

DOI: 10.20103/j.stxb.202311172504

欧阳熙煌, 王军邦, 赵亮, 王文颖, 张振华, 周华坤, 赵新全. 青藏高原高寒草地食草家畜碳收支动态. 生态学报, 2024, 44(22): 10133-10145.

Ouyang X H, Wang J B, Zhao L, Wang W Y, Zhang Z H, Zhou H K, Zhao X Q. Carbon budget of herbivorous livestock on alpine grassland over the Qinghai-Tibet Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(22): 10133-10145.

青藏高原高寒草地食草家畜碳收支动态

欧阳熙煌^{1,2}, 王军邦^{1,*}, 赵 亮³, 王文颖⁴, 张振华⁵, 周华坤⁶, 赵新全⁷

1 中国科学院地理科学与资源研究所, 生态系统网络观测与模拟重点实验室, 生态系统大数据与模拟中心, 北京 100101

2 中国科学院大学, 北京 100101

3 中国科学院西北高原生物研究所, 青海三江源草地生态系统国家野外科学观测研究站, 西宁 810001

4 青海师范大学, 生命科学学院, 西宁 810001

5 中国科学院西北高原生物研究所, 青海海北高寒草地生态系统国家野外科学观测研究站, 西宁 810001

6 中国科学院西北高原生物研究所, 青海省寒区恢复生态学重点实验室, 西宁 810001

7 青海大学, 省部共建三江源生态与高原农牧业国家重点实验室, 西宁 810001

摘要: 高寒草地生态系统是青藏高原地区主体生态类型, 支撑着当地牧民的生活和生产, 同时也发挥着维持区域生态安全的重要作用。食草家畜是草地系统和人类社会紧密耦合的重要元素, 其碳收支动态成为草地生态系统碳循环中的重要过程之一, 但目前对食草家畜的碳收支及其动态并没有得到很好的量化。利用县级统计年鉴数据量化了青藏高原 2000—2020 年期间的食草家畜碳收支及去向, 并与基于卫星遥感的净初级生产力 (Net primary productivity, NPP) 和可利用产草量 (Available grass yield, GY_A) 进行了对比分析, 得到如下结论: (1) 2000—2020 年期间, 青藏高原草地 NPP 总量和 GY_A 总量分别为 (153.88 ± 17.96) Tg C/a 和 (26.40 ± 3.19) Tg C/a, 食草家畜碳摄入量 (Intake carbon, IT_c) 为 (31.08 ± 0.98) Tg C/a (占 GY_A 总量的 118%)。 (2) 青藏高原草地 NPP、 GY_A 、 IT_c 均呈现显著增加趋势, 但 IT_c 占 GY_A 的比值呈现显著下降趋势, 并且这一比值在空间上存在异质性。 (3) 食草家畜摄入碳量中有 13.24 Tg C/a (约占 IT_c 的 43%) 通过粪尿排泄排出, 12.35 Tg C/a 通过呼吸产热排出, 0.96 Tg C/a 以 CH_4 形式排出, 固存在家畜体内的碳是 4.53 Tg C/a, 而以畜产品向人类社会输出的碳是 0.384 Tg C/a。从动物代谢生理层面量化了青藏高原食草家畜碳收支及其时空动态, 对草牧业管理、草地碳增汇及全球变化生态学具有重要意义。

关键词: 食草家畜; 动物碳代谢模型; 碳摄入量; 畜产品; 可利用产草量

Carbon budget of herbivorous livestock on alpine grassland over the Qinghai-Tibet Plateau

OUYANG Xihuang^{1,2}, WANG Junbang^{1,*}, ZHAO Liang³, WANG Wenying⁴, ZHANG Zhenhua⁵, ZHOU Huakun⁶, ZHAO Xinquan⁷

1 Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, National Ecosystem Science Data Center, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

3 Sanjiangyuan Grassland Ecosystem National Observation and Research Station, Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810001, China

4 College of Life Sciences, Qinghai Normal University, Xining 810001, China

5 Haibei National Field Research Station of Alpine Grassland Ecosystem, Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810001, China

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究项目 (2019QZKK0302-02); 青海省帅才科学家负责制项目 (2024-SF-102); 国家自然科学基金项目 (31971507); 中国科学院-青海省人民政府三江源国家公园联合研究专项 (LHZX-2020-07)

收稿日期: 2023-11-17; **网络出版日期:** 2024-08-22

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jbwang@igsrr.ac.cn

6 Qinghai Provincial Key Laboratory of Restoration Ecology for Cold Region, Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810001, China

7 State Key Laboratory of Plateau Ecology and Agriculture, Qinghai University, Xining 810001, China

Abstract: The alpine grassland is the major land cover on the Qinghai-Tibet Plateau (QTP), which not only supports the livelihoods and livestock production of local herdsman but also plays an important role in maintaining ecosystem security on the regional scale. As key elements in the system of grassland and human societies, herbivorous livestock has its carbon budget and carbon cycle from grassland to human societies, which are not well quantified at present. This study used the livestock data from the county yearbook to quantify the carbon budget of herbivorous livestock on the QTP from 2000 to 2020. The ratio of carbon intake was quantified based on the available grass yield (GY_A) and net primary productivity (NPP) estimated by remote sensing. The results showed: (1) the multi-year averaged total NPP and GY_A were (153.88 ± 17.96) Tg C/a and (26.40 ± 3.19) Tg C/a from 2000 to 2020, respectively. The carbon intake of herbivorous livestock (IT_C) was (31.08 ± 0.98) Tg C/a (accounting for 118% of total GY_A). (2) The NPP, GY_A , and IT_C of grasslands on the QTP showed a significant increasing trend, but the ratio of IT_C to GY_A showed a significant decreasing trend. Meanwhile, this ratio showed heterogeneity in spatial (such as different grassland types and different regions). (3) About 43% of the total intake was excreted through feces and urine equating to 13.24 Tg C/a, while 12.35 Tg C/a and 0.96 Tg C/a were released through respiration in heat production and CH_4 in belch by herbivorous livestock, respectively. The carbon of 4.53 Tg C/a was finally sequestered in the livestock body and the partial carbon of 0.384 Tg C/a was exported to human society as livestock products. This study quantified the carbon budget and its spatial and temporal dynamics of livestock on the QTP based on the herbivorous physiological metabolism, which is of great significance for grassland management, carbon sequestration in grasslands and global change ecology.

Key Words: herbivorous livestock; animal carbon metabolism model; carbon intake; livestock products; available grass yield

青藏高原是世界上海拔最高的高原,同时也是中国和世界的重要生态屏障。青藏高原以草地生态系统为主,其面积占青藏高原总面积的 60% 以上^[1-2]。这些草地在牧草供给、气候调节、水源涵养、防风固沙以及维持生物多样性等方面具有重要意义^[3-5]。放牧作为长期的人类干扰因素,推动食草动物与高寒草地协同演替而形成偏途演替顶级系统^[6]。在此系统内部,植物—土壤—大气之间的碳交换已经得到了充分的模拟和描述^[7],但是由食草动物介导的动物地球化学循环过程及作用却经常被忽视^[8-9],特别是在青藏高原高寒高海拔的气候环境下,草地生态系统对气候变化和人类活动等外界干扰更加敏感^[10-11],食草家畜碳收支在高寒草地系统中的作用仍然缺乏量化,这可能使得我们对高寒草地生态系统碳过程和机制缺乏其完整性的认识和理解。

食草家畜的碳收支是草地生态系统碳循环中的重要组成部分,其通量大小和动态变化在人类活动日益增强的背景下变得尤为关键。食草家畜通过采食草地植物碳,经过消化、排泄、代谢以及固存等过程后,将摄入碳再分配至包括人类社会在内的各个系统中^[12-14],量化各个通量的大小及动态对各个系统和过程均具有重要意义。例如,对食草家畜摄入的碳进行量化分析,将促进我们对草地和家畜之间碳过程的理解和评估^[15-16];计算食草家畜粪尿的碳归还,将有助于量化生态系统中的养分循环效率,并对生物地球化学模型提供参数支撑^[17-18];而食草家畜通过呼吸产热和反刍打嗝排放的 CO_2 和 CH_4 对气候环境产生巨大影响^[19-20],其量化和定量分析则有助于我们应对全球气候变化这一巨大挑战;最后量化畜产品向人类社会的持续输出有利于提高人类社会系统畜牧业生产效率、优化畜牧业生产结构^[21-22]。虽然已有研究针对三江源区域开展了食草动物碳通量的现状评估^[14],但在碳通量动态和社会供给方面仍然欠缺。特别是对青藏高原区域来说,准确认识食草家畜的碳收支流向及其动态变化,不仅可以加深我们对动物地球化学循环的理解,而且对我国畜

牧业高质量发展以及“双碳”目标的实现具有重要的参考价值。

综上,本研究通过 GLCV-FAM 模型量化青藏高原 2000—2020 年期间的食草家畜碳消耗,分析近 21 年期间草地生态系统生产和食草家畜碳消耗的时空动态、评估食草家畜放牧利用现状,揭示草地生态系统、食草家畜以及人类社会三者之间的碳耦合关系,为草地生态系统管理与畜牧业可持续发展提供理论依据和方法参考。

1 方法

1.1 研究区概况

青藏高原是世界上最高的高原,坐落于 $31^{\circ}39'—36^{\circ}16' N$, $89^{\circ}24'—102^{\circ}23' E$, 由于具有特殊的地理和生态条件而被誉称为是“世界屋脊”、“地球第三极”和“亚洲水塔”(图 1)。青藏高原总面积约 $2.5 \times 10^8 \text{ km}^2$, 占中国领土面积的近 $1/4$ ^[23], 年平均气温在 $-0.5—1.7^{\circ}C$, 年总降水量在 $487.5—561.7 \text{ mm}$ 之间, 平均海拔 4000 m 以上。青藏高原主要包括西藏自治区和青海省, 以及新疆维吾尔自治区、四川省、甘肃省和云南省的部分地区。区域内的农业活动以畜牧业生产为主, 主要放牧牦牛、藏羊等食草家畜^[24]。这些家畜不仅提供日常生活所需的基本营养物质, 同时还是牧民的主要收入来源之一^[25]。据统计, 2020 年青藏高原区域内的畜牧业生产约占第一产业的 38%, 其中青海和西藏地区的畜牧业生产占第一产业的比值超过 50%^[26]。

1.2 数据来源

1.2.1 净初级生产力及可利用产草量

本研究所用的草地净初级生产力 (Net Primary Productivity, NPP) 由 GLOPEM-CEVSA 模型计算得到。GLOPEM-CEVSA 模型是一个将基于遥感的全球生产效率模型与基于植被、大气和土壤的碳交换模型结合的一个耦合模型^[27], 这一遥感-过程耦合模型通过遥感植被指数和生理过程模拟描述了生态系统的过程和机制。在 GLOPEM-CEVSA 中, 输入模型的数据包括 fPAR 数据、气象数据、土壤质地数据以及数字高程模型数据 (DEM) 等, 该模型的详细描述可参见 Wang 等^[27] 和 Wang 等^[28]。GLOPEM-CEVSA 模型的 NPP 数据产品经长期站点监测数据的验证后, 表明数据产品具有较高的可靠性和准确性, 验证结果详见左婵等^[29] 和王春雨等^[30]。

可利用产草量 (Available Grass Yield, GY_A) 是通过各类草地类型的地上部分和地下部分净初级生产力的比值以及产草量可利用比例估算草地的可利用产草量:

$$GY_A = NPP \times \frac{Uf}{(1+f)} \quad (1)$$

式中, GY_A 为草地可利用产草量; NPP 为草地净初级生产力; Uf 为产草量可利用比例, 根据草地可利用率、牧草利用率和可食牧草率将产草量可利用比例取 51.5%^[15]; f 为草地净初级生产力地下部分与地上部分的比值, 根据 Fan 等^[31] 的方法及数据计算得到的。最后为了统一单位, 将草地净初级生产力 NPP 和可利用产草量 GY_A 转换成 $\text{g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 空间分辨率为 1 km , 计算区域总量时则按 Tg C/a 。

1.2.2 土地利用数据

本研究使用了土地利用和土地覆被数据 (Land Use and Cover Change, LUCC) 对青藏高原草地区域进行



图 1 青藏高原研究区概况

Fig.1 Elevation and grassland area of the Qinghai-Tibet Plateau

分析。LUCC 数据来源于 2010 年空间分辨率为 30 m 的 ChinaCover 数据产品^[32],此数据利用 Landsat TM/ETM 数据和 HJ-1 卫星数据,结合大量外业调查数据得到 2010 年中国土地覆盖数据。在此数据的基础上,本研究裁剪出青藏高原区域并重采样至 1 km 进行下一步分析。

1.2.3 草地类型数据

本研究使用的草原类型数据来自《中国草原资源图集》^[33],其中包括 16 类草地类型,空间分辨率为 1 km。在此,我们根据草地的植被类型和气候特征将这 16 种草原类型分为七大类:热性草丛、暖性草丛、典型草原、草甸草原、高寒草甸、高寒草原和荒漠草原,其中青藏高原包含高寒草甸、高寒草原和荒漠草原三类。为了与县域尺度家畜统计数据相匹配,分草地类型进行数值统计时,以各县区草地类型区域内对应的可利用产草量比例划分各代谢通量。

1.2.4 统计资料

在本研究中,食草家畜数据及畜产品产量数据来自各省《统计年鉴》中的年终存栏数据。为了保持数据的准确性,对于只有市域级别的数据,则按照市域数据进行计算,必要时使用草地面积将总数转换成单位面积数值,草地面积来源于 LUCC 数据。此外,对于个别年份缺失数据将使用前后年均值进行填补,而前后 2 年内缺失的数据将使用线性插补进行填补。

1.2.5 GLCV-FAM 碳通量模型

本研究将 2000 年至 2020 年统计年鉴中各县市的食草大家畜和羊数量输入至 GLCV-FAM 模型中得到食草家畜各部分碳通量,单位为 Tg C/a。GLCV-FAM 模型是用于估算反刍动物和啮齿动物代谢通量的方法,是在 GLOPEM-CEVSA 和 IPCC 食草家畜碳排放计算方法的基础上,通过能量代谢过程和物质量计算而开发得到^[14]。GLCV-FAM 模型将不同食草家畜种类(主要以藏牦牛、藏绵羊为主)、食草家畜在不同季节的代谢和需求差异、以及食草家畜的畜群年龄结构等因素考虑在内,并进行参数化后参与食草家畜的碳通量计算。根据最新农业部行业标准(NYT3647—2020),1 个羊单位相当于 1 只体重 50 kg、1 年内哺一只断乳前羔羊的健康成年母绵羊。本研究考虑大家畜、羊的畜群结构和平均体重,换算为羊单位的系数分别为 3.37 和 0.79,其他代谢需求相关参数见 Wang 等^[14]。

在食草家畜代谢过程中,食草家畜首先从地上生物量中摄入植物碳,然后经过消化、代谢后分别流向不同部分或系统,据此形成完整的食草家畜碳收支过程。在这一过程中,摄入的碳通过粪便和尿液部分返回草地生态系统,另一部分通过呼吸作用释放到大气中,还有一部分保留在食草动物体内作为二次生产。因此,GLCV-FAM 模型假设食草动物摄入的碳量等于粪便、尿液、呼吸和二次生产的总和^[14, 34]:

$$RE_C = \sum_{i=1}^4 (IT_{C,i} \times T_i - FR_{C,i} - UR_{C,i} - HPR_{C,i}) \quad (2)$$

式中, RE_C 为固存在动物体内的碳量, i 代表一年中的四个季节, $IT_{C,i}$ 为季节碳摄入量, $FR_{C,i}$ 为返回生态系统的消化碳粪便, $UR_{C,i}$ 为代谢碳尿液, $HPR_{C,i}$ 为用于动物产热的呼吸二氧化碳, T_i 代表季节天数。

此外,为了量化食草家畜向人类社会的碳供应,本研究通过 2000 年至 2020 年各县市统计年鉴中畜产品产量(主要包括肉、毛、奶制品产量)计算得到食草家畜向人类社会输出的碳含量。通过畜产品数据和畜产品碳参数进行计算,其中畜产品碳参数如下见表 1。

2 结果

2.1 草地生产力及可利用产草量时空格局

青藏高原草地 NPP 存在明显的由东南向西北逐渐递减的空间分布格局,如图所示(图 2)。近 21 年,青藏高原全区草地 NPP 多年均值约为 $(99.98 \pm 11.50) \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,合计约 $(153.88 \pm 17.96) \text{ Tg C/a}$ 。其中青海区域 $(146.37 \pm 18.09) \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,合计约 $(59.21 \pm 7.42) \text{ Tg C/a}$ 。西藏区域 $(66.85 \pm 7.67) \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,合计约 $(59.33 \pm 6.80) \text{ Tg C/a}$ 。总体而言,青藏高原草地生态系统 NPP 存在明显的空间梯度,高值主要出现在青藏高

原东南部、低值主要出现在羌塘高原和柴达木区域。此外,青藏高原草地 NPP 在过去近 21 年期间主要呈现显著增加的变化趋势(图 2,图 3)。青藏高原草地 NPP 总量以 $1.44 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ($P<0.001$) 呈现显著增加趋势。而其中青海区域和西藏区域草地 NPP 分别以 $2.09 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ($P<0.001$) 和 $0.96 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ($P<0.001$) 速度显著增加。

表 1 畜产品碳含量计算参数
Table 1 Parameters for calculating the carbon content of livestock products

类别 Categories	名称 Name	大家畜 Large livestock	羊 Sheep	参考文献 References
肉产品 Meat products	畜产品干物质含量	31.64%	30.00%	洛桑等 ^[35]
	干物质蛋白质含量	21.43%	20.07%	张路 ^[36]
	干物质脂肪含量	3.12%	2.46%	
毛制品 Woolen products	绒毛含量		44.81%	柴婷等 ^[37]
	绒毛碳含量		46.53%	实测数据
奶制品 Milk	蛋白质含量		5.28%	褚楚等 ^[38]
	乳脂率		8.18%	
	乳糖		4.40%	

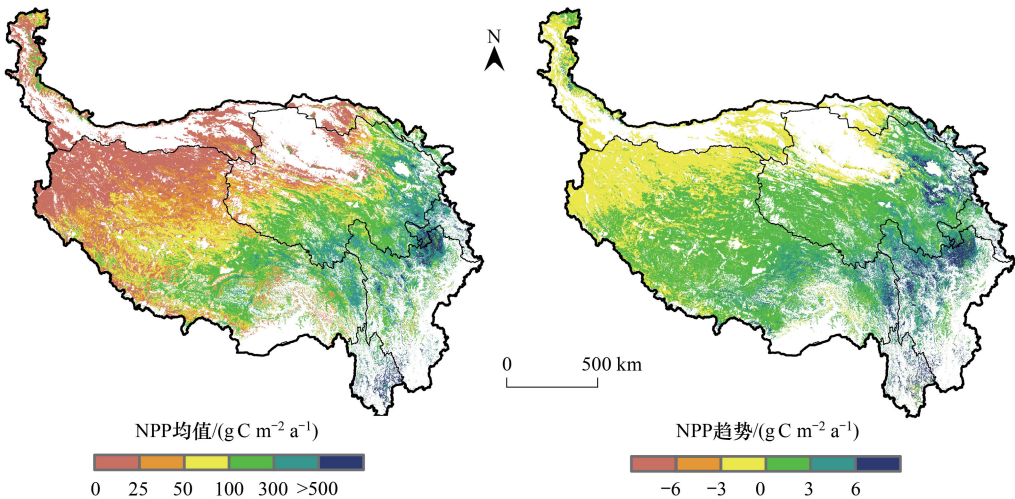


图 2 2000—2020 年青藏高原草地 NPP 均值空间分布及变化趋势

Fig.2 Spatial distribution of grassland NPP on the Qinghai-Tibet Plateau from 2000 to 2020 and spatial distribution of change trends

2000—2020 年期间,青藏高原草地可利用产草量 GY_A 多年均值为 $(17.16\pm1.99) \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 合计约 $(26.40\pm3.19) \text{ Tg C/a}$ 。其中青海区域草地可利用产草量 GY_A 多年均值为 $(25.37\pm3.11) \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 合计约 $(9.90\pm1.28) \text{ Tg C/a}$ 。西藏区域草地可利用产草量 GY_A 多年均值为 $(11.10\pm1.29) \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 合计约 $(10.34\pm1.15) \text{ Tg C/a}$ 。青藏高原草地可利用产草量 GY_A 在过去近 21 年期间的变化趋势与其 NPP 较为一致(图 3), 以 $0.25 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ($P<0.001$) 呈现显著增加趋势。而其中青海区域和西藏区域草地 GY_A 分别以 $0.36 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ($P<0.001$) 和 $0.16 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ($P<0.001$) 速度显著增加。

2.2 食草家畜碳消耗时空动态

2000—2020 年期间,青藏高原食草家畜碳摄入量空间分布格局如图所示(图 4)。总体而言,青藏高原食草家畜碳摄入量存在空间异质性,高值主要出现在青藏高原东部、东南部,低值主要出现在藏北高原。近 21 年期间,青藏高原全区食草家畜碳摄入总量多年均值约为 $(31.08\pm0.94) \text{ Tg C/a}$, 约占 GY_A 总量的 118% (表 2)。其中青海区域 $(7.76\pm0.67) \text{ Tg C/a}$, 约占当地草地 GY_A 总量的 78%。西藏区域 $(6.86\pm0.58) \text{ Tg C/a}$, 约占当地草地 GY_A 总量的 66%。

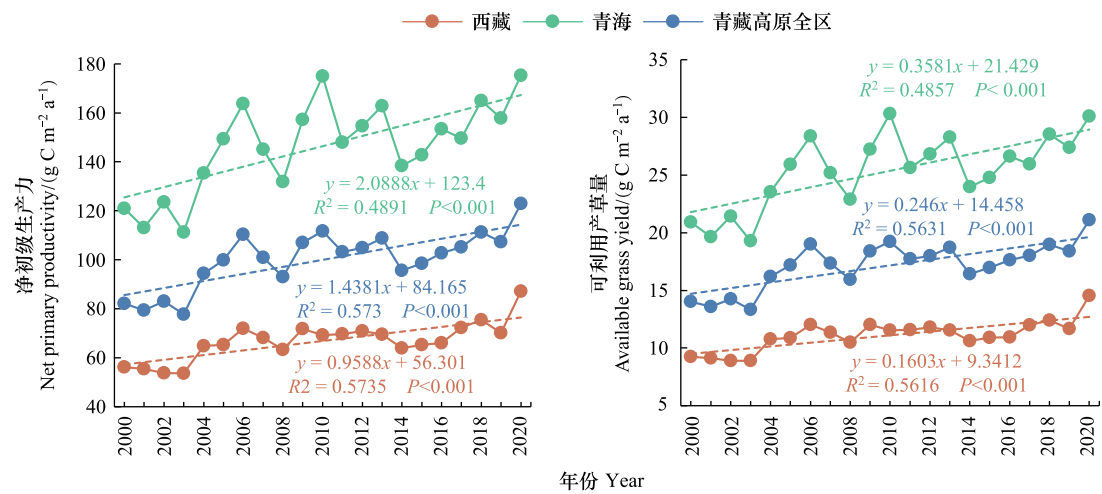


图3 青藏高原草地 NPP 及 GY_A 的变化趋势

Fig.3 Trends in NPP and GY_A in grassland on the Qinghai-Tibet Plateau

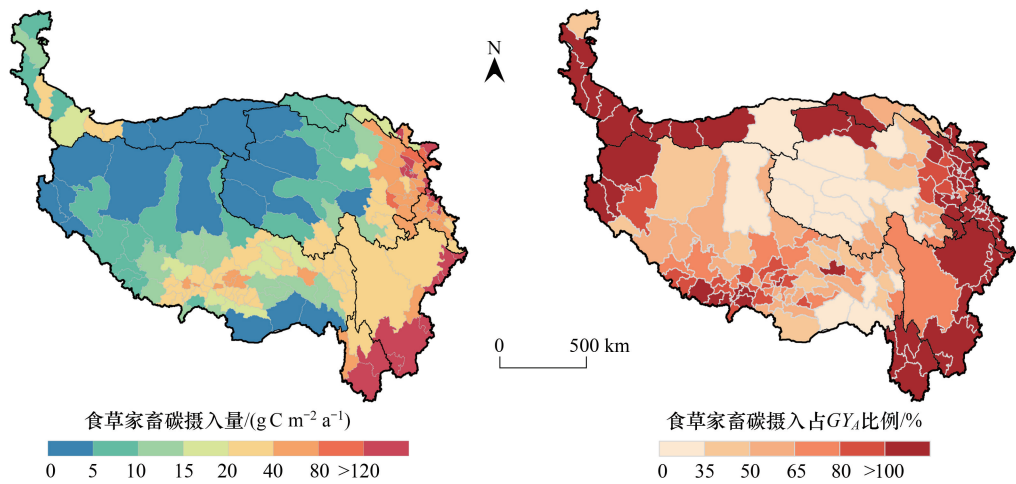


图4 2000—2020 年青藏高原食草家畜碳摄入量及其占可利用产草量比值空间分布

Fig.4 Spatial distribution of carbon intake and its ratio to grass yield for herbivorous livestock on the Qinghai-Tibet Plateau, 2000—2020

表 2 青藏高原及其各子区域食草家畜碳收支多年均值

Table 2 Multi-year average carbon budgets and expenditures of herbivorous livestock on the Qinghai-Tibet Plateau and its subregions

青藏高原 内各区 Region	摄入碳量 IT_C / (Tg C/a)	可利用 产草量 GY_A / (Tg C/a)	摄入量占可 利用产草 量比值 IT_C/GY_A /%	粪碳 FR_C / (Tg C/a)	尿碳 UR_C / (Tg C/a)	CO_2 排放 CO_2 respiratory emissions/ (Tg C/a)	CH_4 排放 CH_4 emissions/ (Tg C/a)	家畜碳 固存 RE_C / (Tg C/a)	畜产品 碳量 LP_C / (Tg C/a)
云南	2.42	0.35	697	0.83	0.18	0.97	0.08	0.36	0.007
四川	9.61	4.33	222	3.55	0.70	3.70	0.29	1.36	0.120
新疆	1.09	0.35	316	0.39	0.08	0.45	0.03	0.16	0.035
甘肃	3.34	1.14	294	1.14	0.25	1.34	0.10	0.49	0.052
西藏	6.86	10.34	66	2.36	0.52	2.76	0.21	1.01	0.091
青海	7.76	9.90	78	2.67	0.59	3.12	0.24	1.15	0.078
全区合计 the Qinghai- Tibet Plateau	31.08	26.40	118	10.92	2.32	12.35	0.96	4.53	0.384

IT_C : 摄入碳量 Carbon intake; GY_A : 可利用产草量 Available grass yield; FR_C : 粪碳 Feces carbon; UR_C : 粪碳 Urine carbon; RE_C : 家畜碳固存 Retained carbon; LP_C : 畜产品碳量 Livestock product carbon

青藏高原食草家畜碳摄入量在过去近 21 年期间主要呈现显著增加的变化趋势(图 5)。青藏高原食草家畜碳摄入总量约以 $0.08 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ($P=0.004$) 呈现显著增加趋势。而其中青海区域和西藏区域食草家畜碳摄入总量分别以 $0.10 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ($P<0.001$) 和 $-0.07 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ($P<0.001$) 速度显著增加和减小。青藏高原全区食草家畜碳摄入量占 NPP 比重、以及占 GY_A 的比重均呈现显著下降趋势,速度分别约为每年 -0.25% 和每年 -1.36% (图 5)。其中,四川区域食草家畜碳摄入量占 GY_A 比重下降趋势最大,速度约为每年下降 5.02% ;西藏地区的食草家畜碳摄入占 GY_A 比重呈现下降趋势,速度约为每年 -1.76% ;而青海区域的食草家畜碳摄入占比没有显著变化。

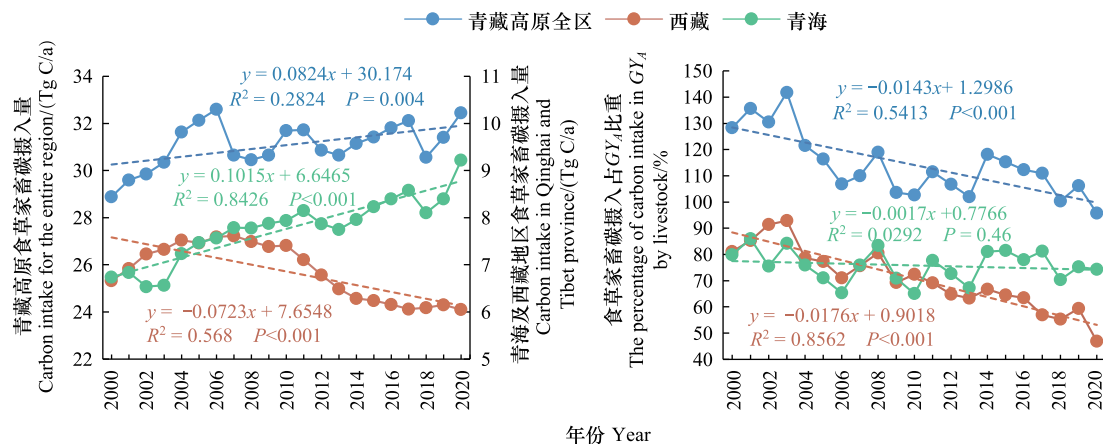


图 5 2000—2020 年青藏高原食草家畜碳摄入量年际动态变化及其占 GY_A 比值的多年动态

Fig.5 Multi-year dynamics of carbon intake and its percentage of GY_A in herbivorous livestock on the Qinghai-Tibet Plateau

2.3 食草家畜碳流动

在全区食草家畜消耗的 31.08 Tg C/a 碳中,通过粪尿排泄的碳是 13.24 Tg C/a ,通过呼吸产热排放的碳是 12.35 Tg C/a ,通过胃肠道甲烷排放 0.96 Tg C/a ,最后固存在家畜体内的碳是 4.53 Tg C/a (表 2)。在家畜固存的碳中,有 0.384 Tg C/a (约占固存碳的 8.5%) 进一步的被出栏、输入到人类社会系统,例如肉、奶和毛制品,其余约 4.146 Tg C/a 被留存在家畜放牧系统中。

3 讨论

3.1 食草家畜碳收支过程

食草家畜在自然生态系统和人类社会系统之间扮演着重要角色,不仅作为青藏高原牧民的主要经济和食物来源,还对草地生态系统固碳过程进行再分配(图 6)。本研究将食草家畜作为联系草地生态系统和人类社会系统的枢纽,进一步完善了通过放牧从草地生态系统向人类社会流动的碳通量过程,并量化了各阶段的碳收支通量,加深了对于草地生态系统碳生产过程的认识。本研究对青藏高原草地生态系统 NPP 的估算值为 $(153.88 \pm 17.96) \text{ Tg C/a}$,在其他研究的数值 $136\text{—}452 \text{ Tg C/a}$ 范围内^[39—42]。食草家畜通过采食牧草(草地生产力或可利用产草量)对人类社会和草地产生巨大影响。对于人类社会系统来说,食草家畜每年持续向其输出众多畜产品,其中碳的传递效率(流入人类社会的畜产品碳量占食草家畜碳固存量的比值)约为 8.5% ,这些畜产品碳为人类社会提供了重要的营养物质和经济来源^[25, 51]。另一方面,食草家畜的采食行为影响了植被的生长和分布,直接影响着草地碳的固定与释放^[52—53],进而对草地碳过程产生干扰。基于通量观测、大气反演、模型模拟的研究结果显示,青藏高原高寒草地净生态系统生产力 NEP 约为 $23\text{—}43 \text{ Tg C/a}$ ^[39, 46—49],异养呼吸约为 $40\text{—}416 \text{ Tg C/a}$ ^[39, 43—45];而食草家畜碳摄入量约 31 Tg C/a ,数值与 NEP 相当,使得食草家畜对青藏高原草地生态系统的固碳生产和碳汇功能具有重要影响^[54—58];此外,摄入后通过呼吸作用排放 CO_2 大约为

12.35 Tg C/a(约 45.28 Tg CO₂当量),肠道打嗝排放 CH₄大约为 0.96 Tg C/a(约 32 Tg CO₂当量),这部分碳被直接排放到大气中,使草地生态系统成为碳源。因此,在未来应当提高畜牧业生产效率、减少温室气体碳排放,以达到“增汇减排”的畜牧业生产目标。

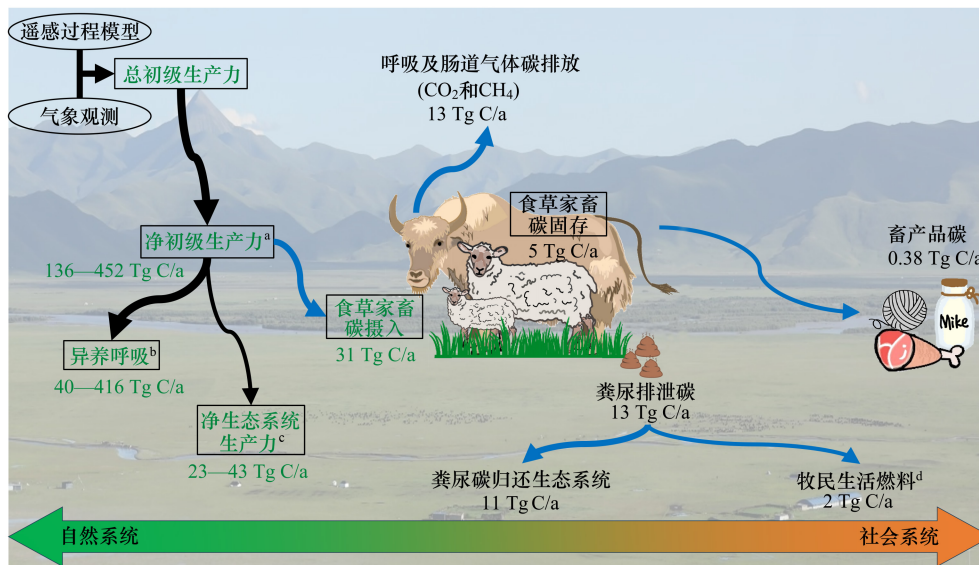


图 6 青藏高原食草家畜碳收支过程及其各部分通量

Fig.6 Carbon budget of herbivorous livestock and its process on the Qinghai-Tibet Plateau

a: 青藏高原草地净生产力 NPP 总量约 136—452 Tg C/a^[39-42]; b: 青藏高原草地异养呼吸 Rh 总量约 40—416 Tg C/a^[39, 43-45]; c: 青藏高原草地净生态系统生产力 NEP 约 23—37 Tg C/a^[39, 46-49]; d: 青藏高原牦牛粪约有 22% 用作日常燃料燃烧^[50]

在碳排放过程中,家畜粪便排泄则对草地生产有着积极的促进作用。本研究结果显示,食草家畜粪尿碳排泄占可利用产草量的近 23% (表 2),这部分碳对当地牧民和草地生态系统来说同样具有重要作用。由于青藏高原特殊的气候和地理环境,当地牧民通常捡拾牛粪用作日常生活所需的燃料,根据相关研究,其比例约为牦牛粪总量的 22%^[50] (约 2 Tg C/a),而其余的 11 Tg C/a 的粪便碳被归还至草地生态系统(图 6)。家畜粪便中的养分可以通过矿质淋溶和有机质分解与养分释放的途径回归到土壤中,促进草地生产的同时^[59-60],也可以减少碳元素从生态系统中流失^[61]。除此之外,食草家畜粪便排放对草地生长的促进作用可能要比植被对气候变化的响应关系更加紧密。因为食草家畜粪便排放一方面增加了土壤有机质、改变了土壤的理化性质^[62],从而可以增加有机质的分解。另一方面,由于土壤有机质分解的温度敏感性随着底物可利用性的增加而增加^[63],进而将导致食草家畜粪便施肥作用比气候变化带来的影响要更加显著。因此,在保证当地居民日常所需的同时,尽可能促进家畜粪便还草将有利于草地生态系统物质循环及可持续发展。特别是在青藏高原地区,高寒的气候条件使得有机质分解速率受到巨大限制^[64],而减少营养元素从系统中流失将更有利于促进物质循环、维持草地生态系统的生态平衡^[50]。

另外,以牛为主的大家畜粪便排泄和以羊为主的小家畜粪便排泄所导致的施肥作用有所不同。因为研究发现,相比于羊粪,分解者对牛粪分解的速率要更高^[65],因而对草地植被的促进作用要更加强烈。并且牛粪便有利于植被种子萌发,对植被的再生和抵抗性生长具有重要作用^[66]。还有研究指出牛粪更有利于提高土壤微生物活性,进一步改变土壤理化性质从而促进植物生长^[67]。但是值得注意的是,过量的牛粪堆积所带来的窒息作用甚至将阻碍植物生长和发育^[68-69]。因此,在促使食草家畜粪肥还草的过程中,如何促使粪便破碎、对不同粪便进行管理是未来青藏高原畜牧业发展中需要注意的问题。

3.2 食草家畜放牧利用的空间异质性

食草家畜的放牧利用对青藏高原草地生态系统碳通量的影响不可忽视,并且在不同草地类型和不同地区

下存在空间异质性(图 7)。本研究结果显示,在未考虑野生食草动物影响的情况下,食草家畜摄入消耗约 (31.08 ± 0.98) Tg C/a,约等于可利用产草量总量的 118% (表 2)。根据已有的研究,若以可利用草地产草量的 12.8% 作为野生食草动物取食^[70-71],全区食草家畜及野生食草动物碳消耗要超过草地现存量。依据“取半留半”的可持续利用原则^[72],目前青藏高原草地总体呈现过度放牧的生产现状。特别是在青藏高原西部和北部区域的草地生产力低于 $100 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,仅食草家畜摄入碳(占可利用产草量 GY_A)的比值便超过 100%(图 2, 图 4),这使得草地生态系统面临巨大的承载压力。并且在不同的草地类型上,食草家畜放牧利用同样存在很大差异(图 7)。其中荒漠类草原上,食草家畜碳摄入量占可利用产草量的比值约为 200%,并且主要是由于藏羊过度放牧导致的;高寒草原次之,约为 173%,主要是大家畜(以藏牦牛为主)的过度所导致的;而高寒草甸主要分布在气候适宜且草地资源较为丰富的青海西南部和西藏东南部,来自食草家畜的压力则相对较小。从不同地区来看,甘肃、新疆、四川和云南地区的食草家畜碳摄入占可利用产草量的比值超过 200%,但是实际上这些地区的畜牧业和经济相对发达,可能受到周边资源和资金的支持(图 7)。因此,在青海和西藏地区,高寒草原和荒漠类草地的食草家畜放牧采食已严重过度,而高寒草甸牧食压力则相对缓和。本研究基于 GLCV-FAM 碳通量模型强调了食草家畜动物的放牧通过采食、消化、代谢和同化作用等一系列过程,并揭示了青藏高原草地放牧管理现状,为青藏高原草地畜牧业管理提供科学参考。

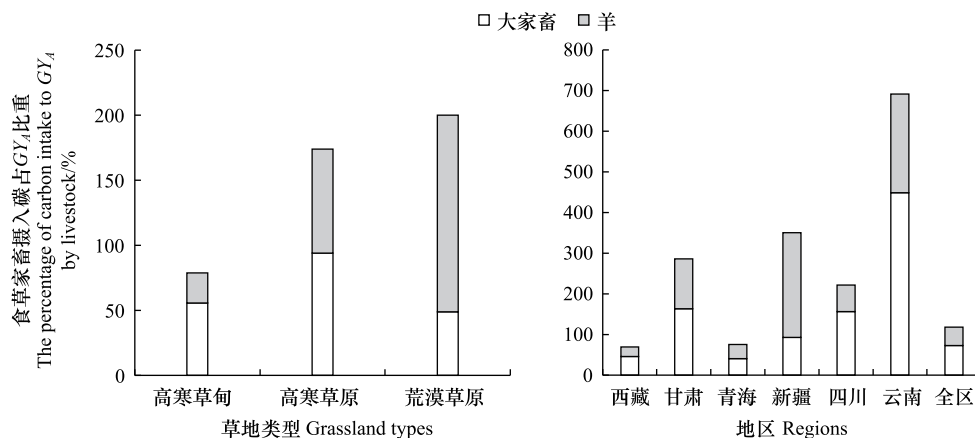


图 7 不同草地类型和地区内大家畜和羊的碳摄入量占可利用产草量 GY_A 的比值

Fig.7 The percentage of carbon intake by large livestock and sheep to the available grass yield (GY_A) within different grassland types and regions

3.3 食草家畜放牧利用的时间动态

在过去的近 21 年时间动态上,家畜碳摄入量与可利用产草量均呈现显著增加趋势,而家畜碳摄入量占可利用产草量的比值呈现显著下降的趋势(图 5)。一方面,需求的增加和新技术的应用同时推动了畜牧业发展^[73],最终导致青藏高原畜牧业生产总体表现为增加的发展趋势。另一方面,自从 20 世纪以来我国不断实施一系列的生态保护工程和放牧奖补政策,在一定程度上使得草地生产增加减轻了草地生态系统的压力^[74-75],同时由于气候暖湿化导致青藏高原草地生态系统生产力总体上仍然保持增加的发展趋势^[56, 76-77]。但是值得注意的是,家畜碳摄入量占可利用产草量的比值呈现显著下降的趋势,这是由于草地生产增加的速率超过食草家畜的摄入需求所导致的,同时也表明最终生态承载潜力呈现出持续增加的趋势^[78]。但是也有研究表明,随着未来气候变化的不断加剧,青藏高原这一植被 NPP 的增长潜力将逐渐减弱甚至呈现下降趋势^[79],这意味着未来食草家畜碳需求的增加将面临更大的挑战。因此,本研究建议在未来青藏高原畜牧业发展过程中需要提高畜牧业生产能效、优化畜牧业生产空间配置。

3.4 不足和展望

食草家畜碳通量对青藏高原草地生态系统的物质循环具有重要作用,本研究量化了通过食草家畜所产生

的碳通量及其动态,但对包括野生动物在内的食草动物在整个生态系统中的碳收支过程及其固碳贡献还需进一步开展研究。目前国内外针对生态系统碳收支提出了在净生态系统生产力基础上扣除草食动物采食后的净生物群落生产力(Net biome productivity, NBP),及进一步扣除人类和自然干扰后进入社会系统的区域生物群落-社会系统的净生产力(Net productivity of a regional biome-society system, NRP)等概念^[80-81];但目前对草地生态系统碳循环过程研究还是以草地植被和土壤碳变化为主的净生态系统生产力概念为核心^[82-83],对于食草动物及后续食物链对草地碳收支的量化及机制的研究仍然有限^[77, 84]。本研究也仅量化了家畜的碳过程,即 NBP 或 NRP 后的部分通量,并不能反映整个草地生态系统碳过程及其机制。此外,青藏高原具有重要的野生动物资源^[85-86],已有研究指出野生食草动物对草地生态系统的影响、及其与食草家畜之间的竞争作用同样不可忽视^[14, 84]。因此,不仅应开展广泛的动植物群落调查和碳通量动态监测,为生态系统碳固存过程和碳排放研究提供数据实证^[81],还应进一步考虑野生食草动物及其食物链所形成的动物生物地球化学循环过程,构建草地植被-草食动物-土壤系统碳循环过程模型,模拟分析草地完整碳循环过程及环境影响机制,为青藏高原生态可持续发展提供科学依据。

4 结论

本研究初次捕获了青藏高原食草家畜碳通量及动态过程,量化了食草家畜对草地生态系统碳收支的时空动态变化,并揭示了食草家畜碳收支对草地生态系统和人类社会的重要性。研究结果表明:(1) 2000—2020 年期间,青藏高原草地 NPP 和 GY_A 呈现由东南向西北递减的空间分布,NPP 多年均值约为 $(99.98 \pm 11.50) \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,合计约 $(153.88 \pm 17.96) \text{ Tg C/a}$,而 GY_A 多年均值为 $(17.16 \pm 1.99) \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,合计约 $(26.40 \pm 3.19) \text{ Tg C/a}$ 。并且,NPP 和 GY_A 分别以 $1.44 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ (合计约 2.24 Tg C/a) 和 $0.25 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ (合计约 0.40 Tg C/a) 的速率显著增加。(2) 食草家畜碳摄入量(Intake carbon, IT_c) 呈现东部和东南部高、北部低的空间分布,全区多年均值约为 $(20.20 \pm 0.60) \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,合计约 $(31.08 \pm 0.98) \text{ Tg C/a}$,约占 GY_A 总量的 118%。在过去近 21 年期间青藏高原 IT_c 呈现显著增加的变化趋势,但是 IT_c 占 GY_A 的比值呈现下降的趋势。(3) 食草家畜碳摄入量中有 13.24 Tg C/a (约占总摄入量的 43%) 通过粪尿排泄排出; 12.35 Tg C/a 通过呼吸产热排出; 0.96 Tg C/a 以 CH_4 形式通过胃肠道打嗝排出;最后固存在家畜体内的碳是 4.53 Tg C/a ,其中以畜产品向人类社会输出的碳是 0.384 Tg C/a 。(4) 2000—2020 年期间青藏高原高寒草地以 NPP 形式固碳约 154 Tg C/a ,食草家畜采食摄入约为 31 Tg C/a ,然后以呼吸和粪尿排泄释放约 26 Tg C/a 、以畜产品进入人类社会约 0.38 Tg C/a ,而以生物碳在动物系统储存约为 5 Tg C/a 。本研究不仅给出了青藏高原高寒草地食草家畜的碳收支动态过程,同时也为区域碳收支核算研究提供了基于食草动物代谢的计算方法,为草畜动态管理提供了科学方法和依据。未来需进一步考虑野生动物—草地植被—土壤系统碳固存过程、完善碳固存的影响机制,进而为区域生态保护与牧业生产可持续管理措施制定提供理论和方法基础。

参考文献 (References):

- [1] Su Y J, Guo Q H, Hu T Y, Guan H C, Jin S C, An S Z, Chen X L, Guo K, Hao Z Q, Hu Y M, Huang Y M, Jiang M X, Li J X, Li Z J, Li X K, Li X W, Liang C Z, Liu R L, Liu Q, Ni H W, Peng S L, Shen Z H, Tang Z Y, Tian X J, Wang X H, Wang R Q, Xie Z Q, Xie Y Z, Xu X N, Yang X B, Yang Y C, Yu L F, Yue M, Zhang F, Ma K P. An updated Vegetation Map of China (1: 1000000). Science Bulletin, 2020, 65 (13): 1125-1136.
- [2] Dong S K, Sherman R. Enhancing the resilience of coupled human and natural systems of alpine rangelands on the Qinghai-Tibetan Plateau. The Rangeland Journal, 2015, 37(1): i-iii.
- [3] 赵同谦, 欧阳志云, 郑华, 王效科, 苗鸿. 中国森林生态系统服务功能及其价值评价. 自然资源学报, 2004, 19(4): 480-491.
- [4] Zuo C, Wang J B, Zhang X J, Ye H, Wang S Q, Watson A E, Li Y N, Zhao X Q. Drought will constrain ongoing increase in net ecosystem productivity under future climate warming over alpine grasslands on the Qinghai-Tibetan Plateau, China. Ecological Indicators, 2023, 154: 110823.
- [5] Fu B J, Ouyang Z Y, Shi P, Fan J, Wang X D, Zheng H, Zhao W W, Wu F. Current condition and protection strategies of Qinghai-Tibet Plateau ecological security barrier. Bulletin of Chinese Academy of Sciences (Chinese Version), 2021, 36(11): 1298-1306.
- [6] 赵新全, 徐世晓, 赵亮, 张同作, 胡林勇, 李奇, 郭同庆. 三江源国家公园生物多样性保护创新及实践. 中国科学院院刊, 2023, 38(12):

1833-1844.

- [7] Bonan G B, Doney S C. Climate, ecosystems, and planetary futures: the challenge to predict life in Earth system models. *Science*, 2018, 359 (6375): eaam8328.
- [8] Schmitz O J, Wilmers C C, Leroux S J, Doughty C E, Atwood T B, Galetti M, Davies A B, Goetz S J. Animals and the zoogeochemistry of the carbon cycle. *Science*, 2018, 362(6419): eaar3213.
- [9] Schmitz O J, Raymond P A, Estes J A, Kurz W A, Holtgrieve G W, Ritchie M E, Schindler D E, Spivak A C, Wilson R W, Bradford M A, Christensen V, Deegan L, Smetacek V, Vanni M J, Wilmers C C. Animating the carbon cycle. *Ecosystems*, 2014, 17(2): 344-359.
- [10] Cong N, Shen M G, Yang W, Yang Z Y, Zhang G X, Piao S L. Varying responses of vegetation activity to climate changes on the Tibetan Plateau grassland. *International Journal of Biometeorology*, 2017, 61(8): 1433-1444.
- [11] Chen B X, Zhang X Z, Tao J, Wu J S, Wang J S, Shi P L, Zhang Y J, Yu C Q. The impact of climate change and anthropogenic activities on alpine grassland over the Qinghai-Tibet Plateau. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2014, 189/190: 11-18.
- [12] Chang J F, Ciais P, Gasser T, Smith P, Herrero M, Havlík P, Obersteiner M, Guenet B, Goll D S, Li W, Naipal V, Peng S S, Qiu C J, Tian H Q, Viovy N, Yue C, Zhu D. Climate warming from managed grasslands cancels the cooling effect of carbon sinks in sparsely grazed and natural grasslands. *Nature Communications*, 2021, 12: 118.
- [13] Soussana J F, Lemaire G. Coupling carbon and nitrogen cycles for environmentally sustainable intensification of grasslands and crop-livestock systems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2014, 190: 9-17.
- [14] Wang J B, Zhao X Q, Ouyang X H, Zhao L, Wang W Y, Zuo C, Zhang Z H, Zhou H K, Watson A, Li Y N. The role of herbivores in the grassland carbon budget for Three-Rivers Headwaters region, Qinghai-Tibetan Plateau, China. *Grassland Research*, 2022, 1(3): 207-219.
- [15] 钱前, 张秀娟, 王军邦, 叶辉, 李英年, 张志军. 2005—2017 年青海三江源区草地家畜承载力时空格局研究. *草地学报*, 2021, 29(6): 1311-1317.
- [16] 高婕, 赵新全, 刘文亨, 杨晓霞, 张春平, 俞畅, 曹铨, 刘玉祯, 张雪, 董全民. 基于供给—消耗关系的青海省高寒草地承载力时空变化分析. *草业学报*, 2023, 32(5): 1-12.
- [17] van Eekeren N, de Boer H, Bloem J, Schouten T, Rutgers M, de Goede R, Brussaard L. Soil biological quality of grassland fertilized with adjusted cattle manure slurries in comparison with organic and inorganic fertilizers. *Biology and Fertility of Soils*, 2009, 45(6): 595-608.
- [18] Zhang T R, Li F Y, Shi C J, Li Y L, Tang S M, Baoyin T. Enhancement of nutrient resorption efficiency increases plant production and helps maintain soil nutrients under summer grazing in a semi-arid steppe. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2020, 292: 106840.
- [19] Li M Q, Liu S L, Sun Y X, Liu Y X. Agriculture and animal husbandry increased carbon footprint on the Qinghai-Tibet Plateau during past three decades. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 278: 123963.
- [20] Reisinger A, Clark H. How much do direct livestock emissions actually contribute to global warming? *Global Change Biology*, 2018, 24(4): 1749-1761.
- [21] 王钦, 贾笃敬, 吴自立. 草地畜牧业生产效率的研究. *草业科学*, 1990, 7(6): 33-37.
- [22] 熊学振, 孙雨萌, 杨春. 中国畜牧业与资源环境承载力的时空耦合协调关系. *经济地理*, 2022, 42(2): 153-162.
- [23] 张德铨, 李炳元, 郑度. 论青藏高原范围与面积. *地理研究*, 2002, 21(1): 1-8.
- [24] 马仁锋, 刘丽东, 伍灵芝, 李佳谔, 张文忠, 罗茂屿, 袁嘉轩. 青藏地区农牧企业区位特征变化及影响因素. *经济地理*, 2022, 42(12): 133-141.
- [25] 杨玉莹, 张一敏, 董鹏程, 韩明山, 朱立贤, 罗欣. 不同品种牛肉品质特性概述. *食品与发酵工业*, 2018, 44(6): 271-276.
- [26] 国家统计局农村社会经济调查司. 中国县域统计年鉴-2021-乡镇卷. 北京: 中国统计出版社, 2022.
- [27] Wang J B, Liu J Y, Cao M K, Liu Y F, Yu G R, Li G C, Qi S H, Li K R. Modelling carbon fluxes of different forests by coupling a remote-sensing model with an ecosystem process model. *International Journal of Remote Sensing*, 2011, 32(21): 6539-6567.
- [28] Wang J B, Liu J Y, Shao Q Q, Liu R G, Fan J W, Chen Z Q. Spatial-temporal patterns of net primary productivity for 1988—2004 based on GLOPEM-CEVSA model in the “Three-River Headwaters” region of Qinghai Province, China. *Journal of Plant Ecology (Chinese Version)*, 2009, 33(2): 254-269.
- [29] 左婵, 王军邦, 张秀娟, 芦光新, 叶辉, 王春雨, 张志军, 李英年. 三江源国家公园植被净初级生产力变化趋势及影响因素. *生态学报*, 2022, 42(14): 5559-5573.
- [30] 王春雨, 王军邦, 张法伟, 李英年, 李红琴, 杨永胜, 罗方林. 近 40 年三江源区高寒草地气候资源利用率及载畜量. *草业科学*, 2022, 39(4): 672-687.
- [31] Fan J W, Shao Q Q, Liu J Y, Wang J B, Harris W, Chen Z Q, Zhong H P, Xu X L, Liu R G. Assessment of effects of climate change and grazing activity on grassland yield in the Three Rivers Headwaters Region of Qinghai-Tibet Plateau, China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2010, 170(1/2/3/4): 571-584.
- [32] 吴炳方, 苑全治, 颜长珍, 王宗明, 于信芳, 李爱农, 马荣华, 黄进良, 陈劲松, 常存. 21 世纪前十年的中国土地覆盖变化. *第四纪研究*, 2014, 34(4): 723-731.
- [33] 中华人民共和国农业部畜牧兽医司, 全国畜牧兽医总站. 中国草地资源. 北京: 中国科学技术出版社, 1996.
- [34] Wang Z W, Zeng J X, Han Y C, Zhang X A. Energy dynamics of some small mammals in an alpine meadow ecosystem. 1. digestibility and assimilation of natural foods on the mouse hare and the mole rat in an alpine meadow ecosystem. *Acta Zoologica Sinica*, 1980, 26(2): 184-195.

- [35] 洛桑, 旦增, 布多, 马红梅, 白玛卓嘎. 藏北牦牛肉成分和营养品质的分析研究. 安徽农业科学, 2009, 37(29): 14198-14199, 14223.
- [36] 张路. 西藏岗巴羊肉品质分析与评价[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
- [37] 柴婷, 许艳丽, 邢巍婷, 吕雪峰, 胡昕, 郑文新, 宫平, 高维明. 高原型藏羊毛绒资源品质分析. 中国草食动物科学, 2017, 37(2): 15-17.
- [38] 褚楚, 张依, 向世馨, 罗雪路, 王海童, 李春芳, 马亚宾, 倪俊卿, 高登营, 贺建宁, 张淑君. 山羊奶、牦牛奶、马奶和骆驼奶中营养成分含量的比较研究. 中国奶牛, 2022(3): 34-39.
- [39] Zhuang Q, He J, Lu Y, Ji L, Xiao J, Luo T. Carbon dynamics of terrestrial ecosystems on the Tibetan Plateau during the 20th century: an analysis with a process-based biogeochemical model. *Global Ecology and Biogeography*, 2010, 19(5): 649-662.
- [40] Yu H L, Ding Q N, Meng B P, Lv Y Y, Liu C, Zhang X Y, Sun Y, Li M, Yi S H. The relative contributions of climate and grazing on the dynamics of grassland NPP and PUE on the Qinghai-Tibet Plateau. *Remote Sensing*, 2021, 13(17): 3424.
- [41] Yan L, Zhou G S, Wang Y H, Hu T Y, Sui X H. The spatial and temporal dynamics of carbon budget in the alpine grasslands on the Qinghai-Tibetan Plateau using the Terrestrial Ecosystem Model. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 107: 195-201.
- [42] Zhang Y L, Qi W, Zhou C P, Ding M J, Liu L S, Gao J G, Bai W Q, Wang Z F, Zheng D. Spatial and temporal variability in the net primary production of alpine grassland on the Tibetan Plateau since 1982. *Journal of Geographical Sciences*, 2014, 24(2): 269-287.
- [43] Wang P Y, Wang J S, Elberling B, Ambus P, Li Y, Pan J X, Zhang R Y, Guo H, Niu S L. Regional emissions of soil greenhouse gases across Tibetan alpine grasslands. *Geoderma*, 2024, 443: 116843.
- [44] Chen J, Luo Y Q, Xia J Y, Shi Z, Jiang L F, Niu S L, Zhou X H, Cao J J. Differential responses of ecosystem respiration components to experimental warming in a meadow grassland on the Tibetan Plateau. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2016, 220: 21-29.
- [45] Li Q L, Liu Y, Kou D, Peng Y F, Yang Y H. Substantial non-growing season carbon dioxide loss across Tibetan alpine permafrost region. *Global Change Biology*, 2022, 28(17): 5200-5210.
- [46] Ding J Z, Chen L Y, Ji C J, Hugelius G, Li Y N, Liu L, Qin S Q, Zhang B B, Yang G B, Li F, Fang K, Chen Y L, Peng Y F, Zhao X, He H L, Smith P, Fang J Y, Yang Y H. Decadal soil carbon accumulation across Tibetan permafrost regions. *Nature Geoscience*, 2017, 10(6): 420-424.
- [47] Wang T, Wang X Y, Liu D, Lv G T, Ren S, Ding J Z, Chen B Z, Qu J, Wang Y F, Piao S, Chen F H. The current and future of terrestrial carbon balance over the Tibetan Plateau. *Science China Earth Sciences*, 2023, 66(7): 1493-1503.
- [48] Piao S L, Fang J Y, Ciais P, Peylin P, Huang Y, Sitch S, Wang T. The carbon balance of terrestrial ecosystems in China. *Nature*, 2009, 458: 1009-1013.
- [49] Yang Y H, Shi Y, Sun W J, Chang J F, Zhu J X, Chen L Y, Wang X, Guo Y P, Zhang H T, Yu L F, Zhao S Q, Xu K, Zhu J L, Shen H H, Wang Y Y, Peng Y F, Zhao X, Wang X P, Hu H F, Chen S P, Huang M, Wen X F, Wang S P, Zhu B, Niu S L, Tang Z Y, Liu L L, Fang J Y. Terrestrial carbon sinks in China and around the world and their contribution to carbon neutrality. *Science China Life Sciences*, 2022, 65(5): 861-895.
- [50] 李博, 何奕忻, 王志远, 罗鹏, 李洪泉. 青藏高原东部高寒草甸牦牛粪便的分解过程和科学管理. 草业科学, 2012, 29(8): 1302-1306.
- [51] 潘庆民, 孙佳美, 杨元合, 刘伟, 李昂, 彭云峰, 薛建国, 夏昊, 黄建辉. 我国草原恢复与保护的问题与对策. 中国科学院院刊, 2021, 36(6): 666-674.
- [52] 穆少杰, 周可新, 陈奕兆, 孙成明, 李建龙. 草地生态系统碳循环及其影响因素研究进展. 草地学报, 2014, 22(3): 439-447.
- [53] 于贵瑞. 全球变化与陆地生态系统碳循环和碳蓄积. 北京: 气象出版社, 2003.
- [54] Yu H Q, Li Y, Oshunsanya S O, Are K S, Geng Y, Saggat S, Liu W X. Re-introduction of light grazing reduces soil erosion and soil respiration in a converted grassland on the Loess Plateau, China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2019, 280: 43-52.
- [55] Zhang T, Xu M J, Zhang Y J, Zhao T H, An T T, Li Y G, Sun Y, Chen N, Zhao T T, Zhu J T, Yu G R. Grazing-induced increases in soil moisture maintain higher productivity during droughts in alpine meadows on the Tibetan Plateau. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, 269/270: 249-256.
- [56] Dong S K, Shang Z H, Gao J X, Boone R B. Enhancing sustainability of grassland ecosystems through ecological restoration and grazing management in an era of climate change on Qinghai-Tibetan Plateau. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2020, 287: 106684.
- [57] Liang W, Zhang W B, Jin Z, Yan J W, Lü Y H, Wang S, Fu B J, Li S, Ji Q L, Gou F, Fu S Y, An S T, Wang F J. Estimation of global grassland net ecosystem carbon exchange using a model tree ensemble approach. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2020, 125(1): e2019JG005034.
- [58] Yan L, Li Y, Wang L, Zhang X D, Wang J Z, Wu H D, Yan Z Q, Zhang K R, Kang X M. Grazing significantly increases root shoot ratio but decreases soil organic carbon in Qinghai-Tibetan Plateau grasslands: a hierarchical meta-analysis. *Land Degradation & Development*, 2020, 31(16): 2369-2378.
- [59] 芦伟, 高月锋, 简路洋, 罗海玲. 羊粪作为有机肥对植物和土壤的影响. 家畜生态学报, 2019, 40(9): 86-90.
- [60] 于应文, 南志标. 畜尿排泄特征及其对草地植被和家畜选择采食的作用. 生态学报, 2008, 28(2): 777-785.
- [61] 宋大利, 侯胜鹏, 王秀斌, 梁国庆, 周卫. 中国畜禽粪尿中养分资源数量及利用潜力. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(5): 1131-1148.
- [62] Dijkstra F, Cheng W, Johnson D. Plant biomass influences rhizosphere priming effects on soil organic matter decomposition in two differently managed soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(9): 2519-2526.
- [63] Gershenson A, Bader N E, Cheng W X. Effects of substrate availability on the temperature sensitivity of soil organic matter decomposition. *Global*

- Change Biology, 2009, 15(1): 176-183.
- [64] Chen Y L, Ding J Z, Peng Y F, Li F, Yang G B, Liu L, Qin S Q, Fang K, Yang Y H. Patterns and drivers of soil microbial communities in Tibetan alpine and global terrestrial ecosystems. *Journal of Biogeography*, 2016, 43(10): 2027-2039.
- [65] 肖自斌, 谢彦, 刘晓娇, 王继涛, 张翔, 刘世伟, 张平, 马建梅, 蒋学勤, 俞凤娟. 不同畜禽粪便养殖蚯蚓对比试验初报. *农业工程技术*, 2023, 43(3): 79-82.
- [66] 周晓鑫, 苗丽宏, 李硕, 万里强, 李向林. 牲畜粪便浸提液对牧草种子萌发特性的影响. *草原与草坪*, 2023, 43(2): 133-142.
- [67] 张英, 武淑霞, 雷秋良, 翟丽梅, 王洪媛, 李浩, 杨波, 刘宏斌. 不同类型粪肥还田对土壤酶活性及微生物群落的影响. *土壤*, 2022, 54(6): 1175-1184.
- [68] 刘丽丽, 李希来. 捡拾牦牛粪对高寒草甸植物功能群特征与生产力的影响. *中国生态农业学报*, 2016, 24(5): 668-673.
- [69] 姜世成, 周道玮. 牛粪堆积对草地影响的研究. *草业学报*, 2006, 15(4): 30-35.
- [70] 邵全琴, 郭兴健, 李愈哲, 汪阳春, 王东亮, 刘纪远, 樊江文, 杨帆. 无人机遥感的大型野生食草动物种群数量及分布规律研究. *遥感学报*, 2018, 22(3): 497-507.
- [71] 杨帆, 邵全琴, 郭兴健, 李愈哲, 王东亮, 张雅娴, 汪阳春, 刘纪远, 樊江文. 玛多县大型野生食草动物种群数量对草畜平衡的影响研究. *草业学报*, 2018, 27(7): 1-13.
- [72] 赵亮, 李奇, 陈懂懂, 徐世晓, 周华坤, 汪诗平, 赵新全. 三江源区高寒草地碳流失原因、增汇原理及管理实践. *第四纪研究*, 2014, 34(4): 795-802.
- [73] 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.
- [74] 胡远宁. 草原生态补偿政策对牧户畜牧养殖和草地的影响——内蒙实证研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2019.
- [75] Zhang H Y, Fan J W, Wang J B, Cao W, Harris W. Spatial and temporal variability of grassland yield and its response to climate change and anthropogenic activities on the Tibetan Plateau from 1988 to 2013. *Ecological Indicators*, 2018, 95: 141-151.
- [76] Wei Y Q, Lu H Y, Wang J N, Wang X F, Sun J. Dual influence of climate change and anthropogenic activities on the spatiotemporal vegetation dynamics over the Qinghai-Tibetan plateau from 1981 to 2015. *Earth's Future*, 2022, 10(5): e2021EF002566.
- [77] Wang Y F, Lv W W, Xue K, Wang S P, Zhang L R, Hu R H, Zeng H, Xu X L, Li Y M, Jiang L L, Hao Y B, Du J Q, Sun J P, Dorji T, Piao S L, Wang C H, Luo C Y, Zhang Z H, Chang X F, Zhang M M, Hu Y G, Wu T H, Wang J Z, Li B W, Liu P P, Zhou Y, Wang A, Dong S K, Zhang X Z, Gao Q Z, Zhou H K, Shen M G, Wilkes A, Miede G, Zhao X Q, Niu H S. Grassland changes and adaptive management on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2022, 3(10): 668-683.
- [78] Fang Y P, Zhu F B, Yi S H, Qiu X P, Ding Y J. Ecological carrying capacity of alpine grassland in the Qinghai-Tibet Plateau based on the structural dynamics method. *Environment, Development and Sustainability*, 2021, 23(8): 12550-12578.
- [79] 陈惺, 王军邦, 何启凡, 王春雨, 叶辉. 未来气候情景下中国植被净初级生产力稳定性及气候影响. *地理学报*, 2023, 78(3): 694-713.
- [80] Chapin F S III, Woodwell G M, Randerson J T, Rastetter E B, Lovett G M, Baldocchi D D, Clark D A, Harmon M E, Schimel D S, Valentini R, Wirth C, Aber J D, Cole J J, Goulden M L, Harden J W, Heimann M, Howarth R W, Matson P A, McGuire A D, Melillo J M, Mooney H A, Neff J C, Houghton R A, Pace M L, Ryan M G, Running S W, Sala O E, Schlesinger W H, Schulze E D. Reconciling carbon-cycle concepts, terminology, and methods. *Ecosystems*, 2006, 9(7): 1041-1050.
- [81] Wang Q F, Zheng H, Zhu X J, Yu G R. Primary estimation of Chinese terrestrial carbon sequestration during 2001-2010. *Science Bulletin*, 2015, 60(6): 577-590.
- [82] Chen S P, Wang W T, Xu W T, Wang Y, Wan H W, Chen D M, Tang Z Y, Tang X L, Zhou G Y, Xie Z Q, Zhou D W, Shangguan Z P, Huang J H, He J S, Wang Y F, Sheng J D, Tang L S, Li X R, Dong M, Wu Y, Wang Q F, Wang Z H, Wu J G, Chapin F S 3rd, Bai Y F. Plant diversity enhances productivity and soil carbon storage. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(16): 4027-4032.
- [83] Panchal P, Preece C, Peñuelas J, Giri J. Soil carbon sequestration by root exudates. *Trends in Plant Science*, 2022, 27(8): 749-757.
- [84] Xu C L, Silliman B R, Chen J S, Li X C, Thomsen M S, Zhang Q, Lee J, Lefcheck J S, Daleo P, Hughes B B, Jones H P, Wang R, Wang S P, Smith C S, Xi X Q, Altieri A H, van de Koppel J, Palmer T M, Liu L L, Wu J H, Li B, He Q. Herbivory limits success of vegetation restoration globally. *Science*, 2023, 382(6670): 589-594.
- [85] Zhao X Q, Zhao L, Xu T W, Xu S X. The plateau pika has multiple benefits for alpine grassland ecosystem in Qinghai-Tibet Plateau. *Ecosystem Health and Sustainability*, 2020, 6(1): 1750973.
- [86] 蔡振媛, 覃雯, 高红梅, 吴彤, 迟翔文, 杨俊东, 苗紫燕, 张婧捷, 宋鹏飞, 连新明, 苏建平, 张同作. 三江源国家公园兽类物种多样性及区系分析. *兽类学报*, 2019, 39(4): 410-420.