DOI: 10.5846/stxb202205111324

代娜,徐维新,肖强智,王淇玉,马扶林,梁好,段旭辉.青藏高原冬季枯草生物量遥感估算.生态学报,2023,43(14):6033-6044. Dai N, Xu W X, Xiao Q Z, Wang Q Y, Ma F L, Liang H, Duan X H.Estimation of wilted grass biomass by satellite remote sensing data in winter on Qinghai-Tibet Plateau.Acta Ecologica Sinica,2023,43(14):6033-6044.

青藏高原冬季枯草生物量遥感估算

代 娜1,徐维新1,*,肖强智1,王淇玉1,马扶林2,梁 好1,段旭辉1

1 成都信息工程大学资源环境学院,成都 610225

2青海省海北州气象局,海北 812200

摘要:草地生物量是高寒草甸生态系统功能状态与生产效益的基础指标。然而,青藏高原冬半年非生育期,包括生物量在内的 牧草要素观测全面中止,使得冬季成为牧草观测的一个空白期。通过 2020 年 8 月—2021 年 4 月在青海海北高寒草地逐月牧草 参数与高光谱野外同步观测试验,进行了牧草不同月份、不同衰减状态下生物量、表观状态、光谱特征的观测及其动态变化过程 分析。结果表明,高寒冬季牧草生物量总体呈迅速下降和相对稳定两个阶段。8—10 月牧草生物量处于迅速衰减下降阶段,牧 草生物量由 8 月的 9225 kg/hm²急剧下降至 10 月的 3536 kg/hm²,降幅近 160%,11 月—次年 4 月则进入总体稳定阶段。利用衰 减过程牧草生物量与反射光谱间关系,提出了一种修订的归一化枯草植被指数(R-DGVI),该指数在低覆盖与高覆盖植被区均 表现出较好的枯草识别能力,具有相比 NDVI 更强的枯草识别能力与更宽的阈值范围。在此基础上,建立的中分辨率成像光谱 仪(MODIS)卫星冬季枯草生物量遥感估算模型 *R*²达到 0.5627(*P*<0.01),进一步,通过给出 5 个等级枯草生物量遥感估算的 R-DGVI 阈值指标,实现了枯草生物量的卫星遥感的较好估算。研究工作为揭示冬季枯草衰减规律以及构建冬季枯草遥感监测业 务提供了关键参数与可行的技术方法。

关键词:枯草;冬季;生物量;遥感;青藏高原

Estimation of wilted grass biomass by satellite remote sensing data in winter on Qinghai-Tibet Plateau

DAI Na¹, XU Weixin^{1,*}, XIAO Qiangzhi¹, WANG Qiyu¹, MA Fulin², LIANG Hao¹, DUAN Xuhui¹ 1 College of Resources and Environment, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China 2 Haibei Meteorological Bureau of Qinghai Province, Haibei 812200, China

Abstract: Grassland biomass is a basic index of ecosystem function and production efficiency of alpine meadow ecosystem. However, during non-growing season of the half of the year in winter takes a gap of grass observations period on Qinghai-Tibet Plateau, the work of grass observation which is completely suspended. This study based on monthly synchronous field observation on grass parameters and hyperspectral in alpine grassland of Haibei, Qinghai, from August 2020 to April 2021, observations of biomass, apparent state and spectral characteristics of grasses in different months and at different states of attenuation, and analysis of their dynamic processes. The results showed that wilted grass biomass in winter is generally in two stages: rapid decline and relative stability, a rapid decline period from August to October with the biomass was decreased sharply from 9225 kg/hm² in August to 3536 kg/hm² in October, there is a distinct decrement of nearly 160% compare to the biomass in August, and then, a gently and less variation period performed on the time of November to April of the next year. A Revised Dead Grass Vegetation Index (R-DGVI) was proposed based on the relationship between ground observed grass biomass and reflectance spectrum, which showed a good ability for wilted grass identification especially in area of lower or higher vegetation cover, compare to Normalized Difference Vegetation Index, it represented the stronger

收稿日期:2022-05-11; 网络出版日期:2023-03-23

基金项目:四川省科技计划项目(2022YFS0490);国家自然科学基金项目(41971328);西藏自治区科技计划项目(XZ202102YD0012C)

^{*} 通讯作者 Corresponding author.E-mail: weixin.xu@ cuit.edu.cn

responsive and wider threshold range on wilted grass biomass monitoring. Furthermore, a remote sensing estimation model for winter wilted grass biomass using MODIS satellite data was established with R^2 reached at 0.5627 (P < 0.01), then, a five-level classified system related to R-DGVI value at different grades grassland was provided, which was suitable for remote sensing monitoring on wilted grass biomass in winter. The results will provide a further information to grass change pattern in winter and some basic methods and technical for biomass monitoring.

Key Words: wilted grass; winter; biomass; remote sensing; Qinghai-Tibet Plateau

青藏高原因其独特的地理位置、气候条件与自然环境特征,其生态环境长期受到全球性的高度关注。草 地作为青藏高原最主要的植被类型^[1],不仅是高原畜牧业生产的基础、也是生态安全屏障的基础,而牧草生 物量的实时监测与估算是科学生产与生态保护的基础与关键指标^[2-3]。然而,青藏高原地区生态环境严重破 坏及畜牧业灾害主要发生于冬半年枯草季^[4]。冬季枯草季,牧草产量和营养价值持续流失并降到一年中最 低水平,直接影响牲畜采食量,引起家畜整体营养状况恶化^[5]。枯草季后期,如果草地采食强度过高,牧草存 量就可能低于临界贮草量^[6],致使生态环境遭受到严重破坏,畜牧业灾害现象大多发生于冬季枯草期与返青 前期^[5]。因此,冬季枯草存量的多少及其时空分布与动态变化,是生态补偿、草畜平衡计算、科学防灾减灾救 灾、以及生态环境保护的数据基础与前提。而枯草监测在冬季的缺失,则直接影响到生态保护与科学生产的 精细化发展。开展冬季枯草监测及其相关技术的研究,具有直接的应用需求。

对于草地生态系统而言,枯草及其凋落物是草地分布格局的一个指示器^[7],作为土壤上部一个薄覆盖层,枯草及凋落物还因具有保温、保湿的特性^[8],促进草地的生产力^[9–10]。此外,枯草的存在不仅能有效减少径流和土壤侵蚀,对草原生态系统的养分、碳、水、能量等的流动也有着重要的影响^[11]。枯草腐烂后能增加土壤养分,改善土壤结构,其作用还随着枯草量的增大而增大^[12–13]。其凋落物一定程度上可以影响到第二年种子和牧草的再生^[14–15]。因此,枯草存量的多少,也是牧草群落结构与生态系统环境相互关系研究的一个重要对象,冬季枯草监测技术的发展,将显著促进高寒草地生态系统与过程的认识。

遥感技术提供了草地大范围同步监测及其时空变化分析的基础^[16],针对高寒绿色植被的遥感监测研究 已取得大量成果^[17-18]。然而,面向冬季牧草的监测则鲜有开展。目前,枯草监测相关研究更多地基于绿草植 被指数和枯草间联系的分析,通过统计回归关系模型实现^[19],如Xu等利用Landsat数据建立了枯草及凋落物 的多光谱判识模型^[20]。国内同类的研究则多集中于草原火险可燃物的识别^[21],且研究区域主要分布于内蒙 地区,青藏高原冬半年枯草生物量监测方法的研究尚未见报道。因此,针对青藏高原高寒冬季牧草遥感监测 技术方法问题,通过野外枯草生物量与光谱的同步调查,本研究试图建立枯草生物量遥感识别的方法模型,并 进一步揭示高寒冬季牧草生物量衰减变化规律,增强青藏高原高寒枯草变化过程的认识的同时,填补当前冬 半年牧草遥感监测评估领域的技术空白,为青藏高原生态环境监测评估与保护建设提供基础技术支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区地处"世界屋脊"之称的青藏高原东北部^[22],主要覆盖青海省海北藏族自治州海晏县、青海省海 南藏族自治州同德县、四川阿坝藏族羌族自治州(100°0′—104°7′E,30°5′—34°9′N)。研究区平均海拔均大于 3000米,以大陆性气候为主,气候温凉寒冷,年较差小、日较差大。全年四季区分不明显,主要表现为冬夏两 个冷热季和植物生长与非生长季,非生长季的冬半年寒冷漫长,时间上可从当年10月持续到次年4月。区域 植被类型以高寒草甸为主,生态环境脆弱,植被受自然环境条件影响大^[23]。研究区属青藏高原高寒生态屏障 区的核心地带,是我国生态环境保护与建设的核心区,同时,畜牧生产也是当地主要的社会经济支柱产业。

研究试验样地布设于中国气象局海北牧业气象试验站(100°50′22.38″E,36°59′47.88″N),该试验场平均 海拔 3100 米,位于青藏高原西北东南走向的日月山和大通山之间,与青海湖隔山相望。该试验场属于典型的

高原大陆性气候。土壤类型有草毡寒冻雏形土(高山 草甸土)、暗沃寒冻雏形土(高山灌丛草甸土)和正常有 机土(沼泽土),土壤有机质及全量养分丰富而速效养 分贫乏。植被类型为青藏高原典型的地带性植被,群落 结构简单、种类组成较少,植物生长期短、生物生产力较 低。是我国高寒生态学研究极其重要的野外支撑平台 和国际知名的高寒草地科学研究基地。研究的主要草 地类型为青藏高原特殊植被类型——高寒草甸[24]。为 保证实验场草地不受到牛羊啃食等非自然因素干扰,在 2019 年 8 月至 2020 年 4 月采样期间,对试验场进行围 封处理。本研究固定样方与随机样方均布设于该试验 场。验证样本覆盖全研究区(图1),通过野外随机调查 的方式,调查路线经由四川阿坝藏族羌族自治州若尔盖 县达扎寺、唐克镇,红原县安曲镇,阿坝县麦尔玛镇,青 海省海南藏族自治州同德县河北乡,青海省海北藏族自 治州海晏县西海镇。

1.2 数据获取与处理

1.2.1 枯草光谱观测方法

采用 ASD Field Spec 4 地物光谱仪进行野外枯草反射光谱的观测。该光谱仪波长范围为 350—2500 nm。 波长精度 0.5 nm、重复性 0.1 nm。野外观测过程中,观 测工作严格控制在 11:00—16:00 时间段、晴朗无云、微 风天气条件下进行。每 30 分钟或受云遮蔽重新观测时



图 1 研究区地理位置及 2019 年 12 月 30 日 MODIS 卫星假彩色 影像图

Fig.1 Location of the study area and false color images of the MODIS satellite on December 30,2019

进行1次白板校准。测量时探头垂直于牧草冠层上方80 cm 处,单次观测光谱记录设为10条。

1.2.2 样方设置与观测方式

(1)固定样方

固定样方布设于海北观测试验场,观测时在试验场内随机选取 3 个 50 cm × 50 cm 标准样方,并将每个样 方再分为 10 cm × 10 cm 的 25 个子样方,以 25 个子样方中间子样方为第 1 子样方,然后依次以东、南、西、北 的次序旋转采样,并逐一标记为第 2、3 子样方直至第 25 子样方。样方详细设置参见^[25]。

以样方中心点为观测点,进行光谱与生物量同步观测。首先在牧草未刈割时进行1次样方光谱观测,获得样方全覆盖牧草光谱数据。然后,齐根部不留茬剪取第1子样方牧草后再次以中心位置观测样方牧草光谱,获取刈割后第1子样方光谱数据。依次顺序刈割其余子样方牧草并观测光谱,直至完成全部25个刈割后子样方光谱数据。

对野外固定样方与随机样方光谱同步观测所剪取的牧草逐一称重,获得各子样方牧草鲜重。同时,对所 获子样方牧草样本用 90℃温度进行烘干处理,并每 30 分钟观测称重记录一次牧草重量,获取牧草枯干过程 及最终枯草重量数据序列。

固定样方每月观测获得总计 3 个样方 75 个子样方的牧草鲜重、及每 30 分种枯干过程牧草干重。同理, 获得 13 个野外调查样区,每个样区东南西北方向各 3 个样方及中点样方所构成的牧草鲜重与干重数据序列。

(2) 验证样方

为反映不同空间区域牧草状况,验证样方以野外调查方式覆盖研究区主要牧草覆盖区。为更好地保证野 外光谱调查的随机性及与不同分辨率卫星数据的匹配性。野外调查采用十字交叉法进行,即选取开阔平坦的 区域,在该区域高寒草地随机选取一点作为观测样区中心点,再以该点为样区中心点,各向南北与东西方向延伸 50 m,形成南北与东西 100 m 十字交叉线。在该交叉线上,分别于 10 m、30 m、50 m 处各设置一个 50 cm × 50 cm 标准样方。对样方牧草进行未刈割和刈割 2 种状况下的光谱与生物量同步观测。

1.2.3 光谱数据

自 2020 年 8 月至 2021 年 4 月,每月月末(以 30 日 为准,前后正负偏差小于 2 日),利用 ASD 光谱仪进行 光谱实地观测。其中,因新冠疫情突发,受防疫控制而 导致 2020 年 12 月月末试验中断,2020 年 12 月数据 缺测。

2020 年 8 月至 2021 年 4 月,共获得海北固定观测 试验场固定样方光谱数据 3910 条,对照样方数据 6240 条。以 2019 年 12 月 06 日—13 日,四川阿坝、青海果洛 地区的 183 个野外随机调查样方的 2580 条光谱数据为 验证数据。

原始观测数据通过单次观测所获 10 条记录,通过 对数据进行一致性对比、以及异常值与无效值判别等方 式,完成数据质量检验与数据质量控制。图 2 为 2020 年 11 月海北试验场高寒枯草不同生物量的光谱观测数 据示例。

1.2.4 牧草生物量数据

固定样方生物量数据,2020 年 8 月至 2021 年 4 月, 共获得海北固定观测试验场固定样方光谱同步牧草鲜重数据 600 条,干重数据 4731 条。

验证样本生物量数据,以 2019 年 12 月 06 日—13 日所获取的野外随机调查数据作为验证数据。该调查 经由四川阿坝藏族羌族自治州若尔盖县达扎寺、唐克镇,红原县安曲镇,阿坝县麦尔玛镇,青海省海南藏族自 治州同德县河北乡,青海省海北藏族自治州海晏县西海镇,共采集调查样方 183 个。其中生物量数据 64 个, 按采样点平均后得到生物量数据 14 个,根据照片与观测记录,删除过度放牧样本及卫星像元有云覆盖的数 据,共获得 9 个有效卫星与地面生物量调查验证数据对。

1.2.5 遥感数据源及数据处理

收集 2019 年 12 月 10 日和 2019 年 12 月 30 日与野外地面调查同期的中分辨率成像光谱仪(MODIS)卫星 MOD09GHK 500 m 地表反射率产品数据(https://earthdata.nasa.gov)。影像覆盖地面试验及随机调查样点,晴空无云且影像质量良好。卫星数据经辐射定标、大气校正、几何校正等基本预处理,由 MODIS 影像的波段 1,2,3 对应 *R*,*G*,*B* 合成的研究区卫星影像假彩色合成图如图 1。

图 1 清晰展示了研究区植被、水体、积雪等地物,积雪主要分布在东部与南缘的高海拔地区,研究区腹地 主要是以高寒草甸为主的草地^[26]。较好的图像质量与适合时相有利于冬季枯草的遥感反演的分析与展示。 **1.3** 方法

1.3.1 生物量遥感估算模型构建

设因变量 y 为生物量,自变量 x 为植被指数。采用最小二乘法,进行多元线性回归方程的参数估计,构建基于枯草指数的生物量线性回归遥感估算模型。多元线性回归方程计算与公式参见文献^[27]。

1.3.2 等级划分

结合《天然草原等级评定技术规范》中的草原等级的划分标准与要求^[28],通过所建枯草生物量遥感估算 模型,确定不同等级对应的枯草指数阈值,实现枯草生物量等级的遥感指标划分。



图 2 2020 年 11 月 30 日海北试验场 3 个固定样方观测获得的 78 个不同生物量子样方枯草光谱数据

Fig.2 Spectral data of wilted grass from 78 different biological quantum plots obtained from 3 fixed plots in Haibei Test Site on November 30, 2020

图中 I、Ⅱ、Ⅲ分别表示样方 1、样方 2 与样方 3, 色标 I-1—I-26、II-1—II-26、III-1—III-26 则分别对应了 3 个固定样方观测获得的 78 个不同生物量子样方枯草光谱曲线

1.3.3 遥感植被指数的选取

本研究选取归一化差异植被指数(NDVI)进行枯草识别能力的对比验证,基于枯草植被指数(DGVI)进行枯草识别与估算的分析。

NDVI 是一种广泛使用的植被指数,可从具有不同空间和时间分辨率的不同传感器获得^[29-30],研究表明 NDVI 与枯草植被覆盖度之间存在一定的相关性^[21],其计算方式与说明参见^[31]。

DGVI 是一种针对高寒枯草的植被指数。本研究表明, DGVI 可以较好地实现高寒枯草的识别。其计算 公式如下:

$$DGVI = \frac{Band5 - Band3}{Band5 + Band3}$$
(1)

式中,Band5与Band3分别为MODIS卫星第5与第3波段反射率值。

2 结果与分析

2.1 牧草生物量衰减规律

2.1.1 自然枯干衰减过程

基于 2020 年 8 月至 2021 年 4 月每月未自然状态下牧草参数的观测结果,对高寒牧草自然枯干衰减过程 进行分析。

图 3(平均)列出了自然状态下不同样方每月(2020 年 12 月缺测)牧草重量观测值。从图中可以发现, 2020 年 8 月至 11 月,生物量值呈持续显著下降变化特征。野外观测 3 个样方的平均值从 8 月的 9225 kg/hm² 下降至 9 月的 7970 kg/hm²,其后进入急速下降阶段,牧草生物量从 9 月的 7970 kg/hm²迅速下降至 10 月的 3536 kg/hm²,降幅达到了全年降幅的 72%。此后,这种下降趋势保持至 11 月,直至牧草生物量跌至约 3000 kg/hm²后趋于稳定。11 月到次年 4 月,牧草生物量基本维持在 3000 kg/hm²左右,并保持基本稳定。总体来 看,青藏高原北部冬半年牧草生物量总体呈 3 个变化阶段,即:8—9 月的明显下降阶段、10—11 月的急速衰减 阶段、以及当年 11 月—次年 4 月的相对稳定阶段。

图 3(中值)列出了自 2020 年 8 月至 2021 年 4 月自然状态下 I、Ⅱ、Ⅲ三个固定样方每月(2020 年 12 月 缺测)各自的 25 个子样方生物量观测值。从图中可以看出,生物量变化趋势与图 3(平均)趋近一致,即分为 明显下降、急速衰减和基本稳定三个阶段。由于随机取样、以及剪草样方的不可重复性,不可避免存在不同时 间取样及样本间的差异性,导致个别样方生物量有较明显差别。如 8 月、9 月和 10 月样方Ⅲ的值偏低于其他 两个样方,但总体上牧草衰减规律与变化趋势仍保持较好的一致性变化特征。



图 3 2020.08—2021.04 海北观测场高寒牧草 I、II、III样方平均值与变化趋势及其不同月份各样方中 25 个子样方观测值与中值 Fig.3 2020.08—2021.04 The average and changing trend of alpine grass I, II and III quadrats in Haibei observation field and the observation and median values of 25 quadrats in different months

6038

为了进一步探讨牧草枯干过程中生物量随时间连续变化的特征,对当年8月(鲜草)至次年4月(半枯草 或枯草)每次野外采样所获得的牧草样本,在采样后立即进行每30分钟间隔烘干称重试验。即保持其他条件 稳定状态下,通过连续烘干,并每30分钟进行一次称重,直至牧草重量稳定少变为止,以模拟牧草随时间变化 的生物量衰减的动态过程。通过烘干试验中高时间频次生物量的观测,探讨生物量随时间衰减的动态特征。 结合野外观测数据,实现烘干试验衰减结果与自然干枯衰减过程的相互佐证,以更精细更准确地刻画牧草的 干枯衰减过程。

从图 3 可知,样方Ⅲ代表了生物量明显偏低的样方区,不利高频次与较完整衰减规律的辨识,因此,主要 以样方 I 和样方 II 的烘干过程来探讨牧草干枯过程。图 4 列出了当年 8 月至次年 4 月每月采样获得的两个 样方牧草样本每 30 分种烘干处理下其重量变化特征。图中横坐标指示每 30 分钟为 1 个观测时次的时间序



图 4 2020-08—2021-04 海北观测场固定样方 I 及样方 II 烘干实验每 30 分钟生物量时间序列

Fig.4 2020-08—2021-04 biomass time series of fixed quadrat I and quadrat II drying experiments in Haibei observation field every 30 min 图中横坐标指示每 30 分钟为 1 个观测时次的时间序列

列。由于 10 月后牧草在自然枯干过程中其重量减少显著, 与 8、9 月数值相差过大, 在图中难以清晰观测该时 段重量变化, 因此, 将 10 月—次年 4 月牧草烘干序列以放大的子图形式表示在图中(图 4)。

图 4 中牧草烘干时间的差异性表明,8 月鲜草水分等物质含量丰富,9 月牧草处于半干枯状态,10—11 月 为牧草干枯衰减的主要时段。而每年 1—4 月,牧草处于干枯的最大程度,较少的烘干时间即可达到干枯状态,这一时期可视为青藏高原北部牧草的枯干季。

从逐月牧草重量的变化过程来看,各月牧草均遵循先急速下降再转为缓慢下降直至动态稳定的规律。而由于 8、9 月牧草起始重量高,从其下降直至稳定所经历的时间长,急速下降的幅度低于 10 月以后的月份。 10—11 月急速下降时段发生在前 90 分钟,降幅达到了 85%,而 1 月后,由于牧草枯干已达到最大程度,在烘 干过程的前 60 分钟水分迅速散失而导致重量急速下降,前 60 分种降幅可达 90%以上。这说明牧草干枯过程 中物质的周转速率在不同月份存在不同的特征,即 8—9 月份的缓慢黄枯阶段、10—11 月的快速干枯阶段、次 年 1—4 月的稳定阶段。这与秋季和冬季不同气候条件、牧草黄枯与干枯的前期持续的时间,以及水分等物质 变化速率有关。

自然干枯衰减过程与烘干试验过程均表明,青藏高原牧草在冬季的枯干衰减过程存在显著不同的阶段。 总体上存在3个不同程度的生物量下降过程,即8—9月的牧草黄枯过程的明显下降期,这与徐维新等人观测 的物候期相一致^[32],这一时期是牧草黄枯过程,水分与叶绿素等物质不断损失,导致生物量不断下降。10— 11月进入一个急速下降阶段,这一时期牧草枯死,随着气候不断寒冷干燥,牧草中的水分迅速丢失,生物量显 著下降并进入枯草期。11月至次年4月,牧草水分已大部损失殆尽,保留的干物质含量也基本稳定,牧草生 物量因风吹日晒或降雪等气候条件影响而轻微波动^[33],处于一个小范围波动的稳定期。

2.2 枯草生物量遥感监测模型

由于 ASD Field Spec 4 地物光谱仪进行野外枯草反射光谱的观测时,设定探头距被测物高 80 cm,因此, 在该仪器 5°的视场角条件下,地表观测直径范围约为 25.0 cm。当子样方设置为 10 cm × 10 cm 范围时,仪器 观测仅可较好覆盖前 9 个子样方。所以,本研究后续计算时仅采用了固定观测样方的前 9 个子样方的生物量 及同步地面观测光谱数据。

2.2.1 R-DGVI

前述的研究表明,11月—次年4月为牧草的基本稳定阶段,即牧草从11月开始全面进入枯草期。因此, 以11月观测数据代表枯草季,进行枯草植被指数的计算与反演分析。依据公式(1)及2020年11月海北试验 场观测得到的各样方前9个子样方地面反射光谱数据,计算得到各样本 DGVI。图5(DGVI)为计算得到的 DGVI与同样本生物量散点图,从图中可以看出,枯草生物量和 DGVI呈现明显的负相关关系,表明随着生物 量的下降,牧草覆盖程度的下降,地表反射率呈增加趋势。

由于,牧草生物量的估算过程中,正相关关系更符合常规的计算分析思维方式。因此,为修订二者之间的 负相关关系,本研究提出一个 R-DGVI 的修订模式,以更方便地开展枯草生物量的估算。其计算公式如下:

$$R-DGVI = 1 - \frac{Band5 - Band3}{Band5 + Band3}$$
(2)

式中 Band5 与 Band3 分别为 MODIS 卫星第5 与第3 波段反射率值。

2.2.2 枯草估算模型

依据公式(2)及 2020 年 11 月海北试验场所获得的三个对照样方的生物量同步地面观测光谱数据,计算得到各样本 R-DGVI。图 5(R-DGVI)为地面观测光谱计算得到的 R-DGVI 与同样本生物量散点图。从图中可以看出枯草生物量和 R-DGVI 线性响应特征显著,二者相关系数 R 达到 0.75(P<0.01),可以利用 R-DGVI 进行冬季地上枯草存量的估算。

利用以上二者间的简单线性拟合计算可以得到一个基于地面观测数据的冬季枯草生物量估算模型:

$$Y = 24067X - 5057.6$$

(3)

式中,Y表示生物量,X表示 R-DGVI。

该模型 R²=0.5627,线性方程 F 检验的总体检验水 平达到 0.01 的显著性水平,表明,该线性模型在估算枯 草生物量时,具有较高的可信度。

2.2.3 模型验证

将所建立的枯草估算模型,以 2019 年 12 月 06 日—13日在青藏高原东北部开展野外随机调查时获取 的9个地面光谱及同步枯草生物量样本数据进行回代 检验。进一步,利用收集到的2019年12月30日同时 相晴空 MODIS 卫星数据,提取地面对应9个验证点像 元数据,基于式(2)与(3)计算得到该样点卫星估算的 枯草生物量。图 6 为由式(3) 计算得到的枯草生物量 与同步观测称重得到的枯草生物量散点图。从图可容 易发现,估算生物量与地面实测生物量呈明显线性相 关,其相关系数为0.7967(P<0.01),通过0.01显著性水 平检验。试验点建立的模型,经过青藏高原东北部不同 区域样本点的检验,且模型输出结果处于 99% 置信区 间。说明模型的建立直接反映了枯草地上生物量的变 化特征,不仅具有较高的可信度,而且有一定的区域适 用性,能客观地反映冬季草地地上生物量,可以用来估 算青藏高原北部地区冬季草地地上生物量。

2.3 基于 R-DGVI 枯草生物量遥感监测等级指标

虽然基于 R-DGVI 建立的枯草监测模型具有一定 的准确性与适用性,然而,也可以发现,通过该公式估算 的结果仍表现出一定的离散性,且公式计算结果的线性 收敛性在不同覆盖程度上并不具有一致的分布,如低覆 盖草地的离散性偏大。这在实际估算应用中不可避免 会带来一定的误差。考虑草地牧草生物量在服务精度 上的需求并不需要准确至某一数值,结合《天然草原等 级评定技术规范》中的草原等级的划分标准与要求,为 便于实际业务监测需要,将枯草生物量划分为五个等 级,并给出了对应等级 R-DGVI 的划分阈值,以方便估 算冬季草地枯草生物量等级分布,并提高遥感估算结果 的准确性。基于 R-DGVI 的枯草生物量等级划分如 表1。

2.4 基于 MODIS 卫星的枯草生物量估算

选取青藏高原东北部地区覆盖全部地面观测试验样点、晴空少云的 2019 年 12 月 10 日与 2019 年 12 月 30 日 MODIS 卫星数据,并通过式(3)逐像元计算得到该卫星区域冬季枯草生物量估算值(图 7)。从图中可 知,12 月高原地区植被覆盖的空间差异性非常显著。冬季牧草生物量总体呈由西北向东南递减的分布特征, 而这一时期,高原上牧草覆盖以 1500—3000 kg/hm²等级的草地为主。但高原上这一时期仍存在一定的 4500 kg/hm²以上的高覆盖草地,高覆盖草地主要分布在环青海湖流域与一些低海拔沟谷地带、以及东部的一些农



图 5 2020.11 青海省海北观测场生物量与 DGVI 及 R-DGVI 散 点图

Fig.5 2020.11 Biomass and DGVI and R-DGVI scatterplots of Haibei observation field in Qinghai Province

DGVI:枯草植被指数 Dead grass vegetation index; R-DGVI:修订的 枯草植被指数 Revised dead grass vegetation index





Fig.6 Verification of the fitting accuracy between the estimated aboveground biomass of grassland and the measured ground biomass at 9 random sampling sites in the field (based on R-DGVI) 业区。低海拔沟谷地区在冬季仍存在高覆盖牧草的状况,与高原地区轮牧方式下冬季草场的留存方式相一 致。对比图 7 不同时间的枯草生物量等级图可知,12 月 10 日与 30 日枯草等级空间格局基本相同,其中,12 月 30 日相对于 12 月 10 日枯草生物量等级为等级 4 和等级 5 的草地有所减少,而枯草生物量等级为等级 1 和等级 2 的草地分布范围变广,说明枯草生物量有所减少,这与 2.1 牧草生物量衰减规律相一致,并且枯草生 物量等级高的变化比较明显,主要表现在中西部地区,说明本文所建模型对高寒冬季牧草时空变化响应较好。

Table 1 Biomass grade of willed grass in Qingnal-11bet Plateau based on K-DGV1		
枯草生物量等级 Biomass grade of wilted grass	枯草生物量(kg/hm ²) Wilted grass biomass	R-DGVI Revised Dead Grass Vegetation Index
无植被 Non-vegetation	/	0.00—0.21
等级 1 Grade1	0—750	0.21—0.24
等级 2 Grade 2	750—1500	0.24—0.27
等级 3 Grade 3	1500—3000	0.27—0.33
等级 4 Grade 4	3000—4500	0.33—0.40
等级 5 Grade 5	>4500	0.40—0.60
云雪冰 Cloud, snow and ice	/	>0.60

表1 基于 R-DGVI 的青藏高原枯草生物量等级

R-DGVI:修订的枯草植被指数 Revised dead grass vegetation index

此外,从图 7 可知,本文所建模型,能较好地估算枯草的生物量、识别不同等级枯草在空间分布上的差别, 且对于积雪与湖冰也有较好的识别能力,能准确地直接识别青海湖的湖冰及西部与南部地区的积雪覆盖区。 说明本研究所建模型,不仅具有很好地冬季枯草及其生物量等级的识别能力,也具有其他地物的判识能力,其 结果可直接应用于实际业务监测服务中。

3 讨论

3.1 R-DGVI 与 NDVI 枯草监测能力对比

3.1.1 枯草生物量估算能力对比

NDVI 是最常用的植被指数,也是衡量植被生长状况的最佳指标,大量研究已证实了 NDVI 对绿色植被的 检测能力^[34],但 NDVI 对枯草识别与监测能力的分析鲜有报道。基于前述地面同步观测牧草生物量与光谱 数据,计算得到 2019 年 12 月 30 日海北固定样方枯草 NDVI,并利用枯草 NDVI 与牧草生物量间的线性拟合, 建立了一个基于 NDVI 的冬季枯草生物量线性估算模型。图 8 为由该模型计算得到的枯草生物量与实测枯 草生物量散点图。结合图 8 与图 6 可知,NDVI 与 R-DGVI 对枯草生物量均具有一定的模拟估算能力,二者线 性拟合方程 *R*²均通过 90%以上的置信区间,但由 R-DGVI 构建的模型其决定系数 *R*²为 0.6347(*P*<0.01),明显 高于 NDVI 的 0.4281(*P*<0.10),且显著性水平相差明显。二者相比,说明 R-DGVI 具有对枯草更高精度的估 算能力与更广阔的适用范围。而 NDVI 虽然在枯草生物量准确度方面刻画存在不足,但仍具有一定冬季牧草 生物量估算的能力。

3.1.2 生物量等级估算能力对比

R-DGVI的范围为 0—1,其中能识别枯草的阈值范围为 0.21—0.60,NDVI 的范围为-1—1,能识别枯草的 阈值范围为 0.09—0.37,两者相比,R-DGVI 的阈值范围大,不同等级的区分能力与精细程度强于 NDVI。从二 者的 MODIS 卫星枯草生物量等级估算结果可以清晰看出(图 7 与图 9),在研究区北部的高植被区,R-DGVI 的识别效果明显优于 NDVI,说明 R-DGVI 较好地克服了 NDVI 容易饱和^[35]、高植被覆盖敏感性不足的弱点。 更具有优势的是,在低植被覆盖区的 0—750、750—1500 和 1500—3000 kg/hm²的三个等级区,R-DGVI 的区分 效果也明显优于 NDVI,植被覆盖分级类型相比更为清晰,空间分布的区域差异得到表现。

3.1.3 非植被地物区分能力

对比图 1、图 7 与图 9 容易发现,二者对云、雪、水体等非植被区均有较好的区分能力。但 NDVI 对云雪冰



 □
 县城
 ▲
 随机调查点
 □
 无植被
 ■
 Grade2
 □
 Grade4
 □
 云雪冰

 ★
 海北试验场
 □
 中国市界
 ■
 Grade1
 ■
 Grade3
 ■
 Grade5

图 7 2019 年 12 月 10 日与 2019 年 12 月 30 日 MODIS 卫星估算的青藏高原东北部地区枯草生物量等级图

Fig.7 Wilted grass biomass grade map of northeastern Qinghai-Tibet Plateau estimated by MODIS satellite on Dec. 10, 2019 and Dec. 30, 2019

有更好地识别效果,从云雪冰周围牧草等地物的准确分 类效果中表现出来,在云雪与牧草相间的区域,对牧草 与其他地物的分界与识别效果要优于 R-DGVI。

3.2 枯草衰减规律对比

已有的大量研究中,冬季牧草生物量估算大多利用 绿草遥感监测的原理与指数进行估算^[36-37],其枯干变 化过程绝大多数都是基于绿草推算得到,使得枯草生物 量自夏至冬变化规律大多建立在推算和查找表的基础 上,估算结果误差较大^[38]。基于推算和查找表的方式, 其冬季某一时段的枯草存量估算的准确性高度依赖于 8月牧草起始重量及模型的描述能力。而本研究实际 测到的逐月变化规律,则清晰地分为两个变化阶段。对 比已有的研究成果发现,现有的成果对于某个阶段的模 拟能力均有较大误差。因此,在对于不同时间段枯草状 态进行估算时,本研究获得的衰减规律具有更高的时间 分辨能力与更准确地描述能力。



图 8 野外 9 个随机调查样点草地地上生物量估算值与地面实测 值拟合精度验证(基于 NDVI)

Fig.8 Validation of fitting accuracy between estimated aboveground biomass and measured aboveground biomass at nine random sampling sites in the field (based on NDVI)

NDVI: 归一化植被指数 Normalized difference vegetation index

吴海艳等指出,8—10月高寒草甸随牧草含水量的 显著降低生物量迅速下降,之后随着牧草枯黄程度的增加,含水量下降幅度减缓,1—4月草地植物群落处于 相对稳定状态生物量变化不大^[39],这与本文的研究结 论一致。但吴海艳等人的研究只选取了 8 月、10 月、次 年 1 月、4 月、5 月这几个月的生物量数据,采样月份之 间的时间间隔相对偏大,对牧草衰减规律的精细刻画略 有不足。郭艳红等^[40]的研究结果也指出高寒草甸 8 月 份地上生物量最高 4 月份最低。但郭艳红等着重于 4 月底返青起至 8 月末的牧草生长期,未能有效得出牧草 枯干期的衰减规律。从已有的基于枯草直接观测的研 究结果证实,本研究所得到的枯草衰减规律较真实地指 示了高寒地区冬季牧草枯萎、衰减的全过程,具有较高 的可信度与参考价值。

崔庆东等的研究表明,从冷季初期的 11 月至次年 4月,牧草生物量大致呈线性匀速下降趋势,牧草的衰 减过程以相对平缓一致的速度呈现,若以 11 月生物量 存量为基准,牧草保存率平均月递减率为 10.6%^[33]。 这与本文以及吴海艳等人得出阶段性下降的变化特征 不同,说明青藏高原高寒地区冬季枯草生物量与温性草 甸草原在冬季的干枯衰减过程中可能存在明显的差异 性。即内蒙等北方温性草原区以逐渐干枯趋势为主,而 青藏高原高寒地区则阶段性快速下降特征显著,本研究 的发现,增进和丰富了我国对不同区域冬季枯草衰减变 化规律的认识。



图 9 2019 年 12 月 30 日 MODIS 卫星估算 NDVI 青藏高原东北 部地区枯草生物量

Fig.9 Estimated wilted grass biomass of NDVI by MODIS satellite on December 30, 2019 in northeastern Qinghai-Tibet Plateau

4 结论

本文以青藏高原东北部为研究区,基于 MODIS 数据和野外实测数据,对高寒牧草自然枯干衰减过程进行 分析,构建高寒冬季枯草生物量遥感估算模型并进行枯草生物量遥感反演,在此基础上对高寒冬季枯草生物 量等级划分。主要结论如下:

(1) 青藏高原牧草在冬半年的枯干衰减过程总体上呈迅速下降和相对稳定两个阶段。存在两个不同程度的生物量下降过程和一个动态稳定过程,即 8—9 月的牧草黄枯过程的明显下降期,10—11 月牧草进入枯草期的生物量急速下降期,11 月至次年 4 月,处于一个小范围波动的稳定期。

(2)基于地面观测数据建立的冬季枯草生物量估算模型,经过青藏高原东北部不同区域样本点的检验, 模型输出结果处于 99%置信区间。模型的建立直接反映了枯草地上生物量的变化特征,不仅具有较高的可 信度,也具有青藏高原北部地区较强的区域适用性。能客观地反映冬季草地地上生物量,可以用来估算青藏 高原北部地区冬季草地地上生物量。

(3)为便于应用,提出了适于高寒冬季枯草生物量遥感监测的5级等级指标,给出了不同等级划分阈值, 为开展冬季牧草遥感监测业务提供基础方法与技术参数。

参考文献(References):

- [1] 中国资源信息委员会. 中国资源信息. 北京: 中国环境科学出版社, 2000.
- [2] 何丽. 基于 PROSAIL 和 GPR 模型的若尔盖草地地上生物量遥感反演研究[D]. 成都:中国科学院大学(中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所), 2020.
- [3] 张爱武, 张帅, 郭超凡, 刘路路, 胡少兴, 柴沙驼. Landsat8 光谱衍生数据分类体系下的牧草生物量反演. 光谱学与光谱分析, 2020, 40 (1): 239-246.

- [4] 洒文君. 青藏高原高寒草地生产力及载畜量动态分析研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2012.
- [5] 冯云飞,张宪洲,石培礼,付刚,张扬建,赵广帅,曾朝旭,张晶.藏北高寒高原载畜量对气候变化的响应:采食量和时滞效应. Journal of Resources and Ecology, 2017, 8(1): 88-96.
- [6] 严学兵,汪玺,郭玉霞,周禾,张德罡.高寒牧区垂穗披碱草草地生物量及营养价值动态的研究.草业科学,2003,20(11):14-18.
- [7] Eisfelder C, Kuenzer C, Dech S. A review on derivation of biomass information in semi-arid regions based on remote sensing data. SPIE Remote Sensing. Proc SPIE 7831, Earth Resources and Environmental Remote Sensing/GIS Applications, Toulouse, France. 2010, 7831; 176-183.
- [8] BIEŃKOWSKI P, TITLYANOVA A A, SHIBAREVA S V. Chemical properties of litter of forest and grassland ecosystems: Transect studies in Siberia (Russia). Polish Journal of Ecology, 2006, 5491-104.
- [9] Li M, Guo X L. Long term effect of major disturbances on the northern mixed grassland ecosystem—a review. Open Journal of Ecology, 2014, 4 (4): 214-233.
- [10] Deutsch E S, Bork E W, Willms W D. Separation of grassland litter and ecosite influences on seasonal soil moisture and plant growth dynamics. Plant Ecology, 2010, 209(1): 135-145.
- [11] Aase J, Tanaka D. Reflectances from Four Wheat Residue Cover Densities as Influenced by Three Soil Backgrounds. Agronomy Journal-AGRON J, 1991, 83.
- [12] 马周文, 王迎新, 王宏, 阿不满, 张贞明, 侯扶江. 放牧生态系统枯落物及其作用. 草业学报, 2017, 26(7): 201-212.
- [13] 马琳,李学斌,谢应忠.草地生态系统枯落物分解及功能研究.草业与畜牧,2011(12):7-12,24.
- [14] BALáZ S D, VALKó O, KELEMEN A, TöRöK P, MIGLÉCZ T, ÖLVEDI T, LENGYEL S, TőTHMÉRÉS Z B. Litter and graminoid biomass accumulation suppresses weedy forbs in grassland restoration. Plant Biosystems-An International Journal Dealing with all Aspects of Plant Biology, 2011, 1457:30-737.
- [15] Quested H, Eriksson O. Litter species composition influences the performance of seedlings of grassland herbs. Functional Ecology, 2006, 20(3): 522-532.
- [16] Bao A M, Cao X M, Chen X, Xia Y. Study on models for monitoring of above ground biomass about Bayinbuluke grassland assisted by remote sensing. Optical Engineering + Applications. Proc SPIE 7083, Remote Sensing and Modeling of Ecosystems for Sustainability V, San Diego, California, USA. 2008, 7083: 155-163.
- [17] Zhang J H, Yao F M, Zheng L Y, Yang L M. Evaluation of grassland dynamics in the northern-Tibet plateau of China using remote sensing and climate data. Sensors: Basel, Switzerland, 2007, 7(12): 3312-3328.
- [18] Miaogen S, Yanhong T, Julia K, Pengcheng Z, Song G, AYako S, Jin C. Estimation of aboveground biomass using in situ hyperspectral measurements in five major grassland ecosystems on the Tibetan Plateau. Journal of Plant Ecology, 2008, 1(14): 247-257.
- [19] Yang X H, Guo X L, Fitzsimmons M. Assessing light to moderate grazing effects on grassland production using satellite imagery. International Journal of Remote Sensing, 2012, 33(16): 5087-5104.
- [20] Xu D D, Guo X L, Li Z Q, Yang X H, Yin H. Measuring the dead component of mixed grassland with Landsat imagery. Remote Sensing of Environment, 2014, 142: 33-43.
- [21] 包玉龙,张继权,刘兴朋,陈鹏,刘晓静,张琪,沈玲玲.基于高光谱遥感的草地可燃物的识别与枯草量估算研究//.风险分析和危机反应的 创新理论和方法——中国灾害防御协会风险分析专业委员会第五届年会论文集,2012;127-131.
- [22] 赵慧芳,李晓东,张东,校瑞香.基于 MODIS 数据的青海省草地地上生物量估算及影响因素研究.草业学报, 2020, 29(12): 5-16.
- [23] 王帅. 浅谈生境干旱化对高寒草甸植被的影响. 林业科技通讯, 2021(11): 37-39.
- [24] 邹珊, 吕富成. 青藏高原两种特殊的植被类型: 高寒草原和高寒草甸. 地理教学, 2016(2): 4-7, 46.
- [25] 梁好,徐维新,段旭辉,张娟,代娜,肖强智,王淇玉.基于 PROSAIL 模型的高寒冬季枯草关键参数阈值率定.光谱学与光谱分析, 2022,42(4):1144-1149.
- [26] 柯长青,李培基.青藏高原积雪分布与变化特征.地理学报,1998,53(3):209-215.
- [27] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术. 2 版. 北京: 气象出版社, 2007.
- [28] 《天然草原等级评定技术规范》. 草业科学, 2008, 25(3): 107.
- [29] Griffith J, Martinko E, Whistler J L, Price K. Interrelationships among landscapes, ndvi, and stream water quality in the us central Plains. Ecological Applications, 2002, 12: 1702-1718.
- [30] 李伟霄,徐军,姚雅情,张志才.全球变暖背景下青藏高原三江源地区植被指数(NDVI)时空变化特征探讨.山地学报,2021,39(4): 473-482.
- [31] Kaufman Y J, Tanre D. Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOS-MODIS. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1992, 30(2): 261-270.
- [32] 徐维新,辛元春,张娟,校瑞香,王晓明.近20年青藏高原东北部禾本科牧草生育期变化特征.生态学报,2014,34(7):1781-1793.
- [33] 崔庆东,刘桂香,卓义.锡林郭勒草原冷季牧草保存率动态研究.中国草地学报,2009,31(1):102-108.
- [34] 张殿岱, 王雪梅, 咎梅. 基于 Landsat 8 OLI 影像的渭-库绿洲植被地上生物量估算. 草业学报, 2021, 30(11): 1-12.
- [35] 程乾,黄敬峰,王人潮,唐延林. MODIS 植被指数与水稻叶面积指数及叶片叶绿素含量相关性研究.应用生态学报,2004,15(8): 1363-1367.
- [36] 鱼海燕. 我国草原防火工作的现状、存在的问题及对策. 养殖技术顾问, 2014(10): 281.
- [37] 王迅,刘书杰,张晓卫,郝力壮,赵月平,王万邦.基于 HJ-1A/1B 数据的高寒草地牧草营养动态监测模型.国土资源遥感,2013,25 (3):183-188.
- [38] 都瓦拉,刘桂香,玉山,李清清.内蒙古草原火险等级短期预报研究.中国草地学报,2012,34(4):87-92.
- [39] 吴海艳,马玉寿,董全民,孙小弟,施建军,王彦龙,盛丽.黄河源区藏嵩草沼泽化草甸地上生物量及营养季节动态研究.草业科学, 2009, 26(1): 8-12.
- [40] 郭艳红, 蒲小剑, 蒲小朋, 杜文华. 青藏高寒牧区天然草地地上生物量和营养品质的变化规律. 草地学报, 2021, 29(4): 734-742.