苏佳雯,李海平,李灵芝,等.腐植酸液体有机肥提升番茄产量与品质的研究[J].山西农业大学学报(自然科学版),2024,44(6):59-67.
Su J W, Li H P, Li L Z, et al.Effects of humic acid liquid organic fertilizer on yield and quality of tomato[J].Journal of Shanxi Agricultural University(Natural Science Edition), 2024,44(6):59-67.
doi: 10.13842/j.cnki.issn1671-8151.202404058

腐植酸液体有机肥提升番茄产量与品质的研究

苏佳雯[1],李海平[1*],李灵芝[1],张慧[1],郭绪虎[2]

(1.山西农业大学 园艺学院,山西 晋中 030801;2.山西大同大学 农学与生命科学学院,山西 大同 037009)

摘　要:[目的]本试验旨在探究腐植酸液体有机肥不同施肥频次与浓度对基质培番茄生长、生理、产量与品质的提升效果,为生产实践提供参考。[方法]以'灵盈3号'番茄为试材,将腐植酸液体有机肥设为3个浇灌频次T1(1 d1次)、T3(3 d1次)、T5(5 d1次),3个浇灌浓度W50(稀释50倍)、W100(稀释100倍)、W200(稀释200倍),设计完全随机试验(CK、T1W50、T1W100、T1W200、T3W50、T3W100、T3W200、T5W50、T5W100、T5W200处理),3次重复。通过测定各处理番茄的生长、光合、矿质元素、产量与品质等方面指标,用隶属函数分析法对各指标进行综合评价。[结果]浇灌腐植酸液体有机肥后,各处理番茄的株高、茎粗、叶面积指数、地上部分干鲜重均增加,T3W50处理生长指标提升最显著;T1W200处理的光合作用效率最佳,其叶绿素总量、净光合速率、蒸腾速率与气孔导度分别显著提高72.04%、66.98%、99.37%、99.44%,胞间CO_2浓度显著降低,叶片PSⅡ最大光化学量子产量(Fv/Fm)、PSⅡ实际光化学效率(ΦPSII)及电子传递效率(ETR)等显著提高;苗期全氮(TN)、全磷(TP)及全钾(TK)含量最高分别可达56.02 mg•g^{-1}、7.93 mg•g^{-1}、66.48 mg•g^{-1},高频次处理效果最显著;T1W200处理对番茄产量与品质的综合促进效果最佳,其产量为46 020.59 kg•hm^{-2},比对照显著提高39.01%,可溶性蛋白含量达到45.27 mg•g^{-1}且比对照显著提高8.04%,还原糖与可溶性糖含量均显著高于其它处理,分别达到20.62%、7.67%,Vc与总酚含量分别达到0.51 mg•g^{-1}、1.24 mg•g^{-1},比对照显著提高41.67%、24.00%,果实风味得到明显提升。[结论]浇灌腐植酸液体有机肥可促进基质培番茄生长发育,提高产量并改善果实品质。经隶属函数分析,高频次低浓度(T1W200处理)对番茄各项指标的促进效果最佳,可有效实现基质培番茄高产优质的目标。

关键词:番茄; 腐植酸液体有机肥; 施肥频次; 施肥浓度; 产量与品质
中图分类号:S626.5　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1671-8151(2024)06-0059-09

近年来,设施农业生产过程中为片面追求高产而过量使用化肥的现象较为普遍[1]。由于缺乏科学的施肥指导,种植户常根据经验进行施肥,往往达不到理想的栽培效果,还会对农业生态环境造成负面影响。随着绿色发展理念的推广,无土栽培迎来新的发展机遇,而化肥的不合理施用也会给无土栽培带来盐渍化等危害,导致蔬菜产量与品质下降。增施液体有机肥能补充作物所需养分,促进根系发育,增强作物对养分的吸收能力,提高光合效率,可有效实现作物增产增质,有利于农业可持续发展。

有机肥种类的选择与施肥方式的合理搭配是提高蔬菜产量与品质的关键。在化肥使用零增长的大背景下,腐植酸肥料在农业生产中越来越受欢迎,具有一定实践意义。腐植酸是由动植物遗骸经过一系列地质变化,并经微生物降解和转化而成的有机物质,可添加在有机肥中成为腐植酸有机肥。腐植酸具有较强的生物活性,易被作物吸收,有利于促进作物生长发育,已被应用于多种农作物生产中。腐植酸主要通过影响作物体内酶、生长素、光合作用、养分吸收等对作物的生长发育进行调控[2]。腐植酸类有机肥能促进植物茎

收稿日期:2024-04-21　　**修回日期**:2024-05-17
基金项目:山西省高等学校科技创新项目(项目编号2020L0462)
作者简介:苏佳雯(ORCID:0009-0003-5361-3185),硕士研究生,研究方向:园艺植物栽培生理与品质调控
*通信作者:李海平(ORCID:0009-0008-4160-9732),副教授,硕士生导师,E-mail:lihp0205@163.com

叶生长并刺激根系生长[3],提高植物对矿质元素的吸收[4-5],同时提高叶绿素含量并促进光合作用,进而增加植株生物量。Li等[6]研究表明,添加腐植酸能提高西葫芦幼苗的抗氧化酶活性,降低叶片氧化损伤程度,提高叶绿素含量,促进植株生长。研究表明,腐植酸类有机肥对西葫芦[7]、辣椒[8]和水稻[9]等作物的生长发育、产量及品质有不同程度的促进作用。

不同作物对不同种类腐植酸有机肥的适宜用量与施用方法有不同要求。目前,针对基质培番茄并设置浇灌不同频次与浓度的腐植酸液体有机肥相关试验较少。鉴于此,本试验以'灵盈3号'番茄为材料,探索腐植酸液体有机肥不同施用方式对基质培番茄生长发育的影响机理,为番茄高产优质栽培提供一定参考。

1 材料和方法

1.1 试验材料

供试番茄品种为'灵盈3号';

基质配方为椰糠∶草炭∶珍珠岩=5∶4∶1(pH 6.05~6.07,EC 0.56~0.60),栽培容器为棕色塑料花盆(5.90~6.00 L);

无机营养液为山崎番茄配方营养液;

腐植酸液体有机肥试验样品指标:pH 5.65,腐植酸≥80 g·L^{-1},有机质≥120 g·L^{-1},N≥90 g·L^{-1},P_2O_5≥50 g·L^{-1},K_2O≥80 g·L^{-1}。

1.2 试验设计

试验于2023年3-10月在玻璃连栋温室(36°86′N,111°60′E)中进行。待番茄长到4叶1心时,选取大小长势一致的幼苗定植于装好基质的花盆中,缓苗7 d后开始处理。

选择腐植酸液体有机肥施用的频次与浓度设计完全随机试验。频次设3个水平,分别为T1(1 d1次)、T3(3 d1次)、T5(5 d1次);浓度设3个水平,分别为W50(稀释50倍)、W100(稀释100倍)、W200(稀释200倍)。不同频次与浓度组合为T1W50、T1W100、T1W200、T3W50、T3W100、T3W200、T5W50、T5W100、T5W200处理,设1个CK处理以不施腐植酸液体有机肥为对照。共10个处理,每个处理8株,重复3次。每株每次定量浇灌30 mL肥液(苗期)、60 mL肥液(开花期)、250 mL肥液(结果期),并与山崎番茄配方营养液交替灌溉(每株施用量相同)。各处理田间管理一致,单干整枝。在苗期测定番茄N、P及K含量,在结果期测定番茄生长指标与光合荧光参数,并测定前二穗果实的产量与品质指标。

1.3 测定指标与方法

1.3.1 生长指标

用卷尺测量番茄株高、叶长与叶宽;用游标卡尺测量茎粗;用电子天平(0.01 g)称量植株各器官鲜重;将鲜样于105 ℃烘箱杀青30 min,75 ℃下烘干致恒重后称量干重。涉及公式:

$$单片叶叶面积=0.258\times叶长\times叶宽+2.393\ 1 \quad (1)$$

$$叶面积指数=叶片总面积/地表面积 \quad (2)$$

1.3.2 光合指标

叶绿素含量采用95%乙醇比色法测定;于晴天上午9:00-11:00在自然光下用LI-6800光合仪测量叶片蒸腾速率、净光合速率、胞间CO_2浓度与气孔导度。测量时光量子通量密度设为500 μmol·m^{-2}·s^{-1},湿度设为50%。

1.3.3 荧光参数

用LI-6800光合仪荧光叶室测定光适应下荧光参数。包括PSⅡ实际光化学效率、有效光化学量子产量、电子传递效率、光化学猝灭系数及非光化学猝灭系数;暗适应1 h后,用荧光叶室测量暗适应下PSⅡ最大光化学量子产量。

1.3.4 矿质元素含量

在苗期将烘干的番茄植株磨碎、过筛并消煮后,用原子吸收分光光度计测定TK(全钾)含量,用钼锑抗比色法测定TP(全磷)含量,用杜马斯法测定TN(全氮)含量。

1.3.5 产量与品质

在番茄结果期,采集前二穗果实并测定产量与品质指标。使用水果硬度计FHT-05测量果实硬度;可溶性糖、还原糖、可溶性蛋白、V_C与总酚含量分别采用蒽酮比色法、3,5-二硝基水杨酸法、考马斯亮蓝比色法、钼蓝比色法及福林酚法测定。

1.4 数据分析

使用Excel 2016进行数据处理及表格制作,使用SPSS 26软件并运用Duncan's新复极差法进行显著性分析,采用隶属函数法[11]对各项指标进行综合评价。

2　结果与分析

2.1　腐植酸液体有机肥不同处理下番茄的生长指标

浇灌腐植酸液体有机肥后,番茄的株高与茎粗有不同程度提高,叶面积指数、地上部分干、鲜重均显著提高(如表1)。番茄株高以T3W100处理最大,比对照显著提高26.84%;茎粗提高最显著的为T3W50、T1W200与T1W100处理,分别比对照增加28.59%、22.65%、20.97%,且3组处理之间无显著差异;番茄叶面积指数相比对照均显著增加,增幅排序为T3W100>T1W200>T3W50处理,3组之间无显著差异,分别比对照显著增加150.69%、133.33%、126.39%;在高频次(T1)下,番茄地上部分干鲜重随浓度增大而降低;在中低频次(T3、T5)下,地上部分干鲜重随浓度减小而降低。番茄地上部分鲜重前3排序为T3W50>T3W100>T1W200处理,分别达到对照的2.66倍、2.64倍、2.58倍;番茄地上部分干重前3排序为T3W50>T1W200>T3W100处理,分别达到对照的2.13倍、1.99倍、1.96倍。

2.2　腐植酸液体有机肥不同处理下番茄的光合指标与荧光参数

2.2.1　光合指标

浇灌腐植酸液体有机肥后,番茄叶绿素含量显著提升,叶片净光合速率、蒸腾速率与气孔导度明显提高,胞间CO_2浓度降低(表2)。番茄叶绿素总量随施肥频次增加而提高,在高频次(T1)下随浓度增加而下降,在中频次(T3)下随浓度增加而上升。叶绿素总量以T1W200处理含量最高,比对照显著增加72.04%,T3W50处理次之,比对照提高59.14%;净光合速率增幅前3为T1W200>T3W50>T1W100处理,分别比对照增加了66.98%、58.00%、39.89%;T1W200处理的蒸腾速率显著高于其它处理,比对照提高99.37%;叶片气孔导度最大的为T1W200处理,其次为T3W50处理,比对照提高94.44%、88.89%;胞间CO_2浓度整体变化趋势相反,排序为T1W200<T3W50<T1W100处理,分别降低47.46%、40.12%、35.27%,且3组之间无明显差异。

2.2.2　荧光参数

浇灌腐植酸液体有机肥后,番茄叶片对光能的捕获、吸收及转换效率得到提高,光能耗散减少(表3)。各处理番茄叶片Fv/Fm均有提高,T3W50处理Fv/Fm值最大,比对照提高7.00%。其次为T1W200处理,增幅为6.07%;随着施肥频次与浓度的增大,叶片ΦPSⅡ整体表现出上升趋势。T1W50处理的ΦPSⅡ值最高,比对照增加了34.36%;T3W50处理叶片Fv′/Fm′值最大,比对照提高16.80%;叶片ETR值随施肥频次增加而增加,T1W50处理达到最大,增幅为34.17%;叶片qP值也随施肥频次的增加而增加,且仅在高频次下与对照存在显著性差异。T1W50处理叶片qP值最大,比对照提高了16.48%;各处理NPQ值均有降低,T3W100处理降幅最大,为23.53%。

表1　腐植酸液体有机肥不同处理下番茄的生长指标

Table 1　Growth index of tomatoes under different treatments of humic acid liquid organic fertilizer

处理 Treatments	株高/cm Plant height	茎粗/mm Stem diameter	叶面积指数 Leaf area index	地上部分鲜重/g Fresh weight of above ground part	地上部分干重/g Dry weight of above ground part
CK	133.00±4.11c	10.11±0.26f	1.44±0.10e	95.63±13.50e	15.22±0.93e
T1W50	142.03±6.75bc	10.72±0.58def	2.31±0.18d	150.37±7.38d	21.95±1.76d
T1W100	140.42±6.58bc	12.23±0.43abc	3.15±0.18b	214.87±12.57bc	28.49±2.24abc
T1W200	152.25±11.01abc	12.40±0.59ab	3.36±0.26ab	246.93±12.55a	30.35±3.07ab
T3W50	151.55±8.46abc	13.00±0.87a	3.26±0.26ab	254.43±16.35a	32.47±2.28a
T3W100	168.70±11.71a	11.51±0.70bcd	3.61±0.24a	252.70±19.77a	29.80±1.87ab
T3W200	165.76±20.91ab	10.37±0.66ef	2.71±0.15c	233.57±22.61abc	28.50±3.62abc
T5W50	155.61±18.82abc	11.00±0.24def	3.14±0.06b	240.13±12.88ab	28.57±1.05abc
T5W100	151.62±8.78abc	11.26±0.27cde	2.48±0.19cd	214.10±8.98bc	26.05±1.74bcd
T5W200	166.46±16.80ab	10.26±0.41ef	2.20±0.20d	208.80±16.81c	25.05±2.05cd

注:不同小写字母表示差异显著($P<0.05$),下同

Note:Different lower-case letters in the same column indicated significant differences ($P<0.05$). The same as below

表2 腐植酸液体有机肥不同处理下番茄叶片的光合指标

Table 2 Photosynthetic indexes of tomato leaves under different treatments of humic acid liquid organic fertilizer

处理 Treatments	叶绿素总量/(mg·g^{-1}) Chlorophyll content	净光合速率/(μmol·m^{-2}·s^{-1}) *Pn*	蒸腾速率/(mmol·m^{-2}·s^{-1}) *Tr*	气孔导度/(mol·m^{-2}·s^{-1}) *Gs*	胞间CO_2浓度/(μmol·mol^{-1}) *Ci*
CK	0.93±0.02e	12.81±1.07f	3.19±0.13f	0.18±0.01fg	330.47±16.55a
T1W50	1.41±0.04b	13.86±0.81def	3.07±0.24f	0.16±0.01g	335.14±8.68a
T1W100	1.42±0.12b	17.92±0.95b	5.02±0.18c	0.27±0.01c	213.99±15.40ef
T1W200	1.60±0.08a	21.39±0.45a	6.36±0.21a	0.35±0.02a	173.62±15.03g
T3W50	1.48±0.08ab	20.24±0.86a	5.75±0.37b	0.34±0.03ab	197.90±25.16fg
T3W100	1.10±0.06cde	15.96±1.98bcd	5.85±0.23b	0.30±0.01bc	223.37±13.21ef
T3W200	1.06±0.05de	13.27±0.87ef	4.47±0.22d	0.21±0.02ef	292.29±15.80bc
T5W50	1.11±0.10cd	16.29±1.40bc	4.36±0.43d	0.26±0.02cd	245.27±23.93de
T5W100	1.24±0.05c	15.25±0.55cde	3.78±0.15e	0.22±0.01de	278.55±6.73cd
T5W200	1.23±0.07cd	13.65±1.45ef	4.00±0.15de	0.20±0.02ef	318.13±15.54ab

表3 腐植酸液体有机肥不同处理下番茄番茄叶片的荧光参数

Table 3 Fluorescence parameters of tomato leaves under different treatments of humic acid liquid organic fertilizer

处理 Treatments	PSⅡ最大光化学量子产量 Fv/Fm	PSⅡ实际光化学效率 ΦPSⅡ	有效光化学量子产量 Fv′/Fm′	电子传递效率 ETR	光化学猝灭系数 qP	非光化学猝灭系数 NPQ
CK	0.758±0.015b	0.358±0.040e	0.518±0.017c	30.195±3.356f	0.619±0.062bc	1.262±0.072a
T1W50	0.783±0.013ab	0.481±0.019a	0.577±0.041ab	40.513±1.622a	0.721±0.037a	1.061±0.070ab
T1W100	0.796±0.007a	0.467±0.030ab	0.574±0.009ab	39.323±2.518ab	0.685±0.018ab	1.101±0.111ab
T1W200	0.804±0.012a	0.436±0.029abc	0.577±0.006ab	36.730±2.456abc	0.700±0.009a	1.122±0.096ab
T3W50	0.811±0.006a	0.426±0.009bcd	0.605±0.027a	36.069±0.352bcd	0.685±0.022ab	1.063±0.051ab
T3W100	0.803±0.011a	0.417±0.008cd	0.585±0.014ab	34.989±0.821cde	0.661±0.016abc	0.965±0.079b
T3W200	0.799±0.015a	0.405±0.016cde	0.569±0.040abc	34.164±1.374cdef	0.615±0.013c	1.162±0.103ab
T5W50	0.790±0.015ab	0.386±0.018de	0.573±0.015ab	32.574±1.556def	0.620±0.036bc	1.069±0.132ab
T5W100	0.800±0.009a	0.400±0.030cde	0.578±0.032ab	33.702±2.503cdef	0.613±0.042c	1.046±0.046b
T5W200	0.780±0.039ab	0.392±0.021cde	0.550±0.018bc	31.409±1.322ef	0.611±0.041c	1.019±0.150b

2.3 腐植酸液体有机肥不同处理下番茄苗期的矿质元素含量

浇灌腐植酸液体有机肥能显著提高番茄全株TN、TP、TK含量，高频次处理的番茄对矿质元素的吸收效果最佳(如表4)。随着施肥频次和浓度的增加，番茄植株TN含量呈上升趋势。T1W100处理的TN含量最高，为56.02 mg·g^{-1}，是对照的4.25倍。T5W200处理TN含量增幅最小；番茄植株TP含量随施肥频次和浓度的增加呈上升的趋势。T3W50处理TP含量最高，达到7.93 mg·g^{-1}，比对照增加22.76%；番茄TK含量在中低频次(T3、T5)下随浓度增加而上升，在高频次(T1)下随浓度增加而下降。T1W200处理TK含量最高，为66.48 mg·g^{-1}，比对照增加82.09%。

2.4 腐植酸液体有机肥不同处理下番茄的产量与品质

番茄的单果重、产量与果实硬度均只统计植株的前二穗果。由表5可见，番茄单果重由高到低为 T5W200＞T3W200＞T3W100＞T1W200，分别为136.55 g、134.93 g、133.70 g、113.78 g，比对照显著增加45.37%、43.65%、42.34%、21.13%，其余组单果重无明显增加；番茄产量(前二穗)最高的为T3W100处理，其单株产量为1 605.83 g，产量达到50 583.80 kg·hm^{-2}，比对照显著提高52.80%。其次为T1W200处理，番茄产量为46 020.59 kg·hm^{-2}，增幅为39.01%，T3W100与T1W200处理之间的产量无显著性差异；果实硬度最大的为T1W200处理，其次为T3W50处理，分别比对照显著提高13.31%、10.84%，其余组无显

表4　腐植酸液体有机肥不同处理下番茄苗期全氮、全磷、全钾含量

Table 4　Contents of TN, TP and TK in tomato seedlings under different treatments of humic acid liquid organic fertilizer

处理 Treatments	TN/(mg·g^{-1})	TP/(mg·g^{-1})	TK/(mg·g^{-1})
CK	13.19±1.28g	6.46±0.15e	36.51±2.94e
T1W50	55.23±1.64a	7.63±0.34abc	52.11±2.64c
T1W100	56.02±0.88a	7.86±0.27a	61.96±2.93ab
T1W200	43.79±2.80c	7.38±0.41abcd	66.48±3.99a
T3W50	48.45±2.43b	7.93±0.22a	65.03±4.07ab
T3W100	31.06±2.30d	7.13±0.50bcd	61.44±2.28ab
T3W200	23.66±3.00ef	7.01±0.24cde	53.05±3.24c
T5W50	41.57±2.45c	7.67±0.31ab	59.20±2.46b
T5W100	26.71±2.63de	7.13±0.35bcd	51.32±2.15c
T5W200	19.51±1.36f	6.93±0.13de	44.55±2.44d

著性提高。综上,随施肥频次和浓度增大,番茄产量呈先上升后下降的趋势;随施肥浓度减小,番茄单果重增加。

浇灌腐植酸液体有机肥后,番茄果实品质均得到不同程度提升(如表6)。T1W100、T1W200及T3W50处理果实中可溶性蛋白含量分别比对照显著增加9.45%、8.04%、6.99%,其它处理与对照无显著差异;T1W200处理果实还原糖含量最多,比对照增加9.33%,其余处理均无显著增加;数据显示,T1W100、T1W200及T3W50处理之间的可溶性糖含量无显著性差异,分别比对照显著提高56.02%、59.13%、56.22%;果实Vc含量由高到低为T1W100>T3W50>T1W200处理,分别比对照显著增加50.00%、47.22%、41.67%,明显高于其余处理;T1W100处理总酚含量最高,比对照提高29.00%。综上所述,增加施肥频次有利于提升番茄果实品质,当频次与浓度均过大时会产生抑制,T1W200处理对果实品质提升效果最佳。

2.5　不同处理下番茄生长生理、产量与品质的综合评价

经隶属函数综合分析,浇灌腐植酸液体有机肥能有效优化番茄的生长指标、矿质元素含量、光合荧光参数、产量与品质指标(表7)。综合评价顺序为:

T1W200>T3W50>T1W100>T3W100>T5W50>T1W50>T3W200>T5W100>T5W200>CK处理。

综上所述,在高频次低浓度(T1W200处理)下浇灌腐植酸液体有机肥效果最佳。

表5　腐植酸液体有机肥不同处理下番茄的产量

Table 5　Yield of tomatoes under different treatments of humic acid liquid organic fertilizer

处理 Treatments	单果重/g Single fruit weight	单株产量/g Yield per plant	产量/(kg·hm^{-2}) Yield	果实硬度/(kg·cm^{-2}) Fruit hardness
CK	93.93±12.23cd	1 050.95±54.99f	33 104.89±1 732.23f	5.26±0.69c
T1W50	87.10±4.56d	972.89±96.93f	30 645.91±3 053.29f	5.41±0.41bc
T1W100	96.08±8.15bcd	1 114.62±91.95ef	35 110.50±2 896.52ef	5.65±0.60abc
T1W200	113.78±14.12b	1 460.97±73.19ab	46 020.59±2 305.54ab	5.96±0.41a
T3W50	100.50±10.83bcd	1 393.28±110.80bc	43 888.44±3 490.09bc	5.83±0.57ab
T3W100	133.70±7.86a	1 605.83±117.77a	50 583.80±3 709.71a	5.45±0.43abc
T3W200	134.93±11.59a	1 367.74±87.76bcd	43 083.79±2 764.53bcd	5.30±0.21c
T5W50	100.53±13.43bcd	1 443.24±77.69bc	45 462.04±2 447.24bc	5.74±0.66abc
T5W100	109.25±14.85bc	1 300.60±83.63cd	40 968.88±2 634.30cd	5.45±0.41abc
T5W200	136.55±3.26a	1 218.73±64.36de	38 389.92±2 027.32de	5.27±0.50c

3　讨论

腐植酸可通过调控细胞激肽类、多肽和脱落酸的分布影响植物地上部生长,达到促进植物生长的效果[12]。申沐京[13]设置了2种腐植酸复合肥、3个浓度并施用于设施栽培辣椒,结果表明,腐植酸可有效促进辣椒生长,提高根系活力。樊洪涛[14]研究表明,施用腐植酸有机肥能增加苋菜株高,使叶色深绿、根系发达,使植株生长旺盛。Matthew等[15]发现,增加腐植酸施肥水平可改善秋葵的株高、叶面积、茎粗及果实数等性状,15.0 g HA处理效果较好。孔浩[16]试验得出,腐植酸型水溶肥能增加番茄株高、茎粗、叶面积及叶绿素相对

表6 腐植酸液体有机肥不同处理下番茄果实的品质指标

Table 6 Quality index of tomato fruits under different treatments of humic acid liquid organic fertilizer

处理 Treatments	可溶性蛋白含量/(mg·g^{-1}) Soluble proteins content	还原糖含量/% Reducing sugar content	可溶性糖含量/% Soluble sugar content	维生素C含量/(mg·g^{-1}) Vc content	总酚含量/(mg·g^{-1}) Total phenols content
CK	41.90±2.11d	18.86±1.35b	4.82±0.22d	0.36±0.02d	1.00±0.06f
T1W50	44.09±2.32abcd	19.67±1.13ab	6.30±0.36b	0.42±0.02bc	1.27±0.08ab
T1W100	45.86±0.73a	19.02±0.62b	7.52±0.23a	0.54±0.03a	1.29±0.12a
T1W200	45.27±1.05ab	20.62±1.08a	7.67±0.24a	0.51±0.02a	1.24±0.03abc
T3W50	44.83±2.35abc	19.13±0.86b	7.53±0.12a	0.53±0.06a	1.19±0.10abcd
T3W100	44.17±0.93abcd	19.28±0.62ab	6.59±0.35b	0.46±0.02b	1.14±0.12cde
T3W200	43.01±1.55bcd	20.28±1.78ab	5.43±0.11c	0.40±0.02cd	1.05±0.01ef
T5W50	43.29±2.99abcd	19.73±1.18ab	5.59±0.15c	0.45±0.02bc	1.21±0.06abcd
T5W100	42.40±2.36cd	19.01±0.40b	5.02±0.16d	0.44±0.03bc	1.17±0.10bcd
T5W200	42.41±1.74cd	19.09±0.36b	4.97±0.44d	0.41±0.05cd	1.11±0.05def

表7 不同处理下番茄的生长生理、产量与品质综合评价

Table 7 Comprehensive evaluation of growth and physiology, yield and quality of tomatoes under different treatments

处理 Treatments	生长指标 Growth index	矿质元素含量 Mineral element content	光合荧光参数 Photosynthesis and fluorescence parameters	产量品质指标 Quantity and quality	平均隶属函数 Average membership function	排名 Ranking
CK	0.000	0.000	0.022	0.033	0.014	10
T1W50	0.320	0.766	0.514	0.374	0.494	6
T1W100	0.650	0.935	0.690	0.626	0.725	3
T1W200	0.809	0.780	0.826	0.859	0.819	1
T3W50	0.872	0.925	0.794	0.652	0.811	2
T3W100	0.863	0.569	0.628	0.586	0.662	4
T3W200	0.646	0.390	0.337	0.416	0.448	7
T5W50	0.682	0.748	0.417	0.502	0.587	5
T5W100	0.555	0.423	0.413	0.315	0.426	8
T5W200	0.524	0.245	0.285	0.290	0.336	9

含量,若施肥浓度过高则出现抑制现象。本试验以不同浓度与频次的腐植酸液体肥与山崎番茄配方营养液交替灌溉,番茄的株高、茎粗、叶面积指数与地上部分干鲜重均不同程度提高,其中T1W200、T3W50与T3W100处理对番茄生长的促进作用显著,与上述研究结果基本相符,可能是由于腐植酸液体有机肥具有类似生长素的作用,能刺激植物根系生长,有利于养分吸收,促进植株生长。同时,腐植酸液体有机肥对番茄生长发育的效应与频次和浓度均有关系,超出适宜范围则会抑制番茄生长。

光合作用是有机物合成的途径,腐植酸类物质能提高植物叶绿素含量和光合速率,改善植株光合性能。张水花[17]的试验明确了优化提取物水溶性腐植酸有机肥能促进辣椒生长,显著提高叶绿素含量。Zheng等[18]通过设置黄腐酸与尿素的不同配比试验发现,100%黄腐酸处理(T5)水稻植株叶面积指数显著增加,生物量、叶绿素相对含量、Fv/Fm值与产量均达到最高。樊红梅[19]研究发现,腐植酸肥料处理能降低菊花叶片NPQ,提高Fv/Fm与ΦPSII,并提高叶绿素含量和叶绿体超微结构性能,说明腐植酸处理后,荧光和热耗散减少,叶片对光能的捕获和吸收利用能力增强,光能更多地被光系统吸收并用于光合作用,光合效率提高,光合产物积累增加。本试验与上述结论相似,合理浇灌腐植酸液体有机肥有利于显著增加番茄叶绿素含量,显著提升叶片光合指标,提高Fv/Fm、ΦPSII、Fv′/Fm′、ETR与qP,同时降低NPQ值,有利于提高叶片对光能的捕获量及转化效率,提升光合效率。

腐植酸能提高植物根系H^+-ATP酶等活性,刺激根伸长与侧根生长,增加根系活力,从而增强

植株对养分的吸收能力[20]。武月胜等[2]指出,腐植酸能促进作物对N、P、K元素的吸收。李杰等[21]研究证明,施用腐植酸肥可增加花椰菜对磷元素的吸收。Pavlovich等[5]研究发现,腐植酸肥料使蔬菜作物中钾元素含量显著增加。孙菡如[22]试验得出,腐植酸有机肥可提高番茄茎杆全氮含量,显著提高茎杆全钾含量与叶片N、P、K元素含量。孙海燕等[23]通过化肥减量并配施腐殖酸试验发现,在减少常规化肥用量15%的同时配施400 kg·hm^{-2}腐殖酸钾可有效增强玉米对N、K的吸收。与上述结论基本相符,本试验浇灌腐植酸液体有机肥显著促进了番茄植株对TN、TP、TK的吸收,可能是因为施入腐植酸液体有机肥能改善基质理化性质,活化养分并提高养分的有效性与肥料缓释性能,促进养分平衡供应,从而增强了番茄植株对TN、TP、TK的吸收能力。

实现农产品高产优质是设施蔬菜栽培的目标。陶启威等[24]研究不施肥、施液体有机肥作底肥、施液体有机肥作底肥+喷施液体有机肥对蔬菜的影响,结果表明,液体有机肥作底肥配合喷施的效果最显著,可使蔬菜增产13.73%~31.37%。王彪[25]设置了3个水平腐植酸有机肥施用量处理番茄,结果表明,番茄产量显著提高5.21%~14.73%,果实可溶性糖及Vc含量分别提高8.33%~17.95%、0.32%~23.27%。宋挚[12]研究了3个腐植酸有机肥施用比例对葡萄产量与品质的影响,结果表明,腐植酸有机肥20%碳量替代处理的产量最高,其单穗质量、可溶性固形物、可溶性糖与Vc含量均显著提高。郝晓莉[26]研究发现,施用腐植酸肥料后番茄果实的硬度、可溶性固形物及Vc含量优于其它肥料处理。此外,路希[27]研究了根区体积与施肥频次的耦合效应对番茄生长发育、产量与品质的影响发现,高频次(1 d1次)施用有机营养液虽能显著提高果实品质,却会降低单果重及产量。本试验结果与上述研究相似,合理浇灌腐植酸液体有机肥能显著提高番茄产量并改善果实品质。通过统计每组处理前二穗番茄的单果重、产量与果实硬度可知,T3W100处理产量最高,其次为T1W200处理,2组处理产量无显著差异;T1W200处理对果实品质的提升效果最佳,其可溶性蛋白、可溶性糖与Vc含量均显著增加。虽然增加施肥频次能显著提高番茄果实品质,但频次过高则会产生抑制作用,影响产量与单果重,这可能是因为频繁施肥使基质内养分积累过多,改变了基质的理化性质,根系活力降低,番茄不能有效吸收利用养分,从而导致营养元素吸收失衡,植株的生长及生理活动受到抑制,其机理还需今后进一步研究。

4　结论

为探究适宜基质培番茄的腐植酸液体有机肥施用组合,本试验设置了3个浇灌频次与3个浇灌浓度处理番茄。番茄的株高、茎粗、叶面积指数与地上部分干重最高可分别增加26.84%、28.59%、150.69%、113.34%。各处理番茄生长指标均有提高,其中T1W200、T3W50及T3W100处理的促进效果最显著。

T1W200处理番茄叶片光合作用效率提升最显著,其叶绿素总量、净光合速率、蒸腾速率与气孔导度分别显著提高72.04%、66.98%、99.37%、99.44%,胞间CO_2浓度降低47.46%,Fv/Fm、ΦPSII、Fv′/Fm′、ETR、qP值也显著提高,叶片对光能的捕获、利用及转换效率明显增强;番茄植株TN、TP、TK含量最高分别可达到56.02 mg·g^{-1}、7.93 mg·g^{-1}、66.48 mg·g^{-1},高频次处理下吸收效果最佳。

T1W200处理对番茄产量与品质指标的整体提升最显著,前2穗果产量达46 020.59 kg·hm^{-2},比对照显著提高39.01%,单果重为113.78 g,比对照显著增加21.13%,果实硬度比对照显著提高13.31%,果实中可溶性蛋白含量为45.27 mg·g^{-1},比对照显著提高8.04%,果实还原糖与可溶性糖含量达到20.62%、7.67%,比对照显著增加9.33%、59.13%,Vc与总酚含量为0.51 mg·g^{-1}、1.24 mg·g^{-1},比对照显著提高41.67%、24.00%。经隶属函数分析,T1W200处理对番茄生长生理、产量与品质的综合促进效果最显著。

参　考　文　献

[1]戚兴超.有机无机肥配施对设施番茄生长和土壤生态环境因子的影响及其机制[D]. 泰安:山东农业大学,2020.
Qi X C. Effects of combinative application of organic and chemical fertilizers on tomato growth in greenhouse and soil ecological environment factors and their relative mechanism[D]. Taian:Shandong Agricultural University,2020.

[2]武月胜,李海平,段旭锦,等. 腐植酸的农化效应综述[J]. 腐

植酸,2021(6):7-14.
Wu Y S, Li H P, Duan X J, et al. Summary on agrochemical effect of humic acid[J]. Humic Acid, 2021(6):7-14.

[3]Trevisan S, Francioso O, Quaggiotti S, et al. Humic substances biological activity at the plant-soil interface: from environmental aspects to molecular factors[J]. Plant Signaling & Behavior, 2010, 5(6):635-643.

[4]Kim Y S, Lee T S, Cho S H, et al. Growth and quality changes of creeping bentgrass by application of liquid fertilizer containing humic acid[J]. Weed & Turfgrass Science, 2017, 6(3): 272-281.

[5]Pavlovich L B, Strakhov V M. Effect of humic fertilizers from brown coal on the mineral composition of vegetable crops[J]. Solid Fuel Chemistry, 2018, 52(3):206-210.

[6]Li H P, Kong F R, Tang T T, et al. Physiological and transcriptomic analyses revealed that humic acids improve low-temperature stress tolerance in zucchini (*Cucurbita pepo* L.) seedlings[J]. Plants, 2023, 12(3):548-548.

[7]王研,李灵芝,郭文忠,等. 腐植酸对西葫芦幼苗生长、生理及水分利用率的影响[J]. 中国农学通报,2022,38(13):47-53.
Wang Y, Li L Z, Guo W Z, et al. Effects of humic acid on the growth, physiology and water use efficiency of zucchini seedlings[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2022, 38(13): 47-53.

[8]段剑波,杨培岭,任树梅,等. FA旱地龙对温室辣椒节水效应及产量品质的影响[J]. 水土保持学报,2006,20(2):126-128,148.
Duan J B, Yang P L, Ren S M, et al. Effects of FA handilong on water saving, yields and quality of greenhouse pepper[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2006, 20(2): 126-128, 148.

[9]Satish Kumar Y S, Nayak S B, Reddy C V C M, et al. Effect of potassium humate fertilizers on soil nutrients and productivity of rice crop in vertisols of southern India[J]. Ecology, Environment and Conservation Paper, 2023, 29(1):71-76.

[10]李灵芝,弓志青,李亚灵,等. 温室番茄长季节栽培生长发育特性的研究[J]. 华中农业大学学报,2003,22(4):395-398.
Li L Z, Gong Z Q, Li Y L, et al. The growth and development characteristic of tomato in greenhouse long-season cultivation[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2003, 22(4):395-398.

[11]杨然,郭树勋,杨小慧,等. 硅对低钾胁迫下番茄幼苗生长及生理特性的影响[J]. 山东农业科学,2022,54(9):55-63.
Yang R, Guo S X, Yang X H, et al. Effects of silicon on growth and physiological characteristics of tomato seedlings under low potassium stress[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2022, 54(9):55-63.

[12]宋挚,郭新送,范仲卿,等. 腐植酸等碳替代有机肥对葡萄产量、品质及土壤养分的影响[J]. 华北农学报,2022,37(3):158-167.
Song Z, Guo X S, Fan Z Q, et al. Effect of carbon replacement organic fertilizers such as humic acid on grape yield, quality and soil nutrients[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2022, 37(3):158-167.

[13]申沐京. 腐植酸复合液肥对设施辣椒施用效果初探[D]. 郑州:河南农业大学,2016.
Shen M J. The research on the effects of humic aid compound fertilizer on pepper production in greenhouse[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2016.

[14]樊洪涛. 含腐殖酸水溶肥在生产上的效用研讨[J]. 现代农业,2019(1):44-45.
Fan H T. Discussion on the utility of humic acid-containing water-soluble fertilizer in production[J]. Modern Agriculture, 2019(1):44-45.

[15]Aluko M, Alabi B T. Response of okra varieties to different fertilizer level of humic acid[J]. Asian Plant Research Journal, 2023, 11(6):74-80.

[16]孔浩. 腐殖酸型水溶肥料在黄瓜和番茄上的应用效果及推广应用[D]. 长春:吉林农业大学,2023.
Kong H. Application effect and popularization of humic acid water-soluble fertilizer on cucumber and tomato[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2023.

[17]张水花,李本鸿,段琼琼. 一种水溶性腐植酸有机肥的制备及产物性质研究[J]. 中国土壤与肥料,2021(5):291-295.
Zhang S H, Li B H, Duan Q Q. A method for producing water-soluble humic acid organic fertilize from brown coal and properties of products[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2021(5):291-295.

[18]Zheng E N, Qin M T, Zhang Z X, et al. Humic acid fertilizer incorporation increases rice radiation use, growth, and yield: a case study on the Songnen plain, China[J]. Agriculture, 2022, 12(5):653.

[19]樊红梅. 腐植酸对菊花光合特性、叶绿体超微结构和瓶插寿命的影响[D]. 泰安:山东农业大学,2015.
Fan H M. Effects of humic acid on the photosynthesis, chloroplast ultrastructure and vase life in *Chrysanthemum*[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2015.

[20]张水勤,袁亮,林治安,等. 腐植酸促进植物生长的机理研究进展[J]. 腐植酸,2018(1):46.
Zhang S Q, Yuan L, Lin Z A, et al. Research progress on the mechanism of humic acid promoting plant growth[J]. Humic Acid, 2018(1):46.

[21]李杰,贾豪语,颉建明,等. 生物肥部分替代化肥对花椰菜产量、品质、光合特性及肥料利用率的影响[J]. 草业学报,2015,24(1):47-55.
Li J, Jia H Y, Xie J M, et al. Effects of partial substitution of mineral fertilizer by bio-fertilizer on yield, quality, photosynthesis and fertilizer utilization rate in broccoli[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2015, 24(1):47-55.

[22]孙菡如. 三种有机肥料对设施番茄生长及土壤环境的影响[D]. 泰安:山东农业大学,2023.
Sun H R. Effects of three organic fertilizers on growth and soil environment of facility tomatoes[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2023.

[23]孙海燕,刘浩南,杜丹凤,等. 化肥减量配施腐殖酸对玉米抗氧化系统、养分吸收及干物质积累的影响[J]. 江苏农业科

学,2023,51(22):61-68.
Sun H Y, Liu H N, Du D F, et al. Impacts of chemical fertilizer reduction combined with humic acid on antioxidant system, nutrient absorption and dry matter accumulation of maize [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2023, 51(22): 61-68.
[24]陶启威,李瑞霞,王强,等. 绿博液体有机肥在蔬菜上的应用效果研究[J]. 现代农业科技,2018(22):65, 67.
Tao Q W, Li R X, Wang Q, et al. Study on the application effect of Lubo liquid organic fertilizer on vegetables [J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2018(22): 65,67.
[25]王彪. 腐植酸有机肥对蔬菜产量和品质影响的研究[D]. 延吉:延边大学,2011.
Wang B. Research of humic acid organic fertilizer on vegetable yield and quality[D]. Yanji: Yanbian University, 2011.
[26]郝晓莉,卜庆状,张馨予,等. 腐植酸基肥对日光温室番茄农艺性状、产量、品质的影响[J]. 园艺与种苗,2023,43(4):5-6,50.
Hao X L, Bu Q Z, Zhang X Y, et al. Humic acid basic fertilizer effects on agronomic traits, yield and quality of tomatoes in solar greenhouse [J]. Horticulture & Seed, 2023, 43(4): 5-6,50.
[27]路希. 番茄全有机营养栽培根区体积与灌溉及施肥频率的耦合效应研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2023.
Lu X. Study on the coupling effect of root zone volume with irrigation and fertilization frequency in tomato fully organic nutrient cultivation [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2023.

Effects of humic acid liquid organic fertilizer on yield and quality of tomato

Su Jiawen[1], Li Haiping[1*], Li Lingzhi[1], Zhang Hui[1], Guo Xuhu[2]
(*1.College of Horticulture, Shanxi Agricultural University, Jinzhong 030801, China; 2.College of Agronomy and Life Sciences, Shanxi Datong University, Datong 037009, China*)

Abstract: [Objective] This study aimed to provide insights for practical application by exploring the effects of different frequencies and concentrations of humic acid liquid organic fertilizer on tomato growth, yield, and quality. [Methods] Using the 'Lingying No. 3' tomato variety as test material, humic acid liquid organic fertilizer was applied at three irrigation frequencies: T1(daily), T3(every three days), and T5(every five days). Irrigation concentrations were set at three levels: W50(diluted 50 times), W100(diluted 100 times), and W200(diluted 200 times), forming a completely randomized design(CK, T1W50, T1W100, T1W200, T3W50, T3W100, T3W200, T5W50, T5W100, and T5W200) with three replicates each. Growth characteristics, photosynthetic efficiency, mineral content, yield, and quality were determined, and a membership function analysis method was used to evaluate the overall effects. [Results] Humic acid liquid fertilizer application significantly increased plant height, stem diameter, leaf area index, and above-ground dry and fresh weight. The T3W50 treatment showed the most notable growth improvements, while the T1W200 treatment maximized photosynthetic efficiency, increasing chlorophyll content, net photosynthetic rate, transpiration rate, and stomatal conductance by 72.04%, 66.98%, 99.37% and 99.44%, respectively, with a corresponding decrease in intercellular CO_2 concentration. Photosynthetic indices Fv/Fm, ΦPSII, and ETR also improved significantly. The highest nitrogen (TN), phosphorus (TP), and potassium (TK) contents were observed at the seedling stage, reaching 56.02 mg·g^{-1}, 7.93 mg·g^{-1} and 66.48 mg·g^{-1}, respectively, with high frequency treatments showing the greatest effect. The T1W200 treatment had the most favorable combined impact on yield and quality of tomato, with a yield of 46,020.59 kg·hm^{-2}, 39.01% higher than CK. Soluble protein content reached 45.27 mg·g^{-1}, 8.04% above the CK, while reducing sugar and soluble sugar content reaching 20.62% and 7.67% respectively, which significantly exceeded other treatments. Vitamin C and total phenolic content were determined as 0.51 mg·g^{-1} and 1.24 mg·g^{-1}, significantly enhanced by 41.67% and 24.00%, respectively, improving fruit flavor. [Conclusion] Applying humic acid liquid organic fertilizer promoted tomato growth in substrate cultivation, increasing yield and fruit quality. Membership function analysis indicated that the high-frequency, low-concentration T1W200 treatment was optimal for achieving high-yield, high-quality tomato production.

Keywords: Tomato, Humic acid liquid organic fertilizer, Fertilization frequency, Fertilizer concentration, Yield and quality

(编辑:吕俊俐)