

库布齐沙地三年生人工藻结皮发育特征及微生物分布

饶本强^{1,2,3} 王伟波^{1,3} 兰书斌^{1,3} 李敦海¹ 胡春香¹ 刘永定¹

(1. 中国科学院水生生物研究所, 淡水生态与生物技术国家重点实验室, 武汉 430072

2. 信阳师范学院生命科学院, 信阳 464000 3. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 对库布齐沙地 4 种三年生不同立地条件下人工藻结皮的发育特征和微生物分布进行研究, 结果表明: (1) 将荒漠蓝藻接种到沙面, 形成的人工藻结皮经过 3 年的生长和发育, 结皮的平均厚度达到 2.23—5.36 mm, 呈现深黑色和灰绿色, 结皮盖度大于 70%。其中沙柳 (*Salix cheilophila* Schneid.)—羊草 (*Aelurololpidium chinensis*)—藻 (algae) 结皮 (SAA) 发育最好、生物量最高, 且演替成苔藓结皮。在人工藻结皮区普遍出现沙生植物的拓殖和大量生长, 如沙米 (*Agriophyllum squarrosum* Bieb.), 披碱草 (*Elymus dahuricus* Turcz.), 猪毛菜 (*Salsola collina* Pall.) 等, 植被盖度达 60%—90%。4 种不同立地条件下人工藻结皮中藻类的组成都比较单一, 在藻类的种类数量上变化并不明显, 仍然以具鞘微鞘藻 (*Microcoleus vaginatus* Gom.) 占绝对优势, 其次是爪哇伪枝藻 (*Scytonema javanicum* (Kütz.) Borm. et F. lkh.), 且不同的藻种在结皮中分布的位置不同; 人工藻结皮具有较高的抗压强度, 抗压强度普遍达到 35—70 N/cm²。丝状蓝藻通过紧密和高强度的机械束缚作用以及藻体胞外分泌物对沙粒的黏结作用, 对维持藻结皮的强度起着至关重要的作用。对人工藻结皮的超微结构研究发现, 经过 3 年的野外生长和发育, 藻结皮沙粒土壤中含有丰富的藻丝体。可以观察到大量藻丝体缠绕或黏结着沙粒, 从而实现人工藻结皮的胶结过程; (2) 微生物总数变化趋势变为: 沙柳 (*S. cheilophila*)—羊草 (*A. chinensis*)—藻 (algae) 结皮 (SAA) > 草方格 (grass pane)—藻 (algae) 结皮 (GA) > 沙米 (*A. squarrosum*)—藻 (algae) 结皮 (AA) > 流沙 (shifting sand)—藻 (algae) 结皮 (SA) > 流沙 (CK)。人工藻结皮的生物量变化趋势与其微生物总数的变化趋势相一致; 在微生物各主要类群中, 细菌数量、放线菌数量和真菌数量在不同人工藻结皮中的变化趋势同微生物总数的变化趋势相同; 在 4 种人工藻结皮中, 细菌所占微生物总数的比例均明显高于放线菌和真菌。结皮中细菌所占微生物总数的百分比呈依次增加的趋势, 放线菌所占微生物总数的比例呈递减趋势, 真菌占微生物总数的比例非常小, 且比例差别不大。

关键词: 人工藻结皮; 荒漠蓝藻; 发育特征; 微生物分布; 库布齐沙地

中图分类号: X171.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3207(2009)05-0937-08

20 世纪 80 年代以来, 随着沙漠化威胁的日益加重, 生物结皮在荒漠生态系统中的作用越发突出。生物结皮在荒漠土壤中的保水、改良、防风固沙及全球气候变化等方面所具有的生态功能引起了生态学家的普遍重视, 并渐渐成为荒漠地区生态研究的热点^[1-8]。荒漠地表生物结皮是土壤微生物、藻类、地衣、苔藓植物类群与土壤形成的有机复合体, 其种类组成复杂, 抗逆性强, 生理生态过程独特, 使土壤表面在物理、化学、生物学特性上明显不同于松散沙土, 能增强周围维管植物的养分循环, 促进种子库的建立, 固定大气中的氮素, 增加土壤有机质^[9-11]。

当前国内外对于生物结皮的研究热点主要集中在: 生物结皮的形成、发育及演替机制^[12-15]; 生物结皮中 C、N 等物质的转化^[16-18]和生物结皮的干扰及其生态修复等方面^[19-21]。刘永定、胡春香等对我国西北部生物结皮中藻类的种类组成、分布、演替规律及其形成机理、精细结构以及利用荒漠藻类进行人工固沙结皮等方面进行了较深入的研究^[22-26]。

生物结皮土壤微生物对荒漠地区极端环境具有广泛的生态适应性, 许多耐旱、耐高温的微生物种类可通过生理代谢活动改变沙土表面理化性质, 促进土壤形成及植物营养转化, 利于植物生长, 为流动沙

收稿日期: 2007-11-20; 修订日期: 2008-10-23

基金项目: 淡水生态与生物技术国家重点实验室资助项目 (2008FBZ21); 武汉市科技局与内蒙古自治区发改委重大科技产业化专项 (200720112031); 信阳师范学院青年骨干教师资助计划资助

作者简介: 饶本强 (1974—), 男, 汉族, 河南信阳人; 博士研究生; 主要从事藻类环境生物学研究。E-mail: rbqx@163.com

通讯作者: 刘永定, E-mail: liuyd@ihb.ac.cn

丘向固定、半固定沙丘转化奠定基础^[27, 28]。目前,国内关于生物结皮的发育特征及其土壤微生物的研究已有报道^[15, 29],对于野外条件下人工藻结皮的发育状况及其微生物分布的研究则较少。人工藻结皮经过3年的野外生长,它们呈现怎样的演替状态?其发育特征的差异性如何?人工藻结皮中的土壤微生物数量和组成变化如何?以及人工藻结皮治理沙漠的可行性怎样?这些问题的解决有利于人们进一步了解野外人工藻结皮的形成、发育和固沙机理以及探索荒漠化治理的新途径。本文对库布齐沙地不同立地条件下的人工藻结皮的发育特征及其土壤微生物的数量、组成变化进行研究,探讨了人工藻结皮的生物量、演替状况、藻类组成变化、抗压强度和微观结构特征以及结皮中微生物的分布情况。

1 研究区域概况

库布齐沙地位于内蒙古鄂尔多斯高原的北缘,地处北纬 $40^{\circ}21'30''$ — $40^{\circ}22'30''$,东经 $109^{\circ}50'30''$ — $109^{\circ}51'50''$,属中温带干旱、半干旱气候区,具有明显的大陆性季风气候特征。年平均气温 6.1°C ,年极端最高气温 40.2°C ,极端最低气温 -34.5°C 。全年日照时数为 3142h , $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的年平均积温为 3197.4°C 。年平均风速 3.3 m/s ,最大瞬时风速 30 m/s ,8级以上大风日数27d左右,扬沙天数58d左右。年平均降水量 $240\text{--}306\text{ mm}$,且多集中在七、八、九3个月。年平均蒸发量 2448 mm ,是降水量的8倍。相对湿度55%,无霜期130—140d。沙丘平均相对高度5m,沙丘密度0.35。植被盖度为30%—60%。天然植被以沙生植物为主,主要有沙米(*A. squarrosus*)、披碱草(*E. dahuricus*)、猪毛菜(*S. collina*)、苦豆子(*Sophora alpeaioides* L.)、沙打旺(*Asragalus adsurgens* Pall.)、沙蒿(*Artemisia desertorum* Spreng.)和羊草(*A. chinensis*)等。人工植被有沙柳(*S. cheilophila*)、怪柳(*Tamarix taklimakanensis* M.T. Liu)和柠条(*Caragana microphylla* Paulam.)等。土壤类型主要为风沙土和盐化草甸土,立地类型主要有流动沙丘、半固定、固定沙丘和丘间地。

2 研究方法

2.1 取样地点与方法

采样时间为2006年9月底。样品采集点位于内蒙古林科院库布齐沙漠综合实验研究站内。分别在人工藻结皮分布的实验样地进行取样。人工藻结皮主要分布在流动沙丘:流沙-藻结皮(SA)、草方

格-藻结皮(GA);半固定沙丘:沙米-藻结皮(AA)和丘间地:沙柳-羊草-藻结皮(SAA)。采集流动沙丘表层0—5cm深度的流沙作对照(CK),用环刀法从每个样地中按S线型随机采集10—15个结皮样,将同类型的人工藻结皮去除杂质后混在一起,野外密封后迅速运回实验室进行测定。采集的人工藻结皮均为3年生的人工藻结皮。同时在野外进行人工藻结皮的生态调查,调查样方大小为 $100\text{ cm} \times 100\text{ cm}$,记录人工藻结皮的颜色、形状、厚度、演替阶段等内容。结皮盖度和植被盖度以样方法测定^[30]。

2.2 实验方法

2.2.1 荒漠藻的工程化培养与野外接种

工程化培养 藻种为具鞘微鞘藻(*M. vaginatus*)和爪哇伪枝藻(*S. javanicum*),培养基分别为BG-11和BG-11₀。先在不同容量的三角瓶内进行藻种培养,培养条件为 $(25 \pm 1)^{\circ}\text{C}$ 通气培养,光强 $40\text{ }\mu\text{E}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 连续光照。将培养10—14d的藻种转入光生物反应器(200L)内,在温度 $(25 \pm 1)^{\circ}\text{C}$ 、光强 $60\text{ }\mu\text{E}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 条件下继续培养,5—10d后转入温室培养池进行大规模培养。将培养25d(对数生长期之后)的具鞘微鞘藻和爪哇伪枝藻藻液收集后备用。

野外接种 于2003年8月至9月进行野外接种实验。分别选择流动沙丘、半固定沙丘和丘间地设置实验样地。在流动沙丘的顶部划出2块 $45\text{ m} \times 31\text{ m}$ 的样方,在其中的1块样方内扎成 $0.5\text{ m} \times 0.5\text{ m}$ 的草方格;分别在生长沙米的半固定沙丘顶部和生长沙柳-羊草的丘间地分别划出1块 $15\text{ m} \times 7\text{ m}$ 和1块 $13\text{ m} \times 7\text{ m}$ 的样方。接种时,将*M. vaginatus*和*S. javanicum*的藻液按生物量4:1的比例均匀地喷洒到每个样方沙地的表面。接种后的10—15d内,每天定时定量向接藻后的样方撒水,以保证藻种在沙面上能够存活和生长。

2.2.2 人工藻结皮的生物量与抗压强度测定

生物量测定 人工藻结皮的生物量用叶绿素a含量表示。取风干后的各种藻结皮样品,定量称取2.00g将结皮研磨后加入10mL N,N-二甲基甲酰胺(DMF),振荡,然后在冰箱 4°C 下黑暗静置抽提12h,4000 r/min离心10min后取上清,于分光光度计(Ultrospec 3000, Pharmacia Biotech, Britain.)664, 647, 625, 603 nm测定吸光度值,以公式 $C = 12.92 \times A_{664} - 2.16 \times A_{647} + 1.44 \times A_{625} - 4.91 \times A_{603}$ ^[31]计算每克干重的结皮样品所含叶绿素a的含量,表示为 $\text{mg Chl } a/\text{g dw} \cdot \text{soil}$

抗压强度测定 在自然干燥状态下于野外采集人工藻结皮样品,采用土壤硬度计(TE-3型土壤硬度计,南京土壤仪器厂)对结皮样品进行测定。土壤硬度计接触面积为1 cm²,测深200 mm。测定后通过土壤硬度计的压力标准曲线计算总压力,抗压强度=总压力/接触面积,抗压强度表示为kN/cm²。测定样品数为10个,取平均值和标准差。

2.2.3 人工藻结皮的藻类组成及微观结构观察

将采集的人工藻结皮样品经过初步培养,在 Nikon Eclipse E600显微镜下观察结皮中藻类的种类组成和分布情况,并将结皮样品黏贴于电子显微镜样品台上,喷金镀膜后用LEO1430VP型扫描电子显微镜进行超微结构观察,照相。

2.2.4 人工藻结皮中土壤微生物的数量测定

分别采用牛肉膏蛋白胨培养基、高氏iv号培养基和马丁氏培养基培养细菌、放线菌和真菌,菌种的分离和计数采用稀释平板法^[32]。将人工藻结皮样品在无菌条件下研磨,用无菌水稀释成不同浓度梯度后倒平板。将涂好平板的培养皿倒置在28℃的培养箱中,细菌培养2—3d,放线菌和真菌培养3—5d。

本文所有数据均重复3次以上,取平均值。

3 结果与分析

3.1 不同立地条件下人工藻结皮的发育特征

3.1.1 人工藻结皮发育的基本特征

在试验区接入藻种3年后,经调查研究发现(表1),形成的人工藻结皮发育良好。结皮平均厚度达到2.23—5.36 mm,其中沙柳-羊草-藻结皮(SAA)厚度达5.36 mm。人工藻结皮的颜色为黑绿

色或灰黑色,结皮表面呈尖塔状、平坦状和不规则状。人工藻结皮盖度均大于70%,其中沙柳-羊草-藻结皮盖度高度95%以上。实验结果表明,沙柳-羊草-藻结皮的生物量最高,明显高于直接接种在流动沙丘上的流沙-藻结皮(SA),其次为草方格-藻结皮(GA),其生物量达到12.72 mg Chl a/g dw。丘间地沙柳-羊草丛下出现了发育良好的苔藓结皮,表明人工藻结皮经过发育、演替到苔藓结皮过程并不需要很长时间,当环境条件适宜时,其演替速度相当迅速。沙丘顶部草方格中的人工藻结皮发育比较充分,原因在于设置草方格后沙面抗风蚀能力得到提高,同时有利于沙地凝结水的形成,而沙地凝结水对于生物结皮的生长和发育起到重要作用。丘间地沙柳-羊草-藻结皮发育程度最好并出现苔藓结皮的演替,原因可能是沙柳等高等植物的生长为藻类结皮的生长发育提供荫蔽作用,同时减少了风力和径流的侵蚀。此外在降雨融雪过程中产生的临时性积水,为苔藓等孢子植物的有性繁殖与营养生长创造了良好的生境条件^[29,30]。调查还发现,人工藻结皮区普遍出现了沙生植物的拓殖和大量生长,如沙米(*A. squarrosus*)、披碱草(*E. dahuricus*)、猪毛菜(*S. collina*)、羊草(*A. chinensis*)、苦豆子(*S. alpestris*)和沙蒿(*A. desertorum*)等,植被盖度达60%—90%。这是由于人工藻结皮的快速发育及演替,极大改善了沙漠土壤表层的水分和养分状况,为其他植物类群的大面积定居和繁衍创造了良好的基础条件。当植物的积累连续不断地在沙土表面形成有机腐殖质层,草本和木本植物侵入和拓殖的机会大大增加^[33]。

表 1 不同立地条件下人工藻结皮的发育特征

Tab. 1 Development characteristics of artificial algal crusts at different locations

立地条件	结皮颜色	结皮形态	结皮厚度	结皮盖度	植被盖度	演替阶段
Site types	Color	Form	Thickness (mm)	Crust coverage (%)	Vegetation coverage (%)	Succession
CK	N	N	N	0	0	N
SA	灰黑色	不规则状	2.23	> 70	60—70	藻结皮
GA	黑褐色	尖塔状	3.57	> 90	60—90	藻结皮为主
SAA	黑绿色	光滑平坦状	5.36	> 95	70—90	苔藓结皮为主
AA	灰黑色	不规则状	2.72	> 75	60—75	藻结皮

注: CK: 流沙; SA: 流沙-藻结皮; GA: 草方格-藻结皮; SAA: 沙柳-羊草-藻结皮; AA: 沙米-藻结皮; N: 无结皮

Note: CK: shifting sand; SA: shifting sand-algal crust; GA: grass pane-algal crust; SAA: *Salix cheilophila*-*Aneurolepidium chinensis*-algal crust; AA: *Agropyllum squarrosus*-algal crust; N: no crust

3.1.2 人工藻结皮的藻类组成与分布

本研究发现,经过3年的野外生长和发育,4种不同立地条件下的人工藻结皮中藻类的组成都比较

单一,在藻类的种类数量上变化并不明显。它们仍然都以具鞘微鞘藻占绝对优势,其次是爪哇伪枝藻。此外,还发现少量的席藻(*Phormidium tenue* (Me-

negh.) Gam.)、念珠藻 (*Nostoc* sp.)、集球藻 (*Patellomellococcus minutus* (Ktz.) Chod.) 等藻类。这表明通过人工接种的大量的具鞘微鞘藻作为先锋优势藻类,一方面它的快速生长使沙面迅速得到初步固定,并为其他外来藻类的生存提供了良好的定居条件,另一方面由于它的绝对优势而限制了其他外来藻类的入侵,使具鞘微鞘藻在后来的生存竞争中一直保持绝对优势,这又在某种程度上降低了人工藻结皮初级演替过程中藻类的多样性。研究还发现,爪哇伪枝藻主要分布在藻结皮结皮层的最外层,原因可能是爪哇伪枝藻含有丰富的伪枝藻素 (Scytonemin),该色素对于保护藻结皮不受紫外光的辐射具有较好的屏蔽作用。具鞘微鞘藻主要分布在藻结皮结皮层的中上层,由于其具有丰富的藻丝体并能够分泌较多的胞外聚合物,对于沙粒的缠绕、束缚和捆绑起着重要作用。其他的结皮蓝藻如席藻、念珠藻以及部分结皮绿藻如集球藻等则分布在藻结皮的中下部分层。

3.1.3 人工藻结皮的抗压强度特征

本研究表明,经过3年的野外生长,不同立地条件下人工藻结皮的抗压强度达到 $35\text{--}70\text{ N/cm}^2$ 。由于人工藻结皮主要采用陆生蓝藻具鞘微鞘藻为优势藻和少量的爪哇伪枝藻进行人工接种形成的,这些丝状藻体通过紧密和高强度的机械束缚作用以及藻体胞外分泌物对沙粒的黏结作用,对维持藻结皮的结构起着至关重要的作用,表现为藻结皮的抗压强度比流沙表面显著增强。当沙面接人藻种后,藻类大量的丝状体同沙粒颗粒结合,所分泌的有机凝胶体和多聚糖将松散的沙粒黏结在一起而形成致密的结构,从而增强藻结皮对沙粒的固结作用。研究表明,藻结皮表面覆盖着较多的来自于大气降尘的细物质,这些物质填充在表面沙粒间的空隙,并在藻类分泌的胞外多糖的黏结作用下,形成一层致密的无机层而使得结皮表面更加致密和坚硬,从而进一步增强了藻结皮的抗压强度^[15]。实验研究发现(图1),人工藻结皮的生物量与结皮的抗压强度之间具有一定的相关性。草方格-藻结皮的抗压强度最大,为 69.39 N/cm^2 ,其次为沙柳-羊草-藻结皮,抗压强度为 65.54 N/cm^2 。但两者之间的抗压强度并无显著性差异(图1)。本研究发现,经过3年生长发育至藻-苔藓阶段的结皮具有最高的生物量,但其抗压强度并不是最高,原因可能是藓类植物假根的大量出现削减了丝状蓝藻对沙粒的捆绑或束缚作用而导致结皮抗压强度的下降。有研究发现,在沙坡头地区1年生的人工藻结皮抗压强度 ($0.65\text{--}8.54\text{ kg/}$

cm^2)有时超过了42年生的藓类/地衣结皮的抗压强度 ($3.98\text{--}13.97\text{ kg/cm}^2$)^[14]。这说明在某些条件下,发育的人工藻结皮的抗压强度有可能超过苔藓结皮的抗压强度。研究表明,藓类在藻结皮强度的维系中只起着一定的促进作用,它们的功能很可能主要是在结皮土壤结构的后期改良和理化性质的改善等方面^[14]。影响藻结皮强度的因素可能有多个方面,如藻种、藻种组成、生物量、藻类的分布位置、有机质、土壤质地和结皮厚度等。人工藻结皮的无机质层及其早期阶段的有机质层可能在维系藻结皮的抗压强度中起着更重要的作用^[14]。

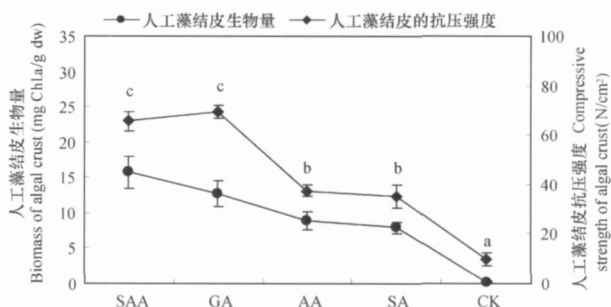


图1 不同立地条件下人工藻结皮的生物量与其抗压强度

Fig. 1 The biomass and compressive strength of artificial algal crusts at different locations

图中的字母 a b c 表示对不同立地条件人工藻结皮抗压强度进行 One-way ANOVA 分析中的 LSD 差异性比较

The letters a b c denoted LSD difference comparison according to One-way ANOVA between compressive strength of artificial algal crusts at different locations

3.1.4 人工藻结皮的超微结构特征

通过对人工藻结皮的超微结构进行研究发现,经过3年的野外生长和发育,藻结皮沙粒土壤中含有丰富的藻丝体。从图中可以观察到大量藻丝体缠绕在较大的沙粒上并与沙粒彼此交错相连,同时丝状藻体亦能黏结粒径较小的沙粒,从而对沙粒起到很好的黏结和“捆绑”作用(图2 A、B、D、E、F)。实验结果表明,随着野外接种的具鞘微鞘藻的大量生长,沙粒间由于丝状藻类紧密和高强度的机械束缚作用以及藻体胞外分泌物对沙粒的黏结作用,加之表面致密的无机层的存在,从而形成了具有一定抗外力干扰(如风蚀和水蚀)能力的人工藻结皮。研究还发现,由于藓类植物的假根深入到沙粒中,可能降低了丝状体对沙粒的黏结作用,表现为藻结皮结构的致密程度下降,结皮抗压强度在一定程度上的降低(图2 C)。藻结皮能够固沙和具有抗蚀能力的一个重要机制就是结皮的胶结问题,Schulten认为

既存在藻丝的机械束缚作用, 也有胞外聚合物的黏结作用^[34]。我们认为, 人工藻结皮之所以能够在野外条件下短期内形成, 最主要的原因还是在于人工接种的大量丝状蓝藻通过快速生长因而能够在较短的时间内完成对沙粒的机械束缚作用和黏结作用, 从而实现人工藻结皮的胶结过程。

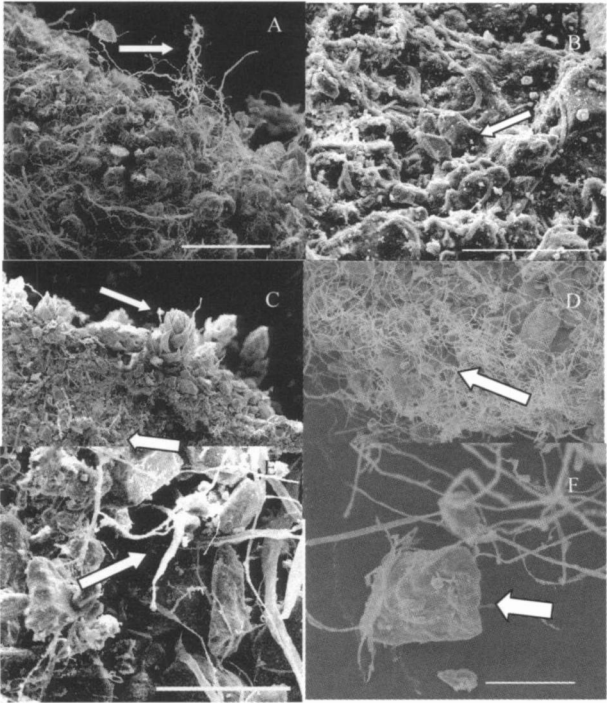


图 2 三年生不同立地条件下发育的人工藻结皮的超微形态结构
Fig 2 Ultra-microstructures of 3-year-old artificial algal crusts at different stations

A. 人工藻结皮的横截面, 箭头示丰富的藻丝体 (scale bar= 500.0 μm); B. 人工藻结皮的上表面, 箭头示丰富的藻丝与沙粒的黏结 (scale bar= 200.0 μm); C. 人工藻苔藓结皮的横截面, 细箭头示苔藓植物, 粗箭头示藻丝 (scale bar= 1.0 mm); D. 人工藻苔藓结皮的下表面, 箭头示丰富的藻丝 (scale bar= 500.0 μm); E. 藻丝对大沙粒的缠绕 (scale bar= 200.0 μm); F. 藻丝对沙粒的“捆绑”作用 (scale bar= 100.0 μm)

A. Cross section of man-made algal crust the arrow denoted rich algal filaments (scale bar= 500.0 μm); B. Upper surface of man-made algal crust the arrow indicated the linkage between algal filaments and sand particles (scale bar= 200.0 μm); C. Cross section of Moss-algal crust the thin arrow denoted moss plants and the thick arrow indicated algal filaments (scale bar= 1.0 mm); D. Below surface of moss-algal crust the arrow denoted abundant algal filaments (scale bar= 500.0 μm); E. Intertwist role of algal filaments to big sand particles (scale bar= 200.0 μm); F. Binding role of algal filaments to sand particles (scale bar= 100.0 μm)

3.2 不同立地条件下人工藻结皮的微生物分布

3.2.1 结皮微生物总数的变化

研究结果表明, 微生物总数变化趋势表现为: 沙

柳-羊草-藻结皮 (SAA) > 草方格-藻结皮 (GA) > 沙米-藻结皮 (AA) > 流沙-藻结皮 (SA) > 流沙 (CK) (图 3)。在丘间地的沙柳-羊草-藻结皮 (SAA) 微生物总数达到最高, 是流沙中微生物总数的 1.87 倍。实验结果表明, 在流动沙丘顶部设置草方格后, 其人工藻结皮的微生物总数仅次于丘间地沙柳-羊草-藻结皮中的微生物总数, 达到流沙的 1.45 倍。不同立地条件下人工藻结皮中微生物总数之所以呈现以上的变化特征, 这与不同人工藻结皮的发育程度以及不同人工藻结皮中的有机质含量和含水量密切相关。人工藻结皮的发育为微生物的生长和繁殖创造了良好的条件。沙面接入藻种后, 藻类能通过光合作用制造碳水化合物, 有些藻类还能固定大气中的氮素, 增加土壤有机质的含量, 从而带动土壤异养微生物的生长。研究结果还发现 (图 4), 人工藻结皮的生物量变化趋势与其微生物总数的变化趋势相同, 即随着人工藻结皮生物量的增加, 其微生物总数也随之增加, 二者之间呈显著性相关, 其相关系数为 $r=0.88 (P<0.05)$ 。

本研究表明, 接种到沙柳-羊草丛下和草方格中的人工藻结皮其微生物总数明显比直接接种在流动沙丘上的人工藻结皮微生物总数要高。究其原因, 可能是设置草方格后, 其抗风蚀能力和积累临时性水分的能力明显提高; 而在低缓的丘间地沙柳-羊草丛下, 发育良好的人工藻结皮及其苔藓结皮和维管植物一起有效固定了丘间地的沙层, 使得丘间地微环境较为稳定, 不易受到风蚀干扰, 土壤生产力提高, 养分得到大量积累, 因而结皮层中的微生物总数达到最高。研究表明, 在生物结皮发育微弱的流动、

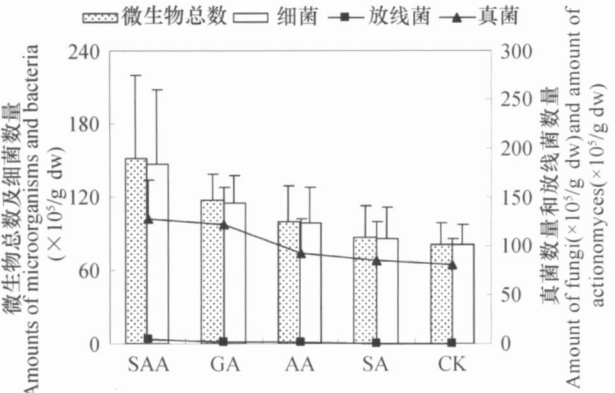


图 3 不同立地条件下人工藻结皮的土壤微生物总数与主要类群的数量分布

Fig 3 Amount distributions of main groups and the total number of soil microorganism within artificial algal crusts at different locations

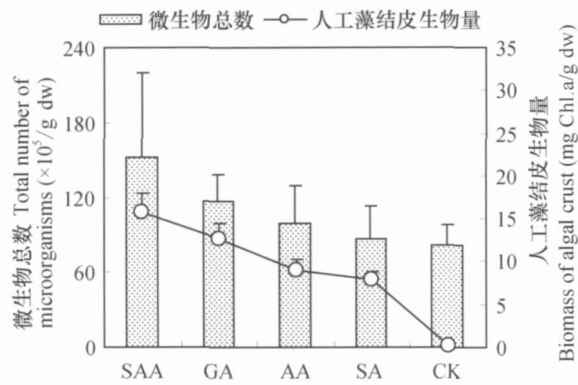


图 4 不同立地条件下人工藻结皮的生物量与其土壤微生物总数的关系

Fig. 4 Relationship between biomass and the total number of soil microorganism within artificial algal crusts at different locations

半固定沙丘的风沙土表层, 有机质含量相对较低, 该部位的生物结皮不能很好地固结沙层, 使得沙面处于流动半流动状态, 沙面易受风力搬动, 此处的土壤微生物一方面易受风蚀等外界因素干扰, 另一方面又缺乏充足的养分供其生长, 因而微生物总数较少^[29, 30]。

3.2.2 结皮微生物主要类群的数量变化

实验结果表明, 细菌数量在不同人工藻结皮中的变化趋势为: 沙柳-羊草-藻结皮 (SAA) > 草方格-藻结皮 (GA) > 沙米-藻结皮 (AA) > 流沙-藻结皮 (SA) > 流沙 (CK) (图 3)。细菌数量的变化与结皮层中微生物总数的变化相一致。其中, 在沙柳-羊草-藻结皮中细菌的数量最多, 是流沙中细菌数量的 1.82 倍。实验结果还表明, 在 4 种人工藻结皮中, 放线菌数量的变化同细菌数量变化的趋势相同。但在沙柳-羊草-藻结皮中的放线菌数量是流沙中放线菌数量的 10.34 倍, 高于相应的细菌数量比 1.82 倍, 表明流沙接种藻形成人工藻结皮后, 放线菌的数量得到大量增加。真菌数量在不同人工藻结皮中的变化趋势表现为: 沙柳-羊草-藻结皮 (SAA) > 草方格-藻结皮 (GA) > 沙米-藻结皮 (AA) ≥ 流沙-藻结皮 (SA) ≥ 流沙 (CK) (图 3)。丘间地的人工藻结皮的真菌数量仍然是最多的, 是流沙的 1.58 倍, 而仅为草方格-藻结皮的 1.05 倍。沙米-藻结皮和流沙-藻结皮中的真菌数量分别为流沙的 1.14 倍和 1.04 倍。实验表明, 人工藻结皮中真菌数量远小于细菌和放线菌数量, 但比流沙中真菌数量增加不多。原因可能是沙面接种的藻类对真菌的生长和繁殖有一定的制约作用。

3.2.3 结皮微生物主要类群的组成变化

4 种人工藻结皮中, 细菌所占微生物总数的比

例均明显高于放线菌和真菌。结皮中细菌所占微生物总数的百分比呈依次增加的趋势。其中沙柳-羊草-藻结皮的细菌比例为 96.81%, 但低于流沙中的细菌比例 99.42%。放线菌所占微生物总数的比例远小于细菌所占比例, 其中在沙柳-羊草-藻结皮中的放线菌比例仅为 3.20%, 但 4 种人工藻结皮中的放线菌所占微生物总数的比例呈递减趋势。真菌在 4 种人工藻结皮微生物总数比例非常小, 比例仅为 0.008%—0.001%, 且比例差别不大 (图 5)。

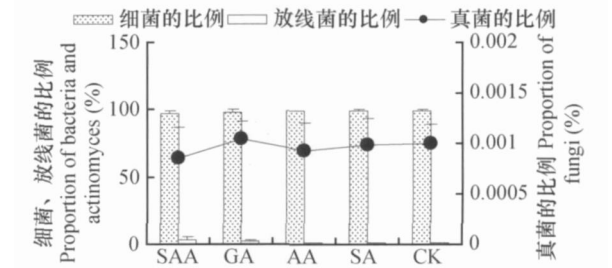


图 5 不同立地条件人工藻结皮中土壤微生物主要类群的组成变化

Fig. 5 Composition changes of main groups of soil microorganism within artificial algal crusts at different locations

4 结 语

从本研究中可以看出, 利用人工藻结皮防沙、治沙具有较好的可行性。人工藻结皮的形成及发育, 能够推动流动沙丘向半固定沙丘和固定沙丘的转化, 促进沙生植物的拓殖和土壤微生物的繁殖, 较好地改善了风沙土的结构、理化特性和营养状况。一方面, 有机质的积累、微生物的侵入, 使土壤基质中养分的可利用性进一步提高。当有机层达到足够厚度, 草本和木本植物便可侵入, 使得沙丘的植物覆盖率, 植物种类和生产力均有所提高。另一方面, 土壤微生物的分布和活跃能够改善土壤的营养状况, 增加土壤肥力, 在生长过程中向体外分泌代谢产物, 从而进一步促进人工藻结皮的发育; 同时高等植物可以减低风速、减弱风蚀以及庇荫的作用为藻类结皮的早期发育也创造了良好的条件。它们之间体现出互相利用、互相促进的作用。

参考文献:

[1] Taro Uchida, Nobuhito Ohte, Akitsu Kinota, *et al.* Sediment yield on a devastated hill in southern China: effects of microbial crust on surface erosion process [J]. *Geomorphology*, 2000, 32: 129—145

[2] Harper K T, Belnap J. The influence of biological soil crusts on

- mineral uptake by associated vascular plants [J]. *Journal of Arid Environments*, 2001, **47**: 347—357
- [3] Behar J, Lange O L. Biological soil crusts: structure, function and management [M]. Springer Verlag, Berlin Heidelberg Hardbound, 2001, 299—300
- [4] Li X R. Micro-biotic soil crust and its effect on vegetation and habitat on artificially stabilized desert dunes in Tengger Desert, North China [J]. *Biology Fertility Soil*, 2002, **35**: 147
- [5] Ekridge D J, Greene R S B. Biological soil crusts: A view of their roles in soil and ecological processes in the rangelands of Australia [J]. *Australian Journal of Soil Research*, 1997, **32**: 389—415
- [6] Behar J. The world at your feet [J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2003, **1**: 181—189
- [7] Li X R, Jia Y K, Long L Q, *et al*. Advances in microbiotic soil crust research and its ecological significance in arid and semi-arid regions [J]. *Journal of Desert Research*, 2001, **21**: 4—10 [李新荣, 贾玉奎, 龙立群, 等. 干旱半干旱地区土壤微生物结皮的生态学意义及若干进展. 中国沙漠, 2001, **21**: 4—10]
- [8] Yang X H, Zhang K B, Zhao Y J. Microbiotic soil crust—a research forefront in desertification prone areas [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, **2**: 474—478 [杨晓晖, 张克斌, 赵云杰. 生物土壤结皮——荒漠化地区研究的热点问题. 生态学报, 2001, **2**: 474—478]
- [9] Harper K T, Pendleton R L. Cyanobacteria and cyanolichens can enhance availability of essential minerals for higher plants [J]. *Great Basin Naturalist*, 1993, **53**: 59—72
- [10] Behar J, Harper K T. Influence of cryptobiotic soil crusts on elemental content of tissue of two desert seed plants [J]. *Arid Soil Res and Rehabilitation*, 1995, **9**: 107—115
- [11] Zaady E, Goffin P, Shachak M. Nitrogen fixation in macro- and microphytic patches in the Negev Desert [J]. *Soil Biol and Biochem*, 1998, **30**: 449—454
- [12] Hu C X, Liu Y D. Primary succession of algal community structure in desert soils [J]. *Acta Botanica Sinica*, 2003, **45**(8): 917—924
- [13] Hu C X, Liu Y D, Huang Z R, *et al*. The fine structure and development of algal crusts in desert area [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2000, **24**: 11—18 [胡春香, 刘永定, 黄泽波, 等. 荒漠藻壳的精细结构与发育. 水生生物学报, 2000, **24**: 11—18]
- [14] Hu C X, Liu Y D, Zhang D L, *et al*. Cementation mechanism of desert algal crusts [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2002, **47**: 931—937 [胡春香, 刘永定, 张德禄, 等. 荒漠藻结皮的胶结机理. 科学通报, 2002, **47**: 931—937]
- [15] Zhang Y M. The micro-structures and its early developmental characteristics of desert surface biological soil crusts [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2005, **50**: 42—48 [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. 科学通报, 2005, **50**: 42—48]
- [16] Zaady E, Kuhn U, Wilske B, *et al*. Patterns of CO₂ exchange in biological soil crusts of succession age [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2000, **32**: 959—966
- [17] Behar J. Nitrogen-fixation in biological soil crusts from southeast Utah, USA [J]. *Biol Fertil Soils*, 2002, **35**: 128—135
- [18] Housman D C, Powers L H H, A D Collins, *et al*. Carbon and nitrogen fixation differ between successional stages of biological soil crusts in the Colorado Plateau and Chihuahuan Desert [J]. *Journal of Arid Environments*, 2006, **66**: 620—634
- [19] Muscha J M, Hild A L. Biological soil crusts in grazed and ungrazed Wyoming sagebrush steppe [J]. *Journal of Arid Environments*, 2006, **67**: 195—207
- [20] Matthew A. Bowker, Jayne Behar, *et al*. Wildfire-resistant biological soil crusts and fire-induced loss of soil stability in Pausé prairies, USA [J]. *Applied Soil Ecology*, 2004, **26**: 41—52
- [21] Liang S M, Wu N, Wang H L, *et al*. Study on the effects of disturbances on the physical and chemical properties of microbiotic crusts in arid areas [J]. *Arid Land Geography*, 2005, **28**: 818—821 [梁少民, 吴楠, 王红玲, 等. 干扰对生物土壤结皮及其理化性质的影响. 干旱区地理, 2005, **28**: 818—821]
- [22] Hu C X, Liu Y D, Song L R. Species composition and distribution of algae in Shapotou area, Ningxia Hui Autonomous Region, China [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1999b, **23**: 443—448 [胡春香, 刘永定, 宋立荣. 宁夏沙坡头地区藻类及其分布. 水生生物学报, 1999b, **23**: 443—448]
- [23] Hu C X, Liu Y D, Song L R, *et al*. Species composition and distribution of algae in semi-desert crusts [J]. *Applied Acta Ecological Sinica*, 2000, **11**: 61—65 [胡春香, 刘永定, 宋立荣, 等. 半荒漠藻结皮中藻类的种类组成和分布. 应用生态学报, 2000, **11**: 61—65]
- [24] Hu C X, Liu Y D, Zhang D L, *et al*. Colonization succession and its influenced factors on desert algae [J]. *Applied Acta Ecological Sinica*, 2003, **14**: 11—12 [胡春香, 刘永定, 张德禄, 等. 荒漠藻类拓殖演替及其影响因子. 应用生态学报, 2003, **14**: 11—12]
- [25] Hu C X, Liu Y D. Soil algal biomass and its influential factors in desert soil crusts [J]. *Acta Ecological Sinica*, 2003, **23**: 284—290 [胡春香, 刘永定. 土壤藻生物量及其在荒漠结皮的影响因子. 生态学报, 2003, **23**: 284—290]
- [26] Hu C X, Liu Y D, Berit Smestad Paulsen, *et al*. Extracellular carbohydrate polymers from five desert soil algae with different cohesion in the stabilization of fine sand grain [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2003, **54**: 33—42
- [27] Wang X Y, Wang L X. Distribution and ecological environment of microorganism in Shan-shan sand hill [J]. *Arid Zone Res*, 1991, **8**: 30—32
- [28] Li X R, Zhang J G, Wang X P, *et al*. Study on soil micro-biotic crust and its influences on sand-fixing vegetation in arid desert region [J]. *Acta Bot Sin*, 2000, **42**: 965—970
- [29] Wu N, Pan B R, Zhang Y M, *et al*. Vertical distribution patterns of soil microorganisms relating to biological crusts in the gurbanunggut Desert, Xinjiang [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2005, **11**: 349—353 [吴楠, 潘伯荣, 张元明, 等. 古尔班通古特沙漠生物结皮中土壤微生物垂直分布特征. 应用与环境生物学报, 2005, **11**: 349—353]
- [30] Wu N, Wang H L, Zhang J, *et al*. Time-space difference of distribution of soil microorganisms relating to biological crusts in the gurbanunggut Desert, Xinjiang [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, **51**(supplement 1): 100—108 [吴楠, 王红玲, 张静,

- 等. 古尔班通古特沙漠生物结皮中微生物分布的时空差异. 科学通报, 2006, **51**(增刊 1): 100—108]
- [31] Brostoff W N. Cryptobiotic crusts of a seasonally inundated Dune-Pan system at Edwards Air Force Base, Western Mojave Desert California [J]. *Journal of Arid Environments*, 2002, **51**: 339—361
- [32] Lab of microorganisms Institute of soil in Nanjing Chinese Academy of Sciences The Methods of soil microorganism research [M]. Beijing Science Publishing Company, 1985, 40—59 [中国科学院南京土壤研究所微生物室. 土壤微生物研究法. 北京: 科学出版社, 1985 40—59]
- [33] Zhang Y M, Cao T, Pan B R. Research summary on ecology of moss in arid and semiarid areas [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, **22**: 1129—1134 [张元明, 曹同, 潘伯荣. 干旱与半干旱地区苔藓植物生态学研究综述. 生态学报, 2002, **22**: 1129—1134]
- [34] Schulten J A. Soil aggregation by cryptogams of a sand prairie [J]. *J Bot*, 1985, **72**: 1657—1661

DEVELOPMENT CHARACTERISTICS AND DISTRIBUTION OF MICROORGANISMS WITHIN 3-YEAR-OLD ARTIFICIAL ALGAL CRUSTS IN HOPQ DESERT

RAO Ben-Qiang^{1,2,3}, WANG Wei-Bo^{1,3}, LAN Shu-Bin^{1,3}, LI Dun-Hai¹, HU Chun-Xiang¹ and LIU Yong-Ding¹

(1. State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072;

2. Life Science College, Xinyang Normal University, Xinyang 464000; 3. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract In this study, development characteristics and distribution of microorganisms within four different types of artificial algal crusts were investigated. The results showed that (1) artificial algal crusts came into being when desert cyanobacteria were inoculated onto surface of dunes with their average thickness of 2.23—5.36 mm, highly black and sage green, and coverage of artificial algal crusts over 70% when artificial algal crusts underwent growth and development of three years. As to the four artificial algal crusts, *Salix cheilophila* Schneid. -*Aneurolepidium chinensis*-algal crust (SAA) was found to gain the best developments and reached the most biomass, and arrived at the succession of moss crust at the same time. Plenty of desert plants occurred at the locations of artificial algal crusts such as *A. squarrosus*, *E. dahuricus*, *S. collina* and *A. chinensis* etc., and the coverage of vegetation accounted for 60%—90%. Algal compositions of artificial algal crusts at four different stations were entirely very single, and the quantities of algal species varied inapparently. *M. vaginatus* was found to be still utterly dominant, whereas *S. javanicum* kept secondary. Moreover, different species of algae were discovered to inhabit distinct ecological niche. It was shown in our study that artificial algal crusts could bear high compressive strength, and compressive strength commonly achieved 35—70 N/m². Cyanobacteria forming artificial algal crust was found to own abundant filamentous growth forms that could band and felt soil particles by compact and high mechanical force, and simultaneously they exude polysaccharide with their filaments to hasten soil aggregation and cement soil particles together. All those meant compressive strength of artificial crusts was able to be maintained due to the presence of filamentous cyanobacteria. The observation to ultra-microstructures of algal crusts indicated that abundant filamentous growth forms occurred between the sand soils within algal crusts during growth and development of 3 years in the fields. A great deal of filamentous growth forms were observed to band up and felt sand particles, which may be contributed to cementation process of artificial algal crusts. (2) Change trend of the total number of microorganisms was SAA > GA > AA > SA > CK. Changes of biomass of artificial algae crusts accorded with that of the total number of microorganisms. Of all main microorganism groups, the quantities of bacteria, actinomycetes and fungi within different types of artificial algae crusts were consistent with that of the total number of microorganisms. Concerning the four artificial algae crusts, the ratio of bacteria quantities to the total number of microorganisms was distinctly more than that of actinomycetes and fungi. The percentage of bacteria quantities to the total number of microorganisms increased sharply in turn, while the percentage of actinomycetes quantities to the total number of microorganisms decreased evidently. Need to mention that it took on very small ratio of fungi quantities to the total number of microorganisms, and differences of the ratios varied very little.

Key words Artificial algal crusts; Desert algae; Development characteristics; Distribution of microorganisms; Hopq Desert