

文章编号: 1008 - 2786 - (2013) 6 - 701 - 09

纤维丝固土护坡植生法在边坡防护中的 水土保持效应

刘世雄¹ 曹兴松^{1*} 程 睿² 章梦涛² 陈振峰²

(1. 重庆建工集团四川遂资高速公路有限公司 重庆 629000; 2. 深圳市如茵生态环境建设有限公司 广东 深圳 518057)

摘 要: 基于四个纤维丝植生层厚度、三个典型坡度下的模拟降雨试验,探讨了特大暴雨和径流冲刷条件下纤维丝固土护坡固土植生法在模拟边坡上的水土保持效应及纤维丝的减流减沙机理,并确定了各个坡度下适宜的喷丝植生层厚度。结果表明:纤维丝固土护坡固土植生法在早期无植被覆盖下经受强降雨时能够有效的防治植生层流失,纤维丝是通过有效减小雨滴溅蚀和消减径流动能,及内部加筋补强作用共同提高植生层抗冲性;坡度 30°条件下能抗当地最大降雨强度冲刷时的纤维丝植生层厚度应保持在 3 cm 以上;坡度 45°条件下,纤维丝植生层的适宜厚度应保持在 6 cm 左右;对于 60°边坡,其适宜的喷丝植生层厚度应保持在 6 cm 以上。

关键词: 纤维丝固土护坡;植生层;加筋补强;水土保持;边坡防护

中图分类号: S157 ,U417.9

文献标志码: A

红层软岩在我国广泛分布,包括西南、华南、华中及西北的广大地区,尤以西南地区分布最多^[1-2]。研究表明,红层软岩具有强度低、孔隙度大、胶结程度差、易崩解、易风化、遇水易软化等特点^[3]。由于我国红层多分布于山地,地形起伏大,边坡挖方工程量,高速公路建设开挖常造成大量的裸露边坡,更加快了红层软岩的风化速度,在遭受暴雨和洪水冲刷时易造成崩塌或滑坡,水土流失严重^[4-5]。目前,生态防护在西南红层高速公路、铁路边坡防护中已广泛应用^[6],但多采用一般岩质边坡的传统防护工艺,工艺简单,缺乏针对性,难以适应红层软岩高边坡生态恢复的需要,造成植被恢复效果差,甚至护坡失败。

针对西南红层软岩高边坡生态防护工艺及防护机制的研究较少^[7],已有的研究也多是介绍传统生

态防护技术的基本原理、施工工艺及应用效果^[8-9],基本上限制在定性和经验的发展阶段,如针对红层软岩的高次团粒混合纤维(CS)法^[10]、改良喷播植草技术^[11]等,多是介绍施工工艺在工程应用方面的情况,缺乏深入的实验数据和定量分析研究,特别是关于防护技术的水土保持效应的定量分析、适宜的植生层厚度等问题的研究鲜见报道。由深圳如茵生态环境建设有限公司针对红层软岩高边坡生态防护开发的纤维丝固土护坡固土植生工艺,原理主要是在高压空气作用下将连续的高强度纤维丝与喷播基材进行同步喷混,在软岩坡面形成一种均匀缠绕纤维丝的近似各向同性力学性质的植生层结构。

边坡植草绿化初期,降雨侵蚀是造成边坡绿化破坏的主要原因^[12],提高早期植生层抗侵蚀性能是边坡绿化成功的关键。本研究通过对纤维丝固土护

收稿日期(Received date): 2013 - 03 - 28; 改回日期(Accepted): 2013 - 06 - 19。

基金项目(Foundation item): 四川省交通科技项目(编号: 2011D - 03) 资助。 [Sichuan province traffic science and technology project (number: 2011D - 03) support.]

作者简介(Biography): 刘世雄(1981 -), 男, 硕士, 工程师, 研究方向: 城市地下工程、岩土工程, 现任重庆建工集团四川遂资高速公路有限公司主管。 [Liu Shixiong (1981 -), male, master, engineer, research direction: city underground engineering, geotechnical engineering, Chongqing Construction Engineering Group Sichuan Suizi Expressway Company Limited Director.]

* 通信作者(Corresponding author): 曹兴松(1972 -), 男, 博士, 教授级高级工程师, 研究方向: 道桥与岩土工程。 [Cao Xingsong (1972 -), male, Dr, professor level senior engineer, research direction: bridge and geotechnical engineering, the Chongqing construction engineering group deputy chief engineer.]

坡固土植生工艺形成的纤维丝植生层进行人工模拟降雨试验,旨在阐明工程施工初期植被未恢复前特大暴雨和径流冲刷对不同纤维丝植生层厚度和坡度条件下的坡面水土保持效应,以期为纤维丝固土护坡固土植生工艺的边坡防护效益提供理论基础,也为制定红层软岩高边坡水土保持措施提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验在黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室人工模拟降雨大厅进行,所用降雨设备为侧喷式自动模拟降雨系统^[13],降雨高度 16 m,能够满足所有雨滴在降落到地面时达到终点速度,降雨均匀度大于 80%。试验土槽为自制式移动变坡式土槽,规格为长 2 m,宽 0.5 m,深 0.5 m,土槽底部钢板上钻有均匀的透水孔。试验前先测定不同处理的总径流量,以便在试验中通过盛满水的稳流槽^[14]供水,通过当量坡长模拟 10 m 的实际边坡坡长。

根据四川遂宁地区近 3 a 的强降雨资料,将模拟降雨强度设计为 120 mm/h,坡度依据高速公路高边坡的常见坡度,采用 30°、45°和 60°,纤维丝植生层厚度为 0 cm、3 cm、6 cm、10 cm,每个坡度和植生层厚度组合后的处理均设置 2 个重复。其中以采自遂(宁)资(阳)眉(山)高速公路软岩边坡的红砂岩母质作为对照处理,可视其纤维丝植生层厚度为 0 cm,植生层喷播基材采用工程施工中实际应用的配置基材,有机质含量 12%。

1.2 试验方法

供试土壤为四川遂宁地区红层软岩母质,经过 10 mm 筛孔过筛。试验土槽填土采用分层填土和分层压实的方法,每次在装填下一层之前将表土打毛,以消除两层之间的垂直层理。红砂岩母质干容重控制在 1.38 g/cm^3 左右,纤维丝植生层为连续纤维丝与基材同步湿喷在红砂岩母质上,干容重控制在 1.02 g/cm^3 ,以尽量接近边坡实际喷播的植生层情况,放置 24 h 后进行降雨。为了保证每次试验的前期土壤含水量基本一致和消除坡面处理的差异性,对喷播基材和加水量进行称重严格配置,降雨前测定土壤含水量,并用喷壶对坡面进行均匀洒水,保证土槽降雨前期土壤含水量基本一致。

降雨前对降雨强度和汇水强度进行率定,当降雨强度、均匀度和汇水强度达到试验要求时方可进

行正式降雨。降雨过程中记录坡面产流时间,并收集全部径流泥沙样,每隔 2 min 收集一次,降雨和径流冲刷试验同时进行 60 min。径流量的测定采用量筒量取,产沙量测定采用烘干法。试验中用染色法对坡面上下两部分(0~1 m 和 1~2 m)测定径流流速。其方法是从降雨产流开始,每隔 3 min 测定水流流过固定坡面区间的时间,并最后选取流速基本稳定后的多次平均值作为坡面的平均流速。

2 结果与分析

2.1 坡度和纤维丝植生层厚度对坡面产流产沙的影响

坡度是影响坡面径流侵蚀的重要因子^[15],一般认为坡度越陡,坡面流速越大,径流冲刷力越强。但是,多年的试验观测和理论研究表明,当坡度大于某一临界值时(坡面土壤侵蚀的临界坡度一般介于 $15^\circ \sim 25^\circ$),径流的冲刷力随坡度的增加而减弱^[16-21]。本研究所选坡度均为大于 30° 的陡坡,根据试验资料分析得到,在本实验所设定的三种坡度下,随着坡度的增大,坡面总径流量和总产沙量均明显减小(表 1、表 2),陡坡为 30° 时的总径流量远高于 45° 和 60° , 30° 时的总径流量是 45° 的 1.25 倍左右,是 60° 的 1.78 倍左右。同样,坡面的总产沙量也表现出类似的变化规律,但是 30° 时的总产沙量与 45° 和 60° 相比,其增加的倍数小于总径流量增加的倍数。鉴于坡面土壤侵蚀的临界坡度一般介于 $15^\circ \sim 25^\circ$,初步分析认为,在本试验设定的三种特定坡度中, 30° 最接近本试验条件下的临界坡度,随着坡度的增加,坡面上的受雨面积及其雨量逐渐减小,导致总径流量逐渐减少;此外,由于径流冲刷力逐渐减弱,造成总侵蚀量减小。

表 1 不同坡度和植生层厚度下坡面的总径流量对比

Table 1 Comparison of the total runoff in different planting layer thickness and slope conditions

植生层厚度 /cm	总径流量/L			比值		
	30°	45°	60°	30°/45°	45°/60°	30°/60°
0	482.9	395.9	280.1	1.22	1.41	1.72
3	455.4	377.6	269.6	1.21	1.40	1.69
6	447.5	370.8	263.3	1.21	1.41	1.70
10	438.4	361.5	259.5	1.21	1.39	1.69

表 2 不同坡度和植生层厚度下坡面的总产沙量对比
Table 2 Comparison of the total sediment yield in different planting layer thickness and slope conditions

植生层厚度 /cm	总产沙量/kg			比值		
	30°	45°	60°	30°/45°	45°/60°	30°/60°
0	10.93	9.27	7.15	1.18	1.30	1.53
3	2.79	2.35	2.17	1.19	1.08	1.29
6	2.73	2.28	2.1	1.20	1.09	1.30
10	2.65	2.16	1.92	1.23	1.13	1.38

不同纤维丝植生层厚度会引起坡面土壤的入渗性、稳定性和抗侵蚀性等的变化,这些变化会造成坡面侵蚀产沙量的差异。因此,研究不同喷丝植生层厚度对坡面产流产沙的影响,对制定治理边坡防护的水土保持措施与平衡施工成本都具有一定的参考意义。

当坡度一定时,随着喷丝植生层厚度的增加,坡面总径流量和总产沙量均有所减小,但是减小的差距不同(表 1、表 2)。以 60°为例,当植生层厚度为 0 cm,即坡面为红砂岩母质、不喷施纤维丝植生层时,其总径流量为 280.1 L,总产沙量为 7.15 kg,分别是 3 cm 喷丝植生层的 1.04 倍和 3.29 倍,而 3 cm、6 cm 和 10 cm 喷丝植生层的总径流量和总产沙量均相差不大。结果表明,在陡坡上喷施纤维丝植生层后,对总径流量的减少趋势不明显,但是对总产沙量的减小作用非常明显,说明纤维丝固土护坡固土植生法能够有效防治边坡水土流失。此外,3 cm 纤维丝植生层与 6 cm 和 10 cm 纤维丝丝植生层的减流减沙效益比较接近,随着植生层厚度增加在总产流量产沙量上略有减少。

随着坡度的增加,不同纤维丝植生层厚度下的总径流量变化趋势和幅度均相似(见表 1),30°的总径流量是 45°的 1.21 ~ 1.22 倍,45°的总径流量是 60°的 1.39 ~ 1.41 倍,这一倍数随着植生层厚度的增大而趋于稳定。不同纤维丝植生层厚度下的总产

沙量随坡度的变化趋势和幅度较总径流量明显,30°的总产沙量是 45°的 1.18 ~ 1.23 倍,即各个植生层厚度下的总产沙量相差不大;45°的总产沙量是 60°的 1.08 ~ 1.30 倍,30°的总产沙量是 60°的 1.29 ~ 1.53 倍,且最大倍数均出现在 0 cm 厚度下,这也充分证明了喷施纤维丝植生层后能够有效减少侵蚀量,防治水土流失。

2.2 不同厚度纤维丝植生层在不同坡度条件下的减水减沙效应

纤维丝植生层的水土保持效应主要是通过植生层表面和内部效应两部分共同实现:表面效应主要通过部分出露的纤维丝减小雨滴溅蚀和防止表层土壤团粒结构破坏位移,以及降低坡面流速消减水流动能减小侵蚀力来实现的;内部效应主要体现在均匀分布于植生层内的纤维丝形成网状结构,具有类似于植物根系的网结作用,对植生层起到加筋补强和改善土壤构型的作用,增强植生层抗冲、抗剪性能。

通过人工模拟降雨试验,定量研究不同厚度纤维丝植生层在特定坡度下的产流产沙特性。从表 3 可以看出,与裸露坡面相比,纤维丝植生层具有显著的减沙效应,且三种特定坡度下植生层产沙量随着厚度的增加都略有减少,然而三种厚度植生层的产沙量随着坡度的增大都明显增大。其中,在 30°、45°坡度下不同植生层厚度的坡面平均含沙率均在 6.0 kg/m³ 左右,而在 60°坡度下不同植生层厚度的坡面平均含沙率在 8.0 kg/m³ 左右,以 60°坡度为例,随植生层厚度增加坡面平均含沙率减小,3 cm、6 cm 植生层厚度的平均含沙率分别为 8.05 /m³、7.98 /m³,10 cm 厚度植生层时最小为 7.4 kg/m³,均只有裸露坡面平均含沙率的 30% 左右(见表 3)。数据分析表明,即便是植被成坪前的纤维丝植生层在经受强降雨过程中依然具有非常优异的水土保持能力,能够有效的保证植被恢复前纤维丝植生层的保存而不被雨水冲蚀。

表 3 不同厚度纤维丝植生层的减流减沙特征
Table 3 Flow and sediment reduction characteristics of different planting layer thickness

植生层厚度 /cm	含沙率/(kg/m ³)			输沙率/(g/m ² · min)			径流系数		
	30°	45°	60°	30°	45°	60°	30°	45°	60°
0	22.63	23.42	25.53	182.17	154.50	119.17	0.929	0.933	0.934
3	6.13	6.22	8.05	46.50	39.17	36.17	0.876	0.890	0.899
6	6.10	6.15	7.98	45.50	38.00	35.00	0.861	0.874	0.878
10	6.04	5.98	7.40	44.17	36.00	32.00	0.844	0.852	0.865

从表4可以看出,与裸露坡面相比,不同厚度植生层在三种特定坡度下的坡面平均含沙率减少较为接近,均在70%左右。随着植生层厚度增加,三种特定坡度下的坡面减沙效益均有所增大,而随着坡度增加,特定厚度植生层的减少效益呈减小趋势,所以在60°坡度和3 cm植生层厚度的组合下减沙效益最小,为68.5%。纤维丝植生层坡面输沙率随植生层厚度增加和坡度增加的变化趋势与坡面含沙率相似,以60°坡度为例,植生层厚度从3 cm到10 cm的坡面与裸露坡面相比,平均输沙率减少了69.7%~73.1%。

对表3、表4分析认为,随着坡度增大可通过适当增加植生层厚度来提高植生层的减沙效应,防止植生层发生水土流失。据此初步推测认为,30°、45°坡度下纤维丝植生层厚度应保持在3 cm以上,60°坡度下植生层应保持在6 cm左右,以作为适宜当地降雨条件下的植生层厚度。

与纤维丝植生层的减沙功能相比,其消减径流作用明显弱于减沙效应,且植生层厚度对坡面减水特征值影响不明显。与裸露坡面相比,纤维丝植生层径流系数减小在3.7%~9.2%,其中10 cm纤维丝植生层在30°坡度下的组合径流系数最小为84.4%,与裸露坡面相比径流系数减小了9.2%。说明纤维丝植生层具有一定的拦蓄降雨的能力,但拦蓄能力有限,且随着植生层厚度增加拦蓄能力也略有增加,但不明显。这主要是因为进行植生层喷施时是采用边坡客土喷播中常用的湿喷工艺,以便模拟边坡真实湿喷施工24 h后遭受强降雨冲刷时的植生层侵蚀情况,验证该工艺在实际工程中的水土保持效应,所以植生层初期含水率本身就较高。

此外,从图1看出,与裸露坡面相比,纤维丝植生层坡面径流流速明显减小,30°坡度下的3 cm植生层和60°坡度下的10 cm植生层的平均径流流速相比裸露坡面分别少了25%和42%。随着坡度增

大,坡面径流流速也明显增大,不同厚度植生层在特定坡度下的增大倍数基本相同,但随着坡度增加增大倍数有所增加,如45°坡度相比30°坡度增大1.15倍左右,60°坡度相比45°坡度增大1.20倍左右;裸露坡面随着坡度的增大径流速度增加的倍数高于植生层,45°坡度下相比30°坡度下径流流速增大了1.19倍,60°坡度下相比45°坡度增大了1.26倍,说明随着坡度增大,纤维丝植生层对径流流速的增大具有一定的延缓作用。而特定坡度下坡面平均径流流速随植生层厚度的增加有较微弱的降低趋势,不同坡度下的降低幅度也基本相似,6 cm相比3 cm植生层厚度下平均径流流速均降低了8%左右,10 cm相比6 cm植生层厚度平均径流流速均降低了10%左右,这可能是因为随着植生层厚度增加坡面入渗率有所增加,造成坡面径流有所减少,使坡面径流流速也有所降低。分析认为,纤维丝植生层具有一定的降低坡面流速,消减坡面径流动能,从而减小径流对坡面造成冲刷的效应,而且随着植生层厚度增加这种效应有所增大。

2.3 纤维丝植生层厚度和坡度影响下坡面产流率的变化规律

将四个纤维丝植生层厚度、三个坡度条件下的产流率绘制于图2,如图所示,当纤维丝植生层厚度为0 cm,即陡坡均为红砂岩母质时,三个坡度下产流率的变化规律比较相似,8 min前产流率随降雨时间的延长而增大,三个坡度的产流率大小表现为30°>45°>60°,此后在8 min左右趋于稳定,稳定状态下波动幅度较小,8~30 min时产流率在90 L/(m²·h)上下波动,30 min后增加到100 L/(m²·h)左右。裸露坡面在降雨初期产流很快达到稳定状态,主要是因为红砂岩母质透水性和蓄水性较差,坡面表层在降雨初期很快达到饱和后即基本不会产生入渗。

当坡面喷施纤维丝植生层后,产流率的变化趋势与红砂岩母质差异较大,尤其是达到稳定状态以

表4 与裸露坡面相比不同厚度纤维丝植生层的减流减沙效益

Table 4 Flow and sediment reduction benefit of different planting layer thickness compared with the bare slope /%									
植生层厚度 /cm	含沙率			输沙率			径流系数		
	30°	45°	60°	30°	45°	60°	30°	45°	60°
0									
3/0	0.729	0.734	0.685	0.745	0.746	0.697	0.057	0.046	0.037
6/0	0.730	0.737	0.688	0.750	0.754	0.706	0.073	0.063	0.060
10/0	0.733	0.745	0.710	0.758	0.767	0.731	0.092	0.087	0.074

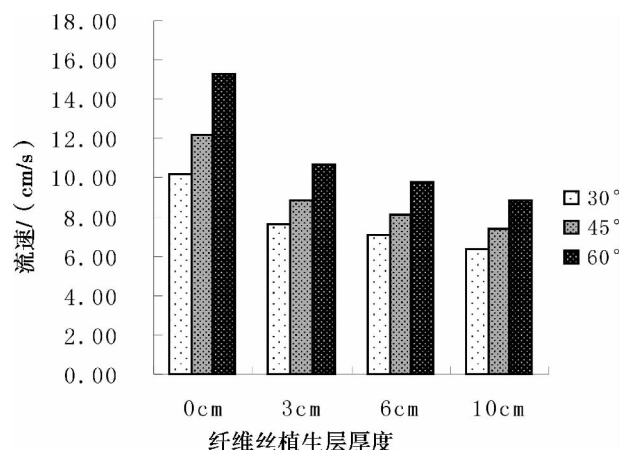


图1 不同植生层厚度和坡度对坡面径流流速的影响

Fig. 1 Runoff velocity changes under different planting layer thickness and slope

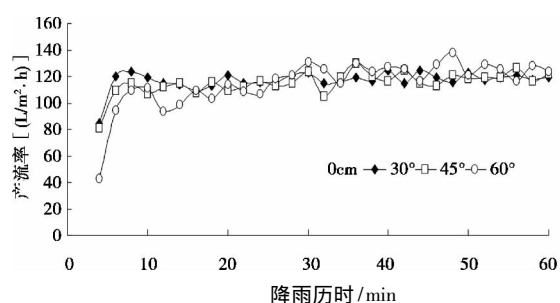
前的产流率变化,且达到稳定状态的时间也有差异(见图2)。纤维丝植生层厚度为3 cm时,坡度为30°条件下,其产流率在13 min左右趋于稳定,此后比较平稳地波动,后期稳定在100 L/(m²·h)。坡度45°和60°条件下的产流率也呈现随降雨历时先增大后趋于稳定波动,转折点为30 min左右,30 min前两个坡度的产流率变化相似,30 min后产流率大小为45°>60°,此时45°产流率稳定在120 L/(m²·h)。

h) 60°产流率稳定在110 L/(m²·h)。

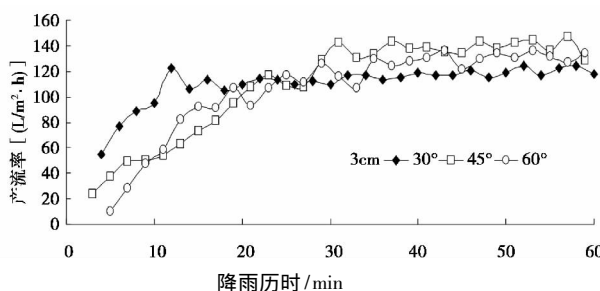
随着纤维丝植生层厚度继续增加,坡度30°下的产流率趋于稳定的时间逐渐推迟,当喷丝植生层厚度为6 cm时,其趋于稳定的时间为25 min左右,当植生层厚度为10 cm时,产流率趋于稳定的时间延迟到30 min。而45°和60°的产流率在6 cm和10 cm植生层厚度下变化不明显,依然在30 min左右趋于稳定,主要波动在110~120 L/(m²·h)区间内。纤维丝植生层坡面开始产流到稳定时间较长,主要是因为纤维丝植生层是采用湿喷工艺法喷施形成,使植生层表面形成物理结皮影响到植生层的入渗性能。此外,喷施纤维丝植生层后,坡面产流率达到稳定状态后均高于红砂岩母质,说明喷丝植生层能够较快吸水入渗,到降雨后期随着坡面开始饱和和入渗量减少,径流量增加。

2.4 纤维丝植生层厚度和坡度影响下坡面产沙率的变化规律

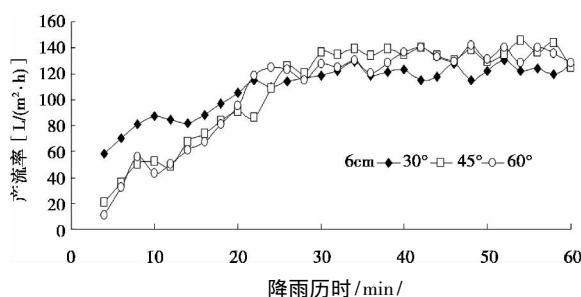
将四个喷丝植生层厚度、三个坡度条件下的产沙率绘制于图3,如图所示,红砂岩母质(0 cm植生层)产沙率变化规律与其对应的产流率变化差异较大,产沙率随降雨历时表现为先减小再略有上升后趋于稳定,主要是因为坡面产沙主要由雨滴击溅和径流冲刷引起^[22],在降雨初始阶段,裸露坡面侵蚀产



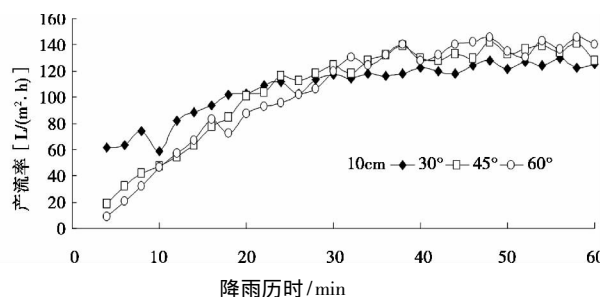
a. 裸露坡面(0 cm 植生层)
a. bare slope (0 cm plant layer)



b. 3 cm 纤维丝植生层
b. 3 cm filaments plant layer



c. 6 cm 纤维丝植生层
c. 6 cm filaments plant layer



d. 10 cm 纤维丝植生层
d. 10 cm filaments plant layer

图2 不同植生层厚度和坡度条件下产流率随降雨历时的变化

Fig. 2 Changes of runoff rate with the rainfall in the different planting layer thickness and slope conditions

沙贡献主要来自雨滴溅蚀作用^[23],产流后由溅蚀作用和径流搬运共同实现。在降雨历时 16 min 左右时,产沙率达到稳定,主要波动在 $2 \sim 2.5 \text{ kg/m}^2/\text{h}$ 区间,稳定状态前坡度 60° 下的产沙率高于 45° 和 30° ,后两者差异较小(见图 3)。这可能主要是因为坡面产流后雨滴溅蚀作用减小,主要由坡面径流搬运形成稳定产沙,而稳定状态前的产沙率以雨滴溅蚀作用为主,而坡度越大雨滴击溅造成的土粒分散向下位移更严重,溅蚀强度越大^[24],从而出现坡度增大时稳定状态前的产沙率更大的现象。

喷施纤维丝植生层后,坡面产沙率明显减少,其变化趋势也发生较大改变,呈现随降雨历时先增大后趋于稳定,而且各个坡度下产沙率的波动变幅较各自对应的产流率变幅大(见图 3)。产沙率达到稳定波动前,其大小均表现为 $60^\circ > 45^\circ > 30^\circ$ 的变化趋势,这是由于坡度越大雨滴击溅造成的侵蚀越严重。纤维丝植生层厚度为 3 cm 时,坡度 30° 下产沙率随降雨历时逐渐增大,至 40 min 趋于稳定波动,产沙率达到稳定的时间较产流率推迟 27 min; 坡度 45° 的产沙率在 30 min 左右趋于稳定,与产流率趋于稳定的时间基本一致; 而 60° 条件下的产沙率在 13 min 达到稳定,较相应的产流率稳定时间提前 17 min,产沙率达到稳定后主要变化与 $0.6 \sim 0.8 \text{ kg/}$

m^2/h 区间内,这是因为坡度增大雨滴向下击溅越严重,表层不稳定的土粒越容易发生破坏侵蚀,当表层不稳定土粒溅蚀流失后,出露的部分纤维丝开始对雨滴击溅起到消减作用,并降低坡面流速,从而达到稳定产沙状态。所以,降雨初期,坡度越大表层雨滴溅蚀越严重,使有利于溅蚀发生的最佳粒径范围的土粒减少更快^[24],反而使纤维丝出露对雨滴动能的消减作用更提前,表现在坡度越大稳定产沙越提前,这也充分说明纤维丝能有效消减雨滴溅蚀和径流动能。

随着植生层厚度增加,在特定坡度下达到稳定产沙的时间在不同厚度纤维丝植生层间差异不大(见图 3)。当纤维丝植生层厚度为 6 cm 时,其产沙率变化与 3 cm 时相近,坡度为 30° 时产沙率从 46 min 开始稳定,陡坡 45° 产沙率达到稳定的时间依然为 30 min 左右,而 60° 条件下产沙率达到稳定的时间在 12 min 左右。当纤维丝植生层厚度继续增加到 10 cm 时,三个坡度下产沙率均波动较大, 30° 下的产沙率在波动中逐渐增大,至 46 min 达到稳定波动, 45° 产沙率达到稳定的时间也可视为 30 min 左右, 60° 条件下产沙率则推迟到 22 min 后达到较稳定波动,这可能是因为随着植生层厚度增加,加上 60° 坡度下径流速度较低坡度要快,使坡面入渗达到

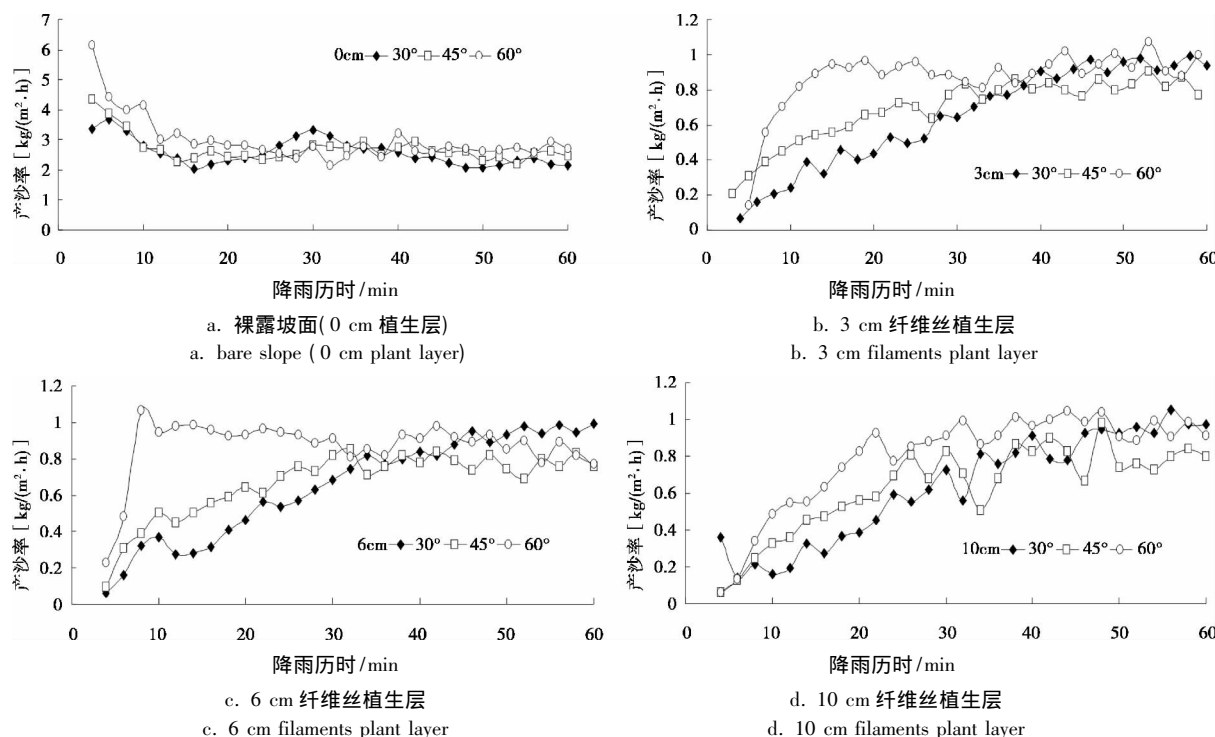


图 3 不同植生层厚度和坡度条件下产沙率随降雨历时的变化

Fig. 3 Changes of sediment yield rate with the rainfall in the different planting layer thickness and slope conditions

饱和时间推迟,表现在稳定产流时间推迟,影响到稳定产沙也有所推迟。

对于30°坡度而言,在3 cm、6 cm、10 cm三个植生层厚度下产沙率变化差异不大,稳定后的最大值主要位于0.7~0.8 kg/(m²·h),因此,可以将3 cm作为30°条件下能抗当地最大降雨强度冲刷时的适宜植生层厚度。对于45°陡坡,植生层厚度为3 cm时,产沙率稳定在0.7 kg/(m²·h)上下;植生层厚度为6 cm时,产沙率稳定在0.6~0.7 kg/(m²·h);而植生层厚度为10 cm时,其产沙率波动较大,但是也主要波动于0.6~0.7 kg/(m²·h)间。因此判定3~6 cm可以作为45°陡坡条件下的适宜植生层厚度。坡度为60°条件下,3 cm、6 cm、10 cm三个植生层厚度产沙率稳定后差异较小,但是达到稳定状态前差异明显,尤其是植生层厚度为3 cm和6 cm时,产沙率均很快趋于稳定,达到0.8 kg/(m²·h)左右,这一数值比对应的30°和45°条件下的产沙率大许多。而植生层厚度为10 cm条件下,坡度60°的产沙率在达到稳定状态前也比相应的30°和45°条件下的产沙率大,但是,与前两个厚度相比,其增大的幅度不大。因此,可以认为对于60°而言,植生层厚度为3~6 cm时,尽管能够减小坡面侵蚀,但是与10 cm相比,其减蚀量较小,所以6~10 cm可作为60°陡坡的适宜植生层厚度。分析认为,随着坡度增大应适当增加植生层厚度,可提高植生层的减蚀能力。

3 结论

纤维丝加筋固土技术作为一种加固土的新方法在国外已有多项研究,特别是欧美国家和日本。日本NTTOC Construction Co., Ltd.曾经通过改良法国Texsol技术开发了连续纤维补强土技术(Continuous Fiber Reinforced Soil),在加筋不强机理方面多有研究^[25],但针对该技术的研究在国内尚属空白。因此,研究连续喷丝固土植生法及水土保持效应对促进国内生态防护技术具有重要意义。

纤维丝植生层的护坡机理是利用均匀分布于具有近似各向同性力学性质的植生层中的纤维丝对植生层起到加筋补强和网结作用,能有效拘束土壤团粒结构破坏和发生位移,可显著增强植生层抗剪强度、抗变应力及抗侵蚀性能,保证植生层整体稳定性。通过模拟降雨试验,定量研究不同纤维丝植生

层厚度与坡度组合下的坡面降雨产流产沙过程与纤维丝植生层水土保持效应,为纤维丝固土护坡固土植生工艺的边坡防护效益提供了理论基础,也为制定红层软岩高边坡水土保持措施提供了科学依据。此外,鉴于实验室内的人工模拟降雨实验并不能完全模拟实际的降雨侵蚀情况,故本实验依托遂(宁)资(阳)眉(山)高速公路,于2011年9月在遂宁段的红层软岩高边坡建有9 000 m²的连续喷丝固土植生法现场实验工程,并设有相关的坡度和植生层厚度组合实验。现场实验工程经历了两次雨季(2012年及2013年的6月、7月)的多次强降雨冲刷,纤维丝植生层保存完好,植被恢复效果非常显著,现场的水土保持效果及组合实验与本实验中的人工模拟降雨实验结论基本吻合。相关结论如下:

1. 湿喷法喷施的纤维丝植生层对总径流量的减少趋势不明显,但对总产沙量的减少作用非常明显,相比裸露红砂岩母质坡面平均产沙率可减少70%左右,证明在早期无植被覆盖下植生层经受强降雨时,纤维丝能够有效的保证植生层整体稳定性,防止水土流失,纤维丝植生层水土保持效益显著。

2. 纤维丝植生层的水土保持效应主要是通过植生层表面和内部效应两部分共同实现:表面效应主要通过纤维丝的缓冲作用减小雨滴溅蚀,防止表层土壤团粒结构破坏位移,以及降低坡面流速消减径流动能减小侵蚀力来实现;内部效应主要通过均匀分布于植生层内的纤维丝形成网状结构,具有类似于植物根系的网结作用,对植生层起到加筋补强和改善土壤构型的作用,增强植生层抗冲、抗剪性能。

3. 降雨初期,坡面侵蚀以雨滴溅蚀为主,并随着坡度增大雨滴溅蚀越严重,使有利于溅蚀发生的表层土粒减少更快,反而使纤维丝出露对雨滴动能的消减作用更提前,表现在坡度越大稳定产沙越提前,稳定产沙前的产沙率越大。

4. 随着坡度增大植生层侵蚀量虽有所减小,但减蚀能力减弱。当坡度增大时,可通过增加植生层厚度来提高植生层减蚀能力,增强水土保持效能。

5. 适宜30°坡度下的植生层厚度应保持在3 cm以上,45°坡度下的植生层厚度应保持在6 cm左右,60°坡度下植生层厚度应保持在6 cm以上。

参考文献(References)

- [1] Cheng Qiang, Kou Xiaobing, Huang Shaobin, et al. The Chinese red layer distribution and the characteristics of the geological envi-

- ronment [J]. Journal of Engineering Geology, 2004, 12(01): 34-40 [程强, 寇小兵, 黄绍槟, 等. 中国红层的分布及地质环境特征[J]. 工程地质学报, 2004, 12(01): 34-40]
- [2] Li Junjie, Tian Fengwen, Zhang Yi. The physical properties and engineering properties of red layer of Southwest China [J]. Foundation Engineering, 2009, 12: 28-32 [李俊杰, 田丰文, 张毅. 浅析西南地区红层的物理性质及工程特性[J]. 地基基础工程, 2009, 12: 28-32]
- [3] Feng Qiyang, Han Baoping, Sui Wanhua. Southwest red layer characteristics of water rock interaction and engineering application [J]. Journal of Engineering Geology, 1999, 7(3): 266-271 [冯启言, 韩宝平, 隋旺华. 鲁西南地区红层软岩水岩作用特征与工程应用[J]. 工程地质学报, 1999, 7(3): 266-271]
- [4] Series Editorial Board of highway. The highway operation and management [M]. Beijing: China Communications Press, 1995: 265-274 [高速公路丛书编委会. 高速公路运营管理[M]. 北京: 人民交通出版社, 1995: 265-274]
- [5] Lu Shiqiang, Wang Zhao, Liu Zude. Application of geosynthetics in principle [M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1994: 134-137 [陆士强, 王钊, 刘祖德. 土工合成材料应用原理[M]. 北京: 水利电力出版社, 1994: 134-137]
- [6] Cheng Qiang, Du Xiaoping, Du Guoping. Chongqing Liangping to Changshou highway side slope ecology protection [J]. Highway, 2004, (9): 177-180 [程强, 杜小平, 杜国平. 重庆梁平至长寿高速公路边坡生态防护[J]. 公路, 2004, (9): 177-180]
- [7] Zhou Lirong, Zhou Depei, Cheng Qiang. Study on red layer parameters of soft rock slope vegetation protection [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(8): 1407-1410 [周立荣, 周德培, 程强. 红层软岩坡面植被防护的相关参数研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(8): 1407-1410]
- [8] Zhang Hanjun. Mixed spraying planting application of technology in railway slope protection works [J]. Shanxi Architecture, 2009, 35(22): 309-310 [张汉军. 喷混植生技术在铁路边坡防护工程中的应用[J]. 山西建筑, 2009, 35(22): 309-310]
- [9] Zhou Ying, Cao Yinghong, Liao Xiaojin, et al. Spraying mixed vegetation technology in expressway rock slope protection and greening of the application [J]. Rock and Soil Mechanics, 2001, 22(3): 353-356 [周颖, 曹映泓, 廖晓瑾, 等. 喷混植生技术在高速公路岩石边坡防护和绿化中的应用[J]. 岩土力学, 2001, 22(3): 353-356]
- [10] Zhai Benchao. The red sandstone side slope ecological restoration and construction technology [J]. Shanxi Building, 2007, 29(9): 269-270 [翟本超. 红砂岩路堑石质边坡生态恢复施工技术[J]. 山西建筑, 2007, 29(9): 269-270]
- [11] Chen Yongang, Wang Ling, Huang Tao, et al. Application of improved spray turfing technique in red sandstone slope [J]. Highway, 2005(1): 212-215 [陈永安, 王玲, 黄滔, 等. 改良喷播植草技术在红砂岩边坡的应用[J]. 公路, 2005(1): 212-215]
- [12] Zhao Zhiming. Engineering slope greening protection mechanism and [D]. Chengdu: Southwest Jiao Tong University, 2007. [赵志明. 工程边坡绿化防护机理与设计指标研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2007.]
- [13] Zheng Fenli, Zhao Jun. Artificial simulation of rainfall and rainfall simulation equipment hall [J]. Research Soil and Water Conservation, 2004, 11(4): 177-178 [郑粉莉, 赵军. 人工模拟降雨大厅及模拟降雨设备简介[J]. 水土保持研究, 2004, 11(4): 177-178]
- [14] Yang Chunxia, Wu Qing, Xiao Peiqing, et al. The artificial simulation of rainfall and runoff scouring experiment in soil erosion prediction [J]. Research Soil and Water Conservation, 2004, 11(3): 229-230 [杨春霞, 吴卿, 肖培青, 等. 人工模拟降雨与径流冲刷试验在水土流失预测中的应用探讨[J]. 水土保持研究, 2004, 11(3): 229-230]
- [15] Jin Changxing. Slope on slope erosion and the role of the [J]. Geographical Research, 1996, 15(3): 57-63 [靳长兴. 坡度在坡面侵蚀中的作用[J]. 地理研究, 1996, 15(3): 57-63]
- [16] Yang Chunxia, Wu Qing, Yang Jianfeng, et al. The overland flow and soil and water conservation in China, experimental study on artificial simulation [J]. Soil and Water Conservation in China, 2003, (6): 24-25 [杨春霞, 吴卿, 杨剑锋, 等. 人工模拟坡面产流试验研究[J]. 中国水土保持, 2003, (6): 24-25]
- [17] Jin Changxing. On the slope erosion critical gradient [J]. Acta geographica Sinica, 1995, 50(3): 234-239 [靳长兴. 论坡面侵蚀的临界坡度[J]. 地理学报, 1995, 50(3): 234-239]
- [18] Yair A, Klein M. The influence of surface properties on flow and erosion processes on debris covered slopes in an arid area [J]. Catena, 1973, 1(1): 1-8
- [19] Renner F G. Conditions influencing erosion of the Boise river watershed [J]. US Dept Agric Tech Bull, 1936: 528
- [20] Xi You. Slope affect soil erosion research [J]. Soil and Water Conservation in China, 1993, (4): 23-25 [席有. 坡度影响土壤侵蚀的研究[J]. 中国水土保持, 1993, (4): 23-25]
- [21] Wu Pute. Dynamic erosion experiments [M]. Xi'an: Shaanxi science and Technology Press, 1997. [吴普特. 动力水蚀实验研究[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1997.]
- [22] Morgan R P C. Soil Erosion and Conservation [M]. Edinburgh: Addison-Wesley Longman, 1995.
- [23] Pan Chengzhong, Shanguan Zhouping. Influence of forage grass on slope erosion dynamic parameters [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(3): 371-376 [潘成忠, 上官周平. 牧草对坡面侵蚀动力参数的影响[J]. 水力学报, 2005, 36(3): 371-376]
- [24] Zhang Keli, Slender Yamada Kenzo. Simulation study and the relationship between gradient and slope erosion process [J]. Scientia Geographica Sinica, 1998, 18(6): 561-566 [张科利, 细山田建三. 坡面减蚀发生过程及其与坡度关系的模拟研究[J]. 地理科学, 1998, 18(6): 561-566]

Soil and Water Conservation Effect of Continuous Spraying Filaments and Fixing Soil Planting Technology in the Side Slope Protection

LIU Shixiong¹, CAO Xingsong¹, CHENG Rui², ZHANG Mengtao², CHEN Zhenfeng²

(1. Chongqing Construction Engineering Group Sichuan Suizi Expressway Co., Ltd., Chongqing 629000, China;

2. Shenzhen Ruyin Ecological Construction Co., Ltd., Shenzhen 518057, China)

Abstract: Soil and water conservation effect and the filaments runoff and sediment reduction mechanism of continuous spraying filaments and fixing soil planting technology on simulated slopes under heavy rainfall and flow scouring was studied based on simulation experiments with four planting layer thickness and three gradients. And the appropriate planting layer thickness in each gradient was proposed. The results showed that spraying filaments planting subjected to heavy rainfall can effectively combat the loss of vegetation layer in the early lack of vegetation cover, filaments through effectively reduce raindrop splash and abatement runoff kinetic energy, and reinforced reinforcement effect together to improve the erosion resistance of vegetation. The appropriate spraying planting layer thickness which could be resistant to the local maximum rainfall intensity under the condition of the 30° side slope should be maintained at more than 3 cm; and about 6cm was the appropriate thickness for the 45°; for 60°slope, the suitable thickness of the planting layer should be maintained at more than 6 cm.

Key words: continuous spraying filaments; planting layer; reinforced reinforcement; soil and water conservation; side slope protection