

人工生物土壤结皮培育技术的研究进展综述

潘健航¹ 周虹^{1,2,3*} 曹海璇¹ 白俊钰¹

1 青海大学农林科学院

2 国家林业和草原局青海贵南荒漠生态系统定位观测研究站

3 青海省种质资源实验室

DOI:10.32629/as.v8i12.3534

[摘要] 荒漠化作为全球重大生态环境问题,严重威胁生态系统稳定性和人类可持续发展。传统防治技术存在成本高昂、周期漫长、生态适应性有限等瓶颈,难以满足快速遏制荒漠化扩张的现实需求。人工生物土壤结皮(Biological Soil Crust, BSCs)作为新型生态修复技术,在快速固沙、土壤改良、生态功能恢复等方面展现出显著优势,已成为荒漠化防治领域的研究热点。本文系统综述了国内外人工BSCs固沙技术研究进展,重点阐述藻种/苔藓材料选择策略、高效培育技术体系及生态效益评估等核心内容。通过整合分析现有研究成果,本文旨在为我国人工BSCs固沙技术的优化创新与规模化应用提供理论支撑,同时为全球荒漠化防治事业贡献科学依据和技术解决方案

[关键词] 生物土壤结皮; 人工培育; 生态修复; 藻结皮; 苔藓结皮

中图分类号: S154 **文献标识码:** A

Research Progress Review on the Cultivation Technology of Artificial Biological Soil Crusts

Jianhang Pan¹ Hong Zhou^{1,2,3*} Haixuan Cao¹ Junyu Bai¹

1 Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Qinghai University

2 Guinan Desert Ecosystem Research Station, National Forestry and Grassland Administration

3 Qinghai Provincial Germplasm Resources Laboratory

[Abstract] Desertification, as a major global ecological and environmental issue, seriously threatens the stability of ecosystems and the sustainable development of human society. Traditional control technologies face bottlenecks such as high costs, long cycles, and limited ecological adaptability, making it difficult to meet the practical demand for rapidly curbing desertification expansion. Artificial biological soil crusts (BSCs), as a novel ecological restoration technology, have demonstrated significant advantages in rapid sand fixation, soil improvement, and ecological function restoration, and have become a research hotspot in the field of desertification control. This paper systematically reviews the research progress of artificial BSC sand fixation technology at home and abroad, focusing on core contents including the selection strategy of algal/moss materials, efficient cultivation technology systems, and ecological benefit evaluation. By integrating and analyzing existing research results, this paper aims to provide theoretical support for the optimization, innovation, and large-scale application of artificial BSC sand fixation technology in China, and simultaneously contribute scientific basis and technical solutions to the global desertification control cause.

[Key words] biological soil crusts; artificial cultivation; ecological restoration; algal crusts; moss crusts

干旱半干旱地区年均降水量普遍低于400mm,蒸发量却远高于降水量,加之强烈的太阳辐射与极端温差,形成苛刻生存环境,导致多数高等植物生长受限,地表植被稀疏,生态系统脆弱,且风力侵蚀强烈(部分区域风蚀模数达5000-10000t·a⁻¹)。频繁风沙活动导致地表物质迁移与沙埋,加剧土壤退化,形成“风蚀-沙埋-植被退化-沙化加剧”的正反馈循环,对区域生态安全和可

持续发展构成严重威胁。传统的沙漠化防治措施(物理沙障、化学固沙、乔灌木重建等)存在成本高、工期长、生态适应性有限等问题。特别是在极端干旱区,植被恢复周期常达数十年至百年,成活率低且维护困难;化学固沙材料的长期环境效应和安全性尚无法得到充分保障。

生物土壤结皮(Biological Soil Crust, BSCs)作为干旱半

干旱地区生态系统的重要组成部分,为解决这一难题提供了新的思路。BSCs是由微生物、藻类、地衣、苔藓等隐花植物及其分泌物与土壤颗粒相互作用形成的复合生物-土壤复合体^[1]。根据优势物种的不同,BSCs可分为藻结皮、地衣结皮以及苔藓结皮三个主要类型。BSCs在干旱半干旱地区生态系统中发挥着多重关键生态功能:(1)通过固氮微生物(如蓝藻、固氮细菌)的代谢活动将大气中的惰性氮素转化为植物可利用的活性氮,显著提高土壤氮素含量^[1];(2)通过分泌胞外多糖等黏性物质黏结土壤颗粒,有效增强土壤结构稳定性,降低风蚀模数达70%-90%;(3)改善土壤理化性质,提高土壤有机质含量和持水能力;(4)为高等植物种子萌发和幼苗定居提供微环境条件。因此,BSCs被认为是干旱半干旱地区生态系统的“工程师”和生态修复的“先锋生物”^[2]。然而,在自然条件下,BSCs的形成和发育是一个极其缓慢的过程,通常需要10-20a甚至更长时间才能达到成熟阶段^[3]。因此,通过人为干预手段加速BSCs的形成过程,已成为当前生态修复领域的研究热点和前沿方向。

近年来,随着全球生态环境问题的日益突出,国内外学者在BSCs人工培育技术方面开展了大量研究工作,在优势物种筛选、接种技术创新、环境因子调控等方面成果显著^[4]。本文系统综述了人工培育BSCs的研究现状,重点阐述了接种材料选择、关键培育技术以及生态效益评价等方面的研究进展,并对未来研究方向和重点领域进行了展望,旨在为BSCs人工培育技术的规模化应用提供理论依据和技术支撑。

1 人工培育BSCs中藻类/苔藓类型的选择

1.1 人工藻类结皮的选择

藻类结皮作为BSCs发育的早期阶段,因生长较快、环境适应性强等特点,成为人工培育BSCs的主要类型。目前,在人工藻类结皮培育中应用较为成熟的蓝藻种类主要包括:具鞘微鞘藻(*Microcoleus vaginatus*)、念珠藻(*Nostoc carneum*)、爪哇伪枝藻(*Scytonema javanicum*)及单歧藻(*Tolypothrix tenuis*)。除上述主要物种外,鞘丝藻(*Lygnbya*)、颤藻(*Oscillatoria*)等蓝藻种类在特定环境条件下也展现出良好的应用前景。

由于不同蓝藻物种对温度、湿度、光照强度、土壤pH值等环境因子的适应阈值存在显著差异,因此在人工藻类结皮培育中,必须遵循“适地适种”的基本原则,结合具体培育区域的环境条件,选择最适宜的优势物种或物种组合。在库布齐沙漠,饶本强等^[5]通过长期定位试验发现,具鞘微鞘藻在该地区具有最佳的生长适应性和生态功能表现。同时,该研究团队创新性地开展了具鞘微鞘藻与爪哇伪枝藻的混合接种试验,结果表明混合接种能够显著提高结皮的稳定性和生态功能,为复杂环境条件下的藻类结皮培育提供了新的技术途径。在古尔班通古特沙漠,郑云普等^[6]的研究表明,念珠藻在该地区的沙质土壤条件下表现出最佳的生长性能。念珠藻形成的大型胶状群体能够有效固定流沙,同时其较高的固氮能力有助于改善贫瘠土壤的养分状况。

1.2 人工苔藓结皮的选择

苔藓结皮作为BSCs发育的高级阶段,在土壤稳定、水分保持和养分循环等方面发挥着更为重要的生态功能。与藻类结皮相比,苔藓结皮具有更强的抗侵蚀能力和更持久的生态效益,但生长速度相对较慢,培育周期较长。

基于长期的野外调查和人工培育实践,不同地区已筛选出一批适宜人工培育的优势苔藓物种。在古尔班通古特沙漠,刺叶墙藓(*Tortula desertorum* Broth)因其极强的耐旱性和快速扩展性,被确定为该地区人工苔藓结皮培育的首选物种^[7]。在腾格里沙漠,真藓(*Bryum* spp.)、长尖扭口藓(*Barbula ditrichoides* broth)、黑对齿藓(*Didymodon nigrescenes*)和双齿墙藓(*Tortula bidentate* baixueliang)是优势苔藓物种^[8]。在毛乌素沙地,真藓占据主导地位,其中银叶真藓(*B. argenteum*)和黄色真藓(*Bryum allelescens*)具有较强的环境适应性和快速繁殖能力,是人工培育的理想选择^[9]。

近年来,国内外学者在不同区域开展了大量人工苔藓结皮培育试验,取得了显著进展。聂华丽等^[10]创新性地开展了低营养条件下的苔藓培育研究,在未添加任何营养元素的培养基上成功培育出刺叶墙藓。在黄土丘陵区,陈彦芹^[11]等通过系统的物种筛选和培育条件优化,成功在黄土丘陵区培育出以土生扭口藓(*Barbula vinealis*)为优势物种的苔藓结皮。该研究表明,选择本土适应性强的物种是培育成功的关键因素。在科尔沁沙地,王鹤松等^[12]通过模拟自然环境条件,成功培育出大面积的银叶真藓结皮。研究发现,适宜的水分管理和微地形改造是提高苔藓成活率的重要措施。

2 人工BSCs的培育技术

2.1 人工培育藻结皮技术

人工藻结皮培育技术,就是运用生物学、生理学和生态学等理论为基础,通过人工分离、纯化后选育优良藻结皮,再经过大规模培育制作成种,最后进行野外接种的一系列过程^[13]。藻类的实验室培养需要精确控制多种环境因子。研究表明,最适培养温度为20-30℃,其中25-28℃为多数蓝藻物种的最适生长温度范围^[4]。培养基通常采用BG11或BG110培养基,前者适用于需要氮源的蓝藻培养,后者则用于固氮蓝藻的培养。光照强度一般控制在2000-3000lx,光照周期为12-16小时光照/8-12小时黑暗^[4]。此外,通过持续搅拌或通气等方式保障充足的氧气供应,对促进藻类生长至关重要^[15]。

室内人工藻结皮培育通常采用分级扩繁策略,该体系包括以下几个关键阶段:在初级培养阶段,将保存的藻种原种移植到试管固体培养基中,置于恒温培养箱内(温度25-28℃,光强约2000lx)培养10-15d,获得足量的纯培养藻种^[15];在中级培养阶段,将初级培养获得的藻种接种到100-500mL不含琼脂的三角液体培养基中,在相同温度和光强条件下,采用静置或通气培养方式培养8-10d,实现藻种的初步扩繁^[15];在扩大化培养阶段,将中级培养的藻种转移到更大体积的培养容器中,进行规模化培养。中国武汉水生生物研究所在这方面取得了显著的突破,建立了从试管培育、三角瓶培养、10-18L容器培育,

到小跑道池(1m×4m)与大跑道池(6m×40m)培养的完整逐级放大体系^[15]。

野外接种是人工藻结皮培育的关键环节,直接决定了培育的成功率和效果。目前主要采用藻液喷洒法和碎片撒播法^[16]。藻液喷洒法是将培养好的藻种制成浓度适宜的藻液,通过喷洒设备均匀喷洒在目标区域表面。赵洋等^[17]和许文文等^[18]在腾格里沙漠的研究中,采用 $200\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ 的接种量,将蓝藻藻液均匀喷洒在试验区,然后用无纺布、防尘网和遮阳网进行覆盖,成功培育出稳定的藻结皮。田婧^[19]等在黄土高原以黄绵土为基质,采用撒播法接种藻结皮,将接种量设定为 $1000\text{g}/\text{m}^2$,培育期间每2d进行1次水分补充,保证土壤水分含量在20%–30%范围内,以维持结皮表面湿润,并在培育的第1个月内覆盖遮阳网,实现遮阳与保湿效果,成功培育出藻结皮。

为提高人工藻结皮培育的成功率和效果,研究者开始探索综合培育技术体系,将藻结皮培育与其他固沙措施有机结合。刘永定等^[13]在库布齐沙漠的研究中,将人工藻结皮与草-灌-乔植被建设模式相结合,不仅使藻结皮生长良好,还显著提高了固沙效果。此外,在流沙表面添加化学固沙剂改善土壤基质,或采用草方格沙障控制风蚀等辅助措施,能够为藻结皮的生长发育创造更加有利的环境条件,显著提高培育成功率^[15]。

2.2 人工培育藓结皮技术

苔藓植物的生长速度相对较慢,对环境条件的要求更为苛刻,其人工培育技术的发展相对滞后于藻结皮^[20]。苔藓植物具有多样化的繁殖方式,苔藓的孢子、配子体、茎叶碎片和芽孢等均可作为人工培育的材料,这为其人工培育提供了丰富的材料来源。基于不同类型的繁殖材料,已发展出多种苔藓植物接种方法,包括孢子繁殖法、断茎法^[11]以及碎皮茎撒播法^[21]、镶嵌法^[22]、分株法^[23]。

室内培育的材料制备是确保培育成功的基础环节。优先选取自然苔藓结皮中的优势物种,这些物种通常具有较强的适应性和生态功能。将采集的苔藓材料浸入水中,使其充分吸水膨胀,然后用土壤筛进行分级处理,去除杂质和较大的土壤颗粒。处理后的材料放入 30°C 的恒温箱中进行干燥,最后用植物粉碎机粉碎并混匀,制成标准化的培育材料^[8]。近年来,研究者开始探索多种基质改良技术。王鹤松等^[24]的研究表明,在人工苔藓结皮培育过程中,施用玉米秸秆能够有效促进苔藓的生长。其中,粉碎秸秆的效果优于炭化秸秆,最佳施用量为 $126\text{g}/\text{m}^2$ 。这可能是由于有机物质能够改善基质的物理结构,提高保水能力和营养供应。

苔藓结皮的野外接种技术直接影响培育的成功率和效果,目前主要采用以下几种方法:(1)撒播法,将苔藓繁殖材料均匀撒播在目标区域表面。这种方法操作简单,适用于大面积的培育,但材料利用率较低,受环境因素影响较大^[21];(2)喷洒法,将苔藓繁殖材料制成悬浮液,通过喷洒设备均匀喷洒在目标区域。该方法能够提高材料的均匀性和利用率,但需要专用的喷洒设备^[25];(3)移植法,将实验室培养的苔藓结皮切块直接移植到目

标区域。这种方法成活率高,见效快,但材料成本较高,适用于小面积的示范工程^[23];(4)镶嵌法,将苔藓繁殖材料镶嵌在预先制备的基质块中,然后将基质块铺设在目标区域。该方法有利于控制苔藓的生长环境,适用于特殊生境的培育^[22]。

3 人工BSCs生长发育的影响因子

3.1 人工藻结皮培育的影响因子

温度能够调控人工藻结皮光合效率,研究发现,藻类结皮的净光合速率在冰点至 50°C 的温度范围内随着温度的提高呈现先升高后降低的单峰曲线特征^[26]。在最适温度范围内,温度升高能够促进酶活性和代谢速率,从而提高光合效率;然而,当温度超过最适范围时,高温会导致光合酶结构破坏、活性降低,同时加速水分蒸发,最终导致光合速率下降甚至使结皮进入休眠状态。任珺等^[27]通过控制实验研究发现,当温度为 25°C ,光照强度为 $120\mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,蓝藻结皮表现出最佳的生长状态。这一研究结果为人工藻结皮培育的环境调控提供了重要参考。不同蓝藻物种对温度的适应范围存在显著差异,例如具鞘微鞘藻的最适生长温度为 $25\text{--}30^{\circ}\text{C}$,而念珠藻则在 $20\text{--}25^{\circ}\text{C}$ 范围内生长最佳^[28]。降水作为干旱半干旱地区最主要的水分来源,对人工BSCs的生长发育具有决定性影响。在干旱缺水地区条件下,处于休眠状态的BSCs能够在降水事件后迅速恢复生理活性^[15]。当降雨量处于适宜范围时,BSCs的生物量会与降雨量呈正相关关系^[15];而过多的降雨则反而会降低BSCs的净光合速率^[29],这可能与水分过多导致的氧气供应不足有关。吴丽等^[30]的研究表明,当土壤中的水分含量维持在20%–40%时,最有利于蓝藻的生长发育。

在小环境尺度,土壤质地和结构是影响人工藻结皮生长发育的重要因子。有研究指出,BSCs的生长发育需要土壤中含有4%–5%的粉粒物质^[31]。粉粒物质的存在不仅能够提供必要的黏结力,有助于土壤团聚体的形成,还能改善土壤的保水性能和养分状况。赵燕翹等^[32]的研究发现,适当添加细物质,能够显著提升人工蓝藻结皮的各项生长指标,包括覆盖度、厚度和生物量等。此外,接种量是影响人工藻结皮培育效果的关键。黄明辉等^[33]在旱区农田的研究中发现,藻液接种量与藻结皮盖度之间存在显著的正相关关系。随着藻液接种量的增加,藻结皮盖度的增长速率明显加快;当接种量达到 $1.2\text{L}/\text{m}^2$ 时,藻结皮的盖度达到稳定状态所需的培养时间最短。

3.2 人工藓结皮培育的影响因子

人工藓结皮对环境因子的要求更为苛刻。温度对藓结皮生长发育的影响具有双重性。适宜温度可以促进藓类植物的光合作用与繁殖过程,而极端高温则会对其产生抑制作用。卜崇峰等^[8]的研究表明,当温度控制在 15°C 时,藓结皮的生长发育状况最佳。研究人员在毛乌素沙地的培育实验中发现,当温度超过 25°C 时,藓结皮的生长开始受到抑制;当温度达到 35°C 时,藓类植物的茎叶碎片将完全丧失繁殖能力^[8]。赵河聚等^[34]人的研究还发现,温度变化对藓结皮-土壤系统碳循环过程的影响具有明显的年际差异。在相对干旱的年份中,适度增温会导致系统呼吸速

率的日峰值出现时间提前;而在相对湿润的年份,增温则会使系统呼吸速率的日峰值出现时间延后。这种差异可能与水分条件对温度效应的调节作用有关。土壤水分是人工藓结皮培育过程中的关键因子。在干旱半干旱地区,苔藓结皮通过长期的进化适应,形成了较强的抗旱能力。当水分缺乏时,藓类植物会进入休眠状态以维持自身生存;一旦获得水分供应,它们能够迅速恢复生理活性^[35]。降水事件对藓结皮生态功能的影响具有明显的剂量效应。中等程度的降水可有效激活BSCs及下覆土壤中微生物的代谢活动,从而增大土壤碳释放速率^[36];然而,极端降水事件则可能破坏土壤通气性、堵塞结皮层孔隙,反而抑制生物土壤结皮覆盖区域的土壤碳释放^[37]。

土壤质地对人工藓结皮的发育具有显著调控作用。马小凤等^[38]的研究表明,在藓结皮培育过程中,壤土比砂土基质更有利于藓类植物的生长,壤土培育出的藓结皮在盖度、厚度、生物量、藓株密度、藓株高度及胞外多糖含量等指标上均有显著提升。

4 人工BSCs的生态效益

4.1 改变土壤理化性质

人工BSCs的发育过程显著改变了土壤的理化性质,推动土壤生态系统向健康稳定状态过渡。人工培育的藻结皮、藻-藓混生结皮能形成特殊的致密结构,降雨时水分会快速填充结皮内部孔隙,在表层形成临时不透水层,影响产流时间^[39],从而改变土壤质地、孔隙度、容重、pH值等。研究表明,成熟的人工BSCs覆盖区域的土壤容重可比对照区域降低15%~30%,显著改善了土壤的物理性状^[40]。这种由容重降低带来的土壤结构优化,进一步为人工BSCs发挥水土保持功能奠定了基础。接种的藻类(如具鞘微鞘藻)分泌胞外多糖和苔藓植物的菌丝网络,能够在短期内将松散的沙粒缠绕、黏结,形成稳定的地表覆盖结构,这种结构显著增强了土壤的抗风蚀能力,减少了沙粒搬运过程中土壤养分的流失^[41],研究表明,人工BSCs覆盖区域的土壤侵蚀模数可降低70%~90%^[42],相应地,土壤养分流失量也显著减少。这为后续的土壤改良和植被恢复奠定了重要基础。其次,人工BSCs通过多种途径增加土壤养分输入。一方面,通过筛选人工BSCs中的光合生物或具有高效固氮能力的蓝藻物种(如念珠藻、鱼腥藻等),经生物光合作用、固氮作用固定大气中的氮、二氧化碳氮,提升土壤碳、氮储备^[43];另一方面,人工BSCs的地表覆盖结构能够有效捕获大气沉降颗粒及降雨中的养分(如磷、钾),进一步补充土壤速效养分^[44]。此外,人工BSCs的群落更新(如部分藻体、藓类组织自然凋亡)也可成为有机质输入的另一途径^[45],为土壤异养微生物提供能量与物质,间接促进土壤养分循环,使原有土壤肥力的逐步提升。研究表明,人工BSCs覆盖区域的土壤的有机质、全氮、速效氮、全磷、有效磷及速效钾含量均显著高于对照区域^[21,46]。通过调控人工BSCs的演替进程(如从单一藻结皮向藻-藓混生结皮培育),可以进一步强化其土壤肥力提升功能。例如,相较于以具鞘微鞘藻为优势种的单一藻结皮,演替后期的藻-地衣混生结皮具有更强的养分积累能力^[43]。

4.2 影响水文过程

人工BSCs通过改变地表覆盖状况和土壤物理性质,显著影响干旱半干旱地区的水文过程,这种影响主要体现在地表径流调控、土壤水分分配和水分蒸发等方面。人工BSCs通过改变地表粗糙度和入渗特性,有效调控地表径流。王国鹏等^[47]在黄土高原的研究表明,藻-藓混生结皮可通过调控群落覆盖度与结构致密性,显著增加地表粗糙度,从而能够有效降低雨水对地表的冲刷强度,延缓地表径流的产生时间,减少土壤侵蚀量^[48]。研究数据显示,BSCs覆盖区域的土壤侵蚀量可比裸地减少60%~80%^[49]。此外,人工BSCs通过影响水分入渗和再分配过程,灵活优化土壤水分的空间分布特征,为不同水文需求的场景提供适宜的解决方案:在降水量较大、需重点解决区域内涝的区域,可培育结构更加致密的藻结皮以缩短初始产流时间、促进径流;若需平衡入渗与径流,则可培育疏松度更高的藻-藓混生结皮,适度降低不透水层的阻碍作用,为深层土壤保留水分。学术界对于BSCs对土壤水分入渗的影响存在不同观点。一些研究认为,BSCs会通过阻碍土壤表面的传导孔隙,对土壤水分入渗产生一定的抑制作用^[50];另一些研究表明,通过人工筛选具有特定功能的物种,可以定向调控BSCs的入渗特性。例如,选择具有高粉尘捕获能力的物种构建BSCs,可能适度调整土壤孔隙度,促进降雨快速入渗^[51]。

5 结论与展望

人工BSCs作为干旱半干旱地区生态修复的重要技术手段,在全球气候变化和生态环境恶化的背景下,展现出广阔的应用前景。尽管我国在人工BSCs研究领域已取得显著进展,但在理论基础、技术体系、应用推广等方面仍存在诸多挑战。未来应从基础研究深化、应用场景拓展、技术体系完善、风险管控强化等多个维度进行系统推进,推动该技术从实验室培育向规模化生态修复高效转化。

在基础研究层面,需要加强跨气候区适应性机制研究。当前人工BSCs研究主要集中在黄土高原、库布齐沙漠、腾格里沙漠、毛乌素沙地等温带干旱半干旱地区,而对于青藏高原等高寒高海拔地区的研究相对匮乏。这些特殊气候区域具有独特的环境胁迫因子组合,如极端低温、强烈紫外辐射、昼夜温差大等,对BSCs的生理生态特性提出了更高要求。未来应重点关注高寒地区BSCs的抗冻机制、强紫外辐射环境下的光保护机制、极端干旱条件下的水分利用策略等科学问题,为不同气候区域的人工BSCs培育提供理论支撑。

在应用场景层面,首先需要构建荒漠化综合治理技术体系。将人工BSCs与传统荒漠化防治措施有机结合,构建“人工BSCs+灌木+草本”复合修复模式和“作物秸秆沙障+人工BSCs”一体化固沙技术,充分发挥不同修复措施的协同效应。其次,开发基于BSCs的矿区生态修复与污染治理技术。利用BSCs在土壤修复和污染治理方面的独特优势,发展基于BSCs的矿区重金属污染土壤修复技术,构建“BSCs-微生物-矿物”协同修复体系,结合生物炭等功能材料提升修复效果。

[基金项目]

国家自然科学基金项目(32360326);中央财政林业科技推广示范项目(青[2023]TG11)。

[参考文献]

- [1]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,(03):287-8.
- [2]赵燕翘,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(05):214-22.
- [3]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].中国荒漠生物土壤结皮生态生理学研究,2016.
- [4]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(01):164-73.
- [5]饶本强,王伟波,兰书斌,等.库布齐沙地三年生人工藻结皮发育特征及微生物分布[J].水生生物学报,2009,33(5):937-44.
- [6]郑云普,张丙昌,赵建成,等.不同理化因子对分离于荒漠生物结皮中念珠藻生长的影响[J].河北师范大学学报(自然科学版),2009,33(04):531-7+42.
- [7]郑云普,赵建成,张丙昌,等.荒漠生物结皮中藻类和苔藓植物研究进展[J].植物学报,2009,44(03):371-8.
- [8]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(04):937-41.
- [9]吴永胜,尹瑞平,田秀民,等.毛乌素沙地南缘人工植被区生物结皮发育特征[J].中国沙漠,2018,38(02):339-44.
- [10]聂华丽,吴楠,梁少民,等.不同沙埋深度对刺叶墙藓植株碎片生长的影响[J].干旱区研究,2006,(01):66-70.
- [11]陈彦芹,赵允格,冉茂勇.黄土丘陵陵区藓结皮人工培养方法试验研究[J].西北植物学报,2009,29(03):586-92.
- [12]王鹤松,吴慧光,徐芸,等.科尔沁沙地藓类结皮人工培育技术[J].草原与草坪,2025,45(01):98-106.
- [13]饶本强,刘永定,胡春香,等.人工藻结皮技术及其在沙漠治理中的应用[J].水生生物学报,2009,33(04):756-61.
- [14]贺鸿志,包江桥,周伊薇,等.一株产水杨酸的稻田固氮蓝藻及其在稻田中的应用,CN108753638B[P/OL].
- [15]刘永定,胡春香,张文军.荒漠蓝藻环境生物学与生物土壤结皮固沙[M].荒漠蓝藻环境生物学与生物土壤结皮固沙,2013.
- [16]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(03):31-8.
- [17]许文文,赵燕翘,王楠,等.人工蓝藻结皮对沙区表层土壤酶活性及其恢复速率的影响[J].生态学报,2023,43(07):2856-64.
- [18]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(05):204-11.
- [19]田婧,王兵,马金龙,等.生物结皮生长发育对黄绵土抗侵蚀性能的影响[J].水土保持学报,2024,38(03):73-81.
- [20]程才,李玉杰,龙明忠,等.苔藓结皮在我国喀斯特石漠化治理中的应用潜力[J].应用生态学报,2019,30(07):2501-10.
- [21]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,(01):28-33.
- [22]李晨辉.水蚀风蚀交错区藓结皮野外快速培育试验研究[D].西北农林科技大学,2018.
- [23]田桂泉,白学良,徐杰.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):164-9.
- [24]王鹤松,吴慧光,徐芸,等.施用粉碎、炭化玉米秸秆对藓类结皮生长特性影响研究[J].内蒙古民族大学学报(自然科学版),2024,39(02):69-74.
- [25]孙庚,类延宝,陈珂,等.含壳聚糖/葡聚糖的苔藓孢子体悬浮液在裸地覆绿的应用方法,CN112335508B[P/OL].
- [26]李佳,贾晓红,周德正,等.极端环境生物土壤结皮发育对碳循环的影响[J].中国沙漠,2025,45(03):131-40.
- [27]吕莹,陶玲,任琚.温度和光照强度对蓝藻结皮生理特性的影响[J].兰州交通大学学报,2015,34(06):6-11.
- [28]王一帆,李璇,罗珊珊,等.温度和初始pH对生物结皮中4种优势蓝藻生长的影响[J].应用生态学报,2024,35(02):516-22.
- [29]苏延桂,李新荣,陈应武,等.温度和CO₂浓度升高对荒漠藻结皮光合作用的影响[J].应用生态学报,2010,21(9):2217-22.
- [30]吴丽,杨红,兰书斌,等.干旱与重吸水对人工藻结皮光合特性的影响[J].土壤学报,2015,52(05):1173-9.
- [31]李金峰,孟杰,叶菁,等.陕北水蚀风蚀交错区生物结皮的形成过程与发育特征[J].自然资源学报,2014,29(01):67-79.
- [32]赵燕翘,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(09):2398-404.
- [33]黄明辉,赵允格,高丽倩.人工藻结皮对旱区农田土壤风蚀的防控效应[J].水土保持通报,2023,43(05):1-6+26.
- [34]赵河聚,岳艳鹏,贾晓红,等.模拟增温对高寒沙区生物土壤结皮-土壤系统呼吸的影响[J].植物生态学报,2020,44(9):916-25.
- [35]陈兰周刘,李敦海,沈银武,谢作明.荒漠藻类及其结皮的研究[J].中国科学基金,2003,(02):28-31.
- [36]HUXMANT E,SNYDER K A,TISSUE D,et al.Precipitation pulses and carbon fluxes in semiarid and arid ecosystems[J].Oecologia,2004,141(2):254-68.
- [37]赵洋,齐欣林,陈永乐,等.极端降雨事件对不同类型生物土壤结皮覆盖土壤碳释放的影响[J].中国沙漠,2013,33(02):543-8.
- [38]马小凤,张文芳,高丽倩.土壤质地对人工藓结皮发育及结构体稳定性的影响[J].水土保持研究,2025,32(06):177-83.
- [39]XIAO B,SUN F,YAO X,et al.Seasonal variations in infiltrability of moss-dominated biocrusts on aeolian sand and loess soil in the Chinese Loess Plateau[J].Hydrological Processes,2019,33(18):2449-63.

- [40]高丽倩,赵允格,秦宁强,等.黄土丘陵区生物结皮对土壤物理属性的影响[J].自然资源学报,2012,27(08):1316-26.
- [41]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):2320-34.
- [42]谢申琦,高丽倩,赵允格,等.模拟降雨条件下生物结皮坡面产流产沙对雨强的响应[J].应用生态学报,2019,30(02):391-7.
- [43]BELNAP J,LANGE O L.Biological Soil Crusts:Structure, Function,and Management [J].Springer Berlin Heidelberg,2003, 10.1007/978-3-642-56475-8.
- [44]WEBER B,BüDEL B,BELNAP J.Biological Soil Crusts as an Organizing Principle in Drylands[J].Springer International Publishing, 2016, 10.1007/978-3-319-30214-0(Chapter1):3-13.
- [45]田国霞,朱娉婷,张淇,等.增温对生物土壤结皮微生物群落组成及其呼吸作用的影响[J].华中农业大学学报,2024,43(4): 51-9.
- [46]ZHAOY,XUM,BELNAP J.Potential nitrogen fixation activity of different aged biological soil crusts from rehabilitated grasslands of the hilly Loess Plateau, China[J].Journal of Arid Environments,2010,74(10):1186-91.
- [47]王国鹏,肖波,李胜龙,等.黄土高原水蚀风蚀交错区生物结皮的地表粗糙度特征及其影响因素[J].生态学杂志,2019,38(10):3050-6.
- [48]王林华,汪亚峰,王健,等.地表粗糙度对黄土坡面产流机制的影响[J].农业工程学报,2018,34(05):120-8.
- [49]CHONGFENG,BU,SHUFANG,et al.The combined effects of moss-dominated biocrusts and vegetation on erosion and soil moisture and implications for disturbance on the Loess Plateau,China[J].PloS one,2015.
- [50]李新荣,龙利群,王新平,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):4-11.
- [51]NINGC,XINPING W,YAFENG Z,et al.Ecohydrological effects of biological soil crust on the vegetation dynamics of restoration in a dryland ecosystem[J].Journal of Hydrology,2018, 563:1068-77.

作者简介:

潘健航(2001--),男,汉族,浙江省金华市东阳市人,硕士研究生,研究方向:生态环境工程。