

DOI: 10.13866/j.azr.2021.06.25

# 干湿交替作用对关中地区壤土临界剪切力的影响

宋鹏帅<sup>1</sup>, 王健<sup>2</sup>, 陈琳<sup>1</sup>, 曹博召<sup>2</sup>

(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)

**摘要:** 为了探究山地丘陵区梯田田坎在自然营力作用下的抵抗剪切破坏机理,通过室内试验测定土壤的临界剪切力,分析干湿交替作用对土壤临界剪切力的影响,以及确定不同干湿交替处理后土壤临界剪切力与土壤黏聚力之间的关系。结果表明:(1)在1~7次干湿交替过程中,土壤单位高度土体水头差与渗流流速之间呈正相关关系,并随着干湿交替次数的增加土壤渗透系数逐渐增大,然后趋于稳定。(2)随着干湿交替次数的增加,1~3次干湿交替对土壤临界剪切力无显著影响,4~7次干湿交替后临界剪切力呈小幅增加并趋于稳定。检验分析表明,不同干湿交替水平对土壤临界剪切力有一定程度的影响,且二者存在正相关关系。(3)随着土壤临界剪切力的增加,土壤黏聚力也逐渐增大,且二者具有显著相关性。研究结果可为梯田修筑及相关工程实践提供理论依据和技术支撑。

**关键词:** 干湿交替; 土壤临界剪切力; 黏聚力; 土壤渗透系数

自然界中的土壤受到降雨蒸发的周期性变化影响而处于干湿循环的变化之中,在这个作用下土壤的理化性质会发生显著的变化<sup>[1-5]</sup>,进而使土壤的结构得到重组。目前针对干湿交替过程对土壤抗剪强度的研究已经取得了诸多成果,杨和平等<sup>[6]</sup>通过直剪实验发现,膨胀土的黏聚力随着干湿交替次数的增加而降低,内摩擦角的变化不明显;吕海波等<sup>[7]</sup>发现土壤的抗剪强度随着干湿交替次数的增加逐渐衰减,最后趋于稳定;陈翔等<sup>[8]</sup>对纤维膨胀土抗剪强度进行了探索,发现随着干湿交替次数的增加,内摩擦角先是小幅度提高,然后逐渐减小并趋于稳定。而干湿循环作用对土壤临界剪切力的影响的试验探究很少,因此对土壤临界剪切力的研究变得尤为重要。

土壤临界剪切力是指土壤颗粒之间发生剪切破坏的临界指标值,其值大小能够一定程度上反映土壤抵抗剪切破坏的能力。诸多研究和实践表明,土体的破坏主要是由剪切所引起的<sup>[9]</sup>,剪切破坏属于土体破坏的重要特征<sup>[8]</sup>。相关研究发现外界条件的变化(主要指干湿循环)会影响土壤抗剪强度的大小<sup>[10-13]</sup>。土壤临界剪切力反映了土体抵抗股流冲

刷作用而发生剪切破坏的能力<sup>[14]</sup>,是定量分析细沟侵蚀发生的重要指标之一。土壤临界剪切力主要由于其自身性质决定,并与土壤的理化性状关系密切<sup>[15]</sup>。土壤临界剪切力( $c_0$ )是土壤侵蚀预测模型(WEPP)中直接反映了土体抵抗外力作用而发生剪切变形破坏的能力<sup>[16]</sup>,可通过经验关系获得的经验值或参考值<sup>[17]</sup>。

多年来,针对土壤临界剪切力的研究主要是从土壤侵蚀角度出发进行的探索,并取得了较多的成果。Elliot等<sup>[18]</sup>探究了土壤抗剪强度与溅蚀分散量之间的关系,并认为土壤抗剪应力可以作为土壤可蚀性的衡量指标。张晴雯等<sup>[16]</sup>通过对WEPP的细沟侵蚀产沙方程进行了分析,发现细沟剥蚀分散率的计算涉及了土壤临界抗剪应力和细沟可蚀性等因子。土壤临界剪应力是土壤抗剪应力的极限值,表征土体临界破坏点,对于明确土壤破坏过程具有重要意义。Gilley等<sup>[14]</sup>通过细沟侵蚀泥沙剥蚀能力方程来计算临界剪应力。李云鹏等<sup>[19]</sup>探究了土壤临界剪切力随土层深度的变化规律,发现土壤孔隙度、含水率和结构指标等因素对土壤临界剪切力有着一定的影响。雷廷武等<sup>[20]</sup>测量了沉积土壤中细

收稿日期: 2021-02-02; 修订日期: 2021-04-22

基金项目: “秦巴山地”近自然坡面整治水土保持关键技术示范与推广项目; 国家自然科学基金(41771308)

作者简介: 宋鹏帅(1994-),男,硕士研究生,主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: 505483732@qq.com

通讯作者: 王健。E-mail: wangjian@nwsuaf.edu.cn

沟再生的力学参数,得到了与沟坡相关的临界剪切应力。Singh等<sup>[21]</sup>认为土壤中的初始含水量在达到临界值(31%)之前与土壤临界剪切力间呈指数正相关关系。Rose等<sup>[22]</sup>将水流剪切应力作为地表径流的侵蚀力指标,细沟侵蚀开始的剪切应力即为农地细沟侵蚀发生的临界值。张乐涛等<sup>[23]</sup>研究表明,当土壤临界剪切力的值为12.80 Pa时,工程堆积体的陡坡坡面发生细沟侵蚀。在土力学领域,土壤临界剪切力的相关研究很少,本研究通过试验设计探索在实际梯田修筑过程中,干湿交替作用对田坎土壤临界剪切的影响。

梯田田坎修筑后,经历自然地干湿交替作用,其力学性质和抗蚀性能均发生变化。土壤临界剪切力能够有效反映土壤的稳定性,而干湿交替过程对临界剪切力产生何种影响,有待试验进一步探究。土壤黏聚力用于描述土壤颗粒之间相互吸引的作用,而土壤临界剪切力是土壤遭到临界破坏所对应的剪切力。土壤黏聚力与土壤临界剪切力都受到土壤颗粒之间吸引力的影响,具有相似的决定因子,但二者之间是否存在联系,有待进一步论证。因此,本研究通过探究干湿交替过程对土壤临界剪切力的影响,分析土壤黏聚力与临界剪切力二者之间的关系,从而为土壤侵蚀研究、土地资源保护以及坡耕地梯田田坎的修筑等水土保持工程实践提供理论依据和技术参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区域位于陕西省中部关中地区,该区域属温带大陆性季风气候区,年平均气温10~12℃,年降雨量500~700 mm,其中6—9月份占60%,多为短时暴雨,冬春降水较少,春旱、伏旱频繁,年均日照数2196 h,无霜期210 d。试验土壤选用关中地区具有代表性的杨凌壤土,土壤采自坡耕地耕层以下20~30 cm。

壤土作为关中地区主要的耕作土壤,是通过长

期耕作和施肥熟化而形成的土壤类型,其分布面积广阔,具有较高的肥力,非常适宜耕作,土壤呈棕灰色,对于关中地区农业发展有着非常重要的意义,因此试验选取壤土作为研究对象,探究其经过干湿交替作用后土壤的相关特性,对于促进当地农业经济的发展、保护当地农业生态环境具有极其重要的意义。土壤的相关理化指标见表1。

### 1.2 研究方法

将试验用土取回至实验室后,进行晾晒和碾碎处理,然后将处理完成的土样过0.5 mm筛,除去石块等杂物,加水配置成质量含水率为18%的土样,静置6 h,待土样中的水分分布均匀后进行下一步试验处理。

1.2.1 土样制备及处理 由于试验土样是模拟自然界梯田田坎,对试验土壤进行一定的击实处理,增加其密实度,与自然界中的田埂密实度更为接近。

#### (1) 击实处理

试验中为方便取样,将过筛的土壤装填至长2 m,宽1 m的矩形钢槽中,装填厚度为10 cm,为保证试验的准确性,击实试验时采取统一标准分层击实,每次击实土壤时击实柄从同一高度落下并击实10次,每装填5 cm整体进行击实,直至装填高度达到10 cm即认为装填完成。经测定土壤的体积质量为 $(1.55\pm 0.03)\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。装填完毕后,用带有编号的体积为200 cm<sup>3</sup>(规格 $h=5.3\text{ cm}$ ,内径 $r=7\text{ cm}$ )的标准环刀在钢槽中依次取出土样,然后用平口刀对土样进行修平,以备下一步处理。

#### (2) 干湿交替处理

自然条件下,梯田田坎土壤频繁地经历着干湿交替的循环作用,包括湿润和干燥两个过程。由于不同的降雨量导致土壤的湿化程度不同,进而影响着土壤理化性质,而本试验是室内模拟干湿交替作用,难以模拟自然条件下不同降雨量对应的土壤含水量,因此,为了消除不同含水量对土壤性质的影响,试验采取统一湿化标准,将饱和含水率定为试验土壤的湿化控制标准。根据采样地土体含水率的测试结果,确定干燥状态下的土壤含水率为8%,

表1 试验用土理化性质

Tab. 1 Physical and chemical properties of soil for test

土壤类型	土壤孔隙度/%	有机质/(g·kg <sup>-1</sup> )	pH	颗粒含量/%			体积质量/(g·cm <sup>-3</sup> )
				<0.002	0.002~0.02	0.02~2.0	
壤土	45.76~53.16	13.08~17.36	8.29~8.40	28.00~28.40	41.30~42.30	29.3~30.70	1.30

结合已有研究<sup>[6,9,24]</sup>和本试验的试验设计,设置如下干湿交替处理:将装有土样的环刀盖上有孔的环刀下盖,放入事先准备好的加有适量纯水的托盘中,水层高度始终高于土壤下表面2 cm,使土壤水分完全饱和,湿化处理持续8 h。经过湿化处理后,为使土壤中的水分分布均匀,待重力水排出之后,采用薄膜密封,静置8 h,然后放入恒温50 ℃的烘箱中干燥脱水,在土样烘干过程中随时取出称重,计算土样的含水率,待含水率小于8%时停止烘干。以上的浸水饱和直至烘干至8%为一个干湿交替过程。本次实验设计7次干湿交替循环,设置3组重复,1组空白对照(0次干湿交替处理),共需要24组土样。

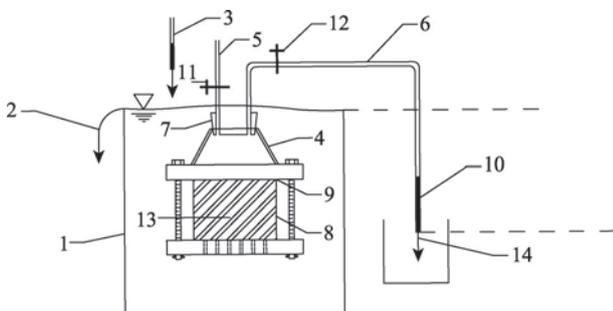
### 1.2.2 试验相关参数的测定

(1) 渗透系数 渗透系数表示流体通过孔隙骨架的难易程度,是反映土体渗透能力的一个综合指标,其大小主要取决于土体颗粒的形状、大小、不均匀系数和水的温度等。可通过室内试验进行测定。计算公式如下:

$$k = \frac{Q}{AJ} \quad (1)$$

式中: $k$ 为渗透系数( $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ); $Q$ 为渗流流量( $\text{cm}^3\cdot\text{s}^{-1}$ ); $A$ 为土壤断面面积( $\text{cm}^2$ ); $J$ 为水力坡降。

(2) 土壤临界剪切力 试验参照Nouwakpo<sup>[25]</sup>关于流化床的试验研究,基于该研究制作了论文中实验装置,该装置获批国家发明专利,实验原理符合力学知识,具有一定可靠性。土壤临界剪切力测定装置见图1,装置包括水箱、土样固定装置、出水装置等。将经过干湿交替处理的土壤放入测定临界剪切力的装置中,使其吸水饱和,然后在管道中充



注:1表示水箱;2表示溢流口;3表示注水管;4表示有机玻璃锥形体;5表示第一排气管;6表示第二排水管;7表示橡皮塞;8表示环刀;9表示密封圈;10表示出水装置;11表示第一阀门;12表示第二阀门;13表示测试土样;14表示出水口。

图1 临界剪切力实验装置

Fig. 1 Experimental apparatus for critical shear force

水,形成连通状态,逐渐降低出水口高度,利用出水口与水箱内水面的压力差形成负压作用在土样上,通过收集一定时间段内的出水口流量,即可确定出该水头下土样渗流流量,水头差与土样高度的比值即为单位高度土样上的水力坡降(单位高度土体水头差)。根据达西定律,水力坡降与流量之间呈现线性关系。但当渗透水流作用在土粒上的力大于土壤黏结力时,土壤颗粒将呈现悬浮状态(流化状态),渗透水流开始变浑浊,水力坡降与流量之间不再呈现线性关系,此时土样对应的状态即为土壤黏结力被克服的流化状态,由此即可确定出土壤临界剪切力(临界黏聚力)。试验通过结合土壤力学以及侵蚀力学的计算过程,进一步得出临界剪切力的计算过程。

(a) 单位高度土体的水头差

单位高度土体的水头差按下式计算:

$$\Delta P = \frac{9.8 \cdot \Delta h}{0.053} \quad (2)$$

式中: $\Delta P$ 为单位高度土体的水头差( $\text{Pa}\cdot\text{m}^{-1}$ ); $\Delta h$ 为出水口与水箱水面之间的水头差( $\text{Pa}\cdot\text{m}^{-1}$ );0.053 m为环刀的高度。

(b) 土壤临界剪切力

土壤临界剪切力的计算公式为:

$$c_0 = \Delta P - (\gamma_s - \gamma_w) \quad (3)$$

式中: $c_0$ 为土壤临界剪切力(kPa); $\gamma_s$ 为土壤的重度( $\text{N}\cdot\text{m}^{-3}$ ); $\gamma_w$ 为水的重度( $\text{N}\cdot\text{m}^{-3}$ )。

(3) 土壤黏聚力

土壤黏聚力由室内剪切试验和现场试验测定<sup>[26]</sup>,测定的主要指标如下:

(a) 剪切位移按下式计算:

$$\Delta l = \Delta l' n' - R \quad (4)$$

式中: $\Delta l$ 为剪切位移(mm); $\Delta l'$ 为直剪仪手轮转一圈的位移量(mm); $n'$ 为手轮转动的圈数; $R$ 为测力计读数(mm)。

(b) 剪应力计算公式如下:

$$\tau = CR/A_0 - 10 \quad (5)$$

式中: $\tau$ 为试样的剪应力(kPa); $C$ 为测力计率定系数 [ $\text{N}\cdot(0.01\text{mm})^{-1}$ ]; $R$ 为测力计读数; $A_0$ 为试样断面面积( $\text{cm}^2$ )。

以剪切位移 $\Delta l$ 为横坐标,剪应力 $\tau$ 为纵坐标,按比例绘制 $\Delta l-\tau$ 曲线,曲线上的峰值点或者稳定点作为抗剪强度 $\tau_c$ ;若无明显峰值,取剪切位移为4 cm对应的剪应力作为 $\tau_c$ 。以垂直压力 $\sigma$ 为横坐标,抗剪

强度  $\tau_f$  为纵坐标, 绘制  $\sigma-\tau_f$  曲线, 曲线与横坐标的夹角称为内摩擦角 ( $\varphi$ ), 曲线与纵坐标的截距  $c$  为黏聚力 (kPa)。

### 1.3 数据处理与分析

本研究采用 Excel 2010、Origin 2018、SPSS 23.0 进行数据处理与分析、制图。试验所得重复数据做均值处理后进行相关误差分析, 误差分析结果以误

差棒的形式标注在图表中。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同干湿交替土壤渗透变化规律

土壤渗流流量与单位高度土体水头差之间的关系如图2所示, 从图中可以看出, 经过不同干湿交替次数处理后, 土壤渗流流量与单位高度土体水头

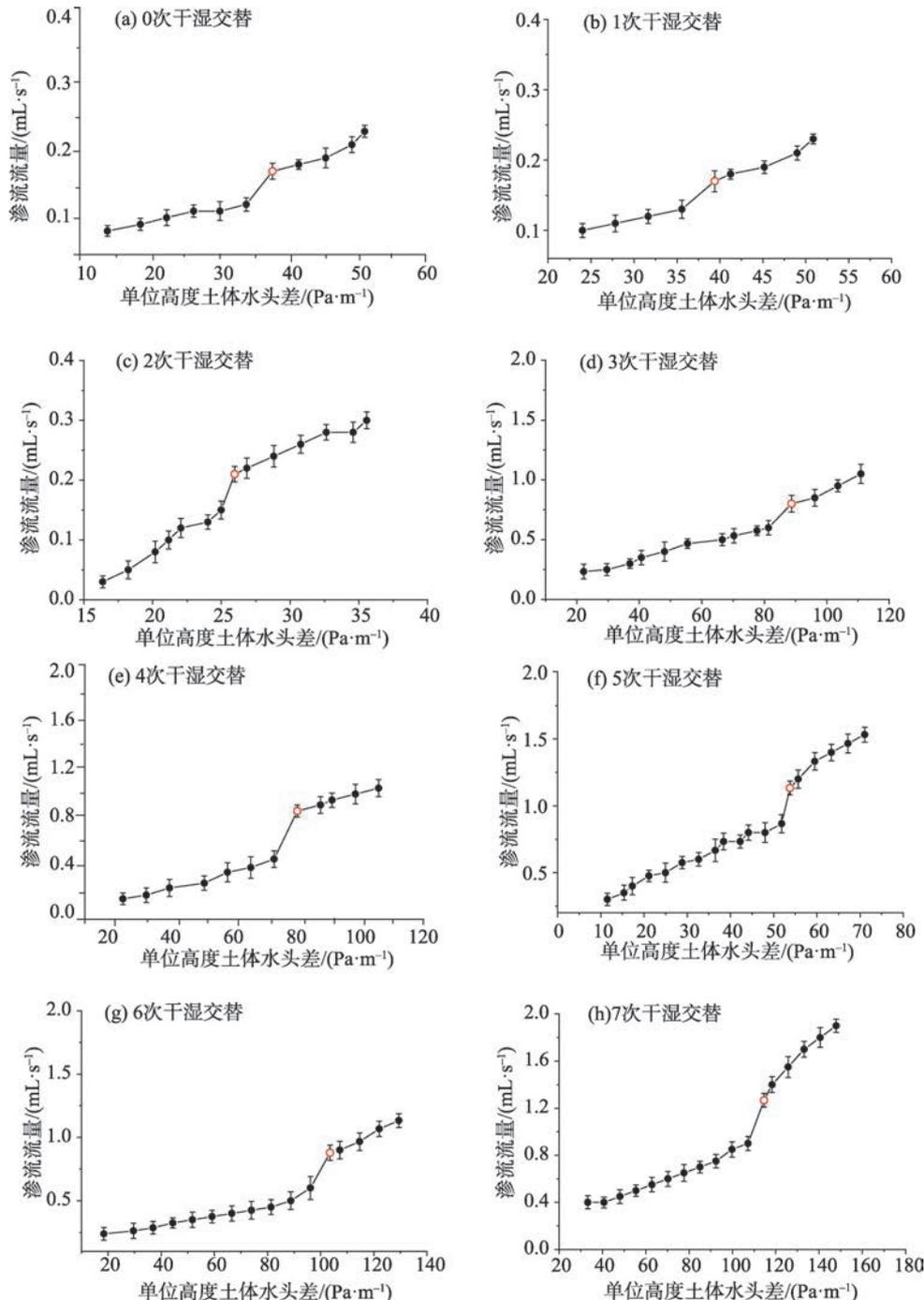


图2 干湿交替0~7次后土壤单位高度土体水头差与渗流流量之间的关系

Fig. 2 Relationship between water head difference per unit height of soil and seepage flow after 0~7 wetting-drying cycles

差成正相关关系,在土壤达到流化点之前,土壤渗流流量随着单位高度土体水头差的增加而增大;超过流化点后,土壤渗流流量出现跳跃点,随后逐渐增大。

在水头差的作用下水分通过土壤孔隙从土壤下表面逐步渗透至土壤上表面,形成出流,并随着水头差的逐渐增大,渗流速率逐渐增加,土壤内部逐渐出现裂隙,随后裂隙进一步加大、加深,直至土体结构破坏。从出水口流出的水体,经历了由“清澈到浑浊”的过程,水体出现浑浊时,即为土壤流化点,此时的单位高度土体水头差对应的土壤剪切力为土壤临界剪切力。

随着干湿交替次数的增加,单位高度土体水头差整体呈现增大趋势,局部区域有波动(图3)。0次和经过1次干湿交替处理的土壤流化点对应的水头差分别为  $37.44 \text{ Pa}\cdot\text{m}^{-1}$  和  $39.40 \text{ Pa}\cdot\text{m}^{-1}$ ;经过2次干湿处理的土壤单位高度土体水头差减小至  $25.98 \text{ Pa}\cdot\text{m}^{-1}$ ;3~5次干湿交替处理后,土壤单位高度土体水头差呈现逐渐降低的趋势,由  $88.79 \text{ Pa}\cdot\text{m}^{-1}$ ,降至  $53.80 \text{ Pa}\cdot\text{m}^{-1}$ ;6次和7次干湿交替后土壤单位高度土体水头差逐渐增大,并在7次达到最大值  $114.66 \text{ Pa}\cdot\text{m}^{-1}$ 。

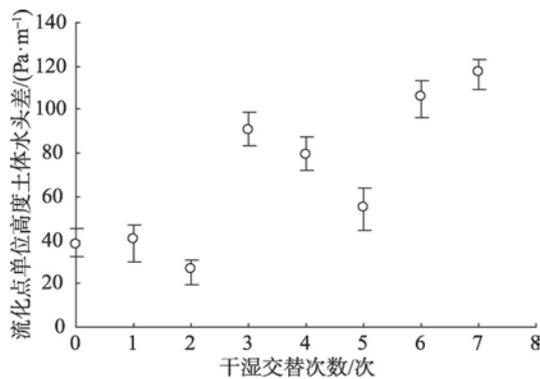


图3 土壤单位高度土体水头差与干湿交替次数之间的关系

Fig. 3 Relationship between head difference of soil unit height and dry-wet alternation times

通过分析干湿交替次数与渗透系数之间的关系(图4),发现随着干湿交替次数的增加,土壤的渗透系数逐渐增大,其中0~3次干湿循环后,土壤的渗透系数增幅较小,4~6次干湿循环后增幅较大,6次后增幅减缓趋于稳定。随着干湿循环次数的增加,土壤的渗透能力逐渐增强,并在第7次干湿交替后土壤的渗透系数达到最大值  $0.22 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 。这是由于

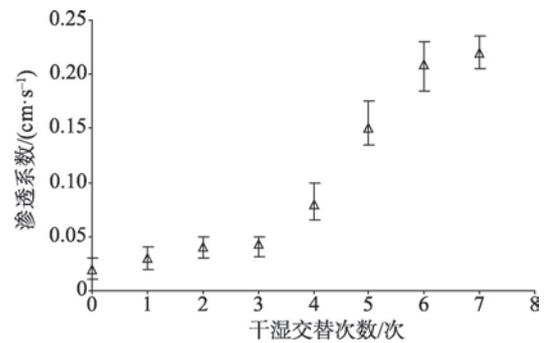


图4 渗透系数与干湿交替次数的关系

Fig. 4 The relationship between permeability coefficient and dry-wet alternation times

土壤的干湿循环作用,促使土体细小渗流通道进一步扩展,更容易形成连通渗流通道<sup>[27]</sup>,因此土壤渗透系数随着干湿交替次数的增加逐渐增大,6次干湿交替作用后,趋于稳定。

## 2.2 干湿交替次数与土壤临界剪切力之间的关系

从图5中可以看出,土壤临界剪切力与土壤的干湿交替次数之间的关系较为复杂。未经过干湿交替处理的土壤临界剪切力为  $0.19 \text{ kPa}$ ;经过1~3次干湿交替过程,土壤临界剪切力在  $0.23\sim 0.41 \text{ kPa}$  之间浮动;而在第3次干湿交替后,土壤的临界剪切力呈小幅增加,然后趋于稳定。

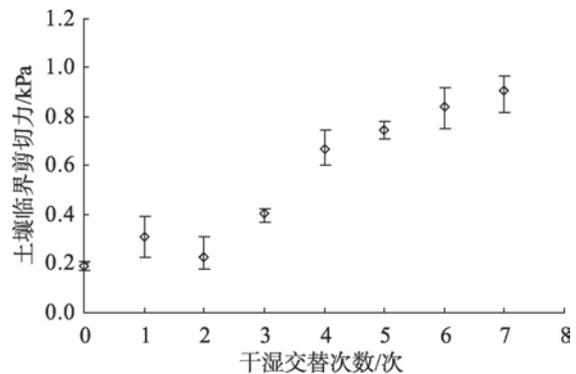


图5 土壤临界剪切力与干湿交替次数的关系

Fig. 5 The relationship between soil critical shear force and dry-wet alternation times

通过分析土壤临界剪切力随干湿循环次数变化的趋势可以看出,土壤在经过较少的干湿循环次数时(1~2次),其抵抗水体破坏的作用变化不明显,经过多次干湿循环后,土壤的临界剪切力有一定程度的增加,说明土壤在经过数次干湿循环后,土壤颗粒逐渐聚集,颗粒之间的胶结作用有一定程度的增强,其抗剪切能力有一定程度的提升。

随着干湿交替次数的增多,土壤在前3次干湿交替作用下,土壤的临界剪切力呈波动变化,规律性不强,而3次干湿交替作用后,土壤临界剪切力呈增加趋势,说明前3次干湿交替作用对土壤的内部结构影响较小,土壤结构尚未发生较大的变化,土体总体稳定;而3次干湿交替作用后,土壤颗粒开始重组,土体内部结构发生较大变化,土体稳定性发生转变,随着干湿交替次数的再次增加,土壤颗粒重组逐渐完成,6次干湿交替作用后,土体内部结构基本稳定,重新达到了一个较为稳定的状态,土壤临界剪切力逐渐趋于稳定,说明干湿交替次数对土壤临界剪切力有一定的影响,低频次(0~3次)对土壤临界剪切力影响较小,高频次(4~6次)影响相对较大,在6次后土壤的临界剪切力趋于稳定。

由于梯田田坎土壤具有一定的密实度,而通过试验结果可以发现,具有一定密实度的土壤在经历降雨和干燥这一干湿交替作用后,低频次作用下临界剪切力变化不显著,高频次作用下临界剪切力在有一定程度的提升后趋于稳定,因此,在自然状态下,梯田田坎经过干湿交替作用后,其抗剪切破坏的能力有一定程度的提升,梯田稳定性得到增强,但是这种提升是有限的,在一定次数作用后逐渐稳定。

不同干湿交替次数可以在大尺度下表征不同的雨季次数,在梯田田坎修筑的初期,田坎的抗剪切能力相对较差,大雨过后极易发生垮塌现象,因此,需要对其进行及时维护,以确保田坎的质量。而在经过多个雨季后,田坎的抗剪切能力有一定程度的提升,发生垮塌现象的频次相对减少,需要定期进行观测,并对出现垮塌的部分进行及时修补。试验结果可以为梯田田坎的修筑和保护提供理论依据。

### 2.3 土壤临界剪切力与土壤黏聚力之间的关系

通过图6可以看出,土壤临界剪切力与已有试验测得的土壤黏聚力之间整体呈现正相关关系( $R^2=0.67$ )。土壤临界剪切力值包含了所有与土体流化

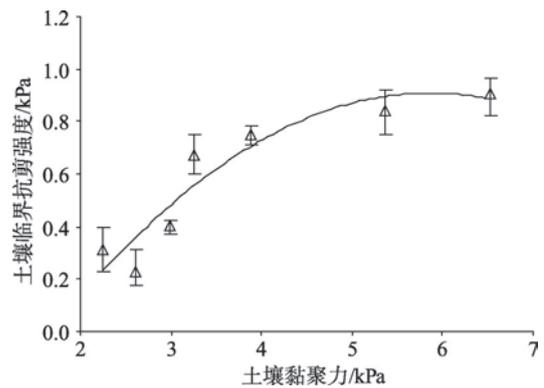


图6 土壤临界剪切力与土壤黏聚力的关系

Fig. 6 The relationship between soil critical shear force and soil cohesion

(或分离颗粒)力相反的力,包括胶结作用或颗粒间的吸引力、颗粒之间的连锁作用和颗粒间的摩擦力,其不同于传统的土壤力学对黏聚力的定义,后者只包括颗粒间的吸引力<sup>[28]</sup>。土壤临界剪切力与黏聚力之间整体呈现线性关系,二者虽有着不同的含义,但均可作为土壤抗侵蚀的指标来描述土壤抵抗破坏的能力。

从拟合曲线可以看出,随着黏聚力的增加,临界剪切力先小幅度波动变化后呈现递增的趋势,然后趋于稳定。因此,土壤临界剪切力和土壤黏聚力二者,均能够在一定程度上反映土壤颗粒之间胶结作用的强弱,可以作为衡量土壤能够承受临界破坏力的指标值。

### 2.4 干湿交替变化对土壤临界剪切力的影响显著性分析

利用SPSS 23.0对不同干湿变化(1~7次),对临界剪切力进行单因素方差分析,计算结果见表2。

由计算结果 Sig. 小于0.05,说明不同干湿交替水平对土壤临界剪切力的影响是显著的,干湿交替作用使得土壤颗粒重组,土壤的内在性质发生改变,使得土壤临界剪切力发生变化,随着干湿交替次数的增加,临界剪切力在低频次(0~3次)干湿交

表2 干湿变化对临界剪切力单因素方差分析

Tab. 2 Single factor analysis of variance of critical shear stress with dry and wet changes

抗剪强度指标	方差来源	离差平方和	自由度	平均平方	F值	Sig.
土壤临界剪切力	组间	123.80	6	20.63	3.71	0.02
	组内	77.85	14	5.56	-	-
	总差异	201.65	20	-	-	-

注:显著水平取0.05;Sig.为统计显著性值。

替作用后,有小幅波动,经过4~7次干湿交替作用后,临界剪切力小幅增加并趋于稳定,通过显著性分析得出,干湿交替次数对土壤的剪切力有一定程度的影响。

本试验的研究背景是模拟梯田田坎的临界剪切力在经过不同次数干湿交替作用后的变化规律,为梯田田坎抗侵蚀能力的增加还是削弱提供参考,进而为梯田修筑及维护提供理论依据。上述结论表明,干湿交替的次数对于梯田田坎的临界剪切力有一定程度的影响,在自然条件下土壤经过多次干湿交替作用后,土壤的临界剪切力值会出现一定程

度的增加,在以临界剪切力作为参数评定土壤的抗剪切能力的前提下,随着干湿交替次数的增加土壤抗剪切能力有一定程度的提升。

### 2.5 不同干湿交替循环下土壤临界剪切力与黏聚力的相关性分析

对不同干湿交替循环的土壤临界剪切力和黏聚力进行相关性分析,结果见表3。通过对 $c_0$ 和 $c$ 进行相关性的分析,得出皮尔逊相关性系数为0.63,即认为土壤临界剪切力与黏聚力之间具有较强的相关性,显著性(双尾)小于0.05,即土壤临界剪切力与黏聚力之间显著性相关。

表3 土壤临界剪切力与黏聚力相关性分析表

Tab. 3 Correlation analysis table of soil critical shear force and cohesion

名称		土壤临界剪切力	土壤黏聚力	干湿交替次数
土壤临界剪切力	皮尔逊相关性	1	0.63*	0.83**
	显著性(双尾)	-	0.00*	0.00
	个案数	24	24	24
土壤黏聚力	皮尔逊相关性	0.63*	1	0.77**
	显著性(双尾)	0.00	-	0.00
	个案数	24	24	24
干湿交替次数	皮尔逊相关性	0.83*	0.77*	1
	显著性(双尾)	0.00	0.00	-
	个案数	24	24	24

注:\*代表在0.05水平(双侧)上显著相关。

## 3 讨论

目前,关于干湿交替过程对于土壤临界剪切力影响的相关研究较少,二者间的关系尚未明确。刘宏泰等<sup>[29]</sup>、张国栋等<sup>[27]</sup>认为随着干湿循环次数的增加渗透系数逐渐增大,这与本研究结果一致。土壤理化性质不同,其对土壤临界剪切力影响也不同,影响因子包括容重和土壤含水率等。王健等<sup>[30]</sup>研究发现,随着干湿交替次数的增加,土壤容重呈现缓慢增加的趋势。潘欣等<sup>[31]</sup>发现,土壤容重越大<sup>[19]</sup>,土壤抵抗剪切破坏能力越强,土壤含水率则与土壤临界剪切力成正比。Léonard等<sup>[32]</sup>总结前人的研究成果得出,土壤的抗剪强度与临界剪切力在一定范围内成线性关系。本研究中土壤临界剪切力随着干湿交替次数的增加,前3次规律性不强,4~7次呈小幅增加,然后趋于稳定,结论与以上学者的研究结论相符。研究发现,在低频次(1~3次)干湿交替过程后,土壤临界剪切力值没有明显的规律

性,而在高频次(4~7次)干湿交替处理后,临界剪切力有一定程度的增加。低频次下土壤剪切力变化无规律,可能是由于土壤类型决定了其具有固定的属性,经过干湿交替处理后其内部性质遭到不同程度的破坏,造成无规律性。

试验通过室内模拟干湿交替作用,探索土壤在经过干湿循环后,土壤渗透系数、土壤临界剪切力等的变化规律,以及构建土壤黏聚力与临界剪切力之间的联系,反映自然条件下,梯田田坎在经过数次干湿循环后其在稳定性、强度方面的变化。土壤黏聚力是反映土壤抗剪强度的指标之一,土壤临界剪切力与黏聚力之间存在何种联系,能否直接反映土壤抗剪强度是本研究的一个重点,郁耀闯等<sup>[33]</sup>在对农耕地土壤的相关研究中发现,土壤临界剪切力与土壤黏聚力呈现正相关的关系,本研究的结果也进一步印证了这一观点,同时建立了二者之间的联系。由于目前工程实践中,关于土壤临界剪切力的探索很少,相关资料大都从水力侵蚀角度出发进行

研究,本研究通过试验设计,探寻干湿交替作用影响土壤的颗粒重新组合,进而影响土壤的临界剪切力,从而为梯田田坎的修筑和维护提供依据,能够更好地服务于农业生产实践。

试验的优点在于实验方法新颖,通过测定土壤的流化点来确定土壤临界剪切力,并建立其与土壤黏聚力之间的关系,能够为构建土力学与水土保持研究领域之间的联系提供基础;试验装置简单易造,费用较低,能够快速、准确地测定土壤的临界剪切力,节约试验用时。不足之处在于试验用土较为单一,由于不同的土壤类型,其性质有所差异,对土壤临界剪切力的影响不同,因此,对于不同类型土壤临界剪切力的变化规律具体有何差异,有待后续试验进一步探究。

## 4 结论

本研究通过对关中地区壤土进行室内模拟干湿交替实验,测定土壤的临界剪切力,得出如下主要结论:

(1) 土壤经过不同频次干湿交替处理后,其单位高度土体水头差与渗流流速呈现正相关关系,且流速跳跃点(土体流化点)对应的土壤剪切力为土壤临界剪切力,流化点对应的单位高度土体水头差范围在 $37.44\sim 114.66\text{ Pa}\cdot\text{m}^{-1}$ ;土壤的渗透系数与干湿交替次数呈正相关关系。

(2) 低频次干湿交替次数对土壤临界剪切力的影响无规律,高频次干湿交替次数作用下,土壤临界剪切力呈小幅增加,并趋于稳定;经过显著性分析得出,干湿交替次数对土壤临界剪切力有一定程度的影响。

(3) 经过相关性分析,土壤黏聚力与土壤临界剪切力二者相关性系数为0.82,具有较强的相关性,因此,土壤临界剪切力可以作为衡量土壤抗剪切破坏能力重要指标应用于农业生产及水土保持工程实践。

## 参考文献(References):

[1] 王丽,王力,王全九.不同坡度坡耕地土壤氮磷的流失与迁移过程[J].水土保持学报,2015,29(2):69-75. [Wang Li, Wang Li, Wang Quanjiu. The processes of nitrogen and phosphorus loss and migration in slope cropland under different slopes[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(2): 69-75. ]

[2] 杨娟,李光录,魏舟,等.陕南土坎梯田田坎强度试验研究[J].水土保持研究,2016,26(1):360-363. [Yang Juan, Li Guanglu, Wei Zhou, et al. Experimental study on strength of terraced field ridge in Southern Shaanxi Province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016, 23(1): 360-363. ]

[3] 段赫,刘目兴,易军,等.干湿交替条件下稻田土壤裂隙开闭规律[J].水土保持研究,2020,27(2):370-376. [Duan He, Liu Muxing, Yi Jun, et al. Propagation and closure law of cracks in the paddy soil during drying-wetting cycle[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(2): 370-376. ]

[4] 刘义花,王振宇,刘彩虹,等.气候变暖背景下青海省春季干旱时空变化[J].干旱区研究,2020,37(2):282-290. [Liu Yihua, Wang Zhenyu, Liu Caihong, et al. Research on the variation characteristics of spring drought in the Qinghai Province under the background of climate warming[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(2): 282-290. ]

[5] 曹丽君,孙慧兰,兰小丽,等.新疆天山极端干湿事件时空演变特征[J].干旱区研究,2021,38(1):188-197. [Cao Lijun, Sun Hui-lan, Lan Xiaoli, et al. Spatio-temporal evolution of the extreme dry and wet events in Tianshan Mountains, Xinjiang, China[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(1): 188-197. ]

[6] 杨和平,肖夺.干湿循环效应对膨胀土抗剪强度的影响[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2005,2(2):1-5,12. [Yang Heping, Xiao Duo. Performance decay of modified asp stored at high temperature[J]. Journal of Changsha University of Science and Technology (Natural Science), 2005, 2(2): 1-5, 12. ]

[7] 吕海波,曾召田,赵艳林,等.膨胀土强度干湿循环试验研究[J].岩土力学,2009,30(12):3797-3802. [Lyu Haiibo, Zeng Shaotian, Zhao Yanlin, et al. Experimental studies of strength of expansive soil in drying and wetting cycle[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(12): 3797-3802. ]

[8] 陈翔,张福海,张晓阳,等.干湿循环效应对纤维膨胀土抗剪强度室内试验研究[J].科学技术与工程,2015,15(19):175-179. [Chen Xiang, Zhang Haifu, Zhang Xiaoyang, et al. Influence of wet-dry cycles on the shear strength of expansive soil modified by fiber[J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15(19): 175-179. ]

[9] 罗冲,殷坤龙,周春梅,等.膨胀土在不同约束状态下的试验研究[J].岩土力学,2007,28(3):635-638. [Luo Chong, Yin Kunlong, Zhou Chunmei, et al. Testing study on expansive soil in different restrained conditions[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(3): 635-638. ]

[10] 徐丹,唐朝生,冷挺,等.干湿循环对非饱和膨胀土抗剪强度影响的试验研究[J].地学前缘,2018,25(1):286-296. [Xu Dan, Tang Zhaosheng, Leng Ting, et al. Shear strength of unsaturated expansive soil during wetting-drying cycles[J]. Earth Science Frontiers, 2018, 25(1): 286-296. ]

[11] 杨和平,王兴正,肖杰.干湿循环效应对南宁外环膨胀土抗剪强度的影响[J].岩土工程学报,2014,36(5):949-954. [Yang Heping, Wang Xingzheng, Xiao Jie. Spatio-temporal evolution of

- the extreme dry and wet events in Tianshan Mountains, Xinjiang, China[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(5): 949-954. ]
- [12] 吴珺华, 袁俊平. 干湿循环下膨胀土现场大型剪切试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增刊): 103-107. [Wu Junhua, Yuan Junping. Field tests on expansive soil during wetting-drying cycles using large shear apparatus[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(Suppl. ): 103-107. ]
- [13] 申紫雁, 刘昌义, 胡夏嵩, 等. 黄河源区高寒草地不同深度土壤理化性质与抗剪强度关系研究[J]. 干旱区研究, 2021, 38(2): 392-401. [Shen Ziyuan, Liu Changyi, Hu Xiasong, et al. Relationships between the physical and chemical properties of soil and the shear strength of root soil composite systems at different soil depths in alpine grass-land in the source region of the Yellow River[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(2): 392-401. ]
- [14] Gilley J E, Elliot W J, Laffen 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.
- [15] Stroosnijder L. Measurement of erosion: Is it possible?[J]. Catena, 2005, 64(2-3): 162-173.
- [16] 张晴雯, 雷廷武, 潘英华, 等. 细沟侵蚀可蚀性参数及土壤临界抗剪应力的有理(实验)求解方法[J]. 中国科学院研究生院学报, 2004, 21(4): 468-475. [Zhang Qingwen, Lei Tingwu, Pan Yinghua, et al. Rational computational method of soil erodibility and critical shear stress from experimental data[J]. Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 2004, 21(4): 468-475. ]
- [17] 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 ASABE, 1989, 32(5):1587-1593.
- [18] Elliot W J. Compendium of soil Erodibility Data from WEPP Cropland Soil Field Erodibility Experiments 1987 & 88[M]. West Lafayette: Agricultural Research Service, 1990.
- [19] 李云鹏, 王云琦, 王玉杰, 等. 重庆缙云山不同林地土壤剪切破坏特性及影响因素研究[J]. 土壤通报, 2013, 44(5): 1074-1080. [Li Yunpeng, Wang Yunqi, Wang Yujie, et al. Characteristics of soil shear failure of different forests and its affecting factors in Jinyun Mountain, Chongqing City[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2013, 44(5): 1074-1080. ]
- [20] 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切应力的实验研究[J]. 农业工程学报, 2000, 16(1): 26-30. [Lei Tingwu, Nearing M A. Laboratory experiments of rill initiation and critical shear stress in loose soil material[J]. Transactions of the CSAE, 2000, 16(1): 26-30. ]
- [21] Singh H V, Thompon A M. Effect of antecedent soil moisture content on soil critical shear stress in agricultural watersheds[J]. Geoderma, 2016, 262: 165-173.
- [22] Rose C W, Williams J R, Sander G C, et al. A mathematical model of soil erosion and deposition processes: II. application to data from an arid zone catchment[J]. Soil Science Society of America Journal, 1983, 47(5): 996-1000.
- [23] 张乐涛, 高照良, 田红卫, 等. 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. [Zhang Letao, Gao Zhaolaing, Tian Hongwei, et al. Hydrodynamic process of soil erosion in steep slope of engineering accumulation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(24): 94-102. ]
- [24] 马璠, 王健, 张鹏辉, 等. 干湿交替处理对土壤抗冲性的影响试验研究[J]. 中国农学通报, 2014, 30(35): 178-184. [Ma Fan, Wang Jian, Zhang Penghui, et al. Effects of dry-wet alternation treatment on anti-scourability of Soil[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, 30(35): 178-184. ]
- [25] Nouwakpo S K, Huang Chihua, 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.
- [26] 钱德玲. 土力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009: 145-146. [Qian Deling. Soil Mechanics[M]. Beijing: China Building Industry Press, 2009: 145-146. ]
- [27] 张国栋, 邓全胜, 李泯蒂, 等. 干湿循环对水库滑坡渗透系数影响的试验研究[J]. 人民长江, 2016, 44(22): 79-82. [Zhang Guodong, Deng Quansheng, Li Mindi, et al. Study on filling construction technique of dam blasted material[J]. Yangtze River, 2016, 44(22): 79-82. ]
- [28] Nouwakpo S K, Huang C H. A fluidized bed technique for estimating soil critical shear stress[J]. Soil Science Society of America Journal, 2012, 76(4): 1192-1196.
- [29] 刘宏泰, 张爱军, 段涛, 等. 干湿循环对重塑黄土强度和渗透性的影响[J]. 水利水运工程学报, 2010, 32(4): 38-42. [Liu Hongtai, Zhang Aijun, Duan Tao, et al. The influence of alternate dry-wet on the strength and permeability of remolded loess[J]. Hydro Science and Engineering, 2010, 32(4): 38-42. ]
- [30] 王健, 马璠, 张鹏辉, 等. 干湿交替对黄土崩解速度的影响[J]. 土壤学报, 2015, 52(6): 1273-1279. [Wang Jian, Ma Fan, Zhang Penghui, et al. Effect of wet-dry alternation on loess disintegration rate[J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, 52(6): 1273-1279. ]
- [31] 潘欣, 王云琦, 高勇, 等. 石匣小流域整地措施对土壤剪切性质的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(6): 314-318. [Pan Xin, Wang Yunqi, Gao Yong, et al. Effect of engineering measures on soil shear characteristics in Shixia Small Watershed[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(6): 314-318. ]
- [32] Léonard J, Richard G. Estimation of runoff critical shear stress for soil erosion from soil shear strength[J]. Catena, 2004, 57(3): 233-249.
- [33] 郁耀闯, 王长燕. 黄土丘陵区典型农耕地土壤临界剪切力季节变化[J]. 中国农业科学, 2016, 49(21): 4149-4159. [Yu Yaochuang, Wang Changyan. Seasonal variations of soil critical shear stress in typical farmlands in the Hilly Region of Loess Plateau[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(21): 4149-4159. ]

## Effect of dry-wet alternation on critical shear stress of Lou Soil in the Guanzhong area

SONG Pengshuai<sup>1</sup>, WANG Jian<sup>2</sup>, CHEN Lin<sup>1</sup>, CAO Bozhao<sup>2</sup>

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China;

2. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China)

**Abstract:** We explored shear failure resistance mechanisms of terraced fields in mountainous and hilly areas under natural forces. We measured critical shear force of soil using laboratory tests, analyzed the effect of dry-wet alternations on critical shear force of soil, and determined the relationship between critical shear force of soil and soil cohesion following different dry-wet alternation treatments. The results showed (1) during 1–7 dry-wet alternations, the water head difference per unit soil mass was positively correlated with seepage velocity and the soil permeability coefficient increased exponentially with increasing number of dry-wet alternations. (2) With the increasing number of dry-wet alternations, the critical shear force was not significantly affected by 1–3 dry-wet alternations, but increased slightly and stabilized after 4–7 dry-wet alternations. The results show that different dry-wet alternation levels can significantly affect critical shear soil stress and highlights a positive correlation. (3) With increasing critical shear stress, soil cohesion gradually increased, which was significantly correlated. This experiment includes compaction test, dry-wet alternation test and critical shear test. Firstly, the experimental soil was compacted, and then the soil that reached the volume mass set in the experiment was treated with different times (0–7 times) of dry-wet alternation. The critical shear force experiment was carried out for the soil treated with different dry-wet alternation times. The soil head difference per unit height, the permeability coefficient and the critical shear force of the soil were measured, and the relationship between the critical shear force and the soil cohesion was analyzed. The results of this study provide theoretical support for relevant experimental research and engineering practices of terraced fields.

**Keywords:** dry-wet alternation; soil critical shear stress; cohesion; coefficient of soil infiltration