

三维土工网防护边坡侵蚀特性的试验研究

王广月, 王 艳, 徐 妮

(山东大学 土建与水利学院, 济南 250061)

摘 要:为了揭示三维土工网防护坡面侵蚀规律,利用室内模拟放水冲刷试验,定量研究了不同坡度(5° , 10° , 15° , 20° , 25° , 30°)、不同流量($1\text{ m}^3/\text{h}$, $1.5\text{ m}^3/\text{h}$, $2\text{ m}^3/\text{h}$)条件下,三维土工网防护坡面的侵蚀过程及侵蚀特征。结果表明:(1)累积侵蚀量随坡度和流量的增大而增大,且冲刷最初 10 min 内得到的侵蚀量占侵蚀总量的 70%左右,而冲刷末期的坡面流含沙率仅在 $0.01\sim 0.04\text{ g}/\text{cm}^3$ 内波动;(2)随着坡度增大,累积侵蚀量的贡献率增大,流量对累积侵蚀量起主导作用,在大流量冲刷的条件下,流量对累积侵蚀量的贡献率比流量较小时更加显著;(3)累积侵蚀量与坡度呈正相关的幂函数关系,相关性显著;(4)三维土工网防护边坡的坡面流为紊流,累积侵蚀量与雷诺系数的关系可以表示为: $M=0.186\text{Re}^{0.672}$,相关系数 $R^2=0.9429$ 。

关键词:三维土工网垫;坡面流;土壤侵蚀

中图分类号:TV131; S157

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2017)01-0079-05

Test and Study on Erosion Characteristics of 3D Geonet Protection Slope

WANG Guangyue, WANG Yan, XU Ni

(School of Civil and Hydraulic Engineering, Shandong University, Ji'nan 250061, China)

Abstract: Aiming to explore the erosion characteristic of 3D geonet protection slope, we quantitatively tested the erosion process and erosion characteristics of 3D geonet protection slope based on laboratory simulation runoff scouring experiments under the different slope gradients (5° , 10° , 15° , 20° , 25° , 30°) and the different flow discharges ($1\text{ m}^3/\text{h}$, $1.5\text{ m}^3/\text{h}$, $2\text{ m}^3/\text{h}$). The experimental results show that: (1) cumulated erosion increases with the increase of slope gradients and flow discharges, at the same time, the amount of erosion occurring in the first 10 minutes takes up 70% of the total, while the sand content of overland flow fluctuates within $0.01\sim 0.04\text{ g}/\text{cm}^3$ at the end of scouring period; (2) the contribution rate of cumulated erosion increases with the increase of slope gradient, while the flow discharge plays a leading role in the process; under the condition of large flow discharge, the flow discharge contribution rate of cumulated erosion is more significant than the small flow discharge; (3) the relation between cumulated erosion and slope gradients significantly follows the power function; (4) the overland flow pattern of 3D geonet protection slope is turbulent flow, and the relationship between cumulated erosion and Reynolds number can be described as: $M=0.186\text{Re}^{0.672}$ ($R^2=0.9429$).

Keywords: 3D geomat; overland flow; soil erosion

三维土工网防护边坡是将三维土工网垫与植被相结合而形成的一种新型生态护坡形式。网垫的上下层面与土体相互作用,产生的摩擦力能提高坡面的稳定性。网垫的网包层将种植土与植物种子固定于边坡表层,为植被的生长提供必要的条件。受到水流冲刷时,由于网垫上表面的凹凸起伏,坡面流的流向被不断改变,沿程能量损失逐渐增大,起到了较好的

消能作用,减轻了水流对坡面的冲蚀,在目前的工程建设中得到越来越广泛的应用。

国内外在坡面土壤侵蚀方面开展了较全面深入的研究,取得了丰富而宝贵的经验和成果^[1-11],为从水流水动力学过程方面研究三维土工网防护坡面侵蚀产沙过程奠定了基础。近年来,我国在生态护坡方面的研究发展速度较快,并取得了一系列有益的研究成果。肖衡林

等^[12]比较系统地对三维土工网的设计力学指标进行了分析,从流体力学、工程力学等方面系统研究了网垫的强度公式,通过不同坡度下的冲刷试验得到了合理的网垫开口尺寸,在一定程度上解决了三维土工网垫的设计指标问题,并提出了三维土工网垫植草护坡技术的施工程序和技术要点;王广月等^[13]采用极限平衡法建立了降雨条件下防护边坡稳定性分析模型,并通过模拟计算分析了土体含水率、边坡角度、铆钉间距、格室坡长、坡面冲刷和格室深度对其稳定性的影响;刘晓路等^[14]针对边坡坡度对网垫的要求,不同地区草种的选择和生态防护体系的养护等影响三维土工网护坡效果的因素进行了全面的分析;陈人豪等^[15]详细分析了边坡角度、水流量、铺沙量和冲刷时间等对三维固土网垫防水冲刷性能的影响,进而对边坡角度、冲刷时间、铺沙量和水流量等因素对各种三维土工网垫的影响进行了比较全面的研究。然而,上述研究主要侧重于坡体稳定、水土保持功效、养护和水土流失的环境影响评价方面,而忽略了坡面侵蚀问题。鉴于此,本文主要针对三维土工网坡面的结构特征,通过室内放水冲刷模拟试验,揭示三维土工网防护坡面土壤侵蚀过程,阐明不同坡度、不同流量条件下,三维土工网坡面侵蚀动力与侵蚀产沙的关系,以期发展这类特殊坡面流动的侵蚀特点和规律,为科学设计三维土工网防护边坡提供科学依据和技术支撑。

表 1 试验用砂质粉土的颗粒级配

粒径/mm	>0.25	0.25~0.075	0.075~0.005	0.005~0.002	<0.002
所占比例/%	18.556	12.317	2.814	58.697	7.616

试验中,坡面流速的测量采用高锰酸钾示踪法,每 2 min 测定一次流速,采用在坡面上、中、下 3 处分别测定流速取三者均值的方法。为确定坡面流含砂率每 1 min 接取 500 ml 左右的浑水试样,用量筒精确测定其体积,用电子天平称其质量,最后用置换法换算出各试样的含砂率。在冲刷的过程中还需测定坡面流水面宽度及观测三维土工网垫的出露情况,在冲刷结束后,测定冲刷深度。

试验采用 1,1.5,2 m³/h 共 3 个冲刷变化流量和 5°,10°,15°,20°,25°,30°共 6 个变化坡度,共进行 18 组试验,每次试验持续冲刷 30 min。

2 结果与分析

2.1 坡面流侵蚀的基本特性

图 1 为三维土工网防护边坡冲刷初期和末期的坡面状况。由于三维土工网垫的作用,边坡表现出特殊的土壤侵蚀特性。冲刷初期,由于坡面存在一定数量的浮土,泥沙颗粒极易启动被搬运,导致冲刷初期

1 试验设备与方案设计

试验采用规格为 5.6 m×1.0 m×0.5 m 自制有机玻璃水槽,并配置导轨式液压变坡系统,使水槽坡度可在 0°~45°变化。冲刷供水系统由蓄水池、定水头水箱、稳流槽等多个部分组成。其中稳流槽设置在水槽顶端,其内按顺序设置了 20 cm 高的无孔钢挡板、50 cm 高的镂空大孔钢挡板以及 50 cm 高的镂空小孔钢挡板,用以消除水流的局部紊动。冲刷流量从电磁流量计上直接读出,并可通过阀门组控制大小。

试验采用型号为 EM3 的三维土工网垫,其规格为:厚度 18 mm,宽度 1 m,拉伸负荷大于 3.2 kN/m,延伸率为 70%。为还原土质边坡实际性状及保证三维土工网垫在同一水平面上,在铺设网垫之前先在水槽内分层填入 15 cm 厚的土并用水准尺找平。铺设时,保证网垫端正、紧贴坡面,每隔 50 cm 设置一行 U 型锚钉,每行 3 个,等距分布。固定好网垫后,均匀覆土,每平方米覆土量以重量控制。用木条将土刮入并充满网垫网包,压实后清除浮土,整平坡面。试验使用济南长清地区的砂质粉土,通过室内标准击实试验可测得该土的最大干密度为 1.853 g/cm³,最佳含水率为 13.8%。通过密度计法测得试验用粉土的颗粒级配,所得数据列于表 1。

阶段,坡面流的含沙率较大,且坡面较为平整,三维网垫几乎还未出露在坡面上。坡面流所受阻阻力较小,有较多的能量用于侵蚀、搬运坡面土体。随着坡面流冲刷的进行,网垫内土颗粒由于受到网垫的束缚作用难以被冲出,虽然冲刷初期坡面流含沙率较大,但是存在急剧下降现象。随着时间的推移,三维土工网垫外的土进一步被坡面流挟带、搬运,导致网垫网包层几乎完全出露在边坡表面,坡面流阻力系数不断增大,侵蚀难度不断增强。在冲刷的末期,流域内网外土体几乎已全部被搬运,流量相同、坡度不同试验条件下的任一坡面流所具有的能量都不能使网包内的大部分土体克服网包束缚被搬运,所以此时段内的含沙率极小。冲刷的最后 5 min 所得的坡面流试样含沙率仅为 0.01~0.04 g/cm³,且多数为 0.02 g/cm³,此时肉眼几乎不能辨认坡面流是否含沙。

2.2 累积侵蚀量变化规律

在不同流量、不同坡度下测量泥沙含量,计算得到 3 个流量下不同坡度的累积含沙量变化,由图 2 可知,3 个试验流量条件下,不同坡度的累积侵蚀量随

冲刷的进行而不断增大,且具有较为一致的变化规律:冲刷最初的7 min内,累积侵蚀量增长迅速;随着冲刷的进行,累积侵蚀量增加逐渐减缓;冲刷末期,由于坡面流含砂率几乎为零,累积侵蚀量的增长极其缓慢;同一流量下,在相同的时间内,泥沙累积侵蚀量随坡度增大而增大。

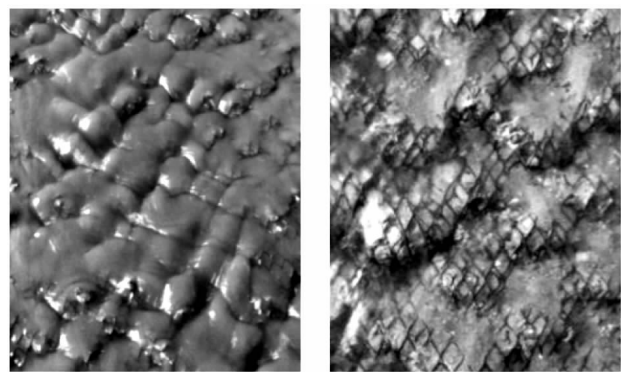


图1 冲刷初期、末期坡面流

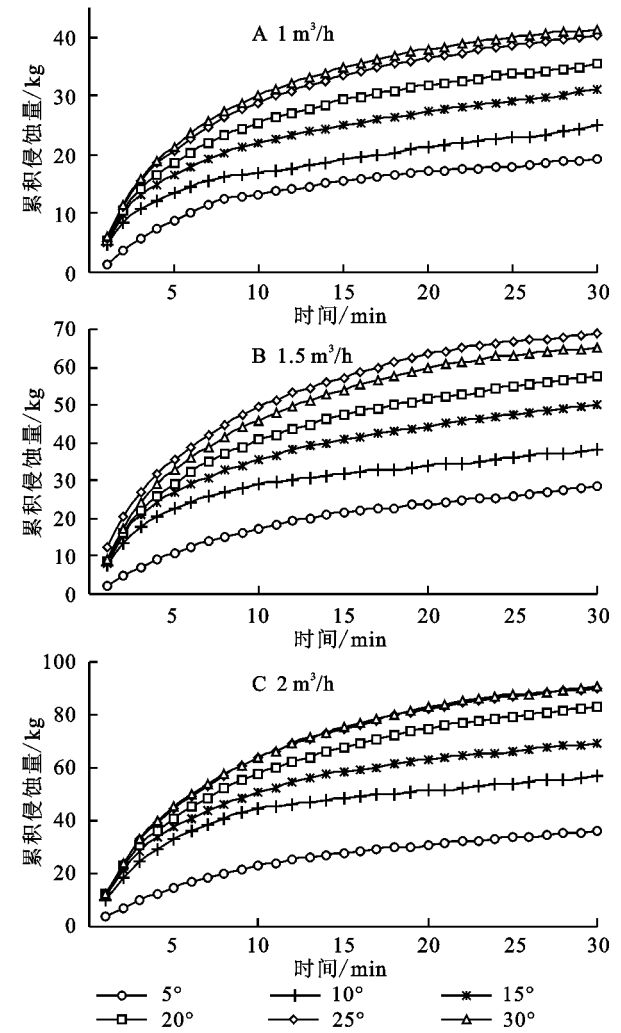


图2 不同流量、不同坡度条件下累计侵蚀量随时间的变化

2.3 累积侵蚀量在各冲刷时间段内的比例

由表2可知,在不同坡度和流量的试验条件下,前10 min内的累积侵蚀量占总侵蚀量的70%左右。冲

刷初期,在坡度为10°,流量为2 m³/h的试验条件下,累积侵蚀量占总侵蚀量的78.51%,是整个试验中对应的最大值;在坡度为5°,流量为1.5 m³/h的试验条件下,该数值为61.33%,是整个试验中对应的最小值。11~20 min内的累积侵蚀量占总侵蚀量的20%左右。在坡度为5°,流量为1.5 m³/h的试验条件下,该数值为22.80%,是整个试验中对应的最大值;在坡度为10°,流量为2 m³/h的试验条件下,该数值仅为12.13%,是整个试验中对应的最小值。21~30 min内的累积侵蚀量占总侵蚀量的10%左右。分析原因认为:冲刷初期,边坡表面具有较多可蚀土壤颗粒,较容易被水流冲刷,使得累积侵蚀量迅速增长;随着冲刷历时的增加,边坡表面易被冲刷的土壤颗粒多数已被侵蚀,相对初期较大的累积侵蚀量增长速度有较大减缓,坡面被冲刷下来的土壤颗粒主要来自三维土工网垫外的凹处部分;冲刷末期,三维土工网垫外的土颗粒多数已被侵蚀,而网包内的土颗粒由于网垫的包裹作用不容易被水流冲出,导致累计侵蚀量增长缓慢。进一步说明三维土工网的存在将坡面对边坡的侵蚀阻滞在面状侵蚀阶段,使得每分钟对应的侵蚀量随冲刷的进行而减小,并在冲刷末期趋于稳定。

表2 各时间段内累计侵蚀量

坡度/ (°)	流量/ (m³·h ⁻¹)	各时间段内累积侵蚀量/kg		
		1~10 min	11~20 min	21~30 min
5	1	13.32	3.86	2.07
	1.5	17.46	6.49	4.51
	2	22.97	7.93	5.33
10	1	16.92	4.36	3.64
	1.5	28.94	4.98	4.26
	2	44.49	6.87	5.30
15	1	21.95	5.35	3.74
	1.5	35.45	8.93	5.88
	2	50.72	12.36	6.42
20	1	25.37	6.45	3.54
	1.5	40.67	10.86	5.95
	2	57.71	17.06	8.20
25	1	28.90	8.01	3.79
	1.5	49.35	14.02	5.41
	2	63.77	19.56	7.97
30	1	29.98	7.96	3.39
	1.5	45.98	13.94	5.15
	2	63.59	19.27	7.67

2.4 冲刷流量、坡度对坡面侵蚀产沙量的贡献率

坡度和流量的变化会导致侵蚀效果的不同,两者对侵蚀量的影响采用计算贡献率^[16]的方法进行量化。分别以1 m³/h为流量基准、5°为坡度基准对1 m³/h和1.5 m³/h冲刷流量以及1 m³/h和2 m³/h

冲刷流量作用下各坡度和流量变化对累积侵蚀量的贡献率进行分析,具体计算方法见表 3、表 4。

由表 3、表 4 可见,当流量由 1 m³/h 增大到 1.5 m³/h,坡度增大对累积侵蚀量的贡献率总体呈增大趋势,但流量对累积侵蚀量的变化起主导作用,流量变化对累积侵蚀量变化的最小贡献率为 51.81%;当流量由 1 m³/h 增大到 2 m³/h 时,仍然存在随着坡度增大,累积侵蚀量的贡献率增大、流量对累积侵蚀量起主导作用的规律,且流量对累积侵蚀量的贡献率比流量较小时更加显著,流量由 1 m³/h 增大到 2 m³/h 时,流量对累积侵蚀量的贡献率最小值达到 69.03%。分

析原因认为:由于三维土工网垫的护坡作用,边坡在遭遇冲刷侵蚀时,坡度对累积侵蚀量的影响大大减弱。坡面流能够挟带的泥沙多数为边坡表面上、三维土工网垫外的坡面土体。虽然随着坡度的增大,能够转化成动能的坡面流势能有所增大,但其增大程度不足以主导累积侵蚀量的变化。而冲刷流量变化时,导致坡面径流量激增,坡面流水深增加且紊动性变强,坡面流对边坡表面的剪切力和剥蚀作用变大。对于经过坡面流冲刷、土体稳定性变差的坡面,流量变大对其的侵蚀作用存在放大效应,造成坡度变化对累积侵蚀量的影响被掩盖。

表 3 流量为 1 m ³ /h 和 1.5 m ³ /h 试验条件下各坡度、冲刷流量对侵蚀的贡献率							
坡度/(°)	a_i/kg	A_j/kg	A_j-a_5/kg	a_i-a_5/kg	A_j-a_i/kg	$a_i-a_5/A_j-a_5/\%$	$A_j-a_i/A_j-a_5/\%$
5	19.25	28.47	9.22	0	9.22	0	100
10	24.92	38.17	18.92	5.67	13.25	29.97	70.03
15	31.04	50.25	31.00	11.79	19.21	38.03	61.97
20	35.36	57.49	38.24	16.11	22.13	42.13	57.87
25	40.21	68.79	49.54	20.96	28.58	42.31	57.69
30	41.33	65.07	45.82	22.08	23.74	48.19	51.81

注: a_5 为流量 1 m³/h、坡度 5°试验条件下的累积侵蚀量,是计算贡献率的基准; a_i 为冲刷强度为流量 1 m³/h,各坡度累积侵蚀量; A_j 为 1.5、2 m³/h 流量下各坡度累积侵蚀量; A_j-a_5 为由坡度和冲刷流量增大引起的累积侵蚀量的增量; a_i-a_5 为由坡度增大引起的累积侵蚀量的增量; A_j-a_i 为由冲刷流量增大引起的累积侵蚀量的增量; a_i-a_5/A_j-a_5 为坡度对累积侵蚀量的贡献率; A_j-a_i/A_j-a_5 为流量对累积侵蚀量的贡献率; $i=5,10,15,20,25,30$; $j=5,10,15,20,25,30$,下表同。

表 4 流量为 1 m ³ /h 和 2 m ³ /h 试验条件下各坡度、冲刷流量对侵蚀的贡献率							
坡度/(°)	a_i/kg	A_j/kg	A_j-a_5/kg	a_i-a_5/kg	A_j-a_i/kg	$a_i-a_5/A_j-a_5/\%$	$A_j-a_i/A_j-a_5/\%$
5	19.25	36.22	16.97	0	16.97	0	100
10	24.92	56.67	37.42	5.67	31.75	15.15	84.85
15	31.04	69.50	50.25	11.79	38.46	23.46	76.54
20	35.36	82.97	63.72	16.11	47.61	25.28	74.72
25	40.21	90.24	70.99	20.96	50.03	29.53	70.47
30	41.33	90.54	71.29	22.08	49.21	30.97	69.03

2.5 累积侵蚀量与坡度的关系

根据试验所得数据,得出三维土工网防护边坡累积侵蚀量与坡度的关系。从图 3 中可看出:坡度是影响边坡侵蚀的主要因素之一。边坡存在坡面流的情况下,坡度较小时,随着坡度的增加,坡面流水深减小、流速增大,挟带泥沙的水流和坡面相互作用增强。所以坡度的增大,不仅使坡面流势能转化成动能的部分增大,而且也使坡面流有效切应力增大,侵蚀量随之增大。对 1、1.5、2 m³/h 冲刷流量下,各坡度与对应的累积侵蚀量进行曲线拟和,结果表明:累积侵蚀与水力坡降呈正相关的幂函数关系,即累积侵蚀量随坡度的增大而增加,拟合结果见表 5。

2.6 累积侵蚀量与雷诺系数的关系

采用包含坡面粗糙度的绕流雷诺系数来分析坡

面流流态,其公式为

$$M=uR/\nu$$

式中: u 为坡面流平均流速(m/s); R 为坡面绝对粗糙度(m),在本次试验中取冲刷深度; ν 为运动粘滞系数(cm^2/s)。

表 5 累积侵蚀量和坡度间关系的拟和结果		
流量/(m ³ ·h ⁻¹)	拟合关系式	R^2
1.0	$M=58.49J^{0.167}$	0.985
1.5	$M=98.95J^{0.512}$	0.977
2.0	$M=135.8J^{0.505}$	0.974

式中: J 为边坡坡度。

图 4 给出了坡面累计侵蚀量随雷诺系数的变化规律,可以看出:试验中雷诺系数在 1 198~10 529 范围内变化,均大于临界雷诺系数 500,即三维土工网

防护边坡的坡面流为紊流。流态为紊流时,一般流体流速较大,流场中存在许多漩涡,流线几乎不可辨认。雷诺系数越大,由紊动产生的附加切应力越大,坡面流对边坡的侵蚀作用也越强烈。对累积侵蚀量和雷诺系数进行幂函数拟和,可得到 $M=0186Re^{0.672}$, 相关系数 $R^2=0.9429$, 见图4。以此可以说明,坡面流流态对边坡累积侵蚀量的影响显著。

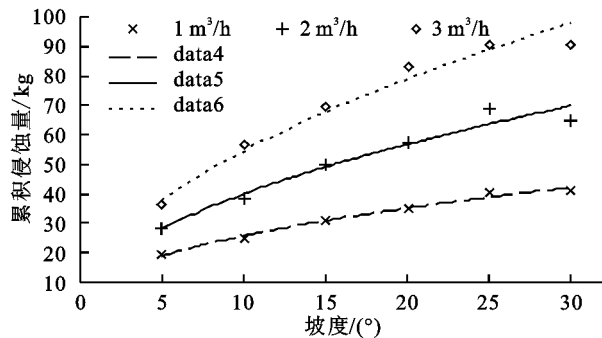


图3 累积侵蚀量与坡度的关系

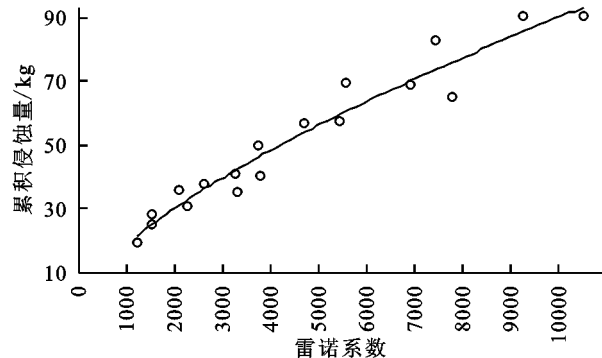


图4 累积侵蚀量和雷诺系数的关系

3 结论

(1) 冲刷初期,坡面流含有大量泥沙。在冲刷过程中,泥沙含量急剧下降,且在冲刷末期基本达到稳定。在任何坡度、任何流量下,冲刷末期的含沙率在 $0.01\sim 0.04\text{ g/cm}^3$ 波动。(2) 累积侵蚀量随坡度和流量的增大而增大,且冲刷最初 10 min 内得到的侵蚀量占侵蚀总量的 70% 左右。(3) 坡面侵蚀产沙过程中,随着流量和坡度增大,累积侵蚀量的贡献率增大,但流量对累积侵蚀量起主导作用,尤其流量较大时更加显著。(4) 累积侵蚀量与坡度呈正相关的幂函数关系,相关性显著;三维土工网防护边坡的坡面

流为紊流,累积侵蚀量与雷诺系数的关系可以表示为: $M=0186Re^{0.672}$, 相关系数 $R^2=0.9429$ 。(5) 侵蚀土壤的颗粒分布和颗粒分布随时间的变化规律,尚需开展一系列相关试验研究。

参考文献:

- [1] Ellison W D. Studies of raindrop erosion[J]. Agricultural Engineering, 1944, 25(4): 131-136.
- [2] Nearing M A, Simanton J R, Norton L D, et al. Soil erosion by surface water flow on a stony, semiarid hillslope [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1999, 24(8): 677-686.
- [3] 胡世雄, 靳长兴. 坡面流与坡面侵蚀动力过程研究的最新进展[J]. 地理研究, 1998, 17(3): 326-335.
- [4] 雷廷武, 张晴雯, 赵军, 等. 细沟侵蚀动力过程输沙能力试验研究[J]. 土壤学报, 2002, 39(4): 476-482.
- [5] 丁文峰, 李占斌. 坡面细沟侵蚀过程的水动力学特征试验研究[J]. 水土保持学报, 2002, 16(3): 72-75.
- [6] 申震洲, 姚文艺, 李勉, 等. 不同下垫面对坡面侵蚀特征的影响[J]. 水土保持研究, 2010, 17(1): 6-9.
- [7] 蔡强国, 王贵平, 陈永宗. 黄土高原小流域侵蚀产沙过程与模拟[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [8] 夏卫生, 雷廷武, 张晴雯, 等. 冲刷条件下坡面水流速度与产沙关系研究[J]. 土壤学报, 2004, 41(6): 876-880.
- [9] 吴长文, 陈法扬. 坡地土壤侵蚀机理研究进展与现状[J]. 中国水土保持, 1996(11): 21-24.
- [10] 鲁克新. 陡坡薄层水流侵蚀动力过程试验研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2001.
- [11] 田凯, 李小青, 申震洲, 等. 不同床沙下的坡面流水力学特性试验研究[J]. 水土保持学报, 2010, 24(2): 70-73.
- [12] 肖衡林, 周锦华, 刘晓路. 边坡生物工程防护方法研究[J]. 中国水运: 学术版, 2007, 7(5): 55-57.
- [13] 王广月, 韩燕, 王杏花. 降雨条件下土工格室柔性护坡的稳定性分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(10): 3020-3024.
- [14] 刘晓路, 高强, 肖衡林. 基于三维土工网垫的植草护坡技术研究[J]. 长江科学院院报, 2008, 25(3): 58-61.
- [15] 陈人豪, 彭泽仁. 固土网垫应用研究: 铁路边坡铺网垫植草被防护试验[J]. 天津纺织工学院学报, 1999, 18(2): 21-24.
- [16] 耿晓东, 郑粉莉, 刘力. 降雨强度和坡度双因子对紫色土坡面侵蚀产沙的影响[J]. 泥沙研究, 2011(6): 48-53.