

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.10.032

# 施用沼液对设施番茄生长与土壤生态环境的影响

郑健<sup>1,2</sup> 殷李高<sup>1,3</sup> 朱传远<sup>1,3</sup> 马静<sup>1,3</sup> 张平安<sup>1,3</sup>

(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;  
3. 兰州理工大学西部能源与环境研究中心, 兰州 730050)

**摘要:** 为探求番茄全生育期施用沼液对其生长及土壤环境的影响, 系统研究了沼液配比及灌溉量对番茄农艺性状、品质、产量、土壤理化环境和土壤生物学特性的影响。结果表明: T3 处理(沼液配比 1:4, 作物-皿系数( $K_c$ )为 1.0) 番茄的株高、茎粗和单株叶面积均为各处理最大, 分别比纯水处理(C0)高 24.11%、15.59% 和 33.92%。与 C0 处理相比, 灌施沼液可以增加番茄产量、改善番茄品质和口味, T2 处理(沼液配比 1:4,  $K_c$  为 0.8) 能够获得最高产量、最高的维生素 C 及可溶性总糖含量。灌施沼液可以降低土壤容重和土壤 pH 值, 增大土壤总孔隙度及土壤饱和导水率, 灌施沼液各处理土壤有机质含量随土层深度呈先增加后降低的趋势。灌施沼液还可以增加各生育期内细菌、真菌、放线菌数量, 其中土壤细菌、真菌数量均表现出自苗期到果实膨大期呈增加趋势, 阈值出现在果实膨大期, 而后逐渐降低, 放线菌数量自苗期到果实成熟期呈逐渐增加的趋势, 阈值出现在果实成熟期。施用沼液各处理土壤中过氧化氢酶、蔗糖酶、脲酶的活性在番茄生育期内分别表现为持续增大、先增加后降低和先降低后上升的变化规律, 阈值分别出现在果实成熟期和果实膨大期、开花结果期。综合分析试验结果, T2 处理更有利于番茄的生长、产量品质的形成以及土壤环境的改善。

**关键词:** 设施番茄; 产量; 品质; 土壤理化环境; 土壤生物学特性; 沼液

**中图分类号:** S274.3    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1000-1298(2019)10-0278-11

## Effects of Digestate on Tomato Growth and Soil Ecological Environment in Greenhouse

ZHENG Jian<sup>1,2</sup> YIN Ligao<sup>1,3</sup> ZHU Chuanyuan<sup>1,3</sup> MA Jing<sup>1,3</sup> ZHANG Ping'an<sup>1,3</sup>

(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

3. Western Energy and Environment Research Center, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** To explore the effects of digestate application on tomato growth and soil environment during the whole growing period of crop, the influences of digestate application ratio and irrigation amounts on tomato agronomic characteristics, quality, yield, soil physical, chemical environment and biological characteristics were systematically studied. The results showed that the plant height, stem diameter and leaf area of T3 treatment (digestate ratio was 1:4, and crop-pan coefficient ( $K_c$ ) was 1.0) were the greatest, which were 24.11%, 15.59% and 33.92% higher than those of treatment C0 irrigated with water only, respectively. The application of digestate can increase the yield, quality and taste of tomato, in which the treatment of T2 (digestate ratio was 1:4, and  $K_c$  was 0.8) obtained the highest vitamin C and total soluble sugar content. Meanwhile, digestate application can decrease the soil bulk density and pH value, and subsequently increase the soil total porosity and saturated hydraulic conductivity. The content of soil organic matter was firstly increased and then decreased with the increase of soil depth in treatments applied with digestate. Furthermore, the application of digestate can also increase the number of bacteria, fungi and actinomycetes in each growth period of tomato, in which the quantity of soil bacteria and fungi presented an increase trend from seedling stage to fruit swelling stage, where they

收稿日期: 2019-03-15 修回日期: 2019-04-14

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51509122)、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项目(18JR3RA154)、杨凌示范区产学研用协同创新重大计划项目(2018CXY-14)和兰州理工大学红柳一流学科建设项目

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

reached the peak value and then decreased, while the peak value of actinomycetes quantities appeared at fruit ripening stage. The activities of catalase, invertase and urease in the soil of tomato root zone presented the trend of increase continuously, first increase and then decrease, and first decrease and then increase during the whole growth period, and the peak value of them appeared at fruit ripening stage, fruit enlargement stage, flowering and fruiting stage, respectively. T2 treatment was more conducive to tomato growth when the agronomic traits, quality and yield, and soil biological characteristics of tomato were comprehensively analyzed.

**Key words:** facility tomato; yield; quality; soil physicochemical environment; soil biological characteristics; digestate

## 0 引言

设施农业是由传统农业向现代化集约型农业转变的有效方式,是实现农业现代化的必由之路<sup>[1]</sup>。我国西北干旱半干旱地区干旱缺水,不利于农业发展,但具有海拔高、气候冷凉、年降雨量少、日照充足、升温速度快等特点,适宜发展设施农业<sup>[2]</sup>。同时,随着国家退耕还林和生态环境重建政策的落实,以及农业产业结构的调整,设施农业生产已经成为西北农村经济中的主导产业<sup>[3]</sup>。近年来,受经济效益的驱使,广大农户为了追求短期的经济效益,通过大量施用化肥提高作物产量,化肥投入量甚至是大田种植的数十倍。过多养分的不断堆积,造成了设施土壤环境的恶化和严重的养分失衡<sup>[4]</sup>,严重制约了设施农业的发展。因此,有必要开展设施农业适宜肥料种类和科学施肥模式研究,改善设施土壤环境,提高设施土壤的可持续利用。

随着畜禽养殖业的快速发展,我国畜禽粪便年产量超过 221 亿 t,占农业有机废弃物的 40% 以上<sup>[4]</sup>。为解决畜禽养殖污染,户用沼气和规模化沼气工程迅速发展,截止 2015 年底,我国已有 5 000 多万口户用沼气池<sup>[5]</sup>。沼气生产过程中会产生大量沼液,而沼液是一种养分全面、速缓肥效兼备的优质有机肥料。研究表明,施用沼液后能够改善作物根区土壤环境,疏松土壤,有利于微生物生长,并能够调整微生物种群分布,为作物增产、高产提供必要的基础条件<sup>[6-9]</sup>。目前,对于沼液的施用多参考化肥施用模式进行,采用水、沼液分开施用的方式,没有考虑沼液含水率高、低肥的特性<sup>[10-14]</sup>。同时,施用后对设施土壤物理、化学及土壤生物学特性综合分析的影响研究相对较少。

基于此,本文将水和沼液一体化,在番茄生长的全生育期施用,研究不同沼液施用配比及灌溉量对作物生长、产量、品质和土壤生态环境的影响,为沼液在设施农业中的科学运用提供理论支撑,为设施农业中土壤环境的改善、质量退化的防治以及设施土壤的可持续利用提供新思路。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究对象为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。日光温室长 50 m,宽 10.5 m,高 4 m,位于北纬 36°3′、东经 103°40′,平均海拔 1 872 m,日光充足,干旱少雨,年平均气温 8.9℃,无霜期 150 d 左右,年平均降水量 310.5 mm,多集中在 7—9 月,年平均蒸发量 1 158.0 mm。

### 1.2 试验材料

#### 1.2.1 供试作物种类

供试作物为番茄“红宝三号”,是早熟大红果硬果品种,2017 年 3 月 12 日播种,4 月 7 日幼苗略大四叶一心时定植,7 月 30 日拉秧结束试验。

#### 1.2.2 供试土壤

土壤类型为壤质黏土,其中砂粒、粉粒和黏粒质量分数分别为 38.92%、21.06%、40.02%。1 m 土层内土壤平均容重 1.40 g/cm<sup>3</sup>,田间持水率为 25% (质量含水率)。作物种植前测得土壤养分状况为:0~40 cm 土层有机质平均质量比为 9.1 g/kg,全氮质量比为 0.575 g/kg,全磷质量比为 1.531 g/kg,全钾质量比为 1.586 g/kg,试验前土壤 pH 值为 8.05。

#### 1.2.3 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,该沼气工程以牛粪为发酵原料。沼液原液 pH 值为 7.23,养分状况为有机质质量浓度 10.75 g/L,全氮质量浓度为 1.036 g/L,全磷质量浓度为 0.533 g/L,全钾质量浓度为 1.186 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。

### 1.3 试验设计

试验设置 3 个沼液配比(沼液、水体积比分别为 1:4、1:6 和 1:8),3 个灌溉量(灌溉量  $W = K_c A E_p$ ,其中  $K_c$  为作物-皿系数,分别为 0.6、0.8 和 1.0;  $A$  为小区面积,本试验中为 30 cm × 50 cm;  $E_p$  为两次灌

水间隔蒸发皿累计蒸发量)。具体设置如下:T1~T3 沼液配比均为 1:4,  $K_e$  分别为 0.6、0.8 和 1.0; T4 沼液配比为 1:6,  $K_e$  为 0.8; T5 沼液配比为 1:8,  $K_e$  为 0.8。同时,设置 C0 和 CK 作为对照组,C0 为  $K_e = 0.8$  的纯水对照组,CK 为大棚里未经过任何耕作处理,且不施用沼液和水的空白对照。每个处理设 3 次重复,采用随机区组排列。番茄株距设为 30 cm,行距 50 cm。小区周边设保护行,为了防止小区间水肥相互渗透影响试验的准确性,用埋深 1 m 的塑料布将相邻的两个小区分开。试验采用沼液穴孔灌溉,穴孔设在沿垄方向距作物 10 cm 处,每株作物两边各一个,直径 7 cm,深度 5 cm。在番茄的全生育周期里采用安装在大棚内直径为 20 cm 的蒸发皿来测量蒸发量,灌溉量以每隔 1 d 08:30 测定的蒸发量乘以灌溉面积确定,灌溉频率为 2 d/次。

## 1.4 测定项目与方法

### 1.4.1 番茄生理形态指标

每个处理选取具有代表性的 3 株,自番茄定植后第 6 天开始(2017 年 4 月 9 日),每隔 8 d 测定一次株高和茎粗直至番茄植株打顶(6 月 20 日)。株高用米尺从茎基开始量取,茎粗用千分尺采用交叉法在茎秆基部测量直径,主根长用米尺测定;采用图像法测定叶面积;在番茄各生育期每个处理选取具有代表性的 3 株采用破坏性取样,将根、茎、叶、果分别装入纸袋,在 105℃ 干燥箱杀青 30 min 后,调至 75℃ 恒温干燥至恒定质量,待冷却后用电子天平(精度为 0.01 g)称干质量,根冠比为地下部分与地上部分干物质量的比值。

### 1.4.2 番茄品质及产量指标

可溶性固形物含量:采用 WAY-2S 型阿贝折射仪测定。维生素 C 含量:钼蓝比色法<sup>[15]</sup>。可滴定酸度含量:滴定法。可溶性总糖含量:蒽酮比色法。番茄果实成熟期每隔 2~4 d 采收一次,记录采收时间、单株成熟的果实数目及产量,各处理产量为该处理单株产量的总和。

### 1.4.3 土壤环境指标

在番茄不同生育期(苗期、开花结果期、果实膨大期、果实成熟期)分别用内径 50 mm、高 51 mm 环刀取土,分次取 0~20 cm 的土层土样,每个处理分别重复取 3 次,土样采用低温(-20℃)保存,用来测定土壤微生物及土壤酶活性。土壤中可培养微生物数量的测定采用稀释平板法<sup>[16]</sup>,细菌数量采用 PDA 培养基,真菌数量采用马丁氏培养基,放线菌数量采用高氏 1 号培养基。过氧化氢酶活性用  $KMnO_4$  滴定法<sup>[3]</sup>,蔗糖酶活性采用还原糖滴定法<sup>[3]</sup>,脲酶活性采用靛酚比色法<sup>[3]</sup>。

在种植作物试验结束后,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(内径 61.8 mm、高 40 mm;内径 50 mm、高 51 mm)分别在同一土层剖面取 3 个土样备用。内径 61.8 mm、高 40 mm 的环刀取样后采用变水头法,用纯水测定土壤饱和导水率(结果换算成 10℃ 下的土壤饱和导水率)<sup>[17]</sup>;内径 50 mm、高 51 mm 的环刀取样后用来测土壤干容重、土壤含水率、孔隙度、pH 值等。其中,土壤容重用环刀法测定<sup>[18]</sup>;土壤初始含水率采用干燥法测定(105℃, 8 h)<sup>[19]</sup>;土壤有机质含量采用重铬酸钾外加热法<sup>[20]</sup>;土壤 pH 值采用 pH 计电位法测定(PHS-25 型便携式 pH 计,上海雷磁仪器仪表股份有限公司)。

## 1.5 数据处理与分析

采用 Origin 9.0、Excel 2017 软件绘制图表,采用 SPSS 20.0 软件对所测试验数据进行显著性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 施肥方式对设施番茄生长的影响

不同施肥处理番茄收获时的生长发育特征见表 1。由表 1 可知,T3 处理的番茄的株高最大,分别比 T1、T2、T4、T5、C0 高 11.38%、3.51%、10.27%、14.93%、24.11%。相同沼液配比,番茄株高随沼液灌溉量的增大而增加,由小到大依次为 T1、T2、T3。相同沼液灌溉量,番茄株高与沼液配比呈正相关,即沼液含量越高番茄株高越大,由大到小依次为 T2、T4、T5。番茄茎粗的生长变化规律与株高变化相一致,T3 处理番茄茎粗最大,较 C0 高 15.59%,而茎秆的直径可以作为衡量作物健壮程度的指标,也在某种程度上决定了产量的高低<sup>[21]</sup>。从单株叶面积来看,T3 处理的单株叶面积最大,C0 纯水对照组单株叶面积最小,T3 处理比 C0 高 33.92%,差异显著( $P < 0.01$ )。各处理单株叶面积均随沼液配比和灌溉量的增加呈增大趋势,而主根长和根冠比与沼液配比和灌溉量呈负相关,C0 处理的主根长最大,T3 处理的主根长最小,C0 处理较 T3 处理高 7.94%,主根长和沼液配比以及沼液灌溉量呈负相关。各处理根冠比差异不明显,但较 C0 处理,施用沼液会降低根冠比。由 T1、T2、T3 处理可知,相同沼液配比条件下(1:4),根冠比随沼液灌溉量增加而减小;由 T2、T4、T5 处理可知,相同灌溉量条件下(0.8AE<sub>p</sub>),根冠比与沼液配比呈负相关。表明在水肥供应充足的情况下,光合产物主要积累在地上部分,茎叶生长比较旺盛,使植物的根冠比降低,而缺肥缺水时,植

物地上部分生长受阻,地下部分在与地上部分竞争水分和养分时表现出很大的优势,植物的根冠比变大,进一步论证了不同水肥施用模式可以调节作物根系和冠部的生长状况,从而保证作物处于最佳的生长状态。

表 1 不同施肥处理番茄收获时的农艺性状

Tab.1 Agronomic characters of tomatoes harvested with different fertilizers

处理	株高/cm	茎粗/mm	单株叶面积/cm <sup>2</sup>	主根长/cm
T1	146.53 <sup>d</sup>	11.98 <sup>d</sup>	8 053.9 <sup>e</sup>	47.74 <sup>c</sup>
T2	157.67 <sup>b</sup>	12.45 <sup>b</sup>	8 830.8 <sup>b</sup>	46.44 <sup>e</sup>
T3	163.21 <sup>a</sup>	12.75 <sup>a</sup>	9 104.6 <sup>a</sup>	45.73 <sup>f</sup>
T4	148.01 <sup>c</sup>	12.23 <sup>c</sup>	8 596.2 <sup>c</sup>	47.58 <sup>d</sup>
T5	142.01 <sup>e</sup>	11.76 <sup>e</sup>	8 154.3 <sup>d</sup>	48.57 <sup>b</sup>
C0	131.50 <sup>f</sup>	11.03 <sup>f</sup>	6 798.4 <sup>f</sup>	49.36 <sup>a</sup>

注:同列不同字母表示  $P < 0.05$  水平下差异显著 (Duncan 检验),下同。

表 2 不同施肥处理的番茄品质

Tab.2 Quality of tomatoes with different fertilizer treatments

处理	根冠比	维生素 C 含量/ (mg·(100 g) <sup>-1</sup> )	可溶性总糖质量 分数/%	可滴定酸度质量 分数/%	糖酸比	可溶性固形物质量 分数/%
T1	0.036 2	18.756 <sup>d</sup>	2.765	0.265	10.434 <sup>b</sup>	5.39
T2	0.034 5	19.973 <sup>a</sup>	3.154	0.301	10.478 <sup>b</sup>	5.57
T3	0.033 3	19.546 <sup>b</sup>	3.103	0.309	10.040 <sup>e</sup>	5.50
T4	0.035 9	19.077 <sup>c</sup>	3.028	0.271	11.186 <sup>a</sup>	5.43
T5	0.037 8	18.376 <sup>c</sup>	2.311	0.244	9.469 <sup>d</sup>	5.31
C0	0.038 0	15.921 <sup>f</sup>	1.940	0.228	8.525 <sup>e</sup>	5.25

由图 1 可知,沼液施用对单株产量差异显著 ( $P < 0.05$ ),各处理番茄产量由大到小依次为 T2、T3、T4、T1、T5、C0, T2 处理 (1:4、0.8AE<sub>p</sub>) 产量最高,为 4.15 kg/株,对比 C0 处理,提高了 13.22%。相同沼液配比 (1:4) 时,番茄单株产量随沼液灌溉量的增加呈先增大后减小的趋势,阈值出现在 T2 处理,由大到小依次为 T2、T3、T1,而在相同的灌溉量时 (T2、T4、T5),番茄单株产量呈现随沼液配比的增加而增加的趋势,由大到小依次为 T2、T4、T5。

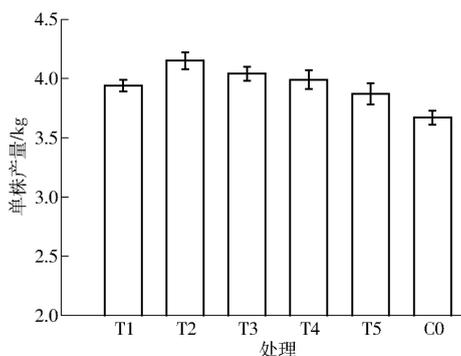


图 1 各处理单株产量

Fig.1 Yield per plant of each treatment

## 2.2 施肥方式对设施番茄品质和产量的影响

从表 2 可以看出,相比于 C0 对照组,灌施沼液可以增加番茄维生素 C、可溶性总糖、可滴定酸度、可溶性固形物含量以及增大番茄糖酸比。T2 处理的番茄维生素 C 含量最高,为 19.973 mg/(100 g),较 T1、T3、T4、T5、C0 处理高 6.49%、2.18%、4.49%、8.69%、25.45%。从 T2、T4、T5 处理可知,灌溉量相同时,番茄维生素 C 含量同沼液配比呈正相关,即番茄维生素 C 含量随沼液配比的增加而增大。各处理番茄可溶性总糖含量由大到小依次为 T2、T3、T4、T1、T5、C0, T2 处理比 T1、T3、T4、T5、C0 处理分别高 14.07%、1.64%、4.16%、36.48% 和 62.58%。施用沼液会在一定程度上提升番茄可滴定酸度含量,但可以较明显提高可溶性糖含量和糖酸比。说明可以通过施用沼液增加番茄可溶性总糖含量来改善番茄糖酸比,提升番茄口感。

## 2.3 沼液施用对日光温室土壤生态环境的影响

### 2.3.1 土壤物理环境的响应

从表 3 可以看出,果实成熟期土壤容重随土层深度增加呈上升的趋势,相对 C0 和 CK 处理,各施用沼液处理土壤容重均有所降低,由大到小依次为 T3、T2、T4、T1、T5,降低幅度为 2.13% ~ 8.97% ( $P < 0.05$ ),表明沼液配比越大、灌溉量越大,土壤容重降低幅度越大。C0 处理的土壤容重较 CK 有所增大,增幅在 2.07% ~ 2.90% 之间 ( $P < 0.05$ )。土壤总孔隙度与土层深度呈负相关,相同沼液配比的条件下 (T1、T2 和 T3),不同土层深度土壤总孔隙度随沼液灌溉量的增大而增加。相同沼液灌溉量的条件下 (0.8AE<sub>p</sub>),不同土层深度土壤总孔隙度随沼液配比量的增大而增加。较 CK 处理,C0 处理各层土壤总孔隙度均有所下降。表明施用沼液可以适度降低土壤容重,增大土壤孔隙度,改善土壤物理环境,而纯水灌溉会增加土壤容重,这与王建东等<sup>[22]</sup>的研究结果相同。

同时由表 3 可知,不同土层深度的土壤含水率与所施用沼液配比无明显相关性,与沼液灌溉量呈

表3 果实成熟期不同土层深度土壤容重、含水率和总孔隙度变化情况

Tab.3 Changes of soil bulk density, initial moisture content and total porosity at different soil depths during fruit ripening stage

处理	土壤容重/(g·cm <sup>-3</sup> )				土壤含水率/%				土壤总孔隙度/%			
	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	1.28 <sup>d</sup>	1.32 <sup>cd</sup>	1.35 <sup>d</sup>	1.38 <sup>b</sup>	12.15 <sup>f</sup>	12.34 <sup>f</sup>	10.52 <sup>f</sup>	9.98 <sup>f</sup>	51.70 <sup>d</sup>	50.19 <sup>d</sup>	49.06 <sup>d</sup>	47.92 <sup>d</sup>
T2	1.25 <sup>d</sup>	1.28 <sup>ef</sup>	1.31 <sup>e</sup>	1.34 <sup>cd</sup>	12.35 <sup>e</sup>	12.63 <sup>e</sup>	10.93 <sup>e</sup>	10.36 <sup>e</sup>	52.83 <sup>b</sup>	51.70 <sup>b</sup>	50.57 <sup>b</sup>	49.43 <sup>b</sup>
T3	1.23 <sup>e</sup>	1.26 <sup>f</sup>	1.29 <sup>e</sup>	1.32 <sup>d</sup>	13.59 <sup>a</sup>	14.12 <sup>a</sup>	12.78 <sup>a</sup>	12.10 <sup>a</sup>	53.58 <sup>a</sup>	52.45 <sup>a</sup>	51.32 <sup>a</sup>	50.19 <sup>a</sup>
T4	1.27 <sup>d</sup>	1.30 <sup>de</sup>	1.34 <sup>d</sup>	1.37 <sup>bc</sup>	12.59 <sup>d</sup>	12.86 <sup>d</sup>	11.23 <sup>d</sup>	10.66 <sup>d</sup>	52.08 <sup>c</sup>	50.94 <sup>c</sup>	49.43 <sup>c</sup>	48.30 <sup>c</sup>
T5	1.31 <sup>c</sup>	1.34 <sup>c</sup>	1.38 <sup>c</sup>	1.40 <sup>b</sup>	13.14 <sup>c</sup>	13.27 <sup>c</sup>	11.74 <sup>c</sup>	11.12 <sup>c</sup>	50.57 <sup>e</sup>	49.43 <sup>e</sup>	47.92 <sup>e</sup>	47.17 <sup>e</sup>
C0	1.38 <sup>a</sup>	1.42 <sup>a</sup>	1.45 <sup>a</sup>	1.48 <sup>a</sup>	13.21 <sup>b</sup>	13.51 <sup>b</sup>	12.20 <sup>b</sup>	11.15 <sup>b</sup>	47.92 <sup>g</sup>	46.42 <sup>g</sup>	45.28 <sup>g</sup>	44.15 <sup>g</sup>
CK	1.35 <sup>b</sup>	1.38 <sup>b</sup>	1.41 <sup>b</sup>	1.45 <sup>a</sup>	8.48 <sup>g</sup>	8.84 <sup>g</sup>	9.04 <sup>g</sup>	9.32 <sup>g</sup>	49.06 <sup>f</sup>	47.92 <sup>f</sup>	46.79 <sup>f</sup>	45.28 <sup>f</sup>

正相关,即沼液灌溉量越大,土壤含水率越高。CK组土壤含水率随土层深度呈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先增大后减小的抛物线趋势,在0~20 cm之间先逐渐增加,阈值均出现在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。

由图2可知,在垂直剖面上,土壤饱和导水率均随土壤深度的增加而下降。相对于CK组,采用沼液灌溉各处理(T1~T5)土壤饱和导水率均呈上升趋势,而纯水灌溉处理(C0)土壤饱和导水率较CK处理有所下降。T3处理平均土壤饱和导水率最大,C0处理最小,各沼液处理的平均土壤饱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,平均土壤饱和导水率增大。说明沼液施用可以增大土壤饱和导水率,改善土壤物理环境。

### 2.3.2 土壤化学环境的响应

各处理收获时植株根区不同土层深度土壤pH值和有机质质量比见表4。从土壤pH值变化来看,随着土层深度的增加各处理土壤pH值均有降低的趋势,且沼液灌溉条件下各土层pH值均小于C0和

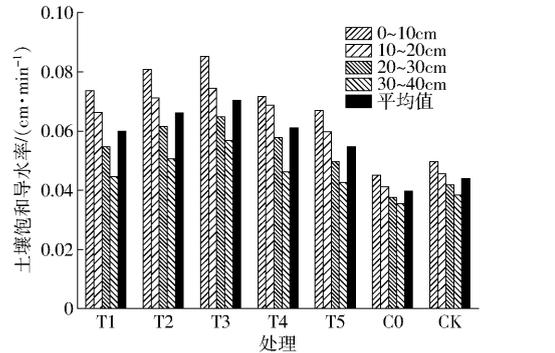


图2 不同处理的沼液灌溉下土壤剖面饱和导水率  
Fig.2 Saturated hydraulic conductivity of soil profiles under different treatments of biogas slurry irrigation

CK处理,其降低幅度为1.25%~3.75% ( $P < 0.05$ )。采用不同沼液配比和灌溉量施用,土壤pH值在各土层变化由大到小整体为T3、T2、T4、T5、T1。相同灌溉量下,随着沼液配比增大,对土壤pH值的降低作用逐渐增强,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,纯水处理(C0)表层土壤(0~20 cm)的pH值有所下降。说明灌溉沼液有利于土壤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4 果实成熟期不同土层深度土壤pH值及有机质质量比

Tab.4 Soil pH and organic matter quality ratio at different soil depths during fruit ripening stage

处理	土壤pH值				土壤有机质质量比/(g·kg <sup>-1</sup> )			
	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	7.98 <sup>b</sup>	7.95 <sup>b</sup>	7.93 <sup>b</sup>	7.91 <sup>b</sup>	12.48 <sup>d</sup>	18.51 <sup>d</sup>	11.33 <sup>d</sup>	9.01 <sup>c</sup>
T2	7.83 <sup>e</sup>	7.80 <sup>e</sup>	7.78 <sup>e</sup>	7.76 <sup>d</sup>	14.75 <sup>b</sup>	20.33 <sup>b</sup>	13.31 <sup>b</sup>	9.11 <sup>a</sup>
T3	7.80 <sup>e</sup>	7.78 <sup>e</sup>	7.75 <sup>f</sup>	7.71 <sup>e</sup>	15.18 <sup>a</sup>	21.37 <sup>a</sup>	14.09 <sup>a</sup>	9.15 <sup>a</sup>
T4	7.89 <sup>d</sup>	7.85 <sup>d</sup>	7.83 <sup>d</sup>	7.81 <sup>e</sup>	13.25 <sup>e</sup>	19.29 <sup>c</sup>	11.98 <sup>c</sup>	9.06 <sup>b</sup>
T5	7.93 <sup>c</sup>	7.91 <sup>e</sup>	7.87 <sup>e</sup>	7.84 <sup>c</sup>	11.97 <sup>e</sup>	18.08 <sup>e</sup>	11.05 <sup>d</sup>	8.97 <sup>e</sup>
C0	8.07 <sup>a</sup>	8.06 <sup>a</sup>	8.05 <sup>a</sup>	8.03 <sup>a</sup>	9.14 <sup>f</sup>	9.08 <sup>f</sup>	9.01 <sup>e</sup>	8.91 <sup>d</sup>
CK	8.09 <sup>a</sup>	8.07 <sup>a</sup>	8.03 <sup>a</sup>	8.01 <sup>a</sup>	9.20 <sup>f</sup>	9.15 <sup>f</sup>	9.11 <sup>e</sup>	8.94 <sup>d</sup>

从土壤有机质质量比变化来看,C0处理土壤有机质含量的变化规律与CK处理一致,其土壤有机质含量随土层深度增加呈下降趋势。沼液各处理

(T1~T5)土壤有机含量总体变化规律均随土层深度呈先增加后降低的趋势。在相同沼液配比条件下,各土层深度土壤有机含量随沼液灌溉量的增加

而增加;在相同沼液灌溉量条件下,各土层深度土壤有机质含量与沼液配比呈正相关,即各土层深度土壤有机质含量随沼液配比的增大而增大。说明沼液施用可以增加土壤有机质含量,而土壤有机质是土壤结构形成和稳定作用的核心物质,它能够团聚土壤颗粒形成水稳性团聚体<sup>[23]</sup>,进而改善土壤环境。

### 2.3.3 土壤生物学特性的响应

#### 2.3.3.1 土壤菌群

土壤中微生物菌群分布广、数量大、种类多,是土壤生物中最活跃的部分,不仅可以促进植物的生

长,还可以增强植物对土壤中营养元素的吸收能力,对维持土壤生态系统的平衡具有重要意义<sup>[24]</sup>。表 5 是番茄全生育期内土壤微生物区系变化情况。对比 C0 组,施用沼液明显增加各生育期内细菌数量。在相同沼液配比条件下,各生育期内土壤细菌数量随沼液灌溉量的增大而增加。在相同沼液灌溉量条件下,各生育期内土壤细菌数量同沼液配比呈正相关。同时,各处理在全生育期内的土壤细菌数量自苗期到果实膨大期呈增加趋势,阈值出现在果实膨大期,达到峰值后呈下降趋势。

表 5 不同生育期内番茄土壤微生物区系变化情况

Tab.5 Changes of soil microbial flora in tomato at different growth stages

CFU/g

处理	细菌数量				真菌数量				放线菌数量			
	苗期	开花结果期	果实膨大期	果实成熟期	苗期	开花结果期	果实膨大期	果实成熟期	苗期	开花结果期	果实膨大期	果实成熟期
T1	6.34 × 10 <sup>7d</sup>	6.41 × 10 <sup>7d</sup>	6.55 × 10 <sup>7d</sup>	6.48 × 10 <sup>7d</sup>	1.498 × 10 <sup>4d</sup>	1.529 × 10 <sup>4d</sup>	1.887 × 10 <sup>4d</sup>	1.493 × 10 <sup>4d</sup>	2.087 × 10 <sup>5d</sup>	3.026 × 10 <sup>5d</sup>	4.236 × 10 <sup>5d</sup>	5.718 × 10 <sup>5d</sup>
T2	6.91 × 10 <sup>7b</sup>	7.02 × 10 <sup>7b</sup>	7.21 × 10 <sup>7b</sup>	7.11 × 10 <sup>7b</sup>	1.626 × 10 <sup>4b</sup>	1.672 × 10 <sup>4b</sup>	2.060 × 10 <sup>4b</sup>	1.638 × 10 <sup>4b</sup>	3.130 × 10 <sup>5b</sup>	4.538 × 10 <sup>5b</sup>	6.353 × 10 <sup>5b</sup>	8.577 × 10 <sup>5b</sup>
T3	7.36 × 10 <sup>7a</sup>	7.44 × 10 <sup>7a</sup>	7.60 × 10 <sup>7a</sup>	7.50 × 10 <sup>7a</sup>	1.739 × 10 <sup>4a</sup>	1.775 × 10 <sup>4a</sup>	2.190 × 10 <sup>4a</sup>	1.728 × 10 <sup>4a</sup>	4.068 × 10 <sup>5a</sup>	5.899 × 10 <sup>5a</sup>	8.259 × 10 <sup>5a</sup>	11.150 × 10 <sup>5a</sup>
T4	6.51 × 10 <sup>7c</sup>	6.60 × 10 <sup>7c</sup>	6.75 × 10 <sup>7c</sup>	6.68 × 10 <sup>7c</sup>	1.539 × 10 <sup>4c</sup>	1.578 × 10 <sup>4c</sup>	1.945 × 10 <sup>4c</sup>	1.539 × 10 <sup>4c</sup>	2.408 × 10 <sup>5c</sup>	3.491 × 10 <sup>5c</sup>	4.887 × 10 <sup>5c</sup>	6.598 × 10 <sup>5c</sup>
T5	6.17 × 10 <sup>7e</sup>	6.23 × 10 <sup>7e</sup>	6.37 × 10 <sup>7e</sup>	6.31 × 10 <sup>7e</sup>	1.458 × 10 <sup>4e</sup>	1.487 × 10 <sup>4e</sup>	1.836 × 10 <sup>4e</sup>	1.454 × 10 <sup>4e</sup>	1.918 × 10 <sup>5e</sup>	2.685 × 10 <sup>5e</sup>	3.759 × 10 <sup>5e</sup>	5.075 × 10 <sup>5e</sup>
C0	5.58 × 10 <sup>7f</sup>	5.66 × 10 <sup>7f</sup>	5.78 × 10 <sup>7f</sup>	5.70 × 10 <sup>7f</sup>	1.321 × 10 <sup>4f</sup>	1.351 × 10 <sup>4f</sup>	1.669 × 10 <sup>4f</sup>	1.315 × 10 <sup>4f</sup>	1.427 × 10 <sup>5f</sup>	1.928 × 10 <sup>5f</sup>	2.602 × 10 <sup>5f</sup>	3.383 × 10 <sup>5f</sup>

从真菌数量的变化规律来看,各处理的土壤真菌数量在全生育期内总体表现为先增大后减小的趋势,阈值出现在果实膨大期。沼液灌溉处理较 C0 对照组,土壤真菌数量均表现为增加的趋势,但随着沼液配比的增大,真菌数量的增幅变缓,平均增幅由最大的 10.28% 下降到 5.99%,即随着沼液配比和灌溉量的增加会表现出抑制真菌数量增长的趋势。

放线菌数量的变化规律表明,各处理放线菌的数量自番茄苗期到果实成熟期表现出逐渐增加的趋势,果实成熟期的放线菌数量最高。在相同沼液配比条件下(1:4),土壤放线菌数量随沼液灌溉量的增大而增加。在相同沼液灌溉量条件下(T2、T4、T5),土壤放线菌数量随沼液配比的增大而增加。

#### 2.3.3.2 土壤酶活性

土壤酶参与了腐殖质的合成和分解,使植物和微生物残体的分解转化成植物可利用的养分形态<sup>[24]</sup>。不同沼液处理对日光温室土壤过氧化氢酶活性的影响(表 6)表明:不同沼液配比及沼液灌溉量对温室土壤过氧化氢酶活性的影响较小,总体表现为随着沼液配比及灌溉量的增加,过氧化氢酶的

活性略有变大。在全生育期内分析,随着番茄生育阶段的推进,过氧化氢酶活性逐渐增强,在果实成熟期的活性最高,初步分析是因为果实成熟期时值 6—7 月,此时温室内平均温度比较高,由此导致过氧化氢酶的活性较高,表明温度对土壤过氧化氢酶活性的影响更大。

表 6 不同施肥处理对温室土壤过氧化氢酶活性的影响

Tab.6 Effect of different fertilization on dynamic changes of catalase activity in greenhouse soil

mL/g

处理	过氧化氢酶活性			
	苗期	开花结果期	果实膨大期	果实成熟期
T1	6.68 <sup>cd</sup>	6.87 <sup>d</sup>	7.06 <sup>cd</sup>	7.27 <sup>e</sup>
T2	6.91 <sup>b</sup>	7.11 <sup>b</sup>	7.30 <sup>b</sup>	7.49 <sup>b</sup>
T3	7.10 <sup>a</sup>	7.30 <sup>a</sup>	7.48 <sup>a</sup>	7.67 <sup>a</sup>
T4	6.74 <sup>c</sup>	6.92 <sup>c</sup>	7.12 <sup>c</sup>	7.31 <sup>c</sup>
T5	6.61 <sup>d</sup>	6.81 <sup>d</sup>	7.00 <sup>d</sup>	7.18 <sup>d</sup>
C0	6.50 <sup>e</sup>	6.73 <sup>e</sup>	6.92 <sup>e</sup>	7.02 <sup>e</sup>

不同沼液施肥处理后,温室土壤蔗糖酶活性如图 3 所示,不同处理的沼液灌溉后均会提升日光温

室土壤蔗糖酶活性。T3 处理土壤蔗糖酶活性最高,表明沼液配比及沼液灌溉量越大,提升土壤蔗糖酶活性的能力越大。从苗期到果实膨大期,蔗糖酶活性均表现出增加的趋势,阈值出现在果实膨大期,达到峰值后蔗糖酶活性随着番茄生育期的推进变弱。果实膨大期土壤蔗糖酶活性最高,表明这个时期酶促反应加快,能够加快有机物质的分解,促进番茄生长。

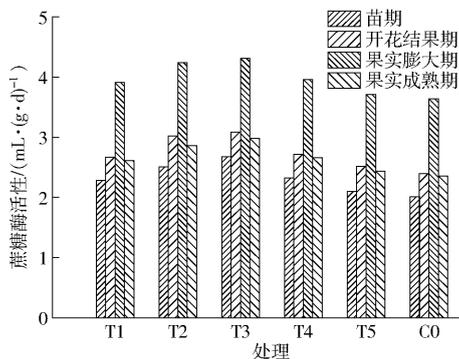


图3 不同施肥处理对温室土壤蔗糖酶活性的影响

Fig. 3 Effect of different fertilization on dynamic changes of sucrase activity in greenhouse soil

从图4可以看出,随着番茄的生长,温室土壤脲酶活性呈现先下降后上升趋势,自苗期到开花结果期呈下降趋势,最小值出现在开花结果期,此后随着生育期的推进呈上升趋势,且沼液施用量会在一定程度上增加脲酶活性。在相同沼液配比条件下,土壤脲酶活性最高的是T2处理,表明脲酶活性会随着沼液灌溉量的增加呈先增加后减小的趋势。相同沼液灌溉量的条件下,沼液配比越大提升土壤脲酶活性的能力越强。

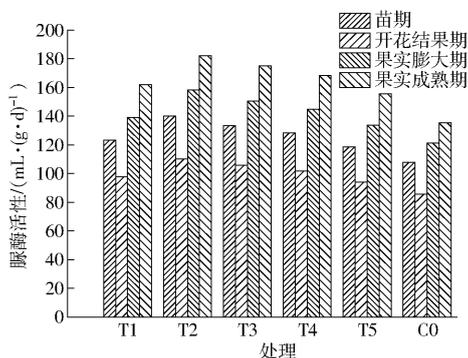


图4 不同施肥处理对温室土壤脲酶活性的影响

Fig. 4 Effect of different fertilization on dynamic changes of urease activity in greenhouse soil

### 3 讨论

设施农业由于其经济效益高和对环境适应性强等特点被广泛推广,但与之相悖的过量施加化肥和高强度的种植模式来增加经济效益导致设施土壤透气性差、土壤养分失衡和土壤结构恶化等后果,致使

设施农业的发展进入瓶颈期。近年来多种研究均表明沼液农用可以促进作物生长发育、提高产量以及改善品质。沼液应用于设施农业不仅可以减少化肥使用从而降低化肥对土壤结构的危害,又可以解决集约化禽畜养殖的粪便任意排放带来的环境压力问题。

ZHANG 等<sup>[25]</sup>研究表明,沼液是一种优质的有机肥料,富含丰富的有机质和营养物质,不仅可以维持农产品的质量,并且能够明显改善土壤的理化性质,与合成肥料相比,重金属含量更低。DUAN 等<sup>[26]</sup>研究也表明,适量灌溉厌氧发酵后的沼液有助于温室黄瓜产量的提高以及品质的改善,并能降低碳排放。赵莉等<sup>[27]</sup>试验结果表明,冲施沼液沼渣同样能有效促进株高与茎粗的生长发育,增加辣椒功能叶片的叶绿素,且每次每公顷冲施沼液沼渣 4 500 ~ 6 750 kg 时,辣椒产量最高。本文研究了不同沼液配比及灌溉量对设施番茄农艺性状、品质及产量的影响。发现施用沼液可以明显提高番茄的株高、茎粗以及单株叶面积,这与 ABUBAKER 等<sup>[4]</sup>研究结果一致,该研究表明沼液复合微生物菌肥的施用都可显著地促进不同生育期番茄植株的生长,且其促进作用优于其他无机肥等施肥类型。这是因为沼液中富含丰富的 N、P、K 等必需营养元素及微量元素,对于植物根系起到了“速效营养库”的作用,满足植株的营养需要<sup>[28]</sup>。本文研究还发现,主根长和根冠比与沼液配比以及沼液灌溉量呈负相关, HERRMANN 等<sup>[29]</sup>研究表明,根冠比和壮苗指标的变化,可作为施肥是否合适的一个重要指标。而施用沼液可以降低根冠比,这充分说明水肥可以调节作物根系和冠部的生长状况,从而保证作物处于最佳的生长状态。同时,本试验研究还发现,沼液灌溉可以增加番茄维生素 C、可溶性总糖、可滴定酸度、可溶性固形物含量以及增大番茄糖酸比和单株产量,虽然施用沼液会略微提升番茄可滴定酸度含量,但可溶性糖含量的增加幅度大于可滴定酸度含量,故施用沼液会增大番茄的糖酸比,说明施用沼液可以通过增加番茄可溶性总糖含量来改善番茄糖酸比,从而改善番茄口感,这与王卫平等<sup>[30]</sup>研究结果一致,此外,罗华等<sup>[31]</sup>的研究也表明可溶性糖是影响口感的主要因素之一,并对作物采后贮藏、运输中的营养品质变化也有重要影响。

姚向君等<sup>[32]</sup>研究表明,沼液含有丰富的营养成分,是农作物的无公害长效肥料,施用后能增产增收、改善土壤环境和土壤结构。本文研究发现,灌施沼液可以降低设施土壤容重、增大土壤总孔隙度、增大土壤饱和导水率,但土壤含水率和沼液配比关系

不大,只与沼液灌溉量呈正相关关系。而土壤容重是反映土壤松紧程度的重要指标,土壤松紧状况是土壤重要的物理性质之一,直接影响土壤肥力状况和植物根系的发育<sup>[33]</sup>,沼液各处理的试验结果充分说明沼液可以通过改善土壤容重和土壤物理结构来改善设施作物的生长环境从而达到增产的目的。赵晓艳<sup>[34]</sup>研究表明,有机肥中含有大量的微生物,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。本试验结果发现施用沼液可以增大土壤饱和导水率,而 HENDRY 等<sup>[35]</sup>认为土壤饱和导水率与土壤质地、体积质量和孔隙度关系紧密,进一步说明,沼液灌溉可以增大土壤孔隙,提高土壤饱和导水率,改善设施土壤物理结构。

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>[36-37]</sup>。王卫平等<sup>[38]</sup>的研究结果显示,施用沼液可以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。本研究也再次证明了上述结论,试验中发现灌施沼液后可以降低土壤 pH 值,而纯水灌溉则略微降低土壤 pH 值。杜臻杰等<sup>[39]</sup>认为,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,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 值的能力越强,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。此外本试验还发现,灌施沼液可以增加土壤有机质含量,这是因为沼液本身就富含丰富有机质,而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>[7]</sup>,故沼液施用不仅可以改善土壤物理环境,同时也可以改善土壤化学环境。

国内外诸多研究已证实施用沼液除了可以增加作物产量以外,还可以影响土壤微生物活性,增加土壤中细菌、真菌、放线菌的数量<sup>[40-43]</sup>,这与本试验研究结果一致。此外,本试验发现施用沼液后,在全生育期内土壤细菌数量表现出先增加后降低的趋势,阈值出现在果实膨大期。真菌数量呈先增加后降低的趋势,阈值出现在果实膨大期。放线菌数量呈逐渐增加的趋势,果实成熟期的放线菌数量最高。初步分析是因为果实膨大期作物生长旺盛,土壤酶促反应越发剧烈导致植物残体分解加快,故为微生物提供的能量物质也越多,有利于细菌和真菌的生长

繁殖;放线菌生长相较细菌和真菌而言,竞争力较弱,故在营养水平高的时期不占优势,而在果实成熟期,营养物质变得有限再加上细菌和真菌的生长变缓,减小了竞争,此时放线菌就变成占据优势的一方,故果实成熟期其生长旺盛,这与张无敌等<sup>[44]</sup>研究结果相近。郝鲜俊等<sup>[24]</sup>研究结果表明,细菌数量与真菌数量比值的降低,是设施土壤土传病害的原因之一,施用沼液可以显著提高连作土壤细菌数量与真菌数量比值,使土壤微生物多样性增加从而改善土壤微生态环境,本试验也发现施用沼液可以增大细菌数量与真菌数量比值,且在沼液配比 1:4、灌溉量 0.8AE<sub>p</sub> 时细菌与真菌数量比值增大幅度最大,进一步证实,T2 为各处理中最适合设施番茄生长的处理。

土壤酶是土壤中动植物及微生物活动的产物,施用沼液可以改善土壤酶的活性<sup>[43,45]</sup>。YANG 等<sup>[3]</sup>研究发现,施用沼液可以增大土壤脲酶以及蔗糖酶活性,而过氧化氢酶活性受温度变化的影响较大,且随温度升高有增加的趋势,这与本文的研究结果一致。本试验研究发现,在全生育期内分析,过氧化氢酶活性随着作物的生长而变高,在果实成熟期的活性最高,因为果实成熟期时值 6—7 月,此时的平均温度比较高,由此导致过氧化氢酶的活性较高,表明温度对土壤过氧化氢酶活性的影响更大。试验结果显示沼液配比越大,提升土壤蔗糖酶和脲酶活性的能力越大,万海文等<sup>[46]</sup>认为沼液中含有大量易分解的含氮化合物及生物活体,可以分泌脲酶和蔗糖酶等土壤酶类,故随着沼液配比的增大,分泌脲酶和蔗糖酶的能力越大。从全生育期来分析,蔗糖酶的活性均表现出先增加后下降的趋势,果实膨大期土壤蔗糖酶的活性最高,这是因为果实膨大期生长旺盛,促进蔗糖酶水解成葡萄糖,为微生物提供能量物质,有利于有机物质的分解<sup>[3]</sup>。试验发现全生育期内温室土壤脲酶的活性呈现先下降后上升的现象。而土壤脲酶是决定土壤氮转化的关键酶,随着作物的生长,作物根系分泌物增加以及土壤微生物数量增加导致土壤脲酶活性增强,促进土壤有机氮的转化,提高土壤氮素肥力,为作物生长提供更多氮素<sup>[3]</sup>。

## 4 结论

(1) 沼液施用对设施番茄的农艺性状、产量和品质均有显著影响,沼液灌溉能够提升设施番茄的农艺性状,提高作物品质及产量,结合三者(农艺性状、产量和品质)综合分析发现,T2(1:4、0.8AE<sub>p</sub>)为各处理中最适宜设施番茄的生长模式,更有利于番

茄生长和产量品质的形成。

(2)全生育期内施用沼液可以降低设施土壤容重,提高设施土壤孔隙度和土壤饱和导水率,进而改善土壤物理环境;同时,施用沼液还可以降低土壤pH值,增加土壤有机质含量,提高土壤的保肥性和缓冲性,促进土壤结构体的形成。

(3)全生育期内施用沼液可以明显提高土壤细菌、真菌、放线菌数量。全生育期内细菌和真菌数量自苗期到果实膨大期呈增加趋势,阈值出现在果实膨大期,达到峰值以后逐渐下降。而放线菌数量在生育期内呈逐渐增加趋势,阈值出现在果实成熟期。

同时,施用沼液还可以增大土壤细菌与真菌数量比值,从而降低设施土壤土传病害的能力,在增加土壤微生物多样性的同时,还能达到改善土壤生态环境的目的。

(4)沼液灌溉可以提高土壤中过氧化氢酶、蔗糖酶以及脲酶的活性。过氧化氢酶的活性从苗期到果实成熟期一直增强,阈值出现在果实成熟期。蔗糖酶的活性在苗期至果实膨大期之间增加,峰值出现在果实膨大期,此后其活性逐渐减弱。脲酶活性在生育期内呈先降低后增加的趋势,开花结果期达到最小值,然后逐渐增加。

#### 参 考 文 献

- [1] ZHANG Ying, WANG Pengjie, WANG Lei, et al. The influence of facility agriculture production on phthalate esters distribution in black soils of northeast China[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 506-507: 118-125.
- [2] 李俊, 李建明, 曹凯, 等. 西北地区设施农业研究现状及存在的问题[J]. *中国蔬菜*, 2013(6): 24-29.  
LI Jun, LI Jianming, CAO Kai, et al. Present status and existing problems of studies on protected agriculture in Northwest China [J]. *China Vegetables*, 2013(6): 24-29. (in Chinese)
- [3] YANG Hui, DU Taisheng, QIU Rangjian, et al. Improved water use efficiency and fruit quality of greenhouse crops under regulated deficit irrigation in northwest China[J]. *Agricultural Water Management*, 2017, 179: 193-204.
- [4] ABUBAKER J, RISBERG K, PELL M. Biogas residues as fertilisers-effects on wheat growth and soil microbial activities[J]. *Applied Energy*, 2012, 99(2): 126-134.
- [5] 李伟, 吴树彪, BAH H, 等. 沼气工程高效稳定运行技术现状及展望[J/OL]. *农业机械学报*, 2015, 46(7): 187-196.  
LI Wei, WU Shubiao, BAH H, et al. Status analysis and development prospect of biogas engineering technology[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(7): 187-196. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20150727&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150727&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.07.027. (in Chinese)
- [6] 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/OL]. *农业机械学报*, 2013, 44(8): 118-125.  
WU Shubiao, CUI Chang, ZHANG Xiaoqian, et al. Effect of biogas slurry on yield increase, quality improvement, water and soil environment[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(8): 118-125. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20130821&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130821&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.08.021. (in Chinese)
- [7] 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.  
ZHANG Wudi, YIN Fang, LI Jianchang, et al. Influence of biogas fluid on the organic matter content in soil and its fertilization effect[J]. *Renewable Energy Resources*, 2008, 26(6): 45-47. (in Chinese)
- [8] 郑学博, 樊剑波, 周静, 等. 沼液化肥配施对红壤旱地土壤养分和花生产量的影响[J]. *土壤学报*, 2016, 53(3): 675-684.  
ZHENG Xuebo, FAN Jianbo, ZHOU Jing, et al. Effects of combined application of biogas slurry and chemical fertilizer on soil nutrients and peanut yield in upland red soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53(3): 675-684. (in Chinese)
- [9] ISLAM M R, RAHMAN S M E, RAHMAN M M, et al. The effects of biogas slurry on the production and quality of maize fodder[J]. *Turkish Journal of Agriculture & Forestry*, 2010, 34(1): 91-99.
- [10] 唐华, 郭彦军, 李智燕. 沼液灌溉对黑麦草生长及土壤性质的影响[J]. *草地学报*, 2011, 19(6): 939-942.  
TANG Hua, GUO Yanjun, LI Zhiyan. Effects of slurry irrigation on ryegrass growth and soil properties[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2011, 19(6): 939-942. (in Chinese)
- [11] 冯丹妮. 连续定位施用沼液对水旱轮作耕层土壤微生物区系及酶活性的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(8): 1644-1651.  
FENG Danni. Influence of long-term applications of biogas slurry on microbial community composition and enzymatic activities in surface soil under rice-rape rotation[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(8): 1644-1651. (in Chinese)
- [12] 杨子峰, 陈伟强, 王伟, 等. 沼液施用对西兰花耕作土壤微生物特性的影响[J]. *中国农学通报*, 2017, 33(29): 112-115.  
YANG Zifeng, CHEN Weiqiang, WANG Wei, et al. Effects of biogas slurry on soil microbial characteristics of broccoli[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2017, 33(29): 112-115. (in Chinese)
- [13] OMAR E D K, BELAL E B, ELABD E N A. Effects of foliar application with compost tea and filtrate biogas slurry liquid on yield and fruit quality of Washington navel orange (*Citrus sinensis* Osbeck) trees[J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2012, 62(7): 767-772.

- [14] RIVA C, ORZI V, CAROZZI M, et al. Short-term experiments in using digestate products as substitutes for mineral (N) fertilizer: agronomic performance, odours, and ammonia emission impacts[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 547: 206–214.
- [15] 李军. 钼蓝比色法测定还原型维生素 C[J]. *食品科学*, 2000, 21(8): 42–45.  
LI Jun. Study on molybdenum blue method of L-VC test by spectrometry[J]. *Food Science*, 2000, 21(8): 42–45. (in Chinese)
- [16] GARG R N, PATHAK H, DAS D K, et al. Use of flyash and biogas slurry for improving wheat yield and physical properties of soil[J]. *Environmental Monitoring & Assessment*, 2005, 107(1–3): 1–9.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 程东娟, 张亚丽. 土壤物理实验指导[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2012: 13–43.
- [20] 靳彩霞. 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.  
JIN Caixia. Determination of soil organic matter by oil bath heating potassium dichromate volumetric method[J]. *Agricultural Science Technology and Information*, 2012(4): 33–34. (in Chinese)
- [21] 费良军, 汪爱科, 王龙飞, 等. 日光温室基质栽培樱桃番茄滴灌试验研究[J]. *排灌机械工程学报*, 2016, 34(12): 1070–1076.  
FEI Liangjun, WANG Aike, WANG Longfei, et al. Experiment on substrate cultivation of cherry tomatoes in sunlight greenhouse with drip irrigation[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2016, 34(12): 1070–1076. (in Chinese)
- [22] 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.  
WANG Jiandong, GONG Shihong, BAO Ziyun, et al. The effect of irrigation models on the change of soil volume-weight for no-tillage field[J]. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2013, 11(2): 130–136. (in Chinese)
- [23] LADO M, PAZ A, BENHUR M. Organic matter and aggregate size interactions in infiltration, seal formation, and soil loss [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 27(68): 935–942.
- [24] 郝鲜俊, 洪坚平, 乔志伟. 沼液对甘蓝连作土壤生物学性质的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2011, 17(3): 384–387.  
HAO Xianjun, HONG Jianping, QIAO Zhiwei. Effect of biogas slurry on biological properties of cabbage continuous cropping soil[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2011, 17(3): 384–387. (in Chinese)
- [25] ZHANG J, WANG M, CAO Y, et al. Replacement of mineral fertilizers with anaerobically digested pig slurry in paddy fields: assessment of plant growth and grain quality[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(10): 8916–8923.
- [26] DUAN N, LIN C, GAO R Y, et al. Ecological and economic analysis of planting greenhouse cucumbers with anaerobic fermentation residues[J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2011, 5(1): 71–76.
- [27] 赵莉, 于建光, 常志州, 等. 施用沼液对水芹产量及品质的影响[J]. *土壤*, 2014, 46(1): 94–99.  
ZHAO Li, YU Jianguang, CHANG Zhizhou, et al. Effect of biogas slurry on the growth and quality of *Oenanthe javanica*[J]. *Soils*, 2014, 46(1): 94–99. (in Chinese)
- [28] 王婧, 逢焕成, 李玉义, 等. 微生物菌肥对盐渍土壤微生物区系和食葵产量的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2012, 31(11): 2186–2191.  
WANG Jing, FENG Huancheng, LI Yuyi, et al. Effects of microbial fertilizer on soil microflora and sunflower yield in saline soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(11): 2186–2191. (in Chinese)
- [29] HERRMANN A, SIELING K, WIENFORTH B, et al. Short-term effects of biogas residue application on yield performance and N balance parameters of maize in different cropping systems[J]. *Journal of Agricultural Science*, 2013, 151(4): 449–462.
- [30] 王卫平, 陆新苗, 魏章焕, 等. 施用沼液对柑桔产量和品质以及土壤环境的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(11): 2300–2305.  
WANG Weiping, LU Xinmiao, WEI Zhanghuan, et al. Influences of applying biogas slurry on yield and quality of citrus and soil environment[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(11): 2300–2305. (in Chinese)
- [31] 罗华, 李敏, 胡大刚, 等. 不同有机肥对肥城桃果实产量及品质的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(4): 955–964.  
LUO Hua, LI Min, HU Dagang, et al. Effects of organic fertilization on fruit yield and quality of Feicheng peach (*Prunuspersica* cv. Feicheng)[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2012, 18(4): 955–964. (in Chinese)
- [32] 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.  
YAO Xiangjun, HAO Xianrong, GUO Xianzhang. Commercialized operation model and development of integrated energy-environment engineering on scaled livestock farms[J]. *Transactions of the CSAE*, 2002, 18(1): 181–184. (in Chinese)
- [33] 余薇薇, 张智, 罗苏蓉, 等. 沼液灌溉对紫色土菜地土壤特性的影响[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(16): 178–184.

- YU Weiwei, ZHANG Zhi, LUO Surong, et al. Characteristics of purple vegetable soil under biogas slurry irrigation[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(16): 178–184. (in Chinese)
- [34] 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.  
ZHAO Xiaoyan. Comparative study on application effect and mechanism of different bio organic fertilizers[D]. Beijing: China Agricultural University, 2003. (in Chinese)
- [35] 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.
- [36] 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.  
ZHANG Jinjin, DUAN Zengqiang. Preliminary study on classification & grading standards and causes & hazards of secondary salinization of facility vegetable soils[J]. Soils, 2011, 43(3): 361–366. (in Chinese)
- [37] MENG H, XU M, LÜ J, et al. Soil pH dynamics and nitrogen transformations under long-term chemical fertilization in four typical chinese croplands[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2013, 12(11): 2092–2102.
- [38] 王卫平, 朱凤香, 陈晓阳, 等. 沼液农灌对土壤质量和青菜产量品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2010, 22(1): 73–76.  
WANG Weiping, ZHU Fengxiang, CHEN Xiaoyang, et al. Effect of biogas slurry irrigation on soil quality and yield quality in *Brassica chinensis*[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2010, 22(1): 73–76. (in Chinese)
- [39] 杜臻杰, 齐学斌, 陈效民, 等. 生物质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.  
DU Zhenjie, QI Xuebin, CHEN Xiaomin, et al. Effect of biochar and piggery biogas slurry on hydraulic characteristic parameter of alluvial soil[J]. Journal of Soil & Water Conservation, 2014, 28(1): 189–192. (in Chinese)
- [40] ABUBAKER J, RISBERG K, JONSSON E, et al. Short-term effects of biogas digestates and pig slurry application on soil microbial activity[J]. Applied & Environmental Soil Science, 2015(1): 1–15.
- [41] WENTZEL S, JOERGENSEN R G. Effects of biogas and raw slurries on grass growth and soil microbial indices[J]. Journal of Plant Nutrition & Soil Science, 2016, 179(2): 215–222.
- [42] ZHENG X, FAN J, CUI J, et al. Effects of biogas slurry application on peanut yield, soil nutrients, carbon storage, and microbial activity in an Ultisol soil in southern China[J]. Journal of Soils & Sediments, 2016, 16(2): 1–12.
- [43] 钟珍梅, 黄秀声, 翁伯琦, 等. 沼液对种植狼尾草的山地红壤可溶性有机氮和土壤微生物特征的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(5): 111–116.  
ZHONG Zhenmei, HUANG Xiusheng, WENG Boqi, et al. Effect of biogas slurry application on soluble organic nitrogen and microbial characteristics of hilly red soil under *Pennisetum* (*P. americanum* and *P. purpureum*) grassland[J]. Journal of Soil & Water Conservation, 2015, 29(5): 111–116. (in Chinese)
- [44] 张无敌, 尹芳, 徐锐, 等. 沼液对土壤生物学性质的影响[J]. 湖北农业科学, 2009, 48(10): 2403–2407.  
ZHANG Wudi, YIN Fang, XU Rui, et al. Effect of biogas liquid on biological properties of soil[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2009, 48(10): 2403–2407. (in Chinese)
- [45] 冯伟, 管涛, 王晓宇, 等. 沼液与化肥配施对冬小麦根际土壤微生物数量和酶活性的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(4): 1007–1012.  
FENG Wei, GUAN Tao, WANG Xiaoyu, et al. Effects of combined application of biogas slurry and chemical fertilizer on winter wheat rhizosphere soil microorganisms and enzyme activities[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(4): 1007–1012. (in Chinese)
- [46] 万海文, 贾亮亮, 赵京奇, 等. 追施沼液对小麦光合特性及土壤酶活性和养分含量的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2017, 45(1): 35–44.  
WAN Haiwen, JIA Liangliang, ZHAO Jingqi, et al. Effects of topdressing biogas slurry on photosynthesis characteristic of wheat and soil enzyme activities and nutrient[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2017, 45(1): 35–44. (in Chinese)