

不同干燥方法对淫羊藿多糖化学性质和抗氧化活性的影响

徐洲,刘静,冯士令,申世安,刘露,向春蓉,丁春邦*

(四川农业大学生命科学院,四川雅安 625014)

摘要:为研究不同干燥方法对淫羊藿多糖化学性质及抗氧化活性的影响,以粗毛淫羊藿为材料制备多糖。测定热风干燥多糖(EAP-H)、真空干燥多糖(EAP-V)和真空冷冻干燥多糖(EAP-F)的中性糖、糖醛酸和蛋白质含量,单糖组成及DPPH自由基、羟基自由基和超氧阴离子的清除能力。结果表明:淫羊藿多糖为含有少量蛋白质的酸性多糖,不同干燥方法将会影响其单糖组成和糖醛酸含量;EAP-F糖醛酸含量最高并具有最强的DPPH自由基、羟基自由基和超氧阴离子清除能力。因此,真空冷冻干燥是制备淫羊藿多糖的最佳干燥方法。

关键词:淫羊藿多糖,化学性质,抗氧化活性,干燥方法

Effects of different drying methods on chemical properties and antioxidant activities of polysaccharides extracted from *Epimedium*

XU Zhou, LIU Jing, FENG Shi-ling, SHEN Shi-an, LIU Lu, XIANG Chun-rong, DING Chun-bang*

(College of Life Sciences, Sichuan Agricultural University, Ya'an 625014, China)

Abstract: The study aimed to explore the effect of drying methods on the chemical properties and antioxidant activities of polysaccharides extracted from *Epimedium*, three polysaccharides (EAP-H, EAP-V, EAP-F) were obtained from *Epimedium acuminatum* Franch. via methods such as air drying, vacuum drying and vacuum freeze drying, respectively. Their neutral sugar, uronic acid and protein content were studied, and antioxidant activities were investigated on the basis of assay for DPPH radical, hydroxyl radical, superoxide anion free radical scavenging ability. Results showed that *Epimedium* polysaccharides were acidic polysaccharides containing a small amount of protein, different drying methods could affect their monosaccharide composition and uronic acid content; compared with air drying and vacuum drying methods, vacuum freeze drying method resulted to *Epimedium* polysaccharides with higher uronic acid content, stronger antioxidant abilities of DPPH radical, hydroxyl radical and superoxide anion free radical scavenging ability. As a result, vacuum freeze drying method was the best choice for the preparation of the *Epimedium* polysaccharides.

Key words: *Epimedium* polysaccharides; chemical properties; antioxidant activities; drying methods

中图分类号: TS201.2

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2015)19-0116-05

doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2015.19.015

淫羊藿为小檗科(Berberidaceae)淫羊藿属(*Epimedium*)多年生草本植物,是我国传统补益中药^[1]。因其具有益精气、坚筋骨、补腰膝、强心力等功效而被广泛应用于治疗心血管异常、不孕不育、骨质疏松及肢体麻木等疾病^[2]。近年来,淫羊藿多糖作为淫羊藿主要活性成分而受到广泛关注。现代药理学研究表明,淫羊藿多糖具有抗氧化、抗肿瘤、增强免疫、延缓衰老等诸多生物活性,在食品和制药工业中具有良好的应用前景^[3-4]。

多糖是由许多单糖聚合而成的天然高分子化合

物,具有复杂的化学结构和多样的生物活性^[5]。干燥作为多糖制备工艺中的一个重要环节,将会影响多糖的单糖残基、化学组成及空间构象,进而影响多糖生物活性^[6-7]。淫羊藿多糖为多种单糖残基链接而成的含有少量蛋白质的酸性杂多糖,其性质受提取方法、纯化手段等诸多因素的影响^[4,8],而不同干燥方法对淫羊藿多糖性质的影响还未见报道。因此,本实验以淫羊藿为材料,考察热风干燥、真空干燥、真空冷冻干燥三种不同干燥方法对淫羊藿多糖理化性质和体外抗氧化活性的影响,筛选淫羊藿多糖提取

收稿日期:2015-02-12

作者简介:徐洲(1991-),男,硕士研究生,研究方向:药用植物资源学,E-mail:285732360@qq.com。

*通讯作者:丁春邦(1966-),女,博士,教授,研究方向:药用植物资源学,E-mail:dcb@sicau.edu.cn。

基金项目:四川省科技厅科技支撑计划项目(2014NZ0103)。

过程中的最佳干燥方法,为淫羊藿多糖工业制备提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

淫羊藿 四川省雅安市四川农业大学农场,经丁春邦教授鉴定为粗毛淫羊藿 (*Epimedium acuminatum* Franch.),于50℃烘干至恒重,粉碎过60目筛,干燥保存备用。

2,2-二苯基-1-苦味基肼 (DPPH)、氯化硝基四氮唑蓝 (NBT)、还原型辅酶 I (NADH)、吩嗪硫酸甲酯 (PMS) 美国 Sigma 公司;MD44 透析袋 (截留分子量 8000~14000) 北京 Solarbio 科技有限公司;牛血清白蛋白 (BR) 上海博奥生物科技有限公司;30% H₂O₂、考马斯亮蓝 G-250 (BR) 成都市科龙化学试剂厂;石油醚、乙醇、硫酸亚铁、葡萄糖、葡萄糖醛酸、水杨酸钠等试剂 均为国产分析纯。

BT-124S 型电子天平 德国 Sartorius 公司;UV-3200PC 紫外分光扫描仪 上海美谱达仪器有限公司;QP-2010Ultra 型 GCMS 仪 日本 Shimadzu 公司;DHG-9240A 型电热恒温鼓风干燥箱 上海一恒科技有限公司;DZ-2BC 型真空干燥箱 天津泰斯特仪器有限公司;DTS-05 真空冷冻干燥机 抚顺低温干燥设备有限公司;RB-52AA 型真空旋转蒸发器 上海亚荣生化有限公司;HWSY11-K 型电热恒温水浴锅 北京市长风仪器仪表有限公司;J-26 XP 型冷冻离心机 美国 Beckman 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 原料预处理 将淫羊藿粉末置于索氏提取器中,经石油醚 (沸点 60~90℃) 回流除去色素,再用 80% 乙醇回流提取除尽单糖、低聚糖等醇溶性杂质,药渣挥干溶剂后备用。

1.2.2 淫羊藿多糖的制备 精确称取淫羊藿药渣 100 g,以蒸馏水为溶剂,按料液比 1:30 (g/mL)、70℃ 水浴提取 2 次,每次 120 min^[9]。合并提取液,60℃ 减压旋转蒸发浓缩,浓缩液 seavage 法除去蛋白质,水层透析 24 h 除去小分子杂质。浓缩透析袋中液体,加入 4 倍体积无水乙醇 4℃ 过夜后离心 (4000 r/min),沉淀即为精制淫羊藿多糖。

1.2.3 淫羊藿多糖的干燥 采用热风干燥、真空干燥、真空冷冻干燥三种不同干燥方法处理^[10],分别得到热风干燥多糖 (EAP-H)、真空干燥多糖 (EAP-V) 和真空冷冻干燥多糖 (EAP-F) 三种淫羊藿多糖。热风干燥的条件是:干燥室温度 60℃;真空干燥的条件是:干燥室温度 60℃,压力 0.07 MPa;真空冷冻干燥的条件是:干燥室温度 -60℃,压力 0.07 MPa。

1.2.4 中性糖、糖醛酸及蛋白质含量测定 中性糖含量以葡萄糖为标准品,采用苯酚硫酸法测定^[11]。糖醛酸含量以葡萄糖醛酸为标准品,采用间羟基联苯法测定^[12]。蛋白质含量以牛血清白蛋白为标准品,采用考马斯亮蓝染色法测定^[13]。

1.2.5 单糖组成分析 多糖的单糖组成分析采用糖脲乙酸酯衍生,GC-MS 分析^[14]。称取 2 mg 多糖样品于安瓿瓶中,于水浴中用 3 mL 3 mol/L 三氟乙酸

(TFA) 100℃ 完全水解,水解后加入 20 mg 硼氢化钠,常温下还原 8 h,用乙酸清除过量的硼氢化钠,减压蒸干后加入 1 mL 醋酸酐和 1 mL 吡啶,震荡溶解后,于 100℃ 条件下进行乙酰化反应 6 h,减压蒸干乙酸酐和吡啶,余下的粉末用 CHCl₃ 溶解,过 0.22 μm 微孔滤膜进行 GC-MS 分析。

GC-MS 条件为:RTX 5 ms 石英毛细管色谱柱 (0.25 μm × 0.25 mm × 30 m);H₂ 流速为 30 mL/min;柱温 120℃ 持续 3 min,以 3℃/min 升至 210℃,持续 4 min;进样口温度 250℃;检测器温度 280℃。

1.3 抗氧化活性测定

1.3.1 DPPH 自由基清除能力的测定 参照李小勇等^[15]报道的方法,稍作修改,以 V_c 为阳性对照,在试管中分别加入 1 mL 不同质量浓度的不同干燥方法得到的淫羊藿多糖溶液或 V_c 溶液,加入 2 mL 0.2 mmol/L DPPH 乙醇溶液,摇匀,37℃ 水浴反应 30 min,以蒸馏水作为参比,测定 517 nm 波长处的吸光度 (A_{sample})。空白对照组以 1 mL 蒸馏水代替样品,测定 517 nm 波长处吸光度 (A_{blank})。DPPH 自由基清除率通过以下公式计算:

$$\text{DPPH 自由基清除率}(\%) = (1 - A_{\text{sample}}/A_{\text{blank}}) \times 100$$

式中:A_{sample} 为样品或 V_c 溶液和 DPPH 溶液反应吸光值;A_{blank} 为蒸馏水代替样品和 DPPH 溶液反应吸光值。

1.3.2 羟基自由基清除能力的测定 参照 Zhang 等^[16]报道的方法,稍作修改,以 V_c 为阳性对照,在试管中分别加入 1 mL 不同质量浓度的不同干燥方法得到的淫羊藿多糖溶液或 V_c 溶液,再分别加入 0.5 mL 1.5 mmol/L FeSO₄ 溶液、0.35 mL 6 mmol/L H₂O₂ 溶液和 0.15 mL 20 mmol/L 水杨酸钠溶液,摇匀,37℃ 水浴反应 60 min,以蒸馏水作为参比,测定 562 nm 波长处的吸光度 (A_{sample})。空白对照组以 1 mL 蒸馏水代替样品,测定 562 nm 波长处吸光度 (A_{blank})。羟基自由基清除率通过以下公式计算:

$$\text{羟基自由基清除率}(\%) = (1 - A_{\text{sample}}/A_{\text{blank}}) \times 100$$

式中:A_{sample} 为加入样品或 V_c 溶液的反应液吸光值;A_{blank} 为蒸馏水代替样品的反应液吸光值。

1.3.3 超氧阴离子清除能力的测定 参照 Shen 等^[14]报道的方法,稍作修改,以 V_c 为阳性对照,在试管中分别加入 1 mL 不同质量浓度的不同干燥方法得到的淫羊藿多糖溶液或 V_c 溶液,再分别加入 1 mL 557 μmol/L NADH 溶液、1 mL 108 μmol/L NBT 溶液和 1 mL 45 μmol/L PMS 溶液,摇匀,常温静止 5 min,以蒸馏水作为参比,测定 560 nm 波长处的吸光度 (A_{sample})。空白对照组以 1 mL 蒸馏水代替样品,测定 560 nm 波长处吸光度 (A_{blank})。超氧阴离子自由基清除率通过以下公式计算:

$$\text{超氧阴离子清除率}(\%) = (1 - A_{\text{sample}}/A_{\text{blank}}) \times 100$$

式中:A_{sample} 为加入样品或 V_c 溶液的反应液吸光值;A_{blank} 为蒸馏水代替样品的反应液吸光值。

1.4 数据处理

所得数据均采用 IBM SPSS Statistics 22 进行统

计分析及 T 检验。

2 结果与分析

2.1 EAP-H、EAP-V 和 EAP-F 的化学组成

多糖含有中性糖和糖醛酸,并通过共价键与蛋白质等其他成分相结合而展现出多种生物活性^[17]。由表 1 可知,三种多糖均由中性糖、糖醛酸及少量蛋白质组成,说明三种多糖均是含有少量蛋白质的酸性多糖。EAP-H、EAP-V 和 EAP-F 中性糖含量分别为 86.65%、86.63% 和 85.37%,蛋白质含量分别为 2.09%、2.24% 和 2.20%,三者之间中性糖和蛋白质含量差异不明显。EAP-H 糖醛酸含量为 4.23%,显著低于 EAP-V 4.48% 及 EAP-F 5.20%,这可能是因为 EAP-H 在干燥过程中有氧和高温环境对糖醛酸造成了破坏^[18]。

表 1 不同干燥方法的淫羊藿多糖的化学组成(%)

Table 1 The chemical compositions of polysaccharides obtained by different methods (%)

样品	EAP-H	EAP-V	EAP-F
中性糖	86.65 ± 2.22 ^a	86.63 ± 1.11 ^a	85.37 ± 1.73 ^a
蛋白质	2.09 ± 0.08 ^a	2.24 ± 0.10 ^a	2.20 ± 0.07 ^a
糖醛酸	4.23 ± 0.05 ^b	4.84 ± 0.23 ^a	5.20 ± 0.38 ^a

注:表中数据均为 3 次重复的平均值 ± 标准差,同一行数据后不同小写字母表示差异显著($p < 0.05$)。

2.2 EAP-H、EAP-V 和 EAP-F 的单糖组成

利用 GC-MS 技术,对不同方法干燥的淫羊藿多糖单糖组成进行了分析。由表 2 可知,三种多糖均含有阿拉伯糖、半乳糖、葡萄糖、甘露糖、鼠李糖和木糖等六种单糖,组成 EAP-H、EAP-V 和 EAP-F 的单糖摩尔比分别为 1:15.13:336.75:34.38:284.00:583.63、1:8.03:67.06:5.56:73.59:138.24 和 1:3.12:25.41:2.15:22.34:63.95。这表明不同的干燥方法不会影响组成多糖的单糖种类,但将改变单糖的构成比例,这可能与干燥过程中单糖构象的改变有关^[18-19]。同时,干燥过程中温度、真空度和干燥时间的差异也将会对多糖的分子量、表面结构和空间构象等性质产生影响^[20-21]。

2.3 EAP-H、EAP-V 和 EAP-F 对 DPPH 自由基的清除作用

DPPH 是一种稳定的自由基,抗氧化剂可与其配对结合形成稳定的 DPPH 分子并伴随着 517 nm 处特征吸收峰消失^[22]。由图 1 可以看出,在低浓度范围内,三种淫羊藿多糖对 DPPH 自由基的清除率与质

量浓度呈现较好的量效关系。当多糖质量浓度达到 3.0 mg/mL 时,EAP-F 和 EAP-V 对 DPPH 自由基清除率达到最大,分别为 87.73% 和 87.93%,清除效果显著优于同一浓度的 EAP-H。EAP-H、EAP-V 和 EAP-F 清除 DPPH 自由基 50% 时质量浓度即 IC₅₀ 分别为 1.38、0.87、0.67 mg/mL,表明真空冷冻干燥多糖清除 DPPH 能力最强,真空干燥多糖次之,热风干燥多糖最差。

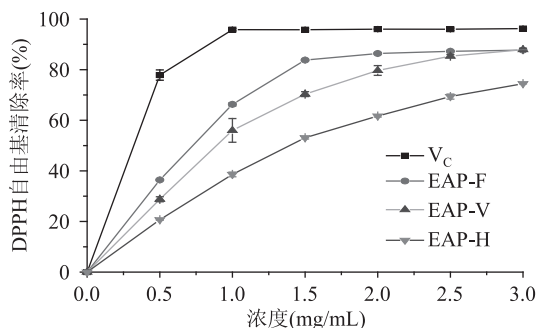


图 1 不同干燥方法的淫羊藿多糖 DPPH 自由基的清除能力

Fig.1 Scavenging effect of polysaccharides obtained by different drying methods on the DPPH radical

2.4 EAP-H、EAP-V 和 EAP-F 对羟基自由基的清除作用

羟基自由基是生物机体极易产生的一种活性高、毒性强的自由基,清除羟基自由基的能力是评价抗氧化物质的重要指标^[23]。如图 2 所示,三种淫羊藿多糖对羟基自由基都有良好的清除效果,且基本趋势一致,在质量浓度 0~2 mg/mL 的范围内具有良好的量效关系。当多糖质量浓度为 2.5 mg/mL 时,EAP-H、EAP-V 和 EAP-F 对羟基自由基的清除能力均达到最大,分别为 67.95%、83.37 和 87.53%。EAP-H、EAP-V 和 EAP-F 对羟基自由基的清除能力 IC₅₀ 值分别为 1.32、0.99、0.92 mg/mL,表明真空冷冻干燥多糖清除羟基自由基能力最强,真空干燥多糖略低,热风干燥多糖最差。

2.5 EAP-H、EAP-V 和 EAP-F 对超氧阴离子的清除作用

超氧阴离子是活性氧中的一种,是生物体内产生的第一个氧自由基,能引起一系列自由基的产生,对机体造成危害^[24]。如图 3 所示,当多糖质量浓度为 0.5 mg/mL 时,EAP-H、EAP-V 和 EAP-F 对超氧

表 2 不同干燥方法的淫羊藿多糖的单糖组成(%)

Table 2 The monosaccharide compositions of polysaccharides obtained by different methods (%)

样品	EAP-H	EAP-V	EAP-F
阿拉伯糖	0.08 ± 0.0005 ^c	0.34 ± 0.0046 ^b	0.85 ± 0.0041 ^a
半乳糖	1.21 ± 0.01 ^c	2.73 ± 0.04 ^a	2.65 ± 0.13 ^b
葡萄糖	26.94 ± 0.44 ^a	22.80 ± 0.31 ^b	21.60 ± 0.79 ^c
甘露糖	2.75 ± 0.60 ^a	1.89 ± 0.36 ^b	1.83 ± 0.01 ^b
鼠李糖	22.72 ± 0.51 ^b	25.02 ± 0.34 ^a	18.99 ± 0.08 ^c
木糖	46.69 ± 0.27 ^b	47.00 ± 0.88 ^b	54.36 ± 1.18 ^a

注:表中数据均为 3 次重复的平均值 ± 标准差,同一行数据后不同小写字母表示差异显著($p < 0.05$)。

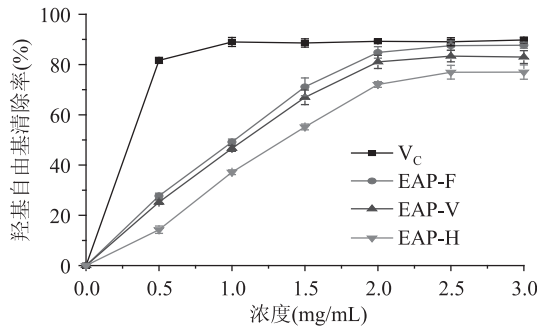


图2 不同干燥方法的淫羊藿多糖羟基自由基的清除能力

Fig.2 Scavenging effect of polysaccharides obtained by different drying methods on the hydroxyl radical

阴离子清除力为 58.80%、60.38% 和 70.37%，均高于 50%；当多糖质量浓度为 2.5 mg/mL 时，清除力达到最大，分别为 82.15%、83.05% 和 88.61%；EAP-H、EAP-V 和 EAP-F 对超氧阴离子清除力 IC₅₀ 分别为 0.28、0.25、0.14 mg/mL，表明真空冷冻干燥多糖清除超氧阴离子能力最强，真空干燥多糖和热风干燥多糖清除能力差异不显著，但明显低于真空冷冻干燥多糖。EAP-H、EAP-V 和 EAP-F 对超氧阴离子清除能力的强弱可能与多糖的单糖组成和糖醛酸含量高低相关^[10]。

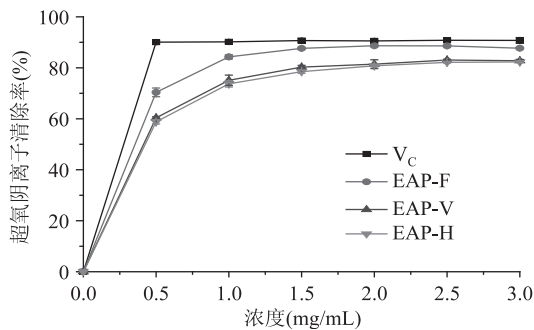


图3 不同干燥方法的淫羊藿多糖超氧阴离子的清除能力

Fig.3 Scavenging effect of EAPs obtained by different drying methods on the superoxide anion radical

3 结论

本实验对热风干燥、真空干燥和真空冷冻干燥三种不同的干燥方法对淫羊藿多糖的化学组成和抗氧化活性的影响进行分析。结果表明，淫羊藿多糖为含有少量蛋白质的酸性多糖，不同干燥方法将会影响其单糖组成和糖醛酸含量。体外抗氧化实验表明，淫羊藿多糖具有优良的 DPPH 自由基、羟基自由基和超氧阴离子清除能力，是一种天然的抗氧化药物和抗氧化食品添加剂。不同干燥方法将会对淫羊藿多糖抗氧化活性造成不同影响，其中真空冷冻干燥多糖糖醛酸含量最高且具有最优的抗氧化能力。因此，真空冷冻干燥是制备淫羊藿多糖的合适干燥方法。

参考文献

- [1] 李时珍.本草纲目[M].北京:人民卫生出版社,1982:750.
- [2] Zhang D, Cheng Y, Wang N, et al. Effects of total flavonoids and flavonol glycosides from *Epimedium koreanum* Nakai on the proliferation and differentiation of primary osteoblasts [J].

Phytomedicine, 2008, 15 (1) :55-61.

[3] Fan Y, Hu Y, Wang D, et al. *Epimedium* polysaccharide and propolis flavone can synergistically stimulate lymphocyte proliferation *in vitro* and enhance the immune responses to ND vaccine in chickens [J]. International journal of biological macromolecules, 2010, 47 (2) :87-92.

[4] Cheng H, Feng S, Shen S, et al. Extraction, antioxidant and antimicrobial activities of *Epimedium acuminatum* Franch polysaccharide [J]. Carbohydrate polymers, 2013, 96 (1) :101-108.

[5] Yang L, Zhang L. Chemical structural and chain conformational characterization of some bioactive polysaccharides isolated from natural sources [J]. Carbohydrate polymers, 2009, 76 (3) :349-361.

[6] Huang F, Guo Y, Zhang R, et al. Effects of Drying Methods on Physicochemical and Immunomodulatory Properties of Polysaccharide-Protein Complexes from Litchi Pulp [J]. Molecules, 2014, 19 (8) :12760-12776.

[7] Nep E, Conway B. Physicochemical characterization of grewia polysaccharide gum: Effect of drying method [J]. Carbohydrate Polymers, 2011, 84 (1) :446-453.

[8] Cheng H, Feng S, Jia X, et al. Structural characterization and antioxidant activities of polysaccharides extracted from *Epimedium acuminatum* [J]. Carbohydrate polymers, 2013, 92 (1) :63-68.

[9] 付亮, 袁璟亚, 杨瑞武, 等. 正交实验优化淫羊藿总黄酮和多糖的分步提取工艺优化 [J]. 食品科学, 2012, 33 (24) :56-60.

[10] Wu S, Li F, Jia S, et al. Drying effects on the antioxidant properties of polysaccharides obtained from *Agaricus blazei* Murrill [J]. Carbohydrate polymers, 2014, 103 (1) :414-417.

[11] Masuko T, Minami A, Iwasaki N, et al. Carbohydrate analysis by a phenol-sulfuric acid method in microplate format [J]. Analytical biochemistry, 2005, 339 (1) :69-72.

[12] Blumenkrantz N, Asboe H. New method for quantitative determination of uronic acids [J]. Analytical biochemistry, 1973 (54) :484-489.

[13] Wei Y, Li K, Tong S. A linear regression method for the study of the Coomassie brilliant blue protein assay [J]. Talanta, 1997, 44 (5) :923-930.

[14] Shen S, Cheng H, Li X, et al. Effects of extraction methods on antioxidant activities of polysaccharides from camellia seed cake [J]. European Food Research and Technology, 2014, 238 (6) :1015-1021.

[15] 李小勇, 霍喜东, 杨自勇, 等. 不同方法提取国槐叶黄酮及其抗氧化活性研究 [J]. 食品工业科技, 2014, 35 (17) :102-106.

[16] Zhang Z, Lv G, Jiang X, et al. Extraction optimization and biological properties of a polysaccharide isolated from *Gleostereum incarnatum* [J]. Carbohydrate polymers, 2015, 117 (1) :185-191.

[17] Rupérez P, Ahrazem O, Leal J. Potential antioxidant capacity of sulfated polysaccharides from the edible marine brown seaweed

(下转第 123 页)

纤维素和木质素含量之间存在一定的关系,即力学特性随着纤维素、半纤维素和木质素含量的变化而不同。纤维素是由葡萄糖组成的大分子多糖,不溶于水及一般的有机溶剂。它是构成植物细胞壁的主要成分,相当于茎芽的骨架物质。由于纤维素分子有极性,分子链之间相互作用力很强,所以纤维素柔顺性很差,是刚性的。这样的结构特性可以提供茎芽一定的机械强度和形变的柔韧度。半纤维素是构成植物细胞初生壁的主要成分之一,它与伸展蛋白、结构蛋白、纤维素和果胶等一起构成具有一定硬度和弹性的细胞壁^[15-16]。半纤维素结合在纤维素微纤维的表面,起着基体粘结作用,以增强众多纤维整体的强度。半纤维素具有亲水性能,这将润胀细胞壁,可赋予纤维弹性。所以相同成分组成的试样在含水率不同的情况下,力学特性也有很大的区别。木质素是一种复杂的酚类聚合物,是由高度取代的苯基丙烷单元随机聚合而成的高分子^[17],具有使细胞相连的作用。木质素填充于纤维素构架中可以增强植物体的机械强度,尽管它的强度比纤维素弱,但能提供刚度并改善耐久性。因此,随着生长状态的变化,马铃薯茎芽的化学成分含量和力学性能也随之改变,即随着芽龄期的增长,其力学性能和化学成分含量也就越高。

3 结论

在芽龄期相同的情况下,不同品种茎芽的相同部位和同一品种茎芽的不同部位压缩强度与最大压缩应变存在差异,整体表现出茎芽压缩强度与最大压缩应变由顶部至基部增大,且茎芽顶部与基部的压缩强度和最大压缩应变差异均显著($p < 0.05$),中部与顶部和基部的压缩强度差异显著($p < 0.05$)。马铃薯茎芽主要由纤维素、半纤维素和木质素组成,茎芽的纤维素、半纤维素和木质素含量由顶部到基部增加,整体表现出 25 d 芽龄期茎芽的纤维素、半纤维素和木质素的含量均高于 15 d 芽龄期茎芽的含量,且茎芽顶部与基部的半纤维素和木质素含量差异均显著($p < 0.05$)。马铃薯茎芽的压缩强度与纤维素和半纤维素含量呈显著正相关,与木质素含量呈极显著正相关;最大压缩应变与纤维素含量呈显著正相关,与半纤维素和木质素含量呈极显著正相关。

(上接第 119 页)

Fucus vesiculosus [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2002, 50(4): 840-845.

[18] Ma L, Chen H, Zhu W, et al. Effect of different drying methods on physicochemical properties and antioxidant activities of polysaccharides extracted from mushroom *Inonotus obliquus* [J]. Food Research International, 2013, 50(2): 633-640.

[19] Wang Y, Liu Y, Huo J, et al. Effect of different drying methods on chemical composition and bioactivity of tea polysaccharides [J]. International journal of biological macromolecules, 2013, 62: 714-719.

[20] Wu Z. Effect of different drying methods on chemical composition and bioactivity of finger citron polysaccharides [J].

参考文献

[1] 马尚明, 李生宝. 马铃薯地膜覆盖栽培的效果与技术 [J]. 作物杂志, 1997(4): 29-30.

[2] 郑有才, 杨祁峰. 不同覆盖模式对旱作马铃薯生育期及土壤含水量的影响 [J]. 安徽农业科学, 2008, 36(20): 8462-8464.

[3] 杨有. 自出苗地膜覆盖种植技术: 中国, CN1341346 [P]. 2002-03-27.

[4] 杨来胜, 席正英, 李玲, 等. 马铃薯高垄膜上覆土自然破膜出苗栽培技术 [J]. 中国蔬菜, 2010(11): 47-48.

[5] 梁莉, 郭玉明. 不同生长期小麦茎秆力学性质与形态特性的相关性 [J]. 农业工程学报, 2008, 24(8): 131-134.

[6] 段传人, 王伯初, 王凭青. 水稻茎秆的结构及其性能的相关性 [J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2003, 26(11): 38-40.

[7] 陈争光, 王德福, 李利桥, 等. 玉米秸秆皮拉伸和剪切特性实验 [J]. 农业工程学报, 2012, 28(21): 59-65.

[8] 王金主, 王元秀, 李峰, 高艳华, 徐军庆, 袁建国. 玉米秸秆中纤维素、半纤维素和木质素的测定 [J]. 山东食品发酵. 2010(3): 44-47.

[9] 熊素敏, 左秀凤, 朱永义. 稻壳中纤维素、半纤维素和木质素的测定 [J]. 粮食与饲料工业, 2005(8): 40-41.

[10] 范鹏程, 田静, 黄静美, 等. 花生壳中纤维素和木质素含量的测定方法 [J]. 重庆科技学院学报: 自然科学版, 2008, 10(5): 64-65, 67.

[11] 郭维俊, 王芬娥, 黄高宝, 等. 小麦茎秆力学性能与化学组分实验 [J]. 农业机械学报, 2009, 40(2): 123-127.

[12] 张忠旭, 陈温福, 杨振玉, 等. 水稻抗倒伏能力与茎秆物理性状的关系及其对产量的影响 [J]. 沈阳农业大学学报, 1999, 30(2): 81-85.

[13] 洗杏娟. 竹纤维增强树脂复合材料及其微观形貌 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1995.

[14] 王芬娥, 黄高宝, 郭维俊, 等. 小麦茎秆力学性能与微观结构研究 [J]. 农业机械学报, 2009, 40(5): 92-95.

[15] 郭玉华, 朱四光, 张龙步. 不同栽培条件对水稻茎秆化学成分的影响 [J]. 沈阳农业大学学报, 2003, 34(2): 89-91.

[16] 山东农学院. 作物栽培学: 上册 [M]. 北京: 农业出版社, 1995.

[17] 尹思慈. 木材学 [M]. 北京: 中国林业出版社, 1996.

International Journal of Biological Macromolecules, 2015. 76(1): 218-223

[21] Vendruscolo C, Ferrero C, Pineda E, et al. Physicochemical and mechanical characterization of galactomannan from *Mimosa scabrella*: Effect of drying method [J]. Carbohydrate Polymers, 2009, 76(1): 86-93.

[22] 李路宁, 陈威, 赵立仪, 等. 蓝莓花青素的酰化及其抗氧化性评价 [J]. 食品工业科技, 2014, 35(6): 102-106.

[23] 程浩然, 付亮, 冯士令, 等. 淫羊藿药渣多糖体外抗氧化活性研究 [J]. 食品工业科技, 2014, 35(2): 143-145.

[24] Wickens A. Ageing and the free radical theory [J]. Respiration physiology, 2001, 128(3): 379-391.