

模拟酸雨处理后番茄叶片叶绿素含量及 叶绿素荧光参数的动态变化

陈文胜^{1,2}, 出佳范², 吕再辉², 黄晓松², 徐冰莹², 邱栋梁^{2,①}

(1. 福建农业职业技术学院园艺园林系, 福建 福州 350119; 2. 福建农林大学园艺学院, 福建 福州 350002)

摘要:以番茄品种‘倍盈’(*Lycopersicon esculentum* ‘Beiyong’)幼苗为研究材料,对 pH 5.6(CK)、pH 3.5 和 pH 3.0 模拟酸雨处理结束后 0~20 d 叶片的叶绿素含量、OJIP 曲线和叶绿素荧光参数的动态变化进行了比较和分析。结果表明:在模拟酸雨处理结束后 0~20 d,随时间延长,各叶绿素含量相关指标以及各叶绿素荧光参数均呈波动的变化趋势,其中,叶绿素荧光参数 F_o 、 V_j 、 M_o 、 φ_{D_o} 、ABS/RC、 TR_o /RC、 DI_o /RC、 TR_o /CS_o、 DI_o /CS_o 和 RC/CS_o 值整体呈下降的趋势, F_v/F_o 、 S_m 、 ψ_o 、 φ_{E_o} 、 ET_o /RC、 ET_o /CS_o 值整体呈上升的趋势。在模拟酸雨处理结束后 0~20 d,2 个模拟酸雨处理组的叶绿素 a、叶绿素 b 和总叶绿素含量以及 pH 3.0 模拟酸雨处理组的叶绿素 a 含量与叶绿素 b 含量的比值(Chla/Chlb)总体上低于 CK 组,其中,叶绿素 b 含量以及 Chla/Chlb 值在各组间均无显著差异;在 pH 3.5 模拟酸雨处理结束后 5~20 d,叶绿素 a 和总叶绿素含量与 CK 组均无显著差异;而在 pH 3.0 模拟酸雨处理结束后 0~20 d,叶绿素 a 和总叶绿素含量均显著低于 CK 组。在模拟酸雨处理结束后 0 d,2 个模拟酸雨处理组 OJIP 曲线的 O 和 J 值均高于 CK 组,P 值则低于 CK 组,且曲线形状与 CK 组差异明显;但随时间延长,2 个模拟酸雨处理组 OJIP 曲线的 O 和 J 值呈下降趋势,而 I 和 P 值则呈上升趋势,曲线形状与 CK 组趋同。与 CK 组相比,pH 3.0 模拟酸雨处理结束后 0 d,叶片 F_m 、 F_v/F_o 、 F_v/F_m 、 S_m 、 ψ_o 、 φ_{E_o} 、 ET_o /RC 和 ET_o /CS_o 值显著下降, F_o 、 V_j 、 M_o 、 φ_{D_o} 、ABS/RC、 DI_o /RC 和 DI_o /CS_o 值显著上升,但 pH 3.5 模拟酸雨处理后叶片的大多数叶绿素荧光参数与 CK 组无显著差异。总体上看,在 pH 3.5 模拟酸雨处理结束后 20 d,叶绿素含量基本恢复至 CK 组水平,且叶绿素荧光参数也在处理结束后 0 d 基本恢复至 CK 组水平;而在 pH 3.0 模拟酸雨处理结束后 20 d,叶绿素含量未能恢复至 CK 组水平,且叶绿素荧光参数在处理结束后 5~10 d 逐渐恢复至 CK 组水平。综合分析结果表明:经模拟酸雨处理后,番茄叶片叶绿素 a 含量降低,OJIP 曲线形状改变,PS II 反应中心受损,导致大多数叶绿素荧光参数发生改变,从而对光合系统产生影响;且随模拟酸雨 pH 值的降低,对叶绿素含量及叶绿素荧光参数的影响效应增大。

关键词:番茄;模拟酸雨;叶绿素含量;OJIP 曲线;叶绿素荧光参数

中图分类号: Q948.11; S641.2; X517 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2019)03-0108-09

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2019.03.14

Dynamic changes in chlorophyll content and chlorophyll fluorescence parameters of leaf of *Lycopersicon esculentum* after simulated acid rain treatment CHEN Wensheng^{1,2}, CHU Jiafan², LYU Zaihui², HUANG Xiaosong², XU Bingying², QIU Dongliang^{2,①} (1. Department of Horticulture and Gardening, Fujian Vocational College of Agriculture, Fuzhou 350119, China; 2. College of Horticulture, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2019, 28(3): 108-116

Abstract: Taking seedlings of *Lycopersicon esculentum* ‘Beiyong’ as research material, dynamic changes in chlorophyll content, OJIP curve and chlorophyll fluorescence parameters of leaf were compared and analyzed after stopping simulated acid rain treatment at pH 5.6 (CK), pH 3.5 and pH 3.0 for 0-20 d.

收稿日期: 2018-08-02

基金项目: 福建省教育厅访问学者资助项目(闽教人[2013]60号); 福建农林大学科技创新专项基金项目(CXZX2016107)

作者简介: 陈文胜(1970—),男,福建南靖人,硕士,副教授,主要从事园艺植物生产与推广工作。

①通信作者 E-mail: qiudongliang@aliyun.com

The results show that after stopping simulated acid rain treatment for 0–20 d, each chlorophyll content related index and chlorophyll fluorescence parameter all show a fluctuation change tendency with elongation of time, in which, values of fluorescence parameters of F_o , V_j , M_o , φ_{D_o} , ABS/RC, TR_o/RC, DI_o/RC, TR_o/CS_o, DI_o/CS_o and RC/CS_o show a tendency to decrease in general, while values of F_v/F_o , S_m , ψ_o , φ_{E_o} , ET_o/RC and ET_o/CS_o show a tendency to increase in general. After stopping simulated acid rain treatment for 0–20 d, contents of chlorophyll *a*, chlorophyll *b* and total chlorophyll of two simulated acid rain treatment groups, and ratio of chlorophyll *a* content to chlorophyll *b* content (Chla/Chlb) of pH 3.0 simulated acid rain treatment group are lower than those of CK group in general, in which, there is no significant difference in chlorophyll *b* content and Chla/Chlb value among each group. After stopping simulated acid rain treatment at pH 3.5 for 5–20 d, contents of chlorophyll *a* and total chlorophyll are not significantly different with those of CK group; while after stopping simulated acid rain treatment at pH 3.0 for 0–20 d, contents of chlorophyll *a* and total chlorophyll are significantly lower than those of CK group. After stopping simulated acid rain treatment for 0 d, O and J values of OJIP curves of two simulated acid rain treatment groups are all higher than those of CK group, while their P values are lower than those of CK group, and their curve shapes are significantly different with those of CK group; but with elongation of time, O and J values of OJIP curves of two simulated acid rain treatment groups show a tendency to decrease, while their I and P values do a tendency to increase, and their curve shapes are almost the same with those of CK group. Compared with CK group, values of F_m , F_v/F_o , F_v/F_m , S_m , ψ_o , φ_{E_o} , ET_o/RC and ET_o/CS_o of leaf decrease significantly, while values of F_o , V_j , M_o , φ_{D_o} , ABS/RC, DI_o/RC and DI_o/CS_o increase significantly after stopping simulated acid rain treatment at pH 3.0 for 0 d, but most chlorophyll fluorescence parameters of leaf are not significantly different with those of CK group after simulated acid rain treatment at pH 3.5. In general, after stopping simulated acid rain treatment at pH 3.5 for 20 d, chlorophyll content basically restores to the level of CK group, and chlorophyll fluorescence parameters basically restore to the level of CK group after stopping treatment for 0 d; while after stopping simulated acid rain treatment at pH 3.0 for 20 d, chlorophyll content cannot restore to the level of CK group and chlorophyll fluorescence parameters gradually restore to the level of CK group after stopping treatment for 5–10 d. The comprehensive analysis result shows that after simulated acid rain treatment, chlorophyll *a* content in leaf of *L. esculentum* decreases, shape of OJIP curve changes, and PS II reaction center is damaged, resulting in variation of most chlorophyll fluorescence parameters, thus affecting photosynthesis system; with decrease of pH value of simulated acid rain, influences on chlorophyll content and chlorophyll fluorescence parameters increase.

Key words: *Lycopersicon esculentum* Mill.; simulated acid rain; chlorophyll content; OJIP curve; chlorophyll fluorescence parameters

酸雨是全球性的环境污染问题之一,在中国一直呈发展态势,因其具有可转移性而受到广泛关注;且酸雨可直接伤害农作物,导致农作物减产和巨额经济损失,据统计江苏、浙江和安徽等 11 个省主要农作物受酸雨沉降影响的面积达 $1\ 288.74 \times 10^4 \text{ hm}^2 \cdot \text{a}^{-1}$, 年经济损失约 42.57 亿元^[1]。酸雨对植物的伤害机制一直是污染生态研究的热点之一^[2]。酸雨对植物的伤害首先表现在叶片上,而叶片又是光合作用的主要场所。大量的研究表明:酸雨胁迫可引起多种植物叶片叶绿素含量降低,如粉叶新木姜子 (*Neolitsea aurata* var. *glauca* Yang) 和四川大头茶 [*Polyspora speciose* (Kochs) B. M. Barthol. et T. L. Ming]^[3] 以及青冈 [*Cyclobalanopsis glauca* (Thunb.) Oerst.]^[4]、马尾松 (*Pinus massoniana* Lamb.)^[5]、龙眼

(*Dimocarpus longan* Lour.)^[6]、大叶黄杨 (*Buxus megistophylla* Lévl.)^[7]、菊花 [*Dendranthema morifolium* (Ramat.) Tzvel.]^[8]、水稻 (*Oryza sativa* Linn.)^[9]、芒萁 [*Dicranopteris dichotoma* (Thunb.) Bernh.]^[10] 和苦槠 [*Castanopsis sclerophylla* (Lindl.) Schott.]^[11] 等种类,这是酸雨胁迫导致植物光合作用能力减弱的主要原因之一^[12-13]。叶绿素荧光参数是反映植物光系统对光能的吸收、传递和耗散的指标^[14-16],可作为植物叶片光合作用能力的探针^[15-17],因而,研究酸雨对叶绿素荧光参数的影响,对探讨酸雨对植物光合作用的影响机制以及明确酸雨胁迫条件下不同植物种类光合能力的变化趋势具有重要意义。

番茄 (*Lycopersicon esculentum* Mill.) 隶属于茄科 (Solanaceae) 番茄属 (*Lycopersicon* Mill.), 是主要的经

济作物和模式植物,受酸雨危害严重。相关的研究结果^[18-21]表明:酸雨对番茄的种子萌发、叶片基因差异表达和叶片细胞膜透性均有影响,并且不同番茄品种对酸雨的耐性也不相同。为了解酸雨胁迫对番茄叶片光合能力的影响,明确经酸雨胁迫后番茄叶片光合能力的恢复效应,作者采用人工模拟酸雨的方法,对模拟酸雨处理后不同时间番茄叶片的叶绿素含量、快速叶绿素荧光诱导动力学曲线(OJIP)和叶绿素荧光参数的动态变化进行了比较和分析,以期为酸雨区番茄以及其他经济作物的栽培和管理提供基础研究数据。

1 材料和方法

1.1 材料

模拟酸雨实验在福建农林大学园艺学院农业设施工程系的玻璃温室中进行。供试番茄品种‘倍盈’(‘Beiyong’)为中国南方的番茄主栽品种,由福建省农业科学研究所提供;于2014年12月1日播种,参照文献^[21]进行育苗、盆栽及水分管理,每盆1株。

1.2 方法

1.2.1 模拟酸雨配制 参照文献^[22]中的方法,并按照福建省南部天然酸雨中 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 的比例 $[n(\text{SO}_4^{2-}):n(\text{NO}_3^-)=5:1]$ 配制模拟酸雨。使用浓硫酸和浓硝酸,按照上述比例用1000 mL蒸馏水配制成模拟酸雨母液(即母液中 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 的浓度分别为5和 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$),备用;取适量的模拟酸雨母液,采用pHSH-4型酸度计(上海雷磁仪器厂)控制模拟酸雨的pH值,用蒸馏水分别配制成pH 5.6(对照组,CK)、pH 3.5(处理1组,T1)和pH 3.0(处理2组,T2)3组模拟酸雨。

1.2.2 模拟酸雨处理 待番茄幼苗长至8枚真叶时,选择株高及生长状况基本一致的植株,分别用上述3组模拟酸雨进行处理,每处理15株,共45株;每处理的15株植株置于同一小区,株间距40 cm,便于保持植株间的通风及模拟酸雨的喷淋处理;3个小区即为3组处理,每个小区间距1.5 m,以避免处理间的相互影响。参照文献^[21]于每日10:00和16:00各喷淋1次模拟酸雨,当T2组的植株出现叶片皱缩、黄化和焦枯等明显症状时(处理3周后),停止喷淋模拟酸雨。

1.2.3 叶绿素含量及叶绿素荧光参数测定 在酸雨处理结束的当天(0 d)以及处理结束后的5、10、15和20 d,分别取样测定叶片的叶绿素含量及叶绿素荧光参数。

分别采集各植株上第1花序下的第2枚叶片,立即用液氮速冻,之后置于 $-80 \text{ }^\circ\text{C}$ 冰箱中保存、备用。每处理组每次取样3株,视为3次重复。采用王学奎^[23]的方法测定叶片的叶绿素a和叶绿素b的含量,并依据测定结果计算总叶绿素含量(叶绿素a和叶绿素b含量的总和)以及叶绿素a含量与叶绿素b含量的比值(Chla/Chlb)。

使用Handy PEA便携式植物效率分析仪(英国Hansatech公司)测定叶片的叶绿素荧光参数,测定前对植株进行3 h暗适应,即在天黑3 h后进行测定。采用SigmaPlot软件制作OJIP曲线,并采用JIP测验方法^[24-26]分析OJIP曲线的数据;参考文献^[24, 27-28]中的方法计算初始荧光(F_0)、最大荧光(F_m)、PS II潜在光化学活性(F_v/F_0)、PS II最大光化学效率(F_v/F_m)、在拐点(J)的相对可变荧光(V_j)、OJIP曲线的初始斜率(M_0)、PS II受体侧电子传递体数(S_m)以及荧光诱导开始时($t=0$)的捕获的激发子将电子移入电子传递链中的概率(ψ_0)、电子运输的量子产率(ϕ_{E_0})、用于热耗散的量子比率(ϕ_{D_0})、单位反应中心的吸收通量(ABS/RC)、单位反应中心捕获能量通量(TR_0/RC)、单位反应中心电子运输通量(ET_0/RC)、单位反应中心耗散能量通量(DI_0/RC)、单位横截面捕获能量通量(TR_0/CS_0)、单位横截面电子传递通量(ET_0/CS_0)、单位横截面耗散能量通量(DI_0/CS_0)和单位横截面活化的PS II中心数量(RC/CS_0)等叶绿素荧光参数。

1.3 数据统计和分析

采用SPSS 16.0统计分析软件进行数据处理;采用ANOVA方法进行数据统计和分析,采用LSD法进行差异显著性分析。

2 结果和分析

2.1 模拟酸雨处理后番茄叶片叶绿素含量的动态变化

经pH 5.6(CK)、pH 3.5(T1)和pH 3.0(T2)模拟酸雨处理后番茄叶片叶绿素含量的动态变化见表1。

由表1可见,在模拟酸雨处理结束后0~20 d,随时间延长,各处理组的叶绿素 a 、叶绿素 b 和总叶绿素含量以及叶绿素 a 含量与叶绿素 b 含量的比值($Chla/Chlb$)均呈波动的变化趋势。其中,处理结束后20 d,3个处理组的叶绿素 b 含量均降至最低, $Chla/Chlb$ 值则升至最高,而CK组和T1处理组的叶绿素 a 和总叶绿素含量也均升至最高,但T2处理组的总叶绿素含量则降至最低。3个处理组中,叶绿素 a 含量和 $Chla/Chlb$ 值以及叶绿素 b 和总叶绿素含量的最低值分别出现在T2处理组处理结束后10和20 d。

在模拟酸雨处理结束后0、5、10、15和20 d,T1和T2处理组的叶绿素 a 、叶绿素 b 和总叶绿素含量

以及T2处理组的 $Chla/Chlb$ 值总体上低于CK组;而T1处理组的 $Chla/Chlb$ 值总体上高于CK组。其中,T2处理组的叶绿素 a 和总叶绿素含量均显著($P<0.05$)低于CK组,但与T1处理组无显著差异;T1处理组的叶绿素 a 和总叶绿素含量仅在处理结束后0 d显著低于CK组,其余时间均与CK组无显著差异;而在处理结束后0、5、10、15和20 d,T1和T2处理组以及CK组间的叶绿素 b 含量和 $Chla/Chlb$ 值均无显著差异。

总体上看,在模拟酸雨处理结束后20 d,T1处理组的叶绿素含量相关各项指标均恢复至CK组水平,而T2处理组的叶绿素含量相关各项指标均未能恢复至CK组水平。

表1 经模拟酸雨处理后番茄叶片叶绿素含量的动态变化($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

Table 1 Dynamic change in chlorophyll content in leaf of *Lycopersicon esculentum* Mill. after simulated acid rain treatment ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

处理组 Treatment group	不同时间 ²⁾ 叶片的叶绿素 a 含量/($mg\cdot g^{-1}$) Chlorophyll a content in leaf at different times ²⁾				
	0 d	5 d	10 d	15 d	20 d
pH 5.6(CK)	1.59±0.12a	1.39±0.04a	1.42±0.01a	1.40±0.03a	1.69±0.13a
pH 3.5(T1)	1.45±0.11b	1.32±0.19ab	1.39±0.11ab	1.26±0.12ab	1.55±0.29ab
pH 3.0(T2)	1.18±0.10bc	1.14±0.02b	0.95±0.02b	1.14±0.10b	1.06±0.24b
处理组 Treatment group	不同时间 ²⁾ 叶片的叶绿素 b 含量/($mg\cdot g^{-1}$) Chlorophyll b content in leaf at different times ²⁾				
	0 d	5 d	10 d	15 d	20 d
pH 5.6(CK)	0.83±0.21a	0.86±0.01a	0.92±0.03a	0.85±0.10a	0.78±0.23a
pH 3.5(T1)	0.74±0.08a	0.78±0.04a	0.76±0.16a	0.76±0.07a	0.72±0.07a
pH 3.0(T2)	0.61±0.05a	0.75±0.08a	0.67±0.16a	0.71±0.01a	0.53±0.22a
处理组 Treatment group	不同时间 ²⁾ 叶片的总叶绿素含量/($mg\cdot g^{-1}$) Total chlorophyll content in leaf at different times ²⁾				
	0 d	5 d	10 d	15 d	20 d
pH 5.6(CK)	2.41±0.30a	2.25±0.02a	2.34±0.03a	2.25±0.13a	2.47±0.34a
pH 3.5(T1)	2.19±0.11b	2.10±0.19ab	2.14±0.25ab	2.03±0.07ab	2.27±0.29ab
pH 3.0(T2)	1.80±0.07bc	1.90±0.08b	1.62±0.17b	1.85±0.08b	1.59±0.55b
处理组 Treatment group	不同时间 ²⁾ 叶片的 $Chla/Chlb$ 值 $Chla/Chlb$ value in leaf at different times ²⁾				
	0 d	5 d	10 d	15 d	20 d
pH 5.6(CK)	1.92±0.39a	1.63±0.06a	1.53±0.04a	1.66±0.17a	2.16±0.56a
pH 3.5(T1)	1.97±0.31a	1.69±0.25a	1.84±0.37a	1.66±0.29a	2.16±0.27a
pH 3.0(T2)	1.93±0.30a	1.52±0.16a	1.42±0.37a	1.60±0.17a	2.01±0.25a

¹⁾ 同列中不同的小写字母表示同一时间不同处理组间差异显著($P<0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant ($P<0.05$) difference among different treatment groups at the same time. $Chla/Chlb$: 叶绿素 a 含量与叶绿素 b 含量的比值 Ratio of chlorophyll a content to chlorophyll b content.

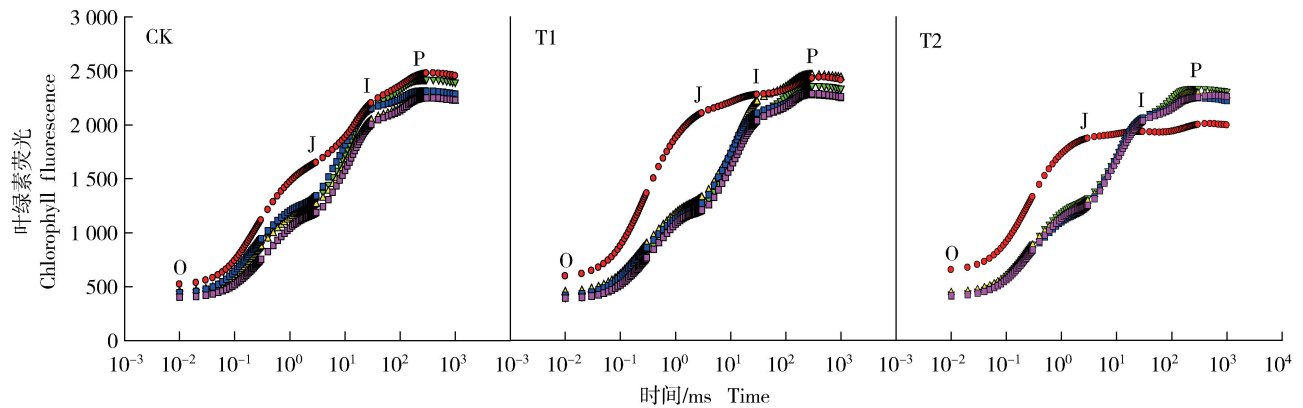
²⁾ 模拟酸雨处理结束后的天数 Days after stopping simulated acid rain treatment.

2.2 模拟酸雨处理后番茄叶片 OJIP 曲线的动态变化

经 pH 5.6(CK)、pH 3.5(T1)和 pH 3.0(T2)模拟酸雨处理后番茄叶片 OJIP 曲线的动态变化见

图1。

结果显示:在T1和T2处理组以及CK组的OJIP曲线中,偏转(I)和最高峰(P)值均高于原点(O)和拐点(J)值,其中,在模拟酸雨处理结束后0 d,T1和



O, J, I, P: 分别表示叶绿素荧光的原点、拐点、偏转和最高峰 Representing the points of original, inflexion, deflexion and peak of chlorophyll fluorescence, respectively. ●: 模拟酸雨处理结束后 0 d After stopping simulated acid rain treatment for 0 d; ▼: 模拟酸雨处理结束后 5 d After stopping simulated acid rain treatment for 5 d; ▲: 模拟酸雨处理结束后 10 d After stopping simulated acid rain treatment for 10 d; ■: 模拟酸雨处理结束后 15 d After stopping simulated acid rain treatment for 15 d; ■: 模拟酸雨处理结束后 20 d After stopping simulated acid rain treatment for 20 d.

CK: pH 5.6 模拟酸雨处理组(对照组) Treatment group of simulated acid rain at pH 5.6 (the control group); T1: pH 3.5 模拟酸雨处理组 Treatment group of simulated acid rain at pH 3.5; T2: pH 3.0 模拟酸雨处理组 Treatment group of simulated acid rain at pH 3.0.

图 1 经模拟酸雨处理后番茄叶片快速叶绿素荧光诱导动力学曲线(OJIP)的动态变化
Fig. 1 Dynamic change in the fast chlorophyll fluorescence induction kinetics curve (OJIP) of leaf of *Lycopersicon esculentum* Mill. after simulated acid rain treatment

T2 处理组的 O 和 J 值均高于 CK 组, 而 P 值则低于 CK 组; 但随时间延长, T1 和 T2 处理组的 O 和 J 值呈下降的趋势, 而 I 和 P 值则呈上升的趋势, 并且曲线形状与 CK 组趋同。在同一时间, 随模拟酸雨 pH 值的降低, O 值上升幅度和 P 值下降幅度的趋势从大至小依次为 T2 处理组、T1 处理组、CK 组。此外, 在模拟酸雨处理结束后 0 d, T1 和 T2 处理组的 OJIP 曲线上上升幅度均在拐点后明显趋缓, 曲线形状与其他时间以及 CK 组差异明显。

2.3 模拟酸雨处理后番茄叶片叶绿素荧光参数的动态变化

经 pH 5.6 (CK)、pH 3.5 (T1) 和 pH 3.0 (T2) 模拟酸雨处理后番茄叶片叶绿素荧光参数的动态变化见表 2。

总体上看, 在模拟酸雨处理结束后 0~20 d, 随时间延长, 各叶绿素荧光参数均呈波动变化的趋势, 其中, 3 个处理组的 F_o 、 V_j 、 M_o 、 φ_{D_o} 、 ABS/RC 、 TR_o/RC 、 DI_o/RC 、 TR_o/CS_o 、 DI_o/CS_o 和 RC/CS_o 值整体呈下降的趋势, F_v/F_o 、 S_m 、 ψ_o 、 φ_{E_o} 、 ET_o/RC 、 ET_o/CS_o 值整体呈上升的趋势, 而 F_v/F_m 值整体变幅不大, 在 3 个处理组间仅 F_m 值的变化趋势不同, 其中 T2 处理组的 F_m 值整体呈上升趋势, 而 T1 处理组和 CK 组的 F_m

值整体呈下降的趋势。

在模拟酸雨处理结束后 0 d, T2 处理组的 F_m 、 F_v/F_o 、 F_v/F_m 、 S_m 、 ψ_o 、 φ_{E_o} 、 ET_o/RC 和 ET_o/CS_o 值均显著低于 CK 组; T1 处理组的 F_m 值显著高于 T2 处理组, 但与 CK 组无显著差异, 而 ψ_o 和 φ_{E_o} 值则显著低于 CK 组但与 T2 处理组无显著差异。在模拟酸雨处理结束后 5 d, T1 和 T2 处理组的 F_m 值仍显著低于 CK 组, 其余叶绿素荧光参数值则与 CK 组无显著差异。总体上看, 在模拟酸雨处理结束 10 d 以后, T1 和 T2 处理组的上述 8 个叶绿素荧光参数值与 CK 组均无显著差异。

在模拟酸雨处理结束后 0 d, T2 处理组的 F_o 、 V_j 、 M_o 、 φ_{D_o} 、 ABS/RC 、 DI_o/RC 和 DI_o/CS_o 值均显著高于 CK 组; T1 处理组的 F_o 、 V_j 、 M_o 和 φ_{D_o} 值均高于 CK 组而低于 T2 处理组但无显著差异, ABS/RC 、 DI_o/RC 和 DI_o/CS_o 值显著低于 T2 处理组但与 CK 组无显著差异。总体上看, 在模拟酸雨处理结束 5 d 以后, T1 和 T2 处理组的上述 7 个叶绿素荧光参数值与 CK 组均无显著差异。

此外, 在模拟酸雨处理结束后 0、5、10、15 和 20 d, T1 和 T2 处理组的 TR_o/RC 、 TR_o/CS_o 和 RC/CS_o 值高于或低于 CK 组, 但均无显著差异。

表 2 经模拟酸雨处理后番茄叶片叶绿素荧光参数的动态变化 ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

Table 2 Dynamic change in chlorophyll fluorescence parameters of leaf of *Lycopersicon esculentum* Mill. after simulated acid rain treatment ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

处理组 Treatment group	不同时间 ²⁾ 叶片的 F_o 值 F_o value of leaf at different times ²⁾				
	0 d	5 d	10 d	15 d	20 d
pH 5.6(CK)	476.00±86.75b	405.33±21.01a	423.67±34.85a	410.33±31.34a	373.00±14.93a
pH 3.5(T1)	547.00±28.84ab	368.00±10.82a	418.67±7.02a	391.00±23.58a	360.67±6.81a
pH 3.0(T2)	615.67±107.97a	394.33±41.65a	411.00±33.87a	382.33±40.10a	380.67±42.25a
处理组 Treatment group	不同时间 ²⁾ 叶片的 F_m 值 F_m value of leaf at different times ²⁾				
	0 d	5 d	10 d	15 d	20 d
pH 5.6(CK)	2 477.00±65.43a	2 422.33±122.77a	2 243.00±88.64a	2 313.33±30.66a	2 249.33±31.66a
pH 3.5(T1)	2 435.67±7.02a	2 363.67±187.52b	2 461.33±81.01a	2 279.33±93.44a	2 287.00±7.23a
pH 3.0(T2)	2 005.00±322.27b	2 337.33±105.08b	2 292.33±23.54a	2 251.67±31.43a	2 280.33±391.37a
处理组 Treatment group	不同时间 ²⁾ 叶片的 F_v/F_o 值 F_v/F_o value of leaf at different times ²⁾				
	0 d	5 d	10 d	15 d	20 d
pH 5.6(CK)	4.32±1.00a	4.99±0.34a	4.30±0.90a	4.66±0.42a	5.04±0.23a
pH 3.5(T1)	3.46±0.22ab	5.43±0.21a	4.88±0.18a	4.84±0.18a	5.34±0.08a
pH 3.0(T2)	2.38±1.12b	4.97±0.61a	4.61±0.58a	4.94±0.71a	5.01±0.26a
处理组 Treatment group	不同时间 ²⁾ 叶片的 F_v/F_m 值 F_v/F_m value of leaf at different times ²⁾				
	0 d	5 d	10 d	15 d	20 d
pH 5.6(CK)	0.81±0.04a	0.83±0.01a	0.81±0.04a	0.82±0.01a	0.83±0.01a
pH 3.5(T1)	0.78±0.01ab	0.84±0.01a	0.83±0.01a	0.83±0.01a	0.84±0.00a
pH 3.0(T2)	0.68±0.10b	0.83±0.02a	0.82±0.02a	0.83±0.02a	0.83±0.01a
处理组 Treatment group	不同时间 ²⁾ 叶片的 V_j 值 V_j value of leaf at different times ²⁾				
	0 d	5 d	10 d	15 d	20 d
pH 5.6(CK)	0.57±0.27b	0.42±0.03a	0.44±0.04a	0.45±0.02a	0.41±0.03a
pH 3.5(T1)	0.79±0.05ab	0.41±0.03a	0.42±0.04a	0.43±0.02a	0.42±0.02a
pH 3.0(T2)	0.89±0.08a	0.45±0.06a	0.44±0.03a	0.43±0.02a	0.44±0.01a
处理组 Treatment group	不同时间 ²⁾ 叶片的 M_o 值 M_o value of leaf at different times ²⁾				
	0 d	5 d	10 d	15 d	20 d
pH 5.6(CK)	1.31±0.66b	0.95±0.12a	0.99±0.07a	1.12±0.09a	0.81±0.07a
pH 3.5(T1)	1.73±0.15ab	0.87±0.06a	0.94±0.14a	0.99±0.05a	0.84±0.07a
pH 3.0(T2)	2.09±0.27a	1.03±0.18a	1.01±0.13a	0.98±0.12a	0.96±0.10a
处理组 Treatment group	不同时间 ²⁾ 叶片的 S_m 值 S_m value of leaf at different times ²⁾				
	0 d	5 d	10 d	15 d	20 d
pH 5.6(CK)	16.91±5.55a	15.53±1.54a	15.44±0.52a	12.27±0.60a	17.84±0.58a
pH 3.5(T1)	13.88±2.18ab	16.27±0.42a	16.44±0.94a	13.56±0.64a	17.72±1.11a
pH 3.0(T2)	10.29±0.89b	15.27±2.09a	15.61±1.90a	13.92±1.01a	21.92±11.31a
处理组 Treatment group	不同时间 ²⁾ 叶片的 ψ_o 值 ψ_o value of leaf at different times ²⁾				
	0 d	5 d	10 d	15 d	20 d
pH 5.6(CK)	0.43±0.27a	0.58±0.03a	0.56±0.04a	0.55±0.02a	0.59±0.03a
pH 3.5(T1)	0.21±0.05b	0.59±0.03a	0.58±0.04a	0.57±0.02a	0.58±0.02a
pH 3.0(T2)	0.11±0.08bc	0.55±0.06a	0.56±0.03a	0.57±0.02a	0.56±0.01a
处理组 Treatment group	不同时间 ²⁾ 叶片的 φ_{E_o} 值 φ_{E_o} value of leaf at different times ²⁾				
	0 d	5 d	10 d	15 d	20 d
pH 5.6(CK)	0.35±0.23a	0.49±0.03a	0.45±0.05a	0.45±0.01a	0.49±0.02a
pH 3.5(T1)	0.16±0.04b	0.50±0.02a	0.48±0.04a	0.47±0.01a	0.49±0.02a
pH 3.0(T2)	0.08±0.07bc	0.46±0.06a	0.46±0.03a	0.47±0.03a	0.47±0.02a

续表2 Table 2 (Continued)

处理组 Treatment group	不同时间 ²⁾ 叶片的 φ_{D_0} 值 φ_{D_0} value of leaf at different times ²⁾				
	0 d	5 d	10 d	15 d	20 d
pH 5.6(CK)	0.19±0.04b	0.17±0.01a	0.19±0.04a	0.18±0.01a	0.17±0.01a
pH 3.5(T1)	0.22±0.01ab	0.16±0.01a	0.17±0.01a	0.17±0.01a	0.16±0.00a
pH 3.0(T2)	0.32±0.10a	0.17±0.02a	0.18±0.02a	0.17±0.02a	0.17±0.01a
处理组 Treatment group	不同时间 ²⁾ 叶片的 ABS/RC 值 ABS/RC value of leaf at different times ²⁾				
	0 d	5 d	10 d	15 d	20 d
pH 5.6(CK)	2.81±0.23b	2.74±0.16a	2.78±0.10a	2.99±0.04a	2.37±0.16a
pH 3.5(T1)	2.81±0.18b	2.54±0.06a	2.70±0.14a	2.77±0.05a	2.37±0.09a
pH 3.0(T2)	3.46±0.48a	2.73±0.18a	2.79±0.27a	2.74±0.28a	2.64±0.20a
处理组 Treatment group	不同时间 ²⁾ 叶片的 TR_0/RC 值 TR_0/RC value of leaf at different times ²⁾				
	0 d	5 d	10 d	15 d	20 d
pH 5.6(CK)	2.27±0.07a	2.28±0.12a	2.25±0.05a	2.46±0.07a	1.98±0.13a
pH 3.5(T1)	2.17±0.14a	2.14±0.04a	2.24±0.11a	2.29±0.05a	2.00±0.07a
pH 3.0(T2)	2.33±0.15a	2.27±0.10a	2.28±0.17a	2.27±0.17a	2.20±0.15a
处理组 Treatment group	不同时间 ²⁾ 叶片的 ET_0/RC 值 ET_0/RC value of leaf at different times ²⁾				
	0 d	5 d	10 d	15 d	20 d
pH 5.6(CK)	0.96±0.60a	1.33±0.02a	1.25±0.11a	1.34±0.03a	1.17±0.09a
pH 3.5(T1)	0.45±0.11ab	1.27±0.06a	1.30±0.03a	1.30±0.01a	1.15±0.00a
pH 3.0(T2)	0.24±0.19b	1.24±0.09a	1.28±0.08a	1.29±0.06a	1.23±0.05a
处理组 Treatment group	不同时间 ²⁾ 叶片的 DI_0/RC 值 DI_0/RC value of leaf at different times ²⁾				
	0 d	5 d	10 d	15 d	20 d
pH 5.6(CK)	0.55±0.16c	0.46±0.05a	0.50±0.10a	0.53±0.03a	0.39±0.04a
pH 3.5(T1)	0.63±0.06bc	0.39±0.02a	0.46±0.03a	0.47±0.02a	0.37±0.02a
pH 3.0(T2)	1.13±0.47a	0.46±0.08a	0.54±0.12a	0.47±0.11a	0.44±0.05a
处理组 Treatment group	不同时间 ²⁾ 叶片的 TR_0/CS_0 值 TR_0/CS_0 value of leaf at different times ²⁾				
	0 d	5 d	10 d	15 d	20 d
pH 5.6(CK)	381.84±48.86a	337.36±13.72a	336.75±19.81a	337.27±20.15a	311.09±10.19a
pH 3.5(T1)	423.97±20.28a	310.66±7.35a	347.41±5.99a	323.89±17.92a	303.78±5.29a
pH 3.0(T2)	413.27±12.10a	327.29±27.01a	342.02±31.00a	316.72±25.44a	317.05±33.20a
处理组 Treatment group	不同时间 ²⁾ 叶片的 ET_0/CS_0 值 ET_0/CS_0 value of leaf at different times ²⁾				
	0 d	5 d	10 d	15 d	20 d
pH 5.6(CK)	154.81±90.58a	196.54±8.20a	188.61±13.86a	184.25±19.14a	183.53±11.89a
pH 3.5(T1)	87.49±19.64ab	183.70±11.07a	202.43±17.56a	184.05±11.83a	175.73±4.25a
pH 3.0(T2)	43.18±33.00b	178.04±9.49a	191.37±30.13a	180.54±9.75a	177.96±14.71a
处理组 Treatment group	不同时间 ²⁾ 叶片的 DI_0/CS_0 值 DI_0/CS_0 value of leaf at different times ²⁾				
	0 d	5 d	10 d	15 d	20 d
pH 5.6(CK)	94.16±38.03bc	67.97±7.38a	74.25±14.10a	73.06±11.19a	61.92±4.85a
pH 3.5(T1)	123.03±10.47b	57.34±3.54a	71.26±2.53a	67.11±5.81a	56.88±1.63a
pH 3.0(T2)	202.40±95.90a	67.05±14.64a	81.65±16.24a	65.61±15.24a	63.62±9.23a
处理组 Treatment group	不同时间 ²⁾ 叶片的 RC/CS_0 值 RC/CS_0 value of leaf at different times ²⁾				
	0 d	5 d	10 d	15 d	20 d
pH 5.6(CK)	168.24±16.51a	147.91±4.10a	147.68±5.95a	137.36±12.29a	157.51±6.06a
pH 3.5(T1)	195.07±3.77a	145.15±1.34a	155.48±9.76a	141.16±7.89a	152.20±3.73a
pH 3.0(T2)	177.72±13.76a	144.24±6.61a	152.19±10.66a	139.65±4.05a	144.08±6.60a

¹⁾ 同列中不同的小写字母表示同一时间不同处理组间差异显著 ($P < 0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant ($P < 0.05$) difference among different treatment groups at the same time.

²⁾ 模拟酸雨处理结束后天数 Days after stopping simulated acid rain treatment.

3 讨论和结论

大量研究结果表明:酸雨对植物的生长和生理过程均可产生伤害作用^[29-31];酸雨可导致植物叶片叶绿素含量降低,且酸雨 pH 值越低其降幅越大^[32-34],进而影响植物的光合作用能力。本研究中,经 pH 3.0 和 pH 3.5 模拟酸雨处理后番茄叶片总叶绿素含量均有不同程度降低,与模拟酸雨处理后叶绿素 *a* 含量下降有直接关系;在 pH 3.0 模拟酸雨处理结束后 20 d,叶片的叶绿素 *a* 和总叶绿素含量仍与 CK 组(pH 5.6 模拟酸雨处理组)存在显著差异,而在 pH 3.5 模拟酸雨处理结束 5 d 以后这 2 个指标与 CK 组均无显著差异,说明 pH 3.0 模拟酸雨对番茄叶片的伤害程度更大。这可能是由于叶绿素中的 Mg^{2+} 被置换,形成脱镁叶绿素而使叶片退绿^[30],进而导致番茄叶片出现黄化和焦枯等危害症状,并在处理后较长时间内不能恢复至正常状态。

从 OJIP 曲线的变化幅度看,在模拟酸雨处理结束后 0 d, pH 3.0 和 pH 3.5 模拟酸雨处理后番茄叶片 OJIP 曲线的 O 和 J 值均高于 CK 组,而 P 值则低于 CK 组,且随模拟酸雨 pH 值的降低, O 值的上升幅度和 P 值的下降幅度依次增大,即 pH 3.0 模拟酸雨处理后 OJIP 曲线的 O 值上升幅度和 P 值下降幅度最大。这 2 个模拟酸雨处理后 OJIP 曲线的 O 和 J 值随时间延长呈下降的趋势,而 I 和 P 值则呈上升的趋势。具体体现在叶绿素荧光参数上,例如: M_0 值反映了初级醌受体(Q_A)被还原的最大速率,即 O~J 过程中 Q_A 被还原的速率; V_j 值反映了在 J 点关闭的 PS II 反应中心数量,即 Q_A^- 的积累量^[35],上述 2 个模拟酸雨处理后番茄叶片的 M_0 和 V_j 值增大且 pH 3.0 模拟酸雨处理后的这 2 个指标与 CK 组差异显著,说明模拟酸雨处理导致光合电子传递链中 Q_A^- 大量的积累, PS II 反应中心活性下降、电子传递能力降低,而处理结束 5 d 以后与 CK 组基本差异不大,说明 PS II 反应中心活性又逐渐恢复至 CK 组水平,与 OJIP 曲线的变化幅度相一致,也说明 pH 3.0 模拟酸雨处理的 PS II 反应中心受损比 pH 3.5 模拟酸雨处理严重。

叶绿素荧光参数可用于评价环境胁迫对植物光合特性的影响^[36-37],是逆境胁迫对植物光合作用影响研究的重要指标^[38]。本研究中,在模拟酸雨处理结束后 0 d,与 CK 组相比, pH 3.0 和 pH 3.5 模拟酸

雨处理后番茄叶片的 F_0 值均增大,但 F_m 、 F_v/F_0 和 F_v/F_m 值却减小,这些叶绿素荧光参数的变化说明模拟酸雨处理可明显降低番茄叶片的 PS II 光能转换效率和潜在活性,阻碍光系统线性电子传递,导致光合机构受损;而 ϕ_{D_0} 、 ABS/RC 、 DI_0/RC 和 DI_0/CS_0 值则均增大,说明 PS II 反应中心启动了相应的防御机制,使过剩的激发能可以及时耗散以便减少过剩光能对番茄叶片的伤害^[39]。

综上所述,模拟酸雨处理可导致番茄叶片中叶绿素 *a* 含量降低,改变番茄叶片的 OJIP 曲线形状,伤害 PS II 反应中心,其中, pH 3.0 模拟酸雨处理还可伤害 PS II 反应中心供体侧和受体侧的电子传递体,使光系统线性电子传递受损,导致叶片光合能力下降,并因此抑制番茄的正常生长,使叶片出现明显的受害症状。

参考文献:

- [1] 冯颖竹,陈惠阳,余土元,等. 中国酸雨及其对农业生产影响的研究进展[J]. 中国农学通报, 2012, 28(11): 306-311.
- [2] 李永裕,潘腾飞,余东,等. 模拟酸雨对龙眼叶片 PS II 反应中心和自由基代谢的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(24): 7866-7873.
- [3] 唐晓芬,王彬,王玉杰,等. 不同酸度模拟酸雨对重庆缙云山 2 种阔叶树光合特性的影响[J]. 植物资源与环境学报, 2015, 24(4): 45-51.
- [4] 汪赛,伊力塔,余树全,等. 模拟酸雨对青冈光合及叶绿素荧光参数的影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(8): 2183-2192.
- [5] 沈燕,伊力塔,殷秀敏,等. 模拟酸雨对马尾松叶绿素荧光特性的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2013, 30(5): 706-713.
- [6] 邱栋梁,刘星辉. 模拟酸雨对龙眼叶片叶绿素 *a* 荧光特性的影响[J]. 园艺学报, 2000, 27(3): 177-181.
- [7] 刘雯雯,邸葆,张钢,等. 模拟酸雨对大叶黄杨叶片叶绿素荧光参数的影响[J]. 河北农业大学学报, 2012, 35(3): 52-57.
- [8] 侯维,潘远智. 酸雨对勋章菊保护酶活性及叶绿素荧光参数的影响[J]. 核农学报, 2013, 27(7): 1054-1059.
- [9] 王雯,李曼,王丽红,等. 酸雨对全生育时期水稻叶绿素荧光的影响[J]. 生态环境学报, 2014, 23(1): 80-85.
- [10] 吕钺香,张明如,邹伶俐. 模拟酸雨与光强处理对苜蓿叶绿素及荧光特性的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2015, 32(1): 52-59.
- [11] 金清,江洪,余树全,等. 酸雨胁迫对苦楝幼苗气体交换与叶绿素荧光的影响[J]. 植物生态学报, 2010, 34(9): 1117-1124.
- [12] DONG D, DU E, SUN Z, et al. Non-linear direct effects of acid rain on leaf photosynthetic rate of terrestrial plants [J].

- Environmental Pollution, 2017, 231: 1442-1445.
- [13] DU E, DONG D, ZENG X, et al. Direct effect of acid rain on leaf chlorophyll content of terrestrial plants in China[J]. Science of the Total Environment, 2017, 605: 764-769.
- [14] SHAN Y. Effects of simulated acid rain on *Pinus densiflora*: inhibition of net photosynthesis by the pheophytization of chlorophyll[J]. Water, Air, and Soil Pollution, 1998, 103: 121-127.
- [15] 张守仁. 叶绿素荧光动力学参数的意义及讨论[J]. 植物学通报, 1999, 16(4): 444-448.
- [16] YU J Q, YE S F, HUANG L F. Effects of simulated acid precipitation on photosynthesis, chlorophyll fluorescence, and antioxidative enzymes in *Cucumis sativus* L. [J]. Photosynthetica, 2002, 40(3): 331-335.
- [17] 殷秀敏, 伊力塔, 余树全, 等. 酸雨胁迫对木荷叶片气体交换和叶绿素荧光参数的影响[J]. 生态环境学报, 2010, 19(7): 1556-1562.
- [18] 商 桑, 田丽波, 黄绵佳, 等. 模拟酸雨对茄科3种蔬菜种子萌发的影响[J]. 植物研究, 2007, 27(4): 494-499.
- [19] 刘婷婷. 模拟酸雨胁迫下番茄叶片的基因差异表达研究[D]. 福州: 福建农林大学园艺学院, 2010: 1-36.
- [20] 陈文胜, 出佳范, 吕再辉, 等. 酸雨胁迫对番茄叶片细胞膜透性的影响[J]. 福建农业学报, 2017, 32(4): 376-381.
- [21] 陈文胜, 徐冰莹, 出佳范, 等. 番茄不同品种耐酸雨胁迫能力的比较研究[J]. 热带作物学报, 2018, 39(9): 1745-1750.
- [22] 汤大钢, 王 玮, 庞燕波, 等. 氮氧化物在闽南地区酸雨中的贡献[J]. 环境科学研究, 1996, 9(5): 38-40.
- [23] 王学奎. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 2版. 北京: 高等教育出版社, 2006: 134-136.
- [24] 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): 1863-1871.
- [25] STRASSER R J, TSIMILLI-MICHAEL M, SRIVASTAVA A. Analysis of the chlorophyll a fluorescence transient [M] // PAPAGEORGIOU G C, GOVINDJEE. Chlorophyll a Fluorescence: A Signature of Photosynthesis. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2004: 321-362.
- [26] SMIT M F, VAN HEERDEN P D R, PIENAAR J J, et al. Effect of trifluoroacetate, a persistent degradation product of fluorinated hydrocarbons, on *Phaseolus vulgaris* and *Zea mays* [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2009, 47: 623-634.
- [27] APPENROTH K-J, STÖCKEL J, SRIVASTAVA A, et al. Multiple effects of chromate on the photosynthetic apparatus of *Spirodela polyrhiza* as probed by OJIP chlorophyll a fluorescence measurement[J]. Environmental Pollution, 2001, 115: 49-64.
- [28] CAO J A, GOVINDJEE. Chlorophyll a fluorescence transient as an indicator of active and inactive photosystem II in thylakoid membranes [J]. Biochimica et Biophysica Acta, 1990, 1015: 180-188.
- [29] 宋晓梅, 曹向阳. 模拟酸雨对不同园林植物叶片生理生态特性的影响[J]. 水土保持研究, 2017, 24(2): 365-370.
- [30] 孟赐福, 姜培坤, 曹志洪, 等. 酸雨对植物的危害机理及其防治对策研究进展[J]. 浙江农业学报, 2008, 20(3): 208-212.
- [31] 张 佩, 周 琴, 张国正, 等. 模拟酸雨对油菜幼苗生物量及其主要生理指标的影响[J]. 中国油料作物学报, 2010, 32(2): 229-234.
- [32] 赵则海. 模拟酸雨对五爪金龙幼苗光合生理特性的影响[J]. 生态环境学报, 2014, 23(9): 1498-1502.
- [33] 王 强, 金则新, 彭礼琼. 模拟酸雨对乌药幼苗生理生态特性的影响[J]. 浙江大学学报(理学版), 2013, 40(4): 447-455.
- [34] 陆晓民, 詹秋文, 盛 伟. 模拟酸雨对杂交苏丹草种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 核农学报, 2007, 21(4): 409-412.
- [35] 原佳乐, 马 超, 冯雅岚, 等. 不同抗旱性小麦快速叶绿素荧光诱导动力学曲线对干旱及复水的响应[J]. 植物生理学报, 2018, 54(6): 1119-1129.
- [36] SPERANZA A, CROSTI P, MALERBA M, et al. The environmental endocrine disruptor, bisphenol A, affects germination, elicits stress response and alters steroid hormone production in kiwifruit pollen[J]. Plant Biology, 2011, 13(1): 209-217.
- [37] 李 晓, 冯 伟, 曾晓春. 叶绿素荧光分析技术及应用进展[J]. 西北植物学报, 2006, 26(10): 2186-2196.
- [38] YANG L T, QI Y P, CHEN L S, et al. Nitric oxide protects sour pummelo (*Citrus grandis*) seedlings against aluminum-induced inhibition of growth and photosynthesis [J]. Environmental and Experimental Botany, 2012, 82: 1-13.
- [39] 柴彦亮, 窦铁岭, 董肖杰, 等. 唐菖蒲光合特性的研究[J]. 河北农业大学学报, 2008, 31(6): 34-39.

(责任编辑: 郭严冬)