

微润灌溉施肥对干热区芒果光合特性、 产量和水肥利用的影响

彭有亮¹, 刘小刚¹, 张岩², 冷险险¹, 孙光照¹, 黄一峰¹, 杨启良¹, 杨先琴¹

(1.昆明理工大学农业与食品学院,昆明 650500;2.淮安市淮阴区水利局,江苏 淮安 223300)

摘要:为探明干热区芒果高效生产的灌溉施肥模式,应用微润灌溉施肥技术在西南干热区开展大田芒果试验。以7年生“贵妃芒”为试验材料,设置4种灌溉模式和3个施肥水平。4种灌溉模式为全生育期充分灌溉(FI,100% ET_C)和3个生育阶段调亏灌溉(RDI),调亏阶段分别为开花期、膨大期和成熟期(RDI_{FS}、RDI_{ES}和RDI_{MS}),调亏阶段的灌水水平为50% ET_C ,非调亏阶段为100% ET_C 。3个施肥水平为高肥(F_H)、中肥(F_M)和低肥(F_L)。研究不同水肥处理对芒果光合特性、产量和水肥利用效率的影响。结果表明:不同生育期RDI均可显著减小芒果净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)和蒸腾速率(T_r),而增大叶片瞬时水分利用效率(WUE_i)。相同灌溉水平下,开花期和膨大期 P_n 、 G_s 和 T_r 随施肥量的增加而增加,WUE_i随施肥量的增加先增后减,成熟期 P_n 、 T_r 和WUE_i随施肥量的增加而增加。与FI处理相比,RDI_{FS}减少芒果单果重量、产量和肥料偏生产力(PFP)分别为11.74%、23.43%、23.98%,RDI_{ES}分别减少为21.09%、20.29%、20.50%,RDI_{ES}和RDI_{MS}分别提高灌溉水利用效率IWUE为11.87%和32.81%。与F_M相比,F_H减少产量和IWUE分别为4.17%和4.06%,F_L分别减少6.75%和6.67%,PFP随着施肥量的增加而减少。与CK相比,除RDI_{MS}F_M处理增加产量6.36%和RDI_{MS}F_L增加不明显外,其余处理减少3.14%~31.76%,RDI_{MS}F_L处理下的PFP和RDI_{MS}F_M处理下的IWUE取得最大值,分别为363.93 kg/kg和15.80 kg/m³,与CK相比均显著增加。因此,综合考虑产量和IWUE等指标,RDI_{MS}F_M处理最优,是干热区芒果适宜的微润灌溉施肥模式。

关键词: 芒果; 灌溉施肥; 光合特性; 产量; 灌溉水利用效率

中图分类号:S571.2;S275.6

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2020)01-0350-08

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbxb.2020.01.050

Effects of Moistube Fertigation on Photosynthesis, Yield, and Use of Water and Fertilizer of Mango (*Mangifera indica* L.) in Dry and Hot Region

PENG Youliang¹, LIU Xiaogang¹, ZHANG Yan², LENG Xianxian¹,

SUN Guangzhao¹, HUANG Yifeng¹, YANG Qiliang¹, YANG Xianqin¹

(1.Faculty of Agriculture and Food, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500;

2.Huaiyin District Water Resources Bureau, Huaian, Jiangsu 223300)

Abstract: In order to evaluate the fertigation mode of mango with high efficiency production in dry and hot region, a field mango experiment was carried out in dry and hot region of southwest by applying moistube fertigation technology. Four irrigation modes and three fertilization levels were set up with 7-year-old Guifei mango as experimental materials. Four irrigation modes were full irrigation (FI, 100% ET_C) in all fruit developmental stages and regulated deficit irrigation (RDI) in three growth stages. The deficit adjusted stage were flowering stage, expanding stage, and mature stage (RDI_{FS}, RDI_{ES} and RDI_{MS}), and the irrigation level in deficit adjusted stage was 50% ET_C , non-deficit adjusted stage was 100% ET_C . Three fertilization levels were high fertilizer (F_H), medium fertilizer (F_M), and low fertilizer (F_L). The effects of different water and fertilizer treatments on mango yield, water and fertilizer use efficiency, and photosynthetic characteristics were studied. The results showed that the P_n , G_s , and T_r of mango leaves were significantly reduced by water regulation deficit at different growth stages, while WUE_i of mango leaves was significantly increased. At

收稿日期:2019-07-10

资助项目:国家自然科学基金项目(51769010,51979133,51469010,51109102);国家级大学生创新创业计划项目(201810674023)

第一作者:彭有亮(1991—),男,硕士研究生,主要从事节水灌溉新技术研究。E-mail:pengyouliang666@126.com

通信作者:刘小刚(1977—),男,博士,教授,主要从事水土资源高效利用研究。E-mail:liuxiaogangjiy@126.com

the same irrigation level, P_n , G_s and T_r increased with the increase of fertilizer application, WUE_i increased first and then decreased with the increase of fertilizer application, and P_n , T_r and WUE_i increased with the increase of fertilizer application at maturity. Compared with FI treatment, RDI_{FS} significantly reduced the weight, yield, and PFP by 11.74%, 23.43% and 23.98%, RDI_{ES} decreased by 21.09%, 20.29% and 20.50%, while RDI_{ES} and RDI_{MS} increased IWUE by 11.87% and 32.81%, respectively. Compared with F_M , F_H significantly reduced yield and IWUE by 4.17% and 4.06%, and F_L reduced by 6.75% and 6.67%, respectively. PFP decreased with the increase of fertilizer application. Compared with CK, except $RDI_{MS}F_M$ treatment increased yield by 6.36% and $RDI_{MS}F_L$ treatment did not increase significantly, the other treatments decreased by 3.14%~31.76%. Under $RDI_{MS}F_L$ and $RDI_{MS}F_M$ treatments, PFP and IWUE achieved maximum values of 363.93 kg/kg and 15.80 kg/m³, respectively, which increased significantly compared with CK. Therefore, considering yield and IWUE, $RDI_{MS}F_M$ is the best moistube fertigation mode of mango in dry and hot region.

Keywords: Mango; fertigation; photosynthetic characteristics; yield; IWUE

芒果(*Mangifera indica* L.)是世界五大热带水果之一,有“热带果王”的美誉。截止 2017 年,中国芒果种植面积达 2.07×10^6 hm²,年产量达 1.80×10^9 kg。干热河谷区光热充足,冬季温度高,适合芒果生长。但由于干热区降水量少且分配不均,蒸发量大,水热平衡失调以及水肥管理粗放,导致芒果产量不能得到保证。

调亏灌溉能大量节约灌溉用水^[1-2],保持或者增加作物产量,同时提高水分利用效率^[3-4]。已有研究^[5-6]表明,在芒果的某些阶段进行亏水灌溉,会导致芒果净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)和气孔导度(G_s)下降,而胞间 CO₂ 浓度(C_i)和叶片温度影响不显著。另外水分亏缺后恢复充分灌溉,可使 P_n 、 T_r 和 G_s 恢复甚至超过复水前的水平^[7]。已有研究^[8]发现,在开花初期到坐果期不灌溉或者调亏灌溉会显著降低产量。与充分灌溉相比,坐果期调亏灌溉(75%ETc 或 50%ETc)会导致芒果产量降低,而成熟期调亏灌溉(50%ETc)能保证产量和水分利用效率不降低。目前有关干热区芒果适宜的调亏灌溉模式尚不清楚。

微润灌溉是一种利用半透膜材料实现连续灌溉的农业节水新技术^[9],使作物吸水过程与田间灌溉过程基本同步,具有减少地表蒸发、节水高效和改善作物根区土壤环境等特点^[10-11]。与滴灌相比,微润灌溉可节约作物灌水量,提高作物水分利用效率和产量^[12-13],同时显著提高 G_s 和叶片瞬时水分利用效率(WUE_i),但降低了 T_r ^[9]。微润管为农业水肥一体化提供了最佳载体,微润灌溉施肥可提高湿润体内水肥均匀性^[14]。目前微润灌溉施肥技术的研究成果大都集中在室内模拟阶段,在大田生产的应用和实践效果尚不清楚。

灌溉施肥技术将水肥供应通过灌溉结合起来,合理的灌溉施肥能提高作物的产量、水肥利用效率和光

合特性^[15-16],但由于作物果实在不同生育期内的生长发育存在明显差异性,导致不同生育期内最佳水肥一体化模式也存在差异性^[17]。已有研究^[18]表明,滴灌施肥处理能显著提高作物生长后期光合指标,同时增加产量。芒果水肥一体化的研究成果较少。与常规畦灌相比,滴灌施肥显著增加芒果产量和水分利用效率,并能节约灌水量^[19]。与沟施肥料和传统漫灌组合相比,滴灌施肥方式提供了最佳的水肥耦合条件,可增加芒果产量。而微润灌溉施肥对于干热区芒果产量和光合特性的影响尚需研究。

如何有效结合调亏灌溉与微润灌溉施肥,实现芒果节水增产和提高光合作用尚不清楚,值得进一步研究。为此,本研究在不同施肥水平下,以充分灌溉为对照,研究不同调亏灌溉时期对芒果光合作用、产量和水肥利用效率的影响,以期找到最佳调亏灌溉和施肥耦合模式,为干热区芒果灌溉施肥提供科学依据。

1 材料与方法

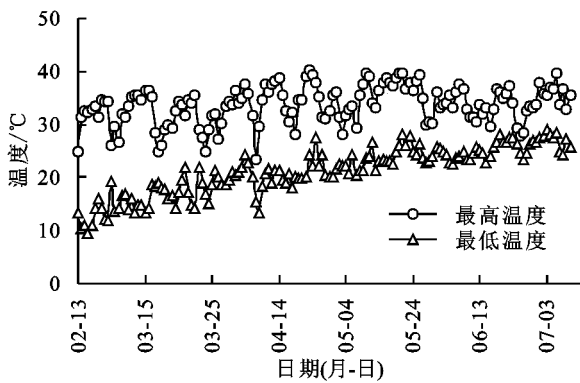
1.1 试验区概况

试验于 2018 年 2—7 月在干热区云南省元江县(102°00'N,23°11'E)进行。该区海拔 840.05 m,年平均降水量 788 mm,雨季多集中在 5—10 月,季节性干旱明显。年均温度 23.80 ℃,极端最高气温 42.30 ℃,≥10 ℃活动积温 8 708.90 ℃,终年无霜。年平均蒸发量 2 750.90 mm,年平均相对湿度 67%。2018 年试验期间气象要素见图 1。试供土壤为砂壤土,容重为 1.35 g/cm³,pH 为 6.70,有机质含量为 10.10 g/kg,碱解氮含量为 60.20 mg/kg,有效磷含量为 30.30 mg/kg,速效钾含量为 118.50 mg/kg。

1.2 试验设计

试验以 7 年生“贵妃芒”芒果为供试材料,株高 3.00~3.20 m,地径 11.00~14.00 cm,行株距为 7.00 m×5.00 m。根据文献[6]将芒果主要生育期划分为开花期(FS,2 月 20 日至 4 月 1 日)、果实膨大期(ES,

4 月 2 日至 5 月 13 日)和果实成熟期(MS,5 月 14 日



至 7 月 10 日)。

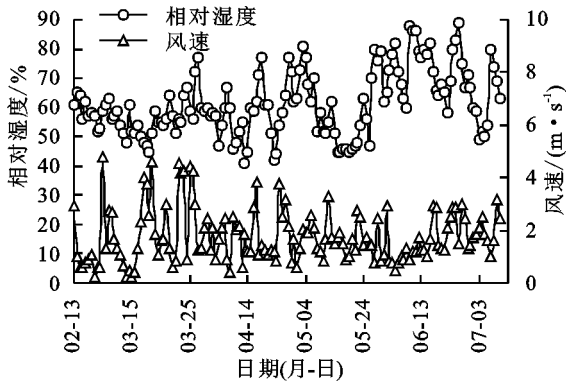


图 1 2018 年试验基地气象要素

试验设置 4 种灌水模式和 3 个施肥水平,完全方案
设计,共 12 个处理,每个处理 3 个重复。4 个灌水
模式包括全生育期充分灌水(FI)和 3 个生育阶段调
亏灌溉(RDI_{FS}、RDI_{ES}和 RDI_{MS}),RDI_{FS}、RDI_{ES}和
RDI_{MS}分别为开花期、膨大期和成熟期调亏灌溉,调
亏阶段的灌水水平为 50%ET_C,非调亏阶段为 100%
ET_C。根据芒果的蒸发蒸腾(ET_C)和实际有效降雨
量确定充分灌水(FI)的灌水定额(表 1)。3 个施肥水
平,即 F_H(128.57 kg/hm²)、F_M(102.86 kg/hm²,当
地施肥量)和 F_L(77.14 kg/hm²)。

表 1 试验期间灌水量和降雨量 单位:mm

灌溉 模式	开花期		膨大期		成熟期	
	灌水量	降雨量	灌水量	降雨量	灌水量	降雨量
RDI _{FS}	32.45		87.42		76.55	
RDI _{ES}	73.60	8.70	19.11	49.20	76.55	65.10
RDI _{MS}	73.60		87.42		25.93	
FI	73.60		87.42		76.55	

1.3 试验布置

微润灌溉施肥系统由微润管、供水箱、水表、过滤
器、排气阀、减压阀、压力表和冲洗阀等组成。每个处
理都有单独的供水箱和水表精确控制灌水量。第 3
代微润管(深圳市微润灌溉技术有限公司)的内层为
厚度 0.06 mm 的高分子半透膜,孔隙直径为 10~900
nm。根据文献[20]和微润管出水量要求,设置每棵
芒果树水平埋设 3.00 m 有效渗水长度的微润管,压
力水头 0~2.50 m,埋深 20.00 cm,流量约为 0.01~
4.70 L/(m·d)。微润管分别在树行 2 侧 0.50 m 处
埋设。随时检查并保证微润灌溉施肥系统正常运行。
供试肥料为大量元素水溶肥(N:P₂O₅:K₂O 为 2:
8:40,赛固特生物科技有限公司),分别于 2 月 20
日、4 月 2 日、5 月 14 日等量施入,进行 2 次稀释后随
微润管施入芒果根区。

芒果蒸发蒸腾量 ET_C采用单作物系数法,计算
公式为:

$$ET_C = K_C ET_0$$
 (1)

式中:K_C为综合作物系数,开花期、膨大期和成熟期
分别取 0.5、0.8 和 0.7^[21]。

ET₀采用彭曼公式,计算公式为:

$$ET_0 = \frac{0.41\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900.00}{T + 273.00} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}$$
 (2)

式中:ET₀为参考作物蒸发蒸腾量(mm/d);R_n为输
入冠层净辐射量(MJ/(m²·d));G 为土壤热通量
(MJ/(m²·d));T 为 2 m 高处日平均温度(°C);u₂为
2 m 高的风速(m/s);e_s为饱和水汽压(kPa);e_a为实际水
汽压(kPa);Δ为饱和水汽压与温度关系曲线在某处的斜
率(kPa/°C);γ为干湿温度计常数(kPa/°C)。

1.4 测定项目与方法

1.4.1 光合特性 分别在 FS、ES、MS 的中期(3 月
6 日、4 月 17 日、5 月 31 日)上午 9:00—11:00 使用
便携式光合仪(Li-6400)测定芒果叶片光合特性,即
净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)和气孔导度(G_s)。
测量时选择长势良好的同一功能叶测定,每个处理 3
个重复,每个重复测定 3 次。

芒果叶片瞬时水分利用效率计算公式^[5]为:

$$WUE_i = P_n / T_r$$
 (3)

式中:WUE_i为叶片瞬时水分利用效率(μmol/
mmol);P_n为净光合速率(μmol/(m²·s));T_r为蒸
腾速率(mmol/(m²·s))。

1.4.2 产量和水肥利用效率 芒果成熟后,按处理
采摘,并统计平均单果重量和产量。灌溉水利用效率
计算公式^[5]为:

$$IWUE = Y / 10I$$
 (4)

式中:IWUE 为灌溉水利用效率(kg/m³);Y 为产量
(kg/hm²);I 为灌水量(mm)。

肥料偏生产力计算公式^[22]为:

$$PFP = Y / F$$

式中:PFP 为肥料偏生产力(kg/kg);F 为总施肥量
(kg/hm²)。

敏感度值计算公式为：

$$SAV = |(V - V_i) / (W - W_i)| \quad (6)$$

式中：SAV 为敏感度值；V 为充分灌溉下各变量的值； V_i 为不同生育期调亏灌溉下各变量的值；W 为各生育期内充分灌溉的灌水量(m^3)； W_i 为各生育期内调亏灌溉的灌水量(m^3)。

1.5 数据处理

采用 Excel 2016 软件进行数据统计分析和作图,用 IBM SPSS Statistics 19 软件进行方差分析(ANOVA)和回归分析,多重比较采用 Duncan 法($\alpha=0.05$)。

表 2 不同水肥处理对各时期芒果光合特性的显著性检验(P 值)

因素	净光合速率			气孔导度			蒸腾速率			瞬时水分利用效率		
	开花期	膨大期	成熟期	开花期	膨大期	成熟期	开花期	膨大期	成熟期	开花期	膨大期	成熟期
灌溉模式	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
施肥水平	<0.05	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.07	<0.05	0.78	0.88	<0.01
灌溉模式×施肥水平	0.99	0.85	0.86	0.61	0.98	0.80	0.99	0.99	0.99	0.98	0.62	0.75

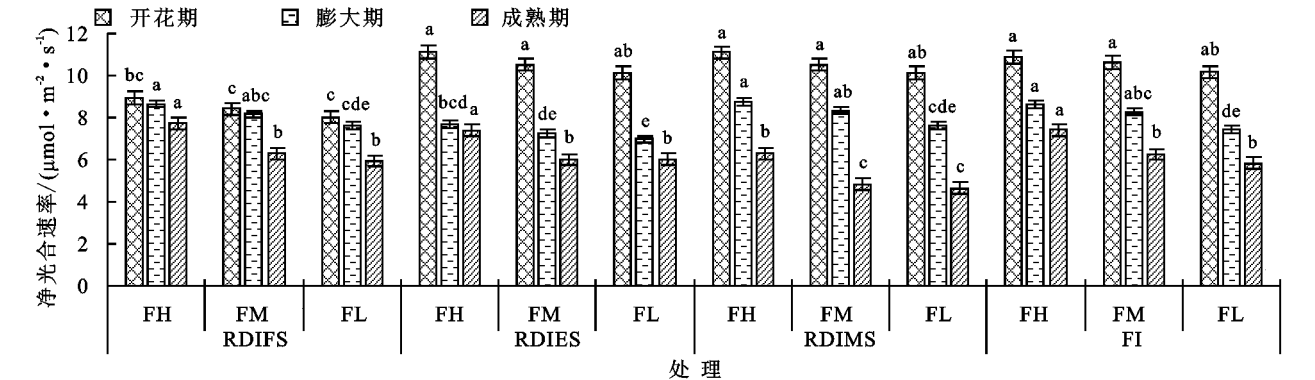
2.1.1 净光合速率 由图 2 可知,随着生育期的延长,不同处理下 P_n 呈减小趋势。在不同生育期进行水分亏缺后, P_n 出现减小趋势,但在复水后出现补偿现象,且与充分灌溉(FI)相比差异不明显。在开花期,与 FI 相比, RDI_{ES} 和 RDI_{MS} 处理的 P_n 无明显变化,而 RDI_{FS} 降低 P_n 19.96%。与 CK(FIF_M)相比,除 $RDI_{ES}F_H$ 、 $RDI_{MS}F_H$ 和 FIF_H 增大 P_n 不明显外,其余处理 P_n 降低 1.13%~24.53%。在果实膨大期,与

2 结果与分析

2.1 微润灌溉施肥对芒果光合特性的影响

由表 2 可知,灌溉模式对 3 个时期的净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、蒸腾速率(T_r)和瞬时水分利用效率(WUE_i)的影响显著($P<0.05$),除施肥水平对膨大期的 T_r 和 WUE_i ,开花期的 WUE_i 的影响不显著($P>0.05$)外,其余情况施肥水平对 P_n 、 G_s 、 T_r 和 WUE_i 的影响显著($P<0.05$)。灌溉模式和施肥水平的交互作用对 P_n 、 G_s 、 T_r 和 WUE_i 的影响不显著($P>0.05$)。

FI 相比, RDI_{ES} 处理 P_n 降低 8.88%。与 F_M 相比, F_H 增加 P_n 5.36%。与 CK 相比,除 $RDI_{FS}F_H$ 、 $RDI_{MS}F_H$ 和 FIF_H 增大 P_n 不明显外,其余处理降低 P_n 1.45%~15.70%。在果实成熟期,与 FI 相比, RDI_{FS} 和 RDI_{ES} 的 P_n 变化不明显,而 RDI_{MS} 减少 P_n 19.12%。与 F_M 相比, F_H 增加 P_n 23.48%, F_L 降低 P_n 19.12%。与 CK 相比, $RDI_{FS}F_H$ 增加 P_n 23.84%, $RDI_{MS}F_L$ 减少 P_n 25.76%。



注:图柱上方不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

图 2 不同水肥处理对芒果叶片净光合速率的影响

2.1.2 气孔导度 除 RDI_{ES} 处理下的 G_s 随生育期的延长先减小后增大,其余处理都是先增大后减小(图 3),这主要是由于在果实成熟期进行水分亏缺所造成的。开花期和膨大期调亏灌溉后复水, G_s 出现补偿效应且开花期复水后超过 FI 5.77%。由图 3 可知,不同生育期水分调亏均降低了 G_s (3 个时期水分亏缺分别降低 36.26%, 44.07%, 44.98%)。在开花期,与 F_M 相比, F_H 增加 G_s 8.49%, F_L 降低 G_s 5.01%。与 CK 相比, $RDI_{FS}F_L$ 降低 G_s 47.06%, $RDI_{MS}F_H$ 增加 G_s 17.95%。在果实膨大期,与 F_M 相比, F_H 增加 G_s 16.40%, F_L 变化不明显。与 CK 相比,除 $RDI_{FS}F_H$ 、 $RDI_{MS}F_H$ 和 FIF_H 增加 G_s 分别为

11.11%, 16.67%, 16.67% 外,其他处理降低 1.67%~46.11%。在果实成熟期,与 F_M 相比, F_H 增加 G_s 22.70%, F_L 变化不明显。与 CK 相比, $RDI_{FS}F_H$ 增加 G_s 30.77%, 而 $RDI_{MS}F_L$ 显著减少 46.15%。

2.1.3 蒸腾速率 在 RDI_{FS} 处理下, T_r 随着生育期的推进,呈先增大后减小的趋势,而 RDI_{ES} 处理呈相反的趋势,另外 RDI_{MS} 和 FI 则是减小的趋势(图 4)。开花期和膨大期水分调亏后复水, T_r 出现了补偿现象。不同生育期水分亏缺均减少了 T_r (3 个时期分别减少 30.35%, 27.19%, 32.24%)。在开花期,与 F_M 相比, F_H 增加 T_r 7.94%。与 CK 相比,除 RDI_{ES}

F_H 、 $RDI_{MS}F_H$ 和 FIF_H 增大 T_r 分别为 7.83%, 7.57%, 7.32% 外, 其余处理降低 T_r 0.25%~32.58%。在膨大期, 与 F_M 相比, F_H 增加 T_r 6.64%。与 CK 相比, 除 $RDI_{ES}F_H$ 、 $RDI_{ES}F_M$ 和 $RDI_{ES}F_L$ 降低 T_r 分别为 23.03%, 26.24%, 26.24% 外, 其余处理增加 0.17%~9.63%。在果实成熟期, 与 F_M 相比, F_H 增加 T_r 8.47%, F_L 降低 T_r 不明显。与 CK 相比, $RDI_{FS}F_H$ 增加 T_r 11.07%, 而 $RDI_{MS}F_L$ 降低幅度最大, 减少 32.89%。

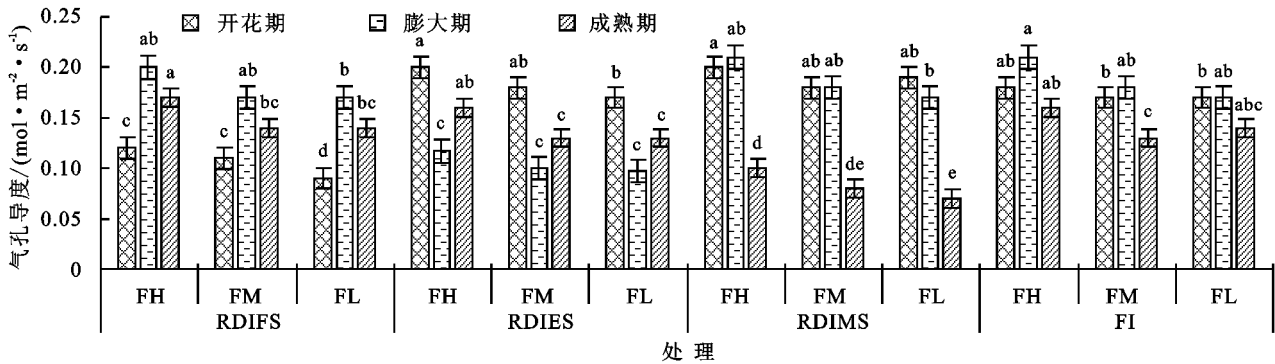


图 3 不同水肥处理对芒果叶片气孔导度的影响

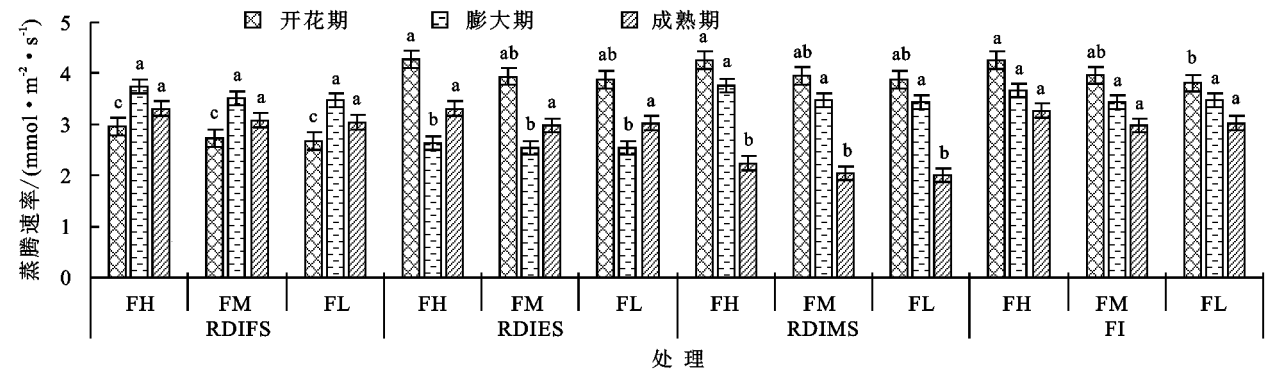


图 4 不同水肥处理对芒果叶片蒸腾速率的影响

2.1.4 瞬时水分利用效率 由图 5 可知, 不同生育期水分调亏均增加了 WUE_i (3 个时期分别增加 15.03%, 27.81%, 23.23%)。施肥水平对 WUE_i 影响较小, 与 F_M 相比, 除成熟期 F_H 增加 10.52% 外, 其他时期 F_H 和 F_L 影响均不明显。与 CK 相比, 在开花期, 除 $RDI_{FS}F_H$ 、 $RDI_{FS}F_M$ 和 $RDI_{FS}F_L$ 增大 WUE_i 13.14%, 13.88%, 9.49% 外, 其余处理减少 0.73%~6.20%。在果实膨大期, 除 $RDI_{ES}F_H$ 、 $RDI_{ES}F_M$ 、 $RDI_{ES}F_L$ 和 $RDI_{MS}F_M$ 增大 WUE_i 外, 其余处理减少 0.81%~10.57%, 且 FIF_L 降幅最大。在成熟期, $RDI_{MS}F_H$ 取得 WUE_i 最大值, 与 CK 相比显著增大 39.87%, 而 $RDI_{ES}F_M$ 取得最小值, 与 CK 相比减小 6.33%。

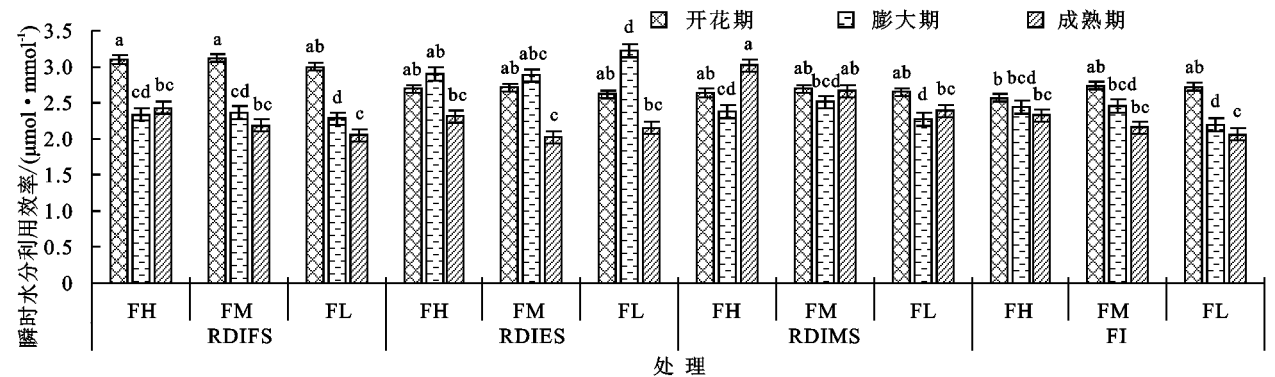


图 5 不同水肥处理对芒果叶片瞬时水分利用效率的影响

2.2 微润灌溉施肥对芒果产量和水肥利用效率的影响 灌溉模式对芒果单果重量、产量、灌溉水利用效率 (IWUE) 和肥料偏生产力 (PFP) 影响显著 ($P<0.05$) (表 3)。与 FI 处理相比, RDI_{FS} 减少芒果单果重量、产量、IWUE、PFP 分别为 11.74%, 23.43%, 7.37%, 23.98%; RDI_{ES} 处理减少单果重量、产量和 PFP 分别为 21.09%, 20.29%, 20.50%, 但显著提高 IWUE 11.87%; RDI_{MS} 处理 IWUE 增加 32.81%, 而增加产量和 PFP 不明显。施肥水平对芒果单果重量、产量、IWUE 和 PFP 影响显著 ($P<0.05$)。与 F_M 相比, 增加或减少施肥量单果重量、产量和 IWUE 处理均有所减少, F_H 处理分别减少 5.95%, 4.17%, 4.06%, F_L 分别减少 7.70%, 6.75%,

6.67%，而 PFP 随着施肥量的增加而减少。灌溉模式和施肥水平的交互作用对单果重量、产量、IWUE 和 PFP 影响显著($P<0.05$)。与 CK 相比,除 $RDI_{MS}F_M$ 处理增加产量 6.36%和 $RDI_{MS}F_L$ 处理增加不明显外,其余处理减少 3.34%~31.76%,且 $RDI_{FS}F_L$ 处理产量最小。

$RDI_{MS}F_M$ 处理的 IWUE 和单果重量最大,与 CK 相比,分别增加 35.16%和 13.01%,而 $RDI_{FS}F_L$ 处理的 IWUE 和 $RDI_{ES}F_L$ 的单果重量最小,与 CK 相比分别减少 17.45%和 28.19%, $RDI_{MS}F_L$ 处理下的 PFP 取得最大值,与 CK 相比显著增加 34.82%。

表 3 微润灌溉施肥对芒果产量和水肥利用效率的影响

灌溉模式	施肥水平	产量/ (kg·hm ⁻²)	平均单果 重量/g	灌溉水分利用效率/ (kg·m ⁻³)	肥料偏生产力/ (kg·kg ⁻¹)
RDI_{FS}	F_H	20917.11±306.62d	508.72±13.55de	10.65±0.16f	162.69±2.38f
	F_M	22047.44±692.15d	491.48±8.64e	11.23±0.35ef	214.34±6.73e
	F_L	18947.98±300.74e	472.56±5.03ef	9.65±0.15g	245.63±3.90d
RDI_{ES}	F_H	22072.68±721.63d	449.67±27.31f	13.04±0.43c	171.68±5.61f
	F_M	21568.20±736.22d	453.98±6.37f	12.74±0.43c	209.69±7.16e
	F_L	20812.04±541.64d	413.12±11.89g	12.30±0.32cd	269.80±7.02c
RDI_{MS}	F_H	26893.76±1512.2bc	533.25±32.92cd	14.39±0.81b	209.18±11.76e
	F_M	29530.19±423.23a	650.08±10.00a	15.80±0.23a	287.09±4.11c
	F_L	28073.91±2010.65ab	574.45±37.14b	15.02±1.08ab	363.93±26.06a
FI	F_H	26824.68±998.53bc	550.01±9.61bc	11.29±0.42ef	208.64±7.77e
	F_M	27764.88±576.31bc	575.26±20.22b	11.69±0.24de	269.93±5.60c
	F_L	26268.10±898.82c	543.41±30.44bcd	11.06±0.38ef	340.53±11.65b
灌溉模式 P 值		<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
施肥水平 P 值		<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
灌溉模式×施肥水平 P 值		<0.05	<0.01	<0.05	<0.01

注:表中数值为平均值±标准差;同列不同小写字母表示不同处理之间差异显著($P<0.05$)。下同。

2.3 基于芒果产量和 IWUE 的水肥管理方案优化

以 3 个生育阶段(开花期、膨大期、成熟期)的灌水水平和施肥量为自变量,芒果产量、IWUE 和 PFP 为因变量,分别建立四元二次方程。由表 4 可知,水肥供应对各变量的影响均达到极显著水平($P<0.01$),决定系数在 0.98 以上。以 50% ET_C 和 F_L 处理为灌水水平和施肥的下限,100% ET_C 和 F_H 处理为灌水水平和施肥的上限,运用 MATLAB 软件分别求出各方程的最大值,

以及最大值对应的各时期灌水水平和施肥量。经计算得出产量最佳时,施肥量为 97.80 kg/hm²;IWUE 最大时,施肥量为 96.54 kg/hm²;PFP 最大时,施肥量为 77.14 kg/hm²。而各变量取得最大值时,灌水水平几乎均取边界值。这主要是由于本试验只设置了 2 个灌水水平,导致各变量呈单调趋势。所以,本研究对于各时期灌水量对因变量的影响程度采用敏感度分析,敏感度绝对值越大,敏感度越大。

表 4 不同水肥处理与芒果产量、水分利用效率和肥料偏生产力的回归关系

因变量	回归方程	R^2	P	Z 最大时各自变量取值			
				X_1	X_2	X_3	X_4
产量/ (kg·hm ⁻²)	$Z_1=12187.0455X_1^2+9168.0503X_2^2-6248.7104X_3^2-2.0814X_4^2+171.9430X_1X_4+199.5046X_2X_4+294.4119X_3X_4-226.8783X_1X_2X_3X_4-10368.5271$	0.98	<0.01	1.00	1.00	0.53	97.80
灌溉水利用效率/ (kg·m ⁻³)	$Z_2=3.1690X_1^2-0.4358X_2^2-7.2575X_3^2-0.0010X_4^2+0.0878X_1X_4+0.0979X_2X_4+0.1512X_3X_4-0.1177X_1X_2X_3X_4+4.8325$	0.99	<0.01	1.00	1.00	0.50	96.54
肥料偏生产力/ (kg·kg ⁻¹)	$Z_3=217.8409X_1^2+164.6838X_2^2-79.2229X_3^2+0.0019X_4^2-2.2142X_1X_4-1.6239X_2X_4+0.5784X_3X_4+0.3106X_1X_2X_3X_4+252.4560$	0.99	<0.01	1.00	1.00	0.50	77.14

注: X_1 、 X_2 和 X_3 分别为开花期、膨大期和成熟期的灌水水平,范围为 0.50~1.00; X_4 为施肥量,范围为 77.14~128.57 kg/hm²。

由表 5 可知,灌溉模式对产量、IWUE 和 PFP 的敏感度值影响显著($P<0.05$)。不同生育期水分调亏对芒果产量和 PFP 敏感强度由大到小依次为开花期、果实膨大期、果实成熟期, RDI_{FS} 处理的产量 SAV 分别是 RDI_{ES}

和 RDI_{MS} 处理的 1.91,6.40 倍,PFP 的 SAV 分别是 RDI_{ES} 和 RDI_{MS} 处理的 1.94,5.88 倍, IWUE 敏感强度由大到小依次为果实 RDI_{MS} 、 RDI_{FS} 、 RDI_{ES} 处理,且 RDI_{MS} 处理的 IWUE 敏感度值是 RDI_{ES} 和 RDI_{FS} 处理的 3.73,3.62 倍。

表 5 微润灌溉施肥下产量、水分利用效率和肥料偏生产力的敏感度值

灌溉模式	产量/(kg·m ⁻³)	灌溉水分利用效率/(kg·m ⁻³)	肥料偏生产力/(kg·kg ⁻¹ ·m ⁻³)
RDI _{FS}	38366.00±5319.55a	5.08±3.07a	397.81±157.54a
RDI _{ES}	20012.61±2643.89b	4.93±1.32b	204.86±63.26a
RDI _{MS}	5992.69±4895.38c	18.39±2.69c	67.66±58.36b
灌溉模式 P 值	<0.01	<0.01	<0.01

3 讨论

光合作用是植物进行生命活动的基础,其产生的淀粉等有机物,是植物自身生长发育的重要营养物质^[17]。本研究发现,亏缺灌溉下净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)和蒸腾速率(T_r)会显著减小,这主要是由于作物遭受水分胁迫后,会导致光合产物输出变慢、光合机构及光合面积扩展受损,进而降低光合速率,此时作物为了保持体内水势和细胞膨压,会通过关闭气孔等调节功能降低 T_r 来防止水分的散失和体内水势的下降^[23]。有研究^[5]表明,作物亏水后,根系吸水速率大幅度降低,进而引起叶片含水率降低,气孔减小或关闭以及气孔水分扩散受阻,最终导致 T_r 显著减小,从而提高瞬时水分利用效率(WUE_i),这与本研究的结果一致。

氮、磷和钾是叶绿素的重要组成元素,影响可溶性蛋白水平及光合酶类的合成与活性,同时还可提高叶片气孔导度、叶绿体表面积和体积,进而调节光合作用^[24]。本研究发现,芒果 P_n 和 T_r 随施肥量的增加而增大,这是因为肥料中的矿质元素为芒果叶片进行光合作用提供了足够的物质基础。水肥通过影响叶片中的酶活性、气孔和色素等,从而显著影响作物的光合^[24-26]。有学者^[27]认为,适当降低灌水量并不会显著降低 P_n ,但增加施肥量会导致 P_n 显著提高;另有学者^[31]认为,作物缺水后,会显著降低 P_n 、 G_s 和 T_r ,而施肥量的增加能减弱下降趋势。本研究发现在 FIF_H 处理下芒果叶片各种光合指标较高,这可能由于在水分充足的条件下,增施肥料有利于提高叶绿素含量^[28],从而提高了叶片的光合作用。

有研究^[29]表明,在作物不同生育期实施水分亏缺对产量和水肥利用效率的影响不同。本研究发现,开花期和果实膨大期调亏灌溉会降低芒果产量(分别降低 23.43%和 20.29%)。芒果开花期是需水较大的一个时期,缺水会严重影响根系吸收营养物质,进而导致降低坐果率^[30],从而降低产量。果实膨大期是芒果增产的需水关键期,此阶段完成 80%的果实生长发育^[31],缺水会导致芒果果实发育受阻,单果重量减小等危害,最终导致产量下降。果实成熟期为果树非需水关键期,此阶段大多数果实已经达到了最终大小^[32],因此水分亏缺对芒果产量没有明显的影响,但灌水量的减少导致芒果 IWUE 显著提高(增加 32.81%)。有学者^[33]认为,在一定范围内增施肥料可使作物产量达到最大值,但如果超

过这个量反而会使产量降低。本研究发现,与中肥(F_M)相比,无论是高肥(F_H)还是低肥(F_L),芒果平均单果质量、产量、IWUE 均有不同程度的降低。这是因为适当施肥可保证叶绿素含量和净光合速率及蒸腾速率始终维持在较高水平,光合产物更多用来生殖生长^[34]。而肥料供应过多虽会使光合速率增大,但更多的光合产物被用来进行生理生长,造成“徒长”现象^[35],而不是增产。肥料供应太少则会导致养分供给不足,进而减少产量。同时通过回归分析发现,产量最大时,施肥量为 97.80 kg/hm²,也说明了产量不是随着施肥量的增加而增加。肥料偏生产力反映单位施肥量的生产力,在本研究中,随着施肥量的增加,肥料偏生产力呈下降的趋势,说明施肥量越高,对产量的抑制也越大,这与相关研究^[36]结果一致。

水肥是影响作物生长发育和提高果实产量的重要因素,且水分和养分之间存在显著的耦合效应^[37],合理的灌水和施肥既可促进作物的生长,增加产量^[38],达到以水促肥、以肥调水的效果。本研究发现在芒果成熟期调亏灌溉且中肥处理的产量和灌溉水利用效率最高,这可能是因为适量施肥能缓解因水分亏缺而对作物产量产生的不利影响^[39],而过量施肥可能导致作物体内水分胁迫加剧^[40],最终降低产量。因此,只有将调亏灌溉和施肥有效的结合起来,才能达到芒果的节水、节肥和增产的目的。

通过敏感性分析可知,芒果产量和 PFP 对开花期水分最敏感,膨大期次之,成熟期最不敏感。因此,结合上面的讨论,得出开花期和膨大期不宜进行调亏灌溉,而成熟期为芒果调亏灌溉的适宜生育期。

4 结论

(1)不同生育期调亏灌溉均可减小芒果叶片 P_n 、 G_s 和 T_r ,但增加 WUE_i ,且复水后, P_n 、 G_s 和 T_r 都得到不同程度的补偿。除成熟期 G_s 随施肥量增加先增后减外,其余时期 P_n 、 G_s 和 T_r 随着施肥量增加而增加。

(2)开花期和膨大期调亏灌溉减少单果重量、产量和肥料偏生产力(PFP),膨大期和成熟期调亏灌溉增加灌溉水利用效率(IWUE)。增加或减少施肥量均会减少芒果单果重量、产量和 IWUE,PFP 随着施肥量的增加

而减少。综合考虑芒果产量、IWUE 和节水节肥的目的,成熟期调亏灌溉且中肥是最优处理。

(3)通过敏感度分析得知,不同生育期调亏灌溉对芒果产量和 PFP 敏感强度由大到小依次为开花期、果实膨大期、果实成熟期,IWUE 敏感强度由大到小依次为果实成熟期、开花期、果实膨大期。

参考文献:

[1] Galindo A, Collado-Gonzalez J, Grian I, et al. Deficit irrigation and emerging fruit crops as a strategy to save water in Mediterranean semiarid agrosystems [J]. *Agricultural Water Management*,2017,202:311-324.

[2] María G D C, Maria A P E, Hammami S B M, et al. Effect of varied summer deficit irrigation on components of olive fruit growth and development [J]. *Agricultural Water Management*,2014,137:84-91.

[3] Yang H, Du T S, Qiu R J, et al. Improved water use efficiency and fruit quality of greenhouse crops under regulated deficit irrigation in northwest China [J]. *Agricultural Water Management*,2017,179:193-204.

[4] Liu X G, Li F S, Zhang Y, et al. Effects of deficit irrigation on yield and nutritional quality of arabica coffee (*Coffea arabica*) under different N rates in dry and hot region of southwest China [J]. *Agricultural Water Management*,2016,172:1-8.

[5] 张效星,樊毅,贾悦,等.水分亏缺对滴灌柑橘光合和产量及水分利用效率的影响[J].*农业工程学报*,2018, 34(3):143-150.

[6] Santos M R, Martinez M A, Donato S L R, et al. Gas exchanges of “Tommy Atkins” mango trees under different irrigation treatments [J]. *Bioscience Journal*, 2013,29:1141-1153.

[7] 邓浩亮,张恒嘉,李福强,等.河西绿洲苕蓝生长、光合特性及品质对膜下滴灌调亏的响应[J].*水土保持学报*, 2018,32(3):321-327.

[8] Santos M R, Donato S L R, Coelho E F, et al. Irrigation deficit strategies on physiological and productive parameters of ‘Tommy Atkins’ mango [J]. *Revista Caatinga*,2016,29(1):173-182.

[9] Sun Q, Wang Y S, Chen G, et al. Water use efficiency was improved at leaf and yield levels of tomato plants by continuous irrigation using semipermeable membrane [J]. *Agricultural Water Management*,2018,203:430-437.

[10] Fan Y W, Huang N, Zhang J, et al. Simulation of soil wetting pattern of vertical moistube-irrigation [J]. *Water*, 2018,10(5):601-619.

[11] Kanda E K, Mabhaudhi T, Senzanje A. Hydraulic and clogging characteristics of moistube irrigation as influenced by water quality [J]. *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua*,2018,67(5):438-446.

[12] 牛文全,吕望,古君,等.微润管理深与间距对日光温室番茄土壤水盐运移的影响[J].*农业工程学报*,2017,33

(19):131-140.

[13] 张明智,牛文全,路振广,等.微润灌对作物产量及水分利用效率的影响[J].*中国生态农业学报*,2017,25(11): 1671-1683.

[14] 李义林,刘小刚,刘艳伟,等.肥液浓度和生物质掺混比例对微润灌溉湿润体内水肥分布的影响[J].*中国生态农业学报*,2019,27(1):119-130.

[15] 邢英英,张富仓,吴立峰,等.基于番茄产量品质水肥利用效率确定适宜滴灌灌水施肥量[J].*农业工程学报*, 2015,31(增刊 1):110-121.

[16] Wang H D, Li J, Cheng M H, et al. Optimal drip fertigation management improves yield, quality, water and nitrogen use efficiency of greenhouse cucumber [J]. *Scientia Horticulturae*,2019,243:357-366.

[17] 陈昱辛,贾悦,崔宁博,等.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(增刊 2):50-58.

[18] 杜少平,马忠明,薛亮.适宜施氮量提高温室砂田滴灌甜瓜产量品质及水氮利用率[J].*农业工程学报* 2016, 32(5):112-119.

[19] Bhrguvanshi S R, Adak T, Kumar K, et al. Drip irrigation scheduling of mango cv. Langra under subtropical condition of Uttar Pradesh [J]. *Soil Conservation Society of India*,2015,14(2):133-140.

[20] 贾腾月,姬宝霖,李仙岳,等.微润灌溉定额及微润带埋深对农田水盐动态及向日葵水分利用效率的影响[J].*水土保持学报*,2019,33(3):283-291.

[21] Cotrim C E, Coelho F M A, Coelho E F, et al. Regulated deficit irrigation and Tommy Atkins mango orchard productivity under microsprinkling in Brazilian semi-arid [J]. *Engenharia Agrícola*,2011,31:1052-1063.

[22] 张富仓,严富来,范兴科,等.滴灌施肥水平对宁夏春玉米产量和水肥利用效率的影响[J].*农业工程学报*, 2018, 34(22):111-120.

[23] 杨学军,武菊英,滕文军,等.亏缺灌溉对 4 种藎草属植物生长和光合特性的影响[J].*植物资源与环境学报*, 2013,22(2):72-77.

[24] 郑睿,康绍忠,胡笑涛,等.水氮处理对荒漠绿洲区酿酒葡萄光合特性与产量的影响[J].*农业工程学报*,2013, 29(4):133-141.

[25] 原向阳,郭平毅,黄洁,等.缺磷胁迫下草甘膦对抗草甘膦大豆幼苗光合作用和叶绿素荧光参数的影响[J].*植物营养与肥料学报*,2014,20(1):221-228.

[26] 王铁良,周罕琳,李波,等.水肥耦合对树莓光合特性和果实品质的影响[J].*水土保持学报*,2012,26(6):286-290,296.

[27] 李银坤,武雪萍,吴会军,等.水氮条件对温室黄瓜光合日变化及产量的影响[J].*农业工程学报*,2010,26(增刊 1):122-129.

[28] 李建明,潘铜华,王玲慧,等.水肥耦合对番茄光合、产量及水分利用效率的影响[J].*农业工程学报*,2014,30(10):82-90.

- erties of soils in southern Ethiopia [J]. Journal of Plant Nutrition & Soil Science, 2017, 180(3): 381-388.
- [24] 李秋霞, 陈效民, 靳泽文, 等. 生物质炭对旱地红壤理化性状和作物产量的持续效应[J]. 水土保持学报, 2015, 29(3): 208-213, 261.
- [25] Wang Z Y, Chen L, Sun F L, et al. Effects of adding biochar on the properties and nitrogen bioavailability of an acidic soil [J]. European Journal of Soil Science, 2017, 68(4): 559-572.
- [26] Bhattacharjya S, Chandra R, Pareek N, et al. Biochar and crop residue application to soil: Effect on soil biochemical properties, nutrient availability and yield of rice (*Oryza sativa* L.) and wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. Archives of Agronomy & Soil Science, 2016, 62(8): 1095-1108.
- [27] 戴中民. 生物炭对酸化土壤的改良效应与生物化学机理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- [28] 钟晓兰, 周生路, 李江涛, 等. 模拟酸雨对土壤重金属镉形态转化的影响[J]. 土壤, 2009, 41(4): 566-571.
- [29] 宋文恩, 郭雪雁, 陈世宝, 等. 酸化方式对土壤中铜的形态及生物有效性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(12): 2343-2349.
- [30] 易卿, 胡学玉, 柯跃进, 等. 不同生物质黑碳对土壤中外源镉(Cd)有效性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(1): 88-94.
- [31] 王晓琦, 唐琦, 黄一帆, 等. 两种生物炭对污染土壤铜有效性的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2016, 33(4): 361-368.
- [32] Uchimiya M, Bannon D I, Wartelle L H. Retention of heavy metals by carboxyl functional groups of biochars in small arTiS range soil [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2012, 60(7): 1798-1809.
- [33] 刘晶晶, 杨兴, 陆扣萍, 等. 生物质炭对土壤重金属形态转化及其有效性的影响[J]. 环境科学学报, 2015, 35(11): 3679-3687.
- [34] 王宏燕, 王晓晨, 张瑜洁, 等. 几种生物质热解炭基本理化性质比较[J]. 东北农业大学学报, 2016, 47(5): 83-90.
- [35] 杨兰, 李冰, 王昌全, 等. 改性生物炭材料对稻田原状和外源镉污染土钝化效应[J]. 环境科学, 2016, 37(9): 3562-3574.
- [36] 李衍亮, 黄玉芬, 魏岚, 等. 施用生物炭对重金属污染农田土壤改良及玉米生长的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(11): 2233-2239.
- [37] 张华伟, 甄华杨, 岳士忠, 等. 水稻秸秆生物炭对污染土壤中镉生物有效性的影响[J]. 生态环境学报, 2017, 26(6): 1068-1074.
- [38] 雷鸣, 廖柏寒, 秦普丰. 土壤重金属化学形态的生物可利用性评价[J]. 生态环境, 2007, 16(5): 1551-1556.
- (上接第 357 页)
- [29] Nangare D D, Singh Y, Kumar P S, et al. fruit yield and quality of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) as affected by deficit irrigation regulated on phenological basis [J]. Agricultural Water Management, 2016, 171: 73-79.
- [30] Coyago C E, Melendez M A J, Moriana A, et al. Yield response to regulated deficit irrigation of greenhouse cherry tomatoes [J]. Agricultural Water Management, 2019, 213: 212-221.
- [31] Levin A G, Peres M, Noy M, et al. The response of field-grown mango (cv. Keitt) trees to regulated deficit irrigation at three phenological stages [J]. Irrigation Science, 2017, 36(3): 1-11.
- [32] Abdelsattar A, Nuria P S, Najera I, et al. Yield response of seedless watermelon to different drip irrigation strategies under Mediterranean conditions [J]. Agricultural Water Management, 2019, 212: 99-110.
- [33] 张小兰, 徐阳, 张金伟, 等. 不同配比的控释肥对日光温室袋培番茄基质养分及其生长、产量和品质的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(3): 309-314.
- [34] 杨小振, 张显, 马建祥, 等. 滴灌施肥对大棚西瓜生长、产量及品质的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(7): 109-118.
- [35] Wang Y Z, Zhang X Y, Liu X W, et al. The effects of nitrogen supply and water regime on instantaneous WUE, time-integrated WUE and carbon isotope discrimination in winter wheat [J]. Field Crops Research, 2013, 144(1): 236-244.
- [36] Wang H D, Wang X K, Bi L F, et al. Multi-objective optimization of water and fertilizer management for potato production in sandy areas of northern China based on TOPSIS [J]. Field Crops Research, 2019, 240(1): 55-68.
- [37] 马彦霞, 张玉鑫, 王晓巍. 河西绿洲区大棚甘蓝产量、品质和养分吸收对不同水肥组合的响应[J]. 水土保持学报, 2018, 32(5): 270-276.
- [38] 王振华, 扁青永, 李文昊, 等. 南疆沙区成龄红枣水肥一体化滴灌的水肥适宜用量[J]. 农业工程学报, 2018, 34(11): 96-104.
- [39] Bharguvanshi S R, Adak T, Kumar K, et al. Impact of fertigation regimes on yield and water use efficiency of mango (*Mangifera indica* L.) under subtropical condition [J]. Indian Journal of Soil Conservation, 2012, 40(3): 252-256.
- [40] 刘小刚, 张彦, 张富仓, 等. 交替灌溉下不同水氮供给对番茄产量和品质的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(4): 283-287.