

铅、锰对黄伞菌丝形态及细胞活性的影响

张琳 刘林德* 黄清荣 张莉

(鲁东大学 生命科学学院 山东 烟台 264025)

摘要:【目的】确定铅(Pb^{2+})、锰(Mn^{2+})对黄伞菌丝形态、结构及其菌丝活力的影响,并比较黄伞对 Pb^{2+} 、 Mn^{2+} 的适应性和耐受性。【方法】采用平板培养和液体培养方法,结合菌落形态和菌丝的电镜观察,测定菌落直径、菌丝鲜重,并以原子吸收分光光度计测定 Pb^{2+} 、 Mn^{2+} 含量。同时测定液体培养条件下菌丝的鲜重和胞外多糖产量以验证菌丝活力。【结果】不同 Pb^{2+} 、 Mn^{2+} 浓度下黄伞菌丝体形态变化明显, Pb^{2+} 、 Mn^{2+} 的浓度 ≥ 500 mg/L 可显著抑制黄伞菌丝的生长;高浓度 Pb^{2+} 、 Mn^{2+} 下 ($Pb^{2+} \geq 700$ mg/L、 $Mn^{2+} \geq 2\ 000$ mg/L) 黄伞菌丝体锁状联合大量减少,且大小不一、分布不均,菌丝褶皱变形。黄伞在菌丝平板生长过程中,当 Pb^{2+} 、 Mn^{2+} 分别为 100 mg/L 时,黄伞菌丝生长速度最快。黄伞在液体培养过程中,当 Mn^{2+} 浓度为 300 mg/L、 Pb^{2+} 浓度为 50 mg/L 时,菌丝鲜重以及产生的胞外多糖含量最大。【结论】 Pb^{2+} 、 Mn^{2+} 对黄伞的菌丝生长、菌丝活力及结构形态有较大的影响;黄伞对锰离子的适应性和耐性明显高于对铅离子的适应性和耐性。

关键词: 黄伞, 铅离子, 锰离子, 菌丝形态, 离子积累, 胞外多糖

Effects of lead and manganese stress on mycelium morphology and cell activity of *Pholiota adiposa*

ZHANG Lin LIU Lin-De* HUANG Qing-Rong ZHANG Li

(College of Life Science, Ludong University, Yantai, Shandong 264025, China)

Abstract: [Objective] (1) To investigate the effect of Pb^{2+} and Mn^{2+} stress on the mycelium morphology, structure and vitality of *Pholiota adiposa*; (2) To compare the adaptability and resistance of *P. adiposa* to Pb^{2+} and Mn^{2+} . [Methods] Mycelia in both plate medium and liquid medium were cultured. The morphological characteristics were studied via electron microscopy and the growth characteristics were recorded. Contents of Pb^{2+} and Mn^{2+} in mycelia were also determined by atomic absorption spectrometry. The production of exopolysaccharides by the mycelia in the liquid medium were measured with the phenol-sulfuric acid method as to validate the vitality of the mycelium. [Results] A significant reduction of clampconnection caused by Pb^{2+} and Mn^{2+} was observed, and meanwhile the clampconnection was found unevenly distributed with big differences in size under the stress. The mycelium appeared rugate and proteiform, suggesting the decrease of the mycelial vitality caused by Pb^{2+} and Mn^{2+} stresses. The colonies were larger than others when the concentration of Pb^{2+}

基金项目: 国家 973 计划项目(No. 2009CB421303)

*通讯作者: ✉: linde_liu@163.com

收稿日期: 2014-09-22; 接受日期: 2014-12-29; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2015-01-12

or Mn^{2+} in the plate medium was 100 mg/L, while the growth was significantly inhibited when the concentration reached to or exceeded 500 mg/L. For the liquid culture, the fresh weight of mycelium and exopolysaccharide production reached to maximum when Pb^{2+} was 50 mg/L, or Mn^{2+} 300 mg/L. **[Conclusion]** High stress of Pb^{2+} and Mn^{2+} have a significant effect on the growth of the mycelium and the vitality of mycelium and morphology. The adaptability and resistance of *P. adiposa* to Mn^{2+} was higher than that to Pb^{2+} .

Keywords: *Pholiota adiposa*, Pb^{2+} , Mn^{2+} , Mycelial morphology, Ion accumulation, Exopolysaccharide

黄伞(*Pholiota adiposa* (Fr.) Quel), 又名黄蘑、多脂鳞伞等, 是一种易生产、较高产的中低温型食用菌, 质地脆嫩, 富含营养, 备受社会关注。黄伞属于球盖菇科鳞伞属食药兼用木腐菌^[1]。其子实体和菌丝体中粗脂肪含量较低, 富含粗蛋白、粗纤维和灰分, 同时含有多种矿物质、维生素及生物活性物质, 如多糖、氨基酸和麦角固醇等^[2]。从黄伞子实体中提取的多糖具有抗肿瘤性^[3]、耐疲劳性^[4]、抗菌性^[5]和抗氧化^[6]作用, 因而具有很高的科研意义和良好的开发前景。

由于包括黄伞在内的大型真菌菌丝质地结实, 分布大量中空结构, 这使它们很容易成为重金属元素的吸附剂或生物过滤器^[7]。已有研究证明多种大型真菌为超富集大型真菌, 在菌丝中可积累大量重金属^[8-11]。因此, 大型真菌被公认为环境污染的优良指示生物^[12]。然而, 重金属对大型真菌的生长及代谢活动影响很大, 浓度过高时有极大的毒害作用。例如, 铅可导致酶活性被抑制, 对细胞膜造成损伤、膜透性改变, 细胞失水从而造成营养物质运输系统的损坏^[13]。高浓度的锰会增大质膜透性, 导致细胞内生化过程失调^[14]、细胞活力下降甚至死亡等。对于像黄伞类似的食用菌而言, 研究其在重金属胁迫下的生长活性及积累效应, 则显得尤为重要。

目前, 对重金属与大型真菌的研究多集中于重金属的吸附规律及菌丝生长速率和生物量上^[8-9], 在重金属对蘑菇的菌丝形态影响等方面未见报道。本实验通过向培养基中分别添加不同浓度的铅(Pb^{2+})、锰(Mn^{2+})离子, 观察重金属胁迫下的菌丝形态, 比较其菌丝的生长速度、菌丝活力及胞外多糖产量等, 通过研究 Pb^{2+} 、 Mn^{2+} 对黄伞菌丝生长和细胞活

性造成的影响, 为黄伞的研究以及生产提供理论与应用基础。

1 材料与方法

1.1 材料

黄伞(*P. adiposa*)为野生黄伞组织分离获得菌株。

1.2 主要仪器

冷冻干燥仪 JFD320, 东莞市金富研磨机械有限公司; 扫描电镜 TM-1000, 日本日立公司; 原子吸收分光光度仪 AA800, 美国 PerkinElmer 公司; 离子镀膜仪 IB-5, 日本 EIKO 公司。

1.3 方法

1.3.1 培养基: 培养基的配制和黄伞培养方法参照卜庆梅等^[15]的方法, 每组做 3 个平行。

培养基灭菌后, 温度降至 60 °C 时分别倒入无菌的重金属母液, 即可得到含不同 Pb^{2+} 、 Mn^{2+} 浓度的培养基(Pb^{2+} : 0、5、10、50、100、200、500、700、1 000、1 500、2 000、3 000 mg/L; Mn^{2+} : 0、50、100、200、300、500、700、1 000、1 500、2 000、3 000、5 000 mg/L)^[8-9]。PDA 培养基倒入重金属母液混匀后立即倒平板。

1.3.2 菌种活化及培养^[9]: 将保藏的菌种在无菌操作条件下接种到 PDA 斜面培养基上, 25 °C 避光培养约 7 d。将活化好的斜面菌种接种至 PDA 平板培养基中, 25 °C 避光培养 5-6 d, 备用。

将含有重金属的 PDA 培养基上铺一层玻璃纸, 在无菌条件下用打孔器从培养好的 PDA 培养基上取直径 0.5 cm 的母种菌块接种于平板中央, 然后于 25 °C 培养箱中倒置培养, 每组设 3 个重复, 定时观察平板, 平板长满菌丝时立即停止培养。

1.3.3 Pb^{2+} 、 Mn^{2+} 对黄伞菌丝形态的影响: 采用电镜观察法, 菌丝的预处理参照黄敏敏等^[16]的方法, 将样品放置在冷冻干燥仪中进行干燥处理, 将干燥后的样品分别粘在载玻片上, 用离子镀膜仪进行喷镀, 最后用扫描电镜观察拍照, 观察菌丝形态并分析。

1.3.4 Pb^{2+} 、 Mn^{2+} 对黄伞菌丝生长的影响: 平板停止培养后, 在菌落边缘做3个标记, 使3个标记连线呈等边三角形, 测量过3个点的直径即为一组数据, 每个平板测3组数据。

1.3.5 Pb^{2+} 、 Mn^{2+} 对黄伞菌丝鲜重的影响: 二级摇瓶培养后将菌丝体用超纯水冲洗3次, 抽滤至恒重(± 0.1 g)后用分析天平称重。

1.3.6 Pb^{2+} 、 Mn^{2+} 对黄伞胞外多糖的影响: 取适量

二级摇瓶抽滤后的发酵液, 10 000 r/min 离心 20 min, 取上清液, 采用苯酚-硫酸法^[17]测定胞外多糖含量。

1.3.7 重金属含量测定: 采用硝酸-高氯酸湿法消化^[8], 消解稀释后用原子吸收分光光度仪测定 Pb^{2+} 、 Mn^{2+} 含量。

2 结果与分析

2.1 Pb 、 Mn 对黄伞菌落生长的影响

如图1所示, 当 Pb^{2+} 浓度为 0–200 mg/L 时各菌落的直径差异不显著; 当 Pb^{2+} 的浓度 ≥ 500 mg/L 时菌丝直径下降, 菌丝生长被显著抑制。当 Pb^{2+} 的浓度 $\geq 1 000$ mg/L 时, 菌丝几乎不生长。

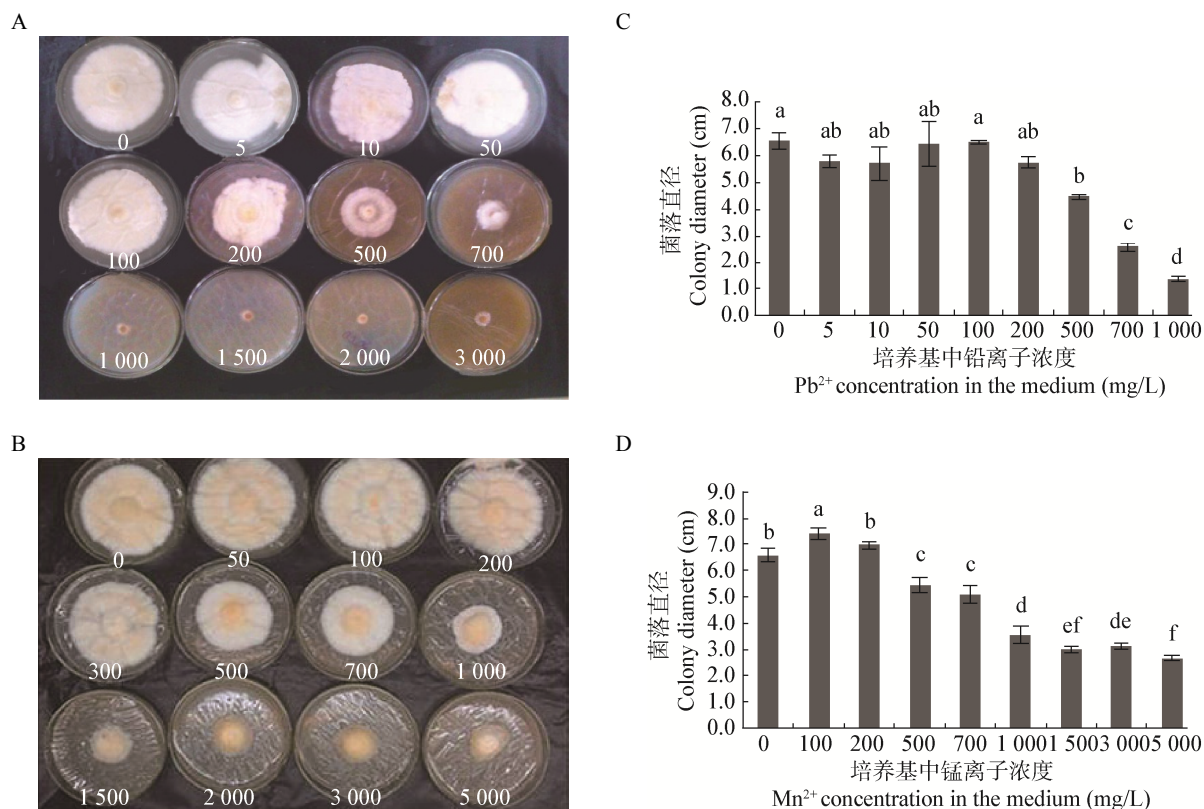


图1 Pb 、 Mn 对黄伞菌落生长的影响

Figure 1 Mycelia growth of *P. adiposa* under different concentrations of Pb^{2+} and Mn^{2+}

注: A、B 分别为 Pb^{2+} 、 Mn^{2+} 处理后菌丝生长状况, 图中平板下方的数字表示培养基中离子的浓度(mg/L); C、D 分别为 Pb^{2+} 、 Mn^{2+} 菌落直径变化情况。每组3个平行, 并进行单因素方差分析 $\alpha < 0.01$ 。

Note: A, B were pictures showing the colony size in lead-treated and manganese-treated group respectively; The figures in the picture indicates the concentration of the ions in the medium (mg/L); C, D were the colony diameters on the plate medium treated with Pb^{2+} , Mn^{2+} respectively. All data were processed by SPSS, one-way ANOVA was conducted at $\alpha < 0.01$.

与 Pb^{2+} 的结果相似, 当 Mn^{2+} 的浓度 ≥ 500 mg/L 时菌丝生长有显著抑制。但 Mn^{2+} 浓度 $\geq 1\ 000$ mg/L 时菌丝可少量生长, 但黄伞菌丝结构蓬松。从图 1A、B 中可以看出, 同浓度下 Pb^{2+} 和 Mn^{2+} 对黄伞菌丝生长的抑制作用有所不同。比如, 当离子浓度 $\geq 1\ 000$ mg/L 时, 同浓度下 Pb^{2+} 处理组黄伞几乎不生长而 Mn^{2+} 处理组黄伞菌丝有少量生长, 菌丝结构蓬松。这些结果可能暗示黄伞对 Mn^{2+} 的耐受能力高于对 Pb^{2+} 的耐受能力。

2.2 Pb^{2+} 、 Mn^{2+} 对黄伞菌丝体表面结构的影响

Pb^{2+} 、 Mn^{2+} 对黄伞菌丝体表面结构的影响如图 2 所示。从图 2 可以看出空白处理组菌丝细长圆滑、锁状联合较多且大小及分布均匀。 Pb^{2+} 浓度为 50 mg/L 时, 大部分菌丝细长无明显变形, 有少量菌丝变形; 锁状联合较多且呈大小均匀的圆状, 但数量上明显比空白组少。当 Pb^{2+} 浓度为 700 mg/L 时, 部分菌丝发生严重膨大变形, 菌丝粗细不均、表面有褶皱; 锁状联合明显变形, 大小不匀。 Mn^{2+} 浓度为 300 mg/L 处理过的菌丝细长圆滑, 粗细相对均匀, 锁状联合比空白组明显变少, 但大小一致

分布仍比较均匀。当 Mn^{2+} 浓度为 700 mg/L 时, 大部分菌丝比较细长圆滑, 小部分菌丝扭曲变形, 锁状联合数量锐减多发生变形。当 Mn^{2+} 浓度为 2 000 mg/L 时, 菌丝粗细不均, 大部分发生严重变形, 表面明显褶皱, 部分发生膨大, 锁状联合个数较少, 形态不一、分布不均。当 Mn^{2+} 和 Pb^{2+} 的浓度均为 700 mg/L 时, Pb^{2+} 处理组的菌丝和锁状联合的变形明显比 Mn^{2+} 处理组严重, 暗示黄伞菌丝在 Pb^{2+} 胁迫下受到的抑制和毒害作用可能比在 Mn^{2+} 胁迫下更为明显。

2.3 Pb^{2+} 、 Mn^{2+} 在黄伞菌丝体中的富集规律

黄伞对 Mn^{2+} 和 Pb^{2+} 的富集规律如图 3 所示。由图 3 可知, 随着培养基中 Pb^{2+} 和 Mn^{2+} 浓度的增加, 黄伞菌丝中 Pb^{2+} 和 Mn^{2+} 含量也在增加。当 Pb^{2+} 和 Mn^{2+} 浓度分别是 100 mg/L 和 1 000 mg/L 时, 菌丝中铅富集量和锰富集量达到最大, 分别为 1.77 mg/g 和 7.45 mg/g。菌丝体中 Pb^{2+} 和 Mn^{2+} 含量达到最大后又迅速下降, 原因可能是黄伞菌丝在高浓度的 Pb^{2+} 和 Mn^{2+} 环境中受到抑制, 菌丝活力减弱, 生物量减少^[9], 所以菌丝对 Pb^{2+} 和 Mn^{2+} 富集量也随之减少, 这与 Pb^{2+} 和 Mn^{2+} 对菌丝体的影响所得结论是一致的。

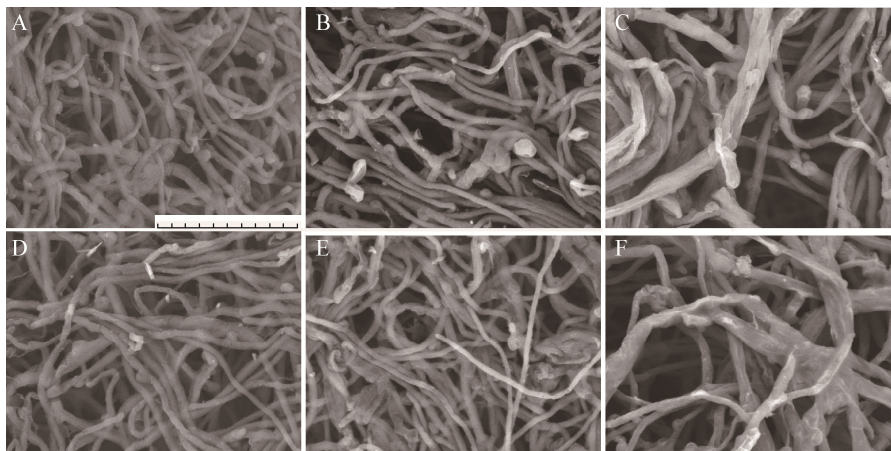


图 2 不同浓度铅离子和锰离子对黄伞菌丝体表面结构的影响

Figure 2 Surface structure of *P. adiposa* mycelia under different concentration of Pb^{2+} and Mn^{2+}

注: A、B 和 C 中 Mn^{2+} 的浓度均为 0, Pb^{2+} 的浓度分别为 0、50、700 mg/L; D、E 和 F 中 Pb^{2+} 浓度均为 0, Mn^{2+} 的浓度分别是 300、700、2 000 mg/L。Bar=30 μ m (各图标尺一致)。

Note: A was the blank sample without Pb or Mn stress; B and C were the Pb-treated group with the stress of 50 and 700 mg/L, respectively; D, E and F were the Mn-treated group with the stress of 300, 700 and 2 000 mg/L, respectively. All the pictures were taken at the same scale, as the scale bar=30 μ m shown in A.

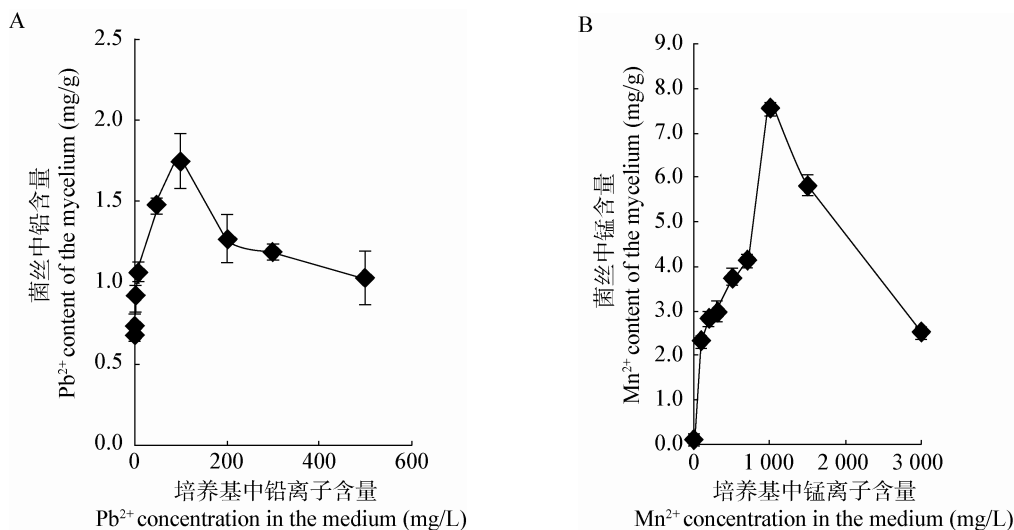


图3 黄伞菌丝对铅离子和锰离子的富集量

Figure 3 Pb²⁺ and Mn²⁺ accumulation by *P. adiposa*

注: A、B 分别表示黄伞菌丝对 Pb²⁺ 和 Mn²⁺ 的富集情况。

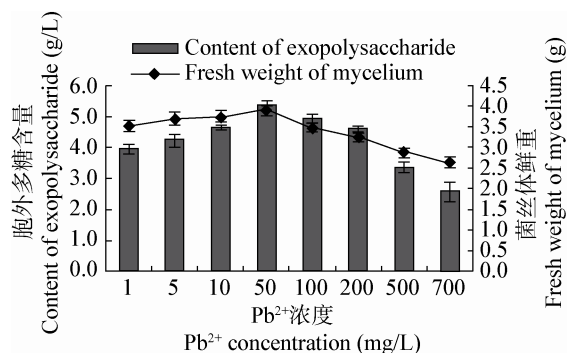
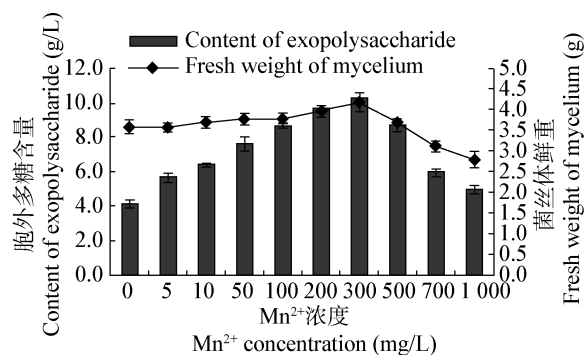
Note: A, B were the Pb²⁺ and Mn²⁺ accumulation by *P. adiposa*, respectively.

2.4 Pb²⁺、Mn²⁺对黄伞菌丝体活力的影响

不同浓度 Pb²⁺对黄伞菌丝体活力的影响如图 4 所示, 将黄伞置于不同浓度的 Pb²⁺液体培养基中培养时, 随着 Pb²⁺浓度的增高, 菌丝体鲜重和胞外多糖含量均随之增高; 当 Pb²⁺浓度达到 50 mg/L 时, 相应的菌丝体鲜重和胞外多糖含量也都达到峰值, 分别为 3.90 g 和 2.55 g/L。之后菌丝体鲜重和胞外多糖含量均随着 Pb²⁺浓度的升高而逐渐下降, 这表明低浓度的 Pb²⁺可刺激黄伞菌丝的生长和胞外多糖的产生, 浓度过高时 Pb²⁺又抑制黄伞菌丝的生长和

胞外多糖的产生。

不同浓度 Mn²⁺对黄伞菌丝活力的影响如图 5 所示。从图 5 可以看出, 在一定范围内随着 Mn²⁺浓度的逐渐升高, 菌丝体鲜重、胞外多糖的含量逐渐升高, 当 Mn²⁺浓度达到 300 mg/L 时, 菌丝体鲜重和胞外多糖的含量均达到最大值, 分别为 4.12 g 和 4.86 g/L; 之后随着 Mn²⁺浓度的升高, 菌丝体鲜重、胞外多糖的含量逐渐下降。从而表明, 当浓度 ≤ 300 mg/L 时, Mn²⁺的添加有利于黄伞菌丝生长和产生胞外多糖。当 Mn²⁺浓度 ≥ 500 mg/L 时, 胞外多

图4 不同浓度 Pb²⁺对黄伞菌丝体活力的影响Figure 4 Effect of different concentrations of Pb²⁺ on the activity of *P. adiposa* mycelium图5 不同浓度 Mn²⁺对黄伞菌丝体活力的影响Figure 5 Effect of different concentrations of Mn²⁺ on the activity of *P. adiposa* mycelium

糖含量对比空白组并无下降,而菌丝鲜重则随 Mn^{2+} 浓度升高不断下降,当 Mn^{2+} 浓度为 1 000 mg/L 时,菌丝鲜重已降至 2.79 g。锰元素作为必需微量元素之一,可以活化细胞内的一系列酶反应,如水解反应、还原反应、磷酸化和脱羧基作用等,而过量的 Mn^{2+} 又会形成高盐胁迫造成生物量下降、作物减产等^[18]。

3 讨论

电镜观察结果显示,不同 Pb^{2+} 和 Mn^{2+} 浓度下黄伞菌丝体结构形态差异比较明显。较低浓度下菌丝粗细均匀、细长圆润,锁状联合数目多且大小均匀;而高浓度下菌丝粗细不均,锁状联合数量少,大小和分布不均。锁状联合为通过核配形成担子进行有性生殖打下基础,但高浓度的 Pb^{2+} 和 Mn^{2+} 会使菌丝变形、影响锁状联合的形成,从而直接影响到菌丝的活力和生长。Graz 等研究结果表明二年残孔菌 (*Abortiporus biennis*) 的膜质结构中铅积累引起细胞高度液泡化^[19],这可能是导致菌丝发生退化、菌丝活力降低的另一个因素。从图 1 可以看出,在高浓度的 Pb^{2+} 和 Mn^{2+} 培养条件下菌丝比低浓度的更加疏松稀薄,尤其是 Mn^{2+} 处理组,菌丝明显蓬松稀薄。可能是由于 Mn^{2+} 影响质膜透性、改变酶活性^[14] 等影响了菌丝细胞的活性和形态。

在一定浓度范围内, Pb^{2+} 和 Mn^{2+} 的添加会刺激黄伞菌丝体的生长,菌丝体鲜重、胞外多糖的产生量逐渐增大;而当 Pb^{2+} 和 Mn^{2+} 浓度过大时就会不同程度地抑制黄伞菌丝体的生长,甚至产生毒害作用。从图 4 和图 5 中可以看出,黄伞菌丝鲜重最大时 Pb^{2+} 和 Mn^{2+} 浓度分别与黄伞产生胞外多糖产量最高时 Pb^{2+} 和 Mn^{2+} 浓度相一致,而且二者变化趋势基本一致,这一结果与卜庆梅等^[15] 实验结果不一致,她们认为在单因素分析中,液体培养下影响黄伞菌丝体生物量的因素与影响黄伞产生胞外多糖的因素不成正相关。一方面,可能是 Pb^{2+} 和 Mn^{2+} 可刺激黄伞菌丝细胞使其含水量增高从而影响菌丝鲜重;另一方面,可能是黄伞生长时间比较短,属于初级生长阶段,胞外多糖的产量受到了一定的影响,一些指标不能通过测得数值客观地予以体

现,同时这也可能与操作方法以及环境因素等有关。

从菌丝体的生长、菌丝体鲜重、胞外多糖、菌丝形态及锰离子和铅离子的富集量来看,黄伞对 Mn^{2+} 的适应浓度和耐受浓度均高于 Pb^{2+} ,可能是由于在木腐菌的代谢过程中 Mn^{3+} ^[20-21] 可作为酶核心结构的一部分或扩散性的氧化剂参与木质素和纤维素聚合物的降解中,而铅作为一种非必需元素,对包括真菌^[22] 在内的生物体均有一定的毒害作用。在细胞水平上, Pb^{2+} 和 Mn^{2+} 都可以引起细胞膜渗透性和酶活力的改变^[13-14,19,23-24],从而引起胞内生理生化作用失调。在生理生化代谢水平上, Pb^{2+} 和 Mn^{2+} 的作用多元化。例如, Ouyang 等^[25] 用核磁共振法和荧光分析法发现 Pb^{2+} 对钙调素(CaM)有较高的亲和力,并且对 4 个位点的亲和力相等。同样,肖凤娟等^[26] 发现 Mn^{2+} 与 Ca^{2+} 在电荷性质、离子半径配位化学性质等方面有相似之处。由于 CaM 的手型结构上 Ca^{2+} 的结合位点并不高度专一,因而 Pb^{2+} 和 Mn^{2+} 能够在 CaM 中一定程度取代 Ca^{2+} ,与 Ca^{2+} 在 CaM 中产生竞争结合,导致 CaM 的构象发生改变,从而影响 CaM 的正常生理功能,从而干扰糖原代谢、核苷酸代谢、细胞运输、细胞运动等过程^[27]。另外, Pb^{2+} 和 Mn^{2+} 在黄伞内的积累与毒害也取决于黄伞菌丝的栖息地及其营养机制等因素。本研究仅分析不同 Pb^{2+} 和 Mn^{2+} 浓度对黄伞菌丝的生长速度、菌丝形态及胞外多糖产量等的影响,至于对菌丝其他生化指标的影响还有待于以后的进一步研究。

参考文献

- [1] Ying JZ, Zhao JD, Mao XL, et al. Edible Mushrooms[M]. Beijing: Science Press, 1984, 138-139 (in Chinese)
应建浙, 赵继鼎, 卯晓岚, 等. 食用蘑菇[M]. 北京: 科学出版社, 1984: 138-139
- [2] Hui FL, Wei MH, Liu Z. Analysis of nutritional components in the fruitbodies of *Pholiota adiposa*[J]. Acta Edulis Fungi, 2003, 10(4): 20-23 (in Chinese)
惠丰立, 魏明卉, 刘征. 黄伞子实体营养成分分析[J]. 食用菌学报, 2003, 10(4): 20-23
- [3] Jiang XQ, Ding XM, Liu HY, et al. Effect of crude polysaccharides of *Pholiota adiposa* on anti-tumor and immunity in bearing-tumor mice[J]. China Pharmacist, 2007, 10(2):

- 119-121 (in Chinese)
蒋晓琴, 丁晓明, 刘海燕, 等. 黄伞粗多糖抗肿瘤及对荷瘤小鼠免疫功能影响的研究[J]. 中国药师, 2007, 10(2): 119-121
- [4] Shimizu K, Fujita R, Kondo R, et al. Morphological features and dietary functional components in fruit bodies of two strains of *Pholiota adiposa* grown on artificial beds[J]. Journal of Wood Science, 2003, 49(2): 193-196
- [5] Dulger B. Antimicrobial activity of the macrofungus *Pholiota adiposa*[J]. Fitoterapia, 2004, 75(3/4): 395-397
- [6] Ji YM, Hu QX, Gong CY, et al. Antioxidation study of extrapolydisaccharides extracted from *Pholiota adiposa* (Fr.) Quel[J]. Biotechnology, 2007, 17(2): 29-31 (in Chinese)
吉叶梅, 胡清秀, 宫春宇, 等. 黄伞胞外多糖抗自由基作用的研究[J]. 生物技术, 2007, 17(2): 29-31
- [7] Volesky B, Holan ZR. Biosorption of heavy metals[J]. Biotechnology Progress, 1995, 11(3): 235-250
- [8] Cheng XH, Gai YP, Sun HY, et al. Zinc tolerance and accumulation characteristics of *Cordyceps militaris*[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(6): 1449-1455 (in Chinese)
程显好, 盖宇鹏, 孙慧涌, 等. 蛹虫草对锌耐性和富集特征[J]. 生态学报, 2010, 30(6): 1449-1455
- [9] Li WH, Yu LL, Cheng XH, et al. Growth tolerance and accumulation characteristics of the mycelia of two macrofungi species to heavy metals[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(5): 1240-1248 (in Chinese)
李维焕, 于兰兰, 程显好, 等. 两种大型真菌菌丝体对重金属的耐受和富集特性[J]. 生态学报, 2011, 31(5): 1240-1248
- [10] Stijve T, Vellinga EC, Herrmann A. Arsenic accumulation in some higher fungi[J]. Persoonia, 1990, 14(2): 161-166
- [11] Borovicka J, Randa Z, Jelinek E, et al. Hyperaccumulation of silver by *Amanita strobiliformis* and related species of the section *Lepidella*[J]. Mycological Research, 2007, 111(11): 1339-1344
- [12] Guillén J, Baeza A. Radioactivity in mushrooms: a health hazard?[J]. Food Chemistry, 2014, 154: 14-25
- [13] Reddy AM, Kumar SG, Jyothsnakumari G, et al. Lead induced changes in antioxidant metabolism of horsegram (*Macrotyloma uniflorum* (Lam.) Verdc.) and bengalgram (*Cicer arietinum* L.)[J]. Chemosphere, 2005, 60: 97-104
- [14] Ren LM, Liu P. Review of manganese toxicity and the mechanisms of plant tolerance[J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(1): 357-367 (in Chinese)
任立民, 刘鹏. 锰毒及植物耐性机理研究进展[J]. 生态学报, 2007, 27(1): 357-367
- [15] Bu QM, Han LY, Huang QR, et al. Optimization of liquid medium for exopolysaccharide production of *Pholiota adiposa*[J]. Food Science, 2007, 28(8): 303-306 (in Chinese)
卜庆梅, 韩立亚, 黄清荣, 等. 黄伞胞外多糖液体培养基的优选[J]. 食品科学, 2007, 28(8): 303-306
- [16] Huang MM, Jiang ZH, Weng BQ. Scanning electron microscopy on mycelium of *Tricholoma lobayense* heim under different pH[J]. Journal of Chinese Electron Microscopy Society, 2010, 29(2): 174-175 (in Chinese)
黄敏敏, 江枝和, 翁伯琦. 不同 pH 值条件下金福菇菌丝体形态的电镜观察[J]. 电子显微学报, 2010, 29(2): 174-175
- [17] Zhang WJ. Biochemical Research Techniques of Glycoconjugates[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1999: 11-12 (in Chinese)
张惟杰. 糖复合物生化研究技术[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1999: 11-12
- [18] Pan RC. Plant Physiology[M]. Beijing: Higher Education Press, 1995: 292-293 (in Chinese)
潘瑞焱. 植物生理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1995: 292-293
- [19] Graz M, Pawlikowska-Pawlega B, Jarosz-Wilkolazka A. Growth inhibition and intracellular distribution of Pb ions by the white-rot fungus *Abortiporus biennis*[J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2011, 65(1): 124-129
- [20] Kähkönen MA, Lankinen P, Hatakka A. Hydrolytic and ligninolytic enzyme activities in the Pb contaminated soil inoculated with litter-decomposing fungi[J]. Chemosphere, 2008, 72(6): 708-714
- [21] Elissetche JP, Ferraz A, Freer J, et al. Influence of forest soil on biodegradation of *Drimys winteri* by *Ganoderma australe*[J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2006, 57(3): 174-178
- [22] Mougín C, Jolival C, Briozzo P, et al. Fungal laccases: from structure-activity studies to environmental applications[J]. Environmental Chemistry, 2003, 1(2): 145-148
- [23] Reddy AM, Kumar SG, Jyothsnakumari G, et al. Lead induced changes in antioxidant metabolism of horsegram (*Macrotyloma uniflorum* (Lam.) Verdc.) and bengalgram (*Cicer arietinum* L.)[J]. Chemosphere, 2005, 60(1): 97-104
- [24] Singh RP, Tripathi RD, Sinha SK, et al. Response of higher plants to lead contaminated environment[J]. Chemosphere, 1997, 34(11): 2467-2493
- [25] Ouyang H, Vogel HJ. Metal ion binding to calmodulin: NMR and fluorescence studies[J]. Biometals, 1998, 11(3): 213-222
- [26] Xiao FJ, Zhang XJ. Recent advance of research on the interaction between trace element Al Mg Zn Mn and Calmodulin[J]. Journal of The Hebei Academy of Sciences, 2003, 20(3): 163-167 (in Chinese)
肖凤娟, 张欣杰. 铝镁锌锰等金属离子与钙调素相互作用研究进展[J]. 河北省科学院学报, 2003, 20(3): 163-167