

多级干湿循环对农田土壤干缩裂缝演变特征的影响

张展羽 李文杰 王策 陈于 范世敏

(河海大学南方地区高效灌排与农业水土环境教育部重点实验室, 南京 210098)

摘要: 为研究多级干湿循环条件下农田土壤干缩裂缝的演变特征,在室内试验基础上,结合数字图像处理技术对裂缝几何形态特征进行了统计与定量分析。结果表明,干湿循环后,土壤开裂位置不变,增湿过程中裂缝闭合规律也大致相似,但干燥初期裂缝开裂规律受第1级干湿循环影响明显。第1级干湿循环后,裂缝面积率在含水率为20%~30%时增速降低,约90%的裂缝长度发育集中在含水率大于30%时,连通性指数在含水率大于14%时近似匀速增大。随着干湿循环级数的增加,土壤开裂含水率逐渐减小,而干缩稳定时裂缝网络连通性有所增强,但裂缝网络形态大致相似,裂缝总长也保持稳定。此外,裂缝宽度与土壤开裂程度均呈递减趋势,且各裂缝的宽度逐渐趋向统一,将对裂缝优先流有所遏制,有利于土壤水分的均匀入渗。

关键词: 土壤; 干缩裂缝; 干湿循环; 演变特征; 几何形态特征

中图分类号: S152.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)12-0172-06

Effects of Dry – Wet Cycles on Evolution Characteristics of Farmland Soil Desiccation Cracks

Zhang Zhanyu Li Wenjie Wang Ce Chen Yu Fan Shimin

(Key Laboratory of Efficient Irrigation – Drainage and Agricultural Soil – Water Environment in Southern China, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Aiming to investigate the evolution characteristics of soil desiccation cracks with multiple dry – wet cycles, laboratory tests were carried out to quantitatively analyze the geometric and morphological characteristics of cracks. It indicated that the soil was cracked at the same position during each dry – wet cycle, and behaved a similar crack closure law. The crack ratio was decreased slowly before moisture content was increased to 12%, and decreased rapidly when moisture content reached 18%, while it was remained stable when moisture content was between 12% and 18%. Both the crack length density and connectivity index were decreased quickly after got a critical moisture content, which was reduced with the increase of dry – wet cycles, respectively, and kept constant before that. However, the initial cracking law was greatly affected by the first dry – wet cycle. Since the second cycle, the acceleration of crack ratio was decreased when the moisture content was changed from 30% to 20%, and about 90% of the crack was developed before moisture content reduced to 30%, and the connectivity index was increased at a constant speed when moisture content was larger than 14%. When the dry – wet cycles were increased, it can be concluded that: the crack morphology and length were kept stable; the cracking moisture content was reduced and the connectivity of crack network was enhanced, but there were no obvious differences; the average crack width and stable crack ratio were decreased gradually, and the average width tended to be the same, which weakened the crack preferential. The research result has practical guiding for cracked soil irrigation.

Key words: soil; desiccation crack; dry – wet cycle; evolution characteristics; geometric and morphological characteristics

收稿日期: 2016-05-12 修回日期: 2016-07-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(51579069, 51179050)、江苏省高校优势学科建设工程项目(YS11001)和高等学校学科创新引智计划(111计划)项目(B12032)

作者简介: 张展羽(1957—),男,教授,博士生导师,主要从事灌溉排水理论及技术研究, E-mail: zhanyu@hhu.edu.cn

引言

土壤干缩开裂是一种影响广泛而又普遍的自然现象。在农业上,干缩裂缝为水分蒸发提供新的途径,加剧了干旱危害^[1];造成作物根系撕裂,影响作物对水分及养分的吸收^[2];同时,作为水分与溶质运移的优先通道,使得非饱和带土壤难以截留水分,并引起养分淋溶损失及地下水污染^[3]。因此,针对土壤干缩裂缝展开研究对提高农业灌水效率与作物产量,防治土壤与地下水污染等具有重要的理论与实践意义。

土壤干缩裂缝的开闭是土壤胀缩变形的结果,与绝大部分土壤属性相关。SIMON等^[4]与GRAY等^[5]认为土壤线胀系数(Coefficient of linear extensibility)主要与土壤黏粒含量有关,GRAY等还发现富含水铝英石的土壤胀缩能力最强,而以高岭石/蛭石和绿泥石/伊利石为主要成分的土壤胀缩能力最弱,这支持了GREENE-KELLY等^[6]关于土壤胀缩能力与膨胀性黏土矿物含量正相关的论点。邢旭光等^[7]表明土壤收缩特性受其机械组成影响,与粉粒和黏粒含量正相关。熊东红等^[8]针对不同类型土壤的调查分析结果表明,裂缝发育程度与土壤黏粒含量、容重正相关,而与有机质含量及总孔隙度负相关。张展羽等^[9]也发现作物根系通过限制裂缝拓宽对土壤开裂有一定的抑制作用,而盐分则对裂缝发育起到促进作用。此外,土壤干缩裂缝还受到外部条件的影响。BANDYOPADHYAY等^[10]表明裂缝发育与耕作方式相关,间隔深松能有效抑制土壤开裂,而免耕方式下裂缝宽度、深度与体积均显著增加。SARMAH等^[11]发现灌水方式对裂缝发育也有明显影响,淹水增湿时裂缝宽度变小,而模拟降雨增湿时裂缝宽度变大,但数量减少。唐朝生等^[12-13]研究了不同黏土厚度、温度、聚丙烯纤维等条件下裂缝的发育规律,发现黏土厚度与环境温度的改变均能引起裂缝节点数、条数、维度以及裂缝率等发生变化,而掺和聚丙烯纤维能显著减小土壤开裂程度。

自然条件下,作物在生育期内往往需经历数级干湿循环过程,特别是近年来中国华南、长江中下游等地区旱涝急转现象日渐频繁,且强度逐渐增大^[14-15]。因此,本文针对多级干湿循环条件下土壤干缩裂缝的演变进行室内模拟,对干缩裂缝几何形态特征进行定量分析。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料与处理

试验土壤取自河海大学南方地区高效灌排与农

业水土环境教育部重点实验室试验大田旱地土壤表层(0~10 cm),土壤容重 1.38 g/cm^3 。取土后先过2 mm筛网以去除土中杂质,碾碎后使其自然风干。利用吸管法测得砂粒(粒径大于0.02 mm)、粉粒(粒径0.002~0.02 mm)和黏粒(粒径小于0.002 mm)的质量分数分别为24.83%、32.45%和42.72%,为壤质黏土。

将风干土按原容重回填至尺寸为 $22.0\text{ cm} \times 22.0\text{ cm}$ 的方形有机玻璃容器中,刮平后利用有机玻璃板均匀压实,使土层初始厚度为10.0 mm。试样制备完成后,加水浸泡24 h,并以此为初始状态,置于通风良好的实验室内展开多级干湿循环试验。

试样从饱和状态开始,依次经历脱水干燥与喷水增湿过程,称为经历1级干湿循环。干燥过程中,每隔4 h拍照记录一次,并称取质量,直至12 h内含水率变化小于0.3%,干燥稳定。增湿过程中采用气压喷壶间断性喷水增湿,喷嘴距土表约80 cm,同时喷嘴保持水平;喷水强度设置为 8.26 mm/h ^[16],每次喷水时长3 min,并用塑料薄膜密封以防止蒸发;30 min后,土壤膨胀变形达到稳定,拍照记录并称量,再次喷水,如此重复,直至裂缝完全闭合。

试验共设置4级干湿循环,设3个重复。试验期间,利用空调设备控制室内环境,使之维持相对稳定状态(温度 $(24 \pm 3)\text{ }^\circ\text{C}$,相对湿度 $50\% \pm 10\%$)。为保证裂缝图像质量,固定相机、电子秤位置,确保拍照时试样相对位置不变,同时遮蔽自然光源,关闭相机闪光灯,仅用略高于试样表面的LED灯提供斜射光照。试验装置示意图如图1所示。

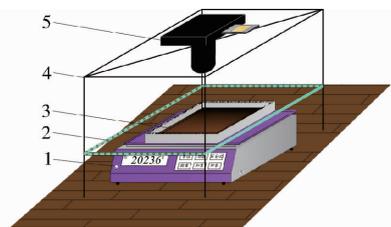


图1 试验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of test device

1. 电子秤 2. LED灯 3. 土壤试样 4. 支架 5. 数码相机

1.2 图像处理与数据提取

为消除容器边壁对裂缝边界的影响,利用Photoshop CS4从原始图像裁剪出试样中央尺寸为 $16\text{ cm} \times 16\text{ cm}$ 的样方作为研究区域,图像分辨率254像素。结合张展羽等^[9]提出的数字图像处理技术,利用Matlab编程实现对研究区域图像的处理,并获取土壤裂缝的几何形态参数及其他相关参数:

(1)含水率 ω :试样水分质量与干土质量的百分比,%。

(2) 裂缝面积率 R_c (%)、裂缝长度密度 L_c (mm/mm^2) 及单裂缝宽度 W_i (mm) 的计算公式分别为

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

$$L_c = \frac{\sum L_i}{A_0} \quad (2)$$

$$W_i = \frac{A_i}{L_i} \quad (3)$$

式中 A_i ——单裂缝 i 的面积, mm^2
 L_i ——单裂缝 i 的骨架长度, mm
 A_0 ——研究区域面积, mm^2

(3) 连通性指数 K : 裂缝交叉点数与裂缝节点数之比, 计算公式为

$$K = \frac{N_{bp}}{N_{bp} + N_{ep}} \quad (4)$$

式中 N_{bp} ——裂缝交叉点数

N_{ep} ——裂缝端点数

(4) 裂缝弯曲度 T 的计算公式为

$$T = \frac{\sum L_i}{\sum [(X_{i1} - X_{i2})^2 + (Y_{i1} - Y_{i2})^2]} \quad (5)$$

式中 (X_{i1}, Y_{i1}) ——单裂缝 i 的起点坐标

(X_{i2}, Y_{i2}) ——单裂缝 i 的终点坐标

2 结果与分析

2.1 裂缝面积率与长度密度随含水率变化

各级干湿循环过程中裂缝面积率与含水率的关系如图2所示。

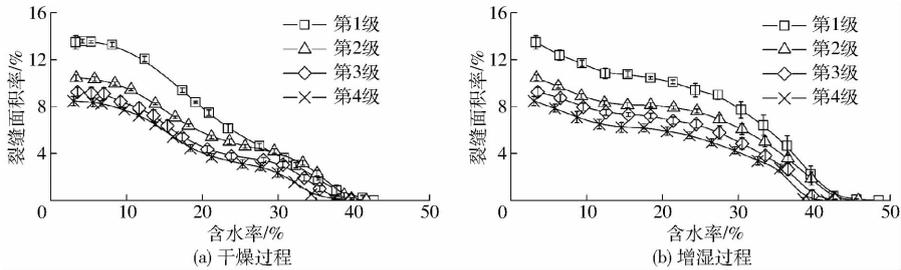


图2 多级干湿循环裂缝面积率与含水率关系曲线

Fig. 2 Relationship curves of crack ratio and moisture content with multiple dry - wet cycles

首次干燥过程中, 裂缝面积率曲线呈“S”形。含水率降低至41%左右时, 试样表面开始随机出现裂缝, 并缓慢发展; 当含水率小于35%时, 裂缝面积率急剧增大, 直至含水率小于5%后稳定在最大值。经历第1级干湿循环后, 裂缝面积率曲线发生变化, 呈“阶梯状”。干燥初期, 土壤沿原有裂缝迅速开裂形成众多细小裂缝, 裂缝面积率迅速增大; 当含水率为20%~30%时, 细小裂缝缓慢延伸并相互连通, 裂缝面积率增速下降; 当含水率小于20%时, 裂缝变宽, 裂缝面积率又迅速增大, 并

在含水率降低至5%左右时达到最大值, 随后保持稳定。

各次增湿过程中, 裂缝面积率遵循相似的变化规律, 可分为3个阶段: 含水率小于12%时, 裂缝面积率由于裂缝宽度收缩而减小, 闭合量约占相应开裂程度的1/5; 当含水率为12%~18%时, 裂缝面积率基本不变; 当含水率大于18%时, 裂缝在长宽两向加速闭合, 面积率迅速减小。

各级干湿循环时裂缝长度密度与含水率的关系如图3所示。

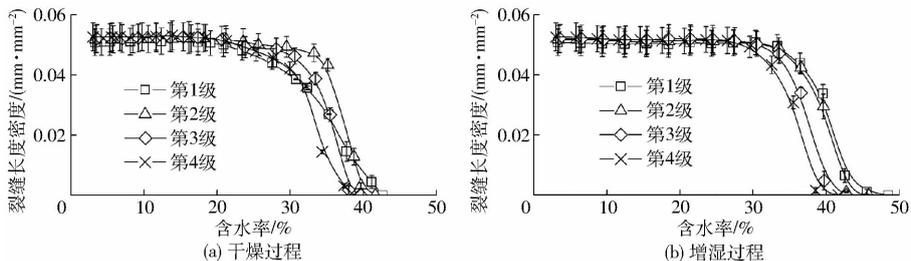


图3 多级干湿循环裂缝长度密度与含水率关系曲线

Fig. 3 Relationship curves of crack length density and moisture content with multiple dry - wet cycles

土壤首次干缩开裂时, 裂缝长度密度自裂缝出现后近乎匀速增长, 直至含水率降到20%左右时达到最大值, 并在随后的干燥过程中保持稳定; 经历第1级干湿循环后, 裂缝长度密度的增大主要集中至

含水率大于30%时, 约90%的裂缝长度发育在该阶段完成; 当含水率小于30%时, 裂缝长度密度缓慢增大, 直至含水率小于20%后稳定在最大值。

各次增湿过程中裂缝长度密度总体变化规律大

致相似。含水率较低时,裂缝长度密度基本不随含水率的增加而发生变化;当含水率超过某临界含水率后,长度密度迅速减小。该临界含水率分别为 33.3%、30.5%、27.5% 与 26.5%,随干湿循环级数的增加而逐渐减小,并趋向于稳定。

对各级干湿循环中干燥稳定时的裂缝稳定面积率 R_{CF} 与稳定长度密度 L_{CF} 进行差异显著性分析,结果如图 4 所示,表明裂缝稳定长度密度差异不明显,但稳定面积率差异显著 ($P < 0.05$),说明随着干湿循环级数的增加,裂缝长度没有明显变化,但土壤开裂程度逐渐减小。这可能是由于对土壤进行增湿时,裂缝两侧土体吸水发生崩解^[17],土壤细颗粒填充进入裂缝,土壤收缩潜力减小,从而导致土壤开裂程度减小。

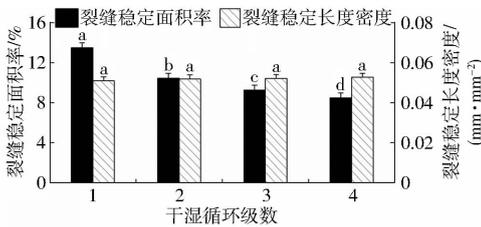


图 4 裂缝稳定面积率及稳定长度密度差异显著性分析
Fig. 4 Difference significance analysis of stable crack ratio and stable crack length density

采用 asymptotic 指数模型对裂缝稳定面积率 R_{CF} 与干湿循环级数 n 的关系进行拟合,拟合方程为 $R_{CF} = 8.0078 + 11.9712 \times 0.4570^n$ ($R^2 = 0.96$)

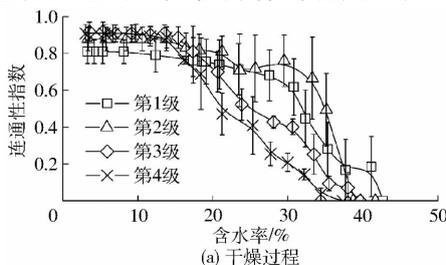
(6)

决定系数 $R^2 = 0.96$,拟合结果良好,说明干湿循环对土壤开裂程度的影响有限,经过若干级循环后将达到稳定。

2.2 裂缝网络连通性随含水率变化

各级干湿循环过程中裂缝连通性指数与含水率的关系如图 5 所示。

干燥过程中裂缝连通性指数的变化反映了裂缝网络的形成过程,受干湿循环影响较大。首次干燥过程中,当含水率大于 30% 时,连通性指数迅速增大,并在含水率为 10% ~ 30% 时增速减小,直至含水率降至 10% 左右后达到最大值并保持稳定。从



第 2 级干湿循环起,裂缝网络形成过程发生变化:土壤先沿原有裂缝开裂,形成众多细小裂缝,这些裂缝往往为原裂缝的一段,在随后的很长一段时间内,裂缝逐渐延伸并相互连通,直至形成完整的裂缝网络,因此连通性指数在含水率大于 14% 时增速较为均匀,这种现象在第 3、4 级干燥过程中尤为明显。

从图 5a 还可以看出,经历第 1 级干湿循环后,干燥稳定时的裂缝稳定连通性指数有较大增幅,而随后的 3 级干湿循环中增长不明显,说明干湿循环对裂缝网络的连通性有一定的促进作用,但主要体现在第 1 级干湿循环。

各次增湿过程中,裂缝连通性指数的变化规律大致相似。含水率较低时,连通性指数稳定在最大值附近,当含水率超过某临界值后,连通性指数迅速减小。该临界含水率分别为 30.3%、12.3%、12.5% 与 11.6%,说明经历第 1 级干湿循环后,土壤增湿时裂缝网络维持稳定的能力大幅下降。

2.3 开裂含水率

将土壤从饱和状态开始,干燥失水过程中土表出现裂缝时所对应的含水率称为开裂含水率 ω_c ,是表征土壤开裂难易程度与水分状态的重要指标。对各级干湿循环过程中土壤试样的开裂含水率进行差异显著性分析,结果如图 6 所示,不同干湿循环级数时土壤开裂含水率差异显著 ($P < 0.05$),说明干湿循环级数越多,开裂含水率越小。对开裂含水率 ω_c 与干湿循环级数 n 的关系进行拟合,拟合方程为

$$\omega_c = 34.0986 + 9.2921 \times 0.7629^n \quad (R^2 = 0.95) \quad (7)$$

决定系数 $R^2 = 0.95$,拟合精度较高,表明干湿循环对土壤开裂含水率的影响有限,若干级循环后开裂含水率将达到稳定。

土壤开裂是与土壤基质吸力密切相关的孔隙水弯液面张力超过土壤最弱点胶结强度,土颗粒发生相对位移在宏观上的体现^[12]。而在同一含水率下,随着干湿循环级数的增加,土壤基质吸力逐渐减小^[18],即基质吸力一致时,干湿循环级数越多,相应的含水率就越低。因此,在土壤最弱点胶结强度接近的情况下,土壤开裂含水率就越低。

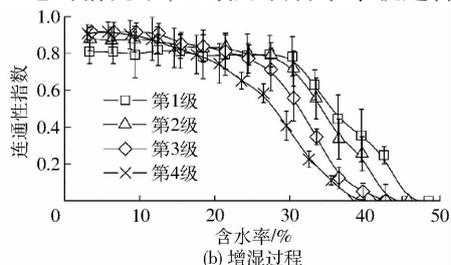


图 5 多级干湿循环连通性指数与含水率关系曲线

Fig. 5 Relationship curves of connectivity index and moisture content with multiple dry - wet cycles

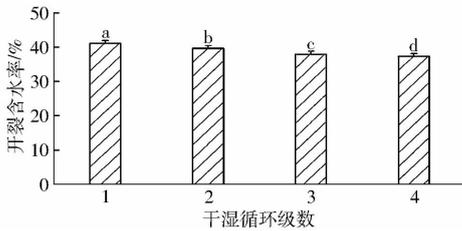


图6 土壤开裂含水率差异显著性分析

Fig. 6 Difference significance analysis of soil cracking moisture content

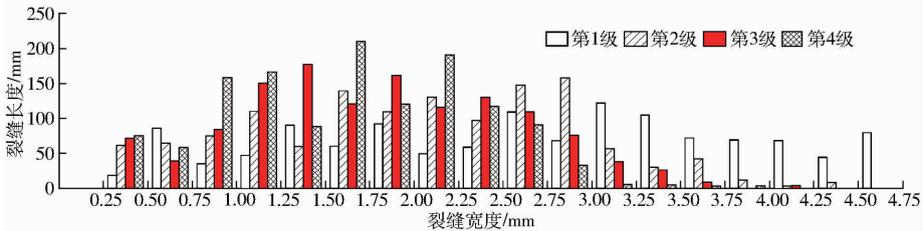


图7 多级干湿循环裂缝稳定宽度分布

Fig. 7 Distribution of stable crack width with multiple dry-wet cycles

首次干燥稳定后,各宽度区间内裂缝长度较均匀,最大宽度大于4.50 mm,且宽度大于3.00 mm的裂缝约为总长的44%;从第2级干湿循环起,裂缝最大宽度递减,宽度大于3.00 mm的裂缝长度也明显减小,而0.75~2.50 mm间的裂缝长度逐渐增大,分别占总长的55%、72%与79%。对裂缝宽度进行离散度统计,如表1所示,裂缝平均宽度、标准差及变异系数均呈递减趋势,说明干湿循环级数越多,裂缝宽度越小,且各裂缝宽度上的差异也逐渐减小,裂缝优先流现象将有所遏制,入渗均匀度也将得到一定的提升。

表1 多级干湿循环裂缝稳定宽度离散度统计

Tab. 1 Dispersion statistics of stable crack width with multiple dry-wet cycles

干湿循环级数	平均宽度/mm	标准差/mm	变异系数/%
1	2.67	1.23	45.9
2	2.03	0.88	43.6
3	1.79	0.76	42.7
4	1.62	0.69	42.4

2.5 土壤干缩裂缝稳定网络形态

各级干湿循环过程中,干燥稳定时试样裂缝网络形态如图8所示。

土壤首次干缩稳定时(图8a),裂缝之间近乎呈

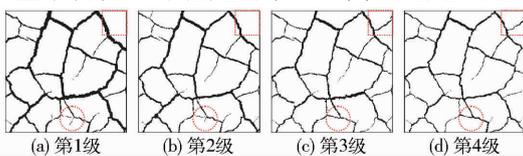


图8 多级干湿循环裂缝稳定网络形态

Fig. 8 Stable crack morphology graphs with multiple dry-wet cycles

2.4 土壤干缩裂缝稳定宽度分布

土壤水分入渗能力与裂缝宽度的平方呈正比^[19],特别是宽裂缝能引起明显的优先流现象^[20],进而降低水分入渗均匀度^[21],因此裂缝宽度分布对土壤水分入渗及水分入渗均匀度有重要影响。以0.25 mm为组距,对各级干湿循环过程中干燥稳定时各裂缝宽度区间内的裂缝长度进行统计,如图7所示。

“T”形垂直交叉而构成完整裂缝网络,试样被裂缝网络分割成若干彼此独立的收缩块区;经历干湿循环后(图8b~8d),土壤继续沿原裂缝处开裂,宽度明显减小,特别是宽度较大的一级裂缝,甚至伴随有部分裂缝的闭合(如图中方框所示)与形成(如图中圆圈所示)。对各级干湿循环过程中干燥稳定时的裂缝稳定弯曲度进行统计,如表2所示,表明干燥稳定时,各级干湿循环裂缝稳定弯曲度差异不明显,裂缝网络形态总体上保持相似。

表2 多级干湿循环裂缝稳定弯曲度

Tab. 2 Stable crack tortuosity with multiple dry-wet cycles

干湿循环级数	重复1	重复2	重复3	平均值
1	1.137	1.135	1.127	1.133 ^a
2	1.139	1.135	1.125	1.133 ^a
3	1.143	1.130	1.129	1.134 ^a
4	1.146	1.133	1.136	1.138 ^a

注:同列数值后相同字母表示差异不显著($P < 0.05$)。

3 结论

(1) 干湿循环对干燥初期土壤开裂规律的影响以第1级干湿循环为主。裂缝面积率在含水率处于20%~30%间时出现增速下降现象;约90%的长度密度增长发生在含水率大于30%时;连通性指数在含水率大于14%时近乎匀速增大。增湿过程中,裂缝遵循相似的闭合规律。裂缝面积率在含水率小于12%时仅小幅减小,并在含水率为12%~18%时基本不变,随后加速减小;长度密度与连通性指数在低含水率状态时保持稳定,但一旦含水率超过某临界值后迅速减小,且该临界含水率随干湿循环级数增

加而逐渐减小。

(2) 干缩稳定时裂缝长度密度不因干湿循环而发生变化, 连通性指数有所增大, 而裂缝稳定面积率与土壤开裂时所对应的含水率随干湿循环级数的增多呈 asymptotic 指数关系递减, 并逐渐趋于稳定。

(3) 干湿循环级数越多, 裂缝最大宽度越小, 裂缝平均宽度呈递减趋势, 且各裂缝宽度上的差异也

逐渐减小, 裂缝优先流现象将有所遏制, 有利于水分均匀入渗。

(4) 随着干湿循环级数的增加, 土壤裂缝位置基本不变, 虽伴随有少量裂缝的闭合与形成, 但裂缝稳定弯曲度差异不明显, 裂缝网络形态总体上保持相似。

参 考 文 献

- ADAMS J E, HANKS R J. Evaporation from soil shrinkage cracks[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1964, 28(2): 609 - 613.
- 田洪艳, 周道玮, 李质馨, 等. 土壤胀缩运动对草原土壤的干扰作用[J]. *草地学报*, 2003, 11(3): 261 - 268.
TIAN Hongyan, ZHOU Daowei, LI Zhixin, et al. Effect of expansion and contraction of grassland soil in Northeastern China[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2003, 11(3): 261 - 268. (in Chinese)
- GREVE A, ANDERSEN M S, ACWORTH R I. Investigations of soil cracking and preferential flow in a weighing lysimeter filled with cracking clay soil[J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 393(1): 105 - 113.
- SIMON J J, OOSTERHUIS L, RENEAU R B J, et al. Comparison of shrink-swell potential of seven ultisols and one alfisol using two different cole techniques[J]. *Soil Science*, 1987, 143(1): 50 - 55
- GRAY C W, ALLBROOK R. Relationships between shrinkage indices and soil properties in some New Zealand soils[J]. *Geoderma*, 2002, 108(3): 287 - 299.
- GREENE-KELLY R. Shrinkage of clay soils: a statistical correlation with other soil properties[J]. *Geoderma*, 1974, 11(4): 243 - 257.
- 邢旭光, 马孝义. 土壤失水过程对土体收缩特性的影响[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(6): 148 - 153.
XING Xuguang, MA Xiaoyi. Effects of soil drying process on soil shrinkage characteristic[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(6): 148 - 153. (in Chinese)
- 熊东红, 杨丹, 李佳佳, 等. 元谋干热河谷区退化坡地土壤裂缝形态发育的影响因子[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(1): 102 - 108.
XIONG Donghong, YANG Dan, LI Jiajia, et al. Influence factors of morphological development of soil cracks in degraded slopes in Yuanmou dry-hot valley region[J]. *Transactions of the CSAE*, 2013, 29(1): 102 - 108. (in Chinese)
- 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.
ZHANG Zhanyu, ZHU Wenyuan, ZHU Lei, et al. Effects of roots and salinity on law of development for farmland soil desiccation crack[J]. *Transactions of the CSAE*, 2014, 30(20): 83 - 89. (in Chinese)
- BANDYOPADHYAY K K, MOHANTY M, PAINULI D K, et al. Influence of tillage practices and nutrient management on crack parameters in a Vertisol of central India[J]. *Soil and Tillage Research*, 2003, 71(2): 133 - 142.
- SARMAH A K, PILLAI-MCGARRY U, MCGARRY D. Repair of the structure of a compacted Vertisol via wet/dry cycles[J]. *Soil and Tillage Research*, 1996, 38(1): 17 - 33.
- 唐朝生, 施斌, 刘春, 等. 影响黏性土表面干缩裂缝结构形态的因素及定量分析[J]. *水利学报*, 2007, 38(10): 1186 - 1193.
TANG Chaosheng, SHI Bin, LIU Chun, et al. Factors affecting the surface cracking in clay due to drying shrinkage[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, 38(10): 1186 - 1193. (in Chinese)
- TANG C, SHI B, LIU C, et al. Influencing factors of geometrical structure of surface shrinkage cracks in clayey soils[J]. *Engineering Geology*, 2008, 101(3): 204 - 217.
- 闪丽洁, 张利平, 陈心池, 等. 长江中下游流域旱涝急转时空演变特征分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2015, 24(12): 2100 - 2107.
SHAN Lijie, ZHANG Liping, CHEN Xinchu, et al. Spatio-temporal evolution characteristics of drought-flood abrupt alternation in the middle and lower reaches of the yangtze river basin[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, 24(12): 2100 - 2107. (in Chinese)
- 何慧, 廖雪萍, 陆虹, 等. 华南地区 1961—2014 年夏季长周期旱涝急转特征[J]. *地理学报*, 2016, 71(1): 130 - 141.
HE Hui, LIAO Xueping, LU Hong, et al. Features of long-cycle drought-flood abrupt alternation in South China during summer in 1961—2014[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(1): 130 - 141. (in Chinese)
- 李文杰, 张展羽, 王策, 等. 干湿循环过程中壤质黏土干缩裂缝的开闭规律[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(8): 126 - 132.
LI Wenjie, ZHANG Zhanyu, WANG Ce, et al. Propagation and closure law of desiccation cracks of loamy clay during cyclic drying-wetting process[J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(8): 126 - 132. (in Chinese)
- 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.
CAO Ling, WANG Zhijian, ZHANG Zhenhua. Experimental research of cracking process of expansive soil under rainfall infiltration and evaporation[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(2): 413 - 421. (in Chinese)

- 5 边轶, 刘石彩, 简相坤. 生物质热解焦油的性质与化学利用研究现状[J]. 生物质化学工程, 2011, 45(2): 51-55.
BIAN Yi, LIU Shicai, JIAN Xiangkun. The state art of view of research progress on characteristics and chemical utilization of tar from biomass pyrolysis[J]. Biomass Chemical Engineering, 2011, 45(2): 51-55. (in Chinese)
- 6 栾艳春. 铁基催化剂对生物质高温蒸气气化影响的实验研究[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2015.
LUAN Yanchun. Experimental study on the influence of iron-based catalyst for high temperature steam gasification of biomass[D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science and Technology, 2015. (in Chinese)
- 7 MARCO Baratieri, ELISA Pieratti, THOMAS Nordgreen, et al. Biomass gasification with dolomite as catalyst in a small fluidized bed[J]. Experimental and Modelling Analysis, 2010, 1(3): 283-291.
- 8 牛永红, 韩枫涛, 陈义胜. 高温蒸气松木颗粒富氢气化试验研究[J]. 农业工程学报, 2016, 32(3): 247-252.
NIU Yonghong, HAN Fengtao, CHEN Yisheng. Experimental study of high-temperature steam gasification of pine particles for hydrogen-rich gas[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(3): 247-252. (in Chinese)
- 9 BALDWIN R M, MAGRINI-BAIR K A, NIMLOS M R, et al. Current research on thermochemical conversion of biomass at the National Renewable Energy Laboratory[J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2012, 115-116: 320-329.
- 10 SONCINI R M, MEANS N C, WEILAND N T. Co-pyrolysis of low rank coals and biomass: product distributions[J]. Fuel, 2013, 112(3): 74-82.
- 11 IRFAN M F, USMAN M R, KUSAKABE K. Coal gasification in CO₂ atmosphere and its kinetics since 1948: a brief review[J]. Energy, 2011, 36(1): 12-40.
- 12 GUIZANI N, AL-SAIDI G S, RAHMAN M S, et al. State diagram of dates: glass transition, freezing curve and maximal-freeze-concentration condition[J]. Journal of Food Engineering, 2010, 99(1): 92-97.
- 13 李琳娜. 生物质高温水蒸气气化制备富氢燃气的研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2011.
LI Linna. Preparation of hydrogen rich gas high temperature steam gasification biomass research [D]. Beijing: China Academy of Forestry, 2011. (in Chinese)
- 14 涂军令. 木屑/木屑炭高温水蒸气气化制备合成气研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2012.
TU Junling. Sawdust/sawdust charcoal high temperature steam gasification and the preparation of syngas [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2012. (in Chinese)
- 15 牛永红, 马黎军, 陈义胜, 等. 下吸式气化炉木屑高温蒸气气化制取富 H₂ 试验[J]. 农业机械学报, 2015, 46(4): 189-193.
NIU Yonghong, MA Lijun, CHEN Yisheng, et al. Performance of downdraft gasifier for hydrogen rich gas by high temperature steam gasification of biomass[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(4): 189-193. (in Chinese)
- 16 李斌, 韩旭, 陈义龙, 等. 钙基催化吸收剂对玉米秸秆热解气化制氢特性的影响[J]. 农业机械学报, 2016, 47(8): 216-220.
LI Bin, HAN Xu, CHEN Yilong, et al. Effects of calcium-based catalyst/absorbent on hydrogen production of corn stalk pyrolysis-gasification[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(8): 216-220. (in Chinese)
- 17 贾立. 生物质热解气白云石催化重整的实验研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
JIA Li. An experimental research on reforming pyrolyzation gas with dolomite[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007. (in Chinese)
- 18 张寰. 秸秆类生物质热解动力学及碳纤维制备实验研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2014.
ZHANG Huan. Study of thermal properties of biomass tar using straw and manufacture technology of carbon fiber [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2014. (in Chinese)
- 19 秦岭. 生物质热解动力学及反应机理的研究[D]. 北京: 清华大学, 2011.
QIN Ling. Study on biomass pyrolysis kinetics and mechanisms[D]. Beijing: Tsinghua University, 2011. (in Chinese)
- 20 RAHMAN M S. State diagram of foods: its potential use in food processing and product stability[J]. Trends in Food Science and Technology, 2006, 17(3): 129-141.

(上接第 177 页)

- 18 刘奉银, 张昭, 周冬, 等. 密度和干湿循环对黄土土-水特征曲线的影响[J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊 2): 132-136.
LIU Fengyin, ZHANG Zhao, ZHOU Dong, et al. Effects of initial density and drying-wetting cycle on soil water characteristic curve of unsaturated loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(Supp. 2): 132-136. (in Chinese)
- 19 孙役, 王志志, 陈兴华. 降雨条件下的单裂隙非饱和和渗流实验研究[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 1999, 39(11): 14-17.
SUN Yi, WANG Enzhi, CHEN Xinghua. Experiment studies for unsaturated flow in a single fracture under rainfall[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 1999, 39(11): 14-17. (in Chinese)
- 20 张展羽, 陈于, 孔莉莉, 等. 土壤干缩裂缝几何特征对入渗的影响[J]. 农业机械学报, 2015, 46(10): 192-197.
ZHANG Zhanyu, CHEN Yu, KONG Lili, et al. Impacts of desiccation crack geometric characteristics on infiltration in soil[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(10): 192-197. (in Chinese)
- 21 陈玖泓, 朱磊, 田军仓. 农田裂隙分布及其对土壤水分运动影响试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(2): 1-6.
CHEN Jiuhong, ZHU Lei, TIAN Juncang. Farmland soil-crack distribution and its impact on soil water movement[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2016, 35(2): 1-6. (in Chinese)