

干湿交替下干热河谷冲沟不同土层的抗侵蚀性研究

张素¹ 熊东红¹ 张宝军¹ 杨丹¹ 校亮¹ 方海东²

(1. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所山地灾害与地表过程重点实验室, 成都 610041;
2. 云南省农业科学院热区生态农业研究所, 元谋 651300)

摘要: 为研究“旱季高温干燥、雨季降水集中且多暴雨”的干湿交替作用对冲沟形成过程的影响,选择干热河谷区典型发育的土层剖面(由上至下依次为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ、Ⅵ层),采用干湿交替原位试验,选取土体抗剪强度、抗冲系数以及崩解性指标,分析不同土层抗侵蚀的特性及差异。研究表明:各土层抗剪强度差异明显,其中Ⅳ层和Ⅴ层抗剪强度较大;内摩擦角随干湿交替次数增多呈波动不定趋势而粘聚力则呈显著负相关关系;各土层抗冲性差异明显,其中Ⅲ层和Ⅵ层抗冲性较小;抗冲性随干湿交替次数增多而增大、剥蚀率则随干湿交替次数增多呈波动减小趋势;各土层平均崩解速度与干湿交替次数呈显著线性相关,Ⅲ层和Ⅵ层较大、Ⅳ层和Ⅴ层较小、Ⅰ层和Ⅱ层介于二者之间。各土层具有“软硬岩层相间”的发育特征,其抗蚀性在垂直方向大致呈现“减小—增大—减小”的趋势,该研究从土壤侵蚀的角度在一定程度上揭示了冲沟发展过程。

关键词: 干湿交替; 不同土层; 土体抗蚀性; 干热河谷; 冲沟

中图分类号: S157.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)12-0152-08

Soil Erosion Resistance under Dry – Wet Alternation in Different Layers of Dry-hot Valley Region

Zhang Su¹ Xiong Donghong¹ Zhang Baojun¹ Yang Dan¹ Xiao Liang¹ Fang Haidong²

(1. Key Laboratory of Mountain Hazards and Earth Surface Processes, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China
2. Institute of Tropical Eco-agriculture, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Yuanmou 651300, China)

Abstract: Gullies are well developed in Yuanmou dry-hot valley region of Southwest China, which result in intense soil erosion and severe land gradation. And local climate and soil properties are two of the main factors controlling gully erosion in this area. The frequent dry – wet alternations occurred in soil are the essential process of gully erosion. Six typical soil layers in the study area are chosen(from top to bottom are as follows: layers Ⅰ, Ⅱ, Ⅲ, Ⅳ, Ⅴ and Ⅵ) to analyze the characteristics and differences of soil erosion resistance by implementing in situ experiments of dry – wet alternation, in which soil shear strength, soil anti-scourability and soil disintegration indices are selected as the main measuring and evaluation indicators. Research results show that the values of soil shear strength of the six soil layers are apparently different, among which those of layer Ⅳ and layer Ⅴ are greater than those of other layers. With the increase of cycles of dry – wet alternation, the internal friction angle shows a fluctuating and irregular trend, while the cohesive force presents significantly negative correlation relationship in the same layer. The difference for the values of soil anti-scourability is significant among the six soil layers, and the values of layer Ⅲ and layer Ⅵ are relatively smaller than those of other layers. During the dry – wet

收稿日期: 2016-03-28 修回日期: 2016-06-14
基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2015CB452704)、中国科学院“西部之光”重点项目(Y4R2060060)和国家自然科学基金项目(41571277)
作者简介: 张素(1990—),女,博士生,主要从事土壤侵蚀、水土保持与土壤物理研究,E-mail: zhangsu211@foxmail.com
通信作者: 熊东红(1974—),男,研究员,博士生导师,主要从事土壤侵蚀、土壤物理与生态恢复研究,E-mail: dhxiong@imde.ac.cn

alternation, the soil detachment rate shows a fluctuating and gradual decreasing trend and the soil anti-scourability is increased with the times of dry – wet alternations in the same layer. The average soil disintegration rates of all layers appear distinct liner correlations with the times of dry – wet alternations, among which those of layer III and layer VI are relatively greater and layer IV and layer V are smaller, while layer I and layer II are intermediate between the former groups. Furthermore, with the feature of soft rock formations alternate with hard ones, the soil layers show an trend of firstly decreasing, and then increasing and finally decreasing for its soil erosion resistance in the vertical direction. The above results contribute to revealing gully development processes from the perspective of soil erosion.

Key words: dry – wet alternation; different soil layers; soil erosion resistance; dry-hot valley; gully

引言

冲沟侵蚀是金沙江下游元谋干热河谷区严重的环境问题之一,冲沟发育空间规模大、沟壁陡立、土层分布明显,沟蚀崩塌剧烈、频繁^[1-2];土壤侵蚀强度达 $1.64 \times 10^4 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,沟壑密度为 $3.0 \sim 5.0 \text{ km}/\text{km}^2$,最大达 $7.4 \text{ km}/\text{km}^2$,其危害程度不逊于东北黑土区^[3]、黄土高原区^[4]和南方崩岗区^[5]的沟蚀危害。沟蚀是土壤侵蚀(水力侵蚀)的主要类型之一,土壤抗蚀性可在一定程度上反应沟蚀的严重程度^[6],然而目前的相关研究大都关注冲沟形态特征与活跃度评价^[7]、冲沟典型植被持水性能^[8]及沟蚀发育和崩塌类型的界定^[9];同时,元谋组地层在该区广泛分布且具有明显层次性(约厚 673 m,可分为 4 段 28 层)^[10-13],垂直方向的土层性质差异明显,却少有冲沟不同土层抗蚀性的研究,探明干热河谷冲沟不同土层抗蚀性的发生原因、作用机制及变化规律,对遏制冲沟发育有一定的重要性。

土壤干湿交替是指土壤受降雨蒸发的周期性变化影响而交替出现湿润、干燥变化的循环过程^[14]。元谋干热河谷干湿季节分明:在旱季,平均温度大于 20℃ 的天数超过 150 d,总降雨量却不到年降水量的 10%,土壤含水率几乎在凋萎系数以下^[15];雨季降雨频繁,平均降雨量达 515.8 mm,占年降水量的 90% 以上,平均暴雨雨量约占年降水量的 25%,集中暴雨对地面冲刷、侵蚀作用极大。可见旱季高温干燥、雨季降水集中且暴雨雨量大,是干热河谷冲沟形成的气候因素。已有研究表明,干湿交替可破坏土壤整体结构,引起胶体矿物的迁移而导致胶结颗粒数量减少,同时降低粘聚力影响土壤力学强度并导致崩解发生^[16-19];干湿交替也是影响土壤抗蚀性不可忽略的外在因素,而目前干湿交替对干热河谷沟蚀影响的相关机理研究较为薄弱。极端干旱-暴雨的气候条件对冲沟土壤的抗蚀性产生的影响及冲沟发育的不同土层对干湿交替气候响应仍不清楚,因此加强干湿交替下冲沟不同土层抗蚀性的研究显

得十分必要。本文选择干热河谷区典型发育的土层剖面,采用干湿交替原位试验,选取土体抗剪强度、抗冲系数以及崩解性指标,研究不同土层的抗侵蚀特性,以期为进一步开展沟蚀防治提供理论依据,为元谋干热河谷区水土保持及生态修复与重建奠定理论基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于干热河谷元谋县境内($101^{\circ}35' \sim 102^{\circ}25'E$ 、 $25^{\circ}25' \sim 26^{\circ}07'N$),属亚热带季风气候,年平均温度 21.9℃,大于等于 10℃ 积温 8 001.5℃,年降水量 520 ~ 590 mm,年蒸发量 4 000 ~ 4 300 mm,具有高温干燥、降雨集中、干湿季分明的特征^[11]。地质构造属于康滇背斜中段、新生代断陷堆积的元谋盆地,元谋组地层在元谋盆地内广泛分布,形成河流相、湖泊相或河湖交替相的沉积物;燥红土是该区基带土壤,变性土和新积土广泛分布^[13]。自然植被为亚热带中山峡谷灌草丛和半湿性常绿阔叶林,乔木树种主要有云南松(*Pinus yunnanensis*)、桉树(*Eucalyptus robusta* Smith)和栎树(*Quercus linn*);灌木代表种有银合欢(*Albizsia kalkora*)、车桑子(*Dodonaea viscosa* (L.) Jacq.);草本代表种有扭黄茅(*Heteropogon contortus*)和木豆(*Leguminosae* sp.)等^[19]。

1.2 研究方法 with 样品测定

1.2.1 土层剖面选取与基本理化性质测定

在干热河谷沟蚀崩塌观测研究站冲沟典型发育区内,选择人工开挖边坡剖面(公路边坡),该剖面高 23.4 m,分层明显,具备干热河谷冲沟土层发育特征,采样前将冲沟剖面土层从上至下依次划分为 I、II、III、IV、V、VI 层(图 1)。其中, I 层为燥红土,裂缝表面积百分比为 2.1%,厚 5.6 m; II 层为燥红土与新积土接壤过渡区域,为变质燥红土^[9],裂缝表面积百分比为 1.5%,厚 4 m; III 层为新积土,无裂隙,厚 2.8 m。IV 层与 V 层均为变性土,土质粘

重,裂缝表面积百分比分别为 6.1% 和 5.2%,厚约 4.6 m,其中Ⅳ层颜色呈浊红棕,Ⅴ层呈亮黄棕。Ⅵ层与Ⅲ层土壤基本特征相近,但由于其所处层位不同,故将Ⅲ层土体划为新积土Ⅰ,Ⅵ层为新积土Ⅱ(表 1)。

1.2.2 土体抗剪强度测定及抗冲性试验设计

抗剪强度测定:运用剪切速度为 0.8 mm/min 的 ZJ 型应变控制式直剪仪进行剪切试验^[20],设置 25、50、75、100 kPa 4 个级别的垂直载荷,测定饱和

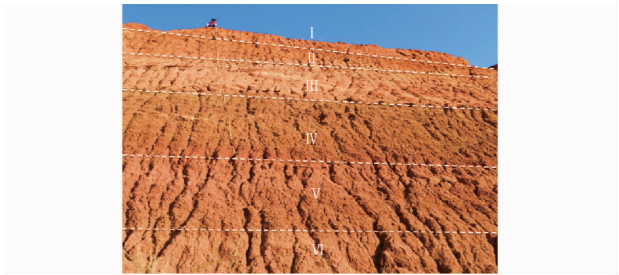


图 1 冲沟剖面土层

Fig.1 Schematic diagram of gully layers

表 1 不同土层基本理化指标

Tab.1 Basic physicochemical properties for different soil layers

土层编号	土体类型	土层	裂缝表面积	容重/	有机碳质量	土体可蚀性	机械组成(质量分数)/%		
		深度/m	百分比/%	(g·cm ⁻³)	分数/%	K	粘粒	粉粒	砂粒
I	燥红土	0~5.6	2.1	1.67	19.72	0.75	16.21	27.58	56.21
II	变质燥红土	5.6~9.6	1.5	1.75	15.08	0.72	18.03	27.77	54.20
III	新积土Ⅰ	9.6~12.2		1.48	6.38	1.12	3.20	12.61	84.19
IV	变性土Ⅰ	12.2~16.8	6.1	1.96	12.76	0.27	30.67	60.14	9.19
V	变性土Ⅱ	16.8~21.4	5.2	1.92	10.44	0.30	25.24	59.69	15.07
VI	新积土Ⅱ	21.4~23.4		1.52	5.80	1.11	3.18	12.25	84.57

土样的抗剪强度指标(内摩擦角 φ 和粘聚力 c)。同一土层设计 3 次重复处理。

抗冲性试验采用蒋定生设计的原状土冲刷测定法^[15]:用尺寸为 20 cm×10 cm×10 cm 的条形取样器采集干湿交替处理后的原状土样,将土体样品装入土样槽,其表面和水槽面齐平。设置冲刷流量 2 L/min,冲刷坡度为 10°^[9],并用稳流池控制流速;冲刷总历时 30 min;每次收集 200 mL 泥沙样,收集时间设置为 0~4 min 阶段间隔 1 min,6~10 min 阶段间隔 2 min,15~30 min 阶段间隔 5 min;冲刷完成后,将泥沙样在 105℃ 下干燥至质量恒定并称量。

同一土层设计 3 次重复处理。

1.2.3 干湿交替试验设计与土体崩解性测定

干湿交替试验:分别于每剖面整理出一个尺寸 0.5 m×1 m 的原位水平试验平台;通过人工浇水与自然暴晒的方法模拟干湿交替处理,浇水使每个平台土壤饱和,随后自然暴晒至干燥(含水率达到凋萎系数)并依次循环试验;1 次“浇水-暴晒”循环计为 1 次干湿交替处理,试验共计 5 次循环。其中干湿交替试验期间无降水,温度、太阳辐射等主要气象参数见表 2(气象数据来源于元谋站 DAVIS 自动气象站,数据获取频度为 1 h/次)。

表 2 干湿交替试验期间主要气象参数

Tab.2 Main meteorological parameters during dry - wet alternation test

干湿交替次数	平均气温/℃	平均空气湿度/%	平均太阳辐射/(W·m ⁻²)	平均太阳能量/(J·cm ⁻²)
0(初始状态)	30.59±4.43	18.78±7.43	251.56	21.64
1	25.94±4.36	32.40±12.40	212.63	19.57
2	25.31±4.78	35.69±11.97	235.41	20.25
3	27.84±5.09	28.05±13.89	268.55	23.10
4	28.57±4.78	18.33±7.30	264.58	22.76
5	30.56±4.87	20.22±7.28	268.04	23.05

注:数据为平均值±标准差,n=72。

土体崩解性采用静水崩解法测定^[14]。采用拉力计记录土样崩解的质量变化,通过测定不同时间土体质量,计算累计崩解量及崩解速度。试验装置包括崩解缸、崩解架、网板(5 cm×5 cm,孔径为 0.5 cm)、铝盒、电子推拉力仪(精度 0.1 g)、摄像机等。用高 4 cm,容积为 120 cm³的圆柱形环刀取原状土样进行崩解试验,试验时将土样放在崩解架上,迅速将崩解架放入水中并悬挂于铝盒内;用摄像机拍

摄电子推拉力仪读数变化全过程,便于试验完成后由摄像机提取崩解过程数据,每 1 min 提取 1 次土体质量数据,持续至 30 min 或读数达到稳定为止。同一土层设计 3 次重复处理。

1.3 数据分析与处理

(1)土体抗剪强度 τ

土体抗剪强度是指在剪应力的作用下土颗粒因持续剪切而引起的剪切变形和变形破坏的阻力。采

用库仑公式计算,即

$$\tau = \sigma \tan \varphi + c$$

(1)

式中 τ ——抗剪强度, kPa
 σ ——作用在剪切面上的法向应力, kPa
 φ ——内摩擦角, (°)
 c ——粘聚力, kPa

(2) 土体抗冲系数 A_{NS}

抗冲性是指土体抵抗径流对其机械破坏和推动下移的能力,选用抗冲系数 A_{NS} (L/g),即每冲走 1 g 干燥土所需水量表示, A_{NS} 越大,抗冲性越大。其计算式为

$$A_{NS} = \frac{ft}{W}$$

(2)

式中 f ——冲刷流量, L/min
 t ——冲刷时间, min
 W ——干泥沙质量, g

(3) 土体剥蚀率 D_r

土体剥蚀率指单位时间单位面积径流所能剥蚀土体的质量, g/(cm²·min), 计算式为

$$D_r = \frac{M_s}{At}$$

(3)

式中 M_s ——时间 t 内径流产沙量, g
 A ——原状土冲刷面积, cm²

(4) 土体累计崩解量 K_i

累计崩解量为每时段内崩解掉的土粒总质量。任意时刻 t_i 累计崩解量 K_i (g) 的计算式为

$$K_i = a_0 - a_i$$

(4)

式中 a_i ——土体在 t_i 时刻的拉力计读数
 a_0 ——土体在起始时刻的拉力计读数

(5) 土体崩解速度 V

单位时间的崩解量即为崩解速度 V (g/min), 即

$$V = \frac{a_1 - a_2}{t_1 - t_2}$$

(5)

式中 a_1 —— t_1 时刻的拉力计读数
 a_2 —— t_2 时刻的拉力计读数

数据处理及作图采用 Excel 2010 软件, 数据统计分析采用 SPSS 17.0 软件。运用单因子方差分析和最小显著极差法 (LSD) 比较干湿交替处理下不同土层各变量间的显著性差异。

2 结果与分析

2.1 干湿交替次数与各层位土体抗剪强度的关系

土体抗剪强度由内摩擦角 φ 和粘聚力 c 组成, 从土壤侵蚀角度来看, 是土颗粒在剪应力作用下因持续剪切而引起的剪切变形和变形破坏的阻力, 其值直接反映土体抵御剪切破坏的极限强度^[20-21]。

内摩擦角指土颗粒间的滑动摩擦和咬合摩擦力^[22], 不同土层 φ 值差异明显, 随干湿交替次数增多同一土层 φ 值均波动不定。由图 2 可知, I、II、III、IV、V 和 VI 层 φ 值分别介于 16.78°~19.60°、14.78°~17.80°、20.70°~22.39°、11.97°~13.87°、12.19°~13.69°和 20.39°~22.59°之间; III 层、VI 层 φ 值明显大于其他土层, IV 层和 V 层 φ 值最小。干湿交替过程中不同层位 φ 值波动幅度在 1.50°~3.02°之间, 表现为: II 层 (3.02°) > I 层 (2.81°) > VI 层 (2.39°) > IV 层 (1.90°) > III 层 (1.69°) > V 层 (1.50°)。 φ 值差异呈现出和土体类型有关的变化趋势: 因土体类型差异导致不同土颗粒表面的摩擦力以及水分与颗粒间的嵌入作用产生的咬合力的大小不同。随干湿交替次数增多同一土层 φ 值均波动不定, 可认为干湿交替次数对 φ 值无明显影响, 这可能是因为土体水分与土颗粒的咬合力增大, 内摩擦角随之增大, 而当水分增加到一定范围时, 单位体积内的土体变少, 土颗粒间的咬合力变小而 φ 值不再增大, 每次干湿交替试验中 φ 值均产生类似变化。

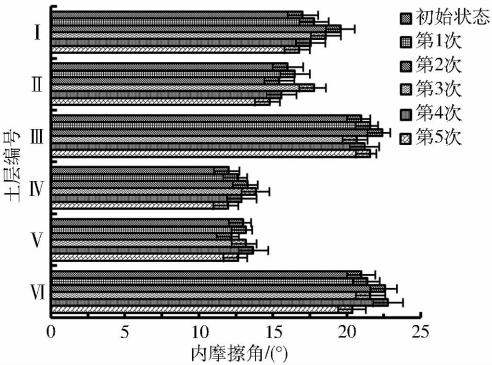


图 2 干湿交替次数与内摩擦角的关系
Fig. 2 Relationship of dry - wet alternation time and soil internal frictional angle

粘聚力 c 指土颗粒间的库仑力、范德华力、胶结作用力等物理化学作用力并反映土颗粒间的凝聚力情况^[22]; 不同土层 c 值差异明显, 随干湿交替次数增多同一土层 c 值则呈显著线性减小趋势 ($P < 0.05$) (表 3)。由图 3 知, I、II、III、IV、V 和 VI 层 c 值分别介于 4.0~6.7 kPa、4.5~7.0 kPa、1.5~3 kPa、8.5~13 kPa、8~12 kPa 和 2.8~5 kPa 之间; 干湿交替下不同土层 c 值大致表现为: IV 层 > V 层 > II 层 > I 层 > VI 层 > III 层; c 值减小幅度由大到小为: III 层 (50.00%)、I 层 (49.25%)、VI 层 (44.00%)、II 层 (35.71%)、IV 层 (34.62%)、V 层 (25.00%)。随干湿交替次数增多同一土层 c 值线性减小, 这可能是因为土粒间的粘聚力易遭受干湿交替的影响, 随干湿交替次数增加, 粘聚力的减小导

致土体强度减弱,力学强度逐渐劣化^[16,23]。综合来看,Ⅳ层和Ⅵ层(变性土层)粘聚力大,受干湿交替次数的影响较小(c 值波动幅度最小),因而可保持较高的力学强度,不易被流水侵蚀,这可能是冲沟发育大面积变性土质侵蚀裂地的力学原因^[24]。

表 3 干湿交替次数与土体粘聚力的关系
Tab.3 Relationship of dry - wet alternation time and soil cohesive force

土层编号	拟合函数	R^2	F	P
I	$Y = -0.657\ 1x + 6.742\ 9$	0.989\ 2	364.828	$<0.05^*$
II	$Y = -0.485\ 7x + 6.947\ 6$	0.989\ 3	368.936	$<0.05^*$
III	$Y = -0.242\ 9x + 2.690\ 5$	0.604\ 2	6.106	$<0.01^{**}$
IV	$Y = -0.948\ 6x + 13.138\ 0$	0.982\ 1	219.424	$<0.05^*$
V	$Y = -0.828\ 6x + 12.238\ 0$	0.974\ 1	150.627	$<0.05^*$
VI	$Y = -0.468\ 6x + 4.704\ 8$	0.874\ 6	27.891	$<0.05^*$

注: *、**分别表示显著性达 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 水平,下同。

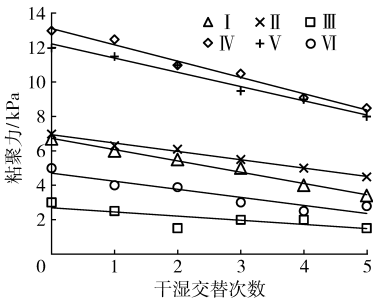


图 3 干湿交替次数与粘聚力的关系

Fig.3 Relationship of dry - wet alternation time and soil cohesive force

2.2 干湿交替次数与各土层抗冲性的关系

土体抗冲性是指土抵御径流冲刷对其机械破坏、推动和下移的能力,其值取决于土颗粒和微结构间的胶结力及土体抵抗径流分散的能力^[25-28]。不同土层抗冲系数存在差异,随干湿交替次数增多同一土层抗冲系数呈递增趋势,仅Ⅰ、Ⅲ和Ⅵ层呈显著线性正相关关系($P < 0.05$) (表 4)。由图 4 知,不同干湿交替处理中Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ和Ⅵ层抗冲系数分别介于 11.0 ~ 13.48 L/g、13.11 ~ 15.15 L/g、7.04 ~ 9.27 L/g、17.56 ~ 20.52 L/g、16.23 ~ 19.58 L/g 和 6.5 ~ 8.84 L/g 之间,Ⅳ层和Ⅴ层的抗冲系数较大,而Ⅲ层和Ⅵ层的抗冲系数较小。5 次干湿交替处理后,不同土层抗冲系数的变化幅度均较小,由大到小依次为:Ⅵ层 (36.00%)、Ⅲ层 (32.42%)、Ⅰ层 (22.57%)、Ⅴ层 (20.60%)、Ⅳ层 (16.86%)、Ⅱ层 (16.57%)。在没有经过干湿交替处理的抗冲性试验中,土样在放水 30 min 内大部分被冲散,这可能是因为试验土样结构松散,孔隙度大,抵御径流冲刷破坏的能力小;当试验土样经过 1 次干湿交替后,水分子占据土体孔隙度,对土颗粒产生了一定吸附作

用,当再次进行冲刷试验时,则需更大的径流冲刷力破坏其吸附力,使得干湿交替后土体抗冲性有一定提高,但这种提高非常有限。这可能因为数次干湿交替后,土颗粒变得密实,容重增大,孔隙度变小,抵抗水流冲刷的作用有所改变,但干湿交替过程并未改变土体团粒结构等特性。

表 4 干湿交替次数与不同土层抗冲系数的关系
Tab.4 Relationship of dry - wet alternation time and soil anti-scourability coefficient in different soil layers

土层编号	拟合函数	R^2	F	P
I	$Y = 0.539\ 2x + 10.996$	0.966\ 8	116.375	$<0.05^*$
II	$Y = 0.311\ 2x + 13.485$	0.528\ 9	4.490	>0.05
III	$Y = 0.334\ 6x + 7.668$	0.543\ 0	4.754	$<0.01^{**}$
IV	$Y = 0.400\ 2x + 17.419$	0.496\ 1	3.938	>0.05
V	$Y = 0.414\ 7x + 16.548$	0.443\ 3	3.186	>0.05
VI	$Y = 0.490\ 3x + 6.319$	0.864\ 5	25.516	$<0.05^*$

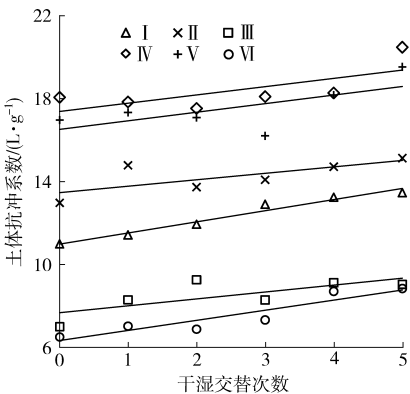


图 4 不同干湿交替次数与土体抗冲系数的关系

Fig.4 Relationship of dry - wet alternation time and soil anti-scourability coefficient

土体剥蚀率是一定条件下水流分离土体能力的体现,剥蚀率在一定程度上反映径流剥离土体的难易程度。由图 5 知,整体而言,Ⅲ层和Ⅵ层土体剥蚀率最大,Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ和Ⅵ层剥蚀率最大波动幅度分别高达 127.60%、122.73%、77.48%、92.00%、127.39% 和 90.98%,不同土层剥蚀率随干湿交替次数增大呈现波动减小趋势,表明各次干湿交替试验下,水流均能分离并带走表层细土,随着试验次数的增加,土体粉粒减少而粗粒相对累积,质地变粗,水流剥蚀力相对减小;Ⅲ层和Ⅵ层波动幅度相对最小的原因可能是因为新积土的剥蚀率整体处于偏大状态。

2.3 干湿交替次数与各层位土体崩解性的关系

土体崩解是指土壤在水中发生分散、碎裂、塌落或强度减弱的现象,崩解强度越大,表明土体在水中碎裂、塌落得越快,给径流提供的松散物质越多,产生土壤侵蚀的几率越大,常用累计崩解量和崩解速度指标表示崩解强度。崩解试验中,各层位土样呈

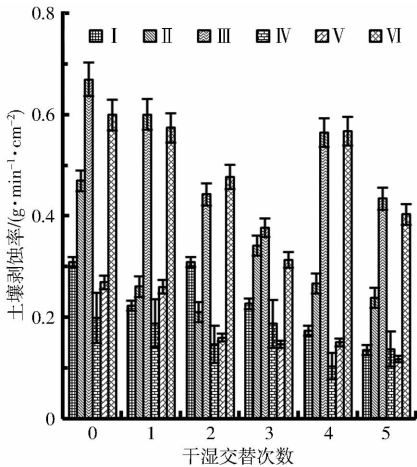


图 5 不同干湿交替次数与土体剥蚀率的关系
Fig.5 Relationship of dry - wet alternation time and soil detachment rate

现出相似规律,试验初期土样因浸泡吸水而排出气体呈现质量增大,增大的质量与少量土粒崩落而减轻的质量相抵消,崩解速度缓慢,使得拉力计记录的数据基本未变,累计崩解量无明显变化;土体气体完全排出且吸水饱和后,土体开始大量破裂、脱离,崩解剧烈,崩解速度呈指数增长趋势,累计崩解量大;崩解发生后期,剩余的部分土粒在水下达到稳定角而呈现稳定状态,仅少量土粒散落,崩解速度缓慢,累计崩解量呈稳定值,土样崩解完成。

不同土层平均崩解速度存在差异(图 6),Ⅲ层和Ⅵ层平均崩解速度最快,而Ⅳ层和Ⅴ层最慢,Ⅰ层和Ⅱ层介于中间;干湿交替次数对各土层崩解速度影响均较大且呈显著线性相关($P < 0.05$)(表 5)。就Ⅰ层、Ⅱ层、Ⅳ层和Ⅴ层而言,干湿交替次数的增加对其平均崩解速度影响逐渐减弱并趋于稳定,这可能是因为土体(燥红土和变性土)的密实性越好,随着干湿交替次数增多,水分瓦解土颗粒的能力变弱,土颗粒在水分子压力作用下得以重组,导致崩解速度减小,从而在一定程度上减缓土壤侵蚀。而Ⅲ层和Ⅵ层的平均崩解速度随干湿交替次数的增加而增大,究其原因可能是新积土结构松散,入渗快,干湿交替试验中快速吸收水分使土体在水分子和重力的作用下快速崩解。

由图 7 知,累计崩解量Ⅳ层和Ⅴ层最小,Ⅲ层和Ⅵ层最大,但干湿交替并未对各土层累计崩解量产生规律性的影响。这可能受试验土样的粘粒含量、湿化速度和前期含水率差异等因素的影响:Ⅳ层和Ⅴ层平均累计崩解量最小,这可能是因其为变性土,粉粒和粘粒含量较高,通透性差,土样浸入水中后,水分向土内部渗透的速度极慢,同时变性土本身具有极强的胀缩特性,土表面因吸水而迅速膨胀,土内部却因渗透性较差而膨胀程度较小,从而出现崩解

时间长而累积崩解量少的结果;Ⅲ层和Ⅵ层为新积土,其砂粒含量极高且粘粒含量极低,颗粒间粘结力低且孔隙度高,通透性好,水分极容易渗入土样内部,在土样内部气泡的挤压作用以及土样内部预固结应力的释放作用下极容易分散崩落。

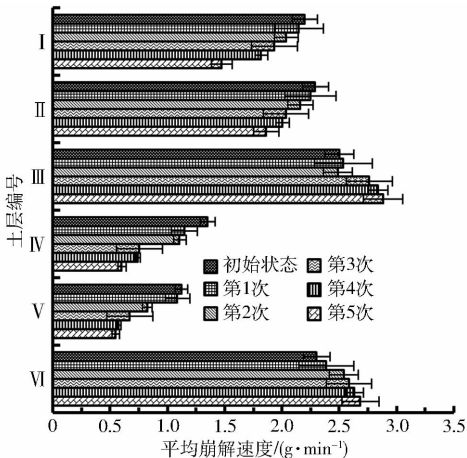


图 6 土体崩解速度与干湿交替的关系
Fig.6 Relationship of dry - wet alternation and soil disintegration rate

表 5 干湿交替次数与不同土层崩解速度的关系
Tab.5 Relationship of dry - wet alternation time and soil disintegration rate in different soil layers

土层编号	拟合函数	R^2	F	P
I	$Y = -0.1350x + 2.4071$	0.9054	37.232	$<0.05^*$
II	$Y = -0.0859x + 2.3996$	0.9740	148.719	$<0.05^*$
III	$Y = 0.0884x + 2.3573$	0.8426	22.280	$<0.05^*$
IV	$Y = -0.1520x + 1.4820$	0.9465	72.336	$<0.05^*$
V	$Y = -0.1302x + 1.2592$	0.9359	53.809	$<0.05^*$
VI	$Y = 0.0771x + 2.2511$	0.9459	68.297	$<0.05^*$

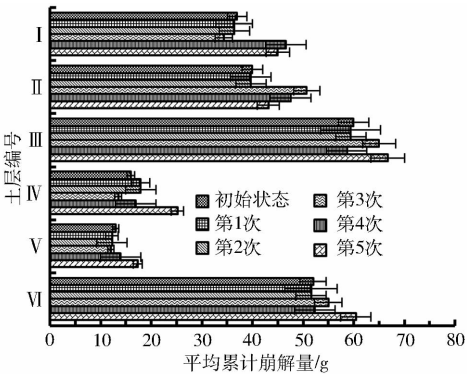


图 7 土体累计崩解量与干湿交替的关系
Fig.7 Relationship of dry - wet alternation and accumulative soil disintegration

3 讨论

为模拟极端天气对干热河谷不同土层抗蚀性的影响,设置不同干湿交替试验处理,试验期间为干热河谷无降雨的旱季末期,各干湿处理试验阶段的环

境条件(如气温、降水量、太阳辐射等)基本一致,选取土体抗剪强度、抗冲性及崩解性指标,揭示各土层抗蚀性差异及干湿交替对其抗蚀性的影响。干湿交替与各土层粘聚力、抗冲性和平均崩解速度呈相关关系,表明上述指标是影响干热河谷沟蚀发育、造成区域土壤侵蚀的重要指标,在土壤侵蚀防治工作中应当采取加强土体力学特性、增大其抗冲性等措施;各土层差异侵蚀明显,Ⅲ层、Ⅵ层为新积土层,其粘聚力和抗冲系数较小而土壤剥蚀率和平均崩解速度较大,在开展生态恢复和冲沟治理的工作中,可侧重防治新积土出露土层的侵蚀问题。

不同于南方崩岗区土体失稳机理,冲沟发生失稳崩塌现象多数由差异性侵蚀造成^[5]。就土体抵御水力侵蚀的能力而言,土自身在结构重组过程中其抗侵蚀能力可能发生的变化,直接受土体机械组成、紧实度、胀缩性、湿化速度和入渗率等因素影响。崩解性作为评价土体抗侵蚀能力的重要指标已得到了广泛的认可和应用,王健等^[14]采用 Richards 模型针对耕作黄土的崩解性研究结果亦表明干湿交替次数与崩解速度相关,今后可验证该模型是否同样适用于干热河谷冲沟发育的土体。

干热河谷区各土层具有“软硬岩层相间”的发育特征,在水力和重力侵蚀的共同作用下,其垂直向的抗蚀性表现为“减小—增大—减小”的交替变化趋势,并发生不同的沟蚀坍塌模式^[9](图 8)。就“燥红土—新积土”层位及“变性土—新积土”层位而言,上层土体稳定性和抗冲性均较大而崩解速度较慢(抗蚀性大),下层则相反因而易发生侵蚀,形成“上凸下凹”的侵蚀形态;就“燥红土—变性土—新积土”层位而言,变性土层抗蚀性最大,在水力侵蚀作用下可保持较好的土体结构和形态,上部燥红土层抗蚀性小于中部土层,土体结构相对疏松而产生溜滑;下部新积土层抗蚀性最小,因而最易被侵蚀掏空形成冲沟特有的内凹洞发育,内凹洞产生后,上部

土体稳定性减弱,降雨使内凹洞底部形成临时性蓄水,蓄水又不断浸润周围土层,促使土体崩解而发生崩塌。在差异性侵蚀的条件下,抗蚀性较差的土层逐渐形成毛沟、细沟,随着水流的继续作用,细沟不断展宽、延伸,最后发展成为冲沟,且呈现出“叶脉状”的发育形态^[2]。

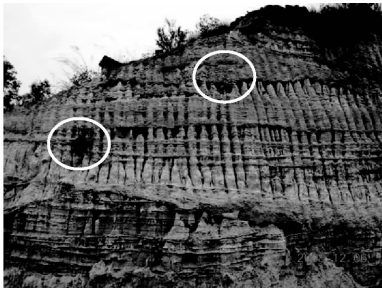


图 8 冲沟剖面差异侵蚀

Fig. 8 Schematic diagram of gully difference erosion

4 结论

(1)各土层抗剪强度差异明显,内摩擦角随干湿交替次数增多呈波动不定趋势而粘聚力则与其呈显著负相关关系。干湿交替次数对内摩擦角无明显影响;不同土层粘聚力大致表现为:Ⅳ层>Ⅴ层>Ⅱ层>Ⅰ层>Ⅵ层>Ⅲ层,随干湿交替次数增多同一土层粘聚力则呈现出显著线性减小趋势。

(2)各土层抗冲性与剥蚀率差异明显,抗冲系数随干湿交替次数增多而增大,剥蚀率则随干湿交替次数增多呈波动减小趋势。Ⅳ层和Ⅴ层的抗冲系数大而剥蚀率小,土层抗蚀性较强;而Ⅲ层和Ⅵ层的抗冲系数小、剥蚀率大,土层抗蚀性较差。

(3)各土层平均崩解速度与干湿交替次数显著线性相关。Ⅲ层和Ⅵ层的平均崩解速度最快,累计崩解量最大,而Ⅳ层和Ⅴ层的平均崩解速度最慢,平均累计崩解量最小,Ⅰ层和Ⅱ层介于之间;干湿交替次数对各土层崩解速度影响均较大且呈显著线性关系($P<0.05$),但并未对累计崩解量产生规律性的影响。

参 考 文 献

1 CHEN Anqiang, ZHANG Dan, YAN Bangguo, et al. Main types of soil mass failure and characteristics of their impact factors in the Yuanmou valley, China[J]. CATENA,2015,125: 82-90.

2 杨丹,熊东红,翟娟,等. 元谋干热河谷冲沟形态特征及其成因[J]. 中国水土保持科学, 2012, 10(1): 38-45.

YANG Dan,XIONG Donghong, ZHAI Juan, et al. Morphological characteristics and causes of gullies in Yuanmou dry-hot valley region[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2012, 10(1): 38-45. (in Chinese)

3 张宝军,熊东红,董一帆,等. 地貌信息熵理论在冲沟沟头活跃度评价中的应用初探[J]. 中国水土保持, 2015(1): 3-7,69.

ZHANG Baojun, XIONG Donghong, DONG Yifan,et al. Application of geomorphologic information entropy theory to evaluation of gully head activity [J]. Soil and Water Conservation in China, 2015(1): 3-7,69. (in Chinese)

4 张霞,李鹏,李占斌,等. 黄土高原丘陵沟壑区临界地貌侵蚀产沙特征[J]. 农业工程学报,2015, 31(4): 129-136.

ZHANG Xia, LI Peng, LI Zhanbin, et al. Characteristics of erosion and sediment yield under critical landform in hill-gully area of Loess Plateau[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(4): 129-136. (in Chinese)

- 5 刘希林, 张大林. 基于三维激光扫描的崩岗侵蚀的时空分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(4): 204–211.
LIU Xilin, ZHANG Dalin. Temporal-spatial analyses of collapsed gully erosion based on three-dimensional laser scanning[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(4): 204–211. (in Chinese)
- 6 秦伟, 左长清, 晏清洪, 等. 红壤裸露坡地次降雨土壤侵蚀规律[J]. 农业工程学报, 2015, 31(2): 124–132.
QIN Wei, ZUO Changqing, YAN Qinghong, et al. Regularity of individual rainfall soil erosion in bare slope land of red soil[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(2): 124–132. (in Chinese)
- 7 李佳佳, 熊东红, 卢晓宁, 等. 基于 RTK-GPS 技术的干热河谷冲沟沟头形态特征[J]. 山地学报, 2014, 32(6): 706–716.
LI Jiajia, XIONG Donghong, LU Xiaoning, et al. Morphological characteristics of the gully head in dry-hot valley based on the RTK-GPS technology[J]. Mountain Research, 2014, 32(6): 706–716. (in Chinese)
- 8 魏雅丽, 贺玉晓, 金杰, 等. 元谋干热河谷典型植被枯落物持水能力研究[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(3): 181–186.
WEI Yali, HE Yuxiao, JIN Jie, et al. Water conservation function of typical vegetation litters in Yuanmou dry-hot valley[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2014, 28(3): 181–186. (in Chinese)
- 9 陈安强, 张丹, 范建容, 等. 元谋干热河谷沟壁崩塌的力学机制与模拟试验[J]. 中国水土保持科学, 2012, 10(3): 29–35.
CHEN Anqiang, ZHANG Dan, FAN Jianrong, et al. Mechanical mechanism and simulation experiment of the collapse of gully cliff in Yuanmou dry-hot valley[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2012, 10(3): 29–35. (in Chinese)
- 10 YANG Dan, XIONG Donghong, GUO Min, et al. Impact of grass belt position on the hydraulic properties of runoff in gully beds in the Yuanmou dry-hot valley region of Southwest China[J]. Physical Geography, 2015, 36(5): 408–425.
- 11 SU Zheng'an, XIONG Donghong, DONG Yifan, et al. Hydraulic properties of concentrated flow of a bank gully in the dry-hot valley region of Southwest China[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2015, 40(10): 1351–1363.
- 12 SU Zheng'an, XIONG Donghong, DONG Yifan, et al. Influence of bare soil and cultivated land use types upstream of a bank gully on soil erosion rates and energy consumption for different gully erosion zones in the dry-hot valley region, Southwest China[J]. Natural Hazards, 2015, 79(Supp. 1): 183–202.
- 13 熊东红, 杨丹, 李佳佳, 等. 元谋干热河谷区退化坡地土壤裂缝形态发育的影响因子[J]. 农业工程学报, 2013, 29(1): 102–108.
XIONG Donghong, YANG Dan, LI Jiajia, et al. Influence factors of morphological development of soil cracks in degraded slopes in Yuanmou dry-hot valley region[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(1): 102–108. (in Chinese)
- 14 王健, 马璠, 张鹏辉, 等. 干湿交替对黄土崩解速度的影响研究[J]. 土壤学报, 2015, 52(6): 1273–1279.
WANG Jian, MA Pan, ZHANG Penghui, et al. Effect of wet-dry alternation on loess disintegration rate[J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, 52(6): 1273–1279. (in Chinese)
- 15 张素, 熊东红, 郑学用, 等. 干热河谷不同活跃程度冲沟沟床土体抗冲性差异[J]. 水土保持学报, 2015, 29(3): 13–17.
ZHANG Su, XIONG Donghong, ZHENG Xueyong, et al. Soil anti-scourability differences on gully beds with different activities in dry-hot valley region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(3): 13–17. (in Chinese)
- 16 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, et al. Influence of wetting-drying cycles on strength characteristics of Nanning expansive soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(5): 949–954. (in Chinese)
- 17 黄震, 傅鹤林, 韦秉旭, 等. 等幅干湿循环条件下膨胀土的低应力抗剪强度特征[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2016, 48(1): 70–77.
HUANG Zhen, FU Helin, WEI Bingxu, et al. Low stress shear strength characteristics of expansive soil under constant amplitude dry wet cycle conditions[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2016, 48(1): 70–77. (in Chinese)
- 18 张雪雯, 莫熠, 张博雅, 等. 干湿交替及凋落物对若尔盖泥炭土可溶性有机碳的影响[J]. 湿地科学, 2014, 12(2): 134–140.
ZHANG Xuewen, MO Yi, ZHANG Boya, et al. Effect of wetting-drying cycle and litter on dissolved organic carbon in peat soil in Zoigê Plateau [J]. Wetland Science, 2014, 12(2): 134–140. (in Chinese)
- 19 陈安强, 张丹, 雷宝坤, 等. 元谋干热河谷变性土收缩变形对其裂缝发育及土体强度的影响[J]. 土壤通报, 2015, 46(2): 341–347.
CHEN Anqiang, ZHANG Dan, LEI Baokun, et al. Effects of contraction and deformation of vertisol on its crack development and shear strength in Yuanmou dry-hot valley [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2015, 46(2): 341–347. (in Chinese)
- 20 张素, 熊东红, 杨丹, 等. 干热河谷不同活跃度冲沟土体抗剪强度分异及理化性质[J]. 水土保持学报, 2014, 28(6): 124–129, 160.
ZHANG Su, XIONG Donghong, YANG Dan, et al. Soil shear strength and its related physical properties on different active degree type of gullies in dry-hot valley[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28(6): 124–129, 160. (in Chinese)
- 21 邓羽松, 李双喜, 丁树文, 等. 鄂东南崩岗不同层次土壤分形特征及抗蚀性研究[J]. 长江流域资源与环境, 2016, 25(1): 63–70.
DENG Yusong, LI Shuangxi, DING Shuwen, et al. Research on different soil layers of collapsing gully fractal characteristics and erosion characteristics in Tongcheng [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2016, 25(1): 63–70. (in Chinese)

- distribution of nitrogen, phosphorus and potassium in winter wheat [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2002, 8(3): 265–270. (in Chinese)
- 19 谷秋荣, 杨占平, 王秋杰, 等. 不同灌水量对土壤氮磷钾养分移动的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2002, 20(4): 30–33. GU Qiurong, YANG Zhanping, WANG Qiujie, et al. Effect of irrigation on nutrient movement of N, P and K in soil [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2002, 20(4): 30–33. (in Chinese)
- 20 刘克礼, 高聚林, 张永平, 等. 春小麦氮、磷、钾三要素利用率的研究[J]. 麦类作物学报, 2003, 23(3): 103–106. LIU Keli, GAO Julin, ZHANG Yongping, et al. Study on N, P, K utilization ratio of spring wheat [J]. Journal of Triticeae Crops, 2003, 23(3): 103–106. (in Chinese)
- 21 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- 22 陆景陵. 植物营养学[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 1994: 10–44.
- 23 李世清, 李生秀. 半干旱地区农田生态系统中硝态氮的淋失[J]. 应用生态学报, 2000, 11(2): 240–242. LI Shiqing, LI Shengxiu. Leaching losses of nitrate from semiarid area agroecosystem [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2000, 11(2): 240–242. (in Chinese)
- 24 McIsaac G, David M, Gertner G, et al. Eutrophication: nitrate flux in the Mississippi River [J]. Nature, 2001, 414(6860): 166–167.
- 25 Xing G X. N_2O emission from cropland in China [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystem, 1998, 52(52): 249–254.
- 26 米国华, 汤利, 张福锁. 两种熟相小麦籽粒建成期的氮素吸收与转运[J]. 中国农业大学学报, 1999, 4(3): 53–57. MI Guohua, TANG Li, ZHANG Fusuo. Nitrogen uptake and translocation during grain formation of two wheat cultivars with contrasting maturity appearance [J]. Journal of China Agricultural University, 1999, 4(3): 53–57. (in Chinese)
- 27 石岩, 林琪, 李素美, 等. 土壤水分胁迫对小麦养分分配及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 1998, 4(1): 50–56. SHI Yan, LIN Qi, LI Sumei, et al. Effect of soil water stress on nutrient distribution and yield of wheat [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 1998, 4(1): 50–56. (in Chinese)
- 28 朱兆良, 文启孝. 中国土壤氮素[M]. 南京: 江苏科技出版社, 1992: 213–249.
- 29 李庆逵, 朱兆良, 于天仁. 中国农业持续发展中的肥料问题[M]. 南昌: 江西科技出版社, 1998: 3–5.
- 30 NEW bould P. The use of fertilizer in agriculture: where do we go practically and ecologically [J]. Plant and Soil, 1989, 115(2): 297–311.

(上接第 159 页)

- 22 李建兴, 何丙辉, 湛芸, 等. 不同护坡草本植物的根系分布特征及其对土壤抗剪强度的影响[J]. 农业工程学报, 2013, 29(10): 144–152. LI Jianxing, HE Binghui, SHEN Yun, et al. Root distribution features of typical herb plants for slope protection and their effects on soil shear strength [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(10): 144–152. (in Chinese)
- 23 栗岳洲, 付江涛, 胡夏嵩, 等. 土体粒径对盐生植物根-土复合体抗剪强度影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(2): 403–412. LI Yuezhou, FU Jiangtao, HU Xiasong, et al. Experimental study of the influence of grain size on the shear strength of rooted soil [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(2): 403–412. (in Chinese)
- 24 张宝军, 熊东红, 郭敏, 等. 干热河谷冲沟侵蚀劣地不同坡位草被生长和土壤水分关系研究[J]. 草业科学, 2015, 32(5): 686–693. ZHANG Baojun, XIONG Donghong, GUO Min, et al. The correlation between soil moisture and grass growth in different slope positions of gully badlands in dry-hot valley [J]. Pratacultural Science, 2015, 32(5): 686–693. (in Chinese)
- 25 吕刚, 刘红民, 高英旭, 等. 排土场边坡根系分布及其对土壤抗冲性的影响[J]. 土壤通报, 2014, 45(3): 711–715. LÜ Gang, LIU Hongmin, GAO Yingxu, et al. Effect of roots distributions on soil anti-scourability in slope of the dump [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2014, 45(3): 711–715. (in Chinese)
- 26 张素, 熊东红, 苏正安, 等. 土壤抗冲性及其影响因素研究进展[J]. 世界科技研究与发展, 2014, 36(6): 721–725. ZHANG Su, XIONG Donghong, SU Zheng'an, et al. Research progress of influence factors in soil anti-scourability [J]. World Sci-Tech R&D, 2014, 36(6): 721–725. (in Chinese)
- 27 寇萌, 焦菊英, 王巧利, 等. 黄土丘陵沟壑区不同植被带植物群落的细根分布特征[J]. 农业机械学报, 2016, 47(2): 161–171. KOU Meng, JIAO Juying, WANG Qiaoli, et al. Fine root distribution characteristics of plant community in different vegetation zones in hill-gully region of Loess Plateau [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(2): 161–171. (in Chinese)
- 28 郑子成, 张锡洲, 李廷轩, 等. 玉米生长期土壤抗剪强度变化特征及其影响因素[J]. 农业机械学报, 2014, 45(5): 125–130, 172. ZHENG Zicheng, ZHANG Xizhou, LI Tingxuan, et al. Characteristics and influencing factors of soil shear strength during maize growing period [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(5): 125–130, 172. (in Chinese)