

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.S0.019

# 基于近红外的小麦植株含水率检测方法

张亚伟<sup>1</sup> 王书茂<sup>1</sup> 陈度<sup>1,2</sup> 王禹<sup>1</sup> 付函<sup>1</sup>

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 现代农业装备优化设计北京市重点实验室, 北京 100083)

**摘要:** 针对小麦植株含水率快速检测需求,提出了一种基于近红外的小麦植株含水率检测方法。利用不同波长近红外感光元件组成的探测器研发了小麦植株含水率无损快速检测装置,利用该检测装置对采集的多组样品进行了测量,通过均值滤波与参考实时校正方法得到了小麦植株的近红外反射强度。基于测量数据,分别采用多元线性回归、多元逐步回归、偏最小二乘以及最小二乘支持向量机建立了含水率检测模型。结果表明,基于最小二乘支持向量机建立的模型效果最优,校正集决定系数  $R^2$  达到 0.974 2。利用建立的检测模型对另一批样品进行含水率检测试验,结果表明:小麦植株含水率真实值与预测值的决定系数  $R^2$  为 0.933 7,预测集均方根误差均小于等于 3.00%。研究结果为小麦植株含水率无损快速检测提供了一种有效的方法与装置,能够满足联合收获机在作业现场对小麦植株含水率快速调整作业参数的需求。

**关键词:** 小麦植株; 含水率; 近红外光电传感器; 最小二乘支持向量机; 联合收获机

**中图分类号:** S225.3; S233      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-1298(2017)S0-0000-00

## Measurement of Wheat Plants Water Content Based on Near-infrared Photoelectric Sensors

ZHANG Yawei<sup>1</sup> WANG Shumao<sup>1</sup> CHEN Du<sup>1,2</sup> WANG Yu<sup>1</sup> FU Han<sup>1</sup>

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Beijing Key Laboratory of Optimized Design for Modern Agricultural Equipment, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Wheat plant water content is one of factors that affects the feeding rate, separation loss and selection cleanliness of combine harvester. A rapid nondestructive detection method for wheat plant water content measurement was proposed based on near-infrared photoelectric sensor. In this system, the near-infrared detectors of different wavelength were designed and the system was built to sense the reflection intensity of wheat plant by the method of median filter and reference real-time correction. Multiple sets of samples were tested and analyzed, then multivariate linear regression, multivariate stepwise regression, partial least squares, and least squares support vector machines were used to build the model respectively. The results showed that the model based on least squares support vector machines performed best, whose correlation coefficient of the correction set came up to 0.974 2. Other sets of samples were tested by the established mode, and found out that the correlation coefficient between the true and predicted value of wheat plant water content was 0.933 7 and standard deviation of predictive sets were less than or equal to 3.00%. This paper provided a rapid and nondestructive detection method and equipment for wheat plant water content, which was beneficial to improve the work performance of combine harvester by real-timely adapting the operating parameters according to the wheat plant water content.

**Key words:** wheat plant; water content; near-infrared photoelectric sensor; least squares support vector machines; combine harvester

收稿日期: 2017-06-30 修回日期: 2017-11-19

**基金项目:** 国家重点研发计划项目(2016YFD0700102)、北京市科技计划项目(D161100003216002)和中央高校基本科研业务费专项资金项目(2017GX001)

**作者简介:** 张亚伟(1988—),女,博士生,主要从事农业装备智能测控技术研究, E-mail: zywcaw@cau.edu.cn

**通信作者:** 陈度(1981—),男,高级工程师,主要从事机电一体化研究, E-mail: tchendu@cau.edu.cn

## 引言

小麦植株含水率是影响联合收获机作业性能及效率的关键指标之一,对联合收获机切割输送、脱粒分析和清选的影响较大<sup>[1-2]</sup>。传统小麦植株含水率的检测方法主要有干燥法、电阻检测法<sup>[3-5]</sup>和电容检测法<sup>[6-9]</sup>。干燥法多通过人工采样后干燥称量计算含水率,测量精度高,但效率低,不能满足联合收获机作业现场对作物含水率快速检测的需求。电阻测量与电容测量法多为插针式探头侵入式测量,易受温度和均匀度影响。近红外光谱技术作为一种新型的分析检测技术,以其检测速度快、分析效率高、不损伤样品、操作简单、性能稳定、成本低廉等特点,适用于现场快速检测<sup>[10-12]</sup>。

国外对植物含水率与波段反射率的研究较早,1971年 THOMAS 等<sup>[13]</sup>通过对 400~2 500 nm 波段的玉米叶片光谱分析,发现其含水率与 910、1 210、1 450、1 930 nm 波长的反射率呈显著相关性,且与 1 450 nm 波长的反射率相关系数达到 0.92。1989年, CURRAN<sup>[14]</sup>发现水的 O—H 键吸收峰主要在 970、1 200、1 400、1 450、1 940 nm 波长,且与淀粉、糖分的吸收峰重合。国内也针对作物含水率与 970、1 450、1 940 nm 近红外波长反射率的关系开展了研究,验证了其之间的正相关性<sup>[15-18]</sup>。王纪华等<sup>[19]</sup>研究发现 1 450 nm 波长的光反射率与抽穗期小麦叶片含水率呈显著相关,相关系数达到 0.882 3。李玉鹏等<sup>[20]</sup>在可见-近红外全波范围(350~2 526 nm),针对光谱原始数据和预处理数据利用交叉验证法及偏最小二乘法建立回归模型,实现了完整烤烟烟叶含水量快速无损检测,所建训练集和预测集的相关系数分别为 0.977 1、0.968 3。

以上研究中,特征波长与含水率的相关性受光谱检测仪器及温度等试验条件影响,存在一定差异,但仍能发现特征波长在 900~1 000 nm、1 400~1 500 nm、1 900~2 000 nm 3 个波段与小麦植株含水率具有较强的相关性。本文针对小麦植株含水率的快速检测,选择具有较强相关性特征波长的感光探头,设计基于近红外的小麦植株含水率快速检测装置,测试样品对近红外的反射率,通过多种回归算法进行含水率模型构建,并进行试验验证。

## 1 近红外检测系统设计

为避免环境光源影响,利用检测暗箱、光源、感光探头、数据采集和处理模块及计算机等搭建了近红外检测装置,如图 1 所示。

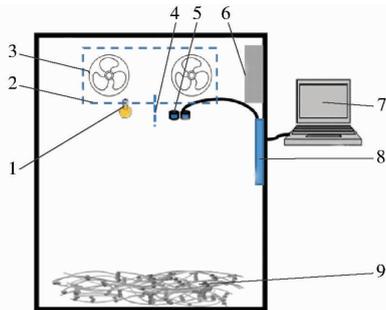


图 1 小麦植株近红外检测系统

Fig. 1 Near-infrared detection system for wheat plants

1. 光源 2, 4. 遮光板 3. 散热风扇 5. 感光探头 6. 电源转换器 7. 计算机 8. 数据采集和处理模块遮光板 9. 小麦样本

### 1.1 检测暗箱

检测暗箱由铝合金制作,内壁黏贴有全反射近红外光的铝箔。箱体内部,2 个 70 cm 的风扇用于散热。靠近风扇处安置有遮光板,用以遮挡外部光线。光源与检测探头之间也装有遮光板,用以阻止光源光线直接进入探头。电源转换器为检测装置提供稳定电源。

### 1.2 光源

被测小麦植株高度一般为 60~100 cm,单波长二极管发光强度较弱、发射角度较小,不能完全覆盖小麦植株高,且不能组合成  $(940 \pm 30)$  nm、 $(1 450 \pm 30)$  nm、 $(850 \pm 10)$  nm 与 900~1 700 nm 波段的连续近红外光。因此,本装置光源采用 12 V、20 W 的卤素灯杯(DONAR),灯杯表面镀有 20  $\mu$ m 铝层,能够发射连续波段近红外光。

### 1.3 感光探头

4 个探头模块分别由 4 种近红外感光元件组成,其中 3 个单波长感光元件的中心波长分别为 850、940、1 450 nm。其中,波长为 850 nm 和 940 nm 的探头模块由截止滤光片、窄带滤光片、光电池等组成。波长为 1 450 nm 的探头模块则由截止滤光片、窄带滤光片和 InGaAs 光电探测器等组成。各元器件主要参数如表 1 所示。

表 1 近红外感光元器件参数

光电 传感器	Near-infrared CCD parameters				nm
	光电池		窄带滤光片		
	感光范围	中心波长	中心波长	带宽	
850	400~1 100	850	850	$\pm 10$	880
940	400~1 100	940	940	$\pm 30$	800
1 450	900~1 700	1 450	1 450	$\pm 30$	

850、940、1 450 nm 3 个单波长感光探头设计如图 2 所示。外壳及支架材质为 ABS 塑料,装配完成之后在外壳贴一层 20  $\mu$ m 的铝箔,用以减少外部光线透过外壳进入光电池带来的干扰。

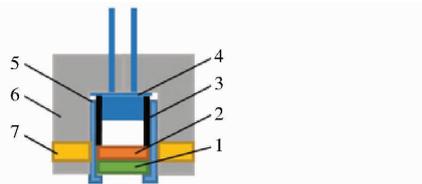


图2 探头模块结构图

Fig.2 Structure diagram of probe module

1. 截止滤光片 2. 窄带滤光片 3. 光电支架 4. 光电管
5. 滤光片支架 6. 外壳 7. 紧固螺钉

另一感光探头选用感光范围 900 ~ 1 700 nm、中心波长为 1 450 nm 的 InGaAs 光电探测器,没有加装其他附件,直接用于信息采集。

#### 1.4 数据采集和处理模块

数据采集模块包括感光元件信号放大模块和模数转换模块。放大模块采用 AD8572 芯片进行 2 级放大,第 1 级放大倍数为 20 倍,第 2 级最大放大倍数为 1 000 倍,两级放大倍数均可调。模数转换模块采用 PCF8591T 芯片,具有 4 路模拟量采集功能。采用 STM32 单片机进行数据处理,采集 40 组数据进行累加,积分时间为 40 ms。

## 2 试验材料与方法

### 2.1 试验材料

于 2017 年 5 月在北京市小汤山镇国家精准农业研究示范基地进行小麦植株样品采集,小麦品种为京冬 22。在麦田随机采集 33 组试验样本,每组样本采集面积为 1 m<sup>2</sup>。从每组样品中再随机挑选 25 株完整的小麦植株,每 5 株作为一个小样本,捆扎后进行编号。

### 2.2 仪器

试验仪器除了自行研制的近红外检测装置外,还包括精密电子分析天平(双杰 JJ1000 型,精度 0.01 g)、恒温鼓风干燥箱(上海一恒,DHG-9145A 型)等,分别用于称量和测试样本真实含水率。

### 2.3 试验方法

#### (1) 试验方法

按照农业行业推荐标准 NY/T 1701—2009《农作物秸秆资源调查与评价技术规范》中农作物秸秆含水率试验方法获取小麦植株真实含水率,同时利用研制的近红外含水率检测装置进行数据采集和记录。

#### (2) 小麦植株含水率测试

以干燥法测试结果作为基准,在测试中,为减少试验过程中其他因素干扰带来的误差,分别测试每组样本中 5 个小样本的含水率,并将其平均值作为该组样本的最终含水率。

测试过程为:干燥前测量小样本质量为  $m_1$ ,在 75℃ 条件下将其干燥至恒质量  $m_2$ (每 100 g 样品 2 次质量差小于 0.02 g),则含水率( $W$ )计算方法为

$$W = (m_1 - m_2) / m_1 \times 100\% \quad (1)$$

#### (3) 近红外反射率检测

在使用近红外检测系统进行数据采集时,设置采集的积分时间为 40 ms,每次先采集暗参考(箱体关闭,光源关闭)与白参考(箱体关闭,光源打开)的数据,再采集样本数据,以便对数据进行校准。将挑选小样后的样品放入暗箱,每次采集 5 组暗参考、白参考与样本数据数据并进行平均。

将每组样本的暗参考数据取平均值得暗参考  $B$ ,白参考数据取平均值得到样本白参考  $W_1$ ,样本数据取平均值得到反射强度  $I_0$ ,样本反射率  $I$  为

$$I = (I_0 - B) / (W_1 - B) \times 100\% \quad (2)$$

## 3 试验结果与分析

### 3.1 试验数据分析

经干燥法测试共得到 33 组小麦植株含水率数据,如图 3a 所示。

在含水率检测模型构建中,样本含水率范围越大,所建立的模型越具有普适性,容错率也越高。在本研究中,试验样本含水率分布如图 3b 所示。

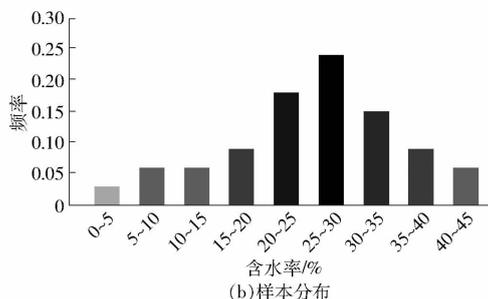
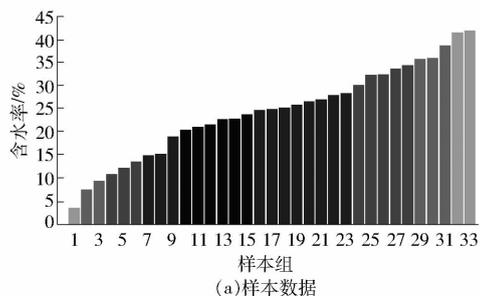


图3 样本含水率与分布直方图

Fig.3 Moisture content data of wheat plants

由图 3b 可知,33 组样本含水率分布在 3.76% ~ 42.34% 之间,样本含水率在区间 [20%, 35%] 内的分布概率为 57.6%。本研究中选用的试验样本含水率分布比较合理。

样本各波段近红外反射率检测结果如图 4 所示。

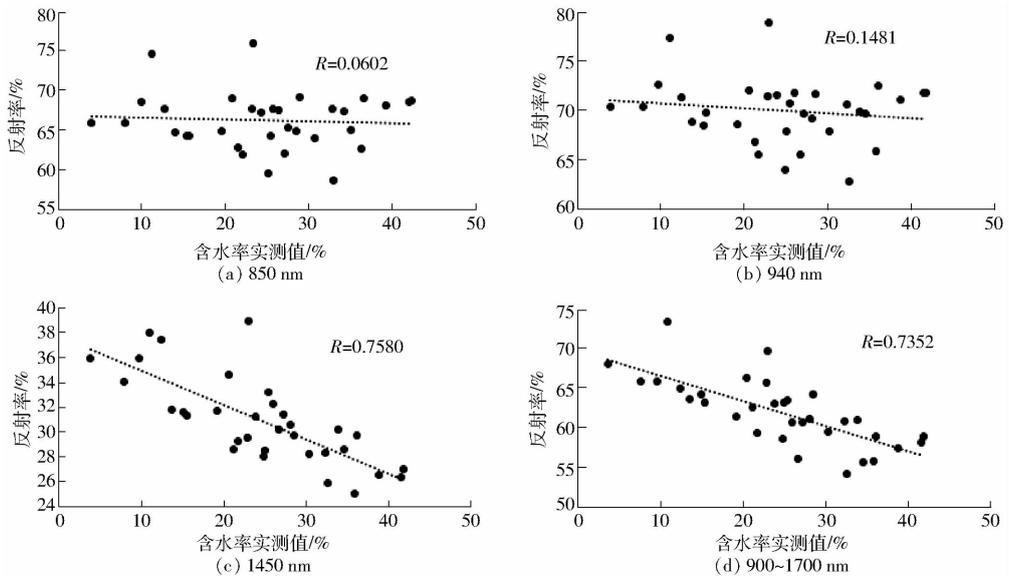


图4 不同波段的反射率与含水率相关关系

Fig. 4 Moisture content distribution histogram

由图4a可知,小麦植株对850 nm波长的近红外反射率与其含水率规律不明显,相关性分析结果显示相关系数仅为0.0602,可认为小麦植株含水率与850 nm波长处近红外反射率不相关。由图4b可知,小麦植株对940 nm波长的近红外反射率与其含水率规律也不明显,但受到970 nm波长对水吸收峰的影响,其线性相关系数为0.1481,可以认为两者具有弱相关关系。由图4c、4d可知,小麦植株对1450 nm和900~1700 nm的近红外反射率与其含水率具有负相关关系,线性相关系数分别为0.7580和0.7352。小麦植株含水率与各波段近红外反射率相关性如表2所示。

表2 小麦植株含水率与各波段反射率相关性

Tab. 2 Determinate coefficient of wheat plants moisture content and reflectivity of different bands

	850 nm	940 nm	1450 nm	900~1700 nm
相关系数	0.0602	0.1481	0.7580	0.7352
显著性	0.7392	0.4109	$3.246 \times 10^{-7}$	$1.099 \times 10^{-5}$
相关性	不相关	弱相关	强相关	强相关

### 3.2 含水率检测模型构建

#### (1) 样本分组

基于获取的小麦植株含水率数据,将样本按照含水率大小排序后,按照2:1的比例分为校正集与验证集(每3个数据随机挑选一个作为验证集)。

#### (2) 模型构建

为了建立最佳的小麦植株含水率预测模型,采用多元线性回归(MLR)、多元逐步回归(MSR)、偏最小二乘(PLSR)与最小二乘支持向量机(LSSVM)等算法进行建模并对分析模型。

基于以上反射率与含水率的相关性分析,采用

多元线性回归与多元逐步回归分析发现,使用940、1450、900~1700 nm的反射率数据建模得到的 $R^2$ 均为0.8637。

使用940、1450、900~1700 nm的反射率数据并采用偏最小二乘法与最小二乘支持向量机建立的模型得到的 $R^2$ 分别为0.8325与0.8640,均小于使用850、940、1450、900~1700 nm的反射率数据建立模型的 $R^2$ ,且均方根误差分别达到了4.15%、3.83%,均大于使用850、940、1450、900~1700 nm的反射率数据建立模型的均方根误差,故选用波长为850、940、1450、900~1700 nm的数据进行建模。

图5为基于不同算法建立的含水率模型对小麦植株含水率测试结果。

由图5可知,4种建模方法所得的含水率检测模型与含水率真实值均具有明显的线性关系。分别计算不同建模方法下其检测结果的决定系数及均方根误差,如表3所示。

由表3可知,使用偏最小二乘法建立模型其检测结果的均方根误差大于3.00%,效果不佳。使用多元线性回归(MLR)、多元逐步回归(MSR)与最小二乘支持向量机(LSSVM)建立的模型均方根误差都小于等于3.00。综合对比,基于最小二乘支持向量机(LSSVM)建立的含水率检测模型效果最优。

### 4 结束语

利用单波长近红外光电传感器搭建了小麦植株含水率的检测系统,基于中心波长分别为850、940、1450 nm单波长探测器和感光范围900~1700 nm波段的探测器设计了4个探头模块。利用研制的近红外

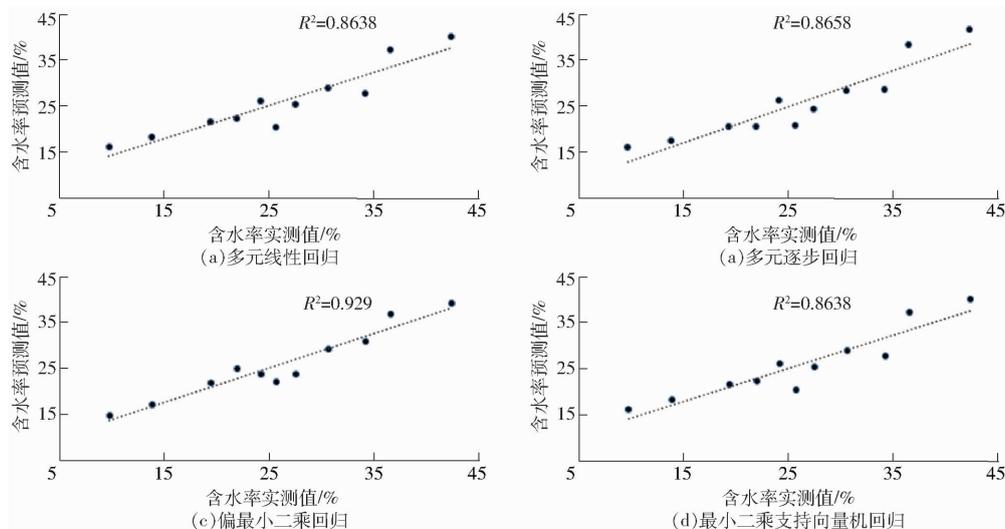


图5 不同建模方法的预测结果

Fig. 5 Reflectivity and moisture content determinate coefficient of different bands

表3 不同建模方法的模型对比结果

Tab. 3 Comparison results of different modeling methods

方法	校正集		验证集	
	$R_c^2$	RMSEC/%	$R_p^2$	RMSEP/%
MLR	0.946 7	2.30	0.865 6	2.96
MSR	0.882 1	2.71	0.915 5	3.14
PLSR	0.895 9	3.35	0.865 8	3.88
LSSVM	0.974 2	1.60	0.933 7	3.00

注： $R_c^2$ 、 $RMSEC$ 、 $R_p^2$  和  $RMSEP$  分别为校正集决定系数、校正集均方根误差、验证集决定系数和验证集均方根误差。

检测装置将采集的多组样品进行检测分析,并分别采用多元线性回归、多元逐步回归、偏最小二乘以及最小二乘支持向量机进行含水率检测模型构建,结果表明基于最小二乘支持向量机建立的模型效果最优,校正集决定系数达到 0.974 2,均方根误差为 1.60%,验证集决定系数为 0.933 7,均方根误差为 3.00%。为小麦植株含水率无损快速检测提供了一种有效的方法与装置,能够满足联合收获机在作业现场针对小麦植株含水率快速调整作业参数的需求。

## 参 考 文 献

- 1 陈度,王书茂,康峰,等. 联合收割机喂入量与收获过程损失模型[J]. 农业工程学报,2011,27(9):18-21.  
CHEN Du, WANG Shumao, KANG Feng, et al. Mathematical model of feeding rate and processing loss for combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(9): 18-21. (in Chinese)
- 2 孙雪娇. 成熟期小麦植株物理特性测试及建模方法研究[D]. 长春:吉林大学,2015:1-12.  
SUN Xuejiao. Research on physical property test and modeling method of mature wheat plants [D]. Changchun: Jilin University, 2015: 1-12. (in Chinese)
- 3 赵燕东,高超,张新,等. 植物水分胁迫实时在线检测方法研究进展[J]. 农业机械学报,2016,47(7):290-300.  
ZHAO Yandong, GAO Chao, ZHANG Xin, et al. Review of real-time detecting methods of water stress for plants [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7): 290-300. (in Chinese)
- 4 张兵,邹一琴,韩霞,等. 小麦叶片生理电特性测定与含水率预测研究[J]. 西南农业学报,2015,28(5):1957-1960.  
ZHANG Bing, ZOU Yiqin, HAN Xia, et al. Study on wheat leaf physiological electrical properties measurement and its moisture content prediction[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2015, 28(5): 1957-1960. (in Chinese)
- 5 SCHONHOFEN A, ZHANG Xiaoqin, JORGE D. Combined mutations in five wheat STARCH BRANCHING ENZYME II genes improve resistant starch but affect grain yield and bread-making quality [J]. Journal of Cereal Science, 2017(75): 165-174.
- 6 SINGH H, BANSOD B S, THAKUR R, et al. Calibration of capacitive cell for measuring moisture content in grains [J]. International Journal of Pure and Applied Physics, 2017, 13(1): 146-149.
- 7 吴沿友,张明明,邢德科,等. 快速反映植物水分状况的叶片紧张度模型[J]. 农业机械学报,2015,46(3):310-314.  
WU Yanyou, ZHANG Mingming, XING Deke, et al. Quick reflection of moisture condition for plant using leaf tensity [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(3): 310-314. (in Chinese)
- 8 李晓丽,程术希,何勇. 基于漫反射光谱的初制绿茶含水率无损检测方法[J]. 农业工程学报,2010,26(5):195-201.  
LI Xiaoli, CHENG Shuxi, HE Yong. Nondestructive measurement of moisture content of green tea in primary processing based on diffuse reflectance spectroscopy[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(5): 195-201. (in Chinese)
- 9 周利明,张小超,苑严伟. 小麦播种机电容式排种量传感器设计[J]. 农业工程学报,2010,26(10):99-103.  
ZHOU Liming, ZHANG Xiaochao, YUAN Yanwei. Design of capacitance seed rate sensor of wheat planter [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(10): 99-103. (in Chinese)

- 22 黎夏,叶嘉安. 基于神经网络的单元自动机 CA 及真实和优化的城市模拟[J]. 地理学报,2002,57(2):159-166.  
LI Xia, YE Jia'an. Neural-network-based cellular automata for realistic and idealized urban simulation[J]. Acta Geographica Sinica, 2002, 57(2): 159-166. (in Chinese)
- 23 PACIFICI F, CHINI M, EMERY W J. A neural network approach using multi-scale textural metrics from very high-resolution panchromatic imagery for urban land-use classification[J]. Remote Sensing of Environment, 2009, 113(6): 1276-1292.
- 24 赵晶,陈华根,许惠平. 元胞自动机与神经网络相结合的土地演变模拟[J]. 同济大学学报:自然科学版,2007,35(8):1128-1132.  
ZHAO Jing, CHEN Huagen, XU Huiping. Simulation of land use evolution based on cellular automata and artificial neural network[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2007, 35(8): 1128-1132. (in Chinese)
- 25 QIANG Y, LAM N S N. Modeling land use and land cover changes in a vulnerable coastal region using artificial neural networks and cellular automata[J]. Environmental Monitoring & Assessment, 2015, 187(3): 1-16.
- 26 黎夏,叶嘉安. 地理模拟系统:元胞自动机与多智能体[M]. 北京:科学出版社,2007.
- 27 任志远,李冬玉,杨勇. 关中地区土地利用格局模拟与驱动力分析[J]. 测绘科学,2011,36(1):105-108.  
REN Zhiyuan, LI Dongyu, YANG Yong. Simulation and driving force analysis of land use pattern in Guanzhong region, Shaanxi province[J]. Science of Surveying & Mapping, 2011, 36(1): 105-108. (in Chinese)
- 28 韩会然,杨成凤,宋金平. 北京市土地利用空间格局演化模拟及预测[J]. 地理科学进展,2015,34(8):976-986.  
HAN Huiran, YANG Chengfeng, SONG Jinping. Simulation and projection of land-use change in Beijing under different scenarios [J]. Progress in Geography, 2015, 34(8): 976-986. (in Chinese)
- 29 谢中凯,李飞雪,李满春,等. 政府规划约束下的城市空间增长多智能体模拟模型[J]. 地理与地理信息科学,2015,31(2):60-64.  
XIE Zhongkai, LI Feixue, LI Manchun, et al. Multi-agent-based simulation model of urban spatial expansion under government planning[J]. Geography and Geo-Information Science, 2015, 31(2): 60-64. (in Chinese)
- 30 张利,周亚鹏,门明新,等. 基于不同种类生态安全的土地利用情景模拟[J]. 农业工程学报,2015,31(5):308-316.  
ZHANG Li, ZHOU Yapeng, MEN Mingxin, et al. Land use scenario simulation with different types of ecological security[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(5): 308-316. (in Chinese)

(上接第 122 页)

- 10 孙通,徐惠荣,应义斌. 近红外光谱分析技术在农产品/食品品质在线无损检测中的应用研究进展[J]. 光谱学与光谱分析,2008,29(1):122-126.  
SUN Tong, XU Huirong, YING Yibin. Progress in application of near infrared spectroscopy to nondestructive on-line detection of products/food quality[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2008, 29(1): 122-126. (in Chinese)
- 11 陆元洲,江朝晖,李想,等. 植物水分含量检测综述[J]. 中国农学通报,2015,31(9):168-177.  
LU Yuanzhou, JIANG Zhaohui, LI Xiang, et al. The review of plant moisture content detection [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(9):168-177. (in Chinese)
- 12 方孝荣,高俊峰,谢传奇,等. 农作物冠层光谱信息检测技术及方法综述[J]. 光谱学与光谱分析,2015,35(7):1949-1955.  
FANG Xiaorong, GAO Junfeng, XIE Chuanqi, et al. Review of crop canopy spectral information detection technology and methods [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2015, 35(7): 1949-1955. (in Chinese)
- 13 THOMAS J R, NAMKEN L N, OERTHER G F, et al. Estimating leaf water content by reflectance measurement[J]. Agronomy Journal, 1971, 63:845-847.
- 14 CURRAN P J. Remote sensing of foliar chemistry[J]. Remote Sensing of Environment, 1989, 30(3):271-278.
- 15 殷哲,雷廷武,陈展鹏,等. 近红外传感器测量不同种类土壤含水率的适应性研究[J]. 农业机械学报,2014,45(3):148-151.  
YIN Zhe, LEI Tingwu, CHEN Zhanpeng, et al. Adaptability of near infrared sensor for moisture measurement of different soils [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(3): 148-151. (in Chinese)
- 16 曾水生,李艳大,舒时富,等. 光谱技术在水稻生长监测中的应用研究进展[J]. 农学学报,2015,5(2):100-104.  
ZENG Shuisheng, LI Yanda, SHU Shifu, et al. Application of spectrum technique in monitoring rice growth [J]. Journal of Agriculture, 2015, 5(2):100-104. (in Chinese)
- 17 田庆久,宫鹏,赵春江,等. 用光谱反射率诊断小麦水分状况的可行性分析[J]. 科学通报,2000,45(24):2645-2650.
- 18 林毅,李倩,王宏博,等. 高光谱反演植被水分含量研究综述[J]. 中国农学通报,2015,31(3):167-172.  
LIN Yi, LI Qian, WANG Hongbo, et al. Research summary of vegetation water content inversion with hyperspectral technology [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(3):167-172. (in Chinese)
- 19 王纪华,赵春江,郭晓维,等. 用光谱反射率诊断小麦叶片水分状况的研究[J]. 中国农业科学,2001,34(1):104-107.  
WANG Jihua, ZHAO Chunjiang, GUO Xiaowei, et al. Study on the water status of the wheat leaves diagnosed by the spectral reflectance[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2001, 34(1): 104-107. (in Chinese)
- 20 李玉鹏,凌智钢,苟正贵,等. 烤烟叶片含水量的光谱检测模型研究[J]. 中国农学通报,2013,29(34):158-161.  
LI Yupeng, LING Zhigang, GOU Zhengui, et al. Study on spectral monitoring model of tobacco water content [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2013, 29(34): 158-161. (in Chinese)