

# 大气二氧化碳浓度变化对禾谷缢管蚜种群动态的影响

张 钧, 杨惠敏, 林久生, 王根轩\*, 王亚馥, 王 静

(兰州大学干旱农业生态国家重点实验室, 兰州 730000)

**摘要:** 利用开顶式熏气室研究了大气 CO<sub>2</sub> 浓度和土壤水分对禾谷缢管蚜 *Rhopalosiphum padi* (L.) 种群动态的影响, 并分析了禾谷缢管蚜密度与被处理小麦叶片化学成分的关系。结果表明: (1) 禾谷缢管蚜种群密度随 CO<sub>2</sub> 浓度升高而持续增大并与土壤水分密切相关, 各 CO<sub>2</sub> 浓度下均以 60% 田间持水量时的密度最大; (2) CO<sub>2</sub> 和土壤水分对小麦叶片化学成分有明显的影响, 麦叶水分、可溶性蛋白质、可溶性糖、淀粉含量随 CO<sub>2</sub> 浓度和土壤水分含量上升而增加, 纤维素含量随 CO<sub>2</sub> 浓度上升而增加、随土壤水分含量上升而降低, 单宁、丁布 (DIMBOA) 含量在 CO<sub>2</sub> 浓度为 550  $\mu$ L/L 时最高, 但单宁含量随土壤水分上升而增加, 丁布含量在 60% 田间持水量时最低; (3) 禾谷缢管蚜密度与叶片水分、可溶性蛋白质、可溶性糖、淀粉含量呈正相关, 与丁布、单宁含量呈负相关。结论: 在未来的气候条件下, 随着 CO<sub>2</sub> 浓度升高禾谷缢管蚜种群可能会持续增长, 这种增长在半干旱区更加突出。禾谷缢管蚜种群增长的原因之一是大气 CO<sub>2</sub> 和土壤水分条件改变了植物的化学成分构成。

**关键词:** 禾谷缢管蚜; CO<sub>2</sub> 浓度; 土壤水分含量; 小麦; 叶片化学成分

**中图分类号:** Q968 **文献标识码:** A **文章编号:** 0454-6296 (2002) 04-0477-05

## Effects of elevated atmospheric CO<sub>2</sub> concentrations on population dynamics of the wheat aphid, *Rhopalosiphum padi* (L.)

ZHANG Jun, YANG Hui-Min, LIN Jiu-Sheng, WANG Gen-Xuan\*, WANG Ya-Fu, WANG Jing (State Key Laboratory of Arid Agroecology, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** Effects of atmospheric CO<sub>2</sub> concentrations (350, 550 and 700  $\mu$ L/L) and soil water levels (40%, 60% and 80% field water capacities, FWC) on the population dynamics of the wheat aphid, *Rhopalosiphum padi* (L.) feeding on spring wheat were examined in open-topped field chambers. Results showed that: (1) Aphid density increased significantly with rising atmospheric CO<sub>2</sub> concentrations, the highest density occurring on wheat grown at 700  $\mu$ L/L CO<sub>2</sub> and 60% FWC treatment; (2) Atmospheric CO<sub>2</sub> concentration and soil water level had significant effects on chemical components in the wheat foliage: water, soluble proteins, soluble carbohydrates, starch and tannin increased with the rising atmospheric CO<sub>2</sub> and FWC. Content of DIMBOA (2, 4-dihydroxy-7-methoxy-1, 4-benzoxazin-3-one) increased as atmospheric the CO<sub>2</sub> concentration rose with the lowest DIMBOA content occurring in the 60% FWC treatment; (3) Aphid density was positively correlated with the contents of water, soluble proteins, soluble carbohydrates and starch, and negatively correlated with the contents of DIMBOA and tannin, in foliage of treated wheat. These results suggest that aphid populations will grow more rapidly in future climate conditions, especially in semiarid areas since increasing CO<sub>2</sub> and changes in soil moisture will alter the chemical composition of host plants.

**Key words:** atmospheric CO<sub>2</sub> concentration; field water capacity; spring wheat; *Rhopalosiphum padi*; chemical composition of wheat foliage

大气 CO<sub>2</sub> 浓度已从工业革命前的 270  $\mu$ L/L 上升到 550  $\mu$ L/L 左右, 21 世纪末可达到 700  $\mu$ L/L (Crane and Liss, 1985; Genthon *et al.*, 1987)。全球 CO<sub>2</sub> 到目前的 350  $\mu$ L/L 左右, 预计到 21 世纪中叶将达

基金项目: 国家自然科学基金 (39770447) 和国家重点基础研究专项经费资助项目 (G1999011705)

第一作者简介: 张钧, 男, 1965 年 12 月生, 理学博士, 主要从事动物生态和植物生理生态研究。现通讯地址: 中国科学院高能物理研究所核分析室, E-mail: zhangjun1965@ihep.ac.cn

\* 通讯联系人 Author for correspondence, E-mail: wanggx@lzu.edu.cn

收稿日期 Received: 2000-10-20; 接受日期 Accepted: 2001-12-30

浓度上升对植物产生的影响人们已经进行了多方面深入的研究 (Bazzaz, 1990; 蒋高明, 1995; 蒋高明和韩兴国, 1997; 周广胜等, 1997), 关于  $\text{CO}_2$  浓度升高对昆虫与植物相互关系的影响, 国外也进行过一些研究, 但大多以食叶昆虫, 尤其以鳞翅目昆虫为主 (吴坤君, 1993; 王大力, 1999), 关于吸汁昆虫与植物的关系只见零星报道 (Cannon, 1998; Smith and Jones, 1998; Brooks and Whittaker, 1999), 对于土壤水分与  $\text{CO}_2$  协同作用下昆虫与植物关系的报道更为鲜见。蚜虫作为世界性的重要农业害虫, 不仅吸取植物汁液, 而且传播多种植物病毒, 造成作物产量的损失 (Dreyer and Campbell, 1987)。因此研究未来大气  $\text{CO}_2$  条件下不同降雨地区蚜虫危害植物的趋势及其原因有重要的现实意义。我们利用开顶式熏气室研究不同  $\text{CO}_2$  浓度和土壤水分条件下禾谷缢管蚜 *Rhopalosiphum padi* (L.) 的种群变化和小麦叶片化学成分的变化, 初步探讨土壤水分与  $\text{CO}_2$  协同作用对禾谷缢管蚜种群动态的影响及其与小麦叶片化学成分变化的关系。

## 1 材料与方 法

### 1.1 供试材料

春小麦 *Triticum aestivum* L. “陇春 292”, 由甘肃省农业科学院粮食作物研究所提供; 禾谷缢管蚜采自田间小麦, 在专门种植的“陇春 292”上预先培养扩大种群, 以备向试验小麦接种。

### 1.2 试验设计与研究方法

**1.2.1 试验设计:** 试验于 1999 年 3~6 月在本校干旱农业生态实验室自制的开顶式熏气室内进行, 选用 3 个  $\text{CO}_2$  浓度 (700、550、350  $\mu\text{L/L}$ ) 和 3 个土壤水分梯度 (80%、60%、40% 田间持水量), 共 9 个处理, 每处理 5 个重复。

**1.2.2 熏气室内  $\text{CO}_2$  浓度控制和桶栽小麦的水分控制:** 开顶式熏气室高 1.7 m, 底面直径 1.5 m, 顶口边长 0.57 m, 外覆塑料棚膜, 置于田间自然条件下, 以橡皮管将钢瓶中的  $\text{CO}_2$  通入气室, 用 CI-301 型红外  $\text{CO}_2$  分析仪 (美国产) 测定气室内的  $\text{CO}_2$  浓度, 并用钢瓶上的气体流量计调节  $\text{CO}_2$  浓度, 使两个气室的  $\text{CO}_2$  浓度为  $(700 \pm 30)$   $\mu\text{L/L}$ , 两个气室为  $(550 \pm 20)$   $\mu\text{L/L}$ , 另两个气室只通入空气,  $\text{CO}_2$  浓度为  $(340 \pm 10)$   $\mu\text{L/L}$ , 整个试验期内

$\text{CO}_2$  昼夜不停供气。水分控制采用重量法, 按占田间持水量 [field water capacity, FWC, 测定方法用威尔科克斯法 (劳家桢, 1988)] 的百分比控制 3 个水分梯度, 即严重干旱为  $(40 \pm 5)\%$ , 轻度干旱为  $(60 \pm 5)\%$ , 正常水分为  $(80 \pm 5)\%$ , 在土壤含水量蒸发散失不超过控重下限时称重补水至控重上限。

**1.2.3 材料处理:** 3 月 25 日播种小麦于直径 28 cm、高 30 cm 的圆形塑料桶内, 出苗后每桶定苗至 40~45 株, 4 月 12 日 (小麦三叶期) 开始控制水分和  $\text{CO}_2$ 。整个生育期内每桶小麦每 10 天按 3 g 尿素, 3 g 磷酸钙施肥, 以保证土壤充足的氮、磷供应。5 月 15 日挑取无翅成熟禾谷缢管蚜接种, 每桶 15 头, 繁殖 5 天后开始记录蚜虫种群数量, 用 5 点取样法, 每桶每次调查 10 株小麦上的蚜虫数量。同时剪取小麦叶片, 液氮冻存, 以备分析化学成分。

**1.2.4 化学成分分析:** 用烘干法测定叶片含水量, 考马斯亮蓝法测定可溶性蛋白质, 蒽酮法测定可溶性糖、淀粉、纤维素, F-D 试剂法测定单宁 (劳家桢, 1988),  $\text{FeCl}_3$  法测定丁布 (BIMBOA) 含量 (Long and Routley, 1974)。

**1.2.5 数据处理:** 将每次每桶内计数的 10 株小麦上蚜虫数之平均值作为一个观测值, 种群平均数量取 5 个观测值的平均值。差异显著性分析用 LSD 法。

## 2 结果与分析

### 2.1 二氧化碳浓度和土壤含水量对禾谷缢管蚜种群密度的影响

在同样土壤水分处理下, 禾谷缢管蚜种群密度随  $\text{CO}_2$  浓度升高而增大, 呈正相关趋势。D350 (即  $\text{CO}_2$  浓度为 350  $\mu\text{L/L}$  下的种群密度, 余同) 远低于 D700 ( $P < 0.01$ ) 和 D550 ( $P < 0.05$ ), D700 高于 D550, 但未达到显著水平 ( $P > 0.05$ ) (图 1), 说明  $\text{CO}_2$  浓度增加有利于禾谷缢管蚜生长, 且当  $\text{CO}_2$  浓度从 350  $\mu\text{L/L}$  上升到 550  $\mu\text{L/L}$  时, 种群密度增长幅度较大, 而当  $\text{CO}_2$  浓度再继续上升至 700  $\mu\text{L/L}$  时, 种群增长速度减缓。在同样  $\text{CO}_2$  浓度时, 种群密度均是 D60% (即 60% 田间持水量下的种群密度, 余同) 高于 D80% ( $P < 0.05$ ) 和 D40% ( $P < 0.01$ ), D80% 高于 D40% ( $P < 0.05$ ) (图 1)。在同一  $\text{CO}_2$  浓度时 3 个土壤水分梯度下的种群密度顺序是 D60% > D80% > D40%, 说明在同一  $\text{CO}_2$  浓度时

轻度干旱条件下生长的小麦有利于禾谷缢管蚜生长发育和种群增长，严重干旱条件下生长的小麦对禾谷缢管蚜生长极为不利。

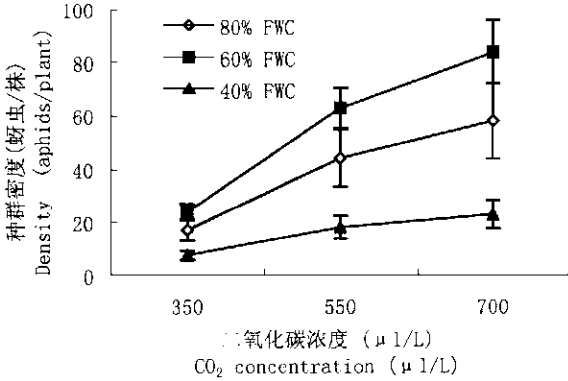


图1 二氧化碳浓度和土壤含水量对禾谷缢管蚜种群动态的影响

Fig. 1 Effects of CO<sub>2</sub> concentration and soil water content on population dynamics of *R. padi*

## 2.2 二氧化碳浓度和土壤含水量对小麦叶片化学成分的影响

从表1可以看出，在同样水分处理下，叶片水分、可溶性蛋白质、可溶性糖、淀粉及纤维素含量均随CO<sub>2</sub>浓度上升而增加。单宁含量以CO<sub>2</sub>浓度为550 μl/L时最高，350 μl/L时最低。丁布含量以CO<sub>2</sub>浓度550 μl/L时最高，700 μl/L时最低。同样CO<sub>2</sub>浓度时，叶片水分、可溶性蛋白质、可溶性糖及淀粉含量随土壤水分升高而增加，纤维素含量则随土壤水分升高而降低，单宁含量随土壤水分升高而增加，丁布含量在60%田间持水量时的含量最低，40%田间持水量时最高。

## 2.3 禾谷缢管蚜密度与叶片化学成分的相关性

总的趋势表现为禾谷缢管蚜密度随叶片水分及可溶性蛋白质、可溶性糖、淀粉含量升高而增大 ( $P < 0.05$ )，随丁布含量升高而减小 ( $P < 0.05$ )，与单宁和纤维素关系不大 ( $P > 0.05$ ) (表2)。

表1 二氧化碳浓度和土壤含水量对小麦叶片化学成分的影响\*

Table 1 Effects of CO<sub>2</sub> concentration and soil water content on chemical components in the foliage of spring wheat, *Triticum aestivum*

化学成分① Components	CO <sub>2</sub> 浓度 CO <sub>2</sub> concentration (μl/L)								
	700			550			350		
	80%②	60%②	40%②	80%	60%	40%	80%	60%	40%
含水量 water content	878.0±2.0 a	866.3±6.5 ab	833.3±8.1 c	860.7±0.7 b	846.1±6.1 c	806.67±1.7 d	857.1±7.8 bc	837.2±6.0 c	794.6±3.8 e
可溶性蛋白质 soluble proteins	57.7±1.0 a	59.5±0.9 a	53.1±0.5 c	54.8±0.6 b	47.3±0.2 d	41.2±0.8 f	51.8±0.8 c	43.1±0.2 e	40.1±0.3 f
可溶性糖 soluble carbohydrates	31.0±0.3 a	26.1±0.4 c	20.8±0.8 f	28.3±0.9 b	24.8±0.4 d	18.7±0.5 g	22.6±0.3 e	16.4±0.2 h	16.6±0.4 h
淀粉 starch	86.2±2.2 a	79.8±2.1 b	78.6±2.5 b	83.8±1.8 ab	78.8±1.8 b	61.7±1.9 c	75.0±1.8 b	55.8±1.3 d	51.3±1.4 e
纤维素 cellulose	16.5±0.4 c	24.2±0.7 a	25.4±0.6 a	15.7±0.2 d	21.0±0.4 b	21.8±0.2 b	11.5±0.3 e	14.3±0.9 d	20.8±1.1 b
单宁 tannins	4.8±0.03 a	4.3±0.02 d	3.7±0.05 g	4.7±0.07 a	4.5±0.05 c	4.4±0.06 d	4.8±0.03 b	4.1±0.03 e	3.9±0.04 f
丁布 DIMBOA③	4.4±0.05 b	3.6±0.04 c	4.5±0.04 b	4.4±0.04 b	4.3±0.08 b	5.7±0.04 a	4.4±0.02 b	4.3±0.05 b	5.6±0.05 a

\* 表中数据为平均值±标准差，同一行数据后有不同字母表示差异达5%的显著水平 Data presented are means ± SD and those in the same column followed by different letters are significantly different ( $P < 0.05$ )

① 叶片化学成分含量以毫克/克植物干重表示 Contents of chemical components in foliage are presented as mg/g dry weight; ② 田间持水量 field water capacity; ③ 2, 4-双羟-7-甲氧基-1, 4-氧氮杂萘酮 2, 4-dihydroxy-7-methoxy-1, 4-benzoxazin-3-one

表2 二氧化碳浓度和土壤水分协同作用下禾谷缢管蚜种群密度与小麦叶片化学成分的关系

Table 2 Relationship between aphid densities and change in chemical components of wheat foliage induced by increased CO<sub>2</sub> concentrations and soil water content

化学成分 Chemical components	回归式 Model	r	P
水分 water content	$y = 0.6683x - 525.27 *$	0.72	<0.05
可溶性蛋白质 soluble proteins	$y = 2.4963x - 87.09$	0.70	<0.05
可溶性糖 soluble carbohydrates	$y = 3.7496x - 48.21$	0.75	<0.05
淀粉 starch	$y = 1.3719x - 61.88$	0.68	<0.05
纤维素 cellulose	$y = 1.3105x + 12.41$	0.24	>0.05
单宁 tannins	$y = 24.4691x - 69.97$	0.39	>0.05
丁布 DIMBOA	$y = -28.6562x + 168.12$	-0.74	<0.05

\*  $y$  = 蚜虫密度 (每株小麦上蚜虫数),  $x$  = 麦叶化学成分  $y$  = aphid density (number of aphids per plant),  $x$  = chemical components in foliage

### 3 讨论

本项研究表明:禾谷缢管蚜种群密度随大气  $\text{CO}_2$  浓度升高而增大并与土壤含水量密切相关,各  $\text{CO}_2$  浓度下均以 60% 田间持水量时的密度最大,预示在未来大气  $\text{CO}_2$  浓度下这种蚜虫在半干旱地区的危害可能会加重。在目前  $\text{CO}_2$  浓度轻度干旱条件下禾谷缢管蚜种群密度最大,严重干旱条件下种群密度最小,这与前人已报道的研究结果 (Braun and Fluckiger, 1984; 梁宏斌, 1998) 一致。蚜虫种群密度随  $\text{CO}_2$  浓度升高而增大已有几例报道 (Awmack *et al.*, 1996, 1997)。由于植物是植食性昆虫的食物和栖息场所,  $\text{CO}_2$  浓度和土壤水分可能更多地通过影响植物的许多特性 (如形态结构、化学成分) 而影响昆虫的生长、发育和繁殖。综观各处理下禾谷缢管蚜种群密度大小与叶片化学成分含量的关系,总的趋势表现为蚜虫种群密度随叶片水分及可溶性蛋白质、可溶性糖、淀粉含量升高而增大,随丁布含量升高而降低,与纤维素含量关系不大。可溶性蛋白质、氨基酸及可溶性糖是蚜虫的基本营养成分,已有大量实验证明其重要性 (Auclair, 1963; 钦俊德, 1987)。另有报道,土壤缺乏氮、磷、钾对蚜虫的生长不利,其中以缺氮的影响最大,而缺磷和缺钾对叶组织内的含氮物质和碳水化合物含量有间接影响 (钦俊德, 1987)。Mattson (1980) 报道许多昆虫为害、生长、产卵或种群数量随寄主氮水平增加而增加,何富刚等 (1991) 亦发现可溶性总氮、可溶性糖的存在对蚜虫是有益的,其含量与植物抗蚜性呈负相关。

丁布 (DIMBOA) 即 2, 4-双羟-7-甲氧-1, 4-氧氮杂萘酮, 以糖苷形式存在于许多禾本科植物体内, 在遇病菌或害虫伤害后可转化为毒性的糖苷配基, 其抗蚜作用早已引起人们注意 (Argandona *et al.*, 1980, 1981; Copaja *et al.*, 1999), 本实验亦表明禾谷缢管蚜种群大小与丁布含量呈负相关。从总体上看, 单宁含量似乎与禾谷缢管蚜种群数量关系不大, 这可从土壤水分和  $\text{CO}_2$  浓度对叶片基本营养物质和次生物质的影响及这两类物质对蚜虫的不同影响方面做出解释: 40% 田间持水量和  $\text{CO}_2$  浓度 350  $\mu\text{L/L}$  处理下的叶片, 其基本营养物质含量均低于 60%、80% 田间持水量及  $\text{CO}_2$  浓度 550、700  $\mu\text{L/L}$  处理下叶片的相应值, 因此, 无论单宁含量高

低, 从营养方面来看, 40% 田间持水量和  $\text{CO}_2$  浓度 350  $\mu\text{L/L}$  处理下的叶片不会成为禾谷缢管蚜的理想寄主, 栖息于这些叶片上的蚜虫繁殖力下降, 死亡率增高, 使得这两种处理下的蚜虫种群密度最小。再考虑 60%、80% 田间持水量及  $\text{CO}_2$  浓度 550、700  $\mu\text{L/L}$  处理下的营养水平较高的叶片, 发现禾谷缢管蚜种群大小与丁布 ( $r = -0.91$ ,  $P < 0.001$ ) 和单宁 ( $r = -0.92$ ,  $P < 0.01$ ) 含量明显呈负相关。通过以上分析说明, 植物组织能否成为昆虫的食物, 首先应决定于植物组织的营养价值, 其次是对昆虫食物利用发生影响的次生物质的性质和含量, 这与钦俊德 (1987) 的观点基本一致。

综上所述, 在未来的气候条件下, 随着  $\text{CO}_2$  浓度升高禾谷缢管蚜种群可能会持续增长, 这种增长在半干旱区更加突出。禾谷缢管蚜种群增长的原因之一是  $\text{CO}_2$  和水肥条件改变了植物的化学成分构成。需要指出的是, 对于禾谷缢管蚜种群增长的原因, 这里仅分析了小麦叶片的几种化学成分与禾谷缢管蚜种群大小的关系, 其它化学成分 (如氨基酸、脂肪、有机酸及芦竹碱等次生物质)、植物在主动防御中产生的诱导成分 (如蛋白酶抑制素等) 以及蚜虫自身的适应能力, 均可影响禾谷缢管蚜种群大小, 这些尚待继续深入研究。

### 参 考 文 献 (References)

- Argandona V H, Luza J G, Niemeyer H M, 1980. Role of hydroxamic acids in the resistance of cereal to aphids. *Phytochemistry*, 19: 1 665 - 1 668.
- Argandona V H, Niemeyer H M, Corcuera L J, 1981. Effect of content and distribution of hydroxamic acids in wheat on infestation by the aphid *Schizaphis graminum*. *Phytochemistry*, 20: 673 - 676.
- Auclair J L, 1963. Aphid feeding and nutrition. *Ann. Rev. Entomol.*, 8: 439 - 490.
- Awmack C S, Harrington R, Leather S R, 1996. The impacts of elevated  $\text{CO}_2$  on aphid-plant interactions. *Aspects of Appl. Biol.*, 45: 317 - 322.
- Awmack C S, Harrington R, Leather S R, 1997. Host plant effects on the performance of aphid at ambient and elevated  $\text{CO}_2$ . *Global Change Biol.*, 3: 545 - 549.
- Bazzaz F A, 1990. The response of natural ecosystem to the rising global  $\text{CO}_2$  levels. *Ann. Rev. Ecol. Syst.*, 21: 167 - 196.
- Braun S, Fluckiger W, 1984. Increased population of the aphid, *Aphid pomi* at a motorway, part 2: the effect of drought and deicing salt. *Environ. Pollut. (Ser A)*, 36: 261 - 270.
- Brooks G L, Whittaker J B, 1999. Responses of three generations of a xylen-feeding insect, *Neophilaenus lineatus* (Homoptera), to elevated  $\text{CO}_2$ . *Global Change Biol.*, 5: 395 - 401.

- Cannon R J C, 1998. The implications of predicted climate change for insect pest in the UK, with emphasis on non-indigenous species. *Global Change Biol.*, 4: 785 - 796.
- Copaja S V, Nicol D, Wratten S D, 1999. Accumulation of hydroxamic acids during wheat germination. *Phytochemistry*, 50: 17 - 24.
- Crane A, Liss P, 1985. Carbon dioxide, climate and the sea. *New Sci.*, 108 (1483): 50 - 53.
- Dreyer D L, Campbell B C, 1987. Chemical basis of host-plant resistance to aphids. *Plant, Cell and Environ.*, 10: 353 - 361.
- Genthon C, Barnola J M, Raynaud D, 1987. Vostok ice core: climatic response to CO<sub>2</sub> and orbital forcing changes over the last climatic cycle. *Nature*, 329: 414 - 418.
- He F G, Liu J, Zhang G X, 1991. Studies on the biochemical basis of resistance in sorghum to the sorghum aphid *Melanaphis sacchari* (Zehntner). *Acta Entomol. Sin.*, 34 (1): 38 - 42. [何富刚, 刘俊, 张广学, 1991. 高粱抗高粱蚜的生化基础. 昆虫学报, 34 (1): 38 - 42]
- Jiang G M, 1995. The impact of global increasing of CO<sub>2</sub> on plants. *Chin. Bull. Bot.*, 12 (4): 1 - 7. [蒋高明, 1995. 全球大气二氧化碳浓度升高对植物的影响. 植物学通报, 12 (4): 1 - 7]
- Jiang G M, Han X G, 1997. Response of plant growth to elevated [CO<sub>2</sub>]: A review on the chief methods and basic conclusions based on experiments in the external countries in past decade. *Acta Phytoecol. Sin.*, 21 (6): 489 - 502. [蒋高明, 韩兴国, 1997. 大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高对植物的直接影响. 植物生态学报, 21 (6): 489 - 502]
- Lao J C, 1988. A Manual for the Analysis of Soil Chemistry. Beijing: Agricultural Press. 212 - 214, 604 - 606. [劳家桢, 1988. 土壤农化分析手册. 北京: 农业出版社. 212 - 214, 604 - 606]
- Liang H B, Zhang R Z, Zhang G X, 1998. Infestation levels of *Diuraphis noxia* Mordvilko response to precipitation and irrigation. *Acta Entomol. Sin.*, 41 (4): 382 - 387. [梁宏斌, 张润志, 张广学, 1998. 降水和灌溉对麦双尾蚜种群数量的影响. 昆虫学报, 41 (4): 382 - 387]
- Long B J, Routley D G, 1974. Rapid procedure for estimating cyclic hydroxamate (DIMBOA) concentration in maize. *Crop Science*, 14: 601 - 603.
- Mattson W J, 1980. Herbivore in relation to plant nitrogen content. *Ann. Rev. Ecol. Syst.*, 11: 119 - 161.
- Qin J D, 1987. The relationships between Insects and Plants. Beijing: Science Press. 20 - 85. [钦俊德, 1987. 昆虫与植物的关系. 北京: 科学出版社. 20 - 85]
- Smith P H D, Jones T H, 1998. Effects of elevated CO<sub>2</sub> on the chrysanthemum leafminer, *Chromatomyia syngenesiae*: a greenhouse study. *Global Change Biol.*, 4: 287 - 291.
- Wang D L, 1999. CO<sub>2</sub> enrichment and allelopathy. *Acta Ecol. Sin.*, 19 (1): 122 - 127. [王大力, 1999. 全球 CO<sub>2</sub> 浓度变化与植物的化感作用. 生态学报, 19 (1): 122 - 127]
- Wu K J, 1993. Effect of elevated levels of atmospheric CO<sub>2</sub> on plant-insect interaction. *Chin. J. Appl. Ecol.*, 4 (2): 198 - 202. [吴坤君, 1993. 大气中 CO<sub>2</sub> 浓度增加对植物-昆虫关系的影响. 应用生态学报, 4 (2): 198 - 202]
- Zhou G S, Zhang X S, Gao S H, 1997. Experiment and modeling on the responses of Chinese terrestrial ecosystems to global change. *Acta Bot. Sin.*, 39 (9): 879 - 888. [周广胜, 张新时, 高素华, 1997. 中国植被对全球变化反应的研究. 植物学报, 39 (4): 879 - 888]