

安溪县花岗岩崩岗土体水分特征曲线及其影响因素

程子捷, 张海东, 蒋芳市, 司晓静, 李欣倩, 林金石, 黄炎和

(福建农林大学资源与环境学院, 福建省土壤环境健康与调控重点实验室, 福州 350002)

摘要: 为研究花岗岩崩岗土体水分特征曲线及其影响因素, 以福建省安溪县崩岗崩壁土为对象, 通过压力膜仪对土体进行脱湿试验, 绘制出崩壁土体水分特征曲线, 并进行曲线参数与影响因素的相关分析。结果表明: 随崩壁土体垂直深度增加, 崩岗土体塑性指数、黏粒含量、分形维数及磨圆度等均整体呈降低的趋势; 水分特征曲线斜率随着深度的增加而增大, 土壤持水能力减弱, 残余含水率及 VG 模型参数 a 却随之减小, 而参数 n 却随之增大; 残余含水率、参数 (a, n) 均与容重和颗粒的磨圆度呈极显著相关; 残余含水率可用容重和黏粒含量描述, 参数 a 可用容重和形状比率描述、参数 n 可用容重和塑性指数描述。研究结果可为崩壁非饱和土的强度试验提供参考。

关键词: 崩岗; 残积土; 水分特征曲线; 磨圆度; VG 模型

中图分类号: S157.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2018)03-0120-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2018.03.019

Water Characteristic Curve and Its Influence Factors of Granite Benggang soil in Anxi County

CHENG Zijie, ZHANG Haidong, JIANG Fangshi, SI Xiaojing, LI Xinqian, LIN Jinshi, HUANG Yanhe

(Fujian Provincial Key Laboratory of Soil Environmental Health and Regulation,

College of Resources and Environment, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002)

Abstract: In order to examine the soil water characteristic curve and its influence factors of granite *benggang* soil, the soil of collapsing gully wall in Anxi County of Fujian Province was taken as the object. Experiment on soil dehumidification was conducted by using the pressure membrane meter, and the soil water characteristic curve of the collapse wall soil was drawn, then the correlation analysis of the curve parameters and the influence factors was carried out. The results showed that the plastic index, clay contents, fractal dimension and roundness were all decreased generally with the increasing vertical depth of the collapsed wall soil. Meanwhile the slope of soil water characteristic curve increased with the increase of vertical depth of the collapsed wall soil, also the water holding capacity, the residual water contents and the VG model parameters a decreased, but the parameters n increased. The residual water contents and parameters (a, n) were all significantly correlated with bulk density and roundness. The residual water contents could be described by bulk density and clay content, the parameter a could be described by bulk density and shape ratio, the parameter n could be described by bulk density and plastic index. The findings can provide reference for the strength test of collapse wall unsaturated soil.

Keywords: *benggang*; residual soil; soil water characteristic curve; roundness; Van Genuchten model

土壤水分特征曲线是表述土壤中基质吸力和含水率之间关系的曲线, 它能够反映出非饱和土的应力状态、渗透性质、强度等诸多特性^[1-4]。从 Fredlund 等^[5]为土水特征曲线建立了理论基础, 至今土水特征曲线在试验方法、曲线拟合、滑坡预测等方面均有了许多较深入进展。赵宝平等^[6]采用体积压力板仪与 Tempe 仪绘制土壤水分特征曲线, 进而得到进气值和残余含水率的值; 祁昊等^[7]将不同降雨条件下的角砾土剪切结果与水

分特征曲线结合, 拟合出该土非饱和黏聚力与含水率参数的关系式; 林鸿州等^[8]通过对水分特征曲线增湿和脱湿 2 种路径渗透系数的研究, 建立了合适滑坡雨量预警基准。水分特征曲线能充分描绘出土体中水气间的相互关系, 可为非饱和土体的剪切破坏提供基础, 为滑坡、崩塌等地质灾害预警提供依据。

崩岗是中国南方典型的一种水土流失现象, 尤其是在花岗岩风化壳上发育的最为广泛^[9-10]。土体中水分变

化是诱发崩岗的主要因素之一,研究土水特征曲线对于揭示崩岗崩壁土体的崩塌具有重要意义。目前已有诸多学者运用水分特征曲线对崩岗侵蚀的发生和发展进行了研究,认为崩壁不同深度土层水分特征曲线的变化规律存在明显差异,红土层持水能力明显强于砂土层和碎屑层^[11],并用 Van Genuchten 模型、Fredlund-Xing 模型和 Gardner 模型对水分特征曲线进行拟合,对比发现 Van Genuchten 模型可以更好地描述花岗岩非饱和残积土的水分特征曲线^[12-13],土壤水分特征曲线受颗粒组成、比重、容重和饱和导水率等基本土壤理化性质的影响^[14]。然而崩岗分布广泛,不同区域崩岗土体性质存在差异,且影响土壤水分特征曲线的影响因素复杂,有必要对崩岗土体水分特征曲线特征做进一步研究。本研究以福建省崩岗分布最广的安溪县为研究区,选取 2 处典型崩岗,对崩壁不同深度的土样进行脱湿处理,分析崩壁土体土水特征曲线的垂直变化规律,并采用 Van Genuchten 模型对曲线进行拟合,分析拟合参数与粒形、粒径、容重等土壤基本性质的关

系,通过回归分析建立拟合参数与土壤基本性质的回归方程,以期进一步认识崩壁土体的水分运动,为充分认识崩壁土体的崩塌提供依据。

1 材料与方 法

1.1 样品的采集

采样区位于福建省安溪县龙门镇洋坑村(118°03' E, 24°57' N),属于亚热带季风气候,年平均气温 19 ℃,年降水量 1 800 mm,受台风影响明显,暴雨较多。安溪县是福建崩岗侵蚀最严重的地区,全县崩岗数量 12 828 个,占全省崩岗总数的 49.28%,其中龙门镇侵蚀状况尤为严重,共有崩岗 1 228 个,占安溪县崩岗总数的 9.57%^[15]。本试验选取该地区 2 处崩壁保留较为完整的崩岗,2 条崩壁分别记为崩壁 A 和崩壁 B。刮去崩壁表层结皮后,采集崩壁表面 10 cm 厚度的土样,按照土层的垂直分布从下至上进行采样,各土层在其深度范围内均匀取土,共 18 个土样。根据野外观测崩壁红土层、砂土层和碎屑层的颜色、紧实和均匀程度,可将土层细化分层(表 1)。

表 1 采样土层划分

土层	编号	土层深度/m	土层描述
红土层	A1	0—0.2	土壤呈红色,土层紧实均匀,长石和云母风化完全,大颗粒石英较少,少量芒萁等植物根系分布在土层中
	A2	0.2—0.5	
	A3	0.5—0.9	
	B1	0—0.4	
过渡层 1	B2	0.4—0.8	土壤呈浅红色,出现少量白色长石风化物,是红土层的底部和砂土层上部接触的混合土层
	A4	0.9—1.1	
	B3	0.8—2.2	
砂土层	A5	1.1—1.6	土壤呈浅红至灰白色,土质较松散,粒径增大,有较多大颗粒石英砂
	A6	1.6—2.1	
	A7	2.1—2.6	
	B4	2.2—3.5	
过渡层 2	B5	3.5—4.1	呈灰白色,土质松散,矿物以石英和云母为主,砂土层的底部和碎屑层上部接触的混合土层
	B6	4.1—5.1	
	A8	2.6—3.0	
碎屑层	B7	5.1—5.6	土壤呈灰白色,土质松散,含有大量石英砂,未完全风化的云母矿物与石英结合紧密,保持花岗岩原生构造
	A9	3.0—3.9	
	A10	3.9—6.0	
	B8	5.6—6.6	

1.2 土壤理化性质测定及分形维数的计算

土壤质地、形状比率和磨圆度采用德国新帕泰克公司 QICPIC 粒度粒形分析仪测定,黏粒、粉粒和砂粒 3 个粒级均随机选取 30 个土壤颗粒得到土壤各粒级平均形状比率和平均磨圆度,然后参照土壤粒级组成进行加权平均得到土壤的形状比率和磨圆度;液、塑限采用液、塑限联合测定法测定并计算得到塑性指数;有机质采用重铬酸钾消煮法测定;pH 采用 pH 计法测定;容重采用环刀法测定;分形维数采用杨培岭模型^[16]计算获得。

1.3 土水特征曲线的测定

试验于 2017 年 4 月在福建省金山水土保持科教园内进行。试验装置压力膜仪由加压系统、压力室和

排水系统组成,利用空气压缩机为加压系统提供气源,有能经受高压而不漏气并可微调的精密调压阀,能准确地调节和测量所加压力。部分装置之间通过有一定硬度的橡胶管连接,整个装置密封性要好,确保气流畅通。采用饱和脱湿的方法来得到土体各基质吸力对应的含水率,具体操作为:

(1)试验开始前先将高进气值陶土板进行饱和,用滤纸吸干陶土板表面的自由水分,同时将风干的崩壁土过 2 mm 土筛,将粒径 2 mm 以下土壤参照野外容重制备成高 1 cm 体积 20 cm³ 圆柱型土样,土样吸水至少 16 h 使其充分饱和,称量精度 0.01 g。

(2)将饱和好的高进气值陶土板放置于压力膜仪

护筒内,并在陶土板上平铺好已饱和土样,保证它们充分接触,再盖好顶盖并旋紧螺丝。

(3)调节压力阀,依次施加 5,10,20,40,80,150,300,600,1 200,1 500 kPa 的吸力,出水口长时间不再出水则认为达到平衡,之后称量每级吸力下土样的重量,从而获得土样含水量的变化数据。

(4)在最后一级吸力达到平衡后,将最终土样放置在烘箱内,在 105 ℃下烘干至恒定质量后,称重得到最高吸力下含水量,并计算得出土样其他各级吸力值对应的含水量,最后绘制出水分特征曲线。每组 3 次重复。

1.4 土水特征曲线模型拟合及参数的获取

土壤水分特征曲线最常用的拟合模型有 Fredlund—Xing 模型和 Van Genuchten 模型,考虑减少参数以提高实用性,同时为了更好地反映崩岗崩壁土体水分特征曲线的规律,本试验选用了 Van Genuchten(VG)提出的水分特征曲线拟合公式:

$$\theta = (\theta_s - \theta_r) / [1 + (a\psi)^n]^m - \theta_r$$

式中: θ 为体积含水率; θ_s 为饱和含水率; θ_r 为残余含水率; ψ 为基质吸力(kPa); a 为与土体的进气值有关, a 越大则土体的进气值越大; m 通常取 $1-n^{-1}$, n 与土体

的孔径分布有关, n 越大则土体孔隙分布越均匀。通过以上方程获得参数 a 、 n 和残余含水率(θ_r)的值。

1.5 数据处理与统计

数据处理采用 Excel 2007,水分特征曲线的绘制及拟合采用的是 Origin 8.0,参数间相关分及逐步回归分析采用 SPSS 18.0 进行。

2 结果与分析

2.1 崩岗土体的基本性质

由表 2 可知,2 条崩壁不同土层理化性质存在一定差异。有机质含量和塑性指数随着土层深度增加不断减小,砂土层容重最小,碎屑层容重最大。黏粒含量随着土层深度的增加而不断减小,分形维数为 2.62~2.80,也随着深度的增加整体呈降低的趋势;从粒形分布看,形状比率为 0.61~0.69,说明颗粒主要为块状颗粒,磨圆度为 0.71~0.80,呈坚棱角状,且磨圆度整体随着深度的增加而降低。以上这些现象主要由于随着土层深度的增加,受到外界生物、温度的影响较小,风化程度较弱,花岗岩中易分化的矿物未能被分解,故有机质、黏粒含量和磨圆度等均呈现降低的趋势。

表 2 土壤理化性质

编号	pH	有机质/ (g · kg ⁻¹)	容重/ (g · cm ⁻³)	塑性 指数/%	砂粒/ %	粉粒/ %	黏粒/ %	质量分形 维数	形状 比率	磨圆度
A1	4.10	9.42	1.39	13.21	46.53	37.52	15.95	2.80	0.67	0.78
A2	3.98	5.28	1.38	9.64	49.58	40.21	10.21	2.75	0.64	0.78
A3	4.54	3.06	1.39	13.34	57.03	35.12	7.85	2.71	0.66	0.76
A4	4.91	2.46	1.37	15.66	68.32	27.66	4.03	2.66	0.65	0.77
A5	4.68	1.61	1.35	12.92	72.33	24.88	2.79	2.64	0.66	0.76
A6	4.98	2.16	1.35	6.60	67.46	29.80	2.74	2.67	0.69	0.80
A7	4.82	1.71	1.34	7.38	63.56	33.42	3.02	2.69	0.63	0.71
A8	5.12	0.93	1.56	5.80	64.34	32.99	2.67	2.70	0.63	0.70
A9	4.94	0.91	1.56	5.77	68.42	29.18	2.40	2.65	0.62	0.75
A10	4.76	0.83	1.57	5.33	71.75	26.18	2.07	2.62	0.62	0.71
B1	3.74	3.97	1.39	34.12	59.42	31.90	8.68	2.72	0.63	0.75
B2	3.95	3.78	1.46	10.67	63.26	28.94	7.80	2.65	0.66	0.75
B3	4.56	1.49	1.31	11.75	52.76	37.33	9.91	2.74	0.65	0.76
B4	5.38	1.08	1.33	8.90	53.68	37.28	9.03	2.74	0.65	0.77
B5	5.44	0.82	1.39	7.54	47.94	45.45	6.61	2.75	0.61	0.74
B6	5.45	0.78	1.53	5.26	45.40	48.00	6.60	2.76	0.63	0.76
B7	4.86	0.51	1.57	11.56	58.12	37.36	4.52	2.69	0.64	0.72
B8	5.12	0.86	1.58	3.60	50.94	43.98	5.08	2.75	0.65	0.72

2.2 土水特征曲线的特征及模型拟合

2.2.1 土水特征曲线的特征 以基质吸力的对数值为横坐标,以体积含水率为纵坐标绘制得到的崩壁不同深度土体的水分特征曲线(图 1)。与经典水分特征曲线^[17](图 2)相比,崩岗土水分特征曲线符合其大致趋势,可将崩壁土体的水分特征曲线分为 3 个阶段,依次为边界效应阶段、转化阶段和残余阶段。在脱湿初期的边界效应阶段,气泡还未进入土体的孔隙中,土壤颗粒接触点处的水膜是连续的;随着基质吸力的增大曲线进入转化阶段,土体的含水率随基质吸力的增大而迅速减

小;最后进入残余阶段,残留的孔隙水只能存在于小孔隙中,土体的含水率随基质吸力的增加而降低的速率显著下降。边界效应阶段和转化阶段以土体的进气值为界,转化阶段和残余阶段以残余吸力为界,与残余吸力对应的含水率就是残余含水率。

由图 1 可知,崩岗崩壁不同土层水分特征曲线存在明显差异性,在边界效应阶段,含水率随基质吸力的增大变化不明显,红土层、过渡层 1 和砂土层进入转化阶段的拐点位置均出现在 10 kPa 附近,而其他土层拐点位置出现较晚,为 20~40 kPa。在转化阶段,含水率随基

质吸力的增加快速降低,但不同土层含水率降低的速率不同,曲线斜率表现出随土层深度增大而增大的趋势。在残余阶段,含水率随着基质吸力的增大缓慢降

低,过渡层 2 和碎屑层进入残余阶段的拐点位置出现在约 600 kPa 附近,而其他土层含水率随基质吸力的增大还在快速降低,仍处在转化阶段。

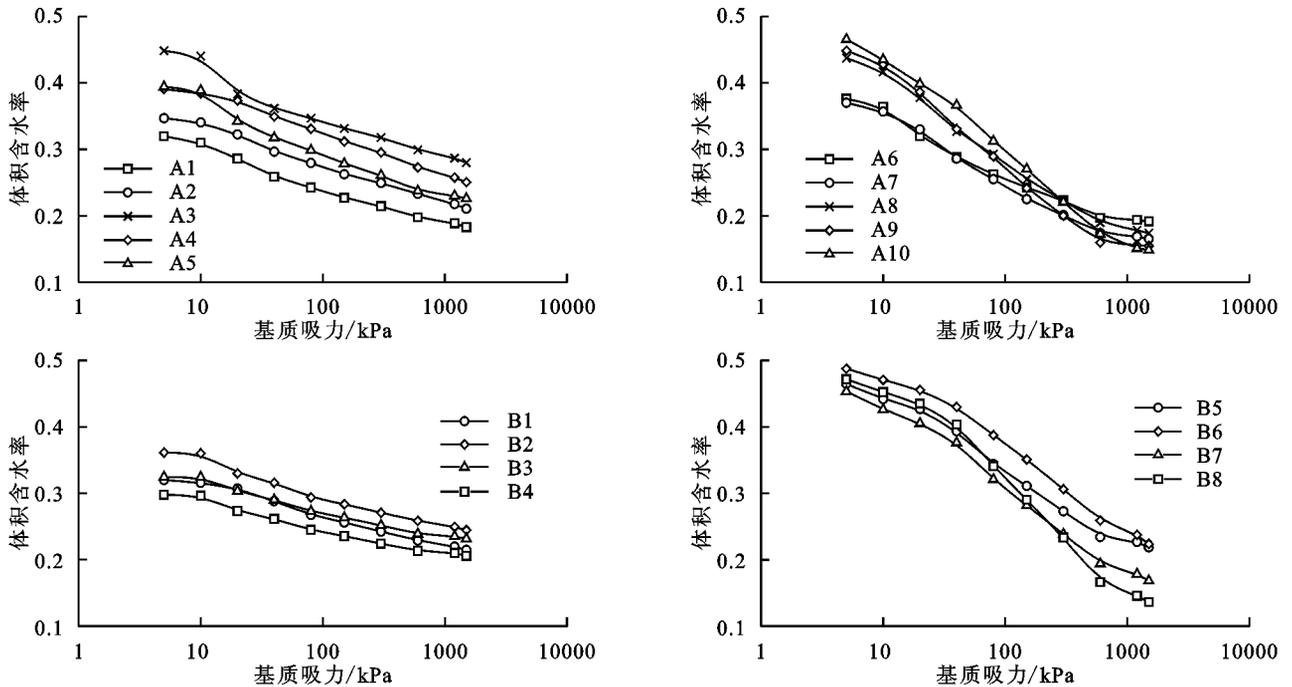


图 1 崩壁各土层水分特征曲线

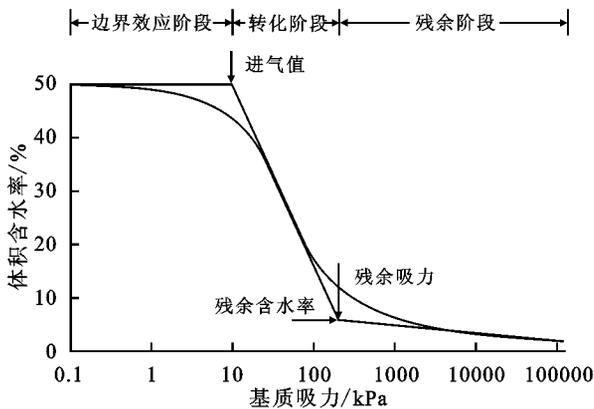


图 2 经典水分特征曲线

综上可知崩壁土水分特征曲线在垂直方向上存在明显差异,且呈现一定的变化规律。过渡层 2 和碎屑层水分特征曲线斜率明显高于其他土层,这是因为过渡层 2 和碎屑层土壤中黏粒含量较少,土壤的持水能力较弱,在排水脱湿过程中,土壤水分快速流失,胀缩变形较大,导致土体极易崩解。因此,在降雨及径流的作用下,崩壁下层土体很容易坍塌,使其上层土壤形成临空面;另一方面红土层由于水分不易流失,自重不断增大,一旦超过红土层塑限和自重,就会发生崩塌。这与邓羽松等^[18]对鄂东南地区崩岗崩壁不同土层水分特征曲线差异导致崩岗发生的研究结果相似。

2.2.2 水分特征曲线的 Van Genuchten 模型拟合 采用 Van Genuchten 模型分别对崩岗 A 的 10 组土样数据和崩岗 B 的 8 组数据进行曲线拟合。由图 3 可知,各土层水分特征曲线变化趋势基本一致,在基质吸力 0~200

kPa 时,曲线变化非常陡,土样的体积含水率随着基质吸力的增加快速降低,之后曲线变化相对平缓,含水率的降低速率随基质吸力的增加越来越低,基质吸力越大曲线越接近平行。拟合方程相关系数平方的均值达到 0.988,说明崩壁土体水分特征曲线使用 Van Genuchten 模型效果较好。由表 3 可知,参数的 a 差异性较大,为 0.045~0.559,呈现出随着土层深度的增加而减小趋势,说明随着土层深度的增加,土体内部孔隙增多,空气更容易冲破水膜进入土体,土体的进气值减小;参数 n 差异不大,为 1.036~1.194,但呈现出随着深度的增加而增大的趋势,说明随着土层深度的增加,土体中孔隙分布均匀程度有增大的趋势;残余含水率为 0.154~0.239,呈现出随着土层深度的增加而减小的趋势,说明随着深度的增加,土体持水能力呈现减弱的趋势。碎屑层残余含水率和黄土较为接近,其他土层残余含水率明显大于黄土,这是因为土壤水分特征曲线受土壤矿物组成、孔隙结构、应力状态等土体性质影响。

2.3 不同土层水分特征曲线影响因素

为研究崩岗崩壁土理化性质对其水分特征曲线的影响,将不同土层水分特征曲线的参数与土体理化性质进行相关分析。由表 4 可知,水分特征曲线基础参数与土壤理化性质具有一定的相关关系。残余含水率与容重、砂粒含量、黏粒含量和磨圆度分别呈极显著正(负)相关关系,与质量分形维数呈显著正相关关系。这是由于残余含水率与土体脱湿后期小孔隙的数量有关,脱湿过程中许多大孔隙在土体水力作用

下形成多个小孔隙,土壤颗粒组成为此提供了条件^[19]。小孔隙的数量越多持水能力越强则需要更大

的基质吸力才能使土体含水率达到残余含水率,故残余含水率与它们呈现出较高的相关性。

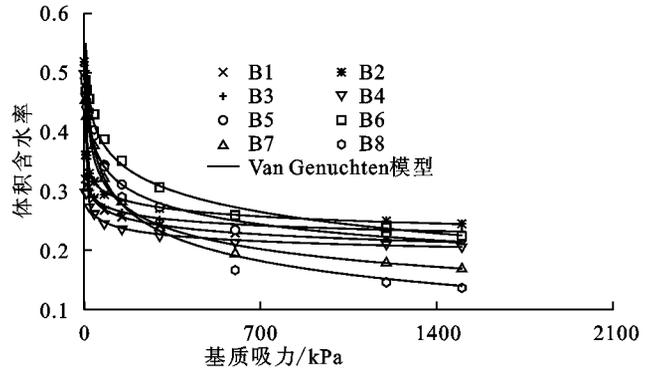
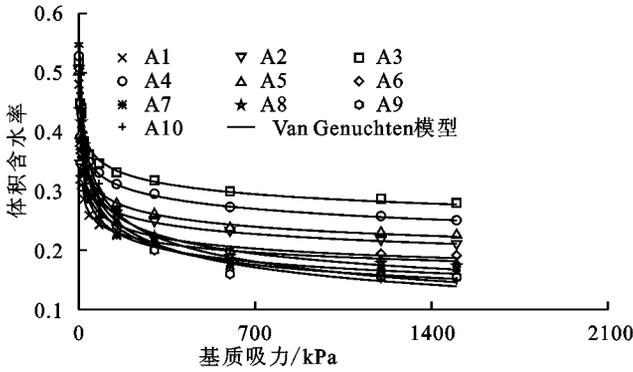


图 3 崩壁模型拟合

水分特征曲线拟合参数(a, n)与土壤理化性质也具有一定的相关关系。其中参数 a 与容重、形状比率和磨圆度均呈现出极显著正相关关系,与有机质含量呈显著正相关关系。参数 a 与进气值有关,容重和颗粒形态均能通过影响土体孔隙结构从而改变进气值的大小,容重越小,土体越松散,内部孔隙结构越大,土壤颗粒形状比率和磨圆度越小,颗粒形状越不规则,颗粒间孔隙越大,进气值越小,参数 a 就越小,故参数 a 与容重和粒形表现出较高相关性。参数 n 与容重呈极显著正相关关系,与磨圆度呈极显著负相关关系,与有机质、塑性指数和黏粒含量均呈显著负相关关系。参数 n 与土体孔径分布有关,容重、磨圆度等均能对土体孔径分布产生影响,容重越大,土体越紧实,颗粒磨圆度越小,颗粒间咬合作用越大,土体中孔隙的均匀程度越高,参数 n 就越大,故参数 n 与它们表现出较高相关性。

表 3 VG 模型拟合参数

土层	编号	θ_r	拟合参数		决定系数 R^2
			α	n	
红土层	A1	0.223	0.559	1.055	0.990
	A2	0.220	0.259	1.054	0.995
	A3	0.202	0.458	1.055	0.962
过渡层 1	A4	0.212	0.115	1.057	0.998
	A5	0.197	0.545	1.065	0.982
砂土层	A6	0.196	0.544	1.077	0.980
	A7	0.173	0.184	1.102	0.985
过渡层 2	A8	0.181	0.187	1.117	0.991
	A9	0.158	0.124	1.151	0.988
碎屑层	A10	0.154	0.094	1.16	0.996
红土层	B1	0.230	0.325	1.042	0.992
	B2	0.215	0.465	1.043	0.982
过渡层 1	B3	0.234	0.476	1.036	0.983
	B4	0.239	0.442	1.037	0.980
砂土层	B5	0.199	0.098	1.105	0.991
	B6	0.192	0.044	1.123	0.997
过渡层 2	B7	0.191	0.095	1.130	0.995
	碎屑层	B8	0.158	0.045	1.194

表 4 残余含水率和拟合参数与土壤理化性质的相关性

参数	有机质	容重	塑性指数	砂粒含量	粉粒含量	黏粒含量	质量分形维数	形状比率	磨圆度
残余含水率	0.43	-0.59**	0.32	-0.59**	0.41	0.69**	0.59*	0.20	0.63**
a	0.52*	0.66**	0.30	0.06	-0.33	0.45	0.05	0.75**	0.62**
n	-0.52*	0.83**	-0.57*	0.09	0.19	-0.57*	-0.17	-0.44	-0.64**

注: * 表示显著相关($p < 0.05$); ** 表示极显著相关($p < 0.01$)。下同。

综上可知,崩岗崩壁土水分特征曲线的残余含水率、VG 模型参数 a 和 n 均与土体容重线性相关性较高,已有不少学者对此得到相似的论证。夏金文等^[14]证实崩岗土水分特征曲线的参数 a 和 n 与土壤容重及质地线性相关性较高;陈东霞等^[20]证实干密度对非饱和残积土水分特征曲线影响较大,且低于干密度土样水分特征曲线进气值较小。另外这些水分特征曲线参数还与土体的磨圆度表现出较高的相关性。这是由于磨圆度对土壤颗粒之间孔隙状况具有直接的影响,颗粒的磨圆度越小,则颗粒间孔隙越大。蒋明镜等^[21]通过电镜扫描的方法发现钙质砂在粒径大于 1 mm 之后,不同形状的颗粒面孔隙度差别越来越大,其中条状颗粒的孔隙度最大,片状颗粒孔隙度最小。颗粒磨圆度通过影响土

体中孔隙状况进而对水分特征曲线产生突出的影响,因此颗粒形态对崩岗土水分特征曲线的影响不容忽视,其作用机制还有待进一步研究。

为了进一步研究土体理化性质对水分特征曲线参数的影响,用 SPSS 对水分特征曲线参数和土体理化性质进行了线性逐步回归分析。分别以残余含水率(Y_1)、参数 a (Y_2) 和参数 n (Y_3) 为因变量,以有机质(X_1)、容重(X_2)、塑性指数(X_3)、砂粒含量(X_4)、粉粒含量(X_5)、黏粒含量(X_6)、形状比率(X_7)和磨圆度(X_8)为自变量进行逐步回归分析(表 5)。由表 5 可知,残余含水率、参数 a 、参数 n 均可通过土体理化性质进行多元线性拟合,方程均通过了极显著性检验($p < 0.01$)。其中,残余含水率可通过黏粒含量和

容重进行表达,参数 a 可通过形状比率和容重进行表达,参数 n 可通过容重和塑性指数表达。

表 5 理化性质影响残余含水率和拟合参数主导因子方程

主导因子方程	R^2	n
$Y_1 = 0.003X_6 - 0.093X_2 + 0.309$	0.697**	18
$Y_2 = 5.639X_7 - 0.832X_2 - 2.162$	0.714**	18
$Y_3 = 0.347X_2 - 0.002X_3 + 0.613$	0.761**	18

3 结论

(1)崩壁土壤塑性指数、黏粒含量、分形维数及磨圆度等随着土层深度的增加大致呈降低的趋势;崩壁土体颗粒主要为块状颗粒,且呈坚棱角状,形状比率为 0.61~0.69,磨圆度为 0.71~0.80,土壤深度越大,土壤颗粒形状越不规则。

(2)崩岗崩壁不同土层土体水分特征曲线差异较大,且表现出一定变化规律。随着崩壁土层深度的增加,曲线斜率逐渐增大,残余含水率逐渐减小,同时 VG 拟合参数 a 呈现出下降的趋势,参数 n 则呈现出增大的趋势。

(3)土壤理化性质对崩岗崩壁土体水分特征曲线影响较大,容重和磨圆度均与残余含水率、VG 拟合参数 a 和参数 n 相关性较高,土壤颗粒形态通过对土体孔隙状况的影响对崩壁土水分特征曲线的影响较大。此外,残余含水率与砂粒含量和黏粒含量等相关性较高,可用容重和黏粒含量表达;参数 a 与形状比率等相关性较高,可用容重和形状比率表达;参数 n 与塑性指数等相关性较高,可用容重和塑性指数表达。

参考文献:

- [1] 张芳枝,梁志松,周秋娟.非饱和土性状及其边坡稳定性[M].北京:中国水利水电出版社,2011.
- [2] Arezoo R. Effects of soil-water characteristic curve and relative permeability equations on estimation of unsaturated permeability function [J]. Soils & Foundations, 2015, 55(6): 1400-1411.
- [3] Dastjerdi M H T, Habibagahi G, Nikooee E. Effect of cconfining stress on soil water retention curve and its impact on the shear strength of unsaturated soils [J]. Vadose Zone Journal, 2014, 13(5): 5-11.
- [4] Gallage C, Uchimura T. Direct shear testing on unsaturated silty soils to investigate the effects of drying and wetting on shear strength sarameters at low suction [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2016, 142(3): 04015081.

(上接第 112 页)

- [16] 朱顺平,薛英.无反射棱镜全站仪及其测试[J].测绘通报,2001(3):41-42,45.
- [17] 涂刚.无反射棱镜全站仪及其在工程测量中的应用[J].武汉勘察设计,2012(6):69-71.
- [18] 张宁宁,刘普灵.黄土丘陵区近 10 年典型小流域对侵

- [5] Fredlund M D, Fredlund D G, Wilson G W. Prediction of the soil-water characteristic curve from grain-size distribution and volume-mass properties [C]// 3rd Brazilian Symposium on Unsaturated Soils, Rio De Janeiro, Brazil, 1997:13-23.
- [6] 赵宝平,李晓云,郭建平,等.基于体积压力板仪及压力膜仪法的土水特征曲线研究[J].科技信息,2010,2(17):34-35.
- [7] 祁昊,冯文凯,陈建峰,等.降雨作用下欢喜坡冰水堆积体角砾土强度特性[J].水文地质工程地质,2017,44(4):78-84.
- [8] 林鸿州,于玉贞,李广信,等.土水特征曲线在滑坡预测中的应用性探讨[J].岩石力学与工程学报,2009,28(12):2569-2576.
- [9] 刘希林,连海清.崩岗侵蚀地貌分布的海拔高程与坡向选择性[J].水土保持通报,2011,31(4):32-36.
- [10] 区晓琳,陈志彪,陈志强,等.闽西南崩岗土壤理化性质及可蚀性分异特征[J].中国水土保持科学,2016,14(3):84-92.
- [11] Xia D, Deng Y S, Wang S L, et al. Fractal features of soil particle-size distribution of different weathering profiles of the collapsing gullies in the hilly granitic region, south China [J]. Natural Hazards, 2015, 79(1): 455-478.
- [12] 江凌.崩壁土体水分入渗与再分布特征实验研究[D].福州:福建农林大学,2015.
- [13] 罗小艳,刘伟平,扶名福.颗粒级配及竖向应力对崩岗区土壤土水特征曲线的影响[J].东南大学学报(自然科学版),2016,46(增刊 1):235-240.
- [14] 夏金文,魏玉杰,蔡崇法.花岗岩风化土物理特征曲线间的相关性研究[J].土壤学报,2017,54(3):581-589.
- [15] 蒋芳市.花岗岩崩岗崩积体侵蚀机理研究[D].福州:福建农林大学,2013.
- [16] 杨培岭,罗远培.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.
- [17] Lu N, Likos W J. Unsaturated soil mechanics [M]. Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2004: 211-212.
- [18] 邓羽松,丁树文,刘辰明,等.鄂东南花岗岩崩岗崩壁土壤水分特征研究[J].水土保持学报,2015,29(4):132-137.
- [19] 李志清,李涛,胡瑞林.非饱和土水分特征曲线特性[J].中国公路学报,2007,20(3):23-28.
- [20] 陈东霞,龚晓南.非饱和和残积土的土-水特征曲线试验及模拟[J].岩土力学,2014,35(7):1886-1889.
- [21] 蒋明镜,吴迪,曹培,等.基于 SEM 图片的钙质砂连通孔隙分析[J].岩土工程学报,2017,39(增刊 1):1-5.

蚀环境演变的泥沙响应.[J].水土保持学报,2017,31(6):106-111,117.

- [19] 陕西省水利科学研究所河渠研究室,清华大学水利工程系泥沙研究室.水库泥沙[M].北京:水利电力出版社,1979.