

文章编号:1000-1638(2025)01-0100-13

DOI:10.13484/j.nmgdxzbk.20250111

固沙材料研究现状与前景展望*

潘霞¹,王祯仪²,王敬安³,高博文⁴,赵欣蕊¹

(1. 内蒙古财经大学资源与环境经济学院,内蒙古产业发展研究基地,呼和浩特 010070;

2. 内蒙古财经大学统计与数学学院,呼和浩特 010070;

3. 内蒙古河套灌区水利发展中心乌兰布和分中心,内蒙古巴彦淖尔 015200;

4. 内蒙古农业大学沙漠治理学院,呼和浩特 010018)

摘要:固沙材料在防止沙漠化扩张、促进植被恢复、调节气候、保障基础设施安全、拓展土地资源以及保护水资源等方面具有关键作用,对生态、经济和社会的可持续发展意义重大。本文对目前常见的工程固沙、生物固沙和化学固沙三大固沙措施的固沙材料进行分类归纳,对固沙材料的固沙机理、使用限制进行了重点分析,并获得以下认识:1) 工程固沙是通过在沙地或沙丘表面设置沙障达到减弱地表风沙流强度从而实现防风固沙的目的,效果显著,但成本高且与环境相容性差,尤其在风沙严重区,该措施只能作为临时性固沙措施。2) 生物固沙是通过封育和栽种耐旱植物或培育固沙微生物等方式,提高沙区环境质量和生产潜力的一种应用最为普遍的技术措施,但是需水量较大,试验证明该措施可作为根本性固沙措施。3) 化学固沙是通过化学黏结材料将松散的沙土黏结在一起,形成固结层,从而阻止风力对沙粒的吹扬和搬运。该措施成本低廉、施工简便,但固沙周期短,且多数化学固沙剂存在高毒性、环境可降解性差等问题,至今也未能普遍应用。此外,固沙材料发展前景表现为:1) 加快研发“低消耗、高效率、易实现”的防沙治沙新材料、新技术是新时代防沙治沙绿色升级技术研发的优先发展方向;2) 利用内蒙古的风能和太阳能等优势资源,配套协调性好、作业质量高、舒适度和安全性最优的治沙机械化设备才能适应市场竞争,满足新时代需求;3) 积极参与国际荒漠化防治工作,并向主导地位奋进,积极提高我国在荒漠化防治领域的国际知名度,向世界传递“中国智慧”。

关键词:固沙材料;工程固沙;生物固沙;化学固沙;荒漠化防治

中图分类号:S156.2 **文献标志码:**A

沙漠化严重威胁人类的生存和发展,是当今社会-经济-人类可持续发展中亟待解决的重大难题之一。沙漠化不仅是中国需要面对的问题,也是困扰全球的难题。在《沙漠化防治公约》和联合国环境规划署的带领下,全球荒漠化防治已步入一个崭新的阶段,全球都在向2030年实现全球土地退化“零增长”的远大目标奋进^[1]。

全球荒漠化防治工作中认为应极大化地利用区域资源优势,各国先从内部尽力缩减土地荒漠化

* 收稿日期:2023-12-09;修回日期:2024-09-19

基金项目:内蒙古高等学校碳达峰碳中和研究专项(STZX202309);2023年度内蒙古产业发展研究基地项目(2023YB008);2024年度自治区“五大任务”研究专项(NCXWD2416);内蒙古财经大学2023年度党建带团建研究专项(DTY2322)

作者简介:潘霞(1993-),女,内蒙古呼和浩特人,讲师,博士。主要从事荒漠化防治研究。E-mail: xianpan0712@foxmail.com

通信作者:王敬安(1967-),男,内蒙古巴彦淖尔人,正高级工程师。主要从事荒漠化防治研究。E-mail: 18248113866@163.com

面积。我国荒漠化防治过程中在防沙治沙措施、造林工程、专利设计等相关科研成果方面取得了举世瞩目的成就。其中,“三北”防护林建设工程、京津风沙源治理工程、退耕还林还草工程等大规模、全方位的重大林业生态工程已顺利实施,初步遏制了土地沙漠化的加剧进程。在此基础上,我国荒漠化防治工作已进入到下一个“高水平、高科技、机械化”的阶段。回顾我国上一个阶段的防沙治沙工作,发现过去多沿用以“覆盖度高,治沙效果好”的植物学观点为基础的高密度植被恢复,导致水资源过度消耗,造成人工林大面积衰退或死亡,生物防沙体系崩溃。同时,防沙治沙工作中还存在工程固沙材料匮乏、易损毁、成本高等问题。此外,我国主要依靠人力治沙,固沙装备严重缺乏等问题也极大地限制了防沙治沙工作的深入开展。基于此,本文对我国现有固沙材料的研究进展、固沙机理、使用限制及应用前景进行了总结,以期为新阶段我国荒漠化防治工作和实现全球土地退化“零增长”的远大目标提供参考。

1 工程固沙

工程固沙是通过在沙地或沙丘表面设置沙障达到有效控制地表风沙流强度、改变地表蚀积状况,从而实现防风固沙的目的,又称为机械固沙^[2]。其中,具有阻滞风沙流和固定沙面功能的障碍物被称为沙障,沙障不仅可以通过增加地表粗糙度和改变下垫面达到减弱风蚀的目的,而且还可以为土壤种子库的建立和植被恢复提供前期保障^[3-4]。在干旱、风大沙多、植被稀少的沙区荒漠化治理中,机械沙障具有不可替代的作用^[5]。

沙障材料对防护作用类型和防护程度具有决定作用^[6]。根据沙障原料的不同,可以分为生物质材料(以玉米、葵花等作物秸秆为主)、矿物质材料(以黏土和砾石为主)及农田里残留农作物发酵后所形成的沙障材料等^[7]。为降低沙障材料运输与造价成本,在沙障设置过程中一般遵循就地取材原则^[8]。设置沙障时,要根据流动风方向的不同,设置不同形状的沙障。例如在某地区流动风只有一个方向时,应该设置行列状沙障;如果某地区流动风为多个方向,那么沙障应设置为格状。与此同时,设置沙障时还应该与主风向形成垂直关系。沙障之间的距离大小也需要慎重选择,距离过大时,容易被风侵蚀,反之则容易被沙埋^[9]。

1.1 沙柳沙障

沙柳(*Salix psammophila* C. Wang et Ch. Y. Yang)是一种小乔木或者灌木,属于杨柳科柳属,分布于内蒙古鄂尔多斯市、阿拉善盟东部、陕西北部以及宁夏东部地区的流动沙丘、半流动沙丘及丘间低地^[10]。沙柳具有极强的耐旱性能,即使将它种植在沙土飞扬与大旱望云的极端环境中,它依旧可以生存。此外,沙柳适应性极强,生长迅速易繁殖,具有耐寒、耐旱及耐高温的能力^[11-12]。

对沙柳沙障的挑选也有一定的要求,时间一般选在春季(4月初),一定要挑选发芽前的本地的沙柳。同时,要选择2~3a生苗木以及直径大于0.8cm且长度110~150cm的沙柳枝条制作沙柳插穗(长约30cm),以单排沙柳制作^[13]。在春季雨前设置沙障,部分沙柳枝条还能长成灌丛,达到工程治沙与生物治沙的双重目的^[14]。沙柳沙障已成为一种经济实用、效果独特且应用广泛的固沙措施^[15-16]。

其他灌木类沙障还包括小叶锦鸡儿、沙拐枣及杨树枝条等。灌木或草类沙障的缺点在长期的野外试验过程中逐渐暴露:灌木或草铺设后与地面接触部分会被土壤微生物腐蚀,地上部分在长期高温和风湿环境中易出现倒伏或断裂现象。这些缺点极大地降低了沙障的使用寿命,因此,在设置沙障前需要使用防腐剂如氨铜季铵盐(Ammoniacal copper quaternary)、铜唑(CuAz)等对沙障进行浸泡处理,以期延长寿命^[17]。

1.2 黏土沙障

相比灌木或草类沙障,黏土、煤矸石、砾石等沙障材料的耐风蚀性较强。甘肃省河西走廊及西北

广大沙区地带的群众利用当地丘间低地多黏土的特点,就地取材,开展了早期不成规模的治沙活动(如构筑挡风墙)。1959年,在总结当地群众固沙经验和治沙措施的基础上,甘肃省民勤治沙综合试验站对以黏土为主的机械沙障的设置方式、规格、间距以及成本等方面进行了大量的野外试验研究,确定黏土沙障的最适间距和障埂高度分别为2~4 m、15~20 cm^[18]。在单风向地区,土埂与主风害方向夹角应设置成大于90°的横格状;风向不定或风害严重地带,土埂设成方格状^[19]。由于黏土沙障具有集中雨水、削弱风速、稳定沙面、取材方便等特点,其在植物难以生长的重沙害区被广泛应用^[20]。虽然此类沙障耐风蚀性较好,但实际施工费时费力^[10]。

1.3 生物可降解聚乳酸 PLA 沙袋沙障

聚乳酸(Poly lactic acid, PLA)纤维是从日本东丽公司引进的以玉米、小麦、甜菜中淀粉为原料提取的。提取过程主要分为三步:首先要经过发酵之后形成乳酸,在此基础上再进行缩聚反应,最后经过一步熔融纺丝。所以它还可以称为“玉米纤维”,化学式为 $(C_3H_4O_2)_n$,纤维颜色为自然白色^[21-22]。“玉米纤维”加工流程如图1(a)所示。织物大致形状为圆柱形,犹如袖筒形状,把圆筒织物生产好后搭叠成卷,它拥有固定长度以及重量,分别为长170 cm和重3 kg,同时要求一箱中打包装入6卷,见图1(b)。以“就地取材,以沙治沙”为原则,将沙土装入筒状的纤维沙袋中就地铺设而成,自然状态下筒径约10 cm,装沙后直径约15 cm,见图1(c)。通过固沙袋的相互连接与叠压作用,以编席的方式形成格状固沙结构,见图1(d)^[23-25]。

PLA沙障经灌沙后形成的沙袋可以设计成多种形状,可以增加地面粗糙度,消耗过境近地面风速动能,使沙丘表层结构稳定^[21]。相比传统的沙障材料,PLA沙障既有天然纤维的生物兼容性和可降解性,又有合成纤维的基本特性,所以它拥有许多优点,比如方便运输、耐用度持久、抗老化以及防护时间长久,因此PLA沙障的应用前景非常广阔,是一种环保型的防沙固沙材料。现已被广泛应用于工业、农业、林业、服装、渔业、卫生医疗等多个领域^[26-30]。但是,PLA沙障也存在缺点:(1)PLA纤维材料的成本较高,难以大面积推广应用;(2)沙障在使用过程中存在漏沙现象,难以长时间使用。

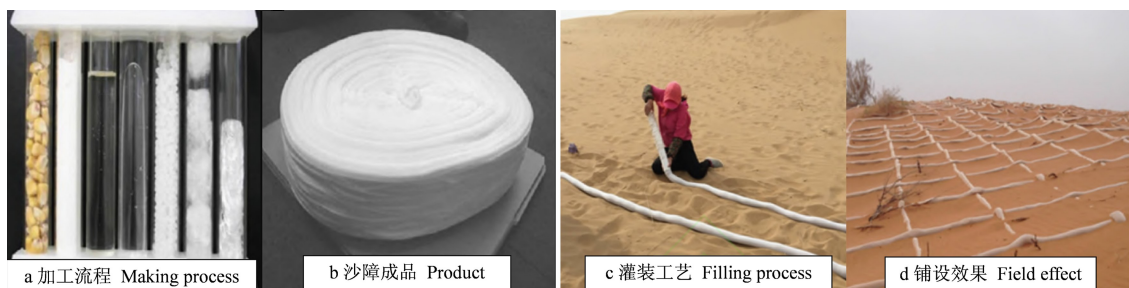


图1 PLA沙障生产工艺与铺施效果

Fig. 1 Production process and field effect of sand barrier with PLA

1.4 秸秆类和碎石类沙障

秸秆类沙障中的麦草沙障用材廉价,且防沙效果明显,但是由于基部孔隙较大不利于保留水分,而且本身截留水量也比较大,难以大面积使用。平铺卵石适用于卵石比较充足的地区,具有减弱蒸发和截流降水的作用^[9]。成本相对较高的尼龙网和塑料网作为新型防沙材料之一,具有抗老化、抗风蚀、便于施工、可工业化生产及防护效果显著等特点,在工矿、交通、国防等治沙领域中具有十分广阔的应用前景^[31-32]。各类型沙障的防护原理和同一类型沙障的工程尺度有差异,防护效应也存在较大区别。实践表明,长期使用的传统型沙障也有许多缺点,比如柴草沙障在光、热、微生物降解下防护作用持续时长缩短,同时柳条、砾石沙障存在蕴藏原料不足和交通阻碍等缺陷。总而言之,在荒漠化治理中要结合区域特色充分利用地方资源,并根据防护目的选用沙障类型,因地制宜,必要时配套使用

不同类型的机械沙障,扬长避短。

秸秆类沙障的铺设流程为:首先人工利用简易“T”字形木质工具在沙漠中划定好沙线,然后将秸秆平铺在划定好的沙线上,再用铁锹将铺设好的秸秆压入沙子,目的是使其保持直立,这样的铺设方式费时费力,效率低下,难以满足我国北方大面积沙化土地亟待治理的现实需求,因此迫切需要大力发展生产秸秆类固沙材料铺设的机械设备和推进机械化作业。

2 生物固沙

2.1 植物固沙

植物固沙是指通过封育和栽种耐旱植物等方式,提高沙区环境质量和生产潜力的一种技术措施,一般选用的耐旱植物有沙枣、沙柳、梭梭、紫穗槐、沙蒿等。固沙植物品种根据以下原则筛选:①所选植物品种能适应造林地的生态环境,适地适树;②选择生态效益和经济效益显著的树种;③选择易繁殖的树种。植物固沙通过增加地表粗糙度、降低风速,从而削弱与抑制风沙流活动,而且其发达的根系能固结沙粒,散落的枯枝落叶利于增加土壤有机质,促进成土作用^[33]。

干旱、半干旱地区有限的水分供给是植物生存和生长的主要限制因素^[34]。种质材料选择不当和配置不合理是沙地人工植被恢复成效低的根本原因^[35-38]。在干旱、半干旱地区,地下水消耗加快,导致土壤湿度接近于萎蔫系数,究其原因是人工造林导致植物密度过大,从而引发沙区水分与植物生长供需不协调。最终,水分严重不足时,植物便会死亡,难以实现沙丘稳定^[39-40]。所以,在沙地应注重水分的状态以及种源品质的选择,它是影响植被建设结果的关键环节^[41-43]。

以杨文斌为代表提出的“低覆盖度治沙”理论与传统“高覆盖度治沙”相反,野外实践证明,传统理论“高覆盖度,治沙效果好”忽视了自然的低覆盖度疏林或稀疏灌丛现象是干旱区、半干旱区的主要自然特征,导致高密度种植的植被吸取大量的地下水,使干旱区、半干旱区地下水位严重下降,并在较大密度的乔木造林中普遍发生衰退或死亡现象,以及不成林或“小老树”现象。而“低覆盖度治沙”是一种打破固有思维的创新性理论,在荒漠化防治野外工作中取得了明显的突破,开创了低覆盖度(15%~25%)的治沙新理论,将引领国内外防沙治沙步入一个新领域^[44]。

以新疆和田地区为代表的“荒漠-绿洲过渡带保护与退化生态系统恢复重建技术模式”中提出了以荒漠河岸林种群更新技术、人工植被与天然植被生态融合技术、荒漠植物群落人工改造和荒漠植被自然恢复人工促进技术等为主要内容的荒漠河岸林保育与恢复技术模式。在荒漠-绿洲过渡带退化生态系统恢复方面,研发并集成了以绿洲-荒漠过渡带生态多样性时空格局技术、生态可持续性时空诊断技术、植物群落物种装配与生态可持续水分高效利用技术等为主要内容的荒漠-绿洲过渡带退化生态系统恢复重建技术模式。在荒漠退化生态系统恢复方面,针对极端干旱环境下土地荒漠化导致的土壤结构和理化性质劣变、生态系统功能受损、物种丢失等问题,研发并集成了以物种框架法、最大多样性和退化土壤原位菌根生物修复为主要内容的荒漠退化生态系统改造修复技术模式^[45-46]。上述技术模式在塔里木河中下游生态整治过程中得到广泛应用,取得了良好的社会和生态效益。

以易志坚为代表的“沙改土”化学-力学黏合技术(沙漠土壤化生态快速恢复一体化技术)实现了“点沙成金”的梦想,他认为土壤沙化根本原因是让土壤颗粒之间失去了 ODI 团结约束,使土壤颗粒处于一种离散状态,丧失了自修复和自调节的能力,若要将沙子变成土壤,就需要重新赋予土壤颗粒 ODI 团结约束。基于此,从植物中提取了一种能让沙子具有生态-力学特性的纤维黏合剂,该纤维黏合剂不仅可以让土壤颗粒之间恢复 ODI 团结约束,还能使黏合而成的土壤颗粒具有存储水分、养分和空气的孔隙结构,该孔隙结构还可以滋养大量微生物^[47]。

2.2 微生物固沙

土壤物质中的微生物是沙地生态系统中的关键构成部分,一方面作为土壤有机质转化的实施者,

另一方面作为植物营养成分的储存库,在参与动植物残体等有机质的分解和转化、风沙土的发生、土壤肥力的形成中发挥着重要作用^[48-49]。如果想要使流动的沙丘固定,可以通过培育固沙微生物实现。在沙丘中,有许多耐旱、耐高温的微生物,它们可以通过自身的代谢活动改变沙丘表面沙土的理化性质,不仅可以促进土壤形成,还可以改变植物的营养物质。土壤里的微小生物包括细菌、放线菌及真菌^[50]。其中,细菌的数量最多,可占土壤微生物总量的80%左右^[51]。近年来,众多学者在微生物方面的探索侧重于生物土壤结皮,比如微生物数量的多少、微生物的种类、生物数量的改变和固沙剂的研制方面^[52]。微生物固沙是通过能固沙的细菌,将液体菌剂直接泼洒在流动沙的表层从而形成固沙材料,而细菌则是通过人工接种或者在生物土壤结皮里提取与分离^[53-54]。微生物固沙面临的最大问题是成本高、微生物菌群育种时影响因素较多、缺乏大量实地应用等,总体来看,微生物固沙野外规模化的低成本施用技术还有待于深入研究。

3 化学固沙

化学固沙是指通过化学黏结材料将一些松散的沙土黏结在一起,从而形成一种拥有一定柔韧性的壳层或硬壳(固结层),阻止风力对流动沙地表面沙粒的吹扬和搬运^[55]。化学固沙剂必须满足以下条件:耐久性、无毒性、水溶性^[56-58]。我国从1950年开始研制化学固沙剂,并获得了一些进展。根据来源及用途,化学固沙材料可分为无机类、有机类及有机-无机复合类^[59]。

3.1 无机类化学固沙材料

3.1.1 水玻璃类

水玻璃类是以碱金属硅酸盐溶液(俗称水玻璃)为主体黏料,根据需求添加合适的固化剂和骨架原料等形成的黏结剂,属于水玻璃改性加入无机胶凝剂混合组成的有效液态固沙剂^[59-60]。迄今为止,常用的水玻璃改性剂有六氟硅酸钠、醋酸乙酯和氧化铝等^[60]。在强碱性条件下,水玻璃浆液在短时间内易快速发生胶凝固结反应,导致浸透性差、固结层强度低、抵抗外力能力弱且易受到碱性环境影响,引发二次碱污染,所以水玻璃浆液的改性研究是目前国内外的研究热点之一^[61]。

3.1.2 水泥类

作为水硬性材料之一的水泥,不仅用于建筑、道路及桥梁方面,也逐渐应用于荒漠化治理方面。水泥硬化体属于脆性材料,极易发生龟裂,且水泥浆的保水性能差,导致强度降低,从而削弱固沙作用^[62]。因此需加入乳化沥青、聚丙烯酸钠高吸水树脂及聚氨酯、聚丙烯酸钠等有机物来有效阻止水分的蒸发,大大提高水泥固沙基材的保水性,从而改善水泥基材的脆性以及韧性^[63]。除此之外,还常在此类固沙材料中添加包含氮、磷、钾的缓释肥料,俗称“植生型”固沙材料^[64]。

3.1.3 石膏类

研究发现,石膏不仅仅是一种用途广泛的工业和建筑材料,还可以作为一种凝固材料。其优点是在减轻固沙材料二次污染的同时还可以提高植物的存活率且成本低,所以可以通过在已经存在的石膏基固沙复合材料的基础之上,将有机肥、秸秆、黑土等与其混合在一起,并优化石膏基固沙材料工艺^[65]。石膏类固沙材料与环境 and 植物均具有较高的兼容性,且制备成本低。在沙漠中由于石膏的脆性极易出现粉化现象,导致耐久性较差等问题^[59]。

3.1.4 改性粉煤灰

粉煤灰是我国西部工业地区广泛存在的火力发电的主要废弃物,由于交通不便且处理成本高,粉煤灰一直是工业固体废弃物处置中的难题。基于此,在西部荒漠化防治进程中探究改性粉煤灰材料的固沙胶结机制是研究热点之一。1992年,刘传义^[66]提出了改性粉煤灰固沙的思想。2000年,王文安等^[67]通过粉煤灰和植物纤维的结合达到固化黄沙土的效果。2010年,曲烈等^[68]通过研究水泥和粉煤灰基固沙材料参数和抗折强度的关系,表明水灰比和吸水剂的种类是沙柱抗折的主要原因。

2021 年,陈艺文通过复配粉煤灰、石膏和牛粪固废,并通过理化性质、重金属特征及土壤质量评价,最终筛选出了 3 种复配土壤的最佳配比^[69]。2024 年,卢海峰等针对改性粉煤灰固沙材料,通过压强度试验、剪切试验等多种分析方法对改性粉煤灰材料的力学性质、水化产物和微观结构进行研究,结果表明适当提高灰沙比,并采用低剂量(2.5%左右)碱激发剂或高剂量(大于 30%)镁渣改性粉煤灰,可以获得更好的经济效益和固沙效果^[70]。

3.2 有机类化学固沙材料

3.2.1 石油类

作为石油产品类固沙剂的代表,沥青主要来源于石油和煤焦油中提炼而成的副产品,由高分子化合物组成^[71]。沥青和乳化剂的共同作用产物是沥青乳液,具有较高的黏度、熔点及凝点,在常温下呈固体或半固体状态,可以由此分为阳离子型、阴离子型和非离子型^[72]。沥青具有防风固沙、提高土壤肥力及改善土壤水热状况等作用,可以作为固沙材料和土壤改良剂,同时被称为“液态地膜”^[73]。除此之外,与植物和机械沙障结合的沥青乳液,不但和植物相容,而且还可以长时间稳固沙面。沥青乳液也可被单独用来固沙,但存在以下缺陷:用量较大,导致成本高;土壤水分入渗能力随着用量的增加而下降,阻碍植物生长;来源受限,无法大面积推广应用。

3.2.2 生物质资源类

制浆废液中的木质素来源充足、价格实惠,常被用于野外固沙。由于木质素具有不耐水蚀的特点,所以在实际应用中通过接枝、缩聚、复配改性及综合改性等进一步强化固沙效果。木质素存在于制浆液中,根据蒸煮工艺的差异可以分为两大类,分别为木质素磺酸盐和碱木质素类。碱木质素又包含两个小类,分别为烧碱木质素和硫酸盐木质素。因为碱木质素中含有大量的 Ph-OH,所以它是接枝改性的最佳原料^[59]。

3.2.3 高分子类

高分子聚合物高吸水性树脂包括淀粉接枝聚丙烯酸类、乙酸乙酯类及纤维素类等^[67]。此类固沙材料能够使单个沙粒聚合成体积较大且富有一定弹性和硬实度的稳定体,固沙效果显著且稳定。在进行固沙时,应用高分子聚合物具有许多优点,比如高吸水树脂所形成的固结层强度较高,且耐水性、吸水性、保水性及黏结性都较好。缺点是在发生化学反应时,高分子材料易发生链的断裂和交联,由此固结层会迅速老化,降低固沙效果。除此之外,难以广泛推广应用的原因还有成本问题;其次是原料以及生产流程问题,其生产流程较复杂、原料来源受限。

3.2.4 改性废塑料类

塑料给人类生活生产带来了极大的便利,塑料在环境中无处不在。同时,塑料的存在也给环境带来了沉重的负担,废塑料的处理问题亟待解决。改性废塑料固沙材料既可以解决“白色污染”问题,又能为防沙治沙提供成本低廉的新材料。铁生年等^[73]通过提取废聚苯乙烯,并将其放置在施加一定温度和压力的密闭容器中,通过剧烈的裂解反应让其产生大量的苯乙烯和成分复杂的残液,其中残液可作为新型固沙胶结材料,具备两个显著优点:第一,相较于其他改性材料和方法,生产工艺简单,生产周期短;第二,理化性能较好,具备固沙和保水的双重作用,显著提高沙漠中植物的存活率。废塑料改性类固沙材料目前仅限于室内试验研究,较少应用于野外试验^[74]。此外,塑料的抗紫外线能力差的问题在改性废塑料类固沙材料中依然存在,需要进一步改性以延长此类固沙材料的使用寿命。

3.3 有机-无机复合类化学固沙材料

有机-无机复合类化学固沙材料是有机-无机化学固沙材料的结合。由于单独的无机材料有很多缺点,比如力学性能差、保水性能差等,如果两者相结合,那么在弥补无机材料缺点的同时还会衍生新的优点,在固沙性、固结强度、抗老性、耐水性、抗冻融性以及抗风蚀性等方面会有所提升。试验证明二者的结合既能固定沙丘表面的流沙,达到稳定沙丘的效果,又能通过改变沙丘内部的温度、水分等,

提高与固沙植物的相容性^[73]。黄剑羚等^[75]以坚木栲胶中的单宁、水玻璃和铁盐为主要原料,以土壤为填料,通过交链和配位聚合作用,以灌浆(或喷洒)方式施工,形成人造有机-无机土壤复合亲水性材料,具有固沙蓄水、盐田防渗、水塘防裂等多重功效。杨中喜等^[76]以形态和性能与沙粒相近的石墨尾矿砂和河沙为固化材料,开发研制出一种有机-无机复合类固沙材料,该固沙材料形态为液体,对沙粒具有胶结固化作用,且适于大面积喷洒、浇洒,可以实现快速固化,且可以对局部破裂点进行喷洒修复。纪蓓等^[77]研制了粉煤灰/膨润土-聚丙烯酸盐固沙剂,该固沙剂无毒害、操作简单易行,适宜机械化作业,是一种优良固沙材料。虽然复合类化学固沙材料有明显的优点,但是忽略了其经济效益。所以,在研究复合类化学固沙材料时应该考虑其综合效应,在未来研究方向上应该致力于研究新型、复合型、多用途的化学固沙材料。时至今日,虽然国内外研制出许多化学固沙材料,但多数材料仍然处于实验室研制阶段,问题较多,比如价格高、材料稀缺、效果欠佳、环境污染等^[78]。表1汇总了2002—2023年我国化学固沙材料的研究进展^[79-93]。

表1 2002—2023年化学固沙材料研究汇总

Table 1 Research summary of chemical sand fixation materials from 2002 to 2023

作者	发表年份	固沙组分	性能
张子阳 ^[79]	2023	葵花秆纤维素基固沙材料	具有良好的水溶性、耐盐性和耐酸性,具备一定的环境适应性、可降解性和生态友好性
李小侠 ^[80]	2022	秸秆基高分子复合材料	沙样的抗压强度明显增强,且耐水蚀性、抗热老化和抗冻融老化等固沙性能较好
王鹏 ^[81]	2020	废弃环保型钻井液	抗压强度高,保水性强,增强沙土质量
高笑 ^[82]	2019	砒砂岩与沙复配成土技术	环境友好型,利于植物生长
康慧芬等 ^[83]	2018	硼砂、尿素和聚乙烯醇接枝水溶性淀粉	黏度较大,热性能稳定,有较强的保水性、抗风蚀性、耐水蚀性和抗压性
申闫春等 ^[78]	2018	羟丙基纤维素为骨架,聚丙烯酰胺为支链的高分子固沙剂	保水性能和耐水性能显著提升,且固化层厚度和强度均满足要求
李紫薇等 ^[84]	2017	NaOH改性向日葵秸秆和棉秆	吸附量较其改性前有明显提高
孔维青等 ^[85]	2016	碱玉米秸秆接枝丙烯酸丁酯(BA)/甲基丙烯酸甲(MMA)/丙烯酰胺(AM)	固沙抑尘剂乳液的黏度、流动性、稳定性以及产品外观良好,且保水性和压缩强度可满足实际应用需求
陈晓晓 ^[86]	2016	玉米秸秆作为原料,采用环氧氯丙烷、二乙烯三胺以及三乙胺在N,N-二甲基甲酰胺中进行改性	吸附效果增强
马晓芳 ^[87]	2016	原始石膏基固沙材料的基础上,合理添加辅助材料秸秆、有机肥、黑土	具有较好的抗紫外辐射性、抗循环冻融性、抗水蚀性
王艺霏等 ^[88]	2014	采用乳液接枝共聚合法制备羟丙基甲基纤维素(HPMC)接枝丙烯酸甲酯(MA)/乙酸乙烯酯(VAc)新型固沙剂	固沙剂乳液的黏度、流动性、产品外观和静置稳定性等均较好
杨明坤等 ^[89]	2012	以竣甲基纤维素钠(CMC)为主接枝	保水性逐渐增加,黏结性能和成膜性能大幅提高
		丙烯酸胺	

表 1(续)

作者	发表年份	固沙组分	性能
曲烈等 ^[90]	2011	土壤、水泥、粉煤灰和植物纤维	可抗旱保肥、耐冲刷、符合植物生长周期性、满足植物相容性和环境适应性
叶德展等 ^[91]	2011	制浆废液木质素类固沙剂	改性后可提高沙子或土壤的抗压强度、抗风蚀强度、聚集体的含量等
杨柳 ^[56]	2011	水玻璃、山梨醇、四硼酸钠、碳酸锂、聚丙烯酰胺和羧甲基纤维素钠	具有良好的抗老化性,且制备简单,所用化学品价廉易得
纪蓓等 ^[77]	2009	粉煤灰/膨润土-聚丙烯酸盐	固沙剂喷洒后固结速度快,固结层强度较高,固沙效果明显
王银梅等 ^[92]	2007	SH 水溶性高分子材料	抗风蚀能力强,适合结合植物固沙
陈友治等 ^[63]	2006	高水灰比、低聚灰比的新型聚合物水泥砂浆	抗压强度平均提高约 15%,抗折强度提高约 20%,水泥基材料的韧性明显增强,吸水保水功能强
谭卓英等 ^[93]	2005	可溶性淀粉、硅酸钠和丙三醇	具有较强的黏结、凝并、吸湿、保水、抗高温和固结路面等性能
许祥俊 ^[62]	2003	水泥、阳离子乳化沥青、聚丙烯酸钠高吸水树脂	具有良好的抗老化性、耐水性、抗冻融稳定性和耐风蚀能力
杨中喜等 ^[76]	2002	石墨尾矿砂和河沙	固化时间短、抗压强度高以及渗水性较好

4 结语与展望

4.1 结语

工程固沙、化学固沙、生物固沙等三大固沙措施为荒漠化地区的流沙固定提供广阔的发展空间,但单一固沙措施都有其优点和局限性。工程机械固沙虽效果显著,但成本高且与环境相容性差。虽然工程固沙措施对于拦截风沙流具有明显效果,但由于防护高度有限,尤其是在风沙较为严重的地区,难以阻挡风沙流的持续侵蚀,常常面临着被掩埋的风险,因此该措施只能作为临时性固沙措施;化学固沙虽成本低廉、施工简便,但固沙周期短,且多数化学固沙剂存在生产工艺不成熟、原料来源受限、高毒性、环境可降解性差等问题,未能普遍应用和推广。化学固沙的优点是能够在流沙表面迅速形成具有防风蚀的固结层,该固结层可以改善沙地的水热条件,从而增强沙地的生物学活性和沙地的团粒结构,最终通过避免水肥渗透流失以及防止深层盐分向上迁移促进植物生长;生物固沙是应用最为普遍的固沙技术,通过调控周围环境的作用达到持久、稳定、高效的固沙效果,但是恶劣的沙区环境难以为植物提供赖以生存的持续生存要素,导致植物难以继续生存。试验证明,沙区的植物成活率仅在 30% 左右,有些地区甚至寸草不生^[94]。其中,微生物固沙主要在形成生物结皮方面具有突出作用,生物结皮的形成对于土壤肥力的稳定性与防风固沙等具有重要作用。目前对于微生物固沙材料的研究仅处于实验室中,或者研究时外部环境单一,缺乏实用性,最为明显的案例就是人工结皮技术的研究以及微生物技术的野外应用方面尚需深入探讨。

综上所述,工程固沙、化学固沙、生物单一固沙措施存在明显不足。为了解决这一问题,部分学者

提出了综合固沙技术,该技术主要包括生物-化学固沙、生物-工程固沙、化学-工程固沙,其中生物-化学固沙技术的应用最为广泛。试验证明,先在流动沙区喷洒化学固沙剂,待沙面逐步稳定后,在半固定沙区建立植物固沙带,栽植灌木、半灌木以及常绿乔木等,可以切断沙源,控制沙漠化继续向绿洲扩展,多年后绿洲边缘的生态环境可得到根本改善。综合固沙技术是利用两种固沙措施的有机结合发挥最大优势,取长补短,比如在治理流沙中,将工程措施治标与生物措施治本相结合,从而在根本上达成防风固沙的目的^[95-97]。位于卡拉库姆东南的列彼捷克沙漠试验站曾开展过一项植物与生物工程相结合的实验,目的就是防止铁路被沙埋,同时他们还结合沙地资源的开采利用,最终形成一种综合固沙技术体系;以色列在防沙治沙工程中,将植物固沙和化学固沙相结合,并利用城市垃圾填充进行防沙治沙工作^[96]。

4.2 展望

随着全球社会经济的日益发展和人口规模的逐步扩大,现有的土地面积已不能满足当今人口的生存和居住,如果能开发利用沙区广阔的土地,将是造福全球人类的一项重大举措。此外,从降低劳动成本和提高生产效率的角度出发,本着快速、便捷、实用的原则,开发与研制一批与固沙新材料相应的机械化、智能化的设备和装置急不可待,以替代目前广泛使用的人工手段,解决费时费工和固沙速度慢等问题,加速防沙治沙的进度,并有效降低建设成本,引领国际荒漠化防治手段的发展方向。

4.2.1 注重治沙新材料和新技术的研发

传统防沙治沙的技术大多数存在缺点,普遍的问题是由于区域限制和气候因素,很难有一种防沙治沙技术可以广泛应用于所有的干旱、半干旱区。从前文表述中可以发现在国际荒漠化防治前沿的引领下,提出利用其他产业的废弃物或副产物生产固沙材料将是今后化学固沙新材料的重点发展方向。此外,如何以最低的水资源损耗,实现干旱、半干旱区流沙的有效固定和土壤生境的加快改善,促进生态系统的整体恢复,完成传统防风固沙技术的提质和增效是我国新时代生态文明建设的全新任务^[98]。加快研发“低消耗、高效率、易实现”的防沙治沙新材料、新技术是新时代防沙治沙绿色升级关键技术研发的优先发展方向。

4.2.2 推广治沙机械设备化

中国的沙化土地具有面积大、分布广等特点,所以,从降低劳动成本和提高生产效率的角度出发,开发研制一批与固沙新材料相适应的机械化、智能化的设备和装置也是当今防沙治沙领域中亟须解决的问题。所以,未来应同时重视治沙机械设备的研发工作,比如:(1)加强相关人才投入,提供专业人才的培养模式,并通过推动产学研体系建设实现科技理论成果转化为生产实际需求;(2)扩大市场份额,搭建行业专有生产线。治沙设备属于特种机械,应建立专门的设备生产线,实现批量化生产,降低生产成本,提高设备的推广力度;(3)积极利用绿色能源,提升使用者体验感。传统治沙机械设备笨重,能源消耗大且污染严重,要利用现存的风能和太阳能等优势资源,配套的治沙机械化设备要具备协调性好、作业质量高的特点,极大地提高机械设备舒适度和安全性,适应市场竞争,满足新时代需求。

4.2.3 实现国际合作,推动全球荒漠化防治

荒漠化是全球人类共同面对的难题,荒漠化防治应携手国际共谋福祉。积极参与国际荒漠化防治工作,并向主导地位奋进,如中非合作论坛、中国与阿拉伯国家、中国与海湾组织合作论坛、中日韩三国合作机制及东北亚环境机制等^[99]。向国际大力推广荒漠化防治技术体系,如援西亚非洲干旱半干旱地区飞播治沙造林种草,中国-联合国合作非洲水行动-非洲沙漠化国家防治荒漠化技术合作与沙产业开发,在援埃及荒漠化防治示范及技术中心项目等^[100]。积极扩大我国在荒漠化防治领域的国际知名度,借此发出中国声音,从而对国际荒漠化防治进程具备影响力,并向世界传递“中国智慧”。

参考文献:

- [1] 亿利公益基金会. 第四届库布其国际沙漠论坛综述[J]. 中国沙漠, 2013, 33(6): 1928-1930.
- [2] 铁生年, 姜雄, 汪长安. 沙漠化防治化学固沙材料研究进展[J]. 科技导报, 2013, 31(增刊1): 106-111.
- [3] 赵廷宁, 曹子龙, 郑翠玲, 等. 平行高立式沙障对严重沙化草地植被及土壤种子库的影响[J]. 北京林业大学学报, 2005, 27(2): 34-37.
- [4] 田美荣, 田雨欣, 杨伟超, 等. 不同规格芦苇沙障生态保护成效研究[J]. 环境工程技术学报, 2023, 13(2): 753-759.
- [5] 董智, 李红丽, 汪季, 等. 土工格栅沙障防风积沙效应风洞模拟实验[J]. 中国水土保持科学, 2007, 5(1): 35-39.
- [6] 王晨洋, 王玉杰, 袁立敏, 等. 不同形状沙袋沙障稳定性及防风效益[J]. 水土保持学报, 2015, 29(5): 7-12.
- [7] 原伟杰, 虞毅, 王戈, 等. 可降解聚乳酸沙障降解性能研究[J]. 水土保持通报, 2012, 32(3): 107-110, 132.
- [8] 党晓宏, 虞毅, 高永, 等. PLA 沙障对沙丘土壤粒径的影响分析[J]. 水土保持研究, 2014, 21(3): 16-19, 24.
- [9] 李瑞军. 棉秆沙障防风固沙效益比较[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2009.
- [10] 龚萍. 沙柳沙障腐蚀过程及防腐抗蚀效果研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2012.
- [11] 刘永安, 骆晓铭, 魏建国, 等. 不同水分条件下麻疯树幼苗的光合生理适应性研究[J]. 林业科学研究, 2010, 23(1): 108-113.
- [12] 范杰英, 郭军战, 彭少兵. 10个树种光合和蒸腾性能对水分胁迫的响应[J]. 西北林学院学报, 2005, 20(2): 36-38, 53.
- [13] 肖芳, 王钟涛, 高永, 等. 新型低压水冲植柳技术下沙障铺设方式对沙柳造林效果的影响[J]. 水土保持研究, 2013, 20(5): 82-85.
- [14] 梁钰镁, 高永, 蒙仲举, 等. 沙柳沙障腐烂过程真菌多样性及其对环境因子的响应[J]. 水土保持通报, 2023, 43(5): 18-26.
- [15] 董智, 李红丽, 胡春元, 等. 沙漠公路不同固沙措施防风固沙效益和成本比较研究[J]. 水土保持研究, 2006, 13(2): 128-130.
- [16] 常兆丰, 仲生年, 韩福桂, 等. 黏土沙障及麦草沙障合理间距的调查研究[J]. 中国沙漠, 2000, 20(4): 455-457.
- [17] 龚萍, 高永, 汪季, 等. ACQ-D 防腐剂处理对沙柳沙障防腐性能的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(3): 188-191.
- [18] 乔宇. 民勤绿洲边缘粘土沙障生态水文效应研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2015.
- [19] 王秀红, 申元村. 柴达木盆地耕地荒漠化及其防治[J]. 中国沙漠, 2001, 21(增刊1): 43-47.
- [20] 胡孟春, 贺昭和. 西部沙漠化防治技术与模式[J]. 中国生态农业学报, 2001, 9(3): 12-14.
- [21] 袁立敏, 高永, 李谦, 等. 沙袋沙障对沙丘植被特征的影响[J]. 水土保持通报, 2011, 31(5): 80-84, 195.
- [22] 周丹丹. 生物可降解聚乳酸(PLA)材料在防沙治沙中的应用研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2009.
- [23] 丁延龙, 高永, 汪季, 等. 生物基可降解聚乳酸(PLA)沙障对沙丘表层沉积物粒度特征的影响[J]. 中国沙漠, 2018, 38(2): 262-269.
- [24] 赵文玲. 新型生物可降解 PLA 沙袋沙障降解特性及其影响因子探究[J]. 水土保持研究, 2015, 22(6): 198-202.
- [25] 原伟杰, 虞毅, 岳永德, 等. 沙丘部位对聚乳酸纤维沙袋沙障降解速度的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(4): 166-171.
- [26] 张旺玺, 张慧勤, 潘玮, 等. 聚乳酸纤维的合成加工与应用[J]. 中原工学院学报, 2005, 16(3): 1-4.
- [27] 马君志, 葛红, 马海健. 绿色环保纤维: 聚乳酸纤维[J]. 纤维与纺织技术, 2006(4): 26-30.
- [28] 万振江, 张弦. 生物可降解 Lactron 纤维的针织产品开发和应[J]. 上海纺织科技, 2002, 30(3): 40-41.
- [29] 顾梦圆, 闫容, 丁志荣. 植物纤维沙障的抗紫外老化性能研究[J]. 产业用纺织品, 2021, 39(8): 40-43.
- [30] YAMANAK K. Lactron-A biodegradable fiber, its development and applications[J]. Chemical Fibers International, 1999, 49(12): 501-503.
- [31] 屈建军, 凌裕泉, 刘贤万, 等. 尼龙网栅栏防沙效应研究[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2002, 38(2): 171-176.
- [32] 高海燕, 闫德仁, 胡小龙, 等. 纱网沙障对风蚀坑积沙区土壤种子库的影响[J]. 西北林学院学报, 2023, 38(5): 93-101.
- [33] 卫秀成, 赵正华, 谌文武, 等. LZU 固沙新材料及固沙综合技术研究[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2007, 43

- (1):37-40.
- [34] 罗祥英,李锦荣,李映坤,等.不同配置参数下立式葵花秆沙障防护效果研究[J].水土保持通报,2023,43(2):148-155.
- [35] 段晓婷,高永,梁钰镁,等.沙柳沙障沙埋段5种木腐真菌的生物学特性[J].水土保持通报,2022,42(1):93-98.
- [36] 邴丹珩,谈嫣蓉,陈文业,等.我国沙障的研究进展与应用综述[J].中国水土保持,2023(7):37-40.
- [37] 李新荣,张志山,王新平,等.干旱区土壤-植被系统恢复的生态水文学研究进展[J].中国沙漠,2009,29(5):845-852.
- [38] 张继义,赵哈林,崔建垣,等.科尔沁沙地樟子松人工林土壤水分动态的研究[J].林业科学,2005,41(3):1-6.
- [39] 郭柯,董学军,刘志茂.毛乌素沙地沙丘土壤含水量特点:兼论老固定沙地上油蒿衰退原因[J].植物生态学报,2000,24(3):275-279.
- [40] 陈有君,关世英,李绍良,等.内蒙古浑善达克沙地土壤水分状况的分析[J].干旱区资源与环境,2000,14(1):80-85.
- [41] 阿拉木萨,蒋德明,李雪华,等.科尔沁沙地典型人工植被区土壤水分动态研究[J].干旱区研究,2007,24(5):604-609.
- [42] 蒋德明,刘志民,寇振武.科尔沁沙地荒漠化及生态恢复研究展望[J].应用生态学报,2002,13(12):1695-1698.
- [43] 阿拉木萨,裴铁璠,蒋德明.科尔沁沙地人工固沙林土壤水分与植被适宜度探讨[J].水科学进展,2005,16(3):426-431.
- [44] 杨文斌,王涛,熊伟,等.低覆盖度治沙理论的核心水文原理概述[J].中国沙漠,2021,41(3):75-80.
- [45] 吴丽丽,杨文斌,冯伟.低覆盖度治沙理论及其在荒漠化防治中的作用[C]//中国治沙暨沙业学会2018年学术年会.格尔木:中国治沙暨沙业学会,2018:66-74.
- [46] 陈亚宁.我国西北地区沙化土地治理的成功经验及启示:以新疆为例[J].国家治理,2023(24):48-55.
- [47] 易志坚,赵朝华.沙漠“土壤化”:沙漠化的生态力学解决方法[J].Engineering,2016,2(3):21-29.
- [48] 陆雅海,张福锁.根际微生物研究进展[J].土壤,2006,38(2):113-121.
- [49] 张元明,杨维康,王雪芹,等.生物结皮影响下的土壤有机质分异特征[J].生态学报,2005,25(12):3420-3425.
- [50] 胡亚林,汪思龙,颜绍馥.影响土壤微生物活性与群落结构因素研究进展[J].土壤通报,2006,37(1):170-176.
- [51] 李克斌,蔡喜运,刘维屏.除草剂单用与混用对土壤微生物活性的影响[J].农业环境科学学报,2004,23(2):392-395.
- [52] 赵增新,唐进年,李银科,等.牛羊粪沙障对高寒区沙化草地恢复的影响:以甘肃省玛曲县为例[J].水土保持通报,2023,43(4):68-76.
- [53] 严亮,杨久俊.新型化学固沙材料的研究现状及其展望[J].材料导报,2009,23(5):51-54.
- [54] 杜宇佳.土壤微生物膜对风沙土固沙保水性能的影响[D].北京:北京林业大学,2021.
- [55] 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.
- [56] 杨柳.新型化学固沙材料的研制和应用[D].兰州:兰州大学,2011.
- [57] 来晓燕,张艳华,宋宜诺,等.化学固沙材料的研究现状及进展[J].化工文摘,2007(5):46-48.
- [58] 丁庆军,许祥俊,陈友治,等.化学固沙材料研究进展[J].武汉理工大学学报,2003,25(5):27-29.
- [59] 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.
- [60] 李美兰,龚伟,祝凤雯,等.化学固沙材料固沙作用机理研究的必要性[J].现代盐化工,2021,48(4):69-70.
- [61] 冯永宏,苟琪,刘任涛,等.不同沙障材料对固沙林地面节肢动物群落结构分布的影响[J].生态科学,2022,41(5):35-45.
- [62] 许祥俊.聚合物水泥基固沙材料的研究[D].武汉:武汉理工大学,2003.
- [63] 陈友治,徐兵波,李方贤,等.新型聚合物改性水泥砂浆材料研究[J].中国建材科技,2006,15(4):21-24.
- [64] 曲烈,乐俐,杨久俊,等.水泥-土基植生固沙材料水、肥释放特征研究[J].水土保持学报,2010,24(1):181-185.
- [65] 马晓芳,铁生年.石膏基固沙植生相容性材料优化工艺研究[J].材料导报,2016(S1):463-466.
- [66] 刘传义.林永昌提出粉煤灰固沙设想[J].粉煤灰综合利用,1992(4):29.
- [67] 王文安,陈士纯,郭薇,等.适用于西部大开发中各种工程需要的短纤维增强增韧复合材料基本性能研究[J].混凝土与水泥制品,2000(增刊1):42-44.

- [68] 曲烈,乐俐,杨久俊,等.水泥-粉煤灰基植生固沙材料的正交优化和氮、磷、钾初期释放速率研究[J].水土保持研究,2010,17(3):148-152.
- [69] 陈艺文.不同物理材料配施组合对风沙土理化与重金属特征的影响[D].泰安:山东农业大学,2021.
- [70] 卢海峰,李中洋,张凯.改性粉煤灰材料固沙特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2024,43(增刊1):3374-3384.
- [71] 周明吉,周玉生,孙加亮,等.我国固沙材料研究及应用现状[J].材料导报,2012,26(增刊1):332-334.
- [72] LEE W F, YANG L G. Superabsorbent polymeric materials. XII. Effect of montmorillonite on water absorbency for poly(Sodium Acrylate) and montmorillonite nanocomposite superabsorbents[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2010, 92(5): 3422-3429.
- [73] 铁生年,姜雄,汪长安.化学固沙材料研究进展[J].材料导报,2013,27(5):71-75.
- [74] 闫沛迎,屈建军,王理德,等.机械沙障固沙对生物土壤结皮形成发育的影响[J].干旱区研究,2023,40(12):1931-1937.
- [75] 黄剑聆,孙达旺,朱琰.FSL-土壤防渗剂的试验及其应用前景探讨[J].南京林业大学学报,1995,3(3):11.
- [76] 杨中喜,岳云龙,陶文宏.高性能固沙材料的开发与研究[J].济南大学学报(自然科学版),2002,16(1):71-73.
- [77] 纪蓓,薛彦辉.粉煤灰/膨润土-聚丙烯酸盐聚合化学固沙材料的研究[J].环境科学与管理,2009,34(2):83-86.
- [78] 申回春,杨献青,王芳辉,等.丙烯酰胺改性羟丙基纤维素固沙剂的研制[J].科技创新与应用,2018(26):45-46.
- [79] 张子阳.葵花秆纤维素基固沙材料的制备工艺及性能评价[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2023.
- [80] 李小侠.秸秆基高分子复合材料的制备及其保水固沙性能研究[D].兰州:西北师范大学,2022.
- [81] 王鹏.利用废弃环保型钻井液治沙技术研究[D].西安:西安石油大学,2020.
- [82] 高笑.砒砂岩在毛乌素沙地边坡治理工程中的应用[J].科学技术创新,2019(29):114-115.
- [83] 康慧芬,徐建,李晓静,等.一种新型高分子环保固沙剂的制备与性能研究[J].石油化工应用,2018,37(7):106-110.
- [84] 李紫薇,欧阳艳,张艺,等.改性向日葵秸秆、棉秆吸附剂对水体中孔雀石绿的吸附研究[J].化工新型材料,2017,45(8):242-244,247-248.
- [85] 孔维青,张丽丹,韩春英,等.碱玉米秸秆接枝丙烯酸酯乳液新型固沙抑尘剂的合成及应用[J].北京化工大学学报(自然科学版),2016,43(3):73-79.
- [86] 陈晓晓.改性玉米秸秆的表征及吸附性能研究[D].长春:长春工业大学,2016.
- [87] 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.
- [88] 王艺霏,韩春英,张丽丹,等.羟丙基甲基纤维素接枝丙烯酸甲酯/乙酸乙烯酯新型固沙剂的合成及应用[J].北京化工大学学报(自然科学版),2014,41(3):82-87.
- [89] 杨明坤,王芳辉,姚洋,等.一种新型环保固沙剂的制备与性能研究[J].材料研究学报,2012,26(3):225-230.
- [90] 曲烈,杨久俊.水泥-土基植生固沙材料的制备及水、肥释放特征研究进展[J].材料导报,2011,25(3):87-92.
- [91] 叶德展,江献财,夏超,等.制浆废液木质素类固沙剂研究进展[J].中国造纸学报,2011,26(4):58-62.
- [92] 王银梅,谌文武.新型化学固沙材料性能的试验研究[J].水土保持通报,2007,27(1):108-111,116.
- [93] 谭卓英,刘文静,赵星光,等.生态型抑尘剂的选择与实验模拟研究[J].环境科学学报,2005,25(5):675-680.
- [94] 王涛.沙漠化研究进展[J].中国科学院院刊,2009,24(3):290-296.
- [95] 庞营军,屈建军,陈怀顺,等.雅鲁藏布江江当宽谷区固沙措施对沙理化性质的改良效应[J].水土保持通报,2016,36(6):67-72.
- [96] 叶建军.边坡生态防护工程中的若干问题探讨[J].水土保持研究,2007,14(5):302-303,306.
- [97] 卓慕宁,李定强,郑煜基.高速公路生态护坡技术的水土保持效应研究[J].水土保持学报,2006,20(1):164-167.
- [98] 范蓉,仇蕊,吴永胜.我国防沙治沙技术回顾与展望[J].内蒙古水利,2023(7):12-13.
- [99] 王曰军.土地沙化与林业防沙治沙措施分析[J].农业灾害研究,2022,12(7):140-142.
- [100] 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.

Research Status and Utilization Prospect of Sand-Fixation Materials

PAN Xia¹, WANG Zhenyi², WANG Jingan³, GAO Bowen⁴, ZHAO Xinrui¹

(1. *College of Resources and Environmental Economics, Inner Mongolia University of Finance and Economics, Inner Mongolia Industrial Development Research Base, Hohhot 010070, China;*

2. *College of Statistics and Mathematics, Inner Mongolia University of Finance and Economics, Hohhot 010070, China;*

3. *Inner Mongolia Hetao Irrigation District of Water Conservancy Development Center with Ulan Buh Sub-Center, Bayannur 015200, China;*

4. *College of Desert Control, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China)*

Abstract: Sand-fixing materials play a key role in preventing the expansion of desertification, promoting vegetation restoration, regulating climate, ensuring infrastructure security, expanding land resources, and protecting water resources, and are of great significance to the sustainable development of ecology, economy, and society. Based on this, this paper classifies and summarizes the sand-fixing materials of the three common sand-fixing measures, namely engineering sand fixation, biological sand fixation, and chemical sand fixation, and focuses on analyzing the sand-fixing mechanism and use restrictions of sand-fixing materials. The conclusions are as follows: 1) Engineering sand fixation reduces the intensity of surface wind-driven sand flow by setting sand barriers on the dunes' surface, thus achieving the purpose of wind-driven sand fixation. The effect is remarkable, but the cost is high and the environmental compatibility is poor. Especially in areas with severe wind-driven sand, this measure can only be used as a temporary sand fixation measure. 2) Biological sand fixation is one of the most widely used technical measures to improve the environmental quality and production potential of sandy areas by sealing and planting drought-tolerant plants or cultivating sand-fixation microorganisms. However, it requires a large amount of water, and experiments have proved that this measure can be used as a fundamental sand fixation measure. 3) Chemical sand fixation is to bond loose sand together through chemical bonding materials to form a consolidated layer, to prevent the wind from blowing and transporting sand particles. This measure is cheap and easy to construct. Still, the sand fixation period is short, and most chemical sand fixation agents have high toxicity, poor environmental degradability, and other problems, so it is not widely used today. In addition, it is indicated in the outlook that: 1) Accelerating the research and development of new materials and technologies of "low consumption, high efficiency, and easy realization" is the priority development direction of the research and development of key technologies for the green upgrading of sand control in the new era; 2) Using the existing advantages of wind and solar energy resources in Inner Mongolia, supporting the best coordination, high operating quality, comfort and safety of the sand control mechanization equipment can adapt to the market competition and meet the needs of the new era; 3) Actively participate in the international desertification control work, and strive for a leading position, actively improve China's international visibility in the field of desertification control, and pass on "Chinese wisdom" to the world.

Key words: sand-fixing material; engineering sand-fixation; biological sand-fixation; chemical sand-fixation; desertification control science