

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2015.08.003

西南林区 3 株外生菌根真菌对 酸铝胁迫的营养响应与抗铝性^①

吴雪莲, 周倩, 辜夕容, 万宇轩,
毛文韬, 宋影, 曾清苹

西南大学 资源环境学院, 重庆 400716

摘要: 试验将西南林区的 3 株土著外生菌根真菌即彩色豆马勃 *Pt* 715(*Pisolithus tinctorius* 715)和松乳菇 [*Lactarius deliciosus* (L. Fr.) Gray] 的两个株系 *Ld* 2, *Ld* 3 培养在酸性铝溶液中, 测定其生长及养分吸收状况, 以研究它们在酸铝胁迫下的营养响应及抗铝性, 为将其应用于酸铝林区的生态修复提供理论依据. 结果表明: ① 3 菌株均具抗铝性, 其抗铝能力大小依次为 *Ld* 2, *Ld* 3, *Pt* 715; ② 酸铝胁迫时, 3 株真菌除对钾的吸收明显下降外, 对磷、铁、镁的吸收显著增强, 对铝有超富集作用, 尤其是高铝时, *Pt* 715, *Ld* 2 和 *Ld* 3 的含铝量分别是低铝时的 4.83 倍, 13.53 倍和 8.89 倍; ③ *Ld* 2 在生长, 对磷、铁、镁的吸收, 以及对铝的富集作用上均强于 *Pt* 715 和 *Ld* 3, 可能是快速缓解铝毒最具潜力菌株.

关键词: 外生菌根真菌; 铝毒; 营养; 抗铝性

中图分类号: S718.52

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2015)08-0013-07

酸性土壤中, 活性铝质量分数增加是引起森林衰亡的主要原因之一^[1]. 我国西南林区土壤活性铝质量摩尔浓度一般在 0.04~0.15 mmol/L 之间^[2], 土壤酸化和铝毒害现象十分普遍. 目前关于土壤酸化引起活性铝质量分数增加, 继而影响植物生长方面已有大量研究. 据报道, 我国西南林区分布最广、蓄积量最大的马尾松在土壤活性铝质量摩尔浓度达到 0.15 mmol/L 以上时即受到毒害, 1.0 mmol/L 以上的活性铝严重危害其生长^[3]. 铝活化后易与土壤中的磷酸根离子结合生成磷酸铝沉淀, 磷的有效性显著降低^[4]; 钾、硫、钙、镁、铁等离子有效性严重降低, 氮的矿化受到影响^[5]. 同时, 生长于活性铝质量分数较高土壤中的树木易吸收大量的铝, 造成植物细胞壁严重损坏, 细胞质膜受损, 矿质元素的吸收和转运受阻^[6], 细胞有丝分裂和减数分裂不能顺利进行^[7-8], 最终导致林木生长减弱甚至死亡. 因此, 减轻铝毒害, 改善土壤和植物营养状况, 对促进酸铝危害林区植物的生长和发育将具有十分重要的意义.

菌根真菌是自然界大多数植物赖以生存的最基本组成部分, 能改善林木营养, 是强化植物对重金属生物修复作用的一种有效的生物学途径^[9-10]. 闫明等^[11]发现, 铝胁迫时丛枝菌根林木的地上部分和地下部分的形态、生物量和不同组织内 P 质量分数等多数指标均显著好于未接种植株, 认为丛枝菌根能缓解铝(Al)毒. 森林生态系统中, 优良外生菌根真菌(ECMF)与植物根系形成菌根之后, 能够显著改善寄

① 收稿日期: 2014-08-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(31100464); 中央高校基本科研业务费专项资金(XDJK2012B021); 西南大学资源环境学院本科生科技创新“光炯”培育项目(20110204).

作者简介: 吴雪莲(1990-), 女, 湖北襄阳人, 硕士研究生, 主要从事林木营养的研究.

通信作者: 辜夕容, 博士, 副教授.

主植物的营养状况^[12]. 有研究表明, 部分 ECMF 能显著提高寄主植物抗(耐)铝毒的能力^[13-14]. 因此, 选用适宜的 ECMF 进行苗期接种可以方便、经济、有效地促进酸化贫瘠土地上林木的生长. 然而, ECMF 菌株与受胁迫程度的差异直接影响到菌株对铝的抗性及其生理生化反应. 如 1.0 mmol/L 的铝对彩色豆马勃(*Pisolithus tinctorius*) *Pt* 715, 线波粘滑菇(*Hebeloma repandum*) *Hr* Sp, 土生空团菌(*Cenococcum geophilum strain* SIV) *Cg* SIV 的生长无抑制作用, 但却明显降低双色蜡蘑(*Laccaria bicolor*) *Lb* S238N, *Lb* S238A 和 *Lb* 270 的生长, 而 6 个菌株的磷、钾吸收量却都明显高于无铝处理^[15]; 王明霞等^[16]也发现 *Pt* 715 的生长未受到铝的显著影响; 但彩色豆马勃的另一个株系 *P. tinctorius* sp(*Pt*) 生长量却明显受到铝的抑制, 然而其菌丝体内 P, K, Ca, Mg 水平却未明显变化^[17]. 可见, 要提高植物抗铝性, 菌株的选择尤为重要^[18]. 我国南方林区土壤酸化和铝毒害现象十分普遍, 造林时最好从土著菌株中就地筛选、就地应用^[19-20]. 为此, 试验特选取西南酸铝林区的土著菌种彩色豆马勃和松乳菇, 研究它们在不同浓度铝胁迫下的生长及对养分和铝的吸收情况, 旨在筛选出适宜西南林区的抗铝菌种(株), 并探索它们在铝胁迫下的营养生理反应, 以进一步弄清 ECMF 的抗(耐)铝机理, 为将 ECMF 应用于我国酸铝林区的生态恢复提供科学理论依据.

1 材料与方法

1.1 供试菌株

试验选用在西南地区分离获得、生长较快的 3 株土著 ECMF 为供试菌株, 分别是彩色豆马勃 *P. tinctorius* 715 (*Pt* 715, 采自四川西昌桉树林下, 微酸性红壤, pH 值 5.9) 和松乳菇 [*L. deliciosus* (L. Fr.) Gray] 的两个株系 *Ld* 2 和 *Ld* 3 (采于重庆缙云山马尾松林下, 酸性黄壤, pH 值 3.9~4.3).

取分离保存的上述菌株, 接种于 Pachlewski 固体培养基上暗培养 14 d 备用. Pachlewski 固体培养基组成为酒石酸铵 0.5 g/L, 磷酸二氢钾 1.0 g/L, 硫酸镁 0.5 g/L, 葡萄糖 20.0 g/L, 维生素 B₁ 0.1 × 10⁻³ g/L, 琼脂 20 g/L 和 1 mL/L 微量元素混合液[每升含 8.45 mg H₃BO₃, 5 mg MnSO₄, 6 mg FeSO₄, 0.625 mg CuSO₄, 2.77 mg ZnCl₂ 和 0.27 mg (NH₄)₂MoO₄]. 无琼脂时为 Pachlewski 液体培养基, pH 值为 5.5.

1.2 试验设计

试验将 Al₂(SO₄) · 18H₂O 加入 Pachlewski 液体培养基, 配制成 Al³⁺ 浓度分别为 0.0, 0.5, 1.0, 2.0 mmol/L 的无铝(对照)、低铝、中铝、高铝 4 种处理, 用稀 HCl 和稀 NaOH 调节 pH 至 3.8. 然后, 分装于 250 mL 三角瓶中, 每瓶 40 mL, 封口后于 121 °C 高温高压蒸汽灭菌 30min, 冷却后分别接种直径为 6 mm 的供试琼脂菌种 4 块, 在 (25 ± 1) °C 的黑暗条件下静置培养 21 d. 试验做 3 次, 每处理设 5 次重复, 取平均值.

1.3 测定项目与方法

培养结束后, 过滤分离菌丝, 去离子水洗净, (80 ± 1) °C 烘至恒质量后测定质量. 用 HNO₃—HClO₄ 消化菌丝体, 分别用钼锑抗比色法、火焰光度计法、铝试剂比色法测定消化液中 P, K 和 Al 的浓度, 消化液中 Mg 和 Fe 浓度用原子吸收分光光度法测定.

1.4 数据分析与处理

试验数据用 spss19.0 软件进行方差分析, 用 Duncan 法进行多重比较, 用 Microsoft Excel 2010 制作图表.

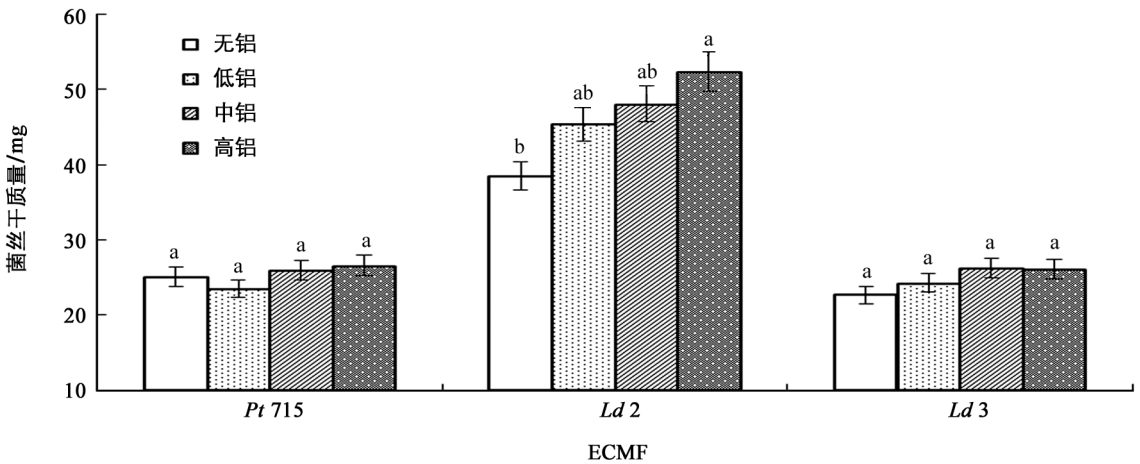
2 结果分析

2.1 酸铝胁迫下 ECMF 的生长响应

酸铝胁迫下, ECMF 的生长状况是筛选抗(耐)型菌种(株)的生理指标之一. 图 1 显示, 与各自的对照相比, *Pt* 715, *Ld* 2 和 *Ld* 3 的生长在 0.5~2.0 mmol/L 的铝胁迫时并未下降, 反而得到一定的促进, 说明它们均具抗铝性. 其中, *Ld* 2 的生长在铝胁迫时明显提高, 低、中、高浓度铝胁迫时的生物量较无铝时分别提高了 17.94%, 25.04% 和 36.31%; 而 *Pt* 715 和 *Ld* 3 在酸铝胁迫时生物量无明显改变. 可见, 3 菌株

都具有抗(耐)铝毒胁迫的能力, 尤以 *Ld 2* 的抗性最强.

图 1 可见, 3 株 ECMF 在酸铝胁迫下的生长速率差异有统计学意义. 其中, *Ld 2* 生长最快, 平均达到 2.19 mg/d, 显著高于 *Pt 715*(1.20 mg/d)和 *Ld 3*(1.18 mg/d), 分别是后两者的 1.83 倍和 1.86 倍.



图中小写字母不同表示差异有统计学意义($p<0.05$).

图 1 酸铝胁迫下 ECMF 的生长响应

2.2 ECMF 对酸铝胁迫的营养响应

2.2.1 磷

低浓度铝对 *Pt 715* 和 *Ld 3* 的含磷量影响无统计学意义, 但中、高浓度铝却令其明显上升(表 1), 分别较无铝时增加了 61.50%, 46.30% 和 18.30%, 24.32%. 而培养液中含铝使 *Ld 2* 的含磷量增长明显, 低、中、高浓度铝时分别比对照高出 43.79%, 40.91% 和 147.80%, 特别是高铝时的增长幅度远远超过 *Pt 715* 和 *Ld 3*, 此时 *Ld 2* 含磷量已超出 *Pt 715* 的 31.10%. 可见, 培养液中加入铝可促进 3 株真菌尤其是 *Ld 2* 对磷的吸收.

表 1 铝对 ECMF 菌丝体磷质量分数的影响 (mg · g⁻¹)

项 目	<i>Pt 715</i>	<i>Ld 2</i>	<i>Ld 3</i>
无铝	18.28±0.59c	14.15±0.32c	33.95±0.53b
低铝	21.85±0.80bc	20.34±0.39b	36.36±0.56ab
中铝	29.53±0.77a	19.93±0.17b	40.17±0.12ab
高铝	26.75±0.99ab	35.06±0.81a	42.21±0.15a

注: 表中同列小写字母不同表示差异有统计学意义($p<0.05$), 数据以平均值±标准差表示.

2.2.2 钾

由表 2 可知, 培养液中加入铝后, 3 菌株的钾质量分数均有一定程度下降, 高铝胁迫时尤为显著. 其中, 含钾量降低程度最大的是 *Ld 3*, 低、中、高 3 种浓度铝处理均有明显作用, 分别较对照少了 27.4%, 30.0%, 53.2%; *Pt 715* 在高铝处理时的含钾量比无铝时少了 27.28%, *Ld 2* 的含钾量只在高铝处理时显著降低, 比无铝时少了 34.74%. 可见, *Ld 3* 对钾的吸收比 *Pt 715* 和 *Ld 2* 受铝的影响更明显.

表 2 铝对 ECMF 菌丝体钾质量分数的影响 (mg · g⁻¹)

项 目	<i>Pt 715</i>	<i>Ld 2</i>	<i>Ld 3</i>
无铝	14.50±0.10a	11.46±0.92a	22.50±0.05a
低铝	11.66±0.42a	12.00±0.25a	16.33±0.29b
中铝	13.71±0.88a	8.81±0.47b	15.76±0.64b
高铝	10.54±0.98a	7.48±0.83b	10.53±0.29c

注: 表中同列小写字母不同表示差异有统计学意义($p<0.05$), 数据以平均值±标准差表示.

2.2.3 铁

培养液中加入铝对菌丝体内含铁量有一定影响,但菌株不同效果有不同(表 3).其中,低铝和中铝未显著改变 *Ld* 2 中含铁量,但高铝却明显促进 *Ld* 2 对铁的吸收,比对照增加了 70.61%;铝显著促进 *Ld* 3 对铁的吸收,但随着铝胁迫加大,促进效应减轻,至高铝时只比低铝时减少了 26.78%.铝对 *Pt* 715 吸收铁有轻微的促进作用,但效果不明显.

表 3 铝对 ECMF 菌丝体铁质量分数的影响(mg · g⁻¹)

项 目	<i>Pt</i> 715	<i>Ld</i> 2	<i>Ld</i> 3
无铝	0.86±0.04a	0.65±0.02b	0.71±0.01b
低铝	1.03±0.04a	0.61±0.05b	1.68±0.07a
中铝	1.05±0.07a	0.85±0.01ab	1.50±0.10a
高铝	1.00±0.02a	1.12±0.09a	1.23±0.10ab

注:表中同列小写字母不同表示差异有统计学意义($p<0.05$),数据以平均值±标准差表示.

2.2.4 镁

铝可促进 *Pt* 715, *Ld* 2 和 *Ld* 3 对镁的吸收(表 4).其中,低、中、高 3 种浓度铝都对 *Ld* 2 吸收镁有显著的促进作用,分别比无铝时增长了 78.00%,73.82%和 162.34%;中、高铝使 *Pt* 715 对镁的吸收明显提高了 54.09%和 130.71%;而 *Ld* 3 仅在高铝时的含镁量明显上升了 57.41%.可见,铝对 *Ld* 2 吸收镁的促进作用最强,其次是 *Pt* 715,最后是 *Ld* 3.

表 4 铝对 ECMF 菌丝体镁质量分数的影响(mg · g⁻¹)

项 目	<i>Pt</i> 715	<i>Ld</i> 2	<i>Ld</i> 3
无铝	13.21±0.80b	9.02±0.78c	21.83±0.68c
低铝	16.19±0.84b	16.05±0.70bc	23.57±0.96bc
中铝	20.36±0.88b	15.67±0.05b	27.40±0.56b
高铝	30.48±0.73a	23.65±0.31a	36.10±0.19a

注:表中同列小写字母不同表示差异有统计学意义($p<0.05$),数据以平均值±标准差表示.

2.3 酸铝胁迫时 ECMF 对铝吸收的响应

培养液中加入铝引起各菌株铝质量分数上升(表 5).无铝时,菌丝体内均未检测到铝的存在;除低铝外,中、高铝处理均使菌丝体中铝质量分数明显高于无铝处理,特别是高铝的增长作用尤其明显,此时 *Pt* 715, *Ld* 2 和 *Ld* 3 的含铝量分别是低铝时的 4.83 倍,13.53 倍和 8.89 倍.3 菌株的铝质量分数在无铝、低铝和中铝时差异无统计学意义,但到高铝时差异有统计学意义,其中以 *Ld* 3 和 *Ld* 2 含铝量最高,达到 12.44 mg/g 和 13.67 mg/g,分别比 *Pt* 715 明显高出 63.5%和 48.8%.由此可见,3 菌株的菌丝体对铝都有强烈的富集作用,其中尤以松乳菇 *Ld* 2 和 *Ld* 3 为甚, *Ld* 2 对铝的富集效应在高铝时特别突出.

表 5 铝胁迫对 ECMF 菌丝体铝质量分数的影响(mg · g⁻¹)

项 目	<i>Pt</i> 715	<i>Ld</i> 2	<i>Ld</i> 3
无铝	0.00c	0.00c	0.00c
低铝	1.73±0.01bc	1.01±0.02bc	1.40±0.01c
中铝	4.44±0.03b	3.30±0.04b	5.48±0.17b
高铝	8.36±0.07a	13.67±0.12a	12.44±0.02a

注:表中同列小写字母不同表示差异有统计学意义($p<0.05$),数据以平均值±标准差表示.

3 结论与讨论

陈奇等^[21]研究表明,部分 ECMF 能提高寄主植物对铝的抗性,这与其本身的抗铝性有关,抗铝型

ECMF 的生长对酸铝胁迫不敏感. 试验发现, 供试 *Pt* 715, *Ld* 2 和 *Ld* 3 的生长在 0.5~2.0 mmol/L 的酸铝胁迫下均未下降, 反而受到一定程度的促进, 说明它们均具抗铝性. 这与 Cumming^[22]、辜夕容等^[15]、王明霞等^[23]在对 *Pisolithus tinctorius* 的酸铝胁迫试验中的结果相同, 但李华等^[24]和 Reddy 等^[25]却发现, *P. tinctorius* 的生长在酸铝胁迫时下降明显. 这可能与所选菌种的株系来源、酸铝胁迫程度等有关. 试验选用的 3 株真菌均是来自西南林区酸性土壤的土著 ECMF, 其中 *Pt* 715 的原生土壤 pH 值为 5.9, 而 *Ld* 2 和 *Ld* 3 的原生土壤 pH 值为 3.9~4.3, 对酸性环境的长期适应令它们对酸铝有较高的抗性, 即使在明显高出王明霞等^[26]、李华等^[24]和 Cumming 等^[22]设置的酸铝胁迫浓度时, 它们仍能正常生长. 特别是分离于酸度较高的重庆市缙云山马尾松林下的 *Ld* 2, 其生长量在高达 2.0 mmol/L 酸铝胁迫下比无铝时甚至还高出 36.31%, 表现出对铝的高抗性. 有报道指出, 如能接入生长迅速且感染力强的 ECMF, 将能更快速地缓解酸性土壤中铝的毒性, 维持植物正常生长^[21]. 由此可推测, *Ld* 2 可能是 3 株真菌中能快速缓解铝毒的最具潜力菌株.

周志春等^[27]研究表明, 酸铝土壤中磷等养分的有效性极低, 而 ECMF 的有益作用之一是增加宿主植物对磷及其他营养的吸收, 这也可能是其提高植物抗性的重要机理之一. 重庆铁山坪的植物叶片营养元素质量分数相对较高, 与高外生菌根真菌侵染率和侵染指数有关^[28]. 酸性条件下, 铝能促进 *Lactarius hepaticus* 对 P, *Lactarius rufus* 对 Mg, *Cantharellus cibarius* 和 *Pisolithus* sp. 对 Ca, Mg, K 和 P 以及 *P. tinctorius* 对 Ca, Mg, Al 的吸收. 但 Cumming 等^[22]的试验却得出, *Laccaria bicolor* 和 *Pisolithus tinctorius* 的 K, Ca, Mg 和 Fe 的质量分数却随铝胁迫程度升高而降低. 本试验发现, *Ld* 2, *Pt* 715 和 *Ld* 3 在酸铝胁迫时对 P, Fe 和 Mg 的吸收增加. 尤其是 *Ld* 2, 对 P, Fe, Mg 的吸收在 2.0 mmol/L 的高铝处理时比对照分别高出 147.80%, 70.61% 和 162.34%, 反映出其对强酸富铝土壤的高度适应性. 铝显著促进 *Ld* 3 对铁的吸收, 但随着铝胁迫程度加大, 促进效应减轻, 至高铝时已比低铝时明显减少了 26.78%, 说明铝浓度越高对铁吸收的促进作用越弱, 可能是因为 Fe^{3+} 和 Al^{3+} 都是高价离子, 在吸收过程中有竞争抑制作用. Brunner 等^[29]认为, 酸化土壤中铝活化后常引起磷固定作用加强, 同时竞争 Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{3+} 等阳离子在细胞膜上的结合位点, 导致植物养分吸收失衡. 供试土著真菌 *Ld* 2, *Pt* 715 和 *Ld* 3 在酸铝胁迫下对 P, Fe 和 Mg 的吸收能力加强, 这对提高植物抗铝性无疑具有极其重要的意义.

王明霞等^[16]发现, 无铝胁迫时 *Suillus luteus* (*Sl* 08 和 *Sl* 14), *Boletus* sp. (*Bo* 15) 可活化土壤矿物中的钾, 促进植物对钾元素的吸收和利用. 试验发现, 有铝胁迫抑制 *Ld* 2, *Pt* 715 和 *Ld* 3 对钾的吸收. 有研究将 *Laccaria bicolor*, *Lactarius rufus* 和 *Lactarius hepaticus* 培养在 pH 3.0~5.0 的溶液中时, 也发现菌丝体中钾质量分数随 H^+ 量增加而明显下降. 一般而言, H^+ 和 Al^{3+} 质量分数较高时, 会与 K^+ 竞争细胞膜上的阳离子交换位点, 导致 K^+ 进入质体的机会减少^[30]. 但也有试验发现, ECMF 对钾的吸收在铝胁迫时显著提高^[20]. 有研究认为^[31], 低 pH 时外部 Al^{3+} 会促进真菌对 K^+ 的吸收, 与维茨效应一致. 看来, 对 K^+ 的吸收因菌株种类及培养条件的不同而异. 试验中的 3 株真菌对钾的吸收受到铝的抑制, 应是大量 H^+ 和 Al^{3+} 竞争 K^+ 的阳离子结合位点而致. 试验结果也提示我们, 在酸铝危害严重林区, 使用 *Ld* 2, *Pt* 715 或 *Ld* 3 菌根苗时, 应注意防止钾的亏缺, 及时补充钾素营养.

Reddy 等^[17]推测, *Cantharellus cibarius* 有较强耐铝性的机理之一是由于其能更好地吸收和积累铝. 辜夕容等^[15]也发现, 耐铝型的 *Pt* 715, *Hbr*, *Cg* SIV 对铝有富集作用. 试验中 *Ld* 2, *Pt* 715 和 *Ld* 3 的菌丝体对铝有明显的富集作用, 来自强酸性黄壤的 *Ld* 2 和 *Ld* 3 在 2.0 mmol/L 铝胁迫时的铝吸收量明显高于来自弱酸性土壤的 *Pt* 715, 说明长期适应高酸富铝环境的 *Ld* 2 和 *Ld* 3 更具铝的富集效应. Brunner 和 Sperisen^[29]指出, 适生于高酸富铝土壤中的木本植物对铝的抗性主要体现在两个方面: 一是排铝, 二是耐铝, 根系铝质量分数在 1 mg/g 以上时即算超富集铝植物. *Ld* 2, *Pt* 715 和 *Ld* 3 在有铝胁迫时的含铝量均在 1 mg/g 以上, 高铝处理时甚至达到 13.67 mg/g, 12.44 mg/g 和 8.36 mg/g. 可见, 这 3 株 ECMF 均对铝有超富集性, 这也可能正是它们能抗铝的重要原因之一.

总之,来自于西南林区的 3 株土著外生菌根真菌 *Pt* 715, *Ld* 2 和 *Ld* 3 均具抗铝性,酸铝胁迫下它们对磷、铁、镁的吸收能力增强,对铝具有超富集作用,揭示出它们抗铝的营养机理.在 3 株 ECMF 中, *Ld* 2 在酸铝胁迫下生长速度最快,生长量增加最大,对磷、铁、镁的吸收能力最高,对铝的富集作用最强,应是能快速缓解铝毒的最具潜力菌株.

参考文献:

- [1] 刘菊秀. 酸沉降下铝毒对森林的影响 [J]. 热带亚热带植物学报, 2000, 8(3): 269—274.
- [2] 辜夕容. 外生菌根缓解铝毒性研究 [D]. 重庆: 西南大学, 2004.
- [3] 刘厚田, 田仁生. 重庆南山马尾松衰亡与土壤铝活化的关系 [J]. 环境科学学报, 1992, 12(3): 297—304.
- [4] 王永仕, 陈欣, 史奕. 农田土壤中磷素有效性及影响因素 [J]. 应用生态学报, 2013, 24(1): 260—268.
- [5] 张东, 扈强, 杜咏梅, 等. 植烟土壤酸化及改良技术研究进展 [J]. 中国烟草科学, 2013, 34(5): 113—118.
- [6] 游牧, 李朝品. 环境污染与生物消长的研究进展 [J]. 环境与健康杂志, 2012, 29(6): 573—575.
- [7] 王晓峰, 罗珍, 刘晓燕, 等. 钙磷对紫花苜蓿根瘤菌体系酸铝胁迫的修复效应 [J]. 西南大学学报: 自然科学版, 2013, 35(5): 137—144.
- [8] MIGUEL A P, JON E S, HOLLY S M, et al. Aluminum Resistance in Maize Cannot Be Solely Explained by Root Organic Acid Exudation. A Comparative Physiological Study [J]. Plant Physiology, 2005, 137(1): 231—241.
- [9] 李芳, 张俊伶, 冯固, 等. 两种外生菌根真菌对重金属 Zn、Cd 和 Pb 耐性的研究 [J]. 环境科学学报, 2003, 23(6): 807—812.
- [10] 吕明姬, 蔡佳亮, 郑维爽, 等. 铆钉菇(*Gomphidius viscidus*)菌丝对 Cu(II)的生物吸附特性 [J]. 环境科学学报, 2009, 29(12): 2484—2491.
- [11] 闫明, 钟章成. 铝胁迫和丛枝菌根真菌对樟树幼苗生长的影响 [J]. 北京林业大学学报, 2007, 29(4): 161—165.
- [12] 林双双, 孙向伟, 王晓娟, 等. 我国菌根学研究进展及其应用展望 [J]. 草业学报, 2013, 22(5): 310—325.
- [13] 辜夕容, 梁国仕, 黄建国. 外生菌根提高植物抗铝性机理研究进展 [J]. 中国农学通报, 2005, 21(9): 218—221.
- [14] 刘敏, 陈刚, 李存英, 等. 川东南马尾松外生菌根苗及其抗铝性研究 [J]. 北方园艺, 2007(11): 205—208.
- [15] 辜夕容, 黄建国. 铝对外生菌根真菌草酸分泌及磷、钾、铝吸收的影响 [J]. 生态学报, 2010, 30(2): 357—363.
- [16] 王明霞, 黄建国, 周志峰, 等. 铝胁迫下外源钙对外生菌根真菌抗氧化保护酶活性的影响 [J]. 环境科学, 2012, 33(10): 3675—3679.
- [17] REDDY M S, BABITA K, GAY G, et al. Influence of Aluminum on Mineral Nutrition of the Ectomycorrhizal Fungi *Pisolithus* sp. and *Cantharellus cibarius* [J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2002, 135(1/4): 55—64.
- [18] 肖春玲, 王安萍, 贺根和, 等. 油茶根际土壤耐铝微生物的筛选 [J]. 贵州农业科学, 2012, 40(1): 90—92.
- [19] 侯爱敏, 彭少麟, 周国逸. 鼎湖山地区马尾松年轮元素含量与酸雨的关系 [J]. 生态学报, 2002, 22(9): 1552—1559.
- [20] 姚青, 朱红惠, 王栋, 等. 亚热带草地中植物优势种与从属种对 AM 真菌的差异性生长反应 [J]. 生态学报, 2006, 26(7): 2288—2293.
- [21] 陈奇, 王奇峰, 陈丽梅, 等. 植物铝抗性基因及抗铝毒基因工程研究进展 [J]. 农业生物技术学报, 2012, 20(4): 455—462.
- [22] CUMMING J R, SWIGER T D, KURNIK B S, et al. Organic Acid Exudation by *Laccaria Bicolor* and *Pisolithus Tinctorius* Exposed to Aluminum in Vitro [J]. Canadian Journal of Forest Research, 2001, 31(4): 703—710.
- [23] 王明霞, 周志峰, 袁玲, 等. 铝胁迫下钙信号抑制剂对外生菌根真菌分泌草酸的影响 [J]. 中国农业科学, 2012, 45(5): 902—908.
- [24] 李华, 黄建国, 袁玲. 铝和锰对外生菌根真菌生长、养分吸收及分泌作用的影响 [J]. 环境科学, 2013, 34(1): 315—320.
- [25] KHOSLA B, REDDY S. Response of Ectomycorrhizal Fungi on the Growth and Mineral Nutrition of Eucalyptus Seedlings in Bauxite Mined Soil [J]. American Eurasian J Agric & Environ Sci, 2008, 3(1): 123—126.
- [26] 王明霞, 袁玲, 周志峰, 等. 铝对外生菌根真菌草酸分泌及氮磷钾吸收的影响 [J]. 林业科学, 2012, 48(2): 82—87.

- [27] 周志春, 谢钰容, 金国庆, 等. 马尾松磷效率及相关性状的家系遗传和变异 [J]. 北京林业大学学报, 2004, 26(6): 1—5.
- [28] 陈 展, 尚 鹤. 接种外生菌根菌对模拟酸雨胁迫下马尾松营养元素的影响 [J]. 林业科学, 2014, 50(1): 156—163.
- [29] BRUNNER I, SPERISEN C. Aluminum Exclusion and Aluminum Tolerance in Woody Plants [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2013(4): 1—12.
- [30] 宋正国, 徐明岗, 刘 平, 等. 不同比例钾锌共存对土壤镉有效性的影响 [J]. 生态环境学报, 2009, 18(3): 904—908.
- [31] 魏世清, 张 磊, 李艳宾, 等. 生物措施缓解酸性土壤铝毒害研究进展 [J]. 土壤, 2007, 39(4): 536—540.

Resistance and Nutritional Response to Aluminum Toxicity of Three Ectomycorrhizal Fungi from Forest Soils in Southwest China

WU Xue-lian, ZHOU Qian, GU Xi-rong, WAN Yu-xuan,
MAO Wen-tao, SONG Ying, ZENG Qing-ping

School of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China

Abstract: Three strains of indigenous ectomycorrhizal fungi (ECMF) derived from the acid forest soils in Southwest China, i. e. *Pisolithus tinctorius* 715 (*Pt* 715), *Lactarius deliciosus* 2 (*Ld* 2) and *L. deliciosus* 3 (*Ld* 3), were cultured in liquid Pachlewski medium added with or without Al and with the pH adjusted to 3.8, and their growth and uptake of nutrient were investigated so as to study their resistance and nutritional response to aluminum toxicity. All the three fungi were shown to have the capacity of Al resistance in the sequence of *Ld* 2 > *Ld* 3 ≥ *Pt* 715. Under Al stress, P, Fe and Mg uptake by the three strains were enhanced, whereas the uptake of K was decreased significantly. All the strains showed hyperaccumulation of Al. *Pt* 715, *Ld* 2 and *Ld* 3 absorbed 4.83, 13.53 and 8.89 times more Al when cultured in the medium with $c(\text{Al}^{3+}) = 2.0 \text{ mmol/L}$ than when cultured in the medium with $c(\text{Al}^{3+}) = 0.5 \text{ mmol/L}$, respectively. Of the three strains studied, *Ld* 2 had the greatest biomass increment, the highest relative growth rate, the greatest uptake of P, Fe and Mg and the highest capacity of hyperaccumulation of Al, suggesting that it might be the most effective ECMF to rapidly ameliorate Al toxicity.

Key words: Ectomycorrhizal fungi (ECMF); aluminum toxicity; nutrient; aluminum resistance

责任编辑 周仁惠

