

DOI: 10.5846/stxb201606281277

何芳兰, 郭春秀, 吴昊, 刘左军, 徐文, 金红喜. 民勤绿洲边缘沙丘生物土壤结皮发育对浅层土壤质地、养分含量及微生物数量的影响. 生态学报, 2017, 37(18): 6064-6073.

He F L, Guo C X, Wu H, Liu Z J, Xu W, Jin H X. Effect of biological soil crust succession on soil texture, nutrient contents, and microbial populations of dune surfaces at the edge of the Minqin Oasis. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(18): 6064-6073.

民勤绿洲边缘沙丘生物土壤结皮发育对浅层土壤质地、养分含量及微生物数量的影响

何芳兰^{1,2}, 郭春秀², 吴昊², 刘左军³, 徐文³, 金红喜^{2,*}

1 甘肃河西走廊森林生态系统国家定位观测研究站, 武威 733000

2 甘肃省治沙研究所, 兰州 730070

3 兰州理工大学生命科学与工程学院, 兰州 730050

摘要:为探明干旱沙区沙丘生物土壤结皮形成及发育对浅层土壤质地、养分含量及微生物数量的影响,以民勤绿洲边缘结皮前期阶段(NCS)、物理-藻类结皮阶段(PACS)、藻类-地衣结皮阶段(ALCS)以及地衣-藓类结皮阶段(LMCS)的0—1 cm层土壤为研究对象,研究了土壤颗粒组成、土壤有机质、全氮、速效磷、速效钾含量以及土壤微生物数量动态变化。结果表明:1)生物土壤结皮在NCS向ALCS的发育过程中,其有效地提高了0—1 cm层土壤细沙粒(0—200 μm)含量,同时降低了粗砂粒(200—2000 μm)含量;在ALCS向LMCS演替过程中,土壤粒度组成无明显变化。2)土壤结皮形成与发育对0—1 cm层土壤有机质、全氮、速效磷以及速效钾含量均有显著影响($P<0.05$),4种养分含量均随生物结皮演替逐渐增大。3)在土壤结皮形成与演替过程中,0—1 cm层土壤细菌、放线菌以及真菌数量均呈现出先增大后减小趋势(峰值均出现在PACS),土壤总藻生物量一直处于持续增大趋势;在5—12月期间,土壤微生物数量或生物量变化均呈现出先增大后减小趋势。4)土壤结皮在NCS向PACS演替过程中,土壤颗粒组成的改变是土壤微生物量及养分变化的主要驱动因子;PACS向LMCS演替过程,土壤藻类、地衣、藓类是提高土壤养分含量的主要因子。表明民勤绿洲边缘沙丘生物土壤结皮形成与发育能有效地改善浅层土壤质量,提高土壤肥力,同时对土壤生态系统改善及生态环境保护具有重要作用。

关键词:民勤绿洲;生物土壤结皮;土壤粒度;养分

Effect of biological soil crust succession on soil texture, nutrient contents, and microbial populations of dune surfaces at the edge of the Minqin Oasis

HE Fanglan^{1,2}, GUO Chunxiu², WU Hao², LIU Zuojun³, XU Wen³, JIN Hongxi^{2,*}

1 Gansu Hexi Corridor Forest Ecosystem National Research Station, Wuwei 733000, China

2 Gansu Desert Control Research Institute, Lanzhou 730070, China

3 Lanzhou University of Technology-School of Life Science and Engineering, Lanzhou 730050, China

Abstract: The Minqin Oasis is located in the northwest Hexi Corridor, and the northern, western, and eastern edges are surrounded by the Tengger and Badain Jaran Deserts. To manage sand and prevent sandstorms, large tracts of *Haloxylon ammodendron* plantations have previously been planted on fixed and semi-fixed sand dunes of the Minqin Oasis fringe. At present, many biological soil crusts have formed and are developing in the fixed woodland. To ascertain whether the formation and development of dune biological soil crust affects soil texture, nutrient contents, and microorganism populations, the woodland of *H. ammodendron* plantations were divided into a no crust stage (NCS), physical-algal crust

基金项目:国家自然科学基金项目(31360203);甘肃省创新群体项目(145RJIA335)

收稿日期:2016-06-28; 网络出版日期:2017-04-25

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jinhxcha@163.com

stage (PACS), algal-lichen crust stage (ALCS), and lichen-moss crust stage (LMCS) according to crust coverage, crust thickness, and underlying and ground covers. Here, the contents of soil clay, silt, fine sand, and coarse sand particles, organic matter, total nitrogen, available phosphorus and potassium, and the populations or biomass of bacteria, fungi, and actinomycetes in the 0—1 cm soil layer were measured and studied. The results showed that 1) the formation and development of biological soil crusts from NCS to ALCS not only considerably increased the content of fine soil particles (0—200 μm) but also decreased soil coarse particle (200—2000 μm) contents. However, there was no significant change in soil particle composition during the succession from ALCS to LMCS; 2) the succession of biological soil crusts obviously influenced the contents of soil organic matter, total nitrogen, available phosphorus and potassium, and their contents gradually increased with succession; 3) during biological soil crust succession, all quantities of soil bacteria, fungi, and actinomycetes showed a trend of initially increasing and then decreasing, peaking in PACS. Simultaneously, the soil total algal biomass continuously increased. Furthermore, microbial quantities or biomass also presented a trend of initially increasing and then decreasing from May to December; and 4) in succession from NCS to PACS, the change of soil particle composition was one of the main factors causing variations in soil organic matter, total nitrogen, available phosphorus and potassium, bacteria, fungi, and actinomycetes. During succession from PACS to LMCS, soil algae, lichen, and mosses were the main factors improving soil organic matter, total nitrogen, and available phosphorus and potassium contents. It was suggested that the formation and development of the biological soil crust distributed in the surface layer soil of Minqin Oasis fringe dunes not only ameliorated shallow soil quality effectively, but also played a considerable role in improving soil ecosystems and protecting the ecological environment.

Key Words: Minqin Oasis; biological soil crust; soil particle size; nutrients

民勤位于河西走廊东北部,东、西、北三面被腾格里沙漠和巴丹吉林沙漠包围。近年来,在当地政府与人民群众的共同努力下建植了大面积的人工固沙林,已在其外围形成了长达 300 多 km 的“绿色长城”固沙带^[1]。随人工林林地植被盖度逐渐增大,原有的流动或半固定沙丘逐渐趋于稳定,沙丘表层逐渐形成土壤结皮,尤其是绿洲与荒漠毗邻区域更为明显。沙丘表面生物土壤结皮形成与发育有效固定了沙面,减少地面风沙活动以及土壤风蚀,从而减缓了就地起沙带来的沙尘危害。也有研究显示,干旱沙区生物土壤结皮形成及发育阻碍降雨及时入渗,致使沙丘深层土壤含水量下降^[2-8];生物土壤结皮在土壤表层形成外壳,使得植物种子空间分布浅表化,从而限制了部分植物种子更新^[9-11]。

目前,民勤绿洲边缘沙丘表面生物土壤结皮形成后,人工梭梭林逐渐出现衰退现象,衰败程度随生物土壤结皮演替呈加剧趋势。同时,一些长期从事风沙一线的科技工作者对其退化原因、人工复壮技术以及土壤水分动态开展了大量研究^[12-15],并取得了一定成果。然而,该区域沙丘生物土壤结皮发育过程浅层土壤颗粒组成、养分含量及微生物数量是否也受到影响?是正作用还是副作用?从现有文献资料来看,有关这方面的研究甚少。为此,本文试图在民勤绿洲边缘选择生物土壤结皮不同发育阶段的林地,通过对其 0—1 cm 土壤粒度组成、养分含量及微生物数量等研究,探讨干旱荒漠区沙丘生物土壤结皮形成与发育过程土壤生态系统演变规律,为干旱区沙丘土壤结皮生态功能的正确评价提供理论依据。

1 研究方法

1.1 研究区自然概况

研究区位于石羊河下游民勤西沙窝 (102°59'05" E, 38°34'28" N),该区域属于典型温带大陆性荒漠气候。冬季寒冷,夏季酷热,昼夜温差大,年平均气温 7.6℃,极端低温 -30.8℃,极端高温 40.0℃,无霜期 175 d;降雨量小,蒸发量大,气候干燥,年均降雨量 113.2 mm,年均蒸发量 2604.3 mm,干燥度 5.1,最高达 18.7,相对湿度 47%;光热充足,年均日照时数 2799.4 h, $\geq 10^\circ\text{C}$ 的活动积温 3036.4℃;冬季盛行西北风,全年风沙日

可达 83 d,并多集中在 2—5 月,年均风速 2.5 m/s,最大风速为 23.0 m/s;地下水位深 23 m 左右。

1.2 样地选择及取样

2014 年 7 月在民勤治沙综合试验站周边 20 世纪 70—90 年代建植的人工梭梭林中选择典型林地。依据生物土壤结皮的厚度、下垫面深度以及地被物特征(表 1),将林地划分为结皮前期阶段(NCS)、物理—藻类结皮阶段(PACS)、藻类—地衣结皮阶段(ALCS)以及地衣—藓类结皮阶段(LMCS)(图 1)。在 4 梯度林地沙丘迎风坡(坡度介于 10°—13°之间)中下部布设 10 m×100 m 样带,每个阶段 3 个,共 12 个;样带内设 5 个 2 m×2 m 小样方(图 2),共 60 个。

表 1 不同发育阶段生物结皮林表特征及植被组成

发育阶段 Successional stage	生物土壤结皮特征 Characteristics of biological soil crusts				植被特征 Vegetation characteristics		
	结皮盖度 Crust coverage/ %	结皮厚度 Crust thickness/ mm	下垫面 Underlying/ mm	地被物 Ground covers	灌木层优势种 Dominant species in shrub layer	草本层优势种 Dominant species in herb layer	盖度 Coverage/%
NCS	< 5	0—1.2	0—1	极少量物理结皮	梭梭(<i>Haloxylon ammodendron</i>)	五星蒿(<i>Bassia dasyphylla</i>)、盐生草 (<i>Halogeton glomeratus</i>)、 画眉草(<i>Eragrostis pilosa</i>)	18—25
PACS	> 75	1.5—3.0	0—3	大量物理结皮+ 大量藻类结皮	梭梭、白刺(<i>Nitraria tangutorum</i>)、红砂 (<i>Reaumuria songarica</i>)	画眉草、五星蒿、黄花 补血草	29—35
ALCS	> 95	3.0—6.0	0—5	大量藻类结皮+ 少量地衣类结皮	梭梭、红砂、白刺	画眉草、黄花补血草、 五星蒿	22—27
LMCS	100	5.0—10.5	0—10	大量藻类结+ 少量藓类结皮	红砂	画眉草、黄花补血草 (<i>Limonium aureum</i>)	15—22

表中 NCS、PACS、ALCS、LMCS 分别代表结皮前期 None crust stage、物理-藻类结皮阶段 Physical-algae crust stage、藻类-地衣结皮阶段 Algae-lichen crust stage 和地衣-藓类结皮阶段(lichen-moss crust stagen)

理化性质土样采集:于 2015 年 7 月 6—8 日在小样方内外缘随机开挖 4—6 cm 坡面,铲子(12 cm×14 cm)插入 0—1 cm 土壤层底部,铲刀(10 cm×2 cm)分离 3 边后采集土壤(下同),每个样地土样混合后装入棉质土样袋中,带入实验室自然风干待用;微生物土样采集:于 2015 年 5 月、7 月、9 月及 12 月上旬,在小样方内取 3 个面积 10 cm×10 cm×1 cm 土样(保证每次取样点不重合),去掉杂物并将每个样地土样混合后装入无菌带置于冰箱冷冻,然后用冰袋保鲜运输至兰州实验室冰箱待用。

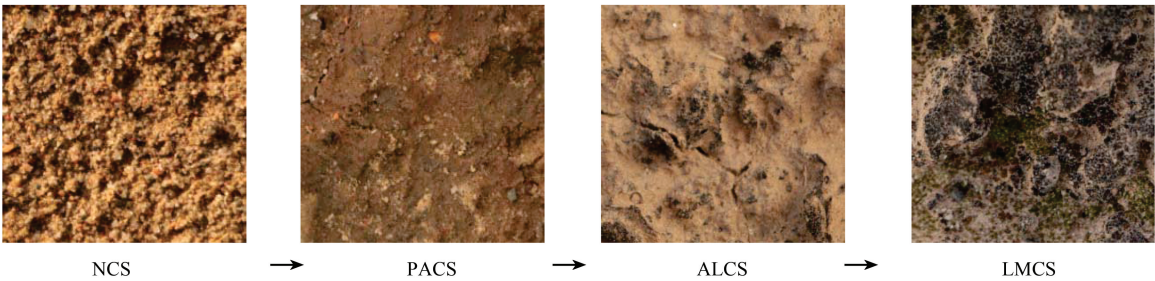


图 1 土壤生物结皮发育阶段

Fig.1 The succession stages of biological soil crust on the sand dunes

图中 NCS、PACS、ALCS、LMCS 分别代表结皮前期 None crust stage、物理-藻类结皮阶段 Physical-algae crust stage、藻类-地衣结皮阶段 Algae-lichen crust stage 和地衣-藓类结皮阶段 lichen-moss crust stagen

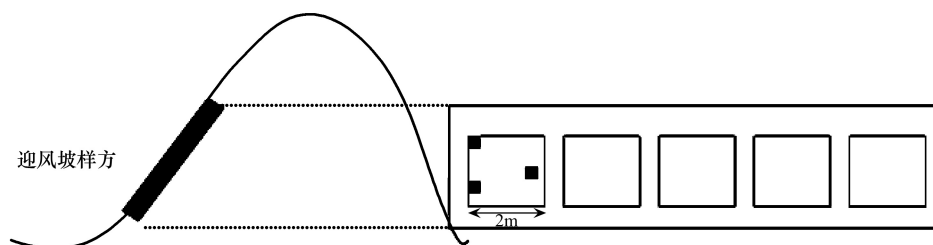


图 2 样地及样方布设示意图

Fig.2 The schematic diagram of sample area and samples layout

1.3 土样测定

1.3.1 粒径组成测定

将风干土压碎后混合均匀,“5 点法”采集 3 份 1.05—1.26 g 土样,用马尔文粒度仪测定土壤颗粒粒径体积百分比组成。

1.3.2 土壤养分测定

风干土用木棒研磨、过筛后,采用“重铬酸钾容量法-外加热法”土壤有机质、“醋酸铵-火焰光度计法”测定速效钾、“碳酸氢钠法”测定速效磷以及“凯式定氮法”测定全氮^[16]。

1.3.3 土壤微生物测定

土壤微生物数量:土壤微生物数量采用平板表面涂抹法计数^[17]。细菌采用牛肉膏蛋白胨琼脂培养基,放线菌采用改良高氏一号培养基,真菌采用马丁-孟加拉红培养基^[18]。

土壤总藻生物量:采用赵洋等人的测定方法^[19]。

1.4 数据分析

应用 Excel 和 SPSS 18.0 软件完成数据处理和统计分析。采用单因素方差分析(one-way ANOVA)和 Duccan's 多重比较方法对生物土壤结皮发育 4 阶段浅层的土壤粒度组成、养分含量及微生物数量进行显著性分析(取显著度 $\alpha=0.05$)。

2 结果与分析

2.1 沙丘生物土壤结皮发育对 0—1 cm 土壤颗粒组成影响

民勤绿洲边缘沙丘生物土壤结皮不同发育阶段 0—1 cm 土层土壤颗粒组成见表 2,可见生物结皮显著影响浅层土壤颗粒组成($P<0.05$)。其中,在 NCS 逐渐演替到 PACS、ALCS 的过程中,土壤粘粒、粉粒、细沙粒体积百分比分别增大了 2.50、2.53、0.17 和 4.67、4.50、0.47 倍,粗砂粒体积百分比分别减小 0.47%和 0.89%;在 ALCS 向 LMCS 阶段演替过程中土壤颗粒体积比变化较小,其两者土壤颗粒体积百分比差异不显著。此外,在 NCS 和 PACS,土壤主要以细沙粒和粗砂粒组成,其体积百分比和高达 94.27%和 79.75%;在 ALCS 和 LMCS,土壤主要以粉粒和细沙粒为主,其体积百分比和均高于 86%。

表 2 沙丘生物土壤结皮不同发育阶段 0—1cm 土壤颗粒组成

Table 2 The soil particle composition of 0—1cm layer in different stages of biological soil crust succession

结皮形成阶段 Stages of soil crust formation	不同粒径颗粒体积百分比 Volume percentage of different size soil particles/%			
	0.01—2 μm (粘粒) Clay particles	2—20 μm (粉粒) Silt particles	20—200 μm (细砂粒) Fine sand particles	200—2000 μm (粗砂粒) Coarse sand particles
NCS	1.28 $\pm$ 0.21a	4.45 $\pm$ 0.45a	42.62 $\pm$ 3.65a	51.65 $\pm$ 1.55c
PACS	4.48 $\pm$ 0.37b	15.74 $\pm$ 1.23b	49.76 $\pm$ 2.67b	29.99 $\pm$ 2.34b
ALCS	7.26 $\pm$ 0.56c	24.48 $\pm$ 1.74c	62.58 $\pm$ 3.67c	5.68 $\pm$ 0.33a
LMCS	7.52 $\pm$ 0.37c	24.07 $\pm$ 1.56c	62.91 $\pm$ 2.54c	5.50 $\pm$ 0.24a

同一列不同字母表示水平间差异性显著;反之,差异不显著

2.2 沙丘生物土壤结皮发育对 0—1 cm 土壤养分含量影响

沙丘不同生物土壤结皮阶段 0—1 cm 层土壤有机质、速效钾、速效磷及全氮见图 3, 可见土壤结皮对各养分含量均有显著影响 ($P < 0.05$)。由图 3 可以见, 在土壤结皮发育过程中, 0—1 cm 层土壤有机质含量呈增大趋势; LMCS 的有机质含量最大, 分别是 NCS、PACS 及 ALCS 的 9.5、3.4、3.2 倍; 除 PACS 与 ALCS 土壤有机质含量差异不显著外, 其他阶段两两之间差异显著 ($P < 0.05$)。由图 3 可知, 0—1 cm 层土壤速效钾、速效磷及全氮含量随土壤结皮发育阶段有增加趋势, 在 LMCS 含量分别是 NCS、PACS 及 ALCS 的 2.8、2.6、1.2、5.8、3.9、1.9 倍和 12.6、9.6、2.5 倍, 4 阶段 3 种养分含量两两之间差异均显著 ($P < 0.05$)。此外, 民勤绿洲边缘沙丘土壤结皮发育过程, 0—1 cm 层土壤中含量有机质最多, 其次为全氮、速效钾、速效磷。

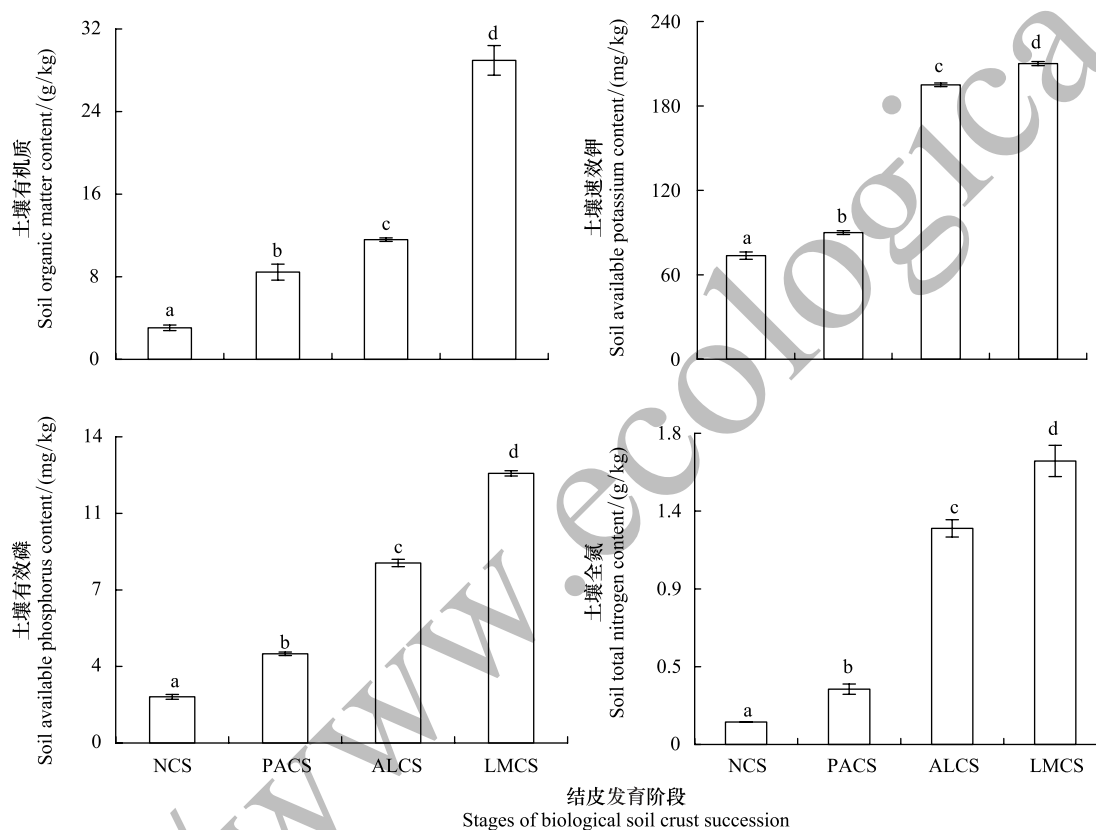


图 3 土壤结皮形成过程中土壤细菌数量动态变化

Fig.3 The dynamic change of soil nutrients in the process of biological soil crust succession

2.3 沙丘生物土壤结皮发育对 0—1 cm 土壤微生物数量或生物量影响

2.3.1 沙丘土壤结皮发育过程中土壤细菌数量变化

由图 4 可知, 土壤细菌数量不仅在结皮发育的不同阶段差异显著, 而且在同一阶段不同月份也存在变化。其中, 土壤细菌数量在 5—12 月期间呈现先增大后减小趋势, PACS 和 ALCS 细菌数量 7 月值最大, 其次为 5 月、9 月、12 月; NCS 细菌数量 9 月值最大, 其次为 7 月、5 月、12 月; ALCS 土壤细菌数量 9 月最大, 其次为 7 月、12 月、5 月。5 和 7 月份, 4 阶段细菌数量大小为: ALCS > PACS > NCS > LMCS, 两两之间差异均显著 ($P < 0.05$); 在 9 月份, 4 阶段细菌数量大小为: LMCS > NCS > PACS > ALCS, 两两之间差异均显著 ($P < 0.05$); 在 12 月份, ALCS 的数量最小, 并与 PACS、ALCS、LMCS 差异显著 ($P < 0.05$), PACS、ALCS 及 LMCS 两两之间差异不显著。不同月份细菌数量均值大小为: PACS > ALCS > NCS > LMCS, 除 PACS 与 ALCS 间差异不显著外, 其余两两之间差异显著 ($P < 0.05$)。

2.3.2 沙丘生物土壤结皮发育过程中土壤放线菌数量变化

生物土壤结皮不同发育阶段土壤放线菌数量见图 5, 可见 4 个阶段土壤放线菌数量在 5—12 月期间呈现

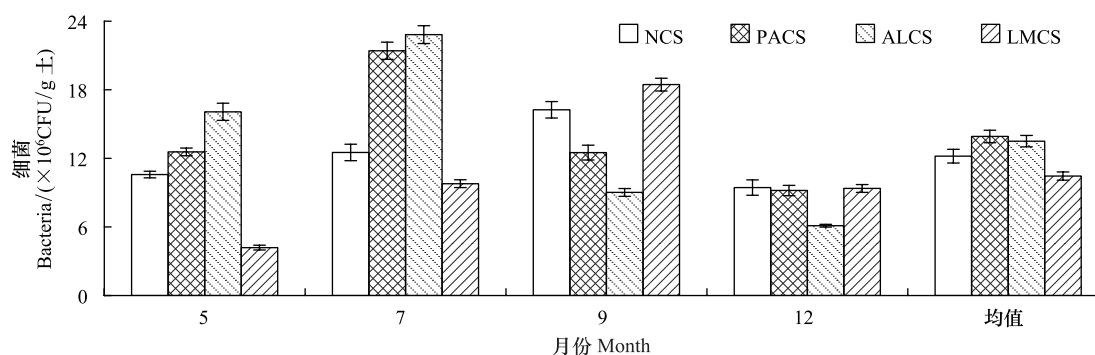


图4 土壤结皮发育过程中土壤细菌数量动态变化

Fig.4 The dynamic change of soil bacterial quantity in the process of biological soil crust succession

出很大变化。5 月和 7 月上旬,4 阶段土壤放线菌数量两两之间差异均显著 ($P<0.05$),大小依次为:PACS>ALCS>LMCS>NCS;9 月上旬,NCS 放线菌数量与其它阶段差异显著 ($P<0.05$),大小依次 LMCS>ALCS> PACS>NCS;12 月上旬,不同阶段放线菌数量两两之间差异不显著。尽管不同阶段土壤放线菌数量在 5—12 月期间处于变动状态,均呈现出先增大后减小的趋势,9 月份达到峰值。不同月份放线菌数量均值大小依次为:PACS>ALCS >LMCS >NCS,除 NCS 与 LMCS、ALCS、PACS 间差异显著外,其余间差异均不显著。

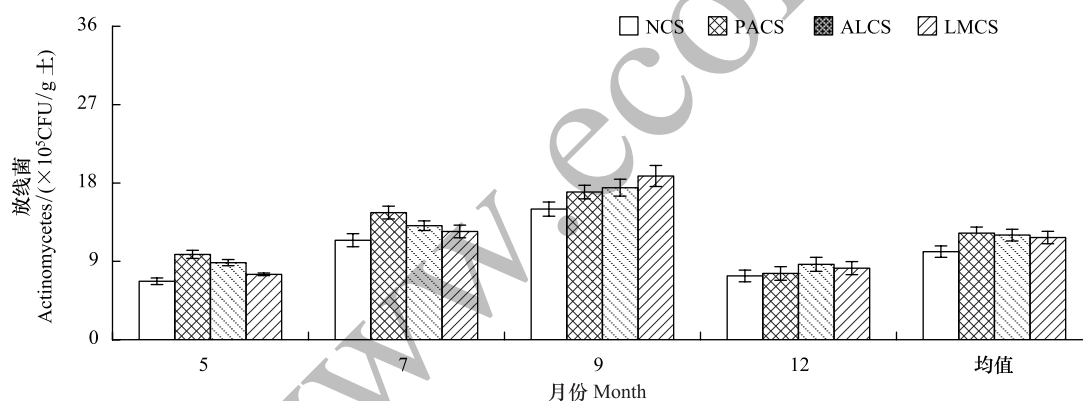


图5 生物土壤结皮发育过程中土壤放线菌数量动态变化

Fig.5 The dynamic change of soil actinomycetes quantity in the process of biological soil crust succession

2.3.3 沙丘生物土壤结皮发育过程中土壤真菌数量变化

由图 6 可知,生物土壤结皮不同发育发育阶段土壤真菌数量完全不同,同一阶段土壤真菌数量在不同月份变化较大。其中,5 月份,LMCS 土壤真菌数量最大,与其它阶段差异显著 ($P<0.05$);7 月份,4 阶段土壤真菌数量两两之间差异均显著 ($P<0.05$),大小为:PACS>ALCS>LMCS>NCS;9 月份,PACS 土壤真菌数量最大,除 NCS 与 LMCS 间差异不显著外,其余两两之间差异均显著 ($P<0.05$);12 月份,LMCS 土壤真菌数量最大,值为其它阶段的 5 倍以上。4 阶段的土壤真菌数量在 5—12 月内变化规律均为:先急剧增大—保持缓慢减小—急剧减小,NCS 和 LMCS 的峰值出现在 9 月份,PACS 和 ALCS 的峰值出现在 7 月份。真菌数量均值大小依次:PACS>ALCS>LMCS> NCS,除 PACS 与 ALCS 间差异不显著外,其余两两之间差异均显著 ($P<0.05$)。

2.3.4 沙丘生物土壤结皮发育过程中土壤总藻含量变化

从图 7 可以看出,0—1 cm 土壤总藻含量不仅随生物土壤结皮发育变化而变化,同时在不同季节也呈现出明显的变化。在 5 月、7 月、9 月及 12 月,4 个阶段土壤总藻生物量大小均为:LMCS>ALCS>PACL>NCS,4 阶段总藻生物量在同一时间点两两之间差异均显著 ($P<0.05$);从 5—12 月,4 个阶段的土壤总藻含量均呈现出先增大后减小的趋势,峰值出现在 9 月份,各水平两两之间差异均显著 ($P<0.05$)。不同月份总藻生物量均

值大小为:LMCS>ALCS>PACS>NCS,两两之间差异均显著($P<0.05$)。

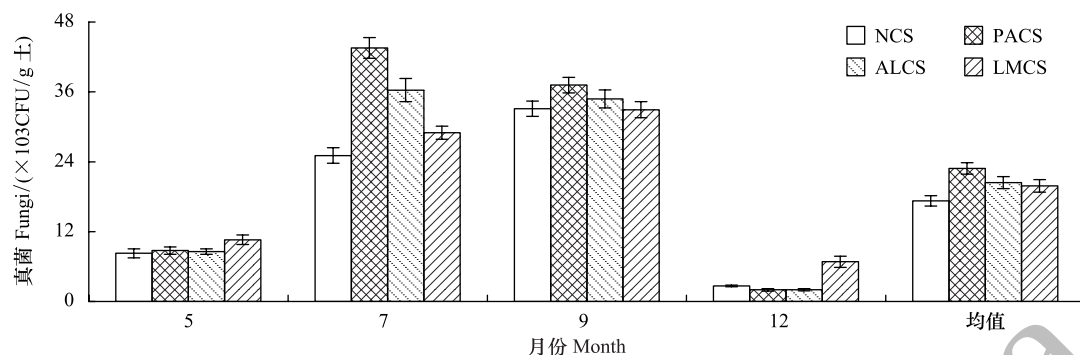


图6 土壤结皮发育过程中土壤真菌数量动态变化

Fig.6 The dynamic change of soil fungus quantity in the process of biological soil crust succession

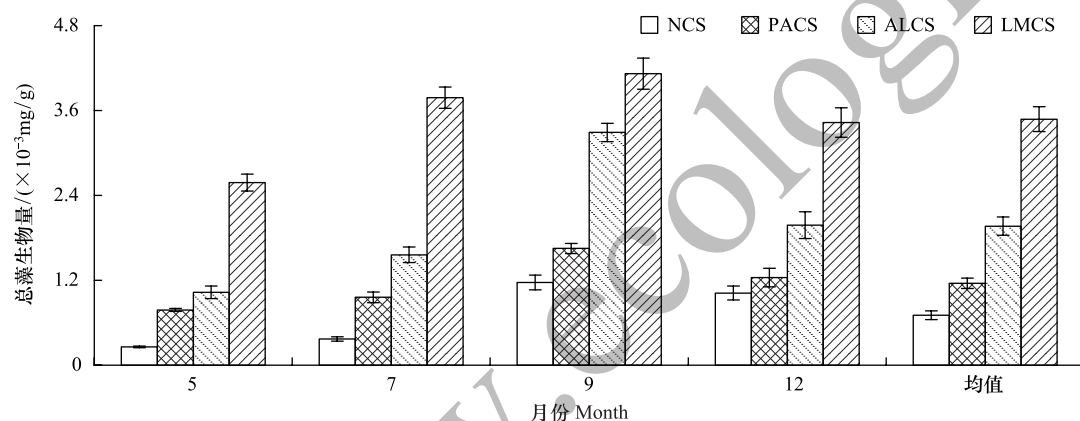


图7 土壤结皮发育过程中土壤总藻含量动态变化

Fig.7 The dynamic change of soil total algae content in the process of biological soil crust succession

2.4 土壤粒径、养分、微生物量间相关性分析

为了进一步了解民勤绿洲边缘沙丘生物土壤结皮发育过程0—1 cm层土壤颗粒组成、土壤养分含量及土壤微生物数量之间的相互关系,对7月上旬土壤样的12个指标进行了相关性分析(表3)。由表3可以看出,土壤总藻生物量与土壤有机质、速效钾、速效磷、全氮、粘粒、粉粒、细沙粒均呈现出极显著正相关关系($P<0.01$),与土壤粗砂粒间呈极显著负相关关系($P<0.01$);土壤细菌数量与放线菌数量、真菌数量呈极显著正相关($P<0.01$),与其他指标之间无显著相关性。不同阶段土壤养分两两之间均存在极显著正相关关系($P<0.01$),并与细沙粒、粉粒、细沙粒体积百分比呈极显著正相关关系,与粗砂粒含量呈极显著负相关关系($P<0.01$);土壤4种颗粒中,粘粒、粉粒及细沙粒两两之间呈极显著正相关关系,与粗砂粒间均呈现极显著负相关关系($P<0.01$)。

3 讨论

民勤绿洲边缘沙丘的生物土壤结皮从NCS演替到ALCS,0—1 cm层土壤粘粒(0.01—2 μm)、粉粒(2—20 μm)以及细沙粒(20—200 μm)含量均逐渐增大,而粗砂粒(200—2000 μm)含量急剧减小;从ALCS演替到LMCS过程中,以上4种颗粒组成几乎没有变化。这可能是NCS沙丘表面还未固定,长期受风力侵蚀,表层较小颗粒被吹移至别处,致使表层粗砂粒含量较高,而细沙粒、粉粒以及粘粒含量较少;从NCS逐渐演替PACS、ALCS、LMCS,沙丘表面土壤结皮逐渐形成防止了土壤细小颗粒被吹移,同时其结皮下垫面逐渐吸纳了异地被吹移来的细小颗粒,最终驱使土壤表层0—1 cm土壤细小颗粒物增多,粗颗粒减少;至于ALCS向

LMCS 演替过程中土壤颗粒组成变化不显著,这可能是 ALCS 向 LMCS 演替时间跨度比较短,而土壤表层颗粒组成异质性较小。土壤是由大小、形状不同的固体组分和空隙所形成的多空介质,其颗粒组成影响着土壤水力、肥力状况,并与土壤退化直接相关^[20-22]。民勤绿洲边缘沙丘生物土壤结皮形成与发育能显著地提高土壤细沙粒(0—200 μm)含量、降低粗砂粒(200—2000 μm)含量,从而改善了土壤质地,这与高光磊等人对毛乌素沙地的研究结果相似^[23]。

表 3 0—1 cm 层土壤颗粒组成、土壤养分及土壤微生物含量间的相关性分析

Table 3 Correlation analysis between every two parameters of soil particle-size distribution and nutrient and microorganism contents in the 0—1 cm layer

因子 Factors	总藻 Total algae	细菌 Bacteria	放线菌 Actinomycetes	真菌 Fungi	有机质 Organic matter	速效钾 Available potassium	有效磷 Available phosphorous	全氮 Total nitrogen	粘粒 Clay particle	粉粒 Silt particle	细沙粒 Fine sand	粗砂粒 Coarse particle
总藻 Total algae	1											
细菌 Bacteria	-0.427	1										
放线菌 Actinomycetes	-0.259	0.825 **	1									
真菌 Fungi	-0.221	0.808 **	0.493	1								
有机质 Organic matter	0.969 **	-0.498	-0.352	-0.203	1							
速效钾 Available potassium	0.889 **	-0.107	-0.422	-0.097	0.753 **	1						
有效磷 Available phosphorous	0.979 **	-0.284	-0.442	-0.129	0.908 **	0.955 **	1					
全氮 Total nitrogen	0.941 **	-0.201	-0.219	-0.131	0.834 **	0.989 **	0.980 **	1				
粘粒 Clay particle	0.721 **	0.290	-0.148	0.353	0.595 *	0.894 **	0.829 **	0.866 **	1			
粉粒 Silt particle	0.783 **	0.206	-0.246	0.305	0.672 **	0.914 **	0.876 **	0.896 **	0.994 **	1		
细沙粒 Fine sand	0.826 **	0.096	-0.295	0.109	0.688 **	0.974 **	0.917 **	0.951 **	0.967 **	0.976 **	1	
粗砂粒 Coarse particle	-0.800 **	-0.167	0.259	-0.223	-0.674 **	-0.945 **	-0.895 **	-0.924 **	-0.989 **	-0.995 **	-0.993 **	1

+正相关, -负相关, * 显著相关 ($P < 0.05$), ** 极显著相关 ($P < 0.01$)

本研究发现,在土壤结皮从 NCS 逐渐演替到 PACS、ALCS 以及 LMCS 过程中,土壤有机质、速效钾、速效磷、有机质均逐渐增大。这主要是土壤结皮形成与发育固定沙表面,改变了表层土壤结构,阻止土壤表层养分流失^[24-25];此外,土壤结皮形成与发育过程中,微生物、地衣以及苔藓出现不断地在沙丘表面形成腐殖质,有效地促进了土壤有机质的积累和养分提高,特别是蓝藻生长为土壤提供了氮源^[26-27]。土壤养分是反应土壤质量以及衡量土壤肥力重要依据。因此,民勤绿洲边缘沙丘生物土壤结皮形成与发育能显著改善了表层土壤质量,提高土壤肥力。

不同结皮发育阶段 0—1 cm 层土壤微生物细菌、放线菌、真菌数量以及总藻生物量测定发现,这些指标在同一时间点(5、7、9 以及 12 月上旬)不同结皮阶段(NCS、PACS、ALCS 以及 LMCS)或同一阶段不同时间点均存在变化,变化趋势为:细菌和真菌数量以及总藻生物量在时间和空间尺度内均呈现出先增大后减小;放线菌数量在空间尺度上呈现出先急剧减小再保持不变,在时间尺度上呈现出先增大后减小趋势。研究资料表明,土壤微生物数量及生物量变化不仅受环境因子影响,同时微生物之间存在直接或间接的互作^[28-30]。因此,本研究土壤微生物动态变化应该受多因子驱动形成的,至于那些因子在不同空间尺度或时间点起主导作用,仍待于开展进一步研究。

土壤生态系统是土壤中生物与非生物环境的相互作用通过能量转换和物质循环构成的整体,各生物因子及非生物因子间存在相互作用与制约的复杂关系。本研究发现总藻生物量与土壤养分、土壤细沙粒(0.01—200 μm)间均存在极显著正相关关系,与土壤放线菌数量、土壤粗砂粒(200—2000 μm)呈极显著负相关关系;细菌、放线菌及真菌间均呈极显著正相关关系,而放线菌与土壤养分间呈显著负相关关系;4 种土壤养分间及其与细沙粒间存在极显著正相关关系。有研究资料报到^[31-34],细菌的挥发性物质影响着真菌的生长,适量增加土壤氮、磷、钾等养分能有效地提高土壤微生物量,土壤微生物量与土壤养分呈正相关关系等。本研究认为,诸如土壤细菌与真菌呈正相关关系以及土壤养分与部分微生物之间无相关性等现象可能是细菌、真菌、放

线菌在整个变化过程中受多个因子影响,而养分对细菌、真菌以及放线菌影响以及细菌对真菌抑制等小于其他因子影响。

基于以上研究与分析,本研究认为在 NCS 向 PACS 演替过程中土壤颗粒组成的改变是土壤微生物数量及养分变化的主要驱动因子;PACS 向 ALCS 演替过程中,土壤藻类快速繁殖及地衣的出现促使土壤养分积累,同时结皮形成的下垫面吸纳细小“客”粒改变了土壤颗粒组成;在 ALCS 向 LMCS 过渡中,土壤藻类、地衣、藓类是提高土壤养分含量的主要影响因子。因此,民勤绿洲边缘沙丘生物土壤结皮形成与发育有效地改善了浅层土壤质量,提高了土壤肥力,对该区域土壤生态系统改善及生态环境保护有重要的意义。

4 结论

(1)民勤绿洲边缘沙丘生物土壤结皮在 NCS 向 ALCS 演替过程中有效地提高沙丘 0—1 cm 层土壤细沙粒(0—200 μm)体积百分含量,同时降低粗沙粒(200—2000 μm)含量。

(2)生物土壤结皮形成与发育有效提高了土壤 0—1 cm 有机质、全氮、速效磷及速效钾的含量,且土壤养分含量随土壤生物结皮不断演替而逐渐增大。

(3)生物土壤结皮发育初期(PACS)最有利于土壤细菌、真菌、放线菌繁殖;结皮形成有利于藻类繁殖,其总藻生物量一直随生物结皮演替逐渐增大;5—12 月期间,4 种微生物量变化均呈现出先增加后减小趋势,峰值出现在 7 或 9 月。

(4)在 NCS 向 PACS 演替过程中,土壤颗粒组成的改变是土壤微生物数量及养分变化的主要驱动因子;在 PACS 向 LMCS 演替过程中,土壤藻类、地衣、藓类是提高土壤养分含量的主要影响因子。

参考文献(References):

- [1] 常兆丰. 民勤人工绿洲的形成、演变及其可持续性探讨. 干旱区研究, 2005, 25(1): 1-9.
- [2] 杨永胜. 毛乌素沙地生物结皮对土壤水分和风蚀的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2012.
- [3] 刘立超, 李守中, 宋耀选, 张志山, 李新荣. 沙坡头人工植被区微生物结皮对地表蒸发影响的试验研究. 中国沙漠, 2005, 25(2): 191-195.
- [4] 李守中, 肖洪浪, 罗芳, 宋耀选, 刘立超, 李守丽. 沙坡头植被固沙区生物结皮对土壤水文过程的调控作用. 中国沙漠, 2005, 25(2): 228-233.
- [5] 李新荣, 龙利群, 王新平, 张景光, 贾玉奎. 干旱半干旱地区土壤微生物结皮的生态学意义及若干研究进展. 中国沙漠, 2001, 21(1): 4-11.
- [6] 李守中, 肖洪浪, 宋耀选, 李金贵, 刘立超. 腾格里沙漠人工固沙植被区生物土壤结皮对降水的拦截作用. 中国沙漠, 2002, 22(6): 612-616.
- [7] Peter G, Leder C V, Funk F A. Effects of biological soil crust and water availability on seedlings of three perennial Patagonian species. Journal of Arid Environments, 2015, 125: 122-126.
- [8] Escolar C, Maestre F T, Rey A. Biocrusts modulate warming and rainfall exclusion effects on soil respiration in a semi-arid grassland. Soil Biology and Biochemistry, 2015, 80: 9-17.
- [9] 陈荣毅, 张元明, 魏文寿, 王红玲, 吴楠, 张静. 不同沙丘部位和不同结皮类型对土壤种子库的影响. 干旱区研究, 2008, 25(1): 107-113.
- [10] 苏延桂, 李新荣, 陈应武, 谭会娟, 贾荣亮. 生物土壤结皮对荒漠土壤种子库和种子萌发的影响. 生态学报, 2007, 27(3): 938-946.
- [11] Li X R, Jia X H, Long L Q, Zerbe S. Effects of biological soil crusts on seed bank, germination and establishment of two annual plant species in the Tengger Desert (N China). Plant and Soil, 2005, 277(1): 375-385.
- [12] 常兆丰, 韩福贵, 仲生年, 张应昌, 何芳兰, 柴成武. 民勤沙区人工梭梭林自然稀疏过程研究. 西北植物学报, 2008, 28(1): 147-154.
- [13] 陈芳, 纪永福, 张锦春, 丁峰, 刘有军, 刘虎俊, 王芳琳. 民勤梭梭人工林天然更新的生态条件. 生态学杂志, 2010, 29(9): 1691-1695.
- [14] 王继和, 马全林. 民勤绿洲人工梭梭林退化现状、特征与恢复对策. 西北植物学报, 2003, 23(12): 2107-2112.
- [15] 张锦春, 纪永福, 王芳林, 陈芳, 王基金, 王功时, 曹虎. 民勤退化人工梭梭种群雨养恢复试验研究. 西北林学院学报, 2010, 25(1): 77-81.
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 1981.

- [17] 许光辉, 郑洪元. 土壤微生物分析方法手册. 北京: 农业出版社, 1986.
- [18] 姚槐应, 黄昌勇. 土壤微生物生态学及其实验技术. 北京: 科学出版社, 2006.
- [19] 赵洋, 李新荣, 贾荣亮. 一种生物土壤结皮中藻类生物量的测定方法: 中国, CN 105092495A. 2015-11-25.
- [20] 董莉丽, 郑粉莉. 陕北黄土丘陵沟壑区土壤粒径分布分形特征. 土壤, 2010, 42(2): 302-308.
- [21] 李海东, 沈渭寿, 邹长新, 袁磊, 纪迪. 雅鲁藏布江江南宽谷风沙化土地土壤养分和粒度特征. 生态学报, 2012, 32(16): 4981-4992.
- [22] 淮态, 庞奖励, 文青, 宋艳. 不同土地利用方式下土壤粒径分布的分维特征. 生态与农村环境学报, 2008, 24(2): 41-44.
- [23] 高广磊, 丁国栋, 赵媛媛, 冯薇, 包岩峰, 刘紫葳. 生物结皮发育对毛乌素沙地土壤粒度特征的影响. 农业机械学报, 2014, 45(1): 115-120.
- [24] 张军红, 吴波. 油蒿与臭柏沙地生物结皮对土壤理化性质的影响. 东北林业大学学报, 2012, 40(3): 58-61.
- [25] 王纪杰, 王炳南, 李宝福, 俞元春. 不同林龄巨尾桉人工林土壤养分变化. 森林与环境学报, 2016, 36(1): 8-14.
- [26] 林先贵, 胡君利. 土壤微生物多样性的科学内涵及其生态服务功能. 土壤学报, 2008, 45(5): 892-900.
- [27] 蔡霜, 胡霞, 王智勇. 峨眉山土壤微生物生物量对海拔梯度的响应. 南方农业, 2016, 10(9): 248-250.
- [28] Girvan M S, Bullimore J, Pretty J N, Osborn A M, Ball A S. Soil type is the primary determinant of the composition of the total and active bacterial communities in arable soils. *Applied and Environmental Microbiology*, 2003, 69(3): 1800-1809.
- [29] Nsabimana D, Haynes R J, Wallis F M. Size, activity and catabolic diversity of the soil microbial biomass as affected by land use. *Applied Soil Ecology*, 2004, 26(2): 81-92.
- [30] Potthoff M, Steenwerth K L, Jackson L E, Drenovsky R E, Scow K M, Joergensen R G. Soil microbial community composition as affected by restoration practices in California grassland. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(7): 1851-1860.
- [31] Mackie A E, Wheatley R E. Effects and incidence of volatile organic compound interactions between soil bacterial and fungal isolates. *Soil Biology and Biochemistry*, 1999, 31(3): 375-385.
- [32] 于丽, 杨殿林, 赖欣. 养分管理对农田土壤微生物量的影响. 微生物学杂志, 2015, 35(4): 19-25.
- [33] Coser T R, Ramos M L G, Amabile R F, Júnior W Q R. Microbial biomass nitrogen in cerrado soil with nitrogen fertilizer application. *Pequisa Agropecuária Brasileira*, 2007, 42(3): 399-406.
- [34] 杨艳菊, 王改兰, 张海鹏, 赵旭, 熊静, 黄学芳. 长期不同施肥处理对栗褐土可培养微生物数量的影响. 中国土壤与肥料, 2013, (4): 35-38.