

文章编号: 1007-4929(2019)04-0046-06

# 沼液施用对设施土壤饱和导水率的影响

郑 健<sup>1 2 3</sup> 殷李高<sup>1 3</sup> 冯正江<sup>1 3</sup> 李欣怡<sup>1 3</sup> 马 彪<sup>1 3</sup>

(1. 兰州理工大学西部能源与环境研究中心, 甘肃 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, 甘肃 兰州 730050; 3. 兰州理工大学能源与动力工程学院, 甘肃 兰州 730050)

**摘 要:** 为探求沼液灌溉对土壤饱和导水率的影响。系统研究了不同沼液配比及灌溉量对番茄根区不同深度土壤的 pH 值、容重、总孔隙度、颗粒机械组成、含水率和有机质的变化规律, 进而分析对土壤饱和导水率的影响。灌施沼液能一定程度降低土壤 pH 值, 降幅为 1.25%~3.75%; 施用沼液可以降低土壤容重, 降低幅度在 2.13%~8.97% 之间; 灌施沼液可以降低土壤砂粒含量, 增加土壤粉粒及黏粒含量; 随着沼液灌溉配比增大以及沼液灌溉量的增加, 不同土层深度的总孔隙度均呈现增加的趋势; 土壤含水率与沼液配比无关与沼液灌溉量呈正相关, 土壤含水率随土层深度呈抛物线变化; 垂直剖面上, 沼液灌溉处理土壤剖面的饱和导水率都随土壤深度的增加而下降; 有机质对土壤饱和导水率的影响阈值为 18.51 g/kg。多元逐步回归分析表明土壤容重、黏粒含量以及土壤有机质含量是影响土壤饱和导水率的主要因子, 建议沼液合理的配比及灌溉量应控制为 T2 处理, 但是其长期施用效果还有待于进一步验证。

**关键词:** 土壤饱和导水率; 沼液; 土壤 pH 值; 土壤因子指标; 土壤有机质

中图分类号: S152.7; S274.3 文献标识码: A

## Analysis of Influence of Saturated Hydraulic Conductivity of Tomato Root Zone Soil with Biogas Slurry Application

ZHENG Jian<sup>1 2 3</sup>, Yin Li-gao<sup>1 3</sup>, FENG Zheng-jiang<sup>1 3</sup>, LI Xin-yi<sup>1 3</sup>, MA Biao<sup>1 3</sup>

(1. Western Energy and Environment Research Center, 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;

3. School of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, 730050, China)

**Abstract:** To explore the effect of biogas slurry irrigation on the hydraulic conductivity of saturated soil hydraulic conductivity, the pH, bulk density, total porosity, mechanical composition, moisture content, and organic matter of soils in different depths of tomato root zone were systematically studied. The effects of different ratio of biogas slurry and irrigation volume on soil saturated hydraulic conductivity were analyzed. The results show that the application of biogas slurry can reduce soil pH to a certain extent, the decrease range is 1.25% to 3.75%; the application of biogas slurry can reduce the soil bulk density, and the decrease range is between 2.13% and 8.97%. And the application of biogas slurry can reduce soil sand content and increase the content of soil particles and clay. With the increase of biogas slurry irrigation ratio and the increase of biogas slurry irrigation volume, the total porosity of different soil depths shows an increasing trend. The relationship between soil water content and biogas slurry ratio is positively correlated with the amount of biogas slurry irrigation, the soil moisture content varies parabolically with the soil depth; in the vertical section, the saturated hydraulic conductivity of soil profiles decreases with the increase of soil depth. The threshold value of soil organic matter to saturated hydraulic conductivity is 18.51 g/kg. The multiple stepwise regression analysis showed that soil bulk density and clay content and soil organic matter are the main factors affecting soil saturated hydraulic conductivity. It is suggested that the reasonable ratio of biogas slurry and the amount of irrigation should be controlled by T2 treatment, but its long-term application effect needs to be further verified.

**Key words:** soil saturated hydraulic conductivity; biogas slurry; soil pH value; soil factor index; soil organic matter

收稿日期: 2018-09-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51509122, 51369014); 甘肃省高等学校科技成果转化项目(2018D-04); 甘肃省自然科学基金(18JR3RA154); 2018 年杨凌示范区产学研用协同创新重大项目计划(2018CX-Y-14)

作者简介: 郑 健(1981-), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事农业水土工程方面的研究。E-mail: zhj16822@126.com。

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

## 0 引言

土壤饱和和导水率是指土壤全部孔隙都充满水情况下,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量或渗流速度<sup>[1]</sup>。土壤饱和和导水率是计算土壤剖面中水的通量和设计灌溉、排水系统工程的一个重要土壤参数<sup>[2,3]</sup>。目前,国内外对于土壤饱和和导水率的研究多集中在测定方法和模型预测方面,对于影响土壤饱和和导水率因素的研究主要集中在土壤有机质含量<sup>[4,5]</sup>、土壤孔隙度<sup>[6]</sup>、土壤容重<sup>[7-9]</sup>、土壤温度<sup>[10]</sup>、土壤初始含水率<sup>[11]</sup>、土壤 pH 值<sup>[12]</sup>、保水剂添加<sup>[13]</sup>、测定时间<sup>[14]</sup>、空间变异<sup>[15-17]</sup>及水质<sup>[18]</sup>等方面。但上述研究均未考虑作物种植的条件下混合灌溉介质对土壤饱和和导水率的影响,尤其是在作物全生育期采用沼液灌溉条件下作物根系不同土层深度土壤饱和和导水率的研究更少。

沼液是人畜粪便、秸秆等有机物经过厌氧发酵后产生的残留物,是一种养分全面、速缓肥兼备的优质有机肥料,沼液施用后能够提高作物的产量品质,改善作物根区土壤环境<sup>[19,20]</sup>,使得其在农业生产中的应用越来越广泛<sup>[21-24]</sup>。但目前对于沼液灌溉所采用的方式普遍较为粗放,且多为水、沼分离灌溉,从灌溉技术和灌溉制度上缺乏科学的理论指导,而土壤饱和和导水率是制定合理灌溉制度的重要参数之一。同时,本课题组在沼液入渗研究中发现随土壤容重和沼液配比增加,沼液入渗速率减小,累积入渗量也随之降低,并初步明确了影响沼液入渗的主要因素为土壤理化特征和沼液黏度以及沼液所含有的有机

表 1 沼液不同配比及不同灌溉量

Tab.1 Different proportions of biogas slurry and different irrigation amount

处理	T1	T2	T3	T4	T5	C0	CK
沼液:水	1:4	1:4	1:4	1:6	1:8	纯水	-
灌溉量 $W$	$0.6E_p$	$0.8E_p$	$1.0E_p$	$0.8E_p$	$0.8E_p$	$0.8E_p$	-

注:  $W=Kc \times A \times E_p$ ;  $Kc$  为作物-皿系数;  $A$  为小区面积,本试验中为  $30 \text{ cm} \times 50 \text{ cm}$ ;  $E_p$  为蒸发皿蒸发量。

### 1.2.2 供试沼液

试验用的沼液取自兰州市花庄镇的甘肃荷斯坦良种奶牛繁育中心正常发酵、正常产气的沼气池中,经曝气静置 2 个月,待其理化性质稳定后施用,该沼气工程以牛粪为发酵原料。沼液原液 pH 值为 7.23,养分状况为有机质  $10.75 \text{ g/L}$ ,全氮含量为  $1.036 \text{ g/L}$ ,全磷含量为  $0.533 \text{ g/L}$ ,全钾含量为  $1.186 \text{ g/L}$ ,试验前将沼液静置 2 个月,待其理化性质稳定后,用 4 层纱布(32 目)过滤掉沼液中较大的悬浮颗粒备用。

### 1.2.3 试验设计

试验采用变水头渗透试验的方法,用纯水测定在试验大棚所取的不同处理的土样的土壤饱和和导水率。具体试验组别分类与大棚试验沼液施用分类一致,试验设置了 T1 到 T5 以及 C0 和 CK 对照等 7 个大组试验,每组试验重复三次,取平均值作为试验结果。T1 到 T5 处理均为沼液施用过后的番茄根区土样,不同沼液配比(沼液:水,1:4、1:6 和 1:8 体积比)和灌溉量( $0.6E_p$ 、 $0.8E_p$  和  $1.0E_p$ ,  $E_p$  为两次灌水间隔蒸发皿累计蒸发量); C0 处理为灌溉量  $0.8E_p$  的纯水施用后的番茄根区土样; CK 处理为试验大棚内未经过任何耕作处理的土样作为对照分析处理。

悬浮颗粒含量<sup>[25]</sup>。但对于作物施用沼液后根区土壤饱和和导水率的变化情况还未见到相关研究。

基于此,采用变水头渗透试验的方法,研究全生育期沼液灌溉对番茄根区不同土层深度土壤饱和和导水率的影响,并从土壤 pH 值、土壤容重、土壤总孔隙度、土壤机械组成、土壤初始含水率和土壤有机质含量等因素的变化规律分析沼液灌溉对土壤饱和和导水率的影响机理,为获得合理的沼液配比、制定合理的沼液灌溉制度及灌溉模式提供理论支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

试验于 2017 年 8-9 月份在兰州理工大学水利水电工程研究所实验室内( $36^{\circ}06'N$ ,  $103^{\circ}78'E$ )进行。实验室位于一层,层高 6 m、空间较大,且安装有空调,在试验周期内能够保持温度变化  $\pm 2^{\circ}C$ ,故可不考虑温度对土壤饱和和导水率的影响。

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 供试土壤

供试土样取样地位于甘肃省兰州市七里河区魏岭乡绿化村的设施蔬菜水肥一体化示范点的温室大棚。待种植作物试验结束,选取不同处理番茄植株根系不同土层深度(0~40 cm)的原状土,用两种不同规格的环刀(一种为内径 61.8 mm、高 40 mm;一种为内径 50 mm、高 51 mm)分别在同一土层剖面取三个土样备用(用于重复试验处理)。具体作物试验期间的沼液施用情况见表 1。

### 1.3 测定项目与方法

规格为内径 61.8 mm、高 40 mm 的环刀取样采用变水头法用纯水测定土壤饱和和导水率(结果换算成  $10^{\circ}C$  下的土壤饱和和导水率)<sup>[26]</sup>;规格为内径 50 mm、高 51 mm 的环刀取样用来测土壤干容重、初始含水率、有机质、土壤机械组成、孔隙度、pH 值等。其中,土壤容重用环刀法测定<sup>[27]</sup>;土壤初始含水率测定采用烘干法测定( $105^{\circ}C$  8 h)<sup>[28]</sup>;土壤有机质采用重铬酸钾外加热法<sup>[29]</sup>;土壤机械组成采用比重计法(0~60 cm 甲种比重计)测定<sup>[30]</sup>;土壤 pH 值采用 pH 计电位法测定( PHS-25 型便携式 pH 计,上海雷磁)。

### 1.4 数据处理

采用 SPSS20.0 软件对土壤饱和和导水率与土壤物理因子的关系进行多元逐步回归分析,试验图表绘制均采用 Origin9.0、Excel2017 软件绘制。

## 2 结果与分析

### 2.1 沼液施用对土壤 pH 值的影响

由表 2 可知:①沼液灌溉条件下各土层 pH 值均小于 C0 和

CK 处理,且随着土层深度的增加各处理土壤 pH 值均有降低的趋势,其降低幅度为 1.25%~3.75% ( $P<0.05$ );②不同沼液配比和灌溉量的沼液灌施以后土壤 pH 值在各土层降低的变化规律呈  $T3>T2>T4>T5>T1$ ,即相同灌溉量下,随着沼液配比增大,对土壤 pH 值的降低作用也越逐渐增强,而在相同沼液配比条件下,随着灌溉量的增加土壤 pH 值也逐渐下降;③纯水处理表层土壤(0~20 cm)的 pH 值略有下降。说明灌施沼液有利于土壤 pH 值的降低,可为温室土壤的次生盐渍化防治提供新思路。

表 2 不同土层深度 pH 值

Tab.2 pH value of different depth of soil layer

土层深度/ cm	处 理						
	T1	T2	T3	T4	T5	C0	CK
0~10	7.98b	7.83e	7.80e	7.89d	7.93c	8.07a	8.09a
10~20	7.95b	7.80e	7.78e	7.85d	7.91c	8.06a	8.07a
20~30	7.93b	7.78e	7.75f	7.83d	7.87c	8.05a	8.03a
30~40	7.91b	7.76d	7.71e	7.81c	7.84c	8.03a	8.01a

注: a, b, c 等不同字母表示  $P=0.05$  水平下的显著性差异(Duncan 检验)。

### 2.2 土壤有机质与土壤饱和导水率的关系

从表 3 中可以看出土壤有机质与沼液配比及沼液灌溉量呈正相关关系,即土壤有机质含量随沼液配比以及沼液灌溉量的增加而增大;CK 和 C0 处理的土壤有机质含量随土层深度增加而出现下降趋势;沼液处理后的土壤有机质含量随土层深度增加呈抛物线趋势,在 10~20 cm 出现峰值,当土层深度大于 20 cm 土壤有机质含量出现下降趋势。

为进一步探明土壤有机质含量和土壤饱和导水率之间的关系,对其进行了数据拟合,如图 1 所示。结果表明,在 0~40 cm 土层内,各处理的土壤有机质含量和土壤饱和导水率的关系呈二次曲线关系( $R^2=0.8210$ ,  $p<0.01$ ),阈值出现在土壤有机质含量为 18.51 g/kg 时,饱和导水率达到最高值 0.0736 cm/min;当有机质含量小于 18.51 g/kg 时,土壤饱和导水率随土壤有机质含量增加而增大,当有机质含量大于 18.51 g/kg 时,土壤饱和导水率呈下降趋势。

表 3 不同土层深度的土壤有机质含量 g/kg

Tab.3 Soil organic matter content of different depth of soil layer

土层深度/ cm	处 理						
	T1	T2	T3	T4	T5	C0	CK
0~10	12.48d	14.75b	15.18a	13.25c	11.97e	9.14g	9.20f
10~20	18.51d	20.33b	21.37a	19.29c	18.08e	9.08g	9.15f
20~30	11.33d	13.31b	14.09a	11.98c	11.05e	9.01g	9.11f
30~40	9.01d	9.11b	9.15a	9.06c	8.97e	8.91g	8.94f

注: a, b, c 等不同字母表示  $P=0.05$  水平下的显著性差异(Duncan 检验)。

### 2.3 不同处理对土壤物理指标的影响

#### 2.3.1 土壤容重

从表 4 中可以看出,随土层深度增加土壤容重呈上升的趋势,相对 C0 和 CK 处理,各施用沼液处理土壤容重均有所降低,降低程度呈  $T3>T2>T4>T1>T5$ ,降低幅度在 2.13%~8.97%

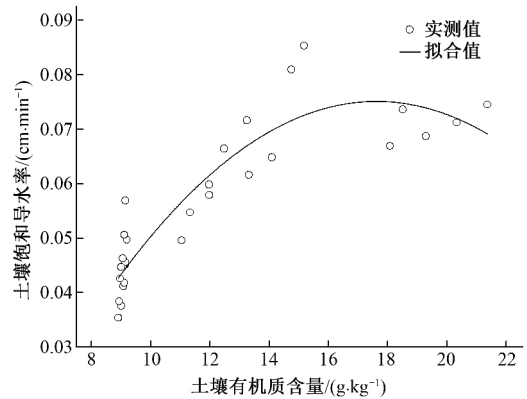


图 1 有机质与土壤饱和导水率的关系

Fig.1 Relation between organic matter and saturated water conductivity of soil

之间( $P<0.05$ ),表明沼液配比越大、灌溉量越大,降低容重的幅度越大;C0 处理的土壤容重较 CK 有所增大,增幅在 2.07%~2.90%之间( $P<0.05$ )。表明施用沼液可以适度降低土壤容重,而纯水灌溉会增加土壤容重,这与王建东<sup>[31]</sup>等的研究结果相同。

表 4 不同土层深度容重值 g/cm<sup>3</sup>

Tab.4 Bulk density value of different depth of soil layer

土层深度/ cm	处 理						
	T1	T2	T3	T4	T5	C0	CK
0~10	1.28d	1.25de	1.23e	1.27d	1.31c	1.38a	1.35b
10~20	1.32cd	1.28ef	1.26f	1.30de	1.34c	1.42a	1.38b
20~30	1.35d	1.31e	1.29e	1.34d	1.38c	1.45a	1.41b
30~40	1.38b	1.34cd	1.32d	1.37bc	1.40b	1.48a	1.45a

注: a, b, c 等不同字母表示  $P=0.05$  水平下的显著性差异(Duncan 检验)。

#### 2.3.2 土壤颗粒机械组成

从表 5 中可以看出,砂粒含量随土层深度增加呈上升的趋势,粉粒含量随土层深度呈现先降低后增加的趋势,而黏粒的含量随土层深度呈现先增加后降低的趋势,阈值均出现在土层深度 10~20 cm;由表 5 中 T1、T2 和 T3 处理可知,在相同沼液配比的条件下,粉粒和黏粒含量与沼液灌溉量呈正相关关系,粉粒和黏粒含量随沼液灌溉量的增加而增加,而砂粒含量和灌溉量呈负相关关系,砂粒含量随沼液灌溉量的增大而减小;由表 5 中 T2、T4 和 T5 处理可知,在相同沼液灌溉量的条件下,黏粒含量与沼液配比呈正相关,黏粒含量随沼液配比量的增加而增加,而砂粒含量与沼液配比负相关关系,砂粒含量随沼液配比量的增大而减小;与 CK 相比,在施用纯水以后,黏粒含量和粉粒含量呈上升趋势,砂粒呈下降趋势。

#### 2.3.3 土壤总孔隙度

从表 6 中可以看出,①土壤总孔隙度与土层深度呈负相关,即随着土层深度增加总孔隙度呈下降趋势;②由 T1、T2 和 T3 处理可知,相同沼液配比的条件下,不同土层深度土壤总孔隙度与沼液灌溉量呈正相关关系,不同土层深度土壤总孔隙度随沼液灌溉量的增大而增加;由 T2、T4 和 T5 处理可知,相同沼

表 5 不同土层深度的土壤颗粒机械组成

%

Tab.5 Soil particle mechanical composition of different depth of soil layer

处理	砂粒( 粒径 2~0.02 mm)				粉粒( 粒径<0.02~0.002 mm)				黏粒( 粒径<0.002 mm)			
	0~ 10 cm	10~ 20 cm	20~ 30 cm	30~ 40 cm	0~ 10 cm	10~ 20 cm	20~ 30 cm	30~ 40 cm	0~ 10 cm	10~ 20 cm	20~ 30 cm	30~ 40 cm
T1	38.04ab	38.19a	38.31a	38.41a	22.03a	21.49a	21.52	21.55	39.93b	40.32a	40.17	40.04
T2	37.92b	37.99ab	38.09b	38.17b	22.07a	21.54a	21.53	21.67	40.01a	40.47a	40.38	40.16
T3	37.86b	37.92b	38.01b	38.07b	22.02a	21.57a	21.59	21.70	40.12a	40.51a	40.40	40.23
T4	37.94b	38.04a	38.19ab	38.29a	22.06a	21.56a	21.53	21.60	40.00a	40.40a	40.28	40.11
T5	38.14a	38.27a	38.38a	38.46a	21.95a	21.44ab	21.49	21.53	39.91b	40.29a	40.13	40.01
C0	38.22a	38.34a	38.45a	38.54a	21.91a	21.40b	21.44	21.47	39.87b	40.26ab	40.11	39.99
CK	38.28a	38.40a	38.51a	38.60a	21.89ab	21.38b	21.41	21.46	39.83b	40.22b	40.08	39.94

注: a, b, c 等不同字母表示 P=0.05 水平下的显著性差异( Duncan 检验)。

表 6 不同土层深度土壤总孔隙度

%

Tab.6 Total soil porosity of different depth of soil layer

土层深度/ cm	处 理						
	T1	T2	T3	T4	T5	C0	CK
0~10	51.70d	52.83b	53.58a	52.08c	50.57e	47.92g	49.06f
10~20	50.19d	51.70b	52.45a	50.94c	49.43e	46.42g	47.92f
20~30	49.06d	50.57b	51.32a	49.43c	47.92e	45.28g	46.79f
30~40	47.92d	49.43b	50.19a	48.30c	47.17e	44.15g	45.28f

注: a, b, c 等不同字母表示 P=0.05 水平下的显著性差异( Duncan 检验)。

液灌溉量的条件下,不同土层深度土壤总孔隙度与沼液配比呈正相关关系,不同土层深度土壤总孔隙度随沼液配比量的增大而增加;③与 CK 相比,C0 处理各层土壤总孔隙度均有所下降,说明灌纯水会导致不同土层深度土壤总孔隙度下降。

### 2.3.4 土壤含水率

从表 7 中可以看出,不同土层深度的土壤含水率与施用沼液配比无关,与沼液灌溉量呈正相关关系,沼液灌溉量越大,土壤含水率越高;与 CK 相比,CK 组土壤初始含水率随土层深度呈现自上到下的增加趋势,而施用沼液和纯水的各处理,土壤含水率随土层深度呈现出先增大后减小的抛物线趋势,主要表现为:在 0~20 cm 之间先逐渐增加,阈值出现在 10~20 cm,过了阈值以后出现下降趋势,在 20~40 cm 之间逐渐减少。

表 7 不同土层深度的土壤含水率

%

Tab.7 Soil moisture content of different depth of soil layer

土层深度/ cm	处 理						
	T1	T2	T3	T4	T5	C0	CK
0~10	12.15f	12.35e	13.59a	12.59d	13.14c	13.21b	8.48g
10~20	12.34f	12.63e	14.12a	12.86d	13.27c	13.51b	8.84g
20~30	10.52f	10.93e	12.78a	11.23d	11.74c	12.20b	9.04g
30~40	9.98f	10.36e	12.10a	10.66d	11.12c	11.15b	9.32g

注: a, b, c 等不同字母表示 P=0.05 水平下的显著性差异( Duncan 检验)。

## 2.4 土壤剖面饱和和导水率变化特征

由图 2 所示,在垂直剖面上,土壤剖面的饱和和导水率均随土壤深度的增加而下降;相对于 CK 沼液灌溉以后的土壤饱和和导水率均呈上升趋势,而纯水灌溉后的土壤饱和和导水率较 CK 处理略有下降;T3 处理平均饱和和导水率最大,C0 处理最小,各沼液处理的平均土壤饱和和导水率与沼液配比以及灌溉量呈正相关关系,即随沼液配比和沼液灌溉量的增大,平均土壤饱和和导水率增大。

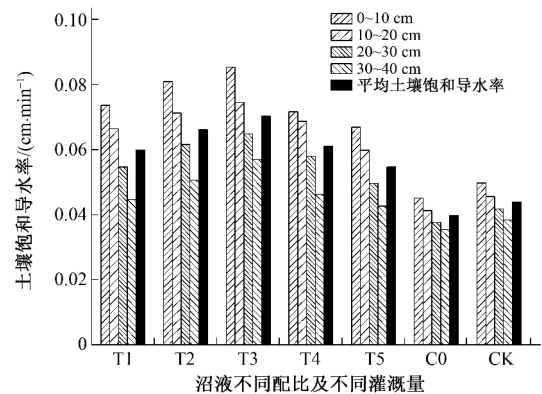


图 2 不同处理的沼液灌溉下土壤剖面饱和和导水率的比较  
Fig.2 Comparison of saturated hydraulic conductivity of soil profiles under different treatments of biogas slurry irrigation

## 2.5 土壤因子对土壤饱和和导水率的影响

土壤因子之间存在着交互作用,单一的土壤因子对土壤饱和和导水率的影响只能表明其在其他土壤因子不变化的情况下的变化规律,并不能准确的反映实际情况下土壤饱和和导水率与土壤因子之间的真实关系<sup>[32]</sup>。Hendry 等<sup>[33]</sup>的研究表明土壤饱和和导水率与土壤容重、土壤质地和孔隙度关系密切。砂、粉、黏粒含量变量总和为 1,其中只有两个变量是独立的,故本文回归分析选用影响土壤饱和和导水率较大的砂粒和黏粒因子;土壤含水率虽对土壤饱和和导水率会有影响,但受季节和气象条件变化较大,故本文回归分析不选用;总孔隙度可根据土壤容重和比重进行计算,因此容重和总孔隙度这两个变量是不独立的,分析时只取其一,故本文回归分析不选用总孔隙度。由表 8 可见,除黏粒与土壤饱和和导水率相关性不显著外( $p=0.241$ ),其他土壤因子与土壤饱和和导水率均呈显著相关( $p<0.01$ ),其相关

系数的大小顺序为土壤容重>砂粒含量>土壤有机质>土壤 pH 值>黏粒含量。为了充分反映土壤因子与土壤饱和导水率之间的真正关系,选择以下砂粒含量  $X_1$ 、黏粒含量  $X_2$ 、土壤容重  $X_3$ 、土壤有机质  $X_4$  和土壤 pH 值  $X_5$  5 个因素作为自变量因子,选取饱和导水率作为因变量  $Y$ ,采用多元逐步回归分析,筛选出影响土壤饱和导水率的相对重要因子,结果为:

$$Y = 0.742 - 0.952X_3 + 0.01X_4 - 0.176X_2$$

通过检验  $F = 7.634 > (F_{0.01} = 3.13)$ ,  $R^2 = 0.961$ ,  $P < 0.001$ ,说明回归方程达到极显著水平,结果说明土壤容重、黏粒含量和土壤有机质是影响土壤饱和导水率的主要因子。

表 8 土壤理化因子与土壤饱和导水率之间的相关分析

Tab.8 Correlation analysis between soil physicochemical factors and saturated hydraulic conductivity of soil

因子	$Y$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$
$Y$	1.000	0.925*	-0.327	-0.964*	0.763*	-0.536*
$X_1$	0.925*	1.000	0.370	-0.955*	-0.659*	0.611*
$X_2$	-0.327	0.370	1.000	0.340	0.661*	-0.536
$X_3$	-0.964*	-0.955*	0.340	1.000	-0.688*	0.612*
$X_4$	0.763*	-0.659*	0.661*	-0.688*	1.000	-0.417
$X_5$	-0.536*	0.611*	-0.536	0.612*	-0.417	1.000

注: \* 表示在  $P = 0.01$  水平上相关性显著。

表 9 说明了主要土壤因子对土壤饱和导水率的直接作用和间接作用的方向及大小(Durbin-Waston 统计量等于 1.84,接近于 2)。土壤饱和导水率与其主要相关因子的直接通径系数绝对值为土壤容重>土壤有机质含量>黏粒含量。土壤容重的直接通径系数为-0.800,对土壤饱和导水率产生直接的负效应最强,同时又通过黏粒含量和土壤有机质含量间接对土壤饱和导水率产生一定的负效应;土壤有机质含量对土壤饱和导水率产生的直接正效应最强,直接通径系数为 0.313,同时又通过土壤容重和黏粒含量间接对土壤饱和导水率一定的正效应。

表 9 土壤主要因子对土壤饱和导水率的通径系数

Tab.9 Path coefficient of soil main factors on saturated hydraulic conductivity of soil

因子	相关系数	直接通径系数	间接通径系数			小计
			$X_2 \rightarrow Y$	$X_3 \rightarrow Y$	$X_4 \rightarrow Y$	
$X_2$	-0.327	-0.152		-0.090	-0.085	-0.175
$X_3$	-0.964	-0.800	-0.110		-0.054	-0.164
$X_4$	0.763	0.313	0.235	0.215		0.450

### 3 讨论

土壤 pH 值能够客观反映土壤酸碱程度。设施栽培中土壤盐分积累是最突出的问题,也是最大的土壤障碍因子<sup>[34]</sup>。土壤饱和导水率高,导水性能好,土壤盐化和碱化程度均会降低<sup>[35]</sup>,同时,农明英<sup>[36]</sup>等的研究表明采用外源有机物料能够有效降低土壤全盐含量和电导率,对改良温室大棚土壤的次生盐渍化有显著作用。本研究中灌施沼液各处理均能够降低试验区内不同土层深度土壤的 pH 值,也再次证明了上述结论。同

时,研究中还发现随着沼液配比和灌溉量的增加,降低土壤 pH 值的能力会逐渐增强,而纯水灌溉仅略微降低了土壤 pH 值,主要是沼液中富含多糖和腐殖酸这些弱酸性功能团不仅能降低碱性土壤的 pH 值,还能提高土壤对酸碱度变化的缓冲性能<sup>[37]</sup>,且随沼液配比和灌溉量增加,多糖和腐殖酸的量增大,中和土壤 pH 的能力越强,而纯水灌溉是将测定土壤中的盐分带到土体的深层,从而导致表层土壤 pH 值的下降。因此,在温室大棚次生盐渍化土壤的改良中可以考虑采用沼液。

土壤容重、机械组成、总孔隙度和土壤含水率等物理性质的变化会影响土壤饱和导水率。赵晓艳等<sup>[38]</sup>研究表明有机肥中里含有大量的微生物,而微生物能够分解土壤中的有机物产生多糖胶、脂肪、蜡等物质能起到胶结作用,达到改善土壤团粒结构,从而降低土壤容重,提高总孔隙度。本研究的试验结果表明沼液作为一种优质的有机肥,施用也能降低试验区土壤容重,增大试验区土壤总孔隙度,这与杨乐<sup>[39]</sup>和侯东梅<sup>[40]</sup>等的研究相同;此外沼液施用会使作物根系越来越发达,根系对土壤的穿插分割作用使土体碎裂,能降低土壤紧实度,根系死亡后分解会使土壤孔隙增加<sup>[41]</sup>,并且随着作物的生长形成的凋落物和根系死亡后形成的有机质进入土壤有利于降低土壤容重;同时随着作物的生长会使土壤微生物类群数量增加<sup>[42]</sup>,分解代谢活动加强,利于降低土壤容重和提高孔隙度。土壤饱和导水率与土壤砂粒含量呈极显著正相关关系,与土壤黏粒含量之间呈显著负相关<sup>[43]</sup>。研究结果表明随着土层深度的增加,砂粒含量逐渐增加,此外不同土层砂粒含量随沼液灌溉量的增加而降低,粉粒和黏粒含量随沼液配比量的增加而增加,这是因为随着沼液灌溉量的增加会使作物根系微生物活动和酶促反应变得活跃,从而产生较多的有机酸,溶解土壤中的黏土矿物,使土壤颗粒变细,利于提高粉粒和黏粒含量,减低砂粒含量<sup>[32]</sup>。此外因为沼液灌溉淋溶作用沿剖面向下层移动,在 20 cm 土层形成淀积层,故黏粒含量阈值出现在 0~20 cm 土层。贾小旭等<sup>[44]</sup>的研究表明单因素中基于土壤饱和导水率的土壤含水率模拟效果最佳,可以通过土壤含水率的变化反映土壤饱和导水率的变化情况。本研究中不同土层深度的土壤含水率大小与施用沼液配比大小无关,而与沼液灌溉量呈正相关,且土壤含水率与土壤饱和导水率呈正相关,表明通过沼液灌溉量的变化能够影响不同土层深度的土壤饱和导水率。

有机质能吸附较多的阳离子,使土壤具有较高的保肥性和缓冲性,同时还能疏松土壤,有利于土壤结构体的形成<sup>[19]</sup>,故与单纯灌水相比,灌施沼液不仅能够大幅度增加土壤有机质含量,还能改善土壤物理性能,从而影响土壤饱和导水率。同时,有机质对土壤饱和导水率的影响受阈值影响,高于阈值时,土壤饱和导率呈下降趋势,土壤有机质含量和土壤饱和导水率的关系呈二次曲线关系,出现了有机质含量阈值,这与单秀枝、彭舜磊和梁向峰等人的研究结果一致<sup>[4, 32, 45]</sup>。说明土壤有机质在一定范围内提高了土壤饱和导水率,但是当土壤有机质含量达到一定值以后,土壤有机质含量对土壤水分的吸附作用将大于增加孔隙度的导水作用,从而降低土壤的入渗性能<sup>[4]</sup>。

### 4 结论

(1) 随着土层深度的增加各沼液灌溉处理土壤 pH 值均有

所降低,随着沼液配比增大和灌溉量的增加,对土壤 pH 值的降低作用逐渐增强。

(2) 施用沼液可以降低土壤容重,增大土壤总孔隙度;不同土层砂粒含量随沼液灌溉量的增加而降低,粉粒和黏粒含量随沼液配比量的增加逐渐增大,说明合理的沼液灌溉量和配比能够通过改善土壤机械组成来提高土壤饱和和导水率;土壤容重和黏粒含量以及土壤有机质含量是影响试验区土壤饱和和导水率的主要因子。

(3) 不同土层深度的土壤含水率与施用沼液配比大小无关,与沼液灌溉量呈正相关关系;沼液灌溉以后的土壤饱和和导水率均有上升趋势,而 C0 处理土壤饱和和导水率较 CK 略有下降;各处理的平均土壤饱和和导水率与沼液配比和灌溉量呈正相关关系,T3 处理平均土壤饱和和导水率最高。

(4) 土壤有机质与沼液配比及沼液灌溉量呈正相关关系,各沼液处理的土壤有机质和饱和和导水率的关系符合二次曲线,有机质对土壤饱和和导水率提高的阈值为 18.51 g/kg,高于阈值时,饱和和导水率呈下降趋势。

综合考虑沼液对土壤物理性质和土壤饱和和导水率的影响,建议最优沼液配比和灌溉量为 T2 处理(1:4,0.8Ep),但是其长期施用效果还有待于进一步验证。此外,由于根系具有一定的直径、长度和表面积等特性,根系生长过程必然会对其在土体的土壤孔隙以及试验取土造成影响,后续研究还应更多的分析根系对土壤物理特性的影响。

#### 参考文献:

- [1] 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,1988:77-78.
- [2] 陈效民,薛泽圣,刘兆普,等.大丰王港试验站滨海盐渍土饱和和导水率的初步研究[J].南京农业大学学报,1994,17(4):134-137.
- [3] Kanwar RS,Riavi HA,Ahmed M et al. Measurement of field-saturated hydraulic conductivity by using guelfh and velocity permeameters [J]. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 1989,32(6):1885-1890.
- [4] 单秀枝,魏由庆,严慧峻,等.土壤有机质含量对土壤水动力学参数的影响[J].土壤学报,1998(1):1-9.
- [5] 乔照华.土壤有机质含量与土壤物理性能参数的相关性分析[J].中国农村水利水电,2008(2):3-4.
- [6] Awad M Helalia. The relation between soil infiltration and effective porosity in different soils[J]. Agricultural Water Management, 1993, 24:39-47.
- [7] Pachepsky Y, Park Y. Saturated Hydraulic Conductivity of US Soils Grouped According to Textural Class and Bulk Density [J]. Soil Science Society of America Journal, 2015,79(4):1094-1100.
- [8] 任荣,马娟娟,孙西欢,等.蓄水坑灌条件下系统温度及土壤体积质量对饱和和导水率的影响试验研究[J].节水灌溉,2014(3):5-8.
- [9] 杜咏梅,孙西欢,毕远杰,等.不同入渗水头和容重作用下土壤饱和和导水率变化特征研究[J].中国农村水利水电,2013(3):66-68.
- [10] Gai Hongbei, Shao Ming-an. Effect of temperature on soil moisture parameters [J]. Shuikexue Jinzhan/Advances in Water Science, 2011,22(4):484-494.
- [11] 王全九,叶海燕,史晓南,等.土壤初始含水量对微咸水入渗特征影响[J].水土保持学报,2004,18(1):51-53.
- [12] Miyamoto S, Stroehlein JL. Sulfuric acid effects on water infiltration and chemical properties of alkaline soils and water. [J]. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 1986,29(5):1288-1296.
- [13] 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和导水率的影响[J].农业工程学报,2011,27(1):89-93.
- [14] 姚毓菲,邵明安.测定时间对定水头法土壤饱和和导水率的影响[J].土壤通报,2015,46(2):327-333.
- [15] Zhao Peipei, Shao Ming-an, Wang Tiejun. Spatial distributions of soil surface-layer saturated hydraulic conductivity and controlling factors on dam farmlands [J]. Water Resources Management, 2010,24(10):2247-2266.
- [16] Zimmermann, Beate, Elsenbeer, Helmut. Spatial and temporal variability of soil saturated hydraulic conductivity in gradients of disturbance [J]. Journal of Hydrology, 2008,361(1-2):78-95.
- [17] Wang Wei, Wang Yu, Sun Qiming et al. Spatial variation of saturated hydraulic conductivity of a loess slope in the south jingyang plateau, china [J]. Engineering Geology, 2018,236:70-78.
- [18] 唐胜强,余冬立.灌溉水质对土壤饱和和导水率及入渗特性的影响[J].农业机械学报,2016,47(10):108-114.
- [19] 张无敌,尹芳,李建昌,等.沼液对土壤有机质含量和肥效的影响[J].可再生能源,2008,26(6):45-47.
- [20] 姚向君,郝先荣,郭宪章.畜禽养殖场能源环保工程的发展及其商业化运作模式的探讨[J].农业工程学报,2002,18(1):181-184.
- [21] Garg RN, Pathak H, Das DK et al. Use of flyash and biogas slurry for improving wheat yield and physical properties of soil [J]. Environ Monit Assess, 2005,107(1-3):1-9.
- [22] Kumar A, Singhal SK, Singh V et al. Impact of rock-phosphate enriched pressmud and biogas slurry on yield, phosphorus nutrition and utilization by soybean (glycine max) in a typic haplustept [J]. Legume Research, 2013,36(1):79-83.
- [23] Abubaker J, Risberg K, Pell M. Biogas residues as fertilisers effects on wheat growth and soil microbial activities [J]. Applied Energy, 2012.
- [24] 杨鑫,王文娥,胡笑涛,等.沼液对水培生菜光合特性、产量及品质的影响[J].灌溉排水学报,2017,36(7):55-59,85.
- [25] 郑健,张恩继,王燕,等.水-沼液一体入渗特征分析[J].兰州理工大学学报,2018,44(1):58-64.
- [26] Price K, Jackson C R, Parker A J. Variation of surficial soil hydraulic properties across land uses in the southern blue ridge mountains, north carolina, usa [J]. Journal of Hydrology, 2010,383(3-4):256-268.
- [27] 袁久坤,周英.利用取土钻改进环刀法准确测定土壤容重和孔隙度[J].中国园艺文摘,2014,30(3):25-26.
- [28] 刘永岗,王曰鑫,李学哲.土壤水分测定三种方法的比较[J].中国农学通报,2006,22(2):110-112.
- [29] 靳彰霞.油浴加热重铬酸钾容量法测定土壤有机质影响因素分析[J].农业科技与信息,2012(4):33-34.

试验结果可以看出橡胶对材料进行防渗性能改性的效果分为有利和不利两方面。一方面,掺入一定比例的橡胶粒后,材料的大孔隙(裂隙)被填充,有效提高了材料的密实性,从而给防渗性能带来有利影响;另一方面,过多橡胶粒掺入浆料后,骨料与橡胶粒的接触界面占用大量水泥浆,材料流动性大大降低,导致密实性下降,孔隙数量和规模增大,使得混凝土试件的防渗性能出现下降。因此,在进行混凝土材料的性能改良时,外掺料的掺和量是影响改性效果的关键因素。

### 3 结论

利用不同粒径和掺量的橡胶对普通混凝土进行改性,并开展混凝土试样的防渗性能测试和核磁共振扫描,得到如下结论。

(1) 掺入橡胶粒后,混凝土的防渗性能得到较大改善,橡胶粒径越小,防渗性能的改善效果越好;防渗性能随颗粒含量的增加呈先增后减的趋势。

(2) 由核磁共振扫描得到橡胶混凝土  $T_2$  分布曲线,从不同橡胶掺量下混凝土  $T_2$  分布曲线中发现孔隙发育程度随橡胶粒含量增加呈现先减后增的趋势。

(3) 橡胶掺量为 20% 时,孔隙发育程度最低,此时渗透高度也达到最小,该现象反映了孔隙结构的改变是防渗性能改善的内在原因。

(4) 在水泥砂浆中掺入橡胶进行改性后,混凝土的渗透性能有明显变化。一方面,橡胶可以对材料内大孔隙和裂隙起到填充作用;另一方面,橡胶和骨料的接触界面占用大量水泥浆料,降低了材料流动性,导致密实性下降。因此,橡胶的掺量是影响防渗性能改性效果的关键因素。

#### 参考文献:

[1] 袁群,冯凌云,曹宏亮,等.橡胶混凝土的应力-应变曲线试验

[J].建筑科学与工程学报,2013,30(3):96-100.

[2] 宋清林,何武全,李根,等.混凝土衬砌渠道保温防冻胀技术研究[J].灌溉排水学报,2015,34(4):43-48.

[3] 刘鲁强,陈发科.聚合物纤维混凝土在渠道防渗中的应用[J].节水灌溉,2001(5):30-32.

[4] 袁群,冯凌云,曹宏亮,等.橡胶混凝土的应力-应变曲线试验[J].建筑科学与工程学报,2013,30(3):96-100.

[5] 曹宏亮,史长城,袁群,等.橡胶颗粒表面形态对橡胶混凝土强度的影响研究[J].三峡大学学报(自然科学版),2014,36(6):76-79.

[6] 马昆林,龙广成,谢友均,等.橡胶颗粒对自密实混凝土性能的影响[J].硅酸盐学报,2014,42(8):966-973.

[7] Benazzouk A, Douzane O, Queneudec M. Transport of fluids in cement-rubber composites [J]. Cement and Concrete Composites, 2004, 26(2): 129.

[8] 杨春峰,叶文超,杨敏.废旧橡胶混凝土的耐久性研究进展[J].混凝土,2012(4):61-63.

[9] 常英,刘金景,陈晓文,等.喷涂速凝橡胶沥青防渗膜在水利工程中的应用[J].新型建筑材料,2013,40(11):83-85,94.

[10] 张娜,赵方方,王水兵,等.岩石孔隙结构与渗流特征核磁共振研究综述[J].水利水电技术,2018,49(7):28-36.

[11] 张克,王海龙,王培,等.改性橡胶再生粗骨料混凝土力学性能及抗冻性试验研究[J].硅酸盐通报,2017,36(9):3105-3111,3118.

[12] 刘倩,申向东,薛慧君,等.基于核磁共振技术对不同粗骨料混凝土孔隙特征试验研究[J].功能材料,2017,48(10):10066-10070,10076.

[13] 董树国,张国杰,侯黎阳,等.核磁共振数据分析混凝土孔隙率与抗盐冻关系[J].电子显微学报,2015,34(5):428-432.

[14] 王越帅,盛怀森,李先文,等.微孔混凝土渗水管道的水力性能研究[J].节水灌溉,2017(12):22-26,32.

[15] JTG E30-2005,公路工程水泥及水泥混凝土试验规程[S].2005.

(上接第 51 页)

[30] 陈丽琼.比重计法测定土壤颗粒组成的研究[J].环境科学导刊,2010,29(4):97-99.

[31] 王建东,龚时宏,鲍子云,等.灌水模式对免耕地土壤容重变化的影响[J].中国水利水电科学研究院学报,2013,11(2):130-136.

[32] 彭舜磊,由文辉,沈会涛.植被群落演替对土壤饱和导水率的影响[J].农业工程学报,2010,26(11):78-84.

[33] Hendry M J, Paterson B A. Relationship between saturated hydraulic conductivity and some physical and chemical properties [J]. Ground Water, 1982, 20(5): 604-605.

[34] 张金锦,段增强.设施菜地土壤次生盐渍化的成因、危害及其分类与分级标准的研究进展[J].土壤,2011,43(3):361-366.

[35] 迟春明,王志春.沙粒对碱土饱和导水率和盐分淋洗的影响[J].水土保持学报,2009,23(1):99-102,116.

[36] 农明英,张乃明,史静,等.外源有机物料对次生盐渍化大棚土壤的改良效果[J].中国土壤与肥料,2013(6):6-10.

[37] 杜臻杰,齐学斌,陈效民,等.生物炭和猪场沼液对潮土水力特

征参数的影响[J].水土保持学报,2014,28(1):189-192,197.

[38] 赵晓艳.不同生物有机肥应用效果及机理的比较研究[D].北京:中国农业大学,2003.

[39] 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.

[40] 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.

[41] 康洁.玉米根系分布特征及其对土壤物理特性的影响[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2013:31-32.

[42] Yi L, You W H, Song Y C. Soil animals communities in the litter of the Evergreen Broad-Leaved Forest at five succession stages in Tian-tong [J]. Frontiers of Biology in China, 2006, 1(2): 142-150.

[43] 迟春明,王志春.碱化盐土饱和导水率特征与影响因素研究[J].土壤通报,2014,45(3):601-607.

[44] 贾小旭,邵明安,魏孝荣,等.黄土高原北部草地表层土壤水分状态空间模拟[J].农业工程学报,2010,26(10):38-44.

[45] 梁向锋,赵世伟,张扬,等.子午岭植被恢复对土壤饱和导水率的影响[J].生态学报,2009,29(2):636-642.