网络出版时间:2020-08-13 16:07 DOI:10.13207/j. cnki. jnwafu. 2021. 02. 010 网络出版地址:https://kns. cnki. net/kcms/detail/61.1390. S. 20200812. 1408. 020. html

# 黄土丘陵区地表甲虫空间异质性对环境变化的响应

马永强<sup>1a</sup>,马 超<sup>2</sup>,欧阳芳<sup>3</sup>,杭 佳<sup>1a</sup>,石 云<sup>1b</sup>

(1宁夏大学 a农学院,b资源环境学院,宁夏 银川 750021;2 宁夏回族自治区自然资源厅 土地勘测规划院,

宁夏 银川 750000;3 中国科学院动物所 农业虫害鼠害综合治理研究国家重点实验室,北京 100101)

[摘 要]【目的】了解环境因子对黄土丘陵区地表甲虫群落多样性和空间分布的影响。【方法】以宁夏彭阳县 高建堡流域为研究区,以GF-2高分辨率遥感影像和数字高程模型(DEM)为数据源,利用 3S 技术获取研究区土地利 用、坡度、海拔等环境因子。采用陷阱法在 6 个植物群落分明的样地诱捕地表甲虫,并对地表甲虫统计数据进行初步 处理和分类。结合广义可加模型(GAM)探究研究区地表甲虫空间异质性与环境因子变化的关系。【结果】(1)GAM 自变量(海拔、坡度、坡向和土壤水分)对因变量(地表甲虫种群数量)的决定系数为 60.20%,说明研究区地表步甲科 甲虫对所选用的环境因子有很大的趋向性。(2)GAM 中各环境因子对步甲科甲虫数量和空间分布的影响存在明显 差异,其中海拔的影响为 23.10%,坡度为 9.54%,坡向为 8.03%,环境因子中土壤水分为 46.80%。(3)土壤水分是 影响黄土丘陵沟壑区步甲科昆虫最重要的因素,其受到海拔、坡度、坡向等地形因子影响,对甲虫生存环境起到关键 性作用,步甲科昆虫在土壤水分 25%~45%的区域分布密度最大。【结论】研究区地表甲虫主要分布于灌草混交林 地、乔灌混交林地和生态薪炭林地,其中灌草混交林地是地表甲虫生存、栖息的最佳生境。步甲科昆虫是该流域内的 广布种和优势种。

[关键词] 黄土丘陵沟壑区;地表甲虫;环境因子;空间异质;广义可加模型(GAM) [中图分类号] Q968.1 [文献标志码] A [文章编号] 1671-9387(2021)02-0068-08

# Response of spatial heterogeneity of surface beetles to environmental changes in the Loess Hilly Region

MA Yongqiang<sup>1a</sup>, MA Chao<sup>2</sup>, OUYANG Fang<sup>3</sup>, HANG Jia<sup>1a</sup>, SHI Yun<sup>1b</sup>

(1 a School of Agricultural, b College of Resources and Environmental Science, Ningxia University,

Yinchuan, Ningxia 750021, China; 2 Land Survey and Planning Institute of Natural Resources Department of Ningxia Hui Autonomous Region, Yinchuan, Ningxia 750000, China; 3 State Key Laboratory of Integrated Management of Pest Insects and Rodents, Institute of Zoology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: [Objective] This study aimed to understand the influence of environmental factors on the diversity and spatial distribution of surface beetles in the Loess Hilly Region. [Method] This study focused on the Gaojianpu watershed in Pengyang County of Ningxia and the GF-2 high-resolution remote sensing image and digital elevation model (DEM) were used as data sources. The 3S technology was used to obtain the environmental factors such as land use, slope and elevation. The trap method was used to trap surface beetles in 6 well-defined plots. The surface beetle statistics were preliminarily processed and classified. The coefficient of generalized additive model (GAM) was used to explore the spatial heterogeneity of surface beetles in the study area. [Result] (1) The independent variables (altitude, slope, aspect and soil moisture)

<sup>[</sup>收稿日期] 2019-10-05

<sup>[</sup>基金项目] 国家自然科学基金项目(41161081);宁夏重点研发项目(2019BEG03049)

<sup>[</sup>作者简介] 马永强(1993-),男,(回族),宁夏吴忠人,硕士,主要从事 GIS 空间分析与遥感应用研究。E-mail;myqmyr@163.com

<sup>[</sup>通信作者] 石 云(1977-),女,宁夏银川人,教授,博士,硕士生导师,主要从事"3S"技术研究。E-mail,shiysky@163.com

of the GAM model had the determination coefficient of 60. 20% for the dependent variable (number of insect populations), indicating that surface beetles tended to choose the selected environmental factors. There were large differences in the influences of environmental factors on number and spatial distribution of beetles in the GAM model. The effects of altitude slope, slope aspect and soil moisture were 23. 10%, 9. 54%, 8. 03% and 46. 80%, respectively. (3) Soil moisture was the most important factor affecting beetles in the Loess Hilly and Gully Region. It affected topographic factors such as elevation, slope and aspect, and played a key role in the survival environment of beetles. The surface beetles had the highest density distribution with soil moisture of 25% - 45%. [Conclusion] The surface beetles in the study area mainly distributed in the mixed grassland, the mixed forest and the fuel-wood forest. The mixed grassland was the best habitat for beetles and surface beetle was the widespread and dominant species in the basin.

**Key words:** the Loess Hilly and Gully Region; surface beetles; environmental factors; spatial heterogeneity; generalized additive model(GAM)

黄土丘陵沟壑区是中国黄土高原的重要组成部 分,该区域水土流失严重,生态脆弱。近年来实施的 生态恢复举措使该区生态系统功能得到改善,生物 多样性明显提高。人为设计和改变区域环境因子会 影响生物群落多样性的空间分布特征和演变规律, 为此探究群落多样性与环境因子变化的关系,维持 生态系统稳定性已成为重要的研究方向<sup>[1]</sup>。

昆虫作为世界上种类和数量最多的生物类群, 其群落多样性受局部环境条件和周围景观特征的影 响<sup>[2-6]</sup>。特别是生物环境中较为多样化的鞘翅目昆 虫类群,其食性复杂<sup>[7]</sup>,扩散力较低,易受到地面环 境影响<sup>[8-9]</sup>,因此适合作为研究物种空间分布规律的 对象。地形、气候、生物等环境因子是引起生态环境 变化的重要因素,这些因子综合影响物种生境所需 光、热、水等要素的空间分布,同时影响动植物群落 分布及种群格局的形成<sup>[10-11]</sup>。长期以来,国内外学 者在研究昆虫群落与地形关系方面,主要建立在感 性认知和定性分析的基础上<sup>[12-13]</sup>,定量分析研究较 为少见。采用定量分析方法研究区域地表甲虫物种 多样性和空间分布规律,探寻其变化与不同环境因 子的关系,进而可对研究区生态效益进行评价。

数理统计和地理信息系统(GIS)空间分析方法 是分析物种分布及其影响因素的重要研究手段。将 统计技术和GIS技术引入研究,使量化后的昆虫数 据与GIS分析数据结合,可定量分析昆虫群落分布 与环境因子之间的关系。广义可加模型(GAM)不 需要预定义参数模型<sup>[14-16]</sup>,数据拟合更具灵活性,能 应用非参数的方法检测数据结构,找出其中规律,得 到更好的预测结果<sup>[17]</sup>。目前,国内学者已将GAM 模型应用于海洋渔业、湖泊微生物<sup>[18]</sup>、潜在植被预 测以及草原昆虫格局空间关系<sup>[19]</sup>等方面。但在黄 土丘陵沟壑区仅停留在定性分析的基础上<sup>[20]</sup>。

黄土丘陵沟壑区地形复杂且具有强烈的褶皱隆 起,易影响区域内动植物分布。小流域是黄土丘陵 沟壑区最小的自然集水单元。以小流域作为水土保 持治理最小单元,有利于更加精确高效治理生态脆 弱区域,实现生态环境治理和打造清洁型小流域双 目标。研究小流域物种分布与环境因子之间的关 系,有助于进一步了解区域内生态效益变化情况。 本研究以适应性较强、活动范围大的鞘翅目地表甲 虫为研究对象,以地处黄土丘陵沟壑区高建堡典型 小流域为研究区,基于统计方法和地理信息系统 (GIS)技术,使量化昆虫数据与 GIS 分析数据相结 合,构建 GAM,定量分析昆虫群落与环境因子的关 系,探究其最佳生境,促进生态脆弱区域生物多样性 保护及生态环境恢复。

# 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

高建堡小流域位于宁夏回族自治区东南部、六 盘山东麓彭阳县王洼镇(36°3′44″-36°6′53″N, 106°38′15″-106°40′43″E),总面积1076.89 hm², 海拔1297~2483 m。流域地处黄土高原,具有黄 土丘陵沟壑区第二副区典型特征,梁、峁、沟壑并存, 沟道发育,农业综合区划属于农牧区,多年平均气温 6.8℃,年平均降水量420 mm,年平均蒸发量为 1550 mm,蒸发强烈,属半干旱大陆性季风气候。 土壤以黄绵土为主,主要分布在梁峁状丘陵坡地上, 土壤肥力中下,生产力水平低,是宁夏水土流失最严 重的县域之一,也是全国重点水土保持治理区。高 建堡小流域面积较小,地形破碎,对地表甲虫物种多 样性和空间分布有重要的影响。

### 1.2 采样时间与样地设置

地表甲虫的取样采用国际通用的陷阱法<sup>[21-22]</sup>。 用一次性塑料水杯(高9 cm,上口直径7.5 cm,下口 直径4 cm)作为陷阱容器,引诱剂为醋、糖、医用酒 精和水混合液(质量比为2:1:1:20),每个陷阱 器放引诱剂40~60 mL。

在高建堡流域选择 6 个植物群落分布典型且坡向、坡度和海拔特征分明的地段作为地表甲虫调查 区域,具体信息见表 1。每个调查区域中设置 3 个 20 m×20 m 的样方,样方间隔 20 m 以上,在每个样 方的四角各放置 1 个陷阱器,每个调查区域设 12 个 陷阱器,共 72 个陷阱器,分别收集每个陷阱器的捕 获结果,统计并编号。利用 GPS(eXplorist 500 LE, MAGELLAN)确定每个陷阱的精准位置。2018 年 7月 10 日 -8 月 25 日,每隔 5 d 对 72 个陷阱器收 集 1 次,并更换诱液。用体积分数 75%酒精保存带 回实验室鉴定到种,并统计数量。

1 貫	1 土 上	陵区宁	夏高建	堡流域典	型植物	<b>肳</b> 群落类型
-----	-------------	-----	-----	------	-----	---------------

Table 1 Typical plant community types in Gaojianbao watershed of Ningxia in the Loess Hilly Region

植物群落类型	概况
Plant community type	Overview
灌草混交林地 Shrub/grassland mixed forest	位于梁峁缓坡退耕地, 植被以根系发达、生长迅速的灌草为主。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。 The plantation is located on a gently sloping farmland in upper slope. The vegetation is mainly shrubs with developed root systems and rapid growth. The tree species configuration is inter-plant mixed, inter-row mixed or ribbon-shaped mixed, and the row spacing is 2 m×2 m.
乔灌混交林地 Tree/shrub mixed forest	位于侵蚀沟,沟坡上缓下陡,模式的树种配置以沙棘、柠条、山杏等为主。株行距 2 m×2 m,带状或隔行隔 株混交。 It is located in the erosion ditch, and the slope of the ditch is gradually lower and steeper. The tree species of the model are mainly seabuckthorn, <i>Caragana korshinskii</i> , and apricot. The plant spacing is 2 m×2 m, and the strips or interlaced plants are mixed.
生态薪炭林地 Fuel-wood forest	位于梁峁陡坡荒山, 坡度较陡,主要以根蘖力强的灌木为主,株行距 2 m×2 m,"品"字形株间或行间混交。 It is located on the steep slope and barren mountain of upper slope. The shrubs with strong root and root strength are the main ones. The row spacing is 2 m×2 m. It is shaped like a square on two squares, just like the character "pin" in Chinese characters, mixed between plants or rows.
生态经济林地 Plantation forest	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,株行距 3 m×4 m。 The low-altitude platform dams and ditch palms are mainly apricots for meat, and a small amount of apples and pears are planted, with a row spacing of 3 m×4 m.
天然封育草地 Naturally restored grassland	以低矮草本植被为主,无乔木和灌木,杜绝人为干扰和家畜采食,以达到自然恢复。 It is dominated by low herbaceous vegetation and no trees and shrubs. It eliminates human disturbance and livestock feeding to achieve natural recovery.
水平农田地 Level terraced field	以水平梯田为主要形式,田面宽度为 8~15 m,田坎高度为 $1.0~2.5$ m,主要种植玉米、马铃薯等作物。 With horizontal terraces as the main form, the width of the field is 8 — 15 m, and the height of the field ridge is $1.0 - 2.5$ m. The main crops are corn and potato.

### 1.3 研究方法

广义可加模型(GAM)是广义线性模型的半参数扩展<sup>[23]</sup>,无需定义参数模型。该模型具有以下优点:(1)不受函数驱动,按数据结构对数据拟合,更具灵活性;(2)无需定义回归参数,可自动选择;(3)相对于广义线性模型(GLM)等其他模型,GAM模拟精度更高;(4)更容易发现数据中的线性关系,并可以处理一个响应变量与多个解释变量之间的非线性关系。假设函数是相加的,且函数的组成成分是光滑函数(smooth functions),其基本模型如下<sup>[24-25]</sup>:

 $g(E_Y) = a_0 + f_1(X_1) + \dots + f_n(X_n) + \varepsilon_o(1)$ 式中: $g(\dots)$ 是连接函数;Y是收集地表甲虫种群数 量, $E_Y$ 是Y的期望值; $a_0$ 是截矩;在 $f_n(X_n)$ 项中,  $X_1, \dots, X_n$ 分别为各环境因子, $f_n(\dots)$ 是解释变量  $X_n$ 的单变量函数; $\varepsilon$ 为随机变量。通常使用光滑样 条函数(smoothing spline function)拟合,因子的重 要性可以通过平滑函数的自由度来简单判断:自由 度高表明因子重要性高。本研究分析在 R 软件的 mgcv 包支持下和 Arcgis10.5 中完成。

### 1.4 数据处理

1.4.1 地形因子 利用 ArcGIS 数字化 1:10 000 地形图,获得研究区 DEM 数据(分辨率为 5 m),分 析提取研究区海拔、坡度和坡向,用于地表甲虫物种 空间分布的相关性分析。其中坡向和坡度采用 3 次 有限差分方法<sup>[26]</sup>计算得到,坡向的组别以国际划分 法确定。根据国家水土保持技术通则将坡度划分为 6 个等级<sup>[27]</sup>。考虑到研究区相对高差不大,因此按 照 50 m 间隔将流域划分为 5 个高程区。根据样地 地形特征,将海拔、坡度、坡向作为模型的预测变量。 1.4.2 土壤水分数据 由于土壤含水量受降雨事 件影响较大,本研究选择 5~7 d 连续无降雨时段取 样,以每个样点中央陷阱器为中心,在直径 2 m 的范 围内用土钻取得 0~30 cm 土壤,带回实验室采用烘 干法测得。

field 总计

Total 比例/% Ratio

Level terraced

#### 结果与分析 2

#### 2.1 黄土丘陵区地表甲虫种群数量及空间分布

本次采样共捕获甲虫标本共5347个,分属于 11 科 60 余种, 地表甲虫种群数量见表 2。由表 2 可 知,步甲科(Carabidae)昆虫在高建堡流域内属于广 布种和优势种,共收集到3844个样本,占地表甲虫 总数的71.90%,因此其适合作为分析地表甲虫与 环境因子关系的研究对象:其次为金龟科(Scarabaeidae)和虎甲科(Cicindelidae),所占比例分别为 13.62%和8.64%。

由表2还可知,在高建堡小流域的6种典型生 境中,灌草混交林地、乔灌混交林地和生态薪炭林地 是地表甲虫生存、栖息的较佳生境,地表甲虫个体数 量分布较多;其他生境地表甲虫种群数量排序依次 为水平农田地>生态经济林地>天然封育草地。由 此可知,不同生境地表甲虫种群分布存在很大的差 异性。步甲科(Carabidae)昆虫在生态薪炭林地分 布最多,其次为乔灌混交林地,灌草混交林地、生态 经济林地和水平农田地中的数量相近,天然封育草 地最少:金龟科(Scarabaeidae)甲虫主要分布于灌草 混交林地和乔灌混交林地:虎甲科(Cicindelidae)昆 中在乔灌混交林地、天然封育草地和灌草混交林地 中分布较多;其他科类地表甲虫个体数量较少,在6 种生境中的分布无明显规律。

——————————————————————————————————————
--

植物群落类型 Plant community type	步甲科 Carabi- dae	金龟科 Scarabaei- dae	虎甲科 Cicindeli- dae	拟步甲科 Tenebrioni- dae	象甲科 Curculio- nidae	芫菁科 Meloidae	鳃金龟科 Melolon- thidae	粪金龟科 Geotrupidae Latreille	埋葬甲科 Silphidae Latreille	瓢虫科 Coccin- ellidae	叩甲科 Elater idae
灌草混交林地 Shrub/grass mixed forest	688	372	87	14	11	12	5	0	5	11	2
乔灌混交林地 Tree/shrub mix forest	770	116	140	33	17	6	4	0	8	11	0
生态薪炭林地 Fuel-wood forest	971	23	44	10	1	4	5	5	4	5	2
生态经济林地 Plantation forest	656	70	23	1	0	0	0	0	0	4	0
天然封育草地 Naturally restored grassland 水平农田地	135	59	116	63	33	14	1	0	2	5	0

0

62

1.16

8

129

2.42

Table 2 Surface beetles quantity in the Loess Hilly Region in Ningxia

#### 黄土丘陵区环境因子的 t 检验 2.2

71.90

625

3 844

环境因子能否作为解释变量,首先需要对环境 因子进行 t 检验,确定它们之间是否存在共线性相 关。经t检验后,如果两个因子之间的 Pearson 相 关系数 R < 0.5,说明两个因子间不存在共线性相

88

728

13.62

52

462

8.64

关,因此这两个因子均可作为解释变量。黄土丘陵 区宁夏高建堡流域环境因子的 t 检验结果如表 3 所 示。由表 3 可知,本研究所选环境因子间的 Pearson 相关系数 R 均小于 0.5,说明所选环境因子均可以 作为解释变量,可全部纳入模型。

0

19

0.36

表 3 黄土丘陵区宁夏高建堡流域环境因子 t 检验结果

Table 3 t test results of environmental factors in the Loess Hilly Region in Ningxia

1

15

0.29

0

5

0.09

0

36

0.67

环境因子 Environmental factor	Pearson 相关系数(R) Pearson correlation coefficient	环境因子 Environmental factors	Pearson 相关系数(R) Pearson correlation coefficient
海拔一坡度 Height-Slope	<0.001	坡度一坡向 Slope—Aspect	0.144
海拔一坡向 Height—Aspect	0.116	坡度-土壤水分 Slope-SWC	<0.001
海拔-土壤水分 Height-SWC	<0.001	坡向一土壤水分 Aspect-SWC	<0.001

甲科

0

5

0.09

7

42

0.78

总计

Total

1 206

1 105

1 072

753

430

782

5 347

100

### 2.3 GAM 计算结果

通过对比不同解释变量组成函数的 GAM 结 果,选取模型方差解释量最大、广义交叉验证值最 小、F 检验概率值(P)精度最高的模型作为最优模 型。一般情况下,当F 检验概率值P<0.05,表明解 释变量对响应变量影响显著;如果调整拟合系数 (R<sup>2</sup>)大于 0.5,说明模型具有良好的稳定性,易于解 释响应变量与解释变量之间关系。由表4可知,本研 究所涉及环境因子均对步甲科甲虫分布有显著影响。

选取黄土丘陵区对地表甲虫生境影响最直接的 地形因子(海拔、坡度、坡向)和土壤水分因子作为解 释变量,利用 GAM 分析和获取其相关性,结果显 示,地表步甲科昆虫种群的个体数量与海拔、坡度、 坡向、土壤水分均显著相关(表 4)。

### 表 4 基于不同环境因子的黄土丘陵区宁夏高建堡小流域地表步甲科甲虫生境的 GAM 运行结果

Table 4 GAM results for surface beetle habitat in the Gaojianbao watershed of Ningxia in the Loess Hilly

Region based on	different	environmental	factors
-----------------	-----------	---------------	---------

环境因子 Environmental factor	自由度 Degree of freedom	F 检验概率值(P) F test probability value	调整拟合系数(R <sup>2</sup> ) Adjust the fit factor	广义交叉验 证值(GCV) Generalized cross- validation value	模型方差 解释量/% Deviance explained
海拔 Height	8.962	<0.001	0.207	216.05	23.10
坡度 Slope	8.805	<0.001	0.069	254.22	9.54
坡向 Aspect	8.424	<0.001	0.056	257.19	8.03
土壤水分 SWC	7.931	<0.001	0.455	147.07	46.80
海拔+坡度 Height+Slope	8.958	<0.001	0.339	185.2	37.30
海拔+坡向 Height+Aspect	8.770	<0.001	0.272	202.99	30.70
海拔+土壤水分 Height+SWC	8.808	<0.001	0.508	136.22	53.20
坡度+坡向 Slope+Aspect	8.705	<0.001	0.132	243.39	17.80
坡度+土壤水分 Slope+SWC	7.727	<0.05	0.496	144.77	48.60
坡向十土壤水分 Aspect+SWC	7.986	<0.05	0.472	145.73	49.60
海拔+坡度+坡向 Height+Slope+Aspect	8.866	<0.001	0.383	174.24	42.00
海拔+坡度+土壤水分 Height+Slope+SWC	8.827	<0.001	0.553	124.47	57.60
坡度+坡向+土壤水分 Slope+Aspect+SWC	8.246	<0.05	0.497	140.73	52.60
海拔+坡度+坡向+土壤水分 Height+Slope+Aspect+SWC	7.580	<0.001	0.573	121.18	60.20

黄土丘陵区宁夏高建堡流域步甲科甲虫种群个 体数量与环境因子的关系如图 1 所示。由图 1-A 可 知,步甲科昆虫种群的个体数量与海拔总体呈非线 性正相关(F=9.449, P < 0.001)。在海拔分别为 1 650~1 680,1 700~1 720,1 750~1 780,1 820~ 1 850 m 区域,步甲科甲虫群落个体数量与海拔之 间主要呈正相关;在海拔 1 680~1 700和 1 780~ 1 820 m 区域,二者之间主要呈负相关。

由图 1-B 可知,步甲科昆虫种群的个体数量与 坡度总体呈非线性负相关(F=3.144,P<0.001)。 在坡度为5°~8°,12°~15°和 19°~23°区域内,二者 之间主要呈正相关;在坡度为 8°~12°、15°~19°和 23°~26°区域,二者之间主要呈负相关。

由图 1-C 可知,步甲科昆虫种群的个体数量与 坡向总体呈现"w"形(F=2.459,P<0.001)。在坡 向 0°~50°和 155°~225°呈负相关;在坡向 51°~ 154°和 226°~360°呈正相关。

由图 1-D 可知,步甲科昆虫种群的个体数量与

土壤水分总体呈非线性正相关(F=31.62,P<0.001)。土壤含水量在10%~25%区域,二者之间 呈负相关;在土壤含水量为25%~45%区域,二者 之间呈正相关。

## 3 讨 论

### 3.1 不同生境地表甲虫个体数量差异

栖息地的环境因子对地表甲虫的生存、繁衍、个体组成和分布规律有很大的影响,鉴于地表甲虫物种对环境因子有趋向性,故其数量能够作为生物学指标在环境监测中应用<sup>[28]</sup>。本研究结果显示,高建堡小流域地表甲虫群落的总体特点为:类群分布不均匀,多样性低,优势度高,且不同生境差异显著,其中步甲科甲虫的种类和数量在流域内占据绝对优势,属于广布种和优势种;其次为金龟科,这与前人在华北地区<sup>[29-30]</sup>、西北荒漠地区<sup>[31]</sup>和南方地区<sup>[32-33]</sup>的研究结果不一致,可能是不同区域地理位置和地表甲虫栖息环境存在差异所致。



纵坐标为各自变量(环境因子)非线性解释函数中的残差值。曲线的峰值表示自变量与因变量间的相关性, 阴影代表样本数量

The ordinate is the residual value in the nonlinear interpretation function of the respective variable (environmental factor). The peaks and troughs of the curve represent the positive and negative correlations between independent and dependent

variables, respectively, and the shade represents the number of samples

图 1 黄土丘陵区宁夏高建堡流域步甲科甲虫种群个体数量与环境因子的关系

Fig. 1 Nonlinear relationship between number of carabid beetles and environmental factors in

the Loess Hilly Region in Ningxia

### 3.2 环境因子对地表甲虫种群的影响

本研究所选取的坡度、坡向、海拔和土壤水分均 对步甲科甲虫数量有显著影响,其中地表步甲科昆 虫种群数量与海拔、土壤水分总体呈现非线性正相 关,说明土壤水分对步甲科甲虫空间分布造成的影 响最大,直接影响其生境。已有研究表明,不同生境 内土壤含水量与甲虫群落特征值具有较高的相关 性,其是影响地表甲虫物种丰富度的关键因 子<sup>[31,34-35]</sup>,这与本研究结论一致。也有学者对不同 研究区土壤含水量与地表甲虫的关系进行研究,结 果却不尽相同<sup>[30,36-37]</sup>,这说明昆虫物种多样性随环 境的变化在不同地区、不同尺度、不同生态系统类型 等的结果存在差异,其具体机制有待进一步研究。

本研究中,步甲科甲虫的个体数量与坡度总体 呈现非线性负相关,且相关性较弱。当坡度大于 25° 时地表甲虫与坡度之间基本保持稳定负相关,说明 在坡度小于 25°区域适宜地表甲虫生存和繁衍。本 研究中由于不同生境冠层盖度和草本盖度不同,直 接改变地表甲虫栖息环境的光热湿等条件,且地表 步甲科昆虫多在阴湿地表生存,因此其种群的个体 数量随坡向变化总体呈现"w"形。地表步甲科昆虫 种群的个体数量与海拔总体呈现非线性正相关,但 海拔是决定地表甲虫栖息环境的直接因素,它影响 区域内土壤含水量、温度等因子,进而影响地表甲虫 空间分布和个体数量特征。

## 4 结 论

在研究区 6 种典型生境中,灌草混交林地是地 表甲虫生存、栖息的最佳生境,步甲科甲虫在流域内 属于广布种和优势种。研究所选取的 4 个环境因子 对地表步甲科昆虫种群数量都具有显著的相关性, 且不同环境因子对地表甲虫数量和空间分布影响存 在明显差异。其中,土壤水分对地表甲虫空间分布 影响最大,但海拔是决定地表甲虫栖息环境的直接 因素。

### [参考文献]

[1] 张景慧,黄永梅.生物多样性与稳定性机制研究进展[J].生态
 学报,2016,36(13):3859-3870.

Zhang J H, Huang Y M. Biodiversity and stability mechanisms: understanding and future research [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016,36(13):3859-3870.

- [2] Dennis P, Young M R, Howard C L, et al. The response of epigeal beetles (Coleoptera: Carabidae, Staphylinidae) to varied grazing regimes on upland Nardus stricta grasslands [J]. The Journal of Applied Ecology, 1997, 34: 433-443.
- [3] Kruess A, Tscharntke T. Contrasting responses of plant and insect diversity to variation in grazing intensity [J]. Biological Conservation, 2002, 106:293-302.
- [4] 欧阳芳, 戈 峰. 农田景观格局变化对昆虫的生态学效应 [J].
   应用昆虫学报,2011,48(5):1177-1183.
   Ouyang F, Ge F. Effects of agricultural landscape patterns on insects [J]. Chinese Journal of Applied Entomology, 2011,48 (5):1177-1183.
- [5] 戈 蜂.害虫区域性生态调控的理论、方法及实践[J].昆虫知 识,2001,38(5):337-341.
   Ge F. The principles, methods and practices of regional ecological regulation and management of pests [J]. Chinese Journal of

Applied Entomology,2001,38(5):337-341.
[6] 赵紫华,石 云,贺达汉,等.不同农业景观结构对麦蚜种群动态的影响 [J].生态学报,2010,30(23):6380-6388.
Zhao Z H,Shi Y,He D H,et al. Population dynamics of wheat aphids in different agricultural landscapes [J]. Acta Ecologica Sinica,2010,30(23):6380-6388.

- [7] Lassau S A, Hochuli D F, Cassis G, et al. Effects of habitats complexity on forest beetle diversity: do functional groups respond consistently? [J]. Diversity and Distributions, 2005, 11: 73-82.
- [8] Kubota K, Lee C Y, Kim J K, et al. 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 [C]//Japan Forestry Culture Association, Review of Forestry Culture. Tokyo: Japan Forestry Culture Association, 2000:137-146.
- [9] Sroka K, Finch O D. Ground beetle diversity in ancient woodland remnants in north-western Germany (Coleoptera: Carabidae) [J]. Journal of Insect Conservation, 2006, 10:335-350.
- [10] Austin M P. Searching for a model for use in vegetationanalysis [J]. Vegetatio, 1980, 42:11-21.
- [11] 张荣祖. 我国动物地理学研究的前景--方法论探讨 [J]. 动物 学报,1995,41(1):21-26.

Zhang R Z. The prospective of zoogeographical study in China-a discussion on methodology [J]. Acta Zoologica Sinica, 1995,41(1):21-26.

[12] 倪绍祥, 巩爱歧, 王薇娟. 环青海湖地区草地蝗虫发生的生态 环境条件分析 [J]. 农村生态环境, 2000, 16(1): 5-8. Ni S X,Gong A Q,Wang W J. Ecological environment for incidence of grasshoppers in the Qinghai Lake Region [J]. Rural Eco-Environment,2000,16(1):5-8.

- [13] 孙 涛,龙瑞军,刘志云. 祁连山北麓四种天然草地蝗虫物种 多样性比较研究 [J]. 昆虫学报,2010,53(6):702-707.
   Sun T,Long R J,Liu Z Y. A comparative study of grasshopper species (Orthoptera: Acridoidea) diversity in different grasslands in the northern slopes of Qilian Mountains [J]. Acta Entomologica Sinica,2010,53(6):702-707.
- [14] 温仲明,赫晓慧,焦 峰,等. 延河流域本氏针芽(Stipa bungeana)分布预测:广义相加模型及其应用[J]. 生态学报, 2008,28(1):192-201.
  Wen Z M, Hao X H, Jiao F, et al. The predictive distribution of Stipa bungeana in Yanhe River catchment: GAM model and its application [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(1):
- [15] 沈泽昊,赵 俊.基于植物-地形关系的物种丰富度空间格局 预测:GAMs途径的一种应用[J].生态学报,2007,27(3): 953-963.

192-201.

Shen Z H,Zhao J. Prediction of the spatial patterns of species richness based on the plant- topography relationship: an application of GAMs approach [J]. Acta Ecologica Sinica,2007,27 (3):953-963.

[16] 李丽丽,赵成章,殷翠琴,等.黑河上游天然草地蝗虫密度与地 形关系的 GAM 分析 [J]. 生态学杂志,2012,31(12):3121-3127.

Li L L,Zhao C Z,Yin C Q, et al. Grasshopper (Orthoptera: Acrididae) density on natural grasslands in upper reaches of Heihe River,Northwest China in relation with topography:an analysis with generalized additive models (GAM) [J]. Chinese Journal of Ecology,2012,31(12):3121-3127.

[17] 牛明香,李显森,徐玉成.基于广义可加模型的时空和环境因 子对东南太平洋智利竹筴鱼渔场的影响 [J].应用生态学报, 2010,21(4):1049-1055.

Niu M X, Li X S, Xu Y C. Effects of spatiotemporal and environmental factors on the fishing ground of *Trachurus murphyi* in Southeast Pacific Ocean based on generalized additive model [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(4): 1049-1055.

[18] 邓建明,秦伯强,王博雯. 广义可加模型在 R 中的快捷实现及 蓝藻水华预测分析中的应用 [J]. 生态学杂志, 2015, 34(3): 835-842.

Deng J M, Qin B Q, Wang B W. Quick implementing of generalized additive models using R and its application in bluegreen algal bloom forecasting [J]. Chinese Journal of Ecology, 2015,34(3):835-842.

[19] 陈 瑶,胥 晓,张德然,等.四川龙门山西北部植被分布与地 形因子的相关性 [J]. 生态学杂志,2006,25(9):1052-1055. Chen Y,Xu X,Zhang D R,et al. Correlations between vegetation distribution and topographical factors in the northwest of Longmen Mountain,Sichuan Province [J]. Chinese Journal of Ecology,2006,25(9):1052-1055.

- [20] 杭 佳,石 云,刘文惠,等. 宁夏黄土丘陵区不同生态恢复生境地表甲虫多样性[J]. 生物多样性,2014,22(4):516-524.
  Hang J,Shi Y,Liu W H,et al. Diversity of ground-dwelling beetles (Coleoptera) in restored habitats in the hill and gully area of Loess Plateau,Ningxia Hui Autonomous Region [J].
  Biodiversity Science,2014,22(4):516-524.
- [21] Baars M A. Catches in pitfall traps in relation to mean densities of carabid beetles [J]. Oecologia, 1979, 41:25-46.
- [22] 许洪军,于立忠,黄选瑞,等. 辽东山区次生林与人工林大型地 表节肢动物多样性 [J]. 生态学杂志,2015,34(3):727-735.
  Xu H J, Yu L Z, Huang X R, et al. Biodiversity of macro ground-dwelling arthropods in secondary forests and plantation forests of montane region of eastern Liaoning Province [J]. Chinese Journal of Ecology,2015,34(3):727-735.
- [23] Hastie T J, Tibshirani R J. Generalized additive models [M]. BocaRaton:CRC Press, 1990.
- [24] Anderson-Cook C M. Generalized additive models: an introduction with R [J]. Publications of the American Statistical Association, 2007, 102(478):760-761.
- [25] 欧阳芳, 之 峰. 基于广义可加模型的昆虫种群动态非线性分析及R语言实现[J]. 应用昆虫学报, 2013, 50(4): 1170-1177.

Ouyang F, Ge F. Nonlinear analysis of insect population dynamics based on generalized additive models and statistical computing using R [J]. Chinese Journal of Applied Entomology,2013,50(4):1170-1177.

- [26] Skidmore A K. A comparison of techniques for calculating gradient and aspect from a gridded digital elevation model [J]. International Journal of Geographical Information Science, 1989,3:323-334.
- [27] 耿 莎,石 云.黄土丘陵区小流域景观格局与生态恢复措施 和地形因子耦合关系研究 [J].生态与农村环境学报,2015, 31(2):197-203.
   Geng S,Shi Y. Coupling relationships of terrain factors with landscape pattern and ecological restoration measures in small

landscape pattern and ecological restoration measures in small watershed in Loess Hilly-Gully Region [J]. Journal of Ecology and Rural Environment,2015,31(2).197-203.

- [28] 张大治,贺达汉,于有志,等. 宁夏白芨滩国家级自然保护区地表甲虫群落多样性[J]. 动物学研究,2008,29(5):569-576.
  Zhang DZ,He DH,Yu YZ,et al. Community diversity of litter-layer beetles in the Baijitan National Nature Reserve of Ningxia [J]. Zoological Research,2008,29(5):569-576.
- [29] 于晓东,罗天宏,周红章.东灵山地区地表甲虫群落组成及季 节变化 [J]. 昆虫学报,2002,45(6):785-793. Yu X D, Luo T H, Zhou H Z. Composition and seasonal dy-

namics of litter-layer beetle community in the Dongling Mountain Region, North China [J]. Acta Entomologica Sinica,2002,45(6):785-793.

- [30] 王 玉,高光彩,付必谦.北京野鸭湖湿地地表甲虫群落组成 与空间分布格局 [J].生物多样性,2009,17(1):30-42.
  Wang Y,Gao G C,Fu B Q. Composition and spatial distribution pattern of ground-dwelling beetle communities in Yeyahu Wetland, Beijing [J]. Biodiversity Science, 2009, 17(1): 30-42.
- [31] 娄巧哲,徐养诚,马吉宏,等.古尔班通古特沙漠南缘地表甲虫物种多样性及其与环境的关系 [J]. 生物多样性,2011,19 (4):441-452.
  Lou Q Z,Xu Y C,Ma J H,et al. Diversity of ground-dwelling beetles within the southern Gurbantunggut Desert and its re-

lationship with environmental factors [J]. Biodiversity Science,2011,19(4):441-452.

- [32] 于晓东,罗天宏,周红章.四川蜂桶寨国家自然保护区地表甲 虫物种多样性[J].昆虫学报,2003,46(5):609-616.
  Yu X D,Luo T H,Zhou H Z. Species diversity of litter-layer beetles in the Fengtongzhai National Nature Reserve,Sichuan Province [J]. Acta Entomologica Sinica, 2003,46(5):609-616.
- [33] 于晓东,罗天宏,周红章. 横断山区东部四种林型地表甲虫的物种多样性[J]. 动物学研究,2004,25(1):7-14.
  Yu X D,Luo T H,Zhou H Z. Species diversity of litter-layer beetles in four forest types in Eastern Hengduan Mountain Region [J]. Zoological Research,2004,25(1):7-14.
- [34] Jankielsohn A, Scholtz C H, Louw S V D M. Effect of habitat transformation on dung beetle assemblages: a comparison between a South African nature reserve and neighboring farms [J]. Environmental Entomology, 2001, 30, 474-483.
- [35] Irmler U. Hoernes U. Assignment and evaluation of ground beetle (Coleoptera:Carabidae) assemblages to sites on different scales in a grassland landscape [J]. Biodiversity and Conservation, 2003, 12, 1405-1419.
- [36] Boscaini A, Franceschini A, Maiolini B. River ecotones: carabid beetles as a tool for quality assessment [J]. Hydrobiologia,2000,422/423:173-181.
- [37] 杨贵军,贺 奇,王新谱.盐池四墩子拟步甲昆虫群落组成与 环境因子的相关性[J].应用生态学报,2010,21(9):2375-2382.

Yang G J, He Q, Wang X P. Darkling beetle community structure and its relations with environmental factors in Sidunzi of Yanchi, Ningxia, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(9): 2375-2382.