

人工藻结皮对河套平原盐碱土理化性质和酶活性的影响

刘太坤¹, 高班¹, 谢作明^{1,2}, 李明¹, 毛青¹, 赵欣鑫¹

(1.中国地质大学(武汉)环境学院, 武汉 430078; 2.中国地质大学(武汉)生物地质与环境地质国家重点实验室, 武汉 430078)

摘要:土壤藻结皮主要由土壤中的藻类和土壤颗粒胶结而形成,具备水土保持、土壤改良、防风固沙等优良的生态功能。为了研究土壤藻结皮对盐碱土的改良效果,在河套平原盐碱地野外试验区分别接种了 *C. miniata* HJ-01, *C. miniata* HJ-01 和 *S. javanicum*, *C. miniata* HJ-01 和土著丝状混合藻,培植人工土壤藻结皮。结果表明:人工藻结皮发育 45 d 后,0—10 cm 深度土壤中水分损失减弱,土壤 pH 值轻微下降,电导率降低 57% ($p < 0.05$),有效氮和有效磷增加 ($p < 0.05$);0—5 cm 深度土壤中脲酶、蔗糖酶、过氧化氢酶和碱性磷酸酶活性分别增加 52.1%, 20.7%, 16.7%, 41.7% ($p < 0.05$)。因此,人工土壤藻结皮能有效改良盐碱地。

关键词:盐碱地; 土壤藻结皮; 土壤改良

中图分类号: S156.4; S154.3

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2022)04-0133-07

Effects of Artificial Algal Crusts on Physicochemical Properties and Enzyme Activities of Saline-Alkali Soil in Hetao Plain

LIU Taikun¹, GAO Ban¹, XIE Zuoming^{1,2}, LI Ming¹, MAO Qing¹, ZHAO Xinxin¹

(1.School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430078, China; 2.State Key Laboratory of Biogeology and Environmental Geology, China University of Geosciences, Wuhan 430078, China)

Abstract: Soil algal crusts are mainly formed by the cementation of soil algae and soil particles, and have excellent ecological functions such as soil and water conservation, soil improvement, windbreak and sand fixation. In order to study the improvement effect of soil algal crusts on saline-alkali soil, the experiment was carried out in the saline-alkali land of Hetao Plain. We inoculated *C. miniata* HJ-01, *C. miniata* HJ-01 and *S. javanicum*, *C. miniata* HJ-01 and indigenous filamentous mixed algae in the field experimental area, and the soil algal crusts were artificially cultured. The results showed that after 45 days of artificial algal crusts development, within the depth of 0—10 cm, the water loss decreased slightly, soil pH value decreased slightly, soil electrical conductivity decreased 57% ($p < 0.05$), and available N and available P increased ($p < 0.05$); the activities of urease, sucrase, catalase and alkaline phosphatase in 0—5 cm soil layer increased by 52.1%, 20.7%, 16.7% and 41.7%, respectively ($p < 0.05$). Therefore, the artificial soil algal crusts could improve the saline-alkali soil effectively.

Keywords: saline-alkali land; soil algal crusts; soil improvement

人类活动加剧了土壤盐碱化,造成耕地生产力下降,影响粮食生产及粮食安全。目前全球大约有 8.31 亿 hm^2 的土地受到盐渍化的威胁^[1],次生盐渍化土壤面积大约为 7 700 万 hm^2 ,其中 58% 发生在灌溉农业区^[2]。受盐渍化影响的土壤分布在 100 多个国家,主

要包括印度、巴基斯坦、中国、伊拉克、澳大利亚和美国。我国盐渍化土壤总面积约 9 913 万 hm^2 ,其中约 30% 具有可利用潜力^[3]。盐渍土中氮、碳和磷的含量通常较低,所含盐碱成分具有较强渗透性和生理毒性,从而阻碍作物的生长,并削弱其产量^[4]。

收稿日期: 2021-06-16

修回日期: 2021-06-29

资助项目: 内蒙古地质调查院科技项目“内蒙古自治区河套灌区盐碱地生物修复与综合开发研究”(2019046338)

第一作者: 刘太坤(1997—),男,山东临沂人,硕士在读,研究方向为环境生物学。E-mail: liutaikun@163.com

高班(1995—),男,湖北汉川人,硕士,研究方向为环境生物学。E-mail: bangao@cug.edu.cn

通信作者: 谢作明(1973—),男,湖北监利人,教授,主要从事环境生物地球化学研究。E-mail: zuoming.xie@cug.edu.cn

经过改良后的盐渍化土壤可以转变为重要的土地资源。生物改良方法是一种有效改善土壤理化特性,提高土壤利用效率的土壤改良技术。生物方式以重建土壤微生态为目的改良土壤环境条件,与物理和化学改良方式相比,具有成本低、生态友好等特点。

土壤藻是土壤微生物群落的重要组成部分。将具有活性的微藻作为生物肥料施加在土壤中可促进土壤养分循环^[5]。土壤藻作为初级生产者,在土壤生态系统中发挥着重要作用。土壤藻的生长发育可以增加磷酸盐的溶解度,促进矿物质释放,持续提升土壤肥力,并有助于重建微生物群落^[6-7]。在受干扰的土壤中接种土壤藻可恢复微生物群落,提高土壤有机质含量^[8-9]。在含水率较低的盐碱土中接种土著藻,能促进农作物的生长并提高作物产量^[10]。土壤藻与土壤颗粒胶结形成的生物土壤结皮已被证明在盐碱地、沙漠和石漠等恶劣生境中具有良好的抗逆性^[11-12]。

本文利用盐渍化农田土壤中筛选的土著藻和一株外源蓝藻作为生物调节剂改良盐渍化土壤,调查其对土壤基本理化性质、土壤养分、土壤酶活性等的影响,综合分析土壤藻改良盐渍化土壤的可行性。研究结果为盐渍化土壤改良和土地资源可持续利用提供重要理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验区概况

试验区设在河套平原地区杭锦后旗蛮会镇永丰村七组(40°59'N,107°11'E)。河套平原海拔为1 007~1 050 m,土地面积约111.9万hm²,灌溉面积约57.4万hm²^[13],盐渍化面积约43.1万hm²^[14]。地处中温带大陆性干旱、半干旱气候区,降雨稀少,蒸发强烈,年均降水量135.9 mm,年均蒸发量1 984.3 mm,年日照时数平均4 449.6 h,年均气温8.7℃,无霜期126 d。地下水埋深一般0.5~1.5 m,地下水矿化度10~20 g/L,土壤类型以硫酸盐为主,并伴有氯化物和碳酸盐、重碳酸盐。

试验田耕作层土壤(0—20 cm)可溶性盐含量为0.2%~1%,pH值为8~8.5,主要为轻中度盐碱土,局部为重度盐碱土。

1.2 土壤藻的筛选与培养

从试验区盐渍化土壤表层生物结皮中筛选并纯化得到一株球状土壤藻。用18S rRNA进行分子生物学鉴定,发现其属于绿藻门(Chlorophyta)中的小球藻属(*Chlorella*),并命名为*Chlorella miniata* HJ-01。土著丝状混合藻也从生物结皮中分离,但并未纯化,其中包含颤藻、鞘丝藻等土壤蓝藻。小球藻

C. miniata HJ-01和丝状混合藻的培养基均为BG11。爪哇伪枝藻(*Scytonema javanicum* (Kütz.) Born et Flah)是一种丝状固氮蓝藻,购自于中国科学院水生生物研究所,培养基为BG110。按照三级培养法,在室内(20 L透明塑料桶)和室外(培养池尺寸为4 m×2 m×0.5 m)中分别将藻种进行扩大培养。室内培养条件:光照强度4 000 lux,光暗比12 h:12 h,温度(24±2)℃,并通气;室外以自然光通气培养。

1.3 试验地样方设计

在试验地共设置3个处理:样地1(S₁)只接种*C. miniata* HJ-01;样地2(S₂)按照10:1的鲜重比例接种*C. miniata* HJ-01和*S. javanicum*;样地3(S₃)按照10:1的鲜重比例接种*C. miniata* HJ-01和土著丝状混合藻;空白对照组(CK)不接种藻液,喷洒等体积BG11培养基。每个处理设置3个重复样地,每块样地15 m²。各样地接种量均为5 g/m²鲜重,使用洒水壶(喷头孔径为3 mm)均匀接入地表。

接种后的30 d内,补充水分和营养元素以保证藻体成活。在第一周,每天9:00,13:00,17:00使用洒水壶向各样地和对照组浇水,水量为4 L/m²。第二周以同样的方式浇水,水量减为2 L/m²。第15—30天,每两天以上述方式浇水,水量为2 L/m²。在第7天和第14天,用洒水壶向各样地和对照组喷洒BG11培养基一次,用量为2 L/m²。接种30 d后停止补充水分和培养基,让藻结皮利用空气中的雨露自行生长发育。

1.4 土壤样品的采集与前处理

试验前和第45天后,分别在样方内形成结皮和未形成结皮的区域按五点采样法一式3份分层采集0—10 cm和10—20 cm土壤,用于土壤理化指标测定;采集0—5 cm深度土壤用于测定土壤酶活性。每5天用直径2 cm的圆形塑料管采集土壤表层藻结皮,深度约为5 mm,用于测定人工藻结皮生物量。

土壤样品在实验室进行风干后,取50 g研磨并过2 mm筛,放入干燥的500 ml锥形瓶中,按照1:5的土水比例加入250 ml无二氧化碳的水,加塞振荡3 min,再用滤纸将土壤悬浊液重复过滤,直至土壤浸提液呈清亮为止。结皮样品迅速风干后装入自封袋密封,于4℃冰箱保存。

1.5 分析方法

叶绿素a采用乙醇提取法测定^[15]。类胡萝卜素和伪枝藻素利用丙酮提取法测定^[16]。土壤含水率采用烘干法测定^[17]。土壤pH值和电导率利用pH计和电导率仪测定。土壤有效氮和有效磷含量分别采用碱解-扩散法和碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定^[18]。脲酶活性采用苯酚钠-次氯酸钠比色法测定;蔗糖酶活性采用

3,5-二硝基水杨酸比色法测定;过氧化氢酶活性采用高锰酸钾滴定法测定;碱性磷酸酶活性采用磷酸苯二钠比色法测定^[19]。室内风干后的藻结皮被切割成薄片,经过喷金前处理后,在场发射扫描电子显微镜(SU8010,HITACHI)下观察其表面微观结构,分析土壤藻结皮的形态和胶结机理。

1.6 数据处理

所有数据采用 3 次重复的平均值±标准偏差来表示。使用 OriginPro 2021 进行图形绘制。使用 SPSS Statistics 26 进行单因素方差(One-way ANOVA)和显著性分析, $p<0.05$ 表示显著。

2 结果与分析

2.1 人工藻结皮的发育和微观结构

叶绿素是藻类光合作用的主要捕光色素,定量分析叶绿素含量对于光合作用、初级生产力及相关研究具有重要意义。如图 1 所示,在前 30 d,由于人工补充水分和培养基,制造了适宜的外部环境,藻结皮的生长速度较快,且达到一定的生物量。第 30 天后藻结皮大量增殖,至第 35 天生长开始趋缓,第 40 天后呈现稳定停滞状态。样地 S_2 的藻结皮生长最佳,在第 45 天叶绿素 a 含量达到 $20.36\text{ }\mu\text{g/g}$ 。样地 S_3 和样地 S_1 生长情况相对较差,最高分别达到 $15.12, 11.37\text{ }\mu\text{g/g}$,分别占样地 S_2 的 74%,56%;对照组样地在自然状态下形成了少量结皮,但在第 45 天藻结皮的叶绿素 a 含量仅为 $2.53\text{ }\mu\text{g/g}$ 。

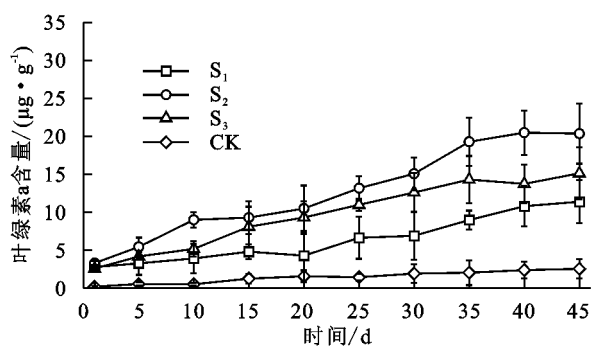
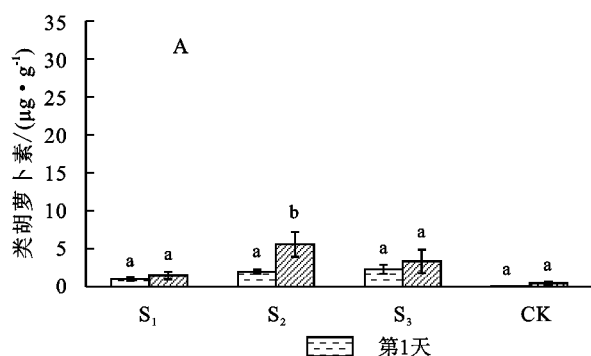


图 1 人工藻结皮的生物量



样地 S_2 接种有 *S. javanicum*,其分泌的伪枝藻素作为一种保护色素,可有效抵御紫外辐射对人工藻结皮的损伤^[20],因此该混合藻结皮既能耐受一定盐碱胁迫,也能耐受紫外辐射,因而快速生长。在样地 S_3 中接种的混合丝状藻,其抵抗紫外辐射的能力相对较弱,导致其生长相对较慢。而样地 S_1 ,只接种了 *C. miniata*,其接种土壤藻太过单一,对环境的抵抗能力较弱,土壤藻生长更慢。空白对照组样地因为没有接种任何藻液,只补充了水分和培养基,所以土壤藻生物量极低。

图 2 显示了人工藻结皮中类胡萝卜素和伪枝藻素含量在试验前后的变化。在第 45 天,样地中两种色素的含量由高到低均为 $S_2>S_3>S_1>CK$,与结皮中叶绿素 a 的含量变化规律一致,表明藻结皮分泌类胡萝卜素和伪枝藻素的能力与生物量呈正相关。

土壤藻接种 1 d 后,由于藻结皮还未形成,样地 S_1, S_2 和 S_3 的表层土壤类胡萝卜素含量均较低,分别为 $1.01, 1.96, 2.31\text{ }\mu\text{g/g}$ 。经过 45 d 的培育,样地 S_1, S_2 和 S_3 藻结皮中类胡萝卜素含量分别为 $1.47, 5.59, 3.34\text{ }\mu\text{g/g}$ 。样地 S_2 藻结皮中类胡萝卜素含量显著增加($p<0.05$),增幅为 185%。其次为样地 S_1 增加 46%和样地 S_3 增加 45%($p>0.05$)。在未接种的空白对照组中,虽然形成了一定厚度的藻结皮,但其中类胡萝卜素含量依然很低,未超过 $0.5\text{ }\mu\text{g/g}$,变化并不显著($p>0.05$)。3 个样地类胡萝卜素含量的差异主要来自接种藻液的不同。

藻结皮中伪枝藻素含量变化与类胡萝卜素相似。由于接种了 *S. javanicum*,经过 45 d 的生长后,样地 S_2 土壤表层中伪枝藻素含量的变化最为显著($p<0.05$),增加了 144%,达到 $24.45\text{ }\mu\text{g/g}$,为样地中最高值。样地 S_3 土壤表层中伪枝藻素含量的变化较显著($p<0.05$),即接种的少量混合丝状藻同样产生了少量的伪枝藻素。而样地 S_1 藻结皮中的伪枝藻素含量仅增加 12%,变化不显著($p>0.05$)。对照组中虽然有少量土壤藻生长,但 45 d 后,其中伪枝藻素的含量仅为 $0.25\text{ }\mu\text{g/g}$ ($p>0.05$)。

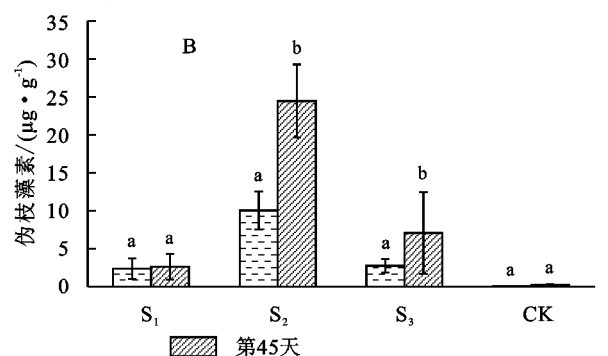


图 2 人工藻结皮中类胡萝卜素和伪枝藻素含量的变化

在藻结皮的人工培植过程中,除了考虑高盐碱环境外,还有必要提高结皮整体的抗干旱和抗紫外辐射能力。类胡萝卜素是一种光合系统保护色素,当环境光照变得较为强烈时,藻细胞产生类胡萝卜素减少活性氧的损害。*S. javanicum* 是一种具有固氮作用的蓝藻,能在干旱和半干旱等特殊环境中生存。谢作明等^[11]研究发现,土壤藻为了应对恶劣的环境条件,产生伪枝藻素等保护色素和 MAAs(三苯甲咪唑氨基酸)的能力显著增强。

图 3A 为人工藻结皮截面的微观结构,可见土壤藻的藻丝在土壤矿物质中间穿插生长,与土壤颗粒相互缠绕结合,从而定植在土壤表层。图 3B 为人工藻结皮表面的微观形态。可见大量土壤藻藻丝相互缠绕形成“微生物垫”覆盖在土壤表层,在藻结皮表面还有单细胞土壤藻。

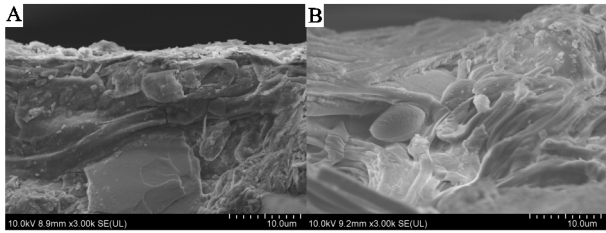
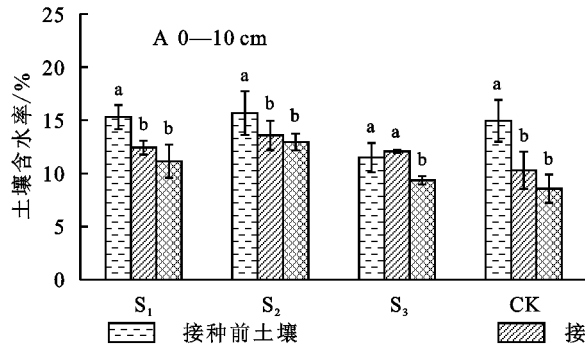


图 3 人工藻结皮的微观结构

结皮的胶结机理可以大致分为两类。一是藻丝的机械性束缚作用,使其与土壤颗粒紧密捆绑和缠绕,这种机械束缚力成为细粒聚合的主要控制力,将分散的土壤聚集起来^[21];二是藻体分泌的胞外物质含有大量糖类,具有较强的黏性,能将藻体和土壤颗



粒牢牢地粘黏住,起到“胶水”的作用。土壤颗粒与藻体胶结形成的大量团聚体覆盖在土壤表层,不仅能抵御风力对土壤的侵蚀,而且还能减少土壤水分的蒸发,从而降低土壤中盐碱成分向上迁移而在表层积聚,达到控制耕作层土壤盐碱含量的目的。

2.2 人工藻结皮对土壤理化性质和养分的影响

图 4 为各样地土壤含水率的变化情况。接种藻液前,试验地植被稀少,水分蒸发量大,各样地 0—10 cm 土壤的含水率(平均值为 14.4%)普遍低于 10—20 cm 深度的土壤含水率(平均值为 16.5%)。

对照组样地土壤含水率显著下降($p < 0.05$),在结皮区和无结皮区 0—10 cm 土壤的含水率分别减少 31.2%,42.7%。结皮区和无结皮区 10—20 cm 土壤的含水率下降同样显著($p < 0.05$),降幅分别为 42.0%,47.7%。3 个处理组样地土壤含水率在两个深度也有较明显的下降($p < 0.05$),但降幅相对对照组偏小。

在试验前,当地有过较大的降雨,导致土壤初始含水率较高。在整个试验期间,气候干旱,降水极少,蒸发量很大。因此 0—20 cm 土壤的含水率总体呈减少趋势,表明人工藻结皮并未完全阻止土壤水分的蒸发。但是,与裸露土壤相比,形成藻结皮的区域,其土壤含水率相对较高,说明土壤藻结皮一定程度上能适当缓解水分的损失,从而达到一定保水效果。土壤藻的拓殖作用能够改善土质,使土壤中粗砂粒含量降低,细颗粒物增加^[22],从而增强土壤对水分的调蓄能力。保持浅层土壤中有效水分的含量,也间接地影响了植被及微生物的分布。

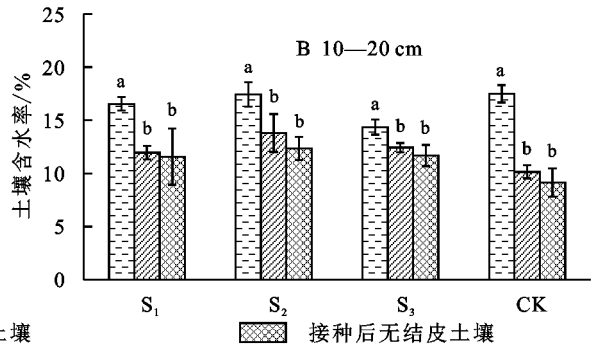


图 4 人工藻结皮对土壤含水率的影响

如图 5A—B 所示,在 0—10 cm 土壤中,样地 S₁, S₂, S₃ 结皮区域的土壤 pH 值均小幅下降,且低于对应的无结皮区域土壤,其中样地 S₁ 最明显($p < 0.05$)。而对照区结皮区土壤的 pH 值略微升高,无结皮区域则显著升高($p < 0.05$)。总体来看,10—20 cm 土壤略高于上层土壤,但变化规律相似。在试验期内,样地 S₂, S₃ 中 0—20 cm 土壤 pH 值变化并不显著($p > 0.05$)。

由图 5C—D 可知,人工藻结皮可降低 0—10 cm 土壤的电导率,样地 S₁ 土壤电导率显著下降 57%($p < 0.05$),样地 S₂, S₃ 分别下降 21%,13%。而在未形成结皮的区域,盐分在地表大量积累,土壤电导率均高于初始值。在对照组中,所有区域土壤电导率均升高。人工藻结皮对 10—20 cm 土壤的电导率的影响不显著($p > 0.05$)。仅样地 S₁ 中结皮区土壤的电导率小幅下降了 0.13 mS/cm,其余区域均有所增加。

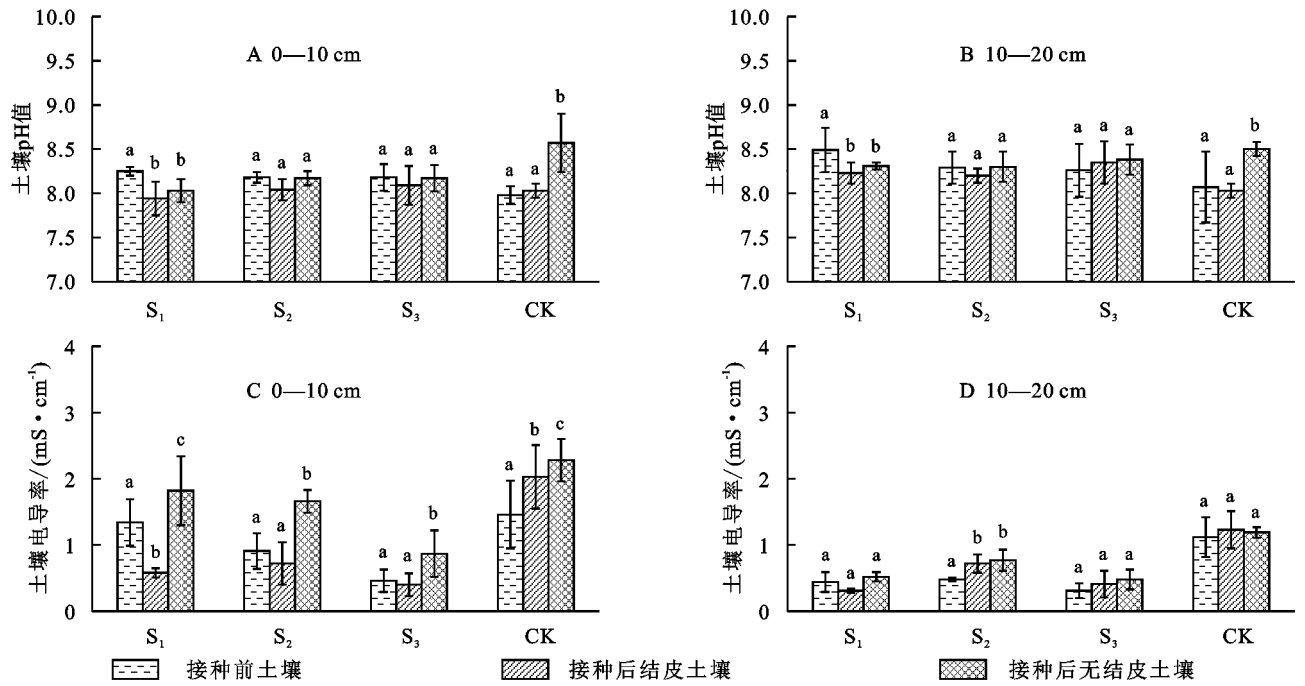


图5 人工藻结皮对土壤 pH 值和电导率的影响

试验田植被覆盖度低,加之气候干旱,水分蒸发量大,携带盐分的地下水沿土壤孔隙大量上移,导致盐分不断累积在土壤表层,因此,在试验前 0—10 cm 土壤的电导率普遍高于 10—20 cm 土壤的电导率。由于人工藻结皮的存在,延缓了土壤水分的蒸发,阻止了大量盐分伴随着孔隙水向上运移,导致 0—10 cm 土壤盐分下降,土壤电导率下降明显。

从图 6 可以看出,样地 S₁, S₂, S₃ 的 0—10 cm 土壤中有有效氮和有效磷的含量随着土壤藻结皮的发育有小幅增加,其中样地 S₂ 土壤中的有效氮变化最显著($p < 0.05$),含量达到 90 mg/kg,这是由于接种的 *S. javanicum* 具有固氮作用,将大气中的 N₂ 转化为氮素,输入到了土壤中。而对照组中土壤的有效氮和有效磷含量变化不显著($p > 0.05$)。

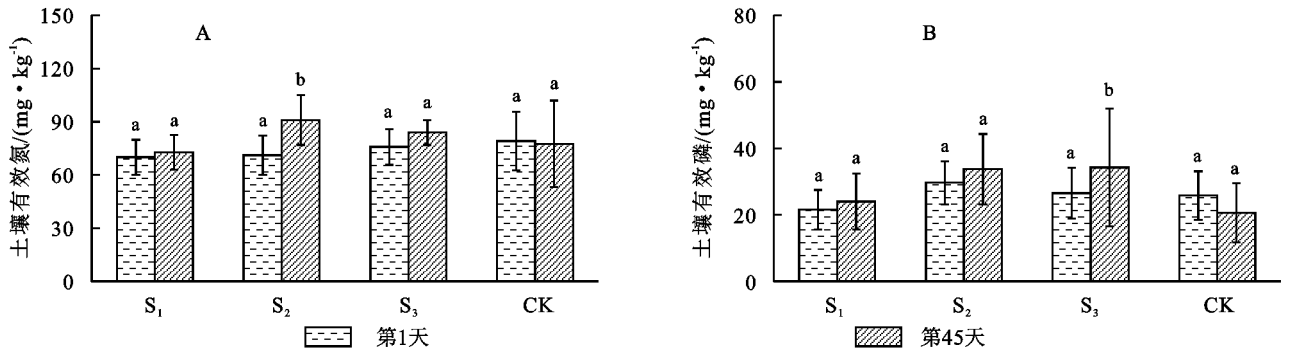


图6 人工藻结皮对土壤有效氮和有效磷的影响

在土壤生态系统中,土壤藻是初级生产者的组成部分。藻细胞叶绿体通过光合作用,将大气中 CO₂ 转化为碳水化合物。部分土壤蓝藻,如 *S. javanicum*,在固氮酶的催化作用下,将大气中不易被生物直接利用的 N₂ 还原为可被生物直接利用的化合态氮,从而增加土壤中的氮素含量,提高土壤肥力,为后续植物的生长补充营养。蓝藻的应用不仅提供氮,而且通过胞外磷酸酶和有机酸的排泄在无机磷酸盐的转化中发挥重要作用^[23],并可提高磷对植物的生物利用度。一些藻类能够溶解土壤和沉积物中不溶性的 Ca₃(PO₄)₂, FePO₄, AlPO₄ 和羟基磷灰石 [Ca₅

(PO₄)₃OH]^[24]。据报道,蓝藻生物体是 C, P, N, Mg, Ca, Na 和 K 的不稳定存储库,这些元素会由于藻类生物体的死亡和快速矿化而释放到土壤中^[25]。

2.3 人工藻结皮对土壤酶活性的影响

表 1 为人工藻结皮培植 45 d 后,不同样地表层土壤中脲酶、蔗糖酶、过氧化氢酶、碱性磷酸酶的活性。与对照组相比,各样地中酶活性均有不同程度的增加。3 种处理的表层土壤脲酶活性分别提高了 9.9%, 14.1%, 52.1%, 蔗糖酶活性分别提高了 14.8%, 17.3%, 20.7%, 过氧化氢酶活性分别提高了 16.7%, 9.6%, 11.2%, 碱性磷酸酶活性分别提高了 6.8%, 41.7%, 15.1%。

表 1 人工藻结皮对土壤酶活性的影响

酶的种类	S ₁	S ₂	S ₃	CK
脲酶活性/(mg·g) ⁻¹	0.78±0.07a	0.81±0.10a	1.08±0.03b	0.71±0.10a
蔗糖酶活性/(mg·g ⁻¹)	16.50±4.48b	16.85±5.55b	17.35±5.92b	14.37±3.32a
过氧化氢酶活性/(ml·g ⁻¹)	15.13±0.05b	14.20±1.78a	14.41±0.66a	12.96±0.12a
碱性磷酸酶活性/(mg·g ⁻¹)	1.56±0.47a	2.07±0.35b	1.68±0.21a	1.46±0.28a

土壤酶是土壤中各种酶类的总称,土壤中各种生化反应都由其催化。土壤酶来源于土壤微生物和动、植物活体或残体,土壤酶活性指示土壤肥力和生产力水平的高低^[26]。脲酶能够促进土壤中有机氮的转化,酶促作用产物——氨是植物氮素营养源之一^[27],因此可以用脲酶的活性来反映土壤中氮素状况。相对于对照组,人工藻结皮能显著提高土壤表层的脲酶活性,其中样地 S₃效果显著好于其他样地($p<0.05$)。蔗糖酶的功能是把高分子化合物分解成可被植物和微生物利用的营养物质,促进土壤微生物的进一步生长和发育,加速土壤的熟化和增加土壤肥力^[28]。无论是单一藻结皮还是混合藻结皮,均能不同程度显著提高土壤表层蔗糖酶活性($p<0.05$)。过氧化氢酶与土壤有机质的转化速度有密切关系。土壤藻结皮向土壤输入有机质,使得过氧化氢酶活性提高,接种 *C. miniata* 显著提高土壤表层过氧化氢酶活性($p<0.05$)。碱性磷酸酶活性反映土壤有机磷转化状况,其酶促作用产物——有效磷是植物磷素营养源之一^[18]。土壤磷酸酶活性增强表明土壤中磷酸盐和有效磷之间的溶解和固定转化加强,有更多的有机磷在磷酸酶的作用下转化为有效磷,从而加速土壤生物从土壤中吸收磷素。混合接种 *C. miniata* 和 *S. javanicum* 的样地比其他样地的效果更显著($p<0.05$)。

土壤藻结皮能够改善表层土壤的理化性质,为土壤微生物生长提供适宜的环境条件。与下层土壤中微生物相比,表层土壤中的微生物更易于利用藻结皮中的养分供其生长。在本研究中,土壤藻结皮能够提高盐碱地表层土壤酶活性和土壤肥力。

3 结论

藻体与土壤颗粒胶结状态的微观结构显示出土壤藻在应对盐碱胁迫和改善土壤结构稳定性方面具有优良性能。具有耐高盐碱胁迫的土著小球藻、丝状混合藻和外源蓝藻培植成的人工藻结皮,可延缓土壤表层水分的蒸发,阻止土壤中的盐分随孔隙水向上运移而在地表累积,并有效改善土壤 pH 值和电导率。人工藻结皮增加了土壤中有效氮和有效磷的含量及土壤酶活性,提高土壤养分含量。因此,人工藻结皮

可以减少盐碱物质在耕作层土壤中的积聚,并有效改良盐渍化农田土壤,促进农业的可持续发展。

参考文献:

[1] Zhu J K. Plant salt tolerance[J]. Trends in Plant Science, 2001,6(2):66-71.

[2] 李建国,濮励杰,朱明,等.土壤盐渍化研究现状及未来研究热点[J].地理学报,2012,67(9):1233-1245.

[3] Luo S S, Tian L, Chang C L, et al. Gras and maize vegetation systems restore saline-sodic soils in the Songnen Plain of northeast China[J]. Land Degradation & Development, 2018,29(4):1107-1119.

[4] Rengasamy P, Chittleborough D, Helyar K. Root-zone constraints and plant-based solutions for dryland salinity [J]. Plant and Soil, 2003,257(2):249-260.

[5] Solovchenko A, Verschoor A M, Jablonowski N D, et al. Phosphorus from wastewater to crops: An alternative path involving microalgae[J]. Biotechnology Advances, 2016,34(5):550-564.

[6] Flaibani, A, Olsen, et al. Polysaccharides in desert rec-lamation: Compositions of exocellular proteoglycan complexes produced by filamentous blue-green and unicel-lular green edaphic algae[J]. Carbohydrate Research, 1989,190(2):235-248.

[7] Jesus J M, Danko A S, Fiúza A, et al. Phytoremedi-ation of salt-affected soils: A review of processes, applicability, and the impact of climate change [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015,22(9):6511-6525.

[8] Acea M J, Prieto-Fernández A, Diz-Cid N. Cyanobacterial inoculation of heated soils: effect on microorganisms of C and N cycles and on chemical composition in soil surface[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2003,35(4):513-524.

[9] Costa O Y A, Raaijmakers J M, Kuramae E E. Micro-bial extracellular polymeric substances: ecological func-tion and impact on soil aggregation[J]. Frontiers in Microbiology, 2018,9.DOI:10.3389/fmicb.2018.01636.

[10] Nisha R, Kiran B, Kaushik A. Bioremediation of salt affected soils using cyanobacteria in terms of physical structure, nutrient status and microbial activity[J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2018,15(3):571-580.

[11] 谢作明,陈兰洲,李敦海,等.土壤丝状蓝藻在荒漠治理中

- 的作用研究[J].水生生物学报,2007,31(6):886-890.
- [12] 罗征鹏,熊康宁,许留兴.生物土壤结皮生态修复功能研究及对石漠化治理的启示[J].水土保持研究,2020,138(1):400-410.
- [13] 王学全,高前兆,卢琦.内蒙古河套灌区水资源高效利用与盐渍化调控[J].干旱区资源与环境,2005,19(6):118-123.
- [14] 侯玉明,王刚,王二英,等.河套灌区盐碱土成因、类型及有效的治理改良措施[J].现代农业,2011(1):92-93.
- [15] 李合生.植物生理生化试验原理和技术[M].北京:高等教育出版社,2000.
- [16] Garcia-Pichel F, Castenholz R W. Characterization and biological implications of scytonemin, a cyanobacterial sheath pigment[J]. Journal of Phycology, 2010, 27(3):395-409.
- [17] 刘凤枝,李玉浸.土壤监测分析技术[M].北京:化学工业出版社,2015.
- [18] Sun, Q Y, An, et al. Chemical properties of the upper tailings beneath biotic crusts[J]. Ecological Engineering, 2004,23(1):47-53.
- [19] 陈心想,耿增超,王森,等.施用生物炭后塬土土壤微生物及酶活性变化特征[J].农业环境科学学报,2014,33(4):751-758.
- [20] Xie, Z M, Liu, Y D, Hu, C X, et al. Relationships between the biomass of algal crusts in fields and their compressive strength[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2007,39(2):567-572.
- [21] 张元明.荒漠地表生物土壤结皮的微结构及其早期发育特征[J].科学通报,2005,50(1):42-47.
- [22] 周小泉,刘政鸿,杨永胜,等.毛乌素沙地3种植被下苔藓结皮的土壤理化效应[J].水土保持研究,2014,21(6):340-344.
- [23] Rai A K, Sharma N K. Phosphate metabolism in the cyanobacterium *anabaena doliolum* under salt stress[J]. Current Microbiology, 2006,52(1):6-12.
- [24] Singh J S, Kumar A, Rai A N, et al. Cyanobacteria: A precious bio-resource in agriculture, ecosystem, and environmental sustainability[J]. Frontiers in Microbiology, 2016,7.DOI:10.3389/fmicb.2016.00529.
- [25] Kaushik B D. Developments in cyanobacterial biofertilizer[J]. Proceedings of the Indian National Science Academy, 2014,80(2):379-388.
- [26] Devi N B, Yadava P S. Seasonal dynamics in soil microbial biomass C, N and P in a mixed-oak forest ecosystem of Manipur, North-east India[J]. Applied Soil Ecology, 2006,31(3):220-227.
- [27] 黄哲,曲世华,白岚,等.不同秸秆混合生物炭对盐碱土壤养分及酶活性的影响[J].水土保持研究,2017,24(4):290-295.
- [28] 赵军,耿增超,张雯,等.生物炭及炭基硝酸铵肥料对土壤酶活性的影响[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2015,43(9):123-130.

(上接第132页)

- [20] 鹿化煜,王先彦, Vandenbergh J. 青藏高原东北部地貌演化与隆升[J].自然杂志,2014,36(3):176-181.
- [21] 罗友弟.青海地区盐渍土分布规律及其盐胀溶陷机制探讨[J].水文地质工程地质,2010,37(4):116-120.
- [22] 孙毅.西宁市黄土滑坡发育特征及稳定性分析:以小西山滑坡为例[D].西安:长安大学,2013.
- [23] 刘亚斌,李淑霞,余冬梅,等.西宁盆地黄土区典型草本植物单根抗拉力学特性试验[J].农业工程学报,2018,34(15):157-166.
- [24] 胡夏嵩,李国荣,朱海丽,等.寒旱环境灌木植物根-土相互作用及其护坡力学效应[J].岩石力学与工程学报,2009,28(3):613-620.
- [25] 周林虎,胡夏嵩,刘昌义,等.西宁盆地黄土区4种灌木原位拉拔试验[J].水土保持研究,2019,26(5):236-242.
- [26] 牛西午,丁玉川,张强,等.柠条根系发育特征及有关生理特性研究[J].西北植物学报,2003,23(5):860-865.
- [27] 谢蕾蕾,宋志刚,何旭洪.SPSS统计分析实用教程[M].北京:人民邮电出版社,2013.
- [28] 李东嵘.黄土区紫花苜蓿与沙棘根系拉拔受力机理研究[D].太原:太原理工大学,2020.
- [29] 张兴玲,胡夏嵩,毛小青,等.青藏高原东北部黄土区护坡灌木柠条锦鸡儿根系拉拔摩擦试验研究[J].岩石力学与工程学报,2011,30(S2):3739-3745.
- [30] 周霞.黄土区紫花苜蓿根土复合体摩擦锚固试验研究[D].太原:太原理工大学,2019.
- [31] 杨闻达,王桂尧,常靖美,等.主直根系拉拔力的室内试验研究[J].中国水土保持科学,2017,15(4):111-116.
- [32] 汤连生,王思敬.湿吸力及非饱和土的有效应力原理探讨[J].岩土工程学报,2000,22(1):86-91.
- [33] 李广信.高等土力学[M].北京:清华大学出版社,2004.
- [34] 汤连生.黄土湿陷性的微结构不平衡吸力成因论[J].工程地质学报,2003,11(1):30-35.