

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2024.06.007

陈晓林, 陈星宏, 马梦雨, 等. 不同水分处理对甘平果实裂果及相关生理特性的影响 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2024, 46(6): 74-87.

不同水分处理对甘平果实裂果及相关生理特性的影响

陈晓林, 陈星宏, 马梦雨, 马岩岩,
郑永强, 易时来, 吕强, 谢让金

西南大学 柑桔研究所/国家柑橘工程技术研究中心/国家数字种植业(柑橘)创新分中心, 重庆 400712

摘要: 选取易裂果品种甘平作为研究对象, 统计果实发育过程中不同土壤水分变化幅度及不同土壤相对含水量处理下裂果的发生率, 检测各处理下树体及果实相关的生理指标变化, 利用数据统计学探究其与裂果的相关性, 进而解析水分调控对甘平裂果发生率的影响。结果显示, 甘平裂果时间主要发生在盛花后 120~150 d, 即果实膨大期(每年 7-8 月), 属于外裂果。水分控制试验结果显示, 土壤相对含水量 75%、变化幅度 20% 以内能有效控制裂果发生。与其他处理相比, 75% 土壤含水量下植株的光合速率最强, 叶片和果实的相对含水量、水势、N、K 和 Ca 含量显著增高, 果实的总果胶、纤维素质量分数最高, 而 OFR, H_2O_2 , MDA 的摩尔质量最低。相关性分析结果显示, 叶片和果皮的水势和含水量、果皮细胞纤维素和总果胶的质量分数以及活性氧代谢与裂果率显著相关, 推测在适宜的土壤含水量, 植株能有效增强光合作用和抗逆性, 进而通过增加果皮厚度和延展性增强果实的抗裂性。

关键词: 甘平; 裂果; 水分平衡; 细胞壁物质; 活性氧; 酶活性

中图分类号: S666.9 文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2024)06-0074-14

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effect of Different Water Treatments on Fruit Cracking and Related Physiological Characteristics of Kanpei Fruit

CHEN Xiaolin, CHEN Xinghong, MA Mengyu, MA Yanyan,
ZHENG Yongqiang, YI Shilai, LYU Qiang, XIE Rangjin

Citrus Research Institute, Southwest University/National Citrus Engineer Research Center/
National Digital Planting (Citrus) Innovation Sub-Center, Chongqing 400712, China

收稿日期: 2024-01-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(31972991); 国家现代农业产业技术体系建设专项资金项目(CARS-26); 西南大学先导计划项目(SWU-XDZD22004); 重庆市智慧柑橘专项课题(cstc2019jcsx-gksbX0089)。

作者简介: 陈晓林, 硕士研究生, 主要从事柑橘栽培与智慧生理研究。

Abstract: Selecting the crack-susceptible variety Kanpei as the research object, fruit cracking rate under different soil moisture changes and relative soil moisture treatments during fruit development was statistically analyzed. The physiological indicators related to the tree and fruit under each treatment were detected, and the correlations with fruit cracking was studied. Furthermore, the impact of water regulating on the rate of fruit cracking in Kanpei was analyzed. Results showed that the cracking time of Kanpei fruit was mainly at 120~150 days after flowering, which is the fruit swelling period (July-August), with the outer layer cracking. Results of water control experiment showed that under relative soil moisture content of 75%, and the variation less than 20%, the incidence of cracking could be effectively controlled. Compared with other treatments, under 75% soil moisture content, the photosynthetic rate of plants was the strongest, and the relative water content, water potential, N, K, and Ca contents of leaves and fruits were significantly increased. The total pectin and cellulose contents of fruits were the highest, while OFR, H₂O₂, and MDA contents were the lowest. Correlation analysis showed that the water potential and moisture content of leaves and fruit peel, the contents of cellulose and total pectin in fruit peel cells, and the metabolism of reactive oxygen species were significantly correlated with fruit cracking rate. It is speculated that under appropriate soil moisture content, plants can effectively enhance the photosynthesis and stress resistance, and thereby enhance the fruit cracking resistance by increasing the thickness and extensibility of fruit peel.

Key words: Kanpei; fruit cracking; water balance; cell wall substances; reactive oxygen species; enzymatic activity

裂果是柑橘生产中一种常见的生理性病害,是由于果皮与果肉生长不一致造成的。柑橘果肉细胞迅速膨大,果实的膨胀压增大,胀破果皮,从而造成果实开裂。宽皮柑橘、甜橙、柚等品种常有裂果发生,裂果率达20%~30%,严重时可高达70%^[1];另外,红江橙^[2]、锦橙^[3]、脐橙^[4]、温州蜜柑^[5]等品种果实亦有报道裂果的发生。据统计,温州蜜柑裂果率可达20%~40%,锦橙裂果率可达30%~40%,脐橙不同品系裂果率一般在2%~14%^[6]。裂果对果实的商品价值和销售特性造成了严重的负面影响,给柑橘产业带来极大的经济损失。

柑橘裂果在果实膨大期至果实成熟期均有发生^[7],但不同品种的裂果类型和裂果发生时间有较大差异。柑橘裂果主要分为外裂和内裂两种类型,二者都是一个渐变的过程。早期内裂发生在果实的内部,前期内裂果与正常果没有明显差异,不易察觉;中后期果实内裂进一步向外扩展,在果皮表面出现明显的凹凸不平,严重时造成果皮的开裂,如纽荷尔脐橙^[8]和早香柚的内裂^[9];外裂是从果顶或果面开裂,由于角质层受到挤压而出现裂缝,由外向内发展,细胞逐渐变形、破裂,最终海绵组织破裂,直至外果皮断裂,形成明显裂口^[10],如朋娜脐橙的裂果^[11]。

柑橘果实的生长发育受果实含水量的影响,而果实含水量又受空气湿度和土壤水分的双重调节^[12],其中土壤水分直接影响果实含水量,是造成裂果的关键因素。已有研究表明,土壤水分的剧烈变化和水分不合需求均能引发裂果^[13]。剧烈的土壤水分变化会加剧裂果的发生,如改良橙在果实生长过程中,久旱后遇骤雨,裂果现象的发生更为严重^[14]。水分胁迫也会造成柑橘果实裂果,Lima^[15]研究发现,柑橘树体在土壤水分胁迫下会使根系受损,降低了吸水能力,进而导致果皮生长受到抑制,但果肉生长能力不变,果皮生长速率跟不上果肉组织生长速率,最终果肉组织膨压导致裂果。赖呈纯等^[16]研究表明,采用适时喷灌的措施,使土壤含水量保持较均衡并在临界值之上,可有效防止茂谷柑裂果;朱潇婷等^[5]研究发现在干旱处理下,较少的灌水变化幅度会加重温州蜜柑的裂果。水分是果树生长过程中矿质元素吸收和运输的载体,而矿质元素的丰缺影响着果实的发育和代谢进程。周利^[17]研究发现,在水分胁迫条件下纽荷尔脐橙和温州蜜

柑果实的钾、钙、镁元素的吸收随土壤水分减少而降低;许建楷等^[18]报道红江甜橙的正常果实钙含量高于裂果果实,并且发现果实的裂果率与钙含量呈负相关;春季或果实早期施用钾肥可以促进果皮发育,增加果皮厚度,增强果实的抗裂能力,减少收获前果实的开裂^[19].

甘平(*Citrus Kanpei*)是由西之香和椪柑杂交而来的柑橘新品种,具有树势强、果型大等特点,风味独特、糖酸适中、耐贮藏,是一个较有潜力的中晚熟杂柑品种.但该品种裂果率较高,如遇气候条件不利的年份或栽培措施不到位,裂果率可高达七成,该难题制约了甘平品种的大面积推广^[20].重庆地区夏季高温少雨,降雨时间分布不均,甘平裂果尤为严重^[21].柑橘裂果与水分密切相关,但关于甘平裂果防治研究中鲜有控制含水量及变化对减轻裂果的报道,水分对果实开裂内部机理的调控机制研究仍需深入.本试验利用水肥一体化智能灌溉系统,精确控制土壤含水量及水分变化幅度,探究果实内部生理变化及其与裂果的相关性以及有效防控甘平裂果发生的最佳土壤含水量,旨在为甘平优质高效栽培提供技术支撑.

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于 2021—2022 年在西南大学柑桔研究所试验地进行,供试验的柑橘为 6 年生香橙砧甘平(*Citrus Kanpei*),果园施肥和病虫害控制统一按常规进行.试验果园土壤基本肥力状况为:土壤 pH 值为 5.41,有机质 17.75 g/kg,碱解氮 106.19 mg/kg,有效磷 61.84 mg/kg,速效钾 173.82 mg/kg,有效钙 1 853 mg/kg,有效镁 37.46 mg/kg.

1.2 试验设计

1.2.1 土壤水分变化幅度的设置

前期田间调查结果显示甘平裂果与土壤水分变化密切相关,因此于 2021 年对土壤水分变化幅度进行精准调控,共设定 5 个土壤含水量变化阈值,分别是 5% (Δ SWC5, 土壤相对含水量 90%~95%), 20% (Δ SWC20, 土壤相对含水量 75%~95%), 35% (Δ SWC35, 土壤相对含水量 60%~95%), 50% (Δ SWC50, 土壤相对含水量 45%~95%) 和自然降雨(对照, CK),利用水肥一体化灌溉设备监测土壤含水量,低于设定阈值后自动开启灌溉系统,土壤含水量达 95% 时停止灌溉.

1.2.2 土壤相对含水量精准控制设置

于 2021—2022 年探究减少甘平裂果的最佳土壤相对含水量,试验共设 5 个处理,分别将土壤相对含水量设定为 45% ($\pm 5\%$, SWC45), 60% ($\pm 5\%$, SWC60), 75% ($\pm 5\%$, SWC75), 90% ($\pm 5\%$, SWC75) 和自然降雨(对照, CK).自第二次生理落果后开始处理,控制土壤相对含水量保持在 5% 上下限范围内.土壤相对含水量的测定使用土壤温湿度传感器实时监控.

树体根系分布深度在 30~50 cm,每棵树在树冠滴水线放置 4 个滴头,每组处理安装 3 个土壤温湿度传感器相互校正控制土壤含水量,传感器探头埋于滴水线 35~40 cm 深处.试验期间种植区外围开沟,沟深 40 cm,垄上铺设防渗膜导出雨水.两组试验中每处理分别选取 9 株树,每 3 株树为一个重复,共计 3 个生物学重复;第一组试验仅于 2021 年进行裂果统计,第二组试验于 2021—2022 年进行裂果统计且分别采集果实及叶片进行生理指标测定.

1.3 采样与指标测定

1.3.1 样品采集

分别于盛花后 75 d(6 月 5 日)、盛花后 90 d(6 月 20 日)、盛花后 105 d(7 月 5 日)、盛花后 120 d(7 月 20 日)、盛花后 135 d(8 月 4 日)、盛花后 150 d(8 月 19 日)、盛花后 165 d(9 月 3 日)、盛花后 180 d(9 月 17 日)在树冠四周随机采集 20 个大小一致的果实,置于带冰袋的泡沫盒中,带回实验室.用去离子水洗净擦干,使用游标卡尺测量果实赤道部横径和纵径,然后在赤道部横切,用游标卡尺测定果皮厚度,果实硬度

使用GY-4数显硬度计测定,以硬度计穿刺果实赤道面果皮的力表示,单位为N。

在果实裂果高峰期(8月4日),分别采集各处理下的已裂果和未裂果各30个,分为两组,一组测定果实性状后,将果皮果肉分离,于105℃杀青30min,然后80℃烘干至恒质量后研磨成粉用于矿质元素的测定;另一组将果皮和果肉分离,取果皮,混样后用锡箔纸分装,液氮速冻,-80℃冰箱保存,用于测定细胞壁物质、水解酶活性、活性氧含量、抗氧化酶活性。同时采集各处理下当年成熟叶片若干,分为两组,一组立即测定水分指标;另一组于105℃杀青30min,然后80℃烘干至恒质量后研磨成粉用于矿质元素的测定。

1.3.2 指标测定

1) 裂果统计. 在生理落果期结束后,记录每株树的果实总数量,自开始出现裂果时观察并记录裂果果实个数,以后每隔15d记录一次,每次数据采集结束后摘除本次裂果(同时摘除病果),直至果园不再出现裂果,裂果率=(裂果个数/总果数)×100%。

2) 水势测定. 采用露点水势测定系统(美国Wescor Inc公司)测定叶片及果皮水势。

3) 叶片与果皮相对含水量的测定. 相对含水量=(FW-DW)/(TW-DW)×%,式中FW为组织鲜质量,DW为组织干质量,TW为组织浸水4h后测定的饱和质量^[22]。

4) 叶片光合指标的测定. 于裂果高峰期时选择晴朗天气,采用3051D便携式光合仪(浙江托普云农公司)和Handy PEA(英国Hansatech公司)在每次采样前原位测定树体东南西北方向各2片当年生春梢叶片的净光合速率(Pn)、胞间二氧化碳浓度(Ci)、气孔导度(Gs)和蒸腾速率(Tr)。

5) 细胞壁物质含量的测定. 细胞壁物质的提取和分离参照Brummell等^[23]、Toshihiro A等^[24]及魏建梅^[25]的方法,分别提取得到总果胶、可溶性果胶、半纤维素以及纤维素;不同形态的果胶质量分数采用咔唑—硫酸比色法测定,半纤维素质量分数通过蒽酮比色法测定。

6) 细胞壁水解酶活性的测定. 纤维素酶(CL)活性的测定参照Georg等^[26]的方法;果胶酶(PG)活性的测定参照Biz等^[27]的方法。

7) 丙二醛(Malondialdehyde, MDA)、超氧阴离子(Superoxide anion, O₂⁻)和过氧化氢(Hydrogen peroxide, H₂O₂)摩尔质量的测定. MDA摩尔质量测定参照吴会会等^[28]的方法,O₂⁻和H₂O₂的摩尔质量测定参照王爱国等^[29]的方法。

8) 超氧化物歧化酶(Superoxide dismutase, SOD)、过氧化氢酶(Catalase, CAT)、过氧化物酶(Peroxidase, POD)活性的测定. 细胞壁代谢酶的测定参照刘欢^[30]的方法。

9) 矿质营养元素的测定. 将烘干后的组织粉碎过筛,用H₂SO₄-H₂O₂法消煮制备成待测液,分别用半微量凯氏定氮法、钼锑抗比色法、火焰光度法测定N, P, K含量;用HNO₃-HClO₄消煮制备待测液,使用电感耦合等离子体光谱仪测定Ca, Mg含量,元素测定参照鲍士旦^[31]的方法。

10) 气象数据采集. 2021年与2022年的气象数据来源于美国国家海洋和大气管理局(NOAA),包括6—9月各月的主要气象参数^[32](降雨量、平均气温、最高气温、最低气温、日照时数、相对湿度)共6项。

1.4 数据分析

采用Microsoft Excel 2019进行数据统计分析;采用SPSS 25.0进行Duncan's差异显著性检验;采用Origin 2021进行绘图,最终结果以两年统计数据的均值显示。

2 结果与分析

2.1 土壤水分对甘平裂果率的影响

以自然降雨作为对照,采用水肥一体化灌溉设备控制土壤湿度变化幅度,统计各处理下裂果的发生情况(ΔSWC5, ΔSWC20, ΔSWC35和ΔSWC50)。图1a结果显示,随着土壤水分变化幅度增大,甘平裂

果率显著升高. 其中, Δ SWC35 和 Δ SWC50 两个处理与 CK 甘平裂果发生率相近, 30 d 内均达到 20% 以上, Δ SWC5 处理的甘平裂果率最低, 30 d 内低于 10%. 当土壤水分变化幅度高于 20% 时, 果实裂果显著增多, 土壤水分变化幅度在 5% 时, 极显著降低了果实裂果率.

由图 1b 可知, 甘平裂果高峰期出现在盛花后 120~150 d, 即果实膨大期(7 月下旬至 8 月上旬), 与对照相比, SWC75 处理显著降低了甘平果实裂果发生率, 说明土壤含水量在 75% 能有效预防裂果.

对柑橘园所在地区 2021 和 2022 年两年柑橘快速生长期气象数据的分析发现, 在柑橘果实快速膨大时期总体呈现高温少雨, 干旱突出的特征. 6—8 月降雨量少且分布不均匀, 连续降雨日短, 空气湿度变化大, 多为少量降雨后干旱再降雨, 高温干燥天气长. 重庆地区 7—8 月处于伏旱季节, 持续高温寡雨, 相对湿度低, 日照时数长, 在自然降雨后, 果实裂果量剧增(图 1c、图 1d).

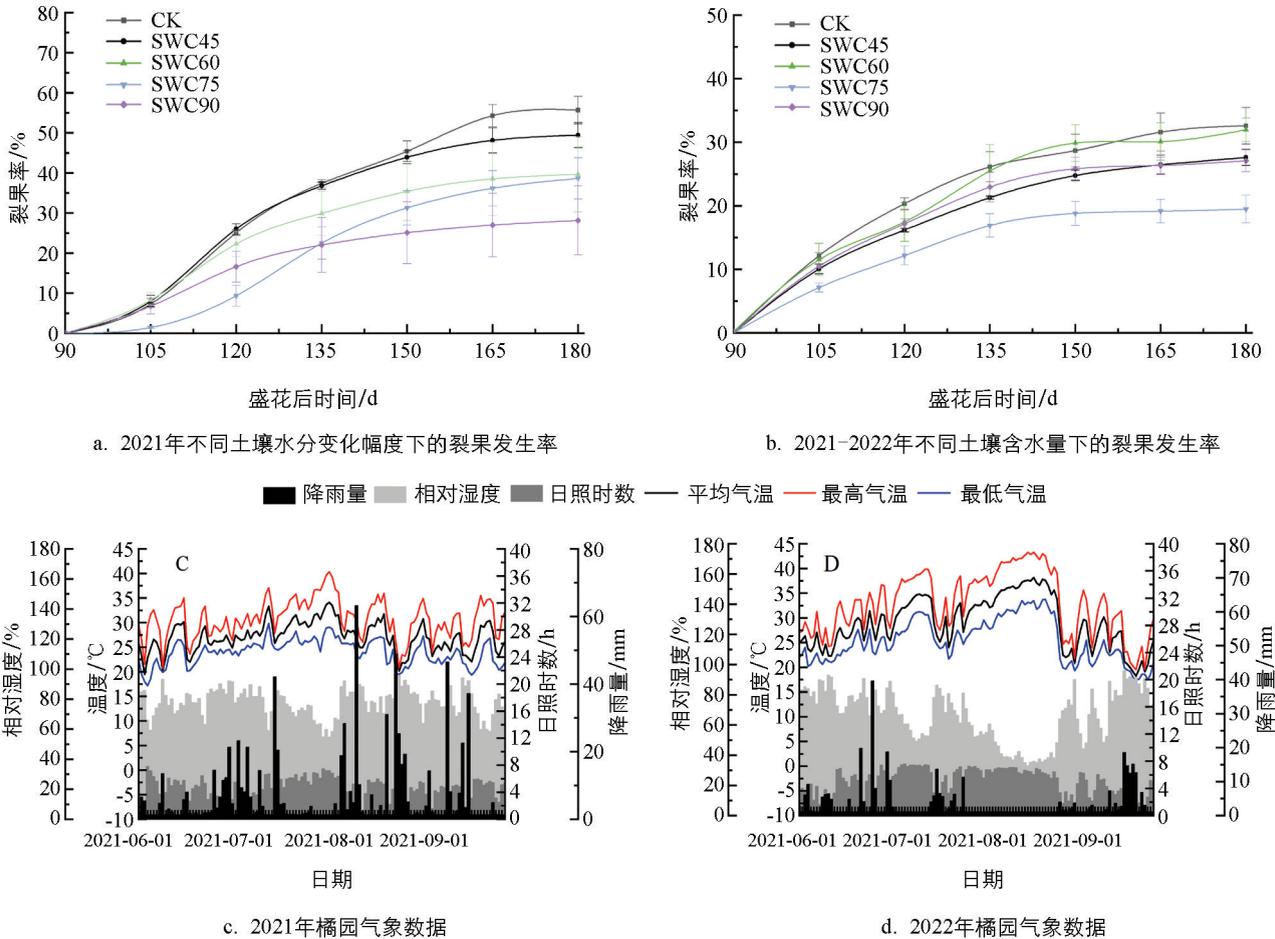


图 1 土壤含水量对甘平裂果的影响及相关气象数据

2.2 正常果与裂果果实生理特征比较

裂果与正常果实生理指标测定显示, 二者的果形指数差异不明显; 正常果的果皮相对含水量低于裂果但差异不明显; 正常果果皮水势显著低于裂果. 此外, 正常果的果皮厚度和果皮硬度分别比裂果高 16.96% 和 18.19% (表 1).

果皮细胞壁成分分析发现, 裂果果皮中总果胶和纤维素的质量分数显著低于正常果果皮, 分别低 6.50% 和 14.01%, 而可溶性果胶与半纤维素的质量分数低于正常果皮但差异不显著; 裂果果皮中果胶酶和纤维素酶的活性显著高于正常果(表 2).

果皮活性氧代谢分析显示, 裂果果皮中 O_2^- 和 H_2O_2 的摩尔质量都显著高于正常果皮, 分别高 26.69% 和 44.90%; 开裂果皮中 MDA 摩尔质量略高但差异不显著; 裂果果皮中 SOD, CAT 和 POD 的活性显著低于正常果, 分别低 16.49%, 19.10% 和 19.96% (表 3).

表 1 甘平正常果与开裂果果实常规指标比较

	果皮相对含水量/ %	果皮水势/ Mpa	果形指数	果皮厚度/ cm	果实硬度/ N
正常果	60.45±0.87a	-4.60±0.25a	0.78±0.01a	2.69±0.04a	53.34±0.85a
开裂果	63.80±1.36a	-4.22±0.18b	0.76±0.01a	2.30±0.06b	45.13±1.35b

注: 同列数据后小写字母不同表示处理间差异有统计学意义($p < 0.05$).

表 2 果皮细胞壁成分及相关水解酶活性比较

	总果胶/ (mg·g ⁻¹)	可溶性果胶/ (mg·g ⁻¹)	纤维素/ (mg·g ⁻¹)	半纤维素/ (mg·g ⁻¹)	果胶酶/ (mg·h ⁻¹ ·g ⁻¹)	纤维素酶/ (mg·h ⁻¹ ·g ⁻¹)
正常果	192.21±11.24a	16.56±2.06a	216.58±16.56a	168.76±36.28a	1.55±0.23b	0.66±0.09b
开裂果	179.72±28.37b	20.12±2.32a	186.24±11.56b	151.09±39.47a	2.31±0.36a	0.77±0.09a

注: 同列数据后小写字母不同表示处理间差异有统计学意义($p < 0.05$).

表 3 活性氧代谢及相关代谢酶活性比较

	超氧阴离子/ (nmol·g ⁻¹)	过氧化氢/ (nmol·g ⁻¹)	丙二醛/ (nmol·g ⁻¹)	超氧化物歧化酶/ (U·g ⁻¹)	过氧化氢酶/ (μmol·min ⁻¹ ·g ⁻¹)	过氧化物酶/ (ΔOD ₄₇₀ ·min ⁻¹ ·g ⁻¹)
正常果	117.58±11.19b	5.85±0.69b	8.46±0.38a	422.21±52.88a	388.25±13.73a	118.48±9.51a
开裂果	148.95±26.18a	8.48±1.78a	9.15±1.00a	352.58±30.15b	314.11±14.89b	94.84±15.55b

注: 同列数据后小写字母不同表示处理间差异有统计学意义($p < 0.05$).

2.3 不同土壤含水量处理对果实生理的影响

2.3.1 不同土壤水分处理下甘平果实生长动态

在各处理条件下, 甘平果实果形指数自盛花期 75 d 后均不断减小(图 2a). 在盛花后 135~150 d 时达到最低, 约为 0.74, 此后果实横径发育减缓, 果形指数逐渐上升, 至膨大期结束, 各处理果形指数基本维持在 0.76 左右.

在整个果实发育期, 75% 和 90% 土壤相对含水量处理下果皮厚度高于其他各处理(图 2b). 盛花后 75 d, 甘平果实快速膨大, 果皮厚度持续变薄, 各处理下的果皮厚度变薄的速率总体上呈现出“快—慢—快”的变化趋势; 盛花后 135 d, 果皮厚度降低的趋势逐渐平缓, 盛花后 180 d; 果实进入转色期, SWC60 和 SWC45 处理的甘平果皮厚度较低, SWC75 处理的果皮最厚, 但各组差异不显著.

随着果实的发育, 果实硬度一直降低(图 2c), 盛花后 75~135 d, 硬度降低速率最快; 盛花后 135 d, 果实硬度缓慢降低, 膨大期结束果实硬度基本维持在 30 N 左右, 各组处理甘平果实硬度变化基本一致, 但不存在显著差异.

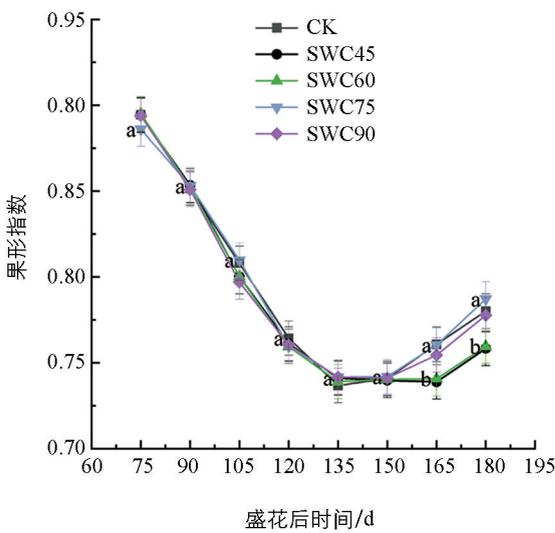
2.3.2 不同土壤水分处理下果皮含水量和水势的差异

由表 4 可知, 土壤含水量在 SWC45 和 SWC60 时, 果皮的水势降低, SWC75 和 SWC90 处理的果皮水势显著高于 CK 和其他处理, 其中, SWC90 处理下的水势略低于 SWC75. 结果显示, 果皮相对含水量随着土壤相对含水量的升高而升高, CK 果皮的相对含水量为 60.26%, SWC45 和 SWC60 处理下的果皮相对含水量与 CK 差异不显著, SWC75 和 SWC90 处理下的果皮相对含水量显著高于 CK.

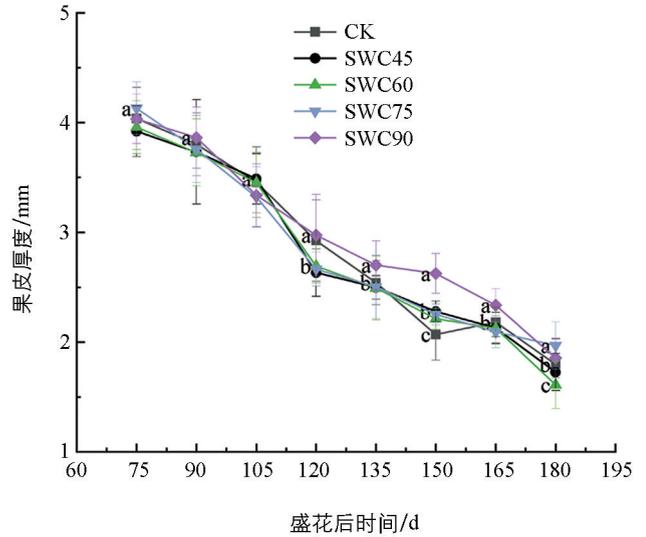
表 4 不同土壤水分条件下果皮含水量差异

处理	果皮相对含水量/%	果皮水势/Mpa
CK	60.26±1.60b	-4.64±0.14ab
SWC45	59.70±1.18b	-4.84±0.21a
SWC60	61.40±1.69b	-4.33±0.21b
SWC75	69.98±2.61a	-3.22±0.21c
SWC90	68.79±1.22a	-3.43±0.29c

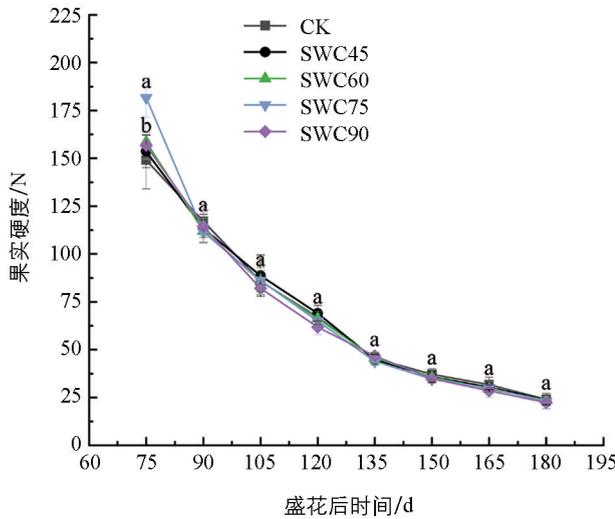
注: 同列数据后小写字母不同表示处理间差异有统计学意义($p < 0.05$).



a. 不同土壤含水量下果形指数的变化



b. 不同土壤含水量下果皮厚度的变化



c. 不同土壤含水量下果实硬度的变化

a, b, c 中同组数据中小写字母不同表示处理间差异有统计学意义($p < 0.05$).

图 2 不同水分下甘平果实生长动态

2.3.3 不同土壤含水量下果皮细胞壁物质质量分数及水解酶活性的差异

从统计结果可以看出, SWC75 和 SWC90 处理下果皮总果胶的质量分数显著高于 CK 和其余处理, 分别为 263.11 mg/g 和 213.90 mg/g; SWC75 处理下果皮可溶性果胶质量分数最低且显著低于其余处理; 果皮纤维素质量分数在 SWC75 处理下最高, 为 272.81 mg/g, SWC45, SWC60 和 SWC90 处理果皮纤维素质量分数与 CK 无明显差异; 果皮半纤维素的质量分数在各处理间不存在显著差异, 但 SWC75 处理的半纤维素质量分数最高, 为 148.46 mg/g. 分析果皮中两种主要细胞壁水解酶在不同土壤水分条件下的活性差异, 结果显示, SWC45 处理下果胶酶活性最高, 且显著高于其余处理, SWC60 和 SWC90 处理的果胶酶活性低于 CK 但无显著差异, SWC75 处理果胶酶活性最低且显著低于其余各处理; 纤维素酶的活性在 SWC45 处理下最高, 其余 4 组处理间纤维素酶活性无明显差异, SWC75 处理下纤维素酶活性最低, 为 0.56 mg/h/g, 与 CK 相比差异不显著, 但显著低于 SWC45(表 5).

表 5 不同土壤水分条件下果皮细胞壁物质的质量分数及水解酶活性的差异

处理	总果胶/ (mg · g ⁻¹)	可溶性果胶/ (mg · g ⁻¹)	纤维素/ (mg · g ⁻¹)	半纤维素/ (mg · g ⁻¹)	果胶酶/ (mg · h ⁻¹ · g ⁻¹)	纤维素酶/ (mg · h ⁻¹ · g ⁻¹)
CK	186.89 ± 10.18c	17.71 ± 1.11ab	229.34 ± 7.18bc	133.72 ± 3.87a	1.54 ± 0.11ab	0.61 ± 0.07ab
SWC45	181.99 ± 5.52c	15.10 ± 1.89b	214.66 ± 10.02c	135.55 ± 4.31a	1.73 ± 0.14a	0.71 ± 0.03a
SWC60	195.12 ± 2.04c	16.87 ± 2.61ab	238.42 ± 9.36b	135.81 ± 3.20a	1.36 ± 0.10b	0.67 ± 0.12ab
SWC75	263.11 ± 8.19a	10.00 ± 1.24c	272.81 ± 8.10a	148.46 ± 9.53a	1.13 ± 0.12c	0.56 ± 0.01b
SWC90	213.90 ± 4.72b	18.59 ± 1.22a	242.99 ± 8.64b	132.37 ± 13.76a	1.35 ± 0.07b	0.64 ± 0.03ab

注: 同列数据后小写字母不同表示处理间差异有统计学意义 ($p < 0.05$).

2.3.4 不同土壤水分处理下果皮活性氧及丙二醛(MDA)代谢的差异

研究表明, 在 SWC60 处理下果皮中 O₂⁻ 的摩尔质量最高且显著高于其余各处理, SWC75 和 SWC90 处理下果皮 O₂⁻ 摩尔质量显著低于 CK, 分别为 92.16 nmol/g、106.30 nmol/g; SWC60, SWC75 和 SWC90 处理下的果皮过氧化氢摩尔质量显著低于 CK; SWC75 和 SWC90 处理果皮的 MDA 摩尔质量显著低于 CK, 其中 SWC75 处理的 MDA 摩尔质量最低, 为 5.22 nmol/g. 分析不同土壤水分条件下甘平果皮中抗氧化酶的活性, 结果表明, 各处理下 SOD 的活性都显著高于 CK, 其中 SWC75 处理下的果皮 SOD 酶活性最高, 为 972.01 U/g; 在 SWC75 处理中, 果皮 CAT 活性为 459.56 μmol/min/g, 显著高于对照; SWC45, SWC75 和 SWC90 处理的 POD 活性显著高于对照, 其中 SWC90 处理最高, SWC75 处理次之(表 6).

表 6 不同土壤水分条件下果皮活性氧代谢的差异

处理	超氧阴离子/ (nmol · g ⁻¹)	过氧化氢/ (nmol · g ⁻¹)	丙二醛/ (nmol · g ⁻¹)	超氧化物歧化酶/ (U · g ⁻¹)	过氧化氢酶/ (μmol · min ⁻¹ · g ⁻¹)	过氧化物酶/ (ΔOD ₄₇₀ · min ⁻¹ · g ⁻¹)
CK	110.34 ± 4.42b	6.41 ± 0.28a	8.40 ± 0.10a	352.80 ± 7.28d	380.85 ± 6.32b	111.93 ± 5.91c
SWC45	113.11 ± 4.28b	6.02 ± 0.53ab	8.70 ± 0.40a	416.99 ± 62.27c	385.41 ± 15.59b	129.90 ± 1.85b
SWC60	129.28 ± 12.21a	5.11 ± 0.44bc	8.29 ± 0.52a	774.99 ± 91.50b	398.50 ± 14.82b	113.60 ± 5.35c
SWC75	92.16 ± 1.84c	4.41 ± 0.79c	5.22 ± 0.45c	972.00 ± 16.52a	459.56 ± 13.76a	135.81 ± 9.96b
SWC90	102.30 ± 1.50bc	4.19 ± 0.76c	6.60 ± 0.28b	709.68 ± 10.11b	317.29 ± 15.38c	161.31 ± 5.59a

注: 同列数据后小写字母不同表示处理间差异有统计学意义 ($p < 0.05$).

2.3.5 不同土壤水分处理下果实矿质营养的差异

SWC45, SWC60 和 SWC75 中 N 含量与土壤相对含水量呈正比, SWC75 处理下的果皮和果肉中 N 含量最高, SWC90 处理的果皮与果肉中 N 含量同样有所降低. SWC45 和 SWC60 处理果皮中的 P 含量显著低于其余处理, SWC45 处理果肉中的 P 含量最低. SWC75 处理下的果皮与果肉中 K 含量也显著高于其余处理. 在果皮和果肉中 SWC75 的 Ca 含量最高, 且果实膨大期果皮钙含量高于果肉. 此外, 随土壤含水量的增加, 果实对 Ca 的吸收增加, 但当土壤相对含水量达 90% 时, 叶片和果实对 Ca 的吸收降低. 果皮中不同水分处理下 Mg 含量不存在显著差异, 果肉中的 Mg 含量在 SWC45 处理下含量极低, 仅为 0.69 g/kg, 显著低于其余处理, 与 CK 相比低 45.24%, SWC75 处理下果肉 Mg 含量最高, 且显著高于其余处理(表 7).

表 7 不同土壤水分条件下果实矿质营养含量的差异

部位	处理	N/%	P/%	K/%	Ca/(g·kg ⁻¹)	Mg/(g·kg ⁻¹)
果皮	CK	2.25±0.07b	0.24±0.04a	1.39±0.08c	7.28±0.44b	1.45±0.26a
	SWC45	2.23±0.59b	0.17±0.01c	1.49±0.05c	7.33±0.58b	1.78±0.22a
	SWC60	2.46±0.10ab	0.19±0.01bc	1.72±0.05b	7.97±0.21b	1.55±0.27a
	SWC75	2.82±0.27a	0.23±0.04ab	1.88±0.08a	9.48±0.92a	1.56±0.20a
	SWC90	2.26±0.33b	0.24±0.03a	1.67±0.14b	7.81±0.85b	1.50±0.17a
果肉	CK	2.52±0.15ab	0.38±0.38a	2.27±0.08bc	5.73±0.44ab	1.26±0.20b
	SWC45	1.67±0.16c	0.33±0.33c	2.12±0.08d	4.70±0.42c	0.69±0.16c
	SWC60	2.59±0.14ab	0.37±0.37ab	2.14±0.08cd	6.12±0.47ab	1.38±0.14b
	SWC75	2.68±0.60a	0.34±0.34bc	2.94±0.04a	6.39±0.84a	1.67±0.11a
	SWC90	2.14±0.44bc	0.39±0.39a	2.40±0.18b	5.45±0.55bc	1.38±0.21b

注：同列数据后小写字母不同表示处理间差异有统计学意义($p < 0.05$)。

2.4 不同土壤水分处理对植株生理的影响

2.4.1 不同土壤水分下叶片含水的差异

由表 8 可知,在不同土壤水分下,叶片与果皮的水势差异趋势一致,土壤含水量降低时,叶片水势均降低,SWC75 和 SWC90 处理的叶片水势显著高于 CK 和其余处理,其中,SWC75 处理下的水势最高,SWC60 处理下的水势与 CK 差异不显著.叶片相对含水量随着土壤相对含水量的升高而升高,CK 叶片的相对含水量为 56.39%,SWC45 和 SWC60 处理下的叶片相对含水量与 CK 差异不显著,SWC75 和 SWC90 处理下的叶片相对含水量显著高于 CK.

表 8 不同土壤水分条件下叶片含水量的差异

处理	叶片相对含水量/%	叶片水势/Mpa
CK	56.39±2.86b	-2.67±0.14b
SWC45	55.90±2.07b	-3.17±0.14a
SWC60	57.77±1.55b	-2.52±0.18b
SWC75	65.31±2.11a	-2.02±0.18c
SWC90	65.04±2.24a	-2.22±0.29c

2.4.2 不同土壤水分下叶片矿质营养的差异

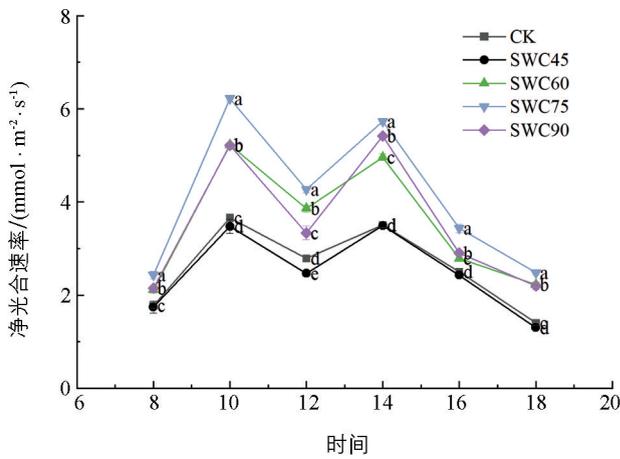
甘平叶片中氮(N)含量随着土壤含水量的增加而增加,SWC75 处理下的叶片 N 含量显著高于其余处理;不同水分处理下叶片磷(P)含量无显著差异;叶片中 CK 的钾(K)含量最低,SWC45 和 SWC60 处理的叶片 K 含量高于 CK 但差异不显著,SWC75 处理的叶片 K 含量最高且显著高于其余处理,与 CK 相比高 32.97%;SWC45 处理的叶片钙(Ca)含量最低,与 CK 相比无差异,但显著低于其他处理;SWC60,SWC75 和 SWC90 处理叶片中 Ca 含量显著高于 CK 和 SWC45,其中 SWC75 处理 Ca 含量最高.结果还表明,随着干旱胁迫的减轻,叶片对 Ca 的吸收增加;SWC45 处理的叶片中镁(Mg)含量显著低于其余处理,SWC75 处理的叶片 Mg 含量最高(表 9).

表 9 不同土壤水分条件下叶片矿质营养的差异

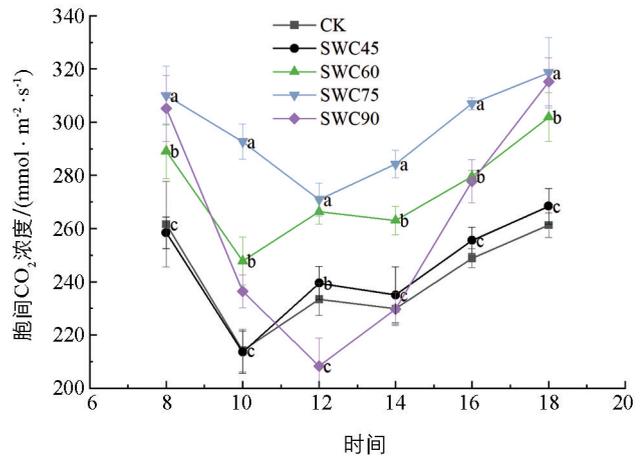
部位	处理	N/%	P/%	K/%	Ca/(g · kg ⁻¹)	Mg/(g · kg ⁻¹)
叶片	CK	2.60±0.15b	0.31±0.02a	1.85±0.11c	31.17±2.52bc	1.78±0.29ab
	SWC45	2.52±0.14b	0.29±0.05a	1.95±0.03bc	28.38±3.44c	1.60±0.75b
	SWC60	2.63±0.16b	0.29±0.01a	1.95±0.12bc	34.19±1.34ab	1.84±0.16ab
	SWC75	2.91±0.13a	0.33±0.02a	2.46±0.08a	35.29±2.41a	2.33±0.33a
	SWC90	2.73±0.20ab	0.34±0.03a	2.06±0.23b	32.50±3.40ab	1.76±0.16a

2.4.3 水分处理对植株光合作用的影响

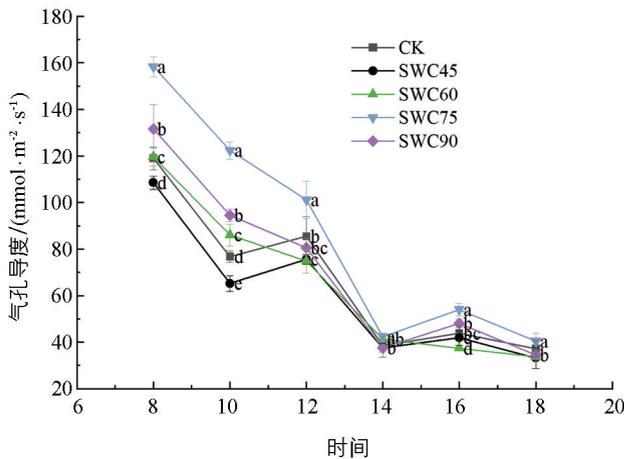
从图 3 可以看出, SWC75 处理下的植株光合指标显著高于其余处理, 各处理的 Pn 日变化整体呈现“M”状, 在 12:00 出现“午休现象”, 且 Pn 随着土壤含水量的升高呈先升高后降低的趋势; 与 CK 相比, SWC75 处理的 Pn 显著提高 ($p < 0.05$).



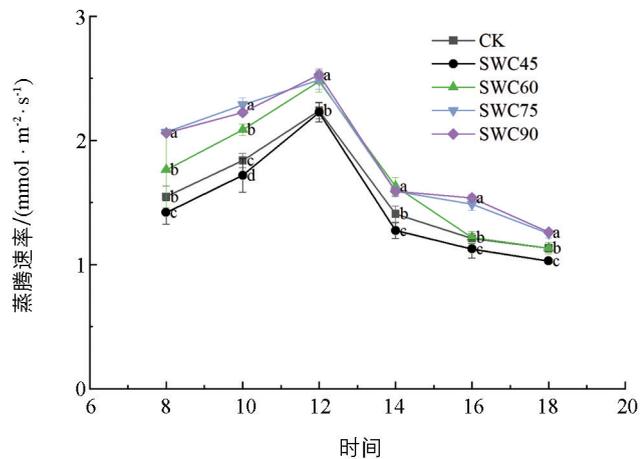
a. 不同土壤含水量下叶片净光合速率差异



b. 不同土壤含水量下叶片胞间CO₂浓度差异



c. 不同土壤含水量下叶片气孔导度差异



d. 不同土壤含水量下叶片蒸腾速率差异

a, b, c, d 中同组数据中小写字母不同表示处理间差异有统计学意义 ($p < 0.05$).

图 3 不同土壤含水量下甘平植株光合作用差异

各处理中以 SWC75 的 Pn 最高, 且在全日各时段均高于其余处理; 各处理的 Ci 日变化整体呈现“V”型, 除 SWC45 处理外, 其余处理与 CK 差异均达显著水平 ($p < 0.05$), 且 SWC75 和 SWC90 处理的各时间段 Ci 显著高于 CK ($p < 0.05$), SWC90 处理 Ci 日变化最剧烈. 各处理的 Gs 日变化整体呈现下凹型, 在整日变化中, SWC75 处理的 Gs 日变化显著高于其余处理 ($p < 0.05$), SWC90 处理次之, 处理间 SWC75 的

Gs 整日都高于其余处理. 各处理的 Tr 的日变化总体上呈倒“V”型, 8:00—12:00 各组处理 Tr 均不断升高, 12:00 后 Tr 开始降低. CK 日均 Tr 为 $1.56 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, SWC45 处理日均 Tr 与 CK 无显著差异 ($p > 0.05$), SWC60, SWC75, SWC90 处理日均 Tr 显著高于 CK ($p < 0.05$), 其中 SWC75 和 SWC90 处理 Tr 始终高于其余处理.

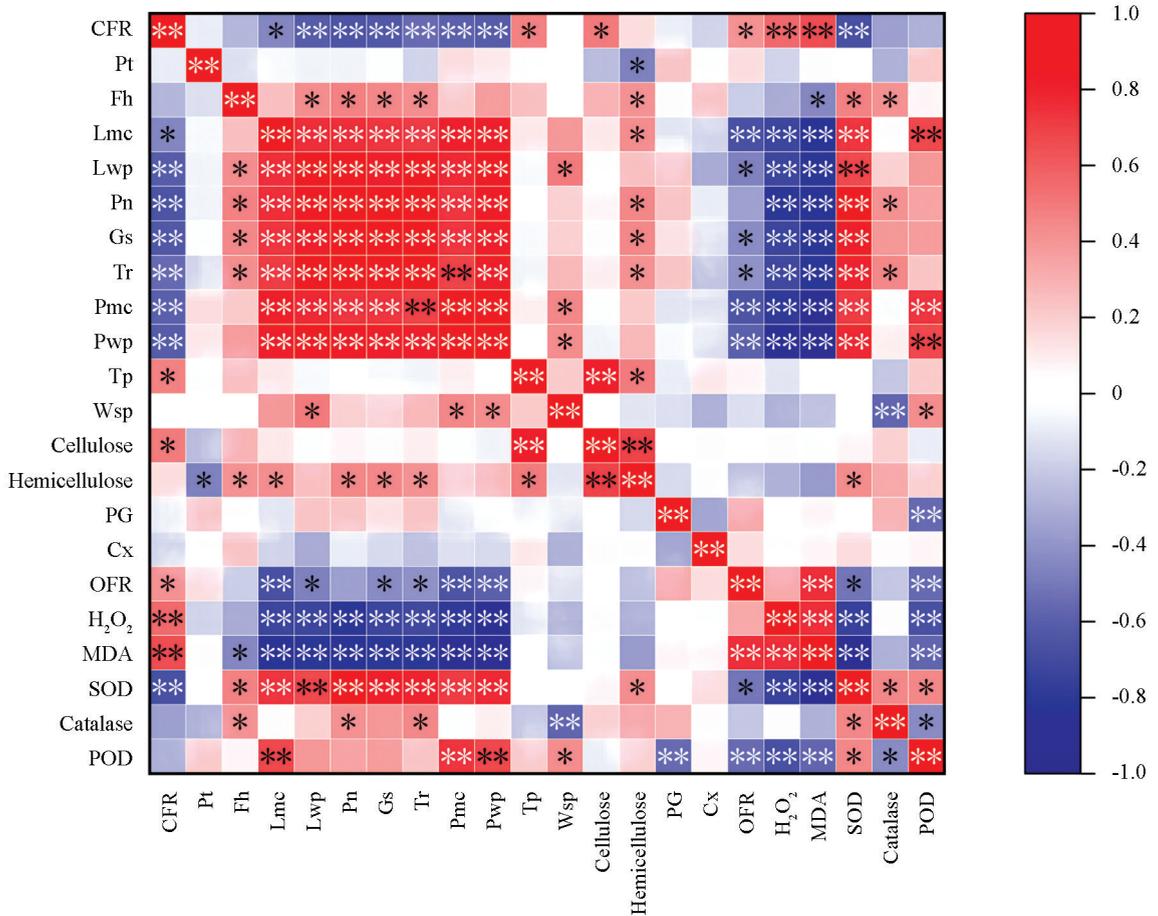
2.5 裂果因素的主成分分析

如表 10 所示, 根据主成分分析结果可知, 叶片含水量、叶片水势、净光合速率、气孔导度、蒸腾速率、果皮含水量、果皮水势、果皮超氧阴离子摩尔质量、果皮过氧化氢摩尔质量、果皮丙二醛摩尔质量、果皮超氧化物歧化酶活性、果皮过氧化物酶活性(第一主成分中红色字体)是引起裂果的主要因素.

表 10 主成分得分系数、特征值及贡献率

指标	第一主成分	第二主成分	第三主成分	第四主成分	第五主成分
裂果率	-0.663	0.225	0.545	0.298	-0.107
果皮厚度	-0.030	-0.505	-0.096	0.162	0.635
果实硬度	0.462	0.476	-0.001	-0.102	0.262
叶片含水量	0.875	-0.080	0.224	0.013	-0.151
叶片水势	0.893	-0.058	-0.108	0.308	-0.090
净光合速率	0.925	0.187	-0.175	0.119	0.117
气孔导度	0.900	0.137	-0.160	0.093	0.029
蒸腾速率	0.891	0.191	-0.203	0.237	-0.090
果皮含水量	0.894	-0.287	0.164	0.001	0.016
果皮水势	0.944	-0.198	0.051	0.046	0.035
果皮总果胶	0.029	0.384	0.779	0.192	0.321
果皮可溶性果胶	0.318	-0.462	0.450	0.446	-0.110
果皮纤维素	0.034	0.724	0.564	0.209	0.083
果皮半纤维素	0.410	0.705	0.414	-0.063	-0.109
果皮果胶酶	0.004	0.208	-0.537	0.680	0.271
果皮纤维素酶	-0.105	0.163	0.062	-0.717	0.507
果皮超氧阴离子	-0.625	0.101	-0.128	0.318	0.472
果皮过氧化氢	-0.849	0.168	-0.100	-0.025	-0.317
果皮丙二醛	-0.954	0.004	0.013	0.121	0.084
果皮超氧化物歧化酶	0.885	0.182	-0.129	-0.212	0.173
果皮过氧化氢酶	0.259	0.685	-0.574	-0.165	-0.121
果皮过氧化物酶	0.590	-0.472	0.535	-0.288	0.072
特征值	9.868	2.970	2.745	1.834	1.382
贡献率/%	44.854	13.500	12.477	8.335	6.282
累积百分率/%	44.854	58.354	70.831	79.166	85.448

相关性分析可知, 甘平果实裂果率与叶片水势、净光合速率、气孔导度和蒸腾速率呈极显著负相关, 与叶片含水量呈显著负相关. 甘平果实果皮生理指标中, 裂果率与过氧化氢摩尔质量和 MDA 摩尔质量呈极显著正相关, 与 O_2^- 摩尔质量呈显著正相关; 裂果率与果皮含水量、果皮水势、总果胶质量分数、纤维素质量分数及超氧化物歧化酶活性呈极显著负相关(图 4).



**表示 $p < 0.01$ (双尾), 相关性显著; *表示 $p < 0.05$ (双尾), 相关性显著。

图4 裂果率与各生理指标间相关性分析

3 讨论

甘平是优良晚熟柑橘新品种,具有较高的商业价值,但是甘平高裂果性严重影响其大面积推广。关于柑橘裂果因素前人已有不少研究报道,但是结论分歧较大^[1-3, 33]。本研究田间调研显示甘平裂果发生在盛花后 90~180 d,裂果高峰集中在盛花后 120~150 d,即果实快速膨大期。甘平裂果主要是果皮纵、横向裂的外裂形式,短时间内大幅度的土壤水分变化使根系快速吸收水分,而果皮生长速率低于果肉生长速率,果实内部膨压增加,导致表皮胀裂而出现裂果。本研究发现,75%的土壤含水量及 20%以内土壤水分变化幅度能有效降低甘平的裂果,所以控制土壤含水量变化的平衡对防控裂果具有重要意义。

适宜的土壤水分会增加果皮的硬度和厚度,从而有利于果皮发育进而缓冲生长压力、减轻裂果^[34]。本试验中土壤含水量 75%时,甘平果皮的厚度及硬度均最高,果皮的强度和延伸性决定了果实的抗裂性,并与果皮细胞壁物质的组成密切相关^[35]。果皮中总果胶和纤维素质量分数与甘平裂果率呈显著负相关,随着干旱胁迫程度的加重,果实中果胶和纤维素大量降解,水解酶活性增强,果皮细胞壁稳定性降低,裂果也随之增多,这与前人研究结果相一致^[36-37]。表明水分在果皮的细胞壁代谢和发育中发挥重要作用,影响果皮细胞壁强度与完整性,进而影响裂果的易感性。

活性氧代谢的失衡会加剧细胞损伤,增强膜质过氧化水平,降低植物抗性^[38]。本试验主成分和相关性分析结果显示 H₂O₂, MDA 和 O₂⁻ 摩尔质量与甘平裂果率呈显著正相关,抗氧化酶活性与甘平裂果率呈显著负相关。活性氧代谢失衡会增加果皮对环境变化的敏感性,进而导致果实开裂^[31]。在干旱和水分胁迫下 O₂⁻, H₂O₂ 和 MDA 摩尔质量均增加,造成细胞损害,导致裂果增多;在土壤含水量 75%时,抗氧化酶活性高,活性氧累积量低,裂果最少。表明水分调控可以通过维持果实代谢平衡进而减少裂果。

矿质元素是柑橘正常生命活动必不可缺的营养成分,营养物质不足会导致果实中的发育和代谢紊乱. 研究结果显示,不同土壤水分处理下,甘平中的 N, K 和 Ca 差异较大. N 影响果树的生理生化过程和植株长势^[39]; K 可以维持高渗透压和膨压,有研究表明,陷痕果果皮中的 K 含量高于正常果皮^[40]. 在春季或果实发育早期施用钾肥可促进果皮发育,增加果皮厚度,增强果实抗开裂能力,减少收获前果实开裂^[41]. Ca^{2+} 含量与柑橘裂果呈显著负相关,如红江甜橙^[2]和锦橙^[3]的裂果及 Ca 含量显著低于正常果,这与本试验的研究结果一致. 柑橘果实的生长发育和品质形成需要叶片供应养分,叶片各营养元素的丰缺对柑橘的产量和品质有重要影响^[42]. 周上铃^[43]报道,水分亏缺会降低柑橘叶片对 N, P, K, Ca 等矿质元素的吸收,进而影响果实对矿质营养的吸收与利用,本试验结果也证实了维持适宜的土壤含水量可以促进植株内营养物质的运输,减少裂果.

4 结论

甘平裂果时间主要发生在果实膨大期,即每年 7—8 月,属于外裂果. 土壤相对含水量 75%、变化幅度 20% 以内能有效控制裂果发生,该水分条件下甘平果皮细胞壁物质相对稳定,抗氧化酶活性较高,活性氧代谢平衡,植株和果实对营养物质的吸收较强,甘平裂果率达最低. 因此,在膨大期合理进行水分管理,保持稳定适宜的土壤含水量是促进甘平果实发育和植株生长、降低柑橘果实开裂的有效措施.

参考文献:

- [1] 周立,陈品文,蒲成伟,等. 柑橘裂果的主要原因及预防措施研究进展 [J]. 现代农业科技, 2022(13): 35-38.
- [2] 邹河清,许建楷. 红江橙的果皮结构与裂果的关系研究 [J]. 华南农业大学学报, 1995, 16(1): 90-96.
- [3] 温明霞,石孝均. 锦橙裂果的钙素营养生理及施钙效果研究 [J]. 中国农业科学, 2012, 45(6): 1127-1134.
- [4] 陈继群,刘丽贞,陈杰忠,等. 不同钙处理对脐橙裂果及其细胞壁酶活性的影响 [J]. 华南农业大学学报, 2014, 35(6): 29-32.
- [5] 朱潇婷,金国强. 灌溉对宫川温州蜜柑裂果的影响 [J]. 中国南方果树, 2016, 45(1): 46-48.
- [6] 叶先桂. 增施钾肥预防柑桔裂果 [J]. 中国柑桔, 1992, 21(2): 41.
- [7] 李蕾. 脐橙果皮发育与裂果发生的解剖学研究 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2006.
- [8] WANG J Q, SUN L, XIE L, et al. Regulation of Cuticle Formation during Fruit Development and Ripening in 'Newhall' Navel Orange (*Citrus sinensis* Osbeck) Revealed by Transcriptomic and Metabolomic Profiling [J]. Plant Science: an International Journal of Experimental Plant Biology, 2016, 243: 131-144.
- [9] 刘冬峰,林绍生,陈巍,等. 异花授粉对柚果实代谢产物的影响及其与内裂的关系 [J]. 核农学报, 2021, 35(2): 271-279.
- [10] 马小焕,赖九江,阮树堂,等. 柑桔裂果的种类、特点及影响因素 [J]. 中国南方果树, 2014, 43(5): 21-24.
- [11] 李娟,陈杰忠,万继锋,等. 朋娜和华盛顿脐橙果皮结构与裂果类型的关系 [J]. 热带作物学报, 2011, 32(5): 921-925.
- [12] 徐跃兴. 塔罗科血橙新系裂果成因与调控研究 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2010.
- [13] NIRALA S K, SURESH R. Effect of Water Sprinkling over Tree Canopy on Fruit Cracking, Quality and Yield of Litchi Fruits [J]. International Journal of Environment and Climate Change, 2022: 1573-1581.
- [14] 朱庆竖,李华,廖伟平. 改良橙的果实发育与裂果防止试验 [J]. 中国南方果树, 2006, 35(4): 6-7.
- [15] LIMA J E O, DAVIES F S, KREZDORN A H. Factors Associated with Excessive Fruit Drop of Navel Orange1 [J]. Journal of the American Society for Horticultural Science, 1980, 105(6): 902-906.
- [16] 赖呈纯,黄贤贵,王琦,等. 果实生长与果园土壤含水量的变化对'茂谷柑'裂果的影响 [J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2019, 48(4): 434-439.
- [17] 周利. 水分胁迫及不同肥料处理对柑橘营养和生理特性的影响 [D]. 长沙: 湖南农业大学, 2010.
- [18] 许建楷,陈杰忠,邹河清,等. 钙与红江橙裂果的关系研究 [J]. 华南农业大学学报, 1994, 15(3): 77-81.
- [19] K. D Y, K. Y M, PARVATI D, et al. Effect of Foliar Application of Micronutrients on Yield and Quality of Pomegranate [J]. International Journal of Bio-resource and Stress Management, 2022, 13 (9): 914-920.
- [20] 柯甫志,徐建国,罗君琴,等. 2 个晚熟高糖柑橘新品种引种的品质表现 [J]. 浙江柑橘, 2014, 31(1): 17-18.
- [21] 江东,孙珍珠,王婷,等. 杂柑'甘平'在重庆北碚的引种表现及栽培技术 [J]. 中国南方果树, 2017, 46(1): 32-33, 36.

- [22] 徐文,冯雅婷,朱士江,等.水分调控及生物炭对柑橘土壤和叶片养分的影响[J].排灌机械工程学报,2023,41(9):966-972.
- [23] BRUMMELL D A, BOWEN J K, GAPPER N E. Biotechnological Approaches for Controlling Postharvest Fruit Softening [J]. Current Opinion in Biotechnology, 2022, 78: 102786.
- [24] ARAE T, NAKAKOJI M, NOGUUCHI M, et al. Plant Secondary Cell Wall Proteome Analysis with an Inducible System for Xylem Vessel Cell Differentiation [J]. Dev Growth Differ, 2022, 64(1): 5-15.
- [25] 魏建梅. 苹果(*Malus domestica* Borkh.)果实质地品质发育及采后调控的生理和分子基础[D].杨凌:西北农林科技大学,2009.
- [26] GEORG N, KAIRI K, SANA O B, et al. Amperometric Method for the Determination of Cellulase Activity and its Optimization using Response Surface Method [J]. Journal of Analytical Science and Technology, 2022, 13(1): 21.
- [27] BIZ A, FARIAS F C, MOTTER F A, et al. Pectinase Activity Determination: an Early Deceleration in the Release of Reducing Sugars Throws a Spanner in the Works! [J]. PLoS One, 2014, 9(10): e109529.
- [28] 吴会会,邹英宁,吴强盛.干旱胁迫下AMF对盆栽枳实生苗生长和活性氧代谢的影响[J].中国南方果树,2018,47(2):36-38,45.
- [29] 王爱国,邵从本,罗广华,等.活性氧对大豆下胚轴线粒体结构与功能的损伤[J].植物生理学报,1990,16(1):13-18.
- [30] 刘欢.枣果皮结构及细胞壁代谢酶活性与抗裂果关系的研究[D].阿拉尔:塔里木大学,2019.
- [31] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000.
- [32] YU L R, ZHANG X M, ZHANG F, et al. Chitosan and Chitooligosaccharide Regulated Reactive Oxygen Species Homeostasis at Wounds of Pear Fruit during Healing [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 240: 124395.
- [33] 周平,高鹏,陈文彬,等.不同水分处理下柑橘树光合参数对水分及气象因素的响应[J].节水灌溉,2022(6):90-95.
- [34] 陈桂芬,黄玉溢,熊柳梅,等.不同柑橘品种裂果比较及施钙对柑橘的影响效应[J].中国园艺文摘,2013,29(1):1-2,32.
- [35] QIUYAN B, TONGJIN L, KUN N, et al. Effect of Calcium Treatment on the Browning of Harvested Eggplant Fruits and its Relation to the Metabolisms of Reactive Oxygen Species (ROS) and Phenolics [J]. Food Science Nutrition, 2021, 9(10): 5567-5574.
- [36] ZHANG C, ZHAO Y, JIANG F, et al. Differences of Reactive Oxygen Species Metabolism in top, Middle and Bottom part of Epicarp and Mesocarp Influence Tomato Fruit Cracking [J]. The Journal of Horticultural Science and Biotechnology, 2020: 1-11.
- [37] 张蓓,刘林婷,刘若南,等.钙与IAA对易裂果蜜广橘果皮活性氧代谢和相关抗氧化基因表达的影响[J].果树学报,2021,38(12):2034-2044.
- [38] 何苇竹.我国柑橘叶片矿质养分含量标准的建立及营养诊断[D].武汉:华中农业大学,2020.
- [39] 罗雅尹.施氮水平对柑橘(春见)生长及品质的影响研究[D].重庆:西南大学,2023.
- [40] YUN J, CUNLONG S, QIAOYUN S. Integrated Physiological and Metabolomic Analyses of the Effect of Potassium Fertilizer on Citrus Fruit Splitting [J]. Plants, 2022, 11(4): 499-499.
- [41] GUPTA V, DAS P R, BHATTA D, et al. Effect of Boron and Potash on Control of Fruit Splitting and Fruit Drop in Mango (*Mangifera indica* L.) cv. Amrapali [J]. Advances in Life Sciences, 2016, 5(6): 2093-2099.
- [42] 王强,王秀琪,曾明.钙处理对纽荷尔脐橙裂果及果实品质的影响[J].西南农业学报,2013,26(1):308-311.
- [43] 周上铃.柠檬园土壤养分、叶片营养与果实品质的相关性研究[D].重庆:西南大学,2021.