

冲沟不同部位土壤机械组成及抗冲性差异^①

张 素^{1,2,3}, 熊东红^{1,2*}, 校 亮^{1,2,3}, 吴 汉^{1,2,3}, 杨 丹^{1,2,3}, 张宝军^{1,2,3}, 郑 旭⁴

(1 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室, 成都 610041; 2 中国科学院/水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041;

3 中国科学院大学, 北京 100049; 4 四川省宁南县水务局, 四川宁南 615400)

摘 要:选取 3 类典型冲沟(活跃、较活跃和稳定)的集水区、沟头和沟床土壤, 探明冲沟不同空间部位土壤机械组成特性及其抗冲性差异, 结果表明: 活跃、较活跃冲沟土壤质地均为砂质壤土, 稳定冲沟各部位土壤质地各不相同; 黏粒含量、粉粒含量总体为活跃冲沟<较活跃冲沟<稳定冲沟; 细砂粒含量为较活跃冲沟>活跃冲沟>稳定冲沟; 粗砂粒含量则是活跃冲沟>较活跃冲沟>稳定冲沟。3 类冲沟各部位土壤抗冲性均是沟床最高, 而 3 类冲沟同一部位抗冲性大小比较中, 沟头和沟床土壤抗冲性为稳定冲沟>较活跃冲沟>活跃冲沟, 集水区以活跃冲沟土壤抗冲性最小, 较活跃与稳定冲沟的土壤抗冲性相当。线性回归分析表明: 砂粒含量是影响 3 类冲沟各部位土壤抗冲性的主要指标, 黏粒含量影响稳定冲沟各部位土壤抗冲性, 粉粒含量与较活跃冲沟沟头、稳定冲沟集水区和沟床的土壤抗冲性有关。研究结果从土壤机械组成和土壤抗侵蚀性的关系角度为冲沟研究提供一定的理论参考。

关键词: 冲沟; 土壤抗冲性; 土壤机械组成; 干热河谷; 不同部位

中图分类号: S157.1

元谋干热河谷的土壤为第四季河湖相沉积物, 具有结构松散、胶结度差、黏砂互层和层际组成物质差异显著的特征^[1]。该区冲沟极度发育且有集水区面积小、沟壁陡立、溯源侵蚀速度快等发育特点, 是金沙江下游突出的生态环境问题之一^[2]。已有的冲沟侵蚀研究主要侧重冲沟形态变化、沟蚀速率和监测方法^[3]等方面, 针对冲沟沟头^[4-6]、沟壁^[7]和沟床^[8]等单一部位的研究亦有大量报道, 而冲沟各部位之间的对比研究仍少有涉及。李佳佳等^[5]基于 RTK-GPS 技术构建了干热河谷冲沟活跃度评价指标体系; 张素等^[9]依据该评价指标选取了不同活跃度冲沟并初步比较了冲沟土体抗剪强度差异; 张宝军等^[10]应用地貌信息熵理论评价了冲沟沟头活跃度。此外, 针对冲沟活跃度的研究较少。

土壤机械组成亦称土壤质地, 是指土壤中矿物颗粒的大小及其组成比例。一定意义而言, 土壤的形成就是黏粒的形成与机械组成的变化^[11]。土壤机械组成是度量区域生态系统功能的指标之一^[12]。在水力冲刷作用下, 土壤表层细土极易被带走, 粗粒相对积累,

使土壤出现质地变粗且厚度不一的覆沙层^[13]。土壤质地单一, 不利于植被生长, 而各粒径颗粒组成比例适当, 能使土壤保持较好的结构, 拥有较高的保水保肥性能。目前相关研究集中于不同植被类型土壤的机械组成和肥力比较方面^[11,14], 鲜有干热河谷冲沟土壤机械组成的研究报道。

土壤抗冲性是指土壤抵抗径流机械冲刷破坏土壤结构的能力, 是表征土壤抗侵蚀性的重要指标之一^[15]。朱显谟院士提出土壤抗冲性概念以来, 相关研究在全国大量开展。土壤抗冲性受不同地表坡度、径流流量和土地利用类型等外在因素和土壤体积质量(容重)、水稳性团聚体和机械组成等内在因素的共同影响^[15]。针对干热河谷的抗冲性研究中, 周维等^[16]查明不同土地利用类型条件下的土壤抗冲性, 陈安强等^[17]初步探讨了干热河谷坡面表层土壤的力学特性及其对抗冲性的影响。当前在土壤机械组成与抗冲性关系方面研究结果较少, 而此类研究对于科学认识冲沟侵蚀特性具有重要意义。

因此, 本研究以元谋干热河谷冲沟发育区为研究

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2015CB452704)、中国科学院“西部之光”重点项目(Y4R2060060)、国家自然科学基金项目(41571277)和 2015 年度四川省学术和技术带头人培养资金项目资助。

* 通讯作者(dhxiong@imde.ac.cn)

作者简介: 张素(1990—), 女, 四川遂宁人, 博士研究生, 主要从事土壤侵蚀与水土保持、土壤物理研究。E-mail: zhangsu211@foxmail.com

对象,测定土壤机械组成并运用原状土水槽冲刷试验,探讨不同活跃程度冲沟(活跃、较活跃、稳定)不同部位(冲沟沟头、沟床和集水区)土壤机械组成特性及其与抗冲性关系,以期从土壤抗侵蚀性的角度,探明冲沟发育内在机理,为干热河谷区的沟蚀治理工作提供一定理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于云贵高原北缘金沙江下游的干热河谷冲沟发育区(101°48'48" ~ 101°49'54" E, 25°50'30" ~ 25°51'18" N; 海拔 1 350 ~ 1 600 m)。该区属南亚热带季风气候,年平均温度 21.9℃,极端最高气温 43℃,极端最低气温 -0.8℃,最热月(5月)均温 27.2℃,最冷月(12月)均温 15.4℃,≥10℃积温达 8 001.5℃;年降水量 520 ~ 590 mm,年蒸发量 4 000 ~ 4 300 mm,无霜期 360 ~ 365 天,具有炎热干燥、降雨集中、干湿季分明而四季不分明特征。地质构造属于康滇背

斜,元谋断陷堆积盆地^[2]。土壤以燥红土和变性土为主,燥红土是该区的基带土壤,弱腐殖质层较薄,土壤体积质量稍高;变性土土面裂隙多且密集^[18],植被生长差,甚至呈荒裸状态。自然植被为稀树灌木草丛,以禾草为主,杂以灌木、乔木零星分布,草本植物主要为扭黄茅(*Heteropogon contortus*)、毛臂形草(*Brachiaria villisa*)和孔颖草(*Bothriochloa Kuntze*)等^[9]。

1.2 研究方法

1.2.1 土样采集 依据冲沟沟头的跌坎高差比降、沟头深宽比、集水区和沟床植被盖度等判别标准^[5],在中国科学院干热河谷沟蚀崩塌观测研究站内选择 3 类典型(活跃、较活跃和稳定)冲沟。沿沟道方向按照 10 m 等间距采样方式,分别在 3 条冲沟(活跃冲沟、较活跃冲沟和稳定冲沟)的 3 个部位(沟头、沟床及集水区)布设 2 个采样点,共计 18 个样点(图 1)。用 GPS 记录采样点的地理位置、坡面坡度,在每个采样点采用林分标准样地调查法均设置 1 m × 1 m 草本样方,调查冲沟植物盖度(表 1)。

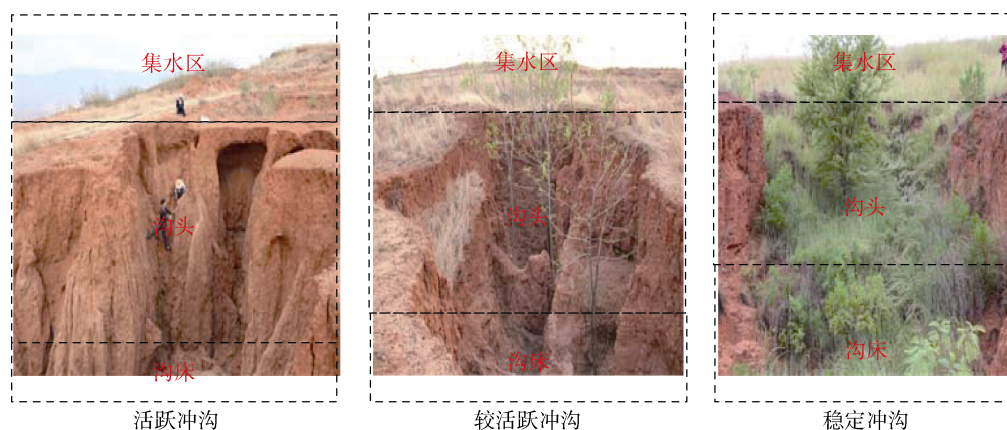


图 1 不同活跃程度冲沟实地照片

Fig. 1 Photos of different activity gullies

1.2.2 冲刷试验及指标测定 土壤抗冲性指标的获取采用原状土水槽冲刷试验,在冲沟各部位分别布设 2 个采样点,剪除采样点植被及枯枝落叶,用规格为 20 cm × 10 cm × 10 cm(长×宽×高)的方形取土器采集原状土,土样采集后用保鲜膜密封,尽量减少取样后的土样破坏、流失,并立即开展冲刷试验。设置原状土水槽冲刷试验装置坡度为 10°,冲刷流量为 1 L/min,冲刷历时 30 min,从开始产流时作为计时起始点,在产流开始后前 5 min,每 1 min 收集 1 次泥沙样,随后每 5 min 收集 1 次,共取 10 次样。用水桶收集试验产生的全部水流,冲刷结束后置泥沙样于烘箱中 105℃烘干称重,测定冲刷泥沙质量(g),共计 18 次冲刷试验。

选用抗冲系数:ANS(L/g),即每冲走 1 g 烘干土

所需水量表示,ANS 越大,土壤的抗冲性越强。

$$ANS = \frac{f \times t}{W}$$

式中: f 为冲刷流量, L/min; t 为冲刷时间, min; W 烘干泥沙质量, g。

土壤机械组成采用吸管法获取^[9]。

1.2.3 数据统计分析 数据分析采用 SPSS17.0 统计软件,差异显著性检验采用 LSD 法($P < 0.05$, 双尾),应用线性回归分析进行函数拟合。

2 结果与分析

2.1 不同活跃度冲沟形态特征

2.1.1 沟头跌坎高差和宽深比 冲沟坡面集水区

表 1 冲沟各采样点基本情况
Table 1 The basic situation of sampling sites

冲沟类型	空间部位	采样点编号	植被盖度(%)	经纬度	海拔(m)
活跃	集水区	A1	—	101.82671°E, 25.85181°N	1 121.02
		A2	—	101.82667°E, 25.85175°N	1 101.31
	沟头	A3	—	101.82515°E, 25.85182°N	1 087.02
		A4	5	101.82651°E, 25.85183°N	1 086.96
	沟床	A5	2	101.82629°E, 25.85179°N	1 084.78
		A6	2	101.82630°E, 25.85192°N	1 082.07
较活跃	集水区	B1	50	101.82652°E, 25.85110°N	1 088.53
		B2	45	101.82645°E, 25.85102°N	1 088.51
	沟头	B3	15	101.82632°E, 25.85095°N	1 080.04
		B4	10	101.82630°E, 25.85090°N	1 077.95
	沟床	B5	70	101.82622°E, 25.85083°N	1 073.09
		B6	78	101.82614°E, 25.85110°N	1 071.43
稳定	集水区	C1	90	101.82505°E, 25.85103°N	1 086.96
		C2	85	101.82501°E, 25.85139°N	1 083.64
	沟头	C3	85	101.82493°E, 25.85132°N	1 075.09
		C4	88	101.82480°E, 25.85121°N	1 072.72
	沟床	C5	95	101.82472°E, 25.85114°N	1 066.81
		C6	90	101.82460°E, 25.85102°N	1 050.39

注：“—”指无植被覆盖。

的径流量越大,沟头汇聚而成的跌水的冲刷力越强,因冲刷而形成的跌坎的高差就越大,沟头的下切及崩塌活动发生就越频繁,且大都发育内凹洞,冲沟溯源侵蚀剧烈,反之亦然,活跃冲沟、较活跃冲沟的沟头跌坎高差分别为 2.00 m 和 0.70 m,稳定冲沟沟头则无明显跌坎(表 2)。冲沟发育是沟头的溯源侵蚀导致冲沟长度加长,沟壁受重力和水力侵蚀崩塌导致宽度扩展和沟床在径流侵蚀下切变深的过程。“沟头宽深比”指沟头宽度与平均沟深之间的比值,活跃冲沟、较活跃冲沟和稳定冲沟的“沟头宽深比”分别为 2.50、3.80、7.80。

表 2 3 类不同活跃程度冲沟形态特征
Table 2 The morphological characteristics of different activity gullies

形态特征	不同活跃度冲沟		
	活跃冲沟	较活跃冲沟	稳定冲沟
沟头跌坎高度(m)	2.00 ± 0.15	0.70 ± 0.22	—
沟头宽深比	2.50 ± 0.37	3.80 ± 0.90	7.80 ± 0.17
沟壁坡度(°)	88.00 ± 0.89	82.00 ± 1.07	57.00 ± 0.92
沟床比降(%)	44.90 ± 0.44	28.93 ± 0.31	20.18 ± 0.48
植被盖度(%)	<5	40 ~ 60	>90

注：“—”指无明显跌坎,n=4。

2.1.2 冲沟沟壁坡度和沟床比降 沟壁坡度指冲沟沟壁的铅直高度和水平宽度之比,沟壁坡度越大其

因重力而崩塌的概率也越大,冲沟发育越为活跃。活跃冲沟、较活跃冲沟和稳定冲沟的沟壁坡度分别为 88.00°, 82.00°, 57.00°(表 2)。稳定冲沟沟壁几乎无崩塌发生,原有沟壁面受水力侵蚀坡度不断减缓;活跃冲沟和较活跃冲沟由于溯源侵蚀剧烈,其沟壁较易发生崩塌,沟壁坡度较陡。沟床比降高低反映沟床部位的侵蚀与淤积平衡情况,沟床比降越大,沟床以径流侵蚀为主,冲沟发育越活跃;沟床比降越小,受流水侵蚀越弱,沟床以泥沙淤积为主,冲沟发育越稳定。活跃、较活跃和稳定冲沟的沟床比降分别为 44.90%、28.93% 和 20.18%。

2.1.3 冲沟植被盖度 植被盖度是表征冲沟活跃程度的有效指标之一。较高的植被盖度能一定程度减轻降水的溅蚀作用,保持土体颗粒的完整性,不易被破坏侵蚀,能有效拦沙有利于冲沟由活跃向稳定发育。不同活跃程度冲沟,其植被盖度存在明显差异,冲沟越发育,侵蚀崩塌越剧烈,不易于先锋物种的着床和存活,因而植被盖度越低。活跃、较活跃冲沟的植被盖度相对较低,稳定冲沟的植被盖度较高。活跃冲沟的植被盖度小于 5%,较活跃冲沟植被盖度约为 40%~60%,稳定冲沟植被盖度则超过 90%(表 2)。

2.2 不同活跃度冲沟土壤机械组成特征

根据国际制土壤质地分级标准^[13-14],可将 3 类典型冲沟各部位的土壤质地分为砂质壤土、粉砂质壤土和

壤土 3 类(表 3)，土壤机械组成为黏粒(<0.002 mm)、粉粒(0.002 ~ 0.02mm)、细砂粒(0.02 ~ 0.5 mm)和粗砂粒(0.5 ~ 2 mm)4 类。

活跃冲沟集水区、沟头和沟床的土壤质地均为砂质壤土。活跃冲沟各部位土壤机械组成的分布大致为：黏粒含量为 5.44%~10.94%，沟头黏粒含量最高而沟床黏粒含量最低；粉粒含量为 10.69%~19.14%，沟头的粉粒含量最高而沟床的粉粒含量最低；细砂粒含量为 62.82%~70.07%，沟床的细砂粒含量最高而沟头的细砂粒含量最低；粗砂粒含量为 5.56%~13.81%，沟床的粗砂粒含量最高而沟头的粗砂粒含量最低。

较活跃冲沟集水区、沟头和沟床的土壤质地同活跃冲沟土壤质地相同，也为砂质壤土。较活跃冲沟各部位土壤机械组成的分布大致为：黏粒含量为 7.77%~12.09%，集水区黏粒含量最高而沟头黏粒含量最低；粉粒含量为 11.22%~21.69%，沟床的粉粒含量最高而沟头的粉粒含量最低；细砂粒含量为 64.44%~75.59%，沟头的细砂粒含量最高而沟床的细砂粒含量最低；粗砂粒含量为 3.84%~5.42%，沟头的粗砂粒

含量最高而集水区的粗砂粒含量最低。

稳定冲沟各部位土壤质地有所差别，其集水区为粉砂质壤土，沟头为壤土，沟床为砂质壤土。稳定冲沟各部位土壤机械组成的分布大致为：黏粒含量为 6.99%~18.13%，集水区黏粒含量最高而沟床黏粒含量最低；粉粒含量为 14.16%~47.43%，集水区的粉粒含量最高而沟床的粉粒含量最低；细砂粒含量为 33.87%~74.37%，沟床的细砂粒含量最高而集水区的细砂粒含量最低；粗砂粒含量为 0.58%~4.49%，沟床的粗砂粒含量最高而集水区的粗砂粒含量最低。

分析表明，不同活跃度冲沟土壤机械组成有所差别。活跃冲沟土壤主要来源于沟岸沟壁的新鲜崩积物和坡面物质的运移，受径流冲刷影响大，粗砂粒含量最高而黏粒含量和粉粒含量最低，透水性强；较活跃冲沟细砂粒含量最高，其余颗粒含量变化大；稳定冲沟黏粒含量、粉粒含量最高而细砂粒含量和粗砂粒含量最低，这可能是因为冲沟集水区无汇水，沟头停止发育，土壤受径流冲刷作用小，且经过多年的物理风化和地表及地下的生物作用，其颗粒分布较均匀，土壤质地较好。

表 3 不同活跃度冲沟土壤机械组成
Table 3 Soil mechanical composition on each part of different activity gullies

冲沟活跃度	冲沟部位	质地	土壤机械组成 (%)			
			黏粒	粉粒	细砂粒	粗砂粒
活跃	集水区	砂质壤土	10.94 ± 6.33 bc	12.88 ± 5.04 d	69.59 ± 9.96 bc	6.60 ± 1.75 b
	沟头	砂质壤土	12.49 ± 0.26 b	19.14 ± 2.64 c	62.82 ± 1.61 c	5.56 ± 3.60 bc
	沟床	砂质壤土	5.44 ± 4.4 c	10.69 ± 8.03 d	70.07 ± 2.28 b	13.81 ± 10.28 a
较活跃	集水区	砂质壤土	12.09 ± 1.27 b	12.77 ± 1.96 d	71.30 ± 0.34 ab	3.84 ± 1.10 bc
	沟头	砂质壤土	7.77 ± 2.07 c	11.22 ± 1.01 d	75.59 ± 1.93 a	5.42 ± 2.98 bc
	沟床	砂质壤土	9.25 ± 1.36 bc	21.69 ± 3.90 c	64.44 ± 4.22 c	4.63 ± 1.59 bc
稳定	集水区	粉砂质壤土	18.13 ± 3.78 a	47.43 ± 2.82 a	33.87 ± 6.90 e	0.58 ± 0.36 c
	沟头	壤土	11.53 ± 0.81 b	35.57 ± 2.20 b	51.87 ± 2.56 d	1.04 ± 0.47 c
	沟床	砂质壤土	6.99 ± 1.31 c	14.16 ± 0.37 d	74.37 ± 3.77 ab	4.49 ± 2.89 bc

注：表中数据为平均值 ± 标准差(n=9)，同列不同小写字母表示不同活跃度冲沟土壤机械组成差异显著(P<0.05)。

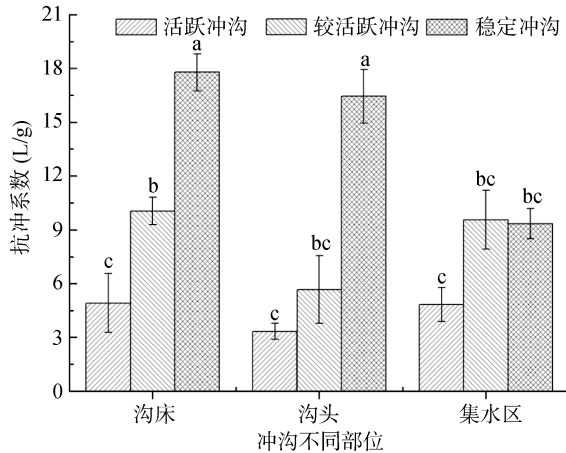
2.3 不同活跃度冲沟土壤抗冲性特征

土壤抗冲性是指土壤抵抗径流对其机械冲刷破坏作用的能力，是表征土壤抗侵蚀性能的重要指标之一。比较同一冲沟不同部位土壤抗冲性可知，3 类冲沟沟床的抗冲性均最高，而活跃、较活跃冲沟的沟头和稳定冲沟的集水区抗冲性最低。活跃冲沟土壤抗冲性为 3.34 ~ 4.92 L/g，各部位抗冲性差异小，其中沟头抗冲性最小为 3.34 L/g，沟床抗冲性最大，较沟头抗冲性增大 47.31%，集水区抗冲性较沟头抗冲性增加 44.91%。较活跃冲沟土壤抗冲性为 5.67 ~ 10.05 L/g，各部位抗冲性差异较大，沟头抗冲性最小为 5.67 L/g，

沟床抗冲性最大，较沟头抗冲性增大 77.25%，集水区抗冲性较沟头抗冲性增加 68.61%。稳定冲沟土壤抗冲性为 9.34 ~ 17.78 L/g，沟头和沟床抗冲性相差不大，集水区抗冲性最小，沟床抗冲性最大，较集水区抗冲性增大 90.36%，沟头抗冲性较集水区抗冲性增加 68.61%。

比较不同活跃度冲沟沟床的土壤抗冲性，活跃冲沟沟床土壤抗冲性最小，较活跃冲沟、稳定沟床土壤抗冲性分别比活跃冲沟沟床土壤抗冲性增大 104.27% 和 261.38%；比较不同活跃度冲沟沟头的土壤抗冲性，活跃冲沟沟头的土壤抗冲性最小，较活跃

冲沟、稳定沟头土壤抗冲性分别比活跃冲沟沟床土壤抗冲性增大 69.76% 和 392.51%；比较不同活跃度冲沟集水区的土壤抗冲性,活跃冲沟集水区的土壤抗冲性最小,较活跃冲沟、稳定沟头土壤抗冲性分别比活跃冲沟集水区土壤抗冲性增大 97.52% 和 92.98%。



(柱图上方不同小写字母表示不同冲沟土壤抗冲性差异显著 ($P < 0.05$), $n = 6$)

图 2 3 类典型冲沟不同部位土壤抗冲性
Fig. 2 The ANS on each part of different activity gullies

比较不同活跃度冲沟同一部位抗冲性可知,沟头和沟床的土壤抗冲性大小依次为稳定冲沟>较活跃冲沟>活跃冲沟,集水区以活跃冲沟土壤抗冲性

最小,较活跃与稳定冲沟的土壤抗冲性相当。这可能是因为稳定冲沟的上游集水区无坡面汇流,沟头溯源侵蚀停止,无跌坎发育,沟壁几乎无崩塌发生,鲜有结构松散的新鲜崩积物,原有沟壁面受水力侵蚀坡度不断减缓,土壤原位停留时间长,植被大量生长。

2.4 土壤抗冲性与机械组成的关系

影响 3 类典型冲沟土壤抗冲性的机械组成指标有所差别。通过对土壤黏粒含量 X_1 、粉粒含量 X_2 、细砂粒含量 X_3 和粗砂粒含量 X_4 与土壤抗冲性 Y 进行线性回归分析得到土壤抗冲性方程(表 4)。土壤的砂粒含量是影响 3 类活跃度冲沟(各部位)抗冲性的主要指标,黏粒含量(X_1)是影响稳定冲沟(各部位)、活跃冲沟沟头、较活跃冲沟集水区和沟床的土壤抗冲性指标;粉粒含量(X_2)与较活跃冲沟沟头、稳定冲沟集水区和沟床的抗冲性有关。

研究表明,砂粒含量越高,土壤透水性越强,结构越松散,土壤颗粒间的胶结力越小,越易被径流冲刷破坏,从而导致土壤抗冲性越低,这与陈安强等^[17]研究结论相似;相反,黏粒含量越高,土壤结构越稳定,吸附水的能力越强,崩解性低,抵抗径流冲刷的能力越强。可推断,今后可通过增大土壤黏粒含量的土壤改良措施,开展冲沟的治理工作。

表 4 不同活跃度冲沟各部位土壤抗冲性与机械组成的关系
Table 4 The relationship between ANS and soil mechanical composition on each part of different activity gullies

冲沟	部位	拟合公式	Sig	R^2	F
活跃冲沟	集水区	$Y = 16.692 - 0.221 X_3 + 0.53 X_4$	0.186	0.674	3.103
	沟头	$Y = 13.241 + 6.627 X_1 - 1.449 X_3 - 0.298 X_4$	0.195	0.865	4.28
	沟床	$Y = 77.332 - 1.104 X_3 + 0.36 X_4$	0.461	0.404	1.015
较活跃	集水区	$Y = -171.353 + 2.75 X_1 + 2.112 X_3 - 0.762 X_4$	0.689	0.459	0.567
	沟头	$Y = -416.017 - 2.171 X_2 + 5.669 X_3 + 3.245 X_4$	0.779	0.365	0.384
	沟床	$Y = 692.064 - 27.066 X_1 - 5.988 X_3 - 9.908 X_4$	0.452	0.67	1.353
稳定	集水区	$Y = -8.236 + 3.447 X_1 - 0.435 X_2 - 42.111 X_4$	0.135	0.908	6.561
	沟头	$Y = -3062.92 + 111.703 X_1 + 34.505 X_3 + 2.293 X_4$	0.24	0.984	41.229
	沟床	$Y = -149.236 - 0.203 X_1 + 11.582 X_2 + 0.996 X_4$	0.926	0.176	0.142

注: X_1 , X_2 , X_3 , X_4 分别指代黏粒含量、粉粒含量、细砂粒含量和粗砂粒含量; Sig, R^2 , 和 F 分别指代差异显著性、决定系数和显著性检验; Y 为土壤抗冲性, $n = 6$ 。

3 讨论

通过长期野外调查和 RTK-GPS 定位监测发现,干热河谷冲沟呈现不同的形态特征,并初步建立了判定标准^[5],并依托该量化指标选取了活跃、较活跃、稳定 3 类冲沟,比较了冲沟的沟头跌坎高度、沟头宽深比、沟壁坡度以及沟床比降等形态特征;土壤机械

组成是土壤结构的基础,因而本文依托土壤机械组成指标,从不同空间尺度上研究了冲沟的土壤抗冲性。研究发现,冲沟各部位土壤机械组成、机械组成与抗冲性的关系差异明显;细砂粒含量(X_3)和粗砂粒含量(X_4)是影响 3 类活跃度冲沟抗冲性的主要指标,影响稳定冲沟抗冲性的指标还有黏粒含量(X_1)。

影响冲沟发育的因子如沟头溯源侵蚀^[3]、沟壁的

崩塌^[7]和土壤结构^[19]等已有大量研究成果, 冲沟不同形态特征指标与土壤机械组成、抗冲性等土壤性质间是否存在内在逻辑联系这一问题有待探讨; 冲沟呈现出不同活跃程度的发育形态, 其地形条件、地表水文过程也是重要影响因素, 今后应当加强对冲沟沟头集水区、冲沟沟道规模等指标的持续监测, 开展沟蚀发育过程与可视化模拟^[20]研究, 以期更全面地了解沟蚀发育过程。

植被根系具有固结、缠绕土壤的能力, 可有效提高土壤抗剪强度, 减缓径流对土壤颗粒的分散作用, 根系分泌物可改变土壤微环境^[21-22]; 不同植被根系类型、根系生物量、根长密度和根重密度等指标对土壤抗冲性的强化作用亦不容忽视。但受试验条件和测量方法的限制, 获取的植被根系指标人为误差较大, 数据质量差, 今后可借助 Win RHIZO 根系分析系统, 深入探讨植被根系指标对土体抗冲性的影响, 增强土壤抗冲性研究的精确化和科学化。

除了土壤机械组成, 影响冲沟抗冲性的土壤指标因子是多元的, 如土壤入渗、崩解性以及胀缩特性等; 本文针对冲沟的沟头、沟床和集水区等部位做了对比研究, 冲沟沟壁部位土壤抗冲性的研究也应加以重视, 以期更综合地探讨冲沟的土壤抗冲性问题; 此外在土壤科学发展历程中, 对单一土壤的内在机理探讨非常深入, 却一定程度忽略了土壤的多样性(差异性)研究^[23], 而不同土壤类型的比较研究对于全面了解土壤的生态环境过程具有较大意义, 今后可针对元谋干热河谷不同土壤类型, 开展燥红土、变性土和新积土等之间的对比研究。

4 结论

1) 3类活跃度冲沟呈现不同形态特征。综合比较“沟头跌坎高差、沟头宽深比、沟壁坡度、沟床比降”等指标表现为活跃冲沟>较活跃冲沟>稳定冲沟, 植被盖度指标则相反。活跃冲沟沟头有明显跌坎(2.0 m), 内凹洞发育, 溯源侵蚀剧烈, 沟壁崩塌活动频繁, 沟床下切, 植被盖度极低(<5%), 沟头宽深比高达2.5; 较活跃冲沟的沟头仍然发育, 但沟壁坡度、沟床比降和沟头宽深比等指标已明显小于活跃冲沟, 且沟床尾部已有大量草本植被着床生长(植被盖度>40%)。

2) 冲沟各部位及3类冲沟的土壤机械组成和抗冲性有所差别。活跃、较活跃冲沟各部位土壤质地均为砂质壤土, 稳定冲沟集水区为粉砂质壤土、沟头为壤土、沟床为砂质壤土; 黏粒(<0.002 mm)含量、粉粒(0.002 ~ 0.02mm)含量总体表现为活跃冲沟<较活

跃冲沟<稳定冲沟; 细砂粒(0.02 ~ 0.5mm)含量为较活跃冲沟>活跃冲沟>稳定冲沟; 粗砂粒(0.5 ~ 2mm)含量则是活跃冲沟>较活跃冲沟>稳定冲沟。

3) 冲沟各部位、不同活跃度冲沟土壤抗冲性各不相同, 3类冲沟各部位土壤抗冲性均是沟床最高, 比较不同活跃度冲沟同一部位抗冲性可知, 沟头和沟床的土壤抗冲性大小依次为稳定冲沟>较活跃冲沟>活跃冲沟, 集水区以活跃冲沟土壤抗冲性最小, 较活跃与稳定冲沟的土壤抗冲性相当。可推断, 针对不同的部位采取不同的治理措施, 应重视集水区(尤其是活跃冲沟)部位的治理, 采用生物措施保持冲沟沟床土壤稳定性。

4) 线性回归分析表明: 砂粒含量(X_3 、 X_4)是影响3类冲沟(各部位)土壤抗冲性的主要指标。此外黏粒含量(X_1)还是影响稳定冲沟(各部位)、活跃冲沟沟头、较活跃冲沟集水区和沟床土壤抗冲性的指标, 粉粒含量(X_2)与较活跃冲沟沟头、稳定冲沟集水区和沟床土壤抗冲性有关。今后可通过增大土壤黏粒含量的土壤改良措施, 开展冲沟的治理工作。

参考文献:

- [1] Su Z A, Xiong D H, Dong Y F, 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: 1 351-1 363
- [2] 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
- [3] Su Z A, Xiong D H, Dong Y F, et al. Simulated headward erosion of bank gullies in the Dry-hot Valley Region of southwest China[J]. *Geomorphology*, 2014, 204: 532-541
- [4] 陈安强, 张丹, 魏雅丽, 等. 元谋干热河谷冲沟沟头土壤结构对入渗性能的影响[J]. *水土保持学报*, 2011, 25(1): 47-52
- [5] 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
- [6] 熊东红, 杨丹, 翟娟, 等. 元谋干热河谷冲沟沟头径流水动力学特性及产沙效应初探[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(6): 52-56, 62
- [7] 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
- [8] 杨丹, 熊东红, 张素, 等. 金沙江干热河谷冲沟沟床草被对径流水动力特性的影响[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(6): 77-81
- [9] 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

- [10] 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
- [11] 邓廷飞, 刘彦, 颜秋晓, 等. 贵州典型山银花土壤机械组成与养分特性及其关系[J]. 水土保持学报, 2014, 28(5): 209-214
- [12] 黄欢, 何丙辉, 鲍玉海, 等. 不同模式地埂植物篱对土壤颗粒组成特征参数的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(6): 256-261
- [13] 张保刚, 梁慧春. 草地土壤机械组成研究综述[J]. 辽宁农业科学, 2009(6): 38-41
- [14] 王长庭, 王根绪, 刘伟, 等. 高寒草甸不同类型草地土壤机械组成及肥力比较[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(9): 160-165
- [15] 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.
- [16] 周维, 张建辉, 李勇, 等. 金沙江干热河谷不同土地利用条件下土壤抗冲性研究[J]. 水土保持通报, 2006, 26(5): 26-30, 42
- [17] 陈安强, 张丹, 熊东红, 等. 元谋干热河谷坡面表层土壤力学特性对其抗冲性的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(5): 108-113
- [18] 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
- [19] 张丹, 陈安强, 苏友波, 等. 云南典型紫色泥岩微观结构的定量特征[J]. 土壤通报, 2014, 45(2): 320-327
- [20] 吴淑芳, 刘政鸿, 霍云云, 等. 黄土坡面细沟侵蚀发育过程与模拟[J]. 土壤学报, 2015, 52(1): 48-56
- [21] 李佳, 黄梦静, 任艳, 等. 水分胁迫对向水性突变体 *rhe2* 根生长与响应的影响[J]. 土壤, 2015, 47(5): 858-862
- [22] 孙波, 廖红, 苏彦华, 等. 土壤-根系-微生物系统中影响氮磷利用的一些关键协同机制的研究进展[J]. 土壤, 2015, 47(2): 210-219
- [23] 任圆圆, 张学雷. 土壤多样性研究趋势与未来挑战[J]. 土壤学报, 2015, 52(1): 9-16

The Difference of Soil Mechanical Composition and Soil Anti-scourability on Different Positions of Gullies

ZHANG Su^{1,2,3}, XIONG Donghong^{1,2*}, XIAO Liang^{1,2,3}, WU Han^{1,2,3}, YANG Dan^{1,2,3},
ZHANG Baojun^{1,2,3}, ZHENG Xu⁴

(1 Key Laboratory of Mountain Hazards and Earth Surface Processes, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China; 2 Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China; 3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4 Soil and Water Conservation Department in Ningnan of Sichuan Province, Ningnan, Sichuan 615400, China)

Abstract: The gully area with tattered landform and loosen soil structure has threatened to the restoration of degraded ecosystem in dry-hot valley. For ascertaining the different characteristics of soil mechanical composition and soil anti-scourability (ANS), the soil samples were collected from three different gully positions of the gully watershed, gully head and gully bed in each of active gully, semi-active gully and stable gully. The results indicated that active gully and semi-active gully were distributed with sandy loam soil, but soil texture in stable gully varied with soil position in the gully. The contents of soil clay and silt followed the same order: stable gully > semi-active gully > active gully, while the coarse sand content followed an opposite order. Fine sand content followed the order: semi-active gully > active gully > stable gully. The ANS of the soil in gully beds were the highest among the three positions for all gullies. The soil ANS in gully head and gully bed, followed the order: stable gully > semi-active gully > active gully. The watershed of active gully had the lowest soil ANS and the soil ANS of semi-active gully watershed was similar to that of the stable gully watershed. The linear regression analysis indicated that the sand content was the main factor affecting the soil ANS in three different gully positions of different activities gullies. The clay content was the main factor affecting the soil ANS in three gully positions of stable gully. The silt content was related to the soil ANS of the semi-active gully head and watershed and bed of stable gully. The research results can be expected to provide theoretical references for the further study on the relationship between soil texture and soil anti-erosion.

Key words: Gully; Soil anti-scourability; Soil mechanical composition; Dry-hot valley; Different positions