

## 木质素固沙材料田间固沙实验与成效分析

王汉杰<sup>1</sup>, 景 丽<sup>1</sup>, 刘茂松<sup>2</sup>, 金永灿<sup>3</sup>

(1. 中国科学院东亚区域气候-环境重点实验室, 北京 100085; 2 南京大学生命科学院, 江苏 南京 210093;

3. 南京林业大学化学工程学院, 江苏 南京 210037)

**摘 要:**利用草浆造纸厂制浆废液经化学改性后制备的新型固沙材料进行了相关野外固沙实验。对 3 年生固沙群落(主要固沙植物有沙米(*Agriophyllum squarrosum* L.)、沙蒿(*Artemisia desertorum* Spreng)等)进行的野外生态学研究表明:(1)木质素固沙新材料不仅可以快速有效地固定“沙进人退”地区的流动沙丘,而且可以结合植树种草,使沙丘迅速绿化。(2)固沙新材料形成的“沙结皮”,节水保墒功能明显,有利于沙生植物成活并最终形成稳定群落。(3)固沙新材料结合沙生植物沙米、沙蒿等固沙后,土壤有机质和全氮增加明显,有利于土壤肥力的增加,可进一步促进植物的生长。(4)与传统的“草方格”固沙技术相比,木质素固沙新材料的使用可以促进地衣结皮快速形成,有利于土壤改良。

**关键词:**防沙固沙;木质素固沙材料;土壤水分;土壤养分

中图分类号:S728.2 文献标识码:A 文章编号:1000-2006(2008)02-0011-06

### A preliminary report on the field experiment of dune fixation using lignin-based sand stabilization material

WANG Han-jie<sup>1</sup>, JING Li<sup>1</sup>, LIU Mao-song<sup>2</sup>, JIN Yong-can<sup>3</sup>

(1. Laboratory of Regional Climate-Environment Research for Temperate East Asia Institute of Atmospheric Physics Chinese

Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. School of Life Science Nanjing University, Nanjing 210093, China;

3. College of Chemical Engineering Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

**Abstract:** This paper presented the preliminary results of desertification control in the field a new sand fixation material, which was made from straw pulping black-liquor. The field ecological measurement was conducted in a three-year old sand fixation community dominated by *Agriophyllum squarrosum* (L.) Moq., and *Artemisia desertorum* Spreng. The results showed the lignin-based sand stabilization material (LSSM) can not only fix the fugitive dune but also make it vegetative fast since the arenaceous plants can be planted and grew well simultaneously with the LSSM implementation. It was found that the fixation shell formed by LSSM protected the soil water from evaporation effectively, and was beneficial to the plant growth and to the formation of stable community. As arenaceous plants community constructed, the organic matter and total nitrogen in the upper-level soil was increased significantly. It stimulated the increase of soil nutrition and consequently the plant growth. Compared with the traditional sand fixation method known as “straw-grid” technique, the utilization of LSSM speeded up the formation of microbiological-shell and the soil amelioration as

**Key words:** Desertification control; Lignin-based sand stabilization material (LSSM); Soil water content; Soil nutrition

中国是世界上受沙漠化危害最严重的国家和地区之一,沙漠化引起的沙尘暴已成为制约国民经济发展、提高人民生活质量的瓶颈<sup>[1-2]</sup>。结合干旱半干旱区生态建设需要,笔者研究推广的木质素固沙新材料及其田间施用技术,经过 3 年多的田间试验,证明从草浆造纸厂黑液中提取的木质素等降解产物经改性处理后制成的木质素固沙材料,不仅可以快速有效地固定“沙进人退”的流动沙丘,而且可以结合植树种草,使沙丘迅速绿化<sup>[3-5]</sup>。固沙木质素施用的最佳地区是各种风成流动沙丘,特别是由于“沙进人退”而形成的新月形沙丘。此类沙丘多位于大沙漠的下风区,如宁夏沙湖东南隅的沙丘,腾格里沙漠的细沙冬季在西北气流的驱动下,经过正对沙湖的贺兰山风口吹向沙湖,由于冬季湖面结冰,就在其东南方向堆积成丘,

收稿日期:2007-03-30 修回日期:2007-08-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40675040,30771687,90302015);国家重点基础研究发展计划(“973 计划”(2006CB400505)

作者简介:王汉杰(1950—),男,教授,博士,主要研究方向为气象与环境学, hjwang@tea.ac.cn

引文格式: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

大大小小的沙丘散布于灌溉农田、居民点、交通干线附近,每年向前滚动,已达银川市北郊<sup>[6]</sup>。在未沙化前,这里的荒漠植物都可以正常生长,说明其气候和土壤条件是适合植物生长的,但由于流动沙丘的滚动、掩埋,使沙漠化面积逐年扩展。这类地区是木质素固沙新材料施用最合适的地区之一,只要将流动沙丘固定,恢复植被是完全能够做到的。笔者根据治沙试验3年后植物群落结构和土壤营养元素的变化情况,分析了在流动沙丘上使用木质素固沙材料的固沙绿化机理,为这一新材料的大面积推广应用提供理论依据,为干旱半干旱区的沙漠化防治提供一条新途径。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验区简况

实验区位于宁夏回族自治区平罗县前进农场,流动沙丘位于 106.22 E, 38.75 N,海拔 1100 m,属典型内陆干旱气候区。该地极端最高气温 37.3,最低 -30.2,平均温度变化在 4.7~8.1。实验区年均降水 172.5 mm,其中 67%出现在 7—9月,蒸发量 1800 mm<sup>[5]</sup>,土壤水分严重亏缺,沙漠化趋势十分严重。

实验从 2001年开始。在沙丘上播撒沙生植物如沙米,又名沙蓬(*Agriophyllum squarrosum* (L.) Moq)、沙蒿(*Artemisia desertorum* Spreng)等和栽植沙生耐旱小灌木如柽柳(*Tamarix chinensis* Lour)、柠条(*Caragana korshinskii* Kom.)、梭梭(*Haloxylon ammodendron* (C. A. Mey) Bunge)等的同时,喷洒固沙木质素水溶液,喷洒后即形成 0.5~1 cm厚的“沙结皮”,“结皮”强度和厚度与固沙剂溶液浓度及用量有关。之后有自然降水时逐渐下渗增厚,并可长期维持,厚度最大可达 3~5 cm<sup>[3]</sup>。有效“沙结皮”可维持 150 d以上。在此期间,沙生植物种子有充分的水分和时间发芽、生根、成长,各种地衣、真菌、孢子类植物得以繁殖、生长,从而形成“生物沙结皮”,最后达到固定、绿化沙丘,改善生态环境的目的<sup>[3]</sup>。目前,试验区已包括 3年生、2年生和 1年生固沙群落近 7 hm<sup>2</sup>(图 1)。



图 1 试验地原貌及固沙后植被恢复情况

Fig 1 The original feature of the experiment site and the restored vegetation after the moving sand dune was fixed

### 1.2 野外调查与试验设计

为了进一步分析流动沙丘固定后沙生植物的生长状况及固沙木质素对土壤养分的改良效果,分别对 3年生、2年生和当年生的固沙群落进行了植物群落学和土壤营养学野外调查。调查于 2005年 8月上、中旬进行,持续 15 d。2005年宁北地区属特别干旱年份,至 8月上旬进行野外观测时,仅有 17 mm降水,当年撒播的沙米、沙蒿均未出苗,但木质素结皮保存良好。因此野外调查主要针对 2年生(2003年播种)和 3年生群落进行(2002年播种)。沿固沙区坡面取 2 m ×10 m观测样带 40个,每个样带自坡底向上取 2 m ×2 m样方 5个,如此构成 10 m ×80 m测量取样区。

依据野外生态学测量方法和程序对取样区内的固沙植物进行常规群落学测定<sup>[7-9]</sup>,测量数据包括:单位面积主要固沙植物沙米、沙蒿、柽柳的植株数,沙蒿、柽柳等灌木和半灌木的基径(Base coverage)、冠幅、株高等群落学参数,冠层透光率、群落叶面积指数等生态学参数,以及 20 cm和 12 cm沙层的土壤水含量。其中冠层透光率、群落叶面积指数用英国 Delta公司的 SunScan System1-1叶面积测定仪测量;土壤水分利用美国 Campbell科学仪器公司 Hydrosense高精度土壤水分测量仪<sup>[10]</sup>(分别测定 20 cm和 12 cm沙层的土壤水含量);野外观测当天的气象条件由美国 Nielsen Kelleman公司生产的 Kelstel 4000

型便携式气象观测仪记录。土壤样品分表土、0~10 cm和 10~30 cm 3层取样,常规土壤营养元素分析由中国科学院生态环境研究中心土壤分析重点实验室完成。

## 2 结果与分析

### 2.1 沙生植物群落结构

经过 3年多的生存竞争,不同浓度固沙剂喷洒处理之间的差异已不明显。图 1b是测量时的沙生植物群落,由于 2005年宁北地区属特旱年份,作为固沙植物主角的沙米刚刚出芽,图中枯黄的沙米植株是前一年的残留物(图 1b)。但它反映了正常年份沙米的生长状况,虽然枯黄,但固沙作用仍在。而根据主要固沙植物沙蒿的冠幅测量值绘制的群落分布图发现,冠幅的个体差异很大。另外两个群落特征参数基径与株高也显示类似特征(表 1)。

样地内 333株沙蒿生长情况见表 1。表 1中的数据一方面说明沙生植物个体差异大,同时也说明群落已进入自我繁育的良性状态。调查结果显示:自然演替的 1年生苗有 42株,占 12.6%;2年生 74株,占 22.2%。这一数据主要受当年自然降水多寡的影响,2003年降水量 204.9 mm,较多年平均值高 18.6%,而 2004年仅 86.7 mm,约低于多年平均值 50%。这也说明选用多年生灌木固沙植物的重要性,即使在特别干旱、草本植物无法出苗的年份,灌木仍能起到防风固沙的作用。野外调查发现,相对稳定的生境形成以后,碱蓬(*Suaeda salsa*)、棘豆(*Oxytropis ochrocephala*)、猪毛菜(*Salsola foliosa*)等沙漠植物,小动物如狗獾(*Meles meles*)、野兔(*Lepus capensis*)、鼠类(*Gyanys desertor*)等也相继出现,生态系统进入自我恢复的良性状态<sup>[3-4]</sup>。

人工干预条件下生物生态工程固沙的成败在于固沙群落的稳定性。稳定的人工固沙群落应具备下列条件:(1)适应当地环境条件,特别是适于当地干旱条件;(2)要有自己固有的种类组成,并逐步形成完成或较完整的草本层;(3)要有能够恢复改善生态环境的能力,特别是改善土壤营养条件的能力;(4)要有正常发育和自我更新的能力<sup>[11-13]</sup>。根据对试验区群落结构的调查结果,从群落对极端干旱条件的适应能力、固定组成及正常发育自我更新方面,该固沙群落已属于稳定的群落。

### 2.2 固沙群落内土壤水分状况

根据多点随机测量确定土壤水含量测点个数的方法<sup>[10]</sup>。经反复试验,取用 5点平均法反映样方内土壤水分空间分布的不均匀特性。

自东向西不同样带内 5个样方土壤水含量均值变化见图 2(为了消除边际效应,作图时两边各去掉一条样带的数据)。图 2显示,12 cm土壤含水量明显大于 20 cm土壤含水量。造成这一现象的主要原因是作为固沙植物主角的沙米仍未出苗,而多年生的沙蒿正值生长旺季,其根系较深,能吸收深层水分,从而使得 20 cm深度土壤水损失过多。由图 2还可知,即使在当年仅 18 mm降水的特旱条件下,固沙群落中 12 cm深度的土壤水分最大可达 9%,平均为 6.5%(20 cm平均为 3.4%),并且能保障沙蒿、柽柳等灌木、半灌木正常生长。这一方面说明流动沙丘由于缺少毛细管蒸发作用,对浅层地表水有特殊的保护功能,另一方面说明沙米、沙蒿等固沙植物对特殊干旱生境的适应能力。近年来的实践证明,1年生草本植物(如沙米)和多年生灌木、半灌木(试验品种有沙蒿、柽柳、沙柳、花棒等)在固沙中各自发挥应有的作用,二者缺一不可。固沙初期,1年生沙米生长快,地表覆盖面积大,可以有效地降低近地面风速,减少土壤水分蒸发,为沙蒿等木本植物提供比较优越的生存条件。而 1年生草本植物凋落物还可以有效地改良土壤,

表 1 沙蒿群落测量数据

Table 1 The measured data of *Artemisia desertorum* Spreng community

测量项目 Items	组合根茎/cm Base coverage	冠幅/cm Crown diameter	株高/cm Height
均值	3.0	81.3	74.8
方差	2.8	43.2	32.1
最小	0.3	3.0	12.0
最大	21.0	214.0	161.0

注:测量总株数为 333株,样地面积为 10 m ×80 m。

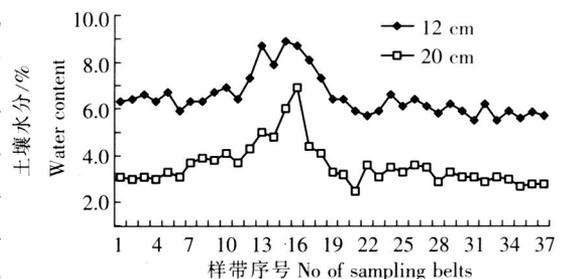


图 2 自东向西各样带土壤水分平均值的差异  
Fig 2 The difference of averaged soil water content in sampling belts from east to west

增加土壤有机质,这也是流动沙丘最缺乏的土壤营养成分。另外,沙米种子就地撒落,次年繁生快,可以较快增加地表盖度。待多年生木本植物成活后,可以更加有效地利用较深层的土壤水,偶遇特旱年份,草本植物不能出苗时,仍能保证一定的群落密度和固沙功能。

由于实验地事实上相当于大面积流动沙丘上的一个“绿岛”。群落中间诸样带的土壤水分条件明显好于边缘样带(图 2)。这说明固沙植物群落形成后,由于群落内部风速减弱,地表蒸发降低,使土壤水得以保存,土壤湿度相对较高,这对于固沙植物至关重要。总之,3年多的固沙试验揭示了如下事实:

(1)流动沙丘中有“水”可供植物利用;(2)群落形成后,其中间地带由于土壤水蒸发损失较少,使土壤水得以有效保存。这种植物与土壤水环境之间的“良性互动”正是所期望达到的目标,也是固沙试验能否成功的关键。目前学术界存在某些争议:认为植物汲取地表(地下)水,会加剧沙漠化进程。通过该实验及结果分析,笔者认为:“一方水土养育一方生物”,在一定的气候、土壤条件下,某种植物(包括动物)能否生育繁衍,是“物竞天择”、“适者生存”的自然规律所决定的,只要对相应的“水土”选种相应的“植物”,即“适地适树(草)”,它就能生存、发展、持续。但如果植物品种选择不当,自然会对地表水量平衡造成影响,造林的后果也是可以预见的。值得注意的是:因人为活动造成的“水土变异”,则需要适度的人工促进措施去弥补,木质素固沙新材料的制作、使用正是按这种科学思想进行的。

### 2.3 固沙群落内土壤养分状况

固沙植物群落是否具有恢复和改善生态环境,特别是改善土壤营养条件的能力,是衡量治沙是否成功,群落是否稳定的重要生态学指标。只有土壤营养条件持续得到改善,植物生长才有可能进入良性的正反馈。

采自试验区土样的常规土壤学分析结果表明(表 2):虽然固沙植物群落已经形成,该区土壤的外表特征虽与常规土壤差别较大,但随着固沙时间的延长,土壤改良的效果十分明显。特别是表土层,3年生固沙群落土壤有机质比 2 年生的高 97%,比空白对照区高近 151%。王汝庸等曾研究了内蒙古东部地区人工种草以后生草沙土土壤养分的变化情况,发现 2 年生沙打旺处理区 0~15 cm 土层腐殖质较对照区增加 87.3%,3 年生处理区增加 160%<sup>[12]</sup>,这与该实验的结果类似。

表 2 土壤营养元素对比

土层 /cm	样品	c(有机质) / (g·kg <sup>-1</sup> )	c(TN) / (mg·kg <sup>-1</sup> )	c(TP) / (g·kg <sup>-1</sup> )	c(TK) / (g·kg <sup>-1</sup> )
Soil layer	Sample				
表土	3年生	2.81(150.9)	106.0(121.3)	0.226(5.6)	13.4(0.1)
	2年生	1.43(27.7)	59.9(25.1)	0.215(0.1)	13.6(2.2)
	对照	1.12(-)	47.9(-)	0.214(-)	13.3(-)
0~10	3年生	1.73(76.5)	73.6(76.5)	0.208(-2.3)	13.4(0.0)
	2年生	1.53(56.1)	68.5(64.3)	0.221(3.7)	13.8(3.0)
	对照	0.98(-)	41.7(-)	0.213(-)	13.4(-)
10~30	3年生	1.33(41.5)	53.6(38.5)	0.198(-6.6)	13.2(-1.4)
	2年生	1.19(26.6)	58.1(50.1)	0.209(-1.4)	12.5(-6.7)
	对照	0.94(-)	38.7(-)	0.212(-)	13.4(-)

注:()中为增加的比例(%)。

分析发现,固沙初期木质素的使用是土壤有机质含量增加的原因之一,沙米、沙蒿、柽柳等植物的凋落物,以及后期进入的小动物、繁生的微生物遗体、分泌物、排泄物及它们的分解产物,都是土壤有机质增加的直接原因。

土壤有机质含量与土壤肥力是密切相关的,在一定范围内,有机质含量的高低是衡量土壤肥力水平的重要标志之一,而且土壤有机质是土壤各种营养元素特别是氮、磷的重要来源<sup>[11]</sup>。表 2 中的数据显示,全氮增加最为明显,值得注意的是,10~30 cm 土层全氮增加 50.1%,增加量高于 3 年生群落。可能是由于 2 年生固沙群落中沙蒿等深根植物数量极少,而沙米在测量时尚未出苗,所以该区深层土壤氮素含量被吸收利用的较少,而 3 年生群落中沙蒿、柽柳等长势良好,对深层土壤氮素吸收利用较多。氮含量的增加主要来自以下几个方面:(1)木质素固沙材料改性合成时有氮元素加入;(2)固沙植物凋落物增加了土壤有机质;(3)活性沙结皮形成后,有大量固氮藻类出现,增加了土壤的固氮功能。

表 2 中的数据还显示,木质素固沙群落中全磷含量变化较小,表土层全磷含量有所增加。这主要是植物凋落物增加以及空气中干、湿沉降造成的,因此 3 年生群落中表土层全磷含量的增加(5.6%)明显大于 2 年生群落(0.1%)。下层土壤中的全磷含量基本上是减少的,这既与固沙植物吸收利用有关,也反映磷元素向根系密集的表土层富集的过程<sup>[12]</sup>。2 年生群落中下层土壤磷的减少不明显,如前所述,一方面由于群落刚刚形成,植物吸收利用很少,另一方面是 2 年生群落中多年生深根性植物极少,对磷的吸收利用不足以改变土壤中的磷含量。

木质素固沙后土壤全钾含量的变化基本上可以忽略不计。即使是表土层,钾含量也几乎没有变化。

试验区与对照区的微小差异在取样误差范围之内。2年生群落土壤深层(10~30 cm)钾含量减少6.7%,目前尚没有合适的理由加以说明,可能也是取样误差造成的。

总之,木质素固沙新材料结合沙生植物沙米、沙蒿等植物固沙后,土壤有机质和全氮增加明显,这有利于土壤肥力的增加,对进一步促进植物生长是有益的。这也是促进群落进入良性循环的关键。氮素含量的增加来源于3个方面:木质素固沙材料,植物凋落物,生物沙结皮中的固氮藻类。群落形成后,土壤深层的磷元素会有所减少,因此在固沙初期,适当增施磷肥是有益的。虽然固沙群落中钾元素变化不明显,但考虑到流动沙丘土壤肥力极端贫瘠,基本营养成分比正常耕作土壤小1~2个量级,固沙初期增施氮、磷、钾肥都是必要的。另外,根据治沙区的气候条件,选用适生的豆科植物固沙可能会收到事半功倍的效果。

#### 2.4 活性沙结皮的形成

为进一步分析木质素固沙材料的功能,对3年生固沙群落出现的活性沙结皮进行采样分析。并与常规草方格固沙区(宁夏沙坡头)形成的沙结皮、成熟荒漠结皮对比(表3)。一般沙结皮是由藻类、菌类微生物形成的地衣结皮,其中的绿藻、蓝藻均具固氮功能,且固氮速度非常高,可达10~20 g/(m<sup>2</sup>·a),而大气干、湿沉降的固氮速率仅为2~3 g/(m<sup>2</sup>·a)<sup>[17]</sup>。藻类固定的氮有50%左右,即5~10 g/(m<sup>2</sup>·a)能成为高等植物的组成部分,其余部分经过短途循环,以挥发性氮和来自反硝化作用的N<sub>2</sub>的形态返回大气。但无论如何,“活性沙结皮”的形成对于增加土壤含氮量是至关重要的<sup>[15]</sup>。

在3年生木质素固沙区现场采集的沙结皮与其他区域的采集样本中藻类、菌类、苔藓、原生动物以及有机颗粒的比较见表3。结果显示:3年生木质素固沙群落形成的地衣结皮与成熟荒漠草地结皮中藻类已十分接近,菌丝体、放线菌等也已经出现,数量上已比多年生(取样区草方格固沙已有15年)草方格固沙区高,这说明木质素的使用可以促进地衣结皮快速形成,有利于土壤改良。

### 3 结 语

木质素固沙新材料固沙技术虽然有化学固沙的成分,但与传统的化学固沙有本质区别。目前国内流行的有60余种用于荒漠化防治的化学产品,通常采用的有乳化沥青或乳化原油、合成树脂或有机胶乳、无机胶乳、高分子聚合物、纤维层覆盖等,伊朗、沙特阿拉伯等国均进行过飞机喷洒化学固沙剂试验<sup>[16-18]</sup>。这些产品固沙效果普遍很好,但存在成本太高、生物降解困难等问题,某些人工高分子聚合物是否会造成二次环境污染,目前尚无定论<sup>[19-21]</sup>。流行化学产品的最主要缺点是难以与植树、种草等生物固沙措施相结合,只能实现固沙,而不能完成生态环境的恢复和重建,因此无法大面积推广。我国沙漠化面积还在逐年扩大,显然必须寻求一种高效且价格低廉的固沙材料,最好能是废物利用,并结合环境污染治理。因此,利用草浆制浆废液制备“固沙木质素”可对我国沙漠化土地进行大面积治理,适时植树种草,迅速改善沙漠化地区的生态环境。

国内比较成熟的“草方格”治沙措施已大面积应用于西北的治沙工程,也受到联合国环境署的充分肯定<sup>[2,22]</sup>。但此方法工程投资大,劳动力消耗多,实验周期长,而且一般要5~8a才能形成有效“沙结皮”。随着我国近年劳动力资源的不断升值,这种方法操作起来越来越困难。除非在急需治理的铁路、公路沿线,国家有大额经费投入的情况下,才能实施。利用草浆造纸厂废液制成固沙木质素并用于沙漠化治理,不仅可以让草浆造纸企业尽快走出“污染—待岗—失业”的困境,还可经济高效地遏制局部地区沙漠化蔓延扩展的势头,为最终实现沙漠化土地的综合治理开辟一条切实可行的新路。

表3 不同固沙方案形成的“沙结皮”中微生物种群对比  
Table 3 Microbiological community in the Sand Stabilization Shells formed by different sand fixation methods

类别 Items	藻类 Algae	菌类 Fungi	苔藓 Bryophyta	原生动物 Protozoan	有机颗粒 Organic particle
2年草方格	极少 颤藻	无	无	无	极少
多年草方格	极少 颤藻	少量菌丝体,以放线菌为主	无	无	极少
木质素处理的沙结皮	大量颤藻、硅藻,纠结包裹细小的砂粒或土壤团粒	有菌丝体,以放线菌为主	无	有,较多	丰富
成熟荒漠结皮(草地)	大量颤藻、硅藻、绿藻(绿球藻、小球藻等)	菌丝体中,有放线菌、霉菌	有,较多	有,较多	丰富

致谢:中国科学院生态环境研究中心系统生态重点实验室协助完成土壤样品分析工作,宁夏农业综合开发办公室、宁夏沙湖前进农场为项目野外实验提供大力帮助,南京大学生命科学院研究生张程、张琴妹、郁文、董一波、许梅、盛晟、庞延军等参与野外调查。

### [ 参 考 文 献 ]

- [ 1 ] 王汉杰. 西部开发与生态建设 [M]. 北京:中国林业出版社, 2001.
- [ 2 ] Wang Tao, Wu Wei. Combating desertification in China [R]. New Technologies to Combat Desertification, Proceedings of the International Symposium, Tehran, Iran, 1998.
- [ 3 ] Wang H J, Jing L, Lu X Z. A field experimental study of Lignin sand stabilizing material (LSSM) extracted from spent - liquor of straw pulping paper mills [J]. J of Environmental Sciences, 2005, 17(4): 650 - 654.
- [ 4 ] 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.
- [ 5 ] 刘茂松, 鲁小珍, 王汉杰, 等. 宁夏平罗西大滩有序人类活动之环境效应及发展对策 [J]. 南京林业大学学报:自然科学版, 2001, 25(3): 83 - 88.
- [ 6 ] 徐秀梅, 张新华. 宁夏土地退化防治与生态环境治理 [M]. 银川:宁夏人民出版社, 2003.
- [ 7 ] Reichle A. Advances in Ecosystem Analysis [J]. Bioscience, 1975, 25: 257 - 2649.
- [ 8 ] Kimmins J P. Forest Ecology [M]. Prentice Hall: Pearson Education Publishing, 2004.
- [ 9 ] Smith R L. Elements of Ecology and Field Biology [M]. New York: Harper & Row Publishers, 1977.
- [ 10 ] Campbell Scientific Inc. Hydrosense Instruction Manual [Z]. 2001.
- [ 11 ] 王礼先. 水土保持学 [M]. 北京:中国林业出版社, 2000.
- [ 12 ] 王汝庸, 王春裕, 张素君, 等. 白音他拉地区土壤考察报告 [C] / 曹新孙. 内蒙古东部地区风沙干旱综合治理研究 ( ). 呼和浩特:内蒙古人民出版社, 1984.
- [ 13 ] 王汝庸, 刘永恩, 裴 勇, 等. 内蒙古东部霍林河上游地区土壤资源及其环境影响与保护 [C] / 曹新孙. 内蒙古东部地区风沙干旱综合治理研究 ( ). 北京:科学出版社, 1990.
- [ 14 ] 中国土壤学会农业专业委员会. 土壤农业化学常规分析方法 [M]. 北京:科学出版社, 1983.
- [ 15 ] Wang R Y, Liu Y E, Fei Y, et al. Soil resource and its environmental influence and protection in the upper reaches of Huolinhe River of Eastern Inner Mongolia [C] // Cao X - S. The Comprehensive Management Study on the Desertification and Drought in Eastern Inner Mongolia Region (1). Beijing: Science Press, 1990.
- [ 16 ] Ibrahim M, Asi Hamad I, Al - AbdulWahhab, et al. Stabilization of dune sand using foamed asphalt [J]. Geotechnical Testing Jour, 2002, 25 (2): 168 - 176.
- [ 17 ] Pakparvar M. Desert research and control desertification in Iran [R]. New Technologies to Combat Desertification, Proceedings of the International Symposium. Tehran, Iran, 1998.
- [ 18 ] Li Y, Sarsakhen S. Kraft Ligin-based thermo-plastic polymer blends [J]. 11th ISWPC, 2001 (1): 75 - 78.
- [ 19 ] 吴玉英, 张力奇, 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.
- [ 20 ] 龚福华, 何兴东, 彭小玉, 等. 塔里木沙漠公路不同固沙体系的性能和成本比较 [J]. 中国沙漠, 2001, 21(1): 45 - 49.
- [ 21 ] 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): 103 - 106.
- [ 22 ] Xia Xuncheng, Fan Shengyue. Research progress of desert science in China [J]. Chinese Science Bulletin, 2000, 45(24): 2209 - 2213.

(责任编辑 郑琰焱)