

不同类型喀斯特植物的荧光特征及抗旱性比较

韩玉杰, 徐志防*, 叶万辉, 曹洪麟, 韦 霄

(中国科学院华南植物园, 广州 510650)

摘要: 利用叶绿素荧光技术观测了五个不同类型的喀斯特植物翅荚香槐、大盃凤仙、红背叶、牛耳朵和青冈栎在不同作用光强下的光能利用特征, 并且对这五种植物在 PEG 诱导水分胁迫下的抗旱性作了比较。结果表明, 随着作用光强的增加, 这五种植物的光化学反应能力(qP)逐渐降低, 非光化学耗散作用(NPQ)明显增加, 同时 PS II 有效光化学效率(F_v'/F_m')随之下降, 导致 PS II 电子传递量子效率($\Phi_{PS II}$)也明显下降, 但在相同作用光强下这五个类型植物的荧光特征无明显差异。在 PEG 诱导水分胁迫的实验中, 牛耳朵、青冈栎在 PEG 处理后 F_v/F_m 变化不明显, 而红背叶 F_v/F_m 值下降程度最大, 其次为翅荚香槐、大盃凤仙。由此推测, 牛耳朵和青冈栎的耐干旱能力最强, 红背叶抗旱能力最弱, 翅荚香槐、大盃凤仙居中。

关键词: 喀斯特; 叶绿素荧光; 水分胁迫; 聚乙二醇(PEG)

中图分类号: Q945.79, Q948.11 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3142(2007)06-0918-05

Characteristics of chlorophyll fluorescence and comparison of drought resistance among different species of karst plants

HAN Yu-Jie, XU Zhi-Fang*, YE Wan-Hui,
CAO Hong-Lin, WEI-Xiao

(South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China)

Abstract: Under different actinic light intensities, the characteristics of light energy using were observed in five species of karst plants by using technique of chlorophyll fluorescence, and their drought resistance was compared under water stress induced by PEG. The five karst plants are *Cladrastis platycarpa*, *Impatiens macrovexilla*, *Alchornea trewioides*, *Chirita eburnea* and *Quercus glauca*. The results showed that qP decreased gradually and NPQ increased evidently in these plants with the increase of actinic light intensity. Simultaneously, F_v'/F_m' and $\Phi_{PS II}$ declined significantly. However, there was no evident difference in fluorescence characteristics between these plants under the same actinic light. The F_v/F_m of *Chirita eburnea* and *Quercus glauca* changed insignificantly under the water stress induced by PEG, and the F_v/F_m decreased moderately in *Cladrastis platycarpa* and *Impatiens macrovexilla*, but the value decreased most evidently in *Alchornea trewioides*. Thus, it was deduced that *Chirita eburnea* and *Quercus glauca* are the strongest in drought resistance, *Alchornea trewioides* is the lowest, *Cladrastis platycarpa* and *Impatiens macrovexilla* are in the middle.

Key words: karst; chlorophyll fluorescence; water stress; polyethylene glycol(PEG)

喀斯特是指石灰岩受水的溶蚀作用和伴随的机械作用形成的各种地貌, 我国喀斯特地区主要位于云南、贵州、广西等地, 其地貌类型之多、分布面积之广, 为世界少有。喀斯特生境具岩石裸露率高、土层

收稿日期: 2005-10-14 修回日期: 2006-06-31

基金项目: 中国科学院西部行动计划重大项目(KZCX2-XB2-08)[Supported by the Major Programs of the Chinese Academy of Sciences Action-plan for West Development(KZCX2-XB2-08)]

作者简介: 韩玉杰(1980-), 女, 山东青岛人, 硕士生, 研究方向为植物生理生态。

* 通讯作者(Author for correspondence, E-mail: xuzf@scib.ac.cn)

浅薄贫瘠、土壤富钙、偏碱性等特征,而且水土流失严重,旱涝灾害频繁,植被极易遭到破坏且很难恢复(宋林华,2000;朱守谦等,2003;万福绪等,2003)。

我国仅在广西弄岗、木论和贵州茂兰等保护区还存有一定面积的原生喀斯特植被。这些喀斯特地区生境变化大,植被群落组成相对复杂,植被类型较丰富。植被的形成主要受气候因素控制,同时也受土壤的制约。虽然喀斯特植被是非地带性的,但喀斯特地区植被与同地带的非喀斯特地区植被有明显差异,具有不同的植被类型(张邦琨等,2000;姚长宏等,2001;朱守谦等,2003)。

喀斯特地区因其特有的岩、水、气循环系统,导致土壤保水能力差,植被生长环境相对干旱。主要植被为喜钙、耐旱、石生的物种及种群,并表现出不同的植物形态特征。据我们观察,喀斯特植物有以下几种特征类型来适应干旱生境:(1)落叶或枯萎类:干旱时可通过落叶或枯萎来减少水分的散失,当水分供应充足很快又恢复常态;(2)肉质化或多汁化类:叶片或茎贮存大量水分,可在缺水时维持正常的生理代谢过程;(3)茎、叶多毛化或多刺类:叶片具发达的毛状体,这些毛状体呈灰色或白色,可反射阳光的照射,有免受热灼失水的作用;(4)叶片具厚角质层类:植物叶片是革质的,具很厚的角质层,可防止水分蒸发、抵御干旱;(5)特化根茎类:根或茎的外部形态发生变化,可存贮大量水分,以度过缺水期。

目前对喀斯特的研究多集中于地质、地貌、水文、土壤特点、群落演化等,而针对干旱缺水生境下不同类型喀斯特植物的研究却很少。本文以几种不同类型的喀斯特植物为实验材料,着重于植物光能利用过程,观测这些喀斯特植物在不同光强下的叶绿素荧光特征,比较其在水分胁迫下的抗旱性大小,可为筛选喀斯特生境植被恢复的植物种类提供相关理论依据。

1 材料与方 法

1.1 植物材料和实验仪器

以广西桂林雁山附近典型石山生境中五种喀斯特植物翅荚香槐(*Cladrastis platycarpa*)、大盃凤仙(*Impatiens macrovexilla*)、红背叶(*Alchornea trewioides*)、牛耳朵(*Chirita eburnea*)和青冈栎(*Quercus glauca*)为实验观测材料,它们分别属于落叶类乔木、多汁类草本、落叶类灌木、多毛类草本和厚角质层类乔木。翅荚香槐位于石山的山脚及中

下坡,大盃凤仙在山脚的洼地和山坡上均有分布,红背叶在山脚处分布相当普遍,牛耳朵生长在靠近山下的背阴处,多位于潮湿的岩石上或石缝中,青冈栎则分布在山顶及其周围。采用便携式 Licor-6400 荧光光合作用测量仪等。

1.2 测定方法

1.2.1 不同作用光强下的叶绿素荧光测定 在天气晴朗、CO₂ 浓度为 360~380 μmol·mol⁻¹ 的条件下,选取这五种类型植物的成熟叶片,通过 Licor-6400 荧光光合作用测量仪的自动测量程序,进行不同作用光强下的相关荧光参数的测定。自动测量过程中,暗测量光为 0.04 μmol·m⁻²·s⁻¹,饱和光脉冲为 7 000 μmol·m⁻²·s⁻¹,远红外光 6~7 μmol·m⁻²·s⁻¹,作用光强分别为 0、20、50、100、200、500、800、1 000、1 200、1 500、1 800 μmol·m⁻²·s⁻¹,测定前所测的叶片至少经过 20 min 的暗适应。

1.2.2 PEG 模拟干旱胁迫下的叶绿素荧光测定 五种类型植物的离体枝条取回后立即插入 10%、20% 浓度的 PEG6000 水溶液中,诱导植物遭受中、重度水分胁迫,以未作 PEG 处理的枝条作为对照。每天测定一次光系统 II 光化学效率,连续测定 4 d。以上每项测定至少重复 3~5 次,所得数据用 SPSS 软件作统计分析,并进行差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 不同作用光强下的叶绿素荧光特征

(1)qP 和 NPQ:光化学猝灭(qP)表示 PS II 反应中心中开放的反应中心所占比例的指标,反映植物进行光化学反应转化光能的效率,非光化学猝灭(NPQ)表示非光化学反应如热耗散等过程所引起的荧光变化(许大全,2002)。

图 1a 中,五种喀斯特植物随着作用光强的增加,qP 值均呈下降趋势。不同作用光强下,它们的 qP 值相差甚微,说明这五种类型植物 PS II 反应中心的光能转化效率对光强的响应程度基本一致。

随着作用光强的增加,五种类型植物的 NPQ 呈上升趋势,表明植物对过剩光能的耗散作用逐渐增加(图 1b)。作用光强在 500 μmol·m⁻²·s⁻¹ 以下时各植物的 NPQ 几乎是一样的,而在 1 200 μmol·m⁻²·s⁻¹ 作用光下时,五种类型植物的 NPQ 接近各自的最大值,并表现出对强光的不同耗散能力。

(2)Fv'/Fm' 和 ΦPS II:PS II 有效光化学效率

(F_v'/F_m')反映了开放的 PS II 反应中心在有效光照射下的实际量子产量,PS II 电子传递量子效率($\Phi PSII$)表示单位光量子所产生线性电子传递效率。

由表 1 看出,与作用光强 $100 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时

相比,五种植物的 F_v'/F_m' 在 500 和 $1500 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 作用光下均显著降低 ($P < 0.05$); 与作用光强 $500 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时相比,翅荚香槐和牛耳朵 F_v'/F_m' 值在 $1500 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时变化不显著,而大盔

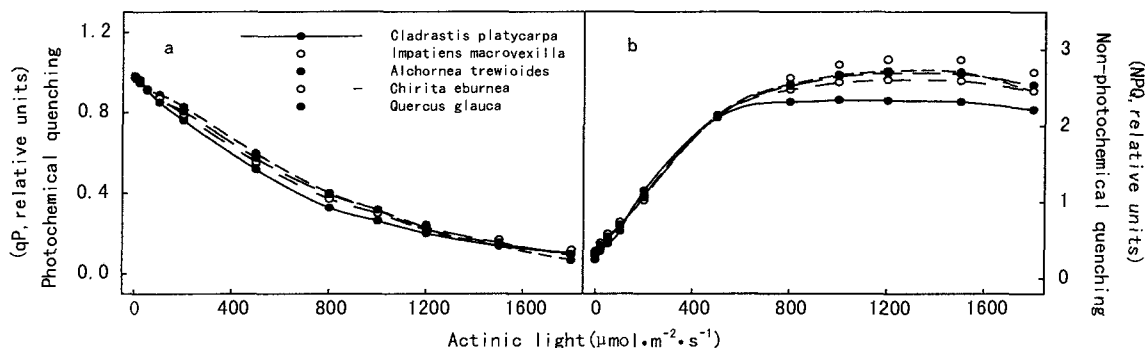


图 1 五种喀斯特植物 qP 和 NPQ 对不同作用光的响应

Fig. 1 The response of qP and NPQ in five karst plants to different actinic light

表 1 不同作用光对五种喀斯特植物 F_v'/F_m' 值和 $\Phi PSII$ 的影响

Table 1 The effect of different actinic light on F_v'/F_m' and $\Phi PSII$ in five karst plants

| 作用光强 V Actinic light intensity ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) | 翅荚香槐 <i>Cladrastis platycarpa</i> | 大盔凤仙 <i>Impatiens macrovexilla</i> | 红背叶 <i>Alchornea trewioides</i> | 牛耳朵 <i>Chirita eburnea</i> | 青冈栎 <i>Quercus glauca</i> |
|--|--------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| F_v'/F_m' 值 | | | | | |
| 100 | 0.664 ± 0.004 a | 0.664 ± 0.010 a | 0.668 ± 0.006 a | 0.610 ± 0.015 a | 0.670 ± 0.012 a |
| 500 | 0.471 ± 0.016 b | 0.494 ± 0.018 b | 0.484 ± 0.020 b | 0.399 ± 0.013 b | 0.439 ± 0.008 b |
| 1500 | 0.434 ± 0.036 b | 0.402 ± 0.011 c | 0.369 ± 0.028 c | 0.381 ± 0.038 b | 0.390 ± 0.006 c |
| $\Phi PSII$ 值 | | | | | |
| 100 | 0.564 ± 0.012 a | 0.579 ± 0.009 a | 0.593 ± 0.014 a | 0.525 ± 0.014 a | 0.559 ± 0.026 a |
| 500 | 0.242 ± 0.012 b | 0.271 ± 0.021 b | 0.288 ± 0.008 b | 0.145 ± 0.011 b | 0.190 ± 0.024 b |
| 1500 | 0.059 ± 0.003 c | 0.067 ± 0.002 c | 0.051 ± 0.009 c | 0.043 ± 0.004 c | 0.039 ± 0.004 c |

注: 同列数据后不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$), 下表同。

Note: Numbers followed by different letters within each column indicated significant difference at $P < 0.05$. The same below.

凤仙、红背叶、青冈栎则有明显下降 ($P < 0.05$)。

表 1 中, 随着作用光强的增加, 各个物种的 $\Phi PSII$ 值均呈显著性下降 ($P < 0.05$), 这主要是由于 F_v'/F_m' 的下降引起的。 F_v'/F_m' 下降意味着天线捕获激发能的效率下降, 用于光化学反应的光能减少, 而非光化学猝灭耗散作用则增加。 与作用光强 $100 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时相比, 当作用光强为 $1500 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 五种植物的 $\Phi PSII$ 值下降程度相差不大。

2.2 模拟水分胁迫下的叶绿素荧光特征

聚乙二醇是一种易溶于水的大分子有机物, 可通过其渗透作用来模拟干旱胁迫研究植物对水分亏缺的反应, 其中 PEG6000 诱导水分逆境的效果与将土壤逐步干旱几乎是一样的 (Kaufmann 等, 1971; Michel 等, 1973; 张云贵等, 1994)。

PS II 光化学效率表示暗适应下 PS II 反应中心

完全开放后的最大量子产量, 用于度量植物叶片 PS II 原初光能转换效率, 表明 PS II 利用光能的能力, 常作为植物受到环境胁迫时最直接的光合生理响应指标 (陈贻竹等, 1995; 张守仁, 1999)。

表 2 中, PEG 胁迫处理开始的第 1 日为对照, 除红背叶以外, 其它 4 个植物的 F_v'/F_m' 值均大于 0.8。 到第 2 日, 大盔凤仙、红背叶、青冈栎在两种胁迫处理下均无显著性变化, 说明植物叶片还未受到水分亏缺的明显影响。 翅荚香槐在 10% 和 20% PEG 处理下的 F_v'/F_m' 值, 与对照相比均有明显变化 ($P < 0.05$), 而两个胁迫处理相比, F_v'/F_m' 值变化不显著, 说明中度水分亏缺就已使翅荚香槐受到干旱胁迫。 牛耳朵在 20% 处理下变化显著, 10% 处理下变化不明显。

当处理到第 3 日, 红背叶、青冈栎在两种程度的 PEG 胁迫处理下, F_v'/F_m' 值与对照相比仍无明显变

表 2 PEG 诱导的水分胁迫对五种喀斯特植物 Fv/Fm 的影响
Table 2 The effect of water stress induced by PEG on Fv/Fm of five karst plants

| 植物种类 Plant species | PEG 胁迫处理 Treatment of PEG | 处理时间 Time of treatment (d) | | | |
|------------------------------------|------------------------------|----------------------------|---------------|---------------|---------------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 翅荚香槐 <i>Cladrastis platycarpa</i> | CK | 0.809±0.003 | 0.806±0.002a | 0.807±0.002a | 0.808±0.000a |
| | 10% | — | 0.787±0.006b | 0.758±0.009b | 0.739±0.019b |
| | 20% | — | 0.774±0.003b | 0.748±0.011b | 0.736±0.011b |
| 大盃凤仙 <i>Impatiens macrovexilla</i> | CK | 0.811±0.001 | 0.806±0.001 | 0.802±0.001a | 0.793±0.006a |
| | 10% | — | 0.800±0.004 | 0.775±0.013ab | 0.677±0.034b |
| | 20% | — | 0.798±0.002 | 0.763±0.013b | 0.721±0.023ab |
| 红背叶 <i>Alchornea trewioides</i> | CK | 0.799±0.004 | 0.795±0.008 | 0.793±0.006 | 0.798±0.002a |
| | 10% | — | 0.763±0.025 | 0.623±0.097 | 0.436±0.104b |
| | 20% | — | 0.760±0.018 | 0.672±0.056 | 0.466±0.106b |
| 牛耳朵 <i>Chirita eburnea</i> | CK | 0.820±0.004 | 0.821±0.003a | 0.812±0.003 | 0.807±0.002 |
| | 10% | — | 0.816±0.002ab | 0.808±0.005 | 0.801±0.003 |
| | 20% | — | 0.809±0.003b | 0.798±0.006 | 0.801±0.001 |
| 青冈栎 <i>Quercus glauca</i> | CK | 0.800±0.005 | 0.819±0.005 | 0.813±0.002 | 0.821±0.002a |
| | 10% | — | 0.808±0.002 | 0.807±0.003 | 0.804±0.010ab |
| | 20% | — | 0.816±0.003 | 0.804±0.004 | 0.795±0.003b |

化,牛耳朵在胁迫处理下的 Fv/Fm 值虽然有所下降,但与当天的对照相比变化不显著。翅荚香槐在两种胁迫处理下的 Fv/Fm 值与对照相比均有显著性变化($P<0.05$),而胁迫处理之间的变化却不显著。与对照相比,大盃凤仙在 10% 处理下变化不显著,20% 处理下变化显著($P<0.05$)。

处理到第 4 天,牛耳朵在两种胁迫处理下的 Fv/Fm 值仍大于 0.8,与对照相比无明显变化。青冈栎在 10% 的 PEG 胁迫下 Fv/Fm 值大于 0.8,20% 胁迫处理下 Fv/Fm 值略低,不过这两种胁迫处理并无显著性变化。

从第 4 天观测情况看,牛耳朵、青冈栎在受到干旱胁迫后 Fv/Fm 值下降比例最小,其次为翅荚香槐、大盃凤仙。Fv/Fm 值下降幅度最大的是红背叶,说明其叶片 PSII 反应中心受到的破坏最为严重。

3 讨论

通常,随着光照强度的增加,植物耗散光能(NPQ)的作用就会增加,通过保护性的热耗散将过剩的光能耗散掉,使光合结构免受强光的破坏,与 NPQ 增加相伴的往往是光能转化效率的降低。实验结果表明,这五种植物在受到的作用光强增加时, NPQ 呈增加趋势, Fv'/Fm' 不断下降, Φ PSII 也显著降低,但在同一光强下,这五种植物的光化学反应和非光化学反应没有显著差异,这说明这五种喀斯特适应类型的植物在自然条件下,其光

能转化与耗散机制没有明显的差别,它们对环境胁迫的耐性更可能是来自于其不同的形态与生活型特征。PEG 模拟水分胁迫实验表明,牛耳朵和青冈栎的耐干旱能力最强,红背叶抗旱性最弱,翅荚香槐、大盃凤仙抗旱性居中。

牛耳朵属喜湿和耐阴植物,一般生长于山下背阴处潮湿的岩石壁上,叶片较厚,贮存水分较多,受到严重水分胁迫时,叶片发生卷曲,防止水分散失。青冈栎生长于山顶及其周围,这里环境条件相对恶劣,全天受到太阳直射,且土壤极少。青冈栎的叶片小型化、数目较多,这可能是对石灰岩干旱环境的一种适应,更重要的是其叶片角质层厚,保水力较强。

虽然红背叶抗旱性最小,但能通过落叶以减少水分蒸发,这也是一种适应方式(喻理飞等,2003)。红背叶在石山脚下分布较为普遍,这种生境光照时间相对不长,比较荫蔽,湿度条件较好,因此红背叶的分布占有一定优势。而翅荚香槐、大盃凤仙多生长在洼地或山坡上较为潮湿的地方,生长条件较好,且体内含有较多的水分,具有一定的抗干旱能力。翅荚香槐位于山下或山腰地段,湿度条件相对山顶较好,多为高大乔木,因此根系较深,可以吸取深层水分,这可能也是其抗旱的原因之一。

广西植物研究所的李光照老师帮助鉴定植物种名,李虹、蒋运生、唐辉协助野外观测,在此致以衷心的感谢!

参考文献:

许大全. 2002. 光合作用效率[M]. 上海:上海科学技术出版

- 社:32-34
- 朱守谦,何纪星,魏鲁明,等. 2003. 茂兰喀斯特森林小生境特征研究[C]//朱守谦. 喀斯特森林生态研究(Ⅲ). 贵阳:贵州科技出版社:38-48
- 张云贵,谢永红. 1994. PEG 在模拟植物干旱胁迫和组织培养中的应用[J]. 亚热带植物通讯,23(2):61-64
- 张邦琨,张萍,赵云龙. 2000. 喀斯特地貌不同演替阶段植被小气候特征研究[J]. 贵州气象,24(3):17-21
- 喻理飞,朱守谦,叶镜中. 2003. 喀斯特森林不同种组的耐旱适应性[C]//朱守谦. 喀斯特森林生态研究(Ⅲ). 贵阳:贵州科技出版社:212-217
- Chen YZ(陈贻竹), Li XP(李晓萍), Xia L(夏丽), et al. 1995. The application of chlorophyll fluorescence technique in the study of responses of plants to environmental stresses(叶绿素荧光技术在植物环境胁迫研究中的应用)[J]. *J Trop Subtrop Bot* (热带亚热带植物学报),3(4):79-86
- Kaufmann MR, Eckard AN. 1971. Evaluation of water stress control with polyethylene glycol by analysis of guttation[J]. *Plant Physiol*,47(4):453-456
- Michel BE, Kaufmann MR. 1973. The osmotic potential of polyethylene glycol 6000[J]. *Plant Physiol*,51(5):914-916
- Song LH(宋林华). 2000. Progress and trend of karst geomorphology study(喀斯特地貌研究进展与趋势)[J]. *Progress in Geo*(地理科学进展),19(3):193-202
- Wan FX(万福绪), Zhang JC(张金池). 2003. Ecological characteristics and vegetation rehabilitation techniques in the karst mountain areas of Guizhou Province(黔中喀斯特山区的生态环境特点及植被恢复技术)[J]. *J Nanjing Fore Univ(Nat Sci Edi)*(南京林业大学学报·自然科学版),27(1):45-49
- Yao CH(姚长宏), Jiang ZC(蒋忠诚), Yuan DX(袁道先). 2001. Vegetation karst effects on the karst area of southwest China(西南岩溶地区植被喀斯特效应)[J]. *Acta Geo Sin*(地球学报),22(2):159-164
- Zhang SR(张守仁). 1999. A discussion on chlorophyll fluorescence kinetics parameters and their significance(叶绿素荧光动力学参数的意义及讨论)[J]. *Chin Bull Bot*(植物学通报),16(4):444-448

(上接第 928 页 Continue from page 928)

- application in theory and practice(竹林培肥研究与 50 年理论与实践)[J]. *Eco Fore Res*(经济林研究),19(3):53-55
- He DX(贺东祥), Shen YG(沈允钢). 1995. Seasonal changes of photosynthetic characteristics of four evergreen plants(几种常绿植物光合特性的季节变化)[J]. *Acta Phytophysiol Sin*(植物生理学报),21(1):1-7
- Kramer P J. eds. 1980. Adaptation of plants to water and high temperature stress[C]. New York:Johnwiley and sons:233-249
- Liu S(刘殊), Liao JS(廖镜思), Chen QX(陈清西), et al. 1997. Photosynthetic response to surrounding temperature in longan leaves(龙眼光合作用对环境温度的响应)[J]. *J Fujian Agric Univ* (福建农业大学学报),26(4):407-410
- Huang QM(黄启民), Yang DD(杨迪蝶), Gao AX(高爱新), et al. 1989. The research on photosynthesis of bamboo(不同条件下毛竹光合作用的研究)[J]. *Bamboo Res*(竹类研究),8(2):8-16
- Huang QM(黄启民), Yang DD(杨迪蝶), Gao AX(高爱新). 1989. A study on photosynthesis of bamboo(毛竹光合作用的研究)[J]. *Sci Silv Sin*(林业科学),25(4):366-369
- Huang CC(黄承才), Ge Y(葛滢), Chang J(常杰). 2000. Studies on photosynthesis and respiration of blades of *Phyllostachy heterocycla* cv. *Pubescens* in eastern mid-subtropical zone, China(中亚热带东部毛竹叶片光合及呼吸的研究)[J]. *J Zhejiang Fore Sci Tech* (浙江林业科技),20(5):14-16
- Li XG(李新国), Xu DQ(许大全), Meng QW(孟庆伟). 1998. Response of photosynthesis to strong light in *Ginkgo biloba* leaves(银杏叶片光合作用对强光的响应)[J]. *Acta Phytophysiol Sin*(植物生理学报),24(4):354-360
- Ma NX(马乃训). 1989. Bamboo study in China(我国的竹类科学研究)[J]. *J Bamboo Res* (竹子研究汇刊),8(1):76-83
- Qiu EF(邱尔发), Chen CJ(陈存及). 2002. Analysis on respiratory characters in different provenances of *Phyllostachy heterocycla* cv. *Pubescens*(毛竹种源呼吸性状态动态变化分析)[J]. *J Fujian Coll Fore*(福建林学院学报),22(3):213-218
- Shi JM(施建敏), Guo QR(郭起荣), Yang GY(杨光耀). 2005. Study on the photosynthetic dynamic variation of *P. edulis*(毛竹光合动态研究)[J]. *Fore Res*(林业科学研究),18(5):551-555
- Sun GC(孙谷畴), Zhao P(赵平), Zeng XP(曾小平), et al. 2002. Changes of leaf photosynthetic parameters in leaves of *Woonyoungia septentrionalis* and *Tsoongiodendron lotungensis* under different growth-irradiation(不同光强下焕铺木和观光木的光合参数变化)[J]. *Acta Phytoecol Sin*(植物生态学报),26(3):355-362
- Xia YG(夏有根), Xu EN(徐尔娜), Xu CH(许翠华), et al. 2000. Making progress on bamboo research of China(我国竹子研究概述)[J]. *J Jiangsu Fore Sci Tech* (江苏林业科技),27(3):44-48
- Xu DQ(许大全). 1997. Some problems in stomatal limitation analysis of photosynthesis(光合作用气孔限制分析中的一些问题)[J]. *Plant Physiol Commun*(植物生理学通讯),33(4):241-244
- Yang DD(杨迪蝶), Huang QM(黄启民). 1990. The research on biomass and photosynthesis of bamboo seedlings and interrelated factors(毛竹实生苗生物量及光合速率的研究)[J]. *Fore Res* (林业科学研究),3(5):461-465
- Zhang XQ(张小全), Xu DY(徐德应). 2002. Effects of temperature on the photosynthetic physiology of 18-year-old Chinese Fir (*Cunninghamia langceolata*)(温度对杉木中龄林针叶光合生理生态的影响)[J]. *Sci Silv Sin*(林业科学),38(3):27-33