doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2022.10.036

生物炭混掺对沼液间接地下滴灌土壤水力特性的影响

郑　健[1,2]　向　鹏[1,2]　孙　强[1,2]　康　健[1]　王　燕[1]

(1.兰州理工大学能源与动力工程学院,兰州 730050;
2.甘肃省生物质能与太阳能互补供能系统重点实验室,兰州 730050)

摘要:为了探究生物炭混掺量对不同配比沼液间接地下滴灌土壤水力特性的影响,采用室内土箱模拟试验,设置4个生物炭混掺水平(生物炭、土壤质量百分比分别为0、1%、2%、5%(B_0、B_1、B_2、B_5))和4个沼液配比水平(沼液、水体积比分别为0、1∶8、1∶6、1∶4(Z_0、$Z_{1:8}$、$Z_{1:6}$、$Z_{1:4}$)),探求小麦秸秆生物炭混掺对沼液间接地下滴灌土壤持水性能、土壤饱和导水率和土壤湿润体特征的影响。结果表明:土壤持水性能随生物炭混掺量和沼液配比的增大而提升;Van-Genuchten模型能够准确拟合各处理土壤水分特征曲线;生物炭混掺和沼液灌溉可以增加土壤孔隙度和毛管孔隙度;土壤饱和导水率随生物炭混掺量的增加呈先降低后升高的趋势,随沼液配比的增大而趋于减小;幂函数能够准确描述不同处理湿润锋运移距离与灌水时间的关系;生物炭混掺量为5%时,湿润锋垂直向下运移距离增大,垂直向上和水平方向运移距离减小,存在深层渗漏可能;湿润锋运移距离、湿润体体积、土壤高含水率分布区域面积均在生物炭混掺量为2%、沼液配比为1∶4时结果最优。综合考虑各项指标,处理$Z_{1:4}B_2$的生物炭混掺量和沼液配比能够使间接地下滴灌下的粉壤土获得较好的土壤水力特性。

关键词:沼液;小麦秸秆生物炭;间接地下滴灌;土壤水力特性

中图分类号:S275.6　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2022)10-0340-12　　**OSID**:

Effects of Biochar Addition on Soil Hydraulic Characteristics under Indirect Subsurface Drip Irrigation with Biogas Slurry

ZHENG Jian[1,2]　XIANG Peng[1,2]　SUN Qiang[1,2]　KANG Jian[1]　WANG Yan[1]

(1. *College of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou* 730050, *China*
2. *Key Laboratory of the System of Biomass Energy and Solar Energy Complementary Energy Supply System in Gansu, Lanzhou* 730050, *China*)

Abstract: In order to explore the influence of biochar addition on soil hydraulic characteristics under indirect subsurface drip irrigation with biogas slurry, four levels of biochar mass percentages (biochar and soil mass ratios of 0, 1%, 2%, and 5%) and four levels of biogas slurry content (the volume ratio of biogas slurry and water was 0, 1∶8, 1∶6 and 1∶4) were set in the experiment. The biochar and the biogas slurry used wheat straw and cow dung as raw materials, respectively. The soil water holding capacity, soil saturated water conductivity and soil wetting characteristics were investigated. The results showed that soil water holding capacity was increased with the increase of biochar and biogas slurry contents. The Van-Genuchten model can accurately fit the soil moisture characteristic curve of each treatment. Both biochar addition and biogas slurry irrigation alone can increase soil porosity and capillary porosity, and their coupling effects on soil porosity and capillary porosity were more obvious. The soil saturated water conductivity was decreased firstly and then increased with the increase of biochar content, and reached the minimum value when the biochar content was 2%; while it was decreased with the increase of biogas slurry content; moreover, there were an interactive effect between the influence of biochar addition and biogas slurry irrigation on soil saturated water conductivity. The power function can accurately describe the relationship between the wetting front transportation distance and irrigation time under different treatments. The difference of biogas slurry and biochar content among different treatments

收稿日期:2021-12-02　修回日期:2021-12-31

基金项目:国家自然科学基金项目(51969012)、甘肃省高等学校产业支撑引导项目(2019C-13)、甘肃省教育厅产业支撑计划项目(2021CYZC-27、2021CYZC-33)和兰州理工大学红柳一流学科项目(0807J1)

作者简介:郑健(1981—),男,教授,博士生导师,主要从事农业水土工程研究,E-mail:zhj16822@126.com

had obvious effects on the shape of soil wetting body under indirect subsurface drip irrigation, when the biochar content was 1% or 2%, the migration distance of wetting front and volume of wetting body was decreased with the biogas slurry application, the range in the wetting body with high water content (greater than soil field water capacity, 0.306 2 cm^3/cm^3) was increased; for treatment with 5% biochar content, the horizontal and vertically upward migration distance of wetting front was decreased with the application of biogas slurry, while the vertically downward migration distance was increased, resulting in an relative smaller area of wetting body with high water content although the volume of wetting body which was as big as that of treatment with 2% biochar content. Taking all indexes into comprehensively consideration, the coupling treatment of $Z_{1:4}B_2$, and the fine loam soil under indirect subsurface drip irrigation can obtain better soil hydraulic characteristics.

Key words: biogas slurry; wheat straw biochar; indirect subsurface drip irrigation; soil hydraulic characteristics

0　引言

间接地下滴灌最早源于砂管灌，不仅可以实现水肥一体化灌溉，而且能够有效地解决普通滴灌蒸发损失大的问题，在提高水分利用效率的同时还具有节约劳力以及方便使用、管理、维修的优点，特别适宜于干旱缺水地区，且在果园和设施栽培中的应用效果良好[1-2]。国内外学者通过室内试验和数值模拟研究确定了间接地下滴灌的关键技术参数和理论模型[3-4]，并在甜瓜[5]和枣树[6]等作物的试验研究中，发现该灌水技术还具有节水、抑盐和增产调质的作用[7]。但在水肥一体化条件下对间接地下滴灌水、养分分布特征的试验研究还显欠缺。

沼液是以人畜粪便及农作物秸秆等为原材料，通过厌氧发酵后的产物，是良好的绿色有机肥料[8]。但因其具有高水低肥的特性，在施用过程中水分和养分易产生淋洗流失，从而导致作物根区土壤可利用营养元素滞留量下降，造成资源浪费，甚至还会对地下水构成一定的污染威胁[9-10]。因此，如何有效减少配施沼液中水分和养分的损失，提高其在根区土壤的滞留量，已成为当前沼液农田应用亟待解决的实际问题。生物炭是由农林有机废弃物在限氧和一定温度（＜700℃）条件下热解制成，具有含碳率高、孔隙结构丰富、比表面积大、表面可吸附有机官能团多等特点[11-12]，在农业生产中作为土壤改良剂混掺于土壤之中，能够显著改良土壤物理及水力特性[13]。王竹等[14]的试验结果显示，施加生物炭在整体上可以提高土壤体积含水率，但在不同的水吸力下土壤的保水能力存在差异。IBRAHIM 等[15]施用生物炭对沙壤土水力特性影响的研究也表明，生物炭的应用会降低土壤饱和导水率和入渗速率。同时，TOMASZ 等[16]和 HANSEN 等[17]的研究还发现生物炭的应用可以增加土壤的有效水含量。现有研究充分表明了生物炭混掺入土壤后对土壤保水方面具有积极作用，但生物炭在水/沼液一体化灌溉条件下对土壤水力特性的影响，目前还未见相关研究报道。

基于此，本文将间接地下滴灌技术应用于沼液灌溉，同时融入生物炭能改良土壤物理及水力特性的作用，采用室内土箱试验，探索沼液间接地下滴灌条件下，不同生物炭混掺量和沼液配比对土壤持水特性、土壤饱和导水率、湿润锋运移、湿润体体积变化以及湿润体含水率分布规律的影响，旨在提高沼液灌溉时水分和养分在作物根区的滞留量，提高水分利用效率，为沼液灌溉中存在的实际问题提供解决方案，也为沼液间接地下滴灌的应用推广提供理论依据和技术支撑。

1　材料与方法

1.1　供试材料

试验于 2021 年 3—7 月在兰州理工大学水利水电工程研究所的实验室进行（36°06′N，103°78′E）。实验室层高 6 m，空间较大，且装有空调，在试验周期内能够保持温度为（20 ± 2）℃，故可忽略温度对土壤水分特性的影响。

试验所用土壤取自甘肃省兰州市魏岭乡狗牙村正常耕作农田，采集土壤深度为耕层 0 ~ 40 cm，采集后自然风干、混合均匀，过 2 mm 筛备用。同时，采用土壤比重计（TM - 85 型）进行土壤粒径分析，砂粒（粒径 0.02 ~ 2 mm）、粉粒（粒径 0.002 ~ 0.02 mm）、黏粒（粒径 0 ~ 0.002 mm）质量分数分别为 24.30%、55.77%、19.93%。依据国际制土壤质地分类标准，供试土壤为粉壤土。根据当地农田土壤的容重状况，设置试验土壤容重为 1.35 g/cm^3。

试验所用沼液取自兰州市花庄镇甘肃荷斯坦良种奶牛繁育中心正常发酵、产气的沼气工程，该沼气工程的发酵原料为牛粪，沼液取出后曝气并静置 60 d，待其理化性质稳定后备用。试验前将静置已久的沼液摇匀，用 32 目（4 层）纱布过滤掉沼液中较大悬浮颗粒，并按照试验设置浓度进行配比（沼液、

水体积比),基本理化性质如表 1 所示。

表 1 试验沼液基本理化性质

Tab.1 Physical and chemical properties of biogas slurry

沼液配比	黏度/(Pa·s)	干物质质量分数/%	电导率/(mS·cm^{-1})	pH 值
1∶8	9.80×10^{-4}	0.18	3.50	7.04
1∶6	1.01×10^{-3}	0.22	3.80	7.06
1∶4	1.08×10^{-3}	0.25	4.42	7.11

试验采用的生物炭为小麦秸秆生物炭,其容重为 0.19 g/cm^3,比表面积为 9 m^2/g,总孔隙度为 67.03%,通气孔隙度为 12.87%,持水孔隙度为 61.10%,pH 值为 10.24,阳离子交换量为 60.8 cmol/kg。

1.2 试验设计

试验依据预试验结果,设置 4 个生物炭混掺量(生物炭、土壤质量百分比):0(B_0)、1%(B_1)、2%(B_2)和 5%(B_5),4 个沼液配比(沼液、水体积比):0(Z_0)、1∶8($Z_{1:8}$)、1∶6($Z_{1:6}$)和 1∶4($Z_{1:4}$),将不混掺生物炭和清水入渗的处理 Z_0B_0 作为对照,共计 16 个处理,各处理进行 3 次重复,取均值作为试验结果。

1.3 测定内容及方法

1.3.1 土壤水分特征曲线

土壤水分特征曲线采用高速恒温冷冻离心机(CR21GⅡ型,日立公司)测定[18],先将土壤按试验设计分层装入环刀,并在溶液(蒸馏水、不同配比沼液)中进行 24 h 的饱和处理,水面高度低于环刀高度 1 mm,之后将环刀滞空放置一段时间,直到不再有重力水排出,此时认为土样达到饱和,并用高精度电子天平称量,然后按照土壤水分特征曲线测定规程进行测定,结束后置于 105℃恒温干燥箱内干燥至质量恒定,以计算土壤含水率。各处理均进行 4 次重复,取其均值作为试验结果。土壤水分特征曲线拟合采用 Van-Genuchten 模型[18],模型参数通过软件 RETC 拟合确定,模型为

$$\theta(h)=\begin{cases}\theta_r+\dfrac{\theta_s-\theta_r}{(1+|\alpha h|^n)^m} & (h<0)\\ \theta_s & (h\geqslant0)\end{cases} \tag{1}$$

其中

$$m=1-1/n \tag{2}$$

式中 $\theta(h)$——土壤相对饱和度,cm^3/cm^3

θ_s——土壤饱和体积含水率,cm^3/cm^3

θ_r——土壤残余体积含水率,cm^3/cm^3

α——进气值倒数,cm^{-1}

h——负压,m

n——与孔径分布相关的经验参数

m——经验形状系数

1.3.2 土壤有效水含量

土壤有效水是土壤中植物能够有效利用的水分,其含量计算公式为[19]

$$SAW=\theta_{FC}-\theta_{PWP} \tag{3}$$

式中 SAW——土壤有效水含量,cm^3/cm^3

θ_{FC}——田间持水率,取土壤水吸力为 100 cm 处的土壤体积含水率,cm^3/cm^3

θ_{PWP}——凋萎含水率,取土壤水吸力为 15 000 cm 处的土壤体积含水率,cm^3/cm^3

1.3.3 土壤孔隙

土壤中孔隙大小和分布可由土壤水分特征曲线间接反映。若将土壤中孔隙设想为各种孔径的圆形毛管,则土壤水吸力 s 和当量孔径 d 的关系可简单地表示为[20]

$$s=4\sigma/d \tag{4}$$

其中

$$d=300/s \tag{5}$$

式中 σ——水的表面张力系数,室温条件下一般为 7.5×10^{-4} N/cm

s——土壤水吸力,cm

d——当量孔径,mm

根据式(4)计算出当量孔径,就可反映不同处理土壤中孔隙大小和分布。若土壤含水率 θ_1 对应的当量孔径为 d_1,含水率 θ_2 对应的当量孔径为 d_2,则土壤中孔径在 d_2 与 d_1 之间的孔隙所占的体积与孔隙总体积之比为 $\theta_1-\theta_2$($\theta_1>\theta_2$)[20]。因此,可根据不同处理土壤孔隙大小和分布状况,分析不同处理土壤持水能力的变化。

1.3.4 土壤饱和导水率

土壤饱和导水率采用变水头渗透试验法测定[21],结果均换算为 10℃下的饱和导水率进行分析。试验装置采用 TST-55 型渗透仪(南京土壤仪器厂),如图 1 所示。

1.3.5 土壤湿润体特征

试验系统由土箱和供水装置两部分组成,如图 2 所示。土箱采用 30°扇形有机玻璃装置,取入渗所形成湿润体的 1/12 作为研究对象。土箱高 50 cm,径向长度 40 cm,材料厚度为 1 cm,供水装置采用蠕动泵,以设定恒定流量供水。图 2 中导水装置高度为 20 cm,其中透水边界高度设为 8 cm,不透水边界高度为 12 cm,直径为 7.4 cm,滴头流量设定为 1.8 L/h。试验土样按照预定容重(1.35 g/cm^3)分层(5 cm)均匀装入有机玻璃土箱内,层间打毛,装土高度为 50 cm。土样装入土箱自然沉降 24 h 后进行试验。每组试验重复 3 次,取均值作为试验结果。

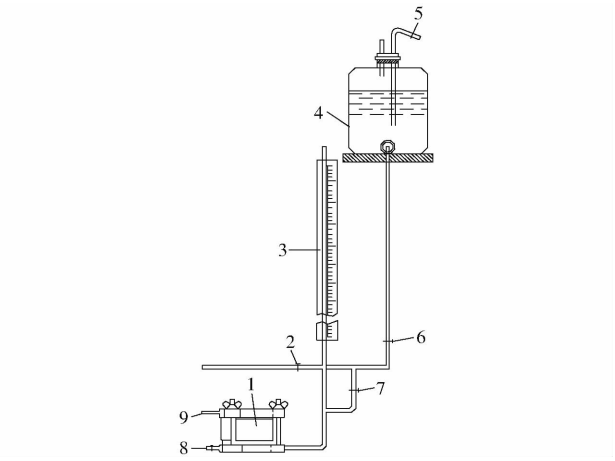

图 1　变水头渗透试验装置

Fig. 1　Diagram of variable head penetration test device

1. 渗透容器　2、6、7. 进水管夹　3. 变水头管　4. 供水瓶　5. 接水源管　8. 排气水管　9. 出水管

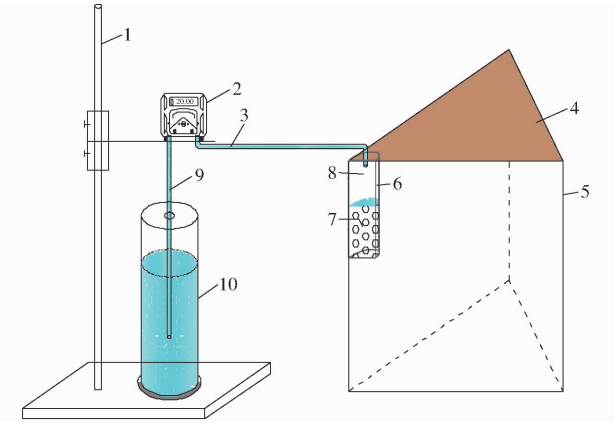

图 2　间接地下滴灌试验装置

Fig. 2　Schematic of indirect subsurface drip irrigation

1. 高度可调节支架　2. 蠕动泵　3. 出水管　4. 土壤表面　5. 土箱　6. 不透水边界　7. 透水边界　8. 导水装置　9. 进水管　10. 水桶

试验开始后，用秒表计时，按照先密后疏的原则观测土壤湿润锋运移，在土箱两侧描绘二维坐标系记录不同入渗时刻所对应的湿润锋位置。以图 3 所示坐标系，分别测量湿润体水平运移距离 R，垂直向上运移距离 X，垂直向下运移距离 H，各方向的最大湿润距离分别记为 R_{max}、X_{max} 及 H_{max}，试验以定额灌水量（1 000 mL）入渗完成为试验结束标志，结束后立刻用直径 1 cm 土钻沿水平方向不同深度进行取土，沿水平间隔距离为 5 cm，垂直间隔距离为 5 cm，并将土样放入 105℃ 恒温干燥箱内干燥至质量恒定，以计算湿润体土壤体积含水率。

1.4　数据处理

采用 Excel 2016 整理数据，水动力参数拟合采用 RETC 软件，显著性统计分析采用 SPSS 24.0 软件进行，绘图采用 Origin 2018 软件，并采用 surfer12 绘制等值线图。

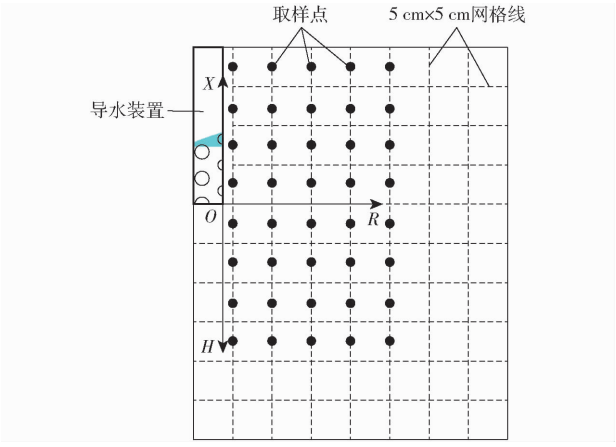

图 3　坐标系及取样点位置示意图

Fig. 3　Coordinate system and sampling point location diagram

2　结果与分析

2.1　不同处理对土壤持水特性的影响

2.1.1　土壤水分特征曲线及拟合分析

为了分析不同生物炭混掺量和沼液配比对土壤水分特征曲线的影响，以试验实测数据为基础，绘制不同处理下的土壤水分特征曲线，如图 4 所示，图中 lg$s$ 和 θ_v 分别为土壤水吸力对数、土壤体积含水率。从图 4 可以看出，不同处理土壤水分特征曲线形态类似，当土壤水吸力 s 从 0 增至 15 000 cm 时，各处理的土壤水分特征曲线在数值上产生一定差异，例如当土壤水吸力为 1 000 cm 时，处理 Z_0B_1、Z_0B_2、Z_0B_5 较处理 Z_0B_0 的土壤含水率分别增加 1.12%、2.68%、3.11%，处理 $Z_{1:8}B_0$、$Z_{1:6}B_0$、$Z_{1:4}B_0$ 的土壤含水率较对照处理 Z_0B_0 分别增加 1.82%、2.96%、3.34%，处理 $Z_{1:4}B_1$、$Z_{1:4}B_2$、$Z_{1:4}B_5$ 的土壤含水率较对照处理 Z_0B_0 分别增加 4.58%、8.92%、9.13%，即在相同土壤水吸力下，施用生物炭和沼液处理的土壤含水率均高于对照处理，且与沼液配比、生物炭混掺量均呈正比，联合施用的效果更加明显。

为了定量分析生物炭混掺量和沼液配比对土壤持水特性的影响，采用 Van－Genuchten 模型对各处理的土壤水分特征曲线进行拟合计算，结果见表 2。从表 2 可以看出，各处理拟合曲线的决定系数 R^2 均大于 0.99，即 Van－Genuchten 模型的参数拟合度符合要求，各参数均可用来解释土壤持水曲线的变化规律。混掺生物炭对间接地下滴灌入渗 θ_s、θ_r、α、n、θ_{FC}、θ_{PWP} 和 SAW 的影响均具有统计学意义。与对照 Z_0B_0 相比，处理 Z_0B_1、Z_0B_2、Z_0B_5 的 θ_s 分别增加 1.69%、3.47% 和 5.29%，θ_r 分别增加 2.35%、10.19% 和 14.31%，θ_{FC} 分别增加 2.3%、3.99% 和 6.81%，θ_{PWP} 分别增加 3.75%、10.53% 和 14.1%，

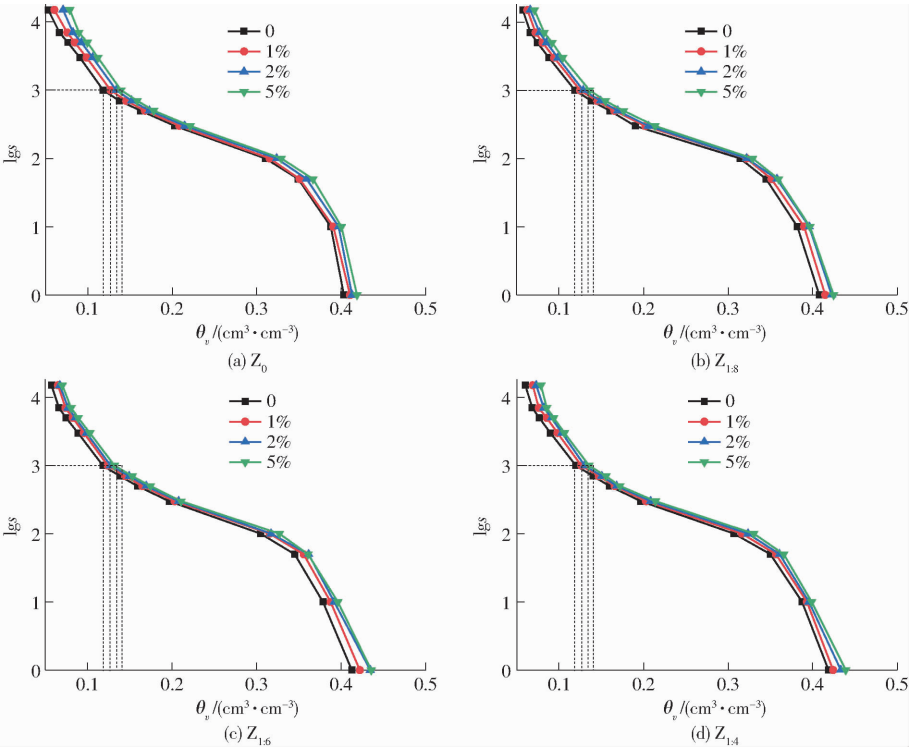

图 4 不同处理土壤水分特征曲线

Fig. 4 Soil moisture characteristic curves under different treatments

表 2 不同处理对土壤水动态参数的影响

Tab. 2 Effects of different treatments on dynamic parameters of soil water

处理	θ_s/(cm³·cm⁻³)	θ_r/(cm³·cm⁻³)	α/cm⁻¹	n	R^2	θ_{FC}/(cm³·cm⁻³)	θ_{PWP}/(cm³·cm⁻³)	SAW/(cm³·cm⁻³)
Z_0B_0	0.372 2^{k}	0.051 0^{i}	0.011 2^{a}	1.668 8^{n}	0.999 5	0.306 2^{j}	0.054 1^{i}	0.252 1^{e}
Z_0B_1	0.378 5^{j}	0.052 2^{i}	0.011 0^{a}	1.697 1^{k}	0.999 6	0.315 3^{h}	0.054 2^{i}	0.261 1^{d}
Z_0B_2	0.385 1^{i}	0.056 2^{gh}	0.011 0^{a}	1.686 0^{l}	0.999 5	0.320 5^{g}	0.058 8^{gh}	0.261 7^{d}
Z_0B_5	0.391 7^{ef}	0.058 3^{cde}	0.011 0^{a}	1.671 4^{m}	0.999 5	0.329 2^{d}	0.060 7^{def}	0.268 5^{ab}
$Z_{1:8}B_0$	0.388 6^{h}	0.054 9^{h}	0.009 7^{b}	1.722 3^{h}	0.998 5	0.311 2^{ij}	0.057 2^{h}	0.254 0^{f}
$Z_{1:8}B_1$	0.390 7^{fg}	0.056 4^{fgk}	0.009 7^{b}	1.733 3^{e}	0.998 4	0.321 8^{fg}	0.059 1^{fg}	0.262 7^{d}
$Z_{1:8}B_2$	0.395 8^{d}	0.058 1^{def}	0.009 4^{b}	1.719 3^{i}	0.999 0	0.328 1^{e}	0.060 7^{def}	0.267 4^{b}
$Z_{1:8}B_5$	0.396 6^{cd}	0.059 4^{cd}	0.009 1^{b}	1.711 0^{j}	0.998 7	0.331 9^{bc}	0.062 3^{bcd}	0.269 6^{a}
$Z_{1:6}B_0$	0.389 4^{gh}	0.055 4^{h}	0.009 5^{b}	1.746 9^{c}	0.998 9	0.312 7^{i}	0.057 2^{h}	0.255 5^{ef}
$Z_{1:6}B_1$	0.393 3^{e}	0.057 3^{efg}	0.009 2^{b}	1.748 5^{c}	0.998 8	0.322 3^{f}	0.060 2^{efg}	0.262 1^{d}
$Z_{1:6}B_2$	0.397 6^{bc}	0.059 1^{cde}	0.009 2b	1.738 0^{d}	0.999 2	0.330 9^{c}	0.062 2^{bcd}	0.268 7^{ab}
$Z_{1:6}B_5$	0.398 5^{ab}	0.061 8^{b}	0.009 0b	1.731 0^{f}	0.999 0	0.333 1^{b}	0.064 0^{ab}	0.269 1^{ab}
$Z_{1:4}B_0$	0.390 9^{fg}	0.058 0^{def}	0.009 3b	1.755 1^{b}	0.999 4	0.314 5^{h}	0.060 1^{fg}	0.254 4^{f}
$Z_{1:4}B_1$	0.393 4^{e}	0.058 7^{cde}	0.009 2b	1.756 8^{a}	0.999 3	0.327 1^{e}	0.062 0^{cde}	0.265 2^{c}
$Z_{1:4}B_2$	0.399 2^{ab}	0.060 1^{c}	0.009 0b	1.729 3^{g}	0.999 6	0.332 4^{bc}	0.063 1^{abc}	0.269 3^{a}
$Z_{1:4}B_5$	0.399 7^{a}	0.067 2^{a}	0.008 9b	1.717 8^{i}	0.999 1	0.334 9^{a}	0.064 8^{a}	0.270 1^{a}
P Z	<0.001 *	<0.001 *	<0.001 *	<0.001 *		<0.001 *	<0.001 *	<0.001 *
P B	<0.001 *	<0.001 *	0.384	<0.001 *		<0.001 *	<0.001 *	<0.001 *
P Z×B	<0.001 *	<0.001 *	0.999	<0.001 *		<0.001 *	0.040 *	<0.001 *

注:在 $P<0.05$ 水平上,使用最小显著性差异检验;同一列数据后不同字母表示 $P<0.05$ 差异显著;* 表示 5% 的显著水平。

SAW 分别增加 2.09%、2.63% 和 5.29%,即生物炭的混掺提高了土壤的持水能力,有效水含量增加。沼液间接地下滴灌各项土壤水动态参数的影响也均具有统计学意义,与对照 Z_0B_0 相比,处理 $Z_{1:8}B_0$、$Z_{1:6}B_0$、$Z_{1:4}B_0$ 的 θ_s、θ_r、θ_{FC}、θ_{PWP} 和 SAW 增幅分别为 4.41% ~ 5.02%、7.05% ~ 13.73%、2.5% ~ 4.45%、7.14% ~ 12.97%、1.52% ~ 2.67%,说明沼液灌溉也可以提升土壤的持水能力。沼液和生物炭

两因素交互作用对间接地下滴灌入渗 θ_s、θ_r、α、θ_{FC}、θ_{PWP}和 SAW 的影响也均达到统计学水平，处理 $Z_{1:4}B_1$、$Z_{1:4}B_2$、$Z_{1:4}B_5$ 较处理 Z_0B_0，θ_s 分别增加 5.7%、7.25% 和 7.25%，θ_r 分别增加 15.1%、17.84% 和 31.76%，θ_{FC} 分别增加 6.13%、7.85% 和 8.66%，θ_{PWP} 分别增加 16.54%、18.61% 和 21.8%，SAW 分别增加 4%、5.61%、6.92%。这表明，沼液灌溉和生物炭混掺耦合作用对土壤持水性能的增强明显大于单独沼液灌溉或生物炭混掺。

2.1.2　土壤总孔隙度和毛管孔隙度

取土壤饱和含水率所对应的土壤孔隙度为总孔隙度，土壤水吸力为 $1.5\times10^2\sim1.5\times10^3$ cm 所对应的土壤孔隙度为毛管孔隙度[22]，根据式(4)可计算各处理的土壤总孔隙度和毛管孔隙度，见表 3。从表 3 可以看出，处理 Z_0B_1、Z_0B_2、Z_0B_5 较处理 Z_0B_0 的土壤总孔隙度分别增加 1.81%、2.41%、3.10%，毛管孔隙度分别提高 1.08%、2.30%、2.87%，表明生物炭轻质而疏松多孔的结构特点与土壤混掺后增加了土壤总孔隙度和毛管孔隙度，从而提升试验土壤的持水能力；处理 $Z_{1:8}B_0$、$Z_{1:6}B_0$、$Z_{1:4}B_0$ 的总孔隙度较对照处理 Z_0B_0 分别增加 1.16%、2.36%、3.87%，而毛管孔隙度分别增加 0.73%、1.18%、3.02%，这表明施用沼液亦可通过改善土壤孔隙结构来提高土壤的持水能力；处理 $Z_{1:4}B_1$、$Z_{1:4}B_2$、$Z_{1:4}B_5$ 的总孔隙度和毛管孔隙度较对照处理 Z_0B_0 分别增加 1.31%、4.42%、4.87% 和 3.27%、4.52%、4.89%，这表明联合施用生物炭和沼液可改善土壤的土壤孔隙结构，从而提高土壤持水能力，且比单施效果更加明显。

表 3　不同处理土壤孔隙度

Tab.3　Soil porosity for different treatments　%

处理	总孔隙度	毛管孔隙度
Z_0B_0	40.31	28.77
Z_0B_1	41.04	29.06
Z_0B_2	41.28	29.43
Z_0B_5	41.56	29.57
$Z_{1:8}B_0$	40.78	28.98
$Z_{1:8}B_1$	41.48	29.12
$Z_{1:8}B_2$	42.24	29.57
$Z_{1:8}B_5$	42.32	29.81
$Z_{1:6}B_0$	41.26	29.11
$Z_{1:6}B_1$	42.82	29.52
$Z_{1:6}B_2$	43.40	29.98
$Z_{1:6}B_5$	43.56	30.05
$Z_{1:4}B_0$	41.87	29.69
$Z_{1:4}B_1$	42.42	30.64
$Z_{1:4}B_2$	43.72	30.98
$Z_{1:4}B_5$	43.91	31.09

2.2　土壤饱和导水率

由图 5(图中小写字母表示相同沼液配比水平下不同生物炭混掺量水平的土壤饱和导水率之间差异显著($P<0.05$)；大写字母表示相同生物炭混掺量水平下不同沼液配比的土壤饱和导水率之间差异显著性($P<0.05$))可知，混掺生物炭显著减小土壤的饱和导水率($P<0.05$)，处理 Z_0B_1、Z_0B_2、Z_0B_5 较对照处理 Z_0B_0 分别减小 57.5%、76.25%、70%，即当生物炭混掺量为 1%、2% 时，土壤饱和导水率与生物炭混掺量呈负相关；而当生物炭混掺量为 5% 时，土壤饱和导水率高于 2% 的生物炭混掺量处理。施用沼液亦可显著减小土壤饱和导水率，与对照 Z_0B_0 相比，处理 $Z_{1:8}B_0$、$Z_{1:6}B_0$、$Z_{1:4}B_0$ 的土壤饱和导水率分别下降 35%、52.27%、63.64%，即土壤饱和导水率和沼液配比呈负相关。沼液和生物炭联合施用对土壤饱和导水率的影响达到显著性水平，相比对照 Z_0B_0，其中处理 $Z_{1:4}B_1$、$Z_{1:4}B_2$、$Z_{1:4}B_5$ 降幅达 63.64%～91.36%，说明联合施用沼液和生物炭降低了土壤饱和导水率，二者对土壤饱和导水率的影响存在交互作用，且土壤饱和导水率最小的是处理 $Z_{1:4}B_2$，即沼液配比 1∶4 和生物炭混掺 2% 处理。

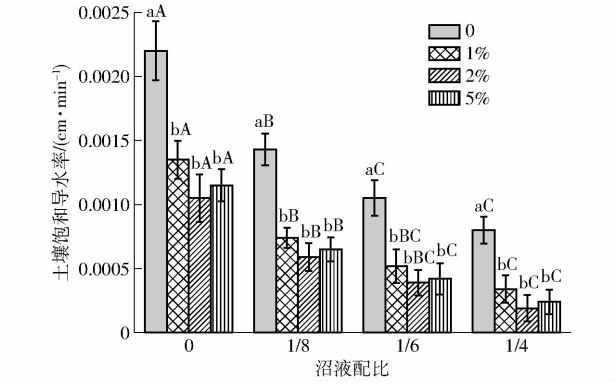

图 5　不同处理土壤饱和导水率

Fig. 5　Saturated water conductivity of soil under different treatments

2.3　不同处理对湿润体特征的影响

2.3.1　湿润锋运移距离

图 6 为入渗时间 t 在 10、140、400 min 时不同处理的实测湿润锋运移距离。从图 6 可以看出，土壤湿润锋水平运移距离 R、垂直向上运移距离 X 和垂直向下运移距离 H 均随灌水时间 t 的推移呈增加趋势。与水平 B_0 相比较，B_1、B_2 和 B_5 的 X、R 从大到小依次为 B_0、B_1、B_2、B_5，即混掺生物炭降低了水分在水平方向和垂直向上方向的运移距离，而 H 先减小后增大，顺序为 B_5、B_0、B_1、B_2。即同一沼液配比水平下，混掺 1% 或 2% 的生物炭，能够有效减小土壤湿润锋运移距离，促使水分更好地集中在植物根系附近，便于植株吸收利用。

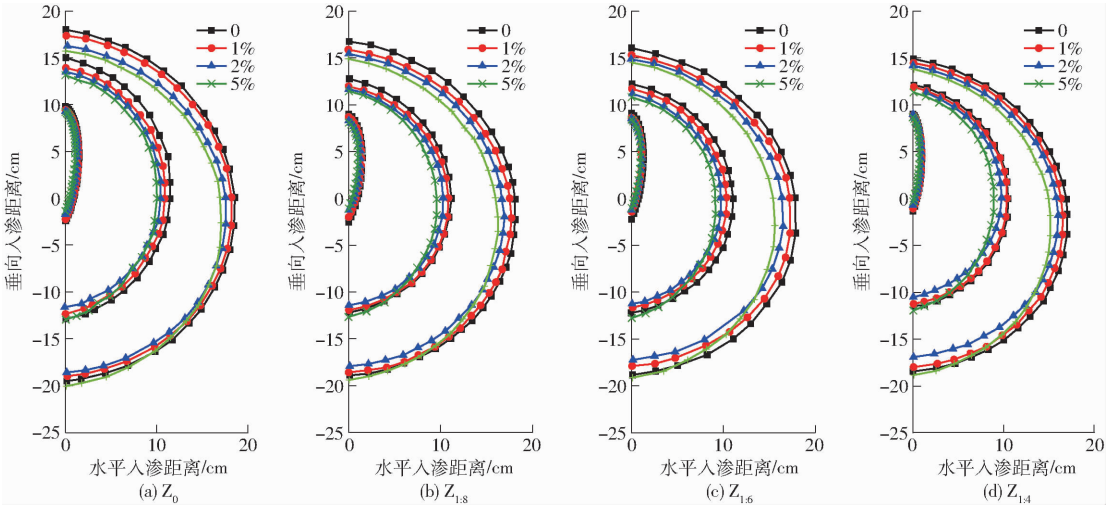

图 6 不同处理湿润锋运移距离

Fig. 6 Wet front movement distances of different treatments

与水平 Z_0 相比较，$Z_{1:8}$、$Z_{1:6}$和 $Z_{1:4}$的湿润锋运移距离 X、R、H 由大到小均依次为 Z_0、$Z_{1:8}$、$Z_{1:6}$、$Z_{1:4}$，处理 $Z_{1:8}B_0$、$Z_{1:6}B_0$、$Z_{1:4}B_0$的 X_{max}较处理 Z_0B_0 分别减小 6.67%、11.11%、16.67%；R_{max}分别减小 1.28%、2.13%、6.38%；H_{max}分别减小 3.09%、4.64%、5.67%。即随着沼液配比的升高，水分在水平方向和垂直向上、向下方向的运移距离均减小。

为进一步揭示不同处理湿润锋运移距离与灌水时间的关系，建立二者之间的幂函数关系

$$\begin{cases} X = At^B \\ H = Ct^D \\ R = Et^F \end{cases} \tag{6}$$

式中 A、B——垂直向上方向扩散系数、扩散指数

C、D——垂直向下方向扩散系数、扩散指数

E、F——水平方向扩散系数、扩散指数

具体拟合结果如表 4 所示，各处理拟合方程的决定系数 R^2均在 0.93 以上，达极显著水平，说明幂函数能够准确描述生物炭混掺条件下沼液间接地下滴灌湿润锋运移距离与时间的关系。

表 4 不同处理下湿润锋运移距离与时间的拟合参数

Tab. 4 Fitting parameters of movement distance and time of wet front under different treatments

处理	X			H			R		
	A	B	R^2	C	D	R^2	E	F	R^2
Z_0B_0	6.321	0.174	0.996 7	1.860	0.391	0.998 5	2.921	0.349	0.999 5
Z_0B_1	6.118	0.171	0.989 2	1.749	0.397	0.998 4	2.680	0.361	0.999 4
Z_0B_2	6.618	0.148	0.990 9	1.582	0.408	0.997 6	2.393	0.376	0.999 0
Z_0B_5	6.461	0.146	0.991 9	2.003	0.381	0.998 3	2.266	0.381	0.999 3
$Z_{1:8}B_0$	5.187	0.188	0.954 9	1.796	0.391	0.998 3	2.779	0.354	0.995 9
$Z_{1:8}B_1$	5.150	0.180	0.953 7	1.599	0.408	0.999 5	2.718	0.355	0.998 8
$Z_{1:8}B_2$	4.966	0.179	0.963 6	1.457	0.417	0.996 8	2.618	0.355	0.999 3
$Z_{1:8}B_5$	4.933	0.177	0.967 6	1.921	0.384	0.998 7	2.399	0.364	0.997 3
$Z_{1:6}B_0$	5.941	0.154	0.946 4	1.900	0.378	0.999 0	2.201	0.394	0.996 2
$Z_{1:6}B_1$	5.530	0.160	0.957 4	1.676	0.392	0.999 2	2.418	0.373	0.999 8
$Z_{1:6}B_2$	5.407	0.157	0.931 3	1.535	0.402	0.998 1	2.477	0.361	0.997 8
$Z_{1:6}B_5$	5.420	0.152	0.925 3	1.946	0.381	0.995 6	2.400	0.359	0.999 6
$Z_{1:4}B_0$	6.305	0.138	0.974 8	1.196	0.456	0.997 1	2.631	0.356	0.998 9
$Z_{1:4}B_1$	6.236	0.136	0.972 5	1.081	0.469	0.995 8	2.640	0.353	0.998 6
$Z_{1:4}B_2$	6.457	0.125	0.965 0	1.056	0.462	0.994 9	2.361	0.368	0.997 3
$Z_{1:4}B_5$	6.194	0.128	0.972 3	1.364	0.437	0.995 2	2.179	0.372	0.999 0

2.3.2 湿润体形状特征

从图 6 可以看出各处理湿润体形状近似为椭球体。为了分析不同处理入渗过程中湿润锋在垂向和水平方向运移过程及湿润体形状变化，本文采用方程 $\beta = (a-b)/a$ 计算椭球体扁率[23]，其中 a 为垂向湿润距离，b 为水平湿润距离，计算结果如图 7 所示。经分析可知，在入渗过程中，各处理湿润体扁率大于零且随时间延长逐渐减小，说明入渗初始阶段，湿润锋在垂向的湿润距离远大于在横向的湿润距离，随着时间的延长，二者之间的差距逐渐减小，湿

润体形状为长轴在垂向的扁平程度逐渐减小的椭球体。同时，在相同沼液配比条件下，生物炭混掺量为1%、2%时，湿润体扁率小于对照处理，而生物炭混掺量为5%时，湿润体扁率大于对照处理。

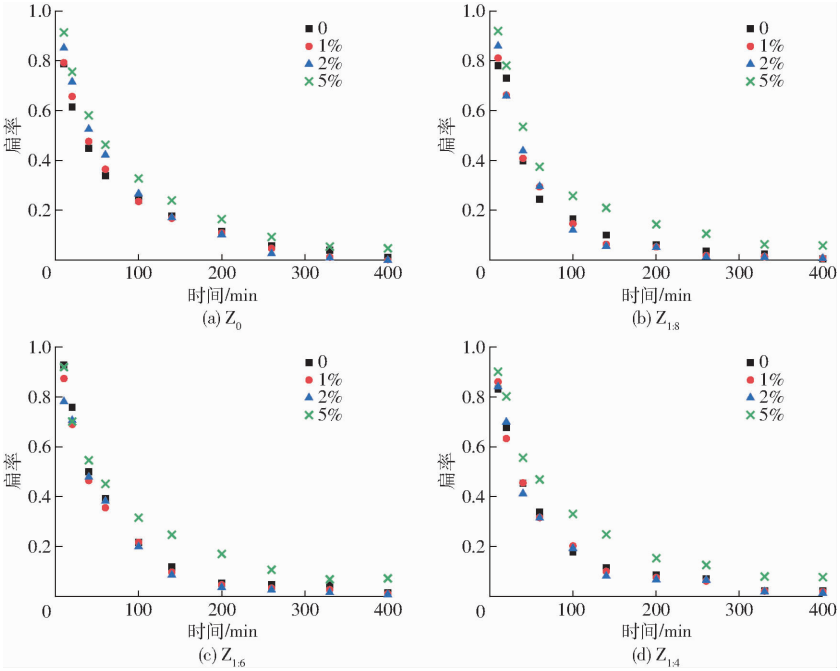

图 7　不同处理湿润体扁率

Fig. 7　Different treatments wetting zone flattening rates

2.3.3　湿润体体积

由上述分析可知，间接地下滴灌入渗过程中，土壤湿润体形状呈椭球体，试验各处理湿润锋运移距离与时间的关系也可用幂函数进行描述（表 4），则湿润体体积 V 计算公式为

$$V=\frac{4}{3}\pi R^2X-2\pi rH=\frac{4}{3}\pi(Et^F)^2At^B-2\pi rCt^D \tag{7}$$

式中　r——导水装置半径，为 3.7 cm

将表 4 中的参数代入式（7）计算各处理湿润体体积，结果如图 8 所示，可以看出，相同沼液配比和入渗时间下，湿润体体积随生物炭混掺量的增大而减小，但生物炭混掺量为 2% 和 5% 时，湿润体体积差异较小；相同的生物炭混掺量和入渗时间下，湿润体体积随着沼液配比的增大而减小，其中处理 Z_0B_5 的湿润体体积比 Z_0B_0 减小了 9.54%，处理 $Z_{1:4}B_0$ 减

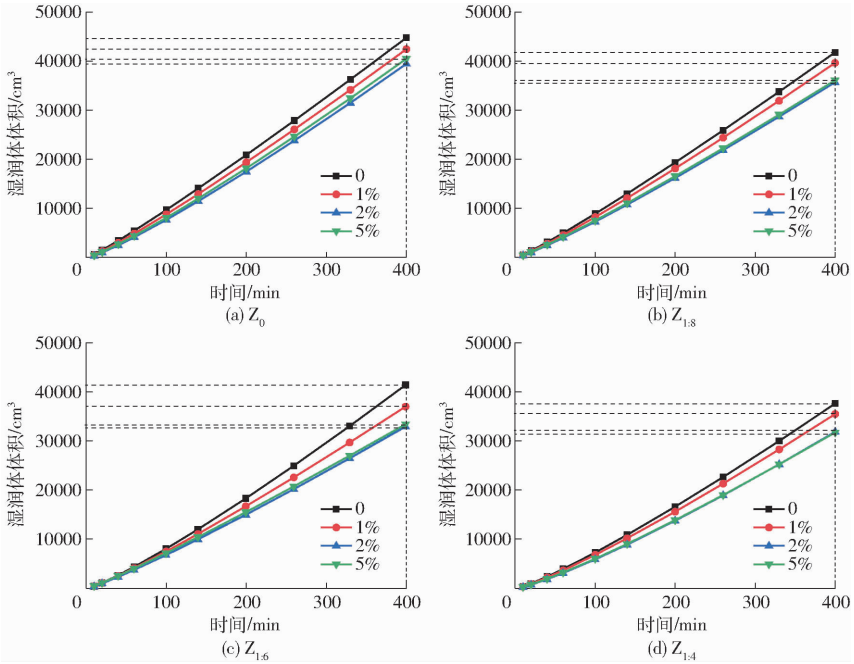

图 8　不同处理湿润体体积变化

Fig. 8　Volume changes of wetted zone under different treatments

小了 15.82%,处理 $Z_{1:4}B_5$ 减小了 29.02%,这表明:随着生物炭混掺量和沼液配比的增大,湿润体体积呈较小趋势,二者存在交互作用。

2.3.4 湿润体含水率分布

图 9 为不同生物炭混掺量和沼液配比下间接地下滴灌湿润体水分分布情况。由图 9 可见,在相同灌水定额下,不同处理的土壤含水率等值线形状差异不大,均为近似的旋转"椭球体",线源附近土壤含水率较高,由内向外土壤含水率逐渐降低,等值线逐渐密集。处理 Z_0B_0、Z_0B_1、Z_0B_2、Z_0B_5 下,土壤高含水率(大于土壤田间持水率,0.306 2 cm^3/cm^3)分布区域面积为 12.30、64.72、100.41、48.9 cm^2,即随着生物炭混掺量的增大,土壤高含水率分布区域面积不断增大,在生物炭混掺量为 2% 时达到最大值,混掺量为 5% 出现明显减小;处理 Z_0B_0、$Z_{1:8}B_0$、$Z_{1:6}B_0$、$Z_{1:4}B_0$ 下,土壤高含水率分布区域面积分别为 12.30、57.87、68.7、93.27 cm^2,表明土壤高含水率区域面积与沼液配比呈正比,处理 $Z_{1:4}B_2$ 土壤高含水率分布区域面积获得最大值(125.3 cm^2),较对照处理 Z_0B_0 增大了 10.2 倍,即生物炭和沼液配施可增大土壤高含水率区域面积,二者耦合作用明显。

3 讨论

3.1 土壤持水性能

土壤水分是决定作物生长的关键生态因子,不仅影响着土壤的理化性质及肥力特性,而且直接影响作物的生长和发育。土壤持水性能制约着土壤对水的吸持和贮存,是土壤水分管理必不可少的研究对象[24],探究如何提高土壤持水性能,既可改善土壤抗旱性,亦促进农业增产增收。生物炭具有表面积大、孔隙率高、吸附性强的特点,QIAN 等[25]施用生物炭对华南红壤保水特性影响的试验,以及 BARNA 等[26]混掺生物炭对粉壤土物理特性影响的研究结果均表明,生物炭添加可以改善土壤物理结构并提高土壤持水性能。沼液施用对土壤持水能力的提高也有积极作用,杨乐等[27]、侯冬梅等[28]和 YAGUE 等[29]的研究结果表明,施用沼液能够增大土壤总孔隙度和土壤毛管孔隙度,进而提高土壤的持水能力。ABDO 等[30]在联合应用生物炭和沼液对土壤水物理性质变化的研究中发现,生物炭和沼液联合应用可提高沙土的持水能力,且效果优于单施生物炭或沼液。本研究将生物炭和沼液联合施用,同样发现生物炭混掺和沼液的施用均可以改善土壤结构,提高了土壤孔隙度和毛管孔隙度,增加了土壤水分常数(土壤饱和含水率、残余含水率、田间持水率和凋萎含水率),从而提升了土壤的持水能力,进一步论证了生物炭和沼液对土壤持水性能的提高具有耦合效应。其主要原因是生物炭和沼液的微粒填充了土壤的大孔隙(排水孔),且沼液与土壤颗粒可形成稳定的土壤团聚体[31],其颗粒密度低,可通过稀释效应降低土壤容重,从而改变土壤孔隙的含量和分布,改善土壤的持水性能。

3.2 土壤饱和导水率

土壤饱和导水率是指土壤全部空隙都充满水情况下,在单位水势梯度作用下,通过垂直于水流方向的单位面积土壤的水流通量或渗流速度,是土壤水分和溶质运移的重要水力参数[32]。HERATH 等[33]研究表明生物炭的添加提高了粉壤土饱和水力传导度,而本文的试验结果表明,低混掺生物炭量(1%、2%)可降低土壤饱和导水率,而高生物炭混掺量(5%)处理土壤饱和导水率高于低生物炭混掺量处理。存在差异的原因可能是土壤中混掺的生物炭颗粒粒径不同所致,HERATH 等[33]试验所用生物炭颗粒,粒径大于 1 mm 的颗粒占比 80%,而本试验所用生物炭粒径小于 1 mm。这与逄雅萍等[34]研究得出生物炭阻滞土壤水分运移能力,且生物炭颗粒越细越容易导致土壤水分运移能力降低的结论一致。同时,本研究中土壤饱和导水率与沼液配比呈负相关,这与郑健等[35]沼液施用对设施土壤饱和导水率影响的研究结果相同。主要是由于试验所用生物炭粒径较小,当生物炭混掺量较低(1%、2%)时,生物炭的微小颗粒在入渗过程中填充了土体颗粒间的大孔隙,阻挡了土体的渗流通道,从而减少土壤水分入渗;当生物炭混掺量较高(5%)时,生物炭颗粒可以形成新的、清晰的排水通道,从而促进了土壤水分的渗透。但随沼液配比增大,沼液电导率、沼液黏度、沼液干物质质量分数及沼液 pH 值均逐渐增大,而土壤饱和导水率与沼液配比、沼液电导率、沼液黏度、沼液干物质质量分数之间均呈负相关关系,与沼液 pH 值呈抛物线关系[36],且沼液溶液中微小的悬浮颗粒随着沼液配比的增加而增多,灌溉过程中沼液中含有的有机悬浮颗粒在施用过程中容易在土壤入渗面形成致密层,影响沼液在土壤中的运移[37]。因此,土壤饱和导水率随着沼液配比的增大而不断减小。

3.3 间接地下滴灌湿润体特征

间接地下滴灌湿润体形状为长轴在垂向的扁平程度逐渐减小的椭球体,这与赵伟霞等[23]间接地下滴灌湿润体形状表现为扁率不断减小的椭球体的研究结论相一致。滴灌中湿润锋水平运移距离、垂直

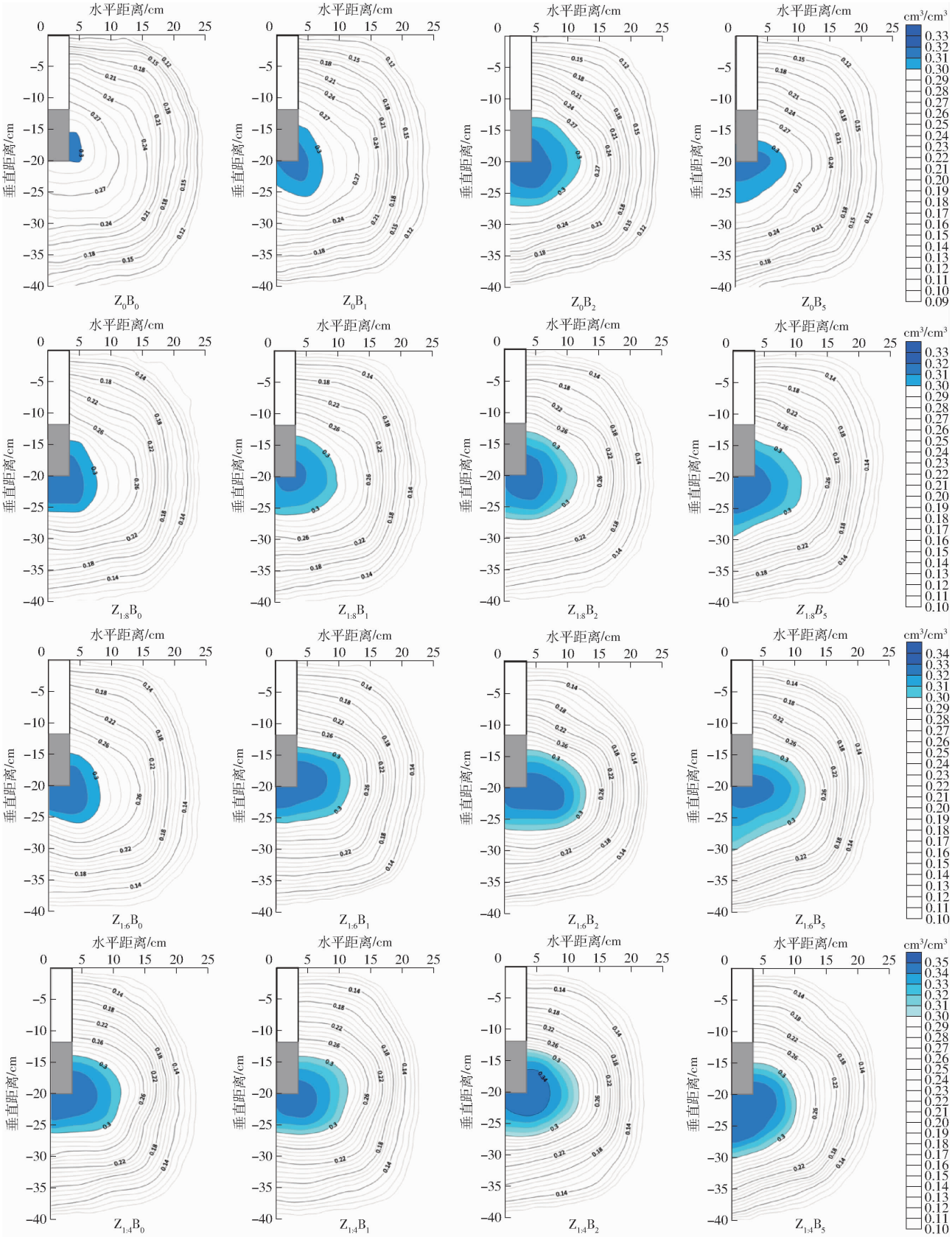

图 9　不同处理湿润体体积含水率

Fig. 9　Volumetric water content in wetted zone under different treatments

向上运移距离和垂直向下运移距离随时间的变化规律能够反映土壤湿润体的变化规律[3]。本研究中，相同沼液配比下，随生物炭混掺量的增大，湿润锋垂直向上运移距离 X 和水平运移距离 R 逐渐减小，向下运移距离 H 先减小后增大，这与许健等[38]生物炭添加可以促进微润灌土壤水分的水平和向下运移，抑制微润灌土壤水分的向上运移的研究结果相近。而相同生物炭混掺量下，随沼液配比的增大，湿润锋

运移距离 X、R、H 均减小,这与沼液穴灌入渗中,沼液配比越大,相同时间内土壤湿润锋运移距离越小的研究结论相同[39]。说明沼液和低混掺量生物炭(1%、2%)耦合作用可以减小湿润体体积,增大土壤高含水率(大于 0.306 2 cm^3/cm^3)分布区域面积,而沼液和高混掺量生物炭(5%)耦合作用使得土壤湿润体体积与混掺 2% 生物炭处理相近,并明显减小土壤高含水率分布区域面积,即处理 $Z_{1:4}B_2$ 可以更好地使水分聚集在植物根系附近,满足作物需水要求,进而提高作物的水分利用效率。

4 结论

(1)生物炭混掺和沼液灌溉均可以提高土体对水分的吸持能力,且两者耦合作用效果更加明显;随生物炭混掺量的增加和沼液配比的提高,土壤总孔隙度和毛管孔隙度逐渐增加;Van - Genuchten 模型能够准确描述生物炭配施沼液条件下的土壤水分特征曲线。

(2)当沼液配比一定,生物炭混掺量分别为 0、1%、2% 时,土壤饱和导水率与生物炭混掺量呈负相关,而当生物炭混掺量为 5% 时,土壤饱和导水率明显增大;相同生物炭混掺量下,土壤饱和导水率随沼液配比的增大而降低。

(3)与沼液配合施用,生物炭混掺量为 1%、2% 时,可以减小湿润锋运移距离,但生物炭混掺量为 5% 时,湿润锋垂直向下运移距离增大,垂直向上和水平方向运移距离减小,存在深层渗漏可能;土壤湿润体体积与沼液配比和生物炭混掺量成反比;土壤高含水率(大于 0.306 2 cm^3/cm^3)分布区域面积与沼液配比和生物炭混掺量(1%、2%)成正比,和高生物炭混掺量(5%)成反比;幂函数能够准确描述不同处理湿润锋运移距离与灌水时间的关系。

(4)综合考虑各项指标,处理 $Z_{1:4}B_2$ 的生物炭混掺量(2%)和沼液配比(1∶4)能够使间接地下滴灌下的粉壤土获得较好的土壤水力特性。

参 考 文 献

[1] MESHKAT M. Evaporation reduction potential in an undisturbed soil irrigated with surface drip and sand tube irrigation[J]. Transactions of the ASAE, 2000, 43(1): 79 - 86.

[2] 鲁东大学. 一种间接地下滴灌系统: 200910019536.7[P]. 2010 - 03 - 17.

[3] 赵伟霞, 张振华, 蔡焕杰, 等. 间接地下滴灌导水装置规格参数模型[J]. 水利学报, 2009, 40(3): 355 - 363.
ZHAO Weixia, ZHANG Zhenhua, CAI Huanjie, et al. Parameter model of water-conducting device specification for indirect subsurface drip irrigation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(3): 355 - 363. (in Chinese)

[4] BEN-GAL A, LAZOROVITCH N, SHANI U. Subsurface drip irrigation in gravel-filled cavities[J]. Vadose Journal, 2004, 3(4): 1407 - 1413.

[5] 谢恒星, 蔡焕杰, 张振华. 间接地下滴灌对温室甜瓜植株性状、品质和产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2010, 29(3): 50 - 52.
XIE Hengxing, CAI Huanjie, ZHANG Zhenhua. Effects of indirect subsurface irrigation on plant physiological characteristics, quality and yield of greenhouse muskmelon[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2010, 29(3): 50 - 52. (in Chinese)

[6] 孙三民, 安巧霞, 杨培岭, 等. 间接地下滴灌灌溉深度对枣树根系和水分的影响[J]. 农业机械学报, 2016, 47(8): 81 - 90.
SUN Sanmin, AN Qiaoxia, YANG Peiling, et al. Effect of irrigation depth on root distribution and water use efficiency of jujube under indirect subsurface drip irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(8): 81 - 90. (in Chinese)

[7] 孙三民, 安巧霞, 蔡焕杰, 等. 枣树间接地下滴灌根区土壤盐分运移规律研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46(1): 160 - 169.
SUN Sanmin, AN Qiaoxia, CAI Huanjie, et al. Research on salt movement law in jujube root zone under indirect subsurface drip irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(1): 160 - 169. (in Chinese)

[8] 陆国弟, 杨扶德, 陈红刚, 等. 沼液应用的研究进展[J]. 中国土壤与肥料, 2021(1): 339 - 345.
LU Guodi, YANG Fude, CHEN Honggang, et al. Research progress on application of biogas slurry[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2021(1): 339 - 345. (in Chinese)

[9] 吴树彪, 崔畅, 张笑千, 等. 农田施用沼液增产提质效应及水土环境影响[J]. 农业机械学报, 2013, 44(8): 118 - 125, 179.
WU Shubiao, CUI Chang, ZHANG Xiaoqian, et al. Effect of biogas slurry on yield increase, quality improvement, water and soil environment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(8): 118 - 125, 179. (in Chinese)

[10] MDLAMBUZI T, MUCHAONYERWA P, TSUBO M, et al. Nitrogen fertiliser value of biogas slurry and cattle manure for maize (*Zea mays* L.) production[J]. Heliyon, 2021, 7(5): e07077.

[11] 刘慧, 苏航, 温小艳, 等. 黑土区坡耕地生物炭应用模式综合效益研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(7): 325 - 336.
LIU Hui, SU Hang, WEN Xiaoyan, et al. Comprehensive benefit of biochar application modes on slope farmland in black soil region[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(7): 325 - 336. (in Chinese)

[12] WARNOCK D D, LEHMANN J, KUYPER T W, et al. Mycorrhizal responses to biochar in soil-concepts and mechanisms[J]. Plant and Soil, 2007, 300(1-2): 9-20.

[13] 魏永霞, 朱烜豫, 刘慧. 连年施加生物炭对黑土区土壤改良与玉米产量的影响[J]. 农业机械学报, 2022, 53(1): 291-301.
WEI Yongxia, ZHU Tianyu, LIU Hui. Effects of successive application of biochar on soil improvement and maize yield of black soil region[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(1): 291-301. (in Chinese)

[14] 王竹, 叶晓思, 孙爱华, 等. 生物炭对土壤水分特征曲线影响的试验研究[J]. 水利科学与寒区工程, 2018, 1(12): 47-53.
WANG Zhu, YE Xiaosi, SUN Aihua, et al. Experimental study on the influence of biochar on soil moisture characteristic curve[J]. Hydro Science and Cold Zone Engineering, 2018, 1(12): 47-53. (in Chinese)

[15] IBRAHIM H M, Al-WABEL M I, USMAN A, et al. Effect of conocarpus biochar application on the hydraulic properties of a sandy loam soil[J]. Soil Science, 2013, 178(4): 165-173.

[16] TOMASZ G, JOANNA P, TOMASZ Z, et al. Effect of biochar application on soil hydrological properties and physical quality of sandy soil[J]. Geoderma, 2016, 281: 11-20.

[17] HANSEN V, HAUGGAARD-NIELSEN H, PETERSEN C T, et al. Effects of gasification biochar on plant-available water capacity and plant growth in two contrasting soil types[J]. Soil & Tillage Research, 2016, 161: 1-9.

[18] 邢旭光, 赵文刚, 马孝义, 等. 土壤水分特征曲线测定过程中土壤收缩特性研究[J]. 水利学报, 2015, 46(10): 1181-1188.
XING Xuguang, ZHAO Wen'gang, MA Xiaoyi, et al. Study on soil shrinkage characteristics during soil water characteristic curve measurement[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(10): 1181-1188. (in Chinese)

[19] HARDIE M, CLOTHIER B, BOUND S, et al. Does biochar influence soil physical properties and soil water availability[J]. Plant and Soil, 2014, 376(1-2): 347-361.

[20] 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: 18-24.

[21] 李阜棣. 农业微生物学实验技术[M]. 北京: 中国农业出版社, 1996: 69-91.

[22] 黄巧云. 土壤学[M]. 2 版. 北京: 中国农业出版社, 2016: 73.

[23] 赵伟霞, 张振华, 蔡焕杰, 等. 间接地下滴灌土壤湿润体特征参数[J]. 农业工程学报, 2010, 26(4): 87-92.
ZHAO Weixia, ZHANG Zhenhua, CAI Huanjie, et al. Characteristic parameters of soil wetted volume under indirect subsurface drip irrigation[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(4): 87-92. (in Chinese)

[24] 李洪兵, 赵西宁, 王娟, 等. 生草和树枝覆盖对果园土壤持水性能的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(1): 136-141, 181.
LI Hongbing, ZHAO Xining, WANG Juan, et al. Effects of ground covers and mulches on soil water-holding capacity in jujube orchards[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2015, 33(1): 136-141, 181. (in Chinese)

[25] QIAN Z, TANG L, ZHUANG S, et al. Effects of biochar amendments on soil water retention characteristics of red soil at South China[J]. Biochar, 2020, 2(4): 479-488.

[26] BARNA G, MAKO A, TAKACS T, et al. Biochar alters soil physical characteristics, arbuscular mycorrhizal fungi colonization, and glomalin production[J]. Agronomy, 2020, 10(12): 1933.

[27] 杨乐, 张凤华, 庞玮, 等. 沼液灌溉对绿洲农田土壤养分的影响[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2011, 29(5): 542-545.
YANG Le, ZHANG Fenghua, PANG Wei, et al. Effect of biogas fluid on soil nutrient in oasis farmland[J]. Journal of Shihezi University(Natural Science), 2011, 29(5): 542-545. (in Chinese)

[28] 侯东梅, 王新平, 杨萍, 等. 沼液改良煤矸石地对樱桃栽培地土壤性状的影响[J]. 安徽农业科学, 2017, 45(13): 124-126.
HOU Dongmei, WANG Xinping, YANG Ping, et al. Effect of biogas slurry modified coal gangue on soil properties of cherry cultivation land[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2017, 45(13): 124-126. (in Chinese)

[29] YAGUE M R, DOMINGO-OLIVE F, BOSCH-SERRA A D, et al. Dairy cattle manure effects on soil quality: porosity, earthworms, aggregates and soil organic carbon fractions[J]. Land Degradation & Development, 2016, 27(7): 1753-1762.

[30] ABDO A I. Changes in sandy soil hydro-physical properties as function of biochar and biogas slurry amendments[J]. Soil Use Manage, 2021, 37(4): 762-771.

[31] SUN Y, DING N, XING Y S. Key techniques and parameters for briquetting corn stover sprayed with biogas slurry in a cold region in China[J]. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 2016, 38(9): 1219-1235.

[32] SHI Y, ZHAO X, GAO X, et al. The effects of long-term fertiliser applications on soil organic carbon and hydraulic properties of a loess soil in China[J]. Land Degradation & Development, 2016, 27(1): 60-67.

[33] HERATH H, CAMPS-ARBESTAIN M, HEDLEY M. Effect of biochar on soil physical properties in two contrasting soils: an alfisol and an andisol[J]. Geoderma, 2013, 11(209-210): 188-197.

[34] 逄雅萍, 黄爽, 杨金忠, 等. 生物碳促进水稻土镉吸附并阻滞水分运移[J]. 农业工程学报, 2013, 29(11): 107-114.
PANG Yaping, HUANG Shuang, YANG Jinzhong, et al. Promotion of biochar on adsorption of cadmium and retardation on water transport in paddy soil[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(11): 107-114. (in Chinese)

(下转第 404 页)