果 树 学 报 2021,38(3):361-371
Journal of Fruit Science

DOI:10.13925/j.cnki.gsxb.20200337

不同减量施肥模式对蜜柚产量、品质及经济效益的影响

张 青[1],栗方亮[1],孔庆波[1*],庄木来[2,3]

([1]福建省农业科学院土壤肥料研究所,福州 350013;[2]福建省平和县农业农村局,福建平和 363700;[3]平和琯溪蜜柚综合试验站,福建平和 363700)

摘 要:【目的】通过研究连续3年不同减量施肥模式对蜜柚产量、品质及经济效益的影响,为蜜柚水肥一体化施肥模式下减量施肥提供科学理论依据。**【方法】**田间试验设置5种不同施肥模式,空白对照(CK)、传统施肥(TF)、追肥期肥料减量30%埋施缓控释肥(SCR)、追肥期肥料减量30%喷水带施肥(DSF)、追肥期肥料减量30%滴灌施肥(DDF)。**【结果】**使用滴灌施肥技术,可明显改善蜜柚品质、提高产量及经济效益。与TF模式相比,SCR、DSF、DDF模式3年蜜柚平均产量依次增产13.20%、19.00%、24.67%,平均次果率分别为11.36%、6.97%、5.71%;肥料偏生产力逐年递增,以DDF模式最高;DDF模式有利于提高蜜柚单果质量、果肉质量及降低裂果率,可提高蜜柚可溶性糖含量、糖酸比和维生素C含量及降低可滴定酸含量,但各模式之间无显著差异;DDF模式平均投入成本最低,综合生产效益明显提高,平均产投比最高(4.29∶1)。**【结论】**从几种施肥模式的蜜柚产量、肥料偏生产力、蜜柚农艺性状、品质及经济效益等参数来看,滴灌施肥模式将是蜜柚生产中理想的灌溉施肥方式。滴灌减量施肥模式对于提高蜜柚产量、经济效益,改善蜜柚品质及实现果园可持续发展具有深远意义。

关键词:蜜柚;滴灌技术;减量施肥;产量;品质;经济效益

中图分类号:S666.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-9980(2021)03-0361-11

Effect of different reduced fertigation modes on the yield, quality and economic benefits of honey pomelo

ZHANG Qing[1], LI Fangliang[1], KONG Qingbo[1*], ZHUANG Mulai[2, 3]

(*[1]Institute of Soil and Fertilizer, Fujian Academy of Agricultural Science, Fuzhou 350013, Fujian, China; [2]Agricultural and Rural Affairs Bureau of Pinghe County, Pinghe 363700, Fujian, China; [3]Pinghe Guanxi Honey Pomelo Comprehensive Test Station, Pinghe 363700, Fujian, China*)

Abstract:【Objective】In this paper, the effects of different reduced fertilization modes on the yield, quality and economic benefits of honey pomelo were studied through three years test (2016—2018) in order to provide the theoretical basis for the reduction of fertilization .【Methods】In this experiment, 5 irrigation and fertilization modes were set up: no fertilizer (CK); traditional fertilization (TF); reduce 30% of fertilization during the top dressing period under burring application of slow controlled release fertilizer (SCR); reduce 30% of fertilization during the top dressing period by sprinkling tape fertilizer (DSF); reduce 30% of fertilization during the topdressing period by drip irrigation and fertigation (DDF). The tested fertilizers were as follows: 1) traditional fertilization treatment, according to the local farmers' habits: urea (N 46%), calcium superphosphate (P_2O_5 12%), potassium sulfate (K_2O 50%); 2) Controlled release fertilizer was a special formula controlled release fertilizer (base fertilizer N∶P_2O_5∶ K_2O = 10∶6∶10; the flowering stage, N∶P_2O_5∶K_2O = 20∶10∶10; young fruit stage, N∶P_2O_5∶K_2O = 20∶10∶15; the vigorous fruit stage, N∶P_2O_5∶K_2O = 15∶15∶20). The controlled-release nitrogen was resin coated urea with nitrogen content of 43%, and the controlled-release period of 60 days. The phosphorus and potassium in

收稿日期:2020-09-10 接受日期:2020-12-09

基金项目:"十三五"国家重点研发计划(2017YFD0202000);福建省属公益项目(2018R1022-6);福建省自然科学基金(2019J01106)

作者简介:张青,女,助理研究员,硕士,主要从事土壤环境与施肥技术研究。Tel:13675062867,E-mail:zhangqing202@163.com

*通信作者 Author for correspondence. Tel:13675062871,E-mail:qbkong@qq.com

the formula were monoammonium phosphate and potassium sulfate, respectively. 3) Urea (N 46%), potassium dihydrogen phosphate (P_2O_5 52%, K_2O 34%) and total water-soluble potassium sulfate (K_2O 50%) were selected as nitrogen fertilizer for sprinkler belt and drip irrigation.【Results】The application of drip irrigation and fertilization technology could improve the quality, yield and economic benefitsin thehoneypomelo. (1) The effects of 4 fertilization modes on the average yield of the honeypomelo in 3 years was DDF > DSF > SCR > TF. Compared with TF mode, the average yields of the honey pomelo in the SCR, DSF and DDF modes were increased by 13.20%, 19.00% and 24.67%, respectively. There were significant differences between the three models and the TF model; the average yield of the DDF model was 10.38% higher than that of the SCR model, and the difference between them was significant; the yields of the DDF model in 3years were 4.74%, 6.10% and 3.51% higher than those of the DSF model, with an average increase of 4.79%. The results showed that the effect of the integrated mode of water and fertilizer on improving the average yield of the honey pomelo was better, the drip irrigation fertilization mode had a certain increase effect on the yield of the honey pomelo. Compared with the TF mode, the average commodity rate of the SCR, DSF and DDF increased by 2.48%, 7.59% and 9.18%, respectively. The three-year average second class fruit rates of the SCR, DSF and DDF modes were 11.36%, 6.97% and 5.71%, respectively. The results showed that drip fertilization, sprinkler fertilization and slow controlled release fertilization could improve the marketability of the honey pomelo, and the effect of drip irrigation was the best. From 2016 to 2018, the treatments of the SCR, DSF and DDF significantly increased the single fruit weight and pulp weight compared with the TF mode. The average fruit cracking rates showed the following trend: the TF (11.97%) > the SCR (11.30%) > the DSF (9.27%) > the DDF (7.93%). Different fertilization patterns had no significant effect on peel weight and flesh granulation rate. Drip irrigation and fertilization (fertigation) significantly improved the basic agronomic traits, increased the single fruit weight and reduced the cracking rate. (2) The partial factor productivity showed an increasing trend year by year. The highest partial factor productivity was the DDF mode, which was increased from 22.73 $kg \cdot kg^{-1}$ in 2016 to 36.50 $kg \cdot kg^{-1}$ in 2018, with an increase of 60.56%, compared with the TF, SCR and DSF modes, the average partial factor productivity in three years was increased by 12.72 $kg \cdot kg^{-1}$, 4.17 $kg \cdot kg^{-1}$ and 2.06 $kg \cdot kg^{-1}$, respectively. The reasonable fertilization mode was beneficial to increase the yield of the honeypomelo and the agronomic utilization rate of fertilizer, while the effect of drip irrigation was the best. (3) The DDF mode was in favor of improving fruit weight, pulp weigh and decreasing fruit cracking rate, and to a certain extent, it could improve the contents of soluble sugar, sugar /acid and vitamin C, and reduce the titratable acidity of the honey pomelo. There was no significant difference among different fertilization patterns, the DDF was the best, the DSF was the second; (4) The average input cost of the DDF mode was 60 522.9 Yuan $\cdot hm^{-2}$, saving 7 473 Yuan $\cdot hm^{-2}$, 7 383.8 Yuan $\cdot hm^{-2}$ and 2 502.7 Yuan $\cdot hm^{-2}$ respectively compared with the TF, SCR, DSF modes. And the output of the DDF mode was high, the proportion of commodity fruit was large and the comprehensive production efficiency was significantly improved, the average net income was 47.79%, 27.13%, 7.68% higher than the TF, SCR and DSF respectively. And the average input-output ratio of the DDF mode was the highest (4.29∶1), which was 1.31 times higher than that of the TF mode.【Conclusion】According to the parameters of the honey pomelos' yield, partial factor productivity, agronomic characters, quality and economic benefits, drip fertilization was an ideal way of irrigation and fertilization in the honey pomelo production. The drip irrigation and reduced fertigation method was of great significance to improving yield, economic benefits, quality and sustainable development in the honey pomelo orchard.

Key words: Honey pomelo; Drip irrigation technology; Reducing fertigation; Yield；Quality; Economic efficiency

‘琯溪蜜柚’[*Citrus grandis* (L.) Osbeck. ‘Guanxi Miyou’]原产于福建省漳州市平和县，距今已有500多年的栽培历史[1]。自1989年被评为农业部优质果品之后，‘琯溪蜜柚’逐步成为平和县经济支柱之一。截至2016年，其栽培面积达4.33万hm^2，年产量120万t[2]。近年来随着我国农业集约化水平不断提高，传统的农业生产方式越来越难以为继，目前我国水肥投入不合理导致肥料深层淋失、产量品质下降及其环境污染等问题，使传统农业方式受到前所未有的挑战和冲击[3]。研究表明，合理的施肥模式是促进作物生长和产量形成的重要保证[4]。根据调查，农民采用传统方式种植蜜柚，所需劳动力多，费水费肥，拉低了产投比，很难满足和适应集约化蜜柚生产的需要[5]；另外，福建省多以山地丘陵为主，造成蜜柚施肥和管理十分不便。因此，探索一种高效的蜜柚施肥方式，节省劳动力、提高蜜柚产量及品质是未来蜜柚产业的必由之路[6-9]。与传统施肥方式相比，缓控释肥有肥效期长、明显减少追肥次数和节肥省工等特点[10]；滴灌施肥可有效调控灌水的体积、增强施肥的准确性和均匀性，从而提高作物水肥利用效率，使作物的产量和品质都得到可靠保证，具有节水节肥、增产增效的优点[11-15]。农业发达国家采用滴灌施肥的果园比例为75%~80%。Hebbar等[16]研究结果表明滴灌施肥一体化模式显著提高了番茄产量和肥料利用效率，全年实现增产33.23%。当前，我国正在开展化肥使用零增长行动。一些国内学者也针对滴灌减量施肥进行了研究，如严程明等[17]发现滴灌减量施肥菠萝可以增产39.04%，比对照净收益增长92.07%；邢英英等[18]对温室番茄的研究表明，在滴灌施肥条件下中等施肥水平可获得较高的产量；臧小平等[19]研究表明，与常规的氮磷钾施肥量比较，滴灌减量施肥（纯N减量47.1%，P_2O_5减量37.4%，K_2O减量65.3%）不会导致香蕉减产[20]。李焕春等[21]发现在玉米河套灌区的滴灌条件下，氮肥用量在现有的用量基础上减少12%~24%，可以在不减产的前提下获得较高的肥料利用率，减氮36%~48%则会使产量显著降低。张杰等[22]研究发现采用滴灌施肥技术能够提高‘红地球’葡萄产量与果实品质，与传统水肥管理相比，在不降低施肥水平和比例的前提下，采用滴灌施肥的产量和维生素C含量分别提高19.6%、16.7%，减少肥料投入水平，采用滴灌施肥单粒质量提升10.8%。前人已有研究报道滴灌减量施肥方式对菠萝、香蕉、玉米和番茄等作物的产量、品质及其他特性的影响；由此可见，滴灌减量化施肥可能是解决蜜柚减量施肥、提高效益的有效途径，但滴灌减量化施肥在蜜柚上的实验研究尚未见报道。有鉴于此，笔者连续3年研究不同减量施肥模式对蜜柚产量、品质及经济效益的影响，以期为完善蜜柚施肥技术提供科学依据。

1　材料和方法

1.1　试验材料

定位试验位于福建省漳州市平和县霞寨镇黄庄村（N 24°21′32.18″，E 117°08′19.12″）琯溪蜜柚基地进行，试验期间（2016—2018年）的年均降水量为1724 mm，3年年均气温为21.3 ℃，地属南亚热带季风区。供试土壤为砖红壤，质地为砂黏土。试验开始时的土壤基本性状为：有机质（*w*，后同）24.1 $g·kg^{-1}$、全氮1.62 $g·kg^{-1}$、有效磷108.1 $mg·kg^{-1}$、速效钾131.7 $mg·kg^{-1}$、交换性钙367.2 $mg·kg^{-1}$、交换性镁52.5 $mg·kg^{-1}$、pH 5.1。蜜柚选用红心蜜柚品种，大小株高基本一致。

1.2　试验设计

试验设5个处理，分别为：空白对照（CK）、传统施肥（TF），追肥期肥料减量30%埋施缓控释肥（SCR）、追肥期肥料减量30%喷水带施肥（DSF）、追肥期肥料减量30%滴灌施肥（DDF）。每个处理重复3次，每个重复5棵树，随机排列，小区间设保护行。供试肥料包括：1）传统施肥处理，按照当地农民习惯施入供试氮磷钾肥料：普通尿素（N 46%），过磷酸钙（P_2O_5 12%），硫酸钾（K_2O 50%）；2）控释肥选用专用配方控释肥（基肥N、P_2O_5、K_2O体积比为10∶6∶10，促梢壮花期为20∶10∶10，幼果期为20∶10∶15，壮果期为15∶15∶20），其中控释氮素为树脂包膜尿素，含氮量为43%，控释期为60 d，配方中磷、钾分别为磷酸一铵和硫酸钾（金正大集团提供）。3）喷水带施肥与滴灌施肥选用氮肥为尿素（N 46%），磷肥为磷酸二氢钾（P_2O_5 52%、K_2O 34%），钾肥为全水溶硫酸钾（K_2O 50%）。

传统施肥及缓控释肥为埋施（即在距离树体主干左右两侧40 cm处挖长50~60 cm、深度和宽度约30 cm的环状沟，施肥后覆土），各个时期分别一次性施入；滴灌施肥和喷水带施肥为肥料随水冲入，追肥期每个时期分5次施入，间隔7~10 d。滴灌施肥

每次株用水量0.02 m³，株总灌水量为1.2 m³。喷水带施肥每次株用水量0.08 m³，株总灌水量为4.8 m³。每年施肥一致。具体施肥时间及施肥量见表1。其他管理措施与大田一致。

表1 2016—2018年不同试验地蜜柚施肥量

Table 1 Fertilization amount of honey pomelo in different experimental sites from 2016 to 2018

（kg·hm^{-2}）

施肥时间 Fertilization time	SCR、DSF、DDF			TF		
	N	P_2O_5	K_2O	N	P_2O_5	K_2O
采果后期（10—11月） Late fruit picking period（October to November）	250	150	250	250	150	250
促梢壮花期（2月） Flowering period of promoting shoot growth（February）	140	70	70	200	100	100
幼果期（3—5月） Young fruit stage（March to May）	84	42	63	120	60	90
壮果期（7月） Strong fruit period（July）	105	105	140	150	150	200
总养分量 Total nutrient content	579	367	523	720	460	640

注：SCR. 缓控释肥；DSF. 肥料量减少30%滴灌带施肥；DDF. 肥料量减少30%滴灌；TF. 传统施肥。下同。

Note: SCR. Slow and controlled release fertilizer; DSF. Fertilizer quantity reduced by 30% in drip irrigation zone; DDF. 30% reduction in fertilizer volume by drip irrigation; TF. Traditional fertilization. The same below.

1.3 取样及测定方法

1.3.1 *蜜柚产量、肥料偏生产力测定* 单果质量的测定，各处理每小区分别随机采摘50个果实（空白处理30个果实），称量质量，分别计算平均值，即为各处理的平均单果质量。

裂果率是指每株裂果数占总果数的百分率，有裂纹的果实均算；粒化率是指每株粒化果数占总果数的百分率，有粒化的果实均算；次果率是指每株次果数占总果数的百分率，≥2.5 kg和≤1.0 kg的果实为次果。

肥料偏生产力（partial factor productivity，PFP），指施用某一特定肥料下的作物产量与施肥量的比值。它是反映当地土壤基础养分水平和化肥施用量综合效应的重要指标[23-24]。

肥料偏生产力/(kg·kg^{-1})=（施肥区农作物产量−不施肥区农作物产量）/（施N量+施P_2O_5量+施K_2O量）。

1.3.2 *蜜柚品质测定* 维生素C含量采用2，6-二氯靛酚法测定；可滴定酸含量采用酸碱中和滴定法（以柠檬酸计）测定，可溶性糖含量采用蒽酮比色法测定，并以可溶性糖含量与可滴定酸含量的比值计算糖/酸比。

1.3.3 *经济效益计算* 空白处理用工成本/(元•hm^{-2})=修剪/(元•hm^{-2})+环割/(元•hm^{-2})+采摘/(元•hm^{-2})+浇水/(元•hm^{-2})。

常规处理用工成本/(元•hm^{-2})=修剪/(元•hm^{-2})+环割/(元•hm^{-2})+采摘/(元•hm^{-2})+施肥/(元•hm^{-2})+浇水/(元•hm^{-2})。

投入成本/(元•hm^{-2})=地租/(元•hm^{-2})+肥料/(元•hm^{-2})+用工/(元•hm^{-2})+电费/(元•hm^{-2})。

产出/(元•hm^{-2})=商品果质量/(kg·hm^{-2})×当年商品果价格/(元•kg^{-1})+次果质量/(kg·hm^{-2})×当年次果价格/(元•kg^{-1})。

净收益/(元•hm^{-2})=产出/(元•hm^{-2})−成本/(元•hm^{-2})。

成本、产出价格依照2016—2018年3 a市场价格计算。

1.3.4 *试验数据处理* 试验数据采用Microsoft Excel 2003和SPSS 17.0软件进行处理。

2 结果与分析

2.1 不同施肥模式对蜜柚产量的影响

连续3 a（2016—2018年）不同减量施肥模式下，与空白对照（CK）处理相比，传统施肥（TF）、缓控释肥（SCR）、喷水带施肥（DSF）及滴灌施肥（DDF）均能显著提高蜜柚产量，但不同施肥模式之间蜜柚产量存在差异（表2）；不同施肥模式的蜜柚产量在年际间变异不大。与TF模式相比，SCR、DSF、DDF模式3年蜜柚平均产量分别增产13.20%、19.00%、24.67%，3种模式均与TF模式存在显著差异；DDF模式比SCR模式3年平均产量增产10.38%，两者之间差异显著；3年DDF模式蜜柚产量较DSF模式分别增产4.74%、6.10%、3.51%，平均增产4.79%。说明水肥一体化模式下提高蜜柚平均产量的效果较优，滴灌施肥模式比喷水带施肥模式对蜜柚产量有一定的增产效果；埋施缓控释肥模式增产效果次之。表2结果显示，与空白对照（CK）处理相比，不同施肥模式均提高了蜜柚商品率，SCR、DSF、DDF模式3年平均商品率较TF模式相比提高了2.48%、7.59%、9.18%；说明滴灌施肥、喷水带施肥、缓控释施肥模式对提高蜜柚商品率有一定的作用。不同施

表 2　不同施肥模式的蜜柚产量

Table 2　Yield of pomelo under different fertilization modes

处理 Treatment	2016 产量 Production/（kg·hm^{-2}）	2016 商品果质量 Commercial fruit mass/（kg·hm^{-2}）	2016 次果率 Inferior fruit rate/%	2017 产量 Production/（kg·hm^{-2}）	2017 商品果质量 Commercial fruit mass/（kg·hm^{-2}）	2017 次果率 Inferior fruit rate/%	2018 产量 Production/（kg·hm^{-2}）	2018 商品果质量 Commercial fruit mass/（kg·hm^{-2}）	2018 次果率 Inferior fruit rate/%
CK	35 050.4±1 278.2 d	32 141.1±1 732.8 e	8.32±0.94 c	25 111.6±563.1 e	19 436.5±513.8 e	22.6±1.4 a	21 347.6±1 197.3 e	17 291.6±1 234.9 e	19.0±0.6 a
TF	56 233.6±1 079.0 c	47 404.8±1 541.9 d	15.70±1.32 a	48 015.2±773.2 d	43 885.7±849.2 d	8.6±0.8 b	58 987.5±482.7 d	49 490.5±1 148.2 d	16.1±1.1 ab
SCR	67 144.4±1 343.8 ab	59 705.5±1 808.0 c	11.08±1.09 b	52 048.4±646.7 c	47 988.5±573.6 c	7.8±0.6 b	65 948.0±1 389.3 c	55 923.9±1 345.4 c	15.2±1.2 b
DSF	65 348.8±1 079.0 b	58 683.3±1 810.9 b	10.20±0.72 b	56 657.6±516.9 b	54 334.7±1 076.0 b	4.1±0.4 c	72 430.8±1 804.4 b	67 650.4±1 559.3 b	6.6±0.3 c
DDF	68 448.0±1 253.1 a	65 824.0±1 906.5 a	3.83±0.19 d	60 115.6±619.8 a	55 727.1±597.5 a	7.3±0.4 b	74 973.0±678.8 a	70 474.6±1 182.3 a	6.0±0.2 c

注：1.0~2.5 kg 的果实为商品果，≥2.5 kg 和≤1.0 kg 的果实为次果，同列数据后不同小写字母表示差异显著（$p < 0.05$）。下同。

Note: Fruits of 1.0-2.5 kg are commercial fruits, fruits of more than 2.5 kg (including 2.5 kg) and less than 1.0 kg (including 1.0 kg) are second fruits. Different small letters in the same column indicate significant differences ($p < 0.05$). The same below.

肥模式间蜜柚次果率存在差异，且不同施肥模式的蜜柚次果率年际间变异大；SCR、DSF、DDF 模式 3 年平均次果率分别为 11.36%、6.97%、5.71%，DDF 模式 3 年平均次果率最低；说明滴灌施肥、喷水带施肥、缓控释施肥模式均可提高蜜柚商品性，而滴灌施肥效果最佳。

2.2　不同施肥模式对蜜柚的主要性状的影响

在蜜柚生产中，单果质量、可食率、裂果率等是影响蜜柚产量的重要农艺性状。由表 3 可以看出，3 年蜜柚平均单果质量 SCR（1 611.5 g）、DSF（1 691.9 g）、DDF（1 728.6 g）比 TF（1 545.9 g）模式分别提高 4.24%、9.44%、11.82%，与 TF 模式相比均达到差异显著水平，而 DDF 模式 3 a 蜜柚可食率最高；2016—2018 年 3 a SCR、DSF、DDF 模式比 TF 模式均显著提高了可食率。3 a 蜜柚平均裂果率呈现下列趋势：TF（11.97%）> SCR（11.30%）> DSF（9.27%）> DDF（7.93%），DDF 模式 3 a 蜜柚裂果率最低，比 TF 降低 4.04%；SCR 模式与 TF 模式 3 a 裂果率均无明显差异，DDF 模式与 TF 模式间差异均显著。不同施肥模式对蜜柚果皮质量、果肉粒化率基本无显著影响，但对单果质量、果肉质量、裂果率影响较为显著；滴灌施肥明显改善了蜜柚基本农艺性状，提高了单果质量，降低了裂果率。

表 3　不同施肥模式下蜜柚的主要性状

Table 3　Main characters of pomelo under different fertilization modes

处理 Treatment	2016 单果质量 Single fruit mass/g	2016 可食率 Edible rate/%	2016 裂果率 Dehiscent fruit rate/%	2016 果肉粒化率 Pulp granulation rate/%	2017 单果质量 Single fruit mass/g	2017 可食率 Edible rate/%	2017 裂果率 Dehiscent fruit rate/%	2017 果肉粒化率 Pulp granulation rate/%	2018 单果质量 Single fruit mass/g	2018 可食率 Edible rate/%	2018 裂果率 Dehiscent fruit rate/%	2018 果肉粒化率 Pulp granulation rate/%
CK	1 345.6±53.4 d	73.4±2.1 b	13.7±0.1 a	7.5±0.5 a	1 250.7±57.6 b	73.0±1.5 b	14.4±0.4 a	6.1±0.2 b	1 095.8±62.8 c	72.3±1.4 b	13.8±0.2 a	6.5±0.4 b
TF	1 525.4±72.4 c	76.7±2.5 a	12.0±0.3 b	7.9±0.3 a	1 598.5±23.0 a	78.3±2.1 a	12.5±1.1 ab	6.4±0.2 ab	1 513.7±97.8 b	76.8±2.1 a	11.4±0.1 b	6.7±0.4 ab
SCR	1 620.7±80.8 ab	77.8±1.9 a	11.2±0.2 c	7.7±0.5 a	1 600.1±86.2 a	77.0±1.9 a	11.7±0.9 c	6.7±0.5 a	1 613.7±110.5 ab	77.6±1.7 a	11.0±0.02 b	7.0±0.3 ab
DSF	1 691.1±32.6 ab	78.4±1.0 a	10.1±0.2 d	8.2±0.3 a	1 688.6±95.2 a	77.5±2.4 a	9.1±1.8 d	6.8±0.2 a	1 696.0±99.9 ab	78.2±1.6 a	8.6±0.4 c	7.2±0.3 a
DDF	1 751.5±111.8 a	79.2±1.5 a	8.2±0.3 e	8.0±0.3 a	1 707.4±108.7 a	78.5±1.7 a	7.9±0.4 cd	7.0±0.4 a	1 726.9±104.5 a	78.3±2.4 a	7.7±0.2 d	7.3±0.3 a

2.3　不同施肥模式对蜜柚内在品质的影响

果实可溶性糖含量、可滴定酸含量、糖酸比和维生素 C 含量等是评价果实内在品质的重要指标，其中糖酸比是衡量果实糖、酸含量的综合指标，直接影响果实的口感风味。从表 4 可以看出，TF 与

表4 不同施肥模式下蜜柚的内在品质

Table 4 Internal quality of pomelo under different fertilization modes

处理 Treatment	2016				2017				2018			
	w(维生素C) Vitamin C content/(mg·kg⁻¹)	w(可溶性糖) Soluble sugar content/%	w(可滴定酸) Titratable acid content/%	糖酸比 Sugar acid ratio	w(维生素C) Vitamin C content/(mg·kg⁻¹)	w(可溶性糖) Soluble sugar content/%	w(可滴定酸) Titratable acid content/%	糖酸比 Sugar acid ratio	w(维生素C) Vitamin C content/(mg·kg⁻¹)	w(可溶性糖) Soluble sugar content/%	w(可滴定酸) Titratable acid content/%	糖酸比 Sugar acid ratio
CK	316.3±12.8 b	11.7±0.3 a	0.768±0.01 a	15.2±0.5 b	301.1±12.9 b	11.0±0.4 b	0.776±0.01 a	15.1±0.7 c	279.3±12.7 b	10.1±0.4 b	0.779±0.01 a	13.0±0.5 d
TF	330.4±11.4 ab	12.2±0.4 a	0.762±0.01 a	16.0±0.5 ab	322.1±13.8 ab	11.7±0.5 ab	0.768±0.02 a	15.2±0.9 bc	326.5±14.8 a	12.0±0.3 a	0.770±0.01 a	15.2±0.9 c
SCR	336.2±10.5 ab	12.4±0.6 a	0.759±0.01 a	16.3±0.9 a	323.6±14.4 ab	11.8±0.6 ab	0.769±0.02 a	15.3±0.5 ac	331.9±13.5 a	11.7±0.2 a	0.765±0.02 a	15.3±0.3 bc
DSF	351.2±11.7 a	12.3±0.6 a	0.760±0.01 a	16.2±0.6 a	340.7±14.4 a	12.0±0.5 a	0.762±0.01 a	16.4±0.8 ab	349.3±15.4 a	12.6±0.2 a	0.757±0.02 a	16.6±0.9 ab
DDF	348.8±13.1 a	12.8±0.8 a	0.755±0.02 a	17.0±1.5 a	345.5±13.9 a	12.6±0.4 a	0.756±0.03 a	16.7±1.1 a	354.0±14.3 a	13.0±0.4 a	0.755±0.03 a	16.7±0.4 a

SCR、DSF与DDF两两间维生素C含量差异不显著，2016—2018年3 a各施肥模式间品质指标的含量差异均不显著。SCR、DSF、DDF较TF模式3 a平均维生素C含量分别增长1.32%、6.37%、7.08%，以DDF最高，为349.4 mg·kg⁻¹；SCR、DSF、DDF较TF模式3 a平均糖酸比分别高0.13、0.93、1.33，以DDF最高（16.8）。综上所述，不同施肥模式比不施肥模式对蜜柚品质指标均有一定提高，并且逐年提高程度逐渐明显，而4种施肥模式品质差异不大，以DDF模式效果较佳，DSF模式次之。

2.4 不同施肥模式对肥料偏生产力的影响

肥料偏生产力是反映当地土壤基础养分水平和化肥施用量综合效应的重要指标。由图1可以看出，连续3 a定位试验，蜜柚的肥料偏生产力除SCR处理2017年比2016年稍高外，其他施肥模式下均呈

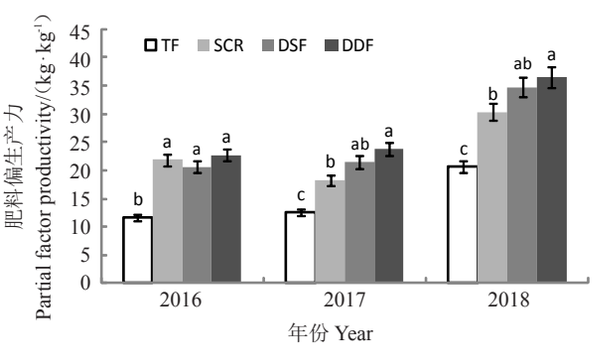

图1 不同施肥模式的肥料偏生产力

Fig. 1 Partial factor productivity of different fertilization patterns

现逐年递增趋势。从施肥的长期效应看，TF模式肥料偏生产力最低，3 a平均为14.97 kg·kg⁻¹；SCR、DSF、DDF施肥模式比TF模式3 a平均肥料偏生产力显著提高8.55、10.65、12.72 kg·kg⁻¹，说明SCR、DSF、DDF施肥模式均可在一定程度上提高肥料的增产效应；DDF模式肥料偏生产力最高，3 a平均为27.69 kg·kg⁻¹，比SCR、DSF模式提高4.17、2.06 kg·kg⁻¹，这与DDF模式产量值最高有关；其次为DSF模式，3 a平均为25.62 kg·kg⁻¹，肥料偏生产力与DDF模式间差异不显著，比SCR模式提高2.11 kg·kg⁻¹，且两者间差异不显著。可见，合理的施肥模式有利于提高蜜柚产量及肥料偏生产力，而滴灌施肥模式的效果最理想。

2.5 不同施肥模式经济效益分析

不同施肥模式对蜜柚的投入成本和经济效益的影响表现不同。通过对比4种施肥模式的经济效

益（表5）可知，DSF、DDF模式在投入方面增加了水电费和设备费，较TF、SCR模式节省了肥料和用工方面的投入；而DSF模式较DDF模式增加了水电费、设备费及用工方面的投入。综合计算3 a平均投入成本以TF模式最高为67 995.9 元•hm^{-2}，SCR模式、DSF模式、DDF模式3 a平均比TF模式投入成本分别降低89.2、4 970.3、7 473 元•hm^{-2}；而滴灌施肥模式（60 522.9 元•hm^{-2}）最低，比SCR、DSF模式降低7 383.8、2 502.7 元•hm^{-2}。

表5　不同施肥模式经济效益分析

Table 5　Economic benefit analysis of different fertilization modes　（Yuan·hm^{-2}）

	项目 Project	CK	TF	SCR	DSF	DDF
2016—2018年平均投入 Average investment from 2016 to 2018	地租 Land rent	30 000.0	30 000.0	30 000.0	30 000.0	30 000.0
	肥料 Fertilizer	0.0	10 136.5	9 387.1	8 778.1	8 778.1
	用工 Labor costs	12 260.4	27 529.4	28 189.6	18 607.5	18 284.8
	水费 Cost of water	180.0	180.0	180.0	1 440.0	360.0
	电费 Cost of electricity	150.0	150.0	150.0	900.0	300.0
	设备费 Cost of equipment	0.0	0.0	0.0	3 300.0	2 800.0
	合计 Total	42 590.4	67 995.9	67 906.7	63 025.6	60 522.9
2016—2018年平均产出 Average output from 2016 to 2018	商品果 Commercial fruit	90 616.7	185 263.2	208 385.1	237 014.7	251 537.2
	次果 Inferior fruit	10 630.2	17 479.0	16 174.6	10 968.1	8 133.0
	合计 Total	101 246.9	202 742.2	224 559.7	247 982.8	259 670.2
	净收益 Net income	58 656.5	134 746.3	156 653.0	184 957.2	199 147.3
	比TF增加 More than TF	−76 089.8	-	21 906.7	50 210.9	64 401.0

注：肥料均以当地市场价格计；柚子按各年份市场价格计算，2016 年商品果 3.8 元•kg^{-1}，次果 2.6 元•kg^{-1}，2017 年商品果 4.5 元•kg^{-1}，次果 3.0 元•kg^{-1}，2018 年商品果 3.6 元•kg^{-1}，次果 1.8 元•kg^{-1}，喷水带设备一次性安装首部设施和管道共计 15 000 元•hm^{-2}，平均可以使用 5 a，每年维护费用 300 元•hm^{-2}，折合一年设备成本 3300 元•hm^{-2}；滴灌设备一次性安装首部设施和管道部分共计 25 000 元•hm^{-2}，平均可以使用 10 a，每年维护费用 300 元•hm^{-2}，折合一年设备成本 2800 元•hm^{-2}。

Note: Fertilizers are priced at local market prices;pomelo is calculated according to the market price of each year.2016 commodity fruit 3.8 Yuan·kg^{-1}, inferior fruits 2.6 Yuan·kg^{-1}; 2017 commodity fruit 4.5 Yuan·kg^{-1}, inferior fruits 3.0 Yuan·kg^{-1}; 2018 commodity fruit 3.6 Yuan·kg^{-1}, inferior fruits 1.8 yuan·kg^{-1}, a total of 15 000 yuan·hm^{-2} for one-time installation of the head facilities and pipes of the water spray belt equipment, it lasts an average of five years, the annual maintenance cost is 300 Yuan·hm^{-2}, equivalent to the annual equipment cost of 3300 Yuan·hm^{-2}; the one-time installation of the bow facilities and pipelines for drip irrigation equipment amounts to 25 000 Yuan·hm^{-2}, it lasts an average of ten years, the annual maintenance cost is 300 Yuan·hm^{-2}, equivalent to the annual equipment cost of 2800 Yuan·hm^{-2}.

从产出方面可知，SCR、DSF、DDF模式比TF模式3 a平均产出合计分别提高10.76%、22.31%、28.08%，其中DDF模式的产量高，商品果所占比例较大，综合生产效益最高，最终净收益比TF模式高出64 401 元•hm^{-2}；SCR、DSF、DDF模式3 a平均最终净收益比TF模式分别增收16.26%、37.26%、47.79%；而DDF模式比SCR、DSF模式净收益分别增收27.13%、7.68%。试验中3 a平均各模式产投比从大至小依次是DDF（4.29∶1）>DSF（3.93∶1）>SCR（3.31∶1）>TF（2.98∶1）>CK（2.38∶1），3 a平均产投比以DDF模式最高（4.29∶1），比TF、SCR、DSF模式分别高出1.31、0.98、0.36倍。水肥一体化模式下的经济效益明显高于传统施肥，且滴灌施肥的经济效益更优于喷水带施肥。

3　讨　论

在本试验条件下，滴灌施肥（DDF）、喷水带施肥（DSF）、埋施缓控释肥（SCR）比传统施肥（TF）3年蜜柚平均增产分别为24.67%、19.00%、13.20%，增产效果明显。同样，邵蕾等[25]研究表明，相对于混施处理，控释肥比普通施肥草莓产量增加81.11%。朱国梁等[26]研究表明，缓释肥比普通复合肥处理黄瓜产量增加15.7%。本试验中，埋施缓控释肥比传统施肥3年平均增产13.2%，控释肥较传统施肥具有良好的增产效果，与前人研究表现出相同趋势。主要是因为缓控释肥料养分释放速率缓慢，释放期较长，在作物生长期都可以满足作物生长需求，因此提高了肥料养分利用率。

本试验表明，滴灌施肥比喷水带施肥增产

4.79%。同样，臧小平等[27]也发现滴灌处理香蕉单株产量显著高于喷水带处理，与常规施肥比较，滴灌施肥处理红毛丹增产率达24.84%[28]。马铃薯滴灌处理比喷灌单位产值高61.70%[29]。Kumar等[30]研究表明，在滴灌施肥模式下施用75%的推荐施肥量就能使香蕉获得良好的增产效果。蒋德赏等[31]也表明，在滴灌施肥模式下施用40%施肥量比常规施肥增产30.38%。臧小平等[32]表明在滴灌施肥模式下施用70%施肥量比传统施肥增产29.2%。

Qin等[33]对柑橘的研究表明，灌水量减少20%，保持传统施氮量（200 kg·hm^{-2}）处理在不降低产量的前提下可显著提高氮肥利用率。本试验中，滴灌施肥模式蜜柚产量最高，比传统施肥模式增产24.67%，增产效果比较明显，说明追肥期减施化肥30%不但没有造成蜜柚产量下降，反而有所增加，这一结果与前人研究结果一致。探究增产原因，虽然传统施肥中氮磷钾纯养分施入量并不低，但存在水溶性差、养分易流失等问题；而滴灌施肥模式可以实现水肥一体化，按各时期作物需肥特点，多次将肥随水施入，在灌溉的同时将肥料也带到作物根系，在此条件下提高了肥料利用率，促进了作物对养分的吸收，实现精准施肥和平衡施肥，从而达到增产效果。同时滴灌水肥一体化可通过影响叶片色素、气孔行为及生物酶活性等多种途径调控光合作用，进而影响作物产量和水分利用效率[34]。陈昱辛等[34]发现不同生育期适宜的滴灌水肥一体化处理都可以提高柑橘叶片光合能力。已有研究表明，灌溉可通过直接影响土壤含水量、通气性、温度等，从而改变土壤微生物活性[35-38]。干旱能够改变土壤微生物的群落结构、降低土壤微生物活性[39]，而灌溉可以促进土壤生物学特性的改善[40]。李华等[41]研究表明，随着灌溉定额的增加，细菌和放线菌数量呈先升高后降低的趋势。刘振香等[42]研究不同水肥处理对夏玉米田土壤微生物特性的影响发现，减少灌溉量能够显著降低土壤微生物生物量。吕东英等[43]研究表明，在低灌溉定额时，多枝柽柳根际细菌的数量随灌溉定额的增大而增加。滴灌施肥技术作为现代农业发展的一项综合管理技术措施，不仅可以大幅度降低劳动力成本，且可以节省大量的水肥资源，提高作物的产量和改善产品品质。

除产量外，果实品质也是重要的，包括可溶性糖含量、可滴定酸含量、糖酸比和维生素C含量，都直接影响人们的消费取向。滴灌施肥在各项指标上比传统施肥没有表现显著的促进作用，这一结果与前人研究结果基本一致。如张兰勤等[44]发现，与常规施肥相比，施肥量减量30%~40%滴灌施肥的樱桃番茄果实外观形态和品质并未变劣。严程明等[17]报道滴灌减量施肥处理和常规处理的菠萝果实品质较为一致，滴灌减量施肥对菠萝的内在品质没有促进作用。

很多研究表明，滴灌减量施肥模式能提高经济效益，严程明等[17]在菠萝上的试验发现滴灌减量施肥模式比传统施肥模式净收益要高69 670元•hm^{-2}，增长92.07%，产出投入比由2.0∶1上升到2.97∶1；杨尚东等[45]在广西对番茄的研究结果表明，滴灌减量施肥处理纯收入比常规施肥增加15 070.4元•hm^{-2}，增长21.26%。于舜章[46]在山东省设施黄瓜上的试验表明，滴灌减量施肥处理单位面积纯收入比农民传统施肥处理增加明显，每公顷增加纯收入3.87万~5.92万元，增长20.2%~30.9%。本研究结果表明，与常规施肥相比，滴灌减量施肥模式的净收益明显提高。滴灌减量施肥模式3年平均净收益达19.9万元•hm^{-2}，收益提高7.68%~47.79%，人工成本最低，产出投入比由2.98∶1上升到4.29∶1；这一结果与前人研究结果一致。联合国粮农组织认为VCR>2（VCR，vario -costratio，指改进施肥后增加农产品所得价值与施肥开支的比值）就具有经济合理性，滴灌模式产投比为4.29∶1，说明滴灌模式对蜜柚生产具有经济合理性。

4 结 论

在蜜柚上使用滴灌施肥技术，可明显改善蜜柚品质、提高产量及经济效益。与传统模式相比，追肥期肥料减量30%的埋施缓控释肥、喷水带施肥、滴灌施肥模式3 a蜜柚平均产量均增产、平均次果率降低、肥料偏生产力逐年递增，以滴灌施肥模式最高；滴灌施肥模式有利于提高蜜柚单果质量、果肉质量及降低裂果率，且数值上提高蜜柚可溶性糖含量、糖酸比和维生素C含量及降低可滴定酸含量，但无显著差异；滴灌施肥模式平均投入成本最低，商品率高，净收益最大，人工成本大大节省，综合生产效益明显提高，平均产投比最高（4.29∶1）。从几种施肥模式的蜜柚产量、肥料偏生产力、蜜柚农艺性状、品质及经济效益等参数来看，滴灌施肥模式将是蜜柚

生产中理想的灌溉施肥方式。采用滴灌施肥技术，有望解决我国蜜柚肥料和劳力投入大、经济效益低等问题。

参考文献 References：

[1] 位高生，胡承孝，谭启玲，朱东煌，李潇彬 . 氮磷减量施肥对琯溪蜜柚果实产量和品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2018，24(2)：471-478.
WEI Gaosheng，HU Chengxiao，TAN Qiling，ZHU Donghuang，LI Xiaobin. The effect of nitrogen and phosphorus fertilizer reduction on yield and quality of Guanxi pomelo[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer，2018，24(2):471-478.

[2] 陈军金，陈毅炜 . 琯溪蜜柚高接换种技术措施[J]. 中国南方果树，2016，45(1)：111-112.
CHEN Junjin，CHEN Yiwei. Guanxi pomelo top-working technical measures[J]. South China Fruits，2016，45(1): 111-112.

[3] 李若楠，张彦才，黄绍文，唐继伟，王丽英，陈丽莉，翟彩霞 . 节水控肥下有机无机肥配施对日光温室黄瓜-番茄轮作体系土壤氮素供应及迁移的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2013，19(3)：677-688.
LI Ruonan，ZHANG Yancai，HUANG Shaowen，TANG Jiwei，WANG Liying，CHEN Lili，ZHAI Caixia. Effects of combined application of organic manure and chemical fertilizers on soil nitrogen availability and movement under water and fertilizer saving management in cucumber-tomato double cropping system[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer，2013，19(3):677-688.

[4] 姜慧敏，张建峰，杨俊诚，刘兆辉，宋效宗，江丽华，张相松 . 不同施氮模式对日光温室番茄产量、品质及土壤肥力的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2010，16(1)：158-165.
JIANG Huimin，ZHANG Jianfeng，YANG Juncheng，LIU Zhaohui，SONG Xiaozong，JIANG Lihua，ZHANG Xiangsong. Effects of different models of applying nitrogen fertilizer on yield and quality of tomato and soil fertility in greenhouse[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer，2010，16(1):158-165.

[5] 吴凌云，李志忠，丁文 . 缓控释肥在蜜柚上的施肥效果研究[J]. 福建农业科技，2011(4)：77-82.
WU Lingyun，LI Zhizhong，DING Wen. Effects of slow-controlled release fertilizer on honeyed shaddock[J]. Fujian Agricultural Science and Technology，2011(4):77-82.

[6] CHU H Y，HOSEN Y，YAGI K. NO，N_2O，CH_4 and CO_2 fluxes in winter barley field of Japanese andisol as affected by N fertilizer management[J]. Soil Biology and Biochemistry，2007，39(1):330-339.

[7] 栗方亮，张青，王煌平，安梦鱼，罗涛 . 土壤调理剂对蜜柚产量、品质及土壤性状的影响[J]. 中国农学通报，2018，34(6)：39-44.
LI Fangliang，ZHANG Qing，WANG Huangping，AN Mengyu，LUO Tao. Effects of soil amendments on yield，quality of honey pomelo and soil properties[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin，2018，34(6):39-44.

[8] 张金桃 . 平和琯溪蜜柚优质丰产规范栽培技术[J]. 中国热带农业，2014(5)：67-70.
ZHANG Jintao. Pinghe Guanxi honey pomelo cultivation techniques with high quality and high yield[J]. China Tropical Agriculture，2014(5):67-70.

[9] 邢晓鸣，李小春，丁艳锋，王绍华，刘正辉，唐设，丁承强，李刚华，魏广彬 . 缓控释肥组配对机插常规粳稻群体物质生产和产量的影响[J]. 中国农业科学，2015，48(24)：4892-4902.
XING Xiaoming，LI Xiaochun，DING Yanfeng，WANG Shaohua，LIU Zhenghui，TANG She，DING Chengqiang，LI Ganghua，WEI Guangbin. Effects of types of controlled released nitrogen and fertilization modes on yield and dry mass production [J].Scientia Agricultura Sinica，2015，48(24):4892-4902.

[10] 张承林，邓兰生 . 水肥一体化技术[M]. 北京:中国农业出版社，2012.
ZHANG Chenglin，DENG Lansheng. Water and fertilizer integration technology[M]. Beijing: China Agricultural Press，2012.

[11] 陈静，王迎春，李虎，王立刚，邱建军，肖碧林 . 滴灌施肥对免耕冬小麦水分利用及产量的影响[J]. 中国农业科学，2014，47(10)：1966-1975.
CHEN Jing，WANG Yingchun，LI Hu，WANG Ligang，QIU Jianjun，XIAO Bilin. Effects of drip fertigation with no-tillage on water use efficiency and yield of winter wheat[J]. Scientia Agricultura Sinica，2014，47(10):1966-1975.

[12] DAWIT M，DINKA M O，LETA O T. Implications of adopting drip irrigation system on crop yield and gender-sensitive issues: The case of Haramaya district，Ethiopia[J]. Journal of Open Innovation: Technology，Market，and Complexity，2020，6(4):1-17.

[13] QUAN L，YAN L，FENG T，YUNBIAO T，TIAN L. Drip irrigation elevated olive productivity in Southwest China[J]. HortTechnology，2019，29(2):1-6.

[14] FAN J，LU X，GU S，GUO X. Improving nutrient and water use efficiencies using water-drip irrigation and fertilization technology in Northeast China[J]. Agricultural Water Management，2020，241: 106352.

[15] MA X，SANGUINET K A，JACOBY P W. Direct root-zone irrigation outperforms surface drip irrigation for grape yield and crop water use efficiency while restricting root growth[J]. Agricultural Water Management，2020，231: 105993.

[16] HEBBAR S S，RAMACHANDRAPPA B K，NANJAPPA H V，PRABHAKAR M. Studies on NPK drip fertigation in field grown tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) [J]. European Journal of Agronomy，2004，21(1):117-127.

[17] 严程明，张江周，石伟琦，刘亚男，马海洋，李晓林 . 滴灌施肥对菠萝产量、品质及经济效益的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2014，20(2)：496-502.
YAN Chengming，ZHANG Jiangzhou，SHI Weiqi，LIU Yanan，MA Haiyang，LI Xiaolin. Effects of drip fertigation on yield，quality and economic benefit of pineapple[J]. Journal of Plant

Nutrition and Fertilizer，2014，20(2):496-502.

[18] 邢英英，张富仓，张燕，李静，强生才，吴立峰 . 滴灌施肥水肥耦合对温室番茄产量、品质和水氮利用的影响[J]. 中国农业科学，2015，48(4)：713-726.
XING Yingying，ZHANG Fucang，ZHANG Yan，LI Jing，QIANG Shengcai，WU Lifeng. Effect of irrigation and fertilizer coupling on greenhouse tomato yield，quality，water and nitrogen utilization under fertigation[J]. Scientia Agricultura Sinica，2015，48(4):713-726.

[19] 臧小平，韩丽娜，马蔚红，周兆禧，钟爽，刘永霞 . 非饱和灌溉条件下香蕉施肥减量技术研究[J]. 中国农学通报，2014，30(13)：247-251.
ZANG Xiaoping，HAN Lina，MA Weihong，ZHOU Zhaoxi，ZHONG Shuang，LIU Yongxia. Reduction fertilization for banana under unsaturated irrigation[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin，2014，30(13):247-251.

[20] 臧小平，井涛，周登博，王尉，丁哲利，王必尊，谢江辉，马蔚红 . 滴灌减量施肥对香蕉产量、养分吸收利用及效益的影响[J]. 灌溉排水学报，2019，38(S1)：22-27.
ZANG Xiaoping，JING Tao，ZHOU Dengbo，WANG Wei，DING Zheli，WANG Bizun，XIE Jianghui，MA Weihong. Effects of reducing nitrogen，phosphorus and potassium fertilizer on yield，nutrient absorption and economic benefit of banana under drip irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage，2019，38(S1):22-27.

[21] 李焕春，赵娜，莎娜，妥德宝，冯君伟，贾有余，李秀萍，任冬生，常新娟，郝云凤 . 滴灌条件下减量施肥对玉米产量及肥料利用率的影响[J]. 北方农业学报，2017，45(6)：39-43.
LI Huanchun，ZHAO Na，SHA Na，TUO Debao，FENG Junwei，JIA Youyu，LI Xiuping，REN Dongsheng，CHANG Xinjuan，HAO Yunfeng. Effects of reduced fertilization on yield and fertilizer use efficiency of maize under drip irrigation[J]. Journal of Northern Agriculture，2017，45(6):39-43.

[22] 张杰，韩建，孙卓玲，张丽娟，尹兴，汪新颖，吉艳芝 . 滴灌施肥对红地球葡萄产量、品质及土体氮磷钾分布的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2019，25(3)：470- 480.
ZHANG Jie，HAN Jian，SUN Zhuoling，ZHANG Lijuan，YIN Xing，WANG Xinying，JI Yanzhi. Effects of drip fertigation on yield，quality of red globe grape and distribution of soil NPK[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers，2019，25(3):470-480.

[23] 蒋静静，屈锋，苏春杰，杨剑锋，余剑，胡晓辉 . 不同肥水耦合对黄瓜产量品质及肥料偏生产力的影响[J]. 中国农业科学，2019，52(1)：86-97.
JIANG Jingjing，QU Feng，SU Chunjie，YANG Jianfeng，YU Jian，HU Xiaohui. Effects of different water and fertilizer coupling on yield and quality of cucumber and partial factor productivity of fertilizer[J]. Scientia Agricultura Sinica，2019，52(1):86-97.

[24] 李建明，于雪梅，王雪威，张俊威，焦晓聪，黄茜 . 基于产量品质和水肥利用效率西瓜滴灌水肥制度优化[J]. 农业工程学报，2020，36(9)：75-83.
LI Jianming，YU Xuemei，WANG Xuewei，ZHANG Junwei，JIAO Xiaocong，HUANG Qian. Optimization of fertigation scheduling for drip-irrigated watermelon based on its yield，quality and fertilizer and water use efficiency[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering，2020，36(9)：75-83.

[25] 邵蕾，张民，王丽霞 . 不同控释肥类型及施肥方式对肥料利用率和氮素平衡的影响[J]. 水土保持学报，2006，20(6)：115-119.
SHAO Lei，ZHANG Min，WANG Lixia. Effects of different controlled-release fertilizers and different applying methods on fertilizer use efficiency and nitrogen balance[J]. Journal of Soil and Water Conservation，2006，20(6): 115-119.

[26] 朱国梁，毕军，夏光利，孙哲，史桂芳，董浩，衣文平 . 不同缓释肥料对黄瓜产量、品质及养分利用率的影响[J]. 中国土壤与肥料，2013(1)：68-73.
ZHU Guoliang，BI Jun，XIA Guangli，SUN Zhe，SHI Guifang，DONG Hao，YI Wenping. Effects of different slow-release fertilizers on cucumbers’ yield，quality and nutrient use efficiency[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China，2013(1): 68-73.

[27] 臧小平，邓兰生，郑良永，张承林，魏长宾，孙光明 . 不同灌溉施肥方式对香蕉生长和产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2009，15(2)：484-487.
ZANG Xiaoping，DENG Lansheng，ZHENG Liangyong，ZHANG Chenglin，WEI Changbin，SUN Guangming. Effects of different fertigation methods on growth and yield of banana[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science，2009，15(2): 484-487.

[28] 臧小平，林兴娥，丁哲利，戴敏洁，谭琳，葛宇，魏长宾，马蔚红 . 滴灌施肥对红毛丹产量、品质及经济效益的影响[J]. 中国农学通报，2015，31(25)：113-117.
ZANG Xiaoping，LIN Xing’e，DING Zheli，DAI Minjie，TAN Lin，GE Yu，WEI Changbin，MA Weihong. Effects of drip fertigation on yield，quality and economic benefit of rambutan[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin，2015，31(25): 113-117.

[29] 王玉明 . 滴灌、喷灌及管灌对马铃薯产量与水分生产效益的影响[J]. 华北农学报，2007，22(S3)：83-84.
WANG Yuming. Effects on potato production and water absorption efficiency of different irrigation methods: dripping，spray and duct[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica，2007，22(S3): 83-84.

[30] KUMAR D，PANDEY V. Effect of NPK fertigation on growth，yield and quality of banana Rasthali (AAB-Pathkapoora) in eastern coastal agro-climatic conditions of India[J]. Indian Journal of Agricultural Sciences，2008，78(9): 798-800.

[31] 蒋德赏，王世杰，全洪友，卫双荣，莫荣富，蒋毅敏，蔡昭雄 . 水肥一体化在冬种马铃薯生产上的应用效果[J]. 广西农学报，2011，26(4)：42-45.
JIANG Deshang，WANG Shijie，QUAN Hongyou，WEI Shuangrong，MO Rongfu，JIANG Yimin，CAI Zhaoxiong. Application effect of fertigation on winter potato[J]. Journal of Guangxi Agriculture，2011，26(4): 42-45.

[32] 臧小平，马蔚红，张承林，武红霞，刘胜辉，王松标，魏长宾 . 芒

果滴灌施肥效果研究初报[J]. 广东农业科学，2009(3)：75-82.
ZANG Xiaoping，MA Weihong，ZHANG Chenglin，WU Hongxia，LIU Shenghui，WANG Songbiao，WEI Changbin. Primary research on the effect of drip fertilization of mango[J]. Guangdong Agricultural Sciences，2009(3): 75-82.

[33] QIN W，HEINEN M，ASSINCK F B T，OENEMA O. Exploring optimal fertigation strategies for orange production，using soil-crop modeling[J]. Agriculture，Ecosystems and Environment，2016，223: 31-40.

[34] 陈昱辛，贾悦，崔宁博，杨永刚，赵璐，胡笑涛，龚道枝 . 滴灌水肥一体化对柑橘叶片光合、产量及水分利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报，2018，37(S2)：50-58.
CHEN Yuxin，JIA Yue，CUI Ningbo，YANG Yonggang，ZHAO Lu，HU Xiaotao，GONG Daozhi. Effects of integrated management of water and fertilizer on citrus photosynthesis，yield and water use efficiency[J]. Journal of Irrigation and Drainage，2018，37(S2):50-58.

[35] XIE X，MACHIKOWA T，WONPRASAID S. Drip irrigation systems controlled by soil moisture sensors and a soil water balance model for cassava grown in soils of two different textures [J]. South African Journal of Plant and Soil，2020，37(4): 255-264.

[36] WANG J，LI Y，NIU W. Responses of bacterial community，root-soil interaction and tomato yield to different practices in subsurface drip irrigation[J]. Sustainability，2020，12(6):2338.

[37] 张明智，牛文全，李康勇，李元 . 灌溉与深松对夏玉米根区土壤微生物数量的影响[J]. 土壤通报，2015，46(6)：1407-1414.
ZHANG Mingzhi，NIU Wenquan，LI Kangyong，LI Yuan. Effect of irrigation and subsoiling on the number of summer maize rhizosphere microbes [J]. Chinese Journal of Soil Science，2015，46 (6): 1407-1414.

[38] CHEN R，SENBAYRAM M，BLAGODATSKY S，MYACHINA O，DITTERT K，LIN X，BLAGODATSKAYA E，KUZYAKOV Y. Soil C and N availability determine the priming effect: microbial N mining and stoichiometric decomposition theories[J]. Global Change Biology，2014，20(7): 2356-2367.

[39] HUESO S，GARCÍA C，HERNÁNDEZ T. Severe drought conditions modify the microbial community structure，size and activity in amended and unamended soils[J]. Soil Biology & Biochemistry，2012，50(50): 167-173.

[40] 叶德练，齐瑞娟，张明才，李召虎 . 节水灌溉对冬小麦田土壤微生物特性、土壤酶活性和养分的调控研究[J]. 华北农学报，2016，31(1)：224-231.
YE Delian，QI Ruijuan，ZHANG Mingcai，LI Zhaohu. Study of saving-irrigation regulated the soil microbial characteristics，soil enzyme activities and soil nutrient in the winter wheat field[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica，2016，31(1):224-231.

[41] 李华，贺洪军，李腾飞，张自坤 . 不同地下滴灌制度下黄瓜根际微生物活性及功能多样性[J]. 应用生态学报，2014，25(8)：2349-2354.
LI Hua，HE Hongjun，LI Tengfei，ZHANG Zikun. Microbial activity and functional diversity in rhizosphere of cucumber under different subsurface drip irrigation scheduling[J]. Chinese Journal of Applied Ecology，2014，25(8): 2349-2354.

[42] 刘振香，刘鹏，贾绪存，程乙，董树亭，赵斌，张吉旺，杨今胜 . 不同水肥处理对夏玉米田土壤微生物特性的影响[J]. 应用生态学报，2015，26(1)：113-121.
LIU Zhenxiang，LIU Peng，JIA Xucun，CHENG Yi，DONG Shuting，ZHAO Bin，ZHANG Jiwang，YANG Jinsheng. Effects of irrigation and fertilization on soil microbial properties in summer maize field[J]. Chinese Journal of Applied Ecology，2015，26(1): 113-121.

[43] 吕东英，李卫红，杨玉海，朱成刚，苏芮 . 多枝柽柳幼苗根际微生物数量与分布对土壤水分变化的响应[J]. 中国沙漠，2012，32(3)：737-743.
LÜ Dongying，LI Weihong，YANG Yuhai，ZHU Chenggang，SU Rui. Response of the quantity and distribution of microorganisms in the rhizosphere of *Tamarix ramosissima* seedlings to soil moisture[J]. Journal of Desert Research，2012，32(3): 737-743.

[44] 张兰勤，唐新莲，黎晓峰，唐琳，陆兴伦，阳继辉 . 水肥一体化减量施肥对樱桃番茄产质量的影响[J]. 南方农业学报，2015，46(7)：1270-1274.
ZHANG Lanqin，TANG Xinlian，LI Xiaofeng，TANG Lin，LU Xinglun，YANG Jihui. Effect of reducing fertilizer application on yield and quality of cherry tomato under integration of water and fertilizer[J]. Journal of Southern Agriculture，2015，46(7): 1270-1274.

[45] 杨尚东，吴俊，周柳强，谢如林，黄金生，黄美福，刘永贤，谭宏伟 . 非饱和灌溉条件下番茄施肥减量技术研究[J]. 热带作物学报，2013，34(7)：1232-1236.
YANG Shangdong，WU Jun，ZHOU Liuqiang，XIE Rulin，HUANG Jinsheng，HUANG Meifu，LIU Yongxian，TAN Hongwei. Reduction fertilization for tomato under unsaturated irrigation[J]. Chinese Journal of Tropical Crops，2013，34(7): 1232-1236.

[46] 于舜章 . 山东省设施黄瓜水肥一体化滴灌技术应用研究[J]. 水资源与水工程学报，2009，20(6)：173-176.
YU Shunzhang. Application of drip irrigation of integral control of water and fertilization for cucumber under protected cultivation in Shandong province[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering，2009，20(6): 173-176.