

元谋干热河谷坡面表层土壤力学特性对其抗冲性的影响

陈安强^{1,2,3}, 张丹^{1,2,3}, 熊东红^{1,3}, 刘刚才^{1,3*}

(1.中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041; 2.中国科学院研究生院, 北京 100049;
3. 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室, 成都 610041)

摘要: 为了研究元谋干热河谷区坡面表层土壤的抗侵蚀性能, 通过对燥红土机械组成、团聚体组成、基质吸力、黏聚力 c 和内摩擦角 φ 等参数的分析, 并用原状土进行冲刷试验测定土壤的抗冲指数 ANS , 探讨了这些参数对土壤抗冲性的影响。结果表明, 土壤分散率和 ANS (soil anti-scourability) 呈一元三次多项式变化, 随着分散率的逐渐增加, ANS 逐渐下降, ANS 随着平均重量直径 MWD 的增大呈幂函数增长, 随着基质吸力、黏聚力 c 和内摩擦角 φ 的逐渐增加, ANS 也呈对数函数增长; ANS 与各力学参数的相关程度依次为: 抗剪强度 $\tau_f > \varphi > MWD > \text{分散率} > \text{基质吸力} > c$, 逐步回归表明, 黏聚力 c 、平均重量直径 MWD 和抗剪强度 τ_f 与 ANS 呈较好的线性关系 ($R^2_{\text{总}}=0.983$), 偏相关系数 ($R_{MWD}(0.915) > R_c(0.829) > R_{\varphi}(0.776)$) 表明水稳性团聚体的稳定性、颗粒及团聚体之间的胶结凝聚力和土壤抵抗水流的剪切破坏力对 ANS 影响较大。

关键词: 土壤, 力学特性, 抗剪强度, 抗冲性, 分散率, 基质吸力, 干热河谷

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.05.018

中图分类号: S152.9

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2012)-05-0108-06

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.
Chen Anqiang, Zhang Dan, Xiong Donghong, et al. Effects of mechanical properties of surface soil on soil anti-scourability in Yuanmou dry-hot valley[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(5): 108—113. (in Chinese with English abstract)

0 引言

元谋干热河谷沟蚀崩塌充分发育, 造成了大量的水土流失, 冲沟侵蚀及崩塌发生成为长江上游主要的泥沙来源^[1]。由于冲沟侵蚀带走了大量的泥沙, 加之特殊的水热条件, 使得冲沟沟头和沟壁处植被严重退化, 土壤粘重紧实, 水分入渗困难。降雨时, 大量雨水不能及时入渗而转化为径流带走大量泥沙, 使侵蚀进一步加剧, 造成了冲沟发育和崩塌发生的恶性循环。土壤抗冲性研究是土壤侵蚀机理研究的一个重要方面, 抗冲性是土壤抵抗坡面径流对其冲刷破坏的能力, 其破坏过程是土体抗剪能力的丧失, 其大小主要取决于土粒和水的亲和力及土粒间的胶结力。土壤内部是一个非均质、多相和多孔的复杂系统, 它是由大小、形状不同的固体颗粒和孔隙以一定形式连结形成具有一定强度的土壤结构^[2], 土壤固体颗粒及胶结物的大小、数量、形状及结合方式决定着土壤结构^[3], 从而对土壤的抗冲性有重要影响。土壤颗粒间、微团间的胶结力以及颗粒和团聚体的稳定性影响着

土壤的抗冲性。土壤的抗剪强度也是影响土壤抗冲特性的主要指标^[4-5], 黏聚力 c 和内摩擦角 φ 是反映土壤抗剪强度的重要参数。所以, 土壤结构特性和土壤的抗剪强度是防止土壤冲刷的内在因素, 土壤颗粒和团聚体的稳定性及其抗剪强度的大小直接反映土壤的抗侵蚀能力。

国内外学者对土壤抗冲性有较多的研究^[6-7], 主要集中在土壤抗冲性的测定方法、评价指标、抗冲性的时空分布及分级和影响因素等方面^[8-10]。Bajracharya 等^[11]以团聚体稳定性和土壤抗剪强度指标来评价了季节性土壤的可蚀性。史冬梅等^[12]通过原状土冲刷试验, 研究了土壤物理特性、入渗速率和植物根系生物量与抗冲性的关系。杨玉梅等^[7]研究了不同土地利用方式下土壤抗冲性, 指出 <1 mm 须根是增强土壤抗冲性能的关键因子。周利军等^[13]认为三峡库区典型林分林地土壤抗冲性与毛管孔隙度、稳渗率、非毛管孔隙度、 <1 mm 根长关系最密切。周维等^[14]研究了金沙江干热河谷不同土地利用条件下土壤抗冲性, 认为土壤有机质、粗粒径 ($3\sim 5$ mm、 $5\sim 10$ mm 和 >10 mm) 的水稳性团聚体的增加有利于提高土壤的抗冲性。潘利君等^[15]在研究泰国青迈省的 Mae Rim 流域时, 认为土壤抗剪力制约着土壤的可蚀性, 用土壤的抗剪强度来确定土壤侵蚀等级。AL-Drruah 等^[16]利用土壤抗剪强度来研究土壤的抗击溅机理, 证明溅蚀量与抗剪强度有密切的关系。可见, 多数学者主要从土壤物理特性和根系固结土壤这方面研究与抗冲性的关系, 对于土壤的力学特性参数如黏聚力等对抗冲性的影响研究较少, 特别是在元谋干热河谷区特殊的水热条件和地貌特征下, 对抗冲性的研究鲜见报道。本文通过对元谋干热河谷区沟

收稿日期: 2011-07-23 修订日期: 2011-09-13

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目 (KZCX2-EW-QN317); 国家自然科学基金项目 (41071013, 40971168)

作者简介: 陈安强 (1981—), 男, 山东潍坊人, 博士生, 主要从事土壤侵蚀与水土保持等研究。成都 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 610041。Email: chaq163@163.com

*通信作者: 刘刚才 (1967—), 男, 四川内江人, 中国科学院成都山地灾害与环境研究所研究员, 博士, 博士生导师, 主要从事水土保持、生态水文等研究。成都 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 610041。Email: liugc@imde.ac.cn

头表层土壤抗冲性的测定, 分析土壤颗粒与团聚体的稳定性、土壤基质势、土壤的黏聚力和内摩擦角等参数与抗冲性间的相互关系, 分析该区土壤的力学特性对抗冲性的影响, 为元谋干热河谷区冲沟侵蚀机理研究提供一定的理论基础。

1 研究区概况

试验地位于云南省元谋县苴林乡境内的元谋干热河谷沟蚀崩塌观测研究站内, 是中国科学院成都山地灾害与环境研究所和云南省农业科学研究院联合共建的野外观测研究站。位于 $101^{\circ}48'48''\sim 101^{\circ}49'54''E$, $25^{\circ}50'30''\sim 25^{\circ}51'18''N$ 。海拔 $1067\sim 1138\text{ m}$, 试验站内地形切割破碎, 沟蚀崩塌严重, 大部分坡面发育成纵横交错的冲沟, 在接近冲沟沟头和沟壁两侧, 由于强烈的侵蚀, 使得植被难以获取适宜的水土条件, 都已严重退化。坡面耕地完全是改造后的台地, 沟蚀发展严重威胁着坡面耕地的利用。干热河谷内年均温 21.9°C , 极端最高气温 42°C , 极端最低气温 -2°C , $\geq 12^{\circ}\text{C}$ 的持续天数 349 d , $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温 7786°C , 年均降雨量 630 mm 左右, 集中在 $5\sim 9$ 月, 其他月份少雨或无雨, 年均蒸发量达 3911.2 mm , 蒸发量是降雨量的 6 倍, 干燥度 4.4。干热河谷砂土黏土交替成层分布, 燥红土为基带土壤。植被类型为干旱稀树灌草丛, 草本植物主要是扭黄茅 (*Heteropogon*) 和孔颖草 (*Botnrochola portusa*) 居多; 灌木和乔木主要有车桑子 (*Dodoneae viscosa*)、合欢 (*Albizia julibrissm*) 等。

2 研究方法

2.1 土壤抗冲性测定

土壤抗冲性试验用原状土冲刷土槽法。用自制的规格为 $30\text{ cm}\times 20\text{ cm}\times 10\text{ cm}$ 的方形取样器, 沿着 3 个沟头坡面自分水岭至沟头沟缘的直线距离分上、中、下 3 个部位取表层原状土。原状土样取回后放在水中浸泡 12 h 至土样饱和, 然后放在冲刷槽中备用。冲刷槽设定的坡度与取样坡面的平均坡度一致, 为 15° , 冲刷槽上部的水池提供水源, 冲刷槽和水池之间用水管连接, 在水管上段安装流量计, 测定水流量。根据当地降雨泥沙径流小区的观测, 用标准径流小区内 ($20\text{ m}\times 5\text{ m}$) 产生的最大径流量来计算为单位流量为冲刷流量, 即 2 L/min , 通过流量计调好设定的冲刷水流, 冲刷时间为 19 min 。在冲刷开始后的前 4 min , 用取样桶每 1 min 取一次水流泥沙样, 以后每 3 min 取一次, 共取 9 次样。取的泥沙样经过沉淀、过滤后, 烘干称重。土壤抗冲能力用冲失 1 g 土所需时间, 即抗冲指数来表示^[12]

$$ANS = \frac{T}{WLDS} \quad (1)$$

式中, ANS 为单位流量土壤抗冲指数, min/g ; T 为冲刷历时, min ; $WLDS$ 为冲失干土质量, g 。

2.2 土壤物理特性参数测定

在 2010 年 8 月, 在研究区选择 3 个典型冲沟沟头, 以沟头上部坡面汇水面积处作为试验地, 试验地表层土

壤是燥红土, 为粉黏性土。植被类型是草本植被, 盖度较低, 约为 10% 左右, 植被主要是扭黄茅 (*Heteropogon*) 和孔颖草 (*Botnrochola portusa*)。在每个冲沟的汇水面积处, 沿坡面自分水岭至沟头沟缘的直线距离分上、中、下 3 个部位分别取表层燥红土土样和 9 个环刀 ($\Phi 45\times 55\text{ mm}$) 样, 带回实验室用常规方法^[17]测定土壤的机械组成、微团组成和水稳性团聚体 (表 1)。用 15 bar 压力膜仪测定土壤的水分特征曲线, 来拟合土壤的基质吸力与质量含水率的关系和计算土壤容重、孔隙度等参数。经测定土体的平均干容重为 1.6 g/cm^3 , 平均总孔隙度为 37.46% 。分散率和平均重量直径 (MWD) 根据下式计算^[18-19]

$$\text{分散率} = <0.05\text{ mm 微团聚体} \div <0.05\text{ mm 机械组成} \quad (2)$$

$$MWD = \sum_{i=1}^{n+1} X_i \times W_i \quad (3)$$

式中, X_i 为 i 粒级与 $i+1$ 粒级的平均直径, mm ; W_i 为该粒级范围内水稳性团聚体的含量, $\%$ 。

表 1 燥红土的机械组成、微团聚体和水稳性团聚体含量

	Table 1 Mechanical composition, micro-aggregate and water-stable aggregate content of dry red soil /%						
	2~1 mm	<1~0.5 mm	<0.5~0.25 mm	<0.25~0.05 mm	<0.05~0.02 mm	<0.02~0.002 mm	<0.002 mm
微团聚体	5.79	13.20	26.20	35.05	6.20	10.11	3.46
颗粒组成	2.14	4.97	10.05	35.68	11.14	16.94	19.08
	>5 mm	5~>3 mm	3~>2 mm	2~>1 mm	1~>0.5 mm	0.5~0.25 mm	<0.25 mm
水稳性团聚体	11.26	8.73	12.42	16.33	12.85	5.09	33.32

用带回实验室的土样, 分别制备不同初始质量含水率 (8% 、 10% 、 13% 、 16% 、 19% 、 22% 和 25%) 的试样, 试样的干密度和原状土干密度相同, 为 1.6 g/cm^3 , 直剪试验的剪切速率为 0.8 mm/min , 分别施加 50 、 100 、 200 和 300 kPa 的正应力, 测定土壤的黏聚力 c 和内摩擦角 φ 。

在降雨后, 每隔 2 min 左右, 用沈阳建科仪器研究所生产的便携式直剪仪在取原状样的地方对表层土进行原位剪切试验, 测定不同质量含水率下的抗剪强度 τ_f , 每次测 3 个值取平均, 随后取铝盒样测定土壤质量含水率。根据土壤质量含水率和压力膜仪测定的土壤水分特征曲线, 计算不同含水量下的基质吸力。

2.3 数据处理

用 spss12.0 进行相关分析和逐步回归分析, 用 sigmaplot8.0 进行各参数与 ANS 的关系进行函数拟合。

3 结果与分析

3.1 土壤结构体稳定性对抗冲性的影响

土壤颗粒和团聚体是组成土壤结构的基本单元, 其联结状态构成一定强度的土壤结构, 土壤颗粒和团聚体的稳定性影响着土壤结构的稳定性。土壤团聚体是在胶结作用、凝聚作用和团聚作用等内外力作用下由细小的土粒和微团聚体组合而成, 团聚体团聚作用的强弱影响着土壤颗粒间黏聚力的大小, 也影响着土壤抵抗径流对其冲刷破坏能力。为了反应土壤结构体的力学特性, 引

入土壤分散率和平均重量直径 *MWD* 来表征土壤抗分散性能和团聚体的水稳性特征。

土壤分散率是表示土壤易蚀性指标，分散率的大小取决于土粒与水的亲和力和胶结力，因此，分散率从一定程度上反映了土壤颗粒间的作用力。分散率是 <0.05 mm 微团聚体与 <0.05 mm 机械组成的比值，分散率愈大，土壤越容易被冲蚀。通过对土壤分散率和 *ANS* 进行回归分析（图 1），表明分散率和 *ANS* 呈一元三次多项式变化，随着分散率的逐渐增加，*ANS* 逐渐下降，在分散率为 0.3~0.38 左右时，抗冲指数下降平缓，之后，随分散率的降低，抗冲指数下降迅速。主要因为分散率越大，<0.05 mm 微团聚体含量就高，对土壤颗粒起团聚作用的>0.05 mm 的微团聚体所占比重减小，土壤团聚程度差，大量的土壤颗粒就越容易分散悬浮被水流冲走，抗冲指数就小，随着<0.05 mm 的微团含量的减小，>0.05 mm 的微团聚体所占比重增加，土壤颗粒的胶结力和凝聚力增强，土粒就不易被分散冲刷。

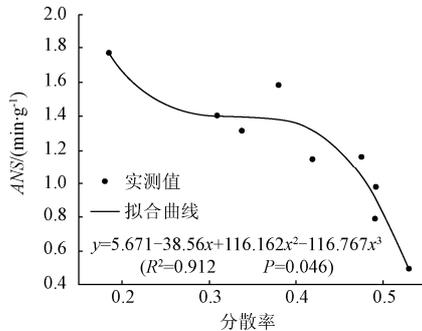


图 1 分散率与 *ANS* 的线性关系

Fig.1 Linear relationship between dispersion rate and *ANS*(soil anti-scourability)

水稳性团聚体对保持土壤结构的稳定性有重要的作用，一定程度上反映了包括有机质在内的硅、铁、碳酸盐等胶结物胶结力的大小，是衡量土壤抗侵蚀能力的重要指标，*MWD* (mean weight diameter) 是反映土壤团聚体大小分布状况的常用指标。通过对 *MWD* 和 *ANS* 的关系分析表明（图 2），*MWD* 和 *ANS* 呈幂函数变化，相关系数 R^2 为 0.954，两者呈显著性正相关 ($P < 0.0001$)。图 2 看出，随着 *MWD* 的逐渐增加，*ANS* 也呈增长趋势。主要是因为 *MWD* 值越大，表示土壤团聚体的团聚程度越高，组成团聚体的小颗粒胶结作用增强，亲水力降低，

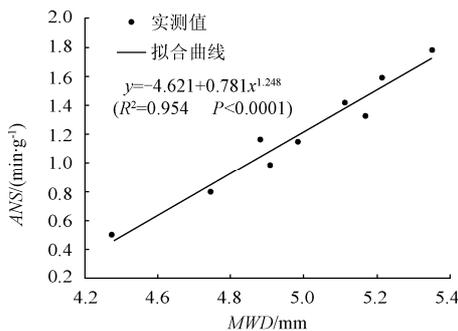


图 2 平均重量直径 *MWD* 与 *ANS* 的关系
Fig.2 Relationship between *MWD* and *ANS*

团聚体不易被水流分散悬浮，一定程度上增强了团聚体内部土粒的黏聚力和水稳性团聚体表面的抗滑力，土壤的抗冲能力增强。

3.2 基质吸力对抗冲性的影响

基质吸力是土粒对水的吸持潜能，含水量对基质吸力影响较大，一般认为，基质吸力随含水量的增大而单调减小^[20]。汤连生^[21]认为基质吸力对非饱和土的抗剪强度有很大影响，非饱和土抗剪强度不仅取决于可变结构吸力 S_c 、湿吸力 S_a 和牵引力 S_d ，还取决于基质吸力 ($u_a - u_w$)。刘小文等^[22]认为随着基质吸力的增加抗剪强度有线性增加的趋势，这种线性变化的趋势在法向应力较小时更为明显。用压力膜仪测定土壤水分特征曲线，以此来拟合质量含水率与基质吸力之间的相互关系，结果表明含水率与基质吸力呈较好的幂函数关系 ($y = 2 \times 10^9 x^{-6.1647}$)，相关系数 $R^2 = 0.997$ ，两者呈显著性相关 ($P < 0.0001$)，说明用回归方程能够较好的预测不同含水率下的基质吸力。

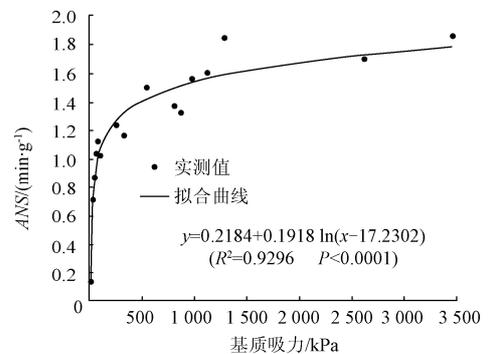


图 3 基质吸力与 *ANS* 的关系

Fig.3 Relationship between matrix suction and *ANS*

根据实测的土壤质量含水率，运用预测方程计算土壤的基质吸力，表 2 是不同质量含水率下测定的土壤 τ_f 、基质吸力和 *ANS*，表明随着基质吸力和 τ_f 的增加，抗冲指数也逐渐增加。通过对 τ_f 、基质吸力和 *ANS* 的相关分析表明，*ANS* 与 τ_f ($R = 0.827, P < 0.0001$)、基质吸力 ($R = 0.743, P < 0.0001$) 呈显著性正相关。*ANS* 与基质吸力、 τ_f 呈较好的线性关系，回归方程为 $y = -0.299 + 0.018x_{\tau_f} + 0.0002x_{\text{吸}}$ ，复相关系数 $R^2 = 0.758$ ($P = 0.000$)。就基质吸力与 *ANS* 的相互关系来看（图 3），*ANS* 与基质吸力呈较好的对数函数关系 ($R^2 = 0.9296, P < 0.0001$)，并随着基质吸力的增加呈对数函数递增，在开始阶段，*ANS* 增长较快，主要是因为开始土壤含水率较大，土壤的基质吸力较小，造成土壤黏聚力降低，土壤容易被冲蚀，*ANS* 低；随着含水率的逐渐减少，引起基质吸力的快速增加，增强了土壤的黏聚力，使得 *ANS* 增长迅速。当基质吸力在 548.554 kPa 之后，虽然基质吸力也有较快的增长，但 *ANS* 增加平缓。

3.3 c 和 ϕ 值对抗冲性的影响

Jumics 和 Barer^[23]从土壤侵蚀的角度把抗剪强度定义为：在剪应力的作用下，抵抗土壤颗粒或土壤团粒因持续剪切而引起的剪切变形及变形破坏的阻力，它由土粒间的黏聚力、颗粒间相互联结的抵抗变形力和颗粒表面

表 2 不同质量含水率下测定的 τ_f 、基质吸力及 ANS

Table 2 Determination of τ_f , matric suction and ANS under different water content

质量含水率/%	τ_f /kPa	基质吸力/kPa	ANS /($\text{min}\cdot\text{g}^{-1}$)
8.600	95.000	3468.386	1.852
9.000	88.000	2 620.663	1.695
10.108	85.000	1 280.895	1.840
10.331	90.000	1 119.525	1.596
10.560	86.700	978.248	1.554
10.750	88.000	876.408	1.324
10.870	91.000	818.640	1.364
11.599	83.600	548.554	1.493
12.579	84.500	332.754	1.163
13.107	80.000	258.225	1.235
15.438	77.900	94.142	1.025
15.676	66.500	85.668	1.123
16.129	59.000	71.860	1.010
16.515	76.400	62.105	1.034
17.041	74.800	51.194	0.709
17.340	56.000	45.990	0.865
18.230	54.000	33.780	0.876
20.210	49.000	17.890	0.136

间的抗滑力 3 部分组成，所以，库伦公式能较好的表达土壤的抗剪强度。分析土壤的抗剪强度 (c 和 ϕ 值) 和 ANS 的相互关系是从土壤侵蚀力学的角度研究土壤的抗侵蚀能力，由于土壤在水流冲刷下的破坏表现为剪切破坏，所以研究土壤 c 和 ϕ 值对抗冲性的影响就显得尤为重要。土壤的 c 是阻止坡面径流对土体冲刷破坏的有效阻力，能够很好的防止径流把有序的土体结构变得松散杂乱。土壤的 c 和 ANS 的关系表明 (图 4)， c 和 ANS 呈较好的对数函数关系 ($R^2=0.8697$, $P=0.0022$)， ANS 随着 c 的增大呈对数函数增长， c 越大，土壤的抗冲性能就越好。当黏聚力 $c < 10$ kPa 时， ANS 增长迅速，但是当 $c > 10$ kPa 时， ANS 增长缓慢，说明 c 增长到一定程度后， c 的变化对 ANS 增长速度的影响效应减小。

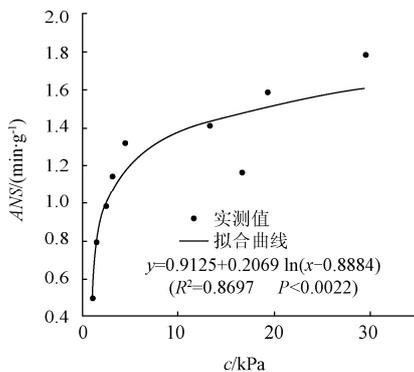


图 4 黏聚力 c 与 ANS 的关系

Fig.4 Relationship between c and ANS

土壤中颗粒和团聚体以一定形式排列成一定的土壤结构，不同颗粒表面摩擦力以及颗粒间的嵌入和联锁作用产生的咬合力的大小影响其抵抗外力破坏的能力。图 5 看出 ANS 与 ϕ 呈较好的对数函数关系，相关系数 $R^2=0.8824$ ，经 t 检验两者达到显著性相关 ($P=0.0016$)。 ANS 随着 ϕ 的增加呈对数函数增加，说明土壤 ϕ 的增加，有利于增强土壤抵抗径流冲刷的能力，主要是 ϕ 越大，土壤颗粒间的摩擦力和咬合力越大，增强了土壤颗粒抵抗径流冲刷破坏的能力，土壤越不容易被水流冲散。

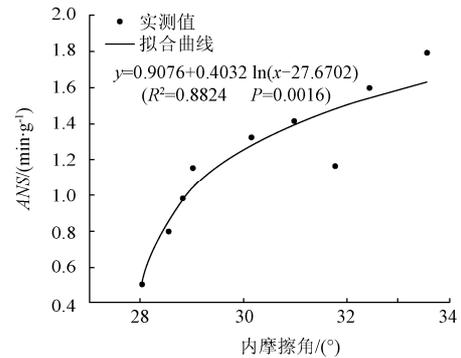


图 5 内摩擦角 ϕ 与 ANS 的关系

Fig.5 Relationship between ϕ and ANS

3.4 土壤力学特性对抗冲性的影响

影响土壤抗冲性的土壤力学特性主要有抗剪强度、压缩强度、土壤结构稳定性等参数^[4,19,23]。为了从土壤侵蚀的力学角度综合分析各土壤力学参数对抗冲性的影响，本文选用分散率(x_1)、 $c(x_2)$ 、 $\phi(x_3)$ 、 $MWD(x_4)$ 、 $\tau_f(x_5)$ 和基质吸力(x_6)6 个反应土壤力学的参数来分析其对抗冲性的影响。表 3 是各参数之间及其与 ANS 的相关关系，分散率与其它参数和 ANS 之间呈负相关关系，其中与 c 、 ϕ 和 MWD 呈显著负相关 ($p < 0.05$)，与 τ_f 和基质吸力呈极显著负相关 ($p < 0.01$)，主要是因为分散率越大，团聚体的稳定性降低，土粒间的黏聚力和内摩擦角变小，使得土壤抵抗水流的剪应力降低，土壤越容易被分散冲刷。除了分散率，其它各力学参数之间呈正相关关系， c 、 ϕ 、 τ_f 和基质吸力之间呈极显著性相关 ($p < 0.01$)，而这 4 个参数与 MWD 呈不同程度的正相关，主要是因为 c 、 ϕ 和基质吸力是表征 τ_f 的有效参数，土体的 τ_f 由这三部分组成^[24]。 ANS 与各力学参数呈极显著相关 ($p < 0.01$)，就相关程度看， $x_5 > x_3 > x_4 > x_1 > x_6 > x_2$ 。

为了进一步定量分析 ANS 与各参数的相关关系，对各物理力学参数和 ANS 进行逐步回归分析，结果表明， c 值、 MWD 和 τ_f 被引入回归方程，说明水稳性团聚体的稳定性、颗粒及团聚体之间的胶结凝聚力和土壤抵抗水流的剪切破坏力对 ANS 影响较大，回归方程为： $ANS = -3.070 + 0.012x_2 + 0.674x_4 + 0.01x_5$ ，复相关系数 $R^2=0.983$ ，说明用这 3 个参数能较好的表达其对 ANS 的定量关系，从偏相关系数看， $R_{x_4}(0.915) > R_{x_2}(0.829) > R_{x_5}(0.776)$ ，说明水稳性团聚体对 ANS 的影响较大，这与 Bajracharya 等^[13]周维等^[16]研究结果一致。其次是黏聚力和抗剪强度，说明团聚体越稳定，团聚体就不易被水流破坏，颗粒内

部及颗粒间的黏聚力和摩擦力就越大, 增强了土壤的抗剪强度, 从而提高了土壤的抗侵蚀能力。

表3 土壤力学参数与 *ANS* 的相关分析

Table 3 Correlation analysis between soil mechanical parameter and *ANS*

	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6
x_2	-0.743*	1.000				
x_3	-0.760*	0.975**	1.000			
x_4	-0.760*	0.550	0.654	1.000		
x_5	-0.853**	0.892**	0.869**	0.759*	1.000	
x_6	-0.848**	0.758**	0.862**	0.770*	0.826**	1.000
<i>ANS</i>	-0.885**	0.835**	0.899**	0.886**	0.934**	0.868**

注: *在 0.05 水平上显著相关; **在 0.01 水平上极显著相关; $x_1 \sim x_6$ 分别为分散率、 c 、 φ 、*MWD*、 τ_f 和基质吸力

4 结论

1) 分散率和抗冲指数 *ANS* 呈一元三次多项式变化, 随着分散率的逐渐增加, *ANS* 逐渐下降, 分散率在 0.3~0.38 左右时对 *ANS* 下降影响的效应较小, 之后, *ANS* 下降迅速。随着平均重量直径 *MWD* 的逐渐增加, *ANS* 也呈增长趋势, 两者呈较好的幂函数关系。

2) 用 $y=2 \times 10^9 x^{-6.1647}$ 方程 ($R^2=0.997$, $P<0.0001$, y 为基质吸力, x 为质量含水率) 能较好的预测燥红土在不同质量含水率下的基质吸力。抗冲指数 *ANS* 与基质吸力呈较好的对数函数关系, 并随着基质吸力的增加, 开始阶段, *ANS* 增加较快, 当基质吸力在 548.554 kPa 后, *ANS* 增加平缓。

3) 抗冲指数 *ANS* 随着黏聚力 c 和内摩擦角 φ 的增大呈对数函数增长, c 和 φ 越大, 土壤颗粒内部及颗粒间的凝聚力和摩擦力就越大, 增强了土壤颗粒抵抗径流分散、冲刷破坏的能力, 土壤的抗冲性能就越好。

4) 除了分散率与各力学参数和抗冲指数 *ANS* 呈负相关关系外, 其它各参数之间呈正相关关系。*ANS* 与各参数呈极显著相关性 ($p<0.01$), 就相关程度看, 抗剪强度 $\tau_f >$ 内摩擦角 $\varphi >$ 平均重量直径 *MWD* $>$ 分散率 $>$ 基质吸力 $>$ 黏聚力 c 。*ANS* 与各参数的逐步回归表明, c 、*MWD* 和 τ_f 和 *ANS* 呈较好的线性关系 ($R^2_{复}=0.983$), 偏相关系数表明水稳性团聚体的稳定性、颗粒及团聚体间的胶结凝聚力和土壤抵抗水流的剪切破坏力对 *ANS* 影响较大。

[参 考 文 献]

[1] 刘刚才, 邓伟, 文安邦, 等. 试论金沙江河谷建立沟蚀崩塌科学观测研究站的重要性及学科方向[J]. 山地学报, 2010, 28(3): 333-340.
Liu Gangcai, Deng Wei, Wen Anbang, et al. A review on the essentiality and subject orientation of establishing gully erosion and collapse experimental station in Jinsha River Valley[J]. Journal of Mountain Science, 2010, 28(3): 333-340. (in Chinese with English abstract)

[2] Tyler S W, Wheatcraft S W. Fractal scaling of soil particle size distributions: analysis and limitations[J]. Soil Science Society of America Journal, 1992, 56: 362-369.

[3] 赵勇钢, 赵世伟, 曹丽花, 等. 半干旱典型草原区退耕地土壤结构特征及其对入渗的影响[J]. 农业工程学报, 2008, 24(6): 14-20.
Zhao Yonggang, Zhao Shiwei, Cao Lihua, et al. Soil structural characteristics and its effect on infiltration on abandoned lands in semi-arid typical grassland areas[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 24(6): 14-20. (in Chinese with English abstract)

[4] 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.
Wang Yunqi, Wang Yujie, Zhang Hongjiang, et al. Impacts of soil structure on shear-resistance of soil under different land uses in Jinyun Mountain of Chongqing City[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2006, 22(3): 40-45. (in Chinese with English abstract)

[5] 邵明安, 王全九, 黄明斌, 等. 土壤物理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.

[6] Fattet M, Fu Y, Ghestem M, et al. Effects of vegetation type on soil resistance to erosion: Relationship between aggregate stability and shear strength[J]. Catena, 2011, 87: 60-69.

[7] 杨玉梅, 郑子成, 李廷轩. 不同土地利用方式下土壤抗冲性动态变化特征及其影响因素[J]. 水土保持学报, 2010, 24(4): 64-41.
Yang Yumei, Zhen Zicheng, Li Tingxu. Soil anti-scourability dynamic variation characteristics and its influencing factors under different land use types[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(4): 64-41. (in Chinese with English abstract)

[8] 刘国彬, 张光辉. 原状土冲刷法与人工模拟降雨法研究土壤抗蚀性对比分析[J]. 水土保持通报, 1995(4): 32-37.
Liu Guobin, Zhang Guanghui. Comparison analysis on soil anti-scourability between undisturbed sampling and artificial rainfall plot[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1995(4): 32-37. (in Chinese with English abstract)

[9] Farres P J, Cousen S M. An improved method of aggregate stability measurement[J]. Earth Surface Processes Landforms, 1985, 10: 321-329.

[10] 胡维银, 刘国彬, 许明祥. 黄土丘陵沟壑区小流域坡耕地土壤抗冲性试验研究[J]. 水土保持通报, 2000, 20(3): 26-28.
Hu Weiyin, Liu Guobin, Xu Mingxiang. Dynamic of soil anti-scourability on slope cropland in Loess Hilly Region[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2000, 20(3): 26-28. (in Chinese with English abstract)

[11] Bajaracharya R M, LaL R. Seasonal soil loss and erodibility variation on a Miamian silt loam soils[J]. Soil Science Society of America journal, 1992, 56(5): 1560-1565.

[12] 史东梅, 陈晏. 紫色丘陵区农林混作模式的土壤抗冲性影响因素[J]. 中国农业科学, 2008, 41(5): 1400-1409.
Shi Dongmei, Chen Yan. The influencing factors of soil anti-scourability of tree-crop intercropping land in Purple Soil Hilly Region[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008, 41(5): 1400-1409. (in Chinese with English abstract)

- [13] 周利军, 齐实, 王云琦. 三峡库区典型林分林地土壤抗蚀抗冲性研究[J]. 水土保持研究, 2006, 13(1): 186—188.
Zhou Lijun, Qi Shi, Wang Yunqi. Research on forest soil anti-erosion and anti-scour of typical forest in Three Gorges Reservoir areas[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2006, 13(1): 186—188, 216. (in Chinese with English abstract)
- [14] 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.
Zhou Wei, Zhang Jianhui, Li Yong, et al. Soil anti-scourability under different land uses in dry-warm valleys of the Jinshajiang River Basin[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2006, 26(5): 26—30, 42. (in Chinese with English abstract)
- [15] 潘剑君, Bergsma I E. 利用土壤入渗速率和土壤抗剪力确定土壤侵蚀等级[J]. 水土保持学报, 1995, 9(2): 93—96.
Pan Jianjun, Bergsma I E. Determination of soil erosion class Using soil infiltration rate and soil shear resistance[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1995, 9(2): 93—96. (in Chinese with English abstract)
- [16] Al-Durrah M M, Bradford J M. Parameters for describing soil detachment due to single waterdrop impact[J]. Soil Science Society of America journal, 1981, 46(4): 836—840.
- [17] 刘光崧. 土壤理化分析[M]. 北京: 中国标准出版社, 1996.
- [18] 宫阿都, 何毓蓉. 金沙江干热河谷区退化土壤结构的分形特征研究[J]. 水土保持学报, 2001, 15(3): 112—115.
Gong Adu, He Yurong. Study on fractal features of soil structure of degraded soil in Dry and Hot Valley Region of Jinsha River[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2001, 15(3): 112—115. (in Chinese with English abstract)
- [19] 梁向锋, 赵世伟, 华娟, 等. 子午岭林区典型植被下土壤结构及稳定性指标分析[J]. 水土保持通报, 2008, 28(3): 12—16, 22.
Liang Xiangfeng, Zhao Shiwei, Hua Juan, et al. Analysis of soil structure and its stability indexes under typical vegetation in Ziwuling forest area[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2008, 28(3): 12—16, 22. (in Chinese with English abstract)
- [20] Fredlund D G, Rahardjo H. 非饱和土土力学[M]. 陈仲颐译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
- [21] 汤连生. 从粒间吸力特性再认识非饱和土抗剪强度理论[J]. 岩土工程学报, 2001(4): 412—417.
Tang Liansheng. New suggestion on shear strength in unsaturated soil based on suction between grains [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001(4): 412—417. (in Chinese with English abstract)
- [22] 刘小文, 常立君, 胡小荣. 非饱和红土基质吸力与含水率及密度关系试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(11): 3302—3306.
Liu Xiaowen, Chang Lijun, Hu Xiaorong. Experimental research of matric suction with water content and dry density of unsaturated laterite[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(11): 3302—3306. (in Chinese with English abstract)
- [23] Kok H, McCool D K. Quantifying freeze/thaw-induced variability of soil strength[J]. Transactions of the ASABE, 1990, 33(2): 501—506.

Effects of mechanical properties of surface soil on soil anti-scourability in Yuanmou dry-hot valley

Chen Anqiang^{1,2,3}, Zhang Dan^{1,2,3}, Xiong Donghong^{1,3}, Liu Gangcai^{1,3*}

(1. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Science and Water Resources Ministry, Chengdu 610041, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Key Laboratory of Mountain Hazards and Earth Surface Processes, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China)

Abstract: To study the effects of soil physical-parameters on soil anti-scourability in Yuanmou Dry – Hot Valley, soil particle size distribution, soil aggregate content, matric suction, cohesion c and friction angle φ of surface dry red soil were measured in Lab., and soil anti-scourability index (ANS) was determined by undisturbed soil trough scouring test in field. The results showed that the ANS and dispersion rate were the unary cubic multinomial change. ANS decreased gradually with the increase of dispersion rate. With the increase of the mean weight diameter MWD , ANS showed the power function growth. ANS also had the logarithmic function growth with the increase of matric suction, c and φ . The order of correlation degree between ANS and the different soil mechanical parameters were shear strength $\tau_f > \varphi > MWD > \text{dispersion rate} > \text{matric suction} > c$. The stepwise regression analysis between ANS and the different parameters showed that ANS had good linear relation with cohesion c , mean weight diameter MWD and shear strength τ_f (multiple correlation coefficient $R^2=0.983$). The partial correlation coefficient ($R_{MWD}(0.915) > R_c(0.829) > R_{\tau_f}(0.776)$) showed that the stability of water stable aggregate, the cohesive force between particles and aggregates and soil resistance to shear destructive power of flow had a great influence on ANS .

Key words: soils, mechanical properties, shear strength, anti-scourability, dispersion rate, matric suction, dry-hot valley