

赵逸雪,赵洋,连煜超,等.固沙灌木种类和密度对凋落物及生物土壤结皮的影响[J].中国沙漠,2025,45(3):262-270.

固沙灌木种类和密度对凋落物及生物土壤结皮的影响

赵逸雪^{1,2}, 赵洋¹, 连煜超^{1,2}, 赵燕翘¹, 许文文^{1,2}

(1.中国科学院西北生态环境资源研究院 沙坡头沙漠研究试验站,甘肃 兰州 730000; 2.中国科学院大学,北京 100049)

摘要:生物土壤结皮(Biological Soil Crust, BSC)广泛分布于干旱半干旱区,被誉为荒漠生态系统工程师。固沙灌木与BSC在地表镶嵌分布,其凋落物对BSC发育具有重要影响,但不同固沙灌木在不同种植密度下调落物差异如何影响BSC的拓殖和发育仍鲜见报道。针对这一科学问题开展相关研究,以期为腾格里沙漠东南缘固沙灌木与BSC协同恢复提供科学依据和实践指导。本研究以腾格里沙漠东南缘20、35、50株/100 m²种植密度的沙拐枣(*Calligonum mongolicum*)、沙木蓼(*Atraphaxis bracteata*)、花棒(*Hedysarum scoparium*)为对象,分别测定凋落物盖度、厚度、质量和BSC属性,并通过多因素和回归分析探究凋落物属性对BSC生长发育的影响。结果表明:固沙灌木种类、种植密度和两者的交互作用均显著影响BSC厚度、总胞外多糖含量和抗压强度。此外,固沙灌木种类显著影响BSC厚度,种植密度对BSC盖度也有显著影响。回归分析发现,不同种植密度的沙拐枣、沙木蓼和花棒样地BSC各生长指标与凋落物属性的关系最佳拟合均为二次函数,即先增加后平缓或者减少的变化规律。相同密度下,沙拐枣和花棒样地BSC发育水平显著高于沙木蓼;不同种植密度中,3种固沙灌木下的BSC均在20株/100 m²时发育最好。不同种类固沙灌木和种植密度导致其凋落物属性差异,引起地表微环境变化,影响BSC的拓殖与发育。综上,本研究建议在腾格里沙漠东南缘固沙灌木-BSC联合生态恢复工作中,优先选择种植沙拐枣和花棒,其次为沙木蓼,最优种植密度均为20株/100 m²。

关键词:生物土壤结皮;固沙灌木;凋落物属性;种植密度

文章编号:1000-694X(2025)03-262-09

DOI:10.7522/j.issn.1000-694X.2025.00033

中图分类号:P941.73

文献标志码:A

0 引言

生物土壤结皮(Biological Soil Crust, BSC)广泛分布于干旱半干旱区,是由蓝藻、地衣、藓类为主的光合自养生物与异养微生物和沙粒胶结形成的地表稳定复合体^[1],占地表活体覆盖面积的40%以上^[2]。BSC有减少风蚀水蚀、改良土壤结构、增加土壤养分、固氮和固碳等生态功能,被誉为荒漠生态系统工程师^[3]。

固沙灌木和BSC是荒漠生态系统的重要组成部分,在干旱半干旱区地表镶嵌分布^[2,4]。固沙灌木产生的凋落物影响BSC的水热条件^[5-6]、光照^[7]和辐射^[8]等微环境,凋落物覆盖还可以减弱外力侵蚀,增加地表环境的稳定性^[9],进而对BSC的拓殖和发育

产生影响。少数研究表明凋落物盖度不会影响BSC盖度^[10],但多数研究显示凋落物盖度增加会降低BSC盖度^[5]。Briggs等^[11]发现澳大利亚桉树(*Eucalyptus*)和白羽杉(*Callitris glaucophylla*)凋落物盖度与BSC盖度负相关;Sun等^[12]针对黄河源区人工恢复草地的研究表明凋落物盖度超过30%,其盖度增加会降低BSC盖度,可能是较高的凋落物覆盖导致过度遮阴环境,抑制了BSC的光合作用^[13-15],从而影响BSC盖度^[5]。不同BSC类型对凋落物覆盖响应各异,蓝藻和地衣结皮表现出较高的敏感性,凋落物覆盖会降低其盖度,而藓类结皮则较为稳定,这可能与两者对光照的依赖程度不同有关^[16]。有研究表明凋落物厚度影响BSC属性^[11],BSC厚度与

收稿日期:2025-03-03; 改回日期:2025-04-16

资助项目:国家自然科学基金项目(32471708,32171630);中国科学院“西部之光”重点项目

作者简介:赵逸雪(1999—),女,山东泰安人,硕士研究生,主要从事恢复生态学研究。E-mail: zhaoyxcn@foxmail.com

通信作者:赵洋(E-mail: zhaoyang66@126.com)

凋落物厚度显著负相关^[13]。Qiu等^[14]对中国黄土高原地区油蒿(*Artemisia ordosica*)和沙冬青(*Ammopiptanthus mongolicus*)研究表明凋落物厚度与BSC厚度和生物量显著负相关,这主要是由于凋落物厚度显著改变了水热光照条件,从而使BSC的生理活动受限^[14]。凋落物质量显著影响BSC盖度,例如Zhang等^[17]发现黄土高原中部地区随着植被凋落物质量的增加BSC盖度降低。

固沙灌木种类决定了凋落物属性。在相同立地条件和生长年限下,白羽杉针状凋落物的盖度高于桉树的片状凋落物,但其厚度较小^[11];此外,不同固沙灌木产生的凋落物质量有差异^[18-19],花棒(*Hedysarum scoparium*)、柠条(*Caragana microphylla*)、沙柳(*Salix psammophila*)的凋落物质量依次递减^[19]。尽管固沙灌木种类决定了凋落物属性,但目前只在中国黄土高原开展了少量自然生长植物的凋落物盖度、厚度对BSC盖度影响的研究^[17],缺乏干旱沙区人工植被区固沙灌木凋落物盖度、厚度、质量对BSC生理指标影响的研究。有研究表明乔木和灌木的种植密度也会影响凋落物属性,例如科尔沁沙地杨树(*Populus xiaozhuanica*)的凋落物(叶与枝干)质量随着造林密度的增加而降低^[20]。安慧等^[21]对毛乌素沙地南缘种植密度分别为20、60、80株/100 m²的沙柳研究结果显示沙柳叶片质量随种植密度的增加先上升后下降,在密度为60株/100 m²时,每株沙柳产生的叶片凋落物最多(约为300 g)。赵丽等^[22]对嫩江沙地柠条和花棒凋落物的研究表明花棒在25株/100 m²密度下枝叶质量大于4株/100 m²,柠条的枝叶质量为21株/100 m²>16株/100 m²>25株/100 m²。科尔沁沙地植被群落凋落物盖度与植被密度正相关^[23],但是固沙灌木种植密度引起的凋落物差异如何影响BSC盖度和生物量等生理属性仍少有研究。

本研究选取位于腾格里沙漠东南缘的中国科学院沙坡头沙漠试验研究站2010年建立的人工植被固沙样地为研究区域。以该区域内不同种植密度下3种典型固沙灌木(沙拐枣(*Calligonum mongolicum*)、沙木蓼(*Atraphaxis bracteata*)、花棒)产生的凋落物及样地中发育的BSC为研究对象,探究不同固沙灌木类型和种植密度下凋落物属性对BSC生长和发育的影响,以期对固沙灌木-BSC联合修复沙化土地和退化沙地生态系统提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于腾格里沙漠东南缘中国科学院沙坡头沙漠研究试验站(37°27'N, 104°57'E),海拔1 250 m。该地区处于干旱半干旱区过渡地带,降水量为186 mm,主要在6—8月。年平均风速2.8 m·s⁻¹,年平均温度为9.6 °C,年平均潜在蒸发量约3 000 mm^[24]。研究区有沙拐枣、沙木蓼、花棒、柠条等固沙灌木,刺蓬(*Salsola tragus*)、雾冰藜(*Bassia dasyphylla*)、小画眉草(*Eragrostis poaeoides*)等草本植物镶嵌分布^[2],BSC广泛发育,藻类结皮22种,盖度约为30%,地衣藓类结皮约10种,盖度约为80%^[25]。

实验样地为2010年流动沙丘推平后进行人工植被恢复的区域,区域设有20 m×25 m的固沙植被区,按不同密度(20、35、50株/100 m²)种植3种典型固沙灌木,固沙植被区内设10 m×10 m的监测样方。植被实际生长密度与初始种植密度详见表1。

表1 沙拐枣、沙木蓼和花棒初始种植密度与实际密度对比
Table 1 Comparison of the initial planting density and the actual density of *Calligonum mongolicum*, *Atraphaxis bracteata* and *Hedysarum scoparium*

| 固沙灌木 | 种植密度/(株/100m ²) | 实际密度/(株/100m ²) |
|------|-----------------------------|-----------------------------|
| 沙拐枣 | 20 | 17 |
| 沙拐枣 | 35 | 9 |
| 沙拐枣 | 50 | 15 |
| 沙木蓼 | 20 | 19 |
| 沙木蓼 | 35 | 32 |
| 沙木蓼 | 50 | 43 |
| 花棒 | 20 | 10 |
| 花棒 | 35 | 15 |
| 花棒 | 50 | 17 |

1.2 实验设计

研究基于固沙灌木种类和种植密度两个关键因素开展,选取沙拐枣、沙木蓼和花棒3种典型灌木和3个不同水平的种植密度,形成9种处理。每组处理按平均长势选取3株植株,以每株灌木为中心,按正北方向为0°,顺时针旋转,在0°、120°和270°方向各设置一个20 cm×20 cm的灌丛下样方,同时也在无灌木覆盖的灌丛间区域随机设置相同规格的灌

丛间样方。每个处理包含3株样本植株,每株对应3个灌丛下样方和一个灌丛间样方为一个重复,共计3个重复。每个实验指标的测量数据为灌丛下3个样方测量值取平均值;再将该灌丛下数值与相邻灌丛间样方的测量值取平均值。

1.3 测定指标及方法

BSC 盖度采用“数码照相法”测量^[26];厚度用游标卡尺测量,用内径为7.08 mm的圆柱形不锈钢器具取BSC样,测定叶绿素 a 含量和总胞外多糖(EPS)含量($\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$)。叶绿素 a 经乙醇法提取后,在665 nm波长下使用分光光度计测定吸光值,计算公式如下^[27]:

$$a = \frac{11.9035 \times V_{\text{乙醇}} \times A_{665}}{S} \quad (1)$$

式中: a 为叶绿素含量,单位为 $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$; $V_{\text{乙醇}}$ 为乙醇的体积,单位为mL; A_{665} 为提取液在665 nm波长下分光光度计的吸光值; S 为取样面积,单位为 cm^{-2} 。

使用苯酚-浓硫酸法提取BSC的EPS,在485 nm波长下使用分光光度计测定吸光值。EPS计算公式如下^[28]:

$$\text{EPS} = \frac{5 \times \frac{A_{485} - 0.1089}{0.0072}}{S} \quad (2)$$

式中:EPS为总胞外多糖含量,单位 $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$; A_{485} 为提取液在485 nm波长下分光光度计的吸光值; S 为取样面积,单位为 cm^{-2} 。

BSC抗压强度用推拉力计(型号: SJ-500)进行测量,将推拉力计垂直于BSC表面用力下压,用BSC破碎时的最大推力值(单位: N)来反映BSC的抗压强度。灌木的株高、冠幅用卷尺测量。采用“数码照相法”^[26]测定样方内凋落物盖度。用软毛刷沿样方边缘向中心轻柔清扫,收集样方内的凋落物后置于A4信封袋中,并在70 °C条件下烘干至恒重后称重测定凋落物质量。使用间隙尺在样方内随机选取3个点测量凋落物厚度,取其平均值作为样方内凋落物的厚度。

1.4 数据处理

经Excel整理后,使用SPSS 21.0对BSC盖度、厚度、叶绿素 a 含量、EPS含量和抗压强度分别进行不同植株种类和种植密度的单因素方差分析,进行植株种类和种植密度的双因素方差分析。使用Ori-

gin 2018进行BSC指标和凋落物回归分析,根据 P 值和 R^2 选取最佳拟合函数,并完成统计图表绘制。

2 结果与分析

2.1 BSC发育特征

不同固沙灌木类型及种植密度的BSC特征如图1所示。所有处理下BSC盖度均高于88.0%,沙拐枣BSC盖度在35株/100 m²时最高(98.3%),在50株/100 m²时最低(88.5% ($P=0.01$))。花棒在50株/100 m²密度的盖度显著低于其他密度($P<0.001$)。

沙拐枣种植密度为50株/100 m²的BSC厚度显著低于其他两种($P=0.013$);沙木蓼种植密度为20株/100 m²时BSC厚度显著高于其他两种($P=0.009$)。3种植植密度下花棒的BSC厚度普遍最大,沙木蓼最小($P<0.01$)。

沙拐枣在20株/100 m²密度下BSC的叶绿素 a 含量显著高于其他两种密度($P=0.01$),花棒BSC的叶绿素 a 含量在20株/100 m²密度下最高,35株/100 m²密度下最低($P<0.001$)。同一密度下(除50株/100 m²外),沙拐枣BSC的叶绿素 a 含量最高,沙木蓼最低。

沙拐枣和花棒在种植密度为20株/100 m²时BSC的EPS含量显著高于另外两种密度($P<0.001$)。3种植植密度下,沙木蓼下BSC的EPS含量均显著低于其他两种固沙灌木($P<0.005$)。

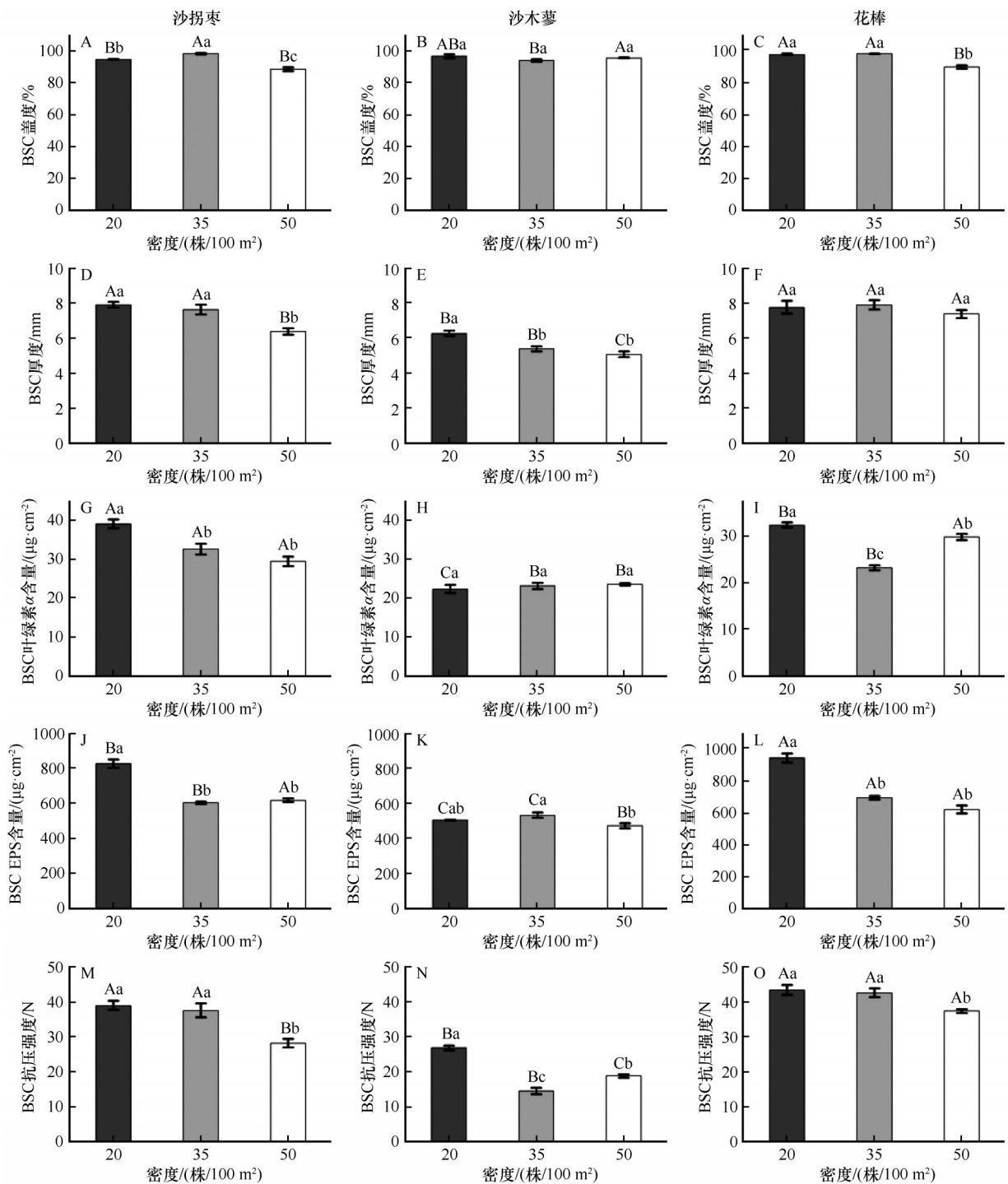
沙拐枣和花棒在种植密度为50株/100 m²的BSC抗压强度显著小于另外两种($P=0.013$; $P=0.044$);沙木蓼BSC抗压强度变化为20株/100 m²>50株/100 m²>35株/100 m² ($P<0.001$)。3种植植密度下,BSC抗压强度花棒最大,沙木蓼最小($P<0.001$)。

2.2 固沙灌木凋落物属性

沙拐枣和沙木蓼在20株/100 m²种植密度下的凋落物盖度显著高于其他两种,花棒的凋落物盖度随着种植密度的增加显著降低($P<0.001$,图2)。

沙拐枣的凋落物厚度在50株/100 m²种植密度下显著低于其他两种($P<0.001$);沙木蓼的凋落物厚度在20株/100 m²种植密度下显著高于其他两种($P<0.001$);花棒的凋落物厚度随着种植密度的增加呈先增后减趋势($P<0.001$)。

沙木蓼在种植密度为20株/100 m²时凋落物质



注：不同小写字母表示同一固沙灌木内部不同种植密度之间差异显著，不同大写字母表示同一种种植密度不同固沙灌木之间差异显著

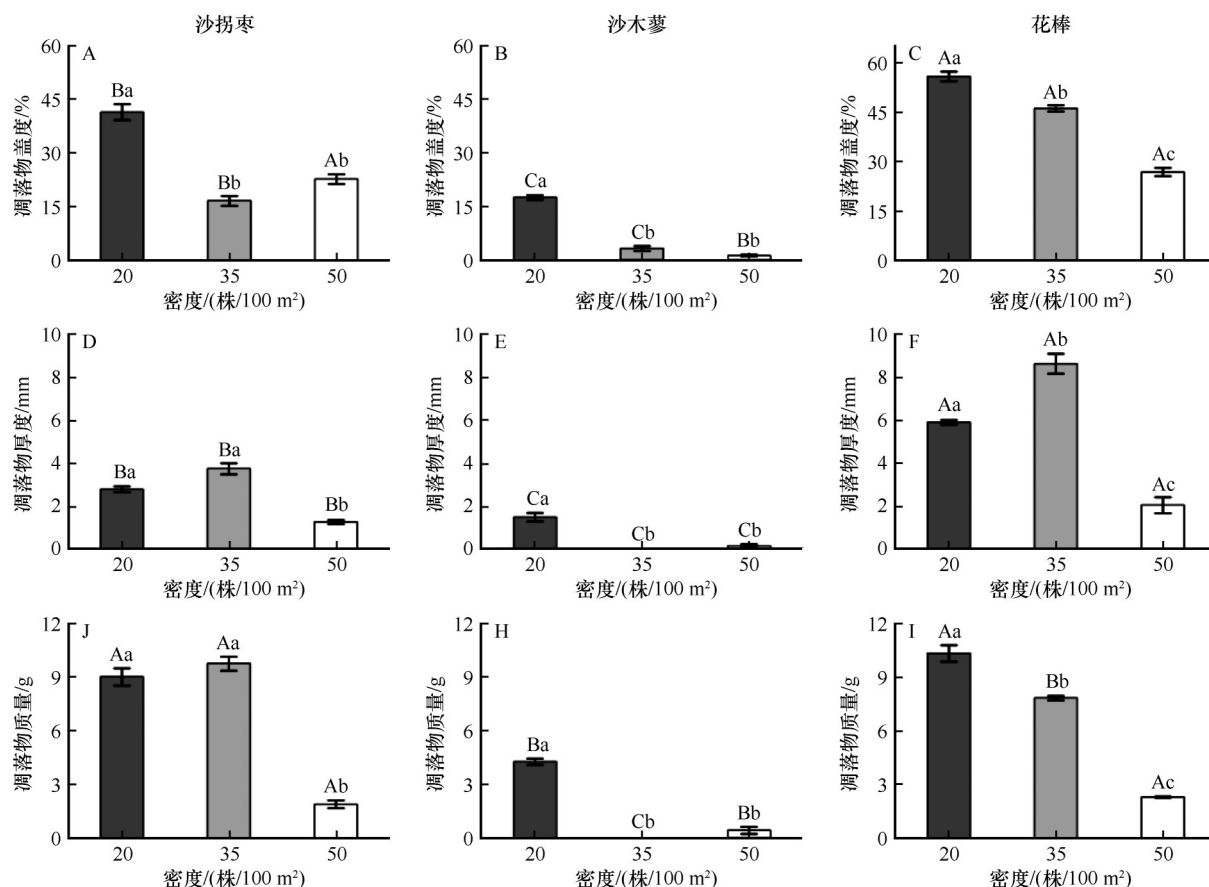
图 1 不同种植密度沙拐枣、沙木蓼和花棒对 BSC 的影响

Fig.1 Effects of *Calligonum mongolicum*, *Atraphaxis frutescens* and *Hedysarum scoparium* under different planting densities on BSC

量高于其他两种密度($P=0.082$);花棒凋落物质量在不同种植密度下表现为:20株/100 m²>35株/100 m²>50株/100 m²($P=0.027$)。当种植密度为20、50株/100 m²时,沙木蓼的凋落物质量显著低于沙拐枣和花棒($P<0.05$)。

2.3 影响 BSC 生长发育的因子

固沙灌木种类和种植密度影响 BSC 的生长发育,对 BSC 的盖度、厚度、叶绿素 a 含量、EPS 含量和抗压强度进行固沙灌木种类和种植密度的双因素方差分析(表 2)。固沙灌木种类显著影响 BSC 盖度



注:不同小写字母表示同一固沙灌木内部不同种植密度之间差异显著,不同大写字母表示同一种种植密度不同固沙灌木之间差异显著

图2 不同固沙灌木和种植密度凋落物属性

Fig.2 Litter attributes of different sand-fixing shrubs and planting densities

以外的其他指标;种植密度对BSC各发育指标均有显著影响;固沙灌木种类和种植密度的交互作用显著影响BSC厚度以外的其他指标。

BSC的盖度、厚度、叶绿素 a 含量、EPS含量和抗压强度与凋落物的盖度、厚度和质量指标的回归关系最佳拟合为二次函数模型(图3)。BSC盖度随着凋落物盖度增加呈先降后升趋势($P=0.053$)。BSC盖度和凋落物厚度($P=0.034$)、质量($P=0.006$)、BSC叶绿素 a 含量和凋落物质量($P=0.008$)、BSC的EPS含量与凋落物的盖度及质量($P<0.001$)均呈正相关。BSC厚度、抗压强度和凋落物各属性,BSC叶绿素 a 含量、EPS含量和凋落物厚度均呈先升后降的单峰趋势($P<0.001$)。

3 讨论

3.1 固沙灌木凋落物属性对BSC盖度、厚度的影响

本研究发现BSC盖度、厚度随凋落物属性的变化呈现不同趋势,BSC盖度随凋落物厚度、质量增

加呈上升趋势,但随凋落物盖度的增加呈现先降后升的非线性变化;BSC厚度随凋落物盖度、厚度和质量的增加呈先升后降的单峰趋势。适当水平的凋落物可为BSC提供稳定的微环境,促进其生长^[12],然而,过多凋落物会导致过度遮光,抑制BSC发育^[17]。在青海玛沁的人工恢复植被区,凋落物覆盖促进了BSC盖度和厚度的增长,与本研究结果一致,与Briggs等^[11]在澳大利亚东南部的温带海洋气候区的研究结果不同,其结果表明凋落物覆盖对BSC盖度产生不利影响,该差异可能源于地表微环境稳定性的不同。澳大利亚东南部地表较为稳定,乔木及其凋落物过度遮阴抑制了BSC生长。腾格里沙漠东南缘的沙坡头地区地表环境恶劣且稳定性差,凋落物覆盖能够有效增加水分湿润时间,降低地表极端高温并减小温度波动,同时保护BSC免受风沙侵蚀^[29],凋落物积累反映了地表微环境的稳定性^[9],从而促进了BSC盖度和厚度的发育。本研究亦发现沙木蓼凋落物盖度、厚度和质量均显著低

表 2 固沙灌木种类和种植密度对 BSC 指标的双因素方差分析

Table 2 Two-way analysis of variance of the effects of sand-fixing shrub species and planting densities on BSC indices

| BSC 属性指标 | 因素 | III 型平方和 | df | 均方 | F | P |
|----------|-------------|------------|----|------------|--------|-------|
| 盖度 | 固沙灌木种类 | 13.73 | 2 | 6.86 | 2.96 | 0.078 |
| | 种植密度 | 170.15 | 2 | 85.08 | 36.73 | 0.001 |
| | 固沙灌木种类×种植密度 | 122.86 | 4 | 30.71 | 13.26 | 0.001 |
| 厚度 | 固沙灌木种类 | 22.90 | 2 | 11.45 | 50.89 | 0.001 |
| | 种植密度 | 5.04 | 2 | 2.52 | 11.20 | 0.001 |
| | 固沙灌木种类×种植密度 | 1.70 | 4 | 0.42 | 1.89 | 0.157 |
| 叶绿素 a 含量 | 固沙灌木种类 | 515.34 | 2 | 257.67 | 72.20 | 0.001 |
| | 种植密度 | 116.88 | 2 | 58.44 | 16.38 | 0.001 |
| | 固沙灌木种类×种植密度 | 161.18 | 4 | 40.30 | 11.29 | 0.001 |
| EPS 含量 | 固沙灌木种类 | 300 792.64 | 2 | 150 396.32 | 114.99 | 0.001 |
| | 种植密度 | 177 276.64 | 2 | 88 638.32 | 67.77 | 0.001 |
| | 固沙灌木种类×种植密度 | 94 734.45 | 4 | 23 683.61 | 18.11 | 0.001 |
| 抗压强度 | 固沙灌木种类 | 2 126.99 | 2 | 1 063.50 | 171.04 | 0.001 |
| | 种植密度 | 308.33 | 2 | 154.17 | 24.79 | 0.001 |
| | 固沙灌木种类×种植密度 | 193.15 | 4 | 48.29 | 7.77 | 0.001 |

于沙拐枣和花棒,相应的 BSC 厚度也最薄,这可能是沙木蓼下地表微环境不够稳定所致。

3.2 固沙灌木凋落物属性对 BSC 厚度的影响

不同水平凋落物覆盖对 BSC 厚度的影响存在显著差异^[13]。本研究表明,BSC 厚度随凋落物盖度和厚度增加呈先升后降的单峰变化趋势,而随凋落物质量增加持续上升。Serpe 等^[13]研究认为少量凋落物覆盖可通过延长 BSC 光合时间促进其生长,但过度覆盖造成光合抑制导致生物量下降,与本研究结果一致。黄土高原野外控制实验显示在 100%凋落物覆盖条件下,油蒿和柠条的凋落物厚度与质量增加显著降低了藓类结皮的生物量^[12]。这可能是由于此时凋落物各属性值均已对 BSC 光合作用形成了抑制^[12-13]。本研究还发现固沙灌木种类和种植密度对 BSC 厚度有显著影响,沙拐枣样地 BSC 生物量最高,沙木蓼最低,表明沙拐枣下由凋落物覆盖所营造的微环境更利于 BSC 生物量的积累。

3.3 固沙灌木凋落物对 BSC 中 EPS 含量及破碎度的影响

BSC 中 EPS 含量与 BSC 厚度和生物量正相关,发育良好的 BSC 拥有更复杂的微生物群落结构,从

而产生更多的 EPS^[30]。本研究中 BSC 的 EPS 含量、厚度对凋落物属性的响应趋势相似,这可能是凋落物通过影响 BSC 发育进而影响 EPS 分泌。BSC 抗压强度与 BSC 厚度、生物量和 EPS 含量呈正相关关系^[30],BSC 中的菌丝和 EPS 胶结形成的胶结层显著提升了其抗压强度^[31]。无论是不同固沙灌木种类还是相同固沙灌木的不同种植密度,BSC 抗压强度与 BSC 厚度、生物量和 EPS 含量的变化规律基本一致。随着凋落物盖度、厚度和质量的增加,BSC 的抗压强度呈先升后降的趋势。由此推测凋落物属性通过直接影响 BSC 厚度、生物量和 EPS 含量来影响其菌丝和 EPS 的胶结,进而影响其抗压强度^[30]。本研究中沙拐枣和花棒样地 BSC 中 EPS 含量和抗压强度显著高于沙木蓼,这可能与沙木蓼样地 BSC 发育和胶结较差有关。对于不同种植密度的沙拐枣和花棒,20 株/100 m²密度 BSC 的 EPS 含量显著高于其他两种,当种植密度为 20 株/100 m²和 35 株/100 m²时,沙木蓼 BSC 的抗压强度显著低于另外两种,可能是因为在此种植密度下,凋落物覆盖更有利于 BSC 发育,从而提高了 EPS 含量,促进了其胶结程度,进而提升了其抗压强度。

本研究开展调查工作时发现沙拐枣和花棒处

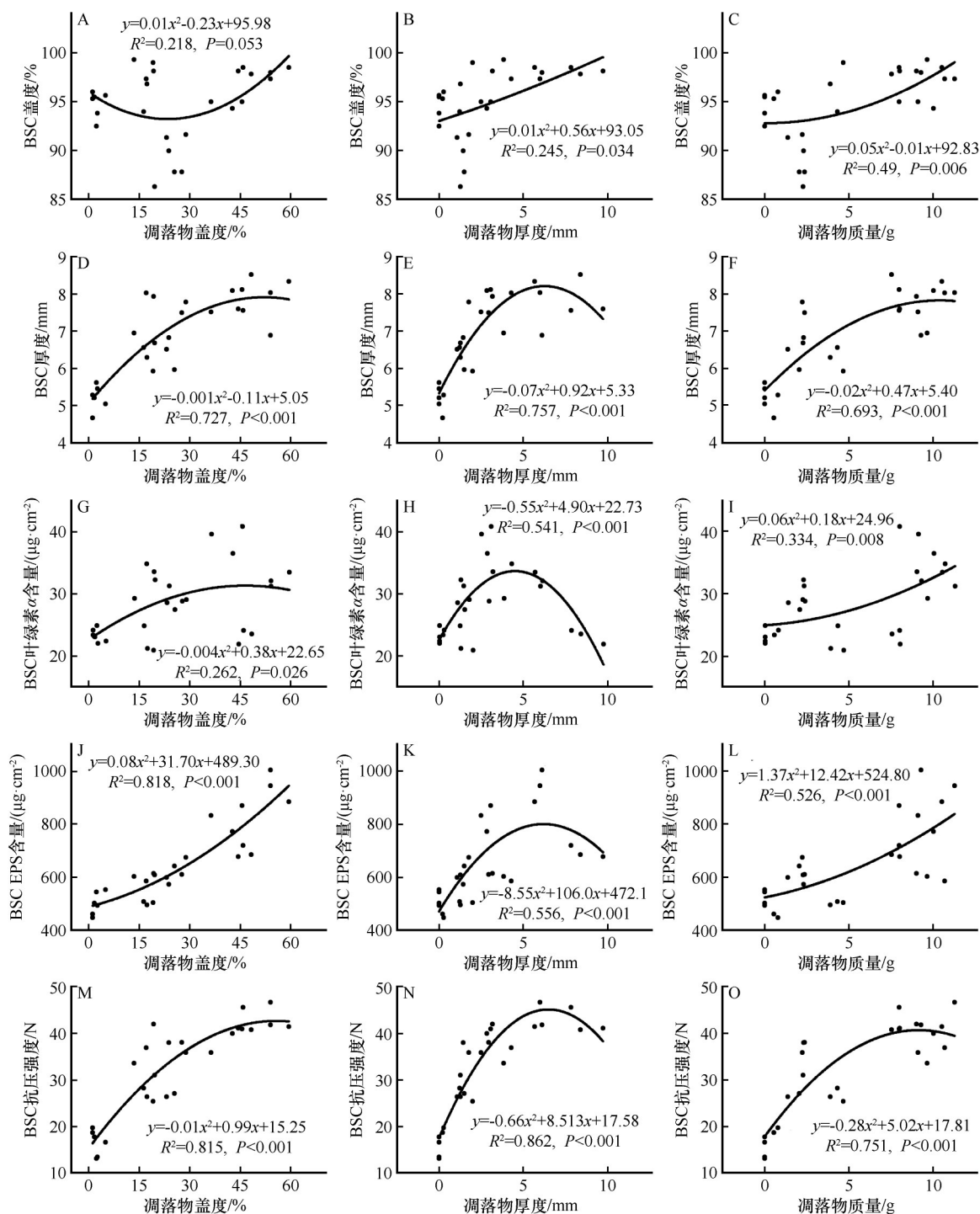


图3 BSC各发育指标与凋落物各指标的回归分析

Fig.3 Regression analysis of each development index of BSC and each index of litter

理的现存密度显著低于初始种植密度,这可能不能准确反映初始种植密度对BSC拓殖和发育的影响。然而,沙坡头站对本研究使用的样地中灌木生长动态进行了长期监测,发现固沙灌木种植5~6年内基本维持初始密度。本研究基于植被建设13年后进行样地调查,尽管现存沙拐枣和花棒处理的密度已

低于初始值,但仍维持由初始种植植物构成的单一物种林分,同时发现不同初始密度处理下BSC属性存在显著差异。这些结果表明初始种植密度影响BSC的发育。为了能够更好地构建凋落物与BSC间的关系,今后的研究将开展长期连续监测,厘清固沙灌木种类和密度凋落物与BSC间的动态关系。

4 结论

花棒、沙拐枣和沙木蓼在不同种植密度下发育的BSC各生长指标对凋落物属性的响应存在差异。BSC盖度与凋落物厚度, BSC叶绿素 a 含量与凋落物质量, 以及BSC中EPS含量与凋落物盖度、质量均显著正相关。BSC盖度随凋落物盖度呈先降后升的变化趋势; BSC叶绿素 a 含量与凋落物盖度、厚度, BSC中EPS含量与凋落物厚度, 以及BSC厚度、抗压强度与凋落物各属性均呈先升后降的单峰变化趋势。不同固沙灌木和种植密度固沙灌木下BSC生长发育状况差异显著, 相同密度下, 沙拐枣和花棒下BSC发育水平显著优于沙木蓼; 在同种灌木不同种植密度中, BSC在20株/100 m²种植密度下发育最好。因此, 建议在腾格里沙漠东南缘开展固沙灌木-BSC联合生态恢复工作时, 优先选择沙拐枣和花棒固沙灌木, 其次为沙木蓼, 种植密度均为20株/100 m²。

参考文献:

- [1] Eldridge D, Greene R. Microbiotic soil crusts: a review of their roles in soil and ecological processes in the rangelands of Australia [J]. Australian Journal of Soil Research, 1994, 32 (3): 389-415.
- [2] 李新荣. 荒漠生物土壤结皮生态与水文学研究[M]. 北京: 高等教育出版社, 2012.
- [3] 李新荣, 贾玉奎, 龙利群, 等. 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[J]. 中国沙漠, 2001, 21(1): 7-14.
- [4] 潘伯荣. 我国固沙植物引种的历史及展望[J]. 中国沙漠, 1987, 7(1): 4-11.
- [5] Wu G L, Zhang M Q, Liu Y, et al. Litter cover promotes biocrust decomposition and surface soil functions in sandy ecosystem [J]. Geoderma, 2020, 374: 114429.
- [6] Xiong S J, Nilsson C. The effects of plant litter on vegetation: a meta-analysis [J]. Journal of Ecology, 1999, 87(6): 984-994.
- [7] Facelli J, Pickett S. Plant litter: its dynamics and effects on plant community structure [J]. Botanical Review, 1991, 57(1): 1-32.
- [8] 苏延桂, 李新荣, 赵昕, 等. 紫外辐射增强对不同发育阶段荒漠藻结皮光合作用的影响[J]. 中国沙漠, 2011, 31(4): 889-893.
- [9] Belnap J, Gillette D A. Vulnerability of desert biological soil crusts to wind erosion: the influences of crust development, soil texture, and disturbance [J]. Journal of Arid Environments, 1998, 39(2): 133-142.
- [10] Thompson W A, Eldridge D J, Bonser S P. Structure of biological soil crust communities in *Callitris glaucophylla* woodlands of New South Wales, Australia [J]. Journal of Vegetation Science, 2006, 17(3): 271-280.
- [11] Briggs A, Morgan J W. Morphological diversity and abundance of biological soil crusts differ in relation to landscape setting and vegetation type [J]. Australian Journal of Botany, 2008, 56(3): 246.
- [12] Sun H, Li X, Jin L, et al. Evolutionary characteristics of biological soil crusts in grassland restoration in the source zone of the Yellow River [J]. Israel Journal of Ecology & Evolution, 2022, 68(1/4): 31-42.
- [13] Serpe M D, Roberts E, Eldridge D J, et al. *Bromus tectorum* litter alters photosynthetic characteristics of biological soil crusts from a semiarid shrubland [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2013, 60: 220-230.
- [14] Qiu D, Xiao B, Algora C, et al. Litter covering decreases moss activity, mediating the relationships between moss biocrusts and shrub patches in semiarid dryland ecosystems [J/OL]. Plant and Soil (2024-08-24) [2025-03-27]. <https://doi.org/10.1007/s11104-024-06905-2>.
- [15] Lange O L. Photosynthesis of soil-crust biota as dependent on environmental factors [M]// Belnap J, Lange O L. Biological Soil Crusts: Structure, Function, and Management. Berlin, Germany: Springer, 2001: 217-240.
- [16] 程军回, 张元明. 影响生物土壤结皮分布的环境因子 [J]. 生态学杂志, 2010, 29(1): 133-141.
- [17] Zhang J, Liu G, Xu M, et al. Influence of vegetation factors on biological soil crust cover on rehabilitated grassland in the hilly Loess Plateau, China [J]. Environmental Earth Sciences, 2013, 68(4): 1099-1105.
- [18] 卢德浩, 郑峰霖, 古佳玮, 等. 不同林分类型凋落物和土壤水源涵养能力分析与评价 [J]. 生态环境学报, 2025, 34(1): 26-35.
- [19] 郜超, 张继平, 刘冬林, 等. 不同灌木树种造林改良沙地效果比较 [J]. 陕西林业科技, 2020, 48(5): 1-3.
- [20] 杨文斌, 王晶莹, 王晓江, 等. 科尔沁沙地杨树固沙林密度、配置与林分生长过程初步研究 [J]. 北京林业大学学报, 2005, 27(4): 33-38.
- [21] 安慧, 王俊波, 安钰. 灌丛密度对毛乌素沙地南缘沙柳生长及土壤水分动态的影响 [J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(1): 197-203.
- [22] 赵丽, 张玉柱, 王春, 等. 小叶锦鸡儿花棒固沙林生物生产力及适宜经营密度 [J]. 防护林科技, 2008, 84(3): 14-16.
- [23] 陈银萍, 李晓辉, 罗永清, 等. 科尔沁不同沙地类型植被动态特征及其与凋落物的关系研究 [J]. 草地学报, 2021, 29(1): 114-120.
- [24] 李新荣, 周海燕, 王新平, 等. 中国干旱沙区的生态重建与恢复: 沙坡头站60年重要研究进展综述 [J]. 中国沙漠, 2016, 36(2): 247-264.
- [25] 张鹏, 李新荣, 张志山, 等. 腾格里沙漠东南缘生物土壤结皮

- 的固氮潜力[J].应用生态学报,2012,23(8):2157–2164.
- [26] 许文文,赵燕翘,王楠,等.人工生物土壤结皮对草本植物群落组成与多样性的影响[J].中国沙漠,2022,42(5):204–211.
- [27] Zhao Y, Wang N, Zhang Z, et al. Accelerating the development of artificial biocrusts using covers for restoration of degraded land in dryland ecosystems[J]. Land Degradation & Development, 2021, 32(1): 285–295.
- [28] Pereira S, Zille A, Micheletti E, et al. Complexity of cyanobacterial exopolysaccharides: composition, structures, inducing factors and putative genes involved in their biosynthesis and assembly [J]. Fems Microbiology Reviews, 2009, 33 (5) : 917–941.
- [29] 连煜超,白剑,刘荣霞,等.接种体状态和不同材料覆盖对人工蓝藻结皮拓殖的影响[J].生态学报,2025,45(2):950–961.
- [30] Yu X, Xiao B, Cao Y, et al. Microbial-induced extracellular polymers are fundamentally responsible for the mechanical stability of biocrusts in drylands[J]. Catena, 2024, 245: 108349.
- [31] Belnap J, Gardner J S. Soil microstructure in soils of the Colorado Plateau: the role of the cyanobacterium *Microcoleus vaginatus* [J]. Great Basin Naturalist, 1993, 53(1): 40–47.

The influence of sand-fixing shrubs species and densities on the litter and biological soil crusts

Zhao Yixue^{1,2}, Zhao Yang¹, Lian Yuchao^{1,2}, Zhao Yanqiao¹, Xu Wenwen^{1,2}

(1. Shapotou Desert Research and Experiment Station, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Biological soil crust (BSC), known as "engineers of desert ecosystems," are widely distributed in arid and semi-arid regions. Sand-fixing shrubs and BSC form mosaic patterns on the soil surface, and shrub litter significantly influences BSC development. However, how litter differences caused by shrub species and planting densities affect BSC colonization and growth remains poorly understood. In this study, we selected three sand-fixing shrub species—*Calligonum mongolicum*, *Atraphaxis bracteata*, and *Hedysarum scoparium*—planted at densities of 20, 35, and 50 plants/100 m² in the southeastern Tengger Desert. Coverage, thickness, and weight of litter and BSC attributes were measured, and the effects of litter properties on BSC growth were analyzed using multifactorial and regression analyses. The results showed that shrub species, planting density, and their interaction significantly influenced BSC biomass, extracellular polymeric substance content, and compressive strength. Additionally, shrub species significantly affected BSC thickness, while planting density notably influenced BSC coverage. Regression analysis found that, the relationships between BSC growth indicators and litter properties under different shrub species and densities were best fitted by quadratic function models, showing a pattern of first increasing and then gradually decreasing or decreasing changes. This study aims to conduct an in-depth investigation into this scientific issue, with the goal of providing scientific evidence and practical guidance for the coordinated restoration of sand-fixing shrubs and biological soil crusts in the southeastern edge of the Tengger Desert. At the same density, BSC development under *C. mongolicum* and *H. scoparium* was significantly better than under *A. bracteata*. Among planting densities, the BSC under three types of sand-fixing shrubs developed the best at 20 plants/100 m². The different types and planting densities of sand-fixing shrubs lead to differences in their litter properties, which in turn cause changes in the surface microenvironment and affect the colonization and development of BSC. In conclusion, for ecological restoration combining sand-fixing shrubs and BSC in the southeastern Tengger Desert, priority should be given to planting *C. mongolicum* and *H. scoparium*, followed by *A. bracteata*, with an optimal density of 20 plants/100 m². This study analyzed the optimized configuration mode of sand-fixing shrubs and BSC collaborative restoration of ecological environment in arid areas, providing scientific basis and practical guidance for wind and sand control and ecological restoration.

Key words: biological soil crust; sand-fixing shrubs; litter attributes; planting density