

# 基于比色法和光谱法的土壤中磷的快速检测方法研究

孙明\*

(中国农业大学信息与电气工程学院, 现代精细农业系统集成研究教育部重点实验室,  
农业部农业信息获取技术重点实验室, 北京 100083)

**摘要:** **目的** 研发土壤中磷素的快速检测方法。**方法** 针对土壤中磷含量的快速检测, 利用比色法和光谱法构建了磷钼蓝反应的吸收曲线模型, 并对一种智能土肥养份综合测试仪进行了测试。**结果** 在检测波长为 870 nm 时, 将 2.0 mL 的 26 g/L 的钼酸铵溶液、1.0 mL 的 100 g/L 抗坏血酸溶液和 0.4 g/L 的 EDTA 添加到酸性反应体系中, 通过使用紫外-可见分光光度处理所测得的数据, 可知磷溶液浓度与吸光度之间呈线性关系, 得到线性回归模型为  $Y=0.01558X-0.1106$ , 决定系数( $r^2$ )=0.995。对这种智能土肥养份综合测试仪进行准确性测试, 线性偏差在 3% 内, 通过与所构建的线性回归模型的计算值进行对比, 预测值误差在 4% 以内。**结论** 所构建的线性回归模型是可用的, 这种智能土肥养份综合测试仪可满足土壤中磷的快速检测要求。

**关键词:** 比色法; 光谱法; 快速检测; 磷钼蓝反应; 土壤养份测试仪

## Rapid determination of phosphorus content in soil based on colorimetry and spectroscopy

SUN Ming\*

(College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Key Laboratory of Modern Precision Agriculture System Integration Research, Ministry of Education, Key Laboratory of Agricultural Information Acquisition Technology, Ministry of Agriculture, Beijing 100083, China)

**ABSTRACT: Objective** To research a rapid detection method of phosphorus in soil. **Methods** For rapidly detecting the phosphorus content in soil, the absorption curve model of phosphorus molybdenum blue reaction by using the colorimetric method and the spectral method was established, and a kind of intelligent soil nutrient tester was tested. **Results** At the detection wavelength 870 nm, by adding 2.0 mL 26 g/L ammonium molybdate solution, 1.0 mL 100 g/L ascorbic acid solution with 0.4 g/L EDTA in the reaction system, based on the data measured by a UV-visible spectrophotometer, the absorbance was linear with the concentration of the phosphorus solution, and the linear regression model was  $Y=0.01558X-0.1106$ , correlation coefficient ( $r^2$ )=0.995. For the intelligent soil nutrient tester, the accuracy test was taken and the linear deviation was within 3%. And by comparing the calculated values with the established linear regression model, the predicted error was within 4%. **Conclusion** The established linear regression model is available and the intelligent soil nutrient tester can meet the requirements of the rapid detection of

基金项目: 国家星火计划项目(2015GA620012)

**Fund:** Supported by National Spark Program (2015GA620012)

\*通讯作者: 孙明, 博士, 副教授, 主要研究方向为数字图像处理、机器视觉及光谱技术在农业质量安全中的应用。E-mail: sunming@cau.edu.cn

\*Corresponding author: SUN Ming, Ph.D., Associate Professor, College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, No.17 Tsinghua East Road, Haidian District, Beijing 100083, China. E-mail: sunming@cau.edu.cn

phosphorus in soil.

**KEY WORDS:** colorimetry; spectroscopy; rapid detection; phosphorus molybdenum blue reaction; soil nutrient tester

## 1 引言

植物生长所必须的磷元素大多来自于土壤,磷肥的合理使用可使作物增产,改善作物品质。除了磷肥的使用,含磷农药的使用也影响着土壤中的磷含量。磷的过量使用问题日益严重。快速检测土壤中磷含量,不仅可以了解土壤中能够逐渐被植物吸收的磷贮备量,对合理施用磷肥也有直接指导意义,可以合理利用土地,更好地保护生态环境,为土壤改良、土地分类、土地资源开发利用等提供依据,更是保证食品安全、人类生命安全的一个重要举措。因此,快速精确地检测土壤中的磷含量至关重要<sup>[1]</sup>。国内外对磷的快速检测研究很多,普遍方法是定量分析的仪器法,大致上可以分为以下几类,光谱法、电化学法、离子色谱法、比色法等<sup>[2-14]</sup>。本研究针对土壤中的磷,使用钼抗钒比色法的原理,通过改进钼钒比色法,基于比色法和光谱法,通过重复性实验,得到最优检测波长及钼蓝反应体系的吸收曲线,建立相应的回归曲线方程,构建土壤中磷含量的预测模型,以实现其快速检测,并利用现有的一种土肥养份综合测试仪检测土壤样品中的磷元素,以测试该种仪器的测定精度。

## 2 材料与方法

### 2.1 仪器与试剂

#### 2.1.1 仪器

UV-2450 紫外-可见分光光度计(日本岛津公司); TFC-203 智能土肥养份综合测试仪(北京强盛分析仪器制造中心); JA2003 电子精密天平(上海恒平仪器仪表有限公司); WI68091 回旋振荡器/摇瓶机(北京金泉水科技有限公司); GX-9023MBE 电热鼓风干燥箱(上海博讯实业有限公司医疗设备厂)。

#### 2.1.2 样品及试剂

土壤,来自中国农业大学信息与电气工程学院农业与环境参数检测实验室,样品是已经过粉碎烘干处理。

碳酸氢钠、磷酸二氢钾、浓硫酸、钼酸铵、酒石酸锑钾、抗坏血酸、EDTA、柠檬酸(分析纯,北京易秀博谷生物科技有限公司)。

#### 2.1.3 软件

本研究主要用到的软件为 UVProbe2.33 及 MATLAB 2013a。UVProbe 为岛津 UV-2450 的配套控制软件,用于计算机端与分光光度计的连接与信息传输。本研究使用了 UVProbe 的光谱测定及报告生成功能。本研究使用

MATLAB2013a 版本软件对分光光度计所测得的数据进行直线拟合,以获得最优检测波长及钼蓝反应体系的吸收曲线,建立相应的回归曲线方程,形成初步模型。

### 2.2 试验方法

#### 2.2.1 溶液配制

配制待测液:由于样品为石灰性土壤,采用 Olsen 法浸提土壤中有有效磷<sup>[15]</sup>。称取 42 g 碳酸氢钠,加 1000 mL 蒸馏水,若 pH 值不到 8.5,则用浓度为 4 mol 的氢氧化钠调节 pH 至 8.5。取 2 g 风干处理的土样,加入土壤浸提剂碳酸氢钠溶液 40 mL,在 25 °C 室温下用回旋振荡器振荡 30 min,将浸提液过滤在小烧杯中。此过滤液即为待测液。

配制磷标准液(0.1 g/L):称取 0.4390 g 预先在 105 °C 干燥并已经恒重过的磷酸二氢钾,精确至 0.1 mg,溶于 50 mL 蒸馏水中,加入 5 mL 浓硫酸,加蒸馏水定容于 1000 mL 的容量瓶中,用水稀释至刻度线,摇匀。

配制钼酸铵溶液(10 g/L):称取 10 g 钼酸铵,精确至 0.5 g,溶于 300 mL 蒸馏水中。将 100 mL 浓硫酸缓缓加入到 400 mL 蒸馏水中,并不停的搅拌,冷却后加入已配好的钼酸铵溶液中,再冷却。称取 0.5 g 酒石酸锑钾,溶于钼酸铵溶液。将上述溶液转移至 1000 mL 棕色容量瓶中,加水稀释至刻度线,摇匀。

配制还原剂(100 g/L):称取 10 g 抗坏血酸溶于 100 mL 水中。再称取 0.040 g 的 EDTA 溶于抗坏血酸溶液中。将此溶液转移至 100 mL 容量瓶中。加入 EDTA 可延长抗坏血酸的稳定性,对实验数据的重复性和可信度有较大的提高。

#### 2.2.2 标准曲线绘制

有机磷中的磷酸酯键容易在降解条件下发生水解,转化为磷酸盐,而磷酸盐在一定的酸性环境下,能与钼酸铵发生反应,生成的磷钼杂多酸再加入还原剂后可以转化为蓝色的络合物,即磷钼蓝。根据反应产生的磷钼蓝的颜色深浅就可作为土壤中磷含量的判定指标。

分别取磷标准液 0、1、2、3、4、5、6、7、8 mL 于 9 个 50 mL 的容量瓶中,用去离子水稀释至 30 mL 后,依次加入 5 mL 0.2 mol/L 的柠檬酸、2 mL 10g/L 的钼酸铵溶液,间隔 30 秒后加入 1 mL 还原剂,用水稀释至刻度线,摇匀。在室温下显色 30 min。用空白组调零,用 1 cm 比色皿在所筛选的特征波长下测定吸光度。重复实验 5 次。

#### 2.2.3 样品分析

吸取 5 mL 过滤后的待测液于 5 个 50 mL 的容量瓶中,用去离子水稀释至 30 mL 后,分别加入 5 mL 0.2 mol/L 的

柠檬酸、2 mL 10 g/L 的钼酸铵溶液，间隔 30 秒后加入 1 mL 还原剂，摇匀排出气泡，加水定容至 50 mL 后摇匀，在室温下显色 30 min 后，用 1 cm 比色皿在所筛选的特征波长下测定吸光度。

2.2.4 TFC-203 智能土肥养份综合测试仪的测试

用干净的塑料吸管向比色皿中加去离子水至三分之二的位置，作为空白对照组，放入 TFC-203 智能土肥养份综合测试仪的比色暗盒中的 1 号槽中，如图 1 所示。用干净的塑料吸管向比色皿中加入 18 滴蒸馏水，加入 2 滴磷标准液，然后摇匀，放入 2 号槽中，此标准液含量为 20 mg/L。将 2.2.2 节及 2.2.3 节中放入分光光度计测试的比色皿依次放入 3 号、4 号、5 号、6 号槽中，依次检测待测液的浓度。



图 1 TFC-203 智能土肥综合测试仪的比色暗盒

Fig. 1 Colorimetric cassette of TFC-203 intelligent soil nutrient tester

3 结果与分析

3.1 检测波长的选择

将配制的浓度为 80 mg/L 的待测液用紫外-可见分光光度计在波长 600~900 nm 范围内进行扫描后得到的吸收光谱如图 2 所示。由图 2 可知，在实验检测范围内，此磷钼蓝反应体系有 2 个吸收峰，分别在 720 nm 和 870 nm 处，最大吸收峰在 870 nm 处，略低于国家标准 GB 12297-1990 《石灰性土壤有效磷含量测定》<sup>[16]</sup>中给出的 880 nm，因此选取 870 nm 作为特征波长。将测得的数据进行平滑处理，得到吸收光谱图如图 3 所示。

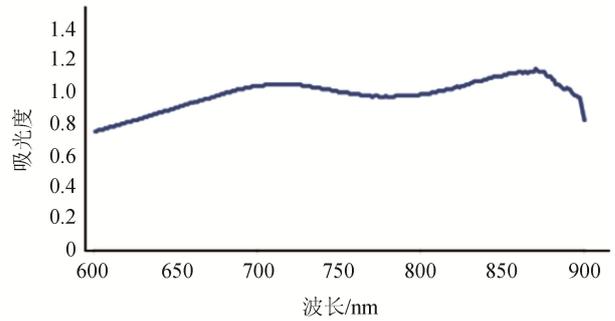


图 2 浓度为 80 mg/L 时磷钼蓝反应吸收曲线

Fig. 2 Absorption curve of phosphorus molybdenum blue reaction (80 mg/L)

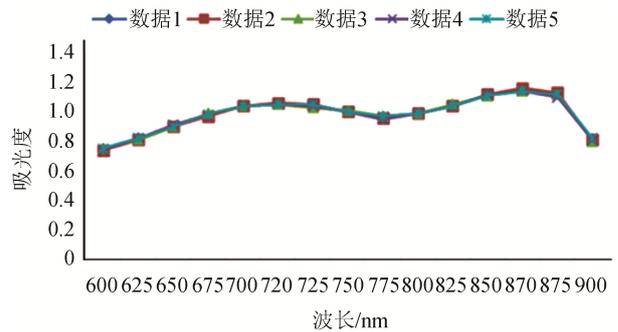


图 3 平滑处理后的浓度为 80 mg/L 时磷钼蓝反应吸收曲线

Fig. 3 Absorption curve of phosphorus molybdenum blue reaction after smoothing (80 mg/L)

3.2 数据拟合

3.2.1 偏最小二乘法拟合

利用偏最小二乘法对实验所得光谱数据进行建模，在提高运算效率与模型可靠性的同时也可以减少噪声对模型的影响。在特征波长 870 nm 下获取了各浓度磷酸根的量与吸光度的关系，通过 MATLAB 用偏最小二乘法进行线性拟合，通过 5 次实验得到直线拟合图，其中第一次实验的拟合图如图 4 所示，其拟合的一阶线性方程如下：

$$Y=0.01532X-0.1109.$$

式中 X 为磷酸根溶液浓度，Y 为特征波长 870 nm 时的磷酸根溶液的吸光度。本次实验的决定系数  $r^2=0.994$ 。5 次实验结果如表 1 所示，5 次实验的平均决定系数为 0.994。

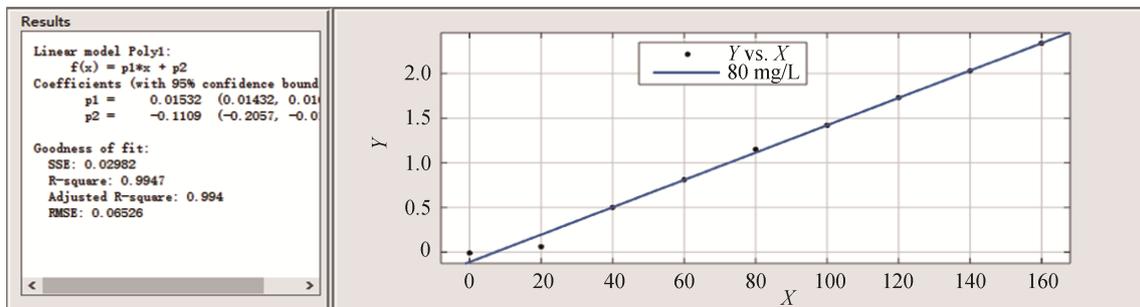


图 4 第一次实验得到的磷钼蓝反应标准曲线

Fig. 4 Standard curve of phosphorus molybdenum blue reaction obtained from experiment one

表 1 基于偏最小二乘法的建模结果  
Table 1 Modeling results based on partial least squares

实验次数	拟合方程	决定系数 $r^2$
1	$Y=0.01532X-0.1109$	0.994
2	$Y=0.01532X-0.1053$	0.995
3	$Y=0.01574X-0.1293$	0.991
4	$Y=0.01518X-0.1047$	0.995
5	$Y=0.01515X-0.1031$	0.995

3.2.2 偏最小二乘法重复性分析

利用偏最小二乘法, 在特征波长 870 nm 时得到的磷酸根含量与吸光度关系模型的重复性测定结果如图 5 所示。

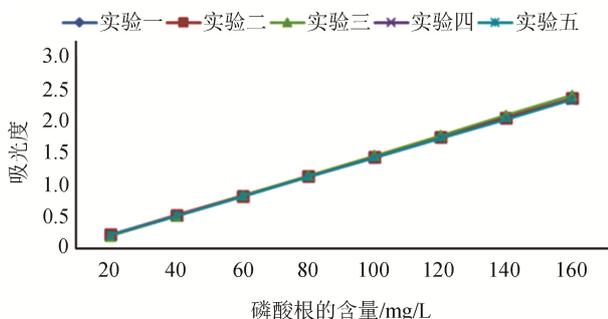


图 5 磷钼蓝反应重复性测定

Fig. 5 Repeatability determination of phosphorus molybdenum blue reaction

计算出 5 次数据经 MATLAB 直线拟合后得到的直线斜率的标准偏差为 0.000236, 截距的标准偏差为 0.010827, 重复性好。

在上述条件下, 得到磷酸根浓度与吸光度的关系式为  $Y=0.01558X-0.1106$ , 决定系数  $r^2=0.995$ 。

式中  $X$  为磷酸根溶液浓度,  $Y$  为特征波长 870 nm 时的磷酸根溶液的吸光度。

3.2.3 多元线性回归法拟合

选取吸收光谱(如图 2 所示)上的两个吸收峰 720 nm、870 nm 和一个吸收谷 800 nm 时所测得的实验数据, 利用 MATLAB 进行多元线性回归建模。其中第一次实验得到的磷酸根浓度与吸光度的关系式为:

$$Y=7.9721-1.7134X_{720}+6.9874X_{800}+60.0156X_{870}$$

式中  $Y$  为磷酸根溶液浓度,  $X_{720}$ 、 $X_{800}$ 、 $X_{870}$  分别为此浓度的磷酸根溶液在波长 720 nm、800 nm、870 nm 时的吸光度。

本次实验的决定系数为  $r^2=0.995$ 。5 次实验结果如表 2 所示, 5 次实验的平均决定系数为 0.995。

表 2 基于多元线性回归法的建模结果  
Table 2 Modeling results based on multiple linear regression

实验次数	拟合方程	决定系数 $r^2$
1	$Y=7.9721-1.7134X_{720}+6.9874X_{800}+60.0156X_{870}$	0.995
2	$Y=7.6945-3.1829X_{720}+7.4231X_{800}+61.2350X_{870}$	0.995
3	$Y=8.0621-3.7341X_{720}+7.2688X_{800}+61.8534X_{870}$	0.995
4	$Y=7.6673-5.0398X_{720}+8.5856X_{800}+62.0789X_{870}$	0.995
5	$Y=7.6321-6.6703X_{720}+10.3470X_{800}+62.0161X_{870}$	0.995

3.2.4 多元线性回归重复性分析

利用多元线性回归法, 选取波长为 720 nm、800 nm、870 nm 时测得的数据得到的磷酸根含量与吸光度的模型进行重复性测定, 将 5 次数据经 MATLAB 处理后得到的回归系数进行比较, 并计算出 5 次实验的回归系数标准偏差分别为 0.1761、1.6825、1.2384、0.7723, 重复性较好, 数据如表 3 所示。

表 3 5 次实验回归系数的标准差  
Table 3 Standard deviation of regression coefficients obtained from five experiments

测量次数	回归系数 b0	回归系数 b1	回归系数 b2	回归系数 b3
1	7.9721	-1.7134	6.9874	60.0156
2	7.6945	-3.1829	7.4231	61.235
3	8.0621	-3.7341	7.2688	61.8543
4	7.6673	-5.0398	8.5856	62.0789
5	7.6321	-6.6703	10.347	62.0161
标准偏差	0.1761	1.6825	1.2384	0.7723

在上述条件下, 利用多元线性回归法选取 720 nm、800 nm、870 nm 时的数据, 得到磷酸根浓度与吸光度的关系式为  $Y=7.6497-5.8551X_{720}+9.4663X_{800}+62.0475X_{870}$ , 决定系数  $r^2=0.995$ 。

式中  $Y$  为磷酸根溶液浓度,  $X_{720}$ 、 $X_{800}$ 、 $X_{870}$  分别为此浓度的磷酸根溶液在波长 720 nm、800 nm、870 nm 时的吸光度。

3.2.5 两种建模方法结果比较

将平滑处理后的 5 组实验数据分别用偏最小二乘法以及多元线性回归法建模。通过建模指标的决定系数  $r^2$  可以判断, 通过偏最小二乘法建模与通过多元线性回归建模得到的模型都较为理想, 决定系数都为 0.995。因此可任意选取其中的一种方式构建的模型, 对土壤中的磷含量进行快速检测。

### 3.3 智能土肥养份综合测试仪的准确性测试结果

将配制的磷标准液用 TFC-203 智能土肥养份综合测试仪进行准确性测试, 得到的结果如表 4 所示。

表 4 TFC-203 智能土肥综合测试仪准确性测试  
Table 4 Accuracy test of TFC-203 intelligent soil nutrient tester

测量次数	实际浓度/(mg/L)	显示浓度/(mg/L)	相对误差
1	20	19.9	0.5%
2	40	40.28	0.7%
3	60	60.06	0.1%
4	80	79.75	0.31%
5	100	102.0	2%
6	120	121.8	1.5%
7	140	141.4	1%
8	160	159.75	0.16%

由表 4 可知, 测试结果符合仪器说明书, 线性误差小于 3.0%<sup>[8]</sup>, 测定准确性较好。

将土壤样品分别用紫外-可见分光光度计检测, 并利用数学模型计算浓度后的结果与直接用 TFC-203 智能土肥养份综合测试仪进行检测的结果进行比对, 两者比对结果如表 5 所示。

表 5 土壤样品检测结果比对  
Table 5 Comparison of soil sample detection results

测量次数	870 nm 时吸光度	计算后浓度/(mg/L)	快速测试浓度	相对误差
1	0.05	10.3	10.17	1.26%
2	0.05	10.3	10.06	2.3%
3	0.05	10.3	9.97	3.2%
4	0.05	10.3	10.28	1.94%
5	0.05	10.3	9.95	3.3%

由表 5 可知 TFC-203 智能土肥综合测试仪对土壤中磷含量的测试值与通过数学模型计算出来的预测值误差在 4% 之内, 测试结果良好。

## 4 结论

在特征波长 870 nm 处, 对磷酸根浓度与吸光度数据进行直线拟合, 分别通过偏最小二乘法与多元线性回归法建立一元线性方程数学模型。两种建模方法得到的模型相关系数相同, 均可对土壤中的磷含量进行快速检测。

对 TFC-203 智能土肥养份综合测试仪进行了准确性测试, 线性误差在 3% 以内, 满足土壤中磷的定量化学检测

要求。

TFC-203 智能土肥综合测试仪对土壤中磷含量的测试值, 通过与数学模型计算值进行对比, 预测值误差在 4% 之内。表明可以利用 TFC-203 智能土肥养份综合测试仪对土壤中的磷含量进行量化的快速检测。

### 参考文献

- [1] 王玉功, 杨发旺, 刘建军, 等. 电感耦合等离子体发射光谱法测定土壤中全磷[J]. 分析测试技术与仪器, 2012, 18(3): 183-186.  
Wang YG, Yang FW, Liu JJ, *et al.* Inductively coupled plasma atomic emission spectrometric determination of total phosphorus in soil [J]. Anal Test Technol Instrum, 2012, 18(3): 183-186.
- [2] 李良, 王晴, 江勇, 等. 离子色谱法同时测定奶粉中亚硝酸根、硝酸根、氯离子和磷酸根[J]. 理化分析(化学分册), 2007, 43(10): 835-837.  
Li L, Wang Q, Jiang Y, *et al.* Simultaneous determination of nitrite, nitrate, chloride and phosphate in milk powder by ion chromatography [J]. Phy Chem Anal (Part B: Chem Anal), 2007, 43(10): 835-837.
- [3] 谢永洪, 张新申. 分光光度法测定磷酸盐的研究进展[J]. 皮革科学与工程, 2009, 19(2): 36-41.  
Xie YH, Zhang XS. Development of spectrophotometric analysis of phosphat [J]. Leather Sci Eng, 2009, 19(2): 36-41.
- [4] 涂华民, 王继业. 比色法测定微量焦磷酸根[J]. 光谱实验室, 2000, 7(3): 313-315.  
Tu HM, Wang JY. Determination of micropyrrophosphate by colorimetric assay [J]. Chin J Spectrosc Lab, 2000, 7(3): 313-315.
- [5] 莫达松, 关雄俊, 张兰, 等. ICP-AES 法测定磷酸盐中的钙和磷[J]. 光谱实验室, 2000, 17(1): 104-106.  
Mo DS, Guan XJ, Zhang L, *et al.* Determination of phosphorus and calcium in phosphate by ICP-AES [J]. Chin J Spectrosc Lab, 2000, 17(1): 104-106.
- [6] 李琼. 基于铜纳米材料的非酶有机磷农残电化学传感检测研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.  
Li Q. A Non-enzymatic organophosphorus pesticides sensor based on copper nanomaterials [D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.
- [7] 张雪梅, 汪徐春, 许晨晨, 等. 土壤中有效磷快速测定方法的研究[J]. 安徽科技学院学报, 2015, 29(5): 50-54.  
Zhang XM, Wang XC, Xu CC, *et al.* The study of fast determination method of effective phosphorus in soil [J]. J Anhui Sci Technol Univ, 2015, 29(5): 50-54.
- [8] [8] 牛红红, 孟繁磊, 张国辉, 等. 土壤中有效磷测定不确定度评定[J]. 黑龙江农业科学, 2016, (7): 38-40.  
Niu HH, Meng FL, Zhang GH, *et al.* Evaluation of uncertainty of determination of available phosphorus in soil [J]. Heilongjiang Agric Sci, 2016, (7): 38-40.
- [9] 田翔, 乔治军. 糜子中全磷、全钾含量的测定[J]. 山西农业科学, 2016, 44(8): 1092-1094.  
Tian X, Qiao ZJ. Determination of total phosphorus and total potassium contents in *Panicum miliaceum* [J]. J Shanxi Agric Sci, 2016, 44(8): 1092-1094.
- [10] 杨依彬, 官利兰, 邓兰生, 等. 两种测定水溶肥中全磷方法的比较研究[J]. 磷肥与复肥, 2015, 30(10): 41-43.  
Yang YB, Guan LL, Deng LS, *et al.* Comparative study of two

- determining methods of phosphorus in water soluble fertilizer [J]. Phosphate Compound Fertilizer, 30(10): 41–43.
- [11] 白杨, 刘善江, 马良, 等. ICP-OES 法测定水溶肥料中的磷和钾[J]. 贵州农业科学, 2015, 43(1): 90–94.  
Bai Y, Liu SJ, Ma L, *et al.* P and K elements in water-soluble fertilizers determined by ICP-OES [J]. Guizhou Agric Sci, 2015, 43(1): 90–94.
- [12] 马宗琪, 衣宁, 杨发斌, 等. 植物中氮磷钾元素含量的快速测定方法[J]. 现代农业科技, 2014, (1): 140, 142.  
Ma ZQ, Yi N, Yang FB, *et al.* A rapid detection method of nitrogen, phosphorus and potassium in plants [J]. Mod Agric Sci Technol, 2014, (1): 140, 142.
- [13] 刘焯潼, 陈秋生, 张强, 等. 联合消解测定海水底泥中全氮、全磷的含量[J]. 天津农业科学, 2011, 17(6): 45–47.  
Liu YT, Chen QS, Zhang Q, *et al.* Determination of total nitrogen and total phosphorus of marine sediment by sulfuric acid – hydrogen peroxide digest [J]. Tianjin Agric Sci, 2011, 17(6): 45–47.
- [14] 宋钰, 边超, 李洋, 等. 基于紫外热消解的小型自动化总磷检测系统[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2015, 13(5): 805–809.  
Song Y, Bian C, Li Y, *et al.* Small automatic total phosphorus testing system based on ultraviolet digestion [J]. J Terahertz Sci Electr Inf Technol, 2015, 13(5): 805–809.
- [15] 王献华, 谢如林, 周柳强, 等. Olsen 法测定的土壤速效磷含量与土壤 pH 值的相关性研究[J]. 广西农业科学, 2008, 39(2): 199–201.  
Wang XH, Xie RL, Zhou LQ, *et al.* Content of available phosphorus in soil determined by Olsen method and its correlation with soil pH [J]. Guangxi Agric Sci, 2008, 39(2): 199–201.
- [16] GB 12297-1990 石灰性土壤有效磷含量测定[S].  
GB 12297-1990 Method for the determination of available phosphorus in calcareous soil [S].

(责任编辑: 白洪健)

## 作者简介



孙 明, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要研究方向为数字图像处理、机器视觉及光谱技术在农业质量安全中的应用。  
E-mail: sunming@cau.edu.cn