

李浪,刘妮,朱生亮,等. 重金属铅镉胁迫对羊肚菌菌丝体生长的影响[J]. 江苏农业科学,2024,52(5):237-243.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2024.05.035

重金属铅镉胁迫对羊肚菌菌丝体生长的影响

李浪¹, 刘妮¹, 朱生亮¹, 代丽华¹, 吴克华¹, 杨超²

(1. 贵州科学院贵州省山地资源研究所, 贵州贵阳 550001; 2. 贵州黔之境农旅发展有限公司, 贵州贵阳 550034)

摘要:探究重金属离子铅、镉胁迫对羊肚菌菌丝体生长发育的影响, 以为羊肚菌菌丝生理指标变化提供理论参考。以羊肚菌菌丝为试验材料, 采用不同浓度铅离子和镉离子溶液进行单一胁迫处理, 探究不同重金属离子浓度对羊肚菌菌丝生长发育过程中菌丝生长速度、菌丝微观形态、菌丝色泽及疏密度、重金属吸收特性、生长抑制率和重金属耐受性的影响。随铅离子、镉离子胁迫浓度的增加, 菌丝生长速度减缓, 直至不生长, 菌丝色泽变化不明显, 但逐渐变稀疏, 菌丝体粗细不均匀, 生长呈不规则变化。对羊肚菌菌丝中铅、镉含量进行检测, 结果发现, 随培养基中重金属浓度的增加, 菌丝中积累的铅镉含量逐渐升高, 其中铅含量从 0.171 mg/L 升高至 2.351 mg/L, 镉含量从 0.244 mg/L 升高至 2.262 mg/L。通过半最大效应浓度 EC_{50} 对羊肚菌菌丝受重金属离子 Pb^{2+} 、 Cd^{2+} 胁迫下的耐受性进行表征, 其 EC_{50} 值分别为 6.636、4.942 mg/L。铅镉胁迫对羊肚菌的菌丝生长总体表现为不同程度的抑制作用, 但铅离子对羊肚菌菌丝的抑制效果弱于镉离子, 羊肚菌菌丝对铅的耐受性强于镉; 相对抑菌率与铅镉离子浓度成正比, 但在低浓度时对菌丝生长有促进作用。 Pb^{2+} 和 Cd^{2+} 对羊肚菌菌丝生长发育的影响是复杂的, 不能仅以其中某个生理指标变化分析铅离子、镉离子浓度对羊肚菌菌丝生长的影响。

关键词:羊肚菌; 铅; 镉; 胁迫; 生长状况; 耐受性

中图分类号:S646.901 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2024)05-0237-06

羊肚菌(morchella)又称编笠菌、草笠竹、羊肚菜, 是大型真菌的一种, 外形如伞状, 因其菌盖上有许多网棱状的褶皱, 与羊肚极其相似, 故称羊肚菌^[1-3]。羊肚菌富含多糖^[4]、蛋白质、微量元素、食用纤维和维生素^[5]等生物活性物质, 具有降血脂、抗肿瘤^[6-7]、抗氧化^[8]、抗疲劳、增强免疫力等多种药理活性^[9-12]。但与绿色植物相比, 包括羊肚菌在内的众多种类的食用菌能积累更高浓度的重金属^[13-16]。如姬松茸对重金属镉的富集能力很强, 富集系数为 65.235~108.135^[17]。黄晓辉等对不同浓度梯度 Pb、Cd、As、Hg 重金属胁迫下培养金针菇、杏鲍菇菌丝进行研究, 发现重金属对菌丝生长及菌丝球量表现为低浓度时促进而高浓度时抑制, 适宜浓度的重金属离子浓度会使菌丝前期受到抑制而后期又恢复到正常生长状态^[18]。黄建成等对姬松茸

菌丝生长情况和子实体中镉含量进行检测, 发现随镉浓度的增加, 姬松茸菌丝生长受到抑制, 镉浓度越高, 抑制作用越大, 半最大效应浓度为 20.237 5 mg/kg^[19]。食用菌对环境中的重金属具有选择性吸收作用, 也具有较弱的富集作用^[20], 其菌丝体在生长基质中延伸范围广、深度大, 菌丝形成网络, 可以高效率地吸收利用生存基质中的生长因素, 同时也能吸收积累重金属于其子实体中^[21-22]。目前, 大多数学者围绕食用菌子实体如何吸收重金属展开了较多研究, 而对食用菌菌丝与重金属之间关系的研究少见报道。本研究在相关文献的基础上, 以羊肚菌菌丝为试验对象, 采用不同浓度 Pb^{2+} 和 Cd^{2+} 溶液对羊肚菌菌丝体进行胁迫生长试验, 探究不同重金属离子浓度对羊肚菌菌丝生长发育过程中菌丝生长速率、菌丝色泽及疏密度、铅镉积累量、生长抑制率和重金属耐受性的影响, 以为羊肚菌的生理研究提供参考依据, 为进一步研究食用菌的重金属阻控提供可行性参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料与试剂

羊肚菌菌种: 贵州科学院山地资源研究所中心

收稿日期: 2023-05-15

基金项目: 贵州省科技计划(编号: 黔科合支撑[2021]一般 468); 贵州科学院青年基金(编号: 黔科院 J 字[2021]23 号)。

作者简介: 李浪(1992—), 男, 贵州贵阳人, 硕士, 助理研究员, 主要从事食用菌及中药资源研究。E-mail: 1475178890@qq.com。

通信作者: 吴克华, 硕士, 副研究员, 主要从事种质资源保护与开发利用研究。E-mail: 46417349@qq.com。

实验室提供;PDA 培养基:按照标准 PDA 培养基制备方法配制;重金属试剂铅、镉标准溶液(山东省冶金科学研究院标准样品研究所);硝酸(优级纯,国药集团上海有限公司);盐酸(优级纯,国药集团上海有限公司);硫酸(优级纯,国药集团上海有限公司);超纯水($18.25 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$)。

1.2 主要试验仪器

人工气候箱(BIC-400,上海博迅实业有限公司);研究级正置微分干涉生物显微图像系统[Nikon ECLIPSE Ni-U,尼康仪器(上海)有限公司];全谱直读电感耦合等离子发射光谱仪(Optima8000,PerkinElmer,USA);微量分析型超纯水机(WP-UP-WF-10,四川沃特水处理设备有限公司);电子分析天平[EX124ZH,奥豪斯仪器(上海)有限公司];微波消解仪(MWD-600,上海元析仪器有限公司);真空干燥箱(GZX-9240MBE,上海博迅实业有限公司);DB-不锈钢数显控温电热板(DB400×600,盐城市华康科学仪器厂)。

1.3 铅和镉对羊肚菌菌丝体生长影响试验

以不同重金属离子浓度的 Pb^{2+} 、 Cd^{2+} 重金属培养基对羊肚菌菌丝进行平板培养法培养。在 PDA 平板培养基中加入相应浓度的重金属标准溶液,培养基中各种离子的最终浓度如下:Pb 标准溶液分别为 1、2、4、6、8、10、20 mg/L;Cd 标准溶液分别为 1、2、5、8、10、12、20 mg/L。以“元素符号+数字”表示不同重金属离子浓度,以不加 Pb^{2+} 、 Cd^{2+} 为空白对照(CK)。每种金属离子的不同浓度设 3 组重复,确认平板无菌后在超净工作台中用打孔器(5 mm)打取圆形菌丝块接种于培养皿中心,接种完成后放入贵州省山地资源研究所中心实验室人工气候箱内 25°C 恒温倒置避光培养,以生长速度最快的 1 组长满平板为期限,每天实时观察菌丝的生长情况并记录。

1.4 羊肚菌菌丝体结构形态表征

(1)宏观观察。接种完成后对菌丝生长情况进行拍照记录,对其菌落形态特征进行宏观观察,采用划线法对菌落直径进行测定,具体测定步骤为在菌落任意位置测量其直径,再依次逆时针旋转 60° 测量其直径,取 3 次测量的平均值作为菌落的直径^[23],计算出菌丝在供试培养基上的生长速度,直至生长速度最快的一组长满平板为止^[15]。定性观测培养皿中羊肚菌菌丝的色泽,同时以 CK 组为参

考,将各处理的菌丝生长情况与对照进行比较,用菌丝较稀疏、稀疏、较浓密、浓密等描述菌丝的疏密度^[24]。

(2)微观观察。挑取成熟期菌落的菌丝,以压片方法制成菌丝玻片标本后置于生物显微图像系统下观察,观察内容包括菌丝形状、菌丝分枝等,找到合适的视野(要求菌丝分布均匀、视野清晰、能清楚看到菌丝形态结构)后拍照记录^[25]。

1.5 羊肚菌菌丝体重金属含量测定

羊肚菌菌丝体培养结束后,将培养皿中的琼脂加热融化,待融化后将菌丝用镊子取出,并用去离子水反复冲洗直至菌丝上无附着培养基后于 85°C 烘箱内烘干,记录菌丝体干重。

准确称取样品 0.25 g 于干净干燥的微波消解内罐中,依次往消解内罐中加入硝酸、盐酸预消解后补加适量的酸,置入微波消解仪内消解,消解完成后将消解液转移至 50 mL 容量瓶中定容待测^[26]。重金属含量参考 GB 5009.268—2016《食品安全国家标准 食品中多元素的测定》进行测定。

1.6 羊肚菌菌丝体富集试验

羊肚菌菌丝生长过程中会通过栽培基质吸收重金属,给定不同重金属浓度生长环境,用富集系数(PUF)来表征羊肚菌菌丝对其生长基质的富集能力^[27-28],公式计算如下:

$$PUF = \frac{C_p}{C_s} \quad (1)$$

式中:PUF 表示富集系数; C_p 表示羊肚菌菌丝重金属元素含量,mg/L; C_s 表示设定的培养基重金属元素含量,mg/L。

1.7 羊肚菌菌丝体生长抑菌率及耐受性评价

待生长速度最快的一组菌丝长满平板培养皿时,用“1.4”节中菌落直径测量方法来测量各处理的菌落直径,采用公式(2)计算各处理浓度对菌丝生长的抑菌率^[29]。

$$P = \frac{D_{CK} - D}{D_{CK}} \times 100\% \quad (2)$$

式中:P 表示抑菌率;D 表示试验菌落最终真实直径,mm; D_{CK} 表示空白对照组最终真实直径,mm。

1.8 数据处理

使用 SPSS 20.0 数据处理工具将生长抑制率换算成概率值,质量浓度以对数值表示,以铅和镉不同浓度的对数值(x)减去菌丝生长抑菌率的概率值(y),求取回归方程 $y = a + bx$,并计算抑制菌丝生长

的半最大效应浓度(EC_{50})值^[30],比较不同重金属浓度对羊肚菌菌丝生长的抑制效果^[31]。

2 结果与分析

2.1 重金属胁迫对羊肚菌菌丝生长的影响

2.1.1 重金属胁迫对羊肚菌菌丝生长速率的影响

由图 1 可知,不同铅镉重金属浓度胁迫下,羊肚菌菌丝生长表现出不同的生长速度。随着铅浓度的增大,铅在 0~1 mg/L 时羊肚菌菌丝生长几乎不受影响,之后随铅离子浓度增加,菌丝生长速度下降明显,当铅离子浓度达到 10 mg/L 时完全抑制了菌丝生长;而镉的添加浓度在 12 mg/L 时,菌丝还能稀疏生长,当镉离子浓度达到 0~2 mg/L 时羊肚菌菌丝的生长受到影响,生长速度呈现出先下降后增加的趋势,之后随镉浓度增大菌丝生长速度也持续下降直至为 0。说明添加外源铅后,低浓度菌丝生长不受影响,高浓度菌丝生长受抑制情况显著,添加镉后菌丝生长趋势为低浓度有轻微波动、高浓度对菌丝生长起到抑制作用。

2.1.2 重金属胁迫对羊肚菌菌丝宏观形态的影响

分别对添加不同浓度的铅和镉培养的羊肚菌菌丝生长情况进行拍照记录(图 2),并对其菌落形态进行定性描述(表 1)。由图 2 可知,培养基中无重金属离子时,羊肚菌菌丝均匀向四周生长,呈现出规则的生长之势,菌丝浓密且为纯白色,加入铅离子后,羊肚菌菌丝生长稀疏、生长变缓,当铅离子浓

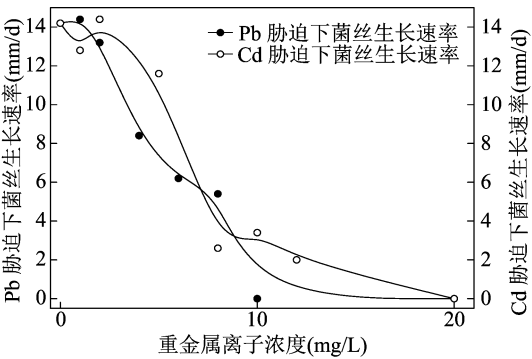


图1 不同浓度铅、镉胁迫对羊肚菌菌丝生长速率的影响

度达到 10 mg/L 时菌丝停止生长,颜色也由之前的纯白渐变为灰白色(表 1);加入镉离子后菌丝在低浓度时生长速率受影响较小,但与 CK 相比,菌丝变稀疏,当镉离子浓度增加到 8 mg/L 后,菌丝生长迟缓,多数生长成畸形。可能是因为随着铅镉离子浓度的升高,重金属对菌丝的毒害作用使得菌丝生长速度慢慢下降,同时对菌丝细胞产生氧化损伤,使得羊肚菌菌丝细胞不能充分吸收水和养分,致使菌丝不能正常生长,外观形态发生变化。此外,随着重金属离子浓度的增加,羊肚菌菌丝生长受到抑制,加速菌丝老化,老化的菌丝开始分泌红棕色或深褐色的色素,菌丝出现从白色到其他颜色的变化。

2.1.3 重金属胁迫对羊肚菌菌丝微观结构的影响

通过研究级正置微分干涉生物显微图像系统观察不同铅镉离子浓度培养下的羊肚菌菌丝,发现菌丝的微观形态有较大差异。由图 3 可知,菌丝整体

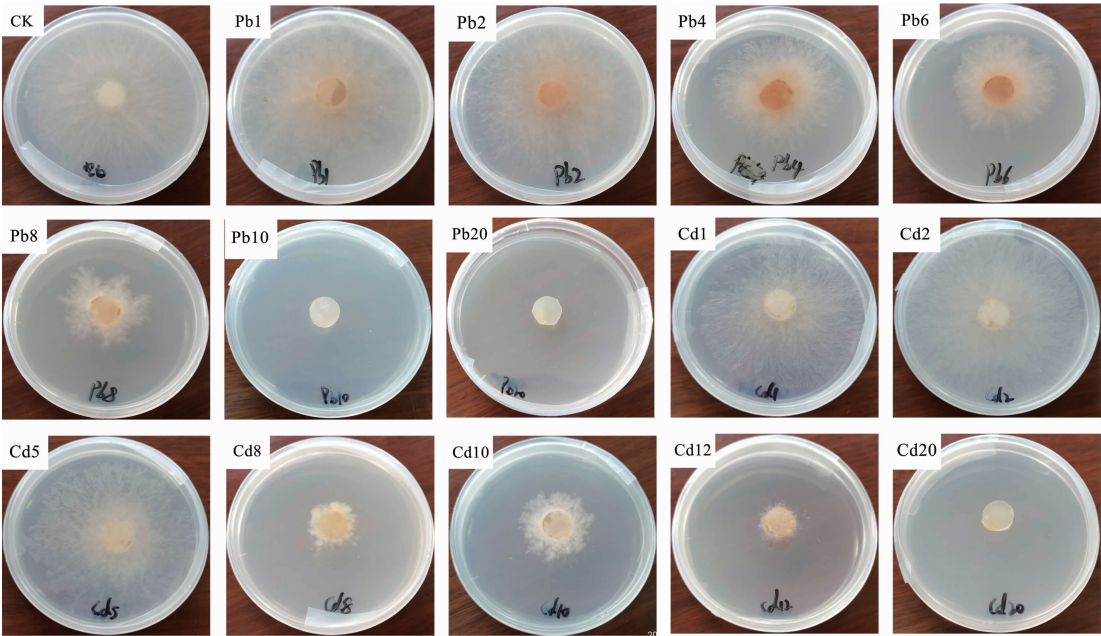


图2 铅镉胁迫下羊肚菌菌丝的生长情况

表 1 铅镉重金属对羊肚菌菌丝菌落形态的影响

重金属	重金属添加浓度 (mg/L)	菌落边缘整齐度	菌丝疏密度	菌丝色泽度
Pb	CK	整齐	浓密	白
	1	整齐	浓密	灰白
	2	整齐	浓密	灰白
	4	整齐	浓密	灰白
	6	整齐	浓密	灰白
	8	不整齐	较浓密	白
	10	—	—	—
	20	—	—	—
Cd	1	整齐	较浓密	白
	2	整齐	浓密	白
	5	整齐	较浓密	白
	8	不整齐	较稀疏	灰白
	10	不整齐	较稀疏	白
	12	不整齐	稀疏	灰白
	20	—	—	—

注:—表示未见菌丝生长。

呈中空状态,色泽变化不明显,CK 组培养的菌丝致密,壁厚,有竹节状,发育良好,表面纹理清晰,菌丝顶端分枝较多,尖端呈多指状或树枝状分枝,并交织成网状。随着铅离子浓度的增加,菌丝变细,且菌丝体表现为透明状,壁薄,分枝减少,竹节间距变长,说明铅离子浓度达到 8 mg/L 后,羊肚菌菌丝细胞在铅胁迫作用下发生消融,致使菌丝壁薄,呈现透明状^[32]。随着培养基中镉离子浓度的增加,菌丝

生长过程中分枝量逐渐减少,当镉离子浓度增加到 5 mg/L 后,菌丝弯折,菌丝体开始变得干瘪,粗细不均匀,生长呈不规则变化,说明在较高重金属离子浓度下菌丝生长会受到明显抑制,显微结构下观察到的菌丝受毒害明显。

2.2 羊肚菌菌丝对铅镉重金属的吸收特性

食用菌胞外多聚物会对重金属吸附、络合以及微沉淀等,重金属元素被食用菌吸收后会留存下来,对外就表现为食用菌对重金属具有一定的吸收特性^[33]。用全谱直读电感耦合等离子发射光谱仪测定羊肚菌菌丝体重金属铅镉含量,通过公式(1)计算出羊肚菌菌丝吸附重金属的富集系数,结果见表 2。由表 2 可知,羊肚菌菌丝体对铅镉均具有吸收富集作用,且羊肚菌菌丝中铅镉重金属含量均随着培养基重金属添加浓度的增加而增加,这与“食用菌子实体中重金属含量随栽培基质中铅镉浓度的增加而增大”的结论^[34]一致。说明栽培原材料中重金属含量对食用菌富集重金属产生直接影响。当铅标准溶液浓度在 1~4 mg/L 范围时,羊肚菌菌丝体对铅的富集能力逐渐增大,在铅离子浓度添加到 4 mg/L 时,富集系数最大,为 0.45,之后继续增加铅离子添加浓度,富集能力反而逐渐下降,直至铅浓度添加浓度达到 10 mg/L 时,羊肚菌菌丝停止生长。而随着镉标准溶液浓度的增加,羊肚菌菌丝体的富集系数变化不大,稳定在 0.12~0.24 之间,在镉添加浓度为 12 mg/L 后菌丝几乎不再生长。说

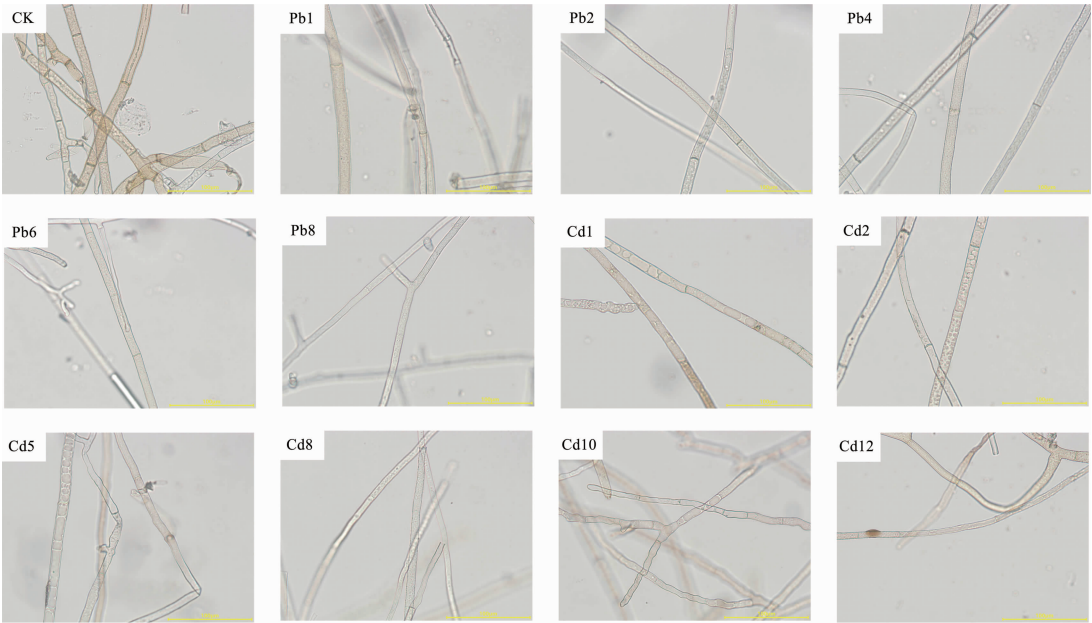


图3 铅镉胁迫下羊肚菌菌丝微观形态

明羊肚菌菌丝在重金属低培养浓度时表现出对重金属铅镉的富集能力,且羊肚菌菌丝富集铅的能力强于富集镉。当重金属达到一定浓度后,对菌丝造成严重致损,完全抑制了羊肚菌菌丝的生长。

表 2 不同铅镉离子浓度胁迫对羊肚菌菌丝重金属富集的影响			
重金属	培养基重金属添加浓度 (mg/L)	菌丝体中重金属富集量 (mg/L)	富集系数
Pb	1	0.171	0.17
	2	0.581	0.29
	4	1.804	0.45
	6	1.879	0.31
	8	2.351	0.29
	10	—	—
	20	—	—
Cd	1	0.244	0.24
	2	0.355	0.18
	5	0.611	0.12
	8	0.966	0.12
	10	2.050	0.21
	12	2.262	0.19
	20	—	—

2.3 铅镉胁迫下羊肚菌菌丝耐受性

通过测定重金属离子对菌丝的抑菌率和半最大效应浓度 (EC₅₀) 评价羊肚菌菌丝重金属的耐受

性,将不同浓度重金属加入培养基培育菌丝,发现羊肚菌菌丝对重金属的极端耐受能力呈现较大差异性。由表 3 可知,在设定的铅镉离子浓度内,整体来看,羊肚菌菌丝的生长受到重金属离子的抑制,且随铅镉离子浓度增加,抑制作用增强。在低浓度时,能促进菌丝生长,铅离子浓度为 1 mg/L 时的菌丝比空白培养基时生长快,促进率为 1.41%,同样在镉离子浓度为 2 mg/L 时也能轻微促进菌丝生长。之后,随着培养基重金属离子浓度增加,菌丝生长的抑制作用均逐渐增强,当铅离子浓度增加到 10 mg/L,羊肚菌菌丝完全停止生长,相比之下,在镉离子浓度增加到 12 mg/L 时,菌落直径为 10 mm,尚未完全抑制菌丝生长,相对抑菌率为 85.92%。不同铅镉离子浓度培养下,菌丝的半最大效应浓度 (EC₅₀) 值也有所差异,其 EC₅₀ 值分别为 6.636、4.942 mg/L,之所以表现出一定的耐受性,可能是因为铅、镉离子进入菌丝体细胞内后,某些形态的重金属与菌丝相互作用而产生耐受性。EC₅₀ 值作为真菌对重金属的耐性指标,能够较客观地反映羊肚菌菌丝的金属耐受性,EC₅₀ 值越小,重金属的抑制作用越大^[24]。说明虽然铅镉离子对菌丝均具有一定的抑制效果,但铅离子对羊肚菌菌丝的抑制作用弱于镉离子。

表 3 不同铅镉离子浓度胁迫对羊肚菌菌丝生长的抑制作用					
重金属	培养基重金属添加浓度 (mg/L)	菌落直径 (mm)	抑菌率 (%)	回归方程	EC ₅₀ (mg/L)
Pb	CK	71	0.00		
	1	72	-1.41	$y = 7.326 - 8.914x$	6.636
	2	66	7.04		
	4	42	40.85		
	6	31	56.34		
	8	27	61.97		
	10	0	100.00		
	20	0	100.00		
Cd	1	64	9.86	$y = 2.396 - 3.453x$	4.942
	2	72	-1.41		
	5	58	18.31		
	8	13	81.69		
	10	17	76.06		
	12	10	85.92		
	20	0	100.00		

3 结论与讨论

采用不同浓度 Pb²⁺ 和 Cd²⁺ 溶液对羊肚菌菌丝

生长环境进行单一胁迫处理后,羊肚菌菌丝生长发育过程中菌丝生长速度、菌丝微观形态、菌丝色泽及疏密度、重金属吸收特性、生长抑制率和重金属

耐受性均受到不同程度的影响。随着铅镉离子胁迫浓度的增加,菌丝生长速度在低浓度时影响甚微,高浓度时菌丝生长速度减缓,直至完全停止生长;菌丝色泽变化不明显,但逐渐变稀疏;菌丝粗细不均匀,渐渐失去光泽,分枝减少,竹节间距变长,生长呈不规则变化。说明随着铅镉离子浓度的增加,对菌丝生长的毒害和破坏作用越来越大。因此,在菌种培育的源头阶段就要加强对栽培基质重金属污染的防治。对羊肚菌菌丝中 Pb^{2+} 和 Cd^{2+} 含量进行检测可知,随着培养基中重金属离子浓度的增加,菌丝中积累的铅镉含量逐渐升高, Pb^{2+} 从 0.171 mg/L 升高至 2.351 mg/L, Cd^{2+} 从 0.244 mg/L 升高至 2.262 mg/L。计算羊肚菌菌丝吸附重金属的富集倍数,发现羊肚菌菌丝体对铅镉均具有吸收富集作用,且羊肚菌菌丝中铅镉重金属含量均随着培养基重金属添加浓度的增加而增加,直至高浓度后,对菌丝造成严重致损,完全抑制羊肚菌菌丝生长。

羊肚菌菌丝对重金属有一定的耐受性,根据相对抑菌率和半最大效应浓度 (EC_{50}) 评价羊肚菌菌丝重金属耐受性。在设定的铅镉离子浓度内,整体来看,羊肚菌菌丝的生长受到重金属离子的抑制,且随铅、镉离子浓度增加抑制作用增强,其 EC_{50} 值分别为 6.636、4.942 mg/L,虽然铅镉离子对菌丝均具有一定的抑制效果,但铅离子要弱于镉离子对羊肚菌菌丝的抑制作用。

参考文献:

- [1] Hibbett D S, Binder M, Bischoff J F, et al. A higher - level phylogenetic classification of the Fungi[J]. *Mycological Research*, 2007,111(Pt5):509 - 547.
- [2] 杜习慧,赵 琪,杨祝良. 羊肚菌的多样性、演化历史及栽培研究进展[J]. *菌物学报*,2014,33(2):183 - 197.
- [3] Masaphy S. Biotechnology of morel mushrooms: successful fruiting body formation and development in a soilless system [J]. *Biotechnology Letters*,2010,32(10):1523 - 1527.
- [4] 范三红,贾槐旺,张锦华,等. 羊肚菌多糖纯化、结构分析及抗氧化活性[J]. *食品与发酵工业*,2020,46(3):65 - 71.
- [5] 熊宏苑,宋 卿. 云南 6 种食用菌中维生素 B_1 和 B_2 的含量调查[J]. *食品安全质量检测学报*,2019,10(22):7606 - 7609.
- [6] Meng B, Zhang Y Z, Wang Z Q, et al. Hepatoprotective effects of *Morchella esculenta* against alcohol - induced acute liver injury in the C57BL/6 mouse related to Nrf - 2 and NF - κ B signaling[J]. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*,2019,2019:6029876.
- [7] Nitha B, Fijesh P V, Janardhanan K K. Hepatoprotective activity of cultured mycelium of Morel mushroom, *Morchella esculenta* [J]. *Experimental and Toxicologic Pathology*,2013,65(1/2):105 - 112.
- [8] Tang Y, Chen J L, Li F H, et al. Antioxidant and antiproliferative activities of modified polysaccharides originally isolated from *Morchella angusticeps* Peck[J]. *Journal of Food Science*,2019,84(3):448 - 456.
- [9] 孟凡云. 羊肚菌胞外多糖与胞内硒多糖抗氧化活性研究[D]. 泰安:山东农业大学,2010.
- [10] Tietel Z, Masaphy S. True morels (*Morchella*) - nutritional and phytochemical composition, health benefits and flavor; a review[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*,2018,58(11):1888 - 1901.
- [11] 孙巧弟,张江萍,谢洋洋,等. 羊肚菌营养素、功能成分和保健功能研究进展[J]. *食品科学*,2019,40(5):323 - 328.
- [12] Cui H L, Chen Y, Wang S S, et al. Isolation, partial characterisation and immunomodulatory activities of polysaccharide from *Morchella esculenta* [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*,2011,91(12):2180 - 2185.
- [13] Sanglimsuwan S, Yoshida N, Morinaga T, et al. Resistance to and uptake of heavy metals in mushrooms [J]. *Journal of Fermentation and Bioengineering*,1993,75(2):112 - 114.
- [14] 王北洪,马智宏,冯晓元,等. 北京市蔬菜重金属含量及健康风险评估[J]. *食品安全质量检测学报*,2015,6(7):2736 - 2745.
- [15] 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.
- [16] 于德洋,程显好,罗 毅,等. 大型真菌重金属富集的研究进展[J]. *中国食用菌*,2011,30(1):10 - 13.
- [17] 徐丽红,何莎莉,吴应森,等. 姬松茸对有害重金属镉的吸收富集规律及控制技术研究[J]. *中国食品学报*,2010,10(4):152 - 158.
- [18] 黄晓辉,王春晖,徐 宁,等. 金针菇、杏鲍菇菌丝对四种重金属耐受和富集特性的研究[J]. *北方园艺*,2019(3):143 - 150.
- [19] 黄建成,余应瑞,应正河,等. 姬松茸菌累积特性研究: II 镉胁迫对菌丝及子实体生长发育的影响[J]. *农业环境科学学报*,2008,27(1):78 - 81.
- [20] 黄天骧,张微思,边银丙,等. 云南省不同地区松茸中重金属含量分析[J]. *中国食用菌*,2011,30(3):37 - 40.
- [21] 夏珍珍,范秀芝,王明锐,等. 黑木耳菌丝对铅、铬和镉重金属富集规律的研究[J]. *湖北农业科学*,2017,56(24):4875 - 4877.
- [22] 陈 兰,陈玉霞,冯 军,等. $Pb(II)$ 和 $Cd(II)$ 在长根菇菌丝体中的富集及其对 SOD、CAT 酶活的影响[J]. *四川大学学报(自然科学版)*,2011,48(6):1391 - 1396.
- [23] 安鑫龙,周启星,李 婷,等. 田头菇菌丝体对镉、铅及其复合胁迫的生长与富集响应[J]. *中山大学学报(自然科学版)*,2008,47(5):93 - 97.
- [24] 安鑫龙. 大型真菌对重金属污染环境的生态修复潜力研究[D]. 天津:南开大学,2008.
- [25] 努尔阿丽耶·阿卜力米提. 一株新疆灵芝的生长特性及响应面发酵优化灵芝多糖[D]. 乌鲁木齐:新疆大学,2016.
- [26] 肖振林,丛 俏,曲 蛟. 铅矿区周边果园土壤重金属污染评价及对水果品质的影响[J]. *科学技术与工程*,2010,10(23):5831 - 5834.

庄海峰, 卢云鹏, 傅建舟, 等. 施用猪粪炭对水稻田土壤肥力与酶活性的影响及安全性分析[J]. 江苏农业科学, 2024, 52(5): 243–249.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2024.05.036

施用猪粪炭对水稻田土壤肥力与酶活性的影响 及安全性分析

庄海峰¹, 卢云鹏¹, 傅建舟², 谢博伊², 赵宇飞¹, 张雅荃¹

(1. 浙江科技学院浙江省废弃生物质循环利用与生态处理技术重点实验室, 浙江杭州 310023; 2. 舟山市农业科学研究院, 浙江舟山 316004)

摘要: 采用大田试验, 研究不同施用量(0、1%、2%、3%)的猪粪炭对水稻田土壤肥力提升及酶学性质的影响, 分析猪粪炭优化调控水稻产量及钝化土壤重金属的应用性。结果表明, 施用猪粪炭提高土壤氮、磷、钾及有机质的含量并降低土壤容重。施炭处理促进提高水稻产量, 其中 1% 施炭处理的水稻产量较对照提高 8.19%, 有效分蘖数提高 17.57%。随着施炭量增加, 分蘖期土壤的蔗糖酶活性呈递增趋势, 成熟期蔗糖酶活性以及 2 个生育期脲酶活性呈先升后降趋势; 成熟期 1% 施炭处理的蔗糖酶、脲酶活性较对照分别提高 51.24%、31.60%。施用猪粪炭显著降低土壤有效态重金属 As、Cd 的含量; 1% 施炭处理在分蘖期、成熟期有效态 As 含量较对照分别降低 10.28%、7.69%, 有效态 Cd 分别降低 14.14%、11.82%。综上, 猪粪炭施用能够促进土壤肥力提升, 提高作物产量并降低土壤重金属风险, 其中 1% 施炭处理效果最佳。

关键词: 猪粪炭; 土壤肥力; 水稻生长; 酶活性; 重金属

中图分类号: S511.06 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2024)05-0243-07

近年来, 随着经济的快速发展和居民消费水平的提高, 畜禽养殖业的生产规模不断扩大, 我国畜禽养殖业已由原来的分散型、小规模向集约化、大规模化方向发展, 这导致动物粪便的大量产生^[1]。据统计, 我国每年畜禽粪污产生量高达 38 亿 t, 给周边环境安全带来潜在的危害, 加剧农业面

源污染问题^[2]。研究表明, 畜禽粪便中含有植物生长需要的多种营养物质, 能够促进作物生产, 是化肥的有机替代品^[3]。然而, 在施用粪肥之后, 农田土壤和作物中可能出现重金属含量增加或超标等现象, 这对农业安全生产构成严重威胁^[4]。如何对畜禽粪便进行有效管理和利用, 已成为一个迫切需要解决的问题。

随着全球环境污染和能源危机的不断加剧, 畜禽粪便生物炭作为一种可再生、环保的废弃物资源, 如何对其进行循环利用, 已成为备受关注的课题。闫翠侠等通过土壤培养试验发现, 鸡粪生物炭有着较强的钝化效果, 可以显著降低 TCLP 提取态的 Pb、Cd 含量^[5]。孙雪等通过盆栽试验发现, 猪粪

收稿日期: 2023-05-08

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 51708505); 浙江省重点研发计划(编号: 2020C01017); 舟山市科技计划(编号: 2021C31019)。

作者简介: 庄海峰(1984—), 男, 黑龙江牡丹江人, 博士, 副教授, 主要从事环境污染防治与废物资源化研究。E-mail: zhuanghai Feng 1984@163.com。

通信作者: 傅建舟, 硕士, 高级工程师, 主要从事农业农村生态与能源技术推广应用工作。E-mail: fujz306@139.com。

[27] 钟晓兰, 周生路, 黄明丽, 等. 土壤重金属的形态分布特征及其影响因素[J]. 生态环境学报, 2009, 18(4): 1266–1273.

[28] 吴迪, 邓琴, 秦樊鑫, 等. 黔产红托竹荪基地土壤中重金属含量及其生态危害风险评价[J]. 土壤通报, 2013, 44(3): 719–722.

[29] 王妮, 尹显慧, 彭丽娟, 等. 辣椒炭疽病原鉴定及其杀菌剂毒力测定[J]. 植物保护, 2019, 45(4): 216–223.

[30] 曾令达, 黄颖, 曾海泉, 等. 不同提取方法对植物粗提物抑制荔枝霜疫霉效果的影响[J]. 广东农业科学, 2016, 43(8): 103–107.

[31] 孟祥春, 黄泽鹏, 凡超, 等. 茶树油粕中茶皂素的提取及其对果蔬采后致病菌的抑制作用[J]. 保鲜与加工, 2019, 19(3): 90–96.

[32] 李波. 镉胁迫下两个姬松茸品种生长及镉富集特性研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2016.

[33] 李春冬, 徐伟良, 郭梁. 食用菌对重金属吸附作用的研究进展[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(5): 23–27.

[34] Tuzen M, Sesli E, Soy lak M. Trace element levels of mushroom species from East Black Sea region of Turkey[J]. Food Control, 2007, 18(7): 806–810.