

土壤固化剂及其水土保持应用研究进展^①

张冠华, 牛俊, 孙金伟, 李昊

(1 长江科学院水土保持研究所, 武汉 430010; 2 水利部山洪地质灾害防治工程技术研究中心, 武汉 430010)

摘要: 随着水土流失的加剧和生态环境的恶化, 人们不断探索一些水土保持新技术、新材料和新方法, 而土壤固化剂作为防治水土流失的一种化学措施应用前景广阔。本文阐述了土壤固化剂的类型特点、固化机理和固化性能, 总结了土壤固化剂在水土保持中的应用现状, 并指出其应用中存在的若干问题及研究方向, 为土壤固化新材料的研发提供指导。

关键词: 土壤固化剂; 水土保持; 可持续发展; 植物生长; 高效生态农业

中图分类号: S156.2; S157.9 文献标识码: A

水土流失已成为我国头号生态环境问题。《全国水土保持规划(2015—2030年)》显示, 目前我国水土流失面积尚有 294.91 万 km², 占我国陆地面积的 30.7%, 严重的水土流失导致水土资源破坏、生态环境恶化、自然灾害加剧, 威胁国家生态安全、防洪安全、饮水安全和粮食安全, 是我国经济社会可持续发展的突出制约因素。因此, 采取各种物理、化学和生物的方法来防治水土流失一直是土壤侵蚀与水土保持研究领域的重要课题。

近年来, 治理水土流失单纯的林草措施显得势单力薄, 生物措施、工程措施与水土保持材料相结合的多元治理模式成为一种新趋势, 综合运用化学固结与生物防治方法成为防治水土流失的有效手段^[1]。土壤固化剂能够改良土壤结构, 提高土体强度和耐久性, 兼具高效、经济、生态、环保的特点, 成为水土保持固结材料的研究热点。土壤固化剂是土壤改良剂的一种, 可在常温下直接胶结土壤颗粒表面或与黏土矿物反应生成胶凝物质, 从而改善和提高土壤的工程性能^[2], 其固化土壤的本质是与土壤颗粒之间发生一系列的物理化学反应, 改善土壤颗粒之间的接触面, 强化土壤颗粒间的连结结构^[3]。自 20 世纪 40 年代, 土壤固化技术就开始蓬勃发展, 国内外许多学者对固化剂如何改变土壤物理力学性质、化学性质进行了大量试验和研究, 取得了许多研究成果^[4-10], 并将固化剂广泛应用于道路交通、水土保持、水利工程以及环保工程等多种领域^[11-14]。笔者对当前土壤固化剂的类

型、固化机理和固化性能进行梳理, 总结了土壤固化剂在水土保持中的应用现状并分析了其应用中存在的若干问题及研究方向, 以期能为土壤固化新材料的开发研制提供科学依据。

1 土壤固化剂的类型特点

土壤固化剂按其外观形态分为两种: 粉体土壤固化剂和液体土壤固化剂, 按照主要化学成分可以分为 4 种: 无机类、有机类、有机无机复合类和生物酶类^[15]。

1.1 无机类土壤固化剂

一般为粉末状, 以水泥、石灰、粉煤灰及各类矿渣、煤矸石等作为主固剂, 以硫酸盐类、各种酸类、其他无机盐及少量的表面活性剂等作为激发剂复合配制而成^[15-16]。这类固化剂加固土主要是靠其自身的水解、水化及其水化产物与土壤颗粒之间的化学反应产物一起增加土壤的强度^[17]。此类固化剂的优点是成本低、强度稳定性好; 缺点是: 渗透性差, 固结施工困难, 常常需要固结材料和砂土拌和进行铺设, 且固结层容易干缩形成裂缝, 厚重的固结层也不利于生态防护^[18]; 用量比较大, 运输成本高, 早期强度不高^[19]。

1.2 有机类土壤固化剂

有机类土壤固化剂多为液体状, 目前主要有改性水玻璃类、环氧树脂类、高分子材料类和离子类等中的一种或多种组合配制而成^[15]。这类固化剂一般通

①基金项目: 水利部技术示范项目(SF-201601)、中央级公益性科研院所基本科研业务费项目(CKSF2017050/TB; CKSF2017028/TB)和国家自然科学基金项目(41301298)资助。

作者简介: 张冠华(1983—), 女, 内蒙古赤峰人, 博士, 高级工程师, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: zgh83113@126.com

过离子交换原理或材料本身聚合加固土壤。高分子类固化剂主要是与土壤发生聚合反应,并渗透到土壤中与土粒继续发生化学反应从而达到胶结土粒的作用^[20]。此类固化剂具有较高的早期强度、耐水性,但随着时间的延长及周围环境的影响,老化趋势明显,其后期强度及耐水性均有所下降^[21]。通过离子交换作用的固化剂,一般为液态,能将土壤水分中的电荷与土壤颗粒电荷充分交换,并发生电化学反应,使它与土混合压实后,能长久地将土壤颗粒、气体、水组成的土粒固相骨架与水分子之间的亲水性改变为憎水性,再通过外力作用将水和气体排出形成密实板体结构,提高土的承载能力,并有效地阻止外界水分的侵入,保证工程质量。离子类固化剂代表性产品是 ISS 固化剂,黄褐色黏滞性液体,易溶于水,无毒,是一种优异的筑路新型土壤稳固材料。它是由多种强离子化合物组合而成的水溶剂,主要含有活性成分磺化油,经稀释后均匀地按比例掺入土壤中,经平整压实之后就变成永久、耐压、不沉陷、不变形的固化剂结构面层^[22],被称为 20 世纪重大发明之一。此类固化剂的优点是用量少、成本低、易于运输、施工方便、早期和后期强度都易于控制、对土的适应性强,缺点是使用寿命短、抗水性能差、受环境的影响比较大^[19]。

1.3 有机无机复合类土壤固化剂

复合类固化剂是将无机材料和有机材料进行复合配制而成,两种形态都有,一般是由无机类的主固化剂和少量激发剂组成,无机类的主固化剂可采用无机化合类土壤固化剂的主剂,激发剂可以采用无机盐类的无机激发剂,也可以采用聚丙烯酰胺、聚丙烯酸等高聚物激发剂^[19]。此类固化剂既避免了使用无机材料干缩大、易开裂、水稳性差的缺点,又充分利用了有机材料的优势,从而实现对土壤的有效改性,使其能够符合工程应用技术条件的要求^[15]。

代表性产品是 Aught-set 高性能土壤固化剂,是一种以水泥为基础,由多种无机和有机材料配制而成的水硬性胶凝材料。其最重要的技术突破是激素的发现。激素是添加于土壤固化剂中的低含量物质,能够激活黏土中的矿物成分,使黏土矿物也成为一种反应物质,发挥出其潜在的活性,从而使固化效果大幅度提高^[19]。Aught-set 土壤固化剂因其优良的性能现已广泛用于市政、环保、交通、水利等工程中,如北京中南海湖底的固化、昆玉河水系的治理^[23]和朔黄铁路路基的处理^[24]。

1.4 生物酶类土壤固化剂

此类固化剂是由有机物质发酵而成,属蛋白质多酶基产品,为液体状。通过生物酶素的催化作用,经

外力挤压密实后,能使土壤粒子之间黏合性增强,形成牢固的不渗透性结构。此类固化剂的优点是无毒,可降低土壤膨胀系数,固化土具有良好的整体性和连续性,密实度高,承载力强^[17];缺点是因生物酶类土壤固化剂具有生物降解的特点,固化土浸水后强度会降低,其使用寿命较短(约为 8 年),但对其长期的强度和稳定性仍有待实践检验^[16]。

代表性产品是 Perma-zyme(派酶),由美国帕尔玛公司生产出的高科技液态生物制剂,具有催化土壤固化和改善土壤结构的显著作用,是一种高效的生物土壤固化材料。派酶能增加土壤密度,降低土壤膨胀系数,增强土壤抗渗、防水和防冻性能,从而大大提高土壤工程性能。派酶固化土具有早期强度高、凝结时间快及较好的抗冻性能等特点^[25],尤其适用于寒区道路。

2 土壤固化剂的固化机理

土壤固化剂的固化机理可概括总结为物理力学过程、化学过程和物理化学过程 3 大过程^[16]。物理力学过程是指土壤固化剂在固化土壤时,土料经过粉碎、拌合和压实,土体的基本单元在外力的作用下彼此靠近,从而减少土体的空隙率,增大密实度,降低渗水性,这种过程是可逆的,土体的强度随着外界条件的改变会发生变化。物理力学过程是一种最简单、最基本的加固手段,但该过程是任何类型的土壤固化剂在固化土壤时都必需的,因为固化土壤的密度和土壤固化剂在土体中的均匀性,对强度的形成具有非常重要的作用。

化学过程是指土壤固化剂在固化土壤的过程中,其本身组分发生的化学反应、土体与土壤固化剂中的某些组分发生的反应等。前者包括无机类土壤固化剂材料本身的水解与水化反应、与空气中二氧化碳的碳酸化反应、有机类土壤固化剂的聚合与缩聚反应等;后者如土壤固化剂中的组分与土壤颗粒之间的火山灰反应、有机高分子与土壤颗粒表面间的络合反应等。

物理化学过程主要指土壤颗粒与土壤固化剂中各组分的吸附过程,包括物理吸附、化学吸附和物理化学吸附。物理吸附指在分子力的作用下,土体的基本单元将土壤固化剂中的某些组分吸附在其表面,使其表面自由能得以降低。化学吸附指吸附剂与被吸附物质之间发生化学反应而生成新的不溶性物质,并在吸附剂与被吸附物质之间形成化学键。物理化学吸附指土壤固化剂中的某些离子与土体基本单元表面的离子发生了离子交换吸附。在土壤固化剂与土体的物

理化学作用过程中,无机类土壤固化剂主要是物理化学吸附,如无机类土壤固化剂中的钙盐、镁盐溶解后,钙离子和镁离子与土体基本单元所吸附的钠离子发生交换反应,可以增加土壤颗粒的团聚作用;有机类土壤固化剂主要是物理吸附和化学吸附过程,如高分子材料的某些基团与土壤颗粒之间的物理吸附,高分子材料与土壤颗粒吸附的离子之间可以发生化学吸附。

以上 3 种过程相互联系相互促进,其中,化学过程和物理化学过程能使土体的力学性能、抗渗性能、耐久性能等工程性能得以改善,而物理力学过程则是保证化学过程和物理化学过程更好地发挥作用。

3 土壤固化剂的固化性能

土壤固化剂的固化性能包括力学性能、变形性能和耐久性能^[16,19],由于不同领域对固化土的性能要求不同,所以其固化性能的研究也就因工程要求不同而异。土壤固化剂的性能试验目前尚无统一的、专门的试验标准、规程,实践中一般参考《土工试验方法标准》(GB/T 50123-1999)、《水工混凝土试验规程》(DL/T 5150-2001)、《土壤固化剂应用技术导则》(RISN-TG003-2007)、《公路土工试验规程》(JTGE40-2007)、《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTGE51-2009)、《水泥土配合比设计规程》(JTGT233-2011)和土壤固化外加剂(CJ/T 486-2015)。

3.1 力学性能

固化土的力学性能包括抗压、抗拉、抗弯和抗剪等,一般通过无侧限抗压强度测定其抗压性能,通过劈裂强度试验测定其抗拉性能,通过抗压回弹模量试验测定其抗弯能力,通过直接剪切试验或者三轴压缩试验测定其抗剪性能。抗压、抗拉和抗弯试验是路用固化材料必须进行的 3 个最基本的试验。

影响固化土力学性能的主要因素有土质、土壤固化剂掺量、龄期、密度和含水率及养护条件等。其中土质、土壤固化剂掺量和密度是影响固化土力学性能的 3 大要素。土壤固化剂的掺量越高,密度越大,则固化土的抗压强度越高。即使同种土壤固化剂也会由于土质的不同,而导致其固化性能不同。因此,研究适合不同土质的土壤固化剂,或研究兼容性较强的土壤固化剂,是目前土壤固化剂的研究方向之一。

3.2 变性能

土壤固化剂的变形性能主要包括固化土的受力变形、体积变形等。受力变形指固化土构件在承受拉伸力或压缩力时产生的变形。体积变形指固化土构件

在成型后,由于环境变化而引起的变形,如温度、湿度等,一般包括干缩变形、湿胀变形和冻胀变形。固化土的变形性能研究,主要集中在受力变形和干缩变形方面,其他方面的变形研究相对较少。

3.3 耐久性能

土壤固化剂的耐久性能主要包括抗渗性能、抗冻性能、耐干湿循环能力等,在特殊的领域还包括耐腐蚀性能、耐冲刷性能等。土壤固化剂虽然具有较高的力学性能,但是由于土壤中亲水性薪土矿物含量高,所以对固化土的耐久性能具有较大的影响。试验^[26-27]证明,影响固化土力学性能的因素,对固化土的耐久性能也有显著影响。在固化土耐久性能试验中,研究较多的是固化土的抗渗性能和抗冻性能。有研究^[28]表明,固化土具有较高的抗渗性能,但抗冻性能较差,这就限制了土壤固化剂的应用领域和区域。由于土壤固化剂的耐久性能是工程设计达到技术经济指标优化的基础,因此,通过改进土壤固化剂的配方或改进固化土的施工工艺,以提高固化土的耐久性能,是今后研究的方向之一。

4 土壤固化剂在水土保持中的应用

传统的砂土固结材料主要为常规的土木工程胶凝材料如水泥、石灰、粉煤灰等以及一些具有活性或潜在活性的工业废料,这些材料可以单独使用也可多种材料复合使用。Dash 和 Hussain^[29]研究了石灰加固土体的收缩性能;Ismail 和 Abdullah^[30]将大理石粉末和粉煤灰作为砂土固结材料,而 Ismail 和 Suleyman^[31]进一步将其作为黏土固结材料;Galvão 等^[32]利用窑灰加固红壤土并探讨了其对土体压缩性和渗透性的影响。王朝辉等^[33]将吸水材料与水泥相结合形成一类新型水土保持固结材料;董明芳等^[34]发现粉煤灰、菌渣、蚕沙均能有效降低不同生育期作物对重金属的吸收,且粉煤灰的作用最明显;汪益敏^[35]选用 ISS2500 和 ROADBAND 固化剂与石灰和水泥混合制成固土材料对广东吉山土进行加固,得到加固边坡的固化剂最佳配比,为边坡固化研究提供了理论依据。此外,生产生活常用的低成本固化剂如水玻璃和乳化沥青等以及具有生态、环保、无污染等优点的生物酶类固化剂,近年来也成为理想的水土保持固结材料。Latifi 等^[36]利用水玻璃液体固结一类热带地区砂土体并取得成功,Eric 等^[37]对有机酸类砂土固结剂进行了系统研究并探讨其固结机理,Ahmed 等^[38]详细探讨了微生物固结土体的影响因素。

随着高分子材料技术的飞速发展,高分子聚合物

类固化剂受到广泛关注,特别是环保意识的增强,推动了生态环保、环境友好型高分子改性材料的研发及其水土保持应用^[39-42]。研究表明在土壤中施入聚合物后,团粒数增多且团粒的水稳性和机械强度增大,因此抑制了溅蚀和细沟侵蚀,控制了水土流失^[43]。应用聚合物进行水土保持的同时也抑制了肥料元素流失,聚乙烯醇、FES 施入土壤后可防控磷素的流失^[44-45],淀粉-丙烯酸钾-丙烯酰胺共聚物使 NH_4 流失率从 62% 减至约 10%^[46],某些吸水树脂能同时减少钾离子、铵根离子和硝酸根离子流失^[47]。聚乙烯醇和水铝矿与绿泥石混合后使用,可有效抑制土壤板结^[48]。多糖类物质能提高表土层的渗透性,防止土壤板结,抑制干旱和半干旱地区的水土流失^[49];还能提高易板结土壤的种子出苗率,有利于幼苗生长,增加农作物产量。聚乙烯醇、聚丙烯酰胺和丙烯酸-尿素共聚物多组分混合使用时,在减少水土流失量方面的效果,比施用同质量的单组分好。

我国学者在固化剂改良土壤结构、增加土壤水稳性团聚体,提高土壤抗蚀、抗冲、抗剪、抗渗、抗崩性能等方面进行了卓有成效的研究。夏海江等^[50]研究发现某些土壤固化剂能使较小的土壤颗粒胶结凝聚成颗粒较大的团粒结构,即水稳性团聚体,这种团聚体遇水不易崩解流失,从而有效提高土壤的抗蚀能力。陈涛等^[51]研究显示 HEC 固结剂对黄土干密度和渗透性能有很大改善作用,并且通过不同比例掺入量的对比试验,确定了 HEC 固化剂的最佳掺入量。张丽萍^[52]研究了 LUKANG、CONAID、SSA 和 EN-1 4 种固化剂对黄土抗剪强度、抗渗性能和抗冲刷性的影响,优选出黄土边坡防护的最佳固化剂、配合比、养护龄期和压实度。单志杰^[21]研究了 EN-1 固化剂对黄土边坡土壤水分有效性、入渗性、结构性、抗崩性、抗蚀性和抗冲刷性等的影响,阐明了 EN-1 固化剂对边坡土壤的加固机理,认为 EN-1 固化剂对土壤抗蚀性的影响程度与固化剂掺量、土壤类型和土壤的取土层次有关。丁小龙等^[53-54]同样认为 EN-1 不同掺入量的固化性能受土壤类型的影响,该固化剂可以明显减小黄棕壤和壤土的饱和导水率,大幅提高壤土和黄棕壤的黏聚力;但固化剂掺入量过多反而降低土壤的饱和导水率和抗剪强度,掺量为 1%、养护 28 d 时黄绵土和风沙土的饱和导水率最低,掺入量为 0.01%、养护 28 d 土壤的固化效果最佳;同时得出该固化剂适用于黏粒含量较大的土壤,不适用于砂粒含量较大的土壤。而从有效利用率和经济性的角度考虑,当 EN-1 固化剂掺量为 0.20%,养护 7 d 及以上,压实度为 0.90

及以上时抗崩解固土性能较好^[55]。祝亚云等^[56]研究发现 W-OH 固化剂(改性亲水性聚氨酯材料)能够显著降低崩岗崩积体土壤的分离速率,土壤分离速率随 W-OH 喷施浓度的升高而降低;由于固结表层的存在, W-OH 固化剂显著改变了表层土壤的侵蚀过程,使得土壤分离速率与坡度、水流剪切力、水流功率等参数之间的函数关系相较对照(不喷施 W-OH)发生了改变,并且表层土壤发生分离的临界水流剪切力也得到了提升。

针对我国黄土高原砒砂岩区水土流失综合治理模式与技术,学者们进行了一系列研究。西北农林科技大学开展了 EN-1 固化剂对砒砂岩风化土工程力学特性和模拟边坡抗冲性试验,优选出适用该地区固化边坡的 EN-1 掺量、养护龄期、压实度和土壤含水量^[57-58]。国家“十二五”科技支撑计划砒砂岩区抗蚀促生技术研究团队,将 W-OH 用于固结促生风化砒砂岩,根据其粒径分布、侵蚀机理等研发了基于 W-OH 的抗蚀促生新技术,并开展了相关的试验研究与示范^[59-60]。W-OH 为高分子固化材料,可与水迅速反应形成网状的弹性凝胶体,该凝胶体具有固土(沙)、保水、保肥、促生的作用,且不会对生态环境造成危害^[61];W-OH 对砒砂岩边坡抗降雨侵蚀效果非常明显,不同条件下减沙比均超过了 90%^[62],其抗径流冲刷的喷施浓度为 4%、喷施量为 1.5 L/m^2 较为适宜^[63];据野外试验观测, W-OH 抗蚀促生试验小区径流量减少 70% 以上,产沙量减少 91% 以上^[64]; W-OH 抗蚀促生技术兼具固结、保水、抗蚀、促生的综合性能,适用于水力侵蚀、重力侵蚀和风力侵蚀交互耦合的侵蚀环境,对砒砂岩区快速修复植被、防治水土流失具有明显的效果,有望解决砒砂岩区沟道高边坡侵蚀治理的问题。

在土壤固化剂的水土保持应用中,有关固化剂对植被生长影响的研究较少。刘月梅等^[65-66]在研究黄土性土壤固化对黑麦草生长的影响中发现,添加 EN-1 固化剂可以提高黑麦草的根系活力,促进其吸收土壤水分和养分,适宜掺量的固化剂也会促进黑麦草的生长,该研究中固化剂用量 0.15% 较为适宜。单志杰等^[21]对于 EN-1 固化剂加固黄土边坡机理研究中也表明,该土壤固化剂能够促进植物光合作用,有利于植物根系吸收养分。尽管上述研究表明 EN-1 固化剂能够促进植被的生长,但并不是添加量越大植株长势越好,存在最佳掺量,且最佳掺量受辅助剂添加的影响;而且大部分传统固化剂容易导致表土形成固结层或者在土体内部形成结块,会对种子的萌发及植物根系

的生长产生一定阻碍作用^[55]。张磊等^[67]研究发现 W-OH 浓度小于 6% 时,可促进单子叶植物发芽,缩短发芽时间;但会抑制双子叶植物种子发芽时间和发芽率,且抑制效果随 W-OH 浓度(超过 4%)增大而越发明显;W-OH 浓度大于 6% 时,造成表土微观结构孔隙和渗水速率减小,从而影响植物种子的发芽时间和发芽率。W-OH 可大大延长植被的生长周期,提高植被恢复效率,3% 浓度的喷洒区 2 a 后植被覆盖率可达 85%^[14]。

5 存在的问题及研究展望

综上所述,在过去几十年里土壤固化剂研究与应用取得了大量成果,为其在不同领域中的示范与推广奠定了重要基础。目前,水土保持领域常用固化剂类型为有机类土壤固化剂,特别是高分子聚合物类和离子化合物类,主要应用于水蚀、风蚀(如砂、土固结材料和荒漠化防治材料)的防治,一些改性高分子材料还可用于高寒、冻融侵蚀区的防渗抗冻。水土保持中主要侧重固化剂改良土壤结构(理化性质、持水供水特性、渗透特性、团粒结构、团聚体稳定性等),提高土壤抗蚀、抗冲、抗剪、抗崩性能及其应用后的植物生长效应。

我国应用固化剂防治水土流失尚处于起步阶段,从理论上分析,固化剂具有良好的水土保持效果,但在实际应用过程中仍存在一些科学问题有待深入研究。

1)由于不同区域地理、水文、气候、土壤等条件的差异,导致固化剂应用过程中的固化性能有很大差异。在选择固化剂时,只能是初步比较几种固化剂的性能之后进行模拟或实地验证其使用效果,并且往往单纯使用一种固化剂很难达到预期效果,需添加一些辅助剂^[68]来改善该种固化剂存在的不足,一旦主固化剂的选择不当,不仅耗费财力物力,还会浪费研究者大量的时间和精力。因此,新型固化剂的研发,应当同时考虑针对性和兼容性,加强研究固化剂添加其他农林制剂,形成植树造林、防沙治沙、农田生产、绿化护坡等不同用途的多功能固化剂系列化复合产品,从而使其具有较大的应用范围。

2)在土壤固化剂的应用中,人们往往只关注其使用效果而忽略环境影响问题。尽管市面上已出现大量环保型固化剂,但考虑实际应用效果和成本,环保型固化剂不可能被完全取代,非环保型固化剂仍占有很大比重,其大量使用可能会对土壤及地下水产生一定的影响,而且一些高分子固化剂本身就是一种有毒物

质或在某些条件下分解产生有毒物质^[69]。因此,需深入研究长期使用固化剂对土壤综合效应的影响以及从机制方面分析其保水、保土、保肥效果,以期为水土保持中正确施用固化剂及其环境影响评价提供理论依据。

3)已有研究多关注土壤固化剂的“水土保持”效果,对其“植被恢复”效果的研究相对薄弱,且主要集中于黄土性土壤/黄土高原,对其他水土流失区域的研究涉及甚少。由于水土流失是农业面源污染发生的重要途径和载体,因此,农用固化剂的研发还应加强面源污染阻控效应及其应用对作物生长发育、作物产量、农产品质量安全等影响方面的研究,为发展高效生态农业提供可靠的科学依据。以往有关固化剂减少面源污染的研究,特别是高分子类或离子类固化剂在肥料保持方面的研究,主要集中在降低因坡面径流造成的肥料流失以及减少水分下渗引起的肥料淋溶方面,对使用固化剂后土壤中的肥料含量变化研究鲜有报道,尤其是施用高分子、离子化合物的土壤经过作物利用后的肥料含量变化情况研究更少。而固化剂的应用效果也会因为肥料种类的不同发生变化,因此固化剂与施用肥料的相互作用及其动态变化有待进一步试验研究,如最常施用的氮肥。此外,固化剂作为土壤侵蚀化学调控技术措施,在农业生产应用中,应结合生物措施、耕作措施及合理的农艺,才能发挥更大的作用。

4)土壤固化剂种类繁多,其存在形态、应用领域、工程要求、施工工艺等不尽相同,甚至使用固化剂想实现的效果也不一,造成目前固化剂在使用过程中缺乏统一规范的试验规程。因此,应研究构建土壤固化剂评价体系,制定土壤固化剂的试验规程;还应进行土壤固化剂施工工艺的研究,并研制专用的施工机具和设备,提高施工效率。

水土保持中使用土壤固化剂,不但可改善生态环境,同时在一定程度上也可促进经济效益的提高,带来巨大的生态效益和社会效益,只有将经济效益、生态效益结合起来,在改善生态环境的同时,促进经济发展,才能使当地经济进入良性的可持续发展轨道。

参考文献:

- [1] 梁止水, 吴智仁, 杨才千, 等. 基于 W-OH 的砒砂岩抗蚀促生机理研究[J]. 水利学报, 2016, 47(9): 1160-1166
- [2] Kalra P D. Case study of soil stabilization with cement[J]. Indian Concrete Journal, 2002, 76: 189-191
- [3] 李琴, 孙可伟, 徐彬, 等. 土壤固化剂固化机理研究进展及应用[J]. 材料导报 A: 综述篇, 2011, 25(5): 64-67

- [4] Zalihe N, Emin G. Improvement of calcareous expansive soils in semi-arid environments[J]. *Journal of Arid Environments*, 2001, 47(4): 453–463
- [5] Katz L E, Rauch A F, Liljestrand H M, et al. Mechanisms of soil stabilization with liquid ionic stabilizer[R]. *Geometricals 2001 Transportation Research Record*, 2001, 1757: 50–57
- [6] Thecan C C. Soil binding properties of mucilage produced by a basidiomycete fungus in a model system[J]. *Mycological Research*, 2002, 106(8): 930–937
- [7] Omar Saeed Baghabar Al-Amoudi. Characterization and chemical stabilization of Al-qurayyah sabkha soil[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2002, 14(6): 478–484
- [8] Sivapullaiah P V, Lakshmi Kantha H, Madhu Kiran K. Geotechnical properties of stabilized Indian red earth[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2003, 21: 399–413
- [9] Byung S C, Jin C K. A Study on the soil improvement properties of FGC stabilizing agent[C]. Melbourne Australia: *Proceedings of GeoTech*, 2000
- [10] Hilmi Lav A. Microstructural development of stabilized fly ash as pavement base material[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2000, 12(2): 157–163
- [11] 赵鑫. 土壤固化剂在公路工程中的应用研究[D]. 西安: 长安大学, 2012
- [12] 龙明杰, 张宏伟, 曾繁森, 等. 聚合物在水土保持中的应用[J]. *水土保持通报*, 2000, 20(3): 5–10
- [13] 张丽萍, 张兴昌, 孙强. EN-1 固化剂加固黄土的工程特性及其影响因素[J]. *中国水土保持科学*, 2009, 7(4): 60–65
- [14] 梁止水, 吴智仁. 改性水溶性聚氨酯的固沙促生性能及其机理[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(22): 171–177
- [15] 宋南京, 陈新中, 赵洪义. 土壤固化剂的研究进展和应用[J]. *中国建材科技*, 2009(1): 55–61
- [16] 樊恒辉, 高建恩, 吴普特. 土壤固化剂研究现状与展望[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2006, 34(2): 141–147
- [17] 李沛, 扬武, 邓永峰, 等. 土壤固化剂发展现状和趋势[J]. *路基工程*, 2014(3): 1–8
- [18] 刘建成. 高性能聚氨酯砂土固结材料研究与应用[D]. 成都: 成都理工大学, 2016
- [19] 周海龙, 申向东. 土壤固化剂的应用研究现状与展望[J]. *材料导报 A: 综述篇*, 2014, 28(5): 134–138
- [20] 刘月梅. EN-1 固化剂对黄土性土壤与黑麦草的效应研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2013
- [21] 单志杰. EN-1 离子固化剂加固黄土边坡机理研究[D]. 杨凌: 中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心, 2010
- [22] 罗莎. 固化剂改良土在堤防道路上的应用研究[D]. 天津: 天津大学, 2007
- [23] 葛立冬. 土壤固化剂技术的应用[J]. *铁道标准设计*, 2000, 20(5): 5–8
- [24] 王云鹤, 许兆义. 朔黄重载铁路肃北至黄骅港段路基填料改良试验研究[J]. *岩土工程界*, 2002, 5(3): 20–22
- [25] 李国栋. 派酶加固土路用性能试验研究[D]. 沈阳: 东北林业大学, 2009
- [26] 张金山, 薛敏, 张学峰. 水泥土力学性能和耐久性能简介与分析[J]. *包头钢铁学院学报*, 1997, 16(3): 224–228
- [27] 宁宝亮, 陈四利, 刘斌. 冻融循环对水泥土力学性质影响的研究[J]. *低温建筑技术*, 2004 (5): 10–12
- [28] 张海燕, 韩苏建, 李元婷, 等. 土壤固化剂用于渠道防渗工程初探[J]. *水土保持通报*, 2004, 24(1): 40–42
- [29] Dash S K, Hussain M. Influence of lime on shrinkage behavior of soils[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2015, 27(12): 04015041
- [30] Ismail Z, Abdullah D. Use of marble dust and fly ash in stabilization of base material[J]. *Science and Engineering of Composite Materials*, 2013, 20(1): 47–55
- [31] Ismail Z, Suleyman G. The effects of marble dust and fly ash on clay soil[J]. *Science and Engineering of Composite Materials*, 2014, 21(1): 59–67
- [32] Galvão T C de Brito, de Mendonca A A, Simões G F. Effects of kiln ash on the compressibility of residual lateritic soils[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2003, 129(10): 948–951
- [33] 王朝辉, 郭滕滕, 孙晓龙, 等. 新型固化剂 CDK 固化淤泥微观结构及性能[J]. *长安大学学报(自然科学版)*, 2015, 35(1): 14–19
- [34] 董明芳, 范稚莲, 莫良玉, 等. 不同土壤改良剂对大豆富集重金属的影响[J]. *土壤*, 2016, 48(4): 748–753
- [35] 汪益敏. 路基边坡坡面冲刷特性与加固材料性能研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2003
- [36] Latifi N, Eisazadeh A, Marto A. Strength behavior and microstructural characteristics of tropical laterite soil treated with sodium silicate-based liquid stabilizer[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 72(1): 91–98
- [37] Eric Y, Jonghwi L, Younghun K, et al. Stabilization mechanism for sands treated with organic acids[J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2014, 18(4): 1001–1008
- [38] Ahmed A Q, Kenichi S, Carlos S. Factors affecting efficiency of microbially induced calcite precipitation[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2012, 138(8): 992–1001
- [39] 杨明坤, 王芳辉, 姚洋, 等. 一种新型环保固沙剂的制备与性能研究[J]. *材料研究学报*, 2012, 26(3): 225–230
- [40] 赵浩, 张丽丹, 韩春英, 等. 木质素磺酸钠改性脲醛树脂新型固沙抑尘剂的研究[J]. *北京化工大学学报(自然科学版)*, 2015, 42(5): 60–64
- [41] 杜峰, 方显力, 项尚林. 内交联型淀粉改性水性聚氨酯固沙剂的植被[J]. *环境科学与技术*, 2012, 35(12): 165–168, 174
- [42] 刘瑾, 施斌, 顾凯, 等. 聚氨酯型固沙剂改性土室内试验研究[J]. *防灾减灾工程学报*, 2013, 33(1): 29–34
- [43] Levy G J, Frenkel H, Shainberg I. Aggregates stability and seal formation as affected by drops impact energy and soil amendments[J]. *Soil Science*, 1992, 145(2): 113–119
- [44] 刘义新, 李忻. 聚乙烯醇对土壤钼吸附的影响[J]. *土壤通报*, 1996, 27(6): 283–284

- [45] 姬红利, 颜蓉, 李运东, 等. 施用土壤改良剂对磷素流失的影响研究[J]. 土壤, 2011, 43(2): 203–209
- [46] Janet C H, David L H. Ammonium and nitrate retention by a hydrophilic gel[J]. Hortscience, 1985, 20(4): 667–668
- [47] Yeager T H, Barret J E. Influence of an anion exchange resin on phosphorous and sulfur leaching from a soilless container medium[J]. Hortscience, 1986, 21(1): 152
- [48] Gallebaut F. The effect of polymer structure on soil physicochemical properties and soil water evaporation[J]. J. Chem. Technol. Biotechnology, 1979, 79(70): 723–729
- [49] 李元元, 王占礼, 刘俊娥, 等. 喷施中性多聚糖对黄土坡面降雨入渗的影响[J]. 土壤学报, 2017, 54(4): 843–853
- [50] 夏海江, 杜尧东, 孟维忠. 聚丙烯酰胺防治坡地土壤侵蚀的室内模拟试验. 水土保持学报, 2000, 14(3): 14–17
- [51] 陈涛, 周俊荣, 孙明星. HEC 固化剂对土壤渗透性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2004(4): 192–193
- [52] 张丽萍. 黄土边坡坡面稳定及防治技术研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2009
- [53] 丁小龙, 张兴昌, 窦晶晶, 等. EN-1 固化剂对 4 种土壤保水和导水率的影响研究[J]. 水土保持通报, 2012, 32(1): 132–134
- [54] 丁小龙, 张兴昌, 王建玉. EN-1 固化剂对 4 种土壤抗剪强度的影响研究[J]. 水土保持通报, 2015, 35(1): 159–162
- [55] 郭玉姗. EN-1 固化剂对土壤理化及生物学性质的影响[D]. 北京: 北京林业大学, 2015
- [56] 祝亚云, 曹龙熹, 吴智仁, 等. 新型 W-OH 材料对崩积体土壤分离速率的影响[J]. 土壤学报, 2017, 54(1): 73–80
- [57] 苏涛, 张兴昌. EN-1 对砒砂岩固化土坡面径流水动力学特征的影响[J]. 农业机械学报, 2011, 42(1): 68–85
- [58] 苏涛, 张兴昌, 王仁君. EN-1 对砒砂岩固化土抗剪强度特征的影响[J]. 农业机械学报, 2013, 44(9): 85–91
- [59] 姚文艺, 吴智仁, 刘慧, 等. 黄河流域砒砂岩区抗蚀促生技术试验研究[J]. 人民黄河, 2015, 37(1): 6–10
- [60] 姚文艺, 时明立, 吴智仁, 等. 砒砂岩区二元立体配置治理技术及示范效果[J]. 人民黄河, 2016, 38(6): 1–7, 10
- [61] 梁止水, 杨才千, 吴智仁. W-OH 与砒砂岩固结体力学性能研究[J]. 人民黄河, 2016, 38(6): 30–34
- [62] 王其东, 高海鹰, 梁止水, 等. 新型亲水性聚氨酯对砒砂岩边坡抗降雨侵蚀的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(3): 29–33
- [63] 李俊俊, 高海鹰, 姚文艺. W-OH 固化剂防治砒砂岩坡面侵蚀的临界量研究[J]. 人民黄河, 2016, 38(6): 22–25
- [64] 肖培青, 姚文艺, 申震洲, 等. 黄河中游砒砂岩区抗蚀促生技术研究[J]. 中国水土保持, 2016(9): 73–76
- [65] 刘月梅, 张兴昌, 王丹丹. 黄土性土壤固化对黑麦草生长和根系活力的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(10): 2604–2608
- [66] 刘月梅, 张兴昌. EN-1 固化剂、N 肥与土壤体质量对黑麦草生长及水分利用效率的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2014, 42(1): 151–158
- [67] 张磊, 冯伟风, 乔贝, 等. 砒砂岩抗蚀促生材料对植物发芽影响研究[J]. 人民黄河, 2016, 38(6): 39–41
- [68] 石学堂, 吴雪梅, 贺高红, 等. 曼尼希改性异佛尔酮二胺环氧固化剂性能研究[J]. 化学与粘合, 2008, 30(5): 8–11
- [69] 侯雪光, 王卫华. 环氧固化剂的研究现状与未来[J]. 粘接, 2008, 29(1): 49–52

Soil Stabilizer and Its Application in Soil and Water Conservation: A Review

ZHANG Guanhua, NIU Jun, SUN Jinwei, LI Hao

(1 Soil and Water Conservation Department, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China; 2 Research Center on Mountain Torrent & Geologic Disaster Prevention of Ministry of Water Resources, Wuhan 430010, China)

Abstract: With the aggravation of soil and water loss and the deterioration of ecological environment, new techniques, materials and methods are continually explored for soil and water conservation. As a chemical measure for controlling soil and water loss, soil stabilizers showed a wide application prospect. The paper stated the type characteristics, the solidifying mechanism and performances of soil stabilizers; summarized the application status of soil stabilizers in soil and water conservation, and put forward the current problems of application and future research aspects for soil stabilizers in order to provide a guidance for research and development of new soil stabilizers.

Key words: Soil stabilizer; Soil and water conservation; Sustainable development; Plant growth; Efficient ecological agriculture