

# 一种植入型生态护坡的制备工艺及施工方法

李锐<sup>1</sup>, 黄永刚<sup>2</sup>, 胡筱敏<sup>1</sup>

(1. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819)

**摘 要:** 工程材料覆盖物护坡和传统的生态护坡均会一定程度上扰动河流边坡, 改变原有的生境, 使河流生态系统面临不同程度的危机. 针对这一问题, 研究开发了一种植入型生态护坡配方工艺和施工方法: 以城市污水处理厂剩余污泥为主要原料, 氧化钙和氯化镁作为微生物灭活剂和胶凝剂, 混合草种制成“植入泥浆”, 采用泥浆泵加压, 应用直径为 10 cm 的高速旋转(1 000 r/min)喷射头在地表以下 10 ~ 50 cm 深度范围内注入“植入泥浆”. “植入泥浆”内的草种发芽, 经过约 20 天的生长后形成生态护坡. 对比试验表明, 这种方法一方面利用剩余污泥的保水性能和肥效, 另一方面采用独特的地表下旋喷植入工艺, 对河流边坡表层土壤扰动很小, 在保持河道边坡稳定的同时, 很好地保护生境, 有利于河流生态系统持续健康发展.

**关 键 词:** 河流生态系统; 生态护坡; 生境; 剩余污泥; 边坡稳定

**中图分类号:** X 703.1      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-3026(2018)08-1201-04

## A Preparation Technology and Construction Method of Implantable Ecological Slope Protection

LI Rui<sup>1</sup>, HUANG Yong-gang<sup>2</sup>, HU Xiao-min<sup>1</sup>

(1. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: HUANG Yong-gang, E-mail: 657142396@qq.com)

**Abstract:** The slope protection made of engineering materials or the traditional ecological slope protection will disturb river slopes to a certain extent, which will change the original habitat and endanger the river ecological system at different levels. Aiming at this problem, a new type of implantable ecological slope protection was developed. This kind of slope protection is mainly made of surplus sludge from municipal sewage treatment plants. CaO and MgCl<sub>2</sub> were used as the microbial inactivating agent and gelatinizing agent. The above materials were mixed with appropriate grass seeds and certain amounts of water to produce implantation mud(IM). Driven by pumps, the IM was injected into the soil under the earth surface from 10 cm to 50 cm through a rapidly rotating(1 000 r/min) injector. The grass seeds would sprout in the IM. About 20 days later, the grass would grow and the ecological slope protection would come into being. On the one hand, this method could take advantage of the surplus sludge's water-retaining property and fertilizing effect; on the other hand, the special rotating injection technology was expected to have less disturbance to the surface soil. Therefore, this kind of ecological slope protection could not only keep slope stability but also conserve habitats perfectly, which would be beneficial for the sustainable and healthy development of the river ecosystem.

**Key words:** river ecosystem; ecological slope protection; habitat; surplus sludge; slope stability

河流岸坡和河流缓冲带是水陆交错带,是陆地生态系统和水生生态系统的过渡带,是河流周

边生态系统中各陆生物种的重要栖息地,也是河流中物质和能量的重要来源,直接影响整个河流

的水质及流域的生态景观价值<sup>[1]</sup>. 工程材料硬覆盖护坡对环境、景观、生态等方面负面影响很大,主要表现在影响水体的自净能力和危害河流生态系统<sup>[2]</sup>,对生物量和多样性也会有很大程度的负面影响,甚至会导致河流生态系统发生功能性改变. 不仅如此,硬覆盖护坡阻隔了河流与陆地的生物链,影响了水体自净能力的发挥,日积月累,无疑会影响天然河流的水质,河流也会丧失原有的生机,同时也严重影响河岸带的自然生态景观<sup>[3]</sup>.

生态护坡综合考虑了水安全、水环境和水景观的协调,可以在保证河流边坡稳定的基础上,营造水体、土壤和生物之间的物质信息和能量的循环体系,实现边坡生物多样性的目标,使护坡兼具景观和生态功能<sup>[4-6]</sup>. 但是,护坡植被需要一定的生长周期,如遇洪水植被就有被冲毁的危险<sup>[5]</sup>. 此外,植被护坡的效果受环境的水分及土壤肥力的限制. 生态护坡砖等形式的复合型生态护坡为植被生长初期提供了保护,但在其施工过程中对河流边坡表层土的扰动还是不可避免的<sup>[7-8]</sup>.

综上所述,无论是工程材料型覆盖物护坡还是其他各种类型的生态护坡,均会或多或少地改变河流生态系统中生物原有的生境,不仅工程造价较高,而且在施工过程中扰动表层土,破坏生境. 针对上述问题,本文研究开发了一种新型的植入型生态护坡的配方工艺和施工方法. 产品以城市污水处理厂的剩余污泥为主要材料,并混合了草种、微生物灭活剂和胶凝剂. 采用独特的旋喷贯注施工工艺,对原有河流边坡扰动极小,同时胶凝剂为生态护坡草种长成之前提供早期保护,剩余污泥为护坡植物提供水分和肥力.

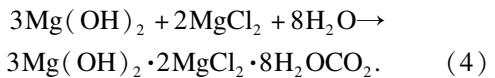
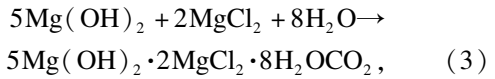
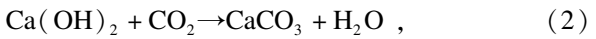
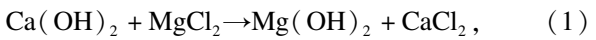
## 1 研究方法

### 1.1 问题分析和解决方案

污水处理厂产生的污泥中包含有潜在利用价值的有机质 N、P、K 和各种微量元素,剩余污泥固相组分为亲水性多孔介质,具有很强的保水性<sup>[9-10]</sup>. 剩余污泥是护坡植物的良好基质,但是还存在两个问题需要解决:一是污泥中的有机质大部分存在于生物细胞内,肥效发挥作用所需时间过长(约 2 个月);二是污泥中可能存在病原微生物.

为了解决上述问题:一方面,利用间距为 2 ~ 3 mm 的多组高速转动(2 000 ~ 4 000 r/min)的转盘产生的水力剪切作用破坏污泥细胞壁结构,使

细胞内的有机质流出,这样不仅可以灭活污泥中的部分病原生物,同时也可以加快污泥肥效的发挥;另一方面,混入草种之前在泥浆内加入氧化钙和氯化镁作为微生物灭活剂和胶凝剂. 主要化学反应如下:



### 1.2 植入泥浆生产工艺

植入泥浆的具体做法如图 1 所示:利用水力剪切作用将剩余污泥破解,向破解后的泥浆中加入氧化钙、氯化镁和催芽后的草种,搅拌 5 ~ 10 min,然后制成植入泥浆,最后按照梅花型布置旋喷贯注机,将植入泥浆注入河流边坡,完成植入型生态护坡的生产和现场施工.

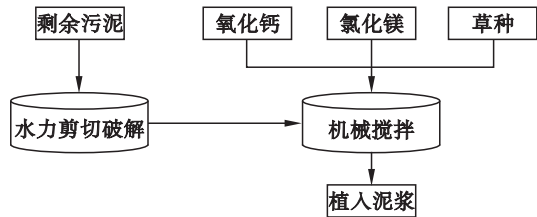


图 1 植入泥浆生产工艺图  
Fig. 1 Flow chart of implantation mud production

植入泥浆生产过程中,各种物料的配合比(质量分数)为:  $\text{MgCl}_2$  3%;  $\text{CaO}$  6%; 剩余污泥 91% (剩余污泥按干物质计). 草种的投加量可以根据具体需要适量选用和投加. 本次研究选适合在辽河流域生长的黑麦草、高羊茅,两种草种等比例混合,在植入泥浆中的投加比例为  $0.1 \text{ kg/m}^3$ .

### 1.3 植入点布设和植入施工

植入点的布设如图 2 所示,泥浆的植入施工采用旋喷贯注机(如图 3 所示). 制成的植入泥浆由加压泵加压(约 300 ~ 500 kPa),由图 3 中所示进液管 6 进入缓冲腔 7 内. 缓冲腔内的泥浆由转轴进液孔注入中空的旋喷转轴内,高压泥浆经喷射孔 9 喷注到土壤中. 工作时,喷射孔位于地表以下 10 ~ 50 cm 处,喷射转轴以 1 000 r/min 左右的转速旋转,泥浆的喷射半径约为 300 mm,在河流边坡地表以下 10 ~ 50 cm 范围内形成底面半径为 300 mm 的泥浆柱. 植入泥浆与土壤混合后发生如式(1) ~ 式(4)所示的化学反应,生成物  $3 \text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot 2\text{MgCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$  和  $5\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot 2\text{MgCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$  结晶复盐、 $\text{CaCO}_3$  和剩余部分

Mg(OH)<sub>2</sub>胶体,在土壤形成具有一定强度的纤维结构,这种纤维结构在护坡植物尚未长成期间保护河岸边坡,防止水土流失.泥浆中的剩余污泥为草种的萌芽提供肥料和水分.

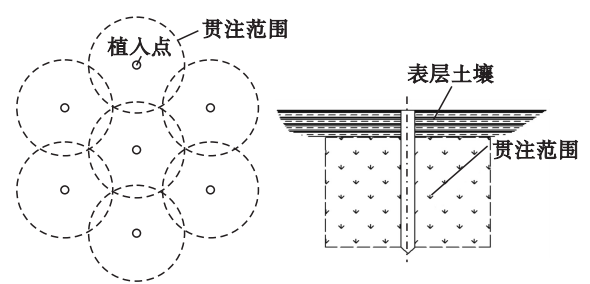


图 2 植入点布置示意图

Fig. 2 Layout of implantation points

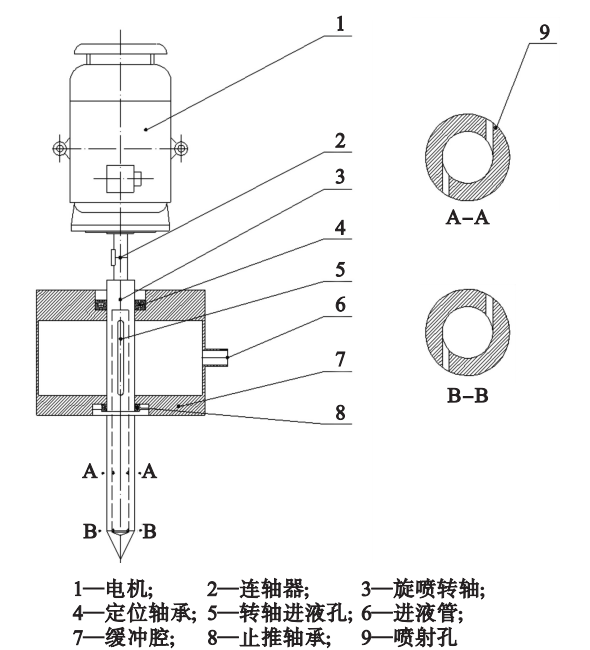


图 3 旋转喷射装置示意图

Fig. 3 Sketch map of the rotating injector

## 2 现场试验

### 2.1 试验区概况

试验区设在辽河干流沈阳市法库县和平生态

蓄水工程下游 2 km 处. 土质属砂壤土,容重约为  $1.38 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ,孔隙率约为 49.2%.

### 2.2 试验材料和试验方案

试验区选在河流右岸边坡,沿河方向长度 10 m,坡面宽度 5 m,坡度 28°,面积 50 m<sup>2</sup>. 选取 3 块相同面积的地块(分别记为 1 号、2 号和 3 号地块)进行对比试验. 分别在试验地块坡下方敷设长 10 m,宽 0.8 m,深 0.4 m 的 U 型槽,用于收集坡面产流;每个地块的另外三个边开挖宽 0.8 m、深 0.4 m 排水沟,收集周边的雨水径流,直接排入河流.

试验期从 2016 年 5 月 1 日至 2017 年 4 月 30 日. 1 号地块保持原有的自然状态;2 号地块人工混种黑麦草和高羊茅;3 号地块按 1.3 节所述方法种植生态护坡. 观测记录两个地块植被生长情况,分别收集 U 型槽内的降雨产流,测定其中干物质的质量,进行对比分析.

### 2.3 试验结果与分析

试验区降水量如图 4 所示. 2016 年 4 月 30 日完成试验地块的施工,包括排水沟、U 型槽.

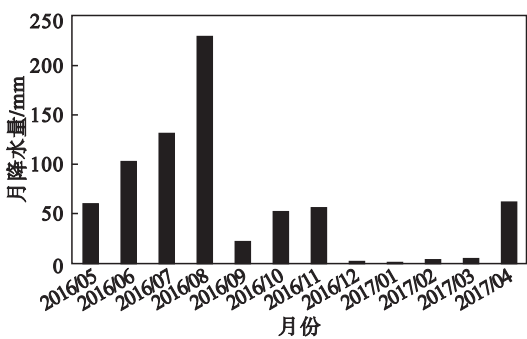


图 4 月降水量图

Fig. 4 Monthly total precipitation

从 2015 年 5 月 1 日至 6 月 30 日,每天观察 2 号和 3 号地块护坡植物的发芽和生长情况,观测记录见表 1. 根据实际降水产流情况全年收集 3 个集水 U 型槽内的径流并测定全年的泥砂量、干物质量,数据见表 2.

表 1 护坡植被生长情况观测记录

Table 1 Observation record of slope-protecting plants

种植天数	12	14	16	18	20	22	23	24	26	34	35
生长高度/cm											
地块 2			发芽	1	3	5	6	7	10	20	长成
地块 3	发芽	1	4	6	10	16	20	长成			

如表 1 所示,植入型生态护坡在植入后 12 天开始发芽,23 天后长成(护坡植物生长高度超过 20 cm 视为长成);在河岸边坡自然状态下,传统

人工种植护坡植物 16 天后发芽,35 天后长成. 说明植入型生态护坡,植入泥浆中的剩余污泥有很好的保水性能和肥力效应,比普通种植的情况提

前 4 天发芽,提前 11 天长成.

表 2 水土保持效应对比表

Table 2 Comparison of soil and water conservation effects

地块号	产流量/m <sup>3</sup>	流失干物质量/kg
1	11.2	16.7
2	10.0	15.0
3	8.4	6.7

如表 2 所示,3 个地块的集水槽全年所收集的水量,即年产流量:1 号是地块最大为 11.2 m<sup>3</sup>;2 号地块次之为 10 m<sup>3</sup>;3 号地块最小,为 8.4 m<sup>3</sup>;对应的随着径流流失的干物质质量:1 号地块最大,为 16.7 kg;2 号地块次之,为 15.0 kg;3 号地块最小为 6.7 kg.2 号地块流失干物质量比 1 号地块少了 10.2%,3 号地块流失干物质量比 1 号地块少了 59.9%.说明人工种植植被可以减少水土流失,但人工种植过程对表层土产生扰动,在护坡植物生长期间仍会有很严重的水土流失.植入型生态护坡对水土保持的作用十分显著,主要原因有三个方面:一是植入型生态护坡在施工过程中采用独特的旋喷贯注工艺,对表层土的扰动很小;二是植入泥浆中的胶结料可以在初期形成具有一定强度的纤维结构,有很好的固沙作用;三是植入泥浆中的剩余污泥为植物生长提供了水分和肥力,使生态护坡提前形成,护坡植物具有更好的长势,因而水土保持的效果极为显著.

### 3 结 论

- 1) 植入型生态护坡采用剩余污泥为主要原料,变废为宝,生产成本低.
  - 2) 对比试验结果表明:植入型生态护坡对表层土壤扰动小,具有初期硬化效应和保水保肥效应,不仅不破坏原有生境,而且具有极佳的水土保持效果.为河流河势稳定,防止水土流失和河流水生态保护提供了一种新的行之有效的工艺方法.
- 植入型生态护坡的生产工艺和施工方法有以下两个方面可以进一步发展和创新:在生产实践中,可能存在剩余污泥中重金属含量超标的情况,

因而污泥中重金属稳定技术或浸提技术有待进一步研究;病原生物灭活对于剩余污泥再利用至关重要,尚需进一步深入的研究.

### 参考文献:

[1] Shilon R, Rose H, Semon G, et al. Assessment and prioritization of eco-revetment projects in urban rivers[J]. *River Research Applications*,2009,25(8):946-961.

[2] 周超,王继堂,李文聪,等.城市河道堤岸生态护坡工程应用及趋势研究[J].资源节约与环保,2014,12(7):81-91. (Zhou Chao, Wang Ji-tang, Li Wen-cong, et al. Engineering application and trend research on the ecological slope protection for the urban river bank [J]. *Resources Economization & Environment Protection*, 2014, 12 (7): 81-91.)

[3] 彭俊杰,赵烁,彭海明.生态护坡技术在河流环境综合治理中的应用实践[J].水资源研究,2017,6(1):42-48. (Peng Jun-jie,Zhao Shuo,Peng Hai-ming. The application of ecological revetmenton comprehensive remediation in river environment [J]. *Journal of Water Resources Research*, 2017,6(1):42-48.)

[4] Hunt J, Birch G, Warne M. Quantifying reduction in ecological risk in Penrhyn Estuary, Sydney, Australia, following groundwater remediation [J]. *Integrated Environmental Assessment and Management*,2012,8(1):98-106.

[5] Sanjaya K,Asaeda T. Assessing the performance of a riparian vegetation model in a river with a low slope and fine sediment [J]. *Environmental Technology*, 2017, 38 (5): 517-528.

[6] Doble R, Brunner P, McCallum J, et al. An analysis of river bank slope and unsaturated flow effects on bank storage[J]. *Ground Water*,2012,50(1):77-86.

[7] Yang T, Liu J, Chen Q, et al. Estimation of environmental flow requirements for the river ecosystem in the Haihe River Basin, China [J]. *Water Science and Technology*, 2013, 67 (4):699-707.

[8] Kumar R, Solanki R, Kumar J. Seasonal variation in heavy metal contamination in water and sediments of river Sabarmati and Kharicut canal at Ahmedabad, Gujarat [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2013, 185 (1): 359-368.

[9] Wang L, Chen X, Yan L, et al. Using excess activated sludge treated 4-chlorophenol contained waste water to cultivate chlorella vulgaris[J]. *Environmental Science*, 2015, 36 (4): 1406-1411.

[10] Guo L, Liu H, Li X, et al. Bioproduction of volatile fatty acids from excess municipal sludge by multistage countercurrent fermentation [J]. *Chinese Journal of Biotechnology*, 2008, 24(7):1233-1239.