

干旱复水对海棠叶片光合蒸腾及水分利用效率的影响

徐颖, 张瑞雪, 曹辉, 宁留芳, 周春然, 吕婷雯, 杨洪强*

山东农业大学园艺科学与工程学院, 作物生物学国家重点实验室, 山东泰安271018

摘要: 以13个类型的盆栽海棠为材料, 分析了自然干旱及旱后复水时叶片净光合速率(net photosynthesis rate, P_n), 蒸腾速率(transpiration rate, T_r)及水分利用效率(water use efficiency, WUE)。结果表明: 13个海棠中, 西府海棠的 P_n 和WUE最低, 对水分变化最不敏感; 平邑甜茶比较适应轻度和中度干旱, 不适应重度干旱。复水后‘紫色王子’、‘绚丽’和‘雪球’等9个类型的 P_n 明显超过原初状态; ‘红艳’、‘糖美林’、‘红粉’、‘红宝石’和‘王族’通过提高WUE来抵抗干旱胁迫, ‘绚丽’、‘红丽’和垂丝海棠通过维持较强的恢复能力适应抗旱。干旱时, ‘绚丽’比其他海棠能够更高效地利用水分。

关键词: 海棠; 干旱复水; 光合作用; 水分利用效率; 抗旱性

干旱缺水是影响植物生长发育和农业生产的重要因素, 我国是水资源短缺的国家, 水的供需存在着巨大矛盾。绿化树木对水分需求比较高, 绿化用水的供需风险不容忽视问题(孙红等2014), 在利用工程技术及节水栽培达到最佳绿化效果的同时, 应积极挖掘和利用抗旱种质资源(Chaves等2003)。

海棠即可观花也可观果, 是深受欢迎的观赏树木; 同时, 大多数类型的海棠还可用作栽培苹果和优异观赏海棠的砧木(陈恒新2007), 它在环境绿化美化, 植物观赏和果树栽培领域均具有重要的研究和应用价值(楚爱香和汤庚国2008)。我国海棠种质资源丰富, 类型多样, 但不同类型的海棠对环境的适应性有较大差异(张静等2013)。由于海棠作为观赏植物资源的研究起步较晚, 对于干旱胁迫下不同类型海棠的光合蒸腾和水分利用效率研究报道比较少见。本研究选择13个类型的观赏海棠, 采用盆栽自然干旱人工控水法, 测定光合指标, 计算水分利用效率, 比较不同类型间的差异, 评价海棠的抗旱性, 为抗旱性苹果砧木的筛选以及海棠在干旱地区的绿化应用提供参考。

材料与方 法

1 植物材料

试验所用13个海棠类型来自山东省临沂世标园林海棠资源圃和山东农业大学(表1)。

2 试验方法

2.1 植株栽培

试验在山东农业大学温室和山东省高校果树生物学重点实验室进行。于2014年10月采集以上海棠果实, 取其饱满充实的种子, 清洗, 灭菌后与5

倍体积的河沙混合, 置于4°C冰箱内进行层积处理。2015年1月, 挑选发芽长势一致的种子播于育苗钵, 出苗后定植于7.5 cm×7.5 cm×10 cm的花盆中, 盆栽土壤为草炭土、蛭石和珍珠岩按照3:1:1的体积比均匀混合而成。

2.2 干旱与复水处理

当植株生长至第7片真叶刚出现时, 选取生长势一致的盆栽幼苗, 在充分灌溉后停止供水, 12 d后重新灌水(复水)。于停水当天(0 d)和第4、8、12天及复水后第4天(fs)测定其土壤相对含水量(RWC)和海棠叶片净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)和水分利用效率(WUE)。

2.3 指标测定及统计方法

选择晴朗天气上午的9:00~11:00利用CI-RAS-2便携式光合荧光仪测定各类型海棠的中部功能叶片的 P_n 和 T_r , 并取其平均值, 计算 $WUE=P_n/T_r$ (Nijs等1997)。

利用水分温度测定仪定期测定各处理的土壤含水量, 并计算出土壤相对含水量。

用Microsoft Excel 2003和DPS 7.05软件进行数据分析, 用新复极差法进行差异显著性检验。

实验结果

1 干旱及旱后复水过程中各类型海棠的土壤相对含水量

如表2所示, 各类型海棠土壤相对含水量在停

收稿 2015-12-10 修订 2016-03-01
资助 国家“十二五”科技支撑计划项目(2014BAD16B02)和国家自然科学基金(31372016)。

* 通讯作者(E-mail: hqyang@sdau.edu.cn; labft@sdau.edu.cn)。

表1 供试13个类型海棠的产地

Table 1 The producing area of thirteen crabapples tested in the study

海棠	产地
平邑甜茶矮生型(<i>Malus hupehensis</i> var. <i>pinyiensis</i> Dwarfed)	山东省临沂市世标园林海棠资源圃
平邑甜茶(<i>M. hupehensis</i> var. <i>pinyiensis</i> Jiang)	山东省泰安市山东农业大学园艺试验站
北美海棠‘红艳’(<i>M. ‘Hongyan’</i>)	山东省泰安市山东农业大学校园
北美海棠‘糖美林’(<i>M. ‘Sugar Tyme’</i>)	山东省临沂市世标园林院内
北美海棠‘红粉’(<i>M. ‘Hongfen’</i>)	山东省泰安市山东农业大学校园
北美海棠‘紫色王子’(<i>M. ‘Purple Prince’</i>)	山东省临沂市世标园林院内
北美海棠‘红宝石’(<i>M. ‘Red Jade’</i>)	山东省临沂市世标园林院内
北美海棠‘红丽’(<i>M. ‘Red Splendor’</i>)	山东省临沂市世标园林海棠资源圃
北美海棠‘绚丽’(<i>M. ‘Radiant’</i>)	山东省临沂市世标园林海棠资源圃
北美海棠‘王族’(<i>M. ‘Royalty’</i>)	山东省临沂市世标园林海棠资源圃
西府海棠(<i>M. micromalus</i> Makino)	山东省临沂市世标园林海棠资源圃
垂丝海棠(<i>M. halliana</i> Koehne)	山东省临沂市世标园林海棠资源圃
北美海棠‘雪球’(<i>M. ‘Snowdrift’</i>)	山东省泰安市山东农业大学校园

表2 干旱复水下不同类型海棠土壤相对含水量变化

Table 2 Changes in RWC of various types of crabapples leaves under drought and rehydration

类型	土壤相对含水量/%				
	干旱处理0 d	干旱处理4 d	干旱处理8 d	干旱处理12 d	复水
平邑甜茶矮生型	86.8±5.02 ^{bcd}	47.6±1.04 ^a	32.7±5.44 ^a	12.0±1.62 ^{cd}	55.0±2.70 ^{de}
平邑甜茶	91.9±3.26 ^{ab}	44.5±3.84 ^{ab}	21.2±1.20 ^c	11.5±2.95 ^{cd}	62.1±3.26 ^{bc}
‘红艳’	87.9±3.52 ^{abc}	39.6±2.21 ^{ab}	32.9±4.01 ^a	20.4±1.05 ^a	53.5±2.61 ^{ef}
‘糖美林’	87.6±3.53 ^{abc}	39.6±2.29 ^{ab}	30.0±4.62 ^{ab}	5.3±0.80 ^e	62.0±3.15 ^{bc}
‘红粉’	93.9±4.67 ^a	40.3±4.04 ^{ab}	34.7±1.60 ^a	8.3±2.38 ^{de}	64.3±2.03 ^b
‘紫色王子’	82.1±4.10 ^{cd}	43.3±1.37 ^{ab}	34.8±3.15 ^a	9.7±1.07 ^{de}	74.1±1.22 ^a
‘红宝石’	76.4±2.46 ^f	39.8±4.10 ^{ab}	32.7±1.15 ^a	17.0±1.41 ^{abc}	50.6±2.78 ^{fg}
‘红丽’	76.1±2.73 ^f	36.1±3.55 ^b	29.9±1.42 ^{ab}	8.4±1.59 ^{de}	75.5±1.20 ^a
‘绚丽’	75.1±1.31 ^f	41.2±2.20 ^{ab}	33.6±5.25 ^a	19.4±1.64 ^{ab}	59.2±1.86 ^c
‘王族’	81.8±5.69 ^{cd}	35.4±4.19 ^b	19.7±1.81 ^c	12.6±0.53 ^{cd}	60.1±2.16 ^c
西府海棠	80.4±4.56 ^{def}	38.2±2.86 ^{ab}	23.4±1.25 ^c	13.8±2.52 ^{bcd}	50.4±1.64 ^g
垂丝海棠	78.2±1.96 ^{ef}	37.7±2.20 ^b	24.5±2.06 ^{bc}	16.2±0.81 ^{abc}	58.4±1.85 ^{cd}
‘雪球’	83.5±3.20 ^{cde}	35.1±2.74 ^b	20.4±1.78 ^c	12.4±0.36 ^{cd}	53.1±1.27 ^{efg}

不同小写字母表示差异性达5%显著水平。下表同此。

止供水当天(0 d)为75%~95%，之后逐渐下降，在第4、8、12天时分别降至35%~50%、20%~35%、5%~20%。按照Hsiao (1973)的水分胁迫划分标准，停止供水第4、8、12天相当于轻度干旱、中度干旱和重度干旱。恢复供水4 d后，土壤相对含水量恢复为50%~75%。

2 正常供水处理下各类型海棠叶片的光合蒸腾及水分利用效率

停止供水当天，土壤水分充足，各类型海棠还没有受到干旱胁迫，此时，平邑甜茶的净光合速率最高，其次是‘王族’，西府海棠的净光合速率最低，

‘紫色王子’也很低，其余大部分类型的海棠净光合速率相近。平邑甜茶、‘绚丽’和‘王族’3个类型的蒸腾速率较高，‘紫色王子’、‘红艳’、‘红丽’和西府海棠4个类型的较低。‘红艳’的叶片水分利用效率最高，其次是‘红丽’和‘紫色王子’，‘绚丽’和西府海棠的最低(图1)。

3 轻度干旱胁迫下各类型海棠叶片的光合蒸腾及水分利用效率

由图2可见，停止供水第4天，各类型海棠处于轻度干旱胁迫状态。与停止供水当天相比(图1)，叶片净光合速率整体出现下降趋势，此时，平邑甜

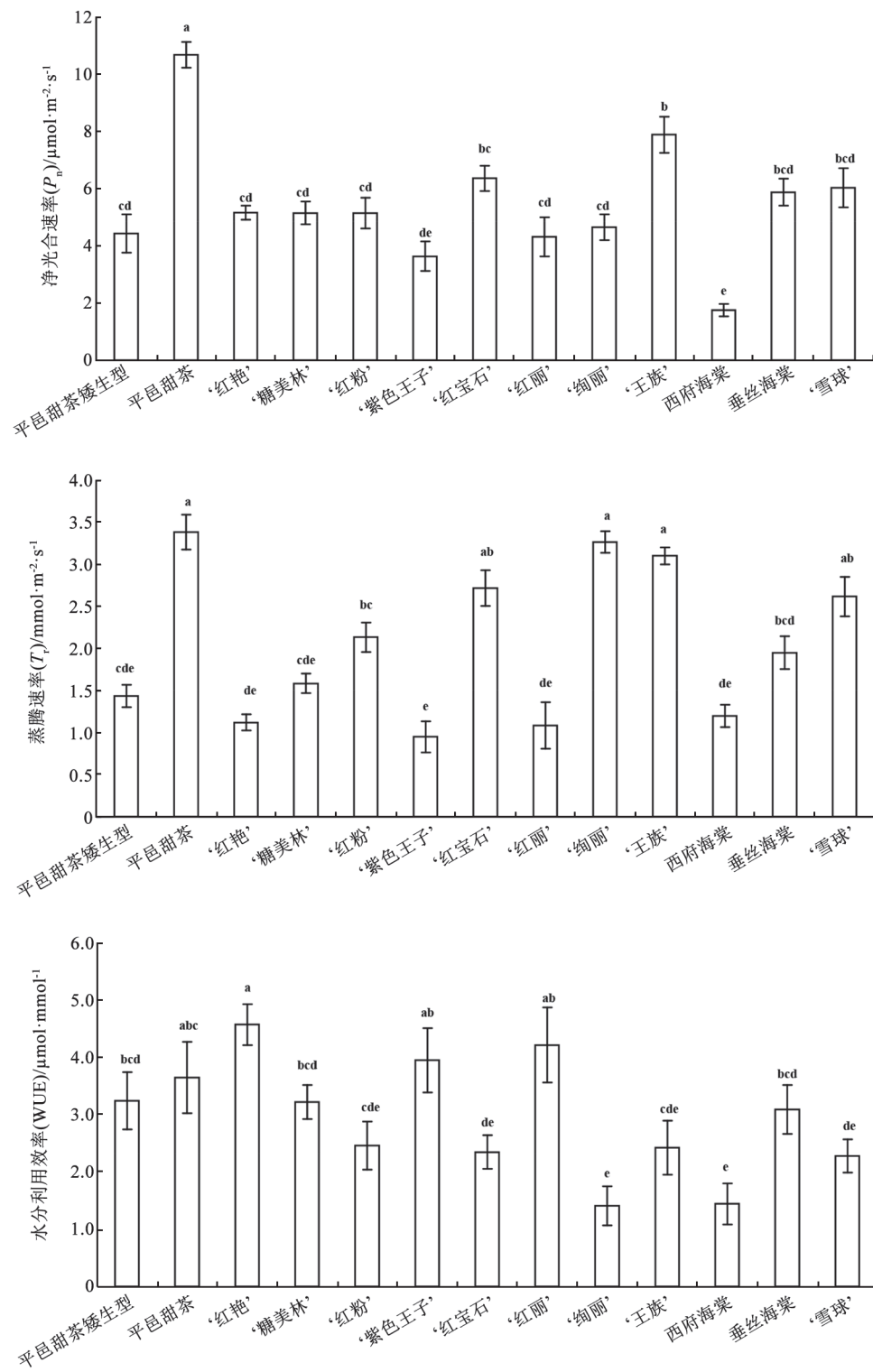


图1 正常供水处理下海棠叶片的净光合速率、蒸腾速率和水分利用效率

Fig.1 P_n , T_r and WUE of crabapples leaves under normal water supply

不同小写字母表示差异性达5%显著水平。下图同此。

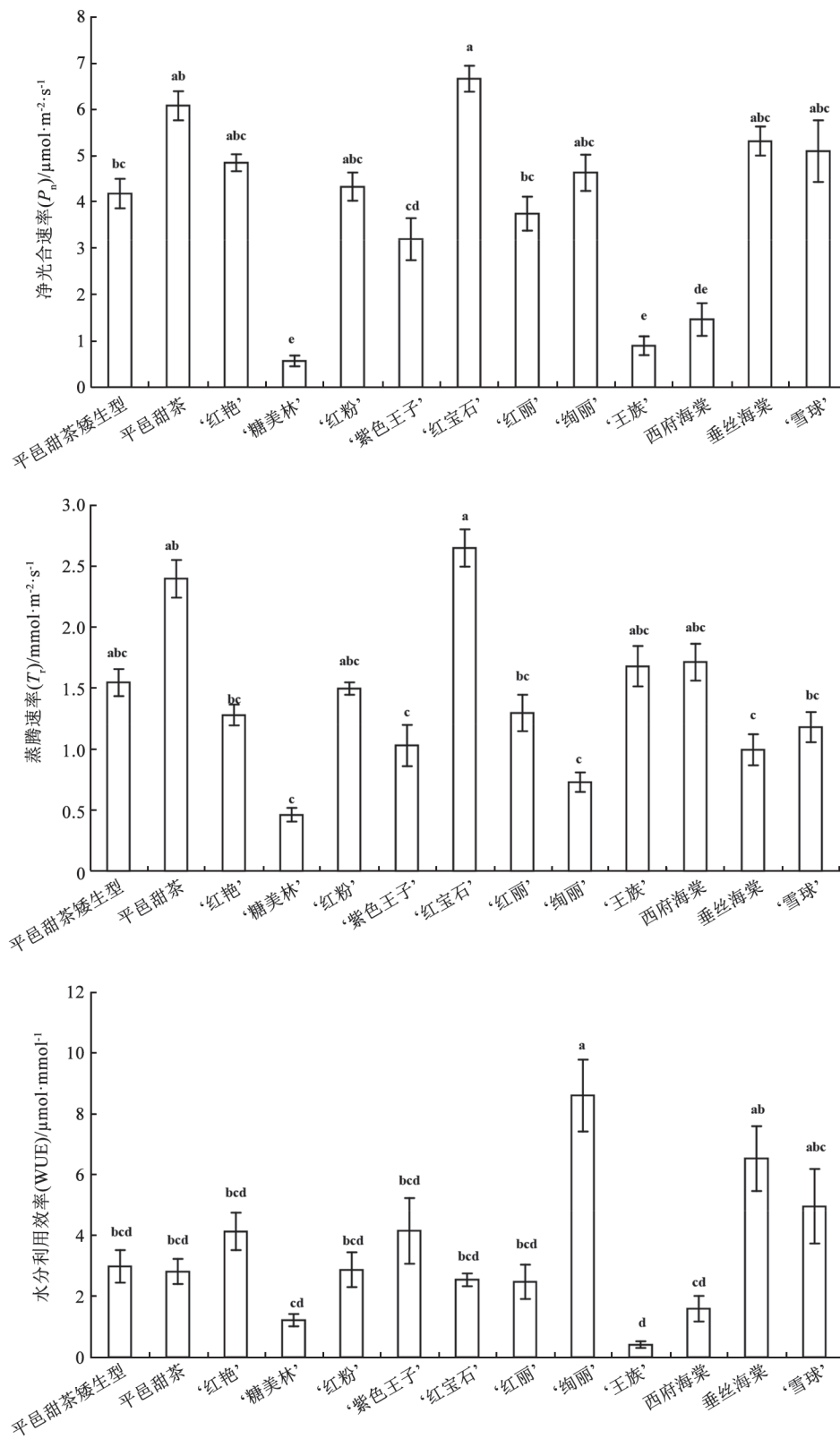


图2 轻度干旱胁迫下海棠叶片的净光合速率、蒸腾速率和水分利用效率

Fig.2 P_n , T_r and WUE of crabapples leaves under mild drought stress

茶仍是叶片净光合速率最高的2个类型之一,西府海棠仍是净光合速率最低的类型之一,而‘王族’则由较高的类型变为较低的类型;‘糖美林’的净光合速率降幅(89.00%)最大,‘绚丽’的降幅(0.36%)最小,表明轻度干旱胁迫对‘绚丽’、平邑甜茶和西府海棠的光合作用没有太大影响,而对‘王族’和‘糖美林’的光合抑制明显,即从叶片净光合速率的变化来看,‘绚丽’、平邑甜茶和西府海棠对轻度干旱胁迫不太敏感,而‘王族’和‘糖美林’则比较敏感。

停止供水第4天,大部分海棠的叶片蒸腾速率也呈下降趋势,而叶片水分利用效率出现增长趋势,其中,‘绚丽’的 T_r 降幅(77.55%)和WUE增幅(5.11倍)均最大。在13个海棠中,‘绚丽’WUE为最高(图2),说明在轻度干旱胁迫下‘绚丽’比其他类型能够更高效地利用水分。

4 中度干旱胁迫下各类型海棠叶片的光合蒸腾及水分利用效率

由图3可见,停止供水第8天,各类型海棠处于中度干旱胁迫状态。它们的净光合速率均持续下降,其中,‘王族’降幅(63.71%)最大,‘红艳’降幅(7.10%)最小,平邑甜茶和‘红宝石’依然保持较高水平,表明中度干旱胁迫对平邑甜茶、‘红宝石’和‘红艳’的光合作用影响较小,而对‘王族’的抑制最明显。

图3还显示,停止供水第8天时,大部分海棠的蒸腾速率持续下降,水分利用效率持续增高,与停止供水当天(图1)相比,‘绚丽’的 T_r 降幅(90.31%)和WUE增幅(11.7倍)仍然最大,WUE数值也最高。中度干旱胁迫使‘绚丽’的 T_r 明显下降导致其WUE明显提高,说明‘绚丽’比其他类型能够更高效地利用水分。

5 重度干旱胁迫下各类型海棠叶片的光合蒸腾及水分利用效率

图4显示,停止供水第12天,各类型海棠处于重度干旱胁迫状态,它们的 P_n 持续下降。‘红艳’和‘红宝石’的 P_n 依然保持较高,平邑甜茶由净光合速率较高类型降至一般水平,‘西府海棠’仍是净光合速率最低的类型之一。与停止供水当天相比,平邑甜茶矮生型的 P_n 降幅(77.8%)最大,其次是平邑甜茶(71.7%),‘红艳’降幅(13.5%)最小(表3)。

在轻度和中度干旱胁迫下,平邑甜茶及其矮

生型能保持较高的 P_n ,而在重度干旱胁迫时显著下降,说明停止供水第12天应达到了平邑甜茶能够承受的胁迫临界点。在整个胁迫过程中,‘红艳’的 P_n 变化幅度较小,对干旱胁迫不敏感,在重度胁迫时依然保持较高的 P_n ,具有耐干旱、高光合的特点。西府海棠一直保持较小的净光合速率,对干旱胁迫也不敏感,呈现耐干旱、低光合的特点。

重度干旱胁迫下,各类型海棠的蒸腾速率依然下降,平邑甜茶依然保持相对较高的蒸腾速率(图4)。正常供水相比,‘绚丽’ T_r 的降幅(91.3%)仍然最大,其次是‘王族’(78.5%);‘紫色王子’降幅(5.3%)最小,其次是‘红艳’(表3)。

重度干旱胁迫下,‘王族’和‘绚丽’能保持较高的水分利用效率,而西府海棠的WUE仍然最低,平邑甜茶矮生型、平邑甜茶和紫色王子也较低(图4)。与停止供水当天相比,除平邑甜茶矮生型、平邑甜茶、紫色王子和西府海棠的WUE下降外,其他9个类型海棠的均上升,其中‘绚丽’的增幅(4.14倍)最大,其次是‘王族’(2.26倍),‘红丽’增幅(22.6%)最小(表3)。

恢复供水第4天,‘雪球’的 P_n 最高;‘紫色王子’和‘红粉’的 P_n 比较高;‘王族’、‘红丽’和‘红艳’的比较低;西府海棠的最低(图5)。

复水后各类海棠的 P_n 均比停水第12天大幅度升高,‘紫色王子’增幅(4.91倍)最大,其次是平邑甜茶矮生型(4.53倍)和‘绚丽’(3.62倍),‘红艳’增幅(23.58%)最小;相比于停止供水当天,除了平邑甜茶、‘王族’和西府海棠外,其他9个类型的 P_n 变化都为正值(表4),其中,‘紫色王子’增幅(1.47倍)最大,其次是‘绚丽’(75.6%)和‘雪球’(70.2%),表明‘紫色王子’等9个类型的海棠都能够恢复甚至超过了原初状态。12 d的停水虽然使 P_n 下降,但对它们不仅没有损害叶片的光合机构,甚至还增强了叶片光合性能,尤其是‘紫色王子’,其 P_n 具有很强的恢复能力,干旱胁迫对其有良好的“锻炼”作用。

恢复供水第4天,‘雪球’的 T_r 最高,‘红宝石’和平邑甜茶的较高,垂丝海棠、‘绚丽’和‘红丽’的较低,‘红丽’的最低(图5)。所有海棠的 T_r 在复水后均回升,与停止供水第12天相比,‘糖美林’的回升幅度(4.86倍)最大,其次是‘绚丽’和平邑甜茶矮生型;与停止供水当天相比,‘紫色王子’、‘糖美林’等8个

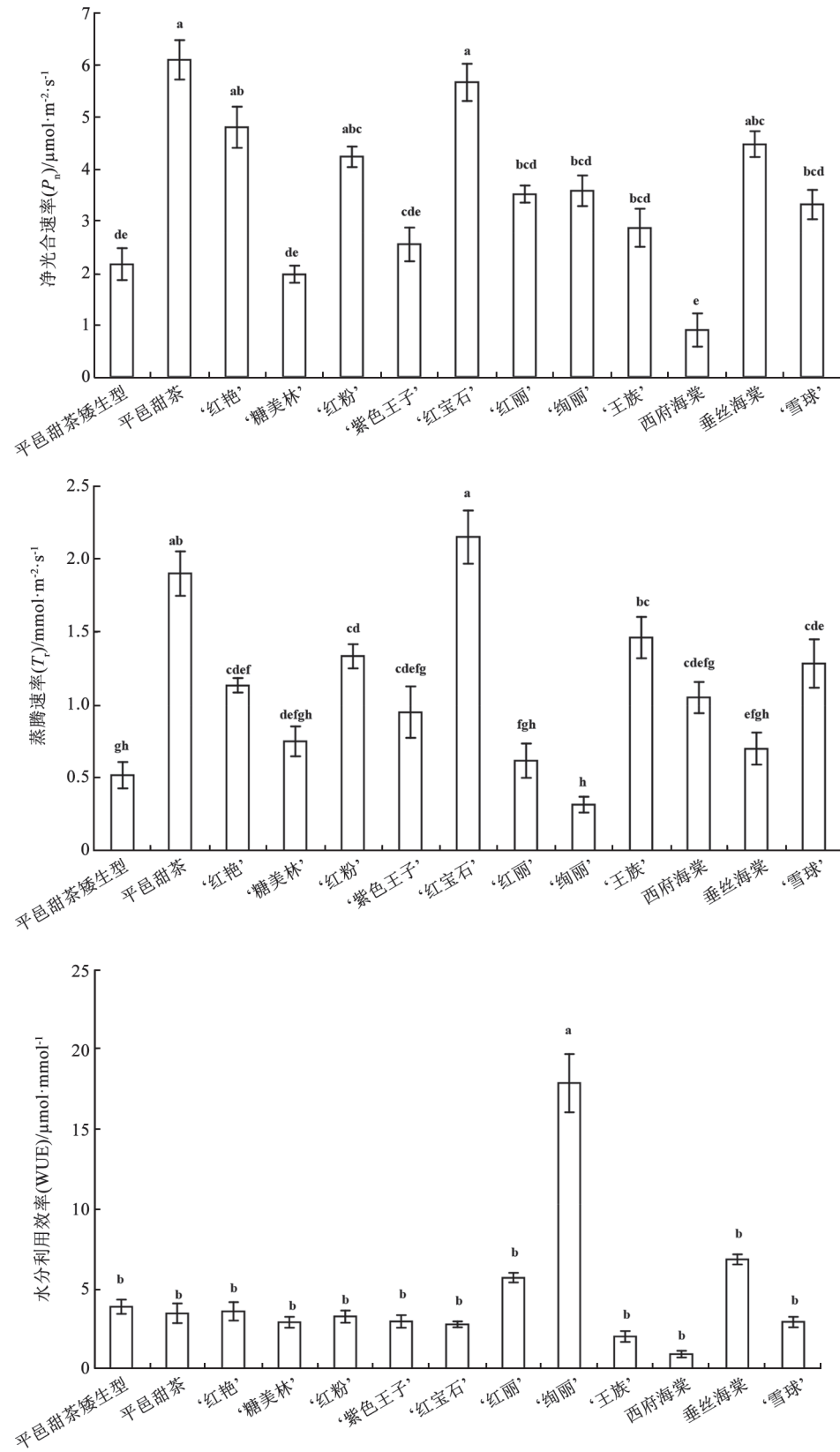


图3 中度干旱胁迫下海棠叶片的净光合速率、蒸腾速率和水分利用效率

Fig.3 P_n , T_r and WUE of crabapples leaves under moderate drought stress

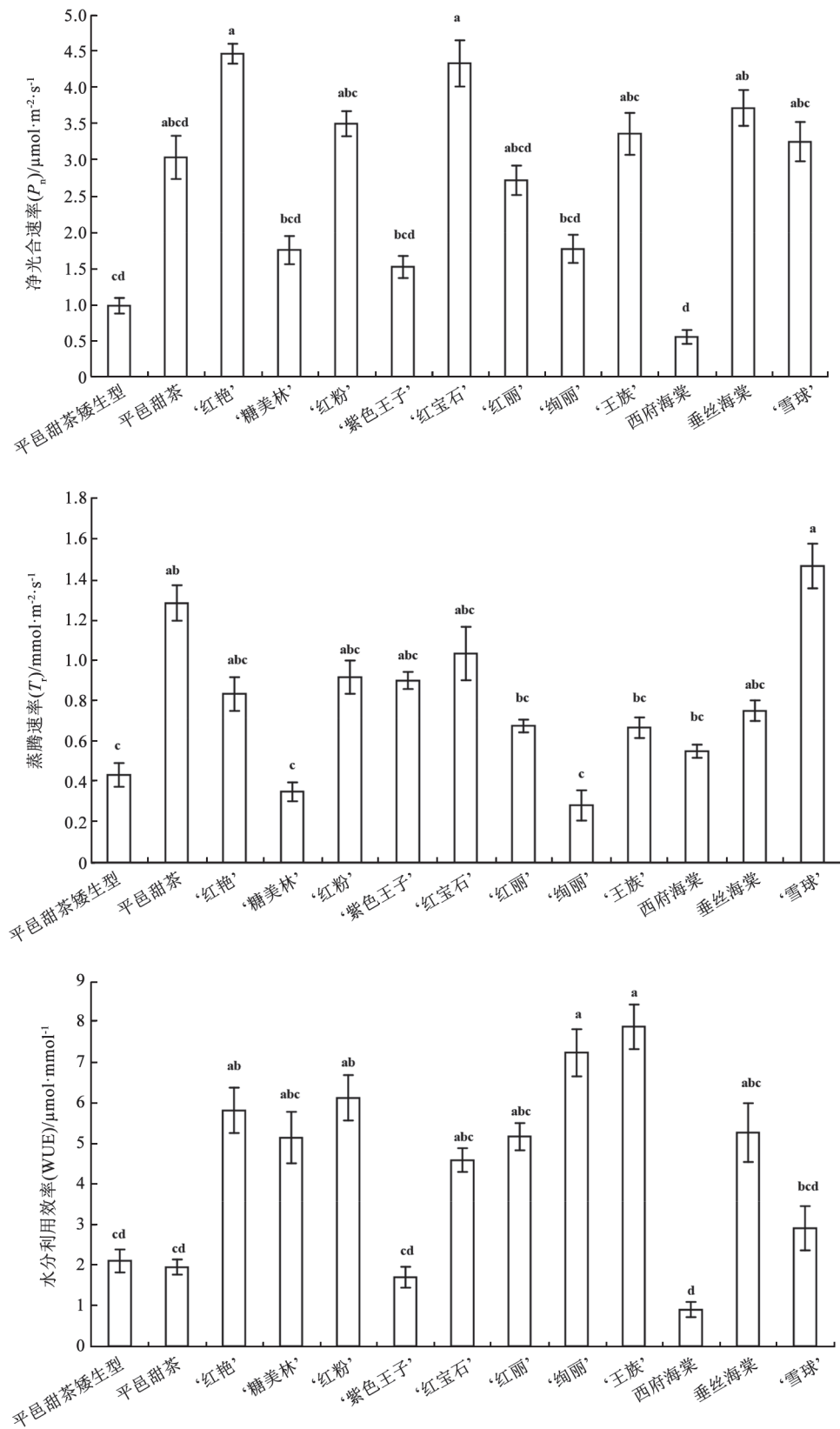


图4 重度干旱胁迫下海棠叶片的净光合速率、蒸腾速率和水分利用效率

Fig.4 P_n , T_r and WUE of crabapples leaves under severe drought stress

表3 重度干旱胁迫下各海棠叶片 T_r 、 P_n 和WUE的变化幅度Table 3 The change range of T_r , P_n and WUE in crabapples leaves under severe drought stress

类型	变化幅度(重度干旱胁迫/正常供水)/%		
	T_r	P_n	WUE
平邑甜茶矮生型	-69.8	-77.8	-35.2
平邑甜茶	-62.1	-71.7	-46.6
‘红艳’	-25.6	-13.5	+27.2
‘糖美林’	-77.9	-66.0	+59.5
‘红粉’	-57.0	-32.0	+149.2
‘紫色王子’	-5.30	-58.3	-57.0
‘红宝石’	-62.0	-31.9	+95.8
‘红丽’	-37.7	-37.1	+22.6
‘绚丽’	-91.3	-62.0	+413.8
‘王族’	-78.5	-57.5	+225.6
西府海棠	-54.2	-68.6	-37.5
垂丝海棠	-61.5	-36.8	+70.2
‘雪球’	-43.9	-46.1	+27.7

数值前的“+”号表示升高,“-”号表示降低。下表同此。

类型恢复甚至超过了原初状态,‘绚丽’、‘王族’等5个类型没有恢复到停止供水当天的水平(表4)。

恢复供水第4天,‘红丽’的WUE最高,‘绚丽’和垂丝海棠次之,其余各类型海棠之间差异不明显。复水后,各类型海棠的WUE变化差异较大,与停止供水第12天相比,平邑甜茶、平邑甜茶矮生型、‘紫色王子’、‘红丽’和垂丝海棠的WUE增加,其余8个类型均降低;与停止供水当天相比,‘糖美林’、‘红粉’、‘红丽’、‘绚丽’、垂丝海棠和‘雪球’的WUE增加,其中,‘绚丽’增幅(3.25倍)最大,其次是‘红丽’和垂丝海棠,其余7个类型均降低(表4)。

讨 论

在不显著降低光合速率的前提下,尽可能地降低蒸腾速率,是植物适应干旱的一种重要策略(尹丽等2010)。在停止供水过程中,‘绚丽’、‘王族’、‘糖美林’和平邑甜茶矮生型的 T_r 降幅较大,‘紫色王子’和‘红艳’的 T_r 变化幅度较小,单从蒸腾速率的变化看,‘绚丽’、‘王族’、‘糖美林’和平邑甜茶矮生型能够通过降低蒸腾速率而适应土壤干旱,‘紫色王子’和‘红艳’基本不能通过降低蒸腾速率而适应土壤干旱。干旱胁迫下致植物叶片光合速率的降低程度与其抗旱能力有关(裴斌等2013),‘红艳’和‘红宝石’的 P_n 在整个干旱过程中降幅较小,绚

丽’、平邑甜茶矮生型和‘糖美林’的 P_n 降幅较大,但复水后回升较高,因此,单从光合速率的变化来看,‘红艳’、‘红宝石’、‘绚丽’、平邑甜茶矮生型和‘糖美林’抗旱能力较强。平邑甜茶的 P_n 虽然较高,但在重度胁迫后显著下降,复水后也未恢复至正常供水时的水平,表明平邑甜茶对严重干旱的适应能力较低。相同环境条件下,WUE值越大的植物,其经济用水能力越高,抵御干旱的能力越强(韩永芬等2013)。在整个干旱过程中,‘红艳’、‘糖美林’、‘红粉’、‘红宝石’和‘王族’的WUE逐渐增加,说明随着胁迫程度的加剧,这些海棠可通过WUE的增加来抵抗干旱胁迫;‘绚丽’、‘红丽’和垂丝海棠的WUE在复水后显著超过正常供水时的水平,显示它们可通过WUE的恢复而适应干旱胁迫。

综合分析可知,在整个干旱过程中,‘红艳’和‘红宝石’ P_n 、 T_r 和WUE的变化比较稳定, P_n 一直保持较高水平,呈现耐干旱、高 P_n 的特点。‘红粉’的 P_n 、 T_r 虽然不是最高,但干旱时降幅较小,并一直保持在中上水平,而且其WUE在重度胁迫时也保持较高水平,并且 P_n 、 T_r 和WUE在复水后都超过了正常供水时的水平,显示‘红粉’对土壤干旱也有较强的适应能力。‘王族’的 P_n 、 T_r 和WUE在正常供水条件下均较高,轻度干旱虽然明显下降,但它在严重胁迫时保持较高的 P_n 和WUE。‘糖美林’的 P_n 、 T_r 和WUE在轻度干旱时降幅均较大,但复水后能够恢复到略高于正常供水时的水平,说明它可通过维持较强的恢复力而适应土壤干旱。平邑甜茶在水分充足、轻度和中度干旱时均能保持较高的 P_n 和 T_r ,但在重度干旱时,其 P_n 、 T_r 和WUE显著降低,复水后也未恢复至正常供水水平,表明停止供水12 d导致的严重胁迫是其能够承受的胁迫临界点。平邑甜茶矮生型在水分充足、轻度和中度干旱时 P_n 、 T_r 和WUE均处于中等水平,降幅较小,受胁迫影响小;重度干旱时, P_n 下降明显,复水后 P_n 和 T_r 回升,但WUE未恢复至正常供水水平,可见平邑甜茶矮生型也是能够忍受轻中度干旱而不适应重度干旱。在干旱胁迫下,‘绚丽’ P_n 降幅较小, T_r 降幅大,其WUE一直是13个海棠中最高的,并且 P_n 和WUE复水后明显提高,可见干旱提高了‘绚丽’的水分利用能力。西府海棠、紫色王子、‘红丽’、‘雪球’和垂丝海棠的 P_n 、 T_r 和WUE在整个干旱过程中

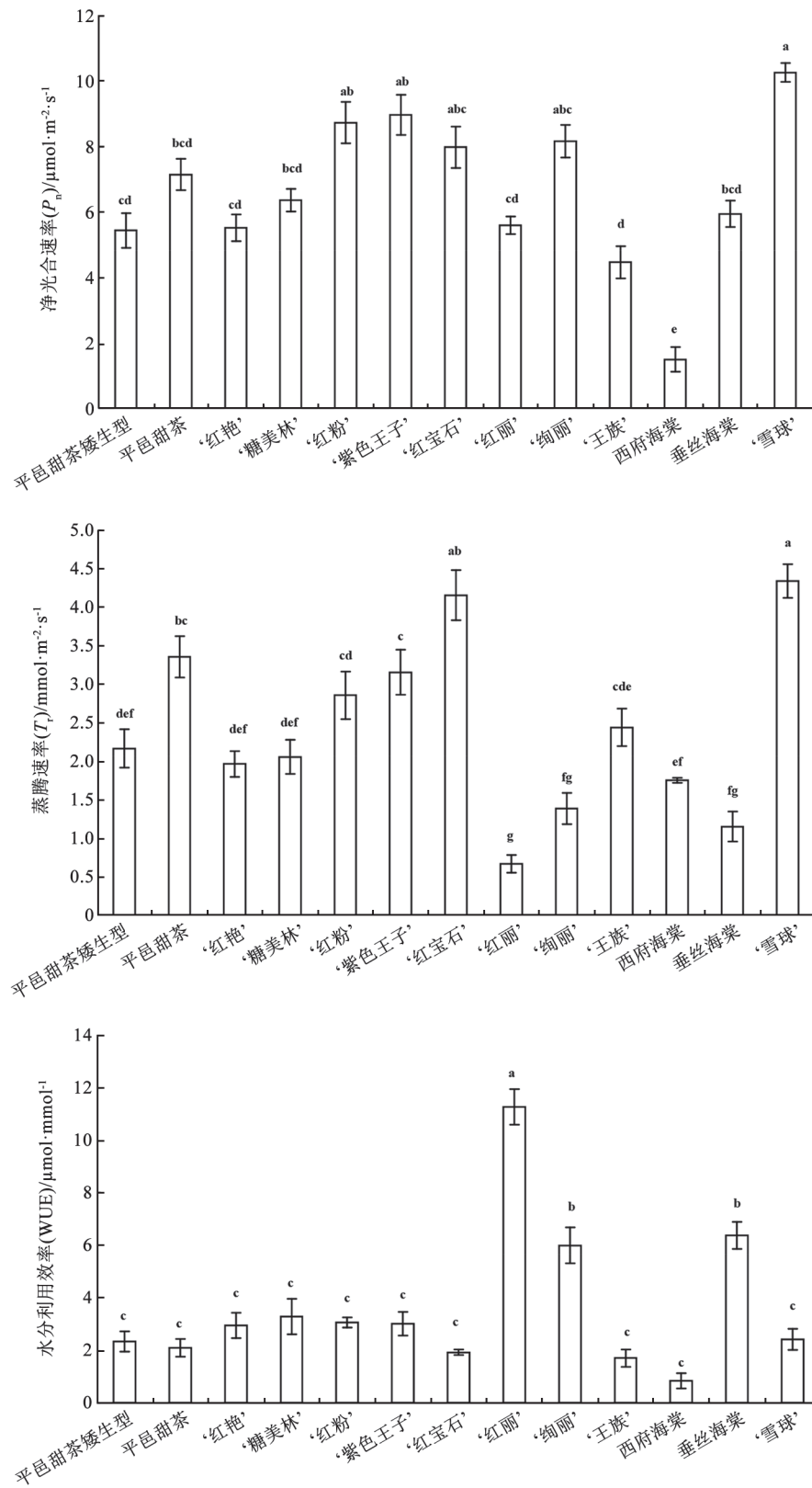


图5 恢复供水下海棠叶片的净光合速率、蒸腾速率和水分利用效率
 Fig.5 P_n , T_r and WUE of crabapples leaves after restoring water supply

表4 复水处理下各海棠叶片 T_r 、 P_n 和WUE的变化幅度Table 4 The range of change of T_r , P_n and WUE from the fourth day to restore water supply

类型	变化幅度(相对于重度干旱)/%			变化幅度(相对于停水当天)/%		
	T_r	P_n	WUE	T_r	P_n	WUE
平邑甜茶矮生型	+398.5	+453.2	+11.1	+50.7	+22.7	-27.9
平邑甜茶	+161.0	+135.7	+7.7	-1.0	-33.2	-42.5
‘红艳’	+135.2	+23.6	-49.3	+75.0	+6.8	-35.5
‘糖美林’	+485.7	+263.8	-36.2	+29.5	+23.6	+1.8
‘红粉’	+210.9	+149.5	-50.0	+33.6	+69.6	+24.7
‘紫色王子’	+250.0	+491.2	+76.9	+231.6	+146.8	-23.8
‘红宝石’	+301.6	+84.2	-58.1	+52.8	+25.4	-17.9
‘红丽’	-1.2	+106.1	+118.2	-38.5	+29.7	+167.4
‘绚丽’	+388.3	+362.3	-17.2	-57.7	+75.6	+325.5
‘王族’	+265.0	+32.9	-78.4	-21.5	-43.5	-29.7
西府海棠	+218.2	+172.7	-6.9	+45.8	-14.3	-41.8
垂丝海棠	+53.3	+59.9	+21.1	-41.0	+1.0	+106.2
‘雪球’	+195.4	+215.9	-16.8	+65.6	+70.2	+6.2

一直处于中低水平, 变化幅度也比较小, 对土壤干旱有较低的敏感性; 复水后, 西府海棠的 P_n 和WUE依然在13个海棠中处于最低, 呈现不敏感、低 P_n 和低WUE的特点; 而‘雪球’和‘紫色王子’的 P_n 以及‘红丽’和垂丝海棠的WUE在复水后明显增大, 显示出较强的恢复能力。

在干旱胁迫下维持高水平的 P_n 和WUE以及复水后能够很快恢复甚至超过原初状态更有利于适应干旱。据此, 可将13个类型海棠分为3种类型, 其中: ‘绚丽’、‘红丽’、‘红粉’和‘雪球’为抗旱能力比较强的类型; 平邑甜茶、平邑甜茶矮生型和西府海棠为抗旱能力比较弱的类型; 其他海棠为中间类型。

参考文献

- Chaves MM, Maroco JP, Pereira S (2003). Understanding plant responses to drought from genes to the whole plant. *Funct Plant Biol*, 30: 239–264
- Chen HX (2007). Research on the cultivars classification and resources utilization of crabapple (*Malus* spp.) in Shandong [Master's thesis]. Nanjing: Nanjing Forestry University (in Chinese with English abstract) [陈恒新(2007). 山东海棠品种分类与资源利用研究[硕士论文]. 南京: 南京林业大学]
- Chu AX, Tang GG (2008). Research on the cultivar classification of ornamental crabapples. *Bull Biol*, 07: 15–17 (in Chinese) [楚爱香, 汤庚国(2008). 观赏海棠品种分类研究进展. 生物学通报, 07: 15–17]
- Han YF, Luo TJ, Li J, Zhao XY, Yang F, Lu RX (2013). Photosynthet-

- ic properties of three chicory lines and their responses to drought stress. *Pratac Sci*, (07): 1036–1043 (in Chinese with English abstract) [韩永芬, 罗天琼, 李娟, 赵相勇, 杨菲, 陆瑞霞(2013). 干旱胁迫条件下菊苣的光合响应. 草业科学, (07): 1036–1043]
- Hsiao TC (1973). Plant responses to water stress. *Ann Rev Plant Physiol*, 24: 519–570
- Nijis I, Ferris R, Blum H (1997). Stomatal regulation in a changing climate: A field study using free air temperature increase (FATI) and free air CO₂ enrichment (FACE). *Plant Cell Environ*, 20 (8) : 1041–1050
- Pei B, Zhang GG, Zhang SY, Wu Q, Xu ZQ, Xu P (2013). Effects of soil drought stress on photosynthetic characteristics and antioxidant enzyme activities in *Hippophae rhamnoides* Linn. seedlings. *Acta Ecol Sin*, 33 (5): 1386–1396 (in Chinese with English abstract) [裴斌, 张光灿, 张淑勇, 吴芹, 徐志强, 徐萍 (2013). 土壤干旱胁迫对沙棘叶片光合作用和抗氧化酶活性的影响. 生态学报, 33 (5): 1386–1396]
- Sun H, Mi F, Tian MH, Peng QD (2014). Risk assessment of water supply and demand for urban greening in Beijing city. *Bull Soil Water Conserv*, 34 (5): 153–157 (in Chinese with English abstract) [孙红, 米锋, 田明华, 彭强第(2014). 北京市城市绿化用水的供需风险评估. 水土保持通报, 34 (5): 153–157]
- Yin L, Hu TX, Liu YA, Yao SF, Ma J, Liu WT, He C (2010). Effect of drought stress on photosynthetic characteristics and growth of *Jatropha curcas* seedlings under different nitrogen levels. *Chin J Appl Ecol*, (03): 569–576 (in Chinese with English abstract) [尹丽, 胡庭兴, 刘永安, 姚史飞, 马娟, 刘文婷, 何操 (2010). 干旱胁迫对不同施氮水平麻疯树幼苗光合特性及生长的影响. 应用生态学报, (03): 569–576]
- Zhang J, Zhao LM, Zou ZR (2013). Drought resistance of different apple rootstocks *in vitro*. *J Fruit Sci*, (01): 88–93 (in Chinese with English abstract) [张静, 赵亮明, 邹志荣(2013). 不同苹果砧木组培苗抗旱性的比较研究. 果树学报, (01): 88–93]

Effect of drought and rehydration on photosynthetic transpiration and water use efficiency of crabapple

XU Ying, ZHANG Rui-Xue, CAO Hui, NING Liu-Fang, ZHOU Chun-Ran, LÜ Ting-Wen, YANG Hong-Qiang*

College of Horticulture Science and Engineering, Shandong Agricultural University/State Key Laboratory of Crop Biology, Tai'an, Shandong 271018, China

Abstract: The seedlings of 13 types of crabapples were used as experimental materials and analyzed the net photosynthesis rate (P_n), transpiration rate (T_r), water use efficiency (WUE) of leaves under the natural soil drought and rehydration. The results showed that *Malus micromalus* had the lowest P_n and T_r in the 13 types of crabapples and was the least sensitive to water changes; *M. pinyiensis* was suitable for mild and moderate drought but not suitable for severe drought. After rehydration, the P_n of *M.* 'Purple Prince', *M.* 'Radiant', *M.* 'Snowdrift' and other 9 types of crabapples were obviously more than those of the original state; *M.* 'Hongyan', *M.* 'Sugar Tyme', *M.* 'Hongfen', *M.* 'Red Jade' and *M.* 'Royalty' resisted drought stress by improving WUE, *M.* 'Radiant', *M.* 'Red Splendor' and *M. halliana* resisted drought stress by maintaining strong recovery capability. And *M.* 'Radiant' had more efficient use of water than others.

Key words: crabapple; drought and rehydration; photosynthesis; water use efficiency; drought-resistance

Received 2015-12-10 Accepted 2016-03-01

This work was supported by National "Twelfth Five-Year" Plan for Science & Technology Support (Grant No. 2014BAD16B02) and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 31372016).

*Corresponding author (E-mail: hqyang@sdau.edu.cn; labft@sdau.edu.cn).