

W-OH材料对砒砂岩坡面土壤剥蚀率和微结构的影响

梁止水^{1,2}, 刘豪伟¹, 张立欣³, 郭策¹, 赵艳兵¹, 吴智仁⁴, 高海鹰¹

(1.东南大学土木工程学院,南京 210096;2.长江科学院水土保持研究所,武汉 430010;

3.内蒙古库布其沙漠技术研究院,内蒙古 鄂尔多斯 017400;4.江苏大学环境与安全工程学院,江苏 镇江 212013)

摘要: 砒砂岩区是我国水土流失问题最严重的区域之一。为研究砒砂岩坡面土壤剥蚀率的影响因素及W-OH材料对其的改良效果,以内蒙古自治区准格尔旗地区砒砂岩为研究对象,采用模拟冲刷试验方法研究了冲刷流量(2,3,4 L/min)、坡度(5°,7.5°,10°)以及W-OH喷洒浓度(1%,2%,3%)对砒砂岩坡面土壤剥蚀率和微结构的影响。结果表明:(1)砒砂岩坡面剥蚀率沿坡面方向逐渐减小,且随着冲刷流量和坡度的增大而增大;(2)在流量、坡度固定条件下,随着W-OH溶液浓度的提高,砒砂岩坡面土壤剥蚀率改善效果越明显,坡面的抗蚀性能提升越高,当浓度超过2%时,对坡面固结效果较为明显;(3)SEM试验结果说明W-OH溶液可以对砒砂岩颗粒进行有效地包裹,从而防止水分侵蚀,提高坡面抗蚀性,这与溶液浓度和喷洒量关系密切,也与坡度和冲刷流量有一定相关性。研究结果将对W-OH用于砒砂岩坡面治理提供一定的理论支撑。

关键词: 砒砂岩; 剥蚀率; 水溶性聚氨酯; 模拟冲刷; 土壤侵蚀

中图分类号:S157.2

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2020)05-0355-06

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2020.05.049

Effect of W-OH Material on the Denudation Rate and Microstructure of Pisha Sandstone Slope

LIANG Zhishui^{1,2}, LIU Haowei¹, ZHANG Lixin³, GUO Ce¹,
ZHAO Yanbing¹, WU Zhiren⁴, GAO Haiying¹

(1.School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096; 2.Soil and Water Conservation Department, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010; 3.Inner Mongolia Kubuqi Desert Technology Research Institute, Ordos, Inner Mongolia Autonomous Region 017400; 4.School of the Environment and Safety Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013)

Abstract: Pisha sandstone area is one of the most serious soil erosion areas in China. In order to study the influencing factors of the soil denudation rate and the improving effect of W-OH material on the Pisha sandstone slope, the Pisha sandstone from Zhungeer banner of Inner Mongolia Autonomous Region was used and the effect of the erosion discharge (2, 3 and 4 L / min), slope angle (5°, 7.5° and 10°) and the W-OH spraying concentration (1%, 2% and 3%) on the soil denudation rate and microstructure of Pisha sandstone slope surface were studied by the method of simulated scouring experiment. The results show that: (1) The denudation rate of Pisha sandstone slope decreases gradually along the slope direction (from the top to the bottom), and it increases with the increase of flow and slope angle; (2) When the slope angle and flow are fixed, the denudation rate is improved significantly with the increase of the spraying concentration of W-OH solution. When the concentration is more than 2%, the consolidation effect of slope is more obvious; (3) SEM results show that W-OH solution can effectively wrap the Pisha sandstone particles to protect them from erosion, and the soil anti-scourability is increased. Additionally, it is closely related to the concentration of solution and the amount of spray, and also to the slope angle and the flow. The research results will provide some theoretical support for the application of W-OH material in Pisha sandstone area.

Keywords: Pisha sandstone; denudation rate; hydraulic polyurethane; simulated scouring; soil erosion

收稿日期:2020-02-13

资助项目:江苏省自然科学基金青年项目(BK20190348);国家重点研发计划项目(2017YFC0504505)

第一作者:梁止水(1988-),男,博士,助理研究员,主要从事水土保持与生态修复研究。E-mail: zs_liang@seu.edu.cn

通信作者:高海鹰(1966-),女,博士,教授,主要从事土壤侵蚀和水处理研究。E-mail: gaohaiying@seu.edu.cn

砒砂岩是我国黄河中上游流域一种由砂岩、砂页岩和泥质砂岩所构成的特殊松散岩石互层,由于其颗粒间胶结程度差、结构强度低等特点,极易风化,遇水溃散成沙,土壤侵蚀剧烈,侵蚀模数可达到 30 000~40 000 t/(a·km²),因此,该区是全国侵蚀最为剧烈的地区^[1-2]。砒砂岩区的严重水土流失和生态退化造成了当地土地资源的损失及土地生产力的降低,而且还严重影响了我国的生态文明建设和黄河的长治久安^[3]。

长期以来,砒砂岩的治理主要以工程措施和生物措施为主,也有两者相结合的综合治理措施,取得了一定的治理成效^[4-6]。然而砒砂岩坡面风化严重,颗粒松散,抗蚀能力差,且养分贫瘠,因此植被在坡面上成活率较低,治理效果有限,而工程措施以沟道“拦沙”为主,不能有效解决坡面侵蚀问题,严重影响措施的综合治理效益^[4]。因此,以土壤固结材料为主的快速固土抗蚀,并结合工程和生物措施的综合治理技术,可以很好解决坡面抗侵蚀和植被恢复问题,成为了砒砂岩区坡面治理的新途径。亲水性聚氨酯(W-OH)材料是一种以水为固化剂的生态环保型高分子材料,可以与任意比例的水混合,当喷洒在沙土表面时,可以在短时间渗透并包裹沙土颗粒形成一定厚度的多孔性柔性固结层,不仅可以有效抵抗坡面侵蚀,而且可以促进植被恢复^[7]。与传统的化学改良剂(如PAM、EN-1)等不同,W-OH材料具有可控性、环境友好、稳定性等优点,已经被广泛应用于荒漠化治理和水土保持领域,目前W-OH的相关研究集中在固结体的抗蚀促生机理及效果^[8-9]、喷洒用量^[10-11]等方面,而对W-OH材料用于改良砒砂岩坡面的剥蚀率研究较少,需要开展系统研究。

土壤剥蚀率是表征土壤侵蚀最重要的指标之一,是单位时间(s)、单位面积(m²)上土体在侵蚀动力的作用下被剥蚀掉的土壤颗粒质量(kg)。唐科明等^[12]利用坡面模拟冲刷试验研究了研究坡度、流量及根系对土壤分离速率的定量影响及土壤分离过程的水动力机理。丁文峰等^[13]通过径流冲刷试验和能量守恒

定律,建立了给定土壤条件下坡面土壤侵蚀率估算模型。赵宇等^[14]对黄土高原的安塞黄绵土进行不同条件下的细沟侵蚀过程模拟试验,提出了一种新的细沟含沙水流剥蚀率的估算方法。然而砒砂岩坡面的土壤剥蚀率影响规律和改进措施研究很少。

本研究针对砒砂岩坡面的剥蚀规律及W-OH材料固结改良砒砂岩开展研究,采用模拟冲刷试验,以内蒙古自治区准格尔旗地区砒砂岩为研究对象,采用模拟冲刷试验方法研究了冲刷流量(2,3,4 L/min)、坡度(5°,7.5°,10°)以及W-OH喷洒浓度(1%,2%,3%)对砒砂岩坡面各个断面的土壤剥蚀率和微结构的影响规律,为W-OH材料用于砒砂岩的治理提供一定的理论基础。

1 材料与方 法

1.1 供试砒砂岩

本试验采用的砒砂岩来自于内蒙古自治区鄂尔多斯准格尔旗的二老虎沟(皇甫川支沟),地理位置为110°32′—111°6′E,39°26′—39°56′N,海拔1 005 m,温带大陆性气候,春季干旱,冬季寒冷,无霜期为148天,多年平均气温为7.3℃,平均有效积温3 492.2℃,年总降水量在142.5~636.5 mm,多年平均降水量389 mm,降水主要集中在7—9月,占全年的70%左右,年日照时间3 101.0 h,年总蒸发量在1 695.2~2 436.2 mm,多年平均蒸发量为2 040.9 mm,全年主导风向为西北风,年平均风速为2.1 m/s,年平均大风日数18.57天,该地区植被稀少,以灌木形态为主。

采样点为典型的覆土砒砂岩坡面,取用表层土壤,多为砒砂岩碎块,间有黄土、黄沙。取用后,将样品混合均匀、风干,过5 cm筛除去植物根系和大块碎石。

1.2 供试试剂

试验采用土壤改良剂为W-OH复合材料,该材料由江苏杰成凯新材料有限公司提供,主要成分为改性亲水聚氨酯,遇水可快速反应,生成具有良好力学性能的弹性凝胶体,该凝胶体具有高度的环境安全性,主要参数见表1。

表 1 W-OH 复合材料基本物化参数

外观	密度/ (g·cm ⁻³)	黏度/ (20℃,mPa.s)	固含量/ %	凝固时间 范围/s	饱水量/ 倍
浅黄色透明液体	1.18	650~700	85	30~1800	≥40

1.3 试验装置与步骤

室内模拟坡面冲刷试验于2018年11月至2019年5月在东南大学玄武岩纤维生产及应用技术国家地方联合工程研究中心试验大厅进行。试验装置为自制模拟坡面冲刷系统,由贮水池、进水泵、溢流箱体、冲刷水槽、排水口、取样桶、水槽支架等部分组成,其中进水泵为0~6 L/min量程的纽凯BT6003—

KZ25型高精度蠕动泵(江苏省科学器材公司购买)。冲刷水槽和溢流箱体尺寸,参照中国科学院南京土壤研究所等机构使用的标准水槽设计^[12,15]。

试验土槽钢质槽,槽身尺寸为4.21 m(长)×0.3 m(宽)×0.3 m(高),槽体前端连接有无缝衔接的溢流箱,溢流箱尺寸为0.5 m(长)×0.3 m(宽)×0.5 m(深),设计坡度分别为5°,7.5°和10°。

为更准确地探究坡面剥蚀率,本试验分别从土槽的 1,2,3,4 m 断面处取样,获得每个断面的剥蚀率,再经过曲线拟合,应用简单的积分中值定理,测算后获得坡面平均剥蚀率。试验装置示意图见图 1。

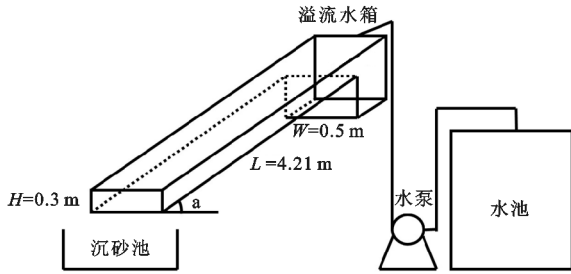


图 1 室内模拟边坡冲刷系统示意

为了保证试验时流量准确达到设计要求,每次冲刷试验展开前,对蠕动泵出流量进行率定,待流量稳定准确后开始进水。为了保证坡面尽可能模拟自然边坡,坡面先铺上 5 cm 厚的黄沙作为透水层,再覆上 5 cm 厚的样品,分 3 次添加并压实,以“S”形 5 点取样,测定其密度为 1.65~1.95 g/cm³ 后进行试验。此外,为减少静水溢流箱与冲刷槽接合处因边壁作用导致的土壤下陷,坡头和坡尾的覆土厚度应相对较薄,在静水溢流箱下面铺上透水纱布,防止出水口土壤表面由于水流的冲刷而过度侵蚀,造成试验误差增大。同时,坡底不应设置成“坎状”,防止出现“跌坎”,保证该所获取产沙数据等主要指标的准确性^[16]。

试验中主要围绕抗蚀性指标展开,铺装样品土完成后,无压喷淋清水(试验控制流量在 100~300 mL/min 左右)直至坡面轻微产流,过 10 min 再喷洒 1 次,如此反复 3~5 次。从断面 1,2,3,4 m 处各取 3 个样,烘干 12 h 后测定其容重。在烘干样品的同时,须使冲刷系统在稳定、避光的环境内,以确保坡面土壤状态不受外界因素扰动。每次喷洒不同浓度 W-OH 溶液(1%,2%,3%)时,统一剂量为 1.5 L/m²,采用无压喷雾器均匀喷洒,保证其喷洒的均匀性及渗透性,并对砒砂岩和喷洒不同浓度 W-OH 材料的坡面上取样,采用扫描电子显微镜(南京理工大学格莱特纳米科技研究所,型号为 Quanta FEG 250)测定其微结构变化。

试验开始后,开启定量蠕动泵进水,经过槽体前端的静水溢流箱缓冲后,水流沿槽宽方向均匀、平稳地以薄层水流的形式,漫流进入坡面试验土槽。放水冲刷时,自坡面产流起计时,冲刷 30 min 后结束,以环刀分别从断面 1,2,3,4 m 处各取 3 个样用作剥蚀率试验的样品,并以烘干法测得样品干重。

2 结果与分析

2.1 砒砂岩坡面的断面剥蚀率

由图 2 可知,在所有流量、坡度情况下,断面剥蚀

率均随着坡长方向延伸而逐渐降低,同等侵蚀条件下,坡头侵蚀情况比坡脚严重,同时流量和坡度越大,坡面整体的剥蚀率也越大。经计算,在冲刷流量为 2,3,4 L/min、坡面坡度为 5°,7.5°,10°的条件下,坡面整体平均剥蚀率分别为 6.93×10^{-4} , 13.60×10^{-4} , 21.28×10^{-4} , 15.70×10^{-4} , 27.47×10^{-4} , 38.53×10^{-4} , 23.05×10^{-4} , 49.42×10^{-4} , 78.91×10^{-4} kg/(s·m²)。

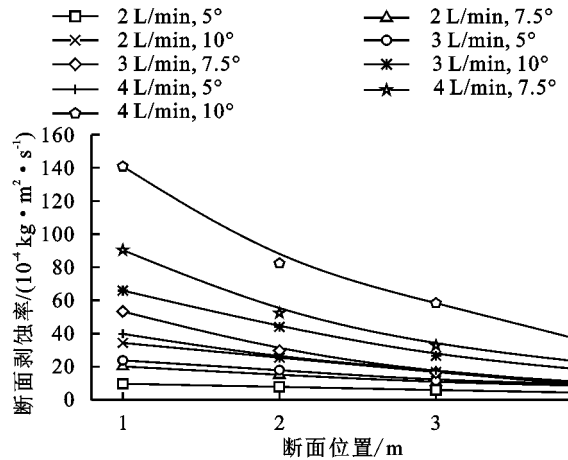


图 2 典型流量坡度条件下的断面剥蚀率

从以上数据来看,断面剥蚀率不是随着坡长方向线性降低的简单函数,而是与坡长具有一定相关关系^[17-19],根据上述曲线,可初步判断断面剥蚀率与断面位置的关系可能是一个“凹函数”,且随着流量、坡度的增大,“凹”的程度越大。因而,对每组的 4 个数据进行 $D_r = Ae^{-Bx}$ 函数拟合。式中: D_r 为砒砂岩坡面平均剥蚀率(kg/(m²·s)); x 为断面与坡顶的距离(m); A 和 B 为回归系数。9 种条件下的断面剥蚀率规律见表 2。

根据产流产沙试验过程中的现象,可以定性验证剥蚀率是沿沟长延伸而逐渐降低的。一方面,上游水流清澈,含沙量低,其剥蚀能力挟沙能力强,沟道下切也更严重,随着水流延伸,含沙量增大,其沟蚀程度自然变弱^[19];另一方面,上游细砂被水流冲刷、携带沉积到下游,下游测量到的剥蚀率也会较低。这与雷廷武^[20]的研究结果类似:只要脱离原本母质区域的泥沙就应算作被“剥蚀”的部分,采用 REE 法测定剥蚀率就可以良好地回避下游沉积的影响。但考虑到 REE 法对试验条件要求过高,本研究将固定空间内、单位时间单位过流面积流失的土壤质量定义为“剥蚀率”,沿用采样实测到的数据作为计算剥蚀率的基础数据。

从能量角度解释,水流从装置入口到出口的过程中,径流的总能量不断消耗在克服坡底阻力做功、坡面起伏的消能,还有水流搬运、携带泥沙做功,以及撞击、分离土壤颗粒(即剥蚀过程)做功,随着水流的延伸,含沙量会越来越高,水流迁移损耗的能量就越大,用于剥蚀的能量会逐渐减少。此外,结果也表明,如果坡体足

够长,在一定坡度、流量条件下,断面剥蚀率一定会出现几乎为零的情况,此时的坡长为“有效坡长”。

表 2 断面剥蚀率与断面位置回归分析结果

流量/ (L·min ⁻¹)	坡度 (正切值)/(°)	回归系数		函数 D_r / (kg·m ⁻² ·s ⁻¹)	R^2	P
		A	B			
2	5	9.95	0.12	$D_r = 9.95 \times 10^{-4} e^{-0.12x}$	0.990	<0.01
	7.5	19.16	0.13	$D_r = 19.16 \times 10^{-4} e^{-0.13x}$	0.991	<0.01
	10	38.60	0.20	$D_r = 38.60 \times 10^{-4} e^{-0.20x}$	0.968	<0.05
3	5	22.74	0.13	$D_r = 22.74 \times 10^{-4} e^{-0.13x}$	0.983	<0.01
	7.5	49.39	0.24	$D_r = 49.39 \times 10^{-4} e^{-0.24x}$	0.996	<0.05
	10	63.97	0.19	$D_r = 63.97 \times 10^{-4} e^{-0.19x}$	0.998	<0.01
4	5	41.48	0.21	$D_r = 41.48 \times 10^{-4} e^{-0.21x}$	0.985	<0.01
	7.5	82.51	0.20	$D_r = 82.51 \times 10^{-4} e^{-0.20x}$	0.995	<0.01
	10	134.90	0.20	$D_r = 134.90 \times 10^{-4} e^{-0.20x}$	0.993	<0.01

2.2 冲刷流量、坡度对砒砂岩坡面剥蚀率的影响

由表 2 可知,坡面的剥蚀率在各断面上是不均匀、非线性的,在坡脚选取一个或者几个固定位置进行取样,测定其断面剥蚀率或其平均值,用于代表坡面剥蚀率,其准确性都是比较差的。故本试验中采用表 2 中断面剥蚀率拟合函数的积分均值作为坡面剥蚀率。在相同坡度时,砒砂岩坡面剥蚀率随进水流量增加而增加,并且流量越大增速越大。同时有研究^[15-19]表明,坡面剥蚀率与流量、坡度呈幂函数关系,故拟定 $D_r = kq^a S^b$ 。

运用回归分析的方法,对整个试验涉及坡度、流量范围的所有剥蚀率数据进行分析,得拟合公式: $D_r = 3.563 \times 10^5 q^{1.798} s^{1.601}$ 。式中: D_r 为砒砂岩坡面平均剥蚀率(kg/(m²·s)); q 为单宽流量(m³/(m·s)); S 为坡面坡度,取正切值(°)。

以上拟合公式中, $n=9$, $R^2=0.984$, $P<0.01$, 表明研究坡度范围内,坡度、单宽流量与坡面剥蚀率是高度相关的,使用单宽流量和坡度拟合砒砂岩坡面平均剥蚀率是高度显著的。

因此,相同进水流量下,随着坡度的增大,土壤剥蚀率也是显著增加的。坡度越大,剥蚀率的增速也越大,二者也应当是幂函数关系。不过值得注意的是,王瑄等^[21]、张光辉等^[22]研究表明,存在 21°~25°左右的“临界坡度”,本次试验数据中未出现明显的坡度增大而剥蚀率增速下降的趋势。这主要是因为土壤侵蚀本质上是土壤颗粒与下垫面相互作用的过程。侵蚀过程中,外营力作用在土壤颗粒上,当水流与颗粒表面剪切力超过了土壤颗粒自身的黏结力(抗蚀力),就发生了剥蚀。具体原因:当坡度增大,一方面颗粒的重力沿坡面的分量增大了,颗粒自身的稳定性降低;另一方面,坡度增大时径流滞留时间短、流速大、冲刷能量大(流量增大也会产生类似效果),作用在颗粒表面的剪切力也变大了,因此坡度增大后,坡面的剥蚀情况会加剧。

2.3 W-OH 浓度对砒砂岩平均剥蚀率的影响

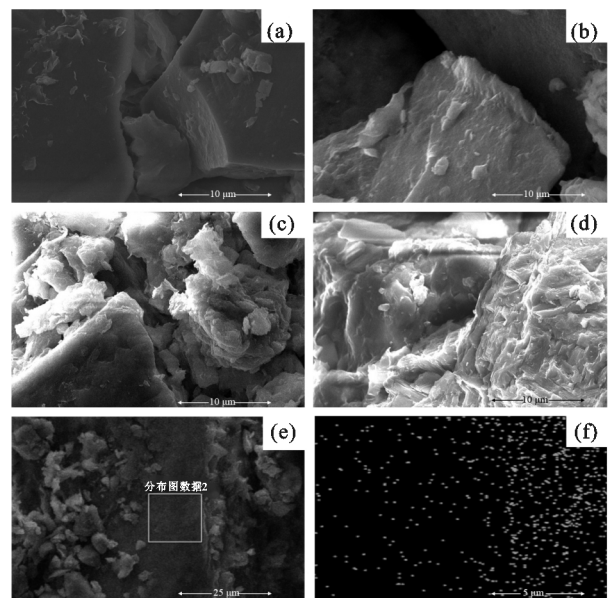
由图 3 可知,在冲刷流量为 2,3,4 L/min 及坡面坡度为 5°,7.5°,10°的条件下,坡面喷涂 1%~3% W-OH 材料后,坡面剥蚀率均会较原坡面降低。随着 W-OH 浓度的增加,坡面产沙少,剥蚀率减小,特别是当浓度 >2% 时,坡面剥蚀率降低显著,且降低过程无明显规律,说明 W-OH 对坡面起到了很好的固结作用,使得坡面的抗蚀性显著提高。当坡面坡度为 5°和冲刷流量为 2 L/min 条件下,相较于原坡面剥蚀率 6.91×10^{-4} kg/(m²·s),1%,2%,3% 浓度 W-OH 溶液覆盖下的坡面平均剥蚀率分别为 2.64×10^{-4} , 0.79×10^{-4} , 0.56×10^{-4} kg/(m²·s),相较于同条件下不添加 W-OH 溶液的坡面剥蚀率分别减少 61.79%,88.56%,91.90%。其中 1% 浓度 W-OH 溶液喷洒条件下,坡面形成的固结层不均匀、很薄透。在 1.5 L/m² 的统一喷洒剂量下,随着冲刷时间的延长形成的径流中含有部分 W-OH 材料,这说明 1% 浓度固结效果较差,未能对砒砂岩颗粒进行有效包裹。

同一坡度下,随着流量的增大,加入 W-OH 材料所降低的侵蚀量也越大,但抗蚀性能提升的比例会有所降低。在坡度在 5°条件下,添加 2% 浓度 W-OH 溶液的砒砂岩坡面,在 2,3,4 L/min 流量下,相比于同条件下不添加 W-OH 溶液的砒砂岩坡面,坡面剥蚀率分别减少了 88.56%,84.70%,84.29%,降低比较明显。但是在 30 min 的持续冲刷下,W-OH 溶液形成固结层会被一定程度冲散、破碎,这与固结层厚度和强度关系密切。同时也说明,不同 W-OH 施加浓度下的固结层可以对坡面起到很好的固结作用,但是在实际应用中应考虑采用更高浓度或者喷洒量来提升整体的抗冲刷效果^[8]。

2.4 W-OH 溶液对砒砂岩微结构的影响

对砒砂岩及不同浓度 W-OH-砒砂岩固结体

进行了 SEM 扫描(图 4)。扫描结果显示,砒砂岩颗粒呈层状分布,分布较为分散,颗粒棱角分明,表面光滑,颗粒间黏结性较差(图 4a)。当表面喷洒不同浓度 W-OH 溶液后,溶液渗透到松散的砒砂岩颗粒中并在表面慢慢固化包裹,形成一层柔性固结层,砒砂岩遇到溶液后会发生一定的微膨胀,发生部分脱落现象,同时溶液对颗粒进行包裹后,棱角开始消失,表面变得粗糙,空隙逐渐被固结材料填充,形成颗粒间交联黏结。W-OH 浓度从 1% 到 3% 过程中,固结、包裹和黏结效果逐渐提高(图 4b、c 和 d),同时当喷洒量及浓度增加时,可以将砒砂岩颗粒有效黏结在一起,形成一个具有一定强度的整体,从而提高坡面的抗侵蚀和抗冲性。结合能量色散 X 射线光谱仪(EDS, Energy Dispersive Spectrometer)对 W-OH-砒砂岩的固结体中的 C 元素进行了分析(图 4e 和 f),其中图 4f 中 C 元素在固结体表面均有分布,覆盖了近 1/3 的区域,说明表面均有 W-OH 材料包裹,同时与 SEM 特征进行对照,从而进一步说明了 W-OH 材料已经在砒砂岩颗粒表面进行了包裹。



注:(a)原状砒砂岩颗粒;(b)1%浓度的 W-OH 溶液固结;(c)2%浓度的 W-OH 溶液固结;(d)3%浓度的 W-OH 溶液固结;(e)4 000 倍的 2%浓度的 W-OH 溶液固结体;(f)对应 C 元素分布密度图像(白色为 C 元素)。

图 4 不同条件下的砒砂岩颗粒的微形态及 C 元素分布

3 结论

(1)在砒砂岩坡面的侵蚀过程中,不同断面位置的剥蚀情况不一样,越接近坡脚,其剥蚀率数值越小,且坡度、流量越大,剥蚀率随坡长下降得越快。

(2)以多断面剥蚀率拟合、计算出坡面平均剥蚀率发现,砒砂岩坡面平均剥蚀率与坡度、流量可以表示为以下关系: $Dr = 3.563 \times 10^5 q^{1.798} s^{1.601}$ 。式中: Dr 为砒砂岩坡面平均剥蚀率($\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$); q 为单宽流量($\text{m}^3/(\text{m} \cdot \text{s})$); S 为坡面坡度,取正切值($^\circ$)。在不同流量、坡度等外界条件下,施加 W-OH 材料可以较为显著的改善坡面剥蚀情况。在固定流量、坡度条件下,W-OH 溶液施加浓度越高,改善效果越明显,坡面的抗蚀性能提升越高。当浓度超过 2% 时,W-OH 溶液固结砒砂岩的抗冲效果提升显著。

(3)不同坡度、流量条件下,同一浓度 W-OH 溶液施加后,溶液在固化过程中,可渗透并对砒砂岩颗粒进行包裹,从而有效提高坡面抗冲刷能力,但是 W-OH 溶液的浓度及喷洒量对其效果影响显著,且与坡度、冲刷流量有一定而相关性。其坡面抗蚀效果及现场治理效果需开展进一步的研究。

参考文献:

[1] 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]. 郑州:黄河水利出版社,2007.
 [2] Zhen Q, Zheng J Y, He H H, et al. Effects of Pisha sandstone content on solute transport in a sandy soil[J]. Chemosphere, 2016,144:2214-2220.

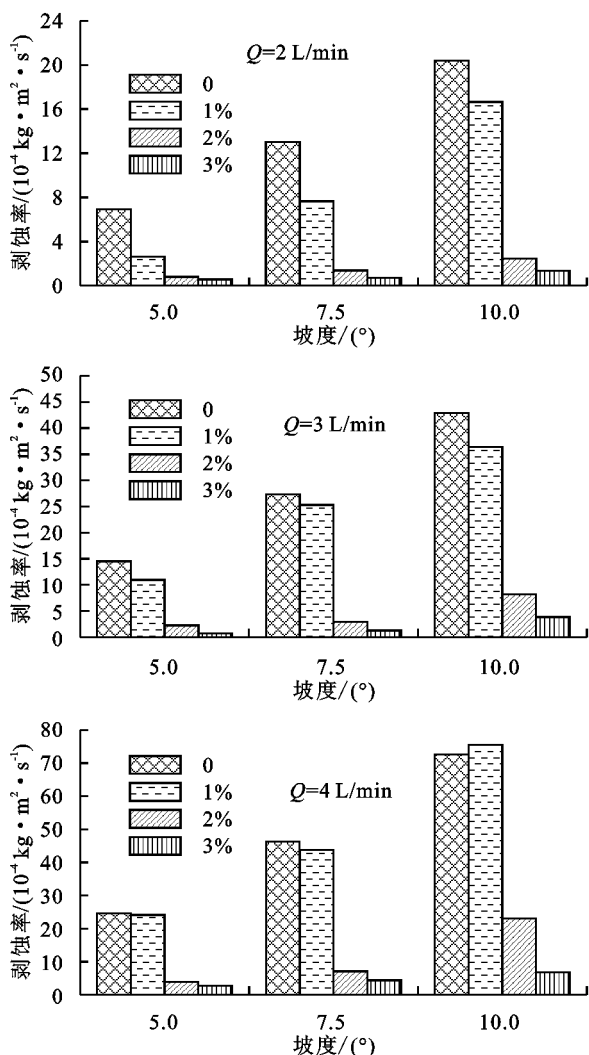


图 3 添加不同 W-OH 浓度的不同砒砂岩坡面的剥蚀率

- [3] 梁止水. 砒砂岩抗蚀促生技术研发[D].南京:东南大学,2018.
- [4] 肖培青,姚文艺,刘慧.砒砂岩地区水土流失研究进展与治理途径[J].人民黄河,2014,36(10):92-941.
- [5] Xu X Z, Zhang H W, Zhang O Y. Development of check-dam systems in gullies on the Loess Plateau, China[J]. Environmental Science & Policy, 2004,7(2):79-86.
- [6] Yang F S, Cao M M, Li H E, et al. Simulation of sediment retention effects of the single seabuckthorn flexible dam in the Pisha Sandstone area[J]. Ecological Engineering, 2013, 52(3):228-237.
- [7] Gao W M, Wu Z R, Wu Z S. Study of mechanism of the W-OH sand fixation[J]. Journal of Environmental Protection, 2012,3(9):1025-1033.
- [8] Liang Z S, Wu Z R, Mohammad N, et al. A new ecological control method for Pisha sandstone based on hydrophilic polyurethane[J]. Journal of Arid Land, 2017,9(5):790-796.
- [9] 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.
- [10] 张冠华,孙金伟,牛俊,等.W-OH固化剂对玉米生长及土壤养分淋失的影响[J].水土保持学报,2017,31(5):250-255,262.
- [11] Liang Z S, Liu H W, Zhao Y B, et al. Effects of rainfall intensity, slope angle, and vegetation coverage on the erosion characteristics of Pisha sandstone slopes under simulated rainfall conditions [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020,27(15):17458-17467.
- [12] 唐科明,张光辉,任宗萍,等.坡面薄层水流分离土壤的动力学机理[J].水土保持学报,2011,25(4):46-49.
- [13] 丁文峰,李占斌,崔灵周.黄土坡面径流冲刷侵蚀试验研究[J].水土保持学报,2001,15(2):99-101.
- [14] 赵宇,陈晓燕,米宏星,等.估算细沟含沙水流剥蚀率的改进方法[J].农业工程学报,2014,30(15):174-181.
- [15] 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.
- [16] 罗婷,王文龙,王贞,等.非硬化土路土壤剥蚀率与水动力学参数分析[J].人民黄河,2011,33(4):96-98.
- [17] 朱秀迪,丁文峰,张冠华,等.新型水溶性聚氨酯对紫色土坡面产流产沙的影响[J].长江科学院院报,2018,35(1):47-51.
- [18] 田风霞,王占礼,牛振华,等.黄土坡面土壤侵蚀过程试验研究[J].干旱地区农业研究,2005,23(6):145-150.
- [19] Nearing M A, Simanton J R, Norton L D, et al. Soil erosion by surface water flow on a stony, semiarid hill-slope [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1999,24(8):677-686.
- [20] 雷廷武.流域水土流失模拟方法[M].北京:科学出版社,2015.
- [21] 王瑄,李占斌,李雯,等.土壤剥蚀率与水流功率关系室内模拟实验[J].农业工程学报,2006,22(2):85-187.
- [22] 张光辉,刘宝元,何小武.黄土区原状土壤分离过程的水动力学机理研究[J].水土保持学报,2005,19(4):48-52.

(上接第354页)

- [7] 潘梦绮,黄权中,冯榕,等.基于热示踪的饱和层状介质水热参数反演[J].水利学报,2017,48(11):1363-1372.
- [8] Rai V, Pramanik P, Das T K, et al. Modelling soil hydrothermal regimes in pigeon pea under conservation agriculture using Hydrus-2D [J]. Soil and Tillage Research, 2019,190:92-108.
- [9] Qiu R J, Du T S, Kang S Z. Root length density distribution and associated soil water dynamics for tomato plants under furrow irrigation in a solar greenhouse[J]. Journal of Arid Land, 2017,9(5):637-650.
- [10] Ren J, Wang X P, Shen Z Z, et al. Heat tracer test in a riparian zone: Laboratory experiments and numerical modeling[J]. Journal of Hydrology, 2018,563:560-575.
- [11] 王建东,龚时宏,马晓鹏,等.地下滴灌条件下水热运移数学模型与验证[J].水利学报,2010,41(3):368-373.
- [12] Bu L D, Liu J L, Zhu L, et al. The effects of mulching on maize growth, yield and water use in a semi-arid region [J]. Agricultural Water Management, 2013, 123(10):71-78.
- [13] Zhao W J, Yu P, Ma X Y, et al. Numerical simulation of soil evaporation with sand mulching and inclusion [J]. Water, 2017,9(4):1-10.
- [14] 陈光杰,冯浩,吴淑芳,等.垄膜沟秸秆种植方式对夏玉米水热效应的影响[J].水土保持学报,2017,31(3):162-168.
- [15] 王冬林,冯浩,李毅,砾石覆盖对土壤水热过程及早作小麦玉米产量的影响[J].农业工程学报,2017,33(7):132-139.
- [16] Zhao W J, Cui Z, Zhang J Y, et al. Temporal stability and variability of soil-water content in a gravel-mulched field in northwestern China[J]. Journal of Hydrology, 2017,552:249-257.
- [17] 赵文举,郁文,范严伟,等.滴灌条件下压砂对土壤水分入渗的影响[J].兰州理工大学学报,2017,43(1):56-60.
- [18] 齐智娟,冯浩,张体彬,等.干旱区大田玉米膜下滴灌土壤水热效应研究[J].水土保持学报,2017,31(1):172-178.
- [19] 刘利华,费良军,朱红艳.水温对滴灌土壤水分入渗特性的影响[J].排灌机械工程学报,2019,37(2):166-173.
- [20] Joel R C, Lincoln Z, Michael D D, et al. Soil moisture distribution under drip irrigation and seepage for potato production[J]. Agricultural Water Management, 2016, 169:183-192.