

DOI: 10.20103/j.stxb.202308111732

张四虎, 艾 鷺, 田黎明, 泽让东科. 牦牛夏季补饲对青藏高原高寒草甸植物群落和土壤特性的影响. 生态学报, 2024, 44(10): 4288-4296.

Zhang S H, Ai Y, Tian L M, Mipam Tserang D K. Effects of summer supplemental feeding of yaks on plant communities and soil properties in alpine meadows on the Qinghai-Tibetan Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(10): 4288-4296.

牦牛夏季补饲对青藏高原高寒草甸植物群落和土壤特性的影响

张四虎¹, 艾 鷺¹, 田黎明², 泽让东科^{1,*}

¹ 西南民族大学草地资源学院, 四川若尔盖高寒湿地生态系统国家野外科学观察研究站, 成都 610041

² 四川大学生命科学学院, 成都 610065

摘要: 由于气候变化与人类活动的共同作用, 青藏高原草地不断退化, 草畜矛盾日趋严重, 限制着高原畜牧业的可持续发展。夏季补饲可以加快牦牛生产速率、提高出栏率, 减小草地放牧压力, 是实现草地可持续发展的重要措施之一, 但夏季补饲如何影响草地生态系统功能仍不明晰。以高寒草甸为研究对象, 以牦牛为放牧实验家畜, 设置夏季补饲放牧 (FG)、传统重度放牧 (TG) 和禁牧 (NG) 3 个放牧处理, 每个处理设置 3 个重复。两年补饲试验后的结果表明: 夏季补饲减缓传统放牧降低植物群落 α 多样性的趋势; 夏季补饲与传统放牧均降低了植物群落生物量; 传统放牧表层土壤 pH 和硝态氮均显著小于禁牧, 但夏季补饲减弱了这些变化; 夏季补饲显著降低了 20—30 cm 土层有机碳; 夏季补饲增加了土壤表层磷含量。本研究表明夏季补饲放牧具有降低传统放牧压力的潜力, 为保护和管理青藏高原高寒草甸生态系统提供重要的科学依据, 并为改善牦牛的夏季饲养管理提供参考。

关键词: 夏季补饲; 高寒草地; 植物群落; 土壤特性

Effects of summer supplemental feeding of yaks on plant communities and soil properties in alpine meadows on the Qinghai-Tibetan Plateau

ZHANG Sihu¹, AI Yi¹, TIAN Liming², MIPAM Tserang Donko^{1,*}

¹ Sichuan Zoige Alpine Wetland Ecosystem National Observation and Research Station, College of Grassland Resources, Southwest Minzu University, Chengdu 610041, China

² Key Laboratory for Bio-resource and Eco-environment of Ministry of Education, College of Life Sciences, Sichuan University, Chengdu 610065, China

Abstract: Climate change and human activities have resulted in grassland degradation on the Qinghai-Tibetan Plateau, enhancing grass-livestock imbalance and restricting the sustainable development of pastoralism on the plateau. Summer supplementary feeding is regarded as an important way to achieve sustainable development goal due to accelerated production rate, enhanced slaughter rate, and reduced grazing pressure. However, the impact of summer supplementary feeding of yaks on ecosystem functions in grasslands remains unclear. To address this issue, we established a yak grazing experiment in an alpine meadow, including summer supplementary feeding grazing (FG), traditional heavy grazing (TG), and grazing prohibition (NG). Our results indicated that summer supplementary feeding alleviated the decline in plant α -diversity caused by traditional grazing. Both summer supplementary feeding and traditional grazing reduced plant biomass. The traditional grazing had lower surface soil pH and nitrate nitrogen compared to grazing prohibition, while summer supplementary feeding weakened these effects. Summer supplementary feeding significantly decreased soil organic carbon in

基金项目: 国家自然科学基金项目 (32271628, 42001055); 四川省自然科学基金 (2023NSFSC0201); 西南民族大学“双一流”项目 (CX2023007)

收稿日期: 2023-08-11; **网络出版日期:** 2024-02-28

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: tdmipam@163.com

the 20—30 cm soil but increased total phosphorus content in the surface soil. The study suggests that summer supplementary feeding grazing has the potential to reduce the pressure of traditional grazing and provides important scientific evidence for the protection and management of alpine ecosystems in the Qinghai-Tibetan Plateau.

Key Words: summer supplementary grazing; alpine meadow; plant communities; soil properties

草地作为全球陆地最大的生态系统,约占陆地总面积的 25%。我国的草地覆盖面积约 $3.31 \times 10^6 \text{ km}^2$, 约占国土总面积的 41%^[1], 主要包括温带草地、高寒草地和次生草地等三种类型^[2]。其中,我国的高寒草地主要分布于青藏高原地区,且发挥着至关重要的生态功能,如调节气候、改良土壤、防风固沙、保持水土和维持生物多样性等^[3-4]。据统计,20 世纪初我国退化草地面积占比达 90% 以上^[5],而作为我国最主要牧区之一的青藏高原草地也有约 50% 以上的面积出现了不同程度的退化^[6]。天然草地的退化不仅影响区域生态平衡,还会给环境带来巨大威胁,并对当地畜牧业发展和牧民生活水平产生影响。单一的限制牧民放牧会对青藏高原的经济发展造成阻碍^[7]。因此,探究如何实现生态保护与经济收益的双赢局面是青藏高原草地可持续发展的关键。

在全球范围内,放牧是草地生态系统最直接的利用方式^[8-9]。放牧被认为是导致全球草地退化以及草地生产力与生态功能下降的最主要干扰因素之一,过度放牧会改变群落多样性、植被覆盖率、草地生产力以及牧草的组成结构。放牧通过家畜的采食活动对草地植物群落具有直接影响,植被群落特征是维持草地生态系统功能稳定性的重要指标,其中植被群落物种多样性对群落生产力、抵抗力以及群落的可持续发展具有重要作用,是保证草地生态系统稳定持续发展的基础^[10]。对于土壤物理性质而言,放牧强度增加后,家畜的践踏效应增强,土壤团聚体更加稳定且土壤透水性变差,土壤孔隙度减小,透气性减弱,土壤持水性降低^[11]。放牧还能通过排泄物归还等影响其化学性质,放牧通过采食改变植物群落结构,并在对植物营养成分的吸收与转化后通过排泄的方式返还土壤,家畜的尿液和粪便虽仅分别覆盖 4%—20% 和 1%—5% 的放牧面积^[12],但仍能促进营养物质的快速循环,从而导致土壤化学性质出现变化。土壤为植物的生长提供了营养与介质,是承载家畜与牧草的基础,其结构与成分的稳定性是保持草地生产力与载畜力的基础,研究放牧对于土壤属性的影响,探究夏季补饲对于土壤性质的影响,能够帮助我们更好的确定夏季补饲如何影响草地,保证草地生态系统持续稳定以及为人类社会经济提供持续服务。

为有效保护青藏高原草地生态系统稳定性,我国已出台降低高寒草地放牧强度等有效措施,然而单纯的降低家畜数量会导致牧民经济收入和生活质量下降。研究表明,补饲和哺乳对犏牦牛的生长发育水平有非常显著的提升效果^[13],可使牦牛增重 15.4 kg ^[14]。补饲措施可能改变牦牛的采食选择和营养摄入^[15],从而影响植物群落的物种组成、生物量和生态功能。同时,补饲对草地的土壤养分和水分状况等土壤特性也有一定的影响^[16]。近年来,国内外在放牧方式对高寒草甸植物群落和土壤理化性质的研究报道较多^[17],但在青藏高原地区,探究牦牛夏季补饲放牧对高寒草地土壤特性的影响却鲜见报道。因此,本研究在青藏高原东缘选取典型高寒草甸,使用高原特有且分布最广的牦牛作为大型草食试验动物,探究夏季补饲放牧对植物群落特征和土壤特性的影响,以期高寒草地生态系统的稳定与管理提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验地位于青藏高原东缘的四川若尔盖高寒湿地生态系统国家野外科学观测站 ($32^{\circ}48'N$, $102^{\circ}33'E$), 海拔 3504 m。年均温为 $1.1^{\circ}C$, 年均降水量 749.1 mm, 主要集中在 5—9 月, 年均日照 2158.7 h^[17]。土壤类型为亚高山草甸土, 优势种为高山嵩草 (*Kobresia pygmaea*)、垂穗披碱草 (*Elymus nutans*) 和矮生嵩草 (*Kobresia humilis*)。

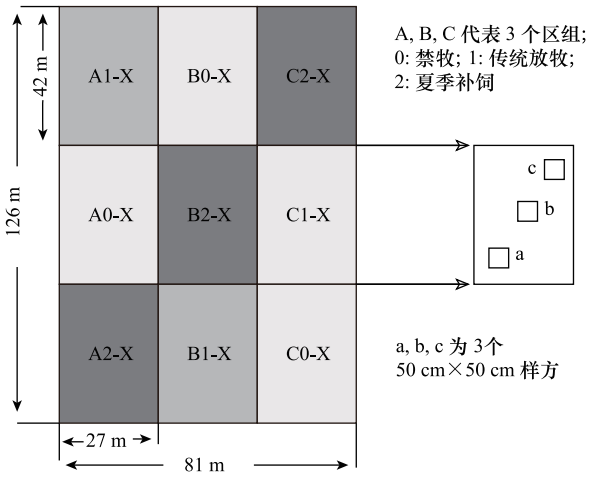


图 1 试验地与采样示意图
Fig.1 Schematic of sampling and plot sites

1.2 试验设计

于 2018 年在野外站选择具有代表性且均匀度一致的高寒草地试验样地 1 hm², 为保证试验地初始状况均一, 在 2018 年进行围封禁牧, 于 2019 年开始试验。本研究设置 3 个放牧处理, 即传统放牧 (3 头牦牛/hm²)、夏季补饲 (3 头牦牛/hm²) 和禁牧, 每个处理 3 个重复, 共计 9 个小区。实验小区采用随机区组设计, 因试验草场面积有限, 为满足放牧需求 (3 头牦牛单位/hm² 作为重度放牧强度)^[17], 本试验采用 42 m×27 m 的小区, 面积大小为 1134 m²。试验时间为每年 5 月到 9 月, 大型草食家畜为 48 月龄母牦牛 (品种为麦洼牦牛), 每天 7:00 进行放牧, 19:00 归牧。查阅文献^[18–19] 资料和走访当地牧民发现 3 头牦牛/hm² 为当地牧场重度放牧, 因此传统放牧设置的放牧强度为 3 头牦牛/hm², 夏季补饲处理设置相同的放牧强度, 基于牦牛需求和营养平衡, 在牦牛出牧前补饲 1 kg/d 精料补充料, 为达到所设置的放牧强度, 实验地采用两天不放牧、1 天放牧循环进行。精料购自成都同乐饲料科技有限公司, 营养水平见表 1。

表 1 育肥牦牛精料营养水平 (干物质基础)

Table 1 Nutritional level of fattening yak concentrate (dry matter base)

项目 Item	含量/% Content	项目 Item	含量/% Content	项目 Item	含量/% Content
粗蛋白质 Crude protein	14	钙 Calcium	0.5—1.8	水分 Water content	13
粗纤维 Crude fibre	16	全磷 Total phosphorus	0.3	赖氨酸 Lysine	0.4
粗灰分 Crude ash	10	氯化钠 Sodium chloride	0.4—1.8		

1.3 样品采集与测定方法

采样时间为 2020 年 8 月底 (即补饲试验的第 2 年), 采集 6 个放牧样地和 3 个禁牧样地的地上生物量, 每个样地均随机采集 3 个 50 cm×50 cm 的样方^[20]。对每个样方进行植物群落调查, 植物多度、频度、盖度等通过目测法测定; 将植物群落调查后样方框内植物剪下, 分为优势类植物: 禾本科、莎草科、豆科和菊科, 将其他科植物归为杂草类^[19], 带回实验室 105 ℃ 杀青半小时后 65 ℃ 烘至恒重测量其地上生物量, 在采集地上生物量后的样方用 38 mm 土钻采集在 0—10 cm、10—20 cm、20—30 cm 分别采集 3 个土柱带回实验室洗出其中的植物根系, 65 ℃ 烘至恒重后称其地下生物量; 最后使用圆状土钻采集 5 个 30 cm 的柱状土壤样品, 分层为 0—10 cm、10—20 cm 和 20—30 cm。土样经自然风干后去除石块、草根等杂质, 碾磨、过筛后测定用于测定土壤理化性质。各项指标根据标准方法进行测定^[21], 其中土壤含水率使用烘干法、全氮 (TN) 用凯氏定氮法、铵态氮和硝态氮用氯化钾浸提法、pH 采用电位法、全磷 (TP) 采用酸融法、有效磷 (AP) 采用氟化铵—盐酸浸提

法、有机碳(SOC)采用重铬酸钾氧化外加热法。

1.4 数据分析

本研究采用了四个 α -多样性指标进行分析,分别为物种丰富度(S)、Shannon-Wiener 指数(H)、Simpson 指数(P)和 Pielou 均匀度指数(J)。其计算公式如下:

物种丰富度: $S = n$

Shannon-Wiener 指数: $H = - \sum_{i=1}^s P_i \ln P_i$

Simpson 指数: $P = 1 - \sum_{i=1}^s P_i^2$

Pielou 均匀度指数: $J = H / \ln S$

式中, n 为样方中出现的物种数; P_i 是物种 i 的相对多度。运用 Excel 2016 预处理原始数据后,用 SPSS 22.0 进行相关统计分析,作图均用 Graphpad Prism 8 软件。对不同放牧方式下植物群落特征和土壤属性进行单因素方差分析(One-way ANOVA),显著水平设置为 0.05。

2 结果

2.1 夏季补饲对植物群落的影响

2.1.1 夏季补饲对植物群落多样性的影响

传统放牧的物种丰富度显著低于禁牧,而夏季补饲与传统放牧和禁牧之间没有显著差异(图 2)。

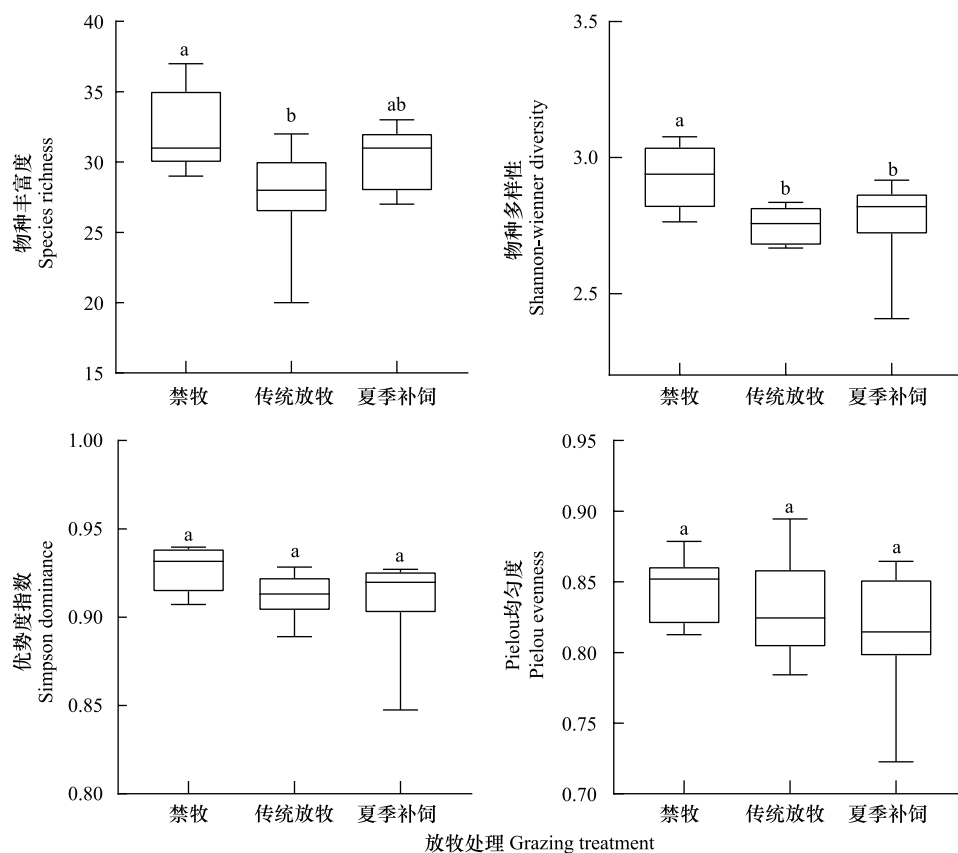


图 2 不同放牧处理对植物物种丰富度、物种多样性、优势度指数和 Pielou 均匀度的影响

Fig.2 Effect of different grazing treatments on plant species richness, Shannon-wiener diversity, Simpson dominance and Pielou evenness

图中误差线表示标准误差,小写字母表示不同放牧处理间的差异显著性;NG:禁牧 No grazing;TG:传统放牧 Traditional grazing;FG:夏季补饲 Grazing and feed supplements

Shannon-Wiener 多样性指数在不同处理下存在极显著差异 ($P<0.01$), 传统放牧、夏季补饲均显著低于禁牧, 而传统放牧与夏季补饲之间无显著差异 (图 2)。Simpson 优势度指数与 Pielou 均匀度指数在各处理间均无显著性差异 (图 2)。由此可见, 传统放牧明显降低高寒草甸植物群落多样性, 但夏季补饲可以在一定程度上减缓该效应。

2.1.2 夏季补饲对植物地上生物量的影响

放牧通过牦牛的采食对植物生物量产生影响, 显著降低植物地上生物量 (图 3), 不同放牧处理对禾本科、莎草科及杂草的生物量具有极显著的降低作用 ($P<0.01$), 放牧对菊科和豆科生物量影响不显著 (图 4)。菊科是传统放牧与夏季补饲处理下生物量最主要的组成部分, 比例分别为 43.54% 和 40.25%; 禾本科在放牧处理下生物量占比明显降低, 由禁牧的 27.91% 降低到传统放牧的 4.35% 和夏季补饲的 3.99%; 作为高寒草甸中生物量最大的莎草科, 在禁牧中生物量占比为 32.53%, 传统放牧中占比降为 12.16%, 夏季补饲中占比降为 13.71% (图 4)。传统放牧与夏季补饲各功能群的生物量及生物量的组成均无显著差异 ($P>0.05$)。

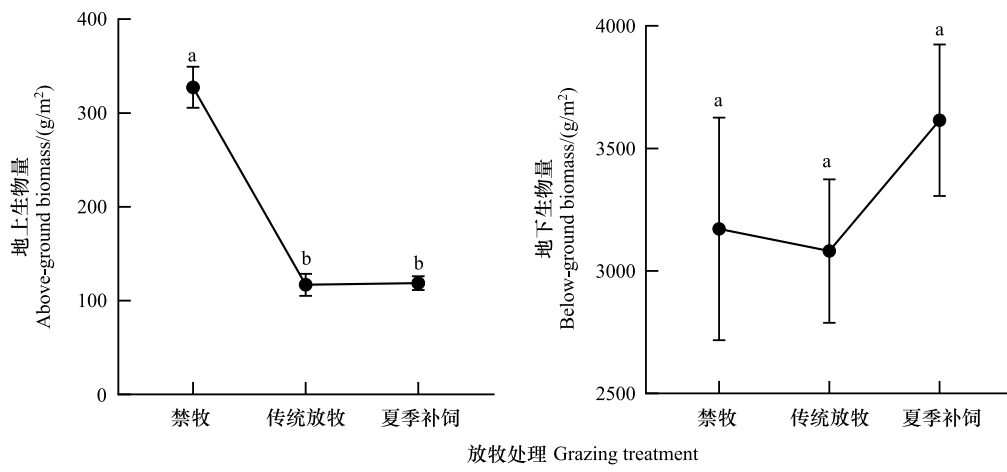


图 3 植物地上和地下生物量对不同放牧处理的响应

Fig.3 Response of plant aboveground biomass and belowground biomass to different grazing treatments

图中误差线表示标准误差, 小写字母表示不同放牧强度间的差异显著性

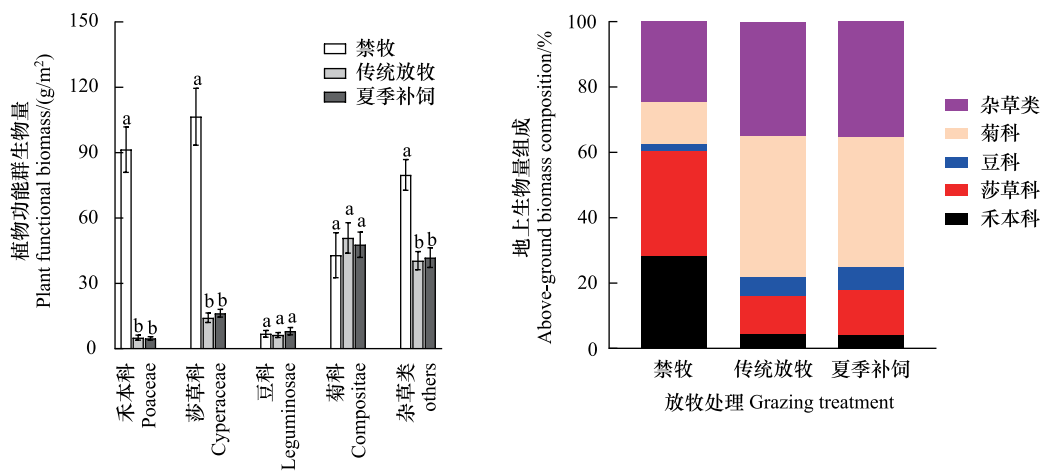


图 4 不同放牧处理下植物功能群生物量和地上生物量组成的变化

Fig.4 Change of plant functional group biomass and aboveground biomass composition under different grazing treatments

NE:非线性增强;BE:双因子增强;ENG:能源消耗水平;INS:产业结构;TECH:技术进步;图中误差线表示标准误差,小写字母表示不同放牧强度间的差异显著性

2.2 夏季补饲对土壤属性的影响

2.2.1 夏季补饲对土壤含水率和 pH 的影响

土壤含水率随土层深度的增加逐渐减小,处理间的土壤含水率在所有土层中呈现为传统放牧>禁牧>夏季补饲。除表层土壤处理间无显著差异外,10—20 cm 和 20—30 cm 的夏季补饲均显著小于传统放牧,禁牧与夏季补饲、传统放牧间无显著差异($P>0.05$)。实验样地土壤总体呈弱酸性,各土层的土壤 pH 值小于 6,实验处理对表层土壤的影响较大,10—20 cm 与 20—30 cm 土层处理间无显著差异,表层传统放牧处理的 pH 显著小于禁牧($P<0.05$),夏季补饲与其它两个处理不存在显著差异($P>0.05$)。

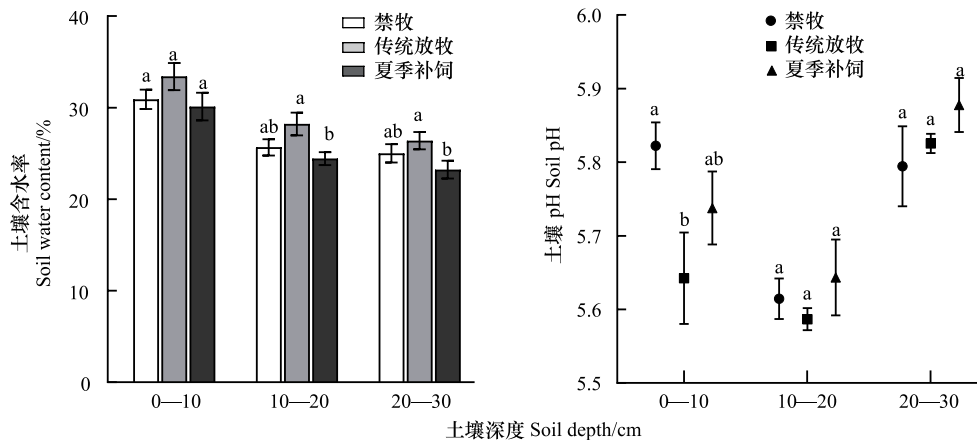


图 5 不同放牧处理对土壤含水率和 pH 的影响

Fig.5 Effect of soil water content and pH to different grazing treatments

图中误差线表示标准误差,小写字母表示不同放牧强度间的差异显著性

2.2.2 夏季补饲对土壤养分的影响

由图 6 可知,随土壤深度增加有机碳含量呈现降低趋势,放牧方式对深层土壤有机碳具有显著影响,20—30 cm 土层禁牧显著大于夏季补饲($P<0.05$),传统放牧与禁牧、夏季补饲之间的差异不显著($P>0.05$);0—10 cm 土层土壤的有机碳在不同处理间存在差异,但不显著($P>0.05$)。

土壤全氮与无机氮含量总体呈现随土壤深度增加而减少的趋势,但在同一土层的变化规律不完全相同。如图 6 所示,0—10 cm 全氮含量为 5.16—5.46 g/kg,10—20 cm 为 3.83—4.12 g/kg,20—30 cm 则为 3.13—3.39 g/kg,全氮含量随土层变化明显,3 个土层的不同处理间均无显著性差异($P>0.05$),但各土层均呈禁牧>传统放牧>夏季补饲的规律。在 0—10 cm 土层,传统放牧的土壤铵态氮含量为 10.88 mg/kg,高于夏季补饲的 10.17 mg/kg 和禁牧的 10.10 mg/kg,但处理间差异不显著($P>0.05$);而 10—20 cm 土层传统放牧的铵态氮含量显著高于夏季补饲和禁牧,夏季补饲与禁牧之间无显著差异($P>0.05$);在 20—30 土层中,传统放牧显著高于禁牧,夏季补饲与传统放牧、禁牧无显著差异,可见在各土层中传统放牧均可增加铵态氮含量,且对深层土壤的影响更明显。土壤硝态氮含量较小,0—10 cm 土层处理间差异显著,传统放牧、夏季补饲显著小于禁牧($P<0.05$);10—20 cm 和 20—30 cm 土层处理间差异不显著($P>0.05$)。

土壤全磷在土层间没有明显的变化趋势,0—10 cm 处理间存在极显著差异($P<0.01$),夏季补饲显著高于传统放牧和禁牧($P<0.05$);10—20 cm 与 20—30 cm 土层的处理间全磷差异不明显。图 6 表明,土壤速效磷会受到土壤深度的影响,土层越深含量越低,但不同放牧处理在同一土层间的差异不显著($P>0.05$)。

3 讨论

植物群落物种多样性是维持草地生态系统稳定性的重要基础^[22],与生态系统的功能密切相关,物种多样性与生态系统生产力呈正相关^[23]。本研究结果表明,放牧活动降低了植物丰富度、多样性与优势度,夏季补

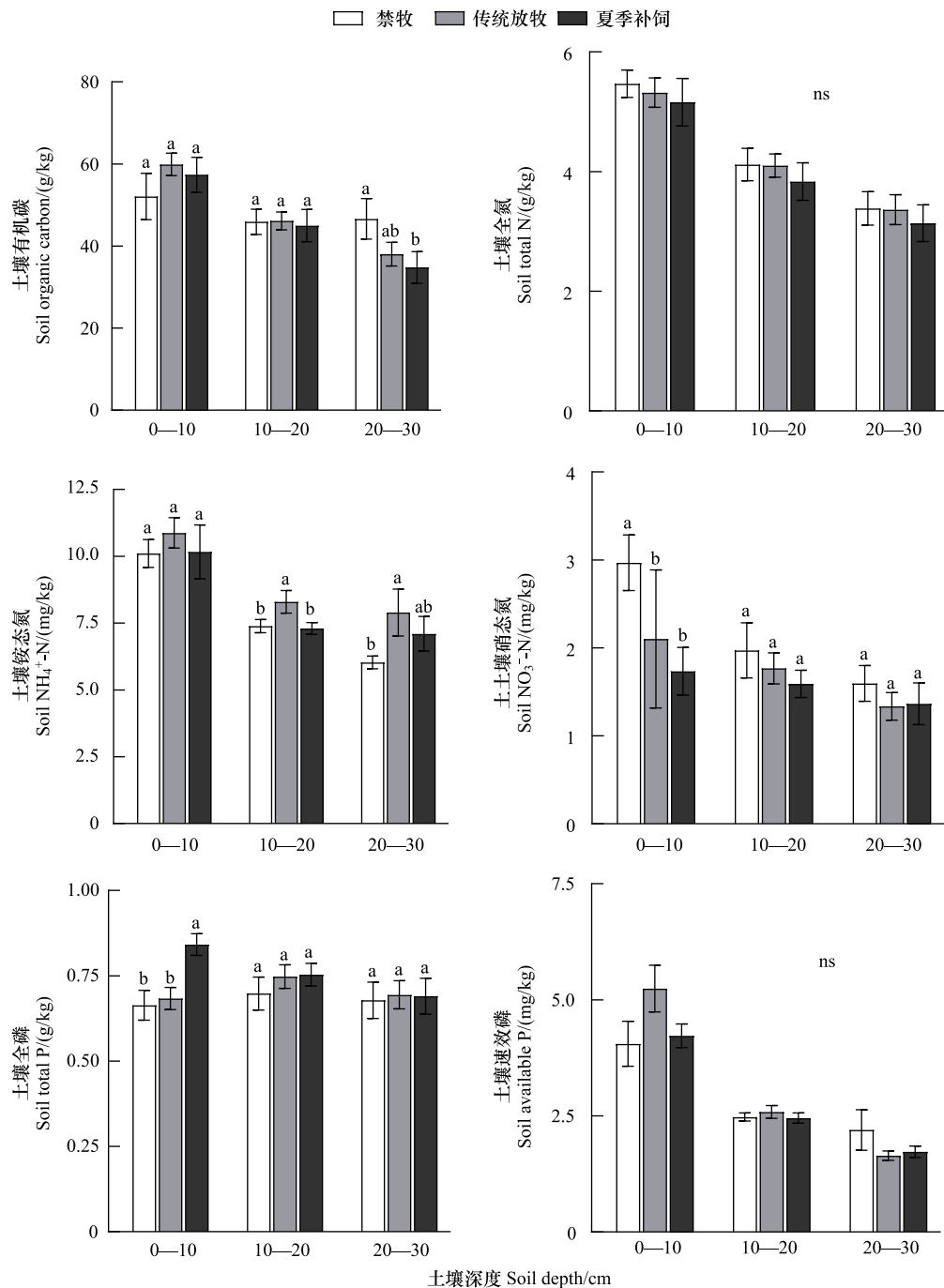


图 6 不同放牧处理下土壤有机碳、全氮、铵态氮、硝态氮、全磷和速效磷的变化

Fig.6 Changes of Soil organic carbon, total nitrogen, ammonium nitrogen, nitrate nitrogen, total phosphorus and available phosphorus under different grazing treatments

图中误差线表示标准误差,小写字母表示不同放牧强度间的差异显著性

饲缓解传统放牧影响的趋势,这可能是由于夏季补饲可以提供额外的营养补给,改善了植物的生长条件,从而增加了物种的多样性。夏季补饲相比于传统放牧,补饲行为减轻了放牧压力,同时能够增加对光需求更高物种的数量^[24],从而使植物多样性有所增加。本研究发现,两种放牧方式通过降低禾本科、莎草科、杂类草等主要功能群显著降低了植物地上生物量。Yao 等的研究表明,高寒草甸围封增加了群落中的禾本科与莎草科植物的地上生物量^[25],其主要原因是禾本科、莎草科等适口性高的植物在群落中具有更高的竞争力,是群落生

产力的主要组成部分,但强度较高的牦牛放牧使植物的补偿生长减弱^[26],导致地上现存生物量显著下降。而功能群生物量存在的差异主要是因为牦牛的采食习惯与植物群落所具有的空间分布特征,牦牛的采食偏好更加倾向于禾本科和莎草科,其采食习惯为舌头卷绕混合采食^[27],导致禾本科、莎草科以及部分植株较高的杂类草生物量显著降低。虽然夏季补饲与传统放牧在地上生物量的差异不显著,但禾本科、莎草科等生物量呈现夏季补饲高于传统放牧趋势。

土壤含水量受土壤质地、植被特征、气候、人类活动等因素影响,其中放牧是影响土壤水分的重要因素之一。在本研究中,传统放牧的土壤含水率均高于其他处理,一方面是由于研究区质地不均匀导致 10—20 cm 土层含水量较高,造成放牧有利于土壤水分增加的现象;另一方面是因为在重度放牧条件下,牦牛连续踩踏对土壤压实作用变强,使土壤孔隙度减小,引起土壤水分扩散率降低和地表蒸发降低,导致土壤持水能力增加^[28]。夏季补饲与传统放牧相比,土壤含水率显著降低,且深层土壤的含水率降低更显著,可能因为夏季补饲植物根系更发达,蒸腾作用更加强烈^[29],土壤中毛细根系发达,为土壤水分蒸发提供了有利条件^[30]。本研究表明,传统放牧下表层土壤的 pH(0—10 cm)酸度显著增加,与益西措姆等^[31]研究结果相悖,主要原因是重度放牧过程中牦牛的排泄物聚集在土壤表面,加快了土壤表面离子的交换,使酸性增加^[32]。补饲使土壤表面蒸发量增大,可溶性盐类随毛细水的上升累积于地表^[33],从而呈现 pH 增高的趋势。

在本研究中,放牧降低了 20—30 cm 土壤有机碳,且夏季补饲显著小于禁牧处理,0—10 cm 土壤有机碳在放牧过程中表现出增加趋势,与周国利等^[34]研究一致,原因可能是一方面家畜采食导致有机物向地下转移^[17],提高植物根冠比;另一方面,牦牛的践踏加速凋落物的分解,促进有机碳向下运转^[35]。在短期的放牧过程中,牦牛的践踏使植物碎屑与木质素混入表层土壤中,使土壤表层的有机碳含量增加^[36],而补饲行为会降低牦牛的活动频率,使得混入土壤的生物量减少,导致土壤有机碳降低。表层土壤的有机碳积累是由植物成分控制,但底层土壤的有机碳主要由微生物衍生物决定的,较高的植物多样性会促进光合同化与根系分泌,导致了碳有效性增强,在底层土壤中的效应更强;同时凋落物的有效碳经过淋溶导致底层有机碳的增加,提高了底层土壤的有机碳增加^[37]。土壤氮是植物的主要营养成分,土壤中的氮受多方面的影响,主要有植物吸收、家畜排泄与土壤中的各种氮反应有关。本研究表明放牧处理下各土层的土壤全氮变化不显著,但均呈现下降趋势,与李强等^[38]的结果相似。放牧对土壤氮含量的影响由两个方面产生,首先是家畜对采食植物的氮吸收只有其中的一部分,大部分氮通过家畜的排泄行为返还给土壤;其次,放牧过程中家畜将植物残渣混入土壤表层中,为表层微生物提供了基质,加速了氮矿化^[39]。本研究结果还表明夏季补饲对土壤全氮的影响比传统放牧更大,其可能的原因是补饲降低了放牧压力,且排泄物中更高的速效营养使植物的补偿生长更旺盛^[40],从而降低了土壤氮。土壤磷是植物生长繁殖的必需元素,在植物代谢与遗传物质组成中具有重要作用,土壤全磷生态系统物质循环与能量流动的主要组成部分^[41]。放牧对土壤磷含量影响目前仍然没有一致性的结论,但放牧通过改变凋落物、植物根系分布、粪尿返还等,影响土壤微生物活性以及植物和微生物对磷的吸收^[42],从而影响表层土壤的磷含量,尤其是长期重度放牧下,使凋落物显著降低,植物根系分布浅层化,粪尿返还量显著增加^[43—44]。有学者认为,草地、高寒草甸和高山草原的土壤全磷含量一般随土层深度的增加而降低^[8],与本研究结果相似。在本研究中,夏季补饲显著增加了 0—10 cm 土壤中的全磷含量,其主要原因是家畜补饲从精饲料中输入了磷元素,大量的磷不能被家畜吸收,通过排泄粪尿返还给土壤。由于磷具有移动性差的特点,排泄物中的磷元素会与土壤中的其它元素形成难溶络合物,使表层磷含量增加^[45]。土壤中速效磷对各处理的响应不显著,但传统放牧相比于禁牧土壤表层速效磷呈上升趋势。

4 结论

本研究发现传统放牧活动显著降低高寒草甸植物群落的 α 多样性,而夏季补饲缓解其降低幅度;夏季补饲和传统放牧都导致了植物地上生物量的降低;夏季补饲使土壤含水率呈现下降趋势,尤其是在深层土壤;传统放牧导致表层土壤 pH 显著降低,而夏季补饲减缓了这种趋势;夏季补饲导致 20—30 cm 土层有机碳显著降

低;放牧显著降低了表层土壤硝态氮,而夏季补饲呈现增加的趋势;0—10 cm 土壤全磷在夏季补饲处理中显著高于其他处理。

参考文献 (References):

- [1] 郑德高,董淑敏,林辰辉.大城市“中密度”建设的必要性及管控策略.国际城市规划,2021,36(4):1-9.
- [2] 杨俊宴,史宜.城市规划语境下密度研究的源流演化与展望.国际城市规划,2023,38(2):1-7.
- [3] 冯薇,赵荣钦,谢志祥,丁明磊,肖连刚,孙锦,杨青林,刘天昊,尤增涛.碳中和目标下土地利用碳排放效率及其时空格局——以黄河流域72个地级市为例.中国土地科学,2023,37(1):102-113.
- [4] 郭施宏,高明.城市土地经济密度与碳排放的EKC假说与验证——基于省际静态与动态面板数据的对比分析.南京农业大学学报(社会科学版),2017,17(1):80-90+146-147.
- [5] 田成诗,陈雨.人口虹吸、集聚与城市能源效率——以沪苏浙皖地区为例.统计研究,2022,39(5):93-106.
- [6] Lee S, Lee B. The influence of urban form on GHG emissions in the U.S. household sector. Energy Policy, 2014, 68: 534-549.
- [7] 张苗,吴萌.土地利用对碳排放影响的作用机制和传导路径分析——基于结构方程模型的实证检验.中国土地科学,2022,36(3):96-103.
- [8] 张玥,代亚强,陈媛媛,柯新利.土地利用隐性转型与土地利用碳排放空间关联研究.中国土地科学,2022,36(6):100-112.
- [9] 周璟茹,赵华甫,吴金华.关中城市群土地集约利用与碳排放关系演化特征研究.中国土地科学,2017,31(11):55-61,72.
- [10] 曾永明,张利国.新经济地理学框架下人口分布对经济增长的影响效应——全球126个国家空间面板数据的证据:1992-2012.经济地理,2017,37(10):17-26.
- [11] 袁凯华,甘臣林,杨慧琳,朱庆莹.建设用地扩张与碳排放增长的EKC验证及特征分解研究——以武汉市为例.中国土地科学,2019,33(1):56-64.
- [12] 杨文越,曹小曙.多尺度交通出行碳排放影响因素研究进展.地理科学进展,2019,38(11):1814-1828.
- [13] Ribeiro V H, Rybski D, Kropp P J. Effects of changing population or density on urban carbon dioxide emissions. Nature Communications, 2019, 10(1):1-9.
- [14] 祁慧博,沈欣懿,龙飞,刘梅娟,高晓玮.浙江省县域碳排放的时空格局与影响因素研究.长江流域资源与环境,2023,32(4):821-831.
- [15] 卢新海,李佳,刘超,匡兵,蔡大伟,侯娇.中国城市土地绿色利用效率驱动因素及空间分异.地理科学,2022,42(4):611-621.
- [16] 朱泳丽,丁利杰.长三角城市群碳排放强度的空间效应及影响因素——基于产业转移视角.资源科学,2022,44(7):1373-1387.
- [17] 蔺雪芹,边宇,王岱.京津冀地区工业碳排放效率时空演化特征及影响因素.经济地理,2021,41(6):187-195.
- [18] 侯勃,岳文泽,王腾飞.中国大都市区碳排放时空异质性探测与影响因素——以上海市为例.经济地理,2020,40(9):82-90.
- [19] 郭艺,曹贤忠,魏文栋,曾刚.长三角区域一体化对城市碳排放的影响研究.地理研究,2022,41(1):181-192.
- [20] 陈占明,吴施美,马文博,刘晓曼,蔡博峰,刘婧文,贾小平,张明,陈洋,徐雨笑,赵晶,王思元.中国地级以上城市二氧化碳排放的影响因素分析:基于扩展的STIRPAT模型.中国人口·资源与环境,2018,28(10):45-54.
- [21] 信猛,陈普泉,彭雪鹏,师岚,钱辉.农业碳排放驱动因素——区域间贸易碳排放转移网络视角.中国环境科学,2023,43(3):1460-1472.
- [22] 屈小娥,骆海燕.中国对外直接投资对碳排放的影响及传导机制——基于多重中介模型的实证.中国人口·资源与环境,2021,31(7):1-14.
- [23] 杨浩,卢新海,匡兵,侯娇.城市紧凑度与碳排放强度的时空互动关系及驱动因素——以长株潭城市群为例.长江流域资源与环境,2021,30(11):2618-2629.
- [24] 何文举,张华峰,陈雄超,颜建军.中国省域人口密度、产业集聚与碳排放的实证研究——基于集聚经济、拥挤效应及空间效应的视角.南开经济研究,2019(2):207-225.
- [25] Fei F, Dai S, Bo Y, Ke H. Urban density, directed technological change, and carbon intensity: An empirical study based on Chinese cities. Technology in Society, 2023, 72: 102151.
- [26] 陈阳,孙婧,逯进.城市蔓延和产业结构对环境污染的影响.城市问题,2018(4):18-25.
- [27] 陈乐,李郇,姚尧,陈栋胜.人口集聚对中国城市经济增长的影响分析.地理学报,2018,73(6):1107-1120.
- [28] 任晓松,刘宇佳,赵国浩.经济集聚对碳排放强度的影响及传导机制.中国人口·资源与环境,2020,30(4):95-106.
- [29] 孙宏日,刘艳军,周国磊.东北地区交通优势度演变格局及影响机制.地理学报,2021,76(2):444-458.
- [30] 王少剑,高爽,黄永源,史晨怡.基于超效率SBM模型的中国城市碳排放绩效时空演变格局及预测.地理学报,2020,75(6):1316-1330.
- [31] 程钰,张悦,王晶晶.中国省域碳排放绩效时空演变与技术创新驱动研究.地理科学,2023,43(2):313-323.
- [32] 王凯,关锐,胡鸣镝,李娴,甘畅.数字经济与碳排放绩效:以中国276个城市为例.环境科学研究,2023,36(9):1824-1834.
- [33] 诸大建,刘国平.碳排放的人文发展绩效指标与实证分析.中国人口·资源与环境,2011,21(5):73-79.
- [34] Wang S, Wang J, Fang C, Li S. Estimating the impacts of urban form on CO₂ emission efficiency in the Pearl River Delta, China. Cities, 2019, 85: 117-129.
- [35] 何建坤,苏明山.应对全球气候变化下的碳生产率分析.中国软科学,2009(10):42-47+147.
- [36] 辛晓华,吕拉昌.中国主要城市技术创新影响环境污染的空间分异与机理.地理科学,2021,41(1):129-139.
- [37] 邵帅,张可,豆建民.经济集聚的节能减排效应:理论与中国经验.管理世界,2019,35(1):36-60+226.
- [38] 贾鹏,胡燕,匡海波.全国空港客货运格局的时空演化及驱动机制研究.系统工程理论与实践,2019,39(5):1198-1211.
- [39] 马淑燕,赵作权,赵紫威,白冰.2000-2019年中国航空客货运格局演变及其影响因素研究.地理科学,2023,43(6):1011-1021.
- [40] Huang B, Wu B, Barry M. Geographically and temporally weighted regression for modeling spatio-temporal variation in house prices. International Journal of Geographical Information Science, 2010, 24(3):383-401.
- [41] 陈田田,黄强,王强.基于地理探测器的喀斯特山区生态系统服务关系分异特征及驱动力解析——以贵州省为例.生态学报,2022,42(17):6959-6972.
- [42] 俞立平,阮先鹏,吴贤豪,吴凌挺.基于Sigmoid函数的文献计量指标评价标准研究.情报杂志,2020,39(9):176-182.
- [43] 俞立平,宋夏云,王作功.评价型指标标准化与评价方法对学术评价影响研究——以TOPSIS评价方法为例.情报理论与实践,2020,43(2):15-20+54.