

ISSN 0564-3929

# Acta Pedologica Sinica 土壤学报

Turang Xuebao

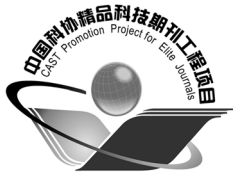


中国土壤学会 主办  
科学出版社 出版

2015

第52卷 第3期

Vol.52 No.3



# 土壤学报

(Turang Xuebao)



第 52 卷 第 3 期 2015 年 5 月

## 目 次

### 综述与评论

- 强还原土壤灭菌防控作物土传病的应用研究····· 蔡祖聪 张金波 黄新琦等 (469)
- 土壤裂隙及其优先流研究进展····· 张中彬 彭新华 (477)

### 研究论文

- 东北典型黑土区农耕土壤团聚体流失特征····· 温磊磊 郑粉莉 沈海鸥等 (489)
- 青藏高原永冻土活动层厚度预测指标集的建立及制图····· 陈吉科 赵玉国 赵 林等 (499)
- 贡嘎山海螺沟冰川退缩区土壤序列矿物组成变化····· 杨子江 邴海健 周 俊等 (507)
- 成都典型区水稻土有机碳组分构成及其影响因素研究····· 廖 丹 于东升 赵永存等 (517)
- 河北省土壤温度与干湿状况的时空变化特征····· 曹祥会 雷秋良 龙怀玉等 (528)
- 喀斯特小流域土壤饱和导水率垂直分布特征····· 付同刚 陈洪松 王克林 (538)
- 大沽河中游地区土壤水与浅层地下水转化关系研究····· 杨玉峥 林 青 王松禄等 (547)
- 化学转化法测定水体中硝酸盐的氮氧同位素比值····· 王 曦 曹亚澄 韩 勇等 (558)
- <sup>13</sup>C脉冲标记定量研究施氮量对光合碳在水稻-土壤系统中分布的影响 ···· 刘 萍 江春玉 李忠佩 (567)
- 垄作免耕对稻田垄埂土壤有机碳累积和作物产量的影响····· 慈 恩 王莲阁 丁长欢等 (576)
- 施入<sup>15</sup>N标记氮肥在长期不同培肥土壤的残留及其利用 ····· 赵 伟 梁 斌 周建斌 (587)
- 长期不同施肥对红壤性水稻土产量及基础地力的影响····· 鲁艳红 廖育林 周 兴等 (597)
- 长期施肥对双季稻产量变化趋势、稳定性和可持续性的影响····· 冀建华 侯红乾 刘益仁等 (607)
- 高粱分泌硝化抑制物对羟基苯丙酸与质子泵的关系研究····· 周金泉 张明超 魏志军等 (620)
- 钝化剂-锌肥降低烟草镉含量长期效果研究 ····· 曹晨亮 王 卫 马义兵等 (628)
- 钾肥和腐殖酸互作对烤烟有机钾盐指数的影响····· 郑东方 许嘉阳 许自成等 (637)
- 桉树取代马尾松对土壤养分和酶活性的影响····· 张 凯 郑 华 陈法霖等 (646)
- 荒漠区生物土壤结皮对土壤酶活性的影响····· 杨航宇 刘艳梅 王廷璞 (654)
- 高量秸秆不同深度还田对黑土有机质组成和酶活性的影响····· 矫丽娜 李志洪 殷程程等 (665)
- 链霉菌JD211对水稻幼苗促生作用及土壤细菌多样性的影响 ····· 王世强 魏赛金 杨陶陶等 (673)

### 研究简报

- 基于最小数据集的塔里木河上游绿洲土壤质量评价····· 贡 璐 张雪妮 冉启洋 (682)
- 铁膜对水稻根表面电化学性质和氮磷钾短期吸收的影响····· 郑芸芸 李忠意 李九玉等 (690)
- 长期不同施肥条件下红壤性水稻土微生物群落结构的变化····· 夏 昕 石 坤 黄欠如等 (697)
- 滨海盐碱地不同造林树种林地土壤盐碱化特征····· 王合云 李红丽 董 智等 (706)

### 信息

- 2015国际土壤年 ····· (696)

封面图片：稻田裂隙二维与三维图像（由张中彬提供）

DOI: 10.11766/trxb201409030446

# 土壤裂隙及其优先流研究进展\*

张中彬 彭新华<sup>†</sup>

(土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008)

**摘要** 土壤在干燥脱水的过程中易收缩产生裂隙。裂隙的产生是土壤性质与外界条件等多种因素综合作用的结果, 其形态结构也非常复杂, 难以准确描述。裂隙能够作为优先流的路径, 增加农田水分和养分的流失以及地下水污染的风险。本文总结和归纳了裂隙产生的影响因素、裂隙的表征指标与测定方法、裂隙导致的优先流的研究方法、裂隙对优先流的影响和模拟等方面的研究进展。今后应进一步加强裂隙产生机理的全面深入的研究; 构建和完善裂隙三维指标体系及其测定方法; 推进裂隙导致的优先流的定量化和数学模拟研究; 加大田间原位裂隙及其优先流的研究。

**关键词** 土壤裂隙; 土壤收缩; 土壤水; 优先流

**中图分类号** S152.4 **文献标识码** A

随着全球气候的变化, 区域性的干旱时常发生, 给农业生产带来严重危害。伴随着干旱的发生, 土壤中水分不断减少, 土壤颗粒会发生新的分离与结合, 在土体的薄弱处会产生裂隙。裂隙的产生与土壤自身的性质(有机质和黏土矿物含量等)和气候等外在条件密切相关。裂隙产生会导致一些不良的后果, 比如裂隙会增加土体的表面积, 促使土壤水分通过裂隙的内表面迅速蒸发, 加剧干旱的危害。其次裂隙可能影响植物根系的分布和吸水过程, 甚至造成根系生理损伤<sup>[1]</sup>。再者裂隙在后来的灌溉或降雨过程中可作为优先流的路径, 加速水分入渗, 降低水肥的利用效率, 增加地下水污染的风险<sup>[2]</sup>。裂隙可加剧土壤侵蚀过程, 导致土柱和土林等强侵蚀景观形成<sup>[3]</sup>。因此研究裂隙及其优先流对节约农业用水、提高水分和肥料利用效率、减轻地下水污染、保护水土资源等均具有重要的指导意义。本文主要介绍了裂隙产生的影响因素、裂隙的表征指标与测定方法、裂隙与优先流等方面的最新研究进展, 并展望了未来裂隙及其优先流的研究重点。

## 1 裂隙产生的影响因素

裂隙的产生和闭合伴随着土壤的收缩和膨胀, 是土壤含水量、土壤黏土矿物、土壤有机质等土壤物理、化学和生物的内在性质在外界环境条件下(如干湿交替、作物生长和耕作等)综合作用的结果, 是一个复杂的动态过程。各种因素对裂隙的影响也不尽相同, 各因素也存在不同程度的交互作用, 因此要深入了解土壤裂隙产生的机制, 必须弄清楚各个驱动因子对裂隙产生的影响。

### 1.1 土壤黏粒

土壤黏粒具有明显的塑性、胀缩性、吸湿性和黏结性, 是影响土壤收缩特征的一个重要因素<sup>[4]</sup>。Simon等<sup>[5]</sup>研究发现42%的条形线性伸展系数的变化和71%的标准线性伸展系数的变化均与黏粒含量有关。有研究进一步表明土壤的收缩能力与土壤黏粒含量呈显著正相关<sup>[6]</sup>。但是Yule和Ritchie<sup>[7]</sup>认为土壤收缩与黏粒含量没有相关关系。这不一致的结果主要是土壤收缩不仅与黏粒含量存在一定的关系, 且更与黏土矿物性质密切相关。

\*国家自然科学基金项目(41171180, 41401245)资助

<sup>†</sup>通讯作者: 彭新华(1972—), 男, 湖南茶陵人, 博士, 研究员, 从事土壤物理和水文过程研究。E-mail: xhpeng@issas.ac.cn

作者简介: 张中彬(1985—), 男, 河南新蔡人, 博士, 助理研究员, 从事土壤结构与功能研究

收稿日期: 2014-09-03; 收到修改稿日期: 2015-01-15

## 1.2 土壤黏土矿物类型

土壤中的黏土矿物一般分为膨胀性黏土矿物和非膨胀性黏土矿物,前者主要包括蒙脱石、绿脱石、拜来石、蛭石等2:1型膨胀性矿物,后者主要包括高岭石、埃洛石等1:1型矿物和伊利石等2:1型非膨胀性矿物。当土壤中的膨胀性黏土矿物占主导时,土壤的收缩能力就比较大。据Greene-Kelly<sup>[8]</sup>报道土壤的收缩能力与土壤中膨胀性黏土矿物的含量显著相关。Gray和Allbrook<sup>[8]</sup>研究了新西兰的不同类型土壤的收缩,发现水铝英石含量高的土壤收缩能力最强,其次是以蒙脱石和埃洛石为主的土壤,而以高岭/蛭石和绿泥石/伊利石为主的土壤收缩能力最弱。

## 1.3 土壤有机碳

一般情况下有机碳含量高的土壤,结构较为疏松,孔隙较多,因而其收缩能力较强<sup>[9-10]</sup>。泥炭土的有机质含量很高,可达400 g kg<sup>-1</sup>以上,孔隙度达70%以上,因而具有很强的收缩能力<sup>[10]</sup>。Peng和Horn<sup>[11]</sup>总结大量文献的96个土样的数据,发现土壤的收缩能力与有机碳含量呈极显著的正相关关系( $p < 0.001$ )。但是关于有机碳对土壤收缩的作用的研究结果并不一致。De Jong等<sup>[12]</sup>研究发现土壤收缩与有机碳含量不存在相关关系。有机碳含量高的土壤,结构较为稳定,土壤持水能力较强,在田间情况下可能不易失水产生裂隙。

## 1.4 土壤容重

一般容重小的土壤较为疏松,其收缩能力较大,容易产生裂隙<sup>[6]</sup>。Zhang等<sup>[13]</sup>发现稻田土壤的收缩能力随着容重的增加而逐渐降低。具有强膨胀性黏土矿物的黏粒能产生疏松结构的土壤,而土壤的收缩能力与膨胀性黏土矿物含量正相关,这就部分解释了容重与收缩能力负相关的原因<sup>[14]</sup>。但是Bandyopadhyay等<sup>[15]</sup>的研究却发现0~15 cm土层裂隙的宽度和体积与土壤容重显著正相关,土壤含水量和容重解释了79%的裂隙体积的变化。Flowers和Lal<sup>[16]</sup>发现随着压实强度的增加,土壤容重随之增加,导致田间裂隙的面积增加;室内土柱实验却表明随着容重的增加,土柱收缩体积逐渐减小。

通常情况下上述土壤性质对土壤裂隙和收缩的影响是综合作用的。Reeve等<sup>[17]</sup>报道容重、黏粒含量、有机碳含量、阳离子交换量等均是影响土壤收缩最重要的因素,对上述因素的多元回归分析表

明它们解释了87%和82%的表层和下层土的总的收缩的变化。熊东红等<sup>[18]</sup>研究表明土壤裂缝发育程度与土壤黏粒含量、土壤胀缩度、土壤容重呈正相关,与土壤有机质含量、土壤总孔隙度呈较弱的负相关。田间裂隙的产生除了受土壤自身性质的影响外,还受耕作方式、作物生长、田间管理等外界因素的影响。

## 1.5 土壤干湿交替

土壤由于降雨或灌溉等经常处于干湿交替的水分条件下,而干湿交替的次数、强度等因素均会影响土壤的收缩和裂隙产生。据Peng等<sup>[9]</sup>报道,干湿交替的强度显著影响了土壤的收缩,当土壤干燥的强度超过某一阈值时,即使土样重新饱和,仍然无法膨胀恢复至最初的体积;而干湿交替的次数和顺序对收缩的影响并不显著。Tang等<sup>[19]</sup>发现随着干湿交替次数的增加,裂隙的面积密度呈下降趋势,不规则的裂隙在增加。张家俊等<sup>[20]</sup>研究发现在室内干湿循环的作用下裂隙总面积与总长度增加,达到一定程度后便会因为土块尺寸过小而停止。Zhang等<sup>[13]</sup>发现在水稻生长季中随着干湿交替的进行,土壤的收缩能力呈下降趋势,而裂隙的数量呈增长趋势。

## 1.6 土壤耕作方式

不同利用方式下,土壤的耕作方式不一致,土壤裂隙的特征也不一致,比如旱地和水田。即使同一种利用方式下,耕作方式的差异也会导致裂隙的差异。张佳宝和赵诚斋<sup>[21]</sup>指出稻田泥浆化导致水稻土结构变差,收缩能力增强,结构性收缩消失,线性收缩增加。稻田泥浆化减小了土壤中大土块的数量、土壤容重和穿透阻力,使土壤更加均质化,导致了裂隙数量的增加和复杂程度的下降<sup>[22-23]</sup>。Bandyopadhyay等<sup>[15]</sup>证实在大豆-亚麻的利用方式下,与传统耕作相比,间隔深松减小了裂隙的宽度、深度、长度等指标;在大豆-小麦的利用方式下,免耕与传统耕作相比,显著增加了裂隙的宽度、深度和体积,减小了裂隙的长度和表面积。

## 1.7 植物生长

植物根系能固定土壤,增加土壤的抗张强度,从而减小裂隙产生的可能性,因此农田裂隙多产生于作物的行间<sup>[22, 24]</sup>。Yoshida和Adachi<sup>[22]</sup>发现随着作物间距增加,裂隙的宽度也随之增加;在作物正常的吸水条件下,表层裂隙倾向于呈线状并与植株行平行,若作物不吸水裂隙则呈现各向同性。

Mitchell和van Genuchten<sup>[24]</sup>认为裂隙通常形成于土壤起始含水量最高区域内的阻力最小点。由于行间根系较少，对行间土壤的固定较弱，行间水分被作物利用较少，这导致行间更容易产生裂隙。作物地上部分也会对裂隙产生影响，有研究表明天然植被覆盖下土壤开裂程度低于人工行式种植的同一种植被下的土壤<sup>[24]</sup>。不同作物下土壤的裂隙特征也不一致<sup>[25]</sup>。由此可见，在有植被覆盖的情况下，裂隙形态不仅是土壤性质的函数，还是植株布局的函数。

### 1.8 其他因素

唐朝生等<sup>[26]</sup>发现，温度作为外部环境因素，不仅直接影响土中水分的蒸发，还对裂隙出现的时间、临界含水率及裂隙的演化过程有明显的制约作用。Tang等<sup>[27]</sup>发现在土壤中添加纤维导致裂隙的数量显著减少，裂隙的抵抗力得到显著改善。在土壤中添加植物残体等会改变土壤的塑性、破碎强度以及裂隙的特征等<sup>[28]</sup>。作物秸秆还田和灌溉也均会影响裂隙的产生<sup>[29]</sup>。张同娟等<sup>[30]</sup>研究发现土壤膨胀性与碳酸钙含量呈显著负相关关系。

总体而言，目前关于裂隙的影响因素的研究依然比较薄弱。以往的研究多集中在对现象的描述，对各因素对裂隙的影响机理的研究和分析较少。此外目前对裂隙影响因素的研究还不够全面。比如在富含铁铝的土壤中，铁铝是土壤结构形成的重要因子，因此也可能对土壤裂隙产生影响，但目前尚未见到关于铁铝对裂隙影响的报道。对于农田土壤而言，农田管理措施如施肥、栽培方式、灌溉、秸秆还田等均可能对裂隙的发生发展产生重要影响，但是关于这方面的报道非常少。

## 2 土壤裂隙的表征指标与测定方法

### 2.1 土壤收缩的表征与模拟

裂隙是土壤在失水时收缩所导致的，土壤的收缩幅度往往决定了裂隙的多少，因此土壤的收缩幅度往往用来表征土壤的开裂状况。Grossman等<sup>[31]</sup>定义了土壤的线性伸展系数（Coefficient of linear extensibility, COLE）：

$$COLE = \frac{L_m - L_d}{L_d}$$

式中， $L_m$ 为湿润时土壤样品的长度， $L_d$ 为干燥时土壤样品的长度。在实际运用时，线性伸展系数可根

据实际情况的需要变换计算形式<sup>[31]</sup>。

土壤线性伸展系数只能描述土壤在干燥和湿润两点间收缩的幅度的大小，不能描述土壤在各个含水量状态下连续的收缩状况，因此研究者引入了收缩曲线。土壤收缩曲线（Soil shrinkage curve）一般以土壤的比容和含水量分别作为纵横坐标<sup>[32]</sup>，或者以孔隙比和水分比分别为纵横坐标<sup>[33]</sup>。典型的收缩曲线可以分为四个部分：

（1）结构收缩（structural shrinkage），（2）线性收缩（proportional shrinkage），（3）残余收缩（residual shrinkage）和（4）零收缩（zero shrinkage）。在结构收缩阶段，大孔隙首先脱水，但是收缩的量却十分有限。结构收缩一般只发生在结构良好的土壤中。线性收缩阶段，土壤的失水量与收缩的量呈线性关系，无结构的黏土在该阶段的斜率可等于1<sup>[32]</sup>，结构良好的土壤该阶段的斜率远小于1<sup>[34]</sup>。也有研究者将线性收缩阶段命名为常规收缩或者基础收缩<sup>[35]</sup>。残余收缩阶段土壤团聚体内部的水分开始损失，收缩的量小于土壤的失水量。零收缩阶段土壤水分的损失几乎不会导致土壤的收缩。尽管如此在零收缩阶段土壤黏粒仍会发生重组，导致一些微观裂隙的产生<sup>[36]</sup>。研究发现并非所有土壤的收缩曲线均具有四个典型的收缩阶段。Peng和Horn<sup>[11]</sup>总结了270组收缩曲线的数据，按四个收缩阶段的有无，将收缩曲线分为六种不同的类型。

目前，描述收缩曲线的模型有很多种，比如有多项式模型<sup>[37]</sup>、分段式模型<sup>[32, 38]</sup>以及S型模型<sup>[39]</sup>等。但是目前尚没有一个通用的模型，各个模型也均有自己的优势和不足之处。多项式模型只有最小值没有最大值，因而只能描述收缩曲线的零收缩、残余收缩和线性收缩三个阶段；分段式模型每一段的参数有一定的物理意义，但是各段的划分存在主观性，且参数较多；S型模型一般能较好地拟合收缩曲线，且参数较少，但是各参数没有明确的物理意义。Peng和Horn<sup>[39]</sup>以van Genuchten<sup>[40]</sup>方程为基础提出了一个描述收缩曲线的模型。该模型只有一个方程三个可变参数，拟合精度较高，能完整描述收缩曲线的四个收缩阶段以及各种类型的收缩曲线，且各个收缩阶段可以通过对方程求导等运算量化区分。为了方便该模型的应用，他们于2014年也开发了相应的土壤收缩模拟软件（Soil shrinkage simulator，下载地址：<http://pan.baidu>。

com/s/1rQyz8), 进一步推动土壤收缩曲线模拟和收缩阶段划分的研究。

## 2.2 土壤裂隙的表征

裂隙的长度、宽度、深度等是描述裂隙特征的基本指标。裂隙面积密度 $D_c$  (crack area density) 定义为土壤表层裂隙面积与所研究的土壤表层面积之比, 是最常用到的表征地表开裂程度的指标之一<sup>[41]</sup>。这些指标相对直观且容易测定, 但是过于粗略, 不能充分反映地表裂隙的复杂程度, 为此很多研究者提出了其他描述裂隙的指标。

Yoshida和Adachi<sup>[22]</sup>将裂隙的当量宽度 $EW$  (equivalent width)、紧密度 $CP$  (Compactness) 以及方向指数 $CDI$  (directional index) 作为描述裂隙的指标体系。Xiong等<sup>[42]</sup>将裂隙面积密度 $D_c$ 、裂隙面积加权平均分形维和连通性指数作为裂隙形态的评判指标, 因为它们不仅能描述裂隙发展的强度, 还能描述裂隙形态的复杂性和连通性。Tang等<sup>[19]</sup>将裂隙的节点数、块区数和面积等作为描述裂隙的指标, 同时将概率密度分布函数引入对裂隙的分析中。张展羽等<sup>[43-44]</sup>分析了裂隙的交叉角分布、块区分散度、条数与节点数之比、平均弯曲度等指标, 同时将正态分布应用到裂隙形态的描述中, 丰富了裂隙指标体系。

为了更好地描述裂隙的复杂、不规则的几何特征, Preston等<sup>[45]</sup>将分形几何的理论应用到了对裂隙的描述当中。他们用分形维数来描述裂隙的异质性, 用谱维数来描述裂隙的连通度。采用分形几何学能够近似描述裂隙的异质性等, 作为新的表述裂隙的指标, 越来越被广泛应用<sup>[46]</sup>。该方法为量化描述裂隙的复杂结构提供了新的思路, 但是这些指标体系有待进一步完善。

Vogel等<sup>[47]</sup>引入明科夫斯基值 (Minkowski numbers)、明科夫斯基方程 (Minkowski function) 以及裂隙的分支角度 (Angles of bifurcation) 等指标来描述裂隙的大小、连通性以及形态等。该方法引用拓扑学的概念和方法, 突破了传统欧式几何的局限, 在定量复杂的裂隙形态上做出积极有益的探索。

如何描述裂隙是深入研究裂隙的基础, 但是由于裂隙形态特征复杂无序, 因此准确而全面表述裂隙特征并非易事。以上总结了很多研究者提出的不同指标体系, 它们大多针对某一研究目的而提出, 因此也各有优劣。总之, 迄今为止尚未形成完善且

通用的土壤裂隙指标体系, 今后建立完整、可靠的指标体系是裂隙研究的目标之一。

## 2.3 裂隙测定方法

裂隙的宽度、长度以及深度等指标经常通过直接测量的方法获取。裂隙长度的测量通常要借助线绳随着裂隙延伸来测定; 深度的测定通常要借助金属丝插入裂隙内直至感受到明显的阻力为止<sup>[15, 28]</sup>。Ringrose-Voase和Sanidad<sup>[48]</sup>提出“半圆法”来测定裂隙, 通过计算直径为1 m的半圆与裂隙的焦点数估算裂隙的长度分布等指标。网格法也经常被用到裂隙的测定当中<sup>[49]</sup>, 测定时一般先将事先做好的样框 (尺寸约1 m × 1 m, 网格大小0.1 m × 0.1 m) 放置于裂隙样地上, 然后依次测定每个格子中裂隙的宽度及长度, 最后计算裂隙的面积; 或者将绘图纸置于样框上, 将裂隙的位置绘制在绘图纸上用于测定分析。直接测量的方法能够获取裂隙的特征参数, 但是测定起来比较费时费力, 不能及时测定裂隙的动态变化; 此外直接测量的准确度还有待进一步提高。

目前应用最为广泛的裂隙测定方法是图像分析法。图像分析方法主要是指采用数码相机等手段采集数字化裂隙图像, 利用相关的计算机软件对图像进行形态学处理, 最终计算获得裂隙的各项参数。Peng等<sup>[50]</sup>采用图像分析技术研究了土壤的裂隙, 指出图像分析的精度能达到1.0 mm, 是一种简便且有效的获取裂隙特征的手段。李德成等<sup>[51]</sup>结合土壤切片和图像技术研究了裂隙与其他类型孔隙在结构上的差异。刘春等<sup>[52]</sup>根据计算机数字图像处理技术, 提出一整套裂隙图像计算机识别和定量分析方法, 并开发出裂隙图像处理系统 (CIAS)。该系统能够成功地应用于土体干缩裂隙的图像识别和形态定量分析研究中, 为裂隙图像的定量分析提供了便利。利用图像分析软件可以通过裂隙的图像数据计算裂隙面积、周长、分形维数等多种指标。该方法能够连续测定土壤裂隙的变化, 不会破坏土表结构, 且测定成本较低。该方法的不足之处在于它只能获得裂隙的二维参数, 且只在地表覆盖较少的区域使用。在野外使用时, 由于光线条件不易控制, 图片的质量不易控制会给后期图像处理带来不便。在图像处理过程中, 阈值的选取、杂点的去除等技术手段有待进一步研究提升。

上述方法大多是测定裂隙的一维或二维指标, 对裂隙的三维指标很少涉及。多数情况下裂隙的三

维指标如体积是通过裂隙的宽度、深度、长度等指标计算得来。计算裂隙体积时一般将裂隙在土体内的垂直截面形状简化为三角形<sup>[15]</sup>，而这种假设往往与实际情况相去甚远<sup>[53]</sup>。因此很多研究者直接测定裂隙三维结构做出了各种尝试<sup>[54]</sup>。

用一定量的沙子、树脂或乳胶对裂隙进行填充来估算裂隙的体积的方法被一些研究者采用<sup>[50, 53, 55]</sup>。Abou Najm等<sup>[53]</sup>采用液态乳胶对开裂的土体进行填充，待乳胶凝固后将土体挖出，洗去乳胶上附着的土壤颗粒即可得到裂隙的三维结构，通过排水法可以得到裂隙的体积。该方法的不足之处在于比较费时费力，对土体具有破坏性。乳胶同时填充了除裂隙之外的大孔隙，在测定裂隙指标时需要将其分离。

电阻率断层扫描技术也被用于裂隙的三维结构的测定，该技术可以得到裂隙在土体中的位置、方向等<sup>[56]</sup>。Greve等<sup>[57]</sup>总结电阻率层析成像技术在裂隙研究中的理论和方法，指出该技术是监测土体中裂隙动态变化的有效工具。超声波已经被应用到岩土内部裂隙的探测，但目前鲜有将该技术应用于农田土壤裂隙的研究报道<sup>[58]</sup>。

CT扫描技术越来越多的被应用于三维土壤结构的定量化研究，近来研究者也开始将这一技术应用到对裂隙三维结构的分析中<sup>[59]</sup>。Zhang等<sup>[60]</sup>采用CT扫描技术研究了裂隙的三维结构特征，发现该技术能够很好地定量化描述裂隙的三维结构。相较于其他方法，CT扫描技术能够精确计算裂隙的体积、表面积以及在土体中的空间分布等三维特征。该技术的不足在于它体积大、成本高，只能在室内扫描一定尺寸范围的土柱，不能在田间原位测定土壤裂隙的特征。

Seyfarth等<sup>[61]</sup>利用激光扫描制作了一个设备测定土壤的收缩和裂隙体积。该设备测定结果与CT扫描的结果十分接近，同样不会破坏土壤结构。虽然精确度不及CT扫描技术，但是其成本较低且应用更为方便。Sanchez等<sup>[62]</sup>设计一套装置包括激光扫描仪、电脑控制的运动控制器和电子天平，用来测定裂隙体积的变化。Uday和Singh<sup>[63]</sup>成功地将激光显微镜应用到裂隙的三维结构的研究中，为裂隙的研究提供了新的手段。

目前裂隙的测定主要还是以获取土壤表面二维裂隙参数为主，各测定方法也存在一定不足之处。对裂隙三维指标的测定除体积、表面积等指标外，

尚未见其他报道。因此今后应进一步加强对裂隙三维指标的完善和测定研究。

### 3 裂隙与优先流

#### 3.1 优先流的定义

土壤优先流是指水分绕过土壤基质沿着优先途径在土体剖面内运动的现象<sup>[64]</sup>。优先流在土体内普遍存在，研究表明约70%~85%的水分运动与优先流有关<sup>[65-66]</sup>。优先流通常可分为多种类型，分类的方法和依据并不统一，主要有以下几种类型：裂隙流（crack flow）、指流（finger flow）、侧向流（lateral flow）和大孔隙流（macropore flow）等<sup>[64, 67]</sup>。

裂隙流是指水分沿着不饱和土壤中相互连通的裂隙流动的现象。相较于其他类型的优先流，裂隙流的独特之处在于裂隙的产生和闭合与土壤含水量密切相关，是极其不稳定的。在土壤含水量较低时，裂隙发育较好，优先流现象显著；当土壤水分供应充足时，裂隙可能会逐渐闭合，优先流现象也会减弱。再者裂隙的存在破坏了土体的完整性，在土壤表层形成连通的复杂分支，具有强烈的不均匀性和各向异性。因此裂隙存在会导致大量水分沿着裂隙横向运动，产生水平方向上的优先流<sup>[68]</sup>。

#### 3.2 优先流（裂隙流）研究方法

优先流的研究方法大致可以分为两类：一类是直接测定优先流的路径，如植物根孔、动物洞穴以及裂隙等；二是间接测定，主要通过测定土壤导水率，或通过染色剂、离子等示踪，或根据不同大小孔隙对水分吸力的差异等描述优先流现象。前者主要包括树脂或石蜡填充法、CT扫描等，后者主要包括染色示踪、圆盘入渗仪、穿透曲线等。关于裂隙的直接测定，已在2.3节做了详细论述，下面主要介绍针对裂隙流研究所使用的间接测定方法。

（1）圆盘入渗仪。圆盘入渗仪由Perroux和White<sup>[69]</sup>发明制作，经过不断改进，已经实现自动化测定，并且测定的精度不断提高<sup>[70]</sup>。根据不同大小孔隙对水分的吸力存在差异，圆盘入渗仪通过调节不同的负压使水分在不同孔隙中流动，据此可以推求不同负压下土壤的导水率、导水的孔隙度、导水孔隙对水分入渗的贡献等参数。该仪器的优势还在于它使用相对方便、快捷，而且对土壤的扰动较小，目前已经被广泛应用于研究土地利用方

式、耕作方式、土壤类型、地形坡位、灌溉等因素对优先流的影响<sup>[71]</sup>。Zhang等<sup>[60]</sup>利用圆盘入渗仪研究发现水稻土裂隙能够显著增加土壤的导水率。目前将圆盘入渗仪专门应用于裂隙流的研究报道依然非常少,因此将其应用到研究裂隙流是很好的尝试。圆盘入渗仪能够估算大孔隙优先流对水分入渗的贡献,但它是将大孔隙作为一个整体,不能区分裂隙与其他类型孔隙的贡献的差异。

(2) 染色示踪法。在自然状态下,土体内的优先流难以用肉眼观测,借助染色剂对土壤水分运动路径示踪可加强优先流的可视性。染色法能够区分土壤中水分运动活跃和不活跃的区域,用数码相机进行拍照,利用计算机软件对图像数据进行分析,得出优先流的分布等。Bouma等<sup>[72]</sup>、Bouma和Dekker<sup>[73]</sup>利用染色示踪技术分析了田间溶质迁移分布格局,开启了染色示踪研究的先河。早期对于染色图片的解读主要是将图片分为染色和不染色的两部分,然后计算染色部分的面积等指标<sup>[74]</sup>。Forrer等<sup>[75]</sup>提出了一种更为精确的图像处理方法,该方法能更好地定量土壤中染色液浓度和分布,进而分析不同孔隙的优先流状况。利用染色法,Sander和Gerke<sup>[76]</sup>以及Zhang等<sup>[60]</sup>研究了稻田裂隙的优先流现象。染色法的不足在于它是破坏性观测,不能重复观测。根据孔隙形态的差异,染色法能够大致区分裂隙与其他类型孔隙导致的优先流,但仍难以量化区分其差异。

(3) 离子穿透曲线。穿透曲线是指在土壤表层使用化学示踪剂,土壤中某一深度示踪剂的浓度随时间变化的示意图<sup>[77]</sup>。由于田间实验较为费时费力,室内经常采用原状或填充土柱测定其穿透曲线。根据穿透曲线的形状可以判断优先流的现象是否存在。Allaire等<sup>[77]</sup>认为脉冲式加入示踪剂的穿透曲线显示双峰时就表明优先流的存在。当示踪剂以连续的方式加入存在大孔隙的土体后,穿透曲线经常是极度弯曲的,而且穿透曲线的弯曲度随着优先流的重要性的增加而增加的<sup>[78]</sup>。Zhang等<sup>[79]</sup>采集田间原装土柱(高20 cm,内径10 cm)并利用穿透曲线研究了稻田裂隙对优先流的影响。室内穿透曲线的获得较为简便,但利用它定量估算优先流的作用却非常复杂,而且还受到溶液施用方法和初始含水量等因素的影响。

很多研究者也应用其他的方法对裂隙流进行了大量的研究。通过监测不同土壤层次的水分水势

或电阻率的变化可判定优先流是否存在,也可以监测到优先流发生的快慢,但不能估算裂隙流对水分入渗的贡献。Topp和Davis<sup>[80]</sup>在距离裂隙不同位置不同深度埋设时域反射仪(TDR),然后观测人工降雨条件下土壤中水分的变化,进而评估裂隙在水分入渗中的作用。Amidu和Dunbar<sup>[81]</sup>、Greve等<sup>[82]</sup>通过测定土壤剖面电阻率分布的动态变化分析裂隙流在水分变化中的作用。Mitchell和van Genuchten<sup>[83]</sup>采用蒸渗仪研究了裂隙对优先流的影响。他们将灌溉水分在开裂土体的运动分为三个部分:一是裂隙充水,二是土壤基质的吸收,三是水分在土体内的运动;最终通过估算裂隙充水所占的比例来分析裂隙对入渗的影响。利用双环入渗法测定开裂土体的入渗速率,根据初始入渗速率和稳定入渗速率的差异来评定裂隙的优先流作用;也可以与未开裂的同类土壤的入渗速率进行比较来评定裂隙流<sup>[84-85]</sup>。Tuong等<sup>[68]</sup>在研究开裂稻田灌溉时的水分运动时,通过观测水平方向上土壤的湿润水头来研究裂隙对纵向的优先流的作用;通过观测不同点地下水位的变化评价裂隙对垂直方向上优先流的影响。裂隙流的研究方法很多,但多数方法只能定性描述裂隙流存在与否;部分方法能够定量描述裂隙流对水分下渗的贡献,但往往也忽略其他非裂隙流的优先流的作用。

### 3.3 裂隙对优先流的影响

裂隙受土壤含水量的影响很大,因而裂隙对优先流的影响也比较复杂。裂隙的存在能够导致优先流的发生,使地表水很快到达土壤深层,而且通过裂隙内表面积增大了入渗面积,提高了入渗速度<sup>[85-86]</sup>。Mitchell和van Genuchten<sup>[83]</sup>报道入渗量在开裂的水稻土较非开裂的水稻土高35%左右,同时土体饱和程度更为充分。据Liu等<sup>[84]</sup>报道裂隙的产生导致水田的水分入渗率提高,但是在灌水以后由于土壤的膨胀和裂隙的闭合,水分入渗率逐渐下降。Favre等<sup>[87]</sup>也发现由于快速且非均质的土壤膨胀,裂隙所导致的优先流只能持续数小时。也有研究者发现在重新湿润后,裂隙并不会闭合,导致大量的水分下渗<sup>[68]</sup>。Návar等<sup>[88]</sup>报道裂隙产生后需要经历三个月,450 mm的降雨量后才能在土壤表面闭合。另有研究者强调即使裂隙在土壤表层闭合,它仍然能够作为优先流的路径存在<sup>[76]</sup>。这些不一致的结果可能是由于不同土壤收缩膨胀性质和环境条件的差异导致的。



裂隙流的发育与裂隙的深度密切相关, Wells等<sup>[89]</sup>通过模拟降雨实验发现在开始的几次降雨过程中, 土壤累积入渗量随着裂隙深度的增加而线性增加。Tuong等<sup>[68]</sup>在田间研究了灌水条件下开裂水稻土的水分入渗情况, 结果表明优先流占灌水总量的41%~57%, 受裂隙的深度、下层土壤导水性等因素影响。对于水稻田而言, 犁底层较为紧实且不易透水, 其导水率较耕层土壤和下层土壤低数倍, 是稻田水分下渗的限制性因素<sup>[90]</sup>。若裂隙的深度不能穿透犁底层, 裂隙导致的优先流也仅限于耕作层<sup>[60]</sup>, 对水分下渗的影响将大大减弱<sup>[91]</sup>。一旦裂隙穿透犁底层, 稻田土壤的入渗率就显著提高, 裂隙流的作用明显增强<sup>[91]</sup>。

### 3.4 裂隙导致的优先流的模拟

与生物性的大孔隙不同, 土壤的裂隙受土壤含水量的影响显著, 裂隙的几何形状会随着土壤含水量的改变而改变, 这给精确模拟裂隙导致的优先流带来很大困难。Hoogmoed和Bouma<sup>[92]</sup>提出一个模型来模拟含有裂隙的土壤的入渗情况。他们将模型分为三个方面: (1) 土壤水分垂直入渗; (2) 通过裂隙的水分流动; (3) 土体裂隙内水分的入渗。Novák等<sup>[86]</sup>在模拟裂隙流时将水分在开裂土体的入渗过程分为五个部分: (1) 在表层尚未饱和时土壤的非饱和入渗; (2) 在表层土壤饱和后水层的形成; (3) 当表层土壤饱和且水层达到关键值后, 水分通过裂隙流动; (4) 当裂隙充满水后的地表径流; (5) 裂隙内水分的横向入渗。Janssen等<sup>[93]</sup>开发了一个简单的确定性模型(PADDY-FLUX)用来评估不同水分管理模式导致的稻田结构变化(裂隙变化)对水分渗漏的影响。Liu等<sup>[91]</sup>采用FEMWATER模型<sup>[94]</sup>, 以稻田需水量, 土壤的物理性质、土壤导水率等数据作为输入参数模拟了水稻田不同裂隙状况下的水分运动。其他研究者也提出了各种模型描述开裂土体的水分和溶质的运动<sup>[95-96]</sup>, 但是这些模型所得到的结果并不十分理想, 一部分原因在于模型概念上的不足, 另一方面在于对于作为输入量的裂隙参数的精度估计有待提高。上述模型均未考虑裂隙的几何形状随含水量的变化, 因此关于裂隙流的模拟需要进一步研究。Novák等<sup>[97]</sup>将裂隙参数随含水量变化的情况引入模型, 模拟结果发现考虑裂隙变化的模型对土壤水分入渗的估算高于稳定裂隙模型。当裂隙的几何形状随含水量变化时, 开裂土体的水分

入渗受到各种复杂过程的影响。对这一复杂过程的模拟有助于理解各种过程的重要性以及裂隙对入渗的影响。

## 4 研究展望

裂隙在土壤中非常普遍, 是影响土壤水文过程的重要因素。国内外在土壤裂隙定量化、裂隙产生机制、以及裂隙对优先流的影响等方面做了许多工作。但是, 由于裂隙空间结构与优先流模拟的复杂性, 相关的科学问题需要进一步深入研究。我们认为今后裂隙及其优先流的研究重点应集中在:

(1) 全面深入分析不同环境条件下裂隙的产生机理。以往研究多关于各因素对土壤裂隙的影响的现象描述, 今后应结合土壤力学以及土壤水力学, 深入分析各因素对裂隙的影响并建立相应的数学模型; 同时加强研究多因素(土壤性质、自然环境、人为活动等)综合作用对土壤裂隙的影响。

(2) 建立定量刻画土壤裂隙指标体系, 尤其是三维指标体系; 同时应推进裂隙三维指标测定方法的研究。裂隙的三维指标才能真正反映裂隙的特征及其对水分、空气、溶质运动的影响, 三维指标完善和测定是进一步研究裂隙的基础。

(3) 关于裂隙对优先流的影响, 目前尚难以精确区分裂隙与其他类型的大孔隙对优先流的不同贡献。裂隙极不稳定, 其特征随水分变化, 对优先流的影响也处于变化之中。如何描述裂隙的动态过程对优先流的影响, 同时对该过程进行数学模拟? 这些问题均值得进一步研究。

(4) 以往关于裂隙产生发展及其对水分运动和溶质迁移影响的研究工作主要集中在室内人工装置内模拟开展, 而在田间原位的工作报道仍然较少。虽然室内实验易于控制和实施, 但其结果难以准确反映自然状态下真实情况, 因此应加强田间裂隙产生发展及其对水分和溶质运移的影响。

## 参考文献

- [1] 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. 草地学报, 2003, 11(3): 261-268. Tian H Y, Zhou D W, Li Z X, et al. Effect of expansion and contraction of grassland soil in Northeastern China (In Chinese). Acta Agrestia Sinica, 2003, 11(3): 261-268

- [ 2 ] Beven K, Germann P. Macropores and water flow in soils. *Water resources research*, 1982, 18 ( 5 ) : 1311—1325
- [ 3 ] 何毓蓉, 沈南, 王艳强, 等. 金沙江干热河谷元谋强侵蚀区土壤裂隙形成与侵蚀机制. *水土保持学报*, 2008, 22 ( 1 ) : 33—36, 42. He Y R, Shen N, Wang Y Q, et al. Mechanism of formation of soil crevice and soil erosion in intensively-eroded area in Yuanmou dry and hot valley of Jinshajiang River ( In Chinese ) . *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, 22 ( 1 ) : 33—36, 42
- [ 4 ] 邵明安, 吕殿青. 土壤收缩特征曲线的实验研究. *土壤学报*, 2003, 40 ( 3 ) : 471—474. Shao M A, Lv D Q. Experimental study on soil shrinkage characteristic curves ( In Chinese ) . *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40 ( 3 ) : 471—474
- [ 5 ] Simon J, Oosterhuis L, Reneau Jr R. Comparison of shrink-swell potential of seven Ultisols and one Alfisol using two different core techniques. *Soil Science*, 1987, 143 ( 1 ) : 50—55
- [ 6 ] Gray CW, Allbrook R. Relationships between shrinkage indices and soil properties in some New Zealand soils. *Geoderma*, 2002, 108 ( 3—4 ) : 287—299
- [ 7 ] Yule D F, Ritchie J T. Soil shrinkage relationships of Texas Vertisols: I. small cores. *Soil Science Society of America Journal*, 1980, 44 ( 6 ) : 1285—1291
- [ 8 ] Greene-Kelly R. Shrinkage of clay soils: A statistical correlation with other soil properties. *Geoderma*, 1974, 11 ( 4 ) : 243—257
- [ 9 ] Peng X, Horn R, Smucker A. Pore shrinkage dependency of inorganic and organic soils on wetting and drying cycles. *Soil Science Society of America Journal*, 2007, 71 ( 4 ) : 1095—1104
- [ 10 ] Kechavarzi C, Dawson Q, Leeds-Harrison P. Physical properties of low-lying agricultural peat soils in England. *Geoderma*, 2010, 154 ( 3 ) : 196—202
- [ 11 ] Peng X, Horn R. Identifying six types of soil shrinkage curves from a large set of experimental data. *Soil Science Society of America Journal*, 2013, 77 ( 2 ) : 372—381
- [ 12 ] De Jong E, Kozak L, Storehouse H. Comparison of shrink-swell indices of some Saskatchewan soils and their relationships to standard soil characteristics. *Canadian Journal of Soil Science*, 1992, 72 ( 4 ) : 429—439
- [ 13 ] 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. *Geoderma*, 2013, 192: 12—20
- [ 14 ] 熊东红, 周红艺, 杜长江, 等. 土壤裂缝研究进展. *土壤*, 2006, 38 ( 3 ) : 249—255. Xiong D H, Zhou H Y, Du C J, et al. A review on the study of soil cracking ( In Chinese ) . *Soils*, 2006, 38 ( 3 ) : 249—255
- [ 15 ] Bandyopadhyay K, Mohanty M, Painuli D, et al. Influence of tillage practices and nutrient management on crack parameters in a Vertisol of central India. *Soil and Tillage Research*, 2003, 71 ( 2 ) : 133—142
- [ 16 ] Flowers M, Lal R. Axle load and tillage effects on the shrinkage characteristics of a Mollic Oehraqualf in northwest Ohio. *Soil and Tillage Research*, 1999, 50 ( 3 ) : 251—258
- [ 17 ] Reeve M, Hall D, Bullock P. The effect of soil composition and environmental factors on the shrinkage of some clayey British soils. *Journal of Soil Science*, 1980, 31 ( 3 ) : 429—442
- [ 18 ] 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. *农业工程学报*, 2013, 29 ( 1 ) : 102—108. Xiong D H, Yang D, Li J J, et al. Influence factors of morphological development of soil cracks in degraded slopes in Yuanmou dry-hot valley region ( In Chinese ) . *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29 ( 1 ) : 102—108
- [ 19 ] Tang C, Shi B, Liu C, et al. Influencing factors of geometrical structure of surface shrinkage cracks in clayey soils. *Engineering Geology*, 2008, 101 ( 3 ) : 204—217
- [ 20 ] 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. *岩土力学*, 2011, 32 ( 9 ) : 2729—2734. Zhang J J, Gong B W, Hu B, et al. Study of evolution law of fissures of expansive clay under wetting and drying cycles ( In Chinese ) . *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32 ( 9 ) : 2729—2734
- [ 21 ] 张佳宝, 赵诚斋. 太湖地区水稻土的粘闭及其对土壤物理性质的影响. *土壤*, 1987, 19 ( 4 ) : 183—190, 224. Zhang J B, Zhao C Z. The puddling of paddy soils and its impact on physical properties in Tai Lake region ( In Chinese ) . *Soils*, 1987, 19 ( 4 ) : 183—190, 224
- [ 22 ] Yoshida S, Adachi K. Effects of cropping and puddling practices on the cracking patterns in paddy fields. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2001, 47 ( 3 ) : 519—532
- [ 23 ] Mohanty M, Painuli D K, Mandal K G. Effect of puddling intensity on temporal variation in soil physical conditions and yield of rice ( *Oryza sativa* L. ) in a Vertisol of central India. *Soil and Tillage Research*, 2004, 76 ( 2 ) : 83—94

- [24] Mitchell A R, van Genuchten M T. Shrinkage of bare and cultivated soil. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56 (4): 1036—1042
- [25] Sharma R, Verma G. Characterization of shrinkage cracks in medium black clay soil of Madhya Pradesh. *Plant and Soil*, 1977, 48 (2): 323—333
- [26] 唐朝生, 崔玉军, Tang A, 等. 膨胀土收缩开裂过程及其温度效应. *岩土工程学报*, 2012, 34 (12): 2181—2187. Tang C S, Cui Y J, Tang A, et al. Shrinkage and desiccation cracking process of expansive soil and its temperature-dependent behaviour (In Chinese). *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, 34 (12): 2181—2187
- [27] Tang C S, Shi B, Cui Y J, et al. Desiccation cracking behavior of polypropylene fiber-reinforced clayey soil. *Canadian Geotechnical Journal*, 2012, 49 (9): 1088—1101
- [28] Bhushan L, Sharma P K. Long-term effects of *Lantana* (*Lantana* spp. L.) residue additions on soil physical properties under rice-wheat cropping: I. Soil consistency, surface cracking and clod formation. *Soil and Tillage Research*, 2002, 65 (2): 157—167
- [29] 张毅峰. 秸秆还田抑制地表土壤裂缝工艺参数的优化. *山西农业科学*, 2011, 39 (10): 1111—1114. Zhang Y F. Optimization of process parameters of crop incorporation inhibited soil cracks at surface (In Chinese). *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2011, 39 (10): 1111—1114
- [30] 张同娟, 王益权, 刘军, 等. 黄土地区影响土壤膨胀性的因子分析. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2007, 35 (6): 185—189. Zhang T J, Wang Y Q, Liu J, et al. Factors influencing swelling of soils in Loess Plateau (In Chinese). *Journal of Northwest A & F University: Natural Science*, 2007, 35 (6): 185—189
- [31] Grossman R, Brasher B, Franzmeier D, et al. Linear extensibility as calculated from natural-clod bulk density measurements. *Soil Science Society of America Journal*, 1968, 32 (4): 570—573
- [32] Chertkov V. Modelling the shrinkage curve of soil clay pastes. *Geoderma*, 2003, 112 (1): 71—95
- [33] Peng X, Zhang Z, Wang L, et al. Does soil compaction change soil shrinkage behaviour? *Soil and Tillage Research*, 2012, 125: 89—95
- [34] Braudeau E, Costantini J, Bellier G, et al. New device and method for soil shrinkage curve measurement and characterization. *Soil Science Society of America Journal*, 1999, 63 (3): 525—535
- [35] Groenevelt P, Grant C D. Re-evaluation of the structural properties of some British swelling soils. *European Journal of Soil Science*, 2001, 52 (3): 469—477
- [36] Bruand A, Prost R. Effect of water content on the fabric of a soil material: an experimental approach. *Journal of Soil Science*, 1987, 38 (3): 461—472
- [37] Gir á ldez J V, Sposito G, Delgado C. A general soil volume change equation: I. The two-parameter model. *Soil Science Society of America Journal*, 1983, 47 (3): 419—422
- [38] 黄传琴, 邵明安. 干湿交替过程中土壤胀缩特征的研究. *土壤通报*, 2008, 39 (6): 1243—1247. Huang C Q, Shao M A. Experimental study on soil shrinking and swelling characteristics during the alternative drying and wetting processes (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, 39 (6): 1243—1247
- [39] Peng X, Horn R. Modeling soil shrinkage curve across a wide range of soil types. *Soil Science Society of America Journal*, 2005, 69 (3): 584—592
- [40] Van Genuchten M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 1980, 44 (5): 892—898
- [41] Novák V. Soil-crack characteristics—Estimation methods applied to heavy soils in the NOPEX area. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1999, 98/99: 501—507
- [42] Xiong D, Lu X, Xian J, et al. Selection of judging indicators for surface morphology of soil crack under different development degrees in Yuanmou Arid-hot Valley Region. *Wuhan University Journal of Natural Sciences*, 2008, 13 (3): 363—368
- [43] 张展羽, 王策, 朱成立, 等. 土壤干缩裂缝网络几何特征. *地球科学——中国地质大学学报*, 2014, 39 (10): 1465—1472. Zhang Z Y, Wang C, Zhu C L, et al. Geometric characteristics of shrinkage crack network in soil (In Chinese). *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2014, 39 (10): 1465—1472
- [44] 张展羽, 朱文渊, 朱成立, 等. 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*, 2013, 29 (16): 119—124. Zhang Z Y, Zhu W Y, Zhu C L, et al. Statistical characteristics of random distribution of shrinkage cracks on farmland soil surface (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29 (16): 119—124
- [45] Preston S, Griffiths B S, Young I M. An investigation into sources of soil crack heterogeneity using fractal geometry. *European Journal of Soil Science*, 1997, 48

- (1) : 31—37
- [46] Baer J, Kent T, Anderson S. Image analysis and fractal geometry to characterize soil desiccation cracks. *Geoderma*, 2009, 154 (1) : 153—163
- [47] Vogel H J, Hoffmann H, Roth K. Studies of crack dynamics in clay soil: I. Experimental methods, results, and morphological quantification. *Geoderma*, 2005, 125 (3/4) : 203—211
- [48] Ringrose-Voase A J, Sanidad W B. A method for measuring the development of surface cracks in soils: application to crack development after lowland rice. *Geoderma*, 1996, 71 (3/4) : 245—261
- [49] Kishn é A S, Morgan C L, Ge Y, et al. Antecedent soil moisture affecting surface cracking of a Vertisol in field conditions. *Geoderma*, 2010, 157 (3) : 109—117
- [50] Peng X, Horn R, Peth S, et al. Quantification of soil shrinkage in 2D by digital image processing of soil surface. *Soil and Tillage Research*, 2006, 91 (1/2) : 173—180
- [51] 李德成, Velde B, 张桃林. 土壤中裂隙与其他类型孔隙结构差异的图像比较. *土壤与环境*, 2002, 11 (1) : 57—60. Li D C, Velde B, Zhang T L. Image comparison on structures between cracks and other types of pores (In Chinese). *Soil and Environmental Sciences*, 2002, 11 (1) : 57—60
- [52] 刘春, 王宝军, 施斌, 等. 基于数字图像识别的岩土体裂隙形态参数分析方法. *岩土工程学报*, 2008, 30 (9) : 1383—1388. Liu C, Wang B J, Shi B, et al. Analytic method of morphological parameters of cracks for rock and soil based on image processing and recognition (In Chinese). *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2008, 30 (9) : 1383—1388
- [53] Abou Najm M R, Jabro J D, Iversen W M, et al. New method for the characterization of three-dimensional preferential flow paths in the field. *Water Resources Research*, 2010, 46 (2) : W02503
- [54] Dinka T M, Lascano R J. Review paper: Challenges and limitations in studying the shrink-swell and crack dynamics of Vertisol soils. *Open Journal of Soil Science*, 2012, 2 (2) : 82—90
- [55] Dasog G, Shashidhara G. Dimension and volume of cracks in a Vertisol under different crop covers. *Soil Science*, 1993, 156 (6) : 424—428
- [56] Samouëlian A, Richard G, Cousin I, et al. Three-dimensional crack monitoring by electrical resistivity measurement. *European Journal of Soil Science*, 2004, 55 (4) : 751—762
- [57] Greve A K, Acworth R I, Kelly B F. Detection of subsurface soil cracks by vertical anisotropy profiles of apparent electrical resistivity. *Geophysics*, 2010, 75 (4) : WA85—WA93
- [58] 黎伟, 刘观仕, 姚婷. 膨胀土裂隙特征研究进展. *水利水电科技进展*, 2012, 32 (4) : 78—82. Li W, Liu G S, Yao T. Research progress in crack features of expansive soils (In Chinese). *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2012, 32 (4) : 78—82
- [59] Peth S, Nellesen J, Fischer G, et al. Non-invasive 3D analysis of local soil deformation under mechanical and hydraulic stresses by  $\mu$ CT and digital image correlation. *Soil and Tillage Research*, 2010, 111 (1) : 3—18
- [60] Zhang Z B, Zhou H, Zhao Q G, et al. Characteristics of cracks in two paddy soils and their impacts on preferential flow. *Geoderma*, 2014, 228/229: 114—121
- [61] Seyfarth M, Holldorf J, Pagenkemper S. Investigation of shrinkage induced changes in soil volume with laser scanning technique and automated soil volume determination—A new approach/method to analyze pore rigidity limits. *Soil and Tillage Research*, 2012, 125: 105—108
- [62] Sanchez M, Atique A, Kim S, et al. Exploring desiccation cracks in soils using a 2D profile laser device. *Acta Geotechnica*, 2013, 8 (6) : 583—596
- [63] Uday K, Singh D. Application of laser microscopy for studying crack characteristics of fine-grained soils. *ASTM Geotechnical Testing Journal*, 2013, 36 (1) : 146—154
- [64] Hardie M A, Cotching W E, Doyle R B, et al. Effect of antecedent soil moisture on preferential flow in a texture-contrast soil. *Journal of Hydrology*, 2011, 398 (3) : 191—201
- [65] Watson K, Luxmoore R. Estimating macroporosity in a forest watershed by use of a tension infiltrometer. *Soil Science Society of America Journal*, 1986, 50 (3) : 578—582
- [66] Wilson G, Luxmoore R. Infiltration, macroporosity, and mesoporosity distributions on two forested watersheds. *Soil Science Society of America Journal*, 1988, 52 (2) : 329—335
- [67] 彭海英, 李小雁, 崔步礼, 等. 土壤优势流研究方法综述. *干旱气象*, 2011, 29 (2) : 137—143. Peng H Y, Li X Y, Cui B L, et al. Review on the study of preferential flow in soil (In Chinese). *Journal of Arid Meteorology*, 2011, 29 (2) : 137—143

- [ 68 ] Tuong T, Cabangon R, Wopereis M. Quantifying flow processes during land soaking of cracked rice soils. *Soil Science Society of America Journal*, 1996, 60 ( 3 ) : 872—879
- [ 69 ] Perroux K, White I. Designs for disc permeameters. *Soil Science Society of America Journal*, 1988, 52 ( 5 ) : 1205—1215
- [ 70 ] Kechavarzi C, Špongrová K, Dresser M, et al. Laboratory and field testing of an automated tension infiltrometer. *Biosystems Engineering*, 2009, 104 ( 2 ) : 266—277
- [ 71 ] Angulo-Jaramillo R, Vandervaere J-P, Roullet S, et al. Field measurement of soil surface hydraulic properties by disc and ring infiltrometers: A review and recent developments. *Soil and Tillage Research*, 2000, 55 ( 1 ) : 1—29
- [ 72 ] Bouma J, Jongerius A, Boersma O, et al. The function of different types of macropores during saturated flow through four swelling soil horizons. *Soil Science Society of America Journal*, 1977, 41 ( 5 ) : 945—950
- [ 73 ] Bouma J, Dekker L W. A case study on infiltration into dry clay soil I. Morphological observations. *Geoderma*, 1978, 20 ( 1 ) : 27—40
- [ 74 ] Petersen C, Hansen S, Jensen H. Tillage-induced horizontal periodicity of preferential flow in the root zone. *Soil Science Society of America Journal*, 1997, 61 ( 2 ) : 586—594
- [ 75 ] Forrer I, Papritz A, Kasteel R, et al. Quantifying dye tracers in soil profiles by image processing. *European Journal of Soil Science*, 2000, 51 ( 2 ) : 313—322
- [ 76 ] Sander T, Gerke H H. Preferential flow patterns in paddy fields using a dye tracer. *Vadose Zone Journal*, 2007, 6 ( 1 ) : 105—115
- [ 77 ] Allaire S E, Roullet S, Cessna A J. Quantifying preferential flow in soils: A review of different techniques. *Journal of Hydrology*, 2009, 378 ( 1/2 ) : 179—204
- [ 78 ] Allaire-Leung S E, Gupta S C, Moncrief J F. Water and solute movement in soil as influenced by macropore characteristics: 1. Macropore continuity. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2000, 41 ( 3/4 ) : 283—301
- [ 79 ] Zhang Z B, Peng X, Zhou H, et al. Characterizing preferential flow in cracked paddy soils using computed tomography and breakthrough curve. *Soil and Tillage Research*, 2015, 146: 53—65
- [ 80 ] Topp G, Davis J. Detecting infiltration of water through soil cracks by time-domain reflectometry. *Geoderma*, 1981, 26 ( 1 ) : 13—23
- [ 81 ] Amidu S A, Dunbar J A. Geoelectric studies of seasonal wetting and drying of a Texas vertisol. *Vadose Zone Journal*, 2007, 6 ( 3 ) : 511—523
- [ 82 ] Greve A, Acworth R, Kelly B. 3D Cross-hole resistivity tomography to monitor water percolation during irrigation on cracking soil. *Soil Research*, 2012, 49 ( 8 ) : 661—669
- [ 83 ] Mitchell A R, van Genuchten M T. Flood irrigation of a cracked soil. *Soil Science Society of America Journal*, 1993, 57 ( 2 ) : 490—497
- [ 84 ] Liu C W, Cheng S W, Yu W S, et al. Water infiltration rate in cracked paddy soil. *Geoderma*, 2003, 117 ( 1 ) : 169—181
- [ 85 ] 马佳. 裂土优势流与边坡稳定性分析方法. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2007. Ma J. Preferential flow and stability analysis method for fissure clay slopes ( In Chinese ). Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2007
- [ 86 ] Novák V, Simunek J, van Genuchten M T. Infiltration of water into soil with cracks. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2000, 126 ( 1 ) : 41—47
- [ 87 ] Favre F, Boivin P, Wopereis M C S. Water movement and soil swelling in a dry, cracked Vertisol. *Geoderma*, 1997, 78 ( 1/2 ) : 113—123
- [ 88 ] N ú var J, Mendez J, Bryan R B, et al. The contribution of shrinkage cracks to bypass flow during simulated and natural rainfall experiments in northeastern Mexico. *Canadian Journal of Soil Science*, 2002, 82 ( 1 ) : 65—74
- [ 89 ] Wells R, DiCarlo D, Steenhuis T, et al. Infiltration and surface geometry features of a swelling soil following successive simulated rainstorms. *Soil Science Society of America Journal*, 2003, 67 ( 5 ) : 1344—1351
- [ 90 ] Janssen M, Lennartz B. Horizontal and vertical water and solute fluxes in paddy rice fields. *Soil and Tillage Research*, 2007, 94 ( 1 ) : 133—141
- [ 91 ] Liu C W, Chen S K, Jang C S. Modelling water infiltration in cracked paddy field soil. *Hydrological Processes*, 2004, 18 ( 13 ) : 2503—2513
- [ 92 ] Hoogmoed W, Bouma J. A simulation model for predicting infiltration into cracked clay soil. *Soil Science Society of America Journal*, 1980, 44 ( 3 ) : 458—461
- [ 93 ] Janssen M, Lennartz B, Wöhling T. Percolation losses in paddy fields with a dynamic soil structure: model development and applications. *Hydrological Processes*, 2010, 24 ( 7 ) : 813—824
- [ 94 ] Lin H-C J, Richards D R, Yeh G-T, et al. FEMWATER: A three-dimensional finite element computer model for simulating density-dependent

- flow and transport in variably saturated media. Technical report, No. WES/TR/CHL-97-12. Vicksburg Mississippi, USA: Army Engineer Waterways Experiment Station, 1997
- [ 95 ] Armstrong A C, Matthews A M, Portwood A M, et al. CRACK-NP: A pesticide leaching model for cracking clay soils. *Agricultural Water Management*, 2000, 44 ( 1/3 ) : 183—199
- [ 96 ] van Genuchten M T, Sudicky E. Recent advances in vadose zone flow and transport modeling//*Vadose zone hydrology: Cutting across disciplines*. New York: Oxford University Press, 1999: 155—193
- [ 97 ] Novák V, Šimůnek J, van Genuchten M T. Infiltration into a swelling, cracked clay soil. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 2002, 50 ( 1 ) : 3—19

## A REVIEW OF RESEARCHES ON SOIL CRACKS AND THEIR IMPACTS ON PREFERENTIAL FLOW

Zhang Zhongbin Peng Xinhua<sup>†</sup>

( *State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China* )

**Abstract** Soil tends to shrink and form cracks when it gets dried up. Soil cracks are formed under the joint effect of a variety of factors, like soil properties and environment conditions, and very complicate and hard to describe precisely in morphological structure. As they may act as pathways for preferential flow, their presence enhances the risks of water and nutrient loss and pollution of groundwater. Soil properties, such as soil clay content, soil mineral composition, soil organic carbon content and bulk density, etc. are the main factors affecting soil cracking, while wetting and drying alternation, tillage and plant growth are its external affecting factors. So far, the characterizing indices and determination methods available for soil cracks focus mainly on their two-dimensional structural features, and little has been reported about characterizing indices and determination methods for three-dimensional structure of cracks. The methods for measuring preferential flow caused by soil cracks include dye tracer, disc permeameter, breakthrough curve, profile soil water potential measurement and so on. Cracks vary in feature with soil water content, so the effect of soil cracks on preferential flow is complicate, and closely related to soil properties, soil water content and depth of the cracks. The dynamic variation of cracks makes it more difficult to simulate preferential flow caused by soil cracks. It is, therefore, suggested that more efforts should be dedicated in future to conducting in-depth complete researches on crack-forming mechanism; establishing three-dimensional index systems and determination methods for soil cracks and improving the systems and methods; promoting researches on quantification and mathematic simulation of crack-induced preferential flow; and enhancing in situ field study of cracks and preferential flow.

**Key words** Soil cracks; Soil shrinkage; Soil water; Preferential flow

( 责任编辑: 陈德明 )

CONTENTS

**Reviews and Comments**

- Application of reductive soil disinfection to suppress soil-borne pathogens ..... Cai Zucong, Zhang Jinbo, Huang Xinqi, et al. ( 475 )  
 A review of researches on soil cracks and their impacts on preferential flow...Zhang Zhongbin, Peng Xinhua ( 488 )

**Research Articles**

- Characteristics of soil aggregate loss in croplands in the typical black soil region of Northeast China ..... Wen Leilei, Zheng Fenli, Shen Haiou, et al. ( 498 )  
 Construction of an index set for predicting thickness of active layer of permafrost in Qinghai-Tibet Plateau and for mapping ..... Chen Jike, Zhao Yuguo, Zhao Lin, et al. ( 506 )  
 Variation of mineral composition along the soil chronosequence at the Hailuoguo Glacier foreland of Gongga Mountain ..... Yang Zijiang, Bing Haijian, Zhou Jun, et al. ( 515 )  
 Composition of organic carbon in paddy soil in typical area of Chengdu and its influencing factors ..... Liao Dan, Yu Dongsheng, ZhaoYongcun, et al. ( 526 )  
 Spatio-temporal variation of soil temperature and soil moisture regime in Hebei Province ..... Cao Xianghui, Lei Qiuliang, Long Huaiyu, et al. ( 536 )  
 Vertical distribution of soil saturated hydraulic conductivity in a small karst catchment ..... Fu Tonggang, Chen Hongsong, Wang Kelin ( 546 )  
 Transformation between soil water and shallow groundwater in the middle reaches of the Dagu River ..... Yang Yuzheng, Lin Qing, Wang Songlu, et al. ( 556 )  
 Determination of nitrogen and oxygen isotope ratio of nitrate in water with a chemical conversion method ..... Wang Xi, Cao Yacheng, Han Yong, et al. ( 565 )  
 Quantitative research on effects of nitrogen application rate on distribution of photosynthetic carbon in rice-soil system using <sup>13</sup>C pulse labeling technique ..... Liu Ping, Jiang Chunyu, Li Zhongpei ( 574 )  
 Effects of no-tillage ridge-cultivation on soil organic carbon accumulation in ridges and crop yields in paddy fields ..... Ci En, Wang Liange, Ding Changhuan, et al. ( 585 )  
 Residual of applied <sup>15</sup>N fertilizer in soils under long-term different patterns of fertilization and its utilization ..... Zhao Wei, Liang Bin, Zhou Jianbin ( 595 )  
 Effect of long-term fertilization on rice yield and basic soil productivity in red paddy soil under double-rice system ..... Lu Yanhong, Liao Yulin, Zhou Xing, et al. ( 605 )  
 Effects of long-term fertilization on yield variation trend, yield stability and sustainability in the double cropping rice system ..... Ji Jianhua, Hou Hongqian, Liu Yiren, et al. ( 618 )  
 Relationship between exudation of nitrification inhibitor MHPP and plasma membrane proton pump of sorghum root ..... Zhou Jinquan, Zhang Mingchao, Wei Zhijun, et al. ( 527 )  
 Effects of long-term amendment with passivant and zinc fertilizer on cadmium reduction in tobacco growing in a Cd contaminated field ..... Cao Chenliang, Wang Wei, Ma Yibing, et al. ( 635 )  
 Effects of interaction between potassium and humic acid on index of organic potassium salt in flue-cured tobacco ..... Zheng Dongfang, Xu Jiayang, Xu Zicheng, et al. ( 645 )  
 Impacts of replacement of *Pinus* with *Eucalyptus* on soil nutrients and enzyme activities ..... Zhang Kai, Zheng Hua, Chen Falin, et al. ( 653 )  
 Effects of biological soil crusts on soil enzyme activities in desert areas ..... Yang Hangyu, Liu Yanmei, Wang Tingpu ( 663 )  
 Effect of incorporation of crop straw on composition of soil organic matter and enzyme activity in black soil relative to depth and rate of the incorporation ..... Jiao Lina, Li Zhihong, Yin Chengcheng, et al. ( 671 )  
 Effect of *Streptomyces* JD211 promoting growth of rice seedlings and diversity of soil bacteria ..... Wang Shiqiang, Wei Saijin, Yang Taotao, et al. ( 681 )

**Research Notes**

- Quality assessment of oasis soil in the upper reaches of Tarim River based on minimum data set ..... Gong Lu, Zhang Xueni, Ran Qiyang ( 689 )  
 Effect of iron plaque on surface electrochemical properties and short-term N, P and K uptake by rice roots .....Zheng Yunyun, Li Zhongyi, Li Jiuyu, et al. ( 695 )  
 The changes of microbial community structure in red paddy soil under long-term fertilization ..... Xia Xin, Shi Kun, Huang Qianru, et al. ( 705 )  
 Salinization characteristics of afforested coastal saline soil as affected by species of trees used in afforestation ..... Wang Heyun, Li Hongli, Dong Zhi, et al. ( 712 )

**Cover Picture:** Two dimensional and three dimensional images of soil cracks in paddy field ( by Zhang Zhongbin )

# 《土壤学报》编辑委员会

主 编: 史学正

执行编委: (按姓氏笔画为序)

丁维新	巨晓棠	王敬国	王朝辉	史 舟	宇万太	朱永官
李永涛	李芳柏	李保国	李 航	吴金水	沈其荣	张玉龙
张甘霖	张福锁	陈德明	邵明安	杨劲松	杨明义	杨林章
林先贵	依艳丽	周东美	周健民	金继运	逢焕成	胡 锋
施卫明	骆永明	赵小敏	贾仲君	徐国华	徐明岗	徐建明
崔中利	常志州	黄巧云	章明奎	蒋 新	彭新华	雷 梅
窦 森	廖宗文	蔡祖聪	蔡崇法	潘根兴	魏朝富	

编辑部主任: 陈德明

责任编辑: 汪枳生 卢 萍 檀满枝

## 土 壤 学 报

### Turang Xuebao

(双月刊, 1948年创刊)

第 52 卷 第 3 期 2015 年 5 月

## ACTA PEDOLOGICA SINICA

(Bimonthly, Started in 1948)

Vol. 52 No. 3 May, 2015

编 辑 《土壤学报》编辑委员会  
地址: 南京市北京东路 71 号 邮政编码: 210008  
电话: 025 - 86881237  
E-mail: actapedo@issas.ac.cn

Edited by Editorial Board of Acta Pedologica Sinica  
Add: 71 East Beijing Road, Nanjing 210008, China  
Tel: 025 - 86881237  
E-mail: actapedo@issas.ac.cn

主 编 史 学 正  
主 管 中 国 科 学 院  
主 办 中 国 土 壤 学 会  
承 办 中国科学院南京土壤研究所

Editor-in-Chief Shi Xuezheng  
Superintended by Chinese Academy of Sciences  
Sponsored by Soil Science Society of China  
Undertaken by Institute of Soil Science,  
Chinese Academy of Sciences

出 版 科 学 出 版 社  
地址: 北京东黄城根北街 16 号 邮政编码: 100717

Published by Science Press  
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,  
Beijing 100717, China

印刷装订 北京中科印刷有限公司  
总发行 科 学 出 版 社  
地址: 北京东黄城根北街 16 号 邮政编码: 100717  
电话: 010 - 64017032  
E-mail: journal@mail.sciencep.com

Printed by Beijing Zhongke Printing Limited Company  
Distributed by Science Press  
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,  
Beijing 100717, China  
Tel: 010 - 64017032  
E-mail: journal@mail.sciencep.com

国外发行 中国国际图书贸易总公司  
地址: 北京 399 信箱 邮政编码: 100044

Foreign China International Book Trading Corporation  
Add: P. O. Box 399, Beijing 100044, China

国内统一刊号: CN 32-1119/P

国内邮发代号: 2-560

国外发行代号: BM45

定价: 60.00 元

国 内 外 公 开 发 行



ISSN 0564-3929

