

# 食用菌液体深层发酵的研究进展

苏跃稳, 路鹏, 郭群群, 王健\*

(吉林大学生物与农业工程学院, 长春 130022)

**摘要:** 食用菌中含有的营养物质十分丰富, 而且味道鲜美, 具有极高的食用价值和药用价值。食用菌越来越受到人们的青睐, 这就使食用菌的市场需求量逐年增加。传统的固体培养生产食用菌不能满足人们的需求, 迫切寻找新的生产方法。随着发酵技术的日趋成熟, 菌丝体发酵技术也越来越成熟, 发酵罐发酵生产为菌丝体提供丰富的营养物质和适宜的环境, 优点较多包括培养周期短, 不受季节限制, 有利于规模化, 接种方便, 菌丝体生长一致等。液体发酵法能较有效提高产量和效益, 广泛应用于工业生产。菌丝体开发出来的产品也已进入市场, 有良好的市场前景。本文主要对液体发酵进行介绍并概括影响液体发酵的因素和发酵动力学, 同时, 对食用菌液体深层发酵在医药、保健等行业的应用做出相应总结。

**关键词:** 食用菌; 液体发酵; 应用

## Progress in edible fungus by submerged fermentation

SU Yue-Wen, LU Peng, GUO Qun-Qun, WANG Jian\*

(College of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China)

**ABSTRACT:** Edible fungus have rich nutrient substances, delicious tastes and high medicinal value. The market demand of edible fungus is increasing year by year. Conventional solid culture for edible fungus cannot fulfill the increasing needs, and new producing methods are deserved to be developed. Mycelium fermentation technology has become the main fermentation method. Fermentor provides stable fermentation conditions and suitable environment for the growth of mycelium. Culturing in fermentors can also shorten the fermentation period and is restrict to seasonal change. This kind of culturing method can also benefit to expandable production and convenient for inoculation. Liquid fermentation methods have been widely applied in industrial production and get high commercial benefits already. This study analyzed the main factors for liquid fermentation process of edible fungus and its fermentation kinetics, and summarized the applications of edible fungus liquid fermentation in industries like feed, health care and so on.

**KEY WORDS:** edible fungus; liquid fermentation; application

## 1 引言

食用菌是人类不可多得的绿色食品, 具有高蛋白、低脂肪、氨基酸含量高等特点, 被誉为“素中之荤”、“健康食品”。食用菌含有多糖、多肽以及其他生物活性物质, 具有

抗肿瘤、降血脂、保护心血管等药用价值<sup>[1]</sup>。近些年来, 对食用菌的需求增加, 食用菌栽培得到迅速发展。传统的食用菌生产方法是使用固体培养法, 造成大量树木被砍伐, 环境被破坏, 因此寻找新的生产途径显得尤为必要。目前, 液体发酵法生产菌丝体, 可作为食用菌栽培的良好替代方

\*通讯作者: 王健, 教授, 主要研究方向为代谢工程、代谢控制发酵。E-mail: wangjian99@jlu.edu.cn

\*Corresponding author: WANG Jian, Professor, No.5988, People Street, College of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China. E-mail: wangjian99@jlu.edu.cn

式, 得到人们关注, 已经应用于工业生产。与传统栽培法相比, 主要具有发酵周期短、不受季节限制、可操作性强、产量高等优点。同时, 在培养基中可加入一些物质改善营养结构。

## 2 食用菌液体发酵工艺

食用菌发酵研究开始于 20 世纪 40 年代, 1948 年美国 Humfeld 等<sup>[2]</sup>报液体发酵蘑菇菌丝体, 以后食用菌的液体发酵得到迅猛的发展。20 世纪 60 年代我国开始菌丝体发酵研究<sup>[3]</sup>。用于工业生产的食用菌有灵芝(*Ganoderma lucidum*)、蜜环菌(*Armillaria mellea*)、冬虫夏草(*Cordyceps sinensis*)、猴头(*Hericium erinaceus*)、香菇(*Lentinula edodes*)、黑木耳(*Auricularia aglicula*)、金针菇(*Flammulina velutipes*)等。研究表明, 液体发酵产生的菌丝体营养成分与栽培的子实体相比相差不多, 而且某些菌丝体微量元素含量高于子实体。金针菇的发酵菌丝体与栽培子实体相比, 主要营养达到或超过子实体, 并且锌含量较高<sup>[4]</sup>。菌丝体发酵生产的多糖与子实体产生的多糖之间并未存在显著差异, 而且有些情况, 菌丝体的多糖要比子实体多糖质量要好<sup>[5]</sup>。液体深层发酵受种龄、接种时间、接种量、培养基的组成成分、培养温度、通风、pH、以及搅拌等因素影响。

### 2.1 菌种的选育

育种主要是寻找并对现有的菌种进行改造, 使其更符合工业生产, 能取得良好的经济效益。采取的方法有传统的诱变、原生质体融合以及基因工程, 主要是改变食用菌的营养价值、风味、颜色等。李刚等<sup>[6]</sup>对灵芝原生质体进行紫外诱变, 得到 2 株多糖含量明显高于原始菌株的诱变株。为获得高产灵芝多糖或三萜菌种通常采用菌种选育, 在特定培养基筛选菌株。杨焱<sup>[7]</sup>和余素萍等<sup>[8]</sup>分别在灵芝菌种内筛出多糖和三萜高产菌 G2 和 GL31。

### 2.2 外源物质添加对食用菌发酵的影响

目前深层发酵研究主要集中在培养基和培养条件的优化上, 包括碳源、无机盐、氮源、温度、pH、转速<sup>[9,10]</sup>等。研究表明, 向食用菌发酵液中添加外源物如中药、薏苡仁、玉米油<sup>[11,12]</sup>等, 能有效提高食药菌的代谢产物的产量, 还能合成新的代谢产物。

#### 2.2.1 中药对食用菌深层发酵的影响

食用菌依靠自身的强大酶系对中药中的纤维素、蛋白质、脂类以及淀粉等营养物质进行利用, 能有效促进真菌生长和代谢, 得到丰富的代谢产物。另外, 食用菌还能对中药中的生物碱、皂苷类等进行生物转化, 消除毒副作用, 还能形成新的代谢产物<sup>[13]</sup>。侯晓梅等<sup>[14]</sup>使用 187.5 g/L 浓度的薏苡仁水提取物促进灰树花生长, 生物量提高 1.24 倍, 胞外多糖产量提高 2.78 倍。其机制可能是改变灰树花的细胞壁的结构, 增加透性有利于营养物质的摄取和代谢产

物的排出。向冬虫夏草液体发酵中添加陈皮水提取物, 能有效提高胞外多糖的抗氧化性和抗补体活性, 抗氧化性由 142.8 ~ 219.5 mg/100 g 提高到 284.3 ~ 384.6 mg/100 g, 抗补体活性由 48.2% ~ 68.7% 提高到 58.0% ~ 80.8%<sup>[15]</sup>, 可以看出中药能够影响发酵产物的生物活性。

#### 2.2.2 信号分子对食用菌深层发酵的影响

信号分子能激活特定代谢途径来提高产物产量。信号分子通常包括短肽、气体分子、激素、真菌激子以及一些金属离子, 在食用菌生长发酵过程中起到重要作用。Ren<sup>[16]</sup>等将茉莉酸甲酯添加到灵芝发酵液中诱导灵芝酸的合成, 得到的菌丝体中灵芝酸的产量为 4.52 mg/100 mg, 比对照提高 45.3%。王松华等<sup>[17]</sup>用硝普钠作为外源一氧化氮供体, 添加到灵芝发酵液中进行发酵, 0.5 mmol/L 的硝普钠能促进菌丝体生长、胞外多糖以及胞内多糖的合成, 比未加入硝普钠的发酵液中, 分别提高 1.19 倍、2.58 倍和 1.55 倍。Fan 等<sup>[18]</sup>将 FeSO<sub>4</sub> 作为蛹虫草中虫草素的诱导剂, 虫草素产量达 596.59±85.5 mg/L, 提高了 70%。研究表明 Fe<sup>2+</sup>对虫草素合成起到促进作用, 主要是能对嘌呤核苷类物质的代谢途径中由 IMP 合成 AMP 关键酶的 *purA* 基因进行正调控实现的。

#### 2.2.3 生长因子对食用菌深层发酵的影响

生长因子是微生物生长必不可少的有机化合物, 包括氨基酸、维生素和代谢产物等, 用于酶的辅基或辅酶参与细胞的新陈代谢, 对真菌的生长、代谢物的合成和分泌有着十分重要的作用。VB<sub>1</sub> 和 VB<sub>2</sub> 对桑黄菌丝体发酵生长有着不同的促进作用, 并具有协同作用。在 PD 培养基中分别添加 0.3 g/L 的 VB<sub>1</sub> 和 VB<sub>2</sub> 进行发酵, 菌丝体的产量提高, 且多糖的产量也提高了<sup>[19]</sup>。Chien 等<sup>[20]</sup>认为牛樟芝菌丝体的挥发性物质是 4-乙酰基安卓奎诺尔 B 合成前体。从牛樟芝挥发性物质提取出 2,4,5-三甲氧基苯甲醛和橙花叔醇作为添加剂添加到牛樟芝发酵液中, 结果显示这两种化合物均能提高 4-乙酰基安卓奎诺尔 B 的产量。当橙花叔醇的浓度为 1 g/L 时会产生反馈抑制, 能抑制 4-乙酰基安卓奎诺尔 B 的合成。同时研究还发现这 2 种化合物能增强 4-乙酰基安卓奎诺尔 B 的抗癌活性, 其中, 2,4,5-三甲氧基苯甲醛更为显著。

#### 2.2.4 油脂类物质对食用菌深层发酵的影响

一些油脂类物质不仅可作为消泡剂<sup>[21]</sup>, 还可对菌丝体生长代谢产生积极的影响, 因此人们开始尝试使用油脂类物质作为诱导剂来促进食用菌特定活性成分的合成<sup>[22,23]</sup>。研究发现植物油、脂肪酸等油脂类物质对菌丝体生长和代谢有着重要影响, 能改变细胞膜结构、通透性或影响代谢途径中关键酶的活性。Yang<sup>[24]</sup>等研究薏苡仁油对灵芝菌丝体发酵的影响, 结果显示添加 2% 的薏苡仁油能使灵芝生物量达到 10.71 g/L(提高 3.34 倍), 三萜含量达到 92.94 mg/L(提高 2.76 倍)。胞内外多糖则分别提高 2.2 倍和 2.23 倍。Zhang 等<sup>[25]</sup>将浓度为 3.0 g/L 的吐温-80 添加到虎

奶菇发酵液中, 发现虎奶菇的生物量和胞外多糖的产量比对照组分别提高 51.3% 和 41.8%。吐温-80 能影响菌丝体新陈代谢的机制, 并且可能还与菌丝体细胞膜完整结构和跨膜运输有着一定关系<sup>[26]</sup>。

### 2.3 食用菌发酵罐及发酵动力学的应用

由于食用菌深层发酵是在抗生素发酵技术的基础上发展起来的, 因此反应器多采用通用型机械搅拌式反应器。但在液体环境下食用菌的形态多为丝状体, 在通用型机械搅拌式反应器内的培养过程中, 搅拌桨的高剪切力会使菌丝体断裂, 从而造成菌丝体形态破坏, 对生长和代谢活力产生不利影响, 时常伴有菌丝结块和黏壁等问题。所以现在用于菌丝体发酵的反应器多为气升式生物反应器, 这种反应器有较多优势, 能耗低, 结构简单, 由于驱动杆的省去, 使发酵罐的结构复杂性以及污染风险大大降低, 同时有利于代谢产物的生产。现在还研制出鼓泡式反应器, 这种反应器进行测试获得很好的效果<sup>[27,28]</sup>。根据发酵动力学研究, 深入研究菌丝体生长、产物的形成以及基质消耗动态规律, 对发酵工艺的探究、反应操作的规范化和优化具有重要意义, 为小罐实验数据放大以及从分批发酵过渡到补料发酵提供理论依据, 为反应器的优化以及控制服务。由于液体发酵过程代谢复杂, 很难直接建立模型, 一般结合实验数据建立模型。利用动力方程分析发酵特点, 选定合适方程测定生物量、限定基质的浓度以及产物浓度随时间变化关系, 用实验数据进行拟合求出参数, 对实验值和模拟值进行校验。李平作等<sup>[29]</sup>对灵芝胞外多糖的分批发酵建立非结构动力学模型, 灵芝胞外多糖分批发酵是属于菌体生长与产物生成部分偶联型, 选用的是 Monod 模型, 以此作为灵芝菌球生长速率模型, 同时也将菌体自溶考虑在内。龚建华等<sup>[30]</sup>进行碳源限制生长连续培养, 根据生物量、限制生长底物和菌体生成率的三者关系在  $0.01\sim 0.22\text{ h}^{-1}$  稀释率范围内可以分析出菌丝体生长符合 Contois 方程。根据多因素对菌丝体发酵的影响, 从诸多因素中找出有利于生成目的产物的最优化的影响因子。借助数理统计等方法设计实验, 找出关键的影响因子和水平, 确定最优组合。

## 3 食用菌深层发酵的应用

随着发酵技术的逐步成熟, 发酵产品也趋于多样化, 这些产品广泛应用于医药、保健品和饲料行业, 也是重要的农药添加剂和工业原料。

### 3.1 食用菌深层发酵在医药行业的应用

食用菌深层发酵产物已被广泛用作辅助药物, 并且发酵物含有大量氨基酸, 对高血压、冠心病、糖尿病等疗效也较为显著<sup>[31]</sup>。大型食用菌包括香菇、巴西蘑菇、灵芝等经深层发酵后, 得到发酵的提取物具有很高的抗癌和提高机体免疫能力。冬虫夏草的发酵产物经水提和醇提所得

到的物质对不同肿瘤细胞具有明显的毒性<sup>[32]</sup>。灵芝、姬松茸发酵提取物对 S180/U14 腹水型荷瘤和 k562 具有明显的抑制作用<sup>[33,34]</sup>。巴西蘑菇发酵产生的菌丝体使用 85% 的乙醇进行提取, 得到的物质具有较强的抑制瘤细胞活性<sup>[35]</sup>。香菇多糖、冬虫夏草的醇提物和裂褶菌多糖等均能激活 NK 细胞, 其中, 冬虫夏草的醇提物增强小鼠体内 NK 细胞的活性, 同时提高正常人以及白血病人外周血 NK 细胞活性<sup>[36]</sup>。市场上销售的药品灵芝菌片、宁心宝胶囊、蜜环片等均是来自食用菌的深层发酵的提取物。

### 3.2 食用菌深层发酵在食品保健行业的应用

食用菌的营养价值很高, 其主要含有的多糖、多肽等生物活性物质的研究也备受关注。在研究基础上开发出来的保健品也深受人们的喜爱。冬虫夏草是传统药用真菌, 野生虫草由于生长条件限制和人们的过度采集造成资源枯竭, 人工发酵获得菌丝体, 其药用价值成分可以和野生虫草相媲美。其发酵产物多糖具有调节心律失常的功效, 对神经系统也具有良好的调节作用<sup>[37]</sup>, 已经广泛用于保健品的生产。猴头菇经液体深层发酵获得的多糖能够增加胃液分泌, 稀释胃酸, 保护溃疡面, 防止胃溃疡的面积增大<sup>[38]</sup>。茯苓经液体发酵提取的多糖具有抗衰老、抗肿瘤、护肝解毒等功效<sup>[39]</sup>。

### 3.3 食用菌深层发酵在生产抑菌活性物质中的应用

研究发现发酵液具有很强抑菌活性。利用液体深层发酵获得食用菌发酵液, 经过处理可以得到具有抗菌、抗病毒的生物活性物质, 可用于开发食品防腐剂和植物抑菌剂。灵芝<sup>[40]</sup>、红菇<sup>[41]</sup>、鸡腿菇<sup>[42,43]</sup>、榆耳<sup>[44]</sup>等液体深层发酵的发酵液具有较好的抑菌作用。张秋胜等<sup>[45]</sup>研究 10 种真菌抑菌效果, 发现其中雷丸、紫芝与金针菇等发酵液对革兰氏阴性菌具有较好的抑制效果; 紫芝和茶树菇发酵液对革兰氏阳性菌具有较强的抑制效果。赤芝抑菌效果较低, 北虫草抑菌效果不明显。香菇 C91-3 菌深层发酵液对伤寒沙门菌、大肠埃希氏菌、痢疾志贺菌等革兰氏阴性菌表现出较好的抑制效果<sup>[46]</sup>。曾志恒等发酵凤尾菇, 使用乙酸乙酯萃取发酵液, 得到的物质对金黄色葡萄球菌有较明显的抑制效果, 超过部分食品防腐剂<sup>[47]</sup>。计红芳等使用正丁醇提取绒白乳菇发酵液, 所获得的提取物对金黄色葡萄球菌、大肠杆菌、枯草芽孢杆菌以及杨树叶枯病菌具有较强的抑制作用<sup>[48]</sup>。

### 3.4 食用菌深层发酵在饲料生产中的应用

传统的动物饲料多为秸秆、米糠等, 这些物质纤维素含量较高, 蛋白质含量较低。不利于动物的消化吸收, 制约纤维饲料在生产中的应用。利用食用菌发酵液对秸秆等纤维作物进行处理, 发现木质素降解率高达 59%~89%, 并且粗蛋白含量增加了 24.6%~72.4%, 极大提高秸秆的营养价值<sup>[49]</sup>。这是由于食用菌在发酵过程中分泌一些生物活性

物质包括抗生素、微量元素、有机酸、醇等,既丰富了营养又提高了饲料口感,增强动物的抗病能力。研究表明利用白腐菌对麦秸进行发酵,粗蛋白含量提高,麦秸的消化率可提高 2~3 倍。将白腐菌发酵稻草,发酵后稻草木质素含量降低 13.7%~29.9%,蛋白质的含量增加 24.6%~72.4%<sup>[50-52]</sup>。

#### 4 展 望

食用菌市场越来越大,食用菌需求量也是迅速增加。深层发酵技术日趋成熟,菌丝体的培养、发酵以及提取等方面趋于规模化,已经广泛应用于工业生产,并取得可观的经济效益,具有十分广阔的前景。但是,食用菌发酵提取开发出的新产品包括食品防腐剂、抑菌生物活性物质等仅存在于实验室阶段,还未通过大量测试以及工业生产,在技术层面仍需不断研究。现代生物学技术的高速发展,微生物学、发酵工艺学以及工程学等多学科进行交叉渗透,将促进食用菌发酵技术更加完善。

#### 参考文献

- [1] 孟翔鹏,马琳. 食药真菌的研究进展及其应用前景展望[J]. 中国现代中药, 2009, 11(10): 7-9 .  
Meng XP, Ma L. Research progress outlook and application prospect of edible and medicinal fungi [J]. Mod Chin Med, 2009, 11(10): 7-9 .
- [2] Humfeld H. The production of mushroom mycelium (*Agaricus carapestris*) in submerged culture [J]. Science, 1948 (107): 373.
- [3] 杨新美. 食用菌研究法[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998 .  
Yang XM. Mushroom research method [M]. Beijing: China Agriculture Press, 1998.
- [4] 宋士良,杨瑞长,高君辉. 金针菇 FV8812 发酵菌丝体成分分析[J]. 食用菌, 1992, (3): 12 .  
Song SL, Yang RC, Gao JH. Analysis of the body composition of *Flammulina velutipes* mycelia of FV8812 [J]. Edible Fungi, 1992, (3): 12.
- [5] 刘祖同,罗信昌. 食用菌生物技术及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002 .  
Liu ZT, Luo XC. Biotechnology and application of mushroom [M]. Beijing: Tsinghua University Press. 2002.
- [6] 李刚,杨凡,李瑞雪,等. 原生质体紫外诱变选育灵芝新菌种的研究[J]. 微生物学报, 2001, A1(2): 229-233.  
Li G, Yang F, Li RX, et al. A study on the breeding of new *Ganoderma* varieties by UV induced mutagenesis [J]. Acta Microbiol Sin, 2001, A1(2): 229-233.
- [7] 杨焱,刘艳芳,张劲松. 赤芝 G2 深层发酵优化模式的研究[J]. 食用菌学报, 2004, (03): 43-49.  
Yang Y, Liu YF, Zhang JS. An investigation on the optimal submerged-culture mode of *Ganoderma lucidum* G2 [J]. Acta Edulis Fungi, 2004, (03): 43-49.
- [8] 余素萍,张劲松,唐庆九. 不同发酵阶段的灵芝菌丝三萜类成分与抗肿瘤作用的相关性研究[J]. 菌物学报, 2004, (4): 548-554.  
Yu SP, Zhang JS, Tang QJ. Study on the relationship between the three components of *Ganoderma lucidum* mycelium and anti tumor effect in different fermentation stages [J]. Mycosystema, 2004, (4): 548-554.
- [9] Wu ZW, Lu JW, Wang XQ, et al. Optimization for production of exopolysaccharides with antitumor activity in vitro from *Paecilomyces hepiali* [J]. Carbohydr Polym, 2014, 99: 226-234 .
- [10] Tang JP, Liu YT, Zhu L. Optimization of fermentation conditions and purification of cordycepin from *Cordyceps militaris* [J]. Prep Biochem Biotech, 2014, 44(1): 90-106 .
- [11] 李羿,李晨,游元元,等. 以蕈苡仁为基质的茯苓发酵罐补料液体发酵[J]. 药物生物技术, 2011, 18(5): 407-410 .  
Li Y, Li C, You YY, et al. In Yiyiren matrix of *Poria* feeding liquid fermentation fermenter [J]. Pharm Biotechnol, 2011, 18(5): 407-410 .
- [12] Huang HC, Chen CI, Hung CN, et al. Experimental analysis of the oil addition effect on mycelia and polysaccharide productions in *Ganoderma lucidum* submerged culture [J]. Bioproc Biosyst Eng. 2009, 32(2): 217-224 .
- [13] 崔月花,杨艳彬,章克昌. 几种中药对灵芝发酵影响的研究[J]. 食用菌学报, 2008, 15(1): 55-61 .  
Cui YH, Yang YB, Zhang KC. Chinese herbal medicine research on the impact of *Ganoderma lucidum* [J]. Acta Edulis Fungi, 2008, 15(1): 55-61 .
- [14] 侯晓梅,陈敏青,张慧蕾,等. 中草药提取物对灰树花深层发酵的影响[J]. 食品科技, 2013, 38(9): 185-188.  
Hou XM, Chen MQ, Zhang HL, et al. Effects of extracts from Chinese medicines on the submerged fermentation of *Grifola frondosa* [J]. Food Sci Technol, 2013, 38(9): 185-188.
- [15] Choi JW, Ra KS, Kim SY, et al. Enhancement of anti-complementary and radical scavenging activities in the submerged culture of *Cordyceps sinensis* by addition of citrus peel [J]. Bioresource Technol, 2010, 101(15): 6028-6034 .
- [16] Ren A, Qin L, Shi L, et al. Methyl jasmonate induces ganoderic acid biosynthesis in the basidiomycetous fungus *Ganoderma lucidum* [J]. Bioresource Technol, 2010, 101(17): 6785-6790 .
- [17] 王松华,张强,李正鹏,等. 一氧化氮对灵芝多糖产量的影响[J]. 安徽科技学院学报, 2013, 27(3): 25-28.  
Wang SH, Zhang Q, Li ZP, et al. Effect of nitric oxide on the production of extracellular polysaccharide and intracellular polysaccharide of *Ganoderma lucidum* [J]. J Anhui Sci Technol Univ, 2013, 27(3): 25-28.
- [18] Fan DD, Wang W, Zhong JJ. Enhancement of cordycepin production in submerged cultures of *Cordyceps militaris* by addition of ferrous sulfate [J]. Biochem Eng J, 2012, 60(15): 30-35 .
- [19] 丁兴红,温成平,丁志山,等. 桑黄液体发酵生产多糖工艺研究[J]. 中草药, 2012, 43(5): 906-909 .  
Ding XH, Wen CP, Ding ZS et al. Liquid fermentation of *Phellinus igniarius* for production of polysaccharide [J]. Chin Tradit Herb Drug, 2012, 43(5): 906-909 .
- [20] Chien CC, Huang TN, Lin YW, et al. Enhancement of 4-Acetylanthroquinol B production by supplementation of its precursor during submerged fermentation of *Antrodia cinnamomea* [J]. J Agric Food Chem, 2013, 61(38): 9160-9165 .
- [21] Park JP, Kim SW, Hwang HJ, et al. Stimulatory effect of plant oils and fatty acids on the exopolysaccharide production in *Cordyceps militaris* [J]. Enzyme Microbiol Tech, 2002, 31(3): 250-255.
- [22] Hsieh C, Wang HL, Chen CC, et al. Effect of plant oil and surfactant on the production of mycelial biomass and polysaccharides in submerged culture of *Grifola frondosa* [J]. Biochem Eng J, 2008, 38(2): 198-205.

- [23] Cui JD, Zhang YN. Evaluation of metallons and surfactants effect on cell growth and exopolysaccharide production in two-stage submerged culture of *Cordyceps militaris* [J]. Appl Biochem Biotech, 2012, 168(6): 1394-1404.
- [24] Yang HL, Min WH, Bi PY, et al. Stimulatory effects of Coix lacryma-jobi oil on the mycelial growth and metabolites biosynthesis by the submerged culture of *Ganoderma lucidum* [J]. Biochem Eng J, 2013, 76: 77-82.
- [25] Zhang BB, Cheng PCK. Use of stimulatory agents to enhance the production of bioactive exopolysaccharide from *Pleurotuber-regium* by submerged fermentation [J]. J Agric Food Chem, 2011, 59(4): 1210-1216.
- [26] Zhang BB, Cheung PCK. A mechanistic study of the enhancing effect of Tween 80 on the mycelial growth and exopolysaccharide production by *Pleurotus tuber-regium* [J]. Bioresource Technol, 2011, 102(17): 8323-8326.
- [27] Mikio K, Yuki N, Miho A, et al. Submerged culture of agaricus blazei mycelium in a bubble column fermentor [J]. J Chem Eng Jpn, 2004, 37(8): 1056-1061.
- [28] 汪维云, 朱金华. 香菇菌丝体在气升式生物反应器中的培养条件研究 [J]. 中国食用菌, 1999, 18(2): 11-13.
- Wang WY, Zhu JH. Study on the culture conditions of *Mushroom* mycelium in the air lift bioreactor [J]. Edible Fungi China, 1999, 18(2): 11-13.
- [29] 李平作, 章克昌. 灵芝胞外多糖分批发酵非结构动力学模型 [J]. 生物技术, 1999, 9(3): 24-26, 34.
- Li PZ, Zhang KC. Unstructured kinetic models of exopolysaccharides production by batch fermentation of *Ganoderma lucidum* [J]. Biotechnology, 1999, 9(3): 24-26, 34.
- [30] 龚建华, 土义军. 药用菌菌丝体液体培养的生长特征分析 [J]. 微生物学报, 2002, 42(1): 93-98.
- Gong JH, Tu YJ. The kinetic characteristics of mycelium growth of medicinal *mushroom ganoderma sinense* in liquid-submerged cultivation [J]. Acta Microbiol Sin, 2002, 42(1): 93-98.
- [31] 高虹, 谷文英, 丁霄霖. 巴西蘑菇发酵菌丝体醇提物的抑瘤活性 [J]. 食品与生物技术学报, 2006, 25(6): 54-57.
- Gao H, Gu WY, Ding XL. Studies on antitumor activity of ethanol extracts from liquid-cultured mycelium of *Agaricus brasiliensis* sp. [J]. J Food Sci Biotechnol, 2006, 25(6): 54-57.
- [32] 陆建明, 张锡凤. 食用菌液体菌种制备的研究进展 [J]. 中国食用菌, 2003, 22(6): 15-17.
- Lu JM, Zhang XF. Development on the study of production liquid strain in the *Edible Fungi* [J]. Edible Fungi China, 2003, 22(6): 15-17.
- [33] 张宗豪. 冬虫夏草在抗癌方面的研究进展 [J]. 安徽农学通报, 2009, 15(17): 33-34.
- Zhang ZH. Study on progress of *Awetoin* the aspects of anti cancer [J]. Anhui Agric Sci Bull, 2009, 15(17): 33-34.
- [34] 林志彬. 灵芝抗肿瘤活性和免疫调节作用的研究进展 [J]. 北京大学学报, 2002, 34(5): 493-498.
- Lin ZB. Progress of studies on the anti-tumor activity and immunomodulating effect of *Ganoderma* [J]. J Peking Univ, 2002, 34(5): 493-498.
- [35] 黄茂先. 对我国药用真菌的研究发展的浅见 [J]. 中国食用菌, 1991, 10(2): 33-37.
- Huang MX. Medicinal fungus research and development of China's opinion [J]. Edible Fungi China, 1991, 10(2): 33-37.
- [36] Takaku T, Kimura Y, Okuda H. Isolation of an antitumor compound from *Agaricus blazei murill* and its mechanism of action [J]. J Nutr, 2001, 131: 1409-1413.
- [37] 宋宇琪, 王蕾, 郭素萍. 冬虫夏草及其菌丝体的研究进展 [J]. 科技情报开发与经济, 2008, 18(29): 98-99, 102.
- Song YQ, Wang L, Guo SP. Development of study on *Cordyceps sinensis* and its mycelia [J]. Sci-Tech Inf Dev Econ, 2008, 18(29): 98-99, 102.
- [38] 李兴玉, 王非凡, 张星星, 等. 姬松茸多糖抗肿瘤的实验研究 [J]. 中国食用菌, 2004, 23(4): 42-44.
- Li XY, Wang FF, Zhang XX, et al. Experimental studies of *Agaricus blazei murill* polysaccharide antitumor [J]. Edible Fungi China, 2004, 23(4): 42-44.
- [39] 于宙, 钟洁, 吴克. 猴头多糖的提取和分析 [J]. 安徽农业科学, 1997, 25(1): 51-53.
- Yu Z, Zhong J, Wu K. Extraction and analysis of polysaccharides of *Hericium* [J]. J Anhui Agric Sci, 1997, 25(1): 51-53.
- [40] 房华, 廖金玲, 吴庆丽, 等. 茶树菌渣对番茄根结线虫病防治的初步研究 [J]. 莱阳农学院学报, 2004, 21(2): 182-184.
- Hua H, Liao JL, Wu QL, et al. A preliminary study *Chaxing* root knot nematode on tomato mushroom residue prevention [J]. J Laiyang Agric Coll, 2004, 21(2): 182-184.
- [41] 陈颖, 朱继红, 雷秀云, 等. 榆耳发酵液抑菌作用的探讨 [J]. 中国食用菌, 1990, (4): 5-7.
- Chen Y, Zhu JH, Lei XY, et al. The inhibitory effect of the fermentation broth of *Gloeostereum incarnatum* [J]. Edible Fungi China, 1990, (4): 5-7.
- [42] 陈旭健, 刘琴, 陈波. 红菇菌丝及其深层培养液的抑菌活性初步研究 [J]. 食品科学, 2008, 29(7): 260-262.
- Chen XJ, Liu Q, Chen B. Preliminary study of antimicrobial activities of *Russulavinosalindbl* mycelium and its submerged culture fermentation broth [J]. Food Sci, 2008, 29(7): 260-262.
- [43] 李蓉, 丁重阳, 章克昌. 液体深层发酵鸡腿蘑抑菌活性的研究 [J]. 食品研究与开发, 2007, 28(9): 56-60.
- Li R, Ding CY, Zhang KQ. Study on antimicrobial activity of *Coprinus comatus* of submerged fermentation [J]. Food Res Dev, 2007, 28(9): 56-60.
- [44] 马慕英. 灵芝抑菌作用的实验研究 [J]. 食品科学, 1993, (5): 57-60.
- Ma MY. A Study on the inhibition of microorganisms by the *Ganoderma karst* [J]. Food Sci, 1993, (5): 57-60.
- [45] 张秋胜, 徐丙莲, 刘林德, 等. 10 种真菌深层发酵液抑菌活性分析 [J]. 中国酿造, 2010, (9): 70-72.
- Zhang QS, Xu BL, Liu LD, et al. Antimicrobial activity of fermentation broths from 10 kinds of fungi [J]. China Brewing, 2010, (9): 70-72.
- [46] 宁安红, 曹婧, 黄敏, 等. 香菇 C91-3 菌发酵液的抑菌作用的初步探讨 [J]. 中国微生物学杂志, 2001, 13(1): 18-21.
- Ning AH, Cao J, Huang M, et al. The primary study of the bacteria inhibition with *Lentinus*-(91-3) fermentative liquid [J]. Chin J Microbiol, 2001, 13(1): 18-21.
- [47] 曾志恒, 郑怡, 刘艳如, 等. 凤尾菇深层发酵液抗细菌抗真菌活性的研究 [J]. 福建师范大学学报(自然科学版), 2010, 26(3): 72-77.
- Zeng ZH, Zheng Y, Liu YR, et al. Study on antibacterial and antifungal activities of liquid from submerged fermentation of *Pleurotus sajor-caju* [J]. J Fujian Norm Univ (Nat Sci Ed), 2010, 26(3): 72-77.

- [48] 计红方, 张令文, 王青, 等. 绒白乳菇发酵液提取物的抑菌活性及稳定性研究[J]. 哈尔滨商业大学学报(自然科学版), 2011, 27(4): 13-16 .  
Ji HF, Zhang LW, Wang Q, *et al.* Antimicrobial activity and stability of extraction from *Lactarius vellereus* fermenting liquor [J]. J Harbin Univ Commerce (Nat Sci Ed), 2011, 27(4): 13-16 .
- [49] 梁峙, 吕文斌, 张文林. 金针菇发酵液培养的富锌能力探讨[J]. 食用菌, 2001, (2): 7-9 .  
Liang Z, Lv WB, Zhang WL. *Mushroom* fermentation broth ability of zinc [J]. Edible Fungi, 2001, (2): 7-9 .
- [50] 胡建宏, 丁海荣, 王立强. 利用白腐真菌开发农作物秸秆饲料的研究[J]. 饲料工业, 2005, 26(11): 57-59.  
Hu JH, Ding HR, Wang LQ. Study on development crops straw feed by *White rot fungi* [J]. Feed Ind, 2005, 26(11): 57-59.
- [51] 韩建林, 王峰. 白腐真菌可提高秸秆利用率[J]. 中国饲料, 1996, (24): 28-29.  
Han JL, Wang F. *White rot fungi* can improve the utilization of straw [J]. China Feed, 1996, (24): 28-29.
- [52] 闽晓梅, 孟庆翔. 白腐真菌处理秸秆的研究[J]. 饲料研究, 2000, (9):

7-9 .

Min XM, Meng QX. Study straw *White rot fungi* [J]. Feed Res, 2000, (9): 7-9 .

(责任编辑: 白洪健)

### 作者简介



苏跃稳, 硕士, 主要研究方向为氨基酸代谢。

E-mail: suyw0820@126.com



王 健, 教授, 主要研究方向为代谢工程、代谢控制发酵。

E-mail: wangjian99@jlu.edu.cn