



黄汝根, 刘振华, 胡月明, 等. 基于“高分一号”遥感影像反演华南地区亚热带典型作物冠层 SPAD[J]. 华南农业大学学报, 2015, 36(4): 105-111.

基于“高分一号”遥感影像反演华南地区 亚热带典型作物冠层 SPAD

黄汝根, 刘振华, 胡月明, 肖北生

(华南农业大学 资源环境学院/国土资源部建设用地再开发重点实验室/
广东省土地利用与整治重点实验室/广州市测绘地理信息行业工程技术研究中心, 广东 广州 510642)

摘要:【目的】以广州市增城试验基地为例,探索国产高分卫星影像数据在反演华南地区亚热带典型作物冠层叶绿素相对含量(SPAD)的应用.【方法】根据2013年10月1日“高分一号”影像数据和相应的亚热带典型作物的实测数据,建立植被指数与典型作物冠层 SPAD 之间的关系模型,并分别探讨 9 种植被指数与 SPAD 之间线性和非线性关系,以便获得最佳的植被指数和相应的回归模型反演华南地区亚热带作物冠层叶绿素相对含量.【结果和结论】7 种植被指数均与亚热带典型作物冠层 SPAD 有极显著的相关性,其中比值植被指数(RVI)相关性最好,其次是差值植被指数(DVI).经分析,RVI 的指数回归模型 $Y = 31.445e^{0.141X}$ ($R^2 = 0.889$) 是反演亚热带典型作物冠层 SPAD 的最佳回归模型,实际拟合精度达 92.75%,故使用该回归模型估测研究区内大范围亚热带典型作物冠层 SPAD 是可行的.

关键词:亚热带典型作物; 植被指数; “高分一号”卫星; 冠层 SPAD; 回归模型
中图分类号:S431.191 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-411X(2015)03-0105-07

Retrieval of typical subtropical crop canopy SPAD value in South China using GF-1 remote sensing image

HUANG Rugen, LIU Zhenhua, HU Yueming, XIAO Beisheng

(College of Natural Resources and Environment, South China Agricultural University/Guangdong Provincial Key Laboratory of Land Use and Consolidation/ Key Laboratory of the Ministry of Land and Resources for Construction Land Transformation/ Guangzhou Surveying and Mapping Geographic Information Industry Engineering Technology Research Center, Guangzhou 510642, China)

Abstract:【Objective】The purpose of this paper was to explore the retrieval of typical subtropical crop SPAD value in South China with the domestic high resolution satellite image, using Zengcheng Teaching and Research Station for field experiments. 【Method】According to the GF-1 remote sensing data and corresponding subtropical crops measured data on October 1, 2013, the models between vegetation index and typical crop canopy SPAD value were built. In order to get the best regression model for retrieval of subtropical crop canopy related to contents of chlorophyll in South China, the linear and nonlinear relations were found between the nine types of vegetation indices and crop canopy SPAD value. 【Result and conclusion】The results showed that seven types of vegetation indices had an extremely significant correla-

收稿日期:2014-03-12 优先出版时间:2015-06-10
优先出版网址:<http://www.cnki.net/kcms/detail/44.1110.s.20150610.1631.018.html>
作者简介:黄汝根(1990—),男,硕士研究生,E-mail:oscargen@163.com;通信作者:胡月明(1964—),男,教授,博士,E-mail:ymhu163@163.com
基金项目:国家农业科技成果转化资金项目(2013GB2E000364);广东省国土资源厅科研项目(GDGTKJ2014002)

tion with typical subtropical crop canopy SPAD value, and the ratio vegetation index exponential regression model ($Y=31.445e^{0.141X}$) provided the best model for retrieving subtropical crop canopy SPAD value ($R^2=0.889$, and fitting precision = 92.75%), which indicates ratio vegetation index is feasible to retrieve large range of typical subtropical crop canopy SPAD value in the study area.

Key words: typical subtropical crop; vegetation index; GF-1 satellite; canopy SPAD; regression model

叶绿素是一类与光合作用非常密切的色素. 同时, 叶绿素也是一种独特的生物化学参数, 对于估测植物生长状况、诊断植物病理起着至关重要的作用. 通过测算叶绿素的含量, 从宏观上看, 可以对植物的长势和健康程度进行分析和监测, 估算整个区域的生物量, 从而计算出区域内生物生产力的大小; 从微观上看, 通过对植物叶片中叶绿素含量的连续监测, 可以研究植物内完整的光合作用过程以及过程中二氧化碳的吸收和利用, 对研究生物圈内二氧化碳的循环利用效益有着不可小觑的前瞻性作用. 从前, 要了解植物内叶绿素的含量, 需要把采样得到的植物叶片在实验室里利用分光光度法进行测定. 经过不断的研究表明, 影响叶绿素含量的直接因素是植物中所含氮的多少. 因此, 叶绿素计面世有着重要的意义. 叶绿素计通过测定叶片在不同波长的透过系数来确定叶片中的氮含量, 从而确定叶片中叶绿素的相对含量 (Soil and plant analyzer development, SPAD). 叶绿素计携带便捷, 测算速度快, 具有重大的应用价值. 对小范围植物叶绿素的快速测定可以借助叶绿素计, 而对于大范围的植被则难以利用人工手段进行大规模测定植物的叶绿素含量. 因此, 借助遥感影像进行大面积反演植物冠层 SPAD 有着巨大的应用价值, 可以极大地提高估算的效率.

国内外的学者对于叶绿素的研究一般是利用便携式地物光谱仪对植物叶片光谱进行测量, 以光谱数据推算出高光谱指数^[1]、植被指数^[2-4]、植物反射率^[5]、一阶微分光谱^[6-7]等与 SPAD 进行相关性分析, 然后建立回归模型, 进而建立最佳的函数拟合方程反演大范围、大面积植物的叶绿素相对含量. 相对而言, 借助遥感影像反演叶绿素含量的文献较少^[8]. 本研究借助我国刚发射成功不久的自主研发的高分辨率对地观测卫星“高分一号”的最新影像, 从中提取相关地学信息, 构造和筛选合适的反演变量, 对研究区内亚热带典型作物冠层的叶绿素相对含量进行反演, 建立基于高分影像的数据估算叶绿素相对含量的回归模型, 以期在对植物无损伤前提下, 为在短

时间内估测华南地区亚热带大面积典型作物群落冠层的叶绿素相对含量提供理论依据和方法借鉴.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于广东省广州市增城区华南农业大学教学科研基地内的实验园, 总面积约 1 520 000 m², 中心纬度 23°14'33"N、经度 113°38'8"E. 该研究区属于典型的亚热带季风气候, 自然条件良好, 年平均气温 21.8℃, 年均降水量约为 2 065 mm; 人为干扰因素少, 园内主要种植荔枝、龙眼、水稻和玉米等亚热带典型作物. 作物生长健康, 样地均一性良好, 适宜开展反演华南地区亚热带典型作物冠层 SPAD 试验工作.

1.2 数据来源

2013 年 10 月 1 日在研究区内进行了与我国高分一号卫星同步的 SPAD 地面实测试验. 分别对果园中生长情况较好的荔枝和龙眼树分别均匀划分 48 块和 40 块 8 m×8 m 的样地. 同样, 在该研究区内划分 40 块均匀性良好的 8 m×8 m 玉米田. 于当天 10:30—11:30 卫星过境时采用叶绿素仪 (SPAD-502, Konica Minolta) 对样地中的作物冠层叶片 SPAD 进行采样, 并利用差分 GPS 记录样地中心的经纬度坐标. 在采样过程中, 为了减少采样的误差, 选择冠层叶子时要注意挑选形状、大小、颜色比较均一的叶片; 同时, 每片叶子至少测量 10 个点 (测量时要注意避开叶脉), 然后取其平均值作为该叶片实测的 SPAD. 最后获得 48 组荔枝树 SPAD 数据、40 组龙眼树 SPAD 数据和 40 组玉米 SPAD 数据. 其中, 利用 40 组荔枝、40 组龙眼及 40 组玉米 SPAD 的数据建立回归模型, 另外的 8 组荔枝 SPAD 数据对模型进行精度验证.

“高分一号”卫星是我国自主研发和发射的高分辨率对地观测卫星, 为我国自主的陆地、大气、海洋先进对地观测系统, 为现代农业、防灾减灾、资源环境、公共安全等重大领域提供服务和决策支持. “高

分一号”卫星搭载了2台2 m分辨率全色/8 m分辨率多光谱相机,4台16 m分辨率多光谱相机.包括3个可见光波段(0.45~0.52、0.52~0.59和0.63~0.69 μm)和1个近红外波段(0.77~0.89 μm),以及1个全色波段(0.45~0.90 μm).

1.3 研究方法

本研究使用2013年10月1日拍摄的分率为8 m的“高分一号”遥感影像,利用MODTRAN模型和线性回归模型相结合对其进行大气校正,获取该影像4个波段的地表反射率(图1).

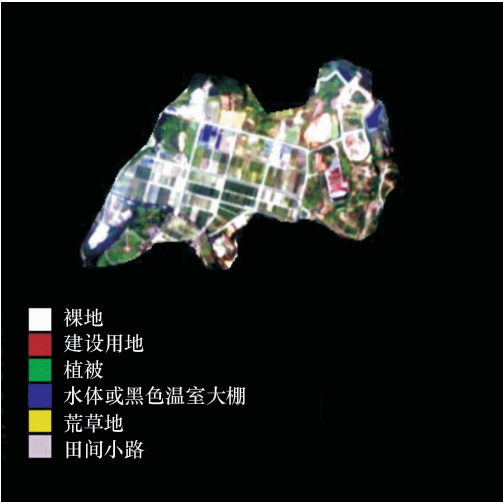


图1 大气校正后的地表反射率(真彩色合成)
Fig. 1 Surface reflectance after atmospheric correction (true color synthesis)

查找相关文献后,找到9种可能与作物冠层SPAD较为密切的植被指数,分别如下:

差值植被指数 (Difference vegetation index, DVI)^[9]

DVI = B₄ - B₃, (1)

绿色归一化植被指数 (Green normalized difference index, GNDVI)^[10]

GNDVI = (B₄ - B₂) / (B₄ + B₂), (2)

近红外百分比植被指数 (Infrared percentage vegetation index, IPVI)^[11]

IPVI = B₄ / (B₄ + B₃), (3)

修改型土壤调整植被指数 (Modified soil adjusted vegetation index, MSAVI)^[12]

MSAVI = (2B₄ + 1 - √((2B₄ + 1)² - 8(B₄ - B₃))) / 2, (4)

归一化差异植被指数 (Normalized difference vegetation index, NDVI)^[13]

NDVI = (B₄ - B₃) / (B₄ + B₃), (5)
垂直植被指数 (Perpendicular vegetation index, PVI)^[14]

PVI = √((0.335B₄ - 0.149B₃)² + (0.335B₃ - 0.852B₄)²), (6)

比值植被指数 (Ratio vegetation index, RVI)^[15]

RVI = B₄ / B₃, (7)

重归一化植被指数 (Renormalized difference vegetation index, RDVI)^[16]

RDVI = √NDVI × RVI, (8)

转换型植被指数 (Transformed vegetation index, TVI)^[17]

TVI = √NDVI + 0.5, (9)

式中, B_i 代表遥感影像中第 i 个波段的反射率. 借助 SPSS 19.0 对 9 种不同植被指数与荔枝、龙眼以及它们混合的冠层叶片 SPAD 进行相关性分析, 筛选出与其显著相关的植被指数, 构建线性、对数、幂和指数函数的回归模型, 通过决定系数 R² 和相关性显著水平 P 的大小判断不同植被指数中回归模型对反演亚热带典型作物冠层 SPAD 的拟合精度, 选取最优的植被指数和相应的回归模型.

1.5 精度验证方法

经相关性和拟合精度筛选出来的回归模型, 需对其反演的植被冠层 SPAD 的精度进行验证. 本文选用误差系数公式^[18] [式(10)和(11)], 利用未参与建模的数据对回归模型进行精度预测.

误差系数 = (预测值 - 实测值) / 实测值 × 100%, (10)

预测精度 = 100% - 误差系数. (11)

2 结果与分析

2.1 提取各类植被指数

根据各类植被指数公式(1)~(9)及样地的经纬度坐标, 通过 ENVI 软件的 Band Math 对研究区提取出 9 种植被指数如图 2 所示.

2.2 不同植被指数与亚热带典型作物冠层 SPAD 的相关性分析

在建立回归模型之前, 先对 9 种不同植被指数与荔枝、龙眼和玉米以及它们混合的 SPAD 进行相关性分析(表1). 从表1中可以看到, 对于荔枝、龙眼和玉米品种, 除植被指数PVI外, 其余8种植被指数均

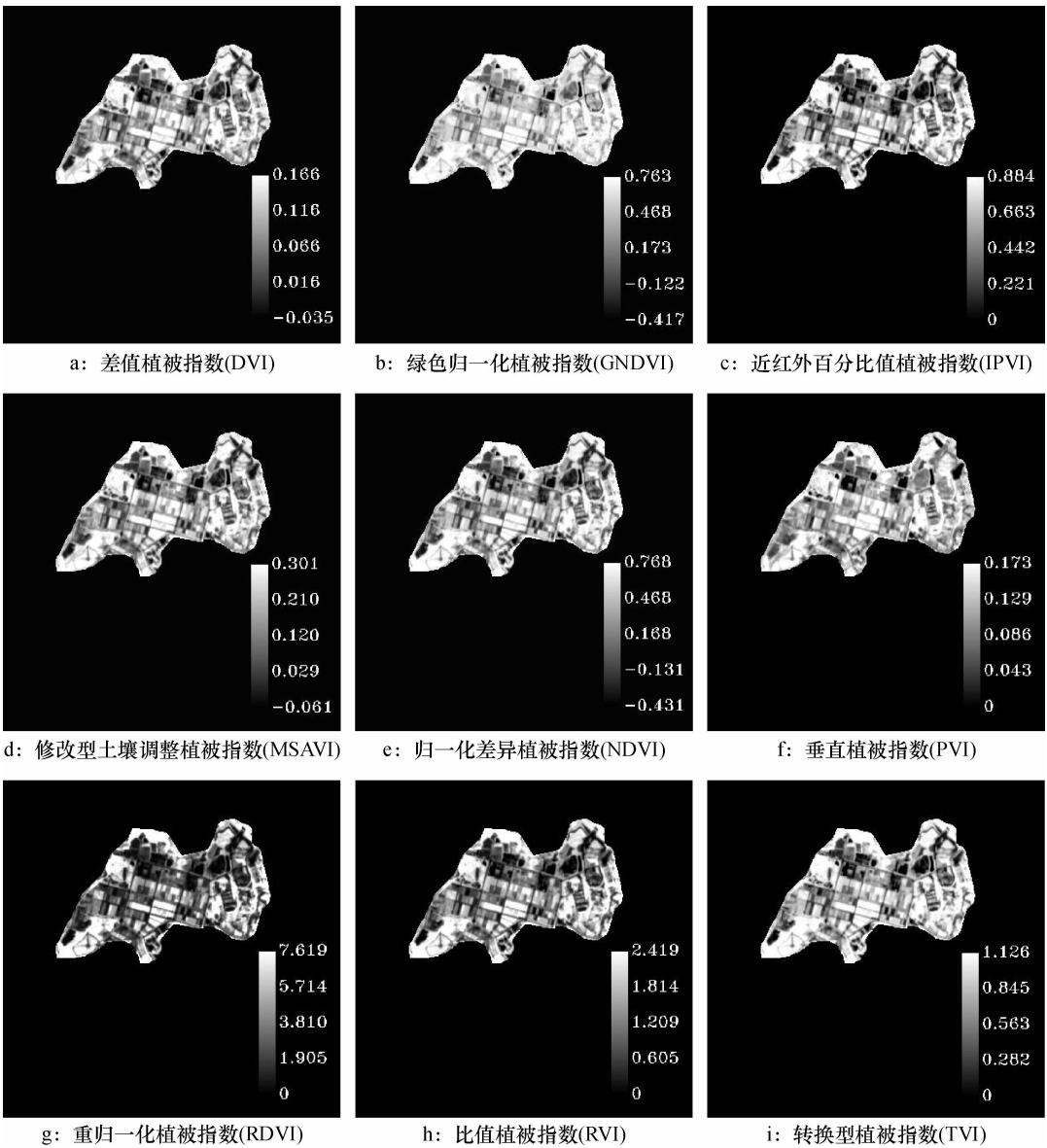


图 2 基于“高分一号”影像提取的 9 种植被指数

Fig. 2 Nine types of vegetation indices extracted with GF-1

与它们冠层 SPAD 显著相关,而对于它们 SPAD 混合数据统计中发现,植被指数 RDVI 与混合 SPAD 在检验水准 0.01 水平上不具有显著相关性.可见,尽管植被指数 RDVI 与荔枝、龙眼和玉米 SPAD 之间的相关性极其显著,但植被指数 RDVI 对作物种类比较敏感,混合后的 SPAD 不再与其具有极其显著相关,同时相关系数偏低,不适宜利用植被指数 RDVI 反演大面积亚热带典型作物冠层 SPAD.故利用 DVI、GNDVI 等 7 种植被指数建立亚热带典型作物冠层 SPAD 的回归模型是可行的.

表 1 不同植被指数与亚热带典型作物 SPAD 的相关系数¹⁾

Tab.1 The correlation coefficient between the different vegetation indices and typical subtropical crops SPAD									
作物种类	DVI	GNDVI	IPVI	MSAVI	NDVI	PVI	RVI	RDVI	TVI
荔枝	0.868 **	0.916 **	0.761 **	0.666 **	0.943 **	0.303	0.961 **	0.942 **	0.836 **
龙眼	0.781 **	0.759 **	0.681 **	0.826 **	0.665 **	0.268	0.953 **	0.918 **	0.905 **
玉米	0.813 **	0.904 **	0.821 **	0.798 **	0.712 **	0.276	0.958 **	0.897 **	0.842 **
混合	0.917 **	0.903 **	0.785 **	0.837 **	0.736 **	0.301	0.932 **	0.241 *	0.814 **

1) ** 表示在 0.01 水平显著相关,* 表示在 0.05 水平显著相关.

2.3 植被指数回归模型的分析

对亚热带典型作物冠层 SPAD 与不同植被指数进行曲线估计,得到了不同植被指数反演亚热带典型作物冠层 SPAD 的各类函数回归模型(表 2). 通过表 2 的数据可以发现:典型作物冠层 SPAD 与挑选出的 7 种植被指数均具有极其显著的相关性,所建立的回归模型的拟合精度均满足估测要求;在同一种植被指数下的不同回归模型中,指数函数模型的拟合精度相对其他 3 种函数模型较高,从一定程度上说明了植被指数与 SPAD 之间存在的不是简单的线性回归关系,需要利用回归模型中具有斜率逐渐变大趋势的曲线才能较为合适地描述植被指数与 SPAD 之间的关系;植被指数 RVI 反演亚热带典型作物冠层 SPAD 建立的回归方程总体拟合精度最高,其次是植被指数 DVI. 植被指数 RVI 中的指数函数回归模型 $Y = 31.445e^{0.141X}$ 的拟合精度最高,拟合精度达 0.889.

表 2 不同植被指数的回归模型¹⁾

Tab.2 Regression models of different vegetation indices

植被指数	函数类型	模型	R ²
DVI	线性	$Y = 324.347X + 20.348$	0.842 **
	对数	$Y = 34.953\ln X + 133.502$	0.833 **
	幂	$Y = 224.153X^{0.627}$	0.844 **
	指数	$Y = 29.459e^{5.807X}$	0.849 **
GNDVI	线性	$Y = 102.349X - 5.246$	0.816 **
	对数	$Y = 61.373\ln X + 87.665$	0.818 **
	幂	$Y = 98.349X^{1.099}$	0.821 **
	指数	$Y = 18.673e^{1.829X}$	0.825 **
IPVI	线性	$Y = 77.796X - 5.436$	0.616 **
	对数	$Y = 58.699\ln X + 69.940$	0.607 **
	幂	$Y = 72.259X^{1.088}$	0.622 **
	指数	$Y = 17.886e^{1.441X}$	0.630 **
MSAVI	线性	$Y = 103.026X + 36.398$	0.691 **
	对数	$Y = 19.089\ln X + 88.029$	0.684 **
	幂	$Y = 99.078X^{0.342}$	0.678 **
	指数	$Y = 39.321e^{1.843X}$	0.693 **
NDVI	线性	$Y = 65.141X + 16.303$	0.542 **
	对数	$Y = 37.251\ln X + 74.622$	0.534 **
	幂	$Y = 78.196X^{0.677}$	0.522 **
	指数	$Y = 27.131e^{1.182X}$	0.543 **
RVI	线性	$Y = 7.988X + 23.676$	0.868 **
	对数	$Y = 30.724\ln X + 13.597$	0.835 **
	幂	$Y = 26.196X^{0.547}$	0.864 **
	指数	$Y = 31.445e^{0.141X}$	0.889 **
TVI	线性	$Y = 109.973X - 57.261$	0.663 **
	对数	$Y = 110.620\ln X + 52.879$	0.654 **
	幂	$Y = 52.631X^{2.003}$	0.680 **
	指数	$Y = 7.177e^{1.990X}$	0.688 **

1)模型中,Y代表亚热带典型作物冠层 SPAD,X代表植被指数;**表示在 0.01 水平显著相关.

2.4 研究区典型作物冠层 SPAD 图

利用“高分一号”卫星影像结合该研究区亚热带典型作物 RVI-SPAD 反演模型进行研究,经植被指数不同回归模型之间的比较后,最后选取了植被指数 RVI 中指数回归模型 $Y = 31.445e^{0.141X}$ 反演整个研究区亚热带典型作物冠层 SPAD 的分布情况(图 3). 结合 Google earth 2012 年 10 月拍摄的高分辨率的卫星影像(图 4)对比可知,荔枝、龙眼等高株典型作物冠层 SPAD 普遍较高,一般数值在 65 左右浮动,最高值为 79.32. 而相对来说,低株作物如玉米和水稻冠层 SPAD 相对较低,主要在 35 ~ 45 之间浮动,不同生长时期的作物冠层 SPAD 也会有所变化.

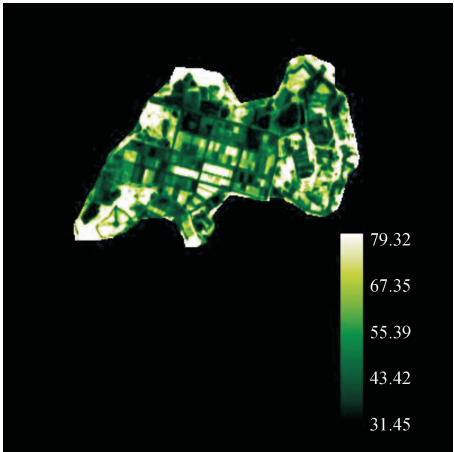


图 3 “高分一号”影像反演研究区亚热带典型作物 SPAD
Fig.3 Subtropical crops SPAD inversion in the study area by GF-1 remote sensing image



图 4 Google earth 显示的研究区(红线范围内)概况
Fig.4 The study area displayed on Google earth (the red line included)

2.5 模型精度验证

为验证植被指数 RVI 中指数回归模型 $Y = 31.445e^{0.141X}$ 反演亚热带典型作物冠层 SPAD 的精度,根据误差系数公式(10),采用未参与建模的 8 组

荔枝冠层叶片 SPAD 对反演模型进行精度验证. 检验结果(表 3)表明, 对于指数回归模型 $Y = 31.445e^{0.141X}$ 反演的亚热带典型作物冠层叶片 SPAD 与实测值较为接近, 预测值与实测值的误差范围为 $-7.71\% \sim 11.65\%$. 平均误差 7.25%, 拟合精度达 92.75%. 采用均方根误差(RSME)法对预测值和实测值的符合程度进行检验, RMSE 为 4.58. 结果表明利用植被指数 RVI 的指数回归模型估测亚热带典型作物冠层 SPAD 是可行的.

表 3 基于植被指数 RVI 的指数回归模型检验

Tab.3 Tests of the exponential regression models based on RVI

样本编号	预测值	实测值	差值	误差系数/%
1	62.34	64.87	-2.53	-3.90
2	68.53	62.86	7.15	11.65
3	63.69	59.23	4.46	7.53
4	53.42	56.35	-2.93	-5.20
5	66.21	60.37	5.84	9.67
6	67.68	61.38	4.82	7.67
7	59.89	57.23	2.66	4.65
8	53.73	58.22	-4.49	-7.71

3 讨论与结论

叶绿素是绿色植物中主要的光合色素,其含量变化与地表植物的生存和生长密切相关,因此,及时、准确、动态地获取亚热带作物冠层叶绿素含量及其变化信息,对精确农业的实施有重要的指导与服务作用. 一些学者利用地表实测的光谱数据,构造植被指数与不同作物叶绿素的估算模型,对作物叶绿素进行反演,均取得了较好的结果^[19-26]. 以上研究仅以单一作物为研究对象,仅考虑到作物的生育期、不同层位、土壤背景等纵向因素影响下叶绿素的变化情况,并无从横向方面考虑在同一纵向因素条件下不同种类的作物之间叶绿素的变化情况. 本研究结合我国自主研发“高分一号”高分辨率遥感卫星,以华南地区亚热带常见的典型作物如荔枝、龙眼和玉米为代表,使得研究对象更具有实用性和广泛性. 同时,各种典型作物参与建模的数据量相对充足和丰富,进而构建的最优回归模型反演大范围、大面积的亚热带典型作物冠层 SPAD 更具有说服力.

本文以华南地区亚热带典型作物为例,利用“高分一号”最新的影像数据提取不同的植被指数反演其冠层 SPAD,通过分别建立不同函数的回归模型分析得到以下结论:①经过本文研究,在区域尺度上,

利用我国高分遥感卫星进行叶绿素监测是可行的,具有重要的研究价值. ②除植被指数 PVI 和 RDVI 外,其余 7 种植被指数均与亚热带典型作物冠层 SPAD 之间的相关性达到极显著水平,利用植被指数与作物冠层 SPAD 建立回归模型估算其冠层叶绿素相对含量具有可行性. ③7 种植被指数与亚热带典型作物冠层 SPAD 建立的回归模型分析表明,植被指数 RVI 估测作物冠层 SPAD 的拟合精度最高,其次是植被指数 DVI. 因此,在华南地区进行大面积亚热带典型作物冠层 SPAD 估算时,可以优先使用该 2 种植被指数作为回归模型的自变量. 同时,选用指数函数的回归模型能更好地描述植被指数与亚热带典型作物冠层 SPAD 之间的变化关系. ④利用误差系数法对植被指数 RVI 中指数回归模型 $Y = 31.445e^{0.141X}$ 结合“高分一号”影像估测研究区 SPAD 图进行精度验证,得到了预测值的平均误差为 7.25%,实际拟合精度达 92.75%, RMSE 为 4.58,证明利用植被指数 RVI 估测研究区内亚热带典型作物冠层 SPAD 是行之有效的. ⑤在研究区典型作物冠层 SPAD 图中可以发现,高株的作物冠层 SPAD 相对较高,而低株的作物冠层 SPAD 相对较低,临界值在 50~55 范围内,笔者认为这可能是区分高株和低株作物的阈值范围,有助于在 SPAD 图中判读作物的高度. 同时,SPAD 图上的预测值比实测值稍微偏高,有可能是由于不同作物种类之间存在差异,但总体偏差在估测误差的范围之内,是可以接受的. ⑥在典型作物冠层 SPAD 的反演中,由于所需数据的限制,本文所用到的一些统计分析方法并不十分理想,对于作物冠层 SPAD 反演模型有待进一步改善. 此外,本文利用的“高分一号”影像分辨率为 8 m,混合像元较多,需要进行卫星像元对地表点数据的尺度转换,以便进一步提高反演精度.

参考文献:

[1] 房贤一,朱西存,王凌,等. 基于高光谱的苹果盛果期冠层叶绿素含量监测研究[J]. 中国农业科学,2013,46(16):3504-3513.

[2] 宋开山,张柏,王宗明,等. 大豆叶绿素含量高光谱反演模型研究[J]. 农业工程学报,2006,22(8):16-20.

[3] 刘璇,林辉,臧卓,等. 杉木叶绿素 a 含量与高光谱数据相关性分析[J]. 中南林业科技大学学报,2010,30(5):72-75.

[4] 孟庆野,董恒,秦其明,等. 基于高光谱遥感监测植被叶绿素含量的一种植被指数 MTCARI[J]. 光谱学与光谱分析,2012,32(8):2218-2221.

[5] 董晶晶,王力,牛铮. 植被冠层水平叶绿素含量的高光谱估测[J]. 光谱学与光谱分析,2009,29(11):3003-3006.

[6] 梁爽,赵庚星,朱西存. 苹果树叶片叶绿素含量高光谱估测模型研究[J]. 光谱学与光谱分析,2012,32(5):1367-1370.

[7] 李敏夏,张林森,李丙智,等. 苹果叶片高光谱特性与叶绿素含量和 SPAD 值的关系[J]. 西北林学院学报,2010,25(2):35-39.

[8] BOEGH E, HOUBORG R, BIENKOWSKI J, et al. Remote sensing of LAI, chlorophyll and leaf nitrogen pools of crop- and grasslands in five European landscapes[J]. Biogeosciences,2013,10(10):6279-6307.

[9] RICHARDSON A J, WIEGAND C L. Distinguishing vegetation from soil background information[J]. Photogramm Eng Rem S,1997,43(12):1541-1552.

[10] GITELSON A A, KAUFMAN Y J, MERZLYAK M N. Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS[J]. Remote Sens Environ, 1996, 58(3):289-298.

[11] CRIPPEN R E. Calculating the vegetation index faster[J]. Remote Sens Environ,1990,34(1):71-73.

[12] QI J, CHEHBOUNI A, HUETE A R, et al. A modified soil adjusted vegetation index[J]. Remote Sens Environ,1994, 48(2):119-126.

[13] DEERING D W, ROUSE J W. Measuring ‘forage production’ of grazing units from Landsat MSS data[C]//Willow Run Laboratories of the University of Michigan. Proceedings of the 10th International Symposium on Remote Sensing of Environment. Michigan: Ann Arbor, 1975: 1169-1178.

[14] WIEGAND C L, RICHARDSON A J, ESCOBAR D E, et al. Vegetation indices in crop assessments[J]. Remote Sens Environ,1991,35(2/3):105-119.

[15] BIRTH G S, MCVEY G. Measuring the color of growing turf with a reflectance spectroradiometer[J]. Agron J, 1968,60(6):640-643.

[16] ROUJEAN J L, BREON F M. Estimating PAR absorbed by vegetation from bidirectional reflectance measurements[J]. Remote Sens Environ,1995,51(3):375-384.

[17] ROUSE J W, HAAS R H, SCHELL J A, et al. Monitoring the vernal advancement of retrogradation of natural vegetation[M]. Maryland: Goddard Space Flight Center, 1974: 371.

[18] 干友民,成平,周纯兵,等. 若尔盖亚高山草甸地上生物量与植被指数关系研究[J]. 自然资源学报,2009,24(11):1963-1972.

[19] 刘秀英,熊建利,臧卓,等. 基于植被指数的马尾松叶绿素含量估算模型[J]. 西北林学院学报,2012,27(3):44-47.

[20] 潘蓓,赵庚星,朱西存,等. 利用高光谱植被指数估测苹果树冠层叶绿素含量[J]. 光谱学与光谱分析,2013,33(8):2203-2206.

[21] 王凯龙,雄黑钢,张芳. 干旱区冬小麦不同生长阶段的光谱特征与叶绿素含量估测研究[J]. 干旱区资源与环境,2013,27(11):45-49.

[22] 夏天,吴文斌,周清波,等. 不同地域冬小麦叶片 SPAD 高光谱估算研究[J]. 中国农业资源与规划,2014,35(4):49-57.

[23] 夏天,周勇,周清波,等. 基于高光谱遥感和 HJ-1 卫星的冬小麦 SPAD 反演研究[J]. 长江流域资源与环境, 2013,22(3):307-113.

[24] 易秋香,黄敬峰,王秀珍,等. 玉米叶绿素高光谱遥感估算模型研究[J]. 科学通报,2007,23(1):83-87.

[25] 张苏,刘良云,黄文江. 基于植被指数的叶绿素密度遥感反演建模与适用性研究[J]. 遥感信息,2013,28(3):94-101.

[26] 赵佳佳,冯美臣,王超,等. 基于光谱植被指数的冬小麦叶绿素含量反演[J]. 山西农业大学学报:自然科学版, 2014,34(5):391-396.

【责任编辑 李晓卉】