

宁夏黄土丘陵区不同生态恢复生境地地表甲虫多样性

杭佳¹ 石云^{1,2} 刘文惠¹ 贺达汉^{1,3*}

1 (宁夏大学农学院, 银川 750021)

2 (宁夏大学资源与环境学院, 银川 750021)

3 (宁夏大学西北退化生态系统恢复与重建国家重点实验室培育基地, 银川 750021)

摘要: 为了解宁夏黄土丘陵区不同生境地地表甲虫群落多样性变化规律及与环境因子的关系, 并探讨不同生态恢复措施对维持地表甲虫群落多样性的影响, 2013年7–8月, 作者利用陷阱法调查了该区6种生境内的地表甲虫群落多样性。结果表明: 灌草混交林地、乔灌混交林地、生态薪炭林地中地表甲虫物种丰富度和个体数量均较高, 天然封育草地、生态经济林地和水平农田中物种丰富度较低, 生态经济林地和水平农田中甲虫个体数量显著高于天然封育草地。不同生境间, 灌草混交林地、乔灌混交林地与生态薪炭林地之间、生态经济林地与水平农田之间甲虫群落组成相似性较高。多元回归分析表明, 草本层生物量、灌木层盖度及土壤含水量是影响甲虫物种丰富度的决定因素, 林冠层盖度和枯落物厚度是决定地表甲虫个体数量的重要因素。CCA分析表明, 枯落物盖度、枯落物厚度、林冠层盖度及草本层盖度是影响地表甲虫群落组成的重要环境因子。研究表明, 灌草混交林地为地表甲虫群落多样性维持较好的生境类型, 是宁夏黄土丘陵区典型生态恢复的最优模式。

关键词: 灌草混交林地, 地表甲虫, 生态恢复, 物种多样性, 典范对应分析

Diversity of ground-dwelling beetles (Coleoptera) in restored habitats in the hill and gully area of Loess Plateau, Ningxia Hui Autonomous Region

Jia Hang¹, Yun Shi^{1,2}, Wenhui Liu¹, Dahan He^{1,3*}

1 Agricultural College, Ningxia University, Yinchuan 750021

2 College of Resources and Environment, Ningxia University, Yinchuan 750021

3 State Key Laboratory for Restoration and Reconstruction of Degraded Ecosystem in North-western China, Ningxia University, Yinchuan 750021

Abstract: The aim of this study was to probe into changes in diversity of ground-dwelling beetles (Coleoptera) and their relation to environmental variables within restored habitats in the hill and gully area of Loess Plateau, Ningxia Hui Autonomous Region, China. An investigation of ground-dwelling beetle communities was carried out using pitfall traps in six habitats including shrub/grassland, tree/shrub mix, fuel-wood forest, naturally restored grassland, plantation forest, and level terraced field in July and August, 2013. We found that species richness and abundance of individual ground-dwelling beetles was higher ($P < 0.05$) in the shrub/grassland, tree/shrub mix, and fuel-wood forest compared to the other three stands. Species richness of ground-dwelling beetles was markedly lower ($P < 0.05$) in naturally restored grassland, plantation forest and level terraced field, whereas the abundance of individual ground-dwelling beetles were higher in plantation forest and level terraced field than in naturally restored grassland. Jaccard indices revealed a high level of similarity amongst shrub/grassland, tree/shrub mix, and fuel-wood forest stands, and then between plantation forest stands and level terraced fields. Multiple linear regression analyses showed that herbaceous biomass, cover of shrub species and soil water content were the key factors affecting species richness of ground-dwelling beetles, while it was canopy cover and leaf litter depth that most affected total abundance. Canonical correspondence analysis (CCA) showed that the cover and depth of leaf litter, cover of canopy and herbaceous layers were important determinants of species abundance and composition of beetle communities.

收稿日期: 2013-09-30; 接受日期: 2014-01-14

基金项目: 国家自然科学基金(41161081)和教育部高校学校博士学科点科研专项基金(20126401110003)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: hedahan@163.com

In conclusion, conversion to shrub/grasslands may be one option for raising ground-dwelling beetle diversity in the hill and gully area of Loess Plateau, Ningxia.

Key words: shrub/grassland, ground-dwelling beetles, ecological restoration, species diversity, canonical correspondence analysis (CCA)

昆虫是地球上种类和数量最多的生物类群, 在诸多生态过程中发挥着重要作用, 其群落多样性受局部环境条件和周围景观特征的影响(Dennis *et al.*, 1997; Kruess & Tscharntke, 2002)。其中鞘翅目昆虫是生物环境中较为多样化的类群之一, 其物种的组成占整个节肢动物多样性的20%(Stork, 1993), 且食性复杂, 包括捕食者、腐食者、食菌者、植食者、食种子者等(Lassau *et al.*, 2005)。相对其他类群鞘翅目昆虫具有较低扩散力, 容易受到地面环境因子的影响(Kubota *et al.*, 2000; Sroka & Finch, 2006), 易于通过陷阱法进行采集与诱捕, 进行量化分析(Ikeda *et al.*, 2008), 被广泛地应用于干扰效应等相关研究中(Fournier & Loreau, 2001; Gardiner *et al.*, 2009; Louzada *et al.*, 2010)。许多研究表明, 生境类型、植被组成和结构、枯落物特征、土壤水分和pH值以及生境受干扰程度等均可能影响地表甲虫群落丰富度和多样性(王玉等, 2009; Hollier *et al.*, 2009; Yu *et al.*, 2010; Cameron & Leather, 2012)。但这些研究主要涉及森林、草原、农田和湿地等(于晓东等, 2002, 2006a, b; Larsen & Work, 2003; Yaacobi *et al.*, 2007; Ikeda *et al.*, 2008; Yu *et al.*, 2008), 对于生态脆弱的黄土丘陵水土流失区的相关研究则很少。

生态恢复是指在人为设计与干扰下, 退化生态系统中生物多样性提高和生态功能的重建与改善(Benayas *et al.*, 2009)。在农业景观中不同昆虫群落组成与多样性分布特性, 是反映生物多样性及生态系统功能的重要指标(Dieckötter *et al.*, 2008)。宁夏南部山区地处我国水土剧烈流失的黄土丘陵沟壑区, 长期以来, 生物多样性匮乏, 生态环境十分脆弱。2000年以来, 该区实施的一系列生态恢复建设工程(退耕还林、封山禁牧和荒山造林), 显著地改善了区域内的小气候以及非生物和生物条件(刘库等, 2006)。然而, 如何测定这些生态恢复工程中的生物多样性变化, 正确地评价其生态效应的改善, 则鲜有人研究。本研究选择宁夏南部黄土丘陵沟壑区6种典型生境, 分析不同生境地地表甲虫群落多样性变

化规律及与环境因子的关系, 并探讨不同生态恢复措施对维持地表甲虫多样性的影响, 以期生态脆弱区生态环境恢复及生物多样性维护提供参考。

1 研究区概况

彭阳县位于宁夏回族自治区东南部、六盘山东麓, 106°32'–106°58' E, 35°41'–36°17' N, 境内海拔1,297–2,483 m, 属半干旱大陆性季风气候。年平均气温7.4–8.5℃, 年日照时数2,518 h, 平均无霜期140–170 d, 年降水量350–550 mm, 年蒸发量1,330 mm, 主季风为西北风。土壤以黄绵土为主, 土壤肥力中下, 生产水平低。地貌由梁峁、残垣、川地和沟壑组成, 以梁峁状丘陵为主, 是我国水土流失最严重的县域之一(刘库等, 2006; 李生宝等, 2006)。

结合本区域内土地利用特点, 本研究选择了6种典型生境, 其中灌草混交林地、乔灌混交林地、生态薪炭林地和天然封育草地分别为具有不同生态恢复措施的生境类型, 生态经济林地和水平农田地为人工干扰较强的生境类型(图1)。各生境基本特征如下:

灌草混交林地: 位于梁峁缓坡退耕地, 海拔较低, 主要以根系发达、生长迅速的灌草为主。采取“88542”(李生宝等, 2006)隔坡反坡水平沟方式整地, 水平沟外种植柠条(*Caragana korshinskii*), 沟内种植沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、山桃(*Amygdalus davidiana*)、山杏(*Armeniaca sibirica*)等, 树种配置采用株间混交、行间混交或带状混交, 株行距2 m × 2 m, 带间种植紫花苜蓿(*Medicago sativa*)。面积约17.49 ha。

乔灌混交林地: 位于侵蚀沟, 沟坡上缓下陡, 模式的树种配置以沙棘、柠条、河北杨(*Populus hopeiensis*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、榆树(*Ulmus pumila*)、山杏等为主。沟头防护林带状整地, 株行距2 m × 3 m; 沟岸、沟坡防护林鱼鳞坑整地, 株行距2 m × 2 m, 带状或隔行隔株混交。面积约33.96 ha。

生态薪炭林地: 位于梁峁陡坡荒山, 坡度较陡,

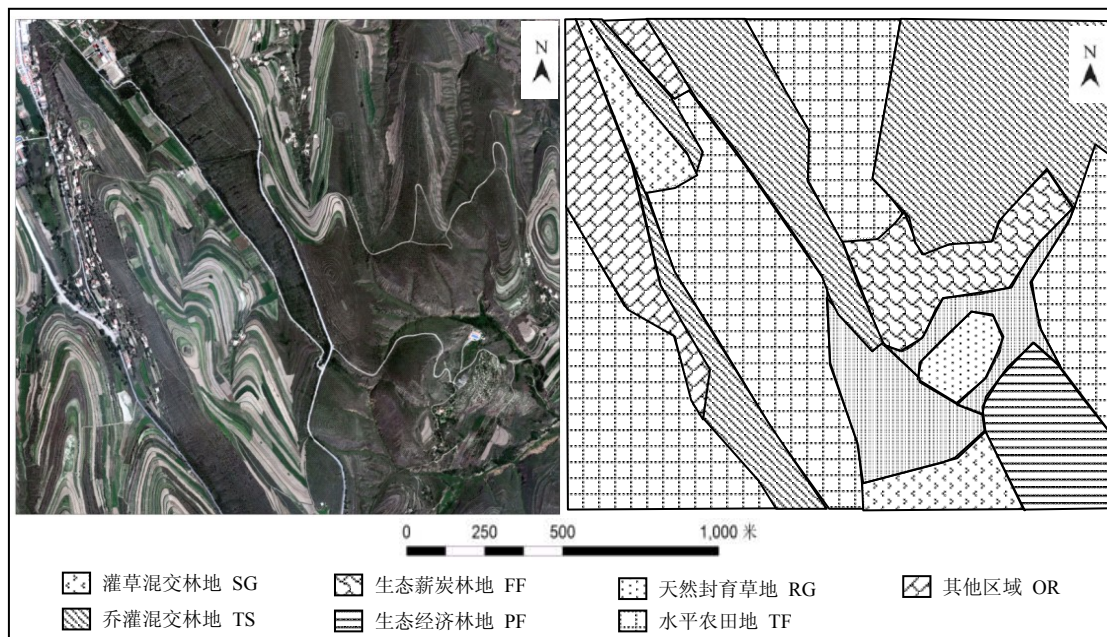


图1 研究区样地分布示意图

Fig. 1 Distribution of the sample sites in study area. SG, Shrub/grassland; TS, Tree/shrub mix; FF, Fuel-wood forest; PF, Plantation forest; RG, Naturally restored grassland; TF, Level terraced field; OR, Other regions.

主要以根蘖力强的灌木为主, 树种配置以柠条、山桃等为主, 采取鱼鳞坑方式整地, 株行距 $2\text{ m} \times 2\text{ m}$, “品”字形株间或行间混交。面积约 16.75 ha 。

天然封育草地: 以低矮草本植被为主, 主要有百里香 (*Thymus mongolicum*)、达乌里胡枝子 (*Lespedeza davurica*)、长芒草 (*Stipa bungeana*) 等。该模式下无乔木和灌木, 杜绝人为干扰和家畜采食, 以达到自然恢复。面积约 6.26 ha 。

生态经济林地: 海拔较低的台地壕坝地、沟掌地, 以肉用杏为主, 少量种植苹果、梨。采用“88542”水平沟整地, 株行距 $3\text{ m} \times 4\text{ m}$ 。面积约 11.85 ha 。

水平农田地: 以水平梯田为主要形式, 田面宽度为 $8\text{--}15\text{ m}$, 田坎高度为 $1.0\text{--}2.5\text{ m}$, 主要种植玉米、荞麦、马铃薯等作物, 是该区防治坡地水土流失的基本农田类型。面积约 65.26 ha 。

2 研究方法

2.1 植物群落调查

2013年在6种生境中选择植物群落分布的典型地段作为调查区域。每种生境设置3个 $20\text{ m} \times 20\text{ m}$ 的样方, 用于乔木层的调查, 样方间隔 20 m 以上。每个样方的四角设置4个 $5\text{ m} \times 5\text{ m}$ 的中样方用于灌

木层的调查, 中样方中随机设置1个 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 的小样方用于草本植物调查。记录各样方内乔木、灌木和草本植物种类、植被覆盖度、枯落物厚度、枯落物盖度和草本植物生物量, 同时, 记录各样方的海拔高度、坡度、坡向及 $0\text{--}30\text{ cm}$ 土壤含水量等环境因子。在小样方中取 $30\text{ cm} \times 30\text{ cm}$ 草本植物地上部分, 烘干, 折算出小样方草本植物生物量(董鸣, 1996); 植被覆盖度及枯落物盖度以直径 2 m 的范围目测估算(于晓东等, 2006a, b); 土壤含水量采用烘干法; 海拔高度利用GPS; 坡度利用手持罗盘测得; 坡向用直接的方向表示。以上植被因子及土壤含水量的平均值作为环境因子参数, 各生境概况见表1。

2.2 地表甲虫调查

地表甲虫的取样采用陷阱法(Yu *et al.*, 2006)。用一次性塑料水杯($h = 9\text{ cm}$, $D_{\text{上口}} = 7.5\text{ cm}$, $D_{\text{下口}} = 4\text{ cm}$)作为陷阱器, 引诱剂为醋、糖、医用酒精和水的混合液, 质量比为 $2:1:1:20$, 每杯放引诱剂 $40\text{--}60\text{ mL}$ 。在每个中样方的四角各放置1个陷阱器, 每个生境共设48杯, 6个生境共288杯。GPS(eXplorist 500 LE, Magellan)定位每个陷阱的确切位置。2013年7月4日开始, 每隔 5 d 对288个陷阱器收集1次, 并更

表1 宁夏黄土丘陵区不同生境环境特征参数(平均值±标准误)
Table 1 The environmental characteristics (mean±SE) in different habitats in the hill and gully area of Loess Plateau, Ningxia

	灌草混交林地 SG	乔灌混交林地 TS	生态薪炭林地 FF	天然封育草地 RG	生态经济林地 PF	水平农田地 TF
林冠层物种数 Species of canopy layer (CS)	0.00±0.00 ^c	3.33±0.33 ^a	0.00±0.00 ^c	0.00±0.00 ^c	1.00±0.00 ^b	0.00±0.00 ^c
林冠层盖度 Cover of canopy layer (CC) (%)	0.00±0.00 ^c	56.67±6.89 ^a	0.00±0.00 ^c	0.00±0.00 ^c	40.33±2.91 ^b	0.00±0.00 ^c
灌木层物种数 Number of shrub species (SN)	3.33±0.33 ^a	1.33±0.33 ^b	2.00±0.00 ^b	0.00±0.00 ^c	0.00±0.00 ^c	0.00±0.00 ^c
灌木层盖度 Cover of shrub species (SC) (%)	33.15±1.15 ^b	23.21±1.15 ^c	43.67±0.88 ^a	0.00±0.00 ^d	0.00±0.00 ^d	0.00±0.00 ^d
草本层物种数 Number of herb species (HN)	6.00±0.58 ^b	8.00±0.58 ^a	9.00±0.58 ^a	6.67±0.33 ^b	4.33±0.33 ^c	3.33±0.33 ^c
草本层盖度 Cover of herb species (HC) (%)	70.33±3.18 ^a	67.67±1.45 ^a	60.00±2.89 ^{ab}	49.33±2.96 ^b	23.67±1.33 ^c	21.35±3.05 ^c
枯落物盖度 Cover of leaf litter (LC) (%)	60.12±2.89 ^{ab}	66.67±1.67 ^a	56.62±1.68 ^b	25.43±1.05 ^c	23.35±1.68 ^c	6.53±0.92 ^d
枯落物厚度 Depth of leaf litter (LD) (cm)	0.37±0.02 ^b	0.55±0.03 ^a	0.33±0.03 ^b	0.19±0.01 ^c	0.11±0.01 ^d	0.05±0.01 ^d
草本层生物量 Herbaceous biomass (HB) (g/m ²)	156.41±37.68 ^a	72.40±7.26 ^b	72.50±3.95 ^b	51.27±7.90 ^b	50.21±1.66 ^b	18.95±2.09 ^b
土壤含水量 Soil water content (SW) (%)	21.64±0.32 ^a	20.71±0.35 ^a	20.15±0.32 ^a	14.13±0.57 ^c	18.01±0.14 ^b	18.13±0.29 ^b
海拔 Elevation (ELV) (m)	1,775.00	1,783.00	1,808.67	1,728.33	1,726.33	1,833.00
坡向 Slop aspect (SA)	东北坡 Northeast	西南坡 Southwest	西坡 West	西南坡 Southwest	东南坡 Southeast	东北坡 Northeast
坡度 Slop gradient (SG)	10°	15°	23°	21°	8°	12°

同行数据间不同上标字母表示差异显著(Tukey法多重比较, $\alpha=0.05$)。
Means within a row with different superscripts are significantly different (Tukey test, $\alpha=0.05$). The meanings of SG, TS, FF, RG, PF and TF are the same as those in Fig. 1.

换诱液, 用75%酒精保存收集到的样本, 带回实验室鉴定到种, 并统计数量(高兆宁, 1999; 王新谱和杨贵军, 2010)。将每个样方内16个陷阱器的捕获数合并作为1个收集单位, 本次调查共进行5次。

2.3 数据分析

根据地表甲虫个体数占群落总个体数的百分比计算甲虫优势度, 占20%以上为优势种, 10–20%为亚优势种, 1–10%为常见种, <1%为少有种。

采用物种丰富度和个体数量分析地表甲虫群落 α 多样性, 以每个研究样方中捕获到的甲虫物种数(S)和个体数量来测定(马克平和刘玉明, 1994)。

采用Jaccard相似性系数分析不同生境间地表甲虫群落 β 多样性:

$$C_j = j / (a + b - j) \tag{1}$$

其中j为两个群落或样地共有种数; a和b分别为样地A和样地B的物种数。根据Jaccard相似性系数原理, 当 $C_j=0.00-0.25$ 时, 为极不相似; $C_j=0.25-0.50$, 为中等不相似; $C_j=0.50-0.75$, 为中等相似; $C_j=0.75-1.00$, 为极相似(马克平等, 1995; 徐正会等, 2001)。

采用非参数检验 Kruskal-Wallis 方差分析

(non-parametric Kruskal-Wallis analysis of variance) 以及Tukey多重比较(Tukey post-hoc pairwise comparisons)分析不同生境内地表甲虫物种丰富度和个体数量的差异。对环境数据进行标准化处理后(对盖度数据进行反正弦转换后, 再将所有环境数据进行平方根转换), 以多元线性回归分析决定影响地表甲虫物种丰富度和个体数量的环境因子。以上的数据分析使用数理统计软件SPSS 16.0完成。

基于以往研究, 温度、湿度、生物生产率以及空间异质性等是决定地表甲虫分布的重要因素(Lövei & Sunderland, 1996; Yu *et al.*, 2010), 所以本研究选择了与上述因素密切相关的林冠层盖度、灌木层盖度、草本层盖度、草本层生物量、枯落物盖度、枯落物厚度和土壤含水量等7个环境变量纳入到分析中。采用基于蒙特卡洛置换检验的偏典范对应分析(canonical correspondence analysis, CCA)方法分析环境变量对地表甲虫群落组成和物种分布的重要性, 将环境变量逐一引入模型中, 先引入最重要的环境变量, 直到引入的变量对模型没有统计学意义(Jongman *et al.*, 1995; Yu *et al.*, 2010)。以上分

析由统计软件CANOCO 4.5完成。

3 结果

研究共采集地表甲虫4,511号, 隶属于11科52种, 本文中去除个体数≤3头的9种, 用于数据分析的物种43种(附表1)。

直角通缘步甲(*Pterostichus gebleri*)为优势种, 个体数占总个体数的29.32%; 麻步甲(*Carabus brandti*)和赤胸长步甲(*Dolichus halensis*)为亚优势种, 分别占总个体数的17.41%和14.45%; 小驼喻蜋螂(*Onthophagus gibbulus*)、中华喻蜋螂(*O. sinicus*)、星斑虎甲(*Cicindela kaleea*)、克小鳖甲(*Microdera kraatzi*)等11种为常见种, 合计占总个体数的31.13%; 半猛步甲(*Cymindis daimio*)、异形琵甲(*Blaps variolosa*)、苹斑芜菁(*Mylabris calida*)等29种为少有种, 合计占总个体数的7.69%。

3.1 地表甲虫群落多样性

从图2中可看出, 地表甲虫物种丰富度在6种生境间存在显著差异($U=14.58, df=5, P=0.012$)。灌草混交林地、乔灌混交林地和生态薪炭林地的物种丰富度显著高于天然封育草地、生态经济林地和水平农田地($P<0.05$), 灌草混交林地、乔灌混交林地和生态薪炭林地之间, 天然封育草地、生态经济林地和水平农田地之间物种丰富度均没有显著差异($P>0.05$)。

地表甲虫个体数量在6种生境间也存在显著差异($U=15.18, df=5, P=0.010$)(图2)。灌草混交林地、乔灌混交林地、生态薪炭林地个体数量显著高于生态经济林地、天然封育草地和水平农田地($P<0.05$), 生态经济林地和水平农田地显著高于天然封育草地($P<0.05$), 灌草混交林地、乔灌混交林地、生态薪

炭林地之间, 生态经济林地和水平农田地之间甲虫个体数量均没有显著差异($P>0.05$)。

Jaccard系数计算结果显示(表2), 6种生境间地表甲虫群落的相似性系数总体上介于0.39–0.67之间。灌草混交林地、乔灌混交林地与生态薪炭林地三者间, 以及生态经济林地与水平农田地间群落相似性较高。生态经济林地和水平农田地除了与天然封育草地均接近中等相似外(0.52, 0.50), 与其他3种生境甲虫群落组成差异较大, 可能与人为干扰有关, 农田以一年生农作物为主, 生态经济林地以食用杏为主, 人为干扰相对较大。

3.2 地表甲虫群落多样性与环境因子的关系

6种生境的林冠层盖度($U=16.83, df=5, P=$

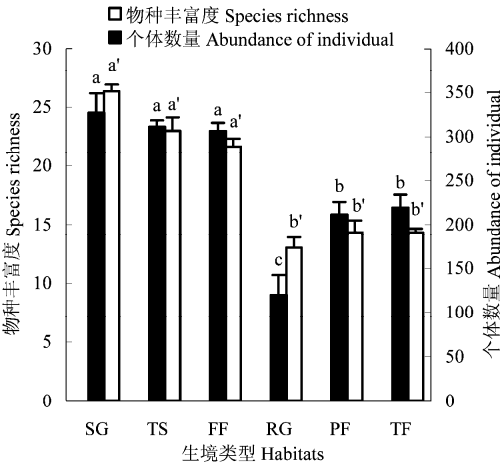


图2 6种生境中地表甲虫物种丰富度和个体数量。图中柱上不同字母表示差异显著($P<0.05$)。各生境名称缩写同图1。
Fig. 2 Species richness and abundance of individual ground-dwelling beetles collected by pitfall traps in different habitats. Means with different letters in bars are significantly different ($P<0.05$). The meanings of SG, TS, FF, RG, PF and TF are the same as those in Fig. 1

表2 不同生境地地表甲虫群落的相似性系数

Table 2 Similarity coefficients of ground-dwelling beetle communities in different habitats

	乔灌混交林地 TS	生态薪炭林地 FF	天然封育草地 RG	生态经济林地 PF	水平农田地 TF
灌草混交林地 SG	0.63	0.67	0.46	0.39	0.49
乔灌混交林地 TS	—	0.61	0.50	0.44	0.39
生态薪炭林地 FF	—	—	0.44	0.45	0.42
天然封育草地 RG	—	—	—	0.52	0.50
生态经济林地 PF	—	—	—	—	0.63

各生境名称缩写同图1。

The meanings of SG, TS, FF, RG, PF and TF are the same as those in Fig. 1.

表3 环境因子与地表甲虫物种丰富度和个体数量的回归分析
Table 3 Regression analysis of environmental variables and species richness and abundance of individual ground-dwelling beetles

	回归模型 Regression model	r^2	P
物种丰富度 Species richness	$-11.68 + 5.35 \text{ SC} + 0.78 \text{ HB} + 1.64 \text{ SW}$	0.83	0.000**
个体数量 Abundance of individual	$76.80 + 12.23 \text{ LD} + 3.42 \text{ CC}$	0.72	0.000**

** $P<0.01$ 。各环境因子名称缩写同表1。The meanings of SC, HB, SW, LD and CC are the same as those in Table 1.

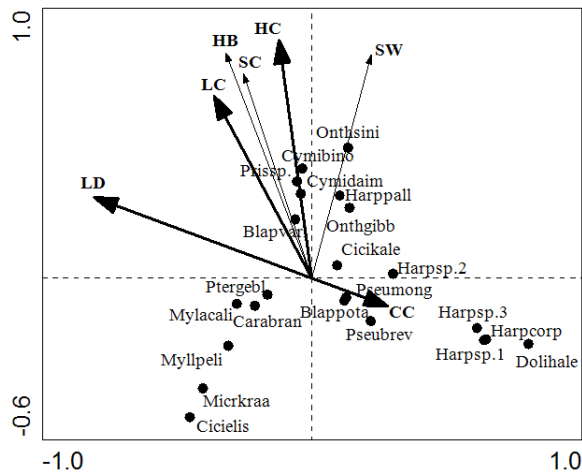


图3 地表甲虫群落组成与7个环境因子的CCA排序图。各环境因子名称缩写同表1。

Fig. 3 CCA for beetle species and seven environmental variables which were the most important in shaping the beetle-abundance patterns. The beetle species are marked with 4+4 letter abbreviations, e.g., *Carabus brandti* = Carabran. The meanings of environmental factors are the same as those in Table 1.

- Blapvari: 异形瓢甲 *Blaps variolosa*
Blappota: 条纹琵甲 *B. potanini*
Carabran: 麻步甲 *Carabus brandti*
Cicikale: 星斑虎甲 *Cicindela kaleea*
Cicielis: 云纹虎甲 *C. elisae*
Cymidaim: 半猛步甲 *Cymindis daimio*
Cymibino: 双斑猛步甲 *C. binotata*
Dolihale: 赤胸长步甲 *Dolichus halensis*
Harpcorp: 直角婪步甲 *Harpalus corporosus*
Harppall: 黄鞘婪步甲 *H. pallidipennis*
Harpsp.1/2/3: *Harpalus* sp.1/sp.2/sp.3
Micrkraa: 克小鳖甲 *Microdera kraatzii*
Mylacali: 苹斑芫菁 *Mylabris calida*
Myllpeli: 暗褐尖筒象 *Mylocherus pelidnus*
Onthgibb: 小驼喻蛭螂 *Onthophagus gibbulus*
Onthsini: 中华喻蛭螂 *O. sinicus*
Ptergebl: 直角通缘步甲 *Pterostichus gebleri*
Pseumong: 蒙古伪葬步甲 *Pseudotaphoxenus mongolicus*
Pseubrev: 短翅伪葬步甲 *P. brevipennis*
Prissp.: 锯步甲属一种 *Pristosia* sp.

0.005)、灌木层盖度($U=16.48$, $df=5$, $P<0.001$)、草本层盖度($U=14.49$, $df=5$, $P=0.003$)、草本层生物量($U=15.92$, $df=5$, $P=0.007$)、枯落物厚度($U=16.24$,

$df=5$, $P=0.006$)、枯落物盖度($U=14.59$, $df=5$, $P=0.002$)和土壤含水量($U=15.68$, $df=5$, $P=0.008$)均存在显著差异(表1)。

对地表甲虫物种丰富度和个体数量与7种环境变量分别进行多元回归分析(表3),发现灌木层盖度、草本层生物量和土壤含水量是决定物种丰富度的3个重要因素($r^2=0.83$, $F=70.14$, $P<0.001$);枯落物厚度和林冠层盖度是决定地表甲虫个体数量的2个主要因素($r^2=0.72$, $F=19.39$, $P<0.001$)。

从CCA排序图看(图3),第一排序轴和第二排序轴的特征值分别为0.42和0.19,占总特征值的54.98%。枯落物厚度与CCA第一排序轴呈显著负相关($P=0.002$, $F=6.08$),林冠层盖度与其呈显著正相关($P=0.018$, $F=3.73$);草本层盖度($P=0.002$, $F=5.64$)和枯落物盖度($P=0.018$, $F=2.26$)与CCA第二排序轴呈显著正相关,而草本层生物量、灌木层盖度和土壤含水量对地表甲虫群落组成无显著影响。

赤胸长步甲、直角婪步甲(*Harpalus corporosus*)和婪步甲属的2个物种(*Harpalus* sp.1, *Harpalus* sp.3)集中分布在第一排序轴的右下方,偏好于草本层和灌木层比例较小、林冠层盖度较低的农田和生态经济林地;暗褐尖筒象(*Mylocherus pelidnus*)、克小鳖甲、云纹虎甲(*Cicindela elisae*)和苹斑芫菁主要分布在第一排序轴的左下方,偏好于湿度较低、林冠层和灌木层贫瘠的天然封育草地;中华喻蛭螂、双斑猛步甲(*Cymindis binotata*)、锯步甲属一种(*Pristosia* sp.)、半猛步甲、黄鞘婪步甲(*Harpalus pallidipennis*)和小驼喻蛭螂集中分布在排序轴上方,偏好于湿度较高、植被生长茂盛的灌草混交林地、乔灌混交林地和生态薪炭林地,其余物种主要集中在排序轴中心位置,对环境变量没有明显偏好性。

4 讨论

本文研究了宁夏南部黄土丘陵区6种典型生境的地表甲虫群落组成和多样性变化规律。地表甲虫

群落物种丰富度和个体数量较高的生境类型依次为灌草混交林地、乔灌混交林地和生态薪炭林地,而生态经济林地、农田和天然封育草地中物种丰富度或个体数量较低。因此,地表甲虫群落多样性维持较好的生境类型为灌草混交林地,而该生境类型固有的“88542”隔坡反坡水平沟整地技术又是该区重要的水土保持治理措施之一,可成为宁夏黄土丘陵区典型生态恢复的最优模式。

灌木层盖度和草本层生物量是影响甲虫群落物种丰富度的关键因子。在6种生境类型中,地表甲虫物种丰富度较高的生境有灌草混交林地、乔灌混交林地和生态薪炭林地。这些生境类型不仅具有较高的植被立体结构,形成干旱地区比较特殊的阴凉微气候,适宜地表甲虫生存与栖息(Antvogel & Bonn, 2001)。同时,这些生境又具有较好的地面覆盖层,为地表甲虫创造了藏身、栖息、产卵与繁殖等生命活动的适宜场所(Antvogel & Bonn, 2001),进一步解释了这些生境中地表甲虫群落物种丰富度较高的原因,也与“灌丛植被可有效调节林下自然生境”(Cushman *et al.*, 2010; Wang *et al.*, 2011)的研究结论相一致。灌草混交林地间作的紫花苜蓿等草本植物,具有较高的草本层生物量,也验证与支持了“草本层生物量与甲虫丰富度为正相关”这一结论(Mazía *et al.*, 2006)。试验还表明,土壤含水量是影响地表甲虫丰富度的另一关键因子。在上述6种生境中,天然封育草地多属于坡地的上段,坡度大,植被结构较差,土壤含水量低,地表湿度差,物种丰富度最低。这与前人(Jankielsohn *et al.*, 2001; Irmiler & Hoernes, 2003; 刘继亮等, 2010)报道类似。

试验表明,甲虫个体数量与林冠层盖度和枯落物厚度成正相关。6种生境中,灌草混交林地、乔灌混交林地和生态薪炭林地的甲虫个体数也显著高于其他生境,原因可能也与当地较为极端的干旱气候条件影响紧密联系,其他裸露、高温的地表环境迫使甲虫向相对更隐蔽的栖境迁移及聚集(Jankielsohn *et al.*, 2001),与“枯落物厚度和林冠层盖度对甲虫个体数量成正相关”的论点(于晓东等, 2006a)相一致。值得注意的是,在生态经济林地和水平农田缺少较厚的枯落物,同样具有较高的个体数量,与本试验结论并不十分一致,其原因可能是人为大面积栽培种类单一的作物,引起个别单食性甲虫的大发生所致,如赤胸长步甲和婪步甲属一种

(*Harpalus* sp.)等。

CCA分析表明,地表甲虫群落组成受到环境因子的显著影响。赤胸长步甲、直角婪步甲等偏好于草本层和灌木层比例较小、林冠层盖度较低的生境,如农田和生态经济林地。克小鳖甲、云纹虎甲等偏好于土壤含水量较低、缺乏乔灌木层的天然封育草地。中华喙蝇螂、双斑猛步甲、锯步甲属一种等偏好于地表湿度较高、植被生长茂盛的灌草混交林地、乔灌混交林地和生态薪炭林地,而有些种类对环境则没有明显偏好性。枯落物厚度、枯落物盖度、林冠层盖度及草本层盖度是影响甲虫群落组成的关键性环境因子,这4种因子体现了地表枯落物特征对地表甲虫的影响。对这些特征的影响不同学者的研究结果差异较大。Topp等(2006)发现在中欧西部原始森林中,地表枯落物对地表甲虫的影响比其他环境因子都要大。Sroka和Finch(2006)的研究表明,枯落物对步甲种群具有中性或正效应,但也有研究发现枯落物厚度和植物残体量对森林地表甲虫物种数具有负效应(Christ & Wiens, 1995)。本文结果表明,枯落物厚度和盖度对当地甲虫群落组成具有显著性影响,对大多数种类来说这种影响是一种正效应。

本文研究了宁夏南部山区6种典型生境类型的地表甲虫群落组成和多样性变化,所涉及到的环境因子主要局限在不同生境类型的地表植被、环境的平面特征,未能充分反映整个区域内不同生态恢复类型的面积及其立体镶嵌体模式的影响。在数据分析中,研究对象主要限制在地表活动甲虫类群,对部分植物上活动种类予以剔除。但在实际调查中,个别非地面活动种类的诱集量很大,如白星花金龟(*Potosia brevitaris*),大牙锯天牛(*Dorystenes paradoxus*)等,这些昆虫的发生亦是环境变化的重要体现,值得重视。为此,今后尚需在大尺度景观镶嵌体和更大范围昆虫对象等方面作更深入的工作。

参考文献

- Antvogel H, Bonn A (2001) Environmental parameters and microspatial distribution of insects: a case study of carabids in an alluvial forest. *Ecography*, **24**, 470–482.
- Benayas JMR, Newton AC, Diaz A, Bullock JM (2009) Enhancement of biodiversity and ecosystem services by ecological restoration: a meta-analysis. *Science*, **325**, 1121–1124.

- Cameron KH, Leather SR (2012) Heathland management effects on carabid beetle communities: the relationship between bare ground patch size and carabid biodiversity. *Journal of Insect Conservation*, **16**, 523–535.
- Christ TO, Wiens JA (1995) Individual movements and estimation of population size in darkling beetles (Coleoptera: Tenebrionidae). *The Journal of Animal Ecology*, **64**, 733–746.
- Cushman JH, Waller JC, Hoak DR (2010) Shrubs as ecosystem engineers in a coastal dune: influences on plant populations, communities and ecosystems. *Journal of Vegetation Science*, **21**, 821–831.
- Dennis P, Young MR, Howard CL, Gordon IJ (1997) The response of epigeal beetles (Coleoptera: Carabidae, Staphylinidae) to varied grazing regimes on upland *Nardus stricta* grasslands. *The Journal of Applied Ecology*, **34**, 433–443.
- Diekötter T, Billeter R, Crist TO (2008) Effects of landscape connectivity on the spatial distribution of insect diversity in agricultural mosaic landscapes. *Basic and Applied Ecology*, **9**, 298–307.
- Dong M (董鸣) (1996) *Survey, Observation and Analysis of Terrestrial Biocommunities* (陆地生物群落调查观测与分析). China Standard Press, Beijing. (in Chinese)
- Fournier E, Loreau M (2001) Respective roles of recent hedges and forest patch remnants in the maintenance of ground-beetle (Coleoptera: Carabidae) diversity in an agricultural landscape. *Landscape Ecology*, **16**, 17–32.
- Gao ZN (高兆宁) (1999) *Agricultural Insect Fauna of Ningxia* (宁夏农业昆虫图志). China Agriculture Press, Beijing. (in Chinese)
- Gardiner MM, Landis DA, Gratton C, Schmidt N, O'Neal M, Mueller E, Chacon J, Heimpel GE, DiFonzo CD (2009) Landscape composition influences patterns of native and exotic lady beetle abundance. *Diversity and Distributions*, **15**, 554–564.
- Hollier JA, McArthur P, Whitehouse D, Mortimer SR (2009) The ground beetle (Coleoptera: Carabidae) assemblages of chalk grasslands of known age in the Chilterns. *British Journal of Entomology and Natural History*, **22**, 73–80.
- Ikeda H, Homma K, Kubota K (2008) Ground-dwelling beetle community in beech forests of Sado Island, Japan: comparison with the mainland. *Journal of Forest Research*, **13**, 357–364.
- Irmmler U, Hoernes U (2003) Assignment and evaluation of ground beetle (Coleoptera: Carabidae) assemblages to sites on different scales in a grassland landscape. *Biodiversity and Conservation*, **12**, 1405–1419.
- Jankielsohn A, Scholtz CH, Louw SVD (2001) Effect of habitat transformation on dung beetle assemblages: a comparison between a South African nature reserve and neighboring farms. *Environmental Entomology*, **30**, 474–483.
- Jongman RHG, ter Braak CJF, van Tongeren OFR (1995) *Data Analysis in Community and Landscape Ecology*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Kruess A, Tschamntke T (2002) Contrasting responses of plant and insect diversity to variation in grazing intensity. *Biological Conservation*, **106**, 293–302.
- Kubota K, Lee CY, Kim JK (2000) Invertebrates on the forest floor in Kangwon Province, Republic of Korea, with special reference to Japanese red pine forest infested with the pine needle gall-midge (*Thecodiplosis japonensis*). In: *Review of Forestry Culture*, vol. 21 (ed. Japan Forestry Culture Association), pp. 137–146. Japan Forestry Culture Association, Tokyo. (in Japanese)
- Larsen KJ, Work TW (2003) Differences in ground beetles (Coleoptera: Carabidae) of original and reconstructed tallgrass prairies in northeastern Iowa, USA, and impact of 3-year spring burn cycles. *Journal of Insect Conservation*, **7**, 153–166.
- Lassau SA, Hochuli DF, Cassis G, Reid CAM (2005) Effects of habitats complexity on forest beetle diversity: do functional groups respond consistently? *Diversity and Distributions*, **11**, 73–82.
- Li SB (李生宝), Jiang Q (蒋齐), Li BC (李璧成) (2006) *Research and Constructive Technology of Ecological Agricultural System in Southern Mountain in Ningxia* (宁夏南部山区生态农业建设技术研究). Ningxia People's Press, Yinchuan. (in Chinese)
- Liu JL (刘继亮), Li FR (李锋瑞), Liu QJ (刘七军), Niu RX (牛瑞雪) (2010) Seasonal variation in soil fauna community composition and diversity in an arid desert ecosystem of the Heihe Basin. *Journal of Desert Research* (中国沙漠), **30**, 342–349. (in Chinese with English abstract)
- Liu K (刘库), Xie YZ (谢应忠), Li YK (李应科), Li Y (李云), Deng ZZ (邓占钊) (2006) Ecological degradation and restoration in Loess Hilly Area of South Ningxia Hui Autonomous Region: taking Pengyang County as an example. *Bulletin of Soil and Water Conservation* (水土保持通报), **26**, 54–56. (in Chinese with English abstract)
- Louzada J, Lima AP, Matavelli R, Zambaldi L, Barlow J (2010) Community structure of dung beetles in Amazonian savannas: role of fire disturbance, vegetation and landscape structure. *Landscape Ecology*, **25**, 631–641.
- Lövei GL, Sunderland KD (1996) Ecology and behavior of ground beetles (Coleoptera: Carabidae). *Annual Review of Entomology*, **41**, 231–256.
- Ma KP (马克平), Liu YM (刘玉明) (1994) Measurement of biotic community diversity. I. α diversity (Part 2). *Chinese Biodiversity* (生物多样性), **2**, 231–239. (in Chinese)
- Ma KP (马克平), Liu CR (刘灿然), Liu YM (刘玉明) (1995) Measurement of biotic community diversity. II. β diversity. *Chinese Biodiversity* (生物多样性), **3**, 38–43. (in Chinese)
- Mazía CN, Chaneton EJ, Kitzberger T (2006) Small-scale habitat use and assemblage structure of ground-dwelling beetles in a Patagonian shrub steppe. *Journal of Arid Environments*, **67**, 177–194.
- Sroka K, Finch O-D (2006) Ground beetle diversity in ancient woodland remnants in north-western Germany (Coleoptera: Carabidae). *Journal of Insect Conservation*, **10**, 335–350.

- Stork NE (1993) How many species are there? *Biodiversity and Conservation*, **2**, 215–232.
- Topp W, Kappes H, Kulfan J, Zach P (2006) Litter-dwelling beetles in primeval forests of Central Europe: does dead-wood matter? *Journal of Insect Conservation*, **10**, 229–239.
- Wang XP (王新谱), Yang GJ (杨贵军) (2010) *Insects Fauna in Helan Mountain of Ningxia* (宁夏贺兰山昆虫). Ningxia People's Press, Yinchuan. (in Chinese)
- Wang XP, Wang ZN, Berndtsson R, Zhang YF, Pan YX (2011) Desert shrub stemflow and its significance in soil moisture replenishment. *Hydrology and Earth System Sciences*, **15**, 561–567.
- Wang Y (王玉), Gao GC (高光彩), Fu BQ (付必谦), Wu Z (吴专) (2009) Composition and spatial distribution pattern of ground-dwelling beetle communities in Yeyahu Wetland, Beijing. *Biodiversity Science* (生物多样性), **17**, 30–42. (in Chinese)
- Xu ZH (徐正会), Li JG (李继乖), Fu L (付磊), Long QZ (龙启珍) (2001) A study on the ant communities on west slope at different elevation of the Gaoligongshan Mountain Nature Reserve in Yunnan, China. *Zoological Research* (动物学研究), **22**, 58–63. (in Chinese with English abstract)
- Yaacobi G, Ziv Y, Rosenzweig ML (2007) Effects of interactive scale-dependent variables on beetle diversity patterns in a semi-arid agricultural landscape. *Landscape Ecology*, **22**, 687–703.
- Yu XD (于晓东), Luo TH (罗天宏), Yang J (杨建), Zhou HZ (周红章) (2006a) Diversity of ground-dwelling beetles (Coleoptera) in larch plantation with different stages of re-forestation in Wolong Natural Reserve, southwestern China. *Zoological Research* (动物学研究), **27**, 1–11. (in Chinese with English abstract)
- Yu XD (于晓东), Luo TH (罗天宏), Zhou HZ (周红章) (2002) Composition and seasonal dynamics of litter-layer beetle community in the Dongling Mountain region, North China. *Acta Entomologica Sinica* (昆虫学报), **45**, 785–793. (in Chinese with English abstract)
- Yu XD, Luo TH, Zhou HZ (2006) Effects of carabid beetles among regenerating and natural forest types in southwestern China. *Forest Ecology and Management*, **231**, 169–177.
- Yu XD (于晓东), Luo TH (罗天宏), Zhou HZ (周红章), Yang J (杨建) (2006b) Influence of edge effect on diversity of ground-dwelling beetles across a forest-grassland ecotone in Wolong Natural Reserve, southwestern China. *Acta Entomologica Sinica* (昆虫学报), **49**, 277–286. (in Chinese with English abstract)
- Yu XD, Luo TH, Zhou HZ (2008) Distribution of carabid beetles among 40-year-old regenerating plantations and 100-year-old naturally regenerated forests in southwestern China. *Forest Ecology and Management*, **255**, 2617–2625.
- Yu XD, Luo TH, Zhou HZ (2010) Distribution of ground-dwelling beetle assemblages (Coleoptera) across ecotones between natural oak forests and mature pine plantations in North China. *Journal of Insect Conservation*, **14**, 617–626.

(责任编辑: 于晓东 责任编辑: 闫文杰)

附录 Supplementary Material

附表1 宁夏黄土丘陵区不同生境内地表甲虫群落的物种组成与分布

Table S1 Species composition and distribution of ground-dwelling beetle communities within restored habitats in the hill and gully area of Loess Plateau, Ningxia

<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/w2013-212-1.pdf>

附表1 宁夏黄土丘陵区不同生境内地表甲虫群落的物种组成与分布

Table S1 Species composition and distribution of ground-dwelling beetle communities within restored habitats in the hill and gully area of Loess Plateau, Ningxia

科 Family	物种 Species	灌草混交 林地 SG	乔灌混交 林地 TS	生态薪炭 林地 FF	天然封育 草地 RG	生态经 济林地 PF	水平农 田地 TF	总个体数 Total	百分比 %
步甲科 Carabidae	直角通缘步甲 <i>Pterostichus gebleri</i>	284	333	419	56	144	79	1,315	29.32
	麻步甲 <i>Carabus brandti</i>	137	248	294	43	6	53	781	17.41
	赤胸长步甲 <i>Dolichus halensis</i>	24	16	2	0	290	316	648	14.45
	直角婪步甲 <i>Harpalus corporosus</i>	5	3	13	0	36	19	76	1.69
	蒙古伪葬步甲 <i>Pseudotaphoxenus mongolicus</i>	10	1	34	3	1	20	69	1.54
	婪步甲属一种 <i>Harpalus</i> sp.1	7	1	2	6	38	0	54	1.20
	锯步甲属一种 <i>Pristosia</i> sp.	33	4	10	0	1	1	49	1.09
	双斑猛步甲 <i>Cymindis binotata</i>	25	12	11	0	1	0	49	1.09
	婪步甲属一种 <i>Harpalus</i> sp.2	4	8	2	1	19	14	48	1.07
	半猛步甲 <i>Cymindis daimio</i>	20	3	10	1	2	0	36	0.8
	短翅伪葬步甲 <i>Pseudotaphoxenus brevipennis</i>	4	1	14	3	7	7	36	0.8
	黄鞘婪步甲 <i>Harpalus pallidipennis</i>	18	10	2	1	3	1	35	0.78
	婪步甲属一种 <i>Harpalus</i> sp.3	5	8	3	0	0	10	26	0.58
	婪步甲属一种 <i>Harpalus</i> sp.4	0	0	0	0	4	2	6	0.13
	中华金星步甲 <i>Calosoma chinense</i>	2	0	0	0	0	2	4	0.09
	考氏肉步甲 <i>Broscus kozlovi</i>	1	0	1	0	0	2	4	0.09
金龟科 Scarabaeidae	小驼嗡蜣螂 <i>Onthophagus gibbulus</i>	160	83	10	45	48	56	402	8.96
	中华嗡蜣螂 <i>O. sinicus</i>	150	11	8	5	11	18	203	4.53
	双顶嗡蜣螂 <i>O. biverter</i>	3	0	1	0	0	0	4	0.09
	大黑蜣螂属一种 <i>Catharsius</i> sp.	0	4	0	0	0	0	4	0.09
虎甲科 Cicindelidae	星斑虎甲 <i>Cicindela kaleea</i>	72	118	37	25	19	44	315	7.02
	云纹虎甲 <i>C. elisae</i>	1	0	0	73	0	0	74	1.65
拟步甲科 Tenebrionidae	克小鳖甲 <i>Microdera kraatzi</i>	0	5	6	47	0	0	58	1.29
	异形琵甲 <i>Blaps variolosa</i>	11	0	2	5	0	2	20	0.45
	条纹琵甲 <i>B. potanini</i>	0	15	0	1	1	3	20	0.45
	扁长琵甲 <i>B. variolaris</i>	1	8	0	0	0	2	11	0.25
象甲科 Curculionidae	暗褐尖筒象 <i>Myllocerus pelidnus</i>	3	13	0	28	0	0	44	0.98
	苜蓿象甲 <i>Hypera postica</i>	4	0	0	0	0	0	4	0.09
	甜菜象甲 <i>Bothynoderse punctiventris</i>	2	1	1	0	0	0	4	0.09

附表1 (续) Table S1 (continued)

科 Family	物种 Species	灌草混交 林地 SG	乔灌混交 林地 TS	生态薪炭 林地 FF	天然封育 草地 RG	生态经 济林地 PF	水平农 田地 TF	总个体数 Total	百分比 %
芫菁科 Meloidae	苹斑芫菁 <i>Mylabris calida</i>	6	1	3	11	0	0	21	0.47
	凹胸黑芫菁 <i>Epicauta xantusi</i>	2	2	0	1	0	0	5	0.11
	暗头豆芫菁 <i>Epicauta obsкуроcephala</i>	2	2	0	0	0	0	4	0.09
鳃金龟科 Melolonthidae	小阔胫玛绢金龟 <i>Maladera ovatula</i>	2	2	3	1	0	1	9	0.20
	福婆鳃金龟 <i>Brahmina faldermanni</i>	2	1	1	0	0	0	4	0.09
粪金龟科 Geotrupidae	戴锤角粪金龟 <i>Bolbotrypes davidis</i>	0	0	4	0	0	0	4	0.09
埋葬甲科 Silphidae	尸葬甲 <i>Necrodes littoralis</i>	2	4	0	2	0	0	8	0.18
	大红斑葬甲 <i>Nicrophorus japonicus</i>	2	0	2	0	0	0	4	0.09
	黄斑葬甲一种 <i>Nicrophorus sp.</i>	0	3	1	0	0	0	4	0.09
瓢虫科 Coccinellidae	七星瓢虫 <i>Coccinella septempunctata</i>	3	0	0	0	0	4	7	0.16
	异色瓢虫 <i>Harmonia axyridis</i>	2	1	1	0	0	0	4	0.09
	多异瓢虫 <i>Hippodamia variegata</i>	0	1	0	0	3	0	4	0.09
	双七瓢虫 <i>Coccinula quatuordecimpustulata</i>	0	0	0	2	0	2	4	0.09
叩甲科 Chrysomelidae	暗色槽缝叩甲 <i>Agrypnus musculus</i>	2	0	2	0	0	0	4	0.09
总计 Total		1,011	923	899	360	634	658	4,485	

SG, shrub/grassland; TS, tree/shrub mix; FF, fuel-wood forest; RG, naturally restored grassland; PF, plantation forest; TF, level terraced field