

多功能固沙保水剂性能及其效果的研究

张建峰¹, 杨俊诚¹, 张夫道¹, 姜慧敏¹, 刘秀梅², 王玉军¹, 张 骏¹

(1.中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081; 2.江西省农业科学院土壤肥料研究所, 江西 南昌 330220)

摘 要:采用液相化学方法,微乳化、高剪切和非均相混聚技术,以风化煤和废弃塑料为主要原料,研制了集提供养分、固沙保水、改良土壤、修复荒漠化土壤作用于一体的 3 种多功能固沙保水剂,通过试验研究,优化出一组固沙保水剂。结果表明,该固沙保水剂的胶团粒径为 20~60 nm,固结层抗压强度为 5.30~16.10 MPa,抗冻融性能和耐老化性能良好,在风速 15 m·min⁻¹ 和 25 m·min⁻¹ 连续吹 30 min、在风速 30 m·min⁻¹ 吹 5 min 均未见起尘及风蚀现象,抗风蚀性能显著。

关键词:风化煤;非均相混聚;固沙保水;抗风蚀

中图分类号:S157.2 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-2043(2008)05-1820-06

Characteristics Evaluation of the Multifunctional Sand-fixing and Water-maintaining Polymer

ZHANG Jian-feng¹, YANG Jun-cheng¹, ZHANG Fu-dao¹, JIANG Hui-min¹, LIU Xiu-mei², WANG Yu-jun¹, ZHANG Jun¹

(1.Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, the Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081,China; 2.Soil and Fertilizer Institute, Jiangxi Academy of Agricultural Science, Nanchang 330200,China)

Abstract: Desertification of lands is one of the most serious ecological problems in China. Three mature methods, namely engineering sand-fixing, biological sand-fixing and chemical sand-fixing, can be applied to control and recover the desert. Former two not only take time and effort but also capital intensive. Therefore, chemical approaches aim at sand-fixing, water-maintaining and nutriments-offering have been an alternate option. In this paper, three types of multifunctional sand-fixing and water-maintaining polymer(humus-plastic polymer, plastic-starch polymer and air-slake coal polymer), which could provide nutriments, fix sand, preserve water, remediate soil and recover desert, were made from the air-slake coal and the abandoned plastics by liquid chemical method, emulsification, high velocity cutting method and mixing in non-homogeneous solution. The characteristics of the polymers such as particle size distribution, viscosity, anti-press intension, freeze-thaw capacity, aging capacity and anti-windy capacity was analyzed to select one polymer with excellent sand-fixing and water-maintaining characters. The results indicated that all three types of polymer not only decreased water evaporation under no vegetation, for example, in 15 days the control evaporated 99.8%, while three types polymer evaporated 98.2%, 98.1% and 97.4% in 50 days respectively, but also increased moisture content with vegetation, for example, after 60 days of seeding, water content in soil was 8.33% ,14.33%,15.45% and 16.35% respectively. And air-slake coal polymer was the best one with integrated analysis as follow:the diameter of the particles was in the scope of 20 nm to 60 nm, the anti-press intension of concretion was 5.30 MPa to 16.10 MPa, and the effect of anti-gelation and anti-weathering were significant. Additionally, the function of anti-wind erosion was strong, for that no dust and erosion occurred when the wind blown continuously at 25 m·min⁻¹ for 30 min and 30 m·min⁻¹ for 5 min, respectively. Therefore, air-slake coal polymer was the optimum one to provide nutriments, fix sand, preserve water.

Keywords: air-slake coal; mixing in non-homogeneous solution; sand-fixing and water-preserving; anti-wind erosion

中国是世界上沙漠化面积较大、危害较严重的国家之一。

收稿日期:2007-11-29

基金项目:国家重点基础研究发展规划项目(2007CB109308)农业成果转化基金项目(2007GB23260386)

作者简介:张建峰(1979—),男,江苏徐州人,助理研究员,主要从事土壤环境和新型肥料研究。E-mail:jfzhang@caas.ac.cn

通讯作者:杨俊诚 E-mail: yangjch@263.net

张夫道 E-mail: fudaozhang@sohu.com

沙漠及沙漠化土地面积达 149 万 km²,其中沙漠化土地面积达 33.4 万 km²[1-2]。全国每年因沙漠化危害造成的直接经济损失约 540 亿元人民币,这给工农业生产、人民生活及人体健康带来了严重的影响[3]。沙漠化已成为我国当前最为严重的生态环境问题之一,为此,许多学者对于沙漠化的防治和治理进行了相关研究[4-6],现今比较成熟的固沙方式有 3 种:工程

固沙、植物(生物)固沙和化学固沙。由于前两种方法不仅费时、费力,而且需要消耗大量资金,所以化学固沙成为国内外学者研究的热点。化学固沙包含了沙地固结和保水增肥两方面,它和植物固沙相结合可大大提高植物的成活率。本研究以风化煤和废弃泡沫塑料为主原料,采用液相化学方法,微乳化、高剪切和非均相混聚技术,研制出集固沙、保水、赋肥、改良土壤作用于体的多功能固沙保水剂,并对此功效进行了研究,为保护生态环境,防止、修复和绿化沙漠化土地提供理论根据和技术方法。

1 材料与方法

1.1 材料

风化煤:采自辽宁阜新煤矿,总腐酸含量 63%,游离腐酸含量 58%,Ca 含量 5%以上,Si 含量 1%以上。

塑料:选择废弃的聚苯乙烯泡沫塑料、塑料薄膜(包括食品袋)和混合塑料制品。

供试土壤:采自包头毛乌素沙漠边缘,栗钙土类,质地为沙土,无粘性,质地松散,pH 值 6.50,有机质 0.12%。

1.2 固沙保水剂的制备

1.2.1 腐植酸混聚物制备

风化煤烘干,球磨机粉碎,过 200 目筛孔;在反应釜中(带有搅拌设备)加入粉碎的风化煤,再加入 45%~50% H₂SO₄,适当加入稀 HCl,加入量视钙、硅化合物含量而定,反应时间为 1.5~2.0 h。工艺方法见专利 ZL 02123975.4^[7]。

1.2.2 塑料-淀粉混聚物(简称 PS)制备

塑料混聚物的制备:废弃塑料分选,洗净,干燥,粉碎。聚苯乙烯泡沫废弃塑料选用乙酸乙酯作溶剂,混合塑料用乙酸乙酯与二甲苯混合溶剂溶解,放置 12~24 h,采用自制混合乳化剂在高剪切设备中(2 万 r·min⁻¹)乳化,加水稀释至固形物含量 25%时使用。工艺方法见专利 ZL 200310116855.2^[8]。

1.2.3 腐植酸-塑料混聚物(简称 HAS)制备

在高速乳化工分散器中,分别加入腐植酸混聚物、塑料-淀粉混聚物,比例为 1:(0.3~0.6),在 2 万 r·min⁻¹条件下,搅拌 15~20 min,即生成腐植酸-塑料混聚物固沙保水剂。

1.2.4 风化煤多功能固沙保水剂(简称 HAS+PS)制备

氮、磷、钾肥料混合水溶液制备:原料为尿素,磷酸一铵,氯化钾;比例为 N:P₂O₅:K₂O=1:0.5:0.5;混合后放入 70~80 ℃热水中,边搅拌边溶解,直至完全溶解

为止。

风化煤多功能固沙保水剂制备:在高速乳化工分散器中,分别加入腐植酸混聚物、塑料-淀粉混聚物和氮、磷、钾肥料水溶液,比例为 1:(0.3~0.6):(0.5~1)(氮、磷、钾水溶液加入量视固沙保水剂固形物含量而定),在 2 万 r·min⁻¹条件下,搅拌 15~20 min,即生成非均相风化煤多功能固沙保水剂。

1.2.5 风化煤多功能固沙保水剂质量指标

表 1 风化煤多功能固沙保水剂质量指标	
Table 1 Characteristics of the air-slake coal polymer	
项目	多功能固沙保水剂指标
外观	半透明黑色粘液
固形物含量/%	20~25
水溶性	全水溶
粘度(涂-4 杯,Pa.s)	20~22
pH 值	7.0
颗粒度/nm	20~100
燃烧性	不燃烧
稳定性(-10~70 ℃)	无沉淀
保存期(月,20 ℃)	6
(N、P ₂ O ₅ 、K ₂ O)/%	N 2.0%,P ₂ O ₅ 1.0%,K ₂ O 1.0%

1.3 表征与测试

风化煤多功能固沙保水剂固形物的形态、尺寸和性能情况的测试采用综合分析方法。用日立 S-570 扫描电子显微镜观察材料的形态;粒度及纯度分布测试在美国 Coulter Multisizer II 型激光粒度分析仪上进行;风洞试验在北京航空航天大学流体研究所第一风洞试验检测。

1.4 多功能固沙保水剂效果的试验方法

试验分为无种植土壤水分蒸发试验和种植条件下土壤水分蒸发试验两部分。无种植条件采用有机玻璃槽,容积为 40 cm×40 cm×40 cm,装土 15.0 kg。种植条件下采用水泥池,长、宽、高为 70 cm×70 cm×150 cm,3 种固沙保水剂用量均为 0.3 g·cm⁻²,2007 年 4 月 30 日播种黑麦草,60 d 收获,每隔 10 d 用土钻取 0~20 cm 土层土样,测定含水量。

2 结果与分析

2.1 多功能固沙保水剂性能研究

2.1.1 多功能固沙保水剂微观结构的分析

作为固沙保水剂,颗粒粒径是其分散均匀性的重要表征。通过扫描电镜(SEM)图像可以观察到,如图 1 所示,图 a 是未经加工的风化煤天然胶团,图 b 是

加入了活化剂和反絮凝剂的风化煤多功能固沙保水剂固形物胶团,比较 a 和 b 发现,天然风化煤和风化煤多功能固沙保水剂的疏松网状结构被解离成小颗粒状,颗粒大小在 20~60 nm 之间,不但增加了其表面积,而且增加了裸露在表面的活性结合位点,为保水和养分缓慢释放提供基础。

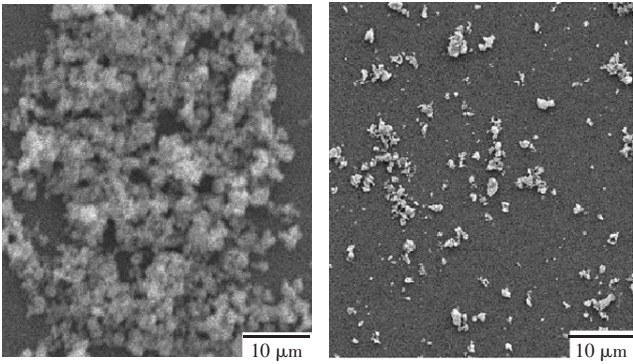


图 a 天然风化煤图 b 风化煤多功能固沙保水剂

图 1 风化煤扫描电镜照片 ×40K 倍

Figure 1 TEM photograph of air-slake coal (×40K)

2.1.2 激光粒度分析

图 2 为激光粒度分析仪利用光的散射现象测量颗粒大小所得出的多功能固沙保水剂的粒度分布曲线。结果显示(图 2),所测风化煤多功能固沙保水剂复合材料固形物 75%粒径在 20~60 nm 之间,这与扫描电镜的观察结果很相似。

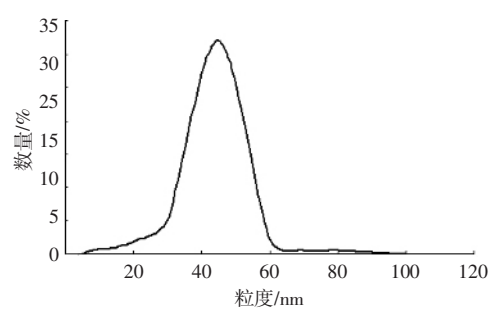


图 2 风化煤多功能固沙保水剂复合材料的激光粒度分析曲线

Figure 2 Particle size distribution of the air-slake coal polymer

2.1.3 粘度

在常温下测定的风化煤多功能固沙保水剂母液粘度与固沙剂的浓度和温度关系很大,浓度越大,温度越低,其粘度越大,如表 2。当固形物含量为 20%、0℃时,粘度达到 28 Pa·s,处于基本不流动状态,60℃时下降为 14 Pa·s;固形物含量 5%时,0℃粘度仅 9 Pa·s,60℃下降为 3 Pa·s。

表 2 浓度和温度对风化煤多功能固沙保水剂粘度的影响(单位:Pa.s)

Table 2 The effect of concentration and temperature on the viscosity of the air-slake coal polymer

固形物含量/%	0℃	20℃	40℃	60℃
1.0	5	3	2	1
5.0	9	7	5	3
10.0	16	12	10	7
15.0	22	16	14	11
20.0	28	21	18	14

固沙保水剂的粘度与其在土壤中的渗透性能直接相关。溶液浓度大,固沙强度较高,但在土壤中下渗困难,聚集于土层表面,降低固沙效果,并影响植物的出苗率;固沙保水剂粘度过小,固然在土层中的渗透能力强,但固结强度达不到预期目标。在实验室内用 40 cm×40 cm×40 cm 玻璃槽试验结果表明,浇灌固沙保水剂原液 200 mL,基本上集中在 0~10 cm 土层中,试验用黑麦草出苗率只有 10%;用自来水稀释 5 倍,1 h 内可渗透至 20 cm 土层。

2.1.4 固结层抗压强度

固沙保水剂加水稀释 5 倍,加入供试土壤,放入标准模具制成的试件,模具直径 φ100 mm,24 h 后脱模,室温下(20~25℃)养护 7 d,室内模拟用材料压力试验机测试,结果见表 3。

表 3 多功能固沙保水剂固结层抗压强度测试结果

Table3 The anti-press intension of the multifunctional sand-fixing and water-maintaining polymer

固沙保水剂名称	编号	用量/g·cm ⁻²	抗压强度/Mpa
HAS	1	0.3	6.36
	2	0.4	9.45
	3	0.5	15.90
PS	4	0.3	5.30
	5	0.4	8.52
	6	0.5	13.05
HAS+PS	7	0.3	6.15
	8	0.4	9.83
	9	0.5	16.10

模拟试验结果表明,固沙保水剂的使用量不同,固结层抗压强度差异很大。随固沙保水剂用量的增加,抗压强度增加,且均超过国际上对固沙强度 1 Mpa 的要求。腐植酸-塑料混聚物和风化煤多功能固沙保水剂固结层抗压强度稍大于塑料-淀粉混聚物。

2.1.5 固结层抗冻融性能

在-20℃冰室中放置 6 h, 后再放入 60℃±1℃恒温室中放置 6 h, 反复 12 次, 试验结果(表 4)表明, 抗压强度, 除了塑料-淀粉混聚物 0.3 g·cm⁻¹ 试件无变化外, 其他试件的抗压强度均有不同程度的增加, 特别是 3 号、8 号、9 号试件增加较多, 其机理是否与腐植酸有关, 尚需进一步探讨。李臻等曾报道, 有机固沙剂固结层在冻融过程中有抗压强度增强的现象^[9]。总的来说, 本研究的 3 种固沙保水剂抗冻融性能较好。

2.1.6 耐老化性能

经紫外光试验箱中紫外线连续照射试验结果(表 5)表明, 经过紫外线的连续照射, 固沙保水剂标准试件的重量和强度虽有变化, 但变化不大, 重量损失率为 0%~1.9%, 抗压强度损失率为 0.2%~4.7%, 无论是试件的颜色还是外形均无变化, 显示了优良的抗老化性。

2.1.7 风洞试验

土壤取自包头市沙漠化土地, 质地沙土。沙盘按标准尺寸制作, 外径长 35 cm、宽为 35 cm, 内径 30

cm×30 cm, 底内高 4.0 cm, 底木板厚 5.0 cm。处理 2 个: 腐植酸-废弃塑料混聚物固沙保水剂; 风化煤多功能固沙保水剂。将上述 2 种固沙保水剂用水稀释 5 倍, 喷洒于沙盘表面, 用量 0.40 g·cm⁻²(母液), 放置 24 h, 在风速 15、25 m·min⁻¹ 连续吹 30 min, 风速 30 m·min⁻¹ 吹 5 min, 均未见起尘及风蚀现象, 试验结果表明该固沙保水剂抗风蚀能力相当强。

2.2 多功能固沙保水剂保水效果

2.2.1 无种植条件土壤下的保水效果

供试土壤装入玻璃槽中后, 表面压实, 其空隙大小在 8 μm 以上, 水分很容易通过, 而使用固沙保水剂溶液后, 由于其材料胶团直径均在 100 nm 之内, 除了与沙粒粘结, 减少孔隙之外, 固沙保水剂胶团含有功能团或存在电性, 它们与沙粒之间会产生电荷作用、分子内力作用, 形成连续或非连续网状结构, 或称为油包水的结构^[10,11], 从而延缓水分的蒸发, 具有保水的功能。由表 6 可知, 无种植条件下, 对照在 10 d 时间水分蒸发 95.8%、15 d 蒸发 99.8%, 而腐植酸-塑料

表 4 多功能固沙保水剂试件冻融试验结果

Table 4 The freeze-thaw experiment result of the multifunctional sand-fixing and water-maintaining polymer														
项目	编号	用量/g·cm ⁻²	重量损失率/%						强度损失率/%					
			2次	4次	6次	8次	10次	12次	2次	4次	6次	8次	10次	12次
HAS	1	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-2.5	-3.8
	2	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-2.9	-4.3	-5.6	-6.7	-7.7	-8.5
	3	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-3.3	-4.8	-6.9	-7.5	-8.8	-9.2
PS	4	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	5	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.5	-0.8	-1.2	-1.9	-2.4	-3.0
	6	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.7	-0.9	-1.2	-2.1	-2.8	-3.6
HAS+PS	7	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-1.6	-2.3	-2.7	-3.1
	8	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-3.2	-3.8	-4.3	-4.8	-7.4	-8.3
	9	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-5.5	-6.8	-7.2	-8.7	-9.5	-10.2

表 5 多功能固沙保水剂标准试件老化试验结果

Table 5 Aging experiment result of the multifunctional sand-fixing and water-maintaining polymer									
项目	编号	用量/g·cm ⁻²	重量损失率/%			强度损失率/%			形体变化
			100 h	200 h	300 h	100 h	200 h	300 h	
HAS	1	0.3	0.6	0.8	1.4	1.2	1.5	1.8	颜色及外形均无变化
	2	0.4	0.3	0.5	1.0	0.9	1.1	1.6	
	3	0.5	0.2	0.5	0.7	0.7	0.9	1.2	
PS	4	0.3	0.5	1.1	1.3	2.0	3.4	4.7	颜色及外形均无变化
	5	0.4	0.5	1.4	1.9	1.7	1.9	2.1	
	6	0.5	0.3	0.5	0.8	1.7	1.8	2.5	
HAS+PS	7	0.3	0.4	0.3	0.5	0.6	0.9	1.3	颜色及外形均无变化
	8	0.4	0.3	0.2	0.5	0.5	1.0	1.0	
	9	0.5	0	0	0.2	0.5	1.3	1.1	

表 6 无种植条件下土壤水分蒸发率

处理	水分蒸发率/%													总蒸发率/%
	5 d	10 d	15 d	20 d	25 d	30 d	35 d	40 d	45 d	50 d	55 d	60 d	65 d	
对照	55.5	40.3	4.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	99.8
HAS	9.0	10.2	10.3	10.4	10.6	10.6	10.4	10.0	9.7	6.9	—	—	—	98.1
PS	7.5	8.0	8.4	8.7	8.2	8.5	8.1	8.5	8.3	8.0	8.1	7.9	—	98.2
HAS+PS	7.2	7.5	7.7	7.6	7.6	7.5	7.5	7.7	7.7	7.6	7.5	7.3	7.0	97.4

表 7 种植条件下土壤含水量

Table 7 Water content of the soil with vegetation								
处理	土壤含水量/%							土壤水分损失率/%
	播种时	10 d	20 d	30 d	40 d	50 d	60 d	
CK	19.50	16.12	15.17	14.66	12.50	10.53	8.33	57.28
HAS	19.50	18.12	17.66	16.88	16.43	15.75	14.83	23.95
PS	19.50	18.35	17.95	17.23	16.84	16.00	15.45	20.77
HAS+PS	19.50	18.80	18.04	17.56	17.10	16.75	16.35	14.10

混聚物处理 60 d 累计蒸发 98.2%,塑料-淀粉混聚物处理 50 d 累计蒸发 98.1%。风化煤多功能固沙保水剂处理65 d 累计蒸发 97.4%。风化煤多功能固沙保水剂效果最佳,腐植酸-塑料混聚物次之,塑料-淀粉混聚物再次之。

2.2.2 种植条件土壤下的保水效果

表 7 为种植黑麦草条件下的土壤含水量变化。在种植条件下,土壤水分蒸发速度较慢,在 60 d 时间内,对照土壤水分损失率 57.28%、塑料-淀粉混聚物处理 23.95%、腐植酸-塑料混聚物处理 20.77%,风化煤多功能固沙保水剂处理 14.10%。从播种到第 10 d,因无植物覆盖,水分损失较多,其中对照处理土壤水分含量下降幅度为 3.38%、塑料-淀粉混聚物处理 1.38%、腐植酸-塑料混聚物处理 1.15%,而风化煤多功能固沙保水剂处理土壤水分损失率最低,下降幅度为 0.70%。对照水分损失率为 17.33%、塑料-淀粉混聚物处理 7.08%、腐植酸-塑料混聚物处理 5.90%,风化煤多功能固沙保水剂处理土壤水分损失率最低,为 3.59%。说明在黑麦草未出苗前风化煤多功能固沙保水剂的保水效果最好,腐植酸-塑料混聚物次之,其次是塑料-淀粉混聚物。随着黑麦草的生长,覆盖率增加,土壤水分损失率降低,各处理土壤水分含量下降平稳,到黑麦草播种第 60 d,对照、塑料-淀粉混聚物、腐植酸-塑料混聚物和多功能固沙保水剂处理土壤中含水量分别为 8.33%、14.83%、15.45%、16.35%,3 种保水剂处理土壤含水量均接近或超过对照的 2 倍左右。

3 结论

腐植酸-塑料混聚物、塑料-淀粉混聚物和风化煤多功能固沙保水剂 3 种产品均能降低土壤水分蒸发,保持土壤水;从耐水性、耐老化性、抗冻融性等性能综合分析,风化煤多功能固沙保水剂优于腐植酸-塑料混聚物、塑料-淀粉混聚物;从保水的角度来看,风化煤多功能固沙保水剂处理效果好于腐植酸-塑料混聚物,腐植酸-塑料混聚物处理效果好于塑料-淀粉混聚物。

参考文献:

[1] 陈广庭. 土地荒漠化[M]. 北京:化学工业出版社,2002. 113-117.
CHEN Guang ting. Land Desertification[M]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2002, 113-117.

[2] 王金波. 浅谈中国的荒漠化及其防治措施 [J]. 甘肃农业, 2004, 7: 16-17.
WANG Jin bo. Desertification state and control strategies in China[J]. Gansu Agriculture, 2004, 7, 16-17.

[3] 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.
LU Qi, LIU Li-qun. Analysis of and solution for institutional obstacles in combating desertification in China[J]. China Population, Resources and Environment, 2003, 13(1): 86-91.

[4] 王红梅. 我国土地荒漠化及其防治对策[J]. 黑龙江环境通报, 2004, 28(2):42-43.
WANG Hong-mei. Desertification state of China and control counter-measures[J]. Hailongjiang Environmental Journal, 2004, 28(2): 42-43.

[5] 欧珠旦增, 张 敏. 西藏荒漠化及防治对策初探[J]. 四川林勘设计, 2004 (4):43-44.

OUZHU Dan-zeng, ZHANG Min. A preliminary study on tibetan desertification and its prevention and cure countermeasures[J]. *Sichuan Forestry Exploration and Design*, 2004(4):43-44.

- [6] 孙保平. 荒漠化防治工程学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000. 8, 223-227.

SUN Bao-ping. Engineering Science of Desertification Prevention and Cure[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000. 8, 223-227.

- [7] 张夫道, 张建峰, 张 骏, 等. 纳米级腐殖酸混物生产技术及农用: 中国, ZL02123975. 4[P]. 2006.

ZHANG Fu-dao, ZHANG Jian-feng, ZHANG Jun, et al. Production Technology and Application of Nano-fumic acids mixture: China, ZL02123975. 4 [P]. 2006.

- [8] 张夫道, 王玉军, 张建峰, 等. 一种多功能固沙保水剂生产方法: 中国, ZL 200310116855. 2[P]. 2006.

ZHANG Fu-dao, WANG Yu-jun, ZHANG Jian-feng, et al. Production Method of multifunctional sand-fixing and water-holding: China, ZL 200310116855. 2[P]. 2006.

- [9] 李 臻, 王宗玉, 胡英娣. 新型化学固沙剂的试验研究[J]. 石油工程

建设, 1997, 2:3-6.

LI Zhen, WANG Zong-yu, HU Ying-di. Test study of new chemical agent for sand consolidation[J]. *Petroleum Engineering Construction*, 1997, 2:3-6.

- [10] 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.

YANG Zhong-xi, YUE Yun-long, TAO Wen-hong. Exploitation and study of high-performance solidifying-sand materials[J]. *Journal of Shandong Institute of Building Materials*, 2002, 16(1):71-73.

- [11] 丁庆军, 许祥俊, 陈友治. 化学固沙材料研究进展[J]. 武汉理工大学学报, 2003, 25(5):27-29.

DING Qing-jun, XU Xiang-jun, CHEN You-zhi. The research advances of chemical sand-fixing materials[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2003, 25(5):27-29.

致谢:部分数据由中国建筑材料科学研究院测试中心协助测试, 在此表示衷心感谢。