

金属离子对食用菌生长发育影响的研究进展

冯光志, 石慧, 郑居神, 石玉*

(武汉设计工程学院 食品与生物科技学院, 湖北 武汉 430205)

摘要:金属离子在食用菌生长发育过程中发挥着重要作用。适当浓度的金属离子对食用菌的生长发育有促进作用, 而金属离子的过度使用以及在食用菌自然生长过程中的过度富集, 又会造成食用菌的重金属污染。该文综述金属离子对食用菌菌丝生长、胞外酶分泌以及营养价值与功能活性成分的影响, 分析金属离子在食用菌子实体中的富集规律, 为在食用菌栽培过程中充分利用好金属离子提供参考依据。

关键词:食用菌; 金属离子; 生长发育; 胞外酶; 功能活性成分

Research Progress of Metal Ion on the Growth and Development of Edible Fungi

FENG Guang-zhi, SHI Hui, ZHENG Ju-shen, SHI Yu*

(College of Food and Biotechnology, Wuhan Institute of Design and Sciences, Wuhan 430205, Hubei, China)

Abstract: Metal ions played an important role in the growth and development of edible fungi. Appropriate concentration of metal ions could promote the growth and development of edible fungi. Excessive use of metal ions and excessive enrichment in the natural growth process of edible fungi would cause heavy metal pollution of edible fungi. In this paper, the effects of metal ions on mycelial growth, extracellular enzyme secretion, nutritional value and functional active ingredient of edible fungi were reviewed, the enrichment of metal ions in fruiting bodies of edible fungi was analyzed. In order to provide reference for making full use of metal ions in the cultivation process of edible fungi. So as to provide reference basis for making full use of metal ions in the process of edible fungi cultivation.

Key words: edible fungi; metal ions; growth and development; extracellular enzyme; functional active ingredient

引文格式:

冯光志, 石慧, 郑居神, 等. 金属离子对食用菌生长发育影响的研究进展[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(1): 193-198.

FENG Guangzhi, SHI Hui, ZHENG Jushen, et al. Research Progress of Metal Ion on the Growth and Development of Edible Fungi[J]. Food Research and Development, 2021, 42(1): 193-198.

食用菌味道鲜美, 具有很高的营养价值和药用价值, 深受广大消费者青睐^[1-2]。中国是世界上最早认识和利用食用菌的国家, 自改革开放以来, 食用菌产业发展突飞猛进, 已成为我国仅次于粮、油、蔬、果的第五

大产业, 在我国农村经济发展和农民增收中发挥着重要作用^[3-4]。

食用菌的生长发育和品质受到多种因素的影响, 诸如栽培基质的营养、温度、光照和湿度等。随着研究的不断深入, 许多科研工作者发现, 金属元素在食用菌生长发育过程中发挥着重要作用。金属元素显著影响着食用菌的菌丝生长、胞外酶的分泌以及营养价值与功能活性成分, 同时, 金属元素还会一定程度的在食用菌子实体中富集, 进而影响食用菌的品质。金属离子是一把双刃剑, 适当进行运用, 对提高食用菌产量、改善食用菌品质、开发新的食用菌产品、推动食用

基金项目: 湖北省教育厅优秀青年科技创新团队项目基金(T201534); 武汉设计工程学院博士科研专项(k201711); 国家级大学生科技创新项目(201814035007)

作者简介: 冯光志(1982—), 男(汉), 实验师, 硕士, 研究方向: 应用微生物。

* 通信作者: 石玉(1983—), 女(汉), 副教授, 博士, 研究方向: 环境资源微生物。

菌产业发展,都具有积极意义,但金属元素的过度使用以及在食用菌自然生长过程中的过度富集,又会造成食用菌的重金属污染,对人体健康产生潜在危害。

1 金属离子对食用菌菌丝生长的影响

食用菌的生长发育受到营养、温度、水分、光线、空气、酸碱度等诸多因素的影响,而金属离子对食用菌生长发育的影响近些年才引起人们的重视,目前,主要关注的金属元素有两类:一类是食用菌生长以及人体所必须的某些金属元素如:钾、钙、锌、硒、铁、碘等元素,也包括铜和锰,它们对于食用菌的生长发育具有一定的促进作用,另一类是对食用菌生长以及人体有害的元素,主要有铅、砷、镉、汞等,这些金属可能带来食用菌产品的质量安全问题。

关于食用菌生长的有益元素,科研工作者做了大量研究,希望能够促进食用菌菌丝生长,缩短食用菌的生长周期,提高食用菌的品质。文晴等^[5-6]以平菇为试材,研究了钾元素和钙元素不同添加量对平菇生长发育的影响,结果表明,随着钾元素和石膏添加量的增加,棉籽壳熟料栽培平菇菌丝长速和生物学效率均呈现先增加后降低的趋势,钾元素添加量为 1 250 mg/kg 时,平菇菌丝长势最好,石膏添加量为 3% 时,菌丝长速最快。杨慧等^[7]比较了铁离子对香菇、金针菇和刺芹侧耳菌丝体生长的影响,发现铁离子可促进或抑制香菇和金针菇的生长,当浓度超过 279.3 mg/kg 时抑制菌丝生长。孔维威等^[8]研究了铜对平菇菌丝生长的影响,结果表明,铜对平菇菌丝生长、原基诱导时间、产量的影响具有显著的浓度效应,铜质量浓度为 1 500 mg/kg 时,平菇菌丝生长速度最快,且原基比对照早 2 d 出现。申进文等^[9]研究了锰离子对糙皮侧耳菌丝生长和生物学效率的影响,发现马铃薯葡萄糖琼脂培养基(potato dextrose agar, PDA)中添加 30 mg/L 和 50 mg/L 的锰离子菌丝长势好、长速快。

近年来,随着生活水平的不断提高,人们对健康饮食越发重视,富硒、富锌食品逐渐受到人们的亲睐,开发富硒、富锌食用菌产品也提上了日程,科研工作者对锌、硒关于食用菌生长发育影响展开了大量研究^[10]。张城等^[11]研究了锌浓度对金针菇和香菇菌丝体生物量和甘露醇含量的影响,结果表明,在一定锌浓度范围内,锌对于食用菌的生长具有促进作用,甘露醇含量随着锌浓度的增加逐渐增加。杨淑云等^[12]对姬松茸富硒液体发酵条件进行了优化,表明姬松茸在最适富硒液体发酵条件下具有最高的生物量。张曦文等^[13]探究了富硒对蛹虫草菌丝干重及胞内酶活性的影响表明,

当硒添加量为 3 mg/kg 时,菌丝干重达 1.51 g/100 mL,较对照组高 19.84%,而过高的硒添加量又会抑制蛹虫草的生长。这些研究都为富锌、富硒食用菌产品的开发与生产提供了宝贵的依据。

关于食用菌生长的有害元素,主要考虑的还是威胁人体健康的一些重金属元素。熊晓斌等^[14]研究了不同质量浓度铅、砷、镉、汞对杏鲍菇和金针菇生长的影响及子实体重金属的富集情况表明,培养料添加重金属质量浓度小于 1 mg/kg 时,菌丝生长速度会变慢,但菌丝更洁白浓密,第一潮菇生物转化率更高,而当重金属质量浓度大于 1 mg/kg 时,会明显抑制菌丝的生长,且菌丝稀疏、长势差。由此可见,即使是极其有害的重金属元素在适当的浓度下,对食用菌生长也有一定的促进作用,关键是如何控制好重金属量的问题。当然,从食品安全的角度出发,这些重金属元素是非常有害的,这些有害元素在人体还具有一定的累积效应,对食品安全具有潜在威胁,应该尽量避免。

2 金属离子对食用菌胞外酶分泌的影响

食用菌在生长发育过程中会产生胞外酶,如漆酶、纤维素酶、木聚糖酶、蛋白酶、淀粉酶等,这些胞外酶可以分解培养料,使纤维素、蛋白质、核酸等天然高聚物裂解成食用菌菌丝和子实体便于吸收的小分子物质,为食用菌菌丝生长、原基形成、子实体生长发育提供营养物质^[15-17]。目前,关于胞外酶的研究主要集中于与木质素降解相关的木质素酶和与纤维素降解相关的水解酶类。

2.1 金属离子对漆酶分泌的影响

真菌漆酶属于诱导酶,漆酶活性的大小能够直接反映真菌对木质纤维素的降解能力^[18-19],通常情况下,食用菌产胞外漆酶量不会太大,但其产量受到诸多物质诱导而增加,主要包括以下几个方面:一是与木质素及其衍生物相关的芳香族或酚类化合物^[20-21];二是碳源或氮源的复杂程度、浓度及其比例^[22-23];三是 pH 值和温度^[24-26];四是一些金属离子及其浓度。金属离子由于其易于操作性,成为科研工作者研究的热点。

关于金属离子对漆酶活性的影响,目前研究较多的主要有铜、镉、铁和锰等,其中以铜对漆酶活性影响的研究最为广泛。杨雪薇等^[27]研究了铜离子对糙皮侧耳木质纤维素降解酶和形态发育的影响,发现添加铜离子能在一定程度上提高漆酶的活性,能够促进糙皮侧耳原基的分化和子实体的发育。肖冬来等^[28]测定了 6 种常见金属离子对香菇漆酶活性的影响发现,亚铁离子能明显抑制漆酶活性。祝嫦巍等^[29]分别添加不同

浓度的重金属离子(铜、铅、镉),考察菌体生长及培养基中漆酶活性的变化情况,表明在培养基中添加铜、铅、镉对平菇漆酶活性均有不同程度的增强作用。

2.2 金属离子对纤维素水解酶分泌的影响

食用菌生长过程中会分泌多种纤维素降解酶^[15],这些酶与食用菌的生长发育和培养料的降解息息相关^[17],食用菌胞外酶活性反映菌株对基质的降解能力,影响食用菌的生产周期^[30]。目前,已有一些学者对这些酶的变化规律展开了研究。安琪等^[22]和胡素娟等^[31]以棉籽壳和玉米芯等基质发酵料栽培平菇,发现不同基质配方不影响平菇胞外酶活性的变化趋势,但影响酶活性的高低。吴周斌等^[23]研究了不同培养料对真姬菇胞外酶活性的影响,发现不同培养料中真姬菇菌丝分泌的同种胞外酶,其活性在各生长发育阶段不同。

伴随着研究的不断深入,科研工作者们发现一些作为食用菌生长所必需的微量元素,影响着食用菌胞外酶的分泌,在食用菌生长发育过程中起着重要作用,研究较多的主要是硒和锌。张孔金等^[32]添加梯度浓度硒培养巴西蘑菇,研究菌丝胞外蛋白酶、淀粉酶、羧甲基纤维素酶、半纤维素酶、漆酶和愈创木酚氧化酶的活性变化,表明添加适当浓度的硒对巴西蘑菇菌丝这6种胞外酶的活性均有促进作用。赵金凤等^[33]采用含梯度浓度亚硒酸钠的液体培养基培养茶树菇,研究了菌丝胞外木质素酶、羧甲基纤维素酶、淀粉酶、果胶酶、超氧化物歧化酶和过氧化物酶的活性变化,表明添加适宜浓度的硒对茶树菇胞外酶活性均有促进作用。胡传琪等^[34]对富锌栽培滑菇的纤维素酶活力进行了测定,研究滑菇纤维素酶和漆酶的变化规律,发现富锌栽培使生物转化率提高了14.25%,在菌丝生长时期富锌栽培滑菇的纤维素酶活均高于纯木屑基料栽培的酶活,其中滤纸酶活提高28.57%,羧甲基纤维素酶活提高84.68%,半纤维素酶活提高17.70%, β -葡萄糖苷酶活力提高60.00%。冯光志等^[35]通过在袋料培养基中添加不同浓度的锌,考察菌体生长及培养基中纤维素酶、木聚糖酶、滤纸酶、淀粉酶的活性变化,发现在一定锌浓度范围内,锌对于食用菌的生长具有促进作用,600 mg/kg 锌能有效促进平菇胞外酶的分泌。

硒、锌是人体必需微量元素,富硒、富锌食用菌已成为人们迫切需求的保健美食^[36],富硒、富锌食用菌的栽培也已经提上日程。研究富硒、富锌栽培平菇的胞外酶变化规律,了解平菇对木质纤维素的降解机制,有望提高平菇的品质和产量,缩短平菇的生长周期,开发新的食用菌产品。

3 金属离子对食用菌营养价值与功能活性成分的影响

食用菌由于其特有的营养价值和保健功能,日益受到消费者的青睐。食用菌类食品集营养性、功能性、美味性、安全性于一身,被营养学家推荐为十大健康食品之一^[37-39]。

3.1 金属离子对食用菌营养价值的影响

目前,我国菌物1.6万种,其中食用菌近1000种,广泛食用的有200种左右^[4]。我国是食用菌生产大国,食用菌产量从1990年占全球总产量的28.8%上升到目前的70%以上,食用菌产业也成为继粮、油、蔬、果后的第五大产业。

食用菌不仅味道鲜美、营养丰富,而且还含有较高的镁、钙、锰、铁、铜、锌等多种人体所需的矿物质元素,是名副其实的健康食品^[40-41]。陈万超等^[42]对浙江庆元产地的7种干香菇(花菇、冬菇、金钱菇、香信、黑面菇、厚菇和椴木花菇)进行主要营养成分、可溶性糖和滋味分析,表明总糖、粗纤维和灰分3种主要营养成分含量均较高且粗脂肪含量较低,是很好的营养健康食品。刘仙金等^[43]测定了香菇、银耳、黑木耳、茶树菇、杏鲍菇、猴头菇、平菇、竹荪、金针菇、滑子菇、草菇、鸡腿菇、姬松茸、黄金菇等14种食用菌中的镁、钙、锰、铁、钴、铜、锌、硒、锶、钼等矿物质元素含量,结果显示,镁、钙等人体必需常量矿物质元素和锰、铁、钴、铜、锌、硒、锶、钼等有益微量元素,在各菌种中所含的量及其所占比例不尽相同。

金属离子对食用菌营养和品质具有一定的影响,一些科研工作者也做了很多研究。纪彩虹等^[44]探究了二价矿物离子对红平菇液体发酵粗多糖的影响,表明在4种金属离子(镁、钙、锌、铜)的最佳组合条件下,红平菇液体发酵具有最大的菌丝多糖含量。刘文玲等^[45]对不同硒浓度下培养的富硒香菇蛋白质营养价值进行了评价,发现在硒浓度为60 mg/kg时,富硒香菇中必需氨基酸含量、化学评分、必需氨基酸指数、生物价、营养指数分别比未富硒组提高了5.49%、1.78%、4.59%、5.41%和6.51%,说明富硒栽培可提高香菇子实体的蛋白质营养价值。

3.2 金属离子对食用菌功能活性成分的影响

食用菌营养丰富,且富含多糖类、多肽氨基酸类、矿物质、维生素、核苷酸、三萜类和麦角甾醇等多种营养和功能成分,具有增强机体免疫力、抗病毒、抗肿瘤、抗衰老、降脂降压、降胆固醇、保肝健胃、护肝利胆、保护心血管系统等功效^[46-48]。

兰天康等^[49]对花菇、平菇、香菇、木耳、银耳这5种食用菌的硒含量、蛋白质含量、碳水化合物含量进行

了分析,发现香菇、平菇中的蛋白质和硒含量有较高的相关性,木耳、银耳中多糖与硒含量有较高的相关性。黄玲玲等^[50]为提高羊肚菌多糖的抗氧化活性,外源加入硒、锌微量元素,测定羊肚菌多糖的抗氧化活性,结果表明,硒、锌的添加使羊肚菌多糖对超氧阴离子自由基($O_2\cdot^-$)的清除率提高了50%,对羟自由基($\cdot OH$)的清除率提高了20%。杨奇等^[51]研究了富硒食用菌硒蛋白对 $\cdot OH$ 和 $O_2\cdot^-$ 的清除和抑制作用,结果显示,在不同硒浓度下,富硒食用菌蛋白对 $O_2\cdot^-$ 的清除率均高于普通食用菌蛋白以及无机硒,硒与食用菌蛋白之间在清除自由基方面存在协同作用。研究金属离子对食用菌功能活性成分的影响,对于开发食用菌功能保健食品具有十分重要的意义。

4 金属离子在食用菌子实体中的富集规律

4.1 食用菌对金属离子的富集作用

近年来,随着人们对食用菌研究的深入,发现食用菌本身具有吸收和富集金属元素的生物学特性^[36, 52-54]。食用菌对金属元素的富集存在着利弊,一方面对有益微量元素的富集,可以促进食用菌生长,增加食用菌营养价值与功能活性成分,另一方面食用菌对重金属的富集,又会造成食用菌的重金属污染。因此,在充分利用食用菌富集有益于人体健康物质特性的同时,也要规避其对重金属富集作用而产生的健康风险。

4.2 金属离子在食用菌子实体中的富集规律

食用菌对于有益元素的富集,目前研究较多的主要是对食用菌生长具有促进作用的钾、钙、镁、铁、铜、锰等元素以及能够提高食用菌营养品质的锌、硒等元素。孔维威等研究了不同质量浓度铜对平菇子实体铜含量的影响,发现子实体菌柄和菌盖中铜含量随着培养料中铜质量浓度(0~3 000 mg/kg)的升高而增加。刘文玲等^[45]考察了硒在香菇子实体中的分布规律,表明随着添加外源硒浓度的增加,香菇子实体的硒浓度有显著的提高,当添加亚硒酸钠浓度为100 mg/kg时栽培出的香菇硒浓度可以达到225.13 mg/kg。冯光志等^[35]通过富锌栽培平菇,研究锌在平菇子实体中的分布,发现平菇子实体菌柄和菌盖中锌含量随着培养料中锌质量浓度(0~900 mg/kg)的升高而增加,不同质量浓度锌影响着锌在平菇子实体菌柄和菌盖中的分布。

食用菌对于有害重金属元素的富集,目前研究较多的主要是对人体健康有重大威胁的铅、砷、镉、汞等元素^[55]。研究表明,食用菌具有富集重金属的生物学特性,且食用菌对重金属的富集根据食用菌菌种不同而异,同种食用菌对不同重金属的富集能力也有差别,

食用菌富集的重金属在食用菌子实体中的分布也有较大差异,因此,各地食用菌的主要重金属污染元素也不尽相同。

铅、砷、镉、汞是食用菌重金属污染物中常见的4种重金属,也是对人体威胁最大的4种重金属元素。就一般规律而言,草腐菌富集重金属的能力比木腐菌强,但两大类食用菌品种对于不同重金属元素的吸收与累积能力又有较大差别^[56]。Michelot D研究发现,草腐菌对铜、镉、银有明显的亲和性,而在森林地带生长的木腐菌则铬、镁、硒、铅有较强的富集能力^[57]。杨小红等^[58]对3个品种平菇分别添加不同浓度铅、汞、砷、镉进行栽培试验,测定平菇子实体和栽培料中重金属含量,结果显示,3个平菇品种对4种重金属的吸收富集能力排序为镉>砷、汞>铅,进行综合分析后筛选出P-8为3个品种中重金属低富集品种。刘烨潼等^[59]以天津自有品种平菇M2013-1作为试材,研究平菇对栽培基质中镉和铅的吸收富集规律,发现培养料中重金属含量不随环境而改变,在栽培过程中重金属元素发生了迁移或生物转化,平菇子实体对栽培基质中重金属的吸收富集系数:镉为0.28~2.13,铅为0.023~0.171,富集能力铬>铅。另外,不同食用菌对同一种重金属的富集能力也有较大差别,如不同食用菌菌种富集铅元素而言,5种食用菌菌丝体对铅元素的富集能力依次为:双孢蘑菇>木耳>糙皮侧耳>香菇>金针菇^[60]。

我国是食用菌生产大国,食用菌年产量居世界第一,栽培品种也是世界上最多的国家^[61]。推动食用菌产业的持续发展,不仅要追求食用菌产量和产值的增长,更要注重质量与效益的提升,食用菌产品的质量安全,尤其是食用菌的重金属污染务必引起重视,即是避免经济利益损失的需要,更是对保证人类健康安全的要求。因此,一方面要充分利用食用菌富集有益于人体健康的多种金属元素和矿物质,另一方面,又要规避其对有害重金属富集作用而产生的健康风险。

5 展望

伴随食用菌产业飞速发展,食用菌相关的科学研究也成为自然科学研究的热点。金属离子在食用菌生长发育过程中发挥着重要作用,金属离子对食用菌菌丝生长、胞外酶分泌、营养物质和功能活性成分都有显著影响,而在食用菌生产过程中,金属离子的控制也相对简单。在食用菌的培育过程中添加适量的有益元素,有利于提高食用菌多糖等生物活性物质的产量,增加食用菌的营养价值和药用价值。研究并控制好金属离子在食用菌生产过程中的调节作用,对促进

食用菌生长,缩短食用菌生产周期,提高食用菌品质,开发新型食用菌产品,都具有非常积极的意义。

参考文献:

- [1] Singdevsachan SK, Auroshree P, Mishra J, et al. Mushroom polysaccharides as potential prebiotics with their antitumor and immunomodulating properties: A review[J]. *Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre*, 2016, 7: 1–14.
- [2] Radzki W, Ziaja-Sołtys M, Nowak J, et al. Effect of processing on the content and biological activity of polysaccharides from *Pleurotus ostreatus* mushroom[J]. *LWT—Food Science and Technology*, 2016, 66: 27–33.
- [3] 庄海宁,张劲松,冯涛,等.我国食用菌保健食品的发展现状与政策建议[J]. *食用菌学报*, 2015, 22(3): 85–91.
- [4] 张金霞,陈强,黄晨阳,等.食用菌产业发展历史、现状与趋势[J]. *菌物学报*, 2015, 34(4): 524–540.
- [5] 文晴,刘秋梅,马浩佳,等.石膏添加量对平菇熟料栽培的影响[J]. *北方园艺*, 2017(16): 166–170.
- [6] 文晴,安运平,魏忠方,等.钾元素对平菇生长发育的影响[J]. *北方园艺*, 2018(17): 161–165.
- [7] 杨慧,张美彦,宋春艳,等.铁、锌、钙离子在三种食用菌菌丝体中的富集及其生长的影响[J]. *食用菌学报*, 2017, 24(2): 27–33.
- [8] 孔维威,卢娇娇,孔维丽,等.铜对平菇生长发育、品质和铜含量的影响[J]. *河南农业科学*, 2017, 46(2): 83–86.
- [9] 申进文,张倩,刘超,等.锰离子对糙皮侧耳菌丝生长和生物学效率的影响[J]. *食用菌学报*, 2015, 22(3): 30–33.
- [10] RG Nunes, LJ Da, RB Freitas, et al. Selenium Bioaccumulation in Shiitake Mushrooms: A Nutritional Alternative Source of this Element[J]. *Journal of Food Science*, 2012, 77(9): 983–986.
- [11] 张城,陈宏伟,朱蕴兰.锌、硒对二种食用菌菌丝体生物量和甘露醇含量的影响[J]. *北方园艺*, 2015(19): 132–136.
- [12] 杨淑云,陈如登,陈仁财,等.姬松茸富硒液体发酵条件优化及其菌丝营养成分分析[J]. *保鲜与加工*, 2017, 17(3): 103–106.
- [13] 张曦文,赵博,张国财,等.富硒对蛹虫草菌丝干重及胞内酶活性的影响[J]. *食品工业科技*, 2017, 38(14): 151–155.
- [14] 熊晓斌,吴芳,黄晓辉.四种重金属对食用菌菌丝生长及子实体富集量影响[J]. *食用菌*, 2018, 40(5): 18–20, 4.
- [15] Cardoso WS, Soares FEF, Queiroz PV, et al. Minimum cocktail of cellulolytic multi-enzyme complexes obtained from white rot fungi via solid-state fermentation[J]. *Biotech*, 2018, 8(1): 46.
- [16] Kunjadia PD, Sanghvi GV, Kunjadia AP, et al. Role of ligninolytic enzymes of white rot fungi (*Pleurotus spp.*) grown with azo dyes[J]. *Springer Plus*, 2016, 5(1): 1487.
- [17] Fernandez-Fueyo E, Ruiz-Duenas FJ, Lopez-Lucendo MF, et al. A secretomic view of woody and nonwoody lignocellulose degradation by *Pleurotus ostreatus*[J]. *Biotechnology for biofuels*, 2016, 9: 49.
- [18] Taniguchi M TD, Watanabe D, Sakai K, et al. Effect of steam explosion pretreatment on treatment with *Pleurotus ostreatus* for the enzymatic hydrolysis of rice straw[J]. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2010, 110: 449–452.
- [19] An Q WX, Han ML, Cui BK, et al. Sequential solid-state and submerged cultivation of the white rot fungus *Pleurotus ostreatus* on biomass and the activity of lignocellulolytic enzymes[J]. *Bioresources*, 2016, 11: 8791–8805.
- [20] 安琪,司静,戴玉成.不同诱导培养基对糙皮侧耳液体发酵产漆酶活性的影响[J]. *菌物学报*, 2018, 37(3): 361–370.
- [21] 韩美玲,杜娟,安琪,等.不同栽培基质对糙皮侧耳不同发酵方式下产漆酶活性的影响[J]. *菌物学报*, 2018, 37(8): 1100–1108.
- [22] 安琪,吴雪君,吴冰,等.不同碳源和氮源对金针菇降解木质纤维素酶活性的影响[J]. *菌物学报*, 2015, 34(4): 761–771.
- [23] 吴周斌,张健,王佳敏,等.不同培养料对真姬菇胞外酶活性的影响[J]. *北方园艺*, 2015(8): 145–149.
- [24] Janusz G CA, Fraç M, Rola B, et al. Laccase production and metabolic diversity among *Flammulina velutipes* strains [J]. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2015, 31: 121–133.
- [25] An Q, HML, Wu XJ, et al. Laccase production among medicinal mushrooms from the genus *Flammulina* (*Agaricomycetes*) under different treatments in submerged fermentation [J]. *International Journal of Medicinal Mushrooms*, 2016, 18(11): 1049–1059.
- [26] Hoa HT, Wang C-L. The Effects of Temperature and Nutritional Conditions on Mycelium Growth of Two Oyster Mushrooms (*Pleurotus ostreatus* and *Pleurotus cystidiosus*) [J]. *Mycobiology*, 2018, 43: 14–23.
- [27] 杨雪薇,张晓昱,龚青,等.铜离子调控木质纤维素降解和糙皮侧耳形态发育的研究[J]. *菌物学报*, 2015, 34(4): 647–652.
- [28] 肖冬来,张迪,林衍铨,等.金属离子对香菇纤维素酶、漆酶和木质素过氧化物酶活性的影响[J]. *中国食用菌*, 2018, 37(3): 56–58.
- [29] 祝嫦娥,鲍广稳,黄顺.平菇漆酶对不同重金属胁迫的响应[J]. *环境科学研究*, 2015, 28(10): 1631–1637.
- [30] Patel H, Gupte S, Gahlout M, et al. Purification and characterization of an extracellular laccase from solid-state culture of *Pleurotus ostreatus* HP-1[J]. *3 Biotech*, 2014, 4: 77–84.
- [31] 胡素娟,段亚魁,康源春,等.2种基质对平菇胞外酶活性、产量及品质的影响[J]. *河南农业科学*, 2018, 47(3): 96–99.
- [32] 张孔金,杨淑云,朱明贞.富硒巴西蘑菇菌丝胞外酶活性研究[J]. *福建热作科技*, 2012, 37(1): 1–4.
- [33] 赵金凤,刘朝贵.硒对茶树菇胞外酶活性的影响 [J]. *北方园艺*, 2018(15): 170–174.
- [34] 胡传琪,江洁,陈静慧,等.以秸秆为基料富锌栽培滑菇的纤维素酶和漆酶的变化规律[J]. *食品与发酵工业*, 2015, 41(4): 121–124.
- [35] 冯光志,刘晓敏,黎玉婷,等.富锌栽培平菇的胞外酶变化规律[J]. *食品研究与开发*, 2019, 49(17): 23–27.
- [36] Kabuyi MK, Kapepula PM, Kabengele JK, et al. Selenium Content and Antioxidant Potential of Some Edible Wild Mushrooms from Bandundu Area, DR Congo[J]. *Natural Resources*, 2017, 8(2): 103–113.
- [37] Jin Z, Li Y, Ren J, et al. Yield, Nutritional Content, and Antioxidant Activity of *Pleurotus ostreatus* on Corncoobs Supplemented with Herb Residues[J]. *Mycobiology*, 2018, 46: 24–32.
- [38] Kapahi M, Sachdeva S. Mycoremediation potential of *Pleurotus*

- species for heavy metals: a review[J]. *Bioresources and bioprocessing*, 2017, 4: 32.
- [39] Zhang Y, Venkitasamy C, Pan Z, et al. Recent developments on umami ingredients of edible mushrooms—A review[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2013, 33: 78–92.
- [40] Gursoy N, Sarikurkcu C, Cengiz M, et al. Antioxidant activities, metal contents, total phenolics and flavonoids of seven *Morchella* species[J]. *Food and Chemical Toxicology: an International Journal Published for the British Industrial Biological Research Association*, 2009, 47: 2381–2388.
- [41] Beluhan S, Ranogajec A. Chemical composition and non-volatile components of Croatian wild edible mushrooms[J]. *Food Chemistry*, 2011, 124: 1076–1082.
- [42] 陈万超, 杨焱, 于海龙, 等. 七种干香菇主要营养成分与可溶性糖对比及电子舌分析[J]. *食用菌学报*, 2015, 22(1): 61–67.
- [43] 刘仙金. 食用菌中矿物质元素含量的测定 [J]. *食药菌*, 2018, 26(5): 306–309.
- [44] 纪彩虹, 赵瑞华, 罗玲玲, 等. 4种二价矿物离子对红平菇液体发酵粗多糖的影响[J]. *天津农业科学*, 2017, 23(12): 9–12.
- [45] 刘文玲, 江洁, 解彬, 等. 富硒香菇硒分布和蛋白质营养价值的评估[J]. *食品与发酵工业*, 2019, 45(2): 105–110.
- [46] Meng X, Liang H, Luo L. Antitumor polysaccharides from mushrooms: a review on the structural characteristics, antitumor mechanisms and immunomodulating activities [J]. *Carbohydrate research*, 2016, 424: 30–41.
- [47] Zhou LB, Chen B. Bioactivities of water-soluble polysaccharides from *Jisongrong* mushroom: anti-breast carcinoma cell and antioxidant potential[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2011, 48: 1–4.
- [48] Sánchez J E, Jiménez Pérez G, Liedo P. Can consumption of antioxidant rich mushrooms extend longevity?: antioxidant activity of *Pleurotus spp.* and its effects on Mexican fruit flies' (*Anastrepha ludens*) longevity[J]. *Age*, 2015, 37(6): 107.
- [49] 兰天康, 顾浩峰, 王燕. 食用菌中主要营养素与硒元素含量的相关性分析[J]. *陕西农业科学*, 2017, 63(1): 42–46.
- [50] 黄玲玲, 苏彩霞, 张宗申, 等. 硒、锌元素对羊肚菌多糖抗氧化性的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2015, 41(7): 122–125.
- [51] 杨奇, 郭阳, 徐锐, 等. 富硒食用菌蛋白清除氧自由基作用研究[J]. *食品研究与开发*, 2014, 35(13): 1–5.
- [52] de Mattos-Shipley KMJ, Ford KL, Alberti F, et al. The good, the bad and the tasty: The many roles of mushrooms[J]. *Studies in Mycology*, 2016, 85: 125–157.
- [53] Almeida SM, Umeo SH, Marcante RC, et al. Iron bioaccumulation in mycelium of *Pleurotus ostreatus*[J]. *Brazilian Journal of Microbiology*, 2015, 46: 195–200.
- [54] 姜源, 郝瑞霞, 杨诗琴. 北京市售食用菌的重金属含量及其对 Pb 的吸附特性研究 [J]. *北京大学学报: 自然科学版*, 2017, 53(1): 125–134.
- [55] Liu B, Huang Q, Cai H, et al. Study of heavy metal concentrations in wild edible mushrooms in Yunnan Province, China[J]. *Food Chemistry*, 2015, 188: 294–300.
- [56] 刘朋虎, 雷锦桂, 王义祥, 等. 食用菌富集重金属主要特征与相关机制研究进展[J]. *热带作物学报*, 2017, 38(12): 2407–2414.
- [57] Michelot D, Siobud E, Doré J C, et al. Update on metal content profiles in mushrooms—toxicological implications and tentative approach to the mechanisms of bioaccumulation[J]. *Toxicon*, 1998, 36(12): 1997–2012.
- [58] 杨小红, 陈慧君, 李俊, 等. 不同品种平菇对 4 种重金属的吸收富集与安全限量值研究[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(5): 868–874.
- [59] 刘烨潼, 陈秋生, 刘连强, 等. 平菇对重金属铅和镉吸收富集规律研究[J]. *食品工业*, 2015, 36(10): 223–226.
- [60] 张亮. 双孢蘑菇生长过程中硒与铅的相互作用[D]. 南京: 南京农业大学, 2012.
- [61] 刘思洁, 牛会坤, 方赤光, 等. 食用菌主要重金属污染及风险评估研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2018, 9(12): 3206–3211.

加工编辑: 张弘

收稿日期: 2020–11–27