

水分胁迫下水肥耦合对矮砧富士幼树生长及保护酶活性的影响

石美娟, 续海红, 郭 华, 杨 凯, 窦彦鑫

(山西农业大学果树研究所, 山西 太原 030031)

摘 要:为了探究滴灌条件下 20% θ_f 、40% θ_f 水分胁迫与 N、P、K 营养元素耦合对矮砧富士幼树生长生理的影响及各种保护酶活性的抗旱响应,于 2019—2020 年以 3 a 矮砧富士幼树为试材,采用“3414”不完全正交设计方案开展盆栽试验,对处理后的矮砧富士幼树形态指标、渗透调节物质、保护酶活性及丙二醛(MDA)含量等变化进行分析。结果发现:在轻度(40% θ_f)水分胁迫下施用 N 150 mg·kg⁻¹时,矮砧富士幼树的新梢生长量降幅最小,为 9.95%;施用 P 70 mg·kg⁻¹时叶面积降幅最小;施用 K 250 mg·kg⁻¹相对叶绿素含量不降反增,升高了 41.8%;MDA 含量在施用 P 35 mg·kg⁻¹时降幅最小,为 45.76%;相对电导率在施用 P 70 mg·kg⁻¹时降幅最小,为 15.66%。在重度(20% θ_f)水分胁迫下施用 N 150 mg·kg⁻¹新梢生长量降幅最小,为 14.71%;施用 P 70 mg·kg⁻¹时叶面积降幅最小,为 7.77%;施用 P 70 mg·kg⁻¹时相对叶绿素含量降幅最小,为 19.77%,MDA 含量在施用 N 100 mg·kg⁻¹、P 70 mg·kg⁻¹、K 250 mg·kg⁻¹时降幅最小,为 61.32%;相对电导率在施用 P 105 mg·kg⁻¹时升高 6.49%。在轻、重度干旱胁迫下,施用 N 100 mg·kg⁻¹和 K 125 mg·kg⁻¹时叶片水势差维持在中等干旱(0.5~1.0 Mpa)水平,利于矮砧富士幼树生长各项形态指标保持正常水平。在轻度(40% θ_f)水分胁迫下,矮砧富士幼树的渗透调节物质:脯氨酸含量在 N 150 mg·kg⁻¹时升幅最明显(157.19%);可溶性糖含量在 N 100 mg·kg⁻¹、P 70 mg·kg⁻¹、K 250 mg·kg⁻¹时升幅最大,为 112.01%;保护酶活性:POD 活性在 N 100 mg·kg⁻¹时升幅最明显(147.26%)、SOD 活性在 N 100 mg·kg⁻¹时升幅最明显(217.92%)。在重度(20% θ_f)水分胁迫下,脯氨酸含量在 N 100 mg·kg⁻¹、P 70 mg·kg⁻¹、K 250 mg·kg⁻¹时升幅最明显(156.95%)、可溶性糖含量在 N 100 mg·kg⁻¹、P 70 mg·kg⁻¹、K 250 mg·kg⁻¹时升幅最大(131.08%);POD 活性在 N 100 mg·kg⁻¹、P 70 mg·kg⁻¹、K 250 mg·kg⁻¹时升幅最明显(180.37%);SOD 活性在 N 50 mg·kg⁻¹时升幅最明显(973.95%)。在 N(50、100 mg·kg⁻¹)、P(35、70 mg·kg⁻¹)、K(125 mg·kg⁻¹)交互作用下新梢生长量、叶面积、相对叶绿素含量及叶片水势差等指标优于单独施用 N、P、K 的抗旱效果;MDA 含量和相对电导率在 N 100 mg·kg⁻¹、P 70 mg·kg⁻¹、K 125、250 mg·kg⁻¹时的抗旱效果优于单独施用 N、P、K;渗透调节物质在 N 100 mg·kg⁻¹、P 70 mg·kg⁻¹、K 250、375 mg·kg⁻¹时,保护酶活性在 N 100、150 mg·kg⁻¹、P 70 mg·kg⁻¹、K 250 mg·kg⁻¹时抗旱效果优于单独施用 N、P、K。在受到干旱胁迫时,若超出 N、P、K 适宜用量范围则会造成果树生理干旱,不利于果树生长。

关键词:滴灌;水分胁迫;氮磷钾;矮砧富士幼树;生长;保护酶活性

中图分类号:S661.1 **文献标志码:**A

Effects of water and fertilizer coupling on growth and protective enzyme activities of dwarf rootstock Fuji sapling under water stress

SHI Meijuan, XU Haihong, GUO Hua, YANG Kai, DOU Yanxin

(Shanxi Agricultural University Pomology Institute, Taiyuan, Shanxi 030031, China)

Abstract: In order to investigate the effects of 20% θ_f and 40% θ_f water stress coupled with elements N, P and K on growth physiology and drought resistance of Fuji sapling under drip irrigation, a pot experiment was carried out using Fuji sapling with 3 a short stocks as experimental materials in 2019–2020, using incomplete orthogonal design scheme “3414”. Morphological indexes, osmotic regulation substances, protective enzyme activities and

MDA content of Fuji saplings treated by short stock were analyzed. The results showed that when $N\ 150\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ was applied under mild ($40\%\theta_f$) water stress, the minimum decrease of shoot growth was 9.95%. The relative chlorophyll content increased by 41.80% when $K\ 250\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ was applied. The decrease of leaf area was the smallest under drought stress ($40\%\theta_f, 20\%\theta_f$). MDA content decreased by 45.76% when $P\ 35\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ was applied. The relative conductivity decreased by 15.66% when $P\ 70\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ was applied. When $N\ 150\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ was applied under severe ($20\%\theta_f$) water stress, the minimum decrease of shoot growth was 14.71%. When $P\ 70\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ was applied, the leaf area decreased by 7.77%. When $P\ 70\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ was applied, the relative chlorophyll content decreased 19.77%, and MDA content decreased 61.32% when $N\ 100\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $P\ 70\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, and $K\ 250\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. The relative conductivity increased by 6.49% when $P\ 105\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ was applied. The leaf water potential difference maintained the medium drought level ($0.5 \sim 1.0\ \text{MPa}$) when applying $N\ 100\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ and $K\ 125\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ under light and severe drought stress, which was conducive to the normal growth of various morphological indexes of Fuji saplings. Under mild water stress ($40\%\theta_f$), the osmotic adjustment substances of Fuji sapling increased by 157.19% at $N\ 150\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, soluble sugar content at $N\ 100\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $P\ 70\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $K\ 250\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, the maximum increase is 112.01%; Protective enzyme activity: POD activity increased by 147.26% and SOD activity increased by 217.92% at $N\ 100\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. Under severe ($20\%\theta_f$) water stress, the increase of proline content was the most obvious at $N\ 100\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $P\ 70\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $K\ 250\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, soluble sugar content at $N\ 100\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $P\ 70\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $K\ 250\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, the maximum increase is 131.08%; Protective enzyme activity: POD activity increased by 180.37% when $N\ 100\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $P\ 70\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $K\ 250\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, SOD activity increased by 973.95% when $N\ 50\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. Under $N\ 50, 100\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $P\ 35, 70\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $K\ 125\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ interaction, shoot growth, leaf area, relative chlorophyll content and leaf water potential difference were better than those of N, P, K alone. MDA content and relative conductivity at $N\ 100\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $P\ 70\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $K\ 125, 250\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ were better than N, P, K alone. The drought-resistance effect of osmotic regulation substance at $N\ 100\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $P\ 70\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $K\ 250, 375\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ and the protective enzyme activity at $N\ 100, 150\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $P\ 70\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $K\ 250\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ was better than that of N, P, K alone. Under drought stress, if N, P, K exceed the appropriate dosage range, physiological drought will result in fruit trees, not conducive to the growth of fruit trees.

Keywords: drip irrigation; water stress; NPK; dwarf rootstock Fuji sapling; growth; protective enzyme activity

截至 2019 年,中国的苹果种植面积和产量均占世界 50% 以上^[1],其中苹果产业布局主要为环渤海湾和西北黄土高原两大优势区,分别占我国苹果总面积的 26.9%、57.2%,生产集中度占 85% 以上^[2]。矮砧集约高效栽培技术模式是世界苹果发展的方向,也是今后一段时间我国苹果栽培的主推模式,目前我国矮砧栽培面积大约 15 万 hm^2 。黄土高原区域苹果主栽区干旱半干旱丘陵山区居半数以上,干旱少雨、水资源严重不足,旱害胁迫成为该地区苹果产业长足发展的主要制约因素。氮磷钾作为植物生长的三大必需元素,对提高作物抵抗逆境能力有着重要作用,而水分是影响肥效发挥的关键因子。治理干旱区中低产田的关键要素就是要遵照“数量减半、少量多次、养分平衡”进行土肥水耦合^[3]。近年来,在干旱胁迫条件下,以单一或两种养分元素耦合对作物抗旱性研究较多,有关水肥耦合对抗旱性影响多集中在玉米^[4]、小麦^[5]、水稻^[6]等农作物,对矮砧富士果树的研究主要集中在产量

和果实品质等方面,针对滴灌条件下水分胁迫时氮磷钾配比耦合对其幼树(挂果前)生理抗旱性的研究较少。本研究选取不同配比水肥耦合处理后富士幼树的形态和生理指标分析研究,旨在阐明不同配比氮磷钾营养元素与矮砧富士抗旱性的关系,科学制定在保证产量的前提下增强其抗旱性的最佳水肥制度,为促进矮砧集约抗旱栽培模式在黄土高原大力推广提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况及参试材料

试验于 2019 年 4 月—2020 年 10 月连续 2 a 在山西省农科院果树研究所旱作节水团队试验园避雨棚(东经 $112^\circ 29'$ 、北纬 $37^\circ 23'$)内进行。试材为 3~4 a 海棠/SH₆/'晋富',挑选长势基本一致、无病虫害的富士幼树,在富士苹果树生长发育期,参照“3414”^[7]不完全施肥方案,按照 $N:P_2O_5:K_2O$ 总施用比例为 1:0.7:1 进行盆栽控水试验。取果园

表 1 “3414”不完全肥料施肥方案
Table 1 “3414” incomplete fertilizer application scheme

处理 Treatment	施肥量 Fertilizing amount/(mg·kg ⁻¹)		
	N	P	K
N ₁ P ₂ K ₂	50	70	250
N ₂ P ₁ K ₂	100	35	250
N ₂ P ₂ K ₂	100	70	250
N ₂ P ₃ K ₂	100	105	250
N ₂ P ₂ K ₁	100	70	125
N ₂ P ₂ K ₃	100	70	375
N ₃ P ₂ K ₂	150	70	250
N ₁ P ₁ K ₂	50	35	250
N ₁ P ₂ K ₁	50	70	125
N ₂ P ₁ K ₁	100	35	125

内 0~80 cm 土层混匀土壤加 1/3 N 肥和全部 P、K 肥作基肥,剩下 2/3 N 肥滴灌追施。设计 3 个水分水平:以田间持水量的 20% θ_f (重度水分胁迫, θ_f 为田间持水量)、40% θ_f (轻度水分胁迫)、60% θ_f (正常水分)为灌水下限进行耦合试验,各处理施肥水平详见表 1。每个处理 3 盆,重复 3 次,完全随机排列。于每次施肥处理后一周左右,选取树体中部各个方向 10 片功能叶片采样,进行生理生化等指标测定^[8-9]。试验所用分析数据为 2 a 所测数据平均值。

1.2 测定项目及方法

新梢增长量测定:采用直接测量法;叶面积测定:采用 AM300 型叶面积仪测量;叶片水势差测定:采用力高泰叶片水势仪测量水分充足时的叶片水势减去干旱胁迫处理后的叶片水势,为该处理下的叶片水势差。等级范围:轻微干旱(0.1~0.5 MPa),中度干旱(0.5~1.0 MPa),重度干旱(1.0~1.5 MPa),严重干旱(1.5 MPa 以上)^[10]。

叶绿素含量测定采用乙醇丙酮浸提法;相对电导率测定采用电导法;丙二醛(MDA)含量测定采用硫代巴比妥酸(TAB)比色法^[11];超氧化物歧化酶(SOD)活性测定采用氮蓝四唑光还原法^[12];过氧化物酶(POD)活性测定采用愈创木酚法^[13];脯氨酸含量采用李合生黄基水杨酸法^[12];可溶性糖含量采用蒽酮比色法测定^[14]。

1.3 数据分析

采用 Excel 2007 进行数据处理和作图,利用 SAS13.0 软件在 $\alpha=0.05$ 水平下对试验数据进行方差分析和 Duncan 多重比较。

2 结果与分析

2.1 水分胁迫下水肥耦合对矮砧富士幼树生长和叶片水势差的影响

由图 1 和表 2 中可以发现,在连续 2 a 的试验中,各个指标变化规律有所不同。处理 N₁P₂K₂、N₂P₂K₂、N₃P₂K₂ 在相同 N 水平时,轻度(40% θ_f)和重度(20% θ_f)水分胁迫下,N3 水平的新梢增长量降幅最小,且各水平间变幅差异不显著($P>0.05$)。随着施 N 量的增加,2 种水分胁迫下叶绿素含量呈先升后降趋势,都是 N₂水平的降幅最小,且各水平间变幅差异不显著。随着施 N 量的增加,2 种水分胁迫下叶面积呈下降趋势;在轻度(40% θ_f)水分胁迫下 N₃水平的叶面积降幅最小;重度(20% θ_f)水分胁迫下 N₂水平降幅最小,且各水平间变幅差异显著。叶片水势差随着施 N 量的增加,在轻度干旱(40% θ_f)、重度(20% θ_f)胁迫下均为 N₂水平增幅最小,轻度干旱(40% θ_f)时 N₃与各水平间差异显著;在重度干旱(20% θ_f)胁迫下,N₂与 N₁、N₃差异显著。

处理 N₂P₁K₂、N₂P₂K₂、N₂P₃K₂,同一 P 水平时,在 2 种水分胁迫下,新梢增长量轻度(40% θ_f)胁迫时呈先升后降,P₂水平的新梢增长量降幅最小,重度(20% θ_f)水分胁迫下呈上升趋势,P₃水平降幅最小,且各水平间差异不显著。相同 P 水平时叶绿素含量呈先升后降趋势,在轻度(40% θ_f)水分胁迫下 P₁水平降幅最小,而重度(20% θ_f)胁迫时 P₂水平的降幅最小,且各水平间差异不显著。随着施 P 量的增加,2 种水分胁迫下叶面积呈先降后缓升趋势,而且都是 P₂水平下的叶面积降幅最小,各水平间差异显著;轻度水分(40% θ_f)胁迫下叶片水势差变化为 P₃水平增幅最大且与其他水平变幅差异显著;重度水分(20% θ_f)胁迫下叶片水势差变化为 P₁水平增幅最大且各增幅间差异极显著。

处理 N₂P₂K₁、N₂P₂K₂、N₂P₂K₃,相同 K 水平时,在 2 种水分胁迫下,新梢增长量呈下降趋势,在轻、重度胁迫时新梢增长量降幅最小的分别是 K₂、K₁水平,且各水平间差异不显著。轻度(40% θ_f)水分胁迫下叶绿素含量呈下降趋势,重度(20% θ_f)水分胁迫下呈上升趋势,轻、重度胁迫下都是 K₁水平的变化幅度最小,且各水平间差异不显著。相同 K 水平时,轻度(40% θ_f)水分胁迫下叶面积呈缓升趋势,K₃水平升幅最大;而重度(20% θ_f)水分胁迫下叶面积呈先降后升趋势,K₂水平下的叶面积升幅最大,各水平间差异极显著。叶片水势差在轻度(40% θ_f)水分胁迫时,K₂水平变幅最大,与其他水平变幅差异

显著;重度水分 ($20\% \theta_f$) 胁迫下 K_3 水平变幅最大, 且与其他水平间差异显著。

NPK 交互作用的结果为:新梢增长量受到轻度 ($40\% \theta_f$) 水分胁迫时 $N_2P_1K_1$ 处理的降幅最小, 为 11.3%, 重度水分 ($20\% \theta_f$) 胁迫时 $N_3P_2K_2$ 处理降幅最小, 为 14.7%, 且都与 $N_2P_2K_2$ 、 $N_2P_3K_2$ 和 $N_2P_2K_1$ 处理差异显著。叶面积受到轻度 ($40\% \theta_f$) 水分胁迫时 $N_1P_2K_1$ 处理的叶面积不降反增高了 6.5%, $N_2P_1K_2$ 与 $N_3P_2K_2$ 间降幅差异显著;重度水分 ($20\% \theta_f$) 胁迫时 $N_1P_2K_1$ 处理下叶面积的降幅最小 (7.8%), 且与 $N_2P_3K_2$ 间降幅差异显著, 其他处理间差异不显著。叶绿素含量受到轻度 ($40\% \theta_f$) 水分胁迫时 $N_1P_1K_2$ 处理的相对叶绿素含量不降反升高了 0.4%, 其中 $N_2P_2K_1$ 、 $N_2P_1K_1$ 与 $N_1P_2K_1$ 差异显著;重度 ($20\% \theta_f$) 水分胁迫时 $N_1P_2K_1$ 处理的降幅最小 (19.8%), $N_2P_2K_2$ 、 $N_2P_2K_3$ 及 $N_2P_1K_1$ 处理间变幅差异不显著, 与其他各处理差异显著。轻度 ($40\% \theta_f$) 水分胁迫时 $N_2P_1K_1$ 处理的水势差表现为 0.285 MPa, 变幅不减反降了 3.7%;重度水分 ($20\% \theta_f$) 胁迫时 $N_2P_1K_1$ 处理的叶片水势差等级最低, 仅 0.798

MPa, 其中 $N_1P_2K_2$ 、 $N_2P_1K_2$ 、 $N_2P_3K_2$ 、 $N_3P_2K_2$ 、 $N_1P_1K_2$ 处理的变幅与 $N_2P_2K_2$ 、 $N_2P_2K_3$ 、 $N_3P_2N_2$ 、 $N_2P_1K_1$ 处理的变幅差异性显著。

2.2 水分胁迫下水肥耦合对矮砧富士幼树渗透调节物质的影响

由图 2 和表 3 中可以发现, 处理 $N_1P_2K_2$ 、 $N_2P_2K_2$ 、 $N_3P_2K_2$, 相同 N 水平下, 在轻度 ($40\% \theta_f$) 水分胁迫下脯氨酸含量呈先降后升趋势, 其中 N_3 水平的升幅最大;在重度 ($20\% \theta_f$) 水分胁迫下脯氨酸含量呈先升后降趋势, 其中 N_2 水平的升幅最大, 且各水平间变幅差异极显著。随着施 N 量的增加, 2 种水分胁迫下可溶性糖含量呈先升后降趋势, 都是 N_2 水平的增幅最大, 且各水平间变幅差异极显著。

处理 $N_2P_1K_2$ 、 $N_2P_2K_2$ 、 $N_2P_3K_2$, 相同 P 水平下, 在 2 种水分胁迫下, 脯氨酸含量都呈先升后降趋势, 也都是 P_2 水平的脯氨酸含量升幅最大, 且各水平间差异极显著。相同 P 水平时可溶性糖含量呈先升后降趋势, 也都是 P_2 水平的脯氨酸含量升幅最大, 且各水平间差异极显著。

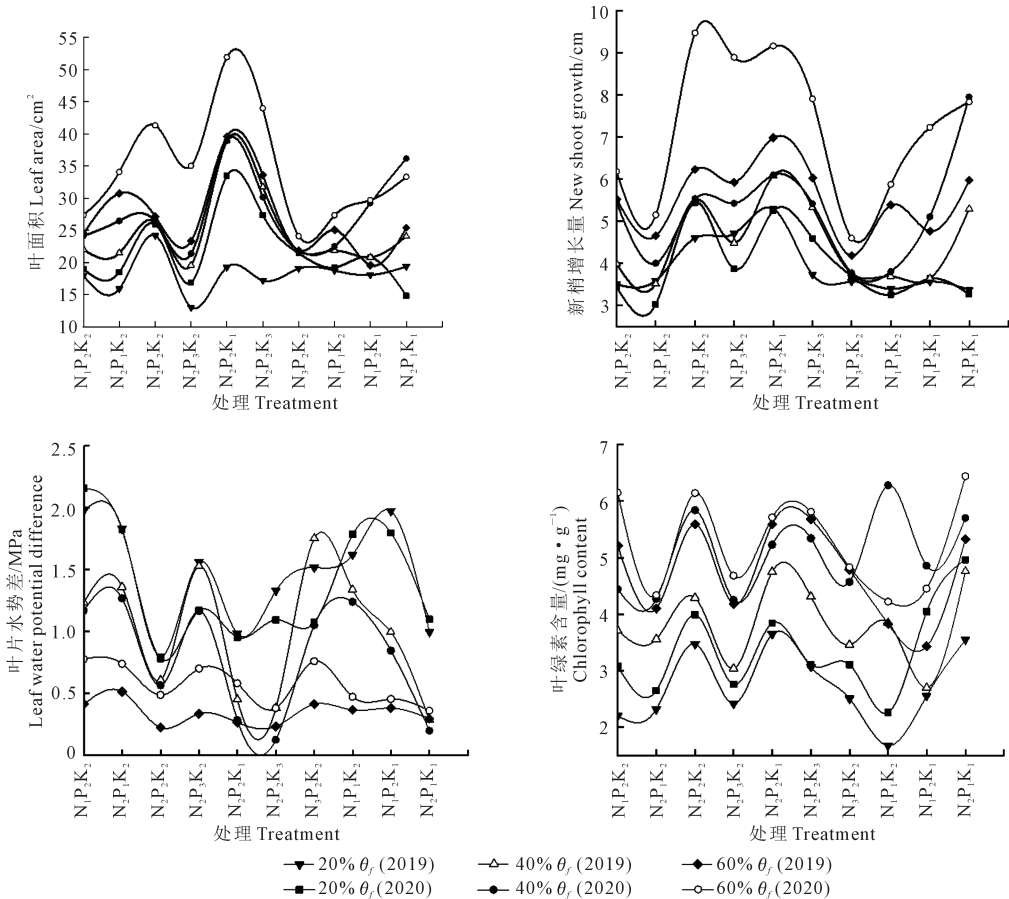


图 1 水分胁迫下不同处理矮砧富士幼树叶面积、新梢增长量、叶片水势差、叶绿素含量的变化
Fig.1 Variation of leaf area, shoot growth, leaf water potential difference and chlorophyll content of dwarf rootstock Fuji sapling under water stress

表 2 水分胁迫下不同处理矮砧富士幼树生理生长及水势差变化幅度

Table 2 Variation range of physiological growth and water potential difference of dwarf rootstock Fuji sapling under different water stress

处理 Treatment	新梢增长量 New shoot growth/cm			叶绿素含量 Chlorophyll content/(mg · g ⁻¹)		
	40% θ_f	20% θ_f	60% θ_f	40% θ_f	20% θ_f	60% θ_f
N ₁ P ₂ K ₂	1.543Aa	2.0225ABa	5.528ABCab	3.182Aa	1.505Aa	5.206CDcd
N ₂ P ₁ K ₂	1.1377Aa	1.0550ABa	4.651BCab	1.773Aab	0.499Aa	4.095Ccd
N ₂ P ₂ K ₂	0.7046Aa	1.6361ABa	6.227ABab	2.299Aab	1.483Aa	5.772ABa
N ₂ P ₃ K ₂	1.4399Aa	1.2155ABa	5.926ABCab	1.758Aab	1.136Aa	4.177Cbc
N ₂ P ₂ K ₁	0.8862Aa	1.6869ABa	6.985Aa	1.94Aab	0.838Aa	5.588Aa
N ₂ P ₂ K ₃	0.6933Aa	0.6933Ba	6.032ABCab	2.613Aab	1.375Aa	5.681Bab
N ₃ P ₂ K ₂	0.4161Aa	0.6157Ba	4.182Cb	2.251Aab	1.298Aa	4.759Cbc
N ₁ P ₁ K ₂	1.6906Aa	1.9922ABa	5.386ABCab	-2.156Bc	-2.172Ba	3.832Dd
N ₁ P ₂ K ₁	1.1212Aa	1.2016ABa	4.765BCab	-0.629Bbc	-0.098ABa	3.182Cc
N ₂ P ₁ K ₁	0.6773Aa	2.6021Aa	5.974ABCab	-1.777Bc	-1.211ABa	5.325ABa

处理 Treatment	叶面积 Leaf area/cm ²			叶水势差 Leaf water potential difference/MPa		
	40% θ_f	20% θ_f	60% θ_f	40% θ_f	20% θ_f	60% θ_f
N ₁ P ₂ K ₂	2.454Dd	6.53Ee	24.46BCb	-0.9685DEcde	-1.3624Bb	0.412ABab
N ₂ P ₁ K ₂	3.792Bb	10.3Dd	30.741DEc	-0.8463CDEbcde	-1.8035Cc	0.513Aa
N ₂ P ₂ K ₂	0.854Gg	2.99Hh	27.167Bab	-0.3856ABCabc	-10.3766Aa	0.223Bb
N ₂ P ₃ K ₂	9.287Aa	14.84Cc	23.337BCab	-1.16332Ede	-1.195Bb	0.335ABab
N ₂ P ₂ K ₁	0.738Hh	20.34Aa	39.584Aa	-0.185Aab	-0.4685Aa	0.265Bab
N ₂ P ₂ K ₃	1.817Ee	16.35Bb	33.549Cb	-0.147Aab	-1.099Bb	0.233Bb
N ₃ P ₂ K ₂	0.073Ii	2.86Ii	21.903Dc	-1.3407Ee	-1.1053Bb	0.412ABab
N ₁ P ₁ K ₂	3.23Cc	6.32Ff	25.063BCb	-0.975DEcde	-1.2549Bb	0.365ABab
N ₁ P ₂ K ₁	-1.267Jj	1.52Jj	19.563Ec	-0.5968BCDabcd	-1.1277Bb	0.399ABab
N ₂ P ₁ K ₁	1.327Ff	6.02Gg	25.39ABa	0.0112Aa	-0.3487Aa	0.296Bab

注：不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)，不同大写字母表示差异极显著 ($P<0.01$)，下同。
Note: Different lowercase letters indicate significant differences ($P<0.05$) and different uppercase letters indicate extremely significant differences ($P<0.01$), the same below.

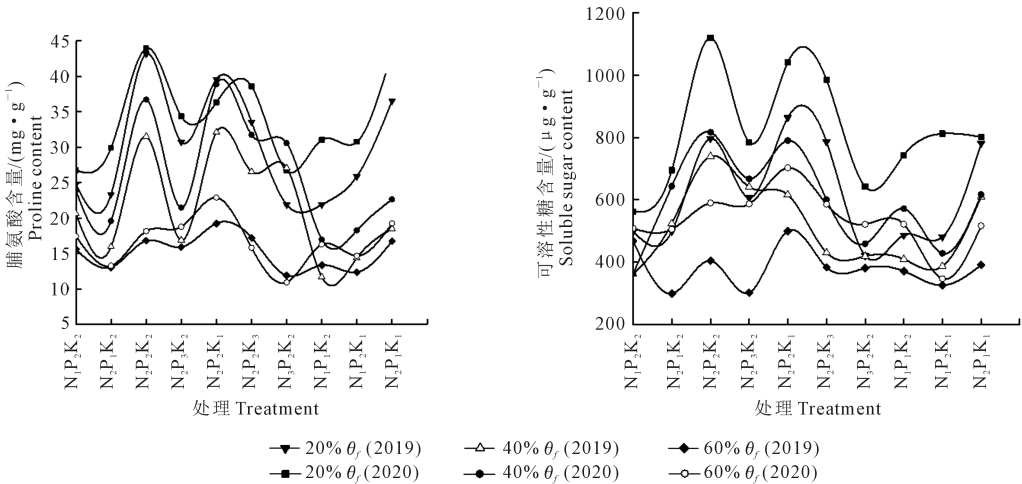


图 2 水分胁迫下不同处理矮砧富士幼树脯氨酸含量、可溶性糖含量的变化

Fig.2 Changes of proline content and soluble sugar content of dwarf rootstock Fuji sapling under water stress

处理 N₂P₂K₁、N₂P₂K₂、N₂P₂K₃，相同 K 水平下，在 2 种水分胁迫下，脯氨酸含量呈先升后降趋势，也都是 K₂ 水平的脯氨酸含量升幅最大，且各水平间差异极显著。轻度 (40% θ_f) 水分胁迫下可溶性糖含量呈先升后降趋势，K₂ 水平的升幅最大；重度 (20% θ_f) 水分胁迫下呈下降趋势，K₃ 水平的升幅最大。2 种水分胁迫下各水平间差异极显著。

NPK 交互作用的结果为：脯氨酸含量受到轻度 (40% θ_f)、重度 (20% θ_f) 水分胁迫时，N₂P₂K₂ 处理的

增幅最大，分别为 1.57 倍和 1.56 倍，且各处理间变幅差异显著；可溶性糖含量受到轻度 (40% θ_f) 水分胁迫时，N₁P₂K₂ 处理增加了 22.4%，N₁P₂K₂ 处理下增幅最大，为 83%，重度水分 (20% θ_f) 胁迫时 N₂P₂K₃ 处理的增幅最大，为 1.04 倍。2 种水分胁迫下各个处理间变幅差异极显著。

2.3 水分胁迫下水肥耦合对矮砧富士幼树 MDA 含量及相对电导率的影响

由图 3 和表 4 可以看出，处理 N₁P₂K₂、N₂P₂K₂、

N₃P₂K₃ 相同 N 水平时,在轻度(40% θ_f)和重度(20% θ_f)水分胁迫下,MDA 含量变化趋势为先降后升,都是 N₂水平的增幅最大,且各水平间变幅差异极显著。随着施 N 量的增加,轻度(40% θ_f)水分胁迫下相对电导率呈先降后升趋势,N₂水平的增幅最大;重度(20% θ_f)水分胁迫下,N₃水平的增幅最大,且各水平间变幅差异极显著。

处理 N₂P₁K₂、N₂P₂K₂、N₂P₃K₂,相同 P 水平时,MDA 含量在轻度(40% θ_f)胁迫时呈下降趋势,重度(20% θ_f)水分胁迫下呈先降后升趋势,2 种水分胁迫下,都是 P₂水平降幅最大,且各水平间变幅差异极显著。相同 P 水平时,相对电导率受水分胁迫时呈先降后升趋势,各水平间差异显著,在轻度(40% θ_f)水分胁迫下 P₃水平变幅最大,而重度(20% θ_f)胁迫时是 P₂水平的变幅最大。

处理 N₂P₂K₁、N₂P₂K₂、N₂P₂K₃,相同 K 水平时,轻度(40% θ_f)水分胁迫下 MDA 含量呈下降趋势,重度(20% θ_f)水分胁迫下呈先降后升趋势,K₁水平降幅最大,且各个水平间变幅差异极显著。轻度(40% θ_f)水分胁迫下相对电导率呈渐升趋势,K₁水平的升

幅最大;重度(20% θ_f)水分胁迫下呈先降后升趋势,K₂水平的升幅最大;各个水平间变幅差异极显著。

NPK 交互作用的结果为:MDA 含量受到轻度(40% θ_f)水分胁迫时 N₂P₂K₃处理的降幅最大,为 61.4%,重度水分(20% θ_f)胁迫时 N₂P₂K₁处理降幅最大,为 75.07%,且各处理间变幅差异极显著;受到轻度(40% θ_f)水分胁迫时 N₂P₂K₁处理的相对电导率降幅最大,重度(20% θ_f)水分胁迫时 N₂P₂K₂处理的降幅最大,2 种水分胁迫时各处理间变幅差异极显著。

2.4 水分胁迫下水肥耦合对矮砧富士幼树保护酶活性的影响

由图 4 和表 5 可以看出,处理 N₁P₂K₂、N₂P₂K₂、N₃P₂K₂,相同 N 水平时,在轻度(40% θ_f)和重度(20% θ_f)水分胁迫下,POD 酶活性呈先升后降趋势,在轻度(40% θ_f)水分胁迫下 N₃水平的升幅最大,重度(20% θ_f)水分胁迫下 N₃水平升幅最大,2 种水分胁迫下各水平间变幅度差异极显著。随着施 N 量的增加,2 种水分胁迫下 SOD 酶活性呈先升后降趋势,都是 N₁水平的升幅最大,且各水平间变幅度差异极显著。

表 3 水分胁迫下不同处理矮砧富士幼树渗透调节物质含量变化幅度

处理 Treatment	可溶性糖含量 Soluble sugar content/($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)			脯氨酸含量 Proline content/($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)		
	40% θ_f	20% θ_f	60% θ_f	40% θ_f	20% θ_f	60% θ_f
N ₁ P ₂ K ₂	104.7Aa	-33.1 Aa	466.273Bb	-8.286Ff	-9.182Bb	15.582Bbc
N ₂ P ₁ K ₂	-224.5Hh	-200.2Ee	299.174Jj	-6.507Ee	-10.299Dd	13.038Cd
N ₂ P ₂ K ₂	-335.3Ii	-393.1Ii	404.117Cc	-19.918Jj	-26.364Jj	16.798Bb
N ₂ P ₃ K ₂	-338.7Jj	-305.1Ff	302.123Ii	-5.548Bb	-14.835Ff	15.906Bb
N ₂ P ₂ K ₁	-115.9Ff	-364.2Gg	499.916Aa	-19.605Ii	-20.343Ii	19.241Aa
N ₂ P ₂ K ₃	-47.3Dd	-403.2Jj	383.295Ee	-14.535Gg	-16.352Gg	17.197Bab
N ₃ P ₂ K ₂	-38.5Cc	-40.7Bb	380.815Ff	-18.671Hh	-10.016Cc	11.878Cd
N ₁ P ₁ K ₂	-38.4Bb	-116.4Cc	371.158Gg	-3.619Aa	-8.541Aa	13.352Ccd
N ₁ P ₂ K ₁	-61.4Ee	-156.2Dd	325.465Hh	-5.911Dd	-13.532Ee	12.347Cd
N ₂ P ₁ K ₁	-219.2Gg	-390.8Hh	390.592Dd	-5.896Cc	-19.827Hh	16.735Bb

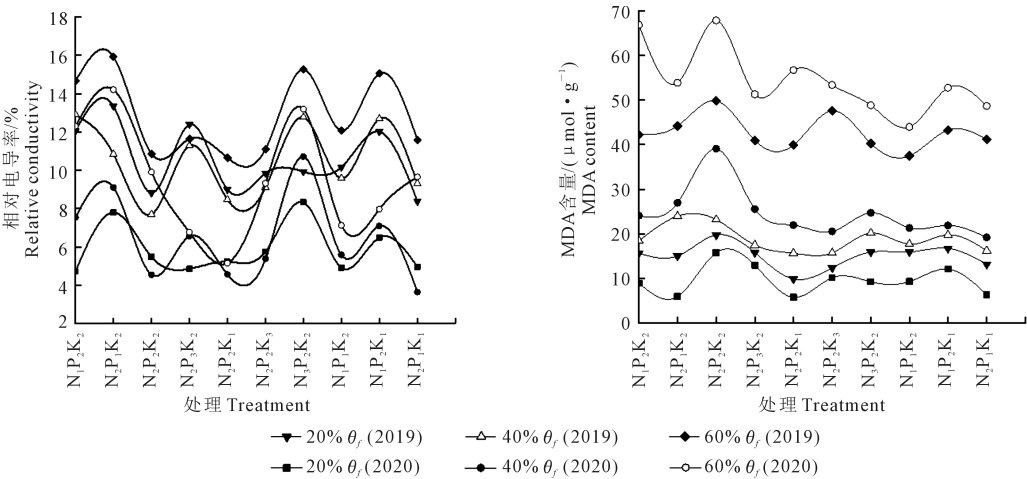


图 3 水分胁迫下不同处理矮砧富士幼树相对电导率及 MDA 含量的变化

Fig.3 Variation of relative conductivity and MDA content of dwarf rootstock Fuji sapling under water stress

处理 $N_2P_1K_2$ 、 $N_2P_2K_2$ 、 $N_2P_3K_2$, 相同 P 水平时, POD 酶活性在轻度 ($40\%\theta_f$) 胁迫时呈上升趋势, P_2 水平的升幅最大; 重度 ($20\%\theta_f$) 水分胁迫下呈先升后降趋势, P_3 水平增幅最大, 在 2 种水分胁迫下, 各水平间变幅差异极显著。相同 P 水平时 SOD 酶活性呈先升后降趋势, 在轻度 ($40\%\theta_f$) 水分胁迫下 P_3 水平变幅最大, 而重度 ($20\%\theta_f$) 胁迫时 P_2 水平的变幅最大, 且各水平间变幅差异极显著。

处理 $N_2P_2K_1$ 、 $N_2P_2K_2$ 、 $N_2P_2K_3$, 相同 K 水平时,

表 4 水分胁迫下不同处理矮砧富士幼树丙二醛含量及相对电导率变化幅度

处理 Treatment	丙二醛含量 MDA content/ $(\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1})$			相对电导率 Relative conductivity/%		
	$40\%\theta_f$	$20\%\theta_f$	$60\%\theta_f$	$40\%\theta_f$	$20\%\theta_f$	$60\%\theta_f$
$N_1P_2K_2$	23.83Ff	26.586Gg	42.239BCab	1.6006Aa	2.1008Ff	14.645Aa
$N_2P_1K_2$	20.20Jj	29.158Bb	44.153Aa	1.5428Bb	2.5928Ee	15.9398Aa
$N_2P_2K_2$	24.64Dd	27.073Ff	40.794Aa	1.1659Ii	2.7431Dd	10.859Bb
$N_2P_3K_2$	23.46Hh	25.182Jj	40.942Bb	1.3609Ee	-0.7558Jj	11.6392Bb
$N_2P_2K_1$	23.96Ee	29.724Aa	39.593Bb	1.1806Hh	1.6538Hh	10.6498Bb
$N_2P_2K_3$	24.96Bb	28.329Cc	40.674Bb	1.0008Jj	1.2523Ii	11.1043Bb
$N_3P_2K_2$	23.11Ii	27.391Ee	43.263Bb	1.4999Cc	5.3391Aa	15.2681Aa
$N_1P_1K_2$	24.79Cc	26.541Hh	42.458ABCab	1.4812Dd	1.9002Gg	12.0592Bb
$N_1P_2K_1$	23.49Gg	26.529Ii	43.258ABab	1.3564Ff	3.0334Cc	15.0494Aa
$N_2P_1K_1$	24.98Aa	28.037Dd	41.174CDbc	1.2615Gg	3.1955Bb	11.5695Bb

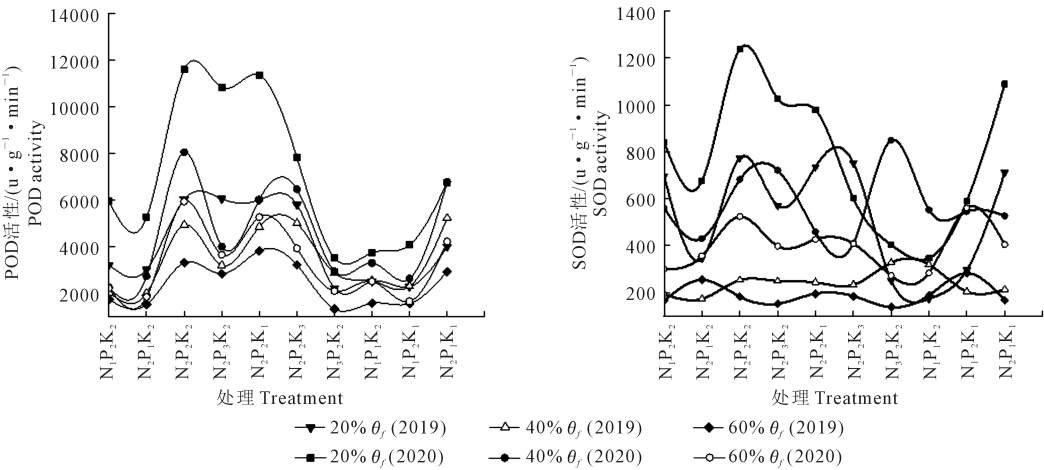


图 4 水分胁迫下不同处理矮砧富士幼树 POD、SOD 酶活性的变化

Fig.4 Changes of POD and SOD activities of dwarf rootstock Fuji sapling under water stress

表 5 水分胁迫下不同处理富士幼树保护酶活性变化幅度

Table 5 Variation range of protective enzyme activity of young Fuji under different water stress

处理 Treatment	POD 活性 POD activity/ $(\text{U} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1})$			SOD 活性 SOD activity/ $(\text{U} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1})$		
	$40\%\theta_f$	$20\%\theta_f$	$60\%\theta_f$	$40\%\theta_f$	$20\%\theta_f$	$60\%\theta_f$
$N_1P_2K_2$	-301.25Aa	-1486.17Ee	1731.54Ff	-28.2Dd	-631.5Ii	64.839Ih
$N_2P_1K_2$	-49062Cc	-1497.25Ff	1509.82Ii	-19.1Bb	-91.8Cc	53.71Ji
$N_2P_2K_2$	-1631.63Hh	-2724.14Ii	3308.58Bb	-70.7Hh	-593.0Hh	182.64Cc
$N_2P_3K_2$	-372.47Bb	-3224.52Jj	2828.52Ee	-96.2Ii	-19.7Bb	152.261Ii
$N_2P_2K_1$	-1030.39Ff	-2184.58Gg	3821.27Aa	-48.2Ff	-541.9Ff	195.51Aa
$N_2P_2K_3$	-1789.24Ii	-2581.67Hh	3216.59Cc	-48.3Gg	-569.0Gg	184.67Bb
$N_3P_2K_2$	-1545.42Gg	-895.31Bb	1314.58Jj	10.0Aa	25.0Aa	137.34Ed
$N_1P_1K_2$	-931.58Ee	-940.26Cc	1569.93Gg	-31.4Ee	-399.7Ee	87.93Fe
$N_1P_2K_1$	-741.71Dd	-717.42Aa	1555.26Hh	-21.7Cc	-399.1Dd	82.534Gf
$N_2P_1K_1$	-2290.71	-1071.34Dd	2929.34Dd	-146.4Jj	-714.2Jj	67.19Hg

NPK 交互作用的结果为:POD 酶活性受到轻度(40% θ_f)水分胁迫时 $N_3P_2K_2$ 处理的增幅最大,重度水分(20% θ_f)胁迫时 $N_2P_1K_1$ 处理增幅最大,2 种水分胁迫下各处理变幅差异显著。SOD 酶活性受到轻度(40% θ_f)水分胁迫时 $N_2P_1K_1$ 处理的增幅最大,重度水分(20% θ_f)胁迫时 $N_1P_2K_2$ 处理的增幅最大,2 种水分胁迫下各处理变幅差异显著。

3 讨论与结论

3.1 水分胁迫下水肥耦合对矮砧富士幼树生理生长及水势差的影响

新梢增长量、叶面积及叶绿素含量都是直接反映果树生长的形态指标。在不同水分供应条件下,各指标的升降幅度能直观反映果树受到胁迫时生长抑制程度。叶片水势是土壤—植物—大气之间水分平衡状态的综合反映,可以通过叶片水势差判断果树与充足水分供应相比受干旱胁迫的影响程度。叶绿素是作物吸收太阳能进行光合作用的重要物质。在本试验中,矮砧富士的新梢生长量、叶面积、相对叶绿素含量在轻、重度水分供应时随着 N、P、K 施用水平的增大都有不同程度地增高,其中当施 P 70 mg · kg⁻¹、K 125 mg · kg⁻¹ 时, N 150 mg · kg⁻¹ 水平下 2 种水分胁迫下降幅最小,有利于矮砧富士幼树生长。这一结果与里程辉等^[15] 研究得出的在水分胁迫时植株对干旱的补偿反应就是通过增加叶片的叶绿素含量从而保持较高产量的结果基本一致。叶片水势则在 2 种水分胁迫时 N 100 mg · kg⁻¹、P 70 mg · kg⁻¹、K 250 mg · kg⁻¹ 时抗旱指数最高,这一结果与周罕觅等^[16] 的高水势处理利于植株旺盛生长的研究结果基本一致;N、P、K、交互作用时,轻度(40% θ_f)水分胁迫下 $N_3P_2K_2$ 、 $N_2P_1K_1$ 利于矮砧富士幼树形态指标及叶片水势差保持正常水平,重度(20% θ_f)水分胁迫下 $N_3P_2K_2$ 、 $N_2P_2K_2$ 、 $N_1P_2K_1$ 处理形态指标和叶片水势差维持较好。说明在矮砧富士以生理生长为主的幼树期,N 素作为限制植物生长和产量形成的重要因素^[17],对其有不可或缺的影响,与罗双龙等^[18] 研究结果一致。

3.2 水分胁迫下水肥耦合对矮砧富士幼树渗透调节物质的影响

渗透调节是抗旱性的一种重要机制^[19]。王元基等^[20] 的研究结果显示:可溶性糖和游离脯氨酸含量与抗旱性密切相关。在本试验中,轻、重度水分胁迫下 N_2 、 P_3 、 K_2 、 K_3 水平下和 $N_2P_3K_2$ 、 $N_2P_2K_3$ 交互作用下可溶性糖含量显著增加;在轻度和重度水分胁迫下的脯氨酸含量在 N_2 、 N_3 、 P_2 、 K_2 水平和 $N_2P_2K_2$

交互作用下增加明显。此结论与刘忠霞等^[21] 得出干旱胁迫时高钾有利于苹果渗透调节物质含量增加的研究结果基本一致。

3.3 水分胁迫下水肥耦合对矮砧富士幼树丙二醛(MDA)含量及相对电导率的影响

质膜的透性、丙二醛的含量变化可以反映膜脂过氧化受破坏的程度。干旱胁迫下通过测定植株外渗电介质的电导率可推算质膜透性的变化^[22] 来对比抗旱性强弱,刘忠霞^[23] 等研究表明抗旱性强的品种其相对电导率或丙二醛的含量较低。在本试验中,轻、重度水分胁迫下 N_2 、 P_2 、 K_1 水平下和 $N_2P_2K_1$ 交互作用下 MDA 含量显著增加;在轻度水分胁迫下相对电导率值在 N_2 、 P_3 和 K_1 和 $N_2P_2K_1$ 交互作用时下降明显,在重度水分胁迫下相对电导率值在 N_3 、 P_2 、 K_2 水平和 $N_2P_2K_2$ 交互作用下下降显著。这一结果与康晓育等^[24] 追施氮肥可增强其抗逆性的研究结果一致。

3.4 水分胁迫下水肥耦合对矮砧富士幼树保护酶活性的影响

当植物受到干旱胁迫时,SOD 作为植物抗氧化系统的第一道防线,其主要功能是清除细胞中多余的超氧阴离子,防止对细胞膜系统造成伤害^[25]。过氧化物酶(POD)作为抗氧化剂作用的酶可以清除自由基,使得细胞膜所受伤害降低^[26],减轻了膜脂氧化的程度。在外界胁迫下保护酶能保持较高水平说明其抗旱性较高,反之则较低。在本试验中,轻、重度水分胁迫下 N_1 、 N_3 、 K_2 、 K_3 、 P_3 和 P_2 水平及 $N_2P_3K_2$ 、 $N_2P_1K_1$ 交互作用下 POD 酶活性显著增加;在 2 种水分胁迫下脯氨酸含量在 N_2 、 N_3 、 P_2 、 K_2 水平和 $N_2P_2K_2$ 交互作用下增加明显。此结果与形态指标所示结果一致。SOD 酶活性在受到 2 种水分胁迫下 N_1 、 K_2 、 K_3 、 P_3 和 P_2 水平及 $N_2P_2K_2$ 交互作用下显著增加,此结果与张海亭等^[27] 得出的 N 150 mg · kg⁻¹、P 130.98 mg · kg⁻¹ 时,干旱胁迫下低 K(249 mg · kg⁻¹)、较高 K(498 mg · kg⁻¹) 提高 SOD 酶活性的幅度大的结论基本一致。由此可见,在干旱胁迫下适量增施 N、P、K 营养素有利于提高保护酶活性。

本试验研究发现:在当前条件下,轻度(40% θ_f)水分胁迫时施用 N(100、150 mg · kg⁻¹)、P(70、105 mg · kg⁻¹)、K(250、375 mg · kg⁻¹),重度(20% θ_f)水分胁迫时施用 N(100、150 mg · kg⁻¹)、P(70 mg · kg⁻¹)、K(125、250 mg · kg⁻¹) 有利于矮砧富士果树生长,且在轻、重度干旱胁迫时 NPK 交互作用抗旱效果要优于单独施用 N、P、K 的抗旱效果。但超出 N、P、K 适宜用量范围则会造成果树生理干旱,不利

于果树生长。干旱是影响苹果生长的重要限制因子,也是一种最为常见的非生物胁迫^[28]。果树因其生长环境复杂,又因干旱的快慢程度、持续时间不尽相同,树体内相关激素或抗旱基因的防御、保护作用大小和先后顺序都由一整套分子机制来控制,因此未来的研究重点将是挖掘果树相关抗旱基因,探明其生理指标的阈值及抗旱分子机制。

参 考 文 献:

- [1] 刘彤.中国苹果种植面积和产量均占世界 50%以上[N/OL].(2019-10-13). <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1647258794726821601&wfr=spider&for=pc>.
LIU T.China's apple planting area and production both accounted for more than 50% of the world[N/OL]. (2019-10-13). <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1647258794726821601&wfr=spider&for=pc>.
- [2] 刘凤之,王海波,胡成志.我国主要果树产业现状及“十四五”发展对策[J].中国果树,2021,(1):1-5.
LIU F Z, WANG H B, HU C Z.Current situation of main fruit tree industry in China and its development countermeasure during the “14th Five-Year Plan” period[J]. China Fruits, 2021,(1): 1-5.
- [3] 薛俊东,翟金勋.现代苹果矮砧集约栽培关键技术[J].果农之友,2020,(1):6-8.
XUE J D, ZHAI J X. Key techniques for the intensive cultivation of the modern apple dwarf anvil[J]. Fruit Growers' Friend, 2020,(1): 6-8.
- [4] 朱华丽.干旱胁迫下不同硅制剂对玉米苗期生理特性的影响[D].哈尔滨:东北农业大学,2020.
ZHU H L.Effects of different silicon preparations on physiological characteristics of maize seedling under drought stress[D]. Harbin: Northeastern Agricultural University, 2020.
- [5] 简明月.冀中北抗旱小麦品种筛选及品种对干旱胁迫的生理生化响应[D].保定:河北农业大学,2021.
LIN M Y.Screening for drought-resistant wheat varieties in north central Hebei Province and their physiobiochemical responses to drought stress [D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2021.
- [6] 刘家玮.长江中下游水稻主要品种产量及抗旱性演替特征研究[D].扬州:扬州大学,2020.
LIU J W.Changes in yield performance and drought resistance in major rice varieties in the middle and lower reaches of the Yangtze River [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2020.
- [7] 姜存仓.果园测土配方施肥技术[M].北京:化学工业出版社,2011.
JIANG C C. Soil measurement and formula fertilization technology of orchard[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2011.
- [8] 刘晓纳.柑橘砧木耐旱性评价及其与根系形态的相关性研究[D].重庆:西南大学,2017.
LIU X N.Studing on drought tolerance of rootstock and its correlation with root morphology in citrus [D]. Chongqing: Southwestern University, 2017.
- [9] 李海燕,耿达立,牛春东,等.苹果砧木富平椒子和 G935 根系抗旱性评估[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2018,46(5): 118-124.
LI H Y, GENG D L, NIU C D, et al. Drought resistance of root system of apple rootstocks *Malus prunifolia* and G935[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2018, 46(5): 118-124.
- [10] 郑炳松,朱诚,金松恒.高级植物生理学[M].杭州:浙江大学出版社,2011.
ZHENG B S, ZHU C, JIN S H. Advanced plant physiology[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2011.
- [11] 王以柔,刘鸿先,李平,等.在光照和黑暗条件下低温对水稻幼苗光合器官膜脂过氧化作用的影响[J].植物生理学报,1986,12(3): 244-251.
WANG Y R, LIU H X, LI P, et al. The effect of chilling stress on membrane-lipid peroxidation of photosynthetic apparatus in rice seedlings in the dark and light[J]. Physiology and Molecular Biology of Plants, 1986, 12(3): 244-251.
- [12] 高俊凤.植物生理学实验指导[M].北京:高等教育出版社,2006.
GAO J F. Experimental guidance for plant physiology[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [13] 孙群,胡景江.植物生理学研究技术[M].杨凌:西北农林科技大学出版社,2006.
SUN Q, HU J J. Research technology of plant physiology[M]. Yangling: Northwest A & F University Press, 2006.
- [14] 刘萍,李明军.植物生理学实验技术[M].北京:科学出版社,2007.
LIU P, LI M J. Experimental techniques in plant physiology[M]. Beijing: Science Press, 2007.
- [15] 里程辉,刘志,王宏,等.干旱胁迫下不同中间砧对“岳冠”苹果叶片光合特性及叶绿素荧光特性的影响[J].干旱地区农业研究,2019,37(5):83-91.
LI C H, LIU Z, WANG H, et al. Effects of different inter stocks on photosynthetic and chlorophyll fluorescence characteristics in leaves of “Yueguan” apple under different drought stress conditions[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2019, 37(5): 83-91.
- [16] 周罕觅,张富仓,KJELGREN R,等.苹果幼树生理特性和水分生产率对水肥的响应研究[J].农业机械学报,2015,46(4):77-87.
ZHOU H M, ZHANG F C, KJELGREN R, et al. Response of physiological properties and crop water productivity of young apple tree to water and fertilizer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(4): 77-87.
- [17] 张建锴,曹红霞,潘小燕,等.基于产量和品质的陕北苹果滴灌水量和追施氮量优化研究[J].干旱地区农业研究,2020,38(5): 143-152.
ZHANG J K, CAO H X, PAN X Y, et al. Optimization of drip irrigation and topdressing nitrogen based on apple yield and quality in northern Shaanxi[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020, 38(5): 143-152.
- [18] 罗双龙,马志明,薛亮,等.有机肥与氮肥配施对膜下滴灌西瓜生长、产量和品质的影响[J].干旱地区农业研究,2021,39(1): 136-142.
LUO S L, MA Z M, XUE L, et al. Influence of the combination application of organic manure and nitrogen fertilizer to watermelon growth, yield and quality under mulched drip-irrigation condition[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2021, 39(1): 136-142.
- [19] 孙羲.植物营养原理[M].北京:中国农业出版社,1997.
SUN X. Principles of plant nutrition[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1997.
- [20] 王元基.干旱对苹果品质的影响及其与糖代谢的关系[D].杨凌:西北农林科技大学,2017.
WANG Y J.Effects of drought on apple quality and its relationship with sugar metabolism [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2017.