

金沙江干热河谷冲沟区优先流影响下的土壤力学特性

徐贵迁¹, 赵洋毅^{1,2}, 王克勤^{1,2}, 段旭^{1,2}, 李志成¹

(1.西南林业大学生态与环境学院,昆明 650224;
2.国家林业和草原局云南玉溪森林生态系统国家定位观测研究站,昆明 650224)

摘要:为探究金沙江干热河谷冲沟区优先流与土壤力学的相关机理,揭示优先流影响下土壤抗剪强度特征规律,丰富干热河谷冲沟发育区沟侵蚀机理,为该地区进一步开展沟蚀治理提供理论依据。在典型冲沟发育区选择完整冲沟为研究对象,基于染色示踪、土壤理化、原状土直剪试验,利用 RDA 等统计方法分析优先流与土壤力学指标间的相关性,明晰优先流和抗剪强度的关系。结果表明:(1)由于冲沟发育使冲沟内由集水区到沟底优先流发育程度逐渐降低。土壤含水率、容重、总孔隙度、有机质含量均呈优先流区大于基质流区,机械组成分形维数整体上基质流区(2.680~2.874)大于优先流区(2.746~2.893)。(2)冲沟区优先流通过影响土壤黏聚力和内摩擦角进而对抗剪强度产生影响,一定程度上会降低土体抗剪强度。集水区、沟头抗剪强度大于沟床和沟底。优先流区黏聚力(1.24~2.65 kPa)小于基质流区黏聚力(1.91~4.27 kPa),优先流区内摩擦角(19.52°~22.47°)略大于基质流区内摩擦角(17.68°~22.35°),优先流区抗剪强度(36.66~43.68 kPa)整体小于基质流区抗剪强度(38.74~47.32 kPa)。(3)优先流与土壤黏聚力和内摩擦角有不同程度的相关性。土壤黏聚力与染色面积比、基质流深度呈显著负相关,内摩擦角与优先流百分数、优先流区染色面积比呈负相关;抗剪强度与染色面比、最大染色深度、优先流百分数、优先流区染色面积比呈负相关。

关键词:干热河谷; 冲沟; 优先流区; 基质流区; 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(2023)02-0100-11

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2023.02.013

Soil Mechanical Properties Under the Influence of Preferential Flow in the Gully Area of Jinsha River's Dry-hot Valley

XU Guiqian¹, ZHAO Yangyi^{1,2}, WANG Keqin^{1,2}, DUAN Xu^{1,2}, LI Zhicheng¹

(1.College of Ecology and Environment, Southwest Forestry University, Kunming 650224; 2.National Forestry Observation and Research Station of Yuxi Forest Ecosystem, National Forestry and Prairie Bureau, Kunming 650224)

Abstract: In order to explore the correlation mechanism between preferential flow and soil mechanics in the gully area of the dry-hot valley of Jinsha River and reveal the characteristics of soil shear strength under the influence of priority flow, to enrich the mechanism of gully erosion in the development area of hot and dry river valleys and provide theoretical basis for further gully erosion control in this area, the intact gully in the typical gully development area were selected as the study object, and based on staining tracer, soil physico-chemical and intact soil straight shear experiments, the correlation between priority flow and soil mechanical indexes were analyzed by statistical methods such as RDA, and to clarify the relationship between preferential flow and shear strength. The results showed that: (1) Due to the development of ditch, the preferential flow development degree from the catchment area to the bottom of the ditch was gradually reduced. The soil moisture content, bulk density, total porosity and organic matter content in the preferential flow area were higher than that the matrix flow area, and the fractal dimension of mechanical composition in the matrix flow area (2.680~2.874) was greater than that in the preferential flow area (2.746~2.893). (2) The preferential

flow area in the gully area affects the soil cohesion and strength, which will reduce the soil shear strength to a certain extent. The shear strength of the water catchment area and the trench head was greater than that of the ditch bed and the ditch bottom. The cohesive in the preferential flow region (1.24~2.65 kPa) was smaller than that in the matrix flow area region (1.91~4.27 kPa), the internal friction angle in the preferential flow region ($19.52^{\circ}\sim 22.47^{\circ}$) was slightly larger than that in the matrix flow area region ($17.68^{\circ}\sim 22.35^{\circ}$), and the shear strength of the preferential flow area region (36.66~43.68 kPa) was generally smaller than that of the matrix flow area region (38.74~47.32 kPa). (3) The preferential flow had different degree of correlation with soil cohesion and internal friction angle. Soil cohesion was significantly negatively correlated with dyeing area ratio and stroma flow depth, while internal friction angle was negatively correlated with the percentage of the preferential flow and dyeing area ratio of preferred flow area. The shear strength was inversely correlated with the ratio of staining surface, the maximum dyeing depth, the percentage of preferential flow and the dyeing area of the preferential flow area.

Keywords: dry-hot valley; gully; preferential flow area; matrix flow area; soil shear strength

金沙江干热河谷是长江流域典型生态环境脆弱区,特殊气候类型、复杂地质构造使该地区冲沟发育规模大水土流失严重,生态系统具有易破坏、难恢复的特点^[1-2]。冲沟侵蚀是土壤水力侵蚀的主要类型之一,流域土壤侵蚀不仅造成土地资源退化甚至彻底破坏,大量径流泥沙混合物对水体质量和河道运行安全造成严重威胁^[3]。土壤结构特性和土壤抗剪强度是防止土壤侵蚀的内在因素,其值大小和团聚体稳定性直接反映土壤抗侵蚀能力^[4-5]。土壤抗剪强度是表征土壤可蚀性的有效指标^[6],也是土壤水力侵蚀模型的重要参数。土壤黏聚力和内摩擦角是影响抗剪强度的主要因素,这些因素与土壤水分等本底特征关系密切。优先流作为一种特殊土壤水分、溶质运动方式^[7],运移过程中使土壤本底特性发生变化,进而对抗剪强度造成影响。因此,关注优先流对土壤力学特性的影响对冲沟发育及治理具有重要意义。

优先流是土壤水分在绕过多孔基质小部分,同时沿着某些路径运动的现象^[8],与地表径流和地下水有密切关系。众多学者^[9-12]针对优先流特征及其影响因素做了大量研究,揭示不同地理环境下的优先流特征及其影响因素。干热河谷地区优先流的发育不仅与土壤理化性质以及植被根系关系密切,还受干湿交替的影响^[7,12]。优先流是土壤水分运动的重要组成部分,水分在优先路径中快速运动过程侵蚀土壤颗粒,影响土壤水分分布,降低土壤抗剪强度,使土体稳定性降低,容易诱发山体滑坡、崩塌和泥石流等地质灾害^[13-14]。相关研究^[15]表明,金沙江干热河谷冲沟不同土层抗剪强度差异明显,黏聚力与干湿交替次数呈负相关,内摩擦角则与其无明显关系,抗剪强度对边坡沟道深度和截面积有显著影响^[16],表层土壤抗冲指数随黏聚力和内摩擦角增加呈对数函数增长^[4],

植物根系不仅能提高土壤抗剪强度^[17],还能延长剪切破坏位移^[18]。目前对土壤力学特征关注度较高的是理化性质、植被类型及根系、土壤微生物等对其的影响。有研究^[19-20]发现,黏聚力与有机质、饱和导水率和毛管孔隙度呈正相关,内摩擦角与粉粒、容重呈正相关,与黏粒、饱和导水率和毛管孔隙呈负相关,土壤容重和含水量是影响耕层土壤抗剪强度的关键因素^[21],植物根系加固可有效提高土壤抗剪强度^[22-23],草地土壤黏聚力、抗剪强度随草地退化程度加剧而减小^[24],农作物根系能增强土体抗剪强度,细根和分支数较多的作物根—土复合体能有效增强土体强度^[25],菌根复合体可进一步提高土壤抗剪强度^[26]。

综上众多学者在土壤理化性质、植物根系以及土壤微生物等与土壤抗剪强度的关系以及机理的相关研究已成熟,针对土壤水分方面的研究还有一定空间,尤其是在优先流对土壤抗剪、抗冲、抗蚀等方向的相关研究相对不足。本研究在干热河谷典型冲沟发育区采用野外染色示踪试验和室内原状土剪切试验结合,探究优先流影响下不同土层抗剪强度特性,可丰富特殊地理环境下小尺度冲沟侵蚀机理,以期为该区进一步开展水土流失治理提供理论依据,对生态恢复具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于云南省元谋县元谋金雷水土保持科技示范园实验区($101^{\circ}49'28.75''\text{E}$, $25^{\circ}51'18.73''\text{N}$),该区沟蚀发育规模大冲沟交错分布地形破碎,土壤侵蚀强烈使得植被严重退化生态脆弱。区内年均温度约 21°C ,年均降水量约 620 mm,年蒸发量约 3 508 mm,将近降水量的 6 倍^[27]。土壤类型以燥红土为主,自然植被类型为稀树灌草丛,草本植物以扭黄茅(*Heteropogon contortus*)和孔

颖草(*Botnrochola portusa*)居多,乔、灌以银合欢(*Leucaena leucocephala*)、车桑子(*Dodonaea viscosa*)为主。研究区位置及采样点示意图 1。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置 综合考虑研究区冲沟完整性选择基底相近(土壤、地形状况、坡向、海拔、植被等因子接近)的 2 条冲沟,在冲沟集水区、沟头、沟床、沟底各设置 2 块 15 m×15 m 大小的样地,总计样地 16 块,并在冲沟各分区样地内分别设置 3 处试验点,用于染色示踪试验及样品采集,分区之间采样点间离设置不小于 20 m(图 1),样地基本情况见表 1。

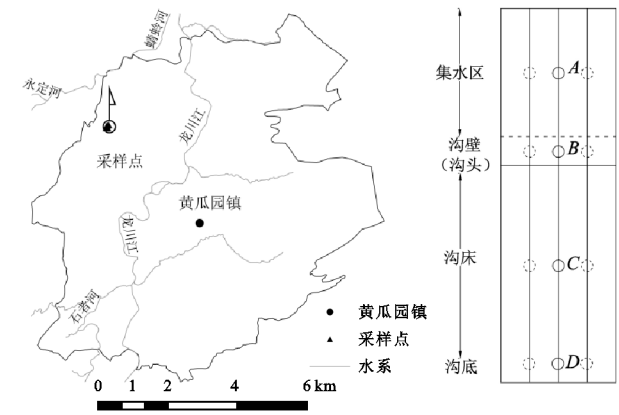


图 1 研究区位置及采样点示意

表 1 样地基本情况

样地 名称	坡度/ (°)	海拔/ m	盖度/ %	自然 含水率/%	土壤容重/ (g·m ⁻³)	土壤质地/%		
						黏粒	粉粒	砂砾
集水区	16	1095.24	70	5.04	1.59	9.88	54.01	36.12
沟头	27	1092.74	40	5.45	1.53	7.81	44.92	47.27
沟床	20	1090.34	60	10.92	1.55	8.11	41.01	50.88
沟底	8	1087.47	80	10.21	1.60	5.60	34.80	59.60

1.2.2 野外染色试验 本研究试验于 2021 年 7—12 月开展,在不扰动土壤腐殖质层的前提下,除去样地表面杂物,然后将预制铁框(80 cm×80 cm×50 cm)埋入土中 30 cm,并实铁框内壁 5 cm 以内的土壤。将调配好的 4 g/L 亮蓝溶液 30 L(模拟当地暴雨强度 60 mm/h),用喷壶均匀喷洒在框内,再盖上防水布。染色 24 h 后,取走防水布和铁框。在铁框中心区域以水平宽度 10 cm 为 1 层由上至下分层挖掘垂直剖面,开挖深度视亮蓝染色最大深度而定,本试验最大开挖深度为 50 cm。开挖过程中采用相机拍摄剖面染色图像,并分优先流区和基质流区取样测定相关指标。

1.2.3 土壤基本性质测定 染色完成后用铝盒、环刀(100 cm³)在优先流区和基质流区分层采集土样,每个取样点均设置 3 次重复取样,测定土壤含水率、容重和孔隙度;每层采集土壤样品约 1 kg 用于测定其他土壤基本性质,其中,土壤机械组成采用激光粒度仪测定,其余相关指标参考《中华人民共和国林业行业标准 LY/T—1999》并根据实际试验进行调整。土壤颗粒分形维数计算方式引自杨培岭等^[28]相关研究。

1.2.4 土壤抗剪强度测定 在染色试验基础上,用抗剪环刀在优先流和基质流区分别取原状土用来测定土壤抗剪强度指标。利用 ZJ 型应变控制式直剪仪以 0.8 mm/min 的剪切速率进行剪切试验^[15],设置 25,50,75,100 kPa 4 个级别的垂直载荷,测定优先流区和基质流区原状土样力学指标内摩擦角(θ)和黏聚

力(C)。同一土层设计 3 次重复处理。

1.3 数据分析与处理

1.3.1 土体抗剪强度指标计算 在剪应力作用下土壤颗粒因持续剪切而引起剪切变形和变形破坏的阻力叫抗剪强度,根据摩尔库伦公式计算,即:

$$\tau = P \tan \theta + C \tag{1}$$

式中: τ 为抗剪强度(kPa); P 为法向应力(kPa); θ 为内摩擦角(°); C 为黏聚力(kPa)。

1.3.2 优先流特征指标计算 本文确定的土壤优先流指标主要有染色面积比、优先流区染色面积比和优先流百分数等,依据图 2 所示染色照片计算优先流指标,计算方法引自相关研究^[29]。

染色面积比反映土壤剖面优先流强度,一定程度上可以体现土壤小尺度水文连通性。染色面积比同时也是判定优先流区和基质流区的重要指标。

$$DC = [D \div (D + ND)] \times 100\% \tag{2}$$

式中: DC 为染色面积比(%); D 为染色面积(cm²); ND 为未染色面积(cm²)。

基质流深度、染色面积比降低至 80% 时,水流运动过程主要为基质流,其水流运动深度成为基质流深度,单位为 cm。

优先流区染色面积比表示优先流区染色面积占图像总面积的百分比。

$$DC_{pf} = (D_{pf} \div S) \times 100\% \tag{3}$$

式中: DC_{pf} 为优先流区染色面积比(%); D_{pf} 为优先流区染色面积(cm²); S 为图像总面积(cm²)。

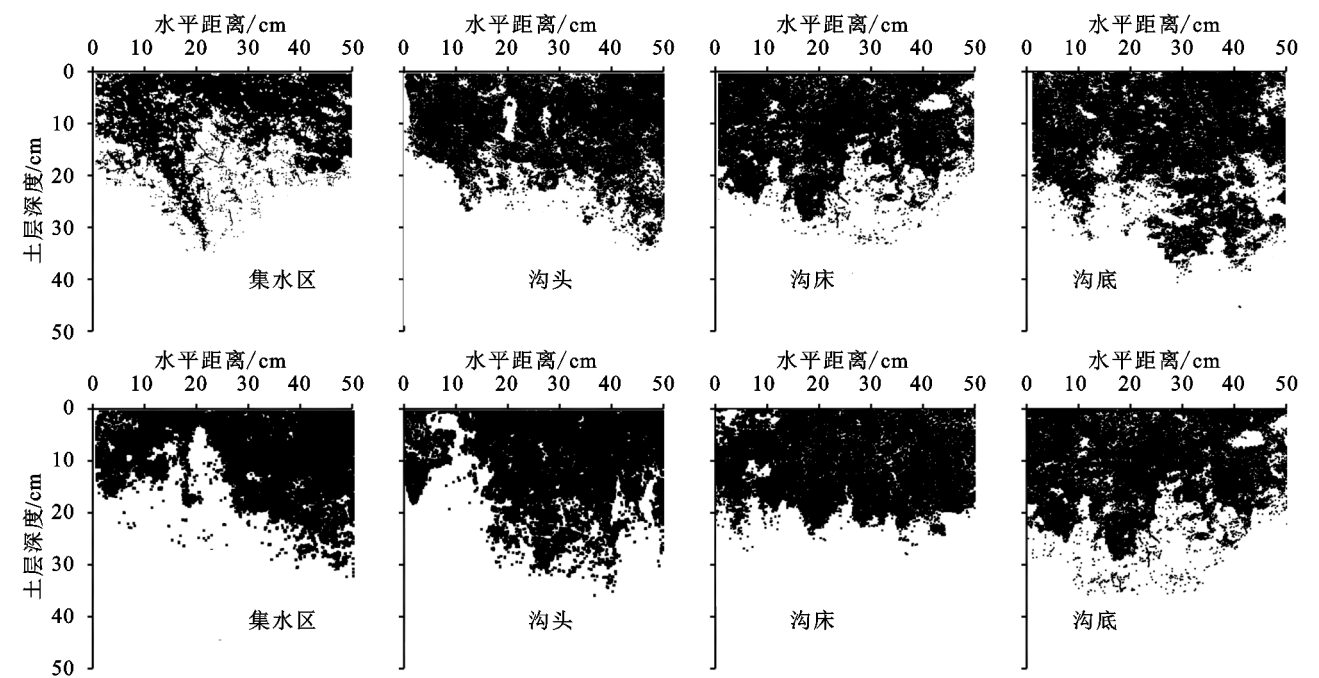


图 2 冲沟不同部位土壤垂直剖面染色

优先流区染色面积占图像中总染色面积的百分比叫优先流百分数。

$$P_{F-fr} = (1 - 50 \times U_{niFr} \div S_{Tot}) \times 100\% \quad (4)$$

式中： P_{F-fr} 为优先流百分数(%)； U_{niFr} 为基质流深度(cm)； S_{Tot} 为总染色面积(cm^2)；50 为土壤垂向剖面宽度为 50 cm。

数据采用 WPS Office 2022、SPSS 25、Origin 2021、Canoco 5 软件进行统计、分析及制图。运用多重比较、相关性检验得到不同土层各变量间的关系，利用冗余分析得到影响土壤力学特性的主要因子等。

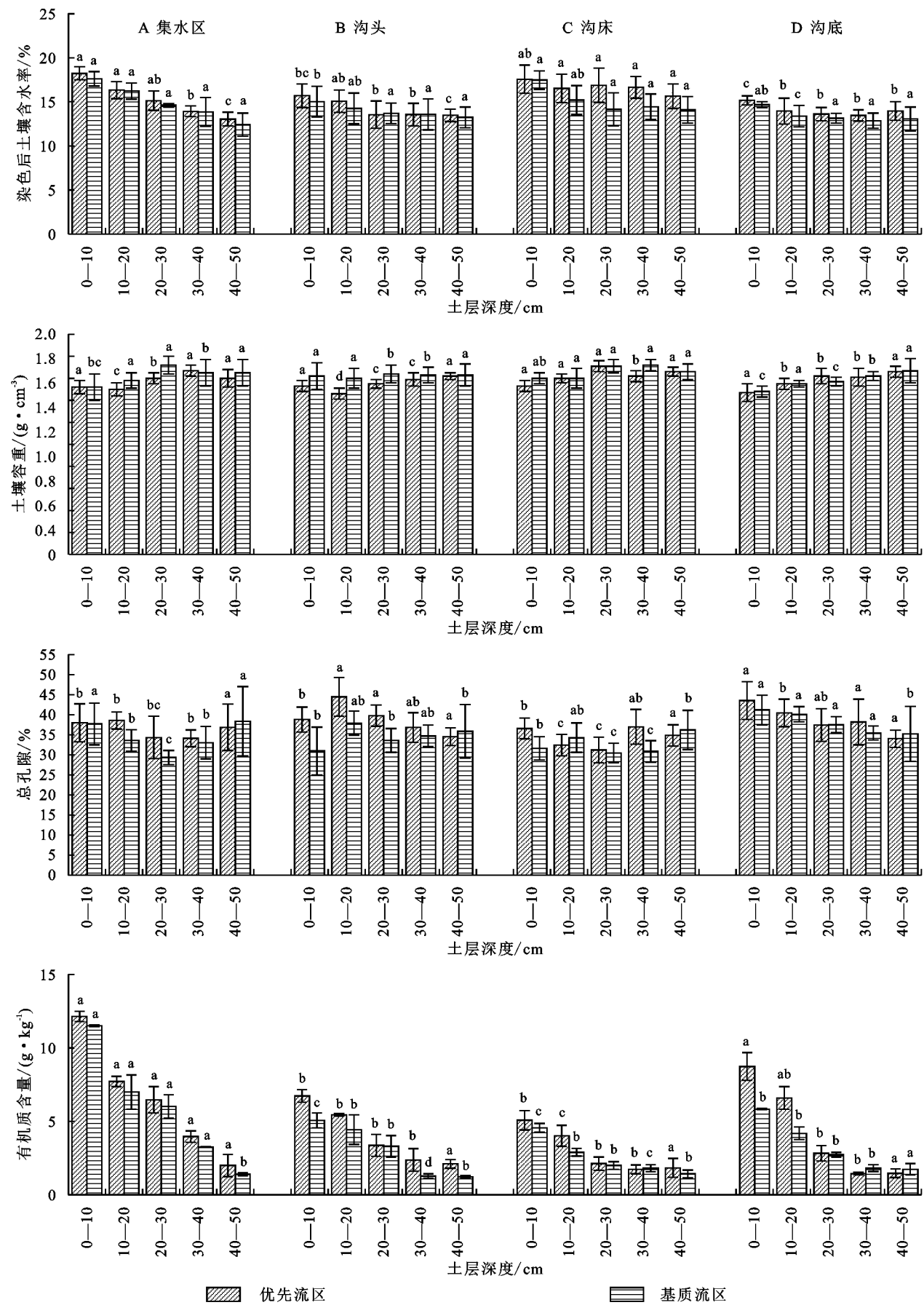
2 结果与分析

2.1 冲沟优先流区和基质流区土壤本底特征

研究区优先流区和基质流区土壤基本特征见图 3 和表 2。冲沟不同部位、不同土层深土壤理化性质存在不同程度差异。冲沟不同样地优先流区和基质流区土壤含水率最大值均出现在 0—10 cm 土层中，并随土层加深而降低，含水率呈优先流区大于基质流区的规律。沟头和沟底土壤含水率不同土层之间的差异最小，集水区和沟床则差异较大。优先流区不同样地同一土层之间含水率存在明显差异($p < 0.05$)，而基质流区含水率在 20 cm 以下相同土层中变化不大(无显著差异)，仅在 0—20 cm 土层范围存在显著差异。冲沟不同部位间土壤容重存在一定差异，沟底容重总体上略小于其他部位。土壤容重整体上优先流区小于基质流区，土壤容重相对稳定，基质流区在 $1.48 \sim 1.72 \text{ g/cm}^3$ ，优先流区在 $1.46 \sim 1.71 \text{ g/cm}^3$ ，在 40—50 cm 土层各样地间无显著差异。不同部位之

间土壤总孔隙差异明显，集水区、沟床整体大于沟头和沟底。土壤总孔隙度整体呈优先流区大于基质流区，浅层土壤(0—20 cm)平均总孔隙度总是大于深层(20—50 cm)，在不同土层中总孔隙度变化较大(存在显著差异)。有机质含量整体呈优先流区大于基质流区，优先流区有机质最大值为 12.14 g/kg ，最小值为 1.44 g/kg ，基质流区分别为 $11.50, 1.21 \text{ g/kg}$ 。0—10 cm 土层有机质含量仅集水区、沟底与沟头存在显著差异，10—50 cm 不同样地相同土层中有机质含量有明显差异($p < 0.05$)，这种差异性在较深土层(40—50 cm)中有减小的趋势。在冲沟集水区、沟头、沟床、沟底 4 个部位有机质含量均随土层加深而降低，表现为 $0-10 \text{ cm} > 10-20 \text{ cm} > 20-30 \text{ cm} > 30-40 \text{ cm} > 40-50 \text{ cm}$ ，冲沟集水区有机质含量高于其他分区。

由表 2 可知，冲沟不同部位相同土层机械组成差异显著($p < 0.05$)。集水区 3 种粒径中粉粒含量占比最高，沙粒次之，沟头、沟床、沟底整体上看沙粒含量占比最高，粉粒次之，由集水区至沟底沙粒含量呈增加趋势，黏粒和粉粒含量则减少，主要是由于冲沟侵蚀水流冲刷所致。冲沟内黏粒和粉粒含量整体呈现优先流区小于基质流区，沙粒则相反，可见优先流区土壤粒径配比更有利于形成水流快速运移的通道。比较各分区土壤分形维数发现，沟底土壤机械组分形维数最小为 $2.680 \sim 2.799$ ，其余 3 个分区均在 $2.780 \sim 2.893$ ，表明沟底土壤结构相对较疏松，透水性强于集水区、沟头和沟床^[28]。在 0—50 cm 土层中优先流区土壤分形维数为 $2.680 \sim 2.874$ ，基质流区为 $2.746 \sim 2.893$ 。



注:不同小写字母表示同一土层不同样地间显著性差异($p<0.05$)。

图 3 冲沟不同分区优先流区和基质流区土壤理化特征

冲沟不同部位同一土层之间存在显著差异,整体上看,不同土层均表现出基质流区分形维数略大于优

先流区,说明基质流区土壤结构更加紧实,通透能力差不利于水分入渗^[28]。

表 2 冲沟不同分区土壤质地及颗粒分形特征

土层 深度/cm	冲沟 部位	优先流区				基质流区			
		黏粒	粉粒	砂粒	分形维数	黏粒	粉粒	砂粒	分形维数
0—10	A	8.72±0.30a	52.34±0.53a	38.93±0.84c	2.865±0.014a	9.15±0.87a	55.17±1.06a	35.68±1.94c	2.876±0.018a
	B	7.66±0.09b	44.68±0.42c	47.66±0.50b	2.824±0.013a	7.83±0.40b	44.92±0.45c	47.26±0.84b	2.830±0.014b
	C	8.82±0.62a	49.88±1.10b	41.30±1.72b	2.861±0.018a	8.50±0.01ab	53.58±0.59b	37.92±0.60c	2.870±0.013a
	D	4.70±0.38c	31.58±1.25d	63.72±1.63a	2.680±0.025b	5.77±0.14c	33.38±0.01d	60.85±0.13a	2.746±0.011c
10—20	A	8.56±0.68a	54.71±0.08a	36.73±0.76c	2.874±0.013a	9.73±0.70a	57.52±0.49a	32.75±1.19d	2.890±0.015a
	B	8.01±0.02a	46.26±0.14c	45.73±0.12b	2.835±0.011b	8.20±0.15b	47.77±0.25b	44.03±0.41c	2.845±0.012b
	C	8.06±0.78a	48.42±1.38b	43.51±2.16b	2.852±0.020b	7.21±0.09c	37.21±0.16d	55.58±0.25a	2.780±0.012c
	D	4.64±0.56b	31.58±0.12d	63.79±0.68a	2.776±0.014c	6.22±0.46d	41.13±0.12c	52.66±0.35b	2.799±0.012c
20—30	A	9.01±0.88a	51.94±0.08a	39.05±0.96d	2.864±0.014a	8.40±0.62a	52.45±0.69a	39.15±1.32c	2.862±0.016a
	B	7.88±0.10a	46.26±0.07b	45.86±0.17c	2.835±0.011ab	8.13±0.12a	46.96±1.11b	44.90±1.24b	2.835±0.016a
	C	7.75±0.82a	41.17±1.55c	51.08±2.37b	2.815±0.023b	7.79±0.52a	37.55±1.77c	54.66±2.29a	2.795±0.024b
	D	5.29±0.21b	33.56±1.24d	61.16±1.03a	2.760±0.017c	6.26±0.61b	40.27±1.12c	53.47±1.73a	2.799±0.020b
30—40	A	8.33±0.74ab	50.96±0.10a	40.71±0.84d	2.857±0.014a	8.69±0.59a	59.46±0.70a	31.85±1.30d	2.893±0.015a
	B	7.55±0.48b	37.27±0.05c	55.18±0.43b	2.782±0.013c	7.98±0.52a	44.69±0.66b	47.33±1.18c	2.831±0.016b
	C	9.34±0.38a	43.32±0.16b	47.34±0.54c	2.825±0.013b	7.41±0.82a	38.85±0.01c	53.74±0.82b	2.789±0.015c
	D	5.12±0.22c	39.08±0.13c	55.81±0.35a	2.776±0.012c	5.75±0.15b	37.37±0.56d	56.88±0.40a	2.771±0.013c
40—50	A	7.90±0.91a	49.08±0.49a	43.02±1.40d	2.844±0.017a	8.20±0.91b	52.17±0.17a	39.62±1.08c	2.861±0.015a
	B	7.97±0.09a	45.11±1.15b	46.92±1.06c	2.826±0.015b	8.35±0.24b	48.66±1.56b	42.99±1.80c	2.843±0.019a
	C	8.08±0.63a	40.27±0.34c	51.65±0.97b	2.800±0.015b	10.46±0.89a	41.49±1.40c	48.05±2.29b	2.816±0.022b
	D	4.97±0.27b	39.28±1.20c	55.75±1.47a	2.784±0.019c	6.27±0.19c	39.42±1.23c	54.31±1.42a	2.794±0.018b

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同小写字母表示同一土层不同样地间显著性差异($p<0.05$);A、B、C、D 分别代表集水区、沟头、沟床、沟底。下同。

2.2 冲沟不同部位土壤优先流特征

冲沟不同部位土壤优先流特征计算结果见表 3。染色面积比可反映出一定土层范围内土壤水分入渗情况,其值大小与优先流现象密切相关。冲沟染色面积比沟底(51.18) > 沟床(45.07) > 沟头(39.99) > 集水区(31.55),优先流百分数呈集水区(50.00) > 沟头(37.41) > 沟底(31.52) > 沟床(31.49),通过优先流百分数能看出优先流发育程度,冲沟发育区染色面积比大小与优先流百分数大小整体相反,说明染色面积比

越大,优先流越不明显^[9]。不同样地间染色面积比变化存在显著差异($p<0.05$),冲沟各分区之间土壤水分运动差异较大,冲沟内土壤空间差异使得优先流在冲沟发育区分布变得复杂化。基质流深为 7.29~16.02 cm,整体呈冲沟上游集水区到沟底逐渐加深的趋势,集水区与其余沟蚀程度较大区域基质流深存在显著差异($p<0.05$)。集水区基质流深度明显小于沟头、沟床、沟底,表明冲沟集水区土壤结构相对完整,有利于优先流发育。

表 3 冲沟区不同部位土壤垂直剖面优先流指标统计分析

冲沟部位	染色面积比/%	基质流深度/cm	最大染色深度/cm	优先流区染色面积比/%	优先流百分数/%
A	31.55±3.85d	7.29±1.36b	42.68±1.43a	18.45±1.91a	50.00±3.29a
B	39.99±0.92c	12.66±1.70a	42.24±4.37a	15.56±3.51b	37.41±3.65b
C	45.07±2.77b	16.02±2.34a	42.85±2.23a	16.34±4.63b	31.49±4.54b
D	51.18±1.18a	15.60±2.63a	43.95±1.19a	19.89±2.17a	31.52±0.85b

冲沟土壤剖面最大染色深度为 42.24~43.95 cm,各分区间染色深度无显著差异($p>0.05$)。从优先流区染

色面积比可以看出冲沟不同部位优先流作用强弱,优先流区染色面积比越大,优先流作用越明显,集水区和沟

底优先流区染色面积比大于其他区域,说明这 2 个冲沟部位优先流作用显著。集水区优先流百分数与其他 3 个区存在显著差异($p<0.05$),集水区优先流百分数明显大于下游分区,该区优先流发育程度高。冲沟系统集水区由于沟蚀程度低土壤结构相对完整,各优先流指标均优于其他分区,表明冲沟集水区优先流发育程度高于其他分区,沟蚀发育改变土壤水分入渗,由上游至下游入渗性能呈降低趋势。

2.3 冲沟不同部位优先流区和基质流区土体抗剪强度特征

土体抵抗剪切破坏的极限强度,被称为抗剪强度,由黏聚力和内摩擦角构成,被广泛应用到土壤侵蚀研究中^[4,19]。从图 4 可以看出,研究区 0—50 cm 土层内摩擦角为 17.68°~22.47°,各分区内摩擦角变化范围为:集水区 18.24°~21.55°,随土层深度变化先

减小后增加;沟头 17.68°~21.99°,随土层加深先增加后减小;沟床 18.72°~22.47°,随土层加深先减后增;沟底 18.52°~21.62°,随土层加深呈“增大—减小—增大—减小”的趋势,这是由于沟蚀对土壤侵蚀、搬运、重组造成的差异。冲沟土壤内摩擦角存在不同程度差异,角度变化在 0~5°,这主要是由于不同分区之间土壤理化性质差异造成的。优先流区和基质流区内摩擦角不同分区在 0—50 cm 土层整体表现出优先流区大于基质流区的趋势,优先流区 0—50 cm 内摩擦角变化情况分别为 18.13°~23.57°,17.58°~23.05°,18.59°~24.32°,18.19°~23.99°,18.28°~24.38°,基质流区 0—50 cm 变化情况分别为 15.89°~23.35°,16.10°~23.16°,16.42°~23.61°,17.43°~24.02°,15.08°~24.02°。优先流区和基质流区内摩擦角的差异说明优先流与内摩擦角之间具有不同程度的关联。

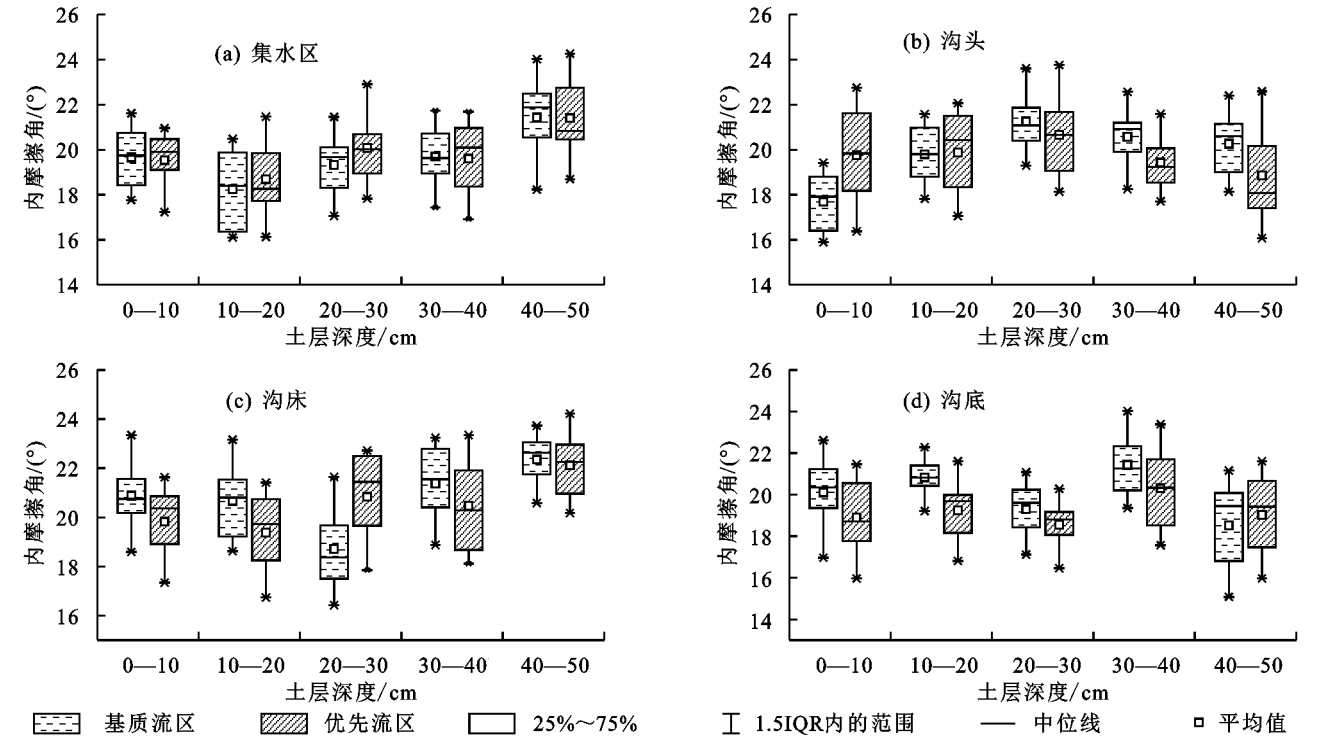


图 4 冲沟不同分区优先流区和基质流区内摩擦角随土层变化规律

土壤黏聚力是土壤力学指标的重要参数,是影响抗剪强度的因素之一。由图 5 可知,试验区土壤黏聚力为 1.24~4.27 kPa,冲沟不同部位黏聚力差异明显,整体上看集水区、沟头黏聚力大于沟床和沟底,这是由于沟蚀发育导致下游土壤结构重组所致。各样地优先流区和基质流区黏聚力存在显著差异,冲沟土壤黏聚力总体上呈基质流区大于优先流区。基质流区黏聚力为 1.91~4.27 kPa,优先流区黏聚力为 1.24~2.65 kPa,基质流区黏聚力是优先流区的 1.09~2.89 倍。造成这种差异的原因是土壤化学性质及孔隙结构差异等因素使优先流区土壤含水率、总孔隙、有机质含量均大于基质流

区,优先流区土壤容重小于基质流区。

由图 6 可知,冲沟集水区、沟头、沟床、沟底土壤黏聚力平均值呈优先流区(1.24~2.65 kPa)小于基质流区(1.91~4.27 kPa),内摩擦角则是优先流区(19.52°~22.47°)略大于基质流区(17.68°~22.35°)。说明在一定土壤基底条件下优先流对黏聚力表现出负效应,对内摩擦角有正效应,在此基础上利用相关、冗余分析进一步探明优先流对土壤抗剪强度的影响。优先流区抗剪强度(36.66~43.68 kPa)总体上小于基质流区抗剪强度(38.74~47.32 kPa),抗剪强度呈集水区和沟头大于沟床和沟底的趋势。

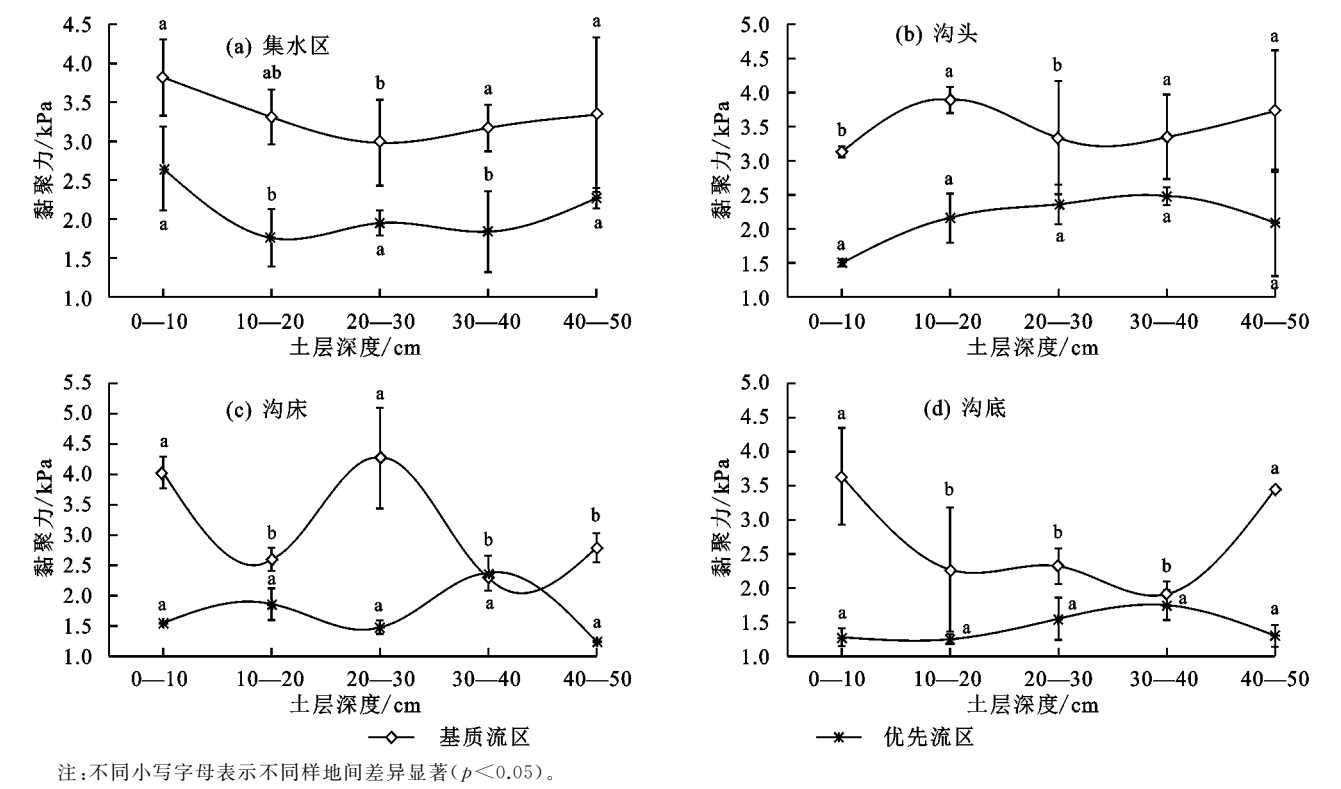


图5 冲沟不同分区优先流区和基质流区黏聚力随土层变化规律

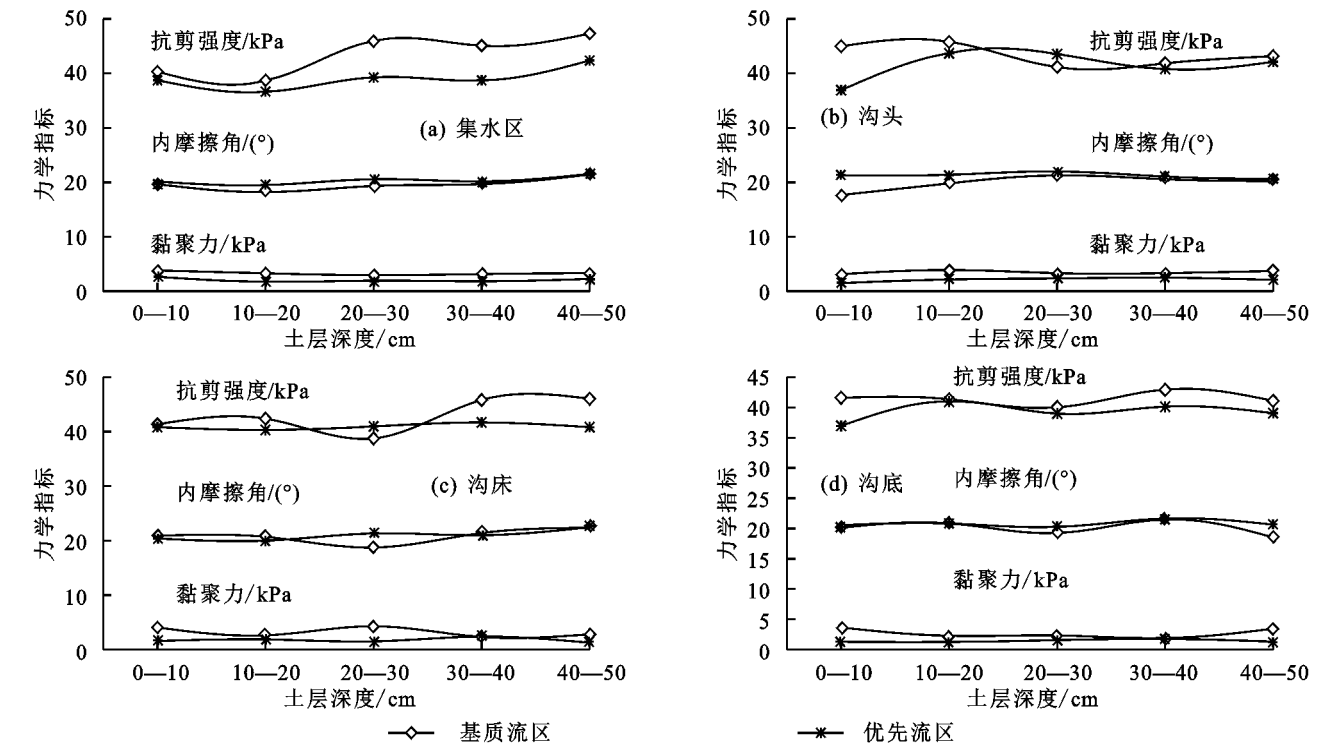
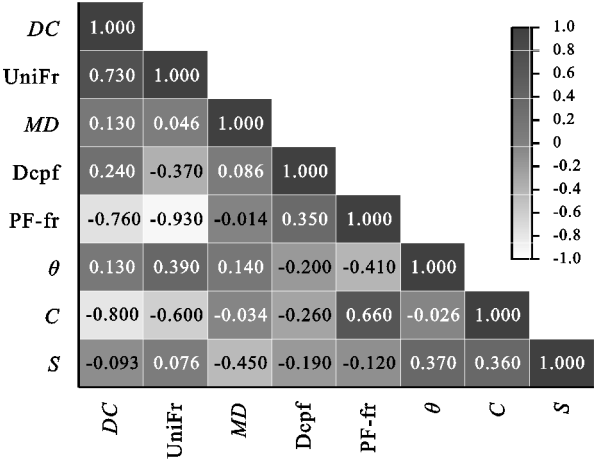


图6 冲沟不同部位优先流区和基质流区黏聚力、内摩擦角、抗剪强度

2.4 优先流与抗剪强度的关系

土壤黏聚力和内摩擦角是决定抗剪强度的主要因素,为了探究优先流对土壤抗剪强度的影响,选取优先流指标与抗剪强度指标分析其相关性(图7)。结果显示,黏聚力和内摩擦角与优先流指标之间显著相关,黏聚力与染色面积比、基质流深度呈显著负相关($p < 0.05$),黏聚力与最大染色深度、优先流区染色

面积比呈负相关,黏聚力与优先流百分数呈显著正相关。说明优先流发育在一定条件下降低土壤黏聚力,使土壤稳定性降低。内摩擦角与染色面积比、基质流深、最大染色深度呈正相关,与优先流百分数、优先流区染色面积比呈负相关;抗剪强度与染色面积比、最大染色深度、优先流百分数、优先流区染色面积比呈负相关。



注:DC 为染色面积比;UniFr 为基质流深度;MD 为最大染色深度;DCpf 为优先流区染色面积比;PF-fr 为优先流百分数; θ 为内摩擦角;C 为土壤黏聚力;S 为抗剪强度。

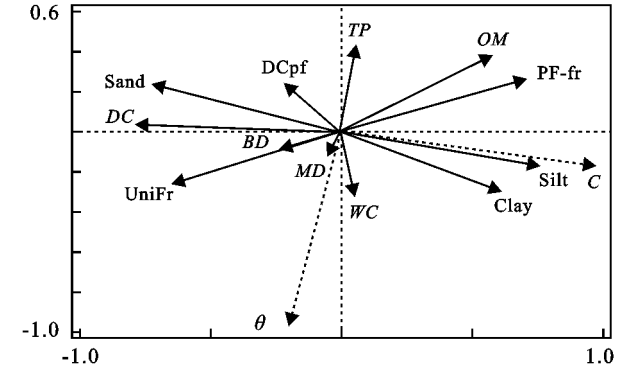
图 7 优先流指标与土壤抗剪强度相关分析

为进一步明确优先流和土壤基本特性对黏聚力和内摩擦角的影响,利用 RDA 绘制优先流指标和土壤基本特征值与抗剪强度指标排序图(图 8),各因子箭头长短表示对抗剪强度指标方差贡献率,箭头越长表示贡献率越大。各因子连线在内摩擦角和黏聚力上的投影表示该因子对其影响程度大小,投影越长表示影响程度越大。所有箭头之间夹角反映两者之间的相关性,夹角越小相关性越显著。由图 8 可知,黏聚力与绝大部分优先流指标之间表现出负相关,少数变量表现正效应,根据分析特征表可知,负效应贡献率占 87.85%,正效应占 12.15%,染色面积比、基质流深度和优先流区染色面积比是主要影响因子。内摩擦角与染色面积比、基质流深、最大染色深之间夹角最小相关性最明显,结合投影情况表正效应大于负效应。除优先流对抗剪强度造成影响外,抗剪强度与土壤本底特征值密切相关。从 RDA 分析结果可以看出,与内摩擦角呈正相关的土壤因子有含水率和容重。结合各因子贡献率发现,优先流对内摩擦角的影响占主导地位(正相关),与内摩擦角呈显著负相关的土壤因子有总孔隙度和有机质。与黏聚力呈显著正相关的土壤因子有黏粒含量、粉粒含量、有机质,含水率与黏聚力相关性不大,呈显著负相关的有沙粒含量和容重。由此可见,土壤本底特征是影响黏聚力的主要因子,优先流对其影响程度相对较低。优先流可以通过影响土壤本底特性进而对土壤黏聚力和内摩擦角产生影响,具体表现为优先流发育一定程度上降低土黏聚力,局部增大内摩擦角。

3 讨论

为探究优先流与土壤力学特性的关系,选取染色

面积比、优先流百分数等典型优先流特征指标与内摩擦角和黏聚力之间进行相关分析,明晰优先与抗剪强度之间的关系,揭示小尺度土壤水分运移对沟蚀的影响。结果发现,冲沟发育区优先流区和基质流区土壤基本特性具有显著差异,优先流发育造成局部土壤理化性质发生变化,从而使土壤力学特性产生差异。相关研究^[30]表明,土壤中优先流区总孔隙度大于基质流区总孔隙度,基质流区总孔隙度几乎无变化。土壤有机碳、有机质、全氮等含量呈优先流区大于基质流区^[29,31]。



注:DC 为染色面积比;UniFr 为基质流深度;MD 为最大染色深度;DCpf 为优先流区染色面积比;PF-fr 为优先流百分数; θ 为内摩擦角;C 为土壤黏聚力;Clay 为黏粒;Silt 为粉粒;Sand 为砂粒;WC 为含水率;BD 为容重;TP 为总孔隙度;OM 为有机质。

图 8 基于 RDA 排序的抗剪强度与优先流和土壤本底特征排序

本研究发现,冲沟发育区土壤含水率、总孔隙度、有机质含量均呈优先流区大于基质流区,各指标随土层加深而降低,土壤容重整体呈现优先流区小于基质流区。冲沟黏粒和粉粒含量整体呈现优先流区小于基质流区,沙粒则相反,可见优先流区土壤粒径配比更有利于形成水流快速运移的通道。机械组成分形维数越高,土壤结构越紧实,土壤质地越不均匀,分维数愈大^[28],冲沟内基质流区分形维数大于优先流区,说明基质流区土壤结构更加紧实,质地均匀性较差,通透能力差,不利于水分入渗。基质流深、染色面积比数值大,优先流区染色面积比小,表明染色液均匀下渗,优先流现象不明显^[29]。冲沟内染色面积比表现为沟底(51.18)>沟床(45.07)>沟头(39.99)>集水区(31.55),基质流深也呈冲沟下游大于上游的规律,且基质流深集水明显小于其他分区,整体上冲沟上游优先流发育情况优于下游,说明冲沟集水区土壤结构相对完整,受侵蚀影响小,有利于优先流发育,沟床、沟底土壤受侵蚀较严重,使其土壤结构发生变化,优先流特征指标与集水区和沟头差异明显。最大染色深度由于染色时长为 24 h,各分区之间变化不大。优先流百分数表现为集水区>沟头>沟床>沟底,可见,冲沟发育区染

色面积比大小与优先流百分数大小整体相反,说明染色面积比越大,优先流越不明显,这与解璐萌等^[29]研究结果吻合。由此可见,冲沟发育引起冲沟内土壤理化指标发生变化,使土壤水分入渗方式发生改变,造成冲沟各部位优先流特征差异。

抗剪强度是表征土壤复合体力学特性的参数,内摩擦角和黏聚力是表征抗剪强度的力学指标。有研究^[19-20]表明,土壤黏聚力与有机质、饱和导水率、毛管孔隙度呈正相关,内摩擦角与粉粒含量、容重呈正相关,与黏粒含量、饱和导水率、毛管孔隙度呈负相关。本研究发现,土壤内摩擦角与总孔隙度、有机质呈负相关,与土壤容重呈正相关;与黏聚力呈显著正相关的土壤因子有黏粒含量、粉粒含量、有机质,呈显著负相关的有沙粒含量和容重。同时抗剪强度与优先流密切相关,土壤水分在优先路径运移过程中侵蚀土壤颗粒,使土壤抗剪切能力降低,从而降低土体稳定性^[13-14]。冲沟内土壤黏聚力均呈优先流区(1.24~2.65 kPa)小于基质流区(1.91~4.27 kPa),内摩擦角则是优先流区(19.52°~22.47°)大于基质流区(17.68°~22.35°),优先流区(36.66~43.68 kPa)抗剪强度总体上小于基质流区(38.74~47.32 kPa)。可见,优先流发育对土壤力学特征指标带来不同影响。不同侵蚀、沉积过程对沟壑区土壤抗剪强度空间异质性起主要作用,沟壑区不同地貌类型和堆积物的土壤抗剪强度存在显著差异,沟头抗剪强度最高^[4],冲沟抗剪强度集水区和沟头大于沟床和沟底,冲沟不同部位黏聚力差异明显,集水区和沟头黏聚力大于沟床和沟底,这是由于沟蚀发育导致不同部位土壤结构重组所致。在此基础上利用相关性、RDA 分析进一步探明优先流对土壤抗剪强度的影响,发现黏聚力与染色面积比、基质流深度呈显著负相关,优先流发育在一定条件下使土壤稳定性降低。内摩擦角与优先流百分数、优先流区染色面积比呈负相关;抗剪强度与染色面比、最大染色深度、优先流百分数、优先流区染色面积比呈负相关。优先流可以通过影响土壤黏聚力和内摩擦角进而对抗剪强度产生影响,具体表现为优先流发育一定程度上会降低土壤黏聚力。本研究对优先流与抗剪强度的关系进行初探,完整揭示优先流区土壤抗剪强度的特征规律;在优先流与抗剪强度的作用机理的研究相对不足,今后在相关研究方向应该考虑水分入渗前后优先流区抗剪强度的变化情况。

4 结 论

(1)冲沟系统内有机质含量均随土层加深而降低,冲沟集水区有机质含量高于其他分区。集水区、

沟头、沟床、沟底土壤含水率、容重、总孔隙度、有机质含量均呈优先流区大于基质流区的规律,冲沟内 0—50 cm 土层中优先流区土壤机械组成分形维数为 2.680~2.874,基质流区为 2.746~2.893,分形维数整体上基质流区大于优先流区。优先流百分数表现为集水区>沟头>沟床>沟底,沟蚀发育改变土壤水分入渗。

(2)冲沟发育区抗剪强度集水区和沟头大于沟床和沟底。土壤黏聚力均呈优先流区(1.24~2.65 kPa)小于基质流区(1.91~4.27 kPa),内摩擦角则是优先流区(19.52°~22.47°)大于基质流区(17.68°~22.35°),优先流区抗剪强度(36.66~43.68 kPa)总体上小于基质流区(38.74~47.32 kPa)。优先流通过影响土壤黏聚力和内摩擦角对抗剪强度产生影响,一定程度上会降低土体抗剪强度。

(3)冲沟区优先流与土壤力学指标具有明显相关性,土壤黏聚力与染色面积比、基质流深度呈显著负相关,内摩擦角与优先流百分数、优先流区染色面积比呈负相关;抗剪强度与染色面比、最大染色深度、优先流百分数、优先流区染色面积比呈负相关。

参考文献:

[1] 钟祥浩.干热河谷区生态系统退化及恢复与重建途径[J].长江流域资源与环境,2000,9(3):376-383.

[2] Yang D, Xiong D H, Zhang B J, et al. Effect of grass basal diameter on hydraulic properties and sediment yield processes in gully beds in the Dry-hot Valley Region of Southwest China[J].Catena,2017,152:299-310.

[3] 井光花,于兴修,李振炜.土壤可蚀性研究进展综述[J].中国水土保持,2011(10):44-47,66.

[4] 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.

[5] Elham A K, Hojat E, Mohammad R M, et al. Estimation of unsaturated shear strength parameters using easily-available soil properties[J]. Soil and Tillage Research,2018,184:118-127.

[6] Zhu T X, Xu X Z, Zhu A X, et al. Assessment of soil shear strength in gully systems: A case-study in the Wangjiagou (WJG) watershed on the Loess Plateau of China[J].Land Degradation and Development,2020,31(17):2648-2661.

[7] 邵一敏,赵洋毅,段旭,等.金沙江干热河谷典型林草地植物根系对土壤优先流的影响[J].应用生态学报,2020,31(3):725-734.

[8] Latorre B, Moret-Fernández D. A new application of the upward infiltration method to quantify preferential flow

- hydraulic conductivity on undisturbed soil cores[J]. Journal of Hydrology, 2022, 610: e127940.
- [9] Chen L L, Qiu Q G, Wang P, et al. Visualization study on preferential flow in highly saturated and super hydrophilic porous media by combining dye tracking and infrared imaging[J]. Journal of Hydrology, 2022, 612: e128077.
- [10] 侯芳, 程金花, 王通簿. 基于探地雷达的滨河带藤本和次生乔木林土壤优先流特征[J]. 生态学报, 2022, 42(5): 1766-1776.
- [11] 马响, 孟晨, 岳健敏, 等. 宁夏荒漠草原不同林龄人工柠条林地土壤优先流研究[J]. 生态学报, 2022, 42(3): 895-903.
- [12] 万艳萍, 赵洋毅, 段旭, 等. 干湿交替对红河干旱河谷区土壤优先流形成特征的影响[J]. 应用生态学报, 2021, 32(7): 2397-2406.
- [13] Verachtert E, Van Den E M, Poesen J, et al. Spatial interaction between collapsed pipes and landslides in hilly regions with loess-derived soils[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2013, 38(8): 826-835.
- [14] Shao W, Bogaard T A, Bakker M, et al. Quantification of the influence of preferential flow on slope stability using a numerical modelling approach[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2015, 19(5): 2197-2212.
- [15] 张素, 熊东红, 张宝军, 等. 干湿交替下干热河谷冲沟不同土层的抗侵蚀性研究[J]. 农业机械学报, 2016, 47(12): 152-159, 212.
- [16] 杨丹, 熊东红, 刘守江, 等. 土壤理化及力学性质对干热河谷台地边坡沟蚀发育的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(4): 170-176.
- [17] Zhang S, Xiong D H, Wu H, et al. Effects of the root morphological characteristics of different herbaceous species on soil shear strength and soil anti-scourability in the dry-hot valley region of South-western China[J]. Soil Research, 2020, 58(2): e189.
- [18] 段青松, 何丙辉, 余建新, 等. 金沙江干热河谷乡土草本植物根系固土能力原位测定[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2015, 37(5): 779-785.
- [19] 文慧, 倪世民, 王艺彤, 等. 赣南崩岗区不同植被类型粉砂质土壤抗剪强度及其影响因素[J]. 土壤学报, 2022, 59(6): 1517-1526.
- [20] 张红霞, 彭新华, 郭自春, 等. 土壤含水量和容重对砂姜黑土抗剪强度的影响及其传递函数构建[J]. 土壤通报, 2022, 53(3): 524-531.
- [21] Zhang J L, Shi D M, Jin H F, et al. Characteristics of cultivated layer soil shear strength for sloping farmland in response to soil erosion in the Three Gorges Reservoir Area, China[J]. Catena, 2022, 215: e106304.
- [22] Huang M Y, Sun S J, Feng K J, et al. Effects of *Neyraudia reynaudiana* roots on the soil shear strength of collapsing wall in Benggang, southeast China[J]. Catena, 2022, 210: e105883.
- [23] Liu X, Cheng X F, Wang N, et al. Effects of vegetation type on soil shear strength in Fengyang Mountain Nature Reserve, China[J]. Forests, 2021, 12(4): e490.
- [24] 张学宁, 王德成, 尤泳, 等. 基于草地切根的根土复合体本构关系研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(7): 337-346.
- [25] Forster M, Ugarte C, Lamandé M, et al. Root traits of crop species contributing to soil shear strength[J]. Geoderma, 2022, 409: e115642.
- [26] 毕银丽, 罗睿, 王双明. 接菌对紫花苜蓿根系抗拉性及根菌复合土体抗剪强度影响[J]. 煤炭学报, 2022, 47(6): 2182-2192.
- [27] 文孝丽, 董一帆, 杨己, 等. 元谋干热河谷冲沟发育区植被恢复对土壤碳氮的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35(4): 282-288.
- [28] 杨培岭, 罗远培, 石元春. 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征[J]. 科学通报, 1993, 38(20): 1896-1899.
- [29] 解璐萌, 张英虎, 张明祥, 等. 黄河三角洲刺槐群落土壤优先流及养分分布特征[J]. 生态学报, 2021, 41(19): 7713-7724.
- [30] 杜晓晴, 牛健植, 侯琨, 等. 华北土石山区优先流区与基质流区土壤特性分析[J]. 中国水土保持科学, 2015, 13(3): 51-57.
- [31] 武亚楠, 张英虎, 张振明, 等. 黄河三角洲湿地植物根区优先流区和基质流区土壤特性分布差异[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2021, 57(1): 69-75.