陈达渝,白炬,李灵芝,等.不同氮素施用模式对大棚番茄产量和品质的影响[J].山西农业大学学报(自然科学版),2025,45(2):29-38.
Chen D Y, Bai J, Li L Z,et al.The effects of different nitrogen application methods on yield and quality of greenhouse tomatoes [J].Journal of Shanxi Agricultural University(Natural Science Edition), 2025,45(2):29-38.
doi: 10.13842/j.cnki.issn1671-8151.202404037

不同氮素施用模式对大棚番茄产量和品质的影响

陈达渝[1],白炬[2],李灵芝[1*],李海平[1],马鑫如[1],王艳芳[1],吴预贵[1],李俊楠[1],王珂[1],张春娟[3],程校琦[4]

(1.山西农业大学 园艺学院,山西 晋中 030801;2.山西农业大学 资源环境学院,山西 太原 030006;
3.山西运能电力科技有限公司 运城新源分公司,山西 运城 044000;4.瑞克斯旺(中国)农业科技有限公司,山东 青岛 266000)

摘　要:[目的]解决塑料大棚番茄生长发育期间施用氮肥不当而引起土壤退化、番茄产量及品质下降的问题。[方法]本试验以番茄品种'瑞粉882'为试验材料,以农户习惯施肥模式为对照(CK),以无氮、100%尿素、硝酸铵钙肥料替代尿素用量75%、螯合多肽钙镁肥替代尿素用量30%为4种不同氮素施加模式,分别用T1、T2、T3、T4表示,其中T2、T3、T4处理氮元素总量为对照处理氮元素施用量的95%,测定土壤中硝态氮与铵态氮含量、果实产量与品质等指标以比较不同氮素施加效果。[结果]在番茄定植90 d后,T4处理降低土壤中的硝态氮和铵态氮含量,提高0~60 cm土层中有机质含量。T4处理土壤养分的平均隶属函数值为0.763,评价最高。T4处理产量最高,为11.52 kg/m^2,与T3处理差异不显著,与其它处理差异显著,比CK增加31.64%。T4处理番茄果实的可溶性蛋白、可溶性糖和还原型维生素C含量分别比CK提高32.63%、12.00%和10.33%,均与CK存在显著性差异。[结论]螯合多肽钙镁肥替代尿素用量30%处理能有效提高番茄产量和品质,是增加设施土壤肥力、改善土壤养分供给的有效途径。

关键词:塑料大棚;番茄;螯合多肽钙镁肥;土壤养分;产量;品质
中图分类号:S626.4　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1671-8151(2025)02-0029-10

The effects of different nitrogen application methods on yield and quality of greenhouse tomatoes

Chen Dayu[1], Bai Ju[2], Li Lingzhi[1*], Li Haiping[1], Ma Xinru[1], Wang Yanfang[1], Wu Yugui[1], Li Junnan[1], Wang Ke[1], Zhang Chunjuan[1], Cheng Xiaoqi[4]

(*1.College of Horticulture, Shanxi Agricultural University, Jinzhong 030801, China; 2.College of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Taiyuan 030006, China; 3.Shanxi Yuncheng power Technology Co., Ltd. Yuncheng new source branch, Yuncheng 044000, China; 4.Rixwan (China) Agricultural Technology Co., LTD., Qingdao 266000, China*)

Abstract: [Objective] This study aimed to address the issues of soil degradation and reduced tomato yield and quality caused by improper nitrogen fertilizer application during the growth period of plastic greenhouses tomatoes. [Methods] In this experiment, the tomato variety 'Ruifen 882' was used as the experimental material. The conventional farmer fertilization practices were used as the control (CK), and four different nitrogen application methods were tested: no nitrogen (T1), 100% urea (T2), calcium ammonium nitrate replacing 75% of urea (T3), and chelated polypeptide calcium-magnesium fertilizer replacing 30% of urea (T4). The total nitrogen content in treatments T2, T3, and T4 was 95% of that in the control treatment. Indicators such as soil nitrate and ammonium nitrogen content, fruit yield, and quality were measured to compare the effects of different nitrogen application methods. [Results] At 90 days after tomato planting, the T4 treatment reduced soil nitrate and ammonium ni-

收稿日期:2024-04-15　　**修回日期**:2024-06-06
基金项目:山西农业大学"特""优"农业高质量发展科技支撑工程项目(TYGC23-16);山西农业大学番茄产业研究院项目(XDHZFQY2022-01);山西省农业农村"六新"项目(2021038);校地合作项目(2022QT001)
作者简介:陈达渝(ORCID:0009-0008-3531-353X),硕士研究生,研究方向:蔬菜栽培生理与品质调控
*通信作者:李灵芝(ORCID:0009-0004-7688-6255),教授,硕士生导师,研究方向:蔬菜栽培生理与品质调控,E-mail:lingzhili@sxau.edu.cn

trogen content while increasing organic matter content in the 0~60 cm soil layer. The average membership function value of soil nutrients in the T4 treatment was 0.763, the highest among all treatments. T4 treatment also achieved the highest yield of 11.52 kg/m^2, which was not significantly different from T3 treatment but significantly higher than other treatments, showing a 31.64% increase compared to CK. Additionally, the T4 treatment significantly improved the soluble protein, soluble sugar, and reduced vitamin C content in tomato fruits by 32.63%, 12.00%, and 10.33%, respectively, compared to CK. [Conclusion] The application of chelated polypeptide calcium-magnesium fertilizer replacing 30% of urea effectively increased tomato yield and quality, making it a viable approach for improving soil fertility and nutrient supply in greenhouse cultivation.

Keywords: Plastic greenhouse, Tomato, Chelating Oligopeptide Calcium-Magnesium Fertilizer, Soil nutrients, Yield, Quality

近年来,中国设施番茄种植面积持续增加,设施番茄栽培面积稳定在100万hm^{2}左右,占据番茄种植总面积的87%[1]。其中,设施蔬菜栽培具有高度集约经营特点,而伴随着土壤质量退化问题[2]。传统单一的氮肥施用模式易导致土壤退化,大量施用氮肥还会破坏生态环境稳定[3]。因此,采取均衡施肥方式和生物有机肥是确保土壤肥力和长期可持续生产力的关键[4]。氮素对植物生长至关重要,是构成重要生物分子的组成部分,适宜的氮素供应能促进植株的发育,同时影响着植物的光合作用[5-6]。然而,过度和低效的氮肥施用会带来经济和环境损失,因此如何高效施用氮肥对于农业生产至关重要[7]。

硝酸铵钙肥料能够迅速补充土壤中的硝态氮和铵态氮养分,有助于改善土壤环境并预防土壤退化[8]。相比之下,尿素、碳铵中的氮全部为铵态氮,需要经过微生物的硝化作用才能转化为硝态氮,显然植物更容易吸收硝酸铵钙中的氮[9]。螯合多肽钙镁肥是一种含有低聚肽(3.5%)、螯合钙(17.4%)和螯合镁(1%)等元素的氨基酸肥料,能够提供植物生长所需的氮素(有机氮15%)等多种元素,并改善土壤结构,对土壤重金属起控制作用、改变土壤中的微生物组成、可缓解土壤连作问题的特性以及促进植物对氮素的吸收利用[10-11]。螯合多肽的存在增强了肥料与土壤中微量元素的结合力,提高了肥料的利用效率;同时,其中的钙和镁是植物生长发育所必需的元素,有助于细胞壁形成,提高植物的抗逆性和品质,在改善土壤贫瘠、促进作物生长以及提高作物品质等方面效果显著[12-14];有机肥还能改善西葫芦幼苗的生长状况[15-16]。而目前生产研究中一般将有机肥作为基肥施用,生物有机肥和化肥配合作为追肥施用相对较少。本试验旨在通过改良施氮模式使设施土壤养分的供给得到改善,并研究改良后的施氮模式对番茄产量和品质的提升效果,筛选出适宜塑料大棚番茄种植的施氮模式,为肥料高效利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点与材料

试验于2023年4月-10月在大同市阳高县王官屯镇兴苑村大同市大山生态农业有限公司园区塑料大棚内(39°49′50"~40°31′10" N,113°28′36"~114°6′15" E)进行,试验地位于山西省东北部,昼夜温差大,塑料大棚为热镀锌钢结构,高度3.3 m,宽度8.0 m,南北朝向。

试验番茄品种为'瑞粉882'。所用肥料中,尿素含氮≥46%、硝酸铵钙含氮≥15%、螯合多肽钙镁肥含氮≥15%、过磷酸钙含五氧化二磷≥12%、硫酸钾中净含氧化钾≥52%。

1.2 试验设计

底肥为牛粪150 m^3/hm^2,羊粪300 m^3/hm^2,蚯蚓粪75 m^3/hm^2,过磷酸钙1500 kg/hm^2,硫酸亚铁750 kg/hm^2,将所有底肥均匀铺施于试验小区。在相同栽培条件下对番茄进行不同施氮模式处理,试验区划分为5个区域,分别以5种不同的施氮模式作追肥。以用肥量进行试验设计,农户习惯模式为对照(CK);无氮处理(T1);100%尿素(氮≥46%)作为氮肥处理(T2),T2处理氮元素施用量为CK氮元素施用量的95%;硝酸铵钙(氮≥15%)肥料替代尿素用量75%处理(T3),T3处理氮元素总量同样为CK氮元素施用量的95%;螯合多肽钙镁肥(氮≥15%)替代尿素用量30%处理(T4),同样T4处理氮元素总量同样为CK氮元素施用量的95%,除对照(CK)和处理T1正常施磷肥、钾肥外,其它处理都施用95%的磷、钾肥(表1)。在番茄定植缓苗结束后,随水追施试验肥料,每隔7 d追施一次,总共追施20次。试验处理设3次重复,试验小区种植总面积667 m^2。番茄采取一畦双行

种植,株距40 cm,大行距100 cm,小行距50 cm。

表1　不同施氮模式的施肥量

Table 1　Fertilizer application in different nitrogen application modes　　**kg/hm²**

处理 Treatments	氮素 N	五氧化二磷 P_2O_5	氧化钾 K_2O	硝酸铵钙 Calcium ammonium nitrate	螯合多肽钙镁肥 Chelating polypeptide calcium magnesium fertilizer
CK	75.0	103.1	162.7	0.0	0.0
T1	0.0	103.1	162.7	0.0	0.0
T2	71.3	97.9	154.6	0.0	0.0
T3	71.3	97.9	154.6	356.3	0.0
T4	71.3	97.9	154.6	0.0	142.5

1.3　测试指标及测定方法

在5个处理的试验小区中随机选取3处土壤取样点。测定土壤有机质(定植90 d后0～60 cm的土壤)以及氨态氮和硝态氮(分别测量定植30、60、90 d后0～60 cm的土壤)3项土壤养分指标。采用重铬酸钾外加热法对土壤有机质含量进行测定[17],采用紫外分光光度计法对氨态氮和硝态氮含量进行测定[18]。

在5个处理的试验小区里,选定5株具有代表性的番茄植株并标记,并对其鲜果重进行累计测产,按种植面积折合产量。果实完全成熟后采摘称量,并根据成熟的果实重量和果实个数计算果实的单果重,单果重为果实总重量除以果实数量。测定果实品质指标,参考高俊凤[19]等的方法:可溶性蛋白含量采用考马斯亮蓝G-250染色法测定;Vc含量采用钼蓝比色法测定;可溶性糖含量采用蒽酮比色法测定。

氮(磷、钾)肥偏生产力(Fertilizer partial factor productivity,PFP,kg/kg)的计算公式为:

$$PFP=Y/FT \quad (1)$$

式中:Y为作物产量(kg/hm²);FT为投入的氮、五氧化二磷、氧化钾的总量(kg/hm²)。

氮肥农学效率(Agronomy fertilizer use efficiency,AFUE,kg/kg)的计算公式为:

$$AFUE=(Y-YO)/FT \quad (2)$$

式中:YO为不施氮肥处理的产量(kg/hm²)

1.4　数据处理

试验数据处理及图表绘制使用Graphpad prism 8,Excel 2021,WPS 2021,SPSS 26.0软件,对数据进行单因素方差分析,采用Duncan法进行差异显著性比较($P<0.05$),综合评价采用隶属函数评价法。

2　结果

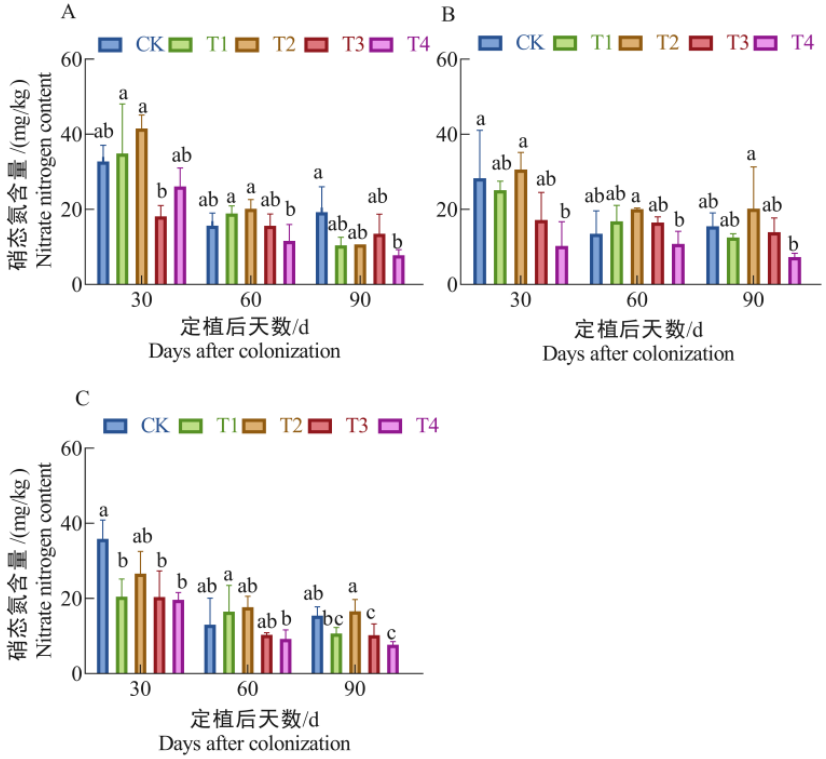
2.1　不同施氮模式下番茄根区土壤硝态氮的时空分布

定植30 d时,0～20 cm土层之中T3、T4土壤中硝态氮含量降低,分别比CK减少44.58%、20.15%(图1A);T3和T1、T2达到显著差异。在定植60 d时,T4土壤中硝态氮含量降低,比CK减少25.61%;T4和T1、T2存在显著差异。在定植90 d时,T1、T2、T3和T4土壤中硝态氮含量降低,分别比CK减少45.92%、44.46%、29.88%、59.71%;T4和CK存在显著差异。

定植30 d时,20～40 cm土层之中T1、T3和T4土壤中硝态氮含量降低,分别比CK减少11.31%、39.34%和63.73%;T4和CK、T2存在显著差异(图1B)。在定植60 d时,T4土壤中硝态氮含量降低,分别比CK减少19.89%;T2与T4相比,达到显著性差异。在定植90 d时,T4土壤中硝态氮含量降低,比CK减少52.92%;T2与T4相比,差异显著,显然在施氮水平相同时,T4土壤中硝态氮含量更低,番茄对土壤中硝态氮的吸收能力增强,导致土壤中硝态氮含量水平降低。

定植30 d时,40～60 cm土层之中T1、T3和T4土壤中硝态氮含量下降,分别比CK减少42.94%、43.12%和45.21%(图1C);T1、T3、T4和CK相比,均差异显著。在定植60 d时,T3、T4处理土壤中硝态氮含量降低,分别比CK减少了

20.66%、29.21%;T4和T1存在显著差异。在定植90 d时,T1、T3、T4处理土壤中硝态氮含量降低,分别比CK减少30.85%、33.85%、50.44%;T3、T4和CK差异显著;T2和T3、T4处理也存在显著差异。



图中不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。A为0~20 cm土层硝态氮含量;B为20~40 cm土层硝态氮含量;C为40~60 cm土层硝态氮含量。各处理施肥量见表1

Different lowercase letters in the figure indicate significant differences between treatments ($P<0.05$). A is 0~20 cm nitrate nitrogen content, B is nitrate content of 20~40 cm, C is nitrate content of 40~60 cm. Fertilizer application of different treatments were shown in Table 1

图1 不同施肥处理下土壤硝态氮含量

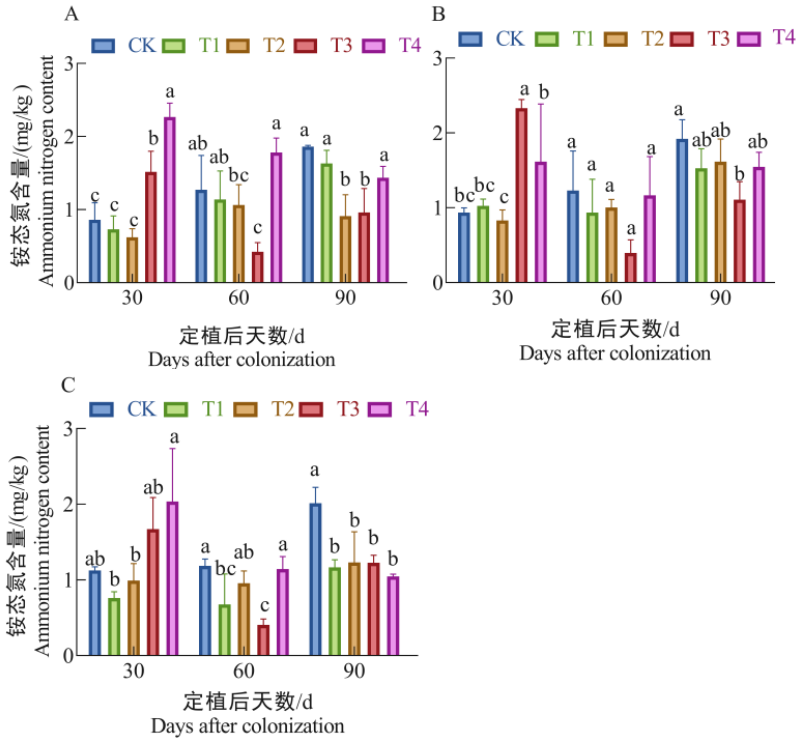
Fig.1 Soil nitrate nitrogen content under different fertilization treatments

2.2 不同施氮模式下番茄根区土壤铵态氮的时空分布

在0~20 cm土层定植30 d时,T3、T4土壤中铵态氮含量提高,分别比CK升高76.36%、163.37%(图2A);T3、T4和CK、T1、T2存在显著差异。在定植60 d时,T3土壤中铵态氮含量降低,比CK显著减少66.67%;T3和T4存在显著差异。在定植90 d时,T2、T3、T4土壤中铵态氮含量降低,分别比CK减少51.04%、48.39%、22.82%;T2、T3和CK存在显著差异。

在20~40 cm土层定植30 d时,T3、T4土壤中铵态氮含量提高,分别比CK升高149.20%、72.73%(图2B),且T3达到显著水平;T2、T3、T4之间存在显著差异。在定植60 d时,T1、T2、T3和T4土壤中铵态氮含量降低,分别比CK减少23.98%、18.29%、67.75%、5.16%。在定植90 d时,T1、T2、T3和T4土壤中铵态氮含量降低,分别比CK减少20.51%、15.93%、42.32%、19.50%;T3和CK存在显著差异。

在40~60 cm土层定植30 d时,T3和T4土壤中铵态氮含量提高,分别比CK升高48.44%、80.89%(图2C);T4和T1、T2存在显著差异。在定植60 d时,T1、T2、T3和T4土壤中铵态氮含量降低,分别比CK减少43.04%、19.41%、65.82%、3.58%;T3较CK、T2和T4存在显著差异。在定植90 d时,T1、T2、T3和T4土壤中铵态氮含量降低,分别比CK减少42.09%、38.80%、39.16%、48.06%;T1、T2、T3、T4和CK存在显著差异。



图中不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。A为0～20 cm土层硝态氮含量;B为20～40 cm土层硝态氮含量;C为40～60 cm土层硝态氮含量。各处理施肥量见表1

Different lowercase letters in the figure indicate significant differences between treatments ($P<0.05$). A is 0～20 cm nitrate nitrogen content, B is nitrate content of 20～40 cm, C is nitrate content of 40～60 cm. Fertilizer application of different treatments were shown in Table 1

图2　不同施肥处理下土壤铵态氮含量

Fig.2　Soil ammonium nitrogen content under different fertilization treatments

2.3　不同施氮模式下土壤有机质的空间分布

在0～20 cm土层中,T4对土壤有机质养分的提高效果最为显著。相比CK,T4的有机质含量显著提高64.8%(表2);CK、T1、T2、T3和T4存在显著差异。在20～40 cm土层中,T4的土壤有机质含量的提高效果最为显著,相比CK,T4的有机质含量显著提高36.99%;CK、T2、T3和T4存在差异显著。在40～60 cm土层中,T1、T3、T4的有机质含量相较于CK均有不同程度的提高,分别提高23.31%、25.92%、39.66%;且T4相较于CK、T2存在显著差异。

2.4　不同施氮模式下番茄的产量及果实品质

2.4.1　不同施氮模式下番茄的产量

在5个试验区中,经过T3、T4的施氮处理后,T3、T4番茄单果重高于其它施氮处理,T4番茄的单果重最大,为183.91 g,较CK显著提高19.03%。T3、T4的产量达11.40、11.52 kg/m^2(表3),较CK分别显著提高30.23%、31.64%;T3、T4和CK、T1、T2存在显著差异。各处理对番茄果实产量的增产效果依次为:T4>T3>T2>CK>T1,分别比CK提高31.64%、30.23%、0.39%、−22.37%。

2.4.2　不同施氮模式下番茄的果实品质

可溶性糖作为果实评价的关键指标,范围在20～60 mg/g[20],直接影响着番茄的果实风味。T3、T4可溶性糖含量达63.47、64.70 mg/g,相较于CK分别显著增加9.88%、12.00%;且T3、T4均和CK、T1存在显著差异(表4)。T1可溶性糖含量为50.76 mg/g,相较于CK降低12.13%;且T1和CK、T2、T3、T4存在显著差异。T4可溶性蛋白含量达12.07 mg/g,比CK显著增加32.63%;且T4和CK、T1、T2、T3存在显著性差异;T1可溶性蛋白含量达7.43 mg/g,比CK显著降低18.36%;且T1和CK、T3、T4存在显著性差异。在番茄果实中,还原型维生素C的含量大约为50～150 μg/g[20]。相较于CK,T3和T4还原型维生素C的含量达82.19、82.61 μg/g,分别提高9.77%和10.33%;且T3、T4均与CK、T1、T2差

表2 不同处理下不同土层有机质的含量

Table 2 Content of organic matter in different soil layers under different treatments g/kg

处理 Treatments	0～20 cm土层 0～20 cm soil layer	20～40 cm土层 20～40 cm soil layer	20～40 cm土层 20～40 cm soil layer
CK	18.52±4.05b	21.94±3.03b	20.97±1.31b
T1	22.70±4.18b	25.75±1.26ab	25.86±1.08ab
T2	19.82±2.31b	21.59±2.78b	20.75±3.94b
T3	22.38±3.43b	23.84±1.40b	26.41±2.56ab
T4	30.53±1.25a	30.05±1.71a	29.29±4.38a

注:数据为平均值±标准差,同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

Note:Data are mean±standard deviation. Different lowercase in the same columnletters indicate significant differences between treatments ($P<0.05$).

异显著。T1还原型维生素C含量为58.66 μg/g,相较于CK降低21.65%,且T1和CK、T2、T3、T4存在显著差异。

表3 不同施肥处理下番茄的产量

Table 3 Yield of tomato under different fertilization treatments

处理 Treatments	单果重/g Weight of single fruit	单株产量/g Yield per plant	产量/(kg/m^2) Yield
CK	154.51±7.55c	2 626.61±128.31b	8.75±0.43b
T1	149.94±8.72c	2 039.17±118.64c	6.80±0.40c
T2	160.79±5.43bc	2 636.88±89.13b	8.79±0.30b
T3	171.03±6.76ab	3 420.59±135.24a	11.40±0.45a
T4	183.91±10.13a	3 457.55±190.40a	11.52±0.63a

注:数据为平均值±标准差,同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

Note:Data are mean±standard deviation. Different lowercase in the same column letters indicate significant differences between treatments ($P<0.05$).

2.5 不同施氮模式下土壤养分指标隶属函数值

T4处理各种土壤养分隶属函数值最高,T3处理各种土壤养分隶属函数值次之,T2处理各种土壤养分隶属函数值最低,综合评价顺序为:T4>T3>T1>CK>T2(表5)。T4处理能提高番茄对土壤中硝态氮的吸收,有效减少土壤中硝态氮的积累,增加土壤中铵态氮的含量,并提高土壤有机质含量,使T4处理下各种土壤养分指标的隶属函数值为最大。

表4 不同施肥处理下番茄的品质

Table 4 Quality of tomato under different fertilization treatments

处理 Treatments	可溶性糖含量/(mg/g) Soluble sugar content	可溶性蛋白含量/(mg/g) Soluble sugar content	还原型维生素C含量/(μg/g) Reduced vitamin C content
CK	57.76±1.30c	9.10±0.76bc	74.87±2.59b
T1	50.76±1.18d	7.43±1.20d	58.66±3.74c
T2	59.07±2.70bc	8.35±0.32cd	76.96±1.61b
T3	63.47±3.07ab	10.54±0.72b	82.19±3.67a
T4	64.70±2.96a	12.07±1.73a	82.61±2.85a

注:数据为平均值±标准差,同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

Note:Data are mean±standard deviation. Different lowercase in the same column letters indicate significant differences between treatments ($P<0.05$).

表5 不同处理土壤养分积累隶属函数值

Table 5 Membership function values of soil nutrient accumulation under different treatments

指标 Index	CK	T1	T2	T3	T4
硝态氮 Nitrate nitrogen	0.329	0.412	0.050	0.629	0.962
铵态氮 Ammoniacal nitrogen	0.681	0.346	0.323	0.262	0.721
土壤有机质 Soil organic matter	0.022	0.479	0.036	0.416	1.000
平均隶属函数 Average membership function	0.344	0.413	0.136	0.436	0.894
排序 Rank	4	3	5	2	1

2.6 不同施氮模式下番茄产量和品质的隶属函数值

T4处理番茄果实产量和品质平均隶属函数值最高,T3番茄果实产量和品质的平均隶属函数值次之,T1番茄果实产量和品质平均隶属函数值最

低,综合评价顺序为:T4>T3>T2>CK>T1(表6)。T4施氮处理能提高番茄产量及果实中的可溶性蛋白、可溶性糖和还原性维生素C的含量,T4处理下番茄产量和品质指标的隶属函数值最大。

2.7　不同施氮模式的氮、磷、钾肥偏生产力及农学效率

T3、T4氮、磷、钾肥偏生产力相对于CK显著增加;T4氮肥偏生产力最高,为1 617.4 kg/kg,相对于CK处理增加38.56%;T3的氮肥偏生产力次之,为1 600.1 kg/kg,相对于CK处理增加37.08%(表7)。各处理磷肥偏生产力从小到大依次为:T1、CK、T2、T3、T4;T4的磷肥偏生产力最高,为1 177.0 kg/kg。各处理钾肥偏生产力从小到大依次为:T1、CK、T2、T3、T4;T4的钾肥偏生产力最高,为745.5 kg/kg。硝酸铵钙和螯合多肽钙镁肥配施即T3、T4的氮肥农学效率显著大于单施尿素的CK,分别显著提高147.53%、154.16%。

表6　不同处理下番茄产量和品质的隶属函数值

Table 6　Membership function values of tomato yield and quality under different treatments

指标 Index	CK	T1	T2	T3	T4
产量 Yield	0.41	0.00	0.42	0.97	1.00
可溶性蛋白含量 Soluble protein content	0.55	0.00	0.44	0.77	1.00
可溶性糖含量 Soluble sugar content	0.50	0.00	0.60	0.91	1.00
还原性维生素C含量 Reducing VC content	0.68	0.00	0.76	0.98	1.00
平均隶属函数 Average membership function	0.54	0.00	0.56	0.91	1.00
排序 Rank	4	5	3	2	1

3　讨论

过量氮肥会导致土壤中氮的累积,进而影响番茄的生长环境。此外,过量氮肥还可能导致植株对其它关键营养元素的吸收和利用产生竞争,从而降低了氮肥的生产力效率。马新超[21]研究发现施氮量与氮肥偏生产力呈极显著负相关,这与本研究的结果类似。本研究结果发现单一施氮模式(CK)与(T2)相比,氮(磷、钾)肥偏生产力及氮肥农学效率均随施肥量的增加而降低;同时,本研究还发现适当减少氮、磷、钾肥施用量(T3、T4)可显著提高氮(磷、钾)肥偏生产力以及氮肥农学效率(表7)。主要原因是适当减少化肥施用量能够提高肥料利用率。

作物产量能综合反映土壤肥力高低,不同施肥处理的土壤肥力也必然反映出作物产量的变化[22]。过量施用化肥,并不能保证作物持续高产,相反会降低肥料的利用率和质量。合理的减量施肥及有机肥配施,不仅作物产量不会降低,还能够提高作物品质和土壤肥力。施用有机肥,有利于土壤团粒结构的形成,增加土壤孔隙度,提高土壤透气性和保水能力,从而促进作物对土壤养分的吸收,进而提高作物的产量和品质[23-24]。Jin等[25]研究发现生物化肥减量加有机肥配施下作物产量得到提升,且这种肥料组合的方式可改善作物和土壤质量。Cai等[26]研究结果表明,有机肥能提高番茄的产量。马祥等[27]的研究表明生物有机肥能够使土壤肥力增加,提高有机质含量,这与本研究的结果类似。本研究结果发现,化肥减量配施有机肥可以增加土壤有机质含量(表2),同时还能降低番茄定植90 d后土壤硝态氮和铵态氮的积累(图1、图2)。本研究还发现,番茄产量与土壤有机质、氮、磷、钾肥偏生产力及氮肥农学效率呈显著正相关(表7)。因此,在本研究中,螯合多肽钙镁肥替代尿素用量30%(T4)的施肥方式同样能使土壤中有机肥含量显著提高,提升土壤肥力,同时还降低了土壤中速效养分硝态氮和铵态氮积累。

混合氮源施肥(T3、T4)可提供更为全面的营养供给,包括多种形态的氮素和其它关键营养元素,这有助于植株充分吸收和利用各种营养成分,从而促进番茄果实的全面发育和品质提升。混合氮源施肥提高氮素的利用效率,减少氮素的损失,使得植株更有效地利用氮素进行生长和代谢,从而提升果实品质[28]。相较于单一尿素施肥(CK),混合氮源施肥可能减少了土壤中氮素的累积量,降低对土壤环境的负面影响,有利于维持良好的生长环境,进而改善番茄果实的品质。张佼等[29]

研究表明有机肥+复合肥处理显著增加番茄的可溶性蛋白和Vc,提高了番茄果实品质。Chang等[30]研究表明施用生物有机肥可以提高番茄品质,包括可溶性固形物含量和糖酸比。Khasawneh等[31]研究表明施用混合氮源的杏树的果实总可溶性糖含量增加34%,蔗糖含量增加38%。该研究发现施用混合氮源可以提高设施番茄的可溶性糖、还原型维生素C和可溶性蛋白含量(表4),可能是T3、T4施氮处理改善土壤环境和提高土壤肥力,可以刺激土壤微生物的繁殖和活动,有助于基肥中的有机肥分解,从而增加土壤中的有机质含量,释放更多的酶类、糖类和生长促进剂等物质[32]。而还原型维生素C和可溶性糖含量与土壤有机质含量呈显著正相关,更进一步证实了这一点。可溶性蛋白质是植物体内氮素存在的主要形式,氮、磷、钾养分供应充足有利于蛋白质的合成。番茄可溶性蛋白质含量与氮、磷、钾肥偏生产力及氮肥农学效率呈显著正相关关系(表7),混合氮源施肥提高肥料利用率,改善土壤环境有可能是增加番茄可溶性蛋白质含量的直接原因。说明混合氮源施肥(T3、T4)番茄果实发育良好,可溶性蛋白等物质含量增多,会提高番茄的营养品质,对改善番茄的品质和口感有重要意义。

表7 不同处理的氮、磷、钾肥偏生产力及农学效率

Table 7 Partial productivity and agronomic efficiency of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizer under different treatments

kg/kg

处理 Treatments	氮肥偏生产力 PFPN	磷肥偏生产力 PFPP	钾肥偏生产力 PFPK	氮肥农学效率 AFUEN
CK	1 167.3±57.0b	849.4±41.5b	538.0±26.3b	261.1±57.0b
T1	—	694.2±40.4c	439.7±25.6c	—
T2	1 233.5±41.7b	897.6±30.3b	568.6±19.2b	279.6±41.7b
T3	1 600.1±63.3a	1 164.4±46.0a	737.6±29.2a	646.2±63.3a
T4	1 617.4±89.1a	1 177.0±64.8a	745.5±41.1a	663.5±89.1a

注:数据为平均值±标准差,同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

Note: Data are mean±standard deviation. Different lowercase in the same line letters indicate significant differences between treatments ($P<0.05$).

4 结论

本研究通过改良施氮方式使设施土壤养分的供给得到平衡,明确了改良后的施氮方式对番茄产量和品质的提升效果。在番茄定植90 d后螯合多肽钙镁肥替代尿素用量30%处理可以降低土壤中的硝态氮和铵态氮含量,提高0~60 cm土层有机质含量。采用隶属函数分析法对不同施氮方式下土壤养分进行综合评价,5个处理综合评价从大到小依次为T4>T3>T1>CK>T2,表明螯合多肽钙镁肥替代尿素用量30%(T4)是增加设施土壤肥力改善土壤养分供给的有效途径。

相较其它处理,螯合多肽钙镁肥替代尿素用量30%处理(T4)番茄产量最高,为11.52 kg/m^2,且番茄果实品质最佳,可溶性蛋白、可溶性糖和还原型Vc含量分别达到12.07 mg/g、64.70 mg/g和82.61 μg/g。采用隶属函数分析法对不同施氮方式下番茄产量和品质进行综合评价,5个处理综合评价从大到小依次为T4>T3>T2>CK>T1。因此,螯合多肽钙镁肥替代尿素用量30%(T4)能有效提高番茄产量和品质。

参 考 文 献

[1]刘洁,高润蕾,崔瑛,等. 番茄产业发展现状与内蒙古巴彦淖尔市番茄产业发展建议[J]. 现代农业,2023,48(3):47-51.
Liu J, Gao R L, Cui Y, et al. Development status and development proposals for tomato industry in Bayannur, inner mogolia[J]. Modern Agriculture,2023,48(3):47-51.

[2]敬如岩. 磁化水灌溉对设施蔬菜土壤和蔬菜品质的影响[D]. 泰安:山东农业大学,2018.
Jing R Y. Effect of magnetized water irrigation on soil and vegetable quality of protected vegetables[D]. Taian: Shandong Agricultural University,2018.

[3]赖力,黄贤金,王辉,等. 中国化肥施用的环境成本估算[J]. 土壤学报,2009,46(1):63-69.
Lai L, Huang X J, Wang H, et al. Estimation of environmental

costs of chemical fertilizer utilization in China [J]. Acta Pedologica Sinica,2009,46(1):63-69.

[4]Xiao X M, Li J, Lü J, et al. Chemical fertilizer reduction combined with bio-organic fertilizers increases cauliflower yield via regulation of soil biochemical properties and bacterial communities in Northwest China [J]. Frontiers in Microbiology,2022,13:922149.

[5]李灵芝,郭荣,李海平,等. 不同氮浓度对温室番茄生长发育和叶片光谱特性的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2010,16(4):965-969.
Li L Z,Guo R,Li H P,et al. Effects of nitrogen concentration in hydroponics on growth and development of tomato and spectral characteristics of leaf in greenhouse[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science,2010,16(4):965-969.

[6]张涛. 不同施氮量和氮素形式对水稻光合特性的影响[D]. 扬州:扬州大学,2004.
Zhang T. Effects of different nitrogen application rates and nitrogen forms on photosynthetic characteristics of rice [D]. Yangzhou:Yangzhou University,2004.

[7]Matsuoka M, Kumar A, Muddassar M, et al. Discovery of fungal denitrification inhibitors by targeting copper nitrite reductase from *Fusarium oxysporum*[J]. Journal of Chemical Information and Modeling,2017,57(2):203-213.

[8]汪家铭. 新型复合肥硝酸铵钙发展概况与市场前景[C]. 第十四届全国化肥市场("盐桥"钾肥)研讨会论文集. 西宁. 2009:193-202.
Wang J M. Development and market prospect of new compound fertilizer calcium ammonium nitrate [C]. Proceedings of the 14th National Fertilizer Market ("Salt Bridge "Potassium Fertilizer) Seminar. Xining. 2009:193-202.

[9]李好管,郭少青. 硝酸铵钙的国内推广前景[J]. 化肥工业,2001,28(2):12-13,39-59.
Li H G,Guo S Q. Prospects for domestic promotionof calcium ammonium nitrate[J]. Journal of Chemical Fertilizer Industry,2001,28(2):12-13,39-59.

[10]鲁洪娟,周德林,叶文玲,等. 生物有机肥在土壤改良和重金属污染修复中的研究进展[J]. 环境污染与防治,2019,41(11):1378-1383.
Lu H J, Zhou D L, Ye W L, et al. Advances in application of bio-organic fertilizer in soil improvement and remediation of heavy metals pollution [J]. Environmental Pollution & Control,2019,41(11):1378-1383.

[11]Liu T, Wang S S, Chen Y N, et al. Bio-organic fertilizer promoted phytoremediation using native plant *Leymus chinensis* in heavy Metal (loid) s contaminated saline soil [J]. Environmental Pollution,2023,327:121599.

[12]Li M, Li Q, Yun J J, et al. Bio-organic-mineral fertilizer can improve soil quality and promote the growth and quality of water spinach[J]. Canadian Journal of Soil Science, 2017: CJSS-2016-0090.

[13]Wang X W, Cai H, Liu Y L, et al. Addition of organic fertilizer affects soil nitrogen availability in a salinized fluvo-aquic soil[J]. Environmental Pollutants and Bioavailability, 2019,31(1):331-338.

[14]Liu W B, Cui S Y, Wu L T, et al. Effects of bio-organic fertilizer on soil fertility, yield, and quality of tea[J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition,2023,23(4):5109-5121.

[15]高浩冉,段旭锦,武月胜,等. 尿素配施腐植酸钾对西葫芦幼苗生长和光合特性的影响[J]. 腐植酸,2023(1):50-55.
Gao H R,Duan X J,Wu Y S,et al. Effects of urea combined with potassium humate on growth and photosynthesis characteristics of zucchini seedlings[J]. Humic Acid, 2023 (1):50-55.

[16]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.

[17]杨树筠.用重铬酸钾氧化法简便快速测定土壤有机质含量[J].现代农业,1997(4):23.
Yang S Y. Simple and rapid determination of soil organic matter content by potassium dichromate oxidation method[J]. Modern Agriculture,1997(4):23.

[18]鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社, 2000:129-163.
Lu R K. Methods for agricultural chemical analysis of soil[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000:129-163.

[19]高俊凤.植物生理学实验指导[M].北京:高等教育出版社,2006:140-204.
Gao J F. Experimental guidance of Plant Physiology [M]. Beijing: Higher Education Press,2006:140-204

[20]贺朋飞. 番茄品质性状综合评价与初生代谢物分析[D]. 福州:福建农林大学,2023.
He P F. Comprehensive evaluation and primary metabolite analysis of tomato quality characters [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University,2023.

[21]马新超,轩正英,闵昊哲,等. 水氮耦合对沙培黄瓜叶片抗氧化酶及水氮利用的影响[J]. 节水灌溉,2022(7):58-64.
Ma X C,Xuan Z Y,Min H Z,et al. Effects of water-nitrogen coupling on antioxidant enzymes and water-nitrogen utilization in sand-cultivated cucumber leaves [J]. Water Saving Irrigation,2022(7):58-64.

[22]张涛,刘勇鹏,朱广权,等. 定位化肥牛粪配施对设施蔬菜产量和土壤肥力的影响[J]. 中国土壤与肥料,2021(1):161-168.
Zhang T, Liu Y P, Zhu G Q, et al. Effect of combined application of fertilizer and cow manure on yield and soil fertility of protected vegetable[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China,2021(1):161-168.

[23]任立军,李金,邹洪涛,等. 生物有机肥配施化肥对设施土壤养分含量及团聚体分布的影响[J]. 土壤,2023,55(4):756-763.
Ren L J,Li J,Zou H T,et al. Effect of bio-organic fertilizer

combined with chemical fertilizer on nutrient contents and soil aggregate distribution in greenhouse soil[J]. Soils, 2023, 55(4):756-763.

[24]高添,王琰,孙凯,等. 生物有机肥用量对地黄生长和土壤养分的影响[J]. 中国土壤与肥料,2021(1):143-150.
Gao T, Wang Y, Sun K, et al. Effects of different application rates of bio-organic fertilizers on the growth and soil nutrients of *Rehmannia glutinosa*[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2021(1):143-150.

[25]Jin L, Jin N, Wang S Y, et al. Changes in the microbial structure of the root soil and the yield of Chinese baby cabbage by chemical fertilizer reduction with bio-organic fertilizer application[J]. Microbiology Spectrum, 2022, 10(6): e0121522.

[26]Cai F, Chen W, Wei Z, et al. Colonization of *Trichoderma harzianum* strain SQR-T037 on tomato roots and its relationship to plant growth, nutrient availability and soil microflora[J]. Plant and Soil, 2015, 388(1):337-350.

[27]马祥,贾志锋,张永超,等. 生物有机肥对青海高寒牧区燕麦产量和土壤肥力的影响[J]. 草地学报,2019,27(6):1759-1765.
Ma X, Jia Z F, Zhang Y C, et al. Effects of bio-organic fertilizers on oat production and soil fertility in alpine region of Qinghai-Tibet Plateau[J]. Acta Agrestia Sinica, 2019, 27(6): 1759-1765.

[28]王瑞. 氮素对油茶苗木生长的影响研究[D]. 长沙:中南林业科技大学,2021.
Wang R. Effects of nitrogen application on seedling growth in *Camellia oleifera* abel.[D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2021.

[29]张佼,屈锋,朱玉尧,等. 增施有机肥和微生物菌剂对春季杨凌设施番茄产量和品质的影响[J]. 西北农业学报,2019,28(5):767-773.
Zhang J, Qu F, Zhu Y Y, et al. Effects of more organic fertilizer and microbial agents on yield and quality of spring greenhouse tomato in Yangling[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2019, 28(5):767-773.

[30]Chang T T, Shao X H, Zhang J, et al. Effects of bio-organic fertilizer application combined with subsurface drainage in secondary salinized greenhouse soil[J]. Journal of Food, Agriculture and Environment, 2013, 11(1):457-460.

[31]Khasawneh A E R, Alsmairat N, Othman Y A, et al. Influence of nitrogen source on physiology, yield and fruit quality of young apricot trees[J]. Journal of Plant Nutrition, 2021, 44(17):2597-2608.

[32]赵自超,赵时锋,张宏启,等. 菌渣还田对设施瓜菜产量、品质和土壤肥力的影响[J]. 中国农学通报,2021,37(19):112-118.
Zhao Z C, Zhao S F, Zhang H Q, et al. Effect of mushroom residue on cucumber and melon yield and quality and soil fertility in greenhouse[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2021, 37(19):112-118.

(编辑:郭玥微)