

小麦不同组织器官叶绿素测定方法的比较研究

丁富功¹, 侯泽豪¹, 卢奕霏¹, 宋婧含¹, 孙悦¹, 马东方¹, 刘易科², 朱展望²,
张鹏飞³, 张迎新¹, 方正武¹, 王书平^{1*}

(1. 长江大学农学院/主要粮食作物产业化湖北省协同创新中心, 湖北 荆州 434025; 2. 湖北省农业科学院粮食作物研究所, 武汉 430064; 3. 襄阳市农业科学院, 湖北 襄阳 441057)

摘要: 为了更准确、高效地揭示小麦不同器官的叶绿素含量, 本研究以小麦的旗叶、小花和花药为材料, 分别采用 80% 丙酮研磨法 (Arnon 法)、丙酮乙醇研磨法、丙酮乙醇浸提法来提取小麦不同组织器官的叶绿素。结果表明: 不同提取方法提取的叶绿素溶液的吸光光谱基本一致, 但在提取效率上存在差异, 其中丙酮乙醇研磨法为旗叶和小花叶绿素提取的最佳方法, 而用丙酮乙醇浸提法 (浸提 18 h) 提取小麦花药的效率更高, 这为准确提取和检测小麦不同组织器官叶绿素提供了必要的技术支持。

关键词: 小麦; 旗叶; 小花; 花药; 叶绿素含量

中图分类号: S512.1

文献标识码: A

文章编号: 2096-5877(2022)05-0111-05

Comparative Study on Determination of Chlorophyll in Different Tissues and Organs of Wheat

DING Fugong¹, HOU Zehao¹, LU Yifei¹, SONG Jinghan¹, SUN Yue¹, MA Dongfang¹, LIU Yike², ZHU Zhanwang²,
ZHANG Pengfei³, ZHANG Yingxin¹, FANG Zhengwu¹, WANG Shuping^{1*}

(1. College of Agriculture, Yangtze University/Hubei Center for Collaborative Innovation of Grain Industry, Jingzhou 434025; 2. Food Crops Institute, Hubei Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430064; 3. Xiangyang Academy of Agricultural Sciences, Xiangyang 441057, China)

Abstract: In order to reveal the chlorophyll content of different organs of wheat more accurately and efficiently, the flag leaf, floret and anther of wheat were used as materials in this study to extract chlorophyll from different tissues and organs of wheat by using 80% acetone grinding method (Arnon method), acetone ethanol grinding method, and acetone ethanol extraction method respectively. The results showed that the absorption spectra of chlorophyll solutions extracted by different extraction methods were basically the same, but there were differences in extraction efficiency. Among them, the acetone ethanol grinding method was the best method for extracting chlorophyll from flag leaves and florets, while the acetone ethanol extraction method (extraction for 18 hours) was more efficient for extracting wheat anthers, which provided necessary technical support for accurate extraction and detection of chlorophyll from different tissues and organs of wheat.

Key words: Wheat; Flag leaf; Floret; Anther; Chlorophyll

叶绿素是叶绿体的主要成分, 是植物进行光合作用的主要色素, 它能吸收光能, 并在叶绿体将产生的能量同化二氧化碳和水制造有机物质释

放氧气。因此, 叶绿素含量以及叶绿素 a 和叶绿素 b 的比值是植物营养胁迫、光合作用能力和生长状况的重要指示因子, 对植物生理特性和抗性研究具有重要意义^[1]。在小麦整个生长发育期间, 叶绿素是延缓叶片衰老和促进生殖发育的重要因子之一^[2], 直接影响小麦光合作用速率和光合产物形成^[3]。叶绿素的含量是植物生长发育的重要生理指标之一, 其含量与植物光合速率、营养状况、光合作用等密切相关^[4]。

目前, 常用的叶绿素含量的测定主要是用丙

收稿日期: 2019-12-21

基金项目: 湖北省科学技术重大创新专项 (2018ABA085); 湖北省自然科学基金 (2017CFB234)

作者简介: 丁富功 (1995-), 男, 在读博士, 研究方向: 作物遗传育种。

通讯作者: 王书平, 男, 博士, 副教授, E-mail: wangshuping2003@126.com

酮、乙醇混合液法浸提测定,并利用分光光度计测定叶绿素的吸光度,通过公式来计算出叶绿素含量^[5]。SPAD-502叶绿素仪因具有快速、简便和无损的特点常用于大田试验数据检测^[6]。但由于SPAD叶绿素仪测定的是相对含量,在日常试验中以分光光度计法测定叶绿素的绝对含量应用最广泛^[7],并根据对样品的处理方法和提取溶剂的不同,又衍生出多种测定方法,同一样品选择不同的测定方法对测定结果也会产生较大偏差^[8]。国际上广泛采用Arnon法,但该方法由于要先加入石英砂研磨,研磨后又需过滤、除渣,工作量大,步骤繁琐,不适宜田间大量样品的提取和测定^[9]。据此,对叶绿素提取方法进行了改进和完善,并衍生出了二甲基亚砷(DMSO)法^[10]、丙酮乙醇水混合液法^[11]和丙酮乙醇混合液法^[12]等。DMSO法通过二甲基亚砷直接浸提植物组织中的叶绿素,省去了研磨和过滤的步骤;但由于提取叶绿素需在65℃的高温下进行,高温使叶绿素遭受破坏,使其光谱吸收峰后移,并导致沿用Arnon公式计算存在一定误差^[11]。此外,DMSO受温度影响较大,温度低于19℃时,提取液DMSO会出现大量的结晶。研究表明二甲基甲酰胺(DMF)可在室温条件下从完整植物材料中直接提取叶绿素,并克服了DMSO法需在65℃高温条件下提取的缺点^[10],于志刚等^[13]和杨彩根等^[14]利用DMF对海水中浮游植物的叶绿素进行提取和测定,结果表明DMF法具有提取时间短,萃取率高,重复性和稳定性好的特点;但DMF和DMSO均有一定的毒性,经呼吸道和皮肤吸收会引起中毒反应,对操作人员有一定的危害。近年来,研究人员先后研究了丙酮、乙醇及其不同配比方式和不同的提取方法(研磨和浸提)对叶绿素提取效果的影响^[11-12],研究表明丙酮:无水乙醇:蒸馏水=4.5:4.5:1的混合液浸提法对杜鹃叶片叶绿素提取效果较好^[15];丙酮:乙醇=1:1的混合液浸提法适合小麦、小白菜、冬青叶片叶绿素的提取;丙酮:乙醇=1:2的混合液则适合提取油菜叶片的叶绿素^[7, 16-17]。但由于不同植物或同一植物不同组织和器官在色素组成、次生代谢物等方面存在显著的差异,以及叶绿素本身易受溶剂、温度、提取时间和溶解度等的影响,不同提取方法对叶绿素含量测定影响很大^[19]。因此,探索和优化适合不同组织器官的叶绿素精确测定方法对实验结果的可靠性分析仍是关键。

本研究分别以小麦的旗叶、小花和花药为材

料,对叶绿素的提取方法进行探索和优化,旨在为植物叶绿素的提取和含量测定提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料处理

供试小麦品种为西农1376。待花药发育至单核早期,4℃分别收集旗叶、小花和花药进行试验,取样时期的确定按Wang等^[18]的方法进行。

1.2 叶绿素提取方法

80%丙酮研磨法(Arnon法):分别称取新鲜的小麦旗叶、小花和花药各1g,放入预冷的研钵中,加入5mL提取液(80%丙酮)和少量石英砂,充分研磨成匀浆状后,用滤纸过滤、用提取液洗涤后定容至25mL,并立即在645nm和663nm波长下测定吸光值。

丙酮乙醇研磨法:分别称取新鲜的小麦旗叶、小花和花药各1g,放入预冷的研钵中,加入丙酮:乙醇=1:1的提取液5mL和少量石英砂,充分研磨成匀浆状后,在恒温摇床(110r/min,避光)浸提14h,过滤、定容至25mL,测定其在645nm和663nm波长下吸光值。

丙酮乙醇浸提法:分别称取小麦旗叶、小花和花药各1g,分别加入25mL浸提液(丙酮:乙醇=1:1),并置于恒温摇床(110r/min,避光)分别浸提12、14、16、18、20、22h,过滤、定容至25mL,测定其在645nm和663nm波长下吸光值。

同时对不同提取方法进行400~700nm波段扫描吸收光谱。

1.3 统计方法

试验设置三个重复,每个重复进行三次测量。所得数据经Amon公式计算叶绿素含量:

$$\text{叶绿素 a (mg/g)} = (12.71 \times A_{663} - 2.59 \times A_{645}) \times V/W$$

$$\text{叶绿素 b (mg/g)} = (22.88 \times A_{645} - 4.67 \times A_{663}) \times V/W$$

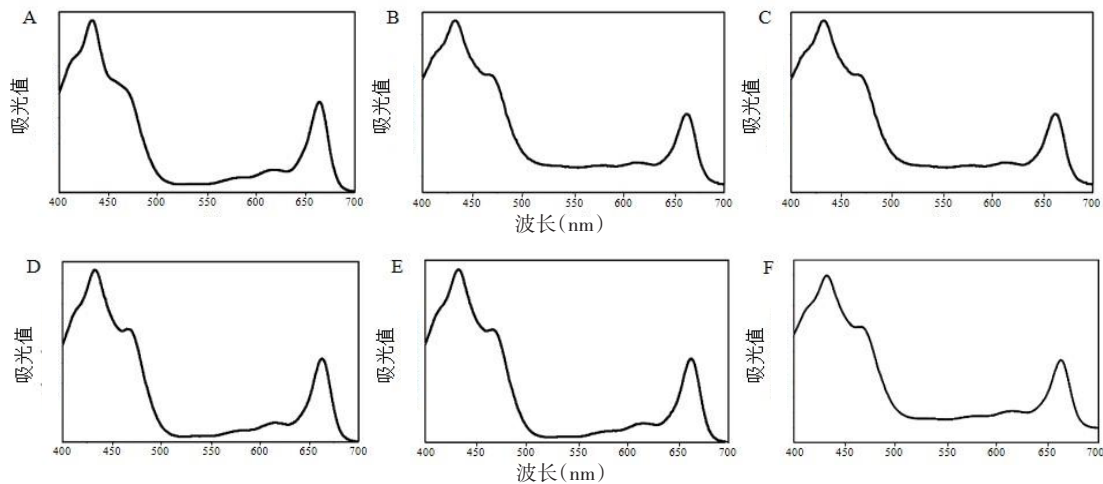
$$\text{叶绿素总含量 (mg/g)} = (8.04 \times A_{663} + 20.29 \times A_{645}) \times V/W$$

利用Microsoft Excel 2010进行数据整理和统计分析。最终结果以“平均值±标准差”表示。

2 结果与分析

2.1 叶绿素不同提取方法的吸收光谱比较

为了对不同提取方法的吸收光谱进行比较分析,本研究分别提取了小麦的旗叶、小花和花药叶绿素,并利用紫外分光光度计进行了全波长(400~700nm)扫描(图1)。结果显示:3种方法所提取的旗叶、小花和花药叶绿素的吸收光谱基本一致,波峰和波谷所对应的波长基本相同,且在



注: A~C: 小花叶绿素吸光值; D~F: 花药叶绿素吸光值; A、D: 80% 丙酮研磨法 (Arnon 法); B、E: 丙酮乙醇研磨法; C、F: 丙酮乙醇直接浸提法

图 1 不同叶绿素提取液吸收光谱图

435 nm 和 665 nm 处都呈现出明显的吸收峰, 分别为类胡萝卜素的吸收峰以及叶绿素 a 和叶绿素 b 共同形成的吸收峰, 所有光谱图的形状基本相似。因此, 本研究中针对小麦小花和花药的 3 种不同的叶绿素提取方法均可采用 Arnon 法的计算公式。

2.2 小麦旗叶叶绿素提取方法的比较分析

分别采用 80% 丙酮研磨法 (Arnon 法)、丙酮乙醇研磨法和丙酮乙醇直接浸提法提取并测定小麦旗叶叶绿素, 结果见表 1。不同提取方法的提取效果存在一定的差异, 经比较发现, 丙酮乙醇研磨法对小麦旗叶的叶绿素提取效果最佳, 且提取的叶绿素 a、叶绿素 b 和总叶绿素的含量均显著高于 80% 丙酮研磨法 (Arnon 法) 和丙酮乙醇直接浸提法。采用丙酮乙醇直接浸提法在提取小麦旗叶叶绿素过程中, 叶绿素的提取量呈现先增加后减少的趋势, 在浸提 20 h 达到最大值。故采用丙酮乙醇研磨法为最优的旗叶叶绿素提取方法。

表 1 不同提取方法提取小麦旗叶叶绿素含量

提取方法	mg/g		
	叶绿素 a	叶绿素 b	总叶绿素
80% 丙酮研磨法	1.891±0.003a	0.585±0.002a	2.476±0.004a
丙酮乙醇研磨法	2.358±0.007e	0.694±0.003b	3.059±0.01d
丙酮乙醇浸提 12 h	1.679±0.002f	0.452±0.003c	2.131±0.002e
丙酮乙醇浸提 14 h	1.762±0.007g	0.485±0.001d	2.246±0.007f
丙酮乙醇浸提 16 h	1.837±0.007h	0.505±0.002e	2.342±0.009g
丙酮乙醇浸提 18 h	1.908±0.01b	0.524±0.002f	2.432±0.012h
丙酮乙醇浸提 20 h	2.033±0.017d	0.559±0.004h	2.593±0.02c
丙酮乙醇浸提 22 h	1.975±0.017c	0.541±0.002g	2.516±0.019b

注: 同列不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$), 下同

2.3 小麦小花叶绿素提取方法的比较分析

表 2 结果表明, 由丙酮和乙醇组成的研磨法或浸提法对小花叶绿素的提取效果均优于 80% 丙酮研磨法 (Arnon 法), 叶绿素 a、叶绿素 b 和总叶绿素的含量均显著高于 80% 丙酮研磨法 (Arnon

表 2 不同提取方法提取小麦小花叶绿素含量

提取方法	mg/g		
	叶绿素 a	叶绿素 b	总叶绿素
80% 丙酮研磨法	0.196±0.014a	0.073±0.000a	0.269±0.014a
丙酮乙醇研磨法	0.259±0.011e	0.086±0.002b	0.345±0.012d
丙酮乙醇浸提 12 h	0.221±0.004b	0.091±0.001bcd	0.312±0.004b
丙酮乙醇浸提 14 h	0.222±0.005bc	0.087±0.000bc	0.309±0.004b
丙酮乙醇浸提 16 h	0.227±0.005bcd	0.092±0.001bcd	0.319±0.006bc
丙酮乙醇浸提 18 h	0.232±0.003bcd	0.094±0.003d	0.326±0.001c
丙酮乙醇浸提 20 h	0.232±0.004bcd	0.091±0.001bcd	0.323±0.004bc
丙酮乙醇浸提 22 h	0.236±0.003cd	0.091±0.005bcd	0.328±0.008c

法)。同时, 丙酮乙醇研磨法提取的叶绿素 a 和总叶绿素含量显著高于丙酮乙醇直接浸提法, 而叶绿素 b 含量则没有显著差异。此外, 丙酮乙醇浸

提法浸提时间的长短对叶绿素的提取效果没有较大影响。因此, 本研究认为丙酮乙醇研磨法为小麦小花叶绿素提取的最佳方法。

2.4 小麦花药叶绿素提取方法的比较分析

表 3 结果表明,丙酮乙醇直接浸提法提取的叶绿素 a、叶绿素 b 和总叶绿素的含量均显著高于 80% 丙酮研磨法 (Arnon 法) 和丙酮乙醇研磨法,且

随着浸提时间的延长,叶绿素的提取量也随着增加,浸提 18 h 达到最大值,随后呈下降趋势。故丙酮乙醇直接浸提 18 h 为最优的花药叶绿素提取方法。

表 3 不同提取方法提取小麦花药叶绿素含量 mg/g

提取方法	叶绿素 a	叶绿素 b	总叶绿素
80% 丙酮研磨法	0.235±0.013a	0.083±0.002a	0.318±0.015a
丙酮乙醇研磨法	0.256±0.013b	0.088±0.006a	0.344±0.019a
丙酮乙醇浸提 12 h	0.280±0.004c	0.164±0.012b	0.444±0.016b
丙酮乙醇浸提 14 h	0.285±0.001cd	0.170±0.008bc	0.455±0.009bc
丙酮乙醇浸提 16 h	0.296±0.005de	0.185±0.005cd	0.482±0.010cd
丙酮乙醇浸提 18 h	0.307±0.005e	0.203±0.017d	0.509±0.021d
丙酮乙醇浸提 20 h	0.307±0.008e	0.193±0.009d	0.500±0.016d
丙酮乙醇浸提 22 h	0.302±0.007e	0.188±0.016d	0.489±0.022d

3 讨 论

叶绿素是植物体内叶绿体的重要组成成分,是植物光合作用中吸收光的主要色素,能将捕捉到的光能转化为生物能,为植物生长发育提供所需的营养物质和能量。因此对叶绿素的准确测定对研究植物氮素营养等生理变化和反映植物利用光能效率的高低有着一定的指导意义^[7,19],而选择稳定、高效的叶绿素提取方法则有利于得到准确、可靠的测定数据,因此建立适合于不同植物组织叶绿素的有效提取方法是叶绿素准确测定的前提。前人对植物叶绿素测定因植物种类不同结果各异,但均发现丙酮、乙醇混合溶剂浸提效果较好^[17]。本试验亦发现丙酮、乙醇混合溶剂在提取小麦不同组织叶绿素的效果和稳定性方面均优于以 80% 丙酮为溶剂的 Arnon 法。此外,光也是影响叶绿素稳定的重要因素,且叶绿素 a 降解速度快于叶绿素 b,因此,叶绿素 a 的提取速度及其稳定性保持是叶绿素提取效率的关键^[9]。基于此,本研究将叶绿素的提取时间设定在 24 h 之内,萃取过程均在避光条件下进行。

针对小麦不同组织器官在细胞结构、细胞内容物和光合特性等方面存在差异,为了建立快速、准确的叶绿素测定方法,本研究分别以小麦的旗叶、小花和花药为供试材料,比较分析了 3 种叶绿素提取方法的提取效率。结果表明,3 种叶绿素提取液的吸收光谱基本一致,均可套用 Arnon 计算公式进行叶绿素的测定。前人研究结果认为 Arnon 法提取麻烦,工作量大,提取过程中叶绿素易受光氧化破坏,使测定值偏低^[20]。同时由于小麦旗叶的细胞结构比较特殊,在光学显微镜

下旗叶的叶肉细胞呈现出单个或(和)多个细胞紧密连接在一起的排列方式,组织偏厚、叶绿素含量较高;小花位于小穗的两片护颖之内,每朵小花由内外颖、3 枚雄蕊、1 枚雌蕊、2 个浆片组成,是小麦生殖发育的主要器官,组织器官较大。因此,研究发现采用直接浸提的方法很难在短时间内充分萃取出旗叶和小花中的叶绿素,且萃取结束后仍能看到组织上有部分叶绿素残留。而采用丙酮、乙醇混合溶剂结合组织研磨的方法,可以使组织器官碎片化,同时通过不间断振荡,使碎片化的组织器官与提取液充分有效接触混合,大大提高了提取效率。本研究认为采用丙酮乙醇研磨法提取小麦旗叶和小花的叶绿素效果较好。花药是小麦生殖生长阶段最活跃的组织器官之一,经历着物质和能量之间的频繁转化,在花药内存在大量的糖类、脂类、淀粉类以及各种植物生长调节物质^[21]。研究表明糖的积累可以导致叶绿素含量下降,植物生长调节物质可以激活叶绿素降解酶类加速叶绿素降解^[22]。同时,花药组织相对偏小,并随着花药的不断发育叶绿素含量逐渐减少,糖类物质不断增加^[19]。因此,采用比较温和的丙酮乙醇直接浸提法可以有效减缓糖类和植物生长调节物质的释放,并通过对浸提时间进一步优化,可以有效地提高花药叶绿素萃取效率。

综上所述,小麦旗叶和小花的叶绿素提取宜选用丙酮乙醇研磨法,而花药中叶绿素的提取则宜选用丙酮乙醇直接浸提法且浸提时间为 18 h。此外,光是影响小麦叶绿素稳定性的重要因素,所以在叶绿素浸提、测定及保存时,要尽量选择避光处理。本研究针对小麦不同组织器官的特性,建立了适宜而有效的叶绿素提取方法,这为

科研数据的准确性提供了重要的指导方法。

参考文献:

- [1] 吕梦雨,魏晓楠,王秋悦,等.植物叶绿素含量不同提取方法的比较研究[J].中国农学通报,2016,32(27):177-180.
- [2] 侯泽豪,张迎新,王欢,等.高温胁迫对小麦花药叶绿素质量分数及RuBP羧化酶基因表达的影响[J].西北农业学报,2018,27(9):1280-1286.
- [3] 李亚婷,朱荣,李昱,等.小麦早衰研究综述[J].农业科学研究,2015,36(3):57-62.
- [4] 张晓琳,陈梦恬,翟鹏辉,等.增水和施肥对苜蓿-冬小麦轮作系统冬小麦叶片光合速率和叶绿素含量的影响[J].山西农业大学学报(自然科学版),2019,39(4):40-46.
- [5] 宋廷宇,何自涵,程艳,等.菜心叶片SPAD值与叶绿素含量的相关性分析[J].东北农业科学,2017,42(1):34-37.
- [6] 宋廷宇,吴春燕,常雪,等.西葫芦叶片SPAD值与叶绿素含量相关性分析[J].吉林农业科学,2014,39(3):67-70.
- [7] 薛香,吴玉娥.小麦叶片叶绿素含量测定及其与SPAD值的关系[J].湖北农业科学,2010,49(11):2701-2702.
- [8] 向芬,李维,刘红艳,等.茶树叶绿素测定方法的比较研究[J].茶叶通讯,2016,43(4):37-40.
- [9] 李得孝,郭月霞,员海燕,等.玉米叶绿素含量测定方法研究[J].中国农学通报,2005,21(6):153-155.
- [10] 苏正淑,张宪政.几种测定植物叶绿素含量的方法比较[J].植物生理学报,1989(5):77-78.
- [11] 惠杜娟,冀乙萌,李瑞梅,等.木薯中两种叶绿素提取方法的比较及其含量测定[J].基因组学与应用生物学,2011,30:1279-1283.

- [12] 洪法水,魏正贵,赵贵文.菠菜叶绿素的浸提和协同萃取反应[J].应用化学,2001,18(7):532-535.
- [13] 于志刚,张经,张耀红,等.提取测定大型海藻叶绿素a的新方法[J].海洋科学,1997(5):1-2.
- [14] 杨彩根,宋学宏,孙丙耀.浮游植物叶绿素a含量简易测定方法的比较[J].海洋科学,2007(1):6-9.
- [15] 何丽斯,苏家乐,刘晓青,等.高山杜鹃叶片叶绿素含量测定及其与SPAD值的关系[J].江苏农业科学,2012,40(11):190-191.
- [16] 徐芬芬,叶利民,徐卫红,等.小白菜叶绿素含量的测定方法比较[J].北方园艺,2010(23):32-34.
- [17] 徐澜,许冰霞,张珺,等.不同材料叶绿素提取条件探究[J].广州化工,2017,45(9):102-105.
- [18] Wang S P, Zhang Y X, Song Q L, et al. Mitochondrial dysfunction causes oxidative stress and tapetal apoptosis in chemical hybridization reagent-induced male sterility in wheat[J]. Frontiers in Plant Science, 2018(8): 2217.
- [19] 李鹏程,董合林,刘爱忠,等.棉花上部叶片叶绿素SPAD值动态变化研究[J].中国农学通报,2012,28(3):121-126.
- [20] 苏正淑.叶绿素测定条件及几种作物叶绿素含量的研究[J].沈阳农学院学报,1982(1):81-86.
- [21] 彭京青,赵海风,庞光惠.小麦高产节水栽培技术综述[J].山东省农业管理干部学院学报,2005(5):173.
- [22] Jacob-Wilk D, Holland D, Goldschmidt E E, et al. Chlorophyll breakdown by chlorophyllase: isolation and functional expression of the chlase1 gene from ethylene-treated citrus fruit and its regulation during development[J]. Plant Journal, 2010(20): 653-661.

(责任编辑:王丝语)

(上接第110页)

参考文献:

- [1] Han W Y, Ma L F, Shi Y Z, et al. Nitrogen release dynamics and transformation of slow release fertiliser products and their effects on tea yield and quality[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2010, 88(5): 839-846.
- [2] Han Z Y, Zhu X C, Fang X Y, et al. Hyperspectral estimation of apple tree canopy LAI based on SVM and RF regression[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2016, 36(3): 800-805.
- [3] 陈百翠,魏峭嵘,石瑛,等.SPAD值在马铃薯氮素营养诊断和推荐施肥中的研究与应用[J].吉林农业科学,2014,39(4):26-30,38.
- [4] 姚霞,朱艳,田永超,等.小麦叶层氮含量估测的最佳高光谱参数研究[J].中国农业科学,2009,42(8):2716-2725.
- [5] 贾学勤,冯美臣,杨武德,等.基于多植被指数组合的冬小麦地上干生物量高光谱估测[J].生态学杂志,2018,37(2):424-429.
- [6] 黄春燕,王登伟,曹连莆,等.棉花地上鲜生物量的高光谱估算模型研究[J].农业工程学报,2007,23(3):131-135.
- [7] 刘斌,任建强,陈仲新,等.冬小麦鲜生物量估算敏感波段中心及波宽优选[J].农业工程学报,2016,32(16):125-134.
- [8] 任建强,吴尚蓉,刘斌,等.基于Hyperion高光谱影像的

冬小麦地上干生物量反演[J].农业机械学报,2018,49(4):199-211.

- [9] Millard P, Wright G, 杨帆.根据红光和近红外光谱区的反射率估算马铃薯的光截获量和生物量[J].气象科技,1991(6):47-51.
- [10] 蔡兆伟,孙玉军,刘凤娇.长白落叶松林下灌木生物量模型研究[J].河南农业科学,2013,42(6):126-129.
- [11] 牛庆林,冯海宽,杨贵军,等.基于无人机数码影像的玉米育种材料株高和LAI监测[J].农业工程学报,2018,34(5):73-82.
- [12] 仇瑞承,苗艳龙,张漫,等.基于线性回归的玉米生物量预测模型及验证[J].农业工程学报,2018,34(10):131-137.
- [13] Abrera-bosquet L, Molero G, Stellacci A M, et al. NDVI as a potential tool for predicting biomass, plant nitrogen content and growth in wheat genotypes subjected to different water and nitrogen conditions[J]. Cereal Research Communications, 2011, 39: 147-159.
- [14] Pradhan S, Bandyopadhyay K K, Sahoo R N, et al. Predicting wheat grain and biomass yield using canopy reflectance of booting stage[J]. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 2014, 42(4): 711-718.
- [15] 吴伟斌,李佳雨,张震邦,等.基于高光谱图像的茶树LAI与氮含量反演[J].农业工程学报,2018,34(3):195-201.

(责任编辑:王丝语)