

CO₂ 浓度增高对三裂叶蟛蜞菊 光合生理特性的影响

刘金祥, 李志芳

(湛江师范学院热带草业科学研究所, 广东湛江 524048)

摘要: 在人工控制 CO₂ 浓度梯度条件下, 测量了喜阴多年生草本植物三裂叶蟛蜞菊 1 月和 3 月的光合速率 (Pn)、蒸腾速率 (Tr)、胞间 CO₂ 浓度 (Ci)、气孔导度 (Gs) 和叶面饱和蒸气压亏缺 (Vpd)。结果表明: CO₂ 浓度升高对三裂叶蟛蜞菊的光合生理特性影响较大, 当 CO₂ 浓度由 0 升高到 1 900 μmol · mol⁻¹ 的过程中, Pn 增加很快, 其值在 -1.53 ~ 11.3 μmol · m⁻² · s⁻¹ 之间; 水分利用率 (WUE: 光合与蒸腾之比) 随 CO₂ 浓度的升高也在增大, 当 CO₂ 浓度为 1 900 μmol · mol⁻¹ 时, 1 月份的 WUE 是 18.248 μmol · mmol⁻¹, 3 月份的只有 8.794 μmol · mmol⁻¹, 高水分利用效率与其对于旱的适应性密切相关。

关键词: 三裂叶蟛蜞菊; CO₂ 浓度; 光合生理

中图分类号: Q945.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-3142(2005)05-0477-04

Effects of CO₂ concentrations increasing on photosynthetic physiological characteristics of *Wedelia trilobata*

LIU Jin-xiang, LI Zhi-fang

(Institute of Tropical Patacultural Science, Zhanjiang Normal College, Zhanjiang 524048, China)

Abstract: In order to study influence of CO₂ enhance on photosynthetic physiological characters of *Wedelia trilobata* L., photosynthesis rate (Pn), transpiration rate (Tr), intercellular CO₂ concentrations (Ci), stomatal conductance (Gs) and vapor deficit at the leaf surface (Vpd) were measured on individuals of *W. trilobata* with the effective of CO₂ concentrations increased from 0 to 1 900 μmol · mol⁻¹. Results were summarized as followed: Pn, Ci and WUE all increased with the increasing of CO₂ concentrations. The Gs, Tr in January at first increased with the increasing of CO₂ concentrations, but later decreased as CO₂ concentrations exceed 1 000 μmol · mol⁻¹. The Gs, Tr in March reduced with the increasing of CO₂ concentrations. The value of WUE is also increased with the increasing of CO₂ concentrations, but there is a difference between January and March at 1 900 μmol · mol⁻¹. There may be more correlation between WUE and dry ability of *W. trilobata*.

Key words: *Wedelia trilobata*; CO₂ concentrations; photosynthetic physiological characteristics

三裂叶蟛蜞菊 (*Wedelia trilobata*) 是菊科多年生草本植物, 分布于日本、越南、印度、印度尼西亚以及我国南方等地。该植物喜生于湿润的沙质土, 亦见于干旱的草坡, 适应性广泛, 侵占性强。对光照反

应不敏感, 可在光照充分或隐蔽条件下良好生长。在各类瘦瘠的土壤均可生长, 但以在肥沃而湿润的地方生长最旺。叶对生, 花鲜黄, 几乎全年开花, 但以夏至秋季最盛, 枝呈蔓性, 地被栽培则呈匍匐性

收稿日期: 2004-05-08 修订日期: 2005-06-14

基金项目: 广东省“千百十”优秀人才基金(Q02113); 湛江市科技攻关项目(2002101)资助。

作者简介: 刘金祥(1964-), 男, 教授, 博士, 主要从事生态学与草业科学的教学研究工作。E-mail: lightlong@163.com

(刘金祥, 2004)。

CO₂ 浓度是影响植物光合特性、蒸腾特性及水分利用效率的主要因素之一, 已有的研究表明, 短期 CO₂ 浓度的升高在一定程度上能够促进植物的光合作用, 减少水分蒸腾, 提高植物水分利用效率(郭志华等, 1998)。而植物对长期高 CO₂ 浓度适应之后, 光合作用又会恢复到原来水平甚至下降(Lawlor 等, 1991; Norby 等, 1991; Gunderson 等, 1993)。三裂叶蟛蜞菊是华南地区常见的地被绿化植物, 笔者曾对三裂叶蟛蜞菊光合生理特性对光合有效辐射响应的季节性动态进行了研究(刘金祥等, 2005), 目前尚未见到该植物光合生理特性对 CO₂

浓度增高响应的报道。本文在人工控制 CO₂ 浓度梯度条件下研究三裂叶蟛蜞菊的光合生理变化, 以探讨其对 CO₂ 浓度升高的响应。

1 研究地区自然概况

实验分别于 2003 年 1 月和 3 月在广东省湛江师范学院内进行, 地理位置为 110°24' E, 21°12' N。年均降雨量 1 500~1 600 mm, 多集中在 4~9 月; 年均日照时数 1 417~1 802 h; 年均温度 22.3 °C, 极端高温为 38.1 °C, 极端低温 2.8 °C, 1 月最冷, 平均温度 15.5 °C, 7 月最热, 平均温度 28.9 °C, 年积温为 8 309~8 519 °C(曾昭璇等, 2001)。

2 材料与方法

利用美国基因公司的 LI-6400 便携式光合作用测量仪的 CO₂ 控制系统, 测量不同梯度的 CO₂ 浓度下的光合速率(Pn)、蒸腾速率(Tr)、气孔导度(Gs)、胞间 CO₂ 浓度(Ci)和叶面饱和蒸汽压亏缺(Vpdl)。CO₂ 浓度的梯度设置: 0、50、350、700、1 000、1 300、1 600、1 900 μmol·mol⁻¹。于 2003 年 1 月 21 日(代表冬季)和 2003 年 3 月 30 日(代表早春)进行了 2 次测定, 有效光辐射强度(PAR)始终控制在 800 μmol·m⁻²·s⁻¹。选取生长在校园内树荫下的三裂叶蟛蜞菊健康植株的正常叶片于当天上午 9~11 时按顺序测量, 重复三次, 取其平均值。利用 Excel 软件对结果进行统计分析。水分利用效率 WUE = Pn/Tr。

3 结果和分析

3.1 Pn 对 CO₂ 浓度升高的响应

Pn 对 CO₂ 浓度升高的响应见图 1。Pn 随 CO₂ 浓度升高而增大, 在 1 900 μmol·mol⁻¹ 时, Pn 最大, 3 月份的最大值为 11.3 μmol·m⁻²·s⁻¹, 1 月份的最大值为 10.0 μmol·m⁻²·s⁻¹, 3 月份的 Pn 均比 1 月份的高。CO₂ 浓度升高可能在两方面影响植物的光合作用, 一方面是 CO₂ 浓度增加提高了 Rubisco 酶结合位点羧化速度, 另一方面通过抑制呼吸提高净光合效率(林伟宏, 1998)。植物的光合作用随温度上升而增加, 3 月份日均温为 29.04 °C, 高于 1 月份的 23.44 °C。结果表明 3 月份的 Pn 都比 1 月份的高, 它们的 Pn 增强可能是 CO₂ 浓度升高和温度上升共同作用的结果。

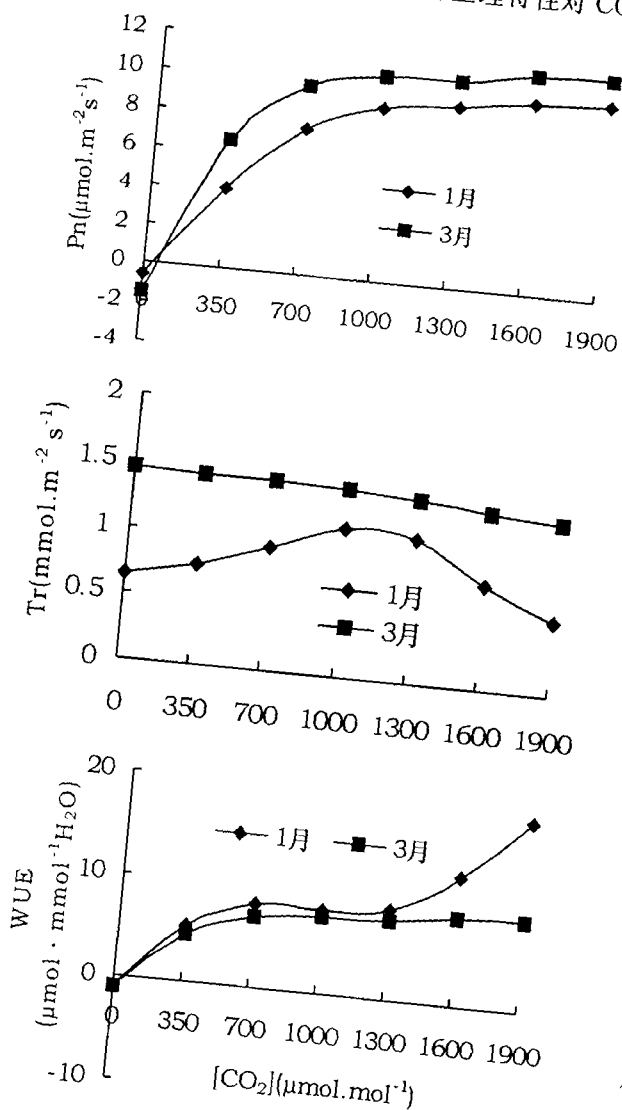


图 1 Pn, Tr, WUE 对 CO₂ 浓度升高的响应
The response of photosynthesis rate, transpiration rate and water use efficiency to the increase of CO₂

结果。但这两个季节的 Pn 差异不显著($P>0.05$)。

3.2 Tr 对 CO₂ 浓度升高的响应

CO₂ 浓度在 0~1 000 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 范围内,1 月份的 Tr 随 CO₂ 浓度升高而增大(图 1),到 1 000 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 时达到最大值(1.11 $\text{mmol H}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$),之后,Tr 减小(当 CO₂ 浓度为 1 600 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 时 Tr 已降至 0.548 $\text{mmol H}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)。3 月份的 Tr 均比 1 月份的大,且差异显著($P<0.05$)。当大气温度增高时,气孔下腔蒸汽压的增加大于空气蒸汽压的增加,所以叶内外的蒸汽压加大,有利于水分从叶内逸出,Tr 加强(潘瑞炽等,1995)。气孔的开关程度影响植物叶片水分的散失,两者之间存在极显著正相关关系(蒋高明等,1996;魏胜利等,2001;李美茹等,2001)。随着气温的升高,叶温和叶、气温差及叶、气饱和和水气压差增大,相对湿度降低(郭志华等,1998),所以 3 月份的 Tr 较高。

3.3 WUE 对 CO₂ 浓度升高的响应

WUE 表示每单位水分所制造的有机物的量,它由 Pn 和 Tr 之比来决定。三裂叶蟛蜞菊 WUE 随 CO₂ 浓度的升高而增大(图 1)。1 月份略高于 3 月份,但在 CO₂ 浓度升至 1 600 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 时,1 月份明显高于 3 月份,在 1 900 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 时,两者的差值变大,1 月份的为 18.248 $\mu\text{mol}\cdot\text{mmol}^{-1}$,而 3 月份的只有 8.794 $\mu\text{mol}\cdot\text{mmol}^{-1}$,但差异不显著($P>0.05$)。除植物的生物学特性外,外界的环境因子也对植物 WUE 起着十分重要的作用(严昌荣等,2001)。由于 1 月份气候干燥,降水量少,土壤湿度很低,能被利用的水分十分有限,这时光合作用已达到较高的水平,蒸腾强度仍保持在较低水平,导致有较高的 WUE。3 月份后由于降水量增加,土壤湿度增加,能被植物利用的水分多,植物蒸腾强度大,导致 WUE 较低。由此可见,三裂叶蟛蜞菊在干旱条件下的高水分利用率,与其对干旱的适应性密切相关。

3.4 Gs 对 CO₂ 浓度升高的响应

Gs 对 CO₂ 浓度升高的响应见图 2。CO₂ 浓度在 0~1 000 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 范围内,1 月份的 Gs 随 CO₂ 浓度升高而增大,到 1 000 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 时达到最大值 0.068 3 $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,超过 CO₂ 饱和点之后,气孔导度反而减小;而 3 月份的 Gs 在整个 CO₂ 浓度升高过程中随 CO₂ 浓度的升高而减小,1 月和 3 月的差异显著($P<0.05$)。气孔是叶片获取 CO₂ 的通道,Pn 增大,消耗 CO₂ 也增大,叶片为了弥补 CO₂ 的消耗,通过调节气孔,增大 Gs 来加速外界

CO₂ 向叶细胞内的扩散。随着外界环境 CO₂ 浓度的升高,植物叶片越来越容易获得 CO₂,而光合作用消耗 CO₂ 量增加不多,导致 Ci 的增大,为保持胞间 CO₂ 分压始终低于大气 CO₂ 分压,植物通过调节气孔开闭程度来降低 Ci(Berry 等,1992)。植物对 Ci 的变化很敏感,Ci 的增加常伴随着气孔的关闭,导致 Gs 逐渐减小。

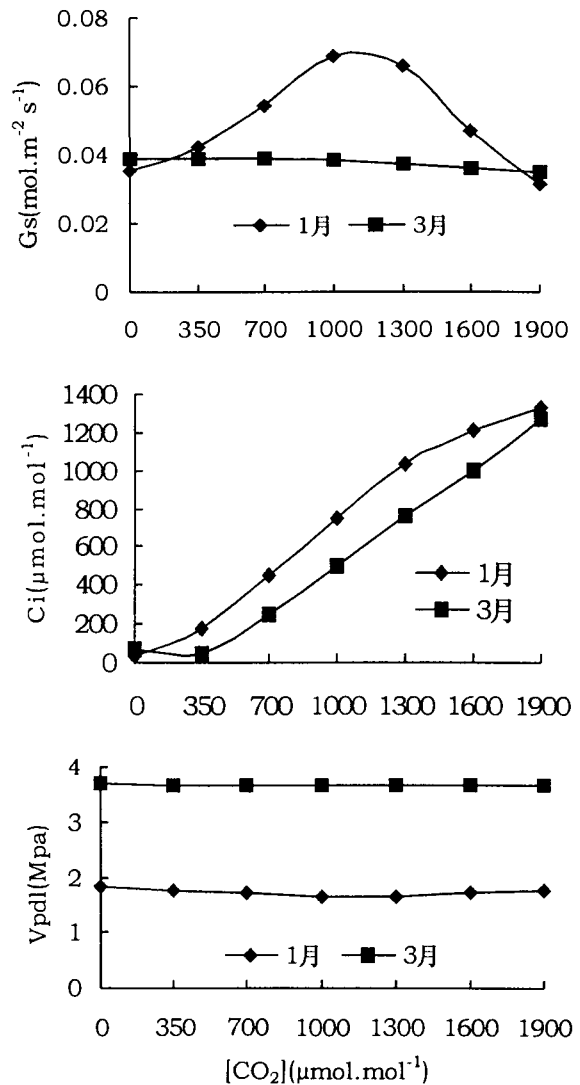


图 2 Gs, Ci and Vpdl 对 CO₂ 浓度升高的响应

Fig. 2 The response of stomatal conductance, intercellular CO₂ concentrations and vapor pressure deficit at the leaf surface to the increase of CO₂ concentrations.

3.5 Ci 对 CO₂ 浓度升高的响应

Ci 随 CO₂ 浓度的升高而增大(图 2)。CO₂ 浓度梯度增加的过程中,1 月份的 Ci 从 30.3 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 增至 1 330 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$,而 3 月份的从 66.6

$\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 增至 $1\ 265\ \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$, 1月份高于3月份, 差异不显著 ($P > 0.05$)。因为随着 CO_2 浓度的升高, 光合速率增大, RUBP 和 CO_2 消耗也增大, 3月份的光合速率大于1月份, 且3月份的温度较高, RUBP 羧化酶的活性也得到了提高, 消耗的 CO_2 也多, 所以1月份的 C_i 高于3月份的 C_i 。

3.6 Vpdl 对 CO_2 浓度升高的响应

CO_2 浓度升高对 Vpdl 影响不大(图2), 始终处于波动状态。在人工控制叶面光照强度和 CO_2 浓度情况下, 叶面不受外界环境变化的影响, 光照强度始终控制在 $800\ \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 下, CO_2 浓度升高对光合速率和胞间 CO_2 浓度的影响不显著, 所以对叶片的饱和蒸气压亏缺的影响也不大。

3月份的 Vpdl 始终在 3.65 Mpa 附近波动, 而1月份的始终只在 1.66~1.85 Mpa 附近波动。因为3月份的气温高, 叶温增大, 蒸腾失水到叶面附近的水蒸汽很快就被蒸发了, 因此3月份的 Vpdl 高于1月, 差异显著 ($P < 0.05$)。

4 讨论

以大气 CO_2 浓度增高和气温升高为主要内容的全球变化现象将在不同程度上对生态系统结构和功能以至人类社会产生广泛而深远的影响。 CO_2 浓度增加在短期内能促进植物的光合作用(张利平等, 1998; Ward 等, 1999; 蒋高明等, 1997; 许大全, 1994)。受光合产物的转移能力和可利用养分的限制, 植物光合作用对 CO_2 浓度升高的长期反应表现为下调现象, 但光合速率仍然高于目前 CO_2 浓度下的水平(Ward 等, 1999)。本实验设计 CO_2 浓度从 0~1 900 $\mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$ 是探讨在瞬时 CO_2 浓度连续升高条件下, 三裂叶蟛蜞菊的光合速率是否也连续升高, 即 CO_2 饱和点是否随 CO_2 浓度的增加而升高, 还是下调?

本实验表明, CO_2 浓度由 0 到 1 900 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 升高的过程中, 能够提高冬春季三裂叶蟛蜞菊的光合速率, 其 P_n 值在 -1.53 到 $11.3\ \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间。 CO_2 浓度的升高, 提高了 RuBP 跟 CO_2 的结合能力, 短时间地供给高浓度 CO_2 促进了植物的光合作用(林伟宏等, 1998)。WUE 随 CO_2 浓度的升高而增大, 在 CO_2 浓度为 1 900 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 时, 1月份的 WUE 是 $18.24\ \mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$, 3月份的只有 $8.79\ \mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$ 。 CO_2 浓度升高能够明显降

低叶片单位面积的蒸腾失水, 提高水分利用效率。这种实验结果对农业生产实践有一定的意义, 如 CO_2 施肥, 不仅能提高植物的 WUE, 还能提高生产力。这与 Bunce(1992), Chaudhuri 等(1990)在 CO_2 浓度倍增条件下植物的生物量越能得到促进结论一致。

在对 CO_2 浓度升高的理解方面, 绝大多数学者以目前 CO_2 倍增进行研究, 如项文化等(2004)和 Johnston 等(1986)都用 $1\ 500\ \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$, Frederick 等(1990)用 $1\ 800\ \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$, 也有人用更高的 CO_2 浓度进行研究, 如蒋高明等(1996)在美国生物圈2号内用生长在 CO_2 浓度高达 $1\ 500\sim 4\ 500\ \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 的5种荒漠植物和5种热带雨林植物所做实验发现, 所有植物的最大表观光能利用率和最大光合速率均随 CO_2 浓度升高而升高(仅大黍下降)。很显然, 这样高的 CO_2 浓度下个世纪未必能出现, 科学家感兴趣的是真正很高的 CO_2 浓度下植物如何适应(Johnston 等, 1986), 这也是本实验的初衷。

参考文献:

- 刘金祥. 2004. 中国南方牧草[M]. 北京: 化学工业出版社. 147.
曾昭璇, 黄伟峰. 2001. 广东自然地理[M]. 广州: 广东人民出版社, 6.
潘瑞炽, 董愚得. 1995. 植物生理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 140-150.
Berry J A W J S. 1992. Downton. Environmental regulation of photosynthesis[A]. In: Govindjee(ed). photosynthesis Vol. II. Development, carbon metabolism and plant productivity [M]. New York: Academic Press.
Bunce J A. 1992. Stomatal conductance, photosynthesis and respiration of temperate deciduous tree seedlings growth outdoors at an elevated concentration of carbon dioxide[J]. *Plant, Cell and Environment*, **15**: 541-549.
Chaudhuri UN, Kirkham MB, Kanemasu ET. 1990. Root growth of winter wheat under elevated carbon dioxide and drought[J]. *Crop Sci*, **30**: 853-857.
Freder JR, Alm DM. 1990. Overcoming drought-induced decreases in soybean leaf photosynthesis by measuring with CO_2 -enriched air[J]. *Photosynthetic Research*, **25**: 49-57.
Gunderson C A, Norby R J, Wullschlegler S D. 1993. Foliar gas exchange responses of two deciduous hard woods during three years of growth in elevated CO_2 : No loss of photosynthetic enhancement[J]. *Plant, Cell and Environment*, **16**: 797-807.
Guo ZH(郭志华), Wang BS(王伯荪), Zhang HD(张宏达). 1998. On the characteristics of transpiration and its responses to shade in *Ginkgo biloba* (银杏的蒸腾特性及其对遮荫的响应)[J]. *Acta Bot Sin*(植物学报), **40**(6): 567-572.
Jiang GM(蒋高明), Lin GH(林光辉). 1996. Photosynthetic responses to light intensity in intact leaves of some coastal (下转第 446 页 Continue on page 446)

- Manchester SR. 1980. *Chattaway* (Sterculiaceae): A new genus of wood from the Eocene of Oregon and its implication for xylem evolution of the extant genus *Pterospermum* [J]. *Am J Bot*, **67**: 59—67.
- Manchester SR, Miller RB. 1978. Tile cells and their occurrence in malvacean fossil woods[J]. *IAWA Bulletin* 1978/2—3: 23—28.
- Metcalfe CR, Chalk L. 1950. *Anatomy of the Dicotyledons* [M]. Oxford: Clarendon Press, 223—266.
- Nyffeler R, Baum DA. 2000. Phylogenetic relationships of the durians (Bombacaceae-*Durioneae* or/Malvaceae/Helicteriodeae/*Durioneae*) based on chloroplast and nuclear ribosomal DNA sequences[J]. *Plant Systematics and Evolution*, **224**: 55—82.
- Tang Y (唐亚). 1990. The systematic position of *Corchoropsis* Sieb. & Zucc. and *Paradombeya* Stapf, in relation to the delimitation between Tiliaceae and Sterculiaceae (田麻属和平当树属的系统位置兼论椴树科和梧桐科的界限) [D]. 中国科学院昆明植物研究所博士学位论文.
- Tang Y (唐亚). 1992a. A study of *Melhania hamiltoniana* in relation to the systematic position of the genus (梧桐科梅蓝的研究兼论属的系统位置) [J]. *Acta Bot Yunnan* (云南植物研究), **14**: 13—20, 图版 2.
- Tang Ya. 1992b. The systematic position of *Corchoropsis* Sieb. et Zucc [J]. *Cathaya*, **4**: 131—150.
- Tang Ya. 1993. On the systematic position of *Paradombeya* Stapf [J]. *Acta Phytotax Sin*, **31** (4): 297—308, plus 3 plates.
- Tang Y (唐亚), Xie JS (谢嘉穗), Gao H (高辉). 2005. A study of wood anatomy of *Burretiodendron* Rehder and *Excentrodendron* H. T. Chang & R. H. Miao and its systematic implications (锦葵目蚬木属和柄翅果属的木材解剖学研究及其系统学意义) [J]. *Acta Bot Yunnan* (云南植物研究), **27**: 235—246.
- Terada K, Suzuki M. 1998. Revision of the so-called 'Reevesia' fossil woods from the Tertiary in Japan—a proposal of the new genus *Wataria* (Sterculiaceae) [J]. *Rev Palae Paly*, **103**: 235—251.
- Webber IE. 1934. Bearing of upright ray cells in the woods of *Hibiscus mutabilis* on usage of the term tile cell [J]. *Trop Woods*, **37**: 9—13.
- Wheeler EA, Baas P, Gasson PE, et al. 1989. IAWA list of microscopic features for hardwood identification [J]. *IAWA Bulletin*, **10**: 219—332.

维普资讯 http://www.cqvip.com

(上接第 480 页 Continue from page 480)

- desert and tropical rain forest plant species in atmospheres with different CO₂ concentrations. (不同 CO₂ 浓度下某些海岸和热带雨林植物种类的完好叶片在不同 CO₂ 浓度下对强光的光合反应) [J]. *Acta Bot Sin* (植物学报), **18**: 133—137.
- Jiang GM (蒋高明), Han XG (韩兴国), Lin Gh (林光辉). 1997. Response of plant growth to elevated CO₂: A review on the chief methods and basic conclusions based on experiments in the external countries in past decade (大气 CO₂ 浓度升高对植物的直接影响——国外十余年模拟实验之主要手段及基本结论) [J]. *Acta Phytocool Sin* (植物生态学报), **21** (6): 489—502.
- Johnston M, Grof CD. 1986. Sodium deficiency in the C₄ species *Amaranthus tricolor* is not completely alleviated by high CO₂ concentrations [J]. *Photosynthetica*, **4**: 476—479.
- Lawlor DW, Mitchell RAC. 1991. The effects of increasing CO₂ on crop photosynthesis and productivity: A review of field studies [J]. *Plant, Cell and Environment*, **14**: 807—818.
- Li MR (李美茹), Wang YR (王以柔), Liu HX (刘鸿先), et al. 2001. The regulation of light intensity to antioxidative ability in leaves of four subtropical forest plant (四种亚热带森林种类在控制光强下叶片的抗氧化能力) [J]. *Acta Phytocool Sin* (植物生态学报), **25** (4): 460—464.
- Lin WH (林伟宏). 1998. Response of photosynthesis to elevated atmospheric CO₂ (植物光合作用对大气 CO₂ 浓度升高的反应) [J]. *Acta Eco Sin* (生态学报), **18** (5): 529—535.
- Liu JX (刘金祥), Mo SQ (莫穗秋). 2005. Response of photosynthetic physiological characteristics of *Wedelia trilobata* to the increasing photosynthetic active radiation (三裂叶蟛蜞菊光合生理特性对光合有效辐射的响应) [J]. *Grassland and Turf* (草原与草坪), (2): 27—30.
- Norby R J, O'Neill E G. 1991. Leaf area compensation and nutrient interactions in CO₂-enriched seedling of yellow-poplar (*Liriodendron tulipifera*) [J]. *New Phytol*, **117**: 515—528.
- Ward J K, Strain B R. 1999. Elevated CO₂ studies: oast, present and future [J]. *Tree Physiol*, **19**: 211—220.
- Wei SL (魏胜林), Liu YH (刘业好), Qu HY (屈海泳), et al. 2001. Effects of high CO₂ concentration on physiological and biochemical processes in Lily (*Lilium dauricum*) (高 CO₂ 浓度对百合 (*Lilium dauricum*) 生理生化过程的影响) [J]. *Acta Phytocool Sin* (植物生态学报), **25** (4): 410—413.
- Xiang WH (项文化), Qian DL (田大伦), Yan WD (闫文德), et al. 2004. Photosynthetic responses of *Quercus fobri* leaves to increase in CO₂ concentration and temperature (白栎光合特性对二氧化碳浓度增加和温度升高的响应) [J]. *J Zhejiang Forestry Coll* (浙江林学院学报), **21** (3): 247—253.
- Xu DQ (许大全). 1994. Responses of photosynthesis and related processes to long term high CO₂ concentration (光合作用及有关过程对长期 CO₂ 浓度的响应) [J]. *Plant Physiol Commun* (植物生理学通讯), **30** (2): 81—87.
- Yan CR (严昌荣), Han XG (韩兴国), Chen LZ (陈灵芝). 2001. Water use efficiency of six woody species in relation to micro-environmental factors of different habitats (六种木本植物水分利用效率和其小生境关系研究) [J]. *Acta Ecol Sin* (生态学报), **21** (11): 1952—1956.
- Zhang LP (张利平), Wang XP (王新平), Liu LC (刘立超), et al. 1998. Study on gas exchange characteristics of main constructive plants *A. ordosica* and *C. korshinskii* in Shapotou Region (沙坡头主要建群植物油蒿和柠条的气体交换特征研究) [J]. *Acta Ecol Sin* (生态学报), **18** (2): 133—137.