Sentinel-2 和 GF-1 影像结合提取苜蓿空间分布

包旭莹[1]，王 燕[2]，冯琦胜[1]，葛 静[1]，侯蒙京[1]，刘畅宇[1]，高新华[1]，梁天刚[1※]

（1.兰州大学草地农业生态系统国家重点实验室/兰州大学农业农村部草牧业创新重点实验室/兰州大学草地农业教育部工程研究中心/兰州大学草地农业科技学院，兰州 730020；2.崇信县第一中学，平凉 744200）

摘 要：及时准确地获取苜蓿空间分布信息有利于对草业生产发展和管理提供科学数据支撑。该研究基于 GF-1/WFV 和 Sentinel-2 遥感影像，以甘肃省金昌市作为研究区，构建了苜蓿的归一化植被指数（Normalized Difference Vegetation Index，NDVI）数据集，并结合苜蓿光谱反射率随生育期的变化规律，提出一种利用 MATLAB 寻峰函数（Findpeaks）提取苜蓿遥感特征的方法，通过确定最小峰值突出（Minimum Peak Prominence，MPP）值实现金昌市苜蓿空间分布信息的提取。研究结果表明，基于 Sentinel-2 遥感数据的识别苜蓿精度优于 GF-1/WFV，识别精度和 Kappa 系数在 85%和 0.7 以上，主要是由于 Sentinel-2 数据的 NDVI 时间序列曲线密度较 GF-1/WFV 大，可以更好地识别苜蓿刈割前后的关键时间点；寻谷法的苜蓿提取总体精度、Kappa 系数、用户精度、制图精度指标均比寻峰法高，基于 Sentinel-2 影像的寻谷法苜蓿遥感识别总体精度为 92.25%，Kappa 系数为 0.81，位置精度为 86.44%；2019 年金昌市苜蓿空间分布整体呈现从北到南逐渐增多的趋势，统计得到苜蓿种植面积为 15 449.07 hm^2，其中金川区的苜蓿面积为 1 353.42 hm^2，占金昌市苜蓿总面积的 8.76%；永昌县的苜蓿面积为 14 095.65 hm^2，占总面积的 91.24%。研究结果证实，基于 Sentinel-2 遥感数据的寻谷法可以有效识别苜蓿空间分布，对于实现草牧场精准化管理和草牧业生产信息精准监测具有重要意义。

关键词：遥感；图像识别；时间序列；苜蓿；归一化植被指数 NDVI；信息提取

doi：10.11975/j.issn.1002-6819.2021.16.019

中图分类号：S127 **文献标志码**：A **文章编号**：1002-6819(2021)-16-0153-08

包旭莹，王 燕，冯琦胜，等. Sentinel-2 和 GF-1 影像结合提取苜蓿空间分布[J]. 农业工程学报，2021，37(16)：153-160. doi：10.11975/j.issn.1002-6819.2021.16.019 http://www.tcsae.org

Bao Xuying, Wang Yan, Feng Qisheng, et al. Spatial distribution extraction of alfalfa based on Sentinel-2 and GF-1 images[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(16): 153-160. (in Chinese with English abstract) doi：10.11975/j.issn.1002-6819.2021.16.019 http://www.tcsae.org

0 引 言

苜蓿具有产量高、营养丰富、适口性好、易于家畜消化等特点[1]，是世界上广泛分布的优良牧草，素有“牧草之王”的美称[2]。苜蓿作为重要饲草饲料的来源，在保障生态安全和食品安全方面发挥着重要作用。近年来，随着畜牧业的大力发展以及农业结构的调整，苜蓿作为优质牧草，在中国部分省区大面积集约种植，促进了苜蓿产业得到快速发展[3]。但是，针对大面积的苜蓿，目前尚缺乏精确快速的宏观监测方法，苜蓿生产和宏观调控缺乏精准便捷的数据支撑[4]。

针对苜蓿遥感识别，李存军等[5]观测了北京顺义区和昌平区 4 月初到 6 月初苜蓿和冬小麦的光谱特征，发现该地区冬小麦和苜蓿在 5 月下旬到 6 月初的 Landsat 8 影像近红外波段反射率差异明显，认为该时间段是区分冬小麦和苜蓿的最佳时期。任海娟等[6]基于 Landsat 8 OLI 遥感影像，利用归一化植被指数（Normalized Difference Vegetation Index，NDVI）差值加和法区分了内蒙古阿鲁科尔沁旗苜蓿草地与其他土地覆盖类型的差异，该方法可识别的总体完整斑块精度为 94.55%。刘涛等[7]利用多时相的 GF-1 卫星影像构建了内蒙古林西县旱作苜蓿的 NDVI 时间序列数据集，采用阈值法逐一剔除干扰地物，斑块位置精度为 89.47%。

尽管上述方法在小区域取得了良好的效果，但是在实际应用中存在较大局限性，难以进行大范围苜蓿草地的分类识别。主要原因包括 2 个方面：第一，苜蓿的收获时间取决于种植时间、种植年限、品种、收割机械和天气状况等多种因素[8]，苜蓿地块间的统计特征差异较大，相邻地块在遥感影像上可能呈现出明显不同的光谱特征，因此无法利用同一标准进行大范围苜蓿草地的判识和衡量。第二，苜蓿与部分农作物（如冬小麦、玉米菠菜、洋葱等）的物候期具有相当长时间的重叠性，仅针对特定成像时间的遥感影像阈值法区分苜蓿草地与其他地物的方法仍具有很大局限性，难以完全剔除其他地物的干扰。

遥感 NDVI 时间序列数据具有的季节节律是植物季相变化特征的综合反映[9]，可用于区域或全球尺度植被物候特征的识别，也是提取农作物信息的一个常用指标[10]。然而，李胜林等[11-12]研究表明，具有短时间重返周期和高空间分辨率的遥感影像 NDVI 时间序列数据才能够高

收稿日期：2020-09-28 修订日期：2021-05-08

基金项目：现代农业产业技术体系建设专项资金（CARS-34）；中国工程院重点咨询研究项目（2021-HZ-5，2020-XZ-29，2018-XZ-25）；兰州大学中央高校基本科研业务费专项（lzujbky-2020-kb29）；长江学者和创新团队发展计划（IRT_17R50）

作者简介：包旭莹，研究方向为草地农业遥感与地理信息系统。Email：baoxy19@lzu.edu.cn

※通信作者：梁天刚，博士，教授，博士生导师，研究方向为草地农业资源与环境遥感。Email：tgliang@lzu.edu.cn

效捕捉和定量反演农作物或草地等的物候变化信息。GF-1/WFV 和 Sentinel-2 遥感卫星数据具有周期短、分辨率高等优点，均具有构建高时空分辨率 NDVI 时序数据集和开展作物分类识别研究的巨大潜力[13]。杨闫君等[14]利用 GF-1 影像构建了 NDVI 时间序列数据集，对研究区作物进行分类，支持向量机分类方法总体精度最高可达 96.33%。谷祥辉等[15]利用 Sentinel-2 数据的多种植被指数组合成时间序列数据进行作物分类，总体精度最高的随机森林方法的分类精度达 87.92%。

本研究以高空间分辨率的 GF-1/WFV 和 Sentinel-2 遥感影像作为数据源，将甘肃省金昌市作为研究区，结合研究区苜蓿生长周期和生产规律在 NDVI 时间序列上的表现，探寻苜蓿信息提取问题，以期提供一种基于遥感数据获取苜蓿空间分布和种植面积的最优方法，为草业发展的精准监测以及苜蓿产业的宏观调控管理提供可靠的技术支撑和科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

金昌市位于东经 101°04′35″～102°43′40″，北纬 37°47′10″～39°00′30″（图 1a），下辖地区为金川区和永昌县，地处甘肃省河西走廊东段，祁连山北麓，阿拉善台地南缘。地势自西南向东北倾斜，地形以山地、平原为主，戈壁、绿洲、大漠东西展开，南北交替，相间排列。属大陆性温带干旱气候，年均气温 4.8～9.2 ℃，年日照率 51%～66%，年降水量 140～350 mm，全年无霜期 96～186 d，适宜苜蓿生长[16]，是国内优质牧草的重要产地[17]。2016 年，金昌市苜蓿种植面积达 14 100 hm^2，主要集中在金昌市永昌县的东寨镇、六坝乡等乡镇[18]。苜蓿属耐寒性较强的作物，春季返青早，5 月中下旬即进入初花收割期[19]。

1.2 数据来源与预处理

1.2.1 实地测量数据

野外调查于 2019 年 7—11 月进行，共调查 146 个苜蓿样地，利用奥维互动地图软件（http://www.gpsov.com/cn/main.php），现场绘制苜蓿的边界范围，其中最小地块面积为 0.25 hm^2，最大地块面积为 296.52 hm^2。此外，为了验证识别结果精度，记录非苜蓿样地地理位置 18 个。运用地理信息系统平台 ArcGIS 10.2 建立野外调查样地的属性和空间数据库（图 1b）。

1.2.2 GF-1/WFV 卫星数据

GF-1 卫星搭载了 4 台宽视域（Wide Field of View，WFV）的多光谱相机，扫描幅宽 800 km，分辨率 16 m。WFV 传感器共设置 4 个波段，光谱范围为 0.45～0.89 μm，红光和近红外波段分别为 0.63～0.69 和 0.77～0.89 μm，重访周期为 4 d[20-21]。本研究采用的 GF-1 遥感影像为 2019 年 4 月至 11 月成像的 WFV 卫星数据，下载自中国资源卫星应用中心（http://www.cresda.com/CN/），共 21 景，图像选取时主要考虑覆盖研究区的完整性和图像时相，影像云量小于 20%。

利用 ENVI5.3 遥感图像处理软件对 GF-1/WFV 数据进行预处理，主要包括辐射定标、大气校正、正射校正、几何精校正等。首先，采用 GF-1/WFV 卫星自带的有理多项式系数（Rational Polynomial Coefficient，RPC）参数，结合 NASA（http://reverb.echo.nasa.gov/reverb/）的全球数字地面模型（Global Digital Elevation Model，GDEM）数据进行正射校正；其次，从地理空间数据云平台（http://www.gscloud.cn）获取覆盖研究区的 Landsat 8 OLI 数据，以重采样为 10 m 作为控制影像进行几何精校正[22]；最后完成对影像的投影转换，并利用金昌市行政分区矢量数据裁剪出 GF-1/WFV 数据所覆盖的研究区。

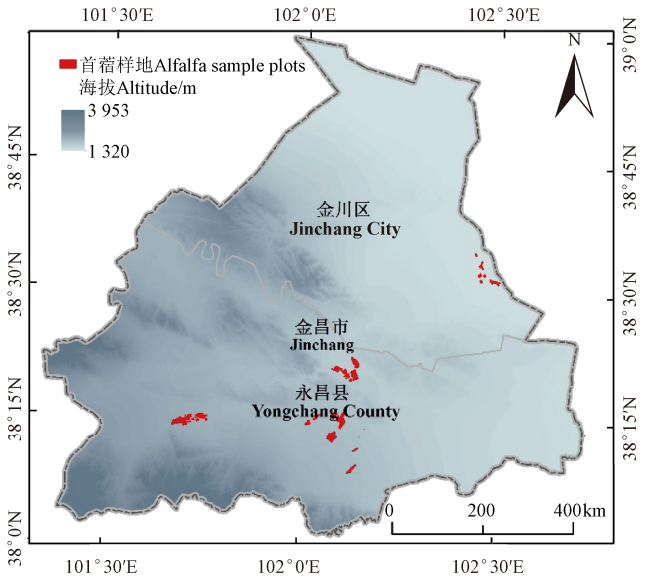


图 1 研究区地理位置及样地分布

Fig.1 Geographical location of study area and distribution of sample plots

1.2.3 Sentinel-2 卫星数据

Sentinel-2 是高分辨率的多光谱成像卫星，分为 Sentinel-2A 和 Sentinel-2B 两颗卫星。2 颗卫星互补的重访周期为 5 d，覆盖 13 个光谱波段，包括 10 m 分辨率的 3 个可见光波段和 1 个近红外波段，20 m 分辨率的 3 个红边波段、1 个近红外波段和 2 个短波红外波段，60 m 分辨率的海岸、水汽和卷积云波段[23]。产品等级有 Level-1C（L1C）和 Level-2A（L2A），其中 L1C 级产品已经完成辐射校正、几何校正和辐射定标[24]，因此只需要进行大气校正。本研究采用的 Sentinel-2 遥感影像为 2019 年 4 月至 11 月云覆盖量小于 20% 的卫星数据，下载自欧空局（https://scihub.copernicus.eu/），共 24 景，其中 L2A 产品数据 17 景，L1C 产品数据 7 景，同一时相完整覆盖金昌市影像 4 幅。

利用欧洲航空局（European Space Agency，ESA）开发的哨兵卫星数据处理开源软件 SNAP 对 Sentinel-2 影像进行处理。首先，利用该软件的 Sen2Cor-2.4.0 插件对 L1C 级产品进行大气校正，得到 L2A 级别产品；其次，利用 SNAP 软件自带的 Graph Builder 工具计算基于 L2A 产品数据的 NDVI，完成 Sentinel-2 数据的预处理；最后，对影像进行投影转换、影像镶嵌，并利用金昌市行政分区

矢量数据裁剪出 Sentinel-2 数据所覆盖的研究区。

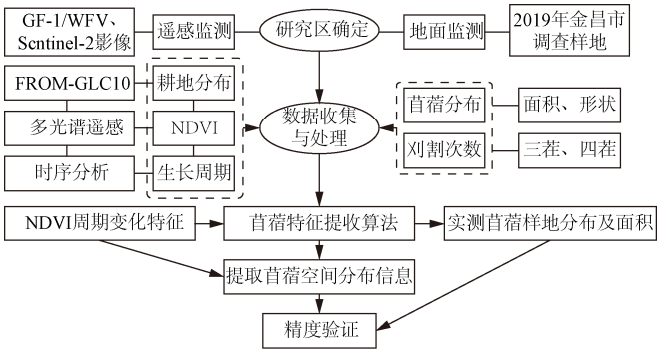
1.2.4　耕地数据

采用 10 m 分辨率的全球地表土地覆盖产品（Finer Resolution Observation and Monitoring-Global Land Cover 10，FROM-GLC10）（http://data.ess.tsinghua.edu.cn/）[25]。该产品将全球地表土地覆盖分为 10 种类型，包括耕地、林地、草地、灌木林地、湿地、水域、苔原、不透水面、裸地、积雪和冰川。本研究提取其中的耕地数据，利用覆盖研究区 7 月 23 日的 Sentinel-2 数据进行校正，用于分析苜蓿的空间地理位置。

1.3　研究方法

1.3.1　技术路线

本研究以 GF-1/WFV 和 Sentinel-2 遥感影像作为数据源，计算研究区的 NDVI 时间序列数据集，综合考虑苜蓿的物候期、生长特征、生产管理措施等，结合野外调查的苜蓿样地地理位置等信息，构建基于 NDVI 时序数据的苜蓿识别方法，提取金昌市苜蓿的空间分布信息。具体研究方法和技术流程如图 2。



注：FROM-GLC10 表示 10 m 分辨率的全球地表土地覆盖产品；MPP 表示 MATLAB 计算器寻峰函数中的最小峰值突出参数。

Note: FROM-GLC10 is a global land cover product with 10 meters resolution; MPP is the minimum peak prominence parameter of the findpeaks function of the MATLAB calculator.

图 2　本文研究方法与技术流程

Fig.2　Research methods and technical process of this paper

1.3.2　精度评价

本研究采用 Kappa 系数、总体精度、制图精度、用户精度共 4 项指标开展苜蓿识别方法的精度评价[26]。另外，为了评估苜蓿识别的位置准确度，利用遥感识别的苜蓿种植面积进行位置精度（k，%）的验证。

位置精度是指研究区内所有地块或像元识别正确的百分比。本研究对苜蓿种植面积的位置精度以样地为单元进行评价[27]，其计算如式（1）所示：

$$k=\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(1-\left|m_i-m_{i0}\right|\right)\cdot S_i}{\sum_{i=1}^{n}S_i}\times 100\% \qquad (1)$$

式中 m_i 为遥感识别得到的第 i 个样地内的苜蓿面积百分比，%；m_{i0} 为实测数据中第 i 个样地内的苜蓿面积百分比，%，作为准真值；S_i 为第 i 个苜蓿样地的面积，m^2；n 为样地个数，n=146。

1.3.3　苜蓿遥感提取算法

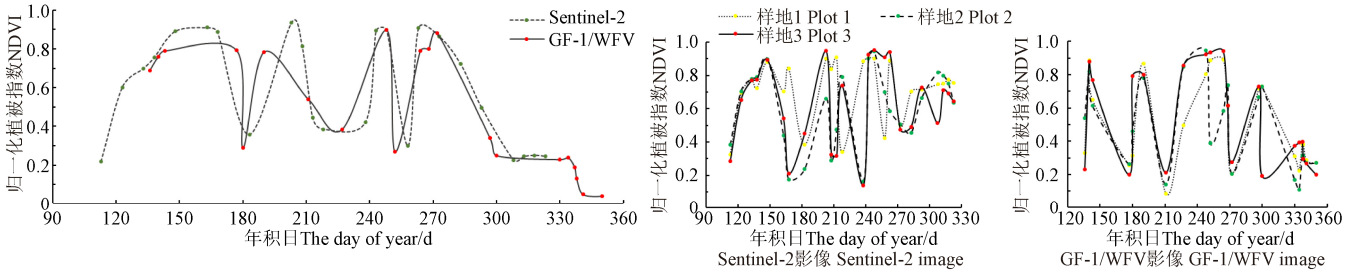
1）苜蓿 NDVI 时序特征

NDVI 时间序列曲线反映了作物在整个生长季的 NDVI 变化特征[27]。图 3a 是基于 GF-1/WFV 和 Sentinel-2 遥感影像提取的 146 个样地的 NDVI 均值。可以看出，在全年生长期内，NDVI 呈现多次升高-峰值-降低的趋势，即 NDVI 时间序列出现了多个波峰和波谷，其中峰代表苜蓿在某一生长阶段 NDVI 达到较高值，是生长旺盛期；谷反映了苜蓿刈割后的状态，即苜蓿经过刈割收获后生物量减少，影像中的 NDVI 值也随之骤降。研究区苜蓿在全年生长期内有 3～4 个波谷出现，谷的个数与刈割次数相对应，谷的位置与刈割时间点相同，与调研苜蓿每年刈割 3～4 次的实际情况相符合。此外，峰出现在谷之前且峰的个数通常大于或等于谷的个数，为 3～5 个。因此，可以利用 GF-1/WFV 和 Sentinel-2 的 NDVI 时序数据来判识刈割苜蓿的次数。

从野外调研的甘肃省国营八一农场中选取位置相邻的 3 个样地，分别记为样地 1（N 102.0164，E 38.2422）、样地 2（N 102.0229，E 38.2427）、样地 3（N 102.0210，E 38.2474），提取 3 块样地的 Sentinel-2 和 GF-1/WFV 影像 NDVI 并计算均值，得到 NDVI 时间序列曲线，如图 3b。可以看出，虽然样地 1、样地 2 和样地 3 处于同一区域，但是峰谷位置仍难以达到完全相同，Sentinel-2 影像 NDVI 时间序列曲线图中 3 块样地谷的位置位于 165～335 d，而 GF-1/WFV 影像 NDVI 时间序列曲线图中 3 块样地谷的位置位于 180～300 d。进一步以 Sentinel-2 影像 NDVI 时间序列曲线图为例进行分析发现，样地 1 发生第一个谷的天数为 180 d，而样地 2 和样地 3 第一次谷的时间节点均在 180 d 以前，这是由于刈割时间受天气情况、土壤条件等多种因素影响，在同一时期的遥感图像上 NDVI 的变化不完全同步。

2）苜蓿遥感特征提取

苜蓿周期性刈割这种独特的生产模式有利于基于时间序列遥感数据对苜蓿和其他作物进行区分。本研究针对这种特殊的栽培管理特征在 NDVI 时序图上的表现，提出苜蓿识别的寻峰法（Find Peaks，FP）和寻谷法（Find Troughs，FT）。



a. 苜蓿平均 NDVI 时序曲线
a. Average NDVI time series curve of alfalfa

b. 相邻样地 NDVI 时序曲线
b. NDVI time series curve of adjacent plots

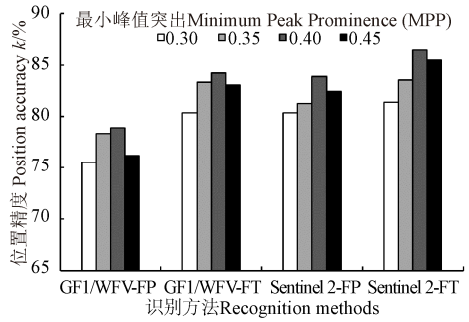
图 3　苜蓿 NDVI 时序曲线图

Fig.3　Normalized Difference Vegetation Index（NDVI）time series of alfalfa

MATLAB 计算器的寻峰函数（Findpeaks）具有返回输入信号局部最大值（峰值）的特性，可以通过参数的阈值设定查找感兴趣的峰值。最小峰值突出（Minimum Peak Prominence，MPP）是 MATLAB 计算器寻峰函数的参数，使用该参数可以快速寻找并返回相对重要的一些峰值。本研究中，NDVI 时间序列影像的峰谷差值等同于 MPP 值，即当 MPP 值达到某一个设定值时，计算机可自动识别为波峰，基于峰谷关联分析，即可确定相应的波谷。

3）最小峰值突出（MPP）值的确定

根据图 3 的 NDVI 时间序列变化曲线可以看出，苜蓿在生长旺盛期的 NDVI 值通常可以达到 0.70～1.0，而刈割后的 NDVI 值大部分位于 0～0.40，由此计算峰谷差值的最小值为 0.30。在本研究中，NDVI 峰谷差值对应 MPP 值，为了探寻最合理准确的 MPP 值，将 MPP 值以 0.30 的最小值为基础，分别预设 0.30、0.35、0.40 和 0.45 的梯度变化提取苜蓿信息，然后进行位置精度验证。发现识别分类位置精度随着 MPP 值的变化而改变（图 4）。由图 4 可知，当 MPP 在 0.30～0.40 范围内，识别位置精度随着 MPP 值的增大而增加。MPP 值为 0.40 时位置精度达到最大值，其中 GF-1/WFV 数据的寻谷法和 Sentinel-2 数据的寻峰法、寻谷法识别的位置精度均达到 80%以上。当 MPP 值为 0.45 时，位置精度相较于 0.40 有所降低，出现这种情况的原因可能是 MPP 值设置过大导致苜蓿识别面积变小，出现识别地块不完整的情况，相应的位置精度变差。所以，确定 0.40 为提取金昌市苜蓿信息最为合理的 MPP 值。



注：FP 表示寻峰法，FT 表示寻谷法。
Note: FP is the find peaks method, and FT is the find troughs method.

图 4 不同最小峰值突出值位置精度验证结果

Fig.4 Verification results of position accuracy for different minimum peak prominence value

2 结果与分析

2.1 苜蓿识别结果精度评价

2.1.1 不同数据源的识别结果与分析

本研究利用地理信息系统平台 ArcGIS 10.2 中的 Creat random points 工具分别创建基于实地调研数据的苜蓿和非苜蓿样本验证集，对解译结果的位置准确度和识别的精度进行验证，结果如表 1 所示。基于 GF-1/WFV 数据识别的苜蓿总体精度均小于 85%，用户精度均小于 80%且 Kappa 系数在 0.6 左右，说明分类结果与实际样地一致性较差。而 Sentinel-2 影像识别的研究区苜蓿总体精度和 Kappa 系数均在 85%和 0.7 以上，整体识别效果较好，其中基于 Sentinel-2 影像的寻谷法识别效果表现最优，总体精度达到 92.25%，Kappa 系数为 0.81，用户精度和制图精度分别为 90.33%和 99.26%，识别结果与验证样地之间高度一致。Sentinel-2 影像寻谷法识别的位置精度为 86.44%，对空间位置有较好的监测效果，满足解译需求。从总面积识别结果来看，基于 Sentinel-2 数据识别的研究区苜蓿总面积均达到 1.5 万 hm^2 以上，而 GF-1/WFV 数据识别的苜蓿种植面积较小。造成以上差异的主要原因有：1）遥感数据的时间分辨率和研究区域的天气状况直接影响遥感识别结果。遥感识别所用的卫星图像时间分辨率越高且研究区内晴天天气越多，遥感图像越能更加精准地识别苜蓿刈割的具体日期。本研究中，Sentinel-2 数据的 NDVI 时间序列曲线密度较 GF-1/WFV 数据大，可以更好地捕捉苜蓿识别的关键时间点，从而满足寻峰和寻谷识别方法的要求；2）遥感数据的空间分辨率对作物提取的精准性具有显著影响。结合地块单元的苜蓿遥感识别是精准解译分析的关键，Sentinel-2 影像的空间分辨率为 10 m，而 GF-1/WFV 影像的分辨率是 16 m，更高的空间分辨率能越能准确地剔除天然草地、灌木、田间道路、水渠、田坎等干扰物，减少错分情况，从而进一步提高分类精度。

2.1.2 不同识别方法的结果与分析

通过对比研究区苜蓿遥感识别与精度评价结果，发现寻谷法更具优势，利用该方法提取的苜蓿总体精度、Kappa 系数、用户精度、制图精度指标均比寻峰法高。其中，基于 Sentinel-2 数据的寻谷法精度评价指标结果最高，而基于 GF-1/WFV 和 Sentinel-2 数据的寻峰法各项评价指标均较低，Kappa 系数为 0.60～0.75。进一步对比同种遥感数据，发现寻峰法识别的研究区苜蓿种植面积均小于寻谷法。分析发现，寻峰法识别的苜蓿地块内明显有像元分布零散、聚集度不高的现象；寻谷法识别的苜蓿地块内的像元分布较为集中且饱和程度高，说明寻谷法比寻峰法的空间监测结果更可靠。导致这种差异的主要原因可能是：1）苜蓿的 NDVI 时间序列曲线中峰代表苜蓿生长旺盛期，持续时间较长；而谷代表苜蓿被刈割或者被刈割恢复生长初期的状态，在 NDVI 时间序列曲线上表现为突降，更好地对应苜蓿特殊的生产管理形态，使得寻峰函数能够更加灵敏地识别到苜蓿 NDVI 时序数据的数值“突变”；2）在实际生产中，企业和农户会采取相应管理措施保证苜蓿安全越冬，来年再度萌发。相关研究表明，当年末茬收获时留茬高度与越冬率成正比，且留茬高度会大于前几次[28]。所以，在遥感识别过程中 NDVI 谷值也相应变大；同时 10 月以后温度较低苜蓿生长难以达到旺盛期水平，遥感识别的 NDVI 峰值变低，进而峰谷差值变小，第 4 或第 5 个峰谷差值小于设定 MPP 值（0.40）。因此，难以检测到第 4 或第 5 个峰，从而影响苜蓿信息的提取。

2.2 苜蓿面积及分布

结合上述精度评价结果，利用基于 Sentinel-2 影像 NDVI 时间序列的寻谷法提取 2019 年金昌市苜蓿，统计研究区苜蓿面积识别情况（表 2），由表 2 可知，截止

2019 年，金昌市苜蓿种植面积达 15 449.07 hm^2，其中金川区的苜蓿面积为 1 353.42 hm^2，仅占金昌市苜蓿总面积的 8.76%；永昌县的苜蓿面积为 14 095.65 hm^2，占总面积的 91.24%，是金昌市苜蓿的主要种植区域。根据文献报道[29]，金昌市 2019 年苜蓿种植总面积为 16 666.67 hm^2，本文方法的总体识别精度达到 92.69%。

表 1　金昌市苜蓿识别结果和精度评价

Table 1　Recognition results and precision evaluation of Jinchang alfalfa

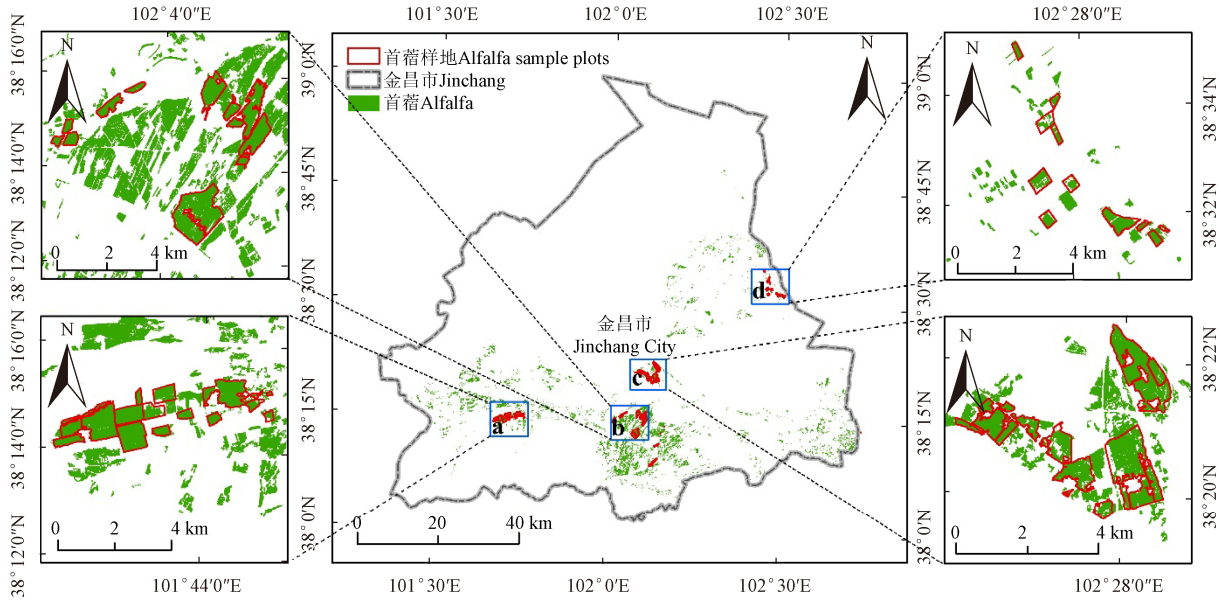
数据源 Data source	方法 Methods	总面积 Total area /hm^2	总体精度 Overall accuracy/%	Kappa 系数 Kappa coefficient	用户精度 User's accuracy/%	制图精度 Producer's accuracy/%	位置精度 Position accuracy/%
GF-1/WFV	寻峰法	13 398.82	82.50	0.62	77.33	99.15	78.89
	寻谷法	14 372.65	83.25	0.63	78.33	99.16	84.22
Sentinel-2	寻峰法	15 352.43	88.25	0.73	85.00	99.22	83.86
	寻谷法	15 449.07	92.25	0.81	90.33	99.26	86.44

根据野外调研将苜蓿样地分为 a、b、c、d 四个验证区，进一步检验研究区内苜蓿的遥感提取空间分布效果，如图 5 所示。可以看出，金昌市苜蓿种植分布整体呈现从北到南逐渐增多的趋势，苜蓿大部分连片种植的区域主要集中在金昌市的中南部和西南部，北部部分区域有零星分布。验证区 a、b、c 识别出的苜蓿大面积连片式分布，苜蓿地块形状明显且饱满程度高。处在金昌市东北部的验证区 d 中识别出的苜蓿空间分布较为零散，地块饱满程度较低，种植面积较小。整体而言，金昌市识别出的苜蓿地理位置、空间分布与野外实测苜蓿样地的匹配度较高，满足遥感解译需求。

表 2　不同区域的苜蓿面积

Table 2　Areas of alfalfa in different regions

区域 Regions	苜蓿面积 Alfalfa area/hm^2	百分比 Percentage/%
永昌县 Yongchang County	14 095.65	91.24
金川区 Jinchuan District	1 353.42	8.76



注：a、b、c、d 为苜蓿遥感提取效果验证区。

Note: a, b, c and d are the verification areas of alfalfa remote sensing extraction effect.

图 5　金昌市苜蓿空间分布图

Fig.5　Spatial distribution of alfalfa in Jinchang City

国内苜蓿产业正处于发展阶段，国家为了积极实施振兴奶业苜蓿发展行动，投入专项资金，建设高产优质苜蓿示范区，带动优质苜蓿种植面积不断扩大，有力促进了苜蓿产业和奶业的发展。截止 2015 年，已经形成了甘肃河西走廊、内蒙古科尔沁草地、宁夏河套灌区等一批 6 000 hm^2 以上集中连片的优质苜蓿种植基地。苜蓿种植面积超过 600 hm^2 的县有 405 个。本文研究区的金川区和永昌县为苜蓿发展重点县[30]。受政策的影响，企业和农户为了提高苜蓿干草产量，促进苜蓿商品化转化，苜蓿从年刈割 2 次发展为 3～4 次，苜蓿生产收益增大。苜蓿空间分布的遥感监测对政策制定、发展和实施具有一定的贡献意义。

3　结　论

本文以甘肃省金昌市为研究区，以 GF-1/WFV 和 Sentinel-2 两种高时空分辨率的多时相遥感影像为数据源，提出利用 MATLAB 计算器寻峰函数自动寻找 NDVI 时间序列数据的波峰或波谷特征的苜蓿提取方法，综合野外实测苜蓿样地的地理位置信息，分析了研究区苜蓿的空间分布特征。主要结论如下：

1）高时空分辨率的 NDVI 时间序列数据集是有效提取苜蓿面积信息及其空间分布格局的关键。基于

Sentinel-2 数据的识别精度要优于 GF-1/WFV，识别精度和 Kappa 系数均在 85%和 0.7 以上，识别结果与验证样地之间有高度的一致性。造成差异的原因在于 Sentinel-2 数据的 NDVI 时间序列曲线密度较 GF-1/WFV 大，可以更好地识别苜蓿刈割时期前后的关键时间点，从而满足寻峰和寻谷识别方法的要求；Sentinel-2 数据的分辨率较 GF-1/WFV 高，可以更加准确地识别田埂等细节，剔除干扰物，从而进一步提高分类精度。

2）寻谷法在进行研究区苜蓿识别时更具优势，遥感识别的苜蓿总体精度、Kappa 系数、用户精度、制图精度指标均比寻峰法高。说明苜蓿 NDVI 时间序列曲线中的谷能够更好地对应苜蓿特殊的生产管理形态，利用寻谷法识别的苜蓿样地内像素的饱和程度高且形状更为完整。

3）基于 Sentinel-2 数据的寻谷法识别的精度最高，总体精度达到 92.25%，Kappa 系数为 0.81，用户精度和制图精度分别为 90.33%和 99.26%，位置精度达到 86.44%，监测效果较好，自动化程度高，不具有区域特殊性，有很大的实际推广应用潜力。

4）金昌市苜蓿空间分布整体呈现从北到南逐渐增多的趋势，大部分连片的区域主要集中在金昌市的中南部和西南部，北部区域仅有零星分布。基于 Sentinel-2 影像的寻谷法识别的 2019 年金昌市苜蓿种植面积为 15 449.07 hm^2，其中金川区的苜蓿面积为 1 353.42 hm^2，占金昌市苜蓿总面积的 8.76%；永昌县的苜蓿面积为 14 095.65 hm^2，占总面积的 91.24%。

由于苜蓿的植被指数与其当年所处的环境息息相关，降水、温度等气候条件达不到生长需求时，苜蓿长势以及刈割次数会出现较大变动。针对不同研究区仍需结合实地调研情况进行具体判断，需要根据研究区条件设置合理的最小峰值突出（Minimum Peak Prominence，MPP）值和峰谷个数来准确提取苜蓿的空间分布信息。其次，能否获取高时空分辨率的遥感影像是精准提取苜蓿空间分布信息的关键。GF-1/WFV 和 Sentinel-2 影像受云的影响较为严重，部分区域的 NDVI 值存在偏差和缺失，难以完全满足解译，因此还需要进一步探索多源高时空分辨率卫星数据（如 GF-1/6 WFV 和 Sentinel-1/2 等）的综合应用方法，避免天气状况对部分区域苜蓿识别结果的影响，优化提取结果。在未来的研究中也可以考虑更多的辅助信息（如不同区域农事操作时间节点、气象等）作为判别变量，利用机器学习算法进一步提高苜蓿遥感识别的精度，为苜蓿的科学管理和产业发展提供更为精确的数据支撑。

[参 考 文 献]

[1] 张春梅，王成章，胡喜峰，等. 紫花苜蓿的营养价值及应用研究进展[J]. 中国饲料，2005(1)：15-17.
Zhang Chunmei, Wang Chengzhang, Hu Xifeng, et al. The nutritional value of alfalfa and its application in feedstuffs[J]. China Feed, 2005(1): 15-17. (in Chinese with English abstract)

[2] 杨青川，孙彦. 中国苜蓿育种的历史、现状与发展趋势[J]. 中国草地学报，2011，33(6)：95-101.
Yang Qingchuan, Sun Yan. The history, current situation and development of alfalfa breeding in China[J]. Chinese Journal of Grassland, 2011, 33(6): 95-101. (in Chinese with English abstract)

[3] 李向林，万里强. 苜蓿青贮技术研究进展[J]. 草业学报，2005(2)：9-15.
Li Xiang, Wang Liqiang. Research progress on *Medicago sativa* silage technology[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2005(2): 9-15. (in Chinese with English abstract)

[4] 陶莎. 2019 年 1-10 月国内饲料市场形势分析及 2020 年走势预测[J]. 中国乳业，2020(1)：17-20.
Tao Sha. Analysis of domestic feed market situation from January to October 2019 and forecast of 2020 trend [J]. China Dairy, 2020(1): 17-20. (in Chinese with English abstract)

[5] 李存军，王纪华，刘良云，等. 利用多时相 Landsat 近红外波段监测冬小麦和苜蓿种植面积[J]. 农业工程学报，2005，21(2)：96-101.
Li Cunjun, Wang Jihua, Liu Liangyun, et al. Land cover mapping of winter wheat and clover using muti-temporal Landsat NIR band in a growing season[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2005, 21(2): 96-101. (in Chinese with English abstract)

[6] 任海娟，董建军，李晓媛，等. 利用多时相 Landsat8 图像提取苜蓿人工草地信息[J]. 中国草地学报，2015，37(2)：81-87.
Ren Haijuan, Dong Jianjun, Li Xiaoyuan, et al. Extraction artificial alfalfa grassland information using Landsat 8 remote sensing data[J]. Chinese Journal of Grassland, 2015, 37(2): 81-87. (in Chinese with English abstract)

[7] 刘涛，韩鹏，郭茉苒，等. 基于多时相遥感数据提取旱作苜蓿人工草地空间分布信息[J]. 中国草地学报，2018，40(6)：56-63.
Liu Tao, Han Peng, Guo Moran, et al. Extracting spatial distribution of rainfed artificial alfalfa grassland based on multi-temporal remoting sensing data[J]. Chinese Journal of Grassland, 2018, 40(6): 56-63. (in Chinese with English abstract)

[8] Ashourloo D, Shahrabi H S, Azadbakht M, et al. A novel automatic method for alfalfa mapping using time series of Landsat-8 OLI data[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2018, 11(99): 4478-4487.

[9] 刘焕军，武丹茜，孟令华，等. 基于 NDVI 时间序列数据的施肥方式遥感识别方法[J]. 农业工程学报，2019，35(17)：162-168.
Liu Huanjun, Wu Danqian, Meng Linghua, et al. Remote sensing recognition method of different fertilization methods in NDVI time series[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2019, 35(17): 162-168. (in Chinese with English abstract)

[10] 平跃鹏，臧淑英. 基于 MODIS 时间序列及物候特征的农作物分类[J]. 自然资源学报，2016，31(3)：503-513.
Ping Yuepeng, Zang Shuying. Crop classification based on MODIS time series and phenological characteristics[J]. Journal of Natural Resources, 2016, 31(3): 503-513. (in

Chinese with English abstract)

[11] 李胜林，李大成，韩启金，等. 基于时空融合的 NDVI 时序生成技术在冬小麦监测中的应用[J]. 太原理工大学学报，2019，50(1)：69-75.
Li Shenglin, Li Dacheng, Han Qijin, et al. Application of NDVI time series generation technology based on spatial-temporal fusion in winter wheat monitoring[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2019, 50(1): 69-75. (in Chinese with English abstract)

[12] 张敏. 基于高时空分辨率 NDVI 数据集的草原植被返青期遥感反演[D]. 成都：西南交通大学，2019.
Zhang Min. Inversion of Grassland Vegetation Greenup Based on High Temporal and Spatial Resolution NDVI Dataset by Remote Sensing[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019. (in Chinese with English abstract)

[13] 王凯，赵军，朱国锋，等. 基于 GF-1 遥感数据决策树与混合像元分解模型的冬小麦种植面积早期估算[J]. 遥感技术与应用，2018，33(1)：158-167.
Wang Kai, Zhao Jun, Zhu Guofeng, et al. Early estimation of winter wheat planting area by decision tree and pixel unmixing methods based on GF-1 satelite data[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2018, 33(1): 158-167. (in Chinese with English abstract)

[14] 杨闫君，占玉林，田庆久，等. 基于 GF-1/WFV NDVI 时间序列数据的作物分类[J]. 农业工程学报，2015，31(24)：155-161.
Yang Yanjun, Zhan Yulin, Tian Qingjiu, et al. Crop classification based on GF-1/WFV NDVI time series[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(24): 155-161. (in Chinese with English abstract)

[15] 谷祥辉，张英，桑会勇，等. 基于哨兵 2 时间序列组合植被指数的作物分类研究[J]. 遥感技术与应用，2020，35(3)：702-711.
Gu Xianghui, Zhang Ying, Sang Huiyong, et al. Research on crop classification method based on Sentinel-2 time series combined vegetation index[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2020, 35(3): 702-711. (in Chinese with English abstract)

[16] 马黎. 河西走廊绿洲区草产业发展现状及对策——以金昌市金川区为例[D].兰州：兰州大学，2017.
Ma Li. Situation and Countermeasures of Grass Industry Development in Oasis Area of Hexi Corridor: A Case Study of Jinchuan District, Jinchang City[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2017. (in Chinese with English abstract)

[17] 谢晓玲. 金昌：种养结合延长肉羊产业链[J]. 农产品市场，2020，932(2)：40-41.
Xie Xiaoling. Jinchang: the combination of planting and breeding extends the industry chain of mutton sheep[J]. Agricultural products Market, 2020, 932(2): 40-41. (in Chinese with English abstract)

[18] 赵国智，蒲中彬. 金昌市草产业调查[J]. 中国畜牧业，2017(24)：62-63.
Zhao Guozhi, Pu Zhongbin. Survey on grass industry in Jinchang[J]. China Animal Industry, 2017(24): 62-63. (in Chinese with English abstract)

[19] 张秀平，陈林，袁兴茂，等. 苜蓿春季返青期田间管理技术[J]. 北方牧业，2017(7)：23.
Zhang Xiuping, Chen Lin, Yuan Xingmao, et al. Field management techniques of alfalfa returning to green in spring[J]. Northern Animal Husbandry, 2017(7): 23. (in Chinese with English abstract)

[20] 侯蒙京，殷建鹏，葛静，等. 基于随机森林的高寒湿地地区土地覆盖遥感分类方法[J]. 农业机械学报，2020，51(7)：220-227.
Hou Mengjing, Yin Jianpeng, Ge Jing, et al. Land cover remote sensing classification method of alpine wetland region based on random forest algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(7): 220-227. (in Chinese with English abstract)

[21] 刘雅清，王磊，赵希妮，等. 基于 GF-1/WFV 时间序列的绿洲作物类型提取[J]. 干旱区研究，2019，36(3)：781-789.
Liu Yaqing, Wang Lei, Zhao Xini, et al. Extraction of crops in oasis based on GF-1/WFV time series[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(3): 781-789. (in Chinese with English abstract)

[22] 刘晋阳，辛存林，武红敢，等. GF-6 卫星 WFV 数据在林地类型监测中的应用潜力[J]. 航天返回与遥感，2019，40(2)：111-120.
Liu Jinyang, Xin Cunlin, Wu Honggan, et al. Application potential of GF-6 satellite WFV data in monitoring forestland types[J]. Space Reentry and Remote Sensing, 2019, 40(2): 111-120. (in Chinese with English abstract)

[23] 何云，黄翀，李贺，等. 基于 Sentinel-2A 影像特征优选的随机森林土地覆盖分类[J]. 资源科学，2019，41(5)：992-1001.
He Yun, Huang Chong, Li He, et al. Land-cover classification of random forest based on Sentinel-2A image feature optimization[J]. Resources Science, 2019, 41(5): 992-1001. (in Chinese with English abstract)

[24] 龚燃. 哨兵-2A 光学成像卫星发射升空[J]. 国际太空，2015(8)：36-40.
Gong Ran. Sentinel-2A satellite launches[J]. Space International, 2015(8): 36-40. (in Chinese with English abstract)

[25] Gong P, Liu H, Zhang M, et al. Stable classification with limited sample: Transferring a 30m resolution sample set collected in 2015 to mapping 10m resolution global land cover in 2017[J]. Science Bulletin, 2019, 64(6): 370-373.

[26] 赵英时. 遥感应用分析原理与方法[M]. 北京：科学出版社，2003.

[27] 王碧晴，韩文泉，许驰. 基于图像分割和 NDVI 时间序列曲线分类模型的冬小麦种植区域识别与提取[J]. 国土资源遥感，2020，32(2)：219-225.
Wang Biqing, Han Wenquan, Xu Chi. Winter wheat planting region recognition and extraction based on image segmentation and NDVI time series curve classification model[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2020, 32(2): 219-225. (in Chinese with English abstract)

[28] 原国新，张世君. 紫花苜蓿越冬刈割时间及留茬高度[J]. 中国农村科技，2001(10)：15.
Yuan Guoxin, Zhang Shijun. Overwintering cutting time and stubble height of alfalfa[J]. China Rural Science and

Technology, 2001(10): 15. (in Chinese with English abstract)
[29] 杨瑞. 牧草种植面积达 25 万亩金昌成甘肃省最大商品苜蓿种植基地[EB/OL]. 2019-10-21, http://www.amic.agri.gov.cn/nxtwebfreamwork/html/0/1788.htm.
[30] 刘源，张院萍. 全国苜蓿产业发展规划（2016-2020）[J]. 中国畜牧业，2017(11)：32.

Spatial distribution extraction of alfalfa based on Sentinel-2 and GF-1 images

Bao Xuying[1], Wang Yan[2], Feng Qisheng[1], Ge Jing[1], Hou Mengjing[1], Liu Changyu[1], Gao Xinhua[1], Liang Tiangang[1※]

(1. *State Key Laboratory of Grassland Agro-ecosystem*; *Key Laboratory of Grassland Livestock Industry Innovation*, *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*; *Engineering Research Center of Grassland Industry*, *Ministry of Education*; *College of Pastoral Agriculture Science and Technology*, *Lanzhou University*, *Lanzhou* 730020, *China*; 2. *Chongxin County* No.1 *Middle School*, *Pingliang* 744200, *China*)

Abstract: Alfalfa is a perennial crop to serve as a key feed variety for the development of herbivorous animal husbandry and food safety in China. Timely and accurate acquisition of alfalfa spatial distribution can greatly contribute to the data support for the scientific management of grass production. In this study, a new extraction was proposed to obtain the remote sensing characteristics of alfalfa using the Findpeaks function of MATLAB, combined with the change of spectral reflectance of alfalfa with the growth stage. A Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) dataset was also constructed using high-resolution GF-1/WFV (Wide Field of View) and Sentinel-2 remote sensing images in Jinchang City, Gansu Province, China. The limitation of automatic identification and area extraction was solved to extract the spatial distribution of alfalfa via determining Minimum Peak Prominence (MPP) value. Firstly, an analysis was made on the time series of alfalfa NDVI. It was found that the alfalfa NDVI increased many times, as the peak value decreased in one year. Specifically, there were many peaks and troughs in the NDVI time series curve, among which the peaks represented the high value of NDVI in a growing period (the flourishing period of alfalfa growth and development), whereas, the troughs reflected the alfalfa from the peak period to the cutting state. Then, a field investigation was conducted to determine the peaks and troughs number of alfalfa, where the trough number was 3-4, and the peak number was 3-5 in the NDVI time series curve. Thirdly, a verification of position accuracy found that the classification accuracy increased when the value of MPP was in the range of 0.3 to 0.4 and reached the maximum when the value of MPP was 0.4, while the classification accuracy tended to decrease with the increase of MPP value. Therefore, the MPP value of 0.4 was set to extract the potential spatial distribution of alfalfa using the Findpeaks function of MATLAB software. As such, the spatial distribution dataset of alfalfa planting area was established in the study area by masking the terrain and cultivated land with the removal of forests and other land objects. Finally, the spatial distribution of alfalfa in the study area in 2019 was obtained using ENVI software for the subsequent classification post-processing, such as multiplicity filtering and fragment elimination. The results show that: 1) The recognition accuracy and Kappa coefficient of Sentinel-2 remote sensing data were more than 85% and 0.7, better than that of GF-1/WFV. The larger density of NDVI time series curve in Sentinel-2 data than that of GF-1/WFV was attributed to better capture the key time points of alfalfa. 2) In terms of identification methods, it was found that the find troughs presented the higher overall accuracy, Kappa coefficient, user accuracy, and mapping accuracy of extracted alfalfa in the study area, compared with the find peaks. 3) The find troughs using Sentinel-2 image performed the best for the remote sensing recognition of alfalfa, with an overall accuracy of 92.25%, a Kappa coefficient of 0.81, and a position accuracy of 86.44%, indicating an excellent monitoring performance in terms of spatial location. 4) The spatial distribution of alfalfa showed a gradual increase from the north to south, while most continuous areas were mainly concentrated in the south-central and southwest, and there was only sporadic distribution in the north of the study area. Specifically, the alfalfa planting area that identified by find troughs using Sentinel-2 image was 15 449.07 hm^2 in 2019, of which the alfalfa area of Jinchuan district was 1 353.42 hm^2, accounting for 8.76% of the total alfalfa area of Jinchang, and the alfalfa area of Yongchang county was 14 095.65 hm^2, accounting for 91.24% of the total area. The research data confirmed that the find troughs using Sentinel-2 remote sensing data can be expected to effectively identify alfalfa in the study area. The finding can provide important practical support to the refined management of pasture for the precise monitoring of grass production.

Keywords: remote sensing; image recognition; time series; alfalfa; NDVI; information extraction