

基于高光谱植被指数的西北玉米不同时期 叶绿素含量估测

张晓华 常庆瑞* 章曼 刘佳岐

(西北农林科技大学 资源环境学院,陕西 杨凌 712100)

摘要 以陕西省扶风县马席村、巨良农场和杨陵区揉谷乡种植的大田玉米为试验材料,分别测定玉米抽雄期、灌浆期和乳熟期的冠层光谱反射率和叶片叶绿素含量,分析冠层各光谱植被指数与叶片叶绿素含量之间的相关关系,建立玉米叶绿素含量估测模型。结果表明,以单变量光谱植被指数估算叶绿素含量,抽雄期的最佳模型由修正叶绿素吸收反射率指数(Modified chlorophyll absorption reflectivity index, MCARI)建立,灌浆期最佳模型由垂直植被指数(Perpendicular vegetation index, PVI)建立,乳熟期最佳模型由植被衰老反射率指数(Plant senescence reflectance index, PSRI)建立。随着玉米生长期的推进,叶片衰老,用 PSRI 所建立的模型来监测玉米叶绿素含量的效果较好,可为高光谱遥感在玉米长势监测提供理论依据和技术支持。

关键词 高光谱;植被指数;西北玉米;叶绿素估算;回归模型

中图分类号 TP 722.4; TP 722.5

文章编号 1007-4333(2015)04-0075-07

文献标志码 A

Hyperspectral vegetation index monitoring of chlorophyll content of different corn growth stage in Northwest China

ZHANG Xiao-hua, CHANG Qing-rui*, ZHANG Man, LIU Jia-qi

(College of Natural Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling 712100, China)

Abstract Aiming to promote the hyperspectral vegetation index application in corn condition monitoring. Field corns in Maxi, Juliang and Yangling area were used to establish the quantitative relationship between spectral vegetation index and the corn chlorophyll content. The canopy spectral reflectance and chlorophyll content were measured at tasseling stage, filling stage and milk stage. The coefficient between them was analyzed. And the relationship between them was used to establish the corn chlorophyll content monitoring model. The results showed that the best vegetation index to estimate the chlorophyll content was the modified chlorophyll absorption reflectivity index (MCARI) at the stage of tasseling. At the stage of filling, the best vegetation index to estimate the chlorophyll content was perpendicular vegetation index (PVI). And plant senescence reflectance index (PSRI) was the best at the stage of the milk stage. Along with the plant growth and leaf senescence, a PSRI model was proved to be valid for monitoring the corn chlorophyll content. It provided theoretical basis and technical support for the hyperspectral remote sensing in the corn growth monitoring.

Key words hyperspectrum; vegetation index; Northwest China corn; chlorophyll content estimation; regression model

收稿日期: 2014-11-14

基金项目: “国家“863”计划项目国家高技术研究发展计划(2013AA102401); 高等学校博士点专项科研基金项目(20120204110013)

第一作者: 张晓华, 硕士研究生, E-mail: zhangxiaohua8809@126.com

通讯作者: 常庆瑞, 教授, 主要从事土地资源与空间信息技术研究, E-mail: changqr@nwsuaf.edu.cn

叶绿素含量是植物生长过程中一个重要的生化参数,对植被光合能力、发育阶段以及营养状况有指示作用^[1]。从20世纪末高光谱遥感就进入了农业领域,Feng等^[2]用统一的光谱指数估算小麦叶绿素含量,并建立估测模型。杨杰等^[3]对水稻上部叶片叶绿素含量进行高光谱模型的估算。李鑫川等^[4]建造融合可见光-近红外与短波红外特征的新型植被指数来估算冬小麦的叶面积指数(Leaf area index, LAI)。唐延林等^[5]对水稻微分光谱和植被指数的作用进行探讨。薛利红等^[6]对光谱植被指数与水稻叶面积指数进行相关性的研究。王福民等^[7]利用新型植被指数对水稻叶面积指数进行估算。吴长山等^[8]利用高光谱数据对作物群体叶绿素密度进行估算研究。杨燕等^[9]利用主成分分析方法,用高光谱反演水稻叶面积指数。关于小麦和水稻的叶绿素含量研究探讨比较多而且很系统,试验来源较广,而且在华北和东北地区玉米的高光谱研究也系统,但在西北玉米的研究中却比较零散。本研究用玉米叶绿素含量与冠层光谱计算出的植被指数进行相关性分析,拟建立玉米叶绿素含量与冠层光谱植被指数的拟合方程,实现用高光谱遥感来监测玉米叶绿素含量,旨在为高光谱遥感在玉米营养监测中的使用提供理论和技术支持。

1 材料与方法

1.1 材料

田间试验设置3个试验区,分别为扶风县的马席村、巨良农场和杨凌区的揉谷乡,地理位置东经 $108^{\circ}01'03''$ — $108^{\circ}01'48''$,北纬 $34^{\circ}14'43''$ — $34^{\circ}33'21''$ 。该区属于大陆性季风性半湿润气候,四季分明,年平均气温 12.6°C ,积温为 4575°C ,平均降水量 620mm ,年日照时数在 2100h 以上。农作物种植属于一年两熟型,种植模式以冬小麦-夏玉米轮作为主,冬小麦生长期从10月中旬一次年5月底,夏玉米生长期在6月初—10月上旬。并且这3个实验区的试验设置都是一样的,因为同属同一地区,降水和其他自然条件相同,实验区的玉米均属于自然生长,施肥采用标准施肥,1次施足底肥,每亩施用优质复合肥 20kg 。数据采集通过野外实地无损检测,分别在玉米生长的抽雄期、灌浆期和乳熟期进行3次田间观测采样。马席村一共设置5个小

区,巨良农场设置8个小区,揉谷乡设置5个小区,每个小区的面积相同,大小为 $6\text{m}\times 8\text{m}$,且种植密度相同,每亩留苗密度 $4500\sim 5000$ 株。

1.2 数据采集方法

1.2.1 玉米冠层光谱采集

玉米冠层光谱是用美国的ASD Fieldspec HH型野外光谱辐射仪采集的,在晴朗无云的10:30—14:00,选择具有代表性的、均匀的无病虫害危害的样本点, 7.5° 视场角,传感器探头向下,距冠层垂直高度 1m 。每个小区采集光谱之前都要进行白板校正,每个样点采集5条光谱数据,以其平均值作为该样点的光谱数据。抽雄期样点采集时间是2013-07-24,采样点个数共为61个;灌浆期样点采集时间是2013-08-13,采样点个数共为39个;乳熟期样点采集时间是2013-09-16,采样点个数共为44个。

1.2.2 玉米叶绿素测定方法

有很多研究^[10]已经验证了SPAD值的可靠性,而且在野外需要快速获取植被的叶绿素值,以防止带回实验室的过程中叶绿素有损失,所以本研究的叶绿素测量采用仪器SPAD-502,该仪器是由日本KONICA MINOLTA公司生产的SPAD(Soil plant analysis development unit)502叶绿素计。测量采集光谱对应的植株冠层叶片叶绿素,每株玉米选择冠层展开的第2、3片叶片进行测量,每片叶片测10个SPAD值,取其平均值作为该叶片的SPAD值,每个小区记录3个SPAD值,最后取该小区内所有记录值的平均值作为该小区的叶绿素含量值。

1.3 高光谱植被指数的计算

根据玉米冠层的光谱特征,结合前人^[11-24]研究成果,选择14种植被指数,具体计算公式见表1。

1.4 模型构建及精度验证

对采集的叶绿素值和计算的植被指数进行相关性分析,选择与叶绿素相关性好的植被指数进行线性拟合和非线性拟合,利用均方根误差RMSE和相对误差RE对拟合值和实测值进行检验,确定最佳估测模型。抽雄期样点个数共有63个,42个样点数据用于建模,21个样点数据用于验证;灌浆期样点个数共有39个,24个样点数据用于建模,15个样点数据用于验证;乳熟期样点个数共有44个,22个用于建模,22个用于验证。

2 结果与分析

2.1 玉米冠层光谱反射率特征

从不同生育期玉米光谱反射率(图1)可以看出,玉米在抽雄期、灌浆期和乳熟期光谱变化趋势基本一致,抽雄期的光谱反射率要高于灌浆期和乳熟期。紫外和蓝绿光段的玉米冠层光谱反射率较低,

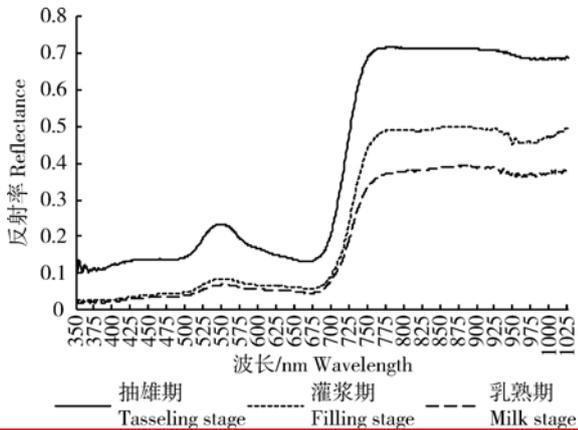


图1 不同生育期玉米光谱反射率

Fig. 1 Spectral reflectance in different stage of corn

随波长增加呈上升趋势,在555 nm处形成1个反射峰;橙红光区的玉米冠层光谱反射率较低且随波长增加呈下降趋势,在680 nm处形成1个吸收谷;此后玉米冠层光谱反射率急剧攀升。随着玉米生长期的推进,玉米持续生长,叶绿素含量不断增加,植株的光合作用不断增强,对蓝红光的吸收增强。进入近红外波段,形成稳定的反射平台,但在955 nm出现低谷,随后又有缓慢上升。

2.2 不同植被指数及叶绿素相关性分析

玉米冠层高光谱植被指数与叶绿素含量进行相关分析结果(表2)表明,在抽雄期与叶绿素含量达到极显著相关水平的植被指数有MCARI、PSRI、VARI、NIR/G、NDWI和PRI,其中相关性最高的是MCARI,相关系数达到-0.61;灌浆期与叶绿素含量达到极显著相关水平的植被指数是MCARI,相关系数为-0.56,PVI达到显著相关水平;乳熟期除PVI和MCARI之外,其余的植被指数与叶绿素含量的相关性均达到极显著相关水平,相关性最高的是PSRI,相关系数为-0.82。

表2 不同生育期植被指数与叶绿素相关系数

Table 2 Correlation coefficient of vegetation index and chlorophyll content in different stage

植被指数 Vegetation index	生育期 Stage		
	抽雄期(42个样本) Tasseling stage	灌浆期(24个样本) Filling stage	乳熟期(22个样本) Milk stage
RVI	0.19	0.36	0.66**
NDVI	0.12	0.32	0.78**
PVI	-0.26	-0.44*	0.49*
DVI	-0.23	-0.41	0.56**
SAVI	-0.08	-0.26	0.67**
RDVI	0.05	-0.01	0.63**
NIR/G	0.48**	0.42	0.66**
WI	0.07	-0.05	0.77**
NDWI	-0.45**	-0.40	-0.76**
PRI	-0.41**	-0.29	-0.81**
ARVI	0.09	0.32	0.80**
VARI	-0.48**	0.17	0.76**
PSRI	0.49**	-0.29	-0.82**
MCARI	-0.61**	-0.56**	0.36

注:** $P < 0.01$ 达到极显著相关水平; * $P < 0.05$ 达到显著相关水平。

Note: ** represents very significant level; * represents significant level.

2.3 玉米叶绿素含量高光谱模型估算

2.3.1 玉米叶绿素含量估算模型的建立及优选

为更好地监测玉米叶绿素含量,选择与叶绿素含量相关系数较高的植被指数作为自变量,以叶绿素含量为因变量,分别建立线性函数、抛物线函数、

指数函数、幂函数和对数函数,从中选取决定系数最高的模型。基于植被指数的玉米不同生育期叶绿素含量回归估测模型,从抽雄期到乳熟期决定系数不断上升,乳熟期的回归方程拟合模型最佳(表 3)。

表 3 玉米不同生育期叶绿素与植被指数估算模型

Table 3 Regression model of vegetation index and chlorophyll content in different stage

生育期 Stage	植被指数 Vegetation index	回归方程 Regression	决定系数 R ²
抽雄期 Tasseling stage	MCARI	$y=2\ 195.4x^2-529.06x+74.315$	0.41
	PSRI	$y=-29\ 704x^2+212.65x+52.001$	0.29
	VARI	$y=-227.18x^2+166.2x+21.815$	0.30
	NDWI	$y=188.76x^2+186.73x+90.988$	0.24
	NIR/G	$y=-0.017\ 6x^2+3.147\ 5x+35.137$	0.23
	PRI	$y=40.191e^{-9.415x}$	0.20
灌浆期 Filling stage	PVI	$y=-119.17x^2+75.814x+46.785$	0.32
	MCARI	$y=-2\ 979.2x^2+84.434x+58.648$	0.34
	DVI	$y=-125.98x^2+83.217x+45.065$	0.90
	NDWI	$y=167.13x^2+198.71x+114.47$	0.18
	NIR/G	$y=0.370\ 4x^2-2.755\ 7x+60.747$	0.19
乳熟期 Milk stage	PRI	$y=-3\ 450.8x^2+94.568x+52.258$	0.71
	PSRI	$y=52.275e^{-1.226x}$	0.75
	ARVI	$y=33.53e^{0.586\ 5x}$	0.72
	NDVI	$y=55.52x^{0.345\ 8}$	0.71
	WI	$y=2.199\ 7e^{2.972\ 7x}$	0.66
	NDWI	$y=-219.9x^2-315.01x-61.427$	-0.65
	VARI	$y=-47.211x^2+26.269x+46.681$	0.61
	RVI	$y=31.182x^{0.244\ 6}$	0.64
	SAVI	$y=-143.98x^2+137.61x+17.897$	0.64
NIR/G	$y=-1.931\ 2x^2+21.413x-7.359\ 7$	0.62	

2.3.2 玉米叶绿素含量估测模型的精度检验
为检验所建立的叶绿素含量监测模型的可靠

性,利用检验数据,采用均方根误差(RMSE)和相对误差(RE)对模型进行检验(表 4、5 和 6)。

表 4 玉米抽雄期叶绿素与植被指数估算模型精度检验

Table 4 Accuracy test of the vegetation index and chlorophyll content estimation model in tasseling stage

植被指数 Vegetation index	MCARI	PSRI	VARI	NDWI	NIR/G	PRI
均方根误差 RMSE	5.41	7.77	5.25	5.77	5.80	6.23
相对误差% RE	-0.88	-0.19	1.70	-1.80	-1.49	-0.59

表5 玉米灌浆期叶绿素与植被指数估算模型精度检验

Table 5 Accuracy test of the vegetation index and chlorophyll content estimation model in filling stage

植被指数 Vegetation index	PVI	MCARI	DVI	NDWI	NIR/G
均方根误差 RMSE	3.38	15.73	3.41	4.97	4.95
相对误差% RE	-1.80	-24.65	-1.88	-5.11	-5.28

表6 玉米乳熟期叶绿素与植被指数估算模型精度检验

Table 6 Accuracy test of the vegetation index and chlorophyll content estimation model in milk stage

植被指数 Vegetation index	PRI	PSRI	ARVI	NDVI	WI	NDWI	VARI	RVI	SAVI	NIR/G
均方根误差 RMSE	3.36	3.50	3.75	3.84	3.96	3.68	3.88	4.22	3.75	3.82
相对误差% RE	0.48	0.23	0.26	0.27	0.31	0.51	0.59	0.33	0.54	0.57

由玉米不同生育期叶绿素含量与植被指数估算模型精度检验结果可知,玉米抽雄期所挑选的6个植被指数的精度检验的RMSE和RE都很低,其中MCARI和PSRI的相对误差最低,能够很好地发挥预测性(表4、5和6)。灌浆期所选模型中PVI的RMSE和RE都很低,说明根据PVI所建立的模型有较好的预测性和普适性。乳熟期所选模型中PSRI的RMSE和RE最低,可作为玉米叶绿素含量的最佳监测模型。

3 结论与讨论

1)从光谱曲线来看,玉米各个生长期冠层光谱反射率在可见光绿光波段有1个反射峰,大致在555 nm处,在可见光红光波段680 nm处有个吸收谷,760 nm处光谱反射率迅速上升,在近红外波段950 nm处有1个小波谷。所以在计算植被指数时可见光蓝光波段选择480 nm,绿光波段选择560 nm,红光波段选择680 nm,近红外波段则选择810 nm。

2)不同生育期与叶绿素含量相关性高的植被指数类型不同,在抽雄期和灌浆期相关性最高的都是MCARI;乳熟期各个相关系数均较高,最高的是PSRI。玉米进入乳熟期后叶片普遍出现很大程度的衰老,PSRI和叶绿素含量的相关性较高。

3)关于植被指数对玉米叶绿素含量的反演和估算,用于不同生育期反演的植被指数不同,建立不同生育期的叶绿素含量估算模型,通过精度检验分析,选出不同生长期玉米叶绿素最适合的估算模型。随着生长期的进一步推进,用PSRI所建立的模型来监测玉米叶绿素含量的效果较好。

植物叶绿素主要用于光合作用,其含量高低影响作物生长,同时也反映作物的生产能力,可用来评价作物的经济产量。由植物光谱研究高光谱植被指数和叶绿素含量之间的关系是遥感领域的一大热点。本研究选取的波段包括可见光和近红外波段,这与杨燕等^[9]反演水稻叶面积指数所用的波段相近。玉米叶绿素含量与高光谱植被指数相关性分析结果表明,RVI、NDVI与叶绿素含量呈正相关关系,PRI与叶绿素含量呈负相关关系,这与孙小芳^[25]在高光谱植被指数与水稻叶片叶绿素相关分析中的结果一致,但不同作物叶片结构存在差异,因而模型拟合与之不同。本研究主要是对玉米不同时期的叶绿素含量进行监测,并用同一时期的样本数据对模型进行检验,提高了估测模型的可信度和普适性,但对于整个生育期的玉米叶绿素含量监测是否适用需进一步讨论。

本试验表明利用高光谱植被指数来监测玉米叶片的叶绿素含量是可行的,改进高光谱植被指数以及剔除各个影响因素(如冠层结构、水分等),还需进行更深层的探讨。

参 考 文 献

- [1] 蒋金豹,陈云浩,黄文江.用高光谱微分指数估测条锈病胁迫下小麦冠层叶绿素密度[J].光谱学与光谱分析,2010,30(8):2243-2247
- [2] Feng W, Yao X, Tian Y C, et al. Monitoring leaf pigment status with hyperspectral remote sensing in wheat [J]. Australian Journal of Agricultural Research, 2008, 59(8): 748-760
- [3] 杨杰,田永超,姚霞,等.水稻上部叶片叶绿素含量的高光谱估算模型[J].生态学报,2009,29(12):6561-6571
- [4] 李鑫川,鲍艳松,徐新刚,等.融合可见光-近红外与短波红外特

- 征的新型植被指数估算冬小麦 LAI[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(9): 2398-2402
- [5] 唐延林, 王秀珍, 黄敬峰, 等. 水稻微分光谱和植被指数的作用探讨[J]. 农业工程学报, 2003, 19(1): 145-150
- [6] 薛利红, 曹卫星, 罗卫红, 等. 光谱植被指数与水稻叶面积指数相关性的研究[J]. 植物生态学报, 2004, 28(1): 47-52
- [7] 王福民, 黄敬峰, 唐延林, 等. 新型植被指数及其在水稻叶面积指数估算上的应用[J]. 中国水稻科学, 2007, 21(2): 159-166
- [8] 吴长山, 项月琴, 郑兰芬, 等. 利用高光谱数据对作物群体叶绿素密度估算的研究[J]. 遥感学报, 2000, 4(3): 228-232
- [9] 杨燕, 田庆久. 高光谱反演水稻叶面积指数的主成分分析法[J]. 国土资源遥感, 2007(3): 47-50
- [10] 李志宏, 刘宏斌, 张云贵. 叶绿素仪在氮肥推荐中的应用研究进展[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(1): 125-132
- [11] Pearson R L, Miller L D. Remote Mapping of Standing Crop Biomass for Estimation of the Productivity of the Shortgrass Prairie [C]//Proceedings of the Eighth International Symposium on Remote Sensing of Environment II. Michigan: Center for Remote Sensing Information and Analysis-Environmental Research Institute of Michigan, 1972: 1357-1381
- [12] Rouse J W. Monitoring the vernal advancement and retrogradation of natural vegetation[R]. Greenbelt, MD, USA: NASA/GSFC, 1974
- [13] Richardson A J, Wiegand C L. Distinguishing vegetation from soil background information [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1977, 43(12): 1541-1552
- [14] Jordan C F. Derivation of leaf area index from quality of light on the forest floor [J]. Ecology, 1969, 50(4): 663-666
- [15] Huete, Alfredo. A soil-adjusted vegetation index[J]. Remote Sensing of Environment, 1988, 25(3): 295-309
- [16] Roujean J L, Breon F. Estimating PAR absorbed by vegetation from bidirectional reflectance measurements [J]. Remote Sensing of Environment, 1995, 51(3): 375-384
- [17] Shibayama M, Akiyama T. Seasonal visible, near-infrared and mid-infrared spectra of rice canopies in relation to LAI and above-ground dry phytomass [J]. Remote Sensing of Environment, 1989, 27(2): 119-127
- [18] Boland D H P. Trophic classification of lakes using LANDSAT-1 (ERTS-1) multispectral scanner data [M]. Corvallis: U S Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, Corvallis Environmental Research Laboratory, Assessment and Criteria Development, 1976
- [19] Mcfeeters S K. The use of normalized difference water index in the delineation of open water features[J]. International Journal of Remote Sensing, 1996, 17(7): 1425-1432
- [20] Gamon J A, Pefiuelas J, Field C B. A narrow-waveband spectra index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency [J]. Remote Sensing of Environment, 1992, 41(1): 35-44
- [21] Kaufman Y J, Tanre D. Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for Eos-MODIS [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1992, 30(2): 261-270
- [22] Gitelson A A, Kaufman Y J, Stark R, et al. Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction [J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 80(1): 76-87
- [23] Merzlyak M N, Gitelson A A, Chirkunova O B, et al. Non-destructive optical detection of pigment changes during leaf senescence and fruit ripening[J]. Physiologia Plantarum, 1999, 106(1): 135-141
- [24] 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
- [25] 孙小芳. 高光谱植被指数与水稻叶片叶绿素相关分析[J]. 闽江学院学报, 2013, 34(2): 124-127

责任编辑: 袁文业