

草地牧草生产力对不同放牧强度响应的研究进展

奚小艳¹, 黄小涛^{2,3*}, 罗格平^{3,4}, 周华坤^{2,3}, 姚步青^{2,3}, 马真^{2,3}

(1. 青海省环境科学研究设计院有限公司, 青海西宁 810007; 2. 中国科学院西北高原生物研究所寒区恢复生态学重点实验室, 青海西宁 810008; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 中国科学院新疆生态与地理研究所荒漠与绿洲生态国家重点实验室, 新疆乌鲁木齐 830011)

摘要 放牧是草地生态系统最主要的利用方式。草地牧草生产力对不同放牧强度的响应研究一直是草原生态学领域的一个重要科学问题, 明确认识该问题对草地生态系统可持续利用至关重要。国内外学者已经针对该问题做了大量研究工作。但对“适度放牧可促进草地牧草生产力”的认识依然存在争论, 对放牧对草地牧草生产力影响这一科学问题缺乏深入的机理认识。综述了国内外对该科学问题的研究进展, 探讨了研究工作中存在的问题, 指出模型模拟结合观测实验数据进行放牧对草地牧草生产力影响的深入机理研究是未来的研究方向。

关键词 草地生态系统; 放牧; 净初级生产力; 生态模型; 补偿性生长

中图分类号 S812 **文献标识码** A

文章编号 0517-6611(2021)12-0001-04

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2021.12.001



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Progress on Effect of Grazing on Grassland Net Primary Productivity

XI Xiao-yan¹, HUANG Xiao-tao^{2,3}, LUO Ge-ping^{3,4} et al (1. Qinghai Environmental Sciences Research and Design Institute Co., Ltd., Xining, Qinghai 810007; 2. Key Laboratory of Restoration Ecology for Cold Regions Laboratory in Qinghai, Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining, Qinghai 810008; 3. University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049; 4. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi, Xinjiang 830011)

Abstract Grazing is the most important use of grassland ecosystem. The effect of grazing on productivity is always an important scientific problem in the field of grassland ecology. Identifying this issue is very important for sustainable utilization of grassland ecosystem. Scholars at home and abroad have done a lot of research on this problem through observation experiments and land ecosystem model simulation. However, there is still a debate on the understanding that “moderate grazing can promote grass productivity”. There is a lack of in-depth understanding of the mechanism regarding the impact of grazing on grassland productivity. This paper reviews the research progress of this scientific problem at home and abroad and discusses the weakness regarding to the related research work. At last, it is pointed out that the future research direction is to study the mechanism of the effect of grazing on grassland productivity by combining model simulation with observation experimental data.

Key words Grassland ecosystem; Grazing; Net primary productivity; Ecological model; Compensatory growth

草地生态系统具有物质生产、调节气候、涵养水源、保持水土、防风固沙、改良土壤和维持生物多样性等经济生态服务功能^[1-2]。作为地球陆地最大的生态系统, 草地约占陆地总面积的 32%, 分布着世界上大多数牧场, 同时草地也是陆地生态系统中极其脆弱的组分之一, 对气候变化和人类活动非常敏感^[3-4]。随着近年来放牧量的持续增加, 不合理的放牧活动导致草地生态系统出现一系列的生态问题, 其中最主要的表现是过度放牧导致的草地生态系统严重退化^[5-6]。过度放牧最直接的后果就是植被退化, 产草量减少, 还会引起土壤沙化、土壤盐渍化等生态环境问题^[7-8]。如何合理利用草地生态系统是维持区域生态系统格局、功能和畜牧业可持续发展的关键。草地生态系统草地和食草动物的相互作用一直是草地生态研究的热点和难点, 并主要侧重于放牧对植物群落的组成、草地土壤性质、牧草生产力和再生性等影响方面^[9-11], 其中放牧或过度放牧对草地生态系统生产力的影响研究一直是草原生态学领域的一个重要科学问题^[12-13]。研究放牧对草地生态系统生产力的影响对草地的可持续利

用有重要的现实意义^[14-17]。最大限度地利用和发挥草地牧草资源的生产潜力, 提高草地的生产力, 扩大牲畜规模, 增加牧民收入, 使草地经济效益和生态效益最大化, 是全球草地生态系统面临的重大问题。

1 牧草的补偿性生长

1992 年提出“草地生态生产力”这一概念^[15], 草地生态生产力(ecological productivity of grassland)是“在不破坏生态系统的健康状态下所表现的生产水平”^[14]。根据 CVOR 草地健康评价指标^[18], 草地的生态生产力可界定为: 草地在某一利用方式之下, 经过健康评价, 其生态系统处于健康阈的草地, 其利用程度可被认为属草地生态生产力利用水平, 这时草地所表现的生产水平称为草地生态生产力, 亦即在不破坏生态系统的健康状态下所表现的生产水平^[19]。

放牧是一种高度复杂的干扰方式, 主要通过啃食、践踏和粪便等方式影响着草地生态系统的结构与功能^[20-21]。放牧可以通过对生物量和营养的重分配而直接和间接地影响生态过程^[22-23]。放牧不仅是天然草地的主要利用方式之一, 而且是一种典型的人为干扰^[24], 调节放牧强度以及轮牧模式是草地管理中合理利用草地的有效途径^[25]。在研究放牧对草地生态系统的影响中, 放牧强度是最主要的一个因素, 对此国内外学者开展了大量的研究, 也取得了丰富的成果^[26-48]。放牧强度一般分为适度放牧、中度放牧和重度放

基金项目 西部之光(2018)项目“放牧对青海湖流域草地生产力影响的定量研究”。

作者简介 奚小艳(1985—), 女, 陕西大荔人, 高级工程师, 从事环境科研工作。*通信作者, 博士, 助理研究员, 从事草地生态学研究。

收稿日期 2020-11-20

牧,根据单位面积上羊的数量来决定。研究表明适度放牧能够提高草地群落的物种丰富度和生物量^[26],适度放牧时植物物种多样性和功能多样性最高^[27-28],从而提高了植物群落结构的复杂性^[29-30]和稳定性^[31],有利于草地的可持续利用^[32]。很多研究也表明,适度放牧可能促进草地牧草的生长,即表现出补偿机制^[21,33]。例如:一部分研究发视,在草甸草原进行轻牧处理时,植物地上生物量有所减少,但地下生物量却显著增加,植物在放牧干扰下表现出适应性,说明轻度放牧对这一区域是较为合理的^[36-37]。锡林图雅等^[38]的研究表明,最轻、较轻和中度放牧的净初级生产力之间没有极显著差异($P>0.01$),适度放牧这种利用方式可使草地净初级生产力达到最优水平。但中度牧区的总采食量最大,地上现存量却不是最小,即牧草存在补偿性生长,说明在适度的放牧强度可以增加草地地上部分净生产力,有利于家畜更好地采食,同时会较好地促进牧草的再生。

研究表明不同草地净初级生产力(NPP)对放牧强度的响应是不同的,并表现出多样性的放牧效应。如在北美大平原,放牧使草地NPP减少,但这种效应也会由于放牧率的不同而存在差异^[49-50];在欧洲草原,有些草地在放牧或刈割以后其NPP是增加的,但在欧洲北部的斯堪的纳维亚半岛上,放牧则不利于草地幼芽的生长^[51-52];在西伯利亚中部和蒙古和我国的内蒙古草原,随着放牧强度的增加,草地生产力总体呈现下降的趋势,但越来越多的研究显示,在适度放牧强度的情况下,草地净初级生产力存在补偿性机制^[53-54];而在非洲草原,研究发现在达到最佳放牧率以前,草地生产力随放牧率的增加而增加,随后,随着放牧率进一步增加而减小^[55-57]。而且在植被-草食动物相互作用的研究中,放牧的效应主要取决于研究的时空尺度,通常差异较大,较难预测^[3,58]。

我国科研工作者在放牧对草地植物补偿性生长方面的研究中发现,放牧既有抑制植物生长的机制,也有促进植物生长的机制,植物的补偿性生长取决于促进与抑制之间的净效应,而这种净效应与草地群落类型、放牧方式、放牧强度以及环境条件等密切相关^[21,33]。如:罗格平在新疆草地研究发现,适度放牧可以促进遭受水分胁迫牧草的生长,在不受水分胁迫的草地,牧草生产力随着放牧强度的增加而降低^[21]。李凤霞等^[59]研究发现在青藏高原三江源区域典型高寒草甸适度放牧条件的轻度放牧和中度放牧制度下,草地地上地下生物量均显著高于对照区(不放牧)。国外学者对现有相关研究文献的统计分析表明在放牧历史较长、消费水平较低和草地或灌木地上生物量较低的情况下,放牧可能有利于草地生产力的提高^[20,51]。

综上所述,尽管更多的研究表明适度放牧会促进草地牧草的生长,但目前学术界对放牧是否促进草地牧草生长这一问题依然存有争论^[21,60]。获得上述结果和认识的研究区,大多分布于北美草原、非洲草原、西伯利亚草原、欧洲草原、澳大利亚草地或中国不同区域草地,这些研究区在气候、地形地貌条件、草地类型、研究手段以及放牧管理等方面存在着

显著差异,这些因素可能是导致科学家对“放牧促进草地牧草生产力”的观点存在争议(图1)的重要原因。



图1 放牧对牧草生产力影响争议

Fig.1 Controversy over the impact of grazing on forage productivity

国内外支持“适度放牧可促进草地牧草生产力”的科研工作者关于放牧对草地牧草补偿性生长机制的解释,主要提出了以下观点:①放牧降低了草地冠层光的遮挡、提高了光能利用效率^[58,61];②放牧降低了地上生物量,减少了植被冠层的蒸散、缓解了植物水分胁迫的强度以及持续时间^[53,62-63];③放牧具有加速或调整营养循环的功能^[57,64];④放牧改变了生物量的地上与地下分配,部分落叶具有增强光合同化产物分配作用^[65-67];⑤放牧后能增加植物组织的光合速率^[68]。尽管国内外支持“适度放牧会促进草地牧草的生长”这一观点的科研工作者对牧草补偿性生长机制从不同角度给出了不同观点的解释,但这些观点很大程度上只是推测或猜想,缺乏有力的科研支撑,对放牧为什么会促进草地牧草生长这一问题依然没有清晰明确的认识。

2 研究方法

关于放牧对草地NPP的影响研究,目前多通过在站点尺度上野外直接观测无放牧和不同放牧强度条件下的草地现存量和牲畜采食量及食性进行的(草地生物量=现存量+牲畜放牧消耗量)^[13,58,66,69]。采用的方法包括传统的移动笼法(Moveable Cage Method, MSM)和称重-口罩法等^[70-72]。MSM不但可以实测无放牧和不同放牧强度条件下的草地生物量,还可以观测牲畜在一定放牧期内的采食量和食性;而称重-口罩法通常用来测量牲畜每日的采食量。站点尺度直接观测法因可以获得可靠数据被认为是目前最准确的研究方法。但因草食动物和草地相互作用的复杂性,采用这种站点尺度直接测量法研究放牧对草地NPP的影响具有较大的局限性,一是无法对放牧过程及其对草地碳循环影响机理进行深入分析,二是这种方法由于速度慢、成本较高、测点少等缺陷,无法进行大范围观测和推广,也无法从区域角度分析放牧对草地NPP的影响以及这种影响的区域差异。

由于站点尺度直接观测法研究放牧对草地NPP影响的局限性,陆地生态系统模型成为研究气候变化和人类活动对生态系统结构与功能影响普遍使用的方法,并被认为是研究陆地生态系统碳水储量和通量强度及其作用机理不可替代的手段^[3,21]。在现有的陆地生态系统模型中,生物地球化学模型最为重要,应用也最为广泛,如Biome-BGC(Biome Bio-GeoChemical Model)、TEM(Terrestrial Ecosystem Model)、CENTURY、DNDC(DeNitrification DeComposition)、DLEM(Dynamic Land Ecosystem Model)、CASA(Carnegie-Ames-Stanford Approach)等^[21,73-76]。这些模型在发展的初期是针对不同研

究目的和时空尺度而发展起来的,目前已更注重物质循环的机理过程,如土壤水运移、干旱胁迫等^[77]。这些模型结构与功能不断完善,且大部分可用于研究区域性或全球性的碳、氮循环和地表的主要过程。随着陆地生态系统模型的发展,对人类活动的作用过程考虑也不断增强,如 CENTURY 模型将放牧对碳动态的影响简化为 4 种类型(无影响、轻度、中度、重度)^[65],Biome-BGC Grazing 可以有效模拟牲畜的啃食和粪便对牧草生长的影响^[21],而 Biome-BGCMuSo 模型不仅可以有效模拟牲畜啃食和粪便对牧草生长的影响,同时也考虑了牲畜践踏作用对牧草生长的影响^[77]。这些模型有些已经具有空间化应用功能,可以进行区域尺度的模拟研究,还不具备空间化应用功能的模型也完全可以利用程序设计等手段实现其空间化应用功能^[3,77]。陆地生态系统模型是分析草地植被与食草动物的相互作用关系,尤其是放牧对草地生态系统 NPP 影响的一个有效的途径。但需要指明的是模型只是现实的简化,陆地生态系统模型模拟效果需要结合观测数据进行校准和验证。目前很多研究因观测数据不足导致对放牧过程模拟模型的验证较为薄弱,这在很大程度上限制了人们对模型模拟结果的认可度。

3 问题与展望

放牧对草地生产力影响研究是草地生态学领域的永恒主题。目前关于放牧对草地生产力影响研究存在以下主要问题和薄弱环节。

(1) 现有关于放牧对草地生产力影响的研究,由于选择的研究区在气候、地形地貌条件、草地类型、放牧管理和采用的研究手段等方面的显著差异,科学家对于放牧是否促进草地牧草生产力依然存有争议,对在什么气候环境条件和放牧制度下,放牧是促进牧草生长还是不利于草地群落生产力提高的科学问题还主要停留在表观认识层面,缺乏深入的机理认识。支持“适度放牧会促进草地牧草的生长”这一观点的科研工作者虽然针对放牧为什么会促进草地牧草生长的科学问题提出了一些推测或猜想,但缺乏有力的科研工作支撑。要明确认识该问题,需要在今后的科研工作中加强放牧对草地牧草生产力影响的机理研究。

(2) 基于野外试验的草地 NPP 对放牧响应的研究,普遍对放牧过程及其对碳水循环影响机理分析较为薄弱,且无法体现区域性差异。这也是放牧对草地牧草生产力影响还具有很大不确定性的主要原因之一。未来对放牧过程及其对碳水循环影响的模型化研究将会得到进一步发展,模型本身的结构和功能必将进一步改进和完善,使其成为分析放牧对草地生态系统结构与功能影响机理的可行手段甚至是不可替代的手段。但陆地生态系统模型模拟效果需要结合观测数据进行校准和验证,否则会降低模型研究的认可度。今后模型模拟研究工作中必要的观测数据搜集工作需要进一步加强。

参考文献

- [1] 黄小涛,罗格平.新疆草地蒸散与水分利用效率的时空特征[J].植物生态学报,2017,41(5):506-509,511.
- [2] 黄小涛,罗格平.天山北坡低山丘陵干草原生长季蒸散特征[J].干旱区

- 地理,2017,40(6):1198-1206.
- [3] HUANG X T, LUO G P, YE F P, et al. Effects of grazing on net primary productivity, evapotranspiration and water use efficiency in the grasslands of Xinjiang, China[J]. Journal of arid land, 2018, 10(4): 588-600.
- [4] 李婧梅,蔡海,程茜,等.青海省三江源地区退化草地蒸散特征[J].草业学报,2012,21(3):223-233.
- [5] ZHANG Y T, GAO X L, HAO X Y, et al. Heavy grazing over 64 years reduced soil bacterial diversity in the foothills of the Rocky Mountains, Canada[J/OL]. Applied soil ecology, 2020, 147[2020-05-26]. https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.09.011.
- [6] YANG X, CHEN J S, SHEN Y, et al. Global negative effects of livestock grazing on arbuscular mycorrhizas: A meta-analysis[J/OL]. Science of the total environment, 2020, 708[2020-05-26]. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134553.
- [7] CARNELL P E, IERODIACONOU D, ATWOOD T B, et al. Overgrazing of seagrass by sea urchins diminishes blue carbon stocks[J]. Ecosystems, 2020, 23(7):1437-1448.
- [8] HASSANALLY K. Overgrazing in general practice: The new Tragedy of the Commons[J]. British journal of general practice, 2015, 65(631):81.
- [9] ZHAN T Y, ZHANG Z C, SUN J, et al. Meta-analysis demonstrating that moderate grazing can improve the soil quality across China's grassland ecosystems[J/OL]. Applied soil ecology, 2020, 147[2020-05-26]. https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.103438.
- [10] MOUSAVI S A, GHAFAROKHI M S, KOUPEAEI S S. Negative impacts of nomadic livestock grazing on common rangelands' function in soil and water conservation[J/OL]. Ecological indicators, 2020, 110[2020-05-26]. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105946.
- [11] LÓPEZ-MÁRSICO L, ALTESOR A, OYARZABAL M, et al. Grazing increases below-ground biomass and net primary production in a temperate grassland[J]. Plant and soil, 2015, 392(1/2):155-162.
- [12] 白哈斯.不同放牧率对羊草+苔草低地草甸草地再生和净初级生产力的影响[J].干旱区研究,2007,24(6):6826-6829.
- [13] ALDEZABAL A, ODRIOZOLA I, GARCÍA-BAQUERO G. Grazing abandonment delays the effect of temperature on aboveground net primary production in Atlantic grasslands[J]. Rangeland ecology & management, 2019, 72(5):822-831.
- [14] 任继周.草业大辞典[M].北京:中国农业出版社,2008:73.
- [15] 任继周.黄土高原草地的生态生产力特征[C]//任继周.黄土高原农业系统国际学术会议论文集.兰州:甘肃科学技术出版社,1992:3-5.
- [16] 任继周,王钦,牟新待,等.草原生产流程及草原季节畜牧业[J].中国农业科学,1978,11(2):87-92.
- [17] 任继周,朱兴运,王钦,等.高山草原草地有效生产能力(P₄)以前诸转化阶生产能力的动态研究[J].生态学报,1982,1(2):1-8.
- [18] 侯扶江,于应文,傅华,等.阿拉善草地健康评价的 CVOR 指数[J].草业学报,2004,13(4):117-126.
- [19] 任继周.草地生态生产力的界定及其伦理学诠释[J].草业学报,2015,24(1):1-3.
- [20] GHAFRAMANI A, HOWDEN S M, DEL PRADO A, et al. Climate change impact, adaptation, and mitigation in temperate grazing systems: A review[J]. Sustainability, 2019, 11(24):1-31.
- [21] LUO G P, HAN Q F, ZHOU D C, et al. Moderate grazing can promote aboveground primary production of grassland under water stress[J]. Ecological complexity, 2012, 11:126-136.
- [22] DI VIRGILIO A, LAMBERTUCCI S A, MORALES J M. Sustainable grazing management in rangelands: Over a century searching for a silver bullet[J/OL]. Agriculture ecosystems & environment, 2019, 283[2020-05-26]. https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.05.020.
- [23] 王芳芳,徐欢,李婷,等.放牧对草地土壤氮素循环关键过程的影响与机制研究进展[J].应用生态学报,2019,30(10):3277-3284.
- [24] 陈利顶,傅伯杰.干扰的类型、特征及其生态学意义[J].生态学报,2000,20(4):581-586.
- [25] 肖绪培,宋乃平,王兴,等.放牧干扰对荒漠草原土壤和植被的影响[J].中国水土保持,2013(12):19-23.
- [26] 蒙旭辉,李向林,辛晓平,等.不同放牧强度下羊草草甸草原群落特征及多样性分析[J].草地学报,2009,17(2):239-244.
- [27] MCINTYRE S, HEARD K M, MARTIN T G. The relative importance of cattle grazing in subtropical grasslands: Does it reduce or enhance plant biodiversity? [J]. Journal of applied ecology, 2003, 40(3):445-457.
- [28] RUIFROK J L, POSTMA F, OLFF H, et al. Scale-dependent effects of grazing and topographic heterogeneity on plant species richness in a Dutch salt marsh ecosystem[J]. Applied vegetation science, 2014, 17(4):615-

- 624.
- [29] MEYERS L M, DEKEYSER E S, NORLAND J E. Differences in spatial autocorrelation (SAc), plant species richness and diversity, and plant community composition in grazed and ungrazed grasslands along a moisture gradient, North Dakota, USA[J]. *Applied vegetation science*, 2014, 17(1): 53–62.
 - [30] ALRABABAH M A, ALHAMAD M A, SUWAILEH M, et al. Biodiversity of semi-arid Mediterranean grasslands: Impact of grazing and afforestation[J]. *Applied vegetation science*, 2007, 10(2): 257–264.
 - [31] 魏乐, 宋乃平, 方楷. 放牧对荒漠草原群落多样性的影响[J]. *江汉大学学报(自然科学版)*, 2011, 39(4): 87–91.
 - [32] 张鲜花, 朱进忠, 孙宗玖, 等. 放牧强度对草地牧草现存量及养分动态的影响[J]. *草业科学*, 2014, 31(1): 116–124.
 - [33] DAI L C, GUO X W, KE X, et al. Moderate grazing promotes the root biomass in *Kobresia* meadow on the northern Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Ecology and evolution*, 2019, 9(16): 9395–9406.
 - [34] 买小虎, 张玉娟, 张英俊, 等. 季节性放牧调控对草地植被的影响[J]. *西北农业学报*, 2014, 23(3): 24–30.
 - [35] 李永宏, 陈佐忠, 汪诗平, 等. 草原放牧系统持续管理试验研究: 试验设计及放牧率对草-畜系统影响分析[J]. *草地学报*, 1999, 7(3): 173–182.
 - [36] 张景慧, 祁瑜, 王艳, 等. 放牧对贝加尔针茅草原植物个体和群落生物量分配的影响[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2012, 48(3): 270–275.
 - [37] 高永恒, 陈槐, 罗鹏, 等. 放牧强度对川西北高寒草甸植物生物量及其分配的影响[J]. *生态与农村环境学报*, 2008, 24(3): 26–32.
 - [38] 锡林图雅, 徐柱, 郑阳. 不同放牧率对内蒙古克氏针茅草原地下生物量及地上净初级生产量的影响[J]. *中国草地学报*, 2009, 31(3): 26–29.
 - [39] 杨殿林, 韩国栋, 胡跃高, 等. 放牧对贝加尔针茅草原群落植物多样性和生产力的影响[J]. *生态学杂志*, 2006, 25(12): 1470–1475.
 - [40] PATTON B D, DONG X J, NYREN P E, et al. Effects of grazing intensity, precipitation, and temperature on forage production[J]. *Rangeland ecology & management*, 2007, 60(6): 656–665.
 - [41] 张春花. 放牧方式和施肥梯度对高寒草甸群落生产力和物种丰富度的影响[J]. *草业科学*, 2014, 31(12): 2293–2300.
 - [42] 吕世杰, 刘红梅, 吴艳玲, 等. 放牧对短花针茅荒漠草原建群种与优势种空间分布关系的影响[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(12): 3469–3474.
 - [43] BAI W M, FANG Y, ZHOU M, et al. Heavily intensified grazing reduces root production in an Inner Mongolia temperate steppe[J]. *Agriculture, ecosystems and environment*, 2015, 200: 143–150.
 - [44] 李怡, 韩国栋. 放牧强度对内蒙古大针茅典型草原地下生物量及其垂直分布的影响[J]. *内蒙古农业大学学报(自然科学版)*, 2011, 32(2): 89–92.
 - [45] 杨勇, 白永飞, 王明玖, 等. 放牧强度对内蒙古典型草原土壤氮矿化潜力的影响[J]. *内蒙古农业大学学报(自然科学版)*, 2010, 31(3): 136–140.
 - [46] 王艳芳, 汪诗平. 不同放牧率对内蒙古典型草原地下生物量的影响[J]. *草地学报*, 1999, 7(3): 198–203.
 - [47] 孙麒麟, 王明玖, 陈海军, 等. 短花针茅荒漠草原地下生物量对不同强度放牧的响应[J]. *内蒙古农业大学学报(自然科学版)*, 2010, 31(4): 101–104.
 - [48] 彭祺, 王宁. 不同放牧制度对草地植被的影响[J]. *农业科学研究*, 2005, 26(1): 27–30.
 - [49] 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.
 - [50] SCHUMAN G E, REEDER J D, MANLEY J T, et al. Impact of grazing management on the carbon and nitrogen balance of a mixed-grass rangeland[J]. *Ecological applications*, 1999, 9(1): 65–71.
 - [51] 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.
 - [52] MIKOLA J, SETÄLÄ H, VIRKÄJÄRVI P, et al. Defoliation and patchy nutrient return drive grazing effects on plant and soil properties in a dairy cow pasture[J]. *Ecological monographs*, 2009, 79(2): 221–244.
 - [53] CHEN Y X, LEE G, LEE P, et al. Model analysis of grazing effect on above-ground biomass and above-ground net primary production of a Mongolian grassland ecosystem[J]. *Journal of hydrology*, 2007, 333(1): 155–164.
 - [54] NA Y T, LI J X, HOSHINO B, et al. Effects of different grazing systems on aboveground biomass and plant species dominance in typical Chinese and Mongolian steppes[J]. *Sustainability*, 2018, 10(12): 1–14.
 - [55] DYER M I, DEANGELIS D L, POST W M. A model of herbivore feedback on plant productivity[J]. *Mathematical biosciences*, 1986, 79(2): 171–184.
 - [56] HILBERT D W, SWIFT D M, DETLING J K, et al. Relative growth rates and the grazing optimization hypothesis[J]. *Oecologia*, 1981, 51(1): 14–18.
 - [57] MCNAUGHTON S J, BANYIKWA F F, MCNAUGHTON M M. Promotion of the cycling of diet-enhancing nutrients by African grazers[J]. *Science*, 1997, 278(5344): 1798–1800.
 - [58] REEDER J D, SCHUMAN G E, MORGAN J A, et al. Response of organic and inorganic carbon and nitrogen to long-term grazing of the shortgrass steppe[J]. *Environmental management*, 2004, 33(4): 485–495.
 - [59] 李凤霞, 李晓东, 周秉荣, 等. 放牧强度对三江源典型高寒草甸生物量和土壤理化特征的影响[J]. *草业科学*, 2015, 32(1): 11–18.
 - [60] 王德利, 王岭. 草地管理概念的新释义[J]. *科学通报*, 2019, 64(11): 1106–1113.
 - [61] DERNER J D, BRISKE D D, BOUTTON T W. Does grazing mediate soil carbon and nitrogen accumulation beneath *C₄* perennial grasses along an environmental gradient? [J]. *Plant and soil*, 1997, 191(2): 147–156.
 - [62] SIMOES M, BARUCH Z. Responses to simulated herbivory and water stress in two tropical *C₄* grasses[J]. *Oecologia*, 1991, 88(2): 173–180.
 - [63] PÁEZ A, GONZÁLEZ M E. Water-stress and clipping management effects on guineagrass. II. Photosynthesis and water relations[J]. *Agronomy journal*, 1995, 87(4): 706–711.
 - [64] DE MAZANCOURT C, LOREAU M, ABBADIE L. Grazing optimization and nutrient cycling: Potential impact of large herbivores in a savanna system[J]. *Ecological applications*, 1999, 9(3): 784–797.
 - [65] HOLLAND E A, PARTON W J, DETLING J K, et al. Physiological responses of plant populations to herbivory and their consequences for ecosystem nutrient flow[J]. *American naturalist*, 1992, 140(4): 685–706.
 - [66] LERICHE H, LEROUX X, GIGNOUX J, et al. Which functional processes control the short-term effect of grazing on net primary production in grasslands? [J]. *Oecologia*, 2001, 129(1): 114–124.
 - [67] LI J H, LI Z Q, REN J Z. Effect of grazing intensity on clonal morphological plasticity and biomass allocation patterns of *Artemisia frigida* and *Potentilla acaulis* in the Inner Mongolia steppe[J]. *New Zealand journal of agricultural research*, 2005, 48(1): 57–61.
 - [68] PIÑEIRO G, PARUELO J M, JOBBÁGY E G, et al. Grazing effects on belowground C and N stocks along a network of cattle enclosures in temperate and subtropical grasslands of South America[J]. *Global biogeochemical cycles*, 2009, 23(2): 1–14.
 - [69] CLAFFEY A, DELABY L, BOLAND T M, et al. Implications of adapting autumn grazing management on spring herbage production-The effect on late lactation milk production and the subsequent response in early lactation animal performance[J/OL]. *Livestock science*, 2020, 231 [2020–05–26]. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2019.103870>.
 - [70] 韩国栋, 李勤奋, 卫智军, 等. 家庭牧场尺度上放牧制度对绵羊摄食和体重的影响[J]. *中国农业科学*, 2004, 37(5): 744–750.
 - [71] 刘冬伟, 史印涛, 王明君, 等. 放牧对三江平原小叶章草甸初级生产力及营养动态的影响[J]. *草地学报*, 2013, 21(3): 446–451.
 - [72] 汤永康, 武艳涛, 武魁, 等. 放牧对草地生态系统服务和功能权衡关系的影响[J]. *植物生态学报*, 2019, 43(5): 408–417.
 - [73] WANG J Y, LI A N, BIAN J H. Simulation of the grazing effects on grassland aboveground net primary production using DNDC model combined with time-series remote sensing data-A case study in zoige plateau, China[J]. *Remote sensing*, 2016, 8(3): 1–20.
 - [74] VUICHARD N, MESSINA P, LUYSSAERT S, et al. Accounting for carbon and nitrogen interactions in the global terrestrial ecosystem model ORCHIDEE(trunk version, rev 4999): Multi-scale evaluation of gross primary production[J]. *Geoscientific model development*, 2019, 12(11): 4751–4779.
 - [75] 刘洁, 孟宝平, 葛静, 等. 基于 CASA 模型和 MODIS 数据的甘南草地 NPP 时空动态变化研究[J]. *草业学报*, 2019, 28(6): 19–32.
 - [76] 祁晓婷, 韩永翔, 张存厚, 等. 公元 1–2000 年内蒙古草原 ANPP 序列的重建及特征研究: 基于 CENTURY 模型[J]. *干旱区资源与环境*, 2018, 32(2): 107–113.
 - [77] HIDY D, BARCZA Z, MARJANOVIĆ H, et al. Terrestrial ecosystem process model Biome-BGCMuSo v4.0: Summary of improvements and new modeling possibilities[J]. *Geoscientific model development*, 2016, 9(12): 4405–4437.