

不同品种山药粉中游离氨基酸和水解氨基酸含量分析

王华芬¹, 王强¹, 刘双燕¹, 张家祥¹, 刘俊桃², 李珂庆¹, 付阳¹, 庄玉伟¹, 刘传艺¹, 任志勇¹

(1. 河南省科学院高新技术研究中心, 河南郑州 450002; 2. 河南牧业经济学院理学院, 河南郑州 450046)

摘要 利用全自动氨基酸分析仪测定不同产地山药粉中游离氨基酸和水解氨基酸的含量并进行分析。结果表明, 不同产地山药粉中含有检测到的 17 种氨基酸, 包括 7 种人体必需氨基酸。不同品种山药粉中游离氨基酸总量从高到低依次为河北小白嘴>河北高阳紫药>山东鸡皮糙>山东陈集铁棍>河南温县铁棍>山东西施>山西永济铁棍>山西运城铁棍。不同品种山药粉中水解氨基酸总量差异不明显, 其中必需氨基酸含量从高到低依次是亮氨酸>苯丙氨酸>缬氨酸>异亮氨酸>苏氨酸>赖氨酸>蛋氨酸。

关键词 全自动氨基酸分析仪; 山药粉; 游离氨基酸; 水解氨基酸; 含量测定

中图分类号 TS 207.3 **文献标识码** A

文章编号 0517-6611(2022)14-0164-03

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2022.14.040

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Analysis of Free Amino Acids and Hydrolyzed Amino Acids in Different Varieties of Yam Powder

WANG Hua-fen, WANG Qiang, LIU Shuang-yan et al (High & New Technology Research Center of Henan Academy of Sciences, Zhengzhou, Henan 450002)

Abstract The contents of free amino acids and hydrolyzed amino acids in yam powder from different origins were determined by automatic amino acid analyzer and analyzed. The results showed that yam powder from different origins contained 17 kinds of amino acids detected, including 7 kinds of essential amino acids. The total content of free amino acids in different varieties of yam powder from high to low was Hebei Xiaobaizui>Hebei Gaoyang Ziyao>Shandong Jipicao>Shandong Chenji Tiegun>Henan Wenxian Tiegun>Shandong Xishi>Shanxi Yongji Tiegun>Shanxi Yuncheng Tiegun. There was no significant difference in the total content of hydrolyzed amino acids in different varieties of yam powder, and the order of essential amino acid content from high to low was leucine>phenylalanine>valine>isoleucine>threonine>lysine>methionine.

Key words Automatic amino acid analyzer; Yam powder; Free amino acids; Hydrolyzed amino acids; Content determination

山药, 又名薯蓣(*Dioscorea opposita* Thunb.), 是薯蓣科多年生缠绕草本植物^[1]。根茎洁白, 营养丰富。山药入食可作为功能性食物, 可能有利于改善脾脏、胃、肾和肺的功能^[2]; 入药常被用来调节厌食症、消化不良、慢性腹泻、哮喘、干咳、频繁或无法排尿、情绪不稳定和糖尿病^[3]等。现代研究表明, 山药不仅能够抗炎、抗肿瘤、抗氧化、抗衰老和免疫调节作用, 还能够降低血糖和脂质水平^[2, 4-8]。山药中含有各种化学物质, 如淀粉、氨基酸、非淀粉多糖、皂苷、尿囊素、山药碱、胆碱、黄酮类化合物、多酚、植物固醇、有机酸等^[9-12]。山药根茎中的蛋白质含量丰富, 氨基酸是构成蛋白质的基本单位, 所以山药中氨基酸的含量, 特别是必需氨基酸的含量极大地影响着山药的营养价值^[13]。目前对山药中氨基酸含量研究主要集中在水解氨基酸的分析方面, 对于山药中游离氨基酸含量的测定相对偏少。目前常用氨基酸分析仪检测样品中氨基酸含量, 其具有检测限高、同时检测种类多等优点, 并且可以直接上样, 操作简便。笔者研究了不同地区种植的山药中游离氨基酸和水解氨基酸的含量, 为山药品种之间的营养评价、种植筛选提供了科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验试剂 蒸馏水, 购于屈臣氏(Watsons); HCl(AR), 购于上海化学试剂厂; MS105DU 分析天平, 购于梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司。20 种水解氨基酸标准品(批号

C1902018), 购于德国曼默博尔公司中国北京代表处。

1.2 主要仪器与分析条件 全自动氨基酸分析仪(Advanced A300), 购于德国曼默博尔公司; 试管浓缩仪(TC-8F), 购于日本 TAITEC 公司。

分析条件: 色谱柱为氨基酸分析专用(锂盐)色谱柱(3 μm, 4.6 mm×100 mm), 流动相 A~F 为含锂离子的溶液, 反应液为茚三酮溶液, 流动相洗脱能力依次增强, 柱温 40~70 ℃, 流速 180~250 μL/min, 检测波长 570/440 nm, 进样量 20 μL, 用 Amino peak 软件记录样品的氨基酸色谱图, 并计算各样品中氨基酸的含量。

1.3 试验材料与处理 河南温县铁棍山药收获于河南省焦作市温县(113.07°E, 35.01°N); 山东陈集铁棍山药收获于山东省菏泽市定陶县陈集镇(111.33°E, 35.46°N); 河北小白嘴山药收获于河北省保定市高阳镇(115.56°E, 38.62°N); 山东鸡皮糙和山东西施山药收获于山东省菏泽市定陶县陈集镇(111.37°E, 35.44°N); 山西运城铁棍和山西永济铁棍山药收获于山西省运城市永济县(110.28°E, 34.90°N); 河北高阳紫药山药收获于河北省保定市高阳镇(115.75°E, 38.67°N)。所有山药收获于 2017 年 11 月。随机收集每个品种的 10 个样本。所有样本均由河南农业大学高志明教授鉴定, 凭证样本保存在河南省生殖健康科学技术研究院。

不同地方采集到的山药根茎样品用水冲洗去除泥沙后, 用去离子水反复清洗去皮, 晾干, 切片, 置于 40 ℃烘箱中烘干。粉碎, 低温干燥保存^[13]。

1.4 游离氨基酸的测定方法 参照 NY/T 1975—2010《水溶肥料 游离氨基酸含量的测定》方法测定山药粉中游离氨基酸的含量, 平行测定 3 次^[14]。步骤如下: 准确称取 2 g(精确

基金项目 河南省科学院杰青人才培养项目(220402003); 河南省科学院基本科研业务费项目(220602043); 河南省科技攻关计划项目(182102410089)。

作者简介 王华芬(1987—), 女, 河南唐河人, 助理研究员, 博士, 从事先进材料合成及食品质量安全研究。

收稿日期 2022-03-21

到 0.001 g) 样品, 置于 100 mL 容量瓶中, 充分溶解后, 加水定容至刻度。放置过夜后, 过滤, 准确吸取滤液 4 mL 于 10 mL 离心管中, 准确加入 2 mL 磺基水杨酸溶液 (50 g/L), 混匀, 放置 1 h。准确加入 1 mL EDTA-Na 溶液 (10 g/L) 和 1 mL 盐酸溶液 (0.06 mol/L), 混匀, 用 0.45 μm 滤膜过滤。取 1 mL 滤液用浓缩仪蒸干, 准确加入 2 mL 样品稀释液, 用 0.22 μm 滤膜过滤上机。

1.5 水解氨基酸的测定方法 参照 GB 5009.124—2016《食品中氨基酸的测定》方法测定山药粉中水解氨基酸的含量,平行测定 3 次^[15]。步骤如下:准确称取 0.5 g(精确到 0.001 g)样品置于水解管中,向管内加入 8 mL 6 mol/L 盐酸溶液,继续加入 4 滴苯酚。于 110 ℃ 水解 22 h,取出,冷却至室温。打开水解管,将水解液过滤至 50 mL 容量瓶中,用水少量多次冲洗水解管,一并过滤至同一 50 mL 容量瓶中,定容,摇匀。准确吸取 1 mL 溶液用试管浓缩仪蒸干,残留物用 1 mL 样品稀释液溶解后用 0.22 μm 滤膜过滤,上机测试。

2 结果与分析

2.1 不同品种山药粉中游离氨基酸的检测与分析

2.1.1 山药粉中游离氨基酸总量。从表 1 可以看出,不同品种山药粉中游离氨基酸含量中都含有 17 种氨基酸,种类齐

全,存在明显差异。在8种不同品种山药粉中游离氨基酸总量最高的是河北小白嘴,其游离氨基酸总量高达2.124%,其次是河北高阳紫药、山东鸡皮糙、山东陈集铁棍、河南温县铁棍、山东西施、山西永济铁棍,游离氨基酸总量最低的是山西运城铁棍品种,仅为0.603%。由此可见,不同品种中游离氨基酸总量差异相对较大,为今后人们挑选不同地域的山药提供了重要的资源信息。

另外,从表 1 中也可以看出山药粉中丙氨酸、赖氨酸、苯丙氨酸、丝氨酸、谷氨酸、天门冬氨酸的含量都较高。

2.1.2 不同品种山药粉游离氨基酸中必需氨基酸含量。游离氨基酸中必需氨基酸的含量极大地影响着山药品质的高低。必需氨基酸是人体不能合成且必需由食物提供的氨基酸,主要为甲硫氨酸、赖氨酸、苯丙氨酸、缬氨酸、色氨酸、异亮氨酸、亮氨酸和苏氨酸。从表 1 可以看出,必需氨基酸总量 0.290%~0.883%,游离氨基酸中必需氨基酸总量最高的是河北小白嘴,达 0.883%,其次是山东鸡皮糙、河南温县铁棍和山东陈集铁棍,总量最低的是山西运城铁棍,仅为 0.290%。其中,苏氨酸含量最高的是河北小白嘴,达 0.083%,最低的是山西运城铁棍,仅 0.038%;缬氨酸、蛋氨酸、亮氨酸和异亮氨酸的含量总体都较低;苯丙氨酸含量维持在 0.172%~

表 1 不同品种山药粉中游离氨基酸的组成与含量
Table 1 Composition and content of free amino acids in different varieties of yam powder %

山药品种 Yam varieties	天门冬氨酸 Asp	苏氨酸* Thr	丝氨酸 Ser	谷氨酸 Glu	甘氨酸 Gly	丙氨酸 Ala
河南温县铁棍 Henan Wenxian Tiegun	0.077	0.051	0.095	0.169	0.033	0.200
山东陈集铁棍 Shandong Chenji Tiegun	0.057	0.050	0.191	0.145	0.025	0.142
河北小白嘴 Hebei Xiaobaizui	0.044	0.083	0.230	0.239	0.053	0.585
山东鸡皮糙 Shandong Jipicao	0.040	0.049	0.164	0.111	0.023	0.176
山东西施 Shandong Xishi	0.048	0.053	0.128	0.119	0.039	0.218
山西运城铁棍 Shanxi Yuncheng Tiegun	0.012	0.038	0.109	0.039	0.016	0.068
山西永济铁棍 Shanxi Yongji Tiegun	0.021	0.041	0.062	0.060	0.014	0.064
河北高阳紫药 Hebei Gaoyang Ziyao	0.124	0.065	0.370	0.169	0.072	0.408

山药品种 Yam varieties	胱氨酸* Cys ₂	缬氨酸* Val	蛋氨酸* Met	异亮氨酸* Ile	亮氨酸* Leu	酪氨酸 Tyr
河南温县铁棍 Henan Wenxian Tiegun	0.009	0.014	0.035	0.002	0.007	0.005
山东陈集铁棍 Shandong Chenji Tiegun	0.011	0.014	0.017	0.002	0.009	0.030
河北小白嘴 Hebei Xiaobaizui	0.037	0.049	0.004	0.014	0.004	0.029
山东鸡皮糙 Shandong Jipicao	0.033	0.032	0.015	0.024	0.014	0.036
山东西施 Shandong Xishi	0.023	0.005	0.012	0.005	0.002	0.022
山西运城铁棍 Shanxi Yuncheng Tiegun	0.008	0.005	0.017	0.004	0.001	0.021
山西永济铁棍 Shanxi Yongji Tiegun	0.013	0.001	0.013	0.003	0.001	0.030
河北高阳紫药 Hebei Gaoyang Ziyao	0.031	0.055	0.008	0.031	0.019	0.019

山药品种 Yam varieties	苯丙氨酸* Phe	组氨酸 His	赖氨酸* Lys	精氨酸 Arg	脯氨酸 Pro	氨基酸总量 Total amino acid	必需氨基酸总量 Total essential amino acids
河南温县铁棍 Henan Wenxian Tiegun	0.212	0.017	0.294	0.004	0.036	1.260	0.624
山东陈集铁棍 Shandong Chenji Tiegun	0.236	0.014	0.281	0.017	0.030	1.271	0.620
河北小白嘴 Hebei Xiaobaizui	0.286	0.018	0.406	0.009	0.034	2.124	0.883
山东鸡皮糙 Shandong Jipicao	0.252	0.011	0.290	0.051	0.032	1.353	0.709
山东西施 Shandong Xishi	0.185	0.012	0.134	0.038	0.035	1.078	0.419
山西运城铁棍 Shanxi Yuncheng Tiegun	0.172	0.012	0.045	0.016	0.020	0.603	0.290
山西永济铁棍 Shanxi Yongji Tiegun	0.199	0.012	0.027	0.143	0.032	0.736	0.298
河北高阳紫药 Hebei Gaoyang Ziyao	0.230	0.021	0.027	0.359	0.040	2.048	0.466

注：* 为必需氨基酸
Note: * is essential amino acid

0.286%,含量最高的河北小白嘴(0.286%),最低的是山西运城铁棍(0.172%);赖氨酸在不同山药粉中的含量差别变化很大,含量最高的是河北小白嘴,高达0.406%,最低的是山西永济铁棍和河北高阳紫药,均是0.027%。以上结果表明,8种山药粉中各类必需氨基酸含量和必需氨基酸总量存在明显差异。

2.2 不同品种山药粉中水解氨基酸的检测与分析

2.2.1 山药粉中水解氨基酸总量。水解氨基酸指的是样品中的蛋白质、多肽等氨基酸链在酸性条件下水解成单独的氨基酸分子。从不同品种山药粉中水解氨基酸含量(表2)可以看出,所有品种的山药粉的水解氨基酸中都包含主要16种氨基酸。该试验采用盐酸水解,测出16种氨基酸,但不能说明不含色氨酸和胱氨酸。色氨酸可能在酸水解的过程中被分解了,胱氨酸可能也被破坏了或者含量极低,故未能测出。8种山药粉中水解氨基酸的总含量没有明显差异,主要在6.057%~7.779%。

8种不同品种山药粉中水解氨基酸的含量测定结果中,除了蛋氨酸的含量相对较低之外,谷氨酸、天门冬氨酸、精氨酸、丝氨酸、丙氨酸等的含量较高。有文献报道谷氨酸不仅能够预防癫痫,还具有降低血压的作用^[12]。天门冬氨酸是一种鲜味氨基酸,具有特殊的鲜味^[16],与谷氨酸、甘氨酸、精氨酸和丙氨酸一起构成主要的鲜味氨基酸,对食品的鲜味有重要影响。已有研究表明,精氨酸的缺乏会引起甘油三酯和胆固醇的升高,其具有显著的降压作用^[17]。

2.2.2 不同品种山药粉水解氨基酸中必需氨基酸含量。从表2可以看出,8种品种山药粉的水解氨基酸中,必需氨基酸总量在1.584%~2.307%,最高的是山东西施品种,最低的是河北高阳紫药品种。7种必需氨基酸的含量在各品种之间的差异不大,总的来说,亮氨酸在8个品种中的含量最高,其次是苯丙氨酸、缬氨酸、异亮氨酸、苏氨酸、赖氨酸,最低的是蛋氨酸。

表2 不同品种山药粉中水解氨基酸的组成与含量						
Table 2 Composition and content of hydrolyzed amino acids in different varieties of yam powder						%
山药品种 Yam varieties	天门冬氨酸 Asp	苏氨酸* Thr	丝氨酸 Ser	谷氨酸 Glu	甘氨酸 Gly	丙氨酸 Ala
河南温县铁棍 Henan Wenxian Tiegun	1.001	0.270	0.510	1.400	0.296	0.462
山东陈集铁棍 Shandong Chenji Tiegun	0.900	0.258	0.583	1.197	0.308	0.432
河北小白嘴 Hebei Xiaobaizui	0.777	0.279	0.655	1.621	0.277	0.947
山东鸡皮糙 Shandong Jipicao	0.872	0.272	0.535	1.044	0.265	0.442
山东西施 Shandong Xishi	0.948	0.297	0.611	1.345	0.305	0.540
山西运城铁棍 Shanxi Yuncheng Tiegun	0.807	0.245	0.525	0.849	0.269	0.337
山西永济铁棍 Shanxi Yongji Tiegun	0.936	0.266	0.438	1.068	0.286	0.386
河北高阳紫药 Hebei Gaoyang Ziyao	0.693	0.240	0.675	1.020	0.251	0.725
山药品种 Yam varieties	缬氨酸* Val	蛋氨酸* Met	异亮氨酸* Ile	亮氨酸* Leu	酪氨酸 Tyr	苯丙氨酸* Phe
河南温县铁棍 Henan Wenxian Tiegun	0.374	0.070	0.289	0.499	0.176	0.407
山东陈集铁棍 Shandong Chenji Tiegun	0.333	0.084	0.282	0.467	0.190	0.372
河北小白嘴 Hebei Xiaobaizui	0.333	0.074	0.232	0.377	0.146	0.290
山东鸡皮糙 Shandong Jipicao	0.360	0.105	0.298	0.474	0.196	0.393
山东西施 Shandong Xishi	0.384	0.120	0.306	0.498	0.203	0.429
山西运城铁棍 Shanxi Yuncheng Tiegun	0.322	0.080	0.270	0.435	0.184	0.356
山西永济铁棍 Shanxi Yongji Tiegun	0.380	0.106	0.315	0.503	0.228	0.426
河北高阳紫药 Hebei Gaoyang Ziyao	0.283	0.050	0.201	0.328	0.153	0.259
山药品种 Yam varieties	组氨酸 His	赖氨酸* Lys	精氨酸 Arg	脯氨酸 Pro	氨基酸总量 Total amino acid	必需氨基酸总量 Total essential amino acids
河南温县铁棍 Henan Wenxian Tiegun	0.186	0.282	1.251	0.306	7.779	2.191
山东陈集铁棍 Shandong Chenji Tiegun	0.148	0.267	0.946	0.257	7.024	2.063
河北小白嘴 Hebei Xiaobaizui	0.124	0.224	1.046	0.174	7.576	1.809
山东鸡皮糙 Shandong Jipicao	0.187	0.242	0.812	0.263	6.760	2.144
山东西施 Shandong Xishi	0.169	0.273	0.756	0.324	7.508	2.307
山西运城铁棍 Shanxi Yuncheng Tiegun	0.138	0.253	0.676	0.311	6.057	1.961
山西永济铁棍 Shanxi Yongji Tiegun	0.157	0.288	0.809	0.299	6.891	2.284
河北高阳紫药 Hebei Gaoyang Ziyao	0.138	0.223	0.904	0.159	6.302	1.584
注:* 为必需氨基酸						
Note:* is essential amino acid						

3 结论

通过对8种不同品种山药粉中游离氨基酸和水解氨基酸的检测与分析,发现不同品种中游离氨基酸总量变化范围

较大,从高到低依次为河北小白嘴>河北高阳紫药>山东鸡皮糙>山东陈集铁棍>河南温县铁棍>山东西施>山西永济铁

(下转第173页)

提出具体建设内容、技术方案以及工程成效监测评估体系等一系列对策措施,对促进流域内生态绿化取得实效,形成土地绿化空间新格局,构筑长江上游生态安全屏障,破解河流源头保护修复治理难题具有重要意义。

赤水河流域(云南段)生态保护修复绿化建设的实施需要统一思想,做好流域整体保护修复的顶层设计,加大山水林田湖草沙综合调控,构建流域生态文明体系,解决好流域保护与发展的关系^[22]。统筹推进赤水河流域(云南段)中央财政支持土地绿化试点示范项目建设,完善项目管理机制和运行机制,健全资金、政策、组织、技术等多元保障,通过流域各项任务措施的实施,恢复提升源头区植被健康水平,增强森林生态系统水源涵养和水土保持功能,保障赤水河流域“一江清水出云南入长江”^[23]。

参考文献

[1] 刘业轩,石晓丽,史文娇.福建省森林生态系统水源涵养服务评估:InVEST模型与meta分析对比[J].生态学报,2021,41(4):1349-1361.

[2] 李文友,田为刚.赤水河(昭通段)生态补偿评估研究[J].环境科学导刊,2020,39(4):19-23.

[3] 国家林业和草原局昆明勘察设计院.云南省昭通市赤水河流域(云南段)中央财政支持国土绿化试点示范项目实施(2021~2022年)[R].2021.

[4] 财政部,国土资源部,环境保护部.关于推进山水林田湖生态保护修复工作的通知:财建[2016]725号[EB/OL].(2016-10-09)[2021-08-06].http://www.gov.cn/xinwen/2016-10/09/content_5116335.htm.

[5] 成金华,尤喆.“山水林田湖草是生命共同体”原则的科学内涵与实践路径[J].中国人口·资源与环境,2019,29(2):1-6.

[6] 代堂刚,余仲相,杨中兰.云南省境内赤水河流域水资源水生态现状分析[J].人民长江,2021,52(S1):47-51.

[7] 国家林业局昆明勘察设计院,昭通市林业局.云南省昭通市森林资源规

划设计调查报告[R].昆明:国家林业局昆明勘察设计院,昭通市林业局,2016.

[8] 吴一帆,张璇,李冲,等.生态修复措施对流域生态系统服务功能的提升:以潮河流域为例[J].生态学报,2020,40(15):5168-5178.

[9] 云南省水文水资源局,云南省水文水资源局昭通分局.赤水河流域(云南段)水资源状况调查报告[R].昆明:云南省水文水资源局,云南省水文水资源局昭通分局,2020.

[10] 环境保护部,中国科学院.关于印发《全国生态功能区划(修编版)》的公告[EB/OL].(2015-11-23)[2021-08-06].http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/hgg/201511/t20151126_317777.htm.

[11] 王忠锁,姜鲁光,黄明杰,等.赤水河流域生物多样性保护现状和对策[J].长江流域资源与环境,2007,16(2):175-180.

[12] 冯兆忠,刘硕,李品.永定河流域生态环境研究进展及修复对策[J].中国科学院大学学报,2019,36(4):510-520.

[13] 任奕蒙,岳南均,徐森,等.利用氮氧同位素解析赤水河流域水体硝酸盐来源及其时空变化特征[J].地球与环境,2019,47(6):820-828.

[14] 王万宾,管堂珍,梁启斌,等.赤水河流域(云南省境内)水环境承载力测算研究[J].人民长江,2021,52(3):28-35.

[15] 代杰,周伟.退化林的形成原因与修复对策[J].种子科技,2021,39(8):74-75.

[16] 王力.退化林成因分析与修复措施:以宣州区为例[J].安徽林业科技,2020,46(2):21-24.

[17] 张昕欣.河北省三北防护林退化林分修复浅析[J].防护林科技,2020(9):77-78.

[18] 曹宇,王嘉怡,李国煜.国土空间生态修复:概念思辨与理论认知[J].中国土地科学,2019,33(7):1-10.

[19] 李祥伟.乡村绿化实施工作中存在的问题及建议[J].林业勘查设计,2021,50(3):16-18.

[20] 李荣喜,许雯,董斌,等.乡村振兴背景下广州市增城区新农村人居环境绿化现状调查与研究[J].安徽农业科学,2020,48(17):128-132.

[21] 应凌霄,王军,周妍.闽江流域生态安全格局及其生态保护修复措施[J].生态学报,2019,39(23):8857-8866.

[22] 储昭升,高思佳,庞燕,等.洱海流域山水林田湖草各要素特征、存在问题及生态保护修复措施[J].环境工程技术学报,2019,9(5):507-514.

[23] 李微希.一江清水出云南——“共舞长江经济带”云南答卷[J].当代党员,2019(1):46-48.

(上接第166页)

棍>山西运城铁棍;而水解氨基酸总量差异不明显,其中必需氨基酸从高到低依次为亮氨酸>苯丙氨酸>缬氨酸>异亮氨酸>苏氨酸>赖氨酸>蛋氨酸。

参考文献

[1] 陈梦雨,刘伟,俞桂新,等.山药化学成分与药理活性研究进展[J].中医药学报,2020,48(2):62-66.

[2] ZHOU N,ZENG M N,LI K,et al.An integrated metabolomic strategy for the characterization of the effects of Chinese yam and its three active components on septic cardiomyopathy[J].Food Funct,2018,9(9):4989-4997.

[3] LI Q,LI W Z,GAO Q Y,et al.Hypoglycemic effect of Chinese yam (*Dioscorea opposita rhizoma*) polysaccharide in different structure and molecular weight[J].J Food Sci,2017,82(10):2487-2494.

[4] XUE H Y,LI J R,LIU Y G,et al.Optimization of the ultrafiltration-assisted extraction of Chinese yam polysaccharide using response surface methodology and its biological activity[J].Int J Biol Macromol,2019,121:1186-1193.

[5] LIN Y P,LEE T Y,TSEN J H,et al.Dehydration of yam slices using FIR-assisted freeze drying[J].J Food Eng,2007,79(4):1295-1301.

[6] ZENG X X,LIU D H,HUANG L Q.Metabolome profiling of eight Chinese yam (*Dioscorea polystachya* Turcz.) varieties reveals metabolite diversity and variety specific uses[J].Life,2021,11(7):687.

[7] 龚凌霄,池静雯,王静,等.山药中主要功能性成分及其作用机制研究进展[J].食品工业科技,2019,40(16):312-319.

[8] 景娜,江海,杜欢欢,等.我国山药研究进展[J].安徽农业科学,2016,44

(15):114-117.

[9] GAO J,ZHU Y Q,LUO F Y.Effects of ethanol combined with ascorbic acid and packaging on the inhibition of browning and microbial growth in fresh-cut Chinese yam[J].Food Sci Nutr,2018,6(4):998-1005.

[10] MA J N,KANG S Y,MENG X L,et al.Effects of rhizome extract of *Dioscorea batatas* and its active compound, allantoin, on the regulation of myoblast differentiation and mitochondrial biogenesis in C2C12 myotubes[J].Molecules,2018,23(8):1-15.

[11] HU G J,ZHAO Y,GAO Q,et al.Functional properties of Chinese yam (*Dioscorea opposita* Thunb. cv. Baiyu) soluble protein[J].J Food Sci Technol,2018,55(1):381-388.

[12] WANG X X,REDDY C K,XU B J.A systematic comparative study on morphological,crystallinity,pasting,thermal and functional characteristics of starches resources utilized in China[J].Food Chem,2018,259:81-88.

[13] WANG Q,WANG X H,WU X J,et al.¹H NMR-based metabolic profiling approach to identify the geo-authentic Chinese yam (*Dioscorea polystachya* Turczaninow cv.Tiegun) [J/OL].J Food Compos Anal,2021,98[2021-09-27].<https://doi.org/10.1016/j.jfca.2021.103805>.

[14] 中华人民共和国农业部.水溶肥料 游离氨基酸含量的测定:NY/T 1975—2010[S].北京:中国农业出版社,2011.

[15] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会,国家食品药品监督管理总局.食品中氨基酸的测定:GB 5009.124—2016[S].北京:中国标准出版社,2016.

[16] 张丽梅,陈青瑛,黄玉吉,等.山药品种间氨基酸含量的差异性研究[J].氨基酸和生物资源,2008,30(2):12-15.

[17] 蒋方程,李傲然,何静仁,等.不同品种山药的营养成分分析及其水提物的体外抗氧化能力研究[J].食品工业科技,2018,39(4):6-11.