

# 水分耗散下紫色土埂坎裂隙发育及影响因素

李颖<sup>1</sup>, 韦杰<sup>1,2</sup>, 罗华进<sup>2</sup>, 甘凤玲<sup>1,2</sup>

(1.重庆师范大学地理与旅游学院,重庆 401331;2.三峡库区地表过程与环境遥感重庆市重点实验室,重庆 401331)

**摘要:** 埂坎裂隙发育危害埂坎稳定性,进而影响埂坎水土保持作用的发挥。为揭示失水过程埂坎裂隙发育规律及其主要影响因素,以紫色土坡耕地埂坎为样地,采用模拟埂坎试验,研究不同初始含水率(25%, 30%, 35%)、干密度(1.3, 1.4, 1.5 g/cm<sup>3</sup>)和加筋量(0.05%, 0.15%, 0.25%)下裂隙发育过程,通过图像分析方法获取裂隙发育强度和复杂度指标,分析了裂隙发育与(初始)含水率、干密度、加筋量的关系。结果表明:水分耗散下裂隙开裂可分为起始阶段、迅速扩展和基本稳定 3 个阶段。不同初始含水率下各试样裂隙开裂强度和形态复杂度均随水分耗散快速增大,直至含水率为 12%后趋于稳定。相同初始含水率情况下干密度越小,试样裂隙强度和复杂度越大。加筋量能抑制裂隙的快速发育,与裂隙开裂程度呈反比。相比而言,初始含水率对水分耗散过程中裂隙起始阶段影响较大,但裂隙开裂之后含水率影响更大,其次是干密度和加筋量。研究结果为紫色土区埂坎的设计、建设和管理维护提供参考。

**关键词:** 埂坎; 裂隙开裂; 水分耗散; 紫色土坡耕地

中图分类号: S157.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2022)01-0038-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2022.01.006

## Cracks Development in Purple Soil Bunds Under Water Evaporation and Its Influencing Factors

LI Ying<sup>1</sup>, WEI Jie<sup>1,2</sup>, LUO Huajin<sup>2</sup>, GAN Fengling<sup>1,2</sup>

(1.School of Geography and Tourism Science, Chongqing Normal University, Chongqing 401331; 2.Chongqing Key

Laboratory of Surface Process and Environment Remote Sensing in the Three Gorges Reservoir Area, Chongqing 401331)

**Abstract:** The development of soil cracks endangers the stability of soil bund, further influences soil conservation. In order to reveal the law of crack development and the main influencing factors under water evaporation, a typical purple soil bund on sloping farmland in Beibei district of Chongqing was chosen to sample and test. Different levels of initial water contents (25%, 30%, 35%), dry densities (1.3, 1.4, 1.5 g/cm<sup>3</sup>) and reinforcements (0.05%, 0.15%, 0.25%) were defined to model the crack development process of purple soil bunds by using a set of simulated bunds. The crack development intensity, complexity indexes and the relationship between crack development and (initial) water content, dry density, and reinforcement were studied through image analysis. The results showed that the crack development process could be divided into three stages under water evaporation in terms of the initial stage, rapid crack expansion and stabilization. Under different initial water contents, the cracks intensity and complexity of all specimens increased rapidly with the decreasing water evaporation, and then tended to be stable at the water content of 12%. Dry density was an important factor impacting soil shrinkage and swell. Under the same initial water content, the cracks intensity and complexity increased as dry density increasing. The amount of reinforcement of polypropylene fiber was inversely proportional to the degree of cracks development. Comparatively, the initial water content had a great impact on the early stage of crack development in the process of water evaporation, but after the cracks began, the water content became a more important impacting factor, followed by the dry density and reinforcement. These results are expected to provide a basis for the design, construction, maintenance and

收稿日期: 2021-07-19

资助项目: 重庆市杰出青年基金项目(cstc2019jcyjQX0025); 重庆英才青年拔尖人才项目(CQYC201905009); 国家自然科学基金项目(41471234)

第一作者: 李颖(1997—), 女, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: ly190426@163.com

通信作者: 韦杰(1979—), 男, 教授, 硕士生导师, 主要从事坡耕地侵蚀与水土保持研究。E-mail: wei\_jie@mailsucas.ac.cn

management of soil bunds in purple soil area.

**Keywords:** soil bunds; crack development; water loss; purple-soil sloping farmland

埂坎是紫色土坡耕地重要的水土保持措施,通过分割坡长、降低坡度来削减地表径流和泥沙,具有良好的水土保持效果。据野外调查<sup>[1]</sup>,紫色土区土坎约占现有埂坎的 65%,其中,绝大部分土坎是长期耕作过程中保留下来的,也有相当一部分是在近年水土保持工程中新修改造的。埂坎稳定性是其发挥水土保持效益的前提,但土坎抗侵蚀能力弱,旱季期间,埂坎土壤水分耗散导致土体收缩产生裂隙,破坏土体结构完整性,降低土体强度<sup>[2]</sup>,引起埂坎浅层土体变形甚至失稳垮塌。明确裂隙发育过程及主要影响因素是保持埂坎稳定性、保障其水土保持作用发挥的重要基础。

初始含水率<sup>[3-4]</sup>、干密度<sup>[5-6]</sup>、干湿循环<sup>[7-9]</sup>、环境湿度<sup>[10]</sup>及纤维加筋<sup>[11]</sup>等都是影响土壤开裂的重要因素。如初始含水率高的土壤可供自由蒸发的水量大,水分蒸发剧烈从而导致裂隙开裂程度大<sup>[12]</sup>。在相同土壤初始含水率水平下,干密度越大,孔隙度越小,裂隙越难以发育<sup>[5]</sup>。干湿循环会降低土体强度,导致裂隙开裂,但干湿循环到一定次数后裂隙停止发育<sup>[7]</sup>。环境温湿度与裂隙发育时间和速度成正比,即湿度越高裂隙发育时间越长,温度越高裂隙发育越快<sup>[13]</sup>。添加纤维能使裂隙开裂模式发生显著变化,其联结作用可以抑制裂隙发展,降低裂隙开裂面积<sup>[14]</sup>。上述研究成果为紫色土埂坎裂隙演化认识奠定了基础,但紫色土因其本身性质与其他土壤类型有所不同,对裂隙发育影响因素的响应也存在差异。本研究以紫色土坡耕地埂坎土壤为对象,通过室内模拟试验,对比分析不同初始含水率、干密度和加筋量下裂隙的开裂强度和裂隙复杂度特征,揭示在水分耗散下裂隙开裂规律,研究结果可为紫色土区埂坎设计、建设和管护提供依据。

# 1 材料与方法

## 1.1 研究区概况

研究区位于重庆市北碚区歇马镇(106°18′02″—106°40′57″E,29°27′08″—30°05′08″N),系华蓥山隔挡式复背斜帚状弧形构造,海拔 200~900 m。属亚热带湿润季风气候,雨量充沛,年平均降水量 1 105.4 mm,降水季节分配不均,多集中在夏季;有春早、夏热、秋短、冬迟等特征,年平均气温 18.3 ℃。土壤类型有紫色土、黄壤和水稻土,以紫色土为主,埂坎是坡耕地重要的水土保持措施,类型以土坎为主,有少量土石混合坎和石坎。埂坎上长有节节草(*Equisetum ramosissimum*),狗牙根(*Cynodon dactylon*)和马唐草(*Digitaria sanguinalis*)等。

## 1.2 样品采集及处理

试验土样于 2019 年 7 月采自重庆市北碚区歇马镇典型紫色土坡耕地土坎。采样时,选择高度、坡度相近的埂坎,去除埂坎上杂草,分别在地埂、坎腰和坎趾采集 5 kg 土样,将土样充分混匀,用于制作试验土样。另采集约 1 kg 土样和 3 个环刀样用于土壤理化性质测定。埂坎土壤为粉壤土质地,土壤中矿物以石英和长石为主,颗粒组成以粉粒(74.18%±0.20%)为主,砂粒含量 16.23%±0.25%,黏粒含量 9.59%±0.05%。干密度 1.35 g/cm<sup>3</sup>,有机质含量为 23.26~23.46 g/kg,液限 14.42%,塑限 10.55%;并在采样完成后对埂坎进行修复。将土样带回实验室自然风干,去除砾石等杂质,用木槌、滚筒研磨,根据《土工试验方法标准》(GBT 50123—2019)<sup>[15]</sup>,过 2 mm 筛进行试验土样制备。

根据研究区自然状态下土坎的干密度和含水率调研情况,供试土样干密度设为 1.3、1.4、1.5 g/cm<sup>3</sup>;初始含水率设置 25%、30%、35%;加筋材料为聚丙烯纤维,加筋量设置 0.05%、0.15%、0.25%,各水平分别做 3 组重复。试验前,取土样平铺于圆形铝盘内,根据试验设计的不同初始含水率计算出所需水量,少量多次加入搅拌均匀,配置好土样回填至长×宽×高为 20 cm×20 cm×6 cm 的玻璃土槽内。将土样初始厚度设为 2 cm,并用保鲜膜密封,浸润 24 h。土样制作好后,放入烘箱进行 40 ℃ 恒温干燥,每间隔 1 h 用电子天平对试样称重,根据质量变化计算含水率至试样质量无明显变化,每次称重的同时使用索尼 DSC-200 型的数码相机(像素为 1 800 万)记录。拍摄光源为日光灯,垂直距离土样 30 cm,以保证每次裂隙图像拍摄距离一致。

## 1.3 图像处理

为减少边缘效应<sup>[16]</sup>影响,截取裂隙分布区域 17 cm×17 cm 的图像进行分析,尺寸为 830×830 像素,参照张展羽等<sup>[17]</sup>研究方法,用 Photoshop 软件对图像进行校正与降噪,并转化为灰度图像(图 1a),通过调整阈值使图像呈黑白两色,其中黑色为裂隙区,白色为非裂隙区(图 1b)。用画笔工具进行杂点去除,保留完整的裂隙网络(图 1c),图片保存为 JPG 格式。最后在 Image J 1.4 中提取裂隙几何参数,利用 SPSS 软件进行分析。

## 1.4 特征参数解析

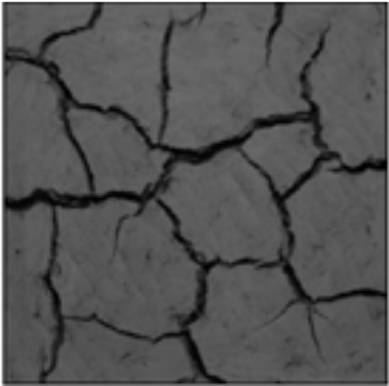
通过记录试验数据与数字图像处理,提取、计算得到土壤裂隙不同的几何形态参数及相关参数。

(1) 裂隙面密度和面积-周长比计算公式为:

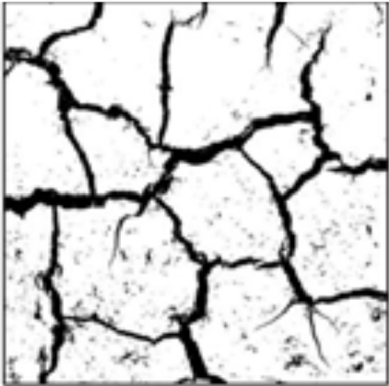
$$S_A = \sum A_i / A_0 \times 100\%$$
 (1)

$$P_A = \sum A_i / P_0$$
 (2)

(a) 灰度



(b) 调整阈值



(c) 去除杂点

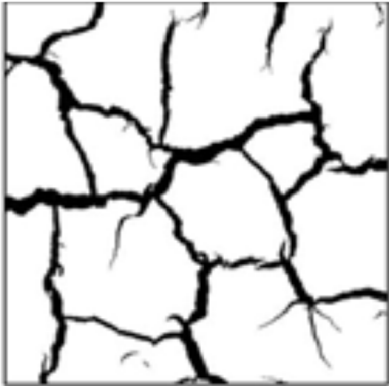


图 1 裂隙图像处理过程

(2) 形状指数是表征网络复杂性的一个指数, 通过计算某一物体形状与相同面积的正方形之间的偏离程度来测量其形状复杂程度。计算公式为:

$$F_A = \sum_{i=1}^n ((0.25 P_i / \sqrt{S_i})(S_i / S_0))$$
 (3)

式中:  $F_A$  为裂隙形状指数;  $P_i$  为各裂隙周长 (cm);  $S_i$  为各裂隙面积 (cm<sup>2</sup>);  $S_0$  为裂隙总面积 (cm<sup>2</sup>)。

(3) 分形维数可以用来描述裂隙网络形态复杂程度, 分形维数值越大, 裂隙发育越复杂。计算公式为:

$$C_A = \sum_{i=1}^n (2 \ln (0.25 p_i) / \ln S_i) / N$$
 (4)

式中:  $C_A$  为分形维数;  $P_i$  为各裂隙周长 (cm);  $S_i$  为各裂隙面积 (cm<sup>2</sup>);  $N$  为裂隙总条数。

2 结果与分析

2.1 水分耗散下埂坎裂隙发育

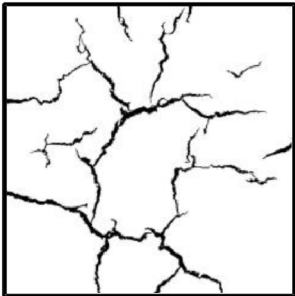
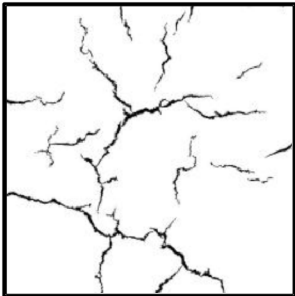
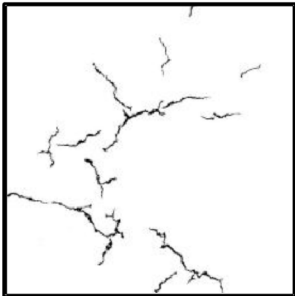
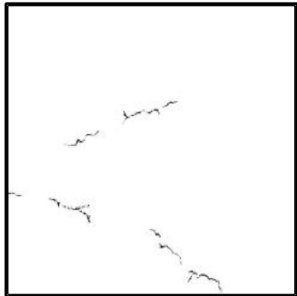
以初始含水率 30%、干密度 1.3 g/cm<sup>3</sup> 和无加筋量埂坎为例, 水分耗散下埂坎裂隙发育过程见图 2。从图 2 可以看出, 裂隙发育逐渐明显, 整个过程大致可以分为 3 个阶段:

(a) 含水率29.09%

(b) 含水率26.78%

(c) 含水率24.60%

(d) 含水率22.22%



(e) 含水率20.00%

(f) 含水率17.26%

(g) 含水率12.82%

(h) 含水率8.72%

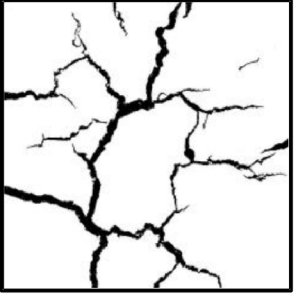
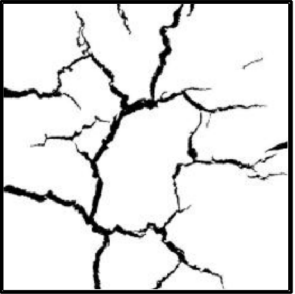
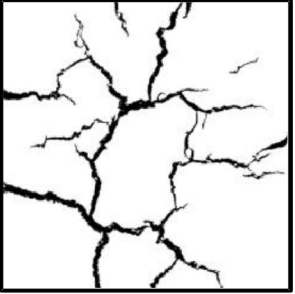
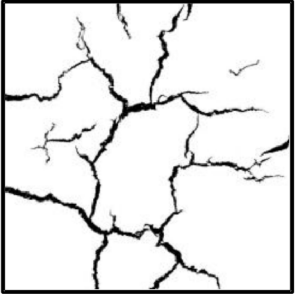


图 2 水分耗散下裂隙开裂形态

(1) 裂隙开裂起始阶段(图 2a~图 2b): 水分耗散初期, 含水率由 30% 耗散至 26% 的过程中, 水分从土壤基质中耗散, 蒸发速率较慢, 仅在试样边缘和表面随机出现细微裂隙, 并沿裂隙尖端向前缓慢延伸和弯曲。此阶段, 裂隙的长宽较小且未形成完整裂隙网络, 裂隙开裂

强度(面密度和面积/周长)和形态复杂度(分形维数和形状指数)增幅较小, 仅增长 3% 和 20%。

(2) 裂隙迅速扩展阶段(图 2c~图 2f): 随水分持续耗散, 含水率由 26% 降至 17%, 裂隙在细微裂隙的基础上不断开裂扩展, 水分不仅通过土壤基质耗散,



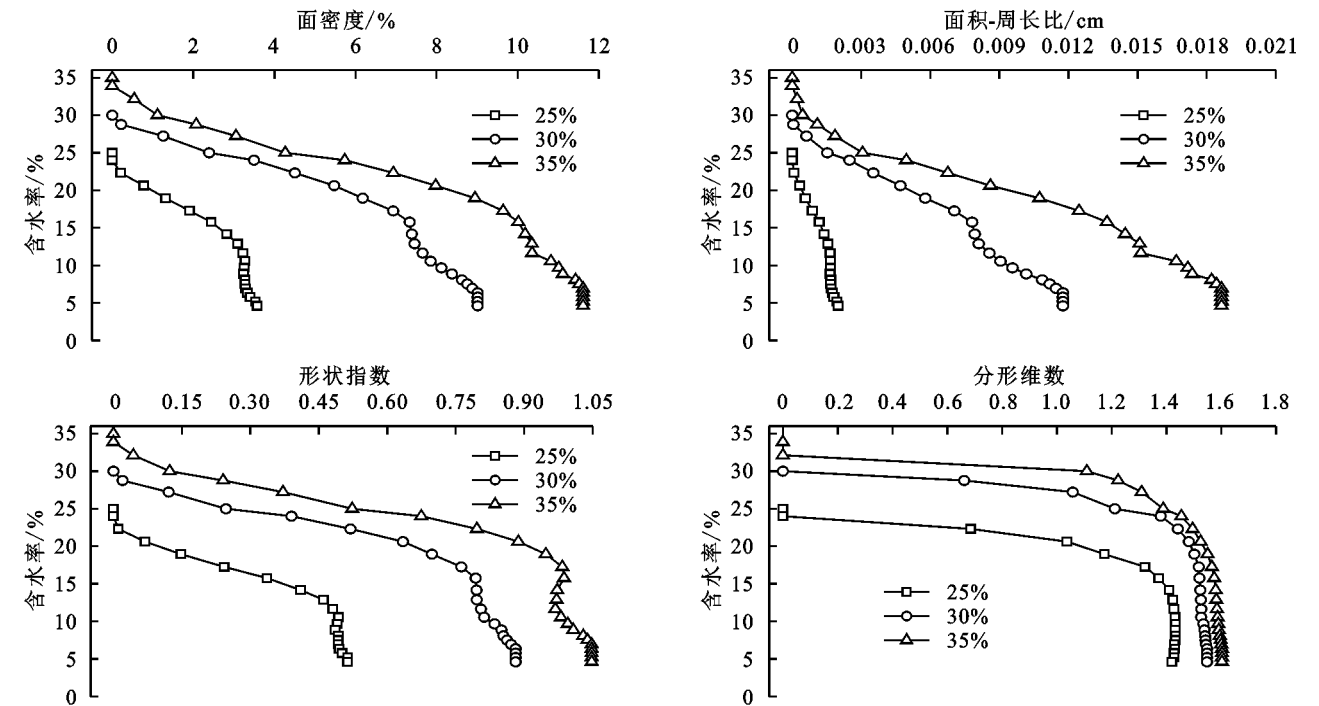
还通过裂隙两侧临空面直接耗散,即水分耗散在水平和垂直2个方向同时进行,此阶段蒸发速率增快,促使裂隙迅速开裂相互连通,形成裂隙网络,且裂隙不断变宽变深,此时裂隙开裂强度和形态复杂度快速增长,分别增长367%和178%。

(3)裂隙基本稳定阶段(图2g~图2h):随着水分进一步耗散至试验结束,土壤含水率趋于低值(含水率12%~8%),土样表面不再出现新生裂隙,表面裂隙网络形态除了些许变宽之外,几乎无其他变化,裂隙开裂强度和形态复杂度增长趋于稳定,增长率仅为4%和15%,说明裂隙开裂基本达到稳定。

2.2 埂坎裂隙发育与(初始)含水率

由图3可知,初始含水率为25%,30%和35%的各试样裂隙开裂强度(面密度和面积-周长比)与形态复杂度(分形维数和形状指数)均随水分耗散逐渐增大并趋于稳定,但不同初始含水率裂隙之间存在差异。从裂隙开裂强度上看,当含水率>25%时,3个

初始含水率试样的裂隙强度随水分耗散均呈缓慢变大。此时,土壤开裂主要发生在土体表面,深度较浅;当含水率界于12%~25%时,呈快速递增变化。其中,初始含水率为35%的土样裂隙发育强度最快,面密度由4.26%增至10.35%,面积-周长比由0.003 cm增至0.015 cm。当含水率在12%左右时,数值略有上涨,其原因是水分耗散使土壤干燥,裂隙边缘微小土块掉落回填裂隙<sup>[18]</sup>,导致数值变大。当含水率<12%时,3个初始含水率试样裂隙发育强度增长幅度较小并趋于稳定。初始含水率为35%和30%的试样,在含水率>20%时裂隙形态复杂度随水分耗散呈快速增长趋势,形状指数从0增至0.372、分形维数从0增至1.31;当含水率<20%时,复杂度增长缓慢并趋向稳定。在初始含水率为25%条件下,含水率由25%耗散到12%的过程中,复杂度指标值快速递增,形状指数由0增至0.460,分形维数为0~1.424,之后随水分耗散复杂度趋向稳定。



注:干密度为1.3 g/cm³,加筋量为0。

图3 不同初始含水率土壤裂隙发育与含水率

此外,虽然不同初始含水率下裂隙开裂强度和复杂度存在差异,但初始含水率对裂隙起始阶段影响较大。由含水率与裂隙开裂强度和复杂度呈负相关关系(表1)可知,含水率越大,裂隙开裂强度与复杂度越小。在水分耗散初期,各初始含水率梯度下的裂隙强度与复杂度没有较大差异,而随着水分耗散,差异逐渐变大。在含水率为22%时,初始含水率35%,30%比25%试样裂隙面密度分别高6.73%和4.30%,形状指数分别高0.51和0.33。当含水率耗散到12%,其差值变大,分别为7.26%,4.36%和0.79,0.51,之后各差值

趋于稳定,变化较小(图3)。表明裂隙发育后,含水率相比初始含水率的影响更大。

表1 含水率与裂隙开裂强度、复杂度的相关性

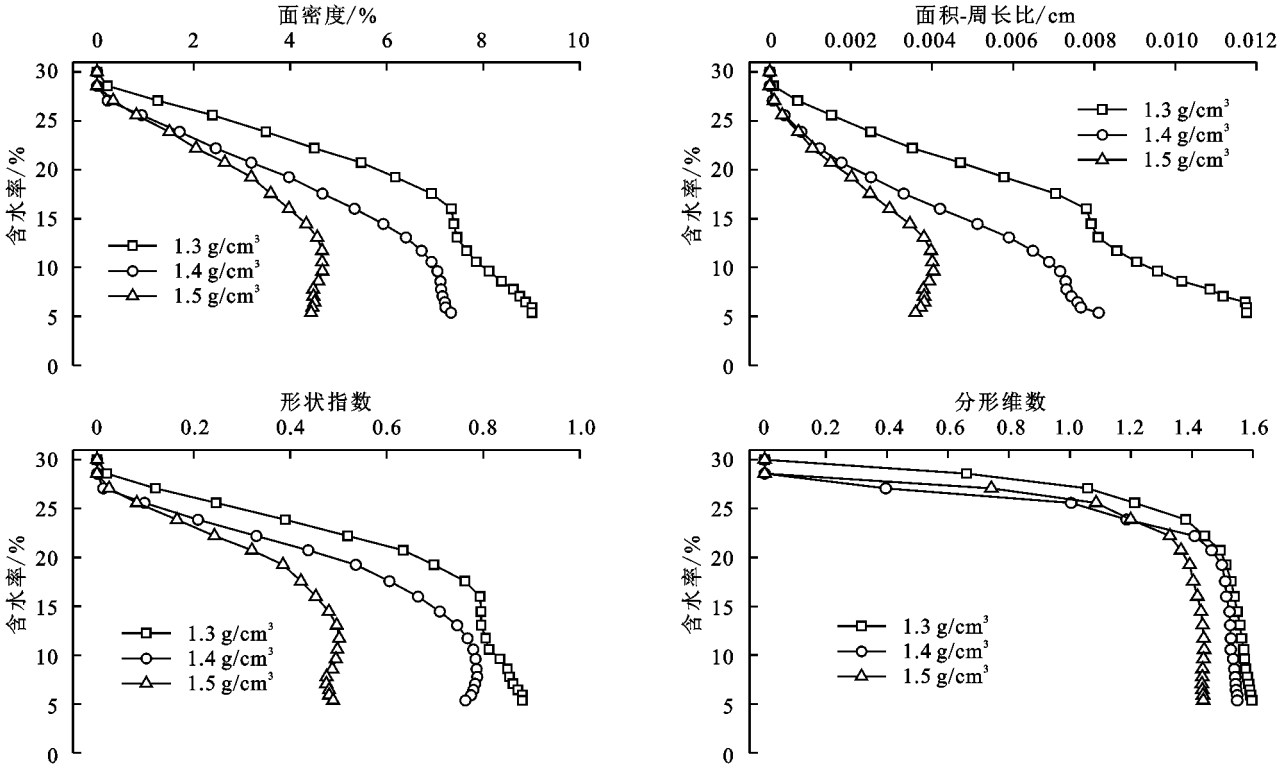
含水率	面密度	面积—周长比	形状指数	分形维数
相关系数	-0.726	-0.592	-0.771	-0.667
显著性	0	0	0	0

2.3 埂坎裂隙发育与干密度

由图4可知,干密度1.3,1.4,1.5 g/cm³试样裂隙开裂强度(面密度和面积-周长比)与形态复杂度(形状指数和分形维数)在水分耗散过程中先增加后趋于稳定。当

含水率 $>26\%$ 时,各试样裂隙强度和复杂度增长缓慢且差异较小,随水分持续耗散,呈快速增长且差异增大。与干密度 $1.4, 1.5\text{ g/cm}^3$ 试样相比,干密度 $1.3\text{ g/cm}^3$ 试样裂隙开裂强度与形态复杂度增长幅度较大。具体而言,当 $17\% < \text{含水率} < 26\%$ 时,干密度 $1.3\text{ g/cm}^3$ 试样面密度、面积—周长比、形状指数和分形维数分别增加了 $5.67\%, 0.006\text{ cm}, 0.64, 0.20$ ,分别比干密度 $1.4\text{ g/cm}^3$ 试

样高 $1.22\%, 0.003\text{ cm}, 0.05, 0.24$ ,比干密度 $1.5\text{ g/cm}^3$ 试样高 $2.40\%, 0.004\text{ cm}, 0.24, 0.66$ 。干密度 $1.3, 1.4, 1.5\text{ g/cm}^3$ 土样裂隙强度和复杂度指标“增—缓”节点均发生在含水率为 $17\%$ 时。但干密度 $1.3\text{ g/cm}^3$ 试样裂隙强度和复杂度指标“增—缓”节点值分别为 $6.94\%, 0.007\text{ cm}, 0.762, 1.518$ ,较干密度 $1.4\text{ g/cm}^3$ 试样高 $1.5$ 倍,较干密度 $1.5\text{ g/cm}^3$ 试样高 $2$ 倍。



注:初始含水率为 $30\%$ ,加筋量为 $0$ 。

图 4 不同干密度土坎裂隙发育与含水率的关系

2.4 埂坎裂隙发育与加筋量

不同加筋量土样裂隙开裂强度(面密度和面积-周长比)与形态复杂度(形状指数和分形维数)随水分耗散的变化规律见图 5。加筋量为 $0\sim 0.25\%$ 的试样裂隙形态参数随含水分耗散呈现先增大后稳定的变化趋势。含水率为 $30\%\sim 25\%$ 时,加筋量为 $0, 0.05\%, 0.15\%, 0.25\%$ 的试样裂隙开裂强度与复杂度增长缓慢且差异较小,面密度分别增加了 $2.39\%, 2.22\%, 2.55\%$ 和 $1.62\%$ ,形状指数分别增加了 $0.25, 0.38, 0.34, 0.21$ 。当含水率从 $25\%$ 降至 $17\%$ 时,不同加筋量试样裂隙开裂强度和复杂度增长迅速,面密度增加了 $4.54\%, 3.07\%, 2.06\%, 2.38\%$ ,形状指数增加了 $0.52, 0.51, 0.22, 0.40$ 。当含水率 $< 17\%$ 至试验结束,试样裂隙开裂强度与复杂度增长缓慢并趋于稳定。此外加筋量为 $0$ 时,试样裂隙发育形态参数均大于加筋试样。在同一含水率下,不同加筋量试样裂隙开裂强度与复杂度存在差异,且差异随水分耗散而增大。当含水率为 $25\%$ 时,加筋量 $0\sim 0.25\%$ 各梯度间试样裂隙面密度和形状指数差值分别为 $0.1\%\sim 1.2\%$ 和

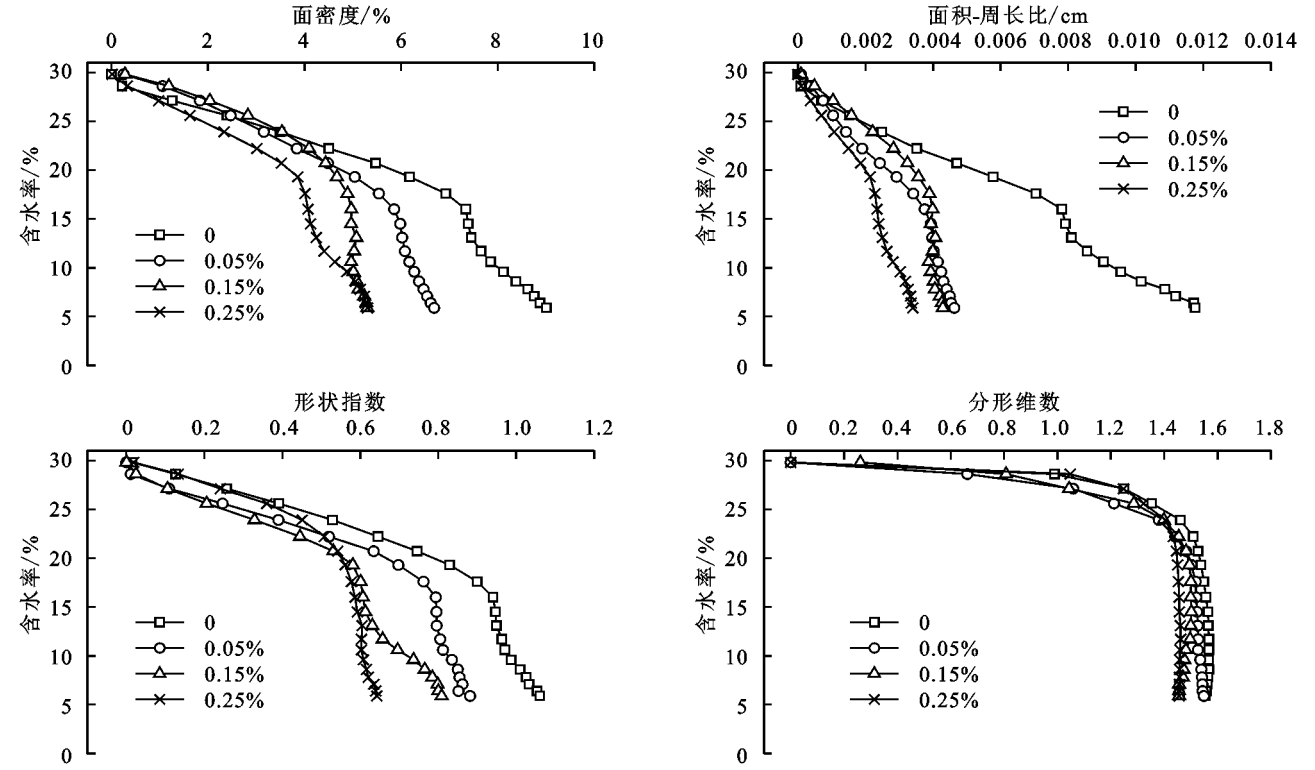
$0.04\sim 0.18$ ,当含水率耗散至 $17\%$ 时,加筋量 $0\sim 0.25\%$ 各梯度间试样裂隙面密度和形状指数度差值分别为 $0.88\%\sim 2.91\%$ 和 $0.02\sim 0.32$ 。

2.5 裂隙发育相关因素的综合分析

在裂隙开裂过程中,初始含水率、含水率、干密度和加筋量对裂隙开裂强度与形态复杂度均有一定影响,采用偏相关分析研究了各因素与裂隙开裂的相关性。由表 2 可知,偏相关分析表明,初始含水率与面密度、面积-周长比和形状指数均呈极显著正相关( $P < 0.01$ ),含水率与裂隙强度与复杂度均呈极显著负相关( $P < 0.01$ ),干密度与面密度、面积-周长比和形状指数呈极显著负相关( $P < 0.01$ ),加筋量与面密度和面积-周长比呈极显著负相关( $P < 0.01$ )。在裂隙发育过程中,开裂强度与初始含水率、含水率、干密度和加筋量均呈极显著相关( $P < 0.01$ )。含水率相比初始含水率、干密度和加筋量,与裂隙强度和复杂度相关性最强。在整个水分耗散过程中,初始含水率对裂隙起始阶段影响较大,裂隙开裂出现时间存在差异,但裂隙开裂之后,含水率影响更大。综合图 3~

图 5 和表 1 可知,含水率对裂隙开裂强度和复杂度的影响贯穿始终,不同初始含水率、干密度和加筋量试样在水分耗散过程中裂隙开裂强度与复杂度存在差

异,并随含水率的降低差异逐渐增大。综上,含水率是影响裂隙开裂的最重要因子,其次是初始含水率、干密度和加筋量。



注:初始含水率为 30%,干密度为 1.3 g/cm³。

图 5 不同加筋量土壤裂隙发育与含水率的关系

表 2 影响因素与裂隙发育的相关性				
指标	初始含水率	含水率	干密度	加筋量
面密度	0.830 **	-0.839 **	-0.549 **	-0.497 **
面积-周长比	0.813 **	-0.913 **	-0.505 **	-0.589 **
形状指数	0.688 **	-0.886 **	-0.484 **	-0.103
分形维数	0.217 **	-0.691 **	-0.104	-0.119

注: \* \* 表示极显著相关(P<0.01)。

3 讨论

埂坎裂隙开裂受多种因素影响,其中,(初始)含水率是重要的影响因素之一。本研究中,在试验初期,试样初始含水率越高其表面相对湿度较大,水分耗散过程中供自由蒸发的水分充足,表面蒸发速率较快,形成差距较大的含水率梯度,导致试样失水收缩剧烈,裂隙开裂程度也越大,表现为各形态特征参数增长迅速,裂隙开裂强度和复杂度参数值也较大。随试验进行,试样表面供自由蒸发的水分减少且试样内部向表面传输的水分也在减少,上下层间的含水率梯度变小,裂隙开裂速度降低,对应的裂隙各形态特征参数增长缓慢。试验后期,各试样含水率接近同一水平,裂隙开裂变化不大,表现为裂隙各形态特征参数趋于稳定。此外,不同初始含水率水平对土壤开裂程度存在显著影响。这主要是在初始含水率较高

的条件下,土颗粒外围包裹了一层较厚的水膜,进而导致颗粒之间的夹角与间距较大,在水分耗散过程中随着水分的减少,颗粒间水膜厚度逐渐减小且颗粒彼此聚拢<sup>[19]</sup>,宏观上表现为土体收缩开裂程度较大,即面密度稳定时数值较大。因此,在雨季应注意埂坎含水率情况,可考虑在雨水较多时采取减缓入渗、快速排水等措施,防止埂坎含水率过高而导致垮塌。

试样干密度大小决定其自身裂隙的开裂程度。本研究中,在初始含水率相同条件下,不同干密度土壤试样裂隙开裂程度随干密度增大而减小。这主要是因为土颗粒间孔径大小直接影响土体内部水分向表面的迁移速率,而土壤干密度的大小决定了土颗粒间孔径的大小,表现为干密度较小的土体孔隙度大,在水分耗散时为毛细水的迁移提供了路径,有利于水分蒸发,裂隙开裂程度较大,裂隙强度与复杂度指标整体较大。干密度较大的土壤紧实度高,孔隙率较少,土颗粒间相互作用力强,土体结构强度大,土体的抗变形能力高<sup>[20]</sup>,所以埂坎裂隙不易开裂发育,裂隙开裂强度与形态复杂度指标整体上相对较小。因此,可在修筑埂坎后对其进行适当压实,增强土壤紧实度。

本研究中裂隙开裂程度随加筋量增加而降低,然

而,已有研究<sup>[21]</sup>表明,裂隙面密度随着加筋量的增加呈先减少后略有增大趋势。原因可能是添加少量的纤维能够在水分耗散过程中对抗部分土颗粒间形成的横向张拉力,从而达到抑制裂隙开裂发育的作用。但是,随加筋量的进一步增加,纤维填充在土壤孔隙里彼此粘附形成团块,从而抑制了土壤颗粒与纤维的接触,引起土壤颗粒与纤维之间的阻力减小,导致在水分耗散过程中土体收缩量增大,裂隙开裂程度增大。综上,可在修筑埂坎时添加适量秸秆、稻草等材料以加强埂坎土体强度达到抑制裂隙开裂的目的。

本研究采用室内试验模拟土质埂坎在连续高温干旱状况下表面裂隙开裂过程,并分析(初始)含水率、干密度和加筋量对裂隙开裂的影响。而在实际情况中,裂隙开裂过程复杂且影响因素众多,因此后续研究中应注重开展原位观测研究土质埂坎裂隙开裂规律及裂隙的三维形态。

## 4 结论

(1)在水分耗散下,裂隙开裂可分为起始阶段、迅速扩展阶段和基本稳定阶段,具有明显的阶段性。

(2)在试验范围内,初始含水率对水分耗散过程中裂隙起始阶段影响较大,裂隙开裂起始时间存在差异,但裂隙开裂之后含水率影响更大。

(3)干密度与裂隙开裂强度和复杂度呈负相关,干密度越大,裂隙开裂强度与复杂度越低。

(4)土壤加筋能抑制裂隙开裂,本研究中聚丙烯纤维加筋量为 0.25% 的试样裂隙各形态特征参数明显比其他加筋量的试样低。

### 参考文献:

- [1] 李进林,韦杰.三峡库区坡耕地埂坎类型、结构与利用状况[J].水土保持通报,2017,37(1):229-233.
- [2] 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.
- [3] 杜长城,祝艳波,苗帅升,等.初始含水率对三趾马红土失水收缩特性影响[J].水土保持研究,2019,26(1):227-233.
- [4] 许锡昌,周伟,陈善雄.南阳重塑中膨胀土脱湿全过程裂隙开裂特征及影响因素分析[J].岩土力学,2015,36(9):2569-2575,2584.
- [5] Julius D, Hans-jörg V, Steffen S. Impact of wetting and drying cycles on soil structuredynamics [J].Geoderma, 2019,345:63-71.
- [6] 范本贤,黄英,孙书君,等.云南红土的循环胀缩特性研究[J].水土保持学报,2018,32(2):120-127,133.
- [7] 王佳妮,马戎,张晓明.干湿循环下崩岗土体裂隙发育对其渗透性能的影响[J].水土保持学报,2021,35(1):90-95,102.
- [8] Tang C S, Cheng Q, Leng T, et al. Effects of wetting-drying cycles and desiccation cracks on mechanical behavior of an unsaturated soil [J].Catena, 2020, 194:e104721.
- [9] 赵贵刚,黄英,张浚枫,等.干湿循环作用下云南红土裂缝发展研究[J].水土保持学报,2017,31(2):157-165.
- [10] 杨振北,胡东旭,汪时机.膨胀土胀缩裂隙演化及其扰动规律分析[J].农业工程学报,2019,35(17):169-177.
- [11] 韩春鹏,田家忆,张建,等.干湿循环下纤维加筋膨胀土裂隙特性分析[J].吉林大学学报(工学版),2019,49(2):392-400.
- [12] Cheng Q, Tang C S, Zeng H, et al. Effects of micro-structure on desiccation cracking of a compacted soil [J].Engineering Geology,2020,265:e105418.
- [13] 刘观仕,陈永贵,曾宪云,等.环境湿度与温度对压实膨胀土裂隙发育影响试验研究[J].岩土工程学报,2020,42(2):260-268.
- [14] Chaduvula U, Viswanadham B V S, Kodikara J. A study on desiccation cracking behavior of polyester fiber-reinforced expansive clay [J].Applied Clay Science,2017,142(SI):163-172.
- [15] 中华人民共和国水利部.GB/T 50123-2019 土工试验方法标准[S].北京:中国计划出版社,2019.
- [16] 曾浩,唐朝生,林奎,等.土体干缩裂隙发育方向及演化特征的层间摩擦效应研究[J].岩土工程学报,2019,41(6):1172-1180.
- [17] 张展羽,朱文渊,朱磊,等.根系及盐分含量对农田土壤干缩裂缝发育规律的影响[J].农业工程学报,2014,30(20):83-89.
- [18] 张展羽,李文杰,王策,等.多级干湿循环对农田土壤干缩裂缝演变特征的影响[J].农业机械学报,2016,47(12):172-177,252.
- [19] 段赫,刘目兴,易军,等.干湿交替条件下稻田土壤裂隙开闭规律[J].水土保持研究,2020,27(2):371-376.
- [20] 夏振尧,张伦,牛鹏辉,等.干密度初始含水率坡度对紫色土崩解特性的影响[J].中国水土保持科学,2017,15(1):121-127.
- [21] El-Halim A A A. Image processing technique to assess the use of sugarcane pith to mitigate clayey soil cracks: Laboratory experiment [J].Soil and Tillage Research, 2017,169:138-145.