

永定河典型生态护岸措施下坡面产流产沙试验研究

郑雪慧¹, 程金花¹, 祁生林², 张建¹, 朱慧鑫¹

(1.北京林业大学水土保持学院,北京 100083;2.北京市水影响评价中心,北京 100071)

摘要:为实现永定河北京段沙质河道生态修复,通过野外径流小区放水冲刷试验,在 3 种放水流量(0.5, 1.0, 1.5 m³/h)、坡度 10°、5 种护岸材料(生态袋、椰丝植生毯、三维土工网、松木桩、卵石)下分析不同生态护岸坡面的水动力学特性、产流产沙状况。结果表明:(1)3 种放水流量下 5 种护岸材料布设坡面的平均流速均小于裸坡,5 种护岸材料平均径流流速均表现为卵石>松木桩>三维土工网>生态袋>椰丝植生毯。5 种生态护岸材料弗劳德数均小于 1,雷诺数均小于 500。(2)生态护岸措施有效减少产流,产流量随时间均呈对数显著增加,5 种生态护岸材料平均径流拦截率表现为松木桩<卵石<三维土工网<椰丝植生毯<生态袋。(3)随放水流量的增大坡面产沙率增大,各生态护岸措施均能有效减少产沙量,各护岸措施的泥沙拦截效果随着放水流量增大显著降低。研究结果对永定河不同河段岸坡治理、生态护岸材料选择、永定河绿色廊道建设有重要意义,也对定量评价不同护岸材料下坡面的减水减沙效益提供参考。

关键词:生态护岸;坡面流;水动力学参数;减流减沙

中图分类号:S157.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-2242(2020)05-0014-06

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2020.05.002

Study on Runoff and Sediment Yield on the Slope with Typical Ecological Riverbank Protection Measures in the Yongding River

ZHENG Xuehui¹, CHENG Jinhua¹, QI Shenglin², ZHANG Jian¹, ZHU Huixin¹

(1.School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083;

2.Beijing Water Impact Assessment Center, Beijing 100071)

Abstract: In order to realize the ecological restoration of sandy river course in Beijing section of Yongding River, through the field runoff plot drainage and scour test, the effects of different ecological riverbank protection measures on hydrodynamic characteristics, runoff and sediment yield during slope erosion process were studied. In the test, five kinds of bank protection materials (ecological bag, coir blanket, 3D-geomat, pine pile and pebble) were used, and the runoff and sediment yield of each treatment were analyzed under three kinds of water discharge flow rate (0.5, 1.0 and 1.5 m³/h) and 10° slope. The results showed that: (1) Under the three release flows, the average runoff velocities of the five bank protection materials were all smaller than that of the bare slope, and the average runoff velocity of the five ecological bank protection materials followed the order of pebble> pine pile> 3D-geomat > ecological bag>coir blanket. The Froude numbers of the five ecological bank protection materials were all less than 1, and the Reynolds numbers were all less than 500. (2) Ecological riverbank protection measures could effectively intercept runoff and slow down the runoff production process, and the runoff production showed a significant logarithmic increase trend with time. The average runoff interception rate of the five ecological bank protection materials followed the order of ecological bag> coir blanket> 3D-geomat > pebble> pine pile. (3) The average sand production rate on the slope surface increased with the increasing of water discharge flow, and the ecological bank protection measures could effectively intercept the slope sand production, and the sediment interception effect of ecological bank protection material gradually decreased with the increasing of the water discharge flow. The research results were of great significance for the bank slope management of different sections of

收稿日期:2020-03-14

资助项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项“永定河(北京段)河流廊道生态修复技术与示范”(2018ZX07101005)

第一作者:郑雪慧(1996—),女,硕士研究生,主要从事土壤侵蚀研究。E-mail:xuehui_zheng001@163.com

通信作者:程金花(1979—),女,教授,博士生导师,主要从事土壤侵蚀防治研究。E-mail:jinhua_cheng@126.com

the Yongding River, the selection of ecological bank protection materials, and the construction of the green corridor of the Yongding River, and also provided a reference for the quantitative evaluation of the water and sediment reduction benefits of different bank protection materials.

Keywords: ecological riverbank protection; slope flow; hydrodynamic parameters; runoff and sediment reduction

北京城市总体规划将永定河定位为“京西绿色生态走廊与城市西南生态屏障”,防洪、供水、生态是永定河三个重要功能。近年来,永定河河道断流,河床干涸,风沙弥漫,生态系统遭到严重破坏。因此,遏制河道沙化,恢复河道生态环境,建立城市西南生态屏障和通道,是目前必须要解决的问题^[1]。在永定河生态修复工作中,对河岸带的生态修复至关重要。传统护岸措施以水泥、混凝土等硬性材料为主,严重阻碍水生态循环和河流自身的净化能力。而生态护岸具有增加河岸缓冲带与水体的连通性、增加水分入渗、减少径流泥沙、延长径流历时、控制面源污染、增加生物多样性等多种功能。选择生态护岸材料进行河道生态修复成为近些年热点研究。国外学者^[2]最先提出“近自然河道整治工程”“多自然型河川工法”“河流生态恢复”等理念。国内水利工作者也将生态护岸技术应用于河流护岸建设,夏继红等^[3]将生态护岸归纳为单纯植物护岸和植物工程措施相结合护岸形式,早期国内常用护岸形式多以植被为材料,然而植被生长受时空限制,后期养护技术要求高,因此植被为主的生态护岸存在一些局限性。随着研究发展,除去植被外,增加了石材、木材、生态袋、三维土工网、土工织物袋、土工格栅等人工合成材料作为护岸材料,以此增加护岸的稳定性和抗冲刷能力。顾鑫等^[4]总结生态护岸与传统护岸差别并提出生态石笼护岸、木桩护岸、绿化混凝土护岸等常用生态护岸结构形式。曾子等^[5]提出了根系—拉索—石笼网结合的生态护坡技术。刘宏远等^[6]研究中植物纤维毯最高减蚀效益为 97.54%,最高减流效益为 88.26%。涂传文^[7]的研究中三维土工网护岸措施坡面平均输沙率减少 85%。目前国内外对于生态护岸的研究大多集中在生态护岸新材料、新技术的研发与应用方面^[8],而对于生态护岸措施下的水力学特性研究较少,仅在含植被的生态护岸措施下进行。多数试验为模拟植被条件下水流流速、水流阻力等水力学参数的变化,对于各种新型生态护岸材料下坡面流体力学特征以及各护岸材料减水减沙效益的定量试验计算研究不多。

通常把坡面流看作均匀覆盖流动的浅薄水层,坡面流的研究主要集中在水动力学特性^[9-10]和产沙输沙机理^[11-12]方面。近年来,国内外学者从植被^[13]、枯落物^[14]、砾石^[15]等不同覆盖条件,台田^[16]、草被等布设措施,不同坡度、不同降雨强度等多个变量条件下开展了对坡面

流水力学特征试验研究,探究各种覆盖措施下坡面水动力特征的变化和其减流减沙效益。但是针对生态护岸材料减流减沙效果和护岸措施下坡面流体力学特征定量研究较少,研究通过布设 6 个简易径流小区,在 10°坡度、3 种放水流量(0.5, 1.0, 1.5 m³/h)下进行冲刷试验,对生态带、椰丝植生毯、三维土工网、松木桩、卵石 5 种生态护岸材料的径流量、泥沙量进行测定,与每场冲刷中裸坡的产流产沙量进行对比分析,从而比较 5 种护岸材料的减流减沙效益。同时对不同生态护岸材料下坡面土壤侵蚀水动力学特性进行观测分析,从而筛选出最优的生态护岸材料。研究将对永定河不同河段岸坡治理、生态护岸材料选择、永定河绿色廊道建设有重要意义,也对定量评价不同护岸材料下坡面的减水减沙效益提供参考。

1 材料与方 法

1.1 试验设计

试验于 2018 年 7 月 6 日至 8 月 23 日在永定河(北京段)卢沟桥至梁各庄段的沙质河道内进行,采用简易径流小区(5 m×2 m)放水冲刷试验,坡度为 10°缓坡,共布设 6 个径流小区,1~5 号径流小区依次为生态带、椰丝植生毯、三维土工网、松木桩、卵石 5 种材料作为生态护岸填料,6 号小区为裸坡用于对照,5 种生态护岸材料基本性质和布设方式见表 1。试验设置 0.5, 1.0, 1.5 m³/h 共 3 种流量,270 个处理,每种处理重复 3 次,共做有效试验 810 次。

布设标准径流小区(5 m×2 m),小区两侧插入宽 0.3 m,厚 0.01 m 的 PVC 板于地下 0.1 m 处并用土埋实,地上露出 0.2 m 控制边界条件,下方用塑料布铺设成漏斗状。在小区底部出口处,开挖柱形集水槽(直径 0.8 m,深 0.8 m),放置集流桶用于收集径流^[17]。为实现均匀布水在小区顶部布设均匀布水槽(长 2 m,宽 0.3 m,深 0.6 m),水槽底部设有 3 对可调节支架用于支撑槽体,布水槽上端一侧边缘余出 0.15 m 布水板用于均匀布水^[18]。

试验开始前,在小区表面用喷壶喷水,使土壤含水量饱和。试验开始后,坡面顶端接通自来水管,使用 DN20 流量计调节放水流量开始放水,将集流桶放入集水槽用于收集径流泥沙。产流开始后,记录产流时间,每间隔 1 min,收集 1 min 径流泥沙样,2 min 为 1 个周期,当冲刷 30 min 后,出口泥沙径

流量为 0 时结束试验。试验期间记录水温(温度计 TA-288),得水流运动黏滞系数。冲刷结束后将径流泥沙样放入明矾静置,待泥沙与径流分开后,用

量筒测量上清液体积并记录径流量,剩余泥沙样倒入铝盒,放入 120 °C 烘箱中烘烤 12 h,用电子天平称取泥沙样质量。

表 1 试验冲刷坡面设计因素

坡面编号	生态护岸	材料规格与特性	布设方式
1	生态袋	0.4 m×0.8 m 透水可降解	装填本小区土方,以平铺时厚度为 0.1 m 为标准,自径流小区顶部起每间隔 1.25 m 布设 1 排
2	椰丝植生毯	厚 12 mm,重 220 g/m ² ,横向和纵向拉力均为 1.4 kN/m	布设方式同三维土工网
3	三维土工网	厚 20 mm,重 350 g/m ² ,横向拉力 1 kN/m,纵向拉力 2.2 kN/m	清除杂物,整平土地,自上而下平铺,顶部用石块固定,四周用铆钉固定
4	松木桩	0.5 m×Φ0.2 m 规则圆柱形	自上而下等间距布设 3 排
5	卵石	Φ20~30 cm 均质卵石	铺设密度约为 9 个/m ² ,随机分布
6	裸地	无	清除等杂物,整平土地

1.2 数据获取及计算

1.2.1 水动力学参数计算 研究选取雷诺数(Re)、弗劳德数(Fr)、Darcy-Weisbach 阻力系数(f)、曼宁糙率系数(n)4 个水动力学参数为研究指标。坡面水动力学参数计算公式^[17]为:

$$V = \alpha V_m \quad (1)$$

$$h = \frac{q}{V} \quad (2)$$

$$Re = \frac{Vh}{\nu} \quad (3)$$

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gh}} \quad (4)$$

$$f = \frac{8ghJ}{V^2} \quad (5)$$

$$n = \frac{h^{\frac{2}{3}} J^{\frac{1}{2}}}{V} \quad (6)$$

式中: V 为平均流速(m/s); V_m 为表层流速(m/s),采用高锰酸钾染色法; α 为修正系数,(层流、过渡流, $\alpha=0.67$,紊流, $\alpha=0.8$); h 为平均径流深(m); q 为单宽流量(m²/s); ν 为水流动力黏滞系数(cm²/s); $\nu=0.01775/(1+0.0337T+0.000221T^2)$, T 为水温(°C); g 为重力加速度,取 9.8 m/s²; J 为水力坡度,其值为坡度正弦值。

1.2.2 产沙率和泥沙拦截率数据处理 分别计算各采样时间内的产沙率和泥沙拦截率,单位时间单位面积的总泥沙重即为该次试验的平均产沙率,对照小区与各处理小区的产沙量之差与对照小区产沙量之比为泥沙拦截率。

$$y = \frac{m}{t \times s} \quad (7)$$

$$W = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\% \quad (8)$$

式中: y 为产沙率(g/(min·cm²)); m 为泥沙重(g); t 为产流时间(min); s 为产流区域面积(cm²); W 为

泥沙拦截率(%); m_1 为对照小区产沙量(g); m_2 为各处理小区产沙量(g)。

研究采用 Origin 2018、Excel 2010 软件进行数据处理及图件制作。

2 结果与分析

2.1 坡面流水动力学特征

坡面流受降雨、下垫面等诸多因素影响,其流速、流型、流态等非常复杂,目前的研究仍未提出完整系统的描述方法,因此学术界一般仍借鉴水力学中的雷诺数、弗劳德数、Darcy 阻力系数、曼宁糙率系数等水力学明渠流参数对坡面流进行研究^[16]。不同放水流量不同生态护岸材料下各坡面水动力学参数数值见表 2。

3 种放水流量下 5 种护岸材料布设坡面的平均流速均小于裸坡,放水流量为 0.5,1.5 m³/h 时,平均径流流速均表现为椰丝植生毯<生态袋<三维土工网<松木桩<卵石。流量为 1.0 m³/h 时,5 种护岸材料间径流流速除椰丝植生毯略大于生态袋外其他无变化。裸坡条件下,平均流速随放水流量增大而增大。生态袋、三维土工网、松木桩在 1.0,1.5 m³/h 放水流量条件下平均流速几乎相等。卵石、椰丝植生毯在 1.0 m³/h 放水流量下平均流速最大,之后随放水流量增大平均流速减小。5 种生态护岸材料下坡面平均水深基本表现为卵石<松木桩<三维土工网<生态袋<椰丝植生毯。放水流量为 0.5 m³/h 时生态袋护岸径流深大于椰丝植生毯。3 种径流冲刷强度下 5 种生态护岸材料 Fr 均小于 1, Re 均小于 500。相对于裸坡 3 种放水流量下,各生态护岸措施均使 Fr 减小,使 Re 增大。随放水流量增大 Re 增大,而相同放水流量条件下,各护岸措施间 Re 差异小, Fr 差异大。

在 3 种放水流量下,各生态护岸措施显著增大坡面流阻力,且径流阻力系数随着放水流量的增大而减小。其中,生态袋和椰丝植生毯增加径流阻力最为

明显,平均分别增加 143.0,165.5 倍,Darcy 阻力系数最大值达到了 1 118.09。3 种流量下,各护岸材料对

坡面流 Darcy 阻力系数表现为卵石 < 松木桩 < 三维土工网 < 生态袋 < 椰丝植生毯。

表 2 不同生态护岸材料的水动力学参数值

护岸布设形式	放水流量/ (m ³ · h ⁻¹)	平均流速/ (m · s ⁻¹)	径流深/ mm	弗劳德数	雷诺数	Darcy 阻力 系数	曼宁糙率 系数
坡面式裸地	0.5	0.051	1.1	0.498	72.30	5.68	0.086
	1.0	0.069	1.2	0.637	109.11	3.47	0.069
	1.5	0.091	1.2	0.841	144.60	2.00	0.052
生态袋护岸	0.5	0.010	5.4	0.044	87.50	724.61	1.274
	1.0	0.013	6.2	0.054	132.05	476.87	1.057
	1.5	0.016	7.0	0.060	181.55	393.76	0.980
椰丝植生毯护岸	0.5	0.009	6.3	0.036	88.52	1118.09	1.621
	1.0	0.022	3.8	0.113	133.58	111.13	0.471
	1.5	0.014	8.1	0.048	175.00	611.89	1.253
三维土工网护岸	0.5	0.020	2.8	0.120	84.68	97.64	0.418
	1.0	0.024	3.5	0.128	127.79	86.00	0.408
	1.5	0.025	4.4	0.121	169.36	95.88	0.447
松木桩护岸	0.5	0.032	1.7	0.243	78.19	23.96	0.192
	1.0	0.033	2.5	0.214	118.00	30.67	0.230
	1.5	0.052	2.1	0.357	156.38	11.07	0.135
卵石护岸	0.5	0.041	1.3	0.357	79.55	11.05	0.125
	1.0	0.059	1.4	0.501	117.13	5.63	0.090
	1.5	0.056	2.0	0.408	155.23	8.48	0.116

2.2 不同护岸材料对坡面径流的影响

在 0.5,1.0,1.5 m³/h 3 种流量强度下,5 种生态护岸材料的平均产流时间比在裸坡上分别增加了 4.8,3.4,3.85 min,护岸材料增加坡面入渗量,增大产流时间。5 种生态护岸材料径流量随时间呈对数显著增加,尽管生态袋护岸措施相关性较低(R²<0.5),但仍符合产流量先增大后基本保持稳定的变化趋势。3 种流量下松木桩护岸措施产生的径流量最多,卵石护岸次之,生态袋护岸措施产生的径流量最少。5 种生态护岸材料在 3 个放水流量下的平均径流拦截率由大到小分别为生态袋 86.15%,椰丝植生毯 79.93%,三维土工网 73.81%,卵石 56.72%,松木桩 25.97%(表 3 和图 1)。

2.3 不同生态护岸材料对坡面泥沙拦截效果

在 3 种放水流量下,5 种生态护岸材料类型坡面的产沙率都显著低于坡面裸地产沙率(p<0.05),各护岸材料的平均产沙率均随放水流量增大而增大。3 种放水流量下,各护岸措施坡面产沙率均保持在较低水平(y<1.5×10⁻⁵g/(min · cm²),坡面泥沙拦截率均保持在较高水平(W>40%)。5 种生态护岸材料在 3 种放水流量下,平均产沙率表现为卵石>松木桩>三维土工网>生态袋>椰丝植生毯,泥沙拦截率与之相反(表 4 和表 5)。

表 3 各护岸措施径流量与时间的回归关系

生态护岸	放水流量/ (m ³ · h ⁻¹)	拟合回归关系	R ²
松木桩	0.5	y=1570.76ln x-1521.32	0.947
	1.0	y=1965.501ln x-828.90	0.901
	1.5	y=2353.09ln x-924.73	0.745
卵石	0.5	y=764.75ln x-118.22	0.905
	1.0	y=846.11ln x+41.47	0.961
	1.5	y=828.66ln x+336.08	0.807
椰丝植生毯	0.5	y=192.78ln x-10.56	0.807
	1.0	y=680.11ln x-323.25	0.920
	1.5	y=1337.55ln x-1783.93	0.736
三维土工网	0.5	y=372.54ln x+86.16	0.94
	1.0	y=447.20ln x+241.94	0.915
	1.5	y=620.56ln x+90.74	0.955
生态袋	0.5	y=273.05ln x-108.74	0.447
	1.0	y=316.41ln x-115.07	0.413
	1.5	y=392.72ln x-196.15	0.743

注:x 为产流时间(min);y 为径流量(mL)。

随着放水流量增大,各生态护岸间产沙率、泥沙拦截率差异减小,在生态袋与椰丝植生毯之间表现最为明显,泥沙拦截率由小流量时差距为 14.97%减少至大流量时 3.17%。总体来看,三维土工网拦沙效果要好于松木桩,但随着放水流量的增大二者的差距逐渐缩小,在放水流量达到 1.5 m³/h 时松木桩材料的泥沙拦截率为 68.18%高于三维土工网的泥沙拦截率

64.86%。除卵石护岸外,其他 4 种护岸材料均表现为 0.5, 1.5 m³/h 放水流量下泥沙拦截率更大,而 1.0 m³/h 放水流量下泥沙拦截率相对较小。

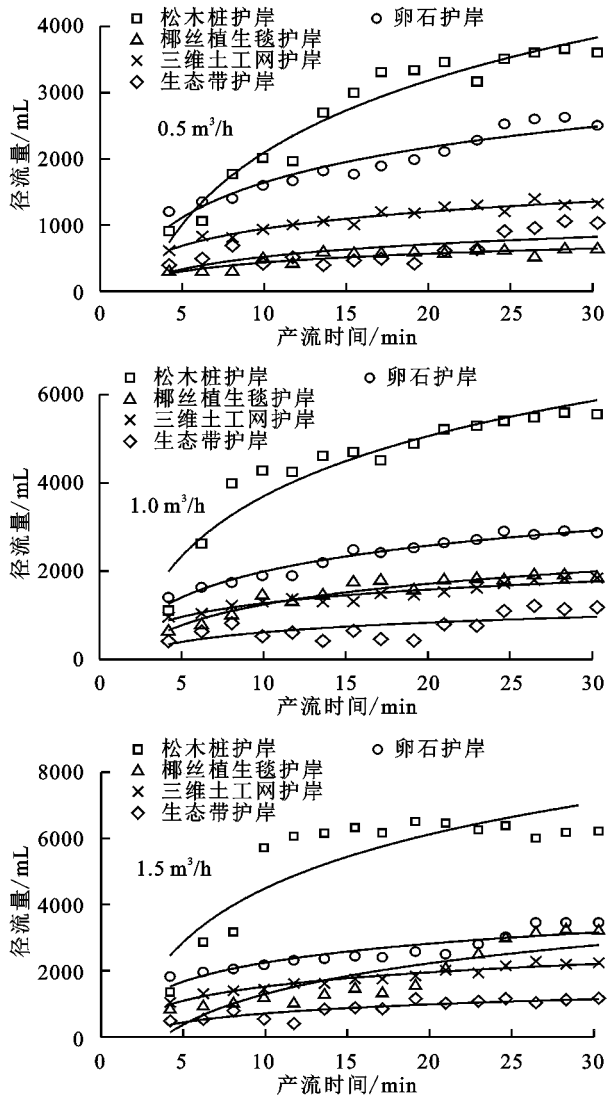


图 1 不同放水流量下坡面径流量随时间的变化

表 4 5 种生态护岸材料平均产沙率对比

放水流量/ (m ³ · h ⁻¹)	平均产沙率/(10 ⁻⁶ g · min ⁻¹ · cm ⁻²)					
	裸地	生态袋	椰丝植生毯	三维土工网	松木桩	卵石
0.5	11.64	3.79	2.06	4.80	6.02	7.80
1.0	14.84	5.05	4.20	5.97	6.83	7.91
1.5	26.60	7.51	6.67	9.35	8.46	14.74
平均值	17.70	5.45	4.31	6.70	7.11	10.15

表 5 5 种生态护岸材料泥沙拦截率对比

放水流量/ (m ³ · h ⁻¹)	泥沙拦截率/%				
	生态袋	椰丝植生毯	三维土工网	松木桩	卵石
0.5	67.43	82.34	58.77	48.24	32.99
1.0	66.00	71.70	56.35	53.98	46.69
1.5	71.75	74.92	64.86	68.18	44.58
平均值	68.39	76.32	59.99	56.80	41.42

5 种护岸材料平均径流拦截率表现为松木桩 < 卵石 < 三维土工网 < 椰丝植生毯 < 生态袋,但在最小放水流量下,各护岸材料又不完全契合这一规律。小

3 讨论

3 种放水流量下布设护岸材料的坡面平均流速均小于裸坡, Fr 均小于 1, Re 均小于 500, 坡面流均为缓流,在流态上均表现为层流。与对照组相比,各护岸材料均使 Fr 减小,使 Re 增大,说明生态护岸措施具有减缓流态、流型等方面的作用。龚杰等^[19]以北京永定河生态护岸工程为例,对几种生态护岸措施效果的研究表明,生态袋、仿木桩护岸措施具有明显的稳定边坡作用。生态护岸材料增大坡面粗糙度、增加摩擦阻力、减小径流动能从而减缓径流流速。5 种护岸材料都具有较好的防护效果,生态袋材料减流效果最为明显。生态护岸的布设使 Re 增大,但仍处于层流范畴,这与吴普特等^[20]定义坡面流为“搅动层流”认为坡面流尽管受到降雨及坡面糙率的扰动,但仍属于层流范畴的研究相一致。但护岸布设使坡面流型倾向于紊乱,这与其对径流的拦截作用有关。王广月等^[21]、涂传文^[7]利用三维土工网护坡材料,进行坡面流水动力学特性试验研究表明,坡面流流态为紊流,流型为急流。由于坡面流受下垫面、坡度、放水流量等诸多因素影响,目前对于其流型、流态仍有较大争议,以后研究中如何建立统一判定标准为研究难点和重点。吴淑芳等^[22]的研究提出了“用水减沙比”概念与计算式,定性描述了调控措施拦截的径流量与减少的侵蚀量之间的复杂关系。目前对于坡面减流减沙的研究多为草被^[17]、枯落物^[14]覆盖措施下的坡面,对于生态护岸的评价多利用定性观测、对比试验等方法,本研究首次对 5 种护岸材料的坡面减流减沙效益做出定量比较。各生态护岸有效拦截径流泥沙,裸坡径流小区产流产沙量明显高于布设各生态护岸措施的径流小区。

流量下,椰丝植生毯拦截效率明显高于生态袋,椰丝植生毯有很强的吸水性、储水效率和较大的接触面积,能有效拦截径流,随流量增大,其储水效率饱和,径流拦截率随之降低。松木桩、卵石径流小区护岸材料间存在空隙,对于径流的拦截效率较差。5 种护岸措施下坡面平均产沙率随放水流量的增大而增大,生态护岸能显著拦截坡面产沙,小流量下各种生态护岸形式泥沙拦截率高于大流量下。随着放水流量的增大各护岸材料的泥沙拦截率显著降低,当径流量增

大到一定水平,5种生态护岸措施的泥沙拦截效果达到一定限度,各生态护岸间泥沙拦截率差异减小,护岸材料不再成为制约因素,此时土壤质地、土壤理化性质本身可能成为泥沙流失与否的制约因素。3种放水流量下,5种护岸措施都能有效拦截径流泥沙。但在不同流量下,各护岸材料表现不同。椰丝植生毯的泥沙拦截效率最高,卵石布设措施下的径流小区泥沙拦截效率最低。尽管5种生态护岸材料形式的生态护岸有平均超过40%的泥沙拦截率,但仍与涂传文^[7]的研究中三维土工网护岸措施坡面平均输沙率减少85%、刘宏远等^[6]研究中椰丝毯减蚀效益高达97.54%有所差距。其原因可能在于本研究的生态护岸布设密度过低,布设材料以及放水流量等选择上存在差异。除卵石外,4种生态护岸措施平均泥沙拦截率均大于55%,椰丝植生毯泥沙拦截率高达76%,可见生态护岸能极大地降低坡面产沙量,减轻径流冲刷造成的河岸破坏。坡面流受坡度、冲刷强度、土壤等众多因素影响,本研究仅以5种护岸材料为对象,缺乏普遍性,还需要更多的试验验证,来进一步阐明生态护岸材料的减流减沙效益。

4 结论

(1)3种放水流量下,布设护岸材料的坡面平均流速均小于裸坡,各种护岸材料坡面平均流速均表现为卵石>松木桩>三维土工网>生态袋>椰丝植生毯。布设护岸坡面 Fr 均小于1, Re 均小于500,坡面流均为缓流,在流态上均表现为层流。

(2)生态护岸能有效拦截径流,减缓径流过程,径流出流量随时间变化均呈显著对数增加趋势($R^2 > 0.9$);其他条件一致时,小流量状态下径流拦蓄更高;5种护岸材料中生态袋、椰丝植生毯的径流拦截率最高。

(3)在3种放水流量下,5种护岸措施坡面泥沙拦截率均保持在较高水平($W > 40\%$)。5种措施平均产沙率表现为卵石>松木桩>三维土工网>生态袋>椰丝植生毯;5种护岸材料中生态袋、椰丝植生毯的泥沙拦截效果最大,卵石护岸泥沙拦截效果最小。

参考文献:

[1] 王越.北京永定河生态护岸综合评价研究[D].北京:北京林业大学,2013.

[2] Becker J F, Endreny T A, Robinson J D. Natural channel design impacts on reach-scale transient storage[J]. Ecological Engineering,2013,57:380-392.

[3] 夏继红,严忠民.国内外城市河道生态型护岸研究现状及发展趋势[J].中国水土保持,2004(3):20-21.

[4] 顾鑫,黄浩浩.生态护岸的技术应用[J].城市道桥与防洪,2019(3):124-126.

[5] 曾子,周成,王雷光,等.基于乔灌木根系加固及柔性石笼网挡墙变形自适应的生态护坡[J].四川大学学报(工程科学版),2013,45(1):63-66.

[6] 刘宏远,刘亮,李秀军,等.植物纤维毯道路边坡防护技术综合效益评价[J].水土保持学报,2019,33(1):345-352.

[7] 涂传文.降雨条件下三维土工网植草护坡水力侵蚀特性试验研究[D].山东泰安:山东大学,2016.

[8] 杨渠峰,王黎.内河生态护岸发展及水力特性研究综述[J].中国水运,2016,16(3):276-278.

[9] 孙立全,吴淑芳,郭慧莉,等.人工掏挖坡面侵蚀微地貌演化及其水力学特性分析[J].水科学进展,2017,28(5):720-728.

[10] Abrahams A D, Li G, Parsons A J. Rill hydraulics on a semiarid hillslope, southern Arizona[J]. Earth Surface Processes and Land-Forms,2015,21(1):35-47.

[11] Zhao C H, Gao J E, Huang Y F, et al. The contribution of astragalus adsurgens roots and canopy to water-erosion control in the water-wind crisscrossed erosion region of the loess plateau [J]. Land Degradation & Development,2017,28(1):265-273.

[12] 张光辉.对坡面径流挟沙力研究的几点认识[J].水科学进展,2018,29(2):151-158.

[13] 杨春霞,姚文艺,肖培青,等.植被覆盖结构对坡面产流产沙的影响及调控机制分析[J].水利学报,2019,50(9):1078-1085.

[14] 李兆松,王兵,汪建芳,等.铁杆蒿与白羊草枯落物覆盖量对黄土坡面流水动力特性的影响[J].农业工程学报,2018,34(17):151-157.

[15] 刘京晶,马岚,黎俊佑,等.不同覆盖条件下坡面流体力学特征试验研究[J].北京林业大学学报,2019,41(8):115-123.

[16] 肖丛宇,程金花,姜群鸥,等.台田措施下坡面流土土壤侵蚀水动力学特征[J].水土保持学报,2019,33(4):10-15.

[17] 朱慧鑫,胡晓静,程金花,等.草被覆盖下坡面流土土壤侵蚀水动力学特征[J].东北农业大学学报,2018,49(7):48-57.

[18] 张建.永定河(北京段)典型生态护岸材料和结构筛选[D].北京:北京林业大学,2019.

[19] 龚杰,王越,杨鹏.几种生态护岸措施效果的研究:以北京永定河生态护岸工程为例[J].城市道桥与防洪,2016(5):137-139.

[20] 吴普特,周佩华.坡面薄层水流流动型态与侵蚀搬运方式的研究[J].水土保持学报,1992,6(1):19-24,39.

[21] 王广月,杜广生,王云,等.三维土工网护坡坡面流体力学特性试验研究[J].水动力学研究与进展(A辑),2015,30(4):406-411.

[22] 吴淑芳,吴普特,宋维秀,等.坡面调控措施下的水沙输出过程及减流减沙效应研究[J].水利学报,2010,41(7):870-875.