

刘晓洁<sup>1,2</sup> 胡兆民<sup>2,3</sup> 邓祥征<sup>1,2</sup> 岳天祥<sup>1</sup> 孙志刚<sup>1</sup> 董金玮<sup>1</sup> 郭金花<sup>1</sup>

# 碳中和目标下生态草牧业的物质流 分析框架与发展策略

## 摘要

实现碳达峰、碳中和中长期目标,既是国家积极应对气候变化的责任担当,也是生态草牧业高质量发展的必然要求。草牧业作为“草-畜”协调发展、相互依存的有机整体,其生命周期包括从牧草种植和饲草加工,到畜牧养殖、畜产品加工和运输,再到消费、废弃物处理,均与碳排放有关。本文基于物质流分析方法,构建了全生命周期生态草牧业研究框架,分析了不同环节的碳源和碳汇特征、影响因素和存在的问题,探讨了碳中和目标下生态草牧业发展主要途径,提出草牧业高质量发展要兼顾增强草地碳汇能力、控制畜牧生产碳源、提高清洁能源利用率等生态任务,并建议组织多部门联合技术攻关和规划实施草牧业碳中和方案,为实现国家碳中和目标提供支撑。

## 关键词

碳中和;物质流分析;生态草牧业;碳汇;碳源

中图分类号 S8-1;X192

文献标志码 A

收稿日期 2022-01-16

资助项目 中国科学院战略性先导科技专项(A类)资助(XDA26050200)

## 作者简介

刘晓洁,女,博士,副研究员,研究方向为可持续食物系统与粮食安全。liuxj@igsnr.ac.cn

郭金花(通信作者),女,博士后,研究方向为资源管理与可持续发展。guojinhua871001@126.com

## 0 引言

2020年9月22日,国家主席习近平在第七十五届联合国大会上宣布我国将力争于2030年前达到碳达峰,努力争取2060年前实现碳中和的目标。“碳中和”是指在规定时期内人为二氧化碳(CO<sub>2</sub>)移除在全球范围抵消人为CO<sub>2</sub>排放时,可实现CO<sub>2</sub>净零排放,也称之为“CO<sub>2</sub>净零排放”<sup>[1]</sup>。畜牧业是重要的温室气体排放来源,排放量占全球温室气体排放总量的18%<sup>[2]</sup>,其中牛、羊等草食反刍牲畜排放量占畜牧业总排放量的55.2%<sup>[3]</sup>。我国拥有60亿亩草地,除用于发展草食畜牧业外,它还发挥着碳汇的重要功能。因此,探索碳中和目标下生态草牧业(Grass-based Livestock Husbandry, GLiH)的高质量发展至关重要。

生态草牧业是指通过天然草地管理和人工种草,经合适的技术加工获取优质高效的饲草料,进行畜牧养殖和加工的生产体系,它强调的是草-畜结合、草-畜协调、草-畜互为依存,生产功能和生态功能的统一和双赢<sup>[4]</sup>。从全生命周期角度来看,生态草牧业碳排放边界与国际畜牧业碳排放研究边界较为近似,不仅包括草地碳汇,以及制草、养畜等生产过程温室气体排放,还应包括饲草料加工、畜产品运输、消费和废弃物处理等各个环节所产生的温室气体。以二氧化碳当量(CO<sub>2</sub>e)计算,畜牧业温室气体排放高达71亿t,其中饲料生产和加工环节占畜牧业总排放量的45%,奶牛在消化过程中产生的温室气体占39%,粪肥腐解过程产生的温室气体占10%,剩余部分来自动物产品的加工和运输<sup>[5]</sup>。我国草地植被碳储量约占全球植被碳储量的1.3%~11.3%,草地土壤碳储量约占全球土壤有机碳储量的9.7%~22.5%。然而,由于自然因素的影响和人为因素的干扰,草地生态受到严重破坏,草地碳储量下降。

目前,我国对畜牧业温室气体排放核算,并未将畜产品加工、储存、运输及废弃物处理等环节纳入进来,而是将其分别纳入工业和交通运输业。从全生命周期角度,需要对生态草牧业研究范围进行重新界定,需要对牧草种植和饲草加工、畜牧养殖、畜产品加工与运输、消费及废弃物处理等环节进行全方位分析。物质流分析(Material Flow Analysis, MFA)是一种根据物质守恒定律,系统且定量地评估具有时空边界的社会-环境系统中物质的存量和流量,从而追踪物质在该系

1 中国科学院地理科学与资源研究所,北京,100101

2 中国科学院大学,北京,100049

3 中国科学院植物研究所生态草牧业工程实验室,北京,100093

统中流动的源、路径和汇的研究方法<sup>[6-7]</sup>.利用物质流分析法,构建生态草牧业研究框架,可以追踪不同资源要素流动全过程,理解草牧业全产业链物质循环利用机理,为开展草牧业系统多要素和多流融合研究提供理论框架.

本文从生命周期角度提出生态草牧业物质流研究框架,分析框架内相关物质和能源的生命周期循环和规律;基于研究框架,梳理文献识别草牧业不同环节碳汇和碳源的特征、影响因素和存在的问题;通过分析生态草牧业提升固碳能力和减少碳排放的主要途径,提出气候变化下生态草牧业的发展方向和应对之策,为我国生态草牧业转型升级和高质量发展提供理论依据.

### 1 基于物质流分析法的生态草牧业研究框架

本文将生态草牧业划分为4个阶段、5种流和2个转化过程(图1).

1)4个阶段:牧草种植和饲草加工(P1),畜牧养殖、畜产品加工和运输(P2),消费(P3)到废弃物管理(P4);

2)5种流:物质及能量流、贸易流、价值流、环境流和生态服务流;

3)2个转化过程:草牧业系统物质的转化过程(P1—P4)与市场交换过程(M1—M5).转化过程用于刻画投入与产出平衡,市场交换过程则在贸易流、

价值流、国内物质和能量流的共同作用下刻画物质与产品供需平衡.

根据草牧业物质流分析中的转化过程,将4个阶段划分为7个环节.从牧草种植(P11)生命周期起始到饲草加工(P12),到畜牧养殖(P21)和畜产品加工(P22),经过运输环节(P23)到消费(P3),最后以废弃物处理(P4)作为草牧业生命周期结束.

5种流具体描述如下:

1)物质及能量流,指在草牧业系统各个环节所发生的要素投入、半成品和成品的流动,旨在研究草牧业系统内物质、能量和元素流量、存量及其平衡关系.

2)贸易流,指为实现草牧业系统供需平衡而产生的物质和能量流动,旨在刻画贸易总量和结构变化对系统内物质流动和能量流动的影响.

3)价值流,指从草牧业投入要素转变为使用产品、到废弃并为其赋予价值的全部活动.产品在使用之前价值流与物质、能量流流动方向相反,在使用后,考虑到废弃物处理消费者付费原则,价值流与物质、能量流流动方向相同.

4)环境流,指在草牧业全生命周期过程中所发生的环境排放,包括碳排放等,旨在研究草牧业系统生产效率及其资源环境影响.

5)生态服务流,指牧草在保护草地生态系统的同时,对于草地生产力的提高.旨在解决我国人畜争粮、饲草料供给不足问题.

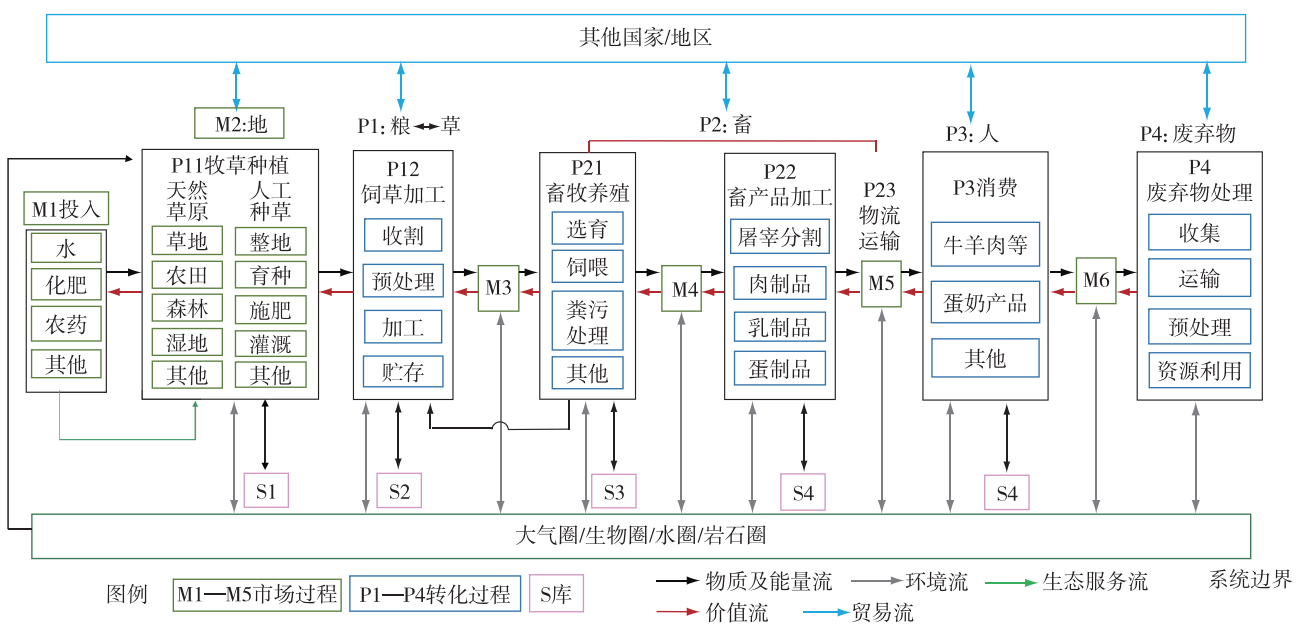


图1 基于物质流分析方法的生态草牧业研究框架

Fig. 1 Framework of ecological GLiH based on material flow analysis (MFA)

4 种库描述如下:

1) 牧草品种库,指优质牧草品种培育与储备,旨在选育和储备适宜种植的优质牧草品种资源;

2) 饲草料库,指供畜牧养殖所需而储备的饲草料,旨在解决牧区因冬季雪灾或歉年导致饲草不足的问题,实现稳定的饲草供给;

3) 畜牧养殖库,指畜牧养殖的存栏量,旨在保证畜产品的市场稳定供给,侧面反映草牧业发展水平;

4) 畜产品库,指在加工、运输、消费等流通环节中畜产品的储备,旨在满足畜产品加工和人类消费市场需求。

从物质流角度分析,库即系统的“存量”。从全产业链角度,库的作用可以充分协调联动上下游不同环节,对抵御市场风险冲击和产业可持续发展具有重要的意义。

## 2 生态草牧业不同环节的碳汇与碳源分析

生态草牧业中既有从大气中吸收  $\text{CO}_2$  的碳汇,也有向大气释放  $\text{CO}_2$  的碳源,涉及环节多链条长、过程复杂。碳汇包括有机碳固定和土壤固碳。有机碳固定是指天然草地、人工种植的苜蓿和燕麦草,以及玉米和大豆等绿色植物从空气中获取  $\text{CO}_2$ ,经过光合作用转化为葡萄糖,再合成为植物体的碳化合物,经过食物链的传递,成为动物体的碳化合物<sup>[8]</sup>。土壤固

碳是指采用退牧还草、退耕还林还草和草原修复生态工程等相应管理措施来提高土壤中的有机和无机碳含量,将大气中的二氧化碳固持在土壤碳库中。碳源包括饲草料种植环节化肥、农药投入和农业机械使用过程中化石燃料燃烧、饲草料加工环节能源投入、畜牧养殖环节  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  等温室气体排放和养殖管理过程中化石燃料消耗,以及畜产品加工、运输、消费和废弃物处理过程需要的能源投入(图2)。

### 2.1 天然草地 P11:生态草牧业的固碳主体

草地作为陆地生态系统重要的碳库,具备强大的碳汇功能。我国天然草地总碳储量为 28.95 Pg,其中,植被碳储量为 1.82 Pg(以 C 计),土壤有机碳储量为 27.13 Pg(以 C 计)<sup>[9]</sup>。健康的天然草地生态系统多表现为碳汇,具有较好的固碳能力和完整的生态、生产功能。在干旱、风沙、洪涝、盐碱和地下水水位变化等自然因素,以及过度放牧刈割、樵采等人为因素的影响下,草地可能发生严重退化,丧失原有生态功能和生产性能,并从碳汇转变为碳源。这一转变主要归咎于严重退化的草地生态系统,生产力大幅下降,造成植被对大气中  $\text{CO}_2$  同化和固定能力的损失。同时生态系统地下部分的根系生物量萎缩减少、土壤有机碳含量大幅下降,使得土壤碳库迅速流失,失去原有的固碳能力(图3)。

然而,全国 90% 的天然草地发生退化造成草地

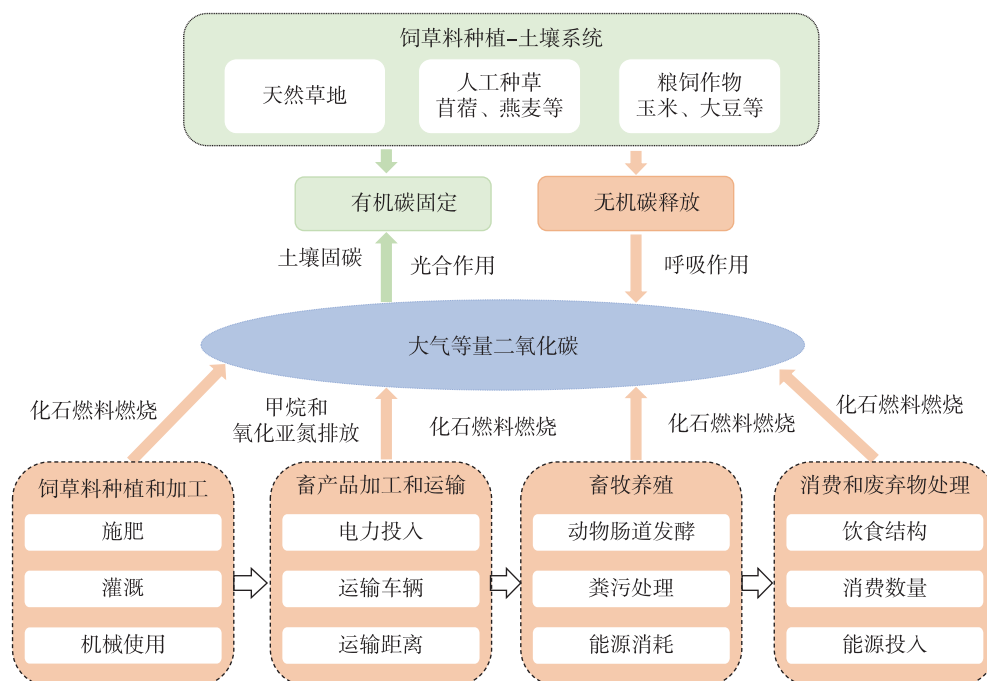


图2 生态草牧业碳汇、碳源分析

Fig. 2 Analysis of carbon sinks and sources of ecological GLiH

刘晓洁,等.碳中和目标下生态草牧业的物质流分析框架与发展策略.

植被覆盖率下降,降低了草地固碳能力<sup>[10]</sup>.典型草原开垦 35 年后,其土壤和根系有机碳截存比围封草地分别降低了 37.9%和 70.8%<sup>[11]</sup>.近 40 年来的过度放牧使草地表层土壤中碳贮量降低了 12.1%<sup>[12]</sup>.另外,草地系统对全球气候变化的响应也可能影响其碳源汇功能的演变.如果未来全球气温升高 2 ℃,青藏高原草地的土壤碳储量将会下降 10%,从而导致青藏高原生态系统由大气 CO<sub>2</sub> 的汇转变为源<sup>[13]</sup>.

### 2.2 饲草料加工 P12: 饲草料用耕地中的碳排放源

目前国内饲草料生产满足不了养殖需求和饲料依赖进口的窘境.苜蓿缺口为(130~430)万 t,燕麦缺口为(30~89)万 t<sup>[14]</sup>.2017 年我国燕麦和苜蓿进口量分别为 30.45 万 t 和 153.67 万 t,比 2010 年增

加了 4.3 倍和 5.7 倍<sup>[15]</sup>;大豆进口量从 2002 年的 1 131 万 t 一直增加到 2019 年的 8 851 万 t,增加 6.8 倍;玉米进口量 2019 年为 479 万 t,比 2018 年增加了 38.6%;饲料用鱼粉进口量常年维持在 150 万 t 左右,约占全球鱼粉产量的 30%(图 4,数据来源于《中国统计年鉴》).据国家统计局资料显示,2013 年我国人工草地面积 1.8 亿亩,仅为天然草地面积的 3%.青饲料播种面积在 1980—2018 年期间增长了 10%.

为提升牧草和饲料粮产量与品质,人工草地与青饲种植需要采取松耙、补播、施肥、灌溉等农业技术措施,需要农机、化肥和农药的投入.随着消费需求的进一步增大,饲草料作物种植所需耕地将进一

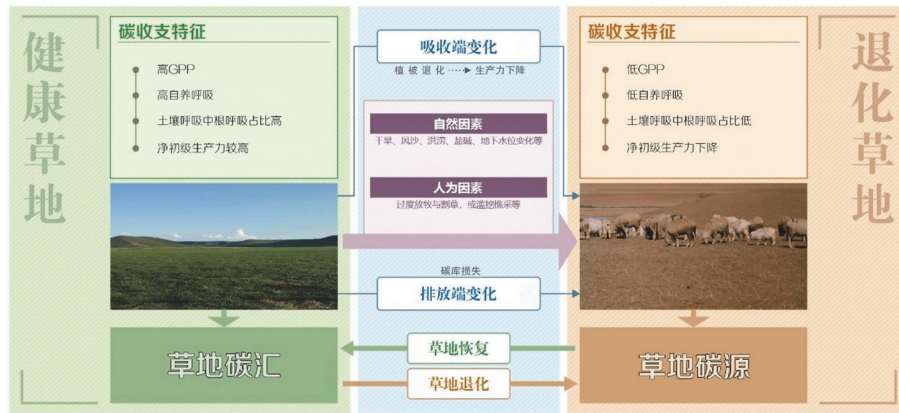


图 3 草地退化导致生态系统源汇功能逆转

Fig. 3 Grassland degradation leads to the reversal of ecosystem source and sink functions

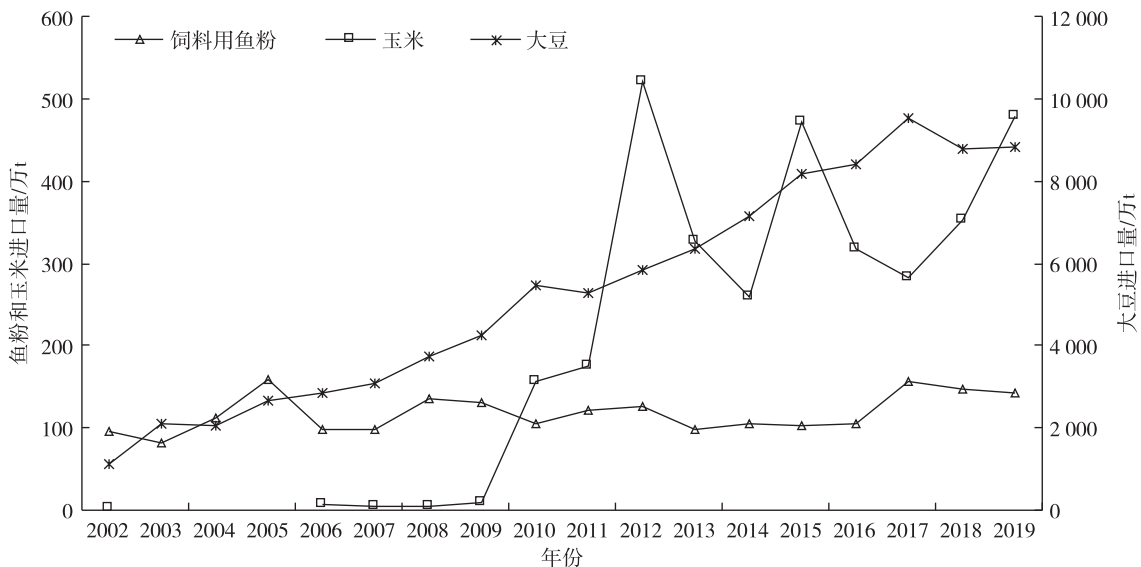


图 4 2002—2019 年我国主要饲料原料进口

Fig. 4 China's feed grain imports from 2002 to 2019

步增长,温室气体排放问题将越来越突出.发达国家十分重视人工草地和草畜产业,畜牧业占农业的比重普遍超过60%,草产业对畜牧业产值的贡献率均超过60%.而我国畜牧业占农业的比重为30%左右,草原畜牧业仅占全国畜牧业总产值的4%左右.建设优质高效低碳人工草地可以使饲草产量提高10~20倍,有望从根本上解决饲草料短缺的瓶颈,有效遏制过度放牧引起的草地大面积退化和生态功能衰退.

### 2.3 畜牧养殖 P21:非二氧化碳温室气体排放的重要来源

我国畜牧业发展迅速.1980—2020年,肉类总产量增加了7倍,牛羊肉和牛奶的产量分别增加了15倍和29倍,比重也从6%增加至15%,增速远高于肉类和猪肉(图5,数据来源于《中国统计年鉴》).畜牧养殖过程是农业非二氧化碳温室气体主要的排放源,比重接近一半.自2005年以来,联合国粮农组织(FAO)相继发布《从畜牧业着手应对气候变化》、《反刍动物供给链的温室气体排放》、《猪与鸡供给链的温室气体排放》、《奶业温室气体排放》等14个相关报告.美、英、日等发达国家每年定期发布温室气体报告,其中2020年美国环境署发布的报告围绕畜种和畜牧生产活动进行了精细化测算.

2010年我国的温室气体排放总量约为95.5亿t CO<sub>2</sub>e,其中农业活动约占8.7%,畜牧业约占农业的42.8%.甲烷和氧化亚氮排放主要来源于农业活动,占比高达40.5%和65.4%<sup>[16]</sup>.畜禽养殖温室气体排放主要源自动物的肠道发酵和粪便管理排放.其中:肠道发酵CH<sub>4</sub>排放占我国畜牧业温室气体排放总量的66.6%,粪便管理过程中的N<sub>2</sub>O和CH<sub>4</sub>排放占比

分别为18.2%和15.1%;从畜禽种类来看,反刍动物(牛、羊)为主要来源,排放占比高达72.4%<sup>[17]</sup>.

### 2.4 畜产品加工与运输 P22、P23:不容忽视的碳排放环节

畜禽屠宰加工环节的能源消耗所产生的温室气体排放属于畜牧业间接的温室气体排放.根据联合国粮农组织(FAO)测算,全球动物产品的加工和运输所产生的碳排放约占部门碳排放的10%.孟祥海等<sup>[3]</sup>根据FAO 2006年发布的标准,我国猪肉、牛肉、羊肉、禽肉、牛奶和禽蛋的屠宰加工耗能系数分别为3.76、4.37、10.4、2.59、1.12和8.16 MJ/kg.另外,畜产品加工环节的碳排放呈现逐年增加趋势<sup>[3]</sup>.农产品加工二氧化碳排放的因素主要有碳排放强度、能源消费结构、人口规模和经济增长4个因素<sup>[18]</sup>.

冷链物流是畜产品重要的运输模式,其碳排放主要由车辆行驶和制冷机组在运输和卸货过程中运行所消耗的燃油产生<sup>[19-20]</sup>.冷藏车类型、运输批量和转运配送方式是影响能源消耗的关键因素<sup>[21]</sup>.冷链物流可以减少生鲜农产品的运输损耗,减少的部分可以抵扣一部分碳排放,而当运输过程的腐损率增加时,相应的冷链模式的碳足迹也会增加<sup>[22-25]</sup>.

### 2.5 消费 P3:膳食结构变化带来的碳排放新挑战

近30年来我国居民膳食结构已经发生显著变化,粮食消费量明显减少,肉、禽、蛋、奶类消费持续增加.1981年我国居民家庭肉禽及制品、蛋类、奶类人均消费量分别仅为16.7、4.9和6.4 kg,2019年相应增加至37.7、10.7和12.5 kg.与之对应的是,我国居民口粮消费量呈现出快速下降趋势.1981—2019

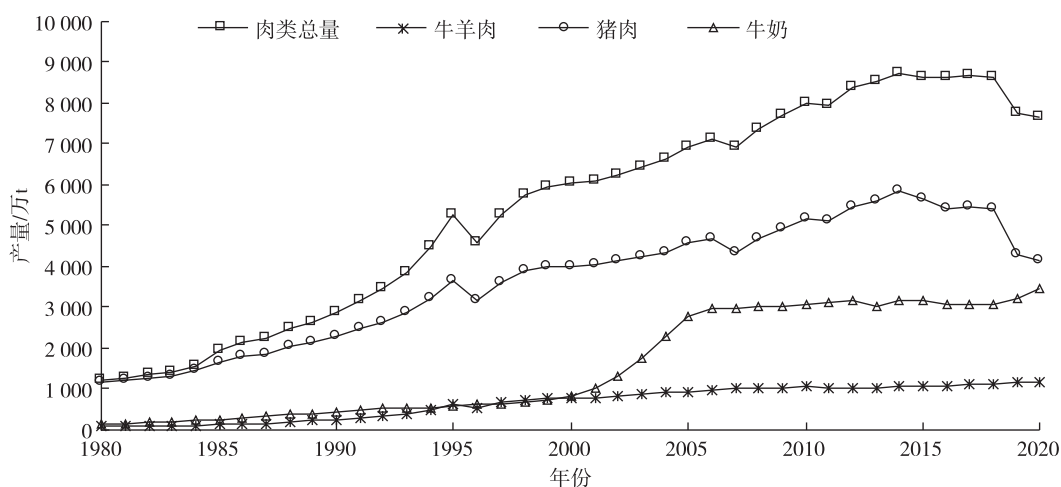


图5 1980—2020年我国肉类和牛奶产量情况

Fig. 5 Meat and milk productions in China from 1980 to 2020

年间,人均口粮(原粮)消费量从 241 kg 下降到 130.1 kg,降幅达 46.0%(图 6,数据来源于《中国统计年鉴》)。随着膳食结构升级,国民对营养健康的刚性需求激增,对畜产品的消费需求将不断增加。

在高化肥投入的传统农业生产模式、饮食结构转变,以及食物损失和浪费行为等因素的综合影响下,中国居民食品消费造成的温室气体排放迅速增长<sup>[26]</sup>。由于消费同重量的动物性食物所产生的碳排放量高于植物性食物<sup>[27]</sup>,饮食结构演替成为中国居民食物消费碳排放总量整体变化的主要驱动因素<sup>[28]</sup>。另外,《2018 中国城市餐饮食物浪费报告》指出,居民消费 42% 的碳排放与食物消费行为有直接或间接的关系,食物浪费造成的温室气体排放占到食物领域总温室气体排放的 11%~13%。

## 2.6 废弃物处理 P4: 农业废弃物中最大的碳源

《第二次全国污染源普查公报》显示,截止到 2017 年底,我国畜禽养殖粪污排放的化学需氧量(COD)达 1 000.53 万 t,占农业污染源排放总量的 93.7%。《中华人民共和国气候变化第三次国家信息通报》显示,我国动物粪便管理温室气体排放量为 1.37 亿 t CO<sub>2</sub>e,占畜牧业温室气体总排放量的 16.6%<sup>[16]</sup>。

畜禽粪便管理过程中的温室气体排放不仅与动物养殖数量有关,还与养殖方式、清粪工艺以及粪便贮存和处理工艺等密切相关。畜禽粪便管理温室气体排放占农业源排放比例呈现显著增加的趋势,从 1994 年的 5.3% 逐渐增加到 2014 年的 17.7%<sup>[29]</sup>。我

国养殖粪污的产生量大,且随着畜牧业规模化水平不断提高,单位动物粪便管理温室气体排放强度也在逐年增加<sup>[30-31]</sup>。

## 3 生态草牧业实现碳中和的主要途径

要想实现碳中和目标,必须提升草地生态系统的固碳能力,同时减少草牧业关键环节的碳排放,从而实现碳源和碳汇的平衡。

### 3.1 固碳增汇: 加强草地恢复和保护

严格推进禁牧、休牧和划区轮牧的三牧措施,实施退牧还草、退耕还草、天然草原治理等草原保护工程,提高草地生态系统的固碳能力。截至 2018 年,我国落实禁牧休牧 1.59 亿 hm<sup>2</sup>,占草原总面积的 40%。“十三五”时期,我国累计种草改良 1.7 亿亩,草原禁牧面积 12 亿亩,草畜平衡面积 26 亿亩。“十四五”时期我国将继续加强草原保护修复,预计实施退化草原修复 2.3 亿亩。各类草地保护与修复工程对草地固碳和碳汇功能具有积极作用,据测算,2003—2010 年北方退牧还草工程区内草地生态系统碳汇总量约为 120.3±16.89 Tg,由于工程措施贡献导致的草地生态系统碳累积量约为 116.76±9.95 Tg。2003—2012 年 10 年间围栏建设工程固碳量约为 54.6 Tg (40.8~68.7 Tg),补播工程固碳量约为 20.9 Tg (14.1~28.1 Tg)<sup>[32]</sup>。

### 3.2 养地提力: 增强土壤固碳能力

积极推广玉米与大豆轮作,实行秸秆“过腹还田”,增加土壤碳储存和腐殖质。推广深松深耕整地,

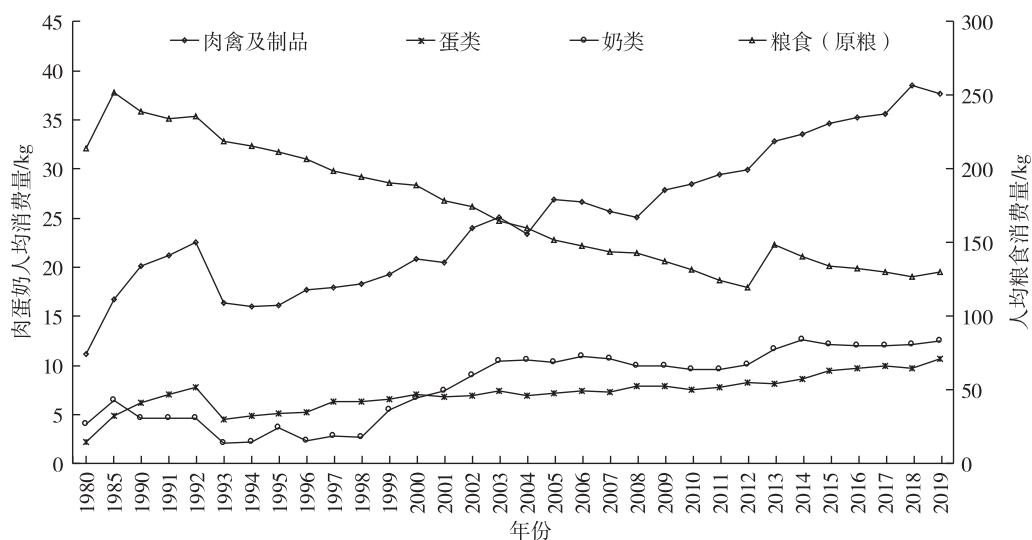


图 6 1980—2019 年我国居民人均主要食物消费量

Fig. 6 Per capita of main food consumptions for Chinese residents from 1980 to 2019

提高土壤蓄水保肥能力.如果将我国 1.2 亿  $\text{hm}^2$  的农田土壤有机质提高 1%,则相当于土壤从空气中净吸收二氧化碳 306 亿  $\text{t}^{[33]}$ .积极鼓励在盐碱地等中低产田发展青贮玉米、饲料油菜、苜蓿、黑麦草、燕麦等优质牧草,提高土壤系统固碳能力.目前我国农区草业的资源优势尚未得到有效发挥,若将我国中低产田、农闲田、轮歇地、四边地、滩海涂地、林(茶、果)间地等农区土地利用面积提高 5%,用于种植高产优质牧草,可增收牧草干物质 1 420 万  $\text{t}^{[34]}$ .如果按照家畜饲养羊单位需要 660  $\text{kg}$  牧草干物质转化的话,理论上可以增加羊单位 2 150 万个,根据羊单位甲烷排放 5  $\text{kg/a}$ ,可以实现甲烷减排 10.75 万  $\text{t}$ .

### 3.3 提质增效:提高饲草料转化率

发展满足当地畜群需求为核心的优质草产品和 TMR 全混合日粮调制技术,提高优质饲草的利用和转化效率,降低单位畜产品碳排放量.由于胃肠道甲烷主要来自瘤胃微生物的发酵,因此改善饲粮营养结构可有效降低胃肠道甲烷的排放量,其中饲粮精粗比是影响甲烷排放量的重要指标<sup>[35]</sup>.反刍动物采食处理过的秸秆有效降低甲烷排放量<sup>[36]</sup>.通过研究发现荷兰的泌乳牛日粮中,平均精粗料比为 45:55 时,随着牧草质量的提高,甲烷排放量有降低的趋势<sup>[37]</sup>.连锁经营餐厅汉堡王的研究结果表明,在牛的饲料中添加柠檬草,可在其生命的最后 3~4 月内,将甲烷排放量减少 33%<sup>[38]</sup>.

### 3.4 绿色生态:发展种养循环农牧业

推进畜禽粪污资源化利用.按减量化、资源化、无害化要求,深入开展畜禽粪污资源化利用行动,加快推进畜牧业绿色发展,积极构建种养循环发展模式.根据农业农村部估算,全国每年产生畜禽粪污 38 亿  $\text{t}$ ,有机肥生产潜力约为 12 亿  $\text{t}$ ,可以抵扣部分替代化肥生产过程中的温室气体排放<sup>[39]</sup>.采用有机肥替代化肥可显著降低温室气体排放.将作物秸秆用于牛饲料,将堆肥后的牛粪返回农田,可以提高土壤肥力<sup>[40]</sup>.粪便循环利用后的土壤固碳量对整个过程的减排量的贡献可以达到 30%~55%<sup>[41]</sup>.

### 3.5 低碳减排:提倡可持续健康饮食

以营养健康为目标,合理引导肉类消费,适当减少动物性肉类食物消费,可以显著减少温室气体排放.按照《中国食物与营养发展纲要(2014—2020 年)》推荐的食物消费标准中肉类为 29  $\text{kg}$ ,奶类 36  $\text{kg}$ ,而目前我国居民人均畜禽肉类消费高于推荐值,

奶类消费未达到推荐值.虽然奶类消费的增加会增加温室气体的排放,但减少肉类消费可以抵消增加的温室气体.综合比较得出,基于中国居民膳食指南的膳食结构调整后可以减少 1.46 亿  $\text{t}$  的温室气体排放<sup>[42]</sup>.2014—2018 年间,我国食物消费阶段的食物浪费碳足迹占整个食物供应链的食物浪费总量的 51%,浪费减量化可减低碳足迹 1.28 亿  $\text{t}$ ,可以抵消中国农业系统碳排放的 19%<sup>[43]</sup>.

## 4 碳中和目标下生态草牧业发展策略

随着肉蛋奶消费需求的持续增长,实现生态草牧业碳中和压力较大.本文建议从科学研究和战略管理方面着重加强下述 5 个方面的工作.

### 4.1 加强天然草原的保护和合理利用,有效提高草地固碳能力

实施退牧还草、退耕还草、草原奖补政策和天然草原治理工程,通过天然草原轮牧、休牧、禁牧、打草场轮刈等放牧管理模式和草畜平衡制度,促进天然草原的合理利用;重点积极研发草地肥水耦合技术、有机无机平衡施肥技术、营养繁殖体恢复技术,为天然草原植被的改良和恢复提供技术支撑;采用松耙、切根、补播、施肥、封育、除杂、毒害草防治和虫鼠害防治等管理措施,对天然草原进行恢复和改良.

### 4.2 充分挖掘优质牧草潜力,优化饲草资源配置和布局

利用中低产田、退耕地、盐碱地、荒地等闲置土地资源和边疆地区、贫困地区等边际土地,充分挖掘苜蓿等优质牧草生产潜力;加强禾本科羊草、燕麦草等其他饲草资源开发利用,实现“牧草替粮”与“草饲互补”齐头并进;利用饲料间的组合效应,挖掘秸秆等副产物的营养价值,缓解我国粗饲料资源短缺,促进饲草作物种植与草食动物养殖匹配发展.

### 4.3 加强减排关键技术或设备研发,降低单位产量或畜产品的碳排放强度

通过提供补充饲料或使用饲料添加剂等方式改变饲料组成,提高饲草料转化率或控制草食动物瘤胃的肠道发酵活动,减少单位畜产品温室气体排放量;实施化肥减量增效技术,开发“零碳”肥料,提高牧草种植效率;加大畜禽粪污干湿分离技术的研发,根据不同区域不同气候,研发适宜的堆肥技术和还田方式,从源头和循环利用协同减少温室气体排放;推广环保节能新设备和低能耗冷链技术,建立高效

绿色低碳的物流体系.

#### 4.4 积极实施绿色能源替代工程,减少或抵扣草牧业生产的碳排放

在加工环节,加大清洁能源代替传统化石能源的比例,促进能源结构化转型,发展绿色加工模式;在物流环节,推动电气化新能源货运体系,减少化石燃料的消耗;在消费环节,改善饮食结构,推行食物碳标签标志,引导低碳绿色消费行为;在废弃物处理环节,开展秸秆、畜禽粪便等废弃物处理工程,减少畜牧养殖过程的温室气体排放.

#### 4.5 设立重大科技创新专项,支撑草牧业碳中和研究

建议设立专项开展生态草牧业低碳研究,组织多部门形成研究团队进行联合技术攻关,研发饲草料精细化加工技术,创新废弃物资源化利用技术;开展草牧业低碳绿色政策支持研究,制定减排固碳关键技术标准;集成生态草牧业温室气体减排固碳技术模式,开展减排、固碳、能源替代等示范.

### 参考文献

#### References

- [ 1 ] IPCC. IPCC special report on global warming of 1.5 °C [ R ]. 2018
- [ 2 ] Steinfeld H, Gerber P, Wassenaar T, et al. Livestock's long shadow: environmental issues and options [ M ]. Rome: FAO, 2006
- [ 3 ] 孟祥海,程国强,张俊飏,等.中国畜牧业全生命周期温室气体排放时空特征分析[J].中国环境科学,2014,34(8):2167-2176  
MENG Xianghai, CHENG Guoqiang, ZHANG Junbiao, et al. Analyze on the spatial temporal characteristics of GHG estimation of livestock's by life cycle assessment in China [ J ]. China Environmental Science, 2014, 34 ( 8 ): 2167-2176
- [ 4 ] 方精云,景海春,张文浩,等.论草牧业的理论体系及其实践[J].科学通报,2018,63(17):1619-1631  
FANG Jingyun, JING Haichun, ZHANG Wenhao, et al. The concept of "Grass-based Livestock Husbandry" and its practice in Hulun Buir, Inner Mongolia [ J ]. Chinese Science Bulletin, 2018, 63 ( 17 ): 1619-1631
- [ 5 ] Gerber P J, Steinfeld H, Henderson B, et al. Tackling climate change through livestock: a global assessment of emissions and mitigation opportunities [ R ]. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2013
- [ 6 ] 刘刚,曹植,王鹤鸣,等.推进物质流和社会经济代谢研究,助力实现联合国可持续发展目标[J].中国科学院院刊,2018,33(1):30-39  
LIU Gang, CAO Zhi, WANG Heming, et al. Promoting material flow and socioeconomic metabolism analysis for achieving UN 2030 sustainable development goals [ J ]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2018, 33 ( 1 ): 30-39
- [ 7 ] 刘立涛,刘晓洁,伦飞,等.全球气候变化下的中国粮食安全问题的研究[J].自然资源学报,2018,33(6):927-939  
LIU Litao, LIU Xiaojie, LUN Fei, et al. Research on China's food security under global climate change background [ J ]. Journal of Natural Resources, 2018, 33 ( 6 ): 927-939
- [ 8 ] 姜联合.全球碳循环:从基本的科学问题到国家的绿色担当[J].科学,2021,73(1):39-43,4  
JIANG Lianhe. Global carbon cycle: from fundamental scientific problem to green responsibility [ J ]. Science, 2021, 73 ( 1 ): 39-43, 4
- [ 9 ] 白永飞,陈世苹.中国草地生态系统固碳现状、速率和潜力研究[J].植物生态学报,2018,42(3):261-264  
BAI Yongfei, CHEN Shiping. Carbon sequestration of Chinese grassland ecosystems: stock, rate and potential [ J ]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2018, 42 ( 3 ): 261-264
- [ 10 ] 王银柱,戴良先,刘晓英,等.我国草原现状及其生态恢复途径初探[J].草业与畜牧,2007(5):29-32  
WANG Yinzhu, DAI Liangxian, LIU Xiaoying, et al. Discussion of the grassland situation and approach of ecological restoration in China [ J ]. Prataculture & Animal Husbandry, 2007 ( 5 ): 29-32
- [ 11 ] 邓蓉,阎晓,孙伯川.我国草业发展现状及趋势[J].农业展望,2010,6(7):36-38,42  
DENG Rong, YAN Xiao, SUN Bochuan. The development status and trend of grass industry in my country [ J ]. Agricultural Outlook, 2010, 6 ( 7 ): 36-38, 42
- [ 12 ] Li L H, Chen Z Z, Wang Q B, et al. Changes in soil carbon storage due to over-grazing in Leymus chinensis steppe in the Xilin River Basin of Inner Mongolia [ J ]. Journal of Environmental Sciences, 1997, 9 ( 4 ): 104-108
- [ 13 ] Tan K, Ciaia P, Piao S L, et al. Application of the ORCHIDEE global vegetation model to evaluate biomass and soil carbon stocks of Qinghai-Tibetan grasslands [ J ]. Global Biogeochemical Cycles, 2010, 24 ( 1 ): GB1013. DOI: 10. 1029/2009GB003530
- [ 14 ] 我国奶价很难再次大幅上升,国内牧草产业发展路在何方? [ EB/OL ]. ( 2017-09-05 ) [ 2021-06-01 ]. https://www. qichacha. com/postnews - 32b4082e3eff618072119e5f98311032.html
- [ 15 ] 郭婷,薛彪,白娟,等.刍议中国牧草产业发展现状:以苜蓿、燕麦为例[J].草业科学,2019,36(5):1466-1473  
GUO Ting, XUE Biao, BAI Juan, et al. Discussion of the present situation of China's forage grass industry development; an example using alfalfa and oats [ J ]. Pratacultural Science, 2019, 36 ( 5 ): 1466-1473
- [ 16 ] 国家气候战略中心.中华人民共和国气候变化第三次国家信息通报[R].2008
- [ 17 ] 郭娇,齐德生,张妮娅,等.中国畜牧业温室气体排放现状及峰值预测[J].农业环境科学学报,2017,36(10):2106-2113  
GUO Jiao, QI Desheng, ZHANG Niya, et al. Chinese greenhouse gas emissions from livestock: trend and predicted peak value [ J ]. Journal of Agro-Environment Science, 2017, 36 ( 10 ): 2106-2113



- [18] 胡圣杰.我国农产品加工企业的碳排放问题研究[D].武汉:武汉工业学院,2012  
HU Shengjie. Research on carbon emission problems of China's agricultural product proceeding enterprises [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2012
- [19] 谢美娥,高倩,陈秀云.基于京东冷链的生鲜冷链物流研究[J].现代商贸工业,2021,42(11):56-58  
XIE Meie, GAO Qian, CHEN Xiuyun. Research on fresh cold chain logistics based on JD cold chain [J]. Modern Business Trade Industry, 2021, 42(11): 56-58
- [20] 梁坤.低碳视角下冷链物流的研究现状与展望[J].物流科技,2019,42(3):79-82  
LIANG Kun. Research status and prospect of cold chain logistics from low carbon perspective [J]. Logistics Sci-Tech, 2019, 42(3): 79-82
- [21] 沈丽,李成玉,甘彦,等.考虑货损和碳排放的生鲜产品配送路径优化[J].上海海事大学学报,2021,42(1):44-49,70  
SHEN Li, LI Chengyu, GAN Yan, et al. Distribution route optimization of fresh products considering cargo damage and carbon emission [J]. Journal of Shanghai Maritime University, 2021, 42(1): 44-49, 70
- [22] 陈福森,陈珊,吴欣欣,等.基于碳足迹的农产品冷链物流脆弱性研究[J].福建轻纺,2019(9):39-42  
CHEN Fusen, CHEN Shan, WU Xinxin, et al. Research on the vulnerability of agricultural products cold chain logistics based on carbon footprint [J]. The Light & Textile Industries of Fujian, 2019(9): 39-42
- [23] 廖晶,谢如鹤,塘杰,等.基于生命周期法的农产品供应链碳足迹分析[J].广东农业科学,2018,45(11):144-149  
LIAO Jing, XIE Ruhe, TANG Jie, et al. Comparative analysis of carbon footprint of agricultural products supply chain based on life cycle [J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2018, 45(11): 144-149
- [24] 刘广海,吴俊章,游力,等.冷链物流系统碳足迹模型构建与实证分析[J].制冷学报,2018,39(4):19-25  
LIU Guanghai, WU Junzhang, YOU Li, et al. Carbon footprint of cold chain system and a case analysis [J]. Journal of Refrigeration, 2018, 39(4): 19-25
- [25] 黄曼.基于碳足迹的农产品冷链物流脆弱性研究[J].农业技术与装备,2019(12):116-119  
HUANG Man. Research on vulnerability of agricultural products cold chain logistics based on carbon footprint [J]. Agricultural Technology & Equipment, 2019(12): 116-119
- [26] 黄和平,李亚丽,杨斯玲.中国城镇居民食物消费碳排放的时空演变特征分析[J].中国环境管理,2021,13(1):112-120  
HUANG Heping, LI Yali, YANG Siling. Spatio-temporal evolution characteristics of carbon emissions from food consumption of urban residents in China [J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2021, 13(1): 112-120
- [27] 曹志宏,郝晋珉,邢红萍.中国居民食物消费碳排放时空演变趋势及其驱动机制分析[J].地理科学进展,2020,39(1):91-99  
CAO Zhihong, HAO Jinmin, XING Hongping. Spatial-temporal change of Chinese resident food consumption carbon emissions and its driving mechanism [J]. Progress in Geography, 2020, 39(1): 91-99
- [28] 高晶,唐增,李重阳.中国城乡居民食物消费碳排放的对比分析[J].草业科学,2018,35(8):2022-2030  
GAO Jing, TANG Zeng, LI Chongyang. Comparative analysis of food consumption on carbon emission of urban and rural residents in China [J]. Pratacultural Science, 2018, 35(8): 2022-2030
- [29] 朱志平,董红敏,魏莎,等.中国畜禽粪便管理变化对温室气体排放的影响[J].农业环境科学学报,2020,39(4):743-748  
ZHU Zhiping, DONG Hongmin, WEI Sha, et al. Impact of changes in livestock manure management on greenhouse gas emissions in China [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020, 39(4): 743-748
- [30] 李红娜,吴华山,耿兵,等.我国畜禽养殖污染防治瓶颈问题及对策建议[J].环境工程技术学报,2020,10(2):167-172  
LI Hongna, WU Huashan, GENG Bing, et al. The bottleneck and countermeasures in the pollution control of livestock and poultry breeding in China [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2020, 10(2): 167-172
- [31] 姚成胜,钱双双,毛跃华,等.中国畜牧业碳排放量变化的影响因素分解及空间分异[J].农业工程学报,2017,33(12):10-19  
YAO Chengsheng, QIAN Shuangshuang, MAO Yuehua, et al. Decomposition of impacting factors of animal husbandry carbon emissions change and its spatial differences in China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(12): 10-19
- [32] 熊定鹏.中国草地退牧还草工程固碳能力与潜力评估[D].北京:中国科学院大学,2016  
XIONG Dingpeng. Evaluation of carbon sequestration capability and potential of China's grassland retirement project [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2016
- [33] 毛文星,苏效良.固碳型生态农业和低碳养殖业刍议[J].中国畜牧业通讯,2011(4):31-34  
MAO Wenxing, SU Xiaoliang. Discussion on carbon-fixing ecological agriculture and low-carbon aquaculture [J]. China Animal Husbandry Bulletin, 2011(4): 31-34
- [34] 李向林,沈禹颖,万里强.种植业结构调整和草牧业发展潜力分析及政策建议[J].中国工程科学,2016,18(1):94-105  
LI Xianglin, SHEN Yuying, WAN Liqiang. Potential analysis and policy recommendations for restructuring the crop farming and developing forage industry in China [J]. Engineering Sciences, 2016, 18(1): 94-105
- [35] 孙凯佳,朱建营,梅洋,等.降低反刍动物胃肠道甲烷排放的措施[J].动物营养学报,2015,27(10):2994-3005  
SUN Kaijia, ZHU Jianying, MEI Yang, et al. Measures of reducing methane emission in ruminants gut [J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2015, 27(10): 2994-3005
- [36] 邵凤君,金家志.减少反刍动物甲烷排放的措施[J].农业环境与发展,1992,9(4):4-6,25,49

SHAO Fengjun, JIN Jiazhi. Possible means of reducing methane emission from ruminants [J]. *Agro-Environment & Development*, 1992, 9(4): 4-6, 25, 49

[37] 程宗佳.降低甲烷排放量的饲养措施[J].饲料研究, 2009(12): 69-70, 80

CHENG Zongjia. Feeding measures to reduce methane emissions [J]. *Feed Research*, 2009(12): 69-70, 80

[38] Future Feed News. Burger King using lemongrass to reduce methane emissions from its meat suppliers [EB/OL]. [2020-7-15]. <https://futurefeednews.com/burger-king-using-lemongrass-to-reduce-methane-emissions-from-its-meat-suppliers/>

[39] 姜茜,王瑞波,孙炜琳.我国畜禽粪便资源化利用潜力分析及对策研究:基于商品有机肥利用角度[J].华中农业大学学报(社会科学版), 2018(4): 30-37, 166

JIANG Qian, WANG Ruibo, SUN Weilin. Potential evaluation and countermeasures on livestock manure resource utilization: based on perspective of commercial organic fertilizer utilization [J]. *Journal of Huazhong Agricultural*

*University (Social Sciences Edition)*, 2018(4): 30-37, 166

[40] Liu H T, Li J, Li X, et al. Mitigating greenhouse gas emissions through replacement of chemical fertilizer with organic manure in a temperate farmland [J]. *Science Bulletin*, 2015, 60(6): 598-606

[41] 孙志岩,张文,于家伊,等.猪场粪便循环利用项目温室气体碳减排量核算方法学研究[J].再生资源与循环经济, 2019, 12(2): 40-44

SUN Zhiyan, ZHANG Wen, YU Jiayi, et al. Study on accounting methodology of greenhouse gas carbon emission reduction for pig manure recycling project [J]. *Recycling Research*, 2019, 12(2): 40-44

[42] 樊胜根,陈志钢,盛芳芳,等.调整膳食结构,走向可持续的健康膳食[J/OL].三农决策要参, 2021, 18: 1-7. <http://www.cirs.tsinghua.edu.cn/sannjyc/3382.jhtml>

[43] Xue L, Liu X J, Lu S J, et al. China's food loss and waste embodied increasing environmental impacts [J]. *Nature Food*, 2021, 2(7): 519-528

## Material flow analysis framework and development strategy of ecological grass-based livestock husbandry under the target of carbon neutralization

LIU Xiaojie<sup>1</sup> HU Zhaomin<sup>2,3</sup> DENG Xiangzheng<sup>1,2</sup> YUE Tianxiang<sup>1</sup>  
SUN Zhigang<sup>1</sup> DONG Jinwei<sup>1</sup> GUO Jinhua<sup>1</sup>

1 Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

3 Engineering Laboratory for Grass-based Livestock Husbandry, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093

**Abstract** Driven by the country's goal of achieving carbon peak and carbon neutrality and to cope with global climate change, the Grass-based Livestock Husbandry (abbreviated as GLiH) must take into account green ecology in order to achieve high-quality development. The life cycle of the GLiH starts from pasture planting and forage grass processing, to animal husbandry, livestock product processing and transportation, then to consumption and ends at waste treatment, all of which are related to carbon emissions. Based on the Material Flow Analysis (MFA), this study constructed the framework of the GLiH research, and analyzed the characteristics, influencing factors and existing problems related with carbon sources and sinks in different links. In view of the key influencing links within the GLiH research framework, some feasible approaches for the ecological development of GLiH were discussed under the carbon neutrality target, which include enhancing the carbon sink of grassland vegetation, regulating the carbon source of livestock production, and improving the efficiency of clean energy. In addition, multi-sectoral joint technical research is needed to systematically plan and advance the green and low-carbon GLiH, thus to provide support for achieving the national carbon neutral targets.

**Key words** carbon neutral; material flow analysis (MFA); grass-based livestock husbandry (GLiH); carbon sink; carbon source