

饱和与非饱和黄绵土细沟径流水动力学特征及侵蚀阻力对比

邢行, 陈晓燕, 韩珍, 黄永超, 李彦海

(西南大学资源环境学院, 重庆 400716)

摘要: 近地表水文状况显著影响坡面土壤侵蚀过程。土壤饱和状态作为一种特殊的近地表水文状况, 其细沟侵蚀特征较之非饱和状态存在明显的差异。以黄绵土为研究对象, 采用限定性细沟模拟冲刷, 对比研究了饱和与非饱和状态下黄绵土的水动力特征和侵蚀阻力。结果表明: 饱和黄绵土径流流速与坡度、流量之间符合良好的幂函数关系, 坡度对流速的影响更甚; 饱和黄绵土径流流速约为非饱和黄绵土的 1.17 倍, 其坡面摩擦阻力仅为非饱和黄绵土的 70.3%; 同种工况下, 非饱和黄绵土的径流含沙量和细沟径流动能明显偏低, 随着径流动能增大, 2 种土的径流含沙量均呈现对数型增长, 径流含沙量峰值稳定在 400、280 kg/m³ 内; 饱和与非饱和黄绵土的细沟可蚀性参数分别为 0.088、0.057 kg/(m²·s), 相应的土壤临界剪切力分别为 0.773、1.561 Pa, 表明饱和黄绵土更易剥蚀、流失。

关键词: 饱和土; 径流流速; 径流剪切力; 剥蚀率; 土壤可蚀性

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)03-0092-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2018.03.015

Comparison of Hydrodynamic Characteristics and Flow Resistance Under Rill Erosion Between Saturated and Unsaturated Loess Soil

XING Hang, CHEN Xiaoyan, HAN Zhen, HUANG Yongchao, LI Yanhai

(College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400716)

Abstract: The hydrological condition of the near surface plays a vital role in the slope soil erosion process. The characteristics of soil erosion in saturated soil were different from that in unsaturated loess soil. In the study, loess soil was adopted in the well-defined rill simulation scouring experiment to explore the different hydrodynamic characteristics and flow resistance between saturated and unsaturated soil conditions. Results showed that the rill flow velocity of saturated soil had good power function with slope gradient and flow rate, and the slope gradient had a greater impact on the velocity. The rill flow velocity of saturated soil was about 1.17 times that of unsaturated loess soil, while the friction resistance of slope surface under saturated state was only 70.3% compared with that in unsaturated condition. Under the same conditions, the rill flow energy and sediment concentration of unsaturated soil were much lower than those of saturated soil. With the increase of rill flow energy, the sediment concentration of both kinds of soil showed a logarithmic growth, and the peak value of rill flow sediment concentration was stable at about 400 and 280 kg/m³, respectively. Saturated and unsaturated loess soil erodibility parameters were 0.088 and 0.057 kg/(m²·s), and the critical shear stress were 0.773 and 1.561 Pa correspondingly, indicating that saturated soil was much easier to be dispersed and eroded by water.

Keywords: saturated soil; flow velocity; shear stress; detachment rate; soil erodibility

细沟侵蚀作为一种特殊的水力侵蚀形式, 受到全世界研究者的广泛关注。相关研究^[1-3]表明, 在黄土高原沟壑区, 细沟侵蚀产沙量可以占到整个上坡区域侵蚀总量的 70% 以上。侵蚀性细沟一旦形成, 会

导致耕层土壤养分和土壤黏粒的大量流失, 使土壤严重退化并引发更为强烈的侵蚀, 从而威胁到农业的可持续发展^[4-5]。对任何土地生产者和管理者而言, 精确测定特定地块的土壤侵蚀量极为重要, 这关系到农

业措施和土地利用规划的合理布设^[6]。以 WEPP 模型为代表的侵蚀预报模型的出现,为该项工作赋予了光明的前景。然而,侵蚀预报模型的推广和完善工作仍有待加强。其中,模型参数的精确测定是研究者们公认的一大难题。

目前,侵蚀预报模型研究基本都忽略了近地表水文状况效应,然而越来越多的研究表明,近地表水文状况对侵蚀产流产沙等过程影响显著。早在 1969 年,Wishe-meier 等^[7]就指出土壤含水量是影响土壤侵蚀的一个重要因子,而且土壤含水量与土壤侵蚀之间存在着正相关关系,但无论是 USLE 还是 WEPP 均没有关于土壤水分的模块^[8-9]。近地表水文状况对土壤侵蚀的影响已成为近年的研究热点。Nouwak-po^[10]通过流化层试验确定了渗流状况下土壤临界剪切力的变化,指出随着水力梯度的增加,土壤临界剪切力逐渐减小,表明壤中流会引发强烈的土壤侵蚀。Abdul 等^[11]采用径流冲刷试验表明土壤剥蚀率会随着近地表水文状况的变化而变化。此外,Singh 等^[12]也通过研究小流域土壤临界剪切力得出,土壤含水量的变化会导致临界剪切力突变。以上研究均表明土壤含水量可引起近地表水文状况的显著变化,进而引发强烈的土壤侵蚀。

在野外,连续的阴雨天气可使地势低洼的地块达到饱和,同时秸秆覆盖下的土壤因蓄水保墒能力较强,在强降雨后也可能达到饱和状态^[13]。土壤饱和作为一种特殊的近地表水文状况,会导致土壤的黏结性、孔隙水压力、表面粗糙度等发生显著变化^[14-15]。此外,饱和土壤颗粒还会受到浮力的影响。目前国内关于饱和土的研究主要针对坡面产流产沙方面,而对于饱和土细沟侵蚀水动力过程及细沟可蚀性参数的研究仍鲜有专题报道。为此,本研究以饱和黄绵土为对象,采用径流冲刷试验,结合已有的非饱和黄绵土冲刷试验数据,深入分析了饱和黄绵土、非饱和黄绵土水动力参数及产沙特征的差异,并由此确定了饱和与非饱和黄绵土的细沟可蚀性参数,从而将土壤侵蚀过程与参数求解有机地结合起来,从径流侵蚀能力和土壤自身侵蚀敏感性 2 方面阐述了饱和与非饱和黄绵土细沟侵蚀特征的差异性,以期为该区域土壤侵蚀预报模型的改进提供一定的依据。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

前期已掌握大量非饱和黄绵土的径流流速(染色剂法)及产沙量数据,本次仅针对饱和黄绵土进行冲刷试验以获得相关数据。试验地点为中国农业大学人工

降雨大厅。采样时间为 2017 年 3 月上旬,采样地点为陕西省延安市安塞区某玉米坡耕地(东经 109°19'23",北纬 36°51'30")。试验时间为 2017 年 5 月中下旬,试验前去除土壤中石块、草根,并进行破碎处理,风干后过 8 mm 筛。供试黄绵土容重为 1.27 g/cm³,初始土壤含水率为 3.76%。土壤机械组成采用吸管法测定,黏粒含量(<0.005 mm)19.16%,粉粒含量(0.005~0.05 mm)56.36%,砂粒含量(>0.05 mm)19.16%。

1.2 试验方法

试验土槽为可调节坡度(0~30°)的钢制土槽,长 8 m,宽 1 m。为便于研究,用钢板将土槽隔成 9 条规格为 8.0 m×0.1 m 的限定性细沟。为了使土壤饱和,本次试验对土槽进行了特殊处理。沿顺坡方向将试验土槽分为 8 段,每段长度为 1 m,每个小段又分为 A、B 单元,长度分别为 10、90 cm。在每个 A 段中部,细沟挡板底端横向钻有小孔,使得直径为 1 cm 的 PVC 管刚好通过,在每条细沟内的管道上扎有小孔,开口处缠以纱布防止孔隙堵塞,在土槽底端与下管壁之间填入黏土并压实,该层之上铺设纱布,然后再填入粗沙直至 5 cm 厚,B 段不做处理,直接填入厚度为 5 cm 的黏土,设计示意图 1。土槽底部装填厚度为 5 cm 的黏土,控制其容重为 1.50 g/cm³,用以模拟犁底层。在犁底层以上铺设纱布,均匀填入黄绵土,填土深度约为 20 cm,分 4 层填装并逐层打毛,填土容重控制在 1.2 g/cm³,用以模拟耕作层,填装完毕后用耙子打毛土壤表面以接近其天然糙度。用防水记号笔在挡板上标记好填土位置,以保证重复试验填土的一致性。将凡士林涂抹在钢板两侧并粘上相同的黄绵土,以减少边界效应。钢板一侧土壤轻微突起,中间略低,使土壤表面呈浅“U”形,以消除钢板对径流的导向作用。填土完毕后通过土层底部的供水管,采用极小的供水流量将水流供入沙层,再由沙层从土壤底部开始供水,待土壤饱和后仍保证底部持续供水。

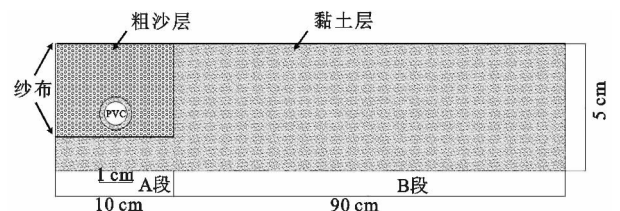


图 1 犁底层装填示意

土壤饱和后,将土槽调至设计的坡度(5°,10°,15°,20°),采用可控流量的水泵进行供水,本次试验共设置 3 种入流量(2,4,8 L/min),在试验前标定水泵出流量,并在水流入沟前设置稳流槽保证均匀出流。在细沟入口前缘铺设海绵层,避免水流在入口处

直接集中冲刷土壤表面。试验采用 3 次重复, 总共试验为 36 场。水流稳定后(进出口水量平衡, 量筒测定), 利用亚甲基蓝染色剂法测定水流流速, 测距为 1 m, 距离入口 0.5 m 开始测定, 在 0.5~2, 3~5, 6~8 m 坡段各测 1 次。采用优势流法^[16]测定径流准确流速, 以便确定出亚甲基蓝染色剂法的合理修正系数。水槽下端设有集流桶收集产沙, 每场试验分别采集泥沙样品, 确定泥沙量。

1.3 计算方法

1.3.1 平均径流深 平均径流深是计算达西阻力系数和径流剪切力的重要参数, 由于研究的是坡面细沟侵蚀, 细沟深度普遍偏小, 直接测量误差较大, 因此引入平均径流深, 计算公式为:

$$h = \frac{Q}{V \cdot b \cdot T} \quad (1)$$

式中: h 为平均径流深(m); Q 为观测时段内断面之间径流总量(m^3/s); b 为细沟宽度(m); T 为径流通过观测断面间距的时间(s)。

1.3.2 达西阻力系数 该系数可直接反映出细沟径流沿坡面运动时所受阻力的影响, 计算公式为^[17]:

$$f = \frac{8 \cdot g \cdot h \cdot J}{V^2} \quad (2)$$

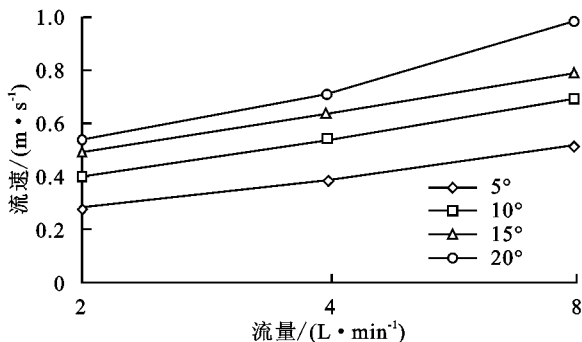
式中: f 为达西阻力系数, 无量纲; J 为水力坡度, 由于试验坡长较长, 可取坡度的正弦值替代, 无量纲; V 为修正后的平均径流流速(m/s)。

1.3.3 径流动能 径流动能是表征径流侵蚀力的重要指标, 计算公式为:

$$F = \frac{\gamma \cdot q \cdot V^2}{2g} \quad (3)$$

式中: F 为径流动能(J); q 为观测断面的单宽径流量(m^3/s); γ 为容重(N/m^3); V 为径流流速(m/s)。

1.3.4 径流剪切力 细沟径流剪切力作为一种重要



的水力参数, 是指径流分散及剥蚀土壤颗粒的能力, 计算公式为:

$$\tau = \gamma \cdot J \cdot h = \gamma \cdot J \cdot \frac{q}{V} \quad (4)$$

式中: τ 为径流剪切力(Pa); γ 为水容重(N/m^3); J 为水力坡度, 由于试验坡长较长, 取坡度的正弦值替代, 无量纲; h 为平均径流深(m); q 为观测断面的单宽径流量(m^2/s); V 为径流流速(m/s)。

1.3.5 土壤剥蚀率 土壤剥蚀率是指单位时间内径流剥蚀单位面积上土壤的质量, 计算公式为^[18]:

$$D_r = \frac{S}{L \cdot b \cdot T} \quad (5)$$

式中: D_r 为土壤剥蚀率($\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$); S 为观测时段内的径流产沙量(kg); L 为坡长(m); b 为细沟宽度(m); T 为观测时间(s)。

1.4 数据统计与分析

本文各项散点拟合图及对比图采用 Excel 软件完成, 示意图由 Visio 2013 软件绘制, 数据检验采用 SPSS 19.0 软件。

2 结果与分析

2.1 饱和土径流流速特征

以亚甲基蓝作为示踪剂, 以 1 m 的间距测定出不同流量、坡度组合下的细沟径流流速, 每种工况分上、中、下 3 个坡位进行流速测定, 试验采用 3 次重复, 并将所得结果进行平均后作为终值。由图 2 可知, 当坡度一定时, 饱和黄绵土细沟径流流速随着冲刷流量的增加而增加。由于流量变大, 单位时间内过水断面的水量势必增加。当流量一定时, 流速将随着坡度的增加而增加。由于坡度上升, 单位水体的重力势能迅速增加, 沿径流方向的下滑分力激增, 因此径流流速明显变大^[16]。

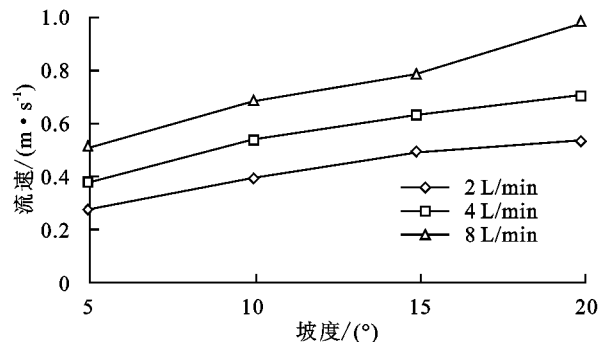


图 2 饱和土细沟径流流速分别与流量和坡度的关系

从图 2 中不难看出, 流量和坡度均可对细沟径流流速产生正效应, 但图 2 无法直接反映二者影响程度的大小。为此, 需分别对不同坡度、流量组合下的细沟径流流速进行多元回归分析。根据前人^[17,19]的研

究, 本文采用的回归模型为:

$$V = a \cdot Q^m \cdot S^n \quad (6)$$

式中: V 为细沟径流平均流速(m/s); Q 为冲刷流量(m^3/s); S 为坡度($^{\circ}$); a 、 m 、 n 均为回归系数。

本试验计算公式为:

$$V=0.103 \cdot Q^{0.404} \cdot S^{0.462}, R^2=0.94, n=36, P<0.01 \quad (7)$$

式中: n 为样本总量; P 为显著性检验结果。

从公式(7)中不难发现,对饱和黄绵土而言,流量和坡度对细沟径流流速的影响程度大致相当,但较之流量,坡度的影响程度更甚。李鹏等^[20]研究亦表明,原状土坡面径流平均流速会随坡度和流量的增加而增加,坡度对流速的影响程度大于流量。同时还指出,径流流速与坡度、流量之间存在指数函数关系,这一点和本研究的结果相悖,这可能是由于饱和黄绵土与原状土在土壤结构、物理性状等方面存在诸多差异。本研究结论与李永红等^[17]对黄绵土工程堆积体的冲刷试验得出的结论相契合,2个试验均表明径流流速与流量、坡度之间存在幂函数关系,且坡度是主要的影响因子。这可能是由于工程堆积土和本试验土壤均属于重塑土,其土壤结构较为松散。试验回归方程决定系数为0.94,显著性检验达到了极显著水平,验证了回归模型的合理性。

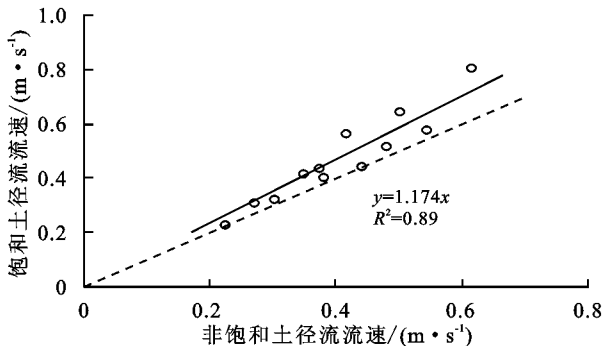
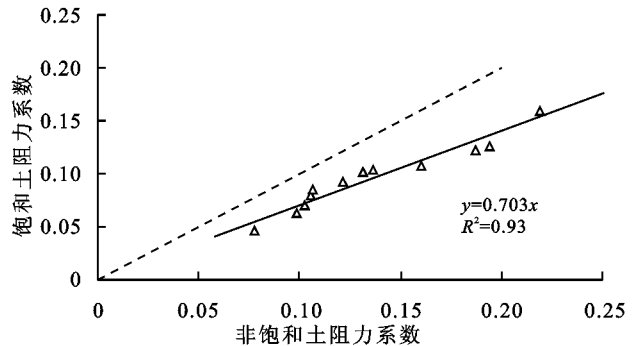


图3 饱和与非饱和土径流流速及阻力系数的对比

2.2.2 径流动能与泥沙量关系的对比 径流动能是一种重要的水动力参数,可较为全面地反映坡面侵蚀程度及侵蚀方式的变化情况,是衡量细沟径流侵蚀能力的重要指标^[22-23]。通过径流动能与泥沙含量之间的关系可以探究饱和土与非饱和土在坡面侵蚀过程中的差异性,深入理解土壤饱和对土壤侵蚀的影响程度及机理。需要强调的是,入口处的清水具有最大的潜在剥蚀能力,其泥沙含量为零,随着侵蚀过程的发展,径流含沙量不断增加,忽略冲刷过程中的泥沙沉积,本试验取出口处的径流含沙量近似作为最大含沙量^[24]。不同试验条件下的饱和土与非饱和土的径流动能分别由公式(8)计算得出。由图4可知,同种试验工况下,饱和土细沟径流含沙量明显大于非饱和土。由于土壤饱和,坡面阻力减小,径流流速增大,径流侵蚀动能上升从而导致径流剥蚀能力和挟沙能力上升,单位时间内被剥蚀、搬运的泥沙含量迅速增大。

2.2 饱和与非饱和黄绵土侵蚀参数的对比

2.2.1 径流流速的对比 细沟径流流速对于了解坡面土壤侵蚀过程极为重要,也是计算其他水动力参数的重要指标。用亚甲基蓝染色法测得饱和土的细沟径流流速,并根据前述推求的修正系数0.81进行校核^[16-21],得出了不同试验工况下的准确流速。为探讨土壤水分含量变化对流速的影响,将同种工况下饱和土与非饱和土的准确流速分别点绘于坐标系中。由图3可知,不同水力工况下饱和黄绵土细沟径流流速均大于非饱和土,平均高17%。为进一步探讨两者的流速差异,利用公式(6)分别计算出饱和土与非饱和黄绵土土壤表面的达西阻力系数 f 。当土壤饱和后,黄绵土坡面的达西阻力系数将减少到初始值的70%,这是由于土壤饱和后,土壤表层颗粒间的空隙被水分填充,其粗糙程度显著降低,使得饱和土细沟径流所受的摩擦阻力明显低于相同条件下非饱和土坡面的摩擦阻力。无论是细沟径流流速,还是达西阻力系数,饱和土与非饱和土对比分析的决定系数均超过了0.89,验证了试验结果的合理性。



此外,从图4中还可以发现,随着径流动能的增加,饱和土与非饱和土所对应的径流含沙量先逐渐增加而后趋于平稳。从泥沙含量的变幅范围来看,饱和黄绵土所对应的最大径流含沙量稳定在400 kg/m³以内,而非饱和黄绵土所对应的最大径流含沙量不超过280 kg/m³,泥沙含量并不随着径流动能的增大而无限增大。究其原因,径流动能一部分用于剥离土壤颗粒,另一部分用于泥沙运移,随着泥沙量的增加,大部分径流动能用于泥沙运移,用于剥离颗粒的能量将大幅度减少,因此泥沙含量的增幅逐渐减少,当泥沙含量达到径流的挟沙能力时,含沙量将保持不变,径流能量将全部用于泥沙搬运,此时径流剥蚀能力为零。此外,挟沙水流在运移过程中会受到坡面的摩擦阻力,随着侵蚀过程细沟形态的不断变化,摩擦阻力将不断增大,使得径流动能大幅减少。

综上所述,泥沙含量并不会无限增大。径流动能

与泥沙含量之间可以用对数函数表征:

$$y = m \cdot \ln x + n \quad (8)$$

式中: y 为径流泥沙含量 (kg/m^3); x 为径流动能 (J); m 、 n 均为回归系数。经回归分析, 无论是饱和黄绵土还是非饱和黄绵土, 回归模型的决定系数均大于 0.91, 验证了模型的合理性。

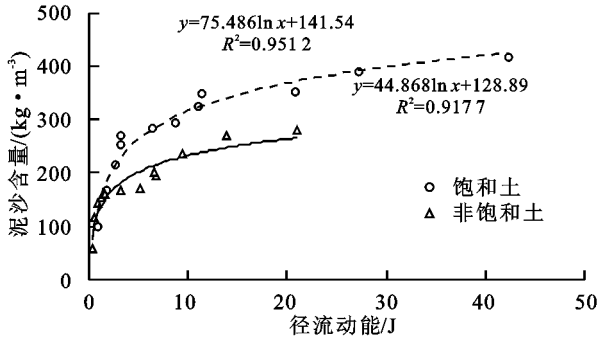


图 4 饱和土与非饱和土径流动能与泥沙含量的关系

2.2.3 细沟径流剪切力与剥蚀率的对比 细沟径流剪切力作为一种基本的水动力学参数, 对了解细沟侵蚀机理和建立侵蚀模型有重要的意义。径流顺坡流动时, 只有当径流剪切力足够大, 使土壤颗粒处于分离、搬运的临界状态, 土壤才会被剥蚀、分散, 此时的径流剪切力称为土壤临界剪切力^[25-27]。土壤剥蚀率则是定量描述径流剥蚀能力的指标, 在 WEPP 模型中, 前人^[10]明确地用线性方程表征了土壤剥蚀率与径流剪切力的关系, 两者线性关系直线的斜率代表细沟可蚀性, 直线横截距即为土壤临界剪切力。因此, 研究细沟径流剪切力与土壤剥蚀率的关系可以将侵蚀动力学和土壤自身侵蚀敏感性联系起来, 以便更加深入地理解坡面土壤侵蚀过程。饱和土与非饱和土的细沟径流剪切力与土壤剥蚀率分别由公式(4)、公式(5)求得。

由图 5 可以很明显地看出, 饱和黄绵土对应直线斜率大于非饱和土, 表明饱和黄绵土的细沟可蚀性大于非饱和黄绵土。此外, 还可以看出饱和黄绵土对应直线横截距小于非饱和黄绵土, 这说明饱和土的土壤临界抗剪切应力明显偏低。饱和黄绵土与非饱和黄绵土相应的剥蚀率与径流剪切力回归方程分别为:

$$D_r = 0.088(\tau - 0.773) \quad (R^2 = 0.83, P < 0.01) \quad (9)$$

$$D_r = 0.057(\tau - 1.561) \quad (R^2 = 0.90, P < 0.01) \quad (10)$$

根据上述表达式, 饱和黄绵土细沟可蚀性参数为 $0.088 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 非饱和黄绵土的细沟可蚀性参数为 $0.057 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; 两者的临界剪切力分别为 $0.773, 1.561 \text{ Pa}$ 。

细沟可蚀性参数是土壤自身侵蚀敏感程度的客

观反映, 与土壤状况、耕作情况、土壤覆盖度、土壤冻融情况和前期降雨等有一定的关联性^[28]。土壤临界剪切力可以反映土壤抵抗外力剪切变形的难易程度, 是土壤抵抗径流冲刷能力的量度指标。上述结果表明, 黄绵土饱和后其细沟可蚀性参数约为非饱和土的 1.6 倍, 而其土壤临界剪切力仅为非饱和土的一半。这说明饱和黄绵土的侵蚀敏感程度明显高于非饱和土, 其土体抵抗径流剪切破坏的能力也大幅度降低。因此, 较之非饱和土, 饱和黄绵土更易剥蚀、流失。

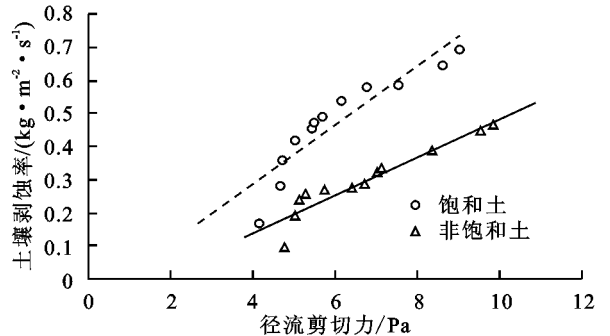


图 5 饱和与非饱和土径流剪切力与土壤剥蚀率的关系

黄绵土粉砂质含量较高, 有机质含量偏低, 土质疏松, 饱和后土壤颗粒之间的胶结作用减弱, 因此遇水极易分散, 这会直接导致其土壤可蚀性上升^[19]。另外, 当土壤达到饱和后, 表层土壤颗粒在浮力的托举作用下, 更易被径流剥蚀搬运, 这可能是土壤侵蚀敏感程度上升的另一个重要原因。Nouwakpo^[10]通过渗流试验指出, 细沟可蚀性参数会随近地表水分状况的变化而变化, 本试验结果与之相契合。

土壤临界剪切力主要与土壤孔隙水压力有关, 土壤饱和后, 土壤颗粒间的孔隙水压力增大, 势必导致土壤临界剪切力减小^[14]。此外, 土壤临界剪切力还可能与土壤颗粒之间的摩擦力有关, 由于土壤充分饱和, 在孔隙水压力和浮力的影响下, 土壤颗粒间的间隙变大, 颗粒之间的摩擦力将大幅度降低, 由此导致土壤临界剪切力偏低。根据前人^[28]的研究, 土壤临界剪切力并不是一个确定值, 它不仅与土壤质地、土壤冻融情况、前期降雨等关, 甚至与试验坡度及流量等都有一定的关联性。本次试验表明, 土壤水分含量会引起土壤临界剪切力的突变, 这与前人^[28]的结论一致。

3 结论

(1) 饱和黄绵土流速随坡度和流量的增大而增大, 流速与流量、坡度之间的关系可以用幂函数来表征, 较之流量, 坡度对径流流速的影响程度更大。

(2) 饱和黄绵土细沟径流流速约为非饱和土的 1.17 倍, 这主要是土壤饱和后坡面摩擦阻力减小所导致, 饱和黄绵土坡面达西阻力系数仅为非饱和土坡面的 70.3%。

(3)同种工况下,饱和黄绵土细沟径流动能和径流含沙量明显高于非饱和土,径流含沙量与径流动能之间符合良好的对数关系,2种土壤的径流含沙量随径流动能增加均呈现先逐渐增加而后趋于平稳的趋势,最大径流含沙量分别稳定在400,280 kg/m³以内。

(4)根据土壤剥蚀率与径流剪切力的线性关系,推导出饱和与非饱和黄绵土的细沟可蚀性参数分别为0.088,0.057 kg/(m²·s),两者临界剪切力分别为0.773,1.561 Pa。饱和黄绵土较非饱和黄绵土更容易剥蚀、流失。

参考文献:

- [1] 赵晓光. 黄土塬区坡面水蚀作用过程[J]. 水土保持学报, 2000, 14(3): 122-124.
- [2] 肖培青, 郑粉莉, 汪晓勇, 等. 黄土坡面侵蚀方式演变与侵蚀产沙过程试验研究[J]. 水土保持学报, 2008, 22(1): 24-27.
- [3] Miao C Y, Ni J R, Borthwick A G L. Recent changes of water discharge and sediment load in the Yellow River basin, China [J]. *Progress in Physical Geography*, 2010, 34(4): 541-561.
- [4] 郑庆福, 刘艇, 赵兰坡, 等. 东北黑土耕层土壤黏粒矿物组成的区域差异及其演化[J]. 土壤学报, 2010, 47(4): 734-746.
- [5] 王旭艳, 王志强, 宋维念, 等. 东北典型黑土耕层颗粒组成与腐殖质层厚度的关系[J]. 中国水土保持科学, 2011, 9(1): 39-44.
- [6] Shruithi R B V, Kerle N, Jetten V, et al. Quantifying temporal changes in gully erosion areas with object oriented analysis [J]. *Catena*, 2015, 128: 262-277.
- [7] Wischmeier W H, Mannering J V. Relation of soil properties to its erodibility [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1969, 33(1): 131-137.
- [8] 陈云明, 刘国彬, 郑粉莉, 等. RUSLE 侵蚀模型的应用及进展[J]. 水土保持研究, 2004, 11(4): 80-83.
- [9] 肖培青, 姚文艺. WEPP 模型的侵蚀模块理论基础[J]. 人民黄河, 2005, 27(6): 38-39, 50.
- [10] Nouwakpo S K. Impact of vertical hydraulic gradient on rill erodibility and critical shear stress [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2010, 74(6): 1914-1921.
- [11] Abdul S T, Al-Madhhachi A T, Hanson G J, et al. Deriving parameters of a fundamental detachment model for cohesive soils from flume and jet erosion tests [J]. *Transactions of The Asabe*, 2013, 56(2): 489-504.
- [12] Singh H V, Thompson A M. Effect of antecedent soil moisture content on soil critical shear stress in agricultural watersheds [J]. *Geoderma*, 2016, 262: 165-173.
- [13] 蔡太义, 贾志宽, 黄耀威, 等. 不同秸秆覆盖量对春玉米田蓄水保墒及节水效益的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(增刊1): 238-243.
- [14] 徐晗, 朱以文, 蔡元奇, 等. 降雨入渗条件下非饱和土边坡稳定分析[J]. 岩土力学, 2005, 26(12): 1957-1962.
- [15] Bullock M S, Nelson S D, Kemper W D. Soil cohesion as affected by freezing, water content, time and tillage [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1988, 52(3): 770-776.
- [16] Chen C, Ban Y, Wang X, et al. Measuring flow velocity on frozen and non-frozen slopes of black soil through leading edge method [J]. *International Soil & Water Conservation Research*, 2017, 5(3): 180-189.
- [17] 李永红, 牛耀彬, 王正中, 等. 工程堆积体坡面径流动力学参数及其相互关系[J]. 农业工程学报, 2015, 31(22): 83-88.
- [18] 张乐涛, 高照良, 田红卫. 工程堆积体陡坡坡面土壤侵蚀水动力学过程[J]. 农业工程学报, 2013, 29(24): 94-102.
- [19] 赵宇. 黄土细沟侵蚀过程冲刷试验研究[D]. 重庆: 西南大学, 2015.
- [20] 李鹏, 李占斌, 郑良勇. 黄土坡面径流侵蚀产沙动力过程模拟与研究[J]. 水科学进展, 2006, 17(4): 444-449.
- [21] 张婧. 土壤入渗与优先流测量方法研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.
- [22] 米宏星, 陈晓燕, 赵宇, 等. 黄土坡面细沟径流流速的试验研究[J]. 水土保持学报, 2015, 29(1): 66-69, 110.
- [23] 雷阿林, 唐克丽. 黄土坡面细沟侵蚀的动力条件[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1998, 4(3): 39-43, 72.
- [24] 赵宇, 陈晓燕, 米宏星, 等. 基于体积法对黄土细沟侵蚀沿程分布模拟的研究[J]. 土壤学报, 2014, 51(6): 1234-1241.
- [25] Shainberg I, Laflen J M, Bradford J M, et al. Hydraulic flow and water quality characteristics in rill erosion [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1994, 58(4): 1007-1012.
- [26] Gilley J E, Elliot W J, Laflen J M, et al. Critical shear stress and critical flow rates for initiation of rilling [J]. *Journal of Hydrology*, 1993, 142(1/4): 251-271.
- [27] Huang C, Laflen J M, Bradford J M. Evaluation of the detachment transport coupling concept in the WEPP rill erosion equation [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1996, 60(3): 734-739.
- [28] 雷廷武, 张晴雯, 闫丽娟. 细沟侵蚀物理模型[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 77-91.