

DOI: 10.11686/cyxb2025269

http://cyxb.magtech.com.cn

李梦棋, 董全民, 孙彩彩, 等. 环青海湖地区牦牛和藏羊粪便夏季分解对土壤养分的影响. 草业学报, 2026, 35(4): 42—53.

LI Meng-qi, DONG Quan-min, SUN Cai-cai, *et al.* Effects of summer decomposition of yak and Xizang sheep dung on soil nutrients in the Peri-Qinghai Lake Region. *Acta Prataculturae Sinica*, 2026, 35(4): 42—53.

环青海湖地区牦牛和藏羊粪便夏季分解对土壤养分的影响

李梦棋¹, 董全民^{1,2}, 孙彩彩¹, 吕卫东¹, 许蔚¹, 刘玉祯^{1,2}, 刘文亭^{1,2}, 杨晓霞^{1,2*}

(1. 青海大学畜牧兽医科学院, 青海省高寒草地适应性管理重点实验室, 青海 西宁 810016; 2. 三江源区高寒草地生态教育部重点实验室, 青海 西宁 810016)

摘要: 牦牛和藏羊是青藏高原的主要放牧家畜, 其粪便分解会对高寒草地生态系统产生直接影响, 而目前关于两种粪便对土壤养分影响的作用机制和差异尚不清楚。本研究采用尼龙网袋法监测相同干重的新鲜牦牛和藏羊粪便的养分释放动态, 并使用同心圆分层取样法研究粪便分解释放的养分在土壤垂直方向(粪下)和水平方向(粪周)的迁移特征和富集特征。结果表明: 1) 新鲜的牦牛和藏羊粪便中全碳、全氮、全磷含量分别为 333.39 和 311.41 g·kg⁻¹, 22.25 和 15.51 g·kg⁻¹, 6.95 和 7.47 g·kg⁻¹。2) 经过 45 d 的自然分解后, 牦牛和藏羊粪便的干物质、全碳、全氮、全磷含量分别损失了 28.58% 和 12.82%, 23.68% 和 17.85%, 9.35% 和 15.54%, 22.45% 和 30.21%。3) 分解 45 d 后, 牦牛和藏羊粪便处理下土壤全碳含量达到峰值, 藏羊粪便处理粪周土壤全磷含量略高于牦牛, 而牦牛粪下与粪周的全氮含量高于藏羊粪便处理。4) 分解 45 d 时, 藏羊粪下全碳富集率显著高于牦牛粪便, 但两种粪便粪下和粪周土壤全氮富集率无显著差异。综上, 新鲜牦牛粪便中全碳、全氮含量高于藏羊粪便, 且牦牛粪便分解更快、氮释放更强, 藏羊粪便则更利于土壤碳的持续富集, 两者均能促进磷的积累, 且养分在垂直方向的迁移优于水平方向。

关键词: 高寒草地; 牦牛; 藏羊; 粪便分解; 土壤养分; 养分富集

Effects of summer decomposition of yak and Xizang sheep dung on soil nutrients in the Peri-Qinghai Lake Region

LI Meng-qi¹, DONG Quan-min^{1,2}, SUN Cai-cai¹, LYU Wei-dong¹, XU Wei¹, LIU Yu-zhen^{1,2}, LIU Wen-ting^{1,2}, YANG Xiao-xia^{1,2*}

1. *Qinghai Academy of Animal Science and Veterinary, Qinghai Provincial Key Laboratory of Adaptive Management on Alpine Grassland, Qinghai University, Xining 810016, China*; 2. *Key Laboratory of Alpine Grassland Ecosystem in the Three-River-Source, Ministry of Education, Xining 810016, China*

Abstract: Yaks and Xizang sheep are the primary grazing livestock on the Qinghai-Tibet Plateau. The decomposition of their dung exerts a direct effect on alpine grassland ecosystems, yet the mechanisms and differences in how these two types of dung affect soil nutrients remain poorly understood. In this study, the nylon mesh bag method was used to monitor nutrient release dynamics from fresh yak and Xizang sheep dung of equal dry weight. A concentric-circle stratified sampling approach was employed to investigate the migration and enrichment patterns of nutrients released from dung decomposition along the vertical (below-dung) and horizontal (around-dung) directions

收稿日期: 2025-07-01; 改回日期: 2025-08-28

基金项目: 环青海湖高寒草地土壤线虫和节肢动物群落多样性和土壤功能对放牧强度的响应机制(2025-ZJ-942M)资助。

作者简介: 李梦棋(1998—), 女, 内蒙古赤峰人, 在读硕士。E-mail: 379155294@qq.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: xxyang@qhu.edu.cn

in the soil. The results indicated that: 1) The total carbon (TC), total nitrogen (TN), and total phosphorus (TP) contents in fresh yak and Xizang sheep dung were 333.39 and 311.41 g·kg⁻¹, 22.25 and 15.51 g·kg⁻¹, and 6.95 and 7.47 g·kg⁻¹, respectively; 2) After 45 days of natural decomposition, the losses in dry matter, TC, TN, and TP were 28.58% and 12.82%, 23.68% and 17.85%, 9.35% and 15.54%, and 22.45% and 30.21% for yak and Xizang sheep dung, respectively; 3) On the 45th day of decomposition, the soil TC content reached its peak under both dung treatments. The TP content in the soil around Xizang sheep dung was slightly higher than that around yak dung, while the TN content beneath and around yak dung was higher than that in the Xizang sheep dung treatment; 4) The enrichment rate for TC beneath Xizang sheep dung was significantly higher than that beneath yak dung after 45 days of decomposition, but no significant differences were detected in the TN enrichment rates between the two types of dung in either the below-dung or around-dung soil sampling. In summary, fresh yak dung contained higher TC and TN than Xizang sheep dung, decomposed more rapidly, and released nitrogen more strongly. In contrast, Xizang sheep dung facilitated more sustained soil carbon enrichment. Both types of dung promoted phosphorus accumulation, and nutrient migration was more pronounced in the vertical direction than in the horizontal direction.

Key words: alpine grassland; yak; Xizang sheep; dung decomposition; soil nutrients; nutrient enrichment

青海省拥有丰富的草地资源,根据第三次全国土地调查,青海省草地面积约 3.95×10^7 hm²,占青海省总面积的 54.6%。放牧是对高寒草地最行之有效的利用方式^[1],放牧不仅具有为当地牧民提供丰富的畜产品等经济和社会功能,也是维持草地群落结构稳定和生态系统功能正常发挥的必要活动^[2]。放牧家畜采食牧草后只能消化并吸收牧草中的部分营养物质,剩下 60%~90% 的养分会通过尿液和粪便的形式排出体外并参与草地畜牧业“草—畜—粪—土—草”物质养分循环系统^[3]。土壤碳、氮、磷可以表征有机质分解过程中养分矿化与固持的动态平衡,其变化直接调控生态系统养分循环效率,进而影响群落结构稳定性与功能持续性^[4],而家畜粪便在分解过程中,会对土壤中的碳氮磷等养分产生影响。研究发现,牲畜排泄的粪便可以直接增加土壤中全氮、全磷、全钾的含量^[5],还会增加粪便下方土壤微生物活性,从而提高养分循环速率,可以在较小范围内(0~20 cm)影响土壤的理化性质和生物学特性^[6],从而增加土壤养分的异质性。在内蒙古典型草原,绵羊粪尿返还增加了土壤氮素供应(绵羊通过粪尿形式每年向草地生态系统归还大量氮素,其中以粪形式排出的氮量占采食氮量的 54.74%~78.79%),并改变了草地土壤氮素形态和迁移转化速率^[7-8]。而在青藏高原,牦牛粪便的分解显著提升了土壤养分可利用性,添加牦牛粪使土壤微生物生物量碳和氮分别增加了 14.24% 和 20.29%,同时促进了土壤微生物活性和相关酶的产生,其中 β -1,4-葡萄糖苷酶、 β -1,4-木糖苷酶和脲酶的活性分别显著提高了 8.4%、8.2% 和 6.6%^[9]。赵宇等^[10]在黑龙江省西部中度盐碱退化羊草(*Leymus chinensis*)草地研究发现,添加鲜羊粪可以显著提高植被高度、盖度和地上生物量,降低生草土层土壤的总含盐量,改善土壤团聚体组成结构,羊粪添加量为 2.50 kg·m⁻²时,0~10 cm 土壤团聚体稳定性最高。

牦牛和藏羊是青藏高原放牧的支柱畜种^[11],在牲畜采食的过程中,牦牛因能量需求及固有采食高度驱动,优先选择生物量与株高占优的禾本科和莎草科植物;而藏羊受限于其特殊的口齿结构、代谢特征及消化道容量,更倾向于采食低矮且蛋白含量较高的豆科植物^[12],此外,牦牛和藏羊的消化道结构也有很大差异,因此消化能力^[13]不同,导致两种牲畜排泄的粪便在形态、质地、养分含量上存在明显差异。例如,牦牛粪便通常呈较大的饼状或堆状,含水量高且质地黏稠,而藏羊粪便呈较小的球形或椭圆形,质地干燥。相比之下,新鲜牦牛粪便的全碳、全氮及全钾含量均高于藏羊粪便^[14]。此外,粪便分解过程不仅受环境因子(如降水模式、地温条件及微生物群落活动)的调控,其内在理化特性与组成成分同样构成关键的制约因素^[15]。正是这种环境因子与内在特性的交互作用,导致牦牛和藏羊粪便的分解速率存在差异,并通过粪便中养分的释放对土壤养分含量以及草地生态系统养分循环过程产生不同的影响。

综上所述,牲畜粪便的返还对于土壤—微生物—植物系统有重要的影响,现有研究大多是以一种牲畜粪便作为研究对象,但在青藏高原,牦牛和藏羊同为重要的家畜(据统计,青藏高原牦牛超过1300万头,藏绵羊数量超过3000万只^[16]),因此在同一时间同一试验地研究牦牛和藏羊粪便对土壤养分的影响,分析两种不同类型牲畜粪便沉积对粪下和粪周土壤养分变化的可能影响和关系,对进一步分析高寒草地的养分响应特性和加强牲畜排泄物管理具有重要意义。基于此,本试验以环青海湖地区高寒草地夏季牦牛和藏羊粪便为研究对象,采用同心圆分层取样法,同时监测牦牛和藏羊粪便的时间动态变化,引入富集率概念进而量化养分迁移效率,拟阐明不同粪便类型在分解过程中对土壤养分空间分布的影响,揭示关键时间节点的富集特征,主要解决以下科学问题:1)牦牛和藏羊粪便自身养分释放差异;2)牦牛和藏羊粪便分解过程中土壤养分的空间分布和富集效应差异。

1 材料与方法

1.1 研究地概况

本试验依托青海大学高寒草地—家畜系统适应性管理技术平台开展。平台位于青海省海北藏族自治州海晏县西海镇(36°44′—37°39′ N, 100°23′—101°20′ E),平均海拔3100 m^[17]。隶属于大陆高原寒温带季风气候,年均降水量为400 mm,多为地形雨且集中于5—9月。全年无绝对无霜期,仅以冷热两季区分,年均温为1.4℃,最冷月平均气温为-24.8℃,最热月平均气温为12.5℃。草地类型为草甸化草原,土壤类型为高山草甸土。植物群落的主要物种有紫花针茅(*Stipa purpurea*)、矮生蒿草(*Carex alataensis*)、星毛委陵菜(*Potentilla acaulis*)和赖草(*Leymus secalinus*)等^[18]。

1.2 粪便分解试验布置

在研究区域内选择地势平坦、群落结构相对均一的草地作为粪便分解试验样地,试验开始前一周将草地统一剪到3 cm高度。使用人工采集法采集试验地牦牛和藏羊新鲜排出的粪便(便出时间<24 h),收集粪便后,捡除粪便表面枯落物和昆虫,取部分粪样用于测定样品的含水率(布置试验前采集大量符合要求的新鲜牦牛和藏羊粪便,混合均匀后取10份10 g新鲜粪便,采用105℃烘干法测定其干基含水率),计算得到牦牛和藏羊新鲜粪便的干基含水率分别为387.71%和173.75%。根据本研究试验设计,每个试验处理需要相当于50 g干重的新鲜粪便,因此根据干基含水率公式[鲜重=干重×(1+干基含水率)]计算得到分解试验所需的新鲜牦牛粪便量为243.85 g,新鲜藏羊粪便量为136.88 g。本研究选择50 g干重粪便作为标准投放量,旨在精准对比牦牛粪与藏羊粪分解机制的差异。统一干重可排除初始质量与试验环境的干扰,确保分解差异成为核心观测变量。此重量设置适配青藏高原粪便分解研究的标准尼龙网袋法(15 cm×25 cm),因其处于该方法的典型样本量区间(30~60 g),能使袋内填充率稳定在60%~70%。该填充比例平衡了微生物接触、气体交换效率及均匀响应冻融的需求,并避免了填充过密(>80%)导致的内部缺氧或过疏(<40%)引发的边缘效应。同时,50 g干重具有生态尺度合理性,鉴于牦牛单次排粪干重为200~300 g,藏羊粪为40~60 g,50 g相当于1/6块牦牛粪或约一整块藏羊粪,该尺度贴近自然排泄斑块,能有效避免因斑块过大(牦牛粪)或过小(藏羊粪)造成的微环境异质性,使分解过程更真实反映野外实际情况^[14-19]。

粪便分解试验开始于2024年6月11日,在放置粪便前采集土壤样品测定土壤养分含量初始值。试验共设置3个处理,分别为50 g干重的牦牛粪(yak dung, YD);50 g干重的藏羊粪(Xizang sheep dung, SD);无粪便添加的空白对照(CK),每个处理设置5个重复。研究共包含45个1 m×1 m的样方(3个处理×5个重复×3次取样),样方间隔为0.5 m,将粪便样品置于孔径为1 mm×1 mm的尼龙网袋(15 cm×25 cm)中,以确保粪便颗粒不会漏出,避免对表层土壤造成污染。尼龙袋置于每个样方的正中央,以粪样为圆点分别安装半径为10、20、30 cm的同心圆,使其自然分解。

1.3 粪便和土壤取样

在粪便分解第0、15、30和45 d时,即2024年6月11日、6月26日、7月11日和7月26日,对粪便进行取样,每个处理取样5个重复,进行粪便取样的同时,采集土壤样品,分为垂直和水平两个方向:1)垂直方向(牦牛或藏羊粪便处理的粪便正下方)分别在0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm进行取样;2)水平方向(以牦牛或藏羊粪便为中

心向外)分别在 0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm 进行取样。以下采用“粪下”和“粪周”分别对应垂直方向和水平方向,具体取样方式如图 1,所取得的土壤样品和粪便样品置于自封袋后,带回实验室于 4 °C 保存,以便进行后续测定。

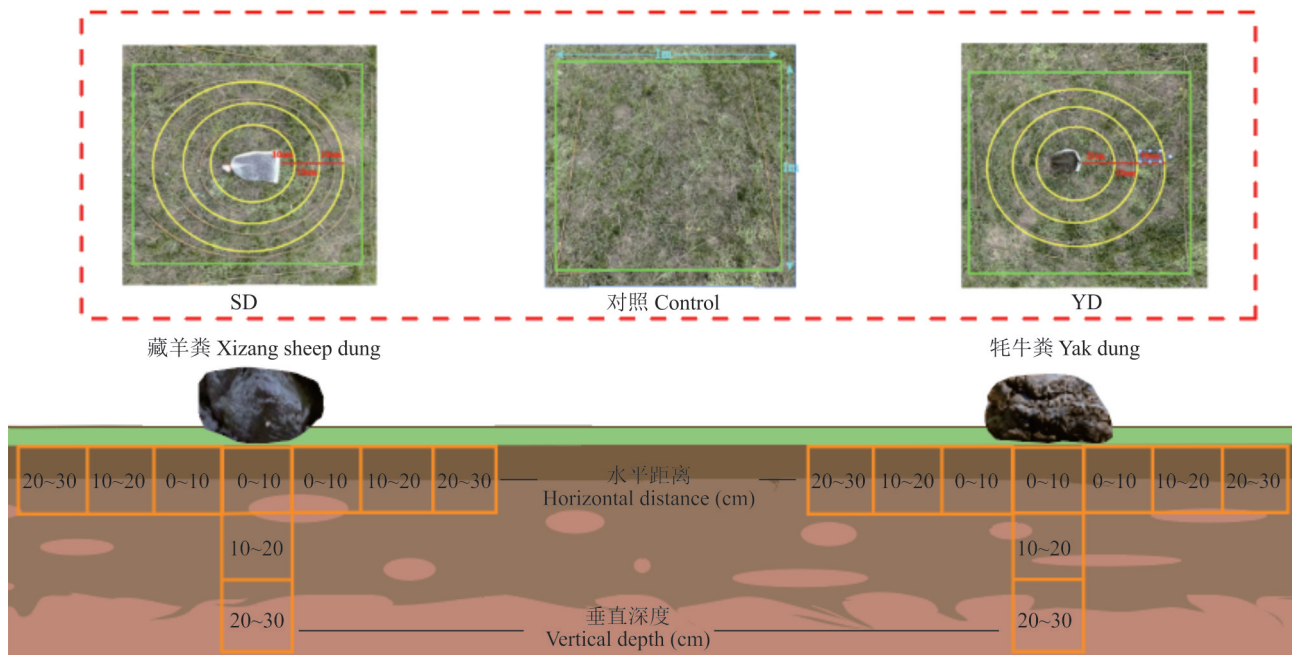


图 1 垂直方向和水平方向上土壤样品采集示意图

Fig. 1 Schematic diagram of soil sampling in the vertical and horizontal directions

1.4 指标测定

粪便含水率:将 10 g 新鲜样品(牦牛和藏羊粪便)均匀地铺在已知准确质量的铝盒中,将铝盒置于 105 °C 的烘箱中烘干至恒重(连续 24 h,质量差 ≤ 0.001 g 视为恒重),根据样品前后质量差计算粪便含水率,本试验使用干基含水率^[20](以干物质质量为基数)表示粪便含水量,干基含水率是指水分质量占干物质质量的百分比(对于高水分含量的粪便样品,干基含水率会超过 100%),以消除样本初始鲜重差异对数据可比性的干扰,便于不同粪便类型及不同分解阶段的水分变化直接对比,如公式(1):

$$\text{含水率} = \frac{(\text{鲜重} - \text{干重})}{\text{干重}} \times 100\% \quad (1)$$

将粪便和土壤烘干至恒重,用球磨机(TJG-215,东方天净)MM400 粉碎后,过 0.075 mm 筛,使用元素分析仪(Thermo Scientific FlashSmart,赛默飞世尔科技公司)测定全碳(total carbon, TC)和全氮(total nitrogen, TN)含量。采用 NaOH 碱熔钼锑抗比色法测定全磷(total phosphorus, TP)含量。

1.5 数据分析

用养分富集率^[21](enrichment ratio, E)表征两种粪便在分解过程中对不同位置土壤养分的富集程度:

$$\text{富集率} = \frac{\text{处理区养分含量}}{\text{对照区养分含量}} \quad (2)$$

式中:处理区养分含量指牦牛或藏羊粪便处理的粪下或粪周土壤养分含量;对照区养分含量指无粪便处理下的土壤养分含量,若 $E > 1$,说明该粪便对土壤养分存在富集效应,提高了土壤肥力。

使用 Excel 2021 进行数据整理,所有数据均经过正态性和方差齐性检验,应用 SPSS 27.0 软件进行统计学分析,采用单因素方差分析和最小显著差异法(LSD)对两种粪便类型在同一分解时间下养分的差异性以及不同粪便类型和不同采样位置对土壤全碳、全氮、全磷含量的影响进行显著性检验和多重比较($P < 0.05$),采用 Origin

2025, Adobe illustrator 2024, GraphPad Prism 10. 4. 1 进行作图。

2 结果与分析

2.1 牦牛和藏羊粪便养分差异

牦牛粪便中全碳、全氮含量显著高于藏羊粪便,而藏羊粪便中全磷含量则显著高于牦牛粪便($P < 0.05$)。0~10 cm 土层土壤全碳含量显著高于10~20 cm 和20~30 cm 土层;土壤全氮、全磷含量则随土层深度增加逐渐递减且各土层间差异显著(表1)。

表1 牦牛和藏羊粪便以及土壤养分含量的初始值

Table 1 Initial values of nutrient content in yak and Xizang sheep dung and soil

项目 Item	全碳含量 Total carbon content ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全氮含量 Total nitrogen content ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全磷含量 Total phosphorus content ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	干基含水率 Dry basis moisture content (%)
牦牛粪 Yak dung	333.39 ± 2.74A	22.25 ± 0.63A	6.95 ± 0.10B	387.71
藏羊粪 Xizang sheep dung	311.41 ± 1.93B	15.51 ± 0.53B	7.47 ± 0.15A	173.75
0~10 cm 土壤深度 Soil depth	39.55 ± 0.82a	2.11 ± 0.04a	0.60 ± 0.01a	
10~20 cm 土壤深度 Soil depth	35.31 ± 0.82b	1.53 ± 0.05b	0.54 ± 0.01b	
20~30 cm 土壤深度 Soil depth	33.93 ± 0.51b	0.92 ± 0.07c	0.44 ± 0.01c	

注: 数据为平均值 ± 标准误; 不同大写字母表示同一指标牦牛和藏羊粪便之间差异显著($P < 0.05$); 不同小写字母表示同一指标不同土层间差异显著($P < 0.05$)。

Note: Data are presented as mean ± standard error (SE); Different uppercase letters indicate significant differences in the same parameter between yak and Xizang sheep dung (at the 0.05 level), while different lowercase letters indicate significant variations in the same parameter across vertically stratified soil layers (at the 0.05 level).

2.2 牦牛和藏羊粪便的分解速率

在粪便分解过程中, 牦牛和藏羊粪便干重、全碳、全氮和全磷含量均随分解时间增长呈明显的下降趋势(图2)。

牦牛粪便干重损失量显著高于藏羊粪便的损失量($P < 0.001$), 分解45 d后, 牦牛粪便干重损失14.49 g, 即减少了28.58%, 藏羊粪便干重损失6.41 g, 即减少了12.82%, 表明在45 d的分解周期内, 牦牛粪便高于藏羊粪便分解量(图2)。

牦牛粪便初始全碳含量显著高于藏羊粪便, 但分解30 d后, 牦牛和藏羊粪便全碳含量无显著差异, 分解45 d后, 藏羊粪便中的全碳含量下降至255.83 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 损失了17.85%, 牦牛粪便的损失量则为23.68%, 表明牦牛粪便全碳损失量大于藏羊粪便。

牦牛和藏羊粪便中全氮含量的分解速率低于其他养分, 且两种粪便在分解30~45 d的损失量明显高于分解0~15 d。此外, 牦牛粪便全氮含量始终高于藏羊粪便($P < 0.001$), 在分解45 d时, 牦牛和藏羊粪便中全氮含量分别为20.17和13.10 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 损失量则为9.35%和15.54%。

牦牛和藏羊粪便全磷含量的损失趋势相同, 均为分解0~15 d高于分解30~45 d, 在0~15 d内, 牦牛和藏羊粪便中全磷含量的损失量最大, 分别为0.80和1.00 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

2.3 粪便类型在不同分解时间下对土壤养分含量的影响

粪便类型会影响土壤养分含量, 且存在明显的滞后性(图3)。具体而言, 牦牛和藏羊粪便处理下土壤全效养分含量会随分解时间的延长不断提高, 并对表层土壤(0~10 cm)的影响显著大于深层土壤(20~30 cm)。

垂直方向, 在粪便分解15 d, YD处理粪下0~10 cm土层全碳、全氮、全磷含量分别较同时段下的CK处理的同一土层增加了2.50%、5.12%、3.57%, 但SD处理粪下0~10 cm土层全碳、全磷含量始终高于YD处理; 在粪便分解30 d, 粪下土壤呈显著的养分富集效应。YD处理粪下0~10 cm土层全氮含量达到2.30 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 与同时段

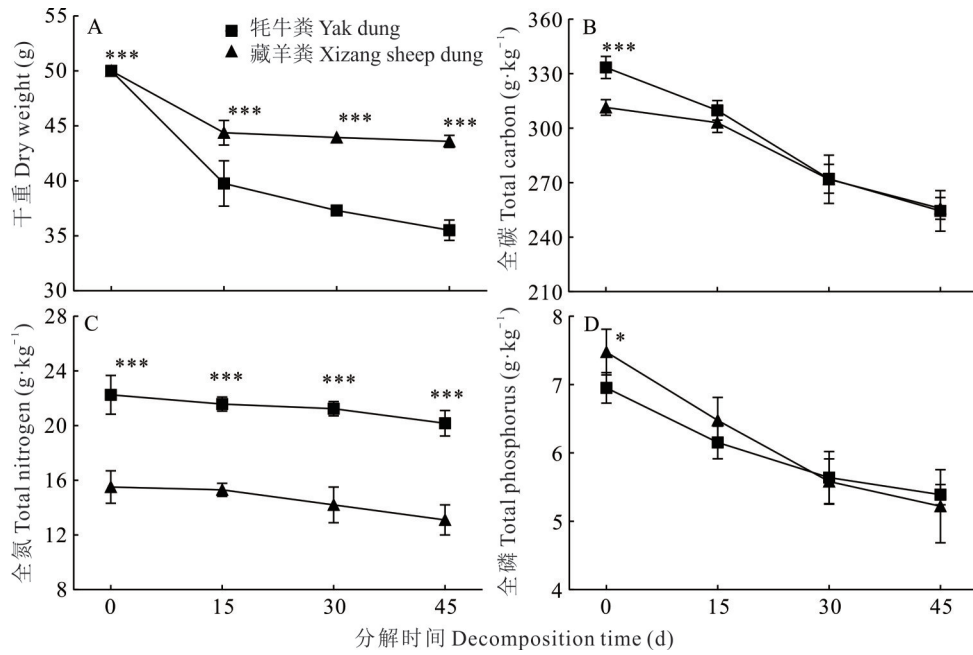


图 2 不同分解时间下牦牛和藏羊粪便的营养变化

Fig. 2 Nutrient variations in two fecal types under different decomposition periods

*: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$; ***: $P < 0.001$; 下同 The same below.

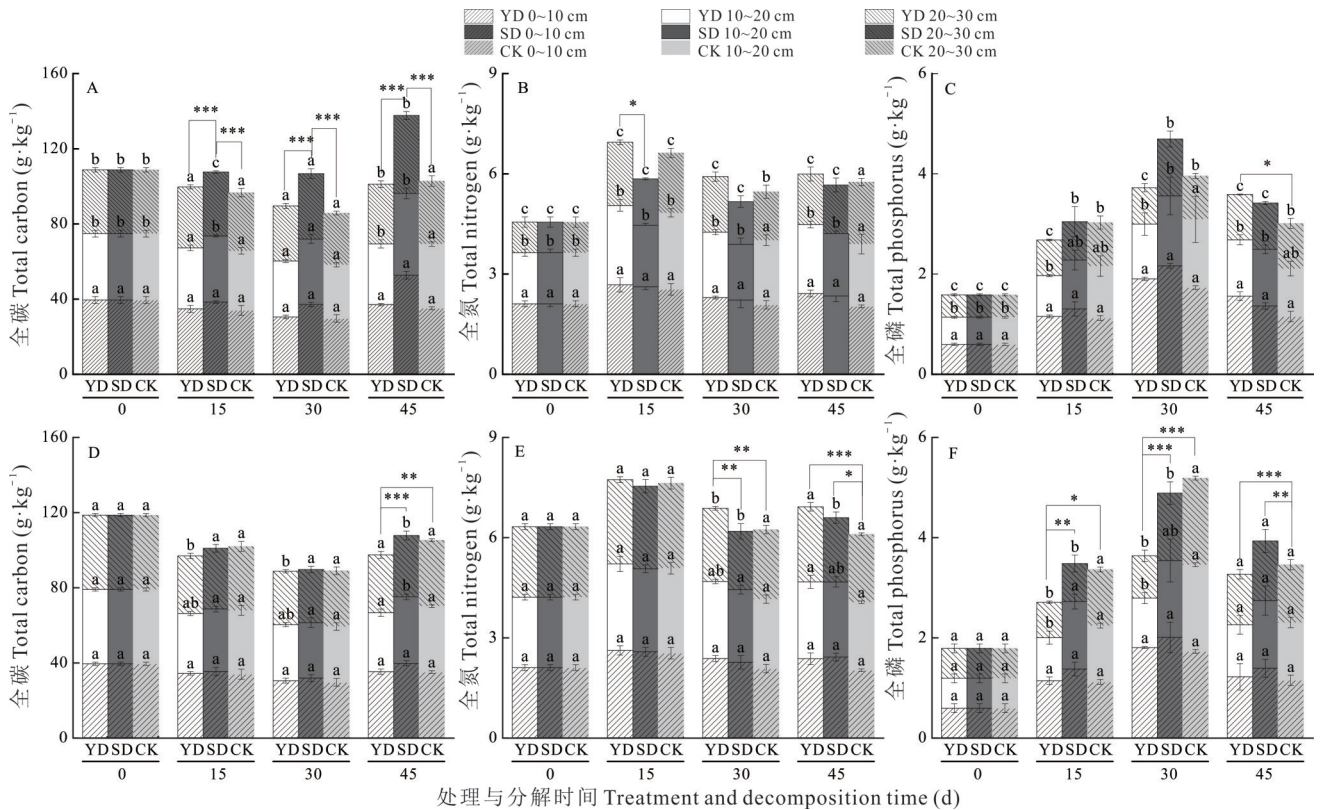


图 3 不同处理土壤养分在不同分解时间不同土层的差异性特征

Fig. 3 Response of soil nutrients to treatment, decomposition time, and soil depth

YD: 牦牛粪便 Yak dung; SD: 藏羊粪便 Xizang sheep dung; CK: 无粪便处理 No dung application; 不同小写字母表示同一处理下不同土层之间差异显著 ($P < 0.05$) Different lowercase letters indicate significant differences among different soil layers under the same treatment (at the 0.05 level); 图 A、B、C 和图 D、E、F 分别表示垂直方向 (粪下) 和水平方向 (粪周) 的营养变化 Panels A, B, C and D, E, F represent nutrient changes in the vertical direction (beneath the dung) and horizontal direction (dung periphery), respectively; 下同 The same below.

下CK处理相比增加了9.57%,其全碳含量增加缓慢,全磷含量增加了 $0.17\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,且YD处理粪下的全碳含量显著低于SD处理;在粪便分解45 d后,YD和SD处理下的3个垂直土层之间养分含量发生明显变化,均为0~10 cm土层中养分含量显著高于10~20 cm和20~30 cm土层。此外,10~20 cm土层土壤全氮和全磷含量显著高于20~30 cm土层,SD处理粪下0~10 cm土层全碳含量较YD处理同层高出 $15.64\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。SD处理在各土层均表现出更强的保留碳的能力(图3A~C)。

水平方向,粪便分解15 d后,相比于粪下土层其粪周土壤仅在0~10 cm处轻微增加,这表明粪便分解存在表聚现象。与YD处理相比,SD处理对粪下全碳的影响明显较大;粪便分解30 d后,土壤吸收的全碳、全氮、全磷含量增加,该时段下YD处理对粪周的土壤全氮的影响显著高于SD处理,这表明不同牲畜粪便的养分扩散模式存在明显差异;粪便分解45 d后,YD、SD处理粪周土壤全氮含量均显著高于CK处理。此外,SD处理粪周的全碳、全氮在0~10 cm和20~30 cm存在显著差异,但YD处理粪周的3个土层间土壤养分差异并不显著(图3D~F)。

2.4 粪下及粪周表层土壤养分变化特征

相对变化差值能够有效表征粪便对土壤养分的直接影响,通常使用粪便处理下土壤养分含量与无粪便处理下土壤养分含量的差值表示,通过计算发现,在45 d的分解周期内,添加两种粪便处理的土壤全碳、全氮含量呈持续增长趋势且两种粪便中的养分向土壤中的迁移速率,均表现为垂直迁移高于水平迁移。在粪便分解30 d内,SD处理中土壤的全碳、全磷含量均高于YD处理,但全氮含量却与之相反,呈YD处理微高于SD处理的趋势(图4)。

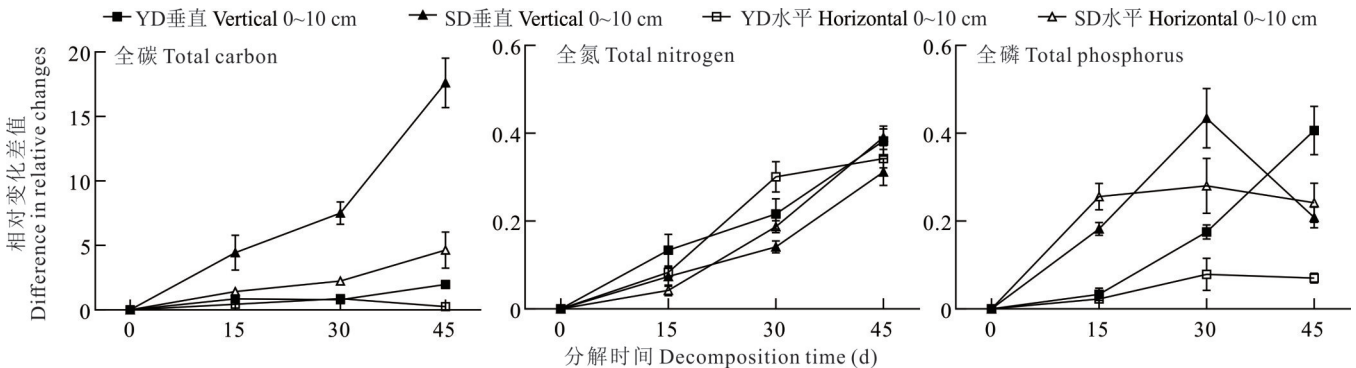


图4 不同处理表层土壤养分的相对变化差值

Fig. 4 Inter-treatment differences in relative changes of surface soil nutrient

2.5 牦牛和藏羊粪便分解对3层土壤养分富集效应的影响

垂直方向,粪便分解15 d后,YD和SD处理的粪下土壤均存在全碳富集效应,且在SD处理下富集效应显著高于YD处理($P<0.001$)。土壤全磷的富集效应主要发生在YD和SD处理的表层土壤中;粪便分解30 d后,SD处理粪下土壤全碳富集率显著高于YD处理($P<0.001$),YD和SD处理的全氮富集率在垂直和水平方向变化趋势相似;粪便分解45 d后,藏羊粪便粪下土壤的全碳富集率显著高于牦牛粪便处理($P<0.001$),此时全碳富集率达到峰值。YD和SD处理均对土壤全磷含量产生了富集效应,但两者之间并无显著差异,此时YD和SD处理粪下表层土壤(0~10 cm)全磷富集率分别为1.35和1.18(图5A~C)。

水平方向,粪便分解15 d后,同一时段下YD和SD处理的粪周土壤全碳富集效应主要集中在0~10 cm土壤,富集率分别为1.01和1.04。土壤全氮在YD处理粪周0~10 cm和10~20 cm土壤中均存在富集效应,而SD处理仅在粪周0~10 cm土壤存在富集效应,对10~20 cm和20~30 cm土层并无显著影响;粪便分解30 d后,牦牛和藏羊粪便粪周0~10 cm土壤全碳富集率分别为1.03和1.08,同一时段下,牦牛和藏羊粪便粪周土壤全磷富集主要出现在0~10 cm土层,且藏羊粪便处理的粪周土壤全磷富集率显著高于牦牛处理;粪便分解45 d后,牦牛粪便处

理仅对垂直表层土壤和水平方向 0~10 cm 土壤全碳产生富集效应,此时,富集效应仍表现为表层富集大于深层富集。此外,YD和SD处理粪周 0~10 cm 土壤全磷富集率分别为 1.06 和 1.21(图 5D~F)。

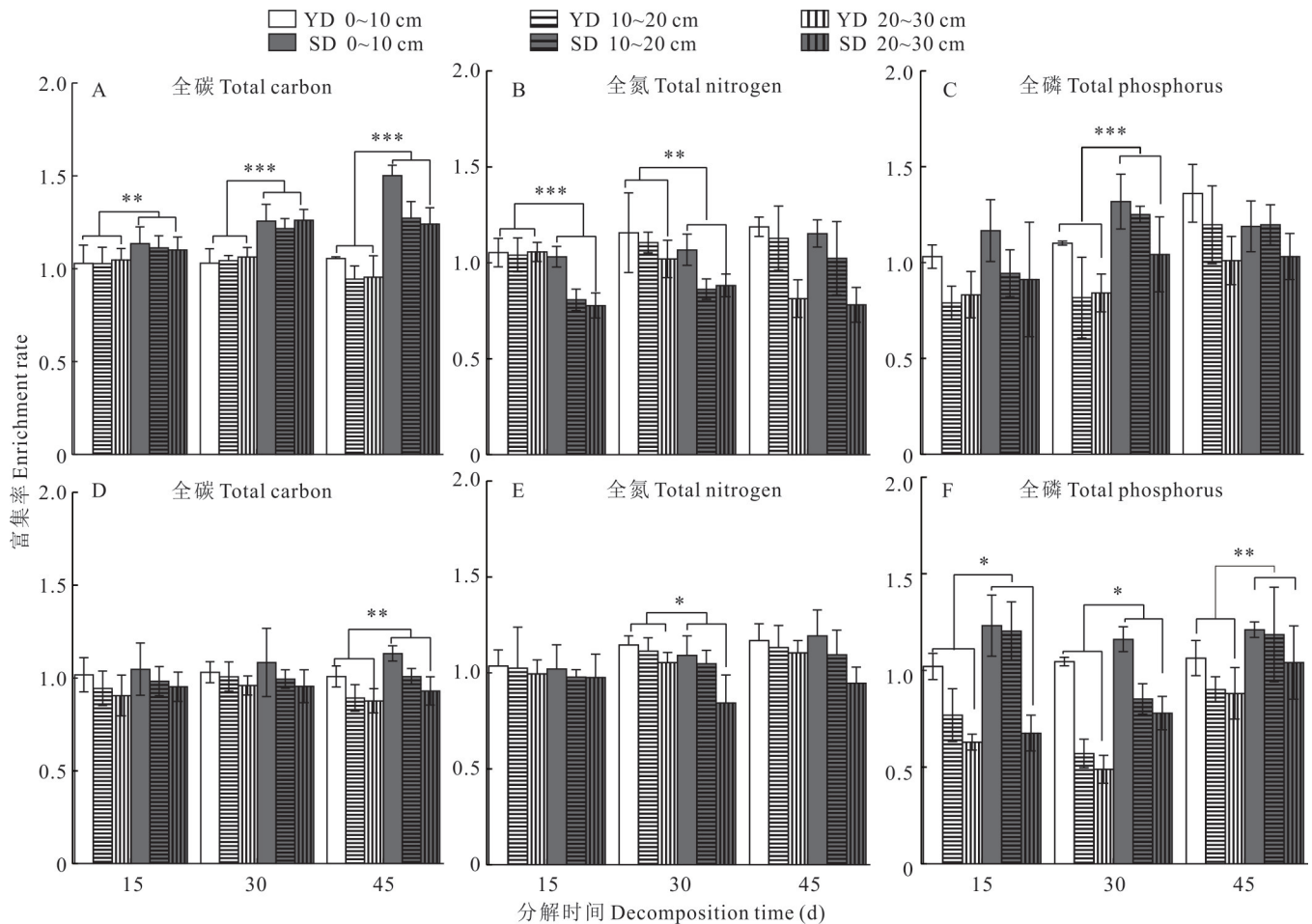


图 5 不同处理不同土层土壤养分富集率随粪便分解时间的变化

Fig. 5 Treatment- and layer-specific changes in soil nutrient enrichment during decomposition

3 讨论

3.1 牦牛和藏羊粪便分解与养分的释放

本研究结果表明,牦牛和藏羊粪便的初始养分含量和分解动态存在显著差异。新鲜牦牛粪便的全碳、全氮含量和含水率均显著高于藏羊粪便(表 1),这与杜子银等^[14]在青藏高原的研究结论一致,他们发现牦牛粪的有机碳和全氮含量普遍高于藏羊粪,这主要源于两种家畜食性差异及消化能力的不同^[12-13]。本研究监测结果显示,分解 45 d 后的牦牛粪便的干物质损失率(28.58%)显著高于藏羊粪便(12.82%)(图 2A),表明牦牛粪便的分解速率快于藏羊粪便。这一差异主要与粪便的物理性状和化学组成有关:牦牛粪质地松散、含水量高,为微生物的侵入和活动创造了更为有利的条件;而藏羊粪便呈致密的颗粒状、含水量较低,其物理结构可能在分解初期限制了微生物和微小分解者的活动范围^[22]。此外,牦牛粪便中含有较高的初始氮含量($22.25 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$),更有效地促进微生物的增殖,从而加速了其自身的分解过程^[6]。这与吴新卫等^[23]关于高含水量促进分解的观点一致。从养分释放模式来看,两种粪便的全碳、全磷均在分解 0~15 d 损失最快,在分解 30~45 d 趋缓(图 2B, D),这可能与易分解有机质(如糖类、有机酸等)的快速消耗有关。而全氮的释放则相对滞后,在 15~45 d 损失更为明显(图 2C),这表明蛋白质等含氮有机化合物的矿化是一个更为缓慢和复杂的过程^[24]。

3.2 土壤中养分在垂直和水平方向迁移的差异

本研究通过同心圆分层取样,揭示了牦牛和藏羊粪便分解对土壤养分空间分布的异质性影响。研究发现,养分从粪便向土壤的迁移存在明显的“表聚现象”和“滞后效应”。本研究证实,牦牛与藏羊粪便的添加显著提高了土壤全碳、全氮、全磷含量(图3和图4),这一发现与姜世成等^[5]关于牲畜粪便提升土壤养分的研究结论一致。粪便作为重要的有机肥源,其分解释放的养分是土壤养分库的有效补充^[2]。首先,养分富集主要发生在粪便正下方(垂直方向)0~10 cm的表层土壤,且富集程度随土层深度增加而递减(图3A~C),表现出明显的“表聚现象”,这与任雪等^[21]关于“肥岛”效应的研究结论相似。即有机物质输入后,养分在垂直方向上的迁移深度有限,主要富集于表层。该现象主要是由于高寒草地土壤对养分的吸附固定作用较强,加之环青海湖地区夏季降水虽集中但蒸发量大,水分下渗深度有限,溶解性养分的垂直淋溶较弱,共同导致了养分在表层的累积。其次,土壤对粪便养分输入的响应存在“滞后效应”。本研究中粪便的养分在0~15 d快速释放(图2),而土壤中的养分含量在15~30 d才显著增加(图3和图4)。这种现象说明,从粪便养分释放到被土壤固持、转化是一个渐进的过程^[25]。这是因为在粪便分解15 d内释放出的可溶性养分一部分被土壤微生物快速吸收同化,用于构建自身生物量(即微生物固持)^[6];随后,随着微生物细胞的死亡和周转,这些养分才被重新释放到土壤中,从而被检测为土壤全量的增加^[26]。此外,养分在土壤中的扩散和均匀化也需要时间。本研究还发现,藏羊粪便处理下土壤全碳的富集效应显著强于牦牛粪便(图3A和图5A)。尽管牦牛粪初始全碳含量更高且分解更快,但其可能以更易被矿化分解的形式存在;而藏羊粪分解相对缓慢,其释放的碳组分可能化学稳定性更高、更易于与土壤矿物结合或被微生物转化为稳定的有机质,从而导致更高的土壤碳固持效率。此外,牦牛粪便对土壤全氮的提升作用,尤其是在粪便分解45 d内和粪周区域,强于藏羊粪便(图3B, E),这直接得益于其较高的初始氮含量和更快的分解与氮矿化速率。

3.3 土壤养分富集率在垂直和水平方向上的差异

养分富集率用以量化两种粪便在分解过程中对不同位置土壤养分的净富集程度,其计算方式可有效剔除土壤背景值的影响。本研究结果表明,两种粪便均对粪下和粪周土壤产生了显著的富集效应^[27-28],但富集程度和空间模式存在差异。在垂直方向上,藏羊粪便对粪下土壤全碳的富集率在分解45 d后显著高于牦牛粪便(图5A),这与全碳含量的变化结果(图3A)相对应,进一步证实了藏羊粪便在促进土壤碳固持方面的优势。牦牛粪便处理下全氮的绝对增加值高于藏羊处理(图3B, 图4),说明其归还氮素的总量更大。在水平方向上,养分的富集效应随距离增加而锐减,主要局限在距粪便0~10 cm的范围内(图5D~F)。养分的水平迁移能力明显弱于垂直迁移。这主要是由于养分的水平扩散更多地依赖于水分的侧向运移,而在环青海湖地区,即使在降水集中的夏季,水分的侧向运移范围也非常有限,导致养分难以远距离迁移^[29]。牦牛粪便对粪周土壤全氮的富集范围比藏羊粪便更广(图3E和图5E),这可能与其分解初期释放出更多的铵态氮、可溶性有机氮等可溶性组分有关,这些组分更易随微小的水分进行短距离扩散^[30-31]。综上所述,牦牛粪便以其更快的分解速率和更高的氮含量,在短期内(尤其是分解30 d内)能更快速地向土壤,特别是表层土壤,提供有效氮源;而藏羊粪便虽然分解较慢,但其碳释放过程与土壤碳库的固持机制更为匹配,从而产生了更强且更持续的土壤碳富集效应。两种粪便的共同作用是提高了土壤磷的有效性,并显著改变了土壤养分的空间异质性,创造了局部的“养分热点”^[32],这对高寒草地生态系统的物质循环和植被斑块动态具有重要意义。

本研究通过45 d原位监测,明确了牦牛与藏羊粪便养分释放的时空差异(如牦牛干重损失率达28.58%,显著高于藏羊的12.82%),并揭示了土壤养分在垂直与水平方向的富集特征。然而,以下局限需在后续研究中深化:现有数据仅覆盖夏季快速分解期,而青藏高原冻融循环对分解后期(如冬季低温阶段)的调控作用尚未验证。未来可结合Olson模型延伸观测至完整年度周期,计算分解95%所需时间,以全面评估养分归还潜力。本研究土壤全量养分变化未能揭示速效养分动态。粪甲虫破碎作用、微生物群落功能(如固氮菌活性)及氮矿化率等关键过程未纳入分析,这些因素可能解释牦牛粪便分解更快但氮素固持更强的现象。未来需通过控制试验量化其贡献。综上所述,未来的研究应结合更长的时间尺度、更敏感的速效养分指标以及对关键生物因子与生态过程的监测,从而构建一个更全面、更机理化的“牲畜粪便—土壤—植物”系统养分循环模型,为高寒草地的精准施肥与可

持续放牧管理提供更深入的理论依据。

4 结论

基于环青海湖地区高寒草地牦牛和藏羊粪便夏季分解试验得出的主要研究结论:1)新鲜牦牛粪便中全碳、全氮含量(333.39 和 $22.25\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)高于藏羊粪便(311.41 和 $15.51\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$),而藏羊粪便中全磷含量($7.47\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)微高于牦牛粪便($6.95\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$),且牦牛粪便分解速率更快。2)牦牛和藏羊粪便中养分释放对土壤养分的影响存在滞后性,但在分解周期内,牦牛粪便提升土壤氮含量更显著,藏羊粪便促进土壤碳富集,两种粪便均促进土壤磷富集。3)粪下土壤养分富集效应显著且表层土壤养分($0\sim 10\text{ cm}$)变化尤为明显,藏羊粪下土壤全碳富集率显著高于牦牛粪。粪周土壤养分呈表聚现象,总体而言,两种粪便养分的垂直迁移速率高于水平迁移,垂直方向可显著影响 $0\sim 20\text{ cm}$ 土层养分含量,而水平方向养分富集则主要局限于 $0\sim 10\text{ cm}$ 表层土壤。

综上所述,牦牛粪便分解速率高于藏羊粪便,但其全碳损失更大;藏羊粪便虽分解较慢,但对土壤碳的富集效应更持久。

参考文献 References:

- [1] Zhang Y J, Zhu J T, Shen R N, *et al.* Research progress on the effects of grazing on grassland ecosystem. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2020, 44(5): 553–564.
张扬建, 朱军涛, 沈若楠, 等. 放牧对草地生态系统影响的研究进展. *植物生态学报*, 2020, 44(5): 553–564.
- [2] Dong S K, Shang Z H, Gao J X, *et al.* Enhancing sustainability of grassland ecosystems through ecological restoration and grazing management in an era of climate change on Qinghai–Tibetan Plateau. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2019, 287(C): 106684.
- [3] Willott J S, Miller J A, Incoll D L, *et al.* The contribution of rabbits (*Oryctolagus cuniculus* L.) to soil fertility in semi-arid Spain. *Biology and Fertility of Soils*, 2000, 31(5): 379–384.
- [4] Gao Z Y, Wang H Y, Zhang Y F. Soil carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometric characteristics and driving factors: a review. *Journal of Zhejiang A & F University*, 2025, 42(3): 645–656.
高子滢, 王海燕, 张亦凡. 土壤碳氮磷化学计量特征及其驱动因素. *浙江农林大学学报*, 2025, 42(3): 645–656.
- [5] Jiang S C, Zhou D W. The impact of cattle dung deposition on grasslands in the Songnen Grassland. *Acta Prataculturae Sinica*, 2006, 15(4): 30–35.
姜世成, 周道玮. 牛粪堆积对草地影响的研究. *草业学报*, 2006, 15(4): 30–35.
- [6] Wang C H, Xing X R, Han X G. Advances in study of factors affecting soil N mineralization in grassland ecosystems. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(11): 2184–2188.
王常慧, 邢雪荣, 韩兴国. 草地生态系统中土壤氮素矿化影响因素的研究进展. *应用生态学报*, 2004, 15(11): 2184–2188.
- [7] Liu X M, Chen H Y, Zheng R, *et al.* Decomposition of sheep and cattle dung in a steppe in Inner Mongolia, China. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2011, 17(6): 791–796.
刘新民, 陈海燕, 峥嵘, 等. 内蒙古典型草原羊粪和牛粪的分解特征. *应用与环境生物学报*, 2011, 17(6): 791–796.
- [8] Liu X M. Assemblage characteristics of dung beetles in livestock dung in Inner Mongolian typical steppe. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(1): 24–29.
刘新民. 内蒙古典型草原家畜粪中的粪金龟子群落特征. *生态学杂志*, 2011, 30(1): 24–29.
- [9] Zhang Z Y, Zhang S T. Effects of yak dung deposition on soil enzyme activities in an alpine meadow in the Tibetan Plateau. *Pratacultural Science*, 2021, 38(5): 803–811.
张志阳, 张世挺. 牦牛粪沉积对青藏高原高寒草甸土壤酶活性的影响. *草业科学*, 2021, 38(5): 803–811.
- [10] Zhao Y, Li S Y, Dong B W, *et al.* Effects of fresh sheep manure addition on vegetation and soil characteristics of moderately saline-alkali degraded *Leymus chinensis* grassland. *Chinese Journal of Grassland*, 2023, 45(9): 57–65.
赵宇, 李思宇, 董博文, 等. 鲜羊粪添加对中度盐碱退化羊草草地植被及土壤特征的影响. *中国草地学报*, 2023, 45(9): 57–65.
- [11] Sun P F. Research progress on the impacts of yak dung deposition from grazing on grassland-based animal husbandry. *China Animal Industry*, 2021, 7(2): 57.
孙鹏飞. 放牧牦牛粪对草地畜牧业影响研究进展. *中国畜牧业*, 2021, 7(2): 57.

- [12] 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.
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.
- [13] Illius A W, Gordon I J. The allometry of food intake in grazing ruminants. *Journal of Animal Ecology*, 1987, 56(3): 989–999.
- [14] Du Z Y, Cai Y J, Wang X D, *et al.* Temporal variation of yak and Tibetan sheep dung nutrients from an alpine steppe in northern Tibet, China. *Mountain Research*, 2014, 32(4): 423–430.
杜子银, 蔡延江, 王小丹, 等. 牦牛和藏绵羊粪便降解过程中的养分动态变化. *山地学报*, 2014, 32(4): 423–430.
- [15] Cao J M, Guo Y Y, Li N N, *et al.* Effects of dung beetles on characteristics of nutrient changes in cattle and horse feces and soil in *Scirphidium semidesert*. *Chinese Journal of Grassland*, 2021, 43(2): 75–81, 114.
曹佳敏, 郭亚亚, 李娜娜, 等. 绢蒿荒漠粪甲虫对牛粪、马粪分解及粪下土壤养分的影响. *中国草地学报*, 2021, 43(2): 75–81, 114.
- [16] Huang C, Yan P, Liang C N. Current status and development directions of the yak breeding industry in China. *Chinese Livestock and Poultry Breeding*, 2023, 19(7): 121–127.
黄纯, 阎萍, 梁春年. 中国牦牛种业现状与发展方向. *中国畜禽种业*, 2023, 19(7): 121–127.
- [17] Lyu W D, Dong Q M, Sun C C, *et al.* Effects of yak and Tibetan sheep grazing on the nitrogen pool of plant communities of alpine grasslands in the Qinghai–Tibetan Plateau. *Acta Agrestia Sinica*, 2024, 32(5): 1420–1428.
吕卫东, 董全民, 孙彩彩, 等. 牦牛和藏羊放牧对青藏高原高寒草地植物群落氮库的影响. *草地学报*, 2024, 32(5): 1420–1428.
- [18] Sun C C, An H T, Dong Q M, *et al.* Responses of soil microbial activity to grazing intensity in alpine grasslands of Qinghai–Tibetan Plateau. *Chinese Journal of Ecology*, 2024, 44(9): 2930–2937.
孙彩彩, 安海涛, 董全民, 等. 青藏高原高寒草地土壤微生物活性对放牧强度的响应. *生态学杂志*, 2024, 44(9): 2930–2937.
- [19] Du Z Y, Wang X D, Hong J T, *et al.* Effects of seasonal freeze-thaw cycles and livestock excreta returning on soil physical properties, and nitrogen and phosphorus dynamics in alpine grassland. *Mountain Research*, 2022, 40(1): 29–42.
杜子银, 王小丹, 洪江涛, 等. 冻融及牲畜排泄物作用下的高寒草地土壤物理特性和氮磷变化. *山地学报*, 2022, 40(1): 29–42.
- [20] Shen Y L. Study on optical measurement method of leaf moisture content of lettuce. Zhengzhou: Hebei Agricultural University, 2019.
申艳路. 生菜叶片含水率光学测量方法研究. 郑州: 河北农业大学, 2019.
- [21] Ren X, Chu G X, Song R Q, *et al.* The characteristics of “fertile island” on *Haloxylon ammodendron* at an oasis-desert ecotone in the south edge of Junggar Basin. *Chinese Journal of Soil Science*, 2010, 41(1): 100–104.
任雪, 褚贵新, 宋日权, 等. 准噶尔盆地南缘绿洲——荒漠过渡带梭梭“肥岛”效应特征. *土壤通报*, 2010, 41(1): 100–104.
- [22] Wan J X, Wang X F, Yang T J, *et al.* Livestock manure type affects microbial community composition and assembly during composting. *Frontiers in Microbiology*, 2021, 12: 621126.
- [23] Wu X W, Li G Y, Sun S C. Effect of rainfall regimes on the decomposition rate of yak dung in an alpine meadow of northwest Sichuan Province, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(23): 28–36.
吴新卫, 李国勇, 孙书存. 降水量对川西北高寒草甸牦牛粪分解速率的影响. *生态学报*, 2011, 31(23): 28–36.
- [24] Williams P H, Haynes R J. Effect of sheep, deer and cattle dung on herbage production and soil nutrient content. *Grass and Forage Science*, 1995, 50(3): 263–271.
- [25] Wachendorf C, Lampe C, Taube F, *et al.* Nitrous oxide emissions and dynamics of soil nitrogen under ¹⁵N-labeled cow urine and dung patches on a sandy grassland soil. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2008, 171(2): 171–180.
- [26] Ran X L, Deng Y, Sai N G, *et al.* Hotspots and future trends of phosphorus recycling from livestock manure: A bibliometric review. *The Science of the Total Environment*, 2023, 892: 164346.
- [27] Kong Y Y, Yu Y W, Hou F J. Interspecific associations in plant communities under yak dung depositions in an alpine meadow. *Acta Prataculturae Sinica*, 2017, 26(3): 44–52.
孔杨云, 于应文, 侯扶江. 牦牛粪沉积下高寒草甸植物群落种间关联研究. *草业学报*, 2017, 26(3): 44–52.
- [28] Nargiza G L, Xiao Y X, Song B Y, *et al.* Effects of “fertile island” effects of desert plants on spatial distribution of soil

nutrients. *Bulletin of Botanical Research*, 2023, 43(6): 868–880.

阿力甫那尔格孜, 肖钰鑫, 宋泊沂, 等. 荒漠植物“肥岛”效应对土壤养分空间分布的影响. *植物研究*, 2023, 43(6): 868–880.

- [29] MacDiarmid B N, Watkin B R. The cattle dung patch. 2. Effect of a dung patch on chemical status of soil, and ammonia nitrogen losses from patch. *Journal of the British Grassland Society*, 1972, 27(1): 43–48.
- [30] Sager M. Trace and nutrient elements in manure, dung and compost samples in Austria. *Soil Biology & Biochemistry*, 2006, 39(6): 1383–1390.
- [31] Aarons R S, O'Connor R C, Gourley P J C. Dung decomposition in temperate dairy pastures. I. Changes in soil chemical properties. *Soil Research*, 2004, 42(1): 107–114.
- [32] Finzi A, Mattachini G, Lovarelli D, *et al.* Technical, economic, and environmental assessment of a collective integrated treatment system for energy recovery and nutrient removal from livestock manure. *Sustainability*, 2020, 12(7): 2756.