

固化剂对土壤中重金属的稳定作用及其在河岸固化护坡中的应用研究

张长波¹, 罗启仕¹, 付融冰¹, 杨洁¹, 章树久², 李小平¹

(1.上海市环境科学研究院, 上海 200233; 2.上海鼓华生态科技有限公司, 上海 201901)

摘要:为评估一种自主开发的固化剂(GSS-02)对土壤中重金属的稳定作用,探讨该固化剂用于河岸固化护坡工程的可行性,在实验室内分别采用普通硅酸盐水泥(OPC)和 GSS-02 对土壤实施固化处理,用 US EPA 的 TCLP 方法测定浸出毒性,评估添加剂对土壤 Cu、Zn、Cr 和 Ni 的稳定效果,测定固化体的无侧限抗压强度,初步评估土壤固化体的物理性能。结果表明,加入 OPC 或 GSS-02 在一定程度上提高了土壤浸出液的 pH 值,固化剂添加量与浸出液 pH 值存在显著的正相关关系;OPC 和 GSS-02 对 Cu、Zn 和 Ni 有较好的稳定作用,能使浸出液中重金属浓度降低为对照样品的 1/3~1/7,但能够活化 Cr;加入 OPC 或 GSS-02 能提高固化体的无侧限抗压强度,与 OPC 相比,低剂量时 GSS-02 能显著提高无侧限抗压强度,而高剂量时则相反,这有利于土壤生物工程的实施。上海市南汇区某河岸固化工程应用表明,GSS-02 能满足土壤重金属稳定和土壤生物生长恢复的需要,与 OPC 相比是一种良好的生态型固化剂。

关键词:土壤固化;固化剂;稳定作用;浸出毒性;无侧限抗压强度

中图分类号:X53 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2009)10-2050-07

Stabilization of Heavy Metals by A Self-developed Soil Binder and Its Application in Ecological Embankment Engineering of Riverbank

ZHANG Chang-bo¹, LUO Qi-shi¹, FU Rong-bing¹, YANG Jie¹, ZHANG Shu-jiu², LI Xiao-ping¹

(1.Shanghai Academy of Environmental Sciences, Shanghai 200233, China; 2.Shanghai Guhua Ecological Science and Technology Co. Ltd., Shanghai 201901, China)

Abstract: The present study aimed to evaluate the stabilization of soil heavy metals by a self-developed binder named GSS-02 which would become a standard for the implementation of riverbank solidification engineering. Ordinary Portland cement (OPC) and GSS-02 were mixed with soil samples at various ratios and the efficiency of stabilization of Cu, Zn, Cr and Ni in soils was evaluated by the US EPA TCLP toxicity test. The unconfined compressive strength of the solidified soil was also measured to estimate its physical properties. Addition of OPC or GSS-02 increased the pH value of the leachate up to a maximum of 7.0 and there was a clear positive relationship between the amount added and the leachate pH value. OPC or GSS-02 had a positive effect on stabilization of Cu, Zn and Ni in soils thereby decreasing their concentrations in the leachate by 3~7 fold and simultaneously activated Cr. Both additives increased the compressive strength of the solidified body. When the additive ratio was less than 10% the compressive strength of the solidified body treated with GSS-02 was greater than that with OPC treatment. The opposite effect was observed when the additive ratio was increased, resulting in conditions favorable for plant growth. This was the main advantage of the binder system over OPC when applied to soil bioengineering. The laboratory study suggests that the binder is suitable for soil solidification engineering and has been applied in riverbank ecological restoration engineering at Nanhui District in Shanghai.

Keywords: soil solidification; binder; stabilization; leaching toxicity; unconfined compressive strength

收稿日期:2009-03-13

基金项目:国家“863”计划重大项目课题(2007AA06A401);上海市科委世博科技专项课题(06dz05810)

作者简介:张长波(1979—),男,山东聊城人,硕士,助理工程师,主要从事污染土壤修复方面的研究。E-mail:cbzhang2007@yahoo.com.cn

通讯作者:罗启仕 E-mail:qsluo99@yahoo.com.cn

固化/稳定化是比较成熟的废物处置技术,经过几十年的研究,已成功应用于放射性废物、底泥、工业污泥的无害化和资源化。与其他技术相比,该技术具有处理时间短、适用范围广等优势^[1],因此美国环保局曾将固化/稳定化技术称为处理有毒有害废物的最佳技术^[2]。

土壤固化剂是由胶凝材料、添加剂等多种组分有机结合而形成的,常用的胶凝材料有水泥和石灰等无机粘结物质。土壤固化剂广泛应用于道路和水利工程,在西方国家已有30多年的历史^[3],随着土壤固化技术的不断成熟,应用的领域也逐渐拓展,目前已经扩展到污染土壤的修复。在污染土壤的固化/稳定化研究和应用方面,美、英等西方国家走在了世界的前列,如在美国这种技术已被用于180个超级基金项目^[4]。我国的固化剂专利有20余项,但是针对土壤污染物固化/稳定化的固化剂还相当匮乏,这对该技术的研究、工程实践和推广是十分不利的。因此,非常有必要借鉴国外相关的先进技术和经验,研制开发针对污染土壤修复的新型固化剂,这将为我国固化/稳定化技术的实验室研究和工程应用奠定坚实的基础。

土壤经过固化剂处理后能够形成具有一定强度的固化体,这有利于稳定边坡、减少水土流失,因此在河道护岸工程方面具有广泛的应用前景。本课题研究人员自主开发了一种新型的土壤固化剂GSS-02,经过该固化剂处理的土壤不仅具有较高的整体强度,经受-18℃的低温而不龟裂,抗浸泡性能也比较优良,更为重要的是固化体还具有四通八达的内部孔隙,有利于水分和空气的通透,比较适合于植物根系的生长,因此有利于解决强度提高和植物生长之间的矛盾,能把河堤改造成为水体和土体、水体和植物相互涵养,适合生物生长的仿自然状态的护岸。另外,固化剂能与土壤中的重金属污染物发生反应,使之转化为不易溶解、迁移能力弱、毒性更小的形式^[5],较低的污染物浸出浓度也更加有利于植物的生长和河流生态系统的安全。这些特性都为该固化剂在生态护岸方面的应用提供了有力保障。

为了进一步验证这种新型固化剂对重金属污染土壤的修复效果,探索它在河岸整体固化工程中的应用,本研究根据工程的实际操作过程,在实验室内利用GSS-02进行了河岸土壤固化处理,采用US EPA的Toxicity Characteristic Leaching Procedure(TCLP)方法测定了浸出毒性,探讨不同添加比例下GSS-02对土壤重金属污染物的稳定效果;以无侧限抗压强度为

依据初步判断土壤固化体的物理性能,为重金属污染河岸的土壤生物工程维护提供参考。本课题组对上海市南汇区某村的河道实施了护岸工程,对实验室研究结果进行检验。

1 材料与方法

1.1 土壤样品采集、前处理与重金属全量测定

2008年5月2日,以多点混匀的方式在上海市南汇区某村河堤采集约50 kg土壤样品带回实验室。为了符合土壤生物工程的实际情况,固化试验所用土壤没有经过风干和研磨处理,而是保持其自然状态,只剔除了大颗粒的石砾和植物残体,并充分混匀。

取少量土壤样品,经自然风干后研磨过100目筛,按照McGrath和Cunliffe^[6]的方法对其进行消煮,用ICP-MS(Agilent 7500)测定Cu、Zn、Pb、Cd、Cr和Ni等元素含量。结果表明,土壤中的Cu、Zn、Cr和Ni的浓度分别为59.55、99.95、81.20和42.00 mg·kg⁻¹,都高于上海市表层土壤元素背景值^[7],说明土壤样品在一定程度上已经受到了这些元素的污染。其中Pb和Cd的浓度都低于上海市表层土壤元素背景值。

1.2 固化剂的制作

GSS-02主要由粉煤灰、铁铝酸钙、高炉渣、硫酸钙、碱性激活剂以及锯末组成,另外,为了增强对重金属污染物的吸附作用添加了约10%的粘土矿物。

1.3 土壤固化处理与养护

到目前为止,水泥仍是最常用、最重要的固化剂^[8],因此本研究把普通硅酸盐水泥(OPC)作为固化剂的参考物质。2008年5月9日采用OPC和GSS-02对采集的土壤进行了固化处理,添加剂的添加比例分别设置为5%、10%、15%和20%4个梯度。称取约4.5 kg土壤,根据添加比例计算水泥或GSS-02的添加量,按照液固比为1:3的比例加入去离子水,充分混合后填入70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm的模具中,为了使二者充分接触,施加压强为1.5 MPa的压力进行压实,上述过程24 h后脱模形成固化体。为了与工程实际相结合,固化体在室温条件下养护28 d后进行重金属浸出毒性和无侧限抗压强度分析。

1.4 土壤固化体浸出毒性测定

按照US EPA Method 1311 TCLP的具体过程,利用冰醋酸溶液在该方法指定的振荡装置-翻转式振荡器(3740-6-BRE)上对粉碎过筛后的土壤-添加剂混合物振荡提取18 h,加压过滤浸提剂后获得浸出液,继而用pH计(Sartorius PB-10)记录浸出液pH值;用

稀硝酸将浸出液酸化至 pH<2,于 4℃下冷藏保存,用 ICP-MS(Agilent 7500)测定主要重金属的含量。

1.5 土壤固化体无侧限抗压强度测定

有研究人员认为,固化体的抗压强度与污染物浸出毒性之间有着密切的关系^[9],建议把固化体的抗压强度作为污染物固化程度的指标,其强度越高,越有利于减弱污染物的移动性。但是对于土壤-植物系统而言,太高的强度又不利于植物根系的生长,影响河岸的稳定效果,因此固化体的强度对工程的效果较为重要。

本研究按照中华人民共和国行业标准《建筑砂浆基本性能试验方法》(JGJ70—1990)中“立方体抗压强度试验”的具体过程,利用液压数字式压力试验机(DYE-2000)测定土壤固化体的无侧限抗压强度。

1.6 数据处理

数据分析采用 SPSS 13.0 和 Excel 2003。

1.7 生态护岸工程的实施

在实验室研究的基础上,确定了现场护岸工程的主要参数和施工流程。2008 年 6 月 17 日,选取南汇区某村庄的一段长约 50 m、坡宽 3 m 的土质河段,利用 GSS-02 对河岸实施了整体固化工程。施工的工序包括范围圈定、剔除杂物、场地平整、土壤性质测定、固化剂铺设、多次混匀、碾压和草袋覆盖养护。工程实施时土壤含水率约为 35%,能够满足固化剂水化的需要。固化剂的添加比例约为 15%,即铺设固化剂至 3 cm 厚,通过土壤旋耕机使之与约 17 cm 的土壤充分混匀。混合均匀后用振动压路机碾压 3 遍,碾压后用草袋覆盖 3 d。养护 28 d 后移栽红花继木(*Redlow-ered Loropetalum*)和金边黄杨(*Euonymus Japonicus cv. Aureo-ma*)两种木本观赏植物。另外,采集柱状固化土壤样品,用于后续分析。

2 结果与分析

2.1 浸出液 pH 值

土壤固化体的 pH 值对整体强度的形成、重金属的有效性植物的生长都具有非常重要的意义。水泥为基料的系统在凝结及硬化阶段都需要碱性环境(pH>10)^[10],如果碱性不满足要求可能会导致凝结缺陷。另外,重金属氢氧化物是固化体中一种非常重要的存在形式,通常情况下,它们的溶解度是介质 pH 值的函数,介质的碱性特征有利于重金属的沉淀反应抑制浸出现象的发生,对重金属的长期稳定性起到了十分重要的作用^[11]。本研究所用的水泥和固化剂都是

碱性物质,加入到土壤中会改变该体系的酸碱程度。虽然土壤经过了冰醋酸溶液的提取,但浸出液 pH 值仍然可以在一定程度上反映出固化体的酸碱特性。

各处理的浸出液 pH 值变化趋势见图 1。从中可以看出,水泥和固化剂都增加了固化体和浸出液的 pH 值,改善了固化体内的酸碱环境,当添加量为 20% 时,浸出液 pH 值接近 7.0,这在一定程度上起到了稳定重金属的作用^[12]。水泥或固化剂添加量与浸出液 pH 值存在显著的正相关关系,由回归方程系数可以得知,与水泥相比固化剂对固化体的 pH 值增加作用效果稍弱,配对 *t* 检验结果表明,两者之间的差异没有达到 0.05 显著性水平。

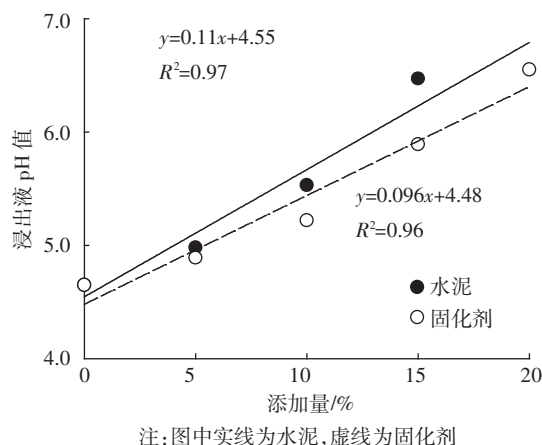


图 1 水泥或固化剂添加量对浸出液 pH 值的影响

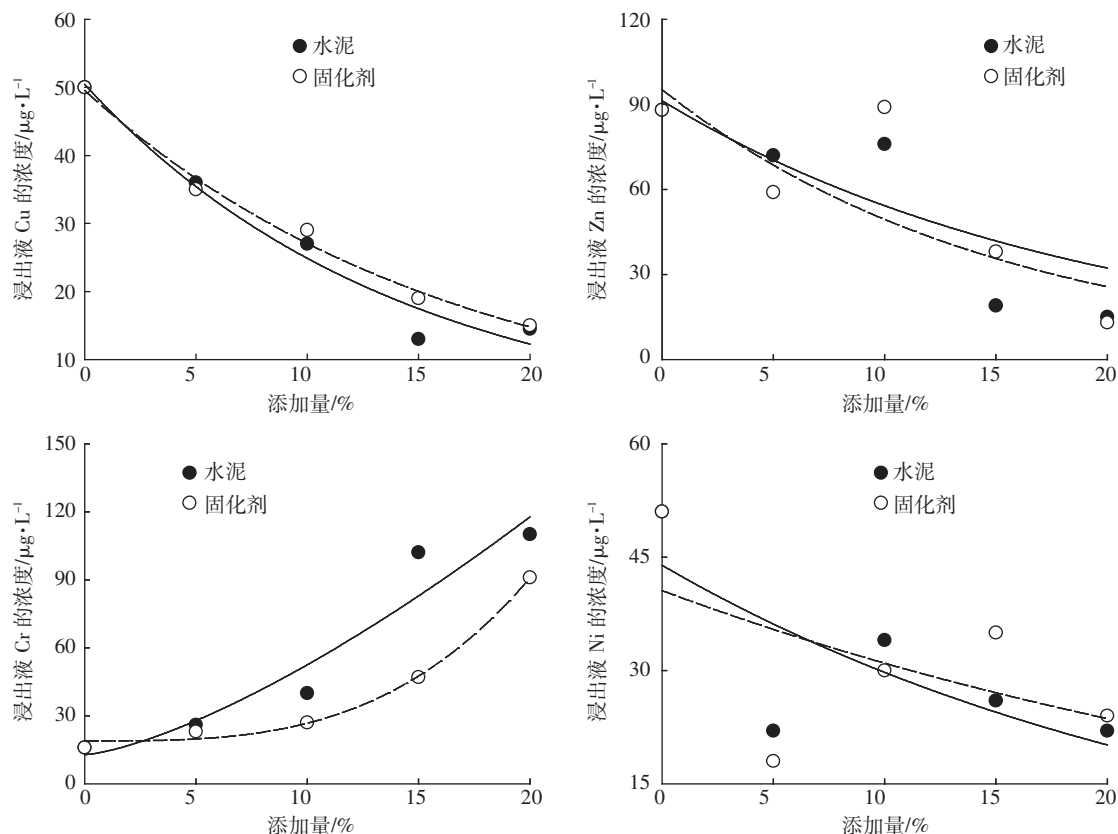
Figure 1 Effect of cement or binder dose on pH value of leachate

2.2 浸出液重金属含量

浸出液中主要的重金属有 Cu、Zn、Cr 和 Ni。对于同一种重金属而言,水泥和固化剂处理的变化趋势基本是一致的(见图 2)。随着水泥或固化剂的加入,浸出液中 Cu 的浓度呈现下降的趋势,当添加量增加到 20% 时,Cu 浓度降低为对照样品的约 1/3,这是土壤 Cu 被钝化的具体体现,说明水泥和固化剂对土壤中的 Cu 都具有稳定作用。浸出液 Zn 和 Ni 的浓度也大致表现为逐渐下降,当添加量为 20% 时,Zn 和 Ni 的浓度降低为对照样品的约 1/7,说明当添加剂含量达到一定程度后能够稳定土壤中的这两种元素。

与上述 3 种元素不同的是,随着添加剂的加入,浸出液中 Cr 的浓度逐渐增加。当水泥或固化剂的添加量为 20% 时,Cr 浓度分别增加为对照样品的约 5 倍,这说明水泥和固化剂激活了土壤中的 Cr,增大了其有效性和可提取性。

浸出液中重金属含量受到多个因素的共同影响,



注:图中实线为水泥,虚线为固化剂

图2 水泥或固化剂添加量对浸出液中Cu、Zn、Cr和Ni浓度的影响

Figure 2 Effect of cement or binder dose on Cu, Zn, Cr or Ni concentration in leachate

其中最为重要的有固化体酸碱性、元素性质、氧化还原电位、吸附剂含量,添加剂加入导致的稀释效应也会起到一定的作用。但是,由于该研究中添加剂的用量最大为20%,跨度较小,稀释效应不显著,这种效应对重金属的变化趋势没有起到决定性的作用。从图1可知,随着水泥或固化剂的加入,固化体中的碱性不断增加,有利于重金属氢氧化物的形成,这对土壤中Cu、Zn和Ni的稳定起到重要的作用。固化剂中添加了部分粘土矿物,这些物质会对土壤污染物起到吸附作用,阻碍它们向周围环境的迁移。胶凝物质的物理固封效应能够隔离或阻断污染物与外界环境的联系,控制污染物的迁移。因此,土壤固化剂成分的多元化决定了污染物稳定机理的多元化,是实现污染物稳定化的重要保证。

土壤中Cu的稳定性强烈依赖于pH值,当低于10时,随着pH值的增加Cu的移动性逐渐降低^[13],因此通过添加飞灰等物质来升高土壤的pH值是抑制Cu移动性的有效方式^[14],本研究的结果也充分证明了这一结论。随着水泥或固化剂的加入,土壤的pH

值逐渐升高,导致浸出液中Cu的浓度呈现下降的趋势。Coz等^[15]利用模型模拟研究了影响Zn浸出的主要因素,结果发现在较为宽泛的pH范围内,基于氢氧化物溶解度计算出的Zn浓度与浸出液中实际的Zn浓度非常吻合,而Pb或Cd则不具有这种特征,由此可见锌的氢氧化物形态是影响Zn浸出性的主要因子。正如前文所述,重金属氢氧化物的溶解度往往表现为介质pH值的函数,因此浸出液pH值是决定浸出液中Zn浓度的最重要因素,在本研究中,随着pH的不断增高Zn的可淋出性逐渐降低。通常认为,Ni能够与水泥中的Ca按照1:4的比例发生反应,这种物质控制着浸出液中Ni的溶解度,所以很多的研究发现浸出液中的Ni浓度与pH值有着密切的关系^[16-18]。

土壤中的Cr主要表现为三价和六价,六价Cr多以可溶性 CrO_4^{2-} 或 $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ 等阴离子形态存在,同时它们会受到土壤胶体表面负电荷的排斥作用,移动性较强;而三价Cr在土壤中多以阳离子形式存在,常形成溶解性较差的氧化物或氢氧化物,不易从土壤中迁移出去^[19]。因此土壤中Cr的迁移性主要受到价态的影

响。由于 Cr 在水泥中不易形成沉淀物,利用普通硅酸盐水泥很难对它进行有效固化,这也是目前国际上所面临的难题^[20]。另外,也有研究表明水泥的加入会氧化三价 Cr 使之转化为吸持性能更弱、活性更大、更易浸出的六价 Cr,将显著增加它的浸出毒性^[21],这与本研究的结果是一致的。固化剂中所包含的水泥的某些成分,也对土壤中的 Cr 产生了活化作用。高炉渣能够还原六价 Cr,广泛应用于 Cr 污染介质的稳定化^[22],固化剂中添加了部分高炉渣,使它与水泥相比对 Cr 的活化程度较低,反映了高炉渣的作用。

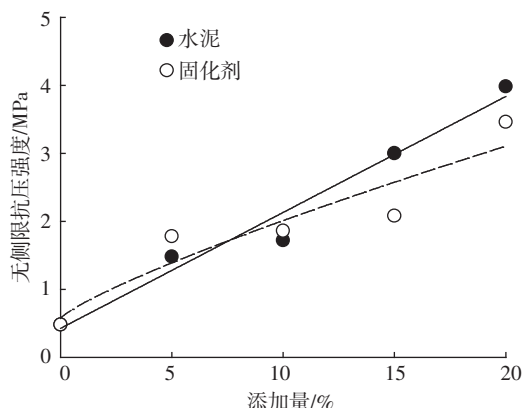
本研究中 Cu 和 Cr 的曲线模拟效果较好,而 Zn 和 Ni 的效果较差,表现为出现离散点,这并不是个别现象,很多研究者都曾遇到过这样的问题^[23-25]。正如上文所述,很多因素影响到浸出液中重金属的浓度变化,这种复杂体系可能是出现离散点的原因。

2.3 土壤固化体无侧限抗压强度

水泥中的硅酸盐阴离子以孤立的四面体存在,水化时逐渐相互连接成二聚物以及多聚物——水化硅酸钙(CSH)^[26]。CSH 是一种由不同聚合度的水化物所组成的固体凝胶,是水泥凝结作用的最主要物质,因此水泥添加量的升高意味着固化体中 CSH 含量的增加,从而导致抗压强度的增强。粉煤灰、高炉渣等火山灰类物质本身不能发生凝硬反应,但在水存在的情况下,可以被 NaOH、KOH 等碱性物质或者 CaSO₄ 激活,发生火山灰反应,生成胶凝物质,形成一定的强度,对污染物进行物理和化学稳定。固化剂中含有多种火山灰类物质和碱性激活剂,能够促成火山灰反应的发生。

根据测定的破坏载荷及承压面积计算出固化体的抗压强度,各处理固化体的无侧限抗压强度见图 3。

由图 3 可以看出,水泥或固化剂用量的多少直接关系到固化体的无侧限抗压强度。随着添加剂的增加,固化体的抗压强度也随之提高。统计分析发现,水泥添加量与固化体的抗压强度存在显著的正相关关系($R^2=0.94$),而固化剂并不具有该特征。当添加量低于 10% 时,固化剂处理的固化体比水泥处理具有更大的无侧限抗压强度,说明较低添加量时固化剂处理更有利于整体强度的形成,能够增强土壤表面的抗剪切强度,减少河岸的土壤流失;而当添加量大于 10% 时情况发生了变化,水泥处理的固化体的无侧限抗压强度迅速上升,当添加量升至 15% 和 20% 时,水泥处理的抗压强度分别达到了 3.0 和 3.98 MPa,固化剂处理的抗压强度分别为 2.08 和 3.46 MPa。



注:图中实线为水泥,虚线为固化剂

图 3 水泥或固化剂添加量对固化体无侧限抗压强度的影响

Figure 3 Effect of cement or binder dose on unconfined compressive strength of the solidified body

很多研究结果表明,过高的土壤硬度不利于植物根系的生长^[27]。一般情况下,抗压强度达到 2.5 MPa 时就会限制根系的生长^[28],而 3.0 MPa 则常被认为是根系生长的上限^[29]。由此可以看出,15% 的固化剂处理能够较好协调土壤抗剪切强度和植物根系生长之间的矛盾,与水泥相比具有一定的优势;同时,该处理也能够显著降低浸出液中 Cu、Zn 和 Ni 的浓度。因此,在生态护岸工程中也选择了这一添加比例。

另外,由于加入了锯末、多孔粘土矿物,固化剂处理形成的固化体具有发达的内部孔隙,为水分和空气的传输提供了通道,为植物根系的生长提供了比较有利的外部条件,比较适用于土壤整体固化与植物栽培相结合的生态护岸技术,这也是与水泥相比固化剂的优异之处。

随着添加剂的增加,浸出液中 Cu、Zn、Cr 和 Ni 的浓度与固化体的抗压强度并不具有显著的负相关关系,这说明整体强度导致的物理固封作用对污染物的稳定没有显著的贡献。由此可以推断,添加剂加入引起的碱度升高以及对污染物的吸附作用是水泥或固化剂稳定重金属污染物的主要原因,这与本文 2.2 部分分析的原因是一致的。

2.4 河岸整体固化与植物栽培相结合的生态护岸技术

河岸整体固化后的现场情况如图 4 所示。养护 10 d 后,河岸已经具有了约 1.2 MPa 的无侧限抗压强度(图 4 右下角),能够使土壤流失量减少为对照(图 4 左上角)的 8%。养护 28 d 后移栽红花继木和金边黄杨两种木本观赏植物。3 个月后,固化体表面略有毛糙感,但依然平整,没有发现明显的冲蚀沟壑,无侧限

抗压强度为 1.9 MPa;植物长势良好,未见萎蔫现象的发生,说明固化体能够满足这两种植物生长的需要。



图4 整体固化工程实施后的河岸状况

Figure 4 Riverbank after implementation of soil solidification engineering

土壤固化与植被构建相结合的技术充分体现了土壤工程和生物工程的交融,通过土壤硬化增强河岸稳定性、减少水土流失的同时能够改善植物生长的外部环境,促进植物根系的形成进一步增强土体的抗剪强度,以达到系统结构稳定化、固岸效应多元化、效果长期化的目的。

3 结论

(1)水泥或固化剂的加入提高了土壤的碱性,当添加量为 20%时,浸出液 pH 值接近 7.0;添加量与浸出液 pH 值存在显著的正相关关系。

(2)随着水泥或固化剂的增加,土壤中 Cu、Zn、Cr 和 Ni 的可提取性呈现出不同的变化趋势,浸出液 Cu、Zn 和 Ni 浓度呈现下降趋势,添加量为 20%时,浓度分别降低为对照样品的约 1/3、1/7 和 1/7;而 Cr 则被活化。

(3)随着添加剂的增加,固化体的抗压强度也随之提高;低剂量时固化剂处理的固化体比水泥处理具有更大的无侧限抗压强度,而高剂量时则相反。15%固化剂处理的土壤具有适中的抗压强度,适宜于植物根系的生长,有利于土壤生物工程的实施。

(4)利用固化剂对河岸实施整体固化能够显著减少土壤流失,固化体能够满足红花继木和金边黄杨生长的需要,生态护岸工程取得成功。

参考文献:

[1] Suman Raj D S, Aparna C, Rekha P, et al. Stabilization and solidification technologies for the remediation of contaminated soils and sedi-

ments: An overview[J]. *Land Contamination and Reclamation*, 2005, 13(1):23-48.

[2] Gougar M L D, Scheetz B E, Roy D M. Ettringite and c-s-h portland cement phases for waste ion immobilization: A review[J]. *Waste Management*, 1996, 16(4):295-303.

[3] 张丽娟,汪益敏,陈页开,等. ISS 土壤固化剂在渠道防渗中的试验研究[J]. *中国农村水利水电*, 2004, 6(6):18-21.

ZHANG Li-juan, WANG Yi-min, CHEN Ye-kai, et al. Experimental study on the application of soil stabilizer ISS in canal seepage control[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2004, 6(6):18-21.

[4] 周启星,宋玉芳. 污染土壤修复原理与方法[M]. 北京:科学出版社, 2004:356-365.

ZHOU Qi-xing, SONG Yu-fang. Principles and techniques of remediation of contaminated soils[M]. Beijing: Science Press, 2004:356-365.

[5] Mulligan C N, Yong R N, Gibbs B F. Remediation technologies for metal-contaminated soils and groundwater: An evaluation[J]. *Engineering Geology*, 2001, 60(1-4):193-207.

[6] McGrath S P, Cunliffe C H. A simplified method for the extraction of the metals Fe, Zn, Cu, Ni, Cd, Pb, Cr, Co and Mn from soils and sewage sludges[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 1985, 36(9):794-798.

[7] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京:中国环境科学出版社, 1990:342-381.

China National Environmental Monitoring Centre. Chinese soil element background values[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1990:342-381.

[8] Akhter H, Butler L G, Branz S, et al. Immobilization of As, Cd, Cr and Pb-containing soils by using cement or pozzolanic fixing agents[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 1990, 24(2-3):145-155.

[9] Johnson D. A review of scale-up factors potentially affecting the long-term performance of s/s-treated materials[M]//Al-Tabbaa A, Stegemann J, eds. Stabilisation/Solidification treatment and remediation: Advances in S/S for waste and contaminated land. London: Taylor and Francis, 2005:117-124.

[10] 马鸿昌. 世界银行第 93 号技术报告——有害废物的安全处置发展中国家的特殊需要和问题[M]. 北京:中国环境科学出版社, 1993:181-193.

MA Hong-chang. Number 93 report of the World Bank: safe disposal of hazardous waste is a special need and problem in developing countries[M]. Beijing: China Environmental Sciences Press, 1993:181-193.

[11] Stouraiti C, Xenidis A, Paspaliaris I. Reduction of Pb, Zn and Cd availability from tailings and contaminated soils by the application of lignite fly ash[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2002, 137(1-4):247-265.

[12] Conner J R, Hoeffner S L. A critical review of stabilization/solidification technology[J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 1998, 28(4):397-462.

[13] Kumpiene J, Lagerkvist A, Maurice C. Stabilization of As, Cr, Cu, Pb and Zn in soil using amendments - A review[J]. *Waste Management*, 2008, 28(1):215-225.

[14] Jackson B P, Miller W P. Soil solution chemistry of a fly ash-, poultry litter-, and sewage sludge-amended soil[J]. *Journal of Environmental*

- Quality*, 2000, 29(2):430-436.
- [15] Coz A, Andres A, Soriano S, et al. Environmental behaviour of stabilised foundry sludge[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2004, 109(1-3):95-104.
- [16] Ract P G, Espinosa D C R, Tenorio J A S. Determination of Cu and Ni incorporation ratios in Portland cement clinker[J]. *Waste Management*, 2003, 23(3):281-285.
- [17] Karamalidis A K, Voudrias E A. Release of Zn, Ni, Cu, SO_4^{2-} and CrO_4^{2-} as a function of pH from cement-Based stabilized/solidified refinery oily sludge and ash from incineration of oily sludge[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 141(3):591-606.
- [18] Yin C Y, Wan Ali W S, Lim Y P. Oil palm ash as partial replacement of cement for solidification/stabilization of nickel hydroxide sludge[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 150(2):413-418.
- [19] Barnhart J. Occurrences, uses, and properties of chromium[J]. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 1997, 26(1):S3-S7.
- [20] Rinehart T L, Schulze D G, Bricka R M, et al. Chromium leaching vs oxidation state for a contaminated solidified/stabilized soil[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 1997, 52(2-3):213-221.
- [21] Cheeseman C R, Fowler G D, Zhou X. Effect of different binder systems on the stabilisation/solidification of metal finishing wastes[M]//Al-Tabbaa A, Stegemann J, eds. *Stabilisation/Solidification treatment and remediation: Advances in S/S for waste and contaminated land*. London: Taylor and Francis, 2005:31-37.
- [22] 韩怀芬, 黄玉柱, 金漫彤. 铬渣的固化/稳定化研究[J]. *环境污染与防治*, 2002, 24(4):199-200.
- HAN Huai-fen, HUANG Yu-zhu, JIN Man-tong. Research of solidification chromium residue with cement binders[J]. *Environmental Protection and Control*, 2002, 24(4):199-200.
- [23] Shanableh A, Kharabsheh A. Stabilization of Cd, Ni and Pb in soil using natural zeolite[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 1996, 45(2-3):207-217.
- [24] Alpaslan B, Yukselen M A. Remediation of lead contaminated soils by stabilization/solidification[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2002, 133(1-4):253-263.
- [25] Stouraiti C, Xenidis A, Paspaliaris I. Reduction of Pb, Zn and Cd availability from tailings and contaminated soils by the application of lignite fly ash[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2002, 137(1-4):247-265.
- [26] 刘巽伯, 魏金照, 孙丽玲. 胶凝材料——水泥、石灰、石膏的生产和性能[M]. 上海:同济大学出版社, 1990:1-4.
- LIU Xun-bo, WEI Jin-zhao, SUN Li-ling. *Production and property of cementitious materials: cement, lime and gypsum*[M]. Shanghai: Tongji University Press, 1990:1-4.
- [27] 张甘霖, 朱永官, 傅伯杰. 城市土壤质量演变及其生态环境效应[J]. *生态学报*, 2003, 23(3):539-546.
- ZHANG Gan-lin, ZHU Yong-guan, FU Bo-jie. Quality changes of soils in urban and suburban areas and its eco-environmental impacts—A review[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(3):539-546.
- [28] Jim C Y. Soil compaction as a constraint to tree growth in tropical and subtropical urban habitats[J]. *Environmental Conservation*, 1993, 20(1):35-49.
- [29] 杨金玲, 汪景宽, 张甘霖. 城市土壤的压实退化及其环境效应[J]. *土壤通报*, 2004, 35(6):688-694.
- YANG Jin-ling, WANG Jing-kuan, ZHANG Gan-lin. The compaction degradation of urban soil and its environmental impacts[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2004, 35(6):688-694.