

稻草基生态护坡板及其拦截污染物效率的实验研究^①

颜蓉^{1,2}, 姬红利^{1,2}, 吴永红², 李运东², 杨林章², 方炎明^{1*}

(1 南京林业大学森林资源与环境学院, 南京 210037; 2 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

摘要: 以稻草为主要原材料, 采用“复合压板”工艺, 研制一种可以复绿的护坡基材。经过高羊茅草种子的发芽试验表明: 该基材可以作为植物生长的载体, 并为植物提供营养供给。基材绿化后形成的护坡材料在径流速度为 0.5 L/s 和坡度 55° 的条件下, 可以有效延迟径流停留时间, 对悬浮固体的平均拦截效率为 85%, 对水溶性磷和泥沙结合态磷的平均拦截率为 93% 和 84%。经过生物安全性测试, 表明稻草基护坡材料具有环境安全性。生态护坡材料的开发, 可以有效遏制我国大量稻草资源的浪费以及缓解污染环境。

关键词: 稻草; 护坡材料; 复合压板; 磷

中图分类号: S158.3

生态护坡工程是一项建立在可靠的土壤工程基础上的生物工程, 即采用存活植物及其他辅助材料构筑各类边坡(山地斜坡、江河湖库堤岸、海岸坡岸等)结构, 来实现稳定边坡、减少水土流失和改善栖息地生境等功能的集成工程技术^[1]。同传统的工程技术相比, 生态护坡技术在技术、生态、经济和美学上具有显著优势^[2]。

在资源相对匮乏的今天, 稻草板制造和应用愈来愈受到社会的关注, 普通稻草板的制造技术在国内外均已趋于成熟, 成为家具业材料、建筑材料的新兴力量^[3-4]。然而, 稻草板虽然已经在很多物理力学性能方面达到并超过刨花板的国家标准规定性能, 但其抗蠕变性能, 尺寸稳定性, 价格以及市场接受度等各方面的因素抑制了其目前的发展^[5-6]。因此, 推广稻草板和开发稻草板新的使用领域将大量节约农业资源, 提升

稻草板生产技术。

本文通过改良现有稻草板的生产工艺, 以稻草为主要原材料研究一种可以应用于公路、河道护坡的基础材料, 并且对该材料进行复绿, 实现为植物的生长繁衍提供栖息环境, 并且深入研究其对水土流失污染物质的拦截效率, 以及应用中可能存在的环境安全问题。

1 材料与方法

1.1 实验室工艺流程

实验工艺如图 1 所示。

将采集的稻草原料粉碎, 粉碎后规格为: 直径 0.2 mm, 长度 10 mm。接着对原材料进行脱色, 脱色方法依据文献[7]进行。再脱水至含水率为 12% ± 2%, 最后进行稻草成分分析, 主要化学成分如表 1 所示。

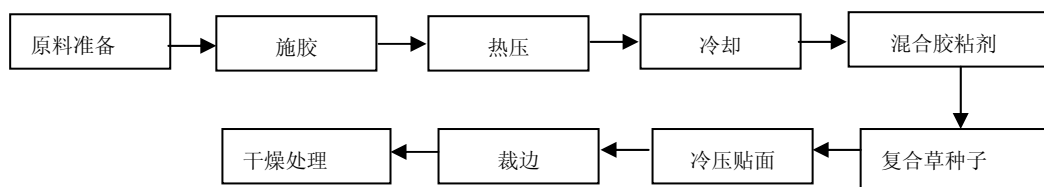


图 1 稻草基护坡板材制作工艺流程

Fig. 1 Production process of slope support made from straw

①基金项目: 中国科学院重要方向青年人才类项目(KZCX2-EW-QN40), 国家自然科学基金重点项目(41030640)和国家科技支撑计划项目(2007BAD87B12)资助。

* 通讯作者(jwu4@njfu.edu.cn)

作者简介: 颜蓉(1984—), 女, 湖北洪湖人, 硕士研究生, 主要从事林学与农业面源污染控制过程研究。E-mail: yanrong521125@163.com

表1 稻草中各种化学成分表 (g/kg)
Table 1 Chemical composition of experimental straw

原料	灰分	溶液抽提物				木质素	多戊糖	纤维素
		冷水	热水	乙醚	1%NaOH			
稻草	15.5	6.8	28.5	6.7	47.7	14.1	18.1	36.2

在pH6~7情况下,对干稻草碎片进行施胶,使用水性异氰酸酯胶粘剂,施胶量为总重量的6%。施胶后,手工铺装。再在温度150℃时,采用三段卸压法进行成型,热压参数见图2。成型后采用脱模纸脱模,热压后取下金属网垫。将成型板冲洗3次后,在金属网结点处撒入四季常绿的草种子高羊茅(*Festuca elata* Keng),并采用冷压贴面,使种子复合入稻草板中。把稻草薄板浸于常温浅水层2h,使得薄板部分充分吸水,置于培养箱中,调节培养箱温度至24℃,湿度63%,全天候光照,至草种子发芽后取出。

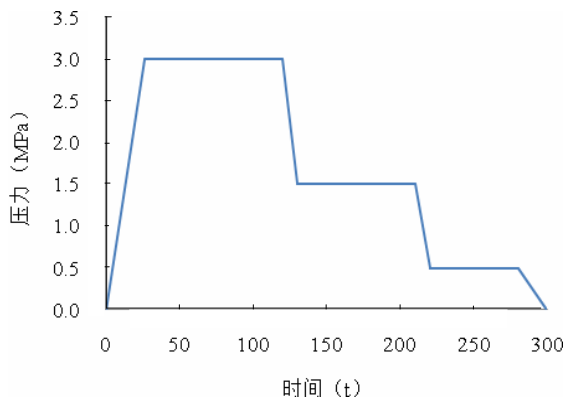


图2 三段式曲线热压图

Fig. 2 Hot-pressure curve of three-steps

1.2 水土流失拦截试验

试验采用设置径流小区的方法,在工程现场进行地表径流模拟试验。将生长了高羊茅的护坡板材铺装已经在整理的55°河道坡地上,使得长2.0m,宽0.8m,径流小区两侧用插入土壤内20cm深的PVC挡水板将其与周围环境隔开,坡顶和坡地各埋入1个聚乙烯水槽。对照中不铺装生长高羊茅的生态板材,即为裸地。为了保证试验结果的可比性,设置了3个重复的径流小区。

模拟地表径流过程中,首先利用水泵从附近河道中抽水至坡度水桶,通过阀门控制,以0.5L/s的恒定流量将水均匀地输入进水槽中进行径流模拟。为了使

模拟用水的水质更加贴近地表径流中总悬浮固体浓度高的特点,从试验现场取若干土壤,风干过筛后加进水桶内充分搅拌,提高进水中总悬浮固体、总P和总N的浓度。当径流小区土壤湿透(约水流流经小区20min)后,开始收集地表径流水样。采用抽滤法测定水样中的悬浮固体质量浓度。水样经0.45μm的滤膜过滤后分析水溶性P。总P不经过滤,用H₂SO₄-HClO₄消煮-钼锑抗比色法测定总P的质量浓度,总P与水溶性P的含量差值为泥沙结合态P的含量。记录各径流小区每次模拟试验所收集到的地表径流体积。生态护坡对悬浮固体和营养盐的拦截率根据如下公式计算得出:

$$R = \frac{(C_{\text{进水}}Q_{\text{进水}} - C_{\text{出水}}Q_{\text{出水}})}{C_{\text{进水}}Q_{\text{进水}}} \times 100\% \quad (1)$$

式中, $C_{\text{进水}}$ 和 $C_{\text{出水}}$ 分别指进水和出水中悬浮固体和P浓度(mg/L); $Q_{\text{进水}}$ 和 $Q_{\text{出水}}$ 分别指模拟径流时,坡顶水槽输入小区的水量(L)和坡底水槽收集到的径流体积(L)。

1.3 环境安全性测试

将研制的稻草基护坡板材用自来水冲洗,将杂质去除后,浸泡在自来水中12h,板材与水的体积分别为1:30,再将购买回来的红鲫(*Carassius auratus*)幼苗(长0.5~1.2cm)放入浸泡板材的水中,每个处理中均放入50尾。并进行3组平行试验,记录红鲫的生长状况。

1.4 数据分析

采用SPSS12.0对数据进行统计分析,经K-S检验,试验获得的样本数据均服从正态分布,故相关分析采用Pair t-test分析。重复样品的测量值取平均值,测量结果的相对误差均在5%以内。

2 结果与讨论

2.1 板材性能

研制后的稻草基生态护坡材料分3层(图3),底层为稻草基板、上层为稻草薄板,中层为植物种子播种层(本研究播种的为高羊茅种子)。

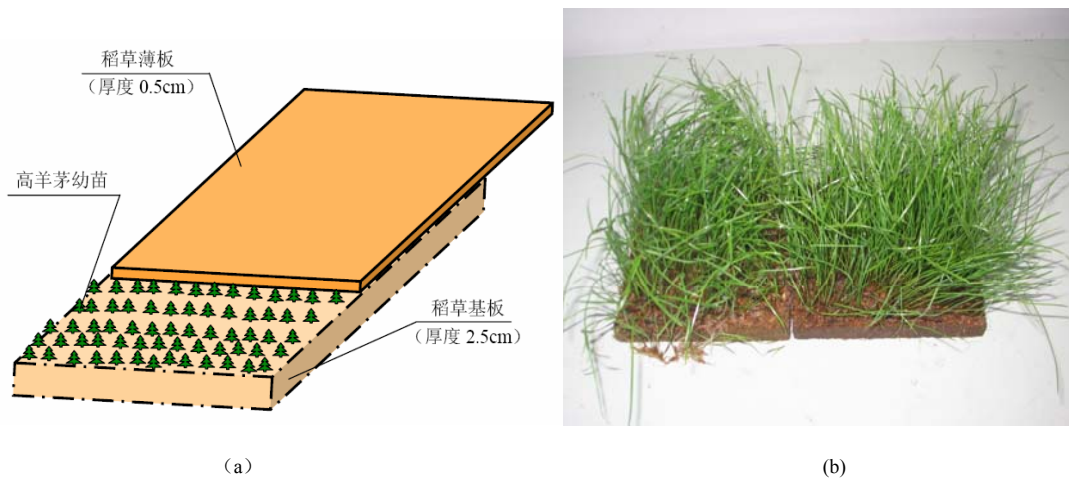


图 3 稻草基生态护坡结构示意图 (a) 和稻草基生态板材护坡复合植物后实际效果图 (b)

Fig. 3 Structure diagram of slope support of straw-based material(a) and practical image of straw eco-slope covered with vegetation(b)

制成的绿化稻草板参照 GB/T17657-1999《人造板及饰面人造板理化性能测试方法》性能测试弹性模量和静曲强度, 结果显示 (表 2), 种植后稻草基材部分的弹性模量和静曲强度较种植前略有降低, 统计分析表明, 均无统计学差异 ($p > 0.05$), 说明稻草基护坡板材符合普通刨花板国家标准。

表 2 力学性能测试结果表

Table 2 Mechanics parameters of ecological slope

稻草基材	弹性模量 (MOE) (MPa)	静曲强度 (MOR) (MPa)
种植前	2 135.40 ± 183.23	19.54 ± 2.18
种植后	1 825.32 ± 160.45	16.73 ± 1.49

2.2 种子发芽与成长情况

种子在培养箱中经 3 天后开始发芽, 7 天后草高 8 ~ 10 cm, 放置在室内经 15 天观察, 仍可正常生长, 长度为 15 ~ 18 cm, 成活率达到 99%。因此, 稻草板作为高羊茅草生长基质是完全可行的。稻草易吸水,

可以为植物生长提供水分来源, 稻草中含有粗蛋白等营养成分, 可保持高羊茅正常生长, 可用于土壤贫瘠的山地。

2.3 生态护坡对地表径流的延滞效应

地表径流可以携带污染物质, 进入水体后, 对水体易产生二次污染。因此, 延滞表面径流在很大程度上可以控制污染物质进入受纳水体的量。待稻草基高羊茅生态护坡铺装以及植物生长 6 个月后, 高羊茅的覆盖率达到 80% ~ 90%。此时, 对裸露坡度和生态护坡地表径流进行入坡下集水槽的水力停留时间进行监测, 结果显示 (表 3), 种植了高羊茅的生态护坡与对照裸地间的径流水力停留时间差异显著 ($p < 0.01$), 说明着生了高羊茅的生态护坡具有很强的延滞地表径流能力。生态护坡对地表径流污染的控制还与坡岸土壤的物理特性密切相关。护坡植物新生根系形成庞大的地下根系网络, 具有固结土壤和支撑坡体的机械效应, 能明显地改善土壤的物理性质、提高土壤抗碱强度^[8], 阻碍水流, 延长水流在护坡中的停留时间。

表 3 地表径流在生态护坡与裸地中的径流停留时间

Table 3 Runoff retention times of eco-slope covered with vegetation and bare-slope

处理	2008 年 8 月平均径流停留时间 ($n=6$) (min)	2008 年 10 月平均径流停留时间 ($n=6$) (min)
稻草基高羊茅生态护坡	21.43 ± 1.38**	18.83 ± 1.52**
对照裸地	0.35 ± 0.04	0.31 ± 0.03

注: ** 表示与裸地的差异在 $p < 0.01$ 水平上显著。

2.4 生态护坡对地表径流中悬浮物和磷的拦截效应

高羊茅覆盖率在 80% ~ 90% 之间时, 稻草基高羊

茅生态护坡对地表径流中悬浮物固体的平均拦截率为 85.56%, 而对照裸地在地表径流的冲刷下, 径流

中固体悬浮物增加了 96.23% (表4)。植物的生长能增加土壤有机质含量、有效地防止土壤表层结皮, 并通过其根系活动增加土壤的通道和空隙, 从而使表

土呈疏松状态、改善土壤结构、加强土壤的渗透能力, 延长水力停留时间, 增加悬浮物固体的吸纳容量 [9-10]。

表 4 稻草基高羊茅生态护坡与对照裸地拦截悬浮固体效率 (径流时间: 30 min)

Table 4 Removal efficiencies of suspended solids by straw eco-slope covered with *Festuca elata* Keng and control (bare slope)

实验次数	生态护坡			对照裸地		
	入口 (g)	出口 (g)	拦截率 (%)	入口 (g)	出口 (g)	拦截率 (%)
1	82.80	13.90	83.21	85.70	173.20	-102.10
2	60.10	8.90	85.19	58.90	116.40	-97.62
3	115.20	12.80	88.89	112.50	214.90	-91.02
4	40.60	3.50	91.38	42.30	79.30	-87.47
5	32.40	5.60	82.72	35.10	68.80	-96.01
6	27.20	4.90	81.99	28.60	58.10	-103.15
平均	59.72	8.27	85.56	60.52	118.45	-96.23

地表径流中主要含有水溶态和泥沙结合态两种形态的营养盐, 有机 P、矿物 P 和有机 N 主要是以泥沙结合态附着在悬浮固体上随地表水迁移。正磷酸磷盐和无机 N (主要为硝酸盐) 主要是以水溶态的形式通过径流途径迁移^[2,11]。从表 5 看出, 稻草基高羊茅生态护坡对水溶性和泥沙结合态 P 均有很好的拦截效果,

拦截率平均达到 93% 和 84%, 而对照裸地中水溶性和泥沙结合态 P 均增加了, 分别增加了 15% 和 22%。统计显示, 稻草基高羊茅生态护坡和对照裸地的对水溶性 P 和泥沙结合态 P 的拦截效率具有显著的统计学差异 ($p < 0.01$), 进一步说明稻草基高羊茅具有很强的拦截水溶性和泥沙结合态 P 的能力。

表 5 稻草基高羊茅生态护坡与对照裸地拦截水溶性P和泥沙结合态P的效率 (径流时间: 30 min)

Table 5 Removal efficiencies of water-soluble phosphorus and sediment combined phosphorus by straw eco-slope covered with *Festuca elata* Keng and bare slope

P 形态	实验次数	生态护坡			对照裸地		
		入口 (g/kg)	出口 (g/kg)	拦截率 (%)	入口 (g/kg)	出口 (g/kg)	拦截率 (%)
水溶态	1	0.23	0.02	91.03	0.18	0.21	-17.42
	2	0.27	0.02	93.29	0.12	0.13	-7.27
	3	0.27	0.03	90.13	0.23	0.25	-8.36
	4	0.18	0.01	95.98	0.09	0.10	-18.85
	5	0.27	0.01	95.66	0.07	0.08	-17.10
	6	0.16	0.01	93.52	0.06	0.07	-22.64
	平均	0.23	0.02	93.27	0.13	0.14	-15.27
泥沙结合态	1	5.22	0.89	82.94	5.40	6.91	-28.01
	2	3.79	0.56	85.19	3.71	4.15	-11.73
	3	7.26	0.84	88.43	7.09	8.54	-20.48
	4	2.56	0.41	83.97	2.66	3.50	-31.34
	5	2.04	0.35	82.72	2.21	2.72	-23.20
	6	1.71	0.31	81.99	1.80	2.15	-19.34
	平均	3.76	0.56	84.21	3.81	4.66	-22.35

2.5 安全性分析

近年来, 不少学者用红鲫 (*Carassius auratus*) 作为实验材料, 进行过遗传育种、受精生物学、肿瘤学、

毒理学等科学研究。由于红鲫作为实验动物具有生活力强、性成熟早、繁殖力强、体型适当、杂食性等特点^[12], 本研究也采用红鲫来供试于护坡材料浸提液的

安全性。用稻草基高羊茅生态护坡浸提液培养红鲫,一个星期后记录红鲫的存活率。当生态基材与自来水体积比为 1:30 时,存活率与对照中的存活率基本一致,为 91%,与对照之间没有统计性差异 ($p>0.05$)。并且在实际工程使用过程中,生态基材与水体水量之比远远大于 1:30,可见,稻草基护坡材料主体为生物质材料,对生物没有潜在的危害,具有环境安全性。

3 结语

制成的护坡材料基材可达到普通刨花板的弹性模量和静曲强度,且植物生长对基材弹性模量和静曲强度影响不大;高羊茅种子可正常生长在制成的护坡材料上,由此复合形成的生态护坡板材具有很强的延长径流停留时间的能力,具有很强的拦截悬浮固体、水溶性 P 和泥沙结合态 P 的能力;该材料可降解,是一类绿色环保新型的护坡材料。

参考文献:

- [1] Coppin NJ, Richards IG. Use of Vegetation in civil Engineering. London: CIRIA, 1990: 29
- [2] 蔡婧, 李小平, 陈小华. 河道生态护坡对地表径流的污染控制. 环境科学学报, 2008, 28(7): 1 326-1 334
- [3] 郑凤山, 马心. 农作物秸秆板工业在国内外发展近况. 林产工业, 2003, 30(6): 3-6
- [4] 郑宏雷, 王华, 型学东. 环保型绿化混凝土护坡板技术综述. 黑龙江水利科技, 2004(1): 56-57
- [5] 郑凤山, 何磊. 我国麦/稻秸秆板工业的发展和思考. 木材工业, 2006, 20(6): 30-32
- [6] Shen H, Sundstol F, Ni D. Studies on untreated and urea-treated rice straw from three cultivation seasons: 2. Evaluation of straw quality through in vitro gas production and in sacco degradation measurements. Animal Feed Science and Technology, 1998, 74: 193-212
- [7] Wu YH, Yang LZ, Li YD, Jia C. Effects of different treatments of straw used for floating plant-bed supports. Fresenius Environmental Bulletin, 2008, 17(6): 526-531
- [8] Li XP, Zhang LQ, Zhang Z. Soil bioengineering and the ecological restoration of riverbanks at the Airport Town, Shanghai, China. Ecological Engineering, 2006, 26: 304-314
- [9] 夏继红, 严忠民. 国内外城市河道生态型护岸研究现状及发展趋势. 中国水土保持, 2004(3): 20-22
- [10] 孙宇. 河道植被护坡技术. 水科学与工程学报, 2005(1): 34-36
- [11] Battett ME, Walsh PM. Performance of vegetative controls for treating highway runoff. Journal of environmental engineering, 1998, 124(11): 1 121-1 128
- [12] 瞿璟琰, 施华宏, 刘青坡, 沈江帆. 溴双酚-A 和五溴酚对红鲫甲状腺激素和脱碘酶的影响. 环境科学学报, 2008, 28(8): 1 625-1 630

Efficiency of Straw Eco-slope on Pollution Control

YAN Rong^{1,2}, JI Hong-li^{1,2}, WU Yong-hong², LI Yun-dong², YANG Lin-zhang², FANG Yan-ming¹

(1 College of Forest Resources and Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China;

2 Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: Based on the "composite plate" technology, straw was used as the main raw material to produce a kind of slope support that can recover green. The seed germination experiments of *Festuca elata* Keng showed that the eco-slope support can be used as the substrate of plant growth and can supply nutrients for plant growth. When the rainfall rate was 0.5 L/s and the slope was 55°, the eco-slope covered with vegetation could effectively delay the runoff retention time. The average removal efficiency of the eco-slope was 85% for suspended solids. The average removal efficiencies of the eco-slope were 93% and 84% for water-soluble phosphorus and sediment combined phosphorus, respectively. The bio-safety tests showed that straw eco-slope was environment-friendly. The development of straw eco-slope could make full use of straw, thus could decrease environmental pollution from straw-burning.

Key words: Straw, Slope support, Composite plate, Phosphorus