

基于高光谱的水浇地与旱地春小麦拔节期叶绿素含量估测模型对比研究

靳彦华^{1,3}, 熊黑钢^{2,3}, 张芳^{1,3}, 王莉峰^{1,3}

(1. 新疆大学资源与环境科学学院, 新疆 乌鲁木齐 830046; 2. 北京联合大学应用文理学院, 北京 100083;
3. 教育部绿洲生态重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830046)

摘要: 测定拔节期水浇地与旱地春小麦冠层光谱、叶绿素含量、覆盖度、苗高和叶宽, 采用回归分析方法建立春小麦叶绿素含量高光谱估测模型, 并对模型精度进行检验。结果表明: 阳坡和双面坡地春小麦拔节期叶绿素含量与原始光谱反射率在可见光和近红外波段均呈正相关, 水浇地和阴坡地在 723 nm 以前相关系数为负, 723 nm 以后为正。各地类春小麦叶绿素含量与各高光谱变量的相关性均较好, 均达到了极显著水平 ($P < 0.01$)。无论在可见光还是近红外波段, 水浇地春小麦叶绿素含量均与倒数之对数 $\lg(1/R)$ 的相关性最好, 相关系数最大值可达 0.98; 阴坡地则与一阶微分的相关性最好, 最大为 0.94; 而与阳坡和双面坡地相关性最好的高光谱指数为归一化植被指数。在各个波段, 倒数之对数模型 $\lg(1/R)$ 、一阶微分模型 (p') 和归一化植被指数模型 (N) 分别是估测水浇地、阴坡地、阳坡和双面坡地春小麦叶绿素含量的最佳模型。虽然各模型 R^2 均超过 0.90, 精确度均大于 0.91, 但阴坡地、阳坡和双面坡地的模型精确度和准确度略低于水浇地。以上模型的建立可为今后估测水浇地与旱地春小麦的健康状况提供参考。

关键词: 高光谱指数; 水浇地; 旱地; 拔节期; 叶绿素含量; 对比研究

中图分类号: S127 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7601(2014)05-0106-06

Comparative study of estimation model on chlorophyll content at jointing stage of spring wheat under different lands based on hyperspectral indices

JIN Yan-hua^{1,3}, XIONG Hei-gang^{2,3}, ZHANG Fang^{1,3}, WANG Li-feng^{1,3}

(1. College of Resources & Environment Science, Xinjiang University, Urumqi, Xinjiang 830046, China;
2. College of Art & Science, Beijing Union University, Beijing 100083, China;
3. Key Laboratory of Oasis Ecology (Xinjiang University) Ministry of Education, Urumqi, Xinjiang 830046, China)

Abstract: In order to establish high spectral chlorophyll content model based on correlation analysis between chlorophyll content and five spectral variables of spring wheat under irrigated and dry land, canopy spectral, chlorophyll content, ground cover, seedling height, leaf width at jointing stage of spring wheat under different land were determined, and the precision of these model were tested. The result showed a positive correlation between chlorophyll content and original spectrum at visible light and near infrared band of sunny and double slopes at jointing stage of spring wheat, and a negative correlation below 723 nm and a positive correlation above 723 nm for irrigated land and shady slope. There was markedly significant correlation ($P < 0.01$) between chlorophyll content and hyperspectral variables of spring wheat under different lands. Regardless of visible light or near infrared wave band, $\lg(1/R)$ was significantly correlated with the leaf chlorophyll content, with a correlation coefficient of 0.98. Shady slope was correlated with first derivative ($r = 0.94$), while for sunny and double slopes normalized difference vegetation index showed significant relationship. For each band, $\lg(1/R)$, p' , and N were suitable indexes estimating chlorophyll content for all lands of irrigated land,

收稿日期: 2013-09-13
基金项目: 国家自然科学基金(41171165); 北京联合大学人才强校计划人才项目(BPHR2012E01); 北京市属高等学校高层次人才引进与培养计划项目(IDHT20130322)
作者简介: 靳彦华(1987—), 女, 甘肃白银人, 硕士, 主要从事区域可持续发展研究。E-mail: jyh76707027@163.com。
通信作者: 熊黑钢(1956—), 男, 湖南湘乡人, 教授, 博士, 主要从事遥感应用及干旱区资源与环境研究。E-mail: xhg1956@sohu.com。

shady slope, and sunny and double-sided slope. Although the regression determination coefficient R^2 was more than 0.90, precision and accuracy of the proposed for shady slope, sunny and double slope are slightly lower than that of irrigated land.

Keywords: hyperspectral variables; irrigated land; dry land; jointing stage; chlorophyll content; comparative study

高光谱技术是当前遥感的前沿技术^[1],具有监测范围广、速度快、成本低、便于进行长期动态监测和直接对地物进行微弱光谱差异的定量分析等优势^[2-3],已成为研究现代农业的一个重要内容和发展趋势^[4],在监测植被,尤其是农作物叶绿素含量方面取得了很大进展^[5],叶绿素的常规测定使用分光光度计法,这种方法需要破坏植株,在运往实验室的过程中会有损失^[6],因此迫切需要寻找高效、非破坏性测量作物叶绿素的方法^[7]。由于通过测定植物叶片的反射率、透射率和吸收率可以测定叶绿素含量,便携式高光谱仪又是一种非损伤性测定叶绿素的方法,这决定了高光谱技术在植被叶绿素含量监测方面表现出强大优势^[8],促进了高光谱遥感技术在作物长势、产量、病虫害监测以及遥感估产中的应用^[9]。

国内外基于高光谱数据对作物叶绿素含量的估测在水稻、棉花、玉米、马铃薯、小麦等作物上已有大量研究,取得的成果主要有:高光谱数据与早播稻、晚播稻群体叶绿素含量有很好的相关性,并建立了遥感监测回归模型^[10];水稻叶绿素含量与冠层光谱及一阶微分光谱相关性较好^[11];植被指数、“红边”光学参数以及导数光谱技术在植被监测中的应用^[12];近红外波段 763 nm 及红光波段 670 nm 是棉花鲜生物量的 2 个敏感波段^[13];750 nm 处一阶微分光谱与叶绿素含量高度相关^[14];用窄波段归一化植被指数(*NDVI*)分别建立了棉花、马铃薯、大豆和玉米的鲜生物量模型^[15];小麦高光谱数据中红边光谱与叶绿素含量的相关性最好^[16]、以及植被指数可以较好地预测叶绿素含量等^[17]。

以上研究主要集中在同一地类,而对水浇地与旱地上生长的同一植被叶绿素含量高光谱模型的研究较少。本文在分析不同地类同种农作物的冠层光谱与叶绿素含量关系的基础上,建立了多种叶绿素含量的高光谱估测模型并检验其精度,通过模型之间的对比,分别选出适合水浇地和旱地春小麦拔节期叶绿素含量的估测模型。目的是建立简便、快速、无损伤和精度高的水浇地与旱地春小麦叶绿素估测模型,为春小麦健康、产量估算、营养状况及病虫害监测提供依据^[18]。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于奇台县,地处新疆维吾尔自治区东北部,天山山脉东段博格达山北麓准噶尔盆地东南缘(43°25′~45°29′N,89°13′~91°22′E)。年平均气温 5.5℃,7 月份最高气温 43℃,1 月份极端最低气温 -42.6℃。年平均降水 176 mm,蒸发潜力 2 141 mm,无霜期平均 156 天,年平均风速 2.9 m·s⁻¹。夏季炎热,冬季寒冷,四季分明,属于典型的中温带大陆性干旱半干旱气候。

1.2 样地选择

2012 年 5 月 22—24 日分别在平原区和山前丘陵选择 3 块春小麦地,并用 GPS 进行现场定位,确定 6 块地的经纬度和海拔,二者的平均海拔分别为 700 m 和 1 250 m。山前丘陵的 3 块春小麦地又分为南坡(阳坡)地、北坡(阴坡)地、和东西坡(双面坡)地。平原区小麦地由机井灌溉(水浇地),山前丘陵区小麦主要依靠天然降水(旱地)。

1.3 叶绿素含量测定

叶绿素含量的测定选用美能达 SPAD-502 叶绿素测量仪,它是一种外形小巧,对植物无破坏性的叶绿素含量测定仪。测量时由叶片从上而下,分叶尖、中部和叶基部三个部位各测量三次,最后取其均值作为该叶片的叶绿素含量。

1.4 春小麦叶宽、苗高及覆盖度的测定

用卷尺测定各样地春小麦的行距、苗高和叶宽,每一项选五个点,测 5 次取其平均值作为该项的数据,测量叶宽时每个叶片均测其中部。采用计算机图像自动识别法提取植被覆盖度^[19]。

1.5 光谱数据采集及处理方法

1.5.1 冠层光谱测定与处理小麦光谱测量采用美国 ASD 公司的 ASD FieldSpecPro3 光谱仪,其波段范围为 350~2 500 nm,去除受外界噪声影响较大的边缘波段 350~390 nm 和 900~2 500 nm,取 400~900 nm,这一波段包括了遥感常用的可见光和近红外波段,可满足本文分析要求。光谱的测定选在晴朗无云无风天气,测量时间为北京时间 12:00~16:00,测量时,传感器探头垂直向下,视场角 25°,探头距离冠

层顶部垂直高度约 15 cm。每个样地设 30 个观测点,每个观测点测量 3 次,将其平均值作为该点的光谱反射值。各样点测定前都进行白板定标,以去除暗电流影响。

采用移动平均法对实测光谱进行去噪处理^[20],即选取测定样本某一点前后光谱曲线上一定范围测定它的平均值。作为该点的值。公式:

$$R'_i = \frac{1}{2k+1}(R_{i+1} + R_{i-k+1} + \cdots + R_i + \cdots + R_{i+k}) \tag{1}$$

式中, R'_i 为样本第 i 点的反射率值(均值), $i = 1, 2, 3, \cdots, n$ 。

1.5.2 光谱数据数学处理 原始光谱,特别是光谱变量与叶片叶绿素含量有一定的相关性^[21];反射率倒数对数和冠层叶绿素单位面积浓度有很好的相关性^[22];微分变量则可很好地消除土壤背景影响;归一化植被指数(NDVI)是评价植被绿度的指标,其不但可以对作物长势长相进行监测,还可以减少土壤背景及外界条件对光谱的影响^[23]。因此,除了实测光谱外,还提取了以下 4 种光谱指标^[24-25]:

反射率一阶微分

$$p'(\lambda_i) = \{p(\lambda_{i+1}) - p(\lambda_{i-1})\} / 2\Delta\lambda \tag{2}$$

$$\text{光谱倒数之对数} = \lg(1/R) \tag{3}$$

$$\text{光谱倒数之对数微分} = (\lg(1/R))' \tag{4}$$

$$\text{归一化植被指数} = \frac{1}{2R(\lambda)} \cdot \frac{dR}{d\lambda} \tag{5}$$

式中, λ_i 为各波段波长; $p'(\lambda_i)$ 为波长 λ_i 的一阶微分光谱; $\rho(\lambda_i)$ 为波长 λ_i 处的光谱反射系数, $\Delta\lambda$ 是波长 $\lambda_i - 1$ 到 λ_i 的间隔。 R 为实测反射率, $R(\lambda)$ 为 700 nm 处反射率。

1.6 模型建立与检验

随机取 20 个样本作为建模样本,另外 10 个样本做为检验样本。采用多元线性回归分析方法,建立实测光谱、光谱微分,光谱倒数之对数、倒数之对数微分、归一化植被指数 5 种光谱指标与叶绿素含量的模型。用模型精确度(模拟值与实测值之间的 R^2 值越接近于 1,精确度越高)^[26] 和总均方根差(RMSE)对预测模型进行精度检验^[21],计算公式为:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n_{i-1}} \sum^n (y_i - y_j)^2} \tag{6}$$

式中, Y_i 和 Y_j 分别为实测值和估计值; n 为样本数(包括试验样本和检验样本)。

2 结果与分析

2.1 不同地类春小麦拔节期叶绿素含量与原始光谱的相关性

波长小于 723 nm 范围内,水浇地和阴坡地春小

麦叶绿素含量与原始光谱反射率均呈负相关,且相关系数较大(图 1),前者的相关系数在 678 nm 处最大,达 0.807,而后者相关系数在 661 nm 处最大,为 0.528;而波长大于 723 nm 时,各地类与原始光谱均为正相关。两者在 723 nm 前后表现出相反的变化规律主要是叶绿素在可见光区域强烈吸收,而在近红外波段叶片内部结构多次反射造成。同时,因水浇地春小麦叶绿素含量高、长势好、叶片宽(图 2),造成其在可见光波段吸收以及在近红外波段反射的相关性均高于阴坡地。

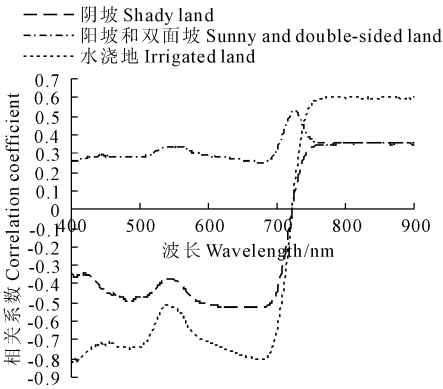


图 1 不同地类春小麦拔节期原始光谱与叶绿素含量的关系
Fig.1 Correlation between original spectrum and chlorophyll content spring wheat at jointing stage under different land types

阳坡和双面坡地春小麦叶绿素含量在各个波段与原始光谱反射率均呈正相关,且相关系数变化没有水浇地和阴坡地明显。相关系数最大值出现在 680~740 nm 区间内。这主要是因为阳坡和双面坡地处于南坡和东西坡,对新疆主要的西北向水汽接受的少,另一方面阳光直射,蒸发强烈,土壤水分少,叶绿素含量低,使得其长势(叶宽、苗高)明显不如阴坡地和水浇地(图 2)。因此,在可见光波段对叶绿素吸收不明显,近红外区叶片结构反射不突出。

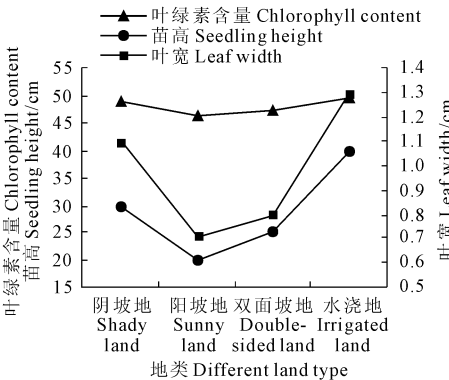


图 2 不同地类春小麦叶绿素含量、苗高和叶宽对比
Fig.2 Comparison of chlorophyll content, seedling height and leaf width in spring wheat under different land types

2.2 不同地类春小麦叶绿素含量和光谱变量的相关分析

由于春小麦拔节期叶绿素含量与原始光谱的相关系数在 700 nm 前后截然不同,因此,以下的讨论将以 700 nm 为界分别进行。

不论是在 400 ~ 700 nm 还是 700 ~ 900 nm 波段,水浇地春小麦叶绿素含量均与光谱倒数之对数的相关系数最大(表 1)。这主要是因为反射光谱倒数之

对数能很好的反映冠层叶绿素单位面积浓度,且水浇地春小麦叶片叶绿素含量高。因此,在 400 ~ 700 nm 和 700 ~ 900 nm 均与倒数之对数的相关性最好。

旱地春小麦长势差、覆盖度低(图 3),受地面土壤的影响较大,而一阶微分和归一化植被指数可以很好的消除土壤背景的影响,所以阴坡地春小麦拔节期叶绿素含量与一阶微分的相关性最高,而阳坡和双面坡地则与归一化植被指数的最好。

表 1 各高光谱变量与各地类春小麦叶绿素含量的相关性

Table 1 The correlation between hyperspectral indices and chlorophyll content of spring wheat

地类 Different land		p	p'	$\lg(1/R)$	$(\lg(1/R))'$	N
400 ~ 700 nm	阴坡地 Shady slope	0.85**	0.94**	0.91**	0.92**	0.83**
	阳坡和双面坡 Sunny and double-sided slope	0.80**	0.91**	0.93**	0.91**	0.94**
	水浇地 Irrigated land	0.90**	0.94**	0.95**	0.93**	0.94**
700 ~ 900 nm	阴坡 Shady slope	0.86**	0.92**	0.91**	0.90**	0.85**
	阳坡和双面坡 Sunny and double-sided slope	0.83**	0.87**	0.83**	0.89**	0.94**
	水浇地 Irrigated land	0.93**	0.96**	0.98**	0.94**	0.96**

注:“ p ”表示光谱反射率,“ p' ”表示光谱反射率一阶微分值,“ $\lg(1/R)$ ”表示倒数之对数值,“ $(\lg(1/R))'$ ”表示倒数之对数一阶微分值,“ N ”表示归一化植被指数。* * 为极显著相关($P < 0.01$); * 为显著相关($P < 0.05$)。

Note: p , spectral reflectance; p' , first derivative value; $\lg(1/R)$, the logarithm of reciprocal; $(\lg(1/R))'$, first derivative of the logarithm of reciprocal; N , normalized difference index. * and * *, significant level at $P < 0.05$ and $P < 0.01$, respectively.

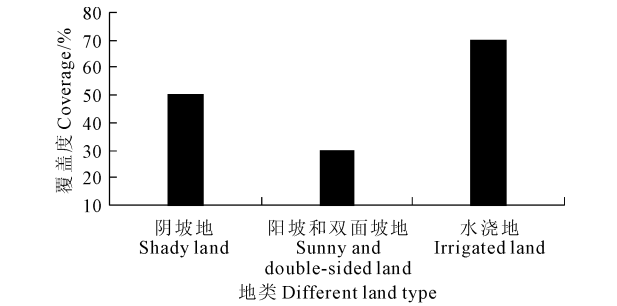


图 3 拔节期不同地类春小麦覆盖度

Fig.3 Ground cover of spring wheat at jointing stage under different land types

各地类春小麦叶绿素含量和各高光谱变量均达到极显著水平($P < 0.01$),水浇地和旱地叶绿素含量与各光谱变量的相关系数基本在 0.8 以上,最高达 0.98。因此可用高光谱变量建立水浇地和旱地春小麦叶绿素含量估算模型。

2.3 水浇地与旱地春小麦拔节期叶绿素含量最佳模型及精度检验

为讨论不同波段高光谱变量与春小麦拔节期叶绿素含量的关系,分别以 400 ~ 700 nm、700 ~ 900 nm 和 400 ~ 900 nm 各光谱指标为自变量,以水浇地与旱地春小麦的叶绿素含量作为因变量,建立两者的回归方程。并从这些模型中分别选出适合水浇地和旱地叶绿素含量估测的最佳模型。

在比较各高光谱模型对水浇地和旱地春小麦叶绿素含量估测的精确度和准确度时,采用模型 R^2 、检验 R^2 和 RMSE3 个统计量对预测模型进行综合评价(表 2)。各模型特点如下:① 各模型 R^2 和检验 R^2 均较大,且通过了极显著水平检验($P < 0.01$),均方根差较小,反映出模型精确度较高(图 4 ~ 图 6)。② 各波段,用高光谱指数估测春小麦叶绿素含量,水浇地、阴坡地、阳坡和双面坡地分别以倒数之对数、一阶微分和归一化植被指数模型最优,其中前者在 700 ~ 900 nm R^2 最高,精确度最大,在 400 ~ 700 nm 最低;中者在三个波段相差不大;而后者在 400 ~ 900 nm 最高,400 ~ 700 nm 次之,700 ~ 900 nm 最低。③ 在三个波段中,无论是哪种模型均显示出:春小麦叶绿素含量估测模型精确度及准确度由大到小的顺序始终是:水浇地 > 阴坡地 > 阳坡和双面坡地,即叶绿素含量越高,模型的精确度和准确度也越高。

3 讨 论

叶绿素是绿色植物光合作用的主要色素,其含量的高低不仅能反映作物的生长状况,又能体现作物的生产能力,因而直接影响作物的产量。通过光谱数据研究高光谱参数和叶绿素含量之间的关系,是近年来遥感领域研究的热点,作物遥感监测的目的是为了实时掌握作物生长状况,以指导农业生产,进行合理的管理调控,提高作物单产。

表 2 水浇地与旱地春小麦叶绿素含量最佳估测模型及精度检验

Table 2 The best estimation model and model testing of chlorophyll content in spring wheat under different lands

项目 Item		变量 Variable	模型方程 Regression model	模型 R^2 Simulating R^2	总均方根差 RMSE	检验 R^2 Predicting R^2	P
400 ~ 700nm	水浇地 Irrigated land	$\lg(1/R)$	$y = 25.67x + 12.361$	0.95	0.69	0.96	0
	阴坡地 Shady slope	p'	$y = 177744x + 16.32$	0.94	0.71	0.95	0
	阳坡和双面坡地 Sunny and double-sided slope	N	$y = 96272x - 76.936$	0.92	0.98	0.92	0
700 ~ 900nm	水浇地 Irrigated land	$\lg(1/R)$	$y = 30.825x + 35.993$	0.98	0.34	0.97	0
	阴坡地 Shady slope	p'	$y = 29245x + 19.519$	0.95	0.87	0.94	0
	阳坡和双面坡地 Sunny and double-sided slope	N	$y = 5367x + 29.409$	0.90	0.96	0.91	0
400 ~ 900nm	水浇地 Irrigated land	$\lg(1/R)$	$y = 41.171x + 5.6216$	0.97	0.59	0.96	0
	阴坡地 Shady slope	p'	$y = 74265x + 11.039$	0.95	0.71	0.95	0
	阳坡和双面坡地 Sunny and double-sided slope	N	$y = 1527528.91x - 3.9$	0.94	0.78	0.94	0

注：“ p' ”表示光谱反射率一阶微分模型,“ $\lg(1/R)$ ”表示倒数之对数模型,“ N ”表示归一化植被指数模型。 $RMSE$ 为均方根误差, P 代表模型检验的显著性水平。 $P < 0.05$ 代表通过显著水平检验, $P < 0.01$ 代表通过极显著水平检验。

Note: p' , first derivative value; $\lg(1/R)$, the logarithm of reciprocal; N , normalized difference index; $RMSE$, root mean square error; P , significant level test of model; $P < 0.05$ and $P < 0.01$, significant levels.

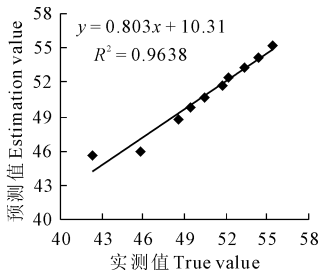


图 4 水浇地小麦倒数之对数模型检验

Fig.4 Result of Logarithmic of reciprocal model of irrigated land

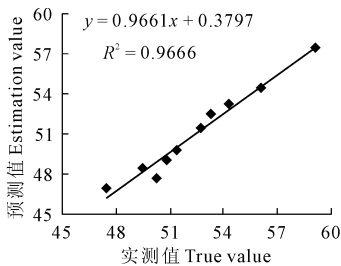


图 5 阴坡地小麦一阶微分模型检验

Fig.5 Result of one-order-derivative model of shady slope

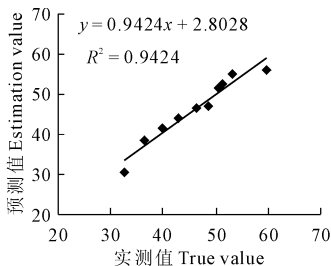


图 6 阳坡和双面坡地小麦归一化植被指数模型检验

Fig.6 Result of Normalized difference vegetation index model at sunny and double slope land

目前很多学者在作物生理生态指标监测方面已取得了重要成果,如王进等人研究表明不同灌水量、氮素营养条件及品种对棉花冠层光谱反射特性均有影响,且随着灌水量的增加,在近红外波段(700 ~ 800 nm),棉花冠层光谱反射率呈上升趋势,在盛蕾期和盛花期不同灌水量处理的光谱反射率差异明显^[27],唐延林等人利用比值植被指数和归一化植被指数有效地反演作物叶绿素含量^[28],吴长山等人研究表明高光谱数据与早播稻、晚播稻群体叶绿素含量有很好的相关性,并建立了遥感监测回归模型^[10],但这些研究主要针对可以灌溉的水浇地,到目前为止很少有人关注以天然降水为主的旱地,而我国旱地面积较大,小麦的种植区有两个,即依靠水灌溉的平原区和坡度较大、靠天然降水的山前丘陵区,就目前我国小麦供不应求的形势来看,发展旱地资源是解决我国粮食问题的途径之一,本文在前人研究的基础上,建立了拔节期水浇地与旱地春小麦叶绿素含量最佳估测模型,为利用高光谱遥感技术无损、快速地监测小麦生长状态,指导其农业生产,这对解决我国粮食安全问题将具有重大的意义。

4 结 论

利用拔节期水浇地和旱地春小麦冠层光谱和叶绿素含量的实测数据,构造了高光谱指数估测春小麦叶绿素含量的模型,通过综合分析,得出以下结论:

1) 水浇地和阴坡地春小麦叶绿素含量与原始

光谱的相关性在 723 nm 前后存在较大差异。723 nm 以前为负相关,723 nm 以后为正相关,相关系数水浇地最大为 0.807,而阴坡地最大可达 0.528。阳坡和双面坡地的相关系数在不同波段均呈正相关,且相关系数相对较小。

2) 不同地类春小麦拔节期叶绿素含量与各光谱变量均有很好的相关性。水浇地各光谱变量在可见光区域的相关系数均大于 0.9,近红外波段,在 0.93 以上。同时其光谱倒数之对数的相关系数最大;阴坡地各个波段相关系数均在 0.83 以上,并与一阶微分的相关系数最大;而阳坡和双面坡的相关系数均比水浇地和阴坡地低,但也达到了极显著水平,并与归一化植被指数的相关系数最高,为 0.94。

3) 各春小麦叶绿素含量的估测模型均通过了极显著水平检验 ($P < 0.01$),表明其具有很好的估测能力。但对水浇地春小麦而言,最佳估测模型是倒数之对数模型,并以 700 ~ 900 nm 波段的模型精度最高且稳定性好;阴坡地以一阶微分模型的决定系数最大, RMSE 最小;阳坡和双面坡地适合用归一化植被指数模型 ($RMSE < 0.98$),且以 400 ~ 900 nm 波段模型最优。以上各最佳模型的建立可为今后利用高光谱指数估测小麦营养状况及产量提供新线索,同时对我国粮食生产安全具有重要的现实意义。

参 考 文 献:

[1] 易秋香,黄敬峰,王秀珍,等.玉米粗脂肪含量高光谱估算模型初探[J].作物学报,2007,33(1):171-174.

[2] 疏小舟,尹 球,匡定波,等.内陆水体藻类叶绿素浓度与反射光谱特征的关系[J].遥感学报,2000,4(1):41-45.

[3] G Vane. Terrestrial imaging spectrometry: current status, future trends [J]. Remote Sensing of Environment, 1993,44(1):109-127.

[4] 方红亮,田庆久.高光谱遥感在植被监测中的研究综述[J].遥感技术与应用,1998,13(1):62-68.

[5] 陆兢槐.农业遥感的应用效益及在我国的发展战略[J].农业工程学报,1998,14(3):64-67.

[6] Madeira A C, Mendonca A, Ferreira M E, et al. Relationship between spectro radiometric and chlorophyll measurements in green beans [J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2000,31(6):631-643.

[7] 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):193-195.

[8] Chappelle E W, Kim M S, McMurtrey J E. Ration analysis of reflectance spectra (RARS): an algorithm for the remote estimation of the concentrations of chlorophyll A, chlorophyll B and the carotenoids in soybean leaves[J]. Remote Sensing of Environment, 1992,39:239-

247.

[9] 蒋金豹,陈云浩,黄文江,等.病害胁迫下冬小麦冠层叶片色素含量高光谱遥感估测研究[J].光谱学与光谱分析,2007,27(7):1364-1369.

[10] 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):228-231.

[11] 刘伟东,项月琴,郑兰芬,等.高光谱数据与水稻叶面积指数及叶绿素密度的相关分析[J].遥感学报,2000,4(4):279-283.

[12] 杨吉龙,李家存,杨德明.高光谱分辨率遥感在植被监测中的应用综述[J].世界地质,2001,20(3):307-312.

[13] 黄春燕,王登伟,曹连莆,等.棉花地上鲜生物量的高光谱估算模型研究[J].农业工程学报,2007,23(3):131-135.

[14] 王登伟,李少昆,田庆玖,等.棉花主要栽培生理参数的高光谱估测研究[J].中国农业科学,2003,36(7):770-774.

[15] Prased S T, Ronald D P. Hyperspectral vegetation indices and their relationships with agricultural crop characteristics[J]. Remote Sensing of Environment, 2000,71:158-182.

[16] Hansena P M, Schjoerring J K. Reflectance measurement of canopy biomass and nitrogen status in wheat crops using normalized difference vegetation indices and partial least squares regression [J]. Remote Sens Environ, 2003,86:542-553.

[17] Broge N H, Leblanc E. Comparing predicting power and stability of broadband and hyperspectral vegetation indices for estimation of green leaf area index and canopy chlorophyll density[J]. Remote Sensing of Environment, 2001,(76):156-172.

[18] 林 辉,唐代生.株洲主要地类地物波谱特征研究[J].中南林学院学报,2003,23(1):93-96.

[19] Zhou Q, Robson M. Automated rangeland vegetation cover and density estimation using ground digital images and a spectral - contextual classifier[J]. Remote Sensing of Environment, 2001,22:3457-3470.

[20] 何 挺,王 静.土壤氧化铁光谱特征研究[J].地理与地理信息科学,2006,3(2):30-34.

[21] 唐延林,王人潮,黄敬峰,等.不同供氮水平下水稻高光谱及其红边特征研究[J].遥感学报,2004,8(2):186-190.

[22] George Alan Blackburn. Quantifying chlorophylls and carotenoids at leaf and canopy scales: An evaluation of some hyperspectral approaches[J]. Remote Sen Environment, 1998,66:273-285.

[23] 乔红波,周益林,白由路,等.地面高光谱和低空遥感监测小麦白粉病初探[J].植物保护学报,2006,33(4):342-346.

[24] 浦瑞良,宫 鹏.高光谱遥感及其应用[M].北京:高等教育出版社,2000:115-120.

[25] Krishnan P, Alexander J D, Butler B J, et al. Reflectance technique for predicting soil organic matter[J]. Soil Sci. Soc, 1980,44:1282-1285.

[26] Massart D L, B G M Vandeginste, S M Deming, et al. Chemometrics: A Textbook[M]. Amsterdam: Elsevier, 1988:35-37.

[27] 王 进,李新建,白 丽,等.干旱区棉花冠层高光谱反射特征研究[J].中国农业气象,2012,33(1):114-118.

[28] 唐延林,王秀珍,王 珂.利用光谱法测定水稻生物物理参数及其与光谱变量的相关性研究[J].贵州大学学报(农业与生物科学版),2002,21(5):327-331.