

转 UDP-葡萄糖:类黄酮 3-O-糖基转移酶基因的高山红景天叶绿素荧光特性

未晓巍, 宁思淇, 杨 槟, 张 鑫, 徐洪伟, 周晓馥

(吉林师范大学 吉林省植物资源科学与绿色生产重点实验室, 吉林 四平 136000)

摘 要:以高山红景天为试材,采用 IMAGING-PAM 调制叶绿素荧光成像系统,测定了转 UDP-葡萄糖:类黄酮 3-O-糖基转移酶基因 *FaGT1* 的高山红景天及转 *FaGT1* 的 RNAi 作用基因 *FaGT1i* 的高山红景天的叶绿素荧光参数,分析转 UDP-葡萄糖:类黄酮 3-O-糖基转移酶基因的高山红景天叶片的叶绿素荧光特性,为研究红景天种质改良提供科学依据。结果表明:当光照强度为 $55 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,转 *FaGT1* 基因高山红景天的光系统II的最大量子产量与高山红景天对照组和转 *FaGT1i* 基因高山红景天无显著差异,光系统II潜在活性、非光化学淬灭系数/光化学淬灭系数和实际量子产量显著高于高山红景天对照组和转 *FaGT1i* 的高山红景天,但是调节性能量耗散的量子产量、非调节性能量耗散的量子产量则相对较低。另外,通过在不同的光照强度下,对光系统II电子传递速率、光化学淬灭系数和非光化学淬灭系数进行了分析,得出转 *FaGT1* 基因高山红景天的光系统II电子传递速率、非光化学淬灭系数呈先上升后稳定的趋势,显著高于高山红景天对照组和转 *FaGT1i* 的高山红景天;但是光化学淬灭系数呈先下降后平稳的变化趋势,与对照及转 *FaGT1i* 基因高山红景天无显著差异。转 *FaGT1* 基因高山红景天的光系统II原初光能转换效率和潜在的光合活力均增强,植物自身的能量代谢得到提高,该研究结果为高山红景天的新种质培育提供了科学依据。

关键词:UDP-葡萄糖:类黄酮 3-O-糖基转移酶;高山红景天;叶绿素荧光

中图分类号:S 567.23⁺9 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0009(2017)06-0108-05

高山红景天(*Rhodiola sachalinensis* A. Bor)是长白山的一种珍稀植物资源,现被列入二级保护植物名录,全草均可入药,含有以红景天甙为主的多种生物活性成分,具有明显的抗缺氧、抗寒、抗疲劳、抗辐射、延缓机体衰老等功效^[1]。高山红景天富含红景天甙(salidroside)及其衍生物、类黄酮、多种维生素、多种微量元素和有机体所必需的多种氨基酸等^[2]。高山红景天的引种栽植受海拔高度和气候条件限制,由于药用成分红景天甙的积累时间较长,栽培周期大约 4~5 年^[3]。由于野生红景天资源稀缺,逐步

开展红景天的引种驯化及红景天合成相关基因的克隆等方向的研究显得尤为重要。UDP-葡萄糖:类黄酮 3-O-糖基转移酶作为一类 UDP-葡萄糖基转移酶与植物次生代谢产物糖基化密切相关的蛋白,该酶优先催化 UDP-葡萄糖形成花青素^[4]。许多研究表明,UDP-葡萄糖:类黄酮 3-O-糖基转移酶基因是花色苷途径的最后一个关键酶基因,该基因的表达强度与花青素的合成密切相关^[5]。UDP-葡萄糖:类黄酮 3-O-糖基转移酶基因可以调控尿苷二磷酸葡萄糖基转移酶(uridine diphosphate-glucosyltransferase, UDPGT)以尿苷二磷酸葡萄糖(uridine diphosphoglucose, UDPG)和酪醇为底物催化合成红景天甙^[6]。课题组通过已成功建立的农杆菌诱导的体系分别将外源 UDP-葡萄糖:类黄酮 3-O-糖基转移酶基因 *FaGT1* 及 *FaGT1* 的 RNAi 作用基因 *FaGT1i* 遗传转化进入高山红景天中,获得了高山红景天中红景天甙含量显著提高的新种质,这对提高高山红景天

第一作者简介:未晓巍(1986-),女,吉林长春人,硕士,助理实验师,研究方向为植物基因工程。E-mail: weixiaowei@jlnu.edu.cn.

责任作者:周晓馥(1964-),女,博士,教授,博士生导师,研究方向为植物基因工程。E-mail: zhouxiaofu@jlnu.edu.cn.

基金项目:吉林省科技发展计划资助项目(20150622022JC)。

收稿日期:2016-12-13

药用成分含量方面具有实际应用价值,但是 UDP-葡萄糖:类黄酮 3-O-糖基转移酶基因与叶绿素荧光特性之间的关系并不明确。

叶绿素荧光动力学以光合作用理论为基础用于分析植物的光合功能,在研究 PSII 及其电子传递过程中提供了丰富的信息^[7]。叶绿素荧光诱导动力学是探析植物光合特性的重要手段,为研究光系统 II (PSII)及其电子传递过程提供了丰富信息^[8]。同时,叶绿素荧光动力学技术也是研究植物光合生理状况的理想探针^[9-11]。高山红景天长期生长在高海拔地区,其独特的光合作用特性使其具有一定的抗逆境能力,目前,关于高山红景天光合作用的研究有部分报道^[12]。但是关于高山红景天叶绿素荧光方面的研究尚鲜见报道。该研究通过比较分析遗传转化 UDP-葡萄糖:类黄酮 3-O-糖基转移酶基因 *FaGTL* 及 *FaGTL* 的 RNAi 作用基因 *FaGTLi* 的高山红景天新种质的叶绿素荧光参数,以期为进一步研究 UDP-葡萄糖:类黄酮 3-O-糖基转移酶基因在高山红景天光合作用过程中次生代谢产物积累之间的关系提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试高山红景天(*Rhodiola sachalinensis* A. Bor)植株采自吉林省长白山,由东北师范大学陆静梅教授鉴定。类黄酮 3-O-糖基转移酶上调基因 *FaGTL* 及利用 RNAi 作用的类黄酮 3-O-糖基转移酶下调基因 *FaGTLi* 由德国慕尼黑工业大学生物与食品研发中心馈赠^[13]。

1.2 试验方法

参照课题组已经研究成熟的试验方法^[14]获得高山红景天遗传转化 UDP-葡萄糖:类黄酮 3-O-糖基转移酶基因 *FaGTL* 植株(以下简称转 *FaGTL* 基因高山红景天, *RhFaGTL*)和转 UDP-葡萄糖:类黄酮 3-O-糖基转移酶基因的 RNAi 作用基因 *FaGTLi* 的植株(以下简称转 *FaGTLi* 基因高山红景天, *RhFaGTLi*),该方法已经获得国家专利授权^[15]。遗传转化后高山红景天的次生代谢产物已经分离鉴定^[16]。高山红景天幼苗于 2015 年 12 月在吉林师范大学智能人工气候室内培养,培养基质均为草炭土。待苗长至 6 叶期进行叶绿素荧光的测定,每个处理 6 株,每株重复测定 6 次,以未经转化处理的高山红景天植株为对照(*RhCK*)。培养条件为光照 25℃/16 h,黑暗 22℃/8 h。

1.3 项目测定

利用 IMAGING-PAM 调制叶绿素荧光成像系

统(MAIX-IMAGING-PAM, Heinz Walz, Effeltrich, Germany)进行叶绿素荧光参数的测定,分别选取长势相同的植株,于相同叶龄的叶片上选取 3 个观测点。测定前将培养瓶移至室内放置 4~6 h,待其充分适应室内环境后,于当日 10:00—12:00,先暗适应 30 min,先用一束小于($0.05 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)测量光(频率为 200 Hz)照射叶片,测初始荧光(F_0),随后施加饱和脉冲光 $702 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,脉冲时间 0.6 s,测得最大荧光(F_m)和可变荧光($F_v = F_m - F_0$),并计算暗适应叶片 PSII 最大潜在光化学效率(F_v/F_m)。打开测量光($55 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$),待 F_t (暗适应后照光 t 时的荧光)稳定后,取此时的 F_t 为稳态荧光(F_s);然后再打开一个同样强度的饱和脉冲光($702 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$),荧光上升到能化类囊体最大荧光(F_m');叶片经过短暂的暗适应后,打开远红光($4 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$),得到能化类囊体最小荧光(F_0')。先后对光系统 II (PSII)的最大量子产量($F_v/F_m = (F_m - F_0)/F_m$)、光系统 II (PSII)的潜在活性($F_v/F_0 = (F_m - F_0)/F_0$)、光化学淬灭系数($qP = (F_m' - F_s)/(F_m' - F_0')$)、非光化学淬灭系数($NPQ = (F_m - F_m')/F_m'$)、实际量子产量($\Phi_{psII} = (F_m' - F)/F_m'$)、调节性能量耗散的量子产量($\Phi_{NPQ} = F/F_m' - F/F_m$)、非调节性能量耗散的量子产量($\Phi_{No} = F/F_m$,式中 F 为打开饱和脉冲之前记录的荧光值)和电子传递速率($ETR = PAR \times \Phi_{psII} \times 0.84 \times 0.5$)及其快速光响应曲线进行了测定。

1.4 数据分析

试验数据采用 SPSS 22.0 统计软件进行差异显著性分析及非线性拟合参数的计算,采用 Origin pro 8.0 进行曲线的拟合,利用 Imaging Win 软件(Heinz Walz, Effeltrich, Germany)采集荧光参数,曲线拟合方程为 $P = P_m \times (1 - e^{-\alpha \times PAR/P_m}) \times e^{-\beta \times PAR/P_m}$ ^[17]。

2 结果与分析

2.1 高山红景天的主要光合特性

2.1.1 转 UDP-葡萄糖:类黄酮 3-O-糖基转移酶基因的高山红景天的 F_v/F_m 、 F_v/F_0 、 qP 和 NPQ 的变化 由表 1 可知,转 *FaGTL* 基因高山红景天的 F_v/F_m 与高山红景天对照组及转 *FaGTLi* 基因高山红景天相比没有显著差异($P > 0.05$),光系统 II 的最大光能转换效率均达到最高,而 F_v/F_0 显著高于高山红景天对照组及转 *FaGTLi* 基因高山红景天,是高山红景天对照组的 1.1 倍,是转 *FaGTLi* 基因高山红景天的 1.42 倍,光系统 II 的潜在活性较好。转 *FaGTL* 基因高山红景天的 qP 显著高于高山红景天对照组

及转 *FaGT1i* 基因高山红景天, 光合活性较强, NPQ 则显著高于高山红景天对照组和转 *FaGT1i* 基因高

山红景天, 其耗散过剩光能的能力较强。

表 1 转 UDP-葡萄糖:类黄酮 3-O-糖基转移酶基因的高山红景天的 F_v/F_m 、 F_v/F_o 、 qP 和 NPQ 的变化

Table 1 Change of F_v/F_m , F_v/F_o , qP and NPQ in UDP-glucose:flavonoid 3-O-glucosyltransferase gene transgenic *Rhodiola sachalinensis*

处理 Treatment	光系统II(PSII)的最大量子产量 F_v/F_m	光系统II(PSII)的潜在活性 F_v/F_o	光化学淬灭系数 qP	非光化学淬灭系数 NPQ
RhCK	0.756±0.061a	3.094±0.102b	0.656±0.029c	0.071±0.018b
Rh <i>FaGT1</i>	0.775±0.007a	3.448±0.137a	0.975±0.095a	0.106±0.014a
Rh <i>FaGT1i</i>	0.720±0.014a	2.426±0.433c	0.829±0.458b	0.089±0.026b

注:数据为3次重复±标准差,不同字母表示样本与对照之间差异 $P < 0.05$ 显著水平。下同。

Note: Data are shown as means±SD of three replications. The values followed by different letters are significantly different between sample and control at $P < 0.05$. The same below.

2.1.2 转 UDP-葡萄糖:类黄酮 3-O-糖基转移酶基因的高山红景天 Φ_{PSII} 、 Φ_{NPQ} 、 qP 和 Φ_{NO} 的变化 转 *FaGT1* 基因高山红景天的 Φ_{PSII} 显著高于高山红景天对照组及转 *FaGT1i* 基因高山红景天, 光系统II的实际光能转换效率较高, Φ_{NPQ} 和 Φ_{NO} 均低于高山红景天对照组及转 *FaGT1i* 基因高山红景天, 此时 65.2% 的光能转换成稳定的化学能(表 2)。

表 2 转 UDP-葡萄糖:类黄酮 3-O-糖基转移酶基因的高山红景天的 Φ_{PSII} 、 Φ_{NPQ} 和 Φ_{NO} 的变化

Table 2 Change of Φ_{PSII} , Φ_{NPQ} and Φ_{NO} in UDP-glucose:flavonoid 3-O-glucosyltransferase gene transgenic *Rhodiola sachalinensis*

处理 Treatment	实际量子产量 Φ_{PSII}	调节性能量耗散的量子产量 Φ_{NPQ}	非调节性能量耗散的量子产量 Φ_{NO}
RhCK	0.450±0.019c	0.163±0.159a	0.388±0.021a
Rh <i>FaGT1</i>	0.652±0.031a	0.078±0.022c	0.272±0.011b
Rh <i>FaGT1i</i>	0.596±0.501b	0.107±0.036b	0.298±0.151b

2.1.3 转 UDP-葡萄糖:类黄酮 3-O-糖基转移酶基因的高山红景天快速光响应曲线的变化 高山红景天的光系统II的相对电子传递速率(ETR)受到光合有效辐射的调控, 不同光照强度(PAR)下, 转 *FaGT1* 基因高山红景天与高山红景天对照组、转

FaGT1i 基因高山红景天的光系统II的相对电子传递速率存在显著差异(图 1)。在光照强度小于 200 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 条件下, 三者光系统II的相对电子传递速率均迅速上升, 此后, 随着光合有效辐射的增加, 转 *FaGT1* 基因高山红景天的光系统II的相对电子传递速率趋于平稳, 高山红景天对照组随着光合有效辐射的增加, 光系统II的相对电子传递速率呈逐步上升趋势, 转 *FaGT1i* 基因高山红景天的变化趋势与转 *FaGT1* 基因高山红景天的变化趋势相一致, 但其光系统II的相对电子传递速率显著低于转 *FaGT1* 基因高山红景天。不同光照强度下, 三者的非光化学淬灭(NPQ)差异显著, 在光照强度小于 100 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 条件下, 三者的光保护能力均迅速增强, 此后, 转 *FaGT1* 基因高山红景天的光保护能力呈逐步增强趋势, 但高山红景天对照组和转 *FaGT1i* 基因高山红景天呈逐步下降趋势。三者的光化学淬灭(qP)差异不显著($P > 0.05$), 随着光照强度的增强, 三者均呈下降趋势, 当光照强度小于 100 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 条件下, 转 *FaGT1* 基因高山红景天的光合活性高于高山红景天对照组和转 *FaGT1i* 基因高山红景天。

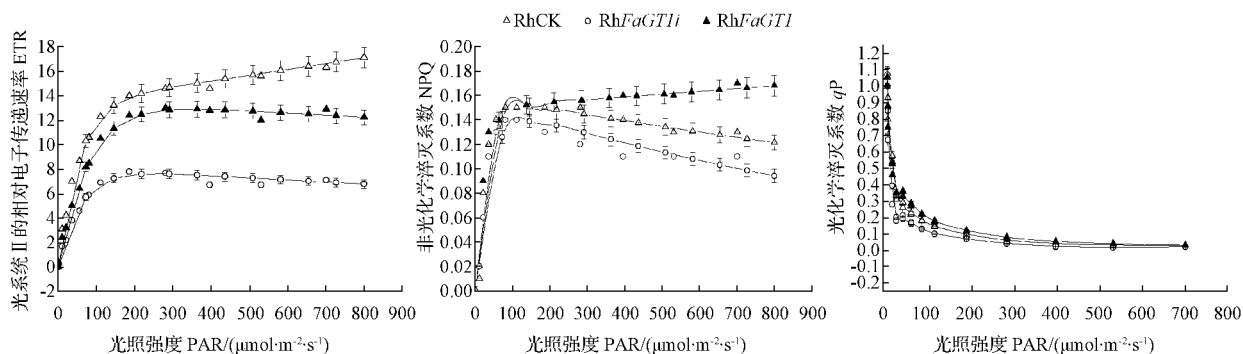


图 1 转 UDP-葡萄糖:类黄酮 3-O-糖基转移酶基因的高山红景天快速光响应曲线的变化

Fig. 1 Change of rapid light curve in UDP-glucose:flavonoid 3-O-glucosyltransferase gene transgenic *Rhodiola sachalinensis*

3 讨论

高山红景天属景天科药用植物,原生长环境位于长白山海拔 1 700~2 500 m 环境恶劣、气候多变的苔原带,长期生长在这种高寒低温的环境下,使其形成了自身特有的光合作途径,使其能够有效抵御强光辐射和强紫外线辐射。光是光合作用的动力,但光合作用对光的利用能力是有限的,当光强超出植物光合作用的利用能力时,就会产生过刺激发能,过刺激发能如果不能及时耗散掉就会导致光合机构的伤害^[18]。为了避免强光对机体的伤害,植物会不断进化,形成一系列的光破坏防御机制^[19-20]。

该研究对转 UDP-葡萄糖:类黄酮 3-O-糖基转移酶基因 *FaGTl* 的高山红景天的叶绿素荧光特性进行研究。结果表明,与高山红景天对照组及转 *FaGTl* 的 RNAi 作用基因 *FaGTli* 的高山红景天相比较, F_v/F_m 没有显著差异($P>0.05$),而 F_v/F_o 是高山红景天对照组的 1.1 倍,是转 *FaGTli* 基因高山红景天的 1.42 倍。 qP 和 NPQ 显著高于高山红景天对照组及转 *FaGTli* 基因高山红景天,说明其光能利用率较高,且光保护能力较强,能够有效地将过剩光能转换成热量耗散掉。转 *FaGTl* 基因高山红景天的 Φ_{PSII} 显著高于高山红景天对照组及转 *FaGTli* 基因高山红景天,进一步说明了其光系统 II 的实际光能转换效率高^[21]。 Φ_{NPQ} 和 Φ_{NO} 均低于高山红景天对照组及转 *FaGTli* 基因高山红景天,此时 65.2% 的光能转换成稳定的化学能,由于关闭态的光系统 II 反应中心贡献的能量较少^[22-23]。由快速光响应曲线分析得出,转 *FaGTl* 基因高山红景天的光系统 II 的相对电子传递速率较高,较高山红景天对照组及转 *FaGTli* 基因高山红景天差异显著。非光化学淬灭(NPQ)直接反映植物的光保护能力,转 *FaGTl* 基因高山红景天的光保护能力呈逐步增强趋势,说明其在强光照时能够有效保护植株不受损伤。光化学淬灭(qP)直接反映光合活性的高低,三者的光合活性无显著差异。

UDP-葡萄糖:类黄酮 3-O-糖基转移酶作为一类花青素合成的关键酶,优先催化的 UDP-葡萄糖形成花青素,UDP-葡萄糖:类黄酮 3-O-糖基转移酶基因的表达直接调控花青素的形成^[24]。花青素在植物的光破坏防御中也发挥着重要作用^[25]。花青素对光破坏的防御机制主要分为 2 个方面:一方面可以通过吸收或屏蔽作用来减少进入叶肉细胞的光强^[26-27];另一方面可以作为抗氧化剂有效清除富集的活性氧,恢复蛋白质、膜质、DNA 和其它细胞组分的活性^[28-30]。因此,花青素对提高植物的光破坏防御机制起着重要作用。叶绿素荧光能有效反映出植物光

能吸收、激发能传递和光化学反应等光合作用过程,可直接反映植物的光合利用效率^[32]。转 UDP-葡萄糖:类黄酮 3-O-糖基转移酶基因高山红景天的光系统 II 反应中心的开放程度和光能转换效率得到增强,植物自身的能量代谢得到提高,该研究结果可为高山红景天的新种质培育提供科学依据。

参考文献

- [1] 国徽. 长白山高山红景天遗传多样性研究[D]. 长春:吉林大学, 2015.
- [2] 王林丽. 红景天及复方制剂药理和临床研究进展[J]. 中医药学报, 2003, 31(1): 51-53.
- [3] 倪付勇, 陈重, 许琼明, 等. 高山红景天化学成分研究[J]. 中草药, 2013, 44(7): 798-802.
- [4] KO J H, KIM B G, HUR H G, et al. Molecular cloning, expression and characterization of a glycosyltransferase from rice[J]. Plant Cell Reports, 2006, 25(7): 741-746.
- [5] STEFAN L, MARILUZ B, ASAPH A, et al. Cinnamate metabolism in ripening fruit: Characterization of a UDP-glucose: cinnamate glucosyltransferase from strawberry[J]. Plant Physiology, 2006, 140(3): 1047-1058.
- [6] FORD C M, BOSS P K, HØJ P B. Cloning and characterization of *Vitis vinifera* UDP-glucose: flavonoid 3-O-glucosyltransferase, a homologue of the enzyme encoded by the maize Bronze-1 locus that may primarily serve to glucosylate anthocyanidins *in vivo* [J]. J Biol Chem, 1998, 273: 9224-9233.
- [7] JONSSON L M V, AARSMAN M E G, BASTIAANNET J, et al. Common identity of UDP-glucose: anthocyanidin 3-O-glucosyltransferase and UDP-glucose: flavonol 3-O-glucosyltransferase in flowers of *Petunia hybrida* [J]. Zeitschrift Für Naturforschung C, 2014, 39(6): 559-567.
- [8] 王一, 张霞, 杨文钰, 等. 不同生育时期遮阴对大豆叶片光合和叶绿素荧光特性的影响[J]. 中国农业科学, 2016, 49(11): 2072-2081.
- [9] 徐澜, 高志强, 安伟, 等. 冬麦春播条件下旗叶光合特性、叶绿素荧光参数变化及其与产量的关系[J]. 应用生态学报, 2016, 27(1): 133-142.
- [10] 马锦丽, 江洪, 舒海燕, 等. 竹炭有机肥对有机卷心菜叶绿素荧光特性和相对叶绿素含量的影响[J]. 东北农业大学学报, 2015(3): 29-36.
- [11] 张春平, 何平, 袁凤刚, 等. 外源 5-氨基乙酰丙酸对干旱胁迫下草珊瑚叶绿素荧光特性及能量分配的影响[J]. 中草药, 2012, 43(1): 164-172.
- [12] LAN Q M, BEN Y L, DONG Y G, et al. Molecular cloning and overexpression of a novel UDP-glucosyltransferase elevating salidroside levels in *Rhodiola sachalinensis* [J]. Plant Cell Reports, 2007, 26(7): 989-999.
- [13] MARKUS G, THOMAS H, MARI L B, et al. Redirection of flavonoid biosynthesis through the down-regulation of an anthocyanidin glucosyltransferase in ripening strawberry fruit [J]. Plant Physiology, 2008, 146(4): 1528-1539.
- [14] 徐洪伟, 周晓馥. 高山红景天毛状根培养的研究[J]. 中国生态农业学报, 2003, 11(3): 45-47.
- [15] 周晓馥, 徐洪伟. 一种利用发根农杆菌遗传转化高山红景天建立毛状根培养体系生产红景天甙的方法: CN101121941A[P]. 2008.
- [16] ZHOU X F, WEI X W, ZHAO Z, et al. The influence of external factors on biomass and salidroside content in hairy roots of *Rhodiola sa-*

sachalinensis induced by *Agrobacterium rhizogenes*[C]. Biomedical Engineering and Informatics(BMEI), 2010 3rd International Conference on IEEE, 2010; 2130-2133.

[17] PLATT T, GALLEGOS C L, HARRISON W G. Photoinhibition of photosynthesis in natural assemblages of marine phytoplankton[J]. J Mar Res, 1980, 38: 687-701.

[18] 李涛, 李运丽, 李志强, 等. 叶片发育影响紫罗勒花青素的强光诱导和激发能分配[J]. 植物生理学报, 2014(5): 675-682.

[19] CHE X, ZHANG Z, JIN L, et al. Effect of reducing nitric oxide in rumex, K-1 leaves on the photoprotection of photosystem II under high temperature with strong light[J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2016, 35(4): 1-8.

[20] 金立桥, 车兴凯, 张子山, 等. 高温、强光下黄瓜叶片 PSII 供体侧和受体侧的伤害程度与快速荧光参数 W_k 变化的关系[J]. 植物生理学报, 2015(6): 969-976.

[21] GENTY B, BRIANTAIS J M, BAKER N R. The relationship between the quantum yield of photosynthetic electron transport and quenching of chlorophyll fluorescence[J]. Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-General Subjects, 1989, 990(1): 87-92.

[22] CAILLY A, RIZZAL F, GENTY B, et al. Fate of excitation at PSII in leaves, the nonphotochemical side[C]. In Abstract Book of 10th FESPP Meeting, Florence, Italy, 1996.

[23] KRAMER D M, JOHNSON G, KIIRATS O, et al. New fluorescence parameters for the determination of QA redox state and excitation

energy fluxes[J]. Photosynthesis Research, 2004, 79(2): 209-218.

[24] HUGHES N M, NEUFELD H S, BURKEY K O. Functional role of anthocyanins in high-light winter leaves of the evergreen herb *Galax urceolata*[J]. New Phytologist, 2005, 168(3): 575-587.

[25] 谢智华, 姜卫兵, 韩键, 等. 叶片花色素苷对植物光合作用影响的研究进展[J]. 植物生理学报, 2011(6): 545-550.

[26] XU Y, WANG G, CAO F, et al. Light intensity affects the growth and flavonol biosynthesis of Ginkgo(*Ginkgo biloba* L.)[J]. New Forests, 2014, 45(6): 765-776.

[27] COONEY L J, SCHAEFER H M, LOGAN B A, et al. Functional significance of anthocyanins in peduncles of *Sambucus nigra* [J]. Environmental and Experimental Botany, 2015, 119: 18-26.

[28] KUMARI S. Lutein, anthocyanin and xanthophyll cycle components in wheat(*Triticum aestivum*) flag leaves under high light and high temperature conditions[J]. Indian Journal of Applied Research, 2013, 3(4): 1-3.

[29] NIELSEN S L, SIMONSEN A M. Photosynthesis and photoinhibition in two differently coloured varieties of *Oxalis triangularis*—the effect of anthocyanin content[J]. Photosynthetica, 2011, 49(3): 346-352.

[30] SCHREIBER U, KLUGHAMMER C, KOLBOWSKI J. Assessment of wavelength-dependent parameters of photosynthetic electron transport with a new type of multi-color PAM chlorophyll fluorometer [J]. Photosynthesis Research, 2012, 113(1-3): 127-144.

Photosynthetic Characteristics of *Rhodiola sachalinensis* Transformed by UDP-glucose: flavonoid 3-O-glucosyltransferase Gene

WEI Xiaowei, NING Siqi, YANG Bin, ZHANG Xin, XU Hongwei, ZHOU Xiaofu

(Key Laboratory for Plant Resources Science and Green Production, Jilin Normal University, Siping, Jilin 136000)

Abstract: *Rhodiola sachalinensis* was used as test material. Modulated chlorophyll fluorescence system (IMAGING-PAM M-Series) was used to measure chlorophyll fluorescence parameters of *Rhodiola sachalinensis* transformed by UDP-glucose: flavonoid 3-O-glucosyltransferase gene to compare the chlorophyll fluorescence characteristics difference of *Rhodiola sachalinensis* and provided the scientific basis for germplasm improvement. The results showed that when exposed to photosynthetic active radiation (PAR) of $55 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, the *FaGTl* gene transgenic *Rhodiola sachalinensis*, the *FaGTli* gene transgenic *Rhodiola sachalinensis* and control had no significant difference in the value of maximum photosystem II quantum yield, the potential activity of photosystem II, non-photochemical quenching, photochemical quenching and effective quantum yield were significant higher in the *FaGTl* gene transgenic *Rhodiola sachalinensis* than in the *FaGTli* gene transgenic *Rhodiola sachalinensis* and control, but the regulated non-photochemical energy dissipation and non-regulated energy dissipation were lower. In addition, the differences of the electron transport rate, photochemical quenching and effective quantum yield in the *FaGTl* gene transgenic *Rhodiola sachalinensis*, the *FaGTli* gene transgenic *Rhodiola sachalinensis* and control under different PAR conditions. The electron transport rate and effective quantum yield were after the first increase in the stability of the trend and that significant higher in the *FaGTl* gene transgenic *Rhodiola sachalinensis* than the *FaGTli* gene transgenic *Rhodiola sachalinensis* and control, but the photochemical quenching was after the first decline in a smooth trend and had no significant difference. The primary light energy conversion of photosystem II and the potential photosynthetic activity had increased of the *FaGTl* gene transgenic *Rhodiola sachalinensis*. The energy metabolism of plant itself has been improved. The results above provided scientific basis for the cultivation of *Rhodiola sachalinensis* germplasm.

Keywords: UDP-glucose: flavonoid 3-O-glucosyltransferase; *Rhodiola sachalinensis*; chlorophyll fluorescence