水保监测与应用技术

砒砂岩区生态恢复的新途径
——一种环境友好型抗蚀促生技术

姚文艺[1,2]，刘 慧[1,2]，梁止水[3]

(1. 黄河水利科学研究院，河南 郑州 450003；2. 水利部黄土高原水土流失过程与控制重点实验室，河南 郑州 450003；3. 东南大学 土木工学院，江苏 南京 210096)

摘 要：[目的] 对砒砂岩侵蚀岩性机理、抗蚀促生机理与技术，以及应用效果进行系统分析，并提出需要进一步研究的科学问题与关键技术，为砒砂岩区生态综合治理提供科技支撑。[方法] 通过揭示砒砂岩侵蚀岩性机理，利用聚合改性方法，研发了用于砒砂岩区生态恢复的抗蚀促生新材料，进行了示范应用，并对需要进一步研究的科学问题与关键技术进行讨论。[结果] 砒砂岩部分化学成分性质活跃、岩石结构不稳定及部分岩石成分遇水膨胀导致孔隙关闭为易蚀的机理所在；通过包裹—聚合改性，研发的抗蚀促生材料可以在砒砂岩表面通过物理化学作用，形成了具有包裹层的单体改性颗粒，起到了疏水保水及防胀作用，并具有促进植物生长的功能；抗蚀促生材料有着良好的力学性能和耐紫外线降解、耐风蚀抗冻融、耐水解等性能，且对土壤、水质不会形成污染。[结论] 根据野外试验观测，应用抗蚀促生技术可以使全坡面径流试验区的产流量产沙量分别减少 70%和 90%以上，示范小流域的植被覆盖度由 25%提高到 75%以上，实现了抗蚀促生功能一体化，为砒砂岩区水土流失治理和生态恢复提供了新途径。

关键词：抗蚀促生；生态恢复；水土流失；黄河粗泥沙；砒砂岩

文献标识码：B **文章编号**：1000-288X(2018)04-0118-07 **中图分类号**：S156.2，S143.6

文献参数：姚文艺，刘慧，梁止水. 砒砂岩区生态恢复的新途径[J]. 水土保持通报，2018，38(4)：118-124. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2018.04.020. Yao Wenyi，Liu Hui，Liang Zhishui. A new approach to ecological restoration in Pisha sandstone area[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2018，38(4)：118-124.

A New Approach to Ecological Restoration in Pisha Sandstone Area
—An Environment-friendly Technique of Anti-erosion and Vegetation-promoting

YAO Wenyi[1,2]，LIU Hui[1,2]，LIANG Zhishui[3]

(1. *Yellow River Institute of Hydraulic Research*，*Zhengzhou*，*He'nan* 450003，*China*；2. *Key Laboratory of Sediment Yield Process and Control on the Loess Plateau of MWR*，*Zhengzhou*，*He'nan* 450003，*China*；3. *School of Civil Engineering*，*Southeast University*，*Nanjing*，*Jiangsu* 210096，*China*)

Abstract：[Objective] The lithologic mechanism of Pisha sandstone erosion，and the mechanism and technique of anti-erosion and vegetation-promoting，and the corresponding application effects were analyzed systematically. The scientific problems and key technique needed further research were proposed to provide support for the comprehensive control of Pisha sandstone area. [Methods] On the basis of revealing the lithologic mechanism of Pisha sandstone erosion，a novel material of anti-erosion and vegetation-promoting，which is suitable for the application in ecological restoration in Pisha sandstone，was developed by the method of polymerization modification. The novel material was applied in a demonstration. Moreover，the problems and key techniques that needed to be studied further were proposed and discussed. [Results] Some of the chemical compositions were detected active and released when Pisha sandstone met water，which was the main reason for Pisha sandstone being eroded easily. A novel material of anti-erosion and vegetation-promoting was

收稿日期：2018-06-20 **修回日期**：2018-06-28

资助项目：国家重点研发计划项目"鄂尔多斯高原砒砂岩区生态综合治理技术"(2017YFC0504500)；河南省创新型科技人才队伍建设工程(162101510004)；"十二五"国家科技支撑计划项目"黄河中游砒砂岩区抗蚀促生技术集成与示范"(2013BAC05B02)

第一作者：姚文艺(1957—)，男(汉族)，河南省周口市人，博士，教授级高级工程师，主要从事土壤侵蚀与水土保持方面的研究。Email：yaowenyi@hky.yrcc.gov.cn。

developed by the method of coating-polymerization modification. The novel material could form a consolidation layer on the surface with monomer-modified Pisha sandstone particles through physical-chemical action. The layer had the functions of hydrophobic water-holding, anti-swelling and growth promotion. The novel material behaved well in the performances of mechanical strength and resistances to UV degradation, freezing and thawing, and hydrolysis, and it would not cause pollution to the soil and water wherein. [Conclusion] Runoff and sediment yield on the slope could be reduced 70% and 90% respectively in the control area where was treated by the technique of anti-erosion and vegetation-promoting, as compared with those of the contrast area. And the vegetation coverage in a small demonstrated watershed increased from 25% to 75%, through which, the integration of anti-erodibility and growth promotion was achieved. The technique might provide a new approach for soil and water conservation and ecological restoration in Pisha sandstone area.

Keywords: anti-erosion and vegetation-promoting; ecological restoration; soil erosion; coarse sediment of the Yellow River; Pisha sandstone

位于黄河流域鄂尔多斯高原的砒砂岩区土壤侵蚀剧烈,生态退化严重,成为黄河粗泥沙来源的核心区,被称之为"地球生态癌症"。所谓砒砂岩,是指古生代二叠纪、中生代三叠纪、侏罗纪和白垩纪所形成的由砂岩、砂页岩、泥质砂岩构成的岩石互层,属于大陆相碎屑沉积岩类[1]。由于砒砂岩成岩程度低,其结构强度弱,颗粒间胶结程度差,具有无水坚如磐石、遇水易分解破碎的特性。砒砂岩区土壤侵蚀治理不仅对于保障黄河长治久安具有重要意义,也是实现中国生态文明建设重大战略目标的迫切需求。长期以来,砒砂岩区被列入国家生态环境建设和水土流失治理的重点区[2],砒砂岩侵蚀治理技术研发也成为水土保持、生态等领域一直关注的中心课题。在 1985 年水利部原部长钱正英提出的"以开发沙棘资源作为加速黄土高原治理的一个突破口"科学建议下,通过黄土高原水土保持世行贷款第一、二期项目实施[3]及晋陕蒙砒砂岩区沙棘生态工程等国家相关的投资项目[4-5],开展了砒砂岩区种植沙棘的技术与措施研究,取得了改善区域生态环境、减少入黄泥沙的效益[6]。在利用沙棘治理砒砂岩的实践基础上,毕慈芬等[7-9]于 1992 年提出了植物"柔性坝"治理砒砂岩沟道侵蚀的技术,并开展相关的试验研究。之后不断探索了利用沙棘等生物措施治理砒砂岩的途径,同时,还开展了利用砒砂岩风化物或沟道沉积物修建淤地坝的探索工作[1],取得了不少研究成果。2011 年,西北农林科技大学引入美国雷诺教授研制的 EN-1 固化剂,开展了利用 EN-1 固化剂固化砒砂岩边坡抗冲稳定性机理试验研究[10]。以往这些技术和措施均在一定程度上促进了砒砂岩区土壤侵蚀治理与生态恢复等实践的发展。然而,由于砒砂岩区多动力复合侵蚀,侵蚀类型多且其过程复杂,复合侵蚀与生态退化互馈发生,侵蚀—地貌—植被耦合及其时空分异性突出[5,11],以往的治理措施相对单一,功能独立,治理局部化、零散化、间断化的问题突出,缺乏全区域尺度复合侵蚀阻控、退化生态治理为一体的系统综合解决方案与技术体系,还不能满足砒砂岩区生态综合治理的需求。另外,由于砒砂岩是我国鄂尔多斯高原特殊的地质体,目前,仍未见国外开展砒砂岩侵蚀治理技术的相关研究,仅有关于单一的砂岩或单一的泥质砂岩侵蚀治理方面的成果见诸报道[12-14]。因此,迫切需要解决我国砒砂岩区多类治理措施与复合性侵蚀有机匹配、阻控侵蚀与生态恢复多功能相协调的关键技术。为此,近年来黄河水利科学研究院联合多家高校、科研单位及有关企业,对砒砂岩区抗蚀促生综合治理技术进行了有益的探索,取得了明显效益。本文基于作者近年研究分析,对砒砂岩侵蚀岩性机理,抗蚀促生机理与技术,以及应用效果进行系统介绍,并提出需要进一步研究的科学问题与关键技术,以期为砒砂岩区生态综合治理提供科技支撑。

1　研究区概况与试验方法

1.1　研究区概况

以黄河一级支流皇甫川的二老虎沟小流域为试验研究区,在二老虎沟上游选取面积约 0.1 km^2 的小流域作为试验区。二老虎沟所在区域多年平均降水量约 350 mm,属典型的盖土砒砂岩区,地形破碎、坡陡沟深,沟壑密度达 7 km/km^2,植被覆盖度很低,平均不足 25%[5]。该流域基岩大面积外露,以水蚀为主并复合风蚀、冻融侵蚀、重力侵蚀,水土流失极为严重,据 1998—2000 年观测表明,裸露区侵蚀模数近 2.00×10^4 $t/(km^2\cdot a)$。

1.2　砒砂岩取样方法

为揭示砒砂岩侵蚀岩性机理,提供研发抗蚀促生

技术的理论依据，需要在试验区采集砒砂岩试样。试样的采集遵循整体与局部、普遍与典型相结合的原则，重点考虑抗蚀促生治理措施实施地块分布对取样的技术要求而设计相应的取样方案。参考土壤学取样方法，采用传统人工挖掘和机械挖掘相结合的水平分层取样方法。在取样时，若取样深度为 2 m 以内，采用传统的人工挖掘方式；对于深度大于 2 m 的砒砂岩区，首先用机械将砒砂岩立面从上到下，从表向里挖掘 2 m 左右，然后通过人工挖掘的方式，在不同纵深处根据砒砂岩沉积特性进行分层取样。按不同颜色，共采集 7 类试样。

1.3 物理化学关键参数测验方法

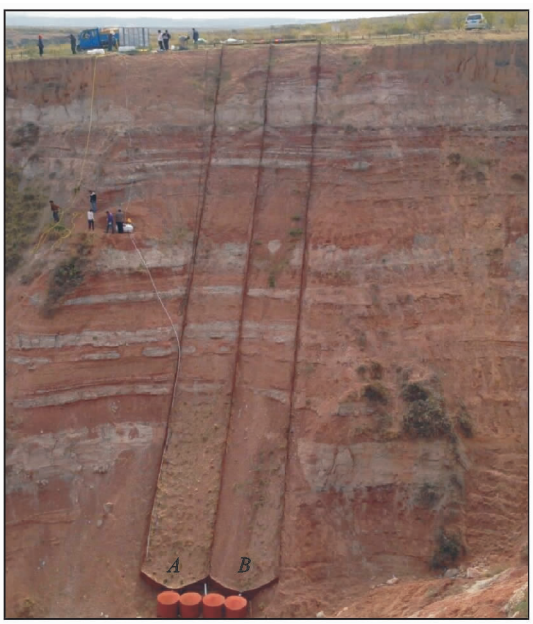
依据《土工试验方法标准(GB/T50123-1999)》，《土工试验规程(SL237-1999)》《FHZDZTR0026 规定》《水泥化学分析方法(GB176-2008-T)》等规定，采用灌沙法测定砒砂岩原样密度；采用电热烘箱烘干法测定砒砂岩原样含水率；利用高温炉熔融法测定烧失量；二氧化硅、三氧化二铝、三氧化二铁等含量均利用高温炉熔融法进行测定；二氧化钛、氧化钙、氧化镁等含量均利用滴定法进行测定；氧化钾、氧化钠等含量，以硫酸、氢氟酸、盐酸、碳酸铵等作为试剂，用低温加热分解法测定。矿物成分分析采用 X-射线法，仪器型号为 D/max-2500PC，工作电压 40 kV，电流 100 mA，射线种类为 CuKa，将所取试样研磨至 200 目，依据《转靶多晶体 X 射线衍射方法通则》(JY/T009-1996)进行检测，利用图谱分析砒砂岩矿物含量。另外，采用 ICPFT-IR 分析砒砂岩的官能团构成。

1.4 试验小区布设

在试验小流域沟头的阳坡区位布设 2 个自坡顶到沟底的自然全坡面试验小区(图 1)，其中一个作为措施试验区(A 区)，另一个作为裸露对比区(B 区)。2 个小区的宽度均为 3.5 m，全长 43.5 m(包括长 2 m，基本为水平的坡顶)，小区坡面上段的最大坡度达 70°以上，每个小区水平投影面积约 106 m^2，小区四周用 30 cm 高的 PVC 板作为围埂。在天然条件下，2 个全坡面试验区均为裸露砒砂岩。在 2 个小区下缘分别设置 2 个连通的由钢板制成的集流桶，用于收集径流泥沙，利用置换法测泥沙量。另外，在小区附近还设置自计雨量计 1 台。

2 砒砂岩侵蚀岩性机理

岩石成分检测的结果表明，砒砂岩的主要矿物成分包括石英、长石、方解石、蒙脱石、高岭石等。与不少类的岩石相比，砒砂岩矿物组成的最大特点是石英含量相对较低而蒙脱石含量高，其中石英的含量多在 40%以下，蒙脱石的含量在 10%～30%，后者是一般岩石的数 10 倍。石英是一种很稳定的矿物质，自然条件下几乎不发生化学溶解反应，只发生机械磨蚀作用，抵抗风化的能力较强，因此从岩性角度分析，石英不是引起砒砂岩抗蚀性弱的主要原因。蒙脱石遇水极易膨胀，使孔隙式胶结的砒砂岩岩体中的孔隙关闭，气体压力增大，从而导致岩体微结构破坏，因此其含量相对较高的蒙脱石是砒砂岩抗蚀性弱的主要成分。砒砂岩中蒙脱石的含量在黏土矿物组分中含量最高，因此，蒙脱石对砒砂岩的影响大于其他黏土矿物组分。蒙脱石是在风化或沉积环境中产生的，这种矿物在风化带中是相当稳定的，它不会在干燥的环境中造成岩体破坏，但遇水其体积可膨胀约 150%，对岩体产生巨大压力。一旦遇水蒙脱石就会发生膨胀，使岩石微结构遭受破坏。另外，在蒸发过程中受温度的影响，溶解的矿物成分会通过再结晶产生化学沉淀，并重复溶解和结晶，也会使岩石结构遭受破坏。因此，为研发抗蚀促生技术，需要从改善砒砂岩溃散的角度出发，研究如何有效抑制蒙脱石等矿物的膨胀，使砒砂岩岩性结构趋于稳定。



注：A 措施区；B 裸露对照区。

图 1 试验小区布置图

砒砂岩的主要化学成分是 SiO_2(表 1)，其中红色砒砂岩的氧化铁 Fe_2O_3 含量较白色的高，SiO_2，MgO，总 Fe 的含量也较白色的高，而白色砒砂岩的 CaO 含量较红色的高。因此，水与红色砒砂岩具有更高的亲和性，水一旦与红色砒砂岩接触，在 0.2 s 内就可以完全渗透到试样体内。

表 1　研究区砒砂岩化学成分组成

砒砂岩成分	各编号样品的成分含量/%						
	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#
SiO_2	70.03	68.25	69.97	68.42	77.75	76.91	74.89
Fe_2O_3	3.31	3.02	3.38	3.65	2.46	2.83	2.39
Al_2O_3	13.10	12.82	12.07	12.06	9.82	10.10	10.25
CaO	2.39	3.24	4.65	2.71	2.05	2.05	2.05
MgO	2.32	0.98	2.23	1.94	1.34	1.40	1.65
SO_3	0.67	0.45	0.70	0.07	0.13	0.10	0.13
Na_2O	0.44	2.05	2.06	0.51	0.47	1.37	0.35
K_2O	1.31	1.58	1.38	1.47	1.20	1.36	1.27
TiO_2	0.31	0.30	0.32	0.31	0.26	0.31	0.27
SiO_2/R_2O_3	7.81	7.86	8.35	8.07	11.58	10.96	10.79

注:砒砂岩样品按色度由深至浅编号,其中 1#—4# 为红色系,5#—6# 为黄色系,7# 为白色。

砒砂岩中 Na_2O,K_2O 和 CaO 总的平均含量为 8.6%,虽然它们的含量远低于其他组分的含量,但这些成分化学性质活泼,在适当的条件下,会在局部富集或被水流带走,从而使岩石的孔隙逐渐增大,化学风化作用加强,最终导致岩体结构破坏。岩石的化学风化程度受多种因素控制,如地形地貌、岩石岩性、气候特征(主要是降雨)等,而岩石中性质活泼的化学成分是影响岩石风化的重要因素,其风化顺序为:CaO>Na_2O>K_2O。根据测试,紫色和粉红色砒砂岩中的 Fe_2O_3 含量高于白色和灰色砒砂岩,表明紫色和粉红色的砒砂岩以铁质胶结为主,而白色和灰色的砒砂岩以二氧化硅胶结为主。氧化铝主要出现在黏土矿物中,氧化铝含量低说明黏土矿物含量低,岩石风化程度高。在水土泥质化作用后,内层砒砂岩黏土矿物含量较高,因此,随着深度的增加,砒砂岩中 Al_2O_3 呈增加趋势,而 CaO 呈下降趋势。此外,Al_2O_3 和 Fe_2O_3 的含量随深度增加呈先增加后减少趋势(除了粉红色砒砂岩,随深度增加而增加)。此过程可以解释为铁铝成分从表层风化砒砂岩部分进入中间层砒砂岩,沉积在岩石裂缝和孔隙处而引起的。砒砂岩风化表层的黏土矿物具有很强的阳离子交换能力,由地下水变化引起的阳离子吸附交换是引起岩石性质变化的第一步。因此,测定砒砂岩岩体中的阳离子交换量是研发抗蚀促生材料的重要基础数据。砒砂岩的最大 pH 值为 10.26,最小值为 8.91,平均值为 9.49,明显呈碱性。雨水的 pH 值通常小于或等于 7,因此砒砂岩中由雨水形成的裂隙水和孔隙水,与岩石中较活泼的化学物质非常容易发生反应。随着水的迁移,反应需要不断地达到新的平衡,进而使得该反应一直循环进行,导致岩石的裂缝和孔隙逐渐扩大,岩石的风化程度逐渐加强。这个过程是缓慢的,但对砒砂岩结构的破坏是巨大的,从而最终使得砒砂岩的力学性能降低,因此高碱性也是砒砂岩遇水极易侵蚀的主要动因。由于砒砂岩具有上述岩性特征,具有较高的可蚀性,根据试验观测[15],红棕色、紫红色砒砂岩与黄绵土相比,在同样降雨条件下,单位径流产沙量的大小顺序为:紫红色砒砂岩>红棕色砒砂岩>黄绵土。基于上述对砒砂岩矿物组成、化学成分及酸碱度等在侵蚀中的驱动机理分析,可进一步假设:岩石是由许多个颗粒通过粒间的物质胶结在一起的,这些组成岩石的微观颗粒为圆形颗粒,据此可由图 2 描述砒砂岩遇水破坏的过程。砒砂岩颗粒间以胶结连接方式为主,在自然干燥状态下,砒砂岩结构比较紧密,其强度相对较大,即人们所说的坚硬如石。在砒砂岩与水的初期接触时,其胶结物黏土矿物所具有的强亲水性使其发生反应而失去胶结作用,致使砒砂岩结构产生破坏。此时,砒砂岩颗粒在自身重力的作用下,其间接触比较紧密,干燥状态下硬度相对较大。如果砒砂岩进一步与水接触,一方面会继续侵蚀砒砂岩的胶结物,另一方面水会润滑颗粒间的接触面使摩擦力减小,易于发生滑动,砒砂岩结构最终发生破坏,形成溃散侵蚀。

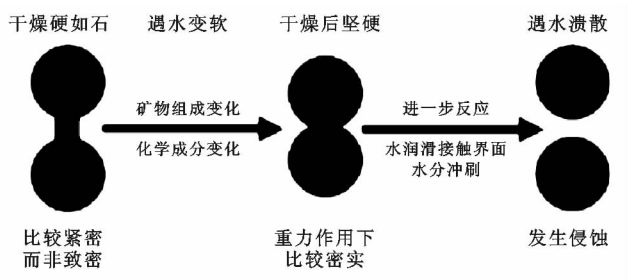


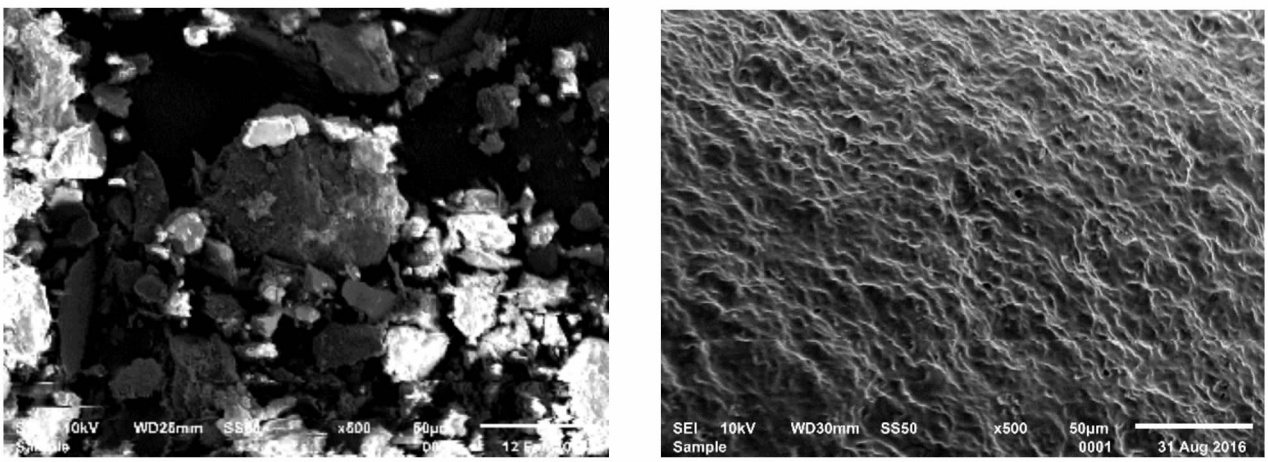
图 2　砒砂岩侵蚀的岩性作用过程

3 抗蚀促生技术与应用

3.1 抗蚀促生技术

抗蚀促生技术是指通过在砒砂岩表面实施一种环境友好型的复合材料，固结砒砂岩表面岩层，达到抗风蚀、水蚀，促进植物生长的综合治理效果。本研究基于对砒砂岩侵蚀岩性机理的揭示，分别以聚丙烯脂类、聚氨酯类材料为基质，添加固结、保水、增肥、抗拉防衰等多种功能性的改性材料，通过特定温度、时间、配比条件的控制剂优化，聚合得到不同类型的抗蚀促生材料。

在抗蚀促生材料研发中充分利用包裹与聚合技术，使其可以与砒砂岩表层岩石颗粒形成包裹层，有效防止因“结皮”而脱落的现象发生。抗蚀促生材料分子由软段和硬段构成，表现出热力学不相容性和微相分离特性，可以在空间上形成相域和微相域，且分子中的异氰酸根和极性基团与水反应后，形成氢键、氨酯键及脲键等基团，这些基团的内聚能较高，能形成高界面张力的黏结层，具有良好的力学性能。根据浸润性和抗蚀性试验，在砒砂岩表面喷洒抗蚀促生材料后，其可以有效的调控水分进入速率，说明材料溶液在渗透过程中与砒砂岩颗粒形成了包裹层，可将松散的表层颗粒连接成一个大型网状结构层（图 3），从而既可以避免砒砂岩表面的水力侵蚀，维持砒砂岩表面的完整性和稳定性，同时又可以满足植物生长的水分需求。



原状结构　　抗蚀促生网状结构

图 3　砒砂岩原状结构与抗蚀促生改性结构电镜扫描图

根据红外光谱分析，抗蚀促生材料中含有部分异氰酸酯、聚醚和酰胺分子，而主要成分为酯，且这些分子的聚合体形成分子交叉，是形成网状结构、包裹砒砂岩颗粒的主要机制（图 4）。

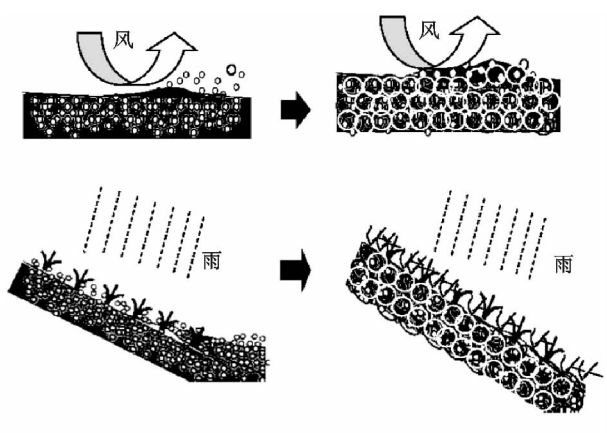


图 4　抗蚀促生层构建及效果

这种结构易于吸收水分、肥料等植物生长的必要成分，且吸收的水分在干燥的条件下可以缓慢释放，因而在一定时期内，抗蚀促生材料能为植物的生长提供必要的水分，促进植物的生长。抗蚀促生材料具有保水控渗、包裹透气、固结抗蚀、增肥促生多功能为一体的突出特性。根据 PONY 等第三方权威检测机构的测验，该材料对植被不产生药害，对生态环境不造成二次污染。根据不同用途，利用调控不同功能性成分的添加量，可以分别制成用于防止砒砂岩陡坡（如坡度＞60°）崩塌的固结抗蚀材料和用于缓坡的阻控侵蚀、促进植被恢复的抗蚀促生材料。

3.2 抗蚀促生技术应用效果

根据准格尔旗水土保持监督检查站对抗蚀促生示范试验效果的观测，抗蚀促生技术对于防治砒砂岩侵蚀、恢复植被具有明显的效果。从植被恢复效果看，在 2014 年抗蚀促生措施实施的当年，措施小区的覆盖度既可达到 95％左右（图 5），而且到目前，其长势依然良好。另外，通过对二老虎沟小流域大面积治理，植被覆盖度由 2013 年的 25％左右到 2016 年增加到了 75％左右。



图 5　试验小区植被修复效果与裸露小区对比

从抗蚀效果看,根据 2014 年 7 月 1 日至 2016 年 8 月 17 日 6 场降雨的产流产沙观测(表 2),最大日降雨量为 2016 年 8 月 17 日的 121.8 mm,最小的为 2014 年 7 月 1 日的 16.4 mm,与无措施的裸露小区相比,在不同场次降雨条件下,喷洒抗蚀促生材料的小区不仅植被得到良好修复,而且产流产沙量明显减少,径流量约减少 70%～94%,产沙量减少 95%以上,其中在 2016 年 8 月 17 日次降雨量达到 121.8 mm 的条件下,其减沙量仍可达到 97%。由此可见,实施抗蚀促生技术,能够起到非常显著的减水减沙效果。根据观测(图 5),在裸露对比小区,因径流冲刷,侵蚀沟发育非常明显,泻溜等重力侵蚀现象时有发生,而抗蚀促生试验小区的地表未见有明显的侵蚀现象。

表 2　抗蚀促生试验区减水减沙效益观测结果

日期	降雨量/mm	小区类型	径流		泥沙	
			径流量/m^3	减少比例/%	泥沙量/kg	减少比例/%
20140701	16.4	自然区	0.47	72.3	216.1	96.0
		措施区	0.13		8.6	
20140802	35.6	自然区	1.27	70.0	1 895.1	99.4
		措施区	0.38		11.9	
20140924	42.4	自然区	0.24	91.7	9.6	99.6
		措施区	0.02		0.038	
20150718	52.8	自然区	0.10	80.0	8.1	95.1
		措施区	0.02		0.4	
20160812	87.4	自然区	2.59	93.8	1 046	97.5
		措施区	0.16		26.0	
20160817	121.8	自然区	2.89	92.0	1 233.0	97.0
		措施区	0.23		37.0	

4　结论与讨论

4.1　结 论

(1) 砒砂岩遇水溃散的主要影响因素包括矿物组成、化学成分、孔隙结构等,其决定了砒砂岩的空隙性、透水性和粘结力。砒砂岩遇水溃散的驱动机制主要在于含量较高的蒙脱石遇水体积膨胀导致微结构破坏;所含性质活泼的 CaO 等化学物质遇水极易反应而被水流带走致使岩体结构破坏;砒砂岩表层结构松散透水性强,增加水岩反应界面而驱动化学侵蚀过程发生。因此,抗蚀的原理就是有效抑制蒙脱石膨胀、改善孔隙结构、减缓水化学反应等,进而提高砒砂岩颗粒间的黏结性和整体性。

(2) 研发的抗蚀促生材料的促生原理是控渗透气保肥,促进种子发育和植物生长。通过包裹和聚合技术的融合,抗蚀促生材料可以在砒砂岩表层形成具有良好力学性能的网状多孔包裹层,不仅可阻控侵蚀,同时具备缓慢吸水、释水、透气和保肥性能,从而达到促生的作用。

(3) 通过全坡面径流小区、小流域等不同范围的示范应用表明,利用抗蚀促生技术,可以取得明显的阻控侵蚀、恢复植被的效果,实现了抗蚀促生功能的一体化,为砒砂岩区生态综合治理探索了一条新途径。

4.2　讨 论

基于砒砂岩侵蚀岩性机理研发的抗蚀促生材料,不失为一项值得探索的新技术新方法。由于砒砂岩侵蚀机理极为复杂,水蚀风蚀重力侵蚀复合交替,加之该地区属于我国由半干旱向干旱过渡,由黄土向沙地过渡的地带,气候条件及立地条件不利于植被恢复,生态极度脆弱,因此,对其治理的难度很大,目前提出的抗蚀促生技术还属于第一阶段性的探索,仍有

必要对抗蚀促生措施及治理技术进行完善，深入研究，并开展大区域推广示范研究。对以下问题需要进一步研究：①抗蚀促生材料对复合侵蚀的适用性，拓展其阻控多类侵蚀的功能。②砒砂岩区治理的生态承载力约束条件，砒砂岩区生态承载力维持与提升机制。③抗蚀促生材料的促生作用临界及其适用于大范围的施工技术等。另外，还需要深化抗蚀促生技术在砒砂岩区生态综合治理中的作用与应用研究，形成生物—植生固结—工程—砒砂岩改性等综合措施体系及治理模式，实现砒砂岩全区域—侵蚀全类型—生态全要素的综合治理，解决生态系统持续退化的侵蚀环境问题。

[参 考 文 献]

[1] 张金慧，徐立青，耿绥和. 砒砂岩筑坝施工方法初步试验研究[J]. 中国水土保持，2002(10)：31-32.

[2] 刘向军，王玉梅. 浅析砒砂岩水土流失重点治理区的沙棘生态建设[J]. 内蒙古水利，2002(1)：56-57.

[4] 李旭，李海宽. 创建世行贷款项目管理新模式：内蒙古自治区黄土高原水土保持世行项目建设概述[J]. 中国水利，2005(12)：4-46.

[5] 王愿昌，吴永红，李敏，等. 砒砂岩地区水土流失及其治理途径研究[M]. 河南 郑州：黄河水利出版社，2007：1-2，12-126.

[6] 殷丽强，梁月. 砒砂岩区人工沙棘林枯落物的持水性能[J]. 国际沙棘研究与开发，2007(3)：10-13.

[7] 祁永新，刘则荣，王兴中. 黄土高原水土保持二期世行贷款项目蓄水保土效益分析[J]. 水土保持研究，2008，15(5)：204-207.

[8] 毕慈芬，李桂芬. 沙棘在治理砒砂岩地区水土流失中的特殊功能 [J]. 水利水电快报，1998，19(18)：1-3.

[9] 毕慈芬. 砒砂岩地区沟道水土流失的分析[R]// 毕慈芬，李桂芬，于倬德，等. 砒砂岩地区植物“柔性坝”试验研究阶段总报告(1995—1998). 河南 郑州：水利部黄委会黄河上中游管理局，1999.

[10] 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(11)：490-495.

[11] 毕慈芬，王富贵. 砒砂岩地区土壤侵蚀机理研究[J]. 泥沙研究，2008(1)：70-73.

[12] MOstafa G T，Mohamed K K. Weathering Behavior Investigations and Treatment of Kom Ombo temple sandstone，Egypt：Based on their sedimentological and petrogaphical information[J]. Journal of African Earth Sciences，2016，113：194-204.

[13] Mio K，Gary J，Mike J P，et al. Impacts of land use change on patterns of sediment flux in Weraamaia Catchment，New Zealand[J]. Catena，2005，64(1)：27-60.

[14] Hajer B，Mennoubi S F，Mohamed R B，et al. Slope and rainfall effects on the volume of sediment yield by gully erosion in the Souar lithologic formation (Tunisia) Snane[J]. Catena，2009，78(2)：170-177.

[15] 王伦江，张兴昌，韩凤鹏，等. 晋陕蒙交界地区砒砂岩土陡坡水力侵蚀试验[J]. 人民黄河，2015，37(11)：92-96.

(上接第 117 页)

[3] 贾顺儒. 农田防护林效应的分析[J]. 甘肃农业，2005(5)：28.

[4] 朱廷曜，关德新，等. 农田防护林生态工程学[M]. 北京：中国林业出版社，2000.

[5] 李锋瑞，张华，赵丽娅，等. 科尔沁沙地人工杨树林生态防风效应研究[J]. 水土保持学报，2003，17(2)：62-66.

[6] 吕仁猛，丁国栋，郝玉光，等. 旷野风速对林网内风速分布及防风效能的影响[J]. 水土保持通报，2014，34(2)：105-110.

[7] 付亚星，王乐，彭帅，等. 河北坝上农田防护林防风效能及类型配置研究：以河北省康保县为例[J]. 水土保持研究，2014，21(3)：279-283.

[8] 曹孙新. 农田防护林学[M]. 北京：中国林业出版，1983：103-104.

[9] 关文彬，李春平，李世锋，等. 林带疏透度数字化测度方法的改进及其应用研究[J]. 应用生态学报，2002，13(6)：651-657.

[10] 万猛，潘存德，王梅，等. 农田防护林林带疏透度数字化测定方法及其应用[J]. 干旱区地理，2005，28(1)：120-123.

[11] 张劲松，孟平，宋兆民，等. 我国平原农区复合农林业小气候效应研究概述[J]. 中国农业气象，2004，25(3)：52-55，62.

[12] 张付民，郭洪敬，戴万德. 农田林网防风效应的观测研究[J]. 山东气象，1993(3)：23-27.

[13] 董慧龙，杨文斌，王林和，等. 单一行带式乔木固沙林内风速流场和防风效果风洞试验[J]. 干旱区资源与环境，2009，23(7)：110-116.

[14] 高海楼. 河北坝上农田防护林防风效能及其空间分布研究[D]. 河北 石家庄：河北师范大学，2012.

[15] 杜鹤强，韩致文，颜长珍，等. 西北防护林防风效应研究[J]. 水土保持通报，2010，30(1)：117-120.