

土壤物理结皮裂缝发育规律

王泽¹, 封瑞坤¹, 王健¹, 师小丹², 雷齐娜²

(1.西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2.韩城市水土保持工作站, 陕西 韩城 714000)

摘要: [目的]土壤物理结皮是裸露地表常见的一种障碍现象, 伴随土壤干燥化将形成干缩裂缝, 直接影响土壤水分的蓄存与利用。为明确土壤物理结皮裂缝的发育规律。[方法]通过人工模拟降雨模拟不同类型物理结皮形成, 在干燥过程中形成裂缝, 采用石蜡填充方法, 对裂缝面积、周长、长度和宽度等参数进行测定, 定量分析不同条件下沉积结皮和结构结皮裂缝的几何特征和空间变化。[结果]沉积结皮裂缝(DC)在裂缝几何参数方面显著高于结构结皮裂缝(SC)。随着降雨历时增加, 裂缝形状系数和密度呈下降趋势, 而裂缝平均宽度增加。试验发现 3 种结皮裂缝的横向收缩类型, 分别为贯穿式(PS)、镶嵌式(IS)和悬浮式(SS)。随着降雨历时增大, PS 占比逐渐增大, IS、SS 占比逐渐减小。随着土层深度增加, 沉积结皮裂缝在不同降雨历时表现出阶梯式下降和短暂增加的现象, 而结构结皮裂缝则表现为先剧烈后平缓下降趋势。[结论]结皮类型及结皮降雨历时对裂缝发育具有重要影响。考虑到结皮因素对裂缝发育的影响, 及时进行田间管理, 改变降水的入渗与水分蒸发, 为田间管理提供技术支持。

关键词: 结皮; 干缩裂缝; 降雨历时; 裂缝几何形态

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2025)01-0208-09

Mechanisms of Soil Physical Crust Crack Formation

WANG Ze¹, FENG Ruikun¹, WANG Jian¹, SHI Xiaodan², LEI Qina²

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. Hancheng District Soil and Water Conservation Workstation, Hancheng, Shaanxi 714000, China)

Abstract: [Objective] Soil physical crusting is a common obstructive phenomenon on exposed surfaces, it can lead to shrinkage cracks as the soil dries, thus directly affecting soil moisture retention and utilization. This study aimed to clarify the development patterns of cracks in physical crusts. [Methods] Artificial rainfall was employed to simulate the formation of different types of physical crusts, followed by crack formation during the drying process. Parameters such as crack area, perimeter, length, and width were measured using a paraffin filling method, the geometric characteristics and spatial variations of cracks in depositional crusts (DC) and structural crusts (SC) under different conditions were quantitatively analyzed. [Results] Cracks in depositional crusts (DC) exhibited significantly higher geometric parameters compared to those in structural crusts (SC). With increasing rainfall duration, the crack shape coefficient and density decreased, while the average crack width increased. Three types of lateral shrinkage cracks were identified, including penetrating shrinkage (PS), interlocking shrinkage (IS), and suspended shrinkage (SS). As rainfall duration increased, the proportion of PS increased, while IS and SS proportions decreased. As soil depth increased, cracks in depositional crusts displayed a stepped decrease and a brief increase under different rainfall durations, while cracks in structural crusts showed an initial sharp decrease followed by a gradual decline. [Conclusion] The type of crust and rainfall duration are crucial factors influencing crack development. This study highlights the impact of crusting on crack formation, suggesting timely field management practices to modify water

infiltration and evaporation, and can provide a technical support for effective field management.

Keywords: soil crust; desiccation cracks; rainfall duration; crack geometry

Received: 2024-08-27

Revised: 2024-10-06

Accepted: 2024-10-26

Online(www.cnki.net): 2024-12-25

农田土壤降雨后极易在表面形成密实、坚硬的层状结构,称为土壤物理结皮^[1]。经过湿润-干燥的失水过程后,伴随物理结皮的土壤产生干缩裂缝。尤其在干旱半干旱地区,此类结皮裂缝分布尤为广泛。裂缝的形成不仅直接影响土壤的入渗性能,还作为优先流的路径,增加农田水分和养分的流失及地下水污染的风险^[2-3]。与均质土壤裂缝相比,结皮裂缝的结构和对土壤的影响更加复杂。

土壤结皮常伴随地表微地形的变化而出现差异,通常分为沉积结皮和结构结皮^[4]。结构结皮是由于降雨击打外力参与下土壤颗粒分散并且重新聚集形成^[5]。沉积结皮是由于雨水下渗淋滤细颗粒并且颗粒不断沉积形成^[6]。土壤干缩裂缝的产生形成与外界条件变化引起的土壤物理、化学、生物综合性质息息相关,包括土壤黏粒质量分数^[7-8]、土壤团聚体^[9]、土壤孔隙结构^[10]、有机质质量分数等因素。而土壤物理结皮的出现改变土壤性质^[11-12],且沉积结皮和结构结皮不同的形成机制对其影响差异较大^[13]。当土体受到张拉应力达到或超过土体的极限抗拉强度时,地表可能产生裂缝^[14]。降雨作用下,随着降雨历时的延长,沉积结皮和结构结皮的土壤剥离能力下降,改变土壤的抗拉能力,结皮的存在使土壤团聚体破碎,加剧土壤裂缝的产生^[15]。方华强等^[16]对淤泥质土干缩裂隙进行研究,淤积层厚度是影响裂隙面积和形态不规则性的主要因素。降雨作用下土壤结皮经历从无到有变薄再变厚的发展历程,土壤结皮厚度同样影响裂缝发育^[17]。杨昌^[18]对坡耕地不同地形和含水率下土壤结皮裂缝的发育规律进行探究发现,土壤结皮裂缝的发育受到地形和含水率的显著影响。不同的降雨条件通过改变物理结皮特征,进而影响裂缝的形成与发育。

目前,有关土壤裂缝发育规律的研究多集中在均质土壤条件,对土壤物理结皮影响下干缩裂缝的发育规律和影响机制了解仍然存在不足。因此,通过人工模拟降雨试验,在形成沉积结皮和结构结皮的土壤上分析裂缝几何形态特征和发育规律,定量探讨不同降雨历时的结皮对裂缝发育的影响,为理解坡耕地土壤侵蚀机理、优化土壤管理和提高农业水肥利用效率提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于陕西杨凌(107°59'~108°09'E, 34°14'~34°24'N),海拔 418.0~540.1 m,地势北高南低,气候类型属暖温带半湿润气候区,四季分明,年平均气温 12.9 °C,极端最高气温 42 °C,最低气温 -19.4 °C,全年无霜期 221 d。年平均降水量 637.6 mm,多集中在 7—10 月,占多年平均降水量的 60%,年平均蒸发量 884 mm。试验土壤为杨凌表层耕作土,采样土层深度为 0~20 cm。利用马尔文激光粒度仪 Mastersizer 2 000 测量土样颗粒粒径组成,按照美国制划分标准,并利用烘干法测量土壤初始水分质量分数。土壤有机质、中值粒径、初始水分质量分数分别为 9.78 g/kg、10.23 μm、7.10%;其砂粒、粉粒、黏粒质量分数分别为 3.87%、62.70%、33.43%,属于粉质壤土。使用 5 mm 细筛对土壤进行筛选。

1.2 研究方法

选取 2.0 m×1.0 m×0.5 m 的径流小区,为避免因坡度过大细沟发育产生的地形变化,坡度设置选择在缓坡耕地具有较好代表性的 3°。为保证土层体积质量的均一性,采用分层定量填充方式,每 5 cm 为 1 层,共 9 层,实测土壤体积质量为 1.2 g/cm³。在小区中模拟等高耕作措施进行试验,垄距为 30 cm,垄高为 10 cm。采用侧喷式降雨机模拟降雨,降雨喷头距地面 6 m,有效降雨面积 3 m×6 m,降雨均匀度达 90%以上,控制雨强为 60 mm/h,降雨时间为 30 min。为减小容器温度变化过大造成边缘裂缝误差,降雨结束后将小区放置在 18~22 °C 室内自然晾干,定时观测结皮裂缝发育情况。同时,采用烘干法测量含水率,待含水率不再变化,认为裂缝发育完全。在小区内多个垄沟中随机选取 3 个垄上区域和 3 个沟底区域作为重复,以测定结构结皮和沉积结皮的裂缝发育特征。使用索尼 LYT-9 001 英寸 50 MP 镜头固定机位在小区上方 80 cm 处拍摄记录(图 1)。

为进一步探究结皮发育对裂缝形成的影响,通过调整人工模拟降雨历时控制沉积结皮和结构结皮发育。选择直径为 28 cm、高度为 12 cm 的圆柱形钢盆,底部均匀分布直径为 2 mm 的圆形小孔,并在盆底铺设滤纸覆盖小孔,填充土壤每层 3 cm,共 4 层,实测土壤体积质量为 1.2 g/cm³。采用相同的降雨设备,降雨强度设置为 90 mm/h,并控制降雨时间为 15~55 min,以 5

min 为间隔,共设置 9 组降雨历时。试验在相同坡度和耕作措施的径流小区内进行,其中,垄上和沟底的长度均为 30 cm,垄距为 60 cm,垄高为 10 cm。每组降雨历时下,分别将 6 个钢盆随机填埋于径流小区的垄上与沟底位置,并确保容器顶部与土壤表面齐平,以模拟自然条件下的沉积结皮和结构结皮的形成过程。每种结皮类型设 3 个重复,确保数据的可重复性。降雨结束后,将钢盆取出,放在室内缓慢晾干,使用相机分别在距离样品 40 cm 正上方处拍摄裂缝情况的图像,适当采用补光遮光处理。

拍摄的裂缝图像使用 Photoshop 2022 软件进行校正,消除因人为拍摄导致的光线差异、角度偏差、曝

光不均匀等问题。为消除框选区域边缘对于裂缝的不规律影响,利用 Photoshop 2022 软件对图片进行裁剪,对于径流小区选取 15 cm×90 cm 长方形区域,对于钢盆则选取以试样中心直径为 28 cm 的圆形区域作为研究对象,然后利用聚类数为 4 的 K-means 方法对图像初步进行杂点处理,利用 MATLAB 2023 图像处理功能进行图像的灰度化、二值化、杂点去除等,最后使用 Photoshop 2022 软件将处理后的图像再次修正,去除残留非裂缝部分,以完成裂缝的识别与提取,并测定表面裂缝的面积、周长、长度和宽度。其中,一边与边壁夹角 30° 且距离 1 cm 的裂缝区域视为无效部分,不作为测定范围。

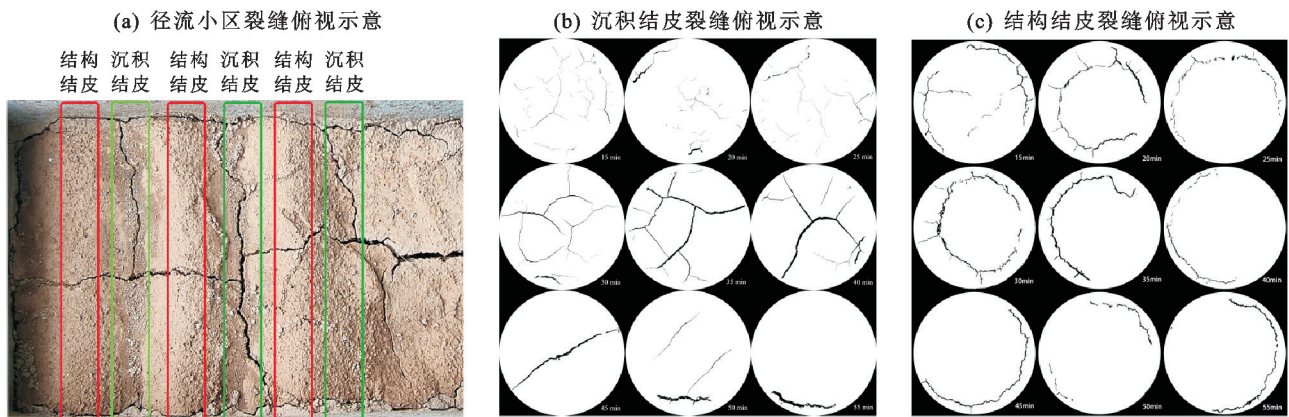


图 1 裂缝发育俯视示意

Fig.1 Top view of crack development

采用石蜡法模拟裂缝的空间结构。将融化的石蜡注入裂缝中,待石蜡凝固后,采用水轻轻洗掉土壤,将土壤剥离,并对凝固后的石蜡进行数据测量。利用 Photoshop 2022 按照 4 mm 为 1 层的间隔,测定不同深度石蜡模型的面积、周长、长度和宽度等数据。

试验所得数据均采用 Excel 2003、GraphPad Prism 9、python 3.8 软件进行数据统计分析作图,包括描述性统计分析和 T 相关性检验等。

1.3 测定项目与方法

裂缝分割度即单位面积上的裂缝面积,是描述土壤裂缝大小和发育程度的参数,用于表征单位土地面积上失水收缩产生裂缝的程度,计算公式为:

$$n = \frac{\sum A_i}{A_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: n 为裂缝分割度,%; A_i 为第 i 条裂缝的面积, cm^2 ; A_0 为样品表面积, cm^2 。

裂缝形状系数用于表征裂缝的几何特征,定义为裂缝周长与断面面积之比,计算公式为:

$$k = 0.28 \frac{L}{\sqrt{A}} \quad (2)$$

式中: k 为裂缝形状系数; L 为裂缝周长, cm ; A 为断

面面积, cm^2 。

裂缝密度指单位面积内裂缝的长度,通常用来描述土壤中裂缝的分布情况,计算公式为:

$$m = \frac{\sum L_i}{A_0} \quad (3)$$

式中: m 为裂缝密度, cm^{-1} ; L_i 为第 i 条裂缝的长度, cm ; A_0 为样品表面积, cm^2 。

2 结果与分析

2.1 不同结皮裂缝几何形态特征

图 2 为在雨强 60 mm/h 人工模拟降雨条件下, 30 min 沉积结皮(DC)和结构结皮(SC)裂缝在分割度 n (图 2a)、形状系数 k (图 2b)和密度 m (图 2c)上的对比。 T 检验结果显示,沉积结皮裂缝在 3 个参数上均显著高于结构结皮裂缝($p < 0.05$)。沉积结皮(DC)裂缝分割度为 3.63%~6.60%,平均值为 4.71%,是结构结皮的 7.4 倍;形状系数为 6.87~7.64,平均值为 7.24,是结构结皮的 2 倍;裂缝密度为 0.17~0.19 cm^{-1} ,平均值为 0.18 cm^{-1} ,则是结构结皮的 6 倍。

2.2 不同降雨历时结皮裂缝几何形态特征

表 1 为不同降雨时长下沉积结皮裂缝和结构结皮裂缝的几何形态特征。对于沉积结皮,裂缝分割度随着

模拟降雨时长的延长呈先增加后缓慢减小的趋势。当降雨时长在 15~25 min 时,裂缝分割度维持为 5%~6%,并在 35 min 时达到峰值 8.54%,比初始值(5.18%)增加约 165%。然而,在降雨持续到 40 min 后,裂缝分割度开始下降,并在 55 min 时减少至 6.75%,比峰值下降 21%。裂缝形状系数随着降雨时长的增加明显下降,从 15 min 的 30.81 减少到 55 min 的 12.64,下降约 59%。

表明随着降雨时间的延长,裂缝形状趋于简单和规则。同时,较长的降雨时长显著限制裂缝的长度发育,在降雨历时为 15~35 min,裂缝密度总体保持在 0.40 cm⁻¹ 以上,但在降雨历时达到 40~55 min 时,裂缝密度急剧下降至 0.23 cm⁻¹,下降约 54%。裂缝平均宽度则随着降雨时长的增加持续增加,从 15 min 的 1.03 mm 增加到 55 min 的 2.86 mm,增加约 178%。

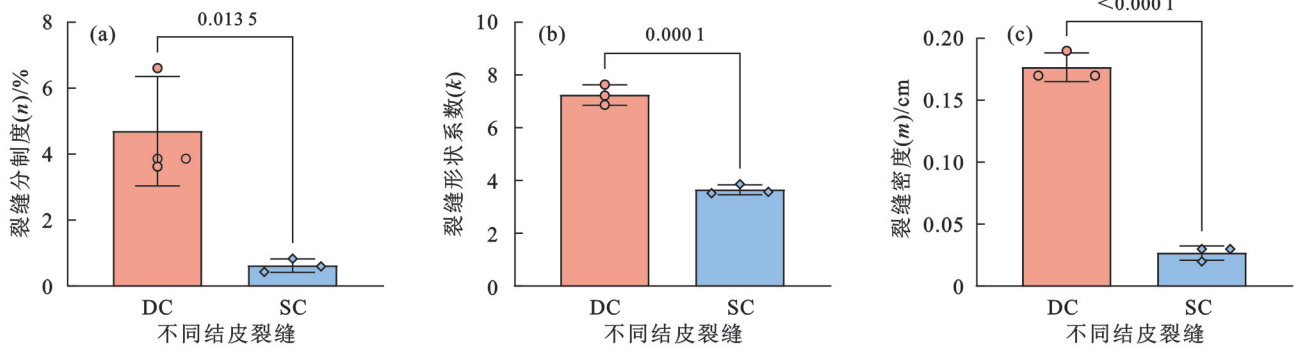


图 2 不同结皮裂缝几何形态特征

Fig.2 Geometrical characteristics of different soil crust cracks

表 1 不同降雨历时沉积结皮裂缝和结构结皮裂缝几何形态特征

Table 1 Geometrical characteristics of depositional crusts and structural crust cracks under different rainfall durations

结皮类型	降雨历时/min	裂缝分割度/%	标准差	裂缝形状系数	标准差	裂缝密度/cm ⁻¹	标准差	裂缝平均宽度/mm	标准差
沉积结皮	15	5.18	0.482	30.81	0.864	0.50	0.061	1.03	0.058
	20	5.27	1.171	29.67	2.219	0.49	0.037	1.08	0.053
	25	5.16	1.191	26.86	1.967	0.43	0.027	1.18	0.032
	30	7.62	0.671	24.90	1.931	0.49	0.078	1.54	0.048
	35	8.54	1.378	22.92	0.554	0.48	0.031	1.78	0.037
	40	7.35	0.774	15.46	1.280	0.30	0.063	2.44	0.009
	45	7.56	1.774	13.20	1.662	0.26	0.122	2.89	0.037
	50	7.79	0.913	15.88	2.097	0.32	0.033	2.44	0.019
	55	6.75	0.728	12.64	1.170	0.23	0.064	2.86	0.053
结构结皮	15	2.95	0.135	19.33	2.140	0.24	0.031	0.12	0.021
	20	2.70	0.163	14.42	1.823	0.17	0.022	0.16	0.014
	25	2.62	0.029	14.13	2.546	0.16	0.010	0.16	0.011
	30	3.49	0.143	15.55	1.815	0.21	0.017	0.17	0.013
	35	2.67	0.138	9.55	1.740	0.11	0.012	0.24	0.005
	40	2.41	0.208	14.40	0.982	0.16	0.043	0.15	0.017
	45	2.60	0.063	15.49	0.978	0.18	0.027	0.14	0.033
	50	1.60	0.095	12.40	2.651	0.11	0.014	0.14	0.004
	55	3.81	0.098	11.42	1.700	0.16	0.019	0.24	0.010

对于不同降雨历时形成的结构结皮,其裂缝分割度在不同降雨历时下波动较大,从最低的 1.60% (50 min)到最高的 3.81%(55 min),最大差异达 2.21 倍(图 3)。裂缝形状系数在降雨历时 15 min 时达到最高值 19.33,在 35 min 时,形状系数降至最低值 9.55,下降 50.6%。随后略有回升,最终在 55 min 时再次下降至 11.42。表明随着降雨时间的延长,裂缝形状逐渐趋于简单,但在某些时段(如 45 min)又出现回升。裂缝密度在不同降雨历时下波动明显,最高值出现在 15 min (0.24 cm⁻¹),而最低值为 35 min

和 50 min 降雨出现的 0.11 cm⁻¹,下降幅度达到 54.2%,表明较长历时的降雨降低裂缝密度。裂缝平均宽度随着降雨历时的变化呈波动变化。降雨历时为 15 min 时,裂缝平均宽度为 0.12 mm,而在 55 min 时,裂缝平均宽度都达到最大值 0.24 mm,宽度增加 1 倍。表明随着降雨时间的增加,裂缝平均宽度的扩展幅度较大。

在不同降雨历时下形成的沉积结皮,其裂缝的几何特征显著高于结构结皮,尤其在关键参数上表现出较大差异。沉积结皮的裂缝分割度在降雨历时为

35 min 时达到 8.54%，是结构结皮的 3.2 倍；裂缝形状系数最高达到 30.81，为结构结皮的 1.6 倍；裂缝密度在 15 min 时达到 0.50 cm^{-1} ，是结构结皮的 2 倍；而裂缝平均宽度在 55 min 时则达到 2.86 mm，是结构结皮的 11.9 倍。表明沉积结皮在裂缝分割度、形状系数、密度和宽度上均超过结构结皮，与雨强为 60 mm/h 降雨 30 min 得出的结论相一致。

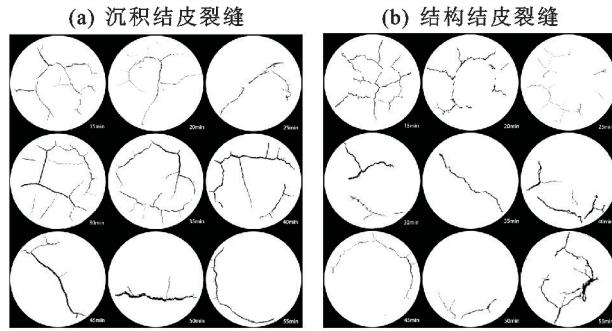


图 3 有效裂缝俯视图示意

Fig.3 Top view of effective cracks

2.3 结皮发育裂缝空间形态

2.3.1 裂缝分类 根据石蜡填充模型，可将裂缝按照其在结皮层中的相对位置分为横向收缩裂缝和纵向收缩裂缝(图 4a)。纵向收缩裂缝是沿着土层深度方向在结皮层下方开裂(图 4b)，而横向收缩裂缝则是沿着土壤表面结皮层的横向方向开裂，进一步可细分为贯穿式收缩裂缝(PS)、镶嵌式收缩裂缝(IS)和悬浮式收缩裂缝(SS)3 种类型。贯穿式收缩裂缝(PS)是裂缝从结皮表面贯穿结皮层，深入到土壤内部(图 4c)。镶嵌式收缩裂缝(IS)则是裂缝在穿透结皮层后迅速减小，仅仅贯穿结皮层，但在土壤中不再进一步发育(图 4d)。悬浮式收缩裂缝(SS)是裂缝未能穿透整个结皮层，而是仅在结皮层内形成，裂缝的开裂深度有限(图 4e)。

2.3.2 不同裂缝发育规律 图 5 为不同降雨历时沉积结皮和结构结皮的不同类型裂缝发育面积情况。不同降雨历时的沉积结皮在贯穿式收缩裂缝(PS)、悬浮式收缩裂缝(SS)和镶嵌式收缩裂缝(IS)的分布和占比具有明显变化规律(图 4a、图 4b)。在不同降雨历时下，沉积结皮的贯穿式收缩裂缝面积显著增加，从 15 min 的 19.75 cm^2 增加到 55 min 的 41.33 cm^2 ，占比最高达到 99.4%。特别是在 35 min 以上的降雨历时，贯穿式裂缝面积和占比迅速提升，成为主要裂缝类型。相比之下，镶嵌式收缩裂缝(IS)在较短降雨时间内(20~25 min)面积较大，最高达到 11.78 cm^2 ，但在 45、55 min 时几乎消失，占比降至最低，仅为 0.6%。悬浮式收缩裂缝也在短时间降雨中面积较大，但在 35 min 及以上的降雨历时内显著减少，面积降至 1 cm^2 以下，占比最低仅为 0.3%。

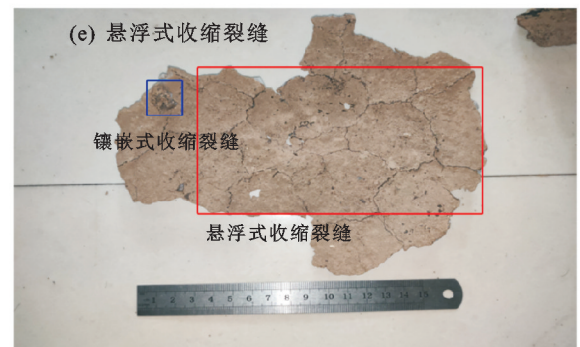
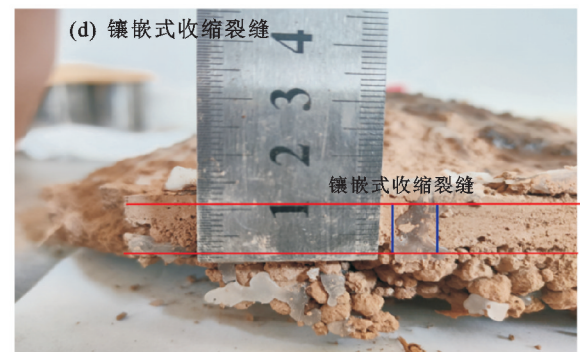
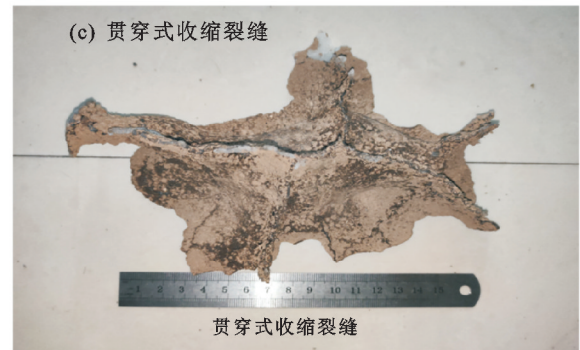
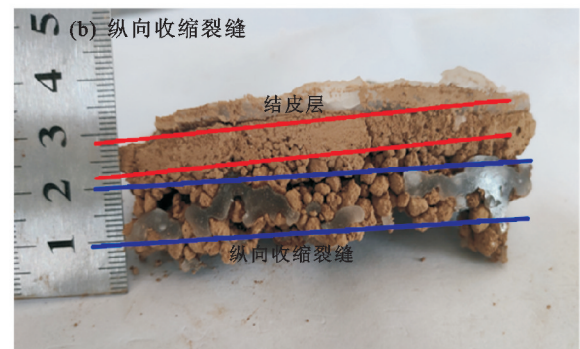
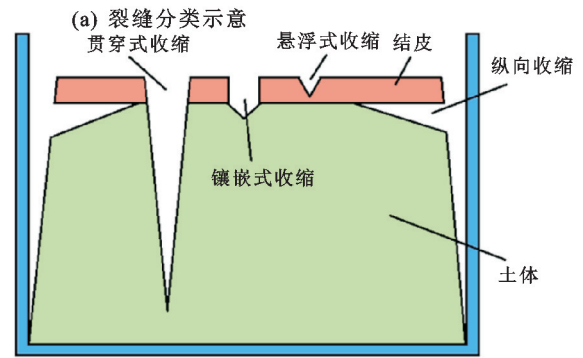


图 4 不同结皮裂缝

Fig.4 Different cracks in soil crusts

不同降雨历时的结构结皮对不同裂缝的发育也有较大影响(图 4c、图 4d)。不同降雨历时对结构结皮中裂缝的发育产生显著影响。贯穿式收缩裂缝在所有降雨历时中都是主要类型,占据绝对优势。在 55 min 的降雨历时下,贯穿式裂缝面积达到 21.26 cm²,占比高达 90.5%;在 45、50 min 的降雨历时中,贯穿式裂缝面积分别为 14.88、8.78 cm²,占比分别为 92.8%、88.8%。相比之下,镶嵌式裂缝面积在不同降

雨历时中波动较大,但趋势不明显。在 35、40 min 的降雨历时中,镶嵌式裂缝面积分别为 2.81、2.65 cm²,占比分别为 17.0%和 17.8%。然而,在较长降雨历时下,镶嵌式裂缝面积显著减少,55 min 仅为 2.01 cm²,占比降至 8.6%。悬浮式裂缝面积则随着降雨历时的增加整体呈减少趋势,15 min 时面积为 2.19 cm²,占比为 12.0%,但在 50、55 min 时分别减少至 0.10、0.22 cm²,占比分别为 1.0%和 0.9%。

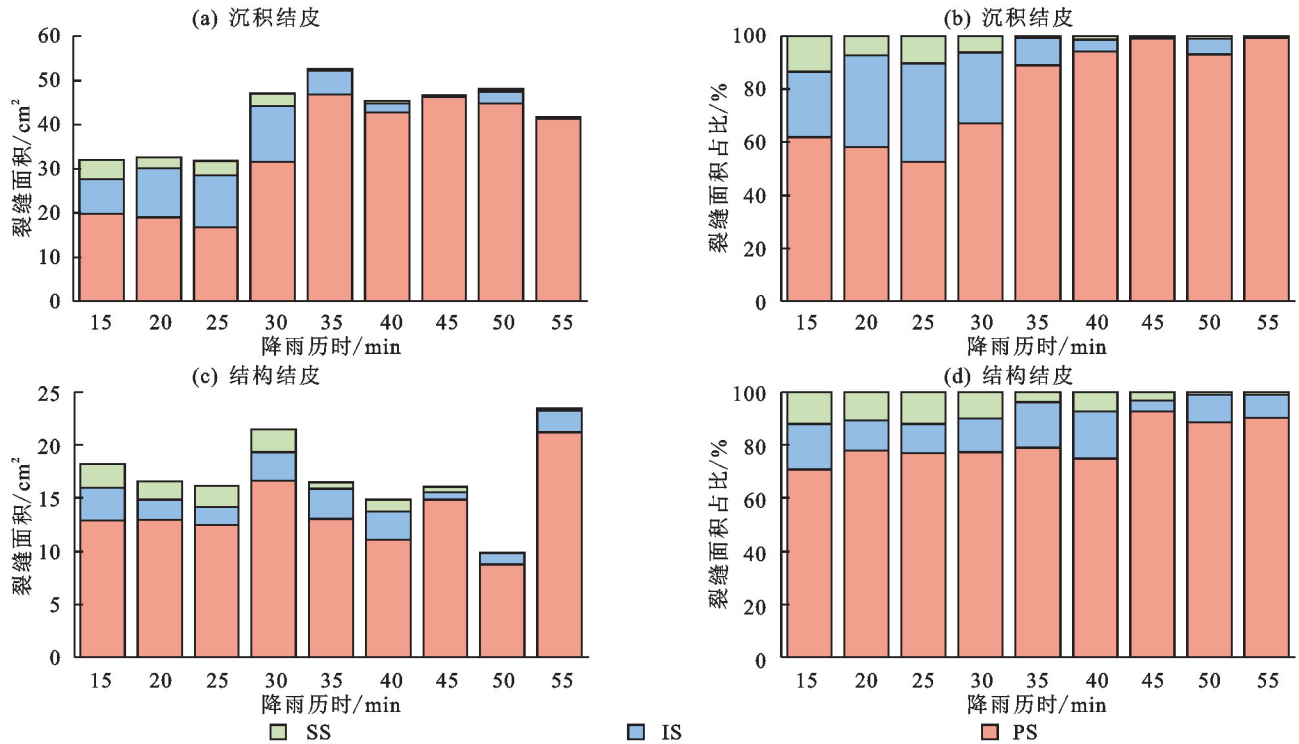


图 5 不同类型裂缝发育面积情况

Fig.5 Area distribution of different types of cracks

2.3.3 裂缝空间变化规律 图 6 为不同降雨历时的沉积结皮和结构结皮裂缝随土层深度增加面积的变化情况。总体来看,裂缝面积随着土层深度的增加逐渐减小。对于沉积结皮,当降雨历时为 15~30 min 时,裂缝面积在浅层迅速减少,在降雨历时为 20 min 时,裂缝面积从表层的 33.2 cm² 骤降至 0.4 cm 深度的 18.9 cm²,减少约 43%。此后,裂缝面积呈平缓阶梯式下降。当降雨历时延长至 35~55 min 时,裂缝面积在浅层呈明显减小趋势。但在 2.4~3.2 cm 土层深度,由于纵向收缩裂缝的出现,裂缝面积出现短暂的增大。在 35 min 降雨时,裂缝面积从 2.4 cm 的 35.6 cm² 增至 3.2 cm 的 37.4 cm²,增幅约为 1.05 倍。随后,裂缝面积再次减少。裂缝不仅在浅层显著发育,在更大深度下也保持一定的面积,且裂缝面积的变化不再是简单的阶梯式下降。对于结构结皮,在短降雨历时(15~30 min)下,裂缝面积在浅层迅速减少,15 min 时的裂缝面积从表层的 18.2 cm² 减少至

4 cm 的 5.2 cm²,减少约 71%。在中等降雨历时(35~45 min)下,裂缝面积的减少趋势有所缓和。在 35 min 降雨时,裂缝面积从表层的 16.5 cm² 减少至 4 cm 的 3.9 cm²,减少约 76%,但在 4~6 cm 土层深度,裂缝面积减小幅度较小。在长降雨历时(50~55 min)下,裂缝面积的变化则更加显著。55 min 降雨历时的裂缝面积在 0~2 cm 土层内迅速减小,从表层 23.5 cm² 减少至 13.9 cm²,减少约 41%。然而,在 6~8 cm 土层,裂缝面积减小幅度则更加平缓。

3 讨论

坡耕地作为土壤侵蚀的频发地,已有研究^[19]表明,其侵蚀方式分为降雨击溅和径流冲刷。雨滴直接打击土壤表面,破坏土壤颗粒间的黏结作用,导致土壤颗粒分散并与表土分离(降雨开始后 5 min 内)。分散的土壤颗粒在雨滴冲击力和水流冲刷力的作用下向四周飞溅(降雨持续 15~20 min),受微地形影响,形成不同类型物理结皮。结皮基本形成并处于

不断破坏与再形成的动态平衡阶段(降雨 30 min 以后)。受微地形影响,水分蒸发后形成农田中垄上、沟底的结构结皮裂缝和沉积结皮裂缝。本试验发现,等高耕作时,沟底更易出现较大裂缝,而垄上裂缝发育较为简单,同时,说明结构结皮的形成对裂缝的发育抑制更为严重。并且随着降雨历时的增加,结

皮土壤颗粒进一步压实,结皮厚度增加,裂缝的长度发育被限制,使得裂缝更加短小;相反,裂缝平均宽度随着降雨历时的增加总体呈增加趋势。对比裂缝密度和裂缝平均宽度的变化趋势可发现,结皮的发育虽然限制裂缝长度,但同时拓展裂缝宽度,使裂缝呈粗短状。

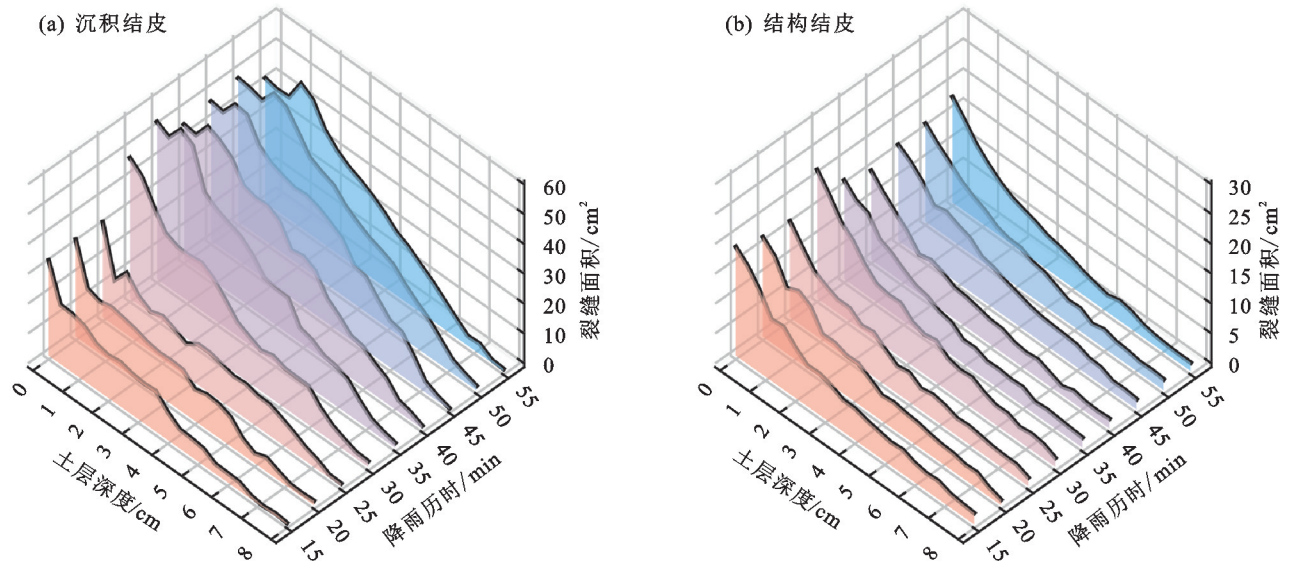


图 6 裂缝空间变化情况

Fig.6 Spatial variation of cracks

土壤物理结皮裂缝是土壤干缩裂缝的特殊情况。TANG 等^[20]研究表明,土壤干缩裂缝的形成主要与土壤水分蒸发和水分变化产生的应力有关。一般均质土壤裂缝产生有 3 个阶段,土壤表面水分首先被蒸发,土壤中含水率逐渐降低,为维持蒸发,下层土壤水分由于毛细作用不断向上传输。土壤中自由水逐渐蒸发,毛管水开始主导,由于孔隙水表面张力和土壤颗粒吸附共同作用,土粒间产生弯液面,使得其相互紧紧靠拢。此现象在宏观上表现为土体体积收缩,并且伴随水分不断蒸发,土体收缩特性也发生改变,在水分继续蒸发的过程中,土壤内基质吸力不断变化,导致土体内部产生不平衡的张拉应力。当某些土壤表面区域的张拉应力超过土壤颗粒间抗拉强度时,连接断裂,从而形成裂缝。而土壤物理结皮裂缝受到结皮的影响,裂缝形成过程有所不同。有学者^[21]研究指出,结皮层土壤结构密实、孔隙度小。在实际降雨情况下,结皮层和下层松散土壤不是突然变化,而是缓慢过渡^[22],渐变结构导致贯穿式收缩裂缝的形成。但受到结皮发育的影响,结皮层和下层松散土壤孔隙度差异很大^[23],使得结皮层中重力水占比远小于下层。当结皮层毛管水占据主导时,下层松散土壤中的重力水还未完全蒸发,结皮层孔隙水表面张力更大,从而使结皮层优先产生裂缝,即镶嵌式收缩裂缝。悬

浮式收缩裂缝仅存在于土壤表面结皮层中,多数出现于土壤抗拉性能较差位置,是其他裂缝导致结皮表面翘曲产生 2、3 级裂缝。纵向收缩裂缝在均质土壤中也普遍存在,原因是钢盆边缘的裂缝面上的土粒合位移方向斜向上,而表层土颗粒的合位移方向为斜向下,从而产生纵向收缩^[24]。结皮的存在加剧此现象的发生,使得纵向收缩裂缝出现在结皮层和下层松散土壤的交界面上。贯穿式、镶嵌式、悬浮式裂缝的出现频率和形态随结皮发育程度的变化而发生变化,是由于裂缝类型在应力条件下表现出不同的力学响应特性。在结皮形成的初期,也是结皮发育程度较低的时期,结皮层和下层松散土壤物理性质差异较大,出现较多镶嵌式收缩裂缝,同时,因为抗拉性能较低,伴随许多悬浮式收缩裂缝。随着结皮不断发育,剧烈程度越发严重,外界因素对土壤表层扰动加大,结皮层抗拉强度增大,同时与下层土壤差异减小,产生的悬浮式、镶嵌式收缩裂缝减少。

结皮裂缝空间变化影响土壤中水分运移^[3]。随着深度逐渐增加,结皮裂缝面积呈逐渐减小趋势。沉积结皮裂缝在降雨历时为 15~30 min 时,裂缝面积下降呈现阶梯式,在 0~0.4 cm 土层下降剧烈,之后下降平缓。是因为该降雨历时的结皮悬浮式收缩裂缝和镶嵌式收缩裂缝较多、面积较大,但土层较浅,仅

在结皮处分布广泛,一旦深度到达土体中,裂缝则迅速消失。而贯穿式收缩裂缝面积减小缓慢。裂缝面积迅速下降主要是因为裂缝数目的减少,下降缓慢则主要因为单条裂缝面积的减小,所以,下降呈阶梯式。当降雨历时为 35~55 min 时,裂缝面积还有短暂的扩张,主要因为纵向收缩裂缝的加入。在结皮和土体交接处,纵向收缩导致裂缝面积短暂增大,随着降雨时间增加,纵向收缩现象越发明显。并且裂缝面积下降不再为阶梯式,印证上述结果:发育较好的结皮贯穿式收缩裂缝更多,裂缝形状更加简单,裂缝网络更加单一。结构结皮裂缝先剧烈下降之后趋于平缓,在深度达到 1.2 cm 之前下降较为迅速,之后下降速度慢慢减缓,当深度达到 4.8 cm 时,裂缝面积几乎不变。此趋势显示,结构结皮裂缝形态特征更加简单,可佐证上文规律。

结皮发育特征较多,其中最明显指标是结皮厚度,无论是携沙径流土壤颗粒沉积还是降雨击打表层,都对结皮厚度产生影响。对土壤干缩裂缝的影响因素分析得出,土壤厚度影响较大。黎桢君等^[25]研究发现,随着厚度增加,干缩裂缝的长度密度降低、宽度密度增加,厚度越小,裂隙分布越密集,裂隙网络越不规则。而土壤结皮作为一种特殊的土壤结构,与此结论相吻合。

土壤干缩裂缝受到较多因素的影响,GANGO-PADHYAY 等^[26]研究表明,裂缝形态特征与土壤黏粒矿物有关;周红艺等^[27]发现,不同地形裂缝发育形态不同。沉积结皮和结构结皮通过较多因素影响裂缝发育,影响机制复杂,不同类型土壤物理结皮对裂缝发育的影响机理尚不清楚,有待进一步研究。此外,裂缝的发育特征不仅仅局限于降雨过程中结皮的形成,在降雨停止后的失水阶段也尤为关键。随着土壤水分体积分数的变化,结皮土壤的张拉应力发生动态变化。可能对裂缝结构的稳定性、开裂模式及后续的裂缝扩展过程产生重要影响。进一步研究结皮裂缝的形成过程及其在降雨后不同水分环境下的结构变化,将为土壤结皮裂缝发育规律提供新的视角和数据支持。

4 结论

1) 不同类型土壤物理结皮对裂缝发育的影响显著,沉积结皮裂缝(DC)在裂缝分割度、裂缝形状系数和裂缝密度等几何参数上均显著高于结构结皮裂缝(SC)。

2) 随着降雨历时的增加,结皮裂缝形状系数和裂缝密度呈下降趋势,裂缝平均宽度呈上升趋势。沉积

结皮裂缝分割度在 35 min 达到最大(8.54%),结构结皮在 30 min 达到最大(3.49%)。

3) 结皮裂缝横向收缩存在贯穿式(PS)、镶嵌式(IS)、悬浮式收缩裂缝(SS)3 种类型。降雨历时对 3 种裂缝类型变化存在一定影响,随着结皮的不断发育,贯穿式收缩裂缝面积逐渐增大,镶嵌式收缩裂缝和悬浮式收缩裂缝面积逐渐减小。

4) 随着土层深度逐渐增加,结皮裂缝面积逐渐减小。沉积结皮裂缝面积在 15~30 min 呈阶梯式下降,35~55 min 在土层较浅处出现短暂增加现象,不再呈阶梯式下降。结构结皮面积裂缝下降趋势先剧烈后平缓。

参考文献:

- [1] BU C F, GALE W J, CAI Q G, et al. Process and mechanism for the development of physical crusts in three typical Chinese soils[J]. *Pedosphere*, 2013, 23(3): 321-332.
- [2] FUJIMAKI H, ABD EL BAKI H. Effect of bypass-flow on leaching of salts in a cracking soil in the Nile delta [J]. *Water*, 2021, 13(7): e993.
- [3] CHEN L, YANG C, WANG J, et al. Variation in preferential flow features induced by desiccation cracks in physical crusts [J]. *Journal of Hydrology*, 2024, 634: e131118.
- [4] LU P, XIE X L, WANG L H, et al. Effects of different spatial distributions of physical soil crusts on runoff and erosion on the Loess Plateau in China [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2017, 42(13): 2082-2089.
- [5] 陈琳,王健,宋鹏帅,等.降雨对坡耕地地表结皮土壤水稳性团聚体变化研究[J]. *灌溉排水学报*, 2020, 39(1): 98-105.
CHEN L, WANG J, SONG P S, et al. Effect of rainfall on water stability aggregates of crust soil on slope surface [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2020, 39(1): 98-105.
- [6] WU Q J, WANG L H, WU F Q. Effects of structural and depositional crusts on soil erosion on the Loess Plateau of China [J]. *Arid Land Research and Management*, 2016, 30(4): 432-444.
- [7] MU Q Y, MENG L L, SHEN Y Q, et al. Effects of clay content on the desiccation cracking behavior of low-plasticity soils [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2023, 82(8): e317.
- [8] BOIVIN P, GARNIER P, TESSIER D. Relationship between clay content, clay type, and shrinkage properties of soil samples [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68(4): 1145-1153.

- [9] LI A J, WANG S J, CAO J J, et al. Morphological evolution of desiccation cracking in purple soil under the influence of aggregate size distribution[J]. *Catena*, 2023, 231:e107287.
- [10] VELDE B. Surface cracking and aggregate formation observed in a Rendzina soil, La Touche(Vienne) France [J]. *Geoderma*, 2001, 99(3/4):261-276.
- [11] 刘冠亨, 吴冠宇, 李建德, 等. 降雨过程中土壤物理结皮入渗情况及当量孔径的变化研究[J]. *干旱区研究*, 2023, 40(10):1608-1614.
LIU G H, WU G Y, LI J D, et al. Equivalent pore size characteristics in the soil physical crust[J]. *Arid Zone Research*, 2023, 40(10):1608-1614.
- [12] TAKU N I S H I M U R A. Effects of surface crust formation on soil physical properties and erodibility[J]. *Journal of Irrigation Engineering and Rural Planning*, 2010, 1998(34):78-79.
- [13] 杨昌, 王健, 李建德, 等. 土壤表层结皮失水裂缝形态发育规律研究[J]. *灌溉排水学报*, 2021, 40(10):103-108.
YANG C, WANG J, LI J D, et al. Formation of crusts and initiation and development of cracks in them following soil wetting and drying[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2021, 40(10):103-108.
- [14] BARBOSA L A P, GERKE H H. Structural heterogeneity of soil clods: Correlating Weibull parameters to fracture surface topography[J]. *Geoderma*, 2022, 428:e116161.
- [15] CHEN L, WANG J, WANG H, et al. Variation in soil detachment capacity of structural and sedimentary crusts induced by simulated rainfall formed on ridge and furrow[J]. *Catena*, 2022, 211:e105971.
- [16] 方华强, 蒋春勇, 王成龙, 等. 厚度及温度影响下重庆淤泥质土裂隙形态试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2021, 40(12):2570-2583.
FANG H Q, JIANG C Y, WANG C L, et al. Effects of layer thickness and temperature on the crack morphology of Chongqing silt[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 40(12):2570-2583.
- [17] 赵宇. 坡耕地地表结皮土壤导水率试验研究[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
ZHAO Y. Experimental study on Waterconductivity of Surface crust soil insloping farmland [D]. Yangling, Shaanxi; Northwest A&F University, 2019.
- [18] 杨昌. 土壤表层结皮裂缝优先流形态特征研究[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2023.
CHANG Y. Study on the morphological characteristics of preferential flow in soil crust cracks [D]. Yangling, Shaanxi; Northwest A&F University, 2019.
- [19] 蔡强国, 陆兆熊. 黄土发育表土结皮过程和微结构分析的试验研究[J]. *应用基础与工程科学学报*, 1996(4):363-370.
CAI Q G, LU Z X. Experimental study of surface crusts process and microfabric analysis on loess soil[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 1996(4):363-370.
- [20] TANG C S, SHI B, LIU C, et al. Experimental investigation of the desiccation cracking behavior of soil layers during drying[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2011, 23(6):873-878.
- [21] LÁZARO R, GASCÓN C, RUBIO C. Runoff and soil loss in biocrusts and physical crusts from the Tabernas Desert (southeast Spain) according to rainfall intensity [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2023, 14:e1171096.
- [22] FENG R K, LIU G H, CHEN Y R, et al. Impacts of rainfall-induced physical crust on near-surface soil pore structure after drying[J]. *Catena*, 2024, e238.
- [23] LIU J X, CHEN L D, WANG B, et al. Effects of physical crust on soil detachment by overland flow in the Loess Plateau region of China[J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2024, 12(1):107-120.
- [24] 唐朝生, 施斌, 崔玉军. 土体干缩裂隙的形成发育过程及机理[J]. *岩土工程学报*, 2018, 40(8):1415-1423.
TANG Z S, SHI B, CUI Y J. Behaviors and mechanisms of desiccation cracking of soils [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, 40(8):1415-1423.
- [25] 黎梭君, 汪时机, 李贤, 等. 三峡库区紫色土干缩裂隙形态几何尺寸效应[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(24):117-126.
LI A J, WANG S J, LI X, et al. Geometrical size effect of desiccation cracks in purple soil in the Three Gorges Reservoir areas[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39(24):117-126.
- [26] GANGOPADHYAY S K, CHANDRAN P, NAYAK D C. Cracking clay soils of middle indo-gangetic Plains of Bihar, India; Characteristics and mineralogy[J]. *Clay Research*, 2020, 39(2):67-76.
- [27] 周红艺, 李辉霞, 叶奇, 等. 华南活动崩岗崩壁土体裂隙发育规律试验研究[J]. *水土保持研究*, 2016, 23(1):338-342.
ZHOU H Y, LI H X, YE Q, et al. Simulation of morphological development of soil cracks in the collapsing hill region of southern China[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2016, 23(1):338-342.