

不同建设方式下河岸带坡面流流态判别及阻力特性

叶继兵, 夏继红, 窦传彬, 刘 瀚, 周之悦, 朱星学, 李朝达

(河海大学 农业工程学院, 南京 210098)

摘 要:为了系统研究河岸带建设方式对坡面流水动力特性的影响,利用野外径流冲刷试验,在 6 种建设方式、3 种流量条件下对河岸带坡面流水动力学参数变化特征进行了分析,阐明河岸带建设方式与坡面流速、流态以及阻力系数的关系。结果表明:坡面流雷诺数受河岸带建设方式影响较小,受单宽流量影响较显著。河岸带建设方式及冲刷流量对弗劳德数、流速、阻力系数影响显著,弗劳德数及阻力特性会随着冲刷流量的增大而降低,流速反之。河岸带建设方式能够有效地提高坡面阻力系数,工程建设措施优于纯植被建设措施,选取的两种工程建设措施中生态球建设措施要优于生态袋建设措施。研究可为河岸带生态护岸建设方案提供理论依据。

关键词:河岸带; 坡面流; 建设方式; 流速; 流态; 阻力特性

中图分类号:TV131

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)03-0342-07

Flow Pattern and Resistance Coefficient of Overland Flow on Riparian Zone with Different Construction Models

YE Jibing, XIA Jihong, DOU Chuanbin, LIU Han, ZHOU Zhiyue, ZHU Xingxue, LI Chaoda

(College of Agricultural Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to systematically study the influence of the riparian construction models on the hydrodynamic characteristics of overland flow, the field scouring simulation experiments were carried out in the riparian zone of north Zhejiang Province. The variations of hydrodynamic parameters of overland flow such as flow velocity and runoff depth were determined at 6 construction models and 3 flow rates. The results show that the Reynolds number is less affected by the construction mode of the riparian zone, and it is more affected by the unit discharge; the riparian construction model and the flow rate have the significant influence on the Froude number, the flow velocity, and the resistance coefficient; the Froude number and the resistance coefficient will decrease as the flow rate increases, and the flow velocity is reversed; the riparian construction model can effectively improve the slope resistance coefficient; the engineering construction models are better than the pure vegetation construction models; the eco-concrete ball construction model is better in the two engineering construction models. These results can provide the theoretical basis for the ecological construction program of the riparian zone.

Keywords: riparian zone; overland flow; construction model; flow velocity; flow pattern; resistance coefficient.

河岸带是陆地生态系统与水域生态系统之间的过渡带,由于其独特的结构特征与边缘效应,在调蓄洪水、调节微气候、拦截泥沙、过滤径流养分和营造景观效果等方面有重要作用^[1]。河岸带水土流失是影响河岸带整个生态系统的重要因素,坡面流是土壤侵蚀的主要动力因素之一,也是侵蚀泥沙搬运、农业面源污染的重要载体^[2]。坡面流流态特征及阻力特性是坡面侵蚀的主要影响因素。随着对河岸带研究的

深入,国家开始越来越重视对河岸带的保护与建设。河岸带的建设方式主要分为自然、工程措施以及两者的有机结合三大类^[3]。目前,坡面流的相关研究主要以室内变坡水槽试验为主^[4],潘成忠等^[5]通过室内的草地模拟降雨试验得出阻力系数 f 与坡度 S 的关系较为复杂,草本植物的叶片比根茎、枯落物对阻力系数的贡献更大。汪孟尧等^[6]通过变坡水槽试验表明,阻力系数与粗糙度成正相关。李兆松等^[7]通过研究

收稿日期:2019-08-14

修回日期:2019-10-14

资助项目:国家自然科学基金(41471069);国家重点研发计划专项(2018YFD0900805)

第一作者:叶继兵(1995—),男,江苏泰兴人,硕士研究生,研究方向为河岸带侵蚀机理研究。E-mail:m18351938200@163.com

通信作者:夏继红(1970—),男,江苏如皋人,教授,博士生导师,主要从事河流健康与生态修复研究。E-mail:syjhxia@hhu.edu.cn

认为植被枯落物覆盖量的增加能有效减缓坡面流流速及增大阻力系数。常松涛等^[8]通过室内红壤土坡面模拟降雨试验发现,坡面径流率、侵蚀率随着植被覆盖度增加而减小;肖从宇等^[9]通过野外径流小区放水试验研究了台田措施下坡面侵蚀过程,结果表明增加台田级数可以减小坡面流雷诺数。由于野外原型坡面水流流动十分复杂,室内试验成果与实际坡面流动过程存在一定出入^[10],目前对坡面流的研究主要集中在植被覆盖下的坡面,缺乏针对河岸带的研究,缺少工程建设措施与植被措施相结合方式的研究,且缺乏对河岸带建设方式的定量评价^[11],故本研究采用 3 个冲刷流量及 6 种坡面建设方式,在河岸带坡面上进行野外径流冲刷试验,旨在探究不同河岸带建设方式下坡面流流态特征与阻力特性,以期为选择合理的河岸带建设方式提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

野外模拟冲刷试验在浙江省桐乡市石门镇河道生

态建设示范工程试验基地内(120°27′55″E,30°37′57″N)进行,研究区位于浙江省北部,杭嘉湖平原腹地,地势平坦(图 1),平均海拔 3.46 m,属典型的江南平原水网区;亚热带季风气候,多年平均降水量为 1 218 mm,雨水充沛,集中在每年 4—9 月;土壤类别为粉砂质壤土,试验区土壤性质见表 1;植被覆盖度高,草本植物以狗牙根、马塘、狗尾草为主,乔木主要有柳树、水杉、栎树等,灌木包括红叶石楠、紫薇、紫叶李等^[12]。试验时,试验坡段岸外土地利用方式为农业用地,多种植水稻。

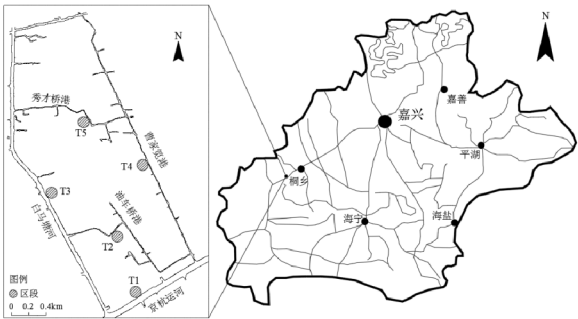


图 1 研究区位置及周边水系

表 1 试验区土壤性质

黏粒 ($<0.002\text{ mm}$)/%	粉粒 ($0.002\sim0.02\text{ mm}$)/%	沙粒 ($0.02\sim2\text{ mm}$)/%	容重/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	饱和导水率/ ($\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$)
13.09 ± 1.94	47.05 ± 2.98	39.86 ± 4.15	1.37 ± 0.08	96.43 ± 8.56

1.2 试验区布置

试验区坡面长 7.5 m,宽 11 m,坡度 1 : 4,在试验区内共布置 6 个试验小区,每个小区坡面长 6.0 m,宽 1.6 m,小区两侧用砖块隔离,并用水泥砂浆抹面,见图 2。

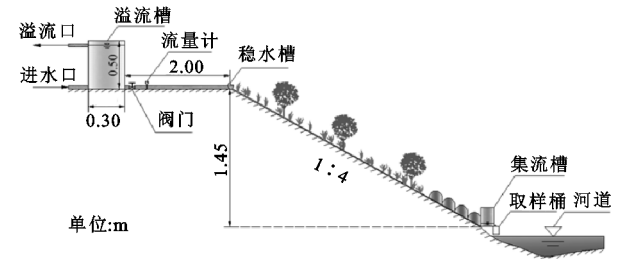


图 2 坡面冲刷装置布置

1.3 试验材料与工况组合

本试验选取生态混凝土球和生态袋两种工程材料与狗牙根和红叶石楠两种植被进行组合,植被均匀分布整个坡面,见表 2。试验区段乔木稀少,因而选取草本植物狗牙根与灌木红叶石楠作为坡面植被建设方式。其中,生态混凝土球为四连球砌块,由 4 个半球和圆台的组合体拼接而成,单球直径为 25 cm,砌块高 25 cm,中部的圆孔直径为 10 cm,可种植草本植物。生态袋以聚丙烯为主要材料,填充后尺寸规格为 58 cm×32 cm×15 cm(长×宽×高)。生态混凝

土球与生态袋均铺设在小区底部,共一排。采用野外径流冲刷,设计流量为 10 L/min,15 L/min,20 L/min。为确保每次试验初始条件基本一致,试验前一天采用 5 L/min 小流量预冲刷至产流。

采用水泵抽水,在小区坡顶一侧设置溢流水槽以便水流均匀地注入试验小区。水槽出水口连接球阀及流量计,并在出水管末端接入长 1.6 m 自制稳水管,以达到均匀出流效果。小区底部由承水槽、集流槽和塑料软管组成。试验时,水流经过溢流槽的稳流、消能,通过调节出水管上的阀门控制流量,在稳水槽出水端溢出流入小区。试验装置图如图 2 所示。每场冲刷试验重复三次。试验沿水流方向将小区分为 4 段,每段长为 1.5 m,每段采取亮蓝染料示踪法测得流速,并记录产流时间与产流量。

表 2 试验设计

试验小区	1	2	3	4	5	6
植被	无	草本+灌木	草本	草本+灌木	草本	草本+灌木
工程设施	无	生态球	生态球	生态袋	生态袋	无

1.4 主要测量参数与数据处理方法

坡面流水动力学参数主要包括流速、水深、流态及阻力特性等,计算公式如下:

平均流速: $u = au_s$ (1)

断面平均水深: $h = \frac{q}{u}$ (2)

雷诺数: $Re = \frac{uR}{\nu_m}$ (3)

弗劳德数: $Fr = \frac{u}{\sqrt{gh}}$ (4)

阻力系数: $f = \frac{8gRJ}{u^2}$ (5)

曼宁糙率: $n = \frac{R^{\frac{2}{3}} J^{\frac{1}{2}}}{u}$ (6)

式中: u 表示断面平均流速(m/s); α 表示断面流速修正系数,层流为 0.67,紊流为 0.80,过渡流为 0.70; u_s 表示优势流速(m/s); h 表示断面平均水深(m); q 表示单宽流量($m^3/(s \cdot m)$); R 表示水力半径(m),为过流面积与湿周之比,由于试验流量下坡面平均水深较小,故本文采用平均水深近似代替; ν_m 表示浑水运动黏滞系数(m^2/s); g 表示重力加速度,取 $9.81 m/s^2$; J 表示水力坡度,采用坡度的正弦值近似代替。

2 结果与分析

2.1 不同建设方式对流速的影响

流速是坡面流水动力学特性的关键参数。坡面

流量、坡度和坡面状况是坡面流流速的主要影响因子。由于坡面流水深较浅,下垫面对其影响较大,而天然河岸带坡面复杂多变,所以流量变化较小时,流速沿程变化规律通常不明显。

由图 3 可知,坡面流流速随着流量的增大而增大。1 号(裸坡)坡面平均流速最大,其他坡面较 1 号(裸坡)坡面对流速均有明显的削减效果。2,3,4,5,6 号坡面流速较 1 号(裸坡)坡面分别降低了 51.1%, 53.4%, 51.8%, 55.5%, 44.0% ($p < 0.01$)。当放水流量为 10 L/min 时,除裸坡外所有坡面平均流速普遍小于 0.08 m/s; 流量增大为 20 L/min 时,2,3,4,5,6 号坡面径流平均流速相差不大,平均流速较流量 10 L/min 时有明显增加,说明在其他影响因素相同的情况下,坡面径流量较小时,草地延缓径流流速作用较大,流量较大时,这种作用相对较弱,坡面草地覆盖延缓径流流速作用大小与径流强度有密切关系。1 号(裸坡)坡面和 6 号(草本+灌木)坡面流速沿程增大,其他坡面呈先增大后减小趋势,主要是因为 1 号(裸坡)坡面和 6 号(草本+灌木)坡面底部缺少工程建设措施,无法对水流形成阻碍作用,使得流速在重力的作用下沿程增加。

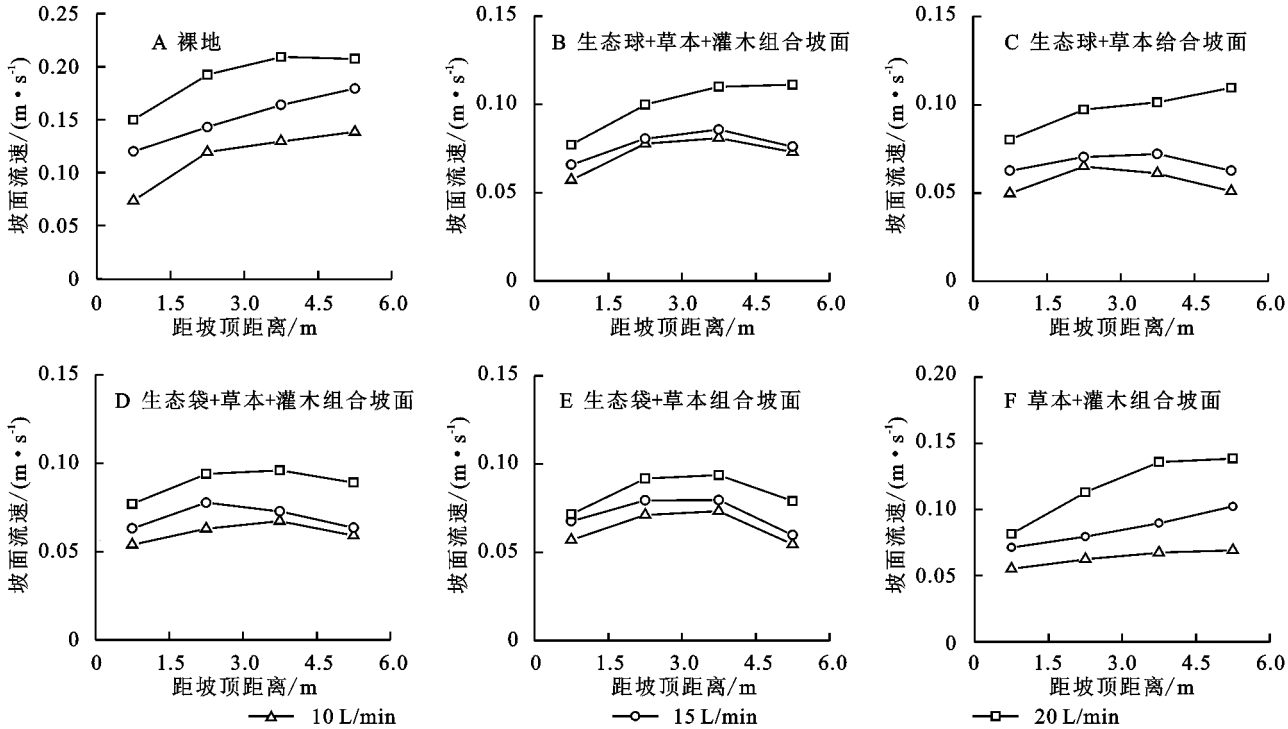


图 3 不同建设方式下坡面流流速

2.2 不同建设方式对雷诺数的影响

水流流态是研究坡面薄层流水动力学特性的重要参数,直接影响坡面流的径流计算与产沙预演。雷诺数作为水流惯性力与黏性力的比值,是衡量水流紊动程度的重要指标,是判别水流流态的主要参数之一。雷诺

数小于 500 时,水流属于层流;雷诺数介于 500, 2 000 之间时,水流属于过渡流;雷诺数大于 2 000 时,水流属于紊流[13]。水流雷诺数越大,说明坡面流紊动越强烈,越容易剥蚀并搬运土壤颗粒。
所有建设方式下坡面流雷诺数随着冲刷历时的

增长整体呈先迅速增加后趋于稳定的变化趋势(图 4),均小于 500,说明试验条件下,坡面流均为层流。植被及工程建设措施能够显著减小雷诺数,不同方式对其的影响不尽相同。相对于 1 号(裸坡)坡面,当冲刷流量为 10 L/min 时,有建设措施的坡面对雷诺数均有降低效应,2 号坡面(草本+灌木+生态球),3 号坡面(草本+生态球),4 号坡面(草本+灌木+生态袋),5 号坡面(草本+生态袋),6 号坡面(草本+灌木)较 1 号(裸坡)坡面分别降低了 20.42%,6.69%,2.60%,

8.79%,7.88%($p<0.05$),建设措施对雷诺数影响较小。可以看出其中灌木对雷诺数的影响效果不显著,主要是因为过流方式采用坡顶放流,使得灌木从在正常降雨状态下削减雨水动量,增强水面稳定性的能力难以发挥,试验中植被对雷诺数的减缓效应主要依靠草本植物。随着冲刷增大为 20 L/min 时,降低幅度分别为 23.64%,9.11%,8.04%,12.33%,9.94%($p<0.05$)。流量增大后,水深进一步增加,淹没坡面表层及部分植被根系,减小了表面水流的紊动,有利于降低雷诺数。

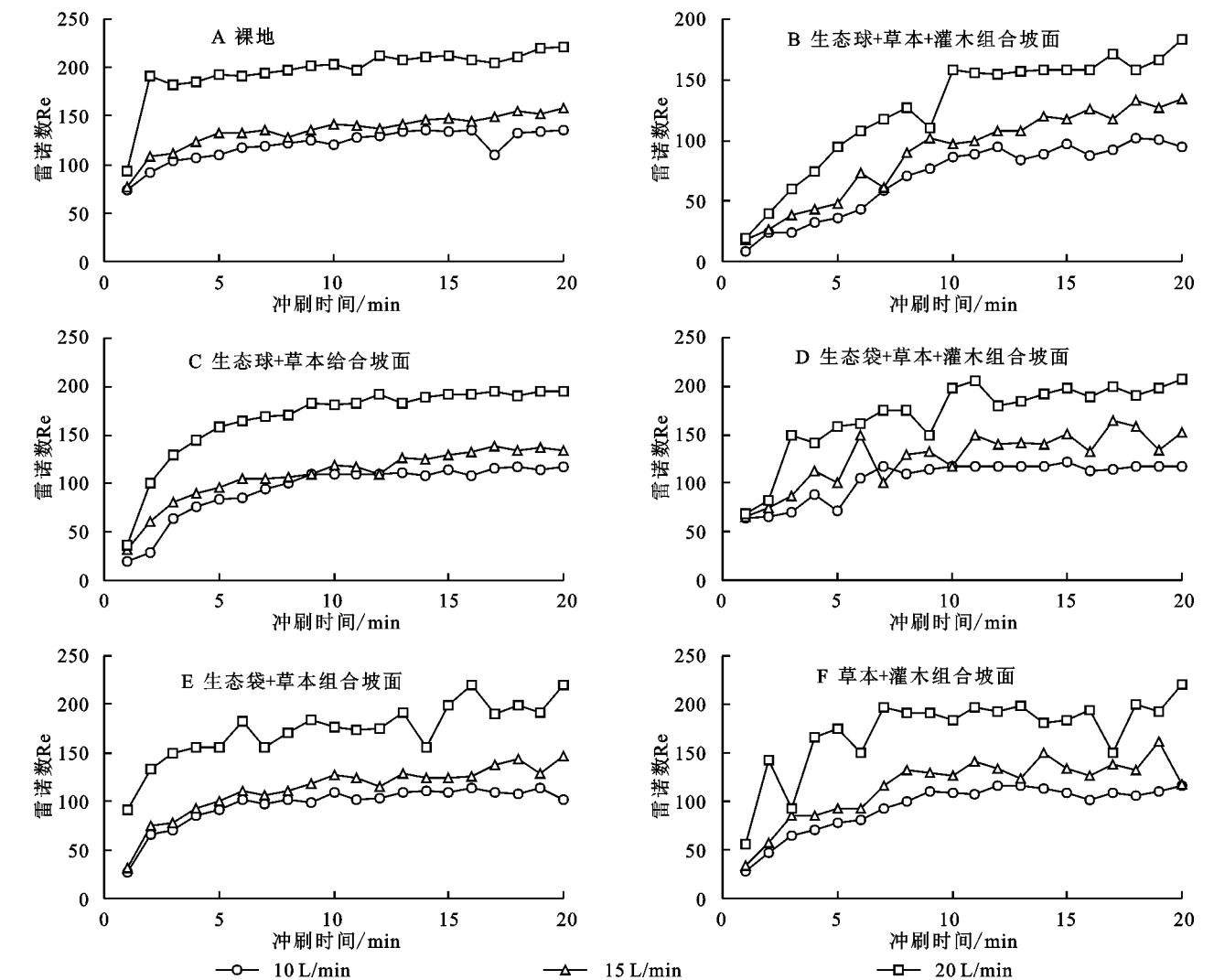


图 4 不同建设方式下雷诺数随冲刷历时变化特征

2.3 不同建设方式对弗劳德数的影响

弗劳德数反映水流惯性力与重力的比值,是判别水流流态的另一个主要参数。弗劳德数大于 1 时,水流为急流;弗劳德数小于 1 时,水流为缓流;弗劳德数等于 1 时,水流为临界流。一般而言,弗劳德数越大,表明坡面流剪切力越大、径流挟沙能力越强。

由弗劳德数的判定条件可知,在本试验工况下(表 3),1 号(裸坡)坡面的流型均为急流;而其他建设方式下,坡面流流型均为缓流。这是由于植被和各种

生态建设措施如生态球等均会对水流形成较大的阻碍作用,降低流速同时抬高水深,呈现出缓流的状态。在相同建设方式下,随着流量的增大,弗劳德数也进一步增大。这是由于流量的增大,水深进一步升高,水流与植被根系等障碍物相对接触面积进一步减小,粘滞作用降低,致使弗劳德数随之增大。

2.4 不同建设方式对阻力系数的影响

坡面流阻力特性是坡面流水动力学特性的又一个重要参数,和明渠流的阻力特性比较起来,它受到

的影响因素更多。明渠渠道通常会得到修整以保证其水流的通畅性,河岸坡面则经常伴随着大面积覆盖的植物、坑坑洼洼的表面以及动物和微生物生存留下的痕迹。因此,在其复杂的机制和水动力特性影响下,只能采用近似计算方法来获得,以便应用于生产实践。目前还是采用明渠流的理论来进行坡面流的近似计算,诸如 Darcy-Weisbach 公式、曼宁公式等就经常被采用。

表 3 不同建设方式下 Fr 值

小区 编号	冲刷流量/(L·min ⁻¹)		
	10	15	20
1	1.030	1.443	1.685
2	0.396	0.469	0.667
3	0.434	0.471	0.597
4	0.479	0.552	0.556
5	0.612	0.599	0.757
6	0.471	0.664	0.856

表 4 不同建设方式下 f 值

小区 编号	冲刷流量/(L·min ⁻¹)		
	10	15	20
1	2.11	0.96	0.70
2	12.71	9.07	4.48
3	10.58	9.00	5.59
4	8.70	7.31	6.46
5	8.98	4.53	2.72
6	5.33	5.56	3.48

在试验范围内,Darcy-Weisbach 阻力系数 f 变化范围为 0.70~12.71(表 4)。冲刷流量为 10 L/min 时,除 1 号(裸坡)坡面,平均阻力系数普遍大于 5,为 1 号(裸坡)的 2.5~6 倍($p<0.01$),说明在流量较小时,坡面植物及工程建设措施通过对水流的阻挡作用,增加了坡面径流运动阻力和过水断面粗糙度,导致坡面阻力系数明显增加;随着流量的增大,各坡面阻力系数均有明显的下降,说明建设措施对坡面的阻滞作用随着流量的增加呈下降趋势,这是由于随着流量的增大,坡面水深会随之增大,坡面流会漫过坡面的枯落物层及部分植被,使得水流与坡面相对接触面积减小,阻碍作用变小。小流量时,底部建有工程设施的坡面平均阻力系数普遍大于纯植被坡面,其中,布设生态球措施的坡面要好于布设生态袋措施的坡面;大流量时,两者相差不大,说明在本次试验条件下,随着流量的增大,工程建设措施的阻力增幅效应减小,而植被对坡面流的阻力效应降低幅度不大,当冲刷流量为 20 L/min 时,植被对坡面流的阻力效应要强于工程建设措施。

曼宁糙率 n 表征地表粗糙程度对水流流动过程中的阻滞作用,由表 5 看出,曼宁糙率 n 与 Darcy-Weisbach 阻力系数 f 变化趋势相同。当坡面建设方式相同时,曼宁糙率 n 随着冲刷流量的增大而减小。其他坡面较 1 号(裸坡)坡面曼宁糙率系数 n 均显著增大。

将 f 与 n 值进行回归分析得:

$$n=0.0367f^{0.5393} \quad R^2=0.9972 \quad (7)$$

说明 Darcy-Weisbach 阻力系数 f 和曼宁糙率 n 在指示坡面流阻力上的意义相似,这与李毅等^[14]得出的结论一致。

表 5 不同建设方式下 n 值

小区 编号	冲刷流量/(L·min ⁻¹)		
	10	15	20
1	0.054	0.035	0.031
2	0.143	0.121	0.085
3	0.130	0.122	0.096
4	0.116	0.107	0.104
5	0.118	0.082	0.064
6	0.087	0.091	0.073

3 讨论

3.1 流态指数与坡面粗糙度综合系数

张宽地等^[15]等基于流体力学理论推导出平均流速与单宽流量和水力坡度的关系

$$v=rq^{1-m}J^k \quad (8)$$

式中: r,m,k 均为系数,其中 r 为与坡面粗糙度有关的综合系数,坡面粗糙度与植被覆盖及坡面建设方式相关; m 定义为流态指数,表征了单宽流量 q 对流速的影响程度。张宽地认为,当 m 值较小时,流体主要通过增加流体流速进行能量转化,阻力做工较弱;当 m 值较大时,流体中能量的消耗主要以阻力做工为主。

引入系数 R ,表示坡面建设措施对坡面粗糙度的影响。

$$r=Rr' \quad (9)$$

式中: r' 为裸坡坡面粗糙度综合系数。将式(8)代入式(9),即为考虑坡面建设方式影响下的坡面流平均流速公式:

$$v=Rr'q^{1-m}J^k \quad (10)$$

对试验数据进行非线性回归分析,不同建设方式下,各坡面拟合幂函数关系中流态指数 m 值及影响系数 R 值如表 6 所示。

表 6 不同建设方式下坡面流流速公式指数值

小区编号	1	2	3	4	5	6
流态指数	0.171	0.611	0.560	0.463	0.261	0.254
R	1	0.018	0.032	0.065	0.382	0.821

根据表 6 可知,在本次试验中,2 号(草本+灌木+生态球)坡面流态指数最大,1 号(裸坡)坡面流态指数最小。6 号(草本+灌木)坡面流态指数较 1 号坡面稍大,而其他坡面较 1 号坡面流态指数均有明显的增加,说明坡面种植植被虽然能够一定程度地对坡面流形成阻碍作用但效果有限,而坡底工程建设措施对坡面流则有较好的削弱效果。在野外条件下,植被对坡面流的削减作用主要依靠植被枝干叶片及产生的枯落物,由于其受多种因素的影响而随机分布,难以均匀覆盖坡面,致使植被阻力增幅效果不一。

由式(10)可知, R 值越小,坡面流速越小,表明坡面糙率越大。在本次试验中,2,3 号坡面 R 值相对最小,4,5 号坡面 R 值要小于 6 号坡面,均小于 1 号坡面,这表明,建设措施中,生态球建设措施对坡面糙率的增加效果最好,生态带建设措施次之,植被建设措施虽有增加但增加幅度不大。

3.2 流态判别

水流流态能够反映水流紊动强度,它是坡面薄层水流水动力学特性十分重要的参数之一,它直接影响坡面流的阻力特征,也与坡面径流计算与坡面输沙直接相关,一直以来都是坡面流研究的热点问题之一。雷诺数 Re 和弗劳德数 Fr 是水流流态的两个指标,雷诺数判定层流、紊流;弗劳德数判定急流、缓流。尽管众多的学者进行了大量的研究,但由于试验的条件不同,得出的结论也不相同,因此目前对坡面薄层水流的流态还没有统一。

Horton 等^[16]通过定量研究,发现坡面流是一种完全的紊流中点缀着层流的混合流。Emmett^[17]、Selby^[18]、沙际德^[19]等通过试验发现坡面水流扰动十分剧烈,是层流和紊流的混合,兼具紊流与层流的特征。陈国祥^[20]、吴普特^[21]等认为薄层水流与明渠流类似,但它是一种不一样的层流范畴,前者将其定义为“伪层流”,后者将其定义为“搅动层流”。张光辉^[22]通过变坡水槽试验,发现坡面流几乎都处在紊流范畴内,在边界状况更加复杂的河岸带坡面上更加不可能出现层流流态。吴长文等等^[23]也认为降雨时,天然坡面上的薄层水流无法维持其层流的状态。张宽地等^[15]通过定床阻力试验分析得出在不同的流量与坡度时,薄层水流主要处在滚波流区与过渡流区,随着流量的增大,水流会逐渐延伸到紊流区。

通过本次试验及李朝栋^[24]、朱慧鑫^[25]、张光辉^[26]等文献中的数据发现,雷诺数与单宽流量密切相关。雷诺数随着单宽流量的增大而增大,且增速没有明显的变化趋势,因此必定存在临界范围使得坡面流流态由层

流转变成紊流。将上述文献中的流量数据转换成单宽流量以消除坡面尺寸差异,统计见表 7。

表 7 不同文献雷诺数汇总

文献	单宽流量 $L/(s \cdot m)$	雷诺数 Re	流态
本文	0.102	111	层流
	0.144	134	层流
	0.160	191	层流
	0.167	134	层流
李朝栋等	0.250	255	层流
	0.333	339	层流
	0.417	427	层流
	0.500	558	过渡流
朱慧鑫等	0.397	310	层流
	0.794	633	过渡流
	1.190	1023	过渡流
	0.625	1276	过渡流
张光辉	1.25	2200	紊流
	2.50	3472	紊流
	3.75	4829	紊流
	5.00	6357	紊流
	7.50	8777	紊流
	10.00	12922	紊流

由此可见,当单宽流量大于 $0.5 L/(s \cdot m)$ 时,雷诺数大于 500,坡面流流态由层流向过渡流转变;随着单宽流量进一步增大,超过 $1.25 L/(s \cdot m)$ 时,雷诺数大于 2 000,坡面流流态由过渡流向紊流变化。

但在野外坡面上,水流难以均匀分布,难以达到明渠流层面的层流状态,只能达到数值意义上的层流。由于条件限制,本试验的单宽流量偏小,可以进行更大流量的试验进行补充。

3.3 建设方式的优选

本次试验采取了植被与生态建设措施组合的坡面建设方式,植被以草本植物狗牙根和木本植物红叶石楠为代表,工程建设措施以生态球和生态袋为代表。通过试验数据分析可以得出,植被(坡面 6)的减流效果在 10%左右,生态球与植被组合工况(坡面 2)的减流效果在 20%以上,而生态袋与植被组合工况(坡面 4)的减流效果也在 10%左右,这表明,在本次试验中,植被与生态球均有明显的减流效果,而生态袋减流效果不明显。试验流量,2 号坡面(生态球+草本+木本)相较裸坡平均减流 22.03%,流态为层流,流型为缓流,Darcy-Weisbach 阻力系数 f 平均为裸坡的 8 倍,减流效果及降低流速效果最佳,在本试

验选取的工况中,推荐采用此种建设方式。

由于本文的研究为径流冲刷试验,未考虑降雨对坡面流产生的影响;工程建设措施的布置位置固定;对河岸带建设方式的评价主要依赖水流条件,也可以结合生物量进行综合评价,需要在今后的研究中加入考虑。

4 结论

(1) 在试验条件下,坡面流流速均随着冲刷流量的增大而增大。植被与工程建设措施能够明显地削减流速,其中 1 号(裸坡)坡面与 6 号(纯植被)坡面流速沿程增加,其余坡面流速呈先增大后减小趋势。坡面流流态均为层流,1 号(裸坡)坡面为急流,其他坡面均为缓流。随着单宽流量的增大,雷诺数增加,两者呈良好的线性关系。

(2) 坡面阻力系数与冲刷流量呈负相关;植被及工程建设措施均能提高坡面阻力系数,其中生态球的效果要好于生态袋。

(3) 在进行河岸带建设过程中,要充分考虑植被与工程建设措施相结合,以充分发挥其护岸效果。在试验所设置的工况中,推荐采用 2 号坡面组合建设方式,生态球布设在坡面底部,草本植物多为狗牙根均匀分布,灌木选取红叶石楠呈梅花桩型分布在整个坡面上。

参考文献:

- [1] 夏继红,周子晔,汪颖俊,等.河长制中的河流岸线规划与管理[J].水资源保护,2017,33(5):38-41.
- [2] 张琦,夏继红,汪颖俊,等.基于分形维数的中小河流滩地沉积物空间分布研究[J].水土保持研究,2019,26(2):366-369.
- [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] 王俊杰,张宽地,龚家国,等.不同覆盖度条件下坡面水流阻力规律[J].水土保持学报,2015,29(5):1-6.
- [5] 潘成忠,马岚,上官周平.含沙量对草地破面径流泥沙沉积和水力特性的影响[J].水科学进展,2008,19(6):857-862.
- [6] 汪孟尧,姚原,宗芯伊.不同地表粗糙度下坡面流水动力学特性试验研究[J].科技通报,2019,35(4):180-184.
- [7] 李兆松,王冰,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.
- [8] 常松涛,黄少燕,查轩,等.雨强和植被覆盖度对红壤坡面产流产沙的影响[J].水土保持学报,2019,33(3):58-63.
- [9] 肖从宇,程金花,姜群鸥,等.台田措施下坡面流土壤侵蚀水动力学特征[J].水土保持学报,2019,33(4):10-15.
- [10] 林庆明,丁文峰,张长伟,等.模拟降雨条件下红壤坡面侵蚀产沙水动力学特征[J].水土保持通报,2019,39(2):16-21.
- [11] Amundson R, Berhe A A, Hopmans J W, et al. Soil and human security in the 21 st century[J]. Science, 2015,348(6235):1261071.
- [12] 林立怀,夏继红,毕利东,等.平原村庄区河岸带植被特征研究[J].中国农村水利水电,2016(7):56-58.
- [13] 张宽地,王光谦,孙晓敏,等.模拟植被覆盖条件下坡面流水动力学特性[J].水科学进展,2014,25(6):825-834.
- [14] 李毅,邵明安.草地覆盖坡面流水动力参数的室内降雨试验[J].农业工程学报,2008,24(10):1-15.
- [15] 张宽地,王光谦,孙晓敏,等.坡面薄层水流水动力学特性试验[J].农业工程学报,2014,30(15):182-189.
- [16] Horton R E, Leach H R, Van Vliet R. Laminar sheet-flow[J]. Eos, Transactions American Geophysical Union, 1934,15(2):393-404.
- [17] Emmett W W. The hydraulics of overland flow on hill-slope[R]. U.S. Geological Survey Professional Paper, 1970.
- [18] Selby M J. Hillslope materials and processes[R]. Oxford: Oxford University Press, 1993.
- [19] 沙际德,蒋允静.试论初生侵蚀性坡面薄层水流的基本动力特性[J].水土保持学报,1995,9(4):29-35.
- [20] 陈国祥,姚文艺.降雨对浅层水流阻力的影响[J].水科学进展,1996,7(1):42-46.
- [21] 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.
- [22] 张光辉,卫海燕,刘宝元.坡面流水动力学特性研究[J].水土保持学报,2001,15(1):58-61.
- [23] 吴长文,王礼先.林地坡面的水动力学特性及其阻延地表径流的研究[J].水土保持学报,1995,9(6):31-38.
- [24] 李朝栋,李占斌,马建业,等.不同长度小麦秸秆覆盖下黄土耕地坡面流水动力学特性[J].农业工程学报,2017,33(4):153-160.
- [25] 朱慧鑫,胡晓静,程金花,等.草被覆盖下坡面流土壤侵蚀水动力学特征[J].东北农业大学学报,2018,49(7):48-57.
- [26] 张光辉.坡面薄层水流水动力学特性的试验研究[J].水科学进展,2002,13(2):159-165.