

生长模式对地木耳营养品质的影响

Effects of different growth patterns on nutritional quality of *Nostoc commune*

谢杰菲 汪超 邓中洋

XIE Jie-fei WANG Chao DENG Zhong-yang

(湖北工业大学生物工程与食品学院, 湖北 武汉 430068)

(School of Biological Engineering and Food, Hubei University of Technology, Wuhan, Hubei 430068, China)

摘要:目的:用人工养殖地木耳替代其野生资源,保护自然环境。方法:对室内、室外培养及野生地木耳的生化组成、质构特性和感官品质进行比较,同时用室外培养葛仙米在上述 3 个方面作为对照。结果:野生条件下地木耳干湿重比最大(2.42%),且硬度和弹性最高,分别为 1.184 N 和 78.5%;室外地木耳藻红蛋白和多糖含量最低,分别为 0.19% 和 24.45%,野生地木耳藻蓝蛋白和蛋白质含量最低,分别为 0.33% 和 20.33%,室内地木耳叶绿素含量和藻蓝蛋白含量最高,分别为 0.82% 和 2.75%;同时,感官评价结果显示人工培养地木耳口感与野生地木耳无显著差异($P < 0.05$)。结论:人工培养的地木耳完全可替代野生资源用于食用及产品的深加工。

关键词:地木耳;室内栽培;室外栽培;野生;生化组成;感官评价;质构特性

Abstract: Objective: Replacing wild resources with artificially cultivated *Nostoc commune* to protect the natural environment. **Methods:** Compare the biochemical composition, texture characteristics, and sensory evaluation of indoor, outdoor cultivation and wild *N. commune*, while using outdoor cultivation of *Nostoc sphaeroides* as a control in the above three aspects. **Results:** The ratio of dry weight to wet weight of wild *N. commune* was the largest (2.42%), and its hardness and elasticity were the highest, which were 1.184 N and 78.5%, respectively. The content of phycoerythrin and polysaccharide of outdoor *N. commune* were the lowest, which were 0.19% and 24.45%, respectively. The allophycocyanin and protein contents of wild *N. commune* were the lowest, which were 0.33% and 20.33% respectively. The chlorophyll and phycocyanin contents

of indoor *N. commune* were the highest, which were 0.82% and 2.75%, respectively. At the same time, the sensory evaluation results showed that there was no significant difference in the taste of *N. commune* among the different growth patterns ($P < 0.05$). **Conclusion:** Artificially cultivated *N. commune* can completely replace wild resources for consumption and further processing of products.

Keywords: *Nostoc commune*; indoor cultivation; outdoor cultivation; wild; biochemical composition; sensory evaluation; textural properties

地木耳(*Nostoc commune*),学名为普通念珠藻,俗名地皮菜、地软、地衣或地耳等^[1],是一种原核藻类,与葛仙米(*Nostoc sphaeroides*)、发菜(*Nostoc flagelliforme*)同属于蓝藻门、蓝藻纲、念珠藻目、念珠藻科、念珠藻属^[2]。野外常见的是地木耳的原植体(thallus),主要呈褶皱片状,由藻丝弯曲、缠绕,外层胶被包裹而成,形似木耳;其长宽可达数厘米左右,呈蓝绿色或褐绿色至黄绿色^[2]。地木耳是中国传统的野生蔬菜资源,是典型的高蛋白、低脂肪、低热值的绿色食品,富含人体必需的氨基酸,多种维生素和矿质元素;同时也具有药效,常食用能够清热解毒、凉血明目、促进新陈代谢等^[3]。在注重绿色、天然、有机健康食品的开发热潮中,地木耳广受大众所喜爱、追捧^[4]。地木耳生长需要特定的气候、地质等环境条件^[2],自然条件下的产量很低,无法满足市场需求,过量的采集导致野生资源在一些地方逐渐枯竭^[5];采集的地木耳夹杂大量的草屑、泥沙,清洗亦十分不易,损耗也高;此外,由于受生长环境的影响,地木耳存在重金属含量超标的风险,可能会导致食品安全问题^[6]。因此,开展地木耳的人工养殖,能有效解决其野生资源开发中存在的各种问题,在保护和利用地木耳资源方面都具有重要意义^[5]。目前国内已有大量研究开展了地木耳人工养殖的尝试,并取得了一定的进展。随着人工养殖规模的扩大,用人

基金项目:湖北省重点研发计划项目(编号:2022BBA006)

作者简介:谢杰菲,男,湖北工业大学在读硕士研究生。

通信作者:邓中洋(1976—),男,湖北工业大学副教授,博士。

E-mail: dengzy@hbut.edu.cn

收稿日期:2023-01-19 **改回日期:**2023-04-13

工养殖地木耳替代其野生资源的采集、食用、开发成为可能。然而这些研究仅涉及地木耳的总产量,并未对人工养殖地木耳的营养品质进行系统化的研究,更未研究不同生长模式下地木耳的食品原料差异性。

研究拟比较分析室内、室外、野生地木耳的营养成分、质构特性、感官品质,同时以与地木耳同属的一种已成功人工培养的葛仙米作为对照,并进行营养成分、质构特性、感官品质的分析,以期地为地木耳后续的开发提供数据支撑。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

人工培养的地木耳(*N. commune*)藻种来自以色列本古里安大学荒漠研究所藻类实验室、葛仙米(*N. sphaeroides*)藻种来自湖北鹤峰,培养液为BG-11^[7],自来水配制。地木耳分别在室内、室外通气培养,室内地木耳的培养由日光灯提供光源,光强 $150\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,温度约 $25\ ^\circ\text{C}$ ^[8];室外地木耳、葛仙米的培养在室外7—8月进行,均采用自然光照,培养温度随外界环境而变化,培养液温度波动范围 $28\sim 32\ ^\circ\text{C}$;试验使用的野生地木耳采自武汉江夏区(114.32°E , 30.37°N)8月份阴雨天。

1.2 试剂与仪器

甲醇、磷酸氢二钾、磷酸二氢钾、硼酸、硫酸铜、苯酚、硫酸:分析纯,国药集团化学试剂有限公司;

摩擦质构分析仪:TA.XT.Plus型,英国Stable Micro Systems公司;

紫外可见分光光度计:UV Power型,北京莱伯泰科仪器设备有限公司;

全自动凯氏定氮仪:K1100型,济南海能仪器股份有限公司;

电子天平:PWN224ZH型,奥豪斯仪器(常州)有限公司;

培养箱:GXZ-280B型,宁波市科技园区新江南仪器有限公司;

立式压力蒸汽灭菌器:LX-B75L型,合肥华泰医疗设备有限公司;

清洁工作台:OptiClean1300型,力康精密科技(上海)有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 干湿重比测定 根据Zhu等^[9]的方法适当修改。测量烘干至恒重的称量瓶 m_1 ,将洗净且除去表面水分的样品放入称量瓶中,测得样品加称量瓶的重量 m_2 ,将含样品的称量瓶放入烘箱 $80\ ^\circ\text{C}$ 烘干至恒重,测量烘干后样品和称量瓶的重量 m_3 ,按式(1)计算样品的干湿比。

$$D = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中:

D ——样品干湿比,%;

m_1 ——称量瓶质量,g;

m_2 ——称量瓶与样品鲜物质质量总和,g;

m_3 ——称量瓶与样品干物质质量总和,g。

1.3.2 叶绿素含量测定 根据Scherer等^[10]的方法适当修改。称取 $0.5\ \text{g}$ 左右的样品,加入 $3\sim 4\ \text{mL}$ 的甲醇,放入 $60\ ^\circ\text{C}$ 水浴锅中水浴 $10\ \text{min}$,收集水浴后的甲醇,重复之前的水浴步骤 $2\sim 3$ 次,直至水浴后的甲醇颜色变为无色,待水浴后的甲醇冷却后用甲醇定容至 $10\ \text{mL}$,于 $665\ \text{nm}$ 下测定其吸光度值,按式(2)计算叶绿素含量。

$$C_{\text{chla}} = \frac{A}{\epsilon \times l} \times 100\% \quad (2)$$

式中:

C_{chla} ——叶绿素质量浓度,mg/mL;

A ——吸光度;

ϵ ——消光系数, $74\ \text{mL}/(\text{cm}\cdot\text{mg})$;

l ——比色皿的宽度, $1\ \text{cm}$ 。

1.3.3 藻胆蛋白含量测定 根据Bennett等^[11]的方法适当修改。称取 $2.5\ \text{g}$ 左右的新鲜样品,于 $-20\ ^\circ\text{C}$ 的冰箱中冷冻 $12\ \text{h}$,室温下避光自然解冻后研磨,加入适量的磷酸缓冲液,反复研磨,离心后收集磷酸缓冲液,反复冻融 $3\sim 4$ 次后,将收集的上清液用磷酸缓冲液定容至 $25\ \text{mL}$,分别于 $562,615,652\ \text{nm}$ 处检测其吸光度值。

$$C_{\text{PC}} = \frac{A_{615\ \text{nm}} - 0.474 \times A_{652\ \text{nm}}}{5.34} \quad (3)$$

$$C_{\text{APC}} = \frac{A_{652\ \text{nm}} - 0.208 \times A_{615\ \text{nm}}}{5.09} \quad (4)$$

$$C_{\text{PE}} = \frac{A_{562\ \text{nm}} - 2.41 \times C_{\text{PC}} - 0.849 \times C_{\text{APC}}}{9.62} \quad (5)$$

式中:

C_{PC} ——藻蓝蛋白的含量,mg/mL;

C_{APC} ——别藻蓝蛋白的含量,mg/mL;

C_{PE} ——藻红蛋白的含量,mg/mL;

$A_{562\ \text{nm}}$ ——波长 $562\ \text{nm}$ 时的吸光度;

$A_{615\ \text{nm}}$ ——波长 $615\ \text{nm}$ 时的吸光度;

$A_{652\ \text{nm}}$ ——波长 $652\ \text{nm}$ 时的吸光度。

1.3.4 蛋白质含量测定 根据GB 5009.5—2016凯氏定氮法适当修改。称取 $5.0\ \text{g}$ 左右的新鲜样品,加入 $0.23\ \text{g}$ CuSO_4 , $3.77\ \text{g}$ K_2SO_4 和 $10\ \text{mL}$ 的浓硫酸进行消化,消化程序: $220\ ^\circ\text{C}$, $1\ \text{h}$ 左右,然后升温至 $400\ ^\circ\text{C}$, $30\ \text{min}$ 至溶液呈澄清透明的草绿色,室温降温后将样品转移至自动凯氏定氮仪中检测其蛋白质含量。

1.3.5 多糖含量的测定 根据Dubois等^[12]的方法适当修改。取 $3.0\ \text{g}$ 左右的新鲜样品,研磨,加入 $15\sim 20\ \text{mL}$ 的蒸馏水,沸水浴 $2\sim 3\ \text{h}$,反复提取 $3\sim 4$ 次,离心

(8 000 r/min, 15 min), 收集上清液, 用蒸馏水定容至 50 mL, 取 1 mL 提取液, 然后依次加入 1 mL 的 9% 苯酚溶液, 5 mL 的浓硫酸, 摇匀后室温反应 30 min, 将反应后的混合液倒入比色皿中, 在 485 nm 处测量其吸光度值, 根据标准曲线计算样品多糖含量。

1.3.6 质构特性测定 根据刘勇等^[13]的方法适当修改。取 3~4 mm 鲜藻样品洗净擦干, 然后在 TA.XT. Plus 质构分析仪上进行检测, 检测参数: 选用 P 0.5 探头, 测前速率 1.0 mm/s、测中速率 0.5 mm/s、测后速率 1.0 mm/s, 压缩比 40%, 两次压缩的时间间隔为 5 s, 触发力 0.049 N。

1.3.7 感官评价 感官评价的标准参照文献^[14]制订, 见表 1。品评人员(男生 12 名, 女生 8 名)依据表 1 及 GB/T 10220—2012 从风味、口感、色泽、表观结构和总体可接受性 5 个方面进行评分。

1.4 数据处理

采用 SPSS 25 软件进行显著性分析, 所有试验重复 3 次, $P < 0.05$ 表示有显著性差异, 各指标含量以干质量计。

2 结果与分析

2.1 地木耳和葛仙米的外观对比

室内、室外培养的地木耳和室外培养的葛仙米在培养结束后采集藻体, 发现颜色呈现明显的差异。室内培养的地木耳呈碧绿色, 室外培养的地木耳呈深绿色, 室外

培养的葛仙米呈墨绿色, 然而野生地木耳呈棕褐色。除颜色外, 野生地木耳与人工地木耳在形状上也存在明显区别: 野生地木耳呈褶皱片状, 与木耳相似, 有的会有少许裂开, 且体积较大, 群体直径可以达到 10 cm 以上。人工养殖的地木耳、葛仙米主要呈球形、近球形, 试验培养的群体直径通常为 3~10 mm。

2.2 干湿重比

如图 1 所示, 不同生长模式下地木耳的干湿重比差别较大, 尤其是野生地木耳(2.42%), 其含水量取决于采摘时的降水量大小、降雨持续时间等环境因素^[15]。降水时, 地木耳吸水膨胀, 迅速恢复生长; 降水偏少或环境干旱时, 地木耳会失水, 含水量变小直至休眠^[2]。人工培养的地木耳和葛仙米生长过程均悬浮于培养液中, 其含水量的差异主要受室内外培养条件、群体尺寸的影响^[16]。

2.3 叶绿素

通过图 2 对比发现, 室内培养地木耳的叶绿素含量为 0.82%, 显著大于室外培养地木耳、室外培养葛仙米、野外培养地木耳的 ($P < 0.05$)。总体来看, 人工培养地木耳的叶绿素含量显著高于野生地木耳的 ($P < 0.05$), 其中室内培养的地木耳叶绿素含量可以达到野生地木耳的 2 倍以上。有研究^[17]表明, 光照强度会影响植物叶绿素含量, 对植物进行适当的遮光处理会提高植物叶绿素含量, 换言之光照较弱的条件下, 地木耳中叶绿素含量较高。对于室内培养地木耳而言, 其光源主要来源于日光灯, 光照最弱, 室外培养地木耳光照较强, 而野生地木耳是直接接受太阳光, 光照最强, 因此室内培养地木耳叶绿素含量最高。

2.4 藻胆蛋白

由表 2 可以看出, 人工培养地木耳总藻胆蛋白含量

表 1 感官评价指标及标准

Table 1 Sensory evaluation indexes and standards

指标	评价标准	评分
风味	有藻类特有的风味	7~9
	无特殊味道	4~6
	有明显的腥味	1~3
口感	口感柔软、细腻、弹性适中	9~10
	口感柔软、细腻、弹性较差	7~8
	口感稍硬, 弹性适中	5~6
	口感稍硬、弹性较差	3~4
	口感稍硬、弹性差	1~2
色泽	色泽通透	7~9
	色泽较杂	4~6
	色泽浑浊	1~3
表观结构	表面光滑细腻	7~9
	表面较平整	4~6
	表面凹凸不平	1~3
总体可接受性	完全可以接受	7~9
	勉强可以接受	4~6
	不能接受	1~3

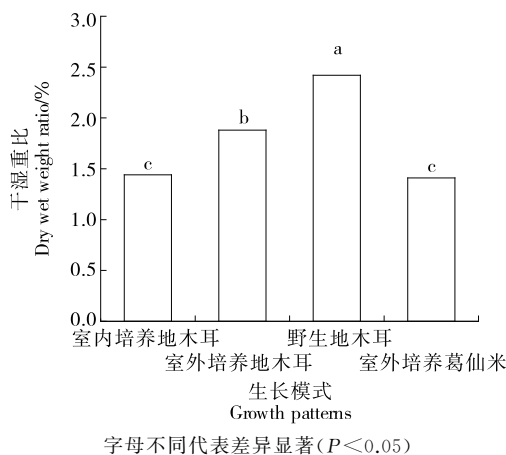


图 1 不同生长模式下地木耳和葛仙米的干湿重比
Figure 1 The ratio of dry weight to wet weight of *N. commune* and *N. sphaeroides* under different growth patterns

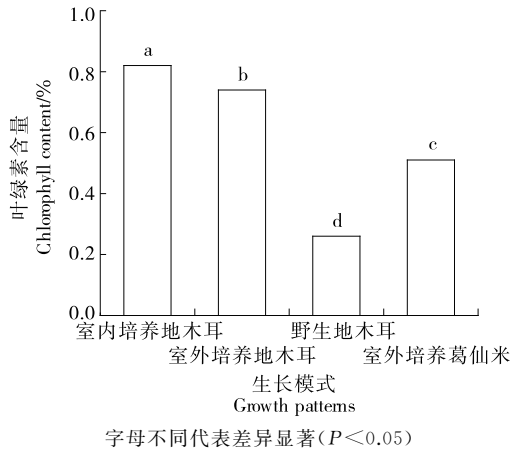


图2 不同生长模式下地木耳和葛仙米叶绿素含量
Figure 2 The chlorophyll content of *N. commune* and *N. sphaeroides* under different growth patterns ($n=3$)

是野生地木耳的2倍以上。大量的研究结果表明,藻胆蛋白具有抗氧化活性、增强免疫力和抗肿瘤活性^[18-20],保健功能较好,开发应用前景很高^[21]。试验在夏季进行,室内培养温度在25℃左右波动,室外培养温度在28~32℃,相比较而言野外生长地木耳的环境温度最高,较低的生长温度有利于促进藻胆蛋白的积累^[22]。

2.5 蛋白质

如图3所示,不同生长模式的地木耳和葛仙米中蛋白质含量存在差异,室内培养地木耳的蛋白质含量高于室外培养地木耳的和野生地木耳的,有研究^[23]显示室内的环境温度适合藻类蛋白质的积累,因此室内培养地木耳的蛋白质含量比野生地木耳的高。

2.6 多糖

通过图4对比,室外葛仙米多糖含量最高,室内地木耳、室外地木耳和野生地木耳中的多糖含量无显著性差异($P>0.05$)。从结果来看,不同生长模式对地木耳多糖

表2 不同生长模式下地木耳和葛仙米藻胆蛋白含量[†]

Table 2 The phycobiliprotein content of *N. commune* and *N. sphaeroides* under different growth patterns

生长模式	藻蓝蛋白	别藻蓝蛋白	藻红蛋白	总藻胆蛋白 %
室内培养地木耳	2.75 ± 0.35 ^a	0.68 ± 0.12 ^{ab}	0.29 ± 0.09 ^{bc}	3.72
室外培养地木耳	2.26 ± 0.29 ^{ab}	0.50 ± 0.04 ^{bc}	0.19 ± 0.02 ^c	2.92
野生地木耳	0.94 ± 0.06 ^c	0.33 ± 0.02 ^c	0.55 ± 0.03 ^b	1.82
室外培养葛仙米	2.03 ± 0.05 ^b	0.83 ± 0.14 ^a	1.50 ± 0.19 ^a	4.36

† 同列字母不同代表差异显著($P<0.05$)。

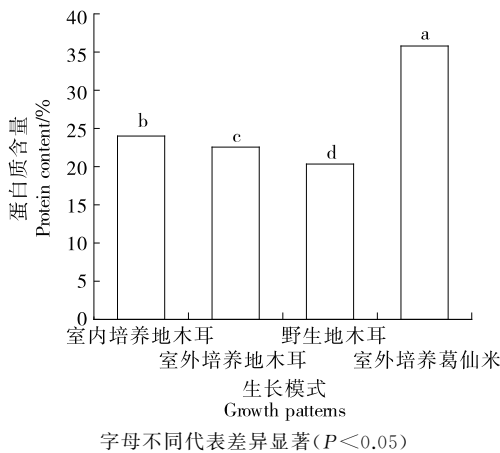


图3 不同生长模式下地木耳和葛仙米蛋白质含量
Figure 3 The protein content of *N. commune* and *N. sphaeroides* under different growth patterns

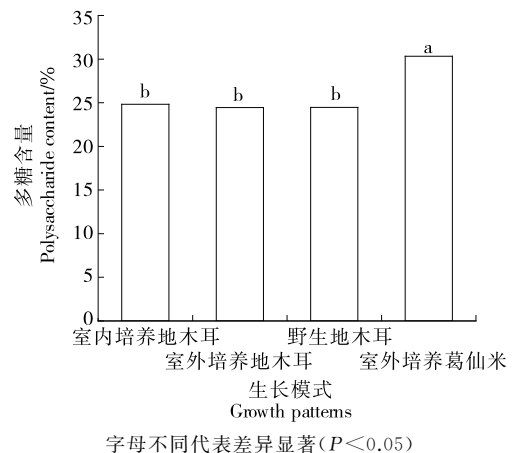


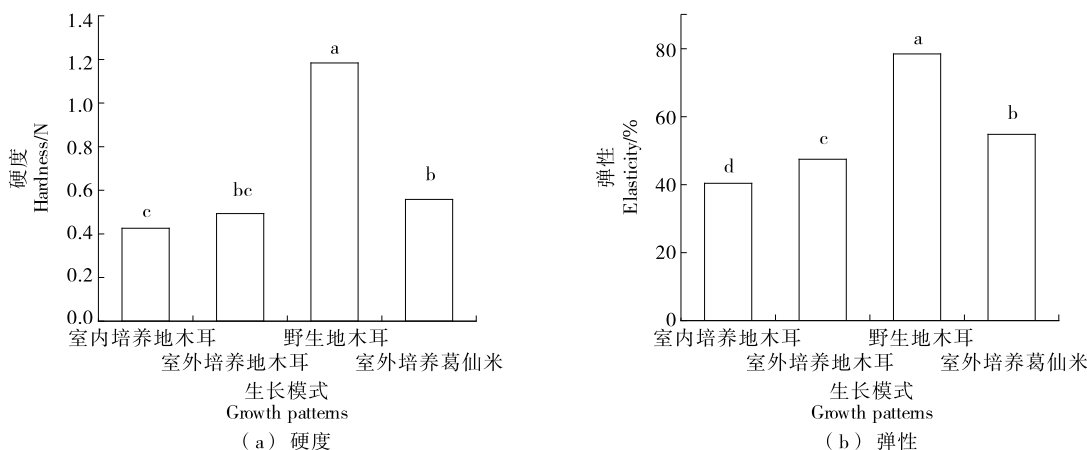
图4 不同生长模式下地木耳和葛仙米多糖含量
Figure 4 The polysaccharide content of *N. commune* and *N. sphaeroides* under different growth patterns

含量影响并不明显,其具体的作用机制有待进一步的试验探究。

2.7 硬度和弹性

由图5(a)可知,野生地木耳的硬度最大,室内、室外培养地木耳的硬度差异不明显;由图5(b)可知,不同生长

模式地木耳和葛仙米的弹性存在显著性差异($P<0.05$),其中野生地木耳的最大,室内地木耳的最小。在硬度和弹性这两项指标中,野生地木耳均为最大值,结合图1中野生地木耳的干湿重比最大,可以推测地木耳的弹性和硬度值与其干湿重比值存在较大的相关性^[24]。



字母不同代表差异显著 ($P < 0.05$)

图 5 不同生长模式下地木耳和葛仙米硬度与弹性对比

Figure 5 The hardness and elasticity of *N. commune* and *N. sphaeroides* under different growth patterns

2.8 感官评价

由图 6 可知,不同生长模式下地木耳和葛仙米的感官评价从风味、口感、色泽、表观结构和总体可接受性 5 个方面看均无显著性差异 ($P > 0.05$),且 5 项指标的评分介于 5.5 与 7.8 之间。说明人工培养地木耳和野生地木耳的口感无明显差别。

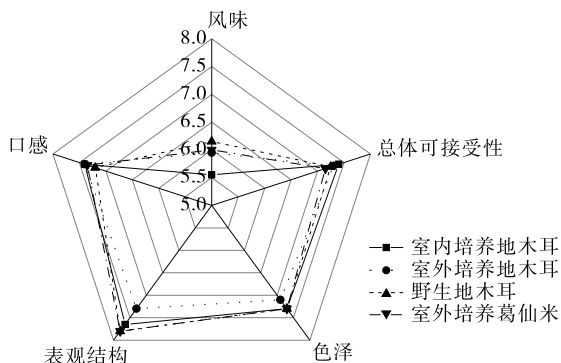


图 6 不同生长模式下地木耳和葛仙米的感官评价结果

Figure 6 The sensory evaluation of the colonies among *N. commune* and *N. sphaeroides* under different growth patterns

3 结论

研究对人工培养的地木耳和野生地木耳在生化组分、质构特性和感官评价等方面进行了对比,从外形来看,人工培养的地木耳近似圆形,野外生长的地木耳呈扁平耳状;人工培养地木耳由于来源的原因,通常呈绿色,而野外采集的地木耳呈棕褐色,相对而言,绿色更易为人们喜爱;对于干湿重比而言,野外生长地木耳干湿重比最大(2.42%),是室内培养地木耳的 1.6 倍;在弹性及硬度方面,野生地木耳都是最高的,分别是室内培养地木耳的

1.9 倍和 2.7 倍;不同生长模式地木耳的感官评价从风味、口感、色泽、表观结构和总体可接受性 5 个方面看均无显著性差异。在营养方面,人工培养的地木耳蛋白质含量显著高于野生地木耳,多糖含量与野生地木耳相差无几。

为了满足市场对地木耳日益增长的需要,用培养的地木耳替代野生资源的采集、食用及产品的深加工,具有更高的资源持续性、环境友好性和食品安全性,也有利于促进地木耳在现代食品工业中的应用。研究的不足之处在于未系统探究环境因素对地木耳营养物质含量影响的具体机制,未来可进一步开展试验研究怎样克服环境因素对地木耳的影响或利用其影响机制培养出人们需要的优质地木耳。

参考文献

- [1] 张会香, 陈晶晶, 杨世军, 等. 地木耳细胞的破碎和藻蓝蛋白提取工艺的研究[J]. 食品工业, 2017, 38(10): 112-116.
ZHANG H X, CHEN J J, YANG S J, et al. Study of cell breaking and extraction of Phycocyanin from *Nostoc commune*[J]. The Food Industry, 2017, 38(10): 112-116.
- [2] 李敦海, 刘永定. 近十年中国地木耳研究概况[J]. 水生生物学报, 2003(4): 408-412.
LI D H, LIU Y D. The past decade's researches on *Nostoc commune vaucher* in China: A review [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2003(4): 408-412.
- [3] 闫桂琴, 桂枝, 杜红红. 地木耳细胞生物学特征初探[J]. 山西师大学报(自然科学版), 1998(1): 53-56.
YAN G Q, GUI Z, DU H H. The preliminary on the cytobiological feature of *Nostoc commune vauch*[J]. Journal of Shanxi Teacher's University Natural Science Edition, 1998(1): 53-56.
- [4] 邓中洋, 胡征宇, 况琪军, 等. 地木耳规模化培养的初步研究[J]. 武汉植物学研究, 2004(6): 578-580.
DENG Z Y, HU Z Y, KUANG Q J, et al. Study of the mass culture

- of *Nostoc commune vauch* [J]. *Journal of Wuhan Botanical Research*, 2004(6): 578-580.
- [5] 王东明, 陈俏彪, 徐丹晔. 地木耳可栽培性能试验初报[J]. *南方农业学报*, 2014, 45(11): 2 014-2 019.
WANG D M, CHEN Q B, XU D Y. Primary report on cultivable performance of *Nostoc commune* [J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2014, 45(11): 2 014-2 019.
- [6] 袁蕾, 谭娅, 胡泽刚, 等. 地木耳的营养成分与铅汞含量分析[J]. *食品安全质量检测学报*, 2020, 11(4): 1 145-1 149.
YUAN L, TAN Y, HU Z G, et al. Analysis of nutrient composition and lead and mercury content of *Nostoc commune*[J]. *Journal of Food and Quality*, 2020, 11(4): 1 145-1 149.
- [7] ROSMARIE R, JOSETTE D, JOHN B, et al. Generic assignments, strain histories and properties of pure cultures of cyanobacteria[J]. *Microbiology*, 1979, 111(1): 1-61.
- [8] 邓中洋. 葛仙米、地木耳的大量培养及葛仙米形态生理特征研究[D]. 武汉: 中国科学院研究生院(水生生物研究所), 2006: 30-34.
DENG Z Y. Studies on mass culture of *Nostoc sphaeroides* and *N. commune* (Cyanophyta) and the structural and physiological characteristics of *N. sphaeroides*[D]. Wuhan: Chinese Academy of Sciences (Institute of Hydrobiology), 2006: 30-34.
- [9] ZHU C J, LEE Y K. Determination of biomass dry weight of marine microalgae[J]. *Journal of Applied Phycology*, 1997, 9(2): 189-194.
- [10] SCHERER S, ZHONG Z P. Desiccation independence of terrestrial *Nostoc commune* ecotypes (cyanobacteria) [J]. *Microbial Ecology*, 1991, 22(1): 271-283.
- [11] BENNETT A, BOGORAD L. Complementary chromatic adaptation in a filamentous blue-green alga[J]. *The Journal of Cell Biology*, 1973, 58(2): 419-435.
- [12] DUBOIS M, GILLES K A, HAMILTON J K, et al. Colorimetric method for determination of sugars and related substances [J]. *Analytical Chemistry*, 1956, 28(3): 350-356.
- [13] 刘勇, 赵干, 魏敏, 等. 滁菊多糖对粗粮面条质构品质的影响[J]. *食品工业*, 2021, 42(4): 34-38.
LIU Y, ZHAO G, WEI M, et al. Effect of chuju polysaccharide on texture and quality of coarse grain noodle[J]. *The Food Industry*, 2021, 42(4): 34-38.
- [14] 李娟娟. 酸浆豆腐加工工艺的研究[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2020: 50-51.
LI J J. Study on processing technology of physalis Tofu [D]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University, 2020: 50-51.
- [15] 刘桂霞, 苗玉华, 李记开. 放牧干扰和年际间降水量变化对地木耳生长速度的影响[J]. *草业科学*, 2011, 28(9): 1 649-1 652.
LIU G X, MIAO Y H, LI J K. Effect of rainfall among years and grazing disturbance on growth rate of *Nostoc commune* [J]. *Pratacultural Science*, 2011, 28(9): 1 649-1 652.
- [16] DENG Z Y, YAN C L, LU F, et al. Growth kinetics of 1-2 mm and 3-4 mm colonies of *Nostoc sphaeroides* (Cyanophyta) in outdoor culture[J]. *Biotechnology Letters*, 2008(30): 1 741-1 746.
- [17] 云菲, 刘国顺, 史宏志, 等. 光氮互作对烤烟光合作用及叶绿素荧光特性的影响[J]. *中国农业科学*, 2010, 43(5): 932-941.
YUN F, LIU G S, SHI H Z, et al. Effects of light and nitrogen interaction on photosynthesis and chlorophyll fluorescence characteristics in flue-cured tobacco[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(5): 932-941.
- [18] 余佳, 王生, 许文琦, 等. 葛仙米藻胆蛋白粗提物、藻蓝蛋白和藻红蛋白的体外抗氧化活性比较研究[J]. *食品研究与开发*, 2019, 40(23): 104-108.
YU J, WANG S, XU W Q, et al. Comparative studies on the antioxidant of phycobiliprotein crude extract, phycocyanin and phycoerythrin in *Nostoc sphaeroides* [J]. *Food Research and Development*, 2019, 40(23): 104-108.
- [19] 余佳, 陈颖, 马淑梅, 等. 葛仙米藻胆蛋白和藻蓝蛋白对 S180 荷瘤小鼠肿瘤生长的影响及其作用机制[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(8): 399-405.
YU J, CHEN Y, MA S M, et al. Effects of phycobiliprotein and phycocyanin from *Nostoc sphaeroides* Kützing on the growth of S180 Tumor-bearing mice and its mechanism [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(8): 399-405.
- [20] 程超, 徐会, 李伟, 等. 葛仙米藻胆蛋白提高小鼠免疫功能的研究[J]. *食品科学*, 2016, 37(5): 167-174.
CHENG C, XU H, LI W, et al. *Nostoc sphaeroides* phycobiliprotein enhances immune functions in mice [J]. *Food Science*, 2016, 37(5): 167-174.
- [21] 范刚, 陈德文, 潘思轶, 等. 葛仙米藻胆蛋白提取工艺及藻蓝蛋白稳定性研究[J]. *食品科学*, 2005, 26(9): 215-218.
FAN G, CHEN D W, PAN S Y, et al. Study on extraction technology of phycobiliproteins and stability of phycocyanins from *Nostoc sphaeroides* Kutz [J]. *Food Science*, 2005, 26(9): 215-218.
- [22] 郑雅莉, 朱宝君, 魏东. 嗜硫原始红藻 *Galdieria sulphuraria* 高产藻胆蛋白的混养条件优化[J]. *现代食品科技*, 2020, 36(9): 54-61, 210.
ZHENG Y L, ZHU B J, WEI D. Optimization of mixotrophic growth conditions for high-yield production of phycobiliprotein by *Galdieria sulphuraria* [J]. *Modern Food Science and Technology*, 2020, 36(9): 54-61, 210.
- [23] 杜晓凤, 邹宁, 孙东红, 等. 温度和光径对微绿球藻生长及营养成分含量的影响[J]. *海洋科学*, 2014, 38(4): 50-54.
DU X F, ZOU N, SUN D H, et al. Effect of temperature and optical path on growth rate and accumulation of nutrients of *Nannochloropsis* sp.[J]. *Marine Sciences*, 2014, 38(4): 50-54.
- [24] 文靖. 不同钙浓度对葛仙米生理生化特性的影响[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2014: 22-28.
WEN J. The effect of different calcium concentration on physiology and biochemistry characteristics of *Nostoc sphaeroides* [D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2014: 22-28.