

藻菌混合结皮对土壤水肥保持及玉米幼苗生长的影响

陆贺港, 任梦楠, 黄海东

(天津农学院 农学与资源环境学院, 天津 300392)

摘要: [目的] 研究藻菌混合结皮对土壤水肥保持及玉米幼苗生长的影响, 为土壤治理与改良策略提供理论依据。[方法] 使用来自内蒙古翁牛特沙漠的2种产胞外多糖的细菌(*Sphingomonas* sp. D3-1 和 *Massilia armeniaca* sp. ZMN-3) 和2种藻类(*Cladophora aegagrophila* D3-a 和 *Nostoc sphaeroides* D3-25) 制备成藻菌混合剂后, 喷洒至土壤表面, 形成土壤结皮。研究藻菌混合结皮与土壤水肥保持、微生物数量及酶活性的关系, 及其对玉米幼苗的影响。[结果] 与对照相比, 藻菌混合结皮明显延缓了土壤水分的流失速度, 并使氮、磷和钾的平均淋失效率分别减少了76.9%, 64.4%和47.8%, 土壤中的细菌、真菌和放线菌数量分别增加了8.3, 1.8和3.1倍, 芽孢杆菌的数量下降了12.4%。另外, 在玉米盆栽中, 藻菌混合结皮使玉米幼苗的地上部鲜/干重、根部鲜/干重和地上/下部长度分别提升30.0%/55.6%, 55.4%/38.5%和16.5%/18.0%, 叶绿素含量增加15.0%。[结论] 藻类与产胞外多糖的细菌共同形成的藻菌混合结皮, 明显改善了土壤的水肥保持效果, 可作为治理土壤的新途径加以推广。

关键词: 藻菌混合结皮; 水肥保持; 土壤微生物; 土壤酶; 玉米幼苗

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2021)04-0077-06

中图分类号: S157.2, S513

文献参数: 陆贺港, 任梦楠, 黄海东. 藻菌混合结皮对土壤水肥保持及玉米幼苗生长的影响[J]. 水土保持通报, 2021, 41(4): 77-82. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2021.04.011; Lu Hegang, Ren Mengnan, Huang Haidong. Effects of cyanobacteria-bacteria biological crusts on soil moisture and nutrient conservation and maize seedling growth [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(4): 77-82.

Effects of Cyanobacteria-bacteria Biological Crusts on Soil Moisture and Nutrient Conservation and Maize Seedling Growth

Lu Hegang, Ren Mengnan, Huang Haidong

(College of Agronomy and Resource Environment, Tianjin Agricultural University, Tianjin 300392, China)

Abstract: [Objective] The effects of cyanobacteria-bacteria biological crusts on moisture and nutrient conservation and maize seedling growth were studied to provide a theoretical basis for soil treatment and improvement strategies. [Methods] Two species of bacteria (*Sphingomonas* sp. D3-1 and *Massilia armeniaca* sp. ZMN-3) and two species of cyanobacteria (*Cladophora aegagrophila* D3-a and *Nostoc sphaeroides* D3-25) isolated from the Wengniute Desert of Inner Mongolia Region, were used to prepare biological crusts. The relationships between the cyanobacteria-bacteria biological crusts and soil moisture and nutrient conservation, soil microbial quantity and soil enzyme activity were explored, and the effect of biological crusts on maize seedling growth was studied. [Results] Compared with the control, the soil surface cyanobacteria-bacteria crust significantly declined the rate of soil moisture loss, and reduced the average leaching efficiency of nitrogen, phosphorus and potassium by 76.9%, 64.4% and 47.8%, respectively, while increased the number of bacteria, fungi and actinomycetes in soil by 8.3 times, 1.8 times and 3.1 times, respectively, and decreased the number of bacillus by 12.4%. Besides, in the corn plants, the cyanobacteria-bacteria crust increased the aboveground fresh/dry weight, root fresh/dry weight, and above/lower length of corn seedlings by 45%/57.8%, 54.6%/32.8% and 19.7%/14.5%, respectively, and the chlorophyll content increased by

收稿日期: 2021-04-11

修回日期: 2021-05-06

资助项目: 天津农学院研究生培养质量提升项目“藻菌生物结皮对土壤水肥保持及作物生长的影响”(2017YYPY017); 国家自然科学基金项目(31571790)

第一作者: 陆贺港(1997—), 男(汉族), 山东省济宁市人, 硕士研究生, 研究方向为应用微生物。Email: 17853513894@139.com。

通讯作者: 黄海东(1972—), 男(汉族), 天津市人, 博士, 教授, 主要从事资源与应用微生物学研究。Email: hdhuang@tjau.edu.cn。

5.7%。[Conclusion] The mixed soil biological crust formed by cyanobacteria and extracellular polysaccharide producing bacteria significantly improved the soil microbial and fertilizer conservation effect, which could provide a reference for developing a new way of soil management.

Keywords: cyanobacteria-bacteria crusts; moisture and nutrient conservation; soil microbial; soil enzyme; maize seedling

由于人们对部分自然资源的不合理利用,或自然环境变动等种种原因,导致了土壤性质与土壤结构改变,土壤中的微生物数量与土壤酶活性降低,水土保持能力急剧下降^[1],并严重影响了农作物的种植^[2]。因此,寻求绿色有效的土壤生态与结构修复方法,成为治理土壤的关键。大量分布于荒漠地区的土壤生物结皮,在土壤生态修复方面具有广阔的应用前景,受到了科学家们的广泛关注。作为干旱或半干旱地区常见地表景观,生物结皮是由土壤中的细菌、藻类、地衣及苔藓等生物,其通过菌丝体、假根以及分泌物与土壤颗粒结合,共同形成生物土壤层^[3]。具有生物结皮的土壤可以增强土壤的水肥保持效果,使土壤结构更加稳定,并表现出明显的抗风雨侵蚀能力^[4]。目前,在制备生物结皮的研究中,大多数研究者关注于藻类、苔藓以及真菌等一种或几种形成的生物结皮,而对于细菌介入的藻类生物结皮讨论较少^[5]。研究^[6]表明,藻类所构成的土壤结皮,属于结皮发育的早期形态,其形成及维持的制约因素较多,水肥保持的稳定性不强,土壤生态环境恢复慢。据报道,微生物产生的胞外多糖(exopolysaccharides, EPS)可以加快土壤结皮形成,提升土壤保水效果^[7],而藻类产生EPS限制因素多,产生量少,对土壤凝集效果弱^[8]。针对这一现象,本文将能够大量产生EPS的细菌^[9-10]引入土壤并与藻类形成混合生物结皮,并通过研究藻菌混合结皮的水肥保持效果,及其对土壤微生物数量、酶活性和盆栽玉米幼苗的影响,为藻菌混合结皮的土壤治理策略提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试菌株与玉米种子

供试细菌 *Sphingomonas* sp. D3-1 与 *Massilia armeniaca* sp. ZMN-3, 供试藻类 *Cladophora algographila* D3-a 与 *Nostoc sphaeroides* D3-25, 于 2016 年 6 月 12 日分离自内蒙古翁牛特荒漠化地区(东经 119°01'16", 北纬 43°01'19")。供试玉米为先玉 335, 由自选系 PH6 WC 为母本, PH4 CV 为父本组配而成。

1.2 培养基与培养条件

牛肉膏蛋白胨培养基;高氏 1 号培养基,使用时

每 300 ml 培养基加入 3% 重铬酸钾 1 ml; 马丁氏培养基,加入 1% 孟加拉红水溶液,使用时每 100 ml 培养基加入 1% 链霉素 0.3 ml; BG11 培养基^[11], 恒温 20 °C, 光照强度 4 000~6 000 lx(日光灯), 光照周期 16 h : 8 h; EPS 合成菌筛选培养基(g/L): 酵母膏 5.0 g, 蛋白胨 5.0 g, 酸水解酵素 5.0 g, 葡萄糖 5.0 g, 可溶性淀粉 5.0 g, 丙酮酸钠 3.0 g, 磷酸氢二钾 3.0 g, 硫酸镁 0.5 g, 琼脂粉 15.0 g, pH 值 7.0~7.5, 30 °C 恒温; 供试发酵培养基(g/L): 蔗糖 40 g, 磷酸氢二钾 1.8 g, 硫酸镁 0.4 g, 硫酸亚铁 0.008 g, 硫酸铵 2.6 g, 酵母粉 1.5 g, pH 值 7.0~7.5。

1.3 供试土壤

供试土壤于 2017 年 8 月采自天津市武清区王庆坨(东经 116°91'07", 北纬 39°19'27"), 砂质潮土, 自然风干, 全氮 0.59 g/kg, 有效磷 5.28 mg/kg, 速效钾 37.25 mg/kg, 有机质 10.73 g/kg, pH 值 8.13。

1.4 试验方法

1.4.1 微生物制剂的制备及结皮形成 试验开展于 2017 年 9 月, 采用室内盆栽模拟的方法。250 ml 三角瓶装 100 ml 发酵培养基, 分别接入 2 种供试菌, 置于旋转式摇床 180 r/min, 30 °C 震荡培养 72 h, 取其发酵液进行 1 : 1 混合后稀释至 7.0 亿 CFU/ml 作为菌剂; 将 2 种供试藻分别于光照培养箱培养 30 d, 经富集、冷冻干燥得到藻粉进行 1 : 1 混合, 配制浓度为 0.75% 制剂作为藻剂。将菌剂与藻剂进行等比混合, 得到藻菌混合剂。将各生物制剂喷洒至土壤表面, 形成土壤结皮。

1.4.2 生物结皮保水性测定 将供试土壤 130 g 置于塑料花盆中(圆形, 直径 6 cm, 高 6.5 cm), 分别加入 20 ml 水(CK)、菌剂、藻剂和藻菌混合剂, 分别设置 3 次重复, 室温下自然蒸发, 定时称重计算土壤含水量, 并观察土壤结皮的形成。待各处理水分均完全蒸发后再次分别加入水 15 ml, 进行第二轮保水试验。

1.4.3 生物结皮保肥性测定 将供试土壤 130 g 置于塑料花盆中。花盆的形状和尺寸同保水性测定试验。底端打 4 圆孔, 孔直径 0.5 cm, 距中心 1.5 cm, 底端铺纱布两层。在花盆中分别加入 30 ml 水(CK)、菌剂、藻剂和藻菌混合剂, 各盆中分别施加

100 mg 硫酸铵、硫酸钾和磷酸二氢钾,分别重复 3 次,室温放置,第 8 d 与第 15 d 分别加水 25 ml 淋溶,收集淋出液并使用 Bioprofile300 A 多参数生化分析仪测定淋出液中的氨离子、磷酸根离子及钾离子含量。

1.4.4 生物结皮对土壤微生物数量影响 使用经保水处理 30 d 后的土壤进行培养,培养方法详见表 1。培养后采用平板计数法统计各微生物数量变化,并观察水肥保持试验后供试菌株在土壤中的存活情况。

表 1 微生物培养方法

待测微生物	培养基种类
土壤细菌	牛肉膏蛋白胨培养基
土壤真菌	马丁氏培养基
土壤放线菌	高氏 1 号培养基
土壤芽孢杆菌	牛肉膏蛋白胨培养基(水浴)
供试细菌	EPS 筛选培养基
供试藻	BG11 培养基

1.4.5 生物结皮对土壤酶活性影响 土壤样品为保水试验处理 30 d 后的土壤。土壤中的脲酶采用靛酚蓝比色法测定,蔗糖酶采用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定,过氧化氢酶采用高锰酸钾滴定法测定^[12]。

1.4.6 生物结皮对玉米幼苗生长影响 供试土壤 5 kg 中加 60 ml 水浸润,置入塑料栽培盆中(圆形,直径 25 cm,高 18 cm;底具 2 圆孔,孔径 1 cm,距圆心 5 cm),在土壤表面放入经清水浸种 24 h,25 °C 光照

催芽后的玉米种子 5 颗,覆土 1 kg,每盆分别加入菌剂、藻剂、藻菌混合剂及水(CK)各 40 ml,分别设置 3 次重复,放置于 25 °C 恒温光照培养箱中光照与黑暗 12 h 交替培养,于第 7,10,13 及 15 d 时分别加水 20, 20,30 和 30 ml,生长至 20 d 时收获幼苗,测量与比较各幼苗的地上/下长(高)度、地上/下重量(鲜/干重),并使用叶绿素测定仪(SPAD,日本 Konica minolta)测定叶绿素含量。

1.4.7 数据整理与分析 使用 Excel 2019 进行数据整理;使用 Origin 2018 绘图;利用 SPSS 23 进行数据分析,并使用 LSD 法进行多重比较。

2 试验结果与分析

2.1 生物的形成及保水效果

将菌剂、藻剂及藻菌混合剂喷洒于土壤表面后,第 2 天即可观察到土壤表面形成结皮。从图 1 可以看出,由于结皮保水作用,处理组水分蒸发量明显减少,在第 3 d 时便展现出明显差异,至第 12 d 时,细菌、藻类及藻菌混合结皮中土壤含水量分别比对照提高 161.0%,15.0%和 248.5%,第二次保水试验表明生物结皮与对照相比有着明显的持效性,至第 12 天时,细菌、藻及藻菌混合结皮中土壤含水量分别比对照提高 56.6%,34.4%和 61.2%(图 1)。保水试验结果表明,藻菌混合结皮具有更稳定的水分保持效果,并且保水性以菌剂为主导,而藻剂结皮表现出的保水效果相对较弱。

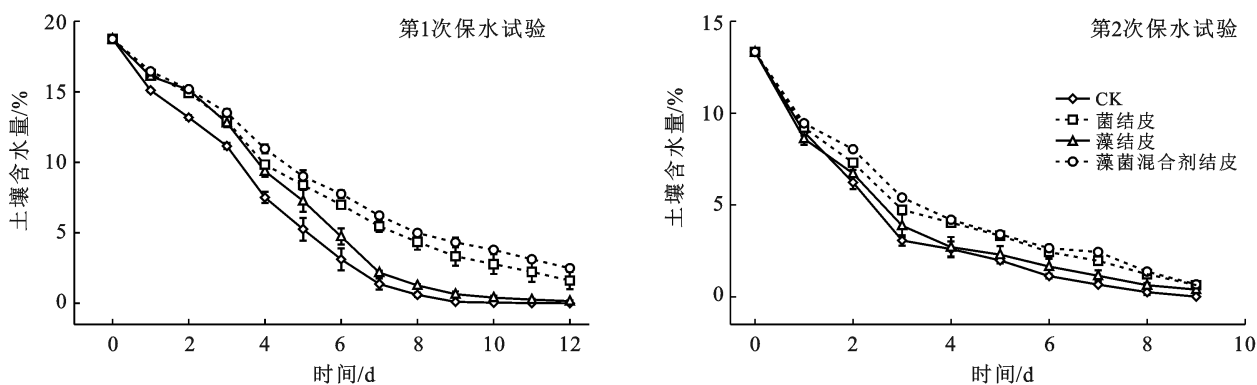


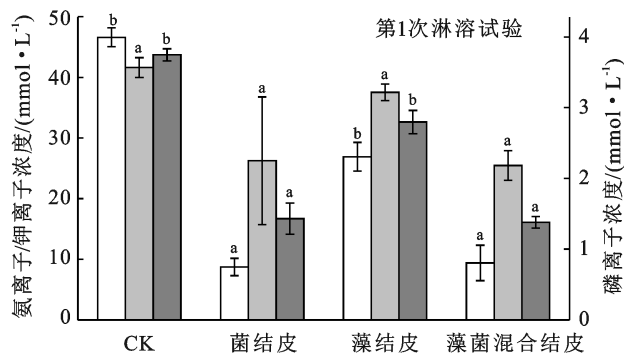
图 1 不同生物结皮含水量的变化

2.2 生物结皮的保肥效果

由图 2 可知,淋溶试验中,在藻菌混合结皮影响下,土壤中的氮、磷和钾的淋失量与 CK 相比分别减少了 79.8%,38.8%和 63.2%,在第 2 次淋溶试验中淋失量分别减少了 74.0%,89.9%和 32.3%。从图 2 可以看出,藻菌混合剂结皮对土壤肥料淋出降低效果更明显。在土壤中,大部分植物所需的营养元素会随

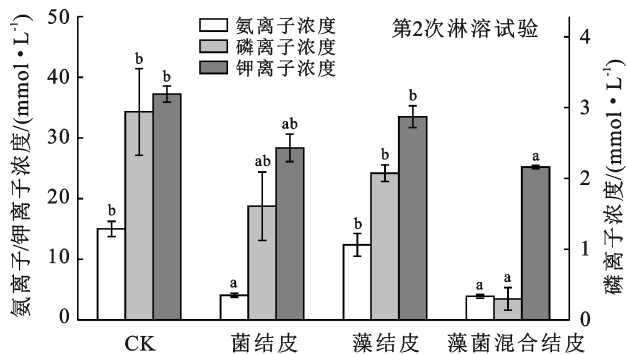
着水的流失而减少^[13],细菌产生的 EPS 对土壤颗粒有着凝集作用,形成土壤结构可以有效阻止土壤水分的蒸发或渗透,进而增强了土壤的保肥效果^[14],而藻类生长与细菌相比更缓慢,但其形成结皮也具有较强的保肥效果^[15]。

保水保肥试验表明,藻菌混合结皮可以使土壤的水肥保持效果明显提高。



注:不同小写字母表示各处理间差异显著($\alpha=0.05$)。下同。

图 2 不同生物结皮的肥料淋出变化



2.3 生物结皮对土壤微生物数量的影响

土壤微生物的数量与组成,可以在一定程度上反映出土壤的优劣程度,与土壤中的元素循环、污染修复及植物根际免疫力的调节直接相关^[16]。由图 3 可以看出,与试验前相比,CK 条件下仅使芽孢杆菌数量显著降低,而其余微生物指标变化差异不显著。与 CK 相比,藻菌混合剂对土壤细菌、真菌和放线菌数量增加效果显著,其数量分别增加 8.3, 1.8 和 3.1 倍。除藻菌混合剂外,其余处理下的土壤芽孢杆菌数量均显著降低,与试验前相比,藻菌混合剂处理的芽孢杆菌数量降低了 12.4%,菌剂与藻剂分别降低了 32.6% 和 50%,其致死原因有待研究。刘玉冰等^[17]认为生物结皮可明显提升土壤微生物数量,也与本文研究结果相符。保水保肥试验后的土壤样品经培养后,在 EPS 培养基及 BG11 培养基中可分离出大量质地黏稠菌落,通过形态学及分类学鉴定,确定为 4 种试验菌株。试验菌株的存活,进一步证实了藻菌混合结皮保水保肥的持效性。

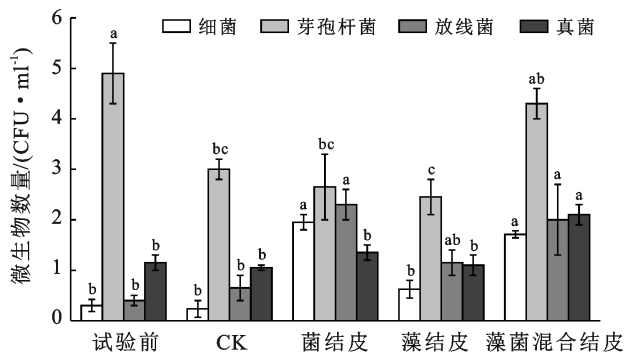
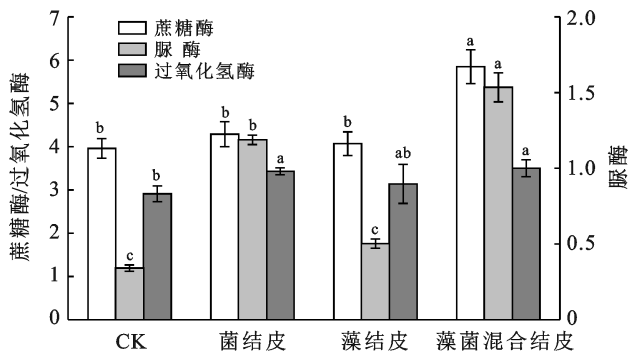


图 3 不同生物结皮的土壤微生物数量变化

2.4 生物结皮对土壤酶活性的影响

土壤中脲酶、蔗糖酶及过氧化氢酶的活性可以作为土壤生化反应强度的理论依据^[18]。由图 4 可知,藻菌混合剂形成的结皮对蔗糖酶和脲酶活性的提升与其他处理差异显著,而过氧化氢酶活性的提升与

菌剂和藻剂处理相比无显著性差异;藻菌混合剂处理对蔗糖酶、过氧化氢酶及脲酶活性与对照相比,分别提高 1.5, 1.2 和 4.3 倍。Ghiloufi 等^[19]研究表明,土壤酶活性主要由土壤中的水和有机物等环境因素控制,而与微生物数量的相关性并不显著。在藻菌混合结皮形成后,土壤中的环境变得更适宜,从而提升了土壤酶活性。杨航宇等^[20]也均认为土壤生物结皮会提高劣化土壤的酶活性。土壤微生物与土壤酶活性试验结果分析表明,藻菌混合结皮可以改善土壤的生态环境。



注:脲酶和蔗糖酶活性单位为 $\text{mg}/(\text{g} \cdot \text{d})$;过氧化氢酶活性单位为 $\text{mg}/(\text{g} \cdot \text{h})$ 。

图 4 不同生物结皮对土壤酶活性影响

2.5 生物结皮对玉米幼苗生长的影响

从表 2 可以看出,藻菌混合剂处理在各项指标中与 CK 相比差异显著。其中,藻菌混合剂处理的地上部的鲜/干重与 CK 相比分别增加了 30.0% 和 55.6%,根部的鲜/干重分别增加了 55.4% 和 38.5%,地上部长度增加 16.5%;而对根部长度影响中,藻结皮使玉米幼苗根长度增加了 28.3%,藻菌混合结皮使幼苗根长度增加了 18.0%;另外,藻菌混合剂使植株叶绿素含量增加了 15.1%。试验数据表明,除根长度指标外,细菌在藻菌混合结皮中起主导作用。藻结皮对玉米幼苗根部长度的增加影响较大,表明藻类形成的

土壤结构更有利于玉米幼苗根部发育,饶本强等^[15]也认为藻类结皮会改善土壤条件,促进植物的生长繁

殖。玉米盆栽试验结论,为藻菌混合结皮的进一步利用提供了参考。

表2 不同生物结皮对玉米幼苗生长影响

处理/指标	株高/cm	根长度/cm	地上鲜重/g	地上干重/g	根鲜重/g	根干重/g	叶绿素含量(SPAD)
CK	34.33±1.53 ^b	10.26±0.40 ^b	0.67±0.07 ^b	0.09±0.01 ^b	0.56±0.08 ^b	0.13±0.001 ^b	28.29±1.56 ^b
菌结皮	40.75±1.92 ^a	11.96±0.57 ^{ab}	0.83±0.08 ^a	0.12±0.01 ^{ab}	0.81±0.02 ^a	0.17±0.018 ^a	32.00±1.14 ^a
藻结皮	36.75±1.41 ^{ab}	13.16±0.99 ^a	0.77±0.04 ^{ab}	0.11±0.01 ^{ab}	0.73±0.05 ^a	0.15±0.007 ^{ab}	30.93±0.75 ^{ab}
藻菌混合结皮	39.99±1.64 ^a	12.11±0.58 ^{ab}	0.87±0.06 ^a	0.14±0.02 ^a	0.87±0.05 ^a	0.18±0.008 ^a	32.55±0.93 ^a

注:不同小写字母表示各处理间差异显著($\alpha=0.05$)。

3 讨论

在土壤结皮的形成及发育过程中,藻类生物维持与稳定了土壤的生态结构,与土壤环境密切相关^[21]。细菌作为土壤中的活跃组分,可以增强土壤肥力,优化土壤生态环境^[22]。将藻类与细菌混合为藻菌混合剂,然后将其均匀喷洒至土壤表面形成混合生物结皮,细菌产生EPS对土壤颗粒与微生物进行固定,同时,自养型的藻类为异养型的细菌提供生长条件,细菌产生的EPS还可作为呼吸底物供土壤微生物利用^[8]。在本研究中,将可以大量产生EPS的细菌加入土壤中,繁殖速度快的细菌与大量EPS,配合藻类生物,提升了土壤凝集效率,促进了土壤团粒结构形成,增强了土壤结皮早期的稳定性,提高了水资源利用率,增强了土壤微生物活动,提高了土壤酶活性以及土壤生化反应强度^[23-24]。此外,在藻菌结皮影响下的土壤栽培玉米幼苗时,发现藻菌混合结皮会加快玉米幼苗的生长速度,提高植物活力。但是,细菌可能产生过多EPS,对多孔土壤团聚体的产生提供了可靠帮助的同时^[25],也可能影响玉米根系的生长发育,而使藻菌混合结皮的根长度短于藻类结皮,因此细菌使用量不宜过大。藻类与细菌的共同作用,弥补了早期结皮形成及发育缓慢与水肥保持效果差的劣势。试验分析表明,藻菌混合结皮的形成,为土壤的生态的修复与改良提供了有效的帮助。

由于微生物活动易受环境影响,如应用于土地过酸过碱、地温过高或过低以及土壤水分严重不足的区域时,藻菌混合剂发挥的作用会小于受环境影响小的化学类保水剂。在利用藻菌混合结皮时,应需考虑环境因素,展开综合治理。例如,在耕地退化区域中人类活动频繁、雨水充足时^[26],适合藻菌混合结皮使用;在荒漠化地区,虽降雨不足但仍有可利用的土壤水^[27],也可采用藻菌混合结皮进行治理;沙漠地区严重缺水,空气湿度低,降雨稀少,土壤环境不适宜^[28],应结合其他治理措施辅助进行;水土流失区往往水分

充足,但因土壤沙化、制备覆盖少而使土壤被水冲刷,引起土壤养分流失和环境问题^[29],也适宜利用藻菌混合结皮进行综合改良。本研究结果对藻菌混合结皮的土壤治理效果提供了理论支撑,但藻菌配比优化研究还有待下一步开展,对藻菌的相互关系是否为共生关系,还有待进一步研究。

4 结论

本研究中,我们通过研究藻菌混合结皮的形成与土壤水肥保持及玉米幼苗生长的关系,发现藻菌混合结皮使土壤的水肥保持效果明显提高,并使土壤中的细菌、真菌和放线菌数量显著提高,还增强了土壤蔗糖酶、过氧化氢酶及脲酶的活性。此外,在玉米盆栽试验中,玉米幼苗的重量、长度及叶绿素含量也因藻菌混合结皮的影响显著增加。结果表明,藻菌混合结皮可以改善土壤生态环境,增强土壤的水肥保持效果,为以结皮法治理土壤提供了理论基础。

[参考文献]

- [1] A Núez Delgado, Zhou Y, Anastopoulos I, et al. Editorial: New research on soil degradation and restoration [J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 269 (3):110851.
- [2] 陆文聪,刘聪.化肥污染对粮食作物生产的环境惩罚效应[J].*中国环境科学*,2017,37(5):1988-1994.
- [3] Steven D W, Roger R, Nicole P. Biological soil crusts of the great plains: A review [J]. *Rangeland Ecology & Management*, 2020. ISSN 1550-7424, <https://doi.org/10.1016/j.rama.2020.08.010>.
- [4] Nevins J C, Strauss L S, Inglett W P. Biological soil crusts enhance moisture and nutrients in the upper rooting zone of sandy soil agroecosystems [J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2020,183(5):615-626.
- [5] Antoninka A, Faist A E, Rodriguez Caballero, et al. Biological soil crusts in ecological restoration:emerging research and perspectives [J]. *Restoration Ecology*, 2020, 28(S2):S3-S8.

- [6] 周晓兵,张丙昌,张元明.生物土壤结皮固沙理论与实践[J].中国沙漠,2021,41(1):164-173.
- [7] Ye Chaoran, Tao Yue, Zhang Yurui, et al. Monosaccharide composition of primary cell wall polysaccharides as a developmental level indicator of biological soil crusts [J]. *Catena*, 2020,195:104782.
- [8] Rossi F, Mugnai G, Philippis R D. Complex role of the polymeric matrix in biological soil crusts [J]. *Plant and Soil*, 2018,429(1/2):19-34.
- [9] 任梦楠,金玉,李晓雁,等.荒漠化土壤中菌株 ZMN-3 的分离鉴定及其保水效果[J].北方园艺,2018(8):23-28.
- [10] 周明明,任梦楠,李晓雁,等.三萜鞘氨醇单胞菌生物结皮对土壤水肥保持的影响[J].北方园艺,2016(20):171-174.
- [11] Wang Lu, Chen Xiurong, Wang Hualin, et al. *Chlorella vulgaris* cultivation in sludge extracts from 2,4,6-TCP wastewater treatment for toxicity removal and utilization [J]. *Journal of Environmental Management*, 2017,187:146-153.
- [12] Xue Dong, Huang Xiangdong. The impact of sewage sludge compost on tree peony growth and soil microbiological, and biochemical properties [J]. *Chemosphere*, 2013,93(4):583-589.
- [13] 杨才敏.土壤有机质与水土流失的关系定量研究[J].水土保持研究,2008,15(5):177-179.
- [14] 上官王丽.产胞外多糖细菌多样性及其对土壤团聚体形成作用的研究[D].江苏南京:南京农业大学,2013.
- [15] 饶本强,刘永定,胡春香,等.人工藻结皮技术及其在沙漠治理中的应用[J].水生生物学报,2009,33(4):756-761.
- [16] 朱永官,彭静静,韦中,等.土壤微生物组与土壤健康[J].中国科学:生命科学,2020,51(1):1-11.
- [17] 刘玉冰,王增如,高天鹏.温带荒漠生物土壤结皮微生物群落结构与功能演替研究综述[J].微生物学通报,2020,47(9):2974-2983.
- [18] Martín Sanz J P, Valverde Asenjo I, Santiago Martín A, et al. Enzyme activity indicates soil functionality affection with low levels of trace elements [J]. *Environmental Pollution*, 2018,243(B):1861-1866.
- [19] Ghiloufi W, Seo J, Kim J, et al. Effects of biological soil crusts on enzyme activities and microbial community in soils of an arid ecosystem [J]. *Microbial Ecology*, 2019,77(1):201-216.
- [20] 杨航宇,刘艳梅,王廷璞.荒漠区生物土壤结皮对土壤酶活性的影响[J].土壤学报,2015,52(3):654-664.
- [21] Sudharsanam A, Suresh R S, Kadiyala V, et al. Soil microalgae and cyanobacteria: The biotechnological potential in the maintenance of soil fertility and health [J]. *Critical Reviews in Biotechnology*, 2019,39(8):981-998.
- [22] Chirom A, Ameer K, Paul A, et al. Molecular diversity and hydrolytic enzymes production abilities of soil bacteria [J]. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 2020,27(12):3235-3248.
- [23] Delgado Baquerizo M, Grinyer J, Reich B P, et al. Relative importance of soil properties and microbial community for soil functionality: Insights from a microbial swap experiment [J]. *Functional Ecology*, 2016,30(11):1862-1873.
- [24] Fan Miaochun, Li Jiajia, Tang Zhuangsheng, et al. Soil bacterial community succession during desertification in a desert steppe ecosystem [J]. *Land Degradation & Development*, 2020,31(13):1662-1674.
- [25] 张文平,李昆太,黄林,等.产胞外多糖菌株的筛选及其对土壤团聚体的影响[J].江西农业大学学报,2017,39(4):772-779.
- [26] 朱青.坡耕地退化机理及侵蚀退化防治措施研究[D].浙江杭州:浙江大学,2007.
- [27] 朱建佳,陈辉,邢星,等.柴达木盆地荒漠植物水分来源定量研究:以格尔木样区为例[J].地理研究,2015,34(2):285-292.
- [28] 赵景波,郁科科,邵天杰,等.腾格里沙漠沙层水分状况初步研究[J].资源科学,2011,33(2):259-264.
- [29] 赵串串,董旭,辛文荣,等.青海湟水河流域水土流失原因及防治措施分析[J].水土保持研究,2008,15(6):200-202.