

# 西兰花芽提取工艺及其 体外抗氧化活性研究

李鑫\*, 王鹏, 刘梦璐, 徐晓晓, 钟斌, 王庚申  
(青岛博恩高科生物技术有限公司, 山东 青岛 266111)

**摘要:**采用单因素及正交实验,以萝卜硫苷和多酚得率为指标,优化水提法提取工艺中的提取时间、提取温度、溶剂倍量和提取次数,并对西兰花芽提取物进行1,1-二苯基-2-三硝基苯肼自由基(DPPH·)、2,2'-联氮-二(3-乙基-苯并噻唑-6-磺酸)阳离子自由基(ABTS<sup>+</sup>)清除活性检测。结果表明,西兰花芽的最佳水提取工艺为:提取温度100℃、提取60 min、溶剂倍量12倍,提取3次,此时西兰花芽中萝卜硫苷的得率为(1.1973±0.0788)mg/g,多酚得率为(1.5699±0.0033)mg/g。该工艺条件下所得的西兰花芽提取物清除DPPH·自由基的半抑制浓度(IC<sub>50</sub>)为0.26 mg/mL;清除ABTS<sup>+</sup>自由基的IC<sub>50</sub>为0.39 mg/mL,具有较好的体外抗氧化性。

**关键词:**西兰花芽;萝卜硫苷;多酚;提取;抗氧化活性

中图分类号:TS2

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2025)S2-0381-06

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2025.S2.066

## Study on extraction technology and in vitro antioxidant activity of broccoli sprouts

LI Xin\*, WANG Peng, LIU Meng-lu, XU Xiao-xiao, ZHONG Bin, WANG Geng-shen  
(Qingdao BNP Bioscience Co., Ltd., Qingdao 266111, China)

**Abstract:** Single factor and orthogonal experiments are designed to optimize the extraction time, extraction temperature, solvent ratio and extraction times in the water extraction process, with yields of glucoraphanin and polyphenols as indicators. The activity of the broccoli sprout extracts in removing 1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl radical (DPPH·) and 2,2'-azino-bis-(3-ethylbenzthiazoline-6-sulphonate) cation radical (ABTS<sup>+</sup>) is also detected. It is found that the optimal water extraction process for broccoli sprouts is as follows: extraction temperature is 100℃, extraction time is 60 min, solvent ratio is 12 times, and the extraction repeats for 3 times. Under these conditions, the yield of glucoraphanin from broccoli sprouts is 1.1973±0.0788 mg/g, and the yield of polyphenols is 1.5699±0.0033 mg/g. The IC<sub>50</sub> value of the extracts for scavenging DPPH· free radicals is 0.26 mg/mL, and that for scavenging ABTS<sup>+</sup> free radicals is 0.39 mg/mL, indicating a good in vitro antioxidant activity.

**Key words:** broccoli sprout; glucoraphanin; polyphenols; extract; antioxidant activity

西兰花(Brassica oleracea var. italica),十字花科芸薹属植物,是一种营养丰富,食用价值非常高的蔬菜。主要化学成分有多酚、蛋白质、维生素和矿物质<sup>[1]</sup>。硫代葡萄糖苷(如萝卜硫苷)是西兰花成分中研究最多的次生代谢物之一,经酶水解得到异硫氰酸盐(如萝卜硫素),可以防止多种癌症,也可以降低心血管疾病的风险,并有助于预防自闭症和骨质疏松症以及神经退行性疾病<sup>[2-4]</sup>。但萝卜硫素性质不稳定,容易发生降解而失去活性,在人体胃肠道中萝卜硫苷可经过肠道菌群水解,转化成萝卜硫素,因此通常以萝卜硫苷形式制备产品<sup>[5]</sup>。近年对西兰花的研究主要包括西兰花籽、西兰花芽、西兰花花

球以及茎叶等。西兰花种子水提物更是通过了新食品原料的安全性评估,成为新食品原料。

西兰花芽有多种药理活性<sup>[6]</sup>,具有抗炎<sup>[7-9]</sup>、缓解疼痛<sup>[10]</sup>、抗氧化<sup>[11-12]</sup>、抗癌<sup>[13-15]</sup>以及延缓衰老<sup>[16-17]</sup>等多种生物活性。有研究表明,具有促进健康的植物化学物质主要集中在西兰花芽中,而不是成年植物的可食用器官中<sup>[18]</sup>。与未发芽的种子相比,发芽会增加总酚和类黄酮水平,如山奈酚和芹菜素;与成熟的西兰花相比,西兰花芽的萝卜硫苷、多酚、 $\alpha$ -生育酚和类胡萝卜素的含量更高,抗氧化水平在西兰花芽中最高,并随着进一步生长而降低<sup>[19-22]</sup>。然而由于西兰花芽的口感不佳,其在日常

饮食中并不常见。

综上所述,本实验以西兰花芽中萝卜硫苷、多酚含量为研究对象,采用单因素实验确定提取参数范围,再通过正交实验优化水提提取工艺,并通过 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼自由基(DPPH·)、2,2'-联氮-二(3-乙基-苯并噻唑-6-磺酸)阳离子自由基(ABTS<sup>+</sup>)清除率实验,评价西兰花芽水提提取物的体外抗氧化活性。为西兰花芽水提物在食品、化妆品、医药等领域的进一步深入研究与利用提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

西兰花籽,临洮县卓玛林木种子店;萝卜硫苷标准品(≥98%),上海源叶生物科技有限公司;VC 标准品,上海源叶生物科技有限公司;没食子酸标准品(90.8%),中国食品药品检定研究院;无水乙醇(分析纯),昆山金城试剂有限公司;过硫酸钾(分析纯),国药集团化学试剂有限公司;福林酚(生物纯),北京索莱宝科技有限公司;DPPH(96%),上海麦克林公司;ABTS(98%),东京化成工业株式会社。

高效液相色谱仪(LC-20AT 型),日本岛津公司;紫外-可见分光光度计(L6S 型),上海仪电分析仪器有限公司;智能数显恒温水油浴锅(YRE-201D 型),巩义市予华仪器设备有限公司;电子天平(AUW220D 型),日本岛津公司;电子天平(PL602E 型),梅特勒-托利多仪器设备有限公司;电热套(500 mL 规格),北京科华实验仪器有限公司。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 西兰花芽培育

西兰花芽由西兰花籽培育而得。培育方法:温度 20~25℃,相对湿度 40%~60%。将西兰花籽浸泡 8~12 h 后,沥干后均匀铺在育苗托盘上。每天早晚用喷壶喷淋水 1 min(育苗盘底不加水)<sup>[23]</sup>。

#### 1.2.2 提取工艺

称取适量西兰花芽,投入水中,保温提取。将提取液过滤、浓缩,并于室温冷却后定容至容量瓶。检测定容后提取液中固形物含量、萝卜硫苷含量以及多酚含量,折算相应得率。

##### (1) 单因素考察

按照 1.2.1 中的提取工艺,考察提取温度为 70±10℃、90±10℃,提取时间为 1 h,溶剂倍量为 8 倍时,对萝卜硫苷以及多酚得率的影响;考察提取时间为 15 min、30 min、1 h、2 h、3 h,提取温度为

100℃,溶剂倍量为 8 倍时,对萝卜硫苷以及多酚得率的影响;考察料液比为 1:4、1:8、1:16、1:32、1:64,提取温度为 100℃,提取时间为 1 h 时,对萝卜硫苷以及多酚得率的影响。

##### (2) 正交实验

以西兰花芽中的萝卜硫苷以及多酚含量为考察指标,提取时间(A)、提取温度(B)、溶剂倍量(C)、提取次数(D)为影响因素,正交实验设计及结果见表 1。

表 1 正交实验设计水平因素表

水平	因素			
	A 提取时间/ min	B 提取温度/ ℃	C 溶剂倍量/ 倍	D 提取次数/ 次
1	15	80	8	1
2	30	90	10	2
3	60	100	12	3

##### (3) 萝卜硫苷含量测定

参照文献[24]中萝卜硫苷含量检测方法,按表 2 中流动相比例进行等度洗脱检测。

表 2 色谱条件

色谱柱	Inertsil ODS-3(250 mm×4.6 mm,5 μm)	
柱温/℃	30	
检测波长/nm	225	
流动相 A/%	甲醇溶液	2
流动相 B/%	0.1%甲酸水溶液	98

##### (4) 多酚含量检测<sup>[25]</sup>

试剂①的配制:取蒸馏水将 10 mL 福林酚试剂稀释至 100 mL,并摇匀。

试剂②的配制:精密称取无水碳酸钠加入蒸馏水,使溶液中无水碳酸钠质量分数为 7.5%,超声溶解,放置过夜,过滤。

对照品溶液的配制:用水溶解没食子酸对照品,精确配得 0.100 0 mg/mL 母液,备用。分别取 0、0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 mL 母液于 25 mL 容量瓶中,加 2.5 mL 试剂①,混匀,3 min 后再加入 7.5 mL 试剂②,用蒸馏水补足至刻度,混匀。将容量瓶置于 37℃ 水浴中反应 1 h,于 765 nm 波长处测定吸光度。

绘制得标准曲线如式(1):

$$Y = 0.0138X - 0.0003 \quad (R^2 = 0.9985) \quad (1)$$

式中,X 为对照品标准溶液的质量浓度,mg/mL;Y 为吸光度值。

### 1.2.3 抗氧化活性检测

#### (1) DPPH 实验

参照文献[26]中方法,配制 50.0  $\mu\text{g}/\text{mL}$  的 DPPH 溶液(称取 DPPH 5.0 mg 溶于无水乙醇后,定容至 100.0 mL,避光保存)。

取西兰花芽水提取浓缩液、VC 对照品,用水稀释至固形物浓度分别为 5.00~0.005  $\text{mg}/\text{mL}$  的系列溶液,备用。分别用移液枪取 DPPH 溶液 3 mL、西兰花芽提取液/维生素 C 各浓度供试品溶液 1 mL,置于试管中( $A_1$ , mL);取无水乙醇 3 mL 与西兰花芽提取液/维生素 C 各浓度供试品溶液 1 mL,置于试管中( $A_2$ , mL);取 DPPH 工作液 3 mL 与纯化水 1 mL,置于试管中( $A_0$ , mL);将样品溶液均匀混合,避光反应 0.5 h,在波长 517 nm 处检测吸收值。

DPPH· 自由基清除率计算公式如式(2):

$$P(\%) = 1 - [(A_1 - A_2)/A_0] \times 100\% \quad (2)$$

#### (2) ABTS 实验

参照文献[27]中的方法,ABTS 母液配制后室温避光放置 24 h,再用 95%乙醇稀释约 120 倍,测其吸光度值为  $0.70 \pm 0.02$ ,备用。

取西兰花芽水提取浓缩液、VC 对照品,用水稀释至固形物浓度分别为 6.00~0.001  $\text{mg}/\text{mL}$  的溶液。精密移取 ABTS 测定溶液 3.6 mL 与各浓度西兰花芽/维生素 C 供试品溶液 0.4 mL,置于试管中( $A_1$ , mL);取 95%乙醇 3.6 mL 与各浓度西兰花芽/维生素 C 供试品溶液 0.4 mL,置于试管中( $A_2$ , mL);取 ABTS 工作液 3.6 mL 与纯化水 0.4 mL,置于试管中( $A_0$ , mL);以上各样品溶液均匀混合后在室温下避光反应 5 min,于 734 nm 下检测吸收值。

ABTS<sup>+</sup> 自由基清除率计算公式和 DPPH· 自由基一样,见式(2)。

### 1.2.4 数据处理

利用 Excel 软件记录并整理实验数据,结果以  $X \pm SD$  表示,运用 SPSS Statistics 26.0 软件进行单因素方差分析(One-Way ANOVA),当  $P < 0.05$  时表示存在显著性差异。运用 Origin 2024 软件绘制折线图。

## 2 结果与分析

### 2.1 苗芽培育情况

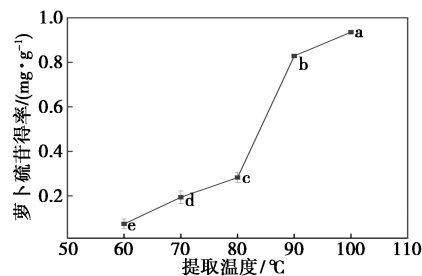
以浸泡后放置托盘当天为培育的第 0 天,西兰花籽于第 1 天开始露出根尖,第 3~4 天大部分西兰花芽完成脱壳。测量西兰花芽长度约 1.5~1.7 cm,根长约 1.7~2.0 cm。有文献表明<sup>[28]</sup>,与种子相比,

发芽 3 d 后的芽中莱菔硫烷、总酚、黄酮含量均提高。因此于第 4 天收集西兰花芽,弃去壳皮,用于单因素和正交实验。

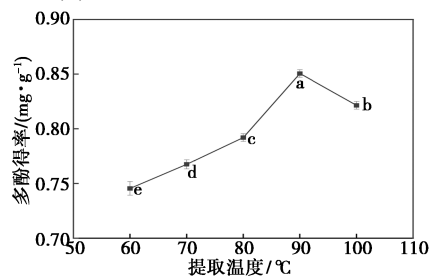
## 2.2 提取工艺

### 2.2.1 单因素试验结果

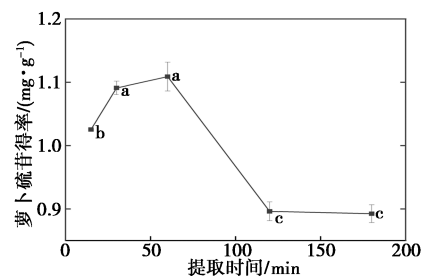
单元素试验结果见图 1。



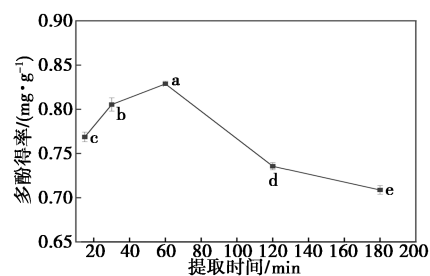
(a) 提取温度对萝卜硫苷得率的影响



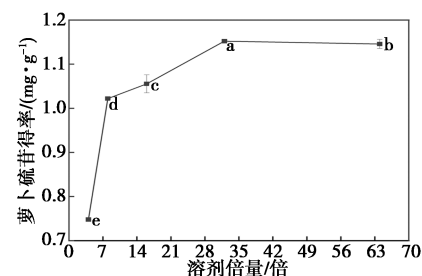
(b) 提取温度对多酚得率的影响



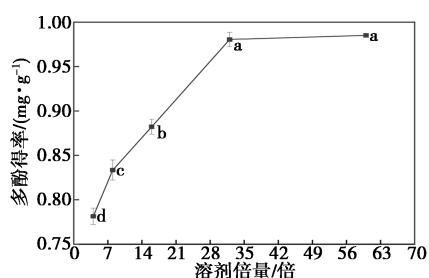
(c) 提取时间对萝卜硫苷得率的影响



(d) 提取时间对多酚得率的影响



(e) 溶剂倍量对萝卜硫苷得率的影响



(f) 溶剂倍量对多酚得率的影响

图 1 提取温度、提取时间、溶剂倍量对萝卜硫苷及多酚得率的影响

**提取温度:**为提取萝卜硫苷,需要将西兰花芽中的黑芥子酶进行灭活,防止萝卜硫苷转化。侯海亮等<sup>[29]</sup>对西兰花种子的研究中,当 pH 为 7 时,在不同温度下对黑芥子酶的酶活性进行检测,酶活在 55~60℃ 时随温度升高而降低,因此,采用 60℃ 以上热水提取,可抑制黑芥子酶的活性。西兰花芽提取过程中,萝卜硫苷得率随着提取温度的升高由(0.073 8±0.021 8)mg/g 提升至(0.935 2±0.001 6)mg/g,当温度达到 100℃ 时,萝卜硫苷得率达到最高。西兰花芽提取物中多酚得率随着提取温度的升高先增大后略有下降,当温度达到 90℃ 时,多酚得率达到了峰值(0.850 6±0.003 5)mg/g。

**提取时间:**在 15~60 min 时,萝卜硫苷、多酚得率随着提取时间的延长而不断升高,水浴时间为 60 min 时,西兰花芽提取过程中萝卜硫苷、多酚得率均达到最高,分别为(1.109 0±0.022 8)mg/g 和(0.828 8±0.002 9)mg/g。当提取时间超过 60 min 后,萝卜硫苷、多酚得率开始下降,可能是由于萝卜硫苷以及部分多酚成分不稳定,受热易水解。

**溶剂倍量:**增加溶剂,萝卜硫苷和多酚得率均呈正相关增加,当溶剂倍量为 32 倍时,萝卜硫苷得率为(1.152 1±0.003 8)mg/g,继续增加至 64 倍时,萝卜硫苷得率下降;当溶剂倍量为 32 倍时,多酚得率为(0.980 4±0.008 1)mg/g,继续增加至 64 倍时,多酚得率变化不显著。

### 2.2.2 正交试验结果

由单因素结果,设计以西兰花芽中的萝卜硫苷以及多酚得率为考察指标的正交试验。其中溶剂倍量结合实际生产中节能等因素,优化为增加提取次数、减少溶剂倍量,当提取次数为 3 次,溶剂倍量为 12 倍时,可满足单因素中 32 倍的提取效果。以提取时间(A)、提取温度(B)、溶剂倍量(C)、提取次数(D)为影响因素,正交设计以及结果见表 3。

表 3 正交试验结果

水平	A/ min	B/ ℃	C/ 倍	D/ 次	萝卜硫 苷得率/ (mg·g <sup>-1</sup> )	多酚 得率/ (mg·g <sup>-1</sup> )
1	60	90	12	1	0.8425± 0.0081	1.0219± 0.0074
2	60	100	8	2	0.9676± 0.0346	1.2638± 0.0143
3	30	80	12	2	0.2243± 0.0220	1.3068± 0.0226
4	30	100	10	1	0.9260± 0.0067	1.0151± 0.0077
5	30	90	8	3	0.6771± 0.0127	1.3400± 0.0179
6	15	100	12	3	1.1458± 0.0037	1.4867± 0.0320
7	15	80	8	1	0.2314± 0.0018	0.7796± 0.0338
8	60	80	10	3	0.4436± 0.0225	1.3891± 0.0159
9	15	90	10	2	0.3158± 0.0146	1.2952± 0.1801
指标萝卜硫苷						
K1	1.69	0.90	1.88	2.00		
K2	1.83	1.84	1.69	1.51		
K3	2.25	3.04	2.21	2.27		
R	0.56	2.14	0.53	0.76		
指标多酚						
K1	3.56	3.48	3.38	2.82		
K2	3.66	3.66	3.70	3.87		
K3	3.67	3.77	3.82	4.22		
R	0.11	0.29	0.43	1.40		

由表 3 可知,各因素影响萝卜硫苷得率的程度依次为 B(提取温度)>D(提取次数)>A(提取时间)>C(溶剂倍量),最优工艺为 A<sub>3</sub>B<sub>3</sub>C<sub>3</sub>D<sub>3</sub>,即提取 60 min、提取温度 100℃、溶剂倍量为 12 倍、提取 3 次。各因素影响多酚得率程度依次为 D(提取次数)>C(溶剂倍量)>B(提取温度)>A(提取时间),最优工艺为 A<sub>3</sub>B<sub>3</sub>C<sub>3</sub>D<sub>3</sub>,即提取 60 min、提取温度 100℃、溶剂倍量为 12 倍、提取 3 次。

结合表 4 方差显著性分析,优选提取时间为 A<sub>3</sub>,60 min;提取温度为 B<sub>3</sub>,100℃;溶剂倍量为 C<sub>3</sub>,

12 倍;提取次数为  $D_3$ , 即 3 次。

表 4 方差分析

方差来源	离均差平方和	自由度	均方	F	P
萝卜硫苷得率					
A	0.1714	2	0.0857	286.95	<0.05
B	2.3020	2	1.1510	3852.96	<0.05
C	0.1425	2	0.0713	238.59	<0.05
D	0.2963	2	0.1482	495.94	<0.05
多酚得率					
A	0.008	2	0.004	0.962	无显著性
B	0.043	2	0.021	5.366	<0.05
C	0.100	2	0.050	12.496	<0.05
D	1.060	2	0.530	132.462	<0.05

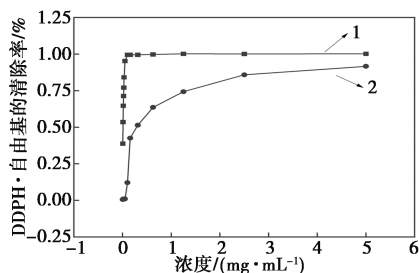
### 2.2.3 验证实验

以 100℃、提取 60 min、溶剂倍量 12 倍、提取 3 次为条件,进行 3 组平行实验。结果表明,在最佳工艺条件下西兰花芽提取物中萝卜硫苷得率为  $(1.1973 \pm 0.0788) \text{ mg/g}$ ,多酚得率为  $(1.5699 \pm 0.0033) \text{ mg/g}$ ,RSD 值 <5%,高于正交表中所有组别。表明正交实验优化的提取条件稳定可行。此工艺可用于提取西兰花芽中的萝卜硫苷及多酚。

## 2.3 抗氧化活性

### 2.3.1 DPPH

如图 2 所示,对照组维生素 C 以及西兰花芽提取物均有对 DPPH· 自由基清除的能力,浓度越高,清除能力越强,抗氧化能力越强。当西兰花芽提取物浓度达到 5.00 mg/mL 时,DPPH· 自由基清除率达到了 91.62%,半抑制浓度 ( $IC_{50}$ ) 值为 0.26 mg/mL。其清除 DPPH· 自由基的能力强于西兰花蔬菜干水提取物<sup>[5]</sup>。



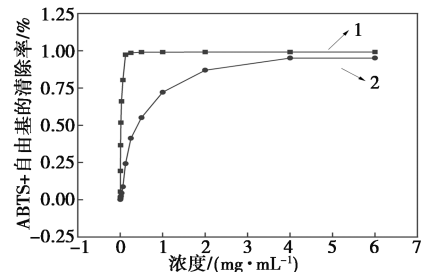
1—VC;2—西兰花提取物

图 2 西兰花芽提取物对 DPPH· 自由基清除率

### 2.3.2 ABTS

如图 3 所示,对照组维生素 C 以及西兰花芽提

取物均有对 ABTS<sup>+</sup> 自由基清除得能力,浓度越高,清除能力越强,抗氧化能力越强。当西兰花芽提取物浓度为 4.00 mg/mL 时,对 ABTS<sup>+</sup> 自由基的清除率达 95.10%, $IC_{50}$  值为 0.39 mg/mL。其清除 ABTS<sup>+</sup> 自由基的能力强于西兰花蔬菜干水提取物的能力<sup>[5]</sup>。



1—VC;2—西兰花芽提取物

图 3 西兰花芽提取物对 ABTS<sup>+</sup> 自由基清除率

## 3 结论

本文对西兰花芽的提取工艺及抗氧化活性进行了研究,采用单因素法确定了提取时间范围 15~60 min,提取温度为 80~100℃,溶剂倍量  $\geq 32$  倍。再经正交验证试验得到西兰花芽的最佳提取工艺为:提取温度 100℃,提取时间 60 min,溶剂倍量 12 倍,提取 3 次。该工艺条件下提取物的萝卜硫苷得率为  $(1.1973 \pm 0.0788) \text{ mg/g}$ ,多酚得率为  $(1.5699 \pm 0.0033) \text{ mg/g}$ 。西兰花芽提取物清除 DPPH· 自由基的  $IC_{50}$  为 0.26 mg/mL;清除 ABTS<sup>+</sup> 自由基的  $IC_{50}$  为 0.39 mg/mL。由此可见西兰花芽提取物具有较好的体外抗氧化活性,具有潜在的应用价值。然而,采用 DPPH· 和 ABTS<sup>+</sup> 的自由基清除能力测试仍存在一定局限性。西兰花芽中更重要的成分萝卜硫素可通过萝卜硫苷在人体内经过酶解得到,而 DPPH 法和 ABTS 法测定的与体内自由基几乎没有相似性<sup>[30]</sup>,不能充分反映体内生理状态,因此西兰花芽提取物在体内的药理活性、代谢途径等更值得进一步研究。

## 参考文献

- [1] Yan L,Zhou G,Shahzad K, *et al.* Research progress on the utilization technology of broccoli stalk, leaf resources, and the mechanism of action of its bioactive substances[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2023,14:1138700.
- [2] Melim C,Lauro M R,Pires I M, *et al.* The role of glucosinolates from cruciferous vegetables (brassicaceae) in gastrointestinal cancers: From prevention to therapeutics[J]. *Pharmaceutics*, 2022,14 (1):190.

- [3] Vanduchova A, Anzenbacher P, Anzenbacherova E. Isothiocyanate from broccoli, sulforaphane, and its properties[J]. *Journal of Medicinal Food*, 2019, 22(2): 121–126.
- [4] Park H S, Hwang E S, Choi G Y, et al. Sulforaphane enhances long-term potentiation and ameliorate scopolamine-induced memory impairment[J]. *Physiology & Behavior*, 2021, 238: 113467.
- [5] 付玉梅, 尧梅香, 周明. 西兰花中萝卜硫苷提取及抗氧化性研究[J]. *化学工程师*, 2023, (4): 104–109.
- [6] Geng J, Li J, Zhu F, et al. Plant sprout foods: Biological activities, health benefits, and bioavailability[J]. *Journal of Food Biochemistry*, 2025, 46(3): e13777.
- [7] Sim H W, Lee W Y, Lee R, et al. The anti-inflammatory effects of broccoli (*brassica oleracea* L. var. *italica*) sprout extract in RAW 264.7 macrophages and a lipopolysaccharide-induced liver injury model[J]. *Current Issues in Molecular Biology*, 2023, 45(11): 9117–9131.
- [8] Holman J M, Colucci L, Baudewyns D, et al. Steamed broccoli sprouts alleviate DSS-induced inflammation and retain gut microbial biogeography in mice[J]. *mSystems*, 2023, 8(5): e0053223.
- [9] Holman J, Hurd M, Moses P L, et al. Interplay of broccoli/broccoli sprout bioactives with gut microbiota in reducing inflammation in inflammatory bowel diseases[J]. *The Journal of Nutritional Biochemistry*, 2023; 113: 109238.
- [10] Gurgul A A, Najjar Y, Chee A, et al. Phenylpropanoid-enriched broccoli seedling extract can reduce inflammatory markers and pain behavior[J]. *Journal of Translational Medicine*, 2023, 21(1): 922.
- [11] Azarashkan Z, Motamedzadegan A, Ghorbani-HasanSaraei A, et al. Investigation of the physicochemical, antioxidant, rheological, and sensory properties of ricotta cheese enriched with free and nano-encapsulated broccoli sprout extract[J]. *Food Science & Nutrition*, 2022, 10(11): 4059–4072.
- [12] Wang J, Zhang J, Chen L, et al. Combination of broccoli sprout extract and zinc provides better protection against intermittent hypoxia-induced cardiomyopathy than monotherapy in mice[J]. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2019; 2985901.
- [13] Li S, Wu H, Tollefsbol T O. Combined broccoli sprouts and green tea polyphenols contribute to the prevention of estrogen receptor-negative mammary cancer via cell cycle arrest and inducing apoptosis in HER<sub>2</sub>/neu mice[J]. *The Journal of Nutrition*, 2020, 151(1): 73–84.
- [14] Bauman J E, Hsu C H, Centuori S, et al. Randomized crossover trial evaluating detoxication of tobacco carcinogens by broccoli seed and sprout extract in heavy smokers[J]. *Cancer Research*, 2021, 81(13): LB221.
- [15] Lozanovski V J, Polychronidis G, Gross W, et al. Broccoli sprout supplementation in patients with advanced pancreatic cancer is difficult despite positive effects—results from the POWDER pilot study[J]. *Investigational New Drugs*, 2020, 38: 776–784.
- [16] Yun J, Kim J E. Broccoli sprout extract suppresses particulate-matter-induced matrix-metalloproteinase (MMP)-1 and cyclooxygenase (CO<sub>x</sub>)-2 expression in human keratinocytes by direct targeting of p38 MAP kinase[J]. *Nutrients*, 2024, 16(23): 1–20.
- [17] Noble R M N, Jahandideh F, Armstrong E A, et al. Broccoli sprouts promote sex-dependent cardiometabolic health and longevity in long-evans rats[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 19(20): 13468.
- [18] Baenas N, Gómez-Jodar I, Moreno D A, et al. Broccoli and radish sprouts are safe and rich in bioactive phytochemicals[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2017, 127: 60–67.
- [19] Bella M C D, Niklas A, Toscano S, et al. Morphometric characteristics, polyphenols and ascorbic acid variation in *Brassica oleracea* L. Novel foods: Sprouts, microgreens and baby leaves[J]. *Agronomy*, 2020, 10(6): 782.
- [20] Ebert A W. Sprouts and microgreens—novel food sources for healthy diets[J]. *Plants*, 2022, 11(4): 571.
- [21] Miyahira R F, de Lima Pena F, Fabiano G A, et al. Changes in phenolic compound and antioxidant activity of germinated broccoli, wheat, and lentils during simulated gastrointestinal digestion[J]. *Plant Foods for Human Nutrition*, 2022, 77(2): 233–240.
- [22] Aloo S O, Ofosu F K, Daliri E B M, et al. UHPLC-ESI-QTOF-MS/MS metabolite profiling of the antioxidant and antidiabetic activities of red cabbage and broccoli seeds and sprouts[J]. *Antioxidants (Basel)*, 2021, 10(6): 852.
- [23] 朱海云, 李发军. 高寒牧区温湿条件及基质对豌豆, 黄豆苗芽菜生长的影响[C]. 2018年教师教育能力建设研究专题研讨会, 2018.
- [24] 李银花, 李娟, 李海, 等. 西兰花籽中萝卜硫苷的 HPLC 分析[J]. *福建分析测试*, 2016, 25(3): 24–28.
- [25] 张杨, 刘勇, 文博, 等. 陇南菜籽油橄榄叶总多酚、总黄酮的分布规律及抗氧化活性[J]. *林产化学与工业*, 2024, 44(6): 167–172.
- [26] 廉伟伟, 郝培娜, 马志欢, 等. 枳实总黄酮提取工艺及抗氧化活性研究[J]. *山西化工*, 2024, 44(12): 5–6, 12.
- [27] 张国燕, 陈海娟, 马永贵, 等. 苜蓿总黄酮提取工艺的优化及体外抗氧化活性研究[J]. *中国野生植物资源*, 2024, 43(12): 43–51.
- [28] Lv X, Meng G, Li W, et al. Sulforaphane and its antioxidative effects in broccoli seeds and sprouts of different cultivars[J]. *Food Chemistry*, 2020, 316: 126216.
- [29] 侯海亮, 邓莉, 杨崑, 等. 西兰花种子中黑芥子酶解性质及其应用研究[J]. *食品科学技术学报*, 2019, 37(5): 98–102.
- [30] 贾雪丽, 祖姆热提·艾孜则, 毕永贤, 等. 两种体外评价抗氧化活性方法影响因素分析: DPPH 和 ABTS[J]. *日用化学工业(中英文)*, 2024, 54(7): 866–872. ■