

DOI:10.11686/cyxb2025297

<http://cyxb.magtech.com.cn>

黄埔, 黄青, 辛晓平. 中国半干旱牧区天然打草场空间格局遥感提取与分析. 草业学报, 2026, 35(7): 1—14.

HUANG Pu, HUANG Qing, XIN Xiao-ping. Remote sensing extraction and analysis of the spatial pattern of natural cutting pastures in semi-arid pastoral areas of China. Acta Prataculturae Sinica, 2026, 35(7): 1—14.

中国半干旱牧区天然打草场空间格局遥感提取与分析

黄埔^{1,2}, 黄青^{1,2*}, 辛晓平^{1,2}

(1. 北方干旱半干旱耕地高效利用全国重点实验室, 北京 100081; 2. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

摘要:天然打草场作为半干旱牧区草地资源的重要组成部分,对维持草地生态系统的稳定与可持续发展具有重要意义。然而,长期以来,我国天然打草场空间分布数据匮乏,现有数据难以准确反映其现状,制约了草地资源的科学管理与保护。为解决这一问题,本研究基于多源遥感数据融合技术(Sentinel-2 与 Landsat-8 影像),引入地形、光谱指数和纹理特征,采用面向对象分割和支持向量机(support vector machine, SVM)算法,对半干旱牧区天然打草场进行了高精度遥感提取。研究结果显示,2020—2022 年间半干旱牧区天然打草场总面积为 794.92 万 hm^2 ,其中内蒙古北部牧区占比最大(81.19%),温性草原为主要打草类型(61.87%)。固定打草场和机动打草场面积分别为 477.12 万和 317.80 万 hm^2 ,占比分别为 60.02% 和 39.98%,空间分布呈现明显区域差异。遥感提取总体精度达 84.76%,Kappa 系数为 0.69,与地面调查数据一致性较高,其中内蒙古北部牧区精度最高(87.16%)。本研究填补了近 10 年来天然打草场空间分布数据的空白,为草地资源的科学管理、生态保护与可持续利用提供了可靠的数据支持。

关键词:半干旱牧区;打草场;多源数据融合;面向对象分割;机器学习模型;遥感提取

Remote sensing extraction and analysis of the spatial pattern of natural cutting pastures in semi-arid pastoral areas of China

HUANG Pu^{1,2}, HUANG Qing^{1,2*}, XIN Xiao-ping^{1,2}

1. National Key Laboratory of Efficient Utilization of Arid and Semi-arid Arable Land in Northern China, Beijing 100081, China;

2. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China

Abstract: As a vital component of grassland resources in semi-arid pastoral areas, natural cutting pastures play a significant role in maintaining the stability and sustainable development of grassland ecosystems. However, China has long faced a scarcity of spatial distribution data on natural cutting pastures, and existing data inadequately reflect their current status, hindering scientific management and conservation of grassland resources. To address this issue, this study employed a multi-source remote sensing data fusion approach (Sentinel-2 and Landsat-8 imagery), incorporating topographic features, spectral indices, and texture features. Using object-oriented segmentation and a support vector machine (SVM) algorithm, high-accuracy remote sensing extraction to identify natural cutting pastures in semi-arid pastoral areas was conducted. The results revealed that the total area of natural cutting pastures in semi-arid pastoral areas from 2020 to 2022 was 7.9492 million hectares, with the pastoral area in northern Inner Mongolia accounting for the largest proportion (81.19%), and temperate grasslands being the dominant type

收稿日期:2025-07-17;改回日期:2025-09-03

基金项目:国家重点研发计划(2021YFD1300500,2023YFD1500102)和现代农业产业技术体系建设专项资金(CARS-34)资助。

作者简介:黄埔(2001—),男,四川内江人,在读硕士。E-mail: 2209913206@qq.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: huangqing@caas.cn

(61.87%)。The areas of fixed cutting pastures and mobile cutting pastures were 4.7712 million and 3.1780 million hectares, accounting for 60.02% and 39.98% of the total area, respectively, showing distinct regional disparities in spatial distribution. The overall accuracy of remote sensing extraction reached 84.76%, with a Kappa coefficient of 0.69, indicating high consistency with ground survey data. The pastoral area in northern Inner Mongolia achieved the highest accuracy (87.16%). This study fills the gap in spatial distribution data of natural cutting pastures over the past decade and provides reliable data support for the scientific management, ecological conservation, and sustainable utilization of grassland resources.

Key words: semi-arid pastoral areas; cutting pastures; multi-source data fusion; object-oriented segmentation; machine learning model; remote sensing extraction

国家林草局近日要求部署并全面开展国家尺度的草原健康和退化评估工作,势在解决长期以来我国草原亚健康和退化底数不清等突出问题,提高国土规划的科学性、精准性。草地是中国最大的陆生系统^[1],承担着固碳、水土保持、气候调节、维持生物多样性等重要的生态功能^[2-5]。在我国的半干旱牧区,定期刈割是对草地资源利用和管理的主要方式^[6],有利于提高草地的生产力和产品质量^[7],促进草地生态系统的可持续发展。然而,刈割主要发生在哪些区域? 占据了多大面积? 这些问题在我国草地系统的研究中尚未明确。

传统的打草场空间分布数据获取方法沿袭着资料收集—野外调查—室内判读—野外核对—图斑修订—一定图成图的技术体系^[8],往往受限于时间、人力和物力资源,难以实现对草场资源的全面、实时监测。近年来,随着遥感数据源的多元发展、遥感平台的与时俱进、机器学习理论的日趋成熟,准确地掌握打草场的空间分布格局已是必然所趋。目前,已有不少学者综合应用多源遥感数据的光谱、纹理和地形特征等并结合机器学习算法在分类制图方面取得了成功。例如,何昭欣等^[9]基于 Google Earth Engine (GEE) 云平台,利用 Sentinel-2 遥感数据的光谱、纹理和地形特征,结合朴素贝叶斯、支持向量机、分类回归树和随机森林 4 种分类器,成功提取了江苏省冬小麦 (*Triticum aestivum*) 和冬油菜 (*Brassica campestris*) 的空间分布信息;刘通等^[10]在辽宁省盘锦市利用 Sentinel-2 影像的物候和纹理特征,结合简单非迭代聚类 (simple non-iterative clustering, SNIC) 算法和随机森林模型,实现了面向对象的高精度水稻 (*Oryza sativa*) 种植分布提取;牛乾坤等^[11]针对河套灌区复杂的种植结构,引入 GlobeLand 30 地物分类数据集、红边植被特征和作物纹理特征,成功提取了主要作物的空间分布,并通过特征优化将平均分类精度提高到 86%;唐雪洁等^[12]以我国南方亚热带季风地区典型丘陵山区双江县为例,利用 Sentinel-2 影像数据构建光谱、植被指数、纹理和地形特征集,结合 SNIC 算法和随机森林模型、支持向量机算法,最终验证了面向对象分割方法在茶 (*Camellia sinensis*) 园提取中的优势。这些研究表明,将多源遥感数据与机器学习算法相结合能够有效地实现并提升地物分类的精度,这也为本研究打草场的分布提取方法带来了启示。

鉴于此,本研究以我国打草最为集中的半干旱牧区为研究区,使用 GEE 平台进行影像融合 (Sentinel-2 与 Landsat-8 影像) 以最大程度地消除云、云阴影所带来的干扰,综合考虑影像的地形、光谱指数和纹理特征,采用面向对象分割和支持向量机算法,对天然打草场进行全面的遥感提取,并进一步划分固定打草场和机动打草场。这一成果是对我国天然打草场资源清单的更新,对于草地资源的管理和保护具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

中国的半干旱牧区天然打草场主要分布在内蒙古、黑龙江、吉林和河北 4 个省区^[8]。为更好地考虑研究区的自然、社会经济条件以及区域的相似性,本研究从资源环境科学数据平台 (<https://www.resdc.cn/>) 获取了《中国农业自然区划》,从 38 个二级农业区中选出 3 个小区作为研究区,分别为:内蒙古北部牧区、内蒙古中南部牧农区和松嫩三江平原农业区,具体分布如图 1 所示。

其中:1) 内蒙古北部牧区是一个广袤的畜牧区域,该地区地势较为平坦,植被以草原为主;2) 松嫩三江平原农

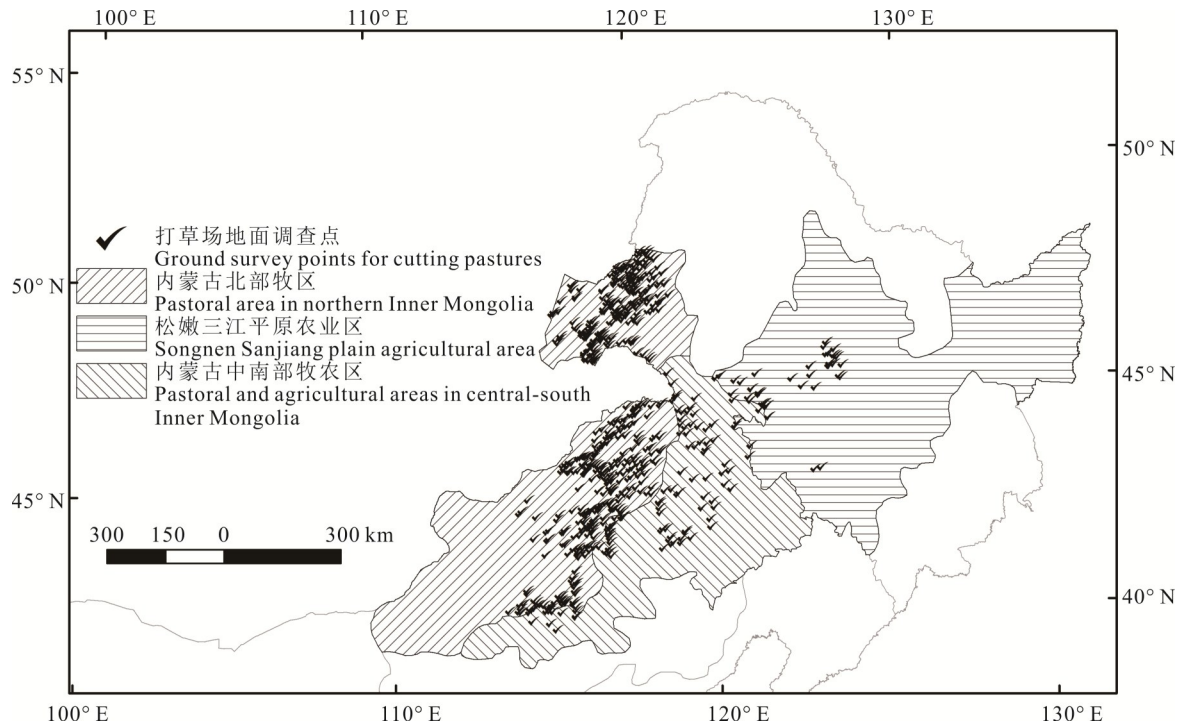


图 1 研究区区位

Fig. 1 Location of the study area

基于自然资源部标准地图服务网站 GS(2024)0650 号标准地图制作,底图边界无修改。Produced based on the standard map GS(2024)0650 from the Standard Map Service website of the Ministry of Natural Resources, with no modifications to the base map boundaries.

业区位于中国的东北部,横跨黑龙江省和吉林省,该地区地势平坦、土地肥沃、农田面积广阔,农业生产比较发达;3)内蒙古中南部牧农区是一个兼具农业和畜牧业的区域,该地区地形较为复杂,包括河谷、山地和草原等不同类型的地貌。

1.2 地面调查数据

2024年9月中下旬—10月上旬开展了一次以调查中国北方半干旱牧区天然打草场空间分布为目的的野外地面作业。根据割草痕迹、留茬高度、草卷堆积以及向当地牧民询问打草情况等方式,结合全球定位系统(global positioning system, GPS)精确定位,确定了634个地面调查点作为打草场提取精度的独立验证点,具体分布如图1所示。

1.3 数据源及图像处理

1.3.1 遥感影像

Sentinel-2是欧空局(European Space Agency, ESA)发射的一组卫星,其影像数据具有高时间分辨率、高空间分辨率、包含多光谱信息的特征,现已广泛应用于遥感观测^[9-12]。Landsat-8则是由美国地质调查局(United States Geological Survey, USGS)提供的免费数据产品,也常用于遥感观测的研究^[13-14]。

本研究以 Sentinel-2 影像为主要的的数据源,在 GEE 平台根据研究区范围,分别筛选 2020、2021 和 2022 年打草后(每年的 9 月 15 日—10 月 15 日)且云量小于 20% 的遥感影像,批量进行辐射定标、去云处理和中值合成,并将空间分辨率重采样至 30 m。然而,打草场集中分布的地区往往云量较多,使用单一的数据源易导致遥感提取时部分重要区域的丢失。因此,使用与 Sentinel-2 影像筛选条件一致的 Landsat-8 影像作为原始影像空缺的补充。Landsat-8 影像也经辐射定标、去云处理和中值合成。

1.3.2 多源数据按时序融合

为最大程度地消除云异常影像对打草场提取的干扰,在 GEE 平台分别生成 Sentinel-2 和 Landsat-8 的时间序列影像(每 15 d 一张),并使用相同时序的 Landsat-8 影像来填补 Sentinel-2 影像的空白,若还有空缺,则使用前、后年的同期数据进行填补。在监测期内(2020、2021 和 2022 年)分别筛选研究区的最佳影像,影像的空间分辨率为 30 m。

1.4 研究方法

1.4.1 分类特征 分类特征包括地形、光谱指数和纹理特征3类。

1)地形特征。一般而言,人工打草的地区坡度平缓,可达性高。因此,使用GEE平台提供的“NASA/NASADEM_HGT/001”数据,分别提取研究区的坡度和高程,作为参与分类的地形特征。

2)光谱指数特征。光谱指数是指通过对多光谱遥感影像的不同波段进行各种线性或非线形组合,得到一些反映地物特性的指标^[15]。归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)就是其中一种常用的光谱指数,较高的NDVI值通常表示更茂密的植被,而较低的NDVI值则表示植被可能受到了一些压力因素的影响^[16]。参考唐欢等^[8]的判别规则:正常植被在标准假彩色影像上呈现为红色,而打草场呈现为深浅不一的暗红色。由此,打草场分布与NDVI值密切相关。其计算公式如下所示:

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}} \quad (1)$$

式中: ρ_{NIR} 和 ρ_{RED} 分别表示多光谱遥感影像在近红外波段和红光波段的反射率。

3)纹理特征。灰度共生矩阵(gray level co-occurrence matrix, GLCM)是由Haralick等^[17]在1973年提出的一种具有广泛性的纹理分析方法,它在较多应用案例中表现出一定程度提高分类精度的能力。打草场的纹理表现为较细、均一、不粗糙^[8],因此,引入GLCM作为参与分类的纹理特征。其计算方法如下所示:

$$Gray = 0.3 \times \rho_{NIR} + 0.59 \times \rho_{RED} + 0.11 \times \rho_{GREEN} \quad (2)$$

式中: ρ_{NIR} 、 ρ_{RED} 和 ρ_{GREEN} 分别表示多光谱遥感影像在近红外波段、红光波段和绿光波段的反射率。由于GLCM的数据量较大,一般不直接作为区分纹理的特征,而是基于一些它所构建的统计量^[18]。本研究选择了角二阶矩(angular second moment, asm)、对比度(contrast, con)、相关性(correlation, corr)和方差(variance, var)这4个常用且在地物分类研究中效果普遍较好的统计量^[18]作为纹理分类特征,通过GEE平台的“glcmTexture”函数直接调用。

将遥感影像的地形、光谱指数和纹理特征一并附加到多源融合影像上,作为原始影像的波段,共同参与影像的分析与分类。

1.4.2 面向对象分割 打草场在遥感影像上通常呈现为形状比较规则的条带状^[8],因此考虑采用面向对象分割的方式先将其分割为具有语义和几何一致性的连续区域,再进行分类。这种方法可以有效降低数据分类的“椒盐”现象,提升地物提取的准确性^[19]。本研究采用ENVI 5.6软件的基于边缘检测算法进行影像分割,并选择“Full Lambda Schedule”方法合并纹理性较强的区域,根据各研究区的地物特点手动调整阈值,逐步达到最佳分割效果(图2)。

1.4.3 地物类别定义 参考2017年《土地利用现状分类》(GB/T 21010—2017)^[20],并结合3个农业区的实际情况,将研究区的地物分别定义为耕地、林地、刈割草地(用于割草的草地,即打草场)、牧草地(用于放牧的草地)、沼泽草地(以天然草本植物为主的沼泽化草地)、其他草地(郁闭度低且不用于放牧的草地)、水域、建设用地和未利用地(表1)。

地物样本的选取采用目视判断的方式。首先,收集历史的地面调查点数据和遥感监测结果等资料^[8],构建目视判断的初步标志;其次,将遥感影像进行假彩色合成处理(近红外、红光、绿光波段分别赋予红色、绿色、蓝色进行合成);最后,对标准假彩色影像,利用上述提及的颜色、形状、位置和纹理等特征直接进行样本点选取。各农业区内的各地物样点数量均不低于表2所列的数量,且样点的空间分布尽量均匀地覆盖整个农业区。

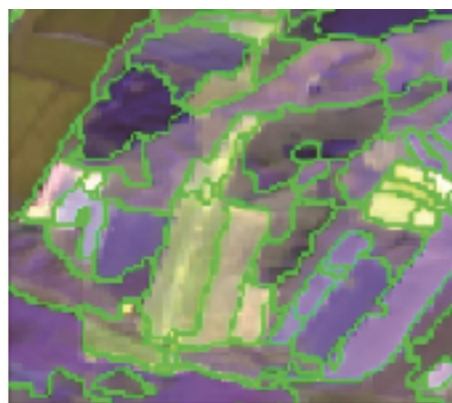


图2 图像分割效果

Fig. 2 Effect of image segmentation

表 1 研究区地物类别划分

Table 1 Land cover classification in the study area

地物类别 Land cover	二级地类 Second land class
耕地 Cropland	水田 Paddy field, 旱地 Dryland, 水浇地 Irrigated land
林地 Forest	乔木林地 Arbor forest land, 竹林地 Bamboo forest land, 森林沼泽 Forest marsh, 灌木林地 Shrub forest land, 灌丛沼泽 Shrub marsh, 其他林地 Other forest land
刈割草地 Cutting pasture	刈割草地 Cutting pasture
牧草地 Grazing pasture	牧草地 Grazing pasture
沼泽草地 Marsh grassland	沼泽草地 Marsh grassland
其他草地 Other grassland	其他草地 Other grassland
水域 Water	河流水面 River water surface, 湖泊水面 Lake water surface, 水库水面 Reservoir water surface, 坑塘水面 Pond water surface, 沟渠 Ditch, 沼泽地 Marshland, 冰川及永久积雪 Glacier and permanent snow cover
建设用地 Building land	零售商业用地 Retail commercial land, 批发市场用地 Wholesale market land, 餐饮用地 Catering land, 旅馆用地 Hotel land, 商务金融用地 Commercial and financial land, 娱乐用地 Entertainment land, 其他商服用地 Other commercial service land, 工业用地 Industrial land, 仓储用地 Warehousing land, 城镇住宅用地 Urban residential land, 农村宅基地 Rural homestead
未利用地 Barren	空闲地 Vacant land, 盐碱地 Saline-alkali land, 沙地 Sandy land, 裸土地 Bare land

表 2 各农业区地物样本数量

Table 2 The number of samples in each agricultural region

农业区 Agricultural region	各地类的样本数量 Number of samples in each class								
	耕地 Crop- land	林地 Forest	刈割草地 Cutting pasture	牧草地 Grazing pasture	沼泽草地 Marsh grassland	其他草地 Other grassland	水域 Water	建设用地 Building land	未利 用地 Barren
内蒙古北部牧区 Pastoral area in northern Inner Mongolia	100	50	400	150	100	300	30	50	50
内蒙古中南部牧农区 Pastoral and agricultural areas in cen- tral-south Inner Mongolia	200	150	250	100	60	80	30	50	50
松嫩三江平原农业区 Songnen Sanjiang plain agricultural area	400	100	100	80	60	120	30	50	50

1.4.4 支持向量机分类算法 支持向量机(support vector machine, SVM)是一种在机器学习领域广泛使用的分类算法^[21-22]。它通过一个核函数将数据映射到高维特征空间,并试图在该空间内寻找一个能够最大化不同类别样本间隔的最优超平面,有效实现分类。该算法的显著优势为寻找最优决策边界的能力,即使在样本量较少的地区(如松嫩三江平原农业区,打草场的样本仅100个左右),也能获得较好的精度。

1.4.5 固定打草场和机动打草场的判定 将2020、2021和2022年的遥感监测结果一并导入到ArcMap 10.8软件中进行空间统计分析。将监测期内仅某1年为刈割草地的区域判定为机动打草场,监测期内2年或以上为刈割草地的区域判定为固定打草场。

1.4.6 精度评价 将2024年的打草场地面调查点作为遥感提取精度的独立验证点,并结合奥维互动地图目视判断除打草场外的其他地物,建立精度评价的混淆矩阵。选择总体精度(overall accuracy, OA)和 $Kappa$ 系数对遥感监测结果进行综合评价^[8-14]。

$$OA = \left(\frac{\sum_{i=1}^n P_{ii}}{N} \right) \times 100\% \tag{3}$$

$$Kappa = \frac{OA - O_e}{1 - O_e} \tag{4}$$

$$O_e = \frac{\sum_{i=1}^n P_i W_i}{N^2} \quad (5)$$

式中: n 为类别数; P_{ii} 为混淆矩阵中第*i*行第*i*列的样本数; N 为总样本数; P_i 和 W_i 分别为第*i*行和第*i*列的样本数之和; O_e 为期望一致性。

2 结果与分析

2.1 半干旱牧区天然打草场的提取精度

遥感提取的精度评价结果如表3所示。半干旱牧区的天然打草场总体提取精度达到了84.76%,相较于先前研究数据^[8]提升了约8%;Kappa系数为0.69,表明提取结果与真实地物之间具有较高的一致性。其中,内蒙古北部牧区的提取精度最高,总体精度达87.16%,Kappa系数为0.74;内蒙古中南部牧农区次之,总体精度为81.12%,Kappa系数为0.61;松嫩三江平原农业区的提取精度最低,总体精度为77.10%,Kappa系数为0.51。总体来看,此结果足以揭示天然打草场的空间分布格局。

表3 打草场遥感提取精度评价

Table 3 Accuracy assessment of remote sensing extraction for cutting pastures

农业区 Agricultural region	总体精度 Overall accuracy (%)	Kappa系数 Kappa coefficient
内蒙古北部牧区 Pastoral area in northern Inner Mongolia	87.16	0.74
内蒙古中南部牧农区 Pastoral and agricultural areas in central-south Inner Mongolia	81.12	0.61
松嫩三江平原农业区 Songnen Sanjiang plain agricultural area	77.10	0.51
半干旱牧区总体情况 General overview of semi-arid pastoral region	84.76	0.69

2.2 半干旱牧区天然打草场的总体状况

遥感提取结果显示(表4),半干旱牧区天然打草场的面积共计794.92万 hm^2 。其中,内蒙古北部牧区的打草场面积居于首位,达645.39万 hm^2 ,占总面积的81.19%;内蒙古中南部牧农区的打草场面积次之,共108.96万 hm^2 ,占比约13.71%;松嫩三江平原农业区的草地退化情况十分严重,打草场面积最小,仅有40.57万 hm^2 ,占半干旱牧区天然打草场的5.10%。

从草地类型来看,半干旱牧区主要是在低地草甸、温性草甸草原、温性草原和温性山地草原上进行打草活动。其中,温性草原的打草面积最大,达491.84万 hm^2 ,占据了半干旱牧区天然打草场总面积的61.87%;低地草甸和温性草甸草原的打草面积大致相当,分别为100.63万 hm^2 、118.17万 hm^2 ,占比分别为12.66%、14.87%;温性山地草原的打草面积最少,仅66.96万 hm^2 ,占比约8.42%;在其他草地类型上仅有少量打草,如温性荒漠草原类、高寒草甸草原类、高寒草甸类等,共占打草场总面积的2.18%。

从固定打草场和机动打草场的空间分布状况来看,半干旱牧区固定打草场的面积共计477.12万 hm^2 ,占打草场总面积的60.02%;机动打草场的面积共317.80万 hm^2 ,占总面积的39.98%。固定打草场主要分布在内蒙古北部牧区中呼伦湖的东翼、南翼和锡林郭勒盟的东北部等地区,而机动打草场因其高度的随机性,在研究区内呈比较零散的分布特征。

2.3 不同农业区天然打草场的分布格局

2.3.1 内蒙古北部牧区的天然打草场分布格局 如图3所示,将内蒙古北部牧区的天然打草场分为以呼伦贝尔市为主(图3a)和以锡林郭勒盟、乌兰察布市、包头市为主(图3b)的两部分。在呼伦贝尔市内(图3a),天然打草场的总面积为229.05万 hm^2 ,其中固定打草场123.61万 hm^2 ,机动打草场105.44万 hm^2 ,植被类型以温性草原(177.93万 hm^2)、低地草甸(20.27万 hm^2)、温性草甸草原(17.14万 hm^2)和温性山地草原(13.71万 hm^2)为主。固定打草场集中分布于呼伦湖东翼、南翼及东北部,机动打草场则零散分布于其周边。从旗县分布看(表5),新巴尔虎右旗面积最大(85.21万 hm^2 ,占37.20%),主要位于呼伦湖附近及南翼水热条件优越区域;而在新巴尔虎右

表 4 各农业区打草场面积

Table 4 Cutting pasture area of each agricultural region

打草场类型 Types of cutting pastures	二级农业区 Secondary agricultural region		低地草甸 Lowland meadow	温性草甸草原 Temperate meadow grass-land	温性草原 Temperate grass-land	温性山地草原 Temperate mountain grass-land	其他类型 Other types
固定打草场 Fixed cutting pasture	松嫩三江平原农业区 Songnen Sanjiang plain agricultural area	面积 Area ($\times 10^4 \text{ hm}^2$)	1.30	2.62	0.27	4.18	4.95
		所占比例 Proportion (%)	0.16	0.33	0.03	0.53	0.62
	内蒙古北部牧区 Pastoral area in northern Inner Mongolia	面积 Area ($\times 10^4 \text{ hm}^2$)	41.43	60.61	298.98	10.61	0.00
		所占比例 Proportion (%)	5.21	7.62	37.61	1.33	0.00
	内蒙古中南部牧区 Pastoral and agricultural areas in central-south Inner Mongolia	面积 Area ($\times 10^4 \text{ hm}^2$)	10.87	6.27	19.37	15.40	0.25
		所占比例 Proportion (%)	1.37	0.79	2.44	1.94	0.03
机动打草场 Mobile cutting pasture	松嫩三江平原农业区 Songnen Sanjiang plain agricultural area	面积 Area ($\times 10^4 \text{ hm}^2$)	3.38	7.92	0.66	3.24	12.05
		所占比例 Proportion (%)	0.43	1.00	0.08	0.41	1.52
	内蒙古北部牧区 Pastoral area in northern Inner Mongolia	面积 Area ($\times 10^4 \text{ hm}^2$)	31.56	34.77	154.71	12.72	0.00
		所占比例 Proportion (%)	3.97	4.37	19.46	1.60	0.00
	内蒙古中南部牧区 Pastoral and agricultural areas in central-south Inner Mongolia	面积 Area ($\times 10^4 \text{ hm}^2$)	12.07	5.99	17.85	20.81	0.06
		所占比例 Proportion (%)	1.52	0.75	2.25	2.62	0.01

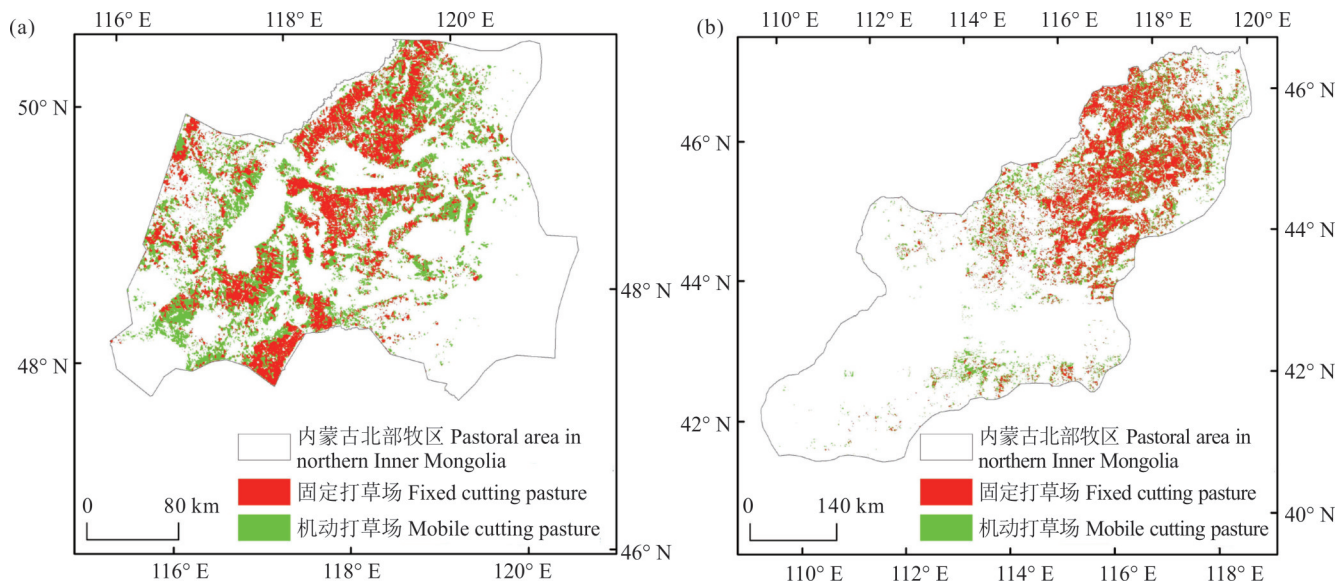


图 3 内蒙古北部牧区的天然打草场分布

Fig. 3 Distribution of natural cutting pastures in the pastoral area in northern Inner Mongolia

基于自然资源部标准地图服务网站 GS(2024)0650 号标准地图制作,底图边界无修改。Produced based on the standard map GS(2024)0650 from the Standard Map Service website of the Ministry of Natural Resources, with no modifications to the base map boundaries.

旗的西部和西南部等地区,由于气候干燥且海拔在 750 m 以上,导致草地生长条件较差,打草的面积相对较少。其次是陈巴尔虎旗(68.60 万 hm^2 ,占 29.95%),属于优质草甸草原,草场资源丰富。其他地区的打草场按照面积大小依次为:新巴尔虎左旗(51.63 万 hm^2 ,占 22.54%)、鄂温克族自治旗(20.10 万 hm^2 ,占 8.78%)、海拉尔区(1.29 万 hm^2 ,占 0.56%)和额尔古纳市(1.00 万 hm^2 ,占 0.44%),剩余地区的天然打草场总面积均不足 1.00 万 hm^2 。

在以锡林郭勒盟、乌兰察布市、包头市为主(图 3b)的内蒙古北部牧区内,天然打草场的总面积共 416.33 万 hm^2 ,其中固定打草场 288.02 万 hm^2 ,机动打草场 128.31 万 hm^2 ,植被类型以温性草原(275.76 万 hm^2)、温性草甸

草原(78.24万hm²)、低地草甸(52.73万hm²)和温性山地草原(9.61万hm²)为主。固定打草场主要分布在东北部锡林郭勒盟的东乌珠穆沁旗、西乌珠穆沁旗、锡林浩特市、阿巴嘎旗等地,机动打草场则主要分布在中南部的四子王旗、苏尼特右旗、镶黄旗、正镶白旗、正蓝旗等地。从旗县分布看(表5),东乌珠穆沁旗面积最大(181.39万hm²,占43.57%),西乌珠穆沁旗(83.48万hm²,占20.05%)、锡林浩特市(63.05万hm²,占15.14%)和阿巴嘎旗(49.36万hm²,占11.86%)次之,其余旗县面积均不足10万hm²。

表5 内蒙古北部牧区的打草场面积

Table 5 Cutting pasture area in the pastoral area in northern Inner Mongolia (×10⁴ hm²)

行政区 Administrative region	打草场 面积 Area of cutting pas- tures	固定打草 场面积 Area of fixed cut- ting pas- tures	机动打草 场面积 Area of mobile cutting pastures	行政区 Administrative region	打草场 面积 Area of cutting pas- tures	固定打草 场面积 Area of fixed cut- ting pas- tures	机动打草 场面积 Area of mobile cutting pastures
东乌珠穆沁旗 East Uzhumuqin Banner	181.39	132.29	49.10	苏尼特左旗 Sunit Left Banner	8.50	4.01	4.49
新巴尔虎右旗 New Bal Tiger Right Banner	85.21	41.94	43.27	镶黄旗 Xianghuang Banner	7.26	2.84	4.42
西乌珠穆沁旗 West Uzhumuqin Banner	83.48	61.67	21.81	正镶白旗 Plain White Banner	4.81	2.51	2.30
陈巴尔虎旗 Chen Bal Tiger Banner	68.60	41.68	26.92	正蓝旗 Plain Blue Banner	3.72	1.48	2.24
锡林浩特市 Xilinhot City	63.05	49.03	14.02	克什克腾旗 Keshiketeng Banner	2.90	2.10	0.80
新巴尔虎左旗 New Bal Tiger Left Banner	51.63	31.65	19.98	四子王旗 Siziwang Banner	1.42	0.60	0.82
阿巴嘎旗 Abag Banner	49.36	28.89	20.47	海拉尔区 Hailar District	1.29	0.29	1.00
鄂温克族自治旗 Evenk Autonomous Banner	20.10	7.18	12.92	额尔古纳市 Ergun City	1.00	0.49	0.51
苏尼特右旗 Sunit Right Banner	9.50	2.38	7.12				

2.3.2 内蒙古中南部牧农区的天然打草场分布格局 图4是内蒙古中南部牧农区的天然打草场分布。打草场面积共108.95万hm²,其中固定打草场52.17万hm²,机动打草场56.78万hm²,主要分布在其北部的科尔沁右翼前旗、科尔沁右翼中旗、霍林郭勒市、扎鲁特旗、阿鲁科尔沁旗,中部的巴林左旗、巴林右旗、林西县、克什克腾旗和南部的康保县、正镶白旗、太仆寺旗、沽源县等区域。从面积占比来看(表6),赤峰市的打草场面积最大,达39.76万hm²,占内蒙古中南部牧农区天然打草场总面积的36.49%,主要包括巴林右旗、阿鲁科尔沁旗、克什克腾旗、巴林左旗、翁牛特旗等地,占比分别为12.94%、8.87%、8.38%、3.68%、1.83%;其次是通辽市,打草场面积共29.21万hm²,占总面积的26.81%,主要包括扎鲁特旗、霍林郭勒市、科尔沁左翼后旗、科尔沁左翼中旗等地,占比分别为22.26%、1.29%、1.23%、1.14%;而后是兴安盟,主要包括科尔沁右翼前旗(11.59万hm²,占10.64%)、科尔沁右翼中旗(11.42万hm²,占10.48%)和突泉县(1.80万

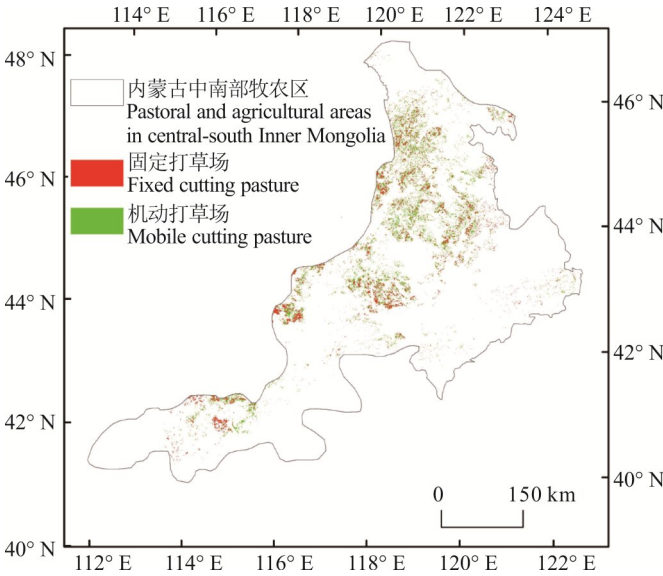


图4 内蒙古中南部牧农区的天然打草场分布
Fig. 4 Distribution of natural cutting pastures in the pastoral and agricultural areas in central-south Inner Mongolia

基于自然资源部标准地图服务网站GS(2024)0650号标准地图制作,底图边界无修改。Produced based on the standard map GS(2024)0650 from the Standard Map Service website of the Ministry of Natural Resources, with no modifications to the base map boundaries.

hm², 占 1.66%)等地;其他地区的打草场按照面积大小为:锡林郭勒盟(10.18 万 hm², 占 9.34%)和张家口市(3.06 万 hm², 占 2.81%);剩余地区的天然打草场总面积均不足 1.00 万 hm²。

表 6 内蒙古中南部牧农区的打草场面积

Table 6 Cutting pasture area in the pastoral and agricultural areas in central-south Inner Mongolia (×10⁴ hm²)

行政区 Administrative region	打草场面积 Area of cutting pastures	固定打草场面积 Area of fixed cutting pastures	机动打草场面积 Area of mobile cutting pastures
赤峰市 Chifeng City	39.76	18.93	20.83
巴林右旗 Bairin Right Banner	14.10	7.84	6.26
阿鲁科尔沁旗 Ar Horqin Banner	9.67	3.69	5.98
克什克腾旗 Hexigten Banner	9.13	5.14	3.99
巴林左旗 Bairin Left Banner	4.01	1.27	2.74
翁牛特旗 Ongniud Banner	1.99	0.80	1.19
通辽市 Tongliao City	29.21	14.17	15.04
扎鲁特旗 Jarud Banner	24.25	11.48	12.77
霍林郭勒市 Huolinguole City	1.40	0.85	0.55
科尔沁左翼后旗 Horqin Left Rear Banner	1.34	0.71	0.63
科尔沁左翼中旗 Horqin Left Middle Banner	1.25	0.68	0.57
兴安盟 Xing'an League	25.69	11.00	14.69
科尔沁右翼前旗 Horqin Right Front Banner	11.59	5.01	6.58
科尔沁右翼中旗 Horqin Right Middle Banner	11.42	4.81	6.61
突泉县 Tuquan County	1.80	0.67	1.13
锡林郭勒盟 Xilin Gol League	10.18	6.18	4.00
太仆寺旗 Taibus Banner	3.55	2.62	0.93
正镶白旗 Plain White Banner	1.94	1.06	0.88
正蓝旗 Plain Blue Banner	1.68	0.70	0.98
西乌珠穆沁旗 West Uzhumuqin Banner	1.48	0.89	0.59
张家口市 Zhangjiakou City	3.06	1.05	2.01
康保县 Kangbao County	1.35	0.51	0.84
沽源县 Guyuan County	1.30	0.13	1.17

注:行政区的第2列均为县级行政单位,它们隶属于上部不分列的市级行政单位,下同。
Note: The second column of administrative regions are all county-level administrative units, which are subordinate to the non-split prefecture-level administrative units above them, the same below.

2.3.3 松嫩三江平原农业区的天然打草场分布格局 图5展示了松嫩三江平原农业区的天然打草场分布。打草场面积仅有40.57万hm²,其中固定打草场13.32万hm²,机动打草场27.25万hm²,主要分布在其西部内蒙古自治区的兴安盟,黑龙江省的黑河市、齐齐哈尔市、绥化市和大庆市,吉林省的白城市、松原市、长春市、四平市和辽源市等市域。从面积占比来看(表7),兴安盟的打草场面积最大,达16.92万hm²,占松嫩三江平原农业区天然打草场总面积的41.71%,主要包括扎赉特旗和科尔沁右翼前旗,占比分别为33.50%、6.84%;其次是白城市,打草场面积共5.64万hm²,占总面积的13.90%,主要包括洮南市(2.53万hm²,占6.25%)和通榆县(1.75万hm²,占4.31%);其他市区的打草场面积较小,均在5.00万hm²以下,按照面积大小依次为:松原市(4.88万hm²,占12.03%)、齐齐哈尔市(3.61万hm²,占8.90%)、大庆市(3.07万hm²,占7.57%)、绥化市(3.01万hm²,占7.42%)和黑河市(2.11万hm²,占5.20%);剩余市区的天然打草场总面积均不足0.50万hm²。

3 讨论

3.1 打草场遥感监测的原理及其重要意义

在半干旱牧区进行的打草活动会显著改变草地地表的光谱、纹理和空间结构,这些变化可通过多源遥感数据进行有效且实时的监测。在光谱特征方面,打草行为会直接移除植被冠层,导致土壤背景暴露,进而引起近红外波段反射率下降和红光波段反射率上升,使得NDVI值在打草期间呈现骤降式变化;相比之下,未打草的草地由于植被持续生长且未被集中刈割,其NDVI值保持较高水平且波动较小;而耕地则因作物类型多样、生育期差异显著等原因,其NDVI值在多数情况下与打草场存在显著差异。因此,光谱指数特征值(NDVI)成为区分打草场与其他地类的关键指标。

在空间纹理方面,规模化的刈割活动通常遵循特定的方向和间距进行,常形成规则且均匀的条带状或斑块状格局,通过GLCM提取的纹理特征(如asm、con、corr和var)能够有效捕捉这种人工管理的

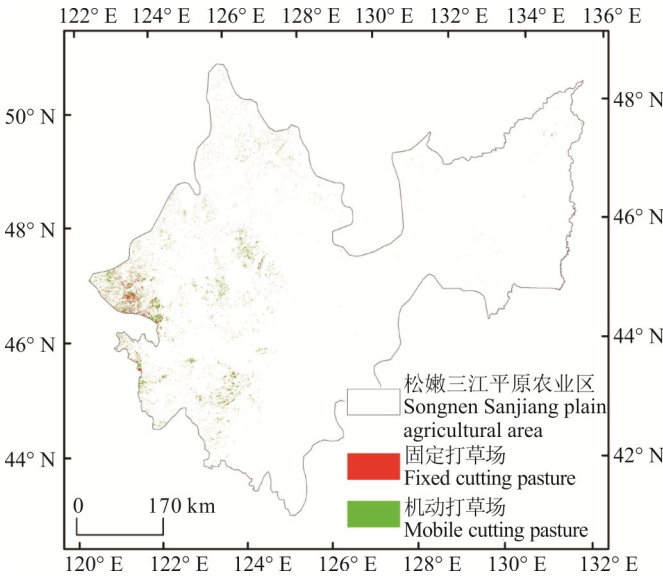


图5 松嫩三江平原农业区的天然打草场分布
Fig. 5 Distribution of natural cutting pasture in the Songnen Sanjiang plain agricultural area

基于自然资源部标准地图服务网站GS(2024)0650号标准地图制作,底图边界无修改。Produced based on the standard map GS(2024)0650 from the Standard Map Service website of the Ministry of Natural Resources, with no modifications to the base map boundaries.

表7 松嫩三江平原农业区的打草场面积

Table 7 Cutting pasture area in the Songnen Sanjiang plain agricultural area (×10⁴ hm²)

行政区 Administrative region	打草场面积 Area of cutting pastures	固定打草场面积 Area of fixed cutting pastures	机动打草场面积 Area of mobile cutting pastures
兴安盟 Xing'an League	16.92	8.20	8.72
扎赉特旗 Jalaid Banner	13.59	6.34	7.25
科尔沁右翼前旗 Horqin Right Front Banner	2.78	1.68	1.10
白城市 Baicheng City	5.64	1.20	4.44
洮南市 Taonan City	2.53	0.82	1.71
通榆县 Tongyu County	1.75	0.18	1.57
松原市 Songyuan City	4.88	1.25	3.63
前郭尔罗斯蒙古族自治县 Qian Gorlos Mongol Autonomous County	3.04	0.84	2.20
齐齐哈尔市 Qiqihar City	3.61	0.56	3.05
龙江县 Longjiang County	1.18	0.23	0.95
大庆市 Daqing City	3.07	0.40	2.67
杜尔伯特蒙古族自治县 Dorbod Mongol Autonomous County	1.38	0.17	1.21
绥化市 Suihua City	3.01	0.90	2.11
黑河市 Heihe City	2.11	0.49	1.62
五大连池市 Wudalianchi City	1.02	0.27	0.75

痕迹;相比之下,放牧草地由于受到牲畜践踏和选择性采食的影响,其纹理显得较为杂乱;而耕地则因垄作、沟渠等人工结构的存在,呈现出周期性的纹理特征。

在时序行为方面,打草活动展现出显著的季节性和年际重复特征。固定打草场通常在每年的同一时段出现NDVI值急剧下降,而机动打草场则可能在不同的年份交替显现这一现象。借助多时相遥感数据融合技术(Sentinel-2与Landsat-8),能够精准捕捉这一规律,从而有效区分其与耕地收割、翻耕以及牧草地自然枯黄等时序模式的差异。

此外,打草场多分布于地势平坦、坡度较小的区域,利于机械或人工刈割作业。结合地形特征(如坡度、高程)可进一步排除不适宜刈割作业的区域(如山区、陡坡等非典型打草区域),提升分类可靠性。本研究正是通过综合运用这些光谱指数、纹理、时序及地形特征,有效区分了打草场与光谱相似的耕地(如收割后的庄稼地)和牧草地(如轻度放牧区域)。

目前,国内关于打草场定量研究的资料较为匮乏,大多数研究还主要集中在打草场的合理利用^[23]及其利用方式^[24-25]等领域。最新发布的打草场空间分布数据可追溯至10年前^[8],但这些数据可能已无法准确反映当前的打草场分布状况。本研究所采用的方法展现了较高的提取精度,能够为打草场的定性、定量研究提供有力支撑。这一成果是对我国天然打草场资源清单的有效更新,对草地资源的管理和保护都具有重要的实践意义。

3.2 方法的局限性与发展前景

在遥感的提取精度方面,本研究的总体精度和Kappa系数均达到良好水平。然而,在各农业区中,提取精度存在明显差异。其中,内蒙古北部牧区的提取精度最高,内蒙古中南部牧农区次之,而松嫩三江平原农业区的提取精度最低。造成这种差异的原因可能包括以下几点:北部牧区以天然草原为主,植被类型单一、地形平坦且生长季稳定,因此分类难度较低;内蒙古中南部牧农区则兼具农业和畜牧业,地形较为复杂,且存在田块沟渠等小面积范围内打草的情况,30 m空间分辨率的遥感影像难以捕捉这些细节;而松嫩三江平原农业区作物种类多样、种植结构复杂,部分耕地与打草场之间存在地物混淆,加之轮作、间作等耕作方式导致混合像元问题突出,进一步增加了分类难度。此外,农业区频繁的翻耕、灌溉等活动会改变地表反射特性,而中分辨率遥感数据对小地块农业区的识别能力有限,这些因素共同导致在人类干预频繁农区的提取精度相对较低。

在遥感数据源方面,Sentinel-2与Landsat-8影像的时序融合有效降低了云覆盖的影响,但在极端多云区域,数据缺失的问题依然难以完全规避。传统填补方法(如前后年同期数据插值)可能引入时间异质性误差^[26],尤其是在当前气候变化背景下,草地物候的逐年波动^[27]可能会削弱填补结果的可靠性。主动遥感数据[如合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)^[28]]具备全天候观测能力,能够穿透云层获取地表信息,弥补光学遥感的不足。在未来,通过结合更丰富的多源数据并开发深度融合算法(如时空注意力机制),有望进一步提升云覆盖区域的数据完整性。此外,本研究主要基于10或30 m空间分辨率的遥感影像,虽满足区域尺度制图的需求,但难以支持牧场尺度的精细化管控(如刈割路径规划、草量估算等),可考虑引入亚米级商业卫星(如WorldView-3)或无人机遥感数据,结合超分辨率重建技术来提升空间细节。

在遥感提取的方法上,SVM在天然打草场的遥感提取中展现出显著的性能,其通过最大化分类间隔的核心理念和高斯核函数的非线性映射能力,有效区分了打草场与其他地物的细微差异。然而,SVM作为一种传统的机器学习模型,仍存在固有缺陷。首先,SVM的分类能力高度依赖人工设计的特征,难以自动捕捉高阶语义信息。同时,SVM本质上是一种静态分类器,无法直接建模时间序列数据中的动态变化规律,例如刈割活动的季节性、年际变化等。随机森林模型^[29]和极限梯度提升模型^[30]等集成学习方法通过特征随机选择,能够在一定程度上缓解特征工程的依赖性,且在处理高维数据时表现优异。然而,这类模型对小样本噪声较为敏感,如何平衡样本数量与分类精度,成为这类模型面临的重要问题。深度学习模型[如卷积神经网络(convolutional neural network, CNN)和长短期记忆网络(long short-term memory, LSTM)]^[31]能够自动提取多层次特征,并在时序数据分析中表现出色,但其对大规模标注数据的依赖和较高的计算成本限制了其在资源有限场景中的应用。为结合SVM的鲁棒性与深度学习的特征提取能力,同时兼顾时序数据的动态特性,未来可探索混合架构,例如利用CNN提取光谱-空间高阶特征,再结合LSTM建模时间序列变化,最后输入SVM进行分类。这种“CNN+LSTM+SVM”框架有望能在小样本条件下保持较高的分类精度,同时实现对刈割活动的动态监测,为天然打草场的精细化管理

和可持续利用提供更智能化的解决方案。

4 结论

本研究基于多源遥感数据融合与面向对象分割方法,结合支持向量机分类算法,实现了对我国半干旱牧区天然打草场空间分布的高精度提取。结果显示,研究区内天然打草场总面积为794.92万 hm^2 ,以内蒙古北部牧区为主(占81.19%),草地类型以温性草原为主导(61.87%)。固定打草场(477.12万 hm^2)集中分布于呼伦湖东翼、南翼及锡林郭勒盟东北部,机动打草场(317.80万 hm^2)则呈零散分布。总体提取精度为84.76%,Kappa系数为0.69,与地面调查数据一致性较高,尤其在内蒙古北部牧区精度达87.16%。本研究为天然打草场资源清单更新与可持续管理提供了可靠的数据支撑。

参考文献 References:

- [1] Xie G D, Zhang Y L, Lu C X, *et al.* Study on valuation of rangeland ecosystem services of China. *Journal of Natural Resources*, 2001, 16(1): 47—53.
谢高地, 张钰铨, 鲁春霞, 等. 中国自然草地生态系统服务价值. *自然资源学报*, 2001, 16(1): 47—53.
- [2] Bai Y F, Chen S P. Carbon sequestration of Chinese grassland ecosystems: stock, rate and potential. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2018, 42(3): 261—264.
白永飞, 陈世苹. 中国草地生态系统固碳现状、速率和潜力研究. *植物生态学报*, 2018, 42(3): 261—264.
- [3] Yang Y, Wang G X, Li Y, *et al.* Spatial-temporal changes in the critical vegetation coverage of grasslands with function of soil-water conservation, wind-breaking and sand-fixing in the Three-Rivers Headwater Region, China. *Mountain Research*, 2024, 42(2): 143—153.
杨祎, 王根绪, 李阳, 等. 三江源区草地水土保持与防风固沙功能临界植被覆盖度时空变化分析. *山地学报*, 2024, 42(2): 143—153.
- [4] Yi M X, Sun Z G, Cong P F, *et al.* Research progress on the response of grassland ecosystem function to climate change. *Chinese Journal of Grassland*, 2023, 45(12): 112—120.
羿明璇, 孙政国, 丛鹏飞, 等. 草地生态系统功能对气候变化的响应研究进展. *中国草地学报*, 2023, 45(12): 112—120.
- [5] Liu L L, Jing X, Ren H Y, *et al.* Grassland biodiversity, stability, and implications for grassland conservation and restoration. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 2023, 37(4): 560—570.
刘玲莉, 井新, 任海燕, 等. 草地生物多样性与稳定性及对草地保护与修复的启示. *中国科学基金*, 2023, 37(4): 560—570.
- [6] Li X L, Hou X Y, Leonid U, *et al.* Effects of climate change on household compound ecosystems and herders' adaptation. *Acta Prataculturae Sinica*, 2013, 22(1): 148—156.
李西良, 侯向阳, Leonid Ubugunov, 等. 气候变化对家庭牧场复合系统的影响及其牧民适应. *草业学报*, 2013, 22(1): 148—156.
- [7] Zhu J, Zhang B, Tan Z L, *et al.* Research progress of clipping effect on quality and biomass of grazing. *Pratacultural Science*, 2009, 26(2): 80—85.
朱珏, 张彬, 谭支良, 等. 刈割对牧草生物量和品质影响的研究进展. *草业科学*, 2009, 26(2): 80—85.
- [8] Tang H, Gao W, Xu L J, *et al.* Monitoring forage harvesting area in semi-arid pasture based on Landsat TM images. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(23): 160—167.
唐欢, 高娃, 徐丽君, 等. 基于Landsat TM影像的半干旱牧区天然打草场面积的遥感监测. *农业工程学报*, 2015, 31(23): 160—167.
- [9] He Z X, Zhang M, Wu B F, *et al.* Extraction of summer crop in Jiangsu based on Google earth engine. *Journal of Geo-information Science*, 2019, 21(5): 752—766.
何昭欣, 张淼, 吴炳方, 等. Google earth engine支持下的江苏省夏收作物遥感提取. *地球信息科学学报*, 2019, 21(5): 752—766.
- [10] Liu T, Ren H R. Object-oriented extraction of paddy rice planting areas using phenological features from the GEE platform. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(12): 189—196.
刘通, 任鸿瑞. GEE平台下利用物候特征进行面向对象的水稻种植分布提取. *农业工程学报*, 2022, 38(12): 189—196.
- [11] Niu Q K, Liu L, Huang G H, *et al.* Extraction of complex crop structure in the Hetao Irrigation District of Inner Mongolia using GEE and machine learning. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(6): 165—174.

- 牛乾坤, 刘浏, 黄冠华, 等. 基于 GEE 和机器学习的河套灌区复杂种植结构识别. 农业工程学报, 2022, 38(6): 165—174.
- [12] Tang X J, Wei Y Q, Luo D L, *et al.* Object-oriented tea plantation extraction based on GEE: The case of Shuangjiang County, a typical hilly mountainous area in the subtropical monsoon region of south China. *Pratacultural Science*, 2024, 41(8): 1897—1908.
- 唐雪洁, 魏彦强, 罗栋梁, 等. 基于 GEE 的面向对象茶园提取——以我国南方亚热带季风地区典型丘陵山区双江县为例. 草业科学, 2024, 41(8): 1897—1908.
- [13] Liu J, Wang L M, Yao B M, *et al.* Ningxia rice area remote sensing estimation on large scale based on multi-temporal OLI data. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(15): 200—209.
- 刘佳, 王利民, 姚保民, 等. 基于多时相 OLI 数据的宁夏大尺度水稻面积遥感估算. 农业工程学报, 2017, 33(15): 200—209.
- [14] Pei H, Sun T J, Wang X Y. Object-oriented land use/cover classification based on texture features of Landsat 8 OLI image. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(2): 248—255.
- 裴欢, 孙天娇, 王晓妍. 基于 Landsat 8 OLI 影像纹理特征的面向对象土地利用/覆盖分类. 农业工程学报, 2018, 34(2): 248—255.
- [15] Vidican R, Mălina A, Ranta O, *et al.* Using remote sensing vegetation indices for the discrimination and monitoring of agricultural crops: A critical review. *Agronomy*, 2023, 13(12): 3040.
- [16] Jin K, Wang F, Han J Q, *et al.* Contribution of climatic change and human activities to vegetation NDVI change over China during 1982—2015. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(5): 961—974.
- 金凯, 王飞, 韩剑桥, 等. 1982—2015 年中国气候变化和人类活动对植被 NDVI 变化的影响. 地理学报, 2020, 75(5): 961—974.
- [17] Haralick R M, Shanmugam K, Dinstein I. Textural features for image classification. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1973, 3(6): 610—621.
- [18] Hall-beyer M. Practical guidelines for choosing GLCM textures to use in landscape classification tasks over a range of moderate spatial scales. *International Journal of Remote Sensing*, 2017, 38(5): 1312—1338.
- [19] Huang P, Zheng Q, Liang C. Overview of image segmentation methods. *Journal of Wuhan University (Natural Science Edition)*, 2020, 66(6): 519—531.
- 黄鹏, 郑淇, 梁超. 图像分割方法综述. 武汉大学学报(理学版), 2020, 66(6): 519—531.
- [20] China Land Surveying and Planning Institute, Department of Cadastral Management (Bureau of Real Estate Registration), Ministry of Land and Resources. Current land use classification: GB/T 21010—2017. Beijing: China Standards Press, 2017.
- 中国土地勘测规划院, 国土资源部地籍管理司(不动产登记局). 土地利用现状分类: GB/T 21010—2017. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [21] Foody G M, Mathur A. A relative evaluation of multiclass image classification by support vector machines. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, 42(6): 1335—1343.
- [22] Huang C, Davis L S, Townshend J R G. An assessment of support vector machines for land cover classification. *International Journal of Remote Sensing*, 2002, 23(4): 725—749.
- [23] Liang Y, Han G D, Zhou H, *et al.* Study on Inner Mongolia *Leymus chinensis* steppe in Hexigten Banner grassland utilization. *Inner Mongolia Prataculture*, 2011, 23(3): 32—36.
- 梁燕, 韩国栋, 周禾, 等. 内蒙古克什克腾旗羊草草原打草场合理利用的研究. 内蒙古草业, 2011, 23(3): 32—36.
- [24] Chen Y J. Study on the utilization of natural grassland in Inner Mongolia based on meteorological conditions. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2007.
- 陈亚军. 基于气象条件的内蒙古天然打草场利用方式研究. 北京: 中国农业科学院, 2007.
- [25] Suo X J, Xiang L, Gao H, *et al.* Effects of different utilization methods on community characteristics of primary vegetation of *Stipa grandis* steppe, Inner Mongolia, China. *Acta Prataculturae Sinica*, 2024, 33(4): 12—21.
- 索晓晶, 项磊, 高贺, 等. 不同利用方式对大针茅草原植被群落特征的影响. 草业学报, 2024, 33(4): 12—21.
- [26] Wu J G, Lin L P, Li T W, *et al.* Fusing Landsat 8 and Sentinel-2 data for 10-m dense time-series imagery using a degradation-term constrained deep network. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2022, 108: 102738.
- [27] Zhao X R, Liu J, Yang S K, *et al.* Spatio-temporal variations of typical woodland and grassland phenology and its response to meteorological factors in northern China. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(9): 3744—3755.
- 赵心睿, 刘冀, 杨少康, 等. 北方地区典型林草地物候时空变化特征及其对气象因子的响应. 生态学报, 2023, 43(9):

3744—3755.

- [28] Zhang Q J, Han X L, Liu J. Technology progress and development trend of spaceborne synthetic aperture radar remote sensing. *Spacecraft Engineering*, 2017, 26(6): 1—8.
张庆君, 韩晓磊, 刘杰. 星载合成孔径雷达遥感技术进展及发展趋势. *航天器工程*, 2017, 26(6): 1—8.
- [29] Breiman L. Random forests. *Machine Learning*, 2001, 45(1): 5—32.
- [30] Chen T Q, Guestrin C. XGBoost: A scalable tree boosting system//*Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*. San Francisco: ACM, 2016: 785—794.
- [31] Li M, Ning D J, Guo J C. Attention mechanism-based CNN-LSTM model and its application. *Computer Engineering and Applications*, 2019, 55(13): 20—27.
李梅, 宁德军, 郭佳程. 基于注意力机制的CNN-LSTM模型及其应用. *计算机工程与应用*, 2019, 55(13): 20—27.