

DOI: 10.5846/stxb202205121336

王忠文, 金红喜, 郭春秀, 汪媛艳, 马福元, 何芳兰. 干旱沙区生物土壤结皮发育对红砂形态及干物质积累的影响. 生态学报, 2023, 43(16): 6581-6589.

Wang Z W, Jin H X, Guo C X, Wang Y Y, Ma F Y, He F L. Effects of biological soil crusts development on morphology and dry matter accumulation of *Reaumuria soongorica* in arid desert area. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(16): 6581-6589.

干旱沙区生物土壤结皮发育对红砂形态及干物质积累的影响

王忠文^{1,3}, 金红喜^{2,3}, 郭春秀³, 汪媛艳³, 马福元³, 何芳兰^{1,3,*}

1 甘肃河西走廊森林生态系统国家定位研究站, 武威 733000

2 甘肃临泽荒漠生态系统国家定位观测研究站, 临泽 734200

3 甘肃省治沙研究所, 兰州 730070

摘要: 为了探讨干旱沙区生物土壤结皮发育对红砂形态及干物质积累的影响, 以巴丹吉林沙漠南缘已发育不同类型生物土壤结皮并有红砂种群成功定居的区域为研究场所, 通过野外监测与室内测定的方法对藻类-地衣、地衣-地衣、地衣-藓类结皮上的红砂(当年生、幼株、成株)形态特征及生物量进行了调查研究。结果表明: (1) 藻类-地衣结皮演替到地衣-藓类结皮的过程中, 当年生红砂形态差异不显著, 但 5 a 以上植株基部分枝长、树冠/侧冠投影面积、主根长均显著减小; 同时, 地衣-藓类结皮的 3—5 a 植株基部分枝数明显减少, 且 5 a 以上植株明显矮化。(2) 生物土壤结皮发育不仅降低了红砂幼株或成株生物量积累能力, 还减小了植株根冠比, 且降低/减小程度随结皮演替或株龄的增大逐渐增大。(3) 红砂形态、生物量指标与物理或藻类结皮面积百分比呈极显著正相关关系, 与藓类结皮面积百分比呈极显著的负相关关系。因此认为, 生物土壤结皮的演替导致土壤关键生态因子(如土壤水分)发生变化, 进而影响红砂植株生长发育能力, 从而使得不同发育阶段结皮上的同龄红砂形态特征及生物量存在差异性。

关键词: 生物土壤结皮; 红砂; 形态特征; 生物量

Effects of biological soil crusts development on morphology and dry matter accumulation of *Reaumuria soongorica* in arid desert area

WANG Zhongwen^{1,3}, JIN Hongxi^{2,3}, GUO Chunxiu³, WANG Yuanyan³, MA Fuyuan³, HE Fanglan^{1,3,*}

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

2 Gansu Linze Desert Ecosystem National Research Station, Linze 734200, China

3 Gansu Desert Control Research Institute, Lanzhou 730070, China

Abstract: In order to explore whether the development of biological soil crusts (formed by cryptogamous plants, microorganisms and other related organisms cementing soil surface particles with secretions, mycelium and pseudoroots) could influence morphology and matter accumulation of *Reaumuria soongorica* (a salt-secreting xerophytic shrub) in arid desert area, the morphological characteristics and biomasses of plants in different age groups (seedlings, young plants and adult plants), separately growing in three types transect regions at the southern edge of Badain Jaran Desert covered by algae-lichen, lichen and lichen-moss, were investigated and studied. The results showed that: (1) with succession from the algae-lichen crusts to lichen-moss crusts, the morphological differences in current year plants of *R. soongorica* were no

基金项目: 国家自然科学基金项目(31860175); 中央财政林业科技推广示范项目(2019ZYT07); 甘肃省基础研究创新群体项目(20JR5RA098)

收稿日期: 2022-05-12; **网络出版日期:** 2023-04-14

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hefanglan2003@126.com

observed. However, the length of basal branches, projection area of transverse/longitudinal crown, and root length of plants older than five years were significantly reduced, respectively. At the same time, the number of basal branches of plants in 3—5 years growing in lichen-moss crusts obviously decreased compared with those growing in algae-lichen crusts, and the plants older than five years were dwarfed distinctly. (2) The development of biological soil crusts not only reduced the capacity of biomass accumulation in young or adult plants, but also diminished their root-shoot ratio. Moreover, the increase or decrease degrees of biomass accumulation in unit time were enlarged gradually with the prolonging of biological soil crust succession or increasing of plant age. (3) The indexes of morphology and biomass in *R. soongorica* plants had an extremely significantly positive correlation with the area percentage of physical crusts or algal crusts, while a very conspicuous negative correlation with that of moss crusts. Therefore, it is considered that the succession of biological soil crusts results in changing of area percentages of soil crusts, which causes the alteration of key ecological factors (such as soil moisture). As a result, the significant differences were induced in morphological characteristics and biomasses of *R. soongorica* plants possessing same plant age and growing in different types of soil crusts. Based on the above results, it suggests that the population construction of *R. soongorica* can be carried out by methods of planting seedlings and supplying seeds in the oasis desert transitional zone of arid sand area where soil crusts are developing from no crusts to lichen crusts stage, and of which the planting seedlings should mainly been taken in the succession of no crusts to algae-lichen crusts stage while the supplying seeds to lichen crusts stage.

Key Words: biological soil crusts; *Reaumuria soongorica*; morphological character; biomass

生物土壤结皮是由隐花植物(如蓝藻、地衣、藓类)、微生物及相关的其他生物体通过分泌物、菌丝体和假根等与土壤表层颗粒胶结形成的地表覆盖体^[1]。在干旱沙区,流动沙面一旦固定后,地表将发育大面积的物理结皮,部分物理结皮并随沙面固定时间的延长逐渐演替为藻类结皮、地衣结皮甚至藓类结皮^[2-3]。受微区域内光照、温度、风向、土壤质地、土壤湿度等因子的影响,同一片区存在多种类型的生物土壤结皮,但整体的演替进度具有明显的一致性。生物土壤结皮不仅具有增强地表抗蚀性^[4-5]、改变土壤质地^[6]、提高土壤肥力^[7,8]等作用,还影响种子传播^[9]、种子萌发^[10]、幼苗定居^[11]、种群动态^[12]等,因此在维持荒漠生态系统稳定性中发挥着重要作用。

红砂(*Reaumuria songarica*)为柽柳科红砂属的一种超旱生泌盐小灌木,具有很强的抗干旱、耐盐碱、阻风沙及保持水土等能力^[13-16],是保护干旱荒漠化土地的重要生态“屏障”。前期的研究发现:在干旱沙漠区,沙面一旦固定并有生物土壤结皮形成后,人工植被梭梭、柽柳及天然植被白刺、沙拐枣等沙生灌木均呈现出形态及生理特性衰退现象,其幼苗或根蘖苗成功定居率极低,特别是地衣至藓类结皮^[17]。沙丘表面生物土壤结皮发育到藻类结皮后,红砂种群不仅可以自然侵入并成功定居,还能实现其种群繁殖与扩散^[18]。研究表明,生物土壤结皮对植物生长发育产生一定影响,其影响程度随结皮类型、物种及其发育阶段的不同而不同^[19]。红砂作为干旱沙区生物土壤结皮上自然定居并实现种群更新的灌木,那么不同类型生物土壤结皮上的红砂生长发育及形态特征如何变化?同株龄的植株生长及形态特征之间是否存在差异?这些问题的解决对区域生态系统稳定性维护具有重要的指导意义。

为此,本文试图以典型干旱沙区—巴丹吉林沙漠南缘已发育生物土壤结皮并有红砂种群成功定居的区域为研究场所,通过对不同株龄红砂在生物结皮上的生长状况及形态特征进行调查研究,掌握不同发育阶段生物土壤结皮上红砂形态特征、干物质积累的变化规律及其差异性,为干旱沙区可持续防风固沙林经营管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于巴丹吉林沙漠南缘 (102°58′08″—102°59′42″ E, 38°34′43″—38°35′05″ 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; 年均降雨量 113.2 mm, 年均蒸发量 2604 mm, 干燥度 5.1, 最高达 18.7, 相对湿度 47%; 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 样带布设及植株选择

2013 年 9 月, 在巴丹吉林沙漠南缘固沙林下已发育生物土壤结皮并有红砂种群定居的沙包迎风面 (主风向), 以生物土壤结皮演替顺序为依据, 选择 3 个不同发育阶段的结皮样地, 并在坡中位置布设宽为 4 m 的样带, 每个类型 8 个, 合计 24 个 (图 1), 样带区不同类型结皮组分见表 1; 在 2013 年、2021 年 9 月下旬, 以 30 cm×30 cm 标尺框为背景, 分别对样带区拍照, 每个样带 3 张。在 2013、2015、2017、2019、2021 年 8 月中旬, 在样带内选择生长旺盛、生长一致的当年生红砂幼苗, 用不锈钢钢钎做标记物。

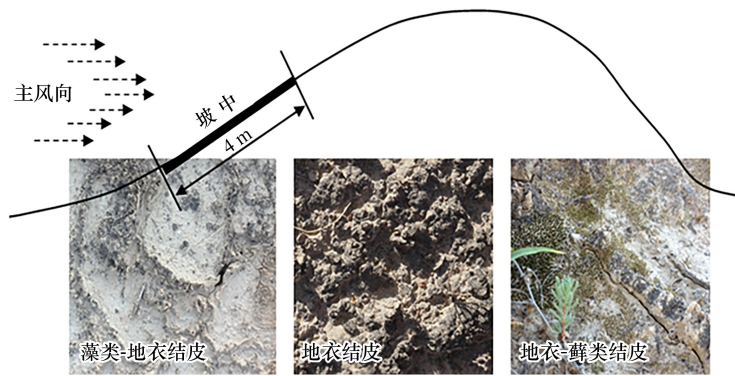


图 1 样带布设位置及地表微形态

Fig.1 The position of belt transect and surface micromorphology

表 1 样带区不同类型结皮组分 (2013 年和 2021 年的均值)

Table 1 Components of different types of soil crusts in three transects (Mean value of 2013 and 2021)

发育阶段 Developmental stage	面积百分比 Area percentage/%					
	流沙 Quick sand	物理结皮 Physical crust	藻类结皮 Algal crust	地衣结皮 Lichen crust	短藓结皮 ($\leq 3\text{ mm}$) Short moss crust	长藓结皮 ($> 3\text{ mm}$) Long moss crust
藻类-地衣结皮 Algae-lichen crust	0.0+0.0a	14.5+1.2a	42.9+5.2a	36.5+2.9b	5.3+1.2c	0.9+0.1c
地衣结皮 Lichen crust	0.0+0.0a	3.9+0.8b	16.8+3.4b	61.3+4.2a	13.0+3.1b	4.9+0.5b
地衣-藓类结皮 Lichen-moss crust	0.0+0.0a	1.2+0.6c	6.1+1.2c	29.9+4.7b	35.0+4.5a	27.8+3.7a

同列不同字母代表差异性显著 ($P<0.05$)

1.3 指标测定

2021 年 9 月下旬, 测定幼株 (3 a、5 a)、成株 (7 a、9 a) 形态特征及生物量; 2021 年 10 月上旬, 测定幼苗 (当年生) 形态特征及生物量。

1.3.1 形态指标测定

用钢卷尺测定株高、根长、一级分枝长、冠幅; 以 80 cm×80 cm 标尺框为背景, 用数码相机垂直树冠、侧冠拍照。每个指标 8 个重复。

1.3.2 生物量测定

幼苗: 采集样株 (每 10 株一组), 清洗干净并从基部剪开, 用烘干法测干重 (65℃ 烘至恒重), 重复 5 次。

幼株及成株:采集样株(每3株一组),清洗干净后从基部剪开,烘干后测定干重(75℃烘至恒重),重复6次。

1.4 数据分析

借助 AutoCAD 2019 软件对相关照片进行处理,计算样带区红砂株冠垂直、水平投影面积。应用 Excel 和 SPSS 22.0 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 Duncan 多重比较法对红砂形态、干物质量等相关指标进行显著性分析($\alpha=0.05$),并对不同类型土壤结皮组分与红砂形体特征及生物量指标进行相关性分析($\alpha=0.01$)。

2 结果与分析

2.1 生物土壤结皮发育对植株形态特征的影响

由图2可以看出,藻类-地衣、地衣、地衣-藓类结皮上同株龄红砂形态特征指标两两之间均存在一定的差异性($P<0.05$),其差异程度随株龄的变化而变化(当年生植株除外)。其中,株龄为3a时,藻类-地衣结皮上的主根长显著大于地衣或地衣-藓类结皮,基部分枝数也显著大于地衣-藓类结皮,但地衣结皮与地衣-藓类结皮之间差异不显著,同时其他形态指标两两之间差异也不显著。当株龄增大到5a时,3种结皮上基部分枝数两两之间的差异性与3a植株一致,但藻类-地衣结皮上的株高、基部分枝均长与地衣-藓类结皮之间均出现了

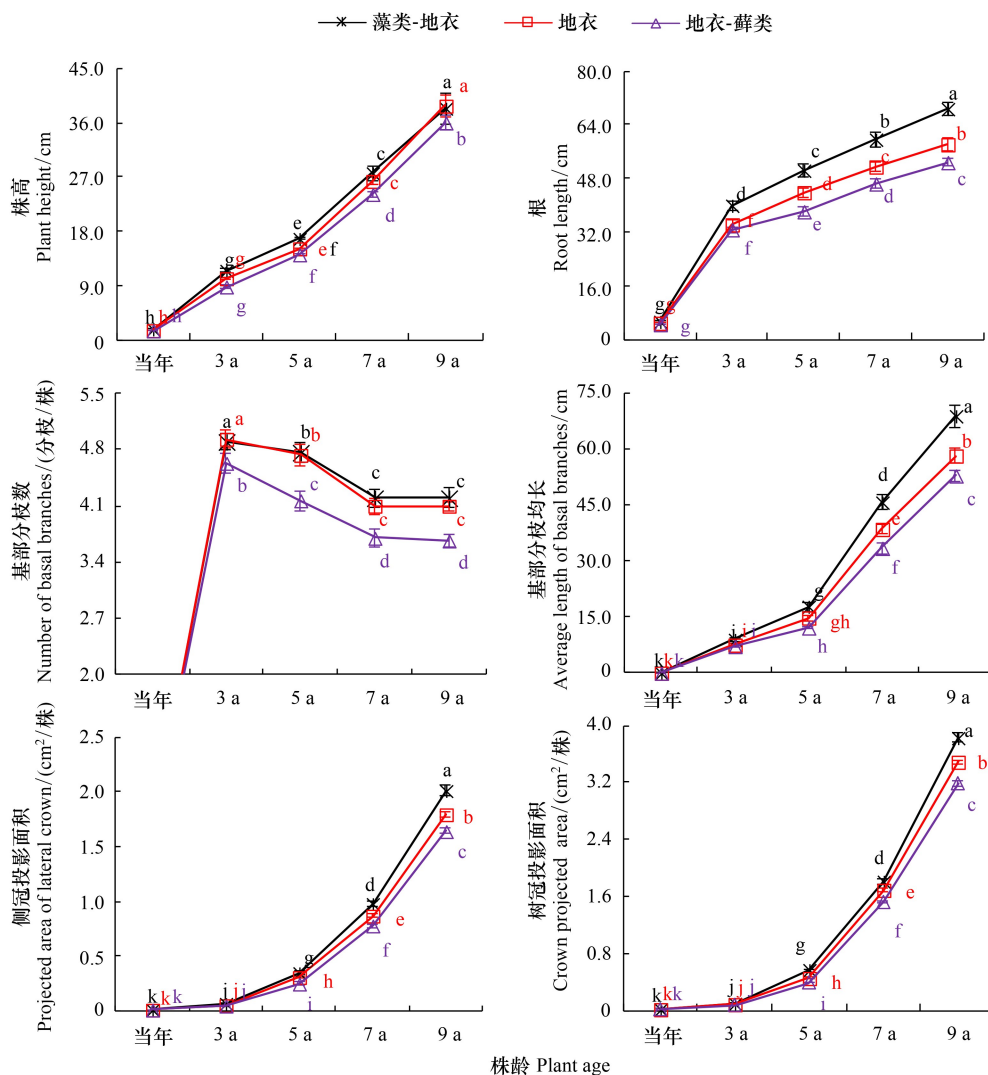


图2 生物土壤结皮发育对红砂形态特征的影响

Fig.2 Effects of biological soil crust development on the morphological characteristics of *R. soongorica* plants

显著差异,并大于地衣-藓类结皮;同时,3种结皮上的根长、树冠垂直投影面积或侧冠投影面积两两之间均存在显著差异性,并以藻类-地衣结皮的值最大,其次为地衣结皮,地衣-藓类结皮最小。当株龄增大到7 a或更大(9 a)时,除藻类-地衣结皮与地衣结皮的基部分枝数外,3种结皮的所有形态指标两两之间均存在显著差异性,各指标大小顺序均为:藻类-地衣结皮>地衣结皮>地衣-藓类结皮。

同样,随株龄持续增大,藻类-地衣、地衣、地衣-藓类结皮上植株同一形态指标的变化趋势完全一致,但单位时间段内的增值(减值)之间存在明显不同。可以看出,基部分枝数出现先急剧增大(第3年内)—持续减小(3—7 a)—稳定不变(7—9 a),且地衣-藓类结皮植株的减幅明显大于藻类-地衣结皮与地衣结皮,但藻类-地衣结皮的减幅与地衣结皮间无明显差异。此外,株高、根长、基部分枝均长、冠幅投影面积、树冠投影面积均呈现出持续增大趋势,而且第3至9年内的增值均以藻类-地衣结皮最大,其次为地衣结皮,地衣-藓类结皮最小(株高除外)。

2.2 生物土壤结皮发育对植株生物量积累的影响

3种结皮上,植株生物量及其年际增值均随株龄的增大而增大,但单位时间内地上生物量或地下生物量增值两两之间的差异程度明显不同(图3)。可以看出,3种结皮上当年植株生物量两两之间均无显著差异,但3年后其地上或地下生物量两两之间均出现显著差异;所有植株生物量均持续增大,但年际增量均以藻类-地衣结皮最大,地衣结皮次之,地衣-藓类结皮最小。同时,前3年内,3种结皮上植株根冠比均出现了显著的增大,当年生根冠比两两之间差异不显著,但第3年时藻类-地衣结皮显著大于地衣-藓类结皮;第5至7年内,所有植株根冠比均显著减小(远远小于第3年),3种结皮上5 a植株根冠比两两之间的差异性仍与3 a的植株一致,但藻类-地衣结皮、地衣结皮上7 a植株的根冠比显著大于地衣-藓类结皮;第9年时,根冠比仍在减小,3种结皮的根冠比两两之间均存在显著差异性,大小依次为:藻类-地衣结皮>地衣结皮>地衣-藓类结皮。还可以看出,随着红砂株龄的增大,藻类-地衣结皮、地衣结皮、地衣-藓类结皮上植株的生物量均持续增大,而且7 a后单位时间内的增量急剧增大。

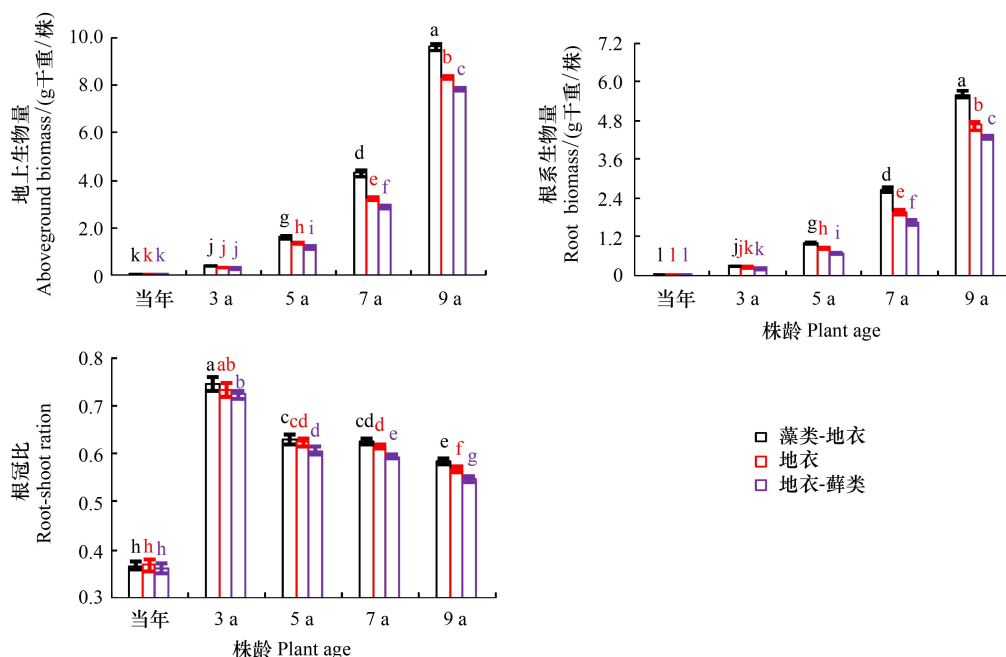


图3 生物土壤结皮发育对不同株龄红砂干物质积累的影响

Fig.3 Effects of biological soil crust development on dry matter accumulation of *R. songorica* at different plant ages

2.3 不同类型土壤结皮组分与植株形态特征及物质积累间的相关性

为了进一步了解单位面积不同类型生物结皮组分与植物形态及干物质积累间的关系,分别对几种结皮

面积百分比与当年生、幼株、成株的主要形态及生物量指标进行了相关性分析(表2)。可以看出,当年生植株高、根长、侧冠投影面积、生物量均与物理结皮或藻类结皮面积百分比呈极显著正相关关系,而与藓类结皮面积百分比呈极显著的负相关关系($P<0.01$);幼株(5 a)或成株(9 a)高、根长、分枝长、横(侧)冠投影面积、生物量、根冠比均与物理或藻类结皮面积百分比呈极显著正相关关系(幼株根冠比除外),但其与藓类结皮面积百分比呈极显著负相关关系($P<0.01$)。

表2 不同结皮面积百分比、红砂形态特征及其干物质积累之间的相关性

Table 2 Correlations of the area percentages of soil crusts and morphological characteristics of *R. soongorica* plants and their dry matter accumulations

株龄/a Plant age	因子 Factors	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
当年生 Current year plant	1	1										
	2	0.986 **	1									
	3	-0.127	-0.038	1								
	4	-0.790 *	-0.845 **	-0.501	1							
	5	0.943 **	0.969 **	-0.056	-0.805 **	1						
	6	0.934 **	0.964 **	0.206	-0.946 **	0.936 **	1					
	7	—	—	—	—	—	—	—				
	8	-0.064	-0.046	-0.459	0.299	0.045	-0.140	—	1			
	9	0.943 **	0.969 **	-0.103	-0.779 *	0.962 **	0.917 **	—	0.153	1		
	10	0.898 **	0.940 **	0.106	-0.866 **	0.908 **	0.937 **	—	0.124	0.941 **	1	
	11	0.216	0.247	0.305	-0.377	0.232	0.311	—	-0.617	0.037	0.150	1
5	1	1										
	2	0.986 **	1									
	3	-0.127	-0.038	1								
	4	-0.790 *	-0.845 **	-0.501	1							
	5	0.947 **	0.961 **	0.056	-0.863 **	1						
	6	0.947 **	0.961 **	0.149	-0.915 **	0.963 **	1					
	7	0.942 **	0.967 **	0.141	-0.913 **	0.992 **	0.982 **	1				
	8	0.965 **	0.979 **	0.055	-0.879 **	0.990 **	0.977 **	0.991 **	1			
	9	0.980 **	0.991 **	-0.021	-0.847 **	0.982 **	0.971 **	0.981 **	0.995 **	1		
	10	0.965 **	0.974 **	0.119	-0.911 **	0.968 **	0.992 **	0.981 **	0.984 **	0.979 **	1	
	11	0.683 *	0.754 *	0.585	-0.964 **	0.770 *	0.832 **	0.833 **	0.789 *	0.756 *	0.810 **	1
9	1	1										
	2	0.986 **	1									
	3	-0.127	-0.038	1								
	4	-0.790 *	-0.845 **	-0.501	1							
	5	-0.015	-0.112	0.043	0.051	1						
	6	0.971 **	0.967 **	0.011	-0.848 **	0.054	1					
	7	0.973 **	0.982 **	0.001	-0.852 **	0.009	0.982 **	1				
	8	0.929 **	0.952 **	0.166	-0.914 **	0.015	0.977 **	0.980 **	1			
	9	0.949 **	0.967 **	0.109	-0.897 **	0.005	0.985 **	0.989 **	0.998 **	1		
	10	0.974 **	0.986 **	-0.043	-0.831 **	-0.071	0.972 **	0.970 **	0.942 **	0.958 **	1	
	11	0.976 **	0.984 **	0.025	-0.867 **	-0.062	0.978 **	0.983 **	0.976 **	0.984 **	0.957 **	1

1. 物理结皮面积百分比 Area percentages of physical crust; 2. 藻类结皮 Area percentages of algal crust; 3. 地衣结皮 Area percentages of lichen crust; 4. 藓类结皮面积百分比 Area percentages of moss crust; 5. 株高 Plant height; 6. 根长 Root length; 7. 基部分枝均长 Average length of basal branches; 8. 树冠投影面积 Projection area of crown; 9. 侧冠投影面积 Projection area of lateral crown; 10. 生物量 Biomass; 11. 根冠比 Root-shoot ration; * 代表显著相关性($P<0.05$); ** 代表极显著相关性($P<0.01$)

3 讨论

在干旱沙区,灌木层植物个体形态特征直接决定着植被的阻风、集沙、固沙等能力,因此固沙灌木株高、基部分枝、冠幅、侧冠疏透度等指标的改变将影响其生态功能。在本研究中,生长在藻类-地衣、地衣-地衣-藓类结皮上的红砂幼株或成株,其地上形态特征均出现了明显的差异性,特别是株龄超过 5 年,即:藻类-地衣结皮的株高、基部分枝数显著大于地衣-藓类结皮;藻类-地衣结皮的基部分枝均长、树冠投影面积、侧冠投影面积均显著大于地衣或地衣-藓类结皮,3 种结皮同一指标两两之间差异显著,大小顺序均为:藻类-地衣结皮>地衣结皮>地衣-藓类结皮。对矮小灌木而言,树冠疏透度小的植株防风阻风作用明显优于疏透度大的^[20],因此认为沙面生物土壤结皮的演替将在一定程度上降低了红砂(5 a 以上)植株的防风固沙能力。此外,我们还发现生物土壤结皮的不断演替抑制了红砂主根的伸长。根系是植物与外界环境进行物质和能量交换的关键器官之一^[21],也决定着植株地上部分生长发育及形态特征,特别是干旱荒漠灌木。因此认为,生物土壤结皮发育抑制了红砂根系的生长发育,进而影响了树冠的形态特征。

植物生物量积累不仅与根系输送养分、水分、矿物质质量等能力密切相关^[22],还依赖于其叶器官有效光合面积、光合活性等^[23],也是特定环境下植株生长状况的反映^[14]。本研究显示,生长在藻类-地衣结皮、地衣结皮、地衣-藓类结皮上的当年生红砂,其地上或地下生量两两之间无显著差异,说明生物土壤结皮的不断演替对当年生红砂生长无显著影响;但当株龄增大到 5 a 或更大时,藻类-地衣结皮上的植株地上、地下生物量均显著大于地衣结皮或地衣-藓类结皮,且 3 种类型结皮上同龄植株地上/地下生物量两两之间均存在显著差异性;从单位时间红砂植株地上/地下生物量积累动态来看,3 种类型结皮上的植株都能正常生长,但生长表现仍以藻类-地衣最好,地衣次之,地衣-藓类最差。这意味着干旱沙区生物土壤结皮发育对红砂幼株及成株地上/下生物量积累产生了负向影响。进一步分析发现,生物土壤结皮不同发育阶段对红砂根冠比影响的起始时间也存在一定差异性,地衣-藓类结皮的影响始于 3 a 的幼株阶段,地衣结皮的影响出现在成株阶段(9 a)。植物根冠比不仅受自身因素的影响,还与诸多环境因子(水分、养分、光照、温度等)密切相关^[24],但本研究中的红砂不仅株龄相同,而且温度、光照及风速风向等因子完全一致,因此推测 3 种类型样带区同龄植株根冠比的差异性可能与土壤水分、养分有关。

研究表明,同一类型结皮对植物生长阶段(比如种子萌发、幼苗定居等)以及不同类型结皮对植物同一生长阶段的影响存在极大的差异^[25-27]。本研究中,幼苗阶段(当年生)的高、根长、侧冠面积、生物量与单位面积内物理结皮或藻类结皮面积百分比之间均存在极显著正相关关系,但与藓类结皮面积百分比呈负相关关系;但植物生长 5 年后,除以上指标外,分枝长、横冠面积、根冠比也与物理或藻类结皮面积百分比呈极显著正相关关系,与藓类结皮的关系仍然相反。因此可知,干旱沙区沙丘表面藓类结皮的发育显著抑制了红砂幼株(≥ 5 a)和成株的生长发育。对干旱荒漠植物来说,土壤水分和养分是限制其生长发育的最主要的环境因素。前期的研究显示,土壤结皮由物理结皮演替到藓类结皮的过程中,浅层土壤有机质、速效氮、速效磷、速效钾等含量均逐渐提高,土壤质地也明显改善^[28],这与本研究中红砂株高、主根长、有效冠幅及生物量等指标的变化正好相反,因此推测生物结皮发育对红砂幼苗-成株的影响主要由土壤水分异质性所导致。李新荣等人研究发现,干旱沙区生物土壤结皮能够通过影响降雨入渗、吸收凝结水、改变土壤蒸发等水文过程影响土壤水分再分配,也影响土壤水分的空间分布^[29-30];同时,在野外长期监测中发现:研究区强降雨后,地衣-藓类结皮的丘间地积水量明显大于藻类-地衣结皮,说明生物土壤结皮不同发育阶段对干旱沙区强降水的再分配量也存在一定差异性。因此认为,不同生物土壤结皮对植株形态及干物质积累的影响模式为:生物土壤结皮发育改变干旱沙区强降水过程中土壤水分入渗量及其空间分布→导致土壤水分出现异质性→影响了植物生长发育能力→改变了形态特征及干物质积累量。

在相同区域,对红砂种子在不同类型生物土壤结皮上的定居能力研究发现,相对于流沙(结皮前期),藻类结皮、地衣结皮、藓类结皮均明显促进了红砂种子定居,而且 3 者的促进能力两两之间存在显著差异,其大

小依次为:地衣结皮>藓类结皮>藻类结皮^[31],这说明生物土壤结皮对红砂种群定居过程是正向作用还是负向作用不仅依赖于生物土壤结皮组分,还与红砂生长发育阶段密切相关。此外,在本研究中,随植株株龄增大3种类型结皮上红砂株高、根长、基部分枝长、有效冠幅、生物量等均随株龄增大而增大,且第7至9年内的增量明显增大,说明红砂在3种结皮上不仅能正常生长,而且株龄大于7 a后生长更快。因此认为,在干旱沙区绿洲-荒漠过渡带结皮前期至地衣结皮林地可以开展红砂人工种群建植工作,并建议在流沙到藻类-地衣结皮区域以红砂实生苗栽植的方式为主,地衣结皮以补充红砂种子源的方式为主。

4 结论

通过对干旱沙区不同类型生物土壤结皮上红砂(幼苗、幼株、成株)形态特征及干物质积累的调查研究,得出以下结论:

(1)藻类-地衣结皮向地衣结皮、地衣-藓类结皮的演替均导致红砂(≥ 5 a)基部分枝长度、主根长度、树冠垂直面积、侧冠投影面积明显减小,地衣-藓类结皮还引起植株基部分枝数减少及植株矮化;同时,生物土壤结皮发育(藻类-地衣结皮演替到地衣-藓类结皮)抑制了红砂植株(≥ 5 a)地上及地下生物量的积累,并使得植株根冠比明显减小,但3种结皮上红砂均能正常生长,且株龄大于7 a后生长及生物量积累能力明显增大。

(2)生物土壤结皮发育改变了干旱沙区强降水过程中土壤水分入渗量及其空间分布,进而导致发育不同类型结皮的微区土壤水分出现异质性,从而使得不同类型结皮上的红砂形态特征及生物量出现明显差异。

参考文献(References):

- [1] 李新荣, 谭会娟, 回嵘, 赵洋, 黄磊, 贾荣亮, 宋光. 中国荒漠与沙地生物土壤结皮研究. 科学通报, 2018, 63(23): 2320-2334.
- [2] Zhang B C, Zhang Y Q, Li X Z, Zhang Y M. Successional changes of fungal communities along the biocrust development stages. *Biology and Fertility of Soils*, 2018, 54(2): 285-294.
- [3] Zhao L N, Liu Y B, Yuan S W, Li Z H, Sun J Y, Li X R. Development of archaeal communities in biological soil crusts along a revegetation chronosequence in the Tengger Desert, north central China. *Soil and Tillage Research*, 2020, 196: 104443.
- [4] Song G, Li X R, Hui R. Biological soil crusts increase stability and invasion resistance of desert revegetation communities in Northern China. *Ecosphere*, 2020
- [5] Rossi F, Mugnai G, De Philippis R. Complex role of the polymeric matrix in biological soil crusts. *Plant and Soil*, 2018, 429(1): 19-34.
- [6] Schaub I, Baum C, Schumann R, Karsten U. Effects of an early successional biological soil crust from a temperate coastal sand dune (NE Germany) on soil elemental stoichiometry and phosphatase activity. *Microbial Ecology*, 2019, 77(1): 217-229.
- [7] Hu R, Wang X P, Pan Y X, Zhang Y F, Zhang H, Chen N. Seasonal variation of net N mineralization under different biological soil crusts in Tengger Desert, North China. *CATENA*, 2015, 127: 9-16.
- [8] Baumann K, Siebers M, Kruse J, Eckhardt K U, Hu Y F, Michalik D, Siebers N, Kar G, Karsten U, Leinweber P. Biological soil crusts as key player in biogeochemical P cycling during pedogenesis of sandy substrate. *Geoderma*, 2019, 338: 145-158.
- [9] Chen S C, Dener E, Altman A, Chen F, Giladi I. Effect of habitat fragmentation on seed dispersal ability of a wind-dispersed annual in an agroecosystem. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2020, 304: 107138.
- [10] Song G, Li X R, Hui R. Biological soil crusts determine the germination and growth of two exotic plants. *Ecology and Evolution*, 2017, 7(22): 9441-9450.
- [11] Godínez-Alvarez H, Morín C, Rivera-Aguilar V. Germination, survival and growth of three vascular plants on biological soil crusts from a Mexican tropical desert. *Plant Biology: Stuttgart, Germany*, 2012, 14(1): 157-162.
- [12] Wang Y L, Li X R, Zhao J C, Liu L C, Yang H T, Zhou Y Y. Population dynamics of *Echinops gmelinii* Turcz. at different successional stages of biological soil crusts in a temperate desert in China. *Plant Biology: Stuttgart, Germany*, 2019, 21(6): 1140-1149.
- [13] Li W, Li X Y, Huang Y M, Wang P, Zhang C C. Spatial patch structure and adaptive strategy for desert shrub of *Reaumuria soongorica* in arid ecosystem of the Heihe River Basin. *Journal of Geographical Sciences*, 2019, 29(9): 1507-1525.
- [14] He F L, Bao A K, Wang S M, Jin H X. NaCl stimulates growth and alleviates drought stress in the salt-secreting xerophyte *Reaumuria soongorica*/L. *Environmental and Experimental Botany*, 2019, 162: 433-443.
- [15] Wang X H, Xiao H L, Cheng Y B, Ren J. Leaf epidermal water-absorbing scales and their absorption of unsaturated atmospheric water in

- Reaumuria soongorica, a desert plant from the northwest arid region of Chin. *Journal of Arid Environments*, 2016, 128: 17-29.
- [16] Yan S P, Chong P F, Zhao M, Liu H M. Physiological response and proteomics analysis of *Reaumuria soongorica* under salt stress. *Scientific Reports*, 2022, 12: 2539.
- [17] 何芳兰, 金红喜, 郭春秀, 马俊梅, 吴昊. 民勤绿洲边缘人工梭梭(*Haloxylon ammodendron*)林衰败过程中植被组成动态及群落相似性. *中国沙漠*, 2017, 37(6): 1135-1141.
- [18] 何芳兰, 郭春秀, 马俊梅, 吴昊, 金红喜. 民勤绿洲边缘梭梭林衰败过程中土壤种子库动态及其与地上植被的关系. *生态学报*, 2018, 38(13): 4657-4667.
- [19] 王宁, 刘俊娥, 周正朝. 生物土壤结皮对种子萌发和幼苗建植的影响研究进展. *生态学报*, 2021, 41(18): 7464-7474.
- [20] 张奕, 肖辉杰, 辛智鸣, 赵廷宁, 蒋方哲, 段媛君. 乌兰布和沙区典型灌木防风阻沙效益. *中国水土保持科学*, 2021, 19(1): 87-96.
- [21] Dannowski M, Block A. Fractal geometry and root system structures of heterogeneous plant communities. *Plant and Soil*, 2005, 272(1): 61-76.
- [22] 马雄忠, 王新平. 阿拉善高原 2 种荒漠植物根系构型及生态适应性特征. *生态学报*, 2020, 40(17): 6001-6008.
- [23] Ma Q, Yue L J, Zhang J L, Wu G Q, Bao A K, Wang S M. Sodium chloride improves photosynthesis and water status in the succulent xerophyte *Zygophyllum xanthoxylum*. *Tree Physiology*, 2012, 32(1): 4-13.
- [24] Ye J Z, Yue C, Hu Y F, Ma H. Spatial patterns of global-scale forest root-shoot ratio and their controlling factors. *Science of the Total Environment*, 2021, 800: 149251.
- [25] Steggle E K, Facelli J M, Ainsley P J, Pound L M. Biological soil crust and vascular plant interactions in Western Myall (*Acacia papyrocarpa*) open woodland in South Australia. *Journal of Vegetation Science*, 2019, 30(4): 756-764.
- [26] Li Y K, Ouyang J Z, Lin L, Xu X L, Zhang F W, Du Y G, Liu S L, Cao G M, Han F. Alterations to biological soil crusts with alpine meadow retrogressive succession affect seeds germination of three plant species. *Journal of Mountain Science*, 2016, 13(11): 1995-2005.
- [27] Kidron G J. The dual effect of sand-covered biocrusts on annual plants: increasing cover but reducing individual plant biomass and fecundity. *CATENA*, 2019, 182: 104120.
- [28] 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.
- [29] Li X R, Tian F, Jia R L, Zhang Z S, Liu L C. Do biological soil crusts determine vegetation changes in sandy deserts? Implications for managing artificial vegetation. *Hydrological Processes*, 2010, 24(25): 3621-3630.
- [30] 李新荣. 荒漠生物土壤结皮生态与水文学研究. 北京: 高等教育出版社, 2012: 265-354.
- [31] 何芳兰, 赵赫然, 王忠文, 汪媛艳, 李雪娇, 金红喜. 干旱沙区生物土壤结皮对红砂种子定居的影响及作用机制. *生态学报*, 2023, 43(1): 304-312.