

# 化学固沙材料研究进展及展望

赖俊华<sup>1,2</sup>, 张 凯<sup>3</sup>, 王维树<sup>3</sup>, 王彦奎<sup>1</sup>, 徐贤伦<sup>4</sup>, 屈建军<sup>1</sup>, 肖建华<sup>1</sup>

(1. 中国科学院西北生态环境资源研究院 敦煌戈壁荒漠生态与环境研究站/甘肃省风沙灾害防治工程技术研究中心, 甘肃兰州 730000; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国人民解放军 63607 部队, 甘肃 酒泉 735000; 4. 中国科学院兰州化学物理研究所, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:** 作为三大治沙措施之一, 化学固沙措施能够使流沙表面迅速地形成防风蚀的固沙层, 受到广泛的关注。无机类化学固沙材料、有机类化学固沙材料及有机-无机复合类化学固沙材料等三大类化学固沙材料为化学固沙措施提供宽阔的发展空间, 但各自也存在着缺点和不足。因此, 研究和开发具有耐水蚀、耐冻融、耐风蚀及抗紫外线辐射性能、对环境没有污染及对植物无副作用、成本低廉的固沙材料是今后化学固沙材料的发展方向。

**关键词:** 固沙措施; 无机类化学固沙材料; 有机类化学固沙材料; 有机-无机复合类化学固沙材料

**文章编号:** 1000-694X(2017)04-0644-15

**DOI:** 10. 7522/j. issn. 1000-694X. 2016. 00032

**中图分类号:** X43

**文献标志码:** A

## 0 引言

《联合国防治荒漠化公约》对“荒漠化”的定义为: 包括气候变化和人类活动在内的种种因素造成的干旱、半干旱和亚湿润干旱地区的土地退化<sup>[1]</sup>。荒漠化是全球性的严重环境问题, 主要分布于亚、非、拉等发展中地区。中国也是荒漠化最严重的国家之一, 沙漠化是荒漠化的一种类型, 即沙质荒漠化。2010 年中国北方沙漠化土地达到 37.59 万 km<sup>2</sup>, 其中轻度沙漠化土地 12.71 万 km<sup>2</sup>, 占沙漠化土地面积的 33.08%; 中度沙漠化土地 8.58 万 km<sup>2</sup>, 占 22.16%; 严重沙漠化土地面积 7.97 万 km<sup>2</sup>, 占 21.21%<sup>[2]</sup>。荒漠化问题已经引起了人们的极大关注, 尤其是中国实施西部大开发战略, 对固沙技术和固沙材料的需求越来越紧迫。

## 1 固沙技术研究进展

国内外的固沙技术可划分为工程固沙技术(又称机械固沙技术)、植物固沙技术、化学固沙技术及综合固沙技术<sup>[3]</sup>。

工程固沙技术是利用风沙的物理特性, 通过设置工程来防治风沙流的危害及沙丘前移压埋。工程措施的基本途径在于: 制止沙粒起动、抑止地表风蚀、加速风沙流运动、强制风沙流沉积、转变风沙流

运动方向、变沙丘的整体运动为风沙流的分散运动等。工程固沙技术主要是利用枝条<sup>[4]</sup>、植物秸秆<sup>[5]</sup>、砾石<sup>[6]</sup>等材料在沙丘上设置障碍物, 以起到防风固沙的作用, 后来发展为玻璃纤维网、尼纶网<sup>[7]</sup>、HDPE 网<sup>[8]</sup>及环保型植物纤维网材料等。设置沙障不仅能明显改良沙地土壤, 还可以调节局部小气候, 增加下垫面粗糙度, 有效降低地表风速, 使防护对象免受沙害<sup>[9]</sup>。另外也有通过往风积沙中添加砒砂岩来改变其物理性质, 从而达到固沙的目的<sup>[10]</sup>。目前青藏铁路沿线使用 HDPE 网编织的高立式大网格防沙网取得了很好的效果<sup>[11]</sup>。采取工程防沙只是暂时性的防沙措施, 要实现彻底的实现固沙, 必须采取植物固沙措施。

植物固沙技术是指在沙漠地区种植植被, 从而能够有效地抑制沙漠进一步侵蚀, 改善沙漠的生态环境。植物固沙的重点是根据当地的水文及气象条件选择合适的植物或微生物及设计有效的植物防护体系及结构<sup>[12]</sup>。植物固沙不仅能调节当地的气候, 提供生物产品, 有经济价值, 而且主要是能改良当地的土壤, 为彻底治理沙漠打好基础<sup>[13]</sup>。受沙漠地区恶劣的气候条件影响, 适合于沙漠地区生长的植物种类很少及植物成活率很低(一般小于 30%), 生长周期长, 很难在短时间内达到防风固沙的目的, 有些地方甚至是寸草不生, 虽然国家投入大量的人力、物

**收稿日期:** 2016-01-20; **改回日期:** 2016-03-15

**资助项目:** 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所科技服务网络计划项目(HHS-TSS-ST5-1504); 中国铁路总公司科技研究开发计划课题(2015G005-B); 国家自然科学基金项目(41501010)

**作者简介:** 赖俊华(1981—), 男, 江西广昌人, 博士研究生, 从事防沙固沙材料及沙材料的研究开发和风沙灾害防治工程。E-mail: laijh@lzb.ac.cn

**通信作者:** 屈建军(E-mail: qujianj@lzb.ac.cn)

力及财力,但很难收到明显的效果<sup>[14]</sup>。

化学固沙技术是指在流动沙丘(地)上喷洒化学粘结材料,在流沙表面形成覆盖层,或渗入表层沙中,把松散的沙粒粘结起来形成固结层(硬壳或具有一定柔韧性的壳层),或者是利用粘结材料把沙粒粘结成具有一定尺寸的沙粒聚集体,在沙面形成人造戈壁,从而防止风力对沙粒的吹扬和搬运,达到固定流沙、防治沙害的目的<sup>[15]</sup>。化学固沙收效快,但成本高,主要应用于干旱少雨、地下水资源开采较困难、流沙危害又很严重的沙漠地区,特别是一些重要的机场、交通线(铁路和公路等)、军事设施和重要的工矿区,并常和植物固沙相配合,作为植物固沙的辅助性和过渡性措施<sup>[16]</sup>。由于化学固结层容易被风沙流掩埋和掏蚀,所以化学固沙技术也常与工程固沙技术相配合。

综合固沙技术是在考虑3种固沙技术优缺点的基础上提出的一种综合性固沙技术,讲究相互配合,相互弥补对方的不足,从而获得很好的防沙固沙效果。目前常用的有工程-植物综合固沙技术、化学-植物综合固沙技术、化学-工程综合固沙技术及工程-化学-植物综合固沙技术等。包兰铁路沙坡头段采用的是化学-植物及化学-工程综合固沙技术<sup>[17]</sup>,塔里木沙漠石油公路则采用的是工程-植物综合固沙技术<sup>[18]</sup>。

## 2 化学固沙材料的研究进展

化学固沙在国外已经有80多年的历史,20世纪30年代中期,原苏联和美国首次进行化学固沙试验。到20世纪60年代,化学固沙技术有了较大发展,特别是在石油资源丰富的沙漠国家,伊朗便是一个突出的例子。随后沙特阿拉伯、利比亚及澳大利亚等国家也开展了化学固沙的试验,均取得了不错的效果。国内化学固沙起步较晚,但在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。如在包兰铁路的沙害地段及塔里木沙漠石油公路的试验路段,都进行过较大面积的化学固沙扩大试验和中间试验<sup>[17-18]</sup>。迄今为止,国内外的科技工作者研究出大量的化学固沙材料,按来源及作用可分为无机类化学固沙材料、有机类化学固沙材料及有机-无机复合类化学固沙材料3大类。

### 2.1 无机类化学固沙材料

#### 2.1.1 水玻璃类

硅酸盐胶黏剂是最重要、也是最有发展前途的

一类无机胶黏剂。它是以碱金属硅酸盐溶液(俗称水玻璃)为主体黏料,按照实际情况加入适量的固化剂和骨架材料等调和而成的胶黏剂,具有环保、资源丰富、粘接力强、制备简单,耐热、耐火和耐久性能优异等特点,因而在众多无机胶粘材料中脱颖而出,成为最具发展潜力的一类无机胶黏剂,并被广泛应用于金属、陶瓷、石材、玻璃、纸品、木材、纤维等材料粘接。由于水玻璃优良的粘结性能,早在20世纪60年代初就有关于水玻璃固沙方面的研究,但水玻璃与松散的沙粒粘结成的固沙层是一刚性壳层,易受外力破坏,特别是在干燥的气候条形下,极易失去内部水分而变得疏松,加上水玻璃碱性强,腐蚀性大,因此在固沙方面受到一定的限制<sup>[19]</sup>。为了提高水玻璃固沙层的强度,降低脆性,延长固沙时间,需要采取合适的改性措施。目前常用的水玻璃改性剂有氟硅酸钠<sup>[20]</sup>、乙酸乙酯<sup>[21]</sup>和氯化铝等。其中氯化铝改性的水玻璃作为粘结材料制备的沙漠绿化砖的抗压强度在2~5 MPa,部分试样的抗压强度能达到6 MPa以上<sup>[22]</sup>。已有研究揭示了氯化铝改性水玻璃的反应机理,发现试样表面存在铝氧Ⅳ配位体及Ⅵ配位体,并且证明了铝氧Ⅳ配位体比Ⅵ配位体稳定。扫描电镜能谱分析表明,2 mol·L<sup>-1</sup>氯化铝改性的水玻璃固沙块试样中Si:Al原子比约为5:1,推测此试样中含有-Si-O-Al-O-(Si-O)<sub>4</sub>基团<sup>[23]</sup>,反应机理为SiO<sub>2</sub>凝胶和生成的Al(OH)<sub>3</sub>交联生成Si-O-Al与沙子交联固化<sup>[24]</sup>。另外利用氯化铝改性的水玻璃也可直接喷洒于沙面固定流沙<sup>[25-26]</sup>。采用山梨醇、四硼酸钠、碳酸锂和聚丙烯酰胺等对水玻璃进行化学改性后与助剂羧甲基纤维素钠复合,制成一种粘结性能强、价廉、有较好抗老化性能,并具有较好抗水性能的固沙材料,抗压强度达14.1 MPa,经过高温(70℃)老化7 d后,抗压强度损失率为11.8%;在低温(-20℃)冷冻老化后,抗压强度损失率为19.5%;水蚀率仅为4.6%<sup>[27]</sup>。用乙酸乙酯改性的水玻璃复配植物栲胶化学固沙浆材及柱撑蒙脱石、缺铝型沸石、吸饱水的高吸水性树脂基生根素制成“复合富水营养包”,在室内模拟沙漠环境下,3个月内不浇水、不施肥,沙棘等植物生长良好,具体情况有待于在沙漠实际环境下验证<sup>[28]</sup>。对水玻璃的改性主要集中在克服固沙层的脆性缺点、提高固沙层强度方面,对于改善水玻璃粘结剂的耐老化性与抗冻融性研究极少,这也是水玻璃改性的一个重要方向。

## 2.1.2 水泥类

水泥作为一种水硬性材料,在建筑、道路和桥梁方面得到了广泛的应用,也作为固沙材料用于沙漠治理中。但由于沙漠地区干旱少雨,空气湿度低,水泥的吸水保水性能差,水泥浆中所含的水分迅速蒸发,一段时间后水泥因缺乏足够的水分而中止水化,使生成的水化产物减少,导致强度降低。另外,水泥凝固硬化体属于脆性材料,在沙漠中易发生龟裂,失去固沙保水的作用。因此,为了制取坚固的在凝固期无需养护的水泥基固沙层,在固沙材料中掺入乳化沥青、聚丙烯酸钠高吸水树脂<sup>[29]</sup>及聚氨酯、聚丙烯酸钠<sup>[30]</sup>等有机物来阻止水分的蒸发,保证水泥的正常水化,提高水泥固沙基材的强度和吸水保水性能,改善水泥基材的脆性,增强韧性。同时为了保证植物能在沙漠地区存活,在固沙材料中添加含有 N、P、K 等缓释肥料,并研究了在固沙材料中的控释速率动力学等特征<sup>[31-33]</sup>。在水泥中掺入了有机高分子化合物,基本保证了水泥在沙漠环境条件下能够水化完全,提高了其固沙的性能,但此类固沙材料的渗透性能差,只能在流沙表面形成覆盖层,固沙效果有限,同时抗老化性能较差。

## 2.1.3 石膏类

石膏是一种用途广泛的工业材料和建筑材料。由于其具有成本较低、强度较好、吸水保水性能强、不污染环境、无毒且可使植物迅速生长的特点,不仅能制成固沙障来固定流沙<sup>[34]</sup>,而且能与膨润土、化肥等制成复合材料,提高沙漠固沙植生的效率<sup>[35-36]</sup>。但由于石膏的脆性,在沙漠环境下容易出现粉化现象,耐久性较差,必须增强其韧性,才有可能成为优良的固沙材料。

## 2.2 有机类化学固沙材料

### 2.2.1 石油类

目前,国内外用于固沙的胶结材料主要是石油化学工业的副产品,一般常用的有沥青乳液、高树脂石油、橡胶乳液和油-橡胶乳液的混合物等;其中,沥青乳液是当前世界各国在化学固沙工程中应用最广泛的材料。早在 1934 年原苏联就在卡拉库姆进行了沥青乳液固沙试验,以后扩大到第聂伯河下游的沙地。到了 20 世纪 60 年代,采用石油产品作为固沙剂的国家有了较大发展,特别是石油资源丰富的沙漠国家,伊朗便是一个突出的例子。它自 1968 年开始大规模进行石油固沙,并建立了林业草场局的石油固沙队专门实施此项工作,在全国 11 个省建立

了 60 多个固沙基地,化学固沙面积达 24 万  $\text{hm}^2$ 。沙特阿拉伯也开展了石油产品固定流沙的工作,并在阿黑巴建立了专门的公司,1977—1987 年已固定流沙约 6 000  $\text{hm}^2$ 。利比亚用化学固沙配合栽植阿拉伯胶树和桉树,生长良好,已营造起一条约 50 km 长的林带。澳大利亚用沥青乳液固沙配合桉树造林均获成效<sup>[37]</sup>。

20 世纪 60 年代中期,中国科学院原兰州沙漠研究所在国内首次研究了化学固沙技术,于 1966 年在兰新铁路大风地段和新疆觉罗塔格(干山)北坡等地,用乳化沥青、造纸废液和水玻璃为主要原料,进行流沙固定试验。80 年代初又在包兰铁路沿线沙坡头试验站开展了乳化沥青(改性)、聚乙烯醇和聚醋酸乙烯乳液等多种化学固沙剂的流沙固定试验。试验证明经受了 10 多年的风沙流袭击考验,固结层基本完好,沙面风蚀并不显著,也未被外来流沙所掩埋,起到了防治沙害的作用。在栽植固沙植物方面,固沙剂所加固的沙丘,植物成活率可达 70% 左右<sup>[38]</sup>。

1968—1970 年铁道部西北研究所与呼和浩特铁路局乌达工务段合作,在位于乌兰布和沙漠边缘的包兰铁路 K374+800~K375+600, K368~K369 地段喷洒了 13 万  $\text{m}^2$  的以亚硫酸造纸废液(木质素磺酸盐)为乳化剂的乳化沥青,并种植各种沙生植物 22 万株。3~5 年后,固结层开始破碎,但结合植物固沙直播的柠条、梭梭、花棒、杨柴和沙拐枣等,成活率和保存率能达到 80%~90%,取得了很好的固沙效果<sup>[39]</sup>。

1982—1986 年铁道部西北研究所与呼和浩特铁路局工务处合作,在包兰铁路 K381~K386 地段,进行了 36.6 万  $\text{m}^2$  的乳化渣油结合沙生植物固沙的试验,种植各种沙生植物 20 万株。乳化渣油的喷洒量为 0.5~0.7  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ,以植苗造林为主,辅以直播和容器育苗,植物种有柠条、杨柴、花棒、梭梭和沙拐枣等。3~5 年后,固结层虽然开始破碎,但栽植的植物成活率>60%,成功地固定了流动沙丘,基本消除了线路沙害<sup>[40]</sup>。

单独使用沥青乳液固沙主要存在以下缺点:①沥青稳定沙土的效率较低,用量大;②沥青是疏水性的,大量使用会使土壤渗水能力下降,水流失增多,不利于植物生长;③受沥青原料来源限制,使用成本太高,难以大面积推广。为此研究人员将沥青与其他物质制备成复合材料,以期改善性能,并降低成本。范维玉等<sup>[41]</sup>以沥青或者渣油、膨润土、水玻璃和聚乙烯醇为原料,并配合使用乳化剂及添加剂

制备出一种多功能液膜固沙剂,该产品具有明显的集水和保墒作用,从而有促进植物生长和提高植被稳定性的效果。沥青作为石油工业的副产品,是由不同分子量的碳氢化合物及其非金属衍生物组成的黑褐色复杂混合物,由于沙漠地区强烈的紫外线,容易分解,缩短固沙寿命。

### 2.2.2 生物质资源类

木质素是仅次于纤维素的第二大生物质资源。造纸制浆工业产生大量的含有木质素的废液,给中国的生态环境造成严重污染。于是治沙工作者将制浆废液用于流动沙丘及沙地的固定,既能解决环境污染问题,又能为治沙提供廉价的材料。但木质素本身可降解性能良好,耐水蚀性能差而不是理想的固沙材料<sup>[42]</sup>。木质素只有通过改性才能满足固沙的性能要求,改性方法包括接枝、缩聚、复配改性和综合改性。原料来源与蒸煮工艺对制浆废液木质素结构有很大的影响。根据蒸煮工艺不同,制浆废液木质素主要分为木质素磺酸盐(LS)和碱木质素两大类,其中碱木质素又包括烧碱木质素(AL)和硫酸盐木质素(KL)等。KL与AL由于Ph-OH含量较多,为接枝改性的理想原料。但在固沙剂的合成与实际应用中还要求接枝改性原料的水溶性要好,因此目前常用LS作为接枝改性的原料<sup>[43]</sup>。

#### 2.2.2.1 接枝改性

早在20世纪80年代,Zaslavsky等<sup>[44]</sup>就申请了木质素磺酸盐粗产品与丙烯腈、乙酸乙烯酯、水解乙酸乙酯和丙烯酰胺接枝改性产物作为固沙材料的专利,之后又开发了木质素磺酸盐粗产品与丙烯酸和甲基丙烯酸接枝技术<sup>[45]</sup>。

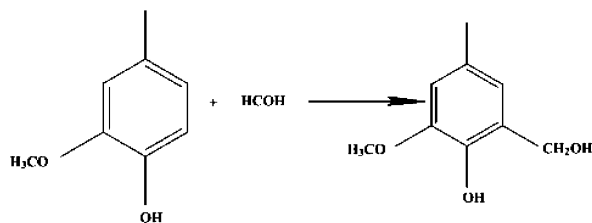
国内在木质素磺酸盐接枝改性研究起步较晚,中国林业科学研究院林产化工研究所在木质素磺酸盐改性方面作了全面系统的研究。木质素磺酸盐粗产品与丙烯酸、丙烯酰胺单体接枝共聚改性后的产物沙土稳定效率得到明显提高,木质素磺酸盐接枝丙烯酸的改性产物用量在 $10\text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 时,沙土可以抵御风速为 $21.1\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的侵蚀;接枝丙烯酰胺的木质素磺酸盐在抗风蚀效果上比接枝丙烯酸的产物略差,可能是前者中的酰胺基与沙土颗粒的结合力小于后者中的羧酸基与沙土颗粒的结合力,导致沙土抗风蚀能力下降,而接枝丙烯酰胺非离子型单体可以进一步提高沙土的抗水蚀效果,估计主要是与不同高分子的亲水能力及与沙土颗粒结合作用有关<sup>[42,46]</sup>。为了制备出抗风蚀效果好,又具有良好的抗水蚀性能的接枝产物,Li等<sup>[47]</sup>合成了丙烯酰胺与

丙烯酸二元接枝改性的木质素磺酸盐产物,并考察了单体与木质素磺酸盐接枝共聚的反应机理、反应条件(包括引发剂的种类及用量、反应温度及时间)及单体对接枝共聚的影响。为了进一步研究木质素磺酸盐的接枝产物在沙漠环境下的固沙性能,制备了具有较高的抗压强度,较好的抗冻融、耐老化、抗风蚀、抗水蚀等性能的丙烯酸、丙烯酰胺与木质素磺酸盐接枝共聚产物固沙剂,在乌兰布和沙漠的现场实验中,固沙效果明显,固沙成本仅为市售阴离子型聚丙烯酰胺(APAM)产品的70%。

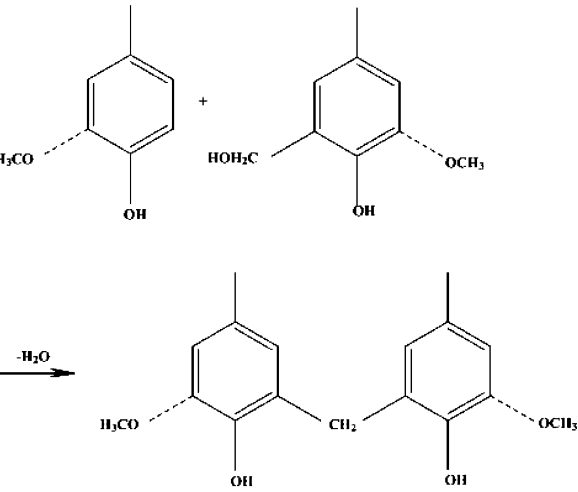
为了降低固沙剂的成本,一些科研工作者尝试直接以废液为原料进行接枝共聚反应<sup>[48]</sup>,结果表明:接枝改性可以显著提高亚硫酸盐制浆废液的沙土改良能力,当施用剂量为0.2%时,用AA和AM接枝改性产物处理的沙土样品中干态稳定性团聚体( $>0.25\text{ mm}$ )含量分别提高到47.6%和45.9%,水稳定性团聚体含量分别提高到38.1%和39.9%;二元接枝改性产物中,AA/AM比率为20/80时产物的沙土改良效果最好。施用剂量为0.2%时,沙土样品中干态稳定性团聚体含量为49.8%,水稳定性团聚体含量为43.1%。Dong等<sup>[49]</sup>在废液与丙烯酸接枝共聚的基础上加入甲醛,制备的固沙剂与没加入甲醛相比具有更高的抗压强度和更好的耐风蚀性能。

#### 2.2.2.2 缩聚改性

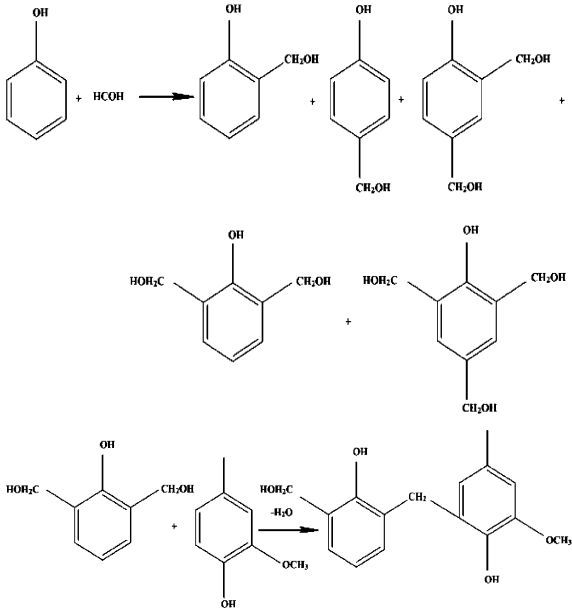
在碱法蒸煮过程中,木质素结构单元间各种连接键的断裂较多,产物分子量较低,新引入的Ph-OH含量较多,且因部分Ar-O-CH<sub>3</sub>断裂,使得苯环上反应活性点C3或C5位活泼氢(H)数量增加,有利于与甲醛(HCHO)发生羟甲基化反应。为了提高碱木质素的分子量,改善其粘结性能,常用甲醛(HCHO)与碱木质素发生缩合反应,其反应机理为<sup>[50]</sup>:HCHO与碱木质素苯环上C5位活泼H原子发生反应,生成羟甲基化木质素:



羟甲基化木质素与苯环上具有C5位活泼H的碱木质素进一步发生缩合反应,从而使分子质量不断增大:

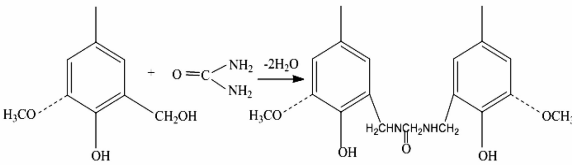


为了进一步提高碱木质素固沙剂的粘结性及固沙效果,吴玉英等<sup>[51]</sup>在加入甲醛交联剂的基础上又添加了苯酚,在碱性条件下,活性基团处于苯酚的邻位和对位,苯酚与甲醛生成一系列的初期产物,这些初期产物分别与苯酚、碱木质素反应最终生成碱木质素-苯酚-甲醛缩合物,其反应机理为:



合成固沙剂的较优化配方为:每升黑液中木质素含量为 228.6 g,苯酚 70 g,甲醛 200 mL,烧碱 40 g。此固沙剂固沙后的沙层不但具有较高的坚实度和抗风化能力,而且具有较好的保水性。

金永灿等<sup>[52]</sup>在碱木质素中加入甲醛的基础上添加了尿素,分别以纯化碱木质素和制浆废液为原料,调节 pH 值至碱性后与甲醛反应,对木质素进行羟甲基化改性。羟甲基化木质素在一定条件下与尿素等试剂反应,其反应机理为:



对制浆废液、纯化碱木质素和分离半纤维素的改性合成表明:随着尿素质量分数的增加,制浆废液和纯化木质素合成产物的粘度均有不同程度的下降,但半纤维素合成产物的粘度却略有上升。纯化碱木质素与脲醛(甲醛与尿素的反应产物)呈现出良好的交联反应性能,合成产物用于固沙的抗压强度较好,而植物原料中的碳水化合物(半纤维素)不能与尿素、甲醛发生交联反应,添加尿素后反而干扰了高聚糖对沙子的粘合,导致沙块抗压强度性能的下降。因此,在利用草类原料碱法制浆废液合成固沙材料时,应充分考虑碳水化合物降解产物与尿素作用的特性,尿素质量分数应控制在 10%~20%。

在尿素与麦草制浆废液中碱木质素反应过程中,碱木质素与尿素、甲醛发生了相当程度的缩合反应,尤其是纯化碱木质使交联产物的大分子量组分所占比例有较大幅度的提高。利用碱性硝基苯氧化法研究发现:随着尿素的质量分数增加,碱纤维素中愈创木基与对-羟基苯结构中苯环上 5 号位或/和 3 号位在交联反应过程中被取代的数量增加,但当尿素的质量分数大于 40%后,发生交联反应的木质素结构比例变化幅度较小,而此时产物中交联木质素成分在固沙材料中的相对含量有所降低,因此当尿素的质量分数大于 40%后,纯化碱木质素合成固沙材料的固沙强度有一定程度的下降。另外,合成产物 C5 位的取代率与产物的固沙抗压强度呈现出良好的线性关系,表明合成反应中的 C5 位的交联程度对固沙材料的性能具有重要作用<sup>[53]</sup>。

野外固沙试验是考察固沙材料能否大面积推广的重要步骤。金永灿等<sup>[54]</sup>用有机物达 75%、氮元素含量超过 10%的制浆废液制备的生物质固沙材料的中试产品进行种子萌发试验,溶液浓度为 100~500 mg·L<sup>-1</sup>时,对种子的萌发具有较明显的促进作用,为实现化学与植物固沙相结合的复合固沙提供了可靠的依据。在半干旱的宁夏平罗前进农场沙化地区进行小范围的生物质固沙材料的固沙试验,试验表明:当固沙材料浓度为 0.5%及 1.0%时,均匀浇湿沙丘表面(用量控制在 2~4 L·m<sup>-2</sup>),可以在 1 d 内快速形成 1 cm 以上的固沙壳层,起到有效

地固定沙土、防止风吹沙跑的作用<sup>[54]</sup>。然后在同一地区进行了利用制浆废液制备的生物质对植物生长影响的试验,结果表明:在流动沙丘上喷施以制浆废液制备的生物质固沙材料,以1%~2%的浓度和 $2.5\text{ L}\cdot\text{m}^{-2}$ 的剂量喷施,可在6~24 h内与表面沙粒快速形成固结层,具有良好的防风固沙作用,同时还可以减缓水分蒸发,对植物的发芽、生长及生物量的积累起到良好的作用。一年生和多年生固沙植物的合理选配,可有效地提高生物固沙的效果<sup>[55-56]</sup>。对试验区的土样进行常规土壤学分析发现:固沙试验2、3年后深度20 cm左右的土样中有机物和总氮含量得到了提高,而有效磷和有效钾基本没什么变化,尤其是固沙试验的3年后有机物和总氮含量增长明显,说明固沙试验区的局部生态进入良性循环状态<sup>[50, 57-58]</sup>。生物质固沙材料的应用实现了化学固沙和生物固沙的有机结合,为干旱、半干旱地区的生态环境建设提供了一项新的技术措施。

何敏等<sup>[59]</sup>为了使制浆废液中的成分更有利于植物的生长,尝试利用镁铵蒸煮制浆法代替传统的钠碱蒸煮草浆造纸法,所得副产品经山西省产品质量监督检验所检测,含有机质36.8%~40%、磺腐酸15%~22%、氮2.0%~2.8%、氧化钾3.0%~3.5%和氧化镁1.9%~2.5%(均为质量分数),pH值8,粘度 $30\text{ mPa}\cdot\text{s}$ ,实质是一种液体有机复合肥。在镁铵蒸煮制浆黑液蒸发浓缩的基础上,科技人员进行改性处理,制备成专用的环保型固沙保土有机肥,然后进行了一系列的测试,结果表明:风蚀角为 $15^\circ$ 、 $30^\circ$ ,风速最大为 $20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,适宜配方试验的风蚀量分别为 $0.313$ 、 $0.156\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ;风速为 $10$ 、 $15\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,风蚀量更小。环保型造纸废液固沙保土有机肥的抗压强度为 $256\sim 383\text{ kPa}$ 。在宁夏中卫市腾格里沙漠东南部中国科学院沙坡头沙漠研究试验站附近进行流动沙丘固定中试试验,同时播撒油蒿和柠条种子,喷洒的环保型固沙有机肥的沙丘表面形成2 mm的固结层,经过80天野外自然风蚀后,对固沙样地基本没有影响,显示了较强的固沙性能。由于固结层有保水作用及固沙有机肥中含有吸湿功能较好的腐殖质和磺腐酸,固结层以下2~3 mm全是湿沙,同时造纸原料所用的麦草含有大量的有机质,来源于蒸煮麦草所用的液氨、氧化钾本身就是化肥和微肥,所以还可以给沙漠补充养分和有机质,而有利于沙漠植物生长。利用环保型造纸废

液固沙保土有机肥进行固沙,连同运费和喷洒施工费用不到 $4\,500\text{元}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,为大面积治沙提供了一条有力的途径。

栲胶是由富含单宁的植物原料经水浸提和浓缩加工制得的化工产品。通常为棕黄色至棕褐色,粉状或块状。主要用于鞣皮,制革业上称为植物鞣剂。此外还用作选矿抑制剂、锅炉水处理剂、钻井泥浆稀释剂和金属表面防蚀剂,凝缩类栲胶也作木工胶黏剂。另外,栲胶也被用于荒漠化治理方面,葛学贵等<sup>[28]</sup>利用栲胶制备的植物栲胶高分子固沙浆材初始粘度低,仅为 $4\text{ mPa}\cdot\text{s}$ ,渗透能力强,胶凝突变拐点明显,表面张力低于蒸馏水,对沙的润湿胶凝性好,在催化剂的作用下,从数秒至3 h的设定时间内可形成强度不同的、稳定的、热固性高分子体型凝胶,固沙体抗压强度为 $1.0\text{ MPa}$ 。将水玻璃-乙酸乙酯微乳液固沙浆材、植物栲胶高分子固沙浆材、SAP高吸水功能材料、柱撑蒙脱石、缺铝型沸石和生根素以合理的配比、科学的方式复合在一起,制成“复合富水营养包”。在模拟的沙漠条件下,营养包对幼苗的成活有一定作用。

利用生物质类作为固沙材料,尤其是造纸工业副产品,为植物生长提供一些养分,在固沙方面取得一定的效果。但由于大部分都是采用有机高分子对生物质进行改性,对生物质类固沙材料的固沙寿命没有实质性的提升。

### 2.2.3 合成高分子类

合成高分子类固沙材料是20世纪60年代以来发展起来的新型化学固沙材料,从本质上看,属于水溶性或油溶性化学胶结物。使用高分子材料固定流沙,施工方便且效率高,可改善劳动条件和缩短工期,固沙效果较其他化学材料显著和稳定,因而引起人们的普遍关注和重视<sup>[60]</sup>。但高分子材料会热氧老化和光氧老化,从而发生链断裂和交联反应。这种分子链的裂解和交联使得固结层遭到破坏以致降低固沙效果。高分子材料成本高、生产工艺及原料来源等方面也受到限制,未能广泛应用,另外一些有机高分子有毒也限制了其使用<sup>[61]</sup>。

1980年以来,蔡建<sup>[62]</sup>利用聚丙烯腈废胶(PAN)皂化水解后形成的亲水性高分子聚合物(HPAN)进行室内的沙盘固沙试验,试验表明HPAN水解液具有明显的固沙作用,渗透性强,透水性好;可直接用水稀释进行固沙,稀释比(HPAN:

H<sub>2</sub>O)在 1:4~1:5 较好;在一定温度(40~80 ℃)下,固沙结皮未受不良影响,而且固沙效果增强。之后又进行了聚丙烯酰胺、聚乙烯醇、聚醋酸乙烯酯乳液和脲纶废胶(聚丙烯脲)水解液室内沙盘固沙、风洞吹蚀试验及沙柱抗压试验,在宁夏中卫沙坡头地区进行野外流沙固定试验。这 4 种高分子材料都具有固定流沙的作用。其中以聚乙烯醇和聚醋酸乙烯酯乳液的固沙效果较好。这些高分子材料可单独用于固沙,也可以与植物和草方格沙障结合固沙。最好与植物结合固沙,这样可在植物幼苗阶段保护幼苗免受风沙危害,待植物长大后,植物本身就能起到固沙作用,因而可长期固定沙面<sup>[63]</sup>。

聚醋酸乙烯酯主要用于涂料和粘合剂,同时也被用于固沙。Liu 等<sup>[64]</sup>利用聚醋酸乙烯酯乳液(PVIN)进行了结构强度、保水性能及抗风蚀性能等室内固沙试验,试验表明在 PVIN 喷洒量  $3 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2}$  不变的情况下,随着浓度的增加,固沙层的厚度及贯入阻力也增加。当 PVIN 浓度为 20%时,固沙层的厚度及贯入阻力能分别达到 5~6 mm 和 41 N。固沙层的 7 d 保水性能明显高于对照组,并且随着 PVIN 浓度的增加,固沙层的保水性能也得到提高。PVIN 在抗风蚀方面也表现良好,在实际应用中固沙剂的浓度为 5%、喷洒量为  $3 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2}$  就足以固定流沙。为了进一步改善聚醋酸乙烯酯乳液的固沙性能,彭雷等<sup>[65]</sup>利用醋酸乙烯酯与丙烯酸丁酯共聚合成水溶性高分子固沙剂聚醋酸乙烯酯-丙烯酸丁酯乳液[P(VAc-BA)]进行试验,发现喷洒不同固含量固沙剂的沙堆试样失水均较慢,并且随着固沙剂的固含量增加,含水量也稍有增加。在固结层耐水方面,P(VAc-BA)固含量在 2.0%~6.0%时,固结层浸水干燥后均可恢复硬度,说明其耐水性较好。在固结层耐温方面,除固含量为 1%的沙堆试样表面外壳在 60 ℃时变松散外,其他沙堆外壳在 30~70 ℃温度下,固结层依然较硬。沙模具有较高的抗压强度,可以达到 1.15 MPa。由于沙粒表面带有一定的负电荷,Meng 等<sup>[66]</sup>在合成 P(VAc-BA)乳液的基础上加入阳离子单体甲基丙烯酸氧乙基三甲基氯化铵(DMC)进行共聚合成阳离子型固沙剂 P(VAc-BA-DMC)乳液,并且考察了固沙剂的保水性能、耐风蚀性能、抗压强度、热老化及抗冻融性能。研究发现:随着乳液固含量的增加,固结层的保水性能提高,乳液固含量为 10%时,固结层经过 12 h 后含水

量仍维持在 25%。谭雪琴等<sup>[67-68]</sup>采用聚乙烯醇和光敏剂重铬酸铵作为固化剂稳定风积沙,试件的抗压强度逐渐增大,等到试件完全干燥,抗压强度就不会随着时间的延长而增加,并讨论了固化剂的固化机理。以聚乙烯醇为主要基料的乳液状高分子不仅具有固沙所需要的粘结性和低成本,而且具有明显的固沙作用和渗透性,并且在一定温度(30~80 ℃)下对固沙结皮未产生不良的影响。沙土经高分子固沙剂形成的固结层具有明显抗风蚀能力<sup>[69]</sup>。姚正毅等<sup>[70]</sup>对比了改性聚醋酸乙烯酯、改性纤维素和 DST(聚乙烯醇的改性物)等 3 种固沙材料的固沙结层力学性能与抗风蚀性能,从而揭示出两者的关系,为指定化学固沙标准提供依据。固沙结层的粘聚力随固沙剂用量增大而增大,并且成直线关系。固沙结层临界侵蚀风速与固沙剂用量呈线性关系,相关性很好。除粘聚力外,材料的性质对抵抗风沙流的侵蚀也有很大的影响<sup>[70]</sup>。

由于聚丙烯酸(酯)类聚合物具有优良的耐候性、耐酸碱性和耐腐蚀性,常被用作化学固沙抑尘剂<sup>[71-72]</sup>。苏鹏等<sup>[73]</sup>合成丙烯酸与全氟辛基甲基丙烯酸酯共聚物表面处理剂,用聚丙烯酸固化的沙粒团聚体经过处理后,孔隙中形成疏水的通道,让降水快速地渗透到保水层以下,也可以防止沙漠深层的水分蒸发。另外还能提高沙粒团聚体的吸水性和耐水性。在固沙的同时使降水充分得入渗,以利于植物的生长。在 20 世纪 80 年代,Wallace 等<sup>[74]</sup>在研究聚丙烯酰胺聚合物防止土壤风蚀时发现固沙剂的水渗透性:当聚丙烯酰胺的用量为  $33 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-1}$ (配制成浓度为  $0.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  的溶液)时,透水量为  $138.4 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ,同时能够减少地表近 100%的风蚀量。羧甲基纤维素钠(CMC)与丙烯酰胺接枝共聚制备成的固沙剂固化层抗压强度能达到 2.45 MPa,保水性能优异,固化层经历 7 次水冲蚀后仍能恢复,表现出最佳的固沙性能。主体 CMC 的高分子纤维素长链结构良好的粘结性和成膜性能以及丙烯酰胺中强亲水酰胺基团优良的保水和吸水性能,使这种固沙剂具有优异的固沙性能<sup>[15,75]</sup>。沈炜敏<sup>[76]</sup>发明的聚丙烯酸类 MB 型土壤固化剂在内蒙古等地进行了  $333.3 \text{ hm}^2$  的应用示范,取得了不错的效果。

聚氨酯胶粘剂具有优异的性能,且应用领域广泛,与被粘接材料之间产生的氢键作用会使高分子内聚力增加,从而使粘接更加牢固。在固沙方面,日



本研究人员采用在播撒植生用绿化物(包括植物种子、水、肥料、保水剂和保肥剂)的沙或者土层上喷洒含浓度2%~7%的溶剂型亲水性聚氨酯树脂的有机复合材料固化剂溶液 W-OH, 形成5~50 mm的多孔质固化沙层, 抑止沙的流动, 表面硬度0.5~1.5 MPa, 拉伸强度0.2~1.0 MPa, 孔隙率为20%~25%<sup>[77]</sup>。由于固化沙层具有多孔质的结构, 即具有透水性、保温性、保肥性和抑止水分蒸发等功能, 所以固化沙层具有植生绿化等功能。Wu等<sup>[78]</sup>将溶剂型亲水性聚氨酯溶液(W-OH)从化学结构方面进行优化, 在室内进行了固沙剂的固化时间、固沙层的渗透性、多孔性、机械性能、保水性能和紫外线辐射测试。试验表明: 聚氨酯溶液喷洒到沙层表面后大约4h就能完全固化。在固化过程中, 异氰酸酯基团(-NCO)与水发生反应释放的CO<sub>2</sub>气体使28~29 mm固沙层形成多孔结构, 抗压强度能达到3.8 MPa。这种结构能增加固沙层的水渗透性, 同时也能减少水分的蒸发, 在紫外线下的寿命大约为4~8个月。Gao等<sup>[79]</sup>还考察了固沙层的抗风蚀性能及固沙剂的固沙机理。化学固沙材料 W-OH 的野外固沙试验在青海湖周边的流动沙丘上进行, 采用坡面喷洒、开沟喷洒和对照3种模式进行治沙试验, 重点对 W-OH 的入渗深度、不同处理喷洒的植被数量、地温及含水量进行了统计分析。试验结果表明: 在同一播种量的条件下, 开沟喷洒处理下植被数量最多, 明显高于坡面喷洒处理和对照; 在2 cm土层内, 3种处理地温无明显差异, 在12、20 cm土层内, 喷洒 W-OH 的处理显著高于对照( $P < 0.05$ ), 且保水效果最好<sup>[80-82]</sup>。

为了减少固沙剂对环境的污染, 研究人员将聚氨酯的合成原料部分采用易降解的聚二元醇, 制备成生态型聚氨酯固沙剂, 固沙体的无侧限抗压强度和剪切强度分别能达到89.8 MPa和8.4 MPa<sup>[83]</sup>。另外, 将3种不同配方的聚氨酯固沙剂 PUA、PUB 与 PUC(聚乙二醇和聚丙二醇的质量比分别为1:1, 1:3和3:1)进行了室内对比研究, 试验结果表明: 3种固沙剂改性土的无侧限抗压强度、内聚力均随着固沙剂浓度的增加而增大, PUA、PUB 和 PUC 浓度为3 kg·L<sup>-1</sup>的改性土的冲刷率分别只有4.4%、14.7%和0.6%, 而对照样高达79.5%。PUA、PUB 和 PUC 浓度为1 kg·L<sup>-1</sup>以上的改性土风蚀后表面保持完整, 没有风蚀破坏痕迹。但上

述溶剂型聚氨酯固沙剂中的有机溶剂也同样会造成环境污染, 于是研究无溶剂臭味和无污染的水性聚氨酯固沙剂势在必行。杜峰等<sup>[84]</sup>开发了一种可生物降解水性聚氨酯固沙剂, 该固沙剂由羟值为200~400 mg KOH·g<sup>-1</sup>的可生物降解型低聚多元醇、二异氰酸酯、二羟甲基丙酸、中和剂、助溶剂、催化剂通过聚合反应形成预聚体, 再加入去离子水进行乳化得到。固沙剂的储存稳定性大于6个月, 分散体成膜后邵氏硬度为35~44, 在10 h时的失水率为52%。随后对可生物降解水性聚氨酯固沙剂进行了改进, 在原有的基础上加入内交联剂, 并采用聚醚型多元醇, 原来的氨水中和剂由磷酸的钾盐和铵盐代替, 使水性聚氨酯固沙剂成为内交联型可生物降解环保营养型。固沙剂的储存稳定性大于6个月, 分散体成膜后邵氏硬度为35~45, 固沙层的厚度为2~6 mm<sup>[85]</sup>。然后对内交联型可生物降解水性聚氨酯固沙剂的保水性及降解性能进行了测试, 结果表明: 随着可溶性淀粉用量的增加, 内交联型可生物降解的聚氨酯固沙剂的粘度增加, 粒径呈增大趋势, 固沙剂对沙盘的保水效果得到提高, 内交联型水性聚氨酯胶膜的生物降解性增强, 能最大可能地缓解废弃物对环境造成的压力<sup>[86]</sup>。

聚天冬氨酸树脂是一种能生物降解的固沙材料。Yang等<sup>[87]</sup>对聚天冬氨酸固沙剂的耐老化性能(包括热老化、冻融和紫外线老化)进行了模拟试验, 发现固沙剂含量、固结层厚度和固结时间等对固结层的抗风蚀能力和抗压强度有很大的影响。固沙剂浓度1%、固结层厚度1 cm的条件下, 经过10个冻融循环后的风蚀模量为19.41 g·m<sup>-2</sup>·min<sup>-1</sup>, 抗压强度为0.842 MPa, 当固结层厚度增加到2 cm时, 风蚀模量减少为12.41 g·m<sup>-2</sup>·min<sup>-1</sup>, 抗压强度为1.142 MPa。而当固沙剂浓度增加到2%, 固结层厚度为1 cm时, 经过10个冻融循环后的风蚀模量为7.41 g·m<sup>-2</sup>·min<sup>-1</sup>, 抗压强度为1.342 MPa。另外, 固结层的机械强度随着固化时间增加而提高, 在14~16 h固结层强度达到最大, 然后随着老化循环次数的增加而逐渐降低。

淀粉原料来源广, 价格低。但由于淀粉物理化学性能方面的原因, 不能直接用作固沙剂。淀粉接枝丙烯酸与醋酸乙烯酯制备成可部分降解性能的乳液型固沙剂, 在200℃下无热力学变化, 热稳定性良好。所制备的固沙剂能使沙粒相互粘结, 形成坚硬



的固沙层。固沙剂乳液可稀释使用,且固含量 1% 沙模的抗压强度大于 1 MPa,能够满足实际固沙应用的要求<sup>[88]</sup>。另外,种子发芽和植物生长试验结果表明,淀粉接枝丙烯酸与醋酸乙烯酯乳液型固沙剂的固沙保墒作用能促进种子的发芽和植物的生长<sup>[89]</sup>。

有机聚硅氧烷高分子中的 Si-O-Si 键较长,键角较大,具有优异的物理化学性能,如耐高低温、耐辐射、耐氧化、高透气及耐候性、耐水性等。由于优异的物理化学性能,有机硅氧烷预聚体与聚乙烯醇 PVA20-88 混合物用作固沙材料,具有快速硬化、不溶于水和固沙效果好的特点。当 PVA20-88 与有机硅氧烷的质量比为 1:4 时,粘聚力达到 483.7 kPa,内摩擦角为 68.39°,在 160 h 的紫外光照射下,具有很好的耐老化性<sup>[90]</sup>。但由于这种固沙剂的成本很高,没能得到大规模的推广应用。

复合磺化尿素-三聚氰胺-甲醛树脂是水溶性阴离子型聚合物。水溶性越好,在应用于固沙时越有利于喷洒和渗透,而且树脂的存储寿命也越长,因此制备水溶性优良又稳定的复合磺化尿素-三聚氰胺-甲醛树脂至关重要。杨明等<sup>[91]</sup>研究发现要制备上述性能的树脂,甲醛的物质的量应约为尿素物质的量的 3 倍和三聚氰胺物质的量的 4 倍之和,保证尿素、三聚氰胺甲基化完全。磺化剂物质的量与尿素和三聚氰胺的物质的量之和比不小于 1:1,这样分子链中才能有足够的亲水基团(磺酸基和羟基),与水分子形成强的氢键,保证树脂充分溶于水。在固沙的实际应用中,含量 2% 的阴离子型复合磺化尿素-三聚氰胺-甲醛树脂的固沙体的抗压强度为 0.69 MPa,而复合磺化尿素-三聚氰胺-甲醛树脂和脲醛树脂含量各为 1% 时,固沙体的抗压强度能达到 1.87 MPa,充分说明这两种树脂在固沙时存在着某种协同效应。同时这两种树脂跟某些盐类也存在很好的协同相应,在前述组分的基础上加入 0.25% 的 NaCl 后,抗压强度提高至 2.4 MPa<sup>[92-93]</sup>。

兰州大学开发了新型水溶性高分子 SH 固沙剂,分子量 20 000 左右,乳白色,比重为 1.09 g·cm<sup>-3</sup>,黏度不大,凝胶时间易于控制,并在室内对其抗压强度、抗冻融性能、耐紫外线老化、抗风蚀性能、微观结构及固沙机理进行了系统的研究<sup>[94]</sup>。该固沙体(7.07 cm×7.07 cm×7.07 cm 立方体)的抗压强度随着 SH 掺量、干密度的增加而增大,当干密度

为 1.65 g·cm<sup>-3</sup>、掺量为 50 mL 时,抗压强度达到最大 5.57 MPa。为了更好地反映 SH 固沙剂的固沙结皮强度的真实情况,邱兆国等<sup>[95]</sup>采用自行设计的实验装置测量了不同配比的固沙结皮在不同载荷下的完全蠕变。在此基础上,导出固沙结皮的弹性模量 E 和蠕变函数公式,并数值模拟了沙床上的结皮在集中载荷作用下的变形。这些力学参数的确定将使得对固沙结皮的有效性和变形、坍塌及破坏过程的理论分析成为可能,并由此对化学固沙剂固沙能力的优劣进行评估。在冻融试验中,抗压强度随冻融循环次数的增加先增大而后减小,这可能与高分子的取向有关<sup>[96]</sup>。在紫外线老化试验中,抗压强度也出现类似的现象,主要是因为 SH 为线性高分子材料,在光、热作用过程中,首先链发生断裂而产生自由基,随之产生交联和降解反应。链与自由基结合发生交联反应,材料的强度会增加。当紫外线继续照射时,更多的链开始断裂(即降解),大分子变成小分子,失去强度<sup>[97]</sup>。根据 SH 材料室内紫外线老化试验数据,换算成野外紫外线老化时间可达 9 当量年<sup>[98]</sup>。另外在抗剪强度方面主要表现为粘聚力值提高幅度较大<sup>[99]</sup>。SH 固沙剂固结层遭侵蚀的主要原因是风沙流的直接冲击和磨损,并且随着风沙流速度的加大,风蚀量也将增大。风沙流的角度也会直接影响风蚀量,同样的固沙材料在相同速度的风沙流条件下,随着坡度的增大,风蚀量随之增大<sup>[100]</sup>。采用红外光谱,扫描电镜结合电子能谱等现代分析方法,初步揭示了 SH 固沙的本质,从微观上探讨了 SH 固沙强度形成的机理。SH 与沙子结合以后,SH 本身的官能团对沙子没有化学键的结合,只表现出微弱的氢键及范德华力的影响,固沙层的强度主要是物理化学作用形成的。氢键作用、吸附作用和絮凝作用等赋予了沙子机械强度和优良的耐水性能而达到固沙的目的<sup>[101]</sup>。利用多元逐步回归分析方法对其性能参数与微观结构参数之间的相关性进行计算,并对其相关性进行评价。两者之间存在着良好的相关关系,各向异性、等效直径、扁圆度、充填比和面积比是对 SH 固化的风沙土的无侧限抗压强度、粘聚力、内摩擦角和渗透性能等力学性能影响较为显著的 5 个微结构参数。试验与分析结果表明,经 SH 材料加固后,风沙土的无侧限抗压强度、抗剪强度得到了明显的提高,渗透性降低不明显,同时微结构发生了微小的变化。这说明 SH 材

料可以显著提高风沙土的强度<sup>[102]</sup>。莫高窟崖顶及鸣沙山现场试验表明, 喷洒 SH 后固结层可调节沙丘内部温度, 抑制沙丘内部水分蒸发, 且喷洒工艺简单、方便、固沙效果显著, 适合在干旱沙漠地区使用<sup>[103]</sup>。

兰州大学研制出 LZU 固沙材料<sup>[104]</sup>, 室内固沙试验表明, 此固沙材料是一类易于喷洒、环境友好的化学固沙材料, 将其喷洒于沙面, 沙固结层干燥后具有一定的干强度且水渗透性良好, 遇水后强度虽有所下降, 但仍有一定湿强度, 抗风蚀、抗冻融性能强, 植物生长适应性良好。在室内固沙试验的基础上, 选取宁夏中卫沙坡头进行了化学-生物综合固沙试验研究, 发现此综合固沙技术可缩短固沙时间, 提高固沙效率, 能够满足现代防沙工程高效、价廉、快速、方便和环保的固沙要求。该技术虽使固沙成本有所增加, 但能很好地解决降雨极少及实验场地后期管理维护等问题, 也适用于恶劣沙漠环境中的防风固沙。LZU 固沙材料为液体, 运输成本相对于固体材料偏高。为进一步降低成本, 并且方便野外施工, 研制了改性聚合物固沙材料, 该材料为白色或微黄色固体颗粒, 能在常温下溶解于水, 耐水性能好, 遇水后强度虽然有所下降但仍有一定湿强度, 植物生长适应性良好。其性能有待于进一步在野外固沙试验中进行考察和研究<sup>[105]</sup>。

在甘肃省民勤县绿洲与沙漠的过渡地带, 张松林等<sup>[106]</sup>应用多功能高分子固沙剂进行流动沙丘固定试验研究。结果表明, 在试验区斜坡下部, 除草试验区比对照区结皮厚度增大 81.25%, 未除草试验区结皮比对照区厚度增加 32.25%, 固沙结皮区比无结皮区更能抗风蚀, 至今固沙结皮依然存在。未除草区有结皮时, 固沙试验区 0~80 cm 各层平均含水率均比对照区高, 其中土层平均含水率比对照区高 76.27%。试验证明施用固沙试剂不仅固沙效果非常明显, 而且在不除草时对土壤水分有很好的保持效果。在同一地区进行了以退化的人工梭梭林和天然白刺灌木丛为受试植物, 辅以滴管措施的多功能高分子植物种草剂的沙生植物复壮试验<sup>[107]</sup>。白刺和梭梭施用种草剂的抗旱、保水效果很显著, 尤其是在白刺上使用效果更好。滴灌试剂时, 单梢干重平均值、最大新梢长平均值、最小新梢长平均值和最大新梢径平均值均比滴灌对照、无滴灌对照和无滴灌试剂高得多。无滴灌施用试剂时比无滴灌对照有

高有低。可见滴灌施用试剂的促生长效果非常明显, 但需要在降水前或预先补充一定量的水分后施用, 以确保试剂能够蓄积足够的水分供后期生长发育需要。由此说明, 多功能高分子固沙种草剂不仅有利于林下土壤水分的保持, 有效提高其抗旱能力, 而且还能促进植物的快速生长, 对退化植被有很强的恢复能力。

深圳市如茵草坪有限公司研制的 RY-1 高分子固沙剂具有良好的固沙能力、良好的保水性能、优良的渗透性及强抗雨水侵蚀与风蚀能力, 是适合与植物固沙工程相结合的一种优良固沙剂<sup>[108]</sup>。新型高分子材料 YDL-固沙胶在沙面上形成的固结层具有抗压强度高、抗风蚀能力强、渗透性能好等特点, 并且渗水后强度损失较小。当固沙胶采用双遍喷洒, 且用量为  $40\sim60\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$  时, 形成的固结层厚度适当, 能促进种子的发芽和生长<sup>[109]</sup>。为了解决在沙漠地区飞播时种子的漂移和在有限的降水条件下实现种子的发芽, 采用由粘结剂、保水剂、凹凸棒土、有机和无机肥料、多孔支撑体等组成的丸粒化种衣剂对种子进行丸粒化处理, 使得处理后的丸粒化种子重量增加到原来的 4~6 倍, 有效地解决了在沙漠地区飞播种子的问题<sup>[110]</sup>。

合成高分子类固沙材料在固沙方面取得了一定的效果, 但由于其对紫外线的敏感性, 需进行改性处理, 提高其抗紫外线性能, 延长固沙寿命。另外合成高分子的成本较高, 不适合大面积推广使用。

## 2.2.4 废塑料改性类

随着社会的发展和进步, 塑料给人们的生活带来极大的便利, 同时大量被丢弃的废塑料给环境沉重的负担, 如何治理和利用废塑料的问题也亟待解决。利用废塑料制备改性废塑料类固沙材料是一项既能解决“白色污染”问题, 又能为沙漠防治找到廉价材料的方法。改性废塑料类固沙材料是通过物理和化学方法对废塑料进行改性处理, 生成可以用来固沙的环保材料<sup>[111]</sup>。包亦望等<sup>[112]</sup>采用裂解法改性废聚苯乙烯, 其原理为在密封容器中的废聚苯乙烯在一定的温度和压力下会发生裂解反应, 容器顶冷却液大部分为苯乙烯, 而容器底成分复杂的残液可作为胶结材料。固沙胶结材料具有两个显著优点: ①具有良好的物理化学性能, 能有效地起到固沙和保水双重作用, 对于提高沙漠中绿色植物的存活率极为有利。②生产工艺简单。同时废塑料也可以

用来合成高分子吸水树脂,以聚乙烯废塑料、丙烯酸为原料,用反相乳液聚合方法通过接枝共聚合成高吸水性树脂,得到吸水率为  $477.8 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$  的高吸水性树脂<sup>[113]</sup>。废塑料经改性后用于防沙固沙领域的研究还是比较少,并且目前只限于室内研究,野外试验较少,其野外的固沙性能还要进一步的考察和研究。

利用废塑料制备固沙材料,成本低廉,解决了成本高的问题,但同样也存在抗紫外线性能差的问题,需要改性以延长其固沙寿命。

### 2.3 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鉴于无机固沙材料的力学性能差、保水性能差等缺点,往无机固沙材料中添加有机组分后所形成的一类新型固沙材料。有机固沙材料与无机固沙材料的复合,不仅弥补了各自的缺点,而且优势互补,从而提高了复合固沙材料的性能。水玻璃是一种广泛应用的廉价的粘结剂,粘结强度较高,耐热、耐水性能较好,但耐酸、碱性能较差,主要用于金属、玻璃、陶瓷等多种材料的粘接<sup>[114]</sup>。为了使水玻璃能够更好地应用于荒漠化的防治,研究者对其进行了一系列的化学改性,特别是添加有机粘结剂的复合化改性。黄剑玲等<sup>[115]</sup>开发的 FSL-土壤防渗剂采用对金属离子有极强配位能力和沙粒有良好亲和性能的植物多酚(单宁)及对土壤、沙粒产生特强化学反应的水玻璃(硅酸盐),同时加入起架桥作用的三价铁离子,将负电荷的土壤胶粒与单宁及硅酸根联接起来。红外光谱证实,水玻璃、单宁和三氯化铁的混合溶液中,有关基团发生了化学反应,产生配位聚合作用。该防渗剂以灌浆的方式渗入土层,填满土壤间隙并发生聚合胶凝作用,形成人造土壤复合高分子亲水性物质,具有一定的强度和持水能力,可降低渗漏并增强地面的稳定性,减少雨淋风蚀所引起的沙粒、土壤流失,为沙地植草造林创造条件。以丙烯酸乳液、明胶、水玻璃、六偏磷酸钠、羧甲基纤维素钠(CMC)、苯磺酸钠、无机填料(包括硫酸镁、硫酸亚铁、硫酸铝)为主要原料,按照一定的比例配置成 6 种固沙材料,喷洒至石墨尾矿砂或河沙表面后形成的固化层,抗压强度可达  $70 \text{ kPa}$ ,渗水时间为  $17 \sim 22 \text{ s}$ ,渗水干燥后,抗压强度下降的幅度不大,不至于破坏沙粒坚硬的固化层。该类固沙材料的固化机理为固沙材料中的

有机溶剂失水后形成的高分子链与沙粒表面的金属离子发生络合作用,使其成为一个整体,达到固沙的目的。同时无机填料中发生化学反应,形成水化铝酸三钙、硫酸钙、水化硅酸三钙和钙矾石等水化产物,它们胶结沙粒或填充在沙粒间,使沙粒表面的强度进一步得到增强<sup>[116]</sup>。为了降低固沙材料的成本,采用廉价的无机材料膨润土和工业废料粉煤灰,综合考虑抗压强度、吸水率、失水率和经济成本,粉煤灰/膨润土/水玻璃/聚丙烯酸钠与聚乙烯醇(1:2)的最佳配比为 37/37/18/8。按照固沙材料 15%、水 85% 的比例混合成泥浆,喷洒至沙表面,喷洒量为  $4.2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$  时可渗入沙层  $2 \text{ mm}$ ,喷洒量为  $10.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$  时可渗入沙层  $5 \text{ mm}$ 。此固沙材料的成本为  $3.6 \text{ 元} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,具有一定的固沙可行性及经济性<sup>[117]</sup>。根据现代控制释放技术,葛学贵等<sup>[28]</sup>提出宏观固定流沙,微观保活单株树木,地下保水保肥、地表固沙、地上成林的三维立体治沙设想。具体操作为:按照梅花状将水玻璃-乙酸乙酯乳液固沙浆材或植物栲胶高分子固沙浆材喷洒至流沙表面,使流沙在一定深度瞬间形成一层由大小不等的沙胶凝球体构成的非连续薄壳。在地表流沙被初步固定、树木根部因覆盖沙土被风席卷而裸露枯死的情况得以避免后,为树木提供长远的水分及养料是保证树木成活的关键。所谓的微观单株保活就是让树苗在营养包所营造的水、肥、氧较为充足的适宜环境中度过幼苗成活期。一旦幼苗度最初的  $3 \sim 6$  个月,其抵抗能力及生命力就会大大增强,加上高分子吸水树脂(SAP)有重复吸附水分的功能,即使它的网络结构中存在的水分被吸收释放完了,如遇自然降雨(有条件的也可人工补充水分),它可将雨水再次吸入自身存储起来,并继续为植株提供水源,从而保证植株后续生长的需要。较大范围的流沙得以固定,无数单株成活构成大片林地,两者相结合就会产生以下效果:地下水分因为树木根系的作用被锁住,沙土也被根须固结;沙地可能因蒙脱石粘土及 SAP 富营养作用而得到一定的改良,反过来较好的土质又支持树木的生长,成林的树木可以减缓风力,相应减弱沙石的搬移迁移,抑止沙漠化的扩张,从而达到综合治理荒漠的效果。

### 3 存在的问题及展望

世界上所有沙漠地区气候的共同点是干旱。降

水稀少是气候干燥的直接表现,也是植被稀疏的主要原因。中国北方沙区幅员辽阔,区域差异显著,在总体上与世界其他干旱沙漠地区相比又有一些突出的特点:①降水少而集中,变率大;②温差大;③风大、风沙天气多。另外,中国沙漠分布区云量少,空气干燥,与同纬度地区相比,相对日照百分率是最高的,一般在70%以上,年日照时数2 800~3 400 h,紫外线照射时间也长<sup>[3]</sup>。因此,理想的固沙材料必须具有耐水蚀、耐冻融、耐风蚀及抗紫外线辐射等性能,才能在沙漠地区发挥固沙的作用。目前,国内外的研究者开发出了上百种固沙材料,但大部分只考虑了耐水蚀、耐冻融和耐风蚀等性能,只有少部分固沙材料中加入了抗紫外线的组分<sup>[78-81]</sup>,尤其是有机类的固沙材料更应该考虑耐紫外线的性能。化学固沙材料往往需要与工程治沙、植物固沙措施相互配合使用,形成综合性的防护体系。在综合的防护体系中,工程治沙措施能够防止化学固沙层被风沙流掏蚀和掩埋等破坏现象,化学固沙层可以通过改善沙地的水热条件,增强沙地的生物学活性,增加沙地的团粒结构,避免水肥渗漏流失和防止深层盐分向上迁移来促进植物的生长。要保证植物的生长,就要求化学固沙材料不能对环境造成污染及对植物有毒害作用,同时要求固沙层的厚度不能影响植物发芽及生长。由于需要治理的沙漠地区面积很大,所以固沙材料的成本要求低廉,利用其他产业的废弃物或副产物来生产固沙材料是一个非常好的方式。研究和开发具有耐水蚀、耐冻融、耐风蚀及抗紫外线辐射性能,对环境没有污染及对植物无副作用,成本低廉的固沙材料是今后化学固沙材料的发展方向。

## 参考文献:

- [1] INCED. International Convention to Combat Desertification in Countries Experiencing Serious Drought/or Desertification, Particularly in Southern Africa[R]. 1994.
- [2] 王涛,宋翔,颜长珍,等. 近35a来中国北方土地沙漠化趋势的遥感分析[J]. 中国沙漠,2011,31(6):1351—1356.
- [3] 王涛. 中国风沙防治工程[M]. 北京:科学出版社,2011.
- [4] 凌裕泉,金炯,邹本功,等. 栅栏在防止前沿积沙中的作用——以沙坡头地区为例[J]. 中国沙漠,1984,4(3):16—21.
- [5] 凌裕泉. 草方格沙障的防护效益[M]//流沙治理研究. 银川:宁夏人民出版社,1980.
- [6] 张克存,张伟民,屈建军,等. 不同砾石盖度戈壁床面动力学特征研究[J]. 干旱区研究,2012,29(6):1077—1082.
- [7] 汪万福,王涛,樊锦诗,等. 敦煌莫高窟顶尼龙网栅栏防护效应研究[J]. 中国沙漠,2005,25(5):640—648.
- [8] 屈建军,喻文波,秦晓波. HDPE 功能性固沙障防风效应试验[J]. 中国沙漠,2014,34(5):1185—1193.
- [9] 高菲,高永,高强,等. 沙柳沙障对土壤性质的影响[J]. 内蒙古农业大学学报,2006,27(2):39—42.
- [10] 童伟,韩霁昌,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.
- [11] 刘虎俊,袁宏波,郭春秀,等. 均匀配置的两种仿真灌木林防风效应野外观测[J]. 中国沙漠,2015,35(1):8—13.
- [12] 谢胜波,屈建军,庞营军,等. 青藏铁路红梁河段沙害成因及防治模式[J]. 铁道学报,2014,36(11):99—105.
- [13] 鲁瑞洁,刘小楝,李金凤,等. 青海湖地区典型固沙植物对根下土壤改良作用的初步研究[J]. 水土保持学报,2015,29(4):177—181.
- [14] 吴溢文. 无机胶凝多孔固沙砖制备及性能表征[D]. 海口:海南大学,2009.
- [15] 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.
- [16] 程道远. 国外化学固沙简介[J]. 世界沙漠研究,1980(1):33—37.
- [17] 兰州沙漠研究所沙坡头科学研究所. 包兰铁路沙坡头段固沙原理与措施[M]. 银川:宁夏人民出版社,1992.
- [18] 中国石油天然气总公司塔里木石油勘探开发指挥部. 塔里木沙漠石油公路[M]. 北京:石油工业出版社,1996.
- [19] 胡英娣,周洁. 水玻璃固沙试验研究[M]//中国科学院兰州沙漠所沙坡头沙漠科学研究所. 腾格里沙漠沙坡头地区流沙治理研究(二). 银川:宁夏人民出版社,1988.
- [20] 朱纯熙. 新型水玻璃砂的发展[J]. 铸造工程,2006,30(2):1—4.
- [21] 李中军,申小清. 水玻璃-乙酸乙酯体系的成胶特性及SiO<sub>2</sub>凝胶粉末的制备[J]. 硅酸盐学报,2000,28(1):77—79.
- [22] 陈平,邓湘云,董磊,等. 无机胶凝沙漠绿化砖制备及其性质的研究[J]. 天津师范大学学报:自然科学版,2009,4(29):38—41.
- [23] 李婷,邓湘云,李建保. 结晶氯化铝对沙漠绿化砖机械性能的影响研究[J]. 陶瓷学报,2009,30(4):452—457.
- [24] 吴溢文,陈永,郑福斌,等. 多孔化学固沙砖的制备[J]. 科学技术与工程,2009,9(7):1965—1969.
- [25] 李婷,邓湘云,李建保,等. 铝硅酸盐改性固沙材料的研究[J]. 材料导报,2010,24(15):431—435.
- [26] 李婷,邓湘云,李建保,等. 铝盐浓度对铝硅酸盐固沙材料稳定性的影响[J]. 硅酸盐通报,2010,29(3):721—727.
- [27] 杨柳. 新型化学固沙材料的研制和应用[D]. 兰州:兰州大学,2011.
- [28] 葛学贵,黄少云,马广伟,等. 环境矿物、SAP、化学固沙浆材综合治理荒漠初探[J]. 岩石矿物学杂志,2001,20(4):511—514.
- [29] 许祥俊. 聚合物水泥固沙材料的研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2003.
- [30] 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(4): 21—24.
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] 曲烈, 杨久俊, 乐俐, 等. 干湿循环下植生固沙材料 N、P、K 素释放特征研究[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(1): 171—174.
- [34] 屈建军, 李成, 董治宝, 等. 组合式多孔石膏板固沙障: 中国, ZL200420085833. 4[P]. 2004-08-11.
- [35] 铁生年, 岛井骏藏, 李建保, 等. 一种用石膏复合材料固沙植生的方法: 中国, ZL200710085351. 7[P]. 2001-03-01.
- [36] 铁生年, 王宁峰, 李昀珺, 等. 沙漠地区防沙固沙植生的方法: 中国, ZL200810008732. X[P]. 2008-08-27.
- [37] 吴正. 风沙地貌与治沙工程学[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [38] 胡英娣. 几种化学固沙材料抗风蚀的风洞实验研究[J]. 中国沙漠, 1997, 17(1): 105—108.
- [39] 裴章勤, 郭国平, 杨发增, 等. 沥青乳液固沙试验[J]. 中国沙漠, 1983, 3(2): 23—30.
- [40] 丁向南. 渣油乳液结合植物固沙的试验研究[J]. 中国沙漠, 1992, 12(2): 47—52.
- [41] 范维玉, 南国枝, 李水平. 一种多功能液膜固沙剂的制备方法: 中国, CN101914383. B[P]. 2010-09-03.
- [42] 李建法, 宋湛谦. 木质素磺酸盐及其接枝产物作沙土稳定剂的研究[J]. 林产化学与工业, 2002, 22(1): 17—20.
- [43] 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.
- [44] Zaslavsky D, Rozenberg L V. Lignosulfonate based graft copolymers, their preparation and uses. United States, 4276077 [P]. 1981-06-30.
- [45] Zaslavsky D, Rozenberg L V. Method for stabilization of soil aggregates: United States, 4303438[P]. 1981-12-1.
- [46] 李建法. 新型高分子沙土稳定材料的研制与应用[D]. 南京: 中国林科院林产化工研究所, 2003.
- [47] Li J F, Song Z Q, Shang S B, et al. Study on graft-copolymerization of crude lignosulfonates with acrylic monomers[J]. Chemistry and Industry of Forest Products, 2004, 24(3): 1—6.
- [48] 李建法, 周永红, 王占军, 等. 改性亚硫酸盐制浆废液对沙土结构的作用研究[J]. 林产化学与工业, 2003, 23(3): 1—5.
- [49] Dong Z, Wang L, Zhao S. A potential compound for sand fixation synthesized from the effluent of pulp and paper mills[J]. Journal of Arid Environments, 2008, 72(7): 1388—1393.
- [50] Wang H, de Vries Frits P, Jin Y. A win-win technique of stabilizing sand dune and purifying paper mill black-liquor[J]. Journal of Environmental Sciences, 2009, 21(4): 488—493.
- [51] 吴玉英, 张力平, 赵永虎, 等. 流沙和半流沙区化学法固沙的研究(I)——固沙剂的合成及固沙效果[J]. 北京林业大学学报, 1998, 20(5): 42—46.
- [52] 金永灿, 刘军, 杨益琴, 等. 草浆废液制备生物质固沙材料及其在植被恢复上的应用(系列报道之一) 生物质固沙材料的合成[J]. 中华纸业, 2006, 27(9): 76—79.
- [53] 金永灿, 刘军, 杨益琴, 等. 草浆废液制备生物质固沙材料及其在植被恢复上的应用(系列报道之二) 生物质固沙材料的结构特性[J]. 中华纸业, 2006, 27(10): 75—78.
- [54] 金永灿, 杨益琴, 安庆坤, 等. 制备固沙材料及其在植被恢复上的应用(系列报道之三) 中试生产与产品性能初步评价制浆[J]. 中华纸业, 2006, 27(11): 79—82.
- [55] 金永灿, 鲁小珍, 杨益琴, 等. 制浆废液制备固沙材料及其在植被恢复上的应用(系列报道之四) 固沙材料对植被恢复的促进作用[J]. 中华纸业, 2006, 27(12): 71—74.
- [56] 鲁小珍, 金永灿, 杨益琴, 等. 木质素固沙材料应用于沙漠化地区植被恢复的研究[J]. 林业科学, 2005, 41(4): 67—71.
- [57] Wang H J, Li J, Lu X Z, et al. A field experimental study of lignin sand stabilizing material (LSSM) extracted from spent-liquor of straw pulping paper mills[J]. Journal of Environmental Sciences, 2005, 17(4): 650—654.
- [58] 王汉杰, 景丽, 刘茂松, 等. 木质素固沙材料田间固沙实验与成效分析[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2008, 32(2): 11—16.
- [59] 何敏, 黄俊发, 何秀院. 镁铵造纸废液生产固沙保土有机肥[J]. 化学工业与工程, 2007, 24(1): 91—94.
- [60] 王丹, 宋湛谦, 商士斌, 等. 高分子材料在化学固沙中的应用[J]. 生物质化学工程, 2006, 40(3): 44—47.
- [61] 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.
- [62] 蔡建. 关于聚丙烯腈(PAN)水解实验的研究报告[J]. 中国沙漠, 1991, 11(2): 69—73.
- [63] 程道远. 高分子聚合物固沙研究[M]//中国科学院兰州沙漠所沙坡头沙漠科学研究所. 腾格里沙漠沙坡头地区流沙治理研究(二). 银川: 宁夏人民出版社. 1988: 349—357.
- [64] Liu J, Shi B, Lu Y, et al. Effectiveness of a new organic polymer sand-fixing agent on sand fixation[J]. Environmental Earth Sciences, 2012, 65(3): 589—595.
- [65] 彭雷, 张丽丹, 韩春英, 等. 固沙剂 P(VAc-BA)的合成及其应用[J]. 应用化学, 2009, 26(2): 149—153.
- [66] Meng X, Peng G, Liu B, et al. Synthesis and sand-fixing property of cationic poly(vinyl acetate-butyl acrylate-dmc) copolymer emulsions[J]. Polymer-Plastics Technology and Engineering, 2013, 52(9): 931—939.
- [67] 谭雪琴, 宋茂林, 刘秀珍. 新型化学固沙剂的试验研究[J]. 山西交通科技, 2005, (5): 44—45.
- [68] 谭雪琴. 新型化学固沙剂的试验研究[J]. 河北交通科技, 2006, 2(3): 34—35.
- [69] 蒿凤延, 董波, 漆文华. 高分子环保固沙剂的研究[J]. 环境科学与管理, 2005, 30(5): 46—47.
- [70] 姚正毅, 韩致文, 赵爱国, 等. 化学固沙结层的力学强度与抗风蚀能力关系[J]. 干旱区资源与环境, 2009, 23(2): 191—195.
- [71] 韩娟娟, 张丽丹, 韩春英. 新型丙烯酸酯抑尘剂的合成及应用

- 性能[J]. 北京化工大学学报: 自然科学版, 2007, 34(增刊2): 78—81.
- [72] 韩娟娟. 水溶性丙烯酸酯固沙抑尘剂的合成与性能研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2007.
- [73] 苏鹏, 马育红, 杨万泰. 丙烯酸/全氟辛甲基丙烯酸酯共聚物的合成及固沙应用[J]. 北京化工大学学报: 自然科学版, 2012, 38(6): 44—48.
- [74] Wallace G A, Wallace A. Control of soil erosion by polymeric soil conditioners[J]. Soil Science, 1986, 141(5): 363—367.
- [75] 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.
- [76] 沈炜敏. 一种能快速、大面积、成本低廉、治理沙尘的 MB 型土壤固化剂: 中国, CN103361070. A[P]. 2012-04-01.
- [77] 吴智仁, 吴智深, 杨才千. 基于有机复合材料的化学固沙绿化技术的沙漠治理方法: 中国, CN101548595. B[P]. 2008-07-15.
- [78] Wu Z, Gao W, Wu Z, et al. Synthesis and characterization of a novel chemical sand-fixing material of hydrophilic polyurethane[J]. Journal of the Society of Materials Science, Japan, 2011, 60(7): 674—679.
- [79] Gao W, Wu Z, Wu Z. Study of mechanism of the w-oh sand fixation[J]. Journal of Environmental Protection, 2012, 3(9): 1025—1033.
- [80] 郭凯先, 孙广春, 刘得俊, 等. 青海湖周边流动沙丘化学治沙效果初探[J]. 青海大学学报: 自然科学版, 2011, 29(5): 21—23.
- [81] 任文浩, 孙广春, 郭凯先, 等. 青海湖流动沙丘化学治沙效果初探[J]. 水利发展研究, 2011(10): 6—7.
- [82] 郭凯先. W-OH 新材料特性及在青海湖周边地区沙化地植生固沙中的应用[J]. 中国农村水利水电, 2012(4): 30—32.
- [83] 湛东中, 施斌, 施泽华, 等. 一种聚氨酯型生态固沙剂及其制备方法: 中国, CN102226088. B[P]. 2011-04-27.
- [84] 杜峰, 项尚林, 方显力. 一种可生物降解水性聚氨酯固沙剂及其制备方法: 中国, CN102417574. B[P]. 2011-11-23.
- [85] 杜峰, 项尚林, 方显力, 等. 水性聚氨酯固沙剂及其制备方法: 中国, CN102304362. B[P]. 2011-07-04.
- [86] 杜峰, 项尚林, 方显力. 内交联型可生物降解水性聚氨酯固沙剂的合成[J]. 中国农学通报, 2012, 28(23): 202—206.
- [87] Yang J, Wang F, Fang L, et al. The effects of aging tests on a novel chemical sand-fixing agent—polyaspartic acid[J]. Composites Science and Technology, 2007, 67(10): 2160—2164.
- [88] 段立哲, 张丽丹, 韩春英, 等. 淀粉接枝丙烯酸/醋酸乙烯酯环保固沙剂的合成及固沙应用[J]. 北京化工大学学报: 自然科学版, 2013, 40(3): 56—60.
- [89] 段立哲. 淀粉接枝丙烯酸/醋酸乙酯固沙剂的合成与研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2013.
- [90] 赵水侠, 王来来. 有机硅氧烷预聚体的合成及其在化学固沙中的应用[J]. 应用化学, 2011, 28(7): 753—758.
- [91] 杨明, 张丽丹, 郭洪猷, 等. 固沙剂的合成与水溶性研究[J]. 北京化工大学学报: 自然科学版, 2003, 30(4): 81—84.
- [92] Lahalih S M, Ahmed N. Effect of new soil stabilizers on the compressive strength of dune sand [J]. Construction and Building Materials, 1998, 12(6/7): 321—328.
- [93] Lahalih S M. Development and evaluation of new multipurpose soil additives [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 1998, 37(2): 420—426.
- [94] 王银梅, 湛文武. 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.
- [95] 邱兆国, 郑晓静. 化学固沙结皮力学性能的研究[J]. 应用力学学报, 2006, 23(2): 325—328.
- [96] 王银梅, 韩文峰, 湛文武. 新型高分子材料固沙抗冻性能试验研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2006, 17(4): 145—148.
- [97] 王银梅, 孙冠平, 湛文武, 等. SH 固沙剂固化沙体的强度特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(S2): 2883—2887.
- [98] 王银梅, 韩文峰, 湛文武, 等. 新型高分子固化材料老化性能的试验研究[J]. 工程地质学报, 2004, 12(3): 318—322.
- [99] 王银梅, 湛文武. 用 SH 固化风沙土的力学性质[J]. 西部探矿工程, 2004(4): 1—3.
- [100] 王银梅, 湛文武, 韩文峰. 新型高分子材料固沙抗风蚀的风洞模拟实验[J]. 水土保持学报, 2005, 19(6): 14—16.
- [101] 王银梅, 湛文武, 韩文峰. SH 固沙机理的微观探讨[J]. 岩土力学, 2005, 26(4): 650—654.
- [102] 和法国, 湛文武, 韩文峰, 等. 高分子材料 SH 固沙性能与微结构相关性研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(12): 3803—3807.
- [103] 王银梅, 韩文峰, 湛文武. 化学固沙材料在干旱沙漠地区的应用[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2004, 15(2): 81—84.
- [104] 卫秀成, 赵正华, 湛文武, 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.
- [105] 赵正华. 固沙用新材料及野外固沙综合技术研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2006.
- [106] 张松林, 田侠, 赵首彩, 等. 多功能高分子固沙剂流动沙丘固定试验研究[J]. 中国沙漠, 2005, 25(3): 450—452.
- [107] 张松林, 田侠, 赵首彩, 等. 多功能高分子固沙种草剂在民勤沙生植物复壮中的试验研究[J]. 中国沙漠, 2006, 26(1): 152—154.
- [108] 郭锋, 章梦涛, 邱金淡, 等. 一种适合植物生长的高分子固沙剂[J]. 水土保持学报, 2003, 17(4): 117—118.
- [109] 张华, 田佳, 张文奎. 新型 YDL-固沙胶的固沙性能及固沙效果试验研究[J]. 水土保持研究, 2008, 15(2): 49—52.
- [110] 刘瑞凤, 阎志宏, 王爱勤. 飞播用花棒种子丸粒化研究[J]. 种子, 2004, 23(9): 35—38.
- [111] 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(3): 51—54.
- [112] 包亦望, 苏盛彪. 利用白色污染废料研制开发固沙胶结材料治理沙漠化[J]. 中国建材, 2001(9): 55—57.
- [113] 秦玉芳, 李利, 周宁琳, 等. 利用聚乙烯废塑料合成高吸水树脂[J]. 南京师大学报: 自然科学版, 2005, 28(2): 71—74.
- [114] 叶楚平, 李陵岚, 王念贵. 天然胶黏剂[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [115] 黄剑玲, 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, 19(3): 11—15.

[116] 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.

[117] 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.

Research Advances and Prospect in Chemical Sand-fixing Materials

Lai Junhua<sup>1,2</sup>, Zhang Kai<sup>3</sup>, Wang Weishu<sup>3</sup>, Wang Yankui<sup>1</sup>, Xu Xianlun<sup>4</sup>,  
Qu Jianjun<sup>1</sup>, Xiao Jianhua<sup>1</sup>

(1.Dunhuang Gobi and Desert Ecological and Environmental Research Station/Gansu Center for Sand Hazard Reduction Engineering and Technology, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3.63607 Unit of Chinese People’s Liberation Army, Jiuquan 735000, Gansu, China; 4.Lanzhou Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** As one of three sandy land rehabilitation measures, chemical sand-fixing measure can make drift sand surface form an anti-wind erosion bonding layer, which is paid much attention. The three chemical sand-fixing materials, including inorganic chemical sand-fixing material, organic chemical sand-fixing material and organic and inorganic composite chemical sand-fixing material, have wide development space, but the chemical sand-fixing materials have their own shortcomings and deficiency. Therefore, studying and developing sand-fixing materials, which possess some properties, such as water erosion resistance, freeze-thaw resistance, wind erosion resistance and anti-ultraviolet radiation, no pollution to environment, no harm to plants, and low cost, is new development tendency in the future.

**Key words:** sand-fixing measure; inorganic chemical sand-fixing material; organic chemical sand-fixing material; organic and inorganic composite chemical sand-fixing material