

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.

中国干旱区沙化土地绿色环保治理技术综述

赵洋,潘颜霞,苏洁琼,张志山

(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)

摘要: 土地沙化是中国面临的严重生态问题。沙化土地治理是中国生态文明建设的重点和难点,也是建设美丽中国必须要面对和解决的问题。在干旱区使用人工植被和草方格机械沙障等措施治理沙化土地效果显著,但同时也存在一定的局限性。针对这些问题,近年来中国学者研发和探索了人工生物土壤结皮等诸多新型、快速的沙化土地绿色环保治理技术。本文评述了2000年以来中国学者在这一领域开展的系列创新性研究,分析了其研究前沿和未来发展趋势,以期全面、准确认识和评估绿色环保沙化土地治理技术提供重要依据。

关键词: 美丽中国建设; 沙化土地治理; 人工生物土壤结皮; 绿色环保技术; 沙区

文章编号: 1000-694X(2021)01-195-08

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2020.00097

中图分类号: Q151.94

文献标志码: A

0 引言

中国是世界上受沙漠化威胁最为严重的国家之一。第五次《中国荒漠化和沙化状况公报》监测结果表明,全国沙化土地面积达172.12万 km^2 ,中国每年因沙漠化问题造成的生态和经济损失超过650亿元,近4亿人直接或间接受到沙漠化问题的困扰,严重制约中国生态安全和社会经济可持续发展^[1-2]。可见,土地沙化是中国当前面临最为严重的生态问题之一,也是中国生态文明建设必须解决的重点和难点内容^[3-5]。近60年来,中国的防沙治沙工作在探索中不断前进,积累和总结了众多防沙治沙模式和典范,针对不同生物气候带沙区,建立多种类型的沙漠化治理模式和系统的沙漠化治理技术体系,推动了区域沙漠化的治理进程^[2]。目前,利用人工植被进行沙漠化(或沙害)防治也是国际上公认的沙区生态重建和沙害防治的有效方法和途径^[6-7]。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中却遇到了很多问题。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,影响了沙化治理的进程和成效^[5]。此外,使用最广、效果最明显的半隐蔽式草方格沙障(简称草方格)流沙固定措施,所用麦草/稻草等容易老化腐烂、维

持时间短^[8-9](图1)。更重要的是,在一些区域通过传统方式进行沙漠治理有时很难达到治沙目标,因此干旱区沙化土地治理必须要有新的思路^[8,10-11]。

沙化土地治理是美丽中国建设必须要面对和解决的问题。然而,从实现美丽中国目标的几个时间维度上比较,按目前生态治理的速度,沙区实现美丽中国目标存在较大困难。近年来,沙化土地面积持续减少,但仍有30万 km^2 未得到有效治理^[1],而且治理难度越来越大,极易出现反复,后续巩固与恢复任务繁重,全国防沙治沙形势依然严峻^[2]。在中国2035年基本实现美丽中国目标、2050年全面建成和谐美丽强国愿景(以下简称美丽中国目标)需求下,确立了以自然生态恢复为主的指导思想。然而,以目前1980 $\text{km}^2\cdot\text{a}^{-1}$ 的沙化土地治理速率^[1],在2035年仅能完成14%,2050年治理不到30%。在此背景下,审视沙区实现美丽中国目标的关键问题,生态自然恢复的质量需要人为干预保障、自然恢复的速度需要在科学干预下加快、生态与发展双赢的途径需要深化研究。因此,如何在提质和加速上攻坚克难,确保沙化土地可持续发展,是沙区实现美丽中国目标的当务之急。近年来,人工生物土壤结皮、环保化学材料、生态垫和微生物等快速治沙和

收稿日期:2020-06-13; 改回日期:2020-09-06

资助项目:中国科学院战略性先导科技专项(A类, XDA23060202);国家自然科学基金国际(地区)合作与交流项目(32061123006)

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

通信作者:张志山(E-mail: zszhang@lzb.ac.cn)

生态修复技术发展迅速,成为沙化土地治理的新方法和新模式^[8, 11-12],已成为沙区恢复生态学研究的前沿和热点。全面、准确认识和评估新型固沙技术对沙化土地治理的作用及其对生态系统的影响,是国内外科学界、政府和公众普遍关注的重大科学问题,为提高科学治沙能力提供重要依据。鉴于此,本文评述了2000年以来中国学者在这一领域取得的重要进展,展示了对沙化土地治理研究所做出的贡献。

1 生物土壤结皮固沙技术

生物土壤结皮(BSC)广泛分布于世界和中国干旱、半干旱区,是由蓝藻、地衣、藓类等隐花植物及土壤中的异养微生物和相关的其他生物体与土壤表层颗粒等非生物体胶结形成的十分复杂的复合体,占地表活体覆盖面积的40%以上^[13-14]。作为“荒漠生态系统工程师”,BSC的形成和发育是生态系统健康的主要标志,其在沙漠化防治、维护荒漠生态系统的稳定性和生态修复等方面所发挥的独特作用引起了广泛关注^[10, 15-16]。但BSC自然形成往往需要几十年,人工培育和扩繁隐花植物技术的成功研发缩短了其形成时间,而且迅速促进了沙面固定,并且显著改变了土壤生境,使得BSC在沙化土地治理的应用成为现实^[12, 17-19]。近年来,利用人工结皮固沙技术进行防沙、治沙和生态修复已成为沙化土地治理研究的热点^[12, 20-21]。

蓝藻结皮是BSC演替的初级阶段,其发育及演替促进了沙面表层营养物质的富集,改善土壤理化属性,为土壤其他生物、草本和灌木的生存、发育和繁殖创造了条件,推进了沙化土地恢复^[14]。蓝藻是BSC形成的先锋物种,它们能够在恶劣的环境条件下(如干旱、紫外线辐射、营养贫瘠等)生长和繁殖^[14]。在腾格里沙漠,李新荣等^[22]和Zhao等^[21]对人工蓝藻结皮培养开展了系统研究,从自然发育的蓝藻结皮中分离纯化出了7种优势蓝藻,包括鱼腥藻(*Anabaena* sp.)、念珠藻(*Nostoc* sp.)、席藻(*Phormidium* sp.)、伪枝藻(*Scytonema* sp.)和单歧藻(*Tolypothrix* sp.)等,建立了蓝藻工厂化培养基地,制定了培养标准。在此基础上,Zhao等^[23]和Park等^[24]分别使用“草方格+蓝藻藻液”和“固沙剂+蓝藻藻液”的方法在野外成功培养出了蓝藻结皮。然后,Zhao等^[21, 25]提出了“育苗+撒播”的模式,成功解决了人工蓝藻结皮培养和养护过程中大量用水的问题,形成

了节水型人工蓝藻结皮培养+养护技术体系。这些技术在宁夏回族自治区中卫市长流水流沙区进行了大面积示范,得到了当地政府有关部门的一致认可(图2)。此外,Li等^[26]和Chi等^[27]尝试用湖泊中生长的蓝藻进行人工蓝藻结皮培养也取得了一些进展。在库布齐沙漠,Lan等^[18]、Wang等^[28]和Chen等^[29]成功分离出蓝藻结皮中的具鞘微鞘藻(*Microcolus vaginatus*)和爪哇伪枝藻(*S. javanicum*),明确了人工蓝藻结皮野外培养的最佳光照、温度和养分条件。来自古尔班通古特沙漠的研究发现,土壤可利用水分可促进具鞘微鞘藻的代谢活动和胞外多糖合成,早期的水分获得是其成功形成蓝藻结皮的关键因素^[30]。

藓类结皮处于BSC演替的后期,较演替初期的蓝藻结皮生产力更高、抗风蚀性更强^[14]。作为藓类结皮的核心组分,藓类植物具有较强的生理耐旱、修复能力和无性繁殖能力,是培养人工藓类结皮的理想材料。大量研究表明藓类植物的芽、茎、叶均能用于人工藓类结皮培养^[17, 31]。在古尔班通古特沙漠、腾格里沙漠、毛乌素沙地以及在黄土高原分别使用刺叶墙藓(*Tortula desertorum*)、真藓(*Bryum argenteum*)和土生对齿藓(*Didymodon vinealis*)成功培养出了藓类结皮,研究者们已明确了人工藓类培养的最佳温湿度、营养液及浓度、基质和野外接种方法^[17, 31-32]。此外,他们在实验室和野外条件下比较了蛭石、沙子、黄土和锯末4种基质对人工藓类结皮形成的影响,结果显示蛭石基质+25%浓度的Knop营养液培养的真藓盖度、株高和株数最高,活性最好^[22]。也有研究发现,芽孢杆菌与植物生长调节剂对藓类结皮生长发育具有显著的促进作用^[33]。

地衣结皮是除了蓝藻和藓类结皮外的第3种BSC类型。它是地衣专化型真菌与一些低等光合共生物,如藻类及菌类紧密结合成的体内胞外互惠共生型生态系统^[13-14]。因此,理论上将地衣结皮中的共生真菌和共生藻分别进行人工培养,一起喷洒后便能形成人工地衣结皮。然而,地衣共生体并非真菌与藻类的简单加和,而是经过长期的相互作用演化而成的、既不同于真菌又不同于藻类的生物体。此外,研究表明人工分离培养的共生菌和共生藻与地衣共生体菌藻相比,其结构、生理、化学和遗传均有较大区别^[34],目前国内仍鲜见人工地衣结皮进行沙化土地治理的报道^[10]。

人工培养的蓝藻和藓类结皮显著增强了沙面

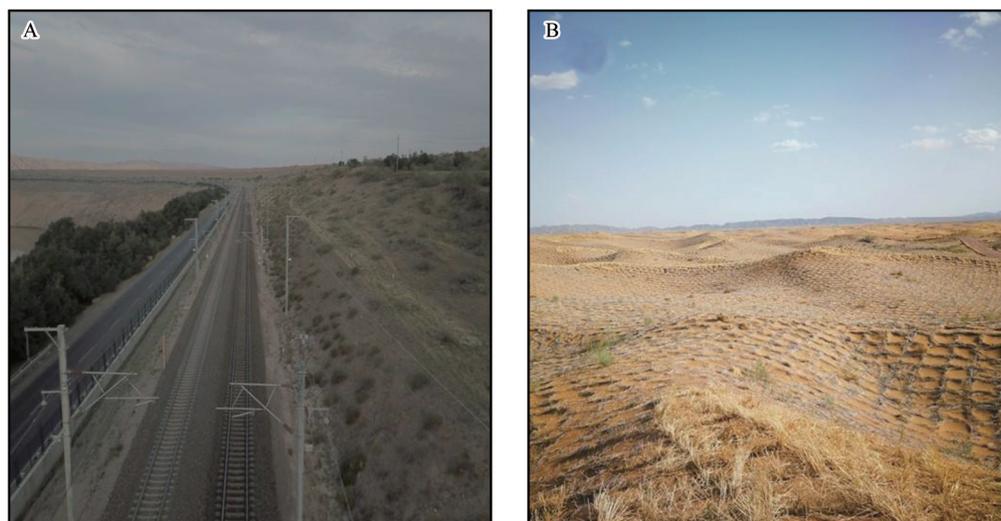


图1 包兰铁路沙坡头段人工固沙植被防护体系(A)和草方格流沙固定措施(B)

Fig.1 Protection system of artificial sand fixation vegetation in Shapotou section of Baotou-Lanzhou railway (A) and straw-checkerboard barriers sand fixing measure (B)

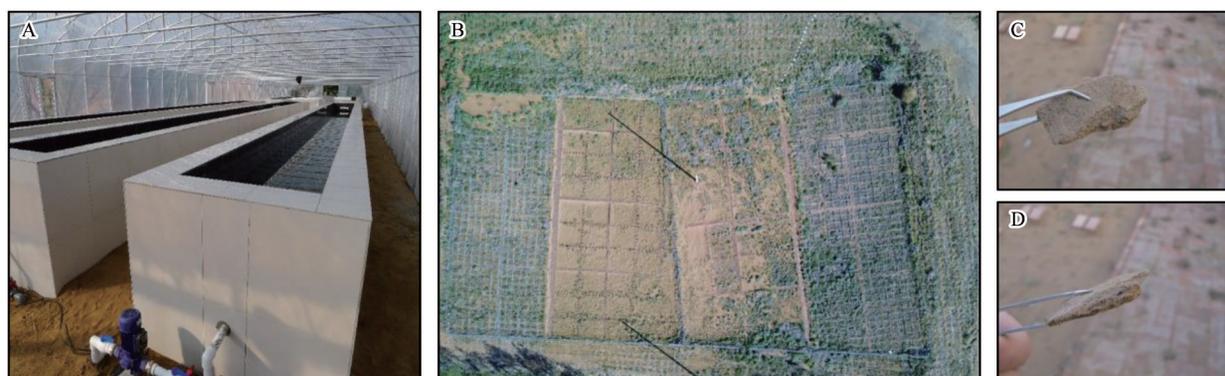


图2 沙坡头站蓝藻规模化生产基地(A)、“草方格+蓝藻藻液”方法培育的人工蓝藻结皮(B, C和D; 引自Zhao等^[23])

Fig.2 Cyanobacteria cultivation base in Shapotou station (A) and artificial cyanobacteria crust cultivated by using “straw-checkerboard barriers with cyanobacteria” method (B, C and D; Cited from Zhao *et al.*^[23])

稳定性^[21,24],促进沙化土地的土壤理化属性、土壤酶活性及微生物多样性恢复^[18,31],提高了草本植物多样性^[21,23],为中国干旱和半干旱地区沙化土地修复提供了有力的技术支撑^[22,35]。值得注意的是,在使用人工结皮固沙技术进行防沙治沙时,应当根据土壤质地和化学性质,以及当地的气候条件,因地制宜选择适宜的人工结皮类型^[22]。

2 环保化学固沙材料

化学材料固沙技术是应用人工合成和植物提取的具有固沙作用的化学材料,在沙丘或沙质地表喷洒快速形成能够防止风力吹扬、又具有保持水分和改良沙地性质的固结层,以达到固定流沙和防治沙害的目的^[36-37]。中国在化学固沙研究方面进行了一系列开创性探索和试验,在实际应用中也取得了

较好成绩。

20世纪60年代起,中国开展了大量化学固沙研究。早期研发的多数固沙剂对植物生长影响较大,材料成本较高,无法大规模推广应用^[36]。近年来,涌现出一批环保化学固沙新材料。在中国北方沙区,改性水溶性聚氨酯(W-OH)^[38]、改性醋酸乙烯酯高分子聚合物(GS-3)^[39]以及聚氨酯和聚醋酸乙烯酯乳液^[40]等环保化学固沙剂均能显著提高固沙植物出苗率和促进植物生长,同时也是沙漠公路两侧和沙漠中基础设施周边等防护沙害的理想固沙材料。在高盐沙地固沙实践中,高分子乳液固沙很好地克服了普通化学固沙剂耐盐性能和生态效应差的问题,取得了良好的沙化土地治理效果^[41]。纳米TiO₂改性P(VAc/BA)乳液显著提高川西北高海拔沙化土地治理效率,很好地解决了高海拔沙区冻融

循环和耐热循环对固沙剂的影响^[42]。值得关注的是,化学固沙剂不仅单独用于沙化土地治理,而且可以和人工结皮结合形成“化学固沙剂+人工结皮”固沙模式。例如,在腾格里沙漠,Zhao等^[23]、Li等^[26]和Park等^[43]分别证明了使用环保固沙剂W-OH、纳米复合固沙剂和TKS7(Tacki-SprayTM)能够促进人工蓝藻结皮的拓殖和发育。Peng等^[44]在科尔沁沙地的研究发现海藻酸钠结合蓝藻的方法能够加速蓝藻结皮的形成。

除化学固沙剂外,高分子聚合物材料产品也被尝试用于沙化土地治理。王多泽等^[45]使用高分子聚合物材料制作的仿生半灌木油蒿在退化梭梭林进行了固沙研究,结果显示仿真灌木可以有效降低风速,减少35%的输沙率,认为仿真固沙灌木林的建立不受气候条件影响,具有可重复应用等优点。潘瑞萍等^[46]将塑料网格(高密度聚乙烯)沙障固沙技术在临(河)策(克)铁路(乌兰布和巴丹吉林沙漠北部边缘)治沙造林中进行了推广应用,取得了良好的效果。牛存洋等^[47]在科尔沁沙地对塑料网格沙障固沙技术的研究发现,该技术可降低风速、减少风蚀、促进植被恢复等。尽管这些研究者一致认为仿生灌木、塑料沙障等固沙技术具有低成本、易操作、寿命长等特点,但同时强调所使用的高分子聚合物材料自然降解困难,实际应用中必须及时回收失效材料,避免环境污染^[46]。

生物类高分子固沙材料来源于生物原料,具有较高的熟度和良好的吸水性、保水性及热稳定性,而且来源广、易分解、无污染,为绿色环保固沙材料研发提供了新思路。李玉领^[48]和刘军^[49]研究发现沙蒿胶(白沙蒿(*Artemisia sphaerocephala*)种子表皮提取的一种亲水性胶体)固沙效果良好,有效改善了土壤微环境,提高了地表抗风蚀能力,并建议野外固沙的最适沙蒿胶喷洒浓度20%左右。刘阳等^[50]探索了大豆脲酶诱导碳酸钙沉积技术的固沙效果,结果显示使用该技术后土壤保水性提高了60%,风蚀率和渗透速率显著降低。杨明坤^[37]以玉米苞皮、秸秆为原料,采用溶媒法二次加碱工艺合成了羧甲基纤维素钠固沙剂,研究发现该固沙剂固化效果明显,风速 $13\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (约为六级风)以下风蚀率小于0.1%,且该材料可降解,对土壤、动植物无危害,具有较好的环境相容性。

近年来,具有良好的吸水性、持水性及抗风蚀能力强的矿物质材料也引起了研究人员的关注。

童伟等^[51]在毛乌素沙地探索了砒砂岩和沙子复配固沙技术,结果显示使用该材料后土壤含水量、地表粗糙度等都有所增加,抗风蚀能力增强。陶玲等^[52]研究发现凹凸棒基高吸水性固沙材料显著促进了蓝藻和藓类结皮发育。在青海沙化土地的研究发现,以石膏基固沙复合材料结合植物草种的配合方式能够有效固定流沙^[53]。王爱娣^[54]和王辉^[55]分别证明了天然矿物黏土复配环境友好型高分子材料制备的新型固沙剂材料具有良好的固沙效果。

目前,环保化学固沙材料固沙技术主要应用于干旱沙区一些重要的基础设施,如机场、交通线(铁路和公路等)、军事设施和重要的工矿区,并常作为植物固沙的辅助性和过渡性措施^[8,36]。

3 生态垫

生态垫是利用棕榈树残渣制造的一种可降解网状覆盖物,具疏松多孔和易分解的优点,属纯天然植物制品。生态垫覆盖提高土体防剪强度和降低雨水侵蚀,施工中铺设简单、高效等特点引起了中国科研人员的关注,并将其应用到防沙治沙实践中^[56-58](图3)。大量研究发现,生态垫覆盖显著影响植物成活率、生长和盖度^[58-60]。在中国京津风沙源治理工程中的研究发现,铺设生态垫增加了油松(*Pinus tabuliformis*)、青杨(*Populus cathayana*)和栌树(*Koelreuteria paniculata*)等乔木成活率、浅层根系生物量分配和胸径直径,提高了光合和蒸腾速率,但同时降低了自然分布物种的丰富度和生物量及土壤微生物数量^[56]。在河北省张家口市宣化县境内黄羊滩沙地的研究证明,生态垫覆盖显著增加了小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)、沙枣(*Elaeag-*



图3 生态垫固沙

Fig.3 Ecological mat sand fixing measure

nus angustifolia)和侧柏(*Platycladus orientalis*)的保存率、生长量和植被盖度^[59,61]。来自在干旱沙区的研究发现,覆盖生态垫后,梭梭(*Haloxylon ammodendron*)和花棒(*Hedysarum scoparium*)的地径、高生长以及冠幅均显著增加,提高了灌木成活率^[58,60]。

关于生态垫提高固沙植物成活率的原因,学术界已经进行了较为深入的研究。研究发现生态垫覆盖增加了土壤含水量,0—20 cm土壤含水量提高17.4%,20—40 cm土壤含水率提高了8.9%^[56-57,59-60];降低了风蚀强度,减少了水土流失^[56],增加了沙面稳定性^[58];在植物生长季,生态垫覆盖较裸地的土壤温度降低1.8—4.5 °C^[56,59];增加了土壤氮和钾的含量,增加了土壤酶活性^[62]。综上,“生态垫覆盖+固沙植物”是目前一致认可的沙化土地治理模式,生态垫通过改善土壤微生境提高乔木和灌木成活率和盖度,实现沙化土地治理。

4 微生物固沙技术

微生物固沙技术是将具有固沙作用的土壤微生物施加到沙面表层,短期内形成稳定土壤环境的一种技术,具有快速、高效、持久的固沙成土和增肥效果,适宜于干旱、半干旱地区流动和半流动沙丘的固定和退化生态系统恢复^[22,63-64]。目前土壤微生物固沙的研究已有大量报道,在腾格里沙漠分离出的芽孢杆菌(*Bacillus tequilensis* CGMCC 17603)^[65],以及柴达木盆地土壤中分离出的海球菌属(*Marinococcus*)、芽孢杆菌属和糖球菌属(*Gracilibacillus*)等19株菌株均具有一定的沙粒团聚效果^[66]。在古尔班通古特沙漠,Pan等^[63]分离得到的寡营养细菌(SGB-5)在实验室条件下和野外条件下均能够迅速固定沙面,具有一定的减缓土壤中水分蒸发的效果^[67];研究者将分离出的另外一株高产胞外多糖菌胶质类芽孢杆菌(*Paenibacillus mucilaginosus* KLBB0001)进行野外固沙研究发现,该菌株对沙化土地的恢复起到有效的促进作用,在缺少水分和养分的环境中表现良好^[64]。邓振山等^[68]从陕北毛乌素沙地土壤中筛选出一株葡萄孢属(*Botrytis*)真菌,固沙试验结果表明该菌剂喷洒于流沙表面可起到黏结沙粒、保持水分的作用。微生物菌剂和固沙植物联合使用也取得了良好的固沙效果。孔剑捷等^[69]研究发现巴氏芽孢八叠球菌(*Sporosarcina pasteurii*)和沙蒿(*Artemisia desertorum*)、沙打旺(*Astragalus adsurgens*)结合,显著增加了固沙植物的成

活率,有效促进了流沙固定。Xiao等^[19]在黄土高原的研究证明了微生物在土壤恢复中至关重要。由于微生物菌种培养、接种或制剂喷洒受多种因素限制,目前利用土壤中固沙微生物及其培养液进行大规模沙害治理的实践活动仍未见报道。

5 展望

中国近60年来在沙害治理方面取得了许多重要进展,但在过去生态治理成就显著的大背景下,生态建设中也出现了许多问题。核心问题是违背自然规律的建设,片面追求植被盖度,造成短期“绿”、长期“黄”的不可持续现象^[11,16]。沙面稳定性增强、土壤结构和微生物过程的恢复对沙化土地的恢复具有重要的指示作用。因此,在沙区进行生态重建与恢复时,必须考虑土壤生境的恢复^[11],不仅是沙化土地治理的重要目标,也是美丽中国之美丽沙区和生态文明建设的核心内容。尽管化学材料固沙技术能够提高固沙植物的成活率和盖度,但它们对土壤理化和生物属性恢复的贡献极小。此外,大多数的高吸水性聚合物均是基于石油基聚体,价格昂贵,难以降解,对环境产生污染。人工生物土壤结皮固沙技术具有快速、高效、持久的固沙成土和增肥效果,符合干旱、半干旱地区流动和半流动沙丘的固定和退化生态系统恢复的要求,不仅为中国防沙治沙提供了新思路和新途径,而且能够加速中国沙漠化治理进程,增强治理的可持续性。因此,以人工生物土壤结皮为代表的生物载体固沙技术是中国未来新型绿色环保固沙技术发展的主要方向,对于荒漠化地区生态环境的恢复与重建不仅必要而且可行,在沙化土地治理中有着重大的理论价值和广阔的应用前景。

水分是干旱、半干旱沙区诸多生态格局和过程的驱动力,控制着荒漠生态过程^[5,70]。然而,在上文提到的诸多固沙技术的实施都离不开水的参与,这无疑对水资源原本就紧缺的干旱、半干旱区用水安全造成了威胁。与此同时,这些固沙技术所用的材料成本较高,不适宜进行大面积推广。更重要的是,这些技术必须由专业人员施工,且施工所需工作人员多,阻碍了技术推广。显然,节水型、低成本和易操作是绿色环保固沙技术亟需突破的瓶颈,而高效的施工方法是绿色环保固沙技术的迫切需求。此外,尽管已有绿色环保固沙材料规模化生产的报道,如蓝藻等。但是,总体而言,绿色环保固沙技术

所需材料的大规模生产仍处于探索阶段,而且没有规范生产标准。显然,在固沙实践中需要提供足够的、高质量的生物体材料,形成规范的生产方法和生产体制是首要解决的问题。因此,固沙材料产业化是绿色环保固沙技术发展和推广应用的必然趋势。

随着“丝绸之路经济带”和“美丽中国”建设的开展,对中国干旱区沙化土地治理提出了更高的要求。沙化土地绿色环保治理技术的发展,不仅要从根本上扭转沙漠化点上治理、面上破坏、局部改善、整体恶化的局面,实现标本兼治,而且要针对干旱区农牧交错带、干旱区沙漠与干草原、绿洲与沙漠边缘的过渡区、沙漠边缘风沙扩张带,以及铁路、公路、风/光伏电站等重大工程建设,不断升级和完善技术体系,满足这些区域的生态治理要求。目前,中国仍鲜见绿色环保治理技术进行大规模沙化土地治理的模式,急需借鉴包兰铁路沙坡头段“以固为主、固阻结合”的铁路综合防沙治沙体系的模式,以水定林的“低覆盖度防沙治沙”模式等经典模式,探索沙化土壤“绿色”治理模式。无论是人工结皮固沙技术、微生物固沙技术,还是化学固沙和生态垫等绿色固沙技术,都具有一定的局限性。例如,人工生物结皮及微生物固沙等方式仅仅涉及地表几毫米至几厘米,因此需要结合其他固沙措施,取长补短,形成人工结皮和植被、沙障等相结合的综合治沙模式,这也是沙化土地绿色环保治理技术未来的发展趋势。

参考文献:

- [1] 国家林业局.第五次全国荒漠化和沙化监测情况公报[M]. 2015.
- [2] Wang T, Xue X, Zhou L, et al. Combating aeolian desertification in northern China [J]. *Land Degradation and Development*, 2015, 26(2): 118-132.
- [3] 傅伯杰,周国逸,白永飞,等.中国主要陆地生态系统服务功能与生态安全[J].*地球科学进展*, 2009, 24(6): 571-576.
- [4] 欧阳志云,崔书红,郑华.我国生态安全面临的挑战与对策[J].*科学与社会*, 2015, 5(1): 20-30.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 卢琦,刘力群.中国防治荒漠化对策[J].*中国人口·资源与环境*, 2003, 13(1): 86-91.
- [8] 屈建军,凌裕泉,刘宝军,等.我国风沙防治工程研究现状及发展趋势[J].*地球科学进展*, 2019, 34(3): 225-231.
- [9] 吴正.风沙地貌与治沙工程学[M].北京:科学出版社,2003.
- [10] 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.
- [11] 李新荣,赵洋,回嵘,等.中国干旱区恢复生态学研究进展及趋势评述[J].*地理科学进展*, 2014, 33(11): 1435-1443.
- [12] 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.
- [13] Belnap J, Lange O L. *Biological Soil Crust: Structure, Function, and Management* [M]. Berlin-Heidelberg, Germany: Springer, 2003.
- [14] 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.
- [15] Bowker M A. Biological soil crust rehabilitation in theory and practice: an underexploited opportunity [J]. *Restoration Ecology*, 2007, 15(1): 13-23.
- [16] 李新荣,张志山,刘玉冰,等.长期生态学研究引领中国沙区的生态重建与恢复[J].*中国科学院院刊*, 2017, 32(7): 790-797.
- [17] Bu C F, Li R X, Wang C, et al. Successful field cultivation of moss biocrusts on disturbed soil surfaces in the short term [J]. *Plant and Soil*, 2018, 429(1/2): 227-240.
- [18] Lan S B, Zhang Q, Wu L, et al. Artificially accelerating the reversal of desertification: cyanobacterial inoculation facilitates the succession of vegetation communities [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(1): 307-315.
- [19] Xiao B, Hu K L, Veste M, et al. Natural recovery rates of moss biocrusts after severe disturbance in a semiarid climate of the Chinese Loess Plateau [J]. *Geoderma*, 2019, 337(3): 402-412.
- [20] Zhou X B, Zhao Y G, Belnap J, et al. Practices of biological soil crust rehabilitation in China: experiences and challenges [J]. *Restoration Ecology*, 2020, 28(S2): 13148.
- [21] Zhao Y, Jia R, Wang J. Towards stopping land degradation in drylands: water-saving techniques for cultivating biocrusts in situ [J]. *Land Degradation and Development*, 2019, 30(12): 2336-2346.
- [22] 李新荣,回嵘,赵洋.中国荒漠生物土壤结皮生理生态学研究[M].北京:高等教育出版社,2016.
- [23] 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(8): 115-120.
- [24] 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.
- [25] Zhao Y, Wang N, Zhang Z S, et al. Accelerating the development of artificial biocrusts using covers for restoration of degraded land in dryland ecosystems [J]. *Land Degradation and Development*, 2021, 32(1): 285-295.
- [26] Li Z H, Xiao J, Chen C, et al. Promoting desert biocrust formation using aquatic cyanobacteria with the aid of MOF-based

- nanocomposite [J]. *Science of the Total Environment*, 2020 (708):1-11.
- [27] Chi Y, Li Z, Zhang G, et al. Inhibiting desertification using aquatic cyanobacteria assisted by a nanocomposite [J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2020, 8(8):3477-3486.
- [28] Wang W B, Liu Y D, Li D H, et al. Feasibility of cyanobacterial inoculation for biological soil crusts formation in desert area [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(5):926-929.
- [29] Chen L, Xie Z, Hu C, et al. Man-made desert algal crusts as affected by environmental factors in Inner Mongolia, China [J]. *Journal of Arid Environments*, 2006, 67(3):521-527.
- [30] 张丙昌,王敬竹,张元明,等.水分对具鞘微鞘藻构建人工藻结皮的作用[J].*应用生态学报*,2013,24(2):535-540.
- [31] 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(6):75-83.
- [32] Xu S, Yin C, He M, et al. A technology for rapid reconstruction of moss-dominated soil crusts [J]. *Environmental Engineering Science*, 2008, 25(8):1129-1138.
- [33] 王清玄,鞠孟辰,卜崇峰.芽孢杆菌与植物生长调节剂在苔藓结皮种源扩繁中的作用[J].*水土保持通报*,2019,39(5):166-171.
- [34] 古海尼沙·买买提.十种地衣体内藻的分离培养、生化成分测定及藻结皮条件研究[D].乌鲁木齐:新疆大学,2019.
- [35] Zhou X, An X, De Philippis R, et al. The facilitative effects of shrub on induced biological soil crust development and soil properties [J]. *Applied Soil Ecology*, 2019, 137(5):129-138.
- [36] 赖俊华,张凯,王维树,等.化学固沙材料研究进展及展望[J].*中国沙漠*,2017,37(4):644-658.
- [37] 杨明坤.纤维素基环保固沙剂的制备与性能研究[D].北京:北京化工大学,2012.
- [38] 梁止水,吴智仁.改性水溶性聚氨酯的固沙促生性能及其机理[J].*农业工程学报*,2016,32(22):171-177.
- [39] 钟帅,韩致文,李爱敏.GS-3生态固沙剂性能及其浓度对植物生长的影响[J].*农业工程学报*,2018,34(24):107-114.
- [40] 谢浩,刘白玲,王文浩,等.聚氨酯的生态固沙性能及其与聚醋酸乙烯酯乳液的对比[J].*高分子材料科学与工程*,2018,34(3):87-92.
- [41] 龚伟,李美兰,谢浩,等.高盐沙地用固沙材料固沙性能研究的必要性[J].*塑料*,2018,47(1):60-63.
- [42] 唐立涛,刘军,陈华林,等.纳米TiO₂改性聚醋酸乙烯酯-丙烯酸丁酯乳液的制备及其在高寒沙地固沙中的应用性能II乳液的固沙性能研究[J].*西南民族大学学报(自然科学版)*,2018,44(4):358-366.
- [43] Park C H, Li X R, Jia R L, et al. Combined application of cyanobacteria with soil fixing chemicals for rapid induction of biological soil crust formation [J]. *Arid Land Research and Management*, 2016, 31(1):81-93.
- [44] Peng C, Zheng J, Huang S, et al. Application of sodium alginate in induced biological soil crusts: enhancing the sand stabilization in the early stage [J]. *Journal of Applied Phycology*, 2017, 29(3):1421-1428.
- [45] 王多泽,袁宏波,郭春秀,等.仿真固沙灌木林与塑料网方格沙障防风固沙效能比较[J].*防护林科技*,2014,11(11):6-10.
- [46] 潘瑞萍,王亮,李君,等.塑料网格沙障固沙技术在临策铁路治沙造林中的推广应用[J].*内蒙古林业*,2014,58(6):10-11.
- [47] 牛存洋,阿拉木萨,宗芹,等.科尔沁沙地流动沙丘塑料防沙网防风固沙效果试验[J].*水土保持学报*,2013,27(4):12-16,22.
- [48] 李玉领.沙蒿胶-微藻联合固沙效果的试验研究[D].湖南衡阳:南华大学,2017.
- [49] 刘军.沙蒿胶固沙性能及其对土壤微生物和生物结皮培育的影响[D].北京:北京林业大学,2016.
- [50] 刘阳,高玉峰,何稼,等.大豆脲酶诱导碳酸钙沉积技术的防风固沙试验研究[J].*河南科学*,2019,37(11):1784-1789.
- [51] 童伟,韩雾昌,王欢元,等.毛乌素沙地砒砂岩与沙复配成土技术固沙效应[J].*中国沙漠*,2015,35(6):1467-1472.
- [52] 陶玲,曹田,吕莹,等.生物型凹凸棒基高分子固沙材料的复配效果[J].*中国沙漠*,2017,37(2):276-280.
- [53] 马晓芳.石膏基固沙复合材料与青藏高原沙生植物相容性研究[D].西宁:青海大学,2016.
- [54] 王爱娣.黏土基复合固沙材料性能研究[D].兰州:西北师范大学,2013.
- [55] 王辉.黏土基改性水性聚氨酯纳米复合材料的制备及固沙性能研究[D].兰州:西北师范大学,2014.
- [56] 孙向阳.生态垫(Ecomat)在京津风沙源治理造林工程中的应用研究[D].北京:北京林业大学,2004.
- [57] 李禄军.绿洲-荒漠交错带生态垫覆盖下沙丘土壤水分动态及预测[D].兰州:甘肃农业大学,2007.
- [58] 侍月华.生态垫覆盖在沙漠治理中的应用分析[J].*现代农业科技*,2020,48(1):194-195.
- [59] 杨志国,孙保平,丁国栋,等.应用生态垫治理流动沙地机理研究[J].*水土保持学报*,2007,21(1):50-53.
- [60] 张梅花.生态垫覆盖对沙丘土壤水分及荒漠灌木生长的影响[J].*水利规划与设计*,2019,31(4):68-71.
- [61] 李澍贵,王志宏,李英华,等.生态垫流动沙地应用试验[J].*河北林业科技*,2011,38(4):6-8.
- [62] 沈文森,耿玉清,王小平,等.覆盖生态垫对沙地土壤有机碳和酶活性的影响[J].*东北林业大学学报*,2010,38(6):68-71.
- [63] Pan H X, Zheng M C, Xue M Z, et al. A study on an oligotrophic bacteria and its ecological characteristics in an arid desert area [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2007, 50(S1):128-134.
- [64] Wu N, Pan H X, Qiu D, et al. Feasibility of EPS-producing bacterial inoculation to speed up the sand aggregation in the Gurbantunggut Desert, Northwestern China [J]. *Journal of Basic Microbiology*, 2014, 54(12):1378-1386.
- [65] Zhao L N, Li X R, Wang Z R, et al. A New strain of *Bacillus tequilensis* CGMCC 17603 isolated from biological soil crusts: a promising sand-fixation agent for desertification control [J]. *Sustainability*, 2019, 11(22):6501-6516.
- [66] 艾雪,王艺霖,张威,等.柴达木沙漠结皮中耐盐碱细菌的分

- 离及其固沙作用研究[J].干旱区资源与环境,2015,29(10):145-151.
- [67] 潘惠霞,程争鸣,张元明,等.寡营养细菌(*Oligographic bacteria*)及其固沙作用的研究[J].中国沙漠,2007,27(3):473-477.
- [68] 邓振山,赵佳福,雷超,等.一株葡萄孢属(*Botrytis*)真菌结皮效果的研究[J].干旱地区农业研究,2012,30(5):200-204.
- [69] 孔剑捷,陈萍,黄顺心,等.微生物矿化与植物共同作用下荒漠风积沙固化试验研究[J].浙江理工大学学报(自然科学版),2019,41(5):688-696.
- [70] 李新荣,张志山,黄磊,等.我国沙区人工植被系统生态-水文过程和互馈机理研究评述[J].科学通报,2013,58(Z1):397-410.

Research status and development trend of green and environmental protection technologies on desertification land prevention in arid region of China

Zhao Yang, Pan Yanxia, Su Jieqiong, Zhang Zhishan

(Shapotou Desert Research and Experiment Station, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Land desertification is currently one of the most serious ecological problems in China. Land desertification control is the focus and difficulty of China's ecological civilization construction. It is also the problem that must be faced and resolved in the construction of beautiful China. The use of artificial vegetation and straw check-board mechanical sand barriers in arid areas has significant effects on desertified land, but there are also certain limitations. In response to these problems, Chinese scholars developed and explored many new and rapid green and environmental protection technologies for desertification land in recent years, such as artificial biological soil crusts. This paper reviewed a series of innovative studies carried out by Chinese scholars in this field since 2000, and analyzed the research frontiers and future development trends. We expected to provide an important basis for the comprehensive and accurate understanding and evaluation of green and environmental protection desertification land management technologies.

Key words: Beautiful China initiative; desertification land prevention; artificial biological soil crusts; green and environmental protection technologies; sand land