为例. 干旱区地理,2008,31(5):693-700.
- [24] 刘继亮,殷秀琴,邱丽丽. 左家自然保护区大型土壤动物与土壤因子关系研究. 土壤学报,2008,45(1):130-136.
- [25] 武海涛,吕宪国,杨青,姜明,佟守正. 三江平原湿地岛状林土壤动物群落结构特征及影响因素. 北京林业大学学报,2008,30(2):51-58.
- [26] 唐本安,唐果,唐敏,李翠娥. 云山国家森林公园土壤动物资源生态特征. 自然资源学报,2003,18(4):499-504.
- [27] 吕浩荣,刘颂颂,朱剑云,叶永昌,陈红跃,莫罗坚. 人为干扰对风水林群落林下木本植物组成和多样性的影响. 生物多样性,2009,17(5):458-467.
- [28] 柯欣,梁文举,宇万太,谢荣栋,翁朝联,杨毅明,伊文英. 下辽河平原不同土地利用方式下土壤微节肢动物群落结构研究. 应用生态学报,2004,15(4):600-604.
- [31] 林英华,张夫道,张俊清,欧阳学军,莫定生,周国逸. 鼎湖山不同自然植被土壤动物群落结构时空变化. 生态学报,2005,25(10):2616-2622.