

李亚红, 卜崇峰, 郭琦, 等. 毛乌素沙地藓、藻结皮生态功能对比[J]. 中国沙漠, 2021, 41(2): 138-144.

# 毛乌素沙地藓、藻结皮生态功能对比

李亚红, 卜崇峰, 郭琦, 韦应欣

(西北农林科技大学/中国科学院/水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** 生物结皮在荒漠生态系统中发挥着重要的生态功能, 不同类型生物结皮有机体组成和比例不同, 生态功能差异巨大。针对毛乌素沙地发育稳定阶段的藓、藻结皮, 通过野外调查监测及室内指标测算, 深入分析了两类生物结皮对土壤含水量、风蚀量和养分含量的影响尺度, 并采用综合指标评价模型定量比较了二者的生态功能差异。结果表明: (1) 两类生物结皮下土壤含水量随着土层深度呈现出先增大后波动下降的趋势, 0—100 cm 深度两类生物结皮下的土壤含水量差异显著 ( $P < 0.05$ ), 在 0—80 cm 深度, 藓结皮的土壤含水量大于藻结皮, 在 90—100 cm 则相反; (2) 相比裸地, 藓结皮和藻结皮影响下土壤风蚀量分别降低了 156.0% 和 136.6%, 但二者未达到显著差异; (3) 两类结皮影响下土壤养分含量差异显著 ( $P < 0.05$ ), 表现为藓结皮下土壤全氮、全磷、有机质含量分别为藻结皮的 3.3、3.5、2 倍; (4) 生物结皮生态功能综合得分藓结皮 > 藻结皮 > 裸地 (1.60 > -0.64 > -9.78)。本研究证实了荒漠生态系统中不同类型生物结皮生态功能的差异及其在保持水土和营养物质循环方面贡献程度的优劣, 突出了在生物结皮探索工作中关于其类型或组成精准细分的重要性。

**关键词:** 生物结皮; 土壤含水量; 土壤风蚀量; 土壤养分; 综合评价模型

文章编号: 1000-694X(2021)02-138-07

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2020.00101

中图分类号: Q948.1

文献标志码: A

## 0 引言

毛乌素沙地是中国四大沙地之一, 位于北方农牧交错带的中部, 处于荒漠草原-草原-森林草原的过渡地带, 是中国干旱地区重要的地貌单元<sup>[1]</sup>。该区沙漠化、草地退化严重, 生物多样性匮乏、生境脆弱, 以及人类活动干扰强烈, 属于典型的生态脆弱区<sup>[2]</sup>。“三北”防护林等国家重点生态环境建设工程的实施, 使得该区植被盖度显著提高, 这为生物结皮的形成创造了微环境, 使得流沙被固定的同时沙丘表面广泛发育了生物结皮。

生物结皮是由细菌、真菌、藻类、地衣和苔藓植物等有机体与表层土壤共同形成的复合生物土壤层, 是荒漠生态系统中的重要活地被物, 覆盖了地球陆地面积的 12%<sup>[3]</sup>。生物结皮生长代谢的分泌物能固定土壤颗粒, 其有机体中的某些地衣和蓝藻不但有固氮功能, 还可通过光合作用增加有机碳的输入, 除此之外, 生物结皮还可以改变影响土壤水分

循环的诸多因素, 如土壤结构、有机质含量、土壤粗糙度以及微地形等<sup>[4-5]</sup>。生物结皮在防风固沙、改善土壤养分、改变土壤水分分布状况等方面具有重要的生态作用<sup>[6-7]</sup>。因此, 对毛乌素沙地中生物结皮生态功能的研究显得尤为重要。

构成生物结皮的有机体及其比例不同, 使得不同类型生物结皮的生态功能存在较大差异。王雪芹等<sup>[8]</sup>指出, 在净风条件下, 各类型结皮的防风效果由强到弱依次为地衣结皮、藻类-地衣结皮和苔藓结皮、藻结皮。Li 等<sup>[9]</sup>在毛乌素沙地的研究表明, 相同降雨条件下, 不同类型结皮覆盖下水分入渗深度蓝藻 > 地衣 > 苔藓。Li 等<sup>[10]</sup>在腾格里沙漠的试验结果显示, 以地衣-苔藓主导的生物结皮年固碳量 ( $26.75 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ) 高于以蓝细菌-藻类主导的生物结皮年固碳量 ( $11.36 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )。可见, 目前对于生物结皮生态功能的研究较多<sup>[11]</sup>, 但仍存在争议<sup>[12]</sup>, 且大多停留在对其某个单项功能和作用的定

收稿日期: 2020-07-20; 改回日期: 2020-09-16

资助项目: 国家重点研发国际合作项目(2016YFE0203400-05); 国家自然科学基金项目(41971131); 杨凌示范区产学研用协同创新重大项目(2017CXY-08); 国家重点研发计划项目(2017YFC0504703)

作者简介: 李亚红(1996—), 女, 甘肃会宁人, 硕士研究生, 主要从事生物土壤结皮研究。E-mail: 171290258@qq.com

通信作者: 卜崇峰(E-mail: buchongfeng@163.com)

性认识。在全球气候变化背景下,关于定量分析生物结皮保持水土和营养物质循环等关键过程的研究还比较缺乏<sup>[13]</sup>,有关生物结皮多种生态功能的综合评价尚未见报道,从而难以明确不同类型生物结皮对荒漠生态系统修复的贡献度。

本文以毛乌素沙地藓结皮和藻结皮为研究对象,比较二者对土壤含水量、风蚀积量、养分含量的影响,并尝试采用最优综合评价模型<sup>[14-15]</sup>对不同类型生物结皮的生态功能进行综合量化评价,以认识不同类型生物结皮生态功能的异同,既是对已有研究成果的有益补充,也对不同类型生物结皮多种生态功能的定量化评价有重要意义。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究地概况

研究样地位于陕西省榆林市榆阳区孟家湾乡(38° 32' 50" —38° 32' 54"N, 109° 36' 14" —109° 36' 24"E),毛乌素沙地东南缘地带。属中温带半干旱大陆性季风气候,降雨少且不均,气候干燥,冬长夏短,四季分明。全区极端最高气温38.6℃,极端最低气温-32.7℃,年平均气温8.1—10℃<sup>[16]</sup>,多年平均降水量405 mm。地貌以起伏的固定和半固定沙丘为主。主要灌木为沙蒿(*Artemisia desertorum*)、沙柳(*Salix psammophila*)和柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii*)。草本植物主要有沙竹(*Psammodloa villosa*)和狗娃花(*Heteropappus hispidus*)等,在样地内零星分布。生物结皮以藓结皮和藻结皮为主,且多分布在沙丘间洼地和灌木下方。

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 样地布设与样品采集

研究区的生物结皮以藓结皮和藻结皮为主,多分布在沙丘间洼地和灌木下方。样地选择布设在灌木之间的空地上,地形起伏较小,以减少微地形差异对生物结皮发育的影响。本试验设3个样地(30 m×30 m),在每个样地中根据结皮类型随机布设1 m×1 m的小样方,以裸地为对照,每类样方3个重复,共设9个样方,调查样方基本信息见表1。在每个样方的中心位置埋设1 m长的TDR水分测管,每隔10 cm测定0—100 cm深度范围内的土壤体积含水量,并用插钎的方法测定风蚀量,在每个小区中部垂直插入1根50 cm长,直径2 mm的钢钎,所

表1 样地基本情况

Table 1 Plot description

结皮类型	盖度/%	厚度/mm	土壤容重/(g·cm <sup>-3</sup> )	土壤pH值
藻结皮	14.17±6.4	7.67±3.4	1.41±0.0	8.30±0.3
藓结皮	38.83±7.8	11.00±1.4	1.42±0.0	8.01±0.2
裸地	—	—	1.60±0.0	8.26±0.3

有钢钎露出土表30 cm,通过插钎的读数获得风蚀和风积的土壤厚度,进而推算风蚀积量。监测时间为2017年7月24日至2017年9月23日,共测定11次;用环刀采集表层0—5 cm的土壤(移除生物结皮层),用于测算土壤容重、土壤养分及pH值等,各个指标均为3次重复。

#### 1.2.2 测定指标及方法

生物结皮指标。采用样框法测量盖度<sup>[17]</sup>,以游标卡尺测定厚度。

土壤指标。容重,烘干法;有机质、全氮、全磷含量用全自动间断化学分析仪(Clever Chem 200,德国)测定;pH值用检测仪(PHS-25)测定;体积含水量(%)用TDR(TRIME-PICO-IPH/T3)测定。风蚀量计算公式 $W=100\rho_b\Delta h$ , $W$ 代表风蚀量,单位 $t\cdot hm^{-2}$ ; $\Delta h$ 代表风蚀或风积厚度,单位cm,为前后两次测钎读数差值,风蚀为正值,风积为负值; $\rho_b$ 代表土壤容重,单位 $g\cdot cm^{-3}$ 。

#### 1.2.3 生物结皮生态功能指标权重

原始实测数据矩阵:对藓结皮、藻结皮和裸地各选取5个实测指标,分别构成33×5的原始数据矩阵,记为 $x$ 。原始数据进行标准化处理,标准化公式<sup>[14]</sup>如下:

$$X_{ij} = \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{s_j} \quad (1)$$

式中: $X_{ij}$ 为第 $i$ 类样方第 $j$ 个指标的标准化值; $x_{ij}$ 为第 $i$ 类样方第 $j$ 个指标的实测值; $\bar{x}_j$ 为第 $j$ 个指标的平均值; $s_j$ 为第 $j$ 个指标的标准差; $i$ 为样方的种类数; $j$ 为评选中所选指标的个数。在标准化过程中,本文的逆向指标按上述公式的相反数标准化。

计算 $W=X_{ij}^T X_{ij}$ 的最大特征值所对应的特征向量(即权重系数),并进行单位化:记为 $b_j$ 。

本文依据以往学者对荒漠生物结皮生态功能的研究<sup>[18-20]</sup>,以土壤含水量、风蚀量、全氮、全磷、有机质含量作为生物结皮保持水土和营养物质循环的生态功能指标,计算得到生物结皮各因子权重系

数。藓结皮,  $b = \{-0.54, -0.57, -0.58, -0.02, 0.18\}$ ; 藻结皮,  $b = \{0.65, 0.47, 0.59, 0.07, 0.11\}$ ; 裸地,  $b = \{-0.46, -0.74, -0.46, 0.16, -0.04\}$ 。

采用最优综合评价模型, 计算不同类型生物结皮生态功能评价得分<sup>[21]</sup>。

$$Y_i = \sum_{j=1}^m b_j X_{ij} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

式中:  $Y_i$  为生态功能评价综合得分;  $b_j$  为不同类型生物结皮各因子权重系数;  $X_{ij}$  为第  $i$  类样方第  $j$  个指标的标准化值。

### 1.3 数据分析

试验数据运用 Microsoft Excel 2010 和 R-3.4.1 进行计算, 并用 SPSS 23.0 中的 One-Way ANOVA 分析不同类型生物结皮影响下土壤含水量、风蚀积量和养分含量的差异, 应用 Origin 2018 做图。

## 2 结果与分析

### 2.1 两类生物结皮对土壤含水量的影响

由图1可知, 藓、藻结皮下土壤含水量随着土层深度呈现出先增大后波动下降的趋势, 分别在 40—50、30—40 cm 层达到最大, 为 11.55% 和 8.21%, 且为裸地下最大土壤含水量的 1.5 倍和 1.1 倍。在 0—

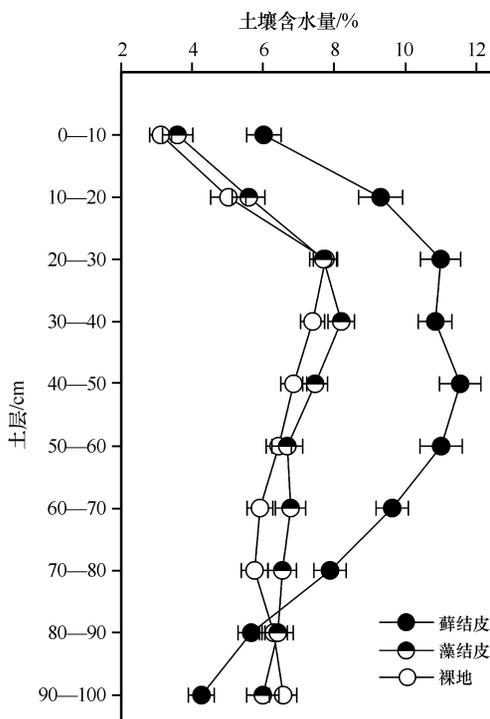


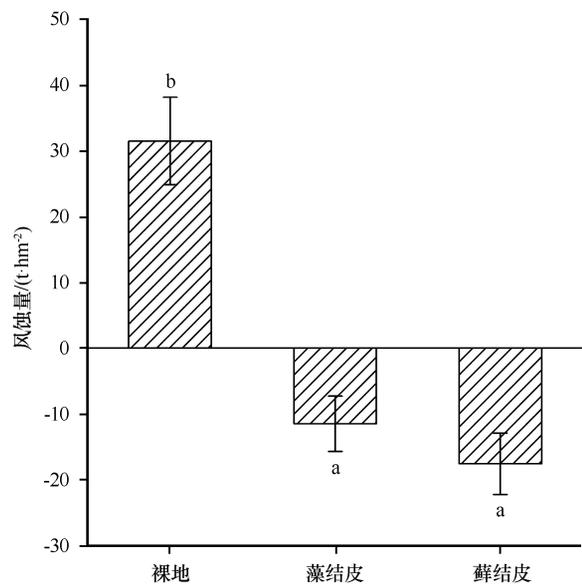
图1 两类生物结皮土壤含水量

Fig.1 Soil water content of two types of biological soil crusts

80 cm 土层深度范围内, 藓结皮下土壤含水量显著高于藻结皮下和裸地土壤含水量 ( $P < 0.05$ ), 且在该土层, 藓结皮下平均土壤含水量相对于藻结皮和裸地分别提高了 47.0% 和 59.9%。在 80—90 cm 土层深度, 两类生物结皮下土壤含水量无显著差异, 但在 90—100 cm 层藻结皮下和裸地土壤含水量反而显著高于藓结皮下 ( $P < 0.05$ ), 表明藓结皮仅能提高 0—80 cm 层土壤含水量, 而消弱了深层土壤含水量。在 0—100 cm 土层深度范围内, 藻结皮与裸地相比土壤含水量虽有数值差异, 但差异未达到显著性水平, 说明藻结皮对土壤含水量的大小无明显影响。

### 2.2 两类生物结皮对土壤风蚀量的影响

图2显示整个监测期间两类生物结皮及裸地的土壤风蚀量。两类生物结皮与裸地土壤风蚀量差异显著 ( $P < 0.05$ ), 且表现为生物结皮影响下土壤风蚀量为负值, 即以风积为主, 并且两类结皮对土壤风蚀量的影响无明显差异。裸地的风蚀频率是藻结皮和藓结皮的 4 倍, 风蚀量最大为  $31.52 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 即以风蚀为主 (表 2)。藓结皮与藻结皮的风蚀、风积频率相差不大, 风蚀量分别为  $-17.64 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$  和  $-11.54 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。相对于裸地, 藓结皮和藻结皮影响下土壤风蚀量分别降低了 156.0% 和 136.6%, 即生



不同小写字母表示不同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )

图2 两类生物结皮影响下土壤风蚀量

Fig.2 Soil wind erosion under the influence of two types of biological soil crusts

表 2 监测期间风蚀、风积频率

Table 2 Wind erosion and wind accumulation frequency during monitoring

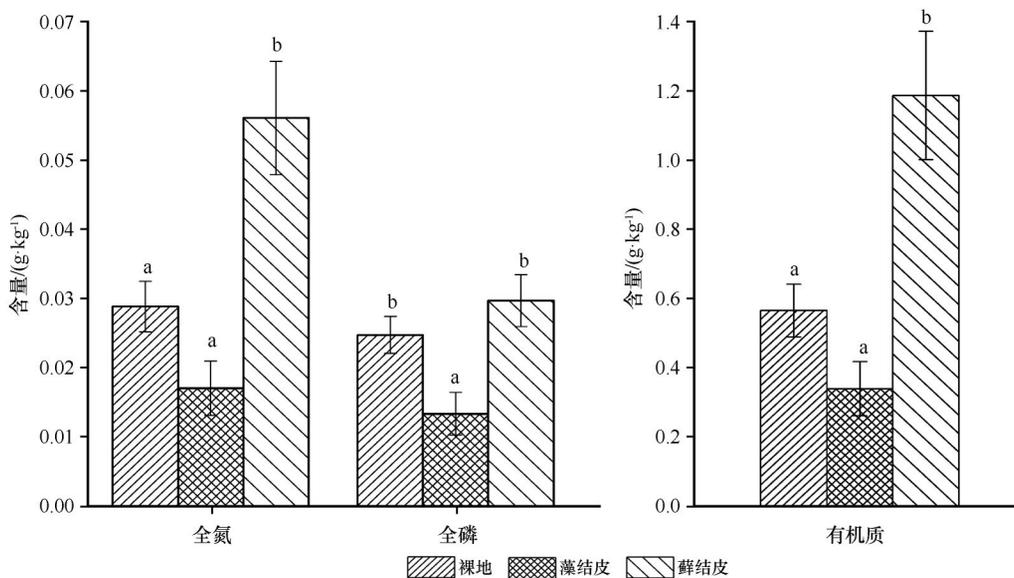
结皮类型	风蚀总量 / (t·hm <sup>-2</sup> )	风蚀频率 / %	风积频率 / %
裸地	31.52	72.7	18.2
藻结皮	-11.54	18.2	81.8
藓结皮	-17.64	18.2	72.7

风蚀或风积频率为风蚀或风积出现次数与观测总次数 (11 次) 的百分比。

藓结皮不但降低土壤风蚀量、保护沙面防止风力侵蚀, 而且还能拦截部分沙粒。

### 2.3 两类生物结皮对土壤养分含量的影响

藓结皮下土壤全氮和有机质含量与藻结皮、裸地差异显著 ( $P < 0.05$ ), 分别为藻结皮的 3.3 倍和 3.5 倍, 裸地的 1.9 倍和 2.1 倍 (图 3)。而藓结皮下土壤全磷含量仅与藻结皮差异显著 ( $P < 0.05$ ), 为藻结皮下全磷含量的 2 倍, 与裸地土壤全磷含量并无显著差异。藻结皮与裸地相比土壤全氮和有机质含量均无显著差异, 但全磷含量差异显著 ( $P < 0.05$ ), 藻结皮下伏土壤全磷含量相对于裸地不但没有提高反而降低了 46%, 究其原因还需进一步深入研究。



不同小写字母表示不同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )

图 3 两类结皮影响下土壤养分含量

Fig.3 Soil nutrient content under the influence of two types of crusts

### 2.4 两类生物结皮的多种生态功能综合评价

最优综合评价模型将被评价单位的技术水平的多指标数据变成一个数, 以便于进行比较<sup>[15]</sup>。表 3 显示, 与藻结皮和裸地相比, 藓结皮下土壤全氮、全磷、有机质、含水量等指标表现出非常好的优势, 其综合得分最高为 1.60; 藻结皮次之, 综合评分为

-0.64; 裸地相对于藻结皮其他指标均无显著差异, 风蚀指标表现最差, 综合得分最低为 -9.78。即生态功能综合得分藓结皮 > 藻结皮 > 裸地。由此可见, 在荒漠生态系统中, 相对于裸地, 藓结皮在保持水土和营养物质循环发挥的生态效益最大的, 藻结皮次之。

表 3 两类生物结皮生态功能综合评价

Table 3 Comprehensive evaluation of ecological functions of two types of biological soil crusts

结皮类型	全氮/(g·kg <sup>-1</sup> )	全磷/(g·kg <sup>-1</sup> )	有机质/(g·kg <sup>-1</sup> )	含水量/%	风蚀量/(t·hm <sup>-2</sup> )	综合得分/Y	优化排序
藓结皮	0.06±0.01	0.03±0.00	1.18±0.18	8.84±0.35	-17.64±4.67	1.60	1
藻结皮	0.02±0.00	0.01±0.00	0.34±0.08	6.57±0.30	-11.54±4.23	-0.64	2
裸地	0.03±0.00	0.02±0.00	0.56±0.07	6.07±0.29	31.52±6.66	-9.78	3

表中数据为平均值±标准误。

### 3 讨论

本研究中,藓、藻结皮下土壤含水量随着土层深度均呈现出先增大后减小的趋势,大致在30—50 cm土层达到最大值(图1)。这主要是由于发育良好的生物结皮可吸滞水分、降低降雨入渗,使得深层土壤水分含量较低<sup>[22]</sup>,而与生物结皮伴生的灌木,如沙蒿、沙柳、柠条锦鸡儿等的细根主要分布在0—40 cm的土层<sup>[23]</sup>,根系生长消耗水分使该深度范围内的土壤含水量降低,使得生物结皮下土壤含水量在30—50 cm层达到最高。本研究中藓结皮仅可提升距地表80 cm以上的土壤水分,而严重削弱下层土壤水分含量,致使土壤水分分布浅层化,这与杨永胜等<sup>[24]</sup>在毛乌素沙地人为干扰藓结皮后的土壤水分效应研究结果有相同之处,而本研究中藻结皮对土壤含水量高低并无明显影响。

生物结皮影响下土壤风蚀量为负值,即以风积为主。Belnap<sup>[25]</sup>和Williams等<sup>[26]</sup>发现,生物结皮中有机体的存在可显著增加地表粗糙度,一方面使风沙流在运动过程中受到生物结皮的摩擦阻力损耗能量,部分沙粒发生沉积现象,另一方面使沙粒起动需要更大的起动风速,而不宜发生风蚀现象。由此可见,生物结皮能显著削弱风力对土壤侵蚀的影响。本研究中藓和藻两种类型生物结皮影响下土壤风蚀量无显著差异( $P>0.05$ )。王雪芹等<sup>[27]</sup>风洞试验显示,未经扰动的不同类型生物结皮在25—30  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的风速下均不会发生沙粒起动和地表风蚀现象。可见,在一定的风速条件下,两类生物结皮在防止土壤风蚀方面发挥着同样的作用,不但可显著减小土壤累积风蚀量,而且还拦截阻滞沙粒,有显著的防风固沙作用。

两类结皮下土壤全氮、全磷、有机质含量均表现为藓结皮>藻结皮。这可能与以下几个原因有关:①不同类型生物结皮对地表粗糙度影响不同,藻结皮使地表光滑,而藓结皮可显著增加地表粗糙度,可阻滞较多细土壤颗粒,进而富集更多养分;②藻结皮形成后为土壤注入养分和水分,同时死亡的藻体又成为土壤有机物,为固氮微生物和其他异养微生物的生长提供碳源<sup>[28]</sup>,随后藓结皮出现,以藓为优势种、藻类、地衣混生的生物结皮又进一步富集养分;③影响生物结皮固氮的首要因素为水分<sup>[29]</sup>,而藓结皮特殊的形态特征(叶片具有特殊的毛状尖),可减小反射入射的光照,进而减少水分蒸

发,其次藓植物体垫状丛生可提高土壤毛细管的持水力,有利于保持结皮水分、减少蒸散作用<sup>[30]</sup>,故在相同环境条件下藓结皮可保存更多水分,从而其可富集更多氮素。

生态功能综合得分为藓结皮>藻结皮>裸地,原因主要是两类生物结皮的生物学特性不同,使二者在生态功能上存在差异。苔藓植物体垫状丛生可以提高土壤毛细管系统的持水力,从而减缓空气在藓结皮层表面的流动速度,降低土壤水分的蒸发量,提高上层土壤水分含量;其次苔藓植物具有浓密的假根,有助于将其植物体与土壤颗粒紧密连接。且埋入沙土中的植物体能进行分枝,从而起到降低风速固定沙面的作用<sup>[31]</sup>;除此以外,苔藓结皮以苔藓植物体密集丛生为特点,地上部分出现了茎叶分化,有一定的柔韧性,可显著增加地表粗糙度,拦蓄大气中的土粒,从而降低风蚀而富集更多的养分<sup>[32]</sup>。相对于藓结皮,藻体通常成束存在且被共同的胶鞘包裹,甚至有些胶鞘也相互缠绕,这种结构在极大程度上增强了藻丝的抗拉能力,另外,球形藻类所分泌的胞外多糖具有黏结作用,使得藻结皮在抵抗风蚀、水蚀和外力干扰中发挥着重要作用<sup>[33]</sup>,但由于发育程度较高的藻结皮会形成光滑致密的表面,较藓结皮粗糙度小,因此抗风蚀能力较弱;蓝藻中的某些丝状体种类具有异形胞,是一种能固氮的细胞,能将空气中游离的氮转化为可利用的化合态氮,同时能通过光合作用将空气中的 $\text{CO}_2$ 固定为碳水化合物<sup>[34]</sup>,但通常情况下苔藓结皮是藻结皮、地衣结皮演替的高级阶段,从而富集更多的土壤养分。即在荒漠生态系统中藓结皮在保持水土和营养物质循环方面的生态功能优于藻结皮,但本研究仅对少量指标进行了评价,不足以阐明二者之间的全部差异,后续需进一步深入研究。

### 4 结论

两类生物结皮下土壤含水量随着土层深度呈现出先增大后波动减小的趋势,藓结皮仅可提升距地表80 cm以上的土壤水分含量,而严重削弱下层土壤水分含量,藻结皮对土壤含水量高低并无明显影响。在一定的风速条件下,两类生物结皮在防止土壤风蚀方面发挥着同样的作用。两类生物结皮影响下土壤养分含量(全氮、全磷、有机质)均表现为藓结皮>藻结皮。由两类生物结皮生态功能综合评价结果可知,在荒漠生态系统中藓结皮在保持水

土和营养物质循环方面的生态功能优于藻结皮。

### 参考文献:

- [1] 黄永诚. 2000-2010年毛乌素沙地植被覆盖度和土地利用变化研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2014.
- [2] 雷金银, 吴发启, 马璠, 等. 毛乌素沙地土壤风蚀的气候因子分析[J]. 水土保持研究, 2007(2): 104-105.
- [3] Rodríguez-Caballero E, Castro A J, Chamizo S, et al. Ecosystem services provided by biocrusts: from ecosystem functions to social values[J]. *Journal of Arid Environments*, 2018, 159: 45-53.
- [4] 包艳丽, 刘左军. 生物土壤结皮的研究进展[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(8): 4667-4668.
- [5] 闫德仁, 薛英英, 赵春光. 沙漠生物结皮国内研究现状[J]. 内蒙古林业科技, 2007(3): 28-32.
- [6] 吴玉环, 高谦, 程国栋. 生物土壤结皮的生态功能[J]. 生态学杂志, 2002(4): 41-45.
- [7] 卜崇峰, 杨建振, 张兴昌. 毛乌素沙地生物结皮层藓类植物培育试验研究[J]. 中国沙漠, 2011, 31(4): 937-941.
- [8] 王雪芹, 张元明, 张伟民, 等. 生物结皮粗糙特征: 以古尔班通古特沙漠为例[J]. 生态学报, 2011, 31(14): 4153-4160.
- [9] Li B, Gao J, Wang X, et al. Effects of biological soil crusts on water infiltration and evaporation in Yanchi, Ningxia, Maowusu Desert, China [J]. *International Journal of Sediment Research*, 2016, 31(4): 311-323.
- [10] Li X R, Zhang P, Su Y G, et al. Carbon fixation by biological soil crusts following revegetation of sand dunes in arid desert regions of China: a four-year field study [J]. *Catena*, 2016, 31(4): 311-323.
- [11] West N E. Structure and function of microphytic soil crusts in wildland ecosystems of arid to semi-arid regions [J]. *Advances in Ecological Research*, 1990, 20: 179-223.
- [12] Eldridge D J, 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.
- [13] 戴黎聪, 柯浔, 曹莹芳, 等. 关于生态功能与管理的生物土壤结皮研究[J]. 草地学报, 2018, 26(1): 22-29.
- [14] 赵思金. 北方地区两种主要类型裸露坡面植被恢复及生态功能评价研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2008.
- [15] 熊席珍. 最优综合评价模型的原理[J]. 系统工程理论与实践, 1992(6): 74-77.
- [16] 焦彩霞. 榆阳区土地利用动态变化过程及驱动力研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2003.
- [17] Li X R, Zhu M. Micro-geomorphology determines community structure of biological soil crusts at small scales [J]. *Earth Surface Processes & Landforms*, 2010, 35(8): 932-940.
- [18] 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.
- [19] 吴玉环, 程国栋, 高谦. 苔藓植物的生态功能及在植被恢复与重建中的作用[J]. 中国沙漠, 2003, 23(3): 9-14.
- [20] 李新凯. 毛乌素沙地生物结皮的空间分布及多种生态功能研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2018.
- [21] 严鸿和, 陈玉祥, 许昭明, 等. 专家评分机理与最优综合评价模型[J]. 系统工程理论与实践, 1989(2): 19-23.
- [22] 熊好琴, 段金跃, 王妍, 等. 毛乌素沙地生物结皮对水分入渗和再分配的影响[J]. 水土保持研究, 2011, 18(4): 82-87.
- [23] 何凌仙子. 青海共和盆地典型固沙植物根系特征及功能研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2018.
- [24] 杨永胜, 邱永利, 周小泉, 等. 毛乌素沙地人为干扰苔藓结皮的土壤水分和风蚀效应[J]. 水土保持通报, 2015, 35(1): 20-24.
- [25] Belnap J. The potential roles of biological soil crusts in dryland hydrologic cycles [J]. *Hydrological Processes*, 2010, 20(15): 3159-3178.
- [26] Williams A J, Buck B J, Beyene M A. Biological soil crusts in the Mojave Desert, USA: micromorphology and pedogenesis [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2012, 76(5): 1685-1695.
- [27] 王雪芹, 张元明, 张伟民, 等. 古尔班通古特沙漠生物结皮对地表风蚀作用影响的风洞实验[J]. 冰川冻土, 2004(5): 632-638.
- [28] 张元明, 王雪芹. 荒漠地表生物土壤结皮形成与演替特征概述[J]. 生态学报, 2010, 30(16): 4484-4492.
- [29] 张鹏, 李新荣, 胡宜刚, 等. 湿润持续时间对生物土壤结皮固氮活性的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(20): 6116-6124.
- [30] 何明珠, 李新荣, 张景光, 等. 土壤生物结皮蒸散特征研究[J]. 中国沙漠, 2006, 26(2): 159-164.
- [31] 张元明, 王雪芹. 荒漠地表生物土壤结皮形成与演替特征概述[J]. 生态学报, 2010, 30(16): 4484-4492.
- [32] 王雪芹, 张元明, 张伟民, 等. 生物结皮粗糙特征: 以古尔班通古特沙漠为例[J]. 生态学报, 2011, 31(14): 4153-4160.
- [33] 张丙昌, 张元明, 赵建成. 古尔班通古特沙漠生物结皮藻类的组成和生态分布研究[J]. 西北植物学报, 2005(10): 2048-2055.
- [34] 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(6): 886-890.

## Ecological functions comparison of moss crust and algae crust in the Mu Us Sand Land

Li Yahong, Bu Chongfeng, Guo Qi, Wei Yingxin

(*Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University / Chinese Academy of Sciences / Ministry of Water Resources of People's Republic of China*)

**Abstract:** Biological soil crust plays an important ecological function in desert ecosystems, but different types of biological soil crust have great differences in ecological functions due to their different compositions and proportions of organisms. This article is intended for the development of stable moss and algae crust in Mu Us Sandy Land, through field survey monitoring and indoor index determination, in-depth analysis of the influence scale of two types of biological crust on soil water content, wind erosion, nutrient content, and establishing a comprehensive evaluation model quantitatively contrasts the ecological function differences between the two. The results show that: (1) the soil water content of the two types of the biological soil crust increases first and then decreases fluctuating with the increase of soil depth. There is a significant ( $P < 0.05$ ) difference in soil water content between the two biological soil crusts, which indicates that the soil water content of moss crust is greater than that of algae crust in the depth range of 0–80 cm, and the opposite is true in the depth range between 90–100 cm; (2) compared with bare land, the soil wind erosion under the influence of moss crust and algae crust decreased by 156.0% and 136.6%, respectively, but there is no significant difference between them; (3) the soil nutrient content under the influence of the two types of crust is significantly different ( $P < 0.05$ ), showing that the total nitrogen, total phosphorus, and organic matter content of the soil under the moss crust are 3.3 times, 3.5 times, and 2 times of the algal crust, respectively; (4) the comprehensive scoring order of ecological functions of different types of biological crust is: moss crust > algal crust > bare land (1.60 > -0.64 > -9.78). This study confirmed the differences in the ecological functions of different types of biological soil crust in desert ecosystems, and their contribution to maintaining the circulation of soil, water and nutrients, highlighting the accurate classification of their types or compositions in exploring the importance of biological soil crust.

**Key words:** biological soil crusts; soil water content; soil wind erosion; soil nutrients; comprehensive evaluation model