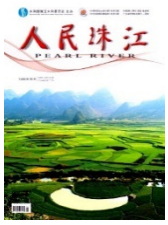


人民珠江
Pearl River
ISSN 1001-9235,CN 44-1037/TV

《人民珠江》网络首发论文

题目：考虑根系作用的草本植物护岸平行水流冲刷机理与量化
作者：王琦，毛硕，赵进勇，丁洋，王伟杰，薛洋，崔子腾，陈汪洋
收稿日期：2024-12-05
网络首发日期：2025-02-11
引用格式：王琦，毛硕，赵进勇，丁洋，王伟杰，薛洋，崔子腾，陈汪洋．考虑根系作用的草本植物护岸平行水流冲刷机理与量化[J/OL]．人民珠江．
https://link.cnki.net/urlid/44.1037.TV.20250210.1610.010

网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

网络首发时间：2025-02-11 09:08:23　网络首发地址：https://link.cnki.net/urlid/44.1037.TV.20250210.1610.010

考虑根系作用的草本植物护岸平行水流冲刷机理与量化

王 琦[1]，毛 硕[2]，赵进勇[1]，丁 洋[1]，王伟杰[1]，薛 洋[3]，崔子腾[3]，陈汪洋[3]

（1.中国水利水电科学研究院，北京 100038；2.东北大学秦皇岛分校，河北 秦皇岛 066004；

3.中国水务投资集团有限公司，北京 100053）

摘要：现有草本植物河岸冲刷研究存在机理与过程分析不清、计算方程假定与实际冲刷现象不符的情况。为确定平行水流条件下草本植物生态护岸抗冲刷特性，对冲刷过程及量化表达参数进行系统分析，提出冲刷过程经历冲刷起动和破坏 2 个阶段，可分别以冲刷速率和冲刷破坏流速量化表达，并提出相应的计算公式。选取永定河引水渠原状生态护岸植草岸坡，开展室内平行水流冲刷试验和植物根系测定试验，对公式进行了验证。研究表明公式符合性较好，冲刷损失系数随冲刷时长呈现显著指数相关；草本植被引起的流速折减系数范围在 0.661～0.781；由冲刷破坏公式计算出的破坏流速 2.56 m/s 与实测破坏流速 2.69 m/s 相比，误差 5.08%。研究成果可应用于生态护岸草本植被设计、植被设计重现期确定和现有护岸植被效果评估等工作，对河流生态保护和修复工作具有重要意义。

关键词：生态护岸；植物根系；冲刷损失系数；冲刷速率

中图分类号：TV 1　　**文献标识码：**A

Mechanism and Quantification of Parallel Flow Erosion of Herbaceous Plant Revetment Considering Root Action

WANG Qi[1], *MAO Shuo*[2], *ZHAO Jinyong*[1], *DING Yang*[1], *WANG Weijie*[1], *XUE Yang*[3], *CUI Ziteng*[3], *CHEN Wangyang*[3]

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. Northeastern University at Qinhuangdao, Qinhuangdao 066004, China; 3. China Water Investment Co., Ltd., Beijing 100053, China)

Abstract: The existing studies on erosion of herbaceous plant revetment often have unclear analysis of mechanism and process and inconsistent assumptions of calculation equations with the actual erosion phenomena. To determine the anti-erosion characteristics of ecological revetment based on herbaceous plants under the condition of parallel flow, this paper systematically analyzes the erosion process and quantitative expression parameters. It is proposed that the erosion process experiences two stages, namely, erosion start and destruction, which can be quantified with erosion rate and erosion destruction velocity, respectively, with the corresponding calculation formulas proposed. The formulas are verified by the experiments of parallel flow erosion and plant root measurement in laboratory with samples collected from original ecological revetment with

grassed slopes along the Yongding River diversion channel. The results show that the formulas are in good conformity, and the erosion loss coefficient has a significant exponential correlation with the erosion time. The coefficient of flow velocity reduction caused by herbaceous vegetation is 0.661–0.781. The error is 5.08% for the destruction velocity (2.56 m/s) calculated by the erosion destruction formula in comparison with the measured destruction velocity (2.69 m/s). The research results can be applied to the design of herbaceous vegetation for ecological revetment, the determination of the recurrence period of vegetation design, and the evaluation of the effect of existing revetment, which are of great significance for the ecological protection and restoration of rivers.

Keywords: ecological revetment; plant roots; erosion loss coefficient; erosion rate

河岸冲刷问题在河流生态治理工作中具有普遍性和严重性，抗冲流速往往是河道设计工作者最为关心的安全参数，但生态护岸抗冲性能往往难以定量表达。生态护岸植被作为一种活体护岸材料[1]，一方面，地表植被对岸坡承受的水流冲刷起到减缓和破碎作用，平行向水流切应力及垂向渗流力受植物枝叶遮蔽作用均有所降低[2]，另一方面，坡面下的根系对于护岸土体的锚固、加筋、拦挡等作用使得护岸土体稳定性都有所提升[3-5]，但在工程实践中如何量化尚不明确。

河流冲刷机理研究一般以宏观尺度下的护岸冲刷侵蚀研究和微观尺度下的泥沙起动研究两方面为主流。其中微观尺度研究侧重机理，研究对象多为单体泥沙颗粒，研究其初始起动过程；而宏观尺度下的护岸冲刷侵蚀侧重总量和结果，以某时段累计冲刷量为研究内容。两类研究各有侧重，但在冲刷机理和假定上存在矛盾。并且，在针对有植被的生态护岸中，两方面研究的量化参数计算方法无法直接应用。

宏观尺度下的护岸冲刷侵蚀研究开始于20世纪60年代[6]，该理论注重特定时间内的持续冲刷过程，以冲刷速率 E（$cm^3/h/cm^2$）反映护岸表面抗冲刷能力及某一流速条件下的土壤流失量。相关研究以 Hanson 提出的超剪应力方程为基础，认为床面切应力超过土体抗剪强度后引起持续剪切冲刷[7-8]。基于该理论，多名学者利用室内或室外概化水槽试验开展有根系抗冲刷试验对比研究[9-13]，并发现坡面土壤流失与植物根系结构形态指标具有较高关联度，包括根径、根系密度、生物量、根长等[14-19]。但该理论并不符合微观尺度泥沙冲刷起动机理，数据拟合误差很大[20]。在微观冲刷起动研究[21-22]中我们知道，冲刷过程其实是河床或护岸表面土体颗粒在受到水流垂向渗流力影响后，土体内部孔隙加大，土体颗粒之间黏结力消失，离散化后的单体土颗粒在浮力、渗流力和床面切应力共同作用下发生流化起动，且这个过程在波浪脉动应力作用下更为明显。冲刷过程可用“冲击-入渗-悬浮-挟带”来描述，土体颗粒起动与到自身重力、土体内部黏聚力、波浪脉动应力和水流垂向渗流力直接相关[23]。因此，这种离散状态下的土体颗粒抗冲刷强度并不能与整体剪切破坏确定的抗剪强度等同[24-27]。即使很小的流速下未达到土体抗剪强度也会发生起动冲刷，假定床面切应力只有超过土体抗剪

强度才会发生冲刷这一假定并不成立，超剪应力方程假定与实际不符。

微观起动理论符合冲刷过程机理，但其量化参数为单体颗粒的起动流速，难以适用于生态护岸土体地表复杂湍流场，微观起动概率事件及水流床面切应力均难以量化，根土复合团聚体[29]的存在也使得散粒体力学方程不再适用，因此起动流速及计算公式无法用于植被护岸。对于生态护岸，关心的往往不是土体颗粒起动，而是持续水流作用下的冲刷速率和植被发生显著破坏时的破坏流速。

因此，本研究基于微观起动理论，对冲刷过程进行分析，在对宏观冲刷超剪应力方程修正的基础上，提出冲刷速率计算方法；同时根据草本植被破坏状态探讨破坏流速计算方法。研究选取华北地区河流生态护岸常用草本植物沿阶草，对草本植物护岸进行公式验证。

1 过程分析与量化

1.1 草本植被冲刷破坏过程

植被生态护岸冲刷经历起动和破坏2个显著过程。□冲刷起动阶段，岸坡土体一方面承受近底流速的表层剪切作用，一方面受地表植被传递至根部的挤压作用。此阶段以植被未覆盖部位土体首先发生松动，其起动机理与无植被覆盖土体并无明显差别。由于毛细根须及黏液等成分增加了根土之间聚合力，从而阻止了散粒状土体起动，由根系包裹的土体不再发生大面积悬扬。水流冲刷通过植物整体传递至土体深层，以拖动土体或抗拉拔的形式抵御水流冲刷，植被根系扎根深度、抗拉强度决定了抗冲刷能力。□冲刷破坏阶段，当流速加大，冲刷持续造成河岸表面土体流失加快，发生迎水面局部凹陷，根土复合团聚体逐渐出露地表，根系周围附着的土体颗粒不断流失，此时，有直立茎干的植物可能发生偏转倒伏，其它大部分低矮草本会整体被拉出并发生翻滚。当发生这些现象后，土体表面将留下明显冲坑，而破坏的植物后续无法继续存活，或可能需要相当长的时间才能自行恢复。这个过程中发现，根土复合团聚体在埋置深度范围内的整体抗拉强度与水流冲刷应力达到平衡是发生破坏临界点（图1）。

a)无植被覆盖土体先发生局部凹陷　　b)冲刷破坏时根系发生整体脱出

a) Local depression occurs first in the soil without vegetation cover

b) The whole root system protrudes during erosion destruction

图1 草本植被护岸冲刷过程

Fig. 1 Schematic diagram of the erosion process of herbaceous plant revetment

1.2不同阶段冲刷量化参数

考虑到草本植被护岸冲刷过程中，起动流速意义不大，更应该关注岸坡表面持续发生的土壤损失量。因此，在冲刷起动阶段，仍然以冲刷速率 E（$cm^3/h/cm^2$）作为主要量化表达方式，表征某流速条件下岸坡表面的单位面积土壤损失量，该参数与水流流速、地表植被、根土复合团聚体有关。

在冲刷破坏阶段，认为植物发生不可逆的翻倒或整体脱出即可判定为发生冲刷破坏，此临界状态以冲刷破坏流速作为主要量化参数。发生翻转时水流拖曳力与根土复合体翻转滑动面位置、土体抗剪强度有关；发生整体脱出时水流拖曳力与根系整体抗拉拔强度有关。由此可对破坏临界状态建立力学平衡方程，确定水流流速与根土复合团聚体力学强度相关关系。

2 量化参数计算公式

2.1冲刷速率计算

Hanson 提出的超剪应力方程源于降雨时地面径流对陆域表面土壤侵蚀量计算，见式（1）：

$$E = k（\tau_0 - \tau_c）^{\alpha} \quad （1）$$

式中：E 为单位面积下河岸土体冲刷速率，$cm^3/h/cm^2$；τ_0 为土水界面处的剪切应力，Pa；k 为土体冲刷损失系数，cm/h/Pa；τ_c 为土体的临界剪切应力，Pa；α 表征岸坡土体冲刷速率与土水界面有效应力和土体临界剪切应力差的关系，一般假定为 1。

对上述方程进行修正。根据韩琪为在微观尺度泥沙冲刷起动机理相关研究中的分析和质疑[25]，冲刷速率 E 与土体抗剪强度 τ_c 并无直接关系。超剪应力方程在应用场景上不能直接应用于护岸冲刷过程。作为一个半经验公式，其目的是把冲刷过程中的主动冲刷应力与土体抗冲刷能力分割，k 直接反映护岸土体抗冲刷能力，与土体颗粒大小、容重、土体内部粘聚力、泥沙与盐类、生物黏结力（包括植物根系）[28]等因素有关，而表层土体在“渗透-分解-悬浮-流化”后黏聚力几乎全部消失，而土体颗粒在起动后可能发生滚动、跳跃和滑动三种状态，只有在颗粒与土体表面发生滑动时，表层颗粒抗剪强度才存在微小的滑动摩擦阻力。对于宏观冲刷研究尺度下的超剪应力方程，这个微小的滑动剪应力可以忽略不计，引起的误差在对 k 的确定中即可被修正。因此去掉 τ_c，认为在很小的流速下也可能引起土壤流失，得到下式（2）：

$$E = k（\tau_0）^{\alpha} \quad （2）$$

根据平行流体剪切力理论对上式改写为近底流速形式。由于物体表面流体剪切力与流体速度梯度变化呈幂指数相关，认为土体表面平行流体在物体表面产生剪应力可按下述公式计算：

$$\tau_0 = K\left(\frac{dv}{dh}\right)^m \quad （3）$$

式中：K 为剪切力常数；v 为物体表面的流体流速；h 为平行水流在土层表层由于垂向入渗过程中递减至 0 时的土层厚度；m 为幂律指数，根据流体类型取值，水的 m 值取 0.5。

参考水力学紊流流速分布中近壁面流速梯度假定[29]，假定□土层内流速递减梯度为线性，且土层流失主要由于水流切应力导致，假定□流速递减层厚度 h 与发生起动的平均土层厚度 k（土体冲刷损失系数）呈线性相关，即 $h=ak$，a 为常数，见图 2，则有下列关系：

$$\tau_0 = K\left(\frac{v}{ak}\right)^m \quad （4）$$

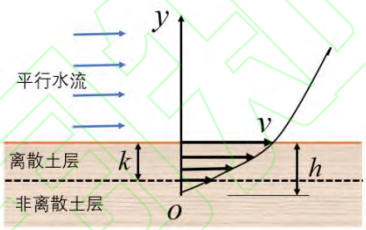


图 2 土体内部冲刷与流速递减相关关系

Fig. 2 Relationship between soil erosion and velocity reduction

将式（4）代入式（2）：

$$E = K \cdot k \cdot \left(\frac{v}{ak}\right)^m = \frac{K}{a^m} \cdot k^{(1-m)} \cdot v^m \quad （5）$$

设$k_v = \frac{K}{a^m} \cdot k^{(1-m)}$，表示土层中由于近底流速 v 引起的冲刷损失系数，上式可写为：

$$E = k_v \cdot v^m \quad （6）$$

上式可写为垂线平均流速形式，设$v = \xi U$ ，U 为垂线平均流速，使 $k_U = k_v \xi^m$，即可得到由垂线平均流速表示的冲刷速率计算公式：

$$E = k_U \cdot U^m \tag{7}$$

当考虑地表植被干扰引起的流速衰减，设 $v_p = \xi_p v$，设 ξ_p 为由于植被引起的流速折减系数，使 $k_{vp} = k_U \xi_p^m$，得到植被护岸冲刷速率计算公式：

$$E = k_{vp} \cdot U^m \tag{8}$$

式（7）、（8）中的 k_U、k_{vp} 分别为受特定流速下护岸土体和植被护岸表面冲刷损失系数，单位为 cm/h/Pa，可通过试验获得。

2.2冲刷破坏流速计算

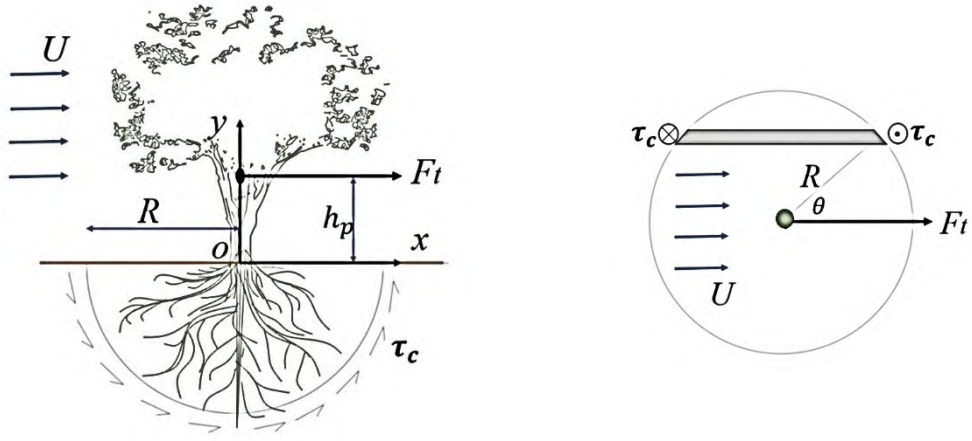
植被发生破坏时的临界状态除了与水流流速相关，还与草本植被高度、根系类型等有关，植被发生破坏可能发生翻转或根系整体脱出两种情况。当地面植被足够高时，水流拖曳力作用使得植被发生翻转。设 F_t 为植物地面以上部分收到的水流拖曳力，此时考虑根系的包裹和团聚作用，可以把发生偏转时地面以下根系近似看作半球体，半径为 R，见图 3a，翻转时降沿球面发生错动，假定此时半球体表面土体剪切力全部达到抗剪强度 τ_c，对半球土体底面所受切应力进行积分，见图 3b，忽略根土复合团聚体转动半球边缘零星根系的摩擦制动作用，以植物主径与地面交点为 o 点建立力矩平衡方程，见式（9）：

$$F_t \cdot h_p = \int_{-90}^{90} \tau_c \cdot R\cos\theta \cdot (\pi R\cos\theta) d\theta \tag{9}$$

化简得：

$$F_t \cdot h_p = \frac{\pi^2 R^2}{2} \tau_c \tag{10}$$

式中：F_t 为植物地面以上部分收到的水流拖曳力，N；h_p 为植物地面以上部分的受水流拖曳力的作用点高度，m；θ 为根系翻转半球体某竖向土体切片轴线与经过球体中心水平轴之间的夹角，范围为-90°~+90°。



a)立式图　　b)俯视图

a) Elevation profile　　b) Top view

图 3 植物发生翻转时受力状态

Fig. 3 Stress state of plants when they are turned over

当地面植被为低矮植被不足以发生翻转时，如无茎草本类植物，发生冲刷破坏时为根系整体脱出，在临界状态时植物受到的水流拖曳力与根系埋置深度内的剩余整体拉拔强度相等。

$$F_t = k_t \cdot F_{\max} \tag{11}$$

式中：k_t 为根土复合团聚体抗拉拔强度折减系数，可根据脱出时剩余埋置根系与整体根系比表面积的比值确定；$F_{\max}$ 为根系整体拉拔强度，N。

水流对植被的推力 F_t 采用拖曳力计算公式[21]：

$$F_t = 0.5 C_D A_p \rho U^2 \tag{12}$$

式中：C_D 为拖曳力系数，一般为 0.4，A_p 为植物有效冲刷面积，m^2。

式（12）代入（10）即可得到翻转破坏时的流速计算公式为：

$$U_1 = \pi R \sqrt{\frac{\tau_c}{C_D A_p \rho h_p}} \tag{13}$$

式（12）代入（11）即可得到植物脱出破坏时的流速计算公式为：

$$U_2 = \sqrt{\frac{k_t \cdot F_{max}}{0.5 C_D A_p \rho}} \tag{14}$$

上式（13）、（14）即为植被护岸冲刷破坏为翻转或脱出时的流速计算公式基本形式。

表 1 公式参数说明

Tab. 1 Formula parameter description

参数符号	参数	说明
k_v、k_U	分别为无植被时水流近底流速 v 或垂线平均流速 U 对应的冲刷损失系数	——
k_{vp}	有植被时护岸土体冲刷损失系数	——
ξ_p	由于植被引起的流速折减系数	有植被和无植被条件下的冲刷损失系数比值，反映植被对冲刷的降低程度
a	平均冲刷厚度与水体渗入土体后纵向流速发生递减的分布深度	假定为常数
U_1、U_2	分别为草本植株发生翻转或脱出破坏时的水流垂线平均流速	——
C_D	水流拖曳力系数	一般取值 0.4
A_p	植物有效冲刷面积	根据植物淹没部分的迎水面投影面积估算
R	草本植株发生整体翻转时，地面以下根系半球体近似半径	可根据根系扫描试验或开挖获取的根系主根长度估计
τ_c	土体抗剪强度	可根据室内土工试验获取
ρ	水的密度	——
h_p	植株地面以上部分的受水流拖曳力的作用点高度	根据植株淹没部分高度估计，可取 1/2 倍淹没高度
k_t	根土复合团聚体抗拉拔强度折减系数	发生根系脱出瞬间，剩余埋置根系与整体根系比表面积的比值
F_{max}	根系最大整体拉拔强度	根据植物原位根系整体拉拔试验获取

3公式验证

3.1冲刷速率测定

采用室内平行水流水槽试验对冲刷速率计算公式（7）、（8）进行拟合和验证。试验通

过模拟平行水流冲刷过程，对不同冲刷时长、不同水流垂线平均流速 U_i 条件下护岸土体流失量进行记录，测定相应冲刷速率 E_i。试验岸坡土体取自北京市永定河引水渠生态护岸植草边坡，边坡植被为沿阶草。室内试验水槽长 15 m，高 1 m，试验段过水水面宽度 0.5 m，见图 4a。在水槽进口处设有阀门和电磁流量计，水面设电子流速仪及传输设备，水槽末端设有土体收集装置。试验土体由原状岸坡切割，并放入水中浸泡 12 h 后装入试验用槽，如图 4b 所示。模拟护岸试件宽 30 cm，高 5~30 cm，边坡坡比与原渠道坡比相同采用 1:2。同步开展裸土即植被护岸冲刷对照组，共 12 组，各试验方案参数见表 2。每组试验持续冲刷 180 min，每隔 30 min 记录岸坡土体冲刷量，试验获取的冲刷速率 E_i 和垂线平均流速 U_i 见图 5。

a) 试验水槽　　b) 试验岸坡

a) Test sink　　b) Test bank slope

图 4 试验水槽和岸坡照片

Fig. 4 Photographs of test sink and bank slope

表 2 平行水流冲刷试验方案

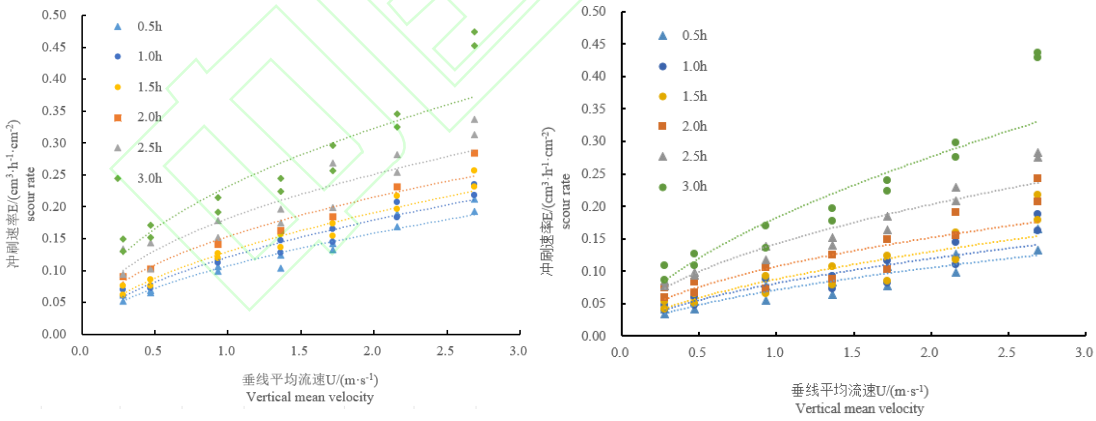
Tab. 2 Schemes of parallel flow erosion test

方案	坡比	流速 U_i/(m·s^{-1})	岸坡类型
1-1		0.28	裸土岸坡
1-2		0.47	裸土岸坡
1-3	1:2	0.93	裸土岸坡
1-4		1.36	裸土岸坡
1-5		1.72	裸土岸坡

1-6		2.16	裸土岸坡
1-7		2.69	裸土岸坡
2-1		0.28	植物岸坡
2-2		0.47	植物岸坡
2-3		0.93	植物岸坡
2-4	1:2	1.36	植物岸坡
2-5		1.72	植物岸坡
2-6		2.16	植物岸坡
2-7		2.69	植物岸坡

3.2 冲刷速率计算公式验证

试验结果显示，在相同冲刷时长条件下，裸土及植被两种岸坡冲刷速率 E 与垂线平均流速 U 存在显著的幂指数关系，验证了公式（7）、（8）形式的合理性。根据图 5 中幂指数关系曲线，可得到式中公式中 k_U、k_{vp}及 m 拟合值，见表 3。结果显示植被护岸冲刷损失系数k_{vp}均低于裸土护岸 k_U，植物引起的流速折减系数 ξ_p 范围 0.661~0.781；m 拟合均值 0.5288±0.039，误差 5.76%。



a) 裸土岸坡　　b) 植物岸坡

a) Bare soil bank slopes　　b) Vegetated slopes

图 5 不同冲刷时长条件下的冲刷速率与垂线平均流速拟合关系

Fig. 5 Fitting relationship between the erosion rate and the average vertical velocity under different erosion

time

表 3 不同冲刷时长条件下的冲刷速率与垂线平均流速拟合结果

Tab. 3 Fitting results of erosion rate and average vertical velocity under different erosion time

岸坡类型	拟合参数	冲刷时长/h					
		0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
裸土	k_v	0.107	0.121	0.130	0.153	0.182	0.231
	m	0.565	0.564	0.558	0.488	0.467	0.481
草本植被	k_{vp}	0.071	0.081	0.088	0.107	0.142	0.173
	ξ_p	0.661	0.670	0.675	0.699	0.781	0.748
	m	0.569	0.556	0.571	0.501	0.515	0.510

试验过程中发现裸土岸坡及草本植被岸坡冲刷损失系数 k_v、k_{vp} 值随冲刷时长不断增加，呈现显著指数相关，相关曲线见图 6、表 4。

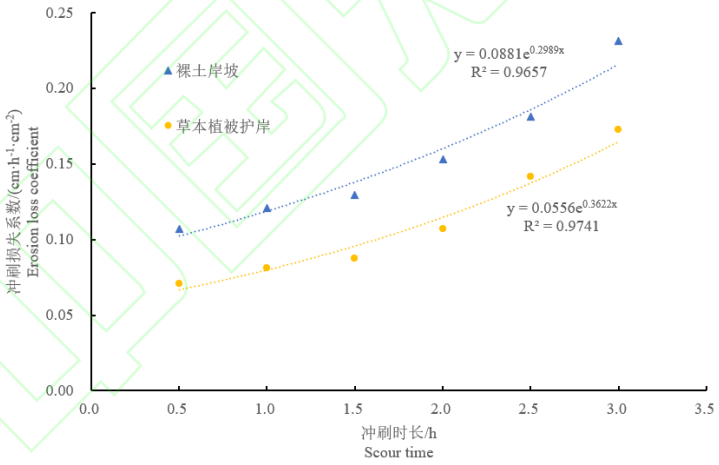


图 6 冲刷时间和冲刷损失系数相关关系

Fig. 6 Relationship between erosion time and erosion loss coefficient

表 4 冲刷时长与冲刷损失系数相关关系

Tab. 4 Correlation between erosion duration and erosion loss coefficient

岸坡类型	相关关系	R^2

裸土岸坡	$k_v = 0.0881 \cdot e^{0.3T}$	0.966
草本植被岸坡	$k_{vp} = 0.0556e^{0.362T}$	0.974

3.3 冲刷破坏公式验证

先根据植物根系形态判定破坏类型。利用原位监测系统扫描出沿阶草根系图，确定沿阶草根系形态为须根，无明显主根（图 7），根系长度主要集中在 30~150 mm，判定冲刷破坏时发生整体脱出。考虑到冲刷破坏发生时，破坏状态与植物根系特征以及根系（族）和周围土体的粘结力有关，对现场根系进行多组根系整体拉拔试验。选取雨后护岸土体完全饱和状态，采用拉力计进行整体根系原位拉拔试验，见图 8。共计测试 20 株，测得单株根系整体拉拔强度为 50.91±9.27N。

试验过程中发现水流流速加大至 2.69 m/s 时，冲刷时长持续到 3 h 后，土体表面出现较大凹陷，岸坡草本根团确实发生了大块脱出（图 1），此时认为达到冲刷破坏流速。经测定，脱出根团平均根系裸露部分占比 42.01%，即认为根系抗拉拔强度折减系数为 0.42，代入公式（14）得到破坏流速 2.56 m/s，与实测流速 2.69 m/s 相比，误差 5.08%，符合程度较好。

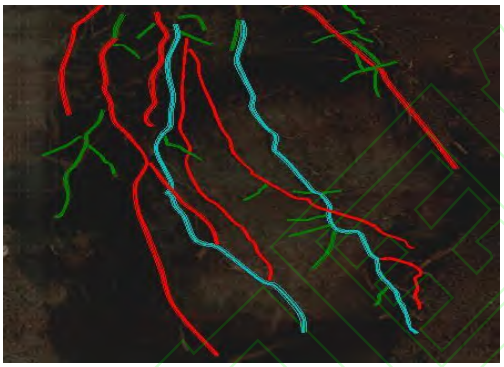


图 7 沿阶草根系原位扫描图

Fig. 7 In situ scan of root system of *Ophiopogon bodinieri*

图 8 整体拔出的沿阶草根系

Fig. 8 Root system of *Ophiopogon bodinieri* pulled out as a whole

4 讨论

与微观尺度起动理论研究叙述一致，在平行水流冲刷实验中，当水流发生微小流动，护岸土体就观察到了土壤流失，植被护岸土壤流失部位先发生在无草叶覆盖的土体表面，这与前述机理分析相一致。目前护岸冲刷实验大多数研究都集中于冲刷损失系数 k 的测定，本实验中得到冲刷损失系数与时间呈现指数相关，与相关实验结果是一致的[30-31]。与裸土岸坡相比，草本植物护岸冲刷速率明显降低，由于植被引起的流速折减系数在 0.661~0.781 范围内，流速越小，折减程度越高，与周小淇在沟渠植草对于土壤侵蚀降低相关研究也是基本一致的[32]，但与唐瑞泽在得到的植被根系对河岸冲刷量减少 0.77%~49.36%结论比相对较高[33]。分

析认为其试验中研究对象为骆驼刺、红柳等乔灌植物，根系类型以主根型为主，护岸土体表面仍然有大量裸露，而本试验中护岸植被分布均匀，因此植物对土体的覆盖程度和植被根系在浅层土体的分布是影响冲刷的主要因素，草本植物抗冲刷作用更为显著。

无论是裸土边坡还是植物边坡，由试验得到的 m 均值 0.5288 与式（3）中对于水体常规取值 0.5 也基本符合，该值表征床面剪切力与水流流速幂指数关系，验证了冲刷速率计算公式假定的合理性，该公式形式也与邓漩提出的宏观尺度下草甸型弯曲河流侵蚀过程经验公式形式极为相近[34]。

目前相关研究对于植物根系的力学性能试验研究主要集中于根系抗拉、抗剪强度试验，但应用场景有所区别。由于草本植物根系主要分布于岸坡浅层土体 30 cm 深度以内[3]，主要依靠根系与土体之间摩擦力抵抗冲刷[35]，脱出破坏是须根系草本主要的破坏形式[36]。试验获得的整体拉拔强度 50.91±9.27 N 与相关原位根系整体拉拔试验结果比较，高于干旱地区草本植物 16.45~46.5 N[37]，低于云南地区草本植物 64.54~76.68 N[38]，分析认为符合土壤含水率对植物根系的负向影响规律[39]，而云南地区土壤肥力导致区域植物根系扎根程度更大也是其拉拔强度更大的原因。

本次研究通过对超剪应力方程进行修正，使其更符合微观起动原理和试验现象。这种将冲刷主动力和护岸抵抗力分解的半经验公式更为容易理解，并且在实际试验数据拟合和现场测定工作中更为准确，避免了低流速水流引起冲刷无法解释和拟合公式误差大的情况。研究试验虽选用沿阶草在北京地区进行了较好的验证，但得到的破坏流速和 k 值不具有普遍性。事实上，k 值和冲刷破坏流速针对不同类型土体、不同类型植物、不同发育期、不同护岸类型均有所区别。根据冲刷试验原理及过程分析认为，k 值与土体渗透性、土体颗粒大小和黏性、土体盐度及有机质含量、植被覆盖度、根长、根径、根系总表面积、根土黏聚力和冲刷时间等均有关，在未来的研究中有望能形成 k 值经验公式或取值范围，使护岸冲刷研究更为明晰。不同植物的破坏流速差别很大，当植物为均匀完整的草本植物时，尤其是匍匐类形态草本植物，决定其破坏流速的因素基本与 k 值相同。但对于深根系灌草，临界破坏流速大小主要取决于植被导致的水流紊动能消散程度，研究对翻转状态进行了概化和假定，从力学平衡角度可知翻转破坏与植物地面以上部分的枝叶发育程度、高度、株径、及根系埋置深度、主根长度及须根分布数量具有直接关系，在这种力学平衡条件下土体抗剪强度不能忽略，相关内容有待进一步验证。

5 结论

本研究通过对冲刷过程及量化表达参数进行系统分析，提出和验证了冲刷速率与冲刷破坏流速计算公式。研究可为生态护岸植被工程物种配置、抗冲效果评估与护岸浅层稳定安全分析等工作提供量化指导，精准评估在洪水等水流冲击下护岸的稳定性，确定在不同流量、流速情况下护岸能够承受的极限冲刷程度，从而有效减少河岸坍塌的风险。以冲刷破坏流速确定的植被工程，可结合工程水文分析应用于河流生态治理工程设计标准，为护岸植被设计重现期提供确切依据，在优化防洪工程设计、提高工程强度和耐久性、维护河岸生态功能、

减少因河岸冲刷引起的经济损失方面具有重要意义。

参考文献：

[1]张云昌,赵进勇.强干扰河流生态学基本问题与技术体系探析[J].中国水利,2023,(22):6-9，41.

[2]董哲仁.生态水利工程学[M].北京:中国水利水电出版社,2019.

[3]郝由之,赵进勇,路明,等.复合植被根系作用对生态岸坡稳定性的影响[J].水生态学杂志,2020,41(3):42-50.

[4]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.

[5]HAN J K , ZHAO J Y, WEI J, et al.Influence of shrub root combinations and spacing on slope stability:study case at the Yongding River flooding regime,Langfang,China[J].Environmental Science and Pollution Research,2022(29):69599-69617.

[6]PARTHENIADES E. Erosion and deposition of cohesivesoils[J].American Society of Civil Engineers, 1965,91(1):190-192.

[7]OSMAN A M , THORNE C R , MEMBER A. Riverbank stability analysis.I:Theory[J].Journal of Hydraulic Engineering,1988,114(2):134-150.

[8]JIA D D, QIN J, ZHANG X N,et al.A New Semi-Analytical Method to Calculate the Fluvial Erosion Rate of Non-Cohesive Riverbanks[J]. Water Resources,2020, 47(4):550-559.

[9]ODGAARD A J.Streambank erosion along two rivers in Iowa[J].

Water Resources Research,1987,23(7):1225-1236.

[10]NANSON G C ,HICKIN E J A. Statistical analysis of bank erosion and channel migration in western Canada[J]. Geological Society of America Bulletin,1986,97(4):497–504.

[11]HOSSEINZADEH M M , BEYRANVAND S M , ESMAILI R. Analysis of channel bank erosion rate using exposed roots of trees: a case study of lavij stream, northern Alborz Mountains, Iran[J].Journal of Mountain Science,2020,17(5):1096-1105.

[12]NI J J,LEUNG A K, NG C W ,et al. Modelling hydro-mechanical reinforcements of plants to slope stability[J]. Computers and Geotechnics,2018,95(10):99-109.

[13]陈志康,宗全利,蔡杭兵.典型荒漠植被根系对塔里木河岸坡冲刷过程影响试验研究[J].长江科学院院报,2022,39(1):56-62,69.

[14]REUBENS B,POESEN J,DANJON F,et al. The role of fine and coarse roots in shallow slope stability and soil erosion control with a focus on root system architecture:a review[J]. Trees,2007,21(4):385-402.

[15]OSHUNSANYA S O, LI Y, YU H Q.Vetiver grass hedgerows significantly reduce nitrogen and phosphorus losses from fertilized sloping lands[J]. Science of the Total Environment,2019,661:86-94.

[16]LI Q, LIU G B, ZHANG Z, et al. Relative contribution of root physical enlacing and biochemistrical exudates to soil erosion resistance in the Loess soil[J]. Catena, 2017,153:61-65.

[17]BAETS S D, POESEN J, REUBENS B,et al. Root tensile strength and root distribution of typical Mediterranean plant species and their contribution to soil shear strength[J]. Plant and Soil, 2008,305(1/2):207-226.

[18]EMADI T M , ATAIE A B, HOSSEINI S M. Integrated impacts of vegetation and soil type on slope stability: A case study of Kheyrud Forest, Iran[J].Ecological Modelling,2021,446:109498.

[19]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.

[20]YAN R, ZHANG X, YAN S, et al.Estimating soil erosion response to land use/cover change in a catchment of the Loess Plateau, China[J].International Soil and Water Conservation Research, 2018,6(1):13-22.

[21]李林林,张根广.斜坡上泥沙起动流速统一公式的建立[J].长江科学院院报,2018,35(4):13-17.

[22]张红武.泥沙起动流速的统一公式[J].水利学报,2012,43(12):1387-1396.

[23]程年生,陆呈啸,卢叶盛,等.泥沙起动参数评析[J].泥沙研究,2024,49(6):1-7.

[24]韩其为,何明民.细颗粒泥沙成团起动及其流速的研究[J].湖泊科学,1997(4):307-316.

[25]韩其为,何明民.泥沙起动规律及起动流速[M].北京:科学出版社,1999.

[26]王军,谈广鸣,舒彩文.固结状态下黏性泥沙起动规律试验研究[J].泥沙研究,2014,39(6):25-29.

[27]马菲,韩其为,赵弟明.黏性细泥沙起动的探讨[J].泥沙研究,2015,40(1):75-80.

[28]龚政,葛冉,冯骞,等.泥沙颗粒间黏结力作用及其对泥沙起动影响研究进展[J].水科学进展,2021,32(5):801-812.

[29]李鉴初,杨景芳.水力学教程[M]. 北京:高等教育出版社,1995.

[30]MCNICHOL B,KASSA K,FOX G,et al.Erodibility Parameters Derived from Jet and Flume,Erosion Tests on Root-Permeated Soils[J].Journal of Contemporary Water Research & Education,2017,160(1):119-131.

[31]HASHIM Z E,AL-MADHHACHI A T, LUBNA A A. Behavior of soil erodibility parameters due to biological soil crusts using jeterosion tests[J].Ecological Engineering,2020,153:105903.

[32]周小淇.蔗区沟渠植草减少土壤侵蚀及其养分流失的有效性研究[D].南宁：广西大学,2023.

[33]唐瑞泽,汤骅,宗全利,等.植被根系对干旱内陆河流岸坡冲刷过程影响的模拟研究[J].水土保持学报,2023,37(2):27-36.

[34]邓漩,刘超,李龙国,等.若尔盖草甸型弯曲河流侵蚀过程机制与计算模型研究[J/OL].工程科学与技术,1-15[2024-12-04].

[35]冯博,宗全利,唐建,等.塔里木河干流岸坡植被对河岸侵蚀影响机理初步分析[J].人民珠江,2017,38(2):7-11.

[36]肖海,张千恒,夏振尧,等.拉拔作用下护坡植物香根草根系的力学性能[J].农业工程学报,2022,38(11):91-97.

[37]王程,胡夏嵩,刘昌义,等.黄河源区六种草本植物根系抗拔力特征及其影响因素研究[J].草地学报,2023,31(1):157-165.

[38]徐宗恒,陈云英,张宇,等.云南省昭通市烂泥箐滑坡源区草本植物根系抗拉特征[J].水土保持通报,2023,43(3):11-18.

[39]夏振尧,闫茹冰,张伦,等.狗牙根根系抗拉性能对水淹时长的响应[J].农业工程学报,2023,39(6):103-110.

（责任编辑：高天扬）

基金项目：水利部重大科技项目(SKS-2022071)；中国水科院项目(WE0145B042021)；中国电力建设股份有限公司科技项目（KJ-2023-187）

收稿日期：2024-12-05　**修回日期**：2025-01-20

作者简介：王琦(1977—)，女，硕士，高级工程师，主要从事生态水工学理论与实践研究。E-mail：450360503@qq.com