

# 不同时期根施钾肥对沿黄灌区‘骏枣’光合特性 及其产量和品质的影响

王双成<sup>1</sup>, 黄华梨<sup>2</sup>, 张露荷<sup>2</sup>, 张夏焱<sup>1</sup>, 张仲兴<sup>1</sup>, 王延秀<sup>1\*</sup>

(1 甘肃农业大学 园艺学院, 兰州 730070; 2 甘肃省林业科学研究院, 兰州 730070)

**摘 要:**在沿黄灌区选择 8 年生‘骏枣’植株, 以不施钾肥作为对照, 分别在果树开花期、幼果期、果实膨大期、转色期每株沟施 300 g 硫酸钾, 测定各处理果实品质、产量、叶片光合以及荧光参数的变化, 以明确沿黄灌区‘骏枣’的最佳施钾时期, 为制定枣树合理施肥措施提供理论依据。结果表明: (1) 与对照相比, 施用钾肥可促进骏枣的光合作用、改善果实品质, 且不同生育期效应不同, 并以果实膨大期施用钾肥对提高骏枣果实品质、产量、叶片光合效果最为显著。 (2) 果实膨大期施用钾肥后, ‘骏枣’的果实纵径、横径、果形指数、单果重、单株产量比对照分别显著提高了 22.64%、39.33%、13.62%、19.52% 和 19.58%, 果实维生素 C(Vc)、可溶性糖和果糖的含量、糖酸比分别比对照显著提高了 37.98%、22.82%、31.37% 和 29.95%, 叶片叶绿素含量、净光合速率 ( $P_n$ )、气孔导度 ( $G_s$ ) 和蒸腾速率 ( $T_r$ ) 比对照分别显著提高了 28.91%、38.44%、36.75% 和 27.25%, 叶片初始荧光 ( $F_o$ )、最大荧光 ( $F_m$ )、电子传递速率 (ETR) 比对照分别显著提高了 28.18%、29.15% 和 37.75%, 而胞间  $CO_2$  浓度 ( $C_i$ ) 和裂果率在果实膨大期达到最低值, 比对照分别显著降低了 28.34% 和 35.50%。研究发现, 在‘骏枣’果实膨大期株施 300 g 钾肥, 可显著增加植株叶片叶绿素含量、光合作用效率和光能吸收、电子传递效率, 提高树体光合能力, 显著降低裂果率, 有效改善骏枣果实外在和内在品质, 显著提高单株产量。

**关键词:** 骏枣; 施钾时期; 果实品质; 单株产量; 光合特性

**中图分类号:** Q945.79; S665.1 **文献标志码:** A

## Effect of Root Application of Potassium Fertilizer in Different Periods on Photosynthetic Characteristics, Yield and Quality of Junzao in Irrigation Area along the Yellow River

WANG Shuangcheng<sup>1</sup>, HUANG Huali<sup>2</sup>, ZHANG Luhe<sup>2</sup>,  
ZHANG Xiayi<sup>1</sup>, ZHANG Zhongxing<sup>1</sup>, WANG Yanxiu<sup>1\*</sup>

(1 College of Horticulture, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 2 Gansu Academy of Forestry Sciences, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** The 8-year-old ‘Junzao’ plants were selected in the irrigation area along the Yellow River. With no potassium fertilizer as the control, 300 g potassium sulfate was applied in the flowering stage, young fruit stage, fruit expansion stage and color transformation stage of fruit trees. The changes of fruit quality, yield, leaf photosynthesis and fluorescence parameters of each treatment were measured, and the best potassium application period of ‘Junzao’ in the irrigation area along the Yellow River was determined,

收稿日期: 2020-02-18; 修改稿收到日期: 2020-04-30

基金项目: 2018 年中央财政林业科技推广示范项目 (2018ZYT64)

作者简介: 王双成 (1996—), 男, 在读硕士研究生, 主要从事果树栽培生理研究。E-mail: 2725886475@qq.com

\* 通信作者: 王延秀, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事果树栽培生理研究。E-mail: wangxy@gsau.edu.cn

which provided a theoretical basis for the formulation of reasonable fertilization measures for jujube trees. The results showed that: (1) compared with the control, the application of potassium fertilizer promoted the photosynthesis and improved the fruit quality of ‘Junzao’ jujube, and the effects were different in different growth stages. And the application of potassium fertilizer in the fruit expansion stage had the most significant effect on improving fruit quality, yield and leaf photosynthesis of Junzao jujube. (2) After applying potassium fertilizer during fruit expansion stage, the vertical diameter, transverse diameter, fruit shape index, weight per fruit and yield per plant of ‘Junzao’ significantly increased by 22.64%, 39.33%, 13.62%, 19.52% and 19.58%, respectively compared with the control. The content of Vitamin (Vc), soluble sugar and fructose contents, the ratio of sugar and acid significantly increased by 37.98%, 22.82%, 31.37% and 29.95% compared with the control, respectively. The leaf chlorophyll content, net photosynthetic rate ( $P_n$ ), stomatal conductance ( $G_s$ ), transpiration rate ( $T_r$ ) significantly increased by 28.91%, 38.44%, 36.75% and 27.25% compared with the control, respectively. The leaf initial fluorescence ( $F_0$ ), maximum fluorescence ( $F_m$ ) and electron transfer rate (ETR) significantly increased by 28.18%, 29.15% and 37.75% respectively compared with the control. However, the intercellular  $CO_2$  concentration ( $C_i$ ) and fruit cracking rate reached the lowest value during the fruit expansion stage, which significantly decreased by 28.34% and 35.50% respectively compared with the control. It was found that the application of 300 g potassium fertilizer to the plant during the fruit expansion period of Junzao could significantly increase the chlorophyll content, photosynthesis efficiency, light energy absorption and electron transfer efficiency of the plant leaves, improve the photosynthetic capacity of the tree, significantly reduce the fruit cracking rate, effectively improve the external and internal quality of the fruit, and significantly increase the yield per plant.

**Key words:** Junzao; potassium fertilization period; fruit quality; yield per plant; photosynthetic characteristic

枣 (*Ziziphus jujuba* Mill.) 原产于中国, 是中国特有的粮食树种之一<sup>[1]</sup>。具有抗逆性强、防治风沙<sup>[2]</sup>、绿化环境等特点, 是目前重要的农田林网树种。甘肃沿黄灌区具有悠久的枣树栽培历史, 近年来该区域由于品种老化、品质及市场经济份额逐年下降, 严重影响该区域果农种植枣树的积极性, 故当地政府大力推广高接换优技术, 引进优良品种‘骏枣’。由于该区域长期偏施氮肥和磷肥, 有机肥和钾肥施用较少, 致使枣果品质逐年下降, 制约枣树产业的发展。

钾是重要的品质元素。它既是果树体内重要的矿质元素, 又是果树体内多种酶的活化剂<sup>[3]</sup>, 在促进光合物质合成与转移、延缓叶片衰老等方面扮演着重要的角色, 对改善果实着色, 提高果实品质有着重要作用。经研究发现, 增施钾肥能够明显增加苹果产量, 改善果实品质<sup>[4]</sup>; 钾肥既可提高小白菜、茶叶、西瓜的产量, 又可提高其糖类、蛋白质的含量<sup>[5]</sup>; 增施钾肥后能够提高砀山酥梨<sup>[6]</sup>、枣<sup>[1,7]</sup>等果实中可溶性糖含量, 降低果实酸度, 从而明显改善果实品质。另外, 钾素能通过促进光合产物的转移, 提高植株叶片的光合速率<sup>[8]</sup>, 加速光合产物的积累, 进而提高果实品质<sup>[9-10]</sup>。例如, 果实膨大期追施钾肥能促

进油桃叶片的光合作用, 进而提高油桃叶片的净光合速率( $P_n$ )、胞间  $CO_2$  浓度( $C_i$ )和叶表温度, 同时也能降低叶片的气孔导度( $G_s$ )与蒸腾速率( $T_r$ )<sup>[11]</sup>; 钾素缺乏会导致山核桃叶片中 PS II 原初光能转化效率( $F_v/F_m$ )、PS II 有效光化学量子产量( $F_v'/F_m'$ )、实际光化学量子效率( $\Phi_{PSII}$ )、电子传递速率(ETR)等显著下降, 而非光化学淬灭系数(NPQ)大幅上升<sup>[12]</sup>; 缺钾还会造成小麦叶片 NPQ 的下降, 而其他荧光参数变化却不大<sup>[13]</sup>; 钾胁迫使水稻叶片的  $F_v/F_m$ 、 $\Phi_{PSII}$ 、 $qP$ 、ETR 显著下降, 而  $F_0$  和 NPQ 显著上升, PS II 活性中心受到损害<sup>[14]</sup>。

目前, 许多关于钾对果树果实品质影响的研究主要集中在苹果、梨、猕猴桃、葡萄等树种上, 在枣树上也有一些报道, 但前人以及本课题组对‘骏枣’的已有研究只涉及到施钾量、钾钙肥配施等对果实品质及树体光合特性的影响, 而对施肥时期对产量、果实品质、叶片光合作用及叶绿素荧光的影响却鲜见报道。正确的施肥时期是指导生产的前提, 本试验以高接换优的‘骏枣’为试材, 考察在‘骏枣’不同生长发育时期增施钾肥对其果实品质、叶片光合作用及叶绿素荧光的影响, 筛选出‘骏枣’最佳的施钾时期, 为当地‘骏枣’合理栽培措施制定提供理论依据。

# 1 材料和方法

## 1.1 材料

本试验于 2018 年在甘肃省白银市景泰县五佛乡兴水村王希禄家枣园进行,选取 8 年生长势一致、经过高接换优的‘骏枣’为试验材料,树干胸径 8 cm,栽植密度为 2 m×3 m。该地区气候条件良好,日照时数长,适宜于‘骏枣’的生长。试验地土壤类型为沙质壤土,除本试验处理以外,其他管理水平应与当地习惯保持一致。

## 1.2 试验处理

本试验在大田条件下进行,采取单因素随机区组设计方案,在氮、磷投入水平一致的前提下,总共设置 5 个施用钾肥处理,每个处理 3 个重复小区,每个小区选取 3 株‘骏枣’,小区之间设置保护行。施钾时期分别为开花期( $T_1$ )、幼果期( $T_2$ )、果实膨大期( $T_3$ )和转色期( $T_4$ ),各处理时期每株均沟施 300 g 硫酸钾(折合  $K_2O$  为 153 g),以不施钾肥作为对照(CK)。施肥方式均为沟施后进行覆土,而其他管理则与当地保持一致。钾肥为硫酸钾( $K_2O$  51%),产自青海格尔木。

## 1.3 测定指标及方法

**1.3.1 果实品质** 于果实成熟期(10 月 1 日)按各处理分别在每株枣树的东、南、西、北 4 个方向随机采集果实 20 个组成混合样带回实验室,并统计单株果树的挂果数和裂果数。果实可溶性蛋白质含量采用考马斯亮蓝染色法测定<sup>[15]</sup>,可溶性糖含量测定采用蒽酮比色法<sup>[16]</sup>,维生素 C(Vc)含量采用 2,6-二氯酚靛酚滴定法测定<sup>[3]</sup>,可滴定酸含量测定采用氢氧化钠滴定法<sup>[3]</sup>,并计算糖酸比(可溶性糖/可滴定酸);果实纵横径用游标卡尺测定后,并计算果形指数(横径/纵径)<sup>[3]</sup>;单果重用称量法测定;同时计算单株产量(单株平均单果重×单株挂果数)和裂果率(裂果数/挂果数)。

**1.3.2 叶片叶绿素含量** 于 8 月中旬测定光合指标的当日,按各处理随机选取每株枣树冠层上部枣吊的中部叶 10 片,置于冷冻采样箱带回实验室进行叶绿素含量的测定。叶片叶绿素含量参照朱祖雷等<sup>[17]</sup>的测定方法,用分光光度计测定波长 645 nm、652 nm 和 663 nm 下的吸光度值  $D_{645}$ 、 $D_{652}$ 、 $D_{663}$ ,并根据以下公式计算叶绿素 a、b 含量及其比值。

$$\text{叶绿体 a}(\text{mg/g}) = [12.7 (D_{663}) - 2.69(D_{645})] \times [V/(1000 \times W)]$$

$$\text{叶绿体 b}(\text{mg/g}) = [22.9 (D_{645}) - 4.68(D_{663})] \times [V/(1000 \times W)]$$

$$\times [V/(1000 \times W)]$$

$$\text{叶绿体总量}(\text{mg/g}) = (D_{652} \times 1000/34.5) \times [V/(1000 \times W)]$$

式中, $V$  为浸提液体积(mL), $W$  为叶片浸提质量(g)。

**1.3.3 光合气体交换参数** 参照吴翠云等<sup>[18]</sup>的方法测定叶片光合气体交换参数。于 8 月中旬,在晴天上午 9:00~11:00 选取位于‘骏枣’中上部长势一致的成熟功能叶,用 Li-6400 光合仪(Li-COR 公司,美国)测定净光合速率( $P_n$ )、气孔导度( $G_s$ )、蒸腾速率( $T_r$ )及胞间  $CO_2$  浓度( $C_i$ );测定时,从每个处理选取 3 株,每株随机选取 6 张叶片。

**1.3.4 叶绿素荧光参数** 于 8 月中旬,选取位于‘骏枣’新梢顶端向下第 5~7 片功能叶,叶片经暗适应 30 min 后,用 Li-COR 6400 装配的荧光叶室测定叶片叶绿素荧光参数;测定时,从每个处理选 3 株,每株随机选 6 张叶片进行测量。测量参数有初始荧光( $F_0$ )、最大荧光( $F_m$ )、光化学量子效率( $F_v/F_m$ )、实际光化学量子效率( $\Phi_{PSII}$ )及电子传递速率(ETR)。

## 1.4 数据分析

数据整理与统计用 Excel 2010,作图用 Origin 8.0,方差分析用 SPSS 19.0。采用单因素 ANOVA 的 LSD 比较处理间差异显著性( $\alpha=0.05$ )。

# 2 结果与分析

## 2.1 施钾时期对‘骏枣’叶片叶绿素含量的影响

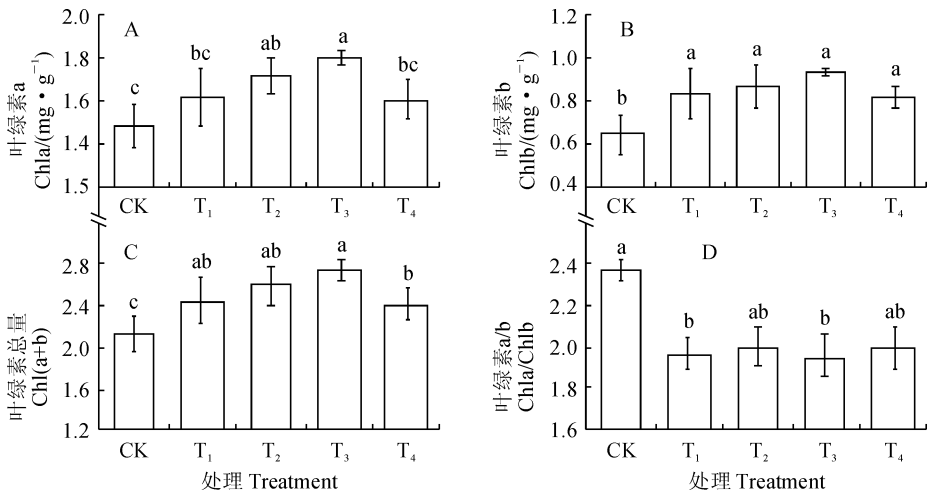
图 1 显示,与对照相比,各施钾时期处理的‘骏枣’叶片叶绿素 a 含量、叶绿素 b 含量和叶绿素总含量均明显升高,且增幅多达到显著水平,而各施钾处理的叶绿素 a/b 均明显降低;随着施钾时期沿生育期后移,‘骏枣’叶片叶绿素 a 含量、叶绿素 b 含量和叶绿素总量均呈先上升后下降的变化趋势,且均在  $T_3$  处理下达到峰值,但各施钾处理的叶绿素 a/b 基本维持稳定,无显著变化。其中,‘骏枣’叶片叶绿素 a 含量在  $T_3$  和  $T_2$  处理下分别比 CK 显著增加 21.66% 和 15.67%,而在  $T_1$ 、 $T_4$  处理下与对照无显著差异(图 1,A);‘骏枣’叶片叶绿素 b 含量在  $T_1 \sim T_4$  处理下均显著高于 CK,增幅为 26.92%~45.79%,各施钾处理间均差异不显著(图 1,B);‘骏枣’叶片叶绿素总量在  $T_1 \sim T_4$  处理下也均显著高于 CK,增幅为 13.84%~28.91%, $T_3$  的叶绿素总量显著高于  $T_4$  处理 13.24%,而与  $T_1$ 、 $T_2$  处理差异性不显著(图 1,C);‘骏枣’叶片叶绿素 a/b 在  $T_1$ 、

T<sub>3</sub> 处理下分别比 CK 显著降低了 16.82% 和 17.53%,而在其余处理下与 CK 无显著差异(图 1, D)。以上结果说明,适期根施钾肥能有效增加‘骏枣’叶片叶绿素含量,降低叶片叶绿素 a/b。

2.2 施钾时期对‘骏枣’光合气体交换参数的影响

各施钾处理‘骏枣’叶片气孔导度( $G_s$ )、蒸腾速率( $T_r$ )和净光合速率( $P_n$ )均比对照不同程度提高,而其叶片胞间二氧化碳浓度( $C_i$ )却不同程度降低;随着施钾时期沿生育期后移,‘骏枣’叶片气孔导度  $G_s$ 、 $T_r$  和  $P_n$  总体呈先上升后下降的变化趋势,并均在 T<sub>3</sub> 达到峰值,而其叶片  $C_i$  则呈先降后升的趋势,

且在 T<sub>3</sub> 达到最低值(图 2)。其中,‘骏枣’叶片  $P_n$  在各施钾处理下均显著高于对照,增幅为 21.24%~38.44%,T<sub>3</sub> 处理也显著高于 T<sub>4</sub> 处理 14.20%,但与 T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub> 处理无显著差异(图 2, D);叶片  $G_s$  和  $T_r$  仅在 T<sub>3</sub> 处理下显著高于对照,增幅分别为 36.75%和 27.25%,且 T<sub>3</sub> 处理叶片  $G_s$  和  $T_r$  也与 T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub> 及 T<sub>4</sub> 处理差异不明显(图 2, A、C);‘骏枣’叶片  $C_i$  在 T<sub>1</sub>~T<sub>3</sub> 处理下均显著低于 CK,降幅为 22.87%~28.34%,而 T<sub>4</sub> 处理与 CK 差异不显著, T<sub>3</sub> 处理比 T<sub>4</sub> 处理显著降低了 20.79%,而与 T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub> 处理无显著差异(图 2, B)。可见,适期根施钾肥



T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub>、T<sub>3</sub>、T<sub>4</sub> 分别表示在开花期、幼果期、果实膨大期和转色期每株施 300 g 硫酸钾,CK 为不施钾肥对照。  
不同小写字母表示处理间在 0.05 水平上有显著性差异。下同

图 1 不同施钾时期下‘骏枣’叶片叶绿素含量的变化

T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub> and T<sub>4</sub> stand for 300 g/plant of potassium sulfate was applied to each furrow at flowering, young fruit, fruit expansion and color transformation stages, respectively, while CK stand for no potassium fertilizer application.  
Different small letters indicate significant difference among treatments at the 0.05 level. The same as below  
Fig. 1 The chlorophyll content in leaves of ‘Junzao’ under different potassium application periods

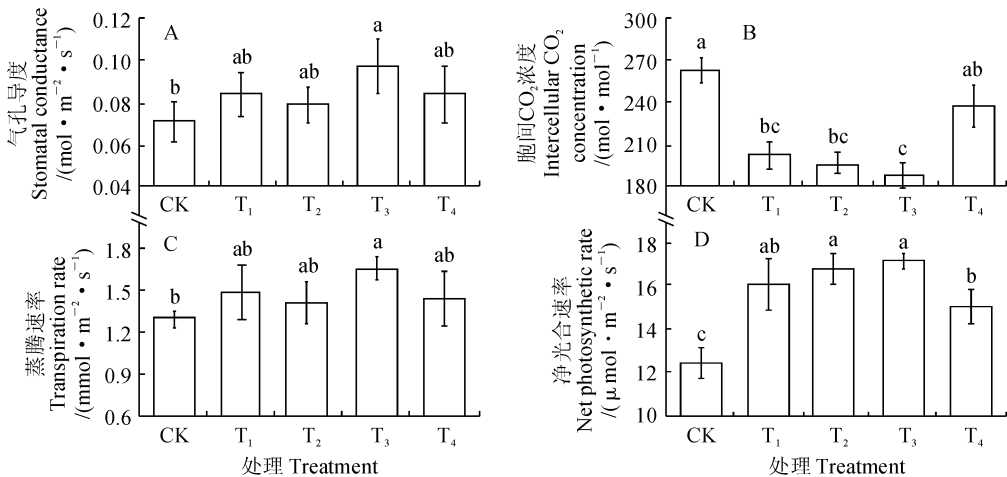


图 2 不同施钾时期下‘骏枣’叶片光合气体交换参数的变化

Fig. 2 The photosynthetic gas exchange parameters of ‘Junzao’ leaves under different potassium application periods

能有效增加‘骏枣’叶片气孔导度( $G_s$ )、蒸腾速率( $T_r$ )和净光合速率( $P_n$ ),降低叶片胞间二氧化碳浓度( $C_i$ ),提高光合作用效率。

### 2.3 施钾时期对‘骏枣’叶绿素荧光参数的影响

由表 1 可知,‘骏枣’叶片的初始荧光( $F_0$ )、最大荧光( $F_m$ )及电子传递速率(ETR)仅在  $T_3$  处理下显著高于 CK,增幅分别为 28. 18%、29. 15% 和 37. 75%,而在其余施钾处理下均与 CK 无显著差异;同时, $T_3$  处理的  $F_0$  分别显著高于  $T_1$ 、 $T_2$  和  $T_4$  处理 25. 81%、20. 20% 和 14. 40%,其  $F_m$  显著高于  $T_2$  处理 26. 57%,其 ETR 与其余施钾处理均无显著差异。另外,‘骏枣’叶片的最大光化学量子效率( $F_v/F_m$ )、实际光化学量子效率( $\Phi_{PSII}$ )在各施钾处理间及施钾处理与对照间均无显著差异。可见,不同时期根施钾肥对‘骏枣’叶片叶绿素荧光参数影响较小,仅果实膨大期施用有显著效果,且仅表现在初始荧光、最大荧光及电子传递速率上。

### 2.4 施钾时期对‘骏枣’果实品质和产量的影响

首先,不同时期施钾均不同程度地增加了‘骏

枣’果实纵径、横径、果形指数和单果重,且  $T_1 \sim T_4$  处理的纵径、 $T_1 \sim T_3$  处理的横径、 $T_3$  处理的果形指数和单果重均与对照(CK)差异达到显著水平;同时,随着施钾时期沿生育期后移,果实纵径、横径、果形指数和单果重总体均表现出先升高后降低的变化趋势,并均在  $T_3$  处理下达到最大值,分别达到 50. 647 mm、38. 333 mm、0. 757 和 25. 37 g,分别比相应对照显著增加 22. 64%、39. 33%、13. 62% 和 19. 52%(图 3, A~D)。可见,不同生育期施用 300 g 硫酸钾均能增加‘骏枣’果实纵径、横径、果形指数和单果重,并以果实横径的变化幅度最大,且在果实膨大期施用效果最佳。

其次,不同时期根施钾肥也一定程度上改善了‘骏枣’果实内在品质,果实的维生素 C、可溶性蛋白质、可溶性糖、果糖含量和糖酸比均比对照不同程度增加;随着施钾时期沿生育期后移,‘骏枣’果实以上内在品质指标总体均呈先上升后下降的变化趋势,维生素 C、可溶性糖和果糖含量均在  $T_3$  处理下达到最大值,而可溶性蛋白含量和糖酸比均在  $T_2$  处理下

表 1 不同施钾时期下‘骏枣’叶片的叶绿素荧光参数

Table 1 The chlorophyll fluorescence parameters of ‘Junzao’ leaves under different potassium application periods

处理 Treatment	初始荧光 $F_0$	最大荧光 $F_m$	最大光化学量子 效率 $F_v/F_m$	实际光化学量子 效率 $\Phi_{PSII}$	电子传递速率 ETR
CK	561. 60±33. 59b	1 609. 73±59. 68b	0. 812±0. 064a	0. 691±0. 031a	16. 21±0. 98b
$T_1$	572. 17±36. 08b	1 952. 10±164. 94ab	0. 816±0. 065a	0. 713±0. 033a	21. 61±2. 91ab
$T_2$	598. 87±86. 19b	1 642. 53±114. 43b	0. 817±0. 048a	0. 714±0. 027a	21. 36±1. 51ab
$T_3$	719. 87±23. 08a	2 078. 93±210. 44a	0. 822±0. 034a	0. 716±0. 025a	22. 33±4. 55a
$T_4$	631. 53±13. 16b	1 961. 00±377. 32ab	0. 820±0. 055a	0. 713±0. 034a	21. 60±2. 65ab

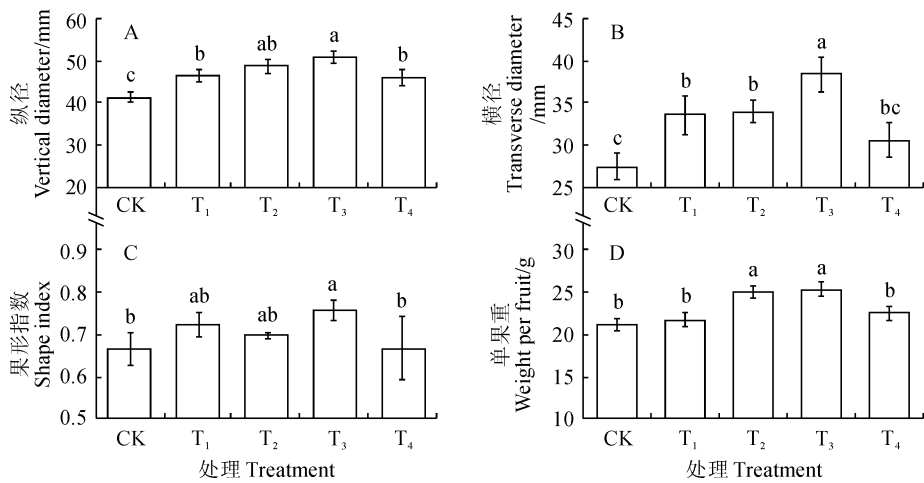


图 3 不同施钾时期下‘骏枣’果实纵径、横径、果形指数和单果重的变化

Fig. 3 The vertical diameter, transverse diameter, fruit shape index and weight per fruit of ‘Junzao’ under different potassium application periods

表 2 不同施钾时期下‘骏枣’果实的内在品质

Table 2 The internal quality of ‘Junzao’ fruit under different potassium application periods

处理 Treatment	维生素 C Vc/(mg/g)	可溶性蛋白质含量 Soluble protein/%	可溶性糖 Soluble sugar/(μg/mL)	果糖 Fructose/(μg/mL)	糖酸比 Sugar acid ratio
CK	1.62±0.10c	3.506±0.333c	37.786±1.924d	14.907±0.925b	6.932±1.634c
T <sub>1</sub>	2.17±0.11a	4.247±0.183b	42.565±0.916bc	15.509±1.524ab	7.011±1.537c
T <sub>2</sub>	1.91±0.30ab	4.853±0.459a	45.089±1.444ab	15.046±1.446b	9.543±0.658a
T <sub>3</sub>	2.24±0.16a	4.056±0.172bc	46.409±2.746a	19.583±4.416a	9.008±1.119ab
T <sub>4</sub>	1.80±0.18b	3.513±0.213c	40.630±1.479cd	15.509±1.320ab	7.435±1.429bc

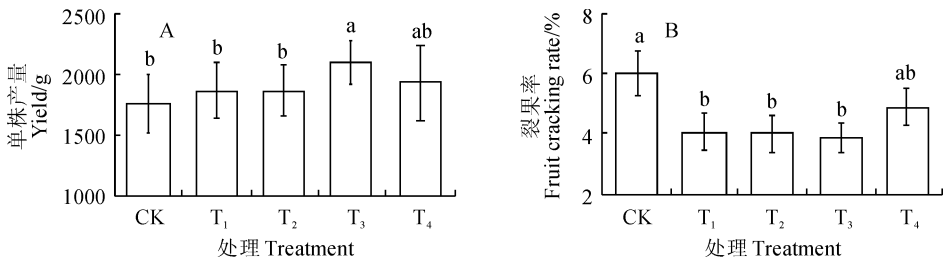


图 4 不同施钾时期下‘骏枣’的单株产量和裂果率

Fig. 4 The yield per plant and cracking rate of ‘Junzao’ under different potassium application periods

达到最大值(表 2)。其中,各时期施钾处理‘骏枣’果实的维生素 C 含量均显著高于 CK(增幅为 10.88%~37.98%),并以 T<sub>3</sub> 处理的维生素 C 含量最高,它显著高于 T<sub>4</sub> 处理( $P<0.05$ ),而与 T<sub>1</sub> 和 T<sub>2</sub> 处理差异不显著。果实可溶性蛋白质含量仅在 T<sub>1</sub> 和 T<sub>2</sub> 处理下显著高于 CK(增幅分别为 21.14% 和 38.42%),并在 T<sub>2</sub> 处理达到峰值且显著高于其他各处理,相比其他施钾处理增加了 14.27%~38.14%。果实可溶性糖含量在 T<sub>1</sub>~T<sub>3</sub> 处理下均显著高于 CK(增幅为 12.65%~22.82%),并在 T<sub>3</sub> 时达到峰值,分别显著高于 T<sub>1</sub>、T<sub>4</sub> 处理 9.03% 和 14.22%,而与 T<sub>2</sub> 处理差异不显著。果实果糖含量仅在 T<sub>3</sub> 处理下显著高于 CK(增幅为 31.37%),它比 T<sub>2</sub> 处理显著增加了 30.15%,而与 T<sub>1</sub> 和 T<sub>4</sub> 处理无显著差异。果实糖酸比与可溶性蛋白质含量变化趋势相同,仅 T<sub>2</sub> 和 T<sub>3</sub> 处理显著高于 CK(增幅分别为 37.67% 和 29.95%),并在 T<sub>2</sub> 处理下达到最高,分别比 T<sub>1</sub>、T<sub>4</sub> 处理显著增加了 36.11% 和 28.35%。可见,在幼果期或者果实膨大期根施钾肥能显著改善‘骏枣’果实内在品质。

另外,不同时期根施钾肥均能不同程度地提高‘骏枣’的单株产量,降低裂果率(图 4)。其中,随着施钾时期沿生育期后移,‘骏枣’的单株产量总体呈上升趋势,并在 T<sub>3</sub> 处理时达到峰值(2 088.027 g),也仅 T<sub>3</sub> 处理显著高于 CK(增幅 19.58%),而其余

施钾处理与 CK 均无显著差异;T<sub>3</sub> 处理单株产量也分别比 T<sub>1</sub> 和 T<sub>2</sub> 处理显著增加了 12.17% 和 12.24% ( $P<0.05$ ),而与 T<sub>4</sub> 处理无显著差异(图 4,A)。同时,果实裂果率随着施钾时期沿生育期后移呈先降后升趋势,且施钾处理均比对照不同程度降低,T<sub>1</sub>~T<sub>3</sub> 处理分别显著低于 CK 约 32.10%~35.50%;裂果率在 T<sub>3</sub> 达到最低值(3.88%),它与 T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub> 处理无显著差异,但显著低于 T<sub>4</sub> 处理 20.93%(图 4,B)。因此,果实膨大期根施钾肥能显著提高‘骏枣’的单株产量、降低裂果率。

### 3 讨论

果实品质决定着果实的价值,外观品质的优劣可直接反映果实价值的大小<sup>[19]</sup>。例如,增施钾肥(0.1 kg/株)可显著提高冬枣的单果重、果皮的花青素含量等外观品质,且产量也有明显的提高<sup>[20]</sup>;苹果<sup>[3]</sup>和骏枣<sup>[18]</sup>果实生长发育中后期追施钾肥,可显著改善果实果形指数,提高产量和品质;枣树增施钙钾元素可降低果实的裂果率<sup>[21]</sup>。在本试验中,随着施钾时期沿生育期后移,骏枣的果形指数、单果重、单株产量均在果实膨大期施钾条件下达到峰值,而裂果率在果实膨大期施钾处理中达到最低。这与林兰稳等<sup>[22]</sup>在荔枝上相关研究结果一致,即钾素含量低的果实易发生裂果。因此,果实膨大期增施钾肥能及时补充枣树对钾素的需求,促进叶片光合作用

的进行,使光合产物能够迅速地向果实中转移并积累,加速果肉组织细胞分裂和体积增大,引起果实的纵横径发生显著变化,从而促进果实的膨大,在提高果形指数的同时也提高骏枣产量。果实膨大期骏枣果实中钾素含量较高,在促进果实膨大的同时也能提高果皮的韧度,从而降低裂果率,提升果实外观品质的竞争性。

果实内在品质也显著影响果实的价值,常用来评价果实内在品质的指标有 Vc、可溶性糖、蛋白质和糖酸比等<sup>[23]</sup>。王建<sup>[24]</sup>在猕猴桃上研究发现果实发育中后期急需大量的钾,该时期补钾对果树显得尤为重要。如果钾素供应不足或不及时,会影响树体的贮藏营养,最终影响果实的内在品质<sup>[3]</sup>。罗宪等<sup>[25]</sup>在幼龄骏枣上研究发现,增施 450 kg/hm<sup>2</sup> 的钾肥可显著提高骏枣果实的蛋白质含量和糖酸比。在本试验中,‘骏枣’果实 Vc、可溶性糖、果糖含量随着施钾时期沿生育期后移均在果实膨大期施钾处理中达到峰值,此时可溶性蛋白质含量、糖酸比也有明显提高,这可能是果实膨大期是枣果内有机物质合成的旺盛阶段,增施钾肥能促进营养物质的合成与转运,使得树体的贮藏营养得以提高,果实品质也得到显著改善,这与 Tagliavini 等<sup>[26]</sup>的研究结果基本一致。钾素的及时补充可促进光合产物的积累,使得果实中可溶性糖含量明显提高,果实的酸度显著降低。钾离子在调控氮素代谢过程的同时,也积极响应糖的合成及转运,进一步调控蛋白质的合成。所以,在果实膨大期增施钾肥能够改善果实的品质。

光合作用是果树生长发育的基础,其强弱可以直接或间接地影响果实的产量和品质<sup>[27]</sup>。吴翠云等<sup>[28]</sup>在幼龄‘骏枣’上研究发现,施肥时期能够影响其叶片中光合色素的含量,在果实膨大期施钾后叶片中光合色素的含量最高,说明其为最佳施钾时期。施钾也能够提高植物体内 RUBP 的含量和活性,进而提高叶片  $P_n$ , 加快光合作用,使细胞间隙中大量的 CO<sub>2</sub> 快速进入叶绿体中,导致  $C_i$  降低<sup>[29-31]</sup>。而且, K<sup>+</sup> 能降低叶片保卫细胞水势,导致其吸水膨胀而使气孔张开,在提高  $G_s$  同时也提高  $T_r$ <sup>[32]</sup>。在本试验中,随着施钾时期沿生育期后移,果实膨大期施钾处理骏枣的叶片叶绿素含量、 $G_s$ 、 $T_r$ 、 $P_n$  均达到峰值,而其  $C_i$  却降到最低值,这可能是‘骏枣’在果实膨大期对钾素的大量需求,能活化并加强光合有关酶的活性,从而更有效地促进光合作用进行。郑炳松等<sup>[33]</sup>发现,施用钾肥后可提高植株叶片叶肉细胞 Rubisco 活性和 RuBP 羧化酶再生能力,从而加速

光合磷酸化的进行;陈爱珠等<sup>[34]</sup>报道增施钾肥后能提高苗期甜玉米叶片  $P_n$ 、 $G_s$  和  $T_r$ , 降低  $C_i$ ; 郭雯等<sup>[35]</sup>发现,施钾能够提高苹果叶片  $P_n$ 、 $G_s$ , 降低  $C_i$ 。因此,果实膨大期施钾可提高叶片叶绿素含量,增强叶肉细胞光合活性,加强气孔调节能力,促进叶片气孔开度增大,加速外界 CO<sub>2</sub> 的吸收,从而显著提高  $P_n$ 、 $G_s$  和  $T_r$ 。

叶绿素荧光被称为研究植物叶片光合功能的高效探针<sup>[36]</sup>,根据对叶绿素荧光的测定反映光合作用的强弱<sup>[37]</sup>,可以较好地评估光合器官的损伤情况<sup>[38]</sup>。 $F_0$  是光合作用中 PS II 活性中心完全开放时所获得的荧光产量,  $F_m$  是 PS II 反应中心处于完全关闭时的荧光水平,可反映 PS II 的电子传递情况。本研究表明,随着施钾时期沿生育期后移,‘骏枣’叶片的  $F_0$ 、 $F_m$  和 ETR 均在果实膨大期施钾处理中达到最大,且显著高于对照处理,说明在果实膨大期施钾后能够促进 PS II 活性中心的完全开放,并加强其活性,提高光能利用效率,促进光合链电子传递,保证光合反应的高效进行。郭英等<sup>[39]</sup>在棉花上发现,钾素的补充能够增加棉花叶片的  $\Phi_{PSII}$  和 ETR, 提高棉花功能叶片的光能利用效率,而杨军等<sup>[40]</sup>认为合理施钾能够降低奈李叶片的  $F_0$ , 提高  $F_m$ 、 $F_v$ 、 $F_v/F_m$ , 本试验研究结果与之不同,有关具体影响还需进一步研究。 $F_v/F_m$  被认为是度量植物叶片 PS II 原初光能转换效率的可靠指标,能准确反映 PS II 光能的转换效率<sup>[41-42]</sup>。本试验中,随着施钾时期沿生育期后移,‘骏枣’叶片的  $F_v/F_m$  和  $\Phi_{PSII}$  虽然均有所提升,但均与对照无显著差异。这表明施钾后,可在一定程度上提高‘骏枣’生育后期叶片的叶面积,加速光能利用与转换的效率,使 PS II 反应中心能够更加充分地利用光能,但总的电子传递受影响较小。张绍阳等<sup>[43]</sup>在油桃上发现,合理施用钾肥可通过提高‘艳光’油桃叶片的  $F_m$ 、 $F_v/F_m$  等来增强 PS II 的潜在活性,进而提高原初光能转换效率。孙哲等<sup>[44]</sup>在甘薯上研究发现,施钾能够显著提高甘薯功能叶的  $F_v/F_m$  和  $\Phi_{PSII}$ , 本试验的结论与之稍有不同,有关具体影响还需进一步研究。因此,不同时期根施钾肥对‘骏枣’叶片叶绿素荧光参数影响较小。

因此,施用钾肥不仅能够明显地改善‘骏枣’品质,而且能显著提高‘骏枣’叶片的光合效率和产量。在 4 个施肥时期中,果实膨大期株施 300 g 钾肥的效果最佳,这为甘肃沿黄灌区‘骏枣’合理施钾提供了理论参考。

参考文献:

[1] 柴仲平,王雪梅,孙霞,等.不同氮磷钾配比滴灌对灰枣产量与品质的影响[J].果树学报,2011,28(2): 229-233.  
CHAI Z P, WANG X M, SUN X, *et al.* Influence of N, P, K with drip irrigation on yield and fruit quality of Huizao jujube [J]. *Journal of Fruit Science*, 2011, 28(2): 229-233.

[2] 陈波浪,盛建东,李建贵,等.氮、磷、钾肥对红枣产量和品质的影响[J].北方园艺,2011,(3): 1-3.  
CHEN B L, SHENG J D, LI J G, *et al.* Effect of nitrogen, phosphorus, potassium fertilizer on the yield and the quality of *Zizyphus jujube* [J]. *Northern Horticulture*, 2011,(3): 1-3.

[3] 路永莉,杨宪龙,李茹,等.不同施钾时期对红富士苹果产量和品质的影响[J].应用生态学报,2015,26(4): 1 179-1 185.  
LU Y L, YANG X L, LI R, *et al.* Effects of different potassium fertilizer application periods on the yield and quality of Fuji apple [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(4): 1 179-1 185.

[4] 王勤,何为华,郭景南,等.增施钾肥对苹果品质和产量的影响[J].果树学报,2002,19(6): 424-426.  
WANG Q, HE W H, GUO J N, *et al.* Effect of application of potassium fertilizer on production and fruit quality of apple trees [J]. *Journal of Fruit Science*, 2002, 19(6): 424-426.

[5] 林新坚,李昱,李清华,等.硫酸钾镁肥对小白菜、茶叶、西瓜产量和品质的影响[J].土壤肥料,2005,(5): 21-24,28.  
LIN X J, LI Y, LI Q H, *et al.* Effects of applying sulphate-potassium magnesium on yield and quality of pakchoi, tea and watermelon [J]. *Soil and Fertilizer*, 2005,(5): 21-24,28.

[6] 何忠俊,同延安,马路军,等.钾对黄土区砀山酥梨产量及品质的影响[J].果树学报,2002,19(1): 8-11.  
HE Z J, TONG Y A, MA L J, *et al.* Effect of potash application on the output and quality of Dangshan Suli pear variety in loess area [J]. *Journal of Fruit Science*, 2002, 19(1): 8-11.

[7] 姜昭然,杨守军,杜振宇.滨海盐碱地冬枣对钾肥的响应[J].南方农业学报,2014,45(10): 1 803-1 806.  
JIANG Z R, YANG S J, DU Z Y. Response of winter jujube tree to potassium fertilizer in coastal saline soil [J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2014, 45(10): 1 803-1 806.

[8] BEDNARZ C W, OOSTERHUIS D M, EVANS R D. Leaf photosynthesis and carbon isotope discrimination of cotton in response to potassium deficiency [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 1998, 39(2): 131-139.

[9] 王馨笙,徐坤,杨天慧.生姜对氮、磷、钾吸收分配规律研究[J].植物营养与肥料学报,2010,16(6): 1 515-1 520.  
WANG X S, XU K, YANG T H. Absorption and distribution of nitrogen, phosphorus and potassium in ginger [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(6): 1 515-1 520.

[10] HUNSCH M, BRACKMANN A, ERNANI PR. Effects of K fertilization on the post-harvest quality of Fuji apples [J]. *Brazilian Journal of Agricultural Research*, 2003, 38: 489-496.

[11] 高清华,叶正文,章镇,等.钾营养对设施油桃幼树光合特性的影响[J].吉林农业大学学报,2005,27(3): 264-267.  
GAO Q H, YE Z W, ZHANG Z, *et al.* Effects of potassium fertilizer on photosynthetic characteristics of young nectarine trees in greenhouse [J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2005, 27(3): 264-267.

[12] 陈苗.缺钾对山核桃幼苗生理生化特性的影响[D].杭州:浙江农林大学,2010.

[13] 张凡,袁澍,雷韬,等.大量元素缺乏对小麦光合、呼吸作用和生理特性的影响[J].四川大学学报(自然科学版),2009,46(2): 462-468.  
ZHANG F, YUAN S, LEI T, *et al.* The effects of macronutrient deficiency on photosynthetic activity, respiration and physiological parameters in wheat [J]. *Journal of Sichuan University (Natural Science Edition)*, 2009, 46(2): 462-468.

[14] 彭海欢.缺钾对水稻叶片光合特性、抗氧化酶的影响及其诱导早衰机制的研究[D].杭州:浙江大学,2006.

[15] 赵世杰,史国安,董新纯.植物生理学实验指导[M].北京:中国农业科学技术出版社,2002: 55-57,98-99.

[16] 王学奎.植物生理生化实验原理和技术.第2版[M].北京:高等教育出版社,2006.

[17] 朱祖雷,黄华梨,张露荷,等.不同钾肥水平对‘骏枣’叶片光合特性及果实品质的影响[J].中国土壤与肥料,2019,(4): 132-140.  
ZHU Z L, HUANG H L, ZHANG L H, *et al.* Effects of different potassium levels on photosynthetic characteristics and fruit quality of ‘Jun jujube’ [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2019,(4): 132-140.

[18] 吴翠云,蒋卉,李天红,等.土施钾肥对骏枣叶片光合特性及果实品质的影响[J].中国土壤与肥料,2018,(4): 99-106.  
WU C Y, JIANG H, LI T H, *et al.* Effect of soil potassium fertilization on leaf photosynthesis and fruit quality of jujube [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2018,(4): 99-106.

[19] 吴玉霞,毛娟,杨江山,等.后期施肥对延后栽培葡萄综合品质的影响[J].中国土壤与肥料,2018,(5): 91-96.  
WU Y X, MAO J, YANG J S, *et al.* Effects of different fertilization in late growth stage on quality of grape in delayed cultivation [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2018,(5): 91-96.

[20] 杜振宇,宋永贵,许元峰,等.钾对冬枣品质与产量的影响[J].中国土壤与肥料,2018,(1): 32-36.  
DU Z Y, SONG Y G, XU Y F, *et al.* Effects of potassium on quality and yield of winter jujube [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2018,(1): 32-36.

[21] 朱俊峰,陈红萍,范永玲,等.红枣裂果的气候环境背景及其防御[J].科学之友,2010,(19): 155-157.  
ZHU J F, CHEN H P, FAN Y L, *et al.* Red jujube dehiscent fruit climatic environment background and defense [J]. *Friend of Science Amateurs*, 2010,(19): 155-157.

[22] 林兰稳.矿质营养对荔枝裂果率的影响[J].土壤与环境,2001,10(1): 55-56.  
LIN L W. Effects of mineral nutrition on fruit cracking rate of *Litchi chinensis* [J]. *Soil and Environmental Sciences*, 2001, 10(1): 55-56.

[23] 严程明,张江周,石伟琦,等.滴灌施肥对菠萝产量、品质及经济



- 效益的影响[J]. 植物营养与肥科学报, 2014, **20**(2): 496-502.
- YAN C M, ZHANG J Z, SHI W Q, *et al.* Effects of drip fertigation on yield, quality and economic benefit of pineapple [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, **20**(2): 496-502.
- [24] 王 建. 猕猴桃树体生长发育、养分吸收利用与累积规律 [D]. 陕西杨陵: 西北农林科技大学, 2008.
- [25] 罗 宪, 吴翠云. 钾肥对幼龄骏枣果实内在品质的影响[J]. 新疆农业科学, 2012, **49**(10): 1 810-1 817.
- LUO X, WU C Y. Effects of potassium on the Junzao fruit quality in close-planting garden[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2012, **49**(10): 1 810-1 817.
- [26] TAGLIAVINI M, ZAVALLONI C, ROMBOLÀ A D, *et al.* Mineral nutrient partitioning to fruits of deciduous trees [J]. *Acta Horticulturae*, 2000, (512): 131-140.
- [27] 文莲莲, 李 岩, 张聘丘, 等. 冬季温室补光时长对番茄幼苗生长、光合特性及碳代谢的影响[J]. 植物生理学报, 2018, **54**(9): 1 490-1 498.
- WEN L L, LI Y, ZHANG D Q, *et al.* Effects of supplemental light duration on the growth, photosynthetic characteristic and carbon metabolism of tomato seedlings in winter under solar greenhouse[J]. *Plant Physiology Journal*, 2018, **54**(9): 1 490-1 498.
- [28] 吴翠云, 白团辉, 王振磊, 等. 钾肥对直播密植枣园幼龄骏枣光合特性的影响[J]. 西北农业学报, 2013, **22**(7): 156-161.
- WU C Y, BAI T H, WANG Z L, *et al.* Effect of potassium on photosynthetic characteristics of young jujube trees in close planting orchard[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2013, **22**(7): 156-161.
- [29] REDDY K R, ZHAO D L. Interactive effects of elevated CO<sub>2</sub> and potassium deficiency on photosynthesis, growth, and biomass partitioning of cotton [J]. *Field Crops Research*, 2005, **94**(2/3): 201-213.
- [30] ZHAO D, OOSTERHUIS D M, BEDNARZ C W. Influence of potassium deficiency on photosynthesis, chlorophyll content, and chloroplast ultrastructure of cotton plants [J]. *Photosynthetica* (Prague), 2001, **39**(1): 103-109.
- [31] SHUKLA B, RAI L C. Potassium-induced inhibition of photosynthesis and associated electron transport chain of *Microcystis*: Implication for controlling cyanobacterial blooms[J]. *Harmful Algae*, 2006, **5**(2): 184-191.
- [32] HSIAO T C. Plant responses to water stress[J]. *Annual Review of Plant Physiology*, 1973, **24**(1): 519-570.
- [33] 郑炳松, 程晓建, 蒋德安, 等. 钾元素对植物光合速率、Rubisco 和 RCA 的影响[J]. 浙江林学院学报, 2002, **19**(1): 104-108.
- ZHENG B S, CHENG X J, JIANG D A, *et al.* Effects of potassium on Rubisco, RCA and photosynthetic rate of plant [J]. *Journal of Zhejiang Forestry College*, 2002, **19**(1): 104-108.
- [34] 陈爱珠, 杨杰文. 钾素对甜玉米苗期光合特性的影响[J]. 中国农学通报, 2010, **26**(9): 230-233.
- CHEN A Z, YANG J W. Effects of potassium on photosynthetic characters of sweet corn in seedling phasing[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, **26**(9): 230-233.
- [35] 郭 雯. 灌溉施钾对红富士苹果叶片光合特性和矿物质营养及果实品质影响的研究[D]. 陕西杨陵: 西北农林科技大学, 2009.
- [36] LONG S P, LICHTENTHALER H K. Applications of chlorophyll fluorescence in photosynthesis research, stress physiology, hydrobiology and remote sensing[J]. *The Journal of Applied Ecology*, 1990, **27**(2): 764.
- [37] BRADBURY M, BAKER N R. A quantitative determination of photochemical and non-photochemical quenching during the slow phase of the chlorophyll fluorescence induction curve of bean leaves [J]. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Bioenergetics*, 1984, **765**(3): 275-281.
- [38] 杨广东, 朱祝军, 计玉妹. 不同光强和缺镁胁迫对黄瓜叶片叶绿素荧光特性和活性氧产生的影响[J]. 植物营养与肥科学报, 2002, **8**(1): 115-118.
- YANG G D, ZHU Z J, JI Y M. Effect of light intensity and magnesium deficiency on chlorophyll fluorescence and active oxygen in cucumber leaves[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2002, **8**(1): 115-118.
- [39] 郭 英, 孙学振, 宋宪亮, 等. 钾营养对棉花苗期生长和叶片生理特性的影响[J]. 植物营养与肥科学报, 2006, **12**(3): 363-368.
- GUO Y, SUN X Z, SONG X L, *et al.* Effects of potassium nutrition on growth and leaf physiological characteristics at seedling stage of cotton [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, **12**(3): 363-368.
- [40] 杨 军, 马振峰, 刘桂华. 钾营养对柰李叶片光合作用及叶绿素荧光的影响[J]. 中国农学通报, 2010, **26**(20): 238-244.
- YANG J, MA Z F, LIU G H. Potassium nutrition on photosynthesis and chlorophyll fluorescence in Nai-plum leaves [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, **26**(20): 238-244.
- [41] LIN Z H, CHEN L S, CHEN R B, *et al.* CO<sub>2</sub> assimilation, ribulose-1, 5-bisphosphate carboxylase/oxygenase, carbohydrates and photosynthetic Electron transport probed by the JIP-test, of tea leaves in response to phosphorus supply[J]. *BMC Plant Biology*, 2009, **9**(1): 43.
- [42] JIANG H X, CHEN L S, ZHENG J G, *et al.* Aluminum-induced effects on Photosystem II photochemistry in *Citrus* leaves assessed by the chlorophyll a fluorescence transient [J]. *Tree Physiology*, 2008, **28**(12): 1 863-1 871.
- [43] 张绍阳. 钾营养水平对油桃光合特性和果实质量影响的研究 [D]. 合肥: 安徽农业大学, 2008.
- [44] 孙 哲, 史春余, 刘桂玲, 等. 干旱胁迫与正常供水钾肥影响甘薯光合特性及块根产量的差异[J]. 植物营养与肥科学报, 2016, **22**(4): 1 071-1 078.
- SUN Z, SHI C Y, LIU G L, *et al.* Effect difference of potassium fertilizer on leaf photosynthetic characteristics and storage root yield of sweet potato under drought stress and normal water condition [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, **22**(4): 1 071-1 078.