

邢德科,于睿,陈璐,等.快速失水下5种喀斯特植物离体叶片叶绿素荧光的响应[J].中国岩溶,2021,40(3):459-465.
DOI:10.11932/karst20210302

快速失水下5种喀斯特植物离体叶片 叶绿素荧光的响应

邢德科¹,于睿¹,陈璐¹,吴沿友²,赵玉国¹,李林¹,付为国¹

(1. 现代农业装备与技术教育部重点实验室/江苏大学农业装备工程学院,江苏镇江212013; 2. 环境地球化学国家重点实验室/中国科学院地球化学研究所,贵州贵阳550002)

摘要:文章设置饱水及随后失水处理自然生长的5种喀斯特植物叶片,测定其叶绿素荧光参数,分析各植物光合过程的响应特征。结果显示:盐肤木(*Rhus chinensis*)PSII反应中心活性及电子传递受严重失水影响,而其稳定的光能转化及光化学效率得益于叶绿素浓度的不断增加;构树(*Broussonetia papyrifera*)和金银花(*Lonicera japonica*)的叶绿素浓度逐渐升高随后趋于稳定,构树PSII反应中心对失水敏感,其活性及光能转化对随后持续失水逐渐适应。金银花光合结构及PSII反应中心表现稳定;火棘(*Pyracantha fortuneana*)叶绿素浓度从第4小时开始增加,光合结构趋于稳定,电子传递速率及光能转化逐渐增加;杨梅(*Myrica rubra*)电子传递速率及光化学效率均较低。

关键词:水势;叶绿素荧光;光化学淬灭;电子传递速率;光合结构

中图分类号:Q945.11 文献标识码:A

文章编号:1001-4810(2021)03-0459-07 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

中国西南喀斯特地区地处亚热带季风性湿润气候区,降水充沛,但季节分布不均,且地表岩层主要以容易受到侵蚀的石灰岩为主,该区成土速度慢、土层浅薄、土壤总量少、岩石渗透性强、土壤保水能力差,因此极易形成干湿频繁交替的临时性干旱环境^[1],致使该地区植物生长缓慢,种群较少,生态环境极其脆弱^[2],加之人类不合理的开发利用,植被一旦被破坏,水土流失严重,很快向石漠化方向发展,导致喀斯特地区水资源分布等生态问题日趋严重^[3]。植被恢复是西南喀斯特石漠化治理和生态重建的关键步骤,首要任务是选择合适的建群植物种类,

以保证喀斯特生态系统能迅速地朝良性方向发展。喀斯特适生植物能很好地适应喀斯特环境,具有较高的生产力,能在石缝中生长,能在土壤瘠薄的石灰土上生长,能在常常出现岩溶干旱的条件下生长^[4]。然而,喀斯特环境具有高度异质性,不同地区土壤保水能力的差异会引发程度各异的临时性干旱逆境。

金银花(*Lonicera japonica*)为忍冬科忍冬属多年生半常绿缠绕及匍匐茎的灌木,自古被誉为清热解毒的良药,生于山坡灌丛或疏林中,生活力强、适应性广^[5]。火棘(*Pyracantha fortuneana*)为蔷薇科火棘属常绿灌木或小乔木,具有良好的滤尘效果,对二氧化硫有很强的吸收和抵抗能力,它对土壤要求不严,耐贫瘠,抗干旱,生命力强^[6]。杨梅(*Myrica rubra*)

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0502602);国家自然科学基金(U1612441);江苏省自然科学基金(BK20180863);江苏高校优势学科建设工程资助项目(苏政办发[2014]37号)

第一作者简介:邢德科(1983-),男,博士,专业方向:植物逆境生理生态。E-mail: xingdeke@ujs.edu.cn。

通信作者:吴沿友(1966-),男,研究员,主要从事喀斯特生态学/生物地球化学研究。E-mail: wuyanyou@mail.gyig.ac.cn。

收稿日期:2020-02-01

为杨梅科杨梅属小乔木或灌木,具有很高的药用、食用、生态和观赏价值,主要分布在东南沿海的浙江、江苏、福建、广东以及湖南、云南、贵州等地,国外也有少量分布。其深根性、萌芽性强,有防风、减尘、减噪声、保持水土等功能^[7]。盐肤木(*Rhus chinensis*)为漆树科盐肤木属落叶小乔木或灌木,是我国主要经济树种,生于向阳山坡、沟谷、溪边的疏林或灌丛中,适应能力强,耐干旱,耐贫瘠^[8]。构树(*Broussonetia papyrifera*)为桑科构属落叶乔木,具有较高的食用、药用价值,还可作为绿化树种,适应性强,耐干旱瘠薄,也能生于水边,多生于石灰岩山地^[9]。上述植物均能在喀斯特地区广泛种植,在防止水土流失方面具有重要作用,但最佳适生环境,尤其对于干旱环境的适应性有所不同,为最大程度发挥各植物在喀斯特脆弱生境植被恢复过程中的作用,对其光合适应机制多样性方面的研究有利于植物与异质性喀斯特干旱生境的快速锚定,提高生态修复效率。

干旱胁迫下,植物水分散失过程中,叶片遭受不同程度脱水,轻者造成气孔关闭光合作用受限,重者导致光合作用结构受损,光合作用严重下降^[10]。光合作用是生物界所有物质代谢和能量代谢的基础,在其原初反应将吸收的光能传递、转化为电能的过程中,有一部分光能以较长的荧光方式释放^[11]。叶绿素荧光动力学技术在测定叶片光合作用过程中光系统对光能的吸收、传递、耗散、分配等方面具有独特的作用,与“表现性”的气体交换指标相比,叶绿素荧光参数更具有反映“内在性”的特点^[12]。其特性与植物受胁迫程度密切相关,可以快速、灵敏和无损地探测植物在胁迫下光合作用的真实行为,通过植物光合过程中荧光特性的探测可以了解植物受胁迫的状况^[13]。目前,主要通过干旱下包括叶绿素荧光等在内的生理生化参数的测定来研究植物的抗旱性,这类方法耗时较长、测试复杂,且不同植物间可比性较差^[14-15]。本文则通过研究几种喀斯特植物叶片在饱水状态下连续失水过程中叶绿素荧光参数的变化情况,分析其光合过程响应特征,为植物抗旱性的快速研究提供依据,进而实现喀斯特脆弱生境生态修复过程中植物的合理配置,以期为揭示喀斯特生态环境演化及植物与喀斯特环境的相互作用规律,利用生物方法来治理和恢复脆弱的喀斯特生态环境提供科学依据。

1 研究区概括

实验在2018年6月份进行,采样点位于贵州省贵阳市乌当区东风镇情人谷景区,该地主要由喀斯特地貌组成,海拔在1 000~1 600 m,年均降雨量在1 200 mm左右,2017年平均降水量为1 167 mm,最大降水量在6-7月份,虽然降水充足,但时空分布不均;冬冷夏凉,年平均气温在15.3℃左右,最高温度为24.0℃,最低温度为4.6℃;年均日照时数为1 400 h,空气相对湿度为63.7%。

2 研究方法

2.1 实验材料

情人谷景区内同一地点处于成熟期的金银花(3年生)、火棘(5年生)、杨梅(6年生)、盐肤木(3年生)与构树(6年生)被选为实验材料。取带有叶片的各植物的新鲜枝条,并用湿布包住植株枝干基部,以减缓水分散发;迅速返回实验室,清理所述植物叶片表面灰尘后,采摘所述新鲜枝条上长势较为一致(第4、5片完全展开叶)的叶片18片,放入装有水的容器中浸泡30 min;待叶片浸泡30 min后,成饱水状态,取出浸泡后的饱水叶片18片,用纸巾将所有叶片表面水分快速轻轻吸干,放置在干燥通风的桌面上让其干燥失水,室内温度为23℃,空气相对湿度为46.7%,在叶片干燥失水后的第0、1、2、4、6、8小时,每种植物分别取出3片上述干燥失水叶片用于叶片水势(Ψ_L)和叶绿素荧光参数的测定^[16],各指标重复测量3次。

2.2 测定指标及方法

2.2.1 叶片水势的测定

将叶片打孔后迅速放在露点水势仪的C-52型水势探头(Water potential system, WESCOR, USA)平衡6 min后进行植物叶片水势的测量,每次测量3个数据,取平均值作为该叶片此时刻的水势测量值(Ψ_L)。

植物叶片水势与细胞液溶质浓度的关系为:

$$\Psi_L = -iQRT \quad (1)$$

式中: i 为解离系数,取1; Q 为细胞液溶质浓度,单位为 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$; R 为气体常数,取 $0.83\times 10^{-2}\text{L}\cdot\text{MPa}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$; T 为热力学温度($T = 273 + t^\circ\text{C}$),单位为K; t 为环境温度,单位为 $^\circ\text{C}$ 。

则细胞液溶质浓度(Q)可被计算为:

$$Q = -\frac{\Psi_L}{iRT} \quad (2)$$

2.2.2 叶绿素荧光参数的测定

用德国产 IMAGING-PAM 调制式叶绿素荧光成像系统 (PAM-2000, Walz, Germany) 测定各植物在不同失水时刻的叶绿素荧光诱导动力学参数。叶片经暗适应 30 min 后首先用弱测量光测定初始荧光 (F_0), 随后用强闪光处理 ($6\ 000\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 脉冲时间 0.8 s) 测得最大荧光 (F_m), 光系统 II (PSII) 原初光能转化效率 (F_v/F_m) 通过 $(F_m - F_0)/F_m$ 计算获得。然后打开作用光, 待荧光值稳定后 (3~5 min), 记录其光下最大荧光 (F'_m)、光下最小荧光 (F'_0) 与稳态荧光产量 (F_s)。其中, 光化学淬灭系数 (qP) 通过 $(F'_m - F_s)/(F'_m - F'_0)$ 计算获得, 光合电子传递速率 (ETR) 则通过 $\text{PPFD}\times\Phi_{\text{psii}}\times 0.85\times 0.5$ 计算获得, 其中系数 0.5 是因为 1 个电子传递需要吸收 2 个量子, 而系数 0.85 表示在入射的光量子中被吸收的占 85%, PPFD 是光合有效辐射强度。

2.3 数据处理

所有试验数据采用 SPSS 13.0 统计软件及 Excel 软件进行差异显著性检验 (LSD 法) 及做图。

3 结果与分析

3.1 不同失水时刻植物叶片水势及细胞液浓度的变化

初始饱水状态下, 金银花、盐肤木和构树拥有较高的叶片水势, 火棘最低。随着水分胁迫的加剧, 火棘和盐肤木的叶片水势呈现出较为显著的下降趋势, 相对来说, 金银花、杨梅和构树叶片的下降幅度较小。在同样失水 8 h 的情况下, 盐肤木叶片水势降为最低, 构树的叶片水势则仍然高于其他植物 (表 1)。

表 1 不同失水时刻植物叶片水势的变化

Table 1 Variation of plant leaf water potential at different dehydration time

失水时刻/h	植物名称				
	金银花	火棘	盐肤木	杨梅	构树
0	-0.98 ± 0.02a	-1.58 ± 0.09a	-0.87 ± 0.08a	-1.34 ± 0.08a	-0.85 ± 0.01a
1	-1.65 ± 0.13bc	-1.77 ± 0.02b	-1.32 ± 0.06b	-1.71 ± 0.09b	-1.56 ± 0.09b
2	-1.42 ± 0.06b	-1.69 ± 0.08ab	-1.49 ± 0.09bc	-1.56 ± 0.08ab	-1.71 ± 0.06bc
4	-1.87 ± 0.07c	-2.02 ± 0.06c	-1.64 ± 0.02c	-1.75 ± 0.13b	-1.92 ± 0.15c
6	-1.84 ± 0.09c	-2.20 ± 0.00d	-2.36 ± 0.01d	-2.20 ± 0.08c	-1.98 ± 0.09c
8	-1.98 ± 0.12c	-2.29 ± 0.04d	-2.64 ± 0.09e	-2.11 ± 0.04c	-1.80 ± 0.08bc

注: 平均值±标准误差 (n=5) 后面字母表示在同一显著水平 $P\leq 0.05$ 下, 通过单因素方差分析与 t 检验对同一列的数据进行差异显著性分析。

初始饱水状态下, 火棘叶片细胞液浓度最高, 金银花、盐肤木和构树则相对较低。随着叶片脱水的加剧, 盐肤木细胞液浓度增加幅度最大, 火棘和杨梅增幅相对较低, 且火棘和杨梅叶片细胞液浓度在失

水第 8 小时的值与第 6 小时相比没有显著差异。金银花叶片细胞液浓度从失水第 4 小时以后的值变化不显著。构树叶片的细胞液浓度则从失水第 2 小时以后变化不显著 (表 2)。

表 2 不同失水时刻植物叶片细胞液浓度的变化

Table 2 Variation of plant leaf cytosol concentration of solute at different dehydration time

失水时刻/h	植物名称				
	金银花	火棘	盐肤木	杨梅	构树
0	0.40 ± 0.01c	0.64 ± 0.04d	0.35 ± 0.03e	0.55 ± 0.03c	0.35 ± 0.01c
1	0.67 ± 0.05b	0.72 ± 0.01c	0.54 ± 0.03d	0.70 ± 0.04b	0.64 ± 0.04b
2	0.58 ± 0.02b	0.69 ± 0.03cd	0.61 ± 0.04cd	0.63 ± 0.03bc	0.70 ± 0.02ab
4	0.76 ± 0.03ab	0.82 ± 0.02b	0.67 ± 0.01c	0.71 ± 0.05b	0.78 ± 0.06a
6	0.75 ± 0.04ab	0.90 ± 0.00a	0.96 ± 0.01b	0.90 ± 0.03a	0.81 ± 0.04a
8	0.81 ± 0.05a	0.93 ± 0.02a	1.08 ± 0.04a	0.86 ± 0.02a	0.73 ± 0.03ab

注: 平均值±标准误差 (n=5) 后面字母表示在同一显著水平 $P\leq 0.05$ 下, 通过单因素方差分析与 t 检验对同一列的数据进行差异显著性分析。

3.2 不同失水时刻植物叶片叶绿素荧光参数的变化

失水导致金银花 F_0 显著下降,但其在不同失水时刻间的值之间没有显著差异。火棘的 F_0 在叶片失水第2小时出现最高值,失水第6和8小时的值则最低。盐肤木的 F_0 在叶片失水第8小时出现最高值,失

水第2小时的值最低,其余失水时刻间的值没有显著差异。杨梅的 F_0 在叶片失水第8小时的值最低,其余各失水时刻间的值则没有显著差异。构树的 F_0 在叶片失水第1小时的值最高,失水0、6和8小时的值最低。与其他植物相比,随失水时刻的增加,金银花 F_0 的变化幅度较小(表3)。

表3 不同失水时刻植物叶片 F_0 的变化
Table 3 Variation of plant F_0 at different dehydration time

失水时刻/h	植物名称				
	金银花	火棘	盐肤木	杨梅	构树
0	0.17 ± 0.01a	0.18 ± 0.01b	0.14 ± 0.01bc	0.18 ± 0.01a	0.14 ± 0.00c
1	0.14 ± 0.01b	0.18 ± 0.00b	0.17 ± 0.02b	0.17 ± 0.01ab	0.20 ± 0.01a
2	0.16 ± 0.01b	0.21 ± 0.01a	0.12 ± 0.01c	0.18 ± 0.01a	0.17 ± 0.01b
4	0.15 ± 0.00b	0.17 ± 0.01b	0.13 ± 0.00bc	0.16 ± 0.01ab	0.17 ± 0.00b
6	0.15 ± 0.00b	0.14 ± 0.00c	0.13 ± 0.00bc	0.14 ± 0.00b	0.14 ± 0.00c
8	0.14 ± 0.01b	0.15 ± 0.00c	0.22 ± 0.02a	0.11 ± 0.01c	0.13 ± 0.01c

注:平均值±标准误差($n=5$)后面字母表示在同一显著水平 $P \leq 0.05$ 下,通过单因素方差分析与 t 检验对同一列的数据进行差异显著性分析。

水分流失造成5种植物叶片的 F_v/F_m 均呈现不同程度的下降。金银花和火棘在失水第1小时即开始显著下降,盐肤木在第4和8小时的值则显著低于其

余时刻的值,杨梅在失水第6小时开始显著下降,构树在第8小时的值最低。随失水时间的增加,杨梅的 F_v/F_m 值变化较小,较为稳定(表4)。

表4 不同失水时刻植物叶片 F_v/F_m 的变化
Table 4 Variation of plant F_v/F_m at different dehydration time

失水时刻/h	植物名称				
	金银花	火棘	盐肤木	杨梅	构树
0	0.71 ± 0.00a	0.72 ± 0.00a	0.65 ± 0.00a	0.74 ± 0.00a	0.71 ± 0.00a
1	0.68 ± 0.01b	0.66 ± 0.01bc	0.64 ± 0.01ab	0.73 ± 0.01a	0.63 ± 0.01b
2	0.66 ± 0.01c	0.67 ± 0.01bc	0.61 ± 0.01ab	0.73 ± 0.00a	0.66 ± 0.01ab
4	0.63 ± 0.00d	0.68 ± 0.01b	0.58 ± 0.01b	0.73 ± 0.00a	0.63 ± 0.01b
6	0.68 ± 0.00bc	0.65 ± 0.01c	0.65 ± 0.01a	0.71 ± 0.00b	0.65 ± 0.01ab
8	0.64 ± 0.00d	0.65 ± 0.00c	0.40 ± 0.05c	0.65 ± 0.00c	0.50 ± 0.05c

注:平均值±标准误差($n=5$)后面字母表示在同一显著水平 $P \leq 0.05$ 下,通过单因素方差分析与 t 检验对同一列的数据进行差异显著性分析。

金银花的 qP 值较为稳定,受失水影响较小。盐肤木的 qP 值在失水第4小时开始显著下降。火棘在失水第4小时的 qP 值最高。杨梅则在失水第1小时的 qP 值显著下降,其后随失水持续未再出现显著下降。失水情况下构树的 qP 值显著低于失水0时刻的值(表5)。

杨梅和火棘的 ETR 的值基本不受失水影响,其值较为稳定。金银花、盐肤木和构树在失水情况下的 ETR 值均显著低于失水0时刻的值。金银花的 ETR 在失水第6小时出现最低值,盐肤木则在失水第4和8小时出现最低值,构树 ETR 的最低值出现在失水第8小时(表6)。

表5 不同失水时刻植物叶片qP的变化
Table 5 Variation of plant qP at different dehydration time

失水时 刻/h	植物名称				
	金银花	火棘	盐肤木	杨梅	构树
0	0.41 ± 0.01ab	0.24 ± 0.02c	0.42 ± 0.03a	0.37 ± 0.00a	0.49 ± 0.01a
1	0.34 ± 0.01b	0.27 ± 0.01c	0.33 ± 0.06ab	0.17 ± 0.01b	0.28 ± 0.02bc
2	0.33 ± 0.01b	0.37 ± 0.01b	0.38 ± 0.00a	0.19 ± 0.00b	0.34 ± 0.03b
4	0.43 ± 0.01a	0.43 ± 0.02a	0.15 ± 0.02b	0.17 ± 0.00b	0.27 ± 0.05bc
6	0.26 ± 0.02b	0.24 ± 0.02c	0.24 ± 0.02b	0.16 ± 0.00b	0.24 ± 0.01c
8	0.43 ± 0.06a	0.34 ± 0.02b	0.20 ± 0.04b	0.13 ± 0.00b	0.24 ± 0.02c

注:平均值±标准误差(n=5)后面字母表示在同一显著水平 $P \leq 0.05$ 下,通过单因素方差分析与t检验对同一列的数据进行差异显著性分析。

表6 不同失水时刻植物叶片ETR的变化
Table 6 Variation of plant ETR at different dehydration time

失水时 刻/h	植物名称				
	金银花	火棘	盐肤木	杨梅	构树
0	70.07 ± 2.05a	38.27 ± 3.14b	68.90 ± 5.31a	12.77 ± 0.27a	85.93 ± 7.02a
1	53.07 ± 3.27b	38.93 ± 1.05b	54.00 ± 10.17ab	16.20 ± 2.80a	42.43 ± 2.25c
2	47.53 ± 2.49bc	55.47 ± 0.72a	58.83 ± 0.32a	17.37 ± 0.69a	56.93 ± 1.74b
4	50.77 ± 1.74b	57.83 ± 4.37a	21.70 ± 1.76c	16.97 ± 3.97a	38.03 ± 0.46c
6	38.60 ± 2.40c	42.67 ± 2.44b	42.67 ± 2.44b	18.80 ± 1.55a	42.67 ± 2.44c
8	52.97 ± 5.43b	52.93 ± 2.43a	15.27 ± 2.00c	12.90 ± 2.10a	13.57 ± 0.33d

注:平均值±标准误差(n=5)后面字母表示在同一显著水平 $P \leq 0.05$ 下,通过单因素方差分析与t检验对同一列的数据进行差异显著性分析。

4 讨论

水分胁迫对植物光合作用的影响是多方面的,不仅直接引发光合结构的损伤,同时也影响光合电子传递及与暗反应有关的酶活性^[17]。 F_0 反映PSII反应中心的活性, F_0 值的增加说明PSII反应中心活性降低^[18]。 F_v/F_m 反映PSII反应中心受损情况,表征光合结构的稳定性, F_v/F_m 降幅较小表明PSII反应中心内光能转化效率和潜在活性只受到轻微影响或影响不大^[19]。ETR表示叶片的表观光电子传递速率,qP表示光化学猝灭,表征叶片吸收的光能用于光化学部分的比率^[20]。设想将叶片细胞液分为水和溶质两大部分,叶绿素包含于溶质中,细胞液浓度在一定程度上可以反映叶绿素浓度的大小。

金银花叶片具有较好的保水能力,失水下叶绿素浓度有所增加。PSII反应中心活性在持续失水情

况下表现较为稳定,电子传递及叶片吸收的光能用于光化学的部分受到影响也较小。这可能与喀斯特适生植物特有的碳酸氢根离子利用特性有关,逆境下植物在光合过程中对细胞内碳酸氢根离子的利用能够为硝酸盐或亚硝酸盐的还原反应提供电子,维持其稳定的电子传递速率^[21]。

火棘叶片水分散失较快,水势下降明显,叶绿素浓度在第4小时才开始显著增加。PSII反应中心活性在失水第2小时即有所下降。然而叶绿素浓度的增加使其光合结构逐渐趋于稳定,电子传递速率与叶片吸收的光能用于光化学的部分甚至有所增加。

盐肤木叶片在第6小时开始出现显著的水分流失,并通过快速降低水势以增强其水分获取能力。叶片水分的快速散失引发叶绿素浓度的增加,其PSII反应中心活性相对有所提升,仅在水分严重缺失时(水势降至-2.64 MPa时)才开始受到抑制,光合结构

部分受损。较高的叶绿素浓度有利于叶片吸收的光能用于光化学的部分保持稳定,确保光合过程的正常进行。

构树叶片水分散失较慢,水分的散失却能迅速引发叶绿素浓度的升高。构树叶片的PSII反应中心活性对水分变化响应灵敏,在第1小时即显著下降,叶片吸收的光能用于光化学部分也受到影响。然而在长时间持续失水情况下,其PSII反应中心活性及光能转化效率转而保持稳定。构树光合结构在失水第8小时开始显著受损。

杨梅为非喀斯特适生植物,然而其叶片保水能力强于火棘和盐肤木。叶片吸收的光能用于光化学的部分对水分变化响应灵敏,在失水第1小时即受到显著抑制,而持续失水则并未对其造成更大影响。在失水第8小时,其叶绿素合成、PSII反应中心活性以及光合结构均受到不同程度的抑制或损伤。杨梅本身电子传递速率较低,失水下没有显著变化,过低的电子传递速率必然会影响其光化学效率。

5 结论

叶片在饱水状态下连续失水过程中的光合响应特征因植物种类不同而不同,体现出植物对喀斯特逆境适应的光合机制多样性。盐肤木PSII反应中心活性及其稳定的光能转化有利于光化学效率的保持,其得益于叶绿素浓度的增加;构树的PSII反应中心及光能转化对失水较为灵敏,然而对长时间持续失水则逐渐体现出适应性;金银花具有独特的碳酸氢根离子利用能力,能够维持稳定的PSII反应中心活性、电子传递及光能转化,适应性好;火棘叶片水分散失较快,快速失水后期其光合结构的稳定、电子传递速率及光能转化的好转与叶绿素浓度的增加有关;杨梅叶片保水能力强于火棘和盐肤木,光能转化易受抑制,而由于其本身电子传递速率较低,失水下变化不显著,过低的电子传递速率必然影响其光化学效率。

参考文献

- [1] 蒲俊兵,袁道先,覃政教,等.我国西南岩溶区水环境问题[J].科学,2010,62(2):32-36.
- [2] 凡非得,王克林,熊鹰,等.西南喀斯特区域水土流失敏感性评价及其空间分异特征[J].生态学报,2011,31(21):6353-6362.
- [3] 闫利会,周忠发,谢雅婷,等.贵州高原石漠化敏感性与宏观地貌的空间关联分析[J].中国岩溶,2018,37(3):400-407.
- [4] Wang R, Wu Y Y, Hang H T, et al. *Orychopragmus violaceus* L., a marginal land-based plant for biodiesel feedstock: Heterogeneous catalysis, fuel properties, and potential[J]. Energy Conversion and Management, 2014, 84:497-502.
- [5] Xing D K, Wu Y Y. Photosynthetic response of three climber plant species to osmotic stress induced by polyethylene glycol (PEG) 6000[J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2012, 34(5):1659-1668.
- [6] 谢国芳,周晓珊,韦开红,等.贵州产地火棘活性成分的聚类分析[J].食品与生物技术学报,2017,36(6):642-648.
- [7] 吕金海.杨梅(*Myrica rubra* S. et Zucc.)植物文化和园林应用研究[J].现代园艺,2018(17):117-118.
- [8] 陈晶,穆燕,陈明,等.盐肤木对重金属铬胁迫的生理生化反应研究[J].生态科学,2017,36(2):26-31.
- [9] Wu Y Y, Liu C Q, Li P P, et al. Photosynthetic characteristics involved in adaptability to Karst soil and alien invasion of paper mulberry (*Broussonetia papyrifera* (L.) Vent.) in comparison with mulberry (*Morus alba* L.) [J]. Photosynthetica, 2009, 47(1):155-160.
- [10] 刘美君,隋晓青,安沙舟.干旱脱水对狗牙根叶片光合机构的影响[J].草地学报,2018,26(2):441-446.
- [11] 刘雷震,武建军,周洪奎,等.叶绿素荧光及其在水分胁迫监测中的研究进展[J].光谱学与光谱分析,2017,37(9):2780-2787.
- [12] Banks J M. Chlorophyll fluorescence as a tool to identify drought stress in *Acer* genotypes [J]. Environmental and Experimental Botany, 2018, 155:118-127.
- [13] Kalaji H M, Rastogi A, Živčák M, et al. Prompt chlorophyll fluorescence as a tool for crop phenotyping: an example of barley landraces exposed to various abiotic stress factors [J]. Photosynthetica, 2018, 56(3):953-961.
- [14] Wu Z Z, Ying Y Q, Zhang Y B, et al. Alleviation of drought stress in *Phyllostachys edulis* by N and P application [J]. Scientific Reports, 2018, 8(1):228-237.
- [15] Sseremba G, Tongoona P, Eleblu J, et al. Heritability of drought resistance in *Solanum aethiopicum* Shum group and combining ability of genotypes for drought tolerance and recovery [J]. Scientia Horticulturae, 2018, 240:213-220.
- [16] Gameiro C, Utkin A B, Cartaxana P, et al. The use of laser induced chlorophyll fluorescence (LIF) as a fast and non-destructive method to investigate water deficit in *Arabidopsis* [J]. Agricultural Water Management, 2016, 164:127-136.
- [17] Banks J M. Chlorophyll fluorescence as a tool to identify drought stress in *Acer* genotypes [J]. Environmental and Experimental Botany, 2018, 155:118-127.
- [18] 邢德科,吴沿友,吴沿胜,等.麻疯树和枫杨幼苗对5种模拟

- 喀斯特逆境的光合生理响应[J]. 中国岩溶, 2016, 35(6): 649-656.
- [19] Zhang C F, Pan C D, Chen H. Effects of leaf-to-fruit ratio on chlorophyll fluorescence parameters of walnut (*Juglans regia* L.) leaves [J]. *Photosynthetica*, 2018, 56(4): 1429-1436.
- [20] Recchia I, Sparla F, Pupillo P. Photosynthetic properties of spring geophytes assessed by chlorophyll fluorescence analysis [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2017, 118: 510-518.
- [21] Lu Y, Wu Y Y, Zhang K Y. Does bicarbonate affect the nitrate utilization and photosynthesis of *Orychophragmus violaceus* [J]. *Acta Geochimica*, 2018, 37(6): 875-885.

Response traits of the chlorophyll a fluorescence to saturation and subsequent continuous dehydration in five karst plants

XING Deke¹, YU Rui¹, CHEN Lu¹, WU Yanyou², ZHAO Yuguo¹, LI Lin¹, FU Weiguo¹

(1. Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment and Technology, Ministry of Education/Institute of Agricultural Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China; 2. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry/Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang, Guizhou 550002, China)

Abstract The heterogeneity of karst habitat together with the diversity of plant adaptive mechanism makes the reasonable allocation of pioneer plant in karst regions very difficult, which affects the efficient governance of the degraded karst ecosystem. Research on the diversity of plant photosynthetic adaptive mechanism can help complete the anchorage of plants and heterogeneous karst drought habitats. In this work, the naturally-grown leaves of five karst plants were selected as materials and treated with saturation and subsequent continuous dehydration. The chlorophyll fluorescence parameters were determined, and the response traits of photosynthetic process were investigated, which provides a basis for the rapid evaluation of plant drought resistance. The results indicate that the leaf photosynthetic process of *Rhus chinensis* exhibits better adaptability to great variation of leaf water content, and the activity of PSII reaction center and electron transport rate are inhibited by high water stress. However, the stable light energy conversion can help maintain the photochemical efficiency, which is attributed to the increasing chlorophyll concentration. The leaf water retention capacities of *Broussonetia papyrifera* and *Lonicera japonica* are relatively high, the chlorophyll concentration increases with water losing and maintains stable subsequently. The PSII reaction center of *Broussonetia papyrifera* is sensitive to water loss, but the activity of PSII reaction center and light energy conversion efficiency show adaptability to the long-term continuous dehydration. The photosynthetic structure of *Lonicera japonica* is not damaged seriously, and the activity of PSII reaction center is stable. The leaf water retention capacity of *Pyracantha fortuneana* is worse than that of other plants, but the chlorophyll concentration increases significantly from the fourth hour. The stability of photosynthetic structure, electron transport rate and the portion of light energy absorbed by leaf that is used for photochemistry are better than that in *Lonicera japonica* under continuous dehydration conditions. *Myrica rubra* is a non-karst plant, of which the chlorophyll concentration decreases under long-term dehydration. The activity of the PSII reaction center is inhibited, and the photosynthetic structure is damaged. Meanwhile, the electron transport rate of *Myrica rubra* is too low to show significant variation as water losing continues, and the photochemical efficiency would be inhibited by the low electron transport rate.

Key words water potential, chlorophyll fluorescence, photochemical quenching, electron transport rate, photosynthetic structure

(编辑 黄晨晖)