

赵洋,连煜超,赵燕翘,等.生物土壤结皮在防沙治沙中的应用综述[J].中国沙漠,2025,45(3):31-38.

## 生物土壤结皮在防沙治沙中的应用综述

赵洋<sup>1</sup>,连煜超<sup>1,2</sup>,赵燕翘<sup>1</sup>,许文文<sup>1,2</sup>,赵逸雪<sup>1,2</sup>

(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:**人工生物土壤结皮(Biological soil crust, BSC)快速治沙技术和生态修复技术发展迅速,已成为沙化土地治理的新模式和沙区恢复生态学研究的前沿和热点。人工培育的BSC在加速生态修复进程中发挥着关键作用,可缩短BSC的形成时间并加速其发展进程。通常情况下,能够将自然条件下BSC形成所需的10~20年时间缩短至1年左右,显著缩短了沙面稳定时间,加速了沙区生态系统功能的恢复。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/宁夏沙坡头沙漠生态系统国家野外科学观测研究站(简称沙坡头站,始建于1955年),作为中国沙区生态研究的重要基地,是较早系统从事人工BSC快速治沙技术理论和应用研究的单位。值此建站70周年之际,本文对过去20年来沙坡头站研究团队在这一领域所取得的重要进展进行了系统地梳理与剖析,并对人工BSC治沙技术在沙化土地治理研究中的发展趋势进行了前瞻性展望。通过该综述,以期全面、准确认识和评估人工BSC快速治沙技术对沙化土地治理的作用及其对生态系统功能的影响提供科学依据,也为后续相关技术的优化改进以及大规模推广应用提供理论指导,推动沙区生态环境的持续改善和可持续发展。

**关键词:**沙化土地治理;人工生物土壤结皮;荒漠蓝藻;沙区

**文章编号:** 1000-694X(2025)03-031-08

**DOI:** 10.7522/j.issn.1000-694X.2025.00091

**中图分类号:** Q948

**文献标志码:** A

### 0 引言

干旱区沙化土地治理是一项极具挑战性的生态工程,主要原因是降水稀少(年降水量一般小于200 mm)、土壤含水量低(小于3.5%)、水分储量有限。同时,干旱区地表风蚀作用强烈,风力侵蚀模数大,频繁的风沙活动使得地表物质不断被搬运和堆积,沙埋现象严重,进一步破坏了地表植被和土壤结构,加剧了土地沙化的程度。在全球范围内,利用人工植被进行土地沙化(或沙害)防治是国际上公认的沙区生态重建和沙害防治最有效的方法和途径<sup>[1-2]</sup>。然而,在干旱区利用人工植被进行沙区生态重建和沙害防治却遇到了很多问题。受水分的限制,人工植被建设周期长、重复率高、稳定性差、成本高,影响了沙化土地治理的进程和成效<sup>[3]</sup>。这种现象在实际治理过程中屡见不鲜,导致了年复一年的造林却难以实现植被的有效恢复,造成资源的浪费和治理时间的延误。化学与工程固沙技术在干旱区沙化土地治理中具有一定的应用价值,通

过机械化作业能够在短期内快速提高流沙的稳定性,从而提升治理速度。然而,这些技术也存在着明显的局限性。化学固沙剂的使用成本较高,且部分化学药剂可能对土壤环境和地下水造成污染,存在较大的生态风险。工程固沙措施如沙障等,虽然能够在一定程度上固定流沙,但长期来看,其可持续性较差,不利于流沙固定后生物的自然定居和繁衍,难以实现生态系统的自我修复和长期稳定。在当前生态环境日益恶化的背景下,如何进一步优化治理模式,提高治理效率,缩短治理周期,成为干旱区沙化土地治理亟待解决的关键问题<sup>[4]</sup>。

生物土壤结皮/生物结皮(Biological Soil Crust, BSC)广泛分布于干旱半干旱区,是由蓝藻、绿藻、地衣、藓类、微生物以及相关的其他生物体通过菌丝体、假根和分泌物等与土壤表层颗粒胶结形成的十分复杂的地表覆盖体,是荒漠生态系统的重要组成部分,是联结荒漠地表生物与非生物成分的“生态系统工程师”<sup>[5]</sup>。BSC的形成和发育是地表稳定的

收稿日期:2025-02-27; 改回日期:2025-03-25

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:赵洋(1984—),男,辽宁沈阳人,博士,研究员,主要从事干旱区恢复生态学研究。E-mail: zhaoyang66@126.com

标志,也是荒漠、沙地生态系统健康的重要标志,发挥着极其关键的生态功能<sup>[5]</sup>。大量研究证明了BSC对防治风蚀、稳定沙面、促进成土过程<sup>[6]</sup>、改善生境以及控制沙面径流入渗平衡<sup>[7-8]</sup>的重要性<sup>[9]</sup>,BSC已成为固沙防护体系不可或缺的部分。然而,BSC自然形成需要10~20年,如何通过人工培育的方法缩短BSC形成周期,加快沙区生态恢复和重建进程,已成为荒漠化防治的重大实践需求<sup>[5,10-11]</sup>。

人工BSC固沙技术就是利用BSC固定沙丘表面和抗风蚀的特点,将BSC中的主要生物体(蓝藻和藓类)进行人工培育、接种到沙地表面并与传统的固沙措施(沙障+固沙灌木等)结合,使地表快速形成BSC,从而提升防风固沙效果,是一种加速荒漠生态系统近自然恢复速度的沙化土地治理模式。人工培育的BSC将BSC自然形成所需的10~20年<sup>[12-15]</sup>缩短至1年左右。人工BSC在地表的覆盖能减少地表风蚀,促进沙面土壤功能快速恢复,并有利于草本植物的定居和多样性增加,进而替代了高密度种植的防护效果,在植被建设中减少了苗木的用量和土壤含水量的消耗,并节约大量的人力、物力和财力,一次性地完成沙化土地治理和生态恢复的任务,实现治沙成果的提速增效,尤其是在灌木稀疏(盖度为10%左右)的固沙区,应用人工BSC进行治沙会达到事半功倍的效果。

近年来,人工BSC快速治沙技术和生态修复技术发展迅速,已成为沙化土地治理的新模式和沙区恢复生态学研究的前沿和热点<sup>[16-21]</sup>。全面、准确认识和评估人工BSC快速治沙技术对沙化土地治理的作用及其对生态系统功能的影响,是国内外科学界、政府和公众普遍关注的重大科学问题,也为提高科学治沙能力提供重要依据。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/宁夏沙坡头沙漠生态系统国家野外科学观测研究站(以下简称沙坡头站,始建于1955年)是中国较早系统从事人工BSC快速治沙技术理论和应用研究的单位。值此建站70周年之际,本文系统梳理和剖析了沙坡头站研究团队近20年来在这一领域取得的重要进展,并对人工BSC治沙技术在沙化土地治理研究中的发展趋势进行了前瞻性展望。通过该综述,以期全面、准确认识和评估人工BSC快速治沙技术对沙化土地治理的作用及其对生态系统功能的影响提供科学依据,同时也为后续相关技术的优化

改进以及大规模推广应用提供理论指导,推动沙区生态环境的持续改善和可持续发展。

## 1 人工BSC培养所用蓝藻种/藓类及其生长特征和规模化培养现状

具鞘微鞘藻(*Microcoleus vaginatus*)、念珠藻(*Nostoc carneum*)、席藻(*Phormidium* sp.)、鱼腥藻(*Anabaena cylindrica*)、伪枝藻(*Scytonema* sp.)、爪哇伪枝藻(*Scytonema javanicum*)和单歧藻(*Tolypothrix tenuis*)是蓝藻结皮中的优势蓝藻,在人工蓝藻结皮培育中应用广泛<sup>[21-22]</sup>。足量的荒漠蓝藻是使用人工蓝藻结皮固沙技术进行大规模沙化土地治理的前提和基础,而蓝藻的规模化培养是该技术推广和应用的重要保障<sup>[17,19]</sup>。荒漠蓝藻的规模化培养研究表明,培养期间具鞘微鞘藻和念珠藻的干重均呈现先快速增加、后缓慢增加、最后稳定的趋势<sup>[17,23]</sup>。随着接种密度的增加,两种蓝藻生长进入稳定期的时间提前。在相同接种密度下,具鞘微鞘藻的总质量显著高于念珠藻<sup>[23]</sup>。此外,在不同扰动处理下,蓝藻的干重呈现先迅速增加,之后趋于稳定的趋势,其中,在6 h扰动处理下,蓝藻干重增量最大<sup>[17]</sup>。因此,综合考虑荒漠蓝藻总产量、生长过程和耗能等多方面因素,荒漠蓝藻规模化培养的最佳扰动时长为6 h。研究还发现,积温对荒漠蓝藻大量生长发挥关键作用<sup>[17,24]</sup>,蓝藻总质量的生长速率随积温的增加逐渐增加,建议在蓝藻培养过程中,有效积温不低于145 °C<sup>[17]</sup>。此外,光照、pH和电导率也是影响蓝藻规模化培养产量的重要因素。

真藓(*Bryum arcticum*)、黄色真藓(*Bryum pallescens*)、银叶真藓(*Bryum argenteum*)、齿肋赤藓(*Syntrichia caninervis*)、刺叶墙藓(*Tortula desertorum*)和土生对齿藓(*Didymodon vinealis*)等是人工藓类结皮培养常用的物种<sup>[25-28]</sup>。藓类植物的孢子体、配子体、茎叶碎片和芽孢等均可作为人工培养的材料<sup>[29-30]</sup>。此外,也可以在野外采集藓类植物的碎片作为接种材料<sup>[31-33]</sup>。藓类接种体的抗旱能力显著影响人工藓类结皮培养的成败。为提高其抗旱能力,研究人员先对人工培育藓类植物供应充足的水分,使其达到饱和状态,待藓类结皮表面变干后施以60%饱和和量的水分,使藓类结皮恢复正常生长。待藓类结皮表面再次变干后,施以20%饱和和量的水分。如此循环,直至藓类结皮表面再次变



干。此方法可使人工培育藓类结皮的渗透调节物质含量达到自然发育藓类结皮的50%,显著提高其抗旱能力<sup>[34-35]</sup>。

## 2 人工BSC接种体培养和野外接种方法

### 2.1 人工蓝藻结皮接种体培养与接种

荒漠蓝藻作为人工蓝藻结皮的主要生物体,是制作接种体的原料<sup>[25,36]</sup>。蓝藻藻液喷洒(液态接种)和蓝藻结皮碎片播撒(固态接种)是野外接种最常用的方法。蓝藻藻液喷洒是将蓝藻和水按一定比例混合后直接喷洒于待治理流沙表面的技术,在腾格里沙漠、巴丹吉林沙漠和库布齐沙漠等区域的沙化土地治理中均取得了一定成效<sup>[16,25,30]</sup>。然而,这种直接喷洒的接种方式使得蓝藻生物体直接暴露于高温干燥的沙面环境,强烈的蒸散发极易使蓝藻迅速失水并造成大量死亡。因此,在接种初期必须依靠多次喷洒藻液或通过定期补水来维持蓝藻成活率。为了提高成活率,沙坡头站研究团队尝试通过蓝藻结皮碎片播撒的方式进行接种,并完全依靠自然降水进行培育。Zhao等<sup>[37]</sup>的研究表明,无论是天然BSC还是人工培养的BSC碎片,在播撒后3个月后,其盖度、厚度以及生物量均得到了显著提升。同时,受限于天然蓝藻结皮形成时间长、不可大规模采挖的客观事实,Zhao等<sup>[16,21]</sup>研发了“育苗+播撒”新模式,成功解决了蓝藻接种碎片来源和养护过程大量用水的问题。但值得注意的是,该模式中人工BSC碎片的培养时间长达9个月,且培养过程占地广,后期采集和运输成本较高。在此基础上,赵燕翘等<sup>[38]</sup>在实验室通过混合蓝藻、风沙土和农田土,两个月内培育出了人工蓝藻结皮接种体。之后,连煜超等<sup>[39]</sup>的研究进一步缩短了培育时间,半流体状的湿润接种体可现配现用,干燥接种体碎片则在2~3天制作完成,并在野外成功接种。至此,随着“育苗”效率的大幅提高,人工蓝藻结皮碎片规模化量产的瓶颈得以突破,极大地推动了蓝藻结皮碎片播撒技术的推广应用。

人工蓝藻结皮在接种初期往往会受环境条件的限制,如地表积蚀、水分短缺、高温和辐射胁迫等。因此,为提高蓝藻结皮成活率,接种时通常配合一定的辅助措施。草方格沙障是当前应用最为

广泛的人工蓝藻结皮辅助措施,Zhao等<sup>[18]</sup>在腾格里沙漠通过草方格沙障+蓝藻藻液喷洒的方式成功培育了人工蓝藻结皮。也有研究表明,在流动沙面施加化学固沙剂可以改善土壤基质,促进人工BSC拓殖。Park等<sup>[19]</sup>在腾格里沙漠利用固沙剂和高吸水性聚合物配合蓝藻藻液进行沙面接种,12个月后蓝藻生物量、微生物生物量、固碳量和有效量子产率均提高。此外,Zhao等<sup>[20]</sup>还通过改变接种土壤基质的方式培育了人工蓝藻结皮。上述方法在人工蓝藻结皮接种初期虽然都发挥了作用,但也存在一定的局限性。以草方格沙障为代表的工程措施仅在风蚀控制方面表现较好,而对其他环境因子(如水分、光强、热量)的调控作用有限,并且近年来由于小麦和水稻秸秆大量使用机械收割导致秸秆长度变短无法满足扎设草方格的需求,可用于防沙治沙的小麦和水稻秸秆变得稀缺<sup>[40]</sup>;同理,固沙剂等化学材料的作用也集中在缓解风蚀上,在野外大面积应用时还存在难以降解的问题。

### 2.2 人工藓类结皮接种体培养与接种

在实验室条件下通过控制藓类植物组织所需温湿度、光照、基质、营养液及浓度,可以成功培育人工藓类结皮<sup>[41-42]</sup>,主要的培养方法有孢子繁殖法<sup>[32]</sup>、断茎法和碎皮法<sup>[43]</sup>以及分株法<sup>[44]</sup>,其中碎皮和分株法因保存了较多的繁殖体种类和数量,培养效果较好<sup>[32]</sup>。人工藓类结皮在野外接种作业时,主要采用播撒与喷洒这两种方式<sup>[45-46]</sup>。喷洒多用于平面或缓坡,播撒则有较好的地形适应性<sup>[26]</sup>。与藻类结皮情况相似,藓类结皮在完成接种后也需要借助一定的辅助措施来保障其生长。然而,利用实验室培养的藓类结皮接种体在野外条件下大规模接种成功的案例却鲜有报道。可能的原因是室内人工培育过程降低了藓类结皮的抗逆性,导致其在野外环境中适应性以及自身维持能力减弱。人工培育藓类结皮规模化应用,不仅要全面且深入地考量水分供应以及光照条件等关键因素,还需在接种后搭配特定的营养液以及植物生长剂,以促进其生长发育。此外,藓类结皮接种体的产量限制是制约人工藓类结皮规模化应用的关键。除了接种材料供应不足外,辅助配套设施的搭建以及后续维护所产生的成本,很可能是限制人工藓类结皮大规模推广应用的又一关键因素。正因如此,目前开展的野外接

种工作大多仅局限于小范围的控制试验阶段,尚未见大规模应用的报道。

### 3 影响人工 BSC 拓殖的主要因子

荒漠蓝藻种是构建人工蓝藻结皮的核心要素,其选择的适宜程度从根本上决定了人工蓝藻结皮接种后的拓殖潜力。藻种的筛选与特定区域天然藻结皮中的优势种密切相关。在腾格里沙漠,李新荣等<sup>[30]</sup>和 Zhao 等<sup>[16]</sup>开展了深入研究。他们从自然发育成熟的蓝藻结皮中,运用专业的分离纯化技术,成功分离出包括鱼腥藻、念珠藻和席藻等在内的 7 种优势蓝藻种,并对这些藻种进行了分离纯化培养,证明它们都可以用于培养人工蓝藻结皮。与人工蓝藻结皮类似,对藓类进行鉴别和筛选是人工藓类结皮成功接种的关键。李新荣等<sup>[30]</sup>通过野外接种实验证明了选择适宜的物种是人工藓类结皮培养的关键。此外,草本植物和灌木的存在有利于人工 BSC 拓殖。在人工 BSC 接种初期,草本植物盖度等属性与人工 BSC 盖度、厚度、生物量和多糖等呈显著的正相关关系;灌木下生长的 BSC 往往发育较好<sup>[47-49]</sup>。

人工 BSC 在接种初期的拓殖受到多种微环境条件限制<sup>[48]</sup>。首先,稳定的地表是人工 BSC 成功定植的关键,而在恶劣的沙质环境中,风是影响地表稳定性的主要外力,主要表现为风蚀和沙埋。其中,风蚀的磨损和剥落作用会降低人工 BSC 的拓殖速率<sup>[20]</sup>,沙埋则通过影响通气性和光密度等环境条件以及藻类结皮厚度增加和藓类结皮芽的伸长等生理生长方面影响 BSC 发育<sup>[50-51]</sup>。其次,BSC 属于变水生物,水分调节能力极差,因此水分条件控制着人工 BSC 的有效发育时间<sup>[52]</sup>。在极端干旱条件下,BSC 会进入休眠状态,只有在满足一定的水分条件时才能发挥各项生理功能。赵燕翘等<sup>[53]</sup>发现,人工蓝藻结皮的盖度、厚度、叶绿素和多糖含量随着单次降雨量的增加而显著上升。温度不仅通过改变地表蒸散发强度影响土壤水分,还可通过调节微生物丰度和群落结构影响人工 BSC 发育<sup>[54]</sup>。人工 BSC 生长需要一定的热量积累,在一定范围内,蓝藻的发育速度与热量呈正相关<sup>[17]</sup>。光照强度是影响人工 BSC 光合过程以及光合速率的关键因素,但高光强也会造成 BSC 细胞氧化、DNA 链损伤和抗氧化酶系统紊乱等生理抑制现象<sup>[55]</sup>。

土壤粒径、盐度、pH、碳氮磷含量及其比值等土壤理化性质也影响人工 BSC 的形成。相关研究表明,土壤粒径越小、细物质含量越高,越有利于人工 BSC 拓殖<sup>[20]</sup>。赵燕翘等<sup>[38]</sup>也指出,随着细物质的添加,人工蓝藻结皮的各项指标发育更好。这是由于土壤颗粒越细密,对水分和养分保持、元素结合的能力越强,越有利于蓝藻细丝缠绕和胶结,最终使得 BSC 发育更加均匀稳定。土壤养分是人工培育 BSC 发育的重要限制因子,适度增加有机碳、硝态氮、铵态氮和磷等养分含量可促进 BSC 发育<sup>[56]</sup>。同时,优化养分结构也可促进 BSC 生长。研究表明 C:N 和 C:P 比值与人工 BSC 覆盖度呈显著正相关关系<sup>[57]</sup>。

### 4 人工 BSC 在沙区生态功能恢复中的作用

盖度、厚度以及叶绿素 *a* 含量等指标,是评判人工培养蓝藻结皮发育效能的关键表征参数。大量研究表明,以喷洒方式在沙地表面接种蓝藻,并采用无纺布或遮阳网进行覆盖处理,可显著促进人工蓝藻结皮的拓殖进程<sup>[21]</sup>。人工蓝藻结皮的盖度、厚度以及叶绿素 *a* 含量与接种时长显著正相关,接种 3 年后,其盖度可超 80%<sup>[58]</sup>。此外,接种的蓝藻能分泌胞外多糖等生物大分子物质,这些分泌物能够通过物理化学作用促使沙面颗粒间形成有效黏结,从而稳固沙面。同时,人工蓝藻结皮在较短时间内提升沙面稳定性的特性,对草本植物在沙地的定居与建群过程具有重要影响<sup>[59]</sup>。

人工蓝藻结皮固沙技术的首要目标是沙面固定,而终极目标是土壤功能以及植被的恢复,这正是荒漠生态系统近自然恢复的关键。研究表明,相较于流沙,人工蓝藻结皮样地的草本植物种类更多,盖度、生物量和物种多样性更高<sup>[60]</sup>。随着接种时间的增加,草本植物的优势种从苋科、菊科逐渐变为禾本科<sup>[58]</sup>,禾本科植物的大幅度增加标志着沙漠植被质量的明显改善。同时,研究还发现在人工蓝藻结皮发育初期,草本植物的盖度、生物量、丰富度和多度与接种时间呈显著正相关<sup>[58]</sup>。此外,早期的人工蓝藻结皮能够提高表层土壤酶(土壤蔗糖酶、纤维素酶和过氧化氢酶)的活性,并与人工蓝藻结皮的发育特征(叶绿素 *a* 和胞外多糖)显著正相关<sup>[61]</sup>,前者表示人工蓝藻结皮所包含的藻类生物



量,是胞外酶的主要来源,后者是土壤碳库的重要来源,是土壤酶发生催化反应的底物,因此两者的增加都促进了土壤酶的分泌。除此之外,人工蓝藻结皮(3年)表层土壤蔗糖酶和纤维素酶的活性已达到了自然发育的蓝藻结皮表层土壤酶活性11年左右的水平,土壤过氧化氢酶也达到了自然发育的蓝藻结皮表层土壤酶活性8年左右的恢复水平,这说明人工蓝藻结皮的应用与人工植被的建植相比,可以加快土壤酶活性的恢复<sup>[61]</sup>。

## 5 展望

在沙化土地的恢复进程里,沙面稳定性的提升、土壤结构的改善以及微生物活动的复苏,都具有关键的指示意义。因此,在沙区开展生态重建与恢复工作时,土壤生境修复是不容忽视的关键环节。这不仅是沙化土地治理的关键目标,更是美丽中国愿景下美丽沙区建设以及生态文明构建的核心要点。人工BSC固沙技术能快速、高效且持久地固沙成土,并起到增加土壤肥力的效果,非常契合干旱、半干旱地区流动和半流动沙丘的固定需求以及退化生态系统近自然恢复的需求。这一技术为中国防沙治沙工作开拓了新思路,提供了新路径,有助于加快中国沙漠化治理进程,提升治理的可持续性。由此可见,以人工BSC为典型代表的生物载体固沙技术将成为中国未来新型绿色环保固沙技术的主要发展方向。

目前,在人工BSC接种体培养领域,荒漠蓝藻的规模化量产技术已渐趋成熟。基于这一核心原料已然具备的优势,接下来的研究重点应聚焦于探索能够提高蓝藻结皮接种体质量且适用于野外大规模实践的方法与技术。回顾蓝藻结皮接种体的发展历程,其经历了藻液、干藻碎片、干藻碎片配合细物质等阶段,在此过程中,接种体逐步克服了水分和土壤粒径等方面的限制。但正如前文所述,BSC的形成受到多种因素制约,进一步提升人工蓝藻结皮接种体的质量仍是亟待攻克挑战。此外,对于藓类结皮接种体而言,突破人工培养藓类结皮的产量瓶颈,加速建立工业化生产体系,是在大规模实践中必须解决的关键问题。在促进人工BSC拓殖的辅助措施方面,积极探寻有效调控多种微环境的辅助手段已成为当务之急。

更关键的是,BSC在不同沙区生境中的生长发

育过程中所需的最适条件存在显著差异。尽管已有研究探讨了不同沙区风沙土的理化属性对人工蓝藻结皮发育特征的影响,评估了人工蓝藻结皮在不同沙漠/沙地风沙土中的拓殖情况。这些研究成果为人工蓝藻结皮在不同沙漠/沙地的大规模应用奠定了基础,也为改良不同沙区风沙土的理化性质提供了有益建议。然而,目前仍存在一些有待完善和深入研究的问题:一方面,人工蓝藻结皮在不同沙区的拓殖情况尚未完全明晰,现有研究的区域范围较小,难以判断其在野外大规模环境下的拓殖成效。因此,未来需要在不同沙区开展实地大规模的应用与检测工作。另一方面,已有研究发现黏粒和粉粒对人工蓝藻结皮的拓殖具有促进作用<sup>[55]</sup>,但黏土矿物作为构成黏粒和粉粒的更微小单元,其矿物组成如何影响风沙土的理化性质以及背后的影响机理,至今尚未阐释清楚。此外,风沙土的理化性质对人工蓝藻结皮的影响机制,以及人工蓝藻结皮的发育与土壤酶活性之间的相互作用机理,都有待进一步深入探索和验证。

通过人工培育蓝藻结皮促进BSC恢复的进程,本质上也是促进土壤和植被恢复的过程。已有研究成果为深入理解人工蓝藻结皮、植物与土壤之间的相互作用奠定了基础,也为人工BSC应用于荒漠治理和生态功能恢复提供了理论指导。然而,现有研究的时间尺度较短,难以明确人工蓝藻结皮接种后草本植物群落组成的变化,究竟是源于人工蓝藻结皮的发育影响,还是由降水等环境因子引发的波动所致。所以,需要开展长期监测,以便对相关结论做出更为科学的解释。不同类型BSC对土壤理化性质、土壤酶以及草本植物会产生不同程度的影响。因此,未来开展关于人工地衣结皮和人工藓类结皮对土壤及植物影响的研究,将有助于推动人工BSC固沙技术的更广泛应用。

## 参考文献:

- [1] 包岩峰,杨柳,龙超,等.中国防沙治沙60年回顾与展望[J].中国水土保持科学,2018,16(2):144-150.
- [2] 卢琦,肖春蕾,包英爽,等.打赢“三北”攻坚战,再造一个“新三北”:实现路径与战略规划[J].中国科学院院刊,2023,38(7):956-965.
- [3] 李新荣,张志山,谭会娟,等.我国北方风沙危害区生态重建与恢复:腾格里沙漠土壤水分与植被承载力的探讨[J].中国科学:生命科学,2014,44(3):257-266.
- [4] 王涛.中国防沙治沙实践与沙漠科学发展的70年:III.发展篇

- (1)[J].中国沙漠,2024,44(1):1-10.
- [5] 魏江春.沙漠生物地毯工程:干旱沙漠治理的新途径[J].干旱区研究,2005,22(3):287-288.
- [6] Evans R, Ehleringer J. A break in the nitrogen cycle in aridlands? Evidence from  $\delta^{15}\text{N}$  of soils[J]. *Oecologia*, 1993, 94(3):314-317.
- [7] Kidron G, Yair A. Rainfall-runoff relationship over encrusted dune surfaces, Nizzana, Western Negev, Israel[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1997, 22(12):1169-1184.
- [8] Brotherson J D, Rushforth S R. Influence of cryptogamic crusts on moisture relationships of soils in Navajo National Monument, Arizona[J]. *The Great Basin Naturalist*, 1983, 4(1):73-78.
- [9] Mazor G, Kidron G J, Vonshak A, et al. The role of cyanobacterial exopolysaccharides in structuring desert microbial crusts[J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 1996, 21(2):121-130.
- [10] 李新荣, 谭会娟, 回嵘, 等. 中国荒漠与沙地生物土壤结皮研究[J]. 科学通报, 2018, 63(23):2320-2334.
- [11] 李新荣, 赵洋, 杨昊天, 等. 生物土壤结皮治理沙化土地的理论与实践[M]. 杭州:浙江教育出版社, 2022.
- [12] Benko Z R. Biological soil crusts: structure, function, and management[J]. *Community Ecology*, 2003, 4(1):118-119.
- [13] 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.
- [14] Lalley J, Viles H. Terricolous lichens in the northern Namib Desert of Namibia: distribution and community composition[J]. *The Lichenologist*, 2005, 37(1):77-91.
- [15] Zhang B, Kong W, Wu N, et al. Bacterial diversity and community along the succession of biological soil crusts in the Gurbantunggut Desert, Northern China[J]. *Journal of Basic Microbiology*, 2016, 56(6):670-679.
- [16] Zhao Y, Jia R L, Wang J. Towards stopping land degradation in drylands: water-saving techniques for cultivating biocrusts in situ[J]. *Land Degradation & Development*, 2019, 30(18):2336-2346.
- [17] 王楠, 许文文, 赵燕超, 等. 荒漠蓝藻规模化培养试验[J]. 中国沙漠, 2022, 42(4):181-189.
- [18] Zhao Y, Wang J. Mechanical sand fixing is more beneficial than chemical sand fixing for artificial cyanobacteria crust colonization and development in a sand desert[J]. *Applied Soil Ecology*, 2019, 140:115-120.
- [19] Park C H, Li X R, Zhao Y, et al. Rapid development of cyanobacterial crust in the field for combating desertification[J]. *PLoS One*, 2017, 12(6):e0179903.
- [20] Zhao Y, Xu W, Wang N. Effects of covering sand with different soil substrates on the formation and development of artificial biocrusts in a natural desert environment[J]. *Soil Tillage Research*, 2021, 213:105081.
- [21] 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*, 2020, 32(1):285-295.
- [22] Wang J, Zhang P, Bao J-T, et al. Comparison of cyanobacterial communities in temperate deserts: a cue for artificial inoculation of biological soil crusts[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 745:140970.
- [23] 王楠, 赵燕超, 许文文, 等. 两种荒漠蓝藻生长特征及其对培养水体微环境的影响[J]. 中国沙漠, 2023, 43(1):66-74.
- [24] 谢作明, 刘永定, 陈兰洲, 等. 不同培养条件对具鞘微鞘藻生物量和多糖产量的影响[J]. 水生生物学报, 2008, 32(2):272-275.
- [25] 周晓兵, 张丙昌, 张元明. 生物土壤结皮固沙理论与实践[J]. 中国沙漠, 2021, 41(1):164-173.
- [26] Bu C, Li R, Wang C, et al. Successful field cultivation of moss biocrusts on disturbed soil surfaces in the short term[J]. *Plant and Soil*, 2018, 429(1):227-240.
- [27] Xiao B, Zhao Y, Wang Q, et al. Development of artificial moss-dominated biological soil crusts and their effects on runoff and soil water content in a semi-arid environment[J]. *Journal of Arid Environments*, 2015, 117:75-83.
- [28] Xu S J, Yin C S, He M, et al. Technology for rapid reconstruction of moss-dominated soil crusts[J]. *Environmental Engineering Science*, 2008, 25(8):1129-1138.
- [29] 曹同, 陈静文, 姜玉霞. 苔藓植物组织培养繁殖技术及其应用前景[J]. 上海师范大学学报(自然科学版), 2005, 34(4):52-58.
- [30] 李新荣, 回嵘, 赵洋. 中国荒漠生物土壤结皮生态生理学研究[M]. 北京:高等教育出版社, 2016.
- [31] 杨永胜. 黄土高原苔藓结皮的快速培育及其对逆境的生理响应研究[D]. 北京:中国科学院研究生院, 2015.
- [32] 陈彦芹, 赵允格, 冉茂勇. 黄土丘陵区藓结皮人工培养方法试验研究[J]. 西北植物学报, 2009, 29(3):586-592.
- [33] 张侃侃. 毛乌素沙地苔藓结皮的人工培育技术[D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学, 2012.
- [34] 贾荣亮, 李新荣, 滕嘉玲, 等. 一种提高人工培育藓类结皮抗旱能力的方法:CN201611191838.9[P]. 2017-05-31.
- [35] 贾荣亮, 李新荣, 高艳红, 等. 一种提高沙区人工培育藓结皮抗高温能力的方法:CN201811412980.0[P]. 2019-03-08.
- [36] 赵洋, 潘颜霞, 苏洁琼, 等. 中国干旱区沙化土地绿色环保治理技术综述[J]. 中国沙漠, 2021, 41(1):195-202.
- [37] Zhao Y, Zhao Y, Xu W, et al. Acquiring high-quality and sufficient propagules/fragments for cyanobacteria crust inoculation and restoration of degraded soils in a sandy desert[J]. *Land Degradation & Development*, 2023, 34(5):1593-1597.
- [38] 赵燕超, 连煜超, 许文文, 等. 土壤基质中细物质含量对人工蓝藻结皮形成的影响[J]. 应用生态学报, 2023, 34(9):2398-2404.
- [39] 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):1-12.
- [40] 黄丽, 田煜. 江苏扬州江都区麦茬稻全程机械化生产模式[J]. 农业工程技术, 2023, 43(19):57-58.

- [41] 王显蓉,赵允格,王媛.干旱半干旱地区藓结皮人工培养研究进展[J].西北林学院学报,2014,29(6):66-71.
- [42] 熊文君,徐琳,张丙昌,等.生物土壤结皮结构、功能及人工恢复技术[J].干旱区资源与环境,2021,35(2):190-195.
- [43] 肖波,赵允格,邵明安.黄土高原侵蚀区生物结皮的人工培育及其水土保持效应[J].草地学报,2008,16(1):28-33.
- [44] 田桂泉,白学良,徐杰,等.腾格里沙漠固定沙丘藓类植物结皮层的自然恢复及人工培养试验研究[J].植物生态学报,2005(1):164-169.
- [45] 王春.喷播苔藓结皮培育恢复技术研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2017.
- [46] 李茹雪.撒播苔藓结皮培育恢复技术研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2017.
- [47] 王楠.荒漠蓝藻水体培养及其关键影响因子[D].北京:中国科学院大学,2022.
- [48] 赵燕翹,连煜超,许文文,等.中国人工蓝藻结皮研究进展[J].中国沙漠,2023,43(5):214-222.
- [49] 赵洋,陈永乐,徐冰鑫.油蒿(*Artemisia ordosica*)退化阶段对生物土壤结皮拓殖和发育的影响[J].中国沙漠,2016,36(4):983-989.
- [50] 赵芸,贾荣亮,滕嘉玲,等.腾格里沙漠人工固沙植被演替生物土壤结皮盖度对沙埋的响应[J].生态学报,2017,37(18):6138-6148.
- [51] Zhao Y, Xu W W, Zhao Y Q, et al. Micro-topography dominated microhabitat significantly influences colonization and development of incubated-cyanobacteria biocrusts in a harsh sandy desert environment [J]. Applied Soil Ecology, 2023, 188: 104449.
- [52] 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.
- [53] 赵燕翹,连煜超,许文文,等.人工培育生物结皮的形成和发育对单次降雨量变化的响应[J].生态学报,2024,44(2):723-732.
- [54] Estelle C, Ulas K, Chien L H, et al. Bacteria increase arid-land soil surface temperature through the production of sunscreens [J]. Nature Communications, 2016, 7(1):10373.
- [55] Hui R, Li X, Zhao R, et al. UV-B radiation suppresses chlorophyll fluorescence, photosynthetic pigment and antioxidant systems of two key species in soil crusts from the Tengger Desert, China [J]. Journal of Arid Environments, 2015, 113: 6-15.
- [56] Antoninka A, Bowker M A, Reed S C, et al. Production of greenhouse-grown biocrust mosses and associated cyanobacteria to rehabilitate dryland soil function [J]. Restoration Ecology, 2016, 24(3):324-335.
- [57] Zhao Y, Zhao Y Q, Xu W W, et al. Soil C:N and C:P ratios positively influence colonization and development of incubated biocrusts in a sandy desert environment [J]. Land Degradation & Development, 2023, 34(17):5171-5179.
- [58] Xu W W, Zhao Y, Lian Y C, et al. Co-development of biocrust and herbaceous plant communities in sandy areas after cyanobacterial inoculation [J]. Plant and Soil, 2025, 508(1):227.
- [59] Li X R, Hui R, Tan H J, et al. Biocrust research in China: recent progress and application in land degradation control [J]. Frontiers in Plant Science, 2021, 12: 751521.
- [60] 许文文,赵燕翹,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.
- [61] 许文文,赵燕翹,王楠,等.人工蓝藻结皮对沙区表层土壤酶活性及恢复速率的影响[J].生态学报,2023,43(7):1-9.

## Review on the application of biological soil crusts in the prevention and control of aeolian desertification

Zhao Yang<sup>1</sup>, Lian Yuchao<sup>1,2</sup>, Zhao Yanqiao<sup>1</sup>, Xu Wenwen<sup>1,2</sup>, Zhao Yixue<sup>1,2</sup>

(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:** The rapid development of artificial biological soil crust (BSC) technology for desertification control and ecological restoration has emerged as a new model for managing desertified land and a frontier research focus in arid ecosystem restoration. Artificially cultivated BSC plays a crucial role in accelerating ecological restoration by significantly reducing the time required for BSC formation and development. Under natural conditions, BSC formation typically takes 10 to 20 years, whereas artificial BSC can be established within approximately one year, greatly shortening the stabilization period of sand surfaces and expediting the recovery of ecosystem functions in arid regions. The Shapotou Desert Research and Experiment Station/Ningxia Shapotou National Field Scientific Observation and Research Station for Desert Ecosystems (hereinafter referred to as the Shapotou Station), established in 1955 and affiliated with the Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, is one of China's key research bases for arid zone ecology. It is also among the earliest institutions to systematically study the theory and application of artificial BSC technology for rapid desertification control. On the occasion of its 70th anniversary, this paper systematically reviews and analyzes the major progress made by the Shapotou Station research team in this field over the past 20 years. Furthermore, it provides a forward-looking perspective on the future development of artificial BSC technology in desertification control research. The study aims to offer a comprehensive and precise understanding of the role of artificial BSC technology in desertification control and its impact on ecosystem functions. Additionally, they provide a scientific basis for the optimization, refinement, and large-scale application of related technologies, ultimately contributing to the continuous improvement of arid-zone ecological environments and sustainable development.

**Key words:** desertified land management; artificial biological soil crusts; desert cyanobacteria; sandy areas