

不同肥水用量下金菠萝的养分吸收特征及产量品质效应

刘亚男¹, 安东升¹, 严程明¹, 何东宁², 徐明岗^{1,3*}

1. 中国热带农业科学院南亚热带作物研究所/海南省热带作物营养重点实验室, 广东湛江 524091; 2. 岭南师范学院, 广东湛江 524048; 3. 山西农业大学, 山西太原 030031

摘要: 为了应对菠萝主产区季节性干旱严重, 限制产业发展问题, 明确适宜高产优质菠萝品种生长、增产增效的肥水用量, 本研究以金菠萝 MD-2 为试验材料, 采用田间小区试验, 设置以下 8 个处理: (1) CK (不施肥不灌水); (2) F₁W₀ (常规施肥不灌水); (3) F₁W₁ (滴灌施肥, 50%~60%田间持水量); (4) F₂W₁ (滴灌施肥量减少 25%, 50%~60%田间持水量); (5) F₃W₁ (滴灌施肥量减少 50%, 50%~60%田间持水量); (6) F₁W₂ (滴灌施肥, 30%~40%田间持水量); (7) F₂W₂ (滴灌施肥量减少 25%, 30%~40%田间持水量); (8) F₃W₂ (滴灌施肥量减少 50%, 30%~40%田间持水量), 每个处理 3 次重复。比较不同肥水用量对金菠萝生长、养分吸收特征及产量品质的影响。结果表明: 高肥高水处理的菠萝总叶片数, 根、茎、叶、果柄、果实和植株干物质累积量, 以及植株氮、磷、钾累积量, 均显著高于对照。与常规施肥相比, 高肥高水处理显著提高了金菠萝株高、茎高、茎粗、D 叶长、D 叶宽和果柄粗度, 茎、叶、果柄、果实和植株干物质累积量, 以及植株氮、钾累积量。高肥高水处理的菠萝果实横径、纵径、单果重和产量显著高于对照和常规施肥处理, 果实产量比对照高 117.46%, 比常规施肥处理高 99.40%, 而常规施肥处理与对照的产量差异不显著。各滴灌施肥处理的肥料贡献率和农学效率显著高于常规施肥处理。常规施肥处理的菠萝果实维生素 C 和可滴定酸含量最高, 但该处理糖酸比最低, 品质不佳。同一灌溉水平下, 不同施肥量处理的菠萝长势、干物质累积和果实品质差异不显著。高肥高水处理产量最高, 与低肥高水处理差异不显著, 与其他处理差异显著。低肥高水处理的灌溉水生产力与各低灌水量处理相当。同一施肥水平下, 高灌水量处理的果实可溶性糖含量和糖酸比显著高于低灌水量处理。综合考虑菠萝生长态势、产量品质以及灌溉水生产力和肥料贡献率等, 低肥高水处理为最优的灌溉施肥组合, 有利于实现菠萝高产优质高效生产。

关键词: 金菠萝; 肥水用量; 养分吸收; 产量; 品质

中图分类号: S668.3 文献标识码: A

Effects of Different Fertilization and Irrigation Rates on Plant Growth, Nutrient Uptake, Yield and Fruit Quality of MD-2 Pineapple

LIU Yanan¹, AN Dongsheng¹, YAN Chengming¹, HE Dongning², XU Minggang^{1,3*}

1. South Subtropical Crops Research Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences / Key Laboratory of Tropical Crops Nutrition of Hainan Province, Zhanjiang, Guangdong 524091, China; 2. Lingnan Normal University, Zhanjiang, Guangdong 524048, China; 3. Shanxi Agricultural University, Taiyuan, Shanxi 030031, China

Abstract: A field experiment was conducted to investigate the effects of different fertilization and irrigation rates on plant growth, nutrient uptake, yield and fruit quality of MD-2 pineapple. The goal was to deal with the seasonal drought in the main producing areas of pineapple, and determine the appropriate rates of fertilization and irrigation for high-yield and high-quality pineapple variety growth, which can increase the yield and efficiency. MD-2 pineapple was subjected to a field plot experiment with eight treatments: (1) CK (no fertilization and no irrigation), (2) F₁W₀ (no irri-

收稿日期 2022-08-01; 修回日期 2022-09-30

基金项目 国家重点研发计划项目 (No. 2020YFD1000600); 中国热带农业科学院基本科研业务费专项 (No. 1630062017024); 岭南师范学院校级科研项目 (No. ZL2019)。

作者简介 刘亚男 (1987—), 女, 硕士, 助理研究员, 研究方向: 养分资源综合管理。*通信作者 (Corresponding author): 徐明岗 (XU Minggang), E-mail: xuminggang@caas.cn。

gation with conventional fertilization), (3) F_1W_1 (fertigation with 50%–60% of field capacity), (4) F_2W_1 (25% reduction in fertilizer application with 50%–60% of field capacity), (5) F_3W_1 (50% reduction in fertilizer application with 50%–60% of field capacity), (6) F_1W_2 (fertigation with 30%–40% of field capacity), (7) F_2W_2 (the amount of fertilizer was reduced by 25%, 30%–40% of field capacity), and (8) F_3W_2 (the amount of fertilizer was reduced by 50%, 30%–40% of field capacity). The results showed that the total number of leaves, root, stem, leaf, stalk, fruit and plant dry biomass accumulations, and plant N, P, K accumulations of MD-2 pineapple of F_1W_1 treatment were significantly higher than those of CK. Compared with F_1W_0 , F_1W_1 treatment significantly increased the plant height, stem height, stem diameter, D leaf length, D leaf width, peduncle diameter, and stem, leaf, peduncle, fruit and plant dry biomass accumulations, and N and K accumulations of plant. The transverse diameter, vertical diameter, fruit weight and fruit yield of MD-2 pineapple of F_1W_1 treatment were significantly higher than those of CK and F_1W_0 . And the fruit yield of F_1W_1 was 117.46% higher than CK and 99.40% higher than F_1W_0 , while there was no difference between F_1W_0 and CK. The fertilizer contribution rate and agricultural efficiency of each fertigation treatment were significantly higher than those of F_1W_0 . The contents of vitamin C and titratable acid of F_1W_0 were the highest, but the sugar-acid ratio was the lowest. Under the same irrigation level, there were no significant differences in growth, dry biomass accumulation and fruit quality of MD-2 pineapple among different fertilization levels. The yield of F_1W_1 treatment was the highest, which had no significant difference with that of F_3W_1 treatment. The irrigation water productivity of F_3W_1 treatment was equivalent to that of all treatments with low irrigation level. Under the same fertilization level, the soluble sugar content and sugar-acid ratio of treatments with high irrigation rate were significantly higher than those of treatments with low irrigation rate. Considering the growth situation, yield and quality of MD-2 pineapple, irrigation water productivity and fertilizer contribution rate, F_3W_1 treatment was the optimal combination of fertilization and irrigation, which was beneficial to realize high yield, quality and efficiency of MD-2 pineapple.

Keywords: MD-2 pineapple; fertilization and irrigation rates; nutrient uptake; yield; quality

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2023.08.013

菠萝 (*Ananas comosus* L. Merr) 作为热带、亚热带名果之一, 在国际市场和国内市场水果贸易中都有很大潜力。广东是我国菠萝种植第一大省, 主产区季节性干旱严重, 菠萝生长发育关键期缺水, 前期大量施肥但肥水耦合困难, 后期植株封行, 追肥困难, 造成产量降低、品质下降、资源浪费。水肥一体化技术是解决菠萝种植过程中肥水时空不匹配问题的重要措施, 可有效调控土壤水分和养分, 实现肥水同步供给。严程明等^[1]研究巴厘品种菠萝, 结果显示, 与常规施肥相比, 采用水肥一体化技术菠萝氮、磷、钾养分吸收量分别增加 31.6%、60.3%和 40.3%。采用水肥一体化技术不仅可提升菠萝养分吸收, 也可提高菠萝的产量和品质。谢盛良等^[2]对巴厘菠萝的研究表明, 应用水肥一体化技术, 每月抽叶数增加 2~10 片, 单果重增加 43.6%, 单位面积产量增加 43.6%, 商品果率提高 10.8%。马海洋等^[3]比较了滴灌、微喷带、喷灌肥水一体化技术在菠萝上的应用效果, 结果表明滴灌是最佳的菠萝栽培管理模式, 应用滴灌施肥技术, 可使菠萝增产 26.3%, 肥料贡献率增加 16.3%。严程明等^[4]研究表明, 滴灌施肥技术可使巴厘菠萝增产 39.0%, 商品品质大幅度提高。刘传和等^[5]研究, 应用水肥一体化技

术可显著增加神湾菠萝青叶数、叶长、叶宽和株高, 产量和可溶性固形物含量显著增加。目前, 关于菠萝水肥一体化技术应用效果的研究, 多集中于传统施肥与水肥一体化比较研究, 且研究对象品种单一, 多为巴厘品种。在当今菠萝产业发展中, 品种结构单一、老化严重的问题比较突出。金菠萝叶片宽大、叶缘少刺, 果型端庄, 成熟时果皮黄绿色、有光泽, 果眼扁平或微隆, 果肉呈橙黄色、香味浓郁, 口感爽脆、香甜, 纤维少, 维生素 C 含量高, 果实风味优于其他品种。该品种产量高, 品质佳^[6], 综合性状优良, 是鲜食、加工均适宜的优良品种, 推广前景广阔。但目前关于金菠萝最佳水肥管理的报道较少, 本研究以金菠萝 MD-2 为试验材料, 比较滴灌施肥条件下, 不同肥水用量对菠萝植株生长、养分累积以及果实产量品质的影响, 明确适宜菠萝增产增效的滴灌施肥组合, 为提高金菠萝的产量和品质, 促进金菠萝产业的绿色发展提供重要理论支撑。

1 材料与方法

1.1 材料

试验地点位于广东省湛江市麻章区中国热带农业科学院湛江实验站基地, 地理坐标为

110°16'E, 21°08'N, 地处雷州半岛, 土壤类型为凝灰岩砖红壤。土壤基础理化性质如下: pH 4.82, 有机质 2.27%, 全氮 1.20 g/kg, 有效磷 38.89 mg/kg, 速效钾 336.67 mg/kg。每年 5—10 月为雨季, 11 月至翌年 4 月为旱季。主要气象数据见图 1。2020 年 5—10 月累计降水量为 1567.2 mm, 占全年降水量的 87.3%, 季节性干旱严重。

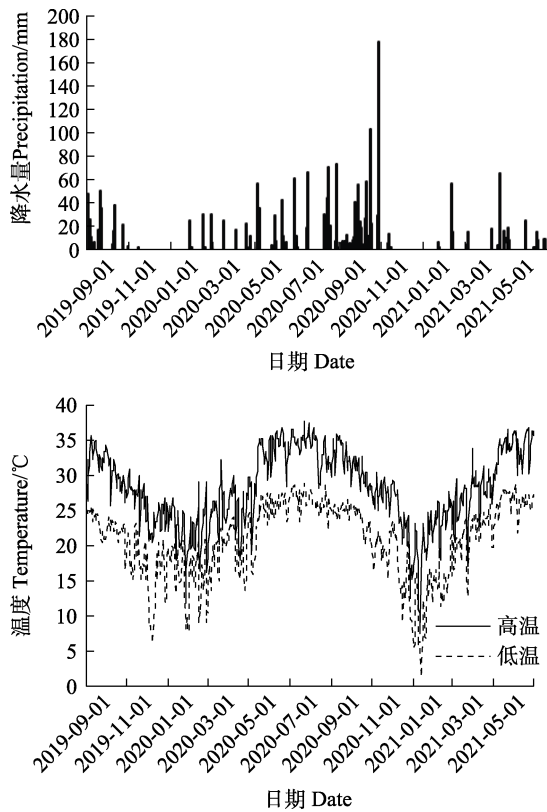


图 1 日降水量和最高、最低气温

Fig. 1 Daily precipitation, highest and lowest temperature

供试菠萝品种金菠萝 MD-2, 种植密度为 60 000 株/hm²。2019 年 9 月定植, 2019 年 10 月至 2020 年 4 月为缓慢生长期, 2020 年 5—9 月为旺盛生长期, 2020 年 10—11 月为催花期, 2020 年 12 月至 2021 年 5 月为果实发育期, 2021 年 6 月收获。

1.2 方法

试验设 8 个处理: (1) CK (不施肥不灌水)、(2) F₁W₀ (常规施肥不灌水)、(3) F₁W₁ (滴灌施肥, 50%~60%田间持水量)、(4) F₂W₁ (滴灌施肥量减少 25%, 50%~60%田间持水量)、(5) F₃W₁ (滴灌施肥量减少 50%, 50%~60%田间持水量)、(6) F₁W₂ (滴灌施肥, 30%~40%田间持水量)、(7) F₂W₂ (滴灌施肥量减少 25%, 30%~40%田间持水量)、(8) F₃W₂ (滴灌施肥量减少 50%,

30%~40%田间持水量)。每个处理 3 次重复, 试验小区采用随机区组排列。小区种植面积 43.5 m², 株距 35 cm, 采用宽窄行种植, 宽行 50 cm, 窄行 40 cm, 滴灌带铺设于两行行间。常规施肥的 N、P₂O₅、K₂O 施用量分别为 300、225、420 kg/hm²。常规施肥处理于菠萝定植期、旺盛生长期、催花期分 3 次撒施; 滴灌施肥处理于金菠萝缓慢生长期 (2 次)、旺盛生长期 (4 次)、催花期、果实膨大期分 8 次滴灌施入。试验所用化肥为高水溶性复合肥 (15-10-20)、尿素 (N 46%)、过磷酸钙 (P₂O₅ 16%) 和氯化钾 (K₂O 60%)。

测定指标与方法: 于收获期采集植物样品, 株高、茎高、D 叶长、D 叶宽和果柄长度用卷尺测量; 茎粗、果柄粗度、果实横径和纵径用分度值为 0.02 mm 的游标卡尺测定; 各部位鲜重和干重用 0.01 g 电子天平称量。根、茎、叶、果柄、果实分离, 于实验室清洗, 采集各部位样本, 105 °C 下杀青 30 min, 70 °C 烘干至恒重, 测定各部位生物量。用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮植物样, 凯式定氮法测全氮, 钼锑抗比色法测全磷, 火焰光度计法测全钾。每个小区随机采摘 30 个金菠萝果实测定平均单果重, 根据种植密度折合成单位面积产量 (t/hm²)。可溶性糖含量用蒽酮比色法测定, 可滴定酸含量用酸碱中和滴定法 (以柠檬酸计) 测定, Vc 含量用 2,6-二氯酚法测定。

灌溉水生产力 (irrigation water productivity, IWP, kg/m³) = 产量 (kg/hm²) / 灌溉水量 (m³/hm²)

肥料贡献率 (fertilizer contribution rate, FCR) = (施肥区产量 - 无肥区产量) / 施肥区产量 × 100%

肥料农学效率 (agronomy efficiency, AE, kg/kg) = (施肥区产量 - 无肥区产量) / 施肥区施肥量

1.3 数据处理

试验数据采用 Excel 2010 和 SAS 8.0 软件进行统计分析, 采用 ANOVA 作方差分析, 利用 Duncan's 作多重比较分析, 采用皮尔森相关分析进行各个指标的相关性分析。

2 结果与分析

2.1 不同水肥处理金菠萝植物学性状

金菠萝采收时, 不同水肥处理植株各项生长指标见表 1。与对照相比, 常规施肥处理显著提高了菠萝株高和 D 叶长, 说明施肥可显著促进菠

萝植株和叶片生长。与常规施肥相比,高肥高水处理显著提高了金菠萝株高、茎高、茎粗、D 叶长、D 叶宽和果柄粗度,说明严重干旱胁迫下,灌水可显著促进金菠萝植株各部位生长。同一灌水条件下,不同施肥处理之间金菠萝各生长指标差异不显著。中肥高水处理的金菠萝茎高显著高于中肥低水处理,高肥高水处理的 D 叶长显著高于高肥低水处理,说明同等施肥量下,灌水有一定的促进金菠萝植株生长的效果。

2.2 不同水肥处理金菠萝植株干物质累积量

不同水肥处理植株干物质累积情况见表 2。高肥高水处理的的根、茎、叶、果柄、果实以及植株干物质累积量均显著高于对照,说明肥水互作可显著促进金菠萝干物质累积。相比常规施肥处理,高肥高水处理的茎、叶、果柄、果实和植株干物质累积量显著提高,说明严重干旱胁迫下,

灌水可显著促进金菠萝干物质累积。同一灌水条件下,不同施肥量对干物质累积无明显影响。中肥高水处理的根干重显著高于中肥低水处理,高肥高水和低肥高水处理的果干重显著高于高肥低水和低肥低水处理,说明灌水可促进金菠萝根生长和果实干物质累积。

2.3 不同水肥处理金菠萝植株氮(N)、磷(P)、钾(K)累积量

由图 2 可以看出,高肥高水处理的 N、P、K 累积量显著高于对照,说明肥水互作可显著促进金菠萝养分吸收,提高养分累积量。相比常规施肥处理,高肥高水处理可显著提高金菠萝植株 N、K 累积量,P 累积量无差异,可能与菠萝对 N、K 元素的需求量高于 P 元素有关。高肥高水处理的植株 K 累积量显著高于低肥高水处理,说明轻度干旱胁迫时,施肥量高低显著影响植株 K 元素累

表 1 不同水肥处理下的金菠萝植株生长情况

Tab. 1 MD-2 plant growth of different treatments

| 处理 Treat- ment | 总叶片数 Leaf number | 株高 Plant height/cm | 茎高 Stem height/cm | 茎粗 Stem diame- ter/cm | D 叶长 D leaf length/cm | D 叶宽 D leaf width/cm | 果柄长度 Peduncle length/cm | 果柄粗度 Peduncle di- ameter/cm |
|-------------------------------|----------------------|--------------------------|-------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|
| CK | 33.33 ^c | 80.43 ^c | 24.90 ^{de} | 5.25 ^{bc} | 72.50 ^d | 4.70 ^{bc} | 17.47 ^{ab} | 2.21 ^{bc} |
| F ₁ W ₀ | 41.00 ^{bc} | 115.20 ^b | 21.60 ^e | 4.93 ^c | 93.27 ^c | 4.43 ^c | 21.93 ^a | 1.96 ^c |
| F ₁ W ₁ | 58.33 ^{ab} | 142.30 ^a | 40.57 ^a | 7.39 ^a | 110.97 ^a | 5.57 ^{ab} | 19.90 ^{ab} | 3.03 ^a |
| F ₂ W ₁ | 52.67 ^{ab} | 121.83 ^{ab} | 38.93 ^{ab} | 6.98 ^a | 96.00 ^{bc} | 5.87 ^a | 18.47 ^{ab} | 2.79 ^a |
| F ₃ W ₁ | 51.00 ^{ab} | 128.73 ^{ab} | 33.73 ^{abc} | 6.55 ^{ab} | 99.50 ^{abc} | 5.67 ^a | 16.97 ^b | 2.95 ^a |
| F ₁ W ₂ | 60.67 ^a | 126.57 ^{ab} | 37.17 ^{abc} | 7.08 ^a | 98.30 ^{bc} | 5.70 ^a | 17.43 ^{ab} | 2.87 ^a |
| F ₂ W ₂ | 51.33 ^{ab} | 128.10 ^{ab} | 29.27 ^{cde} | 6.38 ^{ab} | 106.43 ^{ab} | 5.37 ^{ab} | 18.53 ^{ab} | 2.65 ^{ab} |
| F ₃ W ₂ | 48.33 ^{abc} | 131.70 ^{ab} | 31.70 ^{bcd} | 6.50 ^{ab} | 107.00 ^{ab} | 5.53 ^{ab} | 19.83 ^{ab} | 2.73 ^{ab} |

注: 同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: Different lowercase letters after the same column of data indicate significant difference ($P < 0.05$).

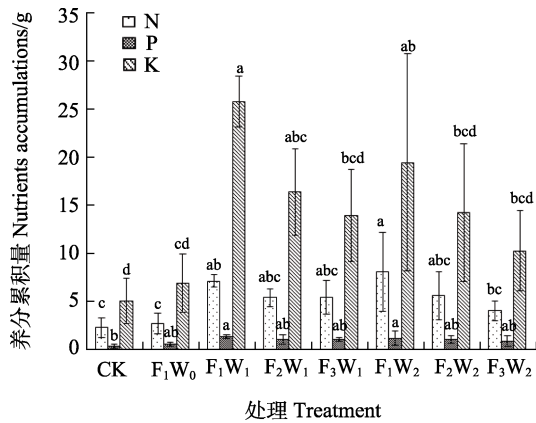
表 2 不同水肥处理下的金菠萝植株干物质累积量

Tab. 2 Plant dry biomass of MD-2 under different treatments

| 处理 Treatment | 根 Root | 茎 Stem | 叶 Leaf | 果柄 Fruit stem | 果实 Fruit | 植株 Plant |
|-------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|
| CK | 14.30 ^c | 56.32 ^b | 139.39 ^b | 8.15 ^{bc} | 127.31 ^{bc} | 345.47 ^c |
| F ₁ W ₀ | 17.89 ^{bc} | 43.08 ^b | 201.14 ^b | 7.71 ^c | 109.65 ^c | 379.47 ^{bc} |
| F ₁ W ₁ | 32.51 ^{ab} | 173.71 ^a | 504.74 ^a | 15.39 ^a | 204.81 ^a | 931.17 ^a |
| F ₂ W ₁ | 44.56 ^a | 145.59 ^{ab} | 400.36 ^{ab} | 12.76 ^{abc} | 156.65 ^b | 759.93 ^{ab} |
| F ₃ W ₁ | 31.10 ^{abc} | 136.77 ^{ab} | 355.26 ^{ab} | 12.90 ^{abc} | 202.90 ^a | 738.94 ^{ab} |
| F ₁ W ₂ | 30.62 ^{abc} | 203.09 ^a | 559.62 ^a | 14.50 ^{ab} | 135.37 ^{bc} | 943.20 ^a |
| F ₂ W ₂ | 18.71 ^{bc} | 112.30 ^{ab} | 386.43 ^{ab} | 11.83 ^{abc} | 152.51 ^{bc} | 681.78 ^{abc} |
| F ₃ W ₂ | 25.85 ^{bc} | 111.75 ^{ab} | 314.98 ^{ab} | 12.93 ^{abc} | 158.19 ^b | 623.70 ^{abc} |

注: 同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: Different lowercase letters after the same column of data indicate significant difference ($P < 0.05$).



不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。
Different lowercase letters indicate significant difference among different treatments ($P < 0.05$).

图 2 不同水肥处理下的金菠萝植株 N、P、K 累积量
Fig. 2 Effect of different treatments on N, P, K nutrients accumulations of MD-2 plant

积；高肥低水处理的植株 N 累积量显著高于低肥低水处理，说明中度干旱胁迫时，施肥量显著影响植株 N 元素累积。

2.4 不同水肥处理金菠萝产量构成及肥料利用率

由表 3 可以看出，高肥高水处理的金菠萝果实横径、纵径、单果重和产量显著高于对照和常规施肥处理，常规施肥处理与对照差异不显著，说明肥水互动和灌水可显著促进金菠萝果实生长，形成产量，而单独施肥的效果不显著。菠萝相对耐旱，但严重干旱胁迫显著影响果实产量。高肥高水处理的果实纵径、单果重、产量显著高于高肥低水处理，说明相对充足的水分供应是肥料高效吸收的基础。中度干旱胁迫时，灌溉水生产力显著高于轻度干旱胁迫。各肥水处理的肥料贡献率和农学效率显著高于常规施肥处理，说明严重干旱胁迫时，肥水不匹配，肥料利用率低，资源浪费严重，灌水在菠萝栽培管理中十分重要。

2.5 不同水肥处理金菠萝果实内在品质

由表 4 可以看出，高肥高水处理的可溶性糖和维生素 C 含量显著低于对照。高肥高水处理的

表 3 不同水肥处理下的金菠萝产量构成及肥料利用率

Tab. 3 Effect of different treatments on pineapple yield and fertilizer efficiency of MD-2

| 处理 Treatment | 果实纵径 Vertical diameter/cm | 果实横径 Transverse diameter/cm | 单果重 Fruit weight/g | 产量 Yield/(t·hm ⁻²) | 灌溉水生产力 IWP/(kg·m ⁻³) | 肥料贡献率 FCR/% | 肥料农学效率 AE/(kg·kg ⁻¹) |
|-------------------------------|---------------------------|-----------------------------|-----------------------|--------------------------------|----------------------------------|-------------|----------------------------------|
| CK | 11.60 ^c | 10.01 ^c | 825.83 ^d | 49.55 ^d | | | |
| F ₁ W ₀ | 11.45 ^c | 10.20 ^{bc} | 900.68 ^{cd} | 54.04 ^{cd} | | 8.31 | 4.75 |
| F ₁ W ₁ | 17.36 ^a | 11.70 ^a | 1795.80 ^a | 107.75 ^a | 8.38 | 54.01 | 61.59 |
| F ₂ W ₁ | 13.90 ^{bc} | 11.13 ^{ab} | 1263.52 ^{bc} | 75.81 ^{bc} | 9.08 | 34.64 | 27.79 |
| F ₃ W ₁ | 14.73 ^{ab} | 10.77 ^{abc} | 1422.98 ^{ab} | 85.38 ^{ab} | 18.06 | 41.96 | 37.91 |
| F ₁ W ₂ | 13.69 ^{bc} | 11.10 ^{ab} | 1306.43 ^{bc} | 78.39 ^{bc} | 22.20 | 36.79 | 30.51 |
| F ₂ W ₂ | 14.97 ^{ab} | 10.83 ^{abc} | 1298.97 ^{bc} | 77.94 ^{bc} | 24.73 | 36.42 | 30.04 |
| F ₃ W ₂ | 13.50 ^{bc} | 11.50 ^a | 1304.43 ^{bc} | 78.27 ^{bc} | 22.60 | 36.69 | 30.39 |

注：同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: Different lowercase letters after the same column of data indicate significant difference ($P < 0.05$).

表 4 不同水肥处理下的金菠萝果实品质

Tab. 4 Effect of different treatments on fruit quality of MD-2

| 处理 Treatment | 可溶性糖 Soluble sugar/% | 维生素 C Vc/(mg·kg ⁻¹) | 可滴定酸 Titratable acids/% | 糖/酸 Sugar/acid |
|-------------------------------|----------------------|---------------------------------|-------------------------|----------------|
| CK | 13.82 ^a | 453.26 ^b | 0.60 ^b | 23.13 |
| F ₁ W ₀ | 11.76 ^b | 759.55 ^a | 0.82 ^a | 14.41 |
| F ₁ W ₁ | 12.07 ^b | 328.63 ^c | 0.49 ^b | 24.72 |
| F ₂ W ₁ | 12.47 ^{ab} | 353.32 ^{bc} | 0.58 ^b | 21.48 |
| F ₃ W ₁ | 12.63 ^{ab} | 388.01 ^{bc} | 0.51 ^b | 24.98 |
| F ₁ W ₂ | 9.79 ^c | 369.66 ^{bc} | 0.63 ^b | 15.63 |
| F ₂ W ₂ | 8.74 ^c | 340.58 ^{bc} | 0.56 ^b | 15.63 |
| F ₃ W ₂ | 9.12 ^c | 416.86 ^{bc} | 0.58 ^b | 15.63 |

注：同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: Different lowercase letters after the same column of data indicate significant difference ($P < 0.05$).

维生素 C 和可滴定酸含量显著低于常规施肥处理,但其糖酸比显著高于常规施肥。同一灌溉水平下,不同施肥量处理的可溶性糖、维生素 C、可滴定酸含量以及糖酸比均差异不显著。同一施肥水平下,高灌水量处理的可溶性糖含量和糖酸比显著高于低灌水量处理。说明一定干旱胁迫条件下,灌水对金菠萝果实可溶性糖含量和糖酸比的影响大于施肥。常规施肥处理的维生素 C 和可滴定酸含量最高,且与其他处理差异显著,但该处理糖酸比最低。

2.6 各指标相关性分析

由表 5 可以看出,果实产量与叶片数、株高、

D 叶长、D 叶宽、植株干重、NPK 累积量和果实横、纵径均呈极显著正相关,与 Vc 和可滴定酸含量呈极显著负相关。可溶性糖含量与菠萝株高、果实横径呈显著负相关,与 D 叶长呈极显著负相关;Vc 含量与总叶片数、植株 P 累积量呈显著负相关,与 D 叶宽、植株干重、植株 N、K 累积量、果实横、纵径、产量呈极显著负相关,与可滴定酸含量呈极显著正相关;可滴定酸含量与植株干重、植株 P、K 累积量呈显著负相关,与 D 叶宽、果实横、纵径、产量呈极显著负相关。说明菠萝植株叶片数越多,干物质和养分累积量越高,可提高菠萝产量,降低果实酸度,有助于实现菠萝增产提质。

表 5 金菠萝各指标相关性分析
Tab. 5 Correlation of the indexes of MD-2

| 指标 Index | 株高 Plant height | D 叶长 D leaf length | D 叶宽 D leaf width | 植株干重 Plant dry weight | N | P | K | 果实横径 Transverse diameter | 果实纵径 Vertical diameter | 产量 Yield | 可溶性糖 Soluble sugar | Vc | 可滴定酸 Titratable acid |
|-------------|--------------------|-----------------------|----------------------|--------------------------|---------|---------|---------|-----------------------------|---------------------------|-------------|-----------------------|----------|-------------------------|
| 总叶片数 | 0.693** | 0.554** | 0.667** | 0.833** | 0.838** | 0.844** | 0.830** | 0.676** | 0.701** | 0.752** | -0.397 | -0.454* | -0.349 |
| 株高 | | 0.867** | 0.607** | 0.714** | 0.660** | 0.686** | 0.694** | 0.698** | 0.725** | 0.777** | -0.508* | -0.349 | -0.221 |
| D 叶长 | | | 0.573** | 0.600** | 0.548** | 0.624** | 0.580** | 0.697** | 0.666** | 0.740** | -0.607** | -0.397 | -0.324 |
| D 叶宽 | | | | 0.765** | 0.638** | 0.676** | 0.608** | 0.582** | 0.611** | 0.656** | -0.319 | -0.628** | -0.558** |
| 植株干重 | | | | | 0.966** | 0.891** | 0.941** | 0.545** | 0.760** | 0.724** | -0.328 | -0.579** | -0.469* |
| N | | | | | | 0.866** | 0.939** | 0.507* | 0.739** | 0.697** | -0.358 | -0.555** | -0.391 |
| P | | | | | | | 0.882** | 0.589** | 0.666** | 0.709** | -0.364 | -0.490* | -0.442* |
| K | | | | | | | | 0.597** | 0.825** | 0.789** | -0.222 | -0.550** | -0.461* |
| 果实横径 | | | | | | | | | 0.640** | 0.863** | -0.438* | -0.603** | -0.522** |
| 果实纵径 | | | | | | | | | | 0.901** | -0.210 | -0.605** | -0.597** |
| 产量 | | | | | | | | | | | -0.321 | -0.639** | -0.651** |
| 可溶性糖 | | | | | | | | | | | | 0.243 | 0.110 |
| Vc | | | | | | | | | | | | | 0.797** |

注: *表示显著相关 ($P<0.05$), **表示极显著相关 ($P<0.01$)。

Note: * indicates significant correlation ($P<0.05$), ** indicates extremely significant correlation ($P<0.01$).

3 讨论

合理的水肥管理对促进菠萝生长,提高菠萝产量和品质具有重要作用。本研究发现,高肥高水处理的金菠萝株高、茎高、茎粗、D 叶长、D 叶宽和果柄粗度显著高于常规施肥处理,与刘传和等^[5]在神湾菠萝上的研究结果一致。高肥高水和高肥低水处理的干物质累积量显著高于常规施肥处理,但不同滴灌施肥处理间差异不显著。说明作为 CAM 途径作物,尽管菠萝具有较强的耐旱性,但长时间的干旱胁迫依然会抑制菠萝植株生长。50%~60%田间持水量和 30%~40%田间持水

量处理,相当于轻度干旱胁迫和中度干旱胁迫^[7-8],说明非重度胁迫下金菠萝生长对于水分供应量不敏感。有研究结果显示,轻度水分胁迫有利于菠萝根系的生长,促进根长的增加,菠萝根系活力和保水力较高^[7]。与常规施肥相比,2 a 滴灌施肥处理番茄干物质质量增加 17.5%和 21.7%^[9]。滴灌条件下增加灌水量和施氮量可促进夏玉米地上部干物质积累,与本研究结果相似^[10]。

高肥高水和高肥低水处理植株 N、K 累积量较高,与对照和常规施肥处理差异显著,常规施肥与对照差异不显著。水分是影响作物养分吸收

的主要因子中最为重要的因素。常规施肥处理土壤中因水分亏缺,影响养分离子迁移,且缓效养分向速效养分的释放过程变少^[11],从而影响作物对养分的吸收利用。MENGEL 等^[12]指出,随着土壤含水量的增加,肥料 K 的有效性显著增加。滴灌条件下,土壤总孔隙度和有效孔隙度增加,土壤通气性和结构性均优于常规管理^[13],促进了菠萝根系生长发育和养分吸收累积。

水肥一体化栽培可使神湾菠萝果长、果径、单果重和产量显著增加^[4]。有研究表明,菠萝单果重与地上部茎叶重呈显著正相关^[14]。在台农 17 号菠萝上研究结果也显示,单果重与单株叶片数、叶片重和地下茎重呈极显著正相关^[15]。地上部叶片干重大说明在叶片上积累的光合产物较多,在果实生长发育阶段能把更多的光合产物转移到果实,有助于菠萝获得高产。在其他作物的研究结果同样表明,滴灌施肥可使番茄产量增加 46.9%,干物质质量增加 54.0%,氮、磷、钾吸收量是常规施肥的 1.4~2.4 倍^[16-17]。有研究指出,降低施肥量对产量影响较小,但降低了植株的营养生长,植株干物质累积量减少,与本研究结果相似^[18]。合理的肥水供应有利于作物对养分的吸收利用,从而促进产量形成。高肥高水处理产量显著高于高肥低水,说明肥料的高效利用必须依靠充足的供水才能被作物有效吸收,形成产量。在温室甜瓜上的滴灌施肥试验表明,高水高氮可促进甜瓜干物质累积,提高产量;同时追求产量和肥料利用效率时,高水中氮为最佳选择^[19],与本研究结果相似。滴灌施肥可显著提高金菠萝产量和肥料贡献率以及农学效率,与根系的良好生长有密切关系。滴灌施肥可促进作物根系生长,0~40 cm 土层根系总长度是对照的 1.5 倍^[20]。

滴灌施肥可提高金菠萝果实糖酸比,高肥高水处理的糖酸比较常规施肥处理高 10.3。路永莉等^[21]研究表明,渭北旱塬区果园,应用水肥一体化技术,苹果增产 13.0%,糖酸比提高 19.1%。同一施肥水平,50%~60%田间持水量处理可溶性糖含量和糖酸比显著高于 30%~40%田间持水量处理,即轻度水分胁迫高于中度水分胁迫处理,与岳文俊等^[19]的研究结果一致。水分是影响果实品质的关键因素,适当水分亏缺能够提高果实品质^[22-23]。

4 结论

相比常规施肥,高肥高水处理可显著提高金菠

萝植株 N、K 累积量, P 累积量无差异。高肥高水处理的菠萝果实产量最高,为 107.75 t/hm²,比对照高 117.46%,比常规施肥处理高 99.40%,但与低肥高水处理差异不显著。各滴灌施肥处理的肥料贡献率和农学效率显著高于常规施肥处理。同一灌溉水平下,不同施肥量处理的可溶性糖、维生素 C、可滴定酸含量以及糖酸比均差异不显著。同一施肥水平下,高灌水量处理的可溶性糖含量和糖酸比显著高于低灌水量处理。

综合考虑金菠萝养分吸收特征、产量品质及肥料贡献率等,低肥高水处理为较优的灌溉施肥组合,有利于实现金菠萝高产优质高效生产。

参考文献

- [1] 严程明,张江周,石伟琦,李晓林,刘亚男,马海洋.滴灌施肥下菠萝氮磷钾的营养特性[J].热带作物学报,2014,35(9):1688-1694.
YAN C M, ZHANG J Z, SHI W Q, LI X L, LIU Y N, MA H Y. Nutritional characteristics of NPK of pineapple under drip fertigation[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2014, 35(9): 1688-1694. (in Chinese)
- [2] 谢盛良,刘岩,周建光,林望达,刘传和,柯开文.水肥一体化技术在菠萝上的应用效果[J].福建果树,2009(4):33-34.
XIE S L, LIU Y, ZHOU J G, LIN W D, LIU C H, KE K W. Application effect of fertigation on pineapple[J]. Fujian Fruits, 2009(4): 33-34. (in Chinese)
- [3] 马海洋,石伟琦,刘亚男,洗皓敏,王璐钢.不同灌溉施肥模式对菠萝产量及水肥利用效率的影响[J].热带作物学报,2016,37(10):1882-1888.
MA H Y, SHI W Q, LIU Y N, XIAN A M, WANG J G. Effect of different irrigation and fertilization methods on yield and water and fertilizer use efficiency of pineapple[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2016, 37(10): 1882-1888. (in Chinese)
- [4] 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 C M, ZHANG J Z, SHI W Q, LIU Y N, MA H Y, LI X L. Effects of drip fertigation on yield, quality and economic benefit of pineapple[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2014, 20(2): 496-502. (in Chinese)
- [5] 刘传和,陈少华,黎锦洪.水肥一体化对山地栽培菠萝生长及品质的影响[J].灌溉排水学报,2017,36(1):102-106.
LIU C H, CHEN S H, LI J H. Effects of fertigation on growth and fruit quality of pineapple at mountain

- condition[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2017, 36(1): 102-106. (in Chinese)
- [6] 刘亚男, 马海洋, 张江周, 洗皑敏, 石伟琦. 不同菠萝品种滴灌施肥养分吸收特性和产量品质差异[J]. *中国南方果树*, 2016, 45(1): 62-65.
LIU Y N, MA H Y, ZHANG J Z, XIAN A M, SHI W Q. Research of nutrient uptake, yield and fruit quality among different pineapple cultivars with drip fertigation[J]. *South China Fruits*, 2016, 45(1): 62-65. (in Chinese)
- [7] 习金根, 吴浩, 王一承, 孙光明. 土壤水分对菠萝地上部和地下部生长的影响[J]. *热带作物学报*, 2010, 31(5): 701-704.
XI J G, WU H, WANG Y C, SUN G M. Effects of soil water content on plant and root growth in pineapple[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2010, 31(5): 701-704. (in Chinese)
- [8] 陈菁, 石伟琦, 孙光明, 洗皑敏. 干旱胁迫对菠萝苗期生长及叶绿素含量的影响[J]. *热带农业科学*, 2012, 32(7): 9-11.
CHEN J, SHI W Q, SUN G M, XIAN A M. Effects of drought stress on the growth and chlorophyll content of pineapple seedling[J]. *Chinese Journal of Tropical Agriculture*, 2012, 32(7): 9-11. (in Chinese)
- [9] 刘文希, 雷忻, 王秀康, 邢英英. 施肥方式与施肥量对番茄生长及养分吸收利用的影响[J]. *延安大学学报(自然科学版)*, 2022, 41(1): 39-47.
LIU W X, LEI X, WANG X K, XING Y Y. Effects of fertilizer method and amount on growth and nutrient absorption and utilization of tomato[J]. *Journal of Yan'an University (Natural Science Edition)*, 2022, 41(1): 39-47. (in Chinese)
- [10] 蔡晓, 吴祥运, 王东, 林祥, 张俊鹏. 水氮互作对滴灌夏玉米生长及水分利用效率的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2020, 39(6): 33-42.
CAI X, WU X Y, WANG D, LIN X, ZHANG J P. Combined effects of water and nitrogen application on growth and water use of summer maize under drip irrigation[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2020, 39(6): 33-42. (in Chinese)
- [11] 胡田田, 康绍忠, 张富仓. 局部灌水方式对玉米不同根区氮素吸收与利用的影响[J]. *中国农业科学*, 2005, 38(11): 2290-2295.
HU T T, KANG S Z, ZHANG F C. Effects of local irrigation on absorption and use of nitrogen from different root zones of maize[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(11): 2290-2295. (in Chinese)
- [12] MENGEL K, VON BRAUNSCHWEIG L C. The effect of soil moisture upon the availability of potassium and its influence on the growth of young maize plants (*Zea Mays L.*)[J]. *Soil Science*, 1972, 40(2): 142-148.
- [13] 陈俊. 节水灌溉条件下甜玉米水肥利用及土壤物理性质变化的研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2006.
CHEN J. Study on water and fertilizer use of sweet corn and soil physical properties variation under the water-saving irrigation[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2006. (in Chinese)
- [14] 陈业渊, 杨连珍, 邓穗生, 魏守兴, 沈奕德. 菠萝果重与营养器官的相关性分析[J]. *热带作物学报*, 2003, 24(4): 35-38.
CHEN Y Y, YANG L Z, DENG S S, WEI S X, SHEN Y D. The relationship between fruit weight and vegetative organs of pineapple[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2003, 24(4): 35-38. (in Chinese)
- [15] 王小媚, 刘业强, 任惠, 苏伟强, 欧世金, 蔡昭艳, 董龙, 黄章保, 方位宽, 黄辉晔, 李志, 李果果. 台农 17 号菠萝营养器官生长量与单果重的相关性和通径分析[J]. *西南农业学报*, 2020, 33(11): 2620-2627.
WANG X M, LIU Y Q, REN H, SU W Q, OU S J, CAI Z Y, DONG L, HUANG Z B, FANG W K, HUANG H Y, LI Z, LI G G. Correlation and path analysis between fruit weight and growth of vegetative organs of Tainong 17 pineapple[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2020, 33(11): 2620-2627. (in Chinese)
- [16] 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(7): 713-726.
XING Y Y, ZHANG F C, ZHANG Y, LI J, QIANG S C, WU L F. Effect of irrigation and fertilizer coupling on greenhouse tomato yield, quality, water and nitrogen utilization under fertigation[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(7): 713-726. (in Chinese)
- [17] 邢英英, 张富仓, 张燕, 李静, 强生才, 李志军, 高明霞. 膜下滴灌水肥耦合促进番茄养分吸收及生长[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(7): 70-80.
XING Y Y, ZHANG F C, ZHANG Y, LI J, QIANG S C, LI Z J, GAO M X. Irrigation and fertilization coupling of drip irrigation under plastic film promotes tomato's nutrient uptake and growth[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(7): 70-80. (in Chinese)
- [18] BENARD C, GAUTIER H, BOURGAUD F, GRASSELLY D, NAVEZ B, CARIS-VEYRAT C, GÉNARD M. Effects of low nitrogen supply on tomato (*Solanum lycopersicum*) fruit yield and quality with special emphasis on sugars, ac-ids, ascorbate, carotenoids, and phenolic compounds[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2009, 57(10): 4112-4123.

- [19] 岳文俊, 何文学, 丁春梅, 柏宇, 周英杰, 奚辉. 不同滴灌水肥处理对温室甜瓜养分吸收、产量和品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2021, 33(12): 2370-2380.
YUE W J, HE W X, DING C M, BO Y, ZHOU Y J, XI H. Effects of different water and fertilization on nutrient uptake, yield and quality of green-house muskmelon under drip irrigation condition[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2021, 33(12): 2370-2380. (in Chinese)
- [20] 孔清华, 李光永, 王永红, 温义刚. 不同施肥条件和滴灌方式对青椒生长的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(7): 21-25.
KONG Q H, LI G Y, WANG Y H, WEN Y G. Influences of subsurface drip irrigation and surface drip irrigation on bell pepper growth under different fertilization conditions[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(7): 21-25. (in Chinese)
- [21] 路永莉, 白凤华, 杨宪龙, 李茹, 高义民, 同延安. 水肥一体化技术对不同生态区果园苹果生产的影响[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(11): 1281-1288.
LU Y L, BAI F H, YANG X L, LI R, GAO Y M, TONG Y A. Effect of fertigation on apple production in different ecological-regions orchards[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2014, 22(11): 1281-1288. (in Chinese)
- [22] 李银坤, 郭文忠, 薛绪掌, 乔晓军, 王利春, 陈红, 赵倩, 陈菲. 不同灌溉施肥模式对温室番茄产量、品质及水肥利用的影响[J]. 中国农业科学, 2017, 50(19): 3757-3765.
LI Y K, GUO W Z, XUE X Z, QIAO X J, WANG L C, CHEN H, ZHAO Q, CHEN F. Effects of different fertigation modes on tomato yield, fruit quality, and water and fertilizer utilization in greenhouse[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(19): 3757-3765. (in Chinese)
- [23] 李毅杰, 原保忠, 别之龙, 康跃虎. 不同土壤水分下限对大棚滴灌甜瓜产量和品质的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(6): 132-138.
LI Y J, YUAN B Z, BIE Z L, KANG Y H. Effects of drip irrigation threshold on yield and quality of muskmelon in plastic greenhouse[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(6): 132-138. (in Chinese)