

大球盖菇生物学特性与栽培条件研究综述

孙颢宸, 杨宪忠, 蔺毅, 严宗山, 王育才, 栾倩倩

(甘肃省农业工程技术研究院设施农业与装备研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 大球盖菇是国际菇类交易市场上的十大品种之一, 同时也是联合国粮农组织向发展中国家推荐栽培的珍稀食用菌之一。口感细腻, 富含蛋白质、糖类、维生素、矿物质以及人体必需的氨基酸和多种生物活性物质, 具有很高的营养价值和药用价值, 有抗菌、抗肿瘤、抗氧化、降血糖、助消化、增强机体免疫力、预防冠心病以及缓解精神疲劳等功效。从大球盖菇的生物学特点、营养及生物活性成分、遗传与育种及栽培条件展开论述, 并对大球盖菇今后的发展方向进行展望, 以期为我国大球盖菇优良品种的培育和各地引种栽培提供参考依据。

关键词: 大球盖菇; 生物学特性; 营养特点; 育种现状; 栽培条件

中图分类号: S646.19 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-2172(2025)03-0220-06

doi: 10.3969/j.issn.2097-2172.2025.03.004

Review on the Biological Characteristics and Cultivation Conditions of *Stropharia rugosoannulata*

SUN Haochen, YANG Xianzhong, LIN Yi, YAN Zongshan, WANG Yucai, LUAN Qianqian

(Gansu Academy of Agri-engineering Technology, Wuwei Gansu 730000, China)

Abstract: *Stropharia rugosoannulata* is one of the top ten varieties in the international mushroom trading market and is also a rare edible fungus recommended by the Food and Agriculture Organization of the United Nations for cultivation in developing countries. It has a tender texture and is rich in proteins, carbohydrates, vitamins, minerals, essential amino acids, and various bioactive compounds. It possesses significant nutritional and medicinal value, with antibacterial, anti-tumor, antioxidant, hypoglycemic, digestive-enhancing, immune-boosting, coronary heart disease-preventing, and mental fatigue-relieving properties. This review discusses the biological characteristics, nutritional and bioactive components, genetics and breeding, and cultivation conditions of *S. rugosoannulata*, and provides insights into its future development. The study aims to serve as a reference for the breeding of superior varieties and the introduction and cultivation of *S. rugosoannulata* in different regions of China.

Key words: *Stropharia rugosoannulata*; Biological characteristic; Nutritional property; Breeding status; Cultivation condition

大球盖菇(*Stropharia rugosoannulata*)隶属担子菌门(Basidiomycota)层菌纲(Hymenormycetes)伞菌目(Agricales)球盖菇科(Strophariaceae)球盖菇属(*Stropharica*), 别称皱球盖菇、皱环球盖菇、斐氏球盖菇、酒红色球盖菇、斐氏球盖菇等, 商品名为红松茸或赤松茸, 俗称益肾菇、彩云菇、粗腿菇。是药食兼用的草腐型土生菌, 为食用菌新品种。其菌盖色泽艳丽, 菇肉细腻脆嫩、爽滑可口, 在食用菌品类中素有“荤中之素”“山林珍品”的美

誉, 富含对人体有益的多种营养物质, 具有很高的药用价值。且其具有很强的适应性及抗杂抗病能力, 易于栽培, 也是联合国粮农组织向发展中国家推荐栽培的珍稀食用菌之一, 极具开发前景。

大球盖菇于1922年前在美国首次发现并被报道, 1930年野生大球盖菇相继在德国、日本被发现, 直到1969年东德成功对大球盖菇进行人工驯化栽培。20世纪70年代, 波兰、捷克、匈牙利

收稿日期: 2023-11-09; 修订日期: 2025-01-08

基金项目: 甘肃省陇原青年创新创业人才(个人)项目(2023LQGR57); 甘肃省科技计划项目-技术创新引导计划(23CXNH0018、22CX8NA080); 甘肃省青年基金项目(22JR11RA286)。

作者简介: 孙颢宸(1998—), 女, 甘肃张掖人, 研究实习生, 主要从事食用菌栽培研究工作。Email: 1522462747@qq.com。

通信作者: 栾倩倩(1993—), 女, 甘肃陇西人, 助理研究员, 主要从事食用菌栽培研究工作。Email: 1120159982@qq.com。

和苏联等国相继栽培成功。1980年我国上海市农业科学研究院食用菌研究所赴波兰考察后引进大球盖菇菌种并试验栽培成功,但未能得到大面积推广。1990年,福建三明食用菌研究所立题研究,栽培大球盖菇获得良好效益,并逐步向省内外推广。在我国,大球盖菇产量呈增长趋势,2019年产量增长149.99%,2020年产量增长40.67%,2021年产量增长5.80%,2022年产量增长93.05%。在河南省、湖北省、广东省等地,大球盖菇的栽培面积快速扩大,产量大幅增加,推动着当地的经济发展和乡村振兴。尤其在甘肃省,2017年之前主要栽培的食用菌品种有平菇、香菇、金针菇、黑木耳及杏鲍菇等;之后开始了大球盖菇的种植,2021年大球盖菇的产量达到10 000 t以上,发展迅速。同时,大球盖菇在资源较为丰富的陇南山区和中部地区发展较快,在徽县山区,资源丰富且有扶贫项目的扶持,食用菌发展势头迅猛,大球盖菇作为适合乡村粗放式生产管理的品种,产量逐年提高^[1-6]。整体来看,我国近年来大球盖菇产量呈逐年增长的趋势,发展势头良好。

1 生物学特点

1.1 自然分布

大球盖菇多长于春季和秋季,生长在林中、树林边缘的草地、道路两侧、园地、垃圾场、木屑堆等含有丰富腐殖质的土地上,有的还会生长在牛马粪堆上^[7]。在自然界中大球盖菇分布于亚洲、欧洲以及北美洲等地;在我国,主要分布在西部地区的新疆、青海、西藏、云南以及四川等地,在山西和吉林等地也有零星分布。自然生境中大球盖菇多分布于高山高原地区,通常生长于阔叶林下的落叶层上,该种气候垂直变化显著,一定高度内,气温较低、湿度大、多云雾、降水较多,非常适合大球盖菇的生长^[8-9]。

1.2 形态特征

大球盖菇菌丝体在PDA培养基上菌落生长形态多样,呈放射状、絮状、毡状、绒状等,直径为3~5 μm ;菌丝体为白色,形态为丝状,气生菌丝少,双核菌丝有大量且明显的锁状联合^[10]。大球盖菇子实体单生、丛生或群生,菌盖接近半球形,后平展至扁平形,直径为3~25 cm。菌柄近似圆柱形,长度为5~15 cm,直径为1~4 cm。

幼菇整体呈现白色,且存在乳头状白色突起。随着生长,菌盖初始呈淡黄棕色,随着子实体的长大渐变成葡萄酒红褐色,之后褪为灰褐色,干燥后呈现深褐色。生长时菌盖表面平滑,有细纤维状鳞片,湿润时会稍微发黏,随着个体生长逐渐消失;菌盖扣于白纸上会得到紫褐色孢子印,显微镜下可观察到大球盖菇的担孢子呈椭圆形,壁厚,且顶端具有明显的芽孔,大小为(12.0~15.0) μm × (6.5~9.0) μm 。

大球盖菇菌肉肥厚呈白色,菌褶呈刀片状,初时接近白色,渐变为灰白色,后成暗紫灰色;当菌盖呈现平展状态时,菌褶会变为紫黑色,菌褶侧有黄色囊状体(Chrysocystidium),整体呈现棍棒状,大小(35~50) μm × (8.5~14.5) μm ;菌褶与菌柄直接相连,呈直生状态,排列紧密,边缘有不规则缺刻。菌柄中央充实或中空,粗壮,向下部延伸渐粗,生长初期几近全白,之后呈淡黄褐色。菌柄上部有菌环,较厚,呈膜质;菌环上存有深沟纹,深裂成星状,前端向上卷起,且容易脱落,在十分成熟的个体上会消失^[7-11]。

2 营养及生物活性成分

2.1 营养成分

大球盖菇味道鲜美,爽滑可口,且含有多种营养物质,如脂类、碳水化合物、蛋白质、维生素及矿物质元素等。大球盖菇干品中含脂类26.0 g/kg,其中包括丰富的脂肪酸,其中13.6%为饱和脂肪酸(如棕榈酸等),86.4%为不饱和脂肪酸(如油酸、亚油酸等)。蛋白质含量为258.1 g/kg,其中,清蛋白和球蛋白占42.80%,清蛋白含有全部的必需氨基酸,成熟的子实体还富含8种必需氨基酸和10种非必需氨基酸;碳水化合物含量占32.73%,其中包括乳糖、核糖、葡萄糖、半乳糖和甘露糖;还含有丰富的B族维生素及多种矿物质元素,矿物质元素磷含量为120.465 mg/kg,是其中含量最多的无机元素^[11-13]。

2.2 生物活性成分

2.2.1 凝集素 Zhang等^[14]从大球盖菇的子实体中分离出首个凝集素糖蛋白,具有热稳定性,可以抑制肝癌Hep G2细胞和白血病L1210细胞的增殖,还能抑制HIV-1逆转录酶活性。

2.2.2 肽类 上海市农业科学院食用菌研究所研

究发现, 大球盖菇的成熟子实体中含有干重为 11%~14% 的游离肽, 明显高于游离氨基酸和核苷酸等小分子呈味物质, 为以食用菌来源的风味肽产品开发利用提供了参考^[10]。

2.2.3 甾体类化合物 日本 Kawagishi 教授团队从大球盖菇的子实体中分离出九种甾醇类化合物, 具有类固醇骨架的甾醇以及拥有独特醚环结构的甾醇两种。这些化合物拥有不同的特性, 其中甾醇化合物 2 和甾醇化合物 5 能够抑制真菌活性, 甾醇类化合物 8、甾醇化合物 9 以及甾醇化合物 1~5 能够抑制破骨细胞的形成, 甾醇化合物 3 对实验用增殖表皮癌细胞(Hela Cells)具有细胞毒性。除此之外还从大球盖菇的子实体中分离出能够调节植物生长的甾体化合物^[15-18]。

2.2.4 黄酮类化合物 有实验表明, 大球盖菇的黄酮类化合物溶液对大肠杆菌和青霉菌具有抑制作用, 其中, 对大肠杆菌的抑制作用强于青霉菌, 但是对啤酒酵母无抑制作用; 大球盖菇中的黄酮类化合物的最佳浓度都较小, 使用很小的量即可获得 20% 的抗氧化性, 可以得出大球盖菇的黄酮类化合物具有一定的抗氧化性^[9]; 大球盖菇提取液中的大球盖菇酚对羟自由基($\cdot\text{OH}$)在一定浓度范围内具有显著的清除效果, 对超氧阴离子($\cdot\text{O}_2^-$)在一定的浓度范围内具有一定的清除效果^[19]。

2.2.5 糖类 大球盖菇菌丝体含有多种类单糖, 包括木糖、甘露糖、核糖、阿拉伯糖等 7 种单糖^[20]; 大球盖菇子实体多糖呈现为淡棕色粉末, 糖环构型以 β 构型吡喃糖为主, 同时也存在少量的 α 糖苷键, 是由 5 种单糖构成的杂多糖^[21]。大球盖菇多糖具有抗病毒、抗肿瘤、抗氧化、促进消化、缓解精神紧张、增强机体免疫力及预防心脑血管疾病的效果。在抗癌方面, 大球盖菇多糖能够抑制人肝癌细胞(HepG2)的生长^[22], 同时, 其对结肠癌细胞和胃癌细胞具有明显的抑制作用^[23]。在自由基清除方面, 研究发现大球盖菇多糖对 $\cdot\text{OH}$ 和 $\cdot\text{O}_2^-$ 都具有显著的清除效果, 随着大球盖菇多糖浓度的逐渐升高, 其对 $\cdot\text{OH}$ 和 $\cdot\text{O}_2^-$ 的清除率也显著增大, 且对 $\cdot\text{O}_2^-$ 的清除作用要比对 $\cdot\text{OH}$ 的清除作用更加优异^[24-25]。在抗氧化方面, 有实验通过建立小鼠心脏模型来对大球盖菇的修复能力进行评估, 结果表明, 在使用高剂量的大球盖菇多糖

对 CCl_4 诱导的小鼠急性肝损伤和 D-半乳糖诱导的小鼠衰老进行治疗后, 大球盖菇多糖在两组模型中可以通过提高心脏中的抗氧化酶活性来降低 MDA 含量, 以此来达到抗氧化的目的。同时, 实验还表明大球盖菇多糖可以提高人工或自然衰老的小鼠的抗氧化酶活性和小鼠心脏中的线粒体抗氧化能力, 使小鼠部分功能得到恢复^[26]。

2.2.6 酶 大球盖菇的胞外酶有漆酶、纤维素酶、 β -葡萄糖苷酶、锰过氧化物酶、羧甲基纤维素酶和木质素过氧化物酶。大球盖菇胞外酶的活性与环境 pH 有关, 这些胞外酶会在降解纤维素和木质素的过程中发挥作用^[12]。

3 遗传与育种

3.1 遗传特征

大球盖菇属于四极性异宗结合担子菌^[27], 品种间的有性育种采用孢子单核体对称交配育种工艺, 而大球盖菇还存在不亲和性因子多样性的情况, 可以采用直接交配而不预先进行极性测定的育种工艺进行大球盖菇育种^[28]。尚俊军等^[29]基于基因组数据通过 Blast 比对搜索到 1 个 A 交配型位点和 B 交配型位点结构, 并对其进行解析。A 交配型位点含有 2 个交配型基因, 分别是 HD1 (590 个氨基酸组成, 基因组物理距离 1 988 bp, 拥有 5 个外显子和 3 个内含子)和 HD2 (617 个氨基酸组成, 基因组物理距离 2 029 bp, 拥有 4 个外显子和 3 个内含子), 且此结构域与其他物种具有同源性。B 交配型位点结构编码信息素前体和信息素受体, 拥有 5 个与其他真菌高度同源的信息素受体基因, 具有 STE3 结构域和 pfam02076, 研究结果也显示大球盖菇的 B 交配型位点结构具有种属特异性, 可以用于大球盖菇的物种鉴定并对该结构位点进行多态性分析。

3.2 育种成果

近年来, 我国的食用菌种植规模与产量有所提升, 品种研发优势凸显。1990 年, 福建三明食用菌研究所对大球盖菇立项研究, 并从国外引进名为 St 0128 的菌株, 该菌株产量高、抗逆能力强, 在大田等地栽培后取得了良好的效益后逐步向省内外推广^[30]; 2004 年, 四川省农业科学院土壤肥料研究所成功筛选培育出适合四川气候条件和生长环境的大球盖菇品种, 由四川省农作物品

种审委会将其审定为大球盖菇新品种大球盖菇 1 号 (川审菌2004004)^[31]。2015 年, 黑龙江省农业科学院畜牧研究所审定登记了适宜在黑龙江省等北方寒冷地区栽培的首个草腐类品种黑农球盖菇 1 号^[32]。2018 年, 山东农业大学收集国内外 28 株大球盖菇种质资源, 使用 SRAP 分子标记技术定向耐高温递进式循环来驯化、确定实验材料, 采用原生质体融合及单孢杂交等多种育种方法进行目标菌株的选育, 最终成功选育耐高温高产菌株山农球盖 3 号(J8L4)并申请发明专利, J8L4 具有耐高温, 产量高, 抗杂能力强等特点^[33]。2020 年, 成都农业科技职业学院与成都市农林科学院从大球盖菇 1 号的黄色变异菌株中选育出新品种黄球盖 1 号, 其子实体单生率及产量均大于大球盖菇 1 号^[34]。2021 年, 昆明食用菌研究所通过采集自然变异菇体, 经菌株分离、中间试验和示范栽培, 选育出稳定高产的大球盖菇新品种中菌金球盖 1 号^[35]。

4 栽培条件

4.1 栽培基质

大球盖菇菌丝体分解木质纤维素能力较强, 需要碳源、氮源和微量的无机盐作为营养物质, 因此人工栽培可以使用农作物秸秆作为原料。常用的农作物秸秆有稻草、豆秸、麦秸、玉米芯、高粱秸、玉米秸等^[11, 36]。大球盖菇菌丝在 pH 4.0~11.0 范围内均可生长, 但更适宜于在微酸性环境中生长, pH 为 6.0 时, 菌丝生长速度最快且菌丝健壮, 干重最重。pH 小于 8.0 时, 菌丝生长速度逐渐加快, 而且生长健壮; 当 pH 逐渐升高时, 菌丝生长速度减慢且菌丝体较为细弱, 菌丝体在 pH 小于 2.0 和大于 10.0 的情况下均不能生长^[9]。菌丝生长的基质最适 pH 为 5.5~6.5, 适于子实体生长发育的培养料 pH 为 5.0~7.5, 覆土材料的 pH 以 5.5~6.5 为宜^[37-38]。

4.2 碳源及氮源

孙萌等^[39]的研究结果, 大球盖菇菌丝体在以乳糖作为碳源的培养基上生长速度较快且干重最大, 是大球盖菇的最适碳源, 蔗糖次之。闫培生等^[40]的研究表明, 大球盖菇生长的最佳碳源是葡萄糖, 麦芽糖次之, 不宜使用果糖和乳糖作为大球盖菇的碳源。陈永刚等^[41]的实验结果则显示大

球盖菇的最佳碳源为葡萄糖, 蔗糖次之, 在加有乳糖的培养基上生长最为缓慢。同时, 孙萌等^[39]和闫培生等^[40]的研究结果均显示大球盖菇在黄豆粉中生长速度最快且干重最大, 是大球盖菇的最佳有机氮源, 酵母膏次之。闫培生等^[40]的研究结果也显示最佳的无机氮源为硝酸铵。

4.3 光温环境

大球盖菇属于中温型菌株, 对温度变化较为敏感。菌丝的最适生长温度在 24~30℃, 温度在 5℃ 以下菌丝不生长^[41]; 5~10℃ 时, 菌丝生长极为缓慢; 25、30℃ 菌丝生长速度最快且速度差异不明显, 且与其他温度条件下的差异极其显著; 温度超过 30℃ 时, 菌丝生长速度显著下降; 温度超过 36℃ 时, 菌丝停止生长, 长时间的高温延续会造成菌丝老化死亡^[7-11]。大球盖菇的原基分化最适温度为 10~25℃, 在此温度区间其生物学效率达到最高, 生长速度加快, 朵形较小且易开伞; 子实体生长阶段发育温度为 4~35℃, 最适发育温度为 14~25℃, 温度低于 4℃ 或者高于 30℃ 均难以生长并形成子实体^[7-11]。大球盖菇菌丝体生长阶段无需光照, 在原基分化以及子实体生长发育阶段, 需要有 100~500 lx 的散射光照。大球盖菇在完全黑暗的条件下无法形成子实体, 但子实体生长也需要 50%~80% 的遮阴度, 若长时间太阳光直射, 会导致大球盖菇的菌柄龟裂, 甚至部分菇体出现干枯死亡^[36, 42]。

4.4 水分及湿度

大球盖菇菌丝对潮湿环境耐受性强, 其生长阶段需要较多的水分, 培养基含水量为 600~850 g/kg 时均能生长^[37]。闫培生等^[40]研究表明, 麦草培养基的含水量为 750 g/kg 左右时, 菌丝生长较为健壮。大球盖菇菌丝含水量在 550~600 g/kg, 菌丝略微生长; 含水量为 650 g/kg 时, 菌丝生长速度加快; 当含水量达到 750 g/kg 时, 大球盖菇菌丝体生长最健壮^[39]。在空气湿度为 70%, 菌丝体生长培养料含水量超过 800 g/kg 时, 菌袋底部会存在积水, 导致菌丝生长缓慢且易引发细菌发酵; 当含水量低于 500 g/kg, 会使培养料干燥, 导致菌丝生长缓慢, 形态细弱^[41]。原基分化阶段, 空气湿度以 85%~95% 为宜^[34]; 子实体生长发育阶段空气相对湿度应保持在 90%~95%^[40]。

大球盖菇属于好气真菌,空气中含氧量主要影响大球盖菇子实体的形成,在菌丝体生长阶段对氧气含量的要求不太严格,二氧化碳浓度不超过 2.00% 即可。但原基分化和子实体生长发育阶段需将二氧化碳浓度控制在 0.15% 以下,提供充足的氧气。因此,栽培场所需要经常通风换气,避免二氧化碳积累过多,导致菌柄变长等出菇畸形的问题^[9, 10, 42-45]。

5 结束语

大球盖菇作为一种药食兼用的食用菌,近年来的研究表明,其含有多种生物活性成分及多种营养物质,如多糖、凝集素、肽类、甾体类化合物、酚类物质以及黄酮类化合物等,但目前对大球盖菇生物合成这些次级代谢产物的分子机制尚未明确,可从次级代谢产物的合成途径进行探索研究。大球盖菇还具有相当大的生态价值,在栽培过程中,大球盖菇的栽培料可以来源于各种农业生产废弃物,在种植中所产生的菌渣等废弃物可与其他农业生产形成可持续且高效的循环经济,尤其是在大球盖菇栽培中产生的各种具有极强活性的酶类,对纤维素、半纤维素和木质素具有很强的分解能力,减少大气污染并改良土壤。大球盖菇对硒、铅、镉等重金属具有较强的富集能力,可有效改善土壤的酶活性、土壤呼吸以及微生物数量^[43]。同时,大球盖菇种植对改良盐碱地也有重要意义。研究表明,栽培大球盖菇可以提升土壤有机质含量,促进脱盐,从而降低土壤的全盐含量,同时促进酸性物质产生,降低土壤 pH,改良土壤中的养分含量,提升土壤速效钾和铵态氮的含量^[46]。目前虽对大球盖菇的生态价值有所认识,但还未进行实践应用,有待进一步证实在农业生产中的实际效用。

大球盖菇作为具有巨大潜力的食用菌,其发展离不开优良品种,然而目前对大球盖菇在分子层面的育种研究处于起步阶段。尽管在研究各种环境因素对大球盖菇生长发育的性状产生和规律方面已有大量的研究成果,但在分子层面对环境因子调控和应答的相关研究仍然较少,无法准确掌握其在生长发育过程中的传感和应答机制,需要结合分子生物学技术进行深入研究。在分子育种工作中需针对大球盖菇的关键农艺性状,筛选

并定位其候选功能基因,如子实体形状、色泽、产量等,同时进行能够运用于分子育种的关键功能基因分子标记技术的研究,以此挖掘更适于规模化、市场化生产的大球盖菇新品种。

参考文献:

- [1] 中国食用菌协会. 2019 年度全国食用菌统计调查结果分析[J]. 中国食用菌, 2021, 40(6): 104-110.
- [2] 中国食用菌协会. 2020 年度全国食用菌统计调查结果分析[J]. 中国食用菌, 2022, 41(1): 85-91.
- [3] 中国食用菌协会. 2021 年度全国食用菌统计调查结果分析[J]. 中国食用菌, 2023, 42(1): 118-127.
- [4] 中国食用菌协会. 2022 年度全国食用菌统计调查结果分析[J]. 中国食用菌, 2024, 43(1): 118-126.
- [5] 张桂香. 甘肃省食用菌产业区划建议[J]. 甘肃农业科技, 2017(11): 66-69.
- [6] 马建成, 陈永辉. 徽县食用菌产业发展现状与对策[J]. 甘肃农业科技, 2022, 53(9): 19-23.
- [7] 黄年来. 中国大型真菌原色图鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998.
- [8] 金银慧. 大球盖菇生物学特性的研究[J]. 农业与技术, 2020, 40(24): 63-64.
- [9] 魏亚兰, 刁治民. 大球盖菇生物学特性及经济价值的探讨[J]. 青海草业, 2017, 26(4): 43-48.
- [10] 张 芳. 大球盖菇人工栽培技术[J]. 农村实用技术, 2005(12): 33-34.
- [11] 骆 庆, 郭 涛, 孙召新, 等. 大球盖菇的生物学基础、活性成分及其应用[J]. 微生物学通报, 2023, 50(6): 2709-2720.
- [12] 段永刚. 大球盖菇营养品质分析、黄酮类化合物提取及应用研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2010.
- [13] 萨仁图雅, 图力古尔. 大球盖菇研究进展[J]. 食用菌学报, 2005(4): 57-64.
- [14] ZHANG W W, TIAN G T, GENG X R, et al. Isolation and characterization of a novel lectin from the edible mushroom *Stropharia rugosoannulata*[J]. *Molecules*, 2014, 19(12): 19880-19891.
- [15] WU J, FUSHIMI K, TOKUYAMA S, et al. Functional-food constituents in the fruiting bodies of *Stropharia rugosoannulata*[J]. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 2011, 75(8): 1631-1634.
- [16] WU J, TOKUYAMA S, NAGAI K, et al. Strophasterols A to D with an unprecedented steroid skeleton: from the mushroom *Stropharia rugosoannulata*[J]. *Angewandte Chemie*, 2012, 124(43): 10820-10822.
- [17] WU J, SUZUKI T, CHOI JH, et al. An unusual sterol from

- the mushroom *Stropharia rugosoannulata*[J]. *Tetrahedron Letters*, 2013, 54(36): 4900–4902.
- [18] SATO S, FUKUDA Y, OGURA Y, et al. Synthesis of the epimeric secosteroids strophasterols A and B[J]. *Angewandte Chemie*, 2017, 129(36): 10911–10914.
- [19] 黄 珊. 大球盖菇酚类物质的提取及其抗氧化性研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2010.
- [20] 金明枝. 大球盖菇多糖的结构表征、化学修饰及生物活性研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2021.
- [21] 陈君琛, 翁敏劫, 赖谱富, 等. 大球盖菇多糖的分子质量分布及其单糖的组成[J]. *中国农业科学*, 2011, 44(10): 2109–2117.
- [22] 何华奇, 曹 晖, 潘迎捷. 大球盖菇菌株形态学观察[J]. *安徽技术师范学院学报*, 2003(4): 327–329.
- [23] 蒋 琳. 大球盖菇多糖(SR-1)与草黄口蘑多糖(TLG-1)的制备、结构鉴定及生物活性研究[D]. 南充: 西华师范大学, 2019.
- [24] 王瑞瑞. 真菌发酵胞外多糖的硫酸化及生物活性研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2014.
- [25] 杜敏华, 王小立, 苏海飞, 等. 大球盖菇多糖超声波提取及抗氧化活性[J]. *食品研究与开发*, 2013, 34(16): 18–22.
- [26] 陶明煊, 王 峰, 王晓炜, 等. 大球盖菇多糖对小鼠心脏抗氧化作用研究[J]. *食品科学*, 2007(9): 529–532.
- [27] 汪 虹, 曹 晖. 大球盖菇交配系统的研究[J]. *食用菌学报*, 2006(2): 9–11.
- [28] 蔡衍山, 黄秀治, 罗凤来, 等. 大球盖菇性遗传模式和育种工艺研究[J]. *菌物研究*, 2007(1): 47–50.
- [29] 尚俊军, 侯 娣, 李 燕, 等. 基于基因组数据解析大球盖菇交配型系统[J]. *菌物学报*, 2020, 39(6): 1152–1161.
- [30] 熊维全, 曾先富, 李昕竺. 大球盖菇的栽培现状与发展建议[J]. *食用菌*, 2021, 43(5): 73–75.
- [31] 刘本洪, 唐 亚, 甘炳成, 等. 大球盖菇 1 号的选育和应用研究[J]. *西南农业学报*, 2005(6): 832–835.
- [32] 倪淑君, 张海峰, 田碧洁, 等. 黑农球盖菇 1 号大球盖菇生产技术要点[J]. *黑龙江农业科学*, 2016(5): 157–158.
- [33] 任纪帆, 朱静娴, 王庆佶, 等. 大球盖菇“山农球盖 3 号”品种的选育[J]. *菌物学报*, 2020, 39(6): 977–982.
- [34] 万 群, 熊维全. 大球盖菇新品种“黄球盖 1 号”的品种特征及栽培技术[J]. *北方园艺*, 2023(9): 153–154.
- [35] 中华全国供销合作总社昆明食用菌研究所. 昆明食用菌研究所成功选育大球盖菇新品种“中菌金球盖 1 号”[J]. *中国食用菌*, 2021, 40(4): 98.
- [36] 方金山. 大球盖菇高产栽培技术[J]. *中国食用菌*, 2004(3): 43–44.
- [37] 刘胜贵, 吕金海, 刘卫今. 大球盖菇生物学特性的研究[J]. *农业与技术*, 1999(2): 19–22.
- [38] 付江习, 徐 晖, 卜致东. 大球盖菇的特性及栽培技术初报[J]. *食用菌*, 1998(6): 9.
- [39] 孙 萌, 陈艳秋, 冉丽萍. 大球盖菇菌丝体生物学特性研究[J]. *延边大学农学学报*, 2013, 35(1): 51–55.
- [40] 闫培生, 李桂舫, 蒋家慧, 等. 大球盖菇菌丝生长的营养需求及环境条件[J]. *食用菌学报*, 2001(1): 5–9.
- [41] 陈永刚, 荆 丹, 黄 重, 等. 大球盖菇菌丝生长环境和营养条件探究[J]. *陕西农业科学*, 2021, 67(12): 62–66.
- [42] 黄美仙, 岑燕霞, 孙 朋, 等. 大球盖菇研究进展[J]. *黑龙江农业科学*, 2021(12): 124–129.
- [43] 刘 娟, 闵冬青, 唐可兰, 等. 大球盖菇的研究现状及发展前景[J]. *湖南农业科学*, 2021(6): 113–117.
- [44] 任爱民, 包玉政, 韩爱民, 等. 基于 D-optimal 法优化香菇菌种培养基质配方的研究[J]. *寒旱农业科学*, 2024, 3(8): 724–733.
- [45] 何士剑, 马黎霞, 管 礼, 等. 北方高寒阴湿区双拱双膜保温冷棚羊肚菌人工栽培技术[J]. *寒旱农业科学*, 2024, 3(2): 185–188.
- [46] 杨宗德吉, 李梦秋, 马 闯, 等. 种植大球盖菇对盐碱土的改良作用研究[J]. *天津农学院学报*, 2022, 29(4): 17–20; 25.