

DOI: 10.20103/j.stxb.202308231818

王金兰, 曹文侠, 李文. 祁连山不同地形饲用植物对藏羊偏食性的影响. 生态学报, 2024, 44(16): 7213-7225.

Wang J L, Cao W X, Li W. Response of foraging preference of Tibetan sheep to forage plants in different topographies on Qilian Mountains. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(16): 7213-7225.

祁连山不同地形饲用植物对藏羊偏食性的影响

王金兰^{1,2}, 曹文侠³, 李文^{2,*}

¹ 青海大学省部共建三江源生态与高原农牧业国家重点实验室, 西宁 810016

² 青海大学畜牧兽医科学院(青海省畜牧兽医科学院), 青海省青藏高原优良牧草种质资源利用重点实验室, 西宁 810016

³ 甘肃农业大学草业学院, 兰州 730070

摘要: 食性选择是家畜的一种复杂生理和生态适应过程, 也是放牧家畜采食行为的核心问题, 对草地放牧管理具有重要意义。目前的研究主要集中在草地植物群落组成、结构及家畜个体特征对采食行为的影响上, 而不同地形的植物如何影响家畜采食行为尚不明晰。以祁连山不同地形(阶地、河漫滩、阴坡、半阴坡、半阳坡和阳坡)饲用植物(禾本科、莎草科、豆科、杂类草、可食灌木及群落)为对象, 采用舍饲自助餐式实验法开展藏羊对不同地形植物的采食选择研究, 探讨藏羊对不同地形植物的偏食性, 并采用结构方程模型探究影响藏羊偏食性的主要因素。结果表明, (1) 禾本科植物的营养品质在阴坡最高, 莎草科和豆科植物的营养品质在阶地最高, 杂类草和整个植物群落的营养品质在阳坡最高。(2) 藏羊对禾本科、莎草科、杂类草及整个植物群落的干物质采食量均在阳坡最高, 分别为 42.6、68.7、69.8 g/h 和 237.6 g/h, 而均在河漫滩最低, 分别为 7.3、8、21.8 g/h 和 69 g/h。(3) 藏羊对阳坡的禾本科、莎草科、杂类草及整个植物群落的偏食性最高, 偏食性指数分别为 5、8、8.1 和 27.7, 而对河漫滩饲用植物的偏食性最低。(4) 结构方程模型表明, 植物粗纤维和粗蛋白含量是影响藏羊偏食性的最主要因素。研究结果为深入理解草地动植物互作关系及制定科学放牧管理策略提供了科学依据, 对草地畜牧业可持续利用具有重要意义。

关键词: 祁连山; 藏羊; 牧草营养品质; 偏食性; 食性选择

Response of foraging preference of Tibetan sheep to forage plants in different topographies on Qilian Mountains

WANG Jinlan^{1,2}, CAO Wenxia³, LI Wen^{2,*}

¹ State Key Laboratory of Plateau Ecology and Agriculture, Qinghai University, Xining 810016, China

² Academy of Animal and Veterinary Sciences, Qinghai University (Qinghai Academy of Animal and Veterinary Sciences), Key Laboratory of Superior Forage Germplasm in the Qinghai-Tibetan Plateau, Xining 810016, China

³ Grassland Science College of Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China

Abstract: Diet selection in livestock is a complex physiological and ecological adaptation process. It is also a core problem in terms of the foraging behavior of grazing herbivores, which is of considerable importance for sustainable grassland management. To date, the available studies have predominantly focused on the effects of plant community composition, structure, and individual characteristics of grazing herbivores on diet selection. However, the study on responses of forage plants in the context of different topographies to the diet selection of grazing herbivores is rare. In this study, forage plants, comprising gramineae, cyperaceae, leguminosae, forbs, edible shrubs and the whole plant community on different topographies, that is, terrace, riparian zones, shady slope, half shady slope, half sunny slope, sunny slopes in the Qilian Mountains were selected. Changes in the nutritional and mineral content of forage plants and differences in Tibetan sheep

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD1602307)

收稿日期: 2023-08-23; 网络出版日期: 2024-06-18

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lw@qhu.edu.cn

forage preference for forage plants on different topographies were examined using an indoor cafeteria trial. A structural equation model was used to illustrate the effects of forage plants on different topographies on Tibetan sheep forage preferences. Our results demonstrated that: 1) the nutritional value of gramineae was the highest on the shady slope. Meanwhile, that of cyperaceae and leguminosae was the highest on the terraces. The nutrient value of forbs and the whole community was the highest on the sunny slope. 2) The dry matter intake of Tibetan sheep to gramineae, cyperaceae, forbs and the whole plant community was the highest on the sunny slope (42.6, 68.7, 69.8 g/h and 237.6 g/h, respectively), and the lowest on the riparian zones (7.3, 8, 21.8 g/h and 69 g/h, respectively). 3) Tibetan sheep forage preference of gramineae, cyperaceae, forbs and community were the highest on the sunny slope, the forage preference index was 5, 8, 8.1 and 27.7, respectively; and the lowest on the riparian zones. 4) Structural equation model (SEM) showed that the crude fiber and crude protein content of forage plants were dominant factors affecting forage preference of Tibetan sheep. The results provide a scientific basis for understanding the relationship between livestock and plant in grassland and formulating scientific grazing management strategies, and is of great significance for the sustainable utilization of grassland-livestock husbandry.

Key Words: Qilian Mountains; Tibetan sheep; forage nutritional quality; forage preference; diet selection

放牧是草地生产与生态管理的关键手段,放牧家畜通过采食、践踏、粪尿沉积等方式对草地生态系统产生影响,其中家畜采食行为是影响植物群落的最直接作用因子^[1]。放牧家畜采食行为的核心问题是食性选择,家畜在草地上不是简单的随意采食,而是随时通过视觉和嗅觉对草地地形、植被组成和结构、牧草的采食可能性与质量进行判断,搜索和选择高质量的植物资源,从而采取有秩序的选择性采食^[2]。即使在小范围内采食,家畜也会表现出对植物的种类、高度、密度、营养状态等有秩序性的选择性采食。家畜的食性选择行为是一种复杂的生理和生态适应过程,也是家畜在长期进化过程中形成的一种营养适应对策,直接影响家畜从环境中获取的营养物质状况,也决定着家畜的日粮组成^[3]。此外,家畜的采食选择也通过对物种的偏好改变物种间的竞争关系,进而影响草地植物群落的结构和功能^[4]。因此,在草地生态系统中,开展放牧家畜采食行为研究,揭示其食性选择策略机制对动植物互作关系的解析及草地放牧管理技术的制定都具有重要意义。

天然草地植物群落的组成在时间和空间上具有高度异质性,即使是同一植物,也存在营养动态的季节与部位变化^[5]。此外,家畜本身生理状态及不同饥饿程度都会显著影响家畜的采食行为^[5]。因此,受天然草地植物群落分布的复杂性和家畜本身体态的影响,放牧家畜的食性选择行为也具有不确定性。目前,关于放牧家畜采食行为的研究较多,主要集中在草地植物空间分布^[6-7]、草地植物物种间复杂的空间邻近关系^[8]、植物多样性^[9-10]、草地异质性斑块特征^[11]及草食动物的饥饿程度^[5]对放牧家畜采食行为的影响方面,但以上研究主要考虑草地植物个体和群落的空间特征及家畜状态对采食行为的影响,而没有考虑草地植物的不同地形分布及其营养状态对家畜采食行为的影响。不同地形分布的植物是否对放牧家畜的采食行为具有影响,影响因素又是什么,目前都不清楚。

我们前期观测发现,相对于其他地形,藏羊更喜欢在阳坡采食,该现象也通过走访牧户得到了验证。我们推测可能是因为阳坡牧草水分含量低、营养品质较高所致。为进一步验证该现象,本研究以祁连山不同地形(阶地、河漫滩、阴坡、半阴坡、半阳坡和阳坡)天然草地饲用植物(禾本科、莎草科、豆科、杂类草、可食灌木及群落)为对象,采用舍饲自助餐式实验法开展藏羊对不同地形植物的采食选择研究,探讨藏羊对不同地形饲用植物的偏食性,并通过构建结构方程模型进一步探讨影响藏羊偏食性的主要因素。研究结果对于进一步深入理解动植物互作关系、揭示家畜采食行为机制、制定科学放牧管理策略及维持草地畜牧业的可持续利用具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 样地自然概况

试验地位于祁连山东段的甘肃省天祝藏族自治县的抓喜秀龙乡(37°11'N, 102°29'E),平均海拔3000 m。

年平均气温为 0.16°C , 年平均降雨量为 $416.9\text{ mm}^{[12]}$ 。研究区属典型高原大陆性气候, 寒冷潮湿, 空气稀薄, 太阳辐射强, 水热同期, 无绝对无霜期, 仅分冷、热两季, 植物生长期约为 120 d 。土壤类型为高山黑钙土。研究区阴坡成带状分布着高寒灌丛草地, 优势灌木为千里香杜鹃 (*Rhododendron thymifolium*) 和头花杜鹃 (*R. capitatum*), 草本植物主要有珠芽蓼 (*Polygonum viviparum*)、问荆 (*Equisetum arvense*)^[13], 灌木的盖度约为 $50\%—80\%$, 草本的盖度约为 $60\%—85\%$ 。其他坡向则以高寒草甸为主, 优势种植物为垂穗披碱草 (*Elymus nutans*)、早熟禾 (*Poa crymophila*) 和矮生嵩草 (*Kobresia humilis*), 草本植物的盖度约为 80% ^[14]。

1.2 试验设计与方法

2019 年 4 月中旬, 参考查轩等^[15]对地形的划分标准, 并结合研究区数字高程模型数据及对研究区草地植被和土壤特征的实地调查, 将研究区草地按地形分布划分为阶地 (0°)、河漫滩 (0°)、半阴坡 ($0—45^{\circ}$, $315^{\circ}—360^{\circ}$)、阴坡 ($45^{\circ}—90^{\circ}$, $270^{\circ}—315^{\circ}$)、半阳坡 ($90^{\circ}—135^{\circ}$, $225^{\circ}—270^{\circ}$) 和阳坡 ($135^{\circ}—225^{\circ}$)。研究区海拔介于 2761 m 到 4398 m 间, 为尽可能全面地反映研究区草地植被特征, 本研究在海拔 $2800—4300\text{ m}$ 的范围, 沿海拔每升高 300 m 设置 1 条 5 km 宽的样带, 共 5 条样带。在每条样带上分别选取阶地、河漫滩、阴坡、半阴坡、半阳坡和阳坡草地, 各地形草地面积至少 0.1 hm^2 , 每条样带上各地形草地分别重复 4 次, 随机排布。各样带上相邻两个地形草地间距至少 500 m 。每条样带上共 24 个样地 ($6\text{ 样地}\times 4\text{ 重复}$), 共计 120 个样地 ($5\text{ 样带}\times 24\text{ 样地/样带}=120\text{ 样地}$)。2019 年 7 月各地形植被和土壤特征如表 1 所示。

表 1 东祁连山不同地形植被和土壤特征

Table 1 Grassland vegetation and soil characteristics on different topographies in eastern Qilian Mountains

	阶地 Terrace	河漫滩 Riparian zones	阴坡 Shady slope	半阴坡 Half shady slope	半阳坡 Half sunny slope	阳坡 Sunny slope
优势种 Dominant species	垂穗披碱草 <i>Elymus nutans</i> 草地早熟禾 <i>Poa pratensis</i> 异针茅 <i>Stipa aliena</i> 矮生嵩草 <i>Kobresia humilis</i>	圆囊苔草 <i>Carex orbicularis</i> 草地早熟禾 <i>P. pratensis</i>	黑褐苔草 <i>C. atrofusca</i> 草地早熟禾 <i>P. pratensis</i> 垂穗披碱草 <i>E. nutans</i> 圆囊苔草 <i>C. orbicularis</i>	垂穗披碱草 <i>E. nutans</i> 草地早熟禾 <i>P. pratensis</i>	异针茅 <i>Stipa aliena</i> 赖草 <i>Leymus secalinus</i> 线叶嵩草 <i>K. capillifolia</i>	异针茅 <i>S. aliena</i> 草地早熟禾 <i>P. pratensis</i> 赖草 <i>L. secalinus</i>
草本植物高度 Herbaceous heigh/cm	$32.35\pm 1.17\text{a}$	$22.65\pm 0.82\text{c}$	$19.4\pm 0.66\text{d}$	$19.26\pm 0.7\text{d}$	$23.6\pm 0.85\text{c}$	$26.1\pm 0.94\text{b}$
草本植物盖度 Herbaceous coverage/%	$95.00\pm 1.73\text{a}$	$82.00\pm 0.58\text{c}$	$69.00\pm 1.73\text{e}$	$93.00\pm 1.15\text{a}$	$87.00\pm 1.73\text{b}$	$76.00\pm 1.15\text{d}$
0—20 cm 层土壤容重 Bulk density in 0—20 cm layer/(g/m^3)	$0.92\pm 0.04\text{bc}$	$1.11\pm 0.04\text{a}$	$0.74\pm 0.03\text{d}$	$0.81\pm 0.03\text{cd}$	$0.93\pm 0.04\text{bc}$	$0.96\pm 0.04\text{b}$
0—20 cm 层土壤含水量 Soil moisture in 0—20 cm layer/%	$34.51\pm 1.24\text{c}$	$28.52\pm 1.03\text{d}$	$43.58\pm 1.57\text{a}$	$38.74\pm 1.39\text{b}$	$26.7\pm 0.96\text{de}$	$24.3\pm 0.88\text{e}$
0—20 cm 层土壤有机质 Soil organic matter in 0—20 cm layer/(g/kg)	$34.51\pm 1.87\text{b}$	$28.54\pm 1.82\text{c}$	$43.57\pm 3.05\text{a}$	$38.73\pm 1.19\text{b}$	$26.73\pm 1.12\text{d}$	$24.32\pm 1.2\text{d}$
0—20 cm 层土壤全氮含量 Soil total nitrogen in 0—20 cm layer/(g/kg)	$6.6\pm 0.19\text{b}$	$6.29\pm 0.21\text{bc}$	$7.69\pm 0.22\text{a}$	$6.82\pm 0.19\text{b}$	$5.6\pm 0.15\text{d}$	$6\pm 0.13\text{cd}$

表中数据为均值±标准误, 不同小写字母表示同一指标在地形间差异显著 ($P<0.05$)

2019 年 7 月中旬, 选取 3 只体重相近的藏系成年母羊 (35 ± 1) kg 作为试验动物, 参照王岭^[5]的舍饲自助餐方法进行模拟投喂试验。在正式投喂试验前, 先对试验藏羊进行调训和熟悉过渡, 为期半个月。过渡期对试验藏羊饲喂新鲜草样和基础精料日粮。于 2019 年 8 月初进行正式投喂试验。在正式投喂试验前一天分别采集不同地形的禾本科、莎草科、豆科、杂类草、可食灌木及群落饲用植物, 贮存在冷窖中。为消除植物多样性

对藏羊偏食性的影响,各地形植物的种类和质量均保持一致。饲喂前将饲用植物铡成 10 cm 左右,在藏羊饱腹一餐 5 h 后进行投喂试验。进行投喂试验时,将 3 只藏羊单独置于圈舍,并将不同地形饲用植物分槽放置,每个食槽内提供等量足够饲草,藏羊自由选择采食 1 h。用秒表计算藏羊的采食时间,饲喂前后分别对投喂的饲用植物称重,计算采食量和偏食性指数。偏食性指数为每个功能群的采食量占总采食量的百分比。

此外,分别采集 400 g 上述投喂植物样品,带回实验室后立即在 105℃ 杀青 30 min,然后在 70℃ 烘干至恒重,称重后粉碎,用于植物粗蛋白(CP)、粗脂肪(EE)、粗灰分(Ash)、粗纤维(CF)、酸性洗涤纤维(ADF)、中性洗涤纤维(NDF)和矿物元素磷(P)、钾(K)、钠(Na)、钙(Ca)、镁(Mg)、铁(Fe)、锰(Mn)、铜(Cu)、锌(Zn)、钴(Co)的测定。以上指标均参照鲍士旦《土壤农化分析》^[16]方法测定,计算无氮浸出物(NFE)和相对饲用价值(RFV)。具体计算公式如下^[17]:

$$\text{NFE}(\%) = 100\% - \text{EE}(\%) - \text{CF}(\%) - \text{CP}(\%) - \text{Ash}(\%)$$

$$\text{DMI}(\%) = \frac{120}{\text{NDF}(\%)}$$

$$\text{DDM}(\%) = 88.9 - \text{ADF}(\%)$$

$$\text{RFV} = \frac{\text{DMI}(\%) \times \text{DDM}(\%)}{1.29}$$

式中,DMI 为干物质采食量,DDM 为可消化干物质。

1.3 数据分析

采用 Microsoft Excel 2019 整理数据,使用 SPSS 软件(SPSS 19.0, Chicago, IL, USA)先对植物营养和矿物元素指标的正态性和方差齐性进行检验。然后采用单因素方差分析中的多重比较(LSD)对同一指标在不同地形间进行显著性分析(0.05 显著水平)。采用 R 4.0.2(R Development Core Team)plyr 数据包多准则决策模型-TOPSIS(Technique for order preference by similarity to an ideal solution)对不同地形植物的营养和矿物元素进行综合评价。为探讨不同地形饲用植物营养物质含量和矿物元素含量对藏羊偏食性的相对贡献,采用 R 4.0.2 Boruta 包对植物营养物质与矿物元素进行重要性排序,Boruta 包在进行重要性大小排序时,会基于随机森林原理产生 3 个预测节点(Min、Mean、Max),重要性小于 Min 的指标认为是贡献度极低的指标,重要性大于 Mean 但小于 Max 的指标认为具有较高的贡献,重要性大于 Max 的指标认为具有极高的贡献。将上述筛选的重要性大于 Max 的指标进行方差分解,以探讨植物营养及矿物元素对藏羊偏食性的相对贡献。采用 R 4.0.2 piecewise SEM 包构建分段结构方程模型,探讨地形、植物功能群及其交互作用如何通过不同路径影响藏羊的偏食性。采用 Origin 8.0 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 不同地形饲用植物营养物质和矿物元素含量特征

2.1.1 饲用植物营养物质特征

阳坡禾本科、莎草科、豆科和杂类草植物的粗蛋白和粗纤维含量显著最高($P < 0.05$)。禾本科、莎草科和群落的粗脂肪含量在半阳坡和阳坡显著最高,豆科粗脂肪含量在阶地、阳坡和半阳坡显著最高。禾本科和莎草科植物的粗灰分含量在河漫滩和阴坡显著最高,杂类草的粗灰分含量在阳坡显著最高。禾本科、莎草科、豆科、杂类草和群落的粗纤维含量在阳坡最高,而在阴坡最低。禾本科、莎草科、豆科和杂类草植物的酸性洗涤纤维含量在阴坡显著最高,而在阳坡显著最低,阴坡较阳坡分别高 29.8%、23.7%、27.1%和 29.7%。禾本科、莎草科、杂类草和群落的相对饲用价值在河漫滩、阴坡和半阴坡显著最高。禾本科、莎草科、豆科、杂类草和群落的无氮浸出物含量均在阴坡最高。

表 2 祁连山不同地形饲用植物营养物质特征

Table 2 Nutrient characteristics of forage plants on different topographies in Qilian Mountains

	地形 Topography	粗蛋白 Crude protein/%	粗脂肪 Crude fat/%	粗灰分 Crude ash/%	粗纤维 Crude fibre/%	酸性洗 涤纤维 Acid detergent fiber/%	中性洗 涤纤维 Neutral detergent fiber/%	相对饲 用价值 Relative feeding value	无氮 浸出物 Nitrogen free extract/%
禾本科 Gramineae	阶地	8.70b	2.62ab	7.56c	28.80bc	52.32bc	47.99ab	50.83b	52.31bc
	河漫滩	6.70c	2.27abc	10.18a	29.40bc	51.45bc	41.27bc	65.54a	51.45bc
	阴坡	7.20c	2.06c	9.3ab	25.60d	55.84a	40.14c	71.68a	55.84a
	半阴坡	7.60bc	2.15bc	8.40bc	27.80cd	54.05ab	42.2bc	66.87a	54.05ab
	半阳坡	8.60b	2.74a	7.70c	31.40b	49.56c	50.38a	51.88b	49.56c
	阳坡	9.92a	2.71a	7.45c	36.90a	43.02d	52.89a	46.01b	43.04d
莎草科 Cyperaceae	阶地	11.50a	2.61ab	7.49b	26.70c	51.7bc	38.83bc	65.62bcd	51.7bc
	河漫滩	9.60bc	2.02c	9.26a	28.50bc	50.62cd	37.12c	74.51ab	50.62cd
	阴坡	9.20c	2.15bc	9.52a	24.30d	54.83a	35.11c	77.14a	54.83a
	半阴坡	10.80ab	2.37abc	6.18c	26.50c	54.15ab	36.35c	68.73abc	54.15ab
	半阳坡	11.90a	2.53abc	7.05bc	30.50b	48.02d	47.14a	56.26d	48.02d
	阳坡	12.00a	2.76a	7.31bc	33.60a	44.33e	44.42ab	60.10cd	44.33e
豆科 Legume	阶地	17.30a	3.42a	8.56b	21.40d	49.32c	38.72a	82.14bc	49.32c
	河漫滩	13.90b	2.13c	7.31c	24.30c	52.36ab	35.41a	100.59a	52.36ab
	阴坡	12.95b	2.53bc	10.86a	20.10d	53.56a	37.20a	92.63ab	53.56a
	半阴坡	13.60b	2.46bc	9.96a	23.40c	50.58bc	36.74a	80.55bcd	50.58bc
	半阳坡	17.80a	2.93ab	10.14a	26.40b	42.73d	37.17a	74.27cd	42.73d
	阳坡	16.80a	3.30a	8.47bc	29.30a	42.13d	40.93a	66.18d	42.13d
杂类草 Forbs	阶地	10.50ab	2.74a	10.77c	17.9cd	58.09b	41.13a	77.75bc	58.09b
	河漫滩	9.23b	2.11b	9.27d	17.60cd	61.42a	38.00a	93.29ab	61.79a
	阴坡	10.35ab	2.93a	8.43d	16.20d	62.09a	39.33a	94.79ab	62.06a
	半阴坡	10.40ab	2.86a	8.43d	18.90c	59.41ab	40.52a	101.45a	59.41ab
	半阳坡	9.50b	2.85a	12.27b	21.30b	54.08c	42.82a	66.25c	54.08c
	阳坡	10.90a	3.10a	13.65a	24.50a	47.85d	38.75a	81.84abc	47.85d
可食灌木 Edible shrubs	河漫滩	12.70a	3.40a	6.50a	24.80b	52.60a	41.10a	85.26a	55.10a
	阴坡	13.50a	3.20a	6.80a	27.90a	48.60b	40.30a	87.89a	50.90b
	半阴坡	13.60a	3.10a	6.40a	26.60a	50.30b	38.10a	90.36a	52.70b
群落 Community	阶地	10.76b	2.72ab	8.28bc	25.25c	37.74ab	59.70a	79.94b	52.99c
	河漫滩	8.80d	2.26c	9.07a	25.8c	34.77b	52.56b	95.92a	54.08bc
	阴坡	9.01d	2.42c	9.10a	23.01d	34.19b	51.37b	99.53a	56.46a
	半阴坡	9.72c	2.48bc	7.70c	25.07c	35.15b	54.15b	92.84a	55.03ab
	半阳坡	10.69b	2.72ab	8.66ab	28.61b	41.38a	59.55a	75.47b	49.32d
	阳坡	11.42a	2.86a	8.75ab	32.67a	41.13a	59.72a	75.54b	44.30e

灌木仅出现在河漫滩、阴坡和半阴坡地形中,表中不同小写字母表示同一指标在地形间差异显著 ($P<0.05$)

2.1.2 饲用植物矿物元素含量特征

如表 3 所示,禾本科、莎草科、杂类草和群落钙、镁和锰含量均在阴坡显著最高 ($P<0.05$)。禾本科植物磷、锌和铜元素含量在阴坡显著最高,在河漫滩最低,阴坡较河漫滩分别高 96.4%、20% 和 40.7%。禾本科植物钾和钠元素含量在河漫滩和半阴坡显著最高,铁元素含量在阳坡显著最高,而钴元素含量在半阴坡显著最高。莎草科植物的磷、锌和铜元素含量在阴坡和半阴坡最高,铁含量在半阳坡和阳坡显著最高,钴含量在阳坡最高。豆科植物磷含量在阶地显著最高,在半阳坡最低,阶地较半阳坡高 92.8%。豆科植物钠含量在半阴坡和半阳坡最高,铁、钴和锌含量在半阳坡和阳坡最高,铜含量在阶地、阴坡和半阴坡显著最高。杂类草的磷含

量在阴坡显著最高,钾、钠、铁、钴和锌含量在阳坡显著最高,而铜含量在阶地显著最高。可食灌木磷、镁、铁和铜含量在阴坡显著高于其他地形,而钙含量在河漫滩和半阴坡显著最高。群落的磷、钙、镁、锰和锌含量均在阴坡最高,在阳坡最低,阴坡较阳坡分别高 150%、53.4%、101.5%、25.6% 和 65.8%。

表 3 祁连山不同地形饲用植物矿物元素含量

Table 3 Elements contents of forage plants ion different topographies in of Qilian Mountains

	地形 Topography	磷 P/ (g/kg)	钠 Na/ (mg/kg)	钾 K/ (g/kg)	钙 Ca/ (g/kg)	镁 Mg/ (μg/g)	铁 Fe/ (g/kg)	锰 Mn/ (μg/g)	钴 Co/ (μg/kg)	锌 Zn/ (μg/g)	铜 Cu/ (μg/g)
禾本科	阶地	1.94b	94.2b	14.74b	0.51d	2.16b	0.51cd	116.62bcd	295.6e	2773.5bc	456.3b
Gramineae	河漫滩	1.1d	117.4a	18.25a	0.41e	1.35c	0.45d	121.09bc	334.2d	2622.8c	357.6d
	阴坡	2.16a	93.2b	14.8b	0.85a	3.16a	0.53bc	142.5a	390.2c	3147.3a	503.3a
	半阴坡	1.96b	110.9a	16.96ab	0.71b	2.08b	0.49cd	127.87b	543.7a	2709.3bc	483.6ab
	半阳坡	1.4c	105.6ab	16.32ab	0.59c	1.04d	0.58b	103.8d	504.11b	2654.3bc	393.5cd
	阳坡	1.13d	95.3b	15.1b	0.45de	1.5c	0.65a	108.1cd	412.3c	2866.2b	412.6c
莎草科	阶地	1.3c	98.3b	15.32a	1.75cd	2.48c	0.51bc	115.16bc	292.7d	2905.2b	432.3b
Cyperaceae	河漫滩	0.98d	134.2a	17.51a	1.51e	1.64d	0.47c	109.3c	279.6d	2423.6c	374.2c
	阴坡	1.92a	113.6b	15.59a	2.65a	3.89a	0.5bc	134.2a	380.6ab	3352.3a	508.7a
	半阴坡	1.8a	143.85a	14.72a	2.09b	3.24b	0.49c	123.5ab	332.11c	3113.7ab	486.3a
	半阳坡	1.51b	130.6a	15.43a	1.95bc	2.42c	0.56ab	105.6c	346.9bc	2986.33b	410bc
	阳坡	1.02d	108.4b	14.93a	1.7de	1.72d	0.57a	115.4bc	406.3a	2865.3b	432.2b
豆科	阶地	2.14a	127.89ab	15.75a	4.64c	4.49c	0.53b	137.2bc	339.6bc	3025.9b	513.4a
Leguminous	河漫滩	1.96b	101.56c	18.53a	4.13d	3.67d	0.51bc	124.3c	305.7c	2866.7b	412.6b
	阴坡	1.5c	120.3b	17.21a	5.7a	6.57a	0.47c	124.2c	321.5c	2986.9b	549.6a
	半阴坡	2.1ab	138.9a	16.43a	5.2b	5.18b	0.49bc	135.2bc	375.2b	2895.2b	508.9a
	半阳坡	1.11e	142.3a	17.79a	4.82bc	2.35f	0.6a	144.3b	413.2a	3105.6ab	422.3b
	阳坡	1.31d	121.2b	17.95a	3.8d	2.95e	0.64a	160.3a	421.6a	3343.3a	441.3b
杂类草	阶地	1.84c	130.94b	17.03a	3.95a	3.35c	0.55c	124.8bc	325.6bc	2707.5b	534.3a
Forbs	河漫滩	1.41d	127.9b	18.25a	3.98a	3.12cd	0.53c	128.9abc	298.4c	2461.2b	404.1b
	阴坡	2.73a	134.5b	17.15a	4.26a	4.28a	0.54c	140.2a	334.8b	2467.7b	396.4b
	半阴坡	2.15b	136.59b	17.65a	3.86ab	3.76b	0.52c	118.4c	342.3b	2568.9b	391.4b
	半阳坡	1.69c	138.6b	15.81a	3.49bc	2.76d	0.61b	116.3c	404.43a	2978.4a	376.7b
	阳坡	1.35d	160.52a	16.32a	3.4c	2.93d	0.68a	136.68ab	412a	3120.9a	401.2b
可食灌木	河漫滩	1.97b	124.6a	17.89a	3.42ab	3.95a	0.57b	153.2a	385.6a	2841.3a	476.3b
Edible shrubs	阴坡	2.2a	131.4a	17.22a	3.25b	4.02a	0.62a	150.3ab	395.8a	2895.6a	524.3a
	半阴坡	2.05b	127.5a	18.21a	3.65a	3.52b	0.59ab	142.3b	412.3a	2854.3a	489.3b
群落	阶地	0.87c	13.27c	139.26b	10.35d	2.73c	0.83c	116.88b	3.99c	27.36c	305.13c
Community	河漫滩	0.59d	15.46a	162.18a	9.66e	2.28d	0.62d	117.65b	2.59e	23.13d	312.95c
	阴坡	1.25a	14.26b	143.91b	14.24a	4.03a	0.65d	136.90a	6.32a	35.87a	357.93b
	半阴坡	1.04b	16.30a	148.48b	12.31b	3.22b	0.78c	122.84b	5.61b	30.79b	409.95a
	半阳坡	0.63d	15.42a	144.88b	10.90c	1.93e	0.92b	107.89c	3.05d	21.59d	427.92a
	阳坡	0.50e	14.36b	140.20b	9.25e	2.00e	1.03a	108.72c	2.97d	21.64d	411.37a

2.1.3 不同地形饲用植物综合评价

采用多准则决策模型-TOPSIS 对不同地形禾本科、莎草科、豆科、杂类草、可食灌木和整个群落饲用植物营养物质和矿物元素含量进行综合评价(图 1)。结果表明,禾本科植物的营养贴合度在阴坡最高,为 0.57,莎草科和豆科植物的营养贴合度在阶地最高,分别为 0.53 和 0.60,杂类草植物的营养贴合度在阳坡最高,为 0.64,可食灌木的营养贴合度在半阴坡、阴坡和河漫滩相同,为 0.97,整个群落的营养贴合度在阳坡最高,为 0.50。

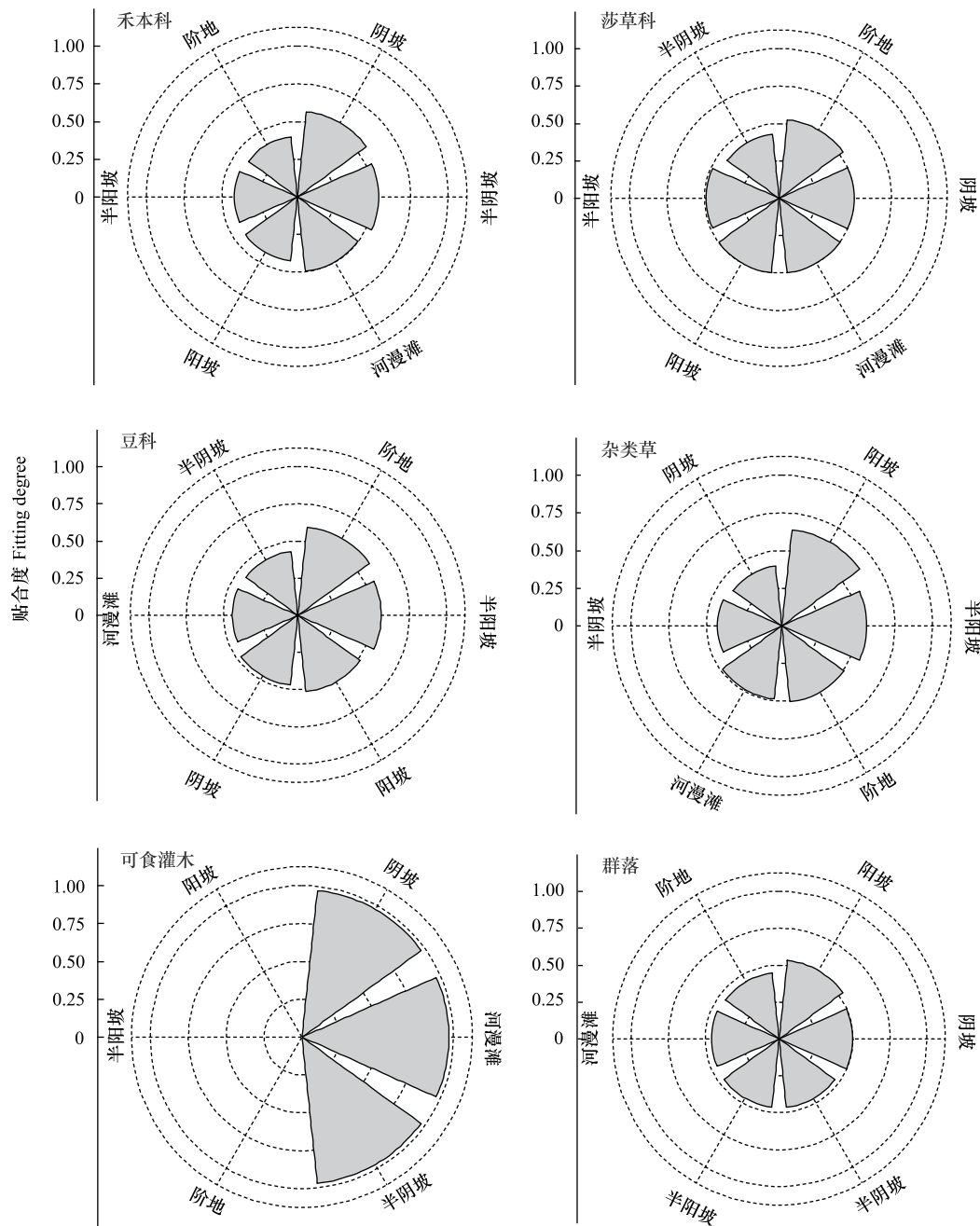
图1 祁连山不同地形饲用植物营养品质综合评价^[18]

Fig.1 Detailed evaluation of forage plant nutrition on different topographies in Qilian Mountains

2.2 藏羊对不同地形饲用植物偏食性

2.2.1 藏羊对不同地形饲用植物干物质采食量

如图2所示,藏羊对禾本科植物的干物质采食量在阶地、半阳坡和阳坡显著最高,分别为43.9、37.3 g/h和42.6 g/h,在河漫滩显著最低,为7.3 g/h;藏羊对莎草科和整个植物群落的干物质采食量均在阳坡显著最高,分别为68.7和237.6 g/h,均在河漫滩和半阴坡显著最低;藏羊对豆科植物的干物质采食量在半阳坡显著最高,为69.5 g/h,而在河漫滩、阴坡和半阴坡显著最低;藏羊对杂类草植物的干物质采食量在阶地和阳坡显著最高,分别为63.5 g/h和69.8 g/h,在其他地形间无显著差异($P>0.05$);藏羊对可食性灌木的干物质采食量在阴坡和半阴坡显著最高,而在河漫滩显著最低。

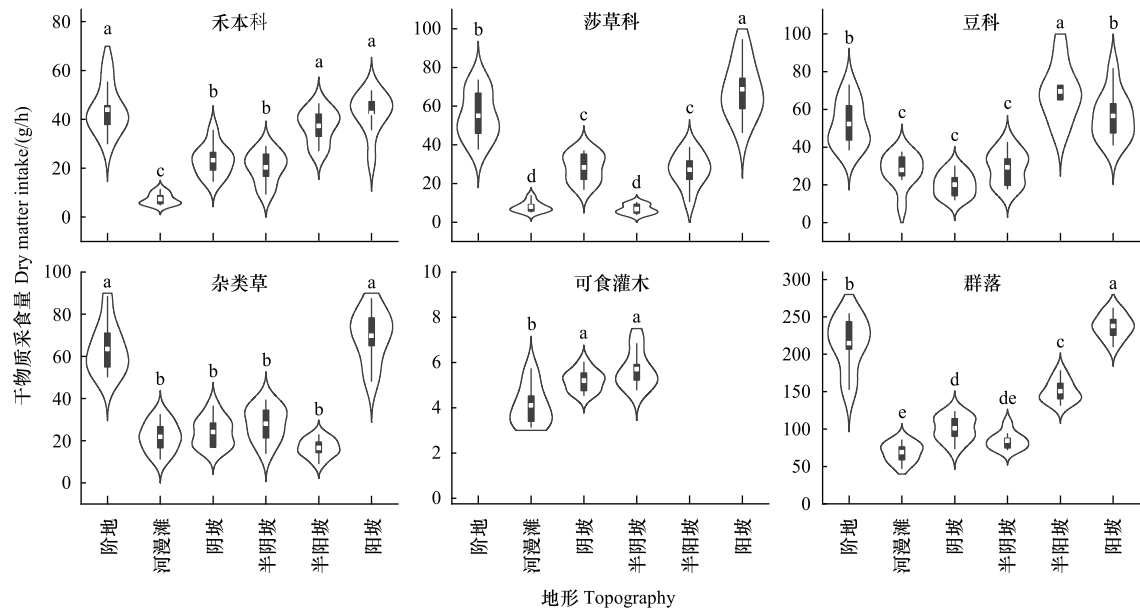


图2 藏羊对祁连山不同地形饲用植物的干物质采食量

Fig.2 Dry matter intake of forage plant by Tibetan sheep on different topographies in Qilian Mountains

图中不同小写字母表示不同地形间差异显著 ($P < 0.05$)

2.2.2 藏羊对不同地形饲用植物偏食性

藏羊对禾本科植物的偏食性指数在阶地、半阳坡和阳坡显著最高,分别为 5.13、4.35 和 4.97,在河漫滩显著最低,为 0.85。藏羊对莎草科植物的偏食性指数在阳坡显著最高,为 8.01,在河漫滩和半阴坡显著最低,分别为 0.93 和 0.78。藏羊对豆科植物的偏食性指数在半阳坡显著最高,为 8.11,在河漫滩、阴坡和半阴坡显著最低,分别为 3.24、2.35 和 3.41。藏羊对杂类草植物偏食性指数在阶地和阳坡显著最高,分别为 7.41 和 8.14。藏羊对整个群落的偏食性指数在阳坡最高,为 27.71,在河漫滩最低,为 8.05(图 3)。

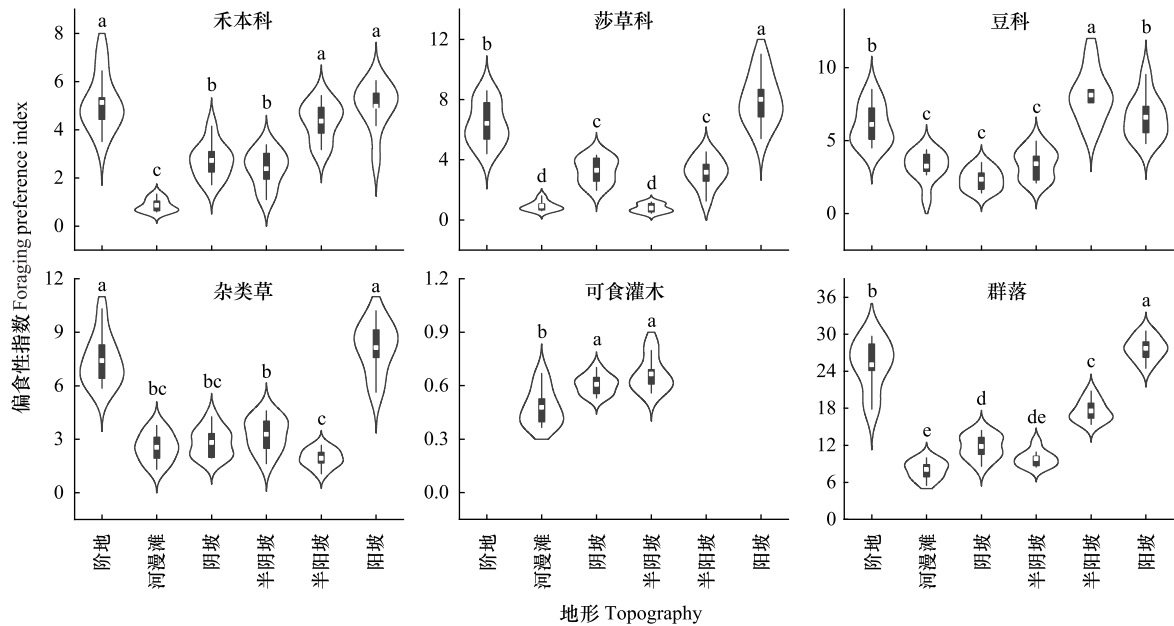


图3 藏羊对祁连山不同地形饲用植物偏食性指数

Fig.3 Foraging preference index of forage plant for Tibetan sheep on different topographies in Qilian Mountains

2.3 藏羊偏食性影响因素

为探讨不同地形饲用植物营养物质含量和矿物元素含量对藏羊偏食性的相对影响,采用随机森林模型进行变量重要性排序(图4),结果表明,对禾本科植物偏食性具有极高贡献的因子分别是 RFV、Mn、Fe、Ash、CP、Na、K、EE、Cu、Ca、P 和 Mg。对莎草科植物偏食性具有极高贡献的因子分别是 K、CP、Ca、NFE、CF、Co、Mg、P 和 Cu 元素。对豆科植物偏食性具有极高贡献的因子分别是 CP、Mg、NFE、P、Fe、Ca、Mn、Co、Zn 和 CF。对杂类草偏食性具有极高贡献的因子分别是 Cu、CF、NFE、Fe 和 Ash。对可食灌木偏食性具有极高贡献的因子分别是 CF 和 NFE。

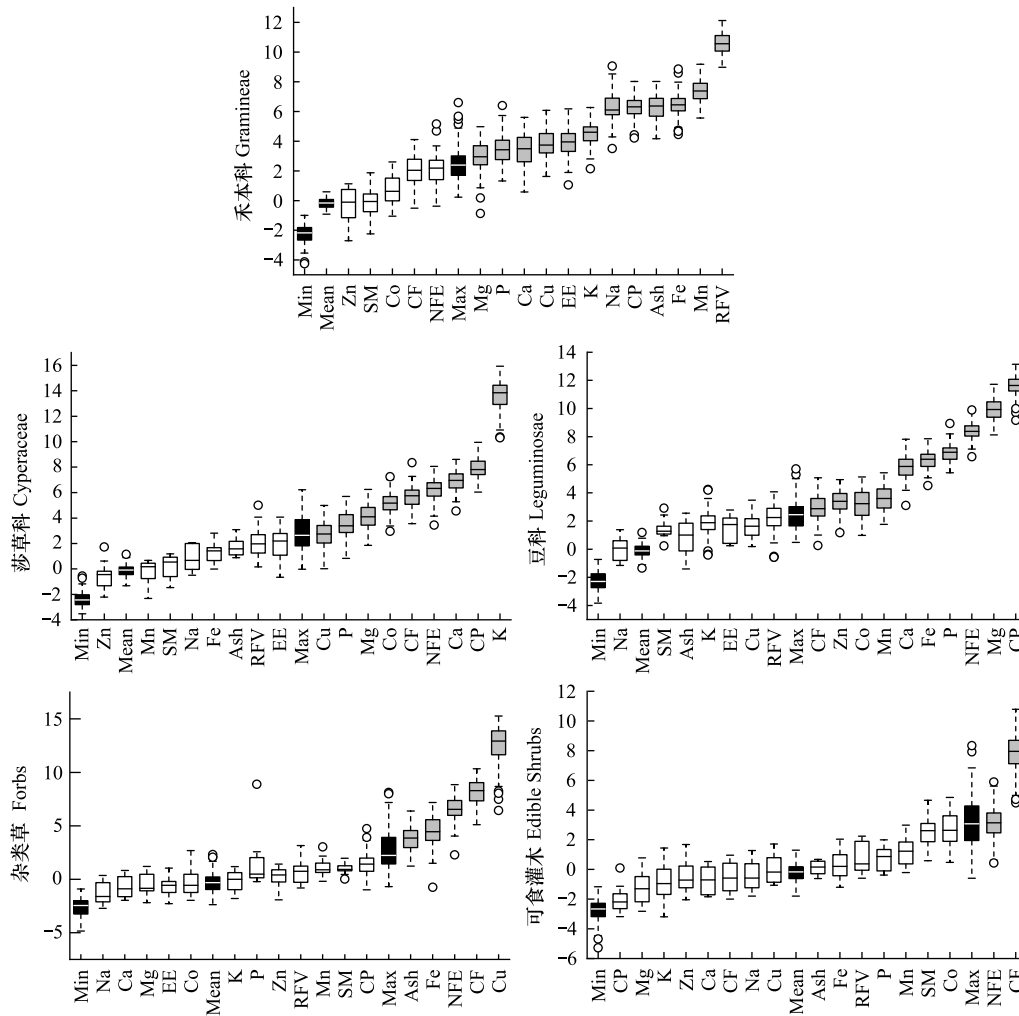


图4 藏羊偏食性变量因子的重要性排序

Fig.4 The importance of variable factors in Tibetan sheep foraging preference

CP:粗蛋白;EE:粗脂肪;Ash:粗灰分;CF:粗纤维;NFE:无氮浸出物;RFV:相对饲用价值;P:磷;K:钾;Na:钠;Ca:钙;Mg:镁;Fe:铁;Mn:锰;Cu:铜;Zn:锌;Co:钴

将上述具有极高贡献的因子划分为植物营养和矿物元素两大类进行方差分解(图5),对于禾本科植物,植物营养物质含量对藏羊的偏食性贡献了24.7%,矿物元素贡献了75.3%,其中CP、RFV和P含量对藏羊偏食性具有显著正向贡献($P<0.05$),而K、Mn和Na含量对藏羊偏食性具有显著负向贡献。对于莎草科植物,植物营养物质含量对藏羊偏食性贡献了35.8%,矿物元素贡献了64.2%,其中CP和Co含量对藏羊偏食性具有显著正向贡献,K含量对藏羊偏食性具有极显著负向贡献($P<0.001$)。对于豆科植物,植物营养物质和矿物元素含量分别对藏羊的偏食性贡献了45.6%和54.4%,其中CP含量对藏羊偏食性具有极显著正向贡献

($P < 0.01$), Mg 含量对藏羊偏食性具有极显著负向贡献 ($P < 0.001$)。对于杂类草植物, 植物营养物质和矿物元素含量分别对藏羊的偏食性贡献了 55% 和 45%, 其中 NFE 对藏羊偏食性具有显著负向贡献, Cu 含量对藏羊偏食性具有极显著正向贡献。

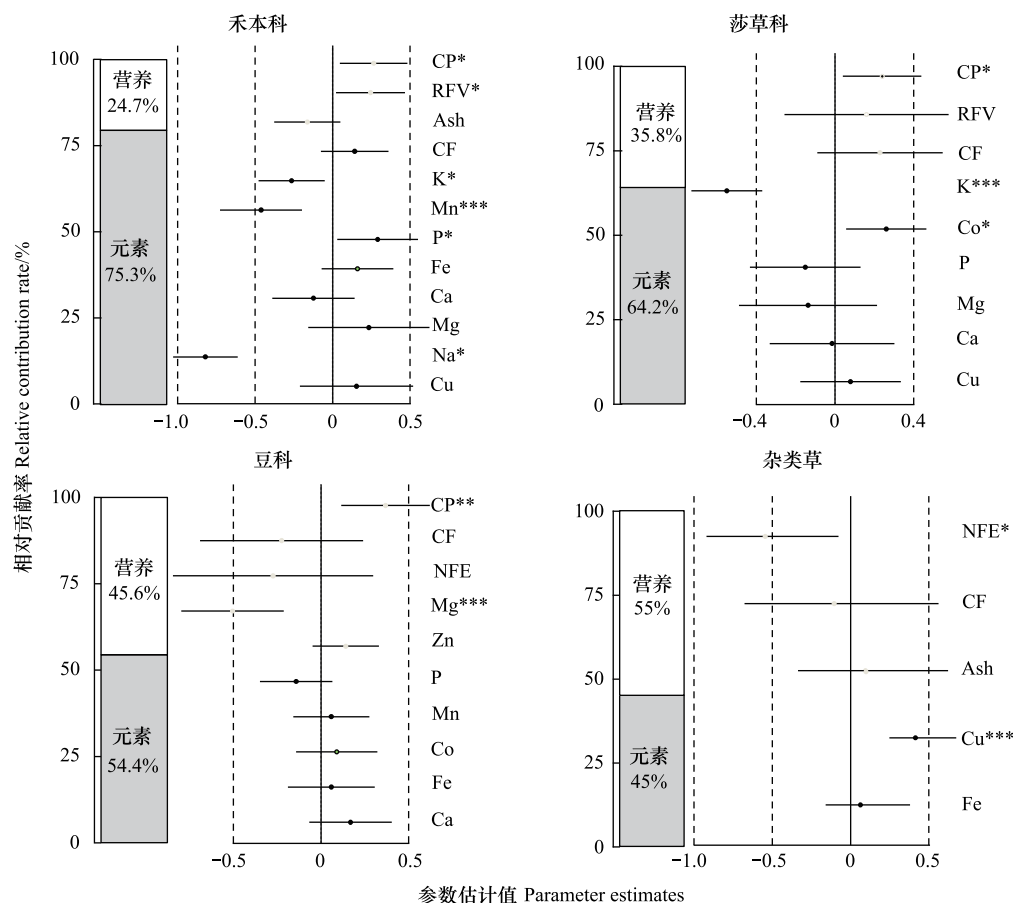


图5 祁连山饲用植物营养物质和矿物元素对藏羊偏食性的贡献

Fig.5 The contribution of forage plant factors to Tibetan sheep foraging preference in Qilian Mountains

* 表示在 0.05 水平上差异显著, ** 表示在 0.01 水平上差异显著, *** 表示在 0.001 水平上差异显著

选取上述方差分解中对藏羊偏食性具有显著贡献的因子建立分段式结构方差模型, 探讨地形、植物功能群及其交互作用对藏羊的偏食性的影响过程及其路径系数(图6)。结果表明, 模型拟合良好, 模型的 $P = 0.61$ 、Fisher's $C = 5.131$ 、Akaike information criterion (AIC) = 88.49。模型分析表明, 地形通过影响植物的粗灰分和粗纤维间接影响藏羊的偏食性。植物功能群对藏羊偏食性有直接正效应, 路径系数为 0.51, 植物功能群还通过影响粗蛋白、粗纤维和相对饲用价值间接影响藏羊的偏食性。地形和功能群的交互作用通过影响粗灰分和钾元素含量间接影响藏羊的偏食性。粗蛋白、粗纤维、相对饲用价值和钾元素含量对藏羊偏食性具有显著直接效应, 路径系数分别为 0.388、-0.336、0.229 和 -0.224。通过计算总效应可知, 粗纤维和粗蛋白对藏羊偏食性的总效应最高, 标准化效应值分别为 0.43 和 0.38。因此, 粗纤维和粗蛋白含量是影响藏羊偏食性的主要因素。

3 讨论

植物营养是反映植物在特定生境下从土壤中吸收和蓄积营养的能力^[19]。饲用植物的营养品质通常是由植物常规化学成分含量决定的, 一般认为粗蛋白含量越高, 粗纤维含量越低, 其营养价值越高^[20-21]。本研究

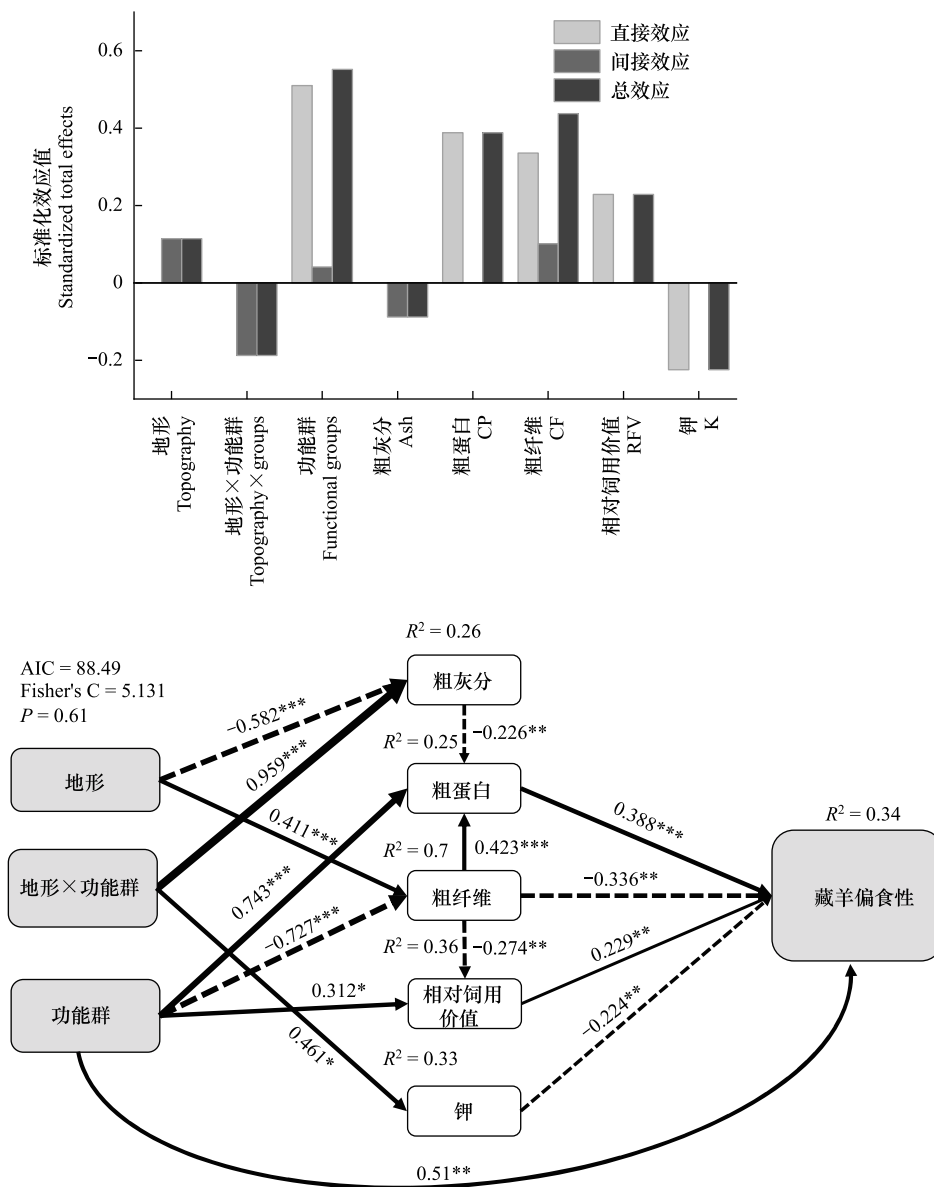


图6 结构方程模型分析植物营养和矿物元素对藏羊偏食性的影响路径及各变量的标准化效应值

Fig.6 Structural equation model was used to analyze the effect of forage grass nutrition and mineral element content variables on foraging preference of Tibetan sheep and the standardized effect value of each variable

图中实线和虚线箭头分别表示显著正向和显著负向路径,数值为标准化路径系数,箭头的粗细表示标准化路径系数的相对大小;*表示在0.05水平上差异显著,**表示在0.01水平上差异显著,***表示在0.001水平上差异显著

对不同地形饲用植物营养研究发现,阳坡禾本科、莎草科、杂类草及群落的粗蛋白含量和粗纤维均显著高于其他地形。O'Brien的“水分-热量动态”理论认为,坡向引诱水分和热量的变化会通过影响微环境的分布格局(光辐射、温湿度及土壤养分)来调节植物的生理活动,最终影响植物的营养特征^[22]。研究表明,环境温度是影响饲用植物营养的主要因素^[23],太阳辐射引诱的热生境导致植物干物质积累速度低于氮素积累速度,植物粗蛋白的含量较高^[24]。此外,随环境温度的升高,植物呼吸增强,累积的非结构性碳水化合物较多,难溶的次生壁结构性碳水化合物(纤维素、半纤维素和木质素)含量相对增加,粗纤维含量较高^[25]。本研究中,阳坡吸收的太阳辐射能量高于其他地形,地表温度高,导致阳坡饲用植物的粗蛋白和粗纤维含量较高,而阴坡光照条件差,地表温度较低植物分解慢,饲用植物的粗蛋白和粗纤维含量最低。矿物元素在饲用植物生长发育过程中不可或缺的营养成分,参与体内细胞分裂^[26]、蛋白质合成^[27]、新陈代谢^[28]及氧化还原过程^[29]。本研究对

不同地形饲用植物矿物元素研究发现,禾本科、莎草科、豆科、杂类草和群落的钙、镁、锰、磷、锌、铜和钴含量均在阴坡和半阴坡较高。土壤有机质含量会正向促进根系对矿物元素的吸收,导致植物矿物元素含量的增加^[30]。此外,土壤丰富的碳、氮源可促进矿物元素溶解,形成可溶性络合物供给植物吸收,增加植物元素含量^[31]。本研究中,阴坡和半阴坡土壤的有机质含量较高,可溶性有机质增加了土壤矿物元素含量,提高了根系对矿物元素的转运能力,导致阴坡和半阴坡植物元素含量较高。此外,阴坡和半阴坡土壤含水量较高,土壤释放矿物元素的速率和频率较快,植物吸收较多^[32],植物元素含量较高。而阳坡土壤有机质含量和土壤水分含量都较低,土壤释放的矿物元素较少,根系对矿物元素的转运不足,导致植物矿物元素含量较低。

家畜的采食行为是家畜为适应不断变化的环境条件和满足不断变化的营养需求,综合考虑后对食物做出的有效采食策略^[33]。家畜采食摄入的营养物质只有在满足生理维持后才能用于生产^[34]。采食量是衡量家畜输入营养物质的重要指标,是反应家畜营养状况的直接因素^[35]。偏食性是家畜最大限度的满足自身生长和繁殖所需要的营养需求时,对某种植物表现出一定的嗜食程度^[36]。家畜的食性选择主要受家畜采食后激素反馈、草地植物资源的分布格局和植物的营养含量等因素的调控^[37]。本研究舍饲自助餐方法进行模拟投喂试验时,家畜因素相同,家畜食性选择主要受植物因子(营养含量和矿物元素)的影响。本研究发现藏羊对阳坡饲用植物群落干物质采食量和偏食性最高,而饲用植物群落营养品质在阳坡最高,这可能是因为家畜更喜食营养价值高的植物^[38]。同时本研究还发现藏羊更喜食阳坡的禾本科、莎草科和杂类草,结构方程表明功能群是藏羊偏食性的主要影响因子。植物功能群是基于植物形态、生理和生活史等对环境因子做出的相似反应,功能群的特征主要受遗传物质和环境因子的影响^[23]。阳坡的水热互作效应有利于禾本科、莎草科和杂类草粗蛋白的积累,但阳坡土壤有机质含量和水分含量较低,释放的矿物元素较少,不利于植物矿物元素含量的积累。家畜喜食阳坡饲用植物,一是阳坡植物粗蛋白含量满足家畜的生长需求,二是阳坡矿物元素含量低,家畜只有最大限度的采食阳坡植物才能补充机体对矿物元素的需求^[39]。本研究还发现粗纤维对藏羊偏食性具有正向作用,这与之前的研究结果不一致^[21]。纤维成分是评价饲用植物质地和适口性的因子,粗纤维含量越低,其营养价值越高^[21]。但本研究中,藏羊是饱腹一餐 5 h 后进行的舍饲自助餐式试验,也就是藏羊在中度饥饿状态下进行的试验^[5],家畜为了生存和生长,必须对某些因素做出权衡,藏羊为饱腹优先选择富含纤维素的植物,因此粗纤维是藏羊偏食性的重要因子。本研究采用“自助餐法”进行了藏羊对不同地形饲用植物偏食性的研究,在家畜非自然状态下反映了藏羊对饲用植物的偏食性,对于进一步深入理解动植物互作关系、揭示藏羊采食行为机制及制定科学放牧管理策略具有重要意义。然而,自然放牧过程最能真切反映家畜对生境的适应与食性选择行为。因此,在后续的研究中有必要开展自然放牧过程家畜对不同地形饲用植物偏食性研究。

4 结论

祁连山禾本科植物的营养品质在阴坡最高,莎草科和豆科植物的营养品质在阶地最高,杂类草和整个植物群落的营养品质在阳坡最高。不同地形饲用植物显著影响藏羊的干物质采食量,藏羊对禾本科、莎草科、杂类草及整个植物群落的干物质采食量均在阳坡显著高于其他地形,而均在河漫滩显著最低。各地形饲用植物中,藏羊对阳坡的禾本科、莎草科、杂类草及整个群落的偏食性最高,而对河漫滩饲用植物的偏食性最低。分段式结构方程表明,地形通过影响植物的粗灰分和粗纤维含量间接影响藏羊的偏食性,植物功能群通过影响粗蛋白、粗纤维和相对饲用价值间接影响藏羊的偏食性,地形和功能群的交互作用通过影响粗灰分和钾元素含量间接影响藏羊的偏食性,其中粗纤维和粗蛋白是影响藏羊偏食性的主要因素。

参考文献 (References):

- [1] 王德利, 王岭, 韩国栋. 草地精准放牧管理: 概念、理论、技术及范式. 草业学报, 2022, 31(12): 191-199.
- [2] 王岭, 张敏娜, 徐曼, 王德利. 草地多功能提升的多样化家畜放牧理论及应用. 科学通报, 2021, 66(30): 3791-3798.
- [3] 王德利, 王岭. 放牧生态学与草地管理的相关概念: I. 偏食性. 草地学报, 2014, 22(3): 433-438.
- [4] Wan H W, Bai Y F, Hooper D U, Schönbach P, Gierus M, Schiborra A, Taube F. Selective grazing and seasonal precipitation play key roles in shaping plant community structure of semi-arid grasslands. Landscape Ecology, 2015, 30(9): 1767-1782.

- [5] 王岭. 大型草食动物采食对植物多样性与空间格局的响应及行为适应机制[D]. 长春: 东北师范大学, 2010.
- [6] Wang L, Wang D L, Bai Y G, Jiang G T, Liu J S, Huang Y, Li Y X. Spatial distributions of multiple plant species affect herbivore foraging selectivity. *Oikos*, 2010, 119(2): 401-408.
- [7] Huang Y, Wang L, Wang D L, Zeng D H, Li Y X, Liu J, Wang Y. Foraging responses of sheep to plant spatial micro-patterns can cause diverse associational effects of focal plant at individual and population levels. *The Journal of Animal Ecology*, 2018, 87(3): 863-873.
- [8] Wang L, Wang D L, Bai Y G, Huang Y, Fan M, Liu J S, Li Y X. Spatially complex neighboring relationships among grassland plant species as an effective mechanism of defense against herbivory. *Oecologia*, 2010, 164(1): 193-200.
- [9] Wang L, Wang D L, He Z B, Liu G F, Hodgkinson K C. Mechanisms linking plant species richness to foraging of a large herbivore. *Journal of Applied Ecology*, 2010, 47(4): 868-875.
- [10] Feng C, Ding S W, Zhang T Y, Li Z Q, Wang D L, Wang L, Liu C, Sun J Y, Peng F G. High plant diversity stimulates foraging motivation in grazing herbivores. *Basic and Applied Ecology*, 2016, 17(1): 43-51.
- [11] Huang Y, Wang L, Wang D L, Li Y X, Alves D G. The effect of plant spatial pattern within a patch on foraging selectivity of grazing sheep. *Landscape Ecology*, 2012, 27(6): 911-919.
- [12] Wang J L, Li W, Cao W X, Abalori T A, Liu Y Z, Xin Y Q, Wang S L, Zhang D G. Soil bacterial community responses to short-term grazing exclusion in a degraded alpine shrubland - grassland ecotone. *Ecological Indicators*, 2021, 130: 108043.
- [13] Wang J L, Li W, Cao W X, Wang S L. Effects of different intensities of long-term grazing on plant diversity, biomass and carbon stock in alpine shrubland on the Qinghai-Tibetan Plateau. *PeerJ*, 2022, 10: e12771.
- [14] Li W, Liu Y Z, Wang J L, Shi S L, Cao W X. Six years of grazing exclusion is the optimum duration in the alpine meadow-steppe of the north-eastern Qinghai-Tibetan Plateau. *Scientific Reports*, 2018, 8: 17269.
- [15] 查轩, 黄少燕, 陈世发. 退化红壤地土壤侵蚀与坡度坡向的关系——基于 GIS 的研究. *自然灾害学报*, 2010, 19(2): 32-39.
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [17] Linn J G, Martin N P. Forage quality analyses and interpretation. *The Veterinary Clinics of North America Food Animal Practice*, 1991, 7(2): 509-523.
- [18] Wang J L, Cao W X, Shi H M and Li W. Forage plants in grasslands with different topographies affect yak foraging preferences on the eastern Tibetan plateau. *Frontiers in Plant Science*, 2024, 15: 1347576.
- [19] Singh M, Dutta S. Growth, yield and quality of teosinte (*Euchleana maxicana* L.) fodder as influenced by nitrogen and phosphorus application. *Journal of Plant Nutrition*, 2021, 44(12): 1732-1740.
- [20] Alibayev N N, Baimukanov A, Yessembekova Z T, Yermakhanov M N, Tuleubayev Z, Abuov G S, Ziyaeva G. Palatability of pasture forage and provision of milk dromedary camels in nutrients. *REPORTS*, 2021, 335(1): 14-18.
- [21] Yang C, Yan T, Sun Y, Hou F. Shrub cover impacts on yak growth performance and herbaceous forage quality on the Qinghai-Tibet Plateau, China. *Rangeland Ecology & Management*, 2021, 75: 9-16.
- [22] 姚喜喜, 周睿, 李长慧, 多杰索南. 坡向对青藏高原高寒草地植被分布格局和牧草品质特征的影响. *草地学报*, 2021, 29(12): 2792-2799.
- [23] 张凡凡, 和海秀, 于磊, 杨开虎, 鲁为华, 马春晖. 新疆沙尔套山四季放牧草地主要牧草营养价值变化特征研究. *草业学报*, 2018, 27(11): 179-191.
- [24] 林洪鑫, 袁展兴, 肖运萍, 汪瑞清, 吕丰娟, 张志华. 不同株型木薯品种干物质生产和氮素累积及利用特征比较. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26(7): 1328-1338.
- [25] 梁建勇, 焦婷, 吴建平, 宫旭胤, 杜文华, 刘海波, 肖元明. 不同类型草地牧草消化率季节动态与营养品质的关系研究. *草业学报*, 2015, 24(6): 108-115.
- [26] Brengi S H, Khedr A A E M, Abouelsaad I A. Effect of melatonin or cobalt on growth, yield and physiological responses of cucumber (*Cucumis sativus* L.) plants under salt stress. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 2022, 21(1): 51-60.
- [27] Johnson R, Vishwakarma K, Hossen M S, Kumar V, Shackira A M, Puthur J T, Abdi G, Sarraf M, Hasanuzzaman M. Potassium in plants: growth regulation, signaling, and environmental stress tolerance. *Plant Physiology and Biochemistry: PPB*, 2022, 172: 56-69.
- [28] Sadeghi F, Rezeizad A, Rahimi M. Effect of zinc and magnesium fertilizers on the yield and some characteristics of wheat (*Triticum aestivum* L.) seeds in two years. *International Journal of Agronomy*, 2021, 2021: 8857222.
- [29] Tavanti R F R, David Queiroz G, Caroline Da Rocha Silva A, Moya Peres W, Pereira Paixão A, Galindo F S, Martins Silva V, Bossolani J W, Moreira Melero M, De Souza Oliveira G, Furlani E Jr, Dos Reis A R. Changes in photosynthesis and antioxidant metabolism of cotton (*Gossypium hirsutum* L.) plants in response to manganese stress. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2020, 66(6): 743-762.
- [30] Daryabeigi Zand A, Mühling K H. Phytoremediation capability and copper uptake of maize (*Zea mays* L.) in copper contaminated soils. *Pollutants*, 2022, 2(1): 53-65.
- [31] Jiang M, Wang K, Wang Y P, Zhao Q L, Wang W Y. Technologies for the cobalt-contaminated soil remediation: a review. *The Science of the Total Environment*, 2022, 813: 151908.
- [32] 杨冲, 王文颖, 刘攀, 周华坤, 索南吉, 刘艳方, 关晋宏. 三江源区不同高寒草地植物矿物元素含量特征及分析. *草地学报*, 2021, 29(S1): 52-61.
- [33] 王岭, 王德利. 放牧家畜食性选择机制研究进展. *应用生态学报*, 2007, 18(1): 205-211.
- [34] Singh M, Dutta S. Growth, yield and quality of teosinte (*Euchleana maxicana* L.) fodder as influenced by nitrogen and phosphorus application. *Journal of Plant Nutrition*, 2021, 44(12): 1732-1740.
- [35] 焦婷, 吴铁成, 吴建平, 赵生国, 雷赵民, 梁建勇, 冉福, 九麦扎西, 刘振恒. 不同类型藏羊消化率与采食量的比较研究. *草业学报*, 2019, 28(5): 100-108.
- [36] 金有顺, 侯扶江. 放牧家畜采食量的测定. *动物营养学报*, 2020, 32(7): 3012-3030.
- [37] 李艳龙, 石椿珺, 程建伟, 郭旭东, 张桐瑞, 李永宏. 内蒙古典型草原三种家畜采食量和食性选择的研究. *草地学报*, 2018, 26(5): 1091-1096.
- [38] 陈文青, 张英俊. 天然羊草草地绵羊采食的季节变化. *草业科学*, 2013, 30(2): 266-273.
- [39] Zhang H, Liu N, Yang G W, Badgery W B, Guo Y P, Zhang Y J. Diet selection of sheep shifted from quality to quantity characteristics of forages as sward availability decreased. *Animal: an International Journal of Animal Bioscience*, 2022, 16(6): 100546.