

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.07.029

冬小麦冠层高光谱特征与覆盖度相关性研究*

姚付启¹ 蔡焕杰¹ 王海江² 张倩¹ 王健¹

(1. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西杨凌 712100;
2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

【摘要】 在2010年度与2011年度冬小麦生长季大田试验小区,实测了3个播种密度、3个灌水水平下冬小麦冠层的高光谱反射率与覆盖度。分析了冬小麦冠层光谱特征以及不同生育期冬小麦冠层光谱特征参数与覆盖度的相关性,建立了基于光谱特征参数的不同生育期冬小麦覆盖度估算模型。结果表明:从返青到成熟,冬小麦冠层可见光区光谱反射率先减小后增大,近红外区先增大后减小。不同种植密度下,适宜供水冬小麦在可见光波段的反射率依次小于轻度亏水、重度亏水条件下的冬小麦;在近红外波段,规律正好相反。在相关性分析中,传统光谱特征参数和新光谱特征参数与覆盖度在不同生育期均具有较好的相关性。相比以传统光谱特征参数为自变量的冬小麦覆盖度估算模型,基于绿峰峰度的估算模型可以提高冬小麦覆盖度的估算精度。

关键词: 冬小麦 冠层 光谱特征 覆盖度 相关性
中图分类号: S127 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)07-0156-07

Correlation between Percentage Vegetation Cover and
Hyperspectral Characteristics of Winter Wheat

Yao Fuqi¹ Cai Huanjie¹ Wang Haijiang² Zhang Qian¹ Wang Jian¹

(1. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid Areas, Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract

The winter wheat PVC estimation models based on canopy spectral characteristic parameters were established in different growth periods. The results showed that the winter wheat canopy hyperspectral reflectance in the visible light decreased from reviving to heading stages, then increased from heading to maturing stages, while in the near infrared band, it increased from reviving to heading stages, decreased from heading to maturing stages. Under different crop densities, hyperspectral reflectance of winter wheat canopy with suitable for water supply in the visible light was less than that of slight water deficit and severely water deficit in order, but in the near infrared band, it had opposite conditions. There were good relationships between winter wheat PVC and the spectral characteristic parameters of traditional and new spectral characteristic parameters in different growth periods. Compared with the models of winter wheat PVC which used the parameters of traditional spectrum characteristic as the independent variables, the models based on the kurtosis of green peak can improve the estimation accuracy of winter wheat PVC.

Key words Winter wheat, Canopy, Spectral characteristic, Percentage vegetation cover, Correlation

收稿日期: 2012-03-02 修回日期: 2012-03-15
* 国家自然科学基金资助项目(51179162)、“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2011BAD29B01)和高等学校学科创新引智计划(111计划)资助项目(B12007)
作者简介: 姚付启, 博士生, 主要从事农业节水与农业信息技术研究, E-mail: fuqiyaol63@163.com
通讯作者: 蔡焕杰, 教授, 博士生导师, 主要从事农业节水和水资源高效利用研究, E-mail: caihj@nwsuaf.edu.cn

引言

作物反射光谱是建立地面光谱与遥感图像之间关系的桥梁,是对作物进行遥感研究和各种模拟的基础数据。各种环境胁迫(如干旱等)都会使作物反射特征发生变化,通过监测作物冠层反射特征可以了解作物的生长状况。

植被覆盖度(观测区域所有植被的冠层、枝叶垂直投影面积占地表面积的百分比^[1~2])是重要的农学和生态学参数,它与生物量和叶面积有密切的相关性,常用来指示作物生长动态变化。作物覆盖度显著影响着作物光谱信息^[3~4]。准确估测农作物的覆盖度对指导农业生产管理和农业生态系统评价有重要的意义。传统的植被覆盖度估计多以定性为主,且具有费时、费力、主观随意性大等缺陷。近年来,随着高光谱分辨率遥感技术的发展,可以直接对地物进行微弱光谱差异的定量分析,在作物遥感研究中表现出强大优势^[5~6]。

对于冬小麦作物冠层光谱特征的分析,国内外已有研究^[7~12]。但是对于利用冬小麦冠层高光谱特征评价冬小麦不同生育期、不同种植密度及不同水分胁迫响应的研究很少^[13~14]。同时分析光谱特征与覆盖度关系的研究主要应用在草地以及水稻、玉米、油菜、棉花等作物中^[15~19]。本文分析冬小麦不同生育期冠层高光谱特征,以及不同种植密度、不同水分条件下的拔节期冬小麦冠层高光谱特征,选取 8 个传统光谱特征参数和提出的 8 个新光谱特征参数与冬小麦覆盖度进行相关性分析,建立基于光谱特征参数的冬小麦覆盖度高光谱估算模型。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2010 年与 2011 年在西北农林科技大学教育部旱区农业水土工程重点实验室的灌溉试验站(东经 108°24',北纬 34°18',海拔 521 m)进行。该站位于陕西省关中地区,地下水埋深较大,所以忽略地下水补给量。多年平均气温 12.5℃,年降水量 400~600 mm,年均蒸发量 1 500 mm。试验地土壤质地为中壤土,1 m 土层平均田间持水量为 23%~25%,凋萎含水率为 8.5%(以上均为质量含水率),平均干容重为 1.44 g/cm³。耕层土壤(0~25 cm)的基本肥力(质量比):土壤有机质 15.28 g/kg,全氮 0.87 g/kg,全磷 0.74 g/kg,全钾 17.64 g/kg,速效磷 80.5 mg/kg,硝态氮 85.32 mg/kg。土壤肥力中等偏上。

1.2 试验设计

供试作物为冬小麦(小偃 22 号)。施肥水平与该地区大田施肥水平一致(纯氮 256.5 kg/hm²,五氧化二磷 240 kg/hm²,播种时一次全部施入)。于 2009 年 10 月 17 日播种,2010 年 3 月 3 日返青,6 月 9 日成熟收获。2010 年 10 月 17 日播种,2011 年 3 月 6 日返青,6 月 7 日成熟收获。以不同的灌水定额和播种密度作为试验因子,综合考虑试验区的生产实践经验,分为 3 个灌水时期:播种分蘖期、拔节抽穗期、灌浆成熟期。设置 3 个灌溉水平,分别为适宜供水处理(75 mm)、轻度亏水处理(60 mm)、重度亏水处理(45 mm)。设置 3 个播种密度,分别为稀播(213 万株/hm²)、适宜播种密度(345 万株/hm²)、密播(460 万株/hm²)。试验小区面积(6 m×5 m),行距 25 cm,设 4 个重复。

1.3 数据采集

1.3.1 冬小麦覆盖度提取

冬小麦覆盖度通过索尼数码相机(DSC-W170)拍摄获得,相机有效像素为 1 010 万,最大分辨率为 3 648×2 736,实际焦距 5~25 mm,光圈范围为 F3.3~5.2。为准确测量冬小麦覆盖度,同时保证所测覆盖度和光谱测量范围对应,在拍摄前放置一铁圈,铁圈大小尽量和光谱仪的视场范围一致。拍摄时相机垂直向下,距离铁圈为 60 cm,保证整个铁圈在拍摄范围内。冬小麦覆盖度的求算在软件 Photoshop 中进行,以冬小麦所占像素数与整个铁圈范围内的像素数之比作为覆盖度值。

1.3.2 光谱测量

拍摄数字照片之后,立即采用美国 ASD 便携式野外光谱仪(ASD FieldSpec HandHeld)对冬小麦当冠层进行光谱测定,光谱仪波段为 325~1 075 nm,光谱分辨率 3.5 nm,光谱采样间隔 1.6 nm,视场角 25°。选择天气晴朗、无风或者风级小于 1 时于北京时间 11:00~13:00 进行光谱测定。2010 年,在各生育期分别做 4 次光谱测量;2011 年,各生育期内分别做 3 次光谱测量。各处理测定前后进行参考板校正,测量时传感器探头垂直向下,距冠层垂直高度 1 m。每个处理光谱值重复采集 10 次,把 10 组数据的平均值作为该样品最终光谱反射率。

1.4 高光谱数据特征参数及提取

常见的高光谱数据特征参数包括从原始光谱提取的基于高光谱位置变量、基于高光谱面积变量、基于高光谱植被指数变量 3 种类型共 8 个特征参数(表 1),同时,本文提出了 8 个新的高光谱特征参数(表 1)。

表 1 高光谱特征参数的定义
Tab. 1 Definitions of hyperspectral parameters

变量类型	变量符号	定义	描述
基于高光谱位置变量	ρ_g	绿峰反射率	波长 510 ~ 560 nm 范围内最大的波段反射率
	λ_g	绿峰位置	ρ_g 对应的波长位置 (nm)
	ρ_r	红谷反射率	波长 640 ~ 680 nm 范围内最小的波段反射率
	λ_r	红谷位置	ρ_r 对应的波长位置
基于高光谱面积变量	s_{ρ_g}	绿峰面积	绿峰内一阶微分波段值总和
	s_{ρ_r}	红谷面积	红谷内一阶微分波段值总和
基于高光谱植被指数变量	ρ_g/ρ_r		绿峰反射率 ρ_g 与红谷反射率 ρ_r 的比值
	$(\rho_g - \rho_r)/(\rho_g + \rho_r)$		绿峰反射率 ρ_g 与红谷反射率 ρ_r 的归一化值
	s_g	绿峰偏度	波长 510 ~ 560 nm 范围内波段反射率的偏度
	k_g	绿峰峰度	波长 510 ~ 560 nm 范围内波段反射率的峰度
新光谱特征变量	s_r	红谷偏度	波长 640 ~ 680 nm 范围内波段反射率的偏度
	k_r	红谷峰度	波长 640 ~ 680 nm 范围内波段反射率的峰度
	s_g/s_r		绿峰偏度 s_g 与红谷偏度 s_r 的比值
	k_g/k_r		绿峰峰度 k_g 与红谷峰度 k_r 的比值
	$(s_g - s_r)/(s_g + s_r)$		绿峰偏度 s_g 与红谷偏度 s_r 的归一化值
	$(k_g - k_r)/(k_g + k_r)$		绿峰峰度 k_g 与红谷峰度 k_r 的归一化值

2 结果与分析

2.1 冬小麦冠层高光谱特征分析

2.1.1 不同生育期

图 1 所示为不同生育期冬小麦冠层高光谱特征,从图中可以看出,不同时期光谱特征基本相似,在蓝紫波段、红光波段形成 2 个吸收谷,在绿光波段形成反射峰。680 nm 后,反射率急剧增加,在近红外波段形成一个高的反射平台。

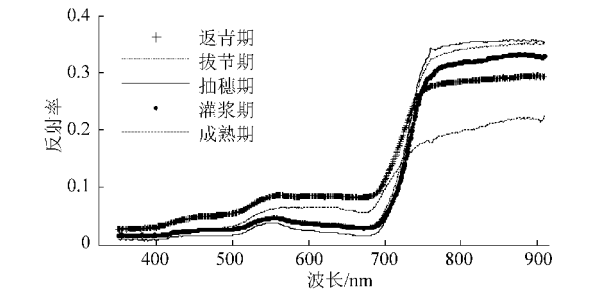


图 1 不同生育期冬小麦冠层光谱
Fig. 1 Canopy hyperspectra for winter wheat at different stages

但是不同时期的光谱特征也存在一定差异(图 1)。在可见光区,冬小麦从返青到拔节,再到抽穗,冬小麦植株持续生长,促使叶面积指数和覆盖度不断增大,因而整个群体的光合能力持续增加,冬小麦对蓝光、红光的吸收随之增强,所以蓝光、红光波段的反射率逐渐减小。冬小麦对绿光的吸收相比蓝光与红光要小,所以绿光波段的反射率相比蓝光与

红光要大,此时形成一个小的反射峰。冬小麦从抽穗到灌浆,叶片的养分向穗部转移,冠层的叶绿素开始减小,此时蓝波段、红波段的反射率逐渐提高。从灌浆到成熟,冬小麦叶片不断衰老、脱落,叶绿素分解,叶片变黄,光合作用下降,叶面积指数和覆盖度开始下降,此时蓝波段、红波段的反射率加快上升。在近红外区,冬小麦从返青到拔节再到抽穗,由于冬小麦植株持续生长,叶面积指数逐渐增大,叶层增多,近红外反射率逐渐增加。冬小麦从抽穗到灌浆再到成熟,叶要向穗部转移养分,同时叶的内部结构也会发生变化,此时近红外波段反射率开始下降。

2.1.2 不同种植密度与灌水定额条件

对于不同灌水定额及种植密度对冬小麦高光谱特征产生的影响,以拔节期冬小麦为例简要说明一下各处理间的差异(图 2)。由图 2 知,在拔节期,调亏灌溉下的适播、稀播、密播冬小麦光谱特征趋势一致,同时存在差异。差异主要表现在反射率不同,在适播条件下,适宜供水冬小麦在可见光波段的反射率依次小于轻度亏水、重度亏水条件下的冬小麦;而在近红外波段,适宜供水冬小麦光谱反射率依次大于轻度亏水、重度亏水条件下的冬小麦。稀播和密播条件下的冬小麦与适播冬小麦出现的规律类似。出现这种差异,与影响光谱特征的冬小麦生理生态指标(叶面积、覆盖度、叶绿素含量等)有关,随着水分胁迫程度加大,冬小麦生理生态指标

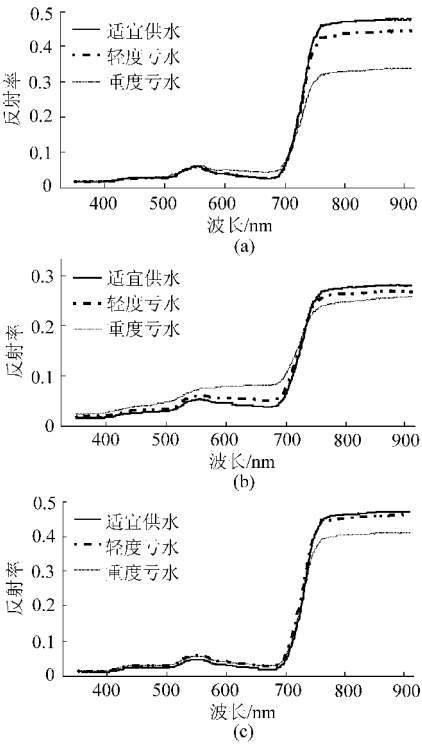


图 2 拔节期不同种植密度与灌水定额条件下冬小麦光谱特征

Fig.2 Canopy hyperspectra for winter wheat with different planting densities and different irrigation levels at elongation stage

(a) 适播 (b) 稀播 (c) 密播

随之减小。

表 2 冬小麦覆盖度与高光谱特征参数之间的相关系数

Tab.2 Correlation coefficient between PVC of winter wheat and hyperspectral parameters					
光谱特征变量		返青期($n=104$)	拔节期($n=101$)	抽穗期($n=100$)	灌浆期($n=98$)
位置变量	ρ_g	-0.819 8 **	-0.503 2 **	-0.704 8 **	-0.846 3 **
	λ_g	-0.650 4 **	-0.553 9 **	-0.506 1 **	-0.489 0 **
	ρ_r	-0.846 9 **	-0.647 5 **	-0.733 8 **	-0.899 7 **
	λ_r	0.449 7 **	0.553 5 **	-0.089 6	-0.135 1
面积变量	s_{ρ_g}	-0.480 4 **	-0.730 4 **	-0.360 4 **	-0.741 5 **
	s_{ρ_r}	-0.714 4 **	-0.865 2 **	-0.483 4 **	-0.703 4 **
植被指数	ρ_g/ρ_r	0.910 9 **	0.893 9 **	0.881 5 **	0.873 9 **
	$(\rho_g-\rho_r)/(\rho_g+\rho_r)$	0.860 4 **	0.938 9 **	0.803 9 **	0.810 7 **
新特征变量	s_g	-0.931 8 **	-0.912 5 **	-0.888 5 **	-0.919 1 **
	k_g	0.812 4 **	0.756 9 **	0.791 5 **	0.878 1 **
	s_r	0.222 4 *	0.278 5 *	0.319 6 **	0.153 3
	k_r	0.151 6	-0.146 6	0.525 8 **	-0.235 8 *
	s_g/s_r	-0.681 0 **	-0.586 8 **	0.322 7 **	-0.141 9
	k_g/k_r	0.181 4	0.209 0 *	-0.505 4 **	0.229 2 *
	$(s_g-s_r)/(s_g+s_r)$	-0.071 4	-0.115 0	0.002 1	0.002 8
	$(k_g-k_r)/(k_g+k_r)$	0.206 0 *	0.238 5 *	-0.511 4 **	0.252 4 *

注：* $p < 0.05$ ，** $p < 0.01$ 。

2.2 基于高光谱特征参数的冬小麦覆盖度监测

2.2.1 冬小麦覆盖度与光谱特征参数的相关性

由图 1、图 2 可知，冬小麦光谱特征随着生育期、生长环境的不同而发生变化，而冬小麦覆盖度发生变化是光谱特征发生变化的直接原因之一。本文分析了返青期、拔节期、抽穗期、灌浆期的冬小麦覆盖度与其高光谱特征参数之间的相关系数（表 2）。

由表 2 可知，在传统光谱特征变量（位置变量、面积变量与植被指数）中， ρ_g 、 λ_g 、 ρ_r 、 s_{ρ_g} 、 s_{ρ_r} 与返青期、拔节期、抽穗期、灌浆期的冬小麦覆盖度均呈负相关，且均达到了 0.01 极显著检验水平。 ρ_g/ρ_r 、 $(\rho_g - \rho_r)/(\rho_g + \rho_r)$ 与返青期、拔节期、抽穗期、灌浆期的冬小麦覆盖度均呈正相关，均达到了 0.01 极显著检验水平。 λ_r 与返青期、拔节期冬小麦覆盖度相关系数达到 0.01 极显著检验水平， λ_r 与抽穗期、灌浆期的冬小麦覆盖度的相关系数未达到显著性检验水平。在新特征变量中， s_g 与返青期、拔节期、抽穗期、灌浆期的冬小麦覆盖度均呈负相关，均达到了 0.01 极显著检验水平，相关系数较大。 k_g 与返青期、拔节期、抽穗期、灌浆期的冬小麦覆盖度均呈正相关，且均达到了 0.01 极显著检验水平。 s_r 、 k_r 、 s_g/s_r 、 s_r/k_r 、 $(s_g - s_r)/(s_g + s_r)$ 、 $(k_g - k_r)/(k_g + k_r)$ 与返青期、拔节期、抽穗期、灌浆期的冬小麦覆盖度相关性低，没有全部达到 0.01 极显著检验水平。

2.2.2 冬小麦覆盖度估算模型

由表 2 知,传统光谱特征参数(ρ_g/ρ_r 、 $(\rho_g - \rho_r)/(\rho_g + \rho_r)$ 、 ρ_r)及新光谱特征参数(s_g 、 k_g)与返青期、拔节期、抽穗期、灌浆期冬小麦覆盖度相关性显著,

且相关系数较大。通过比较,在每个生育期内,分别选择传统光谱特征参数、新光谱特征参数中通过相关性极显著检验且相关系数最大的光谱特征参数,应用 2010 年数据建立冬小麦覆盖度估算模型(表 3)。

表 3 基于高光谱特征参数的冬小麦不同生育期覆盖度估算模型

Tab.3 Estimate models of winter wheat percentage vegetation cover at different growth stages based on hyperspectral parameters				
生育期	光谱特征变量	最佳回归方程	R^2	样本数 n
返青期	ρ_g/ρ_r	$y = 0.5084 \ln x + 0.3095$	0.8421	104
	s_g	$y = 0.1183e^{-3.0816x}$	0.8815	
拔节期	$(\rho_g - \rho_r)/(\rho_g + \rho_r)$	$y = 0.9463x + 0.2662$	0.8816	101
	s_g	$y = 0.1131e^{-2.9427x}$	0.9199	
抽穗期	ρ_g/ρ_r	$y = 0.0806x + 0.5818$	0.7770	100
	s_g	$y = -1.6117x - 0.2078$	0.7894	
灌浆期	ρ_r	$y = 0.1874x + 0.4351$	0.8095	98
	s_g	$y = -1.4096x - 0.1156$	0.8447	

通过对比表 3 数据可以看出,各个生育期基于新特征参数的回归模型的确定系数要高于基于传统特征参数回归模型的确定系数。

为了验证模型的预测效果,应用 2011 年光谱、覆盖度数据对表 3 中各个时期覆盖度预测模型进行了检验(图 3)。由图 3 知,预测值与实测值回归方

程的确定系数 R^2 略低于建模方程确定系数,反演模型是稳定的,能够满足覆盖度预测需要。通过对比传统光谱特征参数(ρ_g/ρ_r 、 $(\rho_g - \rho_r)/(\rho_g + \rho_r)$ 、 ρ_r)和新光谱特征参数(s_g)检验模型的 R^2 可知,基于新光谱特征参数(s_g)的冬小麦覆盖度估算模型优于冬小麦传统光谱特征参数覆盖度估算模型。

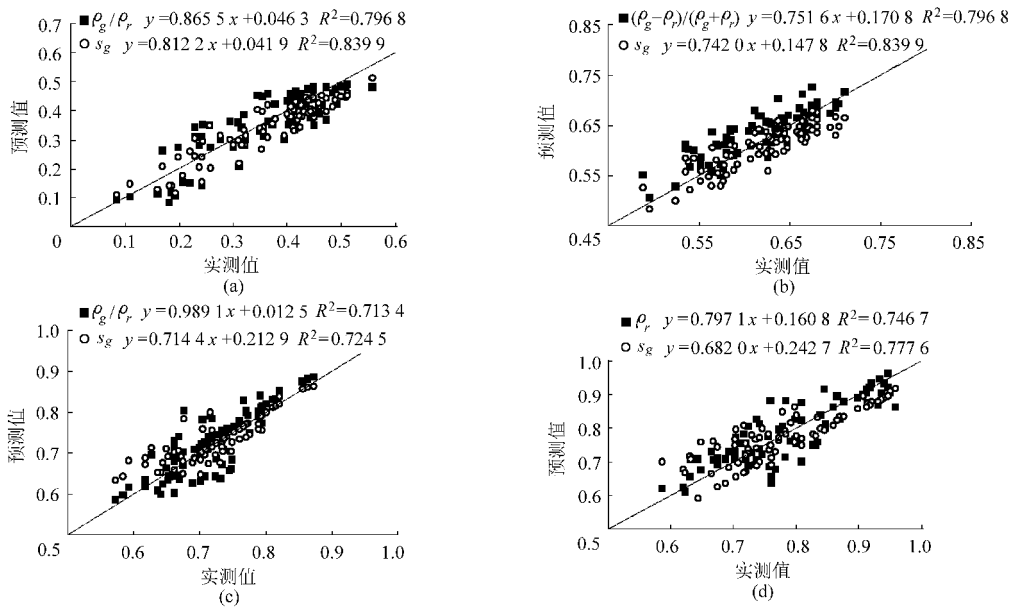


图 3 基于光谱特征参数的冬小麦不同时期覆盖度估算模型的预测性

Fig.3 Predictability of estimate models of winter wheat percentage vegetation cover at different growth stages based on hyperspectral parameters

(a) 返青期, $n=81$ (b) 拔节期, $n=80$ (c) 抽穗期, $n=78$ (d) 灌浆期, $n=76$

3 结论

(1) 不同时期光谱特征基本相似,存在双谷、一

峰及“红边”现象。不同时期光谱特征也存在一定差异,在可见光区,冬小麦从返青到拔节,再到抽穗,光谱反射率逐渐减小,从抽穗到灌浆,再到成熟,光

谱反射率逐渐增大;在近红外区,光谱变化规律与可见光区相反。

(2)不同种植密度下,适宜供水冬小麦在可见光波段的反射率依次小于轻度亏水、重度亏水条件下的冬小麦;在近红外波段,规律正好相反。

(3)传统光谱特征参数 ρ_g 、 λ_g 、 ρ_r 、 s_{pg} 、 s_{pr} 、 ρ_g/ρ_r 、

$(\rho_g - \rho_r)/(\rho_g + \rho_r)$ 和新光谱特征参数 s_g 、 k_g 与返青期、拔节期、抽穗期、灌浆期冬小麦覆盖度相关性显著,均达到了 0.01 极显著检验水平。

(4)以新光谱特征参数 s_g 为自变量的估算模型可以准确预测冬小麦覆盖度的变化,其预测精度要优于同时期传统光谱特征参数冬小麦估算模型。

参 考 文 献

1 Purevdorj T, Tateishi R, Ishiyama T, et al. Relationship between percentvegetation cover and vegetation indices [J]. International Journal of Remote Sensing, 1998, 19(18):3 519 ~3 535.

2 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.

3 Stanhill G, Kafkafi U, Fuchs M, et al. The effect of fertilizer application on solar reflectance from a wheat crop [J]. Israel J. Agric. Res. , 1972, 22(2):109 ~118.

4 Wanjura D F, Hatfield J L. Sensitivity of spectral vegetative indices to crop biomass [J]. Transactions of the ASAE, 1987, 30(3):811 ~816.

5 Blackburn G A. Quantifying chlorophylls and carotenoids at leaf and canopy scales: an evaluation of some hyperspectral approaches [J]. Remote Sensing of Environment, 1998,66(3):273 ~285.

6 王伟,彭彦昆,马伟,等. 冬小麦叶绿素含量高光谱检测技术[J]. 农业机械学报,2010,41(5):172 ~177.
Wang Wei, Peng Yankun, Ma Wei, et al. Prediction of chlorophyll content of winter wheat using leaf-level hyperspectral data [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(5):172 ~177. (in Chinese)

7 Kanemasu E T. Seasonal canopy reflectance patterns of wheat, sorghum, and soybean [J]. Remote Sensing of Environment, 1974, 3(1):43 ~47.

8 Colwell J E. Vegetation canopy reflectance [J]. Remote Sensing of Environment, 1974, 3(3):175 ~183.

9 孙红,李民赞,赵勇,等. 冬小麦生长期光谱变化特征与叶绿素含量监测研究[J]. 光谱学与光谱分析,2010,30(1):192 ~196.
Sun Hong, Li Minzan, Zhao Yong, et al. The spectral characteristics and chlorophyll content at winter wheat growth stages [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2010, 30(1):192 ~196. (in Chinese)

10 罗菊花,黄木易,赵晋陵,等. 冬小麦灌浆期蚜虫危害高光谱特征研究[J]. 农业工程学报, 2011,27(7):215 ~219.
Luo Juhua, Huang Mui, Zhao Jinling, et al. Spectrum characteristics of winter wheat infected by aphid in filling stage [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(7):215 ~219. (in Chinese)

11 王小平,郭锐,张凯,等. 黄土高原不同种植密度下春小麦冠层和叶片高光谱反射特征[J]. 生态学杂志, 2008, 27(7):1 109 ~1 114.
Wang Xiaoping, Guo Ni, Zhang Kai, et al. Canopy and leaf hyperspectral reflectance of spring wheat under different planting densities in Loess Plateau [J]. Chinese Journal of Ecology, 2008, 27(7):1 109 ~1 114. (in Chinese)

12 姚付启,蔡焕杰,王海江,等. 基于平稳小波变换的冬小麦覆盖度高光谱监测[J]. 农业机械学报,2012,43(3):173 ~180.
Yao Fuqi, Cai Huanjie, Wang Haijiang, et al. Monitoring winter wheat percentage vegetation cover based on stationary wavelet transformation derived from hyperspectral reflectance [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012,43(3): 173 ~180. (in Chinese)

13 赵春江,黄文江,王纪华,等. 不同品种、肥水条件下冬小麦光谱红边参数研究[J]. 中国农业科学,2002,35(8):980 ~987.
Zhao Chunjiang, Huang Wenjiang, Wang Jihua, et al. Studies on the red edge parameters of spectrum in winter wheat under different varieties, fertilizer and water treatments [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2002, 35(8):980 ~987. (in Chinese)

14 古艳芳,丁圣彦,陈海生,等. 干旱胁迫下冬小麦 (*Triticum aestivum*) 高光谱特征和生理生态响应[J]. 生态学报,2008, 28(6):2690 ~2697.
Gu Yanfang, Ding Shengyan, Chen Haisheng, et al. Ecophysiological responses and hyperspectral characteristics of winter wheat (*Triticum aestivum*) under drought stress [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28 (6):2690 ~2697. (in Chinese)

15 Purevdorj T, Tateishi R, Ishiyama T, et al. Relationships between percent vegetation cover and vegetation indices [J]. International Journal of Remote Sensing, 1998, 19(18): 3 519 ~3 536.

16 刘占宇,黄敬峰,吴新宏,等. 天然草地植被覆盖度的高光谱遥感估算模型[J]. 应用生态学报, 2006,17(6):997 ~1 002.
Liu Zhanyu, Huang Jingfeng, Wu Xinhong, et al. Hyperspectral remote sensing estimation models on vegetation coverage of

- natural grassland [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17(6):997~1 002. (in Chinese)
- 17 朱蕾,徐俊峰,黄敬峰,等. 作物植被覆盖度的高光谱遥感估算模型[J]. 光谱学与光谱分析,2008,28(8):1 827~1 831.
Zhu Lei, Xu Junfeng, Huang Jingfeng, et al. Study on hyperspectral estimation model of crop vegetation cover percentage [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2008, 28(8):1 827~1 831. (in Chinese)
- 18 陈军,王洪仁. 基于高光谱红边参数的棉花冠层覆盖度提取研究[J]. 安徽农学通报,2009,15(9):124~126.
Chen Jun, Wang Hongren. Study on extracting cotton canopy cover with hyperspectral red-edge parameters [J]. Anhui Agri. Sci. Bull, 2009, 15(9):124~126. (in Chinese)
- 19 王静,郭妮,王小平,等. 半湿润雨养农业区油菜冠层反射光谱与覆盖度的相关分析[J]. 干旱地区农业研究,2007, 25(4):230~234.
Wang Jing, Guo Ni, Wang Xiaoping, et al. Correlation analysis of canopy reflectance and coverage of rape in semi-wet rain fed agriculture area [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2007, 25(4): 230~234. (in Chinese)
- 20 李树强,李民赞,李修华,等. 冬小麦生育早期冠层叶片光谱的特征与应用[J]. 农业机械学报,2012,43(2):165~169.
Li Shuqiang, Li Minzan, Li Xiuhua, et al. Analysis and application of spectral characteristic of winter wheat in early growth periods[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012,43(2):165~169. (in Chinese)
- ~~~~~

(上接第 148 页)

- 7 蒋德云,王海燕,楼超英,等. 用高效液相色谱测定食物中维生素 B₁、B₂ 含量[J]. 分析测试通报, 1989, 8(5):26~30.
Jiang Deyun, Wang Haiyan, Lou Chaoying, et al. Determination of vitamin B₁ and B₂ content in natural food by high performance liquid chromatography [J]. Journal of Instrumental Analysis, 1989, 8(5): 26~30. (in Chinese)
- 8 无锡轻工业学院, 天津轻工业学院. 食品分析[M]. 北京: 轻工业出版社, 1985: 189~192.
- 9 Rolfe J Bryant, Ranjit S Kadan, Elaine T Champagne, et al. Functional and digestive characteristics of extruded rice flour [J]. Cereal Chemistry, 2001, 78(2):131~137.
- 10 安红周,金征宇,赵晓文. 新型方便米食用品质的研究[J]. 食品科学, 2005, 26(4): 145~149.
An Hongzhou, Jin Zhengyu, Zhao Xiaowen. Study on the edible quality of new type instant rice [J]. Food Science, 2005, 26(4):145~149. (in Chinese)
- 11 朱永义. 谷物加工工艺及设备[M]. 北京:科学出版社,2005.
- 12 陆勤丰. 大米营养强化工艺研究[J]. 粮食加工, 2007, 32(6):40~43.
Lu Qinfeng. The study of rice nutrition enriching technologys[J]. Grain Processing, 2007, 32(6): 40~43. (in Chinese)
- 13 王亮,周惠明,钱海峰. 早餐谷物研究进展Ⅲ. 挤压过程中原料成分变化[J]. 粮食与油脂, 2005(8): 11~15.
Wang Liang, Zhou Huiming, Qian Haifeng. Progress study on breakfast cereals Ⅲ. changes in ingredients of materials during extrusion [J]. Cereals & Oils, 2005(8):11~15. (in Chinese)
- 14 郑广钊,肖志刚,孙树坤,等. 挤压加工参数对重组米崩解值的影响[J]. 农业机械学报,2012,43(2):121~127.
Zheng Guangzhao, Xiao Zhigang, Sun Shukun, et al. Effect of extrusion processing parameters on breakdown value of restructuring rice [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012,43(2):121~127. (in Chinese)