

DOI: 10.11686/cyxb2024180

http://cyxb.magtech.com.cn

许雪梅, 姜佳昌, 牛欣, 等. 基于遥感反演的草畜平衡实施效果评估方法探讨——以山丹县为例. 草业学报, 2025, 34(4): 1-15.

XU Xue-mei, JIANG Jia-chang, NIU Xin, *et al.* Evaluation of forage-livestock balance implementation via remote sensing inversion: A case study in Shandan County, Gansu Province. *Acta Prataculturae Sinica*, 2025, 34(4): 1-15.

基于遥感反演的草畜平衡实施效果评估方法探讨 ——以山丹县为例

许雪梅¹, 姜佳昌², 牛欣^{1,3}, 周宏伟⁴, 韩天虎⁵, 曹晓明⁶, 梁春燕⁷, 李旭东¹, 牛得草^{1*}

(1. 兰州大学草地农业科技学院, 草种创新与草地农业生态系统全国重点实验室, 甘肃兰州 730020; 2. 甘肃省草原技术推广总站, 甘肃兰州 730046; 3. 兰州大学资源环境学院, 甘肃兰州 730000; 4. 山丹县草原工作站, 甘肃张掖 734199; 5. 甘肃省治沙研究所, 甘肃兰州 730071; 6. 中国林业科学研究院生态保护与修复研究所, 北京 100091; 7. 甘肃省兰草新生态科技有限公司, 甘肃兰州 730050)

摘要: 草畜平衡实施效果评估对于草地合理管理以及草地畜牧业可持续性发展至关重要。本研究利用遥感技术获取了植被特征数据, 并根据专家意见制定了草地植被指标基准值, 开展了草畜平衡实施效果评估, 且利用传统方法探讨了该方法的可靠性。另外, 本研究通过构建综合草畜平衡指数(CFBI)进行了村级尺度的草畜平衡实施效果综合评定。基于遥感反演的草畜平衡实施效果评估结果显示, 2022年山丹县部分草地存在超载情况, 超载和严重超载面积仅占总面积的1.09%, 各行政村草地之间的综合草畜平衡指数存在明显差异(-10.91~ -3.72)。基于遥感技术的草畜平衡实施效果评估方法可以为山丹县草地禁牧区与放牧区的动态调整提供科学依据。

关键词: 遥感反演; 草畜平衡; 草地利用现状; 综合草畜平衡指数

Evaluation of forage-livestock balance implementation via remote sensing inversion: A case study in Shandan County, Gansu Province

XU Xue-mei¹, JIANG Jia-chang², NIU Xin^{1,3}, ZHOU Hong-wei⁴, HAN Tian-hu⁵, CAO Xiao-ming⁶, LIANG Chun-yan⁷, LI Xu-dong¹, NIU De-cao^{1*}

1. State Key Laboratory of Herbage Improvement and Grassland Agro-ecosystems, College of Pastoral Agriculture Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730020, China; 2. Gansu Grassland Technical Extension Station, Lanzhou 730046, China; 3. College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 4. Grassland Workstation in Shandan County, Zhangye 734199, China; 5. Gansu Desert Control Research Institute, Lanzhou 730071, China; 6. Institute of Ecological Conversation and Restoration, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 7. Gansu Lancao New Ecological Technology Corporation, Lanzhou 730050, China

Abstract: Evaluating the effectiveness of forage-livestock balance is crucial for the rational management of grasslands and the sustainable development of grassland livestock. In this study, we utilized remote sensing technology to obtain data on vegetation characteristics and established baseline vegetation indicators based on expert opinions. The effectiveness of forage-livestock balance implementation was assessed, and the reliability of this strategy was explored using traditional methods. Additionally, we developed a comprehensive forage-livestock balance index

收稿日期: 2024-05-14; 改回日期: 2024-07-18

基金项目: 甘肃省林业和草原局甘肃省草原监测评价科技支撑项目(HT-GSZYTC-ZCJC-21009), 甘肃省林业和草原局甘肃省草原监测评价项目(GSZYTC-ZCJC-21010)和甘肃省林业和草原局科技计划项目(2021kj071)资助。

作者简介: 许雪梅(1999-), 女, 蒙古族, 内蒙古通辽人, 硕士。E-mail: 1467398812@qq.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: xiaocao0373@163.com

(CFBI) to evaluate effectiveness at the village scale. The results indicated that, based on remote sensing inversion, some grasslands in Shandan County, Gansu Province, were overgrazed in 2022, but the overgrazed area and severely overgrazed area accounted for only 1.09% of the total area. There were significant differences in the CFBI among the grasslands in various administrative villages (range, -10.91 to -3.72). The remote sensing-based method for assessing the effectiveness of forage-livestock balance provides scientific evidence for the dynamic adjustment of grazing and non-grazing zones in Shandan County.

Key words: remote sensing inversion; forage-livestock balance; the present situation of grassland utilization; comprehensive forage-livestock balance index

草地作为我国最大的陆地生态系统,不仅是重要的畜牧业生产基地,也是维系我国生态安全的重要屏障,草地生态系统畜牧业的可持续发展关键在于草畜平衡^[1]。草畜平衡是指草原使用者或承包经营者通过多种途径获取的可利用饲草总量与其饲养牲畜所需的饲草饲料量保持动态平衡,以维持草地生态系统的良性循环^[2-4],草畜平衡实施效果评估在草地保护和管理中具有重要意义。自2005年以来,严格落实草畜平衡管理制度是保证我国草地生产和生态协调发展的重要政策^[5-7]。草地管理部门通常以草地面积和产草量为基础,根据家畜日采食量,在适度放牧(或割草)利用并维护草地可持续生产的条件下,确定单位面积上可承养的家畜数目和时间(即理论载畜量),并通过实际载畜量评估草畜平衡(即传统方法)^[8-10]。然而,该方法是对一定区域内草地总产草量的静态描述,不能反映草地生产力的季节特征和空间特征,而且传统方法中一些重要指标的准确估算还尚未统一标准化^[11],例如草地总产草量的测量。

快速准确估算草地产草量是草地植被健康监测和评估草畜平衡状况的重要基础。相比于地面测量法,遥感监测法是当前获取草地植被状况最有效的方法^[12-14]。研究者根据研究区域的范围、气候和植被类型选择合适的植被指数及模型构建方法。例如,低密度植被覆盖区适合使用对植被较敏感的指数,以降低土壤背景值对植被指数的干扰;高密度植被覆盖区则需要考虑植被指数饱和情况^[15-17]。另外,相较于多因素回归模型和机器学习法,单因素回归分析法因其简单构建、易于理解和实现,且精度能满足实际需求,常被用于建立反演模型^[18-19]。现有的草畜平衡研究中,大尺度的研究通常利用中分辨率的MODIS产品归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)与地面植被调查数据建立关系,以构建反演模型^[20-22];而中小尺度的研究多采用高分辨率的Landsat TM/OLI/ETM或Sentinel-2系列影像^[23-26]获得理论载畜量,结合年末家畜存栏数评估一定时间和区域内草地总的草畜平衡状况^[27-28]。

截至目前,关于计算理论载畜量方法的研究较少,除传统方法外,一种是由陈全功^[29]提出的关键牧场理论,该方法利用传统的理论载畜量方法计算各季节中草地的家畜承载力,并将承载力最低的草地定义为关键场,从而确定整个草地放牧系统最大家畜承载力。然而,该理论仍基于传统方法且未改变其局限性,容易导致牧草利用率不足,造成非关键场的资源浪费。在此基础上,Liu等^[30]进一步优化了传统方法和基于关键场的理论载畜量计算,考虑了全年家畜数量变化及其家畜对饲草的季节性需求变化。其研究结果显示,不同牧场的草地利用存在不均衡现象,有的欠负荷,有的超负荷,而且仍需年终畜牧业生产数据才能了解整体草畜平衡状况,表明传统方法评估草畜平衡具有滞后性^[31],未能有效指导实际管理。另一种是2022年由张英俊等^[32]提出的通过评估草地被利用后的健康状况掌握草畜平衡实施效果的评估方法。该方法利用多种植被指标或单一指标(例如,剩余牧草现存量、植被覆盖度和高度),测定生长季末期或冬季草场返青一个月后的草地植被生长特征,以确定草地利用现状,但其局限性在于无法利用遥感技术在空间上显示草层高度和可食牧草比例。此外,该方法还可以结合生境及社会经济特征开展草地退化的成因分析。例如,草地景观特征(草地面积、草地类型和草地细碎化等)会影响放牧对草地的干扰程度,明确其干扰程度对草畜平衡制度因地制宜的落实有指导意义。然而,目前尚未有相关实践案例利用该方法评估草畜平衡实施效果并探究草地面积、草原类型、草地细碎化与草畜平衡之间的关系。

河西地区作为我国重要的生态安全屏障,其草地类型多样,是全省乃至全国重要的草地畜牧业生产基地之

一。草地牧草的可持续性供给和草畜平衡实施效果直接或间接影响着该区草地的健康和草地多功能性的可持续发挥。然而,由于长期不合理利用,导致该地区草地严重退化^[33]。同时,传统方法依赖产草量、家畜采食量及畜牧业生产等数据,其局限性在于统计数据滞后和失真,不能有效指导实际管理。因此,本研究以河西地区山丹县草地为典型研究区域,利用遥感技术结合草地被放牧利用后的植被状况进行调查评估,旨在空间尺度上准确反映山丹县草地草畜平衡实施效果,为草地合理利用以及草畜平衡实施效果评估提供科学方法与理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

山丹县位于甘肃省河西走廊中段,地理位置 $100^{\circ}41' - 101^{\circ}42' E$, $37^{\circ}50' - 39^{\circ}03' N$,海拔1549~4444 m,大陆性半干旱气候,太阳辐射强、日照时数长、昼夜温差大。山丹县草地面积18.92万 hm^2 ,占全县国土总面积的35%,草地分为高寒草甸类、山地草甸类、温性草原类、温性荒漠草原类、温性草原化荒漠类、温性荒漠类6个草地类型(图1)。2022年山丹县年平均气温为 $8.5^{\circ}C$,年降水量为187.7 mm,在牧草生长季节全县大部分草地气温较常年同期偏高,降水量较常年同期偏多,全县草地植被总体长势略好于上年。山丹县下设110个行政村,其中98个行政村分布有草地,各村草地面积差异大,本研究主要分析草地面积大于 4 km^2 的行政村,共计72个。

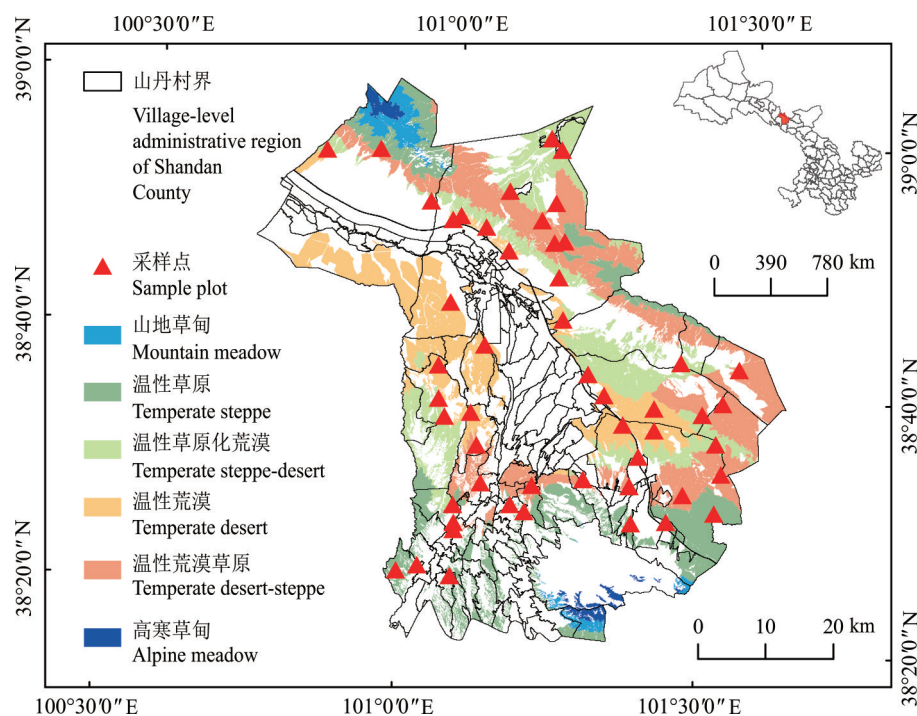


图1 研究区位置、草地类型分布以及采样点

Fig. 1 Location of study area, distribution of grassland types, and sampling points

基于自然资源部标准地图服务网站甘S(2023)10号和甘S(2023)322号标准地图制作,底图边界无修改。Based on the standard map service website Gan S(2023) No.10 and Gan S(2023) No.322 of the Ministry of Natural Resources, the boundary of the base map is not modified.

1.2 数据来源与处理

1.2.1 地面监测数据 根据草地类型分布、代表性和可操作的原则,2022年9月在山丹县草地随机设置了72个样点(图1),于牧草停止生长前一个月开展野外调查。在以灌木及高大草本植物为主的样地,每个样地随机设置1个 $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ 的灌木及高大草本植物样方以及3个 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 草本小样方,草本小样方在大样方内按对角线设置;以草本为主的样地,每个样地随机设置3个 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 草本样方,记录信息包括样方经纬度、剩余牧草现存重(residual biomass, RB)和植被盖度(fractional vegetation coverage, FVC)等。

1.2.2 遥感数据来源与处理 本研究选用的 Sentinel-2 数据归一化植被指数 (NDVI)、增强型植被指数 (enhanced vegetation index, EVI) 数据来自 Google Earth Engine (<https://earthengine.google.com/>), 空间分辨率为 10 m, 共 3 景。选取的影像时间节点涵盖 2022 年 9 月 17 日—2022 年 9 月 24 日, 根据地面采样日期和研究区范围, 利用 ArcGIS 10.8 软件对数据进行裁剪和融合, 并提取与地面采样点对应的 NDVI、EVI 值。

1.2.3 景观指数数据 借助 ArcGIS 10.8 的转换工具将草地资源分布图栅格化, 在 Fragstats 4.2 中计算山丹县各村草地资源的景观指数。

1.2.4 畜牧业生产数据 来源文献[34]中张掖市山丹县牲畜年末存栏数据, 包括山羊、绵羊、牛和马等草食性牲畜。

1.3 研究方法

1.3.1 模型建立及精度验证 从 72 个野外调查数据中随机选取 52 个样点的植被盖度 (FVC) 和剩余牧草现存量 (RB, $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 研究中所提剩余牧草现存量均为风干重) 数据分别作为因变量, 基于 Sentinel-2 数据的 NDVI 和 EVI 分别作为自变量, 建立回归模型, 包括线性、幂函数、指数函数和对数函数。为了比较不同模型的反演效果, 将 72 个地面调查数据中剩余的 20 个样点数据用作模型精度验证。通过计算决定系数 (determination coefficient, R^2)、均方根误差 (root mean square error, RMSE) 和平均绝对误差 (mean absolute error, MAE) 进行精度验证, R^2 的值越接近于 1, 表示模型的精度越高; RMSE、MAE 的值越小, 表示模型的预测结果越好^[35-36]。

1.3.2 传统方法的草畜平衡计算 根据遥感估算的山丹县草地剩余牧草现存量反演结果和农业行业标准《天然草地合理载畜量的计算》(NY/T 635-2015)^[8] 估算不同草地类型以及各行政村的理论载畜量以及单位面积理论载畜量, 计算公式如下所示:

$$SU_i = \sum_{i=1}^6 \frac{RB_i \times A_i \times k_{i1} \times k_{i2}}{1.8 \times D} \quad (1)$$

式中: SU_i 表示第 i 类草地的理论载畜量, 羊单位; RB_i 为第 i 类草地的地上生物量, $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; k_{i1} 、 k_{i2} 分别为第 i 类草地的牧草再生率、可食牧草放牧利用率, %; 1.8 为一只标准成年绵羊单日采食干草量, $\text{kg}\cdot\text{羊单位}^{-1}$; D 为草地放牧利用的天数, 按 365 计算; i 表示草地类型序号; A_i 为第 i 类草地的面积, hm^2 。

根据理论载畜量结果, 结合实际载畜量数据, 计算得到 2022 年超载率 (overgrazing rate, OR)。计算方法如下:

$$OR = (R - SU_i) / SU_i \quad (2)$$

式中: OR 为超载率, %; R 为山丹县实际载畜量, 羊单位, 根据上述标准, 牛、马、山羊、绵羊折算系数分别为 6、6、0.8、1; SU_i 为理论载畜量, 羊单位。 $OR \leq 5\%$ 时, 未超载; $5\% < OR \leq 15\%$ 时, 基本平衡; $15\% < OR \leq 50\%$ 时, 超载; $OR > 50\%$ 时, 严重超载。

1.3.3 基于遥感反演的草畜平衡实施效果评估 1) 草畜平衡分析 基于草地植物学规律及健康特征, 组织专家讨论并确定山丹县不同草地类型合理放牧利用后的生长季草畜平衡植被指标基准值及其权重, 和各类型草地的抗干扰能力 (表 1), 并制定草畜平衡评估分级标准, 划分为未超载、基本平衡、超载和严重超载 4 个等级 (表 2)。基于不同草地类型生长季草畜平衡植被指标基准值, 将实际调查的植被指标与基准值对比, 计算草地植被盖度和剩余牧草现存量相对百分数的减少率。因单项指标不能确定草畜平衡实施效果, 利用公式 4 获取综合分值 (comprehensive index, CI)^[32]。式中: 植被盖度相对百分数的减少率 (T_1) 的权重和剩余牧草现存量相对百分数的减少率 (T_2) 的权重各 50%, 并根据计算得到的分值评估草畜平衡实施效果, 计算公式如下, 具体植被指标加权后分值与草畜平衡状况的对应关系详见表 2。

$$CI = \sum_{i=1}^2 (T_i / T_{\max} \times \lambda_i) \quad (3)$$

式中: CI 表示综合分值, T_i 表示该草地类型相应指标相对百分数的减少率, T_{\max} 表示最高阈值, λ_i 表示权重。

表 1 不同草地类型生长季植被指标基准值

Table 1 Reference values of vegetation indicators during the growing season for different types of grassland

草地类型 Grassland type	植被盖度 Fractional vegetation coverage (FVC, %)	植被盖度相对百分数的减少率 Rate of decrease in FVC as a percentage (T_1)	剩余牧草现存量 Residual biomass (RB, $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	剩余牧草现存量相对百分数的减少率 Rate of decrease in RB as a percentage (T_2)	抗干扰能力 Anti-interference ability (A)
高寒草甸类 Alpine meadow	50	—	200	—	6
山地草甸类 Mountain meadow	50	—	270	—	6
温性草原类 Temperate steppe	45	—	290	—	4
温性草原化荒漠类 Temperate steppe desert	30	—	250	—	3
温性荒漠类 Temperate desert	10	—	230	—	2
温性荒漠草原类 Temperate desert steppe	35	—	200	—	1
最高阈值 Maximum threshold (T_{\max})	—	30	—	50	—

2)综合草畜平衡指数 为了详细反映行政或自然区域内草畜平衡状况,构建了草畜平衡指数和综合草畜平衡指数两个指标。草畜平衡指数 (forage-livestock balance index, FBI)是指针对不同程度的草畜平衡综合分值(CI)进行细化和排序后赋的值,不同CI与其对应的草畜平衡指数见表3。综合草畜平衡指数 (comprehensive forage-livestock balance index, CFBI)是指将某一区域内不同草畜平衡指数与其所占草地面积的加权平均值,是反映一定区域内草畜平衡状况的综合指标,从而实现了对山丹县各行政村草畜平衡状况的综合评价。CFBI结果越低,表明草畜平衡状况越好,CFBI越高表明越差。计算公式如下:

$$CFBI = \sum_{i=1}^{22} (FBI_i \times s_i/S) \tag{4}$$

式中:CFBI表示综合草畜平衡指数;FBI_i表示该村第*i*个分值区间的草畜平衡指数;*s_i*表示该村第*i*个分值区间的面积, hm^2 ;S表示该村总草地面积, hm^2 ; *i*表示草地类型序号。

表 3 综合分值 CI 与草畜平衡指数

Table 3 CI and forage-livestock balance index

序号 Number	综合分值 CI	草畜平衡指数 FBI	序号 Number	综合分值 CI	草畜平衡指数 FBI
1	$CI \leq -250$	-11	12	$0 < CI \leq 25$	0
2	$-250 < CI \leq -225$	-10	13	$25 < CI \leq 50$	1
3	$-225 < CI \leq -200$	-9	14	$50 < CI \leq 75$	2
4	$-200 < CI \leq -175$	-8	15	$75 < CI \leq 100$	3
5	$-175 < CI \leq -150$	-7	16	$100 < CI \leq 125$	4
6	$-150 < CI \leq -125$	-6	17	$125 < CI \leq 150$	5
7	$-125 < CI \leq -100$	-5	18	$150 < CI \leq 175$	6
8	$-100 < CI \leq -75$	-4	19	$175 < CI \leq 200$	7
9	$-75 < CI \leq -50$	-3	20	$200 < CI \leq 225$	8
10	$-50 < CI \leq -25$	-2	21	$225 < CI \leq 250$	9
11	$-25 < CI \leq 0$	-1	22	$CI > 250$	10

FBI: Forage-livestock balance index; 下同 The same below.

表 2 综合分值与草畜平衡状况分级

Table 2 Comprehensive index and forage-livestock balance classification

分级 Grade	综合分值 CI
未超载 Non-overgrazed	$CI \leq 25$
基本平衡 Balance	$25 < CI \leq 50$
超载 Overgrazed	$50 < CI \leq 75$
严重超载 Severe overgrazed	$CI > 75$

CI: 综合分值 Comprehensive index; 下同 The same below.

1.3.4 草地景观特征 分别基于不同草地类型的气候特征和空间异质性,计算综合抗干扰指数和草地细碎化综合指数,反映山丹县不同行政村的草地景观特征。

根据草地类型的植被生长和地带性特征^[37],对各类型抗干扰能力进行赋值。然后,根据各村所有的草地类型抗干扰能力(表1)与其面积占该村草地总面积的权重之积,计算各村综合抗干扰指数(comprehensive anti-interference index, CAI),计算公式如下:

$$CAI = \sum_{i=1}^6 (A_i \times s_i / S) \quad (5)$$

式中:CAI表示该村草原类型综合抗干扰指数; A_i 表示*i*草地类型的抗干扰能力; s_i 表示*i*草地类型的面积, hm^2 ; S 表示该村总草原面积, hm^2 ; i 表示草地类型序号。

草地细碎化表现在草地空间分布分散、地块面积小而多、形状不规则等,还表现在划区轮牧建围栏导致的资源分配不合理,例如水源、牧道等都会导致局部草畜不平衡^[38-40]。根据前人对耕地细碎化的研究方法,本研究采用景观指数法选取4个指标^[41-43]:斑块数(number of patches, NP)、平均斑块面积(mean patches size, MPS)、面积加权平均形状指数(area-weighted mean shape index, AWMSI)和聚集度(aggregation index, AI)作为草地细碎化的评价指标,用层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)确定各评价指标的综合权重(SPSSPRO 2022),采用多因素综合评价法计算草地细碎化综合指数(comprehensive index of grassland fragmentation, CIGF)^[44]。计算公式如下:

$$CIGF = \sum_{i=1}^4 k_i \times w_i \quad (6)$$

式中:CIGF表示草地细碎化综合指数; k_i 表示第*i*个景观指数; w_i 表示第*i*个评价指标的权重值; i 表示草地类型序号。

1.4 数据处理

采用Excel 2019软件进行数据整理和计算分析,使用SPSSPRO 2022进行层次分析;采用ArcGIS 10.8进行影像数据分析;利用Excel 2019、R Studio 2022和ArcGIS 10.8进行绘图。

2 结果与分析

2.1 草地植被盖度、剩余牧草现存量模型构建及精度评价

基于Sentinel-2数据NDVI、EVI指数分别构建了山丹县草地植被盖度和剩余牧草现存量反演模型(表4)。结果显示,基于NDVI、EVI构建的8个RB反演模型中,基于NDVI的乘幂模型($y=13132x^{1.6042}$)较其他7个模型的拟合精度高, $R^2=0.8194$ 、 $\text{RMSE}=318.09 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $\text{MAE}=222.31 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, $P<0.001$;8个FVC反演模型中,基于NDVI的对数模型($y=37.601 \ln x + 142.08$)较其他7个模型的拟合精度高, $R^2=0.7260$ 、 $\text{RMSE}=15.06\%$ 、 $\text{MAE}=12.82\%$, $P<0.001$ 。表明基于不同植被指数建立的模型中,NDVI的结果优于EVI。基于Sentinel-2 NDVI的山丹县草地植被盖度及剩余牧草现存量空间分布见图2,其剩余牧草现存量较高地区主要出现在山丹县东南部的山区(图2b)。

2.2 基于遥感反演的草畜平衡实施效果及空间分布

2.2.1 草畜平衡实施效果 通过模型获取的草地植被指标与植被指标基准值比较得到了山丹县草畜平衡状况。研究发现,山丹县北部及东南地区的CI较低(图3a),不同草畜平衡等级的分布较均匀,超载、严重超载状况主要出现在山丹县县城以西、西北的山区以及县城北部(图3b)。山丹县草地不同草畜平衡等级对应的草地面积占比以未超载为主,未超载面积占总面积的98.12%,其超载和严重超载仅占1.09%(图4)。根据文献[34],山丹县年终家畜实际存栏为1168340羊单位,对比山丹县草地2022年理论载畜量(60173羊单位),利用传统方法分析,发现2022年山丹县草地存在严重超载(OR=1842%)。

2.2.2 综合草畜平衡指数与分布特征 基于山丹县草地不同程度的草畜平衡状况综合分值进行细化和排序赋值获得了山丹县草地草畜平衡指数空间分布及面积占比特征(图5)。结果表明,山丹县不同草畜平衡指数的

表 4 Sentinel-2 获取的草地植被盖度和剩余牧草现存量回归分析与精度评价

Table 4 Regression analysis and accuracy evaluation of grassland FVC and RB retrieved from Sentinel-2

植被指数 Vegetation index	植被指标 Vegetation indicators	模型类型 Model type	模型 Model	R^2	RMSE	MAE	P
NDVI	RB ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	乘幂 Power	$y=13132x^{1.6042}$	0.8194	318.09	222.31	***
		线性 Linear	$y=9600.9x-659.99$	0.8074	348.23	288.64	***
		指数 Exponential	$y=141.02e^{8.6068x}$	0.7571	398.22	251.93	***
		对数 Logarithmic	$y=1699.3\ln x+4221.7$	0.7229	480.50	433.19	***
	FVC (%)	对数 Logarithmic	$y=37.601\ln x+142.08$	0.7260	15.06	12.82	***
		乘幂 Power	$y=189.55x^{0.554}$	0.7007	17.94	15.62	***
		线性 Linear	$y=188.9x+37.41$	0.6606	18.08	16.06	***
		指数 Exponential	$y=40.882e^{2.7352x}$	0.5849	21.30	19.18	***
EVI	RB ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	指数 Exponential	$y=144.26e^{5.4707x}$	0.7789	458.31	290.33	***
		乘幂 Power	$y=3987.1x^{1.3179}$	0.6913	539.38	308.35	***
		线性 Linear	$y=6304.2x-697.44$	0.6551	398.51	339.40	***
		对数 Logarithmic	$y=1406.1\ln x+2951.1$	0.4986	503.42	398.30	***
	FVC (%)	对数 Logarithmic	$y=37.859\ln x+126.64$	0.5921	17.29	14.01	***
		乘幂 Power	$y=153.12x^{0.5672}$	0.5811	19.79	16.58	***
		线性 Linear	$y=132.76x+36.095$	0.5491	19.11	16.64	***
		指数 Exponential	$y=39.971e^{1.9341x}$	0.4803	22.25	19.73	***

***: $P < 0.001$; NDVI: 归一化植被指数 Normalized difference vegetation index; EVI: 增强型植被指数 Enhanced vegetation index; RB: 剩余牧草现存量 Residual biomass; FVC: 植被盖度 Fractional vegetation coverage; R^2 : 决定系数 Determination coefficient; RMSE: 均方根误差 Root mean square error; MAE: 平均绝对误差 Mean absolute error. 下同 The same below.

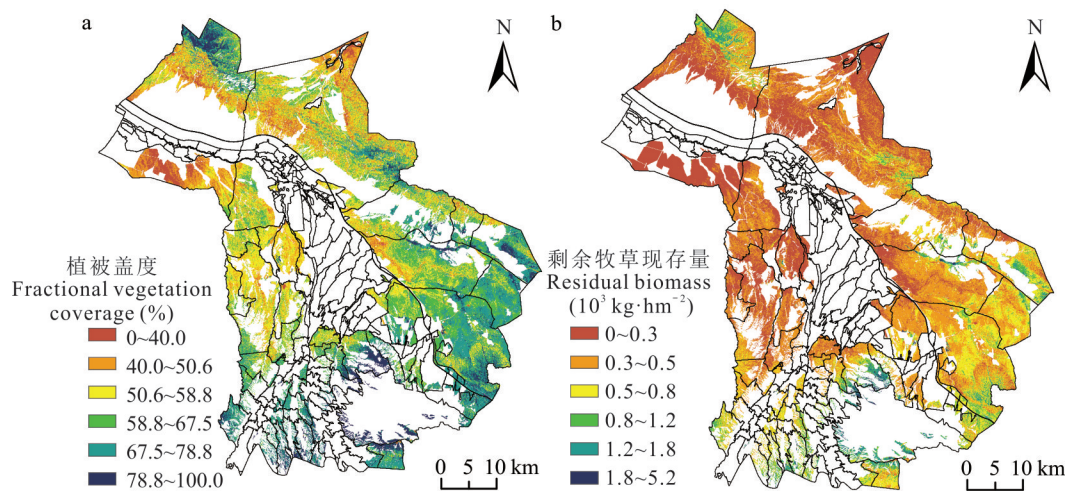


图 2 山丹县草地植被盖度 (a) 与剩余牧草现存量 (b) 空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of fractional vegetation coverage (a) and residual biomass (b) in Shandan County grasslands

基于自然资源部标准地图服务网站甘 S(2023)322 号标准地图制作, 底图边界无修改。Based on the standard map service website Gan S(2023) No.322 of the Ministry of Natural Resources, the boundary of the base map is not modified.

分布与草畜平衡等级状况的空间分布更为精细, 其草畜平衡指数较高的区域主要分布于县城以西、西北的山区以及县城北部(图 5a); 不同草畜平衡指数草地面积占比呈偏态分布, 其中草畜平衡指数为 -11 的草地面积占比为 39.76%, 草畜平衡指数为 5~10 的草地面积占比均小于 0.10%(图 5b), 可知山丹县草地存在严重不均衡利用的情况。

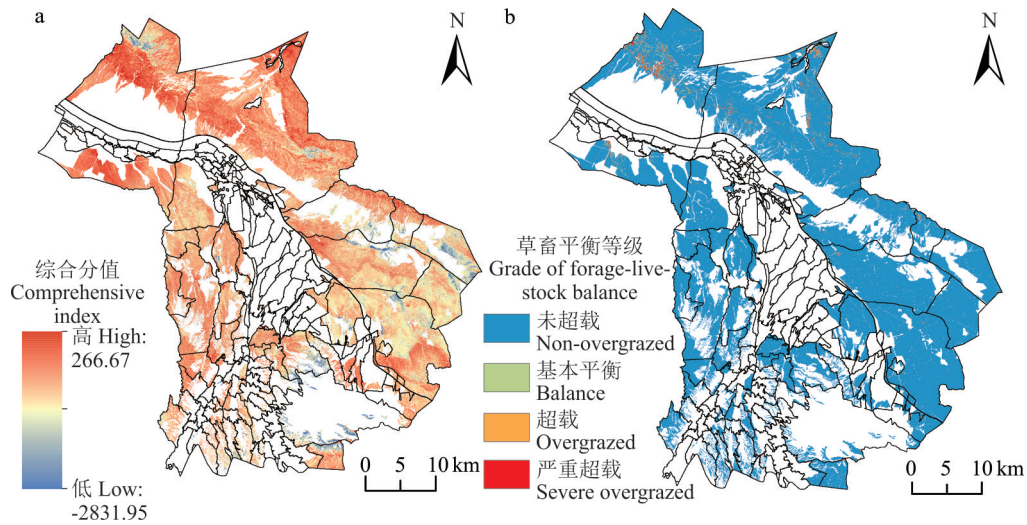


图3 山丹县草畜平衡综合分值(a)与草畜平衡等级(b)空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of comprehensive index (a) and forage-livestock balance grade (b) in Shandan County

基于自然资源部标准地图服务网站甘S(2023)322号标准地图制作,底图边界无修改。Based on the standard map service website Gan S (2023) No.322 of the Ministry of Natural Resources, the boundary of the base map is not modified.

根据草畜平衡等级提取相应草地面积以及各村草地面积得到山丹县各行政村综合草畜平衡指数(表5)。山丹县72个行政村中,18个行政村的综合草畜平衡指数 ≤ -10.00 (为 $-10.91 \sim -10.00$),38个行政村综合草畜平衡指数为 $-9.96 \sim -8.00$,10个行政村的综合草畜平衡指数为 $-8.00 \sim -6.00$,剩余6个行政村综合草畜平衡指数为 $-5.66 \sim -3.72$ 。尽管各村综合草畜平衡指数较为均衡,但与CI空间分布显示的局部超载现象并不矛盾(表5)。不同草地类型的综合草畜平衡指数统计结果显示(图6),山丹县草地中高寒草甸类的面积以及综合草畜平衡指数最低,分别为 0.30 万 hm^2 、 -9.96 ,温性荒漠草原面积最大(4.95 万 hm^2),综合草畜平衡指数为 -8.25 ,山地草甸类的综合草畜平衡指数最高,为 -6.93 (图6)。

2.3 综合草畜平衡指数与草地景观特征的关系

参与分析的山丹县各行政村所占草地面积差距较大,其最大值为 $3.50 \times 10^4 \text{ hm}^2$,但最小值仅为 4.00 hm^2 (表6)。根据层次分析法分析结果,各村草地细碎化指标中NP和MPS的权重均为 39.08% ,AWMSI的权重为 15.08% ,AI指标的权重为 6.74% 。统计结果显示,各村的草地细碎化综合指数的差距也较大,其中最大值为 1338.90 、最小值为 6.70 (表6)。综合草畜平衡指数与草地面积、草地类型和草地细碎化均无显著相关性(图7)。

3 讨论

植被盖度反映草地生态系统的健康状况,剩余牧草现存量则反映草地可承载的家畜数量,两者通常也是反映草地退化的植被指标^[9,30]。因此,本研究选择监测牧草停止生长前一个月的植被盖度和剩余牧草现存量,利用牧草生长特性反映草地生态系统的健康状况。通过遥感反演的实际草地植被指标与草地合理放牧利用参照体系相

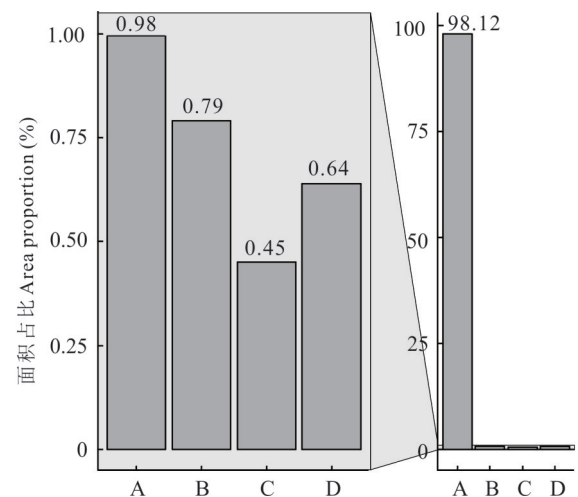


图4 山丹县草畜平衡等级面积占比

Fig. 4 Area proportion of forage-livestock balance grades in Shandan County

A: 未超载 Non-overgrazed; B: 基本平衡 Balance; C: 超载 Overgrazed; D: 严重超载 Severe overgrazed.

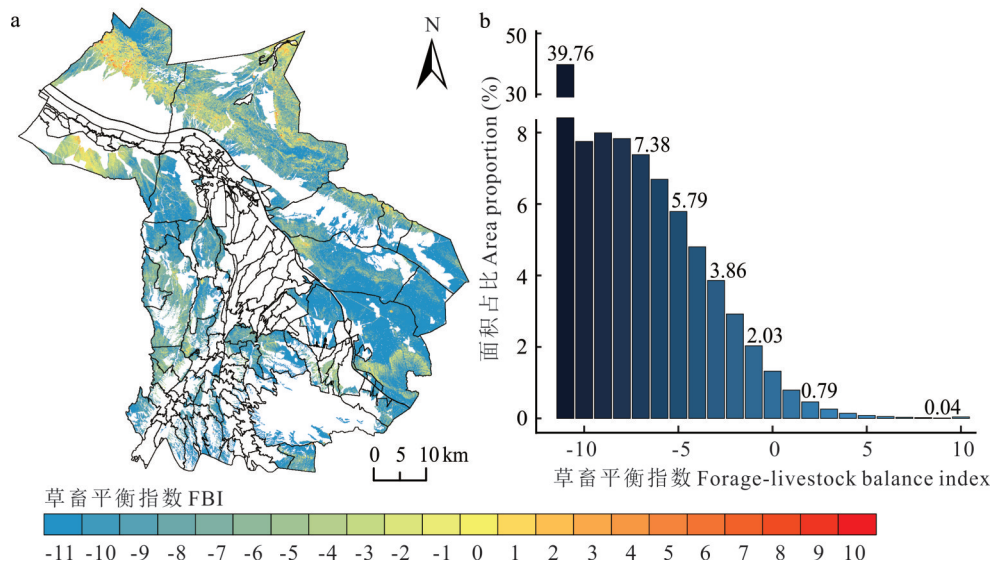


图 5 山丹县草畜平衡指数空间分布(a)与面积占比(b)

Fig. 5 Spatial distribution of forage-livestock index (a) and area proportion (b) in Shandan County

基于自然资源部标准地图服务网站甘S(2023)322号标准地图制作,底图边界无修改。Based on the standard map service website Gan S (2023) No.322 of the Ministry of Natural Resources, the boundary of the base map is not modified.

表 5 山丹县各行政村综合草畜平衡指数

Table 5 CFBI for each village in Shandan County

村 Village	CFBI
朱湾村 Zhuwan village	-10.91
中河村 Zhonghe village	-10.82
上河村 Shanghe village	-10.76
老军乡国有土地(羊种场)State owned land in Laojun town (Yangzhong farm)	-10.56
老军乡国有土地(羊虎口)State owned land in Laojun town (Yanghukou)	-10.47
老军乡国有土地(老军、丰城堡滩)State owned land in Laojun town (Laojun, Fengchengbaotan)	-10.45
马营村 Maying village	-10.40
新墩村 Xindun village	-10.39
硃口村 Xiakou village	-10.38
河湾村 Hewan village	-10.28
新泉村 Xinquan village	-10.27
大黄山林场 Dahuangshan forest farm	-10.25
前山村 Qianshan village	-10.17
东山村 Dongshan village	-10.15
东沟村 Donggou village	-10.12
夹河村 Jiahe village	-10.05
陈户镇国有土地(大沙河及黑山子)State owned land in Chenhu town (Dashahe and Heishanzi)	-10.01
老军乡国有土地(青羊口农场)State owned land in Laojun town (Qingyangkou farm)	-10.00
西沟村 Xigou village	-9.96
楼庄村 Louzhuang village	-9.87
羊虎沟村 Yanghugou village	-9.86
郭泉村 Guoquan village	-9.84
城南村 Chengnan village	-9.82
窑坡村 Yaopo village	-9.81
清泉镇国有土地(瞭高山)State owned land in Qingquan town (Liaogao mountains)	-9.54
下河西村 Xiahexi village	-9.52

续表 Continued Table

村 Village	CFBI
上山湾村 Shangshanwan village	-9.49
老军乡国有土地(花草滩、东水泉)State owned land in Laojun town (Huacaotan and Dongshuiquan)	-9.46
沙沟村 Shagou village	-9.43
刘庄村 Liuzhuang village	-9.37
陈户镇国有土地(北山)State owned land in Chenhu town (Beishan)	-9.36
汪庄村 Wangzhuang village	-9.35
下河村 Xiahe village	-9.26
北滩村 Beitan village	-9.18
上寨村 Shangzhai village	-9.15
清泉镇国有土地(中牧山丹马场)State owned land in Qingquan town (Zhongmu Shandan Racecourse)	-9.09
陈户镇国有土地(陈户公滩)State owned land in Chenhu town (Chenhugongtan)	-9.08
柳荫村 Liuyin village	-9.03
杨坝村 Yangba village	-8.99
东关村 Dongguan village	-8.96
山湾村 Shanwan village	-8.96
侯山村 Houshan village	-8.87
芦堡村 Lubao village	-8.79
双湖村 Shuanghu village	-8.78
大马营镇国有土地 State owned land in Damaying town	-8.78
四坝村 Siba village	-8.76
位奇镇国有土地(新开)State owned land in Weiqi town (Xinkai)	-8.73
杜庄村 Duzhuang village	-8.66
新庄村 Xinzhuang village	-8.64
高庙村 Gaomiao village	-8.56
老军乡国有土地(焉支山)State owned land in Laojun town (Yanzhi Mountain)	-8.48
位奇村 Weiqi village	-8.47
下寨村 Xiazhai village	-8.46
潘庄村 Panzhuang village	-8.28
位奇镇国有土地(北山)State owned land in Weiqi town (Beishan)	-8.26
巴寨村 Bazhai village	-8.15
老军乡国有土地(良种场)State owned land in Laojun town (Liangzhong farm)	-7.84
周庄村 Zhouzhuang village	-7.78
新开村 Xinkai village	-7.68
吴宁村 Wuning village	-7.67
二十里堡村 Ershi village	-7.14
下西山村 Xiaxishan village	-7.01
花寨村 Huazhai village	-6.95
高湖村 Gaohu village	-6.93
上西山村 Shangxishan village	-6.66
清泉镇国有土地(北山)State owned land in Qingquan town (Beishan)	-6.51
十里堡村 Shilibao village	-5.66
东乐镇国有土地(北滩)State owned land in Dongle town (Beitan)	-5.44
李泉村 Liquan village	-5.43
祝庄村 Zhuzhuang village	-5.24
东乐镇国有土地(山羊堡滩)State owned land in Dongle town (Shanyangbaotan)	-5.24
红寺湖村 Hongsihu village	-3.72

CFBI: 综合草畜平衡指数 Comprehensive forage-livestock balance index.

比较,评估了山丹县草地草畜平衡实施效果,并且利用传统的草畜平衡研究方法进行了验证。研究结果显示,基于遥感反演的山丹县草地未超载面积占总面积的 98.12%,严重超载仅占总面积的 0.64%(图 4),超载状况主要分布于山丹县县城以西、西北的山区以及县城北部(图 3a)。这与传统方法计算的严重超载结果(OR=1842%)相比存在明显差异。可能是由于山丹县年末家畜存栏数包含舍饲家畜数量以及未考虑补饲情况,另外剩余牧草现存量由于家畜采食不能反映实际的产草量,导致两种计算结果存在差异。

不同草畜平衡指数的空间分布更精细地反映了山丹县草畜平衡状况。村级尺度的综合草畜平衡指数(CFBI)结果表明,山丹县各行政村草畜平衡实施效果良好,山丹县各行政村之间存在明显差异

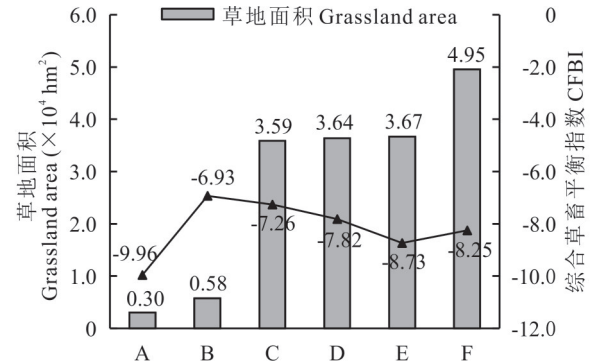


图 6 山丹县不同草地类型面积及综合草畜平衡指数

Fig. 6 Area and CFBI of different grassland types in Shandan County

A: 高寒草甸 Alpine meadow; B: 山地草甸 Mountain meadow; C: 温性草原 Temperate steppe; D: 温性草原化荒漠 Temperate steppe desert; E: 温性荒漠 Temperate desert; F: 温性荒漠草原 Temperate desert steppe.

表 6 各项指标描述

Table 6 Description of each indicator

项目 Project	最大值 Maximum value	最小值 Minimum value	权重 Weight (%)
草地面积 Grassland area (×10 ⁴ hm ²)	3.50	0.0004	—
综合抗干扰指数 Comprehensive anti-interference index	5.57	1.00	—
斑块数量 Number of patches	205.00	1.00	39.08
平均斑块面积 Mean patch size (hm ²)	3401.37	1.47	39.08
面积加权平均形状指数 Area-weighted mean shape index	15.37	1.60	15.08
聚集度 Aggregation index	98.81	67.18	6.74
草地细碎化综合指数 Comprehensive index of grassland fragmentation	1338.90	6.70	—

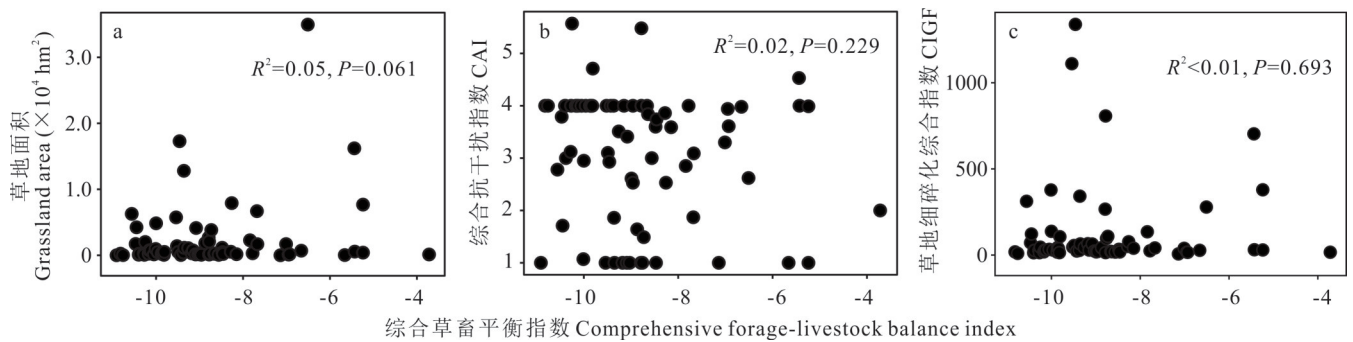


图 7 各行政村的综合草畜平衡指数与草地面积、综合抗干扰指数和草地细碎化综合指数间的关系

Fig. 7 The relationship between comprehensive forage-livestock balance index of each village and grassland area, CAI, CIGF

CAI: 综合抗干扰指数 Comprehensive anti-interference index; CIGF: 草地细碎化综合指数 Comprehensive index of grassland fragmentation.

(-10.91~-3.72),可能由于利用不均衡或秸秆补饲缓解了部分天然草地的载畜压力。虽然以上两种方法在计算过程中各有缺点,但是基于遥感技术的草畜平衡实施效果评估方法更有利于管理者实现草畜平衡实施效果的动态监测并应用于实际指导。基于该方法计算的草畜平衡结果与草地景观特征的相关性分析结果表明,综合草畜平衡指数与草地面积、草地类型和草地细碎化无显著相关性。该结果与褚力其等^[40]、特力格尔^[45]的研究结果不

一致,原因可能是,虽然各行政村的草地类型组成、面积与牧草产量不等造成的差异较大,但是各行政村对草地保护意识较强。总而言之,基于遥感反演的草畜平衡实施效果评估是可行的。同时,基于该方法的评估结果可以用于不同行政区域草地草畜平衡实施效果进行排序,为禁牧区和草畜平衡区的调整以及优化草原保护补助奖励政策的落实提供依据。

4 结论与展望

本研究与传统方法相比,从草地被放牧利用后的植被健康角度出发,结合遥感反演的实际草地植被特征(FVC、RB)与植被基准值的差异,可以更加真实地反映放牧草地的草畜平衡实施效果,可以有效避免畜牧业生产数据的时效和真实性对草畜平衡评估结果产生的影响。本研究结果有助于草地管理部门动态监测草地健康状况,及时调整禁牧、休牧等放牧管理措施以及轮牧区域的划分,避免局部过度利用对草地造成不可逆的损伤。另外,在今后的研究中,可以考虑利用机器学习法估测草地植被特征以继续提高模型精度,准确测量草地地上生物量的时空格局分布,为草畜平衡实施效果的动态监测提供理论依据。此外,受村级尺度畜牧业生产数据的可获取性限制,本研究未能对山丹县村级尺度的草畜平衡实施效果评估结果进行可靠性验证。

参考文献 References:

- [1] Hu Z M, Zhao Z, Zhang Y, *et al.* Does ‘Forage-Livestock Balance’ policy impact ecological efficiency of grasslands in China? *Journal of Cleaner Production*, 2018, 207: 343–349.
- [2] Zhang C, Yan H M, Yao X J. Dynamic assessment of grass-livestock balance in Gannan. *Journal of Natural Resources*, 2022, 37(7): 1903–1917.
张聪, 闫慧敏, 姚晓军. 甘南地区草畜平衡动态评估. *自然资源学报*, 2022, 37(7): 1903–1917.
- [3] Xu B, Yang X C, Jin Y X, *et al.* Monitoring and evaluation of grassland-livestock balance in pastoral and semi-pastoral counties of China. *Geographical Research*, 2012, 31(11): 1998–2006.
徐斌, 杨秀春, 金云翔, 等. 中国草原牧区和半牧区草畜平衡状况监测与评价. *地理研究*, 2012, 31(11): 1998–2006.
- [4] Liu A J, Yang Y, Bo Y C, *et al.* Evolution of forage-livestock balance management model and progress of monitoring technology in China. *Chinese Journal of Grassland*, 2023, 45(12): 1–10.
刘爱军, 杨勇, 柏延臣, 等. 我国草畜平衡管理模式演变与监测技术进展. *中国草地学报*, 2023, 45(12): 1–10.
- [5] Li W J, Jiu C L, Tan Z H, *et al.* Natural grassland productivity and the livestock-feeds balance in Qinghai Province. *Resources Science*, 2012, 34(2): 367–372.
李文娟, 九次力, 谭忠厚, 等. 青海省草地生产力及草畜平衡状况研究. *资源科学*, 2012, 34(2): 367–372.
- [6] Liu X Y, Mu Y T. Research progress in the ecosystem services function and value of grasslands. *Acta Prataculturae Sinica*, 2012, 21(6): 286–295.
刘兴元, 牟月亭. 草地生态系统服务功能及其价值评估研究进展. *草业学报*, 2012, 21(6): 286–295.
- [7] Zong X, Zhang Q L. Differentiated compensation for grass-livestock balance: Case of Ruo ergai-Gannan Yellow River water conservation area. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2022, 36(9): 88–97.
宗鑫, 张钦鲁. 差异化的草畜平衡补偿研究—以若尔盖甘南黄河水源涵养区为例. *干旱区资源与环境*, 2022, 36(9): 88–97.
- [8] Su D X, Yang Z, Yun X J. Calculation of reasonable stocking capacity of natural grassland, NY/T 635-2015. Beijing: Ministry of Agriculture of the People’s Republic of China, 2015.
苏大学, 杨智, 俞旭疆. 天然草地合理载畜量的计算, NY/T 635-2015. 北京: 中华人民共和国农业部, 2015.
- [9] Huang L, Ning J, Zhu P, *et al.* The conservation patterns of grassland ecosystem in response to the forage-livestock balance in North China. *Journal of Geographical Sciences*, 2021, 31(4): 518–534.
- [10] Mo X G, Liu W, Meng C C, *et al.* Variations of forage yield and forage-livestock balance in grasslands over the Tibetan Plateau, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(7): 2415–2425.
莫兴国, 刘文, 孟铖铖, 等. 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.
- [11] Xu M Y. A review of grassland carrying capacity: perspective and dilemma for research in China on “forage-livestock balance”. *Acta Prataculturae Sinica*, 2014, 23(5): 321–329.
徐敏云. 草地载畜量研究进展: 中国草畜平衡研究困境与展望. *草业学报*, 2014, 23(5): 321–329.

- [12] Cao Y N, Wu J S, Zhang X Z, *et al.* Comparison of methods for evaluating the forage-livestock balance of alpine grasslands on the Northern Tibetan Plateau. *Journal of Resources and Ecology*, 2020, 11(3): 272–282.
- [13] Meng B P, Liang T G, Yi S H, *et al.* Modeling alpine grassland above ground biomass based on remote sensing data and machine learning algorithm: A case study in east of the Tibetan Plateau, China. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2020, 13: 2986–2995.
- [14] Zhang Y X, Huang J X, Jin Y X, *et al.* Estimation of grasslands aboveground biomass: A review. *Acta Agrestia Sinica*, 2022, 30(4): 850–858.
张雨欣, 黄健熙, 金云翔, 等. 草地上生物量估算模型研究进展. *草地学报*, 2022, 30(4): 850–858.
- [15] Wang J, Xiao X M, Bajgain R, *et al.* Estimating leaf area index and aboveground biomass of grazing pastures using Sentinel-1, Sentinel-2 and Landsat images. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2019, 154: 189–201.
- [16] Qin Q, Xu D W, Hou L L, *et al.* Comparing vegetation indices from Sentinel-2 and Landsat 8 under different vegetation gradients based on a controlled grazing experiment. *Ecological Indicators*, 2021, 133: 108363.
- [17] Yao Y W, Ren H R. Estimation of grassland aboveground biomass on the Qinghai–Tibet Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(7): 3049–3059.
姚雨微, 任鸿瑞. 青藏高原草地上生物量估算研究. *生态学报*, 2024, 44(7): 3049–3059.
- [18] Gan C Y, Wang X Z, Li B S, *et al.* Changes of vegetation coverage during recent 18 years in Lianjiang River watershed. *Scientia Geographica Sinica*, 2011, 31(8): 1019–1024.
甘春英, 王兮之, 李保生, 等. 连江流域近18年来植被覆盖度变化分析. *地理科学*, 2011, 31(8): 1019–1024.
- [19] Zhao Y H, Hou P, Jiang J B, *et al.* Progress in quantitative inversion of vegetation ecological remote sensing parameters. *National Remote Sensing Bulletin*, 2021, 25(11): 2173–2197.
赵燕红, 侯鹏, 蒋金豹, 等. 植被生态遥感参数定量反演研究方法进展. *遥感学报*, 2021, 25(11): 2173–2197.
- [20] Liu X Y, Feng Q S, Liang T G, *et al.* Spatial-temporal dynamic balance between livestock carrying capacity and productivity of rangeland in Gannan of Gansu Province, China. *Chinese Journal of Grassland*, 2010, 32(1): 99–106.
刘兴元, 冯琦胜, 梁天刚, 等. 甘南牧区草地生产力与载畜量时空动态平衡研究. *中国草地学报*, 2010, 32(1): 99–106.
- [21] Liang T G, Feng Q S, Xia W T, *et al.* Optimization strategy and management decision-making in balancing forage and livestock in Gannan pastoral area. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(4): 1111–1123.
梁天刚, 冯琦胜, 夏文韬, 等. 甘南牧区草畜平衡优化方案与管理决策. *生态学报*, 2011, 31(4): 1111–1123.
- [22] Guo Y, Jia Z B, Zhang Q, *et al.* Study on the spatiotemporal dynamics of forage-livestock balance in Hulunbuir grassland of Inner Mongolia based on remote sensing data. *Chinese Journal of Grassland*, 2021, 43(4): 30–37.
郭阳, 贾志斌, 张琪, 等. 基于遥感数据的内蒙古呼伦贝尔草原草畜平衡时空动态研究. *中国草地学报*, 2021, 43(4): 30–37.
- [23] Psomas A, Kneubühler M, Huber S, *et al.* Hyperspectral remote sensing for estimating aboveground biomass and for exploring species richness patterns of grassland habitats. *International Journal of Remote Sensing*, 2011, 32(24): 9007–9031.
- [24] Guerini F M, Kuplich T M, De Q, *et al.* Estimating natural grassland biomass by vegetation indices using Sentinel 2 remote sensing data. *International Journal of Remote Sensing*, 2020, 41(8): 2861–2876.
- [25] Huang J X, Wu J, Li C B, *et al.* Remote sensing retrieval of grassland above-ground biomass in Tianzhu County based on Sentinel-2 and Landsat 8 data. *Acta Agrestia Sinica*, 2021, 29(9): 2023–2030.
黄家兴, 吴静, 李纯斌, 等. 基于 Sentinel-2 和 Landsat 8 数据的天祝县草地地上生物量遥感反演. *草地学报*, 2021, 29(9): 2023–2030.
- [26] Guo R, Fu S, Hou M J, *et al.* Remote sensing retrieval of nature grassland biomass in Menyuan County, Qinghai Province experimental area based on Sentinel-2 data. *Acta Prataculturae Sinica*, 2023, 32(4): 15–29.
郭芮, 伏帅, 侯蒙京, 等. 基于 Sentinel-2 数据的青海门源县天然草地生物量遥感反演研究. *草业学报*, 2023, 32(4): 15–29.
- [27] Cao J, Zhang Y J, Li X Y, *et al.* Application of remote sensing technology in the study of grassland-livestock balance in Gangcha, Qinghai Province. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2020, 41(10): 138–146.
曹娟, 张勇娟, 李新一, 等. 遥感技术在青海刚察县草畜平衡研究中的应用. *中国农业资源与区划*, 2020, 41(10): 138–146.
- [28] Zhang Y J, Cao J, Yun X J, *et al.* Assessment study on grassland yield and carrying capacity in Gongliu, Xinjiang based on RS, CIS, and GPS. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2020, 41(10): 156–164.

- 张勇娟, 曹娟, 负旭江, 等. 基于3S技术的新疆巩留县草原产草量及载畜平衡评估研究. 中国农业资源与区划, 2020, 41(10): 156–164.
- [29] Chen Q G. Key pasture, seasonal grazing and sustainable development of grassland animal husbandry production in China. *Acta Prataculturae Sinica*, 2005, 14(4): 29–34.
陈全功. 关键场与季节放牧及草地畜牧业的可持续发展. 草业学报, 2005, 14(4): 29–34.
- [30] Liu H F, Hou L L, Kang N N, *et al.* The economic value of grassland ecosystem services: A global meta-analysis. *Grassland Research*, 2022, 1(1): 63–74.
- [31] Li Q F. Series of studies on balance control between animal demanding and feed availability(1)—Discussions and comments on the currently practiced animal-feed balance control system. *Pratacultural Science*, 2011, 28(10): 1869–1872.
李青丰. 草畜平衡管理系列研究(1)—现行草畜平衡管理制度刍议. 草业科学, 2011, 28(10): 1869–1872.
- [32] Zhang Y J, Yin G M, Liu N, *et al.* Evaluating criterion for balance of forage supply and livestock requirement, LY/T 3320-2022. Beijing: National Forestry and Grassland Administration, 2022.
张英俊, 殷国梅, 刘楠, 等. 草畜平衡评价技术规范, LY/T 3320-2022. 北京: 国家林业和草原局, 2022.
- [33] Gou X Z, Gu L R, Zhou G D. The current situation and suggestions of grassland and grassland livestock balance in pastoral areas of Gansu Province. *China Feed*, 2023(19): 187–192.
苟想珍, 顾玲荣, 周国栋. 甘肃牧区草原草畜平衡现状及建议. 中国饲料, 2023(19): 187–192.
- [34] The Zhangye Municipal Bureau of Statistics. Zhangye City national economic and social development statistical bulletin in 2022. https://www.zhangye.gov.cn/sjfb/xbtjnj/202312/t20231204_1151009.html, 2023-12-04.
张掖市统计局. 2022年张掖市国民经济和社会发展统计公报. https://www.zhangye.gov.cn/sjfb/xbtjnj/202312/t20231204_1151009.html, 2023-12-04.
- [35] Meng B P, Chen S Y, Cui X, *et al.* The accuracy of grassland vegetation biomass estimated model based on multi-source remote sensing data—As a case of experimental area in Sangke grassland in Xiahe County. *Pratacultural Science*, 2015, 32(11): 1730–1739.
孟宝平, 陈思宇, 崔霞, 等. 基于多源遥感数据的高寒草地生物量反演模型精度—以夏河县桑科草原试验区为例. 草业科学, 2015, 32(11): 1730–1739.
- [36] Zhao Y H, Hou M J, Feng Q S, *et al.* Estimation of aboveground biomass in Menyuan grassland based on Landsat 8 and random forest approach. *Acta Prataculturae Sinica*, 2022, 31(7): 1–14.
赵翔含, 侯蒙京, 冯琦胜, 等. 基于Landsat 8和随机森林的青海门源天然草地上生物量遥感估算. 草业学报, 2022, 31(7): 1–14.
- [37] Ren J Z. Classification and cluster applicable for grassland type. *Acta Agrestia Sinica*, 2008, 16(1): 4–10.
任继周. 分类、聚类与草原类型. 草地学报, 2008, 16(1): 4–10.
- [38] Tan S H. Impacts and mechanisms of grazing institutional transitions on grassland degradation. *Issues in Agricultural Economy*, 2020, 482(2): 115–125.
谭淑豪. 牧业制度变迁对草地退化的影响及其路径. 农业经济问题, 2020, 482(2): 115–125.
- [39] Yang L, Wu Y H. Research on the problems of grassland fences and fragmentation in Inner Mongolia. *Forward Position*, 2022, 438(4): 118–127.
杨理, 乌亚罕. 内蒙古草原网围栏和草场碎片化问题研究—基于锡林郭勒盟入户调查的分析. 前沿, 2022, 438(4): 118–127.
- [40] Chu L Q, Zhang Z T, Jiang Z D. How does the fragmentation of pasture affect herders' balance between grass and livestock? *Journal of Agrotechnical Economics*, 2022(8): 83–96.
褚力其, 张志涛, 姜志德. 草场细碎化如何影响牧户实现草畜平衡—以内蒙古与青海典型牧区为例. 农业技术经济, 2022(8): 83–96.
- [41] Wang X, Xu X F. Spatiotemporal characteristics and influencing factors of landscape fragmentation of cultivated land in China. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(16): 11–20.
王学, 徐晓凡. 中国耕地景观细碎度时空变化特征及其影响因素. 农业工程学报, 2022, 38(16): 11–20.
- [42] Wei C G, Huang Y Z, Mu Y H, *et al.* Cultivated land fragmentation and guidance of land consolidation based on landscape ecology perspective—A case study of Wenshan Zhuang and Miao Autonomous Prefecture. *Journal of Southwest China Normal University (Natural Science Edition)*, 2022, 47(9): 82–90.
魏成国, 黄义忠, 牟禹恒, 等. 景观生态视角下的耕地细碎化及土地整治分区—以文山壮族苗族自治州为例. 西南师范大学

学报(自然科学版), 2022, 47(9): 82—90.

- [43] Du G M, Zhang Y, Zhang Y Q. The spatial pattern and influencing factors of cultivated land fragmentation in typical counties of the Northeast black soil region. *Research of Agricultural Modernization*, 2023, 44(5): 858—868.
杜国明, 张宇, 章尤琴. 东北黑土区典型县域耕地细碎化空间格局及影响因素分析. *农业现代化研究*, 2023, 44(5): 858—868.
- [44] Guo S, Yang W Z, Wei M H, *et al.* Cultivated land fragmentation and impact factors of Qinglong Manchu autonomous county based on geographically weighted regression. *Research of Soil and Water Conservation*, 2017, 24(3): 264—269.
郭硕, 杨伟州, 魏明欢, 等. 基于地理加权回归的青龙满族自治县耕地细碎化及影响因子分析. *水土保持研究*, 2017, 24(3): 264—269.
- [45] Teligeer. Analysis on the current situation of forage-livestock balance in different grassland types in Inner Mongolia—Take family ranching as an example. Hohhot: Inner Mongolia Normal University, 2021.
特力格尔. 内蒙古不同草原类型草畜平衡现状分析. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2021.