

doi:10.3799/dqkx.2014.139

# 土壤干缩裂缝网络几何特征

张展羽<sup>1,2</sup>, 王 策<sup>1,2</sup>, 朱成立<sup>1,2</sup>, 朱文渊<sup>1,2</sup>, 吴春辉<sup>1,2</sup>

1. 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, 江苏南京 210098

2. 河海大学水利水电学院, 江苏南京 210098

**摘要:** 通过室内试验研究了土壤干缩裂缝发育规律, 采用数字图像处理技术与 AutoCAD 测量功能, 分析了不同含水率下土壤裂缝网络几何形态特征。结果表明: 土壤含水率达到 43% 时出现裂缝, 裂缝骨架长度、周长和面积分别在含水率达到 23%、23%、7% 时趋于稳定, 裂缝平均宽度的发育经历了波动增长、线性增长和稳定 3 个阶段, 并在含水率达到 7% 时保持不变; 裂缝条数与节点数之比随含水率降低而减小, 并最终保持在 1.67, 此结果与收缩块区分散度和裂缝交叉角度分布规律共同表明, 裂缝网络形态呈方形正交网络分布趋势, 且处于方型网络与“T”型正交网络之间; 裂缝平均弯曲度随含水率减小, 由 1.06 减小至 1.02 并保持恒定, 揭示了裂缝整体弯曲程度与不同时期裂缝弯曲的变化规律。

**关键词:** 土壤; 裂缝; 网络; 几何特征; 土壤测试。

中图分类号: S152.4

文章编号: 1000-2383(2014)10-1465-08

收稿日期: 2014-02-23

## Geometric Characteristics of Shrinkage Crack Network in Soil

Zhang Zhanyu<sup>1,2</sup>, Wang Ce<sup>1,2</sup>, Zhu Chengli<sup>1,2</sup>, Zhu Wenyuan<sup>1,2</sup>, Wu Chunhui<sup>1,2</sup>

1. Key Laboratory of Efficient Irrigation-Drainage and Agricultural Soil-Water Environment in Southern China of Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China

2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China

**Abstract:** An indoor experiment was conducted to investigate the development law of the shrinkage crack network in soil in this study. By application of digital image processing technology and the measurement functions of AutoCAD, geometric characteristics of shrinkage crack network were quantitatively analyzed under different moisture contents. The results show that the crack first was initiated when the moisture content was 43%. The length of crack skeleton and crack perimeter began to stabilize once the moisture content was close to 23%, and so did the crack ratio at the moisture content of 7%. The average width of the crack developed in three stages, namely, fluctuation growth, linear growth and stabilization, which reached a stable value as the moisture content came to 7%. The ratio of the crack fragments and intersections decreased as the moisture contents became lower and remained stable at 1.67 ultimately, which, together with dispersity of the aggregate and frequency distribution of intersection angles, revealed the square network distribution trend of the crack network. The mean tortuosity of the crack was reduced from 1.06 to 1.02 with the moisture content dropped and stabilized at 1.02, which indicates the whole tortuosity of the cracks and the variation law of the crack tortuosity during different periods.

**Key words:** soil; crack; network; geometric characterization; soil testing.

土壤裂缝在自然界中十分常见,是关系到土壤性状、作物生长及水分溶质运输的一个复杂过程(Chertkov, 2012)。在农业上,土壤裂缝在一定程度上会影响植株的发育,并加速土壤水分的蒸发(Adams and Hanks, 1964; Sharma and Verma, 1977)。

灌溉或降雨过后,土壤裂缝为水流的下渗提供优先通道,影响根系对水分的充分吸收并造成地下水的污染(熊东红等, 2006; Allaire *et al.*, 2009; Li and Zhang, 2010; 张展羽等, 2013)。土壤裂缝几何形态的分析研究,可定量描述优先流,对于深入认识入渗补

给过程以及地下水污染分析具有重要意义(齐登红等,2007)。

近年来,国内外多名研究者围绕土壤裂缝几何特征定量描述开展了大量工作。Velde(1999)对多个地区不同类型的土壤裂缝进行拍照取样,运用裂缝骨架分析与裂缝面积分析两种分析思路对裂缝网络结构特征进行评价;Horgan and Young(2000)提出了基于裂缝几何特征的二维模型模拟裂缝干缩失水开裂过程,模型采用描述裂缝开展的多个参数,诸如裂缝随机走向、块区大小临界值以及裂缝间既定距离 3 个参数生成裂缝网络;Vogel *et al.*(2005a, 2005b)引用拓扑学的概念和方法,提出了以裂缝面积密度、长度密度、欧拉数、裂缝分支角度为基本参数的裂缝形态特征体系;Baer *et al.*(2009)基于图像处理 and 分形理论,提出了土壤表面裂缝面积、裂缝边缘分形维数、块分形维数和土壤表面裂缝异质性等参数;Novák(1999)建立了一套较为系统的裂缝特征指标,包括裂缝裂隙度、裂缝地表裂隙度、裂缝比内表面积等一系列指标;Tang *et al.*(2011)通过室内试验对土壤裂缝水分蒸发、体积收缩、试样表面裂缝的产生和发展过程进行记录并采用图像分析处理系统对裂缝的几何形态特点进行定量描述。上述研究大部分只对最终状态下的裂缝几何特征进行定量描述,而对不同含水率下的裂缝网络几何形态特征鲜有涉及。

本文对土壤裂缝进行模拟实验,定量分析不同含水率下表面土壤裂缝网络几何形态特征,包括裂缝的基本几何特征、裂缝网络形态特征与裂缝弯曲度特征。

## 1 材料与方 法

土壤试样取自河海大学高效灌排与农业水土环境教育部重点实验室稻麦轮作试验大田,土壤以黄褐土为主,质地隶属粘土。采样地区地处中国东南地带(31°86'N,118°60'E),隶属亚热带季风气候,年均降雨量 1 200 mm,年均蒸发量 900 mm,年平均气温 15.7 °C,年均日照总时数 2 213 h。

土样用 2 mm 筛网进行过筛,按原容重填到直径为 24.1 cm 的有机玻璃容器里面,均匀加水至饱和状态,放在温度和相对湿度相对恒定的实验室内(温度为 20±2 °C,相对湿度为 45%±10%),使土壤试样在自然状态下干燥,试样土壤物理属性如表 1 所示。

试样干燥过程中,记录玻璃容器的净重、各时刻土壤试样和玻璃容器的总重、土壤试样裂缝图像和干燥累积时间。试样的裂缝发展图像采用固定在玻璃容器上方的数码相机拍照来记录,干燥累积时间采用数码相机自带的拍摄时间来进行计算,拍照之前对相机进行时间复位调整并与北京时间校准,每天拍照和记录数据 3 次,早中晚各 1 次,在试样与容器总重量 2 次重量差不大于 0.1%后停止记录。

## 2 数据处 理

### 2.1 图像处 理

(1)图像截取:将所得图像导入 Photoshop 中,按照比例将直径为 24.1 cm 的圆形试样图像从中心截取 16 cm×16 cm 的方形图像,消除容器边缘对裂缝的影响(图 1b)。

(2)二值分割:由于裂缝区与非裂缝区具有较高的对比度,故采用二值分割的方法,分别对源图像进行灰度化、二值化和杂点去除(图 1c),将裂缝与其他区域分割,有目的地删去非裂缝区域的冗余信息,降低数据统计的复杂程度(熊承仁等,2007)。

(3)矢量化:将二值化图像导入 CorelDraw,用中心线描摹和轮廓线描摹等功能将二值图像转化为矢量图形(图 1d,1e),输出为 .dwg 文件导入 AutoCAD,利用其测量功能获得裂缝试样的各种参数。

### 2.2 参数测量和数据计算

试验记录数据和图像测量参数汇总如下:

(1)第  $i$  个观测点下土壤自然干燥累积时间  $t$  (min)。

(2)第  $i$  个观测点下土壤重量含水率  $\theta$ (%) 和第  $i-1$  时刻到第  $i$  时刻之间的土壤水分蒸发强度  $E$  (mm/min)。

表 1 土壤试样物理性质

Table 1 Physical properties of tested soil

试样土壤种类	颗粒粒径分布 (%)			容重 (g·cm <sup>-3</sup> )	土壤质地
	>0.02 mm	0.02~0.002 mm	<0.000 2 mm		
水稻土	31.29	23.49	45.23	1.56	粘土

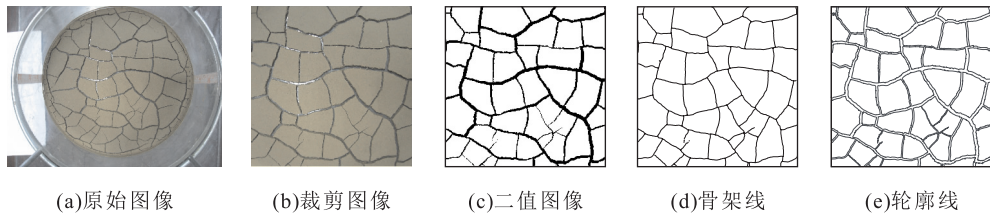


图 1 裂缝图像处理过程

Fig.1 Crack image processing

(3)第  $i$  个观测点土壤裂缝面积率  $R_s(\%)$ 、土壤裂缝总周长  $C(\text{cm})$ 、土壤裂缝骨架总长度  $L(\text{cm})$  和裂缝平均宽度  $W(\text{mm})$ 。

(4)不同观测点裂缝条数  $S$  和裂缝交叉点个数  $I$ ，裂缝最终状态下土壤每个收缩块区面积  $A(\text{cm}^2)$  和周长  $P(\text{cm})$ 。

(5)第  $i$  个观测点下，土壤裂缝平面内所有交叉角度  $\alpha(^{\circ})$ 。

滞于一级裂缝的发展,通常生成于 2 条平行或交角较小的一级裂缝之间(图 2d)。当两条一级裂缝夹角较大时,夹在中间的一级裂缝通常以一定的弧度开展,并且开展后首末两端分别垂直于两条一级裂缝,呈现出弧形骨架。

裂缝骨架结构稳定后,新裂缝不再产生,裂缝的长度保持不变,试样失水干燥引起基质区域的进一步收缩和裂缝宽度的增大,比较图 2f 及之后图像可以看出,裂缝宽度和面积增大,但骨架长度基本保持不变。最终裂缝形态结构保持恒定,如图 2l 所示。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 土壤裂缝开展视觉分析

土壤裂缝发育过程中,将最初开展的裂缝定义为“一级裂缝”。一级裂缝发展的位置与走向具有随机性,这与试验初始的处理条件相关联。随着一级裂缝的发展,其宽度加大,长度变长,并且与其相邻的裂缝相交之后终止。

在一级裂缝成型之时,垂直于一级裂缝之上生成了长度较短的裂缝,将其称为“二级裂缝”。二级裂缝发展较快、长度较短,平均宽度小于一级裂缝,后

#### 3.2 土壤水分蒸发过程

土壤含水率与蒸发强度对时间的关系如图 3 所示。在土壤初始干燥过程中,含水率在 15%之前基本呈线性下降,对应的土壤水分蒸发强度在 1.2 mm/min 左右呈振动趋势微弱地减小,在此时土壤收缩处于正常收缩阶段,土壤含水率有规律地呈线性减小;土壤含水率达到 15%时,其变化趋势开始变缓,试样进入残余收缩阶段,此时土壤收缩明显减缓,蒸发强度呈线性迅速降低,水分由结构孔隙中逸出。最终,土壤含水率保持 3.8%不变,土壤水分蒸发强度

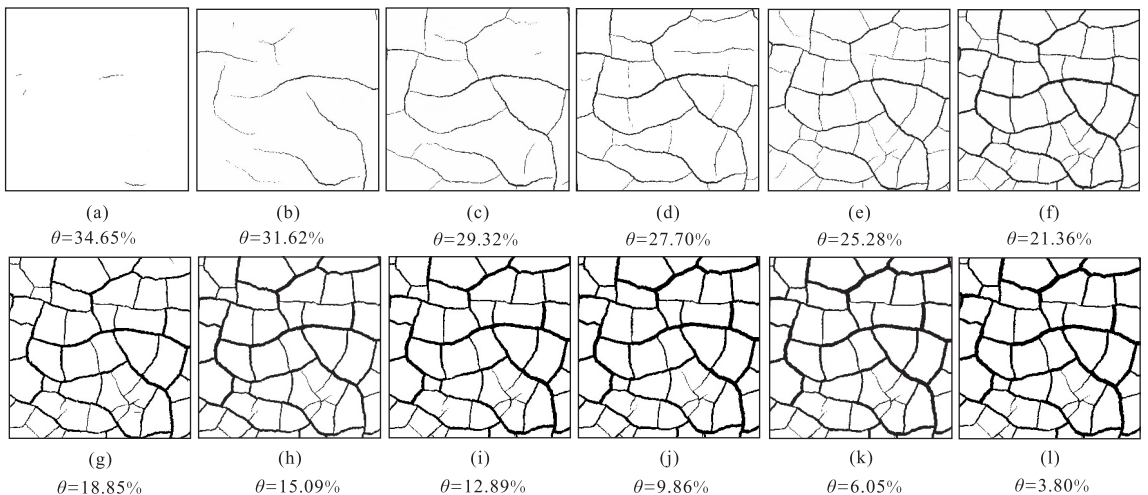


图 2 土壤裂缝二值图像系列

Fig.2 Series of soil cracks in binary image

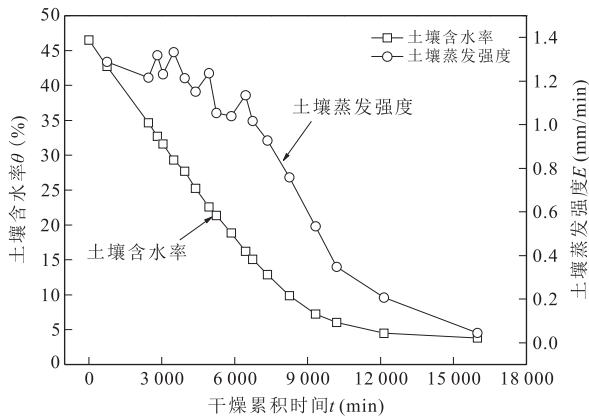


图 3 土壤含水率、蒸发强度随累积时间变化规律

Fig.3 Changes in water content and evaporation rate of soil in relation to the accumulated drying time

接近于零,试样干燥收缩过程结束。

### 3.3 土壤裂缝基本几何特性

裂缝基本几何形态特征的统计对于前期分析裂缝网络特性和后期定量计算土壤裂缝下的水流入渗过程具有重要意义(Wang *et al.*, 2013).土壤裂缝为优先流提供通道,在研究裂缝土壤的机械特征与渗流特性之前,首先要对裂缝的几何特征与网络特性进行描述,构建相应的模型,采用示踪等技术对土壤优先流进行描述和定量计算(Allaire *et al.*, 2009; Ma *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2013).本文主要采用不同含水率下土壤表面裂缝面积率、裂缝骨架总长度、裂缝周长、裂缝平均宽度等整体指标来表征其基本几何形态,并在此基础上又选择裂缝条数与节点数之比、收缩块区分散度频次分布、裂缝交叉角度分布、裂缝弯曲度等一系列指标来具体表征二维裂缝网络特征。

土壤开裂过程中,裂缝的面积、骨架长度、周长及平均宽度是表征裂缝网络特征最为直观的 4 个指标,基于上述参数并结合裂缝深度数据可获得裂缝容积率和内侧表面积,为定量计算开裂土壤的持水量提供数据(Novák, 1999),并可建立优先流裂缝内侧水平入渗模型和水分重分布后的土壤吸水膨胀闭合模型(Novák *et al.*, 2000).土壤试样干燥过程中表面裂缝面积率与重量含水率的曲线关系如图 4 所示,整个曲线呈“S”形.土壤试样在含水率  $\theta = 43\%$  开始有局部开裂的迹象,并在  $\theta = 35\%$  之前缓慢开裂.当含水率减小至  $35\%$  左右时,开裂速度急剧增大并呈线性增长.之后试样继续失水干燥,直至含水率达到  $15\%$  时,土壤进入残余收缩阶段,裂缝面积率增长随之变缓;最后土壤含水率达到  $7\%$ ,裂缝面积

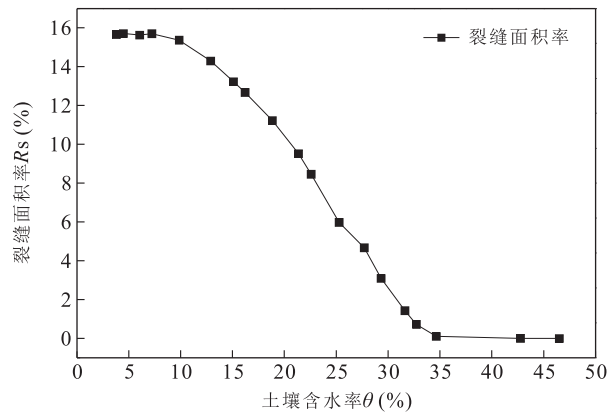


图 4 裂缝面积率与土壤含水率关系曲线

Fig.4 Changes in crack ratio in relation to water content

率保持不变,土壤进入零收缩阶段。

裂缝骨架长度与裂缝周长的初期开展规律与面积率基本相同(图 5),初始开展于  $\theta = 43\%$  并加速于  $\theta = 35\%$ ,不同的是裂缝骨架长度与周长的发展达到含水率为  $23\%$  时停止.随着含水率的进一步减少,裂缝骨架长度保持不变,这是因为一级和二级裂缝的中心骨架已经基本形成.裂缝的周长在含水率达到  $\theta = 23\%$  之后有明显下降趋势,其原因是在裂缝骨架稳定之后,裂缝趋向于宽度方向上的加宽,基质区域进一步收缩导致收缩块区的周长减小,而裂缝与收缩块区毗邻,其周长等同,故而裂缝周长有减小趋势.在裂缝开展的整个过程中,裂缝周长与中心线长度的比值在  $1.85 \sim 2.35$  的范围之内,且基本上呈线性由  $2.35$  减小至  $1.85$ .

裂缝宽度的增加能明显加速裂缝内侧土壤水分的蒸发(Adams and Hanks, 1964).灌溉或降水过后,裂缝加速土壤水分的下渗,而裂缝宽度是影响其下渗速率的重要因素(Liu *et al.*, 2003).裂缝平均宽度的发展可分为 3 个阶段(图 5):含水率从  $43\%$  降至  $23\%$ ,裂缝平均宽度呈波动增长阶段;含水率在  $23\%$  和  $10\%$  之间,平均宽度呈线性增长阶段;含水率小于  $10\%$ ,平均宽度呈稳定阶段.含水率在  $23\%$  之前,裂缝平均宽度波动较大,多存在阶梯状曲线且大多分布在二级裂缝开展时期.在一级裂缝宽度未稳定之前,二级裂缝的发展对整体裂缝平均宽度造成拖拽作用;含水率小于在  $23\%$  之后裂缝中心骨架稳定,平均宽度随含水率呈线性增长,直至含水率达到  $10\%$  后保持恒定。

### 3.4 土壤干缩裂缝网络特征

**3.4.1 裂缝交叉角度分布** 裂缝交叉角度是表征裂缝结构形态的一个重要指标,其分布特点涉及到

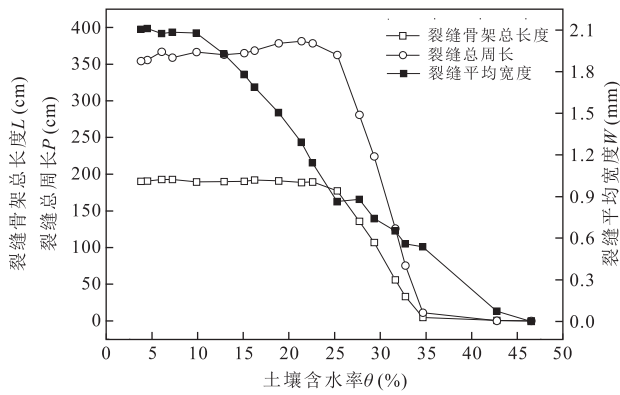


图 5 裂缝骨架总长度、裂缝总周长、裂缝平均宽度与含水率关系曲线

Fig.5 Changes in the total length of the crack skeleton, crack perimeter and average width of the crack in relation to the water content upon drying

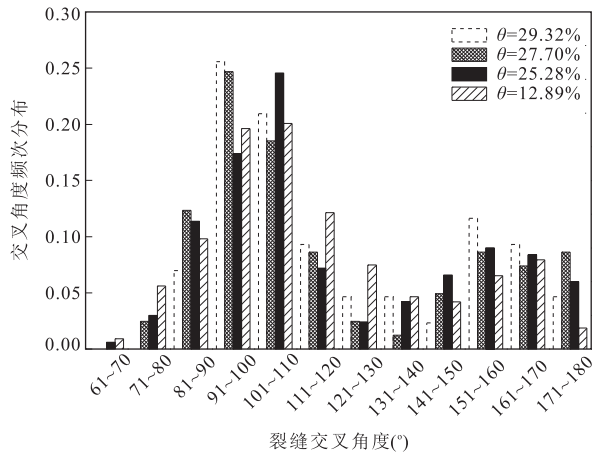


图 6 4 个典型阶段裂缝交叉角度频次分布

Fig.6 Frequency distribution of intersection angles in four typical stages

裂缝发育的物理过程.不同类型的交叉阐释了土壤内部应力和能量的分布规律(Vogel *et al.*, 2005b), 并从侧面反映了裂缝网络的形态特征.本文对 4 个不同含水率  $\theta = 29.32\%$ 、 $27.70\%$ 、 $25.28\%$  和  $12.89\%$  下的裂缝交叉角度频次分布进行了统计分析.4 个含水率所分别对应的代表性阶段为:一级裂缝骨架开展完成;二级裂缝开始开展;二级裂缝大量开展;一、二级裂缝骨架基本稳定.在确定角度频次分布时,将角度区间选定为  $10^\circ$ , 从  $0^\circ \sim 180^\circ$  共分成 18 个区间, 分别统计每个区间范围内的角度频次.

统计结果如图 6 所示,裂缝交叉角度全部分布在  $61^\circ \sim 180^\circ$  之间,4 个阶段下的角度频次分布均存在双峰值,峰值分别在  $91^\circ \sim 110^\circ$  和  $151^\circ \sim 170^\circ$  之间,此结果与观察资料中裂缝多呈不规则“T”形交

表 2 规则图形分散度

Table 2 Dispersity of the regular geometrical patterns

形状	正三角	矩形	黄金矩形	正方形
分散度	20.78	18.00	16.94	16.00
形状	正五边形	正六边形	正八边形	圆形
分散度	14.52	13.86	13.32	12.57

注:矩形长宽比为 2 : 1,黄金矩形长宽比约为 1.618.

叉相一致.另外,4 个不同阶段中峰值的位置仅发生细微的变化,并无明显的波动.

**3.4.2 收缩块区分散度** 几何图形的分散度定义为:

$$Dispersity = \frac{P^2}{A}, \quad (1)$$

它是衡量图形面积形状指标的一种测度,几何形状越复杂、越不规则,其分散度就越大.式中: $P$  为收缩块区周长; $A$  为收缩块区面积.在所有图形中,圆形的分散度为  $4\pi$ , 在所有图形中其分散度最小,表 2 中列举了简单多边形的分散度值作为对照.

本文对裂缝开展稳定状态下( $\theta = 3.8\%$ )的各个收缩块区的分散度进行统计,并得出其频次分布规律如图 7 所示:收缩块区分散度最高频次分布在 16 ~ 17 之间,之后随着分散度增高,频次逐渐减小;收缩块区分散度频次的 68% 分布在 16 ~ 20 之间,说明其复杂程度或规则程度最接近方形.

**3.4.3 裂缝条数与节点数之比** 裂缝的网络特征由土壤的类型、密度、干燥环境以及边界条件等因素所决定.在裂缝网络特征分析过程中,可以采用裂缝中心线骨架的网络特点来描述裂缝的发展情况(Velde, 1999).笔者把裂缝网络骨架看成是由一系列不规则曲线相互交织而成的,在干缩土壤表面,裂

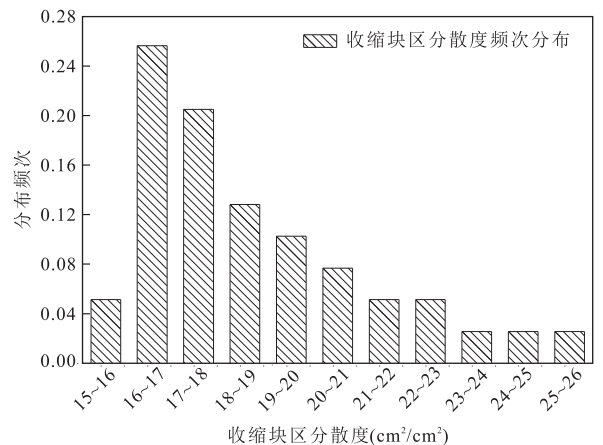


图 7 收缩块区分散度频次分布

Fig.7 The distribution frequency of the aggregates dispersity

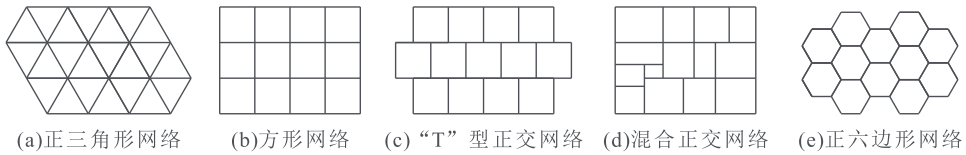


图 8 5 种规则网络实例

Fig.8 Examples of five types of regular geometrical network pattern

缝网络闭合图形通常呈不规则形状,本文将两节点间裂缝骨架线用线性来表示,并以若干种网络形态为参照探求裂缝网络的结构特征。

网络节点个数、裂缝线段条数和单条裂缝长度对于平面内裂缝的总长度有重要的影响,并且可以定义整个网络的形态特征.不同规则形态网络中的线段条数与节点个数  $S/I$  为固定值,例如平面方形网络中  $\lim_{n \rightarrow \infty} S/I=2$  (图 8b),其中  $n$  为平面网络中正方形个数,同理可得平面正三角形网络(图 8a)、“T”型正交网络(图 8c)与平面正六边形网络(图 8e)  $S/I$  的极限值分别为 3、1.5 和 1.5,混合正交网络极限值处于 1.5~2.0 之间(图 8d).笔者采用相同方法对裂缝条数与节点个数进行统计(表 3)。

裂缝开展过程中,随着含水率  $\theta$  的减小,其  $S/I$  值逐渐由 3.25 减小至 1.67 左右并保持稳定,且整个过程  $S/I$  值保持在 1.5~3.3 的范围之内(图 9).当  $27.7\% \leq \theta \leq 31.6\%$  时,  $S/I \in 1.8 \sim 3.3$ ,裂缝网络节点形式介于三角形网络与方形网络之间;当  $\theta \leq 22.6\%$  之后,  $S/I \approx 1.67 \in 1.5 \sim 2.0$ ,此时裂缝的骨架基本形成,裂缝条数与节点数趋于稳定.由于裂缝交

表 3 裂缝条数与节点数统计以及二者的比值

Table 3 Numbers of the crack fragments and intersections and their ratio

含水率( $\theta$ )	裂缝条数( $S$ )	节点数( $I$ )	比值( $S/I$ )
31.62	13	4	3.250
29.32	38	17	2.235
27.70	62	33	1.879
25.28	99	57	1.737
22.58	111	67	1.657
21.36	114	69	1.652
18.85	118	70	1.686
16.22	114	69	1.652
15.09	115	69	1.667
12.89	117	70	1.671
9.86	116	69	1.681
7.23	116	69	1.681
6.05	115	70	1.643
4.48	115	69	1.667
3.80	116	7	1.657

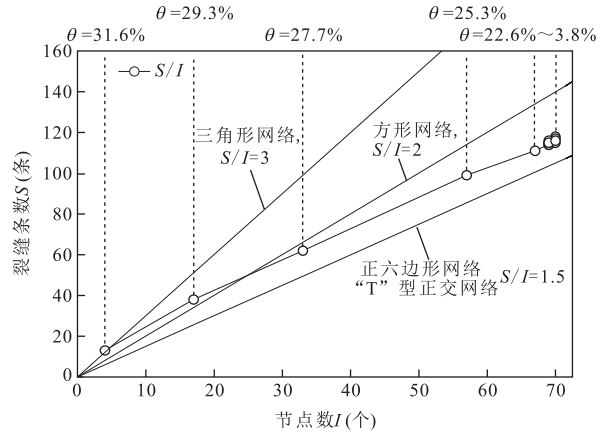


图 9 不同含水率下裂缝条数与网络节点数比值

Fig.9 Relations between the numbers of segments and intersections in the crack networks under different water content

叉角度多呈“T”形分布,且块区复杂度最接近方形,可推断裂缝网络骨架形态处于方形网络与“T”型正交网络之间,且趋近于不规则正交网络.根据这种裂缝条数与节点数之比所得结论,本文采用平面内经拉伸扭转的不同大小的曲边矩形网络建立土壤裂缝最终网络形态模型。

**3.4.4 裂缝平均弯曲度** 土壤裂缝的弯曲度是影响土壤水利特性的一个重要的指标之一,它决定了二维和三维空间内水流在裂缝内运动的实际长度,弯曲度的产生是裂缝合并、分歧与弯曲变形的结果(Chertkov and Ravina, 1999).将裂缝网络的平均弯曲度定义为平面内裂缝中心线总长度与所有相邻两节点间直线距离总和的比值.根据定义,弯曲度的计算公式如下:

$$T = \frac{L_a}{\sum_{i \neq j} \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}}, \quad (2)$$

式中:  $T$  为裂缝平均弯曲度;  $L_a$  为裂缝实际总长度 (cm);  $(x_i, y_i)$  和  $(x_j, y_j)$  分别为相邻两交叉点坐标.对尚未形成回路闭合状态或独立于裂缝网络的裂缝,将其自由端看成是交叉点,此时的  $(x_i, y_i)$  和  $(x_j, y_j)$  分别为非闭合裂缝节点和端点坐标,或为

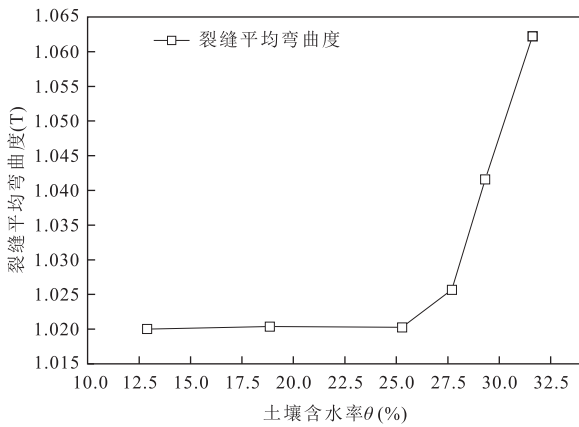


图 10 典型阶段裂缝平均弯曲度

Fig.10 Mean tortuosity of the crack in typical stages

独立裂缝两端点坐标。

结果显示,裂缝平均弯曲度随着含水率的降低而减小,直至最终裂缝网络骨架确定之后稳定在  $T=1.02$  附近(图 10)。初始开裂随机性较大,一级裂缝的开展具有较大的弯曲度,其裂缝的弯曲度受控于开裂方向曲率的大小;二级裂缝出现在 2 个一级裂缝之间,并且以垂直于一级裂缝的方向发展,交汇至一级裂缝之后停止,其长度与弯曲度相对一级裂缝较小,二级裂缝的大量产生降低了整个裂缝骨架网络的平均弯曲度。

## 4 结论

本文通过计算机数字图像处理技术和 AutoCAD 测量统计功能,对土壤在不同含水率下表面干缩裂缝基本几何特征与裂缝网络结构特征进行定量分析,得出如下结论:

(1) 裂缝基本几何特征,包括裂缝面积、骨架长度和周长分别在含水率达到 23%、23%、7% 时趋于稳定。裂缝骨架长度和周长在含水率小于 35% 之后加速开展,在含水率小于 23% 之后保持不变,裂缝周长与骨架长度的比值在整个过程中分布在 1.85~2.35 范围内,且随含水率的减小呈持续降低的趋势;裂缝面积率同样在含水率小于 35% 之后迅速增大,但在含水率小于 7% 后停止增加,裂缝宽度发展经历波动增长、线性增长与稳定 3 个阶段,在含水率小于 10% 之后停止增长。

(2) 裂缝典型阶段的交叉角度分布存在双峰值,分别在  $90^\circ$  附近和  $160^\circ$  附近;收缩块区分散度最高频次与方形分散度值最为接近;裂缝条数与节点数

之比  $S/I$  随含水率减小而降低最终稳定在 1.67,裂缝最终网络形态分布在方形网络与“T”型正交网络之间;裂缝平均弯曲度随着含水率的降低而减小并稳定在  $T=1.02$  附近,初始裂缝的弯曲度较后期生成的裂缝弯曲度大。

## References

- Adams, J. E., Hanks, R. J., 1964. Evaporation from Soil Shrinkage Cracks. *Soil Science Society of America Journal*, 28 (2): 281 - 284. doi: 10.2136/sssaj1964.03615995002800020043x
- Allaire, S. E., Roulier, S., Cessna, A. J., 2009. Quantifying Preferential Flow in Soils: A Review of Different Techniques. *Journal of Hydrology*, 378(1-2): 179 - 204. doi:10.1016/j.jhydrol.2009.08.013
- Baer, J. U., Kent, T. F., Anderson, S. H., 2009. Image Analysis and Fractal Geometry to Characterize Soil Desiccation Cracks. *Geoderma*, 154(1-2): 153 - 163. doi:10.1016/j.geoderma.2009.10.008
- Chertkov, V. Y., 2012. An Integrated Approach to Soil Structure, Shrinkage, and Cracking in Samples and Layers. *Geoderma*, 173 - 174: 258 - 273. doi: 10.1016/j.geoderma.2012.01.010
- Chertkov, V. Y., Ravina, I., 1999. Tortuosity of Crack Networks in Swelling Clay Soils. *Soil Science Society of America Journal*, 63 (6): 1523 - 1530. doi: 0.2136/sssaj1999.6361523x
- Horgan, G. W., Young, I. M., 2000. An Empirical Stochastic Model for the Geometry of Two-Dimensional Crack Growth in Soil (with Discussion). *Geoderma*, 96 (4): 263 - 276. doi:10.1016/S0016-7061(00)00015-X
- Li, J. H., Zhang, L. M., 2010. Geometric Parameters and REV of a Crack Network in Soil. *Computers and Geotechnics*, 37(4): 466 - 475. doi: 10.1016/j.compgeo.2010.01.006
- Liu, C. W., Cheng, S. W., Yu, W. S., et al., 2003. Water Infiltration Rate in Cracked Paddy Soil. *Geoderma*, 117(1-2): 169 - 181. doi:10.1016/S0016-7061(03)00165-4
- Ma, H. Y., Zhang, Z. Y., Jiao, X. Y., et al., 2013. An Experimental Study on Soil Water Movement and Distribution of Film-Furrow Irrigation. *Journal of Food, Agriculture & Environment*, 11(2): 858 - 864.
- Novák, V., 1999. Soil-Crack Characteristics—Estimation Methods Applied to Heavy Soils in the NOPEX Area. *Agricultural and Forest Meteorology*, 98 - 99: 501 - 507. doi:10.1016/S0168-1923(99)0019-7
- Novák, V., Šimáunek, J., Genuchten, M., 2000. Infiltration of Water into Soil with Cracks. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 126(1): 41 - 47. doi: 10.1016/

(ASCE)0733-P437(2000)126;1(41)

- Qi, D. H., Jin, M. G., Liu, Y. F., 2007. Determination of Preferential Flow in Precipitation Infiltration Recharge. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 32(3): 420–424 (in Chinese with English abstract).
- Sharma, R. B., Verma, G. P., 1977. Characterization of Shrinkage Cracks in Medium Black Clay Soil of Madhya Pradesh. *Plant and Soil*, 48(2): 323–333. doi: 10.1007/BF02187244
- Tang, C. S., Shi, B., Liu, C., et al., 2011. Experimental Characterization of Shrinkage and Desiccation Cracking in Thin Clay Layer. *Applied Clay Science*, 52(1–2): 69–77. doi: 10.1016/j.clay.2011.01.032
- Velde, B., 1999. Structure of Surface Cracks in Soil and Muds. *Geoderma*, 93(1–2): 101–124. doi: 10.1016/S0016-7061(99)00047-6
- Vogel, H. J., Hoffmann, H., Leopold, A., et al., 2005a. Studies of Crack Dynamics in Clay Soil: II. A Physically Based Model for Crack Formation. *Geoderma*, 125(3–4): 213–223. doi: 10.1016/j.geoderma.2004.07.008
- Vogel, H. J., Hoffmann, H., Roth, K., 2005b. Studies of Crack Dynamics in Clay Soil: I. Experimental Methods, Results, and Morphological Quantification. *Geoderma*, 125(3–4): 203–211. doi: 10.1016/j.geoderma.2004.07.009
- Wang, Y., Feng, D., Ng, C. W. W., 2013. Modeling the 3D Crack Network and Anisotropic Permeability of Saturated Cracked Soil. *Computers and Geotechnics*, 52: 63–70. doi: 10.1016/j.compgeo.2013.03.005
- Xiong, C. R., Tang, H. M., Liu, B. C., et al., 2007. Using SEM Photos to Gain the Pore Structural Parameters of Soil Samples. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 32(3): 415–419 (in Chinese with English abstract).
- Xiong, D. H., Zhou, H. Y., Du, C. J., et al., 2006. A Review on the Study of Soil Cracking. *Soils*, 38(3): 249–255 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z. Y., Zhu, W. Y., Zhu, C. L., et al., 2013. Statistical Characteristics of Random Distribution of Shrinkage Cracks on Farmland Soil Surface. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 29(16): 119–124 (in Chinese with English abstract).

#### 附中文参考文献

- 齐登红, 靳孟贵, 刘延锋, 2007. 降水入渗补给过程中优先流的确定. *地球科学——中国地质大学学报*, 32(3): 420–424.
- 熊承仁, 唐辉明, 刘宝琛, 等, 2007. 利用 SEM 照片获取土的孔隙结构参数. *地球科学——中国地质大学学报*, 32(3): 415–419.
- 熊东红, 周红艺, 杜长江, 等, 2006. 土壤裂缝研究进展. *土壤*, 38(3): 249–255.
- 张展羽, 朱文渊, 朱成立, 等, 2013. 农田土壤表面干缩裂缝的随机分布统计特征. *农业工程学报*, 29(16): 119–124.