科学通报 2025 年 第 70 卷 第 11 期: 1587 ~ 1600
草原生产力形成与调控机制专辑 论 文
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS

# 放牧强度影响荒漠草原家畜牧食行为及食性选择

武倩[1†], 鞠馨[1†], 王煜鑫[1], 刘楠[2], 王忠武[1], 韩国栋[1*]

1. 内蒙古农业大学草业学院, 草地资源教育部重点实验室, 农业农村部饲草栽培、加工与高效利用重点实验室, 内蒙古自治区草地管理与利用重点实验室, 呼和浩特 010011
2. 中国农业大学草业科学与技术学院, 北京 100193

† 同等贡献

* 联系人, E-mail: hanguodong@imau.edu.cn

2024-02-27 收稿, 2024-06-18 修回, 2024-07-06 接受, 2024-07-15 网络版发表
国家自然科学基金重大项目(32192463)资助

**摘要** 草地家畜牧食行为是影响草地生态系统结构和功能的关键因素, 合理的放牧利用强度能够调节家畜牧食行为, 有利于实现草地资源的可持续利用. 本研究基于内蒙古短花针茅荒漠草原长期(2004年至今)放牧研究平台, 设置对照(0羊单位 $hm^{-2}$ 半年$^{-1}$)、轻度(0.91羊单位 $hm^{-2}$ 半年$^{-1}$)、中度(1.82羊单位 $hm^{-2}$ 半年$^{-1}$)和重度(2.71羊单位 $hm^{-2}$ 半年$^{-1}$)放牧4个放牧强度, 分析绵羊牧食行为及食性选择的变化, 探究荒漠草原合理放牧强度. 结果表明: (1) 与轻度放牧相比, 中度和重度放牧下绵羊的采食和游走时长显著增加, 休息时长显著减少, 家畜活动量和活动距离显著增加; 生长季末期绵羊采食和游走时长显著高于生长季高峰期; (2) 随着放牧强度增大, 植物地上现存量和绵羊采食组分多样性显著降低, 绵羊对多年生禾草短花针茅(*Stipa breviflora*)和无芒隐子草(*Cleistogenes songorica*)的采食偏好逐渐增加, 对灌木狭叶锦鸡儿(*Caragana stenophylla*)的选择性逐渐降低, 尤其在生长季末期对短花针茅的选择性采食达到最高; (3) 绵羊牧食行为与家畜体增重密切相关, 绵羊采食游走时间越长, 采食量越高, 消化率和家畜体增重越低. 因此, 轻度放牧下绵羊采食游走时间较短, 采食量低而消化率高, 植物资源的利用性高, 既有利于家畜生产性能提升又有助于草地生产力的维持, 是实现荒漠草原长期可持续利用的合理放牧强度.

**关键词** 荒漠草原, 采食组分, 放牧强度, 牧食行为, 家畜活动量

草地是世界上面积最大的陆地生态系统之一, 约占总陆地面积的40.5%, 具有防风固沙、涵养水源、调节气候和保护生物多样性等一系列生态系统服务功能[1]. 放牧是天然草地最主要的利用方式之一, 也是草地生态保护和草牧业高质量发展过程中的一个根本性措施. 近些年, 由于过度放牧等人类活动干扰使得草地出现不同程度退化, 草地生产和生态功能持续下降. 因此, 优化放牧管理及采用合理的放牧强度有助于维持草地生态系统功能, 实现草地畜牧业可持续发展.

在放牧草地生态系统中, 放牧家畜是重要的组成部分, 家畜牧食行为是影响草地生态系统结构与功能的重要因子[2~4]. 许多研究认为, 家畜可以通过选择性采食、游走践踏和粪尿返还等一系列活动改变土壤物理化学性质及微生物活性, 改变植物群落组成、结构和多样性等, 从而影响生态系统功能[5~8]. 在这个过程中, 放牧强度具有重要的作用[9,10]. 放牧强度不仅影响草地植物及土壤系统, 也能够对家畜牧食行为产生直接的影响[11]. 研究表明, 放牧强度能够通过影响草原植物的空间异质性进而影响家畜的牧食行为, 家畜的行为也能够间接地反映草地的状况[2,8,12]. 然而, 在绝大部

引用格式: 武倩, 鞠馨, 王煜鑫, 等. 放牧强度影响荒漠草原家畜牧食行为及食性选择. 科学通报, 2025, 70: 1587–1600
Wu Q, Ju X, Wang Y, et al. Grazing intensity affects livestock behavior and diet selection in a desert steppe (in Chinese). Chin Sci Bull, 2025, 70: 1587–1600, doi: 10.1360/TB-2024-0224

© 2024《中国科学》杂志社

分的草地放牧研究中，植物和土壤系统通常作为关键研究对象，对草地家畜行为的研究十分有限. 除此之外, 受草地类型及气候条件等多种因子的影响, 不同放牧强度下家畜牧食行为的变化规律还不清楚，需要进一步研究. 探究不同放牧强度下家畜牧食行为的变化对解释放牧对草畜相互作用关系以及草地生产力和多样性维持具有重要意义.

家畜采食行为是驱动草地生态系统植物群落组成及多样性变化的主要因素，与家畜的食性选择密切相关. 在草地生态系统中, 植物群落本身的组成与结构形成了采食环境的异质性，使家畜产生了不同的食性选择; 而动物的选择性采食又作用于植物群落, 影响草地的生产力及其稳定性[13]，家畜与植物的这种“双向反馈”关系对草地生态系统结构和功能起关键作用[14]. 家畜的食性选择与植物资源的可利用性相关，不同放牧强度下草地植物资源的可利用性差异较大，进而影响到家畜的食性选择，例如，随着放牧强度增大，植物地上净初级生产力及物种丰富度显著降低，物种组成发生明显变化，影响到家畜的选择性采食[15,16]; 另一方面, 由于草地植物自身也会随着季节的变化而变化, 家畜会根据其自身营养需求和食性偏好等因素采取相应的采食策略来应对食物资源可利用性的变化[17]. 因此, 了解放牧家畜与植物的相互作用关系以及家畜食性选择对放牧强度与放牧时间变化的响应十分必要，可为不同放牧强度下草地资源的利用情况及家畜生产性能的研究提供理论依据. 然而, 由于缺乏可行的测定技术和较大的测定误差，自由放牧食草动物的食物组分的量化一直以来都是草地放牧领域面临的较大挑战，因此, 目前有关草地家畜食性的研究十分有限, 不同放牧强度下草地家畜食性选择还存在未知.

荒漠草原位于欧亚大陆草原和荒漠的过渡区域, 是欧亚大陆温性草原的独特组成部分，也是我国北方重要的生态屏障和畜牧业生产基地. 然而, 不同放牧强度下荒漠草原家畜牧食行为的变化规律及其食性选择还不清楚, 合理的放牧利用强度还需要进一步明确. 本研究以内蒙古短花针茅荒漠草原为研究对象，分析长期(2004年至今)不同放牧强度下放牧绵羊牧食行为和食性选择的变化及其内在机制，主要探究以下3个科学问题: (1) 荒漠草原不同放牧强度下家畜牧食行为的变化及其原因是什么? (2) 不同放牧强度如何影响家畜的食性选择? (3) 基于家畜牧食行为和植物可利用性分析，荒漠草原维持长期放牧的最佳放牧利用强度是什么? 本研究为探索草地资源可持续利用方式提供理论依据，有助于深入理解放牧背景下草原生态系统功能维持机制，对优化草原管理及实现草原可持续利用具有重要意义.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古自治区乌兰察布市四子王旗王府一队内蒙古农牧业科学院试验基地，东经111°53′41.7″，北纬41°46′43.6″，平均海拔为1450 m. 研究区属于中温带典型的大陆性季风气候区，试验期间长期年平均降水为235 mm, 降水主要集中在6~9月; 年平均气温3.7°C, 最冷月份1月，最热月份7月，≥10°C的年积温为2200~2500°C[18]. 研究区属短花针茅荒漠草原地带性植被, 建群种为短花针茅(*Stipa breviflora*), 优势种为无芒隐子草(*Cleistogenes songorica*)、冷蒿(*Artemisia frigida*)，其他主要伴生种有银灰旋花(*Convolvulus ammannii*)、狭叶锦鸡儿(*Caragana stenophylla*)等. 经过20年放牧试验，轻度、中度和重度放牧处理下植物群落地上净初级生产力分别降低了5.6%、16.8%和36.6%. 此外，植物群落组成在不同放牧强度下变化较为明显，尤其是重度放牧处理下多年生丛生禾草相对多度增加了49%; 多年生根茎禾草减少了3%; 多年生杂类草减少了9%; 一、二年生植物减少了23%; 灌木及半灌木减少了27%[19]. 根据联合国粮食与农业组织的土壤分类系统，该土壤类型是砂壤土质地的淡栗钙土[6,20].

### 1.2 试验设计

放牧试验自2004年开始，采用完全随机区组试验设计，利用放牧围栏划分不同放牧试验小区，分成3个区组, 即3次重复. 在每个区组中设置4个不同的放牧强度水平，分别为不放牧的对照(control, CK; 0羊单位 $hm^{-2}$ 半年$^{-1}$)、轻度放牧(light grazing, LG; 0.91羊单位 $hm^{-2}$ 半年$^{-1}$)、中度放牧(moderate grazing, MG; 1.82羊单位 $hm^{-2}$ 半年$^{-1}$)和重度放牧(heavy grazing, HG; 2.71羊单位 $hm^{-2}$ 半年$^{-1}$)，放牧强度水平根据卫智军等人[21,22]提出的短花针茅荒漠草原的理论载畜量进行设置. 于每年5~10月在轻度放牧、中度放牧和重度放牧处理小区放牧2岁蒙古绵羯羊，放牧期间，每天早晨6:00将绵羊驱赶至放牧区, 18:00驱赶回畜圈休息, 其余

时间不放牧. 长期放牧处理下, 轻度放牧、中度放牧和重度放牧区中牧草利用率分别为12%、23%和45%. 家畜体重每月测定一次, 于月末清晨绵羊空腹时称量体重. 在放牧实验前(5月)对羊体重进行记录, 实验前各小区绵羊体重相近, 无显著差异(表S1).

## 1.3 测定方法

### 1.3.1 家畜行为监测

本研究于2023年7~9月为不同放牧处理小区绵羊脖颈佩戴GPS项圈(Debut Tag Ⅲ)进行自动跟踪, 24 h不间断记录绵羊的活动量(overall dynamic body acceleration, ODBA). 此外, GPS项圈设定在放牧期间(6:00~18:00)每隔5 min记录一次家畜所在位置坐标, 利用Rstudio软件(R 4.0.3)“geosphere”包根据绵羊所在经纬度计算地理距离, 计算6:00~18:00期间绵羊在放牧小区中的活动距离, 即绵羊每天在试验小区内行走的全部路程.

2023年7~9月, 对绵羊不同牧食行为进行人工跟踪观测. 在各放牧小区中各选取1只体重相近的绵羊进行标记, 轻度、中度、重度放牧处理共选取9只绵羊. 利用望远镜、秒表等工具在绵羊放牧期间(6:00~18:00)同时对不同放牧处理小区标记绵羊进行不间断跟踪观测, 记录每只标记羊的采食、游走、卧息和反刍(站立反刍和卧息反刍)时间, 观测者每个月观测2次. 为确保跟踪观测试验的准确性以及避免人工跟踪观测过程中观测者对绵羊行为的干扰, 实验正式开始之前预观察3 d, 10~20 m为观测者与绵羊的合适观测距离.

根据绵羊牧食行为研究[23,24]和长期放牧经验, 本研究将绵羊的主要牧食行为划分为采食、游走、卧息、反刍(站立反刍和卧息反刍). 为确保跟踪观测试验的准确性以及避免人工跟踪观测过程中观测者观测方法产生的误差, 试验过程中规定了牧食行为观测标准, 具体如下: 对研究区绵羊放牧期间(6:00~18:00)牧食行为进行不间断观测, 采食时间是以绵羊低头将植物摄入口中至再次抬头的时间为一次采食时间, 各采食时间段相加得到绵羊的采食时间; 游走时间是以绵羊头部向上同时四肢交替前伸和后蹬进行移动到停止为一次游走时间, 各游走时间段相加得到绵羊的游走时间; 卧息时间是每次卧倒的起始和终止时间, 各卧息时间段相加得到绵羊的卧息时间; 反刍时间划分为站立反刍和卧息反刍时间, 站立反刍是指绵羊站立时头部朝上, 下颚运动的行为; 卧息反刍是绵羊卧息时头部朝上, 下颚运动的行为, 各站立反刍和卧息反刍时间段相加得到绵羊的站立反刍和卧息反刍时间.

### 1.3.2 家畜采食量测定

本研究中绵羊有机质采食量(organic matter intake, OMI)根据排粪量和消化率之间的关系估算[25], 利用二氧化钛($TiO_2$)外源指示剂法测定排粪量, 采用杜马斯定氮法测定粪中粗蛋白(crude protein, CP)以计算消化率. 于2023年8月15日~2023年8月24日对轻度放牧、中度放牧和重度放牧小区的绵羊粪便进行取样, 于每个小区选取2只体重相近的绵羊进行标记, 连续10 d于每天5:00给每只绵羊投喂5粒重量为0.5 g的$TiO_2$胶囊. 为保证试验的准确性, 我们设置了绵羊对$TiO_2$胶囊的适应性过渡期, 将前5 d设置为预饲期, 只投喂胶囊, 不收集粪便样品; 后5 d为取样期, 投喂胶囊的同时收集粪便样品. 取样期给绵羊穿戴粪袋, 在绵羊出牧前以及归牧后(早晚收集2次)辅以直肠取样法收集新鲜粪便, 将每只羊早晚获取的新鲜粪便样品等量混合, 在65°C烘箱内烘干48 h至恒重后粉碎过1 mm筛子, 用于后续试验分析.

由于$TiO_2$在消化道中为惰性, 并在消化道中均匀分布, 因此通常用于消化率研究, 以避免收集全部粪便. 本研究粪便中$TiO_2$含量以及消化率参照Glindemann等人[26,27]的方法测定, 计算公式如下.

排粪量:

$$FO = \frac{2500}{\text{粪中}TiO_2\text{浓度}}, \tag{1}$$

有机质消化率:

$$dOM = \left[0.899 - 0.644 \times \exp\left(\frac{-0.5774 \times CP}{100}\right)\right] \times 100\%, \tag{2}$$

有机质采食量:

$$OMI = \frac{FO}{1 - dOM}, \tag{3}$$

其中, $FO$为排粪量(faecal output, g DM $day^{-1}$ $sheep^{-1}$), DM为干物质(dry matter), 2500指每天定量给每只绵羊投喂$TiO_2$胶囊2500 mg, 粪中$TiO_2$浓度单位为mg $g^{-1}$ DM; $dOM$为有机质消化率(organic matter digestibility, %), $CP$为粪中粗蛋白含量(g $kg^{-1}$ OM), OM为有机质(organic matter); $OMI$为有机质采食量(g OM $day^{-1}$ $sheep^{-1}$).

### 1.3.3 家畜采食组分测定

为了鉴定绵羊粪便样品中采食植物序列, 对试验区每个放牧围栏内的植物物种进行调查取样, 测定试验小区围栏内广泛分布的植物物种参考序列, 构建样地植物物种参考数据库, 用于后续eDNA比对. 于2022

年8月和2023年8月采集本试验样地内每个物种植物叶片10 g左右, 共采集了39种植物样品材料, 所有植物样品鉴定到种水平. 于液氮冷冻后放置在–80°C超低温冰箱中保存, 用DNeasy Plant Mini Kit试剂盒提取植物基因组DNA, 用Nanodrop 2000检测基因组DNA的浓度, 采用植物叶绿体trnL(UAA)区的P6环通用引物(g:5′-GGGCAATCCTGAGCCAA-3′; h:5′-CCATTGAGTCTCTGCACCTATC-3′)进行PCR扩增, 并用1.5%琼脂糖凝胶电泳检测其完整性, 随后和粪便样品同时进行Sanger测序[17,28].

使用DNA宏条形码技术[28]测定绵羊的采食组分. 本研究于2023年7~9月对轻度放牧、中度放牧和重度放牧小区的绵羊粪便进行取样, 于每个小区选取2只体重相近的绵羊, 连续5 d采用粪袋和直肠取样结合的方法收集粪便样品, 将5 d收集到的粪便等量混合, 于液氮冷冻后放置在–80°C超低温冰箱中保存, 用于后续分析.

称取200 mg粪便样品放入2 mL微量离心管中, 将离心管置于冰盒内完成后续操作. 使用粪便DNA提取试剂盒(Omega Biotek, Norcross, GA)提取绵羊粪便DNA, 提取步骤参考试剂盒说明书. 将所得的DNA溶液收集到离心管中, –80°C保存. 以上述DNA为模板, 用植物叶绿体trnL(UAA)区的P6环通用引物进行PCR扩增. 所有PCR扩增产物用2.0%琼脂糖凝胶进行电泳观察, 选择阳性PCR产物用于下一步测序分析.

全部样本按照正式实验条件进行, 每个样本3个重复, 将同一样本的PCR产物混合后用2%琼脂糖凝胶电泳检测, 使用AxyPrepDNA凝胶回收试剂盒(Axygen Scientific Inc)切胶回收PCR产物. 参照电泳初步定量结果, 将PCR产物用QuantiFluor™-ST蓝色荧光定量系统(Promega Corporation)进行检测定量, 之后按照每个样本的测序量要求, 进行相应比例的混合. 进行Illumina文库构建, 然后由上海凌恩生物科技有限公司根据Illumina Novaseq 6000测序平台的标准流程进行测序. 对获得的测序数据进行质控后利用生物信息学分析手段完成环境DNA物种检测分析, 使用UPARSE (version 10)软件, 按照97%相似性对非重复序列(不含单序列)进行OTU聚类, 在聚类过程中去除嵌合体, 选出与OTU代表序列相似性在97%以上的序列, 生成OTU表格. 为了得到每个OTU对应的物种分类信息, 采用Uclust算法对97%相似水平的OTU代表序列进行分类学分析, 统计各样本的群落组成. 根据不同的引物采用目标数据库进行分类注释, 使用NCBI参考序列库和本地参考序列库进行物种分类注释(100%相似度). 仅保留与参考序列同一性为100%的唯一序列进行后续分析. 如果本地参考数据库和NCBI数据库都鉴定到100%序列, 则用本地数据库比对的结果.

1.3.4 植物地上现存量测定

于2023年7~9月每月月中对植物群落特征进行测定, 在不同放牧处理每个小区中随机设置10个1 m×1 m的样方, 记录其中植物群落的种类组成、高度、盖度和密度, 分物种齐地面刈割, 收集其地上部分, 在65°C烘箱烘干48 h至恒重, 称量各物种的干重得到地上现存量. 植物群落地上现存量为不同物种地上现存量的总和, 将群落中的植物按照不同的生活型[29,30]划分为4个植物功能群(plant functional groups, PFG): (1) 多年生禾草(perennal grasses, PG), (2) 灌木及半灌木(shrubs and semi-shrubs, SS), (3) 多年生杂类草(perennial forbs, PF), (4) 一、二年生植物(annual and biennials, AB)(表S2).

### 1.4 数据处理

采用Microsoft Excel 2019对数据进行初步整理, 计算各测定指标的均值±标准误(Mean±SE). 使用R语言(R4.0.2)采用单因素方差分析和Duncan比较法进行差异性检验分析, 使用Origin 2023 (OriginLab Corporation, USA)软件进行绘制方差分析、回归分析以及Jacob's *D*选择性指数热图.

采食物种的Jacob's D选择性指数[17,31]:

$$D=\frac{r-p}{r+p-2rp}, \tag{4}$$

式中, $r$是家畜对某种植物的采食量占家畜总采食量的比例, $p$是该植物在草地植物群落中的比例(植物物种相对多度). Jacob's $D$选择性指数的取值范围为-1到1, 当$D$=0时, 表示家畜对该植物的选择性是随机的; 当–1<$D$<0时, 表示家畜对该植物有负选择性(避免采食), 即该植物在采食组分中所占比例低于其在环境中的比例; 当0<$D$<1时, 表示家畜对该植物有正选择性(偏好采食), 即该植物在采食组分中所占比例高于其在环境中的比例.

## 2 结果与分析

### 2.1 不同放牧强度对家畜牧食行为的影响

对绵羊行为进行人工观测(图1), 轻度放牧处理区

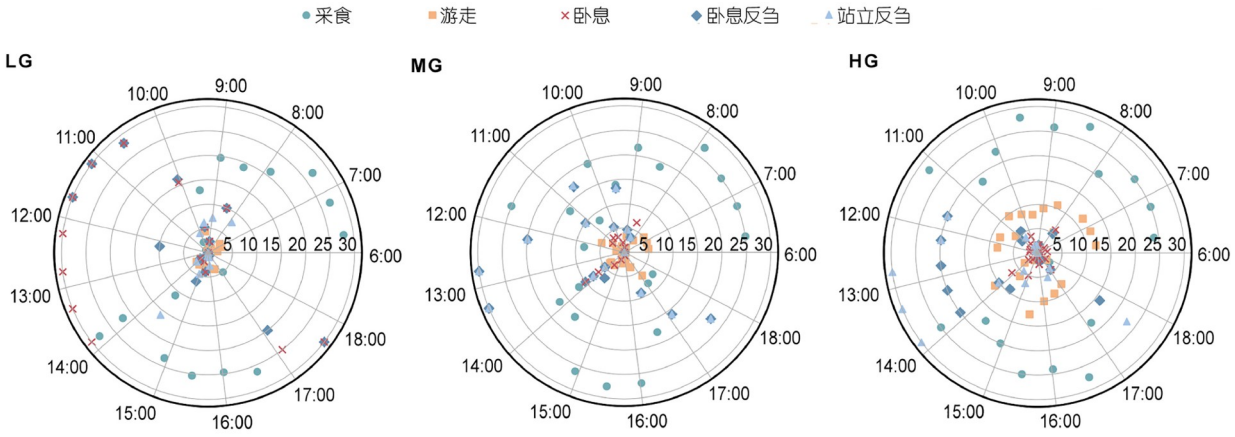



**图 1** 不同放牧强度下绵羊的行为规律. 圆环外侧的刻度显示从6:00~18:00放牧时间区间, 圆环内灰色线条代表家畜行为持续时间的长度, 最内圈表示持续时长为5 min, 由内到外每增加一圈代表时长增加5 min

**Figure 1** The behavior patterns of sheep under different grazing intensities. The scale on the outside of the ring shows the grazing time interval from 6:00 18:00 pm, the gray line inside the ring represents the length of the animal behavior duration, the smallest ring represents the duration of 5 min, and each additional circle from the inside to the outside represents the increase of the duration by 5 min

绵羊采食时间集中于6:00~10:00和14:00~17:00, 中度和重度放牧处理区绵羊采食时间集中于6:00~12:00和14:00~17:00. 轻度放牧处理区绵羊反刍时间集中在10:00~12:00, 而中度和重度放牧处理区绵羊反刍时间推迟, 集中在12:00~14:00. 轻度放牧区中绵羊在12:00~14:00进行休息, 中度和重度放牧区绵羊在此时时间段主要进行卧息反刍和站立反刍. 轻度放牧处理下绵羊游走时长比中度和重度放牧处理短, 休息时长增加(图1).

对2023年7~9月绵羊不同行为时长占比分析可知(图2), 轻度放牧处理下绵羊各行为时间整体表现为采食时间>卧息时间>反刍时间>行走时间, 中度和重度放牧处理下绵羊各行为时间整体表现为采食时间>反刍时间>卧息时间>行走时间, 轻度放牧下绵羊的卧息时间最长, 而重度放牧绵羊的卧息最短. 方差分析结果表明, 与轻度放牧处理相比, 中度和重度放牧处理下家畜的采食和游走时长在7~9月均显著增加($P$<0.05), 卧息时长均显著降低($P$<0.05). 7月份, 绵羊卧息反刍时间在重度放牧处理下显著低于轻度放牧处理($P$<0.05); 9月份, 绵羊卧息反刍时间在中度和重度放牧处理下显著低于轻度放牧处理($P$<0.05). 绵羊站立反刍时间在不同月份不同处理下没有显著差异.

对不同放牧小区绵羊佩戴GPS项圈监测放牧期间家畜活动量和活动距离(图3), 结果表明: 与轻度放牧相比, 中度和重度放牧下的家畜活动量和行走距离均显著增加($P$<0.05). 7~8月, 绵羊活动量及活动距离在中度和重度放牧处理下显著高于轻度放牧处理($P$<0.05); 9月, 重度放牧处理下的绵羊活动量及活动距离显著高于轻度和中度放牧处理($P$<0.05).

## 2.2 不同放牧强度对家畜采食量、消化率及体增重的影响

对绵羊有机质采食量、消化率和家畜体重日增重进行分析(图4), 结果表明, 重度放牧处理下, 绵羊有机质采食量显著增加($P$<0.05); 与轻度放牧相比, 中度和重度放牧处理下绵羊有机质消化率和体重日增重显著降低($P$<0.05).

## 2.3 不同放牧强度对家畜采食组分的影响

对2023年7~9月不同放牧处理小区中绵羊采食组分进行测定, 随着放牧强度增加, 绵羊采食组分多样性显著降低($P$<0.05, 图S1), 并表现出明显的月份差异. 如图5所示, 7月份不同处理下绵羊采食组分比例较高的前3个物种分别为短花针茅(35%~51%)、无芒隐子草(17%~29%)、狭叶锦鸡儿(7%~27%); 8月份不同处理下绵羊采食组分比例较高的前3个物种分别为短花针茅(38%~63%)、无芒隐子草(18%~26%)、狭叶锦鸡儿(1%~15%). 9月份, 短花针茅(49%)、无芒隐子草(18%)、狭叶锦鸡儿(19%)仅在轻度放牧处理下比例相对较高, 中度和重度放牧处理下短花针茅比例分别为93%和92%, 而中度和重度放牧处理下狭叶锦鸡儿占比<1%.

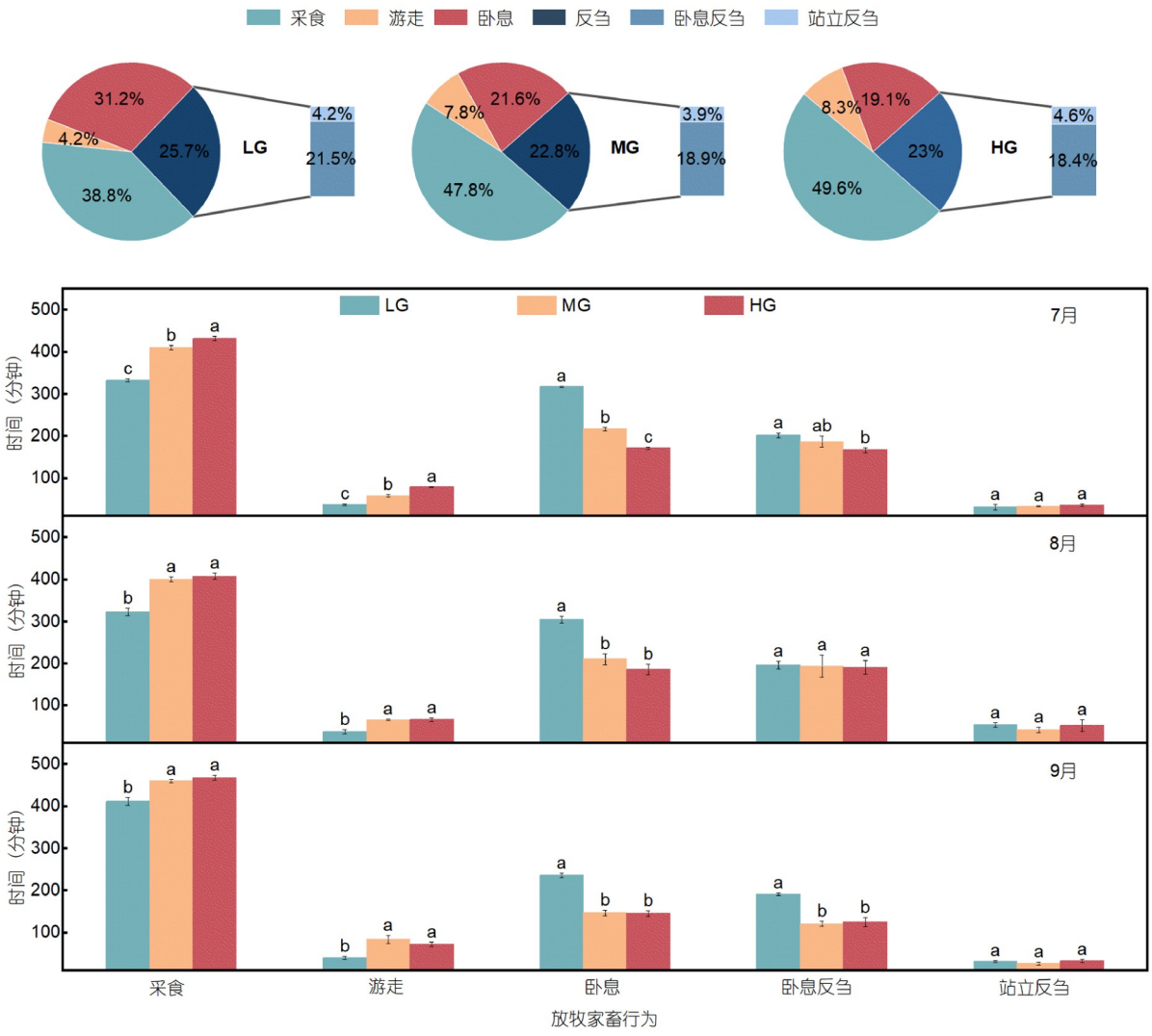



**图 2** 不同放牧强度对家畜行为时间的影响
**Figure 2** The effect of different grazing intensities on livestock behaviors

方差分析结果表明(图5)，中度和重度放牧显著增加了7~9月份短花针茅的采食比例($P$<0.05)，显著降低了狭叶锦鸡儿的采食比例($P$<0.05). 相比于轻度和中度放牧处理，7~8月份无芒隐子草的采食比例在重度放牧下显著增加, 但在9月份显著降低.

Jacob's $D$选择性指数是一种量化动物对某种食物选择性的指数，通过家畜实际采食物种占总采食量的比例与该物种在其生存环境中的相对多度进行计算得出. 不同放牧强度下绵羊对草地植物的Jacob's $D$选择性结果如图6. 7月份, 绵羊对短花针茅、银灰旋花表现为负选择性, 即避免采食; 而对无芒隐子草、狭叶锦鸡儿、冷蒿、细叶葱表现为正选择性, 即偏好采食. 随着放牧强度增加，对短花针茅和无芒隐子草的选择性逐渐升高，对银灰旋花和冷蒿的选择性逐渐降低. 8月份, 绵羊对短花针茅、银灰旋花同样表现为避免采食，而对无芒隐子草、冷蒿、细叶葱表现为偏好采食. 随着放牧强度增加，对短花针茅、无芒隐子草的选择性逐渐升高，对狭叶锦鸡儿、冷蒿及细叶葱的选择性逐渐降低, 尤其对狭叶锦鸡儿的选择性, 在轻度放牧处理下为主动采食，在中度和重度放牧下转变为避免采食. 9月份, 随着植物群落地上现存量的降低, 绵羊对大部分植物表现为负选择性, 随着放牧强度增加, 银灰旋花、细叶葱、冷蒿、狭叶锦鸡儿及无芒隐子草的选择性均逐渐降低. 相比轻度和中度放牧处理, 重度放牧处理下

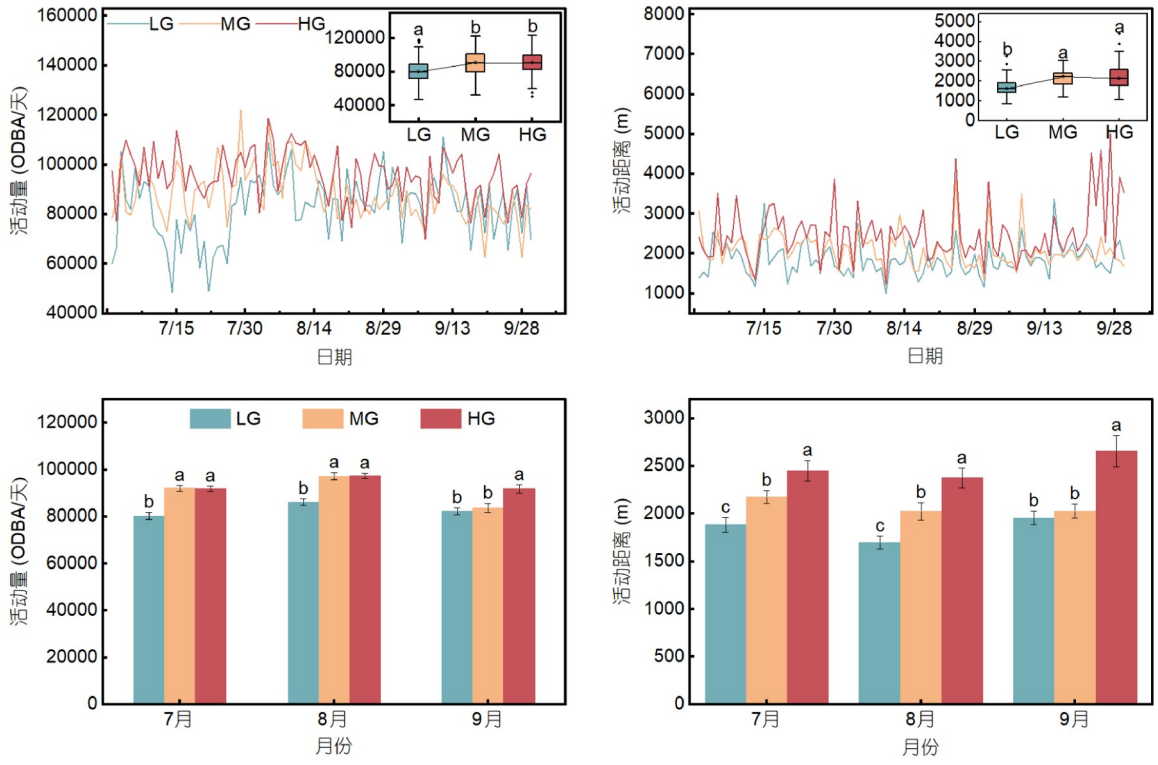



**图 3** 不同放牧强度下绵羊活动量及活动距离
**Figure 3** Activity amount and distance of sheep under different grazing intensities

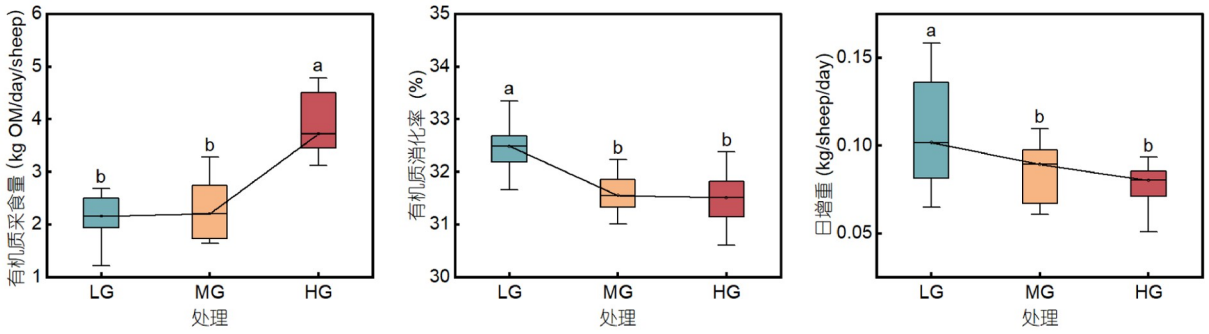



**图 4** 不同放牧强度下绵羊有机质采食量及消化率
**Figure 4** Organic matter intake and digestibility of sheep under different grazing intensities

绵羊对短花针茅的选择性表现为正选择性.

对2023年7~9月植物地上现存量进行分析, 随着放牧强度增加, 植物群落地上现存量显著降低($P$<0.05, 图S2). 分析不同功能群植物、家畜牧食行为及体增重的关系, 结果表明, 不同功能群植物地上现存量与采食时间和游走时间呈显著负相关关系, 与休息和反刍时间呈显著正相关关系(图7(a)). 多年生禾草的采食比例与采食量呈正相关关系, 与消化率和体增重呈负相关关系; 灌木及半灌木和多年生杂类草的采食比例与采食量呈负相关关系, 与消化率和体增重呈正相关关系(图7(b)). 采食时间越长, 采食量越高, 消化率越低, 体增重越低; 卧息时间越长, 采食量越低, 消化率越高, 体增重越高(图7). 将家畜不同牧食行为时间与3种优势植物地上现存量进行线性回归分析, 结果表明, 短花针茅、无芒隐子草、狭叶锦鸡儿地上现存量均与采食时间、游走时间呈现显著线性负相关关系, 与卧息时

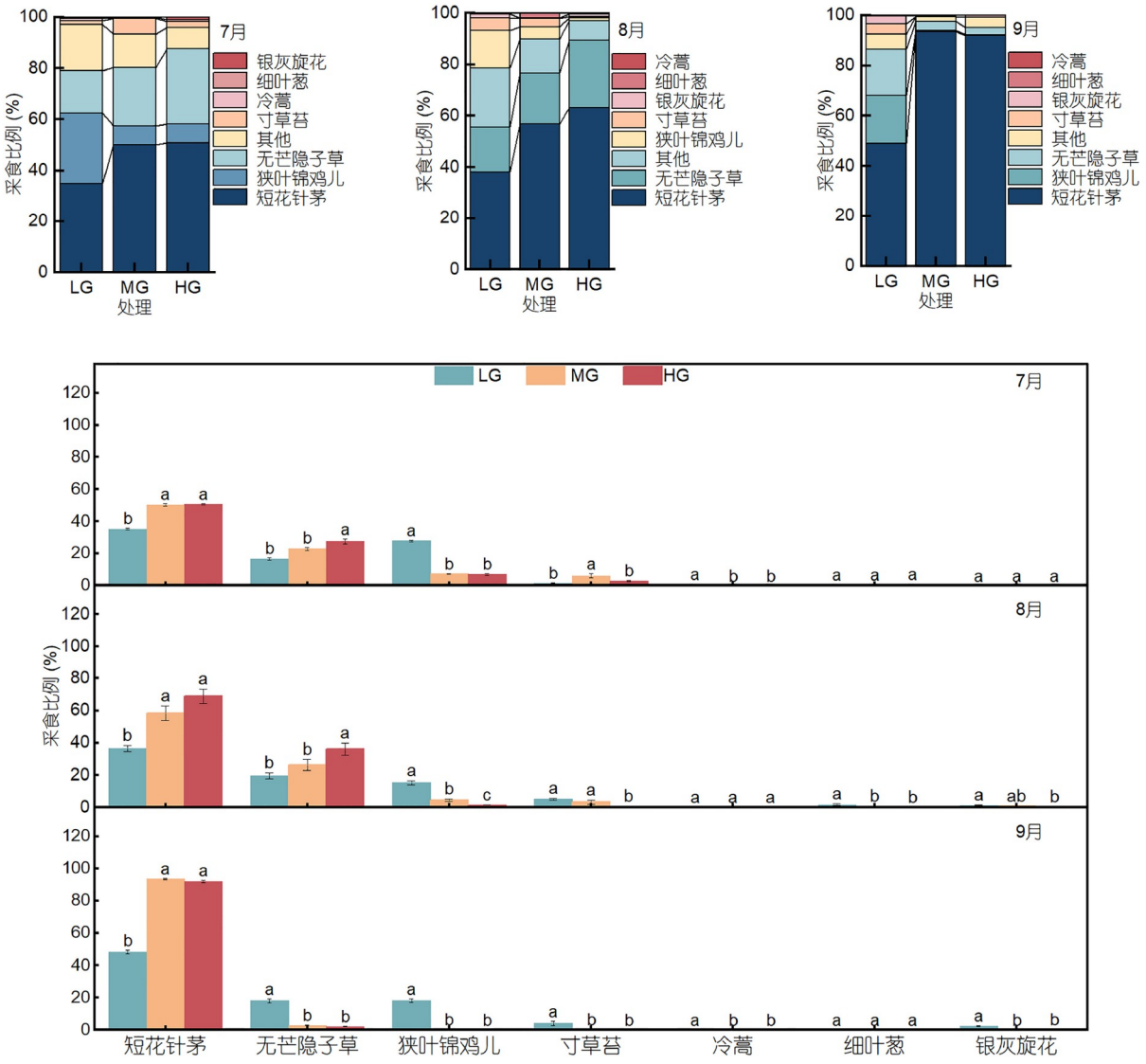



**图 5** 不同放牧强度下绵羊采食组分比例
**Figure 5** Relative abundance of feeding component at different grazing intensities

间、反刍时间呈现显著线性正相关关系 (图S3).

## 3 讨论

放牧能够直接影响草地植物群落组成、净初级生产力和植物生物多样性等[10,32]，过度放牧可能导致草地植被组成单一，探究植物-家畜相互作用及反馈过程对深入了解草地生态系统功能对放牧的响应机制有重要的意义[33]. 草地家畜牧食行为是复杂的行为活动, 草地植物空间分布、牧草的数量与营养品质等因素均会影响到家畜的牧食行为[16,34]. 已有研究表明, 放牧强度对家畜的牧食行为有显著的影响，随着放牧强度增加, 绵羊会增加采食时间并减少休息时间来维持采食需要, 其活动距离及采食量均会增加[35,36]，与本研究结果一致. 本研究中, 随着放牧强度增加, 绵羊采食时间增加主要是由于植物地上现存量尤其是多年生杂类草和灌木及半灌木地上现存量降低导致的. 随着放牧强度增加, 植物地上现存量及高度显著降低, 家畜不得不花费更多的时间游走和采食. 另外, 家畜也会花费时间来寻找适口性更好和蛋白质含量更高的牧草，从而增加了采食游走时间和活动量[37,38]，因此, 重度放牧区单一的食物组成可能不能满足家畜自身营养需求，使得绵羊在重度放牧区中延长采食和游走时间搜寻喜食牧草,

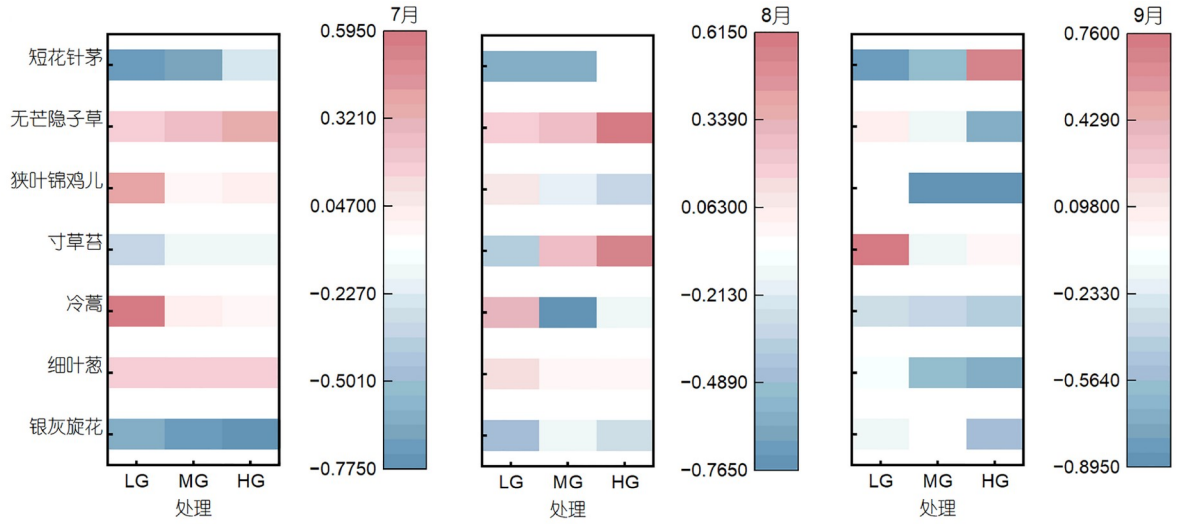



**图 6** 不同放牧强度下家畜采食物种的Jacob's *D*选择性指数. Jacob's *D*选择性指数的取值范围为–1~1. 当–1<*D*<0时, 表示家畜对该植物有负选择性, 表现为避免采食; 当*D*=0时, 表示家畜对该植物的选择性是随机的; 当0<*D*<1时, 表示家畜对该植物有正选择性, 表现为偏好采食

**Figure 6** Jacob's *D* selectivity index for foraging species at different grazing intensities. Jacob's *D* selectivity index ranges from –1 to 1. when –1<*D*<0, it indicates that livestock have negative selectivity towards the plant, which is manifested as avoiding feeding; When *D*=0, it means that the selection of livestock to the plant is random; when 0<*D*<1, it indicates that livestock have positive selectivity towards the plant, showing a preference for feeding

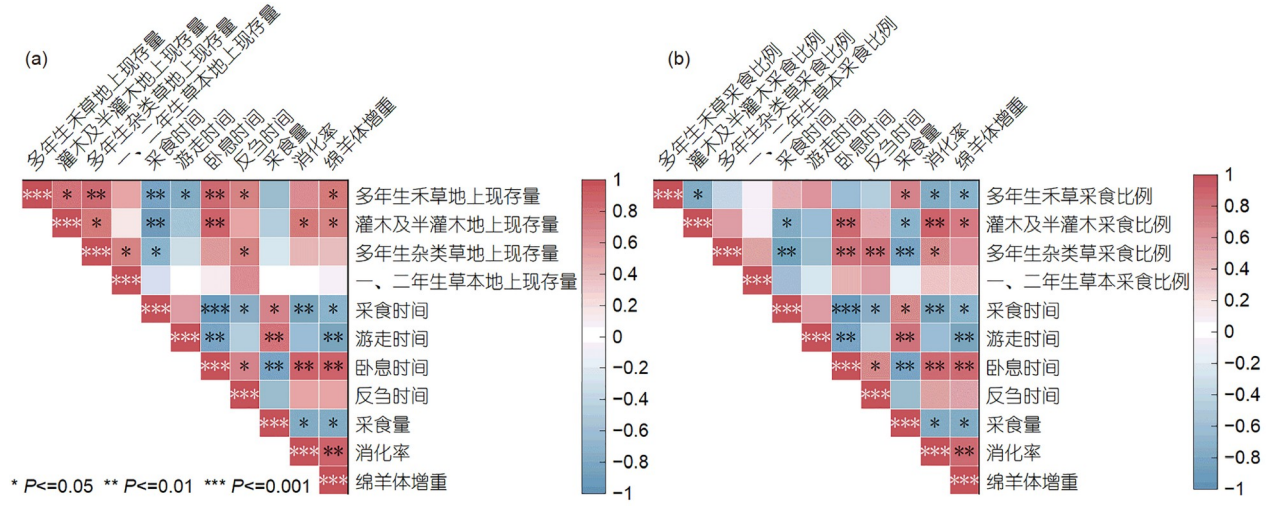



**图 7** 不同功能群植物地上现存量、采食组分与牧食行为和采食量的关系. (a) 7~9月不同放牧强度家畜行为、采食量和植物功能群地上现存量的相关关系; (b) 7~9月不同放牧强度家畜行为、采食量和植物功能群采食组分的相关关系

**Figure 7** Relationships among aboveground biomass of different functional groups, feeding components, grazing behavior and organic matter intake. (a) The correlation between livestock behavior, feed intake and standing crop of plant functional groups at different grazing intensities from July to September; (b) the correlation between livestock behavior, feed intake and feeding components of plant functional groups at different grazing intensities from July to September

进而缩短休息和反刍时间, 增加活动距离. 游走和采食时间增加导致采食量逐渐增加, 但是绵羊消耗的能量也会相应增加, 引起其体增重降低. 另一方面, 由于短花针茅等多年生禾草其营养品质较低, 造成绵羊消化率较低, 进而绵羊体增重降低, 为维持其能量消耗, 绵羊在重度放牧区中不得不采食更多的牧草, 又造成了重度放牧植物地上现存量降低. 此外, 由于不同放牧时期植物生长状况不同, 牧草的不同物候期也会影响家畜的最优采食策略, 进而影响绵羊牧食行为[39]. 有研究表明, 秋冬季节的牧草状况可降低采食量和消化率, 引

起绵羊采食时间和速率增加[40]，但本研究中夏季(7~8月)相较初秋(9月)绵羊采食时间短、卧息时间相对较长，这可能是由于7~8月外界气温较高的原因，高温环境下绵羊的采食时间会减少而反刍休息时间会增加[41]，环境温度变化也会调节绵羊的行为.

家畜采食行为中的食性选择与草地植被状况以及家畜自身生理特征有关，放牧家畜频繁的采食改变了植物群落的结构和种类组成，形成了采食环境的异质性，而植被群落的变化也影响着放牧家畜的食性与食量[42]. 本研究经过长达20年放牧试验，不同放牧强度小区中植物群落组成及空间分布格局出现了明显差异[19]，这些变化不仅影响家畜的牧食行为，也会影响家畜的采食组分. 本研究中，不同放牧强度下绵羊采食组分差异显著，轻度放牧处理下，绵羊采食表现为一定的随机选择性，这主要与轻度放牧地上植物物种多样性较高有关[6]，而动物随机性采食策略也更有利于维持草地植物多样性[12]. 在中度和重度放牧处理下，长期放牧导致丛生禾草比例增加，尤其短花针茅和无芒隐子草比例显著上升，而多年生杂类草、灌木及半灌木以及一、二年生植物比例显著下降，尤其冷蒿、木地肤等荒漠草原优势物种在多年重度放牧处理下几近消失[19]，草地植被组成相对单一，植物多样性降低，由于环境条件的限制，绵羊采食表现为确定选择性，采食多年生禾草的比例显著升高，这与李艳龙等人[43]研究结果一致. 因此，不同放牧强度可通过影响植物群落组成和物种丰富度影响家畜的采食组分.

通常情况下，绵羊会选择性采食适口性好的物种[44]并且喜食富含蛋白的物种[17]. 冷蒿的粗蛋白含量高于短花针茅，但是粗纤维含量低于短花针茅，因此，冷蒿相比短花针茅绵羊较为喜食[45]. 然而，本研究中，长期持续放牧处理下，绵羊的采食偏好会随着放牧强度增加而发生改变. 例如，绵羊对多年生禾草短花针茅和无芒隐子草的选择性增加，即由避免采食转变为偏好采食，而对灌木狭叶锦鸡儿及半灌木冷蒿由偏好采食转变为避免采食. 家畜采食偏好的变化主要与植物的可利用性有关(图S2，S4). 随着放牧强度增加，放牧区中植物组成趋向单一，尤其在重度放牧区主要由建群种短花针茅组成，其他植物可利用性相对较低. 在牧草种类较多，可利用性较高的情况下，绵羊主要喜食富含蛋白且适口性好的品质较高的物种，短花针茅粗蛋白含量显著低于冷蒿等其他植物物种，短花针茅相比其他植物物种并不是绵羊喜食的物种[44,45]. 但是，随着牧草可利用性的降低，绵羊的食性选择会从品质特征转向数量特征[46]. 因此，尽管冷蒿等物种为较喜食物种，在相同的放牧时间里重度放牧区中绵羊采食到足够的喜食物种较困难，而优势种短花针茅、无芒隐子草地上生物量较高，其可利用性相对其他物种均较高(图S2, S4)，在环境的限制下，绵羊采取的应对机制是通过增加短花针茅的采食量以维持大量行走运动带来的体能消耗，进而维持绵羊的代谢消耗，绵羊的食性选择从营养品质的选择转向满足采食数量的选择. 因此，绵羊对重度放牧区中的短花针茅表现为偏好采食. 此外，季节变化对放牧强度与家畜采食组分的关系具有调控作用，随着生长季时间推移，绵羊对短花针茅的选择性增加，尤其在生长季末期重度放牧处理下，绵羊对短花针茅由避免采食转变为偏好采食，这可能与植物的营养成分及物候期有关[47,48]. 生长季高峰期(7~8月)植物多样性较高，多年生杂类草以及一、二年生植物茎叶鲜嫩，具有较低的植物次生化合物和较高的粗蛋白，使这些植物更可口、更易消化和更富含营养，家畜可能会优先选择. 生长季末期(9月)，植物可利用性降低的同时叶片养分含量降低，这种现象在重度放牧区尤其严重，由此绵羊可能会相应调整其采食策略，从而最大限度地获取更多能量和营养. 草地家畜食性选择变化是一个复杂的过程，在后面的研究中还需要进一步验证.

研究不同放牧强度下家畜-植物互作关系有助于充分了解草地生态系统功能及其反馈过程，促进草地可持续放牧管理实施[33]. 不同放牧强度对荒漠草原生态系统的影响已经开展了一系列研究[19]，但主要针对植物-土壤系统，由于研究方法和技术条件限制，对草地家畜行为的研究十分不足. 荒漠草原前期的研究结果表明，随着放牧强度增加，植物群落地上净生产力、高度、盖度等下降，物种多样性和功能群多样性逐渐降低[6,19]. 另外，随着放牧强度的增加，土壤容重逐渐增加，土壤渗透性和土壤呼吸速率逐渐下降，土壤化学性质的变化较为复杂[19]. 这些研究结果整体表明轻度放牧相比于中度和重度放牧处理有助于草地生态系统的可持续利用，与本研究结果一致. 本试验中，相比于中度和重度放牧处理，一方面，轻度放牧处理下植物地上现存量和物种多样性较高(图S2，S5)，植物资源的可利用性增加(图S4)；另一方面，轻度放牧下绵羊采食游走时间较短、活动量和活动距离减少，降低了家畜对草地采食和践踏的负面作用，家畜体能消耗降低，卧息反刍时间增加又有助于绵羊对牧草的消化和吸收，进而

促进了家畜体增重增加. 因此, 轻度放牧处理(0.91羊单位 $hm^{-2}$ 半年$^{-1}$, 牧草利用率约12%) 既有助于草地生产力维持又有利于家畜生产性能提升, 是实现荒漠草原可持续利用的合理放牧强度. 本研究一定程度上弥补了草原放牧家畜研究的不足, 为第一性生产力(牧草产量)与第二性生产力(家畜生产力)的协同优化研究提供理论基础.

## 4 结论

本研究基于荒漠草原长期放牧试验平台, 通过研究家畜牧食行为, 结合草地植物可利用性和家畜生产性能揭示荒漠草原合理的放牧利用强度. 家畜牧食行为和食性选择随放牧季节的变化而变化, 生长季末期绵羊采食和游走时长显著高于生长季高峰期, 并且采食偏好发生变化. 随着放牧强度增加, 绵羊的采食和游走时长逐渐增加, 休息时长减少, 其活动量和采食量增加, 消化率及家畜体增重降低. 放牧强度增加使得植物地上现存量及绵羊采食组分多样性逐渐降低, 绵羊对多年生优势禾草的采食偏好逐渐增加, 对优势灌木的选择性逐渐降低. 在荒漠草原中, 轻度放牧处理下(0.91羊单位 $hm^{-2}$ 半年$^{-1}$)绵羊采食践踏时间及活动距离较短, 采食量低而消化率高, 植物资源的利用性增加, 既有利于家畜生产性能提升又助于草地生产力维持, 是实现荒漠草原可持续利用的合理放牧强度.

## 参考文献


1 White R P, Murray S, Rohweder M. Pilot Analysis of Global Ecosystems: Grassland Ecosystems. Washington, DC: World Resources Institute, 2000

2 Song Y, Xu M, Xu T, et al. Changes in plant community assembly from patchy degradation of grasslands and grazing by different-sized herbivores. Ecol Appl, 2023, 33: e2803

3 Liu Y Z, Zhao X Q, Dong Q M, et al. Research progress on the effects of grazing on grassland ecosystem structure and function (in Chinese). Acta Agrest Sin, 2023, 31: 2253–2262 [刘玉祯, 赵新全, 董全民, 等. 放牧对草地生态系统结构与功能影响的研究进展. 草地学报, 2023, 31: 2253–2262]

4 Mikola J, Setälä H, Virkajärvi P, et al. Defoliation and patchy nutrient return drive grazing effects on plant and soil properties in a dairy cow pasture. Ecol Monogr, 2009, 79: 221–244

5 Li L, Zhang J, He X Z, et al. Different effects of sheep excrement type and supply level on plant and soil C:N:P stoichiometry in a typical steppe on the loess plateau. Plant Soil, 2021, 462: 45–58

6 Zhang R, Wang Z, Han G, et al. Grazing induced changes in plant diversity is a critical factor controlling grassland productivity in the Desert Steppe, Northern China. Agr EcoSyst Environ, 2018, 265: 73–83

7 Li W, Hooper D U, Wu L, et al. Grazing regime alters plant community structure via patch-scale diversity in semiarid grasslands. Ecosphere, 2021, 12: e03547

8 Zhang M, Li G, Liu B, et al. Effects of herbivore assemblage on the spatial heterogeneity of soil nitrogen in eastern Eurasian steppe. J Appl Ecol, 2020, 57: 1551–1560

9 Müller K, Dickhoefer U, Lin L, et al. Impact of grazing intensity on herbage quality, feed intake and live weight gain of sheep grazing on the steppe of Inner Mongolia. J Agr Sci, 2013, 152: 153–165

10 Nunes P A A, Bredemeier C, Bremm C, et al. Grazing intensity determines pasture spatial heterogeneity and productivity in an integrated crop-livestock system. Grassland Sci, 2019, 65: 49–59

11 Yu T, Yan R, Zhang C, et al. How does grazing pressure affect feed intake and behavior of livestock in a meadow steppe in northern China and their coupling relationship. Sci Total Environ, 2024, 908: 168472

12 Liu C, Song X, Wang L, et al. Effects of grazing on soil nitrogen spatial heterogeneity depend on herbivore assemblage and pre-grazing plant diversity. J Appl Ecol, 2016, 53: 242–250

13 Wang D L, Wang L. Interactions between herbivores and plant diversity(review) (in Chinese). Acta Agrest Sin, 2011, 19: 699–704 [王德利, 王岭. 草食动物与草地植物多样性的互作关系研究进展. 草地学报, 2011, 19: 699–704]

14 Wang D L. Progress in the coadaptation and coevolution between plants and herbivores (in Chinese). Acta Ecol Sin, 2004, 11: 2641–2648 [王德利. 植物与草食动物之间的协同适应及进化. 生态学报, 2004, 11: 2641–2648]

15 Li Y, Shi C, Zhang T, et al. Summer grazing by three livestock species at moderate intensity enhances primary productivity and drives community divergence in a semi-arid steppe. Appl Vegetation Sci, 2022, 25: e12683

16 Xiao X, Zhang T, Peter Angerer J, et al. Grazing seasons and stocking rates affects the relationship between herbage traits of alpine meadow and

grazing behaviors of Tibetan sheep in the Qinghai–Tibetan Plateau. Animals, 2020, 10: 488
17 Guo N, Wu Q, Shi F, et al. Seasonal dynamics of diet–gut microbiota interaction in adaptation of yaks to life at high altitude. npj Biofilms Microbiomes, 2021, 7: 38
18 Zhang F, Zheng J, Bennett J A, et al. The legacy effects of grazing and precipitation variability on grassland productivity in a temperate steppe. Agric For Meteor, 2023, 343: 109788
19 Kang S, Han G D, Zhao M L, et al. Research progress on Stipa breviflora desert steppe under grazing (in Chinese). Acta Agrest Sin, 2023, 31: 3587–3596 [康萨如拉, 韩国栋, 赵萌莉, 等. 放牧背景下短花针茅荒漠草原研究进展. 草地学报, 2023, 31: 3587–3596]
20 Wu Q, Ren H, Wang Z, et al. Additive negative effects of decadal warming and nitrogen addition on grassland community stability. J Ecol, 2020, 108: 1442–1452
21 Wei Z J, Han G D, Zhao G, et al. Study on Desert Steppe Ecosystem in China (in Chinese). Beijing: Science Press, 2013 [卫智军, 韩国栋, 赵钢, 等. 中国荒漠草原生态系统研究. 北京: 科学出版社, 2013]
22 Wei Z J, Han G D, Yang J, et al. The response of *Stipa breviflora* community to stocking rate. Chin J Grassland, 2000, (6): 1–5
23 Ding L M, Long R J, Guo X S, et al. Advances in studies on livestock grazing behaviour in grassland ecosystem (in Chinese). Acta Ecol Anim Domast, 2009, 30: 4–9 [丁路明, 龙瑞军, 郭旭生, 等. 放牧生态系统家畜牧食行为研究进展. 家畜生态学报, 2009, 30: 4–9]
24 Jin Z, Guo L, Shu H, et al. Behavior classification and analysis of grazing sheep on pasture with different sward surface heights using machine learning. Animals, 2022, 12: 1744
25 Mayes R W, Dove H. Measurement of dietary nutrient intake in free-ranging mammalian herbivores. Nutr Res Rev, 2000, 13: 107–138
26 Glindemann T, Wang C, Tas B M, et al. Impact of grazing intensity on herbage intake, composition, and digestibility and on live weight gain of sheep on the Inner Mongolian steppe. Livestock Sci, 2009, 124: 142–147
27 Wang C J, Tas B M, Glindemann T, et al. Fecal crude protein content as an estimate for the digestibility of forage in grazing sheep. anim Feed Sci Tech, 2009, 149: 199–208
28 Guo Y P, Zhang H, Zhao X G, et al. Applications of DNA metabarcoding in diet identification of herbivores (in Chinese). Biotechnol Bull, 2021, 37: 252–260 [郭艳萍, 张浩, 赵新钢, 等. DNA宏条形码技术在食草动物食性研究中的应用. 生物技术通报, 2021, 37: 252–260]
29 Bai Y F, Chen Z Z. Effects of long-term variability of plant species and functional groups on stability of Leymus Chinensis community in the Xilin river basin, Inner Mongolia (in Chinese). Chin J Plant Ecol, 2000, 24: 641–647 [白永飞, 陈佐忠. 锡林河流域羊草草原植物种群和功能群的长期变异性及其对群落稳定性的影响. 植物生态学报, 2000, 24: 641–647]
30 Bai Y, Wu J, Clark C M, et al. Tradeoffs and thresholds in the effects of nitrogen addition on biodiversity and ecosystem functioning: Evidence from inner Mongolia Grasslands. Glob Change Biol, 2010, 16: 358–372
31 Jacobs J. Quantitative measurement of food selection. Oecologia, 1974, 14: 413–417
32 He M, Pan Y, Zhou G, et al. Grazing and global change factors differentially affect biodiversity-ecosystem functioning relationships in grassland ecosystems. Glob Change Biol, 2022, 28: 5492–5504
33 Castillo-Garcia M, Alados C L, Ramos J, et al. Understanding herbivore-plant-soil feedbacks to improve grazing management on Mediterranean mountain grasslands. Agr EcoSyst Environ, 2022, 327: 107833
34 Hamidi D, Komainda M, Tonn B, et al. The effect of grazing intensity and sward heterogeneity on the movement behavior of suckler cows on semi-natural grassland. Front Vet Sci, 2021, 8: 639096
35 Lin L, Dickhoefer U, Müller K, et al. Growth of sheep as affected by grazing system and grazing intensity in the steppe of Inner Mongolia, China. Livestock Sci, 2012, 144: 140–147
36 Yang G, Zhou X, Wang S C. Effect of different grazing intensity on performance of sheep (in Chinese). Chin J Anim Sci, 2007, 43: 48–51 [杨刚, 周学, 王思成. 不同放牧强度对绵羊生产性能的影响. 中国畜牧杂志, 2007, 43: 48–51]
37 Villalba J J, Cabassu R, Gunter S A. Forage choice in pasturelands: Influence on cattle foraging behavior and performance1,2. J Anim Sci, 2015, 93: 1729–1740
38 Chapman D F, Parsons A J, Cosgrove G P, et al. Impacts of spatial patterns in pasture on animal grazing behavior, intake, and performance. Crop Sci, 2007, 47: 399–415
39 Dias-Silva T P, Abdalla Filho A L. Sheep and goat feeding behavior profile in grazing systems. Acta Sci, Anim Sci, 2020, 43: e51265
40 Sprinkle J E, Sagers J K, Hall J B, et al. Protein supplementation and grazing behavior for cows on differing late-season rangeland grazing systems. Animals, 2021, 11: 3219
41 De K, Kumar D, Saxena V K, et al. Effect of high ambient temperature on behavior of sheep under semi-arid tropical environment. Int J Biometeorol, 2017, 61: 1269–1277
42 Wang S P. The dietary composition of fine wool sheep and plant diversity in Inner Mongolia steppe (in Chinese). Acta Ecol Sin, 2000, 20: 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: 951–957]
43 Li Y L, Shi C J, Cheng J W, et al. The daily intake and forage species selection of three types of grazing livestocks on a typical steppe in Inner

Mongolia (in Chinese). Acta Agrest Sin, 2018, 26: 1091–1096 [李艳龙, 石椿珺, 程建伟, 等. 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: 1091–1096]
44 Han G D, Bi L, Gao A S. Comparison study on selective intake behavior of sheep at different stocking rates in Stipa breviflora desert steppe (in Chinese). Pratacult Sci, 2004, 21: 95–98 [韩国栋, 毕力格图, 高安社. 不同载畜率条件下绵羊选择性采食的研究. 草业科学, 2004, 21: 95–98]
45 Li Y K, Hu H L, Lu D L. Estimation of diet composition of grazing sheep by n-alkanes as markers on Stipa breviflora desert steppe (in Chinese). Acta Veter Zootechn Sin, 2011, 42: 665–670 [李亚奎, 胡红莲, 卢德勋. 利用饱和烷烃技术对短花针茅荒漠草原放牧绵羊食性的测定. 畜牧兽医学报, 2011, 42: 665–670]
46 Zhang H, Liu N, Yang G, et al. Diet selection of sheep shifted from quality to quantity characteristics of forages as sward availability decreased. Animal, 2022, 16: 11
47 Wang L, Wang D L. Research advances in diet selection mechanisms of grazing herbivores (in Chinese). Chin J Appl Ecol, 2007, 24: 205–211 [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, 24: 205–211]
48 Craine J M, Wolkovich E M, Gene Towne E, et al. Flowering phenology as a functional trait in a tallgrass prairie. New Phytol, 2012, 193: 673–682

## 补充材料

**图S1** 不同放牧强度绵羊采食植物组分多样性分析
**图S2** 不同放牧强度下植物地上现存量的变化
**图S3** 植物群落优势物种地上现存量与家畜牧食行为的关系
**图S4** 不同放牧强度草地植物的可利用性、利用性和绵羊选择性
**图S5** 不同放牧强度下植物物种多样性指数
**表S1** 放牧试验前家畜体重
**表S2** 试验样地植物物种及植物功能群组成

本文以上补充材料见网络版csb.scichina.com. 补充材料为作者提供的原始数据, 作者对其学术质量和内容负责.

Summary for “放牧强度影响荒漠草原家畜牧食行为及食性选择”

# Grazing intensity affects livestock behavior and diet selection in a desert steppe

Qian Wu[1†], Xin Ju[1†], Yuxin Wang[1], Nan Liu[2], Zhongwu Wang[1] & Guodong Han[1*]

[1] *Key Laboratory of Grassland Management and Utilization of Inner Mongolia, Key Laboratory of Forage Cultivation, Processing and High Efficient Utilization of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Key Laboratory of Grassland Resources of the Ministry of Education, College of Grassland Science, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010011, China*
[2] *College of Grassland Science & Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China*
† Equally contributed to this work
* Corresponding author, E-mail: hanguodong@imau.edu.cn

Grazing is a primary use of natural grasslands. Grazing livestock plays a crucial role in grassland ecosystems, and livestock behavior is a key factor affecting the structure and function of grassland ecosystems. Reasonable grazing intensity can regulate livestock behavior, promoting the sustainable use of grassland resources. The desert steppe, a transitional ecosystem between grasslands and deserts, is an important and unique part of the Eurasian temperate steppe. The desert steppe plays an important role in carbon sequestration, biodiversity, animal husbandry and regional economic development. However, current research on livestock behavior in desert steppes is limited, and the effects of different grazing intensities on this behavior and diet selection are not well understood, and the rational grazing utilization intensities need to be further clarified. In this study, a long-term grazing experiment with four grazing intensities (control, 0 sheep unit $hm^{-2}$ half a $year^{-1}$; light grazing, 0.91 sheep units $hm^{-2}$ half a $year^{-1}$; medium grazing, 1.82 sheep units $hm^{-2}$ half a $year^{-1}$; heavy grazing, 2.71 sheep units $hm^{-2}$ half a $year^{-1}$) was established in the *Stipa breviflora* desert steppe in Nei Mongol in China. The changes in sheep behavior and diet selection under different grazing intensities were analyzed and rational grazing intensity was explored. The results show that: (1) As for sheep behavior, the foraging and traveling time were increased but lying time was decreased under moderate and heavy grazing treatments as compared with light grazing. Livestock activity and distance also significantly increased under moderate and heavy grazing. Livestock grazing behavior varied with seasons, and the feeding and traveling time of sheep was significantly longer at the end of the growing season than that at the peak of growing season. (2) With the increase in grazing intensity, the aboveground biomass of plants and the diversity of feeding components of sheep decreased significantly. The preference of the sheep for the perennial grasses *Stipa breviflora* and *Cleistogenes songorica* increased, but the selectivity of the shrub *Caragana stenophylla* decreased gradually. Furthermore, livestock diet selection varied with seasons, especially, the selective feeding of *Stipa breviflora* reached the highest at the end of the growing season. (3) Sheep’s body weight gain correlated with grazing behavior. Longer foraging and traveling times resulted in higher feed intake but lower digestibility and daily weight gain. Light grazing allowed for shorter foraging and traveling times, lower feed intake, higher digestibility, and better plant resource availability, benefiting both livestock performance and grassland productivity and diversity. Therefore, the study concludes that light grazing is a reasonable intensity for achieving long-term sustainable use of the desert steppe. It contributes to the understanding of grassland grazing livestock research, provides theoretical support for optimizing grassland primary and secondary productivity, and offers crucial insights for improving desert steppe grazing management and ensuring sustainable grassland use.

**desert steppe, diet component, grazing intensity, grazing behavior, livestock activity**

doi: 10.1360/TB-2024-0224