

DOI: 10.5846/stxb202009292519

庄明浩, 贡布泽仁, 张静, 李文军. 草原畜牧业温室气体排放现状、问题及展望. 生态学报, 2021, 41(24): 9970-9977.

Zhuang M H, Gongbuzeren, Zhang J, Li W J. Greenhouse gas emissions from grassland animal husbandry: current status, problems and future perspectives. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(24): 9970-9977.

## 草原畜牧业温室气体排放现状、问题及展望

庄明浩<sup>1</sup>, 贡布泽仁<sup>2</sup>, 张 静<sup>3</sup>, 李文军<sup>4,\*</sup>

1 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193

2 西南财经大学中国西部经济研究中心, 成都 611130

3 北京林业大学草业与草原学院, 北京 100083

4 北京大学环境科学与工程学院, 北京 100871

**摘要:** 草原畜牧业生产系统是一个涉及环境、经济、社会多层面、且系统内部气候-土壤-草地-家畜-管理之间相互作用的复杂的社会生态系统。草原不仅为人类提供所需要的肉奶, 也提供了多种生态系统服务。然而, 草原畜牧业也是主要的温室气体排放源之一。减缓畜牧业温室气体排放的研究已成为当前气候变化科学研究关注的焦点。综述了国内外草原畜牧业温室气体排放研究现状, 指出现有研究的不足主要集中在以下 3 个方面: (1) 虽然生命周期评价方法广泛应用于草原畜牧业温室气体排放研究, 但是存在诸多问题, 导致目前的研究框架体系尚不完善, 特别体现在以下几方面: 是否考虑外部输入、是否考虑土壤有机碳、畜牧业温室气体排放强度指标的选择等; (2) 缺乏单一环节减缓措施对草原畜牧业整体温室气体减排效果的研究; (3) 目前对影响草原畜牧业温室气体排放强度的因素主要集中在生态系统层面的分析, 忽略了社会系统的作用, 无法反映社会系统与生态系统的相互反馈机制, 导致机制阐释不完善。综上所述, 未来仍需从以下三方面开展研究: (1) 完善草原畜牧业研究框架体系及提升研究方法; (2) 加强对单一环节减缓措施对草原畜牧业温室气体整体减排效果的综合评价; (3) 基于社会生态系统的角度深入研究影响草原畜牧业温室气体排放强度差异的机制。一方面, 这有助于深入理解草原畜牧业温室气体排放强度情况, 也为低碳型草原畜牧业发展政策的制定提供思路借鉴; 另一方面对于科学合理的可持续利用草场和恢复草地生态环境均具有重要意义。

**关键词:** 草原畜牧业; 温室气体; 生命周期评价; 社会生态系统; 草场管理

## Greenhouse gas emissions from grassland animal husbandry: current status, problems and future perspectives

ZHUANG Minghao<sup>1</sup>, Gongbuzeren<sup>2</sup>, ZHANG Jing<sup>3</sup>, LI Wenjun<sup>4,\*</sup>

1 College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China

2 West Center for China's Economic Development, Southwestern University of Finance and Economics, Chengdu 611130, China

3 School of Grassland Science, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

4 College of Environmental Sciences and Engineering, Peking University, Beijing 100871, China

**Abstract:** Grassland animal husbandry is a coupled social, environmental and economic system which is interrelated through complex interaction between climate, soil, grassland, livestock and management institutions. Grassland animal husbandry not only provides meat and dairy products to people, but also generates variety of significant ecological system services. However, grassland animal husbandry is also a major source of greenhouse gas (GHG) emissions, and how to mitigate GHG from animal husbandry has become a focus of current climate change study. In this article, we reviewed the

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (41901241, 41971256, 71703126); 中国农业大学草地生态修复与健康管理青年科学家创新团队项目

**收稿日期:** 2020-09-29; **网络出版日期:** 2021-08-04

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wjlee@pku.edu.cn

published studies on grassland animal husbandry GHG emissions, and pointed out three shortages of current studies. First, although life-cycle evaluation method has been widely used to measure GHG emissions from livestock production, there still existed shortages and debates, particularly in terms of whether the external variables and soil organic carbon should be considered? How to select indicators to measure the level of GHG emission from livestock production? Second, few studies have focused on the impacts of mitigation measure at single stage on the overall GHG emission reduction of grassland animal husbandry; Third, current studies mainly focused on the impact analysis from ecosystem, while ignored the impacts from social system, which led to poorly describe the feedback mechanism between social and ecological system. Based on the review, we recommend the following topics for the future studies: 1) Improving the life-cycle analytical framework and methods for measuring GHG emission from grassland animal husbandry; 2) Enhancing the comprehensive evaluation of single GHG mitigation measures on whole reduction effectiveness of grassland animal husbandry; and 3) Analyzing the mechanisms influencing GHG emission intensity from the coupled social-ecological system perspective. We believe that this review would help more in-depth understandings GHG emissions from grassland animal husbandry, and have more effective policy implications for low-carbon livestock production system. In addition, it also provides new insights on how to manage grassland ecosystems sustainably and restore grassland ecosystems.

**Key Words:** pastoralism; greenhouse gas; life-cycle assessment; social-ecological system; rangeland management

世界天然草原面积约占陆地面积的 40%<sup>[1]</sup>,其所支撑的草原畜牧业为世界上约 9.38 亿的人口提供生计来源,同时也为社会提供了诸如涵养水源、固碳释氧、传承文化等众多的生态系统服务,是生态安全和食物安全的重要保障<sup>[2-3]</sup>。然而,草原畜牧业在提供上述产品和服务的同时,也会产生大量的温室气体(二氧化碳、甲烷和氧化亚氮)<sup>[4]</sup>。据联合国粮农组织 2006 年的报告指出,依据生命周期理论估算天然放牧畜牧业(由草地生态系统和放牧家畜系统耦合形成的复合系统)温室气体排放约为 5.0 Gt 二氧化碳当量,占到全球人为温室气体排放的 13%,仅次于交通运输业的 14%<sup>[2]</sup>。随着人类对畜产品的需求增多,一方面,放牧家畜肠道甲烷以及粪便甲烷和氧化亚氮的排放量增加<sup>[5-6]</sup>;另一方面,天然草地面临更大的压力,进而有可能导致大面积草地退化。草地退化可能会降低植被生产力和加速土壤有机质的分解,因而,可能会引起土壤碳输入小于碳输出,导致草原畜牧业释放更多的温室气体<sup>[7]</sup>。因此,寻找既要维持甚至增加草原畜产品产量又能够减缓温室气体排放的草原畜牧业生产经营模式,亦即低碳型草原畜牧业生产经营模式,成为目前学术界研究的热点问题<sup>[8-13]</sup>,这对于制定科学合理的区域草地利用方式、改善畜牧业生产效率和减缓草原畜牧业温室气体排放强度均具有重要意义。

## 1 草原畜牧业温室气体研究框架体系及存在问题

草原畜牧业系统是以草地资源为基础,由草地生态系统和畜牧业生产系统耦合形成的复合系统,包括地境-草地、草地-家畜和草畜系统-社会经营管理三个界面。目前大多数的研究主要关注管理方式对单一的草地生态系统或者放牧家畜系统温室气体排放强度的研究<sup>[9,14-18]</sup>,缺乏对草地生态系统与畜牧业生产系统两者耦合的整体系统进行研究,导致对草原畜牧业生产系统温室气体排放强度缺乏系统性的认识<sup>[17,19-20]</sup>。由于一种生产经营管理方式在降低放牧家畜系统温室气体排放量的同时,可能会增加草地生态系统温室气体的排放,导致对草原畜牧业整体系统温室气体排放强度的影响存在较大的不确定性<sup>[21-24]</sup>。例如,Del Prado 等研究发现,如果单纯考虑家畜系统,通过喂养精饲料可以减少牲畜饮食中的粗蛋白的含量,可以减少家畜系统甲烷和氧化亚氮的排放;而从草原畜牧业整体系统来讲,考虑到精饲料的种植、加工等生产过程需要产生大量的温室气体,这一措施却增加了单位产品温室气体排放强度<sup>[19]</sup>。显然,如果将草原生态系统和畜牧业生产系统分开考虑,不能全面反映草原畜牧业温室气体排放强度的真实情况<sup>[19,20,25]</sup>。因此,需要寻找一种方法对草原畜牧业温室气体排放强度情况进行系统性的研究,包括草地土壤、家畜及其粪便、外部输入等产生的温室气体。

为了从整体上评价草原畜牧业温室气体排放强度情况,选择合适的评估方法是必不可少的<sup>[26]</sup>。生命周期评价方法被认为是系统评估草原畜牧业温室气体强度科学的、稳健的方法<sup>[21,27-31]</sup>,且已经被应用于评估和比较不同草原畜牧业生产经营模式温室气体排放强度<sup>[32-36]</sup>。生命周期评价是一种用于评估产品从原材料的获取、产品的生产直至使用后的处置的整个生命周期对环境影响的技術和方法,其具有两大优势:一是可以量化不同系统的总体排放量,并进行比较,二是确定系统组分的最大效率<sup>[37]</sup>。

目前越来越多的研究采用生命周期理论的方法,以草原畜牧业为研究对象,开展不同草原畜牧业生产经营模式温室气体排放强度的研究,为低碳畜牧业发展提供思路<sup>[8,33-35,38-39]</sup>。然而,现有的研究框架体系至今还存在一些问题或者不足,主要表现在以下三方面:

首先,对于构成生命周期温室气体排放组分考虑得不够全面,致使研究结果存在偏差。例如:由于肥料、电力、柴油等生产资料在生产过程中需要消耗能源,会产生温室气体排放,忽略这些温室气体排放可能会低估整个系统的排放<sup>[8,34]</sup>。

其次,绝大多数研究排放清单都忽略了草地土壤有机碳变化,致使研究所得的温室气体排放强度可能并不可靠。Henderson 等<sup>[9]</sup>、Zhuang 等<sup>[20]</sup>、McDermo 和 Elavarthi<sup>[40]</sup>、Meyer 等<sup>[41]</sup>、Song 等<sup>[42]</sup>等研究已经证实土壤碳的变化在草原畜牧业温室气体排放强度评估中起到至关重要的作用。de Figueiredo 等研究并比较了巴西三种不同的草原畜牧业生产经营模式下(退化草地放牧生产经营模式、改善的草地放牧生产经营模式和草地-放牧牲畜-森林耦合的生产经营模式)的温室气体排放强度,发现若不考虑土壤碳,改善的草地放牧生产经营模式具有较低的温室气体排放强度;如果考虑土壤有机碳,则是草地-放牧牲畜-森林耦合的生产经营模式具有较低的温室气体排放强度<sup>[43]</sup>。O'Brien 等研究也证实了不同生产管理模式下的草原畜牧业温室气体排放强度的差异主要在于是否考虑土壤有机碳的变化<sup>[44]</sup>。此外,由于先前排放清单上存在的不足,致使目前的很多研究结果存在争议。例如,以天然放牧畜牧业和半集约草原畜牧业为例,Ogino 等的研究结果显示半集约草原畜牧业具有较低的温室气体排放强度<sup>[34]</sup>;而在 Zhuang 等的研究中则得出相反的结论<sup>[20]</sup>。分析上述两个研究结果,发现差异的原因主要取决于:是否考虑草原畜牧业系统外的输入和是否考虑土壤碳吸收的作用<sup>[20,34]</sup>。

第三,评估指标的选择影响评估结果。温室气体排放单位指标的选择对于结果的解读具有重要的意义,尤其是对于不同草原畜牧业生产系统的比较研究。有研究发现,不同畜牧业生产系统采用不同的单位强度排放指标进行比较,结果可能不同<sup>[33-34,45]</sup>。如采用单位产品的排放强度,往往天然放牧畜牧业高于集约畜牧业;如采用单位面积的排放强度,则低于集约畜牧业。目前大多数研究将单位面积或者单位产品的温室气体排放强度作为评估指标,然而,对于这一指标是否适用于所有情况仍存在异议。虽然目前研究大多数认可单位产品的温室气体排放强度作为功能单元来阐释低碳型草原畜牧业<sup>[19-20,33-34,46]</sup>,然而,Bernués 等<sup>[47]</sup>以及 Ripoll-Bosch 等<sup>[48]</sup>指出天然放牧畜牧业与集约畜牧业的本质区别在于前者除了提供畜产品外还提供其他生态系统服务(可再生的自然资源、生物多样性、传统文化等),而后者则主要提供畜产品,生态系统服务功能方面则较弱。因此,他们的研究进一步指出,比较不同草原畜牧业温室气体排放强度大小时,需要考虑草原畜牧业生产系统的本质差异来选择合适的评估指标。

基于前文的介绍,发现绝大部分研究中排放清单的不完善和比较指标的差异限制了现有草原畜牧业温室气体排放强度结果的可靠性。因此,需要综合考虑草原畜牧业生产管理系统中所有的温室气体排放组分以及选择合适的评估单元(如单位产品温室气体排放强度)等<sup>[20,43,49]</sup>,进而量化和比较不同生产经营模式的草原畜牧业温室气体排放强度,这对于筛选出有效的生产经营模式和减缓草原畜牧业温室气体排放强度均具有重要意义,也是目前国际前沿热点问题<sup>[12,34,43,50]</sup>。

## 2 草原畜牧业温室气体排放与减缓途径研究现状与问题

从生命周期角度来讲,草原畜牧业是全球温室气体排放的主要贡献者。因此,减缓畜牧业温室气体排放



已成为当前众多科学家研究关注的焦点<sup>[17,27]</sup>。目前,减缓畜牧业温室气体排放的途径主要有以下三个:第一种途径是通过技术和管理措施减缓畜牧业温室气体排放<sup>[17,28]</sup>;第二种途径是草原畜牧业转型和优化管理<sup>[3,51]</sup>;第三种途径是提高人们对饮食结构的认识,减少对畜产品的需求<sup>[3-4]</sup>。关于上述三种途径,本综述只关注第一种和第二种途径的研究现状与问题。

## 2.1 技术和管理层面的减缓措施

目前大多数研究只关注草原畜牧业某一环节的温室气体减排<sup>[17]</sup>,例如:肠道甲烷排放的减缓措施(如:增加精饲料、饲草添加剂等)、草地氧化亚氮和甲烷排放的减缓措施(硝化抑制剂、改变放牧强度和时间等)、增加草地碳固持的措施(如:补播、施肥和优化放牧管理等)。Gerber 等<sup>[28]</sup>指出目前的研究较多关注减缓措施对草原畜牧业中某一环节的减排效果,缺少减缓措施对整个草原畜牧业的温室气体强度影响的量化研究。他们的研究进一步指出,草地畜牧业不同组分之间的关系较为复杂,且温室气体排放源之间存在强烈的交互作用。因此,尽管单一措施会降低某一环节温室气体排放量,但是有可能会增加另一环节的温室气体的排放,可能会造成整体温室气体排放强度增加。例如,Hristov 等<sup>[17]</sup>指出,喂养优质饲草和增加饲草添加剂等措施可以在一定程度上减少肠道甲烷的排放,但是可能增加了粪便中氮的含量则会导致粪便氧化亚氮的排放增加,从而有可能导致整体温室气体排放强度增加。Henderson 等<sup>[9]</sup>研究指出,尽管改善放牧管理、豆科植物补播和施用氮肥管理可以增加土壤中碳储量,但同时也会增加土壤中氧化亚氮的排放,进而可能导致整个草地生态系统温室气体排放增加。如果进一步把畜牧业管理系统考虑在内的话,这些措施对整个草地畜牧业生产系统温室气体排放强度目前尚不清晰。因此,未来有必要从草原畜牧业系统的角度去分析某个环节采取的减排措施对整个草原畜牧业温室气体减排是否有效,这样有利于从系统的角度制定行之有效的减缓措施。

## 2.2 草原畜牧业转型和优化管理

从系统的角度探索草原畜牧业转型对减缓草原畜牧业温室气体排放的途径是目前研究者关注的重点,也是研究的热点。关于草原畜牧业转型的研究,天然放牧畜牧业普遍被认为是一种生产力相对较低和温室气体排放强度相对较高的草原畜牧业生产系统<sup>[27,52]</sup>,将其转变为集约畜牧业被认为是提高生产力水平和减少温室气体排放强度的一种有效措施。因此,天然放牧畜牧业向集约畜牧业转变已成为当今的一种主流思想<sup>[49,53-55]</sup>。然而,关于上述结论也有研究持不同观点,Soussana 等<sup>[8]</sup>、Soussana 和 Lemaire<sup>[18]</sup>、Zhuang 等<sup>[20]</sup>、Bellarby 等<sup>[27]</sup>、Meyer 等<sup>[41]</sup>、Rotz 等<sup>[56]</sup>等研究认为,相对于天然放牧畜牧业,尽管集约畜牧业通过饲喂优质饲料可以减少肠道甲烷排放,但天然放牧畜牧业温室气体排放强度仍低于集约畜牧业。主要有两个原因:集约畜牧业可能会通过额外的输入(包括饲草料、肥料、电力等)进而影响温室气体的排放,增加集约畜牧业温室气体排放总量和强度<sup>[20,34]</sup>。另外,先前的研究忽略了一个重要的因素,清单中并未考虑天然草地和人工饲草地中土壤碳吸收的差异情况。上述研究认为如果将土壤碳吸收的变化纳入排放清单中,天然放牧畜牧业可能具有较低的温室气体排放强度,这在相关的研究中也得到证实<sup>[22,34,57]</sup>。更有研究指出如果将土地利用方式引起的碳损失考虑在内,集约畜牧业温室气体排放量会更大,远高于天然放牧畜牧业<sup>[58]</sup>。但也有研究指出即使考虑土壤碳吸收的情况,天然放牧畜牧业温室气体强度仍然高于集约畜牧业,主要原因在于草地土壤有机碳库下降,导致更多的碳损失,进一步增加了天然放牧畜牧业温室气体排放强度<sup>[59]</sup>。上述研究表明,天然放牧畜牧业和集约畜牧业的温室气体排放孰高孰低,学术界尚无定论,仍处于争议中。

除此之外,随着社会经济的发展和牧区相关政策(如游牧民定居政策、生态建设项目等)的实施,草原畜牧业生产经营模式正在发生改变,呈现多样化的草原畜牧业管理模式。部分研究对已有的不同经营模式的草原畜牧业温室气体排放强度进行了研究。例如:Schönbach 等<sup>[60]</sup>系统分析了中国内蒙古地区不同放牧强度下天然放牧畜牧业的温室气体排放强度,得出轻度放牧具有较低的温室气体排放强度,主要归因于较低的牲畜肠道甲烷排放和较低的土壤有机碳排放;Zhuang 等<sup>[31]</sup>研究发现中国青藏高原草场共用的四季移动天然放牧畜牧业向草场承包到户的持续放牧的无季节移动天然放牧畜牧业转变增加了草原畜牧业温室气体排放强度,主要原因为草场承包到户的持续放牧的无季节移动天然放牧畜牧业较草场共用的四季移动天然放牧畜牧业

直接改变了地表的植被特征,同时也改变了土壤环境(如温度、含水量和透气性等)及其养分含量,从而使植物碳分配模式和土壤微生物代谢过程等发生改变,影响了草地生态系统的碳循环过程,最终影响了天然草地畜牧业生产系统温室气体排放强度的变化。虽然目前研究比较了不同草原畜牧业生产系统温室气体排放强度孰高孰低,并从自然科学的角度对结果差异进行了解读。然而,草原畜牧业是一个集社会系统和生态系统耦合而成的复杂系统。目前对影响草原畜牧业温室气体排放差异的原因主要集中在生态系统层面的分析,忽略了社会系统的作用,无法反映草原畜牧业社会系统和生态系统的相互反馈机制,无法深入解读影响温室气体排放强度差异背后的机制。因此,未来迫切需要从社会生态系统角度分析不同草原畜牧业生产经营模式下温室气体排放强度差异的背后机制。

### 3 草原畜牧业温室气体研究展望

已有的草原畜牧业温室气体排放的研究对于低碳型草原畜牧业的发展具有借鉴意义。然而,草原畜牧业是一个包含着环境、资源、经济、社会、管理等多层面且系统内部气候-土壤-草地-家畜-管理之间相互作用的非常复杂的社会生态系统。未来需要在以下三个方面加强研究,具体如下:

(1)完善草原畜牧业温室气体排放研究框架体系及提升研究方法。目前的草原畜牧业温室气体排放分析框架体系尚不完善,限制了相关研究的开展。未来研究需要进一步完善已有的框架体系,包括考虑外部输入、土壤有机碳的变化以及畜牧业温室气体排放强度衡量指标的选择。在此基础上,需要对草原畜牧业温室气体排放进行量化研究。目前量化草原畜牧业温室气体排放的方法主要是基于排放系数或者经验模型来计算各个部分草原畜牧业温室气体排放,然后累积加和获得总体畜牧业温室气体排放。然而,这类方法存在两方面的不足:一是无法反映系统内部元素间的相互作用,即气候-土壤-草地-家畜-管理;二是无法反映出区域气候、土壤、管理水平等方面存在的时空变异性,致使很难对草原畜牧业具体减缓策略效果提供有效的评估<sup>[61-62]</sup>。为弥补目前研究方法的不足,依据生物化学循环过程建立的机理模型相继出现,如:可持续的放牧管理系统模型(Sustainable Grazing Systems, SGS, SGS)、反硝化-分解作用(Denitrification-Decomposition, DNDC)、整合农场系统模型(Integrated Farm System Model, IFSM)等。其优点是可以反映具体的实际情况,包括气候、植被、牲畜、管理等差异。然而,这些模型尚不完善,导致目前的研究结果存在较大的不确定性。随着人们对机理过程的认识加深以及观测数据的完善,机理模型将会更加完善并得到广泛应用,为深入系统研究草原畜牧业生产系统温室气体排放提供方法指导。

(2)加强对草原畜牧业温室气体减缓措施的综合评价。随着牧区社会经济的发展和草场政策的执行,牧区与更大尺度上的社会经济之间的联系更加紧密,对外界资源的依赖性也增强。同时,原本处于气候多变的牧区,愈发受到极端气候(极端降雨、极端干旱、极端低温等)的干扰。面对市场、政策和气候等因素的多重影响,草原畜牧业的管理方式也在发生变化,但这些变化对草原畜牧业温室气体排放的影响尚不明晰。此外,越来越多的减缓措施(如提高精饲养比例、改善牲畜性能、添加硝化抑制剂、减少放牧时间和改变放牧方式等)应用于草原畜牧业,但是这些措施对草原畜牧业整体温室气体排放的影响仍不清楚。目前研究主要侧重对已有的草原畜牧业生产系统的温室气体排放强度评估,未来需要充分考虑系统过程、市场、政策、技术和管理等因素,深入研究这些影响因素对草原畜牧业温室气体排放强度的综合影响,为制定有效的减缓措施提供科学支撑。

(3)深入研究影响草原畜牧业温室气体排放强度差异的机制。社会生态系统是一个由社会和生态系统嵌套组成的、具有等级结构和复杂相互作用和反馈关系的系统,用于理解社会和生态系统中的复杂联系和互动关系<sup>[63-64]</sup>。草原畜牧业作为典型的社会生态系统,然而,目前在解释不同草原畜牧业生产系统的差异的因素主要侧重于自然生态系统层面,鲜有研究考虑社会系统的作用,致使无法反映草原畜牧业社会系统和生态系统的相互反馈机制。未来需要从社会生态系统角度分析不同草原畜牧业生产模式温室气体排放强度差异的机制,深刻阐明这些差异背后的社会系统和生态系统的相互反馈机制,试图找出影响低碳畜牧业发展的关

键因素,为政策的制定和设计提供指导。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] Suttie J M, Reynolds S G, Batello C. Grasslands of the World. Plant Production and Protection Series 34. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2005.
- [ 2 ] FAO. Livestock's Long Shadow: Environmental Issues and Options. Rome: FAO, 2006.
- [ 3 ] FAO. Greenhouse Gas Emissions from Ruminant Supply Chains, A Global Life Cycle Assessment. Rome: FAO, 2013.
- [ 4 ] Herrero M, Henderson B, Havlik P, Thornton P K, Conant R T, Smith P, Wiersenius S, Hristov A N, Gerber P, Gill M, Butterbach-Bahl K, Valin H, Garnett T, Stehfest E. Greenhouse gas mitigation potentials in the livestock sector. *Nature Climate Change*, 2016, 6(5): 452-461.
- [ 5 ] Bai Z H, Ma W Q, Ma L, Velthof G L, Wei Z B, Havlík P, Oenema O, Lee M R F, Zhang F S. China's livestock transition: driving forces, impacts, and consequences. *Science Advances*, 2018, 4(7): eaar8534.
- [ 6 ] Du Y Y, Ge Y, Ren Y, Fan X, Pan K X, Lin L S, Wu X, Min Y, Meyerson L A, Heino M, Chang S X, Liu X Z, Mao F, Yang G F, Peng C H, Qu Z L, Chang J, Didham P K. A global strategy to mitigate the environmental impact of China's ruminant consumption boom. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 4133.
- [ 7 ] Chen W W, Wolf B, Zheng X H, Yao Z S, Butterbach-Bahl K, Brüggemann N, Liu C Y, Han S H, Han X G. Annual methane uptake by temperate semiarid steppes as regulated by stocking rates, aboveground plant biomass and topsoil air permeability. *Global Change Biology*, 2011, 17(9): 2803-2816.
- [ 8 ] Soussana J F, Tallec T, Blanford V. Mitigating the greenhouse gas balance of ruminant production systems through carbon sequestration in grasslands. *Animal*, 2010, 4: 334-350.
- [ 9 ] Henderson B B, Gerber P J, Hilinski T E, Hilinski T E, Falcucci A, Ojima D S, Salvatore M, Conant R T. Greenhouse gas mitigation potential of the world's grazing lands: Modeling soil carbon and nitrogen fluxes of mitigation practices. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2015, 207: 91-100.
- [ 10 ] MacLeod M J, Vellinga T, Opio C, Falcucci A, Tempio G, Henderson B, Makkar H, Mottet A, Robinson T, Steinfeld H, Gerber P J. Invited review: a position on the global livestock environmental assessment model (GLEAM). *Animal*, 2018, 12(2): 383-397.
- [ 11 ] Nieto M I, Barrantes O, Privittello L, Reiné R. Greenhouse gas emissions from beef grazing systems in semi-arid rangelands of central Argentina. *Sustainability*, 2018, 10(11): 4228.
- [ 12 ] Savian J V, Schons R M T, Marchi D E, de Freitas T S, da Silva Neto G F, Mezzalana J C, Berndt A, Bayer C, de Faccio Carvalho P C. *Rotational stocking*: a grazing management innovation that has high potential to mitigate methane emissions by sheep. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 186: 602-608.
- [ 13 ] Vasconcelos K, Farinha M, Bernardo L, do N Lampert V, Gianezini M, da Costa J S, Filho A S, Genro T C M, Ruviano C F. Livestock-derived greenhouse gas emissions in a diversified grazing system in the endangered Pampa biome, Southern Brazil. *Land Use Policy*, 2018, 75: 442-448.
- [ 14 ] Allard V, Soussana J F, Falcimagne R, Berbigier P, Bonnefond J M, Ceschia E, D'hour P, Hénault C, Laville P, Martin C, Pinares-Patiño C. The role of grazing management for the net biome productivity and greenhouse gas budget ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  and  $\text{CH}_4$ ) of semi-natural grassland. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2007, 121(1/2): 47-58.
- [ 15 ] Cai Y J, Wang X D, Ding W X, Tian L L, Zhao H, Lu X Y. Potential short-term effects of yak and Tibetan sheep dung on greenhouse gas emissions in two alpine grassland soils under laboratory conditions. *Biology and Fertility of Soils*, 2013, 49(8): 1215-1226.
- [ 16 ] Cai Y J, Wang X D, Tian L L, Zhao H, Lu X Y, Yan Y. The impact of excretal returns from yak and Tibetan sheep dung on nitrous oxide emissions in an alpine steppe on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 76: 90-99.
- [ 17 ] Hristov A N, Oh J, Lee C, Meinen R, Montes F, Ott T, Firkins J, Rotz A, Dell C, Adesogan C, Yang W, Tricarico J, Kebreab E, Waghorn G, Dijkstra J, Gerber P J, Henderson B, Makkar H. Mitigation of Greenhouse Gas Emissions in Livestock Production -A Review of Technical Options for Non- $\text{CO}_2$  Emission. Rome, Italy: FAO, 2013.
- [ 18 ] Soussana J F, Lemaire G. Coupling carbon and nitrogen cycles for environmentally sustainable intensification of grasslands and crop-livestock systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, 190: 9-17.
- [ 19 ] Del Prado A, Crosson P, Olesen J E, Rotz C A. Whole-farm models to quantify greenhouse gas emissions and their potential use for linking climate change mitigation and adaptation in temperate grassland ruminant-based farming systems. *Animal*, 2013, 7 Suppl 2: 373-385.
- [ 20 ] Zhuang M H, Gongbuzeren, Li W J. Greenhouse gas emission of pastoralism is lower than combined extensive/intensive livestock husbandry: a case study on the Qinghai-Tibet Plateau of China. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 147: 514-522.
- [ 21 ] Del Prado A, Mas K, Pardo G, Gallejones P. Modelling the interactions between C and N farm balances and GHG emissions from confinement dairy

- farms in northern Spain. *Science of the Total Environment*, 2013, 465: 156-165.
- [22] Schils R L M, Eriksen J, Ledgard S F, Vellinga T V, Kuikman P J, Luo J, Petersen S O, Velthof G L. Strategies to mitigate nitrous oxide emissions from herbivore production systems. *Animal*, 2013, 7 Suppl 1: 29-40.
- [23] Zhu X X, Luo C Y, Wang S P, Zhang Z H, Cui S J, Bao X Y, Jiang L L, Li Y M, Li X N, Wang Q, Zhou Y. Effects of warming, grazing/cutting and nitrogen fertilization on greenhouse gas fluxes during growing seasons in an alpine meadow on the Tibetan Plateau. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, 214-215: 506-514.
- [24] Koncz P, Pintér K, Balogh J, Papp M, Hidy D, Csintalan Z, Molnár E, Szaniszló A, Kampfl G, Horváth L, Nagy Z. Extensive grazing in contrast to mowing is climate-friendly based on the farm-scale greenhouse gas balance. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2017, 240: 121-134.
- [25] 娄珊宁, 陈先江, 侯扶江. 草地农业生态系统的碳平衡分析方法. *生态学报*, 2017, 37(2): 557-565.
- [26] Robèrt K H. Tools and concepts for sustainable development, how do they relate to a general framework for sustainable development, and to each other? *Journal of Cleaner Production*, 2000, 8(3): 243-254.
- [27] Bellarby J, Tirado R, Leip A, Weiss F, Lesschen J P, Smith P. Livestock greenhouse gas emissions and mitigation potential in Europe. *Global Change Biology*, 2013, 19(1): 3-18.
- [28] Gerber P J, Hristov A N, Henderson B, Makkar H, Oh J, Lee C, Meinen R, Montes F, Ott T, Firkins J, Rotz A, Dell C, Adesogan A T, Yang W Z, Tricarico J M, Kebreab E, Waghorn G, Dijkstra J, Oosting S. Technical options for the mitigation of direct methane and nitrous oxide emissions from livestock: a review. *Animal*, 2013, 7 Suppl 2: 220-234.
- [29] Huerta A R, Güterica L P, de la Salud Rubio Lozano M. Environmental impact of beef production in Mexico through life cycle assessment. *Resources, Conservation and Recycling*, 2016, 109: 44-53.
- [30] Wang X Q, Kristensen T, Mogensen L, Knudsen M T, Wang X D. Greenhouse gas emissions and land use from confinement dairy farms in the Guanzhong plain of China- using a life cycle assessment approach. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 113: 577-586.
- [31] Zhuang M H, Gongbuzeren, Zhang J, Li W J. Community-based seasonal movement grazing maintains lower greenhouse gas emission intensity on Qinghai-Tibet Plateau of China. *Land Use Policy*, 2019, 85: 155-160.
- [32] Cerri C C, Moreira C S, Alves P A, Raucci G S, de Almeida Castigioni B, Mello F F C, Cerri D G P, Cerri C E P. Assessing the carbon footprint of beef cattle in Brazil: a case study with 22 farms in the State of Mato Grosso. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 112: 2593-2600.
- [33] Dick M, da Silva M A, Dewes H. Life cycle assessment of beef cattle production in two typical grassland systems of southern Brazil. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 96: 426-434.
- [34] Ogino A, Sommart K, Subepang S, Mitsumori M, Hayashi K, Yamashita T, Tanaka Y. Environmental impacts of extensive and intensive beef production systems in Thailand evaluated by life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 112: 22-31.
- [35] Parra A S, de Figueiredo E B, de Bordonal R O, Moitinho M R, De Bortoli Teixeira D, La Scala Jr N. Greenhouse gas emissions in conversion from extensive pasture to other agricultural systems in the Andean region of Colombia. *Environment, Development and Sustainability*, 2019, 21(1): 249-262.
- [36] 赵亮, 陈懂懂, 徐世晓, 赵新全, 李奇. 传统放牧模式下青藏高原高寒牧区藏系绵羊温室气体排放研究. *家畜生态学报*, 2016, 37(8): 36-44.
- [37] ISO. ISO 14040 Environmental management-life cycle assessment-principles and framework. Geneva: ISO, 2006.
- [38] Pelletier N, Pirog R, Rasmussen R. Comparative life cycle environmental impacts of three beef production strategies in the Upper Midwestern United States. *Agricultural Systems*, 2010, 103(6): 380-389.
- [39] Lupo C D, Clay D E, Benning J L, Stone J J. Life-cycle assessment of the beef cattle production system for the northern great plains, USA. *Journal of Environmental Quality*, 2013, 42(5): 1386-1394.
- [40] McDermot C, Elavarthi S. Rangelands as carbon sinks to mitigate climate change: a review. *Journal of Earth Science & Climatic Change*, 2014, 5(8): 221.
- [41] Meyer R, Cullen B R, Eckard R J. Modelling the influence of soil carbon on net greenhouse gas emissions from grazed pastures. *Animal Production Science*, 2016, 56(3): 585-593.
- [42] Song J, Wan S Q, Peng S S, Piao S L, Ciais P, Han X G, Zeng D H, Cao G M, Wang Q B, Bai W M, Liu L L. The carbon sequestration potential of China's grasslands. *Ecosphere*, 2018, 9(10): e02452.
- [43] de Figueiredo E B, Jayasundara S, de Oliveira Bordonal R, Berchielli T T, Reis R A, Wagner-Riddle C, La Scala Jr N. Greenhouse gas balance and carbon footprint of beef cattle in three contrasting pasture-management systems in Brazil. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 142: 420-431.
- [44] O'Brien D, Shalloo L, Patton J, Buckley F, Grainger C, Wallace M. A life cycle assessment of seasonal grass-based and confinement dairy farms. *Agricultural Systems*, 2012, 107: 33-46.



- [45] White T A, Snow V O, King W M G. Intensification of New Zealand beef farming systems. *Agricultural Systems*, 2010, 103(1): 21-35.
- [46] 汪诗平, Wilkes A. 三江源区低碳型草地畜牧业与碳贸易和生态补偿可行性探讨. *农村经济*, 2014, (4): 106-110.
- [47] Bernués A, Ruiz R, Olaizola A, Villalba D, Casasús I. Sustainability of pasture-based livestock farming systems in the European Mediterranean context: synergies and trade-offs. *Livestock Science*, 2011, 139(1/2): 44-57.
- [48] Ripoll-Bosch R, de Boer I J M, Bernués A, Vellinga T V. Accounting for multi-functionality of sheep farming in the carbon footprint of lamb: a comparison of three contrasting Mediterranean systems. *Agricultural Systems*, 2013, 116: 60-68.
- [49] Salvador S, Corazzin M, Romanzin A, Bovolenta S. Greenhouse gas balance of mountain dairy farms as affected by grassland carbon sequestration. *Journal of Environmental Management*, 2017, 196: 644-650.
- [50] Bogaerts M, Cirhigiri L, Robinson I, Rodkin M, Hajjar R, Costa Junior C, Newton P. Climate change mitigation through intensified pasture management: estimating greenhouse gas emissions on cattle farms in the Brazilian Amazon. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 162: 1539-1550.
- [51] Cohn A S, Mosnier A, Havlík P, Valin H, Herrero M, Schmid E, O'Hare M, Obersteiner M. Cattle ranching intensification in Brazil can reduce global greenhouse gas emissions by sparing land from deforestation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, 111(20): 7236-7241.
- [52] Opio C, Gerber P, Mottet A, Falcucci A, Tempio G, MacLeod M, Vellinga T, Henderson B, Steinfeld H. Greenhouse Gas Emissions from Ruminant Supply Chains- A Global Life Cycle Assessment. Rome: FAO, 2013.
- [53] Stackhouse-Lawson K R, Rotz C A, Oltjen J W, Mitloehner F M. Carbon footprint and ammonia emissions of California beef production systems. *Journal of Animal Science*, 2012, 90(12): 4641-4655.
- [54] O'Brien D, Shalloo L, Buckley F, Horan B, Grainger C, Wallace M. The effect of methodology on estimates of greenhouse gas emissions from grass-based dairy systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2011, 141(1/2): 39-48.
- [55] Ruviero C F, de Léis C M, do N Lampert V, Barcellos J O J, Dewes H. Carbon footprint in different beef production systems on a southern Brazilian farm: a case study. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 96: 435-443.
- [56] Rotz C A, Soder K J, Skinner R H, Dell C J, Kleinman P J, Schmidt J P, Bryant R B. Grazing can reduce the environmental impact of dairy production systems. *Forage and Grazing Lands*. [2009-09-16]. <https://pubag.nal.usda.gov/pubag/downloadPDF.xhtml?id=44272&content=PDF>.
- [57] Veysset P, Lherm M, Bébin D. Energy consumption, greenhouse gas emissions and economic performance assessments in French Charolais suckler cattle farms: model-based analysis and forecasts. *Agricultural Systems*, 2010, 103(1): 41-50.
- [58] Burney J A, Davis S J, Lobell D B. Greenhouse gas mitigation by agricultural intensification. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2010, 107(26): 12052-12057.
- [59] Bellamy P H, Loveland P J, Bradley R I, Lark R M, Kirk G J D. Carbon losses from all soils across England and Wales 1978-2003. *Nature*, 2005, 437(7056): 245-248.
- [60] Schönbach P, Wolf B, Dickhöfer U, Wiesmeier M, Chen W W, Wan H W, Gierus M, Butterbach-Bahl, Kögel-Knabner I, Susenbeth A, Zheng X H, Taube F. Grazing effects on the greenhouse gas balance of a temperate steppe ecosystem. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2012, 93(3): 357-371.
- [61] FAO. Greenhouse Gas Emissions from the Dairy Sector: A Life Cycle Assessment. Rome, Italy: FAO, 2010.
- [62] Stewart A A, Alemu A W, Ominski K H, Wilson C H, Tremorin D G, Wittenberg K M, Tenuta M, Janzen H H. Whole-farm greenhouse gas emissions from a backgrounding beef production system using an observation-based and model-based approach. *Canadian Journal of Animal Science*, 2014, 94(3): 463-477.
- [63] Ostrom E. A general framework for analyzing sustainability of social-ecological systems. *Science*, 2009, 325(5939): 419-422.
- [64] McGinnis M D, Ostrom E. Social-ecological system framework: initial changes and challenges. *Ecology and Society*, 2014, 19(2): 30.