

DOI: 10. 11829/j. issn. 1001-0629. 2015-0096

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[J]. 草业科学, 2015, 32(11): 1748-1756.

ZOU Jing-ru, ZHAO Xin-quan. Effects of livestock enclosure and grazing on carbon sequestration in grassland ecosystem[J]. Pratacultural Science, 2015, 32(11): 1748-1756.

## 围栏禁牧与放牧对草地生态系统 固碳能力的影响

邹婧汝<sup>1, 2</sup>, 赵新全<sup>1</sup>

(1. 中国科学院西北高原生物研究所, 青海 西宁 810001; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 草地生态系统固碳能力对全球碳贮量的大小有重要影响。放牧作为草地最广泛的利用方式之一影响着草地的碳贮量, 过度和不合理的放牧方式造成草地退化, 引起草地碳的损失。围栏禁牧与放牧对草地生态系统固碳能力的影响主要包括对植被生产力和土壤碳贮量的影响, 本文对有关的报道进行了综述。结果显示, 由于受植被凋落物、群落结构和气候等多因素的影响, 围栏禁牧对草地植被生产力有正面或负面的效应; 放牧对植被生产力的影响也没有一致的结果, 此外, 放牧对植被生产力的影响还与放牧的强度有关。围栏禁牧与放牧可以通过多种途径对草地土壤碳贮量产生正面或负面的影响。总之, 围栏禁牧与放牧对草地生态系统固碳能力的影响是复杂的, 需要对草地碳贮量进行估算, 并对相关的机制进行研究, 这样才能在草地管理方面做出合理的决策。

**关键词:** 植物生产力; 土壤碳贮量; 碳循环

中图分类号: S812. 29 文献标识码: A 文章编号: 1001-0629(2015)11-1748-09\*

### Effects of livestock enclosure and grazing on carbon sequestration in grassland ecosystem

ZOU Jing-ru<sup>1, 2</sup>, ZHAO Xin-quan<sup>1</sup>

(1. Northwest Plateau Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810001, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Carbon sequestration in the grassland ecosystems has important effects on the global carbon stocks. Grazing as one of the most widely land usage methods affects carbon sequestration in the grassland. However, unreasonable and over-grazing can lead to grassland degradation which has negative effects on carbon stocks in the grassland. Livestock enclosure and grazing affect carbon sequestration in the grassland by altering the vegetation productions and soil carbon stocks. This review indicated that livestock enclosure and grazing had positive or negative effects on the vegetation production which were affected by some other factors and their interaction, such as aboveground litter, vegetation structure, climate conditions, and so on. The effects of grazing on vegetation production were also related to the grazing intensity. Livestock enclosure and grazing had positive or negative effects on soil carbon stocks by affecting many processes in the soil carbon cycling. In summary, the effects of livestock enclosure and grazing on carbon sequestration in grassland were complicated. In order to make the scientific decision on grassland managements, the estimations of carbon stocks and researches on the related mechanisms are necessary in the further study.

\* 收稿日期: 2015-02-11 接受日期: 2015-05-05

基金项目: 中国科学院战略先导专项(XDA05070000)

第一作者: 邹婧汝(1986-), 女, 河南光山人, 在读博士生, 研究方向为草地碳循环。E-mail: zoujingru803@163.com

通信作者: 赵新全(1959-), 男, 陕西扶风人, 研究员, 博士, 研究方向为草地生态学。E-mail: xqzhao@nwipb.cas.cn

**Key words:** vegetation production; soil carbon stocks; carbon cycling

**Corresponding author:** ZHAO Xin-quan E-mail: xqzhao@nwipb.cas.cn

全球草地面积约  $5.0 \times 10^9 \text{ hm}^2$ , 占世界陆地面积的 33.5%<sup>[1]</sup>。我国草地总面积达  $3.9 \times 10^8 \text{ hm}^2$ , 占世界草地面积的 13%, 其中可利用面积为  $3.1 \times 10^8 \text{ hm}^2$ , 是我国陆地上面积最大的生态系统类型<sup>[2-3]</sup>。草地是畜牧业赖以生存和发展的重要物质基础, 草地为人类提供净初级物质生产, 同时草地上的植物、家畜、野生动物和微生物在同一环境中相互作用, 影响着自然界能量与物质(养分、水、分解产物等)的循环, 在生态系统功能的调节方面发挥着重要作用。

工业革命以来, 由于人类活动和化石燃料燃烧引起的含碳温室气体  $\text{CO}_2$  和  $\text{CH}_4$  等的浓度以前所未有的速度增加, 由此引起的区域生态系统碳平衡的变化和全球变暖等一系列严重的环境问题, 为人类自身的生存和社会经济的持续发展带来了巨大的威胁<sup>[4]</sup>。全球排放的  $\text{CO}_2$  中有相当大一部分被草地固定, 草地碳循环在全球碳循环过程中起着重要作用<sup>[5]</sup>。人为活动的干扰对草地碳库影响颇大, 是影响全球碳动态的重要驱动力量。如何通过合理的利用方式维持和提高草地的固碳能力已引起人们的高度关注。

放牧是对草原影响最为广泛的土地利用方式, 其中过度放牧是造成草地退化的主要因素之一, 也是造成草地碳储量变化的重要因素。Wang 等<sup>[6]</sup>估计中国北方草地从 20 世纪 60 年代到 90 年代在中度和重度退化草地共造成了接近 1.24 Pg 的净碳损失。围栏封育是我国退化草地植被恢复的主要措施, 若在重度退化草地全面实施围栏封育措施, 固碳潜力每年达 12.01 Tg C<sup>[7]</sup>。但是, 围栏禁牧与放牧对草地固碳能力的影响是有争议的, 处于不同状态、不同类型和不同放牧历史草地的固碳能力对围栏禁牧的响应是多样的。围栏禁牧与放牧通过影响植被生产力和土壤的碳贮量影响草地的固碳能力, 现将相关的文献做如下综述, 目的是为了探讨不同环境和条件下围栏禁牧与放牧对草地固碳能力的影响和影响的机制, 并对未来的研究方向进行展望。

## 1 围栏禁牧与放牧下草地生态系统的植被生产力

### 1.1 围栏禁牧与放牧对草地生态系统植被生产力的影响

围栏禁牧与放牧下草地植被生产力的差异受草地类型、气候因素和草地放牧历史等因素的影响, 表现在如下几个方面:

围栏禁牧下植被的生产力高于放牧下植被的生产力。在退化的草地生态系统, 放牧不利于草地植被生产力的维持, 而围栏禁牧解除了放牧家畜对草地植被的采食损伤, 这种保护作用有利于草地植被生产力的增加。我国黄土高原典型草地的 5 种退化植被群落在围封 20 年后, 地上生物量和地下生物量都有显著的增加<sup>[8]</sup>。内蒙古科尔沁沙质退化草地的围封试验结果显示, 随着围封年限的延长(7 年、12 年和 25 年) 植被地上生物量和地下生物量都有增加的趋势<sup>[9]</sup>。与放牧相比, 围栏禁牧增加了退化高寒草甸(*Kobresia*) 草甸植被地上部分生产力<sup>[10]</sup>。在其他未退化的草地生态系统, 围栏禁牧下植被生产力也会高于放牧下植被生产力, 在潘帕斯草原, 7 年的围封禁牧增加了地上净初级生产力, 而连续放牧样地的地上净初级生产力较低<sup>[11]</sup>。

虽然很多研究报道, 围栏禁牧下植被的生产力高于放牧下植被的生产力, 但是也有很多研究发现, 在一些草地生态系统特别是有很长放牧时间的草地生态系统, 放牧有利于草地植被生产力的维持与增加, 而围栏禁牧对草地植被生产力有负面作用。在美国的高草普列利草地, 无放牧或其他干扰的草地初级生产力通常较低<sup>[12]</sup>; 在乌拉圭草原, 围封后草地的地上净初级生产力低于中等放牧强度下的草地<sup>[13]</sup>; 在青藏高原的高寒草甸, 适度放牧利用提高了草地的地上净初级生产力, 增加的速率为  $20 \sim 40 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ , 而围栏禁牧产生的凋落物堆积不利于地上净初级生产力的增加<sup>[14]</sup>。

放牧对草地植被生产力有补偿效应<sup>[15]</sup>, 研究发现在高寒灌丛草甸, 与重度放牧相比, 围封增加高寒

灌丛草甸的地上植被生物量,但是地上生物量在轻度放牧处理下最高<sup>[16]</sup>。此外,也有报道发现,放牧的补偿效应与采食时植物的生长与发育时期有关<sup>[17-18]</sup>。在国内,牧区的管理在20世纪50年代就开始提倡根据植物的发育阶段进行适时放牧<sup>[19]</sup>,适时放牧对于牧场的再生草及草原的利用有极大的影响。

放牧对草地植被生产力的补偿效应还表现在植被地上与地下生产力的分配方面。研究认为,放牧对植物地上部分的损伤增加植物有机物质在植物地下部分的分配,从而增加植物地下生产力<sup>[20]</sup>。尽管如此,放牧对植物地下生产力有正面或负面的影响,或者没有影响。不合理的放牧方式和过度的放牧会造成草地退化和植被生产力的降低<sup>[21]</sup>。

## 1.2 围栏禁牧与放牧影响草地生态系统植被生产力的机制

围栏禁牧主要通过降低放牧家畜对植被的采食作用以及改善草地土壤特征增加草地生态系统的植被生产力,但是围栏禁牧对草地生态系统的植被生产力也会产生负面作用,而放牧可以通过调节草地生态系统各因素维持和增加草地的植被生产力。围栏禁牧与放牧影响草地生态系统植被生产力的机制主要包括以下几个方面:

围栏禁牧与放牧下植被地上凋落物对植被的生产力有重要的影响。植物地上部分的凋落物可以改变生态系统的很多功能特性,是影响植被地上生产力的一个重要因素。地上凋落物可以通过减少植被顶层的透光率降低植物群落的光合效率,这种对光的限制作用降低植物生长季有机物的积累,更重要的是会降低植物早期的萌发率<sup>[22]</sup>。地上凋落物还可以影响草地生态系统的特性,特别是土壤与空气之间的养分和水分循环等特性,对植被的生产力产生负面效应<sup>[22-23]</sup>。在植被地上生产力较低特别是退化的草地生态系统,围栏禁牧下植被的地上凋落物较少,对植被生产力的负面作用较弱,放牧下家畜对植被地上部分的采食降低植被地上的生产力,而家畜对地上凋落物的采食对植被生产力并不会产生较大的影响,所以围栏禁牧有利于草地植被生产力的维持。在植被

生产力较高的草地生态系统,围栏禁牧下会积累较多的地上凋落物,不利于植被的生长和生产力的增加,而放牧下家畜对植物地上部分的采食虽然会对植被地上生产力产生负面作用,但是家畜对植被地上凋落物质的采食有利于草地植被的生长和生产力的增加。

围栏禁牧与放牧下草地生态系统植被的生产力还受植被的群落结构变化的影响。植被群落结构的变化包括植被多样性和植物物种组成的变化。很多研究显示,草地植被多样性与生产力呈正相关,植被生产力会由于多样性的增加而增加<sup>[24-25]</sup>。高的植被多样性有利于植被对养分等的吸收,不同植物间生态位的互补有利于植被对资源的充分利用<sup>[25]</sup>。也有一些研究认为,植被多样性对生产力没有影响或产生正面或负面的影响<sup>[26]</sup>。此外,草地植被的物种组成对植被生产力也会产生重要的影响。Rusch和Oesterheld<sup>[11]</sup>在潘帕斯草原的研究结果显示,草地植被的生产力由植物物种决定,而植被的多样性对草地生产力的影响作用较弱。在放牧下,家畜可以通过采食行为直接改变植被群落结构,放牧可以降低适口性植物的丰富度,增加适口性较低和放牧耐受的植物,相反,围栏禁牧会有利于适口性植物的生存和生长<sup>[27-28]</sup>。此外,围栏禁牧下地上凋落物质的积累也会导致草地植被群落结构的改变。内蒙古羊草(*Leymus chinensis*)草原和大针茅(*Stipa grandis*)草原在围封30年的时间内群落结构的变化趋势不同,这种不同与地上凋落物积累引起的局部环境条件的变化有关<sup>[29]</sup>。一些相关的研究结果显示,放牧有利于草地生态系统的植被多样性的维持,但是这种正面作用与地域和历史因素有关<sup>[30-35]</sup>,在一定的条件下,围栏禁牧有利于植被多样性的维持。另外,也有研究认为,围栏禁牧与放牧下植被物种组成的变化是影响植被生产力的主要因素。围栏禁牧后,草地由以暖季植物占优势转变为以冷季植物占优势,放牧组植被生产力低于围栏禁牧组模拟放牧后植被的生产力,这种变化可能是植物物种组成改变的结果<sup>[13]</sup>。

除了以上的因素外,草地植被生产力对围栏禁牧与放牧的响应还受降水、温度等环境因素的影响。

在有关放牧对草地植被生产力影响的研究中,Painter和Belsky<sup>[36]</sup>认为,放牧对植被生产力有负面作用,不提倡草地的放牧利用。而Dyer等<sup>[37]</sup>的观点表明,在一定的放牧强度下草地植被的生产力高于不放牧利用的草地,随着放牧强度的增加,植被生产力逐渐增加,当增加到最大值时,草地植被的生产力会随着放牧强度的增加而逐渐降低,但是这种变化趋势受降水等环境因素的影响,需要在大的时间和空间尺度上进行验证<sup>[38-39]</sup>。此外,青藏高原高寒草地的研究显示,围栏禁牧下的植被生产力高于放牧下草地的植被生产力,两者之间差值随着降水与温度的变化而呈指数增加和直线下降的趋势<sup>[40]</sup>。所以,在评估围栏禁牧与放牧对草地植被生产力的影响方面,应考虑降水、温度等环境因素的作用。

## 2 围栏禁牧与放牧下草地生态系统的土壤碳贮量

大气中的碳以CO<sub>2</sub>的形式被植物光合固定后并不是一直停滞在植物体内,而是会通过根际分泌物、细根的周转、植物地上和根部凋落物的分解等过程转移到土壤中。草地生态系统碳贮量的约90%贮存在土壤碳库中<sup>[41]</sup>,所以,草地生态系统的固碳能力主要取决于土壤碳贮量的大小。

### 2.1 围栏禁牧与放牧对草地生态系统土壤碳贮量的影响

围栏禁牧减少了草地地上植被的损失量,从而会降低碳素的损失,有利于土壤碳贮量的积累。有研究发现,退化的干旱与半干旱草地在围栏禁牧后土壤的碳贮量高于放牧下土壤的碳贮量<sup>[9,42]</sup>。此外,研究结果显示,在其他未退化草地生态系统中,围栏禁牧对土壤碳贮量产生了正面效应<sup>[43]</sup>。也有研究结果报道,围栏禁牧对草地土壤碳贮量有负面影响,而放牧在一定因素的影响下有利于土壤碳贮量的增加<sup>[43-44]</sup>。Mcsherry和Ritchie<sup>[45]</sup>的研究显示,不同草地类型土壤碳素对放牧的响应不同,主要受降水、土壤质地、植被类型、放牧强度等多个因素的交互影响,在选择草地的管理方式时,应充分考虑这些因素以使草地达到较高的固碳能力。

草地生态系统的土壤碳贮量受植被生产力和土壤中碳循环过程变化的影响,在其他因素的影响下,

围栏禁牧与放牧下植被生产力和土壤碳循环过程的改变会影响土壤的碳贮量。

### 2.2 围栏禁牧与放牧影响草地生态系统土壤碳贮量的机制

2.2.1 围栏禁牧与放牧对草地土壤碳贮量的影响与植被生产力有关,草地植被生产力的增加会增加碳素在土壤中的积累。退化的草地在围栏禁牧后植被的生产力会高于放牧下草地植被的生产力,同时土壤的碳贮量也得到了恢复和增长<sup>[9,42]</sup>。放牧下植被生产力的增加也可能是导致土壤有机碳增加的主要原因<sup>[46]</sup>。

草地的土壤碳贮量可能主要受植被地下生产力的影响。在一些受放牧活动影响的植被地上生产力下降的草地中也会出现土壤碳贮量增加的现象,这可能与植被地下生产力的增加或者地下与地上生产力比值的增加有关。Schuman等<sup>[47]</sup>的研究结果显示,与轻度和重度放牧相比,围栏禁牧下草地的地上生物量和地下生物量都增加了,但是土壤碳贮量却降低了,这可能跟地下生物量与地上生物量的比例有关,在重牧组,地下生物量占总植被生物量的比例增加了,这种变化有利于碳从根部向土壤的转移,增加土壤的碳贮量。

2.2.2 围栏禁牧与放牧对草地土壤碳贮量的影响与植被的群落结构有关,围栏禁牧与放牧下草地的植被群落结构会影响草地的生产力,从而会间接影响土壤的碳贮量。在Schuman等<sup>[47]</sup>的研究中,重度放牧增加了根系发达的格兰马草(*Bouteloua gracilis*) 在群落中的比例,这种物种组成的变化引起的地下与地上生物量分配的改变可能是影响土壤碳贮量的主要因素<sup>[44]</sup>。Fornara和Tilman<sup>[48]</sup>认为,较高的土壤碳贮量与较高的植被地下生物量、不同功能植物间的互补作用等因素相关。另外,de Deyn等<sup>[49]</sup>的研究认为,草地植被的多样性特别是植物群落中的豆科(Leguminosae)植物对土壤碳贮量会产生重要的影响,增加土壤的碳贮量。Zou等<sup>[50]</sup>利用稳定同位素的方法研究矮嵩草(*Kobresia humilis*)草甸碳分配对围栏禁牧响应的结果显示,围栏禁牧下光合固定的<sup>13</sup>C在土壤中的分配低于放牧下<sup>13</sup>C在土壤中的分配,这种差异可能与植被多样性的降低、豆科

植物的减少等群落结构的改变有关。

**2.2.3 围栏禁牧与放牧对草地土壤碳贮量的影响**  
与植被地上凋落物有关 围栏禁牧下草地地上凋落物的积累可以降低植被光合效率,降低碳从植被向土壤转移的速率,对土壤碳贮量的积累有负面作用<sup>[51]</sup>;另一方面,围栏禁牧后草地地上凋落物的积累使一部分碳滞留在凋落物中,也会降低碳从植被向土壤的转移速率,降低土壤碳贮量<sup>[47]</sup>。放牧下家畜对植被的采食减少地上凋落物的积累量,促进植被的光合作用,有利于土壤碳贮量的积累,同时,放牧下家畜的踩踏作用增加植被凋落物质的分解速率<sup>[52-53]</sup>,进而增加碳素向土壤碳库的转移。

**2.2.4 围栏禁牧与放牧对草地土壤碳贮量的影响**  
与植物的呼吸作用有关 Morris 和 Jensen<sup>[54]</sup>认为,植被的生物量在一定范围内的光合作用净生产力最大,小于或超过这个范围将不利于植物对碳的固定和土壤碳的积累。这是由于随着植被生物量的增加,植被呼吸作用也增加,对于一些植物物种来说,随着植被生物量的增加,植物光合作用碳固定量与呼吸作用碳的损失量之间的比值会下降,从而降低碳的固定与转移。放牧虽然会减少地上植被的生物量,但并不一定会减少植被净光合作用的固碳量,较高的光合效率和较低的植被呼吸速率会增加碳的固定和转移。相反,围栏禁牧可能会增加地上植被的生物量,但是也会增加通过植被呼吸作用损失的碳量。

**2.2.5 围栏禁牧与放牧对草地土壤碳贮量的影响**  
与土壤碳的分解释放过程有关 从植物地上转移到土壤中的一部分碳素被微生物吸收利用以 CO<sub>2</sub> 的形式释放到大气中,这个过程的变化对土壤碳贮量的变化有重要的影响作用。进入到土壤碳库中的碳经过物理和化学的作用形成不同的碳组分<sup>[55-58]</sup>,包括易分解的碳和稳定的不易分解的碳,这些不同形式的碳具有不同的稳定性和周转速率,对放牧活动的响应也不同。围栏禁牧和放牧可以改变土壤中这些不同形式碳的组成和分解速率,影响土壤碳的分解和土壤碳的贮量<sup>[59]</sup>。

围栏禁牧与放牧下土壤碳分解的过程受土壤温度、土壤物理结构和土壤微生物群落结构等因素的

影响。

围栏禁牧后,草地植物地上凋落物的堆积和较高的地上生物量会降低土壤表层的透光率,减少到达土壤表层的能量,从而降低土壤的温度<sup>[23]</sup>。有研究认为,土壤不稳定碳库对土壤温度的敏感性高于稳定碳库对土壤温度的敏感性,但是也有很多研究对此有不同的观点<sup>[60]</sup>。围栏禁牧下土壤温度的降低会减少土壤碳素的分解,而随着放牧强度的增加,草地土壤温度的增加会促进土壤碳素的分解<sup>[61]</sup>。

土壤团聚体结构的变化会影响土壤有机碳的分解速率。存在于微团聚体中的有机物质与微生物的接触几率较小,而大团聚体中的有机物质更容易被微生物分解利用。围栏禁牧和放牧下草地植被结构的变化会影响土壤团聚体的形成,有研究认为放牧下的植被形成的菌根有利于土壤团聚体的形成,对土壤中的碳素有保护的作用<sup>[45]</sup>,另外,放牧下家畜的踩踏作用改变土壤的物理结构,也会改变土壤的团聚体结构,影响土壤碳素的分解。

土壤中微生物的活性影响土壤碳素的分解,围栏禁牧和放牧下土壤微生物的活性和群落结构会发生变化<sup>[62-64]</sup>, Klumpp 等<sup>[65]</sup>研究发现,放牧可以增加土壤革兰氏阳性菌的数量,减少革兰氏阴性菌和真菌的数量,这种变化会促进土壤中稳定颗粒有机物质的分解,降低土壤碳贮量。可见,土壤微生物的结构变化对土壤有机碳的分解有重要的影响。

**2.2.6 围栏禁牧与放牧对草地土壤碳贮量的影响**  
与草地生态系统氮素的循环有关 围栏禁牧与放牧可以改变草地生态系统氮素的循环。围栏禁牧后,地上凋落物的积累会截留一部分到达土壤表层的大气降水,减少随降水进入土壤中的铵盐和硝酸盐,同时,凋落物上的微生物会同化吸收降水的一部分氮素,减少进入土壤中无机氮素的含量<sup>[22, 66]</sup>。另一方面,围栏禁牧下植被生产力的增长有利于碳与氮向土壤的输入,增加土壤微生物的活性,促进土壤有机碳的分解,增加土壤氨态氮和硝态氮的含量。围栏禁牧与放牧对氮素循环的影响还包括植物、土壤 C/N 的变化,土壤无机氮素的变化会改变植物和土壤的 C/N 值,此外,围栏禁牧与放牧下植物群落结构的变化也可以改变 C/N 值,影响草地生态系统的

氮素循环。

草地生态系统氮素循环的变化会影响土壤的碳贮量。土壤无机氮素含量的增加有利于植被的生长,增加植被的生产力,进而会增加土壤的碳贮量。植被 C/N 值的变化影响凋落物的分解速率,低的 C/N 值有利于凋落物的分解,增加土壤碳的输入;土壤中的有机物质主要来自植物根际分泌的输入和凋落物的分解,所以土壤的 C/N 值受植物 C/N 值的影响,C/N 值的改变会影响土壤微生物对土壤的分解。有研究认为,低的 C/N 值为微生物提供较多的营养,降低土壤微生物对土壤中稳定碳库的分解,有利于土壤碳库的维持<sup>[49]</sup>。

### 3 总结与展望

草地生态系统具有较大的碳汇能力,在全球气候变暖的背景下,草地生态系统在吸收大量工业排放 CO<sub>2</sub> 和减缓气候变暖方面具有重要的作用。但是人类活动特别是家畜的放牧活动影响着草地生态系统的固碳能力。近年来,由于不合理的放牧方式造成草地大面积的退化,降低了草地的固碳能力,而围栏禁牧有利于草地植被和固碳能力的恢复,是草地经济价值和生态功能恢复的主要措施之一,但是围栏禁牧对草地固碳能力的影响也是有争议的。如何合理地对草地进行放牧管理使其具有较大的固碳能力是一个急需解决的问题。本文对有关围栏禁牧与放牧对草地生态系统固碳能力影响的报道进行综述,以探讨放牧活动影响草地固碳能力的机制,并对未来的研究进行思考和展望。

围栏禁牧与放牧对草地生态系统固碳能力的影

响主要包括对植被生产力和土壤碳贮量的影响。草地植被生产力在草地生态系统碳贮量中所占的比例很小,但是草地的植被生产力影响生态系统碳的输入与输出过程,对生态系统的固碳能力有重要的影响。在不同的草地生态系统,草地植被生产力对围栏禁牧的响应或正面或负面,没有一致的结论。相关的研究显示,草地植被生产力还受植被特点、放牧强度、气候等其他因素的影响,而目前缺少不同草地类型在单因素和多因素交互影响下草地植被生产力对围栏禁牧与放牧响应的相关研究。对草地植被生产力在围栏禁牧与放牧和多因素影响下响应模式与规律的了解与研究有利于预测草地植被生产力的变动,以对草地的管理方式做出合理的调整。草地生态系统的碳素主要存在于土壤中,土壤中的碳贮量可以反映生态系统的固碳能力。与草地植被生产力类似,土壤的碳贮量对围栏禁牧的响应有正面也有负面。草地土壤碳贮量受碳的输入与输出过程的影响,围栏禁牧与放牧可以通过多种不同的途径影响土壤碳的输入与输出过程,如改变植被生产力、凋落物的分解速率、土壤碳的分解和氮素循环等途径。围栏禁牧与放牧通过一种途径对草地土壤碳贮量的效应往往会被另一种途径的效应缓冲和影响,所以围栏禁牧与放牧对草地土壤碳贮量的影响是复杂多样的,而且目前对这些机制的研究还不十分清楚,存在很多的争议。为了更好地了解围栏禁牧与放牧对土壤碳贮量的影响,需要研究土壤碳输入与输出过程对其他因素的响应机制,同时也需要对土壤碳贮量进行估算以评估不同的放牧方式对土壤碳贮量的影响。

### 参考文献

- [1] 周寿荣. 草地生态学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1996.
- [2] 中华人民共和国农业部畜牧兽医司, 全国畜牧兽医总站. 中国草地资源[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1996.
- [3] 陈百明. 中国农业资源综合生产能力与人口承载能力[M]. 北京: 气象出版社, 2001.
- [4] Rodle H. A comparison of the contribution of various gasses to the greenhouse effect[J]. Science, 1990, 248: 1217-1219.
- [5] 李博. 中国的草原[M]. 北京: 科学出版社, 1990.
- [6] Wang S, Wilkes A, Zhang Z, Chang X, Lang R, Wang Y, Niu H. Management and land use change effects on soil carbon in northern China's grasslands: A synthesis[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2011, 142(3-4): 329-340.
- [7] 郭然, 王效科, 逯非, 段晓男, 欧阳志云. 中国草地土壤生态系统固碳现状和潜力[J]. 生态学报, 2008, 28(2): 862-867.

- [8] Cheng J ,Wu G L ,Zhao L P ,Li Y ,Li W ,Cheng J M. Cumulative effects of 20-year exclusion of livestock grazing on above- and belowground biomass of typical steppe communities in arid areas of the Loess Plateau ,China [J]. *Plant Soil Environment* 2011 , 57( 1) : 40-44.
- [9] Li Y ,Zhou X ,Brandle J R ,Zhang T ,Chen Y ,Han J. Temporal progress in improving carbon and nitrogen storage by grazing exclusion practice in a degraded land area of China's Horqin Sandy grassland [J]. *Agriculture ,Ecosystems & Environment* 2012 , 159: 55-61.
- [10] Wu G ,Du G ,Liu Z ,Zhang L ,Chen J ,Hu T. Effect of fencing and grazing on a *Kobresia*-dominated meadow in the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Plant and Soil* 2009 ,319( 1-2) : 115-126.
- [11] Rusch G M ,Oesterheld M. Relationship between productivity ,and species and functional group diversity in grazed and non-grazed Pampas grassland [J]. *Oikos* ,1997 ,78( 3) : 519-526.
- [12] Weaver J E ,Rowland N W. Effects of excessive natural mulch on development yield and structure of native grassland [J]. *Botanical Gazette* ,1952 ,114( 1) : 1-19.
- [13] Altesor A ,Oesterheld M ,Leoni E ,Lezama F ,Rodriguez C. Effect of grazing on community structure and productivity of a Uruguayan grassland [J]. *Plant Ecology* 2005 ,179( 1) : 83-91.
- [14] Klein J A ,Harte J ,Zhao X. Experimental warming ,not grazing ,decreases rangeland quality on the Tibetan plateau [J]. *Ecological Applications* 2007 ,17( 2) : 541-557.
- [15] McNaughton S J. Compensatory plant growth as a response to herbivory [J]. *Oikos* ,1983 ,40( 3) : 329-336.
- [16] Zhou H ,Tang Y ,Zhao X ,Zhou L. Long-term grazing alters species composition and biomass of a shrub meadow on the Qinghai-Tibet plateau [J]. *Pakistan Journal of Botany* 2006 ,38( 4) : 1055-1069.
- [17] Jackson T A. The effect of defoliation on yield of radish [J]. *Annals of Applied Biology* ,1980 ,94( 3) : 415-419.
- [18] Hare J D. Impact of defoliation by the Colorado potato beetle on potato yields [J]. *Journal of Economic Entomology* ,1980 ,73( 3) : 369-373.
- [19] 贾慎修. 中国草原的现状及其改进( 下) [J]. *中国畜牧兽医杂志*. 1955 ,6: 248-257.
- [20] Hafner S ,Unteregelsbacher S ,Seeber E ,Lena B ,Xu X ,Li X ,Guggenberger G ,Miehe G ,Kuzyakov Y. Effect of grazing on carbon stocks and assimilate partitioning in a Tibetan montane pasture revealed by <sup>13</sup>C<sub>2</sub> pulse labeling [J]. *Global Change Biology* , 2012 ,18( 2) : 528-538.
- [21] Bai W ,Fang Y ,Zhou M ,Xie T ,Li L ,Zhang WH. Heavily intensified grazing reduces root production in an Inner Mongolia temperate steppe [J]. *Agriculture ,Ecosystems and Environment* 2015 ,200: 143-150.
- [22] Knapp A K ,Seastedt T R. Detritus accumulation limits productivity of tallgrass prairie [J]. *Bioscience* ,1986 ,36( 10) : 662-668.
- [23] Klein J A ,Harte J ,Zhao X. Dynamic and complex microclimate responses to warming and grazing manipulations [J]. *Global Change Biology* 2005 ,11( 9) : 1440-1451.
- [24] Aarssen L W. High productivity in grassland ecosystems: Effects by species diversity or productive species [J]. *Oikos* ,1997 ,80: 183-184.
- [25] van Ruijven J ,Berendse F. Diversity-productivity relationships: Initial effects ,long-term patterns ,and underlying mechanisms [J]. *PNAS* 2005 ,102( 3) : 695-700.
- [26] Schmid B ,Joshi J ,Schlapfer F. Experimental progress and theoretical extensions [A]. Kinzig A ,Tilman D ,Pacala S W. *Functional Consequences of Biodiversity* [M]. Princeton: Princeton University Press ,2002: 120-150.
- [27] Adler P B ,Morales J M. Influence of environmental factors and sheep grazing on an Andean grassland [J]. *Journal of Range Management* ,1999 ,52( 5) : 471-481.
- [28] Hickman K R ,Hartnett D C. Effects of grazing intensity on growth ,reproduction and abundance of three palatable forbs in Kansas tallgrass prairie [J]. *Plant Ecology* 2002 ,159( 1) : 23-33.
- [29] He N ,Han X ,Yu G ,Chen Q. Divergent changes in plant community composition under 3-decade grazing exclusion in continental steppe [J]. *PLOS One* 2011 ,6( 11) : e26506 ,doi: 10.1371/journal.pone.0026506 2011.

- [30] Milchunas D G ,Lauenroth W K. Quantitative effects of grazing on vegetation and soils over a global range of environments [J]. *Ecological Monographs* ,1993 63( 4) : 327-366.
- [31] Collins S L ,Knapp A K ,Briggs J M ,Blair J M ,Steinauer E M. Modulation of diversity by grazing and mowing in native tallgrass prairie [J]. *Science* ,1998 280: 745-747.
- [32] Olf H ,Ritchie M E. Effects of herbivores on grassland plant diversity [J]. *Tree* ,1998 ,13( 7) : 261-265.
- [33] Austrheim G ,Eriksson O. Plant species diversity and grazing in the Scandinavian mountains: Patterns and processes at different spatial scales [J]. *Ecography* 2001 24( 6) : 683-695.
- [34] Vujnovic K ,Wein R W ,Dale M R T. Predicting plant species diversity in response to disturbance magnitude in grassland remnants of central Alberta [J]. *Canadian Journal of Botany* 2002 80( 5) : 504-511.
- [35] Harrison S ,Inouye B D ,Safford H D. Ecological heterogeneity in the effects of grazing and fire on grassland diversity [J]. *Conservation Biology* 2003 ,17( 3) : 837-845.
- [36] Painter E L ,Belsky A J. Application of herbivore optimization theory to rangelands of the western united states [J]. *Ecological Applications* ,1993 3( 1) : 2-9.
- [37] Dyer M I ,Turner C L ,Seastedt T R. Herbivory and its consequences [J]. *Ecological Applications* ,1993 3( 1) : 10-16.
- [38] Williamson S C ,Detling J K ,Dodd J L ,Dyer M I. Experimental evaluation of the grazing optimization hypothesis [J]. *Journal of Range Management* ,1989 42( 2) : 149-152.
- [39] 翟连荣 ,李典谟 ,丁岩钦. 棉铃虫与棉花生长发育耦合系统的建立 [J]. *应用生态学报* ,1991 2( 2) : 134-140.
- [40] Wu J S ,Zhang X Z ,Shen Z X ,Shi P L ,Yu C Q ,Chen B X. Effects of livestock exclusion and climate change on aboveground biomass accumulation in alpine pastures across the Northern Tibetan Plateau [J]. *Chinese Science Bulletin* 2014 59( 32) : 4332-4340.
- [41] Schuman G E ,Janzen H H ,Herrick J E. Soil carbon dynamics and potential carbon sequestration by rangelands [J]. *Environmental Pollution* 2002 ,116: 391-396.
- [42] Su Y Z ,Zhao H L ,Zhang T H. Influences of grazing and enclosure on carbon sequestration in degraded sandy grassland ,Inner Mongolia ,north China [J]. *New Zealand Journal of Agricultural Research* 2003 46( 4) : 321-328.
- [43] Derner J D ,Boutton T W ,Briske D D. Grazing and ecosystem carbon storage in the North American Great Plains [J]. *Plant and Soil* 2006 280( 1-2) : 77-90.
- [44] Reeder J D ,Schuman G E. Influence of livestock grazing on C sequestration in semi-arid mixed-grass and short-grass rangelands [J]. *Environment Pollution* 2002 ,116( 3) : 457-463.
- [45] Mcsherry M E ,Ritchie M E. Effects of grazing on grassland soil carbon: A global review [J]. *Global Change Biology* 2013 ,19( 5) : 1347-1357.
- [46] Connant R T ,Paustian K ,Elliott E. Grassland management and conversion into grassland: Effects on soil carbon [J]. *Ecological Applications* 2001 ,11( 2) : 343-355.
- [47] Schuman G E ,Reeder J D ,Manley J T ,Hart R H ,Manley W A. Impact of grazing management on the carbon and nitrogen balance of a mixed-grass rangeland [J]. *Ecological Applications* ,1999 9( 1) : 65-71.
- [48] Fornara D A ,Tilman D. Plant functional composition influences rates of soil carbon and nitrogen accumulation [J]. *Journal of Ecology* 2008 96( 2) : 314-322.
- [49] de Deyn G B ,Shiel R S ,Ostle N J ,McNamara N P ,Oakley S ,Young I ,Freeman C ,Fenner N ,Quirk H ,Bardgett R D. Additional carbon sequestration benefits of grassland diversity restoration [J]. *Journal of Applied Ecology* 2011 48( 3) : 600-608.
- [50] Zou J ,Zhao L ,Xu S ,Xu X ,Chen D ,Li Q ,Zhao N ,Luo C ,Zhao X. Field <sup>13</sup>CO<sub>2</sub> pulse labeling reveals differential partitioning patterns of photoassimilated carbon in response to livestock enclosure in a Kobresia meadow [J]. *Biogeosciences* ,2014 ,11: 4381-4391.
- [51] Lecain D L ,Morgan J A ,Schuman G E ,Reeder J D ,Hart R H. Carbon exchange rates in grazed and ungrazed pastures of Wyoming [J]. *Journal of Range Management* 2000 53( 2) : 199-206.



- [52] Naeth M A ,Bailey A W ,Pluth D J ,Chanasyk D S ,Hardin R T. Grazing impacts on litter and soil organic matter in mixed prairie and fescue grassland ecosystems of Alberta [J]. *Journal of Range Management* ,1991 ,44( 1) : 7-12.
- [53] Shariff A R ,Biondini M E ,Grygiel C E. Grazing intensity effects on litter decomposition and soil nitrogen mineralization [J]. *Journal of Range Management* ,1994 ,47( 6) : 444-449.
- [54] Morris J T ,Jensen A. The carbon balance of grazed and non-grazed *Spartina anglica* saltmarshes at Skallingen ,Denmark [J]. *Journal of Ecology* ,1998 ,86( 2) : 229-242.
- [55] Darrah P R. Rhizodeposition under ambient and elevated CO<sub>2</sub> levels [J]. *Plant and Soil* ,1996 ,187( 2) : 265-275.
- [56] Jones M B ,Donnelly A. Carbon sequestration in temperate grassland ecosystems and the influence of management ,climate and elevated CO<sub>2</sub> [J]. *New Phytologist* ,2004 ,164( 3) : 423-439.
- [57] Post W M ,Kwon K C. Soil carbon sequestration and land-use change: Processes and potential [J]. *Global Change Biology* , 2000 ,6: 317-327.
- [58] Six J ,Conant R T ,Paul E A ,Paustian K. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils [J]. *Plant and Soil* ,2002 ,241( 2) : 155-176.
- [59] Bremer E ,Janzen H H ,Johnston A M. Sensitivity of total ,light fraction and mineralizable organic matter to management practices in a Lethbridge soil [J]. *Canadian Journal of Soil Science* ,1994 ,74( 2) : 131-138.
- [60] Davidson E A ,Janssens I A. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change [J]. *Nature* , 2006 ,440: 165-173.
- [61] Haynes A G ,Schutz M ,Buchmann N ,Page-Dumroese D S ,Busse M D ,Risch A C. Linkages between grazing history and herbivore exclusion on decomposition rates in mineral soils of subalpine grassland [J]. *Plant and Soil* ,2014 ,374( 1-2) : 579-591.
- [62] Kuzyakov Y ,Cheng W. Photosynthesis controls of rhizosphere respiration and organic matter decomposition [J]. *Soil Biology & Biochemistry* ,2001 ,33( 14) : 1915-1925.
- [63] Cheng W ,Zhang Q ,Coleman D C ,Carroll C R ,Hoffman C A. Is available carbon limiting microbial respiration in the rhizosphere [J]. *Soil Biology & Biochemistry* ,1996 ,28( 10-11) : 1283-1288.
- [64] Stephan A ,Meyer A H ,Schmid B. Plant diversity affects culturable soil bacteria in experimental grassland communities [J]. *Journal of Ecology* ,2000 ,88( 6) : 988-998.
- [65] Klumpp K ,Fontaine S ,Attard E ,Roux X L ,Gleixner G ,Soussana J. Grazing triggers soil carbon loss by altering plant roots and their control on soil microbial community [J]. *Journal of Ecology* ,2009 ,97( 5) : 876-885.
- [66] Seastedt T R. Canopy interception of nitrogen in bulk precipitation by annually burned and unburned tallgrass prairie [J]. *Oecologia* ,1985 ,66( 1) : 88-92.

( 责任编辑 武艳培)