CO₂ 浓度升高对沉水植物菹草叶表型 及生理生化特征的影响

谢永宏 于 丹* 耿显华

(武汉大学生命科学院生态研究所, 武汉 430072)

摘 要 对菹草 (*Potamogeton crispus*) 叶在高 CO₂ ($1\,000 \pm 50\ \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$) 和对照浓度(约 $380\ \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$) 下的表型及一些生理生化指标进行了比较研究。结果表明: CO₂ 浓度升高明显地改变了菹草叶的表型特征, 外形更为粗短, 叶宽、单叶面积、单株总叶面积、叶面积率、叶重比明显增加, 但特殊叶面积和叶长增加不明显。线性回归分析表明单株总叶面积和植株大小密切相关。异速生长分析表明叶面积的变化不是可塑性反应, 而是受植株大小所制约。此外, CO₂ 浓度升高后植物的色素含量和一些化学物质含量明显改变。叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素及类胡萝卜素含量减少, 且叶绿素 a/b 也降低, 可溶性糖含量增加, 而蛋白质、N 和 P 浓度降低。

关键词 高 CO₂ 浓度 菹草 表型可塑性 生理生化特征

EFFECTS OF ELEVATED CO₂ CONCENTRATION ON PHENOTYPIC , PHYSIOLOGICAL AND BIOCHEMICAL CHARACTERISTICS OF SUBMERSED PLANT *POTAMOGETON CRISPUS* LEAF

XIE Yong-Hong YU Dan* and GENG Xian-Hua

(Institute of Ecology, School of Life Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract The effects of elevated CO₂ concentration on growth and development of terrestrial plants have been studied intensively, but less scientific interest has been raised on aquatic plants. In this study, a greenhouse experiment with submersed species *Potamogeton crispus*, one of dominant species in lakes along Yangtze River Basin, was studied comparatively in higher ($1\,000 \pm 50\ \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$) and ambient (about $380\ \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$) CO₂ concentration to test whether CO₂ has significant impacts on phenotypic and some physiological and biochemical characteristics as main effect. In addition, allometric analysis was applied to distinguish whether phenotypic changes such as total leaf area are induced by environment (plastic) or plant size dependent (non-plastic). The results showed that phenotypic characteristics of *P. crispus* leaf in elevated CO₂ concentration changed significantly compared with that in ambient CO₂ concentration. Leaf shape was more stubby, but leaf width, single leaf area, total leaf area per plant and leaf area ratio increased significantly in elevated CO₂ concentration. However, specific leaf area and leaf length did not differ between treatments. Total leaf area per plant was closely correlated with plant weight, indicating that change in this phenotypic characteristic may depend on plant size. The result of allometric analysis certified that this change was a non-plastic response, but plant size dependent. In addition, higher CO₂ concentration led to the changes in pigment concentration. Chlorophyll a, chlorophyll b, total chlorophyll, carotenoid concentration and the ratio of chlorophyll a/b decreased in elevated CO₂ concentration. The soluble sugar concentration increased, but protein, N and P content decreased under higher CO₂ condition. It is concluded that elevated atmospheric CO₂ concentration results in significant changes in some physiological and biochemical characteristics, especially increase of soluble sugar concentration, but not necessary in leaf phenotype. Maybe "true" adjustment in leaf phenotype is under strong genetic rather than CO₂ control.

Key words Elevated CO₂ concentration, *Potamogeton crispus*, Phenotypic plasticity, Physiological and biochemical characteristics

CO₂ 是植物进行光合作用的底物, 其浓度升高将直接影响到植物的生长发育, 因而引起了国内外

研究者的广泛关注。但研究的对象以陆生植物为主, 以水生高等植物尤其是沉水植物为材料进行的

研究较少。就研究的历史而言,水生植物比陆生植物至少要迟 10 年(Bowes, 1993)。沉水植物是淡水生态系统的主要高等植物,也是健康湖泊生态系统的主要维持者(刘建康, 1999)。因此,选择有代表性的沉水植物为研究对象对于认识 CO₂ 浓度升高对湖泊生态系统的影响具有重要意义。

叶片是植物的光合器官,也是对环境条件变化较为敏感的营养器官,其表型特征和生理生化特征都能体现环境因子变化的影响或植物对环境的适应(王勋陵等, 1989)。本研究以长江中下游湖泊冬春季优势种菹草(*Potamogeton crispus*)的叶为对象进行了一些初步研究,目的有二:1)CO₂ 浓度升高对沉水植物叶表型和生理生化特征会产生什么影响?2)如果有表型变化,那么这些变化是 CO₂ 浓度升高引起的,还是受植株大小所制约?

1 材料和方法

1.1 材料和方法

菹草是单子叶植物眼子菜科的一种沉水植物。实验用菹草休眠芽于 2001 年 9 月末采自湖北省梁子湖(30°15.679'N ~ 114°33.614'E),取回实验室清洗干净后放置于地面阴干 6 h,以促其发芽一致,随后放在盛满水的塑料盆中萌发。

1.2 实验处理和测定方法

1 周后,从中选出幼苗高约 0.5 cm、大小一致的芽 96 个放置在 12 个装有 5 cm 东湖底泥的塑料盆中(30 cm × 21 cm × 8 cm)。每盆 8 个芽均匀放置在泥的表层。然后将这些塑料盆置在通了 CO₂ 或空气的用于培养植物的水族缸(100 cm × 50 cm × 75 cm)中。

实验所用 CO₂ 浓度有两种:一是来自于地面 10 m 的高空,约为 380 μmol·mol⁻¹;二是 CO₂ 和空气的混合气,为 1 000 ± 50 μmol·mol⁻¹。空气和 CO₂ 混合气都是 24 h 不停地供应。监测 CO₂ 浓度的仪器为 Vaisala GM12A 便携式 CO₂ 分析仪(Cole-paramer Company, USA)。

实验在武汉大学生态所的人工培养室进行。采用 400 瓦的卤素灯补充光照(每天 14 h),水面的光照强度为 300 μmol·m⁻²·s⁻¹。实验期间白天温度控制为 20 ± 2 °C,晚上为 12 ± 2 °C。自来水是按照植株的生长发育进程不断加入,且每次都保证两处理的深度一致,最后的水深为 50 cm 并保持不变。经测定,在同一时间高 CO₂ 处理的 pH 值比对照低 0.2 ~ 0.3。

实验时间为 2001 年 10 月 15 日至 2001 年 12 月 22 日。其间于 11 月 24 日和 12 月 8 日、22 日分 3 次收获。每次收获时先测定植株的叶长、叶宽,后将植株分为叶、茎、根茎、间隔子和根 5 部分,并在 65 °C 下连续烘 4 d 至衡重,记下生物量,换算出叶重比(叶重/植株总重)。单叶表面积的估算采用坐标纸描绘法,即先随意挑取 48 片叶描绘在坐标纸上,计算出面积,然后以长(*a*)×宽(*b*)为变量,叶面积为依变量进行线性回归,方程式为: $y = 0.87ab - 0.21$, $r^2 = 0.98$ 。单叶面积依此公式将叶长、叶宽换算而得。特殊叶面积为单叶面积与单叶重量的比值。单株总叶面积为叶重和特殊叶面积的乘积。叶面积率为单株总叶面积与植株总重的比值。

生理生化特征为第二次收获时所测定。用于色素含量测定的叶取自顶部倒数第四片,叶绿素和类胡萝卜素的含量采用丙酮提取法。可溶性糖和蛋白质含量为叶片混合后测定值,可溶性糖采用蒽酮法,蛋白质含量采用 Folin-酚法。N、P 含量采用 H₂SO₄ - H₂O₂(Zn 为催化剂)法消化,N 含量采用奈氏比色法,P 含量采用钼锑抗比色法(史瑞和, 1994)。每一种生理生化指标测定重复 3 次。

1.3 统计分析

在分析单株总叶面积与植株总重的关系时,先将所有的数据转化为自然对数以保证其方差齐次性,然后以线性模型求回归方程。在阐明单株总叶面积是可塑性(由环境变化所引起)还是非可塑性(受植株大小所制约)变化时采用了异速生长分析(John *et al.*, 1999; Viveka *et al.*, 2001)。该方法的实质就是将环境条件所引起的特征改变从植物个体发生的影响中分离出来。先对单株总叶面积进行一元方差分析(ANOVA)。如果处理间差异显著,就进行协方差分析(ANCOVA),即将处理指定为固定变量,单株总重指定为协变量的一元协方差分析。

2 结果与分析

2.1 CO₂ 浓度升高对菹草叶表型特征的影响

CO₂ 浓度升高明显改变了菹草叶的表型特征(表 1)。与对照相比,高 CO₂ 处理的叶宽明显增加,叶长增加不明显,叶型(叶长/宽)变得更为粗短。高 CO₂ 条件下菹草的叶重比、单叶面积、叶面积率和单株总叶面积也明显增加,但特殊叶面积没有明显变化。

CO₂ 浓度升高促进了植物的生长,且高 CO₂ 的

所有点都在低 CO₂ 的回归线之上,低 CO₂ 的所有点都在高 CO₂ 的回归线之下。无论 CO₂ 浓度升高与否,这两者间都呈明显的线性关系,从而暗示出单株总叶面积的增加有可能受植株大小所制约,而不是由 CO₂ 浓度升高所引起。因此,对其进行异速生长

分析是必要的。一元方差分析结果表明不同处理间差异显著($F = 9.684, p < 0.01$),但协变量分析结果表明,排除协变量的影响后,处理间差异并不显著(表 2)。因此单株总叶面积的变化不是一种可塑性反应。

表 1 CO₂ 浓度升高对菹草叶形态特征的影响(平均值 ± 标准差)
Table 1 Effects of elevated CO₂ on phenotypic characteristics of *Potamogeton crispus* leaf (means ± SD)

		高 CO ₂ Elevated CO ₂ (E)	对照 CO ₂ Ambient CO ₂ (A)	增加百分比 Percentage of increase (E - A)/A (%)	
叶长	Leaf length (cm)	<i>n</i> = 133	6.69 ± 0.66	6.54 ± 0.74	2.29
叶宽	Leaf width (cm)	<i>n</i> = 133	0.82 ± 0.11	0.74 ± 0.12	10.81
叶长/叶宽	Leaf length/width	<i>n</i> = 133	8.08 ± 0.93	9.23 ± 1.63	- 12.46
单叶面积	Single leaf area (cm ²)	<i>n</i> = 133	4.69 ± 1.02	4.11 ± 0.84	14.11
特殊叶面积	Specific leaf area (cm ² ·g ⁻¹)	<i>n</i> = 20	1 338.75 ± 105.08	1 303.74 ± 92.59	2.69
叶面积率	Leaf area ratio (cm ² ·g ⁻¹)	<i>n</i> = 24	613.55 ± 45.62	527.45 ± 73.99	16.32
叶重比	Leaf weight ratio (g·g ⁻¹)	<i>n</i> = 24	0.46 ± 0.03	0.40 ± 0.06	15.00
单株总叶面积	Total leaf area per plant (cm ²)	<i>n</i> = 24	447.51 ± 225.15	264.90 ± 178.78	68.94

表 2 升高和对照 CO₂ 浓度下菹草单株总叶面积的协变量分析结果
Table 2 The one-way ANCOVA's of leaf area per plant of *Potamogeton crispus* in elevated and ambient CO₂ concentration

	协变量 Covariate	处理 Treatments	协变量 × 处理 Covariate × treatments
单株叶面积			
Leaf area per plant (cm ²)	498.617***	0.352 ^{ns}	0.020 ^{ns}

ns: $p > 0.05$ 无差异显著 No significant difference ***: $p < 0.001$ 差异极显著 Extremely significant difference

图 1 菹草单株总重与单株总叶面积的线性关系
Fig.1 The linear relationship between total plant weight per plant and total leaf area per plant of *Potamogeton crispus*
 Y_E 和实线表示高 CO₂ 处理, Y_A 和虚线表示对照处理 Y_E and real line indicate elevated CO₂ concentration, Y_A and broken line indicate ambient CO₂ concentration

2.2 CO₂ 浓度升高对菹草叶色素含量的影响
CO₂ 浓度升高使菹草叶中的各种色素含量均减

少(表 3),但以类胡萝卜素的含量减少最多,以叶绿素 b 减少百分比最小。叶绿素总量减少较大,但叶绿素 a/b 的变化不大。

2.3 CO₂ 浓度升高后对菹草叶一些生化指标的影响

CO₂ 浓度升高后使菹草叶中可溶性糖含量明显增加(59.02%),但 N、P 和蛋白质含量都有不同程度的减少,其中以蛋白质含量的减少最为明显(表 4)。

3 讨 论

3.1 表型及其可塑性

如果仅以处理作为主效应,单株总叶面积在两处理间差异非常显著,但异速生长分析表明其增加并不是由 CO₂ 浓度升高所引起,而是受植株大小所制约。这和 CO₂ 浓度升高导致陆生和湿生植物生物量分配方面的结果是一致的(Stulen & Denhertog, 1993; Farnsworth *et al.*, 1996)。众多研究表明植物的可塑性变化因物种和环境因子而变(McConnaughay & Coleman, 1999),可能更重要的发现是植物表型特征的可塑性变化更多的是受基因,而不是环境所控制,因此并没有原来想象的那么常见(de Kroon *et al.*, 1994; Gedrock *et al.*, 1996),因为以往很多的研究者并没有将可塑性和非可塑性变化区分开来,而是将所有的变化都归为可塑性反应(Coleman & McConnaughay, 1994; Gedrock *et al.*, 1996)。

CO₂ 浓度升高并没改变沉水植物菹草叶的单株

表 3 CO₂ 浓度升高对菹草叶中色素含量的影响(平均值 ± 标准差)

Table 3 Effects of elevated CO₂ on pigment concentration of *Potamogeton crispus* leaf(means ± SD)

	高 CO ₂ Elevated CO ₂ (E)	对照 CO ₂ Ambient CO ₂ (A)	增加百分比 Percentage of increase (E - A)/A (%)
叶绿素 a Chlorophyl a (ug·g ⁻¹ FW)	1.50 ± 0.15	1.76 ± 0.09	- 14.77
叶绿素 b Chlorophyl b (ug·g ⁻¹ FW)	0.44 ± 0.04	0.49 ± 0.04	- 10.20
叶绿素 a + b Chlorophyl a + b (ug·g ⁻¹ FW)	1.94 ± 0.19	2.25 ± 0.13	- 13.78
叶绿素 a/b Chlorophyl a/b (ug·g ⁻¹ FW)	3.38 ± 0.04	3.59 ± 0.12	- 5.85
类胡萝卜素 Carotenoid (ug·g ⁻¹ FW)	91.49 ± 3.84	125.24 ± 3.12	- 36.89

数据为 3 次重复的均值 Values are means of 3 replications

表 4 CO₂ 浓度升高对菹草叶中某些生化物质及矿质元素含量的影响(平均值 ± 标准差)

Table 4 Effects of elevated[CO₂] on the concentration of some biochemical matters and mineral elements in the leaves of *Potamogeton crispus* (means ± SD)

	高 CO ₂ Elevated CO ₂ (E)	对照 CO ₂ Ambient CO ₂ (A)	增加百分比 Percentage of increase (E - A)/A (%)
可溶性糖 Soluble sugar (mg·g ⁻¹)	5.20 ± 0.24	3.27 ± 0.18	59.02
蛋白质 Protein (ug·g ⁻¹)	31.39 ± 1.63	43.09 ± 3.18	- 27.15
N (mg·g ⁻¹)	77.00 ± 2.72	87.10 ± 1.01	- 11.60
P (mg·g ⁻¹)	5.12 ± 0.10	6.11 ± 0.11	- 16.39

数据为 3 次重复的均值 Values are means of 3 replications

总叶面积 ,那么菹草叶表型的变化(如叶长、叶宽、叶长/宽等)也可能是受植物个体发育所决定的 ,因为 CO₂ 浓度升高促进了植物的生长 ,而叶表型往往随植物的生长而改变 ,如大多草本植物的叶重比或总叶面积随生长发育而增加(Hunt , 1990)。此外 ,如果说叶内 N、P 含量下降在一定程度上说明高 CO₂ 浓度对植物的不利影响(王为民等 ,2000) ,那么菹草叶表型特征的改变可能也是对 CO₂ 浓度升高负面效应的结果。

3.2 生理生化反应

CO₂ 浓度升高后菹草叶中的类胡萝卜素、叶绿素 a、b 及总量含量都有所降低 ,并且叶中含 N、P 量也下降 ,这与某些陆生植物实验结果是一致的(Socias *et al.* , 1993 ;林风平等 , 1999)。因为 N 是光合色素合成的必须原料 ,也是其结构构成成分之一 ,因此含 N 量的下降可能是导致叶绿素含量下降的直接原因。本实验表明 CO₂ 浓度升高后菹草叶绿素 a/b 下降 ,但目前的研究结果表明 CO₂ 浓度升高导致叶绿素 a/b 的变化是不一致的 ,可能下降 ,也可能不变 ,具有较大的物种特异性(Delucia *et al.* , 1985 ; Strain , 1987 ; Socias *et al.* , 1993)。另外 ,含 N 量的下降也可能是导致蛋白质含量下降的主要原因 ,因为 N 是蛋白质合成当中的构成成分。

CO₂ 浓度升高在短期内促进了植物的光合速率和干物质的累积(蒋高明等 , 1997) ,但同时也降低了 N 和光合色素含量 ,因此对植物的生长可能存在潜在的负面影响。此外 ,陆生植物的研究表明由于

N 含量的下降导致了 C/N 的升高(蒋高明等 , 1997)。如果沉水植物也有类似结果的话 ,将对未来湖泊产生一定的影响 ,一方面可能会影响到植物叶的降解速率 ,从而影响到整个湖泊的营养循环 ;另一方面也可能影响到植食动物对植物的取食价值 ,因此植食动物为了满足其对 N 的需求而增加取食量。但这仅是对菹草而言的 ,要对湖泊生态系统影响的全面了解还需要对更多的物种进行实验研究。

3.3 CO₂ 浓度升高对沉水植物影响机理

CO₂ 浓度升高不同程度地促进陆生植物不同光合途径植物的生长(蒋高明等 , 1997)。陆生植物对 CO₂ 浓度升高后一些生化物质的变化主要表现在非结构性碳水化合物、蛋白质及关键酶等方面 ,尤其是可溶性碳水化合物及淀粉含量的明显增加 ,甚至有实验表明淀粉含量增加了 160%(蒋高明等 , 1997 ; Moore *et al.* , 1999)。本实验中沉水植物菹草叶表型及生理生化特征也对 CO₂ 浓度升高作出了响应。虽然其结果与陆生植物是一致的 ,但效果并没有陆生植物明显。因为陆生植物与空气中 CO₂ 是直接接触的 ,而沉水植物对空气中 CO₂ 浓度升高的反应是间接的 ,主要体现在水中总可溶性无机碳(DIC)含量的增加上 ,但总 DIC 含量的增加并不与空气中 CO₂ 浓度升高值成一定比例 ,其反应的相对比率约为 1:10(Goudriaan , 1993)。因此水体中碳源的增加不会有空气中那样明显 ,这可能是导致沉水植物对 CO₂ 浓度升高的反应没有陆生植物强烈的原因之一。

沉水植物不仅可以利用 CO_2 , 也可利用可溶性碳酸根离子(以 HCO_3^- 为主), 但以何种碳源为主因物种而异(Frederick & Hilary, 1999)。空气中 CO_2 浓度升高会使水中 CO_2 浓度成一定比例增加, 并打破 CO_2 和碳酸根离子间的平衡, 使 pH 值有所下降, 但下降的 pH 值又阻止 CO_2 转化为 HCO_3^- , 因此 HCO_3^- 浓度并非与空气中 CO_2 浓度成一固定比例(Goudriaan, 1993)。可见, 空气中 CO_2 浓度升高会使水体的 DIC 含量非固定比例增加, 其成分更多的是可溶性 CO_2 , HCO_3^- 只有少量增加(Frederick & Hilary, 1999; Goudriaan, 1993)。此外, 在沉水植物的进化过程中, 由于长期对光合作用底物缺乏这一极端环境的反应, 光合途径甚至发生了改变, 且光合作用潜力大部分情况下超过了 DIC 的供应, 在自然生境中的生长经常受可获得性碳源的限制(Madsen *et al.*, 1993)。可见, 空气中 CO_2 浓度升高对于以 HCO_3^- 为主要碳源的植物将不会有明显的影响, 而对于以可溶性 CO_2 为主要碳源的植物可能有较大的促进作用。因此, 进一步阐明茳草主要利用的碳源种类及其对不同碳源的亲和力是有必要的。

参 考 文 献

- Bowes, G. 1993. Facing the inevitable: plants and increasing atmospheric CO_2 . Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology, **44**: 309 ~ 332.
- Coleman, J. S. & K. D. M. McConnaughay. 1994. Interpreting phenotypic variation in plants. Trends in Ecology and Evolution, **9**: 951 ~ 954.
- de Kroon, H., J. F. Steuffer, M. Dong & H. J. During. 1994. On plastic and non-plastic variation in clonal plant morphology and its ecological significance. Folia Geobotanica & Phytotaxonomica, **29**: 123 ~ 138.
- Delucia, E. H., T. W. Sasek & B. R. Strain. 1985. Photosynthetic inhibition after long term exposed to elevated levels of atmospheric carbon dioxide. Photosynthetic Research, **7**: 175 ~ 184.
- Farnsworth, E. J., A. M. Ellison & W. K. Gong. 1996. Elevated alters anatomy, physiology, growth and reproduction of red mangrove (*Rhizophora mangle* L.). Oecologia, **108**: 599 ~ 609.
- Frederick, T. S. & A. N. Hilary. 1999. The effects of global climate change on seagrass. Aquatic Botany, **63**: 169 ~ 196.
- Gedrock, J. J., K. D. M. McConnaughay & J. S. Coleman. 1996. Plasticity in root/shoot: optimal, ontogenetic, or both? Functional Ecology, **10**: 44 ~ 50.
- Goudriaan, J. 1993. Interaction of ocean and biosphere in their transient responses to increasing atmospheric CO_2 . Vegetatio, **104/105**: 329 ~ 337.
- Hunt, R. 1990. Basic growth analysis. London: Unwin Hyman.
- Jiang, G. M. (蒋高明), X. G. Han (韩兴国) & G. H. Lin (林光辉). 1997. Response of plant growth to elevated CO_2 : a review on chief methods and basic conclusions based on experiments in the external countries in past decade. Acta Phytocologica Sinica (植物生态学报), **21**: 489 ~ 502. (in Chinese with English abstract)
- John, S. K., S. P. Kurt & R. Z. Donald. 1999. Clonal variation in above- and below-ground growth responses of *Populus tremuloides* Michaux: influence of soil warming and nutrient availability. Plant and Soil, **217**: 119 ~ 130.
- Lin, F. P. (林丰平), Z. H. Chen (陈章和), Z. P. Chen (陈兆平) & D. M. Zhang (张德明). 1999. Physiological and biochemical responses of the seedlings of four legume tree species to high CO_2 concentration. Acta Phytocologica Sinica (植物生态学报), **23**: 220 ~ 227. (in Chinese with English abstract)
- Liu, J. K. (刘建康). 1999. Advanced hydrobiology. Beijing: Science Press. (in Chinese)
- Madsen, T. V., K. Sand-Jensen & S. Beer. 1993. Comparison of photosynthetic performance and carboxylation capacity in a range of aquatic macrophytes of different growth forms. Aquatic Botany, **44**: 373 ~ 384.
- McConnaughay, K. D. M. & J. S. Coleman. 1999. Biomass allocation in plants: ontogeny or optimality? a test along three resource gradients. Ecology, **80**: 2581 ~ 2593.
- Moore, B. D., S. H. Cheng & J. R. Seemann. 1999. The biochemical and molecular basis for photosynthetic acclimation to elevated atmospheric CO_2 . Plant, Cell and Environment, **22**: 567 ~ 582.
- Shi, R. H. (史瑞和). 1994. Analysis of agricultural chemistry of soil. 2nd ed. Beijing: China Agriculture Press. 212 ~ 218. (in Chinese)
- Socias, F. X., H. Medrano & T. D. Sharkey. 1993. Feed back limitation of photosynthesis of *Phaseolus vulgaris* L. grow in elevated CO_2 . Plant, Cell and Environment, **16**: 81 ~ 86.
- Strain, B. R. 1987. Direct effect of increasing CO_2 on plant and ecosystem. Trends in Ecology and Evolution, **2**: 18 ~ 23.
- Stulen, I. & J. Denhartog. 1993. Root growth and functioning under atmospheric CO_2 enrichment. Vegetatio, **104/105**: 99 ~ 115.
- Wang, X. L. (王勋陵) & J. Wang (王静). 1989. Plant morphology and environment. Lanzhou: Lanzhou University Press. 1 ~ 90. (in Chinese)
- Wang, W. M. (王为民), C. Wang (王晨), C. J. Li (李春俭) & W. H. Lin (林伟宏). 2000. Effects of elevated atmospheric CO_2 concentration on growth of plants. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica (西北植物学报), **20**: 676 ~ 683. (in Chinese with English abstract)
- Viveka, V., E. B. W. Sterfan, A. S. John & G. Wilhelm. 2001. Phenotypic plasticity in *Phragmites australis* as a functional response to water depth. Aquatic Botany, **69**: 127 ~ 145.