doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2024.04.031

秸秆还田下土壤孔隙演化及其对溶质穿透特征的影响机理分析

段正宇[1]　朱成立[1]　车子刚[2]　嵇洪波[2]　王　策[1]　陈晓安[3]

(1.河海大学农业科学与工程学院,南京 211100;2.东南大学医学院附属南京同仁医院医学影像科,南京 211102;
3.江西省水利科学院,南昌 330029)

摘要: 为揭示秸秆粉碎还田后,不同腐解进程下土壤孔隙演化及其对水分和溶质穿透特征的影响机理,设置不同秸秆还田量(0、5、10、15 t/hm²)和还田时间(0、30、60 d)处理,采用 CT 断层扫描技术,视觉量化了土壤孔隙结构特征演变,并基于溶质穿透试验,分析了水分-溶质迁移优先流规律。结果表明,秸秆还田引起土壤孔隙/喉道特征变化,抑制水分-溶质迁移过程,田间持水率和土壤含水率上升,溶质穿透变慢,优先流现象减少,土壤水肥有效持留;随秸秆腐解至 60 d,孔隙/喉道特征改变,优先流开始发育,但土壤水肥持留能力增强。秸秆还田 5、10、15 t/hm²初期,和 CK 组相比大孔隙体积占比分别减少 7%、14%、50%,连通孔隙减少 11%、39%、66%,表层含水率增加 1%、3%、6%。腐解 60 d 后,和 0 d 相比大孔隙体积占比分别增加 331%、200%、357%,连通孔隙增加 33%、84%、195%,表层含水率增加 6%、5%、5%,完全穿透试样所需溶质减少 55%、76%、67%。基于 Green-Ampt 模型和指数衰减模型估算了不同秸秆初始投入量在不同腐解时间下的导水特征,发现饱和导水率在秸秆还田后减小,且随秸秆腐解增大。研究可为控制大孔隙流和无效灌溉提供依据,进一步为秸秆科学还田提供实践指导。

关键词: 秸秆腐解;孔隙结构;三维特征;大孔隙优先流;计算机断层扫描;穿透曲线

中图分类号: S271;S278　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1000-1298(2024)04-0312-15　　**OSID:**

Soil Pore Evolution and Effect on Solute Transport with Straw Application

DUAN Zhengyu[1]　ZHU Chengli[1]　CHE Zigang[2]　JI Hongbo[2]　WANG Ce[1]　CHEN Xiaoan[3]

(1. *College of Agricultural Science and Engineering*, *Hohai University*, *Nanjing* 211100, *China*
2. *Department of Radiology*, *Nanjing Tongren Hospital*, *School of Medicine*, *Southeast University*, *Nanjing* 211102, *China*
3. *Jiangxi Academy of Water Science and Engineering*, *Nanchang* 330029, *China*)

Abstract: The evolution of pore structure and the mechanism of its influence on both soil moisture and solute breakthrough during the straw decomposition process were experimentally investigated. Treatments with straw application rates of 0 t/hm², 5 t/hm², 10 t/hm², and 15 t/hm² and decomposition time points of 0 d, 30 d, and 60 d were set up for the CT tomography and breakthrough experiment. CT tomography was employed to visually quantify the evolution of soil pore structure, and the breakthrough experiment was employed to analyze the evolution of moisture-solute transport preferential flow pattern. The results showed that at the early stage of straw decomposition, features of soil pore/throat pathways were modified, which inhibited the moisture-solute transport. Field capacity and soil moisture content were increased, solute breakthrough was slowed down, and the preferential flow pattern was restrained with straw incorporation. Soil moisture and fertilizer can be effectively retained, consequently. As straw was decomposed to 60 d, the pore/throat pathways were changed, and the preferential flow began to develop, but the soil moisture and fertilizer retention capacity were increased. At the initial stage of straw application of 5 t/hm², 10 t/hm², and 15 t/hm², compared with the CK group, the proportion of macropore volume was decreased by 7%, 14%, and 50%, the connected pore was decreased by 11%, 39%, and 66%, the surface moisture content was increased by 1%, 3%, and 6%. After 60 d of

收稿日期:2023-11-26　修回日期:2024-02-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(52109053)、国家科技奖后备培育项目(20212AEI91011)、江西省重点研发计划项目(20203BBGL73226)、江苏省研究生科研与实践创新计划项目(SJCX22_0191)、江苏省自然科学基金项目(BK20200523)、江西省水利科学院开放基金项目(2021SKTR03)和中国博士后科学基金项目(2021M690874)

作者简介: 段正宇(1997—),男,博士生,主要从事农业水土资源规划研究,E-mail:dzy623740104@hhu.edu.cn

通信作者: 朱成立(1966—),男,教授,主要从事农业水土资源规划研究,E-mail:clz@hhu.edu.cn

decomposition, compared with group 0 d, the proportion of macropore volume was increased by 331%, 200%, and 357%, the connected pores was increased by 33%, 84%, and 195%, the surface moisture content was increased by 6%, 5%, and 5%, and the solute collected was decreased by 55%, 76%, and 67% when completed breakthrough, respectively. Based on the Green - Ampt model and the exponential decay model, models for the estimation of saturated hydraulic conductivity were proposed with different straw application rates at different decomposition time points. It indicated that the saturated hydraulic conductivity was decreased after straw application and increased with straw decomposition. The most significant novelty lied in the fact that the features of different stages of straw decomposition were revealed, providing a basis for controlling macropore flow and ineffective irrigation, which can further provide practical guidance for scientific straw application.

Key words: straw decomposition; pore structure; three-dimensional features; macropore preferential flow; computed tomography; breakthrough curve

0　引言

秸秆还田是最简单有效的保护性耕作措施之一[1],具有显著优势。例如提高表层土壤持水率和养分含量[2]、促进养分循环和离子交换过程[3]等。秸秆在土壤中进行复杂物化反应,造成孔隙大小、分布、连通性等性质发生变化,特别是生成大孔隙结构使超过表层导水率的灌溉水大部分通过连通大孔隙以优先流形式下渗,为秸秆腐解释放出的氮、磷提供淋失通道,引起水肥流失或水网富营养化等问题。

已有研究表明,秸秆还田后土壤孔隙度增加、容重减小[4],团聚体直径增加、稳定性变高[5],板结现象和连作障碍减少[6]。通过降低土壤结构收缩段和滞后段,秸秆可改善土壤易于收缩的属性[7],提高土壤水养库容和田间持水率[8],对优先流现象抑制作用明显[9]。还田秸秆在土壤微生物的作用下腐解并释放养分,这一过程受到微生物群落量、活性与环境等多种因素限制[10]。例如合理的灌溉可通过改变土壤水分状况而加速腐解过程[11]、秸秆颗粒高量还田使得土壤和秸秆纤维接触面积增加也能加速腐解过程[12]。还有研究表明秸秆碳氮比也是影响腐解速率的重要参数[13]。土壤空间异质性决定了微生物活动和栖息环境、有机质腐解过程。研究发现,秸秆腐解速率在各个孔隙规模或量级中存在显著差异[14],在大孔隙周围,腐化根系或秸秆增加有机质和养分含量,为更大数量微生物提供了栖息场所,因此腐解速度更快。此外秸秆还田及相应微生物腐化活动可显著改变孔隙形态[15]。腐解过程中真菌菌丝体侵入孔隙空间分解有机质,有机质腐化产生 CO_2 逸出,大孔隙逐渐发育[15]。土壤孔隙尤其是控制优先流的大孔隙特征直接影响水分及养分在土壤中的运移特征,进而影响土壤保水保肥能力,是决定土壤水分特性的关键因素[16]。通过高度连通大孔隙的优先流水分运动无明显土水势上升[17],表明大孔隙流在运移过程中与土壤初始含水率-土水势无直接联系,故无法采用传统的 Darcy - Richards 方程进行描述,常利用双孔隙模型、双域(基质域和大孔隙域)模型[18]结合染色示踪法[19]、穿透曲线法[20]、CT 扫描法[21]等对大孔隙流机理进行描述。已有研究表明,秸秆腐解易形成大孔隙结构,在灌溉过程中造成优先流和养分淋失等现象,导致田间水利用效率降低、养分淋失和地下水污染,如提高淹田期水面中 N、P 浓度[22],增加深层渗漏中 P、DOC(溶解有机物)、Cd、N 浓度和养分渗漏损失[23]等。目前,秸秆腐解进程中孔隙结构演化鲜有报道,对水分溶质运移的影响机理尚未深化,穿透曲线对秸秆还田和腐解的响应机理还需明确。

基于上述研究进展,本文拟进行 CT 断层扫描与溶质穿透试验,揭示秸秆不同腐解进程下孔隙结构和水分溶质运移特征的演化规律,分析孔隙演化对优先流穿透特征的影响机理,进一步为秸秆科学还田提供依据,并为优化生产中秸秆还田模式、有效控制大孔隙流和无效灌溉提供依据。

1　材料与方法

1.1　研究区概况与供试材料

试验地位于南京市江宁区河海大学节水园内(31°92′N,118°79′E),属北亚热带季风气候,年均气温 15.7℃,年均日照时长 2017.2 h,年均蒸发量约 900 mm,降雨量约 1 051 mm。

本研究探讨秸秆腐解进程中孔隙结构演化及水分溶质穿透特征。在试验区稻麦轮作旱田粘壤土表层(0 ~ 20 cm)取得供试土壤。该土壤粒径组成为:43% 粘粒(粒径 0 ~ 0.002 mm)、32% 粉粒(粒径 0.002 ~ 0.02 mm)和 25% 砂粒(粒径大于等于 0.02 mm)。土颗粒比重由比重瓶法测得,为 2.65,干容重由环刀法测得,为 1.18 g/cm^3,初始含水率由称量法测得,为 3.27%,饱和含水率由环刀法和称量法测得,为 55.8%,田间持水率由环刀法测得,为

24.7%。将所取土壤过 5 mm 筛以排除杂质,翻晒并暂存在干燥通风环境中。南京市水稻种植两季,7 月早稻收获后采集秸秆,经晾晒风干,用铡刀粉碎成 5 cm 等长节状,暂存在干燥通风环境中。

1.2 CT 扫描与图像重建

1.2.1 CT 扫描试验设计

以秸秆还田量为变量设计试验。秸秆还田量处理取 5 t/hm^2(5T 组)、10 t/hm^2(10T 组)、15 t/hm^2(15T 组),还田深度 20 cm,另设不添加秸秆对照组(CK)。同时,每组处理设 3 次重复,共 12 个试样。在还田并湿润后(0D 组)、还田 30 d 后(30D 组)、还田 60 d 后(60D 组)分别对所有试样进行 CT 扫描,如图 1 所示。

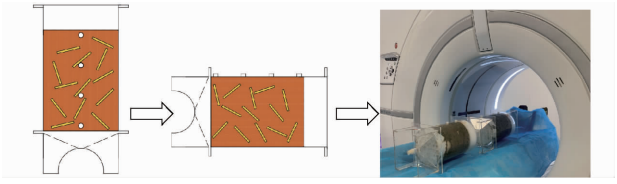


图 1 试样及 CT 扫描

Fig. 1 Specimen and CT tomography

试验装置采用高 25 cm、直径 15 cm 的有机亚克力材质土柱。土柱上下表面外接方板,以便固定扫描方向。土柱侧面沿某一竖直方向等间隔设置直径 1.0 cm 的圆孔用于布设 TDR(Time-domain reflectometry)探针监测土壤体积含水率。人工去除供试土壤根系杂草等杂质后,将供试秸秆、腐熟剂和土壤均匀混合后按干容重 1.25 g/cm^3 逐层(每层 4 cm)回填至试验装置内。腐熟剂为郑州旺农宝生物科技有限公司产“秸秆腐熟剂微生物菌剂”,由多种微生物菌剂和复合酶复配而成,有效菌种为枯草芽孢杆菌,吸水性有限。据产品说明用量,5T 组每试样用腐熟剂 0.88 g,10T 组每试样用腐熟剂 1.77 g,15T 组每试样用腐熟剂 2.65 g。在每层回填后对土壤表面均进行磨毛处理,避免分层并保持层间土壤物理/水力特征的连续性和均匀性。填土过程中,需保证秸秆域内外各试样干容重一致,避免大孔隙结构和水力特征初始差异。

填土完成后,将试样随机排列放置在试验场避雨环境内,模拟喷灌使其完全湿润。控制土壤含水率为田间持水率 80% 左右[24],温度为 5 ~ 35℃[25],以使枯草芽孢杆菌活性和秸秆腐解效率较高。2023 年 7 月南京市平均高温为 31℃,平均低温为 26℃,早稻收获后采集当季秸秆开始试验,定期采用 TDR 探针无扰动测定试样体积含水率并适时适量人工灌水,使每次扫描前试样含水率相同,并定期除草直至 2023 年 9 月试验结束。

1.2.2 CT 扫描试验过程与测定指标

试验采用 CT 断层扫描技术定期扫描土柱。采用日本 GE Revolution CT(扫描精度和切片间距均为 0.625 mm),将土柱侧面开孔向上放入扫描设备中,所得切片导入 Avizo 3D 中。图像处理前对土柱首尾部分切片沿 Z 轴裁剪,裁剪后长度为 200 mm,降噪处理(Filter sandbox)后采用交互式阈值分割(Interactive thresholding)对图像进行二值化处理,获得二值化切片数据。利用 AND Image、Label Analysis、Analysis Filter 识别和筛选土壤中秸秆和大孔隙,通过三维重建模块(Volume rendering)重现立体结构(图 2),采用数据分析模块计算与提取大孔隙三维特征、孔隙孔径分布规律、孔隙度分布规律、孔隙连通性规律等。

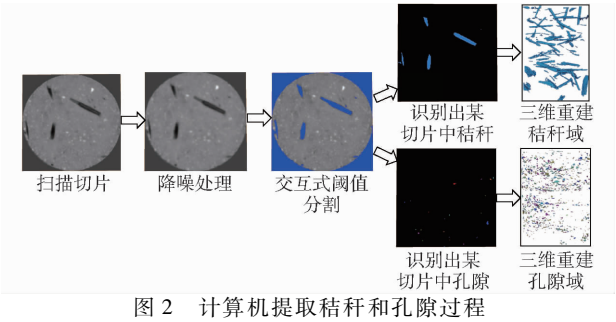


图 2 计算机提取秸秆和孔隙过程

Fig. 2 Straw and pores extraction with computer

1.3 溶质穿透试验

1.3.1 溶质穿透试验设计

试验装置采用高 10 cm、直径 15 cm 的有机亚克力材质土柱。试验处理设置与 1.2.1 节一致。每组处理设 3 次重复,且所有试样仅用于一次穿透试验,共 36 个试样。另再设 12 个试样,装入相同还田量秸秆,其中部分秸秆装入小尼龙袋中,每一试验阶段结束后回收试样测算田间持水率和秸秆腐解率。模拟喷灌使试样完全湿润后,将试样随机埋在土壤中,试样上表面与地表平齐。

1.3.2 溶质穿透试验过程与测定指标

试验开始时,将土柱从土壤中小心取出,置于下部带集液漏斗的有机玻璃架上。用橡胶软管连接集液漏斗出口与自动部分收集器,收集试验过程中产生的土壤出流液。在密封性良好的马氏瓶中添加足量 0.01 mol/L $CaCl_2$ 溶液对试样土柱进行饱和,以保持孔隙结构,使渗流速度稳定[26-27],直到出流液电导率稳定(电导率仪为雷磁 DDBJ-350 型,电导电极为 DJS-10CF 型)。之后利用马氏瓶添加并维持试样上表面 6 cm 定水头溶质(0.01 mol/L 的 $CaCl_2$ 与 0.5 mol/L 的 KBr 混合电导液)用于穿透土柱。用自动部分收集器定时收集出流液,测定并记录出流液体积及电导率,如图 3 所示。当出流液电导率

与混合电导液电导率相同时，穿透试验结束。

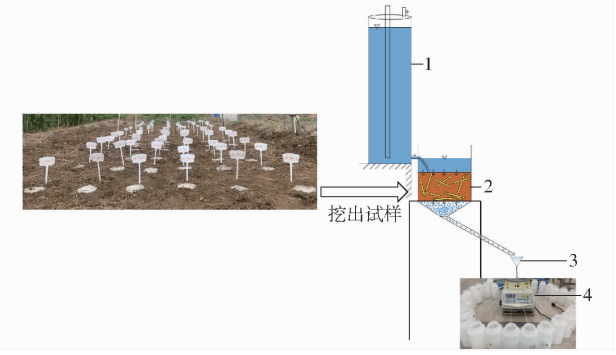


图 3　溶质穿透试验示意图

Fig. 3　Schematic of solute breakthrough experiment

1. 马氏瓶　2. 试样　3. 漏斗　4. 自动部分收集器

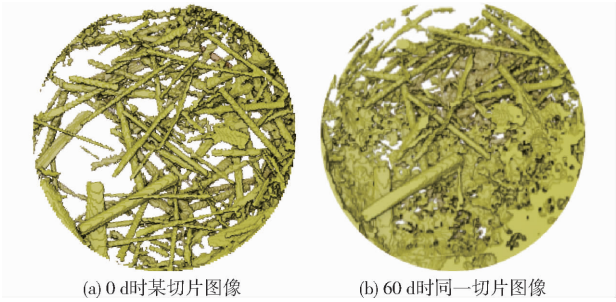
1.4　数据统计与分析

采用 Avizo 9.0 分析 CT 扫描切片，SPSS 27 统计分析数据，采用 LSD 法进行显著性检验。采用 Origin 2021 作图和拟合，图中误差棒为标准差。

2　结果与分析

2.1　秸秆腐解及孔隙分布规律演化

如图 4 所示，60 d 内随秸秆腐解，硬度下降，腐解产物逐渐增多并相连，秸秆由孤立细长节状腐解成相连扁平盘状。排除土壤中秸秆后，识别土壤中大孔隙。受扫描精度所限，本研究只能识别孔径大于 0.625 mm 的土壤孔隙。大孔隙形状多样、特征各异，尚无严格定义，本文借鉴文献[28－29]，将孔



(a) 0 d时某切片图像　(b) 60 d时同一切片图像

图 4　同一切片不同腐解进程示意图

Fig. 4　Schematics of different decomposition processes of the same slice

径小于 1 mm 视作小孔隙，大于 1 mm 视作促进优先流的大孔隙，并通过 Plot Spreadsheet、Plot in Viewer 等命令生成土壤大孔隙分布图，如图 5（图中右侧为识别大孔隙，左侧曲线表征大孔隙在土柱不同高度处体积占比，cm^3/cm^3）所示。对比图 5a、5d、5g、5j 可直观看出，0 d 时秸秆还田组大孔隙明显少于 CK 组；对比图 5 中同一还田量处理在不同腐解进程下分布图可直观看出，60 d 内同一还田量秸秆腐解进程中，大孔隙变多。利用 Avizo 中 Volume Fraction 命令定量统计不同处理下大孔隙体积占试样体积比（表 1），表 1 中秸秆还田 5、10、15 t/hm^2 初期，与 CK 组相比大孔隙体积占比分别减少 7%、14%、50%，进一步证明了秸秆还田有助于减少大孔隙，60 d 内在同一秸秆还田量处理下，随秸秆腐解，大孔隙变多。表 1 中随时间增加，CK 组大孔隙体积占试样体

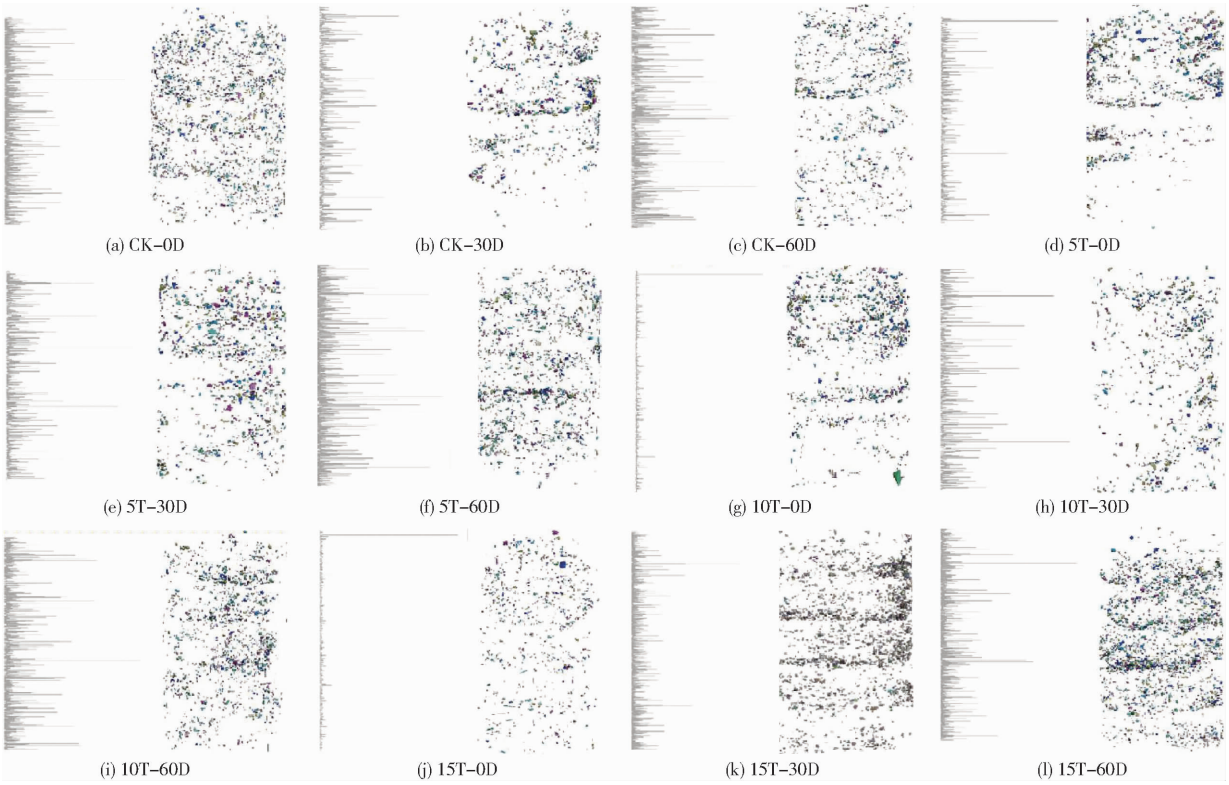


图 5　大孔隙分布规律

Fig. 5　Patterns of macropore distribution

表 1 不同处理大孔隙体积占试样体积比

Tab. 1 Proportion of macropore volume to specimens volume of different treatments

处理	CK	5T	10T	15T
0D	(0.014 ± 0.002)^{Ab}	(0.013 ± 0.001)^{Ab}	(0.012 ± 0.003)^{Ab}	(0.007 ± 0.003)^{Bc}
30D	(0.028 ± 0.005)^{Ab}	(0.026 ± 0.003)^{Ab}	(0.017 ± 0.006)^{Bb}	(0.016 ± 0.002)^{Bb}
60D	(0.132 ± 0.013)^{Aa}	(0.056 ± 0.012)^{Ba}	(0.036 ± 0.010)^{Ca}	(0.032 ± 0.005)^{Ca}

注:不同小写字母表示同一还田量条件下不同腐解进程处理间差异显著($P < 0.05$),不同大写字母表示同一腐解进程条件下不同还田量处理间差异显著($P < 0.05$)。下同。

积比也在增加,可能是干湿循环等因素导致。从 0 d 到 60 d,CK、5T、10T、15T 组大孔隙体积占试样体积比分别增加 842%、331%、200%、357%。可见秸秆还田对土壤大孔隙发育有明显抑制作用。

在 Avizo 中按 XY Plane 计算 Volume Fraction,得到不同土层深度下土壤各组分(秸秆、大孔隙、其他)体积占比如图 6 所示。可见随着秸秆腐解,土壤各层大孔隙占比均增加,其中土壤表层增加更为明显。整理所有可识别孔隙孔径,得到孔径频率分布(某孔径范围孔隙数量占所有孔隙数量比)如图 7 所示(图中孔径范围为 0.625 ~ 3 mm,孔径大于 3 mm 的孔隙频率可通过计算得到)。图 7 中秸秆还田组与空白对照组相比,小孔隙(孔径 0 ~ 1 mm)频率均增加,因此大孔隙频率均减少。即秸秆还田有助于增加土壤小孔隙,减少土壤大孔隙,可能是秸秆插入土壤中将现存大孔隙切分开所致。对比同一秸秆还田量(如 5 t/hm^2)在 0 d 和 60 d 的孔径频率分布,可发现同一秸秆还田量处理下,秸秆腐解 60 d 内,大小孔隙频率变化幅度并不明显。

2.2 大孔隙三维特征与连通性规律演化

通过 Avizo 中 Axis Connectivity 和 Arithmetic 运算先后识别试样中的连通孔隙和孤立孔隙,再利用 Volume Fraction 命令计算两类孔隙体积占比。由图 8 可知,秸秆还田 5、10、15 t/hm^2 初期,与 CK 组相比连通孔隙体积占比减少 11%、39%、66%,腐解 60 d 后,与 0 d 组相比连通孔隙分别增加 33%、84%、195%。无秸秆还田条件下孤立孔隙占比随土壤干湿循环、微生物作用等因素逐渐减少,连通孔隙逐渐

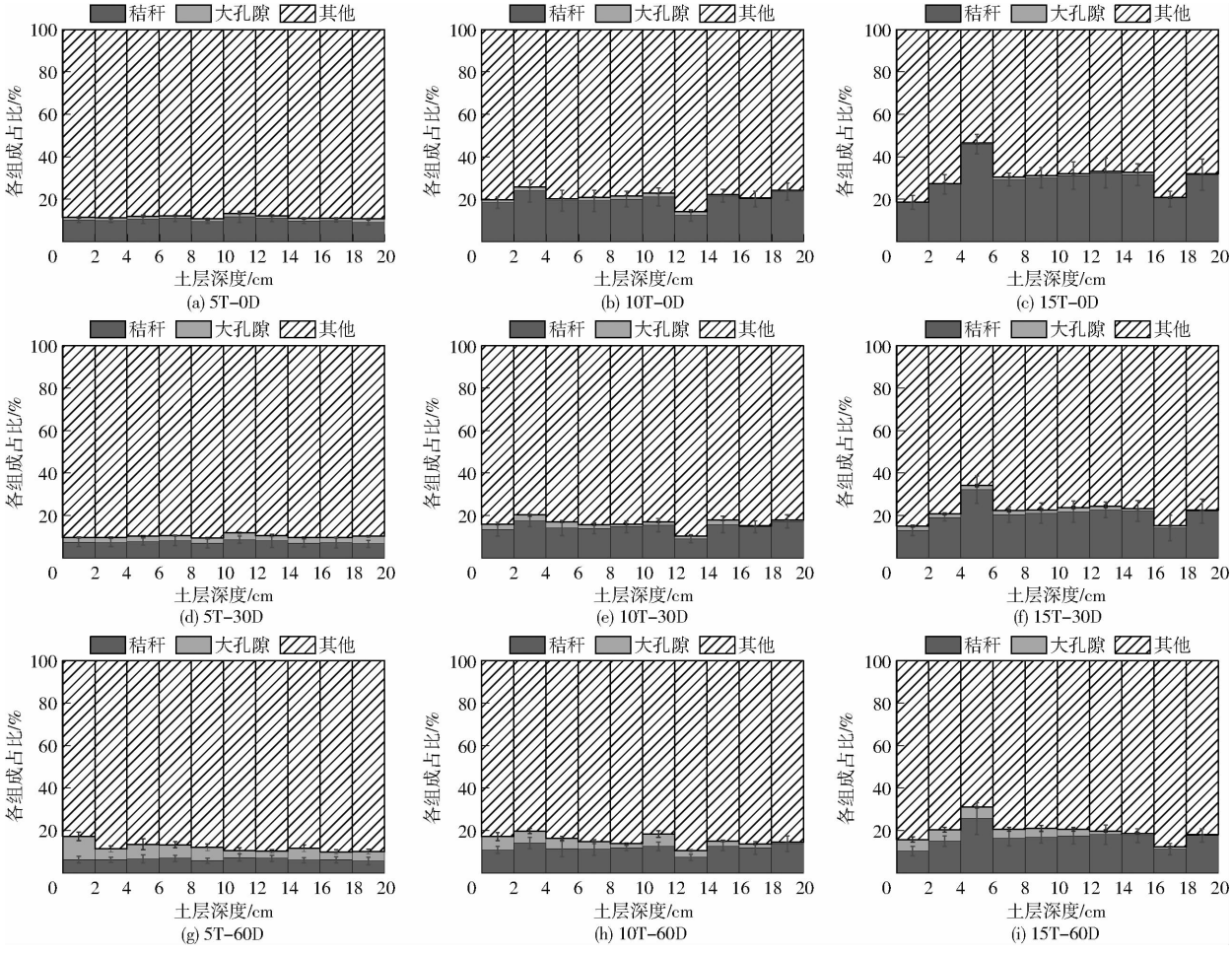


图 6 不同土层深度下土壤各组分占比

Fig. 6 Proportion of soil components in different soil depths

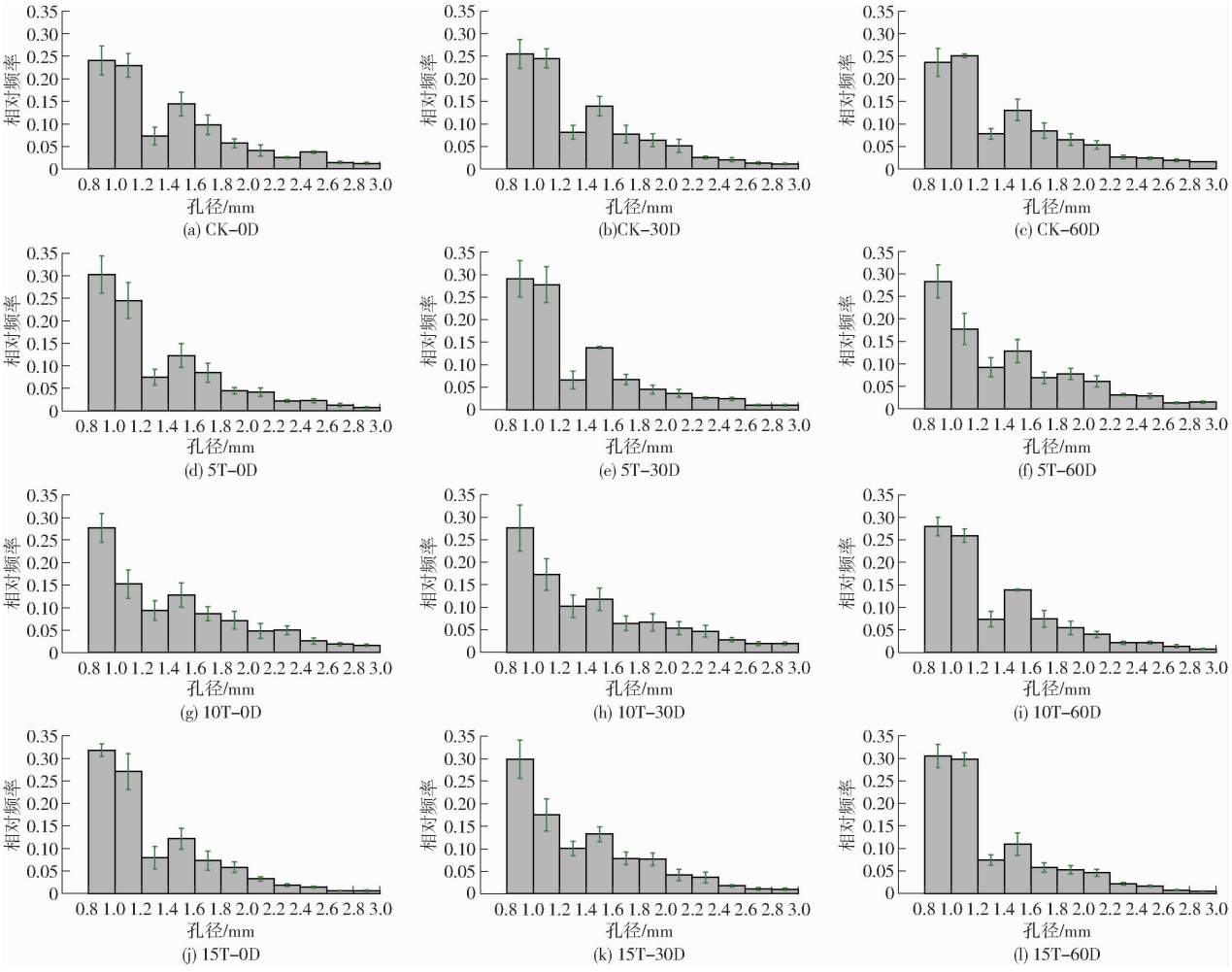


图 7　孔径频率分布图

Fig. 7　Frequency distribution histograms of pore aperture

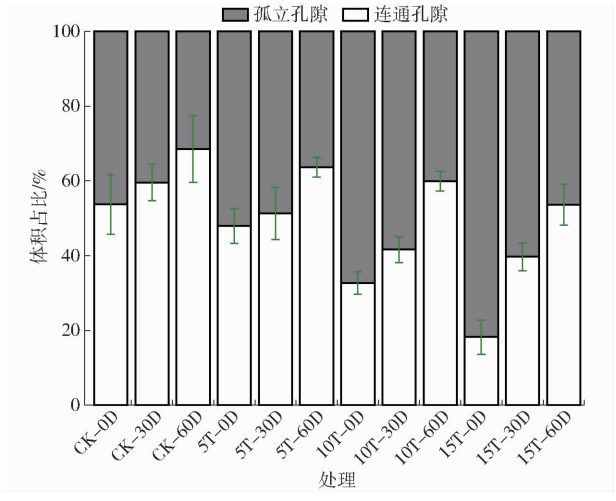


图 8　连通孔隙和孤立孔隙体积占比

Fig. 8　Volume proportion of connected pores and isolated pores

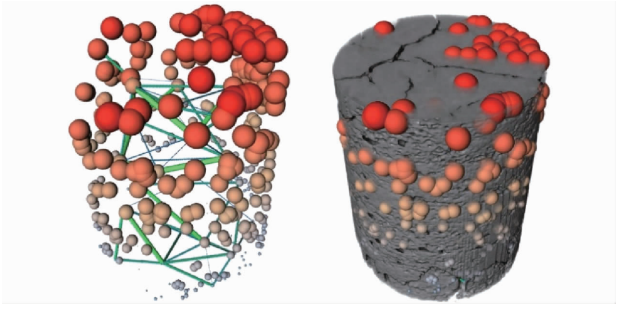


图 9　孔隙网络球棍模型

Fig. 9　Ball-and-stick model of pore network

增加，秸秆还田后虽有相同趋势，但连通孔隙占比均小于无秸秆还田时。可见秸秆还田有助于减少孔隙连通现象。对土壤连通大孔隙运算 Generate Pore Network Model 命令生成孔隙网络模型，如图 9 所示。该模型中，球表征孔隙，棍表征喉道（孔隙间狭窄部位）。在 Avizo 中可分析得出大孔隙三维特征。迂曲度反映土壤水分运移通道的迂回曲折程度。配位数是指某大孔隙连接其他大孔隙的数量。从表 2 可看出，秸秆还田有助于增加迂曲度、喉道平均长度，减少配位数、喉道平均等效半径，即水分运移通道更长、更曲折、数量更少且截面积更小，孔隙和喉道形态不利于水分迁移，有利于土壤保水。王越等[30]研究还发现还田后未腐解秸秆使孔隙、喉道近圆度变低。但在同一秸秆还田量下，60 d 内随秸秆腐解，迂曲度、喉道平均长度逐渐减小，配位数、喉道

表 2 大孔隙三维特征

Tab. 2 Three-dimensional features of macropores

处理	迂曲度			平均配位数		
	0D	30D	60D	0D	30D	60D
CK	(0.96±0.03)^{Ca}	(0.75±0.16)^{Cb}	(0.70±0.06)^{Db}	(2.56±0.35)^{Ab}	(3.25±0.51)^{Aab}	(3.49±0.42)^{Aa}
5T	(1.13±0.08)^{Ca}	(1.04±0.04)^{Bab}	(0.99±0.03)^{Cb}	(1.89±0.20)^{Bb}	(1.98±0.14)^{Bab}	(2.26±0.09)^{Ba}
10T	(1.43±0.11)^{Ba}	(1.24±0.08)^{Ab}	(1.10±0.03)^{Bb}	(1.56±0.13)^{Bb}	(1.79±0.21)^{Bab}	(1.97±0.22)^{BCa}
15T	(1.70±0.12)^{Aa}	(1.43±0.09)^{Ab}	(1.32±0.02)^{Ab}	(0.24±0.06)^{Cc}	(1.06±0.16)^{Cb}	(1.69±0.13)^{Ca}
处理	喉道平均等效半径/mm			喉道平均长度/mm		
	0D	30D	60D	0D	30D	60D
CK	(3.60±0.31)^{Ab}	(3.86±0.25)^{Ab}	(4.76±0.18)^{Aa}	(15.70±1.69)^{Da}	(12.57±1.91)^{Cab}	(11.70±0.96)^{Bb}
5T	(2.04±0.39)^{Bb}	(2.57±0.22)^{Bb}	(4.02±0.34)^{Ba}	(25.63±4.57)^{Ca}	(21.07±1.15)^{Cab}	(18.63±1.64)^{Bb}
10T	(1.70±0.26)^{Bb}	(1.76±0.30)^{Cb}	(3.03±0.25)^{Ca}	(40.70±3.21)^{Ba}	(32.01±7.15)^{Bab}	(28.62±5.91)^{Ab}
15T	(0.27±0.15)^{Cc}	(0.80±0.09)^{Db}	(1.27±0.19)^{Da}	(55.44±4.98)^{Aa}	(49.26±5.24)^{Aa}	(36.15±7.41)^{Ab}

平均等效半径逐渐增加,孔隙和喉道形态发生转变,水分运移通道呈变短、变平直、数量变多且截面积变大的趋势。

2.3 秸秆还田条件下土壤水分特征演化

在灌水后利用 TDR 探针获得各土层含水率。图 10 中,试验组上层土壤含水率均高于对照组,且秸秆还田量越大这一趋势越明显,秸秆还田 5、10、15 t/hm^{2}初期,与 CK 组相比表层含水率增加 1%、3%、6%,充分说明秸秆还田可促进土壤保水。对比同一秸秆还田量处理在不同腐解进程下土壤上层含水率发现,秸秆还田 5、10、15 t/hm^{2}腐解 60 d 后,与 0D 组相比表层含水率分别增加 6%、5%、5%。说明在一定时间内,秸秆腐解时间越长,土壤上层含水率越高,即保水能力更强。利用回收试样测得田间持水率如表 3 所示。在各腐解阶段下,田间持水率由大到小依次为 15T、10T、5T、CK,且 60 d 内随着秸秆腐解,田间持水率持续增大。可见秸秆还田及腐解有助于提升土壤保水能力,秸秆还田量越大这一效果也越显著。这可能是因为秸秆还田和腐解初期土壤孔隙度即蓄水空间增大,使得田间持水率变大。

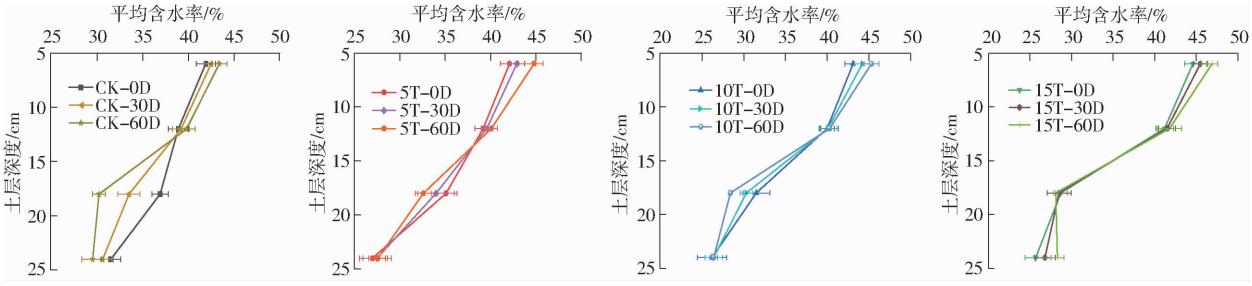


图 10 秸秆不同还田量下各土层平均含水率

Fig. 10 Average moisture content of each soil layer with different straw application rates

表 3 不同秸秆还田量在各腐解阶段下的田间持水率

Tab. 3 Field capacity of different straw application rates at different decomposition time points %

处理	CK	5T	10T	15T
0D	(24.69±0.21)^{Ba}	(25.01±0.16)^{Bb}	(25.61±0.19)^{Ab}	(25.88±0.23)^{Ab}
30D	(24.88±0.18)^{Da}	(25.26±0.14)^{Cb}	(25.84±0.14)^{Bab}	(26.19±0.17)^{Aab}
60D	(25.01±0.14)^{Da}	(25.59±0.10)^{Ca}	(26.09±0.15)^{Ba}	(26.48±0.12)^{Aa}

2.4 溶质运移对腐解进程的响应机理

溶质穿透曲线是指溶质相对出流液浓度(出流液浓度与混合电导液浓度比值)随相对出流液体积(出流液体积与试样孔隙体积比值)变化的关系曲线,可描述溶质在土壤中的运移特征。秸秆还田后,试样中存在基质、未降解秸秆、秸秆降解大孔隙三域,大孔隙优先流快速穿透试样并向基质域、秸秆域侧向入渗的同时,基质流缓慢入渗,多种水流运动叠加,使穿透曲线不规则。如图 11 所示,秸秆还田后,初始穿透时间、相对出流液浓度峰值出现时间延后;同一出流体积下,秸秆还田组相对出流液浓度更低,穿透更慢。可见秸秆还田有助于延缓溶质穿透,对溶质和水分运移存在阻滞作用,可提升土壤保水保肥能力。如图 12、表 4 所示,秸秆还田 5、10、15 t/hm^{2}腐解 60 d 后,与 0D 组相比完全穿透试样所需溶质分别减少 55%、76%、67%,说明土壤保肥能力在 60 d

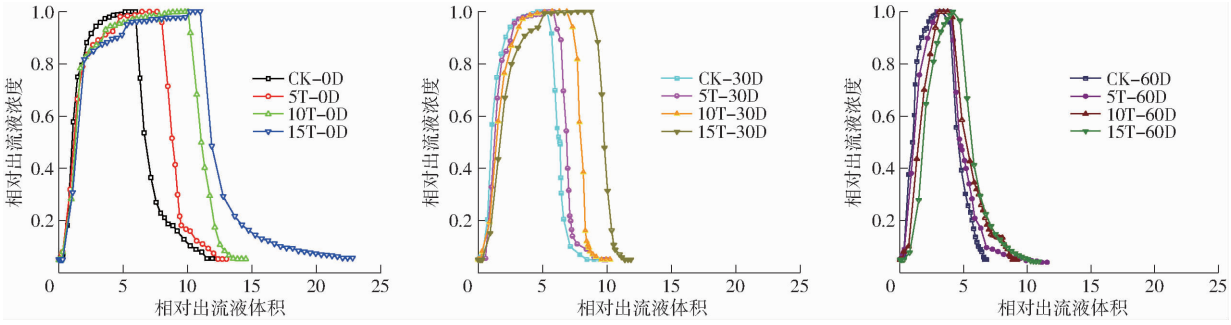


图 11　不同腐解进程下土壤溶质穿透曲线

Fig. 11　Soil solute breakthrough curves at different decomposition time points

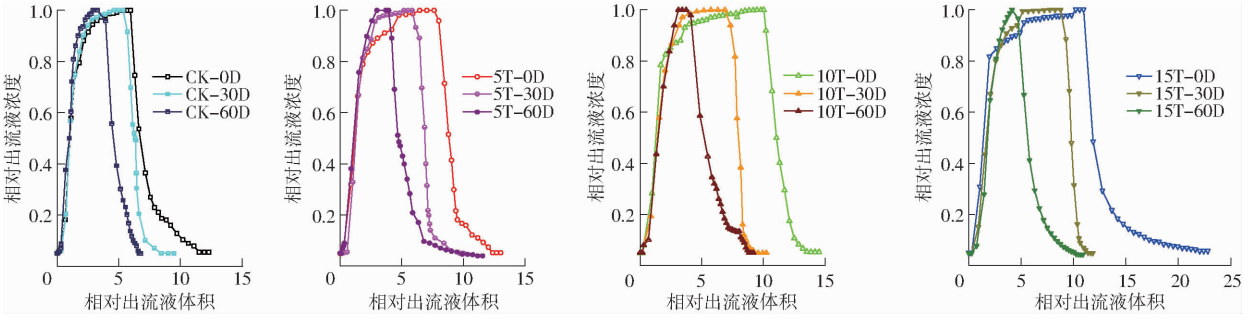


图 12　不同秸秆还田量下土壤溶质穿透曲线

Fig. 12　Soil solute breakthrough curves with different straw application rates

表 4　完全穿透试样时溴离子累积淋出量

Tab. 4　Cumulative leaching mass of bromine ions when specimens were completely penetrated　　g

处理	CK	5T	10T	15T
0D	(63.484 ± 5.158)^{Ba}	(77.481 ± 8.693)^{Ba}	(125.249 ± 14.358)^{Aa}	(135.570 ± 9.985)^{Aa}
30D	(57.083 ± 5.589)^{Ba}	(65.201 ± 7.854)^{Ba}	(74.076 ± 8.156)^{Bb}	(102.927 ± 12.394)^{Ab}
60D	(34.068 ± 2.154)^{Bb}	(34.824 ± 1.569)^{Bb}	(30.463 ± 5.145)^{Bc}	(44.127 ± 4.259)^{Ac}

后得到改善，这可能与秸秆腐解增加土壤中有机质有关。

KOESTEL 等[31]认为溶质归一化前 5% 到达时间（反映溶质质量前 5% 相对到达时间）是穿透曲线最可靠的形状参数。郭会荣等[32]、王红兰等[33]曾利用时间矩定量分析穿透曲线。本研究利用变差系数（二阶中心矩）、偏度（三阶中心矩）、归一化前 5% 到达时间等指标分析穿透曲线特征，如表 5、6 和图 13（图中直线表示出流液溶质归一化质量比为 5%）所示。变差系数（二阶中心矩）反映穿透曲线延展量；偏度反映穿透曲线非对称性程度，大于 0 曲线相对正态分布右偏，小于 0 曲线相对正态分布左偏。计算发现偏度几乎均为正值，即本试验穿透曲线普遍存在右侧拖尾现象。这被视作优先流的典型特征[32,34-35]，因为优先流通道中土水势较小，水分优先从中流过，使得淋洗时基质域内水流通量减少，基质域中溶质浓度下降缓慢，淋出液浓度下降缓慢，造成曲线右侧拖尾。可见本试验装填土壤和秸秆并未做到完全均质，存在部分初始优先流通道，但处理间差异仍能说明规律。60 d 时，偏度显著增大，拖尾和优先流现象更加突出。仅 10T－0D 组和 15T－30D 组偏度为负，曲线左侧拖尾。观察该图像，发现穿透曲线右侧也存在拖尾现象，存在优先流，只是左侧幅度更大，说明穿透段溶质运移较缓，主要在基质域和秸秆域中运移，受基质势和秸秆阻滞作用。这可能是大量秸秆还田产生的效果。60 d 时变差系数更大，穿透曲线延展量更大，与偏度变化趋势一致，说明 60 d 时优先流进一步发育。0 d 时归一化前 5% 到达时间最大，随秸秆腐解，归一化前 5% 到达时间变小，即溶质穿透变快，水分溶质运移效率更高。综上，秸秆还田使试样穿透更慢，对溶质运移存在阻滞作用；60 d 内随秸秆腐解，试样穿透变快，优先流逐渐发育。

2.5　秸秆还田条件下土壤水分运动及其入渗模型

Green－Ampt 模型是一种应用较广的入渗模型，可表示为

$$i = [K_s(\theta_s - \theta_i)S_f]\frac{1}{I} + K_s \tag{1}$$

式中　i——入渗率，cm/min

K_s——土壤饱和导水率，cm/min

表 5 穿透曲线特征指标

Tab. 5 Characteristic indexes of breakthrough curves

指标	处理	CK	5T	10T	15T
偏度	0D	(0.148 ±0.017)^{Ab}	(0.171 ±0.012)^{Ab}	(−0.642 ±0.062)^{Bc}	(0.147 ±0.030)^{Ab}
	30D	(0.018 ±0.003)^{Bc}	(0.034 ±0.006)^{Bc}	(0.236 ±0.031)^{Ab}	(−0.047 ±0.011)^{Cc}
	60D	(0.242 ±0.029)^{Ca}	(0.896 ±0.117)^{Ba}	(1.313 ±0.216)^{Aa}	(0.907 ±0.113)^{Ba}
变差系数	0D	(0.797 ±0.124)^{ABa}	(0.803 ±0.102)^{ABb}	(0.613 ±0.065)^{Bb}	(0.856 ±0.103)^{Aab}
	30D	(0.737 ±0.113)^{Aa}	(0.785 ±0.129)^{Ab}	(0.886 ±0.168)^{Aab}	(0.786 ±0.117)^{Ab}
	60D	(0.820 ±0.101)^{Aa}	(1.010 ±0.066)^{Aa}	(1.034 ±0.208)^{Aa}	(1.093 ±0.138)^{Aa}

表 6 各试样溶质归一化前 5% 到达时间

Tab. 6 Normalized arrival time of the first 5% solute of each treatment

处理	CK	5T	10T	15T
0D	(0.285 ±0.012)^{Aa}	(0.274 ±0.014)^{Aa}	(0.262 ±0.015)^{Aa}	(0.297 ±0.047)^{Aa}
30D	(0.262 ±0.019)^{Aa}	(0.264 ±0.030)^{Aab}	(0.245 ±0.035)^{Aa}	(0.239 ±0.038)^{Aab}
60D	(0.229 ±0.014)^{Ab}	(0.222 ±0.016)^{ABb}	(0.187 ±0.011)^{Bb}	(0.205 ±0.034)^{ABb}

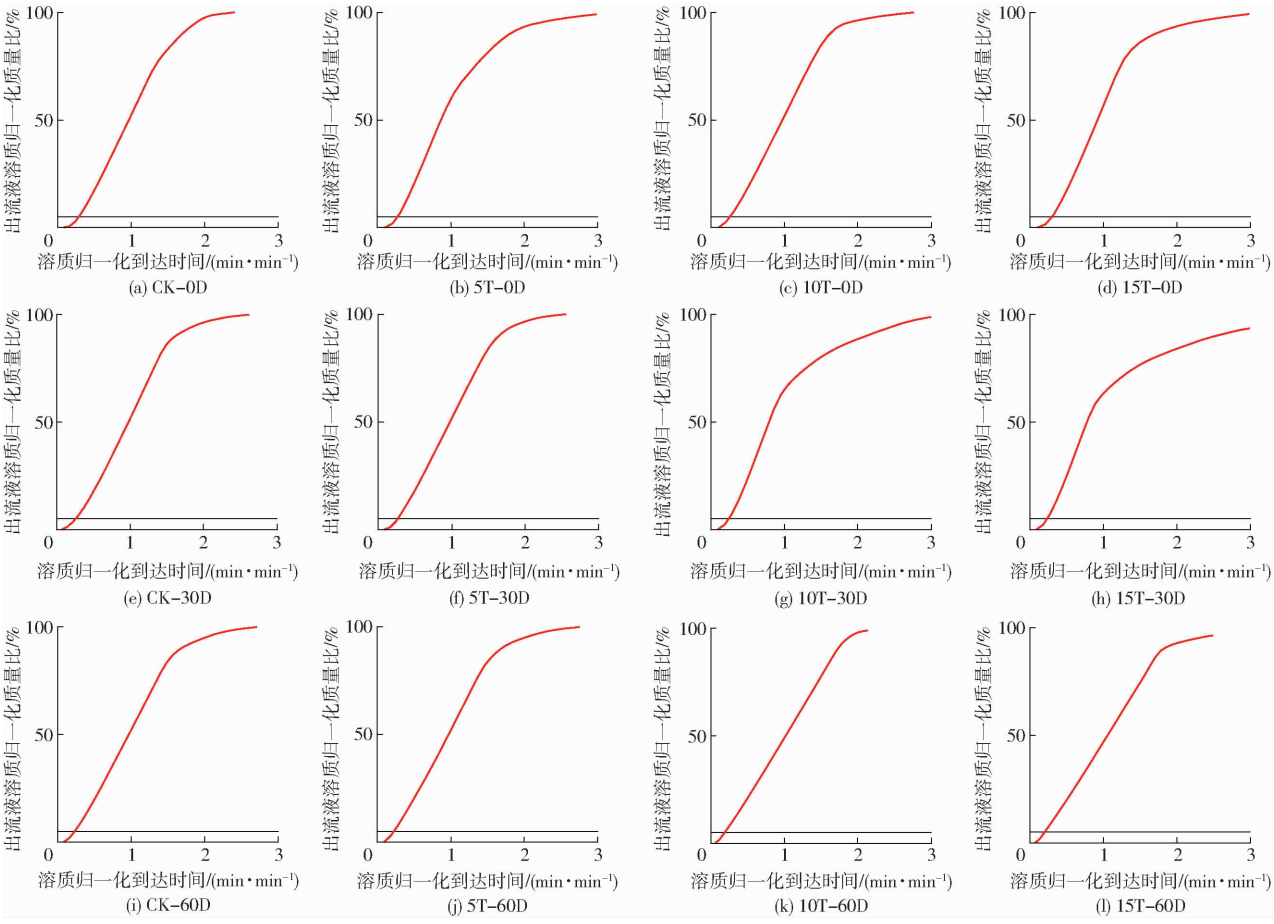


图 13 各处理归一化穿透曲线

Fig. 13 Normalized breakthrough curves of each treatment

θ_s——土壤饱和含水率,取 0.56 cm^3/cm^3

θ_i——土壤初始含水率,取 0.20 cm^3/cm^3

S_f——湿润锋处土壤水吸力,cm

I——累积入渗量,cm

根据试验中定时收集入渗量计算可得入渗率,拟合特征参数如表 7 所示,入渗率-时间散点图及其拟合线如图 14 所示。

由表 7 可知,秸秆还田后,K_s有不同程度减小,即土壤导水能力降低,这与文献[36-38]研究结果相同。随着秸秆腐解,K_s增大,这与孙荣国等[39]研究结果类似。这可能是因为秸秆促进微小粒级颗粒团聚变大,使得团聚体内和团聚体间孔隙增多变大,形成更多大孔隙,同时秸秆腐解减少,水分运移黏滞阻力大大减小,因此饱和导水率增大。有观点认为

表 7　不同处理下 Green－Ampt 模型拟合特征参数

Tab. 7　Characteristic parameters of different treatments fitted by Green－Ampt model

处理	CK			5T			10T			15T		
	K_s/(cm·min^{-1})	S_f/cm	R^2	K_s/(cm·min^{-1})	S_f/cm	R^2	K_s/(cm·min^{-1})	S_f/cm	R^2	K_s/(cm·min^{-1})	S_f/cm	R^2
0D	0.156	1.895	0.906	0.141	2.179	0.874	0.120	2.588	0.799	0.078	4.127	0.786
30D	0.200	1.336	0.941	0.179	1.520	0.896	0.166	1.689	0.945	0.152	2.058	0.901
60D	0.202	1.220	0.933	0.184	1.353	0.966	0.186	1.450	0.769	0.177	1.615	0.742

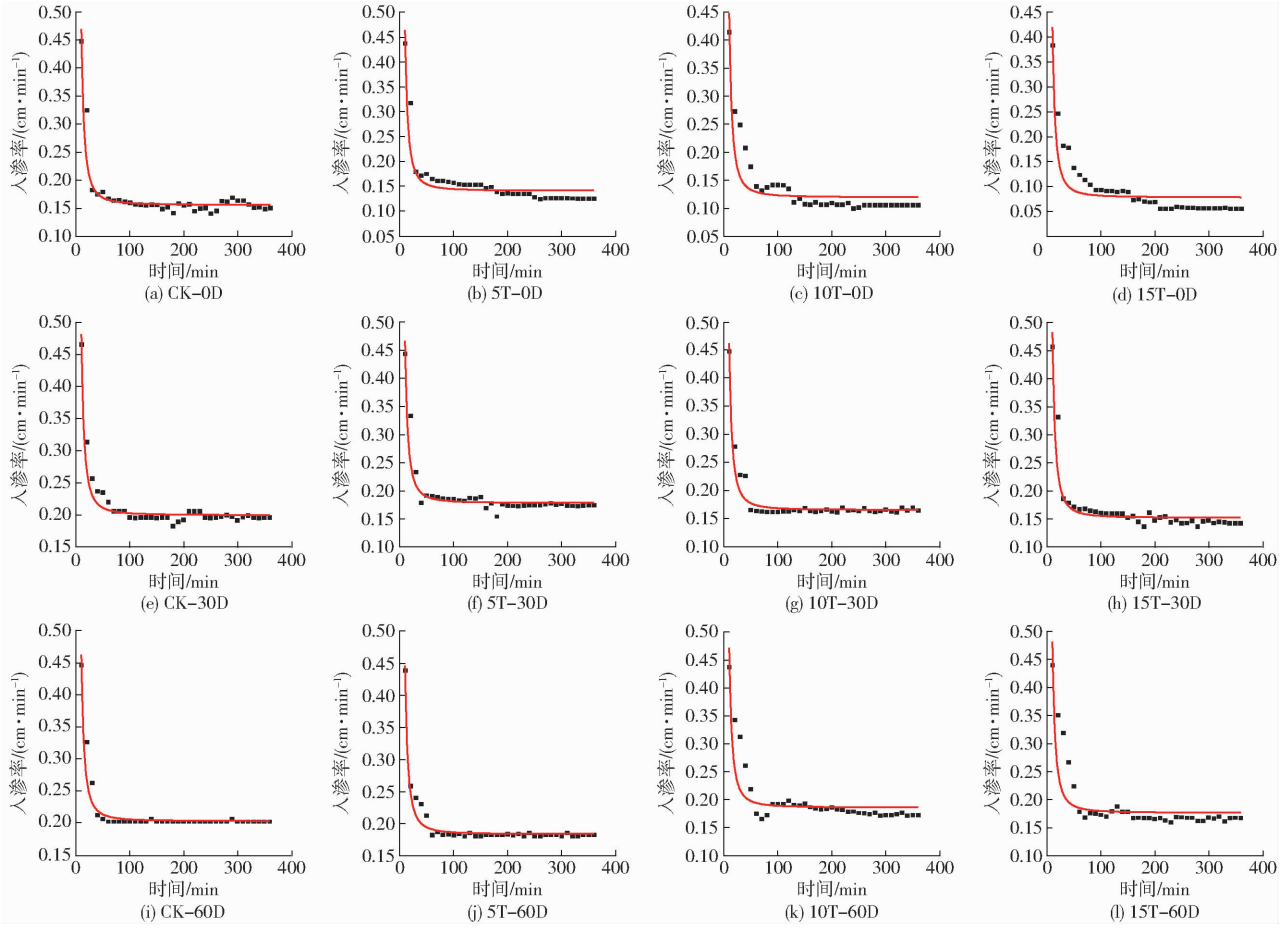


图 14　入渗率-时间散点图及其拟合线

Fig. 14　Infiltration rate-time scatter diagrams and fitted curves

S_f可以视作进气值，秸秆还田后进气值变大，即吸持水分能力变强；秸秆腐解后进气值变小，即吸持水分能力变弱[40]，与前文结果一致。利用 Poly 2D 模型拟合土壤导水率-秸秆初始投入量-腐解时间关系，如图 15 所示，效果良好（决定系数 R^2 为 0.98）。

梁鑫宇等[41]利用指数衰减模型模拟出秸秆腐解规律。陈尚洪等[42]提出秸秆腐解过程符合 OLSON 提出的植物类腐解的指数衰减模型，即

$$x = x_0 e^{-vt} \tag{2}$$

式中　x_0——秸秆初始还田量，t/hm^2

t——腐解时间，d

x——t 天时秸秆剩余量，t/hm^2

v——秸秆分解速率[43]，d^{-1}

但 v 随秸秆腐解减小，不利于分析。为此，本研

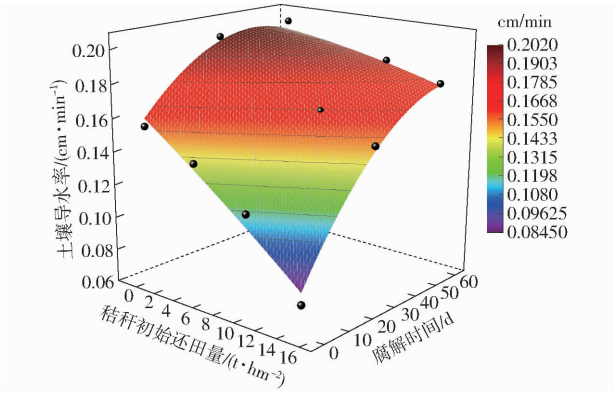


图 15　基于 Poly 2D 模型的土壤导水率-秸秆初始还田量-腐解时间曲面

Fig. 15　Fitted surface of soil hydraulic conductivity－initial straw application rates－decomposition time points based on Poly 2D model

究进一步提出改进后的秸秆腐解衰减模型，并根据测得的实际腐解率对参数拟合为

$$x = px_0 = Ax_0 e^{-k\sqrt{t}} \tag{3}$$

式中 p——秸秆剩余比（腐解一定时间后试样内剩余秸秆占秸秆初始还田量比值），%

A、k——待拟合参数

拟合曲线如图 16 所示，拟合参数如表 8 所示。

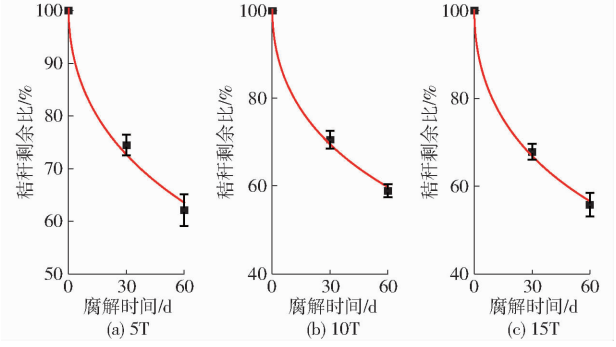


图 16 不同初始还田量下秸秆剩余比-腐解时间拟合曲线

Fig. 16 Fitted curves of residual straw after decomposition and decomposition time points with different straw application rates

表 8 不同初始还田量下秸秆腐解衰减模型拟合参数

Tab. 8 Attenuation model of straw decomposition with different initial straw application rates

参数	秸秆初始还田量/(t·hm^{-2})		
	5	10	15
A	1.005	1.000	1.005
k	0.059	0.067	0.074
R^2	0.993	0.998	0.998

初始还田量 $-k$、秸秆剩余量-土壤导水率拟合曲线如图 17 所示。参数 k 与初始还田量 x_0 线性拟合良好（$k = 0.001\ 5x_0 + 0.051\ 7$，$R^2 = 0.99$）。因此秸秆腐解衰减模型可近似为：$p = \exp((-0.001\ 5x_0 - 0.051\ 7)\sqrt{t})$，即 $x = x_0\exp((-0.001\ 5x_0 - 0.051\ 7)\sqrt{t})$。因此 K_s 与秸秆腐解剩余量 x 可线性拟合建立关系 $K_s = -0.005x + 0.162$，决定系数 R^2 为 0.94。拟合曲面如图 18 所示，决定系数 R^2 为 0.80。

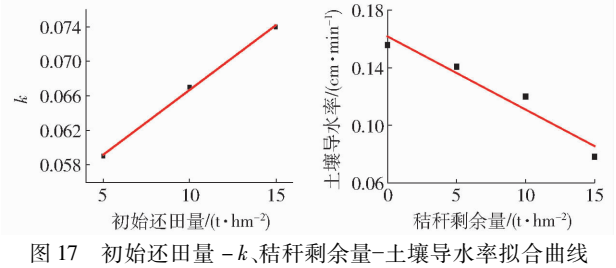


图 17 初始还田量 $-k$、秸秆剩余量-土壤导水率拟合曲线

Fig. 17 Fitted curves of initial application rates $-k$, residual straw $-$ soil hydraulic conductivity

据此，本文总结了两种模型得出不同秸秆初始投入量在不同腐解时间后的 K_s 为

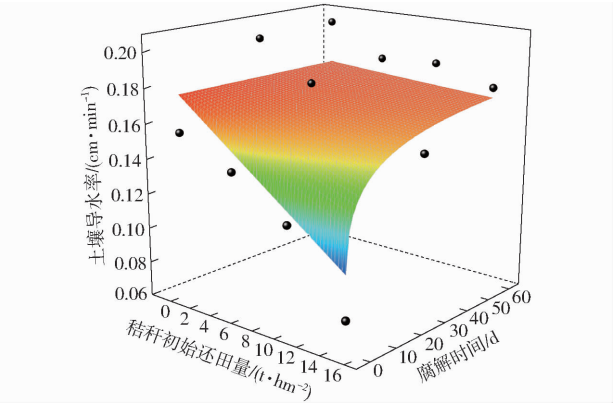


图 18 基于指数衰减模型的土壤导水率-秸秆初始还田量-腐解时间曲面拟合

Fig. 18 Fitted surface of soil hydraulic conductivity $-$ initial straw application rates $-$ decomposition time points based on exponential decay model

$$K_s = 0.161 - 0.005x_0 + 0.002t - 3.667\times10^{-5}x_0^2 - 2.083\times10^{-5}t^2 + 6.067\times10^{-5}x_0t \tag{4}$$

$$K_s = -0.005x_0\exp((-0.001\ 5x_0 - 0.299\ 8)\sqrt{t}) + 0.177\ 5 \tag{5}$$

3 讨论

已有研究认为秸秆还田有助于改善土壤物理性质，本文发现秸秆还田有助于提高土壤含水率和田间持水率，这与 SASAL 等[44]、WUEST[45]研究结果一致。从孔隙结构来看，已有研究指出秸秆还田后土壤孔隙度增加。本文通过 CT 扫描数据分析进一步发现秸秆还田后增加孔隙以小孔隙为主，大孔隙体积占比反而减小；孤立孔隙增加，连通孔隙减少；孔隙和喉道形态不利于水分溶质迁移。这可能是因为：①秸秆纤维素含量高、容重低，还田后如同土壤中的“楔子”[46]，插入土壤中将现存大孔隙切分开[47]。②秸秆表面因腐解形成诸多小孔隙[2]。③秸秆主要由纤维素、半纤维素和木质素等组成，本身是一个重要的碳源[6]，其腐解使土壤中有机质含量增加[48]，促进土壤微生物活动，形成更多小孔隙[49]。④土壤有机质作为团聚体的重要胶结剂，能够促进大团聚体的形成[50]，使小孔隙增加[51]。仵峰等[52]研究还进一步发现，掺加秸秆后土壤内易利用水（田间持水率与毛管断裂持水率之差）比例上升，土壤水分特征曲线中参数 α、n、m 均减小。说明土壤孔隙变多，进气值变大，排水变难，保水效果变好，与本研究结果一致。

还田秸秆进入土壤中，在土壤微生物和酶的作用下进行有机物矿化和腐殖质化等腐解过程。本研究发现秸秆腐解速度在前 30 d 快于后 30 d。这可能是因为秸秆腐解初期大孔隙较少，土壤基质势较

大，中高吸力段占据主导[52]，土壤可吸持较多水分，为土壤微生物和腐解剂菌种提供适宜的潮湿环境，促进腐解。随着腐解进行，气体产物逸出，真菌菌丝体侵入孔隙空间分解有机质，大孔隙逐渐发育[15]，基质势变小，毛管力难以吸持水分，导致中高吸力段同一吸力水平下土壤含水率降低，持水能力减弱，进一步导致微生物活性降低，腐解速度变慢。本研究发现在 60 d 腐解进程中大孔隙体积占比增大，孔隙喉道已经开始发育连通，形态发生转变。随着腐解过程发展，大孔隙发育连通势必进一步产生优先流通道，减弱土壤持水能力。杨梦[53]通过人造大孔隙发现，大孔隙体积虽小，却会显著促进土壤水出流，对土壤水分运移影响的关键孔径可能在 2 ~ 4 mm 之间。

周蓓蓓等[54]在关于混合介质饱和导水率的研究中认为，混合介质饱和导水率变化是水分运动通道弯曲程度、实际过水断面大小、大孔隙数量变化共同作用的结果，3 种效应相互作用使得混合介质饱和导水率有不同演变趋势。因此，饱和导水率变化与掺入物性质、形状、体积、掺入方式等因素密切相关。例如王珍等[4]对比粉末状和其他长度秸秆粉碎还田，因秸秆形态发生变化，土壤导水率会有不同变化。再如 BLANCO-CANQUI 等[55]研究发现，一定量小麦秸秆覆盖还田至粉壤土后土壤饱和导水率增大，与 GARNIER 等[38]和本研究结果不同。GARNIER 等[38]还进一步发现，施加不同量秸秆后，低负压水头下土壤饱和导水率接近，高负压水头下土壤饱和导水率开始分化。可见秸秆还田对土壤导水率的影响不可一概而论。BLANCO-CANQUI 等[55]认为，饱和导水率和有效孔隙率正相关，但本研究发现秸秆还田引起孔隙度增大，饱和导水率却减小。这可能是因为：①秸秆本身导水能力低于土壤。②秸秆与土壤的异质性使得秸秆插入土壤后阻断部分土壤毛管孔隙，减少部分孔隙和喉道的横截面积，过水断面减小。③秸秆使得水分运移通道更为弯曲、复杂。④秸秆还田时中空部分空气尚未排出，形成封闭气泡，水分运移通道受阻。⑤秸秆还田及其腐解产物改变了溶质浓度及溶液粘滞性，导致土壤渗透性降低[40]。PECK 等[56]提出非均质土壤饱和导水率满足关系 $K_s = 2K_0(1 - R_v)/(2 + R_v)$，式中 K_0 为均质土壤饱和导水率，R_v 为掺入物体积分数。根据这一关系，秸秆还田量越大，混合介质饱和导水率越小；随着秸秆腐解、体积分数减少，混合介质饱和导水率随之增加，与本研究试验结果吻合。已有研究通过 Hydrus 数值模拟发现，双渗透模型模拟大孔隙优先流运移拟合较好[53,57]。如将土壤视作复合域（包含基质和未腐解秸秆）和秸秆腐解大孔隙域 2 个水分相互交换的多孔连续介质域，根据双渗透模型[58]，土壤的饱和导水率是 2 个区域饱和导水率体积加权平均值，即 $K_s = w_f K_{sf} + w_m K_{sm}$，式中 w_f、w_m 分别为大孔隙域和基质域占土样的体积比，K_{sf}、K_{sm} 分别为大孔隙域和基质域的饱和导水率。大孔隙域导水率大，复合域导水率小；随着秸秆腐解、大孔隙域逐渐发展，混合介质导水率变大，这与本研究结果吻合。

溶质运移受土壤内外多种因素制约，伴随对流、分子扩散、机械弥散等复杂物理过程。在饱和均质土壤中，溶质运移主要以基质流为载体，穿透曲线呈正态分布。当土壤内存在优先流通道时，施加溶质后水分及溶质在重力驱动下将主要以非均匀流形式快速穿透土体，穿透曲线不再对称。完全穿透后基质和大孔隙均被穿透溶液饱和，在淋洗试样时基质中溶质会慢于大孔隙中溶质被淋洗出，使得穿透曲线拖尾。还田后未腐解秸秆域可视作另一种自身可吸持水分溶质的土壤基质，加剧穿透段变缓，淋出段拖尾现象。本文研究发现，秸秆还田对溶质运移存在阻滞作用，利于土壤保肥，这可能是因为秸秆还田造成水分溶质运移通道更长更曲折，浓度梯度减小，溶质水动力弥散减弱减慢。60 d 内，同一还田量秸秆腐解进程中，溶质运移效率变高，秸秆阻滞作用减弱。这可能是因为：①水分溶质运移通道变短变平直。②腐解产物成为新溶质，浓度梯度回升。③秸秆腐解使土壤黏粒减少[59-60]，黏土层半透膜作用减弱，土壤基质选择系数降低，从而加快溶质运移[40]。60 d 内，同一还田量秸秆腐解进程中土壤保肥能力持续增强，可能与秸秆腐解增加土壤中有机质含量有关。

4　结论

（1）与无秸秆还田相比，秸秆还田后土壤小孔隙增加、大孔隙减少；孤立孔隙增加、连通孔隙减少；水分运移通道更长、更曲折、数量更少且截面积更小，不利于水分溶质迁移。60 d 内，同一还田量秸秆腐解进程中，土壤大孔隙体积占比增大，其中表层土壤大孔隙体积占比增幅更大；孤立孔隙减少、连通孔隙增加、孔隙喉道开始发育连通；水分运移通道变短、变平直、数量变多且截面积变大。

（2）与无秸秆还田相比，秸秆还田有助于延缓溶质穿透，土壤水力特征表现为田间持水率增大、保水保肥能力变强、饱和导水率减小。秸秆腐解 60 d 内，溶质穿透变快、田间持水率和土壤饱和导水率增大、水分溶质运移效率变高、优先流逐渐发育。

(3)基于 Green - Ampt 模型和优化后的秸秆腐解指数衰减模型,建立了秸秆粉碎还田条件下以秸秆初始投入量和腐解时间为参数的饱和导水率模型,进一步为科学秸秆还田和有效灌溉提供依据。

参 考 文 献

[1] 赵政鑫, 王晓云, 李府阳, 等. 秸秆还田配施稳定性氮肥对麦玉轮作水氮利用的影响[J]. 农业机械学报, 2023, 54(6): 350 - 360.
ZHAO Zhengxin, WANG Xiaoyun, LI Fuyang, et al. Effects of straw returning and application of stable nitrogen fertilizer on water and nitrogen use efficiencies of wheat maize rotation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(6): 350 - 360. (in Chinese)

[2] 房焕, 李奕, 周虎, 等. 稻麦轮作区秸秆还田对水稻土结构的影响[J]. 农业机械学报, 2018, 49(4): 297 - 302.
FANG Huan, LI Yi, ZHOU Hu, et al. Effects of straw incorporation on paddy soil structure in rice-wheat rotation system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 297 - 302. (in Chinese)

[3] GOSWAMI S B, MONDAL R, MANDI S K. Crop residue management options in rice-rice system: a review[J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2020, 66(9): 1218 - 1234.

[4] 王珍, 冯浩. 秸秆不同还田方式对土壤结构及土壤蒸发特性的影响[J]. 水土保持学报, 2009, 23(6): 224 - 228,251.
WANG Zhen, FENG Hao. Study on the influence of different straw-returning manners on soil structure and characters of soil water evaporation[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(6): 224 - 228,251. (in Chinese)

[5] 安婉丽, 高灯州, 潘婷, 等. 水稻秸秆还田对福州平原稻田土壤水稳性团聚体分布及稳定性影响[J]. 环境科学学报, 2016, 36(5): 1833 - 1840.
AN Wanli, GAO Dengzhou, PAN Ting, et al. Effect of rice straw returning on paddy soil water-stable aggregate distribution and stability in the paddy field of Fuzhou plain[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, 36(5): 1833 - 1840. (in Chinese)

[6] 潘剑玲, 代万安, 尚占环, 等. 秸秆还田对土壤有机质和氮素有效性影响及机制研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(5): 526 - 535.
PAN Jianling, DAI Wan'an, SHANG Zhanhuan, et al. Review of research progress on the influence and mechanism of field straw residue incorporation on soil organic matter and nitrogen availability[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(5): 526 - 535. (in Chinese)

[7] 王擎运, 陈景, 杨远照, 等. 长期秸秆还田对典型砂姜黑土胀缩特性的影响机制[J]. 农业工程学报, 2019, 35(14): 119 - 124.
WANG Qingyun, CHEN Jing, YANG Yuanzhao, et al. Effect mechanism of long-term straw returning on shrinkage characteristic in typical Shajiang black soil[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(14): 119 - 124. (in Chinese)

[8] 范倩玉, 李军辉, 李晋, 等. 不同作物秸秆还田对潮土结构的改良效果[J]. 水土保持学报, 2020, 34(4): 230 - 236.
FAN Qianyu, LI Junhui, LI Jin, et al. Effect of different crop straw mulching on alluvial soil structure improvement[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(4): 230 - 236. (in Chinese)

[9] 吴晗, 陈晓冰, 姜波, 等. 秸秆还田对甘蔗地土壤优先流运动特征的影响[J]. 应用生态学报, 2022, 33(1): 141 - 148.
WU Han, CHEN Xiaobing, JIANG Bo, et al. Effects of straw returning to movement characteristics of soil preferential flow in sugarcane fields[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(1): 141 - 148. (in Chinese)

[10] 武际, 郭熙盛, 鲁剑巍, 等. 不同水稻栽培模式下小麦秸秆腐解特征及对土壤生物学特性和养分状况的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(2): 565 - 575.
WU Ji, GUO Xisheng, LU Jianwei, et al. Decomposition characteristics of wheat straw and effects on soil biological properties and nutrient status under different rice cultivation[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(2): 565 - 575. (in Chinese)

[11] BEARE M H, WILSON P E, FRASER P M, et al. Management effects on barley straw decomposition, nitrogen release, and crop production[J]. Soil Science Society of America Journal, 2002, 66(3): 848 - 856.

[12] 丛萍, 李玉义, 高志娟, 等. 秸秆颗粒化高量还田快速提高土壤有机碳含量及小麦玉米产量[J]. 农业工程学报, 2019, 35(1): 148 - 156.
CONG Ping, LI Yuyi, GAO Zhijuan, et al. High dosage of pelletized straw returning rapidly improving soil organic carbon content and wheat-maize yield[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(1): 148 - 156. (in Chinese)

[13] AOYAMA M, NOZAWA T. Microbial biomass nitrogen and mineralization-immobilization processes of nitrogen in soils incubated with various organic materials[J]. Soil Science & Plant Nutrition, 1993, 39(1): 23 - 32.

[14] STRONG D T, DE WEVER H, MERCKX R, et al. Spatial location of carbon decomposition in the soil pore system[J]. European Journal of Soil Science, 2004, 55(4): 739 - 750.

[15] DE GRYZE S, JASSOGNE L, SIX J, et al. Pore structure changes during decomposition of fresh residue: X-ray tomography analyses[J]. Geoderma, 2006, 134(1 - 2): 82 - 96.

[16] 刘继龙, 李佳文, 周延, 等. 秸秆覆盖与耕作方式对土壤水分特性的影响[J]. 农业机械学报, 2019, 50(7): 333 - 339.
LIU Jilong, LI Jiawen, ZHOU Yan, et al. Effects of straw mulching and tillage on soil water characteristics[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(7): 333 - 339. (in Chinese)

[17] JARVIS N J. A review of non-equilibrium water flow and solute transport in soil macropores: principles, controlling factors and consequences for water quality[J]. European Journal of Soil Science, 2020, 71(3): 279 - 302.

[18] BEVEN K, GERMANN P. Macropores and water flow in soils revisited[J]. Water Resources Research, 2013, 49(6): 3071 – 3092.

[19] CEY E E, RUDOLPH D L. Field study of macropore flow processes using tension infiltration of a dye tracer in partially saturated soils[J]. Hydrological Processes, 2009, 23(12): 1768 – 1779.

[20] ZHOU H, FANG H, MOONEY S J, et al. Effects of long-term inorganic and organic fertilizations on the soil micro and macro structures of rice paddies[J]. Geoderma, 2016, 266:66 – 74.

[21] MOONEY S J, MORRIS C. Morphological approach to understanding preferential flow using image analysis with dye tracers and X-ray computed tomography[J]. Catena, 2008, 73(2): 204 – 211.

[22] 杨志敏, 陈玉成, 张赟, 等. 淹水条件下秸秆还田的面源污染物释放特征[J]. 生态学报, 2012, 32(6): 1854 – 1860.
YANG Zhimin, CHEN Yucheng, ZHANG Yun, et al. Releasing characteristics of nonpoint source pollutants from straws under submerging condition[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(6): 1854 – 1860. (in Chinese)

[23] 崔思远, 尹小刚, 陈阜, 等. 耕作措施和秸秆还田对双季稻田土壤氮渗漏的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(10): 174 – 179.
CUI Siyuan, YIN Xiaogang, CHEN Fu, et al. Effects of tillage and straw returning on nitrogen leakage in double rice cropping field[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(10): 174 – 179. (in Chinese)

[24] GUNTIÑAS M E, LEIRÓS M C, TRASAR-CEPEDA C, et al. Effects of moisture and temperature on net soil nitrogen mineralization: a laboratory study[J]. European Journal of Soil Biology, 2012, 48: 73 – 80.

[25] STANFORD G, FRERE M H, SCHWANINGER D H. Temperature coefficient of soil nitrogen mineralization[J]. Soil Science, 1973, 115(4): 321 – 323.

[26] ZUMRAWI M M, ELTAYEB K A. Laboratory investigation of expansive soil stabilized with calcium chloride[J]. Int. Sch. Sci. Res. Innov., 2016, 10(2): 223 – 227.

[27] AL-ABDULLAH S F, AL-DULAIMI N S M. Characteristics of gypsies soils treated with calcium chloride solution[J]. Journal of Engineering, 2008, 14(2): 2403 – 2414.

[28] 张宏媛, 逄焕成, 卢闯, 等. CT 扫描分析秸秆隔层孔隙特征及其对土壤水入渗的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(6): 114 – 122.
ZHANG Hongyuan, PANG Huancheng, LU Chuang, et al. Pore characteristics of straw interlayer based on computed tomography images and its influence on soil water infiltration[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(6): 114 – 122. (in Chinese)

[29] LUXMOORE R. Micro-, meso-, and macroporosity of soil[J/OL]. Soil Science Society of America Journal, 1981, 45(3). https://doi.org/10.2136/sssaj1981.03615995004500030051x.

[30] 王越, 况福虹, 马胜兰, 等. 秸秆粉碎和焚烧还田对石灰性紫色土耕层土壤孔隙和有机碳的影响[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(3): 526 – 536.
WANG Yue, KUANG Fuhong, MA Shenglan, et al. Effects of shredded straw and burned straw returning to the field on soil porosity and organic carbon in cultivated layer of calcareous purple soil[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2022, 41(3): 526 – 536. (in Chinese)

[31] KOESTEL J K, MOEYS J, JARVIS N J. Evaluation of nonparametric shape measures for solute breakthrough curves[J]. Vadose Zone Journal, 2011, 10(4): 1261 – 1275.

[32] 郭会荣, 靳孟贵, 王云. 基于室内土柱穿透实验的优先流定量评价[J]. 地质科技情报, 2009,28(6): 101 – 106.
GUO Huirong, JIN Menggui, WANG Yun. Quantitative evaluation of preferential flow based on laboratory breakthrough experiments of soil columns[J]. Geological Science and Technology Information, 2009,28(6): 101 – 106. (in Chinese)

[33] 王红兰, 蒋舜媛, 崔俊芳, 等. 紫色土坡耕地土壤大孔隙流的定量评价[J]. 农业工程学报, 2017, 33(22): 167 – 174.
WANG Honglan, JIANG Shunyuan, CUI Junfang, et al. Quantitative evaluation of macropore flow in purple soil of sloping cropland[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(22): 167 – 174. (in Chinese)

[34] ZHANG Z B, PENG X, ZHOU H, et al. Characterizing preferential flow in cracked paddy soils using computed tomography and breakthrough curve[J]. Soil and Tillage Research, 2015, 146:53 – 65.

[35] 张文杰, 严宏罡, 孙铖. 城市生活垃圾中优先流规律的穿透试验研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(7): 1316 – 1321.
ZHANG Wenjie, YAN Honggang, SUN Cheng. Breakthrough tests on preferential flow in municipal solid waste[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(7): 1316 – 1321. (in Chinese)

[36] 张丽华,徐晨,于江,等. 半湿润区秸秆还田对土壤水分、温度及玉米产量的影响[J]. 水土保持学报,2021,35(4):299 – 306.
ZHANG Lihua, XU Chen, YU Jiang, et al. Effects of straw returning on soil moisture, temperature and maize yield in semi humid area[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2021, 35(4): 299 – 306. (in Chinese)

[37] 舒方瑜, 董勤各, 冯浩, 等. 不同有机物料对黄土高原治沟造地土壤水分运移的影响[J]. 水土保持学报,2022,36(1): 74 – 79.
SHU Fangyu, DONG Qin'ge, FENG Hao, et al. Effects of different organic materials on water movement in gully land consolidation soil on the Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(1): 74 – 79. (in Chinese)

[38] GARNIER P, EZZINE N, GRYZE S D, et al. Hydraulic properties of soil-straw mixtures[J]. Vadose Zone Journal, 2004 (3):714 – 721.

[39] 孙荣国, 韦武思, 王定勇. 秸秆-膨润土- PAM 改良材料对砂质土壤饱和导水率的影响[J]. 农业工程学报,2011,

27(1):89 – 93.
SUN Rongguo, WEI Wusi, WANG Dingyong. Effect of straw – bentonite – PAM improved material on saturated hydraulic conductivity of sandy soil[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(1): 89 – 93. (in Chinese)
[40] 雷志栋, 杨诗秀, 谢森传. 土壤水动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988.
[41] 梁鑫宇, 宋明丹, 韩梅, 等. 不同农作物秸秆腐解规律及模型预测评价[J]. 核农学报,2023,37(6):1244 – 1252.
LIANG Xinyu, SONG Mingdan, HAN Mei, et al. Prediction and evaluation of different crop straw decomposition laws and models[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2023, 37(6): 1244 – 1252. (in Chinese)
[42] 陈尚洪, 朱钟麟, 吴婕, 等. 紫色土丘陵区秸秆还田的腐解特征及对土壤肥力的影响[J]. 水土保持学报, 2006, 20(6): 141 – 144.
CHEN Shanghong, ZHU Zhonglin, WU Jie, et al. Decomposition characteristics of straw return to soil and its effect on soil fertility in purple hilly region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2006, 20(6): 141 – 144. (in Chinese)
[43] ZHANG Z B, PENG X, WANG L L, et al. Temporal changes in shrinkage behavior of two paddy soils under alternative flooding and drying cycles and its consequence on percolation[J]. Geoderma, 2013, 192:12 – 20.
[44] SASAL M C, ANDRIULO A E, TABOADA M A. Soil porosity characteristics and water movement under zero tillage in silty soils in Argentinian pampas[J]. Soil and Tillage Research, 2006, 87(1): 9 – 18.
[45] WUEST S B. Surface versus incorporated residue effects on water-stable aggregates[J]. Soil and Tillage Research, 2007, 96(1 – 2): 124 – 130.
[46] 韩晓增, 邹文秀, 王凤仙, 等. 黑土肥沃耕层构建效应[J]. 应用生态学报, 2009, 20(12): 2996 – 3002.
HAN Xiaozeng, ZOU Wenxiu, WANG Fengxian, et al. Construction effect of fertile cultivated layer in black soil[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(12): 2996 – 3002. (in Chinese)
[47] BHATTACHARYYA R, CHANDRA S, SINGH R D, et al. Long-term farmyard manure application effects on properties of a silty clay loam soil under irrigated wheat-soybean rotation[J]. Soil and Tillage Research, 2007, 94(2): 386 – 396.
[48] 邹文秀, 韩晓增, 陆欣春, 等. 施入不同土层的秸秆腐殖化特征及对玉米产量的影响[J]. 应用生态学报, 2017, 28(2): 563 – 570.
ZOU Wenxiu, HAN Xiaozeng, LU Xinchun, et al. Effects of straw incorporated to different locations in soil profile on straw humification coefficient and maize yield[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(2): 563 – 570. (in Chinese)
[49] NAVEED M, MOLDRUP P, VOGEL H J, et al. Impact of long-term fertilization practice on soil structure evolution[J]. Geoderma, 2014, 217:181 – 189.
[50] 高鸣慧, 李娜, 彭靖, 等. 秸秆和生物炭还田对棕壤团聚体分布及有机碳含量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(11): 1978 – 1986.
GAO Minghui, LI Na, PENG Jing, et al. Effects of straw and biochar returning on soil aggregates distribution and organic carbon content in brown soil[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertitizer, 2020, 26(11): 1978 – 1986. (in Chinese)
[51] MANGALASSERY S, SJOEGERSTEN S, SPARKES D L, et al. The effect of soil aggregate size on pore structure and its consequence on emission of greenhouse gases[J]. Soil and Tillage Research, 2013, 132: 39 – 46.
[52] 仵峰, 张凯, 宰松梅, 等. 小麦玉米秸秆掺土还田量对土壤水分运动特性的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(24): 101 – 105.
WU Feng, ZHANG Kai, ZAI Songmei, et al. Impact of mixed straw on soil hydraulic properties[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(24): 101 – 105. (in Chinese)
[53] 杨梦. 土壤大孔隙特征对水分及溶质优势流运移影响的实验研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2022.
YANG Meng. Experimental study on the effect of soil macropore characteristics on the transport of water and solute preferential flow[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2022. (in Chinese)
[54] 周蓓蓓, 邵明安. 土石混合介质饱和导水率的研究[J]. 水土保持学报, 2006, 20(6):62 – 66.
ZHOU Beibei, SHAO Ming'an. Study on saturated hydraulic conductivity of soil stone mixtures[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2006, 20(6): 62 – 66. (in Chinese)
[55] BLANCO-CANQUI H, LAL R. Impacts of long-term wheat straw management on soil hydraulic properties under no-tillage[J]. Soil Science Society of America Journal, 2007, 71(4): 1166 – 1173.
[56] PECK A J, WATSON J D. Hydraulic conductivity and flow in non-uniform soil[C]// CSIRO Division of Environmental Mechanics, Canberra, 1979:31 – 39.
[57] 李欣丽. 基于室内土柱试验的优先流运移规律及模拟研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2022.
LI Xinli. Simulation of preferential flow and transport based on indoor soil column experiments[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2022. (in Chinese)
[58] SHAO W, NI J, LEUNG A K, et al. Analysis of plant root-induced preferential flow and pore-water pressure variation by a dual-permeability model[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2017, 54(11): 1537 – 1552.
[59] 刘晓舟. 秸秆还田模式对农田土壤稳定性团聚体粒径组成的影响[J]. 东北农业科学, 2021, 46(4): 34 – 37,104.
LIU Xiaozhou. Effect of straw returning mode on soil stability of farmland aggregate particle size composition[J]. Journal of Northeast Agricultural Sciences, 2021, 46(4): 34 – 37,104. (in Chinese)
[60] WANG X J, JIA Z K, LIANG L Y, et al. Maize straw effects on soil aggregation and other properties in arid land[J]. Soil and Tillage Research, 2015, 153: 131 – 136.