植物营养与肥料学报 2014,20(1):64-74
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer doi: 10.11674/zwyf.2014.0108

基于 SPOT-5 遥感影像估算玉米成熟期地上生物量及其碳氮累积量

武 婕, 李玉环*, 李增兵, 董晓晓
(山东农业大学资源与环境学院, 山东泰安 271018)

摘要: 通过构建基于 SPOT-5 光谱参数的玉米成熟期地上生物量、碳氮累积量的遥感估算模型,为耕地生产力估测、农田生态保护和碳氮循环研究提供依据。利用皮尔逊相关分析法分析玉米成熟期地上生物量、碳氮累积量与同期 14 个预选光谱参数之间的相关性,筛选出适宜的光谱参数;通过回归分析,比较得出最优遥感估算模型。在构建的 14 个光谱参数中,土壤校正植被指数(SAVI)与玉米成熟期地上生物量和碳累积量均呈显著的正相关,相关系数分别达到 0.831 和 0.846,因此以 SAVI 为底数的幂函数模型估算生物量和碳累积量的拟合效果最好,决定系数(R^2)分别达到 0.698 和 0.722,在 0.01 水平下的 F 检验均呈显著性;与氮累积量相关性最强的是由近红外波段和绿波段构建的比值指数(R3/R1),相关系数达到 0.844;从而以 R3/R1 为自变量的线性模型对氮累积量拟合效果最佳,决定系数(R^2)达到 0.713,在 0.01 水平下的 F 检验呈显著性。因此,利用 SPOT-5 的土壤校正植被指数(SAVI)、近红外波段和绿波段的比值指数(R3/R1)构建的遥感模型来估算玉米成熟期生物量、碳氮累积量是可行的。

关键词: 遥感; 估算模型; SPOT-5; 玉米地上生物量; 碳氮累积量
中图分类号: TP79; S127 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-505X(2014)01-0064-11

Estimation of biomass and C and N accumulation at the maturity stage of corn using synchronous SPOT-5 spectral parameters

WU Jie, LI Yu-huan*, LI Zeng-bing, DONG Xiao-xiao
(*College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, Tai' an 271018, China*)

Abstract: In order to quickly estimate above-ground biomass, carbon and nitrogen accumulation at the maturity stages of corn, remote sensing estimation models were constructed using synchronous SPOT-5 spectral parameters. The correlations between the synchronous SPOT-5 in 14 kinds of selected spectral parameters and the aboveground biomass, carbon and nitrogen accumulation amount of maize at mature stage were calculated using Pearson correlation analysis, and the suitable spectral parameters were screened out. The regression analysis was used to fit suitable spectral parameters, and to compare and obtain the optimal estimation models of above-ground biomass weight, C and N accumulation. Among the 14 spectral parameters, there are significant positive correlations between soil-adjusted vegetation index (SAVI) and the above-ground biomass weight and carbon accumulation, and the correlation coefficients are 0.831 and 0.846, respectively. So the fitting effect to SAVI as regression equation, the power function models are the best of the estimations of biomass and carbon accumulation, and decision coefficients (R^2) are 0.698 and 0.722 and the F test shows a significant under the 0.01 level. The significant correlation with N accumulation amount is determined by the ratio index of near infrared band and green band (R3/R1), the correlation coefficient is 0.844, thus nitrogen accumulation fitting appears the best effect by R3/R1 for the linear model variable, the coefficient of determination (R^2) is 0.713 (significant at the 0.01 level). It is feasible that

收稿日期: 2013-03-22 **接收日期:** 2013-07-06
基金项目: 山东省自然科学基金项目支持(Y2008H03);山东省科技攻关项目支持(2009GG10006006)。
作者简介: 武婕(1988—),女,山东潍坊诸城人,硕士研究生,主要从事遥感监测与应用和植物营养生理研究。E-mail: yanfei8785@163.com
* 通信作者 E-mail: yuhuan@sdau.edu.cn, Tel: 13954882809

the remote sensing models constructed using soil-adjusted vegetation index (SAVI), ratio index (R3/R1) can best estimate corn mature biomass, C and N accumulation amount in this study.

Key words: remote sensing; estimation model; SPOT-5; above-ground biomass; C and N accumulation

生物量对光能利用、干物质产量形成具有重要影响,是表征作物长势状况的重要参数[1-2]。作物碳累积量是农田土壤碳库的一部分,不仅影响土壤质量和肥力,而且对全球碳循环和气候变化也有深远影响[3]。作物氮累积量是进行作物氮素营养诊断和籽粒生产力评估的重要指标[4]。随着遥感技术的发展,快速、准确、实时地估算农田作物的生物量、碳氮累积量成为可能,这将为提高作物产量、土壤碳氮储备以及碳氮循环等为目的的农田管理措施的改进提供依据[5]。

近年来,国内外应用遥感技术估算作物生物量、碳氮含量及其它营养元素含量的研究越来越多,尤其是植被指数和特征光谱的应用。例如,在生物量估算上,李卫国等[6]研究表明,TM 数字影像的比值植被指数(RVI)比归一化植被指数(NDVI)对冬小麦生物量的估算具有明显优势;而王备战等[7]则发现,SPOT-5 遥感影像的 NDVI 要比 RVI 对于地上生物量的估算略有优势。氮含量估算上,王来刚等[8]利用同期的 SPOT-5 和 HJ-1B 遥感影像研究表明,绿色归一化植被指数(GNDVI)是 SPOT-5 影像估算和监测冬小麦氮含量的最优模型,而 NDVI 是 HJ-1B 影像的最优模型;另外王磊等[9]利用地面光谱测量技术研究得出红边斜率、绿峰最大反射率、比值植被指数分别与玉米 6 叶期和 12 叶期氮含量存在较好的相关关系;MisteleB 等[10]研究指出构造不同的比值植被指数预测冬小麦氮含量是可行的;Zubillaga 等[11]研究认为 NDVI 可以很好地预测小麦的氮营养指数和氮吸收量;Osborne 等[12]研究发现红、绿光区域反射率可以很好地预测玉米植株氮含量。因此,遥感影像的光谱参数可以作为监测作物生物量和其他营养元素诊断的良好指标。但在生物量和碳氮含量监测方面,学者们对于最优光谱参数的选择一直存在不同的见解。究其原因可能受传感器不同、物候期不同、数据获取时间和地面采样时间的一致性等方面的影响。因此导致最后得到的最优光谱参数也并不相同。从逻辑上讲作物不同生育期的生物学和生物物理化学参数可以通过不同的光谱学参数来表征,这就是遥感技术的意义所在。

成熟期作物的遥感监测不仅关系到农田生态系统的碳氮循环,同时对作物的估产,耕地生产力的预测等也具有非常重要的意义。本文以成熟期玉米为对象,旨在通过分析基于 SPOT-5 遥感影像构建的光谱参数与玉米成熟期地上生物量、碳氮累积量之间的定量关系,筛选出估算成熟期玉米地上生物量、碳氮累积量的敏感光谱参数,拟构建并检验遥感估算模型,并制作遥感监测专题图,以期实现玉米成熟期地上生物量、碳氮累积量的空间分布量化的可视表达,为农田管理措施的改进和农田生态系统的平衡提供依据。

1　材料与方法

1.1　试验区概况及样品采集

兖州市谷村镇地处北纬 35°35′～35°39′,东经 116°47′～116°51′,位于兖州市北端,总面积 5810 hm^2,东临 104 国道。该区地形平坦,土壤类型以褐土为主,耕地 2801.4 hm^2,农田水利设施完善,农业机械化水平较高,农业经济以种植业为主,是山东小麦、玉米的高产区之一,粮食产量年均约 1.5×10^7 kg。

于 2009 年 9 月 5 日至 15 日,在谷村镇进行野外玉米植株和土壤样本的采集工作。由于研究区农田生态系统组成的生态景观单元较为单一,故采样点沿便利交通线随机设计,共布设 40 个样点,并利用手持 GPS 野外记录采样点的经纬度。玉米田地上生物量的实地调查采用样方法:每个采样点设 4 个样方,每个样方面积以 4 行玉米行距见方来记录样方的面积、植株棵数、棵间距和行间距,取样方内四角和中心 5 点的 5 棵玉米植株,截取地上部分(包括秸秆、果实),称其鲜重,计算 5 颗植株平均值作为单个样方的值,计算 4 个样方的平均值作为对应点位的玉米地上样本的实测值。

1.2　样品测定与计算方法

截取的植株样本于 105℃下杀青 1 h、80℃下烘干后称量,换算成等单位面积的地上干物质重量(kg/hm^2)。

植株碳含量采用油浴加热—$K_2Cr_2O_7$ 容量法进行测定;植株氮含量采用凯氏定氮法测定。

地上部碳累积量(kg/hm^2) = 样本碳含量 × 地上生物量(kg/hm^2)。

地上部氮累积量(kg/hm^2) = 样本氮含量 × 地上生物量(kg/hm^2)。

研究区 SPOT-5 影像摄于 2009 年 9 月 13 日 3 时。SPOT-5 传感器波段特征见表 1 。利用 SPOT-5 自带定标参数进行辐射定标,采用辐射传输模型 MODTRAN 的 FLAASH 模块进行大气校正[13],以实验区 1:50000 数字地形图采用多项式纠正法进行了几何精纠正,校正误差控制在 1 个像元之内。最后利用非监督分类中的自组织迭代法提取研究区农田玉米种植面积空间分布信息。

表 1 SPOT-5 传感器波段特征

Table 1 The bands feature of SPOT-5 sensor

波段 Spectral band	波段范围 Spectral range	波谱范围 Spectral domain (nm)	空间分辨率 Spatial resolution (m)	主要应用领域 Main application fields
B1	绿波段 Green band	490～610	10	探测健康植物绿色反射率,区分植被类型和评估作物长势 Detection of healthy plants green reflectance, distinction of vegetation types and assessment of crop growth
B2	红波段 Red band	610～680	10	测量植物绿色素吸收率,进行植物分类 Measurement of plant green pigment absorption rate and classification of plants
B3	近红外波段 Near-infrared band	780～890	10	测定生物量和作物长势,区分植被类型 Determination of biomass and crop growth and distinction of vegetation types
B4	短波红外波段 Short-wave infrared band	1580～1750	20	探测植物含水量及土壤湿度,区别云与雪 Detection of plant water content and soil moisture and distinction of cloud and snow

光谱参数法是遥感反演作物生长参数的基本方法之一,具有一定机理性,便于人们掌握和使用。目前使用的植被指数大约有 40 多种[14-16],本文根据 SPOT-5 的多光谱特性与研究区玉米生长的光学需求选取表 1 中 B1、B2 和 B3 三个波段参与分析,筛选和构建了 14 种常见用来估算作物生物量和碳氮累积量的光谱参数,具体算法见表 2,公式中波段反射率的具体数值利用 Arcgis 软件中的空间提取模块进行提取。

2 结果分析

2.1 玉米成熟期地上生物量、碳氮累积量与光谱参数的相关性分析

以光谱参数为自变量,玉米成熟期地上生物量、碳氮累积量为因变量利用 SPSS 软件进行双因素相关性分析(表 3)。从表 3 可以看出,以近红外和红波段构建的植被指数如 NDVI、SAVI、RDVI、MSAVI 等与成熟期作物生物量和碳累积量相关性明显高于以其他波段构建的植被指数,说明成熟期玉米生物量和碳累积量的敏感波段主要是在近红外和红波段。其中,相关性最好的为 SAVI 和 NDVI,相关系数分别高达 0.831(地上生物量)、0.846(碳累积量)。与土壤线性相关的植被指数 SAVI 消除了土壤背景信息的影响,与作物生物量的相关关系高于 NDVI,表明通过引入土壤线性参数可以提高植被指数反演作物生物量的精度[17]。氮累积量与近红外和绿波段构成的比值指数(R3/R1)和 GNDVI 相关性较好,其中与 R3/R1 的相关系数高达 0.844,其原因在于近红外和绿波段是氮素营养水平的敏感波段[18]。因此,近红外和绿波段的比值植被指数和绿色归一化植被指数(GNDVI)等光谱变量对作物植株含氮量有较好的反映。这也与前人关于玉米氮含量的预测应在红光和绿波段,但具体波段随生育期的不同而改变的说法相一致[12]。因此,分别筛选 NDVI 和 SAVI 构建玉米地上生物量和碳累积量,GNDVI 和 R3/R1 构建氮累积量回归分析模型。

表 2　SPOT-5 影像光谱参数

Table 2　Spectral parameters used for SPOT-5 imagery analysis

光谱参数 Spectral parameter	全称 Full name	公式 Formula	作者及出处 Author and source
RVI	比值植被指数 Ratio vegetation index	R3/R2	Jordan[19]
DVI	差值植被指数 Difference vegetation index	R3-R2	Richardson *et al.* [20]
NDVI	归一化差值植被指数 Normalized difference vegetation index	(R3-R2)/(R3+R2)	Rouse *et al.* [21]
SAVI	土壤校正植被指数 Soil-adjusted vegetation index	1.5(R3-R2)/(R3+R2+0.5)	Huete[22]
OSAVI	优化土壤校正植被指数 Optimized soil-adjusted vegetation index	(R3-R2)/(R3+R2+0.16)	Rondeaux *et al.* [23]
RDVI	重归一化植被指数 Renormalized vegetation index	$(R3-R2)/\sqrt{(R3+R2)}$	Roujean *et al.* [24]
GNDVI	绿色归一化植被指数 Green normalized vegetation index	(R3-R1)/(R3+R1)	Gitelson *et al.* [25]
MSAVI2	修饰土壤校正植被指数 Modified soil-adjusted vegetation index	$0.5[2R3+1-\sqrt{(2R3+1)^2-8(R3-R2)}]$	Qi *et al.* [26]
WDRVI	宽范围植被指数 Wide dynamic range vegetation index	(aR3-R2)/(aR3+R2) $0.1\leqslant a\leqslant 0.2$	Gitelson *et al.* [27]
VI	绿度植被指数 Green vegetation index	(R1-R2)/(R1+R2)	Wang *et al.* [7]
	其他植被指数 Other Vegetation Index	R3/R1	
		R3-R1	
		R1-R2	
		R1/R2	

注(Note): R1、R2、R3 分别为绿波段、红波段和近红外波段反射率 Mean the reflectances of green, red and near-infrared bands. a 为加权系数 Weight coefficient.

2.2　玉米成熟期地上生物量遥感估算模型

从研究区 40 个采样点数据中剔除 4 个极值,随机选取 20 个样点数据参与模型构建,剩余 16 个样点数据用于精度评价。

通过分析上文选取的最优光谱参量 SAVI、NDVI 与研究区实测成熟期玉米生物量散点关系,选用一元线性、指数函数、对数函数与幂函数四种模型进行线性和非线性回归分析(表 4)。结果表明: SAVI、NDVI 与玉米成熟期地上生物量之间均存在较好的相关性,决定系数(R^2)均在 0.65 以上。模型均能通过显著性水平 $\alpha=0.01$ 的 F 检验,模型模拟效果极为显著。决定系数(R^2)最高达 0.698,是以 SAVI 为底数的乘幂模型;其次是以 SAVI 为自变量的指数模型,决定系数(R^2)高达 0.697。其中以 SAVI 为自变量的模型决定系数($R^2>0.69$)均高于以 NDVI 为自变量的模型决定系数($0.66>R^2>0.65$)(表 4)。

为更加直观比较两种植被指数拟合生物量的效果,选择两种植被指数中拟合效果最好的模型做散点图(图 1),可以看出: 成熟期玉米地上生物量在 12839 ~ 17958 kg/hm^2,地上部生物量随 SAVI 和 NDVI 均呈现显著正相关的变化趋势,SAVI 构建的幂函数估算模型较 NDVI 构建的模型样点数据拟合效果好。可见相对于 NDVI 等光谱指数,SAVI 对成熟期玉米生物量变化更敏感,原因可能是在 SPOT-5 中高空间分辨率条件下 SAVI 比 NDVI 有更好地描述植被覆盖和土壤背景方面的优势。所以,建立基于 SPOT5-SAVI 的玉米成熟期地上生物量幂函数估算模型是可行的,模型公式为: 生物量 $=17723924\times SAVI^{6.923}$。

表3 玉米成熟期地上生物量、碳氮累积量与光谱参数间的相关性（2009，$n=20$）

Table 3 Correlation between biomass, N and C accumulations of corn at maturity stage and spectral parameters

光谱参数 Spectral parameter	地上生物量（kg/hm²） Above-ground biomass	碳累积量（kg/hm²） Carbon accumulation	氮累积量（kg/hm²） Nitrogen accumulation
RVI	0.165	0.190	-0.693**
DVI	0.361	0.368	0.825**
NDVI	0.807**	0.846**	0.364
SAVI	0.831**	0.846**	0.332
OSAVI	0.393	0.409	-0.531*
RDVI	0.804**	0.830**	0.165
GNDVI	0.170	0.121	0.826**
MSAVI2	0.787**	0.798**	0.583*
WDRVI(a=0.1)	0.163	0.185	-0.697**
WRDVI(a=0.2)	0.161	0.182	-0.700**
VI	-0.059	-0.023	-0.825**
R3/R1	0.158	0.131	0.844**
R3-R1	0.157	-0.052	0.612**
R1-R2	-0.063	-0.024	-0.825**
R1/R2	-0.068	-0.017	-0.801**

注(Note)：*表示显著性达0.05水平 Indicates significant at 0.05 level；**表示显著性达0.01水平 Indicates significant at 0.01 level.

表4 玉米成熟期地上生物量模型估算表现（2009，$n=20$）

Table 4 Performances of estimating above-ground biomass weight of corn at the maturity stage

光谱参数 Spectral parameter	模型类型 Model type	回归方程 Equation	R^2	F	$\alpha=0.01$
SAVI	线性 Line	$y=293709x-90653$	0.691	40.313	$P<0.01$
	指数 Exponential	$y=15.091e^{19.174x}$	0.697	40.333	$P<0.01$
	对数 Logarithmic	$y=106026\ln(x)+123411$	0.691	41.558	$P<0.01$
	乘幂 Power	$y=17723924x^{6.923}$	0.698	41.640	$P<0.01$
NDVI	线性 Line	$y=227972x-106152$	0.651	33.631	$P<0.01$
	指数 Exponential	$y=5.55e^{14.861x}$	0.656	33.401	$P<0.01$
	对数 Logarithmic	$y=121203\ln(x)+91627$	0.650	34.255	$P<0.01$
	乘幂 Power	$y=2208774x^{7.903}$	0.654	34.069	$P<0.01$

注(Note)：y代表生物量 Represents biomass weight；x代表SAVI或NDVI Represents SAVI or NDVI.

2.3 玉米成熟期地上碳累积量遥感估算模型

选取与碳累积量相关性最好的SAVI和NDVI与碳累积量进行线性和非线性拟合，建立玉米成熟期地上碳累积量遥感估算模型(表5)。可知SAVI、NDVI与玉米成熟期地上碳累积量之间的相关性较好，决定系数(R^2)均在0.71以上。各模型在$\alpha=0.01$水平下的F检验表明模型模拟效果极为显著。其中决定系数(R^2)最大的是以SAVI为底数的乘幂模型($R^2=0.722$)；其次是以SAVI为自变量的指数模型($R^2=0.721$)(表5)。从以SAVI和NDVI与碳

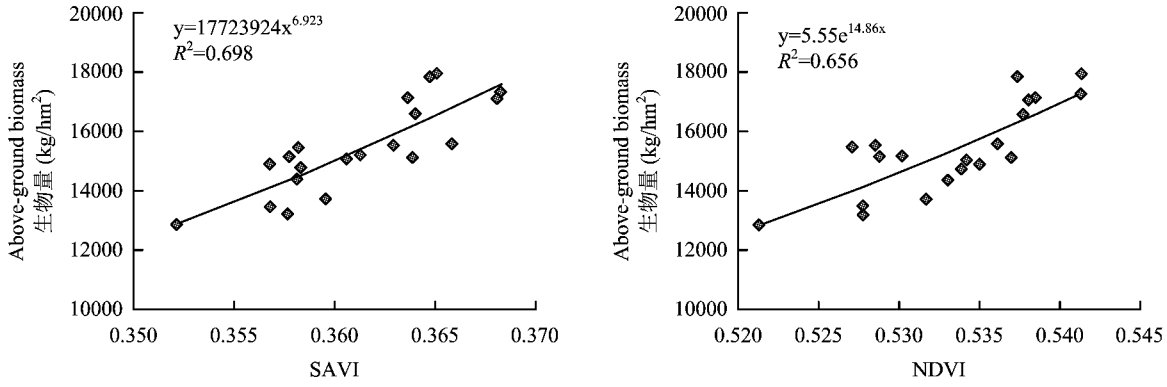

图 1　玉米成熟期地上生物量与 SAVI 和 NDVI 的关系

Fig. 1　Correlations between above-ground biomass weight and SAVI and NDVI of corn at the maturity stage

表 5　玉米成熟期地上碳累积量模型估算表现（2009，n =20）

Table 5　Performances of estimating above-ground C accumulation of corn at the maturity stage

光谱参数 Spectral parameter	模型类型 Model type	回归方程 Equation	R^2	F	α =0.01
SAVI	线性 Line	y =21.404x +6422.2	0.716	45.331	P <0.01
	指数 Exponential	$y=9.3197e^{18.178x}$	0.721	45.426	P <0.01
	对数 Logarithmic	y =43218ln(x) +50661	0.716	46.496	P <0.01
	乘幂 Power	$y=5302999x^{6.565}$	0.722	46.659	P <0.01
NDVI	线性 Line	y =95686x −44386	0.715	45.245	P <0.01
	指数 Exponential	$y=2.8887e^{14.507x}$	0.718	44.943	P <0.01
	对数 Logarithmic	y =50885ln(x) +38636	0.714	45.841	P <0.01
	乘幂 Power	$y=846709x^{7.717}$	0.717	45.617	P <0.01

注(Note)：y 代表碳累积量 Represents carbon accumulation；x 代表 SAVI 或 NDVI Represents SAVI or NDVI.

累积量建立的散点图(图 2)可以看出，成熟期玉米地上碳累积量范围在 5568 ～7837 kg/hm²，碳累积量与 SAVI 和 NDVI 均呈现显著正相关，SAVI 构建的幂函数估算模型较 NDVI 构建的指数模型拟合效果更好，可以发现，这与玉米生物量选取的估算模型较为一致，主要是由于玉米碳累积量是由生物量转化而来的，且两者的敏感波段均在红波段和近红外波段的原因。因此，对于成熟期玉米而言，可以采用 SPOT5 卫星的 SAVI 构建的幂函数模型来估算玉米成熟期的地上碳累积量，最优估算模型为：碳累积量 =5302999 * $SAVI^{6.565}$。

2.4　玉米成熟期地上氮累积量遥感估算模型

选取 GNDVI 和 R3/R1 分别与氮累积量进行回归分析并作散点图(图 3)，依此建立玉米成熟期地上氮累积量遥感估算模型(表 6)。结果表明，GNDVI 和 R3/R1 均能很好地估算氮累积量，回归方程的决定系数(R^2)均高于 0.63，各模型也均通过在 α =0.01 水平下的 F 检验。其中，利用 R3/R1 为变量建立的线性方程估算模型拟合效果最好，决定系数(R^2)高达 0.713。从图 3 可以看出，谷村镇成熟期玉米氮累积量范围在 258.370 kg/hm² ～300.188 kg/hm²，R3/R1 构建的线性模型较 GNDVI 构建的线性模型样点数据拟合效果好，原因在于比值植被指数在植被覆盖浓密的情况下效果更好[28]。因此，我们选择近红外和绿波段构建的比值植被指数R3/R1为氮累积量估算的最优光谱参量，估算模型为：氮累积量 =152.02 × R3/R1 +15.497。

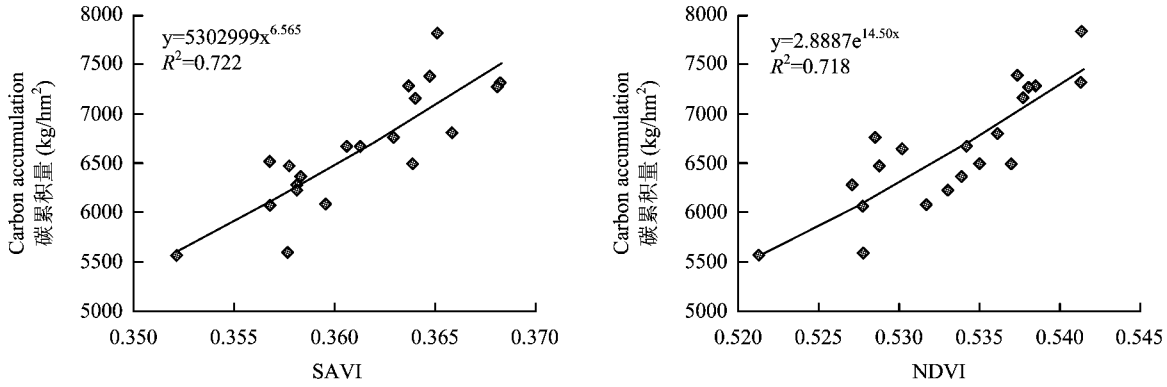

图2 玉米成熟期地上碳累积量与 SAVI 和 NDVI 的关系

Fig. 2 Correlations between above-ground C accumulation of corn at the maturity stage and GNDVI or R3/R1

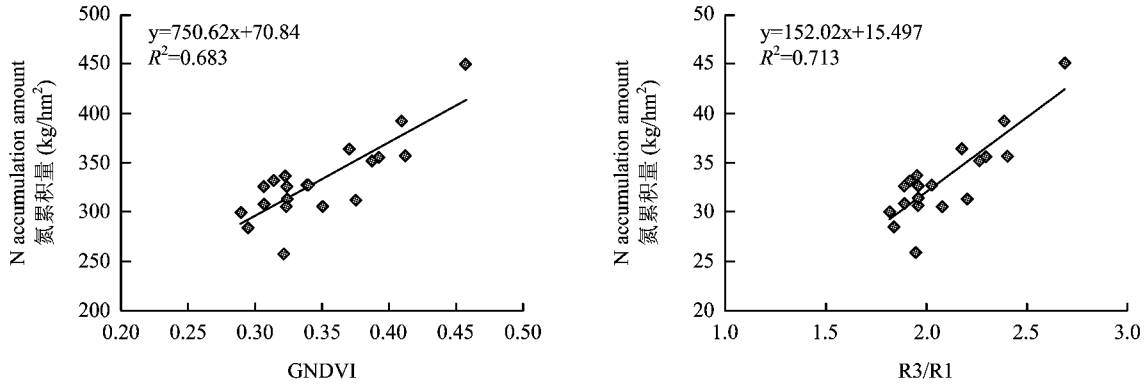

图3 成熟期玉米地上氮累积量与 GNDVI 和 R3/R1 的关系

Fig. 3 Correlations between the above-ground N accumulation of corn at the maturity stage and GNDVI or R3/R1

表6 玉米成熟期地上氮累积量模型估算表现（2009，$n=20$）

Table 6 Performances of estimating above-ground N accumulation of corn at the maturity stage

光谱参数 Spectral parameter	模型类型 Model type	回归方程 Equation	R^2	F	$\alpha=0.01$
R3/R1	线性 Line	$y=152.02x+15.497$	0.713	44.703	$P<0.01$
	指数 Exponential	$y=135.2e^{0.4282x}$	0.677	40.329	$P<0.01$
	对数 Logarithmic	$y=326.18\ln(x)+94.536$	0.691	37.739	$P<0.01$
	乘幂 Power	$y=168.49x^{0.9223}$	0.662	35.185	$P<0.01$
GNDVI	线性 Line	$y=750.62x+70.84$	0.683	38.694	$P<0.01$
	指数 Exponential	$y=157.41e^{2.1253x}$	0.655	33.993	$P<0.01$
	对数 Logarithmic	$y=265.29\ln(x)+614.09$	0.654	34.154	$P<0.01$
	乘幂 Power	$y=735.3x^{0.7542}$	0.632	30.966	$P<0.01$

注(Note)：y 代表碳累积量 Represents carbon accumulation；x 代表 SAVI 或 NDVI Represents SAVI or NDVI.

2.5 回归模型的验证

为检验所建估算模型的可靠性和普适性，需对模型准确性和精度进行检验。利用剩余 16 个实测样点的地上生物量和碳氮累积量样本数据进行模型

检验。以均方根误差(RMSE)、相对误差(RE)和决定系数(R^2)三个指标来综合考察模型的表现(表7),并作预测值与实测值1∶1关系图展示所选模型的可靠性和一致性(图4)。从表7和图4可以看出,预测值与实测值回归分析的决定系数较高,分别为0.771、0.649和0.673 。均方根误差较小,相对误差均在10%左右,这说明各估算模型均具有较高的精度,可以较好地用来估算成熟期玉米的地上生物量和碳氮累积量。图4表明,估算模型的预测值和实测值比较吻合,图中各点均分布在1∶1线周围,玉米地上生物量、碳氮累积量的实测值和预测值的分布均比较紧密,精度较高,总体精度可认为满足实验要求。

$$均方根差(RMSE) = \sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \hat{x}_i)^2/n} \quad (1)$$

$$RE(\%) = (x_i - \hat{x}_i)/x_i \times 100 \quad (2)$$

公式(1)、(2)中,x_i 是实测值,$\hat{x}_i$ 是预测值,n 为样本个数。

2.6　玉米成熟期地上生物量、碳氮累积量遥感填图

利用2009年9月13日SPOT-5影像数据和估算模型(表7)制作研究区玉米成熟期地上生物量、碳氮累积量遥感监测专题图,以分析三者的空间分异规律及其相互协同性。采用Arcmap软件中的自然断点法对上述三项指标分别进行分级处理,从遥感监测专题图(图5)可以看出,玉米成熟期地上生物量、碳氮累积量在空间上均呈现出南高北低的趋势,可能原因是该镇经济结构以农业生产为主,南部耕地围绕镇驻地分布,农业生产精耕细作,耕地生产力水平较高所致;其中生物量和碳累积量的空间分布格局基本一致,氮累积量的空间分布与前两者有明显差异,北部的氮累积量比中西部地区的值明显高一些。这种C/N比的空间分异可能是由玉米套种引起的。谷村镇估算的玉米生物量和碳累积量平均水平分别为17569 kg/hm² 和6320 kg/hm²,其中北部地上生物量和碳累积量较低,水平分别在

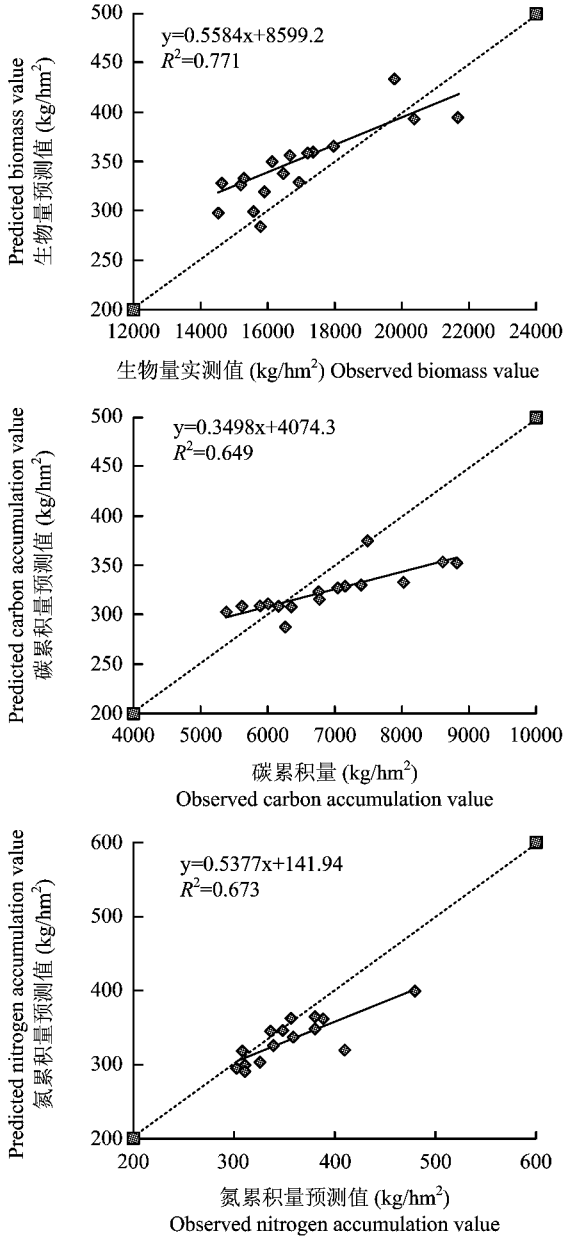

图4　预测值与实测值关系图

Fig.4　Correlations between measured values and predicted values

表7　模型及精度参数

Table 7　Model and the accuracy of parameters

	光谱参数 Spectral parameter	估算模型 Estimation model	均方根误差 RMSE	相对误差 RE(%)	决定系数 R^2
生物量 Biomass	SAVI	$y = 17723924x^{6.923}$	1414.226	8.85	0.771
碳累积量 C accum.	SAVI	$y = 5302999x^{6.565}$	708.285	8.46	0.649
氮累积量 N accum.	R3/R1	$y = 152.02x + 15.497$	30.828	5.13	0.673

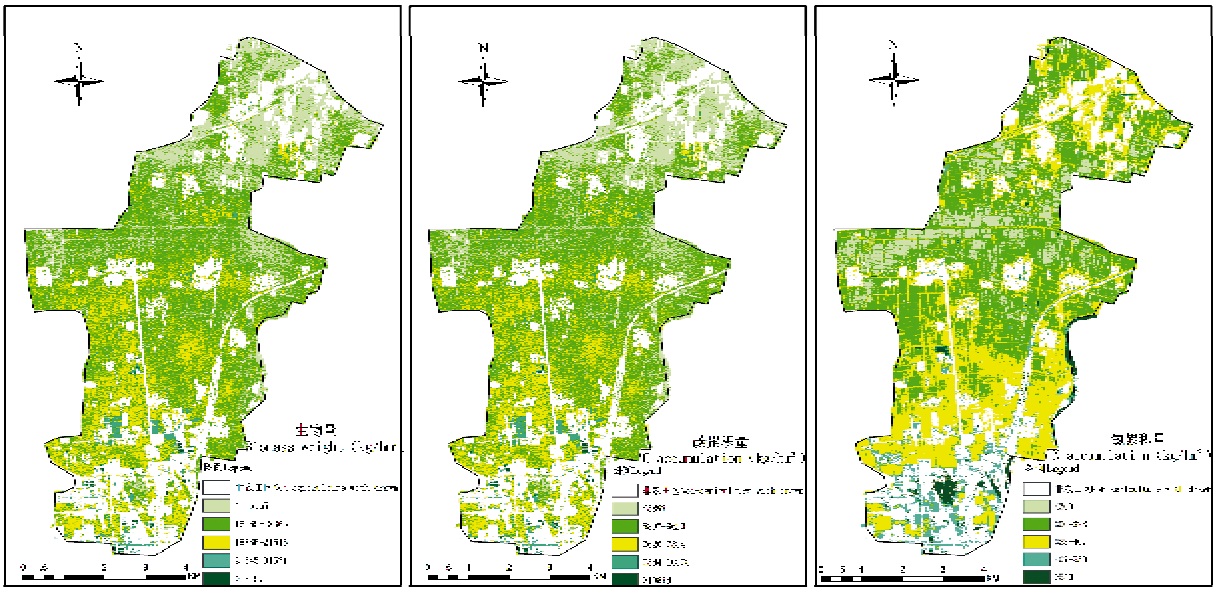

图5 玉米成熟期地上生物量和碳氮累积量遥感监测专题图

Fig. 5 Thematic maps for monitoring above-ground biomass and C and N accumulations of corn at the maturity stage

16165 kg/hm^2 和 5897 kg/hm^2 以下，中部和南部地区值均较高，生物量的水平在 16165 ～ 18365 kg/hm^2 之间，碳累积量的水平在 5897 ～ 7584 kg/hm^2；氮累积量的值相对较集中，平均水平为 341 kg/hm^2，其中氮累积量在 300 ～ 407 kg/hm^2 之间占 78%。总体看来，玉米成熟期地上生物量、碳氮累积量空间分布量化情况与实际调查基本一致，能够较理想地实现玉米成熟期地上生物量、碳氮累积量空间分布量化的可视表达（图5）。

3 结论与讨论

本试验针对玉米成熟期地上部生物量和碳氮累积量进行遥感估算和精度验证，在本试验条件下得出以下结论：

（1）在考察的 14 个光谱参数中，通过相关性分析筛选出玉米成熟期地上生物量、碳氮累积量的最佳光谱参数分别是土壤校正植被指数（SAVI）和比值指数（R3/R1），相关系数分别达到 0.831 和 0.846，均呈极显著的正相关。

（2）通过线性和非线性拟合构建玉米成熟期地上生物量、碳氮累积量的估算模型中，以 SAVI 为自变量构建的幂函数模型为估算成熟期玉米地上生物量和碳累积量的最优模型，以近红外波段和绿波段构建的比值植被指数 R3/R1 为自变量的线性函数模型是氮累积量估算的最优模型。

（3）利用均方根误差、相对误差和 1∶1 图对估算的结果进行精度评价和可靠行分析，决定性系数（R^2）均较高，均方根误差较小，结果满足精度要求，根据构建的最优模型制作了研究区玉米成熟期地上生物量、碳氮累积量的遥感监测专题图，实现了玉米成熟期地上生物量、碳氮累积量的空间分布量化的可视表达。

应当指出，本文虽然通过对成熟期的玉米分析，找到了对应此生育期玉米生物量和碳氮累积量遥感估算的最优模型，并具有较高的精度，但可能由于不同时空条件、不同遥感源下作物光谱反射特征的影响因子不同，所建立的作物遥感监测模型往往不适用于建模外的时空条件[29-30]。同时，研究区选取的最优光谱参数 SAVI 中的调节因子 L 取值是随叶面积指数变化的，本文计算时取 0.5，也可能会影响 SAVI 估算作物的精度，因此，今后将利用不同作物、不同区域和不同分辨率的遥感数据，以及结合作物叶面积指数选取不同的 L 值，对本研究结果做进一步的检验，以提高监测模型的精确度和可靠性。植物和土壤的 CN 含量和 C/N 比值可被用作评估土壤－植物－大气系统元素循环的潜在性控制指标[31]。因此，利用遥感技术分析研究植被生物量、植物和土壤的 CN 含量和 C/N 比值之间的内在联系正迫切成为农田生态评价的重要手段，本文研究内容和技术也会为后续研究奠定基础。

参 考 文 献：

[1] Delécolle R, Maas S J, Guérif M, Baret F. Remote sensing and crop production models: present trends [J]. ISPRS J. Photogramm. & Rem. Sens., 1992, 47(2-3): 145-161.

[2] Wright D L, Rasmussen V P, Ramsey R D *et al*. Canopy reflectance estimation of wheat nitrogen content for grain protein management[J]. GISci. & Rem. Sens., 2004, 41(4): 287-300.

[3] 杨景成，韩兴国，黄建辉，潘庆民. 土地利用变化对陆地生态系统碳贮量的影响[J]. 应用生态学报，2003，14(8)：1385-1390.
Yang J C, Han X G, Huang J H, Pan Q M. Effects of land use change on carbon storage in terrestrial ecosystem[J]. Chin. J. Appl. Ecol., 2003, 14(8): 1385-1390.

[4] 冯伟. 基于高光谱遥感的小麦氮素营养及生长指标监测研究[D]. 南京：南京农业大学博士学位论文，2007.
Fen W. Monitoring nitrogen status and growth characters with canopy hyperspectal remote sensing in wheat[D]. Nanjing: PhD dissertation of Nanjing Agricultural University, 2007.

[5] 田永超，朱艳，姚霞，等. 基于光谱信息的作物氮素营养无损监测技术[J]. 生态学杂志，2007，26(9)：1454-1463.
Tian Y C, Zhu Y, Yao X *et al*. Non-destructive monitoring of crop nitrogen nutrition based on spectral information [J]. Chin. J. Ecol., 2007, 26(9): 1454-1463.

[6] 李卫国，赵春江，王纪华，等. 基于卫星遥感的冬小麦拔节期长势监测[J]. 麦类作物学报，2007，27(3)：523-527.
Li W G, Zhao C J, Wang J H *et al*. Monitoring the growth condition of winter wheat in jointing stage based on Landsat TM image[J]. J. Triticeae Crops., 2007, 27(3): 523-527.

[7] 王备战，冯晓，温暖，等. 基于SPOT-5 影像的冬小麦拔节期生物量及氮累积量监测[J]. 中国农业科学，2012，45(15)：3049-3057.
Wang B Z, Feng X, Wen N *et al*. Monitoring biomass and N accumulation at jointing stage of winter wheat based on SPOT-5 images[J]. Sci. Agric. Sin., 2012, 45(15): 3049-3057.

[8] 王来刚，王备战，冯伟，等. SPOT-5 与 HJ 遥感影像用于冬小麦氮素监测的效果对比[J]. 麦类作物学报，2011，31(2)：331-336.
Wang L G, Wang B Z, Feng W *et al*. Comparative analysis of monitoring winter wheat nitrogen with SPOT-5 and HJ image[J]. J. Triticeae Crops, 2011, 31(2): 331-336.

[9] 王磊，白由路，卢艳丽，等. 基于光谱分析的玉米氮素营养诊断[J]. 植物营养与肥料学报，2011，17(2)：333-340.
Wang L, Bai Y L, Lu Y L *et al*. Nitrogen nutrition diagnosis for corn based on spectral analysis [J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2011, 17(2): 333-340.

[10] Mistele B, Gutser R, Schmidhalter U. Validation of field-scaled spectral measurements of the nitrogen status in winter wheat[A]. Proceedings of the 7th International Conference on Precision Agriculture and Other Precision Resources Management [C]. Minneapolis, MN, USA: 2004, 1187-1195.

[11] Zubillaga M, Urricariet S. Assessment of nitrogen status in wheat using aerial photography[J]. Commun. Soil Sci Plant Analys., 2005, 36(13-14): 1787-1798.

[12] Osborne S L, Schepers J S, Francis D D, Schlemmer M R. Detection of phosphorus and nitrogen deficiencies in corn using spectral radiance measurements[J]. Agron. J., 2002, 94(6): 1215-1221.

[13] 刘宇光，金明，冯钟葵，李晓辉. SPOT 数据反演地物辐射亮度和反射率的基础研究[J]. 地球信息科学，2005，7(2)：111-115.
Liu Y G, Jin M, Feng Z K, Li X H. Study on inversion of radiance and reflectivity with spot data [J]. Geo-infor. Sci., 2005, 7(2): 111-115.

[14] 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 Q J, Min X J. Advances in study on vegetation indices[J]. Adv. Earth Sci., 1998, 13(4): 327-333.

[15] 郭铌. 植被指数及其研究进展[J]. 干旱气象，2003，21(4)：71-75.
Guo N. Vegetation index and its advances[J]. Arid Meteotol., 2003, 21(4): 71-75.

[16] 杨飞，张柏，宋开山，等. 玉米和大豆光合有效辐射吸收比例与植被指数和叶面积指数的关系[J]. 作物学报，2008，34(11)：2046-2052.
Yang F, Zhang B, Song K S *et al*. Relationship between fraction of photosynthetically active radiation and vegetation indices, leaf area index of corn and soybean[J]. Acta Agron. Sin., 2008, 34(11): 2046-2052.

[17] 刘焕军，张柏，宋开山，等. 基于室内光谱反射率的土壤线影响因素分析[J]. 遥感学报，2008，12(1)：119-127.
Liu H J, Zhang B, Song K S *et al*. Soil line influence factors analysis based on laboratory soil hyperspectral reflectance[J]. J. Rem. Sens., 2008, 12(1): 119-127.

[18] 王人潮，陈铭臻，蒋亨显. 水稻遥感估产的农学机理研究——Ⅰ. 不同氮素水平的水稻光谱特征及其敏感波段的选择[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版)，1993，19(Sup.)：7-14.
Wang R C, Chen M Z, Jiang H X. Studies on agronomic mechanism of the rice yield estimation by remote sensing: Ⅰ The rice reflectance characteristics of different nitrogen levels and the selection of their sensitive bands[J]. J. Zhejiang Agric. Univ. (Agri. & Life Sci. Edn.), 1993, 19(Sup.): 7-14.

[19] Jordan C F. Derivation of leaf area index from quality of light on the forest floor[J]. Ecol., 1969, 50(4): 663-666.

[20] Richardson A J, Wiegand C L. Distinguishing vegetation from soil background information [J]. Photogramm. Engin. Rem. Sens., 1977, 43(12): 1541-1552.

[21] Rouse J W, Haas R H, Schell J A *et al*. Monitoring the vernal advancement of retrogradation of natural vegetation[R]. NASA/GSFC, Type III, Final Report, Greenbelt, MD, USA, 1974.

[22] Huete A R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI)[J]. Rem. Sens. Envir., 1988, 25(3): 295-309.

[23] Rondeaux G, Steven M, Baret F. Optimization of soil adjusted vegetation indices[J]. Rem. Sens. Envir., 1996, 55(2): 95-107.

[24] Roujean J L, Breon F M. Estimating PAR absorbed by vegetation from bidirectional reflectance measurements[J]. Rem. Sens. Envir., 1995, 51(3): 375-384.

[25] Gitelson A A, Kaufman Y J, Merzlyak M N. Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS - MODIS[J]. Rem. Sens. Envir., 1996, 58(3): 289-298.

[26] Qi J, Chehbouni A, Huete A R, Kerr Y H *et al*. A modified soil adjusted vegetation index[J]. Rem. Sens. Envir., 1994, 48(2): 119-126.

[27] Gitelson A A. Wide dynamic range vegetation index for remote quantification of biophysical characteristics of vegetation[J]. J. Plant Physiol., 2004, 161(2): 165-173.

[28] 王人潮, 陈铭臻, 蒋亨显. 水稻遥感估产的农学机理研究——Ⅱ. 农学参数与光谱变量的相关分析[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 1993, 19(Sup.): 15-22.
Wang R C, Chen M Z, Jiang H X. Studies on agronomic mechanism of the rice yield estimation by remote sensing: Ⅱ The correlation analysis of agronomic parameters and spectral variable [J]. J. Zhejiang Agric. Univ. (Agri. & Life Sci. Edn.), 1993, 19(Sup.): 15-22.

[29] 宋晓宇, 王纪华, 薛绪掌, 等. 利用航空成像光谱数据研究土壤供氮量及变量施肥对冬小麦长势影响[J]. 农业工程学报, 2004, 20(4): 45-49.
Song X Y, Wang J H, Xue X Z *et al*. Assessment of the influence of soil nitrogen supplies and variable fertilization on winter wheat growth condition using airborne hyperspectral image[J]. Trans. Chin. Soc. Agric. Eng., 2004, 20(4): 45-49.

[30] Grossman Y L, Ustin S L, Jacquemoud S *et al*. Critique of stepwise multiple linear regression for the extraction of leaf reflectance data[J]. Rem. Sens. Envir., 1996, 56(3): 182-193.

[31] 朴河春, 朱建明, 余登利, 冉景丞. 影响C4草本植物的C/N比值变化的因素与土壤有机C积累的关系[J]. 第四纪研究, 2004, 24(6): 621-629.
Piao H C, Zhu J M, Yu D L, Ran J C. The controlling factors of C/N ratios of C4-Grass and their relationships with soil organic carbon accumulation[J]. Guat. Sci., 2004, 24(6): 621-629.