

DOI:10.11686/cyxb2024070

<http://cyxb.magtech.com.cn>

张振豪, 贾子玉, 李鑫宇, 等. 荒漠草原混牧牛羊的放牧行为特征. 草业学报, 2025, 34(1): 226—237.

ZHANG Zhen-hao, JIA Zi-yu, LI Xin-yu, *et al.* Grazing behavior traits of cattle and sheep on mixed pasture in desert steppe. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(1): 226—237.

荒漠草原混牧牛羊的放牧行为特征

张振豪¹, 贾子玉¹, 李鑫宇¹, 程云湘^{1,2*}

(1. 内蒙古大学生态与环境学院, 内蒙古 呼和浩特 010021; 2. 蒙古高原生态与资源利用教育部重点实验室, 内蒙古 呼和浩特 010021)

摘要: 荒漠草原混合放牧家畜的行为特征对草地资源的可持续利用具有重要意义。本研究在内蒙古自治区锡林郭勒盟镶黄旗的荒漠草原牛羊混合放牧牧场开展。试验选取了畜群中的 4 头牛与 8 只羊, 通过分别佩戴载有三轴加速度传感器的 GPS 定位项圈, 分析了混牧牛羊放牧时间(GTIME)与放牧活动水平(GODBA)的时间动态, 并探讨了牛羊放牧行为特征对草地资源月份变化的响应模式。结果表明, 荒漠草原混牧牛羊的 GTIME 与 GODBA 呈显著正相关关系($R^2>0.60$), 且牛羊的 GODBA 对草地资源的响应模式存在差异。其中, 牛受到地上生物量的正向调控($P<0.05$), 受到 Shannon 指数的负向调控($P<0.01$)。而羊则受到地上生物量与毒杂草重要值的负向调控($P<0.001$), 以及 Shannon 指数与牧草粗蛋白含量的正向调控($P<0.001$)。并且, 混牧牛羊 24 h 的行为模式均表现出“多峰”特征, 且随月份变化有收缩的趋势。同时, 牛羊不同行为之间的活动水平存在显著差异, 且羊的活动水平整体高于牛($P<0.05$)。

关键词: 荒漠草原; 混合放牧; 行为特征; 草地资源; 全局动态加速度

Grazing behavior traits of cattle and sheep on mixed pasture in desert steppe

ZHANG Zhen-hao¹, JIA Zi-yu¹, LI Xin-yu¹, CHENG Yun-xiang^{1,2*}

1. School of Ecology and Environment, Inner Mongolia University, Hohhot 010021, China; 2. Ministry of Education Key Laboratory of Ecology and Resources Use of the Mongolia Plateau, Hohhot 010021, China

Abstract: Understanding of the behavioral traits of mixed-grazed livestock in desert steppe is important when planning the sustainable use of grassland resources. This study was carried out in a desert pasture with mixed-grazing by cattle and sheep in Boarder Yellow Banner, Xilingol League, Inner Mongolia Autonomous Region, China. Four cattle and eight sheep from the herds were selected to wear GPS collars containing three-axis acceleration sensors, and their temporal dynamics of grazing time (GTIME) and grazing overall dynamic body acceleration (GODBA) were analyzed. From the data, we explored the response patterns of grazing behavior traits of mixed-grazed cattle and sheep to the monthly changes in the grassland vegetation. GTIME and GODBA showed significant positive correlations in cattle and sheep grazed together on desert steppe pasture ($R^2>0.60$). Further, the results showed opposite patterns in the GODBA responses of cattle and sheep. Cattle were positively stimulated by above-ground biomass ($P<0.05$), while negatively stimulated by Shannon index ($P<0.01$). Sheep were negatively stimulated by above-ground biomass and the proportion of poisonous herbage ($P<0.001$), while positively stimulated by

收稿日期: 2024-03-05; 改回日期: 2024-05-08

基金项目: 蒙古高原生态与资源利用教育部重点实验室开放基金课题(KF2023004), 内蒙古自治区科技重大专项(2021ZD0044)和内蒙古大学高层次人才科研启动金(10000-21311201/018)资助。

作者简介: 张振豪(1998—), 男, 回族, 河北沧州人, 硕士。E-mail: 1352052967@qq.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: chengyx@imu.edu.cn

Shannon index and forage crude protein content ($P < 0.001$). In addition, the 24-hour behavioral patterns of cattle and sheep on mixed pasture both exhibited “multimodal” characteristics, and tended to shrink with the month changes. Furthermore, there were significant differences between cattle and sheep in acceleration intensity during different types of activity, with the acceleration intensity of sheep being significantly higher than that of cattle ($P < 0.05$).

Key words: desert steppe; mixed grazing; behavioral characteristics; grassland resources; overall dynamic body acceleration (ODBA)

混合物种放牧系统往往比单一物种放牧系统具有更高的单位面积生产力^[1]。这是由于物种间的生态位及其采食重叠存在差异。不同物种往往会根据自身策略来互补地利用草地资源,从而降低或消除彼此间的竞争,使自身获得相对更好的生存条件,并实现对草地资源的最大化利用^[2]。有研究指出,混合放牧在一定程度上可以提高草地的生物多样性和生产力,也是荒漠草原的主要利用方式之一^[3-4]。而作为草地生态系统的重要组成,荒漠草原正面临着严重的退化风险。因此,探明混合放牧家畜在荒漠草原的放牧行为特征及其利用策略对草地资源的可持续利用具有重要意义。

研究表明,不同体型的食草动物受到草地资源状况的限制存在差异^[5-6]。在混合放牧系统内,体型较大的家畜,如牛,属于牧食者(grazers,以较高的植株整体为食),用舌头卷集牧草,以牧草的生物量作为其放牧活动的主要限制因子^[7-8]。而体型较小的家畜,如绵羊,则属于觅食者(browsers,以植被的叶子或嫩芽为食),其口腔窄而长,且对牧草的选择性较强,喜食粗蛋白含量较高的牧草物种^[9-11]。因此,当草地资源发生变化时,不同家畜的放牧行为特征往往具有不同的响应模式。其中,当资源较为匮乏时,草地生物量难以满足牛过多的能量消耗,使其倾向于减少放牧活动以维持自身的生长生存^[12-13]。而体型较小的羊,则倾向于通过增加选择性采食,以实现相对均衡的营养摄入^[14-15]。而当草地生产力趋于丰富时,牛倾向于增加放牧活动以获取更多的物质与能量摄入,羊放牧行为特征的变化则相对较小^[13,16]。但由于草地生物量的增加,羊可以表现出更高的放牧效率^[17-18]。

随着动物运动学及相关支撑技术的发展与成熟,有研究提出,动物的能量消耗可以通过由三轴加速度计算的活动水平(overall dynamic body acceleration, ODBA)来表征^[19-20]。2006年, Wilson等^[20]发现动物的ODBA与其心率及耗氧量具有正线性关系。之后, Stothart等^[21]和 Gleiss等^[22]进一步研究发现ODBA与动物的做功及功率存在着密切的关联。自Wilson等^[20]提出ODBA可用于表征鸬鹚的能量消耗以来,学者们进行了大量的相关研究,印证了ODBA在鱼类、其他鸟类及哺乳类动物中同样都具有广泛的应用价值^[23-24]。此外,研究表明,通过佩戴载有三轴加速度传感器的项圈,可以实现对动物多种行为的分类,其中,对家畜放牧行为的分类精度更是可达90%^[25-28]。由于动物休息时的能量支出主要来源于呼吸消耗,而经由三轴加速度计算的ODBA更多的则是代表着动物运动时的机械能支出,故将家畜放牧行为下的ODBA划分出来,可以更准确地表征家畜的活动水平和行为特征。

Putfarken等^[29]通过GPS定位项圈结合实际观测,发现牛羊在牧场内休息的区域与时间存在差异,并与植被状况密切相关。Plaza等^[30]研究发现,羊群在牧场内的分布除与植被状况相关外,也与围栏的距离存在一定的关联。因此,卫星及遥感技术的进步与发展,使得精确量化家畜在牧场内的分布情况有了良好的技术支撑,搭建了家畜与草地之间时空关系的桥梁^[31-33]。最终,通过为荒漠草原混合放牧的牛羊佩戴载有三轴加速度传感器的GPS定位项圈,建立牛羊的行为分类模型,统计两者的放牧时间,并根据ODBA确定其活动水平。在此基础上,结合月份的植被调查,进一步分析荒漠草原草地植被状况与牛羊混合放牧时的放牧行为特征[放牧活动水平(grazing overall dynamic body acceleration, GODBA);放牧时间(grazing time, GTIME)]之间的关系,以探讨:1)牛羊混牧时活动水平的差异;2)牛羊放牧行为特征的时间动态;3)牛羊放牧活动水平及放牧时间对草地资源变化的响应模式。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验区选取在中国内蒙古自治区锡林郭勒盟镶黄旗某家庭牧场,草地类型为半干旱气候的荒漠草原,优势物种包括碱韭(*Allium polyrhizum*)、银灰旋花(*Convolvulus ammannii*)及小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)等。牧场中部设置饮水点,牧场整体占地长约4500 m,宽约200 m(图1)。年降水量约260 mm,主要集中在夏季的6—8月。牧草生长季(7—9月)的有效降水量不足150 mm。年平均气温3.1℃,无霜期126 d。年均蒸发量2250 mm,该地区的牧草生长及放牧活动受降水限制较强。

1.2 试验动物

试验选取30头体型接近的成年西门塔尔母牛,与150只体型接近的成年察哈尔母羊,混合放牧,试验地牧场载畜率为3.0~3.5 sheep·unit·hm⁻²。其中,随机选取4头牛,8只羊佩戴GPS定位项圈(DEBUT系列,德鲁伊科技有限公司,中国成都),作为动物试验重复,以确定畜群的放牧行为特征,并排除动物个体的差异性。项圈设备包括BADGE与NANO,其中,BADGE设备用于实时收集牛羊的活动水平及经纬度信息,以获得牛羊在牧场内的空间分布(图1)。NANO设备则用于收集牛羊的三轴加速度原始数据,以建立牛羊的行为分类模型。试验于2021—2022年的每年牧草生长季(7—9月)进行,牛羊在牧场内24 h自由放牧,无人为干扰。

$$ODBA = |X_m - X_s| + |Y_m - Y_s| + |Z_m - Z_s| \quad (1)$$

式中:ODBA表示动物的活动水平,整体动态加速度(G); X_m 表示X轴方向的动态加速度(G); X_s 表示X轴方向的静态加速度(G); Y_m 表示Y轴方向的动态加速度(G); Y_s 表示Y轴方向的静态加速度(G); Z_m 表示Z轴方向的动态加速度(G), Z_s 表示Z轴方向的静态加速度(G)。

本研究中,仅NANO设备获取的三轴加速度数据需要换算,在BADGE设备中,ODBA的滑动窗口为10且自动计算上传的后台数据。滑动窗口指用于平滑静态加速度数据时所采用的窗口间隔,本研究统一选取了10的滑动窗口。

1.3 行为分类

试验开始后每月进行3~5 d的行为观测,并将1 min内存在多种行为或行为发生变化的数据剔除以保证行为数据的单调性^[27]。最终,共获得3500条牛的实际观测数据,2500条羊的实际观测数据。牛羊行为首先分为卧态休息(lying-rest)、卧态反刍(lying-ruminate)、站立休息(standing-rest)、站立反刍(standing-ruminate)、行走(walk)、采食(forage),共6种多分类行为。其次,则是放牧(graze)与非放牧(non-graze)的二分类行为。由于家畜在牧场上的行走行为大部分发生在采食行为下,而单纯的行走行为较少,仅占每天的1%不到,所以在二分类中,将行走归类于放牧行为下。利用三轴加速度原始数据计算ODBA以及用于模型分类的特征值并筛选,结合实际观测数据,比较以上分类情况分别在极致梯度提升(extreme gradient boosting, XGBoost)、支持向量机(support vector machines, SVM)和决策树(classification and regression tree, CART)3类机器学习模型下的分类精确度,以确定最优分类模型。

1.4 植被样品采集及营养品质测定

于生长季(7—9月)的每月中旬采集植被样品,在牧场内间隔200 m均匀设置30个1 m×1 m的样方,进行植被群落特征调查,包括样方内所有物种的名称、数量、高度、盖度,贴地剪取地上生物量(above ground biomass, AGB),并计算物种重要值及物种多样性。植被样品在65℃条件下烘至恒重,粉碎后过0.425 mm筛,测定牧草粗脂肪(ether extract, EE)、粗蛋白(crude protein, CP)、中性洗涤纤维(neutral detergent fiber, NDF)、酸性洗涤纤维(acid detergent fiber, ADF)等营养成分含量。其中,牧草粗脂肪含量的测定参照《饲料中粗脂肪的测定》^[34]。牧草粗蛋白含量采用凯氏定氮法测定,换算系数为6.25。牧草中性洗涤纤维含量的测定参照《饲料中中性洗涤纤维(NDF)的测定》^[35],酸性洗涤纤维含量的测定参照《饲料中酸性洗涤纤维的测定》^[36]。

功能群比例(重要值)计算:

$$P_i = (h_i + c_i + d_i) / 3 \quad (2)$$

式中: P_i 为物种重要值; h_i 为*i*物种的相对高度; c_i 为*i*物种的相对盖度; d_i 为*i*物种的相对密度。

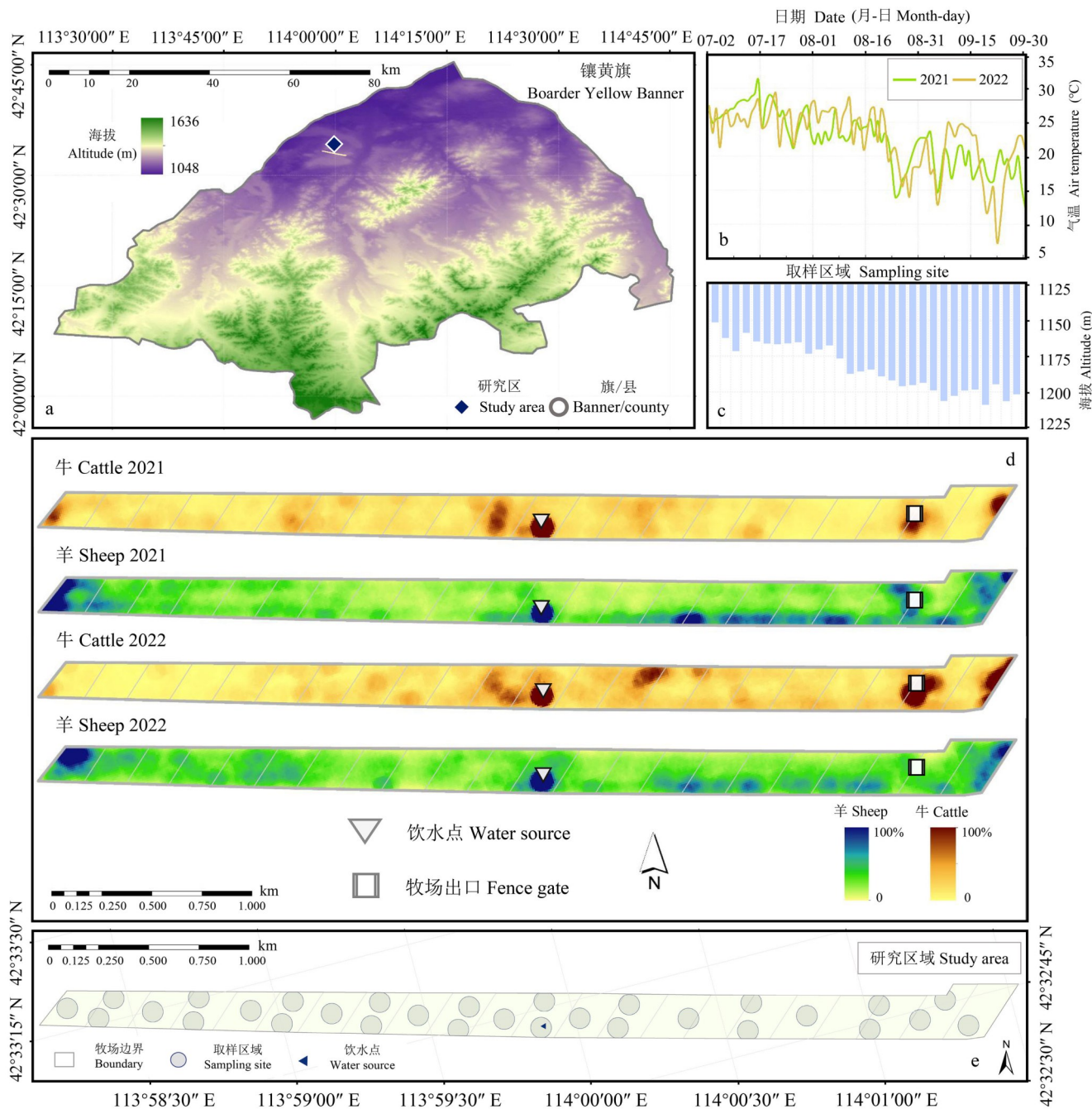


图 1 研究区位置与家畜分布

Fig. 1 Location of the study area and livestock distribution

该图基于自然资源部标准地图服务网站蒙S(2020)030号标准地图制作,底图无修改。b为2021—2022年试验期内的日均气温变化。c为试验区海拔分布格局。d为2021—2022年生长季混牧牛羊在牧场内的空间分布;色带表示牛羊在牧场内出现的频率(0~100%),数值越大表示出现频率越高。The Figure is based on standard map No. MengS(2020)030 of the standard map service website of the Ministry of Natural Resources. The base map is not modified. b shows the daily mean air temperature change during the experimental period in 2021 and 2022. c shows the distribution pattern of altitude in the experimental area. d shows the spatial distribution of cattle and sheep in the mixed pasture during the growing seasons of 2021 and 2022. The color band represents the frequency of cattle and sheep in the pasture (0—100%), and the larger the value, the higher the frequency.

物种多样性计算:

$$\text{Shannon} = -\sum P_i \ln P_i \quad (3)$$

$$\text{Pielou} = \text{Shannon} / \ln S \quad (4)$$

式中:S为群落中的物种总数目。

1.5 数据分析

家畜项圈数据下载整理后,利用 IBM SPSS 20.0 对家畜数据集进行初步统计,将三轴加速度数据导入 R 4.3.0 中,建立极致梯度提升、支持向量机以及决策树的机器学习模型对牛羊的行为进行分类^[28]。根据行为分类模型确定家畜行为,利用 SPSS 及 R 对荒漠草原牛羊混合放牧下的行为模式及特征进行单因素(one-way ANOVA)与多因素方差分析(multifactor ANOVA),确定家畜不同行为之间活动水平(ODBA)的差异,并绘制混牧牛羊 ODBA 的 24 h 日动态。通过家畜的放牧行为计算牛羊的日累计放牧活动水平(GODBA)和日累计放牧时间(GTIME),绘制其放牧行为特征的时间变化动态,并利用多元线性回归模型(multiple linear regression model, MLR)对其影响因素及影响方式进行分析。此外,利用 ArcGIS 10.8 绘制研究区概况及牛羊时空密度图。并且为降低数据冗余度,在行为观测外的日期,将 BADGE 设置为 30 min 间隔获取 ODBA 的采样配置。

2 结果与分析

2.1 牛羊的行为分类模型

对牛来说,在 3 种机器学习模型中,二分类模型的精度均高于多分类。并且,二分类中三类模型精确度接近,XGBoost 为 96.44%,SVM 为 95.80%,CART 为 93.86%。羊表现出与牛相似的结果,XGBoost 为 94.16%,SVM 为 96.27%,CART 为 93.52%(表 1)。

2.2 牛羊不同行为的活动水平差异

混牧牛羊的活动水平(ODBA)存在显著性差异,且羊的 ODBA 整体高于牛($P<0.05$,图 2)。两个物种在行走行为(walk)下的 ODBA 均显著高于其他行为($P<0.05$)。并且,两者的行走和采食行为(forage)的 ODBA 整体显著高于休息(rest)和反刍行为(ruminate),即牛羊在牧场内放牧行为(grazing behavior)的 ODBA 显著高于非放牧行为(non-grazing behavior)。同时,与二分类决策树模型一致,混牧牛羊的放牧与非放

表 1 机器学习模型分类精确度

Table 1 Classification accuracy of machine learning model (%)

物种 Species	分类类别 Classification types	模型精度 Accuracy		
		XGBoost	SVM	CART
牛 Cattle	二分类 Binary classification	96.44	95.80	93.86
	多分类 Multiple classification	77.00	73.00	74.70
羊 Sheep	二分类 Binary classification	94.16	96.27	93.52
	多分类 Multiple classification	75.61	72.85	73.58

Accuracy 表示模型整体的分类准确率。Accuracy indicates the overall classification accuracy of the machine learning model. XGBoost: 极致梯度提升 Extreme gradient boosting; SVM: 支持向量机 Support vector machines; CART: 决策树 Classification and regression tree.

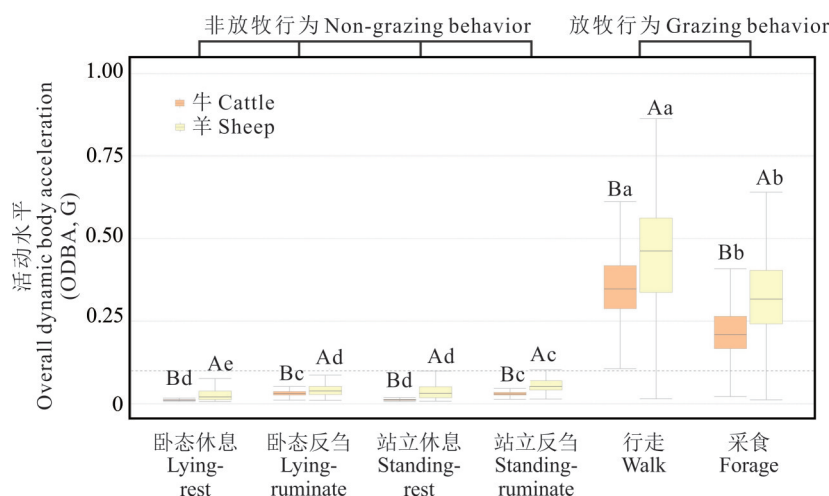


图 2 混牧牛羊不同行为下的活动水平

Fig. 2 ODBA under different behaviors of mixed-grazing cattle and sheep

G: 重力加速度单位($9.80 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$)。不同大写字母表示同一放牧行为不同物种间差异显著($P<0.05$),不同小写字母表示同一物种不同放牧行为间差异显著($P<0.05$)。G: Gravitational acceleration unit ($9.80 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$). Different uppercase letters indicate significant difference between different species of the same grazing behaviors ($P<0.05$), and different lowercase letters indicate significant differences among different grazing behaviors of the same species ($P<0.05$).

牧行为的分类阈值可划分为0.10 G。

2.3 混牧牛羊放牧行为特征的时间动态

混牧牛羊 ODBA 的 24 h 动态在月份和年际间的变化趋势基本一致,存在明显的波峰和波谷,表现为“多峰”模式(图 3a,b)。但两种家畜间“峰”的分布存在差异,且羊的峰值高于牛,而峰数则少于牛。此外,随着月份的变化,牛羊开始放牧的时间后移($ODBA > 0.10\text{ G}$),结束放牧的时间前移($ODBA < 0.10\text{ G}$)。

混牧牛羊各自放牧活动水平(GODBA)与放牧时间(GTIME)的月份动态在年间的变化趋势一致,但两个物种间存在差异(图 3c,d)。在放牧初期,羊的 GODBA 高于牛,而在放牧末期,羊则低于牛(图 3c,d)。随着月份的变化,牛的神 GODBA 表现为有所增加(图 3c),而羊则表现为显著减少的模式($P < 0.05$,图 3d)。同时,随着月份变化,牛的神 GTIME 呈一定的增加趋势,而羊的神 GTIME 则呈显著减少的趋势($P < 0.01$)。并且,牛羊 GTIME 的整体趋势均与各自 GODBA 的变化趋势一致(图 3e,f)。

2.4 植被营养品质及群落物种组成的月份动态

草地植被状况在月份间存在差异,但两年间变化趋势不完全一致(表 2)。2021 年,AGB 随着月份变化呈增加趋势($P > 0.05$)。2022 年,AGB 则呈先增加后降低的趋势,且 8 月的 AGB 显著高于 9 月($P < 0.05$)。两年间,

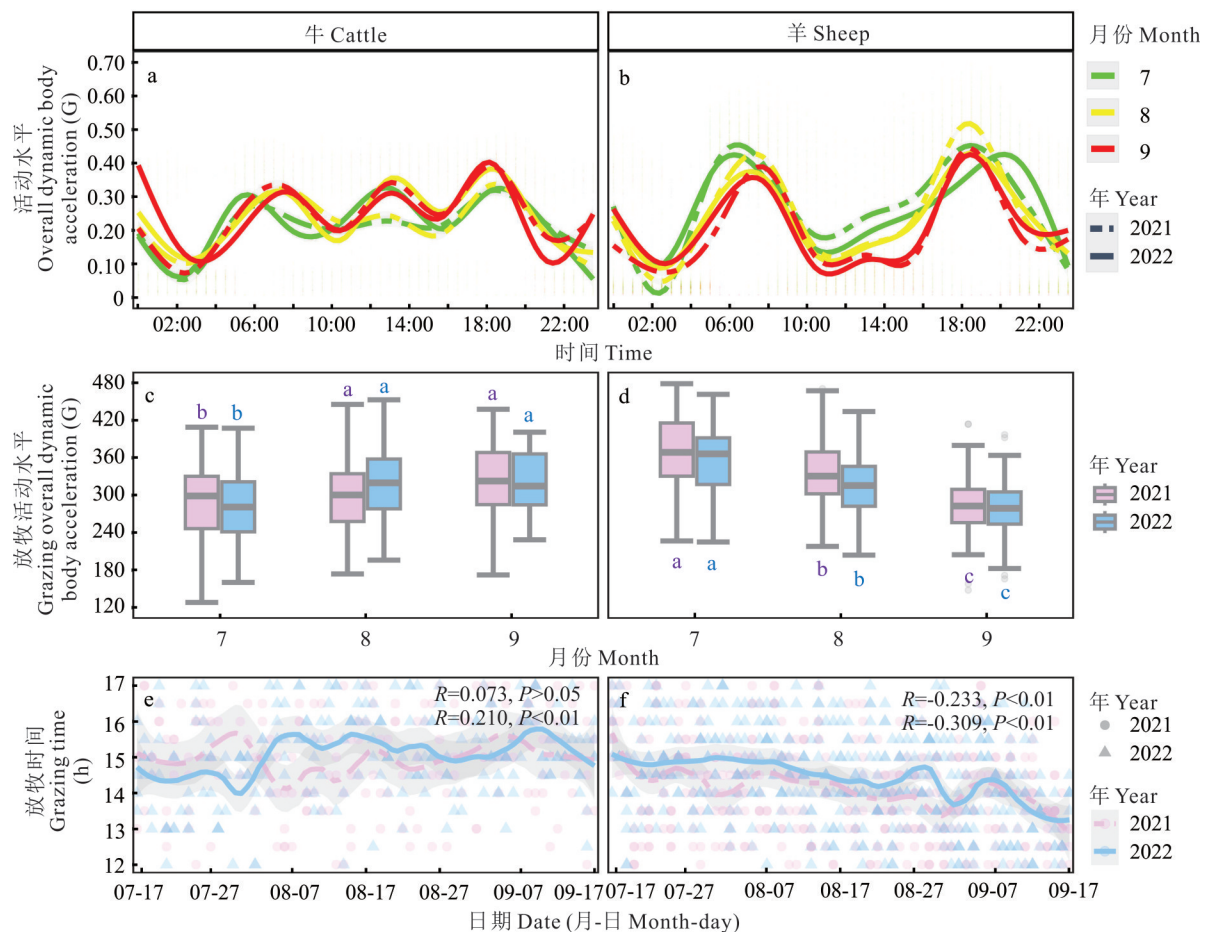


图3 混牧牛羊行为特征的时间动态

Fig. 3 Temporal dynamics of behavioral characteristics of mixed-grazing cattle and sheep

a, b 分别表示牛和羊活动水平(ODBA)的 24 h 动态。c, d 分别表示牛和羊放牧活动水平(GODBA)的月份动态,同一颜色不同小写字母表示家畜不同月份间差异显著($P < 0.05$)。e, f 分别表示牛和羊放牧时间(GTIME)的月份动态, R 表示家畜放牧时间与时间序列的相关系数, P 表示相关系数显著性。a and b represent the 24 hours overall dynamic body acceleration (ODBA) dynamics of cattle and sheep, respectively. c and d represent the monthly dynamics of grazing overall dynamic body acceleration (GODBA) of cattle and sheep, respectively. The same color lowercase letters indicate significant differences among different months of the same livestock ($P < 0.05$). e and f represent the monthly dynamics of grazing time (GTIME) of cattle and sheep, respectively. R denotes the correlation coefficient of grazing time and time series, and P denotes the correlation coefficient significance.

表 2 牧草营养品质与群落物种组成的月份动态

指标 Indexes	2021					
	7月 July	8月 August	9月 September	7月 July	8月 August	9月 September
	2022					
地上生物量 Above ground biomass (AGB, g·m ⁻²)	40.12±4.96a	50.72±9.55a	58.02±8.52a	41.07±6.35ab	50.56±5.07a	37.26±6.03b
粗脂肪 Ether extract (EE, g·100 g ⁻¹)	2.27±0.15a	2.65±0.16a	2.44±0.04a	1.81±0.07a	2.02±0.08a	1.91±0.10a
粗蛋白 Crude protein (CP, g·100 g ⁻¹)	16.46±0.98a	17.75±0.86a	17.25±1.12a	16.05±1.18b	19.52±1.15a	16.26±1.09b
中性洗涤纤维 Neutral detergent fibre (NDF, g·100 g ⁻¹)	54.74±0.40b	56.70±0.26a	57.01±0.42a	38.66±1.56ab	36.64±1.39b	41.48±1.26a
酸性洗涤纤维 Acid detergent fibre (ADF, g·100 g ⁻¹)	36.55±0.27a	37.00±0.30a	37.16±0.23a	32.91±1.72a	32.83±1.28a	34.68±1.24a
香农指数 Shannon index	2.12±0.055a	2.28±0.071a	2.25±0.060a	2.00±0.046a	1.96±0.059ab	1.83±0.047b
均匀度指数 Pielou index	0.89±0.005a	0.88±0.013ab	0.86±0.009b	0.85±0.009a	0.85±0.011a	0.84±0.011a
禾本科重要值 Graminae important value	0.251±0.11a	0.235±0.08a	0.248±0.06a	0.180±0.08b	0.195±0.11ab	0.243±0.12a
百合科重要值 Liliaceae important value	0.252±0.16a	0.280±0.15a	0.261±0.13a	0.218±0.15ab	0.261±0.18a	0.177±0.16b
豆科重要值 Leguminosae important value	0.154±0.10a	0.138±0.08a	0.177±0.10a	0.130±0.11a	0.085±0.10a	0.108±0.16a
旋花科重要值 Convolvulaceae important value	0.148±0.09a	0.083±0.07ab	0.062±0.09b	0.116±0.13a	0.091±0.09a	0.140±0.15a
菊科重要值 Compositae important value	0.060±0.06a	0.007±0.02b	0.014±0.02b	0.022±0.03a	0.011±0.02a	0.011±0.02a
毒杂草重要值 Poisonous weeds important value	0.065±0.09a	0.085±0.10a	0.077±0.10a	0.069±0.13a	0.074±0.14a	0.071±0.15a
其他杂类草重要值 Other forbs important value	0.073±0.04b	0.172±0.06a	0.163±0.09a	0.202±0.14a	0.283±0.13a	0.249±0.15a

注：禾本科主要包括羊草、克氏针茅和糙隐子草等；百合科主要包括碱韭和野韭；豆科主要包括小叶锦鸡儿和乳白花黄芪；旋花科为银灰旋花；菊科主要为冷蒿和黄蒿；毒杂草包括草麻黄和狼毒等；其他杂类草包括虫实、地锦、藜蓼、骆驼蓬、兴安天门冬、猪毛菜以及二裂委陵菜等。不同小写字母表示植被特征在不同月份间的差异显著 ($P<0.05$)。Graminae 主要包括 *Leymus chinensis*, *Stipa krylovii* and *Cleistogenes squarrosa*. Liliaceae 主要包括 *A. polyrhizum* and *Allium ramosum*. Leguminosae 主要包括 *C. microphylla* and *Astragalus galactites*. Convolvulaceae 主要包括 *C. ammannii*. Compositae 主要包括 *Artemisia frigida* and *Artemisia gmelinii*. Poisonous 主要包括 *Ephedra sinica* and *Stellera chamaejasme*. Other forbs 主要包括 *Corispermum hyssopifolium*, *Euphorbia humifusa*, *Tribulus terrestris*, *Peganum harmala*, *Asparagus dauricus*, *Salsola collina* and *Potentilla bifurca*. Different lowercase letters indicate significant differences in vegetation characteristics among months ($P<0.05$).

EE 和 ADF 随月份变化无显著差异,但 NDF 随月份变化均呈显著增加趋势($P<0.05$)。2021 年,CP 和 Shannon 指数随月份变化无显著差异。但在 2022 年,CP 随月份变化呈先增加后降低的趋势,且 8 月最高。而 Shannon 指数随月份变化呈显著减少的趋势($P<0.05$)。Pielou 指数在 2021 年随月份变化呈显著减少的趋势($P<0.05$),但 2022 年无显著差异。牧场内的杂类草重要值在 2021 年呈显著增加趋势($P<0.05$),旋花科与菊科重要值在 2021 年呈显著减少趋势。禾本科重要值在 2022 年呈显著增加趋势($P<0.05$),而百合科重要值在 2022 年则显著减少($P<0.05$)。此外,豆科与毒杂草重要值在月份间无显著差异,但豆科重要值随月份变化呈先减少后增加的趋势,毒杂草重要值呈先增加后减少的趋势。

2.5 牛羊放牧时间与放牧活动水平的关系及其影响因素

混牧牛羊的 GTIME 均随着 GODBA 的增加而增加($R^2>0.60$,图 4b,d),但对草地的植被特征表现出相反的响应模式(图 4a,c)。牛放牧活动水平随着地上生物量的增加而增加($P<0.05$),随着 Shannon 指数的增加而减少($P<0.01$),同时还受到毒杂草重要值和牧草粗蛋白含量的正向影响(图 4a)。羊与牛呈现出相反的响应模式,其放牧活动水平随着地上生物量的增加而降低($P<0.001$),随着 Shannon 指数的增加而增加($P<0.001$),同时受到毒杂草重要值的负向影响以及牧草粗蛋白的正向影响($P<0.001$,图 4c)。

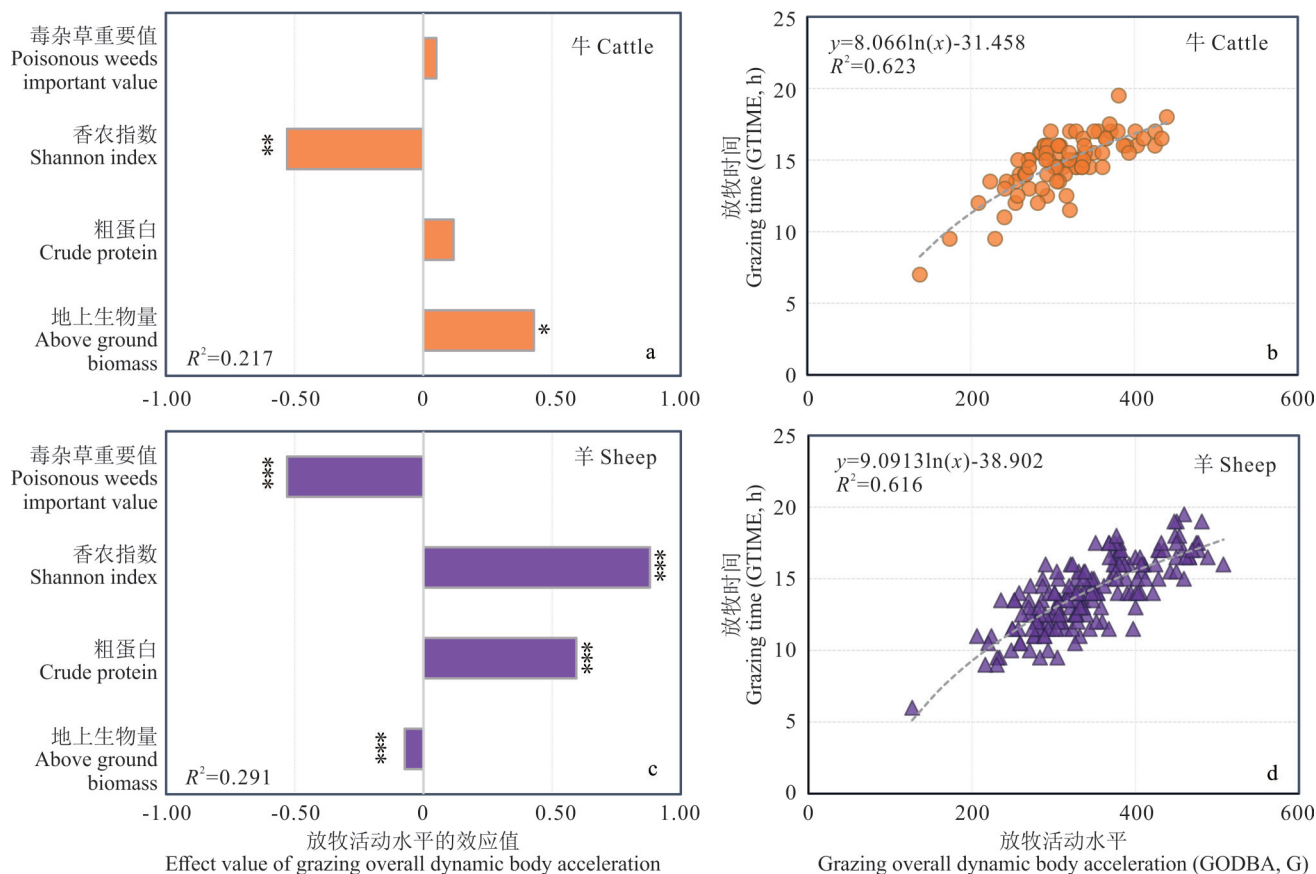


图4 混牧牛羊放牧行为特征的影响因素

Fig. 4 Factors on grazing behavioral characteristics of mixed-grazing cattle and sheep

a, c 为多元线性回归模型。b, d 为对数回归模型。 R^2 为模型拟合优度。a and c are multiple linear regression models. b and d are logarithmic regression models. R^2 indicates the model goodness-of-fit. ***: $P<0.001$; **: $P<0.01$; *: $P<0.05$.

3 讨论

荒漠草原混牧牛羊不同行为之间的活动水平存在差异,特别是放牧与非放牧活动,可以将 ODBA 用于对牛羊放牧行为的简单分类,分类模型阈值为 0.10 G (图 2)。混牧牛羊的 ODBA 存在差异,羊的 ODBA 整体高于牛

(图2)。造成其差异的主要原因是两者体型的不同。首先,因为羊的体型远小于牛,其咬口尺寸相对自身而言更大^[29-33],可以更高效率地获得满足身体所需的牧草摄入,且用于咀嚼和吞咽所需的时间相对更长^[37],使其在两次采食之间的停顿以及行走的距离有所增加^[38]。而由于家畜行走行为的ODBA显著高于采食行为(图2),因此,在放牧过程中夹杂了更多行走行为的羊的ODBA相对更高。其次,嘴巴窄而长的构造,使得羊对选择性采食的执行能力相对更强^[7-11],并且,在行走距离较远的情况下,羊可以检测到更为丰富的草地资源^[29,37]。因此,羊在放牧活动中存在更为频繁的低头采食与抬头觅食之间的动作切换,从而表现为更高的活动水平。最后,体型更小的羊在非放牧过程中的反刍和呼吸行为的动作幅度相对更为剧烈,导致其ODBA同样高于牛。

牛羊活动水平整体上均表现出“多峰模式”(图3a,b),这与以往的研究结果相一致^[12,39-41]。凌晨放牧初期,家畜分布相对聚集且饥饿感较强,为在更短时间内获取足够的物质摄入以消除饥饿感,表现为活动水平逐渐增强,即快速放牧的趋势,同时实现分散采食^[42-43]。随着放牧的持续进行,家畜体力和饥饿感逐渐衰减,当活动水平达到峰值,其饥饿感与能量支出达到平衡,从而通过调整行走和采食行为的分配模式,实现稳定且低能耗的放牧方式^[31,44]。最终,当饥饿感得到满足,且环境气温和日照达到一天内较高的范围,家畜转变为非放牧活动(图3a,b)。同样,家畜在午休之后的放牧活动规律与以上解释类似,但由于饥饿感弱于凌晨时,且受到温度等环境因素的限制,家畜在午休前后的放牧活动中,活动水平变化趋势缓慢(图3a,b)。而在放牧结束前,由于光照、动物本能以及躲避天敌等因素,家畜表现出更快结束放牧的倾向^[37,45-47],从而导致放牧末期的ODBA呈现较快的降低趋势(图3a,b)。

随着月份的变化,牛羊开始放牧与结束放牧的时间发生移动,趋于压缩,牛羊的GTIME与GODBA随月份的变化整体均呈减少的趋势,但两种家畜的变化模式不同(图3c~f)。多元线性回归分析的结果表明,牛的古DBA受AGB的正向调控,受Shannon指数的负向调控,而羊则与之相反(图4a,c)。这是因为随着草地生物量的增加,牛会扩大放牧范围,从而增加放牧活动水平和放牧时间,以获得更多的物质总量的摄入^[8,48]。同时,由于牛较大的体型受到荒漠草原更强的限制,在草地生物量减少的时候,牛会趋于减少放牧,从而保留能量^[6-7]。然而,在多样性较高的情况下,草地生物量则相对较低(表2),这导致牛的活动水平降低,从而使得牛的放牧时间下调。与之相反,由于体型较小,选择性更强的羊受到草地资源的限制反而相对更小^[7,14]。因此,随着草地多样性和牧草蛋白质含量的增加,羊的选择性采食增加,觅食的行走行为增多,导致其活动水平增加,并增加了放牧时间^[8,11]。但在草地生物量增多的时候,羊的放牧效率得以提高,从而降低了放牧活动水平,且在日粮需求更快地得到满足的情况下,羊的放牧时间下调^[18,49]。此外,在毒杂草分布增多的情况下,羊为了避免采食有毒的草麻黄及狼毒等物种,倾向于减少放牧行为,从而降低了放牧活动水平。

4 结论

荒漠草原牛羊混牧时的放牧时间与放牧活动水平呈显著正相关关系,且两种家畜的放牧活动水平对草地资源的响应模式存在差异。其中,牛受到地上生物量的正向调控,受到Shannon指数的负向调控。羊受到地上生物量与毒杂草重要值的负向调控,受到Shannon指数与牧草粗蛋白含量的正向调控。并且,混牧牛羊24 h的行为模式均表现出“多峰”特征,且随月份变化有收缩的趋势。此外,牛羊不同行为之间的活动水平存在显著差异,两者之间的活动水平也存在显著差异,且羊的活动水平整体高于牛。

参考文献 References:

- [1] d'Alexis S, Sauvant D, Boval M. Mixed grazing systems of sheep and cattle to improve liveweight gain: a quantitative review. *The Journal of Agricultural Science*, 2014, 152(4): 655—666.
- [2] Acebes P, Traba J, Malo J E. Co-occurrence and potential for competition between wild and domestic large herbivores in a South American desert. *Journal of Arid Environments*, 2012, 77: 39—44.
- [3] Gullap M K, Erkovan H I, Koc A. Differences in vegetation and soil properties of the highland rangelands grazed with single cattle herd and cattle+sheep herds. *Environmental Science, Agricultural and Food Sciences*, 2018, 7: 62—66.

- [4] Fraser M D, Vale J E, Dhanoa M S. Alternative upland grazing systems: Impacts on livestock performance and sward characteristics. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2013, 175: 8–20.
- [5] Demment M W, Van Soest P J. A nutritional explanation for body-size patterns of ruminant and nonruminant herbivores. *The American Naturalist*, 1985, 125(5): 641–672.
- [6] Illius A W, Gordon I J. The allometry of food intake in grazing ruminants. *The Journal of Animal Ecology*, 1987, 56(3): 989–999.
- [7] Cuchillo-Hilario M, Wrage-Mönnig N, Isselstein J. Forage selectivity by cattle and sheep co-grazing swards differing in plant species diversity. *Grass and Forage Science*, 2018, 73(2): 320–329.
- [8] Sanon H O, Kaboré-Zoungana C, Ledin I. Behaviour of goats, sheep and cattle and their selection of browse species on natural pasture in a Sahelian area. *Small Ruminant Research*, 2007, 67(1): 64–74.
- [9] Hofmann R R. Evolutionary steps of ecophysiological adaptation and diversification of ruminants: a comparative view of their digestive system. *Oecologia*, 1989, 78(4): 443–457.
- [10] Norman H C, Freind C, Masters D G, *et al.* Variation within and between two saltbush species in plant composition and subsequent selection by sheep. *Australian Journal of Agricultural Research*, 2004, 55(9): 999–1007.
- [11] Xu W X, Xia C J, Lin J, *et al.* Diet of *Gazella subgutturosa* (Güldenstaedt, 1780) and food overlap with domestic sheep in Xinjiang, China. *Folia Zoologica*, 2012, 61(1): 54–60.
- [12] Hou L L, Wang X, Zhang X, *et al.* The effect of grazing intensity on beef cattle's behavior. *Acta Agrestia Sinica*, 2021, 29(9): 1974–1982.
侯路路, 王旭, 张翔, 等. 放牧强度对肉牛行为的影响. *草地学报*, 2021, 29(9): 1974–1982.
- [13] Xue B, Zhao X Q, Zhang Y S. Dynamic changes of body weight and energy of livestock grazing on natural grassland in Qinghai Tibetan Plateau. *Animal Husbandry & Veterinary Medicine*, 2005, 37(1): 1–4.
薛白, 赵新全, 张耀生. 青藏高原天然草场放牧家畜体重和体能量变化动态. *畜牧与兽医*, 2005, 37(1): 1–4.
- [14] Laca E A, Sokolow S, Galli J R, *et al.* Allometry and spatial scales of foraging in mammalian herbivores. *Ecology Letters*, 2010, 13(3): 311–320.
- [15] Li H, Yang Y C, Wang X, *et al.* Response of grazing behavior of typical steppe sheep to grazing intensity. *Journal of Inner Mongolia University (Natural Science Edition)*, 2022, 53(4): 376–382.
李浩, 杨妍辰, 王旭, 等. 典型草原绵羊牧食行为对放牧强度的响应. *内蒙古大学学报(自然科学版)*, 2022, 53(4): 376–382.
- [16] Wang S R N, Han G D, Zhang S W, *et al.* Analysis of sheep grazing behavior and interaction with grassland environment in desert steppes using 3S. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015, 23(7): 860–867.
王萨仁娜, 韩国栋, 张圣微, 等. 基于 3S 技术的绵羊牧食行为与草地环境相互作用研究. *中国生态农业学报*, 2015, 23(7): 860–867.
- [17] Wan L Q, Chen W W, Li X L, *et al.* Effect of grazing intensities on foraging behaviors of goats on a cultivated pasture of southern China. *Acta Prataculturae Sinica*, 2013, 22(4): 275–282.
万里强, 陈玮玮, 李向林, 等. 放牧强度对山羊采食行为的影响. *草业学报*, 2013, 22(4): 275–282.
- [18] Wang S P, Li Y H. Behavior ecology of grazing sheep V. interrelation between ingestion behavior and sward characteristics. *Acta Prataculturae Sinica*, 1997, 6(4): 31–38.
汪诗平, 李永宏. 放牧绵羊行为生态学研究 V. 采食行为参数与草地状况的关系. *草业学报*, 1997, 6(4): 31–38.
- [19] Miwa M, Oishi K, Nakagawa Y, *et al.* Application of overall dynamic body acceleration as a proxy for estimating the energy expenditure of grazing farm animals: relationship with heart rate. *PLoS One*, 2015, 10(6): e0128042.
- [20] Wilson R P, White C R, Quintana F, *et al.* Moving towards acceleration for estimates of activity-specific metabolic rate in free-living animals: the case of the cormorant. *Journal of Animal Ecology*, 2006, 75(5): 1081–1090.
- [21] Stothart M R, Elliott K H, Wood T, *et al.* Counting calories in cormorants: dynamic body acceleration predicts daily energy expenditure measured in pelagic cormorants. *Journal of Experimental Biology*, 2016, 219(14): 2192–2200.
- [22] Gleiss A C, Wilson R P, Shepard E L. Making overall dynamic body acceleration work: on the theory of acceleration as a proxy for energy expenditure. *Methods in Ecology and Evolution*, 2021, 2(1): 23–33.

- [23] Green J A, Halsey L G, Wilson R P, *et al.* Estimating energy expenditure of animals using the accelerometry technique: activity, inactivity and comparison with the heart-rate technique. *Journal of Experimental Biology*, 2009, 212(4): 471–482.
- [24] Shepard E L C, Wilson R P, Halsey L G, *et al.* Derivation of body motion via appropriate smoothing of acceleration data. *Aquatic Biology*, 2008, 4(3): 235–241.
- [25] Arablouei R, Currie L, Kusy B, *et al.* *In-situ* classification of cattle behavior using accelerometry data. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2021, 183: 106045.
- [26] Sakai K, Oishi K, Miwa M, *et al.* Behavior classification of goats using 9-axis multi sensors: The effect of imbalanced datasets on classification performance. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2019, 166: 105027.
- [27] Wang J, Bell M, Liu X, *et al.* Machine-learning techniques can enhance dairy cow estrus detection using location and acceleration data. *Animals*, 2020, 10(7): 1160.
- [28] Yu H, Klaassen M. R package for animal behavior classification from accelerometer data-rabc. *Ecology and Evolution*, 2021, 11(18): 12364–12377.
- [29] Putfarken D, Dengler J, Lehmann S, *et al.* Site use of grazing cattle and sheep in a large-scale pasture landscape: A GPS/GIS assessment. *Applied Animal Behaviour Science*, 2008, 111(1/2): 54–67.
- [30] Plaza J, Palacios C, Abecia J A, *et al.* GPS monitoring reveals circadian rhythmicity in free-grazing sheep. *Applied Animal Behaviour Science*, 2022, 251: 105643.
- [31] Solanki G S. Grazing behaviour and foraging strategy of goats in semi-arid region in India. *Tropical Ecology*, 2000, 41(2): 155–160.
- [32] Gwatirisa C, Mudereri B T, Chitata T, *et al.* Microhabitat and patch selection detection from GPS tracking collars of semi-free ranging Mashona cattle within a semi-arid environment. *Livestock Science*, 2022, 261: 104963.
- [33] Larson L, Johnson D E, Wilson M, *et al.* Spatial occupancy patterns and activity of arid rangeland cattle grazing small riparian pastures. *Animal Science Journal*, 2017, 88(3): 553–558.
- [34] Feed Industry. Determination of crude fat in feeds: GB/T 6433-2006. Beijing: Standards Press of China, 2006: 1–6.
全国饲料工业标准化技术委员会. 饲料中粗脂肪的测定: GB/T 6433-2006. 北京: 中国标准出版社, 2006: 1–6.
- [35] Feed Industry. Determination of neutral detergent fiber (NDF) in feeds: GB/T 20806-2022. Beijing: Standards Press of China, 2023: 1–8.
全国饲料工业标准化技术委员会. 饲料中中性洗涤纤维(NDF)的测定: GB/T 20806-2022. 北京: 中国标准出版社, 2023: 1–8.
- [36] Animal Husbandry and Veterinary Bureau of Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China, Feed Industry. Determination of acid detergent fiber (ADF) in feeds: NY/T 1459-2022. Beijing: China Agriculture Press, 2022: 1–4.
中华人民共和国农业农村部畜牧兽医局, 全国饲料工业标准化技术委员会. 饲料中酸性洗涤纤维的测定: NY/T 1459-2022. 北京: 中国农业出版社, 2022: 1–4.
- [37] Shipley L A. The influence of bite size on foraging at larger spatial and temporal scales by mammalian herbivores. *Oikos*, 2007, 116(12): 1964–1974.
- [38] Bremm C, Laca E A, Fonseca L, *et al.* Foraging behaviour of beef heifers and ewes in natural grasslands with distinct proportions of tussocks. *Applied Animal Behaviour Science*, 2012, 141(3/4): 108–116.
- [39] Calviello R F, Titto C G, Amadeu C C B, *et al.* Assessment of behavior of ewes under pasture over 24 hours. *Revista Brasileira de Zootecias*, 2013, 15(1/2/3): 139–145.
- [40] Jochims F, Soares É M, De Oliveira L B, *et al.* Timing and duration of observation periods of foraging behavior in natural grasslands. *Frontiers in Veterinary Science*, 2020, 7: 519698.
- [41] Molle G, Cannas A, Gregorini P. A review on the effects of part-time grazing herbaceous pastures on feeding behaviour and intake of cattle, sheep and horses. *Livestock Science*, 2022, 263: 104982.
- [42] Bai H S, Zhou D W. Observations on the behavioral characteristics of grazing cattle groups. *Animal Husbandry & Veterinary Medicine*, 2005, 37(7): 32–33.
白哈斯, 周道玮. 放牧牛群体行为特性的观察. 畜牧与兽医, 2005, 37(7): 32–33.

- [43] Chen Y S, Che Z B, Cao J M, *et al.* Spatial and temporal characteristics of sheep displacement during grazing. *Pratacultural Science*, 2019, 36(12): 3175—3181.
陈乙实, 车昭碧, 曹佳敏, 等. 绵羊放牧过程中的位移时空特征. *草业科学*, 2019, 36(12): 3175—3181.
- [44] Utsumi S A, Cangiano C A, Galli J R, *et al.* Resource heterogeneity and foraging behaviour of cattle across spatial scales. *BMC Ecology*, 2009, 9(1): 1—10.
- [45] Lefcourt A M, Schmidtman E T. Body temperature of dry cows on pasture: environmental and behavioral effects. *Journal of Dairy Science*, 1989, 72(11): 3040—3049.
- [46] Moyano J J C, Moyano T J, Vera Y V A. Relationships of illumination and temperature with rumination, resting and grazing of Merinos on supplemented dry pasture. *Archivos de Zootecnia*, 1992, 41(151): 27—39.
- [47] Gregorini P. Diurnal grazing pattern: its physiological basis and strategic management. *Animal Production Science*, 2012, 52(7): 416—430.
- [48] Waldron B L, Davenport B W, Malechek J C, *et al.* Relative cattle preference of 24 forage kochia (*Kochia prostrata*) entries and its relation to forage nutritive value and morphological characteristics. *Crop Science*, 2010, 50(5): 2112—2123.
- [49] Wang S P. The dietary composition of fine wool sheep and plant diversity in Inner Mongolia steppe. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(6): 951—957.
汪诗平. 不同放牧季节绵羊的食性及食物多样性与草地植物多样性间的关系. *生态学报*, 2000, 20(6): 951—957.