

DOI: 10.20103/j.stxb.202407301798

张光茹, 王星宇, 吕佳霖, 谭向平, 胡中民. 围栏封育对草地土壤有机碳动态的影响及机制研究进展. 生态学报, 2025, 45(16): - .
Zhang G R, Wang X Y, Lü J L, Tan X P, Hu Z M. Impact and mechanisms of grazing exclusion on soil organic carbon dynamics in grasslands. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(16): - .

围栏封育对草地土壤有机碳动态的影响及机制研究进展

张光茹¹, 王星宇^{2,3}, 吕佳霖^{2,3}, 谭向平², 胡中民^{4,*}

1 华南师范大学地理科学学院, 广州 510631

2 中国科学院华南植物园退化生态系统植被恢复与管理重点实验室, 广州 510650

3 中国科学院大学, 北京 100049

4 国家生态质量综合监测站海南热带雨林站(森林), 海南大学生态学院, 海口 570228

摘要: 围栏封育是退化草地生态系统提升碳汇的有效措施, 对草地生产力的自然恢复和生态系统稳定具有重要意义。围封通过排除牲畜的啃食能有效地恢复植被生物量, 增加土壤有机碳(SOC)含量, 但围封效果也受到管理方式、气候因素、草地类型及土壤条件等的影响。本文通过对围封条件下土壤有机碳恢复效果的研究现状进行总结, 尤其关注有机碳输入和输出过程, 发现目前对土壤有机碳稳定性的研究较少, 特别是来源于植物、微生物, 较为稳定、不易分解的有机碳组分, 导致土壤有机碳对围封的响应及机制还缺乏整体性和系统性的认识, 很难从碳过程机理上解释不同研究围封效果的差异。未来研究应重点关注: 1) 加强围封对 SOC 不同组分研究, 解释 SOC 在不同研究中围封效果的差异; 2) 加强土壤微生物功能群与 SOC 输入和分解之间关系的研究, 深入揭示微生物调控 SOC 对围封的响应规律和机制; 3) 长期围封过程中, 不同时间段地下碳库的变化过程尚不明确, 应加强阶段性、长期性的观测, 以更准确地揭示围封对土壤碳循环的影响规律, 科学合理地评估草地适宜的围封年限; 4) 加强围封与全球气候变化因子的耦合研究, 围封下不同草地类型, 特别是青藏高原等高寒草地, 土壤有机碳动态的驱动气候因子的综合分析还很缺乏。

关键词: 围栏封育; 草地生态系统; 颗粒有机碳; 矿质结合有机碳; 植物来源有机碳; 微生物来源有机碳

Impact and mechanisms of grazing exclusion on soil organic carbon dynamics in grasslands

ZHANG Guangru¹, WANG Xingyu^{2,3}, LÜ Jialin^{2,3}, TAN Xiangping², HU Zhongmin^{4,*}

1 School of Geography, South China Normal University, Guangzhou 510631, China

2 Key Laboratory of Vegetation Restoration and Management of Degraded Ecosystems, South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

4 Hainan Baoting Tropical Rainforest Ecosystem Observation and Research Station, School of Ecology, Hainan University, Haikou 570228, China

Abstract: As a critical restoration strategy for degraded grasslands, grazing exclusion effectively enhances carbon sequestration while revitalizing ecosystem productivity and stability. Livestock exclusion through this practice facilitates vegetation recovery and elevates SOC content via enhanced belowground carbon allocation. However, the effectiveness of grazing exclusion is influenced by management practices, climatic factors, grassland types, and soil conditions. This paper

基金项目: 青藏高原第二次科学考察与研究计划(2019QZKK0405); 国家自然科学基金(U23A2002, 32271725); 海南大学启动基金(KYQD(ZR)21096)

收稿日期: 2024-07-30; 网络出版日期: 2025-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: huzm@igsnr.ac.cn

summarizes the current research on the restoration effects of SOC under grazing exclusion conditions, mainly focusing on organic carbon input and output processes. It is found that there is currently limited research on the stability of soil organic carbon, especially on the more stable and less decomposable organic carbon components derived from plants and microorganisms, which leads to a lack of comprehensive and systematic understanding of SOC responses and mechanisms to grazing exclusion. We further proposed future research directions on SOC dynamics under grazing exclusion: (1) enhancing the study of different SOC components under grazing exclusion to explain the variations in SOC responses to grazing exclusion in different climatic regions; (2) investigating the relationship between soil microbial functional groups and SOC input and decomposition, to reveal the mechanisms and patterns of microbial regulation of SOC responses to grazing exclusion; (3) Quantifying temporal dynamics of subsurface carbon pools across enclosure chronosequences, with enhanced periodic and long-term observations in experiments to more accurately elucidate the impact of grazing exclusion on SOC turnover, and to scientifically assess the appropriate duration of grazing exclusion for grasslands; (4) strengthening the coupling research of grazing exclusion with global climate change factors, as comprehensive analyses of the climatic drivers of SOC dynamics in different grassland types under grazing exclusion, particularly in alpine grasslands like the Qinghai-Tibet Plateau, are still lacking.

Key Words: grazing exclusion; grassland ecosystem; particulate organic carbon; mineral-associated organic carbon; plant-derived organic carbon; microbe-derived organic carbon

草地生态系统覆盖全球陆地面积约 40%, 是人类社会最重要的绿色生态安全屏障和畜牧业生产基地^[1]。中国草原主要分布在东北平原、内蒙古高原、黄土高原、青藏高原及新疆山地, 是世界草原生态系统的重要组成部分^[2], 约占世界总面积的 6%—8%, 其碳储量占世界总碳储量的 9%—16%, 在全球碳循环和应对区域气候变化中发挥重要作用^[3]。在全球范围内, 过度放牧已成为最重要的人为干扰之一^[4], 造成草地生态系统结构与功能的持续退化, 引起草地生产力下降。围栏封育被认为是恢复退化草地生态系统以及提升碳汇能力的有效方法^[5], 其投资成本少, 见效快, 被世界各国广泛采用^[6]。我国在 2003 年实施退牧还草 (RGLG) 国家保护计划以来, 禁牧面积已达 2620 万 hm^2 , 占全国天然草地面积的 10.8%^[7]。通常认为围封可以有效减少草食动物对草原的取食, 有利于草原生态系统的自然恢复。

土壤有机碳 (SOC) 库是陆地生态系统的主要碳库, 其动态在很大程度上影响大气中二氧化碳 (CO_2) 浓度, 并以温室效应的方式影响全球气候变化^[8]。草地 SOC 含量是反映土壤质量和草原健康状况的重要指标, 在维持草地生态系统生产力方面起重要作用。已有研究表明围封可以增加土壤有机碳的积累^[4,7,9], 但也有研究显示围封对土壤有机碳的影响可以忽略不计甚至是负效应^[10-11], 这可能是由于气候条件、草地类型、土壤质地等方面的差异影响草地 SOC 对围封的响应^[12]。土壤有机碳含量的变化主要取决于碳输入与输出之间的平衡^[13]。草地 SOC 的输入主要包括植物凋落物和家畜粪便经微生物的分解作用形成 SOC 的过程^[13]; SOC 的输出包括微生物分解、淋溶迁移以及风蚀侵蚀等^[14]。草地生态系统因其脆弱性易受人为和自然因素的影响, 进而导致草地碳循环过程对围封的响应存在差异^[15]。然而, 目前有关围封对草地 SOC 影响的研究, 大多只针对总 SOC 含量 (库) 或其中某个过程 (例如, 凋落物分解、土壤呼吸等) 的变化, 这难以深入理解围封带来的差异。为此, 本文拟通过梳理围封对草地 SOC 影响的研究现状, 系统总结围封对有机碳输入、输出及固存等过程的影响, 为科学认知围栏封育对草地生态系统植被-土壤体系的作用机制提供理论依据, 促进草原合理利用和可持续发展。

1 围封下草地土壤有机碳的累积效应与响应差异

合理的放牧可以提高植物凋落物的积累量和养分循环^[16], 过度放牧通过增加土壤容重, 降低土壤渗透性和孔隙度, 从而影响草地养分循环, 导致草地退化和 SOC 的损失^[17]。围封通过排除牲畜对植物的啃食, 减少

牲畜粪便和尿液^[18-19],以及有蹄动物对植被和土壤的踩踏来影响 SOC 动态。现有的围封与放牧整合分析研究^[7,12,20]表明,相较于放牧,围封总体上增加了我国草地的土壤碳储量,但对现有文献的梳理发现,围封对草地 SOC 的影响仍存在差异。

(1) 正效应。在不同的草地类型上开展的控制实验发现,与自由放牧样地相比,围封处理显著增加 SOC 含量^[21-23]。Zhong 等^[5]发现封育 7 a 后,内蒙古草地 SOC 储量较放牧区增加了 10%;青藏高原高寒沼泽草甸围封 9 a 后土壤碳储量显著提高^[24];Li 等^[25]研究显示围栏封育是改善西北温带草地土壤碳储量的有效途径。这可能是由于围封通过减少牲畜对植被的取食,使植被生物量及覆盖度得以有效恢复,潜在增加了 SOC 的积累^[4]。

(2) 无效应。由于退化草地生态系统恢复演替的复杂性,有研究者发现围封后 SOC 没有显著性的变化^[26]。Cui 等^[27]发现即使在围封 20 a 后内蒙古草原 SOC 含量仍保持不变;周凌波^[8]研究显示围封对蒿类荒漠草地 0—100 cm 的 SOC 含量无显著影响。也有整合分析显示,围封后高寒草甸 SOC 储量显著增加,但高寒草原和高寒荒漠草原 SOC 储量没有明显变化,作者推测草地类型与年平均降水量(MAP)的差异可能是造成草地 SOC 对围封响应差异的主要原因^[28]。

(3) 负效应。有研究表明随着围封持续时间的延长,SOC 含量较放牧区出现降低的现象^[29]。Shi 等^[30]研究显示围封 8 a 导致地下生物量和 SOC 库减少;Wang 等^[31]发现适当的放牧对草地表层 SOC 起到促进作用,相对于围封区更有利于 SOC 积累^[11]。这可能是由于围封消除了放牧压力,促进草地的自然恢复,提高了土壤养分的输入,但凋落物的增加在短期内促进了土壤微生物的代谢,增强了土壤的呼吸作用和酶活性,加快了原有 SOC 的分解^[32]。围封还排除了家畜的践踏等干扰,从而减缓了凋落物分解的速率。此外,围封后阻碍家畜的排泄物进入土壤,也会导致围封后 SOC 含量降低^[33]。

2 围封效果的多因子调控机制:年限、放牧强度与气候的作用

草地 SOC 对围封处理呈现不同的响应格局,可能受到多重因素的影响,仅从土壤总 SOC 的变化难以精确地评估围封效果。因此,有必要查明围封对不同气候区、草地类型 SOC 动态的影响及主控因子,这对采取适宜的管理计划有效提高草地生态系统承载力,增加草地生态系统的碳汇能力具有重要的科学意义^[34]。

2.1 围封年限

围封持续时间在草地碳动态中的作用至关重要,通常 SOC 含量随围封年限的增加而增加^[7,20]。Su 等^[35]发现地上凋落物产量和土壤碳储量随着围封时间的延长呈现增加的趋势;Du 等^[36]对高寒草地生态系统的研究结果显示,随着围封年限的增长,植物生物量和 SOC 含量均呈增加趋势。尽管大多数研究发现随处理年限的增加,围封恢复效果越明显^[37],但也有研究显示,长期的围封管理会阻碍植物在生长季对光资源的获取^[38],进而减少碳储量的积累^[39]。例如,羊草草地土壤碳储量在围封 20 a 后达到顶峰之后趋于稳定^[40];Liu 等^[41]的研究结果认为短期围封可以提高高寒草甸的碳储量,但继续封育处理,气候因素可能会影响围封的固碳效果。整合分析^[20]的结果也证明各土层的有机碳含量在围封 13—15 a 后达到峰值。由此可见,随着封育年限的延长,退化草地的恢复效果可能呈现“单峰”模式,当达到最大值之后,植被生物量和 SOC 含量趋于稳定或者减少。这可能是由于围封后,受到放牧啃食、践踏处理的植物群落得以恢复,植物功能群逐渐趋于稳定,同时也增强了草地植物之间对资源的竞争,导致植物生长受限。此外,长期的围封使得枯落物大量积聚地表,会降低植物幼苗的萌发以及草地覆盖度和生产力^[42],潜在影响草地生态系统的物质和能量循环,不利于草地生态系统的健康发展。因此,合理控制围栏封育的时间对退化草地的恢复可能更为有益,从而带来更多的生态和经济效益^[43]。

2.2 放牧强度

放牧强度也是造成不同研究结果存在差异的重要原因。Wang 等^[44]研究显示围栏仅对未退化草地和中度退化草地有显著影响,围封是潜在恢复轻度或中度退化草地的重要管理策略,随着放牧强度的增加,SOC 含

量显著降低。但也有研究表明,适度放牧有利于增加 SOC 含量。陈思思等^[45]发现,与围封相比较,适度放牧能增加 SOC 含量和活性碳组分,符合中度干扰假说理论,即适度放牧下家畜的采食而导致植物的超补偿生长^[46],能够促使净初级生产力增加,提高草地养分循环,增加草地植被的固碳能力^[47]。实施放牧时间和放牧强度的优化管理,是轻度乃至重度退化草甸植被恢复的合理途径。对于轻度退化草地,采用短期围封(3—5 a)恢复植被,辅以轻度放牧促进养分循环,可防止土壤干层化和植被老化^[48]。至于极度退化高寒草甸,系统恢复力丧失殆尽,长期围封植被也难以自我复健,通过翻耕改建人工草地以达到退化系统生态功能的快速提升和恢复,还可缓解乃至解决草畜矛盾^[49]。

2.3 气候因素

已有整合分析^[7, 20, 50]显示,气候因子强烈地改变了围封条件下我国草地生态系统碳储量恢复的效果。Hu 等^[12]研究发现,MAP 是影响草地 SOC 变化速率的主要气候因子,在气候较湿润的地区围封将产生更高的碳封存效益。Xia 等^[51]在内蒙古温带草原的研究也支持这一结果,表明在湿润气候条件下,草地围封可以固定更多的 SOC。此外,Wiesmeier 等^[52]的研究发现,低温更有利于围封下高寒草地土壤有机碳的积累。通过整合分析发现 MAT 和 MAP 分别影响了 SOC 含量对围封处理的响应^[20, 50]。上述研究表明气温和降水量对围封条件下的不同草地类型 SOC 的恢复具有重要影响。

2.4 其他因素

以往研究显示围封对不同土层的影响并不一致,围封对表土层影响更大,如干友民等^[53]发现 0—10 cm 表层土壤的有机碳含量变化最为明显;Zhu 等^[54]对中国黄土高原荒漠草原的研究结果显示,围栏处理明显增加 0—30 cm 土层 SOC 含量。与此相反,整合分析研究^[20]显示,围封更有利于我国草地深层土壤固碳。除此之外,围封效果还受到草地类型、氮素等因素的影响,这可能与不同类型草地植被生物量和凋落物返还量的差异有关;黄国柱等^[55]发现内蒙古典型草原、巴音布鲁克的高寒草原、亚高山草甸所需的恢复年限不一致;Liu 等^[41]的研究显示围封处理下不同生态系统类型(如高寒草甸和高寒草原)固碳潜力和固碳机制可能不同。有研究认为氮素有效性可能是草地 SOC 形成的主要限制因素^[56—57],整合分析也显示 SOC 含量的增加伴随着土壤氮含量的增加,表明氮素可能是维持围封前期 SOC 含量增加的关键因子^[12]。

综上,SOC 储量在围封下恢复效果的差异可能与围封时间、放牧强度、气候环境、以及草地类型和土壤条件等因素关系密切^[9, 12, 35, 58]。围封可能会促进 SOC 的积累,但长期围封可能会降低根系生物量的积累速率,从而削弱土壤固碳的潜力。气候变化、不同草地类型以及地上和地下部分的生物量分配等均可能改变土壤碳动态。因此,在管理策略选择时,应结合草地生态系统特征,充分考虑植物、土壤、微生物及其相互作用对 SOC 周转的影响,从而科学合理地选择适宜的措施进行草地保护和恢复^[58]。

3 围封驱动下土壤有机碳动态的输入-输出过程与稳定性机制

土壤有机碳的变化是由植被生产力、凋落物分解、根系周转和动物排泄的输入与土壤呼吸、土壤侵蚀和淋溶的碳输出之间的平衡所决定的^[7],其动态变化对于陆地生态系统碳循环具有重要作用^[59]。围栏封育通过对有机碳的输入、输出途径产生影响,进而影响 SOC 的固存(图 1)。

在土壤 SOC 输入过程,围封排除了牲畜粪便输入,改变了植被生物量以及通过光合作用输入土壤 SOC 库的总量。植物残体部分经微生物分解贡献土壤植物来源 SOC 库;土壤微生物通过直接摄入小分子植物源碳底物合成为自身生物量,通过死亡残体及其部分代谢产物等残留物质贡献土壤微生物来源 SOC 库的形成。输出过程中,围封排除了牲畜对生物量的啃食,改变了植物、微生物呼吸和 SOC 分解产生 CO₂的过程。其中,黑色路径表示 SOC 输入过程,红色路径表示 SOC 输出过程;实线路径和方框表示以往研究对该过程有一定的认识,虚线路径和方框表示对该过程的认识较为匮乏。

3.1 围封对有机碳输入过程的影响

植被生物量是评估草地生产能力和确定草地载畜量的重要指标^[60],也是表征草地健康与否的重要评价

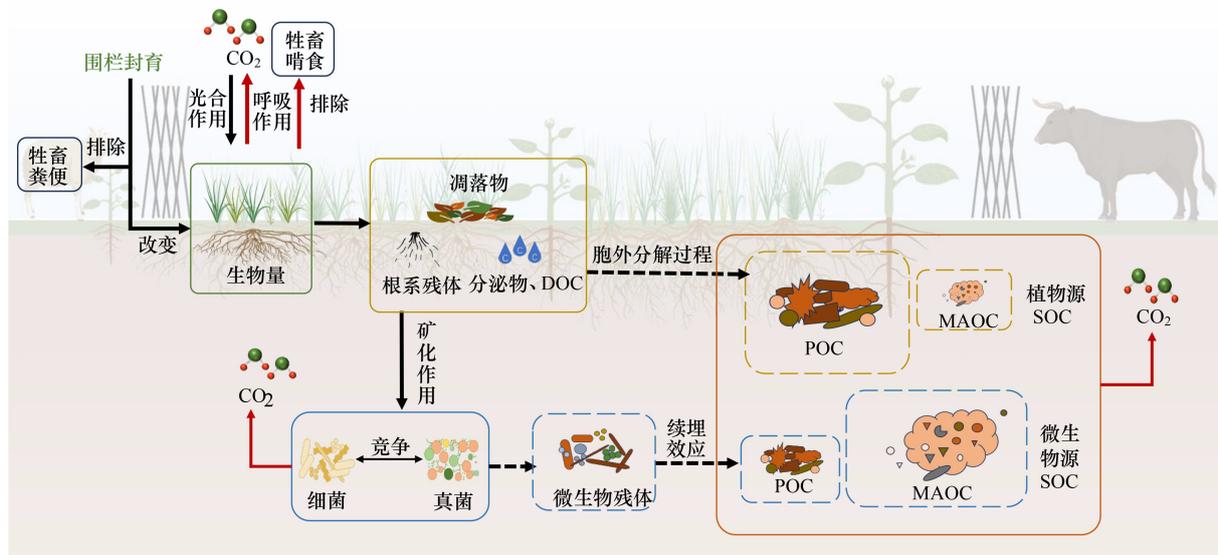


图 1 围栏封育影响土壤有机碳动态的主要途径

Fig.1 Key pathways of soil organic carbon dynamics modulated by grazing exclusion

DOC: 可溶性有机碳 Dissolved organic carbon; POC: 颗粒有机碳 Particulate organic carbon; MAOC: 矿质结合态有机碳 Mineral-associated organic carbon; CO₂: 二氧化碳 Carbon dioxide

指标之一^[8]。家畜优先选择植株鲜嫩、适口性好的植物进行采食,导致有毒有害植物取代适口性好的植物,植被高度和盖度下降、植物叶片光合面积减少、有机物积累效率降低,植物个体趋于小型化^[61],进而减少地上生物量^[62]。围封隔绝了家畜采食、践踏等的干扰,使植被生物量得以恢复。已有研究表明封育显著增加天山蒿类荒漠草地^[63]、北方半干旱草原^[25]、高寒沼泽草甸^[24]、高寒草甸、高寒草原^[44]和高寒荒漠^[64]等的地上植被生物量。地下生物量方面也有相似的结果,例如围封增加了典型蒿类荒漠草地^[8]、内蒙古短花针茅荒漠草原^[65]、云雾山针茅^[66]等地下生物量。尽管目前有关围封后退化草地植物生物量的恢复多表现为围封区大于自由放牧区^[67],但其变化程度也会因围封区域、围封时间^[68]的长短而有所不同。可见,围封后植被地上、地下生物量的增加^[24],潜在促进植物有机碳向土壤的输入^[69]。

另有研究表明,经过围封后植被的恢复效果并不显著。鄢燕等^[70]在高寒草原类草地研究发现,围封前后地上植被生物量差异不显著;内蒙古温性草甸草原植被地下生物量随着封育年限的延长表现为先增加后减少的变化趋势^[71]。此外,围封后植被的生物量分配格局也可能发生改变。郑伟等^[72]发现,围封 2 a 后伊犁绢蒿 (*Seriphidium tran-siliense*) 的地下生物量变化不大,但地上生物量变化较大。出现这种现象的原因可能是放牧下牲畜通过啃食植物顶端组织和衰老组织刺激了植物生长^[73],而地下生物量处于土壤表层之下,对于围栏封育的响应较为迟缓。Niu 等^[74]在阿拉善沙漠草原的研究发现,地下生物量在围封后降低了 22.26%。此外,温度也有可能对此产生影响。沈振西等^[75]在 4700 m 处的高寒草甸研究发现,封育样地地上植被有机碳含量显著低于放牧样地。这些研究表明围封不仅改变草地植物群落结构,初级生产力,同时还会影响植物对地上和地下碳分配格局以及凋落物的化学组成,这都将作用于生物量碳向土壤碳的输入和转化。

3.2 围封对土壤有机碳输出过程的影响

草地生态系统有机碳的输出形式多样,包括呼吸消耗、牧草利用损失、淋溶迁移以及风蚀侵蚀等^[14]。此外,牲畜啃食损失的部分也是草地生态系统有机碳输出的重要途径,但研究中往往被忽略^[76]。呼吸是草地生态系统碳输出的主要途径,以土壤呼吸为主。风蚀虽然能够通过地表侵蚀作用造成 SOC 以颗粒物的形式流失,但植被盖度高于 60% 时风蚀影响较弱或没有影响^[77]。持续的放牧条件下家畜长期啃食,导致可分解底物减少造成呼吸速率降低,且土壤呼吸速率随放牧强度的增加而减弱^[78]。围封能够促进土壤呼吸^[79],且呼吸

速率在一定条件下与围封时间的正向影响^[80],例如围封增加了羊草典型草原土壤呼吸速率,而放牧延缓了羊草典型草原土壤呼吸速率^[81]。这可能是因为围封提高凋落物产量,从而增加土壤可分解底物的量^[80]。但也有研究发现围封对土壤呼吸的影响呈现不同的效果,Chen 等^[82]发现围封 5 a 后,生长季土壤呼吸和年均土壤呼吸降低;Li 等^[83]研究发现,围封显著提高了草地生长季土壤呼吸速率,但对于非生长季土壤呼吸速率没有显著影响。通过整合分析发现放牧草地土壤呼吸比围封草地提高了 4.25%^[84]。

3.3 围封对土壤有机碳稳定性的影响

土壤有机碳的稳定性是决定土壤碳库成为汇/源的一个重要因素。土壤有机碳的形成和分解受到多种因素的共同作用,因此也存在多种机制来解释有机碳的稳定性。例如,有机碳被土壤生物利用的难易程度、SOC 与无机物质或其他有机物分子间的相互作用、团聚体的闭蓄作用、环境条件对有机碳分解的限制以及微生物群落的自身特性^[85]。土壤有机碳动态最终是微生物生长和活动的结果,其介导有机质分解以及转化可利用碳源为惰性有机碳的过程直接影响土壤碳库^[86]。例如,土壤微生物活动被认为是调控植物来源和微生物来源碳对 SOC 贡献的重要生物因子^[87]。土壤微生物对 SOC 循环分配过程的控制途径根据植物源碳的利用模式,分为微生物细胞外修饰和细胞内周转。细胞外修饰是指植物残体部分经微生物和胞外酶分解后,直接进入土壤形成颗粒有机碳(POC),微生物主要作为“分解者”角色。因此,POC 主要由部分分解的动植物残体及其产物组成,易受到干扰,周转速率较快,其持久性主要受生化抗逆性以及微生物和酶抑制作用的控制。细胞内周转是指土壤微生物通过摄入小分子有机化合物合成为自身生物量,通过死亡残体及其部分代谢产物等残留物质形成矿质结合体有机碳(MAOC),微生物作为“贡献者”角色^[13]。可见,MAOC 则是由微生物衍生化合物与土壤矿物质以化学键的形式相结合,不易被微生物获取,周转速率较慢,其持久性主要受土壤矿物的关联所控制^[88]。真菌和细菌的残体在草地 SOC 的积累、稳定和周转中发挥重要作用。通常相较于细菌,真菌产生的化合物稳定性更强,使其在 SOC 的稳定性中占主导地位。此外,在外生菌根真菌主导的生态系统中(例如草原),土壤 MAOM 含量相对较高^[13]。

放牧可以引起植物生物量分配的变化,或通过粪便返回土壤,从而影响 SOC 含量和稳定性^[9]。围封改变 SOC 的稳定性可能通过改变植物物种多样性和生物量、地上和地下生物量分配^[13]、SOC 与团聚体和矿物质的相互作用^[89],从而影响有机碳的形成、转换和分子结构^[90]。在内蒙古草地的一项研究中显示,有机碳库分布和稳定性受到放牧和地形的影响,主要是因为 POC 易受放牧和侵蚀土壤干扰^[91]。Leifeld 和 Fuhrer^[92]发现,放牧下的阿尔卑斯山草地土壤表层的 POC 含量略高于围封的牧场。但 Martinsen 等^[93]发现,与围封相比放牧导致高山草地 POC 有所下降。Damien 等^[94]通过 7 a 的处理显示 POC 含量受围封和放牧强度影响不显著。此外,放牧方式的改变也会影响 SOC 的稳定性。例如,适应性多围场放牧土壤的 MAOC 储量高于传统放牧^[95],最低的放牧强度呈现出最高的 MAOC^[96]。但 Altesor 等^[97]的研究显示,围封导致表层土壤 POC 含量降低,但放牧增加深层土壤 MAOC 含量。可见,在不同围封处理下这些因素(例如植物、土壤生物、矿物、水分、pH、氮磷和土壤温度)之间的相互依赖关系,以及它们在碳储存或损失中的重要性仍缺乏清晰的解释,难以将碳库的变化与围封成效联系起来。因此,未来应尝试从微生物功能群落、碳组分等的角度来理解碳留存的机理。

4 结论和展望

围封通过排除牲畜的啃食,能有效地恢复植被生物量,从而增加 SOC 含量,但围封效果也受到管理方式、气候因素、草地类型及土壤条件等的影响。草地生态系统的源汇关系主要取决于碳的输入与输出之间的平衡(图 1),围封导致碳循环过程的差异,进而影响草地中碳的吸收固定。目前的研究大多只针对输入、输出的某个环节,对于围封下土壤 SOC 在植物、微生物来源中的活性组分、惰性组分的研究相对较少,难以从机理上解释 SOC 在不同研究中围封效果的差异。在未来需在以下几个方面加强探索:

(1) 加强围封对 SOC 不同组分影响研究。以往对围封条件下 SOC 稳定性的研究较少,导致 SOC 对围封

的响应及机制还缺乏全面的认识。土壤有机碳以多种化学和物理形式存在,且这些组分通常具有不同的形成途径和稳定^[88],充分了解 SOC 各组分对围封的响应是十分重要的^[98],尤其是要关注植物来源碳和微生物来源碳对 SOC 恢复贡献的研究。

(2) 加强土壤微生物功能群与 SOC 输入和分解之间关系的研究。尽管微生物群落结构和功能对土壤碳的储存具有重要意义,然而由于土壤的“黑箱”特质(例如有机质组分和微生物群落的复杂性、空间异质性等),难以将土壤微生物过程与有机碳周转过程直接联系起来,使得围封条件下微生物在稳定土壤碳库中的作用和应用尚未引起足够的重视。加强围封对不同草地类型 SOC 的植被和微生物的作用机制和贡献差异性,有助于深入揭示微生物调控 SOC 对围封的响应规律和机制,也为过程模型预测提供更多参考依据。

(3) 加强对长期围封过程不同时间段地下碳库的变化的研究。土壤的变化是一个长期的过程,因此在试验中可以加强阶段性、长期性的观测,以更准确地明晰围封对土壤碳代谢的影响规律,有利于科学合理地评估草地适宜的围封年限,调整管控策略,进而推进退化草地有效恢复,促进草地生态系统可持续发展。

(4) 加强围封与全球气候变化因子的耦合研究。围封下不同草地类型,特别是青藏高原等高寒草地,对气候变化的响应及机制尚不明确。与温带草原相比,降水对高寒草原地上生物量的影响较小,高寒生态系统的 SOC 具有更高的温度脆弱性。然而,目前对高寒草原土壤有机碳动态的驱动气候因子的综合分析还很缺乏。

参考文献(References):

- [1] 吕林有, 赵艳, 陈曦, 刘慧林, 关冰, 罗祥志. 围封对退化沙质草地地下繁殖体库恢复的影响. 黑龙江畜牧兽医, 2019(13): 93-96, 102, 179-180.
- [2] Lal R, Kimble J M, Follett R F, Stewart B A. Soil Processes and the Carbon Cycle. Boca Raton: CRC Press, 2018.
- [3] Ni J. Carbon storage in grasslands of China. Journal of Arid Environments, 2002, 50(2): 205-218.
- [4] Su Y Z, Li Y L, Cui J Y, Zhao W Z. Influences of continuous grazing and livestock exclusion on soil properties in a degraded sandy grassland, Inner Mongolia, northern China. Catena, 2005, 59(3): 267-278.
- [5] Qiu L P, Wei X R, Zhang X C, Cheng J M. Ecosystem carbon and nitrogen accumulation after grazing exclusion in semiarid grassland. PLoS One, 2013, 8(1): e55433.
- [6] Meissner R A, Facelli J M. Effects of sheep exclusion on the soil seed bank and annual vegetation in chenopod shrublands of South Australia. Journal of Arid Environments, 1999, 42(2): 117-128.
- [7] Xiong D P, Shi P L, Zhang X Z, Zou C B. Effects of grazing exclusion on carbon sequestration and plant diversity in grasslands of China—a meta-analysis. Ecological Engineering, 2016, 94: 647-655.
- [8] 周凌波. 封育对蒿类荒漠草地有机碳储量的影响[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2022.
- [9] Wang L, Wang Y J, Sun D D, Wang J Y, Lee S J, Viscarra Rossel R A, Gan Y T. Soil carbon stocks in temperate grasslands reach equilibrium with grazing duration. Science of the Total Environment, 2024, 949: 175081.
- [10] Cui Y X, Dong Y Q, Liu H X, Sun Z J. Short-term grazing exclusions reduced soil organic carbon but not bacterial diversity in the sagebrush desert, Northwest China. Global Ecology and Conservation, 2021, 31: e01872.
- [11] Derner J D, Boutton T W, Briske D D. Grazing and ecosystem carbon storage in the North American great Plains. Plant and Soil, 2006, 280(1): 77-90.
- [12] Hu Z M, Li S G, Guo Q, Niu S L, He N P, Li L H, Yu G R. A synthesis of the effect of grazing exclusion on carbon dynamics in grasslands in China. Global Change Biology, 2016, 22(4): 1385-1393.
- [13] Bai Y F, Francesca Cotrufo M. Grassland soil carbon sequestration: Current understanding, challenges, and solutions. Science, 2022, 377(6606): 603-608.
- [14] 丁虎, 郎赞超, 刘丛强. 土壤碳淋溶流失研究进展. 地球与环境, 2016, 44(1): 139-146.
- [15] 杨元合, 石岳, 孙文娟, 常锦峰, 朱剑霄, 陈蕾伊, 王欣, 郭焱培, 张宏图, 于凌飞, 赵淑清, 徐亢, 朱江玲, 沈海花, 王媛媛, 彭云峰, 赵霞, 王襄平, 胡会峰, 陈世苹, 黄玫, 温学发, 王少鹏, 朱彪, 牛书丽, 唐志尧, 刘玲莉, 方精云. 中国及全球陆地生态系统碳源汇特征及其对碳中和的贡献. 中国科学: 生命科学, 2022, 52(4): 534-574.
- [16] Su Y, Dong K H, Wang C H, Liu X J. Grazing promoted plant litter decomposition and nutrient release: a meta-analysis. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2022, 337: 108051.
- [17] Yang Z N, Zhu Q A, Zhan W, Xu Y Y, Zhu E X, Gao Y H, Li S Q, Zheng Q Y, Zhu D, He Y X, Peng C H, Chen H. The linkage between vegetation and soil nutrients and their variation under different grazing intensities in an alpine meadow on the eastern Qinghai-Tibetan Plateau.

- Ecological Engineering, 2018, 110: 128-136.
- [18] Hobbs N T. Modification of ecosystems by ungulates. *The Journal of Wildlife Management*, 1996, 60(4): 695.
- [19] Luo C Y, Xu G P, Chao Z G, Wang S P, Lin X W, Hu Y G, Zhang Z H, Duan J C, Chang X F, Su A L, Li Y N, Zhao X Q, Du M Y, Tang Y H, Kimball B. Effect of warming and grazing on litter mass loss and temperature sensitivity of litter and dung mass loss on the Tibetan Plateau. *Global Change Biology*, 2010, 16(5): 1606-1617.
- [20] Peng C J, Shi L N, He Y C, Yao Z Y, Lin Z R, Hu M A, Yin N, Xu H K, Li Y K, Zhou H K, Lu X M, Liu K S, Shao X Q. Climate factors regulate the depth dependency of soil organic carbon under grazing exclusion in Chinese grasslands: a meta-analysis. *Land Degradation & Development*, 2023, 34(16): 4924-4934.
- [21] 王玉红, 马天娥, 魏艳春, 魏孝荣, 邵明安, 程积民, 张兴昌. 黄土高原半干旱草地封育后土壤碳氮矿化特征. *生态学报*, 2017, 37(2): 378-386.
- [22] 周瑶, 马红彬, 贾希洋, 张蕊, 宿婷婷, 周静静, 吴兴旺. 不同恢复措施对宁夏典型草原土壤碳氮储量的影响. *草业学报*, 2017, 26(12): 236-242.
- [23] 王颖, 崔向新, 金娟, 史万林, 张琪, 孙青. 围栏封育对典型草原土壤特征的影响. *北方园艺*, 2015(10): 155-158.
- [24] Wu G L, Liu Z H, Zhang L, Chen J M, Hu T M. Long-term fencing improved soil properties and soil organic carbon storage in an alpine swamp meadow of western China. *Plant and Soil*, 2010, 332(1): 331-337.
- [25] Li J P, Ma H B, Xie Y Z, Wang K B, Qiu K Y. Deep soil C and N pools in long-term fenced and overgrazed temperate grasslands in northwest China. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 16088.
- [26] 谢响, 范燕敏, 武红旗, 管光玉, 柴大攀, 何晶. 山地荒漠草地封育对土壤质量的影响. *新疆农业科学*, 2014, 51(9): 1699-1705.
- [27] Cui X Y, Wang Y F, Niu H S, Wu J, Wang S P, Schnug E, Rogasik J, Fleckenstein J, Tang Y H. Effect of long-term grazing on soil organic carbon content in semiarid steppes in Inner Mongolia. *Ecological Research*, 2005, 20(5): 519-527.
- [28] Liu X, Sheng H Y, Wang Z Q, Ma Z W, Huang X T, Li L H. Does grazing exclusion improve soil carbon and nitrogen stocks in alpine grasslands on the Qinghai-Tibetan Plateau? A meta-analysis. *Sustainability*, 2020, 12(3): 977.
- [29] Shi S L. The response of carbon reserves of plants and soils to different grassland managements on alpine meadow of three headwater source regions. *Grassland and Turf*, 2012
- [30] Shi X M, Li X G, Li C T, Zhao Y, Shang Z H, Ma Q F. Grazing exclusion decreases soil organic C storage at an alpine grassland of the Qinghai-Tibetan Plateau. *Ecological Engineering*, 2013, 57: 183-187.
- [31] Wang X Y, McConkey B G, VandenBygaart A J, Fan J L, Iwaasa A, Schellenberg M. Grazing improves C and N cycling in the northern great Plains: a meta-analysis. *Scientific Reports*, 2016, 6: 33190.
- [32] 刘金龙, 王国会, 许冬梅, 许爱云, 于双. 不同封育年限荒漠草原土壤有机碳矿化对枯落物添加的响应. *草业学报*, 2019, 28(4): 47-57.
- [33] 董乙强, 孙宗玖, 安沙舟. 放牧和禁牧影响草地物种多样性和有机碳库的途径. *中国草地学报*, 2018, 40(1): 105-114.
- [34] Zhou Z Y, Li F R, Chen S K, Zhang H R, Li G D. Dynamics of vegetation and soil carbon and nitrogen accumulation over 26 years under controlled grazing in a desert shrubland. *Plant and Soil*, 2011, 341(1): 257-268.
- [35] Su J S, Xu F W. Root, not aboveground litter, controls soil carbon storage under grazing exclusion across grasslands worldwide. *Land Degradation & Development*, 2021, 32(11): 3326-3337.
- [36] Du C J, Jing J, Shen Y, Liu H X, Gao Y H. Short-term grazing exclusion improved topsoil conditions and plant characteristics in degraded alpine grasslands. *Ecological Indicators*, 2020, 108: 105680.
- [37] Cheng J M, Jing G H, Wei L, Jing Z B. Long-term grazing exclusion effects on vegetation characteristics, soil properties and bacterial communities in the semi-arid grasslands of China. *Ecological Engineering*, 2016, 97: 170-178.
- [38] Gao Y H, Zeng X Y, Schumann M, Chen H. Effectiveness of exclosures on restoration of degraded alpine meadow in the eastern Tibetan Plateau. *Arid Land Research and Management*, 2011, 25(2): 164-175.
- [39] 邹婧汝, 赵新全. 围栏禁牧与放牧对草地生态系统固碳能力的影响. *草业科学*, 2015, 32(11): 1748-1756.
- [40] Wu L, He N, Wang Y, Han X. Storage and dynamics of carbon and nitrogen in soil after grazing exclusion in *Leymus chinensis* grasslands of northern China. *Journal of Environmental Quality*, 2008, 37(2): 663-668.
- [41] Liu T Y, Sun J, Chen Y C, Zhou T C, Shang H, Wang Y X, Wu J X, Mi Q, Zhang J T, He W, Sun L. Responses of carbon dynamics to grazing exclusion in natural alpine grassland ecosystems on the QingZang Plateau. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 1042953.
- [42] Karami P, Bandak I, Gorgin Karaji M. Comparing the effects of continuous grazing and long term enclosure on floristic composition and plant diversity in rangeland ecosystems of Saral, Iran. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2019, 16(12): 7769-7776.
- [43] Sun J, Liu M, Fu B J, Kemp D, Zhao W W, Liu G H, Han G D, Wilkes A, Lu X Y, Chen Y C, Cheng G W, Zhou T C, Hou G, Zhan T Y, Peng F, Shang H, Xu M, Shi P L, He Y T, Li M, Wang J N, Tsunekawa A, Zhou H K, Liu Y, Li Y R, Liu S L. Reconsidering the efficiency of grazing exclusion using fences on the Tibetan Plateau. *Science Bulletin*, 2020, 65(16): 1405-1414.
- [44] Wang F, He Y T, Fu G, Niu B, Zhang H R, Li M, Wang Z P, Wang X T, Zhang X Z. Effects of enclosure on plant and soil nutrients in different types of alpine grassland. *Journal of Resources and Ecology*, 2020, 11(3): 290.

- [45] 陈思思,王森,张楚,辛晓平,朱晓昱,郭雷风,闫瑞瑞.不同放牧强度对呼伦贝尔羊草甸草原土壤活性有机碳的影响.中国土壤与肥料,2023(11):16-24.
- [46] 马红彬,余治家.放牧草地植物补偿效应的研究进展.农业科学研究,2006,27(1):63-67.
- [47] 张扬建,朱军涛,沈若楠,王荔.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.
- [48] 张光茹,李文清,张法伟,崔骁勇,贺慧丹,杨永胜,祝景彬,王春雨,罗方林,李英年.退化高寒草甸关键生态属性对多途径恢复措施的响应特征.生态学报,2020,40(18):6293-6303.
- [49] 马玉寿,张自和,董全民,施建军,王彦龙,盛丽.恢复生态学在“黑土型”退化草地植被改建中的应用.甘肃农业大学学报,2007,42(2):91-97.
- [50] Deng L, Shangguan Z P, Wu G L, Chang X F. Effects of grazing exclusion on carbon sequestration in China's grassland. Earth-Science Reviews, 2017, 173: 84-95.
- [51] Xia J Y, Niu S L, Wan S Q. Response of ecosystem carbon exchange to warming and nitrogen addition during two hydrologically contrasting growing seasons in a temperate steppe. Global Change Biology, 2009, 15(6): 1544-1556.
- [52] Wiesmeier M, Urbanski L, Hobbey E, Lang B, von Lützow M, Marin-Spiotta E, van Wesemael B, Rabot E, Ließ M, Garcia-Franco N, Wollschläger U, Vogel H J, Kögel-Knabner I. Soil organic carbon storage as a key function of soils-A review of drivers and indicators at various scales. Geoderma, 2019, 333: 149-162.
- [53] 干友民,李志丹,泽柏,费道平,罗光荣,王钦,王小利.川西北亚高山草地不同退化梯度草地土壤养分变化.草业学报,2005,14(2):38-42.
- [54] Zhu G Y, Deng L, Zhang X B, Shangguan Z P. Effects of grazing exclusion on plant community and soil physicochemical properties in a desert steppe on the Loess Plateau, China. Ecological Engineering, 2016, 90: 372-381.
- [55] 黄国柱,席亚丽,赵传燕,刘瑞雪,杨建红,李娜,李伟斌.围封对祁连山亚高山草地群落结构与生物量的影响.兰州大学学报:自然科学版,2020,56(6):718-723.
- [56] Zeng W J, Wang Z D, Chen X Y, Yao X D, Ma Z Q, Wang W. Nitrogen deficiency accelerates soil organic carbon decomposition in temperate degraded grasslands. Science of the Total Environment, 2023, 881: 163424.
- [57] van Groenigen J W, van Kessel C, Hungate B A, Oenema O, Powlson D S, van Groenigen K J. Sequestering soil organic carbon: a nitrogen dilemma. Environmental Science & Technology, 2017, 51(9): 4738-4739.
- [58] 李佳秀,张青松,吴勇,杜子银.围封对草地植被生长和土壤特性的影响研究进展.中国草地学报,2023,45(5):137-150.
- [59] Liu S S, Yang Y H, Shen H H, Hu H F, Zhao X, Li H, Liu T Y, Fang J Y. No significant changes in topsoil carbon in the grasslands of northern China between the 1980s and 2000s. Science of the Total Environment, 2018, 624: 1478-1487.
- [60] 李早霞,宝音陶格涛,王建英.退化草原围封后地上生物量干鲜比值的比较.中国草地学报,2011,33(2):57-62.
- [61] Kleinebecker T, Weber H, Hölzel N. Effects of grazing on seasonal variation of aboveground biomass quality in calcareous grasslands. Plant Ecology, 2011, 212(9): 1563-1576.
- [62] 鱼小军,景媛媛,段春华,徐长林,杨海磊,罗金龙,安玉峰,安晓东.围栏与不同放牧强度对东祁连山高寒草甸植被和土壤的影响.干旱地区农业研究,2015,33(1):252-257,277.
- [63] 崔雨萱,孙宗玖,刘慧霞,董乙强.短期封育对蒿类荒漠草地现存生物量及植物群落多样性的影响.草业学报,2020,29(12):17-26.
- [64] 闫宝龙,王忠武,屈志强,王静,韩国栋.围封对内蒙古典型草原与荒漠草原植被-土壤系统碳密度的影响.植物生态学报,2018,42(3):327-336.
- [65] 胡向敏,侯向阳,陈海军,丁勇,运向军,武自念.不同放牧制度下短花针茅荒漠草原根系碳储量动态.中国草地学报,2014,36(4):13-17.
- [66] 苏纪帅,赵洁,井光花,魏琳,刘建,程积民,张金娥.半干旱草地长期封育进程中针茅植物根系格局变化特征.生态学报,2017,37(19):6571-6580.
- [67] 张倩,王志成,蒲强胜,侯齐琪,蔡志远,杨晶,姚宝辉,王缠,孙小妹,苏军虎.不同管理模式对甘南高寒草甸碳储量的影响.草地学报,2020,28(2):529-537.
- [68] Zhu G Q, Yuan C X, Gong H D, Peng Y L, Huang C J, Wu C S, Duan H C. Effects of short-term grazing prohibition on soil physical and chemical properties of meadows in Southwest China. PeerJ, 2021, 9: e11598.
- [69] 徐海峰.不同利用方式对龙里草地有机碳含量的影响.南方农业,2017,11(28):80-82.
- [70] 鄢燕,马星星,鲁旭阳.人为干扰对藏北高寒草原群落生物量及其碳氮磷含量特征的影响.山地学报,2014,32(4):460-466.
- [71] 聂莹莹,辛晓平,徐丽君,杨桂霞.封育措施对呼伦贝尔草甸草原区草地生产力的影响.中国农业资源与区划,2022,43(8):74-82.
- [72] 郑伟,于辉.围栏封育对伊犁绢蒿种群构件生长和生物量分配的影响.草地学报,2013,21(1):42-49.
- [73] 马红彬,谢应忠.不同放牧强度下荒漠草原植物的补偿性生长.中国农业科学,2008,41(11):3645-3650.
- [74] Niu D, Hall S J, Fu H, Kang J, Qin Y, Elser J J. Grazing exclusion alters ecosystem carbon pools in Alxa desert steppe. New Zealand Journal of Agricultural Research, 2011, 54(3): 127-142.
- [75] 沈振西,周楠,付刚,张宪洲.围封和放牧条件下藏北高原不同海拔高度高寒草甸植物群落碳氮含量的比较.生态环境学报,2016,25

(3): 372-376.

- [76] Shen Y Y, Fang Y Y, Chen H, Ma Z L, Huang C P, Wu X F, Chang S X, Tavakkoli E, Cai Y J. New insights into the relationships between livestock grazing behaviors and soil organic carbon stock in an alpine grassland. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2023, 355: 108602.
- [77] 董治宝, 陈渭南, 董光荣, 陈广庭, 李振山, 杨佐涛. 植被对风沙土风蚀作用的影响. *环境科学学报*, 1996, 16(4): 437-443.
- [78] Li S C, Xing T T, Sa R L, Zhang Y J, Chen H Y, Jin K, Shao Q Q, Tang S M, Wang C J. Effects of grazing on soil respiration in global grassland ecosystems. *Soil and Tillage Research*, 2024, 238: 106033.
- [79] 李文. 围封对祁连山东段高寒灌草交错系统碳交换的影响[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2020.
- [80] 孙殿超, 李玉霖, 赵学勇, 毛伟, 岳祥飞. 放牧及围封对科尔沁沙质草地土壤呼吸的影响. *中国沙漠*, 2015, 35(6): 1620-1627.
- [81] 纪磊. 放牧和割草对内蒙古羊草草原土壤呼吸及土壤微生物群落结构的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2021.
- [82] Chen J, Zhou X H, Wang J F, Hruska T, Shi W Y, Cao J J, Zhang B C, Xu G X, Chen Y Z, Luo Y Q. Grazing exclusion reduced soil respiration but increased its temperature sensitivity in a Meadow Grassland on the Tibetan Plateau. *Ecology and Evolution*, 2016, 6(3): 675-687.
- [83] Li W, Wang J L, Zhang X J, Shi S L, Cao W X. Effect of degradation and rebuilding of artificial grasslands on soil respiration and carbon and nitrogen pools on an alpine meadow of the Qinghai-Tibetan Plateau. *Ecological Engineering*, 2018, 111: 134-142.
- [84] Zhou G Y, Zhou X H, He Y H, Shao J J, Hu Z H, Liu R Q, Zhou H M, Hosseinibai S. Grazing intensity significantly affects belowground carbon and nitrogen cycling in grassland ecosystems: a meta-analysis. *Global Change Biology*, 2017, 23(3): 1167-1179.
- [85] Lehmann J, Kleber M. The contentious nature of soil organic matter. *Nature*, 2015, 528(7580): 60-68.
- [86] Zak D R, Pellitier P T, Argiroff W, Castillo B, James T Y, Nave L E, Averill C, Beidler K V, Bhatnagar J, Blesh J, Classen A T, Craig M, Fernandez C W, Gundersen P, Johansen R, Koide R T, Lilleskov E A, Lindahl B D, Nadelhoffer K J, Phillips R P, Tunlid A. Exploring the role of ectomycorrhizal fungi in soil carbon dynamics. *New Phytologist*, 2019, 223(1): 33-39.
- [87] Angst G, Mueller K E, Nierop K G J, Simpson M J. Plant- or microbial-derived? A review on the molecular composition of stabilized soil organic matter. *Soil Biology and Biochemistry*, 2021, 156: 108189.
- [88] Cotrufo M F, Ranalli M G, Haddix M L, Six J, Lugato E. Soil carbon storage informed by particulate and mineral-associated organic matter. *Nature Geoscience*, 2019, 12: 989-994.
- [89] Wang X, Yoo K, Wackett A A, Gutknecht J, Amundson R, Heimsath A. Soil organic carbon and mineral interactions on climatically different hillslopes. *Geoderma*, 2018, 322: 71-80.
- [90] Semmartin M, Ghera C M. Intraspecific changes in plant morphology, associated with grazing, and effects on litter quality, carbon and nutrient dynamics during decomposition. *Austral Ecology*, 2006, 31(1): 99-105.
- [91] Xu W H, Wan S Q. Water- and plant-mediated responses of soil respiration to topography, fire, and nitrogen fertilization in a semiarid grassland in northern China. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40(3): 679-687.
- [92] Leifeld J, Fuhrer J. Long-term management effects on soil organic matter in two cold, high-elevation grasslands: clues from fractionation and radiocarbon dating. *European Journal of Soil Science*, 2009, 60(2): 230-239.
- [93] Martinsen V, Mulder J, Austrheim G, Mysterud A. Carbon storage in low-alpine grassland soils: effects of different grazing intensities of sheep. *European Journal of Soil Science*, 2011, 62(6): 822-833.
- [94] Damien H, Nathalie V, Frédérique L, Gael A, Julien P, Catherine P C, Isabelle B, Pascal C. How does soil particulate organic carbon respond to grazing intensity in permanent grasslands? *Plant and Soil*, 2015, 394(1): 239-255.
- [95] Mosier S, Apfelbaum S, Byck P, Calderon F, Teague R, Thompson R, Cotrufo M F. Adaptive multi-paddock grazing enhances soil carbon and nitrogen stocks and stabilization through mineral association in southeastern U.S. grazing lands. *Journal of Environmental Management*, 2021, 288: 112409.
- [96] Dubeux J C B, Sollenberger L E, Comerford N B, Scholberg J M, Ruggieri A C, Vendramini J M B, Interrante S M, Portier K M. Management intensity affects density fractions of soil organic matter from grazed bahiagrass swards. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(9): 2705-2711.
- [97] Altisor A, Piñeiro G, Lezama F, Jackson R B, Sarasola M, Paruelo J M. Ecosystem changes associated with grazing in subhumid South American grasslands. *Journal of Vegetation Science*, 2006, 17(3): 323.
- [98] Lavallee J M, Soong J L, Francesca Cotrufo M. Conceptualizing soil organic matter into particulate and mineral-associated forms to address global change in the 21st century. *Global Change Biology*, 2020, 26(1): 261-273.