北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

卷边桩菇对Cu和Cd胁迫的耐受性响应与富集特性

曲忠雪 岑进 李治鑫 尹大川

Tolerance response and enrichment characteristics of *Paxillus involutus* to Cu and Cd stress

Qu Zhongxue, Cen Jin, Li Zhixin, Yin Dachuan

引用本文:
曲忠雪, 岑进, 李治鑫, 尹大川. 卷边桩菇对Cu和Cd胁迫的耐受性响应与富集特性[J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(11):109–115. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250233
Qu Zhongxue, Cen Jin, Li Zhixin, Yin Dachuan. Tolerance response and enrichment characteristics of *Paxillus involutus* to Cu and Cd stress[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(11):109–115. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250233

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250233

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

卷边桩菇与生物炭协同作用对山新杨幼苗生长及生理指标的影响
Synergistic effects of *Paxillus involutus* and biochar on growth and physiological indices of *Populus davidiana* × *P. alba* seedlings
北京林业大学学报, 2025, 47(10): 74–83. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250195

不同郁闭度林下施用污泥产品对菘蓝重金属富集的影响
Effects of sludge product application on heavy metal enrichment in *Isatis tinctoria* under different canopy densities
北京林业大学学报, 2024, 46(8): 139–147. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240031

过表达胡杨*PEPKR2*负调控拟南芥的镉耐受性
Overexpression of *Populus euphratica PEPKR2* negatively regulates cadmium tolerance in *Arabidopsis thaliana*
北京林业大学学报, 2025, 47(4): 21–36. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240376

胡杨*PeREM6.5*调控拟南芥水分胁迫耐受机制
Populus euphratica PeREM6.5 regulating tolerance mechanism to water stress in *Arabidopsis thaliana*
北京林业大学学报, 2022, 44(9): 40–51. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210195

Pb、Cd复合胁迫对桑树种子萌发及幼苗生长的影响
Effects of lead and cadmium combined stress on seed germination and seedling growth of mulberry
北京林业大学学报, 2020, 42(4): 32–40. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190244

恢复湿地土壤重金属含量变化及污染评价
Changes of soil heavy metal contents and pollution evaluation during the restoration of wetlands
北京林业大学学报, 2020, 42(3): 134–142. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190338

DOI:10.12171/j.1000−1522.20250233

卷边桩菇对 Cu 和 Cd 胁迫的耐受性响应与富集特性

曲忠雪[1] 岑 进[2] 李治鑫[1] 尹大川[1]
（1. 沈阳农业大学林学院，辽宁 沈阳 110866；2. 江西官山国家级自然保护区管理局，江西 宜春 336300）

摘要:【目的】卷边桩菇为山新杨优良外生菌根真菌，本研究通过探究其对重金属胁迫的耐受性，以期为今后进一步开发耐重金属胁迫的外生菌根真菌菌剂提供数据借鉴，同时为东北地区山新杨高质量育苗并提高其造林成活率提供理论依据。**【方法】**以卷边桩菇为研究对象，进行离体培养，通过分析不同浓度铜（Cu）和镉（Cd）胁迫下外生菌根真菌生长和重金属积累的变化，以探索卷边桩菇的重金属耐受性。**【结果】**（1）Cu^{2+}胁迫下，卷边桩菇在 Cu^{2+}浓度 ≤ 0.3 μmol/L 时，可以正常生长；Cu^{2+}浓度 > 0.3 μmol/L 时，其生长受到抑制；通过离子能谱分析可知，卷边桩菇对 Cu^{2+}具有较强的富集能力。（2）Cd^{2+}胁迫下，卷边桩菇在 Cd^{2+}浓度 0.1 μmol/L 处理组受胁迫程度最小，可以正常生长，在其他浓度生长受到严重抑制；扫描电镜能谱分析表明，卷边桩菇对 Cd^{2+}的富集能力不及 Cu^{2+}。**【结论】**卷边桩菇对 Cu、Cd 胁迫具有一定的耐受性和富集能力，研究结果可为科学利用卷边桩菇菌剂，提高山新杨造林成活率提供理论依据。

关键词：重金属胁迫；卷边桩菇；外生菌根菌；耐受性；富集特性
中图分类号：S792.11；Q935 **文献标志码：**A **文章编号：**1000−1522(2025)11−0109−07
引文格式：曲忠雪，岑进，李治鑫，等. 卷边桩菇对 Cu 和 Cd 胁迫的耐受性响应与富集特性［J］. 北京林业大学学报，2025，47(11)：109−115. Qu Zhongxue, Cen Jin, Li Zhixin, et al. Tolerance response and enrichment characteristics of *Paxillus involutus* to Cu and Cd stress［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(11): 109−115.

Tolerance response and enrichment characteristics of *Paxillus involutus* to Cu and Cd stress

Qu Zhongxue[1] Cen Jin[2] Li Zhixin[1] Yin Dachuan[1]
(1. School of Forestry, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, Liaoning, China;
2. Administration of Jiangxi Guanshan National Nature Reserve, Yichun 336300, Jiangxi, China)

Abstract:［**Objective**］*Paxillus involutus* is an excellent ectomycorrhizal fungus for *Populus davidiana* × *alba*. This paper investigates its tolerance to heavy metal stress, aiming to provide data for future development of ectomycorrhizal fungal agents resistant to heavy metal stress. It also seeks to offer a theoretical basis for high-quality seedling cultivation of *Populus davidiana* × *alba* and improving its afforestation survival rate in northeastern China.［**Method**］Using *Paxillus involutus* as the research subject, in vitro cultures were conducted. The changes in ectomycorrhizal fungal growth and heavy metal accumulation under different concentrations of copper (Cu) and cadmium (Cd) stress were analyzed to explore the heavy metal tolerance of *Paxillus involutus*.［**Result**］(1) Under Cu^{2+} stress, *Paxillus involutus* grew normally at Cu^{2+} concentrations ≤ 0.3 μmol/L; its growth was inhibited at Cu^{2+} concentrations > 0.3 μmol/L. Ion energy spectrum analysis indicated that *Paxillus involutus* had a strong accumulation capacity for Cu^{2+}. (2) Under Cd^{2+} stress, *Paxillus involutus* experienced the least stress and grew normally in the 0.1 μmol/L Cd^{2+} treatment group, while its growth was severely inhibited at other concentrations.

收稿日期: 2025−06−23 **修回日期:** 2025−08−05
基金项目: 国家自然科学基金项目（32572061、31800542），辽宁省自然科学基金项目（2024-MSLH-414）。
第一作者: 曲忠雪。主要研究方向：森林病理。 Email：1664972521@qq.com 地址：110866 辽宁省沈阳市沈河区东陵路 120 号沈阳农业大学林学院。
责任作者: 尹大川，副教授。主要研究方向：森林病理。 Email：yindachuan@syau.edu.cn 地址：同上。
本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn；http://journal.bjfu.edu.cn

Scanning electron microscopy with energy-dispersive X-ray spectroscopy analysis showed that the accumulation capacity of *Paxillus involutus* for Cd^{2+} was inferior to that for Cu^{2+}. [**Conclusion**] *Paxillus involutus* exhibits a certain tolerance and accumulation capacity under Cu and Cd stress. The research results can provide a theoretical basis for scientific application of *Paxillus involutus* agents to enhance the afforestation survival rate of *Populus davidiana* × *P. alba*.

Key words: heavy metal stress; *Paxillus involutus*; ectomycorrhizal fungi; tolerance; enrichment characteristics

土壤重金属含量超标是近些年来我国农林业发展及生态环境安全面临的一个重要问题[1]。土壤重金属富集具有表聚性和难治理性，给我国农林业的发展造成极大的阻碍[2]。铜（Cu）、镉（Cd）等具有毒性的重金属离子，以各种形式、途径释放到土壤中。不同重金属离子对植物的作用部位和方式存在差异，即使是同一种重金属离子，其浓度的不同也会对植物产生不同的影响[3]。一些重金属在低浓度时可促进植物生长，但超过阈值，则抑制植物生长，影响植物的品质，间接影响人类健康[4]。重金属离子对植物生长的影响复杂，它们可以降低植物的光合速率、改变植物吸收水分和矿物质营养的能力[5−6]。植物可以通过根部表皮层对重金属进行吸收与转运，根尖对土壤中重金属离子具有吸附作用，根尖的不同部位对重金属的吸附能力不同[7]。有研究[8]发现，砷、镉等元素胁迫下，烟草（*Nicotiana tabacum*）侧根根尖的分生组织发育良好，阻碍了根系对镉的吸收。在玉米（*Zea mays*）根部对镉的吸收研究中发现，Cd^{2+}多积累于玉米的根尖或根尖 3 cm 范围内[9]。

外生菌根为植物根系同菌根真菌形成的复合体，是植物在进化过程中为了适应不良环境，与真菌形成的互惠共生组织。具有外生菌根的植物，根部特征明显，常表现为膨大，且具多种颜色的形态。菌丝常呈分叉状，大多生长于植物幼嫩的根尖部位，形成致密的菌套、哈蒂氏网[10]，对根细胞进行保护以及促进植物生长，增强其耐环境胁迫能力[11]。菌套上长出的形状各异的菌丝，能够代替根毛为植物提供水分以及矿质营养[12]。据不完全的数据统计，约有 3% 的植物具有外生菌根。国内学者对松科（Pinaceae）、柏科（Cupressaceae）、杨柳科（Salicaceae）菌根化植物的研究较多，发现外生菌根对重金属胁迫下植物的生长具有重要意义[13]。有研究[14]表明，外生菌根菌可以有效促进樟子松（*Pinus sylvestris* var. *mongolica*）的生长，并降低 Cd^{2+}对樟子松的毒害程度。

卷边桩菇（*Paxillus involutus*）是一种具有重要生态意义的外生菌根菌，能与松（*Pinus* spp.）、桦（*Betula* spp.）、杨（*Populus* spp.）等多种针阔叶树木共生，形成外生菌根，极大地拓展植物根系吸收范围，高效为植物提供氮、磷等养分和水分，并增强其抗旱、抗病及耐重金属胁迫的能力。课题组前期实验已表明接种外生菌根真菌卷边桩菇的山新杨（*Populus davidiana* × *P. alba*）具有较好的重金属铜和镉的耐受性，而卷边桩菇菌株本身对重金属的耐受性和富集能力尚不清楚。本研究通过分析过量铜与镉胁迫下卷边桩菇的生长耐受性和重金属的积累特征，以期为进一步探索外生菌根真菌的重金属耐受机制与筛选优良菌根真菌提供理论依据，为科学开发具有良好应用价值的外生菌根菌剂奠定基础。

1 材料与方法

1.1 研究材料

1.1.1 供试菌种

卷边桩菇分离自辽宁省彰武县阿尔乡镇沈阳农业大学实验林场杨树人工林下，现保存于沈阳农业大学森林病理实验室。

1.1.2 供试培养基

将 PDA 培养基经 121 ℃、30 min 高压湿热灭菌后，待其温度降至 45 ℃ 左右时，倒入直径为 10 cm 的培养皿中，每个平板 50 mL。然后，加入一定量的重金属溶液（$CuSO_4$ 和 $CdCl_2$），快速混匀，制作成不同 Cu^{2+}、Cd^{2+}重金属浓度（0.1、0.2、0.3、0.4 和 0.5 μmol/L）的 PDA 培养基平板。

1.2 研究方法

1.2.1 菌种活化

将直径为 10 mm 的卷边桩菇饼接入 PDA 平板培养基的中心，在恒温培养箱（25 ℃）中避光培养 5 d，备用。

1.2.2 重金属 Cu、Cd 胁迫处理

将直径为 10 mm 的打孔器灭菌、消毒。用其切取活化后的卷边桩菇菌落，将菌饼分别接种在不同重金属浓度的 PDA 平板中心，将菌饼接种在添加无菌水的平板作为对照组（Con），置于 25 ℃ 恒温培养箱避光连续培养 36 d。

1.2.3 菌落生长模式及生长速率测定

每种重金属浓度设置 5 个平板，重复 3 次试验。在试验期间（36 d），以 4 d 为一个周期，十字交叉法

测量菌落的直径，并记录菌株生长状况。采用 Origin 2024，将记录的时间（X，d）、测定的菌落直径（Y，mm）制成折线图，并进行菌株生长曲线非线性拟合。以菌落每天生长的平均值来表示菌落生长速率（mm/d）。

1.2.4　菌落生物量测定

待菌株生长 36 d 后，从卷边桩菇菌落平板中提取菌丝，放置于烘箱中，设定为 80 ℃，烘干至菌丝质量恒定，用电子天平测定不同处理组菌丝的干质量，即为菌丝的生物量。

1.2.5　卷边桩菇菌丝 Cu、Cd 元素能谱分析

对各重金属浓度处理培养皿中生长 36 d 的卷边桩菇进行取样，用刀片将菌饼切成长方形 6～8 片，在菌饼正面右上角斜切一个小三角后，将修饰好的样品分别放入装有 FAA 固定液的玻璃瓶中，用针筒将瓶中空气抽净，放入 4 ℃ 冰箱保存。将样品送至沈阳农业大学分析测试中心，采用扫描电镜（Hitachi Regulus 8100）进行菌丝 Cu、Cd 元素能谱分析，进而得出各元素在菌丝中的质量和原子占比。

1.3　数据处理

采用 SPSS 26.0 进行单因素方差分析，设定 $\alpha = 0.05$ 对比各处理的差异显著性。

2　结果与分析

2.1　Cu、Cd 胁迫对卷边桩菇生长模式的影响

当 Cu^{2+}浓度 ≤ 0.4 μmol/L 时，卷边桩菇菌落的生长曲线呈“S”形，当 Cu^{2+}浓度 为 0.5 μmol/L 时，菌落的生长曲线呈“J”形，两种生长模式，均呈现出非线性关系（表 1）；在接种 8 d 后，除 0.5 μmol/LCu^{2+}的处理组外，其余浓度的卷边桩菇处理组均进入指数生长阶段（图 1）。Cu^{2+}浓度 ≤ 0.3 μmol/L 的各处理组，在接种后 20～28 d 先后长满平板，所用时间长短依次为对照（Con）< Cu0.1 < Cu0.2 = Cu0.3（图 1）。该结果表明，在中轻度的 Cu^{2+}（≤ 0.3 mol/ L）处理下，菌落生长受到较小的抑制。0.4 μmol/L 处理组已接近长满，而在重度的 Cu^{2+}胁迫下（0.5 μmol/L），菌株在 8 d 后才开始生长，卷边桩菇菌株生长速率、形态明显受到 Cu^{2+}的抑制；对照组长满平板时（36 d），0.5 μmol/L 处理的菌落直径为 72 mm，尚未长满平板（图 1）。

相较于 Cu^{2+}，卷边桩菇的生长受到 Cd^{2+}的严重抑制，除了空白对照组外，其他 Cd^{2+}处理组卷边桩菇的生长均十分缓慢，甚至不生长（图 1B）。其中，0.1 μmol/L 处理组受胁迫程度最小，36 d 后，卷边桩菇菌落直径为 26 mm；而 0.4 μmol/L 和 0.5 μmol/L Cd^{2+}处理下的卷边桩菇处理组几乎没有生长（图 1D）。由试验结果可知，$CdC1_2$ 溶液对菌株生长的抑制作用更加显著。

表 1　Cu、Cd 胁迫下卷边桩菇生长模式

Tab. 1　Growth patterns of *Paxillus involutus* under Cu and Cd stress

处理	浓度/（μmol·L^{-1}）	非线性拟合方程	
Cu^{2+}	0.0	$Y = 42.547\ 0\ln X + 2.035\ 7$	$R^2 = 0.924$
	0.1	$Y = 43.360\ 0\ln X - 6.010\ 0$	$R^2 = 0.897$
	0.2	$Y = 41.265\ 0\ln X - 9.140\ 2$	$R^2 = 0.848$
	0.3	$Y = 41.118\ 0\ln X - 10.154\ 0$	$R^2 = 0.832$
	0.4	$Y = 37.012\ 0\ln X - 7.980\ 0$	$R^2 = 0.831$
	0.5	$Y = 26.431\ 0\ln X - 5.817\ 7$	$R^2 = 0.831$
Cd^{2+}	0.0	$Y = 43.795\ 0\ln X - 8.849\ 2$	$R^2 = 0.876$
	0.1	$Y = 6.288\ 3\ln X + 6.101\ 9$	$R^2 = 0.692$
	0.2	$Y = 4.211\ 2\ln X + 7.039\ 3$	$R^2 = 0.629$
	0.3	$Y = 4.829\ 0\ln X + 6.606\ 1$	$R^2 = 0.660$
	0.4	$Y = 3.040\ 1\ln X + 7.808\ 0$	$R^2 = 0.617$
	0.5	$Y = 0.587\ 3\ln X + 9.512\ 9$	$R^2 = 0.379$

注：Y为培养时间，X为菌落直径。

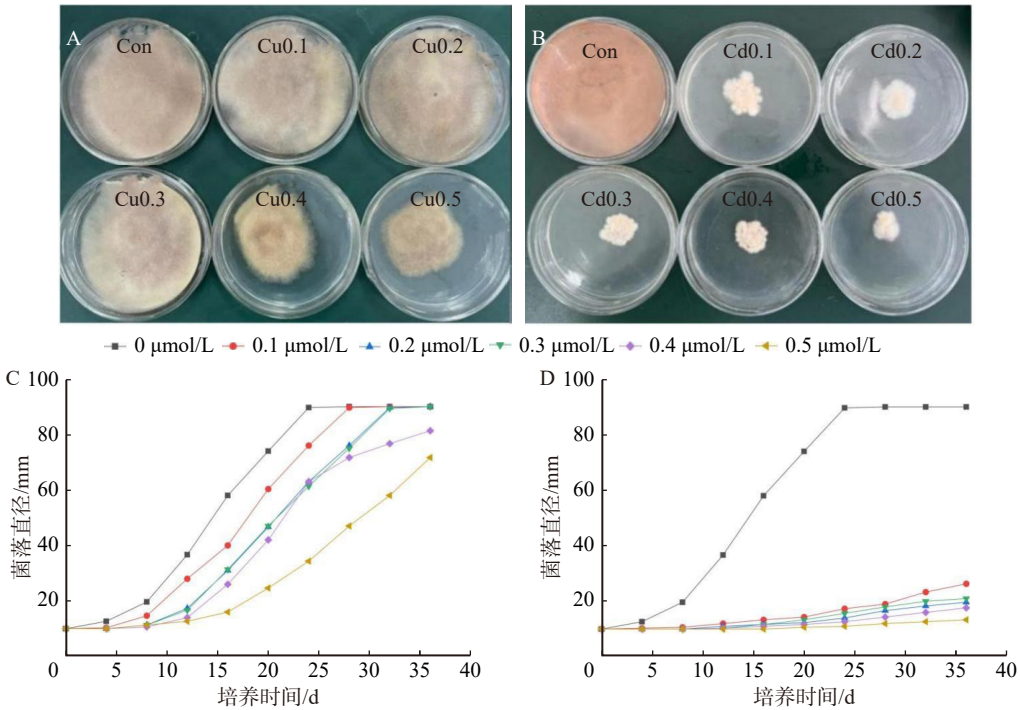
2.2　Cu、Cd 胁迫对卷边桩菇生长速率的影响

不同浓度的 Cu^{2+}对卷边桩菇菌株的生长速率影响不同。随着 Cu^{2+}浓度的升高，卷边桩菇菌株生长速率呈现缓慢下降趋势（图 2）。在 0.1～0.3 μmol/L 浓度下，菌株生长速率基本相同，约为 2.22 mm/d。这反映出中轻度 Cu^{2+}胁迫对卷边桩菇菌株的生长影响较小，即受到的抑制作用较小。当 Cu^{2+}浓度为 0.4～0.5 μmol/L 时，生长速率迅速下降，并降到最低（1.71 mm/d），与对照组间差异显著。这表明重度 Cu^{2+}胁迫下，卷边桩菇菌株的生长受到较强的抑制作用。

相较于 Cu^{2+}，Cd^{2+}胁迫对卷边桩菇菌株的生长速率的影响更大，随着 Cd^{2+}浓度的升高，卷边桩菇菌株生长速率呈迅速下降趋势。在 0.1 μmol/L Cd^{2+}胁迫下，卷边桩菇生长速率急剧下降，与空白对照相比显著下降了 79.7%，后期下降趋势不明显（图 2）。在 Cd^{2+}浓度为 0.5 μmol/L 时，生长速率降至最低（0.09 mm/d），与空白对照组相比存在极大差异。表明卷边桩菇对 Cd^{2+}存在的环境非常敏感，生长受到较大抑制。

2.3　Cu、Cd 胁迫对卷边桩菇生物量的影响

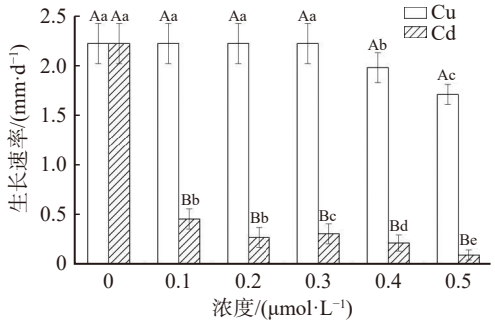
不同浓度的 Cu^{2+}溶液对卷边桩菇菌株的生物量有不同程度的影响，其生物量与 Cu^{2+}浓度呈负相关（图 3）。在 0.1～0.2 μmol/L 浓度范围内，生物量下降不明显，表明中轻度 Cu^{2+}处理对卷边桩菇菌株生长的抑制作用较弱，这进一步支撑了前面的结果。而在重度胁迫下（≥0.3 μmol/），卷边桩菇菌株的生



A. 接种 36 d 不同浓度 Cu 胁迫下卷边桩菇生长情况；B. 接种 36 d 不同浓度 Cd 胁迫下卷边桩菇生长情况；C. 不同浓度 Cu 胁迫下卷边桩菇生长曲线；D. 不同浓度 Cd 胁迫下卷边桩菇生长曲线。

图 1 不同浓度 Cu、Cd 胁迫下卷边桩菇生长情况

Fig. 1 Growth of *Paxillus involutus* under Cu and Cd stress at different concentrations



不同大写字母表示同一浓度下不同 Cu、Cd 胁迫间的生长速率差异显著；不同小写字母表示同一重金属处理下，不同处理浓度的生长速率差异显著。下同。

图 2 不同浓度 Cu、Cd 胁迫下卷边桩菇生长速率

Fig. 2 Growth rates of *P. involutus* under different concentrations of Cu and Cd stress

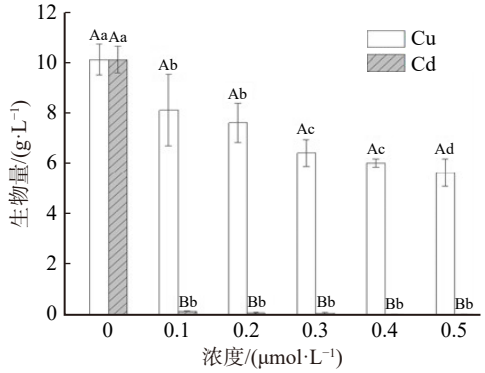


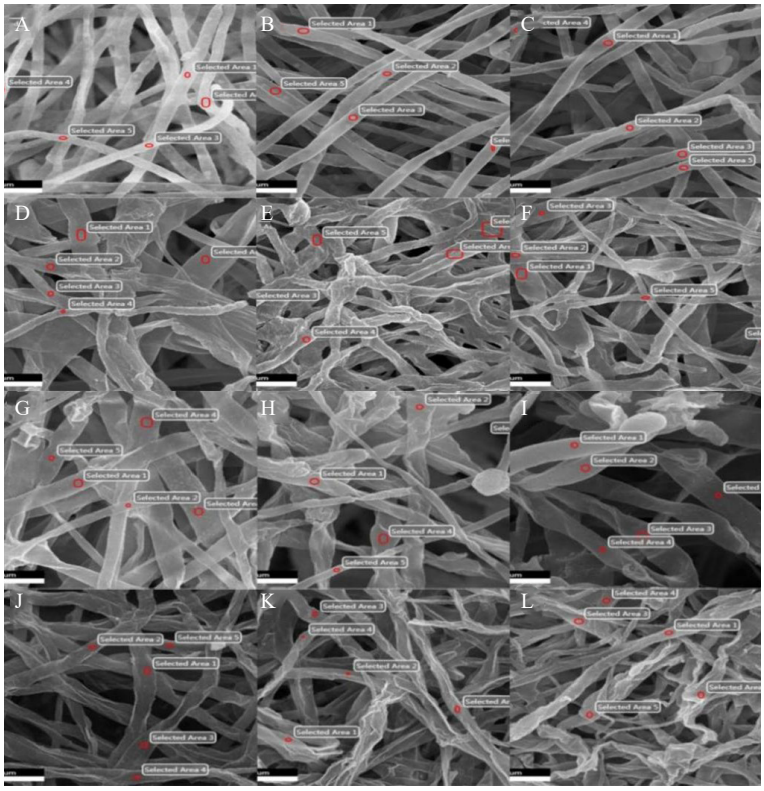
图 3 不同浓度 Cu、Cd 胁迫下卷边桩菇生物量

Fig. 3 Biomass of *P. involutus* under different concentrations of Cu and Cd stress

长受到较强的抑制，Cu^{2+}浓度为 0.5 μmol/L 时，生物量最低为 5.7 g/L，仅为对照组的 55.88%。不同浓度的 Cd^{2+}对卷边桩菇菌株生长的抑制十分明显(图 3)。在 Cd^{2+}胁迫下，卷边桩菇菌饼几乎不生长，各浓度处理组的生物量与空白对照存在显著差异，这进一步表明卷边桩菇对 Cd^{2+}处理非常敏感，生长受到严重抑制。此外，在各浓度处理下，Cu^{2+}和 Cd^{2+}胁迫下的卷边桩菇生物量差异均显著，其中在 0.1 μmol/L 时，差异最大，Cu^{2+}胁迫下的卷边桩菇生物量是 Cd^{2+}胁迫下的 43.16 倍。这进一步表明，相较于 Cu^{2+}，Cd^{2+}对卷边桩菇生长的抑制作用更强。

2.4 卷边桩菇菌丝 Cu、Cd 元素能谱分析

Cu、Cd 元素能谱图(图 4)显示：相对于对照组，重金属处理的卷边桩菇的菌丝失水，褶皱，呈老态；随着 Cu^{2+}、Cd^{2+}浓度升高，菌丝状态越来越差，表明其受毒害越来越深。具体来说，随着 Cu^{2+}浓度升高，Cu 质量占比、原子占比均呈上升趋势；在 0.5 μmol/L 时，Cu 质量占比、原子占比均达到最高，与对照组相比分别显著增加了 267.74% 和 285.00%(图 5A)。随着 Cd^{2+}浓度升高，Cd 质量占比呈先上升后下降趋势，在 0.4 μmol/L 时，Cd 质量占比达到最高，与对照组相比显著增加了 260%；Cd 原子占比总体上呈上升趋势，但变化不明显，在 0.3 μmol/L 时，原子占比达



A 和 G 为对照处理；B ~ F 为 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5 μmol/L Cu^{2+}胁迫下的卷边桩菇；H ~ L 为 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5 μmol/L Cd^{2+}胁迫下的卷边桩菇。红色区域表示 Cu、Cd 离子富集状况以及信号分布。

图 4　卷边桩菇菌丝 Cu、Cd 元素能谱分析

Fig. 4　Energy spectrum analysis of Cu and Cd elements in mycelium of *P. involutus*

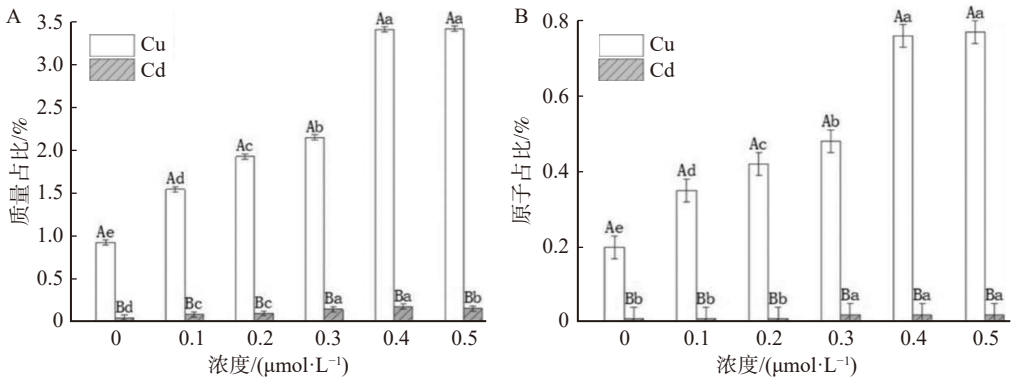


图 5　Cu、Cd 元素质量、原子占比

Fig. 5　Mass and atomic proportions of Cu and Cd elements

到最高值，与对照组相比显著增加了 100%（图 5B）。在 0.5 μmol/L 时，Cu 和 Cd 间的质量占比、原子占比均差异最大，与 Cd 相比，Cu 质量占比、原子占比分别显著增加了 344.16% 和 290.00.%（图 5）。该结果表明，卷边桩菇对 Cu^{2+}、Cd^{2+}均具有一定的吸附能力。

3　讨　　论

3.1　卷边桩菇对重金属 Cu、Cd 具有不同程度的耐受性

真菌的生长受环境中很多因素制约，适量的重金属会促进菌根真菌的代谢，而过量的重金属会阻碍其代谢，甚至抑制菌丝的生长[15]。菌根的形成，是植物与真菌共同适应环境的结果，这种互惠共生关系，可减轻重金属对植物造成的损伤，提高植物对重金属离子的耐受性[16]。本文研究了卷边桩菇菌株在不同对 Cu^{2+}、Cd^{2+}浓度下的生长量变化及生长态势等，结果表明：在中轻度 Cu^{2+}、Cd^{2+}胁迫下（Cu^{2+}浓度 ≤ 0.4 μmol/L，Cd^{2+}浓度 ≤ 0.2 μmol/L），卷边桩菇具有良好的耐受性，菌落生长良好，但在菌丝生物量方面体现不明显。生物量的差异可能与金属离子的种类和对真菌的毒性效应有关，菌根真菌在重金属胁迫下，可以促进植物的生长，同时可以对重金属污染的土壤进行一定程度的修复[17−18]。黄艺等[13]发现纯培养条件下，4 种外生菌根真菌的生长随重金属 Cu 浓

度的增加而显著降低，这与本试验的研究结果类似。而在轻度 Cd^{2+}胁迫下，镉的毒性也较强，菌株对 Cd^{2+}的耐受性相对较弱，高浓度下，卷边桩菇几乎不能正常生长。朱一丹[19]研究结果表明，重金属镉胁迫对 4 种外生菌根真菌的生长都表现为抑制作用，这与本研究结果一致，卷边桩菇对 Cu^{2+}的耐受性要强于对 Cd^{2+}。

3.2 卷边桩菇对重金属 Cu、Cd 具有不同程度的富集特性

利用有益微生物缓解逆境胁迫对植物生长的危害，促进植物的生长发育，开发适应逆境环境的益生菌制剂是近年来国内外研究的热点。菌根真菌的菌丝对重金属吸收积累的量，会不同程度反映该菌丝在重金属胁迫下的耐受能力[20, 14]。菌根真菌在与植物形成菌根共生体后，会大量截留重金属离子，从而提高了植物对重金属的抗性，减轻重金属对植物的危害[21]。从菌丝生物量来看，重金属 Cu^{2+}胁迫下，卷边桩菇的菌丝生物量显著高于 Cd^{2+}胁迫（图 3）。能谱分析结果显示，Cu^{2+}胁迫下，菌丝内 Cu 的原子占比也高于 Cd，原因可能是卷边桩菇菌丝内的 Cu 结合位点要高于 Cd。卷边桩菇在 Cd^{2+}胁迫下，依旧可以生长，说明其对 Cd^{2+}依然具有一定程度的耐受性。有学者[22−23]对重金属耐受性不同的外生菌根真菌 *Suillus bovinus* 菌株进行研究后发现，耐性菌株对重金属的吸收量要低于非耐性菌株。在本研究中，相较于 Cd^{2+}胁迫而言，卷边桩菇菌株对 Cu^{2+}胁迫表现出更高的浓度范围，推测卷边桩菇的铜耐受机理可能是卷边桩菇菌丝细胞中具有较多的 Cu 结合位点，可以把环境中的过量 Cu^{2+}固持在菌丝上，以保证卷边桩菇较高的存活率。

4 结　　论

本文通过观察外生菌根真菌卷边桩菇在不同浓度的铜与镉胁迫下的生长情况，以及分析 Cu 和 Cd 培养条件下菌株的离子能谱，得出以下结论。

（1）卷边桩菇对铜与镉胁迫均具备一定程度的耐受能力，这种耐受特性使其能够在高浓度复合重金属污染的不利环境中保持生存与生长，为其在复杂污染场地的实际应用提供了首要的生物学前提和广泛的适应潜力。

（2）卷边桩菇能通过富集作用机制实现自我防护。卷边桩菇通过菌丝体的大量生物吸附与主动吸收，将环境中的 Cu^{2+}、Cd^{2+}富集于自身，降低环境重金属有效浓度，从而有效阻断 Cu 和 Cd 的毒害作用路径，维持正常的生理代谢功能。

外生菌根真菌卷边桩菇对 Cu 和 Cd 良好的耐受性和富集效应具有良好的菌剂开发前景，下一步可以加大卷边桩菇菌剂的研究力度，为其应用于杨树造林，提高杨树造林成活率，缓解重金属离子对杨树栽植时所造成的重金属胁迫提供技术依据。

参 考 文 献

[1] Khan A, Khan S, Khan M A, et al. The uptake and bioaccumulation of heavy metals by food plants, their effects on plants nutrients, and associated health risk: a review[J]. Environmental Science & pollution Research International, 2015, 22(18): 13772−13799.

[2] 蒋爽. 兴安落叶松 (*Larix gmelinii*) 菌根苗对重金属镉、铜胁迫的生理响应 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2022.
Jiang S. Physiological response of *Larix gmelinii* mycorrhizal seedlings to heavy metal cadmium and copper stress [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2022.

[3] Colpaert J V, Vanassche J A. Zinc toxicity in ectomycorrhizal *Pinus sylvestris*[J]. Plant and Soil, 1992, 143(2): 201−211.

[4] Guo Y, Mao K, Cao H, et al. Exogenous selenium (cadmium) inhibits the absorption and transportation of cadmium (selenium) in rice[J]. Environmental Pollution, 2021, 268: 115829.

[5] 廖自基. 环境中微量元素的污染危害与迁移转化 [M]. 北京: 科学出版社, 1989.
Liao Z J. Pollution hazards and migration transformation of trace elements in the environment [M]. Beijing: Science Press, 1989.

[6] Chen A Q, Mao X, Sun Q H, et al. *Alternaria mycotoxins*: an overview of toxicity, metabolism, and analysis in food[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2021, 69(28): 7817−7830.

[7] 江建波, 文吉昌, 娄飞. 植物对重金属的吸收和转运途径及调控机制研究进展 [J]. 应用化工, 2024, 53(1): 212−217.
Jiang J B, Wen J C, Lou F. Research progress on the absorption and transport pathways and regulatory mechanisms of heavy metals in plants[J]. Applied Chemistry, 2024, 53(1): 212−217.

[8] Tao Q, Hou D, Yang X, et al. Oxalate secretion from the root apex of *Sedum alfredii* contributes to hyperaccumulation of Cd[J]. Plant and Soil, 2016, 398(1/2): 139−152.

[9] Seregin I V, Vooijs R, Kozhevnikova A D, et al. Effects of cadmium and lead on phytochelatin accumulation in maize shoots and different root parts[J]. Doklady Biological Sciences, 2007, 415(1): 304−306.

[10] Kalsotra T, Khullar S, Agnihotri R, et al. Metal induction of two metallothionein genes in the ectomycorrhizal fungus *Suillus himalayensis* and their role in metal tolerance[J]. Microbiology, 2018, 165(16): 868−876.

[11] 何映乾, 李治鑫, 尹大川. 卷边桩菇与生物炭协同作用对山新杨幼苗生长及生理指标的影响 [J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(10): 74−83.
He Y Q, Li Z X, Yin D C. Synergistic effects of *Paxillus involutus* and biochar on growth and physiological indices of *Populus davidiana* × *P. alba* seedlings[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(10): 74−83.

[12] 吴洁婷, 王立, 赵磊, 等. 菌根真菌对芦苇铜吸收及抗铜能力的

影响 [J]. 生态环境学报, 2019, 28(3): 571−579.
Wu J T, Wang L, Zhao L, et al. The effect of mycorrhizal fungi on copper absorption and copper resistance in reed[J]. Chinese Journal of Ecology and Environment, 2019, 28(3): 571−579.

[13] 黄艺, 彭博, 李婷, 等. 外生菌根真菌对重金属铜镉污染土壤中油松生长和元素积累分布的影响 [J]. 植物生态学报, 2007, 31(5): 923−929.
Huang Y, Peng B, Li T, et al. The effect of ectomycorrhizal fungi on the growth and element accumulation distribution of *Pinus tabulaeformis* in soil contaminated with heavy metal copper and cadmium[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2007, 31(5): 923−929.

[14] 尹大川, 邓勋, 宋小双, 等. Cd 胁迫下外生菌根菌对樟子松生理指标和根际土壤酶的影响 [J]. 生态学杂志, 2017, 36(11): 3072−3078.
Yin D C, Deng X, Song X S, et al. Effects of ectomycorrhizal fungi on physiological indexes of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* seedlings and soil enzyme activities under cadmium stress[J]. Chinese Journal of Ecology, 2017, 36(11): 3072−3078.

[15] 孙宇靖. 褐环乳牛肝菌 (*Suillus luteus*) 对马尾松富集转移重金属的影响 [D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2020.
Sun Y J . The effect of *Suillus luteus* on the enrichment and transfer of heavy metals in *Pinus massoniana* [D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2020.

[16] Zhu X C, Song F B, Liu S Q, et al. Arbuscular mycorrhizae improves photosynthesis and water status of *Zea mays* L. under drought stress[J]. Plant Soil Environment, 2012, 58(4): 186−191.

[17] Yang Y R, Beitong H, Xu Z J, et al. Heavy metal domestication enhances beneficial effects of arbuscular mycorrhizal fungi on lead (Pb) phytoremediation efficiency of *Bidens parviflora* through improving plant growth and root Pb accumulation[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022, 29(22): 32988−33001.

[18] Li Y N, Xu Z J, Hu J, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi and glomalin play a crucial role in soil aggregate stability in Pb-contaminated soil[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022, 19(9): 5029.

[19] 朱一丹. 耐镉外生菌根真菌的筛选及其增强麻栎幼苗镉耐性的机理研究 [D]. 济南: 济南大学, 2020.
Zhu Y D . Screening of cadmium tolerant ectomycorrhizal fungi and study on the mechanism of enhancing cadmium tolerance in *Quercus acutissima* seedlings [D]. Jinan: Jinan University, 2020.

[20] 张英伟, 柴立伟, 王东伟, 等. Cu 和 Cd 胁迫下接种外生菌根真菌对油松根际耐热蛋白固持重金属能力的影响 [J]. 环境科学, 2014, 35(3): 1169−1175.
Zhang Y W, Chai L W, Wang D W, et al. The effect of inoculation with ectomycorrhizal fungi under Cu and Cd stress on the ability of heat tolerant proteins in the rhizosphere of *Pinus tabulaeformis* to retain heavy metals[J]. Environmental Science, 2014, 35(3): 1169−1175.

[21] Colpaert J V, Wevers J, Krznaric E, et al. How metal-tolerant ecotypes of ectomycorrhizal fungi protect plants from heavy metal pollution[J]. Annals of Forest Science, 2011, 68(1): 17−24.

[22] Jouni K, Aitor B, Bartosz A, et al. Morphological and ecophysiological root and leaf traits in ectomycorrhizal, arbuscular-mycorrhizal and non mycorrhizal *Alnus incana* seedlings[J]. Plant and Soil, 2019, 436: 283−297.

[23] Quoreshi A M, Khasa D P. Effectiveness of mycorrhizal inoculation in the nursery on root colonization, growth, and nutrient uptake of aspen and balsam poplar[J]. Biomass and Bioenergy, 2008, 32(5): 381−391.

（责任编辑　赵田芸
责任编委　戴玉成）