

# 岷江上游山地牧道与锥花小檗种群特征的关系\*

刘金鑫 官渊波\*\* 郑江坤 张兴华 姜广争 岳艳杰 左 琴 刘 牧

(四川农业大学林学院长江上游林业生态工程四川省重点实验室, 四川雅安 625014)

**摘 要** 以干旱河谷/山地森林交错带的锥花小檗灌丛为对象,采用跟踪放牧和野外调查的方法获取家畜生境利用和牧道分布特征,并使用 RDA 排序筛选出影响牧道分布的主要因子,探讨牧道特征与锥花小檗盖度、大小级和分布格局的关系.结果表明:牧道分布能够直观反映家畜的生境利用特点,并与跟踪放牧结果一致;5 m 尺度的 Morisita 指数能客观地反映牧道的分布类型,样地 1、2 和 6 呈集群分布,其他样地呈均匀分布;在坡面尺度上,灌丛盖度、灌丛高度与牧道特征呈负相关,为显著影响因子;锥花小檗种群盖度和牧道面积呈显著负相关;种群结构与牧道分布密切相关,锥花小檗灌木长轴和短轴比平均为 1.29,灌木形状趋近于圆形,牧道景观及牧道上的放牧家畜对灌木具有塑形作用;锥花小檗种群和牧道 Morisita 指数指向性一致,但实际上两者呈反向分布,灌木斑块或集聚或均匀分布于偏离牧道的区域.

**关键词** 牧道 锥花小檗 RDA 排序 空间分布 山地

**文章编号** 1001-9332(2013)01-0063-08 **中图分类号** Q142.4; S812.8 **文献标识码** A

**Relationships between grazing-path and *Berberis aggregate* population characteristics in upper reaches of Minjiang River, Southwest China.** LIU Jin-xin, GONG Yuan-bo, ZHENG Jiang-kun, ZHANG Xing-hua, JIANG Guang-zheng, YUE Yan-jie, ZUO Qin, LIU Mu (Sichuan Province Key Laboratory of Forestry Ecological Engineering in the Upper Reaches of Yangtze River, College of Forestry, Sichuan Agricultural University, Ya'an 625014, Sichuan, China). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2013, 24(1): 63-70.

**Abstract:** Taking the *Berberis aggregate* shrubs in the ecotone of dry valley and montane forests in upper reaches of Minjiang River as study objects, and by the methods of tracking grazing and field survey, this paper studied the characteristics of habitat utilization by livestock and the features of grazing-path. The major factors affecting the features of grazing-path were screened by redundancy analysis (RDA), and the relationships of the grazing-path features with the coverage, size class, and distribution pattern of the shrubs were analyzed. It was shown that the distribution pattern of the grazing-path could intuitively reflect the characteristics of the habitat utilization by livestock, being in accordance with the results of tracking grazing. The Morisita index at 5 m scale could objectively reflect the distribution type of the grazing-path. Sample plots 1, 2 and 6 presented a contagious distribution of grazing-path, while the other plots showed regular distribution. In slope scale, the coverage and height of the shrubs were the notable affecting factors, which had negative correlations with the grazing-path features. There was a significant negative correlation between the coverage of *B. aggregate* population and the area of grazing-path. The population structure of *B. aggregate* had a close correlation with the distribution of grazing-path. The ratio of the long axis to short axis of the shrubs was averagely 1.29, and the shape of the shrubs approached to round. It was considered that the grazing-path landscape and the livestock on the grazing-paths had the function of reconstructing the shape of the shrubs. The directionality of the population pattern of *B. aggregate* was generally in line with the distribution type of grazing-path, but actually, they were opposite in distribution. The patches of the shrubs were in aggregated or uniform distribution in the areas deviated from the grazing-path.

**Key words:** grazing-path; *Berberis aggregate*; redundancy analysis; spatial distribution; montane.

\* “十一五”国家科技支撑计划项目(2006BAC01A11)、“十二五”国家科技支撑计划项目(2011BAC09B05)和四川农业大学 211 工程创新团队项目资助.

\*\* 通讯作者. E-mail: gyb@sicau.edu.cn

2012-05-04 收稿, 2012-10-29 接受.

目前,山地游牧/半游牧、混农季节性牧业等游动型放牧依然是全世界山地畜牧业的重要生产方式,多表现为畜群水平或垂直的空间移动<sup>[1]</sup>. 家畜的空间分配是放牧管理的重要内容,尤其在干旱、半干旱灌丛草地,适时调整家畜数量和放牧空间分配格局对维持生态系统健康具有重要作用<sup>[2-4]</sup>. 牧道是指家畜空间移动的固定路线、采食路迹、游走小径等<sup>[5]</sup>,表现为植被消退和土壤裸露,可以辅助判断家畜采食策略和放牧格局<sup>[6-8]</sup>,因此被用来研究家畜采食的行为轨迹和空间移动特点<sup>[3,9-10]</sup>. 从家畜行为特点和移动规律来看,采食行为沿着牧道及路径延伸扩展,采食和践踏压力具有由放牧路径向两边递减的规律<sup>[11]</sup>,排泄物也有沿着路径分布的特点<sup>[5]</sup>;从牧道及放牧路径来看,其属于线状景观和微地形地貌,具有廊道功能、斑块效应和环境效应<sup>[5]</sup>. 另外,家畜路径也是衡量放牧强度和家畜-植被层面互作效应的重要指标<sup>[8-9]</sup>. 因此,牧道可以直观地反映家畜的游走路线、频率、选择性采食机制,以及放牧策略和空间分配,其特征和分布规律可以为家畜行为研究、放牧管理和植被保护服务.

牧道是家畜不断选择后的“最优捷径”,坡度等地形因子和植被斑块是影响其形成的重要因素<sup>[5,12]</sup>. 在山地生态系统中,中生和旱生灌丛适口性较差,多呈团块性分布,对家畜的采食和游走限制很大. 家畜通过空间记忆能力躲避不利于采食的斑块,趋向喜食斑块<sup>[13]</sup>. 尤其是多刺类灌木的抗牧性较强,其枝刺或叶刺可以损伤家畜的口和消化系统,对家畜是一种警戒信号. 因此,山地多刺灌丛草地内的家畜牧道在较小尺度内具有一定的规律性,有关研究有助于揭示牧道和植被的相关规律,丰富放牧生态学的研究内容.

岷江上游山地是以干旱河谷为基带的山地生态系统<sup>[14]</sup>,锥花小檗(*Berberis aggregate*)灌丛集中分布于干旱河谷上部及向山地森林过渡的地带,而这一区域恰是生态脆弱带和抑制干旱区上延、促进山地森林下推的重点区域<sup>[15]</sup>. 锥花小檗灌木的分蘖能力强,枝条致密且多刺,具有较强的耐牧性和抗牧性,对家畜放牧行为响应敏感,是探讨家畜行为规律与植被互作关系的良好对象. 小檗属植物有较高的药用和食用价值<sup>[16]</sup>,是干旱河谷水土保持和生态修复的优良乡土物种,具有较高的生态保护和利用价值. 为此,本研究选择岷江上游干旱河谷/山地森林交错的锥花小檗灌丛为研究对象,将牧道作为独立景观,筛选影响牧道特征的影响因素,分析牧道与锥

花小檗灌木,以及家畜的采食行为、牧道、植被之间的相关性,旨在揭示家畜在多刺灌木中的行为特点,为调整家畜空间分配和科学的放牧管理提供依据,也为灌丛保育及生态系统管理提供参考.

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于四川省理县岷江流域杂谷脑河支流的甘堡乡熊耳山(31°31'6"—31°32'10" N, 103°12'25"—103°13'36" E),属于高山峡谷区,平均海拔2700 m. 该区具有明显的干旱河谷气候特征,干湿季明显、日温差大,垂直气候带明显,年均温6~9℃,年降雨量400~600 mm,年蒸发量739.3~1656.7 mm. 土壤以旱生灌木草丛植被下发育的山地燥褐土为主,土壤pH 7.4~8.4. 基带植被以旱生丘状半灌矮草植被类型为主,从下至上依次为干旱河谷灌丛、常绿落叶与落叶阔叶混交林、亚高山针叶林、高山灌丛草甸.

沿山地阳坡进行踏勘,天然次生林下缘位于海拔2800 m左右,干旱河谷典型植被白刺花(*Sophora davidii*)灌丛集中分布的上限位于2450 m左右,中间区域为干旱河谷/山地森林交错带及缓冲区域,锥花小檗分布于此处. 锥花小檗在坡面下端与白刺花形成共优群落,在坡面上端与沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、蔷薇(*Rosa sericea*)形成共优群落. 锥花小檗单优势群落位于2500~2700 m,其间偶见胡颓子(*Elaeagnus pungens*)、小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)、小叶栒子(*Cotoneaster microphyllus*)等灌木;草本层主要有黄花蒿(*Artemisia annua*)、柔毛委陵菜(*Potentilla griffithii*)、牛至(*Origanum vulgare*)、倒提壶(*Cynoglossum amabile*)、车前(*Plantago asiatica*)、苜蓿(*Medicago sativa*)、甘肃棘豆(*Oxytropis kansuensis*)、防风(*Saposhnikovia divaricata*),以及各种禾草、苔草等.

### 1.2 野外调查

样地所在山坡呈现出若干小坡面阶梯状排列的梯田状景观. 锥花小檗单优势种群落分布于14个小坡面上,自下向上选择生境相对均一的6个小坡面作为样地. 样地内的牧道连贯,为家畜爬坡和游走采食路线,牧道错综复杂,密度较大,呈现网状、平行状、放射状等不同分布特点. 采用布设样条的方法<sup>[17-18]</sup>进行调查. 根据微地形特点,在每个样地内平行设置3条间隔5 m的样条,每个样条划分为5个2 m×2 m的连续样方. 测量样条中每个样方截取

的牧道的宽度、长度、面积和中心点位置;调查样方内锥花小檗的高度( $H$ )、盖度、丛数,测量每丛灌木的冠幅长轴( $a$ )和短轴( $b$ ),计算灌木体积( $V$ )<sup>[19]</sup>: $V=abH$ .同时,计算牧道密度( $D$ ): $D$ =样条截获牧道宽度总和/样条长度<sup>[17]</sup>.将3条样条牧道密度的平均值作为样地牧道密度的估计值.记录样地的海拔、坡度、坡向、坡位,由于坡向、坡位差异不大,不计入本次研究范围,只用于样地描述.根据可食部分比例估测食物丰富度,将食物丰富度分为低、中、高三级,分别赋值1(可食部分<30%)、2(可食部分在30%~70%)、3(可食部分>70%).样地基本情况见表1.

试验区内放牧家畜类型以绵羊为主,黄牛、牦牛较少;绵羊为自由放牧,黄牛和牦牛为定点放牧.为了验证牧道对家畜采食行为的反应效果,选择一个牧户进行跟踪放牧和调查访问.该牧户共饲养绵羊64只,其中幼羊9只.观察家畜对样地的使用,特别是在3条样条位置的游走和采食情况.受山地地形限制,训练试验羊和精确记录家畜采食行为的时间和频率较为困难,只能根据观察结果和调查访问给出描述性的判断.

1.3 RDA 排序

根据除趋势对应分析(detrended correspondence analysis, DCA)排序轴梯度的长度决定排序方法,本文使用冗余度分析(redundancy analysis, RDA)判断牧道分异与环境因子的关系.将样地内牧道特征指标设为响应变量,包括90个样方的牧道长度、牧道宽度和牧道的中心位点的实测数据;将地形因子和灌木因子综合构建解释变量,变量矩阵包括90个样方的海拔、坡度、灌丛盖度、灌丛平均高度、食物丰富度5个指标.分析之前对数据进行对数转换、中心化

和标准化处理,使用 Monte Carlo(Using 999 permutations)检验判断变量的解释能力,最终生成排序图.

1.4 数据处理

灌木植株个体大小可以指示种群结构特征和对干扰的适应程度.由于锥花小檗的分枝密且多刺,测量地径比较困难,本研究结合种群统计特征,采用体积( $V$ )区分大小级的方法,依据体积的立方根( $d$ )将锥花小檗分为4个等级:I级, $d<60\text{ cm}$ ;II级, $60\text{ cm}\leq d<120\text{ cm}$ ;III级, $120\text{ cm}\leq d<180\text{ cm}$ ;IV级, $d\geq 180\text{ cm}$ <sup>[19]</sup>.

Morisita 指数统计学基础严密,广泛用于种群格局的判定.本文使用 Morisita 指数( $I_\delta$ )判断牧道的分布格局.为了能够直观比较,采用文献[20]的方法分别计算基于样条的牧道和灌木 Morisita 指数,判定分布格局.数据来源于以1 m为区段记录的样条所截牧道数目和灌木丛数,采用相邻区段合并的方法获得2、5和10 m不同区段尺度的 Morisita 指数.计算公式为:

$$I_\delta = q \frac{\sum n(n-1)}{N(N-1)}$$

式中: $q$ 为样地内区段数; $n$ 为各区段中的观测值; $N$ 为样地内所有区段中观测值的总和. $I_\delta<1$ 为均匀分布; $I_\delta=1$ 为随机分布; $I_\delta>1$ 为集群分布.

使用 Excel 2007 对数据进行处理分析,采用 SPSS 17.0 软件计算 Pearson 相关系数和 Biserial 相关系数,使用 CANOCO 4.5 软件进行 DCA 和 RDA 排序并作图.

2 结果与分析

2.1 锥花小檗群落内家畜对生境的利用状况

研究区内整个坡面均分布着锥花小檗优势群落.其中,样地1内的锥花小檗盖度高达90%,其他灌木很少;样地2和样地6内的灌木盖度分别为30%和20%,均为锥花小檗;样地3内牧道的密度最大,灌丛盖度45%,亦全部为锥花小檗;样地4、样地5内的灌丛盖度分别为60%和65%,锥花小檗占绝对优势,其他灌木零星分布.通过跟踪观察家畜在6个样地上的采食行为规律,并结合调查访问,发现整个坡面为绵羊前往高山草甸和灌丛草地的过渡地段,绵羊主要在出牧和归牧过程中对样地进行利用.样地1的灌丛密度最高,主要为放牧过道;样地2和样地6的草本盖度较大,为放牧地,经常被牛选为采食和卧息点;样地3、4、5为家畜途中游走采食点,大群绵羊通常边游走边采食,也有零星的绵羊进行定

表1 样地基本情况  
Table 1 Basic condition of sites

样地号 Site No.	海拔 Altitude (m)	坡向 Aspect	坡度 Slope	坡位 Position
S <sub>1</sub>	2588	南偏西 18° South by west 18°	22°	下 Lower
S <sub>2</sub>	2605	南偏西 55° South by west 55°	11°	下 Lower
S <sub>3</sub>	2619	南偏西 19° South by west 19°	19°	中 Middle
S <sub>4</sub>	2643	南偏西 36° South by west 36°	20°	中 Middle
S <sub>5</sub>	2659	南偏西 58° South by west 58°	14°	上 Upper
S <sub>6</sub>	2692	南偏西 15° South by west 15°	9°	上 Upper



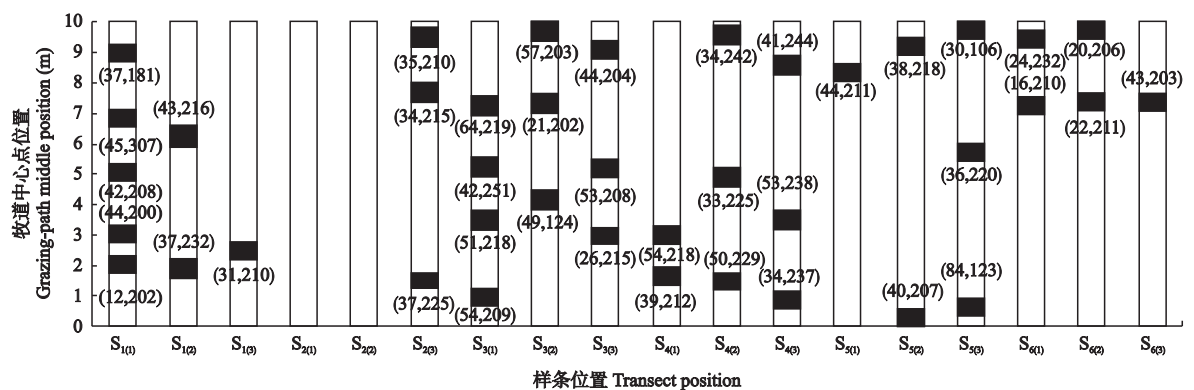


图1 牧道中心点位置示意图  
Fig.1 Sketch of middle positions of grazing-path.

S<sub>1</sub>:样地1 Site 1; S<sub>2</sub>:样地2 Site 2; S<sub>3</sub>:样地3 Site 3; S<sub>4</sub>:样地4 Site 4; S<sub>5</sub>:样地5 Site 5; S<sub>6</sub>:样地6 Site 6. 下同 The same below.

点采食.  
2.2 锥花小檗灌丛内牧道的分布特征

样条的布设和牧道中心点的测量结果能够直观反映家畜的移动特点.由图1可以看出,样地2和样地6牧道的密度较小,且集中于一侧,其中样地2的右侧和样地6的上部为家畜主要游走通道,其他部位为采食或卧息点.样地3和样地4牧道的密度较大,家畜游走和采食遍布整个样地,基本没有成片的采食地点.样地1和样地5牧道相对集中,区域内无牧道处由于被灌丛覆盖,不能被利用.这与家畜的生境利用结果一致.

采用 Morisita 指数 ( $I_{\delta}$ ) 计算不同尺度的牧道(表2)可以发现,在2.5和10 m尺度上牧道分布格局的格局指数指向性并不一致,需要结合跟踪放牧和牧道中心点分布加以分析.样地3和样地4中3种尺度牧道的  $I_{\delta}<1$ ,说明牧道在3种尺度上都是均匀分布.样地2中5和10 m尺度的牧道  $I_{\delta}>1$ ,为集群分布;样地6中5 m尺度的牧道为集群分布,10 m尺度上为均匀分布.由图1可以看出,2个样地的牧道高度集聚,样地2集聚于右侧样段,样地6集聚于上半部分.因此,对于样地2和样地6来说,5 m尺

度是适宜的,10 m尺度在样地6中出现了数理统计上的谬误.类似地,样地1和样地5中5和10 m尺度是适宜的.综合来看,6个样地均可采纳5 m尺度的数据,其他尺度数据可作为参考.5 m尺度上样地1、2和6的牧道呈集群分布,其他为均匀分布,这与跟踪放牧结果相一致.

2.3 锥花小檗灌丛内牧道特征的影响因素  
牧道是家畜与环境长期互作的产物,其形成与异质性环境密切相关,而植被、地形等是其分布的重要影响因素<sup>[12]</sup>.因此,分析牧道与环境因子的关系,筛选主要影响因素,有助于解释牧道在不同生境的分布差异,验证家畜与环境的互作规律.由表3可以看出,第1排序轴与坡度呈显著正相关,与灌丛高度、灌丛盖度呈显著负相关;第2排序轴的相关关系不显著.其中,5个环境因子解释了35.7%的牧道分异,前2轴物种与环境关系累积解释量达到99.9%,表明排序结果的可信度较高(表4).经过 Monte Carlo检验,环境变量解释效果较好的为灌丛

表2 牧道和灌木分布格局的 Morisita 指数  
Table 2 Morisita index of distribution patterns of grazing-path and shrubs

样地 Site	牧道 Grazing-path			灌木 Shrub		
	$I_{\delta 2}$	$I_{\delta 5}$	$I_{\delta 10}$	$I_{\delta 2}$	$I_{\delta 5}$	$I_{\delta 10}$
S <sub>1</sub>	0.77	1.31	1.50	0.74	0.89	0.95
S <sub>2</sub>	0.00	2.00	3.00	1.18	1.06	0.94
S <sub>3</sub>	0.75	0.85	0.98	0.77	0.96	0.98
S <sub>4</sub>	0.67	0.80	0.80	0.83	0.92	0.97
S <sub>5</sub>	1.61	0.86	1.18	0.60	0.91	0.92
S <sub>6</sub>	0.00	1.20	0.60	0.68	1.03	1.00

表3 RDA 排序前2轴与环境因子间的相互关系  
Table 3 Correlation coefficients of environmental factor with the first two axes of RDA

	SPEC Axis 1	SPEC Axis 2	ENVI Axis 1	ENVI Axis 2
SLOP	0.260 *	0.083	0.427 **	0.657 **
ALTI	-0.074	-0.078	-0.122	-0.617 **
SF	0.076	-0.050	0.125	-0.390 **
SH	-0.237 *	0.094	-0.389 **	0.740 **
SC	-0.300 **	0.078	-0.493 **	0.615 **

SLOP:坡度 Slope; ALTI:海拔 Altitude; SF:样地食物丰富度 Site food abundance; SH:灌木高度 Shrub high; SC:灌木盖度 Shrub coverage; PP:牧道位置 Grazing-path position; PL:牧道长度 Grazing-path length; PW:牧道宽度 Grazing-path width. \*  $P<0.05$ ; \*\*  $P<0.01$ . SPEC Axis 1 ~ Axis 2:前2轴的物种信息 Information of species compositions on the first 2 axes; ENVI Axis 1 ~ Axis 2:前两轴的环境信息 Information of environment on the first 2 axes. 下同 The same below.

表 4 RDA 排序的特征值及累积解释量  
Table 4 Eigenvalues and cumulative percentage variance of RDA ordination

排序轴	特征值	种类与环境 因子相关性	物种累 积解释量	物种与环境 关系累积 解释量
Axis	Eigenvalue	Species- environment correlation	Cumulative percentage variance of species data	Cumulative percentage variance of species-environment relation
1	0.356	0.609	35.6	99.8
2	0.001	0.127	35.6	99.9
3	0.000	0.193	35.7	100.0
4	0.611	0.000	96.8	0.0

盖度 ( $P<0.01$ )、坡度 ( $P<0.05$ ) 和灌丛高度 ( $P<0.05$ ), 而海拔 ( $P>0.05$ ) 和食物丰富度 ( $P>0.05$ ) 的贡献程度较差. 综合来看, 灌木因素对牧道特征的影响最大, 地形因素中只有坡度因子有一定的影响.

由图 2 可以看出, 第 1 排序轴中灌木特征因子和坡度因子相关, 第 2 排序轴在一定程度上反映了海拔和食物丰富度的梯度. 其中, 第 1 和第 3 象限代表了坡度梯度, 第 2 和第 4 象限代表了灌木特征梯度. 样地 1 是以灌木为主的群落, 坡度最大, 而样地 6 是以草本为主的群落, 坡度最小, 2 个样地生境均质性较好, 集中分布于排序图两端. 从样方的分布来看, 样地 3、4 和 5 的样方零散地分布于 4 个象限, 说明了生境的高异质性, 复杂的生境给家畜放牧行为的环境解释带来困难. 但排序图的零散只体现在个别样方上, 大多数样方在灌木和坡度梯度上仍然呈现明显的集聚分布规律, 牧道特征与灌木盖度和高度呈显著负相关, 与坡度呈正相关 (图 2), 说明灌木因子和坡度能够解释大部分牧道分异. 海拔因素对牧道特征的影响不显著. 这与研究尺度有关, 本研究限于坡面尺度, 海拔跨度较小, 无法充分反映梯度差异. 食物丰富度与牧道特征有一定的正相关关系, 但贡献率较低 (图 2), 可能是由于长期放牧下草本低矮, 生产力低下, 家畜的采食率降低, 削弱了食物丰富度的贡献率.

2.4 锥花小槲种群与牧道特征的相关性

2.4.1 种群盖度与牧道面积的关系 由表 5 可以看出, 牧道面积和锥花小槲种群盖度呈显著负相关, 而且灌木对牧道分布有显著影响. 除了样地 3 以外, 其他样地牧道的变异系数都>100%, 说明牧道分布具有高异质性; 但种群盖度的变异系数只有样地 2>100%. 灌丛盖度和牧道面积的负相关性说明了牧道对锥花小槲种群的负效应, 包括牧道本身的分割作

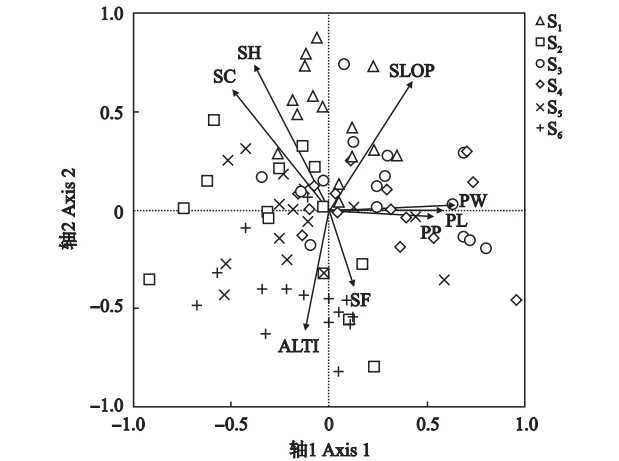


图 2 牧道因子与环境因子的 RDA 排序图  
Fig. 2 RDA ordination diagram of grazing-path and environment factors.

SLOP:坡度 Slope; ALT:海拔 Altitude; SF:样地食物丰富度 Site food abundance; SH:灌木高度 Shrub high; SC:灌木盖度 Shrub coverage; PP:牧道位置 Grazing-path position; PL:牧道长度 Grazing-path length; PW:牧道宽度 Grazing-path width.

用以及牧道上家畜的践踏、采食破坏. 但变异系数特征说明家畜并非完全依照牧道活动, 这增加了家畜与植被之间相互作用的复杂性, 因此, 很难用简单的线性关系进行解释.

2.4.2 大小级与牧道密度的关系 灌木大小级是灌木密度、高度的综合反映指标. 6 个样地共调查锥花小槲灌木 181 丛, 其大小级为: I 级 39 丛, II 级 106 丛, III 级 31 丛, IV 级 5 丛. 从数据分析来看, 锥花小槲种群偏向于增长型, 但是在自然状态下, 锥花小槲的株高可达 3 m, 而调查样地内灌木的平均株高为 81 cm (15 ~ 172 cm), >150 cm 的植株仅为 16 株, 离正常生长水平有一定差距, 说明种群生长受到放牧干扰的抑制. 体现增长型特征的小型植株中, 有很大一部分为家畜采食和践踏破坏后的退化个体, 因此坡面内的灌丛应属于衰退型. 除了样地 2 和样地 6

表 5 牧道面积和种群盖度的变异系数和相关系数  
Table 5 Variation coefficients (CV) and correlation coefficients (CC) of grazing-path and population coverage

样地	牧道变异 系数	灌丛变异 系数	Pearson 相关系数	双列相关 系数
Site	Grazing-path CV (%)	Shrub CV (%)	Pearson CC	Biserial CC
S <sub>1</sub>	113.71	15.84	-0.939 **	0.863 **
S <sub>2</sub>	208.67	108.28	-0.221	0.194
S <sub>3</sub>	83.66	59.82	-0.785 **	0.597 *
S <sub>4</sub>	101.35	50.42	-0.759 **	0.754 **
S <sub>5</sub>	144.36	41.17	-0.896 **	0.765 **
S <sub>6</sub>	159.03	87.57	-0.142	0.175
总计 Sum	125.81	64.02	-0.321 **	0.292 **

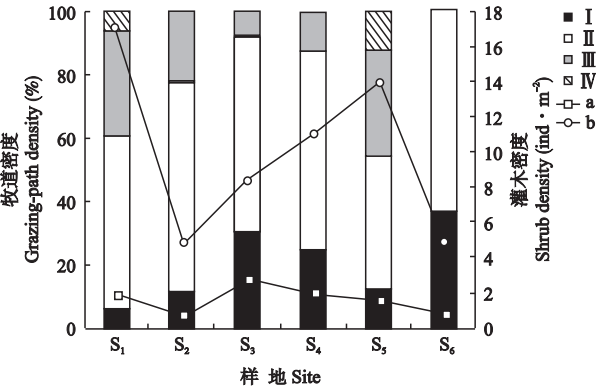


图3 锥花小檗种群各大小级结构的灌木密度及牧道密度  
Fig.3 Shrub density and grazing-path density of *Berberis aggrege* population of different size classes.

a) 牧道密度 Grazing-path density; b) 灌木密度 Shrub density.

以外,其他样地中 I 级灌木比例与牧道密度呈正相关趋势,牧道密度大表明家畜践踏强度高,而小型植株随之增加,说明小型灌木为退化植株,受到了较强的践踏干扰.而且样地 2 和样地 6 灌木的密度小,对家畜的影响小,牧道和灌丛相关性较差.

**2.4.3 种群格局与牧道分布格局的关系** 由表 2 可以看出,锥花小檗种群和牧道的 Morisita 指数整体上具有正向一致性,个别尺度上相反.对牧道来说,5 m 尺度是合理的,因此在 5 m 尺度上对比锥花小檗种群和牧道分布格局特征.结果表明,除了样地 1,其他样地的锥花小檗种群格局与牧道格局类型基本一致,样地 2 和样地 6 为集群分布,其余均为均匀分布.但是从牧道面积和锥花小檗盖度的负相关关系可以看出,两者分布区域是相反的,灌木斑块或集聚或均匀分布于偏离牧道的区域.样地 1 在 3 个尺度上都是均匀分布,主要是因为样地内除了牧道形成的裸地,其他区域全部被灌木覆盖,锥花小檗种群盖度接近 90%.

3 讨 论

本研究表明,牧道的长度、宽度及分布格局等特征能够直观反映家畜的采食行为和生境利用情况.邹梅<sup>[21]</sup>研究得出,黄土高原丘陵区羊道宽度大部分<20 cm.岷江上游山地地形和植被特点明显有别于黄土高原丘陵区.根据跟踪放牧和访问调查,结合地形和植被特点,判断坡面内宽度>50 cm 的牧道为人和家畜综合践踏所成,而宽度较小的牧道为家畜主要游走和采食的路径.从数量特征来看(图 1),牧道最宽为 84 cm,最窄为 12 cm,宽度>50 cm 的牧道有 9 处,<50 cm 的牧道点位占了 78%,说明整个坡

面干扰严重,且以放牧家畜践踏和采食干扰为主.样条截取的牧道长度反映了家畜游走路线的曲折程度,样条宽度 200 cm,截取的牧道长度为 123 ~ 307 cm,表明灌丛的家畜游走路线具有较高的曲折性,高度异质性环境中家畜采食路径更加复杂,这与 Garcia 等<sup>[3]</sup>的研究结果一致.鉴于牧道是家畜践踏强度的定量表现,侯扶江和任继周<sup>[8]</sup>使用牧道相关指标指示家畜践踏及放牧强度.另外,地理信息系统(GIS)、全球定位系统(GPS)和分形分析等技术方法的应用促进了牧道相关研究的开展和深化<sup>[3,9,12,22]</sup>.

群落排序和相关分析表明,锥花小檗灌木与牧道特征关系紧密,灌丛是牧道特征和分布格局的重要影响因子,灌木种群盖度、大小级和分布格局与牧道面积、密度和格局有一定的相关关系.这可以用家畜采食行为的相关理论进行解释.优化采食理论(optimal foraging theory, OFT)是指家畜在采食过程中通过不断调整采食速度、采食路线等行为来适应环境,最终选择最优的采食策略<sup>[23-24]</sup>.牧道是家畜穿过复杂生境的最佳路线,牧道的使用将使家畜在耗费最小体力的情况下在采食站之间迅速转换<sup>[12]</sup>.锥花小檗多刺而浓密,是家畜在采食过程中尽量避开的物种.家畜通过不断的试错学习和空间记忆,游走路径更倾向于锥花小檗分布较少的区域并固定下来.因此,灌丛斑块在一定程度上决定了牧道的形成和分布.锥花小檗在限制家畜移动的同时,也受到放牧家畜的破坏和削减.模拟试验证明,践踏对灌木的削减作用十分明显<sup>[18]</sup>,家畜通过采食和践踏改变灌木斑块的形状,并将大的斑块分割成小的斑块,使其更容易通过<sup>[25]</sup>.牧道周围践踏严重,锥花小檗集中于远离牧道的区域.样地内锥花小檗种群的断代现象说明其受到了很大干扰.锥花小檗灌木冠幅长轴和短轴比平均为 1.29,趋近于圆形,表明家畜对灌木具有塑形作用.另外,家畜的卧息可以抑制灌木的生长,样地 2 和样地 6 灌木盖度较小,与牛长期在此采食、卧息有关.

除了植被,地形、饮水点、人为控制,甚至树荫、矿物质点分布都会成为家畜牧道分布的决定因子<sup>[5]</sup>;而家畜的采食具有等级效应,尺度不同所揭示的规律性也不同<sup>[26]</sup>.本文以锥花小檗灌丛为研究对象,取样限于坡面尺度和锥花小檗单优势种群,缺乏在更大尺度上以及对锥花小檗共优种群的规律性研究,削弱了地形(如海拔)及其他影响因子的解释能力.有研究表明,牧道格局是增加植被空间异质



性、复杂性和变异性的的重要因素<sup>[17]</sup>。从单条牧道来看,距离牧道远近放牧压力不同,植物的响应也不同,但由于牧道错综复杂、网络交错,灌丛斑块的异质性增加了牧道分布的差异,牧道和灌丛嵌套格局打乱了这种规律。因此,今后应补充多尺度综合因子的研究,以便充分兼顾不同因子对牧道分布及家畜行为的效应。

放牧是促进草地灌丛扩张的重要因素<sup>[27]</sup>,家畜的践踏对灌丛的清除效果也比较明显,因此,放牧对灌丛的影响还存在很多争议,这可能源于研究材料、研究角度和尺度的不同<sup>[28-29]</sup>。在大尺度上,放牧活动破坏优质草场,扩大灌丛范围,而灌丛的增加一直被视作草地生态系统退化的重要特征<sup>[27]</sup>;在小尺度上,家畜放牧活动特别是践踏行为会削减灌丛的盖度,加速灌丛向稳定性更差、功能更低的类型(如草坡、裸地)退化。在干旱河谷与山地森林交错带,锥花小檗灌丛是森林破坏的次生植被,生境条件要优于干旱河谷区,是控制干旱河谷面积扩大的重要植被。其在维持生态系统功能和促进群落演替方面具有重要作用,需要科学培育和保护。对牧道分布特征的研究表明,锥花小檗是家畜采食的限制性因子;虽然有多刺灌木存在,群落内的草本和灌木嫩枝仍然遭到过度利用,植被盖度下降。另外,牧道是地表径流的通道,牧道的出现和扩展加剧了当地的水土流失。因此,应合理分配放牧格局,倡导科学合理放牧,保护当地脆弱的生态环境。

## 参考文献

- [1] Wu N (吴宁). Traditional utilization of rangelands in western Sichuan: Disputation on pastoral nomadism. *Journal of Mountain Science* (山地学报), 2004, **22** (6): 641-647 (in Chinese)
- [2] Bailey DW, Brown JR. Rotational grazing systems and livestock grazing behavior in shrub-dominated semi-arid and arid rangelands. *Rangeland Ecology & Management*, 2011, **64**: 1-9
- [3] Garcia F, Carrère P, Soussana JF, et al. Characterisation by fractal analysis of foraging paths of ewes grazing heterogeneous swards. *Applied Animal Behaviour Science*, 2005, **93**: 19-37
- [4] Fuhlendorf SD, Engle DM. Restoring heterogeneity on rangelands: Ecosystem management based on evolutionary grazing patterns. *BioScience*, 2001, **51**: 625-632
- [5] Liu J-X (刘金鑫), Gong Y-B (宫渊波), Zuo Q (左琴), et al. A review of mountain grazing-paths and vegetation spatial heterogeneity. *Acta Prataculturae Sinica* (草业学报), 2012, **21**(1): 254-261 (in Chinese)
- [6] Bertiller MB, Ares JO. Sheep spatial grazing strategies at the arid Patagonian Monte, Argentina. *Rangeland*

- Ecology & Management*, 2008, **61**: 38-47
- [7] Walker JW, Heitschmidt RK. Effect of various grazing systems on type and density of cattle trails. *Journal of Range Management*, 1986, **39**: 428-431
- [8] Hou F-J (侯扶江), Ren J-Z (任继周). Evaluation on trampling of grazed Gansu wapiti (*Cervus elaphus kansuensis* Pocock) and its effects on soil property in winter grazing land. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2003, **23**(3): 486-495 (in Chinese)
- [9] Wang S-P (汪诗平), Wang Y-F (王艳芬), Chen Z-Z (陈佐忠). *Grazing Ecosystem Management*. Beijing: Science Press, 2003 (in Chinese)
- [10] Bailey DW, Keil MR, Rittenhouse LR. Research observation: Daily movement patterns of hill climbing and bottom dwelling cows. *Rangeland Ecology & Management*, 2004, **57**: 20-28
- [11] Liddle MJ, Grieg-Smith P. A survey of tracks & paths in a sand dune ecosystem. II. Vegetation. *Journal of Applied Ecology*, 1975, **12**: 909-930
- [12] Ganskopp D, Cruz R, Johnson DE. Least-effort pathways: A GIS analysis of livestock trails in rugged terrain. *Applied Animal Behaviour Science*, 2000, **68**: 179-190
- [13] Parsons AJ, Dumont B. Spatial heterogeneity and grazing processes. *Animal Research*, 2003, **52**: 161-179
- [14] Bao W-K (包维楷), Wang C-M (王春明). Degradation mechanism of mountain ecosystem at the dry valley in the upper reaches of the Minjiang River. *Journal of Mountain Science* (山地学报), 2000, **18**(1): 57-62 (in Chinese)
- [15] Liu B (刘彬), Luo C-D (罗承德), Zhang J (张健), et al. Soil nutritional properties and moisture gradient of the ecotone between dry valley and montane forest of the Minjiang River. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2011, **31**(1): 58-66 (in Chinese)
- [16] Li J-L (李江陵), Shu G-M (舒光明), Xiao X-H (肖小河). Study on the species resources and distribution laws of the *Berberis* genus plants in Sichuan Province. *Journal of Southwest China Normal University* (Natural Science) (西南师范大学学报·自然科学版), 1997, **22**(4): 385-391 (in Chinese)
- [17] Shang Z-H (尚占环), Yao A-X (姚爱兴), Long R-J (龙瑞军), et al. Spatial heterogeneity of the north slope's plant communities in the mountain desert grassland of the arid region. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2005, **25**(2): 312-318 (in Chinese)
- [18] Gallet S, Lemauiel S, Roze F. Responses of three heathland shrubs to single or repeated experimental trampling. *Environmental Management*, 2004, **33**: 821-829
- [19] You H-Z (尤海舟), Liu X-L (刘兴良), Miu N (缪宁), et al. Individual association and scale effect of spatial pattern of *Quercus aquifolioides* populations along the elevation gradients. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2010, **30**(15): 4004-4011 (in Chinese)
- [20] Yang J (杨娟), Liu L-J (刘丽娟), Ge J-P (葛剑平), et al. Characteristics of canopy gap disturbance in

Wolong Nature Reserve. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2004, **28**(5): 723–726 (in Chinese)

[21] Zou M (邹 梅). Analyzing and Simulating the Goat Road Vegetation Pattern of Semi-arid Hilly Area in Loess Plateau. Master Thesis. Lanzhou: Lanzhou University, 2011 (in Chinese)

[22] Orr RJ, Tozer KN, Griffith BA, *et al.* Foraging paths through vegetation patches for beef cattle in semi-natural pastures. *Applied Animal Behaviour Science*, 2012, **141**: 1–8

[23] Newman JA, Parsons AJ, Thornley JHM, *et al.* Optimal diet selection by a generalist grazing herbivore. *Functional Ecology*, 1995, **9**: 255–268

[24] Wang L (王 岭), Wang D-L (王德利). Research advances in diet selection mechanisms of grazing herbivores. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2007, **18**(1): 205–211 (in Chinese)

[25] Massada AB, Gabay O, Perevolotsky A, *et al.* Quantifying the effect of grazing and shrub-clearing on small scale spatial pattern of vegetation. *Landscape Ecology*, 2008, **23**: 327–339

[26] Gross JE, Zank C, Hobbs NT, *et al.* Movement rules

for herbivores in spatially heterogeneous environments: Responses to small scale pattern. *Landscape Ecology*, 1995, **10**: 209–217

[27] Weber GE, Jeltsch F, Rooyen NV, *et al.* Simulated long-term vegetation response to grazing heterogeneity in semi-arid rangelands. *Journal of Applied Ecology*, 1998, **35**: 687–699

[28] Weber GE, Moloney K, Jeltsch F. Simulated long-term vegetation response to alternative stocking strategies in savanna rangelands. *Plant Ecology*, 2000, **150**: 77–96

[29] Ganskopp D, Svejcar T, Taylor F, *et al.* Can spring cattle grazing among young bitterbrush stimulate shrub growth? *Rangeland Ecology & Management*, 2004, **57**: 161–168

---

作者简介 刘金鑫,男,1984 年生,硕士研究生.主要从事植被生态学和生物多样性研究,发表论文 4 篇. E-mail: jinxin0512@163.com

责任编辑 李凤琴

---