

不同土壤前期含水量对土壤分离临界水动力学特性及其抗剪强度的影响

王晨沣¹, 张守红¹, 王彬^{1,2}, 王玉杰^{1,2}, 王云琦^{1,2}, 胡波¹, 王凯¹

(1. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083;

2. 北京林业大学重庆缙云山三峡库区森林生态系统国家定位观测研究站, 北京 100083)

摘要: 通过实测不同土壤前期含水量(5%~23%)和坡度(1°~10°)条件下黄壤坡面土壤分离临界水动力参数,并结合不同土壤含水量(3%~23%)对土壤抗剪强度的影响,综合分析探讨不同土壤前期含水量、坡度和土壤抗剪强度与临界水动力特性的关系。结果表明:临界流量与不同土壤前期含水量和坡度呈幂函数减小关系,并提出一种能够体现土壤前期含水量和坡度共同作用对临界水动力参数影响的预测方程。在坡度小于5°时,土壤前期含水量对临界水动力学参数影响较小,可直接采用简化的幂函数关系进行计算。土壤黏聚力随土壤含水量的增加先出现峰值后逐渐减小至稳定;与土壤黏聚力的变化趋势不同,土壤分离临界水动力参数则逐渐减小。

关键词: 土壤分离;土壤前期含水量;坡度;临界水动力学参数;土壤抗剪强度

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)01-0091-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2017.01.016

Study on Critical Hydraulic Characteristic of Soil Detachment and Soil Shear Strength Under Different Antecedent Soil Moisture Contents

WANG Chenfeng¹, ZHANG Shouhong¹, WANG Bin^{1,2},

WANG Yujie^{1,2}, WANG Yunqi^{1,2}, HU Bo¹, WANG Kai¹

(1. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083;

2. Chongqing Jinyun Forest Ecological Station, Beijing Forestry University, Beijing 100083)

Abstract: In this study, the critical hydrodynamic characteristics of soil detachment on yellow soil slope were measured under different antecedent soil moisture contents (5%—23%) and slope gradients (1°—10°). The impacts of soil moisture content (3%—23%) on shear strength were also investigated. The study comprehensively analyzed the effects of different antecedent soil moisture contents, slope gradients and soil shear strengths on critical hydrodynamic characteristics. The results showed that critical flow rate had power function relationship with slope gradient and antecedent soil moisture content. In this paper, an accurate equation was proposed, which reflected combined effect between the antecedent soil moisture content and slope gradient on critical hydraulic characteristics. A simplified power function could be used when the slope gradient was smaller than 5°. This equation could ignore the impact of the antecedent soil moisture content. Soil cohesion reached peak firstly and then fell down to stable with the increase of the antecedent soil moisture content. While the critical hydrodynamic characteristics of soil detachment showed a gradually decreasing trend.

Keywords: soil detachment; antecedent soil moisture content; slope gradient; critical hydrodynamic parameters; soil shear strength

土壤侵蚀已成为世界范围的重要环境问题之一,尤其在发展中国家,严重的水土流失已成为阻碍经济发展和危害社会稳定的主要障碍^[1]。在土壤侵蚀研究过程中,准确预报土壤分离是建立坡面侵蚀物理模型

首要解决的问题,并取得了大量的研究成果^[2-3]。同时,一些研究者通过建立土壤分离速率与水动力学参数的函数关系式,为坡面侵蚀的预报做出了重要贡献^[4-5]。张光辉等^[6]和李鹏等^[7]在土壤饱和的条件下

预测出土壤分离临界径流剪切力;何小武等^[8]在土壤前期含水量为田间持水量的条件下预测出坡面侵蚀发生临界水流功率和临界单位水流功率;Wang 等^[9]通过对不同近地表根系特性研究预测出土壤分离临界径流剪切力。以上研究均是通过经验公式预测出坡面土壤分离临界水动力参数,缺乏实测数据进行验证。雷廷武等^[10]在土壤饱和的条件下为探明细沟侵蚀发生临界流量、临界剪切力与坡度和土壤团聚体大小的关系,设计一种试验装置实测出细沟侵蚀发生临界水动力参数。目前,关于坡面土壤分离临界水动力参数对不同处理水平的响应还缺乏进一步深入的研究。

降雨条件下不同近地表水文条件对坡面侵蚀的影响逐渐成为研究热点,并表明近地表水文条件决定了土壤侵蚀的动态变化,取得了一定进展^[11-12]。近期,一些研究者开展了径流冲刷条件下不同近地表水文条件对土壤分离速率的影响^[13]。Nouwakpo 等^[14]通过实测方法得出坡面土壤颗粒起动临界径流剪切力随着水力梯度的增加而减小的变化规律,并阐明壤中流是加强土壤侵蚀的关键因子。而国内对土壤分离的研究多数是在一个特定近地表水文条件—土壤饱和下进行,关于不同土壤前期含水量对土壤分离的影响考虑较少。

坡面侵蚀发生不仅与外在水动力特性有关,还取决于土壤抵抗外力作用下发生剪切破坏的难易程度。在冲刷条件下,土壤抵抗径流剪切破坏能力随抗剪强度的增加而增加,从而减缓坡面侵蚀的发生^[15]。有研究表明土壤抗剪强度能反映出土壤对侵蚀动力的响应^[16]。然而,综合考虑水动力特性和土壤抗剪强度对土壤分离临界条件的影响还需进行深入研究^[17]。因此,本研究以长江中上游地区重要土壤资源之一的黄壤为研究对象,通过实测的方法定量分析不同土壤前期含水量(5%~23%)和不同坡度(1°~10°)与土壤分离临界水动力特性的关系,以及结合不同土壤含水量(3%~23%)对土壤抗剪强度的影响,并探讨坡面侵蚀发生外在侵蚀动力与土壤抗剪强度的关系,为黄壤的侵蚀防治提供理论支持和科学指导。

1 材料与方法

1.1 试验装置与材料

试验于 2015 年 6—10 月通过冲刷和直剪试验相结合的方法进行。冲刷试验在北京林业大学缙云山国家定位观测研究站人工模拟降雨试验场进行,采用长 4 m,宽 0.4 m,高 0.1 m 的试验冲刷槽进行,可控坡度为 0°~30°。在冲刷槽的顶端有一个深度 0.4 m 的稳流池,确保入流水流的稳定供水,尾端通过固定装置连接土壤样品冲刷槽。具体试验器材见图 1,通过阀门组可以调节不同的流量。直剪试验采用 ZJ 型

应变控制式直剪仪(南京土壤仪器厂)进行快剪试验。

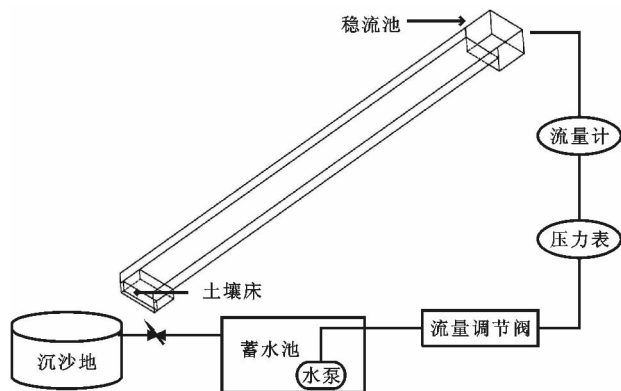


图 1 试验装置示意

1.2 研究方法

1.2.1 冲刷试验 供试土样取自缙云山坡面裸露地带 0—5 cm 表层土壤,土样风干后过 2 mm 土壤筛分别用于冲刷和直剪试验。土壤颗粒组成粘粒、粉粒和砂粒分别为 32.09%,54.22%,13.70%。土壤放样室长 0.2 m,宽 0.4 m,深 0.1 m。为保证放样室中土壤容重均一,试验采用分层装土,即在每 2.5 cm 填装一次土壤,共计 4 次,且在填装过程中按照试验设计控制土壤前期含水量。缙云山裸地表层土壤容重范围 1.12~1.20 g/cm³,故试验容重控制在 1.20 g/cm³ 左右。填装完毕后将土样密封静置 24 h 后进行试验。

有研究表明土壤黏聚力随着含水率从 5% 增加到 20% 时呈先增大后减小的趋势^[18]。结合试验区夏季蒸发量较大的实际条件设计 5 个含水量(风干含水量):5%,8%,13%,18%,23%,其目的是为探索不同土壤含水量土壤黏聚力对黄壤临界水动力参数的影响;缙云山裸地坡度范围是 5°~10°,因此设计 5 个缓坡坡度:1°,2.5°,5°,7.5°,10°。坡面土壤分离试验测定方法为,通过流量调节阀门组从小到大逐渐增加流量,直到土壤床面颗粒出现连续不断被分离为止,记录这一时刻流量和水位。通过探针法在距冲刷槽尾端 0.5~1.5 m 范围内测定水深。流速用高锰酸钾染色法测定,秒表记录冲刷槽尾端 0.5~1.5 m 测速区所用时间,可得到水流表面流速,每个试验处理水平的流速和水位分别测定 12 次,去掉 1 个最大值和 1 个最小值,将剩余的 10 次平均得到平均水深和表面流速。每个试验处理水平设置 3 个重复。

1.2.2 直剪试验 按照《土工实验规程 SL 1999》要求,将风干并过 2 mm 土壤筛的土样平铺在不吸水的盘内,计算所添加的水量,用喷雾器喷洒预计的加水量,静置一段时间后装入玻璃缸内盖紧,润湿 24 h 备用。直剪试验需配置的土壤含水量与冲刷试验的基本一致,即为 3%,8%,13%,15.5%,18%,23% 共 6 组土样,每组制备 6 个土样进行直剪试验,土壤容重为 1.20 g/cm³。试验过程中分别施加 4 种不同的垂直压力:100,200,300,400

kPa。每种试验处理水平进行 3 次重复。

1.2.3 计算方法

径流剪切力的计算: $\tau = \gamma R J$ (1)

式中: τ 为径流剪切力(Pa); γ 为水的重度(N/m³); R 为流体水力半径(m); J 为水力坡度, $J = \sin \theta$, θ 为坡度。

水流功率的计算: $\omega = \tau V$ (2)

式中: ω 为水流功率(N/(m·s)); V 为水流流速(m/s)。

单位水流功率的计算: $P = VJ$ (3)

式中: P 为单位水流功率(m/s)。

抗剪强度计算:

$\tau_f = \sigma \tan \varphi + c$ (4)

式中: τ_f 为土壤抗剪强度(kPa); σ 为作用在剪切面上的法向应力(kPa); φ 为土壤内摩擦角(°); c 为土壤粘聚力(kPa)。

1.2.4 模型的验证 利用纳什系数(NSE)对模型方程的计算效果进行检验,其计算公式为:

$NSE = 1 - \sum (Q_i - Q_{ci})^2 / \sum (Q_i - Q_n)^2$ (5)

式中: NES 为纳什系数; Q_i 为第 i 个样本的实测值; Q_{ci} 为第 i 个样本的模型计算值; Q_n 为模型实测值的均值。

2 结果与分析

2.1 不同土壤前期含水量和坡度对土壤分离临界流量的影响

土壤分离临界流量随着坡度和含水量的增加而减小(图 2、图 3)。临界流量随土壤前期含水量的增加基本呈线性减小趋势,坡度越小,则下降的趋势越大(图 2)。当坡度小于 5°时,临界流量随土壤前期含水量的增加变化非常敏感;当坡度大于 5°时,临界流量变化则不敏感。坡度为 1°的临界流量减小了 12.31×10^{-2} L/s;而坡度 10°的临界流量仅减小了 0.72×10^{-2} L/s。与土壤前期含水量有所不同,临界流量随着坡度的增大呈幂函数减小($R^2 > 0.97$)(图 3)。土壤前期含水量为 5%的临界流量减小了 15.92×10^{-2} L/s;而含水量为 23%的临界流量减小了 4.33×10^{-2} L/s。坡度和土壤前期含水量越小,土壤分离临界流量减小的幅度越大,这说明含水量和坡度对黄壤坡面临界起动流量具有叠加作用。因此对临界流量与含水量、坡度进行多元线性回归,得到结果为:

$Q_c = 0.1726 - 1.0235S - 0.5433M + 3.4766MS$
($R^2 = 0.71, NSE = 0.75, n = 25$) (6)

式中: Q_c 为土壤分离临界流量(L/s); M 为土壤前期含水量(%); S 为坡度的正切值。在公式(6)中(MS)因素体现坡度和流量的叠加作用,其系数 3.476 6 较大,说明其贡献也非常大。通过偏相关分析发现,坡度、土壤前期含水量与土壤分离临界流量的偏相关系数 r 分别为 -0.78, -0.50, p 值分别为 0.000, 0.013,说明坡度和土壤前期含水量决定了土壤分离临界流量的大小。

再对其进行幂函数拟合发现:

$Q_c = 9.9283 \times 10^{-4} \times S^{-0.8663} M^{-0.5766}$
($R^2 = 0.96, NSE = 0.96, n = 25$) (7)

与公式(6)相比,公式(7)的决定系数和纳什系数均达到 0.96,说明在本研究中幂函数更能精确的预测临界起动流量与土壤前期含水量和坡度的关系。通过公式(7)计算出临界流量的预测值,其预测值与实测值的关系如图 4 所示。从图 4 中决定系数($R^2 = 0.96$)可以看出,预测值与实测值较为接近,进一步说明公式(7)预测土壤起动临界流量的准确性。何小武等^[8]在不同流量和坡度下预测出土壤前期土壤含水量为田间持水量时的平均临界流量为 0.116 L/s。实际上,不同坡度下土壤分离临界流量差异很大。是因为土壤颗粒受重力沿坡面向下的分力和相同流量下的径流动能均随坡度的增加而增加,致使不同坡度下土壤分离临界流量减小。研究表明土壤可蚀性随土壤前期含水量的增加而增大^[19],说明土壤前期含水量越大,越易发生土壤侵蚀,由此可知土壤侵蚀发生临界流量就越小。

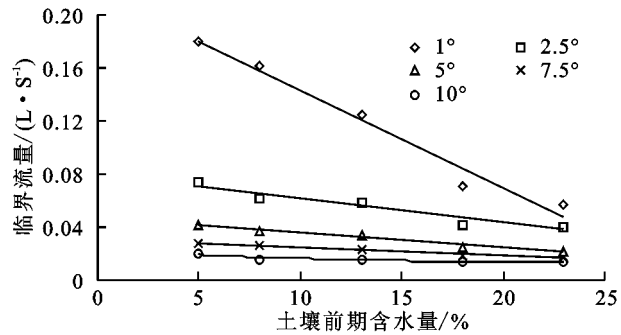


图 2 土壤分离临界流量与土壤前期含水量的关系

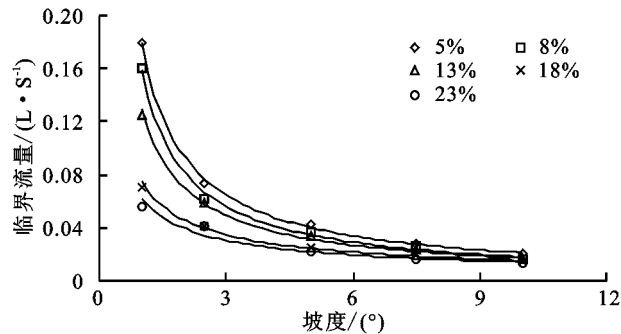


图 3 土壤分离临界流量与坡度的关系

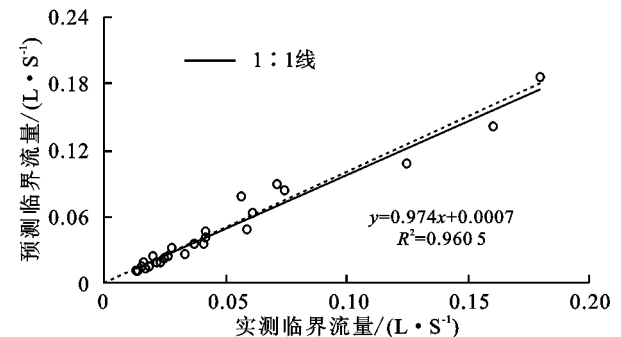


图 4 土壤分离临界流量预测值与实测值关系

2.2 不同土壤前期含水量和坡度对土壤分离临界水动力学特性的影响

当径流剪切力或径流能量大于土壤颗粒临界起动力时,土壤颗粒就会发生剥蚀。临界径流剪切力、临界水流功率和临界单位水流功率随着土壤前期含水量的增加均呈减小趋势;而随着坡度的增加均呈增大趋势(图 5)。通过建立临界水动力参数与坡度和土壤前期含水量的函数关系,发现它们之间呈显著幂函数关系,见公式(8)~公式(10):

$$\tau_c = 4.1660 \times S^{0.6624} M^{-0.1467} \quad (R^2 = 0.98, NSE = 0.98, n = 25) \quad (8)$$

$$\omega_c = 1.0631 \times S^{0.7683} M^{-0.2717} \quad (R^2 = 0.98, NSE = 0.98, n = 25) \quad (9)$$

$$P_c = 0.2452 \times S^{1.0947} M^{-0.1283} \quad (R^2 = 0.99, NSE = 0.99, n = 25) \quad (10)$$

式中: τ_c 为临界径流剪切力(Pa); ω_c 为临界水流功率(N/(m·s)); P_c 为临界单位水流功率(m/s)。

在公式(8)~公式(10)中,决定系数和纳什系数均达到 0.98 以上。经过深入分析发现,临界水动力参数主要受坡度控制,土壤前期含水量对其影响较小,将公式(8)~公式(10)中土壤前期含水量项删除,得到公式(11)~公式(13):

$$\tau_c = 5.726 \times S^{0.6622} \quad (R^2 = 0.95, NSE = 0.95, n = 25) \quad (11)$$

$$\omega_c = 1.9239 \times S^{0.7673} \quad (R^2 = 0.88, NSE = 0.88, n = 25) \quad (12)$$

$$P_c = 0.3240 \times S^{1.0951} \quad (R^2 = 0.98, NSE = 0.98, n = 25) \quad (13)$$

与公式(8)~公式(10)相比,公式(11)~公式(13)决定系数和纳什系数均分别下降了 3.06%, 10.20%, 2.02%。从图 5 可以发现,同一坡度下,不同土壤前期含水量间的临界水动力参数随着坡度的增加其差值在逐渐增大。临界径流剪切力、临界水流功率和临界单位水流功率在坡度 10° 时差值分别是 1° 的 3.64, 4.39, 7.00 倍。不同土壤前期含水量下,临界水动力学参数拟合值与实测值的差值随坡度的增大而逐渐

增大(图 6)。当坡度 $< 5^\circ$ 时,临界水动力参数实测值与预测值基本相等,并落在 1:1 线上;坡度 $\geq 5^\circ$ 时,临界水动力参数拟合值对坡度的变化很敏感。这说明当坡度 $\geq 5^\circ$ 时,土壤分离临界水动力学参数受坡度和土壤前期含水量耦合作用的影响;在 $< 5^\circ$ 时则主要受坡度的影响。坡度 $< 5^\circ$ 时,临界径流剪切力、临界水流功率和临界单位水流功率的纳什系数分别为 0.99, 0.97, 1;而坡度 $\geq 5^\circ$ 时,则分别为 0.91, 0.80, 0.96。因此,为使方程更为精确,简化的幂函数式(公式(11)~公式(13))更适合于坡度 $< 5^\circ$ 。雷廷武等^[10] 实际观测到土壤团聚体为 0~2 mm 细沟侵蚀再生临界剪切应力与坡度的关系为 $\tau_c = A + BS$, 决定系数为 0.93, 这与本研究线性方程得到结果一致。

目前,坡面径流对土壤分离过程的水动力学特性研究已经取得了一定成果^[20-21],但忽视土壤分离临界时刻的研究,因此,定量研究土壤分离临界水动力学特性具有重要意义。在不同土壤前期含水量和坡度下实测出临界径流剪切力变化于 0.27~2.04 Pa, 临界水流功率变化于 0.094 8~0.614 7 N/(m·s), 临界单位水流功率变化于 0.002 6~0.052 3 m/s。临界水动力参数研究多数是在土壤饱和状态和不同坡度水平下利用经验值计算出来的平均值,这些研究并没有对其进行定量描述。

通过总结文献发现,在土壤饱和及不同坡度组合条件下,坡面土壤分离临界径流剪切力大多在 0.54~6.04 Pa 的变化区间内^[6,22-23]。可以发现,在不同坡度组合下由经验计算出的临界剪切力有较大差异。雷廷武等^[10] 通过实测细沟再生临界水流量证明了坡度对临界径流剪切力有剧烈的影响,这与本研究得出的结论一致。

因此,用坡度组合下的平均值不能作为土壤分离临界的实际值。Mahmoodabadi 等^[24] 分析土壤剥蚀率与水流功率的关系发现,坡度为 $2^\circ \sim 6^\circ$, 3 种不同土壤颗粒组成细沟侵蚀发生临界水流功率分别为 0.005, 0.072, 0.082 N/(m·s);王瑄等^[25] 在坡度 $3^\circ \sim 30^\circ$ 时临界水流功率为 0.344 N/(m·s)。表明经验计算的临界水流功率要小于本文的实测值。

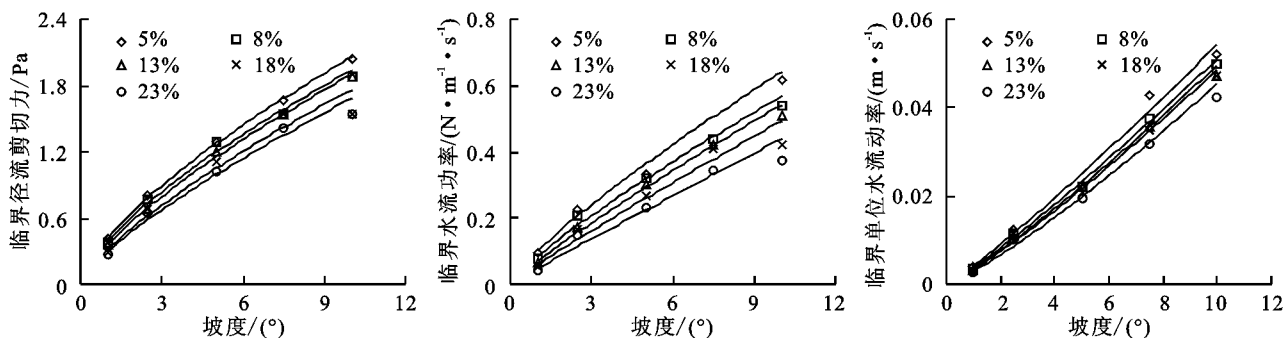


图 5 不同土壤前期含水量下临界水动力学参数与坡度的关系

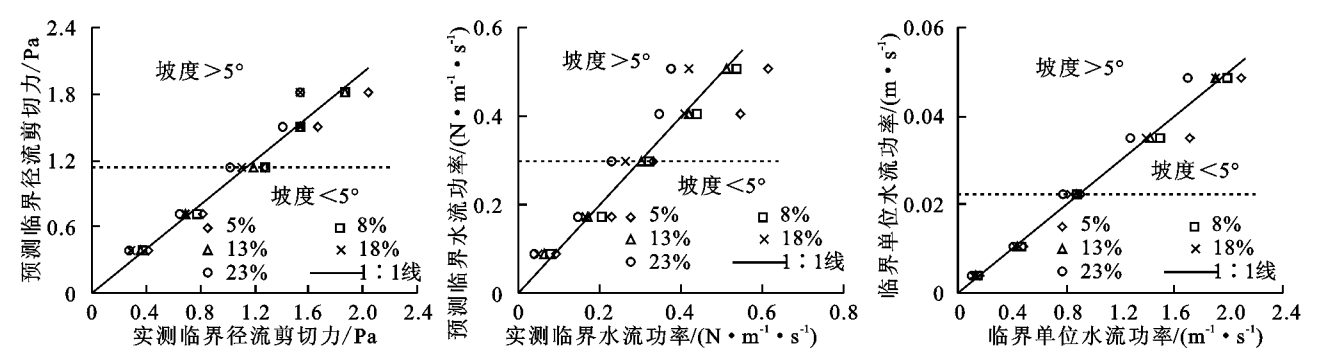


图 6 土壤分离临界水动力学参数实测值与拟合值的关系

2.3 不同土壤前期含水量对抗剪强度的影响

土壤黏聚力随土壤含水量的增加呈先快速增大后急剧减小至稳定(图 7)。土壤黏聚力在含水量 13% 时达到峰值;而当土壤含水量由 13% 增加至 23% 时,土壤黏聚力减小了 66.03%。内摩擦角随含水量的增加呈降低趋势,但相对黏聚力而言,内摩擦角变化较小,当土壤含水量从 3% 增加到 23% 时,内摩擦角仅减小了 15.61%。倪九派等^[18]以缙云山黄壤为研究对象,对不同土壤含水量的抗剪强度进行研究得出,黏聚力随含水量的增加呈先增加后减小的趋势;内摩擦角则呈一直减小的趋势,这与本研 究所得结论基本一致。出现上述原因为土壤黏聚力主要受表观黏聚力的影响^[26],而表观黏聚力则随着土壤含水量的改变而发生变化,它是由基质吸力或负孔隙水压力产生。黄壤黏粒矿物主要以蛭石为主^[27],由于蛭石特殊的双电子层结构,有很强的吸水性,致使黄壤有较强的基质吸力。当土壤含水量较小时,水分子产生的吸力较小,对土壤颗粒的牵引能力并非很强;随土壤含水量逐渐增大,水膜所产生的黏聚效果开始逐渐增强,土壤基质吸力增强,表观黏聚力增大;当含水量增加到一定程度时,随着水膜越来越厚,水膜对土粒的吸力反而减少。因此,表观黏聚力相应减少导致总黏聚力的减小。此外,随着土壤含水量的增大,使得黏粒组铝、铁等游离氧化物在土壤颗粒之间产生胶结作用^[28],会形成稳固的凝聚体;而随着水分的继续增加会造成一些胶结物软化或者是具有胶结作用的盐类物质溶解,破坏了土壤胶结物质,导致土壤的抗剪强度降低^[29]。

有关土壤分离临界条件,多数研究是考虑水动力特性对其产生的影响^[30-31],也有研究者以土力学的观点从土壤抗剪强度的角度进行研究^[32],但采用水力学和土力学相结合的试验方法进行分析土壤分离临界条件的相关研究很少^[17]。土壤抗剪强度指标主要受土壤黏聚力的影响,内摩擦角对其影响较小。本研究中土壤黏聚力随着土壤含水量增加先达到峰值后逐渐减小至稳定;而在不同坡度下土壤分离临界水动力参数随土壤前期含水量的增加均逐渐减小。因此,将 5 个

坡度的临界径流剪切力进行平均得到平均临界径流剪切力(图 8),发现临界径流剪切力随坡度的增加呈线性减小趋势($R^2 = 0.99$),并没有出现与土壤黏聚力相似的变化趋势。这说明不同土壤前期含水量下的黏聚力并不是土壤分离临界起动的主要因素。当坡面径流接触到土壤表面时,土壤快速饱和或接近饱和,使的土壤黏聚力发生变化。由此得出,在径流侵蚀中不同土壤前期含水量下的黏聚力并不能决定土壤抗侵蚀能力的大小,并以此推断用土壤饱和条件下的黏聚力来表征土壤抗侵蚀能力的大小可能更为合理。土壤分离临界水动力参数随土壤前期含水量的增加而减小,主要原因为:一方面土壤湿润锋的吸力梯度随着土壤前期含水量的增加而越小,致使初始入渗速率越低并且降低缓慢^[33];另一方面土壤托举力随着土壤前期含水量的增加而增大。因此,土壤分离临界水动力参数随着土壤前期含水量的增加而减小。

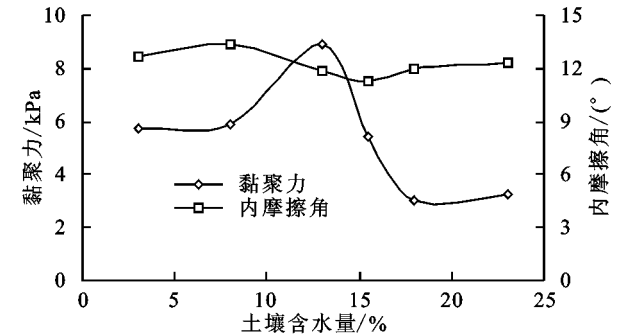


图 7 不同土壤前期含水量与抗剪强度指标的关系

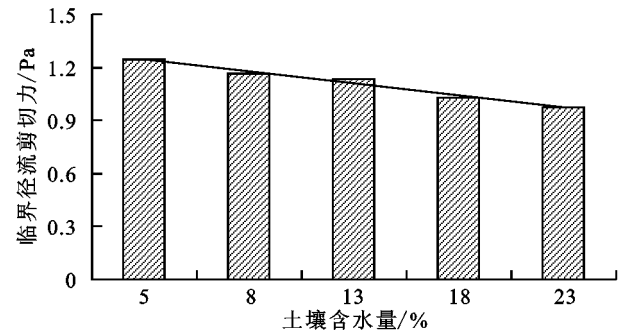


图 8 不同土壤前期含水量与临界径流剪切力的关系

3 结论

(1)坡面土壤分离临界流量随着土壤前期含水量

的增加基本呈线性减小趋势;而随着坡度的增大呈幂函数减小趋势。通过多元非线性回归分析发现,土壤分离临界流量与近地表土壤前期含水量和坡度呈幂函数减小的关系。

(2)临界径流剪切力、临界水流功率和临界单位水流功率随土壤前期含水量的增加均呈减小趋势;而随坡度的增加则呈幂函数增大趋势。本文给出了一种能够体现出土壤前期含水量和坡度共同作用下对土壤分离临界水动力参数影响的预测方程,同时表明土壤前期含水量对临界水动力学参数具有一定的影响。

(3)土壤黏聚力在含水量为 13% 时达到峰值;当土壤含水量由 13% 增加至 23% 时,土壤黏聚力减小了 66.03%。分析土壤内摩擦角发现,内摩擦角随着含水量的增加呈降低趋势,但相对黏聚力而言,内摩擦角变化较小,当土壤含水量从 3% 增加到 23% 时,内摩擦角仅减小了 15.61%。

(4)土壤黏聚力随着土壤含水量增加呈先增大后减小趋势;而土壤分离临界水动力参数随着土壤前期含水量的增加逐渐减小,并没有出现与土壤黏聚力相似的变化趋势。这说明在径流侵蚀中不同土壤前期含水量下的黏聚力并不能决定土壤抗侵蚀能力的大小,并以此推断用土壤饱和条件下的黏聚力来表征土壤抗侵蚀能力的大小可能更为合理。

参考文献:

- [1] Wang B, Zheng F, Römken M J M, et al. Soil erodibility for water erosion: A perspective and Chinese experiences [J]. *Geomorphology*, 2013, 187(5): 1-10.
- [2] 雷廷武, Nearing M A. 侵蚀细沟水力学特性及细沟侵蚀与形态特征的试验研究[J]. *水利学报*, 2000(11): 49-54.
- [3] Lei T W, Zhang Q, Zhao J, et al. A laboratory study of sediment transport capacity in the dynamic process of rill erosion [J]. *Transactions of the ASAE*, 2001, 44(6): 1537.
- [4] 柳玉梅, 张光辉, 李丽娟, 等. 坡面流水动力学参数对土壤分离能力的定量影响[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(6): 96-99.
- [5] 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.
- [6] 张光辉, 刘宝元, 何小武. 黄土区原状土壤分离过程的水动力学机理研究[J]. *水土保持学报*, 2005, 19(4): 48-52.
- [7] 李鹏, 李占斌, 郑良勇, 等. 坡面径流侵蚀产沙动力机制比较研究[J]. *水土保持学报*, 2005, 19(3): 66-69.
- [8] 何小武, 张光辉, 刘宝元. 坡面薄层水流的土壤分离实验研究[J]. *农业工程学报*, 2003, 19(6): 52-55.
- [9] Wang B, Zhang G H, Zhang X C, et al. Effects of near soil surface characteristics on soil detachment by overland flow in a natural succession grassland[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2014, 78(59): 589-597.
- [10] 雷廷武, Nearing M A. 水流作用下疏松土壤材料中细

沟的再生及其临界剪应力的实验研究[J]. *农业工程学报*, 2000, 16(1): 26-30.

- [11] Fox G A, Chu Agor M L M, Wilson G V. Erosion of noncohesive sediment by ground water seepage: Lysimeter experiments and stability modeling[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2007, 71(6): 1822-1830.
- [12] Römken M J M, Helming K, Prasad S N. Soil erosion under different rainfall intensities, surface roughness, and soil water regimes[J]. *Catena*, 2002, 46(2): 103-123.
- [13] Al Madhhachi A S T, Hanson G J, Fox G A, et al. Deriving parameters of a fundamental detachment model for cohesive soils from flume and Jet erosion tests [J]. *Transactions of the ASAE*, 2013, 56(2): 489-504.
- [14] Nouwakpo S K, Huang C, Bowling L, et al. Impact of vertical hydraulic gradient on rill erodibility and critical shear stress[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2010, 74(6): 1914-1921.
- [15] 王云琦, 王玉杰, 张洪江, 等. 重庆缙云山不同土地利用类型土壤结构对土壤抗剪性能的影响[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(3): 40-45.
- [16] 赵晓光, 石辉. 水蚀作用下土壤抗蚀能力的表征[J]. *干旱区地理*, 2003, 26(1): 12-16.
- [17] Léonard J, Richard G. Estimation of runoff critical shear stress for soil erosion from soil shear strength [J]. *Catena*, 2004, 57(3): 233-249.
- [18] 倪九派, 高明, 魏朝富, 等. 干密度和含水率对岩溶地区黄壤抗剪强度的影响: 以重庆市南川区木渡河小流域为例[J]. *中国岩溶*, 2012, 31(1): 82-86.
- [19] 刘振波, 史学正, 于东升, 等. 模拟降雨下土壤前期含水量对土壤可蚀性的影响[J]. *生态环境*, 2008, 17(1): 397-402.
- [20] Zhang G H, Liu B Y, Nearing M A, et al. Soil detachment by shallow flow[J]. *Transactions of the ASAE American Society of Agricultural Engineers*, 2002, 45(2): 351-357.
- [21] Ali M, Sterk G, Seeger M, et al. Effect of hydraulic parameters on sediment transport capacity in overland flow over erodible beds[J]. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 2011, 8(4): 6939-6965.
- [22] 李鹏, 李占斌, 郑良勇. 黄土陡坡径流侵蚀产沙特性室内实验研究[J]. *农业工程学报*, 2005, 21(7): 42-45.
- [23] 王军光, 李朝霞, 蔡崇法, 等. 集中水流内红壤分离速率与团聚体特征及抗剪强度定量关系[J]. *土壤学报*, 2011, 48(6): 1133-1140.
- [24] Mahmoodabadi M, Ghadiri H, Yu B, et al. Morphodynamic quantification of flow-driven rill erosion parameters based on physical principles[J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 514(6): 328-336.
- [25] 王瑄, 李占斌, 李雯, 等. 土壤剥蚀率与水流功率关系室内模拟实验[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(2): 185-187.