

不同干燥方式、存储温度对羊栖菜中岩藻黄素稳定性的影响

赵子硕¹,李红¹,苗祚麻¹,张金荣^{1*},崔巍²,骆其君¹,严小军¹¹宁波大学海洋学院;²宁波大学医学院,宁波 315211

摘要:为探究不同干燥方式、不同存储温度和存储时间对羊栖菜中岩藻黄素稳定性的影响,本研究考察了三种不同干燥方式,包括自然阴干、低温烘干和冷冻干燥,对羊栖菜中岩藻黄素稳定性的影响。结果表明采用冷冻干燥所得羊栖菜,含水量低,岩藻黄素含量高,达到 699.2 μg/g,岩藻黄素保留率为 94.7%,远高于自然阴干及低温烘干。因此,冷冻干燥是最佳干燥方法。考察了四个不同温度(-20、4、25、30 ℃)存储对冻干羊栖菜中岩藻黄素稳定性的影响,结果表明随着存储温度的升高,岩藻黄素的降解率明显增高,因此,-20 ℃为最佳储存温度。

关键词:岩藻黄素;羊栖菜;干燥方式;储存温度;稳定性

中图分类号:R914.1

文献标识码:A

文章编号:1001-6880(2019)4-0689-07

DOI:10.16333/j.1001-6880.2019.4.021

Effect of drying methods, storage temperatures on fucoxanthin stability from *Sargassum fusiforme*

ZHAO Zi-shuo¹, LI Hong¹, MIAO Zuo-xiu¹, ZHANG Jin-rong^{1*}, CUI Wei², LUO Qi-jun¹, YAN Xiao-jun¹

¹School of Marine Sciences, Ningbo University; ²School of Medicine, Ningbo University, Ningbo 315211, China

Abstract: This study investigated the effects of different drying methods, storage temperatures and stored time on the stability of fucoxanthin from *Sargassum fusiforme*. Effects of three different drying methods (air-dried in the shade at room temperature, low-temperature drying method and vacuum freeze drying method) on the stability of fucoxanthin from *S. fusiforme* were discussed. The results showed that compared with low-temperature drying method and air-dried in the shade at room temperature, vacuum freeze drying method was the best drying method due to *S. fusiforme* treated with this method had lower moisture content, higher content of fucoxanthin (699.2 μg/g) and higher retention of fucoxanthin (94.7%). In exploring the effects of different temperatures (-20, 4, 25, 30 ℃) on fucoxanthin from *S. fusiforme*, the results showed that the degradation rate of fucoxanthin was obviously increased with the increase of storage temperatures. Therefore, -20 ℃ was the best storage temperature for *S. fusiforme*.

Key words: fucoxanthin; *Sargassum fusiforme*; drying methods; storage temperature; stability

羊栖菜(*Sargassum fusiforme*),别名鹿角菜、海菜芽,属褐藻纲、马尾藻科、马尾藻属,是暖温带褐藻,广泛分布于我国沿海岛礁。羊栖菜是我国重要经济褐藻,主产于浙江省温州苍南县和洞头县^[1]。羊栖菜富含褐藻多糖、岩藻黄素、褐藻多酚、甘露醇、微量元素等多种活性物质。药理研究表明,羊栖菜具有降血脂、降血糖、抗血栓、增进免疫力、延缓衰老等多种药理活性^[2]。目前,羊栖菜主要以淡干品出

口日本,作为保健食品长期和广泛食用^[2]。

岩藻黄素是一种海洋来源的类胡萝卜素,广泛存在于褐藻、硅藻、金藻和定鞭藻等海洋藻类中^[3]。褐藻中,岩藻黄素和叶绿素共同组成高效捕光复合物,有利于海藻适应水环境中弱光条件的光合作用^[3]。岩藻黄素具有保护肝脏、抗肿瘤^[4]、抗氧化^[5]、抗疟^[6]、抗炎^[7]、降血脂、减肥^[8]、预防糖尿病^[9]、抗老年痴呆^[10]和保护视力^[11]等多种药理活性。岩藻黄素化学结构中包含共轭多烯骨架、连二烯基、酯基等多种官能团,导致岩藻黄素化学性质不稳定,极易被氧化^[5]。据报道,遇热、接受光照、遇酸或碱均可使岩藻黄素发生各种降解反应,造成岩藻黄素稳定性受到很大程度的影响,致使岩藻黄素

收稿日期:2018-05-28 接受日期:2019-01-10

基金项目:国家自然科学基金(41406163);现代农业产业技术体系专项(CARS-50);宁波海洋生物高值化利用公共服务平台(NBHY-2017-P2);水产品加工废弃物制备生物表面活性剂技术(CPR/17/101)

*通信作者 Tel:86-574-87600458;E-mail:zhangjinrong@nbu.edu.cn

很难储存。

羊栖菜是我国重要的经济褐藻,也是岩藻黄素的重要来源^[12]。本研究以新鲜羊栖菜为原料,分别采用三种不同干燥方式(自然阴干、低温烘干和冷冻干燥)对其进行干燥,采用高效液相色谱分析所得干燥中岩藻黄素的含量,考察不同干燥方式对岩藻黄素稳定性的影响,确定最优的干燥方式。将冻干所得羊栖菜研磨成粉,等量装入铝箔袋,真空处理,分别在四个不同温度条件下(-20、4、25、30 ℃)存储,定期测定其中所含岩藻黄素含量,考察不同存储温度对岩藻黄素稳定性的影响,确定最优的存储温度。本研究考察不同干燥方式、不同存储温度对羊栖菜中岩藻黄素稳定性的影响,明确最优干燥方式和存储温度,将为羊栖菜作为保健食品原料,进一步的研究和应用,提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

2016年3月20日于温州鳌江沿海采集新鲜羊栖菜,采集后将整株羊栖菜立刻置于-20 ℃冰箱内低温避光保存,由宁波大学骆其君教授鉴定为马尾藻属羊栖菜 *Sargassum fusiforme*;岩藻黄素对照品(纯度≥95%,Sigma-Aldrich公司);乙腈(色谱纯,上海安谱实验科技股份有限公司);其它试剂均为分析纯。

1.2 主要仪器

仪器:恒温鼓风干燥箱 CT-C-1(南京腾飞干燥设备有限公司);冷冻干燥机 SCIENTZ-100F 型(宁波新芝生物科技股份有限公司);高效液相色谱仪 Waters 2695 Alliance 高效液相色谱系统(沃特世科技(上海)有限公司,美国);含四元溶剂系统、在线脱气机和自动进样器),PDA 检测器系统 Waters 2998(沃特世科技(上海)有限公司,美国);C₁₈ 色谱柱(XBridge™,4.6×150 mm,3.5 μm,沃特世科技(上海)有限公司,美国);电热鼓风干燥箱 DHG-9070A(上海一恒科技有限公司)。

1.3 羊栖菜干燥曲线的绘制

取适量新鲜羊栖菜,纯水洗净,去除杂质与表面水分,备用。

分别采用自然阴干法和低温烘干法2种方法对同一批次的羊栖菜进行干燥,每隔一段时间取样测定羊栖菜的含水率,其含水率按照药典方法测定^[13],以干燥时间为横坐标,含水率为纵坐标绘制曲线。

冷冻干燥法为封闭、连续的单元操作,为保证仪器正常使用,采用实验经验设定为:将羊栖菜放置于-20 ℃条件下冷冻24 h,取出平铺于冷冻干燥机内(温度-50 ℃;真空度:100 Pa)干燥48 h。

1.4 羊栖菜干燥方法

取适量新鲜羊栖菜,纯水洗净后,去除杂质与表面水分,备用。根据干燥曲线结果,采用不同干燥方法的操作步骤如下。

1.4.1 自然阴干法

取100.00 g 纯水洗净的羊栖菜,平铺于纸上,置于室温避光处自然阴干72 h。

1.4.2 低温烘干法

取100.00 g 纯水洗净的羊栖菜,平铺于恒温鼓风干燥箱内,35 ℃鼓风干燥24 h。

1.4.3 冷冻干燥法

取100.00 g 纯水洗净的羊栖菜,-20 ℃下冷冻24 h,取出平铺于冷冻干燥机内(温度-50 ℃;真空度:100 Pa)干燥48 h,实验条件由前期预实验所得。

1.5 水分的测定

按2015年版《中国药典》第一部^[13]附录 IXH 水分测定法之“烘干法”(第二法)测定。分别取三种不同方法干燥的羊栖菜干品约2 g,精密称定后依法操作。

1.6 岩藻黄素的含量测定

1.6.1 对照品溶液的制备

称取岩藻黄素对照品适量,精密称定,置于容量瓶中,加入甲醇溶解定容,并稀释配制岩藻黄素浓度分别为27.0、13.5、6.75、3.375、1.6875、0.8438、0.4219、0.2109、0.1055 μg/mL 的对照品溶液。

1.6.2 供试品溶液的制备

参考 Airanthi 等^[14]的有机溶剂提取法。分别称取不同方法干燥的羊栖菜干品约1.0 g,精密称定,置25 mL 具塞锥形瓶中,加入甲醇10 mL,室温条件避光提取24 h;滤过,滤渣再同样提取两次。合并三次滤液,滤液转移至50 mL 量瓶中,加甲醇定容,摇匀。

1.6.3 HPLC 测定方法

参照任丹丹等^[15]的高效液相色谱(HPLC)测定方法并稍作修改。色谱条件:色谱柱:XBridge™,C₁₈ 色谱柱,粒径3.5 μm,4.6 mm×150 mm;流动相:乙腈-水(73:27);柱温:25 ℃;流速0.8 mL/min;检测波长450 nm;进样量15 μL。

1.6.4 线性关系考察

分别精密量取不同浓度的岩藻黄素对照品溶液,按照 1.6.3 项下方法进行测定。以溶液浓度(X)对色谱峰面积(Y)进行线性回归。

1.7 不同干燥方法对羊栖菜中岩藻黄素含量的影响

分别采用自然阴干法和低温烘干法 2 种方法对同一批次的羊栖菜进行干燥,与 1.3 项同时取样,测定羊栖菜的岩藻黄素含量,其含量测定按照 1.6 项下方法测定,以干燥时间为横坐标,岩藻黄素含量为纵坐标绘制曲线。

冷冻干燥法为封闭、连续的单元操作,为保证仪器正常使用,在干燥过程中未进行岩藻黄素含量的测定。

$$\text{岩藻黄素的含量}(\mu\text{g/g DW}): C = \frac{W_{F_x}}{W_{DW}}$$

其中 C 为岩藻黄素的含量($\mu\text{g/g}$); W_{F_x} 为羊栖菜中岩藻黄素的质量(μg), W_{DW} 为羊栖菜干藻的质量(g),即为羊栖菜去除所含水分后,固形物重量。

$$\text{岩藻黄素的保留率}(\%): L = \frac{W_x}{W_m} \times 100\%$$

其中 L 为羊栖菜中岩藻黄素的保留率; W_x 为干燥羊栖菜中岩藻黄素的实测含量($\mu\text{g/g}$), W_m 为新鲜羊栖菜折算成干藻中岩藻黄素的理论含量($\mu\text{g/g}$)。

1.8 不同储存温度对羊栖菜中岩藻黄素含量的影响

1.8.1 羊栖菜样品在不同温度下储存

羊栖菜冻干样品,加入液氮,进行研磨得到细粉,混匀。分别称取细粉约 10.0 g,置于双铝密封袋内,真空包装,制得 28 袋样品。分别取 7 袋样品置于 -20、4、25、30 °C 条件下储存。

1.8.2 羊栖菜样品中岩藻黄素含量的测定

定期取样,取样时间分别为存储第 4、8、12、16、20、24、28 周。每包样品取样三次作为平行样,按照 1.6.2 项下进行供试品溶液的制备,按照 1.6.3 项下进行羊栖菜中岩藻黄素的含量测定。

$$\text{岩藻黄素的降解率}(\%): K = \frac{W_0 - W}{W_0} \times 100\%$$

其中 K 为羊栖菜中岩藻黄素的降解率; W_0 为第 0 周冷冻羊栖菜中岩藻黄素的含量($\mu\text{g/g}$), W 为实测羊栖菜中岩藻黄素的含量($\mu\text{g/g}$)。

2 结果与分析

2.1 不同干燥方法对羊栖菜干燥曲线的影响

由图 1 可知,将羊栖菜置于 35 °C 鼓风干燥,干燥速率大,干燥时间较短。当干燥时间达到 20 h,羊

栖菜的含水量低于 10%。而将羊栖菜置于室温阴凉处,其中含水量降低较慢,当干燥时间达到 69 h,羊栖菜含水量接近 11%。因此,低温烘干干燥速率明显高于自然阴干。羊栖菜分别低温烘干 20 h 和自然阴干 69 h 后,随着干燥时间的延长,含水量无明显变化。

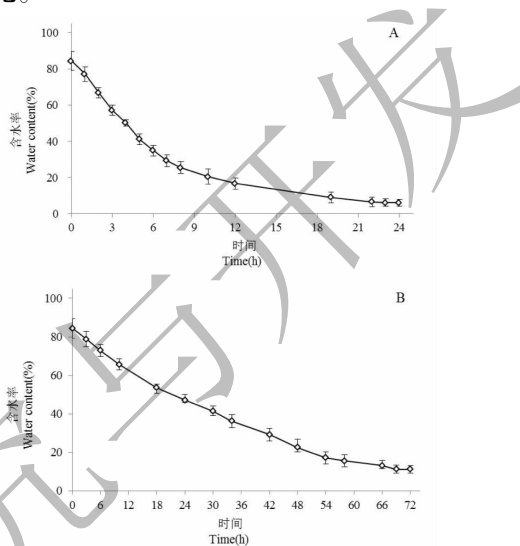


图 1 不同干燥方法的干燥特征曲线
(A:低温烘干法;B:自然阴干法)

Fig. 1 Drying characteristic curves of different drying methods
(A: low-temperature drying method; B: air-dried in the shade at room temperature)

2.2 不同干燥方法对羊栖菜水分含量的影响

不同方法干燥后羊栖菜的含水量如表 1 所示。3 种干燥方法干燥后羊栖菜中水分含量差异较大。其中,自然阴干羊栖菜水分含量最高,低温烘干次之,冷冻干燥羊栖菜水分含量最低,因此,冷冻干燥更利于长期保存羊栖菜。根据文献报道,冷冻干燥在低温、真空条件下进行,通过升华去除水分,赋予产品许多特殊的性能。冷冻干燥具有以下主要优点:脱水彻底,有利于产品长期保存;物料物理结构和分子结构变化较小,很大限度地保存物料的色、香、味;低温干燥,特别适合于热敏物质^[16]。

2.3 羊栖菜中岩藻黄素的含量测定

2.3.1 岩藻黄素标准曲线的绘制

分别精密量取不同浓度的岩藻黄素对照品溶液,按照 1.6.3 项下进行测定,以溶液浓度(X)对色谱峰面积(Y)进行线性回归,建立岩藻黄素标准曲线见图 2。结果表明,色谱峰面积与岩藻黄素质量浓度在 0.1055 ~ 27.0 $\mu\text{g/mL}$ 范围内呈线性关系,其线性回归方程为: $Y = 221239X - 34488$ (Y 表示峰

表 1 不同干燥方法对羊栖菜中水分含量的影响 ($n = 3, \bar{x} \pm s$)Table 1 Effect of different drying methods on the content of moisture in *S. fusiforme* ($n = 3, \bar{x} \pm s$)

干燥方法 Drying method	自然阴干 Air-dried in the shade at room temperature	低温烘干 Low-temperature drying method	冷冻干燥 Vacuum freeze drying method
羊栖菜中水分含量 Moisture content in <i>S. fusiforme</i> (%)	11.21 ± 0.40	6.11 ± 0.28	5.20 ± 0.22

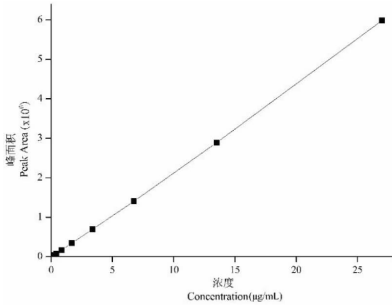


图 2 岩藻黄素标准曲线

Fig. 2 Standard curve of fucoxanthin

羊栖菜中岩藻黄素的含量测定。

羊栖菜中岩藻黄素的含量 ($\mu\text{g/g}$) 为:

$$W = \frac{(S + 34\ 488) \times 50}{221\ 239 \times m}$$

其中 W 为含量 ($\mu\text{g/g}$), S 为色谱峰面积, m 为样品质量 (g)

2.3.2 羊栖菜中岩藻黄素的鉴定

按照 1.6.3 项下测定岩藻黄素对照品所得 HPLC 色谱图 (图 3) 中, 岩藻黄素出峰时间在 16.102 min, UV 全波长扫描发现其在 449.8 nm 处有最大吸收。

面积, X 表示岩藻黄素浓度), $R^2 = 0.9996$, 可用于

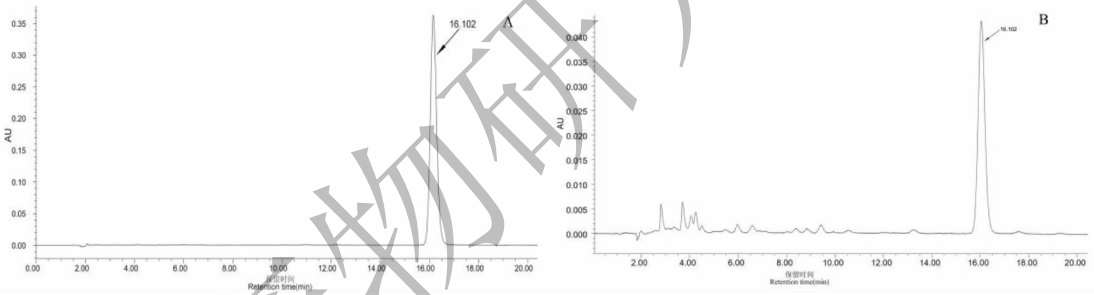


图 3 HPLC 色谱图 (A: 岩藻黄素对照品; B: 冷冻干燥羊栖菜)

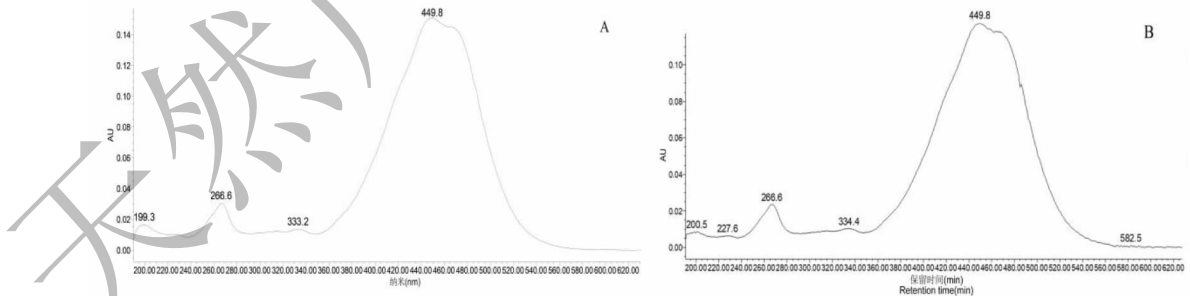
Fig. 3 HPLC chromatograms (A: fucoxanthin standard; B: *S. fusiforme* treated with vacuum freeze drying method)

图 4 UV 光谱图 (A: 岩藻黄素对照品; B: 冷冻干燥羊栖菜)

Fig. 4 Ultraviolet-visible absorption spectra (A: fucoxanthin standard; B: *S. fusiforme* treated with vacuum freeze drying method)

由图 3 和图 4 可知, 按照 1.6.3 项下测定冷冻干燥羊栖菜所得 HPLC 色谱图中, 出峰时间在 16.102 min, 其在 449.8 nm 处有紫外最大吸收, 与岩藻黄素对照品基本一致, 因此, 鉴定其为岩藻黄素。因此, HPLC 技术可用于岩藻黄素的含量测定。

2.4 不同干燥方法对羊栖菜中岩藻黄素含量的影响

采用低温烘干法和自然阴干法对羊栖菜进行干燥, 不同干燥方法对羊栖菜中岩藻黄素含量的影响见图 5。由结果可知, 随着干燥过程推进, 羊栖菜中

岩藻黄素的含量逐步降低。采用低温烘干羊栖菜,干燥6 h,其所含岩藻黄素含量由738.6 $\mu\text{g/gDW}$ 降低至268.7 $\mu\text{g/gDW}$ 。采用自然阴干羊栖菜,干燥6 h,其所含岩藻黄素含量由738.6 $\mu\text{g/gDW}$ 降低至635.2 $\mu\text{g/gDW}$ 。说明岩藻黄素为热敏物质,随着干燥温度的升高,加剧其降解。另外,低温烘干和自然阴干过程中,随着干燥时间的延长,岩藻黄素的降解

均愈加明显。说明岩藻黄素为易氧化物质,长时间暴露于空气(氧气)中,不利于其保留。结合图1,羊栖菜分别低温烘干20 h和自然阴干69 h后,随着干燥时间的延长,其中的含水量无明显变化,但其中岩藻黄素含量仍继续下降。表明传统的干燥方式(如自然阴干和低温烘干)均不利于羊栖菜中岩藻黄素的保存。

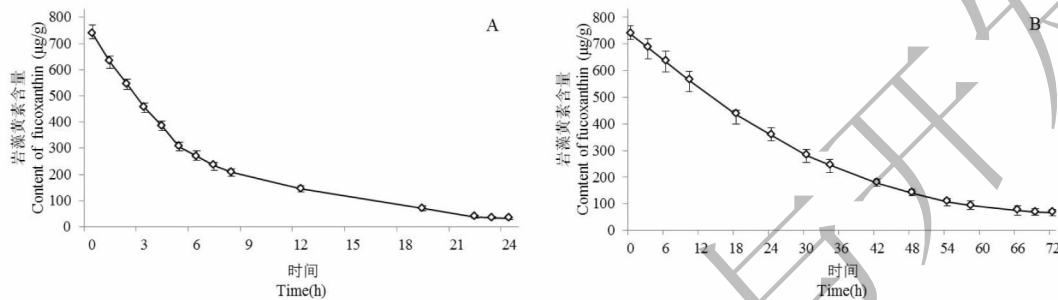


图5 不同干燥方法对羊栖菜中岩藻黄素含量的影响(A:低温烘干法;B:自然阴干法)

Fig. 5 Effect of different drying methods on the content of fucoxanthin in *S. fusiforme* (A: low-temperature drying method; B: air-dried in the shade at room temperature)

三种不同干燥方法对羊栖菜中岩藻黄素含量的影响,结果见表2。冷冻干燥羊栖菜中岩藻黄素含量最高(699.2 \pm 25.1 $\mu\text{g/g}$),远远高于自然阴干羊栖菜(67.1 \pm 4.6 $\mu\text{g/g}$)和低温烘干羊栖菜中岩

藻黄素含量(32.6 \pm 2.3 $\mu\text{g/g}$)。

由图5和表2可知,冷冻干燥羊栖菜中岩藻黄素的保留率高达94.7%,远远高于自然阴干羊栖菜(9.0%)和低温烘干羊栖菜中岩藻黄素的保留率(4.4%)。

表2 不同干燥方法对羊栖菜中岩藻黄素含量的影响($n = 3, \bar{x} \pm s$)

Table 2 Effect of different drying methods on the content of fucoxanthin in *S. fusiforme* ($n = 3, \bar{x} \pm s$)

干燥方法 Drying method	自然阴干 Air-dried in the shade at room temperature	低温烘干 Low-temperature drying method	冷冻干燥 Vacuum freeze drying method
羊栖菜中岩藻黄素含量 Fucoxanthin content in <i>S. fusiforme</i> ($\mu\text{g/gDW}$)	67.1 \pm 4.6	32.6 \pm 2.3	699.2 \pm 25.1

注:DW表示为干重。

Note: DW was dry weight.

根据文献报道,冷冻干燥在低温、真空条件下进行干燥,通过升华去除水分,因此可有效抑制热敏性物质发生生物、物理和化学变化,有利于物料中的活性物质保存^[16]。岩藻黄素化学结构中包含共轭多烯骨架、连二烯基、酯基等多种官能团,导致岩藻黄素化学性质不稳定,极易被氧化^[5]。据报道,遇热、接受光照、遇酸或碱均可使岩藻黄素发生各种降解反应,造成岩藻黄素稳定性受到很大程度的影响。本研究结果进一步验证冷冻干燥可将羊栖菜中岩藻黄素得到有效保留,冷冻干燥为最佳干燥方法。

2.5 不同存储温度和存储时间对羊栖菜中岩藻黄素含量的影响

不同存储温度和不同存储时间对冷冻干燥羊栖

菜中岩藻黄素含量的影响如图6所示。由图6(A)可知,存储温度是影响羊栖菜中岩藻黄素含量的重要因素。不同存储温度对羊栖菜中岩藻黄素含量的影响有显著差异($P < 0.05$),随着存储温度的升高,岩藻黄素的降解率明显增高。存储第4周,低温(-20 $^{\circ}\text{C}$)存储羊栖菜中岩藻黄素的降解率最低,为17.98%,其次为4 $^{\circ}\text{C}$ 存储羊栖菜,25 $^{\circ}\text{C}$ 存储羊栖菜次之,30 $^{\circ}\text{C}$ 存储羊栖菜降解率最大,为71.59%。在第8、12、16、20、24、28周,也发现同样规律,羊栖菜中岩藻黄素的降解率随着存储温度的升高而加剧。

本研究发现,-20 $^{\circ}\text{C}$ 与4 $^{\circ}\text{C}$ 存储样品,岩藻黄素的降解率也有着明显的差距。第4周的检测中,岩藻黄素的降解率已经相差30.60%;第8周的检测

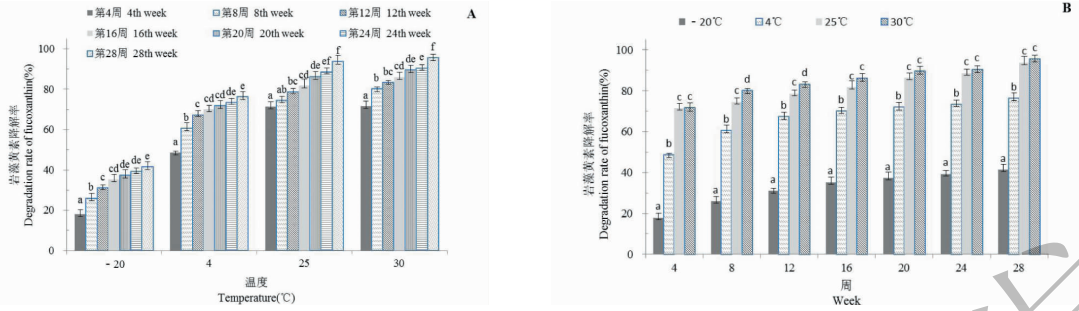


图6 不同存储温度和存储时间对羊栖菜中岩藻黄素含量的影响 ($n = 3$, A:不同存储温度, B:不同存储时间)

Fig. 6 Effect of different storage temperatures and stored time on the degradation rate of fucoxanthin in *S. fusiforme* ($n = 3$, A: different storage temperatures, B: different stored time)

中差距进一步增大为 34.66%; 在第 28 周的检测中差距为 34.87%, 达到了降解率的最大差值。然而 25 °C 与 30 °C 存储样品, 岩藻黄素的降解率均很高, 差距不明显。第 4 周的检测, 羊栖菜中岩藻黄素的降解率差距仅为 0.22%; 第 8 周的检测中差距达到了最大值, 为 5.64%。在第 28 周的检测中差距为 1.76%。说明 25 °C 与 30 °C 存储羊栖菜, 存储第四周, 其中所含岩藻黄素大部分已经发生降解。综上所述, 建议采用 -20 °C 存储羊栖菜。

由图 6(B) 可知, 存储时间也是影响羊栖菜中岩藻黄素含量的重要因素。延长存储时间对羊栖菜中岩藻黄素含量的影响有显著差异 ($P < 0.05$), 随着存储时间的延长, 岩藻黄素的降解率也出现逐步增大。低温 (-20 °C) 存储羊栖菜, 存储第 4 周, 其中岩藻黄素降解率最低, 为 17.98%, 接下来依次为第 8、12、16、20、24 周, 第 28 周时, 羊栖菜中岩藻黄素降解率最大, 为 41.36%。在 4、25、30 °C, 也发现同样规律, 羊栖菜中岩藻黄素的降解率随着存储时间的延长而加快降解。

3 结论

本文首次考察不同干燥方法, 不同存储温度和存储时间对羊栖菜中岩藻黄素含量的影响。岩藻黄素化学结构中包含共轭多烯骨架、连二烯基、酯基等多种官能团, 导致岩藻黄素化学性质不稳定, 遇热、接受光照、遇酸或碱均可使岩藻黄素发生各种降解反应, 致使岩藻黄素很难储存^[15]。2014 年, Zhao 等^[17] 提出岩藻黄素遇热、空气或光均易发生降解, 生成一系列降解产物。研究发现, 岩藻黄素的降解反应属于温度依赖型。随着存储温度的提高, 促进了岩藻黄素主要通过氧化反应和异构化作用, 产生

了 13-顺式和 13'-顺式结构, 产生降解反应。光照会引起岩藻黄素发生异构化, 诱导岩藻黄素由 13-顺式和 13'-顺式转变为全反式, 进一步再变为 9'-顺式结构, 从而发生降解。岩藻黄素遇到空气中的氧气, 主要发生氧化降解。本研究结果验证了此假说, 三种不同方式干燥的羊栖菜所含岩藻黄素含量有显著差异。冷冻干燥法最适合羊栖菜的干燥, 所得羊栖菜含水量低, 岩藻黄素含量高。

据 Ahmed 等^[18] 研究报道, 氧气也是造成雨生红球藻中虾青素发生降解的重要因素。因此, 本研究以冻干羊栖菜为研究对象, 采用独立、真空、避光包装 (真空双铝包装), 考察了不同存储温度对羊栖菜中岩藻黄素含量的影响。所设计的四个不同的温度 (-20、4、25、30 °C) 均为生活中所常见的、容易达到的。-20 °C 和 4 °C 为普通冷库和冷藏的常见温度, 设备常见, 便于实施; 25 °C 和 30 °C 为内陆和沿海地区常见温度。为避免光照对岩藻黄素造成影响, 采用铝箔袋包装; 为排除氧气对岩藻黄素产生降解, 采用真空包装。本研究结果表明存储温度是影响羊栖菜中岩藻黄素稳定性的重要因素。随着存储温度的升高, 岩藻黄素的降解率明显增高, 此结论也与 Huang 等^[19] 研究结论相一致。存储羊栖菜的最佳温度为 -20 °C。

本研究考察了富含岩藻黄素的羊栖菜的最佳干燥方法和储存条件, 为提高羊栖菜的资源化利用, 合理的干燥和储存提供了科学依据。

参考文献

- Xu JL, Luo QJ, Yan XJ. Analysis of cultivated characteristics and ISSR of different strains of *Sargassum fusiforme* (Harv.)

- Setch. In Dongtou, Zhejiang [J]. J Mar Sci (海洋学研究), 2014, 32(2): 74-79.
- 2 Dai ZY, Hong YP, Zhang YP, et al. Evaluation on nutritional components of *Sargassum fusiforme* [J]. J Fish China (水产学报), 2002, 4: 382-384.
- 3 Sugawara T, Matsubara K, Akagi R, et al. Antiangiogenic activity of brown algae fucoxanthin and its deacetylated product, fucoxanthinol [J]. J Agric Food Chem, 2006, 54(26): 9802-98101.
- 4 Nicolantonio DO, Eugenio G, Maria AG, et al. Fucoxanthin: a treasure from the sea [J]. Mar Drug, 2012, 10: 604-616.
- 5 Li JL, Zhu P, Chen HM. Review on bioactive components derived from marine algae used in cosmeceuticals [J]. Nat Prod Res Dev (天然产物研究与开发), 2015, 27: 1979-1984.
- 6 Afolayan AF, Bolton JJ, Lategan CA, et al. Fucoxanthin, tetraprenylated to luquinone and to luhydroquinone metabolites from *Sargassum heterophyllum* inhibit the *in vitro* growth of the Malaria parasite *Plasmodium falciparum* [J]. Z Naturforsch, C; Biosci, 2008, 63: 848-852.
- 7 Heo SJ, Yoon WJ, Kim KN, et al. Evaluation of anti-inflammatory effect of fucoxanthin isolated from brown algae in lipopolysaccharide-stimulated RAW 264. 7 macrophages [J]. Food Chem Toxicol, 2010, 48: 2045-2051.
- 8 Chang YH, Chen YL, Huang WC, et al. Fucoxanthin attenuates fatty acid-induced lipid accumulation in FL83B hepatocytes through regulated Sirt1/AMPK signaling pathway [J]. Biochem Biophys Res Commun, 2017, 495: 197-203.
- 9 Peng J, Deng XQ, Ao YS, et al. Anti-obesity and anti-diabetic effects of fucoxanthin [J]. Mod Food Sci Technol (现代食品科技), 2015, 31: 313-325.
- 10 Lin JJ, Huang L, Yu J, et al. Fucoxanthin, a marine carotenoid, reverses scopolamine-induced cognitive impairments in mice and inhibits acetylcholinesterase *in vitro* [J]. Mar Drug, 2016, 14: 153.
- 11 Liu YX, Liu M, Zhang XC, et al. Protective effect of fucoxanthin isolated from *Laminaria japonica* against visible light-induced retinal damage both *in vitro* and *in vivo* [J]. J Agric Food Chem, 2016, 64: 416-424.
- 12 Yan XJ, Nagata T, Fan X. Antioxidative activities in some common seaweeds [J]. Plant Food Hum Nutr, 1998, 52: 253-262.
- 13 Chinese Pharmacopoeia Commission. Pharmacopoeia of the people's republic of China: Vol. I (中华人民共和国药典: 第一部) [M]. Beijing: China Medical Science Press, 2015.
- 14 Airanthi MK, Sasaki N, Iwasaki S, et al. Effect of brown seaweed lipids on fatty acid composition and lipid hydroperoxide levels of mouse liver [J]. J Agric Food Chem, 2011, 59: 4156-4163.
- 15 Ren DD, Ren XJ, Wang XT, et al. Analysis and identification of major carotenoids from *Scytosiphon lomentaria* [J]. Sci Technol Food (食品工业科技), 2017, 38(2): 59-62.
- 16 Lee JH, Kim HJ. Vacuum drying kinetics of Asian white radish (*Raphanus sativus* L.) slices [J]. LWT-Food Sci Tech, 2009, 42: 180-186.
- 17 Zhao D, Kim SM, Pan CH, et al. Effects of heating, aerial exposure and illumination on stability of fucoxanthin in canola oil [J]. Food Chem, 2014, 145: 505-513.
- 18 Ahmed F, Li Y, Fanning K, et al. Effect of drying, storage temperature and air exposure on astaxanthin stability from *Haematococcus pluvialis* [J]. Food Res Int, 2015, 74: 231-236.
- 19 Huang ZH, Xu LQ, Zhu XM, et al, 2017. Stability and bioaccessibility of fucoxanthin in nanoemulsions prepared from pinolenic acid-contained structured lipid [J]. Int J Food Engineering, 2017, 13: 20160273.