

doi: 10.11733/j.issn.1007-0435.2026.07.002

引用格式: 李家乐, 孟令旭, 毛楠, 等. 不同草地管理方式下土壤结构与持水性的土层分异特征及其与根系的关系研究[J]. 草地学报, 2026, 34(7): 2355–2365

LI Jia-le, MENG Ling-xu, MAO Nan, et al. Vertical Differentiation of Soil Structure and Water Retention under Different Grassland Management Practices and Their Relationships with Root Systems[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(7): 2355–2365

不同草地管理方式下土壤结构与持水性的土层分异特征及其与根系的关系研究

李家乐, 孟令旭, 毛楠, 白燕楠, 张英俊, 刘楠*

(中国农业大学草业科学与技术学院, 北京 100193)

摘要: 土壤物理结构在维持草地生态系统功能中具有关键作用, 其形成与植物根系密切相关。然而, 不同管理方式如何通过调控地下生物量影响全剖面土壤结构及持水性仍不明确。本研究比较了围封、持续放牧、休牧和刈割4种管理方式对0~10、10~30、30~60和60~100 cm土层下土壤物理结构(容重、孔隙分布、团聚体组成)、持水性及地下生物量的影响。结果表明: 土壤结构对管理的响应主要集中于表层。在0~10 cm土层, 持续放牧显著降低地下生物量, 导致容重增加、孔隙率下降及大团聚体减少。相比之下, 休牧通过维持较高地下生物量, 有效缓解土壤压实并维持土壤结构。大团聚体对管理方式最为敏感, 其影响深度可达60 cm。此外, 孔隙结构与持水能力均与地下生物量显著正相关。综上, 地下生物量是驱动土壤结构变化的关键因子, 休牧通过促进根系发育, 有助于提升土壤结构稳定性和蓄水能力。

关键词: 草地管理; 地下生物量; 土壤物理结构; 持水性; 剖面分异; 温带草甸草原

中图分类号: S812.2

文献标识码: A

文章编号: 1007-0435(2026)07-2355-11

Vertical Differentiation of Soil Structure and Water Retention under Different Grassland Management Practices and Their Relationships with Root Systems

LI Jia-le, MENG Ling-xu, MAO Nan, BAI Yan-nan, ZHANG Ying-jun, LIU Nan*

(College of Grassland Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: Soil physical structure plays a crucial role in maintaining grassland ecosystem functions and its formation is intimately linked with plant root systems. However, it remains unclear how different management practices affect soil structure and water retention throughout the profile by regulating belowground biomass (BGB). This study compared the effects of four management practices—fencing, continuous grazing, rest grazing, and mowing—on soil physical structure (bulk density, pore distribution, aggregate composition), water retention, and BGB in the 0-10, 10-30, 30-60, and 60-100 cm soil layers. The results showed that the response of soil structure to management was primarily concentrated in the surface layer. In the 0-10 cm layer, continuous grazing significantly reduced BGB, leading to increasing bulk density, decreasing porosity, and a reduction in macroaggregates. In contrast, rest grazing effectively mitigated soil compaction and maintained soil structure by sustaining higher BGB. Macroaggregates were the most sensitive indicator of management, with impacts extending to a depth of 60 cm. Furthermore, both pore structure and water-holding capacity were significantly and positively correlated with BGB. In conclusion, BGB is a key driver of soil structural changes, and rest grazing, by promoting root development, helps to enhance soil structural stability and water storage capacity.

收稿日期: 2025-12-12; 修回日期: 2026-03-19

基金项目: 国家自然科学基金(32573605); 国家牧草产业技术体系(CARS-34)资助

作者简介: 李家乐(2001-), 男, 汉族, 安徽六安人, 硕士研究生, 主要从事草地生态与管理研究, E-mail: ssl20010411@163.com; *通信作者
Author for correspondence, E-mail: liunan@cau.edu.cn

Key words: Grassland management; Belowground biomass; Soil physical structure; Water retention; Profile differentiation; Temperate meadow steppe

全球草地面积约为52.5亿公顷,占陆地总面积的40.5%,作为陆地生态系统的重要组成部分,草地在全球碳循环、生物多样性维持及生态安全保障中发挥着不可替代的作用^[1-3]。放牧、休牧、刈割和围封作为主要的草地管理方式,能够通过改变植被演替与干扰强度影响生态系统功能^[4-10]。作为衡量草地健康的关键指标,土壤结构(如容重、孔隙分布及团聚体稳定性)直接决定了水分运移与根系生长空间^[11-14]。然而,不同管理方式对土壤物理结构的干扰机制存在显著差异,例如放牧主要涉及家畜践踏的机械压实,而刈割与围封则更多通过改变植被覆盖和根系周转间接影响土壤稳定性^[15-17]。目前研究多集中于容重等单一指标,缺乏对孔隙组成、持水特性及团聚体特征的系统评估^[18]。

此外,土壤性质具有明显的垂直异质性,不同深度土层在水分储存、养分循环及根系固碳中承担着多种生态功能。以往的研究多局限于0~20 cm的表层土壤,往往忽视了深层土壤(>30 cm)在长期生态系统响应中的潜在作用^[19-20]。深层土壤不仅是植物深根系获取水分的“储水库”,其物理性状直接影响植物在干旱胁迫下的水分获取策略^[21]。近期研究表明,草地管理措施对土壤的影响可延伸至深层,如长期过度放牧可能通过抑制根系下扎降低深层土壤的孔隙度与渗透性^[22-23]。然而,关于持续放牧、休牧、刈割和围封等多种方式对0~100 cm全剖面土壤结构与持水性影响的垂直分异规律,目前尚缺乏系统性的比较。

地下生物量是连接地上植被与土壤系统的关键纽带,也是驱动土壤结构演变的重要生物学机制^[24-25]。根系的生长、死亡与分解过程直接参与土壤物理结构的重组:加粗根及其残体分解可在土壤中形成大孔隙,增加水分入渗通道;细根周转及根系分泌物(如胶结物质)则能够促进土壤团聚体的形成与稳定,从而改善土壤孔隙分布与持水性^[26-27]。不同管理方式通过改变光合产物分配,显著影响地下生物量的积累及其在剖面中的垂直分布^[28-29]。尽管如此,在多种管理方式并存的情境下,关于不同土层尺度上地下生物量如何调控土壤容重、孔隙组成、团聚体稳定性及持水特性的耦合关系,仍需进一步量化分析。

本研究依托温带草甸草原持续8年的草地管理

试验平台,分别测试了持续放牧、休牧、刈割和围封下0~100 cm剖面不同土层的土壤结构与持水性及地下生物量,拟解决以下科学问题:(1)不同管理方式如何影响0~100 cm剖面各层土壤结构与持水特性,其影响是否存在深度分异;(2)不同土层地下生物量与土壤容重、孔隙组成及持水性、团聚体之间存在怎样的耦合关系。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验地位于内蒙古呼伦贝尔草地农业生态系统试验站(49°28'N,120°10'E,海拔703 m),属于典型的温带大陆性季风气候。该地区年均气温为-3℃~0℃,2023年最低气温和最高气温分别为-39℃~33.7℃,年均降水量为350~400 mm,且大部分降水集中在6—9月份。该地区草地土壤类型为黑钙土或暗栗钙土,表层土壤(0~10 cm)的总有机碳含量约为3.06%,全氮含量约为0.31%,土壤pH值为6.71。研究区的植被以羊草(*Leymus chinensis*)为主要优势种,并伴生有二裂委陵菜(*Potentilla bifurca*)、草地早熟禾(*Poa pratensis*)、糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)和苔草(*Carex duriuscula*)等植物。

1.2 试验设计

试验地建立于2015年,试验采用随机区组设计,以围封(CK)处理为对照,设置刈割处理(MG)、持续放牧(CG)处理和休牧(RG)处理。CG表示在整个放牧季节(6月15日—9月15日)始终进行放牧;RG表示在夏季(7月15日—8月15日)实施休牧,以允许牧草在生长旺盛阶段充分恢复。其中,CG和RG的放牧强度保持一致,均采用适度放牧。本研究中的适度放牧是通过实时调整家畜数量,来保证合理的牧后剩余量,以防止草地退化。刈割处理(MG)于8月底使用刈割机(东方红554轮式拖拉机挂载往复式割草机,2300 kg)进行刈割,留茬高度为8 cm。该4种草地管理方式随机分布在3个区组中,共计12个小区。每个季节性休牧小区面积约为1 ha(100 m×100 m),CK和CG处理的小区面积约为0.5 ha(100 m×50 m)。

1.3 原状土的采集与测定

2024年9月,在研究区域内不同草地管理处理地块中开展土壤样品采集。为全面评估不同土层土壤结构及持水性对草地管理方式的响应,采用分层采样法,共划分为四个土层:0~10 cm、10~30 cm、30~60 cm和60~100 cm。每个处理小区内随机选取6个样点,在各土层用统一规格的环刀取样。环刀内径为5 cm、体积约为100 cm³,取样时保持土体结构完整,尽量避免压实和扰动。采集完成后,立即用保鲜膜封口密封,以减少水分蒸发和结构破坏,所有样品于当天运回实验室,尽快进行物理性质测定。

在实验室中,首先揭去环刀上盖,保留底部带网眼并铺有滤纸的底盖,将环刀竖直放入盛水盆中,自下而上缓慢浸润,使水面高度与环刀上沿基本齐平,保持浸泡12 h,使土样充分饱和。取出后擦干环刀外壁,立即称量样品饱和湿重。随后,去除环刀底部的网眼底盖,保留滤纸,将环刀置于干燥细沙上自由排水2 h,再次称量湿重;继续置于干砂上自由排水24 h,第三次称量湿重。最后,将环刀中的土样取出,置于105℃烘箱中烘干至恒重,称量干土质量。

根据以下公式计算各项土壤结构指标:

土壤容重(ρ)是指单位体积烘干土的质量:

$$\rho = \frac{M_d}{V_r} \quad (1)$$

式中, ρ 为土壤容重($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$), M_d 为烘干土质量(g), V_r 为环刀体积(cm^3)

饱和持水率(θ_{sat})又称最大持水率,是指土壤孔隙完全被水充满时的含水量。

$$\theta_{\text{sat}} = \frac{M_{\text{wet12}} - M_d}{M_d} \times 100\% \quad (2)$$

式中, θ_{sat} 为饱和持水率($\%$), M_{wet12} 为浸润12小时后湿土质量(g), M_d 为烘干土质量(g)。

毛管持水率(θ_{cap})是指土壤中毛管孔隙所能保持的水量。

$$\theta_{\text{cap}} = \frac{M_{\text{wet2}} - M_d}{M_d} \times 100\% \quad (3)$$

其中: θ_{cap} ,毛管持水率($\%$); M_{wet2} :搁置2小时后湿土质量(g); M_d ,烘干土质量(g)田间持水率(θ_{field})又称最小持水率,是指土壤在充分湿润后,多余重力水排出,土壤水向下渗透速率变慢后,土壤所能保持的水量。

$$\theta_{\text{field}} = \frac{M_{\text{wet24}} - M_d}{M_d} \times 100\% \quad (4)$$

其中: θ_{field} ,田间持水率($\%$); M_{wet24} :搁置24小时后湿土质量(g); M_d ,烘干土质量(g)非毛管孔隙度(P_{nc})代表土壤中大孔隙的体积百分比,这些孔隙中的水主要受重力作用而排出。

$$P_{\text{nc}} = (\theta_{\text{sat}} - \theta_{\text{cap}}) \times \rho \quad (5)$$

其中: P_{nc} ,非毛管孔隙度($\%$); θ_{sat} ,饱和持水率($\%$); θ_{cap} ,毛管持水率($\%$); ρ ,土壤容重($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)

毛管孔隙度(P_{cap})表示土壤中能够通过毛管作用保持水分的孔隙体积百分比。

$$P_{\text{cap}} = \theta_{\text{cap}} \times \rho \quad (6)$$

其中: P_{cap} ,毛管孔隙度($\%$); θ_{cap} ,毛管持水率($\%$); ρ ,土壤容重($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)

总孔隙度(P_{total})是土壤中所有孔隙体积的总和,包括毛管孔隙和非毛管孔隙。

$$P_{\text{total}} = P_{\text{nc}} + P_{\text{cap}} \quad (7)$$

其中: P_{total} ,总孔隙度($\%$); P_{nc} ,非毛管孔隙度($\%$); P_{cap} ,毛管孔隙度($\%$)

1.4 土壤团聚体的测定

采用湿筛法测定土壤团聚体。一般地,将0.25~2 mm、0.053~0.25 mm和<0.053 mm的土壤团聚体分别定义为大团聚体、微团聚体和粘粉粒。利用土壤团聚体筛分仪(Eijkelkamp, 0813)湿筛仪对取自放牧平台的土壤样品进行筛分。将取回的风干土,挑出石块和植物根,每一份土壤样品称取4~4.6 g,土壤样品加入100 mL水浸泡5分钟,然后利用筛分仪器进行土壤筛分,首先利用孔径250 μm 的筛网进行筛分3 min,分离出>250 μm 的土壤大团聚体与<250 μm 的土壤组分,再将该土壤组分静置约30 min后,此时该土壤组分沉淀完全且稳定,利用注射器在确保土壤团聚体质量无损失的情况下吸取移除部分上清液,将剩余部分以孔径53 μm 的筛网进行筛分,分离出53~250 μm 的微团聚体。将湿筛法筛分后的每层土壤装入已知质量的铝盒,105℃烘干后进行称重,测得各层水稳性土壤团聚体的质量百分比。

1.5 根系样品的采集与测定

每个样地内随机选取6个取样点。利用直径为5 cm土钻在每个取样点采集不同土层的土壤根系样品,土层分为0~10 cm、10~30 cm、30~60 cm和

60~100 cm 四个深度。

采集后的土壤样品装入自封袋带回实验室,置于4℃冰箱暂存。测定前将土样轻轻捣碎,除去大块石砾和植物地上部分残体。随后将土样置于0.25 mm筛网中,采用缓慢流水充分冲洗,分离出土壤中的根系。挑净附着在根系上的石砾和有机碎屑,剔除明显的地上枯落物,仅保留地下根系(包括活根及细根残体,不包括地表匍匐茎和明显的地上残体)。

将处理后的根系样品置于65℃鼓风干燥箱中烘干至恒重,取出冷却后称重。根据土钻截面积和相应土层厚度计算各土层的采样体积,再将根系干重折算为单位土地面积上的地下生物量($\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$)。

1.6 数据处理

本研究所有数据的统计分析与绘图均在R软件(v. 4.1.2)中完成。使用“dplyr”包对各土层土壤结构与持水性(容重、孔隙率、持水率、团聚体组成)及地下生物量数据进行整理。采用单因素方差分析(One-wayANOVA)检验不同草地管理方式(CK, MG, CG, RG)及不同土层间各指标的差异显著性。若差异显著,则进一步使用“agricolae”包中的Duncan法进行多

重比较,显著性水平设定为 $P < 0.05$ 。

利用“ggplot2”包绘制不同管理方式下各物理指标随土层变化的带误差棒点线图。为了量化不同土层下地下生物量与土壤物理性状及团聚体稳定性之间的耦合关系,采用“linkET”包进行Mantel检验及相关性矩阵分析。在关联分析图中,矩阵色块代表土壤结构与持水性指标间的Pearson相关系数(r),左侧连线代表地下生物量与各物理指标间的Mantel相关性。连线的颜色深度表示显著性水平($P < 0.05$ 为显著),连线的粗细代表相关程度(r 值大小),以此系统评估地下生物量对剖面土壤结构演变的生物驱动效应。

2 结果与分析

2.1 不同草地管理方式对土壤容重的影响

不同草地管理措施对表层(0~10 cm)土壤容重具有显著影响($P < 0.05$,图1)。具体而言,与围封相比,持续放牧显著增加了表层土壤容重,而刈割和休牧没有显著改变土壤容重。随着土壤加深,不同草地管理方式对容重的影响逐渐减弱,不同处理间无显著差异。

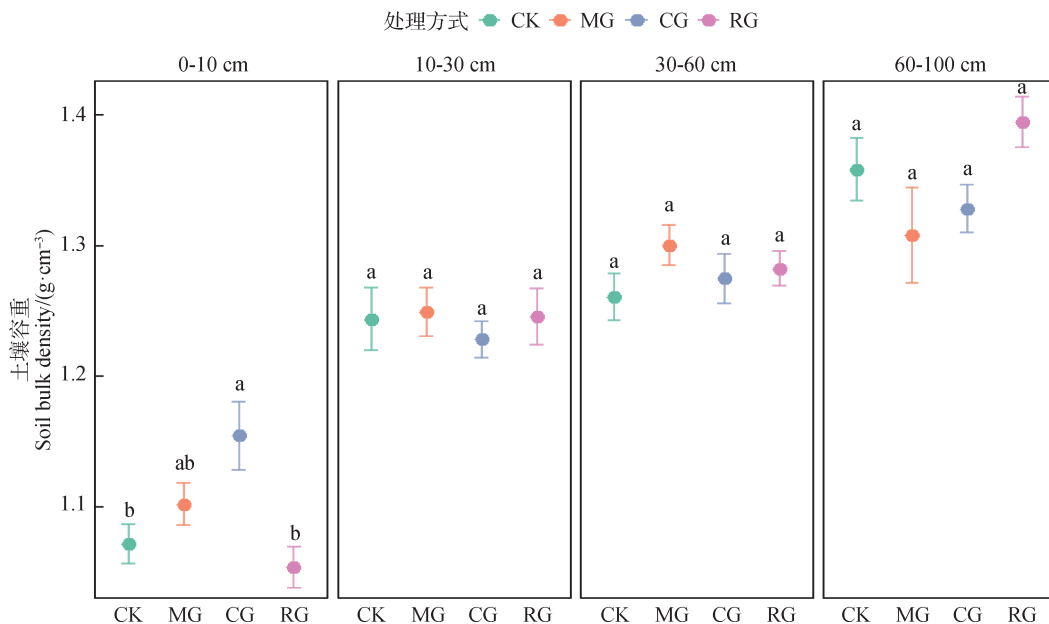


图1 不同草地管理方式对土壤容重的影响

Fig. 1 The effect of different grassland management practices on soil bulk density

注:CK,围封处理;MG,刈割处理;CG,持续放牧处理;RG,休牧处理。不同的小写字母表示不同草地管理方式之间的差异极显著($P < 0.05$)

Note: CK Enclosure treatment; MG: Mowing treatment; CG: Continuous grazing treatment; RG, rest grazing treatment. Different lowercase letters indicate a significant difference between different grassland management methods at the 0.05 level

2.2 不同草地管理方式对孔隙率的影响

不同草地管理措施对毛管孔隙率、非毛管孔隙率和总孔隙率的影响主要表现于表层土壤(图2)。

在0~10 cm土层中,草地管理方式对毛管孔隙率和总孔隙率具有显著影响($P < 0.05$);围封和刈割处理的毛管孔隙率和总孔隙率显著高于持续放牧处理,

休牧处于中间水平。非毛管孔隙率方面,休牧处理略高于其他处理,但并没有表现出显著差异。随着土壤加深至 10~30 cm、30~60 cm 和 60~100 cm,各管理措施间三项孔隙指标的差异总体不显著,仅在

30~60 cm 土层的非毛管孔隙率上表现出围封高于刈割的差异。总体来看,土壤毛管孔隙率、非毛管孔隙率和总孔隙率随土层加深略有降低,不同草地管理措施对深层土壤孔隙特性的影响相对较弱。

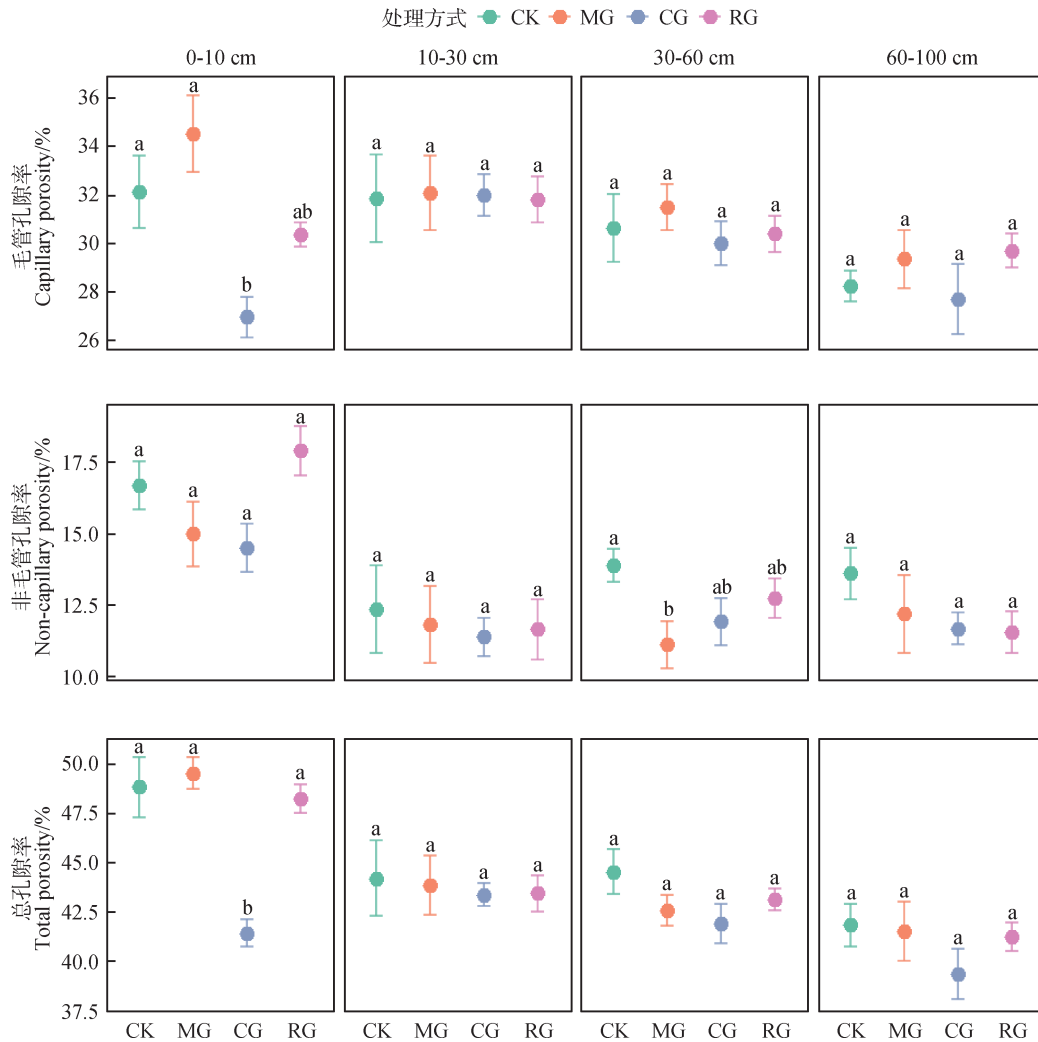


图 2 不同草地管理方式对孔隙率的影响

Fig. 2 The effect of different grassland management practices on porosity

注:CK,围封处理MG,刈割处理CG,持续放牧处理RG,休牧处理。不同的小写字母表示不同草地管理方式之间的差异极显著($P < 0.05$)

Note: CK, Enclosure treatment MG, Mowing treatment CG, Continuous grazing treatment RG, rest grazing treatment. Different lowercase letters indicate a significant difference between different grassland management methods at the 0.05 level

2.3 不同草地管理方式对持水率的影响

图 3 表明,不同草地管理措施对土壤毛管持水率、田间持水率和饱和持水率的影响整体较弱。各土层内,各处理之间多处于同一显著性水平,仅在数值上表现出轻微差异,表层(0~10 cm)中围封和休牧处理的毛管持水率和田间持水率略高于持续放牧和刈割处理,但差异未达到显著水平。随着土壤加深,三项持水指标均呈逐渐降低的趋势,不同草地管理方式之间的差异进一步缩小,在 30~60 cm 和 60~

100 cm 的土壤中各处理间均无显著差异,说明土壤水分保持能力主要受土层深度控制,而不同草地管理方式对持水特性的影响相对有限。

2.4 不同草地管理方式对土壤团聚体的影响

不同草地管理方式没有显著改变各土层中(0~10 cm、10~30 cm、30~60 cm 和 60~100 cm)微团聚体的占比。相比之下,大团聚体对不同草地管理方式更敏感(图 4)。具体而言,在表层(0~10 cm)和

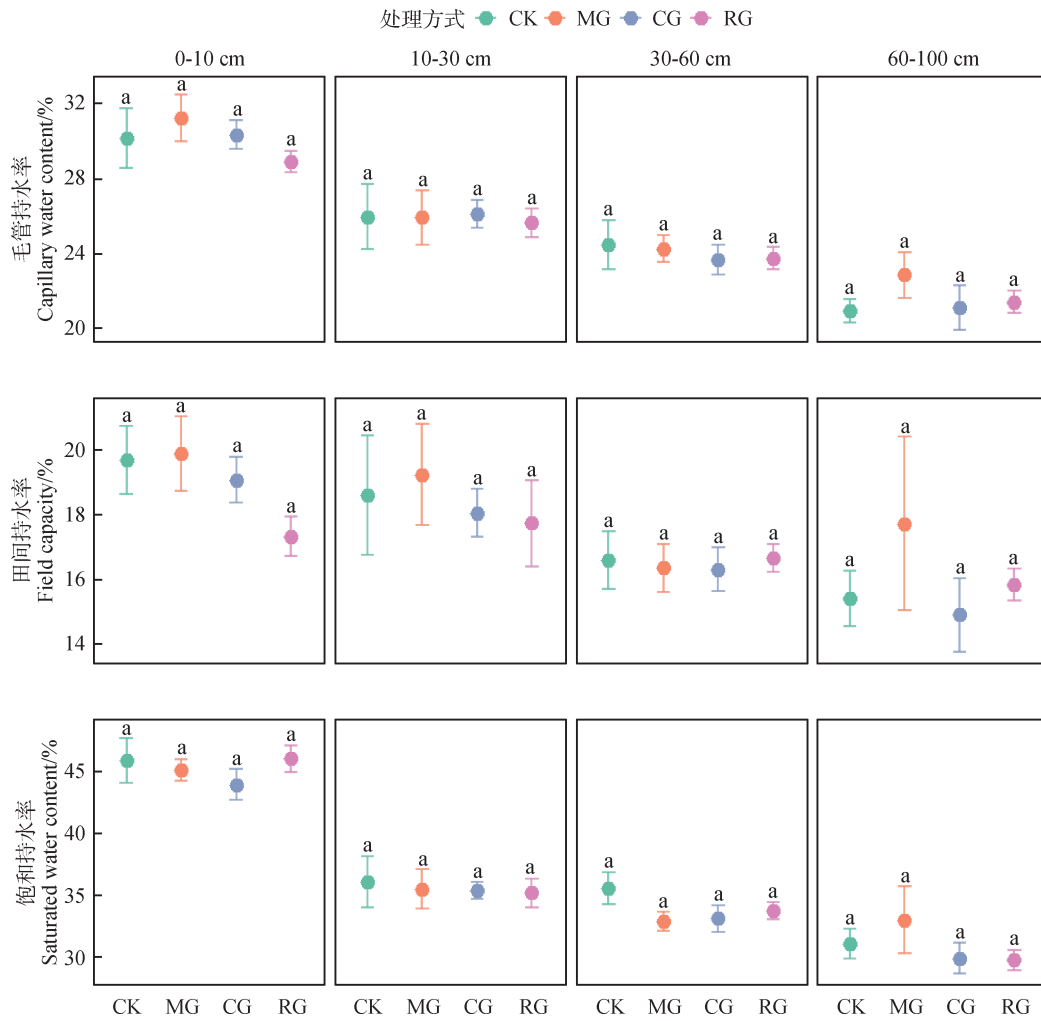


图3 不同草地管理方式对持水率的影响

Fig. 3 The effect of different grassland management practices on water content

注: CK, 围封处理; MG, 刈割处理; CG, 持续放牧处理; RG, 休牧处理。不同的小写字母表示不同草地管理方式之间的差异极显著 ($P < 0.05$)
 Note: CK, Enclosure treatment; MG, Mowing treatment; CG, Continuous grazing treatment; RG, rest grazing treatment. Different lowercase letters indicate a significant difference between different grassland management methods at the 0.05 level

次表层(10~30 cm 和 30~60 cm)土壤中,与围封处理相比,刈割和持续放牧显著降低了大团聚体质量占比($P < 0.05$)。而休牧处理(RG)仅在次表层土壤中显著减少了大团聚体占比($P < 0.05$)。对于深层(60~100 cm)土壤,与围封处理(CK)相比,持续放牧(CG)显著降低了大团聚体的占比($P < 0.05$),其他处理间无显著差异。

2.5 不同草地管理方式对地下生物量的影响

图5表明,不同草地管理措施对地下生物量的影响主要发生在上部土层。表层(0~10 cm)和10~30 cm 土层中,围封处理的地下生物量显著高于其他管理方式($P < 0.05$),而持续放牧、刈割和休牧三者之间差异不显著,说明围封有利于在土壤上部积

累更多地下生物量。随着土壤加深(30~60 cm 和 60~100 cm),各处理地下生物量均明显降低,不同草地管理方式之间的差异逐渐减弱并最终消失,各处理间地下生物量处于同一显著性水平,表明深层土壤中的地下生物量对草地管理措施的响应较弱。

2.6 不同土层土壤结构和持水性与地下生物量的关联分析

在0~10 cm 表层土壤中,地下生物量与土壤水分物理性质表现出极强的正相关性。关联分析显示(图6a),地下生物量与毛管持水率、田间持水率及饱和持水率均呈显著正相关($P < 0.05$),且相关程度较高($r \geq 0.5$)。此外,地下生物量与土壤容重呈显著负

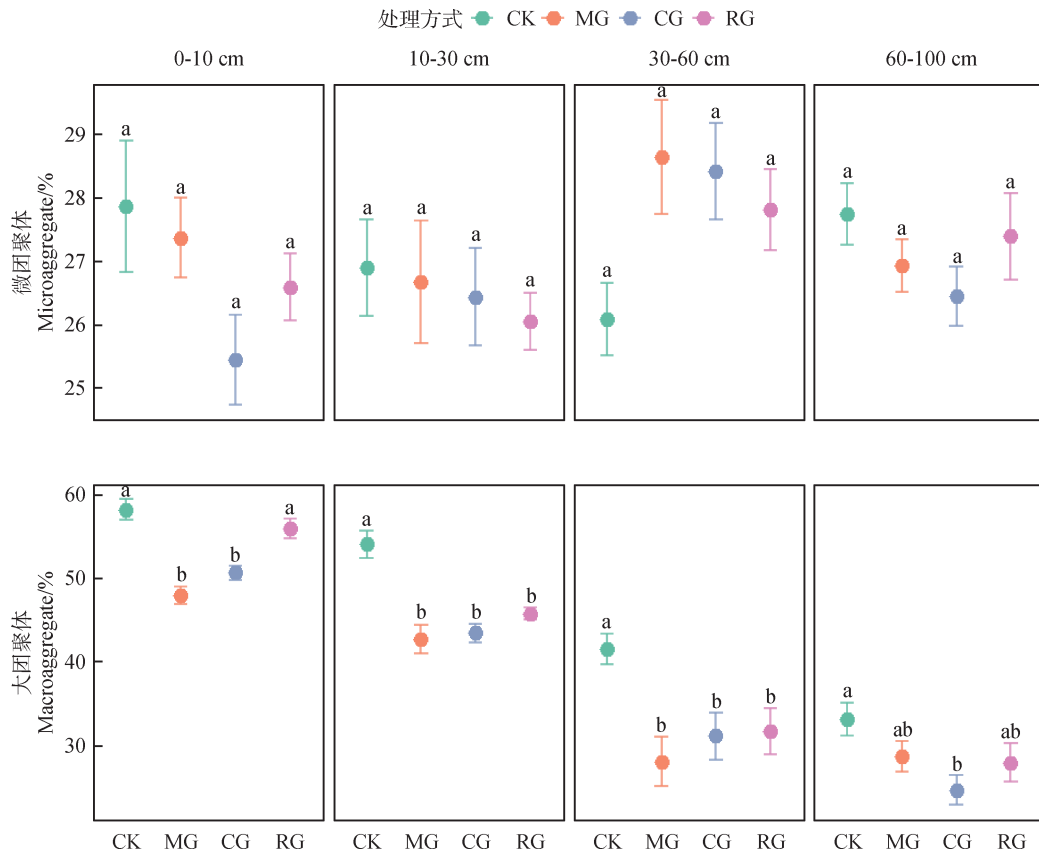


图4 不同草地管理方式对团聚体的影响

Fig. 4 The effect of different grassland management practices on aggregation

注:CK,围封处理;MG,刈割处理;CG,持续放牧处理;RG,休牧处理。不同的小写字母表示不同草地管理方式之间的差异极显著($P < 0.05$)
 Note: CK, Enclosure treatment; MG, Mowing treatment; CG, Continuous grazing treatment; RG, rest grazing treatment. Different lowercase letters indicate a significant difference between different grassland management methods; at the 0.05 level

相关($P < 0.05$),表明该层地下生物量的增加有助于降低土壤紧实度。而在土壤结构方面,地下生物量与微团聚体及大团聚体的关联并未达到显著水平。

在10~30 cm土层中,地下生物量对土壤结构和持水性的影响范围有所扩大(图6b)。地下生物量不仅持续与毛管持水率、饱和持水率呈显著正相关($P < 0.05$),且开始与总孔隙率表现出极显著的正相关关系($P < 0.05, r \geq 0.5$)。值得注意的是,该层地下生物量与非毛管孔隙率的关联性较弱且不显著,说明在次表层,地下生物量主要通过影响毛管孔隙和总孔隙结构来调控土壤的持水能力。

对于30~60 cm土层,地下生物量与土壤理化性质的耦合关系依然紧密(图6c)。地下生物量与三类持水率(毛管、田间、饱和)及总孔隙率均保持显著的正相关过程($P < 0.05$)。与上层相比,该层地下生物量与毛管孔隙率的连线变粗,显示出更强的正相关性($r \geq 0.5$)。这表明在深层土壤中,根系生物量对于维持土壤孔隙结构和水分截留能力具

有至关重要的作用。

在60~100 cm深层土壤中,地下生物量与土壤结构和持水性的关联特征发生了变化(图6d)。虽然地下生物量与毛管持水率、饱和持水率及总孔隙率仍维持显著正相关($P < 0.05$),但与田间持水率的关联性减弱,表现为弱相关。与此同时,地下生物量与土壤容重的负相关性依然显著。综合来看,随着土层深度的增加,地下生物量对土壤结构和持水性的影响虽然在广度上有所收缩,但在调节深层土壤孔隙度及持水性能方面仍具有显著的生物驱动效应。

3 讨论

3.1 不同管理方式对土壤容重与孔隙结构的影响

土壤容重与孔隙度是评价草地压实程度与通气性能的核心指标,家畜践踏产生的机械应力通常被认为是导致表层土壤物理退化的重要原

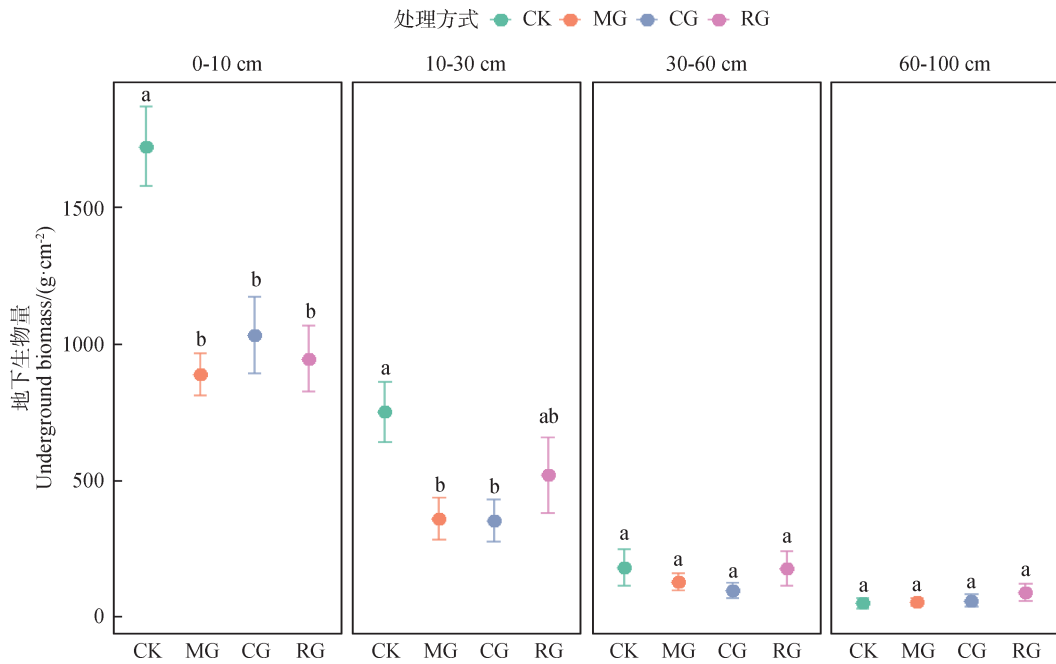


图5 不同草地管理方式对地下生物量的影响

Fig. 5 The effect of different grassland management practices on underground biomass

注:CK,围封处理;MG,刈割处理;CG,持续放牧处理;RG,休牧处理。不同的小写字母表示不同草地管理方式之间的差异极显著($P < 0.05$)

Note: CK, Enclosure treatment; MG, Mowing treatment; CG, Continuous grazing treatment; RG: rest grazing treatment. Different lowercase letters indicate a significant difference between different grassland management methods at the 0.05 level

因^[30-31]。本研究表明,管理方式对土壤物理结构的影响具有“表层敏感性”与“深度衰减性”。在0~10 cm土层,持续放牧显著提高了容重并降低了总孔隙率与毛管孔隙率,而刈割和休牧处理下的指标与围封(CK)无显著差异。随着土层加深(>30 cm),各处理间的差异逐渐消失。这一发现验证了机械压实主要作用于地表并随深度迅速衰减的规律^[32-33]。休牧通过减少关键生长期的践踏显著缓解了压实,而刈割则通过移除地上组织刺激根系补偿性生长,根系周转产生的生物孔隙有效抵消了物理退化^[34-35]。关联分析进一步显示,0~30 cm土层的容重与地下生物量呈显著负相关,说明发达的根系网络是维持表层土壤疏松度的核心生物驱动力。

3.2 草地管理方式对土壤团聚体稳定性的影响

土壤团聚体是物理结构稳定的物质基础。通常大团聚体(>0.25 mm)对外部干扰高度敏感,而微团聚体(<0.25 mm)因其较强的矿物结合力而表现出更高的稳定性^[36]。本研究观察到团聚体对管理方式响应的粒径差异:在0~60 cm土层中,微团聚体含量在各处理间保持稳定,但大团聚体含量在持续放牧和刈割下显著流失。大团聚体的形成依

赖于新鲜有机碳输入(如根系分泌物、真菌菌丝)作为“胶结剂”^[30,34],而持续放牧和刈割大量移除了地上光合产物,阻断了向地下输送能量的途径,加之放牧的物理破碎作用,导致了大团聚体的解体^[37]。休牧处理则为草地土壤恢复提供了窗口期,其在0~10 cm表层土壤的大团聚体占比与围封相比没有显著差异。关联分析显示地下生物量与团聚体指标均无显著直接相关,这可能是由于团聚体的演变可能更多受到物理干扰强度(践踏)和根系瞬时分泌速率的影响,而非仅取决于根系生物量的总量^[38]。

3.3 土壤结构与持水功能的响应

孔隙度的下降与大团聚体的破碎会直接削弱土壤的蓄水与截留能力,影响生态系统的抗旱性^[39]。本研究中,持续放牧减少了表层孔隙与团聚体占比,而各处理间的饱和持水率、毛管持水率及田间持水率均没有显著差异。造成这一现象的原因可能有两点:首先,起关键持水作用的微孔隙与微团聚体网络在各处理下依然保持完整,抵御了物理压实的破坏^[9,40]。其次,关联分析显示地下生物量与各土层持水指标均呈极显著正相关(尤其在0~60 cm),这说明即便在干扰下,残余的地下生物量及其构建

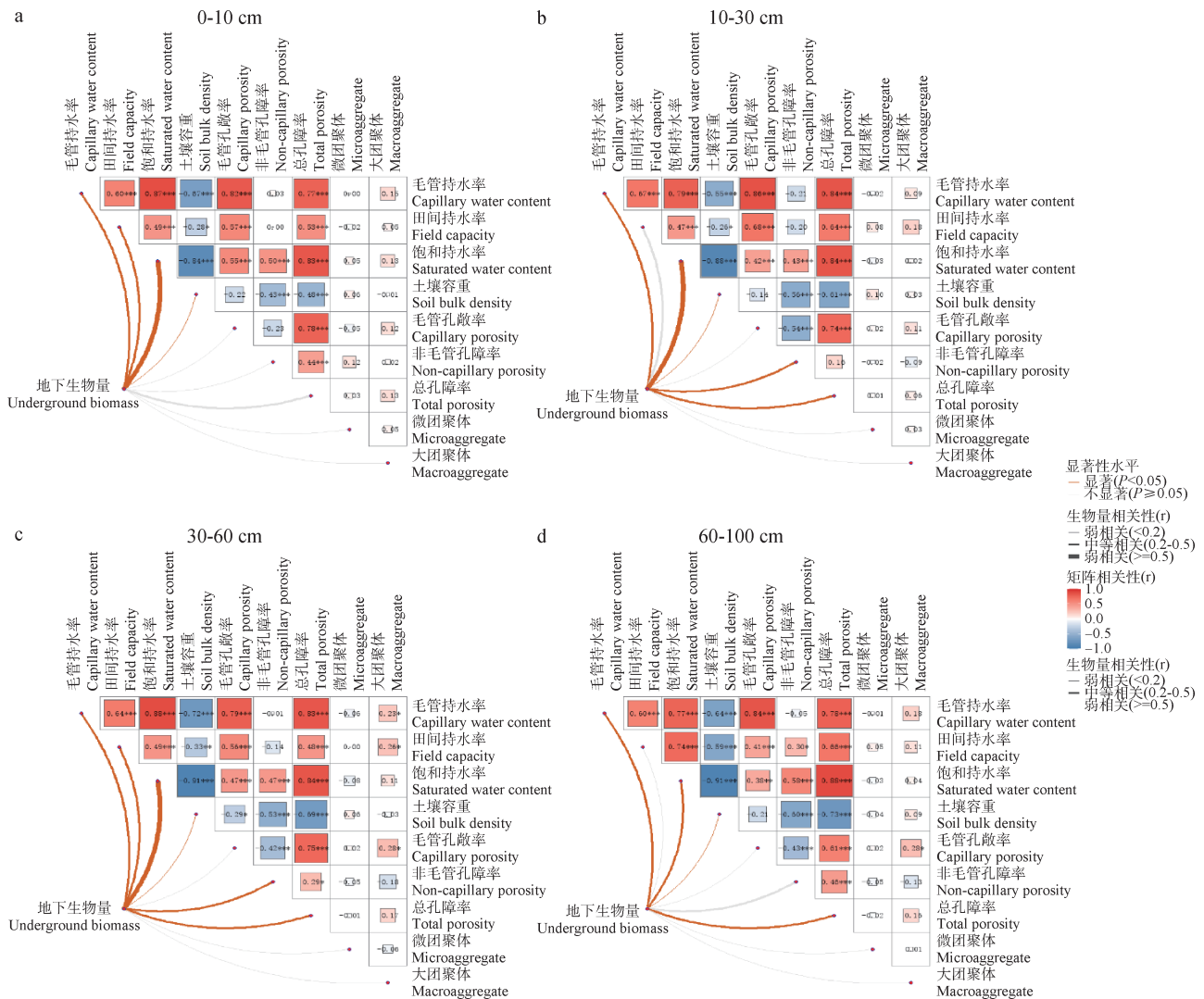


图6 土壤结构和持水性与地下生物量的关联分析

Fig. 6 Correlation analysis of soil structure and water retention with belowground biomass

注:方块内数字右上角的星号表示相关性的显著性水平:*代表 $P < 0.05$ (显著相关),**代表 $P < 0.01$ (极显著相关),***代表 $P < 0.001$ (极其显著相关)

Note: The asterisks indicate the level of statistical significance: * indicates $P < 0.05$ (significant), ** indicates $P < 0.01$ (highly significant), and *** indicates $P < 0.001$ (extremely significant)

的孔隙系统仍能维持基本的持水功能^[41]。

3.4 不同土层结构与持水性与根系的关系

地下生物量是重塑土壤物理结构、促进水土保持的重要生物因子,其在剖面上的分布决定了生态系统的抗逆性^[27]。跨土层关联分析显示,地下生物量与土壤持水能力、总孔隙率之间存在稳健的正反馈关系,且这种关联随深度增加表现出不同的特征^[40]。在表层(0~10 cm),生物量主要调节容重和水分功能;在深层(30~100 cm),其与毛管孔隙率及总孔隙率的相关性提高。虽然深层地下生物量绝对值较低,但其在紧实土层中形成的生物通道对于增强深层蓄水至关重

要^[42]。因此,管理策略若能促进根系向深层延伸(如围封或休牧),将显著提升生态系统的抗干旱能力^[43]。

4 结论

本研究评估了不同管理方式对温带草甸草原0~100 cm土壤结构和持水性的影响,草地管理措施主要影响0~30 cm表层和次表层,并表现出显著的深度分异。相较于容重和孔隙度,大团聚体是表征利用强度的更敏感指标,其占比在持续放牧和刈割下显著降低。与围封相比,持续放牧造成了土壤容重增加、孔隙率下降和大团聚体破碎,而休牧处

理通过维持较高的地下生物量并减少机械干扰,成功维持了表层土壤结构的稳定性。虽然各处理间的持水功能尚未出现显著分异,但地下生物量与各指标的紧密耦合证实了根系驱动的重要性。综上,推荐采用季节性休牧,以通过维持地下生物量驱动的生物改良过程,保障草地生态系统的长期稳定。

参考文献

- [1] JEEWANI P H, VAN ZWIETEN L, ZHU Z K, et al. Abiotic and biotic regulation on carbon mineralization and stabilization in paddy soils along iron oxide gradients[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2021, 160: 108312
- [2] LI J Q, PEI J M, LIU J J, et al. Spatiotemporal variability of fire effects on soil carbon and nitrogen: A global meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2021, 27(17): 4196-4206
- [3] BALDWIN J W, GARCIA-PORTA J, BOTERO C A. Phenotypic responses to climate change are significantly dampened in big-brained birds[J]. *Ecology Letters*, 2022, 25(4): 939-947
- [4] CAO J J, WANG L Y, ADAMOWSKI J F, et al. A context-dependent response of soil carbon and nitrogen to grazing exclusion: evidence from a global meta-analysis[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 434: 139792
- [5] LISEC U, PREVOLNIK POVŠE M, GSELMAN A, et al. Sustainable grassland-management systems and their effects on the physicochemical properties of soil[J]. *Plants*, 2024, 13(6): 838
- [6] LI S C, XING T T, SA R L, et al. Effects of grazing on soil respiration in global grassland ecosystems[J]. *Soil and Tillage Research*, 2024, 238: 106033
- [7] AJAYI A E, FALOYE O T, REINSCH T, et al. Changes in soil structure and pore functions under long term/continuous grassland management[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2021, 314: 107407
- [8] DIGNAM B E A, O'CALLAGHAN M, CONDRON L M, et al. Impacts of long-term plant residue management on soil organic matter quality, *Pseudomonas* community structure and disease suppressiveness[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2019, 135: 396-406
- [9] ZHANG Y X, HE C M, YUE B, et al. The influence of grazing on grassland ecosystem C: N: P stoichiometry[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2025, 70(11): 1566-1576
- [10] WANG M, ZHANG C, CHEN S S, et al. Moderate grazing increased carbon, nitrogen and phosphorus storage in plants and soil in the Eurasian meadow steppe ecosystem[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 914: 169864
- [11] ZHANG Y W, PENG Z C, CHANG S H, et al. Grazing management can achieve the reconfiguration of vegetation to combat climate impacts and promote soil carbon sequestration[J]. *Plant Diversity*, 2025, 47(5): 793-803
- [12] WANG D, LIU C, YANG Y S, et al. Clipping decreases plant cover, litter mass, and water infiltration rate in soil across six plant community sites in a semiarid grassland[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 861: 160692
- [13] YANG Y, MENG Z J, LI H N, et al. Soil porosity as a key factor of soil aggregate stability: insights from restricted grazing[J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2025, 12: 1535193
- [14] CHAI Q L, MA Z Y, CHANG X F, et al. Optimizing management to conserve plant diversity and soil carbon stock of semiarid grasslands on the Loess Plateau[J]. *Catena*, 2019, 172: 781-788
- [15] SIRIMARCO X, VILLARINO S, BARRAL M P, et al. Transformation of tall-tussock grasslands and soil water dynamics in the Flooding *Pampa*[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 896: 165362
- [16] HU J P, ZHANG M X, LÜ Z L, et al. Grazing practices affect phyllosphere and rhizosphere bacterial communities of *Kobresia humilis* by altering their network stability[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 900: 165814
- [17] KUKA K, JOSCHKO M. Grassland management intensity determines root development, soil structure, and their interrelationship: results of a regional study of Leptosols in the Swabian Alps[J]. *Grassland Research*, 2024, 3(2): 171-186
- [18] HAO X H, YANG J J, DONG S K, et al. The influence of grazing intensity on soil organic carbon storage in grassland of China: A meta-analysis[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 924: 171439
- [19] MORRA B, BRISBIN H, STRINGHAM T, et al. Ecosystem carbon and nitrogen gains following 27 years of grazing management in a semiarid alluvial valley[J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 337: 117724
- [20] CID-RODRÍGUEZ M, CANTONATI M, SPITALE D, et al. Using diatoms and physical and chemical parameters to monitor cow-pasture impact in peat cores from mountain mires[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 926: 171779
- [21] XU G J, KANG X M, LI W, et al. Different grassland managements significantly change carbon fluxes in an Alpine meadow[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 1000558
- [22] MA Y L, LIU Y F, BAN Y Y, et al. Divergent shift of normal Alpine meadow exacerbated soil loss of hillslope Alpine meadows based on field experiments[J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2024, 12(3): 565-577
- [23] 张强, 邓军, 毛瑾, 等. 半干旱区不同围封年限对草地土壤和微生物碳氮含量的影响[J]. *水土保持通报*, 2021, 41(1): 29-34, 40
- [24] ZHANG Q, DENG J, MAO J, et al. Effects of different fencing durations on soil and microbial carbon and nitrogen contents in a semi-arid grassland[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2021, 41(1): 29-34, 40
- [24] 张宸, 孙建, 张梦琦, 等. 青藏高原高寒草地土壤磷含量对围栏管理的响应[J]. *草业科学*, 2024, 41(8): 1802-1813
- [24] ZHANG C, SUN J, ZHANG M Q, et al. Response of soil phosphorus content to fencing management in alpine grassland

- on the Tibetan Plateau [J]. Pratacultural Science, 2024, 41 (8): 1802-1813
- [25] CHAPLOT V, DLAMINI P, CHIVENG P. Potential of grassland rehabilitation through high density-short duration grazing to sequester atmospheric carbon[J]. Geoderma, 2016, 271: 10-17
- [26] LA S R, XIANG L J, YANG H X. Research on Soil Organic Carbon Storage Distribution in the Grassland Ecosystem [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(17): 3604-3614
- [27] XU F W, LI J J, WU L J, et al. Resource enrichment combined with biomass removal maintains plant diversity and community stability in a long-term grazed grassland [J]. Journal of Plant Ecology, 2020, 13(5): 611-620
- [28] KHAREL G, DHAKAL M, DEB S K, et al. Effect of long-term semiarid pasture management on soil hydraulic and thermal properties[J]. Plants, 2023, 12(7): 1491
- [29] LI S Y, ZHANG B, LI Y N, et al. Long-term grazing exacerbates soil microbial carbon and phosphorus limitations in the desert steppe of Inner Mongolia-A study based on enzyme kinetics[J]. Applied Soil Ecology, 2024, 194: 105192
- [30] DE ANDRADE BONETTI J, ANGHINONI I, IVONIR GUBIANI P, et al. Impact of a long-term crop-livestock system on the physical and hydraulic properties of an Oxisol[J]. Soil and Tillage Research, 2019, 186: 280-291
- [31] VAROL T, EMIR T, AKGUL M, et al. Impacts of small-scale mechanized logging equipment on soil compaction in forests[J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2020, 20 (3): 953-963
- [32] ZHANG B, ZHAO T Q, HE Q S, et al. Effects of grazing on soil aggregate composition and stability in *Stipa Breviflora* desert Steppe[Z]. (2022-01-01)
- [33] SOLTANPOUR S, JOURGHOLAMI M. Soil bulk density and porosity changes due to ground-based timber extraction in the Hyrcanian forest [J]. Notulae Scientia Biologicae, 2013, 5 (2): 263-269
- [34] GŁĄB T. Effect of soil compaction and N fertilization on soil pore characteristics and physical quality of sandy loam soil under red clover/grass sward [J]. Soil and Tillage Research, 2014, 144: 8-19
- [35] YI X S, LI G S, YIN Y Y. The impacts of grassland vegetation degradation on soil hydrological and ecological effects in the source region of the Yellow River—a case study in Junmuchang region of Maqin country [J]. Procedia Environmental Sciences, 2012, 13: 967-981
- [36] ZHOU Y, MA H B, XIE Y Z, et al. Response of soil aggregate stability and erodibility to different treatments on typical steppe in the Loess Plateau, China [J]. Restoration Ecology, 2022, 30 (5): e13593
- [37] CHEN T, BADEMU Q, DONG X, et al. Effects of heavy grazing on soil microbial diversity and its drivers in different types of grasslands [J]. Chinese Science Bulletin, 2025, 70(11): 1601-1611.
- [38] ZHANG M N, SONG X J, WU X P, et al. Microbial regulation of aggregate stability and carbon sequestration under long-term conservation tillage and nitrogen application [J]. Sustainable Production and Consumption, 2024, 44: 74-86
- [39] WANG T W, ZHANG Z, LI Z B, et al. Grazing management affects plant diversity and soil properties in a temperate steppe in northern China [J]. Catena, 2017, 158: 141-147
- [40] CUI H Y, LI W J, CHEN J, et al. Livestock and subterranean mammals have contrasting impacts on soil infiltration of grasslands [J]. Applied Soil Ecology, 2023, 189: 104950
- [41] LI A, WU J G, ZHANG X Y, et al. China's new rural "separating three property rights" land reform results in grassland degradation: evidence from Inner Mongolia [J]. Land Use Policy, 2018, 71: 170-182
- [42] KENNY L B, GIMÉNEZ D, CAPLAN J S, et al. Rotational horse grazing and dry weather maximize infiltration into soil macropores [J]. Soil and Tillage Research, 2023, 225: 105539
- [43] CHEN Y, QI Y, WEI Y, et al. Root traits and soil detachment in response to variable slope gradients in a representative purple-soil sloping grassland [J]. Catena, 2024, 239: 107936

(责任编辑 彭露茜)