

植物协同微生物诱导碳酸钙沉淀对铜尾矿的固化效果

常道琴^{1,2,3}, 宋乃平^{1,2,3}, 岳健敏^{1,2,3}, 孟晨^{1,2,3}

(1.宁夏大学生态环境学院,银川 750021;2.宁夏大学西北土地退化与生态系统恢复

国家重点实验室培养基地,银川 750021;3.西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室,银川 750021)

摘要:为探讨微生物诱导碳酸钙沉淀技术(microbially induced calcium carbonate precipitation, MICP)和植物技术对污染矿区的固化效果。利用纺锤型赖氨酸芽孢杆菌(*Lysinibacillus fusiformis*)、碱蓬(*Suaeda salsa*)、红砂(*Reaumuria songarica*)开展干旱半干旱高风蚀区尾矿污染固化试验。通过植物根系拉力及根—土复合体抗剪强度表征污染矿区响应效果。结果表明:MICP 处理后红砂、碱蓬 2 种植物根系抗拉力分别增加 59.9%,19.7%,抗拉强度分别降低 7.4%,22.5%。较 MICP 处理前,100 kPa 下红砂、碱蓬复合体抗剪强度分别提高 62.7%,45.9%;200 kPa 下分别提高 130%,122%;300 kPa 下分别提高 26.8%,30.6%。胶结后,红砂、碱蓬根系中的半纤维素、纤维素、木质素的含量显著增加($p < 0.05$),红砂根系分别增加 64%,74%,153%;碱蓬根系分别增加 24%,46%,95%。综上,MICP 协同植被为干旱半干旱高风蚀尾矿区污染修复提供高效途径,研究结果对实现矿区自然环境改善,加速矿区的生态修复具有重大意义。

关键词: MICP; 植物根系; 单根抗拉力; 根—土复合体抗剪强度

中图分类号:X53

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2023)03-0233-07

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2023.03.030

Solidification Effect of Calcium Carbonate Precipitation Induced by Plant and Microorganism on Copper Tailings

CHANG Daoqin^{1,2,3}, SONG Naiping^{1,2,3}, YUE Jianmin^{1,2,3}, MENG Chen^{1,2,3}

(1.College of Ecological Environment, Ningxia University, Yinchuan 750021; 2.Key Laboratory of land

Degradation and Ecosystem Restoration in Northwest China, Ningxia University, Yinchuan 750021;

3.Key Laboratory of Rehabilitation and Reconstruction of Degraded Ecosystems in Northwest China, Yinchuan 750021)

Abstract: In order to explore the solidification effect of microbially induced calcium carbonate precipitation (MICP) and plant technology on contaminated mining areas, *Lysinibacillus fusiformis*, *Suaeda salsa* and *Reaumuria songarica* were used to carry out the solidification experiment of tailings pollution in arid and semi-arid high wind erosion area. The response effect of contaminated mining area was characterized by plant root tension and root-soil composite shear strength. The results showed that the root tensile strength of *R. soongorica* and *S. salsa* increased by 59.9% and 19.7%, and the shear strength decreased by 7.4% and 22.5% after MICP treatment. Compared with before MICP treatment, the shear strength of red sand and *S. salsa* complex increased by 62.7% and 45.9% at 100 kPa. 200 kPa increased by 130%, 122%; 26.8%, 30.6% at 300 kPa. After cementation, the contents of hemicellulose, cellulose and lignin in the roots of *R. soongorica* and *S. salsa* increased significantly ($p < 0.05$), and the roots of *R. soongorica* increased by 64%, 74% and 153%, respectively. *Suaeda salsa* roots increased by 24%, 46%, 95% respectively. In summary, MICP synergistic vegetation provides an efficient and feasible new way for pollution remediation in arid and semi-arid high wind erosion tailings areas. Secondly, the research results can improve the natural environment of the mining area.

Keywords: MICP; plant roots tensile; resistance; root-soil composite shear strength

西北地区各类矿区分布密集,存在大量历史遗留
矿山,受干旱、高风蚀等驱动,矿尘扩散能力强,其中,

重金属矿区的尾矿扩散对周边农田、草原、河流、村庄
等造成严重污染,危及人类健康与环境安全^[1]。同

收稿日期:2022-10-11

资助项目:国家重点研发计划项目(2018YFC1802902)

第一作者:常道琴(1996—),女,甘肃白银人,在读硕士研究生,主要从事矿区修复治理研究。E-mail:2213582962@qq.com

通信作者:宋乃平(1963—),男,陕西扶风人,教授,博士生导师,主要从事土壤学研究。E-mail:Songnp@163.com

时,矿区修复面临干旱、盐碱、风蚀和生境脆弱等障碍,常规修复技术面临技术和经济高等门槛。

微生物诱导碳酸钙沉淀技术(microbially induced calcium carbonate precipitation, MICP)是广泛存在于自然界中的一种生物诱导矿化作用,将化学固定与微生物原位修复结合的土壤重金属污染修复新技术,因其时效高、环境友好、无二次污染、适用性强等优点受到关注^[2]。该技术实质是基于一种高产脲酶微生物,利用其代谢分泌的脲酶水解尿素生成碳酸根离子(CO_3^{2-})和铵根离子(NH_4^+),提高环境 pH,诱导形成以菌体为晶核的碳酸钙质矿物沉淀,在此过程中重金属离子通过替代方解石钙位或进入相邻方解石晶体间空隙而被长期固定,从而降低重金属迁移能力和生态毒性^[3]。经 MICP 胶结后的尾矿土,其表面形成硬壳层,具有良好的抗风力侵蚀能力,能显著降低重金属离子迁移能力,但形成的硬壳与化学固化形成的硬壳层相似,在干旱半干旱高风蚀区易被风沙流掏蚀或掩埋,因此,只可作为过渡性措施,改善尾矿土养分含量、酶活性、肥力状况等,促进尾矿土向土壤的转变,为后期植被恢复创造机遇,提高早期植物幼苗的存活率,辅助植物修复改善土壤条件,以达到可持续污染修复效果。

有学者^[4]提出,采用植物修复技术进行水土治理,该技术主要是在植物新陈代谢的过程中,对重金属污染的土壤进行污染物质提取、挥发和降解处理,改变重金属污染物性质,达到修复重金属污染的目的;其次,植物利用根系的锚固和加筋作用形成根—土复合体对矿区涵水固土、调节自然气候和维护生态平衡具有积极作用。碱蓬(*Suaeda salsa*)、红砂(*Reamuria songarica*)都具有耐盐碱、抗寒抗旱等特点,是优良的固沙植物。碱蓬能够适应干旱的盐碱地,具有防风固土,调节气候等多重功能,且其根系可吸收和累积重金属,有效降低重金属对生态系统的破坏^[5]。红砂作为干旱区优良的固沙植物,其根系在土壤中分布较深,抗寒抗旱能力强,对干旱区植被恢复与重建、水土流失治理等具有重要作用^[6]。但由于干旱半干旱地区气候恶劣,尤其在生态环境脆弱区(尾

矿区),干旱、盐碱、重金属污染及高风蚀等限制该技术的应用^[7]。

目前,国内外学者^[8]主要采用单一的 MICP 技术或植物修复技术进行污染土壤修复,关于两者结合的研究较少。孔剑捷等^[9]探讨 MICP 复合植物根系固沙效果表明,利用 MICP 可将荒漠风积沙的抗风力侵蚀能力提高约 44.08%;郝彤琦等^[10]研究在 MICP 基础上滩涂土壤与植物根系复合体抗剪强度变化表明,含根土壤的抗剪强度比无根土壤抗剪强度高(20%);贺美潮^[11]发现, MICP 处理后沙蒿发芽率高达 54%。因此,若将 MICP 技术和植物修复技术结合起来对于干旱半干旱高风蚀矿区进行固化修复将具有较大的学术研究价值和工程应用前景。

本研究拟通过探讨 MICP 复合植物根系对干旱半干旱高风蚀矿区修复固土效果,为积极解决传统措施所存在的不可持续问题,为污染矿区持续恢复和生态环境的持续改善提供有效途径。其次,研究结果对指导矿区植被修复与营造矿区植物景观具有重要作用,对实现矿区自然环境改善、加速矿区的生态修复、推动矿区经济发展具有重大意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验区位于宁夏中卫市香山北坡的腰峁子沟内,属典型的大陆性干旱气候。矿区温差较大,年最高气温 35℃,最低-25℃。区域风速大,最高可达 21 m/s,风力侵蚀严重。矿区及周边自然植被为草原化荒漠,主要植物为红砂、碱蓬、荒漠锦鸡儿(*Caragana roborovskyi*)、短花针茅(*Stipa breviflora*)等,植被覆盖度为 10%~30%。

1.2 试验材料

1.2.1 尾矿土 尾矿土取自研究区铜尾矿的 4 条冲沟(1,2,3 号冲沟经过 MICP 的处理,4 号为对照),在 4 条冲沟的坡顶、坡中、坡底各布设 3 个采样点,共计 36 个采样点。对采集的尾矿土样品的重金属元素含量和部分化学性质进行监测(表 1),试验发现尾矿土呈碱性。

表 1 尾矿土理化性质

处理	重金属含量/(mg·kg ⁻¹)					化学性质			
	Cr	Cu	Ni	As	Hg	碳酸钙/%	pH	电导率/(mS·cm ⁻¹)	NH ₄ ⁺ 含量/(mg·g ⁻¹)
CK	184.3	1465.7	5.2	81.1	0.6	10.6	8.3	3206.3	0
MICP	142.6	961.7	3.5	87.7	0	15.5	7.1	6271.7	3.8

1.2.2 菌种的菌株来源与培养基成分 菌种为研究区尾矿土中分离纯化得到的 1 株生境菌种—纺锤型赖氨酸芽孢杆菌(*Lysinibacillus fusiformis*),其产脲

酶能力及对环境的适应能力强。

菌种的培养采用 Luria-Bertani 培养基(LB),培养基配方中营养牛肉汤、蛋白胨、氯化钠、琼脂分别为

12,4,2,8 g/L,调节 pH 至 7.2~7.4,置于高压灭菌锅,121 ℃ 高温灭菌 30 min。将菌种接种至培养液中,在 37 ℃,200 r/min 恒温摇床中培养 24 h 后的菌液($OD_{600} \approx 2.02$)用于喷洒制备抗剪试验样品。

1.2.3 胶结液的制备 胶结液的成分包括尿素、氯化钙(浓度均为 1 mol/L)和纺锤型赖氨酸芽孢杆菌菌液,为 MICP 反应过程提供尿素和钙离子,也为细菌的生长繁殖提供充足的营养物质,按照体积比 1:1:1 进行配制胶结液。

1.2.4 植物根系 通过研究区现有植被进行调查,分析其植被组成、植被生长情况以及植被群落物种多样性,筛选出 2 种优势物种,即碱蓬和红砂(表 2)。在研究区内 4 个坡面进行植物根系采集,每个坡面选取 3 个标准株,采用由外向内挖掘法^[12]。采集过程用铲子将整个根—土复合体铲出,装入自封袋中(有效防止根系水分流失)带回实验室,放入 4 ℃ 低温冰箱进行保存。

表 2 不同处理下 2 种植物属性比较

处理	植物种类	根系长度/mm	根系直径/mm	鲜重/g
CK	红砂	21.9	1.5	0.6
	碱蓬	27.9	2.1	2.8
MICP	红砂	22.5	1.6	0.8
	碱蓬	28.4	2.2	3.9

在室内将植物根系冲洗干净,截取单根长度为 5~15 cm 根段,在植物根系的上、中、下 3 个部位采用十字交叉法重复测量 3 次,3 个部位的直径平均值作为根径划分依据。将植物根系进行分级,分别为 1 级(0.5~0.9 mm),2 级(1.0~1.3 mm),3 级(1.4~1.7 mm),4 级(>1.7 mm)。测定根系拉力前,将植物根系置于蒸馏水中浸泡 24 h,以保证每个根系含水率相同。植物根系木质素、纤维素及半纤维素的测定采用范氏洗涤法进行测定。

1.2.5 根—土复合体的制备 采用分层击实法在内径、高分别为 61.8,20 mm 的环刀内进行根—土复合体的制备。选取不同根级的碱蓬和红砂根系,统一剪成 2 cm 根段,进行根—土复合体抗剪试验,并确保每个根段垂直通过剪切面。根据红砂、碱蓬在野外实际状态为垂直分布状态。采用垂直布根法,利用细铁丝(直径为 1 mm)将 2 种植物根系垂直插入素土试样中,每个试样设定 3 个重复。

1.3 试验过程与方法

1.3.1 MICP 浇注试验 按照尾矿土:胶结液为 4:1 的比例制备抗剪试样,为保证微生物菌液和反应液能充满土体并充分反应。对照组每次注入等体积的去离子水。

1.3.2 植物根系拉力试验 使用测力计进行根部拉伸试验,精度为 0.01 N。根部在 1/3 mm 范围内断裂

为有效测试(靠近夹具的根部故障可能是由于机械损坏而引起的)。根系抗拉强度计算公式为:

$$T=4F/\pi D^2$$

式中: F 为根系最大抗拉力(N); D 为根系平均直径(mm)。

1.3.3 根—土复合体直剪试验 使用典型的应变控制直剪仪进行土壤剪切测试,剪切速率为 0.8 mm/min,分别在 50,100,200,300 kPa 垂直载荷下进行剪切。

1.4 数据分析

试验数据采用 Excel 2010 软件进行初步整理。根—土复合体抗剪强度采用 IBM SPSS Statistics 25 软件进行数据分析,采用 Graphpad prism 8.0 软件制图;植物根系拉力及抗拉强度图采用 Origin 8.5 软件绘制;植物根系拉力、抗拉强度、木质素、纤维素、半纤维素间的相关性热力图采用 R 4.0.3 软件绘制。

2 结果与分析

2.1 MICP 处理下根径对植物抗拉力及抗拉强度的影响

由表 3 可知,自然恢复状态下植物种类不同,其根径、根系拉力明显不同,碱蓬根径(2.1 mm)>红砂根径(1.5 mm)。碱蓬、红砂单根拉力、抗拉强度与根茎呈指数函数关系,单根拉力(F)随根径(D)增大而升高,抗拉强度(P)随根径(D)增大而减小,且 2 种植物单根拉力及抗拉强度表现为碱蓬>红砂,红砂最大单根拉力为 109.5 N;最大抗拉强度为 58.98 MPa,最小为 13.23 MPa,碱蓬最大单根拉力为 188.6 N;抗拉强度最大为 114.44 MPa,最小为 15.80 MPa。添加 MICP 后,碱蓬、红砂根径分别为 1.6,2.2 mm。由图 1、图 2 可知,根系抗拉力表现为碱蓬(107.16 N)>红砂(66.82 N),红砂最大单根拉力为 175.09 N;抗拉强度最大为 54.59 MPa,最小为 15.51 MPa,碱蓬最大单根拉力为 237.91 N,最大抗拉强度为 88.63 MPa,最小为 17.67 MPa。红砂、碱蓬单根拉力比自然恢复状态下提高 78.61%,19.75%,根径升高 6.66%,7.28%。

表 3 MICP 下 2 种植物根系拉力统计特征值

处理	植物种类	平均值/ N	直径/ mm	最大值/ N	最小值/ N	变异 系数/%
CK	红砂	37.4	1.5	109.5	9.1	0.6
	碱蓬	89.5	2.1	188.6	14.5	0.6
MICP	红砂	66.8	1.6	175.1	11.0	0.6
	碱蓬	107.2	2.2	237.9	24.8	0.5

2.2 MICP 对根—土复合体的影响

自然恢复状态下,尾矿土在不同垂直载荷下抗剪强度差异显著($p<0.05$),最大抗剪强度为 58.52 kPa,分别是 50,100,200 kPa 垂直载荷下的 5.83,2.72,2.04 倍(图 3)。添加 MICP 后,300 kPa 下抗剪

强度最大(66.52 kPa),分别是 50,100,200 kPa 垂直载荷下的 3.63,2.26,1.20 倍。在 MICP 基础上,红砂根—土复合体及碱蓬根—土复合体在不同垂直载荷下抗剪强

度差异显著($p < 0.05$),红砂根—土复合体抗剪强度分别为 23.34,35.02,65.94,74.23 kPa;碱蓬根—土复合体抗剪强度分别为 23.50,31.42,63.65,76.45 kPa。

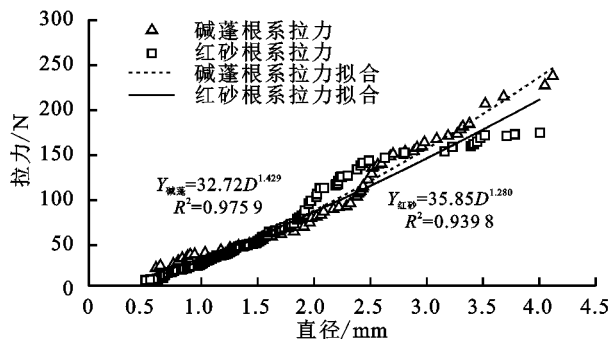
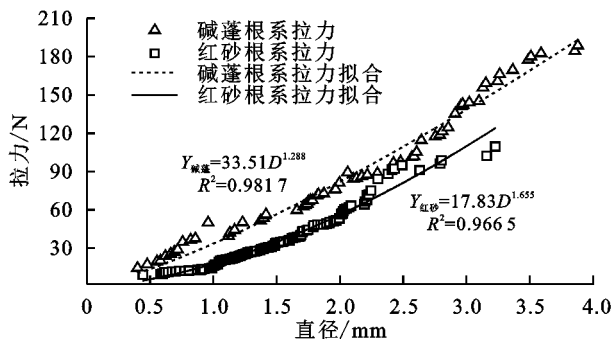


图 1 2 种植物添加 MICP 前后单根拉力

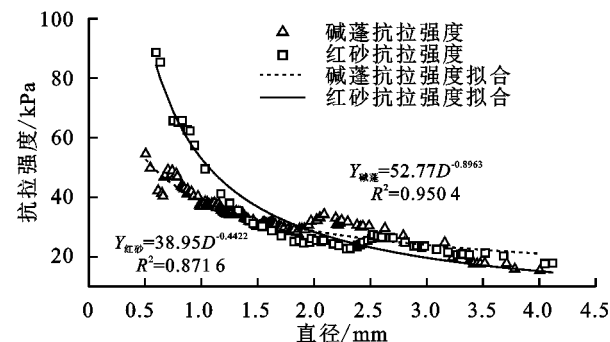
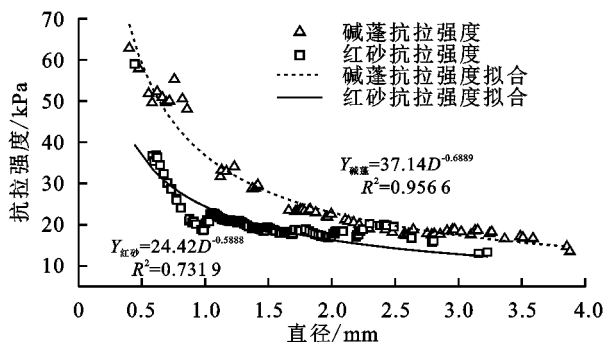
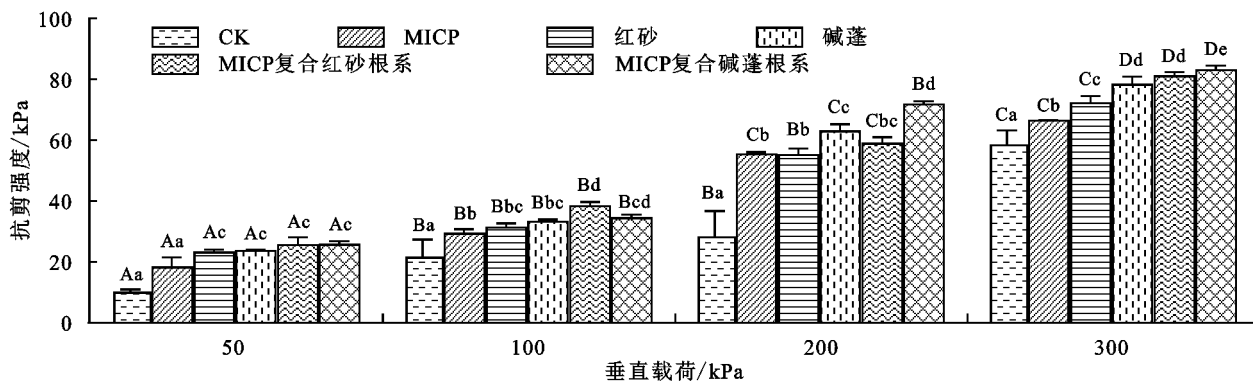


图 2 2 种植物添加 MICP 前后根系抗拉强度

CK(素土)、碱蓬根系、红砂根系、MICP、MICP 复合植物根系的抗剪强度在不同垂直载荷下差异显著($p < 0.05$)。50 kPa 时 MICP 比 CK 显著提高 82%,MICP 复合红砂根系比 MICP 显著提高 27%;100 kPa 下 CK、MICP、MICP 复合植物根系抗剪强度分别为 21.53,

29.38,35.02,31.42 kPa;200 kPa 下 MICP、MICP 复合红砂根系及 MICP 复合碱蓬根系的抗剪强度比 CK 依次提高 94%,130%,122%;300 kPa 下 CK、MICP、MICP 复合红砂根系及 MICP 复合碱蓬根系的抗剪强度依次为 58.52,66.52,74.23,76.45 kPa。



注:大写字母表示同一处理下不同垂直载荷的差异显著($p < 0.05$);小写字母表示同一垂直载荷下不同处理的差异显著($p < 0.05$)。

图 3 根—土复合体抗剪强度的变化

2.3 MICP 对根系木质素、纤维素、半纤维素的影响

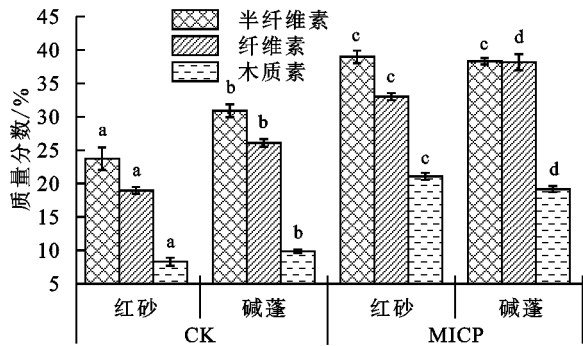
由图 4 可知,自然恢复状态下,碱蓬根系中木质素、纤维素、半纤维素的含量显著高于红砂根系($p < 0.05$);添加 MICP 后,碱蓬根系中纤维素含量显著高于红砂(5.2%)($p < 0.05$),而木质素含量则表现为红砂根系高于碱蓬根系(1.9%)。胶结后,红砂、碱蓬根系中的半纤维素、纤维素、木质素的含量显著增加($p < 0.05$)。红砂根系分别增加 64%,74%,153%;

碱蓬根系分别增加 24%,46%,95%。

2.4 MICP 胶结前后 2 种植物根系拉力、抗拉强度与根系化学组成间的相关性分析

由图 5 可知,添加 MICP 后,红砂根系拉力与半纤维素呈极显著负相关($p < 0.01$),与纤维素呈极显著正相关($p < 0.01$),抗拉强度与纤维素为显著负相关($p < 0.05$),与半纤维素显著正相关($p < 0.05$)。由图 6 可知,碱蓬根系拉力、抗拉强度和纤维素、半纤维素及木质素

在 MICP 胶结后则没有表现出明显相关性。



注:不同小写字母表示差异显著 ($p<0.05$)。

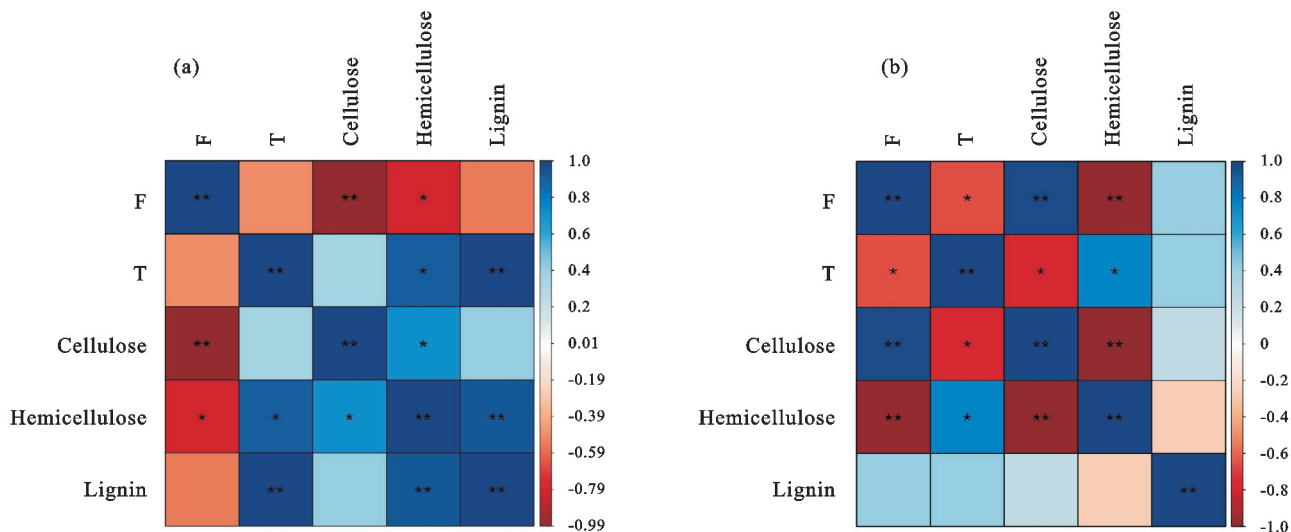
图 4 2 种植物根系木质素、半纤维素、纤维素的变化

3 讨论

3.1 MICP 对 2 种植物根系抗拉力及强拉强度的影响

本研究发现,无论是红砂还是碱蓬的根系,根系

抗拉力都随直径的增加而提高,而抗拉强度都随直径增加而下降。与前人研究的香根草^[13]、欧洲山毛榉等^[14]其他乔灌木、草本植物研究结果一致,但是数值有所不同。其他学者^[15]对柠条根系抗拉强度试验表明,根径与抗拉强度基本呈幂函数或指数函数减少趋势,与本研究结果也相一致,表明根系直径是影响根系抗拉力与抗拉强度的重要因素。添加 MICP 后,红砂、碱蓬 2 种植物根系的拉力、根径及鲜重等发生显著变化,其中单根拉力分别提高 78.61%,19.75%,根径分别升高 6.66%,7.28%,表明 MICP 的添加能显著提升碱蓬、红砂根系的生长和增强其抗拉强度。红砂单根拉力及抗拉强度都小于碱蓬,主要归因于根系内部结构组分含量(木质素、纤维素、半纤维素)的变化,添加 MICP 后碱蓬纤维素含量高于红砂(5.20%)。



注:图 a、b 分别为自然恢复状态、添加 MICP 后根系拉力、抗拉强度与根系化学组成间的相关性分析。下同。

图 5 MICP 胶结前后红砂根系拉力、抗拉强度与根系化学组成间的相关性分析

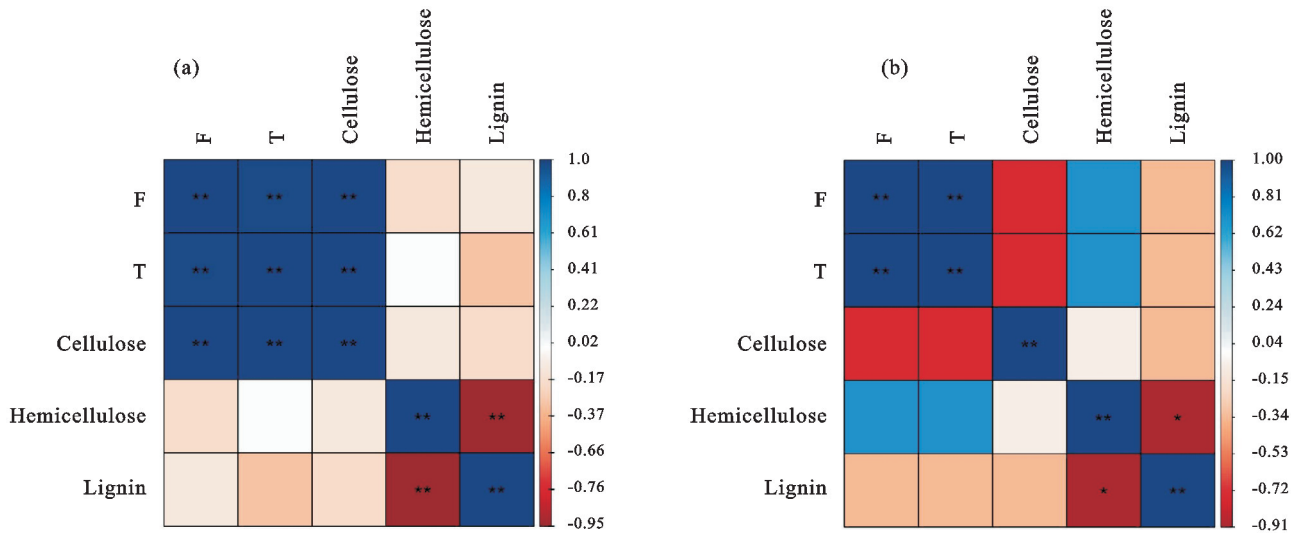


图 6 MICP 胶结前后碱蓬根系拉力、抗拉强度与根系化学组成间的相关性分析

添加 MICP 后,红砂根系拉力与半纤维素呈极显著负相关,与纤维素呈极显著正相关,抗拉强度与纤维素为显著负相关,与半纤维素显著正相关,叶超等^[16]发现,

纤维素与根系抗拉力呈负相关,与抗拉强度呈显著正相关,而抗拉强度与木质素呈负相关;Zhang 等^[17]研究表明,纤维素与根径及木质素含量与根部抗张强度

间存在正相关;Genet 等^[18]也认为,纤维素含量随着根径的减小和根系拉伸强度的增加而升高。而碱蓬根系拉力、抗拉强度和纤维素、半纤维素及木质素在 MICP 胶结后则没有表现出明显相关性,可能与植物根系微观结构、树种的遗传基因及其生长过程中所受的外界因素有关^[19]。

3.2 MICP 对 2 种植物根系生长影响

一般而言,在重金属污染严重的区域,植物受到重金属污染时会出现生长迟缓、植株矮小、根系伸长得抑制等现象,研究^[20]表明,绝大多数植物从土壤中吸收的 Cu 主要分布在根部,表现为根系伸长受阻,根系新陈代谢紊乱等,随 Cu^{2+} , Cd^{2+} 和 Pb^{2+} 离子浓度增大,种子萌发后形成幼苗的根长和芽长都呈降低趋势。碱蓬、红砂根径在 MICP 胶结前后分别升高 6.61%, 7.10%, 表明碱蓬、红砂植物根系在 MICP 胶结前受重金属污染胁迫,根系生长表缓慢。有研究^[21]表明,植物抗拉特性与土壤养分含量、土壤酶活性、根系生长也有一定的关系,而根系生长与土壤养分、土壤酶活性也有一定的关系,所以,抗拉特性可能受土壤养分与土壤酶活性变化的影响。胶结前后,碱蓬根系中木质素含量高于红砂,表明碱蓬根系韧性强于红砂,木质素本质是酚类杂聚物(由多糖和蛋白质组成),是次生细胞壁的成分,具有一定的强度和刚度。MICP 胶结后,红砂根系半纤维素、纤维素、木质素含量分别增加 64%, 74%, 153%;碱蓬根系半纤维素、纤维素、木质素含量分别增加 24%, 46%, 95%, 主要因为 MIP 修复污染土壤过程中,加入筛选好的微生物菌种不仅可有效阻止重金属的迁移,还可分解土壤中的有机质、加快腐殖质的形成,同时也能吸收、固定并释放养分,促进植物的生长。其次,微生物菌剂的添加,能够为土壤补充分解养分及腐殖物质的活性物质,可产生糖类物质及改善土壤团粒结构、物理性质和颗粒损失,尿素和氯化钙的添加改变尾矿土养分含量,让更多的营养元素进入尾矿土^[22]。

3.3 MICP 对 2 种植物根系抗剪强度的影响

本研究表明,添加根系的尾矿土其抗剪强度明显高于未添加根系的尾矿土,与 Campbell 等^[23]的研究结论一致。通过 Li 等^[24]、Mahannopkul 等^[25]的研究发现,垂直荷载增加土壤的抗剪强度,与本研究结论一致,原因是垂直荷载的变化改变尾矿土的干密度,从而导致抗剪强度的变化^[26]。红砂、碱蓬 2 种植物根—土复合体的抗剪强度在添加 MICP 前后表现出不同的响应, MICP 胶结后, 2 种植物根系的根—土复合体抗剪强度显著增强,说明 MICP 的存在增强尾

矿土的抗剪强度,起到加固土体的作用。主要是由于 MICP 以微生物为核心产生的具有胶结作用的碳酸钙减少土体间的孔隙,增大尾矿土颗粒间、尾矿土颗粒和植物根系间的接触面积,将两者紧密结合,进而增加根—土复合体强度^[27]。在剪切根—土复合体时,植物根系发生根系断裂和拔出 2 种破坏机理,根系和尾矿土的含水量在挤压下发生变化,更多的水分被挤压出进入尾矿土中,从而增强根—土复合体的抗剪强度。不同植物其生长规律不同,对于微生物的响应也不一致。本研究发现,垂直荷载 $< 250 \text{ kPa}$ 时,碱蓬根—土复合体抗剪强度显著高于红砂根—土复合体,可能与植物根部含水差异有关,根部含水量不同,通过影响植物根系皮质组织而直接影响根系韧性。根—土复合体强度逐渐增强,主要是构成根细胞壁的骨架物质(纤维素微纤丝)的含量与根径呈负相关,即骨架物质含量随根径增大逐渐递减,微纤丝是拉力传导的重要组织,能够显著提高根系力学强度^[28]。植物根系对松散沙质土壤可产生胶结作用,根系分泌物可使根际土壤凝聚成水稳性团聚体,提高土壤稳定性,增强黏聚力,提高土体抗蚀能力^[29]。经 MICP 胶结后,尾矿土中 Cr、Cu、Hg 等重金属均降低,尾矿土污染程度减弱,从而直接影响植物根系赖以生存的土壤环境使得植物根系遭受重金属胁迫程度减轻,重金属对植物根系细胞破坏程度减小,植物根系强度逐渐增强。

4 结 论

添加 MICP 会提升红砂与碱蓬根系的生长,根径分别增加 6.61%, 7.10%, 根长分别增加 2.55%, 1.72%, 鲜重分别增加 35.48%, 38.57%。MICP 胶结后,红砂根系半纤维素、纤维素、木质素含量分别增加 64%, 74%, 153%, 碱蓬根系半纤维素、纤维素、木质素含量分别增加 24%, 46%, 95%。

添加 MICP 会增强红砂、碱蓬根系的抗拉力(78.61%, 19.75%)与抗拉强度(62.63%, 17.82%)。根系木质素、纤维素、半纤维素的大小决定根系抗拉力与抗拉强度,红砂根系拉力与半纤维素呈极显著负相关,与纤维素呈极显著正相关,抗拉强度与纤维素为显著负相关,与半纤维素显著正相关。

参考文献:

- [1] Slimani H, Aidoud A, Roze F. 30 Years of protection and monitoring of a steppic rangeland undergoing desertification[J]. Journal of Arid Environments, 2010, 74 (6):685-691.
- [2] Mahbub K R, Krishnan K, Naidu R, et al. Mercury remediation potential of a mercury resistant strain *Sphingopyxis* sp.

- SE2 isolated from contaminated soil[J].Journal of Environmental Sciences,2017,51(1):128-137.
- [3] Adrianto L R, Pfister S, Hellweg S. Regionalized life cycle inventories of global sulfidic copper tailings[J].Environmental Science and Technology,2022(7):4553-4564.
- [4] 张颖,赵欣,陆建刚.3种地被竹对重金属复合污染农田土壤的修复潜力[J].环境科学,2022,43(8):4262-4270.
- [5] 吴玉洁,封晓辉,张睿,等.盐镉互作下盐地碱蓬和碱蓬生长及镉吸收的比较研究[J].中国生态农业学报(中英文),2022,30(7):1186-1193.
- [6] 单立山,苏铭,张正中,等.不同生境下荒漠植物红砂—珍珠猪毛菜混生根系的垂直分布规律[J].植物生态学报,2018,42(4):475-486.
- [7] 王胜涛,卢琪,王羽,等.樊庆生红球菌菌剂制备优化及其重金属修复促进效果研究[J].环境科学学报,2022,42(4):403-411.
- [8] Mwandira W, Nakashima K, Kawasaki S, et al. Solidification of sand by Pb(II)-tolerant bacteria for capping mine waste to control metallic dust: Case of the abandoned Kabwe Mine, Zambia[J].Chemosphere,2019,228:17-25.
- [9] 孔剑捷,陈萍,黄顺心,等.微生物矿化与植物共同作用下荒漠风积沙固化试验研究[J].浙江理工大学学报,2019,41(5):688-696.
- [10] 郝彤琦,谢小妍,洪添胜.滩涂土壤与植物根系复合体抗剪强度的试验研究[J].华南农业大学学报,2000,21(1):78-80.
- [11] 贺美潮.微生物矿化风积沙与植物根系复合体抗剪强度试验研究[D].呼和浩特:内蒙古工业大学,2020.
- [12] Wang R Z, Chen Y, Li T, et al. Root distribution characteristics of *Vetiveria zizanioides* and *Digitaria sanguinalis* and their effects on the anti-erodibility of purple soil in slopelands[J].Acta Prataculturae Sinica,2017,26(7):45-54.
- [13] 肖宏彬,赵亮,李珍玉,等.香根草根系的分布形态及抗拉强度试验研究[J].中南林业科技大学学报,2014,34(3):6-10.
- [14] Bischetti G B, Chiaradia E A, Epis T, et al. Root cohesion of forest species in the Italian Alps[J].Plant and Soil,2009,324(1):71-89.
- [15] 朱海丽,胡夏嵩,陈桂琛,等.青藏高原黄土区护坡灌木植物根系力学特性研究[J].岩石力学与工程学报,2008,27(增刊2):3445-3452.
- [16] 叶超,郭忠录,蔡崇法,等.5种草本植物根系理化特性及其相关性[J].草业科学,2017,34(3):598-606.
- [17] Zhang C B, Chen L H, Jiang J. Why fine tree roots are stronger than thicker roots: The role of cellulose and lignin in relation to slope stability[J].Geomorphology,2014,206:196-202.
- [18] Genet M, Stokes A, Salin F, et al. The influence of cellulose content on tensile strength in tree roots[J].Plant and Soil,2005,278(1/2):1-9.
- [19] 左志严,格日乐,王娟,等.内蒙古中西部3种乡土植物根系抗拉力学特性的对比研究[J].水土保持通报,2015,35(2):52-57.
- [20] 鱼小军,张建文,潘涛涛,等.铜、镉、铅对7种豆科牧草种子萌发和幼苗生长的影响.草地学报,2015,23(4):793-803.
- [21] 李翀.微生物与保水剂添加对客土喷播植物根土力学特性的影响[D].南京:南京林业大学,2020.
- [22] 范娜,彭之东,白文斌,等.微生物菌剂对土壤酶活性及高粱生长的影响[J].中国农业科技导报,2021,23(2):185-192.
- [23] Campbell K A, Hawkins C D. Paper birch and lodgepole pine root reinforcement in coarse, medium, and fine-textured soils[J].Canadian Journal of Forest Research,2003,33(8):1580-1586.
- [24] LI C, Jia Z H, Yuan Y D, et al. Effects of mineral-solubilizing microbial strains on the mechanical responses of roots and root-reinforced soil in external-soil spray seeding substrate[J].Science of the Total Environment,2020,723:e138079.
- [25] Mahannopkul K, Jotisankasa A. Influences of root concentration and suction on *Chrysopogon zizanioides* reinforcement of soil[J].Soils and Foundations,2019,59(2):500-516.
- [26] Wei J, Shi B L, Li J L, et al. Shear strength of purple soil bunds under different soil water contents and dry densities: A case study in the Three Gorges Reservoir Area, China[J].Catena,2018,166:124-133.
- [27] 吴旭恒,钟志涛,牟亚清.MICP作用下根土复合体强度研究[J].土木工程,2021,10(3):6.
- [28] 李东彪,朱磊.穿沙公路边坡植被根系固土力学特征比较研究[J].路基工程,2022(1):8-13.
- [29] Gyssels, G, Poesen J, Bochet E, et al. Impact of plant roots on the resistance of soils to erosion by water: A review[J].Progress in Physical Geography,2005,29(2):189-217.