



基于 LCA 的呼伦贝尔生态草牧业技术集成示范效益评估

刘欣超^{1,2,3}, 王路路^{1,4}, 吴汝群^{1,5}, 辛晓平¹, 孙海莲^{2,3}, 姜明红⁶, 李晓爽⁷, 王淼^{1,4}, 刘云⁴, 邵长亮¹

(¹中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 中国北京 100081; ²内蒙古农牧业科学院, 中国呼和浩特 010031; ³中国科学院内蒙古草原研究中心, 中国呼和浩特 010031; ⁴北京农学院生物与资源环境学院, 中国北京 102206; ⁵密歇根州立大学地理、环境和空间科学系/全球变化和

地球观测中心, 美国 East Lansing MI 48824; ⁶呼伦贝尔学院初等教育学院, 中国内蒙古呼伦贝尔 021008;

⁷内蒙古呼和浩特金谷农商银行股份有限公司, 中国呼和浩特 010050)

摘要: 【目的】对天然草场修复过程中的经济环境综合效益进行评估。【方法】基于全生命周期分析(LCA)方法对内蒙古呼伦贝尔市谢尔塔拉牧场奶牛集约化养殖-牲畜粪便处理(包括菌剂发酵有机肥、蚯蚓养殖生成有机肥和蘑菇种植3种模式), 利用谢尔塔拉农场奶牛集约化养殖、牲畜粪便处理利用、天然草场改良数据和当地畜牧生产经营物料投入数据相结合, 建立不同养殖模式下牛奶生产的全生命周期清单, 从畜牧生产全生命周期的角度对牲畜饲养、粪便处理利用和草场修复这个草原畜牧生产循环过程中每生产1 t标准牛奶(FPCM)的资源环境综合成本(温室气体排放、土地占用、耗水量和不可再生能源消耗)和总体经济效益进行定量分析。【结果】牧户散养奶牛和集约化奶牛养殖场在出售牲畜和牛奶方面产生的毛收益分摊在每头成年母牛上分别为0.89和2.11万元, 如扣除经营成本, 两种乳牛饲养模式下每头成年母牛产生的净收益分别为0.42万元(牧户散养)和0.41万元(集约化养殖)。此外集约化养殖场每生产1 t FPCM造成的环境影响为: 占用草场1.19 hm²、占用耕地0.15 hm²、耗水216.47 t、消耗化石燃料1 944.19 MJ、排放温室气体0.73 t二氧化碳当量(CO_{2eq})。当地散养牧户生产牛奶除去草场占用面积(3.25 hm²)外, 造成的环境影响(占用耕地0.04 hm²、耗水70.70 t、消耗化石燃料892.80 MJ、排放温室气体0.55 t CO_{2eq})均小于集约化奶牛养殖场。开展天然打草场改良可显著增加每公顷草地牧草产出(增幅68.57%)和收益(增长10.71%), 改良后生产1 t FPCM可降低40.50%的草场占用面积。但改良中施肥和燃料消耗的增加会造成温室气体排放(增加17.70倍)、燃料消耗(增加2.10倍)等环境问题。在牲畜粪便处理利用技术应用方面, 集约化养殖场产生的牛粪通过发酵有机肥、蚯蚓处理牛粪和蘑菇种植等处理利用方式, 在解决牲畜饲养中粪便污染问题的同时, 创造的净收益相当于生产牛奶净收益的5%—12%, 整体看带来的环境影响相对较少。【结论】集约化养殖场在提高草原利用效率方面优势明显, 在提升饲料能量转化效率、提升牛奶产量和质量方面具有很大的潜力, 但是会增加苜蓿、燕麦等高蛋白饲草料的种植面积, 在控制牛奶生产中的温室气体排放、水资源和能源消耗等方面会产生不利影响。此外, 天然打草场改良和牲畜粪便处理利用技术在呼伦贝尔当地畜牧产业中具有较大的应用潜力。

关键词: 全生命周期分析; 集约化养殖; 季节性放牧; 环境影响

LCA-Based Assessment of Hulunber Ecological Grassland Technology Integration Demonstration

LIU XinChao^{1,2,3}, WANG LuLu^{1,4}, WU RuQun^{1,5}, XIN XiaoPing¹, SUN HaiLian^{2,3}, JIANG MingHong⁶,
LI XiaoShuang⁷, WANG Miao^{1,4}, LIU Yun⁴, SHAO ChangLiang¹

收稿日期: 2019-09-16; 接受日期: 2020-02-19

基金项目: 国家自然科学基金(41771205)、国家重点研发计划(2016YFC0500600, 2017YFE0104500)、内蒙古自然科学基金(2017BS0317)、北京高等学校高水平人才交叉培养实培计划大学生毕业设计项目(2018 科研类)(PXM2020_014207_000009)

联系方式: 刘欣超, E-mail: liuxinchao3211@126.com. 通信作者邵长亮, E-mail: shaochangliang@caas.cn

(¹Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; ²Inner Mongolia Academy of Agricultural & Animal Husbandry Sciences, Hohhot 010031, China; ³Inner Mongolia Prataculture Research Center, Chinese Academy of Sciences, Hohhot 010031, China; ⁴School of Biology, Resources and Environment, Beijing Agricultural College, Beijing 102206, China; ⁵Center for Global Change and Earth Observations, Department of Geography, Environment, and Spatial Sciences, Michigan State University, East Lansing, MI 48824, USA; ⁶College of Primary Education, Hulunber University, Hulunber 021008, Inner Mongolia, China; ⁷Inner Mongolia Hohhot Jingu Agricultural Commercial Bank Co., Ltd, Hohhot 010050, China)

Abstract: 【Objective】 This study evaluated the comprehensive environmental effect of the process of intensive cow breeding-livestock manure utilization-natural grassland improvement. 【Method】 At first, the life cycle inventory of the milk produced under different dairy cattle cultivation modes was established. Then the comprehensive environment effects (greenhouse gas emissions, land occupation, water consumption and non-renewable energy consumption) and overall economic benefits in the whole life cycle of milk production were quantitatively analyzed by combining the experimental data of intensive cow breeding, manure utilization (including microbial fermentation organic fertilizer, earthworm breeding organic fertilizer, and mushroom breeding) and natural grassland improvement with the input data of local animal production and management. The function unit was 1 ton of standard milk (FPCM) in this analysis. 【Result】 The results showed that the mean gross income of local herdsmen's grazing farms and intensive dairy farms was 8 900 yuan and 211 yuan per adult cow, respectively. If the operating cost was deducted, the net income of each adult cow in the two modes was 4 200 yuan (herdsmen's grazing farm) and 4 100 yuan (intensive farm), respectively. The environmental impact caused by the production of 1 ton FPCM in intensive farm was 1.19 hm² of grassland, 0.15 hm² of arable land, 216.47 t of water, 1 944.19 MJ of fossil fuel and 0.73 t of CO_{2eq} of greenhouse gas. In addition to the grassland area (3.25 hm²), the environmental impact of milk production by herdsmen's grazing farms were less than that of intensive dairy farms (0.04 hm² of cultivated land, 70.70 t of water, 892.80 MJ of fossil fuel and 0.55 t of CO_{2eq} greenhouse gas). Natural clipped grassland improvement could significantly increase the hay yield per hectare grassland (increased for 68.57%) and income (increased for 10.71%), it could reduce the grassland area occupied by 40.50%, but the increase of fertilization and fuel consumption in the improvement would cause environmental problems (such as more greenhouse gas emissions 17.70 times) and more fuel consumption (2.10 times). In terms of the application of livestock manure treatment and utilization technology, the cattle manure produced by intensive farms was treated and utilized through microbial fermentation, earthworm treatment and mushroom cultivation, the net income generated was equivalent to about 5%-12% of the net income generated by milk production, and the overall environmental impact was relatively small. 【Conclusion】 Intensive farms had obvious advantages in improving grassland utilization efficiency, and had great potential in improving feed energy conversion efficiency, as well as milk yield and quality. However, intensive dairy farming would increase the planting area of alfalfa, oats and other high protein forages, and cause adverse environmental effects such as more greenhouse gas emissions, more water and energy consumption. In addition, the technology of natural grassland improvement and livestock manure treatment and utilization had great application potential in Hulunber animal husbandry.

Key words: life cycle assessment; intensive farming; seasonal grazing; environmental impact

0 引言

【研究意义】随着近年来全球牲畜存栏数和畜牧产品产量的逐年提高,由牲畜养殖带来的资源环境问题日益受到重视^[1]。从全球的角度来看,畜牧生产被认为是当前重要的人为碳排放源(14.5%),每年牲畜饲养会产生 7.1 Gt CO_{2eq} 的温室气体排放,其中牛奶生产中排放的温室气体达到了 1.4 Gt CO_{2eq},主要是从奶牛肠道甲烷排放(46.5%)、牲畜粪便处理(17.0%)、

饲料生产(10.9%)以及饲草料种植中的化肥使用(7.4%)等环节中产生^[2]。此外,牛养殖规模的扩大,会带来的饲草料需求、牲畜粪污排放增加,如处理不当,可能会引发生物多样性降低、耕地资源短缺、水资源污染消耗等问题^[3]。我国作为全球第三大牛奶生产国,也面临着牛奶产量和消费量不断增加所带来的各种资源和环境问题与挑战^[4]。当前对我国奶牛养殖环境影响方面的研究较多,但主要集中在农区,作为我国重要优质牛奶产区的呼伦贝尔草甸草原牧

区, 相关研究尚不充分^[5], 开展相关研究的需求更加迫切^[4,6-7]。因此, 评估内蒙古草原目前牛奶生产的环境影响和资源利用状况, 探讨降低我国乳品生产资源利用和环境负担的措施, 并寻找建立符合内蒙古草原牧区实际情况且在经济成本和环境效益上具有可行性的生态草畜牧业技术方法, 对于当地农牧产业发展和环境保护具有重要的现实意义。【前人研究进展】全生命周期分析 (life cycle assessment, LCA) 方法可对某种产品或服务“从摇篮到摇篮”整个生命周期中的环境影响和资源消耗进行综合量化评估^[8-10], 对于改善农业畜牧产品生产资源环境影响方面具有重要意义, 因此, 越来越多的研究开始利用 LCA 方法对整个牛奶产业的环境影响进行评估^[3,11-15]。例如 BATTINI 等^[16]比较了意大利北部地区一个集约型奶牛场不同经营管理方式对牛奶生产中温室气体排放、能源消耗、水资源消耗等环境成本的影响。LEDGARD 等^[17]对新西兰和中国的奶牛农场碳、氮足迹进行的 LCA 分析结果表明, 牲畜粪便管理过程是两国奶牛农场氮足迹主要贡献者, 而饲草料的种植和生产环节也是两国降低牛奶生产过程中环境影响的关键点, 对于中国奶牛养殖场来说, 通过改变奶牛养殖场饲草料饲喂结构和提高牲畜粪便管理水平可以有效改善农场畜牧生产的环境效益。WANG 等^[4,18]在 2016 和 2018 年分别对我国关中平原和华北平原的集约化奶牛养殖场温室气体排放、土壤酸化和富营养化等环境影响开展了 LCA 评价, 提出了可以通过提高饲喂效率、改善畜群结构、提高奶牛产奶能力以及改善牲畜粪便处理利用方式等途径来降低当地牛奶生产中温室气体排放的建议。但该研究也认为一些减排措施, 如通过增加不施肥低产苜蓿的投入来增加奶牛产奶量进而降低温室气体排放, 会引起土地占用增加, 造成额外的环境影响。ZHANG 等^[19]基于局部生命周期理论研究不同处理方式有机肥替代化肥模式, 及其对蔬菜生态系统产量、氧化亚氮 (N_2O) 与氨气 (NH_3) 的影响, 提出合理的种养结合模式可以实现粪便资源化利用, 提高蔬菜产量与减少环境负荷的多目标平衡。XU 等^[20]对浙江利用牲畜粪便生成沼气这一处理方式的综合经济和环境效益开展了评估, 从经济价值的角度论述了畜禽粪便技术利用的相关政策影响、成本效益和环境效益。【本研究切入点】目前的研究成果大多开展于农区或者农牧交错地区^[21-22], 主要集中在评估环境影响方面, 忽略了对政策和利益相关者层面等因素的讨论, 关于对奶牛养殖中草场改良、牲畜粪便利用成本效益分析方面的

研究也较少, 还缺乏对适宜当地实际情况的奶牛养殖技术体系和模式的经济成本和环境效益的研究。【拟解决的关键问题】本研究基于 LCA 分析原理, 从饲料种植、饲料加工运输、牲畜饲养、粪便处理等畜牧产业链主要环节评估在我国呼伦贝尔草甸草原退化治理中提出的草场改良、人工草地建设、牲畜粪便资源化利用等技术途径中的经济收益和环境效益, 从整体上为我国草甸草原地区草畜牧业经营管理提供科学参考和决策依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况及评价范围确定

本试验研究区域位于内蒙古呼伦贝尔市谢尔塔拉农场, 坐落在大兴安岭西麓呼伦贝尔草甸草原向典型草原的过渡地带, 属中温带半湿润半干旱大陆性季风气候, 海拔 640—860 m, 地带性植被为温性草甸和温性典型草原, 土壤类型主要为栗钙土和黑钙土。利用国家重大专项项目《北方草甸退化草地治理技术与示范项目》于 2013—2018 年在呼伦贝尔草甸草原开展的奶牛集约化养殖-牲畜粪便综合处理-天然草场生态修复技术模式课题的研究成果, 对谢尔塔拉农场开展的奶牛集约化养殖、牲畜粪便处理利用和天然草场改良试验数据与当地畜牧生产经营物料投入数据相结合, 对当地奶牛集约化养殖-牲畜粪便通过菌剂发酵、蚯蚓养殖和蘑菇饲养 3 种模式处理, 以及天然草场修复这一过程中的经环境综合效益进行评估。

本研究的全生命周期系统边界包括了从天然草场改良、奶牛养殖过程中投入的所有物料生产运输以及牲畜粪便处理利用整个过程中的资源环境成本和经济效益 (图 1), 通过将以上评估结果分摊到所生产的标准牛奶 (FPCM) 对牲畜粪便处理利用和天然草场改良技术模式在畜牧经营和生态环境保护综合效益开展评估。

1.2 生命周期清单分析

天然草地改良数据来自于中国农业科学院呼伦贝尔草原生态系统国家野外科学观测实验站 2013—2018 年在呼伦贝尔草甸草原地区开展的天然打草场改良试验。试验中物料投入和干草产出数据如表 1 所示, 施肥周期为 5 年, 其中第一年每 hm^2 草场施加 225 kg 磷酸二铵底肥, 并追施 150 kg 尿素, 随后 4 年不施加肥料, 每年 8 月中旬开始打草, 每 hm^2 草场打草消耗柴油 6.6 L。本研究依据 IPCC (2006)《国

家温室气体清单指南》中的相关建议参数选择化肥氮输入 N_2O 直接排放系数为: $0.01\text{ (kg N}_2\text{O-N/kg N)}$, 而农业机械柴油燃烧中温室气体排放因子为 EF_{CO_2} : $74\ 100\text{ kg CO}_2\text{-C/TJ}$, EF_{CH_4} : $4.15\text{ kg CH}_4\text{/TJ}$, $\text{EF}_{\text{N}_2\text{O}}$: $28.6\text{ kg N}_2\text{O/TJ}$ 。

牲畜粪便处理投入产出数据来自中国农业科学院呼伦贝尔草原生态系统国家野外科学观测实验站 2015—2018 年联合谢尔塔拉牧场, 开展的牛粪通过菌剂发酵有机肥 (FJ)、蚯蚓处理生成有机肥 (QY) 和牛粪种植蘑菇 (MG) 3 种牛粪无害化处理利用试验的多年平均研究结果。

当地畜牧生产经营物料投入数据来自于 2018 年 7 月在呼伦贝尔市谢尔塔拉牧场针对当地牧民生产经营情况的问卷调查: 结合本研究所评估内容选择当地 7 户散养牛牧户 (SY) 和一处集约化养殖 (JY) 场 2016 年秋季至 2017 年秋季的畜牧生产经营情况 (表 1)。

使用以上数据, 可以从畜牧生产全生命周期的角度对牲畜饲养、粪便处理利用和草场修复整个草原畜

牧生产循环过程中的资源环境综合成本和总体经济效益进行定量分析。对于牲畜饲养中的温室气体排放, 采用 IPCC (2006)《国家温室气体清单指南》中的方法 1 提供的参数计算泌乳奶牛、成年牛、牛犊和育肥牛全年饲养过程中肠道甲烷和粪便甲烷的排放情况, 根据集约化养殖场和养牛牧户饲养奶牛的饲喂方式以及产奶量的差异选择, 并且通过体重比值的 0.75 次方调整, 本研究中采用的温室气体排放计算参数如表 2 所示。

1.3 效益评价

除了经济效益外, 本研究主要探讨草甸草原乳牛养殖-粪污综合处理-天然草场生态修复技术模式中的温室气体排放、土地占用、耗水量和不可再生能源消耗这 4 方面的环境影响。其中对于温室气体排放, 本研究基于 IPCC (2006)《国家温室气体清单指南》中提供的牲畜饲养、粪便处理以及草场改良中温室气体排放的计算方法开展温室气体排放的计算, 最后将通过数据标准化将结果换算为 CO_2 当量表

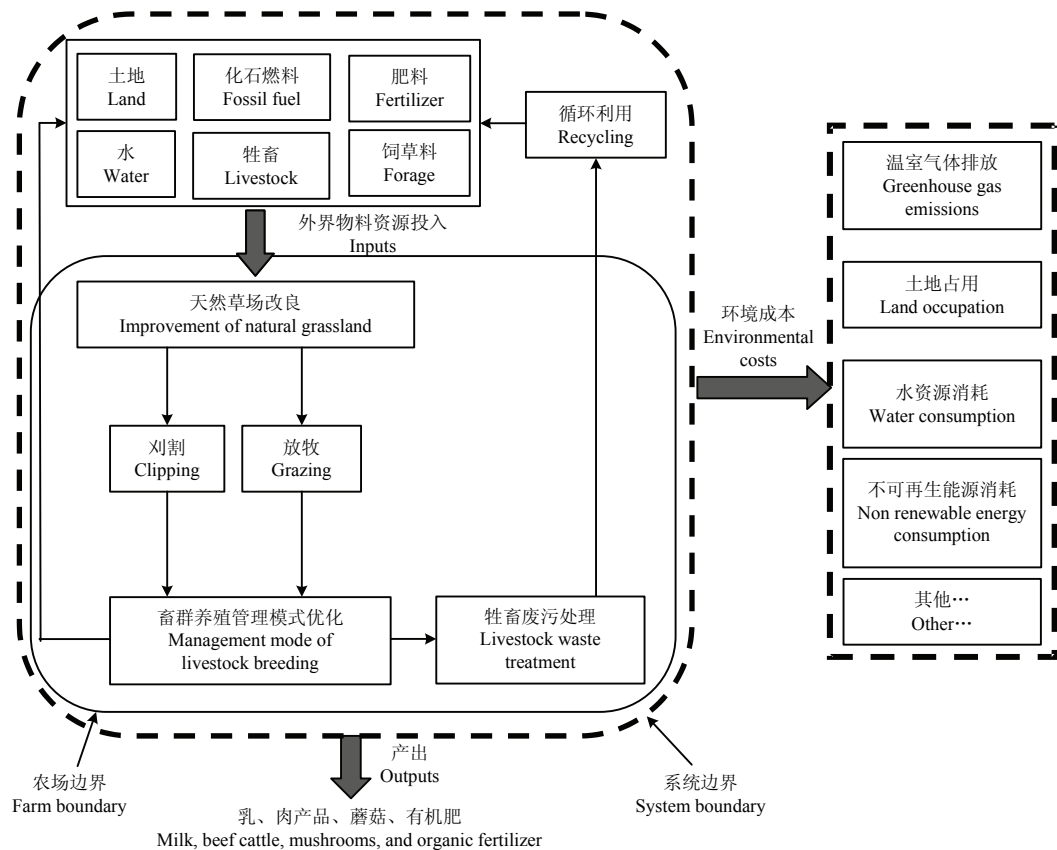


图 1 LCA 分析系统边界

Fig. 1 LCA analysis system boundary

表 1 集约化和牧户散养奶牛生产经营投入产出比较

Table 1 Comparison of input and output of dairy cattle breeding between intensive and herdsman family farm

经营模式 Cultivation mode		集约化养殖 Intensive	牧户散养 Herdsman's free range		
样本数量 Sample size	单位 Unit	1	7		
			均值 Mean	最大值 Max	最小值 Min
成年母牛 Cow	头 Head	880	14.00	20	8
牛犊 Calf	头 Head	615	10.29	16	4
育成牛 Finishing cow	头 Head	360	9.83	23	2
合计 Total	头 Head	1855	32.71	56	18
干草 Hay	t	3247.50	30.86	50	6.25
精饲料 Concentrated feed	t	1675.50	8.29	21.00	3.00
苜蓿 Alfalfa	t	851.90	-	-	-
燕麦 Oats	t	1245.10	-	-	-
青储玉米 Silage corn	t	6811.75	-	-	-
牲畜粪便排放 Livestock manure	t	2523.70	40.29	69.64	16.06
牧场耗水量 Water consumption	t	29017.50	265.67	447.13	109.50
柴油消耗 Diesel consumption	l	60000.00	371.43	800.00	0
耗电量 Power consumption	kW·h	500000.00	2171.43	2800.00	1600.00
出售牲畜 Livestock sold	头 Head	535	8.57	18	4
出售牛奶 Milk sold	t	4471.25	27.94	47.02	3.20
出售牲畜收益 Income from livestock	万元 10000 CNY	255.90	6.51	19.80	1.40
出售牛奶收益 Income from milk	万元 10000 CNY	1596.88	5.95	14.00	0.43

表 2 奶牛饲养温室气体排放计算参数

Table 2 Greenhouse gas emissions of dairy cattle

	JY ¹⁾	SY ²⁾	JY+SY
	肠道甲烷 Ruminant methane emission (kg CH ₄ /head/year)	肠道甲烷 Ruminant methane emission (kg CH ₄ /head/year)	粪便甲烷 Methane emission from manure (kg CH ₄ /head/year)
泌乳奶牛 Lactating cow	115.00	61.00	9.00
非泌乳奶牛 Non lactating cow	53.00	47.00	1.00
牛犊 Calf	11.70	10.40	1.00
育肥牛 Finishing cow	40.56	36.15	1.00

¹⁾ 根据饲养方式和产奶量，采用北美和欧洲奶牛建议值的均值，非泌乳母牛采用两地其他牛的均值，牛犊和育肥牛通过体重比值的 0.75 次方调整；
²⁾ 根据饲养方式和产奶量，泌乳母牛采用亚洲奶牛建议值，非泌乳母牛采用亚洲其他牛的均值，牛犊和育肥牛通过体重比值的 0.75 次方调整
¹⁾ According to the feeding method and milk yield, the mean value of the recommended value of North American and European cows is used, the mean value of other cows in the two places is used for non lactating cows, and the calf and fattening cattle are adjusted by 0.75 power of the weight ratio; ²⁾ According to the feeding method and milk yield, the recommended value of Asian cows is used for lactating cows, the mean value of other cows in Asia is used for non lactating cows, and the weight of calves and fattening cattle is used 0.75 power adjustment of the ratio

达 (CO_{2eq})。土地占用主要计算乳肉牛养殖以及饲料作物种植中占用的草地和耕地面积，单位为公顷 (hm²)。对于能源消耗来说，主要考察乳肉牛养殖-粪污综合处理-天然草场生态修复过程以及化肥制造过程中消耗的煤、柴油和电力等一、二次化石能源，单位为兆焦耳 (MJ)。

2 结果

2.1 不同乳牛养殖经营模式的经济效益与环境成本

本研究选择具有代表性的小规模牧户散养和大规模集约化养殖两种乳牛经营模式进行经济环境效益评估 (表 3)。结果表明，牧户散养奶牛在出售牲畜和

牛奶方面产生的毛收益分摊在每头成年母牛上为 0.89 万元,远低于集约化养殖场每头成年母牛 2.11 万元的毛收益,但是扣除经营成本,两种乳牛饲养模式下每头成年母牛产生的净收益差别不大,分别为 0.42 万元(牧户散养)和 0.41 万元(集约化养殖)。

小规模牧户散养和大规模集约化养殖两种经营模式生产 1 t FPCM 所占用土地面积差异显著。当地小规模奶牛散养牧户所生产的牛奶主要通过私人流动奶贩转销,其售价远低于集约化养殖场。出于降低饲养成本的考虑,奶牛散养牧户夏季(6—9 月)主要将奶牛驱赶至当地公共放牧场采食青草,在冬季舍饲阶段,

散养牧户基本选择依靠自家打草场收获牧草并购买干草作为奶牛的主要食物,因此散养牧户生产 1 t FPCM 所需的草场面积为 3.25 hm²,高于集约化养殖场 1.19 hm²的草场占用面积。

集约化奶牛养殖厂牛奶主要供给当地乳品企业,对牛奶质量如乳脂、乳蛋白含量等指标要求较高,此外,集约化、标准化饲养模式下,需对饲料配方进行优化,提高了苜蓿、燕麦、青储玉米、精饲料等高质量饲草料的饲喂比例。生产以上饲料需要占用耕地资源,因此,集约化养殖场生产 1 t FPCM 占用的耕地面积(0.15 hm²)远高于散养牧户(0.04 hm²)。

表 3 不同养殖模式下每头成年母牛产生的经济效益及生产 1 t FPCM 的环境成本

Table 3 Economic benefits per cow and environmental costs per 1 ton FPCM

		SY			JY
		均值 Mean	最大值 Max	最小值 Min	
经济效益(万元)	毛收益 Gross revenue	0.89	1.27	0.81	2.11
Economic performance	总投入 Inputs	0.47	0.49	0.44	1.70
(10000 CNY)	净收益 Net profit	0.42	0.80	-0.34	0.41
草场占用面积(公顷)	牧户打草场 Clipping pasture	0.83	2.73	0.00	0.00
Grassland occupation	牧户开垦饲料地 Fodder farmland	0.00	0.01	0.00	0.00
(hm ²)	买入干草所需草场 Clipping pasture for purchased hay	2.42	7.86	0.29	1.19
	草地占用合计 Total grassland occupation	3.25	8.90	0.89	1.19
耕地占用(公顷)	买入本市饲草料所需耕地 Arable land occupation in same city	0.02	0.06	0.00	0.08
Arable land occupation	买入市外饲草料所需耕地 Arable land occupation in other city	0.02	0.04	0.00	0.07
(hm ²)	耕地占用合计 Total arable land occupation	0.04	0.10	0.01	0.15
用水情况	买入本市饲草料灌溉水量 Irrigation water consumption in same city	19.84	72.85	0.00	72.27
Water consumption	买入市外饲草料灌溉水量 Irrigation water consumption in other city	45.15	85.16	0.00	138.62
(t)	牧户开垦草场灌溉水量 Irrigation water consumption in farm	1.31	9.20	0.00	0.00
	牧场牲畜需水量 Water consumption for livestock	4.40	6.28	2.10	5.58
	用水量合计 Total water consumption	70.70	160.12	20.79	216.47
化石能源消耗 Fossil energy consumption (MJ)		892.80	1675.85	305.41	1944.19
温室气体排放	牲畜肠道甲烷排放 Ruminant Methane Emission	0.45	0.62	0.20	0.52
Greenhouse gas emission	牲畜粪便甲烷排放 Methane emissions from manure	0.02	0.05	0.00	0.02
(t CO _{2eq})	牧场燃料消耗 Fuel burning emission	0.06	0.11	0.02	0.12
	化肥排放 Emissions from fertilizer applied	0.01	0.04	0.00	0.06
	饲草料运输排放 Emissions from transport	0.01	0.02	0.00	0.01
	总量 Total emissions	0.55	0.78	0.31	0.73

本表中数据来自于 2018 年呼伦贝尔市谢尔塔拉牧场牧民生产经营情况的问卷调查,按照 FAO (2011) 换算标准并根据中国奶业年鉴(2017)中数据将不同养殖模式下生产的牛奶矫正为 4%乳脂和 3.3%乳蛋白含量的 FPCM 标准牛奶
The data in this table are from the questionnaire survey on the production and operation of herdsmen in Xieertala ranch, Hulunber city in 2018. According to the FAO (2011) conversion standard and the data in China Dairy Yearbook (2017), the milk produced under different breeding modes is corrected to FPCM standard milk with 4% milk fat and 3.3% milk protein content

水资源消耗方面，无论是集约化养殖场还是奶牛散养牧户，牛奶生产中耗水量最大的部分来自于饲草料种植过程，分别占总耗水量的 97.42%（集约化养殖场）和 93.78%（奶牛散养牧户）。集约化养殖场生产 1 t FPCM 消耗水资源总量为 216.47 t，为散养牧户生产 1 t FPCM 耗水量的 3.06 倍，两者间的巨大差异主要是由于种植集约化养殖场所需饲草料耗水远高于小规模散养牧户所致。但值得注意的是，如果只考虑养殖场或牧户直接消耗的水资源，集约化养殖场耗水量还要略低于散养牧户，生产同样数量 FPCM 耗水量为后者的 97.70%，因此，如从谢尔塔拉牧场当地水资源消耗的角度来看，两种奶牛养殖模式无明显差异。

不可再生能源消耗方面，集约化养殖场生产 1 t FPCM 消耗能源 1 944.19 MJ，相当于散养牧户的 2.18 倍。相应的集约化养牛场能源消耗带来的温室气体排放也达到了散养牧户的两倍左右，分别占两种养殖模式温室气体总体排放的 10.91%（散养牧户）和 16.44%（集约化养殖场）。两种奶牛养殖模式下，牛肠道甲烷排放是主要排放源，分别达到了总体排放的 81.80%（散养牧户）和 71.23%（集约化养殖场）。

表 4 处理 1 t 干牛粪产生经济效益和环境影响

Table 4 Economic benefits and environmental impact of 1 ton of dry cow manure

处理 Treatment	牛粪成分		产出有机肥			产出蘑菇	耗水情况	化石能源消耗	温室气体排放	净收益
	总氮	有机质	产量	总氮	有机质	Mushroom	Water	Fossil energy	Greenhouse gas	Net profit
	TN (%)	Organic matter (%)	Outputs (t)	TN (%)	Organic matter (%)	outputs (kg)	consumption (t)	consumption (MJ)	emissions (kg CO _{2eq})	(CNY)
FJ	1.84	69.77	0.70	1.65	40.36	—	1.40	96.45	6.24	84.85
QY	1.84	69.77	0.50	0.61	43.56	—	1.00	193.29	14.88	126.64
MG	1.84	69.77	0.49	1.61	30.31	62.00	0.98	74.87	5.76	177.87

表 5 天然打草场改良投入及产出数据

Table 5 Input and output data of natural grassland improvement

		二铵使用	尿素使用	农机消耗柴油	打草消耗柴油	产出干草	净收益
		Ddiammonium fertilizer applied (kg·hm ⁻²)	Urea applied (kg·hm ⁻²)	Diesel consumption by agricultural machinery (L·hm ⁻²)	Diesel consumption during hay clipping (L·hm ⁻²)	Hay harvest (kg·hm ⁻²)	Net profit (CNY/hm ²)
天然打草场改良 Natural clipping pasture improvement	第 1 年 1 st year	225.00	150.00	34.65	6.60	1050.00	-720.00
	第 2 年 2 nd year	0	0	0	6.60	990.00	930.00
	第 3 年 3 rd year	0	0	0	6.60	945.00	885.00
	第 4 年 4 th year	0	0	0	6.60	810.00	735.00
	第 5 年 5 th year	0	0	0	6.60	615.00	525.00
	平均 Mean	45.00	30.00	6.90	6.60	885.00	465.00
对照草场 5 年平均 Untreated clipping pasture mean value during 5 years		0	0	0	6.60	525.00	420.00

2.2 不同牲畜粪便处理利用模式的环境效应

3 种牲畜粪便处理利用模式的经济效益和环境影响如表 4 所示，对于直接发酵有机肥（FJ）、蚯蚓处理牛粪（QY）和蘑菇种植（MG）来说，处理 1 t 牛粪经济收益分别为 85、126 和 178 元。耗水量分别为 0.98 t（MG）、1.00 t（QY）和 1.40 t（FJ），对于化石能源消耗和相应的温室气体排放来说，牛粪种植蘑菇处理模式消耗能源（193.29 MJ）和温室气体排放最高（14.88 kg CO_{2eq}），养殖蚯蚓消耗最低（74.87 MJ），同时温室气体排放也最低（5.76 kg CO_{2eq}）。

在天然草场改良方面，通过施肥的方式进行草场改良与不进行任何处理的打草场相比，在处理五年内，干草产量平均提高 68.57%，每公顷打草场净收益增长 10.71%（表 5）。同时在环境影响方面，由于草场改良中施加化肥以及使用柴油的增加，相对对照草场每公顷不可再生能源消耗增加 2.10 倍，温室气体排放增加 17.70 倍。由于改良后产草量的增加，如将环境影响分摊到产出干草上，由草场改良带来的不可再生能源消耗和温室气体排放方面的环境影响增长分别降低至 0.59 倍和 9.00 倍（表 6）。

表 6 天然打草场改良环境影响
Table 6 Environmental impact of natural grassland improvement

		施肥排放 Emissions from fertilizer applied (kg CO _{2eq})	不可再生能源消耗 Non renewable energy consumption (MJ)	温室气体排放 Greenhouse gas emission (kg CO _{2eq})
改良草场	每公顷 Per hm ²	142.95	366.60	171.15
Natural clipping pasture improvement	每公斤收获 Per kg hay harvest	0.17	0.35	0.20
对照草场	每公顷 Per hm ²	0.00	118.35	9.15
Untreated clipping pasture	每公斤收获 Per kg hay harvest	0.00	0.22	0.02

2.3 奶牛集约化养殖-粪污综合处理-天然草场生态修复全产业链经济效益评价

本研究根据集约化奶牛养殖场的牲畜粪便生成量和饲草消耗情况，将奶牛集约化养殖、天然打草场改良和牲畜粪便处理利用这 3 个呼伦贝尔生态草牧业关键技术环节集成起来，估算整个产业链条上的综合环境影响和经济效益（表 7）。从净收益来看，每生产 1 t FPCM，集约化养殖场净收益为 686.19 元，未改良打草场出售牧草净收益为 499.80 元，合计经济收益 1 185.99 元。当集约化养殖场与打草场改良技术集

成后，每生产 1 t FPCM 为改良打草场带来的净收益为 329.22 元，相较未改良草场净收益下降 34.13%，但改良后生产 1 t FPCM 所需打草场面积仅为 0.71 hm²，节约 40.50%的草场占用面积。除草地占用外，天然打草场改良增加了能源消耗的 10.48%和温室气体排放的 14.86%。在牲畜粪便处理利用技术应用方面，集约化养殖场生产 1 t FPCM 所产生的牛粪通过发酵有机肥、蚯蚓处理牛粪和蘑菇种植，分别可创造净收益 40.72、60.78 和 85.36 元，相当于生产牛奶产生净收益的 5.93%、8.86%和 12.44%，与此同时，整体来看以上

表 7 呼伦贝尔生态草牧业技术集成生产 1 t FPCM 的综合环境影响和经济效益
Table 7 Comprehensive environmental impact and economic benefits of integrated production of 1 ton FPCM by Hulunber ecological grass and animal husbandry technology

		无处理对照 Untreated clipping pasture	天然打草场改良 Natural clipping pasture improvement		
			FJ	QY	MG
土地占用	打草场 Clipping pasture	1.19	0.71	0.71	0.71
Land occupation (hm ²)	耕地 Arable land	0.15	0.15	0.15	0.15
耗水量	饲草种植灌溉用水 Irrigation water consumption	210.89	210.89	210.89	210.89
Water consumption	牲畜饮用水 Water for livestock	5.58	5.58	5.58	5.58
(t)	牲畜粪便处理用水 Water for manure treatment	0.00	0.67	0.48	0.47
不可再生能源消耗	养殖场自身 Farm consumption	1944.19	1944.19	1944.19	1944.19
Non renewable energy	牲畜粪便处理 For manure treatment	0.00	46.29	35.93	92.76
consumption (MJ)	打草场 For hay clipping	140.84	218.65	218.65	218.65
温室气体排放	牲畜肠道甲烷排放 Ruminant methane emissions	0.52	0.52	0.52	0.52
Greenhouse gas	牲畜粪便甲烷排放 Methane emissions from manure	0.02	0.02	0.02	0.02
emission (t CO _{2eq})	农场燃料消耗 Diesel consumption by in farm	0.12	0.12	0.12	0.12
	化肥排放 Emission from fertilizer applied	0.06	0.06	0.06	0.06
	运输排放 Emission from transportation	0.01	0.01	0.01	0.01
	养殖场总排放 Total emission from farm	0.73	0.73	0.73	0.73
	打草场 Emission from hay clipping	0.01	0.12	0.12	0.12
净收益	养殖场自身 From livestock	686.19	686.19	686.19	686.19
Net profit	牲畜粪便处理 From manure treatments	0.00	40.72	60.78	85.36
(CNY)	打草场收益 From hay clipping	499.80	329.22	329.22	329.22

3 种粪便处理方式带来的环境影响相对较少, 用水量增幅不到 1%, 消耗不可再生能源分别增加 2.22% (发酵)、1.72% (蚯蚓) 和 4.45% (蘑菇)。但同时需要说明的是, 由于本研究中对于不同牲畜粪便处理方式中温室气体排放的情况并不明确, 因此本文对于牛粪发酵有机肥、蚯蚓处理和蘑菇种植过程中相应温室气体排放情况没有开展进一步评估。

3 讨论

奶牛养殖业是呼伦贝尔畜牧业的基础性产业, 利用 LCA 方法对当地奶牛养殖过程中的环境影响进行综合评估, 对于改善当地奶牛养殖产业经济效益和环境影响方面具有积极的作用。近年来, 我国对奶牛养殖各个环节的环境影响进行了评估, 但大多采用传统方法, 大部分研究局限于解决单个问题或改进某一生产环节, 对畜牧生产全生命周期总体的环境影响和资源消耗缺乏准确的认识^[6,23-25]; 此外, 在我国北方草原牧区, 也很少对奶牛养殖产业在温室气体排放、环境富营养化、土地资源占用和水资源消耗等方面的综合环境影响进行全面评估。引入 LCA 方法, 可以将畜牧产品生产、消费中的各个环节结合起来, 权衡不同资源环境影响类别, 综合考量畜牧产品全生命周期总体环境影响和资源损益, 为以上问题的解决提供了新的视角和技术途径^[8]。

关于集约化奶牛养殖场和传统季节性放牧牛奶生产系统的比较方面, 当前部分研究结果表明集约化养殖场在温室气体排放、土地占用、粪便排放等方面要远低于小规模散养的牛奶生产系统^[26-28], 其原因在于相比于传统季节性放牧奶牛牧场, 集约化奶牛养殖场通过科学规范的养殖模式, 在提高奶牛饲喂消化效率、提升奶生产奶能力、改良畜群结构、改进牲畜粪便处理利用方面具有明显优势, 使得在相同资源环境成本下, 集约化养殖场牛奶产出更多, 进而降低了单位产出的环境影响^[28-29], 但同时也有学者认为集约化养殖场一些经营方式会增加牛奶生产中某些类别的环境影响, 例如某些集约化养殖场通过种植不施肥低产苜蓿增加奶牛产奶量同时降低温室气体排放, 但会引发牛奶生产过程中的耕地占用面积增加^[18]。

本研究中集约化奶牛养殖厂生产同样数量 FPCM 的温室气体排放明显高于当地季节性放牧的奶牛养殖户。这与部分前人研究结论一致^[30], 集约化养殖系统环境影响高于季节性放牧系统主要是由于集约化养殖系统大量使用精饲料, 而精饲料的生产和作物种植

需要施加大量化肥进而产生较高的温室气体排放, 且精饲料种植过程中消耗较多的灌溉用水也会间接增加集约化养殖场生产牛奶的水资源消耗。同时, LCA 评估中系统边界设定、数据分配方法和数据参数来源等评估方法手段的选择也会对 LCA 评估的结果产生明显影响^[8,31]。本研究中关于集约化养殖与放牧系统两者间比较的结果与其他文献中不太一致, 原因可能是由于本研究对于两种牛奶生产系统的出售牲畜和生产牛奶期间两种产品间环境影响数据分配的问题, 出于数据来源可靠和方法可行性的考虑, 本研究选择用不同产品经济价值来分配环境影响^[17,28,30]。而在实地牧户调研期间, 由于奶价较低且饲草料短缺等问题, 当地小规模奶牛养殖户普遍减少了精饲料投入和生产牛奶数量, 且增加了出售牲畜的数量, 两相比较, 使小规模奶牛养殖牧户经营收入中出售牛奶所占比重较低, 造成了对小规模散养牧户牛奶生产环境影响评价结果偏低的情况。

目前, 对于牲畜粪便及其处理利用造成的环境影响方面, 国内外已有部分研究, 结果表明牲畜粪便管理方式及其处理利用过程对于改善农业畜牧产品生产资源环境影响方面具有重要的意义。例如 KUMAR 等^[32]通过文献综述的方式对韩国畜禽粪便及不同处理利用方式在重金属和病原微生物污染水体和农田土壤方面的环境风险进行了阐述。而 JONES 等^[33]通过对美国爱荷华州西部河流水体的硝酸盐含量、牲畜粪便中氮排放和肥料使用数据的分析, 发现牲畜粪便管理方式对当地河流水质有极为显著的影响。国内禽畜养殖中的粪便污染问题也越来越受到重视, 相关研究结果表明, 从 1978—2008 年, 中国由牲畜粪便引起的 NH_3 排放从 $2.2 \text{ Tg} \cdot \text{yr}^{-1}$ 增长至 $7.3 \text{ Tg} \cdot \text{yr}^{-1}$ ^[34]。张晓明^[24]和朱宁^[35]分别对国内奶牛养殖场和规模化养鸡场的粪便污染情况开展了研究。徐增让等^[36]评估了我国藏北牧区牛粪燃用引起的有机质、养分直接排空流失效应。朱海生等^[37]则对粪便储存中不同堆积高度的肉牛固体粪便温室气体排放进行了观测研究。

对于集约化养殖场来说, 大量未经利用的牲畜粪便直接释放到环境中会引起水体富营养化、空气污染、温室气体排放和病原体传播等一系列环境和公共卫生问题^[32]。禽畜粪便含有大量的有机质, 氮、磷等养分, 是一种重要的有机肥料资源, 但是目前我国禽畜粪便利用程度较低, 畜禽粪尿作为有机肥的还田率仅有 40%—50%, 随着我国畜牧产业集约化和规模化养殖程度的不断提高, 导致农业生产中农牧分离问题的加

剧,进一步限制了牲畜粪便的还田利用^[38-40]。特别是在我国草甸草原牧区,随着当地牧民生活、生产能源结构的改变和牧户牲畜圈舍饲养规模的扩大,当地牲畜圈舍中积累的粪便能作为燃料利用的比例越来越少。由于当地自然条件的限制和草原生态保护的需要,并不适合开展大规模农业种植活动,牲畜粪便无法就近还田,运往农区处理经济成本较高。因此,在呼伦贝尔草甸草原地区大量无法处理的牲畜粪便就在圈舍旁边和牧民定居点附近堆弃,不仅导致当地草原生态系统的养分流失,还严重威胁着当地居民健康和生态环境。相关研究结果表明,通过改进牲畜粪便处理方式,将当前丢弃的粪便作为肥料进行有效利用,可将牛奶生产引发的与氮排放相关的环境影响减少 30%以上,因此,寻找并建立符合我国草甸草原牧区实际情况且在经济成本和环境效益上具有可行性的牲畜粪便的无害化处理和资源化利用途径和技术方法,对于我国农牧产业发展和环境保护方面具有重要的现实意义^[17,41]。但由于数据来源限制等原因,本研究中仅对其经济效益和燃料、水资源消耗方面的环境影响进行了评估,对于不同牲畜粪便处理方式产生的温室气体排放和不同养殖模式下牲畜粪便造成的环境污染情况并不明确,需要在今后相关研究中对这一部分内容逐步扩展和完善,进而得出更加准确的结论。

4 结论

集约化养殖场在提高草原利用效率方面优势明显,同时在提升饲料能量转化效率、提升牛奶产量和质量方面具有很大的潜力。但是与小规模养殖户相比,从单位 FPCM 产品的角度衡量集约化养殖场在温室气体排放、水资源消耗和燃料消耗方面的环境成本较大。对天然打草场进行改良可显著增加每公顷草地牧草产出和收益,但施肥和燃料消耗的增加会造成温室气体排放、富营养化和燃料消耗增加等环境问题。在牲畜粪便处理利用技术应用方面,集约化养殖场产生的牛粪通过发酵有机肥、蚯蚓处理牛粪和蘑菇养殖等处理利用方式,在解决牲畜饲养中粪便污染问题的同时,创造的净收益相当于生产牛奶产生净收益的 5%—12%,整体来看带来的环境影响相对较少,在呼伦贝尔当地畜牧产业中的应用潜力较大。

References

[1] WATTIAUX M A, UDDIN M E, LETELIER P, JACKSON R D,

LARSON R A. Emission and mitigation of greenhouse gases from dairy farms: The cow, the manure, and the field. *Applied Animal Science*, 2019, 35(2): 238-254.

[2] GERBER P J, STEINFELD H, HENDERSON B, MOTTET A, OPIO C, DIJKMAN J, FALCUCCI A, TEMPIO G. Tackling climate change through livestock: A global assessment of emissions and mitigation opportunities. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2013.

[3] PIRLO G, LOLLI S. Environmental impact of milk production from samples of organic and conventional farms in Lombardy (Italy). *Journal of Cleaner Production*, 2019, 211: 962-971.

[4] WANG X Q, LEDGARD S, LUO J F, GUO Y Q, ZHAO Z Q, GUO L, LIU S, ZHANG N N, DUAN X Q, MA L. Environmental impacts and resource use of milk production on the north China plain, based on life cycle assessment. *Science of the Total Environment*, 2018, 625: 486-495.

[5] 黄文强, 董红敏, 朱志平, 刘翀, 陶秀萍, 王悦. 畜禽产品碳足迹研究进展与分析. *中国农业科学*, 2015, 48(1): 93-111.

HUANG W Q, DONG H M, ZHU Z P, LIU C, TAO X P, WANG Y. Research progress and analysis of carbon footprint of livestock products. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(1): 93-111. (in Chinese)

[6] 刘松. 关中地区奶牛饲料作物环境影响生命周期评价[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.

LIU S. Life cycle assessment of dairy cattle feed crops in Guanzhong plain [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2017. (in Chinese)

[7] 倪茹. 呼和浩特奶牛养殖粪污排放与废水处理模式及其工艺改进[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2016.

NI R. Dairy farm waste emissions and improvement of treatment mode and process of wastewater in Hohhot [D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2016. (in Chinese)

[8] 姜明红, 刘欣超, 唐华俊, 辛晓平, 陈吉泉, 董刚, 吴汝群, 邵长亮. 生命周期评价在畜牧生产中的应用研究现状及展望. *中国农业科学*, 2019, 52(9): 1635-1645.

JIANG M H, LIU X C, TANG H J, XIN X P, CHEN J Q, DONG G, WU R Q, SHAO C L. Research progress and prospect of life cycle assessment in animal husbandry. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(9): 1635-1645. (in Chinese)

[9] NOTARNICOLA B, SALA S, ANTON A, MCLAREN S J, SAOUTER E, SONESSON U. The role of life cycle assessment in supporting sustainable agri-food systems: A review of the challenges. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 140: 399-409.

[10] MCCLELLAND S C, ARNDT C, GORDON D R, THOMA G. Type

- and number of environmental impact categories used in livestock life cycle assessment: A systematic review. *Livestock Science*, 2018, 209: 39-45.
- [11] HELLER M C, KEOLEIAN G A. Life cycle energy and greenhouse gas analysis of a large-scale vertically integrated organic dairy in the United States. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(5): 1903-1910.
- [12] CHATTERTON J, GRAVES A, AUDSLEY E, MORRIS J, WILLIAMS A. Using systems-based life cycle assessment to investigate the environmental and economic impacts and benefits of the livestock sector in the UK. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 86: 1-8.
- [13] ESTEVES E M M, HERRERA A M N, ESTEVES V P P, MORGADO R V. Life cycle assessment of manure biogas production: A review. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 219: 411-423.
- [14] JOENSUU K, PULKKINEN H, KURPPA S, YPYÄ J, VIRTANEN Y. Applying the nutrient footprint method to the beef production and consumption chain. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2019, 24(1): 26-36.
- [15] GROENESTEIN C M, HUTCHINGS N J, HAENEL H D, AMON B, MENZI H, MIKKELSEN M H, MISSELBROOK T H, VAN BRUGGEN C, KUPPER T, WEBB J. Comparison of ammonia emissions related to nitrogen use efficiency of livestock production in Europe. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 211: 1162-1170.
- [16] BATTINI F, AGOSTINI A, BOULAMANTI A K, GIUNTOLI J, AMADUCCI S. Mitigating the environmental impacts of milk production via anaerobic digestion of manure: Case study of a dairy farm in the Po Valley. *Science of the Total Environment*, 2014, 481: 196-208.
- [17] LEDGARD S F, WEI S, WANG X Q, FALCONER S, ZHANG N N, ZHANG X Y, MA L. Nitrogen and carbon footprints of dairy farm systems in China and New Zealand, as influenced by productivity, feed sources and mitigations. *Agricultural Water Management*, 2019, 213: 155-163.
- [18] 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.
- [19] ZHANG J, ZHUANG M H, SHAN N, ZHAO Q, LI H, WANG L G. Substituting organic manure for compound fertilizer increases yield and decreases NH_3 and N_2O emissions in an intensive vegetable production system. *Science of the Total Environment*, 2019, 670: 1184-1189.
- [20] XU X B, MA Z, CHEN Y Q, GU X M, LIU Q Y, WANG Y T, SUN M M, CHANG D H. Circular economy pattern of livestock manure management in Longyou, China. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 2018, 20(2): 1050-1062.
- [21] 黄文强. 规模化养殖场牛奶生产碳足迹评估方法与案例分析[D]. 北京: 中国农业科学院, 2015.
- HUANG W Q. Carbon footprint assessment methodology of milk production in intensive dairy farm and case study [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2015. (in Chinese)
- [22] 曹正纲. 黑龙江省奶牛场生命周期评价[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2012.
- CAO Z G. Life cycle assessment of dairy farm in Heilongjiang province, China [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2012. (in Chinese)
- [23] 刘艳娜, 史莹华, 严学兵, 王成章, 梁明根, 周路. 苜蓿青干草替代部分精料对奶牛生产性能及经济效益的影响. 草业学报, 2013, 22(6): 190-197.
- LIU Y N, SHI Y H, YAN X B, WANG C Z, LIANG M G, ZHOU L. Effect of alfalfa hay substituting for part of the concentrate, on the production of cows and economic profit. *Acta Prataculturae Sinica*, 2013, 22(6): 190-197. (in Chinese)
- [24] 张晓明. 奶牛养殖业对环境的污染及其控制. 中国畜牧杂志, 2011, 47(8): 38-42.
- ZHANG X M. Environmental pollution and control of dairy farming. *Chinese Journal of Animal Science*, 2011, 47(8): 38-42. (in Chinese)
- [25] 吕通. 内蒙古牲畜养殖粪污排放特征及其产沼和减排潜力分析[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2016.
- LV T. Emission characteristics and biogas production and emission reduction potential of livestock manure in Inner Mongolia. Hohhot: Inner Mongolia University, 2016. (in Chinese)
- [26] SALOU T, LE MOUËL C, VAN DER WERF. Environmental impacts of dairy system intensification: The functional unit matters. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 140: 445-454.
- [27] ROY P, NEI D, ORIKASA T, XU Q, OKADOME H, NAKAMURA N, SHIINA T. A review of life cycle assessment (LCA) on some food products. *Journal of Food Engineering*, 2009, 90(1): 1-10.
- [28] CAPPER J L, CADY R A, BAUMAN D E. The environmental impact of dairy production: 1944 compared with 2007. *Journal of Animal Science*, 2009, 87(6): 2160-2167.
- [29] BRAGHIERI A, PACELLI C, BRAGAGLIO A, SABIA E, NAPOLITANO F. The hidden costs of livestock environmental sustainability: The case of Podolian Cattle VASTOLA A//*The Sustainability of Agro-food and*

- Natural Resource Systems in the Mediterranean Basin*. Cham: Springer International Publishing, 2015: 47-56.
- [30] 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.
- [31] TICHENOR N E, PETERS C J, NORRIS G A, THOMA G, GRIFFIN T S. Life cycle environmental consequences of grass-fed and dairy beef production systems in the Northeastern United States. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 142: 1619-1628.
- [32] KUMAR R R, PARK B J, CHO J Y. Application and environmental risks of livestock manure. *Journal of the Korean Society for Applied Biological Chemistry*, 2013, 56(5): 497-503.
- [33] JONES C S, DRAKE C W, HRUBY C E, SCHILLING K E, WOLTER C F. Livestock manure driving stream nitrate. *Ambio*, 2019, 48: 1143-1153.
- [34] XU P, KOLOUTSOU-VAKAKIS S, ROOD M J, LUAN S J. Projections of NH₃ emissions from manure generated by livestock production in China to 2030 under six mitigation scenarios. *Science of the Total Environment*, 2017, 607-608: 78-86.
- [35] 朱宁. 畜禽规模养殖户污染防治问题研究[D]. 中国农业科学院, 2016.
- ZHU N. Research on pollution prevention of livestock scale farmers: A case study in layer [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2016. (in Chinese)
- [36] 徐增让, 成升魁, 高利伟, 陈远生. 藏北牧区畜粪燃烧与养分流失的生态效应研究. *资源科学*, 2015, 37(1): 94-101.
- XU Z R, CHENG S K, GAO L W, CHEN Y S. Yak dung use as fuel and nutrient loss in the Northern Tibetan Plateau. *Resources Science*, 2015, 37(1): 94-101. (in Chinese)
- [37] 朱海生, 董红敏, 左福元, 袁丰, 饶骏. 覆盖及堆积高度对肉牛粪便温室气体排放的影响. *农业工程学报*, 2014, 30(24): 225-231.
- ZHU H S, DONG H M, ZUO F Y, YUAN F, RAO J. Effect of covering on greenhouse gas emissions from beef cattle solid manure stored at different stack heights. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(24): 225-231. (in Chinese)
- [38] 马林, 柏兆海, 王选, 曹玉博, 马文奇, 张福锁. 中国农牧系统养分管理研究的意义与重点. *中国农业科学*, 2018, 51(3): 406-416.
- MA L, BAI Z H, WANG X, CAO Y B, MA W Q, ZHANG F S. Significance and research priority of nutrient management in soil-crop-animal production system in China. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(3): 406-416. (in Chinese)
- [39] 张建杰, 郭彩霞, 李莲芬, 张强. 农牧交错带农牧系统氮素流动与环境效应-以山西省为例. *中国农业科学*, 2018, 51(3): 456-467.
- ZHANG J J, GUO C X, LI L F, ZHANG Q. Nutrient flow and environmental effects on crop-livestock system in farming-pastoral transition zone-A case study in Shanxi province. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(3): 456-467. (in Chinese)
- [40] GU B J, JU X T, CHANG J, GE Y, VITOUSEK P M. Integrated reactive nitrogen budgets and future trends in China. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 2015, 112(28): 8792-8797.
- [41] 王敬国, 林杉, 李保国. 氮循环与中国农业氮管理. *中国农业科学*, 2016, 49(3): 503-517.
- WANG J G, LIN S, LI B G. Nitrogen cycling and management strategies in Chinese agriculture. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(3): 503-517. (in Chinese)

(责任编辑 林鉴非, 赵伶俐)