

文章编号: 1005-0906(2010)06-0055-06

基于冠层反射光谱的夏玉米叶片色素含量估算模型研究

张学治^{1,2}, 郑国清^{2,1}, 戴廷波¹, 李国强², 胡峰²

(1. 南京农业大学农学院, 南京 210095; 2. 河南省农业科学院农业经济与信息研究中心, 郑州 450002)

摘要: 通过分析不同施氮水平下夏玉米叶片色素含量与冠层光谱反射率及其衍生的比值植被指数(RVI)、归一化植被指数(NDVI)、正交植被指数(MTVI2、MCARI2、SAVI、MSAVI)以及叶绿素吸收比值指数(CARI)之间的关系, 建立夏玉米叶片叶绿素 a(Chla)、叶绿素 b(Chlb)、叶绿素 a+b(Chl a+b)和类胡萝卜素(Car)含量估算模型。结果表明: NDVI 与夏玉米叶片色素含量的相关性最好, RVI、RVI、CARI 位居其次。通过逐步回归分析确立的夏玉米叶片 Chla、Chlb、Chl a+b 及 Car 含量的估算模型 R^2 分别为 0.790 8、0.832 4、0.808 8 和 0.761 7, 说明利用冠层 NDVI 可以对夏玉米叶片 Chla、Chlb、Chl a+b 和 Car 含量进行可靠的监测。

关键词: 夏玉米; 冠层反射光谱; 叶片色素含量; 回归模型

中图分类号: S513.01

文献标识码: A

Estimation Models of Summer Maize Leaf Pigment Content Based on Canopy Reflectance Spectra

ZHANG Xue-zhi^{1,2}, ZHENG Guo-qing^{2,1}, DAI Ting-bo¹, LI Guo-qiang², HU Feng²

(1. College of Agronomy, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095;

2. Agricultural Economy & Information Research Center, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: Through analyzed the relationships among the leaves pigment contents of summer maize and the canopy reflectance of single waveband and ratio vegetation index(RVI), normalized difference vegetation index(NDVI), orthogonal vegetation indices (MTVI2, MCARI2, SAVI, MSAVI) and chlorophyll absorption ratio index (CARI), the models for estimating the content of chlorophyll a(Chla), chlorophyll b(Chlb), chlorophyll a+b(Chl a+b) and carotenoid (Car) were established. The results showed that NDVI had the best correlation with the leaves pigment contents of summer maize, RVI, RVI and CARI ranks second. Established by stepwise regression analysis, the estimation model determination coefficient R^2 of Chla, Chlb, Chl a+b and Car in summer maize leaf were 0.790 8, 0.832 4, 0.808 8 and 0.761 7. It was suggested that reliable monitoring of the summer maize leaves contents of Chla, Chlb, Chl a+b and Car could be feasible through using canopy NDVI.

Key words: Summer maize; Canopy reflectance spectra; Leaf pigment content; Regression model

光合作用中吸收光能的植物色素有叶绿素(Chl)

和类胡萝卜素(Car), 其中叶绿素是主要的吸收光能物质, 类胡萝卜素有保护叶绿素的功能, 因此, 色素是植物与外界进行物质能量交换的物质基础^[1]。叶绿素含量是植物营养胁迫、光合能力和衰老进程等生理状态的良好指标^[2], 实时掌握作物叶片色素含量的变化, 可以对作物营养状况和光合能力进行有效监测。利用遥感技术监测色素含量及变化, 在作物精确诊断和高效管理中具有重要意义^[3]。

有关玉米叶片色素状况的监测研究已有一些相

收稿日期: 2010-01-11

基金项目: 国家高技术研究发展计划(2007AA10Z221)、河南省杰出人才创新基金项目(074200510012)

作者简介: 张学治(1986-), 男, 山西临县人, 在读硕士, 主要从事农业信息技术研究。

郑国清为本文通讯作者。

E-mail: zgqzx@hnagri.org.cn

关报道。谭昌伟等研究表明,利用一阶微分光谱和红边位置推算夏玉米冠层叶绿素密度,不仅可行而且反演精度较高^[4];Daughtry 等认为,通过玉米叶片和冠层光谱反射率估算叶绿素含量具有可行性^[5];宋开山等通过对高光谱植被指数与叶绿素含量的回归分析以及神经网络对玉米叶绿素含量的预测分析表明,通过高光谱遥感方式能够比较准确地估算农作物的叶绿素含量^[6];易秋香等测定了玉米不同层位叶片和叶片不同部位的室内光谱反射率及对应叶绿素含量,建立了基于高光谱数据的玉米叶绿素含量遥感估算模型^[7]。以上研究仅是对叶绿素含量进行的监测研究,缺乏对不同色素含量的比较分析。谢瑞芝等在叶片水平上对高光谱遥感与叶绿素 a(Chla)、叶绿素 b(Chlb)、叶绿素 a+b(Chl a+b)及类胡萝卜素(Car)含量进行了相关性分析^[8];唐延林等在叶片水平上通过光谱方法来估算 Chla、Chlb、Chl a+b 及 Car 含量,但得出的光谱参数相关性较差^[9]。到目前为止,我国在冠层水平用光谱法对不同色素含量的估算研究还较少。本研究在大田实测夏玉米冠层反射光谱和色素含量基础上,分析夏玉米叶片色素含量与冠层反射光谱特征的定量关系,为玉米冠层遥感长势监测与精确管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料与设计

试验于 2009 年夏玉米生长季在河南省温县农科所(34°57'N,113°05'E)进行。前茬为小麦,土壤为粘壤土,地势平坦,排灌方便,地力均匀一致。土壤有机质 1.35%,速效氮 81.5 mg/kg,速效磷 25 mg/kg,速效钾 170 mg/kg,pH 值为 7.8。试验为裂区设计,3 次重复,氮肥为主区,设 2 个施氮水平,分别为施氮量 75、150 kg/hm²,记为 N1、N2;品种为副区,供试品种为郑单 958 和浚单 20,均属紧凑型品种。小区面积 2.3 m×20 m=46 m²。玉米于 6 月 12 日播种,等行距种植,种植密度为 67 500 株/hm²,各处理同时施基肥 P₂O₅ 75 kg/hm² 和 K₂O 75 kg/hm²。其他管理措施同高产田。

1.2 冠层光谱测定

玉米的群体光谱数据测量采用美国 Cropscan 公司的 MSR-16R 型多光谱便携式辐射计,仪器视场角为 31°。仪器波段范围为 460~1 260 nm,有 16 个波段,其中可见光波段为 460、500、550、600、650、670、730 nm;近红外波段为 780、800、850、900、950、1 050、1 100、1 200、1 260 nm。测量选择晴朗无风的

天气进行,测量时间为 10:00~14:00 时(太阳高度角大于 45°),测量时探头垂直向下,距冠层垂直高度约 1 m。每个试验田块测量 3 点,每点重复 3 次,取平均值作为该小区的光谱测量值。测量日期为拔节期(7 月 23 日)、孕穗期(7 月 30 日)、抽雄期(8 月 7 日)、开花期(8 月 13 日)、灌浆期(8 月 27 日)和乳熟期(9 月 1 日)。第 1 次测量前,将每个试验田块分成两部分,一部分用于光谱测定,另一部分用于破坏性取样进行色素测定。

1.3 叶片色素的测定

与光谱测量同步,每个试验田块选取代表性玉米植株 2 株,取植株上部 5 片新鲜叶放于保鲜袋中,经液氮处理带回实验室,在低温冰柜(-29℃)中保存。色素含量测定时,去除叶脉,切取叶片中部 2 cm 切碎混匀,称取 0.2 g,采用无水乙醇和丙酮 1:1 混合液暗处提取。用 UV-2102C 型紫外可见分光光度计测定在 470、645、663 nm 处吸光度。以 Lichtenthaler 法^[10]计算叶片叶绿素 a(Chla)、叶绿素 b(Chlb)、叶绿素 a+b(Chl a+b)和类胡萝卜素(Car)的含量。

1.4 数据分析

系统计算从可见光波段到中红外波段共 16 个波段的所有两波段组成的比值、归一化植被指数、4 个正交植被指数(MTVI2、MCARI2、SAVI、MSAVI)^[11]和叶绿素吸收比值指数 CARI^[12](由于光谱测定仪波段限制,文中用 730 nm 处光谱反射率代替 700 nm 处)。首先对全生育期色素含量与各波段反射率及植被指数相关性进行分析,初步筛选出一批表现较好的光谱波段及植被指数,然后通过逐步回归分析确定最佳光谱指数及估测模型。

数据处理和绘图运用 Excel 2007 进行,统计分析用 SAS 9.2 进行。

2 结果与分析

2.1 玉米叶片色素含量变化

叶片色素含量是表征玉米氮素状况和光合能力的主要指标。由图 1 可知,两玉米品种从拔节期到灌浆期 Chl a+b 与 Car 含量均随施氮量的增加而提高;从灌浆期到乳熟期除 N1 处理下的 Car 含量还在增加外,其余的色素含量均有所下降,两品种表现一致。从灌浆期到乳熟期 Chl 与 Car 含量变化不同,在 N1 处理下,Car 含量还在增加,这有利于延缓 Chl 降解和叶片衰老;而在 N2 处理下,Car 含量开始下降,加速了 Chl 降解和叶片衰老。Chla 与 Chlb 的变化趋势同 Chl a+b。

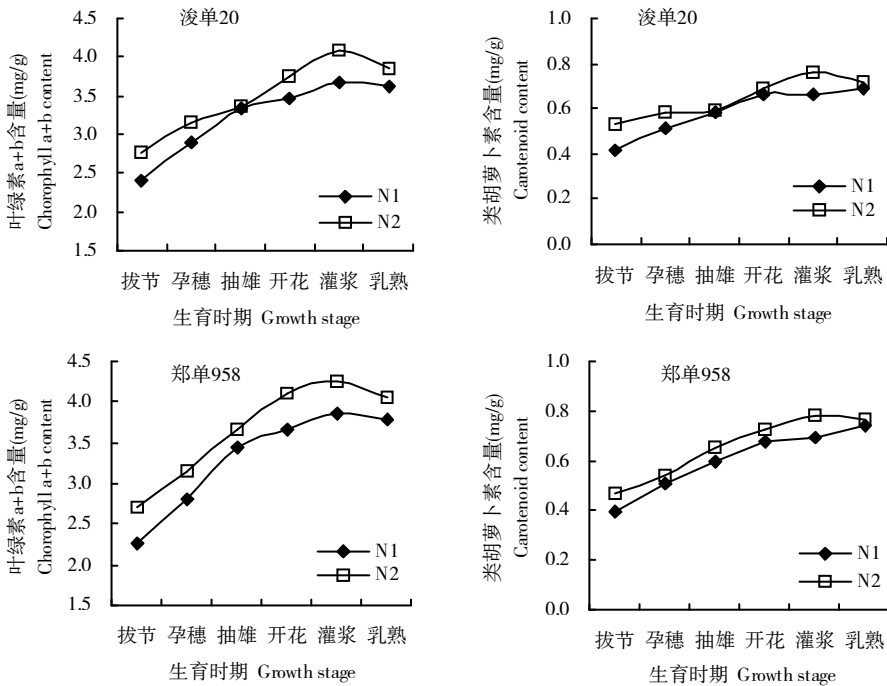


图 1 两个氮肥水平下夏玉米叶片 Chl a+b 含量与 Car 含量随生育进程的变化

Fig.1 Changes of the contents of chlorophyll a+b and carotenoid of leaves with the growth process of summer maize under two nitrogen levels

2.2 玉米冠层光谱反射率的变化

以拔节期两个施氮水平下浚单 20 冠层多光谱反射率为例,分析不同施氮水平下玉米冠层多光谱反射率的变化模式(图 2)。由图 2 可知,在 460~670 nm 范围内,两个施氮水平的冠层多光谱反射率差异不显著,随施氮水平提高而略有下降,这是由于植被在 400~700 nm 波段范围内的反射光谱主要由色素

含量决定;730~1 260 nm 近红外波段的反射率则随施氮水平的提高而上升,这是由于近红外波段的反射光谱主要受叶片的细胞排列方式和植被结构影响,因而与施氮水平密切相关。其他各个生育时期的冠层多光谱反射率均表现出与拔节期相似的规律。两品种表现一致。

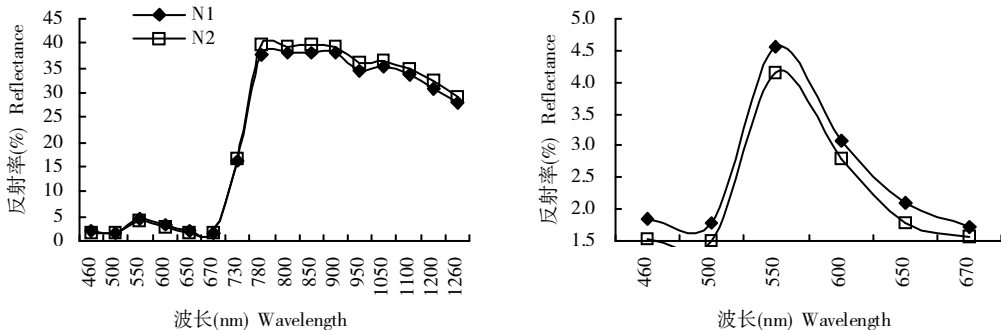


图 2 两个氮肥水平下浚单 20 拔节期的冠层光谱反射率

Fig.2 Spectral reflectance of canopy of Xundan20 at jointing stage under two nitrogen levels

以 N1 水平下浚单 20 为例,分析夏玉米冠层反射光谱随生育期的动态变化(图 3)。由图 3 可知,因为可见光波段冠层光谱反射率主要受色素含量的影响,其叶片光谱反射率在各个生育时期均保持先升后降的趋势,在 550 nm 处形成反射峰,只是在反射

强度上有所差别。随着生育期的推移,叶片细胞的栅栏组织和叶肉海绵组织迅速增长,植株的生物量和叶绿素含量不断增加,LAI 增大,整个群体的光合能力增强,冠层光谱反射率在可见光范围有所降低;而到了生育中后期,由于叶片向穗部提供大量的养分,

叶片的内部组织结构开始发生变化,叶绿素开始降解,冠层光谱反射率又有所上升,这与色素含量的变化规律正好相反。在近红外区域,拔节期反射率较

低,随着生育期的深入,反射率逐渐升高,在抽雄期达到最大,从开花期开始逐渐回落,到灌浆和乳熟期降到最低,这与色素含量的变化规律相似。

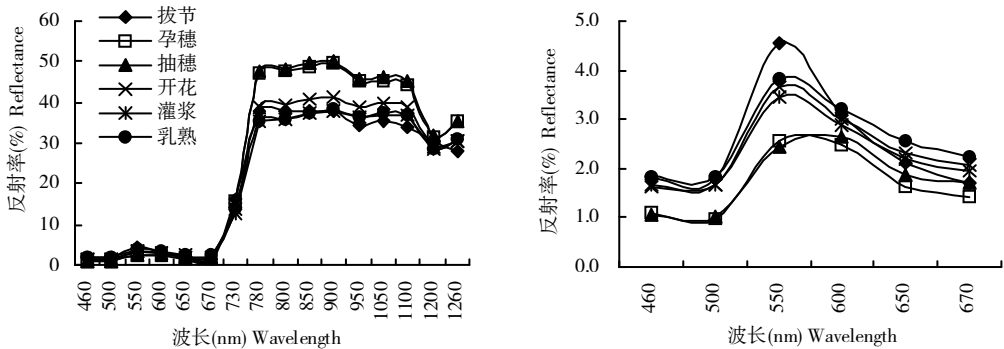


图3 在 N1 水平下浚单 20 冠层反射光谱随生育期的动态变化

Fig.3 Dynamic changes in canopy spectral reflectance of Xundan20 under N1 level at different growth stages

2.3 玉米色素含量与冠层光谱反射特征的关系

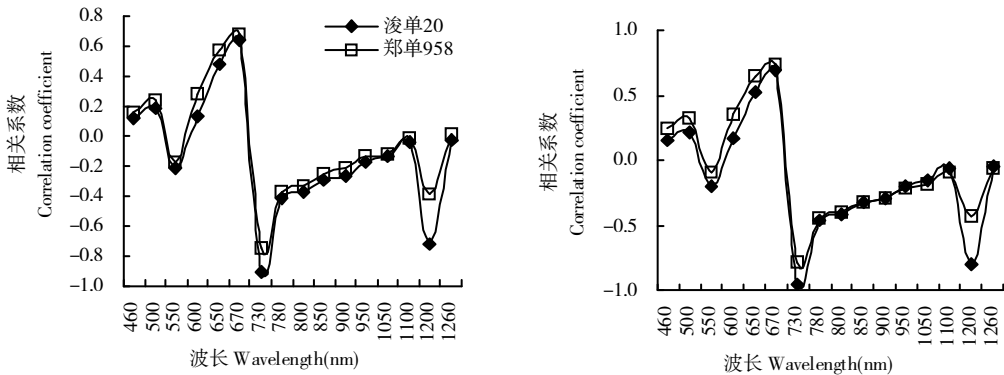


图4 夏玉米冠层光谱反射率与叶片 Chl a+b 含量(左)及 Car 含量(右)的关系

Fig.4 Relationships between canopy spectral reflectance and leaf chlorophyll a+b(left) and carotenoid contents(right) of summer maize

由图4可以看出,由于冠层反射光谱反映的是植被群体的光谱信息,是叶片、茎秆、穗以及土壤等背景光谱特征的综合体,单一波段的反射率易受生物量和观测背景等的影响,因此在图中绝大多数波段的叶片 Chl a+b 及 Car 含量与对应的冠层光谱反射率相关性不是太好,仅在极个别波段达到显著水平。浚单 20 在 730 nm 和 1 200 nm 的光谱反射率与叶片 Chl a+b 及 Car 含量呈极显著负相关($P<0.01$),在 670 nm 呈显著正相关($P<0.05$);郑单 958 在 730 nm 的光谱反射率与叶片 Chl a+b 及 Car 含量呈极显著负相关($P<0.01$),在 670 nm 与 Chl 呈极显著负相关($P<0.01$),与 Car 呈显著正相关($P<0.05$)。Chl a+b 和 Car 含量随冠层光谱反射率的变化规律相似。2 个玉米品种的相关曲线趋势基本一致。

为了发掘更多有用的光谱信息,从而提高光谱诊断的准确性,进一步对从可见光波段到中红外波

段共 16 个波段的所有两波段组成的 RVI 和 NDVI 以及 4 个正交植被指数(MTVI2、MCARI2、SAVI、MSAVI) 和 CARI 与叶片 Chla、Chlb、Chl a+b 及 Car 含量进行相关分析,相关拟合较好的参数见表 1。从表 1 可以看出,Car 与 Chl 关系密切,通常与 Chl 相关性较好的光谱参数与 Car 建立的回归关系也较好。与单波段相比,植被指数与叶片 Chl 及 Car 含量的相关性明显提高,绝大多数植被指数的相关性都达到了显著水平。其中,可见光波段(670、730 nm)分别与近红外波段(1 100、1 200、1 260 nm)构建的归一化指数和比值指数与玉米叶片 Chl 及 Car 含量的相关性较高;CARI、MTVI2 与 MCARI2 这 3 个指数表现较好,相关系数均达到 0.65 以上,在两个品种上表现也基本一致。另外,郑单 958 各个参数的相关系数略低于浚单 20,可能是因为不同品种在辐射吸收与反射方面的差异造成的。

表 1 夏玉米冠层光谱植被指数与叶片 Chla、Chlb、Chl a+b 和 Car 含量的相关系数

Table 1 Correlation coefficient between the vegetation indices of canopy spectral and the contents of leaves chlorophyll a, chlorophyll b, chlorophyll a+ b and carotenoid for summer maize

品 种	植被指数(nm)	叶绿素 a	叶绿素 b	叶绿素(a+b)	类胡萝卜素
Variety	Vegetation index	Chlorophyll a	Chlorophyll b	Chlorophyll a+b	Carotenoid
浚单 20	RVI(1100,730)	0.667 87*	0.687 47*	0.582 00*	0.677 01*
	RVI(1200,670)	-0.658 80*	-0.718 89**	-0.710 13**	-0.676 33*
	RVI(1200,730)	0.913 44**	0.936 30**	0.872 14**	0.925 12**
	RVI(1260,730)	0.802 14**	0.829 95**	0.731 80**	0.814 01**
	NDVI(1100,730)	0.689 42*	0.709 65**	0.611 05*	0.698 86*
	NDVI(1200,670)	-0.679 75*	-0.732 44**	-0.739 20**	-0.695 89*
	NDVI(1200,730)	0.920 05**	0.939 80**	0.879 18**	0.931 13**
	NDVI(1260,730)	0.798 75**	0.823 17**	0.732 79**	0.809 89**
	CARI	-0.844 32**	-0.904 24**	-0.863 22**	-0.861 53**
	MTVI2	-0.742 77**	-0.773 19**	-0.754 74**	-0.682 37*
	MCARI2	-0.660 05*	-0.712 29**	-0.675 95*	-0.724 96**
郑单 958	RVI(1100,730)	0.797 81**	0.765 81**	0.768 53**	0.794 31**
	RVI(1200,670)	-0.663 13*	-0.725 69**	-0.721 37**	-0.676 55*
	RVI(1200,730)	0.861 51**	0.889 55**	0.864 33**	0.869 19**
	RVI(1260,730)	0.824 25**	0.799 93**	0.828 94**	0.822 23**
	NDVI(1100,730)	0.800 00**	0.766 60**	0.771 91**	0.796 25**
	NDVI(1200,670)	-0.668 62*	-0.729 84**	-0.725 62**	-0.681 80*
	NDVI(1200,730)	0.873 23**	0.899 78**	0.875 85**	0.880 67**
	NDVI(1260,730)	0.824 93**	0.798 01**	0.826 51**	0.822 44**
	CARI	-0.827 41**	-0.880 51**	-0.839 58**	-0.870 78**
	MTVI2	-0.756 32**	-0.732 69**	-0.754 22**	-0.731 54**
	MCARI2	-0.707 92**	-0.771 89**	-0.721 72**	-0.769 65**

注:** 表示通过 0.01 显著性检验;* 表示通过 0.05 显著性检验。
Notes: **indicates passing the significant test of 0.01; * indicates passing the significant test of 0.05.

2.4 色素含量的光谱估测模型

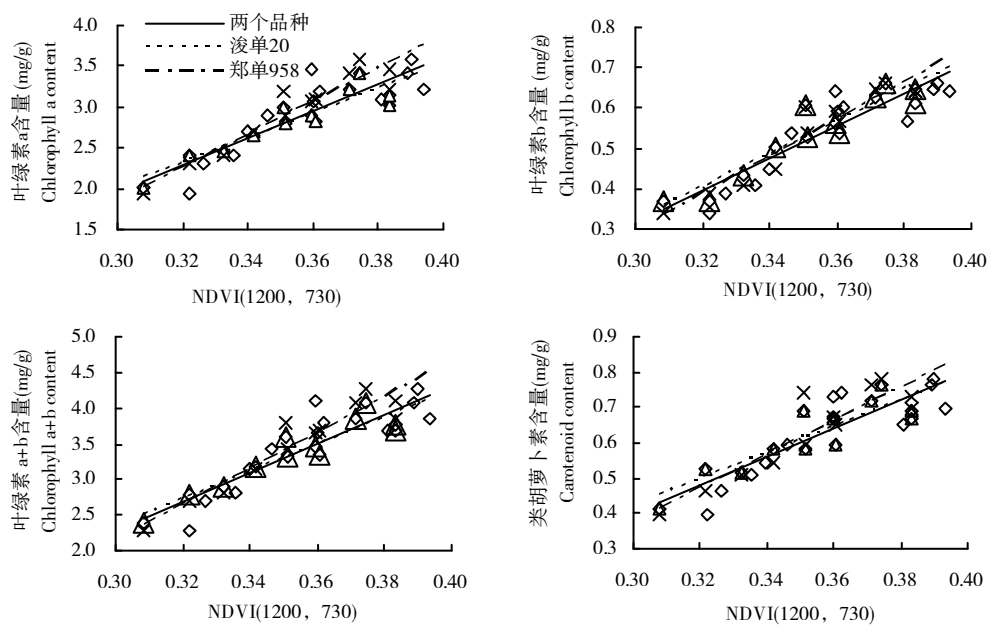


图 5 夏玉米叶片色素含量与植被指数 NDVI(1200,730)的关系

Fig.5 Relationship between summer maize leaves pigment contents and NDVI (1200,730)

采用逐步回归分析对表 1 中的植被指数进行进一步的筛选, 得出表现最好的 4 个参数: NDVI (1200, 730)、RVI(1200, 730)、RVI(1260, 730)与 CARI, 分别对他们与叶片 Chla、Chlb、Chl a+b 及 Car 含量建立的回归模型进行比较分析, 发现 730 nm 和 1 200 nm 组成的归一化植被指数估算叶片 Chla、Chlb、Chl a+b 及 Car 含量的效果最好, 在两个品种上表现一致(图 5)。综合分析两个品种不同色素含量的最佳光谱估算模型为: $C_{\text{Chla}}=16.483\ 54\ \text{NDVI}\ (1200, 730) - 2.986\ 27$, $R^2=0.790\ 8$; $C_{\text{Chlb}}=3.987\ 84\ \text{NDVI}(1200, 730)-0.880\ 84$, $R^2=0.832\ 4$; $C_{\text{Chla+b}}=20.471\ 38\ \text{NDVI}\ (1200, 730)-3.867\ 11$, $R^2=0.808\ 8$; $C_{\text{Car}}=-0.806\ 87\ \text{NDVI}(1200, 730)+4.015\ 89$, $R^2=0.761\ 7$ 。

3 结论与讨论

在可见光波段范围内, 由于光谱反射率主要受色素含量的影响, 各波段的冠层光谱反射率随生育时期的变化规律与对应色素含量的变化规律正好相反;而在近红外波段, 各波段的冠层光谱反射率随生育期的变化规律与对应色素含量的变化规律趋势一致。在利用冠层反射光谱建立夏玉米全生育期色素含量估算模型时, 可以考虑利用近红外波段和可见光波段组合来构造植被指数。

Chla、Chlb 与 Chl a+b 关系密切, 且变化趋势一致, 可以使用统一光谱参数表达与三者的关系, 这为监测模型的建立提供了便利。由于 Car 含量较低, 且生理变化比 Chl 复杂, 导致 Car 估测模型的精度相对较低。本研究利用对 Chl 敏感的光谱参数来监测 Car 信息效果较好。最后筛选的 4 个光谱参数 NDVI (1200, 730)、RVI (1200, 730)、RVI (1260, 730) 和 CARI 预测效果都比较好, 其中 NDVI(1200, 730)表现最好, 相关系数均达到了 0.75 以上。

本研究结果是对已有文献有关玉米叶片色素含

量光谱监测的补充和发展, 为玉米长势的精确诊断及管理调控提供了较便捷、快速的技术途径, 并且相关性最好的归一化植被指数 NDVI(1200, 730)是两个特定波段反射率的组合, 计算方便且容易获取, 为开发便携式光谱监测仪奠定了基础。

参考文献:

- [1] 冯伟, 朱艳, 姚霞, 等. 小麦叶片色素含量的高光谱监测[J]. 应用生态学报, 2008, 19(5): 992-999.
- [2] Penuelas J, Filella I. Visible and near-infrared reflectance techniques for diagnosing plant physiological status[J]. Trends in Plant Science, 1998, 3(4): 151-156.
- [3] 冯伟, 朱艳, 田永超, 等. 基于高光谱遥感的小麦冠层叶片色素密度监测[J]. 生态学报, 2008, 28(10): 4902-4911.
- [4] 谭昌伟, 王纪华, 黄文江, 等. 夏玉米叶片全氮、叶绿素及叶面积指数的光谱响应研究[J]. 西北植物学报, 2004, 24(6): 1041-1046.
- [5] Daughtry C S T, Walthall C L, Kim M S, et al. Estimating corn leaf chlorophyll concentration from leaf and canopy reflectance[J]. Remote Sensing of Environment, 2000, 74(2): 229-239.
- [6] 宋开山, 张柏, 李方, 等. 玉米叶绿素含量的高光谱估算模型研究[J]. 作物学报, 2005, 31(8): 1095-1097.
- [7] 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]. 科技通报, 2007, 23(1): 83-87, 105.
- [8] 谢瑞芝, 周顺利, 王纪华, 等. 玉米叶片高光谱反射率、吸收率与色素含量的关系比较分析[J]. 玉米科学, 2006, 14(3): 70-73.
- [9] 唐延林, 黄敬峰, 王秀珍, 等. 玉米叶片高光谱特征及与叶绿素、类胡萝卜素相关性的研究[J]. 玉米科学, 2008, 16(2): 71-76.
- [10] Lichtenthaler H K. Chlorophylls and carotenoids: Pigments of photosynthetic biomembranes[C]. In Methods in Enzymology, vol. Volume 148: Academic Press. 1987.
- [11] Haboudane D, Miller J R, Pattey E, et al. Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: Modeling and validation in the context of precision agriculture[J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 90(3): 337-352.
- [12] Broge N H, Mortensen J V. Deriving green crop area index and canopy chlorophyll density of winter wheat from spectral reflectance data[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 81(1): 45-57.

(责任编辑: 朴红梅)