doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2024.11.039

基于微结构量化的枣园根土复合体各向异性试验

王得伟[1,2]　王旭峰[2]　尤　泳[1]　王天一[1]　惠云婷[1]　王德成[1]
(1.中国农业大学工学院, 北京 100083; 2.塔里木大学机械电气化工程学院, 阿拉尔 843300)

摘要: 为确定南疆枣园切根抚育作业工艺,测定了枣园土壤含水率、坚实度、孔隙度、容重、粒径分布等物理参数,统计了枣园待切根区的根系聚集深度、土壤含根量等,确定了切根区位置为距树干 750 mm 和切根作业深度应在 0~200 mm 范围内可调的农业技术要求。研究结果表明,根土复合体具有各向异性,取样角 θ 为 0°、45°、90°时,根土复合体抗剪强度 T 关系为 $T_{0°} < T_{45°} < T_{90°}$。为分析根土复合体产生各向异性现象的原因,采用扫描电镜(SEM)获取了根土复合体在不同取样方向上的微观结构图像,通过 PCAS 软件处理并获取了根土复合体微观结构参数。将根土复合体的宏观图像、微观图像、微观结构参数、抗剪强度参数结合,定性和定量分析了根土复合体产生各向异性的原因及规律,得到微观结构参数与抗剪切强度相关性由强到弱依次为孔隙概率熵、孔隙形态分维数、颗粒形状系数、孔隙形状系数、颗粒概率熵、颗粒形态分维数。根据研究结果提出根土复合体抗剪强度测定时,环刀应垂直于耕作过程产生的实际剪切发生面方向取样。本研究可为枣园切根抚育机具设计和研发提供理论依据,为土壤耕作类部件优化设计、耕作类部件与土壤相互作用关系等研究提供参考。

关键词: 枣园; 切根; 根土复合体; 环刀取样; 各向异性; 微观结构参数
中图分类号: S222.3; S224.1　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2024)11-0402-15　　**OSID**:

Experiment on Anisotropy of Soil – Root Composite Based on Microstructure Quantification

WANG Dewei[1,2]　WANG Xufeng[2]　YOU Yong[1]　WANG Tianyi[1]　HUI Yunting[1]　WANG Decheng[1]
(1. *College of Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*
2. *College of Mechanical and Electronic Engineering*, *Tarim University*, *Alar* 843300, *China*)

Abstract: To determine the operation technology of root cutting and nurturing in jujube orchards in southern Xinjiang, physical parameters such as soil moisture content, solidity, porosity, bulk density, and particle size distribution were measured. The root aggregation depth and soil root content of the jujube orchard's root cutting area were also calculated. The agricultural technical requirements were determined that the root cutting area should be located 750 mm away from the tree trunk and the depth of the root cutting operation should be adjustable within the range of 0 ~ 200 mm. The research results indicated that the root soil composite had anisotropy. When the sampling angles θ were 0°, 45° and 90°, the shear strength T relationship of the root soil composite showed trend of $T_{0°} < T_{45°} < T_{90°}$. To analyze the causes of anisotropy in root – soil composites, scanning electron microscopy (SEM) was used to obtain microstructure images of root – soil composites in different sampling directions. The microstructure parameters of the root – soil composites were processed and obtained by using PCAS software. By combining macroscopic images, microscopic images, microscopic structural parameters, and shear strength parameters of root – soil composites, the reasons and laws for the anisotropy of root – soil composites were qualitatively and quantitatively analyzed. The correlation between microscopic structural parameters and shear strength, from strong to weak, was found to be pore probability entropy, pore morphology fractal dimension, particle shape coefficient, pore shape coefficient, particle probability entropy, and particle morphology fractal dimension. According to the research results, it was proposed

收稿日期: 2024-01-08　修回日期: 2024-03-05
基金项目: 国家自然科学基金项目(32360073)、国家重点研发计划项目(2022YFD2202102)和塔里木大学-中国农业大学科研联合基金项目(ZNLH202304)
作者简介: 王得伟(1989—),男,博士生,塔里木大学副教授,主要从事现代农业机械装备研究,E-mail: dewei_wang0528@163.com
通信作者: 王德成(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事牧草机械化研究,E-mail: wdc@cau.edu.cn

that when measuring the shear strength of root – soil composites, the ring cutter should be sampled perpendicularly to the actual shear direction generated during the tillage process. The research result can provide theoretical basis for the design and development of root cutting and nurturing equipment in jujube orchards, and provide reference for the optimization design of soil tillage components and the study of the interaction between tillage components and soil.

Key words: jujube garden; root cutting; soil – root composite; ring knife sampling; anisotropy; microstructural parameters

0　引言

新疆红枣是我国特色的林果产品,2019 年新疆红枣种植面积已达到 4.453×10^5 hm^2,产量 2.625×10^6 t,占全国红枣产量的 49.67%,种植面积和产量均居全国第一[1],其丰富的营养和优秀品质深受广大消费者喜爱[2-4]。项目前期研究发现,枣树行间长期不进行机械扰动,枣树根系功能会逐步显现退化状态,部分侧根和须根出现枯萎、死亡,如不清除已退化根系,会对枣树产生消耗且不会产生新根,影响枣树生长进而影响果实产量及品质。枣树根系发达,在土壤中呈横向分布状态,并在行间与土壤交织产生锚固作用,形成复杂的根土复合体结构,通过切根作业机械打破枣树根系-土壤复合体结构、切断根系为根系生长提供适宜的生长环境是枣园根系抚育的重要手段。国内外研究人员对切根促生复壮做了大量研究,如 MAAS[5] 发现梨果实生长动态受根修剪影响,休眠根系修剪使果实平均尺寸减小,随着作物密度(果实数与树干横截面积比值)的增加,影响更显著。MCARTNEY 等[6] 发现在不加灌溉条件下苹果根系修剪对树木生长有显著影响。文献[7-9]发现,根系修剪可调节根系生长发育,进而调控地上部生长发育。机械化切根促生技术在草地改良中也被广泛研究,并研发了草地切根改良相关作业机械[10-12]。

目前土壤耕作机具、草地切根改良机具等的设计和相关研究均认为土壤各向同性,即认为与土壤在各个方向上的力学性能相同。如张学宁等[13] 研究了草地切根下根土复合体本构关系和不同覆盖度条件下退化草地原状土物理特性,并通过 ABAQUS 仿真结合三轴试验建立了其本构参数的数学模型,但该研究在根土复合体取样时是环刀垂直于地表取样,试验过程和结论均是基于根土复合体各向同性开展的。毛雷等[14-15] 基于有限元 ANSYS 建模建立了振动状态下果园切根刀的受力模型并提出一种振动式果树根系断切装置,马文鹏等[16] 基于离散元建立触土部件-土壤相互作用模型并设计出一种具有仿生结构的低阻松土铲,这些研究中仅考虑了不同深度条件下根土复合体的力学特性差异,均未考虑同层深度条件下根土复合体的各向异性。然而本试验研究发现,相同深度的根土复合体沿各个方向上结构和力学性能存在显著差异,即根土复合体存在各向异性现象。通过查阅文献发现材料各向异性研究最早出现在机械工程材料的研究中,并已有成熟的理论和试验结果解释该现象[17],目前金属材料各向异性研究已实现对金属材料结构和性能预测,并研发出各类性能优异的机械工程材料[18-23]。此外,国内外研究人员在岩土工程、地质工程、土木工程等领域已发现土壤具有各向异性,并开展了相关试验研究[24-28],但以上相关研究仅将土壤视为由土壤颗粒组成的单相组织,并未考虑土壤中根系的作用。然而,研究中发现植物生长区域的土壤中实际上包含了土壤颗粒和根系两种组织组成物,而且由于根系在土壤中的分布导致根土复合体的各向异性更为明显,不能简单利用单相土壤的各向异性理论模型。深入研究根土复合体的力学特性对优化土壤耕作类机具和研发低阻力、低功耗的作业部件有重要意义。根据以上分析和项目的前期研究结果,本研究拟以南疆阿拉尔枣园根土复合体为例,开展根土复合体的各向异性研究,为林下切根抚育机械、草地切根改良机械、农田土壤耕作机械等耕作类机械设计和研发提供参考。

1　材料与方法

1.1　取样地概况与取样点设计

试验取样地点位于新疆维吾尔自治区农一师阿拉尔市十团 3 连(80°35′N,40°22′E,海拔 1 011 m)枣园内(图 1)。该地属于暖温带极端大陆干旱荒漠性气候,年均气温 10.7℃,年日照时数 2 900 h 左右,大于 10℃年积温为 4 541.4℃,无霜期约 220 d,年均降水量 40.1 ~ 82.5 mm,年蒸发量 1 876.6 ~ 2 558.9 mm,降水集中在 6—8 月,需要灌溉,灌溉形式为漫灌,灌溉周期为 30 ~ 40 d。试验时间为 2023 年 9 月 7 日,当日气温 13 ~ 31℃,晴,东北风 3 级。试验枣园枣树树龄为 12 a,枣树行距 L 为 3 500 mm,株距 b 为 1 500 mm,如图 2 所示。

前期枣园实地调研获悉,切根抚育需考虑“保护主要根系”和枣树“滴水檐”两方面问题。切根不



图 1 采样区基本地理信息概况

Fig. 1 Basic geographic information of sampling area



图 2 枣园基本情况和取样点设计

Fig. 2 Basic information and sampling point design of jujube orchards

能破坏枣树根系中直径大于 4 mm 的主要根系，否则会影响枣树正常生长，试验测得枣树主要根系分布在以树干为中心、半径约为 500 mm 范围内，所以切根区与树干的水平距离 d 应大于 500 mm。枣树树冠边缘在地表的垂直投影处称为“滴水檐”，在“滴水檐”处切根会有效增加雨水入渗、促进根系发育，试验测得该枣园枣树“滴水檐”与树干水平距离为 600 ~ 800 mm。综合考虑“保护主要根系”、“滴水檐”和机组作业过程的路径偏差等多方面因素，切根不能距树干太远也不能太近，最终将切根作业区确定为距离树干 750 mm 处。取样时，随机选取任一行间土壤为试验对象，由于已确定切根作业区为离树干 750 mm 位置，故将地表上平行于直线 A 且与直线 A 水平距离为 750 mm 的直线 K 作为取样线。文献[29]研究表明，剪切力、粘附力与含根量成正相关，即含根量高的位置处产生的作业阻力大，故通过枣树树干向取样线作垂线可获得理论上的最大含根量点。取样时，以直线 A 上树干中心点 A_1、A_2、…为起点作 K 的水平垂线并交于 K_1、K_2、…，将 K_1、K_2、…作为取样点，根据试验需求随机选取多个枣树行间并按上述方法取样，直至取足试验样本。

1.2 根系和土壤基本参数测定方法与仪器

由于特殊气候和灌溉等因素影响，南疆枣园枣树的侧根在土壤中分布较浅且呈横走形态，90% 以上根系分布在离地表深度 0 ~ 200 mm 范围内，枣树根系形态如图 3 所示。土壤物理特征包括坚实度、容重、含水率、孔隙度等，土壤坚实度采用 TJSD - 750 型土壤紧实度仪测定，容重、孔隙度、含水率等参数用环刀取样后采用干燥法、饱和水称量法等方法测定[30-31]，土壤液塑限采用 LP - 100D 型液塑限仪测定，土壤颗粒粒径分布采用筛分法和 Litesizer 500 型激光粒度仪测定。



图 3 枣树根系分布形态

Fig. 3 Distribution morphology of jujube tree root system

枣树侧根在土壤中向行间横走延伸，已布满整个行间(图 4a)。大量侧根和须根与土壤交织锚固形成了根土复合体，根土复合体竖直方向截面和水平方向截面形态结构如图 4b、4c 所示。枣树根系分布特征参数包括：根系聚集深度、根系直径、含根量等，使用钢卷尺测定根系聚集深度，以 90% 根系的分布深度作为枣树根系聚集深度。测量根系直径时，测量根系两端和中间 3 个位置直径后取均值作为测定值[13,32-33]，使用称量法测量根土复合体含根量，每个测定指标取 5 个样本平均值作为测定值。

1.3 根土复合体各向异性试验设计

1.3.1 根土复合体各向异性试验假设

无论主动贯入式或被动牵引式切根作业刀具，其对土壤剪切破坏均发生在刀具与土壤接触破坏的剪切面上，以主动贯入式切根为例阐述本试验的试验构想与假设，如图 5 所示。

由图 5 可知，作业时切根刀随机组前进的同时沿回转中心做回转运动，切根刀垂直于地表平面切削土壤并形成剪切破坏面，形成的剪切破坏面的方向与重力方向一致。目前农业机械中的耕作类部件设计测定根土复合体力学特性参数时，取样环刀一般是以环刀 Ⅰ 的状态取样，即环刀中心轴线垂直于地表平面，取样方向与重力方向一致(与重力方向夹角 $\theta = 0°$)，但环刀 Ⅰ 所取样本进行直剪试验过程



(a) 根系向行间横走延伸　(b) 根土复合体竖直截面　(c) 根土复合体水平截面

图 4　土壤-根系复合体特点

Fig. 4　Characteristics of soil – root composite

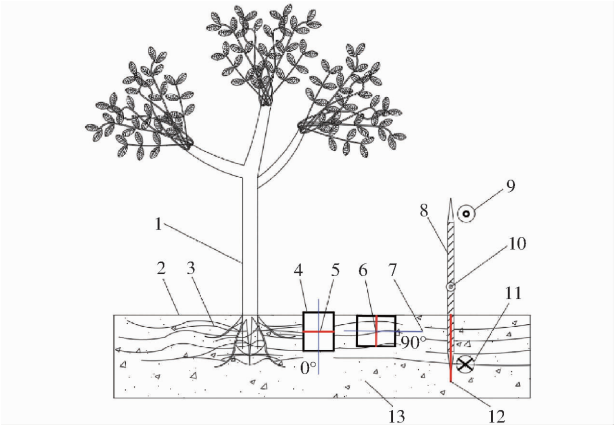


图 5　根土复合体各向异性试验假设示意图

Fig. 5　Schematic of assumptions for anisotropic testing of soil – root composites

1. 枣树　2. 地表　3. 根系　4. 环刀Ⅰ　5. 环刀Ⅰ剪切面　6. 环刀Ⅱ剪切面　7. 环刀Ⅱ　8. 切根刀　9. 上切根刀运动方向　10. 切根刀回转中心　11. 下切根刀运动方向　12. 切根形成的剪切面　13. 土壤

形成的剪切破坏面与实际工况下形成的剪切面方向不一致，两剪切面的二面角为 90°，如果认为二者试验剪切参数值相同，必须以根土复合体是各向同性材料为前提，即根土复合体在不同方向上的结构和力学性能相同。若不同取样方向上的抗剪切特性不同，试验取样时环刀应该以环刀Ⅱ的状态取样，此时取样环刀Ⅱ的中心轴线与重力方向夹角 $\theta = 90°$，样本直剪试验过程的剪切发生面与实际工况下形成的剪切面方向一致。然而，根据 1.2 节试验研究发现，同层根土复合体在根系影响和作用下水平截面和竖直截面上的结构有明显区别，水平截面上的根系呈附着在根土复合体表面的形态，竖直截面上的根系呈穿插在根土复合体中的形态，根土复合体这种不同方向上结构的差异可能导致水平方向、竖直方向和其他不同方向的抗剪切性能不同。基于此，本试验拟对不同取样角条件下根土复合体的微观结构和宏观抗剪切特性进行分析，以确定根土复合体是否具有各向异性特征，并寻求微观结构参数和宏观力学特性参数之间的联系。

1.3.2　根土复合体各向异性试验方案

为了研究根土复合体不同方向上的抗剪切特性，设计取样试验方案：在枣园整侧边和中间随机选取 2 行枣树为研究对象，每行枣树行间随机选取 8 个取样点，取样深度固定在含根量最大的 50 ~ 100 mm 的同一深度土层。取样时在取样点建立以与重力方向平行方向为 Y 轴、与重力方向垂直方向为 X 轴的直角坐标系，以环刀中心轴线与重力方向的夹角 θ 为试验因素，分别获取 0°、45°、90°共 3 个方向的根土复合体样本（图 6）。根据 GB/T 50123—2019《土工试验方法标准》[31]，直剪切试验以施加的正应力 σ_n 为试验因素，取 σ_n 为 50、100、150、200 kPa 共 4 个水平，为了数据的有效性，每个因素对应的水平下重复 4 次试验，共计 48 次试验，为了避免试验过程因样本破坏而无法试验[32-33]，每个取样角度下的样本多取 4 ~ 8 个。于 2023 年 9 月 7 日进行取样作业，根据试验方案采用 Sanliang 型电子角度仪制作取样平面，然后用环刀垂直于取样平面取样，各样本的取样过程保证一致。环刀直径 × 高度为 61.8 mm × 20 mm，取样后立即将环刀和样本一起用保鲜袋包裹密封防止水分散失，并立即带回实验室进行试验，获取的原状枣园根土复合体试样如图 7 所示。

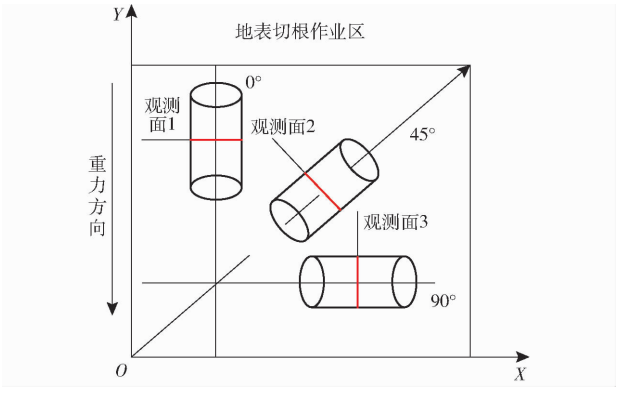


图 6　根土复合体取样设计示意图

Fig. 6　Sampling design for soil – root composite



图 7 原状根土复合体取样

Fig. 7 Undisturbed soil – root composite sample in field

1.3.3 根土复合体微观结构形态测定试验仪器与方法

在 θ 为 0°、45°、90°共 3 个不同方向对根土复合体取样后,建立观测面研究其微观结构特征。用小刀将各角度的根土复合体样本切削成长 × 宽 × 高为 8 mm × 8 mm × 8 mm 的立方体,尽量保证观测面完整并避免人为破坏,将样本底部和侧面涂抹胶水保证其完整性。为避免干燥过程对根系造成损伤,参考文献[28]采用的干燥方法,将样本在室温下自然干燥后再放入干燥箱以 45℃ 低温烘干,形成观测样本(图 8a)。烘干后的样本用导电胶带缠好后放入真空仪中抽干空气和水分,然后进行喷金处理,增强其导电性并保证电镜扫描试验结果清晰准确(图 8b)。根土复合体微观结构试验在塔里木大学分析测试中心采用 Apreo S 型扫描电子显微镜(图 9)进行,该扫描电子显微镜最低发射电压为 200 V,最高发射电压为 30 kV,10 mm 日常工作距离分辨率小于等于 1.0 nm,可获取固体样品的微观形貌、结构特征信息,也可获取样品微区元素成分及线分布和面分布等信息。对不同取样角条件下的样本观测面进行观测,获取放大 50、100、250、800 倍图像。



(a) 根土复合体观测样本制备

(b) 喷金处理及形成的观测样本

图 8 根土复合体微观结构观测样本制备过程

Fig. 8 Preparation process of microstructural observation samples for soil – root composites

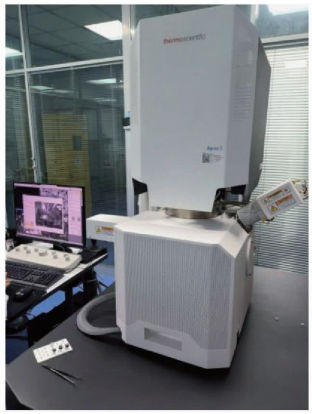


图 9 Apreo S 型扫描电子显微镜

Fig. 9 Type of Apreo S scanning electron microscope

1.3.4 根土复合体抗剪切强度测定试验仪器与方法

试验仪器为西安亚星土木仪器有限公司生产的 YJRB – B 型土壤自动直剪试验仪,如图 10 所示。将取样带回的 0°、45°、90°共 3 个不同取样方向上的 48 个原状根土复合体样本开展直接剪切试验,试验时对不同取样角下的样本分级施加正应力 σ_n 为 50、100、150、200 kPa,试验加载速率为 2 mm/min,试验至剪切最大位移行程 30 mm 时结束,数据由计算机自动采集。

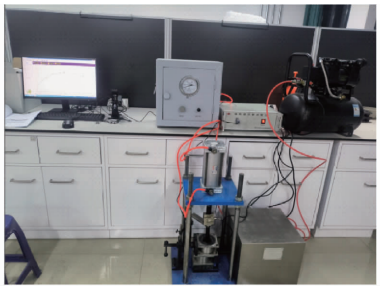


图 10 YJRB – B 型直剪仪

Fig. 10 YJRB – B direct shear apparatus

2 试验结果与分析

2.1 枣园行间土壤物理特征与根系分布特征

试验中发现 10 年以上生枣树根系已遍布整个行间,离树干越近土壤中的根系越多。在新疆特殊的气候环境和灌溉条件等因素影响下,枣树侧根分布较浅,主要分布在离地表 0 ~ 200 mm 深度范围内,该深度范围的根系含量占总根系量的 90% 以上。坚实度即土壤硬度,土壤坚实度过大会阻碍作物根系的生长,不利于根系从土壤中吸收养分,导致作物减产[34]。容重反映了土壤的松紧程度,过高的容重会减少土壤的空隙空间,增大根系伸长生长的机械阻力,进而限制作物生长发育[35]。试验随机选取 10 个取样点取样测定后取平均值作为试验结果,测得天然含水率、干密度、比重、液限、塑限和塑性指数等参数,如表 1 所示。由表 1 可知,行间土壤坚实

度为 3.63 MPa，容重高达 1.57 g/cm^3，超过了作物根系生长所需的 1.1 ~ 1.4 g/cm^3 最佳容重范围，所以在枣园的切根抚育过程还应考虑同时打破行间板结的根土复合体结构，降低行间土壤坚实度和容重、增加土壤孔隙度，以改善枣园行间的土壤结构和提高土壤的蓄水性能。

表 1　土壤物理特性参数试验结果统计

Tab.1　Statistical results of soil physical property parameters

参数	坚实度/MPa	容重/(g·cm^{-3})	天然含水率/%	根系聚集深度/mm	孔隙度/%	天然密度/(g·cm^{-3})	比重	液限/%	塑限/%	塑性指数/%
数值	3.63	1.57	18.49	174.00	52.38	1.93	2.62	36.75	23.52	13.23

在相同采样位置和相同采样深度取样后，将样本带回实验室干燥。由于土壤筛的最小筛孔为 0.05 mm，所以干燥后采用筛分法逐级确定大于 0.05 mm 以上各级直径的土壤颗粒质量及比例，小于 0.05 mm 部分则采用 Litesizer 500 型激光粒度仪测定，试验结果如表 2 所示。由表 2 可知，该地的沙粒含量高、粘粒含量少，属于沙粉土类型的壤土，土壤特性偏向于砂质土特性。

表 2　土壤颗粒组成及比例

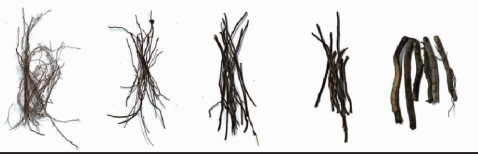
Tab.2　Soil particle composition and proportion

颗粒类型	沙粒						粉粒(0.01 ~ 0.05 mm)	粘粒(0 ~ 0.01 mm)
	>2 mm	1 ~ 2 mm	0.5 ~ 1 mm	0.25 ~ 0.5 mm	0.1 ~ 0.25 mm	0.05 ~ 0.1 mm		
质量分数/%	0.40	0.65	0.73	8.53	11.62	28.27	44.28	5.52

为了研究根土复合体含根量和其分布特点，采用直径 × 高度为 60 mm × 70 mm 环刀在取样点 0 ~ 200 mm 土壤范围内，按 0 ~ 50 mm、50 ~ 100 mm、100 ~ 150 mm、150 ~ 200 mm 共 4 个土层深度取样，每层土壤取 5 个样本，将样本带回实验室后分离泥土和根系，对根系清洗晾干后立即进行统计，主要统计根系直径、数量、根系在根土复合体中的质量分数和土壤中的含根量等参数。用游标卡尺测量根系两端和中间后取平均值作为根系直径测量值，并按根系直径范围对根系分类统计，对环刀内根土复合体中根系分类统计结果如表 3 所示。对数据进一步统计分析，获得根土复合体中根系的分布特性参数如表 4 所示。

表 3　根土复合体中根系分类

Tab.3　Classification and composition of root diameter in soil - root composites

参数	须根	侧根			
根系直径/mm	0~0.25	0.25~1.00	1.0~1.5	1.5~2.0	>2
根系数量/根	18.80±3.77	7.20±2.39	4.40±1.14	2.20±0.84	1.60±0.89
根系质量/g	0.78±0.24	1.54±0.31	2.57±0.42	2.77±1.02	1.56±0.94
根系图像					

由表 4 可知，待切根区不同深度土壤内主要包括须根和侧根 2 种类型，其中须根数量最多，直径范围在 0.11 ~ 0.25 mm，占总根系数量的 54.27% 以上。侧根总质量最大，直径范围在 0.26 ~ 2.35 mm，占总根系质量的 91.77% 以上。待切根区不同深度土壤中根系数量、根系总质量、土壤中含根量均呈先增大、后减小的趋势，其中深度 50 ~ 100 mm 土壤中根系占比和土壤中含根量最高，分别为 2.38% 和 50.62 mg/cm^3。0 ~ 50 mm 和 150 ~ 200 mm 两个深度土层以及 50 ~ 100 mm 和 100 ~ 150 mm 两个深度土层的根系总数量、根系总质量、土壤中含根量无显著性差异（$P > 0.05$）。4 个深度范围土层的须根数量占比为 54.27% ~ 60.58%，且无显著性差异（$P > 0.05$），4 个深度范围土层的侧根质量占比为 91.77% ~ 93.59%，且无显著性差异（$P > 0.05$），这表明虽然

表 4　根土复合体中根系分布特性参数

Tab.4　Root distribution characteristics parameters in soil - root composites

深度/mm	根系直径/mm	根系总数量/根	须根数量占比/%	根系总质量/g	侧根质量占比/%	土壤中根系占比/%	含根量/(mg·cm^{-3})
0 ~ 50	0.11 ~ 1.83	(20.85 ± 1.79)^c	(60.58 ± 4.99)^a	(6.44 ± 0.66)^c	(93.59 ± 1.59)^a	(1.52 ± 0.16)^b	(32.21 ± 3.30)^b
50 ~ 100	0.12 ~ 1.95	(41.23 ± 1.30)^a	(56.23 ± 3.56)^a	(10.11 ± 0.27)^a	(92.79 ± 1.07)^a	(2.38 ± 0.08)^a	(50.62 ± 1.33)^a
100 ~ 150	0.13 ~ 2.15	(40.24 ± 2.17)^a	(59.60 ± 5.15)^a	(9.95 ± 0.22)^a	(93.10 ± 2.40)^a	(2.34 ± 0.07)^a	(49.76 ± 1.10)^a
150 ~ 200	0.13 ~ 2.35	(24.29 ± 1.48)^b	(54.27 ± 5.78)^a	(6.75 ± 0.29)^b	(91.77 ± 1.46)^a	(1.58 ± 0.05)^b	(33.77 ± 1.44)^b

注：采用 Duncan 比较法进行多重比较，同列数值后不同字母表明在 $P < 0.05$ 水平差异显著。

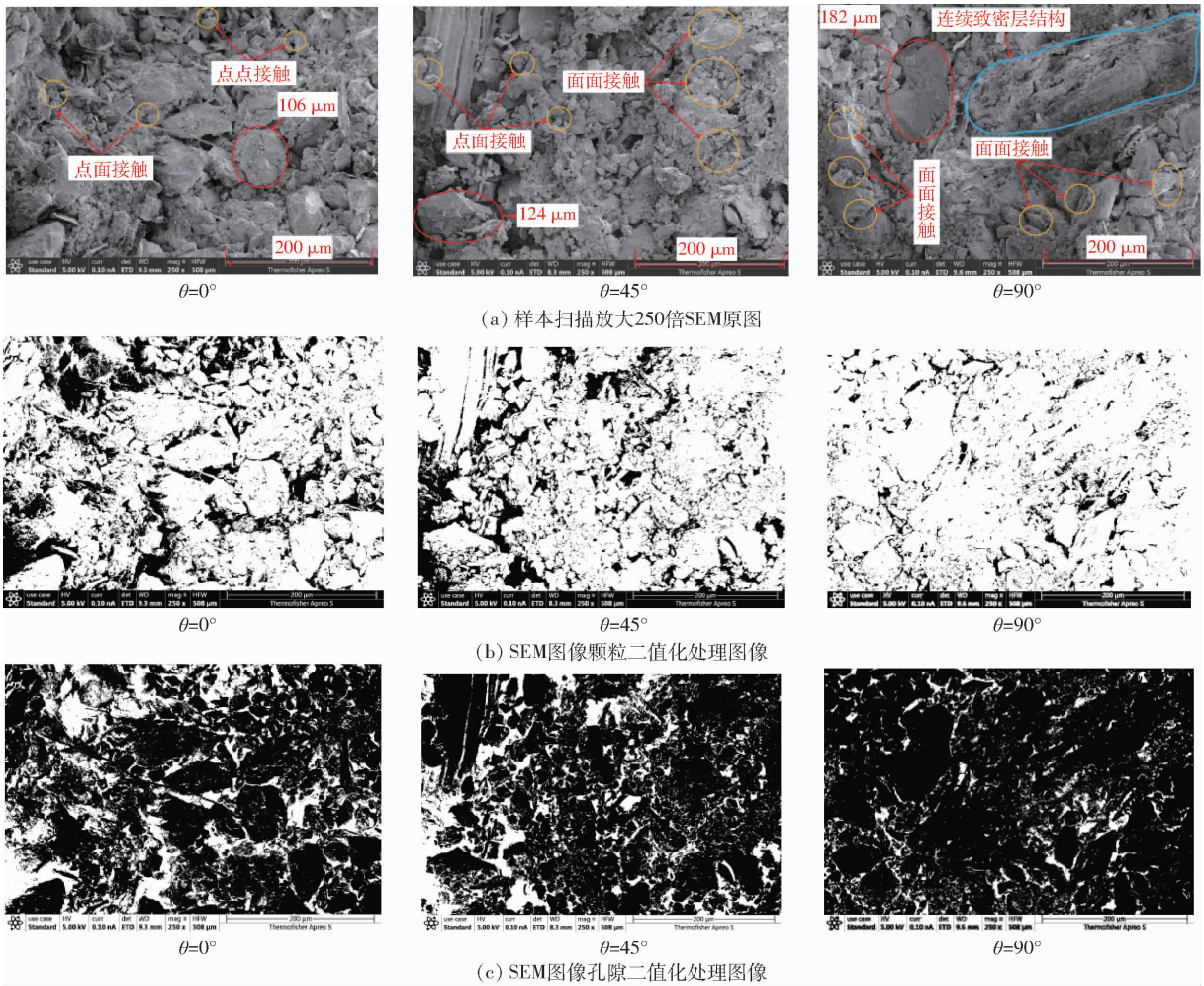
不同土层的根系数量和含根量等有所区别，但根系的组成和比例基本一致。由于含根量与根土复合体的抗剪切性能呈正相关，开展根土复合体各向异性试验过程一方面要利用较大含根量带来的根土复合体各向异性，另一方面还要避免不同深度含根量引起的试验误差，所以本研究的根土复合体取样时取样深度固定在含根量最高的 50 ~ 100 mm 深度范围。

2.2 根土复合体微观结构及其特征分析

2.2.1 根土复合体微观结构定性分析

采用 Apreo S 型扫描电子显微镜对样本表面进行扫描观测，遵循“低倍调、高倍看”的原则，分别获取放大 50、100、250、800 倍的微观图像。对微观图像进行处理和分析需考虑两方面：①能观察到根系与土壤微观结构及不同微观结构间的相互关系。②能看清土壤团粒结构和根系的形态和分布。基于以上考虑，对不同放大倍数的图像对比分析后发现，放大 250 倍图像能较好地兼顾以上问题，故将 250 倍微观图像作为微观处理分析的样本（图 11a）。PCAS 是用于孔隙系统与裂隙系统识别和定量分析的专业软件[36]，可以自动识别图像中的各种孔隙和裂隙，得到各种几何参数和统计参数，目前该软件已在岩土体裂隙、孔隙、页岩气孔隙和矿物颗粒等的定量识别和结构分析中应用。参考 LIU 等[37-38]的研究方法，采用 PCAS 软件对微观图像进行二值化处理并获取微观结构参数。将 SEM 图像导入 PCAS 软件后对孔喉和单元体进行设置，自动识别颗粒和孔隙并获取相关微观结构参数，颗粒的二值化处理图像如图 11b 所示，孔隙的二值化处理图像如图 11c 所示。

主要从 SEM 原图和二值化处理图像中土壤团聚体的接触方式、颗粒和孔隙等方面对图 11 中的图像进行观察和对比分析。对 θ 为 0°、45°、90°的 SEM 原图对比分析发现，随取样角度 θ 增大，土壤团粒结构的密集程度依次增大，土壤团粒颗粒间的间隙依次减小。接触类型参考文献[28]中黄土颗粒接触类型的描述方法，将较小的土壤颗粒之间的接触定义为点点接触，将较小的土壤颗粒与较大的土壤团聚体之间的接触定义为点面接触，将较大的土壤团聚体之间的接触定义为面面接触。从接触类型方面



θ=0° θ=45° θ=90°

(a) 样本扫描放大250倍SEM原图

θ=0° θ=45° θ=90°

(b) SEM图像颗粒二值化处理图像

θ=0° θ=45° θ=90°

(c) SEM图像孔隙二值化处理图像

图 11 根土复合体微观结构和二值化处理图像

Fig. 11 Microstructure and binary processing images of soil - root composite

对比来看，$\theta=0°$时原图中的土壤团聚体颗粒呈堆积形态，颗粒的接触形态主要为点点接触和点面接触，在这种条件下发生剪切破坏时，颗粒间易发生相对滑动。$\theta=45°$时接触形态主要为点面接触和面面接触，土壤团聚体颗粒之间的接触比 $\theta=0°$时紧密，发生剪切破坏时颗粒间相对滑动的难度增大。在 $\theta=90°$时，土壤颗粒、土壤团聚体颗粒接触比 $\theta=45°$时更紧密，主要接触形式为面面接触，且存在接触间隙很小的土壤致密层结构，说明这种条件下根土复合体结构最稳定，其发生滑移、变形等难度最大。此外，从 θ 为 0°、45°、90°二值化分析的结果来看，孔隙平均长径和平均面积依次减小，而颗粒平均长径和平均面积依次增大，如颗粒平均长径依次为 96.3、134.6、182.7 μm。这说明 0°、45°、90°方向上的土壤团粒结构、大小、分布均有显著区别，具体为：$\theta=90°$条件下的土壤团聚颗粒平均粒径最大、孔隙最少、排列最致密，所以理论上 $\theta=90°$方向上根土复合体的抗剪切破坏能力最强，$\theta=45°$时次之，$\theta=0°$时最弱。

由于根系分布会影响土壤结构和力学性能，为了更好地分析其对土壤结构的影响，采用环刀取样后的宏观观察和 SEM 扫描的微观图像定性对比的分析方法。首先通过普通相机拍摄环刀取样后的取样面，整体分析取样面上的根系及其分布特点，由于环刀取样后样本表面与剪切试验的破坏面平行且相差只有 10 mm（环刀高度为 20 mm），故试验中认为两平面的土壤结构相同。为了便于观测，试验中用普通相机拍摄环刀取样后表面图像作为研究对象。然后在不同取样角度取样获得的 SEM 图像中找出含有根系且放大倍数相同的微观扫描图像，先大概看到根系位置和相对关系，再通过大倍数的 SEM 扫描图像分析根系和土壤结构的关系，如图 12 所示。对图 12 进行对比分析发现，$\theta=0°$时根系呈附着在根土复合体表面的状态（图 12a、12d），根系与土壤颗粒接触并不紧密，接触形式主要为点面接触和线面接触，由于黏结不紧密，2 个剪切面被剪切破坏时的阻碍作用相对较小。$\theta=45°$时根系呈倾斜态贯穿于根土复合体中（图 12b、12e），根系附近的土壤被根系锚固，增加了根土复合体强度。$\theta=90°$时根系呈垂直态贯穿于根土复合体中（图 12c），根系附近的土壤无明显团粒结构，土壤在根系附近形成了环绕根系的致密层（图 12f），该致密层以连续的土壤微粒形态紧密包裹在根系上，增加了根土复合体强度。从以上图像的分析可知，根系分布影响了土壤团粒结构的排列和分布，改变了土壤微观结构，进而影响其力学性能。为了简化根土复合体微观结构的分析和计算，在后续微观结构定量分析中将根系和粘附土壤作为一种面积较大的土壤团粒结构处理。

2.2.2　根土复合体微观结构定量分析

为了获得不同取样角度下根土复合体微观结构参数和剪切力学特性参数的内在联系，对获取的根土复合体 SEM 微观结构图像二值化处理后进行量化，得到根土复合体的微观孔隙参数和颗粒参数，引入形状系数 F、形态分维数 D、概率熵 H_m、定向频率 $P_i(\beta)$等 4 个参数进行定量分析。

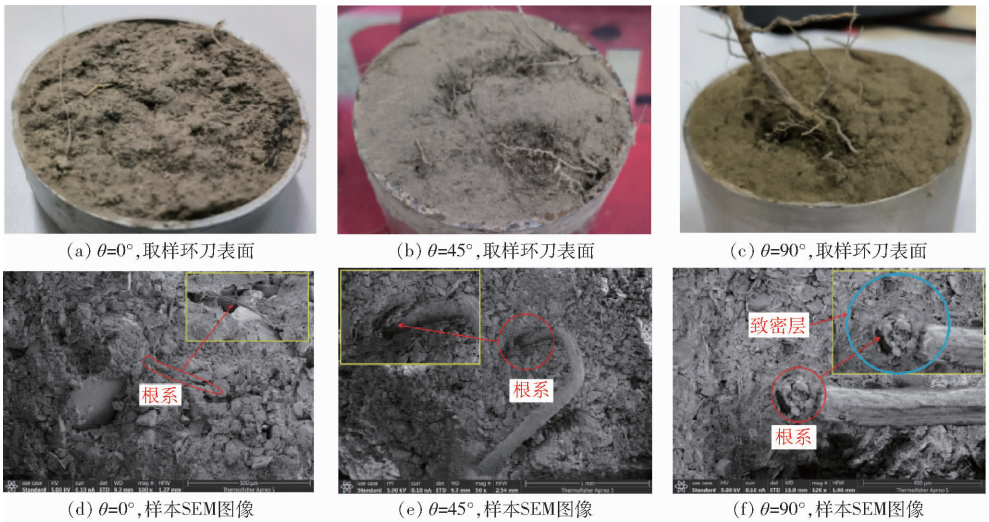
（1）形状系数

形状系数 F 可描述颗粒和孔隙的形态特征，是表征单元体形状圆润程度的参数，其值等于等面积圆周长与实际周长的比值[28]，即

$$\begin{cases} F=\sum_{i=1}^{n}\dfrac{F_i}{n} \\ F_i=\dfrac{C_c}{S_a} \end{cases} \tag{1}$$

式中　C_c——单元体等面积圆周长，μm

S_a——孔隙实际周长，μm



（a）θ=0°，取样环刀表面　（b）θ=45°，取样环刀表面　（c）θ=90°，取样环刀表面

（d）θ=0°，样本SEM图像　（e）θ=45°，样本SEM图像　（f）θ=90°，样本SEM图像

图 12　根土复合体中根系与土壤团粒结构

Fig. 12　Root system and soil aggregate structure in soil－root composite

n——单元体数量

F 处于 0 ~ 1 范围内,其值越趋近于 1 说明单元体的形状更趋近于圆形。

(2)形态分维数

形态分维数 D 用来描述单元体的微观形态分布,形态分维数 D 越大,土颗粒结构或孔隙结构越复杂,其可以用等效周长和等效面积表述[39],计算式为

$$\lg P' = \frac{D}{2}\lg A' + K' \tag{2}$$

式中 P'——单元体等效周长,μm

A'——单元体面积,μm^2

K'——拟合常数

(3)概率熵

概率熵 H_m 用来描述单元体的有序性[40],是指结构单元体在某一方位上出现的概率,能体现孔隙和颗粒的整体排列情况,计算公式为

$$H_m = -\sum_{i=1}^{n_1}\frac{m_i}{M}\frac{\ln\dfrac{m_i}{M}}{\ln n_1} \tag{3}$$

式中 n_1——在单元体排列方向[0 ~ n_1]中等分的方位区数

M——孔隙总数量

m_i——单元体在第 i 个区位上的数量

概率熵 H_m 在 0 ~ 1 范围内,当 H_m 越小时,表明有序性越高。

(4)定向频率

定向频率 $P_i(\beta)$ 定义为某研究区域范围内,当孔隙(或颗粒)长轴与 X 轴正方向夹角为 β 时,该方向上的孔隙(或颗粒)数量占总孔隙(或颗粒)数量的概率[41]。

根据以上微观结构参数的计算方法,获取了不同观测面角度 θ 下孔隙和颗粒的微观结构参数,统计结果见表 5。

表 5 不同观测角度下根土复合体微观结构参数

Tab. 5 Microstructure parameters of soil - root composites with different observation angles

θ/(°)	形状系数 F		形态分维数 D		概率熵 H_m	
	孔隙	颗粒	孔隙	颗粒	孔隙	颗粒
0	0.414 ~ 0.436	0.442 ~ 0.455	1.181 ~ 1.218	1.218 ~ 1.293	0.983 ~ 0.988	0.969 ~ 0.988
45	0.410 ~ 0.431	0.392 ~ 0.449	1.187 ~ 1.193	1.203 ~ 1.214	0.991 ~ 0.996	0.950 ~ 0.979
90	0.351 ~ 0.417	0.288 ~ 0.433	1.182 ~ 1.191	1.193 ~ 1.209	0.976 ~ 0.981	0.951 ~ 0.975

由表 5 可知,孔隙和颗粒的形状系数 F 均小于 0.46、形态分维数 D 均大于 1.18,概率熵 H_m 均大于等于 0.95,这表明不同观测面角度下孔隙和颗粒的圆度低,颗粒和孔隙结构呈排列不规则的复杂形态、孔隙和颗粒的定向排列有序性低。不同取样角度条件下的微观结构参数部分相似,且参数的变化范围较小但存在一定差异,说明不同取样条件下的微观结构整体相似的同时存在差异,这与图 11 中孔隙和颗粒的二值化处理图像相吻合。

对获取的微观结构参数在显著性水平 $\alpha = 0.05$ 条件下采用多重比较法进行方差分析和显著性检验,为了更好地呈现分析结果,通过柱状对比图表征孔隙和颗粒的微观结构参数,如图 13 ~ 15 所示,图中不同字母表示差异显著($P < 0.05$)。对形状系数 F 来说(图 13),孔隙和颗粒的形状系数之间均存在显著性差异,存在 $F_{0°} > F_{45°} > F_{90°}$,这表明从 $\theta = 0°$ 至 $\theta = 90°$ 孔隙和颗粒的圆度同时依次递减,即 $\theta = 0°$ 条件下的土壤颗粒最容易发生滑移,$\theta = 45°$ 条件下滑移性能次之,$\theta = 90°$ 条件下的滑移性能最差,这也与后文 2.3 节的试验结果相吻合。

对形态分维数 D 来说(图 14),在同一观测面条件下孔隙的整体形态分维数小于颗粒的整体形态分维数,说明颗粒边界的不平整度比孔隙的边界不平整度更强;对孔隙形态分维数来说,$\theta = 0°$ 和 $\theta = 45°$ 的 D 无显著性差异,而二者与 $\theta = 90°$ 的 D 有显著性差异,存在 $D_{0°} \approx D_{45°} > D_{90°}$,这表明 $\theta = 0°$ 和 $\theta = 45°$ 两个观察面上的孔隙结构复杂程度相仿,而显著高于 $\theta = 90°$ 的复杂程度,这与图 11 中 SEM 图像的孔隙二值化图像呈现的情况吻合。

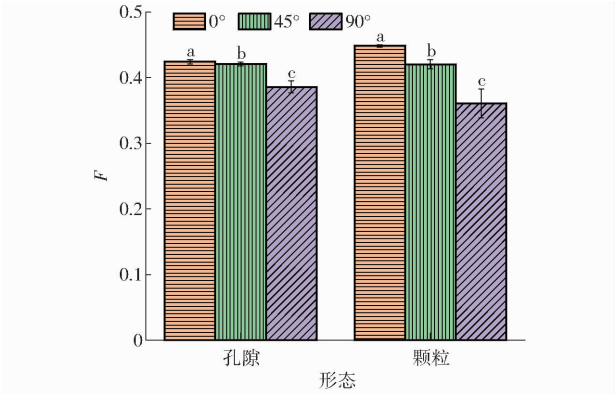


图 13 形状系数对比

Fig. 13 Comparison of shape coefficient

对概率熵 H_m 来说(图 15),各观测面的孔隙和颗粒概率熵 H_m 均大于等于 0.95,表明孔隙和颗粒的有序性整体较低。观测角从 $\theta = 0°$ 至 $\theta = 90°$,孔

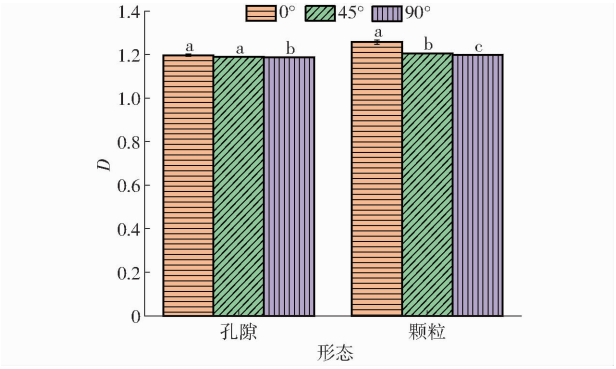


图 14　形态分维数对比

Fig. 14　Comparaison of morphological fractal dimension

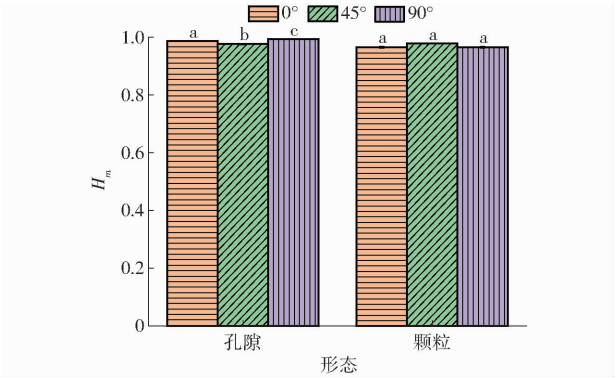


图 15　概率熵对比

Fig. 15　Comparison of probability entropy

隙分布的概率熵 H_m 呈现先减小后增大的趋势，存在 $H_{m0°} \approx H_{m90°} > H_{m45°}$，即 $\theta = 45°$ 观测面条件下孔隙的有序性最高，$\theta = 90°$ 和 $\theta = 0°$ 的有序性相仿且较低。颗粒分布的概率熵 H_m 呈先增大后减小的趋势，显著性分析结果表明，在显著性水平 $\alpha = 0.05$ 条件下，θ 为 0°、45°、90°观测面下颗粒概率熵 H_m 无显著性差异，即颗粒排列的有序性基本一致。

为了进一步分析各不同角度观测面下的排列状态，对孔隙和颗粒长轴的定向频率 $P_i(\beta)$ 进行对比分析，并计算二者的相关系数 ρ，采用定向分布频率玫瑰花图的形式来表征，如图 16 所示。

由图 16 可知，不同角度观测面下孔隙和颗粒长轴的定向分布相关性有明显差异，其中 $\theta = 0°$ 和 $\theta = 90°$ 呈正相关，相关系数 ρ 分别为 0.225 和 0.593，$\theta = 45°$ 孔隙和颗粒长轴的定向分布呈现负相关，相关系数 $\rho = -0.368$。但从相关系数绝对值来看，存在 $\rho_{0°} < \rho_{45°} < \rho_{90°}$，这表明随着观测角度的增大，孔隙和颗粒长轴的定向分布相关性逐渐增大。不同角度观测面下孔隙和颗粒长轴的定向分布呈现非均匀展布状态，为了准确地分析图 16 中孔隙和颗粒定向频率的展布特征，计算了不同取样角条件下孔隙和颗粒的定向分布频率标准差（标准差可以表征数据的离散程度），如表 6 所示。将表 6 和图 16 结合进行分析可知：取样角 θ 从 0°到 90°，孔隙定向分布频率 $P_i(\beta)$ 的标准差先减小后增大，即孔隙的非均匀展布状态先减小后增大；颗粒定向分布频率 $P_i(\beta)$ 的标准差先增大后减小，即颗粒的非均匀展布状态先增大后减小，这与图 15 得出的结论一致。值得注意的是，取样角 $\theta = 45°$ 时颗粒的定向分布频率标准差最大，即此时颗粒的非均匀展布状态最为明显，$\theta = 90°$ 时次之、$\theta = 0°$ 时最低，但 $\theta = 90°$ 和 $\theta = 0°$ 的区别不大（二者标准差接近，分别为 1.738 和 1.805），该分析也表明 $\theta = 90°$ 和 $\theta = 0°$ 时土壤颗粒的定向分布有序性接近。

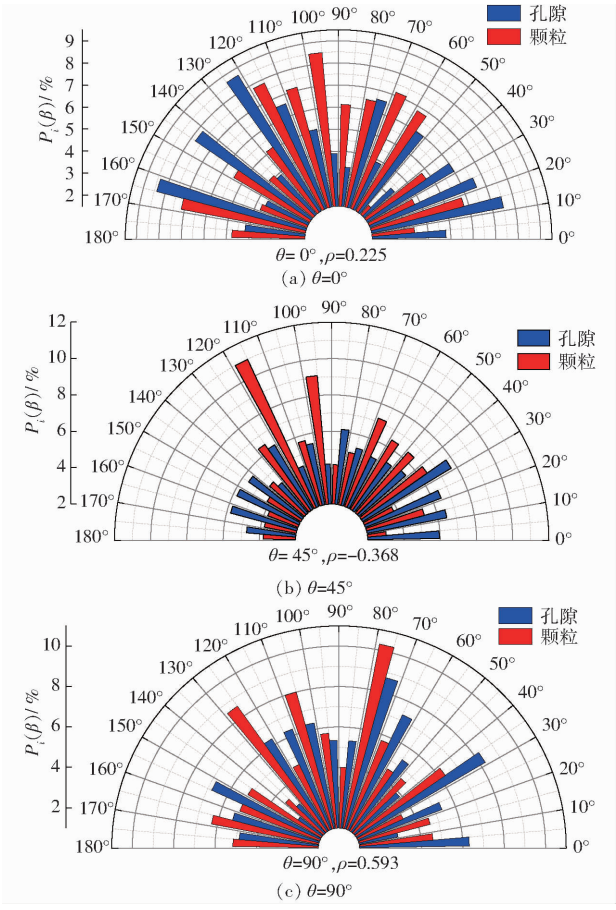


图 16　孔隙和颗粒定向分布频率玫瑰花图

Fig. 16　Directional distribution frequency rose plots of pores and particles

表 6　孔隙和颗粒定向分布频率标准差

Tab. 6　Standard deviation of pore and particle distribution frequency

参数	0°		45°		90°	
	孔隙	颗粒	孔隙	颗粒	孔隙	颗粒
标准差/%	1.800	1.738	0.889	2.058	1.740	1.805

根土复合体中根系分布对土壤颗粒排列造成了影响，在不同取样方向上根土复合体的微观结构及其参数表现出显著的各向异性特征。此外，本研究发现根土复合体中土壤颗粒的定向分布有序性呈现 0°和 90°条件下无显著性差异的现象，与包含

等[26,28]研究的渐变带黄土层(无根系结构)微观结构各向异性特性表现出各方向颗粒和孔隙定向分布均有差异的结果不同,结合图 11、12、15 分析发现该现象是由于根系在土壤中横向延伸分布结构改变了土壤颗粒结构和分布形态导致的。对图 12 中 $\theta=90°$取样观测面上的根系形态和土粒结构分析发现,在根系及根系周围致密层影响下,根系延伸方向的土壤颗粒分布出现了整体有序(致密层)带动部分有序(土壤颗粒)的现象,使得 90°根土复合体中土壤颗粒和孔隙的排列有序性同时得到加强,从图 16c 中 $\theta=90°$观测面下孔隙和颗粒的相关性最高也证明了以上观点。综上所述,根土复合体中根系的分布不仅影响了土壤颗粒的大小、分布、形态,而且土壤颗粒和孔隙的一致性在沿根系的分布方向上得到加强。在根土复合体微观结构层面,$\theta=90°$观测面下体现的根土复合体结构稳定性最高,在该面上发生滑移等剪切破坏理论所需的剪切力最大,$\theta=45°$次之,$\theta=0°$最小。该结论与下面 2.3 节中根土复合体的力学特性试验结果相符合。

2.3 根土复合体力学特性分析

由于土壤耕作部件与土壤发生相互作用时产生的主要破坏是剪切破坏,所以本研究主要以根土复合体的抗剪切强度为指标,研究不同取样方向上宏观力学的各向异性特征。根据库伦-摩尔定律可知,根土复合体的抗剪切强度 T 与正应力 σ_n、土壤内摩擦角 φ、土壤粘聚力 C 相关,计算式为

$$T=\sigma_n\tan\varphi+C \tag{4}$$

通过 1.3.4 节的试验设计和方法开展了根土复合体的抗剪切强度力学特性试验,对试验数据处理后获得了不同取样角条件下根土复合体抗剪强度包络线,如图 17 所示。各取样条件下根土复合体抗剪强度的拟合方程依次为 $y_1=15.335+0.3982x$、$y_2=18.190+0.4316x$ 和 $y_3=19.870+0.4743x$,3 个拟合方程的决定系数分别为 0.998 7、0.997 5 和 0.998 1,均接近于 1,说明方程和试验结果拟合良好。由图 17 可知,在取样角分别为 0°、45°和 90°条件下,根土复合体的抗剪切强度包络线存在明显区别,随取样角度的增大,根土复合体抗剪强度包络线的斜率和在 Y 轴的截距依次增大,即不同取样角下根土复合体的抗剪切强度呈现出各向异性特征。该试验结果与根系在土壤中的分布特点结合可以阐释根土复合体产生各向异性的原因:当取样角 $\theta=0°$时,样本的剪切面发生方向与根系延伸分布方向一致,所以根系对剪切破坏的阻碍作用较低;当取样角 $\theta=90°$,样本发生剪切破坏时,样本的剪切面发生方向与根系延伸分布方向垂直,根系对剪切破坏的阻碍作用较大;当取样角 $\theta=45°$时,根系对剪切破坏的阻碍作用介于 $\theta=0°$和 $\theta=90°$之间。为了进一步分析根土复合体宏观力学特性的各向异性,对其抗剪切强度力学特性参数进行了统计,如表 7 所示。

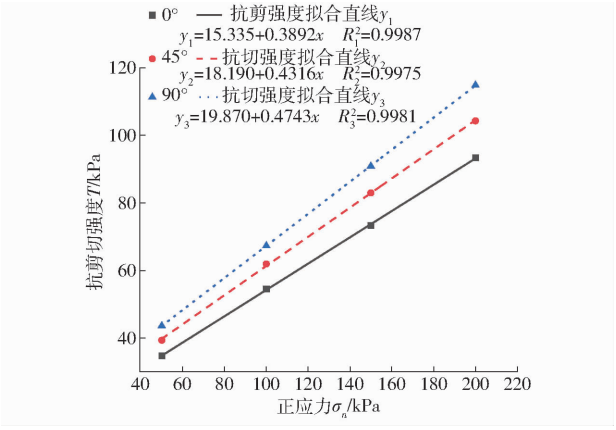


图 17 根土复合体抗剪强度包络线

Fig. 17 Shear strength envelope of soil - root composites

表 7 不同取样角下根土复合体的剪切特性试验结果

Tab. 7 Shear test results of soil - root composites at different sampling angles

取样角 θ/(°)	正应力 σ_n/kPa	抗剪切强度 T/kPa	粘聚力 C/kPa	内摩擦角 φ/(°)
0	50	34.77	16.14	20.91
	100	54.49		
	150	73.32		
	200	93.36		
45	50	39.36	18.08	23.35
	100	61.94		
	150	82.98		
	200	104.28		
90	50	43.62	19.70	25.45
	100	67.32		
	150	90.87		
	200	114.82		

对不同取样角下根土复合体的抗剪切强度 T 进行方差分析,结果如表 8 所示。由表 8 可知,根土复合体抗剪切强度统计量 $F=36.76>4.07$(F 临界值),说明取样角为 0°、45°、90°时的抗剪切强度有显著差异,显著性概率 $P=0.000\,05<0.01$,说明取样角 θ 对根土复合体的剪切强度 T 极显著影响,不同取样角条件下根土复合体抗剪切强度由大到小依次为 90°、45°、0°。根土复合体作为一种复合塑性材料,即使是相同位置的同层土壤,在不同剪切发生面上的抗剪切性能也存在显著差异,即根土复合体的宏观剪切力学特性存在各向异性特征,该结果与本文 2.2 节中根土复合体微观结构的各向异性结论结合分析,发现是由于不同方向上根土复合体的微观

结构差异导致了宏观力学特性差异，从而呈现出各向异性特征。

表 8　不同取样角下根土复合体抗剪切强度方差分析

Tab. 8　Analysis of variance of shear strength of soil – root composites from different angles

差异源	平方和	自由度	均方	F	P	F 临界值
SS_A 组间	6 989.05	3	2 329.69			
SS_E 组内	507.02	8	63.38	36.76	0.000 05	4.07
SS_T 总和	7 496.07	11				

该试验结果和上述分析同时表明，在测定根土复合体力学特性时，由于根土复合体存在各向异性的特点，若采用不合理的取样方式可能会引起较大的试验误差。耕作类部件相关设计中需测定土壤力学特性参数，但取样并没有考虑到根土复合体的各向异性，取样时环刀一般都垂直于地表取样，这可能会导致试验测定结果与实际值不符。以本研究的枣园根土复合体场景为例，计算可能产生的试验相对误差，计算式为

$$\delta = \frac{|T_1 - T_2|}{T_2} \times 100\% \tag{5}$$

式中　δ——试验相对误差，%

T_1——抗剪强度试验值，kPa

T_2——抗剪强度真实值，kPa

由前文的分析可知，最大试验误差出现在取样角 $\theta = 0°$ 和 $\theta = 90°$ 时，由于 $\theta = 90°$ 取样条件剪切发生面与实际耕作过程的剪切发生面一致，故认为 $\theta = 90°$ 时测得的试验值为真实值。经分析表 7 中数据发现，试验最大相对误差出现在正应力 σ_n 为 50 kPa 时，此时 $T_1 = 34.77$ kPa，$T_2 = 43.62$ kPa，代入式(5)中计算获得最大相对误差 $\delta = 20.28\%$。由于 $T_1 < T_2$，所以环刀垂直取样方式下测定的试验值会比实际值偏小，试验相对误差最高达 20.28%，这种误差属于测量方法的缺陷而引起的系统误差，并不能忽略。然而，由于不同作物根系分布的不同，根土复合体剪切力学特性差异性可能与本文研究结果有所区别，但根据本文的相关分析表明，无论耕作部件以何种角度与土壤发生剪切破坏，若环刀垂直于实际剪切发生面取样，直剪试验的剪切发生面方向角就会与实际剪切发生面角度一致，即在这种情况下直剪试验获得的抗剪切参数试验值和实际值在理论上是一致的。所以，耕作类部件设计时为了避免这种因取样方式带来的测量误差，试验取样时应使环刀的中心轴线垂直于耕作部件与土壤剪切发生面，从而获取准确的剪切试验结果。

为了进一步分析不同取样角度剪切特性参数的差异性，在显著性水平 $\alpha = 0.05$ 条件下采用多重比较法对粘聚力 C 和内摩擦角 φ 进行显著性分析，分析结果如图 18 所示。由图 18 可知，在不同取样角条件下，根土复合体的粘聚力 C 和内摩擦角 φ 均存在显著性差异，随着取样角 θ 的增大，粘聚力 C 和内摩擦角 φ 均呈逐渐增大的趋势，即取样角越大，样本剪切面之间越不容易发生滑移等剪切破坏，该结果与 2.2.2 节中发现 $\theta = 90°$ 观测面条件下孔隙和颗粒圆度最低、最不容易产生滑移的分析结果相吻合。

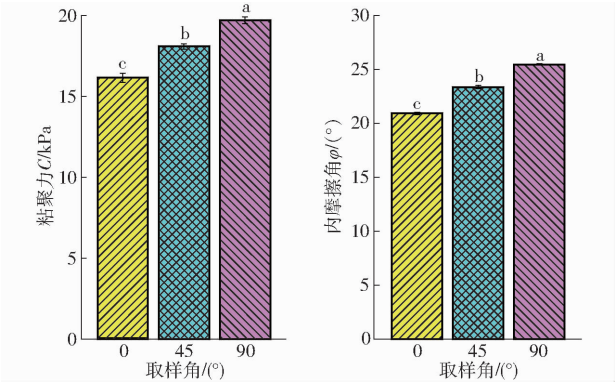


图 18　根土复合体剪切特性参数分析

Fig. 18　Analysis of shear characteristic parameters of soil – root composite

2.4　根土复合体微观结构参数与宏观力学特性参数相关性分析

由于从微观结构和宏观剪切特性发现并证明了根土复合体具有各向异性特征，所以微观结构参数和宏观力学特性参数之间必然存在相关联系，为了寻求微观结构各向异性参数和宏观力学特性各向异性参数之间的相关性，需进一步对试验数据综合分析。为此，将根土复合体孔隙和颗粒的微观结构参数形状系数 F、形态分维数 D、概率熵 H_m 与根土复合体抗剪切强度参数粘聚力 C 和内摩擦角 φ 相结合，绘制微观结构参数对剪切强度参数的影响关系，如图 19 所示。由图 19 可知，根土复合体抗剪切强度参数与微观结构参数之间存在密切相关性，抗剪切强度参数粘聚力 C 和内摩擦角 φ 的变化曲线斜率与微观结构参数形状系数 F、形态分维数 D、概率熵 H_m 的变化率曲线斜率方向相反，即抗剪切强度参数与微观结构参数呈现负相关。

为了定量评价根土复合体微观结构参数对抗剪切强度参数的影响，分别计算了不同取样角 θ 下微观结构的形状系数 F、形态分维数 D、概率熵 H_m 与抗剪切强度参数粘聚力 C 和内摩擦角 φ 的相关系数，如表 9 所示。

由表 9 可知，根土复合体的抗剪切强度参数粘聚力 C 和内摩擦角 φ 与微观结构系数整体呈负相关，但各参数条件下相关系数绝对值不同，说明各参数的相关性有强有弱。其中，孔隙概率熵 H_m 与粘聚

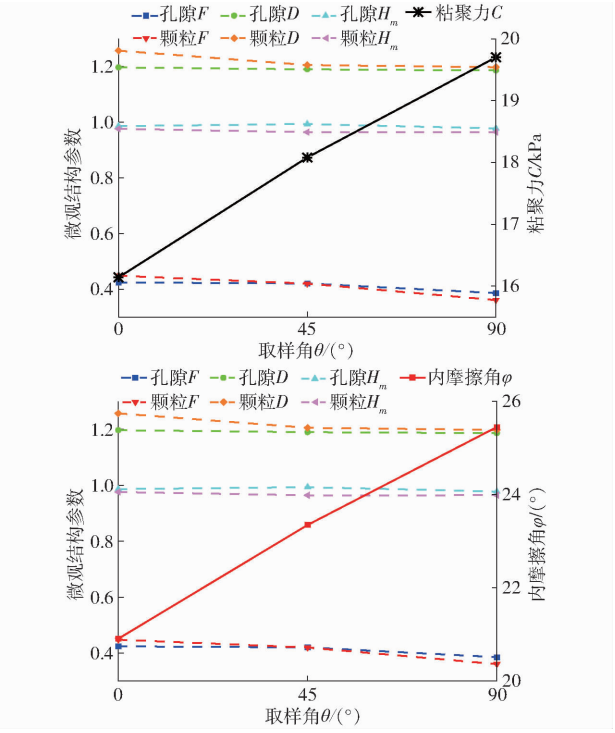


图 19 微观结构参数对抗剪切强度参数的影响

Fig. 19 Influence of microstructure parameters on shear strength parameters

表 9 各参数间相关系数

Tab. 9 Correlation coefficients between different parameters

参数	孔隙微观结构参数			颗粒微观结构参数		
	F	D	H_m	F	D	H_m
C	-0.883 0	-0.967 7	-0.991 2	-0.939 5	-0.490 2	-0.875 3
φ	-0.887 0	-0.969 6	-0.990 0	-0.936 6	-0.497 8	-0.871 1

力 C、内摩擦角 φ 的相关系数分别为 -0.991 2、-0.990 0，相关系数绝对值最大且接近 1，说明其相关性最强。孔隙形态分维数 D 与粘聚力 C、内摩擦角 φ 的相关性次之，相关系数分别为 -0.967 7、-0.969 6。颗粒形状系数 F 与粘聚力 C、内摩擦角 φ 的相关性再次之，分别为 -0.939 5、-0.936 6。其余的相关性按相关系数绝对值由大到小依次为孔隙形状系数 F、颗粒概率熵 H_m、颗粒形态分维数 D。以上分析获得微观结构参数与根土复合体的抗剪切强度参数相关性从强到弱依次为孔隙概率熵、孔隙形态分维数、颗粒形状系数、孔隙形状系数、颗粒概率熵、颗粒形态分维数。颗粒形态系数 D 与粘聚力 C、内摩擦角 φ 的相关系数分别仅为 -0.491 2、-0.497 8，说明其与根土复合体的抗剪切强度相关性最弱，并明显区别于与其他参数值的相关系数（其他相关参数值的相关系数绝对值均大于 0.85），结合图 11 和图 12 分析发现主要是由根土复合体中根系的分布引起的，该结果可用 2.2 节中相关分析结果解释，这是由于根系及根系周围形成的致密层影响了土壤颗粒形态并出现整体有序（致密层）带动部分有序（土壤颗粒）的现象，因此降低了土壤颗粒形态分维数 D 与粘聚力 C、内摩擦角 φ 的相关性。

3 结论

（1）10 年以上生枣树根系已布满整个枣园行间，长期不耕作条件下土壤的板结特性加强，行间土壤坚实度和容重分别为 3.63 MPa 和 1.57 g/cm^3，已超过作物根系生长所需最佳容重范围。枣树切根抚育还应考虑同时打破行间板结的根土复合体结构，降低行间土壤容重、增加土壤孔隙度、提高土壤蓄水性能，构建良好的枣园土壤环境条件。

（2）根据南疆枣园的农艺特点，确定切根位置与树干距离为 750 mm。待切根区枣树根系的聚集深度为 174 mm，因为不同枣园的树龄、生长状况、灌溉类型、管理模式等均会影响根系的分布，所以深度范围应略大于枣树根系聚集深度范围以满足不同类型枣园的需求，建议枣园切根机械设计时将切根刀的入土深度设计在 0 ~ 200 mm 范围内可调。

（3）根土复合体的结构和抗剪切强度表现出各向异性特征，不同取样方向上根土复合体的抗剪切强度 T 关系为 $T_{0°} < T_{45°} < T_{90°}$。将根土复合体的宏观结构、微观结构和抗剪切特性相结合，定性和定量分析了根土复合体产生各向异性的原因及规律，得到根土复合体微观结构参数与抗剪切强度参数相关由强到弱依次为：孔隙概率熵、孔隙形态分维数、颗粒形状系数、孔隙形状系数、颗粒概率熵、颗粒形态分维数。

（4）同层根土复合体在不同取样方向上的抗剪强度不同，不合理的取样方式会导致试验值与真实值之间存在较大误差，最大相对误差达 20.28%。所以测定根土复合体抗剪切力学特性时，应使环刀垂直于耕作过程的实际剪切发生面取样，保证剪切试验产生的剪切发生面与实际工况下产生的剪切发生面一致。

（5）获取了枣园农艺参数和土壤物理特性参数，分析了枣园切根作业农业技术要求，为枣园切根机械设计提供基础数据。基于微观结构量化的方法获取了根土复合体土壤团聚颗粒的直径、分布、接触形式等相关参数，为切根部件仿真优化提供了参数模型，也为其他耕作类部件优化设计提供了参考。

参 考 文 献

[1] 国家统计局. 中国统计年鉴 2019[M]. 北京：中国统计出版社，2019.

[2] 李凤，马惠兰，苏洋. 新疆红枣消费者购买行为：包装偏好、购买渠道与支付水平[J]. 干旱区地理，2015，38(2)：420－427.
LI Feng, MA Huilan, SU Yang. Consumers'purchase behavior of Xinjiang jujube: packaging preferences, purchasing channels and payment level[J]. Arid Land Geography, 2015, 38(2): 420－427. (in Chinese)

[3] 周丽，杨伟志，王长柱，等. 新疆红枣优生区研究[J]. 果树学报，2015，32(3)：453－459，522.
ZHOU Li, YANG Weizhi, WANG Changzhu, et al. Superior production region of Chinese jujube in Xinjiang[J]. Journal of Fruit Science, 2015, 32(3): 453－459, 522. (in Chinese)

[4] 王成，吴东峰，何伟忠，等. 新疆骏枣营养品质特点及其表征指标初探[J]. 中国农业科技导报，2018，20(12)：91－98.
WANG Cheng, WU Dongfeng, HE Weizhong, et al. Preliminary research of nutrition quality characteristics and characterization indexes of Xinjiang Jun jujube[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2018, 20(12): 91－98. (in Chinese)

[5] MAAS F M. Dynamics of fruit growth in 'Conference' pear as affected by root pruning, irrigation, and climatic conditions[J]. Acta Horticulturae, 2007, 732: 555－563.

[6] MCARTNEY S, BELTON R. Apple shoot growth and cropping responses to root pruning[J]. New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science, 1992, 20: 383－390.

[7] 陈盖. 果树根系修剪的作用[J]. 现代园艺，2022，45(7)：80－81.

[8] 张文，朱雪荣，周克友，等. 根系修剪对苹果树光合特性及果实品质的影响[J]. 西北林学院学报，2013，28(6)：42－45，62.
ZHANG Wen, ZHU Xuerong, ZHOU Keyou, et al. Effects of root system pruning on photosynthetic characteristics and fruit quality of apple tree[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2013, 28(6): 42－45, 62. (in Chinese)

[9] ASIN L, ALEGRE S, MOMTSERRAT R. Effect of paclobutrazol, prohexadione-Ca, deficit irrigation, summer pruning and root pruning on shoot growth, yield, and return bloom, in a 'Blanquilla' pear orchard[J]. Scientia Horticulturae, 2007, 113(2): 142－148.

[10] 王德成，尤泳，贺长彬. 草地修复与改良机械化技术态势[J]. 林业和草原机械，2020，1(1)：13－20.
WANG Decheng, YOU Yong, HE Changbin. Technical situation of mechanization for grassland restoration and improvement [J]. Forestry and Grassland Machinery, 2020, 1(1): 13－20. (in Chinese)

[11] 梁方，王德成，尤泳，等. 草地切根施肥补播复式改良机设计与试验[J]. 吉林大学学报(工学版)，2022，52(1)：231－241.
LIANG Fang, WANG Decheng, YOU Yong, et al. Design and experiment of root-cutter with fertilization and reseeding compound remediation machine for grassland[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2022, 52(1): 231－241. (in Chinese)

[12] 张学宁，尤泳，王德成，等. 基于离散元法的板结草地破土切根刀优化设计与试验[J]. 农业机械学报，2022，53(11)：176－187.
ZHANG Xuening, YOU Yong, WANG Decheng, et al. Design and experiment of soil-breaking and root-cutting cutter based on discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery: 2022, 53(11): 176－187. (in Chinese)

[13] 张学宁，王德成，尤泳，等. 草地切根下根土复合体本构关系研究[J]. 农业机械学报，2022，53(7)：337－346.
ZHANG Xuening, WANG Decheng, YOU Yong, et al. Constitutive relation of soil-root composite based on root-cutting of grassland[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(7): 337－346. (in Chinese)

[14] 毛雷，王鹏飞，杨欣，等. 振动式果树根系断切装置设计与试验[J]. 农业机械学报，2020，51(增刊 1)：281－291.
MAO Lei, WANG Pengfei, YANG Xin, et al. Design and analysis of vibratory root system cutting device for fruit trees[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 1): 281－291. (in Chinese)

[15] 毛雷，王鹏飞，任子啸，等. 果树根系修剪机的设计与试验[J]. 中国农机化学报，2019，40(5)：5－9.
MAO Lei, WANG Pengfei, REN Zixiao, et al. Design and experiment of a fruit tree root pruning machine[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(5): 5－9. (in Chinese)

[16] 马文鹏，尤泳，王德成，等. 多年生苜蓿地切根补播机低阻松土铲设计与试验[J]. 农业机械学报，2021，52(2)：86－95，144.
MA Wenpeng, YOU Yong, WANG Decheng, et al. Design and experiment of low-resistance soil loosening shovel for cutting roots and reseeding in perennial alfalfa field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(2): 86－95, 144. (in Chinese)

[17] 王忠. 机械工程材料[M]. 北京：清华大学出版社，2019.

[18] 顾彬. 先进高强钢板各向异性断裂模型及预测研究[D]. 上海：上海交通大学，2019.
GU Bin. Anisotropic farcture model for the failure prediction of advanced high strength steel sheets[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2020. (in Chinese)

[19] 陈靓瑜，秦博渊，褚宇航，等. 增材制造金属材料各向异性的研究现状[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版)，2023，37(3)：18－23.
CHEN Liangyu, QIN Boyuan, CHU Yuhang, et al. Review of anisotropy of additive manufactured metal materials[J]. Jounal of Jiangsu University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2023, 37(3): 18－23. (in Chinese)

[20] 赵辉，彭艳，石宝东. 金属材料各向异性本构模型研究进展[J]. 塑性工程学报，2022，29(10)：32－42.
ZHAO Hui, PENG Yan, SHI Baodong. Research progress on anisotropic constitutive model of metal materials[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2022, 29(10): 32－42. (in Chinese)

[21] WANG Y, ZHANG C, WANG Y, et al. An investigation on the anisotropic plastic behavior and forning limits of an Al－Mg－Li alloysheet[J]. JMEPEG, 2021, 30: 8224－8234.

[22] CHAIMONGKON T, PANICHS, UTHAISANGSUK V. Anisotropic fracture forming limit cune and its applications for sheet metal forming with complex strain paths of aluminum sheet[J]. The Intenational Joumal of Advanced Manufacturing Technology,2021,115:3553 - 3577.
[23] RONG H, HU P, YING L, et al. Moleling the anisotropie plasticity and damage of AA7075 alloy in hot forming[J]. International Journal of Mechanical Sciences,2022, 215:106951.
[24] LI B, ZENG X W. Effects of fabric anisotropy on elastic shear modulus of granular soils[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2014, 13(2): 269 - 278.
[25] CHERTKOV V Y. Shrinkage anisotropy characteristics from soil structure and initial sample/layer size[J]. Geoderma, 2013, 200: 1 - 8.
[26] 包含,尹晓晴,兰恒星,等.基于微结构量化的含渐变带天然黄土渗透各向异性研究——以延安新区 Q1 黄土为例[J].岩土工程学报,2023,45(4):730 - 738.
BAO Han, YIN Xiaoqing, LAN Xingxing, et al. Research on the permeability anisotropy of natural loess with gradual transition zones based on microstructural quantification: a case study of Q1 loess in Yan'an new area[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2023,45(4): 730 - 738. (in Chinese)
[27] 郑英光.各向异性砂土-接触面亚塑性本构模型及数值模拟[D].北京:北京科技大学,2023.
ZHENG Yingguang. Hypoplastic model and numerical simulation of anisotropic sand and sand-structure interface[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2023. (in Chinese)
[28] 包含,马扬帆,兰恒星,等.基于微结构量化的含渐变带黄土各向异性特征研究[J].中国公路学报,2022,35(10):88 - 99.
BAO Han, MA Yangfan, LAN Xingxing, et al. Anisotropic characteristics of loess with gradation zone based on microstructure quantification[J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(10): 88 - 99. (in Chinese)
[29] 贺长彬,尤泳,王德成,等.退化草地复合体力学特性与影响因素研究[J].农业机械学报,2016,47(4):79 - 89.
HE Changbin, YOU Yong, WANG Decheng, et al. Mechanical characteristics of soil-root composite and its influence factors in degenerated grassland[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(4): 79 - 89. (in Chinese)
[30] 中华人民共和国农业部.土壤检测 第3部分:土壤机械组成的测定:NY/T 1121.3—2006[S].北京:中国标准出版社,2006.
[31] 中华人民共和国住房和城乡建设部.土工试验方法标准:GB/T 50123—2019[S].北京:中国计划出版社,2019.
[32] 尹凤杰,蔡国庆,苏彦林,等.常吸力下非饱和粗粒土率相关力学特性试验研究[J].岩土工程学报,2023,45(增刊1):24 - 28.
YIN Fengjie, CAI Guoqing, SU Yanlin, et al. Rate-dependent experimental study on unsaturated coarse-grained soil controlled by matrix suction[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023,45(Supp.1): 24 - 28. (in Chinese)
[33] 欧阳淼,蓝日彦,张红日,等.考虑界面吸力的根-土界面剪切强度模型及影响因素研究[J/OL].中国公路学报:1 - 16[2023 - 12 - 21]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1313.u.20231206.1121.002.html.
OUYANG Miao, LAN Riyan, ZHANG Hongri, et al. Shear strength model of root-soil interface considering interfacial suction and its influencing factors[J/OL]. China Journal of Highway and Transport: 1 - 16[2023 - 12 - 21]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1313.u.20231206.1121.002.html. (in Chinese)
[34] 周修理,秦娜,王开宇,等.基于机器学习的机械压实对大豆产量的影响预测研究[J].农业机械学报,2023,54(11):139 - 147.
ZHOU Xiuli, QIN Na, WANG Kaiyu, et al. Effect of mechanical compaction on soybean yield based on machine learning[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023,54(11): 139 - 147. (in Chinese)
[35] 刘战东,张凯,米兆荣,等.不同土壤容重条件下水分亏缺对作物生长和水分利用的影响[J].水土保持学报,2019,33(2):115 - 120.
LIU Zhandong, ZHANG Kai, MI Zhaorong, et al. Effects of water deficit on crop growth and water use under different soil bulk densities[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(2): 115 - 120. (in Chinese)
[36] 矩阵离散元 MatDEM[EB/OL].[2021 - 09 - 15]. http://matdem.com/content/?603.html.
[37] LIU C, TANG C, SHI B, et al. Automatic quantification of crack patterns by image processing[J]. Computers and Geosciences, 2013, 57(8): 77 - 80.
[38] LIU C, SHI B, ZHOU J, et al. Quantification and characterization of microporosity by image processing, geometric measurement and statistical methods: application on SEM images of clay materials[J]. Applied Clay Science, 2011,54(1): 97 - 106.
[39] MOORE C A, DONALDON C F. Quantifying soil micor-structure using fractals[J]. Geotechnique,1995,45: 105 - 116.
[40] 施斌.粘性土击实过程中微观结构的定量评价[J].岩土工程学报,1996,18(4):57 - 62.
SHI Bin. Quantitative assessment of changes of microstruc-ture for clayey soil in the process of compaction[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,1996,18(4):57 - 62. (in Chinese)
[41] 温晓贵,张勋,周建,等.考虑各向异性的原状软黏土微观结构变化机制研究[J].岩土力学,2011,32(1):27 - 32,38.
WEN Xiaogui, ZHANG Xun, ZHOU Jian, et al. Changing mechanism of microstructure of intact soft clay considering anisotropy[J]. Rock and Soil Mechanics,2011,32(1):27 - 32,38. (in Chinese)