

基于高光谱的苹果果期冠层光谱特征及其果量估测

雷 彤¹, 赵庚星^{1,*}, 朱西存¹, 董 超¹, 孟 岩¹, 战 冰²

(1. 山东农业大学资源与环境学院, 泰安 271018; 2 栖霞市国土资源局, 栖霞 265300)

摘要: 苹果冠层光谱特征是苹果树遥感生理监测和生产管理的重要依据。对栖霞市苹果果期的冠层反射光谱进行实测, 结合数码照相技术探明了苹果果期的反射光谱特性和敏感波段, 并通过敏感波段与果树比指标建立回归模型, 实现了对苹果冠层果量(果树比)的无损估测。结果表明: 苹果树果期冠层光谱曲线总体表现为对蓝光和红光的吸收及对绿光的反射, 在近红外 750—1300nm 之间表现为强烈的反射, 且在 1650nm 和 2200nm 附近呈现两个反射峰。选择 435、670、730、940、1140nm 和 1480nm 等 6 个波段为苹果果期的敏感波段。利用这些波段分别构建了差值、比值及归一化植被指数, 筛选了最佳光谱参数, 进而构建了果量(果树比)估测模型, 经筛选验证确定苹果果量的最佳估测模型为: $y = 0.0086[NDVI(940, 730)]^2 - 1.0934NDVI(940, 730) + 0.3209$ 。模型为苹果果期果量的精确估测提供了比较快捷的方法途径。

关键词: 高光谱; 数码照片; 苹果果期; 光谱特征; 估测模型

Canopy spectral features and fruit amount estimation of apple tree at fruit stage based on hyperspectral data

LEI Tong¹, ZHAO Gengxing^{1,*}, ZHU Xicun¹, DONG Chao¹, MENG Yan¹, ZHAN Bing²

1 College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China

2 Qixia Bureau of Land and Resources, Qixia 265300, China

Abstract: Canopy spectral characteristics of apple tree are the basis for apple physiological monitoring with remote sensing and production management. This study carried out the measurement of apple tree canopy spectral reflectance at apple fruit stage in Qixia City. The reflective spectral features and sensitive wavebands of apple tree canopy at fruit stage were initially explored and regression models between sensitive bands and the ratio of fruit/tree were established with digital photography techniques. The non-destructive estimation of fruit amount (fruit/tree ratio) was realized. The results showed that the spectral features of apple tree canopy at fruit stage mainly presented as absorption of blue light and red light, reflection of green light, and the strong reflection of near-infrared between 750nm to 1300nm, with two reflection peaks near 1650nm and 2200nm. The sensitive bands to fruit amount were 435nm, 670nm, 730nm, 940nm, 1140nm and 1480nm. Vegetation indices of difference, ratio and normalized difference were built respectively with the sensitive bands, and the best spectral parameters were selected. Estimation models of fruit amount (fruit/tree ratio) were established accordingly and the best model was evaluated and validated as $y = 0.0086[NDVI(940, 730)]^2 - 1.0934NDVI(940, 730) + 0.3209$. This model is expected to provide a relatively fast and accurate estimation method for canopy fruit amount at apple tree fruit stage.

Key Words: hyperspectral; digital photos; apple fruit stage; spectral features; estimation model

近年来快速发展的高光谱遥感, 以其数据量大、光谱信息和图像信息有机结合、波谱分辨率高等巨大优势, 成为遥感发展的一项重大创新。高光谱遥感技术已成功应用于实时、大范围、无破坏的植物生长状况与趋

基金项目: 国家“863”计划资助项目(2008AA10Z203); “星火计划”资助项目(2007EA740002)

收稿日期: 2009-06-25; **修订日期:** 2010-03-14

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhaogx@sdau.edu.cn

势探测,为田间管理提供及时的作物信息,并取得了明显的成效^[1-3]。

目前利用地物光谱仪探测田间作物的冠层光谱反射率信息,运用得到的冠层光谱对不同作物的生长动态、营养状况、化学成分含量等进行动态检测已有很多研究,为航空航天遥感农业应用奠定了基础。Armitage、Schmidtlein 和 Sassi 等^[4-7]研究了植物群落和水体的冠层光谱特征与生态因子之间的关系,找出了识别效果最好的敏感波段,通过建立回归模型进行物种识别,表明可以用高光谱进行遥感判读解译分类;吴长山等^[8-12]研究了植被不同品种、不同生长时期、不同种植密度以及不同营养元素使用量对植被冠层光谱反射率特征的影响,探明了植被在不同条件下的长势光谱,找出了反映植被信息的敏感波段;李映雪等^[13-16]利用植被的冠层光谱指数和叶片或籽粒的化学成分进行相关分析,建立预测模型,进而预测植被叶片特征或籽粒品质;Shibayama、Blackburn G A 等^[17-20]基于植被冠层光谱与不同施氮水平下的回归方程建立了植被叶片营养状况、叶绿素和水分的检测模型,并进行了各含量的反演预测;朱艳等^[21]提出两个可见光波段(560 nm 和 710 nm)和 5 个近红外波段(810、870、950、1100 nm 和 1220 nm)组成的植被指数与棉花地上部干物质积累量的相关性较好,其中 $RVI(1100, 560)$ 的相关性最好,通过逐步回归分析确立了棉花地上部干物质积累量的预测模型,大量研究证明通过高光谱遥感手段估测植被地上部物质积累量是可行的^[22-23]。

然而,高光谱遥感技术的发展应用目前主要集中在水稻、玉米、棉花等种植业大田作物,在果树生产与管理中的应用研究却十分少见。因此,本研究着眼于苹果成熟果期这一关键时期,在实测苹果冠层反射光谱的基础上,研究苹果果期不同果量的冠层反射光谱特征,探索苹果果期的敏感特征波段,并从统计学角度分析苹果果量(果树比)与冠层反射光谱特征的定量关系,这对苹果生产管理与园地信息提取等研究具有重要意义。

1 研究区概况

研究区域选择在具有悠久苹果种植历史的“中国苹果之都”山东省栖霞市。栖霞市地处胶东半岛中心位置(图 1),位于 E 120°33′—121°15′、N 37°05′—37°32′之间,总面积 2017.65 km²,境内海拔 30—815m,属山区丘陵地形,素有“六山一水三分田”之说和“胶东屋脊”之称,属暖温带季风型半湿润气候,年平均气温 11.3℃,无霜期 207d,夏季降雨多,春秋降雨少,具雨热同期的特点,环境条件特别适合苹果栽培,具有良好的研究条件和场所基础。目前,全市苹果园地总面积达 3.87 万 hm²,占全国总面积的 2%,年产量 145 万 t 左右,占全国苹果总产量的 5%,在栽植面积、总产量、品种组成、果品质量、产业化程度和出口量上均已达到国内领先水平,苹果产业化、标准化和国际化水平位居全国前列。栖霞先后被誉为“全国优质苹果生产基地”、“中国苹果之乡”和“中国苹果之都”等称号,栖霞苹果享誉中外。

2 材料与方法

2.1 时相选择和实验设计

本试验选择在 2008 年 10 月 8 日—10 日进行苹果果期的冠层光谱采集和数码照片的拍摄,此时苹果树长势良好,大部分处于稳定的结果期,与其他生长植被具有明显差异,是苹果园地光谱信息采集的适宜时期。根据栖霞市苹果园地的分布情况设定实验观测点,有代表性的选取了 12 个镇的 74 棵苹果树作为样本,样点分布如图 1 所示。以 ASD 便携式地物光谱仪直接测定各样本的冠层光谱。

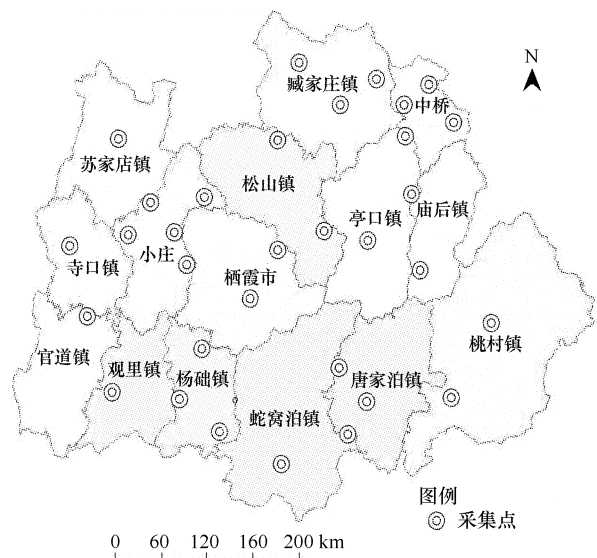


图 1 栖霞市地理位置及样点分布图

Fig. 1 The geographical location of Qixia City and distribution of sample points

2.2 光谱数据的获取和处理

苹果果期冠层反射光谱的测定采用美国 ASD 公司的 Field Spec 3 便携式地物光谱仪,光谱范围为 350—2500nm,其中 350—1000nm 光谱采样间隔(波段宽)为 1.4nm,光谱分辨率为 3nm,1000—2500nm 光谱采样间隔(波段宽)为 2nm,光谱分辨率为 10nm,数据采样间隔为 1nm,光纤前视场角为 25°,外加光纤长度为 5m,以适应果树光谱信息的采集。所有光谱测定均在晴朗、无风、无云的天气,并根据天气条件及时进行标准白板优化校正,每 15min 进行 1 次优化,白板的反射率为 1,测定时间为每日 10:00 到 14:00,此时光照条件良好,阳光几乎直射(太阳高度角大于 45°)。测定时光谱仪探头垂直向下,根据苹果树树冠直径与高度确定探头距果树冠层的高度,保证视场覆盖于树冠之内,每个样本每次记录 10 个采样光谱,进行 10 个采样光谱曲线的平均处理,最后得到该苹果树的反射曲线。

由于光谱仪本身噪声和大气水吸收影响使得红外 1350—1450、1800—1960nm 以及 2350—2500nm 波段范围内产生较大干扰噪音,因此进行了删除处理,进而将原始反射率数据导出,利用数据分析软件 SPSS 13.0 进行相关研究,分析苹果果量和光谱特征值的关系。

2.3 数码照片的获取及处理

在苹果树冠层光谱测定的同时利用数码相机对果树进行拍照,获取果树的果期数码照片。拍摄时对所有果树选择同一高度、同一水平方向照相,把整株果树的树冠信息全部包括在内,所获得的数码照片能够清晰的反应苹果树果、叶、背景等相关信息。经过 Photoshop 图像处理软件去除其他果树枝叶、草地、天空等其他信息,只保留整株果树的信息。

2.4 苹果树果期光谱特征分析与敏感波段选择

为定量分析苹果树果期的敏感波段,研究果量对其光谱特征的影响,将经过处理后的数码照片在图像处理软件 Erdas 中进行分类,确定每棵样本树的果树比(果与果、叶、树干三者面积之和的比例)指标,进而分别计算和每个光谱通道的原始光谱数据的相关系数,探明苹果果量与其果期的光谱特征的定量关系,分析出苹果果期的敏感光谱波段。

2.5 苹果树果树比预测模型的建立

为了获取苹果产量的光谱估测模型,在分析苹果成熟果期冠层高光谱数据并得出其敏感波段的基础上,利用各敏感波段构成的差值植被指数 *DVI* (Differential Vegetation Index)、比值植被指数 *RVI* (Ratio Vegetation Index)、归一化植被指数 *NDVI* (Normalized Difference Vegetation Index) 以及红边反射率与每棵样本果树的果树比指标进行相关分析,在此基础上筛选出与果树比关系密切的光谱波段及植被指数,通过逐步回归分析,构建果树比估测模型,进而确定最佳光谱估测指数与估测模型。

3 结果与分析

3.1 数码照片处理与分类结果

利用 Erdas 遥感图像处理软件对预处理后的数码照片进行了监督分类,果期照片分类结果将图像分为果、叶、树干、土地 4 个类别。图 2 为部分分类后的图像。

对监督分类后的图像与相应数码照片进行目视对比,检查分类精度。进而进行各类别的统计分析,分别计算出每棵苹果树的果树比。为保障数据的准确与独立,减少数据冗余,在对分类结果进行初步分析的基础上,对其中背景信息干扰大的数据样本进行了筛选,从果期 74 棵果树样本中选取了 60 棵树作为研究数据。表 1 为分类后的部分相关数据。

3.2 基于高光谱数据的苹果树果期反射光谱特性

苹果果期的果树果叶相间,红白色果子数量的多少势必会影响苹果果期的冠层反射光谱。一般认为,色素吸收决定着可见光波段的光谱反射率,细胞结构决定近红外波段的光谱反射率,而水汽吸收则主要影响短波红外的光谱反射率。图 3 为苹果树的冠层反射光谱曲线比较,由于每棵样本树的结果量不同,根据果树比分为 3 种类型:果树比大(果树比大于 0.15)、果树比中(果树比在 0.05 到 0.15 之间)和果树比少(果树比在

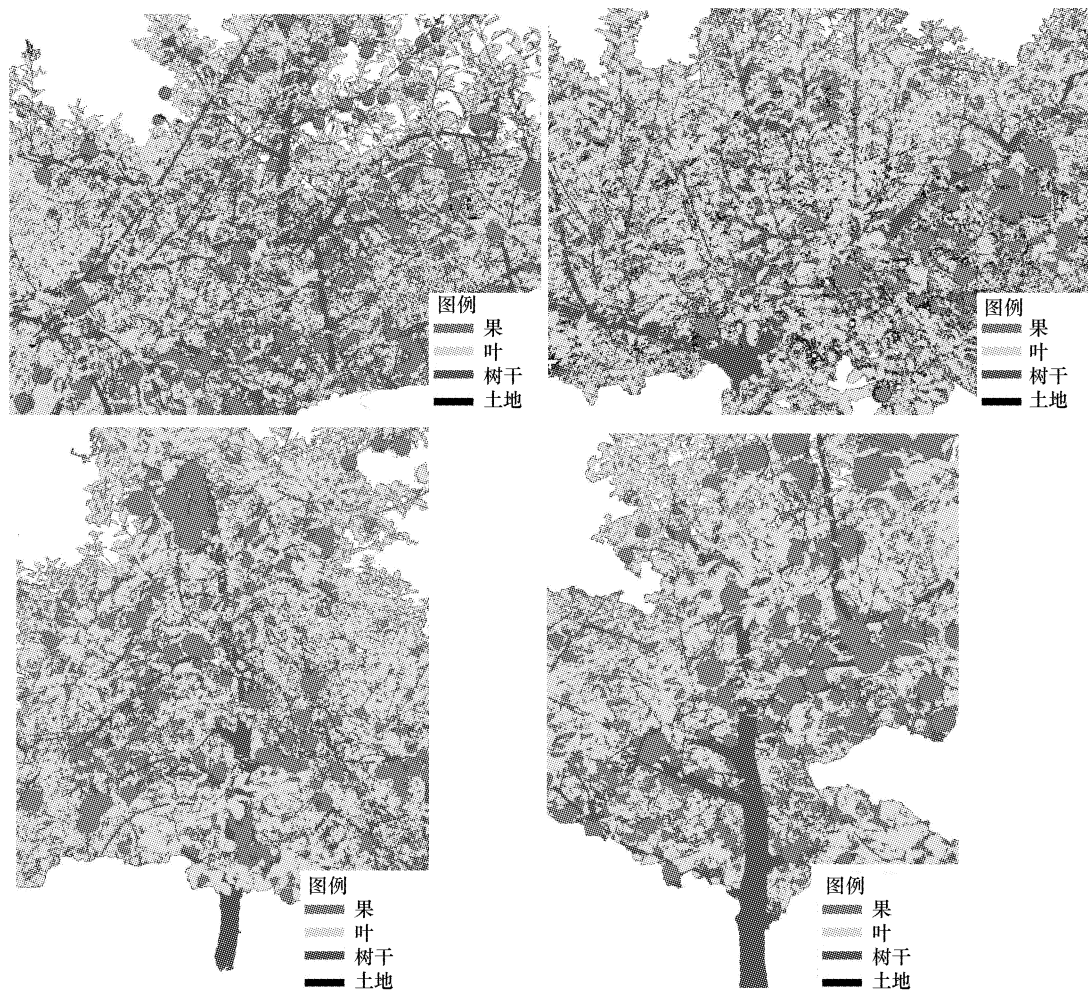


图 2 监督分类后的图像

Fig. 2 Images after supervised classification

表 1 果期样本树监督分类结果统计数据

Table 1 The statistical results of supervised classification

果树代号 Fruit code	果/树 Apple/tree	果树代号 Fruit code	果/树 Apple/tree	果树代号 Fruit code	果/树 Apple/tree	果树代号 Fruit code	果/树 Apple/tree
G01-2	0.074	G04-1	0.132	G06-4	0.117	G07-9	0.145
G01-3	0.111	G04-2	0.110	G06-5	0.066	G08-1	0.113
G02-1	0.053	G04-3	0.049	G06-6	0.038	G08-2	0.086
G02-2	0.052	G04-4	0.089	G06-7	0.075	G08-3	0.113
G02-4	0.116	G04-5	0.091	G06-8	0.085	G08-5	0.172
G02-5	0.098	G04-6	0.121	G06-9	0.088	G08-6	0.138
G03-1	0.111	G04-7	0.118	G06-11	0.077	G08-7	0.128
G03-2	0.070	G04-8	0.128	G06-12	0.049	G08-8	0.188
G03-3	0.068	G04-9	0.076	G06-13	0.055	G08-9	0.205
G03-4	0.109	G04-10	0.071	G06-14	0.029	G08-10	0.167
G03-5	0.067	G05-1	0.080	G07-2	0.049	G08-11	0.195
G03-6	0.045	G05-2	0.121	G07-3	0.078	G08-12	0.249
G03-7	0.021	G06-1	0.129	G07-4	0.056	G08-13	0.155
G03-9	0.075	G06-2	0.116	G07-5	0.060	G08-15	0.125
G03-10	0.002	G06-3	0.137	G07-6	0.104	G08-16	0.097

G01-1 代表果期第一个采样点第一个样本果树; $n=60$

0.05 以下)。可以看出:不同果树比的果树反射光谱曲线存在很大差异,可见光波段果量多的果树反射光谱比其他果树明显偏高,而在近红外区域果量少的果树光谱曲线要比果量多和中等果树反射光谱曲线高,在中红外波段和远红外波段依次为:低果树比 > 高果树比 > 中果树比。由于在可见光波段中叶绿素是冠层光谱的主导因素,叶绿素对蓝光和红光强烈吸收,因此在可见光波段果量多的果树反射率比其他果树高;在近红外、中红外区域,果量少的冠层反射光谱平均较高,主要与结果期叶子内部结构生长发育完全,叶绿素含量和水分含量较高有关。

在波长为 470nm 的蓝青光和 650nm 的红光附近,果期苹果树表现为两个吸收谷,而在 550nm 的绿光附近反射率增加,呈现为一个反射峰。在 700nm 附近,其反射率骤然上升,在近红外 760—1300nm 之间呈现为强烈的反射,形成一个反射平台,反射率最高达到 0.6 左右,其中又分别表现为 870、1100nm 和 1280nm 附近的 3 个反射峰和 950、1150nm 附近的 2 个相对吸收谷。到 1450nm 以后其反射率明显跌落,呈现出 1670nm 附近和 2220nm 附近 2 个相对反射峰。

“红边”是绿色植被在 680—740nm 之间的反射率增高最快的点,也是一阶导数在该区间的拐点,是由于植被在红光波段强烈的吸收与近红外波段强烈的反射造成,“红边峰值”表示冠层反射率一阶微分的最大值。研究证实,红边位置对于叶绿素 a 和叶绿素 b 浓度、植物叶细胞结构变化灵敏,也与植物冠层结构密切相关,但对噪音不敏感。红边斜率主要与植被覆盖度和叶面积指数(LAI)有关,覆盖度越高,叶绿素含量越高,红边斜率越大^[24-25],因此可以利用红边、借助光谱遥感调查植物状态,进一步分析植被的长势情况。

图 4 为苹果果期冠层一阶导数光谱曲线,可以看出,果期冠层光谱红边果少的果树要比果多的果树偏高,这主要是因为果少果树的 LAI 高,叶绿素含量高,红边斜率大。而由于苹果数量的增多,导致果树 LAI 降低,冠层叶绿素含量减少,因此表现为红边斜率的偏低。果期红边位置靠近近红外方向,平均红边位置在 730nm 附近。随着不同样本的果量的增加或减少,红边的位置和斜率变化将呈现出一定的规律性变化,与果树果量的多少有密切关系。因此,选择红边位置 730nm 作为果期反射光谱特征研究的敏感波段。

3.3 基于高光谱与数码照片的苹果树果期敏感波段确定

通过 SPSS 对各样本果树比指标与各波长反射率进行相关性分析,图 5 为各波段反射率与果树比的相关系数曲线。以此可以分析各光谱通道与苹果果量的相关性。

由于去除了干扰波段的影响,使用光谱仪采集的 1741 个通道数据进行相关性研究,其中 1070 个波长数据具有 95% 置信度水平的显著相关,440 个具有极显著相关,其中 705 个显著负相关,84 个极显著负相关,平均相关系数为 0.339,可以看出果树比数据能够对果树光谱变化有较好的反映。

从图 5 可以看出,从 350—700nm 之间呈现稳定的较高相关性,达到了 99% 置信度水平的极显著相关,并且在 435nm 的蓝光附近和 670nm 的红光之间呈现两个相关性峰值,在 700nm 附近相关性逐渐降低,而 730nm

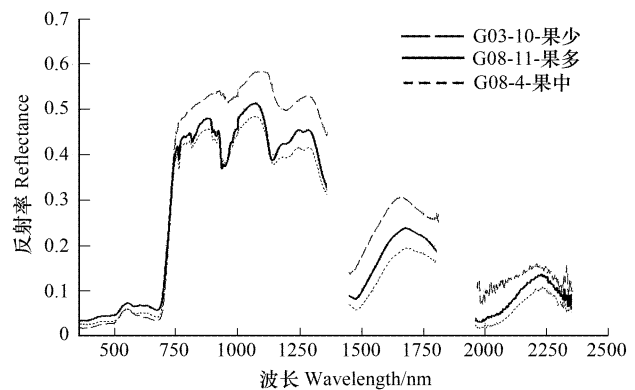


图 3 不同果量苹果树冠层反射光谱曲线

Fig. 3 The reflective spectral curves of apple tree canopy with different fruit amount

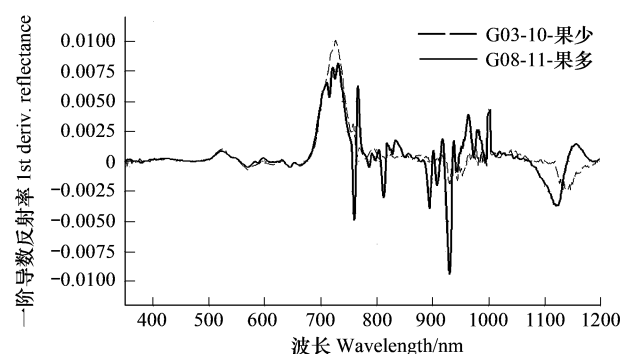


图 4 苹果果期冠层一阶导数光谱

Fig. 4 The first derivative spectra of apple tree canopy at fruit stage

以后则呈现为负相关,在 940、1140nm 和 1480nm 左右呈现为 3 个相关性峰值,且在 1140nm 和 1480nm 处呈现为极显著负相关。

因此,果期混合光谱的敏感性区域主要为 350—700nm 之间的可见光波段和近红外波段,并且在 350—470nm 的蓝紫光 和 590—690nm 的红橙光波段相关性达到极显著水平,在 435、670、940、1140nm 和 1480nm 附近形成相关性峰值。这些区域可以作为果期相关研究的敏感性区域。

3.4 果期敏感性波段以及与植被指数的相关性分析

利用果期敏感性波段可见光 435、670、730nm 和近红外波段 940、1140、1480nm 分别构建差值植被指数 *DVI*、比值植被指数 *RVI*、归一化植被指数 *NDVI* 共 27 个特征植被指数。将这些特征指数分别与果树比进行相关性分析,结果如表 2 所示。其中 *RVI*(940,730)、*NDVI*(940,730)、*RVI*(1140,730)、*NDVI*(1140,730) 相关性表现较好,相关系数达到 0.76 以上。

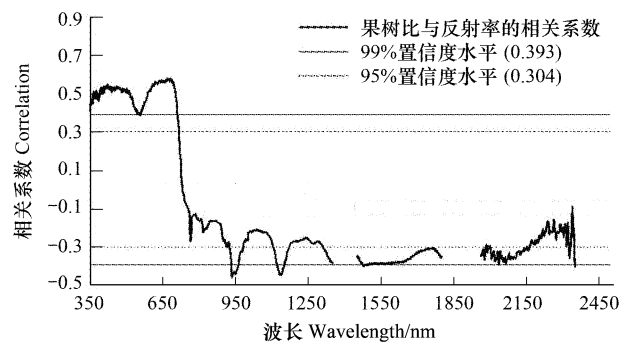


图 5 果树比与各通道反射率的相关性曲线

Fig. 5 The correlation curve of apple/tree ratio with reflectance

表 2 苹果果树比与各类高光谱参数的相关系数

Table 2 Correlation coefficients between hyperspectral parameters and ratio of flower/tree

光谱参数 Spectral parameter	<i>r</i>	光谱参数 Spectral parameter	<i>r</i>	光谱参数 Spectral parameter	<i>r</i>
<i>DVI</i> (940,435)	-0.2569 *	<i>DVI</i> (1140,435)	-0.2469	<i>DVI</i> (1480,435)	-0.3375 **
<i>RVI</i> (940,435)	-0.5963 **	<i>RVI</i> (1140,435)	-0.5997 **	<i>RVI</i> (1480,435)	-0.5239 **
<i>NDVI</i> (940,435)	-0.6042 **	<i>NDVI</i> (1140,435)	-0.6094 **	<i>NDVI</i> (1480,435)	-0.6324 **
<i>DVI</i> (940,670)	-0.2874 *	<i>DVI</i> (1140,670)	-0.2806 *	<i>DVI</i> (1480,670)	-0.4240 **
<i>RVI</i> (940,670)	-0.6032 **	<i>RVI</i> (1140,670)	-0.6119 **	<i>RVI</i> (1480,670)	-0.6942 **
<i>NDVI</i> (940,670)	-0.4982 **	<i>NDVI</i> (1140,670)	-0.5209 **	<i>NDVI</i> (1480,670)	-0.7380 **
<i>DVI</i> (940,730)	-0.6105 **	<i>DVI</i> (1140,730)	-0.5705 **	<i>DVI</i> (1480,730)	-0.4369 **
<i>RVI</i> (940,730)	-0.8699 **	<i>RVI</i> (1140,730)	-0.7615 **	<i>RVI</i> (1480,730)	-0.3975 **
<i>NDVI</i> (940,730)	-0.8723 **	<i>NDVI</i> (1140,730)	-0.7732 **	<i>NDVI</i> (1480,730)	-0.4574 **

** 表示在 0.01 水平上极显著; * 表示在 0.05 水平上显著; *n* = 60

以苹果果期与果树比相关性较好的植被指数 *RVI*(940,730)、*NDVI*(940,730)、*RVI*(1140,730)、*NDVI*(1140,730) 为自变量,以果树比为因变量进行回归分析,分别建立线性、对数、二次多项式、乘幂、指数 5 种估测模型,并根据 *R*² 最大优选原则和光谱特征参数与果树比的散点关系图筛选最佳的估测模型。表 3 为以 *NDVI*(940,730) 为例建立的 5 种回归模型及其检验结果。结果表明,4 个光谱特征参数与苹果果树比所建立的回归模型均达到了 99% 的极显著水平,均能较好的预测苹果果树比,根据 *R*² 最大原则 4 个光谱特征参数建立的估测模型以二次函数模型和对数模型为最佳。图 6 为 4 个光谱特征参数与果树比的散点关系图及其优选的模型。

表 3 *NDVI*(940,730) 与苹果果树比回归模型

Table 3 The regression models of *NDVI*(940,730) with apple/tree ratio

光谱参数(<i>x</i>) Spectral parameter(<i>x</i>)	回归方程 Regression equation	<i>R</i> ²
<i>NDVI</i> (940,730)	$y = -1.0902x + 0.3206$	0.7590 **
	$y = -0.1957\ln(x) - 0.2169$	0.7496 **
	$y = 0.0086x^2 - 1.0934x + 0.3209$	0.7591 **
	$y = 0.0023x^{-2.2343}$	0.4582 **
	$y = 1.1832e^{-13.083x}$	0.5129 **

** 表示在 0.01 水平上显著; *n* = 48

为检验回归模型的可靠性,利用 12 个苹果果树样本的高光谱数据与果树比实测数据,对建立的基于植被

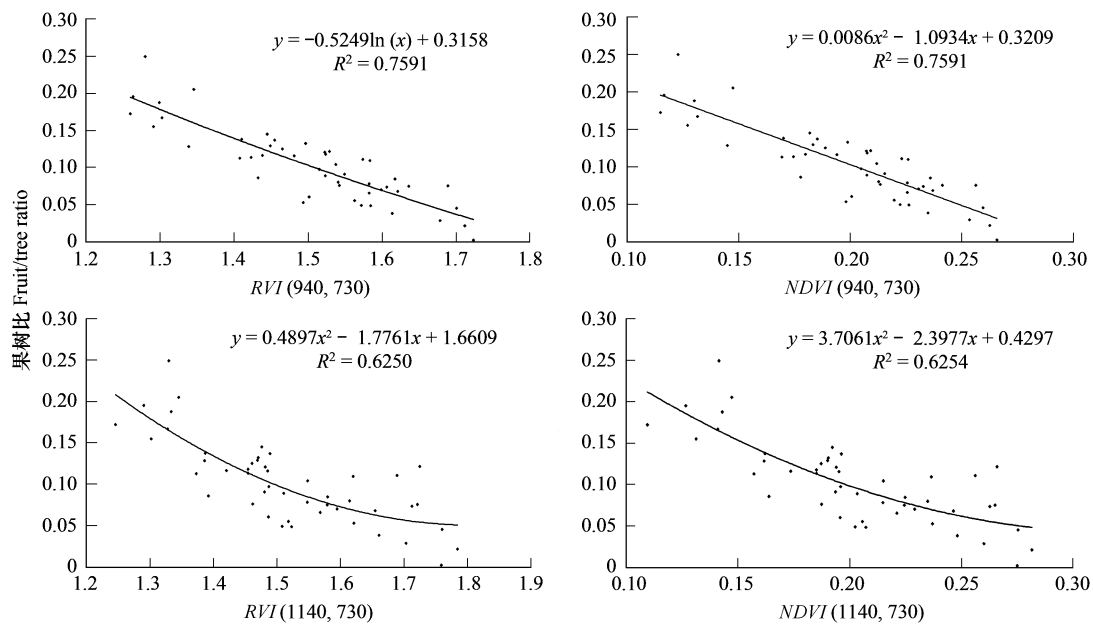


图 6 4 个光谱特征参数与苹果果树比的关系 (n = 48)

Fig. 6 The relationship between the four spectral parameters and the ratio of apple/tree

指数 $RVI(940,730)$ 、 $NDVI(940,730)$ 、 $RVI(1140,730)$ 、 $NDVI(1140,730)$ 的果树比预测模型进行测试,结果如表 4。

表 4 苹果果树比实测值 (X) 与预测值 (Y) 拟合评定指标 (n = 12)

Table 4 The fit evaluation indicators of the measured values (X) and predicted values (Y) of the ratio apple/tree

光谱参数 Spectral parameter	拟合方程 Fitting equation	R^2	RMSE	RE (%)
$RVI(940,730)$	$y = 1.0070x + 0.0055$	0.7949 **	0.0146	4.66
$NDVI(940,730)$	$y = 1.0013x + 0.0058$	0.7955 **	0.0145	4.58
$RVI(1140,730)$	$y = 0.8796x + 0.0204$	0.6924 **	0.0185	9.60
$NDVI(1140,730)$	$y = 0.8529x + 0.0226$	0.6897 **	0.0184	9.79

检验结果表明,4 个光谱特征参数进行检验拟合方程的决定系数 (R^2) 均达到了 0.6 以上,均方根差 (RMSE) 和相对误差 (RE) 也都较小,相比较而言,以 $NDVI(940,730)$ 为自变量构建的诊断模型具有最大的决定系数 ($R^2 = 0.7955$)、最小的均方根差 (RMSE = 0.0145) 和最小的相对误差 (RE = 4.58%),预测精度达到了 95.42%,该模型用于预测苹果果树比较为理想。因此,选择 $y = 0.0086[NDVI(940,730)]^2 - 1.0934NDVI(940,730) + 0.3209$ 作为苹果果期果树比的最佳估测模型。

4 讨论

4.1 苹果果期光谱特征与花期和其它主要植被的比较

找出苹果光谱特征与其它地物具有显著区别的时期是研究区苹果生长监测的重要依据。图 7 为苹果果期和花期冠层反射率及与其它相关植被的比较。

可以看出,苹果果期和花期与其他主要植被在每一个区域都是有很大区别的,可见光区域各主要植被的绿峰平均位置均为 560nm 附近,但是绿峰反射率存在很大区别,苹果果期的绿峰一般在 0.06 左右,而花期在 0.1 左右,樱桃树在 0.065 附近,杂草在 0.075 附近,核桃树在 0.15 左右,枯草绿峰不明显;在近红外波段,苹果花期反射率平均为 0.25 左右而果期反射率平均在 0.5 左右,樱桃树与苹果果期在近红外区域相似,枯草在 0.4 左右,杂草则达到 0.5 以上,核桃树反射率最高,达到 0.8;红边特征也是区分植被类别的主要依据,在红

边反射率上,主要植被红边反射率表现为核桃树 > 杂草 > 苹果果期 > 樱桃树 > 苹果花期 > 枯草,红边反射率区别明显,图 8 为苹果果期和花期冠层一阶导数反射率及与其它植被的比较,通过一阶导数光谱特征比较可知不同植被在红边位置上也存在很大差别,苹果果期红边位置平均为 730nm,苹果花期红边位置为 700nm,樱桃树平均为 720nm,杂草为 725nm,核桃树为 719nm,枯草为 700nm 附近。

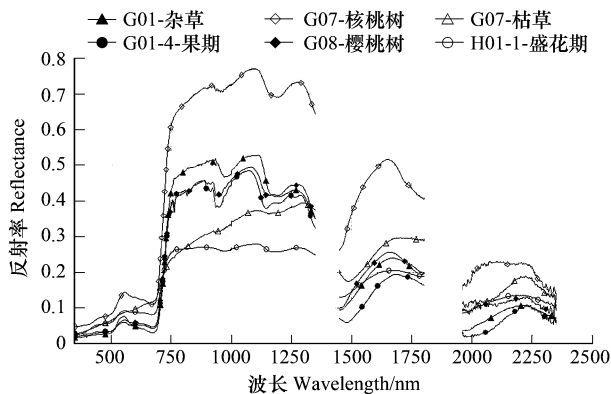


图 7 研究区苹果与其他主要植被冠层光谱特征比较

Fig. 7 The comparison of apple canopy spectral features with other main vegetation in the study area

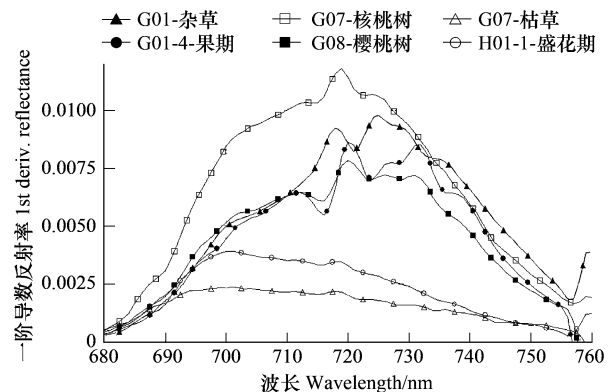


图 8 研究区苹果与其他主要植被冠层一阶导数光谱特征比较

Fig. 8 The comparison of the first derivative spectral of apple tree with other main vegetation in the study area

因此苹果果期和花期与相同时期其他植被的冠层光谱和一阶导数光谱具有一定区别,基于高光谱的苹果冠层光谱探测在苹果生理监测方面具有重要的意义,为苹果果期遥感分类提取提供鉴别依据,也可作为下一步研究的出发点。

4.2 苹果遥感估产的可行性

苹果果期是苹果生长发育的重要时期,苹果的生长信息如营养状况、产量等都通过冠层光谱特征反应出来,运用特征波段建立模型对果树比进行预测能够获取果树产量信息,对果树的产量、营养等研究具有实际意义。但迄今为止,苹果果树冠层光谱信息方面的研究相对较少,尚未确立实用的苹果果树比的估测模型。

本文研究了苹果果期的冠层反射光谱,通过敏感波段建立的植被指数预测苹果果树比,为遥感技术估测苹果果树比指标提供了理论依据,但本研究受区域、气候、土壤等多种因素的影响,对于苹果在不同条件下光谱特征以及果树比的估测还需进一步深入研究。所测定的数据是通过地面遥感得到,与通过卫星遥感数据得到的遥感数据相比有一定的区别,因此需研究构建相应的反演模型应用于卫星遥感层面。

5 结论

本研究通过高光谱探测与数码图像分析相结合的方法,对苹果果期光谱特征进行了系统的分析,并建立了果树比估测模型,得出如下主要结论:

(1) 初步探明了苹果树果期的冠层光谱特征及其敏感波段。在可见光区,苹果果期冠层光谱曲线总体表现为对蓝光和红光的吸收及对绿光的反射,在 700nm 附近反射率骤然上升,在近红外 750—1300nm 之间表现为强烈的反射,之后反射率逐渐降低,在 1650nm 附近和 2200nm 附近呈现两个反射峰。

(2) 苹果树果期光谱特征与果树比指标呈现较好的相关性。在 350—700nm 之间的可见光波段呈现为极显著相关性,苹果果期混合光谱的敏感波段区域表现为 350—470nm 之间的蓝紫光、590—690nm 之间的红橙光和 940、1140nm 和 1480nm 附近的近红外波段区域,因此确定 435、670、940、1140nm 和 1480nm 5 个峰值波段以及红边波段 730nm 为苹果果期的敏感波段。

(3) 利用这些敏感波段区域建立了差值植被指数、比值植被指数及归一化植被指数,通过分析不同果树比与所构建的植被指数的相关关系,建立了果树比的估测模型 $y = 0.0086[NDVI(940, 730)]^2 - 1.0934NDVI(940, 730) + 0.3209$,本模型为苹果果期果树比的精确估测提供了比较快捷的方法途径。

References:

- [1] Thenkabail P S, Smith R B, Pauw E D. Hyperspectral vegetation indices and their relationships with agricultural crop characteristics. *Remote Sensing of Environment*, 2000, 71(2):158-182.
- [2] Tarpley L, Reddy K R, Sassenrath-Cole G F. Reflectance indices with precision and accuracy in predicting cotton leaf nitrogen concentration. *Crop Science*, 2000, 40:1814-1819.
- [3] Jongschaap R E E, Booij R. Spectral measurements at different spatial scales in potato: relating leaf, plant and canopy nitrogen status. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2004, 5:205-218.
- [4] Armitage R P, Kent M, Weaver R E. Identification of the spectral characteristics of British semi-natural upland vegetation using direct ordination: a case study from Dartmoor, UK. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, 25(17):3369-3388.
- [5] Schmittlein S, Sassini J. Mapping of continuous floristic gradients in grasslands using hyperspectral imagery. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 92:126-138.
- [6] Gao Z G, Zhang L Q. Identification of the spectral characteristics of saltmarsh vegetation using indirect ordination: a case study from chongming dongtan, shanghai. *Journal of Plant Ecology*, 2006, 30(2):252-260.
- [7] Gong C L, Yin Q, Kuang D B. Correlations between water quality indexes and reflectance spectra of Huangpujiang River. *Journal of Remote Sensing*, 2006, 10(6):910-916.
- [8] Wu C S, Xiang Y Q, Zheng L F, Tong Q X. Estimating chlorophyll density of crop canopies by using hyperspectral data. *Journal of Remote Sensing*, 2000, 4(3):228-232.
- [9] Wang Y, Huang J F, Wang F M, Liu Z Y. Predicting nitrogen concentrations from hyperspectral reflectance at leaf and canopy for rape. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2008, 28(2):273-277.
- [10] Shibayama M, Akiyama T. Seasonal visible, near-infra-red and mid-Infrared spectra of rice canopies in relation to LAI and above-ground dry biomass. *Remote Sensing of Environment*, 1989, 27:119-127.
- [11] Kimura R, Okada S, Miura H, Kamichika M. Relationships among the leaf area index, moisture availability, and spectral reflectance in an upland rice field. *Agricultural Water Management*, 2004, 69:83-100.
- [12] Scotford I M, Miller P C H. Estimating tiller density and leaf area index of winter wheat using spectral reflectance and ultrasonic sensing techniques. *Biosystems Engineering*, 2004, 89(4):395-408.
- [13] Li Y X, Zhu Y, Dai T B, Tian Y C, Cao W X. Quantitative relationships between leaf area index and canopy reflectance spectra of wheat. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(8):1443-1447.
- [14] Lu Y L, Li S K, Wang J H, Xiao C H, Tan H Z. Prediction of grain protein based on canopy spectra in wheat with different plant types. *Transactions of the CSAE*, 2007, 23(9):147-153.
- [15] Liu G S, Li X Y, Liu D S, Yu Q W. Estimation of tobacco leaf area index and aboveground biomass using canopy spectra. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(5):1763-1771.
- [16] Zhou D Q, Zhu Y, Yao X, Tian Y C, Cao W X. Estimating grain protein content with canopy spectral reflectance in rice. *Acta Agronomica Sinica*, 2007, 33(8):1219-1225.
- [17] Shibayama M, Takahashi W, Morinaga S, Akiyama T. Canopy water deficit detection in paddy rice using a high resolution field spectroradiometer. *Remote Sensing of Environment*, 1993, 45:117-126.
- [18] Zhu Y, Li Y X, Zhou D Q, Tian Y C, Yao X, Cao W X. Quantitative relationship between leaf nitrogen concentration and canopy reflectance spectra in rice and wheat. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(10):3463-3469.
- [19] Blackburn G A. Quantifying chlorophylls and carotenoids at leaf and canopy scales: an evaluation of some hyperspectral approaches. *Remote Sensing of Environment*, 1998, 66:273-285.
- [20] Carter G A, Spiering B A. Optical properties of intact leaves for estimating chlorophyll concentration. *Journal of Environmental Quality*, 2002, 31:1424-1432.
- [21] Zhu Y, Wu H B, Tian Y C, Yao X, Zhou Z G, Cao W X. Estimation of dry matter accumulation in above-ground part of cotton by means of canopy reflectance spectra. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(1):105-109.
- [22] Tang Y L, Wang X Z, Wang F M, Wang R C. Study on the determination of LAI and biomass of crop by hyperspectra. *Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry (Natural Science)*, 2004, 32(11):100-104.
- [23] Casanova D, Epema G F, Goudriaan J. Monitoring rice reflectance at field level for estimating biomass and LAI. *Field Crops Research*, 1998, 55:83-92.

- [24] Niemann K O. Remote sensing of forest stand age using airborne spectrometer data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1995, 61 (9):1119-1127.
- [25] Cheng Y B, Zarco-Tejada P J, Riano D, Rueda C A, Ustin S L. Estimating vegetation water content with hyperspectral data for different canopy scenarios: relationships between AVIRIS and MODIS indexes. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 105:354-366.

参考文献:

- [6] 高占国,张利权. 应用间接排序识别盐沼植被的光谱特征:以崇明东滩为例. *植物生态学报*, 2006,30(2):252-260.
- [7] 巩彩兰,尹球,匡定波. 黄浦江水质指标与反射光谱特征的关系分析. *遥感学报*,2006,10(6):910-916.
- [8] 吴长山,项月琴,郑兰芬,童庆禧. 利用高光谱数据对作物群体叶绿素密度估算的研究. *遥感学报*,2000,4(3):228-232.
- [9] 王渊,黄敬峰,王福民,刘占宇. 油菜叶片和冠层水平氮素含量的高光谱反射率估算模型. *光谱学与光谱分析*, 2008,28(2):273-277.
- [13] 李映雪,朱艳,戴廷波,田永超,曹卫星. 小麦叶面积指数与冠层反射光谱的定量关系. *应用生态学报*, 2006,17(8):1443-1447.
- [14] 卢艳丽,李少昆,王纪华,肖春华,谭海珍. 基于冠层光谱的不同株型冬小麦籽粒蛋白质预测模型. *农业工程学报*,2007,23(9):147-153.
- [15] 刘国顺,李向阳,刘大双,喻奇伟. 利用冠层光谱估测烟草叶面积指数和地上生物量. *生态学报*,2007, 27(5):1763-1771.
- [16] 周冬琴,朱艳,姚霞,田永超,曹卫星. 基于水稻冠层光谱特征构建粳型水稻籽粒蛋白质含量预测模型. *作物学报*, 2007,33(8):1219-1225.
- [18] 朱艳,李映雪,周冬琴,田永超,姚霞,曹卫星. 稻麦叶片氮含量与冠层反射光谱的定量关系. *生态学报*,2006,26(10):3463-3469.
- [21] 朱艳,吴华兵,田永超,姚霞,周治国,曹卫星. 基于冠层反射光谱的棉花干物质积累量估测. *应用生态学报*,2008,19(1):105-109
- [22] 唐延林,王秀珍,王福民,王人潮. 农作物 LAI 和生物量的高光谱法测定. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2004, 32(11):100-104.