

厚壁毛竹光合作用对 CO₂ 浓度倍增的短期响应

施建敏, 杨光耀, 杨清培, 方楷, 李健

(江西农业大学 江西省竹子种质资源与利用重点实验室, 南昌 330045)

摘要: 采用 Li-6400P 光合测定仪对比测定了大气 CO₂ 浓度和短期 CO₂ 浓度倍增下不同季节厚壁毛竹的光合特性, 结果表明: CO₂ 浓度加倍促使最大净光合速率、净光合速率、水分利用率、光合量子效率和光饱和点升高, 年平均增幅分别为 62.79%、48.74%、94.41%、8.70% 和 16.67%; CO₂ 浓度加倍促使蒸腾速率、暗呼吸速率和光补偿点下降, 年平均降幅分别为 17.60%、37.25% 和 40.50%。不同季节厚壁毛竹光合生理特性参数在 CO₂ 浓度加倍后的增加幅度或降低幅度与叶片生理活性和气候变化密切相关。CO₂ 浓度的倍增并未明显改变厚壁毛竹光合特性的季节变化规律, 除光补偿点外, 其它光合参数的季节大小顺序仍与大气 CO₂ 浓度下的相同。厚壁毛竹光合作用对短期 CO₂ 浓度升高的响应特征与 C₃ 植物光合作用对短期 CO₂ 浓度升高响应的普遍规律相符。

关键词: 厚壁毛竹; 光合作用; CO₂ 浓度倍增; 季节性变化

中图分类号: Q945 文献标识码: A 文章编号: 1000-3142(2010)05-0636-05

Photosynthetic responses of *Phyllostachys edulis* 'Pachyloen' to doubled CO₂ concentration

SHI Jian-Min, YANG Guang-Yao, YANG Qing-Pei, FANG Kai, LI Jian

(*Jiangxi Provincial Key Laboratory for Bamboo Germplasm Resources and Utilization, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China*)

Abstract: *Phyllostachys edulis* 'Pachyloen', a cultivar of *Ph. edulis*, has the advantages over bamboo shoots and wood. In order to explore the physio-ecological response and acclimation of *Ph. edulis* 'Pachyloen' to high CO₂ concentration, the photosynthetic characteristics under atmospheric CO₂ concentration and doubled CO₂ concentration were determined in four seasons by Li-6400P. The results showed that the doubled CO₂ concentration promoted the maximal net photosynthetic rate (P_{max}), net photosynthetic rate (P_n), water use efficiency (WUE), apparent quantum yield (AQY) and light saturate point (LSP). The increments were 62.79%, 48.74%, 94.41%, 8.70% and 16.67% respectively. Transpiration rate (Tr), dark respiration rate (R_d) and light compensate point (LCP) were decreased under the doubled CO₂ concentration, and their decrements were 17.60%, 37.25% and 40.50% respectively. After CO₂ concentration doubled, the photosynthetic parameters' variation range of *Ph. edulis* 'Pachyloen' in four seasons were closely related to its leaf physiological activity and climate change. The order of photosynthetic parameters' value was same with that of atmospheric CO₂ concentration except LCP. It indicated that the seasonal variation tendency of photosynthetic characteristics had not been changed by the doubled CO₂ concentration. On the whole, the photosynthetic response of *Ph. edulis* 'Pachyloen' to short-term elevated CO₂ concentration accorded with the general law for C₃ plant.

Key words: *Phyllostachys edulis* 'Pachyloen'; photosynthesis; doubled CO₂ concentration; seasonal variation

收稿日期: 2009-03-25 修回日期: 2010-09-02

基金项目: 国家自然科学基金(30760204); 江西省教育厅青年科学基金(GJJ09476)[Supported by National Natural Science Foundation of China (30760204); the Youth Foundation of Education Department of Jiangxi Province(GJJ09476)]

作者简介: 施建敏(1978-), 男, 江西婺源人, 博士, 主要从事植物生态学研究, (E-mail) sinobamboo@126.com。

厚壁毛竹 (*Phyllostachys edulis* 'Pachyloen') 亦名厚皮毛竹, 与毛竹 (*Phyllostachys edulis*) 相似, 但竿略呈四方形, 因竿壁厚而与毛竹不同。厚壁毛竹是一个材、笋兼优的毛竹变异类型, 江西特有, 仅零星分布于万载、宜丰、铜鼓三县。目前, 野生状态的厚壁毛竹种群数量少, 处于濒危状态, 已被列为江西省重点保护植物 (杨光耀等, 1997)。

由于人类活动的影响, 大气 CO₂ 浓度已由一百年前的 260~280 μmol·mol⁻¹ 上升到目前的 350 μmol·mol⁻¹ 左右, 并继续以每年 1~2 μmol·mol⁻¹ 的速度增加, 预计到 21 世纪中叶, 大气 CO₂ 浓度将达到 700 μmol·mol⁻¹ (林伟宏, 1998; 欧志英等, 2003; 张朋等, 2010)。大气 CO₂ 浓度升高不仅是对植物生长有促进作用, 而伴随的增温效应与 CO₂ 浓度增加的共同作用同样会引起植物其它生理生态特性的响应和适应, 甚至影响植物个体发育、生物量和生产力 (刘世荣等, 1997; 刘金祥等, 2005; 马永亮等, 2007; 徐振锋等, 2008)。目前, 植物对 CO₂ 浓度升高的光合生理生态响应和适应已成为植物生理生态学的研究热点 (蒋高明等, 2000; 欧志英等, 2003; 施建敏等, 2007; 刘金祥等, 2009; 张朋等, 2010)。厚壁毛竹作为一个经济价值高、分布少的优良林木品种, 在未来 CO₂ 浓度持续升高的情况下, 其生理生态特性对 CO₂ 浓度升高的响应和适应直接关系到厚壁毛竹的生长、保育和管理。因此, 开展厚壁毛竹光合作用对 CO₂ 浓度倍增的响应研究具有实际意义。

1 试验地概况

供试植物厚壁毛竹栽培于江西农业大学, 115°49'11"~115°49'23" E, 28°46'00"~28°46'30" N, 海拔 49.5 m。地处江西省中部偏北, 属中亚热带湿润季风气候, 年均气温 17.5 °C, 极端最高气温 40.6 °C, 极端最低气温 -9.3 °C, 历年平均降水量 1 754.9 mm, 平均无霜期 294 d, 日照率 43%。试验地为红壤。

2 研究方法

在自然条件下, 选择长势中等的厚壁毛竹, 取中部冠层向南伸展枝条上部的第 2 或第 3 片当年成熟叶片, 分别在夏、秋、冬、春四季选择若干典型天气日子于上午采用 Li-6400P 光合测定仪 (LI-COR, USA) 进行测定, 结果取多次重复的平均值。对比

测定大气 CO₂ 浓度和样品室 CO₂ 浓度 700 μmol·mol⁻¹ 下厚壁毛竹的光合特性和光响应曲线, 以便比较厚壁毛竹光合作用在 CO₂ 浓度倍增前后的变化。测定光合特性时, 叶室的其它条件与自然环境保持一致。光响应曲线的光照强度设定梯度为 0、50、100、200、300、500、700、1 000、1 200、1 500、1 800、2 000、2 200 μmol·m⁻²·s⁻¹, 样品室相对湿度、叶温控制在当月光合作用的最佳适宜范围内。根据低光照强度测得的光合速率值建立直线回归方程 (许大全等, 1987), 直线与横坐标轴的交点即为光补偿点 (LCP), 直线的斜率即为光合量子效率 (AQY)。

3 结果与分析

3.1 CO₂ 浓度倍增对厚壁毛竹光合特性的影响

CO₂ 浓度倍增使厚壁毛竹光合特性产生明显的变化 (表 1), 对净光合速率 (P_n) 和水分利用率 (WUE) 具有促进作用, 则对蒸腾速率 (T_r) 和暗呼吸速率 (R_d) 具有抑制作用, 总体上有利于厚壁毛竹的光合作用。显著性检验结果表明: 各季节厚壁毛竹光合参数在 CO₂ 浓度倍增前后均在 0.05 水平上具有显著差异, 唯有春季净光合速率差异不显著 ($P=0.41, df=8$); 从全年来看, 净光合速率和蒸腾速率在 CO₂ 浓度倍增前后无显著差异 ($P=0.11, df=38; P=0.50, df=38$), 而水分利用率和暗呼吸速率则具有显著差异 ($P=0.01, df=38; P=0.00, df=38$)。厚壁毛竹光合特性在 CO₂ 浓度加倍后的大小和季节变化规律详述如下:

3.1.1 净光合速率 与大气 CO₂ 浓度下毛竹净光合速率相比, CO₂ 浓度的加倍促使了厚壁毛竹光合速率升高: 夏季增幅最大, 为 72.70%, P_n 高达 20.12 μmol·m⁻²·s⁻¹; 秋季和冬季的增幅居中; 而春季的增幅最小, 仅为 6.64%; 全年平均增幅为 48.74%。CO₂ 浓度倍增后, 厚壁毛竹光合速率和光合速率增幅的季节变化与大气 CO₂ 浓度下厚壁毛竹光合速率的季节变化完全一致, 均为夏季>秋季>冬季>春季。

3.1.2 蒸腾速率 厚壁毛竹的蒸腾速率在 CO₂ 浓度倍增后有不同程度的减弱: 夏季的降低幅度最小, 为 8.67%; 春季的降幅稍高, 为 30.51%; 秋季和冬季的降幅则较大, 分别是 34.12% 和 38.23%; 年平均降幅为 17.60%。从季节变化来看, CO₂ 浓度的倍增没有改变厚壁毛竹四个季节蒸腾速率的大小顺

表1 不同季节厚壁毛竹在CO₂浓度加倍和大气CO₂浓度下的光合特性比较
 Table 1 Comparisons between the photosynthetic characteristics measured under doubled CO₂ concentration and atmospheric CO₂ concentration in *Phyllostachys edulis* 'Pachyloen' in four seasons

月份	P_n^* ($\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	P_n ($\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	增幅 (%)	Tr^* ($\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	Tr ($\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	增幅 (%)	WUE^* ($\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$)	WUE ($\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$)	增幅 (%)	Rd^* ($\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	Rd ($\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	增幅 (%)
夏季	20.12±1.48	11.65±0.81	72.70	2.95±0.32	3.23±0.46	-8.67	6.82±1.06	3.61±0.71	89.10	0.63±0.11	0.85±0.12	-25.88
秋季	8.65±0.69	6.31±0.55	37.08	0.56±0.11	0.85±0.27	-34.12	15.45±1.75	7.42±1.22	108.07	0.45±0.09	0.83±0.13	-45.78
冬季	5.57±0.54	4.53±0.48	22.96	0.21±0.07	0.34±0.15	-38.23	26.52±2.52	13.32±1.63	99.10	0.41±0.09	0.74±0.10	-44.59
春季	2.25±0.29	2.11±0.36	6.64	0.41±0.10	0.59±0.22	-30.51	5.49±0.81	3.58±0.65	53.35	0.38±0.06	0.56±0.08	-32.14
平均	9.15±7.83	6.15±4.25	48.74	1.03±1.12	1.25±1.32	-17.60	13.57±9.62	6.98±4.56	94.41	0.47±0.13	0.75±0.16	-37.25

注: 各参数标有*的为CO₂浓度加倍下所测值, 未标记的为大气CO₂浓度下所测值; 表中数据为平均值±标准差。下同。
 Note: parameters remarked by * were measured under doubled CO₂ concentration, the others were measured under atmospheric CO₂ concentration. The value in the table is Mean±S. D. The same below.

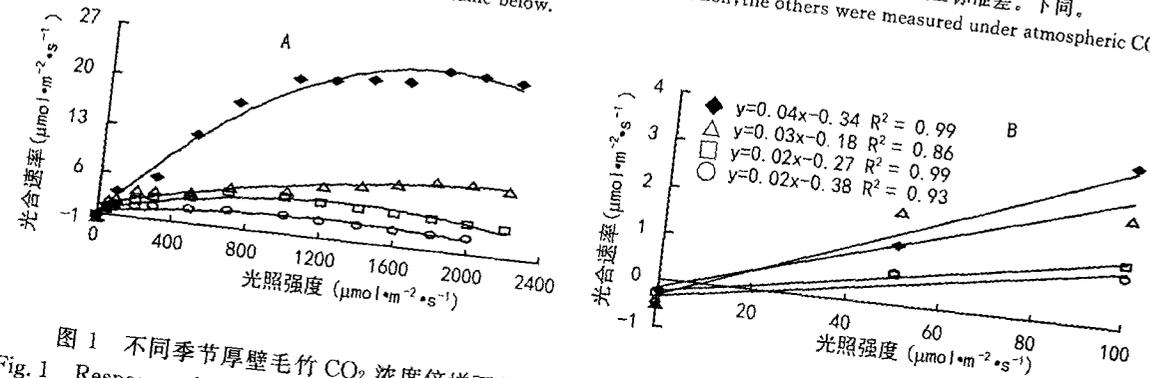


图1 不同季节厚壁毛竹CO₂浓度倍增下的光响应曲线 (—◆—夏季—△—秋季—□—冬季—○—春季)
 Fig. 1 Response of *Phyllostachys edulis* 'Pachyloen' to light under doubled CO₂ concentration in four seasons

为夏季>秋季>春季>冬季。
 水分利用率 CO₂浓度倍增后, 由于厚壁毛竹光合速率提高, 而蒸腾速率下降, 这使得厚壁毛竹各个季节的水分利用率较大气CO₂浓度下有所增加, 年平均水分利用率为13.57 μmol·m⁻²·s⁻¹。几乎是大气CO₂浓度下的2倍, 年平均增幅为4.41%。不同季节, 厚壁毛竹水分利用率的增幅有差异的: 春季的增幅最小(53.35%); 夏季为89.10%; 秋季和冬季的增幅都在100%左右。不同季节的增幅不同, 但是CO₂浓度倍增下厚壁毛竹四季的水分利用速率大小顺序仍与大气下的相同, 均为冬季>秋季>夏季>春季。
 呼吸速率 CO₂浓度的增加减弱了厚壁毛竹的呼吸作用, 年平均降低了37.25%, 秋季和冬季的降幅较大, 均高于40%; 春季的降幅次之, 为25.88%。虽然厚壁毛竹的呼吸速率在CO₂浓度加倍后有不同的程度, 但是暗呼吸速率大小主要还是受环境温度影响, 季节变化趋势仍与大气CO₂浓度下的相同, 均为冬季>秋季>夏季>春季。

3.2.1 倍增对厚壁毛竹光响应特征的影响

对光响应的总体趋势与其在大气CO₂浓度下的光响应相同, 在0~200 μmol·m⁻²·s⁻¹光强范围内, 光合速率几乎呈线性增长, 随着光照强度的继续增加, 光合速率的增长幅度减小, 当光照强度达到光饱和点后, 光合速率就处于一个相对稳定的水平, 此后, 光强进一步升高将导致光合速率下降(图1), CO₂浓度倍增下的厚壁毛竹光响应特性与其在大气CO₂浓度下的季节变化规律也基本一致(表2)。通过对厚壁毛竹在CO₂浓度加倍前后的光响应特征值进行显著性检验, 结果表明: 在季节上, 冬季光合量子效率(P=0.35, df=8)、春季光合量子效率(P=0.56, df=8)、冬季光补偿点(P=0.44, df=8)、冬季光饱和点(P=0.92, df=8)差异不显著, 其它均在0.05水平上具有显著差异; 从全年来看, 除了光补偿点(P=0.01, df=38)具有显著差异外, 其它指标如最大净光合速率(P=0.15, df=38)、光合量子效率(P=0.46, df=38)和光饱和点(P=0.32, df=38)均不具显著差异。

3.2.1 最大净光合速率 厚壁毛竹的最大净光合速率(P_{max})在CO₂浓度倍增后有较大幅度升高, 增幅全年最高, 为92.34%, 最大净光合速率达21.70 μmol·m⁻²·s⁻¹; 秋季和春季...

40%); 冬季增幅最低, 为 19.06%; 年均增幅 62.79%。CO₂ 浓度的倍增未改变厚壁毛竹最大净光合速率的季节变化规律, 仍为夏季 > 秋季 > 冬季 > 春季。

3.2.2 光合量子效率 CO₂ 浓度倍增对不同季节厚壁毛竹光合量子效率(AQY)的影响有差异, CO₂ 浓度升高对夏季、秋季光合量子效率具有正面的促进

作用, 夏季光合量子效率最高(0.037), 但秋季的增幅最大, 为 26.09%; 冬季和春季光合量子效率相比大气 CO₂ 浓度下均有不同程度的降低, 尤其是冬季的降幅最大, 达 10.53%。从全年来看, CO₂ 浓度倍增对厚壁毛竹光合量子效率还是具有促进作用, 年均增幅为 8.70%。大气 CO₂ 浓度和 CO₂ 浓度倍增下的厚壁毛竹光合量子效率的季节变化一致, 均为

表 2 不同季节厚壁毛竹大气 CO₂ 浓度和 CO₂ 浓度倍增下的光响应曲线特征参数比较

Table 2 Comparisons between photosynthetic characteristic for light response curves measured under doubled CO₂ concentration and atmospheric CO₂ concentration in *Phyllostachys edulis* 'Pachyloen' in four seasons

季节	P_{max}^* (mol · m ⁻² · s ⁻¹)	P_{max} (mol · m ⁻² · s ⁻¹)	增幅 (%)	AQY* (10 ⁻²)	AQY (10 ⁻²)	增幅 (%)	LCP* (mol · m ⁻² · s ⁻¹)	LCP (mol · m ⁻² · s ⁻¹)	增幅 (%)	LSP* (mol · m ⁻² · s ⁻¹)	LSP (mol · m ⁻² · s ⁻¹)	增幅 (%)
夏季	25.1±1.62	13.05±1.53	92.34	3.7±0.5	3.1±0.4	19.35	9.38±0.96	15.42±1.37	-39.17	1400±120	1200±115	16.67
秋季	9.85±0.75	7.00±0.54	40.71	2.9±0.4	2.3±0.3	26.09	6.30±0.51	30.06±2.83	-79.04	1800±175	1600±150	12.50
冬季	5.06±0.46	4.25±0.41	19.06	1.7±0.3	1.9±0.3	-10.53	16.21±1.72	17.38±1.80	-6.73	1000±110	1000±105	0.00
春季	2.52±0.31	1.83±0.22	37.70	1.6±0.3	1.7±0.2	-5.88	24.60±2.45	32.07±2.64	-23.29	700±90	400±70	75.00
年平均	10.63±9.11	6.53±4.69	62.79	2.5±1.1	2.3±0.8	8.70	14.12±7.42	23.73±8.71	-40.50	1225±380	1050±450	16.67

夏季 > 秋季 > 冬季 > 春季。

3.2.3 光补偿点 厚壁毛竹的光补偿点(LCP)在 CO₂ 浓度倍增后降低, 但不同季节降低程度不同: 秋季降幅最高, 达 79.04%, 此时光补偿点仅为 6.30 μmol · m⁻² · s⁻¹; 夏季和春季的降幅居中, 分别为 39.17% 和 23.29%; 冬季降幅最低, 为 6.73%; 年平均降低幅度为 40.50%。与大气 CO₂ 浓度下厚壁毛竹光补偿点的季节变化规律(春季 > 秋季 > 冬季 > 夏季)相比, CO₂ 浓度倍增后使厚壁毛竹秋季的光补偿点成为全年最低, 其它季节的大小顺序未变, 为春季 > 冬季 > 夏季 > 秋季。

3.2.4 光饱和点 LSP 在 CO₂ 浓度倍增后除冬季没有明显提高外, 其它季节均有所提高, 夏季增幅 16.67%; 秋季增幅 12.50%; 春季增幅为全年最高达 75.00%, 光饱和点约为 700 μmol · m⁻² · s⁻¹; 年均增幅 16.67%。CO₂ 浓度倍增并未明显改变厚壁毛竹光饱和点的季节变化规律, 与大气 CO₂ 浓度下的季节变化基本相同, 为秋季 > 夏季 > 冬季 > 春季。

4 讨论

C₃ 植物对 CO₂ 浓度短期升高的反应趋于一致, 浓度增加后, 光合速率提高, 气孔导度、蒸腾速率和暗呼吸降低, 水分利用效率提高, 同时使光补偿点降低, 饱和点、光量子效率上升(刘世荣等, 1997; 蒋高明等, 2000; 欧志英等, 2003; 张朋等, 2010), 而且

一般认为 C₃ 植物在 CO₂ 浓度加倍后光合速率提高 10%~50%(蒋高明等, 2000; 刘金祥等, 2009)。厚壁毛竹光合特性对 CO₂ 浓度倍增的响应特征与 C₃ 植物光合作用对 CO₂ 浓度升高响应的普遍规律相符, 而且厚壁毛竹和毛竹(施建敏等, 2007)在 CO₂ 浓度倍增后的光合参数大小、增(降)幅和季节变化都基本一致, 这也在一定程度上反映了它们在生物学特性上的相近。

CO₂ 浓度的升高并未改变厚壁毛竹光合特性的季节变化规律(表 1)。同时, 从图 2 可看出, 夏季和秋季的光、温条件好于春季和冬季, 从而不同季节厚壁毛竹光合参数的大小和增(降)幅均表现出与环境气候变化和叶片生理活性的密切关系(表 1 和图 2)。总体上, 厚壁毛竹夏季和秋季的光合活性要高于冬季和春季。对于这点, 辽东栎(*Quercus liaotungensis*)和辽东栎群落植物光合特性对 CO₂ 浓度升高响应的研究结果(林舜华等, 1997; 蒋高明等, 2000)同样予以支持和证实。

光合量子效率是指光合机构每吸收一个光子所同化固定的 CO₂(或所释放的 O₂)分子数, 人们常用它来表示植物光合作用的光合效率(许大全, 1999)。与大气 CO₂ 浓度下的光合量子效率相比, CO₂ 浓度倍增后厚壁毛竹光合量子效率在叶片生理活性高的夏季和秋季升高, 而在叶片生理活性低的冬季和春季则有所下降。这说明 CO₂ 浓度升高对厚壁毛竹光合效率的影响是会因叶片生理活性的

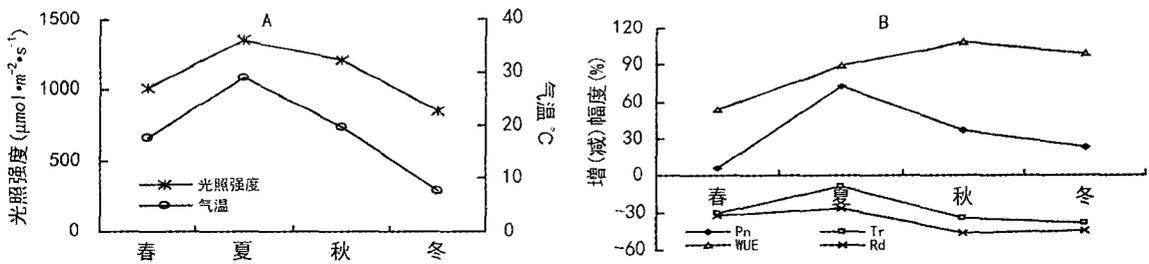


图2 不同季节主要环境因子的变化(A)及厚壁毛竹主要光合特性在 CO_2 浓度倍增后的增(减)幅度趋势(B)

Fig. 2 The increment of photosynthetic parameters after CO_2 concentration doubled and chief environmental factors in four seasons

高低而有差异的。

虽然短期 CO_2 浓度倍增对厚壁毛竹光合作用具有促进作用,但是长期高 CO_2 浓度处理对植物光合作用最初的促进随着时间的推移渐渐消失,光合作用恢复到原来水平甚至下降,出现植物对 CO_2 的光合适应现象(林伟宏,1998;欧志英等,2003;刘金祥等,2009)。普遍的假说认为这是由于光合产物供大于求,源库平衡关系破坏造成的产物积累反馈抑制。但是厚壁毛竹对长期高 CO_2 浓度的光合生理响应和适应特征值得继续深入研究。籍此,才能较为全面的了解其在高 CO_2 浓度下的生理生态特性,为厚壁毛竹的生长、保育和管理提供理论依据。

参考文献:

- Jiang GM(蒋高明), Qu CM(渠春梅). 2000. Photosynthetic response of six woody species to elevated CO_2 in *Quercus liaotungensis* forest in the Beijing mountainous areas(北京山区辽东栎林中几种木本植物光合作用对 CO_2 浓度升高的响应)[J]. *Acta Phytoecol Sin*(植物生态学报), **24**(2): 204-208
- Lin WH(林伟宏). 1998. Response of photosynthesis to elevated atmospheric CO_2 (植物光合作用对大气 CO_2 浓度升高的反应)[J]. *Acta Ecol Sin*(生态学报), **18**(5): 529-538
- Lin XH(林舜华), Xiang B(项斌), Gao LM(高雷明), et al. 1997. The response of *Quercus liaotungensis* to doubled CO_2 concentration(辽东栎对大气 CO_2 倍增的响应)[J]. *Acta Phytoecol Sin*(植物生态学报), **21**(4): 297-303
- Liu JX(刘金祥), Li ZF(李志芳). 2005. Effects of CO_2 concentrations increasing on photosynthetic physiological characteristics of *Wedelia trilobata* (CO_2 浓度增高对三裂叶蟛蜞菊光合生理特性的影响)[J]. *Guihaia*(广西植物), **25**(5): 477-480
- Liu JX(刘金祥), Liu HC(刘海聪), Li JT(李锦添), et al. 2009. Response of vetiver photosynthetic characteristics to elevated persistent available radiation and CO_2 concentration(香根草光合特性对有效光辐射增强和 CO_2 浓度升高的响应)[J]. *Chin J Trop Crops*(热带作物学报), **30**(8): 1 201-1 205
- Liu SR(刘世荣), Jiang YX(蒋有绪), Guo QS(郭泉水). 1997. The likely impact of rising atmospheric CO_2 concentration on tree growth and physiology(大气 CO_2 浓度增加对树木生长和生理的可能影响)[J]. *J Northeast Fore Univ*(东北林业大学学报), **25**(3): 30-37
- Ma YL(马永亮), Wang KY(王开运), Sun Q(孙卿), et al. 2007. Effects of elevated atmospheric CO_2 on plant root system: A review(大气 CO_2 浓度升高对植物根系的影响)[J]. *Chin J Ecol*(生态学杂志), **26**(10): 1 640-1 645
- Ou ZY(欧志英), Peng CL(彭长连). 2003. Progress in studies on plant responses to elevated CO_2 (高浓度二氧化碳对植物影响的研究进展)[J]. *J Trop Subtrop Bot*(热带亚热带植物学报), **11**(2): 190-196
- Shi JM(施建敏), Guo QR(郭起荣), Yang GY(杨光耀). 2007. Seasonal photosynthetic responses of *Phyllostachys edulis* to light under doubled CO_2 concentration(CO_2 浓度倍增下毛竹光合作用对光照强度的季节响应)[J]. *Acta Agric Univ Jiangxi*(江西农业大学学报), **29**(2): 215-219
- Xu DQ(许大全), Li DY(李德耀), Qiu GX(邱国雄), et al. 1987. Studies on stomatal limitation of photosynthesis in the bamboo (*Phyllostachys pubescens*) leaves(毛竹叶光合作用的气孔限制研究)[J]. *Acta Photophysiol Sin*(植物生理学报), **13**(2): 154-160
- Xu DQ(许大全). 1999. Photosynthetic rate, photosynthetic efficiency and crop yield(光合速率、光合效率与作用产量)[J]. *Bull Biol*(生物学通报), **34**(8): 8-10
- Xu ZF(徐振锋), Hu TX(胡庭兴), Zhang YB(张远彬), et al. 2008. Review on responses of plant phenology to simulated elevated CO_2 concentration and temperature(植物物候对模拟 CO_2 浓度和温度升高的响应研究进展)[J]. *Chin J Appl Environ Biology*(应用与环境生物学报), **14**(5): 716-720
- Yang GY(杨光耀), Li ZY(黎祖尧), Du TZ(杜天真), et al. 1997. A new cultivated variety of moso bamboo(毛竹新栽培变种—厚皮毛竹)[J]. *Acta Agric Univ Jiangxi*(江西农业大学学报), **19**(4): 97-98
- Zhang P(张朋), Zhang WH(张文会), Miao XL(苗秀莲), et al. 2010. Effects of doubled CO_2 concentration on growth and photosynthesis of soybean(CO_2 浓度倍增对大豆生长及光合作用的影响)[J]. *Soybean Sci*(大豆科学), **29**(1): 64-67