

干湿交替条件下稻田土壤裂隙开闭规律

段 赫^{1,2}, 刘目兴^{1,2}, 易 军^{1,2}, 朱钊岑^{1,2}, 朱 强^{1,2}, 张海林^{1,2}

(1.地理过程分析与模拟湖北省重点实验室, 武汉 430079; 2.华中师范大学 可持续发展研究中心, 武汉 430079)

摘 要:为研究江汉平原稻田土壤在干湿交替过程下的裂隙发育规律,利用室内试验和数字图像处理方法对典型稻田耕作层和犁底层土壤裂隙特征进行了定量研究。结果表明:在干燥过程中,土壤裂隙形成初期裂隙长而窄,随着土壤含水量的降低,裂隙面积率和当量宽度逐渐增大;在增湿过程中,随着土壤含水量的增加,裂隙面积率和当量宽度逐渐减小,但裂隙长度密度降幅较小。干湿交替条件下的裂隙形成和闭合过程不可逆,且干燥形成的土壤裂隙并不能通过增湿完全闭合。土壤有机质含量和容重差异影响了耕作层和犁底层裂隙开闭特征。在干燥过程中,耕作层土壤裂隙面积率、长度密度和当量宽度分别为 16.1%, 0.076 mm/mm², 2.13 mm, 约为犁底层的 1.63 倍、1.09 倍和 1.54 倍。而增湿结束后,犁底层裂隙闭合程度高于耕作层。耕作层和犁底层的裂隙面积闭合率为 39.8%, 61.6%, 裂隙长度密度降幅为 7.9%, 20.0%, 当量宽度降幅为 35.7%, 53.6%。为减少裂隙发育造成的稻田水肥渗漏,需合理控制土壤水分含量,特别应避免冬春季节长期干旱造成犁底层裂隙无法闭合的现象。

关键词:土壤裂隙; 干湿交替; 土壤水分; 稻田; 江汉平原

中图分类号: S152.4; S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2020)02-0370-07

Propagation and Closure Law of Cracks in the Paddy Soil During Drying-Wetting Cycle

DUAN He^{1,2}, LIU Muxing^{1,2}, YI Jun^{1,2}, ZHU Zhaoen^{1,2}, ZHU Qiang^{1,2}, ZHANG Hailin^{1,2}

(1. Key Laboratory for Geographical Process Analysis & Simulation, Wuhan 430079, China;

2. Research Center for Sustainable Development, Central China Normal University, Wuhan 430079, China)

Abstract: To study the developmental principle of soil cracks in the paddy field of Jiangnan Plain during drying-wetting cycles, quantified results of soil crack parameters at plow layer and plow pan in typical paddy fields were obtained with the methods of simulated experiment and digital image analysis. The results showed that, during the drying process, the long and narrow cracks were formed during the initial stage of drying, while the area densities and equivalent widths of these cracks increased continuously in the further drying period; in the wetting process, the crack area density and equivalent crack width decreased gradually with the increase of soil water content, but the crack length density remained stable. The processes of soil crack forming and crack closing were irreversible during the drying-wetting cycles, and the formed cracks couldn't close completely after wetting process. The differences of soil organic matter content and bulk density were the dominant factors affecting the crack characterizations between plow layer and plow pan. During the drying process, the soil crack area density, length density and equivalent width of plow layer were 16.1%, 0.076 mm/mm², and 2.13 mm, respectively, which were about 1.63 times, 1.09 times, and 1.54 times of those in the plow pan. Higher close rates of soil cracks were observed in the plow pan than those in the plow layer after the re-wetting process. The reduced rates of crack area, crack length density, and equivalent crack width of the plough pan (plow layer) were 61.6% (39.8%), 20.0% (7.9%), and 53.6% (35.7%), respectively. The reasonable soil water content should be maintained in the paddy fields for preventing soil crack formation, especially crack formation of plow pan during the drying seasons in winter and spring, as soil

收稿日期: 2019-03-02

修回日期: 2019-03-23

资助项目: 国家自然科学基金(41601215, 41771261); 湖北省自然科学基金(2016CFA027); 华中师范大学中央高校基本科研业务费(CCNU17TS0001, CCNU19TS005, CCNU18QN002)

第一作者: 段赫(1994—), 女, 河南郑州人, 硕士研究生, 研究方向为土壤水文。E-mail: 641418197@qq.com

通信作者: 张海林(1976—), 男, 湖北随州人, 博士, 副教授, 主要从事土壤水文研究。E-mail: hailzhang@mail.ccnu.edu.cn

crack was a preferential way for water and fertilizer percolation.

Keywords:soil crack; drying-wetting cycle; soil moisture; paddy field; Jiangnan Plain

水稻生长过程中要不断经历灌溉与晒田、降雨与干旱等干湿交替过程。伴随干湿交替的进行,土壤颗粒不断发生分离与组合,导致土壤结构改变,当土壤含水量降低到一定程度时便会在土体薄弱处产生裂隙^[1]。尽管裂隙的产生可以提高土壤的通气性,进而改善根系呼吸条件^[2],但也会增加土壤的蒸发量和水肥渗漏流失量,从而加剧干旱威胁和地下水污染风险^[1,3-5]。另外,干湿交替导致土壤裂隙频繁开闭,土壤饱和导水率和水分特征曲线等水力学性质随之变化,从而加大了水分运动模拟的难度^[6-7]。因此需要开展干湿交替条件下土壤裂隙发育的相关研究,以定量揭示土壤水分与裂隙特征参数的相关关系,从而为合理的农田水分管理和准确的水分运动过程模拟提供科学依据。

土壤含水量变化是引起裂隙开闭的主要原因,土壤裂隙随着含水量的降低不断形成,而随着水分含量的增加逐渐闭合。裂隙发育特征受多种土壤性质影响,如土壤容重^[7]、有机质含量^[8]、黏粒含量^[9-10]和次生矿物类型^[9]等。稻田土壤由于受到耕作影响,会形成理化性质差异明显的耕作层和犁底层,进而影响土壤裂隙的形成与闭合过程。耕作层裂隙的产生会造成水分快速下渗,而犁底层被认为是限制稻田渗漏的关键层次,若裂隙不能穿透犁底层则不会引起水肥的快速渗漏^[11]。除水稻种植的分蘖期和乳熟期的晒田措施或季节性干旱易产生裂隙外,在非水稻生长季的农田排干条件下裂隙发育更为明显。特别是冬春季节小麦或油菜种植时的起垄种植方式会导致垄间的犁底层直接暴露于大气,加剧了犁底层裂隙形成。一旦裂隙穿透犁底层,将导致土壤水分和养分以裂隙作为优先流路径快速向下淋失。尽管目前围绕农田耕层土壤裂隙发育特征开

展了大量的研究工作^[11-14],但关于耕作层和犁底层土壤裂隙发育特征的对比研究非常缺乏。

江汉平原既是我国重要的商品粮生产基地,也是我国主要的水稻生产区。该地区稻田面积占总耕地面积的 60%左右,包括单季稻、双季稻和水旱轮作等形式。江汉平原地下水位埋深较浅,一旦裂隙穿透犁底层,快速的水肥渗漏不仅降低稻田水肥利用效率,而且还会引起浅层地下水污染。因此在该地区开展干湿条件下稻田土壤裂隙发育规律研究具有重要现实意义。基于此,本文以江汉平原典型稻田耕作层与犁底层土壤为研究对象,通过室内模拟试验揭示干湿交替条件下的裂隙开闭过程,量化土壤水分含量与裂隙特征参数的数值关系,以期合理的农田水分管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况与供试土样

江汉平原位于长江中游湖北省中南部地区,总面积约 3.8 万 km²。该地为北亚热带季风气候,具有雨量充沛、日照足、四季分明等特点。年均降水量 1 100~1 400 mm;≥3℃积温为 5 100~5 300℃,1 月平均气温为 2~4℃,7 月均温在 28℃以上。研究区主要农作物为水稻,多年平均地下水位 1.0 m 左右,土壤母质以近现代河流冲积物和湖相沉积物为主,土壤类型多为潜育型和潴育型水稻土,典型剖面产状为 Ap—P—C,土壤质地为壤土和黏壤土^[15]。

本研究以典型稻田的耕作层和犁底层土壤为供试土样,土壤样品采集于华中师范大学江汉平原农业生态系统监测站(29°58′N,112°20′E),土壤基本理化性质见表 1。

表 1 土壤基本理化性质

| 土层 | 深度/ cm | 容重/ (g·cm ⁻³) | 机械组成/% | | | 有机质/ (g·kg ⁻¹) | pH 值 | 电导率/ (μs·cm ⁻¹) |
|-----|-----------|------------------------------|--------|-------|-------|-------------------------------|------|--------------------------------|
| | | | 砂粒 | 粉粒 | 黏粒 | | | |
| 耕作层 | 0—18 | 0.98 | 36.40 | 33.18 | 30.42 | 33.32 | 7.68 | 326 |
| 犁底层 | 18—37 | 1.55 | 26.73 | 37.13 | 36.15 | 11.63 | 7.83 | 182.6 |

1.2 土壤裂隙发育试验

试验分为土壤样品制备、干燥裂隙发育试验和增湿裂隙闭合试验 3 部分。

土壤样品制备:将风干后的土样碾碎过 2 mm 筛,按原容重填至直径为 20 cm 的圆形试验容器,土样厚度为 10 mm。填装结束后使用气压喷壶均匀缓慢加水使其饱和,尽量减少加水过程对土壤表层的扰动,整个加水饱和过程持续 72 h;每层土样 3 个重复。

由于土壤在吸水后发生了膨胀,我们测定了土壤饱和后的体积,耕作层和犁底层土壤饱和后的实际土壤容重分别为 0.85,1.28 g/cm³。

土壤干燥裂隙发育试验:将饱和的土样放置在恒温箱中(30℃)开展干燥试验。当裂隙第一次出现时,称量填装圆盘和填装土样的总质量,以获取含水量数据,同时对土样进行拍照。此后,分别以 3.0%,2.0%的水分含量梯度对耕作层和犁底层的裂隙发育过程

进行拍照。当 24 h 内的土样含水量变化 $<0.1\%$ 时,认为裂隙发育完全,干燥试验结束。为保证图片质量,在拍照时需要固定拍照位置和相机高度,同时保证除倾斜照射土样的 2 个日光灯外无其他光源。

土壤增湿裂隙闭合试验:在干燥试验结束后,用保鲜膜密封容器并在室温下静置土样 10 d(模拟长期无降雨条件),然后开始增湿试验。用气压喷壶对土样进行均匀缓慢喷水,每次喷水量为 2% 的土壤质量含水量。喷水时应保证不会破坏土壤结构,且土样表面不产生注水。喷水结束后,用保鲜膜密封覆盖,以避免土样中水的蒸发散失。每次喷水 24 h 或 48 h 后(湿润前期为 48 h,后期为 24 h),认为土壤膨胀变形达到稳定且其内部水分已达平衡状态,再对土样进行称重,以计算实际含水量;并拍照记录。重复上述步骤,直到加水 48 h 后土壤裂隙中仍有水可流动,则认为土壤已无法继续吸收水分,增湿试验结束。

1.3 图像处理

采用图像分析法对裂隙图像进行处理,用于后期提取裂隙发育参数。为消除试验容器边缘对裂隙的影响,利用 Photoshop 准确裁剪出图片中部 12 cm \times 12 cm 的区域。结合 matlab 图像处理功能,通过二值化、杂点去除、边缘提取和骨架化等流程(图 1),对裂隙图像进行处理^[16-17]。

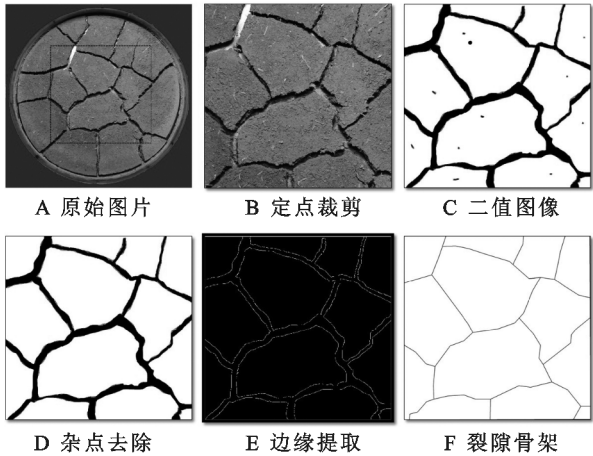


图 1 裂隙图像处理过程

通过室内试验和图像处理获取形态学参数。其中裂隙面积率为裂隙面积与研究区域面积的比值,计算方式为

$$Dc = \frac{A}{S} \times 100\% \quad (1)$$

式中: Dc 为裂隙面积率(%); S 为研究区域总面积(mm^2); A 为裂隙面积(mm^2)。

裂隙长度密度为裂隙长度与研究区域面积的比值:

$$Lc = \frac{L}{S} \quad (2)$$

式中: Lc 为裂隙的长度密度(mm/mm^2); L 为裂隙总长度(mm)。

裂隙当量宽度为 2 倍裂隙的面积与裂隙的周长之比,用以取代平均宽度:

$$EW = \frac{2A}{P} \quad (3)$$

式中: EW 为裂隙的当量宽度(mm); P 为裂隙总周长(mm)。

2 结果与分析

2.1 土壤裂隙发育与闭合的动态过程

土壤裂隙的发育具有随机性,可分为一级裂隙与二级裂隙两类^[17]。随着干湿交替进行,土壤裂隙发育过程见图 2。

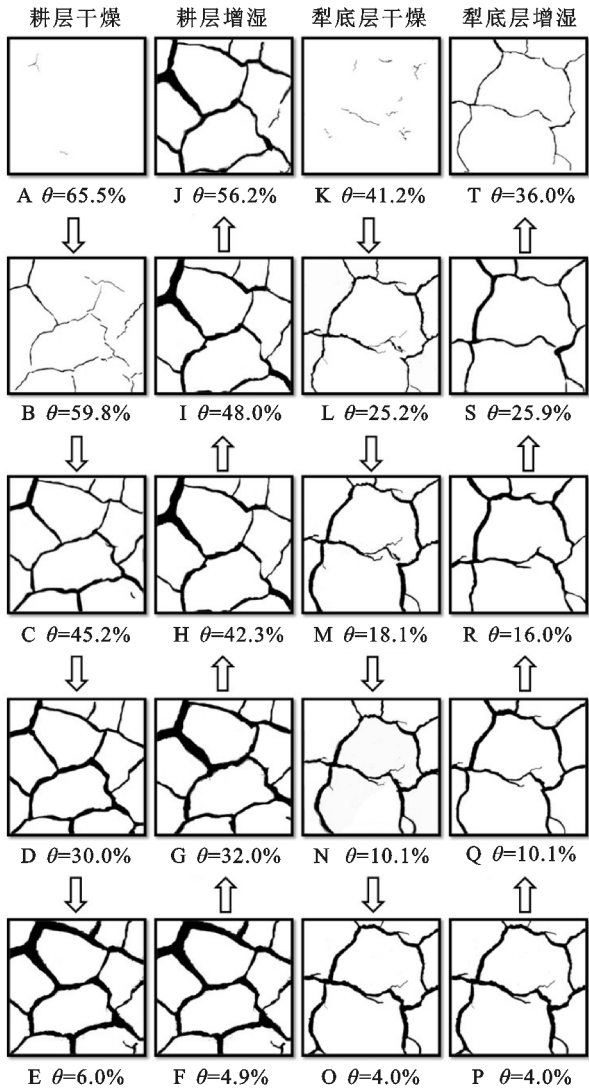


图 2 裂隙发育过程

在耕作层土壤干燥过程中,裂隙的形成可分为 4 个阶段:(1) $65.5\% \geq \theta > 59.8\%$,一级裂隙随机形成(θ 为土壤质量含水量)(图 2A—B);(2) $59.8\% \geq \theta > 30.0\%$,二级裂隙形成,裂隙不断拓宽(图 2B—D);

(3) $30.0\% \geq \theta > 6.0\%$, 裂隙骨架结构保持稳定, 仅宽度不断增加(图 2D—E); (4) $6.0\% \geq \theta$, 裂隙停止拓展。在耕作层土壤增湿过程中, 裂隙的闭合可分为 3 个阶段: (1) $42.3\% \geq \theta \geq 4.9\%$, 裂隙宽度逐渐减小, 大量二级裂隙闭合, 大量裂隙连接点消失(图 2F—H); (2) $56.5\% \geq \theta > 42.3\%$, 裂隙宽度继续减小但骨架结构保持稳定, 少量裂隙逐渐闭合(图 2I—J); (3) $\theta > 56.2\%$, 裂隙停止闭合。

在犁底层土壤干燥过程中, 裂隙的形成可分为 3 个阶段: (1) $41.2\% \geq \theta > 25.2\%$, 裂隙不断形成(包括一级裂隙和二级裂隙)(图 2K—L); (2) $25.2\% \geq \theta > 4.0\%$, 裂隙宽度逐渐增加, 裂隙骨架逐渐趋于稳定(图 2M—O); (3) $4.0\% \geq \theta$, 裂隙停止拓展。

在犁底层土壤增湿过程中, 裂隙的闭合可分为 3 个阶段: (1) $16.0\% \geq \theta \geq 4.0\%$, 裂隙宽度逐渐减小(图 2P—R); (2) $36.0\% \geq \theta > 16.0\%$, 裂隙连接点逐渐消失, 裂隙宽度继续减小(图 2S—T); (3) $\theta > 36.0\%$, 裂隙停止闭合。

2.2 开闭过程中裂隙面积率的变化

在干燥过程中, 裂隙面积率随含水量的降低而逐渐增大, 当达到一定程度后裂隙面积率不再发生变化(图 3)。对于耕作层土壤, 当其 $\theta = 65.5\%$ 时出现裂隙; 当 $65.5\% > \theta > 15.1\%$ 时, 裂隙面积率随 θ 的降低而迅速增长; 当 $15.1\% \geq \theta$ 时, 裂隙基本稳定, 随着 θ 的继续降低裂隙面积率变化极小; 当 $\theta = 6.0\%$ 时, 裂隙面积率达最大值 16.1%。对于犁底层土壤, 当其 $\theta = 41.2\%$ 时出现裂隙; 当 $39.4\% \geq \theta \geq 18.0\%$ 时, 裂隙面积随 θ 的降低而迅速增长; 当 $17.0\% \geq \theta$ 时, 随着 θ 的降低裂隙面积率变化极小, 裂隙基本稳定; 当 $\theta = 4.0\%$ 时, 裂隙面积率达最大值 9.9%。

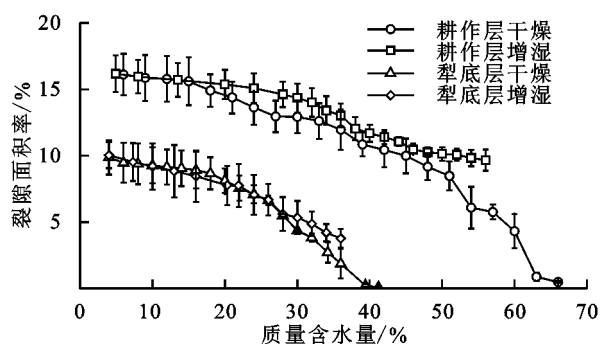


图3 裂隙面积率与含水量关系

在增湿过程中, 土壤裂隙随着含水量的不断增加而逐渐闭合, 但增湿试验结束后仍不能完全闭合(图 3)。对于耕作层土壤, 当 $24.0\% \geq \theta \geq 4.9\%$ 时, 裂隙面积率缓慢降低; 当 $46.1\% \geq \theta > 24.0\%$ 时, 裂隙面积率降低速率加快; 当 $\theta > 46.1\%$ 时, 土壤裂隙闭合速率再次减缓; 当 $\theta = 56.2\%$ 时, 土壤裂隙不再闭合。对于

犁底层土壤, 其裂隙率随 θ 的增加稳定减小; 当 $\theta = 36.0\%$ 时, 土壤裂隙不再发生变化。至土壤增湿试验结束, 耕作层和犁底层土壤的裂隙率分别为 9.7%, 3.8%。在整个干湿交替试验过程中均表现为耕作层土壤裂隙面积率大于犁底层土壤, 干缩裂隙完全形成后和增湿完成后耕作层土壤裂隙面积率约分别为犁底层的 1.63 倍、2.55 倍。

2.3 开闭过程中裂隙长度密度的变化

在干燥过程中, 裂隙长度密度先随着含水量的降低迅速增大, 到达一定程度后裂隙长度密度维持稳定(图 4)。对于耕作层土壤, 其 $\theta = 65.5\%$ 时出现裂隙; 当 $65.5\% > \theta > 47.2\%$ 时, 长度密度快速增大; 当 $47.2\% \geq \theta$ 时, 裂隙长度密度变化极小; 当 $\theta = 6.0\%$ 时, 裂隙长度密度达到最大值 (0.076 mm/mm^2) 不再发生变化。对于犁底层土壤, 其 $\theta = 41.2\%$ 时出现裂隙; 当 $41.2\% > \theta > 25.7\%$ 时, 长度密度快速增长; 当 $25.7\% \geq \theta$ 时, 裂隙长度密度变化极小; 当 $\theta = 4.0\%$ 时, 裂隙长度密度达到最大值 (0.070 mm/mm^2) 不再发生变化。耕作层与犁底层裂隙长度密度的增加都主要集中在干燥前期。

在增湿过程中, 裂隙长度密度随含水量的增加缓慢减小(图 4)。耕作层和犁底层土壤在 θ 分别增至 56.2%, 36.0% 后, 裂隙长度密度就不再发生变化, 且至增湿试验结束耕作层和犁底层土壤裂隙长度密度分别为 0.070, 0.056 mm/mm^2 。增湿过程引起的耕作层和犁底层裂隙长度密度下降幅度均较小, 分别为 7.9%, 20.0%, 表明增湿过程结束后大部分裂隙仍然存在。

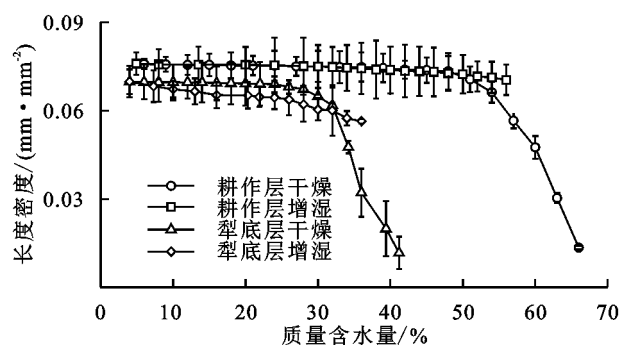


图4 裂隙长度密度与含水量关系

2.4 开闭过程中裂隙当量宽度的变化

在干燥过程中, 裂隙当量宽度随含水量的降低而逐渐增大, 当其达到某一固定数值后不再发生变化(图 5)。耕作层土壤在 $\theta = 65.5\%$ 时出现裂隙, 当 $65.5\% > \theta > 12.2\%$ 时, 裂隙当量宽度快速增加至 2.0 mm 左右; 当 $12.2\% \geq \theta$ 后, 裂隙当量宽度变化极小; 当土壤 $\theta = 6.0\%$ 时, 裂隙当量宽度达到最大值后 (2.13 mm) 不再发生变化。犁底层土壤在 $\theta = 41.2\%$ 时裂隙出现, 当 $41.2\% > \theta > 16.0\%$ 时, 裂隙当量宽度快速增

加至 1.3 mm 左右;当 $16.0\% \geq \theta$ 时,裂隙当量宽度变化极小;当 $\theta = 4.0\%$ 时,裂隙当量宽度达到最大值后 (1.38 mm) 不再发生变化。

在增湿过程中,随着土壤含水量的增加,裂隙当量宽度不断减小(图 5)。耕作层土壤在 $20.0\% \geq \theta \geq 4.9\%$ 时,裂隙当量宽度减小缓慢;当 $44.0\% \geq \theta > 20.0\%$ 时,裂隙当量宽度迅速减小至 1.5 mm 左右;当 $\theta > 44.0\%$ 时,裂隙当量宽度变化极小;当 $\theta = 56.2\%$ 时,裂隙当量宽度不再发生变化。犁底层土壤在 $13.0\% \geq \theta \geq 4.7\%$ 时,裂隙当量宽度减小缓慢;当 $36.0\% > \theta > 13.0\%$ 时,裂隙当量宽度逐渐减小至 0.7 mm 左右;当 $\theta = 36.0\%$ 时,裂隙当量宽度不再发生变化。至增湿试验结束,耕作层和犁底层土壤裂隙当量宽度分别为 1.37、0.64 mm,二者下降幅度分别为 35.7%、53.6%。干缩裂隙完全形成后和增湿完成后耕作层土壤裂隙当量宽度分别为犁底层的 1.54 倍、2.13 倍。

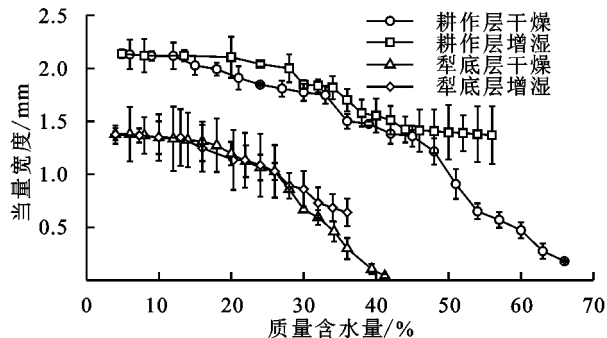


图5 裂隙当量宽度与含水量关系

3 讨论

3.1 土壤裂隙发育与闭合的可逆性

土壤裂隙主要形成于干燥初期,此时的裂隙长而窄;而在干燥后期,较少产生新的土壤裂隙,裂隙特征的变化主要为宽度增加,这与许多研究结果基本一致^[13,18-20]。干燥试验之前土壤颗粒的排列形式以边面接触为主,颗粒之间有效应力相对较小,土壤颗粒之间夹角与距离较大,土壤结构松散;而在干燥过程中随着水分的减少,土壤颗粒间有效应力增加,颗粒间夹角变小,排列形式逐渐向面面接触形式过渡,土壤颗粒逐渐靠近形成团聚体,这在宏观上就表现为土壤体积减小,裂隙面积增加^[20]。在增湿过程中,耕作层和犁底层的裂隙面积率和裂隙当量宽度降幅明显,但裂隙长度密度降幅较小,表明裂隙的闭合和形成是不可逆的两个过程,且裂隙在增湿后不能完全闭合。

唐朝生等^[21]的研究发现土样在吸湿后孔隙比从 0.39 增加到 0.73,比初始值 0.85 低 14%,这也表明土

样在干湿过程中发生了不可逆的体积变形。姚志华等^[22]也发现增湿过程中土壤小裂隙会闭合,大裂隙则不能完全闭合。他们认为,由于干燥过程中土壤颗粒的位置和排列方式均发生了较大变化,土壤结构会发生不可逆的破坏,导致土壤在增湿过程中膨胀能力改变;且土壤存在各向异性,这将导致土壤干燥和增湿过程各裂隙参数变化并不重合^[21-23]。本研究发现在增湿试验结束后,尽管裂隙面积率降幅明显,耕作层和犁底层土壤的裂隙面积闭合率分别为 39.8%、61.6%,但裂隙长度密度降幅仅为 7.9%、20.0%。而李文杰等^[13]研究表明当含水率达到 45% 时土壤裂隙完全闭合;张展羽等^[23]研究也表明当含水率超过某一临界含水量(18%)后裂隙面积率会加速减小至裂隙完全闭合。这可能是由于土壤性质差异或试验条件不同造成。本试验在干燥结束 10 d 后才开展增湿试验,而部分研究是在干燥试验结束后就开始增湿试验^[13,22-23],这种长期的干燥可能导致土壤的形变更为稳定,不易通过增湿过程闭合。

此外,即使完成干燥过程的土样在重新饱和后裂隙会完全闭合,但这并不意味着裂隙消失,因为裂隙的闭合并不能保证裂隙区域土体的抗拉强度得到恢复。张家俊等^[24]研究发现增湿后的闭合土样再次经历干燥过程时,原有的已愈合的裂隙会首先张开,表明其抗拉性能已经遭到破坏。裂隙的不完全闭合进一步增加了长期干燥后的灌溉和降雨事件引起的快速渗漏风险,因此要尽量避免稻田土壤过于干燥导致土壤形成不能完全闭合的裂隙。对于耕作层土壤来说,形成的稳定裂隙会被水稻种植前的翻耕和泥浆化过程破坏,而犁底层的裂隙只能通过泥浆化的耕层土壤填充。尽管这些裂隙被填充,但裂隙区域的土壤更为疏松、导水率高,容易作为水分流失的优先通道。另外,当犁底层再次干燥时,新裂隙也更容易在原裂隙处产生。因此在降雨较少的冬春季节,应尽量避免稻田水分的长期完全排干。

3.2 耕作层与犁底层裂隙开闭差异分析

尽管耕作层和犁底层裂隙开闭规律较为相似,但裂隙形成与闭合过程的各参数存在较大差异。在干燥过程中,耕作层较犁底层裂隙出现早、且裂隙发育更为明显,表明耕作层土壤较犁底层容易形成裂隙。至干燥试验结束,耕作层土壤的裂隙面积率、长度密度和当量宽度分别为犁底层的 1.63 倍、1.09 倍和 1.54 倍。在增湿条件下,耕作层和犁底层裂隙长度降低幅度均较小(7.9%、20.0%),但裂隙面积率降

幅(39.8%, 61.6%)和当量宽度降幅(35.7%, 53.6%)显著。至增湿试验结束,犁底层土壤裂隙闭合率、长度密度和当量宽度降幅约为耕作层的1.55倍、2.53倍和1.50倍。而这些差异主要是由于土壤理化性质不同造成。

与犁底层相比,耕作层表现为更高的有机质含量、更低的土壤容重和黏粒含量,这种差别可能影响土壤裂隙的发育过程及其特征参数。Peng等^[25]研究发现富含有机质的土壤在干燥后的体积收缩程度(77%~78%)远高于有机质含量低的土壤(10%~26%),他们认为有机质高的土壤可以形成更多的结构性孔隙,而这部分孔隙比土壤颗粒孔隙大得多,且更容易发生形变,因此有机质含量高的耕作层土壤较犁底层土壤更容易产生裂隙。另外,高有机质条件往往也伴随着较低的土壤容重,进而影响土壤裂隙发育过程。Zhang等^[7]研究结果发现在低容重条件下土壤更容易产生裂隙,他们认为对于容重较低的土壤,其团聚体和土壤颗粒的接触点也少,而这些接触点的物理或者化学力的存在对于土壤抗形变有重要作用。犁底层土壤容重更大,土壤颗粒的接触点更多,因此在干燥过程中抗形变的能力也就越强。尽管Peng等^[26]研究发现土壤压实强度的增加不会改变土壤裂隙收缩曲线的斜率,但仍会显著降低土壤裂隙的体积,土壤压实后裂隙体积占比明显降低。此外,土壤颗粒组成也会影响土壤收缩能力。研究表明,土壤收缩能力一般与土壤黏粒含量呈正相关^[27],这是由于黏粒矿物(主要为高岭石)晶片之间可以吸收和释放水分,从而导致干湿交替下土壤裂隙形变加剧。尽管犁底层的土壤黏粒含量(36.15%)略高于耕作层(30.42%),但其裂隙发育程度较耕作层弱。Tang^[28]的研究也发现黏粒含量为22%的土壤的裂隙发育特征比29%的土壤更为明显,他们认为可能是矿物类型或其他土壤理化性质因素差异导致。而本研究的犁底层和耕作层的土壤矿物类型应该较为相近,但有机质含量和容重的显著差异可能抵消了黏粒含量差异对土壤裂隙发育的影响。

3.3 室内试验的局限性分析

室内土壤干缩湿胀试验在一定程度上反映了野外田间裂隙的产生及发展规律。在野外田间土壤裂隙的研究中,张中彬^[29]也发现稻田土壤的裂隙主要集中在耕作层,且在裂隙产生以后,即使在较长时间的淹水条件下(约10天),裂隙也不能完全闭合;陈玖泓等^[30]的研究也表明裂隙率随土壤含水率呈线性变

化,且变化先快后慢,当含水率减小到一定程度后,裂隙率不再发生改变。

土壤裂隙的产生是土壤性质与自然环境、人为活动等多种因素综合作用的结果,如土壤前期的含水量^[31]、温度^[32]、耕作方式^[33]和秸秆还田^[34]等都会对裂隙的产生及发展造成重要影响,且各因素之间也存在不同程度的交互作用,复杂多变。虽然室内试验易于控制和实施,但室内试验的各个变量都处于恒定状态,其模拟结果仍难以精准反映自然状态下真实情况。因此,在以后的研究中,应采用室内试验与野外试验相结合的方法。

4 结论

在干燥条件下,土壤裂隙形成初期产生的裂隙长而窄,后期随着土壤含水量的减少,裂隙的变化主要为宽度逐渐增加。在增湿过程中,裂隙面积率的降低主要是裂隙宽度减小造成而裂隙长度降低幅度较小。干燥过程的土壤结构收缩导致的不可逆形变造成土壤裂隙在增湿过程结束后也不能完全闭合。

土壤有机质和容重差异是引起耕作层和犁底层裂隙发育特征分异的主要因素。在干燥过程中,耕作层裂隙发育特征更为明显,表现为更大裂隙面积比、裂隙长度密度和裂隙宽度。在增湿过程中,犁底层裂隙闭合更为明显,表现为更大的裂隙闭合率、长度密度和当量宽度降幅。

室内土壤干缩湿胀试验在一定程度上反映了野外田间裂隙的产生及发展规律,但自然活动和人为活动等因素复杂多变,因此在研究土壤裂隙时应采用室内试验与野外试验相结合的方法。

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] 余海龙,王丽丽,黄菊莹,等.灌淤土裂隙成因及其研究方法述评[J].中国水土保持,2015(12):73-76.
- [3] Keith B, Peter G. Macropores and water flow in soils [J]. Water Resources Research, 1982,18(5):1311-1325.
- [4] 牛健植,余新晓,张志强.优先流研究现状及发展趋势[J].生态学报,2006,26(1):231-243.
- [5] Greve A, Andersen M S, Acworth R I, et al. 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.
- [6] 吕殿青,邵明安.土壤干湿收缩特征研究进展[J].土壤通

- 报,2003,34(3):225-228.
- [7] Zhang Z, Peng X, Wang L, et al. Temporal changes in shrinkage behavior of two paddy soils under alternative flooding and drying cycles and its consequence on percolation[J]. *Geoderma*, 2013,192(1):12-20.
- [8] 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.
- [9] Gray C W, Allbrook R. Relationships between shrinkage indices and soil properties in some New Zealand soils[J]. *Geoderma*, 2002,108(3):287-299.
- [10] 邵明安,吕殿青.土壤收缩特征曲线的试验研究[J].*土壤学报*,2003,40(3):471-474.
- [11] Zhang Z, Zhou H, LIN H, et al. Puddling intensity, sesquioxides, and soil organic carbon impacts on crack patterns of two paddy soils [J]. *Geoderma*, 2016,262(3):155-164.
- [12] Shuichiro Yoshida, Kazuhide A Adachi. Effects of cropping and puddling practices on the cracking patterns in paddy fields [J]. *Soil Science & Plant Nutrition*, 2001,47(3):519-532.
- [13] 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.
- [14] 朱磊,陈玖泓,刘德东.土壤表面干缩裂隙形态定量分析及其数值模拟[J].*农业工程学报*,2016,32(14):8-14.
- [15] 李胜龙,张海林,刘目兴,等.稻田—田埂过渡区土壤水分运动与保持特征[J].*水土保持学报*,2017,31(2):122-128.
- [16] Peng X, Horn R, Peth S, et al. Quantification of soil shrinkage in 2 D by digital image processing of soil surface [J]. *Soil & Tillage Research*, 2006,91(1):173-180.
- [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,王策,朱成立,等.土壤干缩裂缝网络几何特征[J].*地球科学—中国地质大学学报*,2014,39(10):1454-1464.
- [19] 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.
- [20] 易远,汪为巍,张正亚,等.压实膨胀土表面裂隙规律试验研究[J].*土工基础*,2016,30(5):593-595.
- [21] 唐朝生,施斌.干湿循环过程中膨胀土的胀缩变形特征[J].*岩土工程学报*,2011,33(9):1376-1384.
- [22] 姚志华,陈正汉.重塑膨胀土干湿过程中细观结构变化试验研究[J].*地下空间与工程学报*,2009,5(3):429-434.
- [23] 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.
- [24] 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].*岩土学报*,2011,32(9):2729-2734.
- [25] Peng X, Horn R. Anisotropic shrinkage and swelling of some organic and inorganic soils[J]. *European Journal of Soil Science*, 2007,58(1):204-217.
- [26] Peng X, Zhang Z B, Wang L L, et al. Does soil compaction change soil shrinkage behavior [J]. *Soil and Tillage Research*, 2012,125:89-95.
- [27] Peng X, Horn. Identifying six types of soil shrinkage curves from large set of experiment data [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2013,77(2):372-381.
- [28] 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(3/4):204-217.
- [29] 张中彬.红壤性水稻土裂隙特征及其对优势流的影响[D].北京:中国科学院大学,2013.
- [30] 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.
- [31] Kishné A S, Ge Y, Morgan C L S, et al. Surface Cracking of a Vertisol Related to the History of Available Water[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2012,76(2):548-557.
- [32] 唐朝生,崔玉军, Tang A M,等.膨胀土收缩开裂过程及其温度效应[J].*岩土工程学报*,2012,34(12):2181-2187.
- [33] Bandyopadhyay 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 & Tillage Research*, 2003,71(2):133-142.
- [34] 徐玲,杨立魁,高昌珍.翻埋秸秆抑制土壤开裂机理研究[J].*山西农业大学学报:自然科学版*,2015,35(6):660-667.