

DOI: 10.20103/j.stxb.202310302350

李海萍, 李子瑄. 新疆牧区半牧区温室气体排放及其减排效果. 生态学报, 2024, 44(23): 10662-10675.

Li H P, Li Z X. Research on greenhouse gas emissions and emission reduction effects in pastoral and semi-pastoral areas of Xinjiang. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(23): 10662-10675.

新疆牧区半牧区温室气体排放及其减排效果

李海萍*, 李子瑄

中国人民大学生态环境学院, 北京 100872

摘要: 畜牧业是主要的甲烷人为排放源之一, 而牛的肠道发酵是中国畜牧业甲烷的重要排放源。精确评估反刍动物肠道发酵所排放的甲烷对畜牧业“双碳”目标的实现意义重大。新疆是中国四大牧区之一, 为探究其牧区半牧区的畜牧业碳排放及减排效果, 采用土地覆盖、植被类型、NPP、县级牛存栏量和牧业产值等多源数据, 划分草地类型, 估算其产草量和理论载畜量; 对牛的空间分布特征进行分析预测, 并选取新疆牛类的肠道甲烷排放因子对其肠道甲烷排放量进行核算; 参照中国畜牧业排放构成比例, 估算牧区半牧区畜牧业碳排放总量, 估算畜牧业的草地和产值碳排放强度及其空间特征; 结合 2005 年和 2020 年的碳排放强度估算结果, 分析和评估新疆牧区半牧区畜牧业碳减排目标在不同地区的实现情况; 根据 2030 年减排目标及牛存栏量灰色预测结果, 估算 2030 年的畜牧业减排压力的空间分布特征和碳排放量。结果表明: (1) 2020 年新疆牧区半牧区畜牧业排放总量约为 7068.06 Gg CO₂ 当量, 其中牛肠道甲烷排放量为 148.17 Gg; (2) 新疆牧区半牧区畜牧业的草地和牧业产值碳排放强度的平均值分别为 307.08 kg CO₂ 当量/hm² 和 5519.81 kg CO₂ 当量/万元, 在平均水平上完成了 2020 年减排目标; (3) 因空间上存在差异, 分别有 56.56% 和 38.23% 的区域草地碳排放强度或产值碳排放强度未实现减排目标, 阿尔泰山、天山、伊犁河谷等地的畜牧业减排压力严峻, 建议加强草地保护、推动畜牧业绿色转型升级。

关键词: 新疆牧区半牧区; 温室气体排放; 牛肠道发酵; 甲烷排放; 畜牧业碳减排

Research on greenhouse gas emissions and emission reduction effects in pastoral and semi-pastoral areas of Xinjiang

Li Haiping*, Li Zixuan

School of Ecology and Environment, Renmin University of China, Beijing 100872, China

Abstract: Animal husbandry is one of the main anthropogenic sources of methane emissions, and enteric fermentation of cattle is an important source of methane emissions in China's animal husbandry. To realize "dual carbon" goal, it is of great significance for animal husbandry industry to assess methane emissions from ruminants' enteric fermentation accurately. In order to explore the status of animal husbandry's carbon emissions and its reduction in pastoral and semi-pastoral areas of Xinjiang, which is one of the four major pastoral areas in China, multi-source data such as land cover, vegetation type, NPP, cattle inventory and animal husbandry output at county level were used to classify grassland types, estimate grass yield and calculate theoretical carrying capacity of grassland; the spatial distribution characteristics of cattle was predicted and analyzed, and the methane emission factor of cattle's enteric fermentation in Xinjiang was selected to calculate their methane emissions; referring to the emission composition ratio of China's animal husbandry, the total carbon emissions of animal husbandry in pastoral and semi-pastoral areas of Xinjiang were estimated; the spatial characteristics of animal husbandry carbon emission intensity of grassland and output were estimated respectively in pastoral and semi-pastoral areas

基金项目: 中国人民大学“中央高校建设世界一流大学(学科)和特色发展引导专项资金”

收稿日期: 2023-10-30; **网络出版日期:** 2024-08-29

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lhp@ruc.edu.cn

of Xinjiang; combining the calculation results of 2005 and 2020, the achievements of carbon emission reduction targets in animal husbandry of Xinjiang's pastoral and semi-pastoral areas in different regions were analyzed and evaluated; based on the 2030 emission reduction target and grey prediction results of cattle inventory, the spatial distribution characteristics of emission reduction pressure by 2030 and carbon emissions of animal husbandry were estimated. The results show: (1) In 2020, the total emissions from animal husbandry in pastoral and semi-pastoral areas of Xinjiang were approximately 7068.06 Gg CO₂eq, and methane emissions from cattle's enteric fermentation were 148.17Gg; (2) The average carbon emission intensity of grassland and output from animal husbandry of Xinjiang's pastoral and semi-pastoral areas were 307.08kg CO₂ eq/hm² and 5519.81kg CO₂eq/10⁴ yuan respectively, achieving the 2020 emission reduction target at the average level; (3) Due to spatial difference, 56.56% of the area did not achieve the target to reduce grassland carbon emission intensity, and 38.23% of the area did not achieve the target to reduce output carbon emission intensity. The pressure to reduce carbon emissions from animal husbandry in places such as the Altai Mountains, the Tianshan Mountains and the Ili River Valley remains severe. It is recommended to strengthen grassland protection and promote animal husbandry's green transition and upgrade.

Key Words: Xinjiang pastoral and semi-pastoral areas; emissions of greenhouse gases; cattle enteric fermentation; methane emissions; carbon reduction in animal husbandry

农业及其他土地利用产生的温室气体是继能源和工业的第三大温室气体排放源,也是甲烷(CH₄)的最大人为排放源,排放总量占全球人为CH₄排放的28%—37%,其中约89%来自肠道发酵^[1-3],精确估算畜牧业碳排放对全球气候变化和碳减排具有重要意义。肉牛肠道发酵是中国畜牧业CH₄的最主要排放源^[3]。基于严峻的反刍动物CH₄减排压力,2022年出台的《农业农村减排固碳实施方案》提出,到2030年畜牧业反刍动物肠道发酵排放强度进一步降低。2020年新疆牛、羊饲养量分别占全国5.52%和13.61%,分列第六和第二。第三次国土调查显示,仅阿勒泰等7个地州就占全疆草地77%,是新疆主要的牧区半牧区^[4]。但新疆畜牧业发展较为缓慢,牛羊的规模化养殖比例较低、养殖散户多,奶牛单产水平远低于全国平均值,且牛、羊、骆驼等反刍动物养殖量大,畜牧业绿色转型升级任务艰巨^[5-6]。

以牲畜活动数据和排放因子的乘积作为碳排放量的因子法是定量计算牲畜碳排放的常用方法。2007年联合国粮农组织(FAO)使用多层线性回归方法预测并绘制了全球家畜密度分布图(GLW),随后又不断改进其预测模型,目前GLW数据已更新至2015年^[7-9]。国内对家畜数量网格化的研究经历了类似过程,目前,不少学者采用精度更高的机器学习方法预测牲畜的空间分布^[10-12]。因缺乏被普遍认可的CH₄排放因子,国内在进行畜牧业温室气体核算时常直接选用《2006年IPCC国家温室气体清单指南》(后续简称2006年IPCC清单)给出的缺省值^[13-15],结果存在较大的不确定性。采用牲畜个体与饲养方式等特征数据计算排放因子则更为精确^[16-18]。

尽管如此,现有研究仍存在诸多不足,一是机器学习方法不仅需要大量统计或实测数据才可保证模型精度,可移植性也较差,很难找到适应所有条件的最优模型^[19-20]。二是有关牲畜空间分布及其碳排放的研究尺度较大,不仅对特定牧区、半牧区的关注较少,仅排除水域、人口密集区和禁止人类活动的保护区进行牲畜数量空间化的适宜性掩蔽方法对牲畜活动范围的表征也不够精确。三是研究多基于行政单元分析年际变化,对减排量及空间差异的关注度不高。有鉴于此,本研究以新疆牧区半牧区草地为研究对象,基于净初级生产量(NPP)与草地类型估算草地的理论载畜量,并据此将县级尺度的牛存栏统计数据分配到500m尺度的网格上,既弥补了因实测数据或统计样本较少而无法保证机器学习训练精度的不足,又比基于遥感数据估算草食类牲畜空间分布的泛用方法更为可靠。通过新疆牛肠道CH₄排放因子估算其CH₄排放量,并根据FAOSTAT提供的排放比例等参数估算牧区半牧区畜牧业碳排放总量和排放强度,研究结果可为新疆畜牧业温室气体减排提供更为精细的科学依据。

1 研究方法

1.1 研究区概况

根据 2020 年《中国民族统计年鉴》对牧区、半牧区县的界定,新疆分别有牧区县 22 个、半牧区县 15 个,涉及 12 个地(市、州),见图 1。

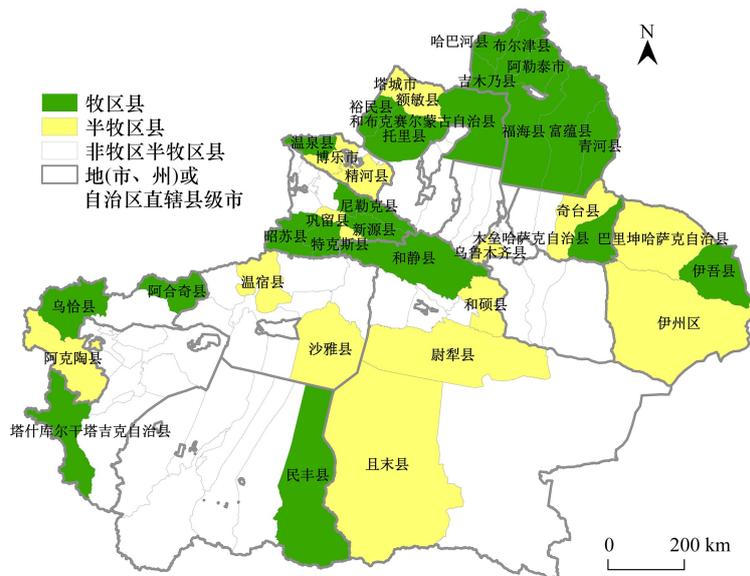


图 1 新疆牧区半牧区空间分布

Fig.1 Spatial distribution of pastoral and semi-pastoral areas in Xinjiang

2020 年,牧区半牧区草地总面积 264759.47km²,约占全疆草地 50.93%,占 2016 年实际经营牧草地的 84.89%,牛饲养量占 47.88%,牧业总产值占 31.75%。牧业是牧区半牧区重要的优势产业,较大的牲畜饲养量也意味着较高的温室气体排放,因此,牧区半牧区成为减排的重点区域。

1.2 数据来源及预处理

基于 CLCD 30m 土地覆盖数据集,提取牧区半牧区的草地分布,并选取 7—8 月云量低于 20%,且经过辐射定标、大气校正等预处理后的 Landsat8 OLI_TIRS 卫星数字产品对草地分布进行更新和验证。根据《数字地形图产品基本要求(GB/T 17278)》,1:10 万地形图的平面位置精度为 0.5mm,即地面距离 50m,故 30m 土地覆盖数据可满足 1:10 万比例尺专题图的精度要求,更新时未计入 2500m²以下的草地图斑。

保护区内通常禁止放牧活动,因此基于联合国环境署世界保护区矢量数据对牧区半牧区草地进行掩蔽,剔除属于世界自然遗产的天山自然保护区部分,得到 2020 年草地分布图。此外,牧区半牧区草地的人口密度大多不超过 10000 人/km²,因此未对人口进行掩蔽处理。数据引文与下载网址见表 1。

用 2019 年和 2021 年的平均值对 2020 年 NPP 中的缺失值进行插值,乘以比例系数 0.0001 后将单位换算为 gC m⁻² a⁻¹;牧业产值以 2005 年为基期,根据对应县第一产业的生产总值指数调整,对缺失值进行线性预测填补。所有空间数据统一到 Krasovsky_1940_Albers 等积坐标系,为与 NPP 数据的空间分辨率保持一致,经重采样将栅格数据的空间分辨率统一为 500m。

1.3 研究方法

1.3.1 草地类型划分

以《1:100 万中国植被图集》为基础,结合《中国地理图集》中的《1:320 万中国草地》获取草地类型,利用新疆地形图和各类草地的主要植被组成与分布信息,将草地细分为温性草甸草原、温性草原、温性荒漠草原、

温性荒漠、山地草甸、低地草甸、高寒草甸、高寒草原和高寒荒漠九种类型,采用 ArcGIS 近邻分析工具确定与新草地最近的草地类型,以解决不同年代植被类型和草地分布数据的空间及属性不一致问题。

表 1 数据来源
Table 1 Data sources

数据类型 Data type	数据名称 Data name	数据来源 Data source
栅格数据 Raster data	30 米土地覆盖年度数据集 Landsat8 OLI_TIRS 卫星数字产品 1:320 万中国草地图 MOD17A3HGFv061 500m NPP 产品	Yang J, Huang X ^[21] 地理空间数据云 (https://www.gscloud.cn/) 《中国地理图集》 ^[22] 美国地质勘探局 (https://lpdaac.usgs.gov/products/mod17a3hgf061/)
矢量数据 Vector data	世界保护区矢量数据 1:100 万中国植被图集	世界保护区矢量数据 (https://www.protectedplanet.net) 北京大学地理数据平台 (https://geodata.pku.edu.cn/)
统计数据 Statistical data	牛年末存栏量、牧业产值、第一产业生产 总值指数 新疆牛、奶牛存栏量 中国畜牧业碳排放比例	《新疆统计年鉴》(2005—2020 年) EPS 数据平台中国农林数据库 (https://www.epsnet.com.cn) FAOSTAT (https://www.fao.org/faostat/)

1.3.2 干草产量与理论载畜量

草地生产力及其理论载畜量是草地生态系统和畜牧业科学管理的基础。本研究假设了放牧的理想情况,即理论载畜量高的草地饲养的牛更多,并基于草地类型,选取 NPP 对草地产草量及理论载畜量进行估算。单位面积干草产量估算公式为^[23]:

$$B_i = \frac{NPP_i}{0.5 \times (1 + RSR_u) (1 - H)} \quad (1)$$

式中, B 为单位面积干草产量 (kg/hm^2); NPP_i 为对应栅格的净初级生产力; 0.5 为植物生物量与 NPP 的转换系数^[23]; RSR_u 为对应草地类型的根冠比^[24]; H 为植被含水率, 取 14%^[23]; i 为栅格单元, u 为草地类型。采用的 NPP 为 MOD17A3HGF 数据产品, 为给定年份内所有 8 d GPP 净光合作用 (PSN) 产品 MOD17A2H 的总和, 计算结果为给定年份的总产草量。

根据《天然草地合理载畜量的计算 (NY/T 635—2015)》及《草原资源承载力监测与评价技术规范 (CCSB 40 LY)》, 理论载畜量估算如下:

$$Z_i = \frac{B_i \times E \times UR_u}{SU \times d} \quad (2)$$

式中, Z 为理论载畜量 (标准羊单位/ hm^2); E 为牧草可食用比例, 取 0.6^[23]; UR 为不同草地的利用率, 参考《天然草地合理载畜量的计算》中的四季放牧利用率, 取其平均值^[25]; SU 定义为 1 只体重 45kg、日消耗 1.8kg 标准干草的成年绵羊; d 为 365 d。不同草地所选参数见表 2。

1.3.3 牛肠道 CH_4 排放总量估算

牛的饲养周期通常大于一年, 假设目标年中新出生牛的排放量与上年出栏的牛一致, 则每年的牛饲养量等于年末存栏数^[26]。基于理论载畜量可对县级尺度的牛存栏统计数据进行空间网格化, 因无法得到不同类型牛的分布数据, 故对不同地区牛的羊单位折算系数采用了相同的数值, 约分后公式如下:

$$AD_i = \frac{Z_i}{Z} \times \frac{SC \times 10^4}{A_i} \quad (3)$$

式中, AD_i 为栅格 i 内的牛活动水平 (头/ hm^2); Z_i 为栅格 i 内的理论载畜量; Z 为县域内所有栅格单元的理论载畜量之和; SC 为年末牛存栏量; A_i 为栅格面积, 即 25hm^2 。

表 2 干草产量和理论载畜量计算参数

Table 2 Parameters for hay yield and theoretical livestock carrying capacity calculation

草地类型 Grassland type	RSR	四季放牧利用率		UR/%
		Grazing utilization rate in four seasons/%		
		下限 Lower limit	上限 Upper limit	
温性草甸草原 Temperate meadow-steppe	5.2	50	55	52.5
温性草原 Temperate steppe	5.6	45	50	47.5
温性荒漠草原 Temperate desert-steppe	6.4	40	45	42.5
温性荒漠 Temperate desert	5.5 ^a	30	35	32.5
低地草甸 Low-land meadow	5.5 ^a	50	55	52.5
山地草甸 Mountain meadow	3.5	55	60	57.5
高寒草甸 Alpine meadow	6.8	50	55	52.5
高寒草原 Alpine steppe	5.2	40	45	42.5
高寒荒漠 Alpine desert	5.8 ^b	35	40	37.5

RSR:根冠比 Root-shoot ratio; UR:利用率 Utilization rate; a:取温性草地的平均值; b:表示取高寒草地的平均值

因环境、气候和经济条件的差异,不同的牛亚种呈较大的空间分布差异,牛肠道 CH₄排放因子也因种类、地区和时间的差异而不同。表 3 是对国内外文献中牛肠道 CH₄排放因子值进行的梳理和对比。

表 3 国内外牛肠道 CH₄排放因子值对比Table 3 Comparison of domestic and foreign cattle intestinal CH₄ emission factor values

文献类型 Article type	来源 Sources	地区 Region	排放因子 Emission factor/(kg 头 ⁻¹ a ⁻¹)	
			奶牛 Cow	非奶牛 Non-cow
国外研究 Foreign study	2006 年 IPCC 清单 Wolf J, Asrar G R, West T O ^[27]	亚洲 东亚-东南亚	68 153.2	47 42.4
国内研究 Domestic study	《省级温室气体清单编制指南(试行)》 Xue B, Wang L Z, Yan T ^[28]	中国	88.1—99.3 ^a	52.9—85.3
	边俊艳 ^[29]	中国	102.2 84.12—127.44 ^c	19.2—59.3 ^b 25.08—45.72

a:包括规模化饲养、农户散养、放牧饲养三种饲养方式的奶牛排放因子; b:包括不同年龄、性别的非奶牛排放因子; c:包括全国 31 个省、市、自治区的奶牛排放因子

为使排放因子尽可能接近新疆实际情况,采用已有的省级尺度研究结果,将奶牛和非奶牛的排放因子取为 127.44 和 45.72^[29],可满足 2006 年 IPCC 清单第 4 卷的多种牲畜的肠道 CH₄排放因子及其所有估计值的不确定性范围(Tier 1:±30—50%, Tier2:±20%)。因缺少牦牛存栏量,根据功能将牛分为奶牛和非奶牛两个子类。每个栅格的牛肠道 CH₄排放量为:

$$E_{\text{enteric},ij} = EF_j \times AD_i \times A_i \times P_j \quad (4)$$

$$E_{\text{enteric},i} = \sum_j E_{\text{enteric},ij} \quad (5)$$

式中, $E_{\text{enteric},ij}$ 为栅格 i 内 j 类牛的排放量(kg); EF_j 为 j 类牛的排放因子; P_j 为 j 类牛占全部牛存栏数的比重,数值见表 4; j 为牛子类。

表 4 新疆牧区半牧区畜牧业碳排放计算的比重参数/%

Table 4 Calculation parameters of carbon emissions from animal husbandry in Xinjiang's pastoral and semi-pastoral areas

年份 Year	奶牛比重 P_{cow} Cow proportion	非奶牛比重 $P_{\text{non-cow}}$ Non-cow proportion	牛肠道 CH ₄ 排放比重 P_{cattle} Cattle proportion	畜牧业肠道 CH ₄ 排放比重 P_{enteric} Husbandry enteric fermentation emission proportion
2005	42.62	57.38	78.79	76.96
2020	21.89	78.11	74.87	75.60

1.3.4 畜牧业碳排放总量与排放强度估算

2006 年 IPCC 清单假设牲畜每年的净 CO₂排放为零,即动物的呼吸排放与其所消耗植物的光合作用吸收

量相抵。据此,本研究仅考虑反刍动物肠道发酵和牲畜粪便管理系统产生的温室气体,并根据 FAOSTAT 提供的排放比例等参数,基于肠道发酵估算畜牧业碳排放总量:

$$E_i = \frac{E_{\text{enteric},i} \times q_{\text{CH}_4}}{P_{\text{cattle}} \times P_{\text{enteric}}} \quad (6)$$

式中, E_i 为栅格 i 内畜牧业碳排放总量 (Gg CO_2 当量, $1\text{Gg} = 10^6\text{kg}$); q_{CH_4} 为 CH_4 的 CO_2 当量因子, IPCCAR6 给出的非化石燃料 CH_4 的全球增温潜势 (100 a) 中该值为 27。 P_{cattle} 为中国肠道发酵排放总量中牛的排放比重, P_{enteric} 为按 CO_2 当量计算的肠道 CH_4 排放量占畜牧业总排放量比重。

土地利用碳排放强度是土地低碳利用的重要指标,计算单位面积草地的 CO_2 排放量 EI_{grass} 并将其视为草地的碳排放强度 (kg/hm^2)。

为进一步计算基于网格的牧业产值碳排放强度,需对各县的牧业产值进行空间网格化,参考谢高地等^[30]和潘冬荣等^[31]对食物生产功能基准单价的调整方法,栅格的牧业产值分配公式为:

$$HP_i = \frac{B_i}{B} \times HP \quad (7)$$

式中, HP_i 为栅格 i 内的牧业产值; B_i 为栅格 i 内的干草产量; B 为县域内所有栅格的干草总产量; HP 为牧业产值。

中国在哥本哈根世界气候大会前夕承诺,2020 年在 2005 年基础上单位 GDP 碳排放强度下降 40%—45%,据此,以单位牧业产值碳排放量 $EI_{\text{husbandry}}$ 表示产值碳排放强度,分别计算 2005 和 2020 年的牛肠道 CH_4 排放量及畜牧业排放强度并进行对比,以探究畜牧业的减排效果。

1.3.5 2030 年牛存栏量预测与碳排放量估算

基于“双碳”目标,以 2016—2020 年牧区半牧区县的牛存栏量对 2030 年牛存栏量进行预测,据此估算 2030 年的温室气体排放量。因影响畜牧业生产的因素较多且多个因素事先无法控制或较难控制^[32],故选用适合对不确定因素系统进行预测的灰色模型 (Grey Model) 进行牛存栏量预测。根据关联度和后验差检验,剔除了后验差比值 $C \geq 0.65$, 误差概率 $P \leq 0.70$ 等的不合格县,以及预测结果大于新疆畜牧业“十四五”规划目标的县。

2 结果

2.1 不同草地的干草产量及其理论载畜量

基于 2020 年草地类型分布 (图 2), 统计各类草地的面积及占比, 根据 1.3.2 中的公式分别计算出干草产量和理论载畜量, 并计算不同类型草地在干草总产量和理论载畜总量中的占比 (表 5)。

相较全疆整体水平, 牧区半牧区草原、草甸的面积占比更高, 温性草原、温性荒漠和温性荒漠草原的占比均在 17% 左右, 天山中脉、南脉和昆仑山的高寒草原分布最广, 天山中脉和阿尔泰山的高寒草甸次之, 分别占 14.46% 和 12.69%, 占比 3.12% 的高寒荒漠分布最小。

基于 NPP 计算出 2020 年各类草地的干草产量, 并将单位面积干草产量乘以栅格面积, 得到每个栅格的总产量, 基于干草产量计算出的理论载畜量, 二者的空间分布特征见图 3。

结果显示, 2020 年新疆牧区半牧区干草总产量 80.31 万 t, 平均 $818.6\text{kg}/\text{hm}^2$, 温性草原在 9 类草地中贡献最大, 占总产量 23.49%, 其次是高寒草甸、山地草甸和温性荒漠草原, 分别占 18.28%、13.40% 和 13.36%, 山地草地仅占 6.83%, 但草地质量和产草量均很高。低地草甸和高寒荒漠分别占 0.34% 和 0.81%, 单位面积产草量远低于其他类型。干草产量北高南低特征明显, 伊犁河谷、塔尔巴哈台山、阿勒泰山和阿拉山口北部等区域高达 $1000\text{kg}/\text{hm}^2$ 以上, 局部超过 $2000\text{kg}/\text{hm}^2$; 南疆地区仅天山南脉和塔里木盆地西部的小部分地区超过 $1000\text{kg}/\text{hm}^2$ 。不同草地的平均产草量由高到低依次为: 山地草甸 > 温性草甸草原 > 温性草原 > 研究区平均值 > 高寒草甸 > 高寒草原 > 温性荒漠草原 > 温性荒漠 > 高寒荒漠 > 低地草甸, 除低地草甸外, 各类草地产草量的数量

规律与其他研究基本一致^[33-35]。理论载畜量空间分布与产草量相似,也呈北高南低,平均理论载畜量为 0.36 标准羊单位/hm²,超过 75%的草地低于 0.5 标准羊单位/hm²。

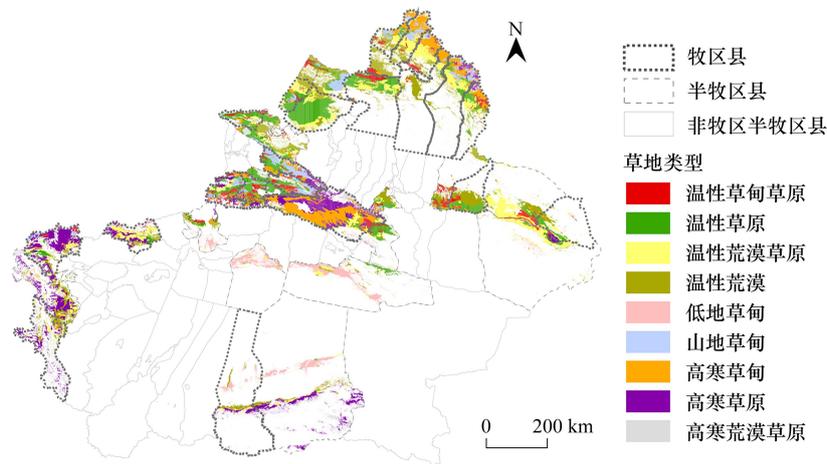


图 2 2020 年新疆牧区半牧区草地类型分布

Fig.2 Distribution of grassland types in pastoral and semi-pastoral areas of Xinjiang in 2020

表 5 2020 年新疆牧区半牧区各类草地面积及其产草量和理论载畜量

Table 5 Area, grass production and theoretical livestock carrying capacity of each grassland type in pastoral and semi-pastoral areas of Xinjiang in 2020

草地类型 Grassland type	面积 Area/km ²	面积占比 Proportion of area/%	平均产草量 Average grass production/ (kg/hm ²)	产草量占比 Proportion of grass production/%	平均理论 载畜量 Average theoretical livestock carrying capacity/ (标准羊单位/hm ²)	理论载畜 量占比 Proportion of theoretical livestock carrying capacity/%
温性草原 Temperate steppe	46797.93	17.68	928.01	23.49	0.40	23.36
温性荒漠 Temperate desert	45608.11	17.23	578.06	11.45	0.17	7.46
温性荒漠草原 Temperate desert-steppe	44991.88	16.99	578.37	13.36	0.22	10.49
高寒草原 Alpine steppe	38294.01	14.46	646.79	9.45	0.25	8.26
高寒草甸 Alpine meadow	33586.89	12.69	801.24	18.28	0.38	16.95
山地草甸 Mountain meadow	18079.17	6.83	1847.67	13.40	0.97	21.87
温性草甸草原 Temperate meadow-steppe	16396.58	6.19	1073.16	9.42	0.51	10.70
低地草甸 Low-land meadow	12752.42	4.82	190.89	0.34	0.09	0.33
高寒荒漠 Alpine desert	8252.49	3.12	480.83	0.81	0.16	0.59
总计/平均值 Total/Average	264759.47	100	818.64	100	0.36	100

2.2 牛活动水平及肠道 CH₄排放量

基于理论载畜量,估算 2020 年牛的活动水平。由于奶牛的肠道 CH₄排放因子约为非奶牛的 2.79 倍,随

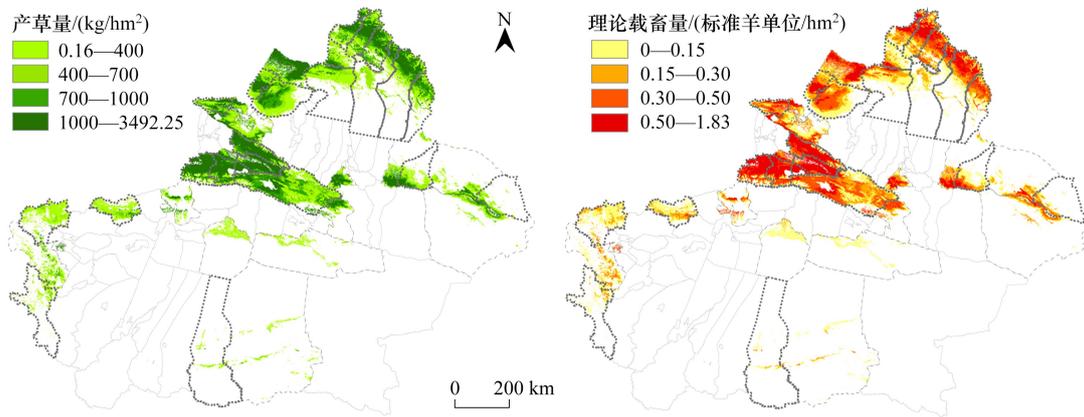


图3 2020年新疆牧区半牧区产草量与理论载畜量空间分布特征

Fig.3 Spatial pattern of grass production and theoretical livestock carrying capacity in pastoral and semi-pastoral areas of Xinjiang in 2020

着奶制品需求的增长,奶牛已成为畜牧业碳减排的重点。根据牛活动水平,参照奶牛与非奶牛的比例系数和排放因子,计算2020年牛肠道CH₄的排放量。牛活动水平及其肠道CH₄排放量的空间分布特征见图4。

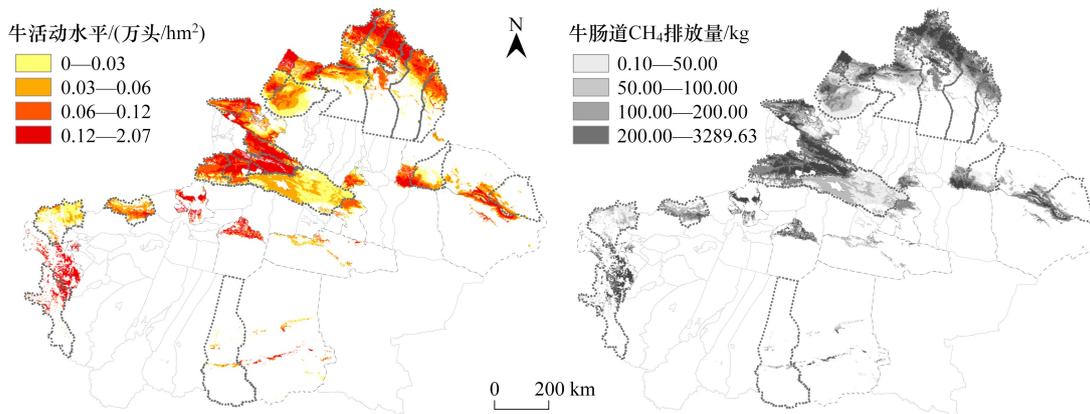


图4 2020年新疆牧区半牧区牛活动水平及其肠道CH₄排放量空间分布特征

Fig.4 Spatial pattern of cattle activity levels and emissions of enteric methane in pastoral and semi-pastoral areas of Xinjiang in 2020

图4显示,阿尔泰山西部、塔尔巴哈台山、伊犁河谷东部的牛活动水平较高,与阿勒泰、塔城和伊犁州等主要牧区的分布基本一致。牧区半牧区的平均载畜量为0.10头/hm²,尽管塔里木盆地北部和西部的草地载畜能力不强,但牛存栏量较高,局部地区牛的活动水平超过0.5头/hm²,接近北疆主要牧区的饲养水平。

阿尔泰山、天山、伊犁河谷、塔尔巴哈台山、塔里木盆地西部和北部边缘的牛肠道CH₄排放量较高,接近75%的栅格排放量不足200kg。将所有栅格的排放量加总,牧区半牧区牛肠道CH₄的总排放量为148.17Gg,其中,奶牛和非奶牛的占比分别为43.86%和56.14%。

根据草地类型对牛肠道CH₄排放量进行分区统计,并计算不同草地对总排放量的贡献(表6)。

结果显示,温性草原和山地草甸的排放最高,占比均超20%;高寒草甸、温性草甸草原和温性荒漠草原次之,总排放贡献率均高于10%;高寒荒漠排放量最少。

2.3 单位草地碳排放量和单位牧业产值排放量

据公式(6)估算出2020年牧区半牧区畜牧业的碳排放总量为7068.06Gg CO₂当量,以单位草地排放量和单位牧业产值排放量表征的碳排放强度见图5,不同类型草地的平均碳排放强度见表7。

表 6 2020 年新疆牧区半牧区各类草地牛肠道 CH₄排放量及其占比Table 6 Enteric CH₄ emissions from cattle of each grassland type and their proportions in pastoral and semi-pastoral areas of Xinjiang in 2020

草地类型 Grassland type	牛肠道 CH ₄ 排放量 Emissions of enteric methane of cattle/Gg	排放量占比 Proportion of emissions/%
温性草原 Temperate steppe	31.55	21.29
山地草甸 Mountain meadow	29.99	20.24
高寒草甸 Alpine meadow	22.81	15.39
温性草甸草原 Temperate meadow-steppe	16.81	11.34
温性荒漠草原 Temperate desert-steppe	16.66	11.24
温性荒漠 Temperate desert	14.04	9.47
高寒草原 Alpine steppe	12.69	8.56
低地草甸 Low-land meadow	2.56	1.73
高寒荒漠 Alpine desert	1.07	0.72
总计 Total	148.17	100

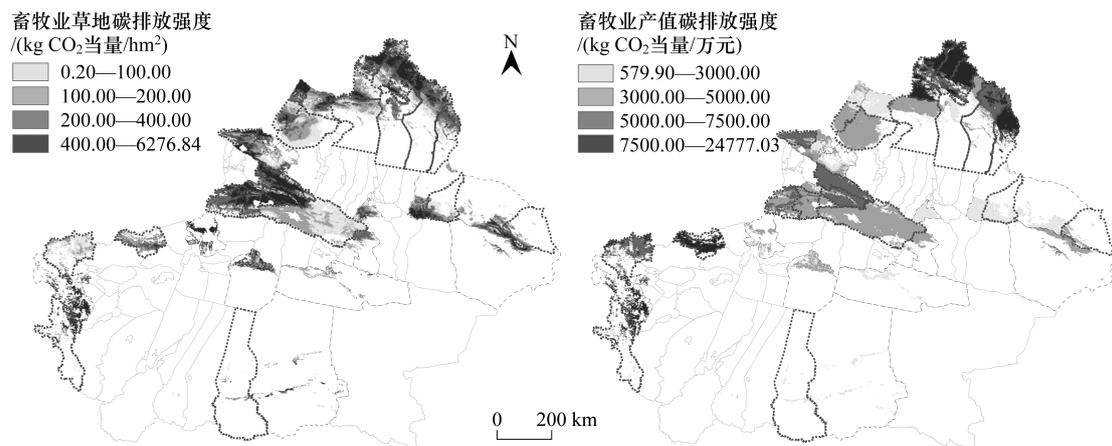


图 5 2020 年新疆牧区半牧区畜牧业碳排放强度空间分布特征

Fig.5 Spatial pattern of animal husbandry's carbon emission intensity in pastoral and semi-pastoral areas of Xinjiang in 2020

表 7 2020 年新疆牧区半牧区各类草地平均草地碳排放强度与产值碳排放强度

Table 7 Average carbon emission intensity of grassland and animal husbandry output of each grassland type in pastoral and semi-pastoral areas of Xinjiang in 2020

草地类型 Grassland type	平均草地碳排放强度 Average carbon emission intensity of grassland/(kg CO ₂ 当量/hm ²)	平均畜牧业产值碳排放强度 Average carbon emission intensity of animal husbandry output/(kg CO ₂ 当量/万元)
山地草甸 Mountain meadow	734.67	7243.56
温性草甸草原 Temperate meadow-steppe	466.29	5450.67
温性草原 Temperate steppe	309.58	4600.85
高寒草甸 Alpine meadow	304.87	6854.95
低地草甸 Low-land meadow	301.61	2596.63
高寒草原 Alpine steppe	224.99	6111.77
温性荒漠草原 Temperate desert-steppe	213.05	5883.39
温性荒漠 Temperate desert	192.41	4252.55
高寒荒漠 Alpine desert	176.33	4587.16
平均值 Average	307.08	5519.81

牧区半牧区草地的平均碳排放强度为 307.08kg CO₂当量/hm²,天山、阿尔泰山、塔尔巴哈台山及昆仑山西部高达 1000kg CO₂当量/hm²以上,伊犁河谷东部和塔里木盆地北部的温宿、沙雅等县也有高值区。山地草甸的碳排放强度最高,平均达 734.67kg CO₂当量/hm²,温性草甸草原次之,为 466.29kg CO₂当量/hm²,温性草原、高寒草甸、低地草甸、高寒草原、温性荒漠草原等均超 200kg CO₂当量/hm²,温性荒漠和高寒荒漠的排放强度较低。

牧区半牧区的平均产值碳排放强度为 5519.81kg CO₂当量/万元,天山大部、塔里木盆地南北、塔尔巴哈台山和阿尔泰山局部低于 5000kg CO₂当量/万元;阿尔泰山、天山南脉和昆仑山西部高于 5000kg CO₂当量/万元,山区高达 10000kg CO₂当量/万元以上。南疆阿克陶县东部和北疆吉木乃县南部更是超过 15000kg CO₂当量/万元,与其牛存栏量高但牧业产值低有关,阿克陶县以载畜量较低的高寒草原、温性荒漠草原为主,却饲养了 13.94 万头牛,牧业产值最低的吉木乃县饲养的 3.31 万头牛集中分布在南部的温性草甸草原和高寒草地。

2.4 碳排放强度变化及 2030 年碳排放量预测

计算 2005 至 2020 年牛肠道 CH₄排放量、草地碳排放强度和产值碳排放强度的增长率,以探究总量水平上的减排效果,结果见表 8 和图 6。

表 8 新疆牧区半牧区畜牧业碳排放量与减排幅度估算结果

Table 8 Estimation results of carbon emissions and emission reductions from animal husbandry in pastoral and semi-pastoral areas of Xinjiang

估算量 Estimated metrics	年份 Year		变化率 Change rate/%
	2005	2020	
牛肠道 CH ₄ 排放量 CH ₄ emissions from cattle enteric fermentation/Gg	167.96	148.17	-11.78
奶牛肠道 CH ₄ 排放量 CH ₄ emissions from cow enteric fermentation/Gg	113.26	64.98	-42.62
非奶牛肠道 CH ₄ 排放量 CH ₄ emissions from non-cow enteric fermentation/Gg	54.70	83.19	52.07
畜牧业碳排放总量 Carbon emissions from husbandry industry/Gg CO ₂ 当量	7478.87	7068.06	-5.49
平均草地碳排放强度 Average grassland carbon intensity/(kg CO ₂ 当量/hm ²)	541.01	307.08	-43.24
平均产值碳排放强度 Average output carbon intensity/(kg CO ₂ 当量/万元)	11056.52	5519.81	-50.08

相比 2005 年,2020 年牛肠道 CH₄排放量减少 19.79Gg,排放量降低 11.78%,80.78%的区域均有减排,但减排幅度未超 100%,减排超 1000kg 的区域集中分布于塔城南北部、伊犁河谷南部、天山南脉与中脉交界处,约占草地总面积 0.75%。阿勒泰地区的吉木乃、哈巴河、富蕴以及西部的乌恰县不仅是主要的排放增长区,排放量增速也最快。2005 年这些县的牛饲养量规模较小,在牛存栏量正常增长下的排放量增速较大。

2020 年畜牧业碳排放总量比 2005 下降约 5.49%,平均草地碳排放强度和平均产值碳排放强度分别下降 43.24%和 50.08%,呈“中间低,两边高”的空间分布特征。碳排放强度增加的地区为阿勒泰北部、天山北脉、伊犁河谷中部、塔里木盆地北部和西部,约占草地总面积 21.93%,其余大部分草地均呈减少趋势。伊犁河谷、塔城地区、东疆和塔里木盆地南北边缘的产值碳排放强度降幅最大,以采矿业为主、畜牧业基础相对薄弱的富蕴县草地面积仅 4.16%,尽管 2005 至 2020 年牛存栏量增长 46.89%,但牧业产值仅增长 28.83%,畜牧业碳排放增速显著高于牧业产值,产值碳排放强度明显增加。

《中国应对气候变化的政策与行动 2022 年度报告》显示,2019 年底我国碳排放强度(单位 GDP 的 CO₂排放量)较 2005 年降低约 47.9%,提前实现减排目标。从牧区半牧区整体层面看,畜牧业单位草地碳排放强度在实现 2020 年减排目标的同时产值碳排放强度还超额完成目标,因区域内部存在较大差异,仍有 56.56%和 36.23%的地区两项指标均未达标(减排幅度小于 40%),阿尔泰山、天山及伊犁河谷、天山南脉等牧区,阿勒泰地区是主要的排放强度增长区。

基于 2030 年碳排放强度比 2005 年下降 65%以上的目标,用 2005 年的产值碳排放强度估算 2030 年的目标值,与 2020 年产值碳排放强度相减,得到 2020 年的碳减排压力及其空间差异,见图 7。

结果显示,阿勒泰地区和克州是碳减排压力最大的两个地区,目标减排量大多在 2000kg CO₂当量/万元

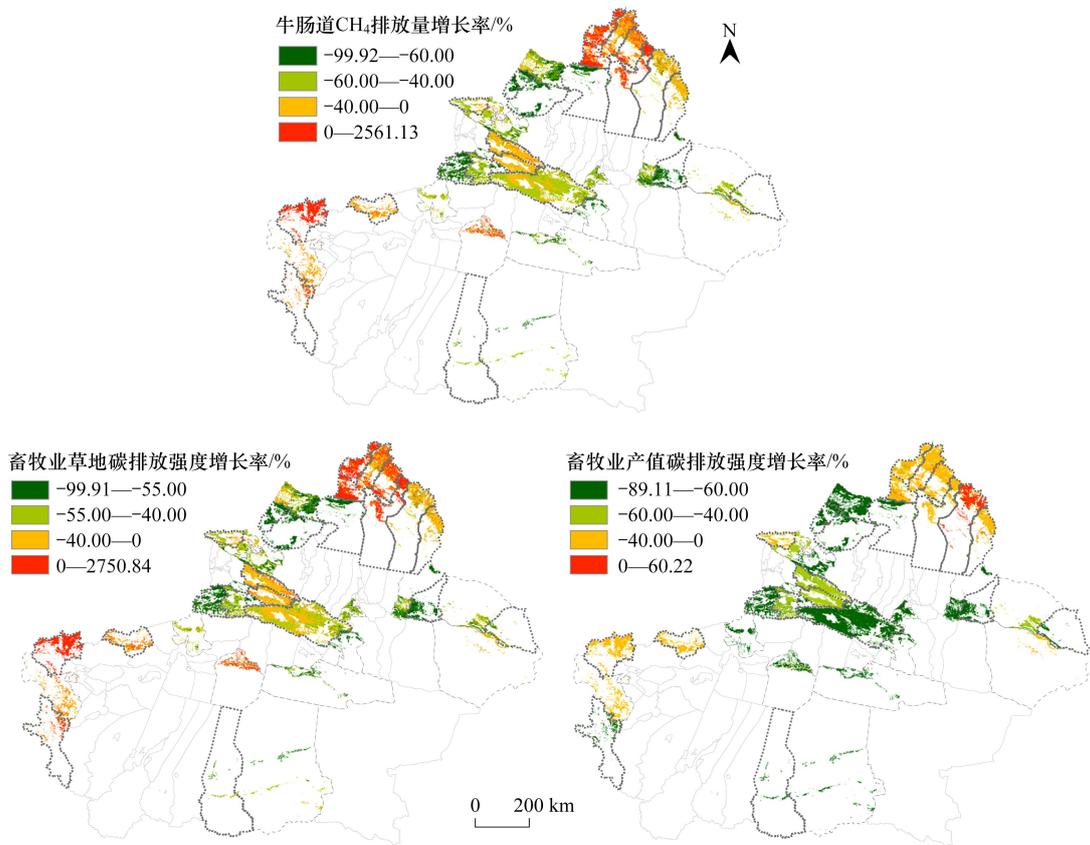


图 6 相比 2005 年的 2020 年牛肠道 CH₄及畜牧业碳排放强度增长率

Fig.6 Growth rate of cattle’s enteric methane emissions and animal husbandry’s carbon emission intensity in 2020 compared to 2005

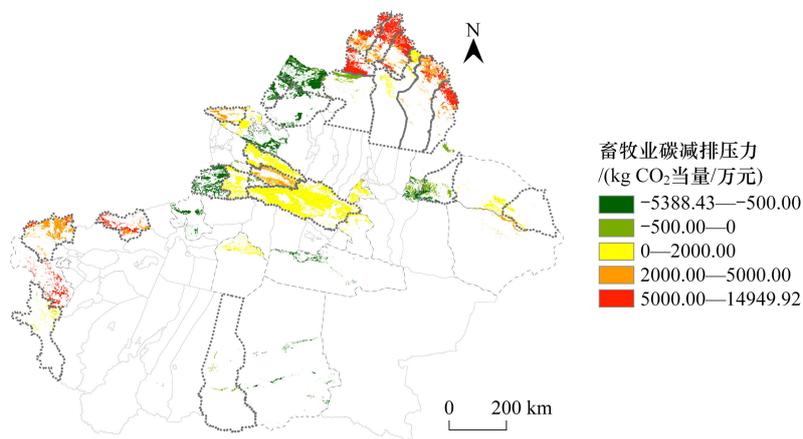


图 7 新疆牧区半牧区畜牧业碳减排压力

Fig.7 Carbon emission reduction pressure of animal husbandry in pastoral and semi-pastoral areas of Xinjiang

以上,其次为中部的伊犁州、博州和巴州等局部地区。

为探究 2030 年“双碳”目标的实现情况,用灰色模型预测 2030 年的牛存栏量,剔除预测精度不合格的 10 个县后,剩余 27 个县的相关度均不低于 0.9,预测效果较好。

预测显示,2030 年 27 个县的牛存栏总量将达 480.99 万头,牛肠道 CH₄排放量为 305.95 Gg,畜牧业排放

总量可达 14594.36 Gg,是 2020 年排放量的 3 倍。除乌鲁木齐县、伊吾、民丰、特克斯、布尔津和富蕴县外,其余 21 个县的碳排放量均呈增长趋势,减排压力依然较大。

3 讨论

3.1 产草量和理论载畜量估算精度分析

本研究基于 2006—2016 年《全国草原监测报告》中新疆干草与鲜草总产量比值的平均值,以 60%为牧草可食用比例,计算结果略低于科技部国家遥感中心欧亚大陆草原可食饲草量数据集显示的研究区干草产量 0.01—1700.20kg/hm²,平均产草量 273.84 kg/hm²[36]。李静等[33]通过采集伊犁河谷 2015—2019 年 7—8 月的天然牧草,测定出的鲜草产量为 1480.24—10621.86kg/hm²,折合干草产量 476.72—3420.87kg/hm²,与本研究结果基本一致。张双丽[34]基于 NDVI 和产草量回归模型估算的新疆鲜草产量为 602.78—5287.44kg/hm²,折合干草产量 194.13—1702.87kg/hm²,由于该研究用盛草期 NDVI 估算产草量,因而低地草甸产草量明显偏高,本研究不仅将草地细分为 9 个类别,同时还将研究范围聚焦于牧区半牧区,因而该研究对其他草地类型的估算结果也略低于本研究。张凡凡等[35]测定出沙尔套山 5—11 月可食牧草干草总产量和月产量,计算出每类草地平均月产草量为 915—1725.73kg/hm²,温性草原和高寒草甸产草量高于本研究,而山地草甸产草量略低于本研究。相较实测法,基于 NPP 进行产草量估算,所选参数在时间和空间上无法准确反映不同区域草地的实际生产力,结果必然会出现一定的偏差。

低地草甸不仅地势低平、土壤潮湿、水分充足,且土层深厚、富含有机质,肥力相对较高,盛草期干草产量可达 644.63—2608.93kg/hm²[34,37],远高于本研究的低地草甸平均产草量 190.89kg/hm²和最大产草量 1449.02kg/hm²,究其原因,与 NPP 年度数据无法细分盛草期的植被生长情况有关,且新疆的低地草甸多分布于塔里木和准噶尔盆地边缘靠近沙漠地带,季节性河流对产草量的影响也很大。此外,本研究提取草地类型依据侯学煜院士主编的中国植被图集数据较早,未能反映 20 多年来的植被变化,而新疆水资源公报显示 2020 年全疆降水量、水资源总量比多年均值略偏少也是低地草甸退化的因素。此外,新疆低地草甸分布相对零散,集中连片区域较小,数据处理时的小图斑省略也会造成结果偏差。

科技部数据中的可食饲草量以及 1.1 标准羊单位/hm²的平均理论载畜量均略高于本研究结果[36]。从局部来看,刘亚君等[38]估算的 2020 年哈密市草原载畜量为 60.96 万只,平均载畜能力约 0.15 标准羊单位/hm²,略小于本研究哈密市 0.24 标准羊单位/hm²的结果,推测与该研究选取国家固定监测点对草原生产力和载畜量进行计算有关;李建伟等[39]通过野外调查,计算出尼勒克县 8 类草地的载畜量,得出温性荒漠草原、温性荒漠的载畜能力较弱的结论与本研究基本一致。

3.2 排放量估算的不确定性

估算网格单元的牛活动水平时,假定理论载畜量越高牛活动水平越高,而实际放牧活动受植被、降水量、白天地表温度、海拔和坡度、人口密度、道路密度等影响,也造成了结果的偏差。本研究估算的 2020 年网格牛活动水平与 FAO2015 年世界牲畜网格数据库(GLW v4)中牛的活动范围基本一致,阿勒泰、塔城地区牛的分布相较 GLW 更集中于山区,因天山东脉和塔里木盆地南部只考虑牛在草地上的活动,其分布相较 GLW 更为集中,说明本研究将牛的活动细化到 500m 的草地网格上,一定程度上提高了牛空间分布的精度。Li X H 等[11]用三种机器学习模型生成的中国西部牛空间分布公里网格数据所显示的牛在新疆西部密度更高也与本研究结果一致。此外,按 FAOSTAT 的牛肠道 CH₄排放量占牲畜部门 CH₄总排放量 85.62%计算,得出牲畜 CH₄排放量平均为 18.01kg/hm²,与北京大学 1980—2010 年排放清单(<http://inventory.pku.edu.cn>)中 2005 年牲畜 CH₄年排放量栅格数据相比,高出 14.87kg/hm²,应与本研究仅考虑草地上牛的活动,未将养殖场集中排放纳入计算有关。

基于植被类型,结合地形、气候等信息更新草地类型,对缺少直接参考依据的地区采用最近邻法确定草地类型,可能与实际情况并不相符。计算载畜量时不同草地的地上及地下光合产物分配比例、牧草可食比例、草

地利用率、牲畜的日采食量等参数在大尺度上难以准确测定,而依据经验和主观认知确定的参数也会使结果出现争议。因统计数据尚未公布县级层面的奶牛、非奶牛、牦牛及其他牛品种的比例信息,本研究未能体现地区间饲养品种的比例差异,而各亚类牛的空间分布和个体差异,以及饲料品质和饲养方式的改进均会造成排放因子的空间和时间差异。

3.3 草地、牛存栏量和牧业产值对碳减排的影响

尽管气候变化和降水偏少使 2020 年的草地面积比 2005 年减少 3.94%,但 21 世纪以来生长季 NDVI 均值变化总体稳定,草地覆盖度均值在平稳中显著增长,草地退化与改善均有轻微转化^[40-41]。因此,草地变化对畜牧业碳排放的影响可忽略不计。

2020 年牧区半牧区的牛存栏总量比 2005 年增长 18.87%,因该时段内新疆的饲养结构变化较大,肠道 CH₄排放量更大的奶牛饲养比重由 42.62%降至 21.89%,故牛肠道 CH₄排放总量表现为下降态势。空间上,牛饲养量向阿勒泰地区北部和伊犁东部等牧区集中,阿勒泰、哈巴河、福海和新疆增长量最大,均超 5 万头,塔城西部、巴州、昌吉和伊犁西部明显减少。增长量最大阿勒泰地区专注于打造绿色奶源基地,牛饲养量明显增长的同时也带来了更多的碳排放,哈巴河、福海大部分区域的牛肠道 CH₄排放量增长明显,坚持草畜平衡、合理控制牛饲养量及奶牛比重是减排的首选措施,新疆县因牛饲养量基数较大,增长量相对较小,仅 4.94%的区域出现排放量增长。牛饲养量增长的县市,应注重发展人工草地以增加碳汇,在提高饲草供应能力的同时也可减轻天然草场的放牧及碳减排压力。

按 2005 年不变价,2020 年牧业产值由 2005 年的 73.37 亿元增长至 183.78 亿元,增长 150.48%。80% 以上的县牧业产值翻了一番,且塔城、塔什库尔干县、温宿和福海县增长率均高于 200%,产值碳排放强度均明显下降。22 个县的牛存栏量有所增加,克州的阿克陶、阿勒泰地区的布尔津、富蕴、青河和吉木乃的牧业产值增速较慢,多数区域的产值碳排放强度降幅低于 30%,富蕴县则呈增长趋势。因牲畜养殖方式整体较粗放,经济效益低而碳排放量大,在奶业振兴和草原畜牧业转型升级背景下,布尔津县应坚持核心育种场的定位,加快牲畜良种培育,阿勒泰地区及克州的其他县应在适宜区域推进标准化规模养殖,以提高牧业产值、降低碳排放强度。

4 结论

(1) 2020 年,新疆牧区半牧区牛肠道 CH₄排放量为 148.17 Gg,畜牧业排放总量约为 7068.06Gg CO₂当量,相较 2005 年,牛肠道 CH₄排放量和畜牧业总排放量分别下降 11.78%和 5.49%。超 80%的区域牛肠道 CH₄排放量降低,阿勒泰地区和乌恰县是最主要的排放量增长区。

(2) 新疆牧区半牧区畜牧业平均草地碳排放强度为 307.08kg CO₂当量/hm²,平均牧业产值碳排放强度为 5519.81kg CO₂当量/万元。与 2005 年相比,2020 年平均草地排放强度和平均牧业产值排放强度分别下降 43.24%和 50.08%,整体上完成了 2020 年的减排目标。

(3) 因存在空间差异性,56.56%的区域草地碳排放强度和 36.23%的区域牧业产值碳排放强度尚未实现减排目标,阿尔泰山、天山和伊犁河谷等地是实现 2030 年减排目标的重点区域。实现“双碳”目标,既要扩大草地面积以增加碳汇,也要提高经济效率以推动畜牧业产值增长,而改良饲草、改进饲养方式也是重要的减排措施。

参考文献 (References):

- [1] Steinfeld H, Gerber P, Wassenaar T, Castel V, Rosales M, De Haan C: Livestock's Long Shadow. The Livestock, Environment and Development Initiative. Rome: FAO; 2006.
- [2] Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA: IPCC, 2022.
- [3] 杜鸣溪. 中国区域人为源甲烷排放清单构建与特征分析[D]. 西安: 西北农林科技大学, 2018.
- [4] 新疆维吾尔自治区统计局. 新疆维吾尔自治区第三次全国国土调查主要数据公报. (2022-01-20) [2024-04-24]. <https://tjj.xinjiang.gov>.

- cn/tjj/wjtz/202201/68170344947f45afbed5cddfbac49d9f.shtml.
- [5] 新疆维吾尔自治区发展和改革委员会.“扩奶畜增单产”推进新疆奶业振兴发展. (2023-01-17) [2024-04-20]. <https://xjdrx.xinjiang.gov.cn/xjfgw/hgjj/202301/d721c1de52b84b6b8df541615eaa9182.shtml>.
- [6] 新疆维吾尔自治区畜牧兽医局. 关于印发《新疆草原畜牧业转型升级规划(2023-2030年)》的通知. (2023-07-24) [2024-04-20]. <https://xmsyj.xinjiang.gov.cn/xjxmsyj/c113720/202307/8423120bd89a468c92d65e1a08b06e2d.shtml>.
- [7] Robinson T P, Franceschini G, Wint W. The food and agriculture organization's gridded livestock of the world. *Veterinaria Italiana*, 2007, 43(3): 745-751.
- [8] Robinson T P, Wint G R, Conchedda G, Van Boeckel T P, Ercoli V, Palamara E, Cinardi G, D'Aielli L, Hay S I, Gilbert M. Mapping the global distribution of livestock. *PLoS One*, 2014, 9(5): e96084.
- [9] Gilbert M, Nicolas G, Cinardi G, Van Boeckel T P, Vanwambeke S O, Wint G R W, Robinson T P. Global distribution data for cattle, buffaloes, horses, sheep, goats, pigs, chickens and ducks in 2010. *Scientific Data*, 2018, 5: 180227.
- [10] 吴雪. 近 30 年来青海草地牲畜时空变化特征分析[D]. 西宁: 青海师范大学, 2020.
- [11] Li X H, Hou J L, Huang C L. High-resolution gridded livestock projection for Western China based on machine learning. *Remote Sensing*, 2021, 13(24): 5038.
- [12] 李翔华, 黄春林, 侯金亮, 韩伟孝, 冯娅娅, 陈彦四, 王静. 结合遥感和统计数据的家畜分布网格化方法研究. *遥感技术与应用*, 2022, 37(1): 262-271.
- [13] 唐洪松, 刘维忠, 苏洋, 马惠兰. 新疆农业现代化进程中的碳排放效应. *生态与农村环境学报*, 2018, 34(1): 46-53.
- [14] 王欢, 乔娟. 中国畜牧业温室气体排放的脱钩与预测分析. *中国生态农业学报: 中英文*, 2019, 27(5): 793-802.
- [15] 苏旭峰, 杨小东, 冉启英. 基于碳排放视角的中国畜牧业绿色增长分析. *生态经济*, 2022, 38(4): 101-107.
- [16] Eska N, Youl B C, Hwan J J, Jung J H, Hyun P K. Greenhouse gas emission intensities for the livestock sector in Indonesia, based on the national specific data. *Sustainability*, 2018, 10(6): 1912.
- [17] Guo Y X, Wang Y D, Chen S F, Zheng S, Guo C C, Xue D, Kuzyakov Y, Wang Z L. Inventory of spatio-temporal methane emissions from livestock and poultry farming in Beijing. *Sustainability*, 2019, 11(14): 3858.
- [18] Kuhla B, Viereck G. Enteric methane emission factors, total emissions and intensities from Germany's livestock in the late 19th century: a comparison with the today's emission rates and intensities. *The Science of the Total Environment*, 2022, 848: 157754.
- [19] 郭彦龙, 赵泽芳, 乔慧捷, 王然, 卫海燕, 王璐坤, 顾蔚, 李新. 物种分布模型面临的挑战与发展趋势. *地球科学进展*, 2020, 35(12): 1292-1305.
- [20] 朱妮, 郭彦龙. 基于四种常用机器学习的梭梭(*Haloxylon ammodendron*(C.A.Mey) bunge)适宜生境分布研究. *生态科学*, 2023, 42(4): 190-199.
- [21] Yang J, Huang X. The 30m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019. *Earth System Science Data*, 2021, 13(8): 3907-3925.
- [22] 王静爱, 左伟, 《中国地理图集》编纂委员会编制. 中国地理图集. 北京: 中国地图出版社, 2010.
- [23] 莫兴国, 刘文, 孟铖铖, 胡实, 刘苏峡, 林忠辉. 青藏高原草地产量与草畜平衡变化. *应用生态学报*, 2021, 32(7): 2415-2425.
- [24] Yang Y H, Fang J Y, MA W H, Guo D L, Mohammad A. Large-scale pattern of biomass partitioning across China's grasslands. *Global Ecology and Biogeography*, 2010, 19(2): 268-77.
- [25] 王瑞杰, 覃志豪, 王桂英. 呼伦贝尔草原产草量及载畜平衡研究. *东北大学学报: 自然科学版*, 2011, 32(12): 1782-1785.
- [26] 林余, 张稳, 黄耀. 中国动物源 CH₄ 排放空间分布和时间变化研究. *环境科学*, 2011, 32(8): 2212-2220.
- [27] Wolf J, Asrar G R, West T O. Revised methane emissions factors and spatially distributed annual carbon fluxes for global livestock. *Carbon Balance and Management*, 2017, 12(1): 16.
- [28] Xue B, Wang L Z, Yan T. Methane emission inventories for enteric fermentation and manure management of yak, buffalo and dairy and beef cattle in China from 1988 to 2009. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, 195: 202-210.
- [29] 边俊艳. 我国牛的个体特征差异性及其对甲烷排放季节与空间变化影响分析[D]. 武汉: 湖北大学, 2014.
- [30] 谢高地, 甄霖, 鲁春霞, 肖玉, 陈操. 一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法. *自然资源学报*, 2008, 23(5): 911-919.
- [31] 潘冬荣, 闫浩文, 韩天虎, 孙斌, 姜佳昌, 柳小妮, 李霞, 王红霞. 基于当量因子法的甘肃省草原生态系统服务价值评估. *草业科学*, 2021, 38(9): 1860-1868.
- [32] 赵宗胜, 王兆平. 家畜群体变动规律的灰色预测分析. *石河子大学学报(自然科学版)*, 2001, 19(3): 234-237.
- [33] 李静, 李涛, 刘建明, 范天文, 李建伟, 杨光维. 新疆伊犁河谷天然牧草生产力及载畜能力变化分析. *中国饲料*, 2021(23): 87-92.
- [34] 张双丽. 新疆产草量遥感估算与牧草长势监测研究及 IDL 实现[D]. 西安: 长安大学, 2018.
- [35] 张凡凡, 杨开虎, 于磊, 鲁为华, 杨国林, 和海秀. 新疆沙尔套山主要草地类型可食牧草产量动态变化规律. *新疆农业科学*, 2018, 55(9): 1737-1746.
- [36] 中华人民共和国科学技术部国家遥感中心. 全球生态环境遥感监测 2021 年度报告. [2024-04-24]. <https://www.chinageoss.cn/geoarc/2021/index.html>.
- [37] 朱习雯, 吾其尔, 赵洁, 王英, 巴音查汗. 尉犁县草原监测和理论载畜量的测算报告. *当代畜牧*, 2021(2): 47-49.
- [38] 刘亚君, 黎松松, 王宏洋, 买买提·阿洪西克. 新疆哈密市 2015—2021 年草原植被动态监测效果分析. *现代畜牧科技*, 2022(12): 44-47.
- [39] 李建伟, 罗志娜, 张生楹, 范天文. 尼勒克县不同草地类型草原 5 年载畜量的变化及经济效益分析. *中国草食动物科学*, 2021, 41(3): 36-42.
- [40] 赵苇康, 井长青, 陈宸. 新疆天然草地时空变化及其对气候因子的响应. *中国农业科技导报*, 2023, 25(7): 197-206.
- [41] 蔡朝朝, 淮永建, 白涛, 董蛮. 基于 NDVI 的新疆草地覆盖变化特征. *应用基础与工程科学学报*, 2020, 28(6): 1369-1381.