

不同光质对苦荞萌发过程中的黄酮类化合物及其抗氧化活性的影响

崔琳琳^{1,2},周一鸣²,季红斌²,唐文²,周小理^{2,*}

(1.上海商学院酒店管理学院,上海 201499;

2.上海应用技术学院香料香精技术与工程学院,上海 201418)

摘要:本文以萌发3 d的苦荞为实验材料,通过红光、黄光、绿光、白光、蓝光、紫外A(254 nm)、紫外C(365 nm)七种不同的光质处理萌发过程中的苦荞,研究了不同光质对萌发苦荞中黄酮类化合物、抗氧化活性以及与黄酮合成和降解有关酶类的影响。实验结果表明:经紫外、蓝光、白光、绿光、黄光和红光处理均可显著地增加苦荞芽中总黄酮和芦丁的含量(与暗处理比较),不同处理之间有显著性差异($p<0.05$)。C段紫外(UV-C)处理后,苦荞芽中总黄酮和芦丁含量最高,与对照相比分别提高了30.1%、40.9%,蓝光处理其次。同时,经光处理后,苦荞芽中黄酮类物质代谢的关键酶苯丙氨酸解氨酶(PAL)和察尔酮异构酶(CHI)活性均显著升高,与总黄酮和芦丁含量呈现正相关。此外,苦荞萌发过程中,光处理可增加苦荞芽对DPPH自由基的清除率,最高可达35.1%,清除率与总黄酮含量呈正相关,表明光处理可以通过增加苦荞芽中黄酮类物质含量进而提高苦荞的抗氧化活性。

关键词:苦荞,萌发,光质,黄酮类化合物,抗氧化

Effects of light quality on flavonoids and antioxidant properties of germinated tartary buckwheat

CUI Lin-lin^{1,2}, ZHOU Yi-ming², JI Hong-bin², TANG Wen², ZHOU Xiao-li^{2,*}

(1.Department of Hotel Management, Shanghai Business School, Shanghai 201499, China;

2.School of Perfume and Aroma technology, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, China)

Abstract: In this paper, the 3 d germinated buckwheat was used as the material. Effects of light quality (red light, yellow light, green light, white light, blue light, UV-A (356 nm) and UV-C (254 nm)) on flavonoids, antioxidant properties and relative enzymes of flavonoids for treating germinated tartary buckwheat. The results indicated that total flavonoid and rutin content in buckwheat sprouts was significantly increased under the treatment of ultraviolet, blue, white, yellow and red light in the germination process (compared with the dark treatment), and there was significantly different between the different treatment ($p<0.05$). After the treatment of UV-C, total flavonoid and rutin contents in buckwheat sprout were the highest, and increased 30.1% and 40.9% compared with the control group, respectively. Moreover, activity of the key enzymes (PAL and CHI) of flavonoids metabolism in buckwheat sprout were significantly increased, and positive correlated with the contents of total flavonoid and rutin, after the treatment of light. These results demonstrated that after the buckwheat sprout treated with light, the contents of flavonoids were increased by improving the activity of key enzymes in anabolism process of flavonoids. In addition, the DPPH free radical scavenging activity of buckwheat sprout could be increased by the light treatment, and increased up to 35.1% in the process of buckwheat germination. The scavenging activity was positive correlated with the total flavonoids content, and indicated that the flavonoids content in buckwheat sprouts could be increased by the light treatment to improve the antioxidant activity of buckwheat.

Key words: tartary buckwheat; germination; light quality; flavonoids; antioxidant properties

中图分类号: TS201.2

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2016)06-0104-05

doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2016.06.012

收稿日期: 2014-04-02

作者简介: 崔琳琳(1981-), 女, 硕士研究生, 实验师, 研究方向: 食品加工与工艺, E-mail: cuilinlin1234690@163.com。

* 通讯作者: 周小理(1957-), 女, 大学本科, 教授, 研究方向: 功能食品开发, 食品新资源深度开发与利用, E-mail: zhoulxslit@163.com。

基金项目: 国家自然科学基金项目(31371761); 国家燕麦荞麦产业技术体系项目(CARS-08-D-2-5); 2013年上海高校实验技术队伍建设计划项目。

荞麦属双子叶禾谷类作物^[1],主要分为甜荞麦和苦荞两种^[2]。苦荞麦营养丰富,富含蛋白质、脂肪酸、维生素、膳食纤维、各类矿质元素和人体必需的氨基酸,与其他一些粮食作物相比,具有独特的营养优势^[3],并且广受人们的喜爱。

光是植物生长中的重要环境因素,除了能够控制光合作用外,还影响植物中诸多生物类活性物质(如黄酮)的积累^[4],因此,利用调节光质以提高产量或品质已引起人们的广泛关注。研究发现,在大豆秧苗生长过程中,黑暗和光照处理后大豆秧苗体内,异黄酮的分布和含量均有明显区别,光照可以显著性地促进异黄酮的积累^[5]。钱丽华^[6]、李波等^[7]研究发现:光照能够诱导植物组织中黄酮类化合物的积累,光照条件下黄酮类化合物的含量是黑暗中的1.5~2倍^[8]。同时,光对黄酮类化合物的影响同光质也有一定的关系,王丽娟^[9]、樊艳平等^[10]发现在不同光膜的条件下,蓝光最有利于类黄酮积累,红光相对于绿光、黄光、中性光来说对类黄酮物质的影响最小。Khatami^[11]发现在圆叶锦葵细胞培养中,紫外可以显著地增加圆叶锦葵细胞中黄酮和花青素含量。在低高原地区,报春花中的类黄酮含量在一定范围内随UV-B辐射强度增加而增加^[12]。Tsurunaga等^[13]研究了不同色光对苦荞萌发过程中的芦丁和花青素的影响,结果表明白光、红光、绿光、蓝光、UV-A和UV-B均显著性地增加了苦荞中芦丁含量。此外,在黄酮合成代谢过程中,苯丙氨酸解氨酶(PAL)和查尔酮异构酶(CHI)是其合成的关键酶,其活性的也受光的影响。李元等^[14]研究发现同一水稻在不同强度UV-B的辐射下,对水稻中PAL活性的影响不同,在一定范围内增加UV-B强度有利于增加水稻中PAL活性。花菜在冷藏的过程中,暴露于光中可提高其PAL活性^[15]。王海伟等^[16]在探究光照条件对不同粒色小麦籽粒花青素合成与积累的影响中发现未遮光处理的有色小麦,其不同时期籽粒花青素含量变化与PAL和CHI活性变化趋于一致,且呈显著正相关,表明CHI与PAL是有色小麦籽粒花青素合成的关键酶。

综上所述,光质可以显著性地改变苗的生长以及苗中生物类活性物质的含量。本文重点研究了不同光质对萌发苦荞中黄酮类化合物含量,包括影响黄酮类化合物合成与降解的相关酶类的变化,以及对其抗氧化能力的影响,为有效提高苦荞的营养价值提供理论性依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

苦荞(黑丰一号) 购自山西左云;乙二胺四乙酸(EDTA)、巯基乙醇、甘油、0.2 mol/L醋酸缓冲液(pH5.0) 国药集团化学试剂上海分公司,AR级;L-苯丙氨酸 上海楷洋生物技术有限公司,BR级;芦丁 Sigma-Aldrich,纯度>99%;槲皮素 Sigma-Aldrich,纯度>99%。

UV2600紫外可见分光光度计、LC-20A高效液相色谱(包含SIL-20A自动进样器,SPD-M20A检测器 岛津企业管理(中国)有限公司;3-18K高速冷冻

离心机 Sigma公司;SPX-300 IC微电脑人工气候箱 上海博迅实业有限公司;FW-200A 倾斜式高速万能粉碎机 北京中兴伟业仪器有限公司;有色塑料膜(红,黄,蓝,绿,透明) 市售;GL-9406型紫外灯 海门市其林贝尔。

1.2 实验方法

1.2.1 苦荞萌发处理 选种→清洗→浸种→光处理→催芽培养→定时采收。

选取饱满的苦荞籽粒,用洁净水洗净籽粒表面尘土,再用2%次氯酸钠浸泡消毒5 min,最后用去离子水洗净。消毒后种子在30℃条件下,清水浸泡6 h,再冲洗2~3次,25~30℃下进行催芽,每间隔10 h淘洗一次,24 h后种子中可见有白色芽露出时铺种。将种子铺于放置有纱网的白磁盘中,置于30℃人工气候培养箱内避光培养。从铺种时算起,连续培养3 d后取样。并将苦荞芽去壳放入-80℃冰箱里冷冻保存。

1.2.2 光质处理 在萌发过程中,每天分别用红、黄、蓝、绿、透明色膜以及紫外灯(紫外A、紫外C)7种不同光质处理萌发的苦荞1 h,以黑暗作为对照。萌发3 d后将籽粒脱壳后冷冻干燥粉碎,4℃下保存备用。实验重复三次。

1.2.3 萌发苦荞中黄酮类化合物提取及测定 将萌发苦荞去皮经真空冷冻干燥后研磨成粉。称取1 g干粉,用50 mL、70%的乙醇溶液于70℃水浴下振荡提取6 h,将提取液于3000 r/min离心10 min,取上层清液于4℃下保存备用。黄酮类化合物含量测定参照宾婕^[17]的方法略有修改。色谱条件:反相C₁₈柱(4.6 mm×150 mm),流动相为乙腈和磷酸(5%,v/v)为流动相,检测波长256 nm,流速为1 mL/min 测定芦丁含量,流速为0.8 mL/min测定槲皮素含量。所有的样品用0.22 μm滤膜过滤之后进样,进样量为10 μL。用纯度比较高(>99%)的芦丁和槲皮素做标品,每个样品重复测量3次取平均值。

1.2.4 萌发苦荞抗氧化活性的测定 采用DPPH自由基清除法^[18]。

1.2.5 酶的提取与测定

1.2.5.1 粗酶液的提取^[19] 取去壳鲜芽样品1 g于冰浴中,加10 mL的0.1 mol/L的硼酸硼砂缓冲液(pH8.8,内含1 mmol/L的EDTA,5 mmol/L的巯基乙醇,1%的聚乙烯吡咯烷酮(PVP),1%的甘油),研磨成匀浆;12000 r/min,4℃冷冻离心20 min;取上清液(即为粗酶液)立即使用或者-80℃保存备用。

1.2.5.2 苯丙氨酸解氨酶(PAL)酶活力的测定 参考文献[20],在290 nm处测定吸光度,并计算酶活。每个样品重复测量3次取平均值。

1.2.5.3 查尔酮异构酶(CHI)酶活力的测定 参考文献[21],在381 nm处测定吸光度,并计算酶活。每个样品重复测量3次取平均值。

1.2.5.4 粗酶液中蛋白质含量的测定 采用考马斯亮蓝(G-250)法测定。

1.2.5.5 酶比活力的计算 酶比活力=酶活单位(U)/蛋白(mg)

1.2.6 芦丁降解酶(RDEs)的提取^[23]与测定 称取1.0 g 冷冻干燥后苦荞芽粉,加入5 mL提取缓冲液,于冰浴下充分研磨后放入4 ℃冰箱保存3 h,12000 r/min,4 ℃冷冻离心20 min,上清液即为RDE粗酶提取液,立即使用或保存于4 ℃冰箱备用。

RDEs酶活性的测定方法参照Morishita^[22]和Chen^[23]的方法。每个样品重复测量三次取平均值。

1.3 数据处理

实验数据均以平均值±标准差($\bar{x} \pm s$)表示,采用SPSS 19.0软件进行统计学分析,组间比较采用方差齐性检验和单因素方差分析(One Way ANOVA),以 $p < 0.05$ 为差异有统计学意义,并运用Origin 9.0软件进行作图。

2 结果与分析

2.1 芦丁与槲皮素的色谱图及标准曲线

按照1.2.3分析程序,得到芦丁和槲皮素标的HPLC图(图1)。以峰面积为纵坐标,芦丁或槲皮素浓度为横坐标,绘制标准曲线,计算出芦丁或槲皮素的线性回归方程(表1),结果表明该方法的回归系数较高,可满足后续实验的精度要求。

表1 芦丁与槲皮素线性回归方程

Table 1 The standard regression line equation of rutin and quercetin

	回归方程	线性范围 ($\mu\text{g/mL}$)	回归系数 (R^2)
芦丁	$Y=305671.2X+2648.6$	0.05~8.12	0.9993
槲皮素	$Y=389666.6X-6872.4$	0.05~7.43	0.9999

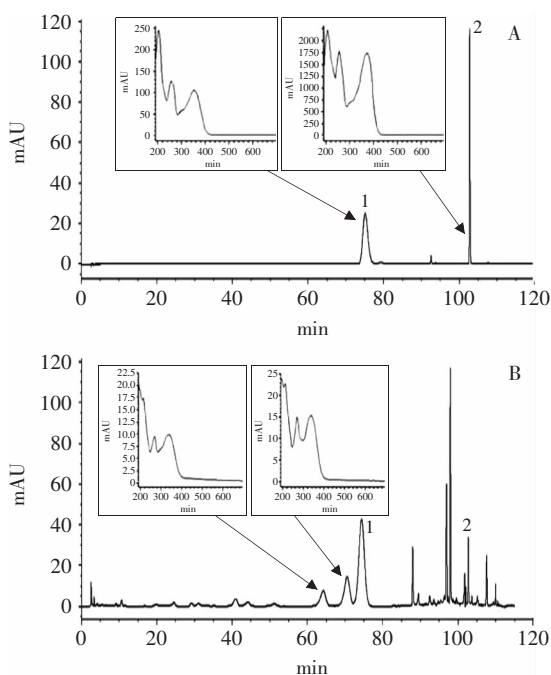


图1 苦荞HPLC图

Fig.1 HPLC chromatography of Tartary buckwheat

注:A混标HPLC图谱,B苦荞HPLC图谱;1芦丁,2槲皮素。

2.2 光质对萌发苦荞中总黄酮含量的影响

图2为不同光质对萌发苦荞中黄酮类化合物含

量的影响,由图2可以看出,相对于黑暗来说,经紫外、蓝光、白光、绿光、黄光和红光处理均可显著地增加苦荞芽中总黄酮含量,不同光质处理之间也均有显著性差异(绿光与黄光处理除外)。其中,C区紫外(UV-C, 254 nm)处理后,苦荞芽中总黄酮含量最高,达到35.13 mg/g干重,与对照相比提高了30.1%,其次分别为白光、蓝光、绿光、黄光、A区紫外(UV-A, 365 nm)和红光,其中红光对萌发苦荞中总黄酮含量的影响最小,绿光与黄光处理之间无显著性差异。此结论与徐茂名、王丽娟等^[9,24]的结果类似。同时,在光谱中,红光、黄光、绿光、蓝光、紫外的波长是依次减小,据此可以认为波长越短,越有利于像黄酮这类次级代谢产物的积累。

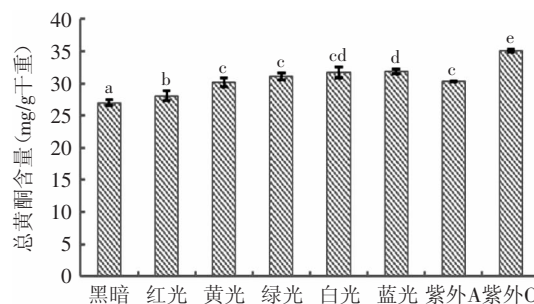


图2 光对萌发苦荞中总黄酮含量的影响(3 d)

Fig.2 Effect of different light quality on total flavonoids content in tartary buckwheat sprouts (3 d)

注:不同小写字母表示差异显著($p < 0.05$)。

2.3 光质对芦丁、槲皮素含量以及抗氧化活性的影响

芦丁是苦荞中最重要的黄酮类物质,由表2可知,与对照(黑暗)相比,红光、黄光、蓝光、绿光、白光、紫外A、紫外C都可以显著促进芦丁的积累。其中,C区紫外(UV-C, 254 nm)对芦丁的影响最大,3 d内使苦荞芽中芦丁提高了40.9%,红光影响最弱(提高了12.3%),其余依次为白光、蓝光、UV-A、黄光和绿光,分别提高了24.7%、23.7%、23.4%、19.2%、18.8%。此外,光处理对苦荞芽中槲皮素、芦丁含量影响不同,绿光处理对槲皮素含量的影响最大,达到5.59 mg/g(干重),提高了20.7%。其次是UV-C处理,提高了

表2 不同光质对芦丁、槲皮素含量以及DPPH影响

Table 2 Effect of different light quality on rutin content, quercetin content and DPPH

	芦丁 (mg/g 干重)	槲皮素 (mg/g 干重)	DPPH (%)
对照(黑暗)	17.45±0.12 ^a	4.63±0.16 ^{ab}	75.67 ^a
红光	19.60±0.31 ^b	4.82±0.11 ^{bc}	80.97 ^b
黄光	20.80±0.30 ^c	4.59±0.12 ^{ab}	82.08 ^b
绿光	20.73±0.30 ^c	5.59±0.18 ^d	79.08 ^b
白光	21.76±0.28 ^d	4.48±0.20 ^{ab}	80.06 ^b
蓝光	21.59±0.37 ^d	4.22±0.13 ^a	82.71 ^b
紫外A (254 nm)	20.03±0.33 ^b	4.81±0.27 ^{bc}	83.03 ^c
紫外C (365 nm)	24.58±0.35 ^d	5.14±0.13 ^c	102.46 ^d

注:同列不同小写字母表示差异显著 $p < 0.05$;表4同。

10.6%, 达到5.14 mg/g(干重)。而红光、黄光、白光、蓝光处理对槲皮素含量的影响与对照无显著性差异。同时, 芦丁与槲皮素作为苦荞黄酮类物质中的主要组分, 光处理分别改变了芦丁或槲皮素组分在总黄酮中的比例, 但二者总量在总黄酮提取物中的比例未见显著性地增加(从85.5%增加到87.0%)。与对照相比, 光处理均提高萌发苦荞清除DPPH自由基能力, 各处理间存在显著性差异。UV-C处理的清除DPPH自由基能力最强, 相对于对照提高了35.1%。

苦荞抗氧化能力体现主要是通过芦丁清除自由基来实现的^[25], 芦丁含量的高低直接影响DPPH自由基清除能力, 光处理对萌发苦荞清除DPPH自由基能力的影响如表3所示。总黄酮含量和芦丁含量分别与DPPH清除率呈现显著的正相关, 相关系数分别为0.836和0.808。由此可知, 光处理提高萌发苦荞清除DPPH自由基能力是通过增加总黄酮含量和芦丁含量实现的。

表3 总黄酮含量、芦丁含量、槲皮素含量和DPPH清除率的相关性分析

Table 3 The correlation coefficient of total flavonoids, rutin, quercetin content and DPPH radical scavenging activity

	总黄酮含量	芦丁含量	槲皮素含量	DPPH清除率
总黄酮含量	-	0.885**	0.204	0.836**
芦丁含量	0.885*	-	0.214	0.808*
槲皮素含量	0.204	0.214	-	0.199
DPPH清除率	0.836*	0.808*	0.199	-

注: *表示5%的差异显著水平; **表示1%差异极显著水平。

2.4 光质对黄酮合成以及降解有关酶的影响

PAL是苯丙烷类代谢的第一个酶, 当PAL酶活力升高, 便伴随着植物中黄酮类化合物的增加。另外, 植物中PAL酶活力与黄酮合成中的其他酶也具有一定的联系。PAL是典型的胞内诱导酶, 该酶受植物不同发育阶段的内部因素和外部生长环境两个因素共同调控, 对外部环境因子较敏感, 其表达具有植物组织和发育时间特异性。光对苦荞芽中PAL酶活性的影响如表4所示。不同光质处理均能显著地增加苦荞芽中PAL酶的比活力(与暗处理比较), 从134.99 U/mg蛋白上升到153.46 U/mg蛋白, 均与对照差异显著。紫外和蓝光处理后, 酶活性较高。PAL酶比活力的变化趋势与总黄酮含量的变化趋势基本一致, 具有一定的相关性。结果表明: 光照处理可提高黄酮类物质合成的第一个关键酶PAL的活性, 使物质合成的代谢流向黄酮类次级代谢转向, 进而提高苦荞芽中总黄酮含量。

CHI是加速非黄酮类物质向具有生物活性的黄酮类物质转化的酶, 对黄酮类活性物质的代谢量具有重要意义。植物生长的外源性刺激对CHI酶的表达也有一定的影响, 如温度与金属离子对植物中花色苷的影响就是通过CHI酶的调节而实现的。光对苦荞芽中CHI酶活性的影响如表4所示。不同光质处理

均能显著地增加苦荞芽中CHI酶的比活力(与暗处理比较), 且各光处理之间具有显著性差异。紫外、白光和蓝光处理后酶活性较高, 可达到对照处理的2~4倍。

RDEs是一种高活性的芦丁分解代谢酶, 是芦丁代谢的关键酶之一, 它将芦丁水解为槲皮素。该酶具有严格的底物特异性, 即其仅对芦丁具有催化降解作用, 易受外源性刺激, 而影响到植物中的芦丁含量。光对苦荞芽中RDEs酶活性的影响如表4所示。光处理RDEs活性变化不大, 其中, 绿光处理对苦荞芽中RDEs酶的比活力影响较大, 蓝光影响较小, 而黄光、绿光和紫外处理之间没有显著性差异。同时, 光照处理对槲皮素含量影响较小, 芦丁含量未下降, 因此, 经光照处理后, 芦丁转化成槲皮素的量很小。

综上所述, 不同光质处理对苦荞芽中PAL和CHI酶的比活力均有促进作用, 说明光刺激黄酮类生物合成是因为提高了与其相关酶的活力。

表4 不同光质对PAL、CHI、RDEs酶活力影响

Table 4 Effect of different light quality on the activity of PAL, CHI and RDEs

	PAL (U/mg 蛋白)	CHI (U/mg 蛋白)	RDEs (U/g 干重)
对照(黑暗)	121.31±3.41 ^a	14.05±0.26 ^a	9.33±0.46 ^a
红光	134.99±2.63 ^b	16.77±1.89 ^a	12.92±0.34 ^d
黄光	144.03±3.14 ^c	20.52±2.72 ^b	13.41±0.35 ^d
绿光	145.99±4.90 ^c	23.72±2.56 ^b	13.72±0.31 ^d
白光	145.83±1.47 ^c	32.58±3.39 ^d	12.03±0.39 ^c
蓝光	148.92±1.23 ^{cd}	28.42±1.72 ^c	10.11±0.44 ^b
紫外A(254 nm)	152.87±5.46 ^d	38.29±1.67 ^e	12.11±0.38 ^d
紫外C(365 nm)	153.46±2.28 ^d	59.37±0.94 ^f	13.28±0.75 ^c

3 结论与讨论

光处理是一种无残留、无污染、简单有效的处理方式。实验结果表明: 紫外(UV-A, UV-C)、蓝光、白光、绿光、黄光和红光处理均可显著地增加苦荞芽中总黄酮和芦丁含量(与暗处理比较), 其中紫外和蓝光处理效果较好, 但对槲皮素含量影响较小。同时, 光处理能提高萌发苦荞清除DPPH自由基能力, UV-C处理的清除DPPH自由基能力最强, 相关分析表明光处理提高萌发苦荞清除DPPH自由基能力是通过增加总黄酮含量和芦丁含量实现的。

PAL和CHI作为黄酮合成关键酶, 其活性变化跟总黄酮类物质含量的变化有密切关系, PAL和CHI活性越高, 总黄酮含量越高^[21]。实验得出, 光照处理均能显著地增加苦荞芽中PAL、CHI酶的比活力(与暗处理比较), 且PAL、CHI酶的比活力的变化趋势与总黄酮、芦丁含量的变化趋势基本一致, 具有一定的相关性。但是不同光照处理均对苦荞芽中RDEs酶的比活力无影响, 且各光处理之间没有有显著性差异。芦丁是总黄酮中的主要组分, 实验结果表明, 光照可刺激荞麦芽中芦丁的生物合成, 但对芦丁的降解转化影响很小。此外, 光处理后, 总黄酮中芦丁与槲皮素

二者总量无明显增加,但分别改变了芦丁或槲皮素组分在总黄酮中的比例。

综上所述,光处理能够刺激萌发苦荞中黄酮类物质的合成,提高荞麦的抗氧化性。本研究结果不仅为生产上提供了一种简单的黄酮类合成的调控方法,也为进一步进行萌发荞麦中黄酮类物质的精确调控和代谢流研究提供了理论依据和技术手段。因此选择适当的萌发条件对提高苦荞中黄酮类物质的含量具有一定意义。

参考文献

- [1] 陆大彪. 中国农业百科全书农作物卷(上)[M]. 北京:中国农业出版社.
- [2] Krkošková B, Mrázová Z. Prophylactic components of buckwheat[J]. Food Research International, 2005, 38: 561-568.
- [3] 辛力, 廖小军, 胡小松. 苦荞麦的营养价值、保健功能和加工工艺[J]. 农产品发, 1995(5): 6-7.
- [4] 徐茂军, 朱睦元, 顾青. 发芽大豆中异黄酮积累的光诱导作用研究[J]. 中国粮油学报, 2003, 18(1): 74-77.
- [5] Graham L T. Flavonoid and isoflavonoid distribution in developing soybean seedling tissues and in seed and root exudates[J]. Plant Physiol, 1991, 95: 594-603.
- [6] 钱丽华, 毛碧增. 光温条件对三叶青愈伤生长及黄酮积累的影响[J]. 浙江农业科学, 2013(9): 1098-1100.
- [7] 李波, 肖静, 李铁, 等. 不同条件对苜蓿愈伤组织异黄酮含量的影响(简报)[J]. 草地学报, 2007, 15(5): 500-502.
- [8] 杨世海, 刘晓峰, 马秀华, 等. 不同理化因子对甘草愈伤组织的生长和黄酮类化合物生长影响[J]. 吉林农业大学学报, 2006, 28(1): 47-50.
- [9] 王丽娟, 张学英, 徐金城, 等. 不同光质对草莓果实花青苷、酚类物质及类黄酮物质的影响[J]. 河北农业大学学报, 2009, 32(2): 54-57.
- [10] 樊艳平, 赵全保, 姚延. 不同覆盖处理对元宝枫叶生物活性物质含量的影响[J]. 林业科学, 2007, 43(1): 50-54.
- [11] Khatami F, Ghanati F. Effects of UV irradiation on cell viability, anthocyanin, and flavonoid contents of callus-cultured *Malva neglecta* cell[J]. International Conference on Life Science and Technology, 2011, 3: 198-201.
- [12] 罗丽琼, 陈宗瑜, 丁金玲, 等. 低纬高原地区UV-B辐射对报春花类黄酮含量的影响[J]. 云南农业大学学报, 2007, 22(2): 229-232.
- [13] Tsurunaga Y, Takahashi T, Katsube T, et al. Effects of UV-B irradiation on the levels of anthocyanin, rutin and radical scavenging activity of buckwheat sprouts[J]. Food Chemistry, 2013, 141(1): 552-556.
- [14] 李元, 高潇潇, 高召华, 等. UV-B 辐射和稻瘟病菌胁迫对水稻幼苗苯丙氨酸解氨酶活性和类黄酮含量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(4): 856-860.
- [15] Zhana L J, Hub J Q, Panga L Y, et al. Light exposure reduced browning enzyme activity and accumulated total phenols in cauliflower heads during cool storage[J]. Postharvest Biology and Technology, 2014, 88: 17-20.
- [16] 王海伟, 王振林, 王平, 等. 灌浆期遮光对不同粒色小麦籽粒花青素积累与相关酶活性的影响[J]. 作物学报, 2011, 37(6): 1093-1100.
- [17] 宾婕, 刘洁, 陈克麟, 周劲, 等. 不同来源苦荞中芦丁和槲皮素的含量测定[J]. 现代食品科技, 2011, 27(1): 117-119.
- [18] 胡喜兰, 韩照祥, 陶莹, 等. DPPH·法测定17种植物的抗氧化活性[J]. 食品科技, 2006(10): 264-268.
- [19] Assis J S, Maldonado R, Munoz T, et al. Effect of high carbon dioxide concentration on PAL activity and phenolic contents in ripening cherimoya fruit[J]. Postharvest Biology and Technology, 2001, 23: 33-39.
- [20] Wang L, Li X D, Niu M, et al. Effect of additives on flavonoids, D-chiro-Inositol and trypsin inhibitor during the germination of tartary buckwheat seeds[J]. Journal of Cereal Science, 2013, 58: 348-354.
- [21] Chen K, Feng H, Zhang M, et al. Nitric Oxide alleviates oxidative damage in the green algae *Chlorella pyrenoidosa* caused by UV-B radiation[J]. Folia Microbiologica, 2003, 48(3): 389-393.
- [22] Morishita T, Hajika M, Sakai J, et al. Development of simple spectrophotometric assay for the rutin-degrading enzyme in buckwheat[J]. Current Advances in Buckwheat Research, 1995, 119: 833-837.
- [23] Chen P, Gu J J. A rapid measurement of rutin-degrading enzyme activity in extract of tartary buckwheat seeds[J]. Food and Bioprocess Technology, 2011, 89: 81-85.
- [24] 徐茂军, 朱睦元, 顾青. 发芽大豆中异黄酮积累的光诱导作用研究[J]. 中国粮油学报, 2003, 18(1): 74-77.
- [25] Ronald E K, Francesca Q, Joseph N M M. The flavonoid biosynthetic pathway in plants: function and evolution [J]. BioEssays, 1993, 16: 123-132.
- [19] 刘素稳, 赵希艳, 常学东, 等. 机械剪切与研磨超微粉碎对海鲜菇粉体特性的影响[J]. 中国食品学报, 2015, 15(1): 99-107.
- [20] 梁琪, 毕阳, 米兰, 等. 沙枣细粉超微粉碎后对物化特性的影响研究[J]. 食品工业科技, 2012, 33(11): 76-78.
- [21] 毕金峰, 陈瑞娟, 陈芹芹, 等. 不同干燥方式对胡萝卜微粉品质的影响[J]. 中国食品学报, 2015, 15(1): 136-141.

(上接第103页)

Food Chemistry, 2003, 80: 221.

[17] Zhang Z P, Song H, Peng Z, et al. Characterization of stipe and cap powders of mushroom (*Lentinus edodes*) prepared by different grinding methods[J]. Journal of Food Engineering, 2012, 109(3): 406-413.

[18] 周禹含, 毕金峰, 陈芹芹, 等. 不同干燥方式对枣粉品质的影响[J]. 食品科学, 2014, 35(11): 36-41.