DOI:10.13758/j.cnki.tr.2006.03.003

土壤裂缝研究进展①

熊东红[1,2]， 周红艺[1]， 杜长江[1,2]， 杨 忠[1]， 张信宝[1]

（1 中国科学院/水利部成都山地灾害与环境研究所， 成都 610041； 2 中国科学院研究生院， 北京 100049）

摘 要： 土壤开裂是一个复杂的物理过程，裂缝形成对土壤性状、作物生长以及水分溶质运输均有重要影响。本文介绍了目前国际上土壤裂缝的表征指标体系及指标测定方法，并讨论分析了裂缝与土壤属性、裂缝发育与植被生长、裂缝形成与土壤入渗和溶质运输等方面的最新国际研究进展，在此基础上，对我国今后的土壤裂缝研究工作的方向和重点提出了建议。

关键词： 土壤裂缝；表征指标；土壤属性；植被生长；水分溶质运输

中图分类号： S152.4

土壤开裂是关系到土壤性状、作物生长及水分溶质运输的一个复杂过程。土壤的膨胀收缩特性一直是土壤物理学、工程地质学深切关注的问题之一，以往有关此方面的研究也较多。但是关于土壤失水收缩产生裂缝方面的研究，国内外相关的报道并不多见。在全球日益变暖和旱涝灾害日渐频繁发生的背景下，土壤开裂现象日趋普遍。由于土壤裂缝的形成关系到土壤结构和土壤入渗性能的变化、土壤水分的蒸发散失状况、土壤溶质的优先迁移及因此带来的土壤水质量的恶化，甚至影响植株根系的发育[1]等诸多土壤重要性质及土体中进行的重要物理、化学及生物过程，该方面研究正成为土壤学、水文学、工程地质学、环境科学共同关注的热点课题之一。近年来，国际上有关土壤裂缝的研究报道呈持续增长的趋势。但是，迄今为止，土壤开裂的许多理论问题及相关的过程机理尚不清楚，还未能形成公认的或统一的裂缝指标体系和较完善的指标测定方法。及时了解和跟踪国际上土壤裂缝研究的最新进展和前沿，对于我国土壤裂缝研究工作的开展具有重要的指导意义。

1 裂缝表征指标及测定方法

1.1 裂缝表征指标

建立一套完善的裂缝指标体系，是系统深入地开展土壤裂缝研究的重要基础和前提。由于裂缝形态发育特征复杂无序，其产生机制尚不完全清楚，迄今为止，尚未形成完善的土壤裂缝指标体系。

以往的研究多集中于对土壤膨胀收缩特性的研究方面，对于地表裂缝发育状况多数仅用“裂缝可见、明显”、“裂缝数目多、数目少”及裂缝的宽度范围等来定性的粗略描述[2-4]，而有关裂缝的几何分布、连接度等与土壤功能密切相关的重要特征却鲜有涉及，未能满足研究需要。

目前，多数研究者采用裂缝的平均体积、平均深度、平均宽度来表征裂缝特征。如 Flower 等[5]在研究不同耕作方式和不同的压实负载对土壤裂缝发生特征的影响时即采用上述 3 项指标来表征水稻土中的裂缝性状。但该指标体系存在表达过于粗略、不能充分反映出裂缝的开裂模式、地表形态发育的复杂特征等问题。

有研究者[6]建议采用裂缝异质性（crack heterogeneity）、裂缝连通度（crack connectivity）及裂缝总密度（total crack density）组成的指标体系。裂缝异质性表示裂缝特征随样方变化的程度，裂缝连通度表示裂缝间连接状况，裂缝总密度用裂缝图像中黑白像元所占的百分比来表示。该指标体系采用分形几何的方法确立裂缝指标，为定量化描述复杂的裂缝几何形态提供了一个很好的思路，应该是今后裂缝表征体系的一个发展方向。但该指标体系中还欠缺直观的、形象描述野外裂缝形态的参数，尚未

①基金项目：国家自然科学基金课题项目（30470297）和国家重点基础研究发展计划项目（2003CB415201）资助。

作者简介：熊东红（1974—），男，江西奉新人，博士研究生， 助理研究员，主要从事土壤水分、土壤质量、植被恢复等方面的研究。E-mail: dhxiong@imde.ac.cn

形成较完善的裂缝表征体系。

Volgel 等[7]进一步引用拓扑学的概念和方法，建立了由 3 个明可夫斯基值（Minkowski numbers）—面密度（area density）、长密度（length density）、欧拉值（Euler number）以及裂缝分支角度组成的裂缝形态表征体系：面密度、长密度量度裂缝大小，欧拉值量度裂缝网络的连通性，裂缝交叉角度分布频率标定裂缝形态。该体系突破了传统欧式几何的局限，在定量复杂的裂缝形态上亦作出了积极、有益的探索，但是该指标体系过于简单、抽象，仍需要结合其他传统数学指标进一步具体化、形象化。

Novak 等[8]建议的裂缝特征指标较为系统、全面，可用于定量分析裂缝对降雨入渗和土壤水分保持过程的影响。该指标体系具有直观可靠、适于常规测定的特点，现介绍如下：

(1) 裂缝裂隙度（crack porosity）：定义为典型开裂土体中的裂缝体积与开裂土体体积（representative volume of soil）之比，用公式表示为：

$$Pc = Vc/V \tag{1}$$

式中 Vc 为典型开裂土体中裂缝体积，V 为典型开裂土体体积。

(2) 裂缝地表裂隙度（crack porosity on the soil surface）：定义为典型开裂土体的裂缝地表面积与其表面积之比。用公式表示为：

$$Pc(0) = Ac(0)/A \tag{2}$$

式中 $Ac(0)$为典型开裂土体裂缝地表面积，A 为典型开裂土体表面积。

(3) 裂缝比内表面积（specific internal area of soil crack）：定义为典型开裂土体的裂缝总内表面积与其土体体积之比。用公式表示为：

$$Sc = Ac/V \tag{3}$$

式中 Ac 为典型开裂土体裂缝总内表面积，V 为典型开裂土体体积。若已知开裂土体单位地表面积的裂缝长度 Lc，及裂缝深度 Z，则裂缝比内表面积可表示为：$Sc = 2LcZ$。

开裂土体裂缝表面积及裂缝体积的积分表达式分别为：

$$Sct = 2\int_{Zc}^{0} Lcdz \tag{4}$$

$$Vct = 2\int_{Zc}^{0} Vc(z)dz \tag{5}$$

式中 Lc 为单位面积典型开裂土体的地表裂缝长度，Vc 为单位面积典型开裂土体的裂缝体积，z 为土体开裂深度。

该指标体系是目前较为系统的裂缝形态指标体系，能够初步地表示出土体开裂的程度，所选取的指标具有简单直观、易于测定的优点，但是也存在明显的不足：如所选指标不能表达出裂缝的分支特征及相互间的连通度等，未能提出表征裂缝发育的几何形态指标。

总之，目前建立的土壤裂缝形态指标还很不完善，还未能建立各种表征裂缝复杂形态及功能的指标体系。笔者认为，理想的裂缝指标体系应该表达直观、易于测定、能够反映土壤裂缝开裂程度、发育形态的复杂性，并且能将其与土壤的收缩特性、土壤的入渗性能、持水性能、土壤的导通性等联系起来。鉴于土壤裂缝形态及发育过程的复杂性，如何应用非线性数学如分形几何学[6,9]、拓扑学[7]的概念及方法来定量表征裂缝形态与功能是未来指标体系建立的发展方向。

1.2 裂缝基本指标的测定方法

裂缝的地表面积、在土体内发育深度及裂缝体积为表达裂缝特征的基本参数，目前文献介绍的比较有代表性的测定方法是：

1.2.1 裂缝地表面积测定

具体分为如下两种测定方法。

(1) 图像分析法。这是目前应用较为普遍的裂缝地表面积测定方法[5,8]。其做法是在一典型裂缝样地内选定一最小地表代表面积（minimum representative surface area），通过数码相机实地拍摄照片获得裂缝形态特征图像，然后在室内应用专业计算机软件提取裂缝地表面积，计算获得裂缝面积的百分比。该方法具有测定简单快速、测量精度较高的优点，但仅适用于在地表无覆被或覆被较少且开裂程度较高的裂缝样地，如干涸的塘湖裂缝地块、休闲水田地块等，对于那些开裂程度较小、草被茂盛的裂缝地块，由于草被的掩蔽作用导致电脑的分辨能力降低，面积测定误差较大。

(2) 网格法。这是借用植被生态学中植被盖度样地调查的方法。其做法是将事先制作好的样框放置于裂缝样地中，依次测定记录样框中每个格子中每条裂缝的宽度及长度，最后计算整个样框面积内裂缝所占的地表面积。由于该法是人工实地测量，所以一般不易产生图像分析法中的裂缝与草被的辨识误差，适用于各种地表覆被状况下的裂缝地表面积测定，精度也能满足要求，缺点是该方法费时、

费力，有时一个 1 m^2 的样框测定需要近 2 h。

1.2.2　裂缝发育深度测定　　裂缝深度是裂缝特征参数中测定最为困难的一个。由于裂缝在土体中的发育多呈现弯曲性及多元分支性，造成野外深度测定的实际困难。对于裂缝发育深度的测定，文献上未见有较完善的测定方法报道。目前常用的方法是塑杆实测法[8]，即用一根不易折断带标尺的弹性塑料质细杆（直径 1 mm 左右），插入每条裂缝中直至其触及到坚硬接触面为止，此时测定的塑绳长度即可认为是该条裂缝的发育深度近似值。该方法仅考虑的是裂缝在土体中垂直发育的情况，无法顾及到裂缝在土体中经常出现的分叉性发育情况，测定值往往仅是裂缝发育深度的一部分，因而总体精度不高，且费时费力。

1.2.3　裂缝内表面积及体积的测定　　裂缝内表面积的大小直接影响裂缝的水分蒸发速率，裂缝的体积大小则关系到降雨入渗速率及入渗量，这二者均为影响裂缝中溶质运移的重要指标。目前直接测定二者的方法仅见于 Anatja Samouelian 等[10]报道的电阻成像法（electrical resistivity imaging method），该法虽快速精确但仍局限于实验室内的裂缝测定。较为通用的方法是通过已获取的裂缝宽度、长度、发育深度参数计算得到[8]。内表面积的计算通常将裂缝视为在土体中一元垂直延伸，且无分叉的深度均一的表面计算获得，体积的计算则视裂缝为一定深度的楔形体，通过计算该楔形体体积获得体积的近似值。

总之，目前裂缝表征的指标体系尚不完善，各种参数的测定方法亦存在明显局限性，建立一套可靠的、易于操作的测定方法是今后裂缝研究的重要目标之一。

2　土壤收缩开裂与土壤属性

土壤开裂与土壤的许多属性有关，包括土壤黏粒含量、有机质、比表面积和阳离子交换量等。

(1) 黏粒含量：在所有相关的土壤属性中，黏粒含量是最常用来表示土壤收缩开裂潜力的一个参数。Simon 等[11]研究发现，42% 的 COLErod 值的变化和 71% 的 COLEstd 值的变化均与黏粒含量有关；有些研究发现土壤收缩特征与细黏粒密切相关[12-13]。但是，也有研究者认为黏粒含量与土壤收缩不存在相关关系[14]。

(2) 土壤矿物组成：对于主要矿物成分为同一具膨胀收缩性的黏土矿物的土壤，黏粒含量与土壤收缩具显著的正相关关系。但是，就土壤收缩而言，土壤所含的黏土矿物的类型所起的决定作用比其黏粒含量更为显著。如 Ross 等[15]采用主要含量分别为蒙脱石、高岭土、伊利石等的土样研究发现，只有在排除蒙脱石这类高收缩的土类后，黏粒含量与土壤收缩的相关系数才会从 0.56 升至 0.81。

(3) 比表面积：土壤颗粒的比表面积是一个与土壤收缩开裂密切相关的土壤属性。Gray 等[16]研究发现 COLErod 和 COLEstd 都与比表面积显著相关（其相关系数达 0.8 以上），这从另一个角度支持了“土壤收缩不仅与黏粒含量有关，更与黏土矿物类型有关”的研究结果。

(4) 阳离子交换量（CEC）：CEC 被许多研究者证实与土壤收缩开裂呈正相关关系[14, 17-18]。Smith 等[19]亦曾报道，以色列 32 种土壤的 COLE 与 CEC 之间的回归系数高达 0.81，该 32 种土壤包含了大多数的土壤黏土矿物类别。Ritchie 等[14]也认为 CEC 整合了土壤黏粒的数量及活性特征。但也有研究者如 Gray 等[16]发现 CEC 与土壤收缩指标 $COLE_{std}$ 关系并不显著。

(5) 土壤体积质量（容重）：研究表明土壤样品风干体积质量和烘干体积质量均与其收缩特征呈显著的负相关关系（与 COLErod 和 COLEstd 的相关系数分别为：-0.720, -0.704)[16]。由于土壤收缩程度与土壤中具膨胀性质的黏粒含量正相关，这意味着具强膨胀收缩性的黏粒能产生疏松结构的土壤，其体积质量较低，不具有膨胀收缩性黏粒的土壤体积质量较高。如主要矿物成分为高膨胀收缩性的水铝英石的土壤，相应其土壤体积质量较低；而高岭石是非膨胀性的，孔隙结构少，相应其土壤体积质量也高。

(6) 有机碳：对于有机碳在土壤收缩开裂中的作用，目前还存在争论意见。Reeve 等[20]研究发现，表层与亚表层土样中的有机质均与土壤收缩正相关，而大多数的研究者如 De Jong 等[18]、Smith 等[19]认为土壤有机碳与土壤收缩性质无相关关系。

3　裂缝分布与植被生长

土壤与植被生长一直是倍受人们关注的领域。作为土壤干旱收缩后的常见现象，土壤开裂对植株干旱胁迫下的生理具有重要影响。目前这方面的研究还不够全面深入，主要集中于植株的布局尤其是

根系吸水与土壤裂缝发育特征的关系上。

多数学者研究表明，植被覆盖下的土壤裂缝发育受植株位置布局和根系发育的影响。Dasog 等[21]发现自然状况下的草地，其开裂程度低于人工行式种植草地。随后人们发现，一般而言，天然植被覆盖下的土壤开裂程度低于人工行式种植的同一种植被下的土壤[22-23]。Fox 等[24]发现大裂缝集中发生于行式种植作物行间，且通常平行于种植行，而小裂缝通常正交于大裂缝，并从不截断根系，因此提出 Skeleton shrinkage 概念，认为根系对土壤起到一种类似骨架一样的锚定作用，并认为耕作土壤的开裂模式（cracking pattern）不仅仅是土壤自身属性的函数，还是植株布局（placement of plant）的函数；Mitchell 和 van Genuchten[22]也得出了类似的结论，并认为裂缝通常形成于土壤起始含水量最高区域内的阻力最小点。Johnson[25]还探讨了行距对行间裂缝的影响并得出"行距越宽，裂缝宽度越大"的结论。这些研究表明因植株根系伸展引起的土壤锚定和水分的双向流动导致了行间裂缝的产生，但未能区分二者对裂缝的具体影响。

进一步的研究表明：因根系吸水导致的土壤水分吸力差异分布格局决定了行间裂缝的位置。Yoshida 等[26]注意到在植株蒸腾作用活跃条件下形成的表层裂缝倾向于呈线状并与植株行平行，若无植株蒸腾则呈现各向同性；因而得出：根系吸水导致的土壤水吸力的不均匀分布，决定了行间裂缝的分布格局。行间裂缝水分运动的研究直到 Nieber 等[27]的创新性工作，才有所突破。他们模拟了因蒸腾蒸发作用产生于两作物行中心的拉伸应力（tensile stress）的产生过程，表明不饱和水流的双向运动导致植株行间裂缝的产生；开裂的临界应力大小随土壤水分变化颇大。该模型成功地模拟了双向不饱和水流导致行间拉伸应力产生的现象，但从土壤力学的角度来看，还很有必要进一步讨论模拟拉伸应力与行间裂缝产生之间的关系。随后的 Nearing 等[28]进一步研究了饱和土壤的拉伸应力对吸力的依赖关系。他们的研究表明，土壤开裂的临界状态不应仅根据土壤全部应力（totle stress）的大小来判断，而应从全部应力与吸力的平衡来分析；并提出采用有效应力 (effective stress）的概念来解决。Yoshid 等[29]模拟研究进一步发现：作物蒸腾和水的双向流动导致应力上升，一旦应力总和与土壤吸力平衡打破，行间裂缝就不可避免出现；水平方向的有效拉伸应力在土壤吸力上升处达到峰值，该处趋近于植株行中央，并随内部吸力增大而增大；有效拉伸应力的分布可有 1 个或 2 个峰值，取决于当时的条件；较大的蒸腾通量、较宽的行距和较薄的土层都易导致有效拉伸应力的双峰分布，导致平行于植株行的双条裂缝产生。

4 裂缝与土壤水分入渗和溶质运输

土壤裂缝研究在水文学上意义重大。土壤在干旱失水条件下收缩产生裂缝，导致结构上的重大变化，其开裂性能对土体中的水分、溶质运输过程具有十分重要的影响。裂缝的大小规模及弯曲度很大程度上决定了水分及其溶质的输送速率，裂缝的分布及导通度决定了径流的通道，因此决定了物质在土壤剖面的扩散状况。目前有关开裂土壤的溶质运移研究受到广泛的关注。

裂缝形成的重要意义及其对土壤水分入渗的重要影响早在上世纪 50 年代就为 Stirk[30] 所关注。他认为裂缝体积能有效提高大雨期间土壤持水能力，促使土壤表面形成小积水塘，有效抑制地表径流的形成；裂缝的内表面也增大了土壤入渗面积，使得开裂土体比未开裂时能保持更多的水分供植株利用。其后的研究如 Bouma 等[31]、Beven 等[32] 也认为，裂缝体积能充分提高持水体积和入渗强度，阻止地表径流的产生；土壤大孔隙尤其是土壤裂缝，能快速地将上层土壤水分和溶质越过不饱和区域导入到地下水，并因此造成地下水质的恶化。

Tabuchi[33] 研究了高、低强度的降雨对土壤裂缝的季节性效果，发现裂缝深度随土壤干旱程度的增大而加深；裂缝提供了一个优先流通道并显著提高了入渗。Mitchell 和 van Genuchten[22] 在一块空闲的水稻田测定了两个地点开裂土壤的入渗量，发现入渗量分别提高了 36.1% 和 35.4%，并发现开裂土壤中水分通过裂缝系统时，能使土体达到的饱和程度比在未开裂土壤中更为充分。Novak[34] 提出了 FRACTURE 模型来模拟水分通过裂缝而无膨胀的入渗过程。模拟结果表明未开裂土壤的入渗量比开裂土壤低 66%。

Liu 等[35] 深入研究了台湾水稻土干旱开裂后的水分入渗及伴随的裂缝闭合过程。研究发现，土壤裂缝只是短暂地提高了水稻土的入渗速率，随着土壤膨胀闭合裂缝，入渗速率显著下降并逐渐返回到未开裂土壤的状态。开裂水稻田显著提高了土壤入

渗率，但在降雨 200 mm 后入渗速率迅速降低为原来的一半。水分入渗后土壤的膨胀极为强烈地影响入渗速率，随着入渗过程的进行，土壤开始膨胀并逐渐闭合裂缝，缝合犁底层；入渗也分散了土壤黏粒并使之在裂缝表面再次沉积，因而大大降低了入渗速率。

总之，目前的研究表明，土壤裂缝对土壤水分保持，土壤入渗具有重要影响，且多起积极的、正面的作用，但是对于开裂土壤溶质运输，尤其是农药、化肥、除草剂等污染物通过裂缝系统运移导致水质污染仍显研究力度不够。

5　土壤裂缝的研究方向与重点

鉴于当前国内外裂缝研究的最新进展，结合我国的实际情况，笔者认为，我国今后一段时间的土壤裂缝研究应集中在土壤裂缝指标体系及指标测定方法，土壤裂缝产生机制，裂缝对土壤水文过程及植被生长的影响，开裂土壤的水分、物质运移规律特别是污染物质运移特性等几个方面。具体来说，有以下几个方面的研究重点。

(1) 裂缝指标体系及测定方法。建立更为恰当合理的裂缝表征指标体系及简单可靠的指标测定方法是深入系统地进行裂缝研究的前提，也是目前研究的当务之急。土壤开裂程度该用哪些指标来量化？如何进一步应用分形几何[6,9,40]、拓扑学[7]等现代数学方法定量描述裂缝复杂的几何形态？能否应用一些较先进的科技手段，如地透雷达技术[36]、CT 扫描技术[37]等快速、非扰动的微波技术及土壤切片数字成像技术[38]、X 光-同步加速器计算机三维透视技术[39] 来替代当前粗糙的裂缝三维结构测定方法？这些问题都是值得进一步深入探讨的。另外，还应针对不同的裂缝研究目的，建立相应的有所侧重的裂缝指标体系。

(2) 土壤裂缝的发生条件、过程、影响因素及其作用机理与时空规律性。以往研究多集中于耕作土（尤其是水稻土）的裂缝研究方面，但是对于更为广泛的土地覆被状况下的裂缝发生规律及分布特征，如裸地、荒草地、放牧地等的裂缝形态、发生特征及其过程，人为因素（如耕作、灌溉等措施）对裂缝产生的影响等还鲜有报道。而这方面的研究对于今后利用裂缝发生规律制定合理的灌溉制度及人为调控裂缝的发生达到节水保水的目的具有重要意义。

(3) 土壤裂缝对土壤结构、土壤水文过程的影响。定量辨识裂缝对土壤结构的破坏作用或优化作用，是目前研究的空白领域；对于裂缝形成对地表径流的产生、降雨入渗量及土体蒸发的影响，以往虽有研究但仍显不够系统和深入，定量化的研究应为今后的重点。裂缝的存在对于土壤结构乃至土壤质量演变的影响如何？对于地表径流的产生起多大程度的抑制作用？多大程度的开裂对于土体水分的蒸发起明显的加速作用？这些问题目前还未十分清楚，需要进一步研究。

(4) 开裂土体内的物质运移规律。鉴于土体中裂缝的存在给水分、养分的向下运移提供了一个优先通道，开裂土体内的物质运移规律（对照于不开裂土体的异同），尤其是肥料、农药、除草剂等污染物通过裂缝下移产生的水质污染等，将是今后很长一段时间内的重点研究方向。

(5) 土壤裂缝与植被生长关系研究。以往的研究偏重于植被（尤其是农作物）对裂缝产生形态的单方面影响，对于植被生长与裂缝之间的耦合作用机制，如裂缝对根系生长、对作物的蒸腾作用影响等方面的研究较少，而这方面的研究对于干旱半干旱地区的植被恢复工作具有重要指导意义。

土壤裂缝的形成是个复杂的过程，涉及到土壤力学、黏土矿物学、土壤水文学、植被生态学等多学科的知识，目前国际上相关的研究还很不深入，我国该方面的研究则更为落后。但令人可喜的是，国内已有学者开始认识到土壤裂缝在 SPAC 系统中的重要作用，相关研究如“干热河谷退化坡地地表干裂、地面蒸发与人工植被生长的耦合作用”也已获得国家自然科学基金资助，期待着能推动我国土壤裂缝研究的发展。

参考文献：

[1] Bandyopadhyay KK, Mohanty M, Painuli DK, Misra AK, Hati KM. Influence of tillage practices and nutrient management on crack parameters in a Vertisol of central India, Soi l & Tillage Research, 2003, 71, 133-142

[2] 何毓蓉, 徐建忠, 黄成敏. 金沙江干热河谷区变性土的特征及系统分类. 土壤学报, 1995, 32 (增): 102-110

[3] 何毓蓉, 黄成敏. 变性土滑擦面的特性与形成机制. 科学通报, 1996, 46 (12): 1100-1102

[4] 仇荣亮, 熊德祥, 黄瑞采. 变性土的膨胀收缩特点及影响因素. 南京农业大学学报, 1994, 17 (1): 71-77

[5] Flowers M, Lal R. Axle load and tillage effects on the shrinkage characteristics of a Mollic Ochraqualf in northwest Ohio. Soil & Tillage Research, 1999, 50: 251-258

[6] Preston S, Griffiths BS, Young IM. An investigation into sources of soil crack heterogeneity using fractal geometry. European Journal of Soil Science, 1997, 48: 31-37

[7] Vogel H-J, Hoffmann H, Roth K. Studies of crack dynamics in clay soil. Ⅰ. Experimental methods, results, and morphological quantification. Geoderma, 2005, 125: 203-211

[8] Novak V. Soil-crack characteristics—Estimation methods applied to heavy soils in the NOPEX area. Agricultural and Forest Meteorology, 1999, 98/99: 501-507

[9] 程先富, 史学正. 分形几何在土壤学中的应用及其展望. 土壤, 2003, 35 (6): 461-464

[10] Samouelian A, Cousin I, Richard G, Tabbagh A, Bruand A. Electrical resistivity imaging for detecting soil cracking at the centimetric scale. Soil Sci. Soc. Am. J., 2003, 67: 1319-1326

[11] Simon JJ, Oosterhuis L, Reneau RB. Comparison of shrink-swell potential of seven ultisols and one alfisol using different COLE techniques. Soil Sci.,1987, 143: 50-55

[12] Anderson JV, Fadul KE, O'Connor GA. Factors affecting coefficient of linear extensibility in vertisols. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 1973, 37: 296-299

[13] Dasog GS, Acton DF, Mermut AR, De Jong E. Shink-swell potential and cranking in clay soils of Saskatchewan. Can. J. Soil Sci., 1988, 68: 251-260

[14] Yule DF, Richie JT. Soil shrinkage relationships of Texas vertisols: Ⅰ. Small cores. Soil Sci. Soc. Am. J., 1980, 44: 1285-1291

[15] Ross GJ. Relationships of specific surface areas and clay content to shrink-swell potential of soils having different clay mineralogical compositions. Can. J. Soil, 1978, 58: 159-166

[16] Gray CW, Allbrook R. Relationship between shrinkage indices and soil properties in some New Zealand soils. Geoderma, 2002, 108: 287-299

[17] Franzmeier DP, Ross SJ. Soil swelling: Laboratory measurement and relation to other soil properties. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 1968, 32: 573-577

[18] De Jong E, Kozak LM, Stonehouse HB, Comparison of shrink-swell indices of some Sasatchewan soils and their relationships to standard soil characteristics. Can. J. Soil Sci., 1992, 72: 429-439

[19] Smith CW, Hadas A, Dan J, Koyumdjisky H. Shinkage and Atterberg limits in relation to other properties of principal soil tupes in Israel. Geoderma, 1985, 35: 47-65

[20] Reeve MJ, Hall GGM, Bullock P. The effect of soil compositon and environmental factors on the shrinkage of some clayey British soils. Soil Sci., 1980, 31: 429-442

[21] Dasog GS, Shashidhara GB. Dimension and volume of cracks in vertisol under different crop covers. Soil Sci., 1993, 156: 424-428

[22] Mitchell AL, van Genuchten MTh. Shrinkage of bare and cultivated soil. Soil Sci. Soc. Am. J., 1992, 56: 1036-1042

[23] Johnston JR, Hill HO. A study of the shrinking and swelling property of Rendzina soils. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 1994, 9: 24-29

[24] Fox WE. Cracking characteristics and field capacity in a swelling soil. Soil Sci., 1964, 98: 413

[25] Johnson WC. Controlled soil cracking as a possible means of moisture conservation on wheatlands of the southwestern Great Plains. Agron. J., 1962, 54: 323-325

[26] Yoshida S, Adachi K. Effects of cropping and puddling practices on the cracking patterns in paddy field. Soil Sci. Plant Nutr., 2001,47: 519-532

[27] Nieber JL. Finite element analysis of soil moisture flow and moisture stress in a desiccating soil // Holz KP, Meisner U, Zielke W, Brebbia CA, Pinder G, Gray W. Proc. 4th Int. Conf. on Finite Elements in Water Resources. Hanover, Germany: Springer, 1982: 13-22

[28] Nearing MA, Parker SC, Bradford JM, Elliot WJ. Tensile strength of thirty-three saturated repacked soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 1991, 55: 1546-1552

[29] Yoshida S, Adachi K. Numerical analysis of crack generation in saturated deformable soil under row-planted vegetation. Geoderma, 2004, 120: 63-74

[30] Stirk G. Some aspects of soil shrinkage and the effect of cracking upon water entry into the soil. Aus. J. Agr. Res., 1954, 5: 279-290

[31] Bouma J. Soil morphology and preferential flow along macropores. Agric. Water Manage. 1981, 3: 235-250

[32] Beven K, German P. Macropores and water flow in soils. Water Resour. Res., 1982, 18: 1311-1325

[33] Tabuchi T. Studies on drainage in clayey paddy fields: A method of calculation of drainage and its influences due to the precipitation. Transactions of the Japanese Society of Irrigation Drainage and Reclamation Engineers, 1968, 25: 50-56

[34] Novak V, Simunek J, van Genuchten MTh. Infiltration of water into soil with cracks. Journal of Irrigation and Drainage, Engineering, 2000, 126: 41-47

[35] Liu CW, Cheng SW, Yu WS, Chen SK. Water infiltration rate in the cracked paddy soil. Geoderma, 2003, 117: 169-181

[36] 程竹华, 张佳宝, 朱安宁. 地透雷达技术概述及其在土壤学研究中应用的前景. 土壤, 2003, 35 (1): 22-26

[37] Feng J, Zhang JB, Zhu AN, Bi JW. Soil Macropore Structure Characterized by X-RayComputed Tomography. Pedosphere, 2003, 13 (4): 289-298

[38] 李德成, Velde B, 张桃林. 利用土壤切片的数字图像定量评价土壤孔隙变异度和复杂度. 土壤学报, 2003, 40 (5): 678-682

[39] 贺秀斌, 冯桓, 冯兆东. 土壤显微结构的 X 光-同步加速器计算机三维图像透视技术. 土壤学报, 2005, 42 (2): 328-330

[40] Cheng ZH, Zhang JB. Introducing fractal dimension to estimation of soil sensitivity to preferential flow. Pedosphere, 2002,12 (3): 201-206

A Review on the Study of Soil Cracking

XIONG Dong-hong[1,2], ZHOU Hong-yi[1,2], DU Chang-jiang[1,2], YANG Zhong[1], ZHANG Xin-bao[1]

(1 *Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu* 610041, *China*;

2 *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*)

Abstract: Soil cracking is a complicated process, which has great influence on soil properties, vegetation growth and soil solute transportation. The present paper gives an introduction to the indicator systems and indicator measurements in use for soil cracking home and abroad, and the latest advances in the study on relationships of soil cracking with soil properties, vegetation growth, soil infiltration and solute transportation. And on such a basis, suggestions are made for directions and key fields of future research on soil cracking in China.

Key words: Soil crack, Indicator system, Soil property, Vegetation growth, Soil water and solute transportation