

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2024.02.005

塔里木河植被根系对河岸冲刷特性影响的现场试验

宗全利¹, 张禹洋¹, 唐瑞泽², 汤骅², 刘华利³, 李琳⁴

(1. 青岛农业大学资源与环境学院, 山东 青岛 266109; 2. 石河子大学水利建筑工程学院, 新疆 石河子 832000;
3. 塔里木河流域管理局, 新疆 库尔勒 841000; 4. 新疆农业大学水利与土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052)

摘要: 为研究现场条件下植被根系对河岸冲刷特性的定量影响, 设计制作了冲刷试验装置, 在塔里木河干流上游选取了4个典型位置, 开展了胡杨、芦苇、红柳和骆驼刺4种典型根系的18组土体起动切应力和冲刷系数现场试验。试验结果表明: ① 起动切应力随根系含量增大基本呈幂函数关系增大, 且相同根系含量对应起动切应力红柳最大, 胡杨和骆驼刺次之, 芦苇最小; 分析了单位根系含量变化对起动切应力的影响效果, 其顺序为骆驼刺 > 胡杨 > 红柳 > 芦苇。② 建立了起动切应力与根系体积密度的定量关系式; 根系的存在可以减小土体冲刷系数, 其值随根系含量增大基本呈幂函数关系减小, 且单位根系含量增加对冲刷系数的减小效果次序为骆驼刺 > 胡杨 > 红柳 > 芦苇。③ 建立了有、无根系影响的冲刷系数与起动切应力幂函数关系式, 并与已有试验结果进行了对比分析; 本文试验结果与现有研究结果规律一致, 但对应的系数和指数均有所差异。研究成果能为塔里木河植被护坡和河岸冲刷过程计算提供参考依据。

关键词: 冲刷特性; 起动切应力; 冲刷系数; 植被根系; 现场试验; 塔里木河

中国分类号: TV149.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2024)02-0232-12

植被根系通过对河岸冲刷过程侵蚀特性的影响, 可以减少水流冲刷^[1]。但现有研究成果多以植被影响的水槽试验和过程模拟为主^[2-3], 缺少植被根系对土体侵蚀特性影响的现场测试资料。因此, 通过现场试验研究植被根系对岸坡土体冲刷特性影响, 对植被护坡和河岸冲刷定量计算均具有重要意义。

河岸土体冲刷特性主要与起动切应力和冲刷系数2个参数有关。目前对这2个参数的测定主要通过室内水槽试验, 如Toan^[4]通过室内水槽试验测试了越南红河岸坡土体起动切应力和侵蚀率; Palermo等^[5]通过水槽试验研究了水流射流冲击作用下起动切应力估算方法; He等^[6]对黄河下游黏性土体冲刷速率进行了试验研究; 张文皎等^[7]采用高速水流喷射试验分析了底泥的起动输移规律; Wahl^[8]对4种不同的黏性土壤进行了52次室内水流喷射试验, 得到最佳冲刷参数拟合方法; 宗全利等^[9]利用水槽冲刷试验装置, 对荆江河岸黏性土起动切应力和冲刷系数进行了试验; 刘明潇等^[10]利用水槽结合水下摄影, 对床面泥沙运动进行了精细观测。综上, 实验室测定土体冲刷特性参数可方便调节水流和边界条件, 但缺点在于试验土体为重塑土, 与天然状态差异较大, 难以准确反映自然冲刷条件, 所得结果与现场结果差异较大, 不能直接用于实际河岸冲刷的计算。

现场试验可以直接获取实际岸坡的冲刷参数, 国内外学者对此开展了相关研究^[11-12]。2007年美国材料与试验协会(ASTM)发布了水流喷射标准测量方法(D5852), 并得到了广泛应用^[13-14]。Karmaker等^[15]通过水流喷射方法对印度Brahmaputra河岸土体进行了冲刷特性参数的现场测定, 得到了土体冲刷系数和起动切应力的定量结果; Wynn^[16]使用水流喷射试验装置, 现场测量了植被对河岸土体冲刷特性的影响。ASTM的

收稿日期: 2023-09-12; 网络出版日期: 2024-01-10

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/32.1309.P.20240110.1448.002>

基金项目: 新疆维吾尔自治区重点研发计划项目(2022B03024-2); 国家自然科学基金资助项目(51569029)

作者简介: 宗全利(1979—), 男, 山东临朐人, 教授, 博士, 主要从事河流动力学方面研究。

E-mail: zongql@qau.edu.cn

通信简介: 李琳, E-mail: lilin_xjau@163.com

D5852 是目前现场测量土体冲刷特性参数比较流行的方法, 得到了广泛应用, 但现有成果中关于植被根系影响下冲刷特性的研究结果很少。

本文通过在塔里木河干流上游河段进行现场试验, 获得 4 种典型植被根系条件下河岸土体冲刷系数和启动切应力值, 分析岸坡植被对河岸土体冲刷特性的影响关系, 为后续河岸侧向冲刷过程计算提供实测数据。

1 试验概况

1.1 试验装置及原理

1.1.1 试验装置

参考 ASTM 的 D5852 标准, 设计制作了现场试验装置。装置分为供水和水流喷射两部分, 其中, 供水部分由调节水阀、支架、注水软管、水泵组成; 水流喷射部分由喷射管、喷嘴、测针、浸没水箱、挡流板和基础环等组成。其中, 喷射管长 70 cm、内径 10 cm, 喷嘴直径 0.4 cm, 测针直径 0.35 cm、长 110 cm, 浸没水箱高 25 cm、内径 10 cm, 基础环高 10 cm、内径 10 cm。具体如图 1 所示。

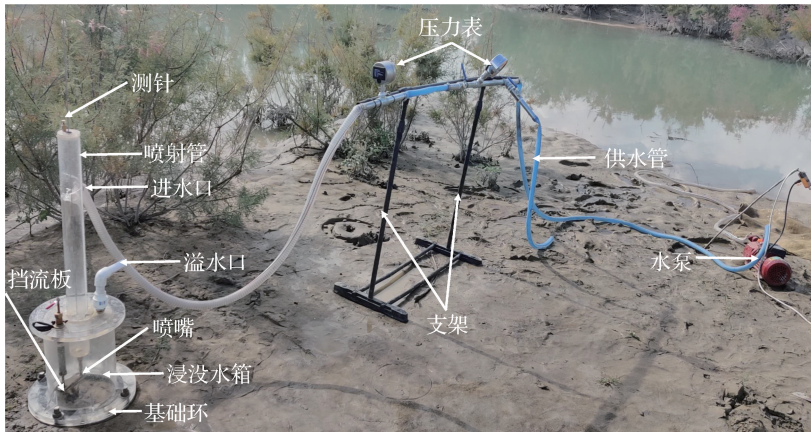


图 1 土体冲刷特性现场试验装置

Fig. 1 In situ test device for soil erosion characteristics

1.1.2 试验原理

启动切应力为水流产生的切应力在喷射水流下方最大冲刷处达到峰值, 该临界状态水流切应力即为土体的启动切应力, 具体计算原理如下:

$$\tau_i = \tau_0 \left(\frac{J_p}{J_i} \right)^2 \quad (1)$$

$$J_p = C_d d_0 \quad (2)$$

$$\tau_0 = C_f \rho U_0^2 \quad (3)$$

$$U_0 = \sqrt{2gh} \quad (4)$$

式中: τ_i 为水流在土体表面产生的应力峰值, N/m^2 ; τ_0 为喷嘴处产生的初始应力, N/m^2 ; J_p 为喷嘴潜在射流长度, m ; J_i 为喷嘴距土体表面冲刷中心距离, m ; C_d 为扩散常数, 取 6.3; d_0 为喷嘴直径, $d_0 = 0.004 \text{ m}$; C_f 为摩擦系数, 文中试验装置的 C_f 为 0.004 16; ρ 为水的密度, $\rho = 1\,000 \text{ kg}/\text{m}^3$; U_0 为喷嘴处流速, m/s ; g 为重力加速度, m/s^2 ; h 为水头差, m 。

结合式(1)一式(4)可以得出 τ_i 的简化方程式:

$$\tau_i = 0.05 \frac{h}{J_i^2} \quad (5)$$

喷射水流在土体冲刷中心表面产生最大切应力,当冲刷深度不变时,水流产生的应力与土体起动切应力达到平衡,此时 J_i 称为平衡深度,代入式(5)中得到 τ_i ,即为土体起动切应力。

冲刷系数通过 Hanson 方法^[17]进行计算:

$$k_d = 0.003 \exp(385I_j) \quad (6)$$

式中: k_d 为冲刷系数, $\text{cm}^3/(\text{N} \cdot \text{s})$; I_j 为射流指数,绘制 D_s/t 和 $U_0/(t)^{-0.931}$ 关系图(D_s 为冲刷距离),用最小二乘法拟合直线,其斜率即为射流指数。

1.2 试验步骤及组次安排

1.2.1 试验步骤

(1) 选择合适的试验地点,安装仪器,将基础环均匀推入试验土体中,直至土体表面与基础环表面相平,如图2(a)所示。

(2) 固定基础环与浸没水箱,用软管连接进水口和水泵(图2(b))。

(3) 用挡流板挡住喷嘴,打开排气阀排出气体,开始供水;待浸没水箱充满水后,将挡流板移开,开始冲刷试验(图2(c)—图2(d));在开始试验30 s和120 s时分别用测针测量冲刷深度,之后每隔120 s测一次冲刷深度,直至连续2次测针读数不变化,表明此时土体冲刷达到平衡状态,试验结束(图2(e))。

(4) 试验完成后,收集基础环内根系,测量所有根系长度、直径,得到根系体积,并计算占基础环土体体积($3\ 140\ \text{cm}^3$)的百分数,即根体积密度(D_{RV})(图2(f))。

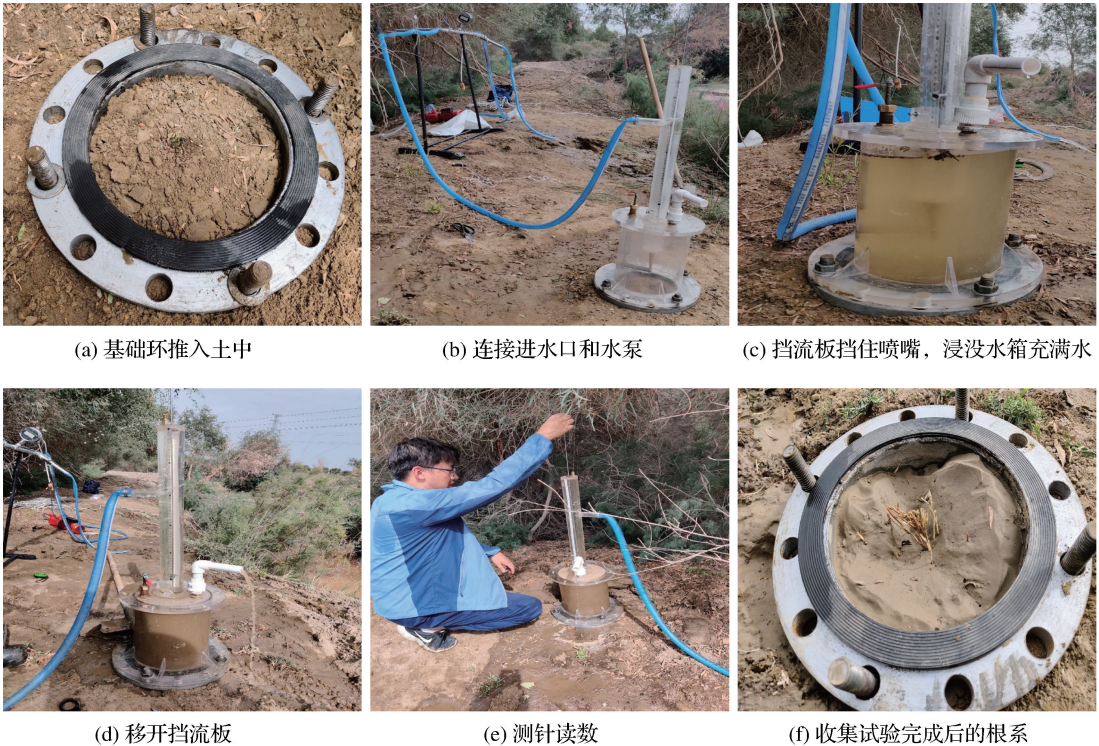


图2 土体冲刷试验过程

Fig.2 Test process of soil erosion

1.2.2 试验组次

根据已有现场调查结果, 塔里木河上游共有 29 种植被, 出现频率较高的有 15 种, 乔木主要是胡杨, 灌木和草本植被主要有芦苇、红柳、骆驼刺等^[18]。因此, 选择胡杨、芦苇分别代表乔木和草本植被, 红柳和骆驼刺代表灌木植被, 以 4 种典型植被根系土体作为研究对象, 在 2022 年 8—9 月进行了现场试验, 具体组次安排见表 1。为了进行对比, 每个试验位置同时进行了无根系土体的冲刷试验。

表 1 试验组次与土体物理性质

Table 1 Test groups and soil physical properties

| 序号 | 试验位置 | 经纬度 | 河岸 | 植被情况 | 试验组次 | 土体物理性质 | | |
|-----|-------------------|------------------------|----|------|------|--------|--------------------------|---------|
| | | | | | | 含水率/% | 干密度/(g/cm ³) | 中值粒径/mm |
| I | 新其满大桥下游 200 m 处 | 82°46'49"E, 40°59'32"N | 右岸 | 胡杨 | 3 | 14.5 | 1.17 | 0.048 |
| II | 大寨水库进水口下游 100 m 处 | 82°33'27"E, 40°57'56"N | 右岸 | 芦苇 | 4 | 18.8 | 1.20 | 0.050 |
| III | 恰克马克生态水闸上游 50 m 处 | 82°18'53"E, 40°54'31"N | 右岸 | 红柳 | 3 | 29.8 | 1.27 | 0.053 |
| IV | 二牧江大桥上游 400 m 处 | 82°07'52"E, 40°52'22"N | 左岸 | 骆驼刺 | 4 | 12.9 | 1.20 | 0.042 |

1.3 河岸土体物理性质

分别对现场试验 4 个位置的土体取样, 测量其主要物理性质和级配情况, 结果见表 1 和图 3。可以看出, 4 个试验位置土体物理性质基本相同, 干密度范围为 1.17 ~ 1.27 g/cm³, 均值为 1.21 g/cm³; 中值粒径范围为 0.042 ~ 0.053 mm, 平均值为 0.048 mm; 土体含水率范围为 12.9% ~ 29.8%。

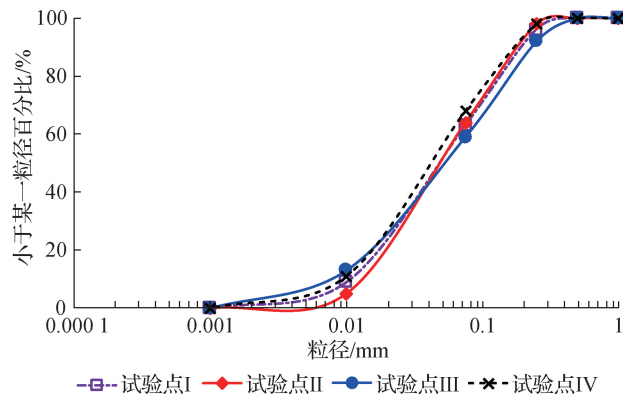


图 3 土体颗粒级配曲线

Fig. 3 Soil particle size distribution

2 试验结果及分析

2.1 结果验证

根据土体物理性质试验结果, 塔里木河干流河岸土体主要为非黏性土体。非黏性土起动主要以单颗粒运动为主, 粒径大小对起动条件具有重要影响, 起动切应力与粒径大小定量关系的研究比较成熟, 相关成果也较多且均经过了大量试验验证。本文以经过验证可靠的非黏性土体起动切应力计算公式对试验土体的起动切应力进行计算, 以此来验证现场试验得到结果的可靠性。

当中值粒径小于 2.0 mm 时, 土体起动切应力常用下式进行计算^[17]:

$$\tau_c = 0.044 \times 16.2 \times d_{50} \quad (7)$$

式中： τ_c 为起动切应力， N/m^2 ； d_{50} 为土体中值粒径， mm 。

根据式(7)计算得到4个现场试验地点土体起动切应力值，与相应无根系土体起动切应力现场试验结果进行对比，结果如图4所示。从图4中可以看出，实测和计算结果基本一致，最小误差为1.2%，最大误差为2.5%，均小于5%，在允许范围内，可以保证现场试验装置的主要参数(C_d 、 C_f)和相应方法的准确性。

2.2 起动切应力结果及分析

为分析植被根系对土体起动切应力的定量影响，现场测得了4种典型植被根系下的土体起动切应力值；并在试验结束后获取根系特征指标，计算 D_{RV} ，结果见表2。从表2中可以看出，4种植被根系对应河岸土体起动切应力均大于无根系数值，说明植被根系存在可以增强土体的起动切应力值。由表1和表2可知，Ⅲ处土体含水率相对较高(29.8%)、干密度较大($1.27 g/cm^3$)，所以，Ⅲ处无根系的起动切应力高于其他试验点，而冲刷系数较低，表明该试验点土体不容易起动、抗冲刷能力较强。

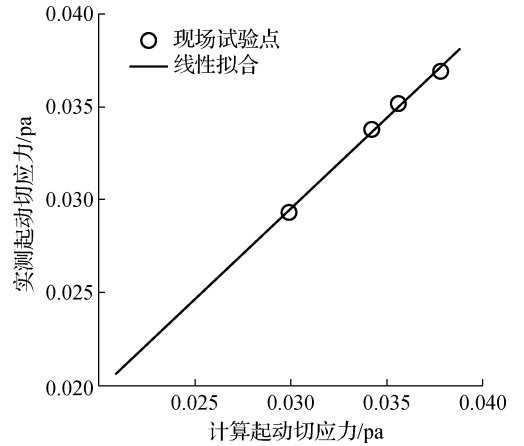


图4 土体起动切应力计算结果与实测结果对比
Fig. 4 Comparison between calculated and measured results of soil critical shear stress

表2 起动切应力和冲刷系数现场试验结果

Table 2 In situ test results of critical shear stress and erodibility coefficient

| 组次 | 不同直径范围根系体积/ cm^3 | | | | $D_{RV}/\%$ | 水头差/m | 平衡深度/m | 射流指数 | 起动切应力/ (N/m^2) | 冲刷系数/ ($cm^3/(N \cdot s)$) |
|-----|--------------------|---------------|---------------|-------------|-------------|---------|---------|---------|-----------------------|---------------------------------|
| | 0 ~ <1.5 mm | 1.5 ~ <3.0 mm | 3.0 ~ <4.5 mm | 4.5 ~ 10 mm | | | | | | |
| I | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.009 7 | 0.119 5 | 0.008 2 | 0.033 8 | 0.070 5 |
| | 4.94 | 7.21 | 34.82 | 0.10 | 1.50 | 0.011 0 | 0.109 0 | 0.006 7 | 0.046 5 | 0.039 6 |
| | 15.22 | 14.30 | 18.67 | 0.18 | 1.54 | 0.011 5 | 0.109 5 | 0.005 9 | 0.047 8 | 0.029 1 |
| | 17.67 | 21.70 | 23.37 | 0.18 | 2.00 | 0.011 6 | 0.109 0 | 0.005 3 | 0.049 0 | 0.023 1 |
| II | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.009 5 | 0.116 0 | 0.008 0 | 0.035 2 | 0.065 3 |
| | 12.78 | 6.25 | 10.48 | 0.46 | 0.95 | 0.009 5 | 0.106 0 | 0.007 2 | 0.042 3 | 0.048 0 |
| | 38.50 | 42.04 | 40.73 | 0.50 | 3.88 | 0.008 9 | 0.096 0 | 0.005 1 | 0.048 4 | 0.021 4 |
| | 13.27 | 8.56 | 8.27 | 0.17 | 0.96 | 0.010 9 | 0.109 0 | 0.006 9 | 0.045 8 | 0.042 7 |
| III | 9.48 | 2.91 | 3.49 | 0.09 | 0.51 | 0.006 8 | 0.094 0 | 0.007 7 | 0.038 6 | 0.058 2 |
| | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.008 8 | 0.109 5 | 0.006 9 | 0.036 9 | 0.042 7 |
| | 0 | 0 | 41.64 | 67.20 | 2.90 | 0.009 5 | 0.093 0 | 0.005 9 | 0.054 8 | 0.029 1 |
| | 2.35 | 9.49 | 48.58 | 58.94 | 3.80 | 0.009 2 | 0.090 0 | 0.005 3 | 0.056 8 | 0.023 1 |
| IV | 0 | 8.18 | 45.46 | 78.92 | 4.22 | 0.010 4 | 0.093 0 | 0.004 6 | 0.060 3 | 0.017 6 |
| | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.006 4 | 0.104 5 | 0.008 4 | 0.029 3 | 0.076 1 |
| | 1.32 | 3.21 | 4.41 | 0.02 | 0.28 | 0.009 2 | 0.108 0 | 0.007 4 | 0.039 6 | 0.051 8 |
| | 0.85 | 2.23 | 31.00 | 0.03 | 1.09 | 0.009 2 | 0.101 0 | 0.005 9 | 0.045 0 | 0.029 1 |
| | 2.12 | 6.10 | 14.95 | 0.03 | 0.74 | 0.009 4 | 0.104 0 | 0.006 2 | 0.043 7 | 0.032 6 |
| | 0.85 | 1.00 | 12.81 | 0.02 | 0.47 | 0.009 1 | 0.106 0 | 0.007 0 | 0.040 7 | 0.044 4 |

需要指出, 本文主要讨论根体积密度对起动切应力和冲刷系数的影响, 但实际上根系的形状、分布等因素也会产生相应的影响。图5给出了冲刷后4种典型植被根系的分布情况, 可以看出, 在冲刷过程中, 4种典型植被根系都比较集中和垂直分布, 这也是得到本文结果的前提条件。

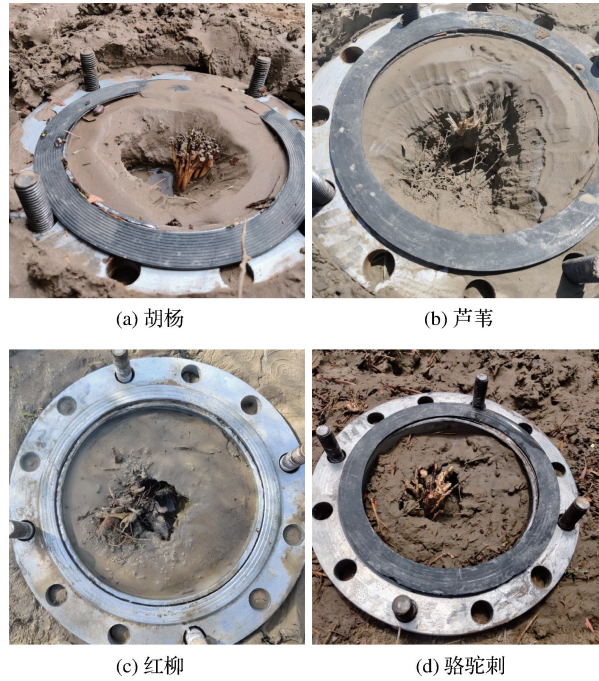


图5 冲刷后4种典型植被根系分布情况

Fig. 5 Roots distribution of four typical vegetation species

2.2.1 不同植被类型对起动切应力的影响

不同植被类型对应起动切应力与根体积密度的关系如图6所示。从图6中可以看出, 在一定根系范围内 ($D_{RV} = 0.28\% \sim 4.22\%$), 起动切应力随根体积密度的增加而增大, 但不同植被增强起动切应力的强度不同。总体上, 相同根体积密度对应的红柳起动切应力最大, 其次为胡杨和骆驼刺, 芦苇最小。

同时, 4种植被根系基本在 $D_{RV} = 1.0\% \sim 1.5\%$ 范围相互交叉。当 $D_{RV} < 1.0\%$ 时, 相同根体积密度下对应骆驼刺起动切应力最大, 芦苇最小, 说明在此范围内根系增强起动切应力的能力为骆驼刺 > 胡杨 > 芦苇 (红柳无此范围根体积密度试验结果); 当 $D_{RV} > 1.5\%$ 时, 相同根体积密度下对应红柳起动切应力最大, 芦苇最小, 说明在此范围内根系增强起动切应力的能力为红柳 > 胡杨 > 芦苇 (骆驼刺无此范围根体积密度试验结果); 当 $1.0\% \leq D_{RV} \leq 1.5\%$ 时, 相同根体积密度下对应胡杨起动切应力最大, 芦苇最小, 说明在此范围内根系增强起动切应力的能力为胡杨 > 骆驼刺 > 芦苇 (红柳无此范围根体积密度试验结果)。受现场试验条件限制, 本文含根系试验组次相对较少, 得到的4种植被根系交叉点范围可能会随着试验数据的增

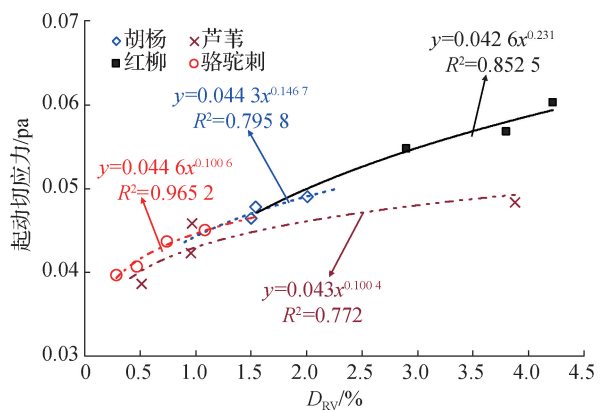


图6 不同植被对应根体积密度与起动切应力关系

Fig. 6 Relationship between root volume density and critical shear stress under different vegetation species

加有所变化,但基本变化趋势不会改变,上述结果应用仅限于4种植被根体积密度范围 $D_{RV} < 4.22\%$ 。

根据上述结果可知,每种植被根系均能增强土体起动切应力,但由于其根系特征并不完全相同,所以增强机理也并不一致。如芦苇为禾本植物,须根较发达,但根系刚度较低,所以芦苇主要通过加筋作用将松散土体联结为复合体,形成加筋土,所以在上述4种典型植被中,芦苇对起动切应力增强作用最弱;红柳为小乔木或灌木植物,根系主要为一条主根,须根较少,主根刚度较高,其主要通过锚固作用稳固土体,所以在根体积密度较大时($D_{RV} > 1.5\%$),红柳表现出最强的增强作用;胡杨为木本植物,根系较粗,具有一定的刚度,主要通过锚固作用可以将浅层不稳定土体与深处较为稳定土层进行稳固,其对起动切应力增强作用与红柳类似;骆驼刺为灌木植物,根系既有纵横交错的须根,也有垂直向下的粗根,主根刚度较高,且垂向发育深度较大,通过锚固和加筋2种作用提高起动切应力,所以骆驼刺在根体积密度中等($0.5\% \leq D_{RV} \leq 1.5\%$)下,也表现出较强的增强作用。

2.2.2 不同根体积密度对起动切应力的影响规律

将不同根体积密度对应起动切应力值与相同条件下无根系结果进行比较,得到4种典型植被不同根体积密度对起动切应力的增强效果(百分数),如图7所示。

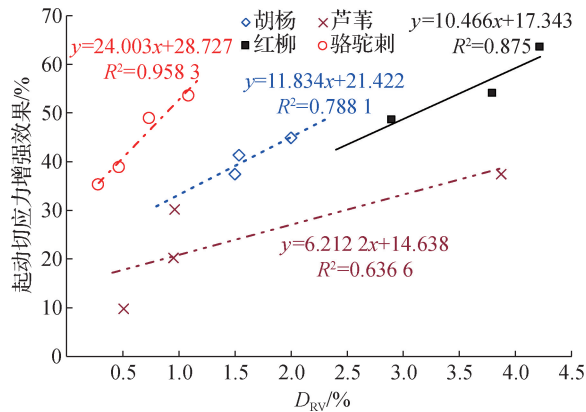


图7 不同类型植被根系对起动切应力的增强效果

Fig. 7 Effect of the roots of different vegetation species on critical shear stress

从图7中可以看出,4种典型植被根系中,相同根体积密度下骆驼刺对起动切应力的增强效果最大,胡杨和红柳次之,芦苇最小。说明根体积密度增大相同值时,骆驼刺对起动切应力增强效果最明显,而芦苇最不明显。如 D_{RV} 保持1.0%增幅,骆驼刺、胡杨、红柳、芦苇起动切应力分别增加24.0%、11.8%、10.5%和6.2%。进一步说明单位根体积密度变化对起动切应力的影响为骆驼刺 > 胡杨 > 红柳 > 芦苇。

根据 Kothyari 等^[19]的试验结果,可建立土体起动切应力与根体积密度的定量经验关系式:

$$\tau_{cr} = a \rho_d^b D_{RV}^d \quad (8)$$

式中: τ_{cr} 为根系影响下的土体起动切应力, N/m^2 ; ρ_d 为土体干密度, t/m^3 ; a 、 b 和 d 分别为系数和指数,须通过试验确定。

根据塔里木河原型土体河岸冲刷特性水槽试验结果^[20],式(8)中系数 $b = 5.11$ 。在此基础上,根据不同 D_{RV} 对应起动切应力拟合关系,得到不同植被类型和土体物理性质(干密度)下起动切应力与 D_{RV} 的定量关系式:

$$\text{胡杨: } \tau_{cr} = 0.020 \rho_d^{5.11} D_{RV}^{0.1467}, \quad R^2 = 0.7910 \quad (9)$$

$$\text{芦苇: } \tau_{cr} = 0.017 \rho_d^{5.11} D_{RV}^{0.1004}, \quad R^2 = 0.7725 \quad (10)$$

$$\text{红柳: } \tau_{cr} = 0.0126 \rho_d^{5.11} D_{RV}^{0.231}, \quad R^2 = 0.8547 \quad (11)$$

$$\text{骆驼刺: } \tau_{cr} = 0.0176 \rho_d^{5.11} D_{RV}^{0.1006}, \quad R^2 = 0.9635 \quad (12)$$

受试验组次较少影响, 式(9)一式(12)拟合系数不是很高, a 、 b 和 d 不确定性也较大, 今后需要补充更多现场试验数据, 完善不同类型植被对应的系数和指数值。

2.3 冲刷系数结果及分析

2.3.1 不同植被类型对冲刷系数的影响

根据试验结果(表 2)可知, 4 种植被根系对应河岸土体冲刷系数均小于无根系值, 说明植被根系的存在可以减小土体冲刷系数。根系对土体冲刷系数的这种减小作用, 可以有效减弱河岸土体的冲刷, 从而保护河岸侧向侵蚀。

4 种典型植被下对应冲刷系数与根体积密度的关系, 如图 8 所示。从图 8 中可以看出, 在一定范围内 ($D_{RV} = 0.28\% \sim 4.22\%$), 土体冲刷系数随根体积密度的增加而减小。这主要是因为根系存在提高了土体抗冲能力, 从而降低了冲刷系数。以芦苇为例, 随着 D_{RV} 从 0.51% 增加到 3.88%, 冲刷系数从 $5.82 \times 10^{-2} \text{ cm}^3 / (\text{N} \cdot \text{s})$ 减少到 $2.14 \times 10^{-2} \text{ cm}^3 / (\text{N} \cdot \text{s})$ 。

与起动切应力规律类似, 4 种植被根系对应冲刷系数与 D_{RV} 曲线也存在相互交叉。其中, 胡杨和芦苇基本在 $D_{RV} = 1.5\%$ 附近相互交叉; 红柳和芦苇在 $D_{RV} = 3.6\%$ 附近相互交叉。当 $D_{RV} < 1.5\%$ 时, 相同根体积密度下对应骆驼刺冲刷系数最小, 胡杨最大, 说明在此范围内植被根系影响冲刷系数的能力为骆驼刺 < 芦苇 < 胡杨(红柳无此范围根体积密度试验结果); 当 $1.5\% \leq D_{RV} \leq 3.6\%$ 时, 相同根体积密度下对应胡杨冲刷系数最小, 红柳最大, 在此范围内植被根系增强冲刷系数的能力为胡杨 < 芦苇 < 红柳(骆驼刺无此范围根体积密度试验结果); 当 $D_{RV} > 3.6\%$ 时, 根系增强冲刷系数的能力为红柳 < 芦苇(胡杨和骆驼刺无此范围根体积密度试验结果)。

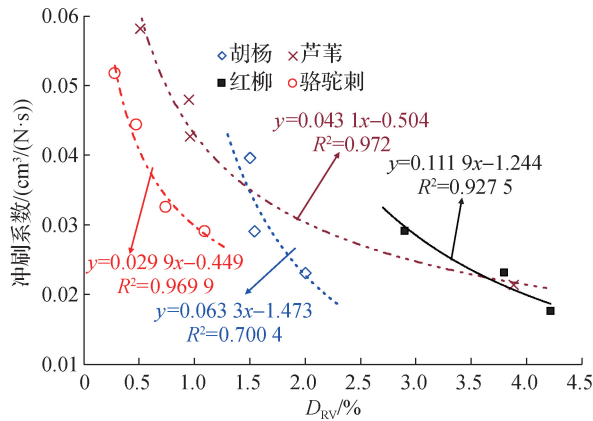


图 8 不同植被对应冲刷系数与根体积密度关系

Fig. 8 Relationship between erodibility coefficient and root volume density under different vegetation species

2.3.2 不同根体积密度对冲刷系数的影响规律

将不同根体积密度对应冲刷系数值与相同条件下无根系对应值进行比较, 得到 4 种典型植被根体积密度对冲刷系数的减小效果(百分比), 如图 9 所示。从图 9 中可以看出, 随着根体积密度增加, 冲刷系数减小效果逐渐增强。以骆驼刺为例, 随着 D_{RV} 由 0.28% 增加到 1.09%, 冲刷系数减小效果由 31.9% 提升到 61.8%。

4 种典型植被根系中, 相同根体积密度变化下骆驼刺对冲刷系数的减小效果最大, 其次为胡杨, 红柳次之, 芦苇最小。说明增大相同根体积密度时, 骆驼刺对冲刷系数的减小效果最明显, 而芦苇相对最不明显。如 D_{RV} 保持 1.0% 增幅, 骆驼刺、胡杨、红柳、芦苇冲刷系数会分别增加 38.0%、34.8%、19.6%、14.7%。

进一步说明单位根体积密度变化对冲刷系数的影响为骆驼刺 > 胡杨 > 红柳 > 芦苇，这与根系对起动切应力影响的试验结果一致。

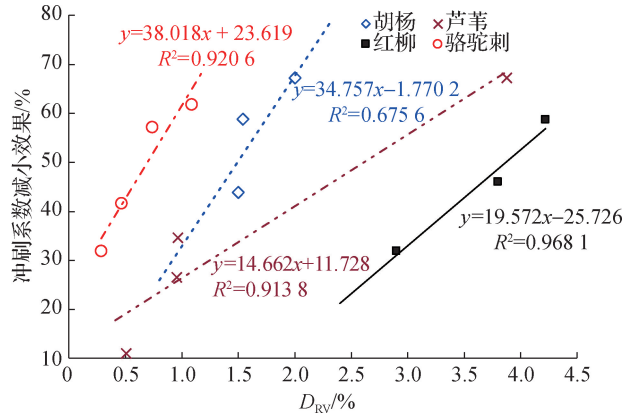


图 9 不同类型植被根系对冲刷系数的减少效果

Fig. 9 Decreased effect of the roots on erodibility coefficient under different vegetation species

3 讨 论

3.1 无植被根系影响下冲刷系数与起动切应力的关系

将无根系影响下冲刷系数和起动切应力结果进行对比，如图 10 所示。从图 10 中可以看出，冲刷系数随着起动切应力的增大而减小，基本呈幂函数关系，两者定量关系如下：

$$k_d = 7.0 \times 10^{-5} \tau_c^{-2.01} \quad (13)$$

由于原型试验数据较少，式(13)拟合系数 $R^2 = 0.60$ 并不是很高。Hanson 等^[17]对美国密西西比的 Yalobusha 河流进行了 83 组现场冲刷试验得到 $k_d = 2.0 \times 10^{-7} \tau_c^{-0.5}$ ；Karmaker 等^[15]对印度 Brahmaputra 河岸进行了 58 组现场试验得到 $k_d = 3.1 \times 10^{-6} \tau_c^{-0.185}$ 。将式(13)与这 2 个研究结果进行对比，发现土体冲刷系数随起动切应力变化的规律均一致。从而可以看出，河岸土体冲刷系数与起动切应力之间确实存在一定的数量关系，但不同河岸由于土体物理性质不同，冲刷系数与起动切应力的关系式也并不相同，主要与土体黏粒含量

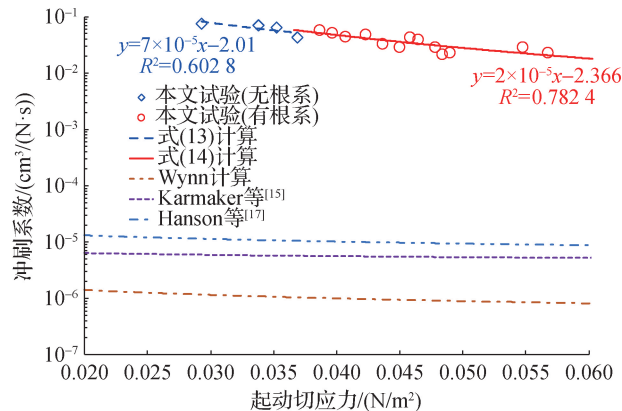


图 10 冲刷系数与起动切应力的定量关系

Fig. 10 Quantitative relationship between erodibility coefficient and critical shear stress

($d < 0.005 \text{ mm}$)、干密度、含水率等物理性质有关^[9]。

与 Hanson 等^[17]和 Karmaker 等^[15]结果对比,本文现场试验所获得的塔里木河干流河岸土体冲刷系数值均大于相同起动切应力条件下的其他结果。具体原因主要为:①从黏粒含量分析,Hanson 等^[17]试验土体黏粒含量为 50%~80%,Karmaker 等^[15]试验土体黏粒含量也在 50%以上,本文 4 组试验土体的黏粒含量为 0~7.0%,相对较低,土体更容易冲刷,所以对应冲刷系数值大;②从干密度角度分析,Hanson 等^[17]和 Karmaker 等^[15]的干密度分别为 $1.12 \sim 1.53 \text{ t/m}^3$ 和 1.80 t/m^3 ,本文试验土体干密度范围为 $1.17 \sim 1.27 \text{ t/m}^3$,相对较小,土壤较松散,对应冲刷系数值也会较大;③从含水量角度分析,Hanson 等^[17]和 Karmaker 等^[15]的含水率分别为 22.8%和 33.0%,本文试验土体的含水率均值为 19.0%,相对较低,塔里木河河岸土体又属于无黏性土体,所以更容易被冲刷。根据以上分析,本文试验土体由于黏粒含量少、土体干密度和含水率较小且属于非黏性土体,所以现场测得的冲刷系数较大。

3.2 植被根系影响下冲刷系数与起动切应力的定量关系

将现场测得的根系作用下土体冲刷系数和起动切应力结果进行对比(图 10),可以看出,与无根系土体规律相同,有根系影响的冲刷系数也随着起动切应力的增大而减小,且基本呈幂函数关系,两者定量关系如下:

$$k_{\text{dr}} = 2.0 \times 10^{-5} \tau_{\text{cr}}^{-2.366} \quad (14)$$

式中: k_{dr} 为植被根系影响下的土体冲刷系数, $\text{cm}^3/(\text{N} \cdot \text{s})$ 。

Wynn^[16]对美国维吉尼亚西南部 25 个植被覆盖河岸进行了 142 组试验,得到 $k_{\text{dr}} = 3.1 \times 10^{-6} \tau_{\text{cr}}^{-0.37}$ 。可见,本文试验结果与现有结果规律一致,即有植被根系影响的土体冲刷系数随着起动切应力增大呈幂函数递减变化,但对应的系数和指数均有所差异,这除了与试验土体物理性质有关外,还与根系含量、根系直径大小等根系特征有关。

Wynn^[16]试验土体黏粒含量在 50%以上,在土壤深度 15 cm 以内,根系直径在 0.5~2.0 mm 范围的 D_{RV} 为 0.5%~<1.5%, 2.0~5.0 mm 范围的 D_{RV} 为 1.5%~<2.0%, 5.0~10.0 mm 范围的 $D_{\text{RV}} = 2.0\%$ 。本文根系直径在 0~1.5 mm 范围的 $D_{\text{RV}} = 0.01\% \sim 1.23\%$ (均值为 0.27%), 1.5~3.0 mm 范围的 $D_{\text{RV}} = 0.03\% \sim 1.34\%$ (均值为 0.30%), 3.0~4.5 mm 范围的 $D_{\text{RV}} = 0.11\% \sim 1.55\%$ (均值为 0.75%), 4.5~10.0 mm 范围的 $D_{\text{RV}} = 0.01\% \sim 2.51\%$ (均值为 0.45%)。总体上,本文试验根体积密度较集中在 3.0~4.5 mm 直径范围,且各直径范围的 D_{RV} 均低于 Wynn^[16]试验土体根体积密度,所以根系对冲刷系数的减小效果相对较弱,这也是导致相同起动切应力条件下本文冲刷系数试验结果比 Wynn^[16]试验大的原因之一。

受到现场试验条件的限制,含根系试验组数相对较少,式(14)拟合结果应用仅限于 4 种植被根体积密度范围 $D_{\text{RV}} < 4.22\%$ 。今后应进一步扩大现场试验的根系直径和含量的范围,以期获得范围更广和样本数据更多的试验结果,确保统计结果的准确性。

4 结 论

本文设计制作了水流喷射试验装置,对塔里木河上游河岸有、无植被根系土体进行了现场冲刷试验,得到了典型植被根系对起动切应力和冲刷系数的影响规律。主要结论如下:

(1) 通过 4 种典型植被起动切应力现场试验结果,发现根系的存在可以增强土体起动切应力,相同根体积密度对应起动切应力红柳最大,其次为胡杨和骆驼刺,芦苇最小,这主要与根系特征差异及其对起动切应力的增强机理不同有关。

(2) 起动切应力随根体积密度的增大基本呈幂函数关系增大,单位根体积密度增大对起动切应力的增强效果顺序为骆驼刺>胡杨>红柳>芦苇,并在此基础上建立了起动切应力与根体积密度的定量关系式。

(3) 河岸土体冲刷系数随根体积密度的增加基本呈幂函数关系减小,单位根体积密度变化对冲刷系数的

减小效果次序为骆驼刺 > 胡杨 > 红柳 > 芦苇。

(4) 根据试验结果揭示了有、无植被根系作用下冲刷系数随起动切应力的变化规律, 与已有成果的规律一致, 即有、无植被根系影响下土体冲刷系数均随起动切应力增大呈幂函数递减变化, 但塔里木河冲刷系数均比相同条件下其他公式计算值大, 这除了与试验土体物理性质有关外, 还与根系含量、直径大小等特征有关; 据此拟合得到了塔里木河岸坡非黏性土体植被根系影响下冲刷系数与起动切应力之间的定量关系式。

参考文献:

- [1] 张珂, 李可, 朱海丽, 等. 黄河源高寒草甸河岸带根-土复合体抗冲特性[J]. 泥沙研究, 2022, 47(2): 43-50. (ZHANG K, LI K, ZHU H L, et al. Impact on the resistance of soil-root composite of riparian alpine meadow in the source region of the Yellow River[J]. Journal of Sediment Research, 2022, 47(2): 43-50. (in Chinese))
- [2] 白玉川, 杨树青, 徐海珏. 不同河岸植被种植密度情况下河流演化试验分析[J]. 水力发电学报, 2018, 37(11): 107-120. (BAI Y C, YANG S Q, XU H J. Experiment and analysis of river evolution under different planting densities of riparian vegetation[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2018, 37(11): 107-120. (in Chinese))
- [3] GASSER E, SCHWARZ M, SIMON A, et al. A review of modeling the effects of vegetation on large wood recruitment processes in mountain catchments[J]. Earth-Science Reviews, 2019, 194: 350-373.
- [4] TOAN D T. Assessing the erosion characteristics and relationship with geotechnical properties for soils at the Red Riverbank, Hanoi, Vietnam[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2023, 16(3): 216.
- [5] PALERMO M, PAGLIARA S, BOMBARDELLI F A. Theoretical approach for shear-stress estimation at 2D equilibrium scour holes in granular material due to subvertical plunging jets[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 146(4): 04020009.
- [6] HE N, YANG L Q, XU L J, et al. Experimental study on the scouring rate of cohesive soil in the Lower Yellow River[J]. Coatings, 2022, 12(3): 418.
- [7] 张文皎, 赵连军, 王仲梅, 等. 射流冲刷底泥起动输移规律及机理[J]. 水科学进展, 2023, 34(6): 960-970. (ZHANG W J, ZHAO L J, WANG Z M, et al. Law and mechanism of sediment starting and transportation during jet scouring process[J]. Advances in Water Science, 2023, 34(6): 960-970. (in Chinese))
- [8] WAHL T L. Methods for analyzing submerged jet erosion test data to model scour of cohesive soils[J]. Transactions of the ASABE, 2021, 64(3): 785-799.
- [9] 宗全利, 夏军强, 张翼, 等. 荆江段河岸粘性土体抗冲特性试验[J]. 水科学进展, 2014, 25(4): 567-574. (ZONG Q L, XIA J Q, ZHANG Y, et al. Experimental study on scouring characteristics of cohesive bank soil in the Jingjiang reach[J]. Advances in Water Science, 2014, 25(4): 567-574. (in Chinese))
- [10] 刘明潇, GUALA M, 孙东坡. 基于水下摄影的床面泥沙运动特性试验研究[J]. 水科学进展, 2021, 32(3): 449-457. (LIU M X, GUALA M, SUN D P. Experimental study on the property of bed load motion based on the underwater photography technology[J]. Advances in Water Science, 2021, 32(3): 449-457. (in Chinese))
- [11] DUNNE K B J, ARRATIA P E, JEROLMACK D J. A new method for in situ measurement of the erosion threshold of river channels[J]. Water Resources Research, 2022, 58(8): e2022WR032407.
- [12] LIU X L, ZHENG J W, ZHANG H, et al. Sediment critical shear stress and geotechnical properties along the modern Yellow River Delta, China[J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2018, 36(8): 875-882.
- [13] ASTM. D5852-00, standard test method for erodibility determination of soil in the field or in the laboratory by the jet index method [S] ASTM International: 100 Barr Harbor Drive, 2007.
- [14] HANSON G J, COOK K R. Apparatus, test procedures, and analytical methods to measure soil erodibility in situ[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2004, 20(4): 455-462.
- [15] KARMAKER T, DUTTA S. Erodibility of fine soil from the composite river bank of Brahmaputra in India[J]. Hydrological Processes, 2011, 25(1): 104-111.
- [16] WYNN T M. The effects of vegetation on stream bank erosion[R]. Blacksburg: Department of Biological Systems Engineering, 2004: 113-120.
- [17] HANSON G J, SIMON A. Erodibility of cohesive streambeds in the loess area of the Midwestern USA[J]. Hydrological Processes

ses, 2001, 15(1): 23-38.

- [18] 郑奕. 塔里木河上游与下游地区天然植被群落特征对比分析[J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(1): 152-156. (ZHENG Y. Comparative analysis on plant community characteristics in the upper and lower reaches of Tarim River[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2008, 22(1): 152-156. (in Chinese))
- [19] KOTHYARI U C, HASHIMOTO H, HAYASHI K. Effect of tall vegetation on sediment transport by channel flows[J]. Journal of Hydraulic Research, 2009, 47(6): 700-710.
- [20] 蔡杭兵, 宗全利, 陈志康. 红柳根系对塔里木河岸坡土体起动规律影响研究[J]. 人民长江, 2020, 51(2): 38-42. (CAI H B, ZONG Q L, CHEN Z K. Study on influence of red willow root system on starting law of soil on bank of Tarim River [J]. Yangtze River, 2020, 51(2): 38-42. (in Chinese))

Field experiment on the influence of vegetation roots on riverbank erosion characteristics in the Tarim River*

ZONG Quanli¹, ZHANG Yuyang¹, TANG Ruize², TANG Hua², LIU Huali³, LI Lin⁴

(1. College of Resources and Environment, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China; 2. College of Water Conservancy and Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi 832000, China; 3. Xinjiang Tarim River Basin Management Bureau, Kuerle 841000, China; 4. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

Abstract: To investigate the quantitative influence of vegetation roots on the erosion characteristics of the river bank under field conditions, an erosion test device was designed, and 18 groups of in-situ tests of critical shear stress and erodibility coefficient were carried out. Four typical locations in the upper reaches of the Tarim River and four typical vegetation roots were selected, including *Populus euphratica* (PE), *Phragmites australis* (PA), *Tamarix ramosissima* (TR), and *Alhagi sparsifolia* (AS). According to the experimental results, the critical shear stress of the soil basically increases as a power function with the increase in root content. Among the four studied vegetation roots, the TR roots exhibited the largest critical shear stress at the same root content, followed by PE and AS, while the PA roots exhibited the smallest value. The increased effects of the critical shear stress with unit root content increase for the four vegetation species were analysed. The order was AS > PE > TR > PA. The quantitative relationship between the critical shear stress and root volume density was established. The existence of roots can reduce the soil erodibility coefficient. It decreases with the increase in root content. With the increase in unit root content, the order of the decreased effects of the erodibility coefficient for the four vegetation species was AS > PE > TR > PA. Based on in-situ test results, the power function relationships between the soil erodibility coefficient and critical shear stress were obtained with and without root influence, and compared to existing experimental results. The experimental results in this study are consistent with the existing studies, except that the corresponding coefficients and exponents are different. This study can provide a reference for riverbank protection by vegetation roots and calculation of the bank erosion process in the Tarim River.

Key words: erosion characteristics; critical shear stress; erodibility coefficient; vegetation roots; field experiment; Tarim River

* The study is financially supported by the Key R&D Program of Xinjiang Uygur Autonomous Region, China (No. 2022B03024-2) and the National Natural Science Foundation of China (No. 51569029).