



中国南方果树  
South China Fruits  
ISSN 1007-1431, CN 50-1112/S

## 《中国南方果树》网络首发论文

题目： 淹水胁迫对对萼猕猴桃光合特性的影响  
作者： 徐零零，徐艳玲，高建有，张帆靖，王发明，查满荣，刘世彪  
DOI： 10.13938/j.issn.1007-1431.20240570  
网络首发日期： 2025-06-20  
引用格式： 徐零零，徐艳玲，高建有，张帆靖，王发明，查满荣，刘世彪. 淹水胁迫对对萼猕猴桃光合特性的影响[J/OL]. 中国南方果树.  
<https://doi.org/10.13938/j.issn.1007-1431.20240570>



**网络首发：**在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认：**纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI: 10.13938/j.issn.1007-1431.20240570

## 淹水胁迫对对萼猕猴桃光合特性的影响

徐零零<sup>1</sup>, 徐艳玲<sup>1</sup>, 高建有<sup>2</sup>, 张帆靖<sup>1</sup>, 王发明<sup>2</sup>, 查满荣<sup>1</sup>, 刘世彪<sup>1</sup>

1 吉首大学生物资源与环境科学学院, 湖南吉首, 416000; 2 广西壮族自治区中国科学院广西植物研究所, 广西桂林, 541006

**摘要** 对萼猕猴桃 (*Actinidia valvata*) 耐涝性强, 被作为猕猴桃耐涝砧木广泛应用。为了解其耐涝生理机制及淹水胁迫对其光合特性的影响, 以对萼猕猴桃“水秀”品种一年生实生苗为试验材料, 以中华猕猴桃“红阳”品种一年生实生苗为对照材料, 以盆栽正常管理为对照, 测定了淹水处理下叶绿素相对含量 (SPAD 值)、叶绿素荧光参数及光合作用指标的变化。结果表明, 连续淹水 10 d “水秀”没有出现明显受害症状, 叶片叶绿素相对含量与正常管理对照相比无显著变化; 叶绿素荧光参数在淹水初期虽有波动, 但能迅速调整至正常水平并与正常栽培对照基本持平; 淹水胁迫下净光合速率与气孔导度显著下降, 仍能维持约为对照 60% 的水平。“红阳”则随着淹水胁迫的持续, 植株受害严重直至死亡, 其间叶绿素含量降低, 叶绿素荧光参数和光合作用指标在后期与正常栽培对照显著偏离, 净光合速率趋近于 0。淹水胁迫对对萼猕猴桃光合特性的影响较轻, 可能与其通过气孔限制来调控光合作用有关。

**关键词** 对萼猕猴桃; 淹水胁迫; 叶绿素含量; 叶绿素荧光参数; 光合特性

## Effects of waterlogging stress on the photosynthetic properties of *Actinidia valvata*

XU Lingling<sup>1</sup>, XU Yanling<sup>1</sup>, GAO Jianyou<sup>2</sup>, ZHANG Fanjing<sup>1</sup>, WANG Faming<sup>2</sup>, ZHA Manrong<sup>1</sup>, LIU Shibiao<sup>1</sup>

1 College of Biology and Environmental Sciences, Jishou University, Jishou 416000, Hunan, China; 2 Guangxi Institute of Botany, Guangxi Zhuang Autonomous Region and Chinese Academy of Sciences, Guilin 541006, Guangxi, China

**Abstract** *Actinidia valvata* is widely used as rootstock with its strong ability of waterlogging tolerance. In order to understand the waterlogging tolerance mechanism of this species, the annual seedlings of *Actinidia valvata* ‘Shuixiu’ were employed as the treatment materials and those of *A. chinensis* ‘Hongyang’ were used as control species in this paper. Based on potting flooding experiment, the changes of relative content of chlorophyll (SPAD), chlorophyll fluorescence parameters and index of photosynthesis were determined, and the effects of water stress on the photosynthetic parameters of the above two species were analyzed. The results showed that after 10 days of waterlogging, no obvious harmful phenotype symptoms were expressed in *A. valvata* ‘Shuixiu’, less changes were occurred in the values of SPAD compared with the control plants in normal cultivation. The chlorophyll fluorescence parameters fluctuated in the early stages during waterlogging treatment, but adjusted quickly to normal level and essentially equal to the control. The descent in net photosynthetic rate and stomatal conductance under waterlogging stress was significant, which still maintained about 60% of the control plants, bothly. However, the control species of *A. chinensis* ‘Hongyang’ experienced serious damage and even to death in 10 days of waterlogging stress, during which the SPAD value decreased, the chlorophyll fluorescence parameters and photosynthetic index deviated significantly when compared with the control plants in normal cultivation, and the net photosynthetic rate approached to 0 at the last day of treatment. Waterlogging stress expressed less effect on photosynthesis in *A. valvata* may revolve in its regulation the photosynthetic properties by stomatal limitation.

基金项目：国家自然科学基金 (32160084)；湖南省自然科学基金 (2023JJ30488)；湖南省教育厅科学研究项目 (23B0502) 资助。

第一作者：徐零零 (2000—)，女，在读硕士研究生。E-mail: x18379268826@163.com

共同通信作者：查满荣，博士，副教授，研究方向为作物生理生态。E-mail: zmr0729@163.com

刘世彪，博士，教授，研究方向为植物学。E-mail: liushibiao\_1@163.com

**Keywords** *Actinidia valvata*; waterlogging stress; chlorophyll content; chlorophyll fluorescence parameters; photosynthetic characteristics

水分作为重要的环境因子对作物形态结构、生理生化及地理分布等起着至关重要的调控作用。生产中许多作物都面临淹水胁迫的问题,植株遭受不同程度伤害,严重时甚至会死亡,从而导致作物减产和经济损失。涝害时,植物根部和茎部的 O<sub>2</sub> 和 CO<sub>2</sub> 扩散速率显著降低,初生根可能会因缺氧胁迫而死亡,一些植物能够形成不定根或通气组织来减缓涝害影响<sup>[1]</sup>;植物的有氧呼吸受到显著抑制,需要通过糖酵解和乙醇发酵等方式获得必要的能量供应,还诱导抗氧化酶活性增加,使其能够抵抗涝害造成的氧化损伤<sup>[2-3]</sup>。植物叶片是光合作用的主要场所,它对生物和非生物胁迫高度敏感<sup>[4]</sup>,叶绿素荧光参数可以描述光化学过程在不同阶段能量吸收、捕获和电子传输的功能特性。研究叶片的光合作用和叶绿素荧光参数已成为植物抗逆机制和能力评价的有效途径和重要方向<sup>[5-6]</sup>。如许楠等<sup>[7]</sup>比较了淹水胁迫条件下乡土风箱果 (*Physocarpus amurensis*) 和引种紫叶风箱果 (*P. opuli*) 的叶片光合作用和叶绿素荧光参数差异,发现淹水胁迫下紫叶风箱果叶片的光合抑制主要为气孔因素,且淹水胁迫对其受体侧电子传递的影响较小。穆寅生等<sup>[8]</sup>研究了淹水胁迫对不同种源流苏树 (*Chionanthus retusus*) 光合作用的影响,显示随着淹水程度加重,各种源流苏树幼苗叶片的部分叶绿素荧光参数明显下降,而初始荧光 (Fo) 呈明显上升趋势。以上结果说明,涝害胁迫可通过抑制叶绿素光能转换能力而影响叶片的光合功能。

中华猕猴桃 (*Actinidia chinensis*) 为多年生落叶藤本植物,具有肉质根系分布浅,叶片肥大、气孔发达、蒸腾强烈的生理特点,是一种抗逆性较弱的树种,不耐水渍<sup>[9]</sup>。米银法等<sup>[10]</sup>研究了中华猕猴桃“红阳”和美味猕猴桃 (*A. chinensis* var. *deliciosa*) “秦美”幼苗在淹水胁迫下的光合特性,证明中华猕猴桃对淹水较敏感,叶片净光合速率受到的影响大于美味猕猴桃。猕猴桃属内具有 75 个种和变种,不同物种之间的抗涝性存在差异,如葛枣猕猴桃 (*A. polygama*) “浙猕砧 1 号”即具有良好的耐涝性<sup>[11]</sup>。对萼猕猴桃 (*A. valvata*) 又称“水杨桃”,自然生长于水边湿地,木质根系发达,通常作为猕猴桃耐涝砧木,是研究猕猴桃耐涝机制的好材料<sup>[12-15]</sup>。Li<sup>[16]</sup>测定了对萼猕猴桃“KR5”品种在淹水胁迫下的气体交换参数,发现其在涝害期间的表现比美味猕猴桃“Hayward”更优异,叶片净光合速率更高。目前,关于淹水胁迫对对萼猕猴桃光合特性和叶绿素荧光参数影响的研究尚不深入。因此,笔者以对萼猕猴桃“水秀”品种为研究对象,以中华猕猴桃“红阳”品种为对照,比较了淹水胁迫引起的光合指标和叶绿素荧光参数变化差异,分析耐涝性与光合特性的关系,为探讨对萼猕猴桃的耐涝机理及生产应用提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料及淹水处理方法

对萼猕猴桃“水秀”品种 (*A. valvata* ‘Shuixiu’) 一年生扦插苗和中华猕猴桃“红阳”

品种 (*A. chinensis* ‘Hongyang’) 一年生组培苗。在同一试验基地规范栽培, 提供一致的环境条件, 选择长势一致的健康植株进行试验。采用双套盆淹水法, 即将处理组植株花盆放置在一塑料大盆中, 往大盆中注水直至水层没过植株土层表面 2~3 cm。对照组正常浇水, 保持土壤最大持水量的 50% 左右。每种猕猴桃处理组和对照组各 3 盆样株, 3 个重复。试验于 2023 年 9 月进行, 持续 10 d。

## 1.2 叶绿素相关指标测定

SPAD-502 叶绿素仪 (Konica minolta, 日本) 可直接在野外简便、快速、无损估测叶绿素含量, 且测定不受时间、气候等条件限制, 被大量科研工作者所采用。相关分析表明, 猕猴桃叶片 SPAD 值与叶绿素 a 含量、叶绿素 b 含量、叶绿素总含量均存在极显著的正相关关系 ( $p < 0.01$ )<sup>[17]</sup>。在淹水处理 0~10 d, 采用叶绿素仪 SPAD-502 连续测定叶片 SPAD 值, 同时采用便携脉冲调制式荧光仪 HandyPEA (HansatechInstrument Ltd., UK) 叶绿素荧光参数。选择主蔓中部 3 片全展叶片测定 SPAD 值, 取其平均值。测量的叶绿素荧光参数包括叶片初始荧光 ( $F_0$ )、最大荧光 ( $F_m$ )、可变荧光 ( $F_v$ )、PSII 最大光化学效率 ( $F_v/F_m$ ) 等。

## 1.3 光合作用指标测定

淹水处理后, 每 2 d 采用 LI-6400 光合仪 (LI-COR 公司, 美国) 测定一次叶片光合作用指标。测定条件: 标准 LI-COR 叶室, 红蓝光源 (6400-02 LED 光源), 光照强度  $1400 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ , 空气流速  $500 \mu\text{mol}\text{s}^{-1}$ 。统一选择主蔓中部全展开的叶片, 测定其净光合速率 ( $P_n$ )、气孔导度 ( $G_s$ )、胞间  $\text{CO}_2$  浓度 ( $C_i$ ) 和蒸腾速率 ( $T_r$ ) 等 4 个指标。3 个重复。

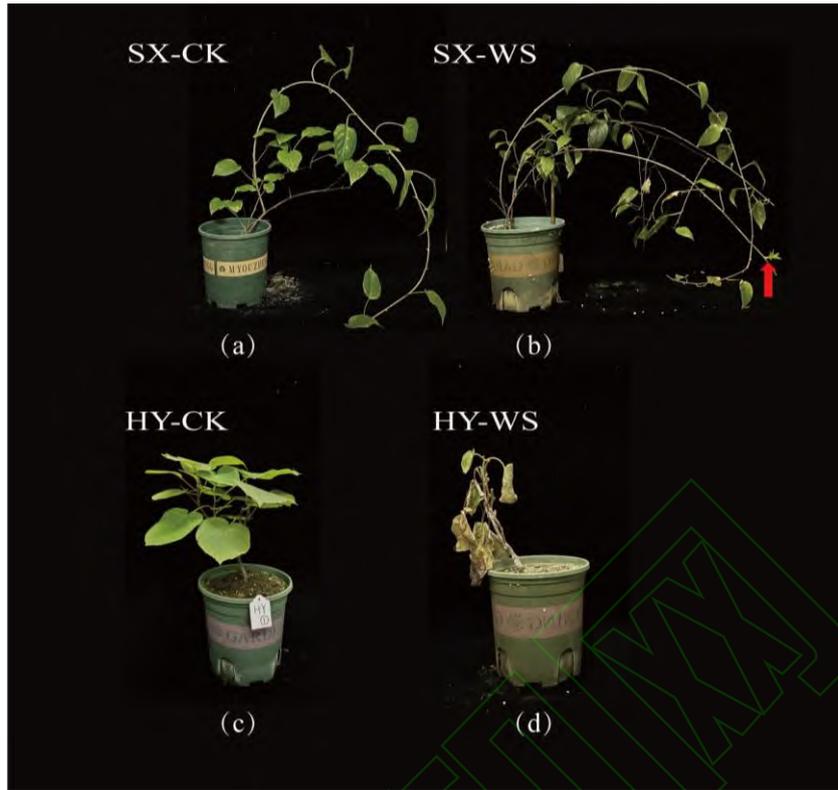
## 1.4 数据分析

采用 SPSS 软件进行处理组与对照组的差异显著性分析, 采用 Origin 软件进行绘图。

# 2 结果与分析

## 2.1 淹水胁迫下植株及叶片的状态

图 1 显示, 淹水 10 d 后, 对萼猕猴桃“水秀”叶片略有发黄、下垂, 未表现出明显受害症状, 且部分植株茎端可见新芽。中华猕猴桃“红阳”在淹水 3 d 后开始出现叶片萎蔫现象, 至淹水 10 d 后, 叶片明显皱缩萎蔫, 植株死亡, 更无新芽出现。表明, 对萼猕猴桃能够耐受短期水涝胁迫, 淹水 10 d 依然能够存活; 淹水 10 d 给中华猕猴桃造成严重伤害而不能生存。



注：(a)“水秀”淹水处理前植株；(b)“水秀”淹水处理 10 d 植株；(c)“红阳”淹水处理前植株；(d)“红阳”淹水处理 10 d 植株。

图 1 淹水胁迫 10 d 对猕猴桃“水秀”与中华猕猴桃“红阳”植株形态的变化

## 2.2 淹水胁迫下叶片叶绿素含量的变化

图 2 显示，淹水前后对猕猴桃“水秀”和中华猕猴桃“红阳”叶片的叶绿素相对含量（SPAD 值）变化趋势明显不同。两者对照（正常浇水）的 SPAD 值均较为平稳。淹水处理“水秀”的 SPAD 值波动趋势与对照相似，无明显变化，说明短期淹水胁迫处理对猕猴桃叶片的 SPAD 值无显著影响。淹水处理“红阳”叶片的 SPAD 值随淹水时间延长而持续下降，10 d 时相比 0 d 下降了 19.95%，与对照差异显著 ( $p < 0.05$ )。

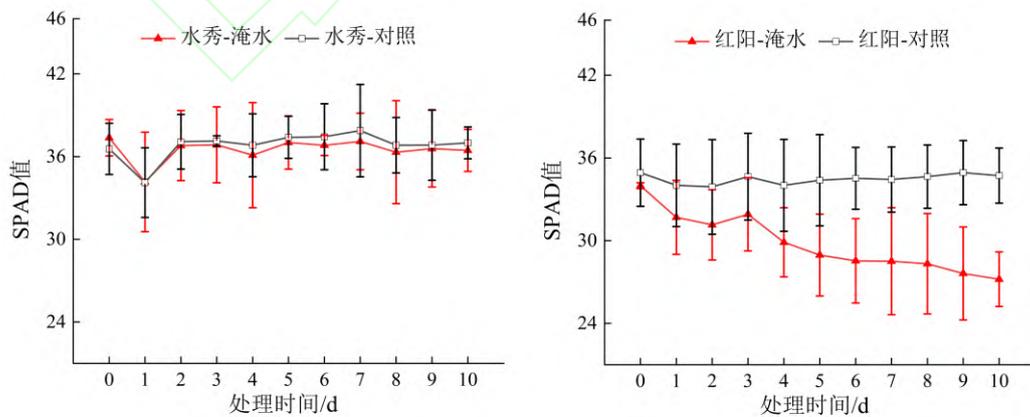


图 2 淹水胁迫下对猕猴桃“水秀”与中华猕猴桃“红阳”叶片 SPAD 值的变化

### 2.3 淹水胁迫下叶片叶绿素荧光参数的变化

植物叶片光系统对光能的吸收、传递、耗散和分配等指标可由叶绿素荧光仪快速检测出来。淹水 1 d 时对萼猕猴桃“水秀”初始荧光 ( $F_o$ ) 大幅上升, 后逐渐下降, 至 5 d 后保持稳定且与对照 (正常浇水) 接近 (见图 3a); 最大荧光 ( $F_m$ )、可变荧光 ( $F_v$ )、PSII 最大光化学效率 ( $F_v/F_m$ ) 变化趋势分别与对照相似, 初期先下降, 随后上升, 至 5~6 d 后维持在相对稳定的水平, 且与对照无显著差异 (见图 3c、图 3e 和图 3g)。淹水处理下中华猕猴桃“红阳”处理组的初始荧光 ( $F_o$ ) 波动较大, 淹水 2 d 内有小幅上升然后下降, 4 d 时开始回升, 后期波动剧烈, 且自第 5 天起即持续显著 ( $p<0.05$ ) 高于对照; 对照在 1 d 时上升到最高, 此后持续下降, 到 5 d 后保持平衡 (见图 3b)。淹水处理下“红阳”的最大荧光 ( $F_m$ )、可变荧光 ( $F_v$ )、PSII 最大光化学效率 ( $F_v/F_m$ ) 在后期 (5~7 d 后) 急剧下降, 显著 ( $p<0.05$ ) 低于对照, 10 d 时分别比对照低 25.5%、45.04% 和 45.71%; 对照的  $F_m$ 、 $F_v$  和  $F_v/F_m$  在 1 d 下降, 此后持续上升, 至 5 d 时达最高, 其后保持相对平衡 (见图 3d、图 3f 和图 3h)。以上结果说明, 对萼猕猴桃对短期淹水胁迫具有比中华猕猴桃更强的耐受性和调节能力。

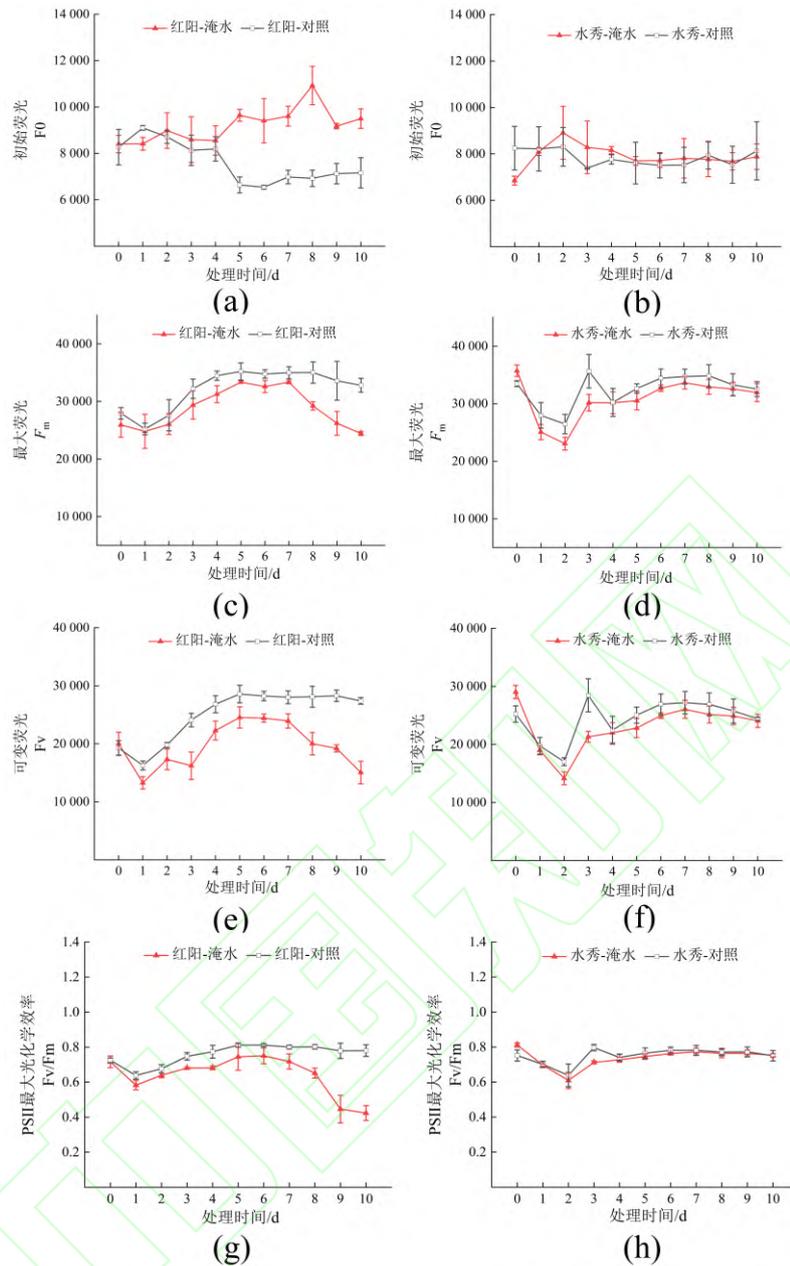


图3 淹水胁迫下对粤猕猴桃“水秀”与中华猕猴桃“红阳”叶绿素荧光参数的变化

叶片性能指数 (PI Inst.) 反映着叶片光合作用的即时效率; PSII 潜在活力 (Fv/Fo) 用于评估植物光系统 II (PSII) 的潜在功能; 以吸收光能为基础的性能指数 (PI abs) 反映了叶片在吸收光能后的转化效率, 衡量了植物利用吸收到的光能进行光合作用的能力。这些指标综合起来, 有助于全面评估植物在逆境条件下的光合作用能力。由表 1 可知, 与对照相比, 经过 10 d 淹水胁迫对粤猕猴桃“水秀”几项指数虽出现小幅的下降, 但差异不显著; 经过 10 d 淹水胁迫中华猕猴桃“红阳”的 PI Inst.、Fv/Fo 和 PI abs 均显著下降, 仅 ETo/RC 无显著变化。表明, 淹水胁迫对中华猕猴桃“红阳”的叶片荧光过程产生了明显的抑制作用。

表 1 淹水胁迫 10 d 对萼猕猴桃“水秀”与中华猕猴桃“红阳”叶片叶绿素荧光参数

品种	处理	叶片性能	PS II 潜在	单位反应中心用于电子	以吸收光能为基础的
		指数 (PI Inst.)	活力 (Fv/Fo)	传递的光能 (ETo/RC)	性能指数 (PI abs)
水秀	淹水	1.02±0.31	3.07±0.12	0.53±0.09	0.66±0.28
	对照	1.48±0.62	3.09±0.37	0.54±0.07	1.16±0.44
红阳	淹水	0.08±0.03*	0.82±0.42*	0.46±0.15	0.10±0.01*
	对照	0.78±0.15	3.67±0.54	0.78±0.03	0.94±0.18

注：数值后标\*表示在 0.05 水平上与对照差异显著。

## 2.4 淹水胁迫下叶片光合作用的变化

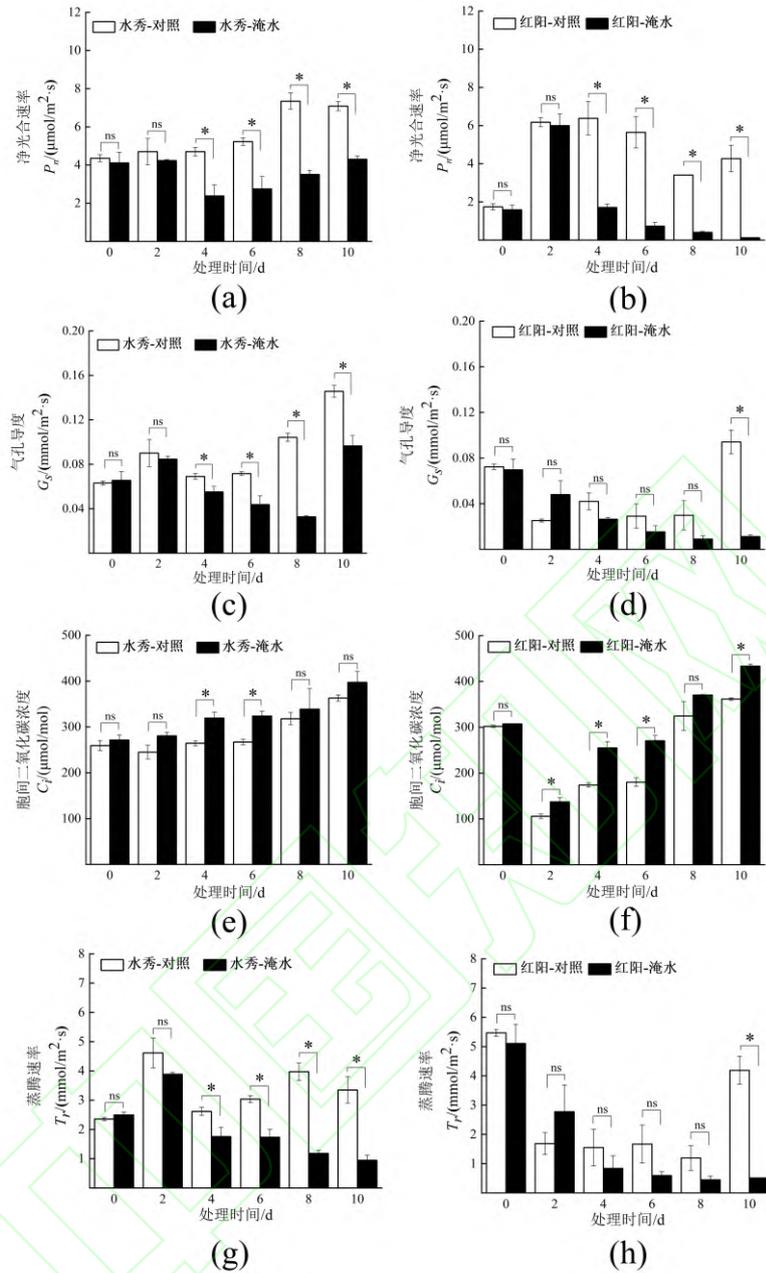
在淹水 4 d 及以后对萼猕猴桃“水秀”的净光合速率  $P_n$  显著 ( $p<0.05$ ) 低于对照 (见图 4a)，淹水 10 d 时  $P_n$  值仍为对照的 60.68%，说明其对短期淹水胁迫具有较强的耐受性。在淹水 4 d 及以后中华猕猴桃“红阳”的净光合速率也显著低于对照，但 4 d 时即已降低至对照的 26.81%，10 d 时几乎降为 0 (见图 4b)。

在淹水 4 d 及以后“水秀”的气孔导度  $G_s$  显著低于对照，淹水 10 d 时仍为对照的 66.28%。淹水 10 d “红阳”处理组的气孔导度仅为对照的 11.9% (见图 4c 和图 4d)。

“水秀”淹水与对照的胞间  $CO_2$  浓度  $C_i$  变化趋势相同，呈持续缓慢上升，且处理始终不低于对照。“红阳”淹水与对照的胞间  $CO_2$  浓度  $C_i$  变化趋势也相同，第 2 d 急剧下降，此后持续上升，且多数时间淹水显著高于对照 (见图 4e 和图 4f)。

在淹水 4 d 及以后“水秀”的蒸腾速率显著低于对照，且后期差距更大。淹水处理下“红阳”的蒸腾速率仅在 10 d 时显著低于对照，其他时间与对照差异不显著 (见图 4g 和图 4h)。

以上结果显示，淹水后两种猕猴桃的净光合速率  $P_n$  与气孔导度  $G_s$  间具有相似的变化趋势，而与胞间  $CO_2$  浓度  $C_i$  变化趋势相反，尤其是中后期极为明显。中华猕猴桃“红阳”对淹水胁迫敏感，随着淹水持续时间的延长，受害程度不断加深，淹水胁迫 10 d 时叶片净光合速率  $P_n$ 、蒸腾速率  $Tr$  和气孔导度  $G_s$  降至极低水平。淹水胁迫下对萼猕猴桃“水秀”的  $G_s$  和  $Tr$  虽然也显著低于对照，但并未下降至极低水平，其净光合速率在淹水 10 d 时仍能达到对照的 60.68%，对淹水胁迫具有更强的耐受性。



注：标 ns (not significant) 表示处理与对照之间无显著性，\*表示处理与对照之间差异显著 ( $p < 0.05$ )。

图4 淹水胁迫下对猕猴桃“水秀”与中华猕猴桃“红阳”净光合速率、胞间二氧化碳浓度、气孔导度、蒸腾速率的变化

### 3 讨论

涝害胁迫致使作物根部缺氧，同时导致代谢物减少、光合作用抑制、根部损伤甚至死亡<sup>[2-3]</sup>。对猕猴桃比猕猴桃生产中常用美味猕猴桃砧木更能耐受淹水胁迫，是一种优良的砧木资源<sup>[15-18]</sup>。本研究中的对猕猴桃“水秀”在涝害胁迫下表现出较少的损伤症状，淹水10 d也没有明显枯萎，并能观察到新芽萌出，这与Li等<sup>[16]</sup>的研究结果一致。植物在应对涝害胁迫时，通常会通过静止策略来抑制地上部分生长，以减少养分消耗，但新芽的伸长可使

植物获得足够的氧气<sup>[19]</sup>，这是对萼猕猴桃具有较强耐涝性的重要原因。

非生物胁迫损害会导致叶片失绿和植物过早衰老，从而损害光合作用<sup>[5]</sup>。本试验中，中华猕猴桃“红阳”淹水处理后叶片 SPAD 值持续显著下降，且淹水后期发生叶枯死，减少了绿叶面积和对光的拦截，说明淹水胁迫会导致叶绿素的捕获、运输和利用光能的能力下降；而对萼猕猴桃“水秀”的 SPAD 值始终保持与对照基本一致，甚至在后期略高于对照，这种响应低水平压力而增加的叶绿素浓度可能会使系统具有增强的防御能力，以在规定的窗口内抵御高水平（威胁健康）的挑战<sup>[20]</sup>，同时也暗示对萼猕猴桃在短期淹水胁迫下可能仍能维持叶绿体的正常结构，保持合成叶绿素相关的酶活性<sup>[21-22]</sup>。

包括 Fo、Fm、Fv、Fv/Fm 在内的叶绿素荧光参数常用于观察植物在遭受逆境胁迫期间光合作用和生长代谢的一系列变化<sup>[23]</sup>。对萼猕猴桃“水秀”的 Fo 在淹水 1 d 时有大幅上升，随后逐渐下降，并于 4 d 时与对照基本一致，说明其对淹水胁迫响应迅速。但前期 Fo 的上升可能会导致原初光能转化效率的降低。另外 3 个荧光参数 Fm、Fv、Fv/Fm 则在淹水 2 d 时降到最低点，其后回升至与对照接近的平稳状态。说明淹水胁迫在短时间内会对“水秀”的光合系统造成影响，但随着作物自身的调整而叶绿素荧光发生可逆性恢复<sup>[24]</sup>。在 Gao<sup>[14]</sup>的研究中，对萼猕猴桃“MRS”具有类似的表现，淹水胁迫 3 周后“MRS”的 Fv/Fm 比“米良一号”（*A. chinensis* var. *deliciosa* ‘Miliang-1’）高出 1.56 倍。中华猕猴桃“红阳”的 Fo 在淹水 5 d 后显著增加，Fm 则在 7 d 后显著降低，Fo 和 Fm 是确定应激严重程度的良好指标，Fo 的增加与高应激水平下 Fm 的下降相对应，表明 PSII 的光捕获复合体受损<sup>[25]</sup>。“红阳”的 Fv、Fv/Fm 在淹水后期均显著降低，显示淹水胁迫破坏了 PSII 光合反应中心，从而导致光合转化效率急剧下降<sup>[19]</sup>。同时，在淹水胁迫条件下，“红阳”PI Inst. 下降，说明叶片光合作用的即时效率降低；PSII 潜在活力（Fv/Fo）显著下降，表明光系统 II 的潜在功能受损；PI abs 显著下降，则反映了叶片吸收的光能转化为光合作用的效率降低。这可能是由于淹水胁迫导致其气孔关闭，光合作用中的电子传递过程受到抑制，从而影响了光合作用的整体效率<sup>[26]</sup>。对萼猕猴桃“水秀”的上述指标并未受到显著影响，说明其光系统可能在淹水胁迫下维持了较高的光合作用潜力<sup>[27]</sup>。

淹水胁迫下气孔的开闭程度能够反映植物的耐涝程度。气孔导度  $G_s$  在涝害胁迫下通常会下降，从而减慢蒸腾速率防止叶片脱水。气孔关闭与涝害胁迫下净光合速率  $P_n$  和蒸腾速率  $T_r$  的减少呈正相关<sup>[28]</sup>。本试验中，淹水下“红阳”的气孔导度明显降低，至淹水 10 d 时显著低于对照，加上其叶片严重失绿和叶绿素降解，共同导致  $P_n$  减少<sup>[29]</sup>，淹水 10 d 时的  $P_n$  几乎为 0。这种光合作用的降低与灯笼椒叶片在淹水胁迫下的光合特性<sup>[30]</sup>相似，应是由气孔关闭和非气孔限制因子共同作用导致的。淹水处理下，对萼猕猴桃“水秀”的净光合速率  $P_n$  和气孔导度  $G_s$  均表现为先下降再小幅回升，至淹水 10 d 时仍能保持约为对照的 60% 水平，但叶绿素含量并未降低，荧光参数快速恢复至对照水平。说明“水秀”的光合系统受淹水胁迫的损伤较小，其光合速率的降低是由气孔限制因子造成的。这可能是对萼猕猴桃与

中华猕猴桃耐涝性差异在光合特性上的主要表现。这与前人对猕猴桃耐涝性的研究结果类似。如：对粤猕猴桃“KR5”在淹水7 d后叶片健康，其  $Pn$  仍保持较高水平；野生对粤猕猴桃种质“MRS”在涝害胁迫下表现出更高的光合速率和叶绿素荧光特性<sup>[14,16,18]</sup>。此外，与“红阳”相比，“水秀”叶片蒸腾速率降低幅度更小，以较强的自我调节能力来减少耗水，适应水分过多的环境<sup>[10]</sup>。与“红阳”相比，淹水胁迫后期“水秀”胞间  $CO_2$  的积累并不显著，暗示“水秀”通过调整气孔导度来阻止  $CO_2$  在细胞间的过度积累而维持一定程度的净光合速率，使植株仍能进行地上与地下部分物质的交换，从而忍耐淹水逆境<sup>[31]</sup>。

综上所述，淹水胁迫下对粤猕猴桃“水秀”光合特性受到的影响较小，叶片更健康，叶绿素降解少，其非气孔限制因子未受到较大影响，同时，其光系统遭受的损伤更小，光合作用仍能维持在较高水平，这是其具有较强耐涝性的重要因素。该结果可为对粤猕猴桃作为砧木在南方多雨和地下水位偏高地区的栽植管理提供参考依据。

## 参考文献

- [1] VOESENEK L, BAILEY-SERRES J. Flood adaptive traits and processes: an overview[J]. *New Phytologist*, 2015, 206(1): 57-73
- [2] PAN J W, SHARIF R, XU X W, et al. Mechanisms of waterlogging tolerance in plants: research progress and prospects[J/OL]. *Frontiers Plant Science*, 2020, 11: 627331. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.627331>
- [3] TIAN L X, ZHANG Y C, CHEN P L, et al. How does the waterlogging regime affect crop yield? A global meta-analysis[J/OL]. *Frontiers Plant Science*, 2021, 12: 634898. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.634898>
- [4] NEDBAL L, SOUKUPOVÁ J, WHITMARSH J, et al. Postharvest imaging of chlorophyll fluorescence from lemons can be used to predict fruit quality[J]. *Photosynthetica*, 2000, 38(4): 571-579
- [5] REN B Z, YU W Z, LIU P, et al. Responses of photosynthetic characteristics and leaf senescence in summer maize to simultaneous stresses of waterlogging and shading[J]. *The Crop Journal*, 2023, 11(1): 269-277
- [6] 宗俊勤, 高艳芝, 陈静波, 等. 淹水胁迫对4种暖季型草坪草光合特性的影响[J]. *热带作物学报*, 2021, 42(1): 130-139
- [7] 许楠, 龙静泓, 张文石, 等. 淹水胁迫对乡土风箱果和引种紫叶风箱果光合特性的影响[J]. *生态学杂志*, 2018, 37(6): 1880-1888
- [8] 穆寅生, 刘文静, 张鸽香. 淹水胁迫对不同种源流苏树幼苗光合与叶绿素荧光参数的影响[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2022, 50(7): 73-83
- [9] 李化龙, 王景红, 张维敏, 等. 高温胁迫对猕猴桃叶片叶绿素荧光特性的影响[J]. *应用气象学报*, 2021, 32(4): 468-478
- [10] 米银法, 崔瑞红. 淹水胁迫对不同抗性猕猴桃幼苗光合特性的影响[J]. *北方园艺*, 2015(2): 14-17
- [11] 古咸彬, 薛莲, 陆玲鸿, 等. ‘浙猕砧1号’对长期淹水处理的响应特征[J]. *果树学报*, 2019, 36(3): 327-337
- [12] ZHANG M J, LIU C X, WANG F M, et al. Genome-wide identification of the DGK gene family in kiwifruit (*Actinidia valvata* Dunn) and an expression analysis of their responses to waterlogging stress[J/OL]. *Horticulturae*, 2024, 10(4): 310. <https://doi.org/10.3390/horticulturae10040310>
- [13] 陈玉明, 史梦琪, 张琮, 等. 耐淹砧木对猕猴桃枝叶生长及淹水胁迫的生理影响[J]. *湖北农业科学*, 2018, 57(8): 77-80
- [14] GAO M X, GAI C Y, LI X Y, et al. Waterlogging tolerance of *Actinidia valvata* Dunn is associated with high activities of pyruvate decarboxylase, alcohol dehydrogenase and antioxidant enzymes[J/OL]. *Plants*, 2023, 12(15): 2872. <https://doi.org/10.3390/plants12152872>
- [15] LI Z, BAI D F, ZHONG Y P, et al. Full-length transcriptome and RNA-Seq analyses reveal the mechanisms underlying waterlogging tolerance in kiwifruit (*Actinidia valvata*)[J/OL]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2022, 23(6): 3237. <https://doi.org/10.3390/ijms23063237>
- [16] LI Z, BAI D F, ZHONG Y P, et al. Physiological responses of two contrasting kiwifruit (*Actinidia* spp.) rootstocks against

- waterlogging stress[J/OL]. *Plants*, 2021, 10(12): 2586. <https://doi.org/10.3390/plants10122586>
- [17] 冯恩英, 岳延滨, 杨国, 等. 猕猴桃叶片 SPAD 值与叶绿素含量的相关性[J]. *农技服务*, 2022, 39(12): 22-26
- [18] BAI D F, LI Z, GU S C, et al. Effects of kiwifruit rootstocks with opposite tolerance on physiological responses of grafting combinations under waterlogging stress[J/OL]. *Plants*, 2022, 11(16): 2098. <https://doi.org/10.3390/plants11162098>
- [19] RAO L Y, LI S Y, CUI X. Leaf morphology and chlorophyll fluorescence characteristics of mulberry seedlings under waterlogging stress[J/OL]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 13379. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-92782-z>
- [20] AGATHOKLEOUS E, FENG Z Z, PEÑUELAS J. Chlorophyll hormesis: Are chlorophylls major components of stress biology in higher plants?[J/OL]. *Science of the Total Environment*, 2020, 726: 138637. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138637>
- [21] 朱向涛, 金松恒, 袁建国, 等. 淹水胁迫下江南牡丹生长及光合特性研究[J]. *广西植物*, 2016, 36(8): 956-962
- [22] LI X, ZHANG W, NIU D, et al. Effects of abiotic stress on chlorophyll metabolism[J/OL]. *Plant Science*, 2024, 342: 112030. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2024.112030>
- [23] 李娟娟, 许晓妍, 朱文旭, 等. 淹水胁迫对丁香叶绿素含量及荧光特性的影响[J]. *经济林研究*, 2012, 30(2): 43-47
- [24] CORREIA M J, OSÓRIO M L, OSÓRIO J, et al. Influence of transient shade periods on the effects of drought on photosynthesis, carbohydrate accumulation and lipid peroxidation in sunflower leaves[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2006, 58(1): 75-84
- [25] FORDOEI A R, BIDGHOLI R D. Impact of salinity stress on photochemical efficiency of photosystem II, chlorophyll content and nutrient elements of nitere bush (*Nitraria schoberi* L.) plants[J]. *Journal of Rangeland Science*, 2016, 6: 1-9
- [26] 李杨, 潘珉, 何锋, 等. 不同底质对海菜花叶绿素荧光诱导动力学参数及净光合速率的影响[J]. *生态学报*, 2017, 37(8): 2809-2817
- [27] 时丽冉, 孙立永, 李明哲. 干旱胁迫对不同品种谷子光合性能及叶绿素荧光动力学参数的影响[J]. *农业科学*, 2020, 10(12): 1014-1019
- [28] IRFAN M, HAYAT S, HAYAT Q, et al. Physiological and biochemical changes in plants under waterlogging[J]. *Protoplasma*, 2010, 241(1-4): 3-17
- [29] PLOCHUK R A, MIRALLES D J, STRIKER G G. Early- And late-waterlogging differentially affect the yield of wheat, barley, oilseed rape and field pea through changes in leaf area index, radiation interception and radiation use efficiency[J]. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 2021, 207(3): 504-520
- [30] CAMPOS H, TREJO C, PEÑA-VALDIVIA C B, et al. Stomatal and non-stomatal limitations of bell pepper (*Capsicum annuum* L.) plants under water stress and re-watering: Delayed restoration of photosynthesis during recovery[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2014, 98: 56-64
- [31] 邵毅, 叶文文, 徐凯. 温度胁迫对杨梅光合作用的影响[J]. *中国农学通报*, 2009, 25(16): 161-166