

基于主动光源的作物冠层反射光谱测量方法*

丁永前¹ 朱艳¹ 李杨² 王致情² 谭星祥² 曹卫星¹

(1. 南京农业大学国家信息农业工程技术中心, 南京 210095;

2. 南京农业大学江苏省现代设施农业技术与装备工程实验室, 南京 210031)

摘要: 结合自主研发的测量装置, 对实现基于主动光源的冠层反射光谱测量方法进行了阐述。对测量装置的测量原理进行了论述, 分析了高频调制光源模块、光电池响应一级放大模块、高通滤波模块、二级放大模块和信号提取模块 5 大功能模块。对其中一级放大电路的参数设计和信号提取模块的算法设计 2 个关键环节进行了理论分析与推导。应用自制测量装置对小麦冠层进行反射测量实验, 实验结果表明: 测量装置可以有效滤除环境光引起的响应, 测量值稳定可靠, 最大相对波动率小于 4.97%。

关键词: 作物冠层 主动光源 反射光谱 反射率 测量

中图分类号: S123; TP79 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)12-0209-06

A Method for Measuring Reflection Spectrum of Crop Canopy Based on Active Light Source

Ding Yongqian¹ Zhu Yan¹ Li Yang² Wang Zhiqing² Tan Xingxiang² Cao Weixing¹

(1. National Engineering and Technology Center for Information Agriculture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China

2. Jiangsu Province Engineering Lab for Modern Facility Agriculture Technology & Equipment, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China)

Abstract: Based on self-developed measuring equipment, a method for measuring the reflection spectrum of crop canopy using active light source was discussed. As well as systematically introduced the measuring principle, five functional modules of the system were introduced. They were high-frequency modulated light source module, first-level amplifier circuit module of the photoelectric cell response, high-pass filter module, second-level amplifier circuit module and signal extraction module. Theoretical analysis and derivation on the design of the two key parts, the first-level amplifier circuit module and the signal extraction module, were provided. Furthermore, the self-developed experimental equipment was used to measure the reflection spectrum in wheat field. The experimental results showed that the impact from passive light source on the measuring results was almost completely filtered, while the response caused by active light source was detected efficiently. Experimental results were stable and had a small fluctuation ratio of less than 4.97% during experiments.

Key words: Crop canopy Active light source Reflection spectrum Reflectivity Measurement

引言

作物反射光谱的获取途径主要包括作物粉末、

活体叶片和作物冠层等 3 个层次的反射光谱, 而利用作物冠层反射光谱更易获取田块和区域尺度下作物的营养状况信息^[1]。作物冠层反射光谱蕴含了

收稿日期: 2013-05-27 修回日期: 2013-06-25

* 中国博士后科学基金资助项目(2011M500935)、中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(KYZ201127)和江苏高校优势学科建设工程资助项目

作者简介: 丁永前, 副教授, 博士, 主要从事农业信息化和自动化研究, E-mail: yongqiand@njau.edu.cn

通讯作者: 曹卫星, 教授, 博士生导师, 主要从事作物生态和信息农业研究, E-mail: caow@njau.edu.cn

丰富的作物生长信息,众多学者利用各种光谱指标来研究反射光谱和作物生长信息之间的定量关系^[2-5],已经成为信息农业领域的研究热点。1994年,第一台被动光源式作物冠层检测仪在美国研制成功,该仪器以太阳光作为检测光源,其使用受天气条件制约^[6]。为了克服被动光源式仪器的缺陷,国外出现了自带光源的主动光源式测量仪器,其使用不受外部光环境的影响,不少学者应用此类测量仪进行了对比研究^[7-8]。

由于国外仪器价格昂贵,难以进行二次开发,国内也开展了冠层反射光谱仪的研发工作,取得了不少成果^[9-15],但所研发仪器基本都属于被动光源式,与国外仪器存在明显差距。魏士平等研制了一款主动光源式的实时 NDVI 测量仪^[16],该设备通过软件差值算法去除太阳光的影响,但未见测量性能的报道。

依托南京农业大学国家信息农业工程技术中心的研发成果^[10,13,15,17-19],本文设计一套主动光源式的冠层反射光谱测量装置,阐述冠层反射光谱测量方法,给出表征测量装置稳定性的田间实验结果。

1 测量原理和功能结构

1.1 测量原理

采用窄带 LED 作为主动光源,经过光学矫形后,使之成为具有一定宽度和长度的条形光,并通过高频调制电路使 LED 光源发射出高频脉动光,冠层产生的脉动反射光和环境反射光一起被检测端的光电池接收,光电池响应经过电流/电压转换和高通滤波放大后检出脉动信号(方波信号)的响应幅值,从而确定由主动光源所引起的冠层光谱响应值。光电池响应信号的检测流程如图 1 所示。

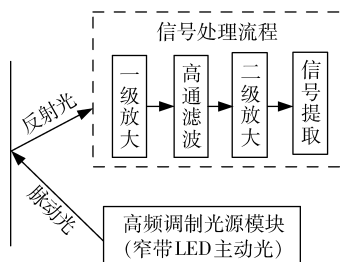


图1 冠层反射光谱响应信号测量流程

Fig.1 Measurement processes of crop reflection spectrum response

1.2 系统的功能结构

图1所示的测量流程表述了信号检测所需要经过的几个必要的处理环节,这些环节分别对应一个独立的处理模块,同时又相互衔接关联,各功能模块的作用描述如下:

(1)高频调制光源模块:通过设计高频电子开关电路高频启停LED,从而产生一定频率的脉动光,使光电池产生与调制频率相同的方波响应信号。

(2)一级放大模块:为了不引起光电池饱和响应,光电池在接收反射光时须先经过滤光片滤除非检测波段成分,使待检测波段的反射光被光电池接收。由于在一级放大的响应信号是由环境光和调制脉动光的综合作用所引起,在外界环境光较强时,脉动光的响应相对来说要弱的多,因此为了有效保留脉动光的响应,一级放大倍数不宜过高,以不引起运算放大器输出饱和为宜。

(3)高通滤波模块:该模块的作用是滤除由环境光所引起的光电池响应,而保留由主动光源所引起的响应值。环境光变化相对主动光源而言要缓慢得多,通过设置合适的高通滤波器截止频率可以有效滤除环境光所引起的低频信号。

(4)二级放大模块:该模块的作用是将高频脉动响应信号进一步放大至后继A/D采集模块的有效电压采集范围内,以提高信号的采样精度。

(5)信号提取模块:该模块主要完成信号的A/D转换,并通过合适的算法提取漫反射光的反射强度。

根据实际开发经验,各功能模块以光电池响应一级放大模块和信号提取算法最为关键,本文就这两部分的设计过程和方法进行讨论。

2 光电流放大电路参数设计

2.1 光电流放大电路

光电流的放大电路采用图2所示的跨阻抗式放大电路。在实际开发过程中,首先需要确定光源的调制频率和光电流的一级放大倍数,光源的调制频率决定放大电路必须具备的带宽频率,而光电流的放大倍数取决于反馈电阻的大小,其他的电气参数则决定放大电路的响应品质。

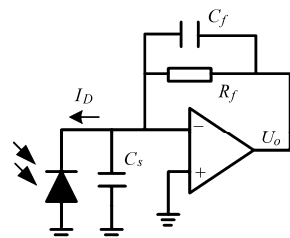


图2 光电流放大电路原理图

Fig.2 Schematic diagram of photocurrent amplifier circuit

2.2 光源调制频率的选择原则

光源调制频率的选择原则要综合考虑3个因素:LED的响应时间、调制电路的可实现性与经济性、LED的工作稳定性。LED在接收方波信号调制

时,其点亮和熄灭需要一定时间,这就是 LED 的响应时间,设计时实际方波调制信号的脉宽时间一般需要大于 10 倍 LED 的响应时间,才能获得稳定的发光强度,LED 的响应时间限制了光源调制的最高频率。确定 LED 的最高调制频率后便要考虑调制电路的可实现性与经济性,调制频率越高对运算器件的要求也越高,需要运算器件具有足够的增益带宽积,同时也要求所匹配的反馈电容 C_f 越小,过大的增益带宽积和过小的电容值都会降低元器件的可实现性与经济性,在设计过程中一般增益带宽积不超过 10 MHz, C_f 不小于 10 pF 级为宜。最后需要考虑 LED 的工作稳定性,LED 工作频率越高导致 LED 的结温越高,从而使其中心波长红移现象越严重,影响测量效果,红移现象和工作频率之间的关系可以通过实验进行测定。综合考虑以上因素,本文实验装置采用的 LED 调制频率为 2 kHz。

2.3 光电流放大电路数学模型

图 2 中 C_s 代表信号源等效电容(是光电池结电容、运放共模电容和差模电容的总和), R_f 和 C_f 分别是放大电路的反馈电阻和反馈电容,将放大电路的各个环节用传递函数的方式进行表达,将放大电路的整体结构表达成图 3 所示的闭环结构,应用控制理论的分析方法对放大电路的动态响应特性进行研究。

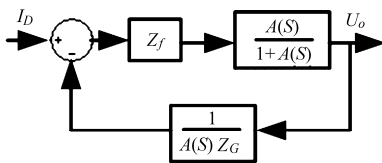


图 3 放大电路等效闭环结构

Fig. 3 Equivalent closed-loop structure of amplifier circuit

图 3 中 I_D 表示光电池产生的光电流, U_o 表示放大电路的输出电压,该闭环结构的传递函数为

$$\phi(S) = \frac{A(S)Z_f}{1 + A(S) + \frac{Z_f}{Z_G}} \quad (1)$$

其中 $A(S) = \frac{G}{S + \omega_a}$ $Z_G = \frac{1}{SC_s}$ $Z_f = \frac{R_f}{R_f C_f S + 1}$

式中 $A(S)$ ——运算放大器的开环传递函数,可以描述成一个惯性单元

Z_G ——信号源电容的阻抗

S ——拉氏变换变量

Z_f ——反馈电阻和电容并联阻抗

G ——运算放大器的增益带宽积

ω_a ——运算放大器的转折频率

代入上述各项参数后,式(1)可以表示为

$$\phi(S) = R_f \frac{\omega_n^2}{S^2 + 2\zeta\omega_n S + \omega_n^2} \quad (2)$$

其中
$$2\zeta\omega_n = \frac{R_f(GC_f + \omega_a C_s) + 1}{R_f(C_s + C_f)}$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{G}{R_f(C_s + C_f)}}$$

式中 ζ ——阻尼比

由式(2)可以看出,放大电路的闭环传递函数是不带零点式的典型二阶系统的结构形式,其对光电流的稳态放大倍数为 R_f 。当光源的调制频率和所需的放大倍数确定后,实质上确定了放大电路所需的带宽和反馈电阻 R_f ,因此放大电路的设计归结为选择合适的运算放大器和配置合适的反馈电容 C_f 。一般情况下, C_s 要比 C_f 大得多,往往可以通过带宽要求优先选择具有足够增益带宽积的运算放大器,然后确定 C_f , C_f 实质上是决定了系统的阻尼比 ζ 和动态响应特征,决定二阶系统是在欠阻尼还是过阻尼状态下运行。

2.4 放大电路参数配置及响应

根据二阶系统的频率响应特性可知,当系统的阻尼比 $\zeta = 0.707$ 时,系统的带宽 $\omega_b = \omega_n$,由此可以推算出运算放大器应该具备的增益带宽积 $G = \frac{\omega_b^2}{2\pi} R_f C_s$,根据 G 的值可以选择相应的运算放大器。最后可以通过理论计算和实验调试相结合的方式确定合适的反馈电容 C_f ,衡量的依据是放大电路的输出具有良好的响应波形,系统有较快的响应速度,同时没有明显的振荡,使系统总体在接近临界阻尼的状态下运行(阻尼比接近 1)。

图 4、5 是所设计的测量系统放大电路在不同反馈电容下放大电路的实际响应波形(以白板作为反射面时,光电池一级放大电路的响应波形)。图 4 所示的响应曲线对应系统阻尼比 $\zeta = 0.95$,系统具有比较理想的响应效果;图 5 所示的响应曲线对应系统阻尼比 $\zeta = 0.45$,其所匹配的电容过小而导致较小的阻尼比,致使系统响应波形出现了比较明显的尖峰振荡,不利于后继电路的处理。

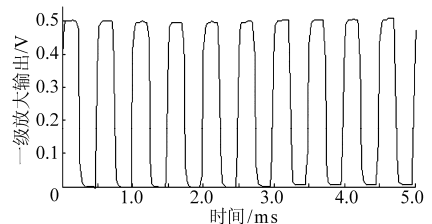
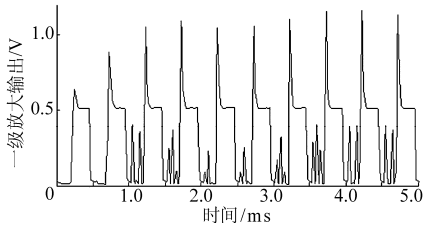


图 4 放大电路响应输出 ($\zeta = 0.95$)

Fig. 4 Output of amplifier circuit at $\zeta = 0.95$

3 冠层反射响应提取算法设计及仿真

作物冠层反射测量的最终目标是获取特定波段

图5 放大电路响应输出 ($\zeta = 0.45$)Fig. 5 Output of amplifier circuit at $\zeta = 0.45$

反射光的反射率。反射率是一个相对值,其值可以表示为冠层反射光谱响应值与标准白板反射光谱响应值之比;而冠层反射光谱响应值与光电池产生的光电流呈正比,亦即正比于放大电路调制方波信号的幅值,因此反射光谱响应值的提取算法就是有效获取方波信号幅值的方法。当方波为理想方波时,理论上只需要一个周期的方波信号即可检出幅值大小,但是在实际检测过程中,由于作物冠层反射面的复杂性和环境干扰的存在,致使实际调制方波与理想方波相比,高、低电平处将出现波动,并且经过高通滤波以后,方波信号将出现斜坡变形,因此从测量原理上讲,需要一定时间长度的信息采集量,用统计特征量表征测量值。

3.1 信号提取算法

为了描述方便,引入均值运算符 \bar{x} 表示对物理量 x 进行均值处理。采用 Y 表示 A/D 模块采集到的时间长度为 t 的测量数据点集, M_Y 表示对点集 Y 处理后得出的信号有效幅值(光谱响应值), Y_H 表示量值大于 Y 均值的数据点集合, Y_L 表示量值小于 Y 均值的数据点集合, Y_{HV} 表示高频调制信号中处于波峰位置的数据点集合, Y_{LV} 表示高频调制信号中处于波谷位置的数据点集合, α 和 β 为计算因子,可根据测量装置通过实验方式测定。各物理量之间的运算关系描述为

$$M_Y = \bar{Y}_{HV} - \bar{Y}_{LV} \quad (3)$$

其中

$$Y_{HV} = \{y | y \leq \alpha(\bar{Y}_H - \bar{Y}), y \geq (1 + \beta)(\bar{Y}_H - \bar{Y}), y \in Y_H\}$$

$$Y_{LV} = \{y | y \leq \alpha(\bar{Y} - \bar{Y}_L), y \geq (1 + \beta)(\bar{Y} - \bar{Y}_L), y \in Y_L\}$$

$$(\alpha < 1, \beta < 1, \alpha + \beta \leq 1)$$

3.2 信号提取的算法仿真

α 和 β 的值可以通过计算机仿真加以确定,一般通过选择合适的 α 和 β 值使 Y_{HV} 和 Y_{LV} 的集合点基本覆盖二级放大输出波形中的斜坡部分。图6是仿真产生的一级放大电路的输出方波(根据实际系统参数构建图3所示放大电路的传递函数)。图7是通过高通滤波器以后的仿真波形(为了分析方便,令二级放大倍数为1),图7上部黑色点表示 Y_{HV} 点集,下部黑色点表示 Y_{LV} 点集,3条虚线对应值从

上到下分别表示 \bar{Y}_{HV} 、 \bar{Y} 和 \bar{Y}_{LV} 。由图6可知方波的幅值为1。图7所示的仿真结果表明:检测出的方波幅值为1.0026,由此可知仿真中所选择的 α 和 β 使检测结果具有较高的测量精度,可以作为实际测量时的运算参数。

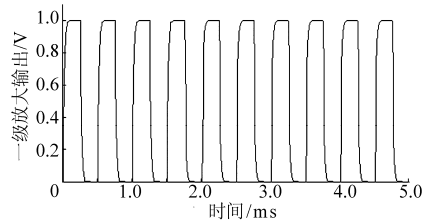


图6 光电池对调制光响应的仿真波形

Fig. 6 Simulation waveform of photoelectric cell response to modulated light

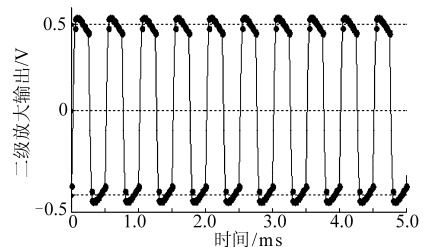


图7 高通滤波后调制光响应的仿真波形

Fig. 7 Simulation waveform of modulated signal treated by high-pass filter

4 田间实验

4.1 实验测试结果

冠层反射测量实验主要验证所设计的测量系统能否有效滤除环境光对测量值的影响,同时验证能否有效检出主动光源引起的方波响应幅值。2013年4月在江苏省南京农业大学如皋实验基地对拔节期的小麦冠层反射进行了测量验证实验,所设计的测量装置能同时测量730 nm和810 nm两个波长的响应。图8是现场测试照片。图9~12展示了测量装置的各个功能环节对波长810 nm反射光响应的处理结果。实验过程在微风或少风情况下进行。



图8 现场测试照片

Fig. 8 Field test photo

图9是一级放大电路的实际响应输出波形,图10是图9的局部放大图。图9和图10表明,高频调制光响应叠加在环境光的缓变响应之中,环境

光的响应值远大于主动光的响应值,测试过程中环境光的光强有明显的变化,同时图 10 表明调制光的响应具有较好的方波特性。

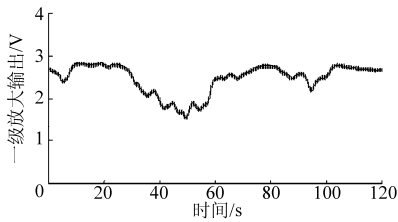


图 9 叠加环境光影响的光电池响应

Fig. 9 Photoelectric cell response superimposed by impact from environmental light

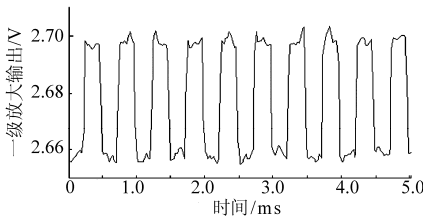


图 10 图 9 的局部放大图

Fig. 10 Partially enlarged image of Fig. 9

图 11 表明经过高通滤波后,环境光的缓变响应被有效滤除,调制光响应变成具有斜坡变形的正负基本对称的方波。黑色标记点是提取出的方波有效幅值点。

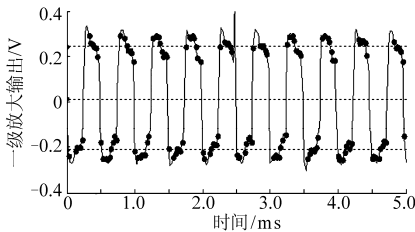


图 11 高通滤波放大后的响应波形

Fig. 11 Response waveform after passing high-pass filter

4.2 测试结果分析

图 12 是以 0.1 s 为处理单位,测量装置检测出的小麦冠层对主动光的反射光谱响应值。该图表明:在环境光变化的情况下,主动光的光谱响应保持了较好的稳定性,环境光的光谱响应被有效滤除。

采用相对波动率对测量装置测量数据的可靠性进行评价,相对波动率定义为

$$\sigma = \frac{|D_t - D_a|}{D_a} \times 100\% \quad (4)$$

式中 σ ——相对波动率, %

D_t ——测量值 D_a ——测量值的平均值

图 12 所示的冠层光谱响应值的相对波动率如图 13 所示,其中最大相对波动率为 4.97%,平均相对波动率 2.32%。

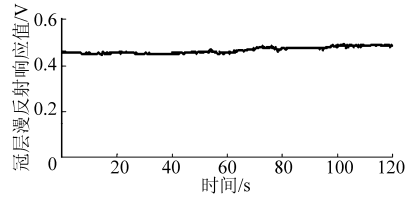


图 12 小麦冠层反射响应幅值

Fig. 12 Response magnitude of reflection of wheat canopy

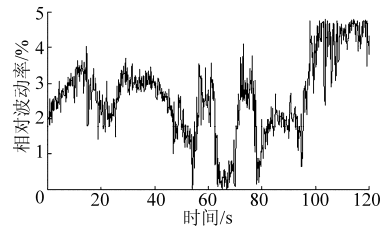


图 13 小麦冠层反射响应相对波动率

Fig. 13 Fluctuation ratio of reflection response magnitude of wheat canopy

多次田间重复实验结果表明,所设计的测量装置两波长(810 nm 和 730 nm)测量值的最大相对波动率均小于 4.97%。在实际测量过程中风对冠层的吹动对测量值有影响,大的冠层风动往往会引起测量值的较大波动,因此测量过程宜在微风或少风情况下进行。

5 结束语

提出了一种基于主动光源的冠层反射测量方法,并给出了冠层反射响应信号的处理流程,对关键环节的设计过程和处理方法进行了理论分析和实验验证。应用本文提出的方法制作了相应的测量装置(该装置已申报国家专利),并进行了田间实验。实验表明:本文提出的测量方法和相应的信号处理流程切实可行,测量装置可以有效滤除环境光(主要是太阳光)引起的反射光谱响应,从而检测出由主动光引起的冠层光谱响应值,能克服被动光源式测量方法对环境光依赖的缺陷;在少风或微风环境下,测量装置的测量值具有较高的稳定性,测量值的最大相对波动率小于 4.97%。

参 考 文 献

- 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]. 生态学学报, 2007, 26(9): 1454 ~ 1463. Tian Yongchao, Zhu Yan, Yao Xia, et al. Non-destructive monitoring of crop nitrogen nutrition based on spectral information[J]. Chinese Journal of Ecology, 2007, 26(9): 1454 ~ 1463. (in Chinese)
- Baret F, Guyot G, Major D J. TSAVI: a vegetation index which minimizes soil brightness effects on LAI and APAR estimation [C] // Proceedings of 12th Canadian Symposium on Remote Sensing, IGARRS'90, Vancouver, BC, Canada, 1989: 1355 ~ 1358.

- 3 Rondeaux G, Steven M, Baret F. Optimization of soil-adjusted vegetation indices [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1996, 55(2): 95 ~ 107.
- 4 Gitelson A, Kaufman Y, Merzlyak M. Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1996, 58(3): 289 ~ 298.
- 5 Fernando Solari, John Shanahan, Richard Ferguson, et al. Active sensor reflectance measurements of corn nitrogen status and yield potential [J]. *Agronomy Journal*, 2008, 100(3): 571 ~ 579.
- 6 宋文冲, 胡春胜, 程一松, 等. 作物氮素营养诊断方法研究进展 [J]. *土壤通报*, 2007, 37(2): 369 ~ 372.
Song Wencong, Hu Chunsheng, Cheng Yisong, et al. Research advancement on crop nitrogen nutrition diagnosis [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2007, 37(2): 369 ~ 372. (in Chinese)
- 7 Nicolas Tremblay, Wang Zhijie, Bao-Luo Ma, et al. A comparison of crop data measured by two commercial sensors for variable-rate nitrogen application [J]. *Precision Agriculture*, 2009, 10(2): 145 ~ 161.
- 8 Sudduth K A, Kitchen N R, Drummond S T. Comparison of three canopy reflectance sensors for variable-rate nitrogen application in corn [C]// *Proceedings of the 10th International Conference on Precision Agriculture*, Denver, Colorado, USA, 2010.
- 9 王秀, 赵春江, 周汉昌, 等. 冬小麦生长便携式 NDVI 测量仪的研制与试验 [J]. *农业工程学报*, 2004, 20(4): 95 ~ 98.
Wang Xiu, Zhao Chunjiang, Zhou Hanchang, et al. Development and experiment of portable NDVI instrument for estimating growth condition of winter wheat [J]. *Transactions of the CSAE*, 2004, 20(4): 95 ~ 98. (in Chinese)
- 10 焦学磊, 曹卫星, 田永超, 等. 用于作物光谱信息监测的微弱信号调理方法与电路设计 [J]. *仪器仪表学报*, 2008, 29(1): 2461 ~ 2464.
Jiao Xuelei, Cao Weixing, Tian Yongchao, et al. Feeble light signal conversion method and circuit design used in crop spectrum information inspection [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2008, 29(1): 2461 ~ 2464. (in Chinese)
- 11 乔欣, 马旭, 张小超, 等. 大豆叶绿素和钾素信息的冠层光谱响应 [J]. *农业机械学报*, 2008, 39(4): 108 ~ 111.
Qiao Xin, Ma Xu, Zhang Xiaochao, et al. Response of coronary spectrum on chlorophyll and K information of soy [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2008, 39(4): 108 ~ 111. (in Chinese)
- 12 李修华, 李民赞, 崔笛. 基于光谱学原理的无损式作物冠层分析仪 [J]. *农业机械学报*, 2009, 40(增刊): 252 ~ 256.
Li Xiuhua, Li Minzan, Cui Di. Non-destructive crop canopy analyzer based on spectral principle [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2009, 40(Supp.): 252 ~ 256. (in Chinese)
- 13 刘海俊, 孙传范, 曹卫星, 等. 便携式作物氮素监测仪性能水稻田间测试 [J]. *农业机械学报*, 2010, 41(9): 80 ~ 84.
Liu Haijun, Sun Chuanfan, Cao Weixing, et al. Evaluation of portable crop nitrogen monitoring instrument based on rice field experiment [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(9): 80 ~ 84. (in Chinese)
- 14 梁留锁, 马旭, 乔欣. 大豆叶片氮素含量检测装置的研究 [J]. *农机化研究*, 2010(12): 121 ~ 124.
Liang Liusuo, Ma Xu, Qiao Xin. Research of the soybean's total leaf nitrogen determination device [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2010(12): 121 ~ 124. (in Chinese)
- 15 倪军, 姚霞, 田永超, 等. 便携式作物生长监测诊断仪的设计与试验 [J]. *农业工程学报*, 2013, 29(6): 150 ~ 156.
Ni Jun, Yao Xia, Tian Yongchao, et al. Design and experiments of portable apparatus for plant growth monitoring and diagnosis [J]. *Transactions of the CSAE*, 2013, 29(6): 150 ~ 156. (in Chinese)
- 16 魏士平. 实时 NDVI 测量仪的设计与实现 [D]. 成都: 电子科技大学, 2012.
Wei Shiping. Design and implementation of NDVI real-time measuring instrument [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2012. (in Chinese)
- 17 李映雪, 朱艳, 田永超, 等. 小麦叶片氮含量与冠层反射光谱指数的定量关系 [J]. *作物学报*, 2006, 32(3): 358 ~ 362.
Li Yingxue, Zhu Yan, Tian Yongchao, et al. Quantitative relationship between leaf nitrogen concentration and canopy reflectance spectra [J]. 2006, 32(3): 358 ~ 362. (in Chinese)
- 18 冯伟, 朱艳, 田永超, 等. 基于高光谱遥感的小麦叶片氮积累量 [J]. *生态学报*, 2008, 28(1): 23 ~ 32.
Feng Wei, Zhu Yan, Tian Yongchao, et al. Monitoring leaf nitrogen accumulation with hyper-spectral remote sensing in wheat [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(1): 23 ~ 32. (in Chinese)
- 19 冯伟, 朱艳, 姚霞, 等. 利用红边特征参数监测小麦叶片氮积累量状况 [J]. *农业工程学报*, 2009, 25(11): 194 ~ 201.

(上接第 203 页)

- 11 宾金华, 姜胜, 黄胜琴, 等. 茉莉酸甲酯诱导烟草幼苗抗炭疽病与 PAL 活性及细胞壁物质的关系 [J]. *植物生理学报*, 2000, 26(1): 1 ~ 6.
Bin Jinhua, Jiang Sheng, Huang Shengqin, et al. The relationship between methyl jasmonate induced anthracnose resistance of tobacco seedlings and phenylalanine ammonia lyase activity and cell wall substances [J]. *Acta Photophysica Sinica*, 2000, 26(1): 1 ~ 6. (in Chinese)
- 12 王相友, 闫聪聪, 刘战丽. 可食性涂膜对双孢蘑菇生理和品质的影响 [J]. *农业机械学报*, 2012, 43(1): 141 ~ 145.
Wang Xiangyou, Yan Congcong, Liu Zhanli. Effect of edible coatings on physiology and quality of mushrooms (*Agaricus bisporus*) [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(1): 141 ~ 145. (in Chinese)
- 13 An J S, Zhang M, Lu Q R. Changes in some quality indexes in fresh-cut green asparagus pretreated with aqueous ozone and subsequent modified atmosphere packaging [J]. *Journal of Food Engineering*, 2007, 78(1): 340 ~ 344.