砾石对石灰土表面干缩裂隙发育特征的影响

王 星[1,2], 徐勤学[1,2], 赖本忠[1,2], 张帅普[1,2], 甘 磊[1,2]

(1. 桂林理工大学 广西环境污染控制理论与技术重点实验室科教结合科技创新基地,
广西 桂林 541004; 2. 桂林理工大学 岩溶地区水污染控制与用水安全保障协同创新中心, 广西 桂林 541004)

摘 要: [目的] 研究砾石粒径及含量对石灰土表面干缩裂隙发育特征的影响,为探索喀斯特地区的水土流失机理提供参考依据。[方法] 通过室内模拟试验和数字图像处理技术,研究了砾石粒径(2.0～5.0 mm 和 5.0～12.5 mm)和砾石含量(0%,10%,20%,30%,40%)条件下的石灰土表面干缩裂隙特征。[结果] ①无砾石石灰土平均表面裂隙率仅为 3.03%,含砾石石灰土具有更大的表面裂隙率,在大粒径(5.0～12.5 mm)高含量(40%)条件下,表面裂隙率最大,达到 8.66%;②当砾石含量增加时,裂隙的形态变得细小且密集,小粒径砾石会使裂隙网络更复杂;③大粒径(5.0～12.5 mm)条件下的土壤表面裂隙率与砾石含量成正线性相关,而小粒径(2.0～5.0 mm)条件下的裂隙率与砾石含量成负线性相关;④砾石会成为裂隙发育的基点,每个砾石颗粒周围都有可能产生围绕砾石或是向外延伸的裂隙。且在砾石形态的棱角处,容易产生向外延伸的裂隙。[结论] 石灰土中存在砾石会导致表面裂隙率提高,弱化土体的抗侵蚀能力,是石漠化治理不容忽视的问题。

关键词: 石灰土; 表面干缩裂隙; 砾石; 裂隙网络参数化

文献标识码: A **文章编号**: 1000-288X(2020)03-0020-07 **中图分类号**: S152.2

文献参数: 王星, 徐勤学, 赖本忠, 等. 砾石对石灰土表面干缩裂隙发育特征的影响[J]. 水土保持通报, 2020,40(3):20-26. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2020.03.004; Wang Xing, Xu Qinxue, Lai Benzhong, et al. Effects of rock fragments on characteristics of surface shrinkage cracks in calcareous soil [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020,40(3):20-26.

Effects of Rock Fragments on Characteristics of Surface Shrinkage Cracks in Calcareous Soil

Wang Xing[1,2], Xu Qinxue[1,2], Lai Benzhong[1,2], Zhang Shuaipu[1,2], Gan Lei[1,2]

(1. *Guangxi Key Laboratory of Environmental Pollution Control Theory and Technology, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi* 541004, *China*; 2. *Collaborative Innovation Center for Water Pollution Control and Safety in Karst Area, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi* 541004, *China*)

Abstract: [Objective] The effects of rock fragment (RF) size and content on the development characteristics of surface shrinkage cracks in calcareous soil were studied to provide a reference basis for exploring the mechanism of soil erosion in karst areas. [Methods] RF size (2～5 and 5～12.5 mm) and RF content (0%, 10%, 20%, 30%, and 40%) were controlled, and digital-image-processing technology was used to study the effect of RFs on surface crack development in calcareous soil. [Results] ① The surface crack rate (SCR) of the calcareous soil without RFs was only 3.03%, whereas the samples with added RFs had a larger SCR. The maximum SCR of sample (5～12.5 mm, 40%) reached 8.66%. ② When RF content increased, the morphology of the crack network became small and dense, and small RFs made the crack network more complex. ③ The SCR of 5～12.5 mm RFs was positively correlated with the RF content, whereas the SCR of 2～5 mm RFs was negatively correlated with the RF content. ④ RFs can become the basis of fracture

收稿日期:2019-12-05 **修回日期**:2019-12-29

资助项目:国家重点研发计划项目"喀斯特峰丛洼地石漠化综合治理与生态服务功能提升技术研究示范"(2016YFC0502403); 国家自然科学基金项目"岩—土覆被格局对岩溶峰丛洼地坡面水土流失的影响机制研究"(51769005); 广西自然科学基金项目"红壤坡面细沟发育过程实验模拟研究"(2016GXNSFAA 380116)

第一作者:王星(1996—),男(汉族),陕西省西安市人,硕士研究生,研究方向为水文与水资源。Email:wx4717@126.com。

通讯作者:徐勤学(1982—),男(汉族),湖南省新宁县人,博士,副教授,主要从事水土保持与农业生态研究。Email:xqx@glut.edu.cn。

development, and each RF probably produce fracture around the RF or extend the crack network. Moreover, at the corner of an RF, it was easy to produce cracks extending outward. [Conclusion] The existence of RFs in calcareous soil could lead to the increase of the SCR and weaken the resistance of soil to erosion.

Keywords: calcareous soil; shrinkage crack; rock fragment; parametric crack network; karst areas

土壤表面裂隙会破坏土壤结构完整性,增加土体风化深度,造成土壤优先流[1],降低土壤抗侵蚀能力[2]。卢全中等[2]总结了黄土裂隙发育特征及其规律,发现黄土中存在大量不同规模不同成因的裂隙,这些裂隙使得黄土高原土壤侵蚀加剧。裂隙是土体在干燥脱水过程中内部应力分布不均匀导致的,裂隙发育过程与土壤中黏粒含量、含水量、温度以及土壤添加物等环境条件密切相关[3]。根据不同环境条件下的裂隙指标可反推出影响土体开裂过程的关键因素[4],相较于传统的人工测量方法,使用数字图像处理技术能够获得更精确的裂隙参数指标。冷挺等[5]对膨胀土在干湿循环条件下产生表面裂隙的过程进行了监测,并对获得的裂隙图像进行处理,得到裂隙网络的量化指标,解释了干湿循环过程土壤表面裂隙的发育规律。朱磊等[6]改进了基于胡克定律的土壤开裂模型,用以模拟蒸发作用下农田土壤表面干缩裂隙的动态开裂,模拟结果与田间试验结果具有一致性。国内的裂隙研究主要集中在黄土[7]、下蜀黄土[8]以及膨胀土[9]等地区,目前针对石灰土表面裂隙的研究比较少见。

石灰土在喀斯特地区广泛分布,在自然条件下有机质含量和土壤肥力高,是珍贵的土地资源。但是由于不合理的耕作活动影响,石灰土的团粒结构很容易被破坏,失去稳定性,在干旱季节会发生土壤板结开裂的现象[10]。石灰土中通常存在砾石,许多学者强调了砾石会加剧土壤侵蚀以及提高土壤入渗速率[11-13]。砾石直接影响到土壤容重、土壤含水率等物理性质,不考虑土壤中的砾石,土壤的有效含水量要高估约 39%[14]。以上研究结果表明,土壤中的砾石与表面裂隙均会加剧土壤侵蚀以及提高土壤入渗速率,那么究竟砾石与表面裂隙有何关系,是否砾石会影响石灰土裂隙发育,还有待进一步研究。

本文以石灰土为研究对象,设计不同砾石粒径及砾石含量的土石混合介质,并进行干湿循环。采用数字图像处理技术,得到多个裂隙网络形态的量化指标。分析砾石含量和粒径对表面裂隙发育特征的影响,并总结含砾石土壤裂隙发育机制,以期为防治石灰土地区的水土流失以及石漠化治理提供参考。

1　材料与方法

1.1　试验材料

本试验所用土壤为石灰土,砾石为石灰岩,于 2018 年 4 月取自广西壮族自治区桂林市灵川县海洋乡枇杷塘村(25°17′32″N,110°33′42″E)。取样区域为典型的喀斯特峰丛坡地地貌,土层浅薄,砾石含量高,由于常年的人为扰动,加剧了石漠化速度,土地类型逐渐转变成裸岩石砾地。取样点位于中坡位,坡度约 30°,取土深度为 10—40 cm,初始含水率约 30%。根据室内试验得出土壤基本理化性质指标(见表 1),机械组成标准采取国际制。取土过程中挑选大块石灰岩砾石,经过破碎筛分后使用,所取石灰岩密度约2.8 g/cm^3,导水性极弱,可忽略不计。

表 1　试验区土壤基本理化性质

容重/(g·cm^{-3})	有机质/(g·kg^{-1})	机械组成/%		
		砂粒(0.02～2 mm)	粉粒(0.002～0.02 mm)	黏粒(<0.002 mm)
1.25±0.17	31.33±2.05	49.10	32.50	18.40

1.2　试验方法

将取回的土样在室内风干,去除根系和砾石等杂质后,研磨过筛(2 mm)。根据前人研究经验,喀斯特峰丛洼地坡面土壤砾石含量最高达到 39.49%[15],砾石粒径分布在 2～75 mm 之间,其中 5～20 mm 粒径之间的碎石最多。本试验使用容器直径为 100 mm,为减小边壁效应,粒径设计为 2～5,5～12.5 mm 两组粒径[16]。最终按不同砾石含量(10%,20%,30%,40%质量百分比)、不同粒径(2～5,5～12.5 mm)与土样混合进行交叉试验,并设置无砾石添加的对照组,每种配置做 3 次重复试验。填土容器选用透明有机玻璃圆柱,高为 50 cm,内径为 10 cm。填土高度为 40 cm。土柱配置见表 2。

干湿循环的次数也会影响裂隙的发育程度,前 2 次干湿过程会加剧裂隙的发育,随着干湿循环次数增多,裂隙发育在第 5 次干湿循环之后趋于稳定[17]。借鉴前人研究经验,本文采取 7 次干湿循环。湿润过程将土柱放入盛满水的圆桶中,使水面高于土面约 5 cm,浸泡 24 h。干燥过程选择恒温烘箱来加速土壤内部水分蒸发,将饱和的土柱放入 60 ℃烘箱内烘干

72 h,此为 1 次干湿过程[16],干湿过程共重复 7 次。湿润过程中,土壤表面放置 1 层滤纸,防止注水过程水滴对表层土壤产生溅蚀,保持表层土壤平整;干燥过程将滤纸去除,不影响水分蒸发。最后 1 次干燥过程结束后,对每个土柱表面进行拍照,获得土壤表面裂隙的高清图像。

表 2 试验土柱配置

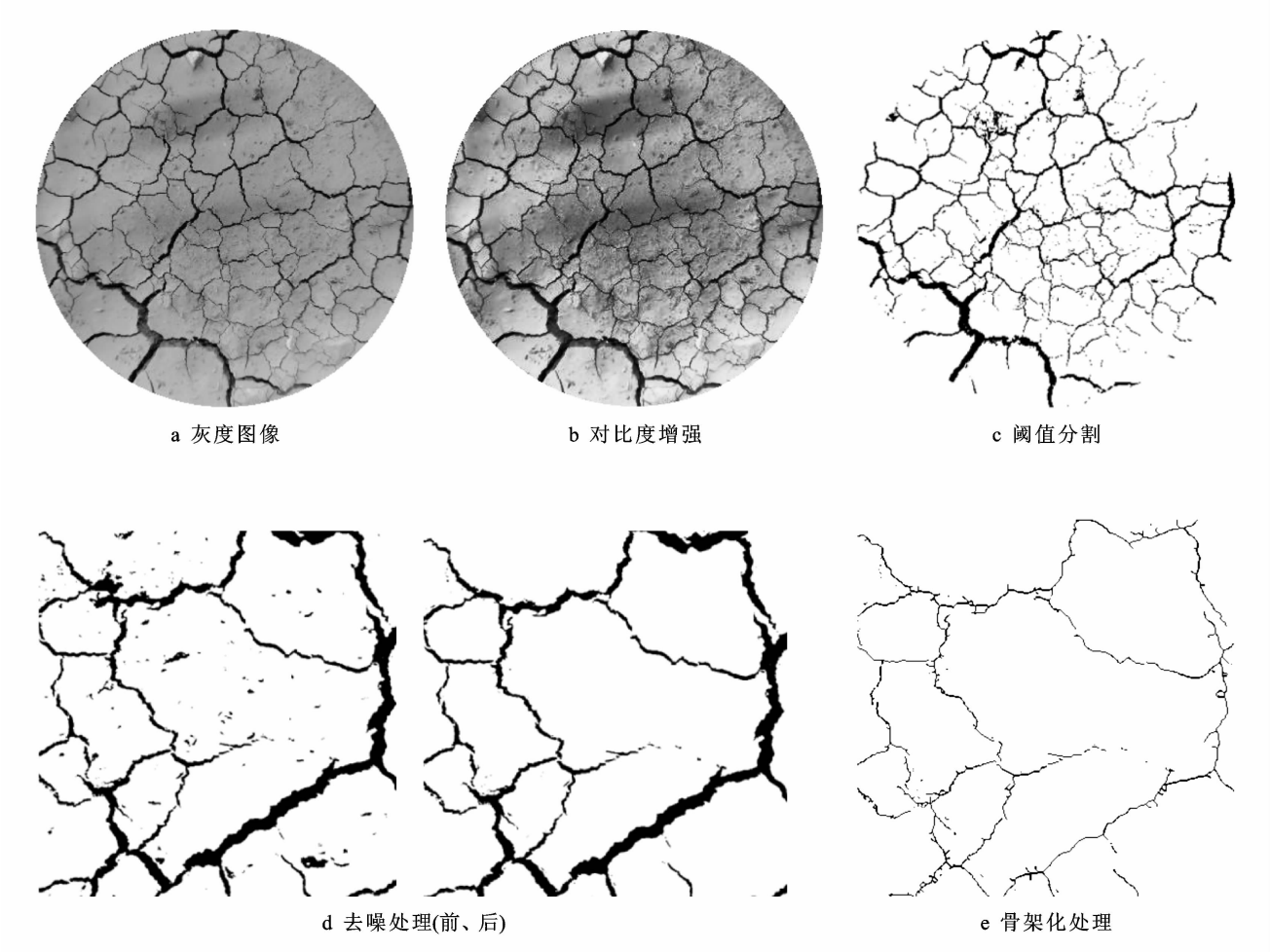
土柱编号	砾石粒径/mm	砾石质量百分比/%	砾石体积百分比/%
1	—	—	—
2	2～5	10	4.73
3	2～5	20	10.05
4	2～5	30	16.08
5	2～5	40	22.96
6	5～12.5	10	4.73
7	5～12.5	20	10.05
8	5～12.5	30	16.08
9	5～12.5	40	22.96

1.3 裂隙图像处理及参数计算

1.3.1 裂隙图像处理 采用 Image J(1.51 版本)软件进行图像的处理。Image J 图像分析软件可以实现图像的预处理、阈值分割、去除噪点、参数提取等一系列操作。

首先对图像进行预处理,为了去除边界效应,裁剪掉约 1/6 直径的外围图像,得到直径约 8.3 cm 的圆形区域。由于彩色图像数据量太大,不方便处理,将图像转化为只有黑白两色的灰度图像(图 1a),灰度值为 0 至 255。使用增强对比度的方法增加裂隙与土壤颗粒的色彩差异(图 1b)。

图像预处理完成后,使用阈值分割功能将裂隙从图像中提取出来并转化为二值图像(图 1c)。然后去除图像上的无关噪点(图 1d)。最后进行骨架化处理,骨架化处理即提取裂隙的中轴线,使裂隙图像转化为单位像素宽度的图像(图 1e),骨架化用于计算裂隙条数。



a 灰度图像 b 对比度增强 c 阈值分割

d 去噪处理(前、后) e 骨架化处理

图 1 石灰石土表面裂隙图像处理过程

1.3.2　裂隙参数计算

(1) 裂隙条数 N:相邻两个交点之间的部分为一条裂隙。使用 Image J 中的 Bone J 插件对骨架化图像进行骨架分析得出裂隙条数。

(2) 裂隙平均宽度 W_{AC}(average crack width)、裂隙平均长度 L_{AC}(average crack length)和裂隙总长度 L_{TC}(total crack length),这 3 个指标用来表示裂隙网络的几何特征。使用 Image J 中的 Bone J 插件进行宽度分析,得出裂隙的平均宽度。裂隙骨架化之后得到单位宽度裂隙图像,单位宽度裂隙所占像素即是裂隙总长度。裂隙平均长度由裂隙总长度除以裂隙条数得到。

$$L_{AC}=\frac{L_{TC}}{N} \tag{1}$$

式中:L_{TC} 表示裂隙总长度(mm);N 表示裂隙条数。

(3) 表面裂隙率 R_{SC}(surface crack rate):土壤表面裂隙面积与总面积之比,反映土体开裂程度。使用 Image J 软件自带的像素测量功能,测量裂隙图像黑色像素的个数,并计算出裂隙率。

$$R_{SC}=\frac{A_C}{A} \tag{2}$$

式中:A_C 表示裂隙网络所占面积(mm^2);A 表示试样面积(mm^2)。

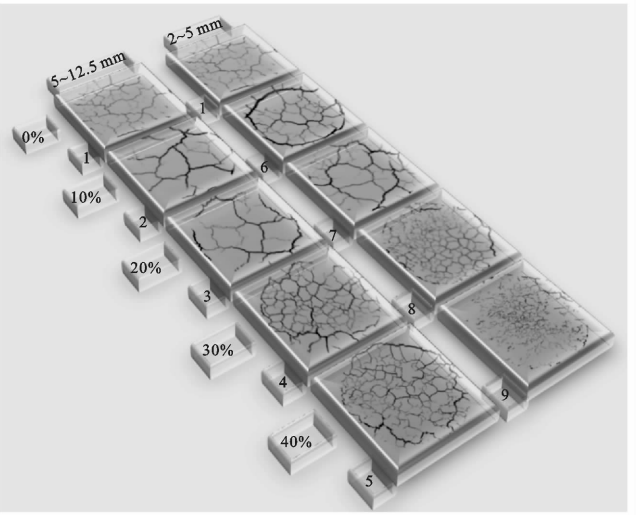
(4) 分形维数 D_F(Fractal dimension):分形维数可以描述土壤表面裂隙的分布情况和复杂程度,Image J 软件中的 Bone J 插件提供了测量分形维数的功能,该功能采用"数盒子"方法计算裂隙结构的分维值。

2　结果与分析

2.1　含砾石石灰土表面裂隙发育特征

不同砾石条件下石灰土表面裂隙见图 2,无砾石石灰土的平均表面裂隙率仅为 3.03%(图 2)。其它学者研究得到膨胀土的表面裂隙率为 5%左右[5,9]。石灰土的表面裂隙率较小可能是由于黏粒含量相对偏低导致的。所有含砾石石灰土土柱的表面裂隙率平均值为 7.18%,高于无砾石石灰土 2.4 倍。图 2 中处理为 2～12.5 mm,40%的表面裂隙率最大,为 8.66%,是无砾石石灰土的 2.9 倍。

对比图 2 中同一粒径不同含量的裂隙图像,从单个裂隙的形态来看,随着砾石含量的增多,裂隙条数变多,裂隙宽度变窄。图 2 中处理为 2～12.5 mm,10%的裂隙条数为 144 条,而图 2 中处理为 2～12.5 mm,40%的裂隙条数为 475 条,裂隙条数增长了 3.3 倍。拓展到整个土壤表面裂隙网络,随着砾石含量的增多,裂隙网络的形态变得狭窄且密集。



注:图中百分数为砾石含量;数字 1—9 为土样编号。

图 2　不同砾石条件下的石灰石土表面裂隙对比

土体裂隙主要是由于土壤孔隙的扩大和开裂,在土体的含水量降低时,由于含水量分布不均匀,在土壤颗粒之间产生含水量梯度,导致局部应力产生差异,从而使土壤孔隙不断扩张,最终导致土体开裂[18]。而土壤中添加砾石,原本的土壤颗粒之间的连接会被砾石打断,形成岩土界面。由于土壤和岩石收缩性差异巨大,当含水量减小时,岩土界面更容易形成裂隙[19]。岩土界面会形成两种形态的裂隙:①围绕砾石的裂隙;②向外延伸的裂隙(见图 3)。从图 3 中还可以看出,在砾石形态的棱角处,容易产生向外延伸的裂隙,可以称之为主裂隙。靠近砾石棱角处的裂隙宽度最大,向外延伸的裂隙宽度会逐渐减小,并产生分支或者与另一条裂隙相连接。因此,随着碎石含量的提高,主裂隙也会越多,同时产生越来越多的分支,使土壤基质破碎,裂隙网络更加复杂。

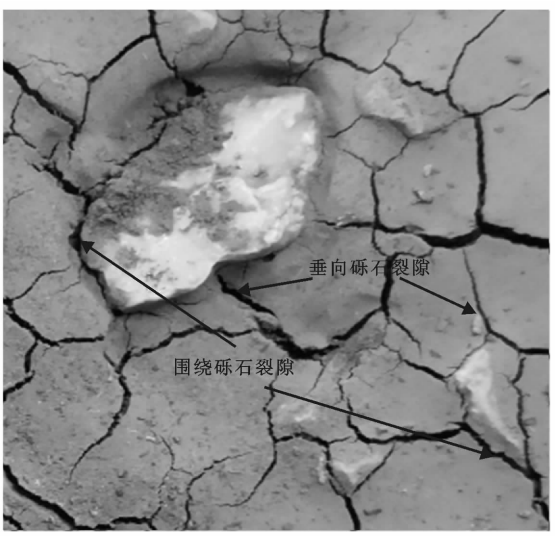


图 3　受砾石影响的石灰石土表面裂隙发育

2.2 大粒径条件下砾石含量对裂隙发育的影响

表 3 中的数据可以定量描述大粒径条件下砾石含量对裂隙发育的影响。所有砾石含量大于 10%的试样，裂隙参数都与无砾石对照组存在较大差异，其中表面裂隙率、裂隙条数、裂隙平均宽度、裂隙总长度以及分形维数都大于对照组。根据表 3 中表面裂隙率和裂隙条数的方差分析结果，1 号(无砾石)与 3 号(20%，5～12.5 mm)，4 号(30%，5～12.5mm)，5 号(40%，5～12.5mm)存在显著性差异。裂隙平均宽度的方差分析结果显示无砾石试样与含砾石试样存在显著性差异。

表 3 大粒径砾石条件下石灰石土表面裂隙网络分析结果

土柱编号	砾石配置		表面裂隙率 R_{SC}/%	裂隙条数 N	裂隙平均宽度 W_{AC}/mm	裂隙平均长度 L_{AC}/mm	裂隙总长度 L_{TC}/mm	分形维数 D_F
	粒径/mm	含量/%						
1	—	—	3.03±0.55^{a}	109±34^{a}	0.36±0.03^{a}	5.08±0.99^{a}	554±234^{a}	1.32±0.08^{a}
2	5～12.5	10	5.07±1.73^{ab}	144±22^{a}	0.85±0.04^{b}	3.38±1.17^{a}	486±165^{a}	1.31±0.05^{a}
3	5～12.5	20	7.17±0.71^{bc}	250±50^{b}	0.83±0.10^{b}	3.01±0.46^{a}	723±100^{a}	1.39±0.01^{ab}
4	5～12.5	30	7.98±1.92^{bc}	420±20^{c}	0.69±0.10^{b}	2.83±0.97^{a}	1190±438^{a}	1.47±0.06^{b}
5	5～12.5	40	8.66±1.26^{c}	475±25^{d}	0.68±0.01^{b}	2.59±0.85^{b}	1228±368^{a}	1.50±0.05^{b}

注：小写字母 abc 表示方差分析结果，不同小写字母表示差异显著($p<0.05$)。

针对各个裂隙参数与砾石含量进行了 Pearson 相关性分析(见图 4)，发现所有裂隙参数均与砾石含量成显著线性相关($p<0.05$)。随着砾石含量的增加，裂隙条数增加，平均宽度和平均长度减小，分形维数提高，裂隙网络分布得更为密集。裂隙平均宽度、裂隙平均长度、裂隙总长度可以描述裂隙网络的几何特征[20]。裂隙总长度与砾石含量呈正相关性，裂隙平均长度与砾石含量呈负相关性。裂隙总长度增加，而平均长度减小，说明裂隙网络被砾石分割成更多的小裂隙。裂隙条数与砾石含量呈正相关性，添加砾石会使土壤表面裂隙条数增多，这也证明了砾石会分割原有的裂隙路径。在本试验中，裂隙条数被定义为两个裂隙节点之间的路径。随着砾石含量增多，土壤表面裂隙网络的节点也会增多，导致裂隙条数增多。

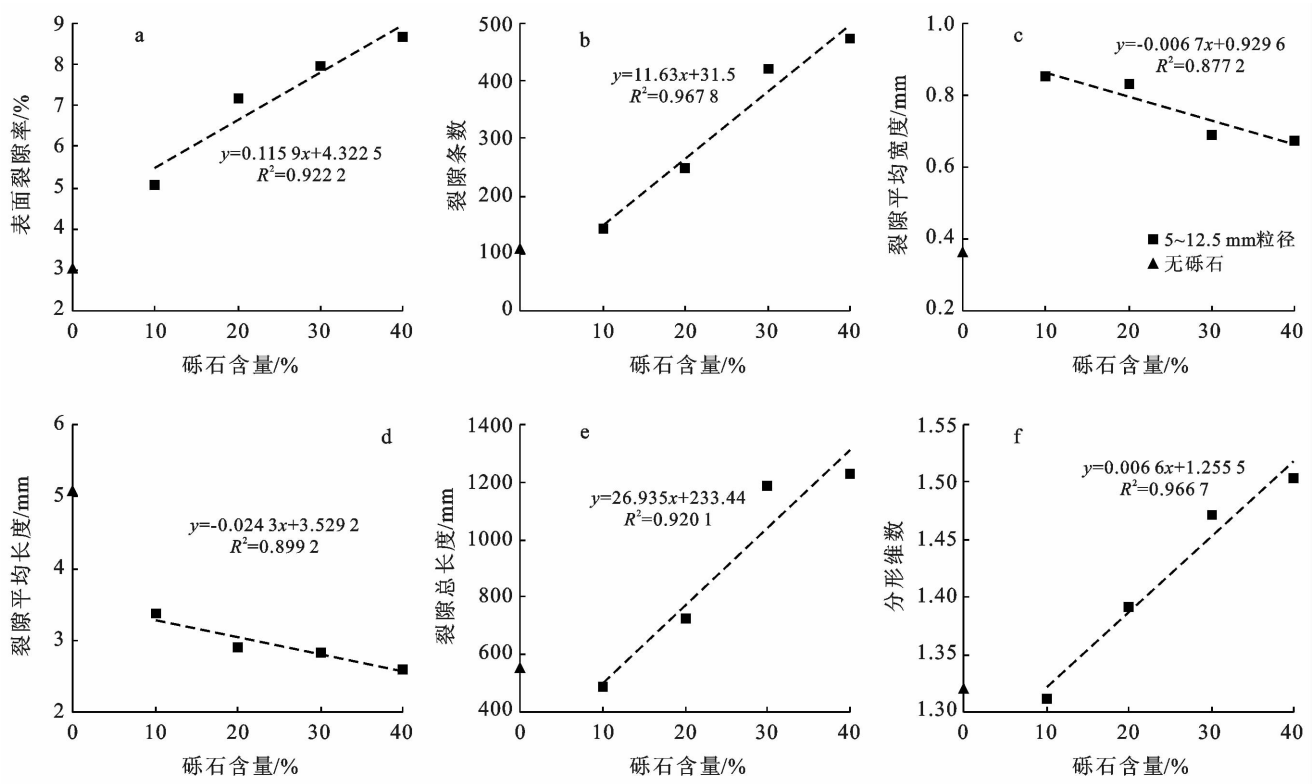


图 4 大粒径砾石配置不同砾石含量对石灰石土表面裂隙参数的影响

砾石会使土壤表面裂隙网络的分形维数提高，分形维数表示裂隙网络的复杂程度[21]。由图 4f 可知，砾石含量与裂隙网络的复杂程度成正比，在本试验中 40%含量配置的裂隙网络最复杂。

2.3　小粒径条件下砾石含量对裂隙发育的影响

结合表 4,从图 4 和图 5 中可以看出,小粒径(2～5 mm)砾石配置的裂隙参数同样与砾石含量具有显著线性相关性。小粒径砾石配置的表面裂隙率与砾石含量成负相关,这与大粒径砾石配置是相反的。除此之外,其余参数的线性相关性与大粒径砾石配置是一致的。整体也表现出砾石含量越大,裂隙网络就会越复杂。

表 4　小粒径砾石条件下石灰石土表面裂隙网络分析结果

土柱编号	砾石配置		表面裂隙率 R_{SC}/%	裂隙条数 N	裂隙平均宽度 W_{AC}/mm	裂隙平均长度 L_{AC}/mm	裂隙总长度 L_{TC}/mm	分形维数 D_F
	粒径/mm	含量/%						
1	—	—	3.03±0.55^{a}	109±34^{a}	0.36±0.03^{a}	5.08±0.99^{a}	554±234^{a}	1.32±0.08^{a}
6	2～5	10	8.62±2.98^{b}	223±31^{a}	1.23±0.09^{b}	2.68±0.67^{b}	597±146^{a}	1.37±0.03^{ab}
7	2～5	20	7.66±3.28^{b}	298±16^{b}	0.88±0.16^{c}	2.37±0.54^{b}	707±187^{a}	1.39±0.01^{ab}
8	2～5	30	6.79±1.87^{b}	599±45^{c}	0.47±0.02^{a}	2.25±0.58^{b}	1 346±409^{a}	1.50±0.06^{b}
9	2～5	40	5.48±0.41^{b}	770±111^{c}	0.38±0.09^{a}	1.76±0.36^{b}	1 353±414^{a}	1.51±0.05^{b}

注:小写字母 abc 表示方差分析结果,不同小写字母表示差异显著($p<0.05$)。

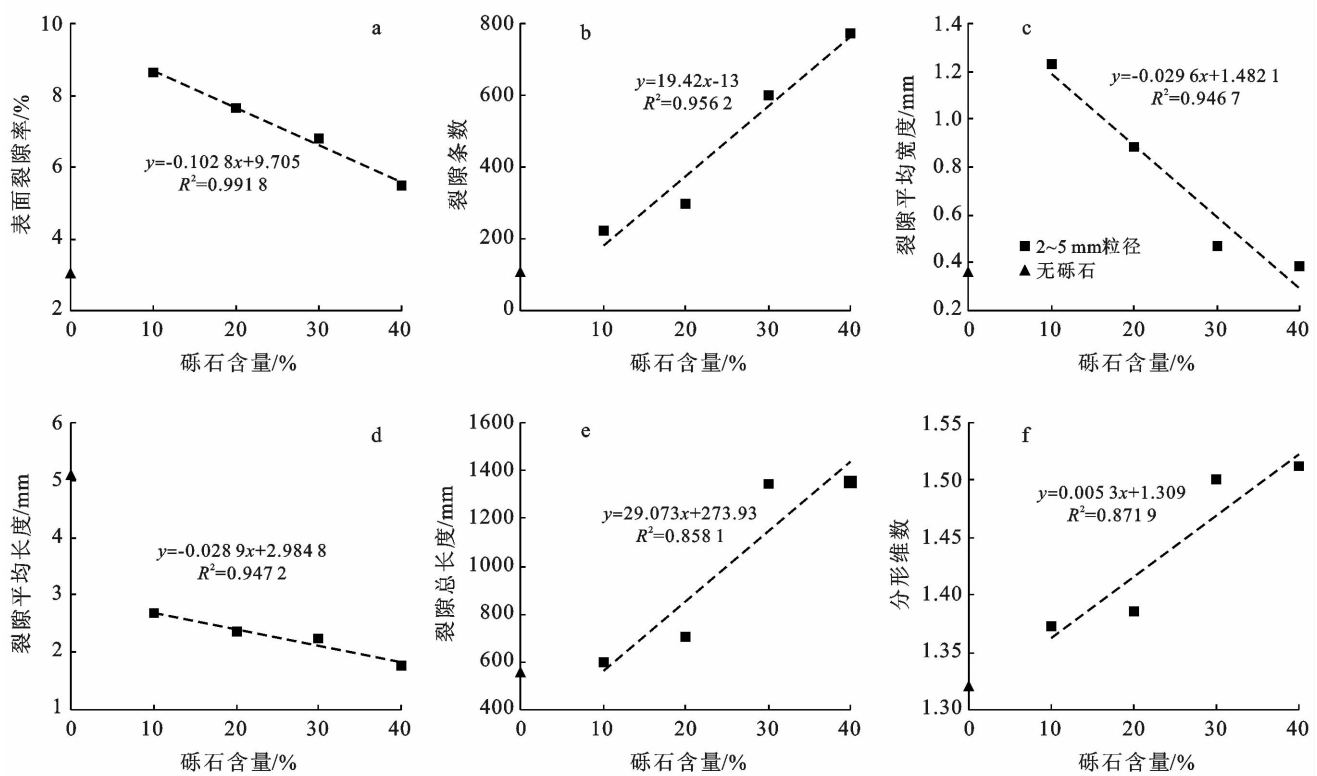


图 5　小粒径砾石配置不同砾石含量对石灰石土表面裂隙参数的影响

不同粒径配置的表面裂隙率变化规律不同,添加大粒径砾石的土柱表面裂隙率与砾石含量成正相关,砾石含量 40%时达到最大,为 8.66%,而添加小粒径砾石的土柱表面裂隙率与砾石含量成负相关,在砾石含量 10%时最大,为 8.62%。造成这种现象的原因可能有两点,首先是由于大粒径砾石的几何形态不规则,大粒径砾石的棱角更多,随着砾石含量的增加,越容易产生主裂隙,而小粒径砾石更接近球体或者正方体;其次小粒径砾石配置的裂隙平均宽度减小的幅度太大,导致裂隙率变小。裂隙平均宽度与砾石含量呈负线性相关趋势。小粒径砾石配置的试样中,裂隙平均宽度从 1.232 mm 减小到 0.382 mm,降幅为 0.850 mm。大粒径砾石配置的裂隙平均宽度从 0.852 mm 减小到 0.676 mm,降幅为 0.176 mm。从图 2 中也可以直观的看出,随着砾石含量增加,宽度较小的裂隙数量会变多,裂隙网络具有更均匀的裂隙宽度并变得更加复杂。DeCarlo 等[22]也观察到砾石影响下裂隙平均宽度的相同趋势。

对比图 4 和图 5,在相同砾石含量时,小粒径砾石配置的裂隙条数、裂隙总长度、分形维数都大于大粒径砾石配置,而平均裂隙长度小于大粒径砾石配置,小粒径最大含量配置的分形维数达到最大。这说明

当砾石含量相同时，小粒径砾石使裂隙网络发育更复杂[16]。

3 结论

(1) 无砾石石灰土的平均表面裂隙率仅为3.03%，含砾石石灰土土柱的表面裂隙率平均值为7.18%，是无砾石石灰土土柱的2.4倍，大粒径(5.0～12.5 mm)高含量(40%)条件下的表面裂隙率最大，达到8.66%。裂隙率的增加表明了砾石会促进表面裂隙发育，进而弱化土体的抗侵蚀能力。

(2) 裂隙网络的分形维数与砾石含量存在显著的正线性相关关系，当砾石含量增加时，裂隙的形态变得细小且密集。小粒径砾石会使裂隙网络更复杂，相同砾石含量时，小粒径配置的分形维数均大于大粒径配置。

(3) 砾石粒径对表面裂隙率的影响存在临界值。大粒径(5～12.5mm)条件下的土壤表面裂隙率与砾石含量成正线性相关，而小粒径(2～5mm)条件下的裂隙率与砾石含量成负线性相关。

(4) 砾石会成为裂隙发育的基点，每个砾石颗粒周围都有可能产生围绕砾石或是向外延伸的裂隙。且在砾石形态的棱角处，容易产生向外延伸的裂隙。靠近砾石棱角处的裂隙宽度最大，向外延伸的裂隙宽度会逐渐减小，并产生分支或者与另一条裂隙相连接。

[参 考 文 献]

[1] 张中彬，彭新华. 土壤裂隙及其优先流研究进展[J]. 土壤学报，2015，52(3)：477-488.

[2] 卢全中，彭建兵，陈志新，等. 黄土高原地区黄土裂隙发育特征及其规律研究[J]. 水土保持学报，2005，19(5)：191-194.

[3] 袁俊平，殷宗泽. 膨胀土裂隙的量化指标与强度性质研究[J]. 水利学报，2004，35(6)：108-113.

[4] 刘春，王宝军，施斌，等. 基于数字图像识别的岩土体裂隙形态参数分析方法[J]. 岩土工程学报，2008，30(9)：1383-1388.

[5] 冷挺，唐朝生，施斌. 干湿循环条件下重塑膨胀土的裂隙发育特征及量化研究[J]. 工程地质学报，2016，24(5)：856-862.

[6] 朱磊，马荣，范东峻，等. 考虑相关长度的土壤开裂模型改进及其参数对裂隙形态的影响[J]. 农业工程学报，2018，34(24)：123-131.

[7] 张萌，申同庆，马荣，等. 作物根系影响下的农田干缩裂隙网络多重分形分析[J]. 灌溉排水学报，2019，38(8)：45-52.

[8] Cheng Qing, Tang Chaosheng, Zeng Hao, et al. Effects of microstructure on desiccation cracking of a compacted soil [J]. Engineering Geology, 2020, 265: 105418.

[9] 张家俊，龚壁卫，胡波，等. 干湿循环作用下膨胀土裂隙演化规律试验研究[J]. 岩土力学，2011，32(9)：2729-2734.

[10] 曹建华，袁道先，潘根兴. 岩溶生态系统中的土壤[J]. 地球科学进展，2003，18(1)：37-44.

[11] Martínez-Zavala L, Jorda'n A. Effect of rock fragment cover on interrill soil erosion from bare soils in Western Andalusia, Spain [J]. Soil Use and Management, 2008, 24(1): 108-117.

[12] Urbanek E, Shakesby R A. Impact of stone content on water movement in water-repellent sand [J]. European Journal of Soil Science, 2009, 60(3): 412-419.

[13] Zhang Yinghu, Zhang Mingxiang, Niu Jianzhi, et al. Rock fragments and soil hydrological processes: Significance and progress [J]. Catena, 2016, 147: 153-166.

[14] Cousin I, Nicoullaud B, Coutadeur C. Influence of rock fragments on the water retention and water percolation in a calcareous soil [J]. Catena, 2003, 53(2): 97-114.

[15] 刘建伟. 桂西北喀斯特峰丛洼地石质土壤入渗试验研究[D]. 重庆：西南大学，2008.

[16] Gargiulo L, Mele G, Terribile F. The role of rock fragments in crack and soil structure development: A laboratory experiment with a Vertisol [J]. European Journal of Soil Science, 2015, 66(4): 757-766.

[17] 曹玲，王志俭，张振华. 降雨-蒸发条件下膨胀土裂隙演化特征试验研究[J]. 岩石力学与工程学报，2016，35(2)：413-421.

[18] 周明涛，杨森，秦健坤，等. 土壤裂隙研究的回顾与展望[J]. 土壤通报，2017，48(4)：988-995.

[19] Poesen J, Lavee H. Rock fragments in top soils: Significance and processes [J]. Catena, 1994, 23(1/2): 1-28.

[20] 唐朝生，王德银，施斌，等. 土体干缩裂隙网络定量分析[J]. 岩土工程学报，2013，35(12)：2298-2305.

[21] 陈尚星. 基于分形理论的土体裂隙网络研究[D]. 南京：河海大学，2006.

[22] DeCarlo K F, Shokri N. Effects of substrate on cracking patterns and dynamics in desiccating clay layers [J]. Water Resources Research, 2014, 50(4): 3039-3051.