doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2023.05.035

农田干缩裂隙形态特征及其裂隙率预测模型研究

翟亚明[1]　李　康[1]　王　策[1]　张展羽[1]　朱成立[1]　陈晓安[2]
(1.河海大学农业科学与工程学院,南京 211100;2.江西省水利科学院,南昌 330029)

摘要:农田干燥收缩产生的裂隙影响土壤水力-物理结构特征,并为农田灌溉水或污染物运移产生优先通道。为揭示农田裂隙形态和基质收缩等演化特征,并对土壤裂隙率进行预测,基于室内土壤收缩及裂隙发育模拟试验,采用图像处理及形态学算法分析了裂隙几何特征,选取非侵入性局部收缩分析方法量化基质域收缩特性;根据脱湿过程中土壤孔隙由基质域向沉降域和裂隙域中的转换机理,结合收缩特征曲线 VG-PENG 模型、收缩几何因子 Logistic 函数 2 个子模型,提出土壤裂隙率预测模型,并对不同厚度土壤试样的裂隙率进行验证。结果表明,厚度在土壤开裂过程中对裂隙形态影响显著,表现为随着土壤厚度加大,土壤表面大裂隙宽度总体加大,且裂隙骨架密度减小,土壤收缩开裂进程放缓;土壤在干燥过程中,基质收缩呈现非均匀特征,并向块区型芯聚集,裂隙边壁区域呈现出局部集中变形区,且收缩量随土壤厚度增加而增大。裂隙率预测模型结合土壤收缩非均匀性特征,从土壤物理角度预测了裂隙率关于含水率的演化过程,有效模拟了裂隙率随含水率演化规律(模型决定系数 $R^2>0.91$)。模型弥补了以往裂隙模型未考虑收缩各向异性的不足,可为裂隙流模型构建及其土壤基质水力特征提供参数基础,有助于制定膨缩土壤修复及水分管理方案。

关键词:土壤裂隙;土壤非均匀收缩;土壤厚度;裂隙率预测模型
中图分类号:S152.4　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2023)05-0335-13　　**OSID**:

Morphological Characteristics of Dry Shrinkage Cracks and Prediction Model of Crack Porosity in Farmland Soils

ZHAI Yaming[1]　LI Kang[1]　WANG Ce[1]　ZHANG Zhanyu[1]　ZHU Chengli[1]　CHEN Xiaoan[2]
(1. *College of Agricultural Science and Engineering*, *Hohai University*, *Nanjing* 211100, *China*
2. *Jiangxi Academy of Water Science and Engineering*, *Nanchang* 330029, *China*)

Abstract: The cracks caused by drying and shrinkage in farmland affected the soil hydraulic and physical structure characteristics and provided preferential channels for the transport of irrigation water or pollutants. In order to reveal the evolution characteristics of crack morphology and shrinkage of matrix in farmland and predict the crack porosity, experiments were carried out in a greenhouse. Digital image processing and morphological algorithm were used to analyze the geometric characteristics of cracks during the dry-wet cycle. Non-invasive local shrinkage analysis method was used to quantify the shrinkage characteristics of matrix domain. According to the transformation mechanism of soil pores from matrix domain to subsidence domain and crack domain during dewetting process, a prediction model of soil crack porosity was proposed, which included two sub-models: VG-PENG model and Logistic function of shrinkage geometric factor. Based on the measured crack porosity experiment, the universal applicability of the model was verified for the crack porosity of soil samples of different thicknesses. From the perspective of soil physics, the evolution process of crack porosity with respect to water content was effectively predicted. The results showed that layer thickness had significant influence on crack morphology during soil cracking. With the increase of soil layer thickness, the width of large cracks on

收稿日期:2022-11-07　修回日期:2023-03-16
基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(52109053)、江苏省自然科学基金青年基金项目(BK20200523)、国家科技奖后备培育项目(20212AEI91011)、国家自然科学基金面上项目(51879071)、江西省重点研发计划项目(20203BBGL73226)和江西省水利科学院开放研究基金项目(2021SKTR03)
作者简介:翟亚明(1982—),男,副教授,博士,主要从事节水灌排理论与技术研究,E-mail:hearoalt@163.com
通信作者:王策(1989—),男,讲师,博士,主要从事农田裂隙及其优先流理论研究,E-mail:wangce@hhu.edu.cn

the surface of the reconstituted soil was increased, the possibility of secondary cracking was decreased, and the density of cracks was decreased, and the process of soil shrinkage and cracking was slowed down. In the process of drying and shrinking, the soil showed the phenomenon of agglomeration to block core. The minimum value deformation near the core in the shrinkage block area tended to be 0, and the edge wall area of cracks showed a concentrated deformation area, and the shrinkage was increased with the increase of soil layer thickness. The vertical uniformity of drying rate and drying degree also changed with soil layer thickness. Thicker soils usually had wider cracks in the soil surface and larger clumps of soil formed by cracking. In the cracking process, the shrinkage anisotropy showed vertical subsidence in the first stage, vertical subsidence in the middle stage with slight horizontal shrinkage, and horizontal cracking in the late stage. Considering the anisotropy of soil shrinkage, the prediction model of crack porosity proposed made up for the shortcoming that the previous crack models did not consider the shrinkage anisotropy, and the model had good effect and was generally applicable in different soil thicknesses ($R^2 > 0.91$). The study quantified the development characteristics of crack and matrix at soil samples of different thicknesses, which provided the parameter basis for the construction of crack flow model and the hydraulic characteristics of soil matrix, and contributed to the formulation of expanded soil remediation and water management schemes.

Key words: soil cracks; non-uniform shrinkage of soil; soil thickness; crack porosity prediction model

0 引言

农田非饱和带为作物生长提供媒介,同时是包气带地下水的过滤器与净化器,其大孔隙特征与非均匀性直接影响田间灌水效率与地下水水质。在大孔隙结构诱因中,因干缩湿胀导致的农田裂隙表现出贯穿性、连通性[1]、干湿重现[2]等特殊性。农田裂隙发育与闭合的本质是土壤脱湿收缩和吸湿愈合过程中孔隙的转变过程,是土壤湿度、粘土矿物含量等内因在降雨、灌溉、辐射等外因下综合作用的结果[3]。土壤大裂隙会影响水分运移并破坏作物根系结构,导致灌溉水肥的流失,并污染地下水[4]。研究表明,土壤裂隙能造成显著的优先流效应[5],影响田间灌水效率及其地下涵水层水质。

现阶段,土壤裂隙基本性质及结构特征引起农业工程、岩土、地质等多学科广泛关注[6]。裂隙开闭特征及其基质域局部收缩变形特征,对土壤局部结构的水力-物理特征产生显著影响。对于裂隙的研究,WANG 等[7]、张展羽等[8]认为土壤裂隙呈现出各向异性及随机性特征,并最终形成裂隙网络;BAER 等[9]基于分形理论提出裂隙表面积、块分形维数、边缘分形维数等评价指标;唐朝生等[10]结合室内试验,利用图像处理工具,获取裂隙面积率、节点个数、平均宽度等指标。此外,已有许多数学模型用于表征土壤基质的收缩特征,这些数学模型将土壤开裂收缩总结为结构收缩、线性收缩、残余收缩和零收缩 4 个阶段[11-12]。PENG 等[11]研究认为,收缩特征曲线可根据土壤容重和团聚体结构分为 6 种类型,6 种类型曲线都可通过 VG 收缩模型模拟得到。TANG 等[3]将土壤收缩开裂分为能量模型、应力控制开裂模型以及体积模型。STEWART 等[13]将团聚体、沉降域和裂隙域的孔隙描述为有关土壤含水率的函数模型;NEELY 等[14]基于线性延伸系数(COLE)改进土壤收缩特性模型并预测了裂隙体积。然而,许多学者在预测裂隙率研究中假设土壤收缩各向同性并将收缩几何因子设定为恒定值 3.0,这将导致裂隙体积模拟存在偏差。

在农业上,土壤厚度反映土壤发育程度,与作物生长发育的空间关系密切。不同地区耕作层厚度存在差异,以往对于土壤厚度的研究集中在其对保水能力、耕地产能[15]、作物发育情况[16]、生物量累计[17]等方面的影响。然而,农田在自然条件下将经历干湿循环并反复开裂愈合[1],不同土壤厚度对其开裂行为的影响仍需关注。本研究拟针对不同厚度土壤裂隙特征进行模拟试验,结合数字图像处理技术和形态学算法,对土壤裂隙的几何形态特征与基质域收缩变形特征展开研究;采用收缩特征曲线和收缩几何因子量化土壤收缩过程及不同脱湿阶段的土壤收缩各向异性,以收缩特征和各向异性参数为基础,提出裂隙率预测模型,针对不同厚度土壤试样对模型有效性进行评价。该研究从机理层面探索裂隙发育及基质域非均匀变形机理,以土壤物理角度快速精准地预测裂隙率关于土壤墒情的发展过程,为裂隙优先流理论提供参数基础,并为膨胀土水分科学管理和土壤修复利用提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 基于土壤收缩特征的裂隙预测模型

土壤由固、液、气三相组成,其中固相为土壤颗粒及团聚体形成的土壤基质,液相与气相分别为水

分和空气。土壤干缩裂隙本质为孔隙在基质内向沉降区域和裂隙区域气相的转换，转化过程中三相符合质量守恒定律，并假定该过程为热力学稳定状态，即针对特定含水率土壤仅存在唯一的裂隙率（或基质域体积）与之对应。土壤干燥开裂三相转换过程如图 1 所示。

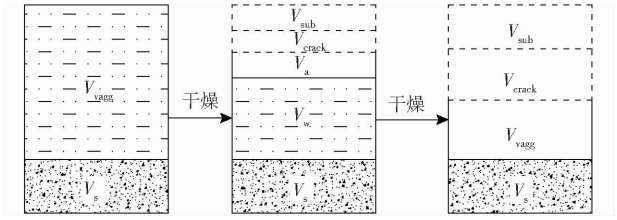


图 1　土壤干燥开裂三相转换过程示意图

Fig. 1　Schematic of three-phase conversion process of soil drying and cracking

设定土壤总体积为 V_{total}，孔隙总体积为 V_v，基质域中孔隙体积为 V_{vagg}，沉降域孔隙体积为 V_{sub}，裂隙域孔隙体积为 V_{crack}，液相体积为 V_w，气相体积为 V_a，土颗粒体积为 V_s。研究过程中，土壤总体积 V_{total}、孔隙总体积 V_v、土颗粒体积 V_s 为恒定值；基质域孔隙体积 V_{vagg} 由液相体积 V_w 与气相体积 V_a 共同组成。土壤饱和状态下，V_{vagg} 达到最大值，当土壤干燥时，V_{vagg} 最小；在干燥过程中，水分逐渐蒸发，空气将进入土壤，土壤发生沉降，基质孔隙发生收缩，土壤出现裂隙，此时孔隙总体积 V_v 由 V_{vagg}、V_{sub}、V_{crack} 共同组成。因此有 $V_{vagg} = V_w + V_a$，$V_v = V_{vagg} + V_{sub} + V_{crack}$。

令土壤总孔隙率为 ϕ_{total}，基质域孔隙率为 ϕ_{agg}，沉降域孔隙率为 ϕ_{sub}，裂隙域孔隙率为 ϕ_{crack}，则有

$$\begin{cases} \dfrac{V_v}{V_{total}} = \dfrac{V_{vagg}}{V_{total}} + \dfrac{V_{sub}}{V_{total}} + \dfrac{V_{crack}}{V_{total}} \\ \phi_{total} = \phi_{agg} + \phi_{sub} + \phi_{crack} \end{cases} \tag{1}$$

根据土壤脱湿收缩最大湿度路径对土壤含水率和孔隙率变量去量纲化可得

$$\begin{cases} \Phi_{agg}(W) = \dfrac{\phi_{agg}(W) - \phi_{min}}{\phi_{max} - \phi_{min}} \\ \Phi_{sub}(W) = \dfrac{\phi_{sub}(W)}{\phi_{max} - \phi_{min}} \\ \Phi_{crack}(W) = \dfrac{\phi_{crack}(W)}{\phi_{max} - \phi_{min}} \\ \Phi_{agg}(W) + \Phi_{sub}(W) + \Phi_{crack}(W) = 1 \\ W = \dfrac{\omega}{\omega_{max}} = \dfrac{\vartheta}{\vartheta_{max}} \end{cases} \tag{2}$$

式中　W——相对含水率

ω——土壤质量含水率，g/g

ω_{max}——饱和时土壤质量含水率，g/g

ϑ——体积含水比，定义为土壤中水分体积与土壤颗粒体积的比值，饱和时有 $\vartheta = \vartheta_{max} W$，$cm^3/cm^3$

ϑ_{max}——体积含水比最大值，cm^3/cm^3

ϕ_{max}、ϕ_{min}——基质域孔隙率最大值、最小值，由试验测得，测量方法见 1.2.4 节，cm^3/cm^3

其中 $\Phi_{agg}(W)$、$\Phi_{sub}(W)$、$\Phi_{crack}(W)$ 为去量纲化的基质域孔隙率、沉降域孔隙率、裂隙域孔隙率。

1.1.1　土壤裂隙率预测模型

收缩特征曲线是一条“S”形曲线，其量化了土壤基质孔隙比与含水率间相关关系，可采用 PENG 等[18]提出的基于 VG 模型的收缩特征曲线模型（即 VG－PENG 模型）进行描述。VG 型式土壤水分特征曲线以及经 VG 模型变形的 VG－PENG 收缩特征曲线模型的形式为

$$\theta(\psi) = \begin{cases} \theta_r + (\theta_s - \theta_r)(1 + |\alpha\psi|^n)^{-m} & (\psi < 0) \\ \theta_s & (\psi = 0) \end{cases} \tag{3}$$

$$e(\vartheta) = e_r + (e_s - e_r)\left[1 + \left(\frac{\chi\vartheta}{e_s - \vartheta}\right)^{-p}\right]^{-q} \quad (0 \leqslant \vartheta \leqslant \vartheta_s) \tag{4}$$

式中　ψ——土壤水势，cm

θ_r、θ_s——土壤残余体积含水率、饱和体积含水率，cm^3/cm^3

α、n、m——VG 持水特征曲线模型参数，α 单位为 cm^{-1}

e、e_r、e_s——土壤孔隙比、残余孔隙比、饱和孔隙比，cm^3/cm^3

χ、p、q——VG－PENG 收缩特征曲线模型参数

ϑ_s——土壤饱和体积含水比，cm^3/cm^3

根据孔隙比 e 和基质域孔隙率 ϕ_{agg} 定义，对式（4）由 e 向变换 ϕ_{agg} 可得

$$\frac{e(\vartheta) - e_r}{e_s - e_r} = \frac{\phi_{agg}(W) - \phi_{min}}{\phi_{max} - \phi_{min}} = \left[1 + \left(\frac{\chi\vartheta_{max}W}{e_s - \phi_{max}W}\right)^{-p}\right]^{-q} \tag{5}$$

饱和时 $e_s = \vartheta_{max}$，则

$$\Phi_{agg}(W) = \frac{\phi_{agg}(W) - \phi_{min}}{\phi_{max} - \phi_{min}} = \left[1 + \left(\frac{\chi W}{1 - W}\right)^{-p}\right]^{-q} \tag{6}$$

$\Phi_{agg}(W)$ 为基质域相对孔隙率关于相对含水率的函数，即 VG 型基质域孔隙率模型。

对式（6）变形可得

$$\phi_{agg}(W) = (\phi_{max} - \phi_{min})\left[1 + \left(\frac{\chi W}{1 - W}\right)^{-p}\right]^{-q} + \phi_{min} \tag{7}$$

式(7)即为根据 VG-PENG 收缩特征曲线变形后的基质域孔隙率关于含水率的预测函数。

由于土壤干燥收缩在不同阶段呈现出各向异性,引入收缩几何因子 r_s 量化其不同阶段各向异性特征,计算式为

$$r_s = \frac{\ln \frac{V_i}{V_0}}{\ln \frac{H_i}{H_0}} \tag{8}$$

其中 $V_0 = V_{total}$

式中 V_i——第 i 次测定时试样体积,cm^3

H_0——土壤初始厚度,cm

H_i——第 i 次测定时土壤厚度,cm

由于 $\frac{\Delta H}{H_0} = \frac{V_{sub}}{V_{total}} = \phi_{sub}$, $1 - \frac{\Delta V}{V_0} = \frac{V_{vagg} + V_s}{V_{total}} = \phi_{agg}(W) + 1 - \phi_{max}$,则式(8)变形可得

$$\phi_{sub}(W) = 1 - (\phi_{agg}(W) - \phi_{max} + 1)^{1/r_s} \tag{9}$$

根据式(7)可得

$$\phi_{sub}(W) = 1 - \left\{ (\phi_{max} - \phi_{min}) \left[1 + \left(\frac{\chi W}{1 - W} \right)^{-p} \right]^{-q} + \phi_{min} - \phi_{max} + 1 \right\}^{\frac{1}{r_s(W)}} \tag{10}$$

式中 $r_s(W)$——收缩几何因子

式(10)即为沉降域孔隙率关于含水率的预测函数。

联立式(2)、(7)、(10)可得

$$\phi_{crack} = (\phi_{max} - \phi_{min}) \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{\chi W}{1 - W} \right)^{-p} \right]^{-q} \right\} - 1 + \left\{ (\phi_{max} - \phi_{min}) \left[1 + \left(\frac{\chi W}{1 - W} \right)^{-p} \right]^{-q} + \phi_{min} - \phi_{max} + 1 \right\}^{\frac{1}{r_s(W)}} \tag{11}$$

式(11)即为土壤裂隙率预测模型,该模型从土壤物理(收缩特征)角度量化了裂隙率关于含水率的演化过程[19],即可采用室内试验测算某类型土壤的收缩特征曲线及其收缩的各向异性特征,从而预测该种土壤裂隙率关于含水率的关系。上述模型包含 ϕ_{max}、ϕ_{min}、χ、p、q 参数,可在室内基于土壤收缩测定试验进行确定。子模型收缩几何因子 $r_s(W)$ 的测算与模拟方法见 1.1.2 节。

1.1.2 收缩几何因子模型

在建立土壤裂隙率预测模型时,引入收缩几何因子 r_s 量化表述土壤收缩各向异性的特征(式(8))。r_s 取值对应土壤脱湿收缩不同阶段[19-20]:①$r_s = 1$,土壤收缩仅呈现纵向沉降。②$1 < r_s < 3$,土壤收缩主要为纵向沉降,少量存在横向收缩。③$r_s = 3$,土壤收缩各向同性。④$r_s > 3$,土壤收缩主要为横向收缩,少量存在纵向沉降。⑤$r_s \to \infty$,土壤收缩仅有横向收缩。

选取 Logistic 模型模拟收缩几何因子随脱湿阶段的变化过程,公式为

$$r_s(W) = r_{s,min} + \frac{r_{s,max} - r_{s,min}}{1 + e^{\lambda(W - \xi)}} \tag{12}$$

式中 $r_{s,min}$、$r_{s,max}$——$r_s(W)$ 的极小值、极大值

λ——曲线增长速率系数

ξ——平移系数,对应斜率极值处的相对含水率

土壤收缩几何因子的测算和模拟亦可通过土壤收缩试验获取,采用游标卡尺或者排水法等方法观测土壤试样体积 V_i 和厚度 H_i,基于式(8)计算 r_s,而后根据式(12)模拟 $r_s(W)-W$ 关系曲线。

1.2 材料与处理

1.2.1 供试土壤

试验土壤取自河海大学江宁节水园区南方地区高效灌排与农业水土环境实验室试验场大田表层 5~25 cm,总孔隙度为 52.5%。取土后,用 2 mm 筛网筛除杂质,所得土壤进行风干,使用干燥法测得风干土的含水率为 4.62%。使用湿筛法测定试验土物理性质,结果如表 1 所示。

表 1 试验土壤物理性质

Tab.1 Physical properties of soil samples

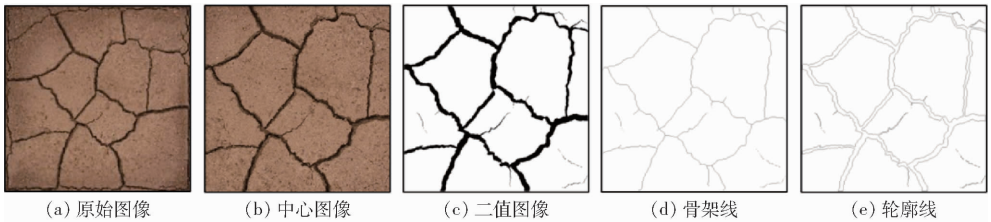
土壤类型	土壤颗粒粒径占比/%			容重/($g \cdot cm^{-3}$)	土壤质地
	0~0.002 mm	0.002~0.02 mm	>0.02 mm		
黄棕壤	45.68	30.64	23.68	1.30	壤质粘土

1.2.2 裂隙发育模拟试验与裂隙参数量化

将风干后的土壤按容重 1.30 g/cm^3 回填至 28.5 cm×28.5 cm 的方形带底有机玻璃容器中,回填高度设计为 1、2、4、8 cm,拟研究不同厚度重塑土干缩裂隙的收缩特征。由于原状土呈现孔隙结构复杂、性质不均匀等特点,为验证模型在田间原位土壤中的适用性,在试验过程中加入原状土试样进行测试,采用 28.5 cm×28.5 cm 方形无底有机玻璃容器于试验场大田 5~25 cm 处取得 4 cm 厚原状土,取土时避开较大石块,取土完成后,将容器底部清理干净并密封。不同试样设置 3 个重复。试样制备完成后,用气压喷壶在试样上方均匀喷水,喷水时保持喷壶喷嘴水平,喷水强度 10 mm/h,避免试样表面因冲刷遭到破坏。喷水直至试样表面产生约 1 cm 水层并浸泡 48 h,得到浸泡充分不同厚度的试样,以此为初始状态。将试样置于河海大学江宁节水园区温室内,模拟土壤干燥脱水过程。称量各试样初始状态质量数据,同时用相机对各试样表面进行拍照记录,

试验每 4 h 对试样进行测量记录 1 次，当试样 12 h 内含水率变化小于 0.2%，认为试样干燥稳定。试验使用佳能 EOS 60D 型相机，电子秤量程 30 kg，精度 0.1 g。

采用高效准确的数字图像处理技术和形态学算法对裂隙进行提取和量化[21]。为消除有机玻璃容器对于试样边界的影响，使用 Photoshop 裁剪出试样表面 20 cm × 20 cm 中心图像（图 2a、2b），处理得到区域对应的像素为 2 000 × 2 000，供后续处理使用。



(a) 原始图像　(b) 中心图像　(c) 二值图像　(d) 骨架线　(e) 轮廓线

图 2　数字化处理试样各阶段图像

Fig. 2　Digitized images of soil samples at each stage

使用 Matlab 进行编程，将试样最终状态的中心图像数据进行灰度化、二值化、骨架化等[13]操作（图 2c ~ 2e），并对得到的图像处理数据进行研究，得到土壤在不同厚度下裂隙的几何形态参数：裂隙面积率 R(%)、长度密度 L(mm/mm^2)、裂隙平均宽度 B(mm)，计算式为

$$R = \frac{\sum A_i}{A_0} \times 100\% \tag{13}$$

$$L = \frac{\sum L_i}{A_0} \tag{14}$$

$$B = \frac{\sum B_i}{i} = \frac{\sum A_i}{\sum L_i} \tag{15}$$

式中　A_i——第 i 条裂隙面积，mm^2

A_0——研究区域面积，mm^2

L_i——第 i 条裂隙骨架长度，mm

B_i——单条裂隙宽度，mm

由于当前研究并无适用度高的测量方法，测量土壤裂隙体积时通常将其近似为棱柱进行计算得到。通过图像数字化处理方法，可以得到每条裂隙的宽度。为进一步得到裂隙率实测值，需要对每条裂缝的深度进行测量。试验中土壤厚度较薄，每条裂隙对应的深度变化不大，故干燥完成后对试样每条裂隙上选取 3 个点进行测深，对其取算术平均值，测算出裂隙体积 V_{crack}，进而计算得到裂隙率实测值（$\phi_{crack} = V_{crack}/V_{total}$）。

1.2.3　土壤基质域局部收缩量化

为研究土壤开裂时的收缩变形规律，对 2 000 像素 ×2 000 像素的试样表面中心区域图像进行分析。使用 Matlab 对比两图像的相似程度，具体方法为：选取图像 A、B，在图像 A 选取一个 50 像素 × 50 像素的点块 a_i，与图像 B 进行比对，找到与之相似度最高的像素点块 b_i。可得 a_i 发生收缩变形位移至 b_i 横纵坐标的变化量 Δx_i、Δy_i，以及 b_i 在图像 B 全图像下的坐标 x_i、y_i，试样某点发生收缩变形的收缩变形量为 $\varepsilon_i = \sqrt{(\Delta x_i)^2 + (\Delta y_i)^2}$，则图像上点块的位置及收缩变形量可用三维坐标（$x_i$, y_i, ε_i）表示，记录并进行下一个像素点块的对比。重复以上操作可得试样各点收缩变形量[22-23]。

1.2.4　土壤收缩特征试验及参数量化

土壤收缩特征测定试验与裂隙发育试验同步进行。将风干后的土壤按照容重 1.30 g/cm^3 回填至 200、500 cm^3 环刀，用 200 cm^3 环刀于试验场大田 5 ~ 25 cm 处取得原状土。环刀试样自下而上进行饱和。干燥过程将环刀试样放置于与 1.2.2 节中方形容器相同的试验环境，每隔 4 h 记录环刀质量，同时进行拍照记录。每次测量记录时，使用电子游标卡尺（精度0.01 mm）测量试样表面固定位置的直径和高度，各方向测定 3 次并记录。试验中测得的直径与高度及其变化量用于计算收缩几何因子 r_s。对干燥过程中测得的含水率及其对应的几何因子进行非线性拟合，得到土壤在各含水率下对应的几何因子参数值。土壤接近饱和时仅发生纵向沉降，r_s 为 1，随着土壤脱湿，r_s 逐渐增大并最终趋于稳定。故式(12)中，$r_{s,min}$ 为 1；$r_{s,max}$ 根据经验由试验过程 r_s 趋近稳定的实测值与拟合曲线上实测点附近的模拟值共同确定。

干燥完成后将环刀试样使用干燥法测定干燥后的试样体积、土壤颗粒质量及干容重，用于推算土壤孔隙比及体积含水比。需要说明的是，在描述土壤含水率时，通常采用质量含水率 ω(g/g)或体积含水率 θ(cm^3/cm^3)指标。由于本文模型涉及基质域体积变化，故引入体积含水比 ϑ(cm^3/cm^3)作为描述变形土壤含水率的指标。此外本文还引入相对含水率作为参数。土壤体积含水比 ϑ、孔隙比 e、基质域孔隙率 ϕ_{agg} 计算方法为

$$\vartheta = \frac{V_w}{V_s} = \frac{\omega \rho_s}{\rho_w} \tag{16}$$

$$e = \frac{V_{vagg}}{V_s} = \frac{\rho_s}{\rho_b} - 1 \tag{17}$$

$$\phi_{agg} = \frac{V_{vagg}}{V_{total}} \tag{18}$$

式中 ρ_s、ρ_w——土颗粒密度、纯水密度,g/cm^3

ρ_b——土壤干容重,g/cm^3

试验测得土颗粒密度 ρ_s 为 2.65 g/cm^3,纯水密度 ρ_w 为 1.0 g/cm^3。由式(17)、(18)及图 1 描述可知,ϕ_{agg} 与 e 存在数量关系,有 $\phi_{agg} = eV_s/V_{total}$。当土壤饱和时,此时 e 达到饱和孔隙比 e_s;使用干燥法可得到试样残余孔隙比 e_r。据此可以计算得到基质域孔隙率最大值 ϕ_{max} 与最小值 ϕ_{min},并绘制 $\phi_{agg} - W$ 曲线。

1.3 模型验证方法

采用一种测定环刀试样收缩特征曲线及其收缩各向异性的方法,预测土壤试样裂隙率随含水率的变化过程。模型验证包括:①环刀土壤收缩特征曲线模型优度评价。基于 1.2.4 节环刀试样收缩试验获取 ϕ_{agg} 与 e 之间量化关系,通过 SPSS 拟合,得到模型参数 χ、p、q,绘制基质域孔隙率 ϕ_{agg} 与相对含水率 W 关系曲线,即 VG - PENG 模型,对模型进行优度评价。②环刀土壤收缩特征几何因子拟合。基于 1.2.4 节环刀试样收缩几何因子实测数据,拟合得到曲线增长速率系数 λ 与平移系数 ξ,绘制收缩几何因子 r_s 与相对含水率 W 关系曲线,对 Logistic 模型优度及有效性评价。③裂隙率预测模型优度评价。基于环刀收缩试验中获取的 VG - PENG 收缩模型与收缩几何因子 Logistic 模型,建立裂隙率预测函数,即式(11);结合 1.2.2 节中裂隙率实测值,验证环刀预测的裂隙率与不同厚度土壤实测裂隙率的契合程度。

1.4 模型优度评价

采用决定系数(Coefficient of determination,R^2)、纳什-苏克里夫效率(Nash - Sutcliffe efficiency,NSE)、均方根误差(Root mean square error,RMSE)、秩和比(Rank-sum ratio,RSR)评价模型预测裂隙孔隙度和实测值匹配程度。其中 R^2 和 NSE 越大,RMSE 和 RSR 越小,模型优度越高。具体判据如表 2 所示。

表 2 统计信息一般性能评级类

Tab. 2 General performance rating classes for recommended statistics

评价	R^2	NSE	RSR
极好	≥0.5	(0.75,1.00]	(0,0.50]
好	≥0.5	(0.65,0.75]	(0.50,0.60]
一般	≥0.5	(0.50,0.65]	(0.60,0.70]
不合适	<0.5	≤0.50	>0.70

2 结果与分析

2.1 农田裂隙形态特征

2.1.1 不同厚度试样土壤裂隙几何特征

干燥过程中,1、2、4、8 cm 重塑土分别在质量含水率 37.33%、35.03%、34.29 %、33.43%时出现裂隙,原状土在含水率 30.22%时开裂。可见,重塑土厚度越厚,其开裂的时间节点越靠后,其保持原本形态的能力也更强,原状土开裂的时间节点较重塑土更加靠后。随着含水率的降低,裂隙延伸、拓宽,当土壤质量含水率降至约 4%时,裂隙形态达到稳定。土壤裂隙形态稳定时的二值图像如图 3 所示。4 种不同厚度的重塑土中,1 cm 重塑土裂隙网络最为细密,裂隙骨架密度较大,2 cm 和 4 cm 重塑土的裂隙条数将逐步减少,骨架密度降低,并出现了大裂隙为主体,四周伴随细小裂纹的情况。4 cm 原状土与重塑土相比裂隙开裂程度更大。

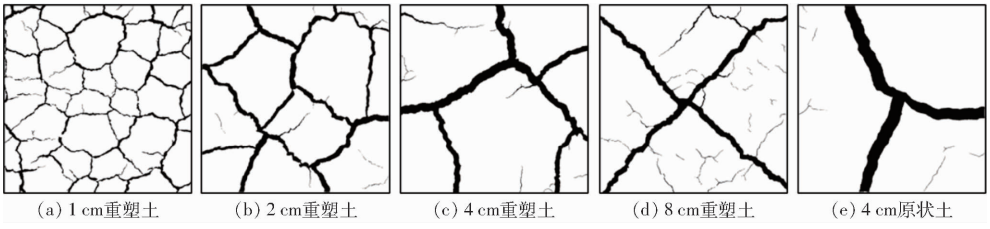


图 3 不同厚度试样开裂二值图像

Fig. 3 Binary images of soil cracks of different thicknesses

不同厚度重塑土干燥开裂完成时的几何参数如图 4 所示,单条裂隙的长度、宽度频次如图 5 所示。可见随着土壤厚度加大,裂隙长度密度先急剧下降后趋于平缓。面积率开始先不变再增大后再减小,整体变化幅度较小;平均宽度总体呈现增大趋势。

由图 5 可知,1 cm 重塑土的单条裂隙长度及宽度频次分布呈现偏态分布,单裂隙长度最大频次出现在 1 cm 时,宽度最大频次出现在 0.05 cm 时。2、4、8 cm 重塑土单裂隙长度分布与 1 cm 重塑土呈现相同特征,而单裂隙宽度频次分布随裂隙宽度加大

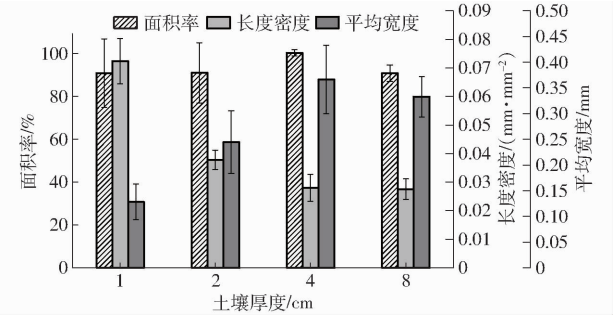


图 4　不同厚度重塑试样裂隙几何参数对比

Fig. 4　Comparison of geometric parameters of cracks in soil samples of different thicknesses

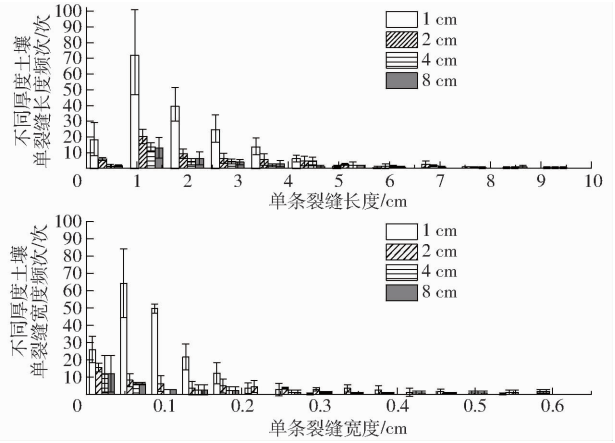


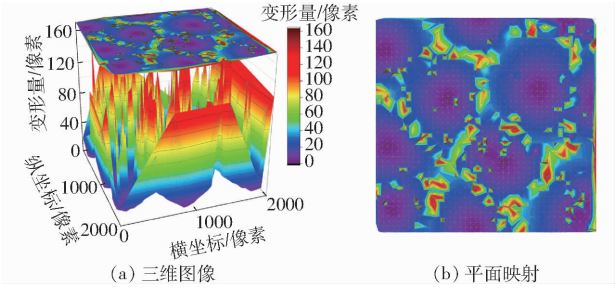
图 5　不同厚度重塑试样单条裂隙长度、宽度频次分布

Fig. 5　Frequency of single crack length and single crack width in crack patterns under different soil layer thicknesses

整体呈下降趋势。对于不同土壤厚度的试样，1 cm 重塑土的单裂隙长度、宽度频次总数远高于其他各土壤厚度试样单裂隙长度、宽度频次之和，且随着土壤厚度加大，试样对应的单裂隙长度、宽度频次之和将减小。结合试验获得的试样表面图像不难发现，1 cm 重塑土裂隙多而细密，随着土壤厚度加大，土壤表面裂隙减少，这也印证了随着厚度加大试样单裂隙长度、宽度频次总数将减小。

2.1.2　不同厚度下土壤基质域收缩非均匀特征

裂隙宏观上是基质收缩变形中孔隙由基质域向裂隙域的转化过程，传统裂隙研究通常聚焦于裂隙本身形态变化，而忽略了基质域缩胀的均匀性，其孔隙非均匀收缩对土壤基质物理-水力特征亦存在显著影响。为研究土壤基质域收缩变形的非均匀规律，将收缩后基质域图像与试样初始状态图像采用局部收缩分析方法进行比对。图 6a 为图像对比后得出的 1 600 个坐标数据组由 OriginPro 绘制而成的土壤收缩变形量的三维图像，图 6b 为三维图像通过平面映射所得图像。为更清晰展示土壤基质各区域收缩变形量，图像中用像素为单位表征收缩变形量，图像最小分辨率为 0.1 mm。图 7 将不同试样的开裂图像与收缩变形量的平面映射图像进行叠加。



(a) 三维图像　　(b) 平面映射

图 6　土壤收缩变形量

Fig. 6　Soil shrinkage deformation

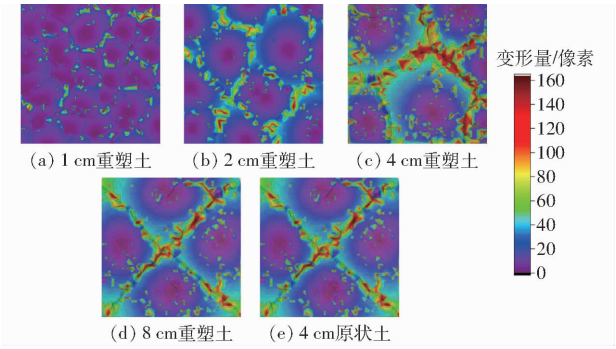


图 7　试样表面裂隙及收缩变形量叠加图像

Fig. 7　Superimposed images of surface cracks and shrinkage deformation of soil samples

图 6b 展现出的收缩变形量形态与图 3b 裂隙形态相近，可见土壤裂隙可以由其收缩变形量的平面映射直观反映，干缩开裂是土壤脱水后土颗粒失去胶结作用而发生位移的表现。根据各点的收缩变形量可知：基质域的收缩变形量集中在 0 ~ 3.5 mm，大部分为 0 ~ 2.0 mm 且块状区域内存在最小收缩变形量趋近于 0 的部分；基质域边缘部分收缩变形量为 3.5 ~ 7.0 mm；收缩变形量大于 7.0 mm 的部分集中在裂隙域内。裂隙对应更大的收缩变形量，基质域存在收缩变形极小值点，该现象表明开裂土壤沿着收缩块区某中心方向收缩。由图 8 可知，随着土壤厚度增加，收缩变形量小于 2.0 mm 的区域占比迅速减小，并随着土壤厚度增加趋于稳定状态；收缩变形量为2.0 ~ 3.5 mm、3.5 ~ 5.0 mm的区域占比总

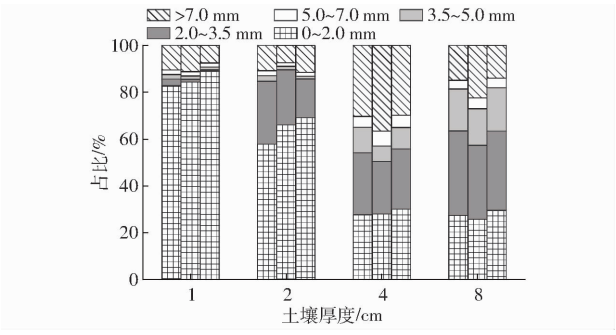


图 8　重塑土收缩变形量累计占比

Fig. 8　Cumulative proportion of shrinkage deformation of remolded soil

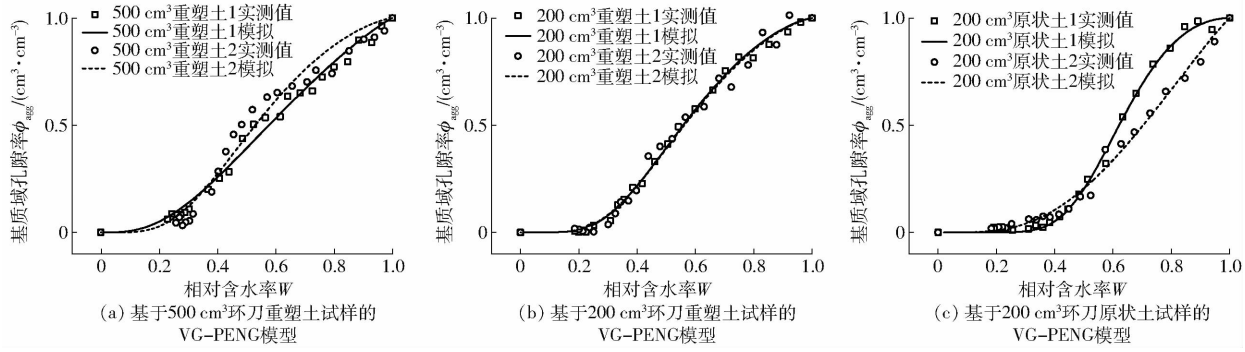
体随土壤厚度加大而加大，5.0～7.0 mm 区域占比变化较小；这说明随着土壤厚度的增加，土壤基质域边缘部分的收缩变形量将加大，土壤厚度较薄时，裂隙开裂程度小。

相较于 4 cm 重塑土试样，原状土试样收缩变形量为 0～2 mm 的部分减小，5～7 mm 部分面积显著增加。基质域边缘收缩变形区域的差异直观反映出不同厚度土壤边缘收缩变形量不同，该现象同时表明裂隙宽度与基质域边缘收缩程度的正相关性，即裂隙是土壤基质域收缩的宏观表现。上述试验结果表明，土壤基质域收缩亦存在非均匀特征，这种收缩现象造成了基质域孔隙的非均匀分布，进一步对土壤基质的持水特征和导水特征产生显著影响。在研究裂隙优先流时，除了裂隙可作为优先通道外，基质域急剧收缩及其水力非均匀特征亦可对水分运移及优先流产生显著影响。

2.2 裂隙率预测模型

2.2.1 收缩特征曲线

采用不同环刀试样测量并拟合收缩特征曲线。由式(6) VG－PENG 模型得到去量纲化的孔隙度 $\Phi_{agg}(W)$ 与相对含水率 W 的关系曲线。图 9 为不同环刀试样测算并拟合的土壤收缩特征曲线。表 3 为 VG－PENG 模型的拟合参数及性能指标。由图 9 与表 3 可知，模型优度评价参数 R^2 与 NSE 均大于 0.96，RSR 均小于 0.04，模型拟合效果较好。结果表明，VG－PENG 收缩特征曲线可精准模拟试样基质域孔隙率与含水率关系。



(a) 基于500 cm³环刀重塑土试样的VG-PENG模型　(b) 基于200 cm³环刀重塑土试样的VG-PENG模型　(c) 基于200 cm³环刀原状土试样的VG-PENG模型

图 9 不同环刀试样的收缩特征曲线

Fig. 9 Shrinkage characteristic curves of different ring cutter samples

表 3 不同环刀试样的收缩特征曲线模型性能

Tab. 3 Performance of shrinkage characteristic curve model for different annular cutter samples

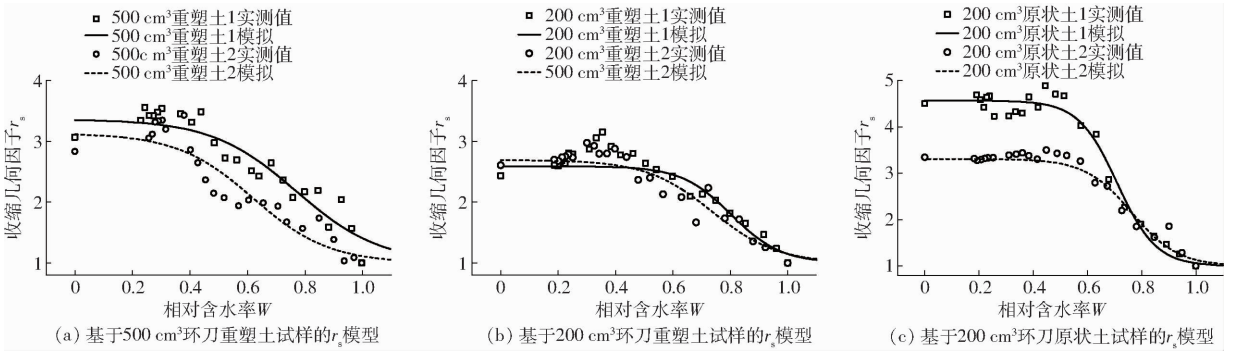
试样	VG－PENG 模型拟合参数					模型评价指标			
	ϕ_{max}/(cm³·cm⁻³)	ϕ_{min}/(cm³·cm⁻³)	χ	p	q	R^2	NSE	RMSE	RSR
500 cm³重塑土 1	0.533	0.377	2.689	1.095	3.204	0.989	0.989	0.034	0.022
500 cm³重塑土 2	0.518	0.398	3.299	1.333	4.325	0.972	0.967	0.061	0.037
200 cm³重塑土 1	0.518	0.393	3.913	1.344	6.269	0.998	0.998	0.018	0.010
200 cm³重塑土 2	0.521	0.391	3.846	1.318	6.007	0.990	0.990	0.037	0.021
200 cm³原状土 1	0.465	0.316	1.686	1.885	5.049	0.997	0.997	0.021	0.011
200 cm³原状土 2	0.488	0.273	1.979	1.090	4.078	0.991	0.991	0.031	0.020

2.2.2 收缩几何因子

收缩几何因子量化了土壤脱湿各阶段过程中收缩各向不均匀性的特征。图 10 为不同环刀试样的收缩几何因子随含水率演化过程。试样由饱和状态开始脱湿时，收缩几何因子接近 1.0，随着相对含水率减小，逐渐增大，并最终趋于稳定值。观测几何因子极大值可知，当相对含水率接近 0 时，500 cm³ 环刀重塑土试样的收缩几何因子略大于 200 cm³ 环刀重塑土试样，且 200 cm³ 环刀原状土试样的明显高于重塑土试样，横向收缩显著。由式(12)可采用 Logistic 函数对收缩几何因子散点图进行拟合，模型的各拟合参数与评价指标如表 4 所示，结果表明，$R^2>0.88$，NSE 大于 0.86，RSR 小于 0.08，拟合呈显著水平，评价等级为极好。收缩各向异性几何因子是裂隙率预测模型的重要参数，其横向收缩部分可作为裂隙分量，Logistic 模型精准模拟收缩几何因子可为裂隙率预测提供参数基础。

2.2.3 裂隙率预测模型

基于环刀试样脱湿收缩试验数据，获取 VG－PENG 模型与收缩几何因子 Logistic 模型各个参数，并验证了上述两模型的有效性后，可根据式(11)构建裂隙率预测模型，基于 1.2.2 节实测裂隙率验证模型适用性。图 11 为基于 500 cm³ 环刀重塑土试样、200 cm³ 环刀重塑土试样、200 cm³ 环刀原状土试



(a) 基于500 cm³环刀重塑土试样的r_s模型　(b) 基于200 cm³环刀重塑土试样的r_s模型　(c) 基于200 cm³环刀原状土试样的r_s模型

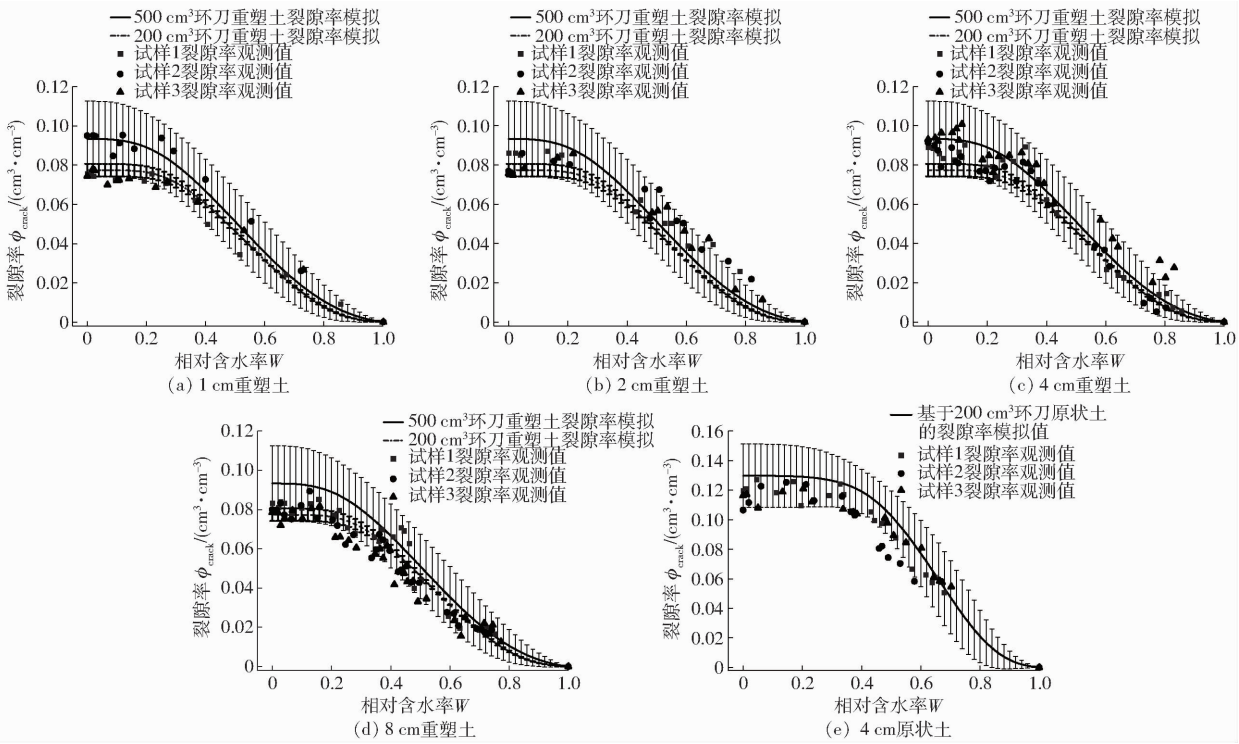
图 10　收缩几何因子的实测结果与预测模型

Fig. 10　Measurement results and prediction model of shrinkage geometry factor

表 4　不同环刀试样的收缩几何因子模型性能

Tab. 4　Performance of shrinkage geometry factor model for different annular cutter samples

试样	Logistic 几何拟合参数				模型评价指标			
	$r_{s,max}$	$r_{s,min}$	λ	ξ	R^2	NSE	RMSE	RSR
500 cm³ 重塑土 1	3.364	1	6.798	0.771	0.900	0.897	0.230	0.066
500 cm³ 重塑土 2	3.133	1	7.577	0.621	0.883	0.880	0.271	0.071
200 cm³ 重塑土 1	2.592	1	11.571	0.803	0.904	0.861	0.212	0.076
200 cm³ 重塑土 2	2.694	1	8.798	0.736	0.907	0.898	0.183	0.065
200 cm³ 原状土 1	4.566	1	13.998	0.710	0.975	0.975	0.204	0.033
200 cm³ 原状土 2	3.308	1	11.787	0.763	0.965	0.959	0.154	0.041



(a) 1 cm重塑土　(b) 2 cm重塑土　(c) 4 cm重塑土　(d) 8 cm重塑土　(e) 4 cm原状土

图 11　不同试样的裂隙率实测结果与预测模型

Fig. 11　Measurement results and prediction models of crack porosity for different soil samples

样的裂隙率预测模型曲线，与不同土壤厚度试样在不同相对含水率下实测裂隙率。

由图 11 可知，基于不同环刀试样的裂隙率模型可有效预测不同厚度试样的裂隙率，裂隙率实测点均分布在预测曲线周围，分布于裂隙率预测模型误差范围内，模型效果显著。图 11 中，500 cm³ 环刀得到的预测值显著大于 200 cm³ 环刀的预测值，可归因于 500 cm³ 环刀试样的横向收缩较为显著，侧面积较大，加速侧向土壤脱湿与水分逸出过程，相同含水率下水平脱湿速度较快。由表 5 可知，该研究提出的裂隙率预测模型可有效模拟不同厚度下土壤裂隙域随含水率发育规律（$R^2 > 0.91$），且弥补了土壤收缩

表 5 裂隙率预测模型对不同土壤厚度试样的效果评价

Tab. 5 Effect evaluation of crack porosity prediction model on soil samples with different soil thickness

试样	基于 500 cm³ 环刀重塑土				基于 200 cm³ 环刀重塑土				基于 200 cm³ 环刀原状土			
	R^2	NSE	RMSE	RSR	R^2	NSE	RMSE	RSR	R^2	NSE	RMSE	RSR
1 cm 重塑土试样 1	0.986	0.726	0.014	0.151	0.981	0.965	0.005	0.054				
1 cm 重塑土试样 2	0.977	0.967	0.005	0.052	0.984	0.784	0.014	0.134				
1 cm 重塑土试样 3	0.969	0.542	0.015	0.195	0.973	0.945	0.005	0.068				
2 cm 重塑土试样 1	0.960	0.904	0.008	0.086	0.955	0.843	0.010	0.110				
2 cm 重塑土试样 2	0.911	0.789	0.011	0.127	0.925	0.741	0.013	0.141				
2 cm 重塑土试样 3	0.928	0.859	0.010	0.104	0.944	0.846	0.011	0.109				
4 cm 重塑土试样 1	0.973	0.955	0.007	0.042	0.976	0.941	0.008	0.048				
4 cm 重塑土试样 2	0.976	0.929	0.008	0.053	0.979	0.961	0.006	0.040				
4 cm 重塑土试样 3	0.958	0.908	0.009	0.061	0.951	0.737	0.015	0.103				
8 cm 重塑土试样 1	0.946	0.876	0.009	0.065	0.949	0.939	0.006	0.046				
8 cm 重塑土试样 2	0.965	0.749	0.012	0.093	0.951	0.945	0.006	0.044				
8 cm 重塑土试样 3	0.953	0.612	0.015	0.116	0.934	0.895	0.008	0.060				
4 cm 原状土试样 1									0.978	0.883	0.012	0.081
4 cm 原状土试样 2									0.923	0.602	0.021	0.169
4 cm 原状土试样 3									0.969	0.808	0.013	0.103

各向异性在裂隙发育中发挥的作用,精准预测了裂隙率与相对含水率间“S”形曲线关系,相较于断裂力学等模型具有精准、简捷等特征。

3 讨论

3.1 土壤裂隙发育机理及基质收缩各向异性特征

脱湿收缩是土壤开裂及裂隙发育的根本原因。土壤孔隙体积随水分含量的变化被定义为土壤收缩膨胀特征[24]。作为固、液、气三相多孔介质,土壤力学与水力性能(如抗拉强度、导水率等)极大程度上取决于水分含量。当土壤水分发生变化时,土壤由接近饱和时的稠状物变为部分饱和时的脆性固体,再变为完全干燥时的颗粒状。因此,土壤的开裂在一定湿度范围内可以用断裂力学描述。针对双孔隙结构粘壤土,脱湿干燥达到进气值时,在蒸发拉力作用下水分逸出并伴随空气进入土壤孔隙,使土壤过渡至不饱和状态,土壤内部水分弯液面使团聚体骨架发生重排,单个团聚体发生收缩变形,最终导致土壤孔隙结构产生变形。土壤脱湿过程中,水分先从大孔隙蒸发逸出,而后从越来越小的孔隙中排出,基质吸力逐渐增大[25],土颗粒与团聚体上的吸应力随着基质吸力的增加而增大。当团聚体间产生的吸应力超过土壤抗拉强度时,裂隙将会产生,并为空气提供新的侵入通道和接触面,裂隙将沿着接触面逐渐拓展[26]。

对于土壤脱湿收缩的过程,可分为结构收缩、正常收缩、残余收缩、零收缩 4 个阶段[18],各阶段基质收缩展现出各向异性特征。结构收缩发生在接近饱和的土壤中,水先从团聚体间大孔隙(结构性孔隙)中排出,伴随轻微的应力及体积变化[27],土颗粒团聚体间形成弯液面,该阶段孔隙结构变形量小于蒸发水体积[21]。随着结构孔隙快速排水,液相浮力逐渐减小,土壤充水区开始施加重力垂直方向的力,团聚体骨架收缩,此时重力与表土层压力影响占据主导地位[28],土壤主要发生纵向沉降。在正常收缩阶段,孔隙排水量体积与孔隙变形量一致,而团聚体内部孔隙仍然保持饱和状态。在残余收缩阶段,空气进入土壤团聚体内部孔隙,土壤发生开裂,此阶段以水平收缩为主,土壤变形量主要为团聚体自身收缩变形量。在零收缩阶段,土壤颗粒与团聚体达到致密状态,此时团聚体内部孔隙蒸发极少量孔隙水,微观孔隙的收缩被视为补偿宏观体积膨胀,土壤总体积收缩并不明显[29]。这种各向异性的收缩变形特征将显著影响土壤物理-水力特性。

3.2 土壤厚度对其开裂行为的影响

在土壤脱湿开裂时,水分蒸发可划分为两个阶段:①当土壤表层湿润时蒸发处于大气蒸发拉力控制阶段,蒸发趋于稳定状态。②表层含水率逐渐降低,蒸发处于输水能力控制阶段,其蒸发强度不受外界蒸发拉力的影响,而是取决于土壤输水能力,此时水分以水汽形式向表层输送。在这个过程中,尺寸(厚度、表面积)是影响裂隙发育形态的一个显著因素[30-31],ÁVILA[32]认为研究土壤裂隙形成和扩展机理时需要考虑尺寸影响。本研究着眼于土壤厚度对其开裂行为的影响,厚度影响土壤内部水力传导路径距离,其变化将影响土壤团聚体失水过程、收缩不均匀性、干燥速率等。土壤厚度较薄时,土壤吸力沿纵剖面方向更为均匀,收缩开裂进程更快,土壤收

缩的同时引发基底摩擦导致细碎裂隙产生。对于厚层土壤，其开裂现象主要发生于第 2 阶段：孔隙水在非饱和状态下蒸发并向上传导的速率相对较低，从下层向表层的蒸发路径更长，导致上层土壤裂隙骨架稳定时下层尚无吸应力；与含水率状态紧密相关的吸力剖面并未完全向深层发展，较厚土壤下底土含水率变化小，导致下层土的收缩变形较弱。当拉应力作用传导至土壤底部时，表面裂隙骨架已达到稳定，此时底层摩擦对开裂几乎不再产生影响，随着土壤厚度增大，裂缝宽度及开裂后土块总体也增大，开裂的土壤发生二次开裂的概率降低。此外，土壤收缩各向异性特征同样与初始厚度有关[33]。本研究中，脱湿初期土壤主要纵向沉降；随着脱湿进行，土壤边界与容器间空隙逐渐增大，增加了水分蒸发逸出面，此时横向收缩的影响增大，针对农田原位裂隙试验，裂隙侧向边壁亦可加速土壤蒸发，强化水平收缩或开裂过程。农田土壤通常呈现层状结构特征，天然状态下土壤沿层深方向土水势虽形态上连续，然而其含水率、孔隙水分形态及土颗粒/团聚体间弯液面差异显著，导致收缩特征及裂隙形态沿纵向深度上的差异，因此基于本研究可深化土壤层结构差异对裂隙的影响机制。

3.3　基于土壤物理方法的裂隙率预测模型

裂隙率为土壤裂隙优先流研究提供参数基础，是优先流理论前提和关键。本研究基于固、液、气三相转换特征，根据 VG－PENG 模型[18]推导获取基质域孔隙关于含水率演化曲线。PENG 等[11,18]基于 270 组收缩数据对模型进行测试，证实了模型的有效性。然而收缩特征曲线模型未能反映出横向-纵向收缩随含水率的变化过程，导致 VG－PENG 模型在预测裂隙率时无法表征土壤收缩各向异性特征。以往多数研究在预测裂隙率时通常假设土壤收缩各向同性，将几何因子假定为恒定值 3.0，导致对土壤收缩变形量和裂缝体积的高估[13-14]，因此本研究引入收缩几何因子量化土壤横向收缩-纵向沉降在各阶段的权重，并采用土壤厚度结合收缩几何因子对土壤裂隙率变化进行预测[28]。当接近饱和时，土壤发生结构收缩产生纵向沉降，收缩几何因子为 1.0。正常收缩及残余收缩阶段，收缩几何因子急剧增加到约 3.0，零收缩阶段时收缩几何因子达到稳定。根据收缩几何因子与含水率的函数关系可知，收缩几何因子从 1.0 增加到约 3.0 的过程，也是土壤从饱和到干燥的过程。本研究试验量化了收缩几何因子与含水率之间的关系，采用 Logistic 曲线较好地拟合了实测数据（$R^2>0.88$）。收缩几何因子模型的引入补充了各向同性假设的不足，能有效提高裂隙率模型精度。

基于 VG－PENG 收缩特征模型和收缩几何因子模型，本文对不同厚度的重塑土和原状土裂隙率进行预测并验证，结果表明裂隙率预测模型对于物理-水力性质均匀的试样和田间环刀原状土试样效果良好。该模型虽有效验证了其在有限尺寸试样中的适用性，但针对田间原位半无限边界土壤中的应用尚需揭示，且未考虑试样纵向方向含水率的非均匀分布。这种采用大尺度平均含水率预测裂隙发育程度的方法，在田间的应用仍需进一步探求。

4　结论

（1）土壤厚度显著影响裂隙几何形态特征。随着土壤厚度加大，重塑土表面大裂隙宽度总体将加大，团聚块出现次级裂隙可能性减小，且裂隙密度减小，土壤收缩开裂时间点放缓。

（2）土壤基质域收缩变形呈现非均匀性特征，且受到土壤厚度影响。开裂后的基质域内部、边缘、裂隙域变形量存在差异，基质域最小收缩变形量存在趋于 0 的部分，证明开裂的土壤会沿着某中心方向收缩。随着重塑土厚度加大，土壤基质域边缘部分的收缩变形量将加大。与重塑土相比，原状土收缩变形量更大。

（3）基于土壤孔隙在基质、沉降和裂隙域间转换机理，提出了裂隙率预测模型。该模型包含描述土壤收缩特征的 VG－PENG 收缩特征曲线模型和量化非均匀变形的收缩几何因子 Logistic 模型。结果表明，采用土壤收缩特征曲线环刀试验，可准确预测不同厚度土壤的裂隙率，证实了该模型在不同厚度及取土方法（原状土和重塑土）试样中的有效性（$R^2>0.91$）。该模型同时弥补了以往裂隙模型不考虑收缩各向异性的缺点，是一种快速、准确估算裂隙率的实用方法。

参　考　文　献

[1]　ZHANG Y, ZHANG Z, MA Z, et al. A review of preferential water flow in soil science[J]. Canadian Journal of Soil Science, 2018, 98(4): 604－618.

[2]　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)：172－177，252.
ZHANG Zhanyu, LI Wenjie, WANG Ce, et al. Effects of dry－wet cycles on evolution characteristics of farmland soil

desiccation cracks[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(12): 172 - 177, 252. (in Chinese)

[3] TANG C S, ZHU C, CHENG Q, et al. Desiccation cracking of soils: a review of investigation approaches, underlying mechanisms, and influencing factors[J]. Earth-Science Reviews, 2021, 216: 103586.

[4] 高朝侠,徐学选,赵娇娜,等. 土壤大孔隙流研究现状与发展趋势[J]. 生态学报,2014, 34(11):2801 - 2811.
GAO Zhaoxia, XU Xuexuan, ZHAO Jiaona, et al. Review on macropore flow in soil[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(11): 2801 - 2811. (in Chinese)

[5] 王策,张展羽,陈晓安,等. 基于水量平衡原理的裂隙优先流双域渗透模型及其应用[J]. 农业机械学报,2021, 52(10): 314 - 326, 348.
WANG Ce, ZHANG Zhanyu, CHEN Xiaoan, et al. Dual-permeability model for crack preferential flow based on principle of water volume balance and its application[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(10): 314 - 326, 348. (in Chinese)

[6] 杨金忠,叶自桐. 野外非饱和土壤水流运动速度的空间变异性及其对溶质运移的影响[J]. 水科学进展,1994,5(1): 9 - 17.
YANG Jinzhong, YE Zitong. Velocity spatial variability and its effect on solute transport in field unsaturated soil[J]. Advances in Water Science, 1994, 5(1): 9 - 17. (in Chinese)

[7] WANG C, ZHANG Z Y, LIU Y, et al. Geometric and fractal analysis of dynamic cracking patterns subjected to wetting-drying cycles[J]. Soil & Tillage Research, 2017, 170: 1 - 13.

[8] 张展羽,陈于,孔莉莉,等. 土壤干缩裂缝几何特征对入渗的影响[J]. 农业机械学报,2015,46(10):192 - 197.
ZHANG Zhanyu, CHEN Yu, KONG Lili, et al. Impacts of desiccation crack geometric characteristics on infiltration in soil[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(10): 192 - 197. (in Chinese)

[9] BAER J, KENT T, ANDERSON S. Image analysis and fractal geometry to characterize soil desiccation cracks[J]. Geoderma, 2009,154(1): 153 - 163.

[10] 唐朝生,王德银,施斌,等. 土体干缩裂隙网络定量分析[J]. 岩土工程学报, 2013,35(12): 2298 - 2305.
TANG Chaosheng, WANG Deyin, SHI Bin, et al. Quantitative analysis of soil desiccation crack network[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(12): 2298 - 2305. (in Chinese)

[11] PENG X, HORN R. Identifying six types of soil shrinkage curves from a large set of experimental data[J]. Soil Science Society of America Journal, 2013, 77: 372 - 381.

[12] QI W, WANG C, ZHANG Z, et al. Experimental investigation on the impact of drying-wetting cycles on the shrink-swell behavior of clay loam in farmland[J]. Agriculture, 2022, 12: 245.

[13] STEWART R D, RUPP D E, ABOU N M R, et al. A unified model for soil shrinkage, subsidence, and cracking[J]. Vadose Zone Journal, 2016, 15: 1 - 15.

[14] NEELY H L, MORGAN C L S, MCINNES K J, et al. Modeling soil crack volume at the pedon scale using available soil data[J]. Soil Science Society of America Journal, 2018, 82(4): 734 - 743.

[15] 董秀茹,刘小庆,孙福军. 沈阳市耕地表土层厚度与耕地产能关系研究[J]. 土壤通报,2019,50(4): 800 - 806.
DONG Xiuru, LIU Xiaoqing, SUN Fujun. Relationship between topsoil thickness and productivity of cultivated land in Shenyang[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2019, 50(4): 800 - 806. (in Chinese)

[16] 匡恩俊,刘峰,高中超. 黑土层厚度及心土培肥对大豆产量的影响[J]. 大豆科学,2012,31(2): 266 - 269.
KUANG Enjun, LIU Feng, GAO Zhongchao. Effect of black soil depth and subsoil fertilizing on soybean yield[J]. Soybean Science,2012,31(2): 266 - 269. (in Chinese)

[17] ZHAO Y J, LI Z, ZHANG J, et al. Do shallow soil, low water availability, or their combination increase the competition between grasses with different root systems in Karst soil? [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, 24(11): 10640 - 10651.

[18] PENG X, HORN R. Modeling soil shrinkage curve across a wide range of soil types[J]. Soil Science Society of America Journal, 2005, 69(3): 584 - 592.

[19] 王策,张展羽,曹德君,等. 基于 VG - PENG 收缩特征曲线与收缩各向异性的裂隙率估算模型[J]. 农业工程学报, 2021,37(7): 112 - 121.
WANG Ce, ZHANG Zhanyu, CAO Dejun, et al. Crack porosity estimation model based on VG - PENG shrinkage characteristic curve and soil shrinkage anisotropy[J]. Transactions of the CSAE, 2021,37(7): 112 - 121. (in Chinese)

[20] PENG X, HORN R. Anisotropic shrinkage and swelling of some organic and inorganic soils[J]. European Journal of Soil Science, 2007, 58(1): 98 - 107.

[21] WANG C, ZHANG Z Y, QI W, et al. Morphological approach to quantifying soil cracks: application to dynamic crack patterns during wetting-drying cycles[J]. Soil Science Society of America Journal, 2018, 82: 757 - 771.

[22] WANG L L, TANG C S, SHI B, et al. Nucleation and propagation mechanisms of soil desiccation cracks[J]. Engineering Geology, 2018, 238: 27 - 35.

[23] 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[J]. Soil & Tillage Research, 2010, 111(1): 3 - 18.

[24] BRAUDEAU E, COSTANTINI J M, BELLIER G, et al. New device and method for soil shrinkage curve measurement and characterization[J]. Soil Science Society of America Journal, 1999, 63: 525 - 535.

[25] WANG C, FENG G, ZHANG Z, et al. Geometrical and statistical analysis of dynamic crack morphology in shrink-swell soils with addition of maize roots or salinity (NaCl)[J]. Soil & Tillage Research, 2021, 212: 105057.
[26] LAKSHMIKANTHA M R, PRAT P C, LEDESMA A. Image analysis for the quantification of a developing crack network on a drying soil[J]. ASTM Geotech Test J., 2009, 32(6): 1 – 11.
[27] BOIVIN P, GARNIER P, VAUCLIN M. Modeling the soil shrinkage and water retention curves with the same equations[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 2006, 70: 1082 – 1093.
[28] BRAKE B T, PLOEG M J, ROOIJ G H. Water storage change estimation from in situ shrinkage measurements of clay soils [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2013, 17(5): 1933 – 1949.
[29] BRUAND A, PROST R. Effect of water content on the fabric of a soil material: an experimental approach[J]. Journal of Soil Science, 1987, 38(3): 461 – 472.
[30] LAKSHMIKANTHA M R, PRAT P C, LEDESMA A. Experimental evidence of size effect in soil cracking[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2012, 49: 264 – 284.
[31] ANDREW C A, LI Guowei, WU Jiantao, et al. An image-based method for quick measurement of the soil shrinkage characteristics curve of soil slurry[J]. Geoderma,2020, 363: 114165.
[32] ÁVILA G. Estudio de la retracción y el agrietamiento de arcillas: aplicación a la arcilla de Bogotá[D]. Barcelona, Spain: Universitat Politècnica de Catalunya, 2004.
[33] PARTHA N M, ZHANG Yuan, HABIBULLAH B, et al. Anisotropy in volume change behaviour of soils during shrinkage[J]. Acta Geotechnica, 2020, 15(12): 3399 – 3414.

(上接第 200 页)

[18] 李红军, 李佳珍, 雷玉平, 等. 无人机搭载数码相机航拍进行小麦、玉米氮素营养诊断研究[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(12): 1832 – 1841.
LI Hongjun, LI Jiazhen, LEI Yuping, et al. Diagnosis of nitrogen nutrition of winter wheat and summer corn using images from digital camera equipped on UAV[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(12): 1832 – 1841. (in Chinese)
[19] 崔丹丹, 杨瑞芳, 佘玮, 等. 基于可见光遥感的苎麻种质资源冠层性状研究[J]. 植物遗传资源学报, 2020, 21(2): 483 – 490.
CUI Dandan, YANG Ruifang, SHE Wei, et al. Studies on canopy characters of ramie germplasm resources based on visible light remote sensing[J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2020, 21(2): 483 – 490. (in Chinese)
[20] GITELSON A A, KAUFMAN Y J, STARK R, et al. Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction[J]. Remote Sens. Environ., 2002, 80(1):76 – 87.
[21] SULIK J J, LONG D S. Spectral considerations for modeling yield of canola[J]. Remote Sens. Environ., 2016, 184: 161 – 174.
[22] HUNT J E R, CAVIGELLI M, DAUGHTRY C S T, et al. Evaluation of digital photography from model aircraft for remote sensing of crop biomass and nitrogen status[J]. Precision Agriculture, 2005, 6: 359 – 378.
[23] JULIANE B, KANG Y, HELGE A, et al. Combining UAV-based plant height from crop surface models, visible, and near infrared vegetation indices for biomass monitoring in barley[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2015, 39: 79 – 87.
[24] 贺英, 邓磊, 毛智慧, 等.基于数码相机的玉米冠层 SPAD 遥感估算[J].中国农业科学, 2018, 51(15):66 – 77.
HE Ying, DENG Lei, MAO Zhihui, et al. Estimation of maize canopy by SPAD remote sensing based on digital camera[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, 51(15):66 – 77. (in Chinese)
[25] 牛庆林, 冯海宽, 周新国, 等. 冬小麦 SPAD 值无人机可见光和多光谱植被指数结合估算[J]. 农业机械学报, 2021, 52(8):183 – 194.
NIU Qinglin, FENG Haikuan, ZHOU Xinguo, et al. Estimation of SPAD value of winter wheat by combination of visible light and multispectral vegetation index[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(8):183 – 194. (in Chinese)
[26] 肖志云,王伊凝.基于 RF – VR 的紫丁香叶片叶绿素含量高光谱反演[J]. 浙江农业学报, 2021, 33(11):2164 – 2173.
XIAO Zhiyun, WANG Yining. Hyperspectral inversion of chlorophyll content in lilac leaves based on RF – VR[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2021, 33(11):2164 – 2173. (in Chinese)
[27] 徐晋, 蒙继华. 农作物叶绿素含量遥感估算的研究进展与展望[J]. 遥感技术与应用, 2016, 31(1): 74 – 85.
XU Jin, MENG Jihua. Research progress and prospect of crop chlorophyll content estimation by remote sensing[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2016, 31(1): 74 – 85. (in Chinese)
[28] CAMPOS I, GONZÁLEZ-GÓMEZ L, VILLODRE J, et al. Mapping within-field variability in wheat yield and biomass using remote sensing vegetation indices[J]. Precis. Agric., 2019, 20:214 – 236.
[29] HUNTER F D L, MITCHARD E T A, TYRRELL P, et al. Inter-seasonal time series imagery enhances classification accuracy of grazing resource and land degradation maps in a savanna ecosystem[J]. Remote Sens., 2020, 2(1):198 – 215.