

典型荒漠植被根系对黏性岸坡侵蚀过程的影响

宗全利^{1,2}, 陈志康², 蔡杭兵², 秦 鹏¹, 刘春霞¹, 金 凯¹

(1. 青岛农业大学资源与环境学院, 青岛 266109; 2. 石河子大学水利建筑工程学院, 石河子 832000)

摘 要: 植被根系对岸坡侵蚀具有明显影响作用, 为定量揭示植被根系对黏性岸坡侵蚀过程的网络作用、护挡作用和牵拉作用, 开展红柳和胡杨典型植被根系的概化水槽试验。结果表明: 1) 在根系网络作用下, 黏性岸坡固土能力显著提高, 有植被根系比无植被提高了 30%~56%, 其中红柳根系比胡杨根系平均提高了 24.2%; 2) 不同布置方式的固土效果差异较大, 红柳和胡杨根系固土效应 V 型布置比竖直布置分别提高了 27.1%和 18.6%; 3) 根系护挡作用对坡脚保护作用显著, 有植被岸坡近岸纵向时均流速和无量纲紊动能分别减小至无植被的 45%~67%和 75%~91%; 4) 根系牵拉作用主要表现在对岸坡崩塌根土黏结体的堆积和分解以及床面淤积的影响等, 其中牵拉作用越强, 崩塌堆积体的体积占比就越大, 根土黏结体被分解时间也越长, 试验结果得到根系牵拉作用对河床保护贡献值平均提高了 20%。研究结果可为干旱区荒漠植被固土护堤作用机理提供技术支持和理论参考。

关键词: 侵蚀; 根系; 红柳; 胡杨; 黏性岸坡; 网络作用; 护挡作用; 牵拉作用

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.18.012

中图分类号: TV 149.2; S157

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2020)-18-0090-09

宗全利, 陈志康, 蔡杭兵, 等. 典型荒漠植被根系对黏性岸坡侵蚀过程的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(18): 90-98.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.18.012 <http://www.tcsae.org>

Zong Quanli, Chen Zhikang, Cai Hangbing, et al. Effects of typical desert vegetation roots on the erosion process of cohesive riverbank[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(18): 90-98. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.18.012 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

干旱地区荒漠植被根系发达, 其保持岸坡稳定和固土护堤作用尤为重要。岸坡植被根系与土体的相互作用将使得岸坡横向变形和稳定性发生变化, 进而影响河床纵向变形并对整个岸坡的侵蚀过程产生重要影响, 与没有植被覆盖相比差异较大^[1]。

植被会影响岸坡横向侵蚀速率, 有植被岸坡横向侵蚀速率比没有植被岸坡低^[2-3]。如 Billi 等^[4-6]利用大量调查数据和试验方法得到植被缺乏河流其平面形态一般为蜿蜒形; 赵清贺等^[7]通过野外试验表明植被的存在可以有效提高土壤的抗侵蚀能力并减少侵蚀产沙量和降低侵蚀泥沙中值粒径; 白玉川等^[8-9]研究了不同植被种植密度等岸坡边界条件对河流动力过程的影响响应, 得到河岸植被种植对河湾稳定性及河岸抗冲刷能力起到了积极的作用, 但增加了近岸垂向冲刷; Yu 等^[10-13]对塔里木河和黄河源头支流植被影响河流平面形态作用分析表明塔里木河河岸植被覆盖稀疏, 且由于河岸由致密根系、细沙和淤泥组成缺乏黏土, 河岸强度和对弯曲运动的限制均有限; 宗全利等^[14-15]对塔里木河流域红柳、甘草、骆驼刺、芦苇、胡杨、白刺 6 种植物根系的根-土复合体试验, 表明根系作用使土体黏聚力由 3.14~16.51 kPa 提高至

9.43~28.30 kPa。

为了评价植被根系对岸坡稳定性影响, Zhu 等^[16]研究草甸型蜿蜒河流中植被对岸坡稳定性影响, 并利用提出的河岸稳定性方法计算了崩塌土体的宽度, 修正了 Wu 模型中系数; Yu 等^[17-21]利用 BSTEM 模型定量分析了不同植被根系特征对岸坡稳定性的重要作用, 得出植被根系可以有效加固未固结河岸, 控制河岸侵蚀, 使堤岸强度提高 63.6%~88.2%, 增强河岸稳定性。

植被根系对岸坡侵蚀具有明显影响, 但现有研究仅局限于植被根系对岸坡侵蚀影响的结果, 对于在水动力作用下, 岸坡侵蚀过程中植被根系的定量影响却很少关注, 现有植被根系与土体相互作用研究成果也不能综合反映根系密度、纵向和横向分布等对岸坡侵蚀过程的定量影响。为此, 本文在塔里木河流域选取典型荒漠植被根系(胡杨和红柳), 结合水槽试验, 定量研究岸坡侵蚀过程中根系的网络作用、护挡作用和牵拉作用, 揭示植被根系对岸坡侵蚀过程的定量影响, 研究结果可为进一步研究干旱区荒漠植被固土护堤作用机理提供技术支持和理论参考。

1 试验概况

1.1 试验装置及模型设计

试验在石河子大学水工水力学试验大厅中完成, 试验水槽长 20 m、宽 50 cm、高 50 cm, 底坡为 0.1%。水槽进口设有调节流量大小阀门, 水槽末端的尾门可控制水位, 尾部设三角形量水堰测量水槽中的流量。试验段上、下游用水泥面塑造连接过渡段, 中间为模型段, 具体布置如图 1a 所示。自试验土体断面开始, 每隔 40 cm

收稿日期: 2020-07-03 修订日期: 2020-09-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51569029); 青岛农业大学高层次人才科研基金(1119031)

作者简介: 宗全利, 博士, 教授。主要从事河流动力学方面研究。

Email: quanli1871@126.com

设 1 个观测断面，共设有 5 个观测断面，即 CS1-CS5；模型中断面形态为梯形，底宽 20 cm、顶宽 10 cm、高度 20 cm，边坡 $m=1:2$ ，如图 1 b 所示。

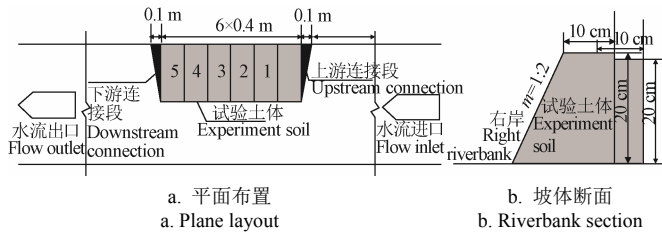
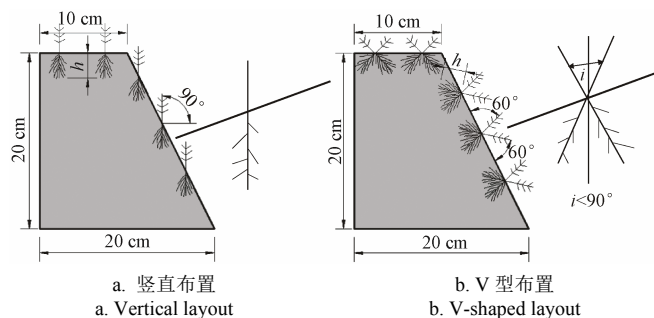


图 1 试验布置
Fig.1 Experimental layout

试验土体分别来源于塔里木河干流河岸的非黏性土和当地低液限天然黏土，经测定天然黏土的塑性指数为 19，中值粒径为 0.015 mm。由于天然黏土黏性大，实验室水流条件下难以起动，为此将其与天然非黏性土按 1:4 比例混合成试验土体。混合后土体自然含水率为 18.3%，干密度为 1.45 g/cm³，塑性指数 12，中值粒径为 0.076 mm，属亚黏土。为保证各工况土体参数相同，制作模型坡体时分层填筑压实以保证质量。试验坡体土的干密度控制在 1.43~1.45 g/cm³，含水率控制在 18.1%~18.6% 范围。

1.2 植被根系布置及特征指标

塔里木河流域属典型的温带干旱大陆性气候，流域内干燥多风，降水稀少，蒸发强烈；地表土主要为沙质土壤，透水性好。胡杨喜光、抗热、抗大气干旱、抗盐碱、抗风沙，能忍受荒漠中干旱的环境，适宜沙质土壤；红柳根系发达，既耐干又耐水湿，抗风能力强，耐盐碱土，具有较强的适应干旱荒漠环境的特征，在沙质和黏土质盐碱化土壤中均可很好生长^[22-23]。因此，塔里木河流域特殊的气候和土壤条件形成了乔木以胡杨、灌木以红柳为优势种的植被群落。胡杨和红柳根系发达，具有明显增强岸坡抗侵蚀的能力^[24]。因此，试验选取天然生长的胡杨和红柳根系，研究岸坡在根系作用下的侵蚀过程。根据根系构型现场调查，胡杨和红柳根系在天然土体中多为竖直向下分布，但在水土条件较好时也会形成水平根系发达的构型^[25]。因此，试验设计中根系在土体中主要以竖直和 V 型 2 种形式布置，其中 V 型根系夹角 i 取 60°，并沿断面等间距分布，平均间距为 4 cm，具体如图 2 所示。试验前用游标卡尺测量根系直径，且为保证精度每单株测量多次取其均值。



注：h 为根系植入土体中深度，cm；i 为根系夹角，(°)。
Note: h is the depth of roots in the soil, cm; i is the angle between the roots and slope, (°).

图 2 根系断面布置方式
Fig.2 Schematic layout of roots in soil section

1.3 试验方案

为使试验土体尽可能与原状土体接近，试验开始前至少一周将坡体铺设完毕，每天洒水养护，使土体在重力作用下自然沉降，根系在土体进行铺设时同步放置。试验开始时，首先从水槽上游注水，使水流以很小流速（小于起动流速）慢慢流入，当水位缓缓上升至离岸坡顶部 5~10 cm，停止注水。浸泡 1~2 h 后，沿 5 个典型断面（CS1~CS5）测量静水中岸滩稳定坡度的形状，然后再进行清水条件下的岸坡侵蚀试验。试验前后均对土体物理性质进行测试，包括干密度和含水率等。试验过程中维持水位不变，根据岸坡侵蚀和崩塌情况随时测量岸坡形态，并对崩塌过程和特点及崩塌块的尺寸大小等进行记录，具体如下：

1) 试验组次

试验在相同水流条件下，进行不用植被根系类型和不同布置方式下的岸坡侵蚀过程试验，试验共有 5 个工况：红柳-竖直、红柳-V、胡杨-竖直、胡杨-V、无根系。根系类型考虑当地优势物种红柳和胡杨，并与无植被根系结果进行对比试验；根系布置方式有竖直和 V 型 2 种；水位基本维持在 12.2 cm 左右，水流作用时间为 64 min，流量为 34 L/s。

2) 流速测量

当岸滩上的土体开始侵蚀时，沿 3 个断面测量流速分布，流速采用 Nortek 公司生产的 ADV 流速仪进行测量。流速场平面上的测点布置，沿水流方向断面间距为 40 cm，在设置的 5 个坡体典型断面基础上，分别取 CS3、CS4、CS5 这 3 个断面为测流断面；沿河宽方向布置 7 根垂线，垂线间距为 5 cm，每条垂线测量 3~5 个点流速。

1.4 计算方法

紊动能 k 可表示为^[26]

$$k = \frac{\overline{v_x'(t)^2} + \overline{v_y'(t)^2} + \overline{v_z'(t)^2}}{2} \quad (1)$$

式中 $v_x'(t)$ 、 $v_y'(t)$ 、 $v_z'(t)$ 分别为纵向、横向及垂向的脉动流速，m/s。

当水流的剪切力大于岸坡土体的抗剪切能力时，位于水流与泥沙交界面上的黏性颗粒团可被水流淘刷带走，岸坡坡度变陡，稳定性降低；当稳定性降低到一定程度后，岸坡便会发生崩塌。崩岸发生后，有根系岸坡以根土黏结体团形式塌落水中，无根系岸坡以大块体黏性颗粒团掉落水中，堆积在坡脚附近的河床，对河床起到一定的保护作用。从土力学-边坡稳定安全系数角度出发，黏性岸坡稳定性力学分析考虑整个滑体力矩平衡，即总抗滑力矩等于总滑动力矩，得到黏性岸坡的稳定安全系数 F_s

$$F_s = \frac{\sum (c_i l_i + W_i \cos \theta_i \tan \varphi_i)}{\sum W_i \sin \theta_i} \quad (2)$$

式中 c_i 为土条 i 的黏聚力 (kN/m²)； l_i 为土条 i 的滑面长度 (m)； W_i 为土条 i 的重力 (kN)； θ_i 为土条 i 滑面的倾角 (°)； φ_i 为土条 i 的内摩擦角 (°)。

对于黏性土岸坡，岸坡的安全系数随其每一块土条

底部滑裂面角 θ_i 增大而减小, 坡脚堆积体坡度越大的岸坡会发生二次崩岸的可能性越大, 直到坡脚处堆积体的坡比小于水下泥沙休止角, 崩岸不会发生。

当根土黏结体的抗剪切应力小于水流切应力时, 根土黏结体团被破坏, 分解为较小的黏性颗粒团随水流被挟至下游。Fukuoka^[27]研究认为河道中崩塌块塌落后尺寸大小的变化可表示为

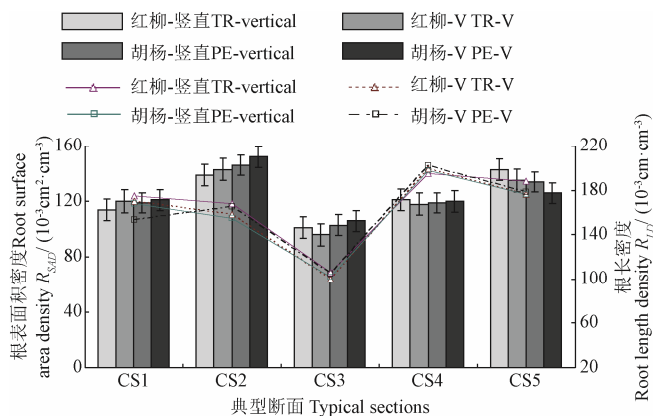
$$V/V_0 = \exp(-\alpha t) \quad (3)$$

式中 V/V_0 为一段时间后崩塌块体积与初始体积比; t 为时间, min; α 为土体分裂系数, 与土体剪切应力及黏聚力有关。

2 结果与分析

2.1 各典型断面根系特征

为评价不同根系特征对岸坡侵蚀过程的影响, 以植物根系特征评价的 2 个重要指标根长密度 R_{LD} (单位土体内根系长度) 和根表面积密度 R_{SAD} (单位土体内根系表面积) 反映根系在土体中的含量和分布情况^[28]。为保证试验结果可比性, 试验中在不同工况下, 同一典型断面的根系布置方式中根系密度基本相同。不同试验组次下各典型断面的根系特征指标如图 3 所示, 从图中可以看出, 相同断面位置的根长密度 R_{LD} 和根表面积密度 R_{SAD} 基本相同, R_{SAD} 平均误差为 2.85%, R_{LD} 平均误差为 4.05%。为分析不同根系含量结果, 不同断面位置 (间距 0.4m) 的根长密度 R_{LD} 和表面积密度 R_{SAD} 有所差异, 其中 R_{SAD} CS2 和 CS5 断面较大, 平均值分别为 $145 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{cm}^3$ 和 $134.5 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{cm}^3$, 其他 3 个断面较小 ($101.5 \sim 119.5 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{cm}^3$); R_{LD} CS5 断面最大 ($198.5 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{cm}^3$), CS3 断面最小 ($103.3 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{cm}^3$)。



注: CS1、CS2、CS3、CS4、CS5 距起始断面分别为 40、80、120、160、200cm。TR, 红柳; PE, 胡杨。

Note: CS1, CS2, CS3, CS4, CS5 are 40, 80, 120, 160, and 200cm from the first cross section respectively. TR, *Tamarix ramosissima*; PE, *Populus euphratica*.

图 3 各典型断面根系特征指标

Fig.3 Root characteristic parameters of typical sections

2.2 根系网络作用分析

2.2.1 岸坡侵蚀过程分析

植被根系交织穿插会把较小结构土块组成大块形成网络结构 (网络作用), 增强岸坡抗剪切能力和稳定性。图 4 为有根系和无根系岸坡在水流冲刷作用下侵蚀崩塌情况, 从图中可以看出, 有根系岸坡在水流冲刷作

用下, 坡脚处形成小凹槽, 随着水流进一步淘刷, 凹槽上部的根土黏结体滑落水中, 对坡脚起了一定的保护作用, 坡脚处水流紊动较无根系坡脚处较弱。对于无根系作用岸坡, 在水流淘刷作用下, 坡脚内凹, 凹槽上部土块以大体块塌落为主, 与有植被根系相比, 相同水流条件下崩塌更为严重, 坡脚水流紊动交织现象明显。

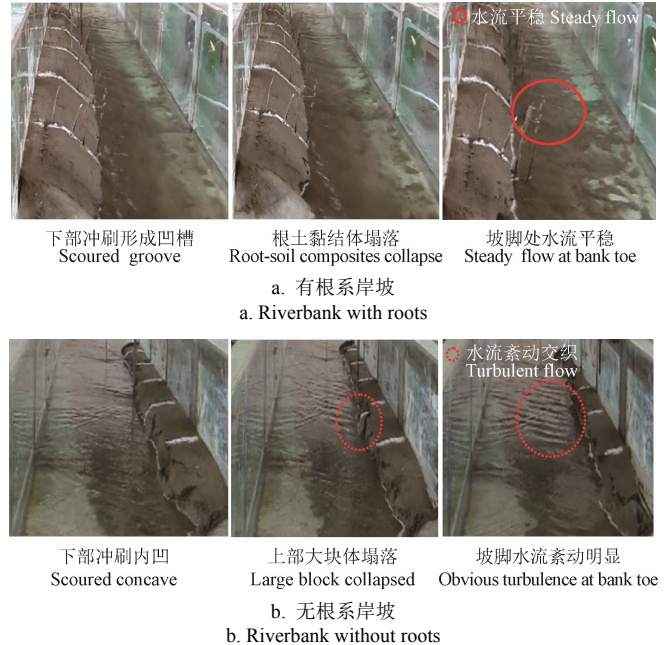


图 4 有根系和无根系岸坡在水流冲刷作用下侵蚀崩塌情况

Fig.4 Riverbank erosion and collapse under the action of flow scouring with and without roots

根系在土体中将较小土块粘结成较大土块的能力 (根系网络作用) 一定程度上决定了岸侵蚀能力的强弱, 图 5 为有无根系岸坡的崩塌与冲淤情况。从图中可以看出, 有植被根系岸坡的崩塌程度低于无植被岸坡, 且岸坡崩退较无根系弱, 但淤积后床面侵蚀较严重。而无植被岸坡河床床面淤积较厚, 岸坡崩退较强。这是因为在根系网络作用下岸坡抗侵蚀能力提高, 岸坡中小土块在根系网络作用下形成较大土块后, 提高了岸坡的稳定性。此外, 无论是红柳根系还是胡杨根系, 竖直布置的岸坡崩退程度较 V 型布置严重, 说明根系在土体中 V 型布置所起到的网络作用均优于根系单一竖直布置, 体现了 V 型布置根系对岸坡崩塌的抑制作用较强, 这种情况与天然河道中的植被根系形态实际情况也是符合的。

2.2.2 根系网络固土效应分析

以岸坡坡脚处为岸坡与床面的分界点, 统计不同工况下岸坡崩塌量与床面冲淤量值, 如图 6 所示。从图中可知, 同种植被情况下, V 型布置 (红柳-V) 岸坡侵蚀量 (110 cm^3) 小于竖直布置岸坡侵蚀量 (142 cm^3), 说明根系密度 (R_{SAD}) 相同条件下, V 型根系网络作用强于单一竖直根, 即根系与土体的接触表面积越大, 在岸坡土体中将较小土块黏接大块体的能力越强, 岸坡的稳定性越好。不同植被组 (红柳-竖直、胡杨-竖直) 对比, 胡杨岸坡崩塌总量 (153 cm^3) 大于红柳

(135 cm^3)，这是因为在相同的 R_{SAD} 下红柳根系的抗剪强度大于胡杨根系，红柳根土复合体产生的表观黏

聚力大于胡杨根土复合体，红柳根系的网络固土作用优于胡杨^[14]。

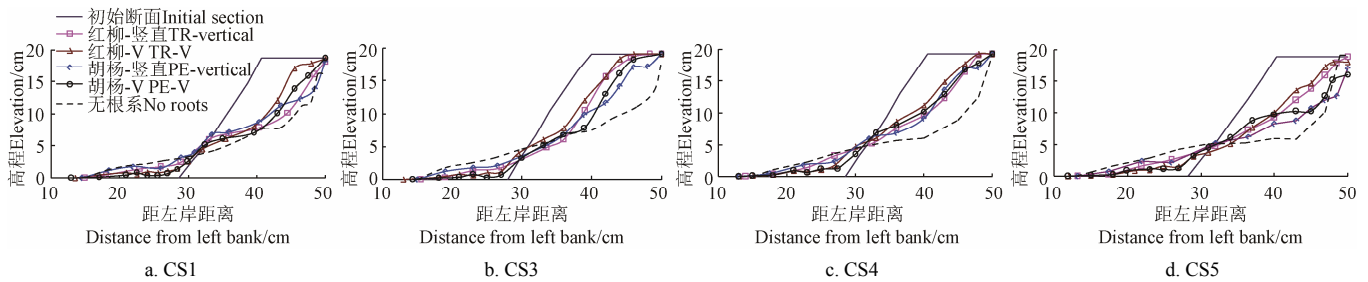


图 5 有无根系岸坡典型断面的崩退情况

Fig.5 Collapse of typical section of bank slope with or without roots

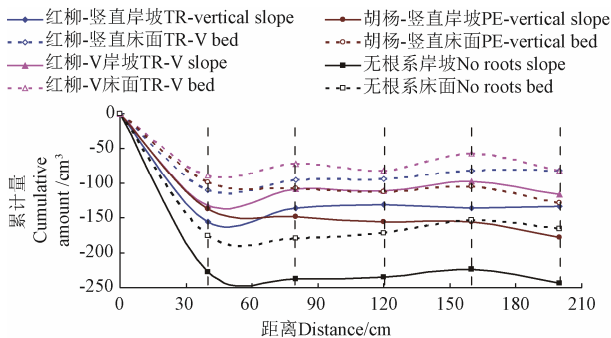


图 6 岸坡崩塌及河床冲淤变化情况

Fig.6 Changes of riverbank collapse and riverbed deposition

定义根系作用下岸坡崩塌减小量与无根系岸坡崩塌量之比为根系网络固土效应，用百分数表示根系网络固土的效应程度，试验结果如图 7a 中所示。从图中可以看出，相同根系 V 型布置的网络作用固土效应基本都大于竖直布置，红柳 V 型布置较竖直布置固土效应平均提高了 27.1%，胡杨根系平均提高了 18.6%；不同植被根系间，在同一竖直、V 型布置形态下，红柳根系相比于胡杨根系分别提高了 19.6% 和 28.1%。总体上，红柳根系网络作用更强，比胡杨的固土效应平均提高了 24.2%。

将根系网络固土效应的百分数转化为实数值，即为根系网络固土效应值，表示根系网络固土效应的大小。经过与无植被根系进行对比，得到各断面的根系网络固土效应值的变化范围，如图 7b 所示。从图中可以看出根系的网络固土效果显著，试验得到的固土效应值为 0.27~0.56，较无植被岸坡，有植被岸坡的固土效应值提高了 30%~56%。

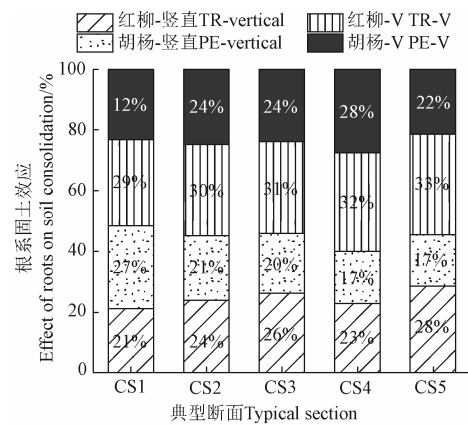
2.3 根系护挡作用分析

2.3.1 根系护挡作用对近岸流速影响分析

植被根系会受水流侵蚀而导致部分根系外露，减小上游水流阻力，并对上游冲来土块起阻挡缓冲作用（护挡作用）。根系护挡作用对坡脚的保护会使近岸流场发生改变，保护岸坡进一步被侵蚀，一定程度上减小了岸坡泥沙崩塌对河床的补充，崩岸现象得以缓解。以胡杨根系与无植被根系相比较，岸坡侵蚀进行至 40 min 时，近岸纵向流速分布及岸坡形状如图 8。

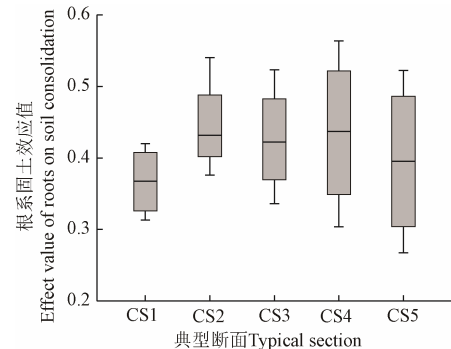
从图中可以看出，CS3、CS4 断面在靠近岸坡处有植被根系流速均比无植被根系流速小，根系直接作用处近岸流速小近一个数量级。由于裸露根系的护挡作用，靠

近岸坡其流速逐渐减小，沿河宽方向流速呈现一个数量级上的明显变化。有植被岸坡在根系护挡作用下，近岸纵向时均流速减小为无植被岸坡的 45%~67%。



a. 根系固土效应

a. Effect of roots on soil consolidation



b. 各典型断面根系固土效应

b. Effect value of soil consolidation of roots in typical sections

图 7 各典型断面根系固土效应

Fig.7 Effects of roots on soil consolidation in typical sections

2.3.2 根系护挡作用对近岸紊动能影响分析

图 9 为胡杨-竖直工况及无根系下 CS3、CS4、CS5 断面的无量纲紊动能 $k/(0.5U^2)$ 值的变化， U 代表断面平均流速。图中将各典型断面无量纲紊动能变化分为：I 为左岸边壁区，II 为中心区，III 为近岸区。从图中可以看出 I 区紊动能值最大，较 III 区最大增至 5.21 倍，可见边壁区的水流扰动剧烈。相较于无植被岸坡，有植被岸坡断面的 II 区紊动能增大至 1.05~1.18 倍，这是由于根土黏结体塌落在河床后，上游来水的冲刷使得黏结体团块

被分解破坏, 部分的根系裸露倒伏水中, 改变了其中心区的流场结构, 增加了水流对其周围黏结块团的随机扰动几率。此外, 扰动几率的增加与根系密度有一定的联

系, R_{SAD} 较大的断面 (其中 CS5 的 R_{SAD} 大于 CS3), 其中心区的紊动能变化也较大, CS5 断面的紊能为 CS3 的 1.13 倍, 水流对其扰动几率增大。

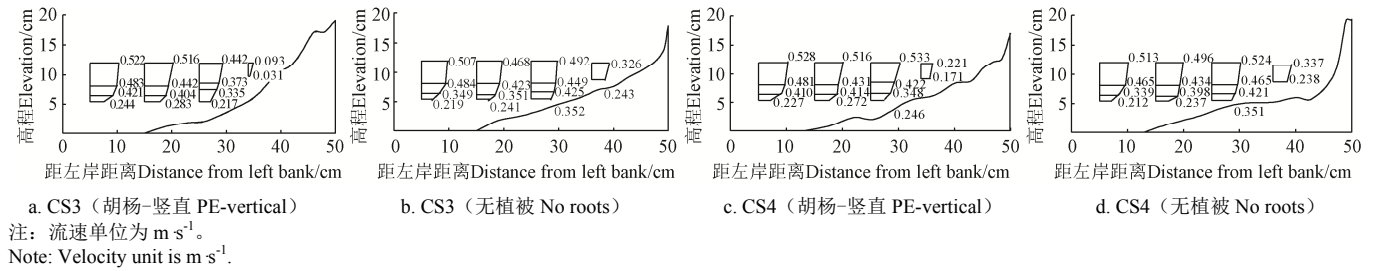
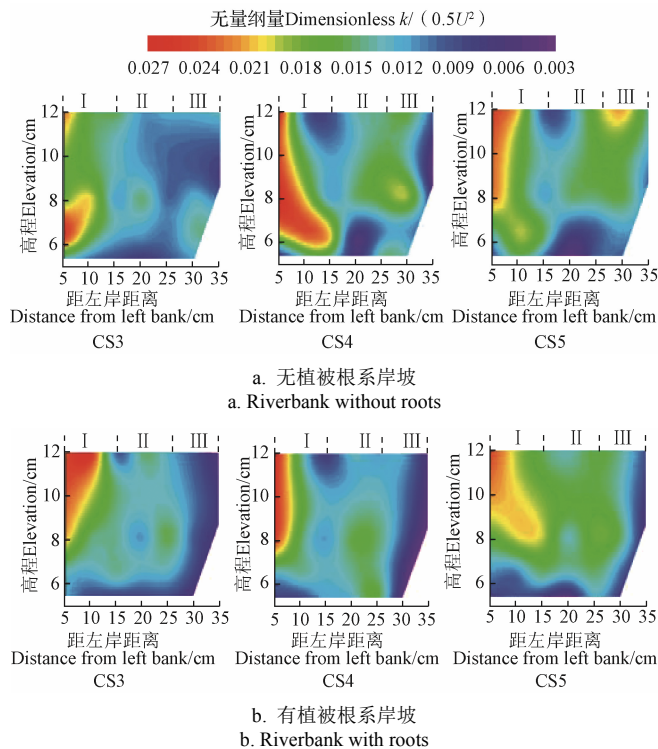


图 8 有无根系近岸纵向时均流速分布及岸坡形状

Fig.8 Vertical mean velocity distribution near bank and bank slope shape with and without roots



注: k 为紊动能, $\text{m}^2 \text{s}^{-2}$; U 为断面平均流速, m s^{-1} ; I、II、III 分别指左岸边壁区、中心区和近岸区。
Note: k is turbulent kinetic energy, $\text{m}^2 \text{s}^{-2}$; U is the average flow velocity, m s^{-1} ; I, II and III refer to the left bank area, central area and nearshore area respectively.

图 9 不同断面的无量纲紊动能 $k/(0.5U^2)$ 值

Fig.9 Values of dimensionless $k/(0.5U^2)$ in different sections

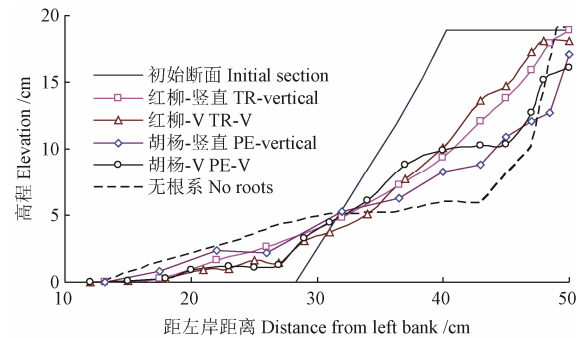
对比 III 区的变化, 可看出无植被根系近岸处的紊动能有增大的趋势, 较 II 区最大增至 1.32 倍, 较强的紊动作用加大了对坡脚的扰动作用, 使得坡脚处土颗粒的咬合松动, 导致侵蚀进一步发展。对比之下, 有植被根系岸坡坡脚处紊动能急剧减小, 由于根系的护挡作用对坡脚起了防护作用, 其侵蚀得到了有效的抑制, 其近岸区的紊动能减小为无植被岸坡的 75%~91%。

2.4 根系牵拉作用分析

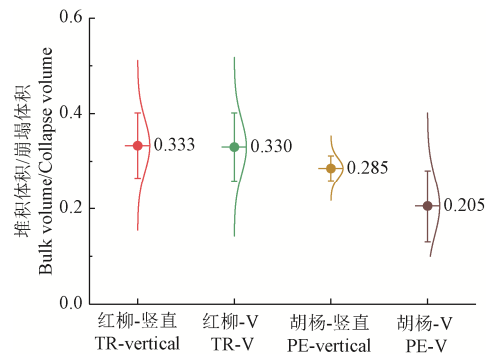
2.4.1 根系作用下崩塌土体的堆积方式及特点

根据试验结果得到: 黏性土体在河床坡脚处的淤积形式类似三角形, 三角形的表面坡角近似等于河岸泥沙的水下休止角。以崩塌较严重的 CS5 断面为例 (图 10a), 有植被岸坡的坡脚坡度略大于无植被岸坡的, 在相同根

系密度、布置方式下, 红柳根系 (TR) 水下坡比较胡杨 (PE) 大。从式 (2) 中不难说明原因, 相同水力要素情况下, 有根系岸坡安全系数高于无根系岸坡, 当临界崩岸时 ($F_s=1$), 有根系坡脚土体滑裂角 θ 大于无根系, 宗全利等^[14-15]研究表明相同根系密度下, 红柳根系抗剪强度大于胡杨根系抗剪强度。所以相同岸坡条件、水力因素下红柳安全系数较高, 崩岸稳定后水下坡比略大于胡杨坡脚处坡比。



a. 坡脚崩塌体的堆积形式
a. Accumulation form of collapsed blocks at bank toe



b. 不同条件下堆积体占比
b. Proportion of deposited soil under different conditions

图 10 CS5 断面坡脚崩塌体的堆积形式及不同条件下堆积体占比
Fig.10 Accumulation form of collapsed blocks at bank toe and proportion of deposited soil of CS5 section under different conditions

图 10b 为不同根系特征下坡脚堆积体的占比关系, 从图中得出红柳根系岸坡下, 堆积体体积占比最大, 占崩塌体体积的 0.26~0.41, 平均占比 0.33; 胡杨根系岸坡下, 堆积体体积占崩塌体体积比例为 0.13~0.31, 平均占比 0.24; 区间占比值总体符合正态分布, 总体体现出红柳根

系下堆积体体积大于胡杨根系。前面提到相同条件下红柳根系的固土作用优于胡杨，当塌落的根土黏结体堆积在坡脚后，红柳根系的崩塌块堆积量多，被分解挟至下游的泥沙少，最终河床上的淤积厚，间接反映出红柳根系根土黏结力强。

2.4.2 根系作用下崩塌土体分解过程

土颗粒紧密附着在根系四周，即使根系在水中飘动，土粒也不易被冲走（牵拉作用），从而增强岸坡土体抗侵蚀能力并限制岸坡横向发展。崩塌块体塌落水中，堆积在坡脚处，短时间内对河床起一定保护作用^[29]。图 11 反应了崩塌块体塌落河床后的分解情况。从图中可以看出，随着水流的持续冲刷，崩塌体的体积随时间的增加逐渐减小。

本试验得到无植被崩塌块体积占比变化与时间的关系为

$$V/V_0 = \exp(-1.87 \times 10^{-2} t); R^2 = 0.90 \quad (4)$$

红柳根系（红柳-竖直）定量关系为

$$V/V_0 = \exp(-8.24 \times 10^{-3} t); R^2 = 0.83 \quad (5)$$

胡杨根系（胡杨-竖直）定量关系为

$$V/V_0 = \exp(-1.23 \times 10^{-2} t); R^2 = 0.87 \quad (6)$$

上述各式决定系数基本在 0.85 左右，说明拟合效果较好。从图中看出塌落河道后的崩塌块体积占比与冲刷时间呈指数递减关系，这与 Fukuoka^[27]试验得到的一致，间接证明本文试验结果的可靠性。与图中 Fukuoka 试验结果对比看出，本试验下塌落河道的崩塌块体积的分解速度快，这主要与试验土体性质不同有关。Fukuoka 试验土体为含粉砂黏性土，本试验所用土体为含细沙黏性土，所以本文试验土体的黏性要小，黏性越小，土体越易分解破坏，故本试验得到的崩塌块体积分解速度相对要快。

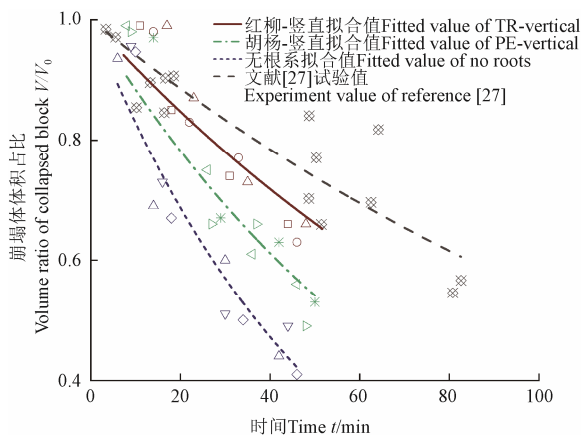


图 11 崩塌体积占比与时间的变化关系

Fig.11 Relationship between the volume ratio of collapsed block and time

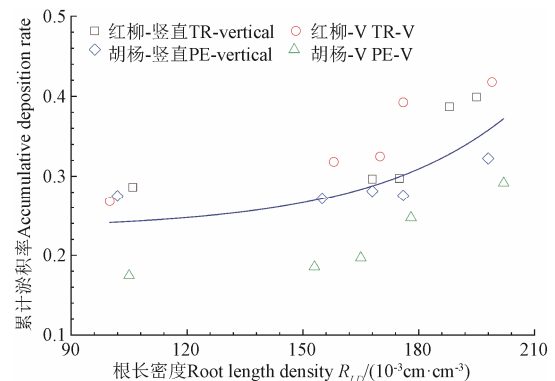
土体分裂系数 α 反映了崩塌体体积的分解速率，试验得到红柳根系、胡杨根系、无根系崩塌块的体积平均分解速率由小到大分别为 8.24×10^{-3} 、 1.23×10^{-2} 、 $1.87 \times 10^{-2}/\text{min}$ 。由于 α 与土体剪切应力有关，同等条件下根土复合体的剪应力大于无根系土体，根土复合体在同等水流条件下较难被分解，故无根系崩塌块分解

的最快。在根土黏结体分解过程中，根土之间的黏结力强弱（根系牵拉作用）影响其破坏时间的长短，根系牵拉作用越强，紧密附着在根系周围的黏土颗粒越多，破坏所需要的时间越长。红柳根土复合体的抗剪强度大于胡杨根土复合体，其 α 值小，红柳根土黏结块的分解速率最小。得出红柳根系的牵拉作用强于胡杨根系，分解所需的时间最长。

2.4.3 河床淤积分析

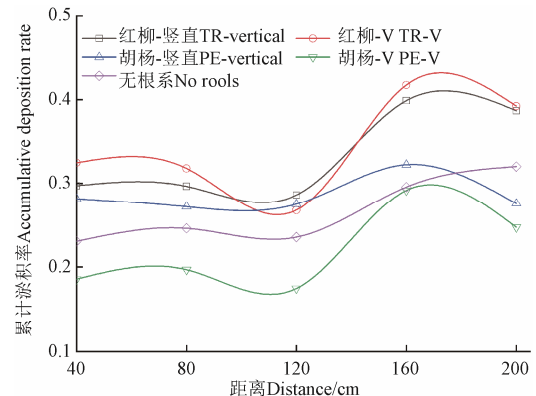
参考文献[30]方法，用坡脚处累计河床淤积量与累计岸坡崩塌量之比代表累计淤积率。图 12a 给出了河床累计淤积率与根长密度的试验结果，从图中可以看出河床累计淤积率与根长密度呈正相关，根长密度越大，累计淤积率越大，相应河床上的淤积量越大。根长密度 R_{LD} 反映根系在岸坡土体中的穿插和缠绕能力，其值越大，表明缠绕同一平面小颗粒土体微粒越强，从而土体抗侵蚀的能力越强^[31]。上述试验结果表明：根长密度越大，说明根系与土体之间穿插缠绕的越紧密，根系的牵拉作用越强，床面的抗侵蚀能力就会越强。

图 12b 为累计淤积率在不同断面的沿程变化情况，其变化范围为 0.17~0.42，无植被根系岸坡的累计淤积率变化范围为 0.23~0.32 左右；将相同断面的有植被根系与无植被根系的累计淤积率进行比较，可以得到两者的差异基本在 0.2 左右，从河床淤积角度分析得到根系牵拉作用对河床保护的贡献值平均提高了 20%左右。



a. 累计淤积率与 R_{LD} 的关系

a. Relationship between accumulative deposition rate and R_{LD}



b. 累计淤积率沿程变化

b. Changes of accumulative deposition rate along the distance

图 12 累计淤积率 ADR 与 R_{LD} 的关系及累计淤积率沿程变化
Fig.12 Relationship between Accumulative deposition rate (ADR) and R_{LD} and changes of ADR along the distance

上述是用河床泥沙的相对淤积程度来表示根系牵拉作用。实际河床泥沙的淤积程度还与坡脚处的水流紊动程度等有关,水流紊动越剧烈,泥沙越不容易淤积。根据图 9 中根系对紊动能影响结果可知:根系的存在使得边壁区和中心区的紊动能增加,这就在一定程度上造成水流结构的紊动,从而影响用累计淤积率表示根系牵拉作用的不确定性。图 12 中胡杨-V 条件下各断面以及胡杨-竖直 CS5 断面处的累计淤积率均低于无植被条件,这主要是因为局部根系穿插周围床面上造成水流紊动较剧烈,加剧了对床面的冲刷,导致一定程度上河床的泥沙淤积量大幅减小,从而使得胡杨-V 条件下试验结果与其他条件不一致。这也反映出有植被根系作用河岸侵蚀及河床淤积等试验结果的复杂性,为以后进一步相关研究提供一定的借鉴。

3 结 论

1) 在根系网络作用下,黏性岸坡固土能力显著提高。相同植被根系 V 型放置较竖直放置,红柳固土效应提高了 27.1%,胡杨提高了 18.6%;相同放置方式下,红柳根系比胡杨根系分别提高了 19.6%(竖直)和 28.1%(V 型);红柳根系网络作用更强,比胡杨根系固土效应平均提高了 24.2%;较无植被岸坡,有植被岸坡的抗侵蚀能力提高了 30%~56%。

2) 根系的护挡作用改变了近岸水流流场,对坡脚起了防护作用,其侵蚀得到了有效的抑制;有植被岸坡近岸纵向时均流速减小至无植被岸坡的 45%~67%,无量纲紊动能减小至 75%~91%。

3) 根系牵拉作用主要表现在对岸坡崩塌根土黏结体的堆积和分解以及床面淤积的影响等,其中牵拉作用越强,崩塌堆积体的体积占比越大,红柳根系(堆积体体积平均占比 0.33)崩塌土体的堆积多于胡杨(0.24),说明红柳根系根土黏结力强于胡杨;同样,牵拉作用越强,根土黏结体进一步被分解时间就越长,试验得到崩塌块体积大小与冲刷时间呈指数递减关系,且红柳根土黏结块的分解速率小于胡杨,其牵拉作用大于胡杨根系;根长密度与河床累计淤积率成正相关,反映了根系在淤床中的穿插缠绕能力,附着在根系四周不易被水流冲走的黏土粒团越多,河床淤积量越大;根据累计淤积率沿程变化试验结果得到根系牵拉作用对河床保护贡献值平均提高了 20%左右。

本文以红柳和胡杨为典型植被根系,通过试验研究了植被根系对黏性岸坡侵蚀的影响过程,研究结果可为干旱区荒漠植被根系固土护坡技术提供一定补充;但荒漠植被种类众多,本文未涉及其他更多植被根系,且植被根系在实际河岸中的分布方式复杂多样,其他形式放置方式下根系作用的研究等也有待今后进一步开展。

[参 考 文 献]

- [1] Gran K B, Tal M, Wartman E D. Co-evolution of riparian vegetation and channel dynamics in an aggrading braided river system, Mount Pinatubo, Philippines[J]. *Earth Surface Process and Landforms*, 2015, 40(8): 1101-1115.
- [2] Helen L M, David L H. Interactions between riparian vegetation and fluvial processes within tropical Southeast Asia: Synthesis and future directions for research [J]. *Progress in Physical Geography*, 2014, 38(6): 716-733.
- [3] Vargas-Luna A, Duró G, Crosato A, et al. Morphological adaptation of river channels to vegetation establishment: A laboratory study[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2019, 124(7): 1981-1995.
- [4] Billi P, Demissie B, Nyssen J, et al. Meander hydromorphology of ephemeral streams: Similarities and differences with perennial rivers[J]. *Geomorphology*, 2018, 319: 35-46.
- [5] Camporeale C, Perucca E, Ridolfi L, et al. Modeling the interactions between river morpho dynamics and riparian vegetation[J]. *Reviews of Geophysics*, 2013, 28(3): 379-414.
- [6] van Dijk W M, Teske R, van de Lageweg W I, et al. Effects of vegetation distribution on experimental river channel dynamics[J]. *Water Resource Research*, 2013, 49(11): 7558-7574.
- [7] 赵清贺, 冀晓玉, 徐珊珊, 等. 河岸植被对坡面径流侵蚀产沙的阻控效果[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(13): 170-178.
- [8] Zhao Qinghe, Ji Xiaoyu, Xu Shanshan, et al. Inhibiting effect of riparian vegetation on erosion and sediment yield of slope runoff[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2018, 34(13): 170-178. (in Chinese with English abstract)
- [9] 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.
- [10] Bai Yuchuan, Yang Shuqing, Xu Haijue. Experimental analysis of river evolution under different planting densities of riparian vegetation[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2018, 37(11): 107-120. (in Chinese with English abstract)
- [11] 杨树青, 白玉川, 徐海珏, 等. 河岸植被覆盖影响下的河流演化动力特性分析[J]. *水利学报*, 2018, 49(8): 995-1006.
- [12] Yang Shuqing, Bai Yuchuan, Xu Haijue, et al. Dynamic characteristics of river evolution under the influence of riparian vegetation cover[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2018, 49(8): 995-1006. (in Chinese with English abstract)
- [13] Yu G A, Disse M, Huang H Q, et al. River network evolution and fluvial process responses to human activity in a hyper-arid environment: Case of the Tarim River in Northwest China [J]. *Catena*, 2016, 147: 96-109.
- [14] Yu G A, Li Z W, Disse M, et al. Sediment dynamics of an allogenic river channel in a very arid environment[J]. *Hydrological Processes*, 2017, 31: 2050-2061.

- [12] Li Z W, Yu G A, Brierley G J, et al. Vegetative impacts upon bedload transport capacity and channel stability for differing alluvial planforms in the Yellow River source zone[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2016, 20: 3013-3025.
- [13] Li Z W, Yu G A, Brierley G J, et al. Migration and cutoff of meanders in the hyperarid environment of the middle Tarim River, northwestern China[J]. *Geomorphology*, 2017, 276: 116-124.
- [14] 宗全利, 冯博, 蔡杭兵, 等. 塔里木河流域河岸植被根系护坡的力学机制[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(5): 1290-1300.
Zong Quanli, Feng Bo, Cai Hangbing, et al. Study on mechanical mechanism of riverbank protection from desert riparian vegetation roots in Tarim River basin[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(5): 1290-1300. (in Chinese with English abstract)
- [15] Feng B, Zong Q L, Cai H B, et al. Calculation of increased soil shear strength from desert plant roots[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2019, 12(16): 1-12
- [16] Zhu H L, Hu X S, Li Z W, et al. The influences of riparian vegetation on bank failures of a small meadow-type meandering river[J]. *Water*, 2018, 10(692): 1-15
- [17] Yu G A, Li Z W, Yang H Y, et al. Effects of riparian plant roots on the unconsolidated bank stability of meandering channels in the Tarim River, China[J]. *Geomorphology*, 2020, 351: 1-12.
- [18] Krzeminska D, Kerkhof T, Skaalsveen K, et al. Effect of riparian vegetation on stream bank stability in small agricultural Catchments[J]. *Catena*, 2019, 172: 87-96.
- [19] 李志威, 郭楠, 胡旭跃, 等. 基于 BSTEM 模型的黄河源草甸型弯曲河流崩岸过程模拟[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2019, 27(3): 509-519.
Li Zhiwei, Guo Nan, Hu Xuyue, et al. Modeling of bank failure processes of meadow-type meandering river using BSTEM in the Yellow River Source[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2019, 27(3): 509-519. (in Chinese with English abstract)
- [20] Zong Q L, Xia J Q, Zhou M R, et al. Modelling of the bank retreat process of a composite riverbank in the Jingjiang Reach using the improved BSTEM[J]. *Hydrological Processes*, 2017, 31(26): 4669-4681.
- [21] Midgley T L, Fox G A, Heeren D M. Evaluation of the bank stability and toe erosion model (BSTEM) for predicting lateral retreat on composite streambanks[J]. *Geomorphology*, 2012, 145/146: 107-114.
- [22] 柯映明, 沈占锋, 李均力, 等. 1994-2018 年新疆塔河干流农作物播种面积时空变化及影响因素分析[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(18): 180-188.
Ke Yingming, Shen Zhanfeng, Li Junli, et al. Temporal and spatial change of sown area of crop and its influencing factors in main stream of Tarim River from 1994 to 2018[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2019, 35(18): 180-188. (in Chinese with English abstract)
- [23] 王海珍, 韩路, 徐雅丽, 等. 控水处理对胡杨、灰胡杨生长特性及水分利用效率的影响[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(增刊 2): 195-201.
Wang Haizhen, Han Lu, Xu Yali, et al. Effects of water stress on growth characteristics and water use efficiency of *Populus euphratica* and *Populus pruinosa*[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2010, 26(Supp. 2): 195-201. (in Chinese with English abstract)
- [24] 陈亚宁. 新疆塔里木河流域生态水文问题研究[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 517-520.
- [25] 井家林. 极端干旱区绿洲胡杨根系空间分布特征及其构型研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2014.
Jing Jialin. Research on the Root System Distribution and Architecture of *Populus Euphratica* in the Extremely Arid Region[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2014. (in Chinese with English abstract)
- [26] Blanckaert K J, Graf W H. Mean flow and turbulence in open-channel bend[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2001, 127(10): 835-847.
- [27] Fukuoka S. Erosion processes of natural riverbank[C]// *Proceedings of 1st International Symposium on Hydraulic Measurement*, Beijing: CHES&IAHR, 1994: 222-229.
- [28] 李强, 刘国彬, 张正, 等. 黄土风沙区根系强化抗冲性土体构型的量化研究[J]. *中国水土保持科学*, 2017, 15(3): 99-104.
Li Qiang, Liu Guobin, Zhang Zheng, et al. Quantitative studies on root reinforcement resisting flow-induced erosion in the sandy loess region[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2017, 15(3): 99-104. (in Chinese with English abstract)
- [29] 夏军强, 宗全利, 许全喜, 等. 下荆江二元结构河岸土体特性及崩岸机理[J]. *水科学进展*, 2013, 24(6): 810-820.
Xia Junqiang, Zong Quanli, Xu Quanxi, et al. Soil properties and erosion mechanisms of composite riverbanks in Lower Jingjiang Reach[J]. *Advances in Water Science*, 2013, 24(6): 810-820. (in Chinese with English abstract)
- [30] 余明辉, 陈曦, 魏红艳, 等. 不同近岸河床组成情况下河岸崩塌试验[J]. *水科学进展*, 2016, 27(2): 176-185.
Yu Minghui, Chen Xi, Wei Hongyan, et al. Experimental of the influence of different near-bank riverbed compositions on bank failure[J]. *Advances in Water Science*, 2016, 27(2): 176-185. (in Chinese with English abstract)
- [31] 湛芸, 何丙辉, 练彩霞, 等. 三峡库区陡坡根-土复合体抗冲性能[J]. *生态学报*, 2016, 36(16): 5173-5181.
Chen Yun, He Binghui, Lian Caixia, et al. Root-soil system anti-scourability on steep slopes in the Three Gorges Reservoir Area[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(16): 5173-5181. (in Chinese with English abstract)

Effects of typical desert vegetation roots on the erosion process of cohesive riverbank

Zong Quanli^{1,2}, Chen Zhikang², Cai Hangbing², Qin Peng¹, Liu Chunxia¹, Jin Kai¹

(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)

Abstract: Desert vegetation roots of various species can contribute to the soil shear strength, and thereby to effectively stabilize the riverbank slope, particularly in the Tarim River Basin with the serious soil erosion. *Tamarix ramosissima* (TR) and *Populus euphratica* (PE) are the dominant plant species in typical shrubs and trees, respectively, where both have significant positive effects on the riverbank erosion. In this study, taking the vegetation roots of TR and PE in the Tarim River Basin as the study objects, the influence of desert vegetation roots on the erosion process of cohesive riverbank was investigated systematically via a generalized laboratory experiment. In the experimental design, the roots were mainly arranged in two forms of vertical and V-shaped with the angles of 90° and 60°, respectively. Subsequently, the roots were equally spaced along the section with an average spacing of 4cm. The results showed that: 1) the capacity of soil consolidation in the cohesive riverbank was significantly improved under the action of the roots network. Specifically, the erosion resistance of riverbank with roots increased by 30% to 56%, compared with that without roots. The roots of TR increased by 19.6% for the vertical layout, and 28.1% for the V-shaped, compared with that of PE, indicating that the capacity of soil consolidation varied in types of roots. The roots of TR and PE for the V-shaped increased by 27.1% and 18.6%, respectively, compared with that for the vertical layout, indicating that the capacity of soil consolidation varied in the layout methods of roots. Generally, the effect of roots network of TR increased by 24.2% on average, compared with that of PE. 2) There was a significant protection of roots retaining effect on the riverbank, mainly aiming to change the near-shore flow field, and protect the bank toe. The experiment results show that the vertical average velocity and turbulent energy of flow near the riverbank with roots were reduced to 45%-67% and 75%-91%, respectively, compared with that without roots. 3) The roots pulling effect was mainly explored by the impact on the accumulation and decomposition of the collapsed root-soil blocks and the deposition in riverbed. Consequently, the experimental results demonstrated that the roots pulling effect can be much stronger, as the increase in the volume of collapsed block accumulation. Specifically, the TR root with the average value of accumulation, 0.33, has more collapsed blocks than that of PE with the value of 0.24, indicating that the adhesion strength of root-soil blocks for the TR was stronger than that of PE. Furthermore, the roots pulling effect can be enhanced, as the increase in the time for further decomposition of the root-soil blocks. Two relationships of exponential functions were also obtained between the volume of collapsed blocks and scouring time for the TR and PE roots. The decomposed rate of root-soil blocks for the TR was lower than that for PE, whereas, the pulling effect of TR was greater than that of PE. In addition, the roots length density was positively correlated with the cumulative deposition rate of the riverbed, reflecting the interpenetration and winding ability of the roots. The contribution value of roots pulling effect to riverbed protection increased by about 20%, according to the cumulative deposition rate. These data can be used to reveal the effects of different vegetation roots on the erosion processes of cohesive riverbank, including the network, retaining and pulling effects. As such, this findings can also provide a sound technical support to the soil reinforcement and riverbank protection by the vegetation roots in arid desert areas.

Keywords: erosion; roots; *Tamarix ramosissima*; *Populus euphratica*; cohesive riverbank; network effect; retaining effect; pulling effect