

# 基于可见光光谱和BP人工神经网络的冬小麦生物量估算研究

崔日鲜<sup>1</sup>, 刘亚东<sup>1</sup>, 付金东<sup>2\*</sup>

1. 青岛农业大学农学与植物保护学院, 山东省旱作农业技术重点实验室, 山东 青岛 266109

2. 中国农业科学院作物科学研究所, 北京 100081

**摘要** 建立基于冬小麦冠层图像分析获取的冠层覆盖度和色彩指数的地上部生物量估算模型, 以促进作物冠层图像分析技术和BP神经网络技术在冬小麦长势无损监测中的应用。六个施氮水平的田间试验条件下, 在冬小麦拔节期, 分四次采集冬小麦冠层图像, 同步进行破坏性取样, 测定冬小麦地上部生物量; 分析了通过图像分析软件(利用微软 Visual Basic 软件开发)获取的冠层覆盖度和10种色彩指数与冬小麦地上部生物量的相关关系, 以逐步回归和BP神经网络方法建立了冬小麦地上部生物量估算模型。结果表明, 冬小麦地上部生物量与冠层覆盖度、饱和度和红光亮度值呈显著相关, 其中, 与冠层覆盖度间的相关性最强, 且除亮度外, 冠层覆盖度、色彩指数与地上部生物量间呈非线性相关。通过BP神经网络方法构建的模型相对于逐步回归模型, 显著提高了冬小麦地上部生物量估算精度, 均方根误差(RMSE)、相对均方根误差(RRMSE)更小, 决定系数( $R^2$ )更大。

**关键词** 冬小麦; 可见光; 色彩指数; 冠层覆盖度; 地上部生物量; BP神经网络

**中图分类号**: S126; S512.1

**文献标识码**: A

**DOI**: 10.3964/j.issn.1000-0593(2015)09-2596-06

## 引言

小麦是我国重要的粮食作物之一, 快速、准确地监测小麦长势信息, 对于小麦生长过程中实施精确管理及估测产量等具有重要意义。作物长势是作物生长的状况与趋势<sup>[1]</sup>, 一般用叶面积、叶色、株高、茎粗和生物量等来衡量其优劣<sup>[2,3]</sup>, 其中, 地上部生物量是表征作物生长状况的重要指标<sup>[1,3-5]</sup>, 其大小与作物群体的光能利用和产量密切相关<sup>[5]</sup>。获取作物地上部生物量的传统方法是通过破坏性田间植株取样和室内分析, 虽具有较好的数据可靠性, 但效率低, 且耗时间和资源<sup>[5-7]</sup>。地面、航空和卫星遥感通过遥感影像的红波段和近红外波段遥感信息计算的植被指数与地上部生物量、叶面积指数等长势指标的相关关系及基于植被指数及统计学方法所构建的线性、非线性模型来估算作物长势指标, 进而实现作物长势监测<sup>[1,5-8]</sup>。而地面遥感较航空、卫星遥感相比, 因更接近于地面而较少受到云层的干扰, 能获得分辨率更高的图像, 另外, 因其图像采集时间选择的随机性, 使实时采集田间图像成为可能<sup>[9]</sup>。

近年来数码相机作为可见光光谱地面遥感工具的一种新的选择, 因其经济、高效等特点, 在作物长势监测领域得到广泛的应用<sup>[10-17]</sup>。Behrens等<sup>[12]</sup>指出油菜冠层图像中提取的冠层覆盖度与地上部干重呈显著相关。Li等<sup>[16]</sup>得出冠层覆盖度与小麦叶面积指数、地上部干重和地上部氮素浓度呈显著相关的结论。Lee等<sup>[17]</sup>利用水稻冠层图像中提取的冠层覆盖度与地上部干重、地上部氮素含量和叶面积指数呈显著正相关, 并利用逐步回归方法拟合了基于冠层覆盖度及其他色彩指数的小麦长势估算模型。基于作物冠层覆盖度及图像色彩指数的作物长势估算模型大多采用多元线性回归或非线性回归方法进行拟合, 但当叶面积指数或生物量较大时, 其估算误差明显增大<sup>[16,17]</sup>。其原因为, 随着作物生育进程的推移, 地上部生物量、叶面积指数等的增大会引起叶片的重叠, 导致冠层覆盖度的增大速度明显小于地上部生物量等的增大速度, 即作物冠层覆盖度的变化不能规律地反映生物量、叶面积指数等的变化。这种现象与高光谱作物长势估算中的饱和现象相似, 即当作物叶面积指数、生物量等较大时, 一些植被指数, 如归一化指数等, 将趋于饱和水平, 从而影响估算精度<sup>[18,19]</sup>。人工神经网络、波段深度分析等方法

收稿日期: 2014-07-31, 修订日期: 2014-10-29

基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划子课题项目(2011BAD09B01), 农业部(948)项目(2012-Z5)和山东省旱地作物水分高效利用科研创新团队项目资助

作者简介: 崔日鲜, 1963年生, 青岛农业大学农学与植保学院博士

e-mail: chis@qau.edu.cn

\* 通讯联系人 e-mail: fujindong@caas.cn

在一定程度上提高生物量、叶面积指数等较大时的作物长势高光谱估算精度<sup>[18-20]</sup>，但有关利用人工神经网络来构建基于冠层图像分析的作物农学参数估算模型的研究报道较少。

本研究旨在利用人工神经网络和多元线性回归方法建立基于冬小麦冠层图像分析的地上部生物量估算模型，并比较两种模型的估算精度，为冬小麦及其他作物长势监测研究提供理论和技术上的借鉴。

## 1 实验部分

### 1.1 试验地概况

本试验于 2013 年 10 月—2014 年 5 月在青岛农业大学科技示范园试验站进行，该试验站位于胶州市胶莱镇，属暖温带季风气候。试验地土壤有机质含量  $15.2\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、碱解氮  $72.67\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、有效磷  $26.38\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、有效钾  $116.95\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

### 1.2 试验设计

供试品种为济麦 22；试验设 6 个施氮处理，处理水平分别为 0, 60, 120, 180, 240, 300  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  纯氮。磷肥、钾肥施用量分别为  $100\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\text{ P}_2\text{O}_5$ 、 $120\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\text{ K}_2\text{O}$ ，全部作为基肥一次性施入。小区面积为  $80\text{ m}^2$  ( $10\text{ m}\times 8\text{ m}$ )，基本苗  $3.5\times 10^6\cdot\text{hm}^{-2}$ ，行距 18 cm。试验采用随机区组设计，三次重复。其他管理按常规方法进行。

### 1.3 测定项目

于 2014 年 3 月 27 日、4 月 6 日、4 月 13 日和 4 月 20 日进行小麦冠层图像采集，之后进行取样。样本在  $105\text{ }^{\circ}\text{C}$  下杀青 30 min 后于  $72\text{ }^{\circ}\text{C}$  下烘干至恒重，称其重量，再计算单位面积的地上部生物量 ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ )。

### 1.4 小麦冠层图像采集及处理

小麦田间破坏性取样前，用数码相机(佳能 60D 相机，镜头 18~135 mm IS)拍摄小麦冠层图像，把数码相机固定在距小麦冠层顶部 1 m 处，与地面垂直进行拍摄。事先自制

$72.5\text{ cm}\times 45\text{ cm}$  的长方形方格，将其置于田间，与小麦冠层保持相同高度。操作时相机取景范围对准长方形方格进行拍摄，拍摄时间为 11:00—13:00。相机设置为程序自动曝光模式，采用多点自动对焦，ISO 设定为 400，图像分辨率设定为 450 万像素 ( $2\,592\times 1\,728$ )，图像以 RAW 格式存储；拍摄时，将 X-rite 白平衡卡置于长方形方格的左上角，与冬小麦冠层一同拍摄。利用相机附带软件 Digital photo professional 进行图像白平衡校正，后以 JPEG (joint photographic expert group) 格式保存。

数码相机拍摄的彩色图像提供每一个像素的红、绿、蓝波段的光谱信息<sup>[14]</sup>，各波段的光谱信息以亮度的方式存储在对应通道。数码图像的 RGB 各有 256 级亮度，分别用 0~255 的整数表示，RGB 三个通道各 256 级色彩总共能组合成约 1 678 万种色彩，其中 (0, 0, 0) 代表黑色，(255, 255, 255) 代表白色<sup>[21]</sup>。利用自制图像分析软件(冬小麦冠层图像分析系统，用微软 Visual Basic 编写)分割冬小麦图像(图 1)，并读取冬小麦图像每个像素点的红光值(R)、绿光值(G)、蓝光值(B)及计算冠层覆盖度(canopy cover, CC)<sup>[16,17]</sup>和冠层图像色彩指数。图像色彩指数包括红光标准化值( $r$ )、绿光标准化值( $g$ )、蓝光标准化值( $b$ )、归一化差值指数(normalized difference index, NDI)<sup>[22]</sup>、色调(Hue)、饱和度(SAT)和亮度(INT)<sup>[23]</sup>。冠层覆盖度及冬小麦图像色彩指数的计算如下所示

$$CC = \frac{\text{冬小麦图像像素数}}{\text{冠层图像总像素数}} \tag{1}$$

$$r = \frac{R}{R + G + B} \tag{2}$$

$$g = \frac{G}{R + G + B} \tag{3}$$

$$b = \frac{B}{R + G + B} \tag{4}$$

$$NDI = \frac{r - g}{r + g + 0.01} \tag{5}$$

$$Hue = \begin{cases} \arccos\left\{\frac{[(R-G) + (R-B)]/2}{[(R-G)^2 + (R-B)(G-B)]^{1/2}}\right\} & \text{if } B \leq G \\ 2\pi - \arccos\left\{\frac{[(R-G) + (R-B)]/2}{[(R-G)^2 + (R-B)(G-B)]^{1/2}}\right\} & \text{if } B > G \end{cases} \tag{6}$$

$$SAT = 1 - \frac{3}{(R + G + B)}[\min(R, G, B)] \tag{7}$$

$$INT = \frac{1}{3}(R + G + B) \tag{8}$$

### 1.5 数据分析方法

共 72 组冬小麦冠层覆盖度及图像色彩指数和其对应的地上部生物量数据中，估算生物量的逐步回归(自变量为冠层覆盖度及 R, G, B 等 10 种色彩指数)模型的学生残差大于  $\pm 2.0$  的一组数据作为异常值(outlier)被剔除，剩余的 71 组样本数据中，随机选取 50 组样本数据，用于冬小麦地上部生物量估算模型的构建，其余 21 组样本数据用于估算模型的验证。

利用决定系数( $R^2$ )、均方根误差(RMSE)、相对均方根误差(RRMSE)，对估算模型进行拟合优度的考察，利用相关系数、均方根误差(RMSE)和相对均方根误差(RRMSE)对估

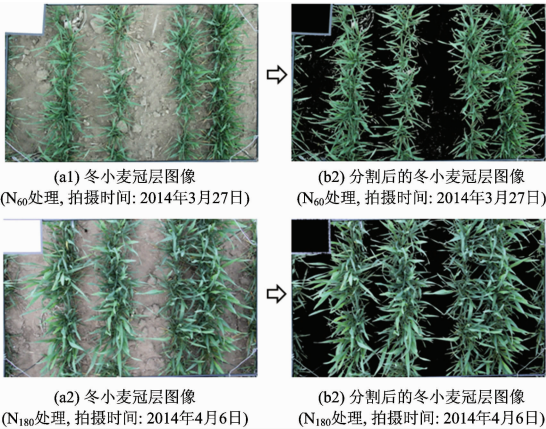


Fig. 1 The camera images of winter wheat canopy, and segmented winter wheat plant images

算模型进行检验。逐步回归模型的建立、验证采用 SAS 9.1 软件，BP 神经网络分析采用 MatLab R2012b 软件。

2 结果与讨论

2.1 冠层覆盖度、图像色彩指数与冬小麦地上部生物量的相关性分析

图 2 为冠层覆盖度、冠层图像色彩指数与冬小麦地上部生物量(*biomass*)的相关分析结果，由图 2 可知，冬小麦地上

部生物量与冠层覆盖度、蓝光值、红光标准化值和色调呈正相关，而与红光值等其他色彩指数呈负相关。冬小麦地上部生物量与冠层覆盖度、饱和度和红光值的相关性较强，均达到显著水平，其中，与冠层覆盖度和饱和度的相关性达到极显著水平，与红光值的相关性达到显著水平。相关分析结果表明，冠层覆盖度、红光值、饱和度等的变化在一定程度上反映了抽穗期以前冬小麦地上部生物量的变化，这也意味着基于冠层覆盖度及红光值、绿光值、蓝光值等冬小麦图像色彩指数的冬小麦地上部生物量估算具有一定的可行性。

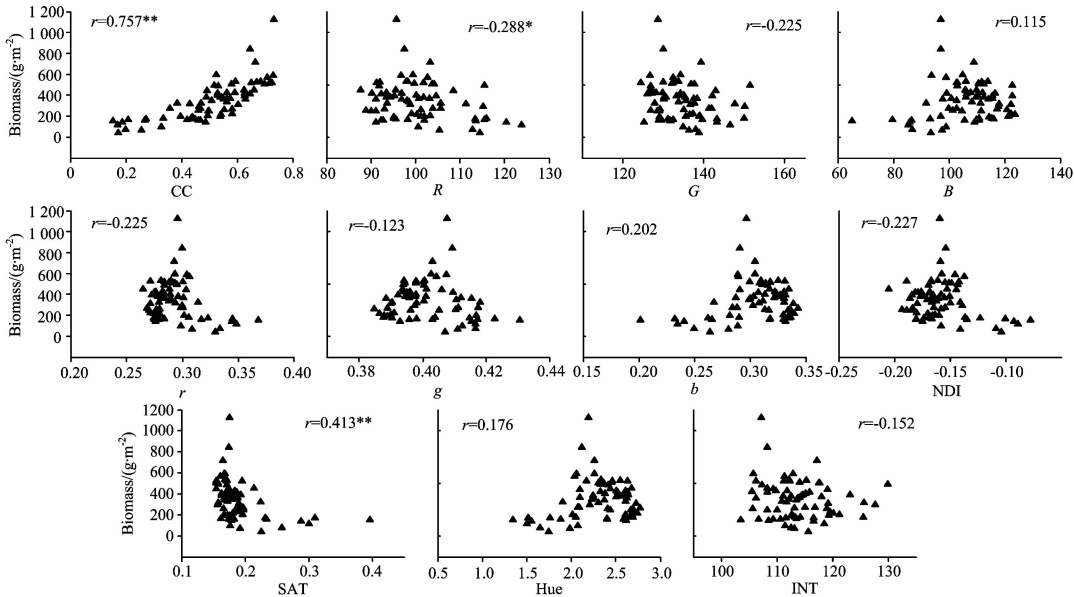


Fig. 2 Relationship between above ground biomass, and canopy cover and other color indices derived from digital camera image of winter wheat canopy

2.2 冬小麦地上部生物量估算模型的构建及验证

地上部生物量与冠层覆盖度及冠层图像色彩指数的相关分析结果表明，除亮度(*INT*)外，冬小麦地上部生物量与冠层覆盖度等均呈非线性相关，因此，首先对除亮度(*INT*)外的其他色彩指数及冠层覆盖度进行数据转换，之后以地上部生物量为因变量，以冠层覆盖度、红光值、绿光值、蓝光值等 10 种冠层图像色彩指数为自变量进行逐步回归分析。回归模型剔除或引入变量的显著性水平设定为 0.05。

BP 神经网络模型的结构通常包括输入层(input)、隐藏层(hidden layer)和输出层(output layer)，冬小麦冠层覆盖度和 10 种色彩指数作为输入层输入变量，经过多种组合的多次

网络测试调整，最终选择生物量估算效果最好的冠层覆盖度(*CC*)、绿光标准化值(*g*)、蓝光标准化值(*b*)和归一化差值指数(*NDI*)作为输入变量。隐藏层为 1 层，隐藏层的节点数，经过多次网络测试调整，确定为估算效果最佳的五个隐藏层节点。输出层为冬小麦地上部生物量。神经网络训练函数采用 trainlm 函数；隐藏层激活函数采用 tansig 函数；输出层采用 pureline 函数；神经网络激活函数的权重、阈值为默认值。待 BP 神经网络训练结束后，21 组数据中的冠层覆盖度和 3 种色彩指数(*CC*, *g*, *b* 和 *NDI*)作为输入矢量，利用 Sim 函数计算并输出冬小麦地上部生物量，最后输出神经网络的权重、偏差等 BP 神经网络模型参数。表 1 为

Table 1 ANN-BP model for estimating winter wheat above ground biomass using canopy color image analysis

输入、输出变量*	模型
输入变量： 冠层覆盖度( <i>CC</i> ) 绿光标准化值( <i>g</i> ) 蓝光标准华值( <i>b</i> ) 归一化差值指数( <i>NDI</i> )	$x_i = w_{1i}CC + w_{2i}g + w_{3i}b + w_{4i}NDI + b_i$ $y_i = \frac{2}{1 + \exp(2x_i)} - 1 \quad i = 1, 2, 3, 4, 5$
输出变量： 地上部生物量( <i>Biomass</i> )	$Biomass = -0.851y_1 + 1.159y_2 + 0.362y_3 + 1.138y_4 - 1.829y_5 + 0.174$

\* The values applied in the input and output layers of the artificial neural network are normalized by Mapminmax function and then the values of outputs are returned to original values of the above ground biomass by the denormalization process.

所构建的估算地上部生物量的 BP 神经网络模型，表 2 为 BP 神经网络模型的权重及偏差。

为验证所建立的两个冬小麦地上部生物量估算模型的预测精度，利用地上部生物量实测值与模型预测值的 1 : 1 关系图、实测值与预测值的一元线性回归方程的决定系数 ( $R^2$ )、均方根误差 (RMSE)、相对均方根误差 (RRMSE) 来评价两个估算模型的表现，其结果示于表 3 和图 3。

Table 3 The models for estimating above ground biomass using stepwise regression method and ANN-BP method and its validation				
生物量估算模型		$R^2$	RMSE	RRMSE/%
$\text{Biomass} = \exp(\exp(1.411 + \text{NDI})) \times CC^{2.189} \times b^{3.239}$	模型建立 ( $n=50$ )	0.760	98.674	27.360
	模型验证 ( $n=21$ )	0.784	106.755	32.656
BP 神经网络模型 (表 1、表 2)	模型建立 ( $n=50$ )	0.870	75.956	21.061
	模型验证 ( $n=21$ )	0.903	61.706	18.876

从表 3 中可以看出，BP 神经网络方法构建的估算模型的 决定系数、均方根误差等指标好于逐步回归方法构建的估算模型，表明 BP 神经网络模型的拟合效果明显好于逐步回归估算模型。两个估算模型的预测值与实测值的回归关系均达到极显著水平，其决定系数均大于 0.75。BP 神经网络方法构建的估算模型的 决定系数明显大于逐步回归模型，均方根误差、相对均方根误差也小于逐步回归模型。图 3 为模型预测值与实测值的对比结果，从图 3 可以看出，逐步回归估算模型的估算效果较差，当地上部生物量大于  $500 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$  时，散点分散程度明显增大。BP 神经网络估算模型估算精度较逐步回归模型相比有了明显的提高，散点基本分布在 1 : 1 线附近，除地上部生物量小于  $200 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$  的两个观测点之外，没有出现散点明显偏离 1 : 1 线的现象，基本分布在 1 : 1 线。

模型预测值与实测值的 1 : 1 关系图、验证模型的决定系数 ( $R^2$ ) 等的对比结果表明，BP 神经网络估算模型较逐步回归估算模型相比对抽穗前的冬小麦地上部生物量的估算有其明显的优势。

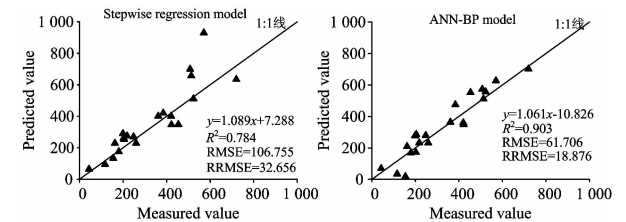


Fig. 3 Relationship between predicted winter wheat above ground biomass based on stepwise regression and ANN-BP methods and measured above ground biomass

References

[ 1 ] YANG Bang-jie, PEI Zhi-yuan(杨邦杰, 裴志远). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报),

Table 2 Weights and bias in table 1					
$i$	权重				偏差
	$w_{1i}$	$w_{2i}$	$w_{3i}$	$w_{4i}$	$b_i$
1	-0.281	1.120	1.590	-1.463	-1.353
2	0.157	-1.296	1.347	2.355	-3.774
3	-0.066	-3.354	1.523	2.550	-2.133
4	-0.605	0.900	-1.578	-1.399	1.475
5	-0.496	0.210	0.273	0.732	0.446

3 结 论

获取作物地上部生物量一般通过田间破坏性取样方法和遥感方法，田间破坏性取样方法虽具有较好的数据可靠性，但效率低、耗时间和资源。近年来，作物冠层图像分析技术，因其经济、高效等特点，在作物长势监测方面得到广泛应用<sup>[10-16]</sup>。本研究的相关分析结果表明，冬小麦地上部生物量与由冠层图像分析获取的冠层覆盖度(CC)、饱和度(SAT)和红光值(R)呈显著相关，其中冠层覆盖度与地上部生物量的相关性最强，这与 Li<sup>[16]</sup>、Lee<sup>[17]</sup>等的研究结果相一致。多数研究表明，作物冠层覆盖度与地上部生物量、叶面积指数等长势指标呈非线性相关<sup>[14, 16, 17]</sup>。鉴于这些结果，首先对样本数据进行数据转换后，利用逐步回归方法构建了地上部生物量估算模型。模型验证结果表明，当地上部生物量达到一定程度开始(约大于  $500 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ )，其估算误差明显增大，Behrens<sup>[12]</sup>，Li<sup>[16]</sup>和 Lee<sup>[17]</sup>等也报道过类似的研究结果。

BP 神经网络方法虽存在一些不足，如有足够多的样本(一般认为样本数超过 50)、实用性差等，但因其对多变量信息的综合能力及对非线性问题的拟合等方面所具有的有无可比拟的优势<sup>[20]</sup>，已被广泛应用于基于高光谱的叶面积指数、地上部生物量等的估算或反演研究领域。有关神经网络方法显著提高叶面积指数、生物量等的高光谱估算精度的研究报道较多<sup>[19, 20]</sup>。本研究利用 BP 神经网络方法所构建的基于冠层覆盖度和图像色彩指数的冬小麦地上部生物量估算模型与逐步回归方法相比能明显提高地上部生物量较大时的估算精度(表 3、图 3)。表明 BP 神经网络方法相对于逐步回归方法更适合于基于冠层图像的冬小麦生物量估算模型的构建。本研究结果可为基于可见光光谱的农田冬小麦及其他作物的长势监测研究提供参考依据。

- 1999, 15(3): 214.
- [2] LIANG Dong, GUAN Qing-song, HUANG Wen-jiang, et al(梁 栋, 管青松, 黄文江, 等). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报), 2013, 29(7): 117.
- [3] LI Jun-ling, ZHANG Hong, CAO Shu-chao(李军玲, 张 弘, 曹淑超). J Maize. Sci. (玉米科学), 2013, 21(3): 149.
- [4] Houborg R, Anderson M, Daughtry C. Remote Sensing of Environment, 2009, 113(1): 259.
- [5] HUANG Chun-yan, WANG Deng-wei, CAO Lian-pu, et al(黄春燕, 王登伟, 曹连莆, 等). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报), 2007, 23(3): 131.
- [6] ZHUANG Dong-ying, LI Wei-guo, WU Li-quan(庄东英, 李卫国, 武立权). Journal of Arid Land Resources and Environment(干旱区资源与环境), 2013, 27(10): 158.
- [7] Nguyen H T, Lee B W. European Journal of Agronomy, 2006, 24(4): 349.
- [8] WU Bing-fang, ZHANG Feng, LIU Cheng-lin, et al(吴炳方, 张 峰, 刘成林, 等). Journal of Remote Sensing(遥感学报), 2004, 8(6): 498.
- [9] Hunt Jr, E R Daughtry C S T McMurtrey, et al. In: Rober, P C, Rust R H, Larson W E (Eds. ). Proceedings of the Sixth International Conference on Precision Agriculture and Other Precision Resources Management, ASA-CSSA-SSSA, Madison, WI.
- [10] Pan G, Li F, Sun G. 2007 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2007. 797.
- [11] Pagola M, Oritiz R, Irigoyen I, et al. Computers and Electronics in Agriculture, 2009, 65(2): 213.
- [12] Behrens T, Diepenbrock W. Journal of Agronomy and Crop Science, 2006, 192(4): 295.
- [13] Jia L, Chen X, Zhang F, et al. Journal of Plant Nutrition, 2004, 27(3): 441.
- [14] WANG Yuan, WANG De-jian, ZHANG Gang, et al(王 远, 王德建, 张 刚, 等). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报), 2012, 28(17): 131.
- [15] WANG Juan, LEI Yong-wen, ZHANG Yong-shuai, et al(王 娟, 雷咏雯, 张永帅, 等). Chinese Journal of Eco-Agriculture(中国生态农业学报), 2008, 16(1): 145.
- [16] Li Y, Chen D, Walker C N, et al. Field Crop Research, 2010, 118(3): 221.
- [17] Lee K J, Lee B. W. European Journal of Agronomy, 2013, 48: 57.
- [18] FU Yuan-yuan, WANG Ji-hua, YANG Gui-jun, et al(付元元, 王纪华, 杨贵军, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2013, 33(5): 1315.
- [19] SONG Kai-shan, ZHANG Bai, WANG Zong-ming, et al(宋开山, 张 柏, 王宗明, 等). Scientia Agricultura Sinica(中国农业科学), 2006, 39(6): 1138.
- [20] XIA Tian, WU Wen-bin, ZHOU Qing-bo, et al(夏 天, 吴文斌, 周清波, 等). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报), 2013, 29(3): 139.
- [21] Rafael C, Gonzalez, Richard E Woods(冈萨雷斯, 伍兹). Digital Image Processing(数字图像处理). Beijing: Publishing House of Electronics Industry(北京: 电子工业出版社), 2011.
- [22] Mao Wenhua, Wang Yiming, Wang Yueqing. Paper Number 031004, 2003 ASAE Annual Meeting. ASABE, St. Joseph, MI, USA, 2003.
- [23] TIAN Yan, PENG Fu-yuan(田 岩, 彭复员). Digital Image Processing and Analysis(数字图像处理与分析). Wuhan: Huazhong University of Science & Technology Press(武汉: 华中科技大学出版社), 2009. 140.

## Estimation of Winter Wheat Biomass Using Visible Spectral and BP Based Artificial Neural Networks

CUI Ri-xian<sup>1</sup>, LIU Ya-dong<sup>1</sup>, FU Jin-dong<sup>2\*</sup>

1. College of Agronomy and Plant Protection, Qingdao Agricultural University, Shandong Provincial Key Laboratory of Dryland Farming Techniques, Qingdao 266109, China
2. Institute of Crop Science, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China

**Abstract** The objective of this study was to evaluate the feasibility of using color digital image analysis and back propagation (BP) based artificial neural networks (ANN) method to estimate above ground biomass at the canopy level of winter wheat field. Digital color images of winter wheat canopies grown under six levels of nitrogen treatments were taken with a digital camera for four times during the elongation stage and at the same time wheat plants were sampled to measure above ground biomass. Canopy cover (CC) and 10 color indices were calculated from winter wheat canopy images by using image analysis program (developed in Microsoft Visual Basic). Correlation analysis was carried out to identify the relationship between CC, 10 color indices and

winter wheat above ground biomass. Stepwise multiple linear regression and BP based ANN methods were used to establish the models to estimate winter wheat above ground biomass. The results showed that CC, and two color indices had a significant correlation with above ground biomass. CC revealed the highest correlation with winter wheat above ground biomass. Stepwise multiple linear regression model constituting CC and color indices of NDI and b, and BP based ANN model with four variables (CC, g, b and NDI) for input was constructed to estimate winter wheat above ground biomass. The validation results indicate that the model using BP based ANN method has a better performance with higher  $R^2$  (0.903) and lower RMSE (61.706) and RRMSE (18.876) in comparison with the stepwise regression model.

**Keywords** Winter wheat; Visible spectrum; Color indices; Canopy cover; Above ground Biomass; BP based artificial neural networks

(Received Jul. 31, 2014; accepted Oct. 29, 2014)

\* Corresponding author

(上接 2595 页)

### 报告形式

为充分利用会议学术交流的效率,会议仍采用“口头报告”和“墙报展示”两种方法进行学术交流。无论是口头报告还是墙报展示,均属大会同等学术交流,无水平高低之分。为尊重个人意见和便于组委会的安排,请投稿人注明选择自己的稿件为“口头报告”或“墙报”的字样。在安排“口头报告”和“墙报”时,将充分考虑作者的意见。为表彰那些研究水平高、能突出研究内容要点、条理清晰的“口头报告”和“墙报”。本次会议将设立“优秀青年论文奖”和“优秀墙报奖”,大会将给获奖作者颁发优秀论文证书和奖金。同时会议还将邀请国内外知名专家学者就分子光谱有关学术领域的的前沿热点问题作大会报告和主题报告。主要报告形式有:

1. 大会邀请报告:主要邀请国内外知名专家学者报告光谱分析的前沿技术在各个领域的最新进展。
2. 论坛主题报告:本次会议将选择光谱技术的热点应用领域,开设多个专题论坛,邀请在该领域的知名专家作论坛主题报告。
3. 论坛邀请报告:邀请专家学者围绕论坛主题进行学术交流。
4. 墙报展示:作为本次会议的主要交流和展示形式之一,会议将统一安排墙报的讲解时间,希望作者能按时到位。

### 重要时间

论文截稿日期:2016年4月30日

第二轮会议通知:2016年6月上旬

第三轮会议通知:2016年9月上旬

会议召开期:2016年10月下旬

请您经常浏览光谱网主页,了解会议筹备情况和会议具体安排。网址:<http://www.sinospectroscopy.org.cn>

### 产品展示

会议热忱邀请国内外仪器厂商前来展示红外、近红外、拉曼、荧光等各类光谱仪以及质谱、核磁等其他相关仪器设备。我们将在本次会议的网站和会议现场提供展出场所,希望各厂商充分利用这次机会展示自己的最新产品。

### 联系方式

大家若有对召开本次会议的建议和想法,可与组委会联系,若您决定参加会议,请填写回执寄回(联系方式见回执表格),或以电子邮件传到组委会电子邮箱 [ypchen@fzu.edu.cn](mailto:ypchen@fzu.edu.cn) 和 [cyb@fjirsm.ac.cn](mailto:cyb@fjirsm.ac.cn),组委会将适时开通网上参会注册系统,请注意组委会的通知。

联系人:陈义平 18950420193 [ypchen@fzu.edu.cn](mailto:ypchen@fzu.edu.cn)

陈玉标 0591-83715544 13600811328 [cyb@fjirsm.ac.cn](mailto:cyb@fjirsm.ac.cn)

主办单位:中国光学学会

中国化学会

承办单位:中科院福建物质结构研究所 结构化学国家重点实验室  
福州大学  
闽江学院