DOI:10.13925/j.cnki.gsxb.20190357

石榴树遥感辨识的最佳时相与方法

邢东兴',焦 俏',王明军2,封建民',车自立',张文帅3

(¹咸阳师范学院资源环境学院,陕西咸阳 712000;²咸阳师范学院物理与电子工程学院,陕西咸阳 712000; ³陕西自然资源勘测规划设计院股份有限公司,西安 710077)

摘 要:【目的】利用2015、2017与2018年逐月GF1-WFV影像(共42景),探寻石榴树遥感辨识的最佳时相与方法。【方法】首先对各景影像分别进行预处理;随后基于13种主要作物样地内的ROI(感兴趣区)数据对6类辨识方法(即反射光谱比较、波段差值或比值分析、光谱指数辨识分析、光谱指数变化追踪、影像复合与多指数联用分析)的辨识效能分别予以探试,以寻求最佳辨识时相与方法;最后采用全域影像对探寻结果加以验证。【结果】(1)4月中旬的石榴树具有相对较低的NDVI值,利用NDVI阈值可较好地将其与除葡萄、桃树外的其他9种果树以及小麦予以区分,但不可将其与葡萄、桃树以及许多城乡绿化植被、有草撂荒地、低龄果树等区分;(2)在5月中旬,正值盛花期的石榴树具有相对较高的1/Rbi-1/Rbi6,利用该指数阈值既可将石榴树与其他大多数果树树种及小麦予以较好地区分,也可将城乡绿化植被、有草撂荒地、低龄果树等下以正确辨别并大幅剔除。但受多种不利因素的影响,导致少数苹果、梨等果树以及一些非果树地物与石榴树混淆难辨。若继用此时期的NDVI阈值则可剔除部分非石榴树地物;(3)在上述两期影像复合、联用(1/Rbi-1/Rbi6)5月中旬,NDVI5月中旬,不留树、NDVI4月中每三重阈值的情形下,辨识精度更为理想,石榴树类的正确识别率可达86.28%,总体分类精度可达85.37%;(4)利用遥感影像辨识石榴树的最佳时相为5月中旬,4月中旬次之。【结论】复合4月中旬与5月中旬的两期影像并联用(1/Rbi-1/Rbi6)5月中旬,178;35月中旬,178;35月中旬,178;35月中旬,178;45月中旬,5月中旬的两期影像并联用(1/Rbi-1/Rbi6)5月中旬,25月中旬,35月中旬,35月中旬,35月中旬,35月中旬,35月中旬,35月中旬,35月中旬,35月中旬,35月中旬,35月中旬,35月中旬,35月中旬,35月中旬,5月中旬的两期影像并联用(1/Rbi-1/Rbi6)5月中旬,35月中旬,5月中旬,5月中旬,34月中旬,35月中旬,35月中旬,35月中旬,35月中旬,35月中旬,35月中旬,35月中旬,35月中旬,35月中旬,5月中旬,35月中旬]

中图分类号:S665.4 文献标志码:A 文章编号:1009-9980(2020)03-0431-10

The best phase and optimal identification method for identifying pomegranate trees

XING Dongxing¹, JIAO Qiao¹, WANG Mingjun², FENG Jianmin¹, CHE Zili¹, ZHANG Wenshuai³ ('College of Resources and Environment, Xianyang Normal University, Xianyang 712000, Shaanxi, China; 'College of Physics and Electronic Engineering, Xianyang Normal University, Xianyang 712000, Shaanxi, China; 'Shaanxi Natural Resources Survey Planning and Design Institute LTD, Xi' an 710077, Shaanxi, China)

Abstract: [Objective] It is of great significance in production and management of fruit industry to quickly and accurately realize the planting information (i.e. planting region, planting area and planting structure) of various fruit trees in large areas by using the remote sensing technology. The present paper tries to find out the best phase and optimal method for identifying pomegranate trees by using monthly GF1-WFV images collected in 2015, 2017 and 2018 (a total of 42 images), in order to provide a theoretical basis for the remote sensing monitoring of pomegranate trees in Guanzhong and other fruit growing regions in China in the future. [Methods] Firstly, the images of each period were preprocessed (including image space clipping, image radiation calibration, image atmospheric radiation correction, image geometry correction, image mean filtering, etc). Then, in order to find out the best identification phase and method, the identification efficiencies of six methods (comparison of reflectance spectra of ground objects, bands difference or ratio analysis, analysis of spectral index identification, spectral index change tracking, image compound and analysis of multi-indices combined use) were tested separately by using

基金项目:国家自然科学基金(61771385);陕西省教育厅哲学社会科学重点研究基地项目(17JZ079)

作者简介:邢东兴,男,工程师,博士,主要从事农业遥感与精准农业研究。Tel:15592109530,E-mail:3036310771@qq.com

收稿日期:2019-08-23 接受日期:2019-12-24

ROI (Region of Interest) data, and these data were collected from the sample plots of 13 main crops (including pomegranate trees, grape vines, peach trees, cherry trees, mulberry trees, persimmon trees, apricot trees, pear trees, apple trees, walnut trees, plum trees, star fruit trees, winter wheat or summer maize). Finally, the identification efficiency of exploration results was verified in global image. [Results (1) Because pomegranate trees were in the early stage of new shoot growth in mid-April, their leaves were small and narrow, and their canopy coverage and leaf area index were both small, the pomegranate trees had relatively low NDVI values during this period. The NDVI thresholds could be used to distinguish pomegranate trees from other 9 types of fruit trees and wheat. However, NDVI thresholds could not distinguish pomegranate trees from grape vines, peach trees, urban and rural green vegetation, abandoned land with grass, young fruit trees, etc. (2) In mid-May, the pomegranate trees that were in full bloom had a relatively high $1/R_{b1}-1/R_{b3}$ value. Using $1/R_{b1}-1/R_{b3}$ thresholds, not only the pomegranate trees could be distinguished from most other fruit tree species and wheat, but also urban and rural green vegetation, abandoned land with grass, and young- fruit trees could be correctly identified and largely eliminated. However, influenced by many unfavorable factors (For example, the complex combination of many ground objects, the existence of mixed pixels, the existence of the phenomenon that different ground objects have the same reflectance spectrum, the limited accuracy of image radiation correction, the lower spatial resolution of the used images, and the tendency of threshold setting), a few of ground objects like fruit trees (such as apple trees, pear trees and so on) and non-fruit trees were confused with pomegranate trees. If the NDVI threshold of this period was used, some non-pomegranate tree features can be removed. (3) The accuracy of identifying pomegranate trees was more ideal when the above two phase of images were compounded and triple thresholds of (1/R_{b1}-1/R_{b3}) mid-May, NDVI mid-May and NDVI mid-April were used. The correct recognition rate of pomegranate trees could reach 86.28%, and the overall classification accuracy could reach 85.37%. (4) The best phase to identify pomegranate trees from remote sensing images was in mid-May, followed by mid-April. Fruit maturity is not the best time for identifying pomegranate trees. The reason for this is that there are not only pomegranate trees but also apple and persimmon trees in the studying area with green leaves and red fruits. And it is difficult to identify pomegranate trees due to the influence of leaf color transformation of some grape vines, kiwi vines and apricot trees at this time. In other periods except the above period, the reflectance spectra of pomegranate trees are not very different from those of other fruit trees, so it is difficult to distinguish them. [Conclusion] When satellite remote sensing images were used to monitor and identify pomegranate trees in Guanzhong fruit growing area, the remote sensing images in mid-April and mid-May (The spatial resolution of these images should be less than or equal to 16 meters, the spectral resolution of these images should be more than or equal to four bands, and these images have blue, green, red and near infrared bands.) could be purchased. On the basis of radiometric calibration, atmospheric radiometric correction, geometric correction, registration and recombination of these images, the accuracy of identifying pomegranate trees could be more ideal when the images of mid-April and mid-May were compounded and triple thresholds of (1/Rbi-1/Rb3) mid-May, NDVI mid-May and NDVI mid-April were used. The above results could be applied to other fruit production areas where crops planting structure and natural environmental conditions are similar to the studying area. Based on these results, the monitoring period should be brought forward or postponed and spectral index methods could be chosen when pomegranate trees are monitored by using the remote sensing images of the fruit production areas with simple planting structure and great difference in natural environment conditions from the studying area.

Key words: Pomegranate trees; GF1-WFV; Fruit tree species identification; Best phase; Spectral index

目前,国内外竞相涌现的四高(空间/波谱/辐射/ 时间分辨率)卫星影像以及可开展多/高光谱遥感无 人机的出现为快捷、准确地获取大面积果区内各种 果树的栽植信息(即栽植地域、面积与结构等)提供 了技术可能。借助于这些现势性强的基础数据,各 级果业管理人员可以即时掌握辖区内各种果树的 栽植现状,适时有效地指导当地果农因地科学选栽 或替换果树树种与品种,及时高效地优化调控当地 各种果树的栽植规模与结构,从而进一步地对当地 果业生产实施精准管理与指导^{III}。

伴随着遥感技术的发展,国内外相关研究者相 继利用各种平台数据对森林树种[2-8]、耕区农作物种 类或单种农作物的不同品种[9-13]等的种植信息进行 了相对深入地监测辨识研究。然而,时至今日有关 果区果树栽植信息遥感监测的研究文献却不多 见。从已刊的少量论文来看,董芳等14利用苹果 (Malus pumila Mill.)花期的TM影像,基于混合像 元分解法对栖霞市苹果园地信息进行了提取研 究。岳俊等^[15]采用GF-1卫星数据,运用支持向量机 等4种分类方法,并结合光谱与纹理特征对南疆盆 地的红枣(Ziziphus zizvphus)等4种果树进行了遥 感识别。李雪等¹⁶利用8景HJ卫星影像,采用光谱 分析、NDVI序变分析以及微分变换方法,对阿克苏 市的红枣等4种林果之间的差异性以及林果与其他 地物的差异性进行了分析研究。杨辽四利用多时相 的ZY3、HJ卫星影像,基于NDVI序变分析对库尔勒 境内香梨(Pyrus sinkiangensis T. T. Yu)的种植信息 进行了分析研究。赵希妮等^[18]基于逐月GF1-WFV 影像在对贺兰山东麓地带的NDVI、EVI(增强型植 被指数)序变特征进行分析的基础上,利用决策树方 法提取了当地葡萄树(Vitis vinifera Linn.)的空间分 布信息。邢东兴等^[19-20]利用野外光谱仪采集的反射 光谱数据先后对礼泉县境果实成熟期、花期的苹果 等4种果树进行了辨识研究。

利用卫星影像如何从大面积果区尤其是栽植 结构复杂的果区内提取石榴树(Punica granatum Linn.)的栽植信息?石榴树遥感监测的最佳时相是 什么?直至目前在遥感应用研究领域仍鲜见对此 问题予以专论的文献。籍此,笔者选取关中果区局 地作为研究区,利用多年逐月GF1-WFV影像从反 射光谱特性角度探寻石榴树遥感辨识的最佳时相 与方法,以期为关中乃至全国各果区在今后开展的 石榴树遥感监测提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究区位于陕西省关中平原中部(图1),经 纬度范围为34°15′26″~34°37′35″N,108°16′52″~ 108°48′15″E,面积约130 km²。该区主体位于渭北 台塬上,平均海拔569 m,地势较为平坦。属暖温 带半湿润气候,雨热同季,年均温13.56 ℃,无霜期 218 d,年均降雨量543~566 mm。该区地处关中果



Fig. 1 The research area location map

业生产核心段,区内果树栽植结构复杂多样,目前 成规模栽植的果树树种超过12种,包括苹果、葡 萄、石榴、杏树(Prunus armeniaca)、柿子(Diospyros kaki)、梨树(Pyrus sorotina)、桃树(Prunus persica)、核桃(Juglans regia)、李子(Prunus cerasifera Ehrh)、樱桃(Cerasum and cerasus)、桑葚树(Morus alba Linn.)、猕猴桃(Actinidia chinensis)等。石榴 树主要分布于北部偏西地带。区内同种果树修剪 方式大致相同,树形接近,并且其物候变化几近相 同。区内除果业生产外,还有以冬小麦、夏玉米为 主的粮食生产。区内各地均具有较好的灌溉条 件。

1.2 遥感影像与预处理

1.2.1 影像介绍 为了获得坚实可靠的研究结果并依据石榴树各物候期内的林相特征,采用了多达42 景的GF1-WFV影像(表1)以期进行对照分析与相互佐证。这些影像都采购于中国资源卫星应用中心,空间分辨率皆为16m,数据级均为L1A,在覆盖研究区的区域皆无云清晰。出于对照分析之用,这些影像依据采集年份而组合为3套。在每套组合时,当年份未能保证统一的情况下尽量采用日期接近的影像。第一套中的两景2014年影像分别代替2015年4月初与6月的影像,第二套中

表1 GF1-WFV遥感影像详情 Table 1 Details of the GF1-WFV remote sensing images

第一套影像	第二套影像	第三套影像	石榴树物候期
First set of images	Second set of images	Third set of images	Phenophase period of apricot tree
WFV1-2015-01-23	WFV2-2017-01-02	WFV1-2019-01-22**	休眠期 Period of dormancy
WFV2-2015-02-13	WFV3-2017-02-12	WFV4-2018-02-25	休眠期 Period of dormancy
WFV3-2015-03-14	WFV1-2017-03-08	WFV4-2019-03-09*	休眠期 Period of dormancy
WFV1-2014-04-07**	WFV1-2017-04-01	WFV3-2018-04-02	萌芽期Germination stage
WFV4-2015-04-16	WFV1-2017-04-14	WFV1-2018-04-18	新梢生长期Shoot growth period
WFV2-2015-05-06	WFV2-2017-05-01	WFV3-2018-04-27**	显蕾与开花初期Budding and Early Blooming
WFV1-2015-05-18	WFV2-2017-05-13	WFV2-2018-05-13	盛花期 Flowering stage
WFV2-2014-06-08**	WFV1-2017-06-02	WFV1-2018-06-14	果实发育期Fruit Development Period
WFV3-2015-07-19	WFV3-2017-07-10	WFV4-2018-07-18	果实发育期Fruit Development Period
WFV2-2015-08-29	WFV3-2016-08-28**	WFV1-2018-08-31	果实发育期Fruit Development Period
WFV3-2015-09-06	WFV1-2017-09-12	WFV2-2018-09-21	果实发育期Fruit Development Period
WFV3-2015-10-01	WFV1-2016-10-03**	WFV4-2018-09-22**	果实成熟期Fruit maturity Period
WFV2-2015-11-27	WFV4-2017-11-06	WFV4-2018-11-22	落叶期Leaf fall period
WFV2-2015-12-01	WFV1-2017-12-28	WFV2-2018-12-12	休眠期 Period of dormancy

注:带*表示替代影像。Note: Substitute image with*.

的两景2016年影像分别代替2017年8月与10月初 的影像,第三套中的四景代替影像分别代替2018年 1月、3月、5月初、10月初的影像。

1.2.2 影像预处理 利用 ENVI5.1 软件分别对上述 各景影像依次进行了如下预处理:(1)辐射定标:采 用的定标公式及参数均来自资源卫星应用中心,定 标公式为L=a×DN+b,式中L为辐射亮度,单位为 w·m²·sr¹·µm⁻¹),a、b分别为增益与偏置,DN为像元 灰度值;(2)空间裁剪;(3)大气辐射校正:利用 FLAASH模块对各景影像分别进行了大气辐射校 正。在校正时,考虑邻边效应、传感器的天顶角与 方位角等;(4)几何校正:对各景影像采用相同的校 正参数(包括投影类型、校正数学模型、像元灰度重 采样方法等)进行了几何校正;(5)均值滤波:对每 景影像中的各个波段分别进行了3×3的均值滤波, 以剔除少数奇异灰度值。

1.3 辨识目标限定

鉴于幼年与成年石榴树的反射光谱存在差异、 宽度不同的石榴树地块在一定空间分辨率的影像 中成像情形有别,此研究将树龄≥5 a(年)(从2014 年算起)、地块宽度≥32 m(即2个像元宽)、面积≥1 800 m²的石榴树作为辨识目标,而将树龄≥5 a(从 2014年算起)的别种果树与小麦/玉米作为与石榴树 区别的主要地物。考虑到撂荒地与裸地、城乡建筑 与道路、水体、低龄果树等与石榴树的反射光谱差 异较大,而将其作为与石榴树区别的次要目标。

15

1.4 最佳时相与辨识方法探寻

1.4.1 探寻过程 在借鉴前人对各种植被进行遥感 辨识所采用的方法以及对各种植被指数进行构建的 方法[2-26]的同时,并结合长期的野外观察与当期石榴树 的反射光谱特征,笔者先采用如下探试性方法对石榴 树进行辨识。

(1)同期作物反射光谱比较:在每期影像中,对 13种作物(即12种果树与冬小麦或夏玉米)的反射 光谱数据分别进行采集(各种作物的采集样地数分 别为:石榴、猕猴桃、桑葚与柿子树分别为40、7、13、 18块,其他作物的样地数均在35~40块之间,共407 块。下同),并对其加以处理与对比,以探寻石榴树 当期反射光谱特征与其他作物的差异;(2)同期影 像波段差值或比值分析:在每期影像中,先对其多 个波段按序进行差值或比值运算,后基于ROI采样 以对比分析石榴树对应的差值或比值序列与同期 其他作物的差别。(3)同套邻期影像差值或比值分 析:在同套影像中,先分别对相邻时期、相隔1期、相 隔2期等的两期影像进行(同波段)求差或求比运算, 后基于ROI采样以探寻石榴树对应的邻期或隔期光 谱变化与其他作物的差异。(4)同期影像光谱指数 求算与分析:对每期影像先后采用表2中的每一光 谱指数并进行相应的波段代数运算,随后基于ROI 采样以探寻辨识效能较佳的光谱指数及其对应的 辨识时相。在表2中,前3个光谱指数用于表征石 榴树枝叶年内逐月变化情状;第4~12光谱指数是笔 者依据花期与果实成熟期石榴树的反射光谱特征 (见图2,其数据是利用便携式光谱仪在室外实测而

Table 2 Spectra	al indices and their calculation formulas
光谱指数	计算公式
Spectral indices	Calculation formulas
1	NDVI = $(R_{b4}-R_{b3})/(R_{b4}+R_{b3})$
2	$EVI = 2.5 \times [(R_{b4} R_{b3})/(R_{b4} + 6R_{b3} - 7.5R_{b1} + 1)]$
3	$ARVI = [R_{b4} - (2 R_{b3} - R_{b1})] / [R_{b4} + (2 R_{b3} - R_{b1})]$
4	$RG = R_{\rm b3}/R_{\rm b2}$
5	$BG = R_{b1} / R_{b2}$
6	$CRI1 = 1/R_{b1} - 1/R_{b2}$
7	$CRI2 = 1/R_{b2} - 1/R_{b3}$
8	$ARI2 = R_{b4} \times (1/R_{b3} - 1/R_{b2})$
9	VI1=1/ R _{b1} -1/ R _{b3}
10	VI2=($R_{b3} + R_{b1}$)/ R_{b2}
11	$VI3 = (R_{b3} - R_{b1}) / R_{b2}$
12	$VI4 = R_{b1} + R_{b2} + R_{b3}$
13	VI5=(1/ R _{b1} - 1/ R _{b2})/NDVI
14	VI6=(1/ R _{b1} -1/ R _{b3})/NDVI

光谱指数及其计算公式[27]

注:R_{bi}表示第 i 波段的反射率。

表2

Note: R_{bi} denote the reflectance of band i.

得)而构建的,以期用于辨识对应时期的石榴树:为 了探试花期地面草多、草少与无草石榴树地能否利 用单一光谱指数予以辨识,而构建了第13~第15个 光谱指数;其他光谱指数还有同期影像4个波段反 射率倒数的对数值的加、减、乘、除及其混合运算以 及同期影像各种作物反射光谱与石榴树反射光谱 的绝对距离、相似系数等的求算。(5)同套连期光谱 指数变化追踪:首先在表2中任选一个光谱指数并 对同套中的每期影像分别进行波段运算,随后基于 ROI采样与数据处理等以观察石榴树对应的该光谱

VI7=(R_{b1}+ R_{b2}+ R_{b3})/NDVI



A. 盛花期石榴树的反射光谱; B. 果实成熟期石榴树的反射光谱。

A. Reflectance spectra of pomegranate trees at flowering stage; B. Reflectance spectra of pomegranate trees at fruit maturity stage. 图2 盛花期与果实成熟期石榴树的反射光谱

Fig. 2 Reflectance spectra of pomegranate trees at flowering and fruit maturity stages

435

指数值序列、该光谱指数值邻期或隔期差值序列与 其他作物的差别。此后采用同样的方法对其他光 谱指数进行逐一分析。(6)对以上探得的几种辨识 效能较佳的方法予以联用,并对其综合辨识效能予 以探试。

1.4.2 探寻结果 在以上探试性辨识结果中,发现 如下较佳的辨识方法与时相:(1)在对3景4月中旬 的影像(即WFV4-2015-04-16、WFV1-2017-04-14、 WFV1-2018-04-18)各自衍生出的NDVI图像分别 进行ROI采集、处理与分析后,皆发现石榴、葡萄与 桃树在此时期均具有较低的NDVI值,利用NDVI 阈值可将这3种果树与其他9种果树及小麦区分, 但难以区分这3种果树(见表3左列)。(2)在对3景 5月中旬的影像(即WFV1-2015-05-18、WFV2-2017-05-13、WFV2-2018-05-13)各自衍生出的1/ R_{b1}-1/R_{b3}(简记 VI1,下同)图像分别进行 ROI 采集、 处理与分析后,皆发现石榴树在此时期具有相对较 高的 VI1 值(见表 3 右列),利用 VI1 的阈值可较好 地识别石榴树。若继用此时期的 NDVI 阈值,则辨 识效果更佳。(3)在上述两期数据复合、所用辨识方 法协同的情形下,可进一步提高石榴树的辨识精 度。(4)通过对比分析可知,利用卫星影像辨识石榴 树的较佳时相为4月中旬,最佳时相为5月中旬。 而果实成熟期并非辨识石榴树的较佳时相,原因是 此时期研究区内林相外呈叶绿果红的果树不止石 榴树一种,还有苹果、柿子树等,再加之此时一些葡 萄、猕猴桃与杏等果树的叶色蜕变等因素影响以致 石榴树较难辨识。在除上述时期外的其他时段内, 因石榴树与较多别种果树的反射光谱曲线差异不 大,以致不易辨别。

	表3	13种作物各自样地4月中旬的NDVI均值与5月中旬的1/Rы-1/Rы均值
Table 3	NDVI Mean	s in mid-April and 1/ R _{b1} -1/ R _{b3} means in mid-May corresponding to 13 crops sample plo

作物	4月中旬 Mid-April			5月中旬 Mid-May		
Crops	2015-04-16	2017-04-14	2018-04-18	2015-05-18	2017-05-13	2018-05-13
石榴 Pomegranate trees	0.214	0.272	0.234	4.167	6.357	5.106
葡萄 Grape trees	0.177	0.205	0.178	3.570	4.443	4.005
桃树 Peach trees	0.225	0.288	0.252	3.585	4.556	4.096
樱桃 Cherry trees	0.283	0.357	0.335	3.524	5.490	4.260
桑葚 Mulberry trees	0.436	0.435	0.411	3.356	3.983	3.296
柿子 Persimmon trees	0.323	0.399	0.384	3.152	3.863	3.496
杏树 Apricot trees	0.401	0.506	0.435	3.874	5.526	4.105
梨树 Pear trees	0.370	0.446	0.383	3.684	5.564	4.254
苹果 Apple trees	0.406	0.490	0.354	3.371	4.994	3.630
核桃 Walnut trees	0.376	0.455	0.372	3.541	3.934	3.621
李子 Plum trees	0.377	0.417	0.341	3.601	5.342	4.110
猕猴桃 Yangtao trees	0.242	0.327	0.284	3.214	4.211	3.824
冬小麦Wheat	0.698	0.758	0.611	3.380	4.862	3.322

上述仅是基于各期各种作物样地内的ROI数据 并对其加以相应处理、对比分析而得出的暂探结 果,此后又采用三对6景(即3个不同年份的4月中 旬与5月中旬影像)全域影像对该暂探结果予以验 证,其结果皆较理想。下文以WFV1-2018-04-18与 WFV2-2018-05-13两景影像为例,详述验证过程与 结果。

2 验证与结果

2.1 验证影像

利用源自WFV1-2018-04-18 与WFV2-2018-05-13 两景影像的衍生影像来进行验证,该影像是经

如下处理而得:(1)首先对上述两景影像进行配准; (2)随后通过波段代数运算分别求取4月中旬影像的NDVI值(记为NDVI418)以及5月中旬影像的ND-VI与VII值(记为NDVI513,VI1513);(3)最后将ND-VI与VII值(记为NDVI513,VI1513);(3)最后将ND-VI513、VI1513与NDVI418三帧图像予以复合、裁剪,形 成验证影像。

2.2 验证过程

首先在验证影像中对石榴树样地内的ROI进 行采集(因两景影像间进行了配准而需进行再次采 样),随后在对所采ROI数据集进行整理、奇异值剔 除等的基础上,又对三个光谱指数的最大、最小值 (即阈值)分别予以求算。最后利用依据这些阈值 (0.175≤NDVI₄₋₁₈≤0.289,4.653≤VI1₅₋₁₃≤5.787,0.461≤ NDVI₅₋₁₃≤0.652)构建的决策树对验证图像进行了基于专家知识的决策树分类。

2.3 验证结果与分析

利用 NDVI₄₋₁₈ 单阈值、VII₅₋₁₃ 单阈值、双重阈值 (VII₅₋₁₃ 与 NDVI₅₋₁₃)、三重阈值(VII₅₋₁₃、NDVI₅₋₁₃ 与 NDVI₄₋₁₈)分别进行辨识。

从图3可见,仅采用NDVI418单阈值即可较好地 将石榴树与除葡萄、桃树外的其他9种果树及小麦 予以区分,但不可将石榴树与葡萄、桃树辨别开。 原因是4月中旬的石榴树正处于新梢生长初期,叶 窄且小,其与发芽抽枝较晚的葡萄树、新枝始抽且 叶面窄细的桃树的冠层盖度、叶面积指数皆较小, 以致三者NDVI值均偏低而难以区别。但此时的其 他果树树种与小麦却具有相对较高的NDVI值以与 石榴、葡萄、桃树区别明显。从该图亦见,许多城乡 绿化植被、有草撂荒地、低龄别种果树等以其较低 的NDVI值也与石榴树混淆难剔。



对图4进行严判后发现,石榴树与小麦的全部 样地均被正确识别(若一地块≥75%的像元被正确 识别,则认为其被正确识别,否则,认为错分。下 同),其他11种果树的绝大多数样地亦被正确识 别。但由于受地面众多地物错综复杂的组合情状、 混合像元与异物同谱现象的存在、影像辐射校正精 度的有限、所用影像较低的空间分辨率(在较低空 间分辨率的影像中采集样地ROI时,很难保证每一 像元都具有代表性与典型性)以及阈值设置的偏倾 性(微调阈值以期所有石榴树样地皆被正确识别)





等多因素影响,以致少数苹果、梨、李子等果树样地与一些非果树地物被错分。从该图亦见,未被ND-VI418指数剔除的那些城乡绿化植被、有草撂荒地、 低龄别种果树等在此也被较明显地剔除。以上表 明光谱指数VI1的确对盛花期的石榴树具有较强的 辨识效能。究其原因是在5月中旬研究区内只有石 榴树处于盛花期,其以丛生绿枝上点缀繁多红花的 独特林相以及由此导致的独特反射光谱(见图2-A) 而与其他地物存在较大区别。从图5可见,在图4 分类的基础上继用NDVI513阈值可进一步剔除一些 非石榴树地物。其原因是此时期石榴树各样地的 NDVI处于一较窄数值区间,利用该区间阈值即可 剔除一些非石榴树地物。



图 5 用 VI1₅₋₁₃与 NDVI₅₋₁₃双重阈值辨识的结果图 Fig. 5 Identification result image using dual thresholds of VI1₅₋₁₃ and NDVI₅₋₁₃

图6为联用三重阈值进行辨识的最终结果图, 从中可见在图5分类的基础上继用NDVI418阈值可 较明显地剔除一些采用 VI15-13 与 NDVI5-13 双重阈值 未能剔除的非石榴果树与非果树地物,使得总体分 类精度更进一步提高。

参照WFV2-2018-05-13影像的假彩色图像对图 6进行严判后得知,40块石榴树样地均被正确辨识, 但受混合像元与配准图像时几何误差的存在等多 因素影响,许多样地的辨识轮廓与实际边界存在出 入,个别宽度较窄或树龄不均的地块辨识形态与实 地存在较大差异。367块非石榴作物样地中有342 个地块(占比93.18%)被正确识别(其中的36块小麦 样地全被正确识别),仅有25处果树样地(占比 6.82%)被错分为石榴树。在随后进行的实地随机 抽验过程中,发现石榴树40块样地与宽度>32m并 且林相整齐的16块非样地均被正确识别,被错分的 石榴树非样地要么是宽度较窄且两侧栽植另类果 树,要么是树龄不均或树木老化或多年弃管。非石 榴果树中的25块样地与31块非样地被错分为石榴 树,其中多数为苹果、梨树,其余为李子、樱桃等果 树。这些果树被错分的原因或由阈值设置时的顾 此失彼引起或因异物同谱现象导致。其余地物未 见错分。





此处以像元为评价单元对图6的分类精度予以 评价。鉴于撂荒地与裸地、城乡建筑及其内部绿化 植被、道路、水体、小麦等非果树地物易与石榴树区 别,在此仅对石榴树与非石榴果树两大类的混分情 况予以评价。首先,在验证影像中对371块果树样 地(从总样地数407中减去36块小麦样地)、随后实 地抽验到的16块石榴树地与31块非石榴果树地共 418个地块进行了ROI采集。在56块石榴树地采 集到2128个像元,在362块非石榴果树地采集到 13922个像元,共16050个像元。在2128个石榴树 像元中,1836个像元被正确识别,292个像元被 错分为非石榴。在13922个非石榴果树像元中, 11867个像元被正确识别,2055个像元被错分。通 过简单计算而得到仅含石榴树、非石榴果树两大类 的混淆矩阵,从中可见石榴树类的正确识别率为 86.28%,总体分类精度为85.37%。

3 讨 论

利用现代遥感技术即时、精确地获取大面积果 区内各种果树的栽植信息,具有重大的生产与管理 意义。这些数据信息是各级果业管理部门对辖区 果业实施科学、高效与精准管理的必要前提,是保 障果区果业高效益、可持续健康发展的有力保障。 而缺失这些数据信息的果业管理与生产,必然会导 致大量品质低劣水果的上市,也必然会导致"多收 了三五斗"惨景的接连上演(比如关中果区近二十 年来相继呈现的诸多惨景:先是秦冠苹果的由盛转 衰,后继山楂的无人管务,再继红提葡萄的低价贱 卖,再继桃子、核桃、樱桃价格的迅速下滑),进而会 折损果农从业的积极性甚至可导致果业生产的不 可持续。

利用遥感影像如何从大面积果区尤其是栽植结 构复杂的果区内提取石榴树的栽植信息?石榴树 遥感监测的最佳时相是什么? 直到目前,国内外遥 感应用研究领域对此问题仍未做答。一些涉及其 他果树遥感辨识的已刊文献[1420]因其研究区域果树 栽植结构相对简单而致其所用辨识方法较为简 易。在套用前人所用方法获得低效辨识结果的情 形下,并考虑到所定研究区内作物种植结构复杂、 辨识石榴树难度可能较大等因素,笔者采用了多个 年份的数十景遥感影像与十多种光谱分析方法以 探寻区内石榴树遥感辨识的最佳时相与方法。结 果表明:(1)在4月中旬,石榴具有相对较低的NDVI 值,采用该指数阈值可较好地将石榴树与除葡萄、 桃树外的其他9种果树及小麦予以区分,但不可将 石榴树与葡萄、桃树以及许多城乡绿化植被、有草 撂荒地、低龄别种果树等区分;(2)在5月中旬,正值 盛花期的石榴树具有相对较高的1/Rы-1/Rы值,利 用该指数阈值既可将石榴树与其他大多数果树树 种及小麦予以较好地区分,也可将城乡绿化植被、 有草撂荒地、低龄别种果树等予以正确辨别并大幅 剔除。但受多种不利因素的影响,导致少数苹果、 梨、李子等果树以及一些非果树地物被错分为石榴 树。若继用 NDVI 阈值则可剔除部分非石榴树地 物;(3)在复合上述两期影像、联用(1/R_{b1}-1/R_{b3})_{5月中旬}、 NDVI_{5月中旬}、NDVI_{4月中旬}三重阈值的情形下,可进一步 提高辨识精度,石榴树类的正确识别率可达 86.28%,总体分类精度可达85.37%;(4)利用遥感影像 辨识石榴树的最佳时相为5月中旬,4月中旬次之。

上述成果是在对多年多景影像进行繁复处理、 谨慎求算与分析的基础上得出的,因而具有一定的 可靠性。但是,因本研究所用影像波谱与空间分辨 率皆较低,其所得结果的坚实性还需采用较高波谱 与空间分辨率的遥感影像予以检验(即检验在本文 分析所得的最佳时相之外是否还有其他较佳甚至 更加时相存在;检验其他波段与特征光谱指数的辨 识效能;检验多种纹理特征的辨识效能等)。

上述成果可适用于自然环境条件与作物种植结构等与本研究区相近的其他果区在今后利用相同 空间与波谱分辨率的影像数据对当地石榴树的栽 植信息进行估测评价,对于作物种植结构简单或自 然环境条件与本研究区差异较大的果区在开展石 榴树栽植信息遥感监测时,可参考本研究的探索途 径与光谱指数联用方式。

4 结 论

在关中果区利用卫星遥感影像对石榴树进行 监测辨识时,可采购4月中旬与5月中旬的遥感影 像(其空间分辨率≤16 m,光谱分辨率≥4个波段), 在对其进行大气校正、配准复合等的基础上,联用 (1/ R_{b1}-1/ R_{b3})_{5月中旬}、NDVI_{5月中旬}、NDVI_{4月中旬}三重阈值, 可以较理想精度辨识石榴树。

致 谢:感谢中国资源卫星应用中心提供卫星 影像支持。

参考文献 References:

[1] 邢东兴.基于高光谱数据的果树理化性状信息提取研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2009.

XING Dongxing. Research on extraction of the information of physical and chemical properties of fruit trees based on spectral reflectance data[D]. Yangling: Northwest Agriculture and Forestry University, 2009.

[2] BOYD D S, RIPPLE W L. Potential vegetation indices for deter-

mining global forest cover[J]. International Journal of Remote Sensing, 1997, 18(6):1395-1401.

- [3] MARTIN M E, NEWMAN S D, ABER J D, CONGALTON R G. Determining forest species composition using high spectral resolution remote sensing data [J]. Remote Sensing of Environment, 1998, 65(3): 249-254.
- [4] ROBERTS D A, GARDNER M, CHURCH R, USTIN S, SCHEER G, GREEN R O. Mapping chaparral in the Santa Monica mountains using multiple endmember spectral mixture models [J]. Remote Sensing of Environment, 1998, 65(3):267-279.
- [5] 宫鹏,浦瑞良,郁斌.不同季相针叶林树种高光谱数据识别分析[J]. 遥感学报,1998,2(3):211-217.
 GONG Peng, PU Ruiliang, YU Bin. Conifer species recognition with seasonal hyper-spectral data [J]. Journal of Remote Sensing, 1998,2(3):211-217.
- [6] 王新辉,沈掌泉,王珂,贾春燕,凌在盈.基于面向对象的香榧资源分布遥感调查研究[J]. 科技通报,2009,25(2):160-166.
 WANG Xinhui, SHEN Zhangquan, WANG Ke, JIA Chunyan, LING Zaiying. Survey of *Torreya grandis* Merrillii resource based on object- oriented method[J]. Bulletin of Science and Technology,2009,25(2):160-166.
- [7] 田光辉,李海亮,陈汇林.基于物候特征参数的橡树树种种植信息遥感提取研究[J].中国农学通报,2013,29(28):46-52. TIAN Guanghui, LI Hailiang, CHEN Huilin. Research on remote sensing extraction of planting information for *Rubber* trees based on phenological characteristic parameters[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin,2013,29(28):46-52.
- [8] 邹尚辉. 植被资源调查中最佳时相遥感图象的选择研究[J]. 植物学报,1985,27(5):525-531.
 ZOU Shanghui. Selection study of optimum temporal remote sensing images for vegetation resources inventory[J]. Chinese Bulletin of Botany, 1985, 27(5):525-531.
- [9] BADHWAR G D. Use of LANDSAT derived profile features for spring small grains classification [J]. International Journal of Remote Sensing, 1984, 5(5): 783-797.
- [10] 白继伟,赵永超,张兵,童庆禧,郑兰芬.基于包络线消除的高光 谱图像分类方法研究[J]. 计算机工程与应用,2003(13): 88-91.
 BAI Jiwei, ZHAO Yongchao, ZHANG Bing, TONG Qingxi, ZHENG Lanfen. Study on the classification methods of the hyperspe-ctral image based on the continuum removed[J]. Computer Engineering and Applications,2003(13): 88-91.
- [11] 王长耀,刘正军,颜春燕.成像光谱数据特征选择及小麦品种 识别实验研究[J].遥感学报,2006,10(2):249-255.
 WANG Changyao,LIU Zhengjun,YAN Chunyan. A experimental study on imaging spectrometer data feature selection and wheat type identification[J]. Journal of Remote Sensing, 2006, 10(2):249-255.
- [12] 王岽,吴见.农作物种类高光谱遥感识别研究[J].地理与地理 信息科学,2015,31(2):29-33.

WANG Dong, WU Jian. Study on crop variety identification on

by hyper-spectral remote sensing[J]. Geography and Geo-information Science, 2015, 31(2): 29-33.

[13] 胡永森,王力,施开分,周巍,饶华,王长耀.基于分区分层随 机抽样的棉花种植面积遥感监测方法研究[J].河南农业科学, 2016,45(10):155-160.

HU Yongsen, WANG Li, SHI Kaifen, ZHOU Wei, RAO Hua, WANG Changyao. Cotton planting area estimation method with remote sensing based on partitioned and stratified random sampling[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2016, 45(10) : 155-160.

[14] 董芳,赵庚星,王凌,朱西存,常春艳.基于实测光谱混合像元 分解的苹果园地遥感提取技术[J].应用生态学报,2012,23 (12):3361-3368.

DONG Fang, ZHAO Gengxing, WANG Ling, ZHU Xicun, CHANG Chunyan. Remote sensing techniques of apple orchard information extraction based on linear spectral mixing with measured data[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(12): 3361-3368.

[15] 岳俊,王振锡,冯振峰,李子艺,王玲段.基于光谱与纹理特征的南疆盆地果树树种遥感识别研究[J].新疆农业大学学报, 2015,38(4):326-333.

YUE Jun, WANG Zhenxi, FENG Zhenfeng, LI Ziyi, WANG Lingduan. Study on remote sensing recognition on fruit trees species based on spectrum and texture features in southern xinjiang basin[J].Journal of Xinjiang Agricultural university, 2015, 38 (4): 326-333.

- [16] 李雪,钟仕全,王蕾,彭波,冯志敏.基于 HJ 卫星遥感数据的 林果光谱特征分析[J]. 新疆农业科学,2011,48(11):1967-1973. LI Xue, ZHONG Shiquan, WANG Lei, PENG Bo, FENG Zhimin. Analysis of spectral characteristics of fruit trees based on HJ satellite remote sensing data[J]. Xinjiang Agricultural Sciences,2011,48(11):1967-1973.
- [17] 杨辽.基于多光谱数据的库尔勒香梨种植面积提取研究[D]. 乌鲁木齐:新疆大学,2015.
 YANG Liao. Based on multi-spectral data of *Kuerle Fragrant* pear planting area extraction research[D]. Urumchi: Xinjiang University,2015.
- [18] 赵希妮,璩向宁,王磊,刘雅清,许兴.基于GF-1/WFV时间序列的葡萄遥感识别[J].河南农业科学,2019,48(3):153-160.
 ZHAO Xini, QU Xiangning, WANG Lei, LIU Yaqing, XU Xing.
 Grape remote sensing recognition based on GF-1/WFV time series
 [J]. Journal of Henan Agricultural Sciences,2019,48(3):153-160.
- [19] 邢东兴,常庆瑞.基于光谱分析的果树树种辨识研究[J].光谱 学与光谱分析,2009,29(7):1937-1940.
 XING Dongxing, CHANG Qingrui. Research on identification of species of fruit trees by spectral analysis[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis,2009,29(7):1937-1940.
- [20] 邢东兴,常庆瑞.基于花期果树冠层光谱反射率的果树树种 辨识研究[J]. 红外与毫米波学报,2009,28(3):207-211.
 XING Dongxing, CHANG Qingrui. Identification of species of

fruit trees based on the spectral reflectance of canopies of fruit trees during flowering period[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2009, 28(3):207-211.

- [21] 谢敏,龚直文.基于高分辨率卫星影像的森林动态变化监测 与驱动力分析[J]. 中南林业科技大学学报,2019,39(5):30-36.
 XIE Min, GONG Zhiwen. Forest resource monitoring and driving force analysis based on high-resolution satellite images[J].
 Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2019,39(5):30-36.
- [22] 胡德玉,刘雪峰,王克健,何绍兰,谢让金,易时来,邓烈.郁闭 柑橘园改造对植株光化学反应参数及果实品质的影响[J].果 树学报,2017,34(5):552-566.

HU Deyu, LIU Xuefeng, WANG Kejian, HE Shaolan, XIE Rangjin, YI Shilai, DENG Lie. Effects of tree pruning in a closed citrus orchard on some parameters of photochemical reactions and fruit quality[J]. Journal of Fruit Science, 2017, 34(5): 552-566.

[23] 程立真,朱西存,高璐璐,王凌,赵庚星.基于随机森林模型的 苹果叶片磷素含量高光谱估测[J].果树学报,2016,33(10): 1219-1229.

CHENG Lizhen, ZHU Xicun, GAO Lulu, WANG Ling, ZHAO Gengxing. Hyperspectral estimation of phosphorus content for apple leaves based on random forest model[J]. Journal of Fruit Science, 2016, 33(10):1219-1229.

[24] 柴仲平,王雪梅,盛建东,李萍,刘茂,孟亚宾.基于光谱分析 的库尔勒香梨叶片全氮含量估测研究[J].果树学报,2013,30 (3):421-426.

CHAI Zhongping, WANG Xuemei, SHENG jiandong, LI Ping, LIU Mao, MENG Yabin. Prediction of the nitrogen content in leaves of Kuerle fragrant pear by spectral analysis[J]. Journal of Fruit Science, 2013, 30(3):421-426.

[25] 元兴兰,肖丰庆,刘健,张李平.基于 SPOT-5 影像的马尾松毛 虫虫害遥感监测研究[J]. 中南林业科技大学学报,2019,39(4): 59-65.

QI Xinglan, XIAO Fengqing, LIU Jian, ZHANG Liping. Study on monitoring *Dendrolimus punctatus* damage based on SPOT-5 remote sensing images[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2019, 39(4):59-65.

- [26] 凌成星,刘华,鞠洪波,张怀清,孙华,由佳,李伟娜.基于地面成像光谱数据特征的湿地典型植被类型识别研究:以东洞庭湖核心湿地为例[J].西北林学院学报,2018,33(3): 208-213. LING Chengxing, LIU Hua, JU Hongbo, ZHANG Huaiqing, SUN Hua, YOU Jia, LI Weina. Identifying typical wetland vegetation types based on imaging spectrometer data: a case study in Dongdongting lake wetland area[J]. Journal of Northwest Forestry University,2018,33(3): 208-213.
- [27] 邓书斌.ENVI 遥感图像处理方法[M].北京:科学出版社, 2010: 378-385.

DENG Subin. ENVI remote sensing image processing method [M]. Beijing: Science Press, 2010: 378-385.