

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.03.032

基于平稳小波变换的冬小麦覆盖度高光谱监测*

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与2011年度冬小麦生长季,通过大田小区试验,实测了冬小麦冠层的高光谱反射率与覆盖度。分析了不同覆盖度下的冬小麦冠层光谱特征以及不同生育期冬小麦冠层光谱反射率与覆盖度的相关性,建立了基于归一化植被指数(NDVI)与比值植被指数(RVI)、小波能量系数的不同生育期冬小麦覆盖度估算模型。结果表明:覆盖度越大,冬小麦光谱反射率在可见光波段越小,在近红外波段越大。在可见光波段,光谱反射率与覆盖度负相关,在“红边”处,由负相关变成正相关。在返青期、拔节期,NDVI估算效果好(R^2 为0.8359、0.8057);在抽穗期、灌浆期,RVI估算效果好(R^2 为0.8031、0.8294)。在返青期、拔节期、抽穗期、灌浆期,以高频、低频小波能量系数为自变量的冬小麦覆盖度估算模型的 R^2 分别达到0.9112、0.8954、0.8802、0.9275。

关键词: 冬小麦 覆盖度 高光谱遥感 平稳小波变换 估算模型

中图分类号: S127 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)03-0173-08

Monitoring Winter Wheat Percentage Vegetation Cover Based on Stationary Wavelet Transformation Derived from Hyperspectral Reflectance

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

By field trials, the canopy hyperspectral reflectance and percentage vegetation cover (PVC) for winter wheat during 2010 and 2011 growth periods were measured. The canopy spectral characteristic of different PVC and the relationship between canopy reflectance and PVC were analyzed in different growth periods. The winter wheat PVC estimation models based on normalized difference vegetation index (NDVI), ratio vegetation index (RVI), wavelet energy coefficients were established in different growth periods. The results showed that the spectral reflectance of winter wheat decreased in visible bands, however, increased in near infrared bands following the PVC increased. The spectral reflectance was negatively correlated with the PVC in visible bands, but the correlation coefficient turned to positive correlation near the red edge. The PVC estimation models based on NDVI was performed better at the greening stage and elongation stage with determination of coefficient (R^2) 0.8359 and 0.8057, respectively. However, the PVC estimation models based on RVI was better at the heading stage, filling stage with R^2 0.8031 and 0.8294, respectively. R^2 of the PVC estimation models based on high frequency energy coefficient and low frequency energy coefficient were 0.9112, 0.8954, 0.8802, and 0.9275 at the greening stage, elongation stage, heading stage and filling stage, respectively.

Key words Winter wheat, Percentage vegetation cover, Hyperspectral remote sensing, Stationary wavelet transform, Estimation model

收稿日期: 2010-11-08 修回日期: 2010-12-10

* 国家自然科学基金资助项目(51179162)和国家科技支撑计划资助项目(2011BAD29B01)

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: fuqiyao163@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

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、叶面积有密切的相关性,常用来指示作物生长动态变化。

目前,作物覆盖度的测算方法有目测估算法、统计测算法、数码照相法和遥感模型法4类^[3]。目测法具有较大不确定性^[4],地面统计调查方法费时费力^[3],数码照相法应用区域小,而遥感模型法可以估算大范围区域的作物覆盖度^[5],用其监测作物覆盖度变化成为必然的趋势。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,在作物覆盖度、生物量、叶面积指数等生理生态参数估算研究中优势明显^[6-9]。

高光谱遥感在提供目标物精细光谱信息的同时带来了大量的基础数据,如何使高光谱数据降维而又尽量保持地物原有的信息成为数据处理的关键^[10]。小波与传统信号分析工具(如傅里叶变换)相比,具有良好的自适应性,成为高光谱数据处理的有力工具^[11]。在植被生理生态参数的高光谱提取方面,小波变换在国内外已有应用^[12-15]。所采用的小波变换方法均为正交小波变换。正交小波变换具有无冗余的优点,但其采样环节使其缺失平移不变性,在信号分析时常出现伪 Gibbs 现象,影响分析结果。平稳小波变换与正交小波变换对于信号分解重构原理基本一致,但由于去除了采样处理环节,具备平移不变性,使其在某些应用领域中独具优势。同时传统的基于高光谱的冬小麦覆盖度估算模型对不同生育期是否存在差异性则研究较少^[16-17]。基于此,本文着重分析基于光谱植被指数的不同生育期冬小麦覆盖度估算模型的差异性,同时探讨平稳小波变换在冬小麦覆盖度高光谱估算中的应用,以期促进高光谱分辨率遥感在冬小麦覆盖度动态监测中的应用。

1 材料与方 法

1.1 试验地概况

试验于2010年度与2011年度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1500 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)为: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)。小麦于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:轻度亏水处理(60 mm)、适宜供水处理(75 mm)、重度亏水处理(45 mm)。设置3个播种密度: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型)拍摄获得,为准确测量冬小麦覆盖度,同时保证所测覆盖度与光谱测量范围对应,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,保证整个铁圈在拍摄范围内。冬小麦覆盖度的求算在Photoshop软件中进行,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)对冬小麦冠层进行光谱测定,光谱仪波长为325~1075 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、无风或者风力很小时于北京时间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 数据分析

1.4.1 光谱植被指数的选取与计算

归一化植被指数NDVI(normalized difference vegetation index)、比值植被指数RVI(ratio vegetation

index) 与植被覆盖度存在良好的相关性^[18]。同时为了所建立模型更好地应用到 TM 卫星中去, 利用所测高光谱数据模拟 TM3 与 TM4 波段, 即由高光谱数据 (630 ~ 690 nm) 和 (760 ~ 900 nm) 波段平均反射率分别代表 TM3 和 TM4 数据。

1.4.2 小波能量系数的提取

小波变换类似于傅里叶变换, 将一般的函数 (信号) 表示为小波基 (其中每个基函数对应各自不同的频率) 的线性叠加, 从而将对原来函数 (在时域或空域里) 的分析转换为对这个叠加权系数, 即小波变换的分析。小波分析的权系数是尺度和位移的二元函数。连续小波变换定义为

$$WT_f(ab) = (f, \psi_{a,b}) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(\lambda) \frac{1}{\sqrt{a}} \psi^* \left(\frac{\lambda - b}{a} \right) d\lambda \quad (1)$$

其中 $\psi_{a,b} = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi \left(\frac{\lambda - b}{a} \right)$ 是小波基, 它由某一小波函数 $\psi(\lambda)$ 通过平移 ($\lambda \rightarrow \lambda - b$) 和伸缩 ($\lambda \rightarrow \lambda/a$) 获得。

对于离散信号的处理, 小波基的尺度和位移都是离散化的。通常, 取 $a = 2, b = 1$, 即常见的正交小波变换。如图 1 所示, 正交小波变换的第 $j(j \geq 1)$ 尺度分解过程为

$$\begin{cases} c_{j+1} = D(Hc_j) \\ d_{j+1} = D(Gc_j) \end{cases} \quad (2)$$

式中 c_j, d_j ——第 j 尺度的近似部分和细节部分, 在尺度分解的初始阶段, c_0 通常用原始离散信号近似代替

H ——低通滤波器 G ——高通滤波器
 D ——下采样操作

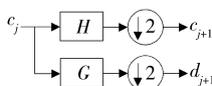


图 1 正交小波变换第 j 尺度分解

Fig.1 Decomposition of orthogonal wavelet transform at scale j

滤波器 H, G 为

$$\begin{cases} h_k = \langle \varphi_{1,0}(\lambda), \varphi_{0,k}(\lambda) \rangle \\ g_k = \langle \psi_{1,0}(\lambda), \varphi_{0,k}(\lambda) \rangle \end{cases} \quad (3)$$

其中 h 和 g 分别是 H 和 G 的时域响应函数。对于正交小波变换的所有尺度, H 和 G 保持不变。 $\varphi(\lambda)$ 和 $\psi(\lambda)$ 分别为尺度函数和小波函数, 满足二尺度差分方程

$$\begin{cases} \varphi \left(\frac{\lambda}{2^j} \right) = \sqrt{2} \sum_k h_k \varphi \left(\frac{\lambda}{2^{j-1}} - k \right) \\ \psi \left(\frac{\lambda}{2^j} \right) = \sqrt{2} \sum_k g_k \varphi \left(\frac{\lambda}{2^{j-1}} - k \right) \end{cases} \quad (4)$$

正交小波变换具有分解无冗余优点, 使其在数据压缩、传输等领域被广泛应用。然而, 由于正交小波变换在分解的每一尺度都要进行采样操作, 不满足平移不变性, 即某个信号的正交小波变换和该信号平移后的正交小波变换间不存在平移关系, 使其在某些信号处理领域, 如信号消噪领域受到限制。

平稳小波变换属于非正交小波变换, 弥补了正交小波变换的不足。其分解过程较为简单, 即在正交小波变换的基础上去除了采样操作。因此, 各尺度分解的结果和原始信号具有相同的长度, 这保证了平稳小波变换具备平移不变性。此外, 与正交小波变换不同的是, 每一尺度的低通、高通滤波器通过上一尺度相应滤波器的上采样 (即补零插值) 获得。平稳小波变换的第 j 尺度分解过程如图 2 所示, 其中 H_j, G_j 分别通过 H_{j-1}, G_{j-1} 上采样求得, 且 $H_0 = H, G_0 = G$ 。

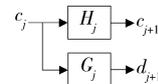


图 2 平稳小波变换第 j 尺度分解

Fig.2 Decomposition of stationary wavelet transform at scale j

与正交小波变换类似, 运用平稳小波变换进行 J 尺度分解可以得到 $J + 1$ 个频带: J 个高频频带与 1 个低频频带。 J 个高频频带中的主频随 j 的增大逐渐减小, 且在最底层的低频频带, 即第 $J + 1$ 频带进一步减小至最小值, 如图 3 中的高频频带 d_1, d_2, d_3 与低频频带 c_3 。这些不同部分包含了信号不同频带的信息, 由其得到的统计参数能够有效地反映信号在频域的能量分布。常用的统计参数如小波能量系数

$$F_j = \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K W_{j,k}^2} \quad (1 \leq j \leq J + 1) \quad (5)$$

式中 F_j ——第 j 尺度的小波能量系数

J ——分解尺度个数

K ——第 j 层分解的系数个数

当 $1 \leq j \leq J$ 时, $W_{j,k}$ 即第 j 尺度高频部分的第 k 个系数; $j = J + 1$ 时 $W_{j,k}$ 即低频部分的第 k 个系数。

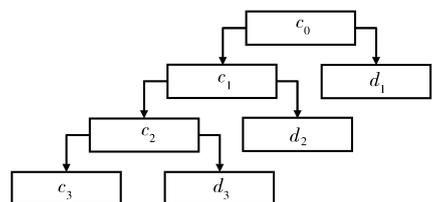


图 3 平稳小波变换 J 尺度分解 ($J = 3$)

Fig.3 J -scale decomposition of stationary wavelet transform ($J = 3$)

小波可分为不同族类, 各族类所包括的小波各

具特色。为综合考察各小波在高光谱数据反演中所表现的性能,本文考察了大多数常用小波,共51个,涵盖5个族类: Daubechies族、Bior族、Rbio族、Symlets族与Coif族。在各族类中按小波支撑集的长度依次选择了若干具有代表性的小波,如Daubechies族中依次选择了db1、db2、db3、db5等小波。本文试验基于Matlab平台实现,所采用的平稳小波函数为

$$C_{\text{SWT}} = \text{swt}(X, J, \text{'wname'}) \quad (6)$$

式中 X ——输入光谱数据

C_{SWT} ——输出小波系数矩阵,其中包括 J 层高频分量和1层低频分量

wname——所采用的小波名称

2 结果与分析

2.1 不同覆盖度下冬小麦光谱特征

作物冠层反射光谱是作物、土壤、大气、水分等多个因子综合形成的,其反射率受作物本身、田间杂草、植被覆盖度、作物水分、土壤状况和大气等多个因素的影响。图4为不同覆盖度下的冬小麦冠层原始光谱特征。由图4可以看出,当覆盖度很小时(11.7%),冬小麦光谱特征不明显,为土壤背景光谱特征。随着覆盖度的增加(34.2%),冬小麦光谱特征开始显性,植被光谱显著特征——红边已经明显出现。当覆盖度达到一定程度时(51.7%、72.4%、87.9%),冬小麦光谱特征曲线呈现“大同小异”的现象,即反射曲线总的趋势大体保持一致,在局部波段区域差异较大。相同点,其光谱曲线具有一般健康绿色植被光谱的“峰”和“谷”特征,在可见光区域(400~700 nm)植物叶片的反射和透射都很低,存在2个“吸收谷”和1个“反射峰”,即450 nm的蓝光、650 nm的红光和550 nm的绿光。“吸收谷”是色素对蓝光和红光的强吸收造成的,而“反射峰”则是由绿光的弱反射造成的,所以植物通常呈暗绿色。在680~740 nm波段,冬小麦光谱反射率急剧上升形成植被光谱最重要的红边特征。这是因为叶肉内的海绵组织结构内有很大反射表面的空腔,且细胞内的叶绿素呈水溶胶状态,具有强烈的红外反射。不同之处是覆盖度越大,光谱曲线反射率在可见光波段越低,在近红外波段越高,2个“吸收谷”也越深。

2.2 冬小麦原始光谱反射率与覆盖度的相关分析

冬小麦在不同的生长阶段具有不同的生态特征,其对应的光谱特征也会产生差异,且不同生长阶段的覆盖度也会发生变化。基于覆盖度与冬小麦原始光谱反射率的相关性在不同生长阶段是否存在差

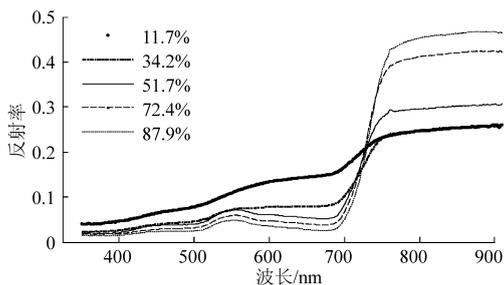


图4 不同植被覆盖度下的冬小麦原始光谱

Fig. 4 Winter wheat canopy spectral reflectance in different percentage vegetation covers

异,分别分析了2010年冬小麦返青期、拔节期、抽穗期、灌浆期、成熟期原始光谱反射率与覆盖度的相关性(返青期、拔节期、抽穗期、灌浆期、成熟期样本个数分别为104、101、100、98、102),如图5所示。通过对比5个时期原始光谱反射率与覆盖度的相关系数变化图可以看出,返青期、拔节期、抽穗期、灌浆期原始光谱反射率与覆盖度的相关系数变化类似。在可见光波段,光谱反射率与覆盖度呈负相关;相关系数在“绿峰”处出现减少再增大的变化;在“红边”处,由负相关变成正相关,在“红边”肩部达到最大值。相比前4个时期,成熟期光谱反射率与覆盖度的相关性不显著,达不到显著性检验水平。之所以出现这种现象,可能是因为随着冬小麦的成熟,叶绿素分解,叶片变黄,此时的冬小麦光谱信息已经不明显。这也说明在利用光谱信息估算冬小麦覆盖度时不能使用成熟期冬小麦光谱数据。

2.3 植被指数与冬小麦覆盖度的回归分析

从图5可知,单波段反射率与冬小麦覆盖度的相关性在不同波段、不同生育期存在差异。而植被指数主要反映植被在可见光、近红外波段反射与土壤背景之间差异的指标,有效地综合各有关的光谱信号,增强植被信息。同时由于植被指数受植被本身、环境等因素的影响,具有明显的地域性和时效性,因此利用2010年冬小麦数据分别建立了基于NDVI、RVI冬小麦返青期、拔节期、抽穗期、灌浆期

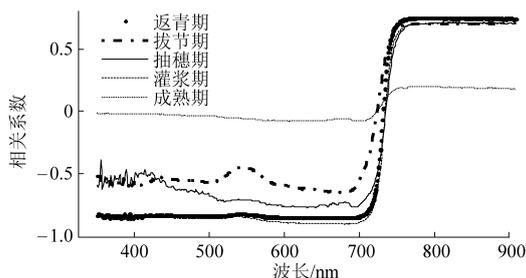


图5 各个生育期冬小麦覆盖度与冠层原始光谱的相关分析结果

Fig. 5 Correlation between canopy reflectance spectrum and percentage vegetation cover at different growth stages

的覆盖度估算模型(表 1),同时利用 2011 年冬小麦返青期、拔节期、抽穗期、灌浆期所测的数据对估算模型进行了检验(表 2)。由表 1 可知,归一化植被指数 NDVI 与冬小麦返青期、拔节期、抽穗期、灌浆期覆盖度的最佳拟合方程均为一元线性回归方程,一元线性回归方程决定系数 R^2 分别为 0.835 9、0.805 7、0.736 7、0.727 5,回归方程决定系数随着生育期的推移,有变小的趋势;比值植被指数 RVI 与冬小麦返青期、拔节期覆盖度的最佳拟合方程分别为对数、乘幂方程,方程决定系数分别为 0.699 3、0.750 1,RVI 与抽穗期、灌浆期覆盖度的最佳拟合方程为一元线性回归方程,方程决定系数分别为 0.803 1、0.829 4,回归方程决定系数随着生育期的

推移,有变大的趋势。这与前人的研究结果一致^[18-19]。由表 2 可知,在返青期与拔节期,基于 NDVI 回归模型预测效果好,模型预测值与实测值之间的线性方程的决定系数 R^2 分别为 0.784 8、0.767 6,预测值与实测值的总均方根误差(RMSE)分别为 0.057 7、0.059 9;在抽穗期与灌浆期,基于 RVI 回归模型反演效果好,决定系数 R^2 分别为 0.753 2、0.786 2,RMSE 分别为 0.061 2、0.057 2。综上所述,运用 NDVI、RVI 植被指数反演冬小麦覆盖度时在不同的生育期应用不同的植被指数。在返青期和拔节期,使用 NDVI 植被指数反演效果好,在抽穗期、灌浆期,使用 RVI 植被指数反演效果好。

表 1 基于植被指数 NDVI、RVI 冬小麦不同生育期覆盖度的估算模型

Tab. 1 Estimated models of winter wheat percentage vegetation cover at different growth stages based on vegetation index NDVI and RVI

生育期	植被指数	最佳回归方程	决定系数 R^2	样本数 n
返青期	NDVI	$y = 0.723 0x + 0.046 3$	0.835 9	104
	RVI	$y = 0.173 4\ln x + 0.226 6$	0.699 3	
拔节期	NDVI	$y = 2.028 9x - 1.052 6$	0.805 7	101
	RVI	$y = 0.289 8x^{0.316 5}$	0.750 1	
抽穗期	NDVI	$y = 3.481 4x - 2.306 6$	0.736 7	100
	RVI	$y = 0.026 5x + 0.292 5$	0.803 1	
灌浆期	NDVI	$y = 1.131 8x - 0.150 1$	0.727 5	98
	RVI	$y = 0.023 1x + 0.506 4$	0.829 4	

表 2 基于植被指数 NDVI、RVI 冬小麦不同生育期覆盖度估算模型的预测

Tab. 2 Predictability of the estimated models of winter wheat percentage vegetation cover at different growth stages based on vegetation index NDVI and RVI

生育期	植被指数	预测值与实测值回归方程	决定系数 R^2	均方根误差	样本数 n
返青期	NDVI	$y = 0.686 6x + 0.210 0$	0.784 8	0.057 7	81
	RVI	$y = 0.507 9x + 0.275 0$	0.647 7	0.079 4	
拔节期	NDVI	$y = 0.986 9x + 0.037 7$	0.767 6	0.059 9	80
	RVI	$y = 0.797 9x + 0.150 0$	0.719 0	0.071 7	
抽穗期	NDVI	$y = 0.850 8x + 0.102 6$	0.679 3	0.074 4	78
	RVI	$y = 0.458 4x + 0.351 3$	0.753 2	0.061 2	
灌浆期	NDVI	$y = 0.554 8x + 0.375 6$	0.653 9	0.081 5	76
	RVI	$y = 0.536 5x + 0.374 6$	0.786 2	0.057 2	

2.4 小波能量系数与冬小麦覆盖度的回归分析

首先对冬小麦返青期、拔节期、抽穗期、灌浆期的光谱数据按式(6)进行小波分解,并根据式(5)计算了每个采样光谱数据的小波能量系数。其中,2010 年冬小麦光谱、覆盖度数据用于建模,2011 年光谱、覆盖度数据用于模型检验。当分解尺度为 1 时,产生 1 个高频能量系数与 1 个低频能量系数。表 3 为分解尺度为 1 时冬小麦不同生育期冠层反射

率小波能量系数与覆盖度之间的一元、多元线性回归方程。同时进一步考察了 51 小波分解函数获得的最佳反演效果,以估算模型决定系数 R^2 作为标准挑选出各个时期估算效果最好的小波函数(表 3)。由表 3 可知,估算模型的决定系数较高,基于高频小波能量系数的冬小麦覆盖度一元线性回归模型以及以高频、低频作为自变量的冬小麦覆盖度二元线性回归模型的决定系数 R^2 ,都要高于同生育期最佳植

被指数估算模型决定系数 R^2 。

为了验证模型的估算效果,应用2011年光谱、覆盖度数据对表3中各个时期覆盖度估算模型进行了检验(表4)。由表4知,预测值与实测值回归方程的决定系数 R^2 略低于建模方程决定系数,预测值与实测值均方根误差较小,反演模型是稳定的,能够

满足覆盖度预测需要。同时通过对比表2中各生育期冬小麦最佳植被指数覆盖度估算模型的精度,各生育期高频小波能量系数的冬小麦覆盖度估算模型以及以高频、低频小波能量系数为自变量的冬小麦覆盖度估算模型的预测精度,都要优于冬小麦最佳植被指数覆盖度估算模型。

表3 基于小波能量系数的冬小麦不同时期覆盖度估算模型

Tab.3 Estimated models of winter wheat percentage vegetation cover at different growth stages based on wavelet energy coefficients

生育期	小波名称与能量系数	预测模型	决定系数 R^2	样本数 n
返青期	Bior3.9, 高频	$y = 128.4900x - 0.1827$	0.8433	104
	Bior3.9, 低频	$y = 4.1986x - 0.3767$	0.7586	
	Bior3.9, 高频和低频	$y = 280.73x_1 - 5.2447x_2 + 0.0932$	0.9112	
拔节期	Rbio3.1, 高频	$y = 55.5980x + 0.2167$	0.8410	101
	Rbio3.1, 低频	$y = 1.7720x + 0.1271$	0.7501	
	Rbio3.1, 高频和低频	$y = 193.4038x_1 - 4.5962x_2 + 0.5013$	0.8954	
抽穗期	Bior3.9, 高频	$y = 112.4600x - 0.1400$	0.8599	100
	Bior3.9, 低频	$y = 3.2473x - 0.2517$	0.7144	
	Bior3.9, 高频和低频	$y = 292.2106x_1 - 5.9794x_2 + 0.1621$	0.8802	
灌浆期	Rbio3.9, 高频	$y = 37.8920x + 0.3510$	0.8480	98
	Rbio3.9, 低频	$y = 1.1459x + 0.3176$	0.7951	
	Rbio3.9, 高频和低频	$y = 93.7783x_1 - 1.4983x_2 + 0.3483$	0.9275	

表4 基于小波能量系数的冬小麦不同时期覆盖度估算模型的预测

Tab.4 Predictability of estimated models of winter wheat percentage vegetation cover at different growth stages based on wavelet energy coefficients

生育期	小波名称与能量系数	预测值与实测值回归方程	决定系数 R^2	均方根误差	样本数 n
返青期	Bior3.9, 高频	$y = 1.5599x - 0.1766$	0.7952	0.0567	81
	Bior3.9, 低频	$y = 1.4301x - 0.0532$	0.6694	0.0752	
	Bior3.9, 高频和低频	$y = 1.5408x - 0.2673$	0.8641	0.0475	
拔节期	Rbio3.1, 高频	$y = 0.3300x + 0.3248$	0.7914	0.0571	80
	Rbio3.1, 低频	$y = 0.3477x + 0.3328$	0.6995	0.0729	
	Rbio3.1, 高频和低频	$y = 0.3273x + 0.3729$	0.8514	0.0433	
抽穗期	Bior3.9, 高频	$y = 0.8023x + 0.0680$	0.7978	0.0560	78
	Bior3.9, 低频	$y = 0.6479x + 0.1112$	0.6718	0.0748	
	Bior3.9, 高频和低频	$y = 0.8125x + 0.0436$	0.8402	0.0493	
灌浆期	Rbio3.9, 高频	$y = 0.3289x + 0.3703$	0.8023	0.0551	76
	Rbio3.9, 低频	$y = 0.2816x + 0.3951$	0.6917	0.0732	
	Rbio3.9, 高频和低频	$y = 0.3666x + 0.3532$	0.8898	0.0410	

3 结论

(1) 覆盖度小的情况下,冬小麦光谱特征不明显。随着覆盖的增大,光谱曲线反射率在可见光波段越低,在近红外波段越高。

(2) 不同生育期冬小麦光谱反射率与覆盖度的相关性具有差异性。

(3) 运用 NDVI、RVI 植被指数反演冬小麦覆盖

度时在不同的生育期应用不同的植被指数。在返青期和拔节期,使用 NDVI 植被指数反演效果好,在抽穗期、灌浆期,使用 RVI 植被指数反演效果好。

(4) 以平稳小波变换得到的小波能量为自变量的估算模型能够准确地预测冬小麦覆盖度的变化,各生育期高频小波能量系数的冬小麦覆盖度估算模型以及以高频、低频小波能量系数为自变量的冬小麦覆盖度估算模型的预测精度,都要优

于同生育期冬小麦最佳植被指数覆盖度估算模型。

(5)相比侧重于利用很少一部分光谱而抛弃大部分波段的光谱信息分析方法,拥有良好数学基础

的小波分析可以有效地利用光谱信息的整体结构特征,建立准确度更高的估算模型。本文的研究结果虽然是在实测冬小麦的基础上得出的,但是对于其他作物同样具有借鉴意义。

参 考 文 献

- 1 Purevdorj T, Tateishi R, Ishiyama T, et al. Relationship between percent vegetation cover and vegetation indices [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1998, 19(18): 3 519 ~ 3 535.
- 2 Gitelson A A, Kaufman Y J, Star K R, et al. Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 80(1): 76 ~ 87.
- 3 秦伟,朱清科,张学霞,等. 植被覆盖度及其测算方法研究进展[J]. *西北农林科技大学学报:自然科学版*,2006, 34(9):163 ~ 170.
Qin Wei, Zhu Qingke, Zhang Xuexia, et al. Review of vegetation covering and its measuring and calculating method [J]. *Journal of Northwest A & F University: Natural Science Edition*, 2006, 34(9): 163 ~ 170. (in Chinese)
- 4 章文波,符素华,刘宝元. 目估法测量植被覆盖度的精度分析[J]. *北京师范大学学报:自然科学版*,2001,37(3): 402 ~ 408.
Zhang Wenbo, Fu Suhua, Liu Baoyuan. Error assessment of visual estimation plant coverage[J]. *Journal of Beijing Normal University: Natural Science*, 2001, 37(3): 402 ~ 408. (in Chinese)
- 5 瞿瑛,刘素红,夏江周. 照相法测量冬小麦覆盖度的图像处理研究方法研究[J]. *干旱区地理*,2010,33(6):997 ~ 1 003.
Qu Ying, Liu Suhong, Xia Jiangzhou. Image processing methods to determine the fractional vegetation cover of winter wheat using digital camera [J]. *Arid Land Geography*, 2010, 33(6): 997 ~ 1 003. (in Chinese)
- 6 Liu Z Y, Huang J F, Wu X H, et al. Comparison of vegetation indices and red-edge parameters for estimating grassland cover from canopy reflectance data [J]. *Journal of Integrative Plant Bioogy*, 2007, 49(3): 299 ~ 306.
- 7 Blackburn G A. Quantifying chlorophylls and carotenoids from leaf to canopy scales: an evaluation of some hyper-spectral approaches [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1998, 66(3): 273 ~ 285.
- 8 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)
- 9 毛罕平,高洪燕,张晓东. 生菜叶片含水率光谱特征模型研究[J]. *农业机械学报*,2011,42(5):166 ~ 170.
Mao Hanping, Gao Hongyan, Zhang Xiaodong. Spectral characteristics model of lettuce leaves water content [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, 42(5): 166 ~ 170. (in Chinese)
- 10 宋开山,张柏,王宗明,等. 小波分析在大豆叶绿素含量高光谱反演中的应用[J]. *中国农学通报*,2006,22(9):101 ~ 108.
Song Kaishan, Zhang Bai, Wang Zongming, et al. Application of wavelet transformation in in-situ measured hyperspectral data for soybean LAI estimation [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2006, 22(9): 101 ~ 108. (in Chinese)
- 11 Bruce L, Li J. Wavelet for computationally efficient hyperspectral derivative analysis [J]. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, 2001, 39(7): 1 540 ~ 1 546.
- 12 Pu R L, Gong P. Wavelet transform applied to EO-1 hyperspectral data for forest LAI and crown closure mapping [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 91(2): 212 ~ 224.
- 13 宋开山,张柏,王宗明,等. 基于小波分析的大豆叶绿素 a 含量高光谱反演模型[J]. *植物生态学报*,2008,32(1): 152 ~ 160.
Song Kaishan, Zhang Bai, Wang Zongming, et al. Soybean chlorophyll a concentration estimation models based on wavelet-transformed, in situ collected, canopy hyperspectral data[J]. *Journal of Plant Ecology: Chinese Version*, 2008, 32(1): 152 ~ 160. (in Chinese)
- 14 方美红,刘湘南. 小波分析用于水稻叶片氮含量高光谱反演[J]. *应用科学学报*,2010,28(4):387 ~ 393.
Fang Meihong, Liu Xiangnan. Estimation of nitrogen content in rice leaves with hyperspectral reflectance measurements using wavelet analysis [J]. *Journal of Applied Sciences—Electronics and Information Engineering*, 2010, 28(4): 387 ~ 393. (in Chinese)
- 15 郭洋洋,张连蓬,王德高,等. 小波分析在植物叶绿素高光谱遥感反演中的应用[J]. *测绘通报*,2010(8):31 ~ 33.
Guo Yangyang, Zhang Lianpeng, Wang Degao, et al. Application of wavelet analysis for determining chlorophyll concentration in vegetation by hyperspectral reflectance [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2010(8): 31 ~ 33. (in Chinese)

Chinese)

- 16 李存军,赵春江,刘良云,等. 红外光谱指数反演大田冬小麦覆盖度及敏感性分析[J]. 农业工程学报,2004,20(5): 159 ~ 164.
Li Cunjun, Zhao Chunjiang, Liu Liangyun, et al. Retrieval winter wheat ground cover by short-wave infrared spectral indices in field and sensitivity analysis [J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(5): 159 ~ 164. (in Chinese)
- 17 卢艳丽,胡昊,自由路,等. 植被覆盖度对冬小麦冠层光谱的影响及量化估产研究[J]. 麦类作物学报,2010, 30(1):96 ~ 100.
Lu Yanli, Hu Hao, Bai Youlu, et al. Effects of vegetation coverage on the canopy spectral and yield quantitative estimation in wheat [J]. Journal of Triticeae Crops, 2010, 30(1): 96 ~ 100. (in Chinese)
- 18 田庆久,闵祥军. 植被指数研究进展[J]. 地球科学进展,1998,13(4):327 ~ 333.
Tian Qingjiu, Min Xiangjun. Advances in study on vegetation indices [J]. Advance in Earth Sciences, 1998, 13(4): 327 ~ 333. (in Chinese)
- 19 牛志春,倪绍祥. 青海湖环湖地区草地植被生物量遥感监测模型[J]. 地理学报,2003,58(5):695 ~ 702.
Niu Zhichun, Ni Shaoxiang. Study on models for monitoring of grassland biomass around Qinghai Lake assisted by remote sensing [J]. Acta Geographica, 2003, 58(5): 695 ~ 702. (in Chinese)

(上接第 167 页)

- 13 Smith J R, Shih-Fu Chang. Automated binary texture feature sets for image retrieval[C]//IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Atlanta, GA, USA, 1996, 4: 2 239 ~ 2 242.
- 14 范德耀,姚青,杨保军,等. 田间杂草识别与除草技术智能化研究进展[J]. 中国农业科学,2010, 43(9): 1 823 ~ 1 833.
Fan Deyao, Yao Qing, Yang Baojun, et al. Progress in research on intelligentize of field weed recognition and weed control technology [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(9): 1 823 ~ 1 833. (in Chinese)
- 15 薄华,马缚龙,焦李成. 图像纹理的灰度共生矩阵计算问题的分析[J]. 电子学报,2006, 34(1): 155 ~ 158,134.
Bo Hua, Ma Fulong, Jiao Licheng. Research on computation of GLCM of image texture [J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(1): 155 ~ 158,134. (in Chinese)
- 16 Suykens J A K, Vandewalle J. Least squares support vector machine classifiers [J]. Neural Processing Letters, 1999, 9(3): 293 ~ 300.
- 17 吴迪,何勇,冯水娟,等. 基于 LS-SVM 的红外光谱技术在奶粉脂肪含量无损检测中的应用[J]. 红外与毫米波学报,2008, 27(3):180 ~ 184.
Wu Di, He Yong, Feng Shuijuan, et al. Application of infrared spectra technique based on LS-Support vector machines to the non-destructive measurement of fat content in milk powder [J]. Journal of Infrared Millimeter Waves, 2008, 27(3): 180 ~ 184. (in Chinese)
- 18 郑水波,韩正之,唐厚君,等. 最小二乘支持向量机在汽车动态系统辨识中的应用[J]. 上海交通大学学报,2005, 39(3): 392 ~ 395.
Zheng Shuibao, Han Zhengzhi, Tang Houjun, et al. Application of LS-SVMs in the automobile dynamical system identification [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2005, 39(3): 392 ~ 395. (in Chinese)