

基于 ANSYS CFX 的细沟水流切应力分析

王友¹ 王健^{1,2} 霍春平³ 马玉红³ 牛银环³ 李鹤^{1,4}

(1. 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100; 3. 西安市水利水土保持工作站, 西安 710016; 4. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 武汉 430061)

摘要: 为探明细沟断面的发育过程, 利用流体力学软件 ANSYS CFX 15.0.7 对细沟的发育变化过程进行数值仿真, 研究细沟断面水流流速及切应力分布, 结合实测细沟发育, 分析了细沟断面水流流速特征和切应力特征, 从计算流体力学角度探索了细沟在水流冲刷情况下的断面发育机理。结果表明: 利用 CFX 数值仿真建模的方法, 得到了染色法测定细沟水流流速时的修正系数为 0.78。宽浅式细沟断面切应力小于窄深式断面, 细沟水流切应力主要集中在 1.41 ~ 2.10 Pa 之间。水流切应力决定着细沟断面的发育, 断面各点的切应力与断面各点发育较为吻合, 切应力与断面各点的发育密切相关。

关键词: 细沟侵蚀; 水流切应力; 断面发育; CFX

中图分类号: S157 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)09-0154-07

Analysis of Rill Flow Shear Stress Based on ANSYS CFX

Wang You¹ Wang Jian^{1,2} Huo Chunping³ Ma Yuhong³ Niu Yinhan³ Li He^{1,4}

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China
2. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China
3. Xi'an Soil and Water Conservation Station, Xi'an 710016, China
4. China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., Wuhan 430061, China)

Abstract: In order to understand the relation between the developing process of rill erosion and flow shear stress, the paper simulated the developing process of rill erosion applying hydrodynamics software ANSYS CFX (version 15.0.7) to explore the distribution of flow velocity and shearing stress in the rill section. Based on flume experiment, 6 m long flush tank was used and rill development in 8 sections was measured. The experimental flow rate was 800 L/h. The paper analyzed the characteristics of flow velocity and shear stress combined with the measured value of rill section and it is a supplement in computing hydrodynamics of the fracture mechanism of rills under water flow. The results showed that the rill section average flow velocity was 0.71 times of the surface velocity, the correction coefficient was 0.78 with the dye method to determine the rill flow velocity when using the way of CFX numerical simulate pattern method. Rill section shape affects the magnitude of shear stress. The shear stress value of broad-shallow section was less than the narrow-deep section which is between 1.41 ~ 2.10 Pa. The shear stress determined the rill development, and the point shear stress distribution of rill section was normal distribution. The point shear stress of rill section was consistent with the rill development and shear stress was tightly correlated with the development of each point in the section.

Key words: rill erosion; flow shear stress; section development; CFX

收稿日期: 2016-05-23 修回日期: 2016-06-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(41371273, 41101268)和西北农林科技大学科技创新项目(QN2011152)

作者简介: 王友(1991—), 男, 博士生, 主要从事土壤侵蚀理论与试验研究, E-mail: 1097497975@qq.com

通信作者: 王健(1973—), 男, 副教授, 主要从事土壤侵蚀与流域管理研究, E-mail: Wangjian@nwsuaf.edu.cn

引言

细沟侵蚀是黄土高原土壤侵蚀的主要形式和重要过程,是沟蚀的初始形态^[1]。细沟作为沟蚀的初始形态,是坡面侵蚀研究的重要内容^[2-3]。坡面细沟水流的动力学特征是分析和控制土壤侵蚀过程的主要参数之一,在很大程度上决定了细沟侵蚀产沙特征和产沙量^[4]。对细沟水蚀的理论与试验研究也有较大进展,王健等^[1-5]根据室内放水冲刷试验分析细沟水流动力学特征,试验探究了影响细沟横断面形态特征的因素及细沟水流侵蚀挟沙能力的变化。张晴雯等^[6]通过水槽放水冲刷试验发现出口处的细沟水流含沙量与坡度及入流流量呈函数关系。陆绍娟等^[7]、沈海鸥等^[8-9]根据模拟降雨试验,研究了影响坡面细沟形态发育的多种因素。已有大量研究从试验角度定量探索了坡面细沟的发育^[10-12]。近年来,随着计算机技术和数值计算科学的发展,ANSYS CFX 软件(以下简称 CFX)在流体力学领域得到广泛使用。CFX 软件是由英国 AEA Technology 公司开发的 CFD 软件,集成于 ANSYS Workbench 当中。其基本求解思想是把计算域划分为有限个互不重叠的单元,在每个单元内,选择一些合适的节点作为求解函数的插值点,将微分方程中的变量改写成由各变量或其导数的节点值与所选用的插值函数组成的线性表达式,借助于变分原理或加权余量法,将微分方程离散求解^[13]。计算流体力学(CFD)被应用于流体运动分析的科学研究,分析流体内应力的分布^[14-15]及其流体与边壁的作用^[16-17]。而将计算流体力学的成熟研究成果应用于细沟侵蚀的研究较少。

本文从计算流体力学的角度对室内试验进行补充研究,探索水流动力学特性对细沟发育的影响,以水流切应力为切入点,研究水流动力学特性与细沟边壁的相互作用。计算采用 CFX 15.0.7,后期制图和数据分析利用 CFD-Post 15.0.7、AutoCAD 2014 和 Microsoft Excel 2013。

1 基于 ANSYS CFX 细沟水流切应力计算

1.1 切应力计算原理

水流壁面剪切力是指沿着坡面梯度方向运动的水流对壁面的剪切作用,是水流对土壤颗粒冲刷、分散、破坏的初始动力。在以前的研究过程中,对水流剪切力的关注很多^[18-20],其中最通用的水流剪切力公式是 FOSTER 等^[21]提出的,即

$$\tau = \gamma R S_f \quad (1)$$

式中 γ ——水的重度, N/m^3

R ——水力半径, m S_f ——能坡, rad

式(1)尽管计算简单、概念清晰,但只能求解整个断面与边壁间的平均水流切应力,不能求解断面与边壁间指定点处的水流切应力,细沟断面形态不同,各点水流切应力差异很大,水流切应力较大的点往往是断面形态发展较快的点,因此,水流切应力的分布对预测断面形态的发展有很大作用。同时,对于细沟水流而言,本身是非恒定流,沿着水流方向水流的机械能时刻在改变,能坡不等于沟道坡降,细沟能坡伴随着细沟的发展而变化,相应地被能坡影响的水流切应力随之改变,进而影响细沟断面的发育。

CFX 是一款流体力学分析软件,采用全隐式耦合多网格线性求解器实现快速收敛,可读入多种形式的网络,并能在计算中自动加密(稀疏)网格,具有并行计算能力、前后处理功能和多种物理模型,可以真实模拟各种流体运动^[13,22]。在 CFX 中可以求解壁面上网格点处的水流切应力。根据 CFX 的帮助文档,计算水流切应力的公式为

$$\tau = \rho u^* u_\tau \quad (2)$$

其中 $u^* = C_\mu^{\frac{1}{4}} k^{\frac{1}{2}}$ (3)

式中 ρ ——流体密度, m^3/s

u_τ ——摩阻流速, m/s

C_μ 、 k ——表征流体紊动状态的物理量,可通过选择合适的紊流模型计算得到

因此,CFX 中求解水流切应力是通过求解近壁面流速和选择合适的紊流模型然后计算摩阻流速的方法。

在细沟内,当水流切应力大于土壤临界切应力时,土壤表现为剥蚀状态^[19,23],伴随着细沟界面的剥蚀,细沟呈现出相应演化。切应力的分布决定着细沟形态的变化。

1.2 CFX 前处理方法

1.2.1 模型的建立

为准确描述细沟断面发育,计算时根据细沟形状,选择细沟发育某一时刻为断面形状对象,测定不同位置细沟断面形状,利用 AutoCAD 2014 中的样条曲线功能,绘制出不同断面描述断面形状的曲线。然后将 AutoCAD 文件导入到 SolidWorks 2014 中,使用放样凸台/基底命令,建立细沟三维曲面。使用 ANSYS Workbench 中的 Meshing 网格自动划分工具进行网格划分。

1.2.2 CFX 前处理和求解

模型导入 CFX 后,将形态(Morphology)选项设置为连续表面(Continuous fluid),开启浮力模型(Buoyancy model)。在多相流(Multiphase)中,主流体(Primary fluid)为 water,选择齐次模型

(Homogeneous model), 设置为自由表面模型 (Free surface model)。紊流模型采用 $k-\varepsilon$ 模型, 表面张力系数 (Surface tension coefficient) 为 0.072 N/m 。

设置进口边界为入口断面, 入流条件采用试验所用清水流量, 出口边界选用出口断面, 设置为自由出流。

对于计算准确度, 收敛判别准则设置为 RMS, 值为 1×10^{-4} 。然后, 启动 CFD - Solver 进行计算^[13]。

2 试验验证

2.1 试验装置

为验证上述细沟水流的有限元仿真过程, 在西北农林科技大学水土保持工程实验室内进行试验。采取冲刷槽内放水冲刷的方法, 装置结构示意图见图 1。钢制冲刷槽长 6 m 、宽 1 m 、深 0.5 m , 可通过液压升降装置, 在 $0^\circ \sim 15^\circ$ 范围内对冲刷槽的坡度进行精确调节。试验所用壤土取自杨凌缓坡耕地 ($107^\circ 59' 72'' \text{E}$, $34^\circ 19' 30'' \text{N}$), 土壤颗粒组成: 砂粒质量分数 (大于 0.05 mm) 为 3.97% , 粉粒质量分数 ($0.005 \sim 0.05 \text{ mm}$) 为 65.74% , 黏粒质量分数 ($0 \sim 0.005 \text{ mm}$) 为 30.29% , 质地为粉质壤土。土壤在试验之前风干, 过 5 mm 筛, 每层 5 cm 分层均匀填至试验冲刷槽中, 厚 50 cm 。土壤容重控制在 1.20 g/cm^3 左右。

采用流量为 800 L/h 、坡度为 5° 进行冲刷试验。放水冲刷 15 min 后, 细沟初步形成。

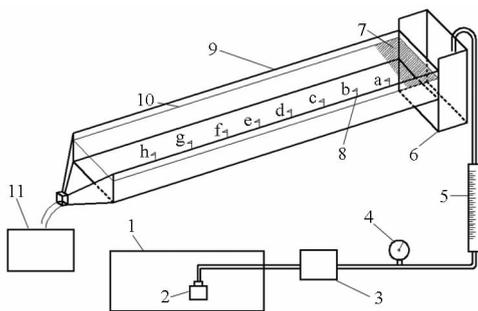


图 1 试验装置结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental set-up

1. 水池 2. 水泵 3. 阀门 4. 压力表 5. 流量计 6. 稳流室
7. 土工布缓冲段 8. 测定点 9. 试验水槽 10. 填土位置
11. 沉砂池

2.2 断面布设与测定

从距冲刷槽顶端放水口 120 cm 处开始, 每间隔 60 cm 布设一个测定断面, 并在边壁设置标记, 从上至下依次标记为 a, b, \dots, h 。

用测针法对细沟横断面形状进行测定^[23]。测针可以竖向移动, 测针底座间可以横向滑动, 测针和

底座滑动槽均标有刻度。测定时, 将测针底座横向固定在冲刷槽上, 横向移动测针, 测得细沟各点起点距, 竖向移动测针, 使测针下端针尖与细沟断面土壤刚好接触, 读取测针刻度值, 即为细沟该点深度。测定横向每移动 1 cm , 重复 3 次上述操作。根据所测读数绘制各个测定断面的横断面图。测定过程中采用喷雾器进行喷雾, 保证细沟内湿润, 避免水分蒸发龟裂。

2.3 细沟水流试验

保持 800 L/h 流量继续放水, 在开始放水瞬间, 测定细沟断面水位, 根据断面横断面状态, 即可确定出细沟各过水断面特征。继续放水, 当整条细沟最深处的沟深再发育 3 cm 左右时 (用时 5 min), 停止放水, 再次测定细沟断面形状后结束试验。试验中采用染色法测定细沟水流流速。

3 结果与分析

3.1 细沟断面流速特征

3.1.1 CFX 计算流速与染色法测定流速关系

采用染色法进行了 4 次流速测定, 并计算平均流速。考虑到测定时, 染色剂从断面 n 前一处加入并开始计时, 从断面 n 下一处流出并停止计时, 因此计算断面 n 前一处至断面 n 下一处之间的水流流速作为断面 n 处的流速, 通过 CFX 软件计算染色法测定时细沟各断面表层流速, 二者关系见图 2。可以看出, 在试验条件下采用染色法测定的流速在 $0.6 \sim 1.1 \text{ m/s}$ 之间, 4 次测定值存在一定程度的离散。计算表层流速在 $0.7 \sim 1.2 \text{ m/s}$ 之间。计算表层流速比测定流速略大, 两者的变化趋势相同, 从误差线分析来看, 各断面计算表层流速位于测定流速的波动范围内, 因此可以认为计算表层流速与测定流速基本一致, 二者关系式为

$$V_b = 1.11 V_r \quad (R^2 = 0.95) \quad (4)$$

式中 V_b ——计算表层流速, m/s

V_r ——测定流速, m/s

染色法测定的是水流表层流速, 计算表层流速与染色法测定流速间呈现较好的线性关系, 直线斜率 1.11 大于 1 , 说明计算表面流速略大于测定流速。主要是由于染色剂加入水流时速度为零, 经过一段时间的加速之后才能达到表面流速, 同时染色剂本身分散、被卷入漩涡等情况会造成速度减小。

3.1.2 断面平均流速与最大流速关系

多数学者认为, 染色法测定的并非断面流速, 而是自由水面流速, 因此需要进行修正^[12, 24]。细沟水流属薄层水流, 现有的试验方法很难得到断面平均流速, 又因为细沟断面形状不规则, 流态不确定, 传

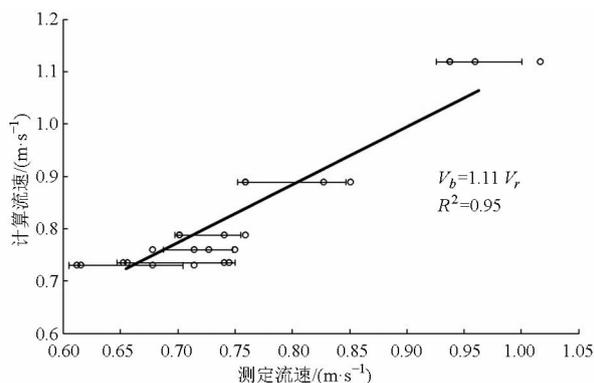


图2 染色法测定流速与CFX计算流速的对比

Fig. 2 Comparison of flow velocity determined by staining method and flow velocity calculated by CFX

统的方法计算断面平均流速较为困难,CFX的仿真分析能力正好可以弥补上述方法的不足。

根据流体力学基本理论,细沟水流断面最大流速出现在自由水面上,因此可以假设,染色法测定的流速是水流表层流速。利用CFX计算8个断面表层流速和断面平均流速,其关系见图3。断面表层流速和断面平均流速之间近似呈正比例关系,其关系式为

$$V = 0.71 V_b \quad (R^2 = 0.98) \quad (5)$$

由此断面平均流速与染色法测定流速间关系为

$$V = 0.78 V_r \quad (6)$$

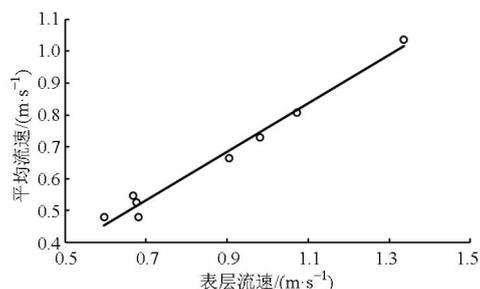


图3 断面表层流速与平均流速的关系

Fig. 3 Relationship between surface flow velocity and mean flow velocity calculated by CFX

染色法是坡面径流流速测定的常用方法,多数研究者认为用染色法获得的流速是径流表面最大流速,要得到径流平均流速必须进行修正。HORTON等确定的修正系数为0.67^[25],EMMETT确定的修正系数为0.5~0.6,当水流呈现紊流状态时修正系数达0.8^[26],LUKS等^[27]的研究结果表明,对于紊流和过渡流,其修正系数为0.75。前人研究的修正系数介于0.5~0.8之间,随水流紊动增强,修正系数越大。本研究中修正系数为0.78,其主要原因为染色法测定的多是薄层水流,而试验中所测定的细沟水流与薄层水流相比,细沟水流紊动更为明显,紊动使水流流速均匀化^[28],表层流速与断面流速较为接近。

3.2 断面水流切应力分布特征

细沟形状通常采用宽深比进行描述,宽深比大的断面一般呈宽浅矩形,称为宽浅式断面,而宽深比小的断面一般呈三角形,称为窄深式断面。根据表1,断面a~e的形状为宽浅矩形、宽深比大,断面f~h形状为三角形、宽深比小。总体来看,宽深比大的断面切应力较小,宽深比小的断面切应力较大。断面形状影响着细沟水流的流态,宽浅式断面中水深较浅,水流流速慢,切应力较小,而三角形断面中水深较深,水流流动快,切应力大。坡面细沟水流切应力变化是水力半径与水力坡度变化的综合表现,不同的断面形状,水流过水断面面积和湿周与水深间呈非线性关系,水力半径的变化取决于水深的变化,因而不同断面形状决定着细沟水流切应力的分布。

表1 各断面水流切应力特征

Tab. 1 Characteristics of flow shear stress at each section

| 断面序号 | 断面宽深比 | 平均切应力/Pa | 最大切应力/Pa |
|------|-------|----------|----------|
| a | 14.2 | 2.18 | 2.04 |
| b | 17.9 | 1.46 | 1.99 |
| c | 18.1 | 1.34 | 1.80 |
| d | 16.1 | 1.69 | 2.02 |
| e | 14.6 | 1.45 | 1.95 |
| f | 3.8 | 1.89 | 2.63 |
| g | 3.3 | 2.40 | 3.47 |
| h | 1.0 | 3.42 | 4.83 |

试验中,断面a~e为宽浅式断面,其水流切应力分布较为集中,以断面c为例,最大切应力为1.80 Pa,水流切应力平均值为1.34 Pa,众数为2.01 Pa。断面f~h为窄深式断面,以断面h为例,最大切应力为4.83 Pa,水流切应力平均值为3.42 Pa,众数为4.30 Pa。

利用CFX计算沟床所有网格点的切应力并绘制图4。从图中可以看出,切应力近似服从正态分布($\bar{\mu} = 1.86, \sigma = 0.84$)。细沟水流切应力主要集中在1.41~2.10 Pa之间。

3.3 水流切应力与断面形状演化的关系

在降雨作用下,坡面细沟发育经历了面蚀、细沟锥形、细沟发育和细沟调整4个阶段^[29]。而坡面水流作用下细沟发育主要集中于细沟发育和细沟调整2个阶段。细沟流主要对细沟底部与内壁进行冲刷,由于两侧对细沟壁的淘蚀,细沟沿在重力作用下,稳定性变差而塌陷,促进细沟的展宽发育。细沟的发育取决于细沟的下切和边壁的塌陷调整。当切应力大于土壤临界切应力时细沟表现为剥蚀状态^[19,23],伴随着细沟底部的剥蚀作用,细沟向纵深

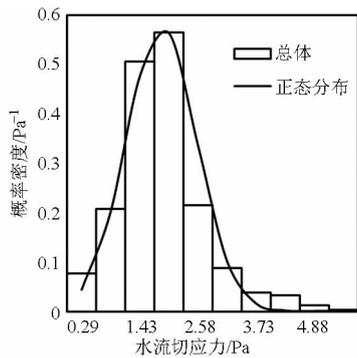


图4 水流切应力分布直方图

Fig. 4 Distribution histogram of flow shear stress

发展。细沟水流流速较缓时,水流下切能力较弱,细沟有一定摆动,形成宽浅细沟。当水流流速较大时,水流能量加大,下切能力加强,细沟向窄深式发展。

在细沟水蚀过程中,横断面受水流的下切侵蚀和沟壁崩塌的影响呈现不同形状。下切侵蚀使得沟道不断变深,边壁崩塌在一定程度上补充了细沟内泥沙,减缓了沟道的下切。沟道下切直接取决于切应力的分布,根据 CFX 计算的细沟各断面边界处的切应力,以点的坐标为圆心以点的切应力为半径作圆,得到各断面土水边界切应力分布图像,同时点绘出经历 5 min 后的断面图,在此以断面 a~d 为例进行分析(图 5)。由图 5 可以看出:图中 4 个断面在不发生溯源侵蚀和沟壁坍塌的情况下,切应力圆的外包络线与结束断面的土水边线非常吻合,水流切应力对断面形状演化起主导作用;图示断面中,断面宽度越宽,切应力越小,分布越平均,断面宽度越大,水层越薄,流速越慢,切应力越小,由于宽浅式断面水流切应力分布平均,细沟发育向更加宽浅的方向进行;断面微地形对切应力分布有重要的影响,具体来说,断面底部凹陷处切应力大,平整的地方切应力小,凹陷处更能汇集水流,切应力更大。

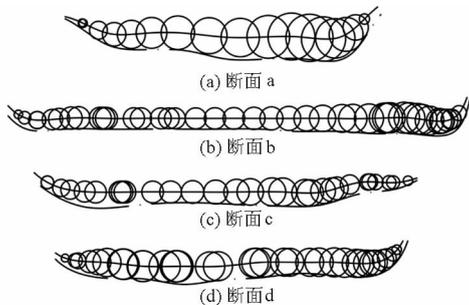


图5 断面切应力及其演化

Fig. 5 Section shear stress and its evolution

根据 CFX 计算的细沟断面处切应力和 5 min 后断面各点下切深度,点绘出断面上的切应力与垂直下切发育状况(图 6)。

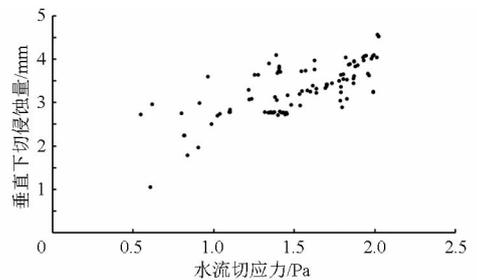


图6 点切应力与垂直下切侵蚀量关系

Fig. 6 Relationship between point shear stress and vertical cutting erosion

通过图 6 可以看出,水流切应力与垂直下切侵蚀量呈正相关,这与实际情况吻合。FOSTER 等^[21]和 NEARING 等^[30]研究结果表明,当水流切应力大于土壤临界切应力的情况下,水流呈现出剥蚀状态,径流剥蚀能力表达式为 $M = k(\tau - \tau_0)$,水流剥蚀能力随水流切应力增大而增大。随着剥蚀的发展,断面逐渐下切。图中在水流切应力较小时,下切侵蚀量与水流切应力间关系较为离散,这是因为水流切应力较小的点更多地出现在靠近边壁处,这个位置水流剥蚀效应偏向水平方向。

4 结束语

利用 ANSYS CFX 15.0.7 软件中的流体力学模块 CFX 对实验室模拟放水冲刷条件下形成的细沟进行建模,计算细沟断面各点流速及切应力分布,结果表明,CFX 能较好地描述细沟水流流速分布,断面表层流速和断面平均流速之间近似呈正比例关系,比例系数为 0.71。染色法作为测定坡面流速常用的方法之一,染色法测定流速与细沟表层流速间也呈线性关系,进而可以确定染色法测定细沟断面流速与断面平均流速间也呈线性关系,斜率为 0.78。细沟断面水流切应力在沟床整体上呈正态分布,断面水流切应力与断面形状有很大关系,窄深式断面水流切应力大于宽浅式断面的水流切应力,切应力的大小决定着细沟断面的发育,断面各点的切应力与 5 min 后断面各点发育较为吻合,水流切应力与断面各点的发育密切相关,水流切应力越大,细沟断面发育越快。

参考文献

- 李鹤,王健,薛姣姣,等. 细沟水流动力学特性分析[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(2): 29-32.
LI He, WANG Jian, XUE Jiaojiao, et al. Analysis of hydraulic characteristics of rill flow[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2015, 34(2): 29-32. (in Chinese)
- 谭贞学,王占礼,王莎,等. 黄土坡面细沟侵蚀过程[J]. 中国水土保持科学, 2012, 10(6): 1-5.

- TAN Zhenxue, WANG Zhanli, WANG Sha, et al. Rill erosion processes on loess hillslope[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2012, 10(6): 1-5. (in Chinese)
- 3 BERGER Catherine, SCHULZE Marcel, RIEKE-ZAPP Dirk, et al. Rill development and soil erosion: a laboratory study of slope and rainfall intensity[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2010, 35(12): 1456-1467.
- 4 SHI Z H, FANG N F, WU F Z, et al. Soil erosion processes and sediment sorting associated with transport mechanisms on steep slopes[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 454: 123-130.
- 5 王健,李鹤,孟秦倩,等. 黄土坡面细沟横断面形态及其水流动力学与挟沙特性[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(3): 32-37. WANG Jian, LI He, MENG Qingqian, et al. Characteristics of rill cross section morphology hydrodynamics and sediment-carrying capacity on loess slope[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(3): 32-37. (in Chinese)
- 6 张晴雯,雷廷武,潘英华,等. 细沟侵蚀动力过程极限沟长试验研究[J]. *农业工程学报*, 2002, 18(2): 32-35. ZHANG Qingwen, LEI Tingwu, PAN Yinghua, et al. Dynamic sediment yield of rill erosion[J]. *Transactions of the CSAE*, 2002, 18(2): 32-35. (in Chinese)
- 7 陆绍娟,王占礼,谭贞学. 黄土坡面细沟水流剪切力及其侵蚀效应研究[J]. *水土保持通报*, 2013, 33(6): 46-50. LU Shaojuan, WANG Zhanli, TAN Zhenxue. Shear stress of rill flow and surface erosion effect on loess hillslope[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2013, 33(6): 46-50. (in Chinese)
- 8 沈海鸥,郑粉莉,温磊磊,等. 降雨强度和坡度对细沟形态特征的综合影响[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(7): 162-170. SHEN Haiou, ZHENG Fenli, WEN Leilei, et al. Effects of rainfall intensity and slope gradient on rill morphological characteristics [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(7): 162-170. (in Chinese)
- 9 沈海鸥,郑粉莉,温磊磊,等. 雨滴打击对黄土坡面细沟侵蚀特征的影响[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(8): 104-112. SHEN Haiou, ZHENG Fenli, WEN Leilei, et al. Effects of raindrop impact on rill erosion characteristics on loess hillslope[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(8): 104-112. (in Chinese)
- 10 雷廷武,张晴雯,赵军,等. 细沟侵蚀动力过程输沙能力试验研究[J]. *土壤学报*, 2002, 39(4): 476-482. LEI Tingwu, ZHANG Qingwen, ZHAO Jun, et al. Laboratory study on sediment transport capacity in the dynamic process of rill erosion[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(4): 476-482. (in Chinese)
- 11 魏霞,李勋贵,李占斌,等. 黄土高原坡沟系统径流水动力学特性试验[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(10): 19-24. WEI Xia, LI Xungui, LI Zhanbin, et al. Experiments on hydraulic characteristics of runoff in slope-gully systems in Loess Plateau [J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(10): 19-24. (in Chinese)
- 12 张光辉. 坡面水蚀过程水动力学研究进展[J]. *水科学进展*, 2001, 12(3): 395-402. ZHANG Guanghui. Progress hydrodynamic hillslope erosion process[J]. *Advances in Water Science*, 2001, 12(3): 395-402. (in Chinese)
- 13 高飞. ANSYS CFX 14.0 超级学习手册[M]. 北京:人民邮电出版社, 2013.
- 14 张振昌,程玉强,何文社. 基于 ANSYS 管道流体-热耦合数值模拟分析[J]. *水利科技与经济*, 2014, 20(10): 40-42. ZHANG Zhenchang, CHENG Yuqiang, HE Wenshe. Numerical simulation analysis of pipeline fluid-thermal coupling based on ANSYS[J]. *Water Conservancy Science and Technology and Economy*, 2014, 20(10): 40-42. (in Chinese)
- 15 吴永发,沈洁,黄清海,等. 不同栓塞程度对颅内动脉瘤介入治疗后囊内血流动力学影响的数值模拟研究[J]. *第二军医大学学报*, 2012, 33(2): 195-199. WU Yongfa, SHEN Jie, HUANG Qinghai, et al. Impact of different coil packing densities on intra-aneurysmal hemodynamics during embolization of intracranial aneurysm: a numerical simulative study[J]. *Academic Journal of Second Military Medical University*, 2012, 33(2): 195-199. (in Chinese)
- 16 张日,刘海笑. 流动保障中管道的颗粒侵蚀分析[J]. *海洋工程*, 2012, 30(4): 10-20. ZHANG Ri, LIU Haixiao. Solid particle erosion analysis of pipelines in flow assurance[J]. *The Ocean Engineering*, 2012, 30(4): 10-20. (in Chinese)
- 17 姚志跃. 机械湍流磨煤机流场仿真及叶片磨损研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学, 2012. YAO Zhiyue. Research on flow field in mechanical turbulence pulverizer and abrasion action of blades [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2012. (in Chinese)
- 18 王瑄,李占斌,丁文峰,等. 土壤剥蚀率与水流剪切力关系试验研究[J]. *沈阳农业大学学报*, 2004, 35(5-6): 592-594. WANG Xuan, LI Zhanbin, DING Wenfeng, et al. Relationship of soil detachment rate and flow shear stress[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2004, 35(5-6): 592-594. (in Chinese)
- 19 王瑄,李占斌,郑良勇. 土壤剥蚀率与水流剪切力关系室内模拟试验[J]. *沈阳农业大学学报*, 2007, 38(4): 577-580. WANG Xuan, LI Zhanbin, ZHENG Liangyong. An indoor simulation experiment of the relationship between soil detachment rate and shear stress[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2007, 38(4): 577-580. (in Chinese)
- 20 王龙生,蔡强国,蔡崇法,等. 黄土坡面发育平稳的细沟流水动力学特性[J]. *地理科学进展*, 2014, 32(8): 1117-1124. WANG Longsheng, CAI Qianguo, CAI Chongfa, et al. Hydrodynamic characteristics of stable growth-rill flow on loess slopes [J]. *Progress in Geography*, 2014, 32(8): 1117-1124. (in Chinese)
- 21 FOSTER G R, HUGGINS L F, MEYER L D. A laboratory study of rill hydraulics; I. Velocity relationships[J]. *Transactions of the ASABE*, 1984, 27(3): 790-796.

- 22 马慧. 基于 ANSYS 的混凝土重力坝抗震优化设计研究[D]. 北京:华北电力大学, 2014.
MA Hui. A study on anti-seismic optimization of concrete gravity dam based on ANSYS[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014. (in Chinese)
- 23 陈力,刘青泉,李家春. 坡面细沟侵蚀的冲刷试验研究[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2005, 20(6): 761-766.
CHEN Li, LIU Qingquan, LI Jiachun. Scouring experimental study on rill erosion on the slope[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2005, 20(6): 761-766. (in Chinese)
- 24 赵春红,高建恩,王飞,等. 含沙量对坡面流水动力学特性的影响研究[J]. 农业机械学报,2013, 44(9): 79-85.
ZHAO Chunhong, GAO Jian'en, WANG Fei, et al. Effects of sediment load on hydrodynamic characteristics of overland flow[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(9): 79-85. (in Chinese)
- 25 HORTON Roberte, LEACH Hr, VLIET Rvan. Laminar sheet-flow[J]. Eos Transactions American Geophysical Union, 1934, 15(2):393.
- 26 EMMETT Williamw. The hydraulics of overland flow on hill slopes[J]. US Geol. Survey Prof. Paper 662-A, 1970.
- 27 LUKS H, MERZ W. Use of the salt tracing technique to determine the velocity of overland flow[J]. Soil Technology, 1992, 5(4):289-301.
- 28 吴持恭. 水力学(上)[M]. 4版. 北京:高等教育出版社, 2008.
- 29 和继军,孙莉英,李君兰,等. 缓坡面细沟发育过程及水沙关系的室内试验研究[J]. 农业工程学报, 2012, 28(10): 138-144.
HE Jijun, SUN Liying, LI Junlan, et al. Experimental study on rill evolution process and runoff-sediment relationship for gentle slope[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(10): 138-144. (in Chinese)
- 30 NEARING M A, FOSTER G R, LANE L J, et al. A process-based soil erosion model for USDA-water erosion prediction project technology[J]. Transactions of the ASAE, 1989, 32(5): 1587-1593.
-

(上接第 185 页)

- 20 刘婷. 基于 PROSAIL 模型和多源数据的玉米关键生育期 LAI 反演方法研究[D]. 北京:中国农业大学,2015.
LIU Ting. Inversion of leaf area index of maize at the key growth stages based on PROSAIL model and multi-source data [D]. Beijing: China Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- 21 马利霞,郑光,何维. 叶方向三维空间分布的地面激光雷达反演与分析[J]. 遥感学报, 2015,19(4):609-617.
MA Lixia, ZHENG Guang, HE Wei. Retrieving three-dimensional spatial distribution of leaf orientation using terrestrial LiDAR data [J]. Journal of Remote Sensing, 2015, 19(4): 609-617. (in Chinese)
- 22 密长林,马爱功,张晓东. 主成分分析在遥感影像数据中的实例应用[J]. 山东国土资源,2013,29(7):69-71,76.
MI Changlin, MA Aigong, ZHANG Xiaodong. Practical application of principal component analysis in remote sensing image processing [J]. Shandong Land and Resources, 2013, 29(7): 69-71,76. (in Chinese)
- 23 张军,王一鸣,赵燕东. 基于椭圆函数的棉花叶倾角分布动态模拟[J]. 农业机械学报,2009,40(4):157-160,183.
ZHANG Jun, WANG Yiming, ZHAO Yandong. Dynamic simulation of leaf inclination angle distribution based on ellipsoidal function[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(4):157-160,183. (in Chinese)
- 24 姜方方,基于地理要素趋势面的 LAI 尺度转换方法研究[D]. 北京:中国农业大学,2015.
JIANG Fangfang. Research on the method of scale transformation for LAI based on geographic trend surface [D]. Beijing: China Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- 25 STONE M. Cross-validatory choice and assessment of statistical predictions [J]. Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological), 1974, 36(2):111-147.