

春小麦对大气 CO₂ 浓度升高的响应及其对 麦长管蚜生长发育和繁殖的影响*

陈法军^{1,2} 吴刚^{1,2} 戈峰^{1**}

(¹中国科学院动物研究所 农业虫鼠害综合治理国家重点实验室,北京 100080; ²中国科学院研究生院,北京 100039)

【摘要】 通过开顶式气室研究了春小麦对大气 CO₂ 浓度升高(542.1±24.8 和 738.8.0±25.7 μL·L⁻¹ vs. 382.4±24.8 μL·L⁻¹)的响应及其对麦长管蚜生长发育和繁殖的影响.结果表明,大气 CO₂ 浓度升高有利于春小麦的生长.与对照相比,5月5日~6月14日,550 和 750 μL·L⁻¹ CO₂ 浓度处理春小麦的株高分别增加 2.80%~14.92% 和 6.30%~17.56%;4月30日~6月9日,叶面积分别增加 5.68%~50.52% 和 6.14%~83.45%;DC₅₀分别提前了 0.39 和 0.90 d,DC₇₅也分别提前了 0.53 和 1.02 d;茎、叶、穗以及整个地上部组织的鲜、干重均有不同程度的增加.大气 CO₂ 浓度升高可显著提高春小麦的穗长和穗粒数,降低千粒重.与对照相比,550 和 750 μL·L⁻¹ CO₂ 浓度处理的麦穗长分别增加 0.56% 和 3.20%;单株穗粒数分别增加 12.5% 和 18%;而千粒重分别降低了 2.23% 和 6.34%.随着大气中 CO₂ 浓度增加,麦穗中葡萄糖、二糖、多糖、总糖、总糖与总氮的比值都显著增加,而果糖、三糖和总氮含量都显著降低.大气 CO₂ 浓度升高可缩短麦长管蚜的产卵前期和世代历期,提高繁殖量和平均相对增长率.与对照相比,550 和 750 μL·L⁻¹ CO₂ 浓度处理麦长管蚜的平均相对增长率分别提高 33.26% 和 74.34%.麦长管蚜种群的平均相对增长率与寄主麦穗中总糖和总氮的比值相关显著.

关键词 开顶式气室 春小麦 CO₂ 麦长管蚜 生长 发育 繁殖 平均相对增长率

文章编号 1001-9332(2006)01-0091-06 中图分类号 Q142, Q968.1; S435.1 文献标识码 A

Responses of spring wheat to elevated CO₂ and their effects on *Sitobion avenae* aphid growth, development and reproduction. CHEN Fajun^{1,2}, WU Gang^{1,2}, GE Feng¹ (¹State Key Laboratory of Integrated Management of Pests and Rodents, Institute of Zoology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China; ²Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2006, 17(1):91~96.

The study on the responses of spring wheat (*Triticum aestivum*) potted in open-top chamber to elevated CO₂ (542.1±24.8 and 738.8.0±25.7 μL·L⁻¹ vs. 382.4±24.8 μL·L⁻¹) and their effects on *Sitobion avenae* aphid growth, development and reproduction showed that elevated CO₂ was advantageous for spring wheat growth. In treatments 550 and 750 μL CO₂·L⁻¹, the plant height during May 5~June 14 increased by 2.80%~14.92% and 6.30%~17.56%, and leaf area per plant during April 30~June 19 increased by 5.68%~50.52% and 6.14%~83.45%, respectively, compared with CK. The DC₅₀ and DC₇₅ were brought forward about 0.39 and 0.53 d for treatment 550 μL CO₂·L⁻¹, and 0.90 and 1.02 d for treatment 750 μL CO₂·L⁻¹, respectively. Moreover, the stem, leaf, ear and above-ground biomass also had some increase under elevated CO₂. Compared with CK, a significant increase of ear length (0.56% and 3.20%) and grain number per ear (12.5% and 18%), but a significant decrease of 1000-grain dry weight (2.23% and 6.34%) were observed for treatments 550 and 750 μL CO₂·L⁻¹, respectively. With increasing CO₂, the chemical constituents in ear, such as glucose, disaccharide, amylose and TSCs/nitrogen ratio increased significantly, while fructose, trisaccharide and total nitrogen decreased significantly. CO₂ elevation shortened the preoviposition duration and longevity of *S. avenae*, and increased the number of offspring per female aphid and mean relative growth rate (MRGR). Compared with CK, the MRGR increased 33.26% in treatment 550 μL CO₂·L⁻¹, and 74.34% in treatment 750 μL CO₂·L⁻¹. Furthermore, there was a significant correlation between the MAGR of *S. avenae* and the TSCs/nitrogen ratio of spring wheat ear.

Key words Open-top chamber, Spring wheat, CO₂, *Sitobion avenae*, Growth, Development, Reproduction, Mean relative growth rate.

1 引言

全球 CO₂ 气体浓度不断升高已成为不争的事实^[10].其中,大气 CO₂ 浓度增加对农业生产的影响日益引起人们的关注^[17].据报道,自工业革命以来的一个半世纪里,大气 CO₂ 浓度已从 280 μL·L⁻¹上

升到 370 μL·L⁻¹左右,预计到 21 世纪末 CO₂ 浓度将再增加一倍,达到 700 μL·L⁻¹^[11,23].CO₂ 是植物进行光合作用的原料,大气 CO₂ 浓度增加有利于提

* 国家自然科学基金资助项目(30571253).

** 通讯联系人.

2004-10-21 收稿,2005-03-24 接受.

高植物的光合作用和生产力^[19,24,26],但同时也可能引起植物化学组分和营养价值的改变^[3,14,16],从而对植食性昆虫产生影响^[15,20].有关大气 CO₂ 浓度升高对植食性昆虫影响的研究很多^[3,9,25,26],但具有不同取食习性及行为习性的昆虫对于大气 CO₂ 浓度增加的反应不尽相同^[3,5].Bezemer 等^[3]在总结前人研究成果的基础上指出,迄今为止,取食韧皮部的害虫是唯一与 CO₂ 浓度呈正相关关系的昆虫,其种群数量随 CO₂ 浓度的增加而增加.Awmack 等^[1]和 Docherty 等^[8]研究认为,高浓度 CO₂ 对刺吸取食韧皮部汁液害虫的影响具长期效应.

春小麦是我国北方地区主要粮食作物之一.韧皮部取食害虫麦长管蚜 (*Sitobion avenae*) 是春小麦生产的主要害虫之一,有关其生物学、生态学特性已有大量研究报道^[28].本文通过开顶式气室 (Open-top chamber) 试验研究大气 CO₂ 浓度升高对春小麦生长、光合作用、营养物质含量和经济产量的影响,以及春小麦地上部组织的营养变化对麦长管蚜生长发育和繁殖等的影响,阐明大气 CO₂ 浓度升高对麦长管蚜种群动态的作用机制,以便对其发生及为害态势进行预警分析.

2 材料与方法

2.1 开顶式气室

气室位于河北省三河市燕郊开发区北爱科技实验中心院内 (116°47'N, 35°57'01"E).由 CO₂ 气源, CO₂ 浓度控制系统和开顶式气室^[6,7] 3 部分组成.试验设 3 个处理,即对照 (只通风而不通 CO₂ 气体) 及两个高 CO₂ 浓度处理 (550 和 750 μL·L⁻¹).4 月 15 日开始通气,6 月 19 日结束通气.通气时间按当地“晨昏朦影”时间^[27] 为准.10:30~20:30, 20 min 记录一次 CO₂ 浓度值,每日共计 30 次,以其平均值作为该日 CO₂ 浓度值.试验期间,550 和 750 μL·L⁻¹ CO₂ 浓度处理的实际控制浓度为 542.1 ± 24.8 μL·L⁻¹ 和 738.8 ± 25.7 μL·L⁻¹,CK 的实测 CO₂ 浓度为 382.4 ± 24.8 μL·L⁻¹.

2.2 供试小麦

克旱 50 春小麦由山东省农业科学院作物研究所提供.2004 年 3 月 11 日播种,盆 (Φ_h = 35 cm × 45 cm) 栽于 3 个开顶式气室内,每盆播种 100 粒,每个开顶式气室 55 盆.土壤成分的体积比为壤土:牛粪:蚯蚓粪 = 8:3:1.3 月 25 日育苗,4 月 10 日定苗,每盆 80 株.6 月 19 日收获.试验期间,每 2 d 浇水一次.

2.3 供试麦蚜

麦长管蚜由中国农业科学院植物保护研究所提供,光照培养箱内盆栽麦苗 (克旱 50) 上饲养,备用.

2.4 试验方法

在每个开顶式气室内随机选取 40 盆小麦用于接种麦长

管蚜,每盆随机接种无翅成蚜 20 头,自然繁衍.剩余 15 盆小麦用 80 目纱网罩笼 (防止麦蚜危害),用于测定大气 CO₂ 浓度升高对春小麦的生长发育、光合作用及生物量和经济产量的影响.

4 月 15 日始,每 10 d 测定春小麦株高,每处理随机测定 15 株,3 次重复.4 月 20 日始,每 10 d 用叶面积测定仪 (CI-202 型,英国 ELE 公司) 测定单株叶面积,每处理随机测定 15 株,5 次重复.5 月 18 日始,逐日调查各开顶式气室内春小麦的抽穗株数 (以麦穗完全抽出为标准).以 DC₅₀ 和 DC₇₅^[21] (累计抽穗率分别达到 50% 和 75%) 两个指标作为小麦发育进度指标.5 月 30 日始,每 10 d 测定春小麦地上部分各组织的生物量和含水量,每处理随机测定 15 株,3 次重复,连续测定 3 次.6 月 2 日开始,调查麦长管蚜个体的生长发育、繁殖和平均相对增长率 (Mean relative growth rate, MRGR).接种当日龄若蚜于指型管中,每管 1 头,喂以新鲜麦穗,每日更新.每处理 15 头蚜虫,3 次重复.每日观察其蜕皮、繁殖、死亡情况,并测定若虫的平均相对增长率. MRGR 的计算公式如下^[22]:

$$MRGR = (\ln W_2 - \ln W_1) / t$$

其中, W₁ 为初测体重; W₂ 为终测体重; t 为两次测定的间隔时间.

6 月 11 日,每处理随机摘取 20 个麦穗,80 °C 连续烘干 72 h,粉碎,过 60 目筛,高效凝胶色谱法 (Waters sugar-pak 凝胶阳离子交换柱) 测定麦糖果糖、葡萄糖、麦芽二糖、麦芽三糖、麦芽四糖、麦芽五糖等含量,凯氏定氮法测定麦穗氮含量.6 月 19 日,每处理随机选取 15 株小麦测定穗长、穗粒数、穗粒重和千粒重,3 次重复.

2.5 数据处理

采用 SAS 6.12 进行数据处理,处理间的差异显著性用新复极差 (Duncan) 检验.处理前对数据进行适当转换,以满足方差分析的要求 (即数据符合正态分布).其中,对百分数进行反正弦转换,对棉花的株高、生物量等指标及棉蚜的繁殖量、历期和种群动态等指标进行自然对数转换.

3 结果与分析

3.1 春小麦

3.1.1 株高和单株叶面积 大气 CO₂ 浓度升高下春小麦的株高增加、叶面积增大 (图 1).5 月 5 日后,大气 CO₂ 变化对春小麦的株高影响显著 (P < 0.05).550 和 750 μL·L⁻¹ CO₂ 处理的春小麦株高分别比对照增加 2.80% ~ 14.92% 和 6.30% ~ 17.56% (P < 0.05).4 月 30 日后,大气 CO₂ 浓度变化对春小麦单株叶面积的影响均达到极显著水平 (P < 0.01).与对照相比,750 μL·L⁻¹ CO₂ 浓度处理春小麦的单株叶面积增加了 6.14% ~ 83.45% (P < 0.05);除 5 月 30 日外,550 μL·L⁻¹ CO₂ 处理春小麦的单株叶面积也增加了 5.68% ~ 50.52% (P < 0.05).4 月 30 日

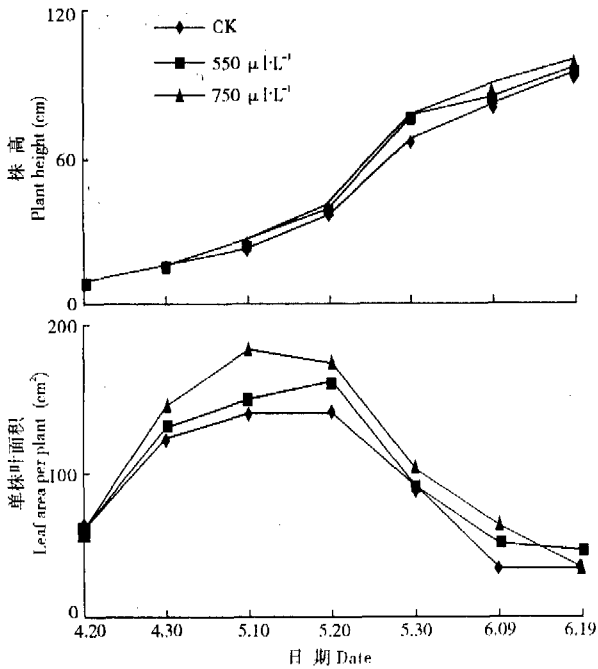


图 1 大气 CO₂ 浓度升高对春小麦株高和单株叶面积的影响
Fig. 1 Effects of elevated CO₂ on plant height and leaf area per plant of spring wheat.

~6 月 9 日, 750 μL⁻¹CO₂ 处理春小麦的单株叶面积显著高于 550 μL⁻¹ CO₂ 处理, 增幅达 6.61% ~ 22.97% (P < 0.05).

3.1.2 发育进度 以抽穗进度作为春小麦的发育进

表 1 大气 CO₂ 浓度升高对春小麦的茎、叶、穗和整个地上部组织生物产量的影响

Table 1 Effects of elevated CO₂ on the stems, leaves, ears and above-ground biomass of spring wheat (g)

日期 Date	项目 Item	组织 Tissue	CO ₂ 浓度 CO ₂ concentration(μL·L ⁻¹)		
			CK	550	750
5.30	单株鲜重 Fresh weight per plant	茎 Stem	2.77 ± 0.06 a	3.27 ± 0.23 a	3.17 ± 0.35 a
		叶 Leaf	1.60 ± 0.17 a	2.10 ± 0.17 a	2.13 ± 0.40 a
		穗 Ear	1.07 ± 0.15 b	1.67 ± 0.06 a	1.23 ± 0.06 b
		地上部组织生物量 Above-ground biomass	5.40 ± 0.30 b	7.00 ± 0.44 a	6.87 ± 0.49 a
单株干重 Dry weight per plant	茎 Stem	0.67 ± 0.06 a	0.70 ± 0.10 a	0.73 ± 0.06 a	
		叶 Leaf	0.57 ± 0.06 a	0.63 ± 0.06 a	0.67 ± 0.15 a
		穗 Ear	0.30 ± 0.00 b	0.43 ± 0.06 a	0.37 ± 0.06 ab
		地上部组织生物量 Above-ground biomass	1.57 ± 0.12 a	1.73 ± 0.12 a	1.77 ± 0.15 a
6.09	单株鲜重 Fresh weight per plant	茎 Stem	1.47 ± 0.21 b	1.73 ± 0.15 b	2.70 ± 0.10 a
		叶 Leaf	0.90 ± 0.17 b	1.47 ± 0.12 a	1.57 ± 0.12 a
		穗 Ear	1.07 ± 0.12 c	1.73 ± 0.12 b	2.13 ± 0.21 a
		地上部组织生物量 Above-ground biomass	3.43 ± 0.15 c	4.90 ± 0.10 b	5.97 ± 0.25 a
单株干重 Dry weight per plant	茎 Stem	0.60 ± 0.00 b	0.63 ± 0.06 b	0.80 ± 0.00 a	
		叶 Leaf	0.53 ± 0.12 a	0.60 ± 0.00 a	0.60 ± 0.10 a
		穗 Ear	0.53 ± 0.12 b	0.70 ± 0.10 ab	0.83 ± 0.15 a
		地上部组织生物量 Above-ground biomass	1.67 ± 0.25 b	1.93 ± 0.06 b	2.30 ± 0.17 a
6.19	单株鲜重 Fresh weight per plant	茎 Stem	1.53 ± 0.15 b	1.90 ± 0.10 ab	2.40 ± 0.44 a
		叶 Leaf	0.80 ± 0.10 a	0.93 ± 0.12 a	0.97 ± 0.12 a
		穗 Ear	1.80 ± 0.26 a	2.27 ± 0.06 a	2.50 ± 0.56 a
		地上部组织生物量 Above-ground biomass	4.33 ± 0.40 b	5.10 ± 0.10 ab	5.90 ± 1.06 a
单株干重 Dry weight per plant	茎 Stem	0.53 ± 0.06 c	0.70 ± 0.00 b	0.87 ± 0.12 a	
		叶 Leaf	0.43 ± 0.06 a	0.47 ± 0.06 a	0.53 ± 0.06 a
		穗 Ear	0.80 ± 0.10 b	1.23 ± 0.06 a	1.30 ± 0.30 a
		地上部组织生物量 Above-ground biomass	1.80 ± 0.10 b	2.40 ± 0.10 a	2.70 ± 0.46 a

同行不同字母表示处理间差异达到显著水平(P < 0.05) Different letters within a row meant significantly difference between treatments at 0.05 level. 下同 The same below.

度指标. 从图 2 可以看出, 随着大气 CO₂ 浓度的增加, 春小麦抽穗提前. 与对照相比, 550 和 750 μL⁻¹CO₂ 处理春小麦的 DC₅₀和 DC₇₅分别提前 0.39 和 0.53 d 及 0.90 和 1.02 d.

3.1.3 生物产量 在高 CO₂ 浓度下, 春小麦的茎、叶、穗及整个地上部组织的鲜、干重都有不同程度的增加(表 1). 以 5 月 30 日的测定结果为例, 大气 CO₂ 浓度变化显著影响春小麦单穗鲜(P < 0.01)、干重(P < 0.05)和地上部组织鲜重(P < 0.01). 与对照相比, 550 μL⁻¹CO₂ 处理春小麦的单穗鲜、干

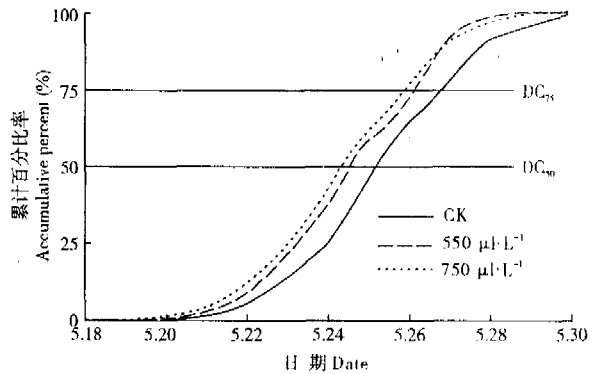


图 2 大气 CO₂ 浓度升高对春小麦抽穗进度的影响
Fig. 2 Effects of elevated CO₂ on the earing process of spring wheat.
DC₅₀: 50% 小麦抽穗 50% of whole plants eared; DC₇₅: 75% 小麦抽穗 75% of whole plants eared.

重分别增加 56.07% 和 43.33% ($P < 0.05$), 地上部组织鲜重增加了 29.63% ($P < 0.05$); $750 \mu\text{l}\cdot\text{L}^{-1}$ CO_2 处理春小麦的地上部组织鲜重也显著增加, 增幅达 27.22% ($P < 0.05$).

6月9日的测定结果表明, 大气 CO_2 浓度变化显著影响春小麦的单株茎、穗和地上部组织鲜重 ($P < 0.01$)、干重 ($P < 0.05$), 但对单株叶干重的影响不显著 ($P > 0.05$). 其中, 除单株叶干重外, $750 \mu\text{l}\cdot\text{L}^{-1}$ CO_2 处理春小麦的其它测定指标都显著大于对照 ($P < 0.05$); 而 $550 \mu\text{l}\cdot\text{L}^{-1}$ CO_2 则仅显著提高了单株叶、穗和地上部组织鲜重, 增幅分别为 63.33%、61.68% 和 42.86% ($P < 0.05$).

6月19日的测定结果表明, CO_2 显著影响了春小麦的单株茎鲜重, 单株茎、穗和地上部组织干重 ($P < 0.05$), 而对叶的生物产量影响不显著 ($P > 0.05$). 与对照相比, $750 \mu\text{l}\cdot\text{L}^{-1}$ CO_2 可显著提高单株茎 (56.86% 和 64.15%) 和地上部组织 (36.26% 和 50%) 的鲜、干重 ($P < 0.05$) 和单株穗干重 (62.5%, $P < 0.05$); $550 \mu\text{l}\cdot\text{L}^{-1}$ CO_2 也显著提高了单株茎、穗和地上部组织干重, 增幅分别为 32.08%、53.75% 和 33.333% ($P < 0.05$).

3.1.4 麦穗营养物质含量 大气 CO_2 浓度变化显著影响麦穗糖和氮的含量 (表 2). 与对照相比, $750 \mu\text{l}\cdot\text{L}^{-1}$ CO_2 处理春小麦麦穗葡萄糖 (34.38%)、二糖 (39.74%)、多糖 (11.51%)、总糖 (10.53%) 和总糖与总氮的比值 (22.67%) 都显著增加 ($P < 0.05$), 而果糖 (24.58%)、三糖 (10.87%) 和总氮 (10.83%) 含量均显著降低 ($P < 0.05$); $550 \mu\text{l}\cdot\text{L}^{-1}$ CO_2 处理春小麦麦穗葡萄糖 (11.46%)、二糖 (12.82%)、多糖 (3.56%)、总糖 (3.19%) 和总糖与总氮的比值 (11.63%) 也显著增加 ($P < 0.05$), 总氮含量显著降低 7.5% ($P < 0.05$). 此外, 750 和 $550 \mu\text{l}\cdot\text{L}^{-1}$ CO_2 浓度处理间所测定的春小麦麦穗营养物质含量差异均达到显著水平 ($P < 0.05$).

表 2 大气 CO_2 浓度增加对春小麦麦穗营养物质含量的影响
Table 2 Impacts of elevated CO_2 on ear nutrient contents of spring wheat

项目 Item	CO_2 浓度 CO_2 concentration ($\mu\text{l}\cdot\text{L}^{-1}$)		
	CK	550	750
果糖 Fructose	1.18 ± 0.02 a	1.08 ± 0.04 a	0.89 ± 0.08 b
葡萄糖 Glucose	0.96 ± 0.01 c	1.07 ± 0.01 b	1.29 ± 0.01 a
二糖 Disaccharide	0.78 ± 0.02 c	0.88 ± 0.01 b	1.09 ± 0.03 a
三糖 Trisaccharide	0.92 ± 0.01 a	0.90 ± 0.01 a	0.82 ± 0.02 b
多糖 Amylose	16.86 ± 0.06 c	17.46 ± 0.08 b	18.80 ± 0.05 a
总糖 Total saccharides (TSCs)	20.71 ± 0.10 c	21.37 ± 0.12 b	22.89 ± 0.10 a
总氮 Total nitrogen	1.20 ± 0.01 a	1.11 ± 0.01 b	1.07 ± 0.01 c
碳氮比 Ratio of TSCs/Nitrogen	17.2 ± 0.2 c	19.2 ± 0.3 b	21.1 ± 0.4 a

3.1.5 经济产量 大气 CO_2 浓度增加可显著提高春小麦的穗长、穗粒数、穗粒重, 但降低了千粒重 (图 3). 与对照相比, 550 和 $750 \mu\text{l}\cdot\text{L}^{-1}$ CO_2 处理的穗长和穗粒数分别显著增加了 0.56% 和 12.5% 及 3.20% 和 18% ($P < 0.05$), 而千粒重则分别降低了 2.23% 和 6.34% ($P < 0.05$).

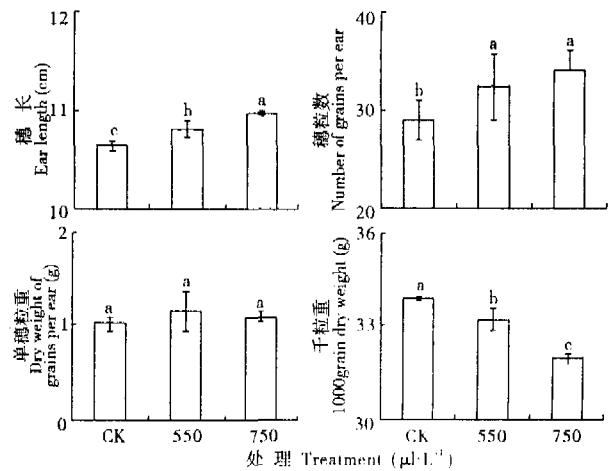


图 3 大气 CO_2 浓度增加对春小麦的穗长、穗粒数、穗粒干重和千粒重的影响
Fig. 3 Impacts of elevated CO_2 on ear length, number of grains per ear, dry weight of grains per ear and 1000-grain dry weight of spring wheat. Different letters meant significant difference between treatments at 0.05 level. 下同 The same below.

3.2 麦长管蚜

3.2.1 发育历期和繁殖力 从 6月2日开始, 完整地观察了一个世代麦长管蚜的产卵前期、世代历期和繁殖量. 随着大气 CO_2 浓度的升高, 麦长管蚜的产卵前期和世代历期缩短, 繁殖量降低 (图 4). 方差分析表明, 大气 CO_2 浓度变化对麦长管蚜的影响未达到显著水平 ($P > 0.05$).

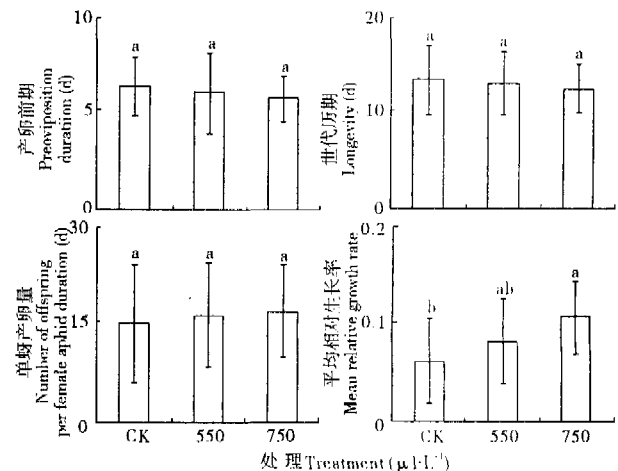


图 4 不同浓度 CO_2 处理下麦长管蚜种群的产卵前期、世代历期、单雌产卵量和平均相对增长率
Fig. 4 Pre-oviposition duration, longevity, number of offspring laid per female aphid and mean relative growth rate of *S. avenae* under different CO_2 concentrations.

3.2.2 平均相对增长率 大气 CO₂ 浓度变化可显著影响麦长管蚜的平均相对增长率 ($P < 0.01$, 图 4)。与对照相比, 550 和 750 $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$ CO₂ 处理麦长管蚜的平均相对增长率分别提高了 33.26% 和 74.34%, 其中, 750 $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$ CO₂ 处理蚜虫的平均相对增长率增加较多。

3.3 麦长管蚜生长发育和种群动态与麦穗营养成分相关分析

大气 CO₂ 浓度升高可显著影响麦穗中糖和氮的含量及麦长管蚜的平均相对增长率 (MRGR)。Pearson 相关性分析表明(表 3), MRGR 与总糖与总氮的比值呈显著正相关 ($P < 0.05$), 而与其它营养因子的相关性均未达到显著水平 ($P > 0.05$)。

表 3 麦长管蚜种群的平均相对增长率与寄主麦穗中营养物质含量相关分析

Table 3 Pearson correlation analysis between mean relative growth rate (MRGR) of *S. avenae* and ear nutritional constituents of spring wheat

项目 Item	平均相对增长率 Mean relative growth rate	相关系数 Correlation coefficient
果糖 Fructose	-0.9962	0.0558
葡萄糖 Glucose	0.9914	0.0834
二糖 Disaccharide	0.9892	0.0938
三糖 Trisaccharide	-0.9719	0.1514
多糖 Amylose	0.9879	0.1018
总糖 Total saccharides (TSCs)	0.9873	0.1016
总氮 Total nitrogen	-0.9644	0.1704
碳氮比 Ratio of TSCs/Nitrogen	0.9993	0.0238*

* $P < 0.05$.

4 讨 论

CO₂ 是植物进行光合作用的原材料, 而当前大气 CO₂ 浓度对植物的光合作用是不饱和的^[10]。因此, 大气中 CO₂ 浓度增加可提高植物的光合作用, 利于植物的生长。研究表明, 大气 CO₂ 浓度增加可显著提高春小麦地上部组织的鲜、干重; 随着高 CO₂ 浓度处理时间的延长, 茎和穗干重的增加显著, 而对叶干重无显著影响。可见, 高 CO₂ 浓度下春小麦光合作用物质积累量增加, 且主要积累于茎和穗中, 进而影响春小麦植株营养物质的分配。本研究中大气 CO₂ 浓度增加显著提高春小麦的单株叶面积的结果与 Luo 等^[14]的研究结果相同。植物单株叶面积增加提高了植株的光合作用能力, 从而增加了物质积累量, 生物量相应提高。大气 CO₂ 浓度升高条件下春小麦单株叶生物量增加不显著, 即高 CO₂ 浓度下植株叶片趋于延展以获得更大的光合叶面积, 而叶片是否相应变薄则有待进一步的组织学研究。此外, 高 CO₂ 浓度下植物光合作用速率提高也是导致生物量增加的原因之一^[12]。大气 CO₂ 浓度升高使春小麦

抽穗提前, 发育进度加快, 麦穗加长、穗粒增加、单穗穗粒重增大等, 有利于其经济产量的提高。这与前人的研究结果一致^[2,25]。大气 CO₂ 浓度升高导致千粒重降低, 从而使单粒重下降。据此推测, 大气 CO₂ 浓度升高可能改变春小麦的繁殖策略, 即降低单粒重、增加穗粒数, 从而有利于其种群存活。

高 CO₂ 浓度下植物光合作用的提高改变了植物组织内营养物质的含量^[3]。麦穗中总糖含量和总糖与总氮的比值显著提高, 总氮量显著降低。高的 C/N 比和低的含氮量意味着植物组织中低的蛋白含量及对于植食性昆虫的低营养供给^[15]。咀嚼性食叶害虫对低蛋白和低含氮量的寄主植物有两种反应策略, 一是增加取食, 二是减缓生长发育^[20]。作为韧皮部刺吸害虫, 蚜虫种群对于大气 CO₂ 浓度升高的反应不同, 且具有种的特异性^[13]。本试验大气 CO₂ 浓度升高条件下, 麦长管蚜种群的产卵提前, 世代历期缩短, 产卵量增加, 平均相对增长率显著提高, 即未来高的大气 CO₂ 浓度对麦长管蚜种群的发生有利。

麦穗总糖与总氮比值的的变化显著影响麦长管蚜的平均相对增长率, 且随着总糖与总氮比值的加大, 平均相对增长率随之增加。总氮含量与麦长管蚜的平均相对增长率相关不显著。可见, 高 CO₂ 浓度下麦穗氮含量的降低并未显著抑制麦长管蚜的生长发育; 相反, 其平均相对增长率显著增加。因此, 单是总氮含量的变化并不能直接影响麦长管蚜种群的生长发育, 只有总糖和总氮含量同步变化才能显著影响麦长管蚜种群的发生。大量室内和田间试验表明, 蚜虫种群对于饲料中氨基酸、糖和可溶性氮的组成和含量有不同需求^[4,18], 但精确的营养需求如何尚不清楚。有关寄主植物营养成分的变化对植食性昆虫的影响还仅局限于相关性分析, 而相关性分析的结果也仅表明寄主植物某些化学成分变化可能影响到这些昆虫相应的种群参数, 准确结果还需要通过大量人工饲料试验来探究。

致谢 衷心感谢河北省三河市燕郊开发区“北爱科技实验中心”雷定榆先生在田间开顶式大气 CO₂ 气室试验中给予的关心、支持和帮助。

参考文献

- 1 Awmack CS, Harrington R, Leather SR. 1997. Host plant effects on the performance of the aphid *Aulacorthum solani* (Homoptera: Aphididae) at ambient and elevated CO₂. *Glob Change Biol*, 3: 545-549
- 2 Bai L-P(白莉萍), Tong C-F(全乘风), Lin E-D(林而达), et al.

2002. Effects of elevated CO₂ on growth and yield of different winter wheat cultivars during later period. *Chin J Agrometeorol* (中国农业气象), **23**(2): 13~16 (in Chinese)
- 3 Bezemer TM, Jones TH. 1998. Plant-insect herbivore interactions in elevated atmospheric CO₂ quantitative analyses and guild effects. *Oikos*, **82**: 212~222
- 4 Braun S, Flückiger W. 1989. Effects of ambient ozone and acid mist on aphid development. *Environ Poll*, **56**: 177~187
- 5 Cannon RJC. 1998. The implications of predicted climate change for insect pests in the UK, with emphasis on non-indigenous species. *Glob Change Biol*, **4**: 785~796
- 6 Chen F-J(陈法军), Ge F(戈峰). 2004. An experimental instrument to study the effects of changes in CO₂ concentrations on the interactions between plants and insects - CDCC-1 chamber. *Entomol Knowl* (昆虫知识), **41**(3): 279~281 (in Chinese)
- 7 Chen F-J(陈法军), Ge F(戈峰), Su J-W(苏建伟). 2005. An improved open-top chamber for research on the effects of elevated CO₂ on agricultural pests in field. *Chin J Ecol* (生态学杂志), **24**(5): 585~590 (in Chinese)
- 8 Docherty MW, Hurst FA, Whittaker DK. 1997. Responses of tree sap-feeding herbivores to elevated CO₂. *Glob Change Biol*, **3**: 51~59
- 9 Dury SJ, Good JEG, Perrins CM. 1998. The effects of increasing CO₂ and temperature on oak leaf palatability and the implications for herbivorous insects. *Glob Change Biol*, **4**: 55~61
- 10 Fang J-Y(方精云). 2000. Global Ecology—Climate Change and Ecological Responses. Beijing: Higher Education Press, Springer-Verlag. (in Chinese)
- 11 Houghton RA, Meira Filho LG, Callander BA, et al. eds. 1996. Climate Change 1995: The Science of Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press.
- 12 Huang J-Y(黄建晔), Dong G-C(董桂春), Yang H-J(杨洪建), et al. 2003. Effects of free-air CO₂ enrichment on biomass accumulation and distribution in rice. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), **14**(2): 253~257 (in Chinese)
- 13 Hughes L, Bazzaz F. 2001. Effects of elevated CO₂ on five plant-aphid interactions. *Entomol Exp Appl*, **99**: 87~96
- 14 Luo YQ, Reynolds J, Wang YP. 1999. A search for predictive understanding of plant responses to elevated [CO₂]. *Glob Change Biol*, **5**: 143~156
- 15 Nicolas G, Sillans D. 1989. Immediate and latent effects of carbon dioxide on insects. *Annu Rev Entomol*, **34**: 97~116
- 16 Penuelas J, Castells E, Joffre R, et al. 2002. Carbon-based secondary and structural compounds in Mediterranean shrubs growing near a natural CO₂ spring. *Glob Change Biol*, **8**: 281~288
- 17 Pitelka LF. 1994. Ecosystem response to elevated CO₂. *Trends Ecol Evol*, **9**: 204~206
- 18 Risebrow A, Dixon AFG. 1987. Nutritional ecology of phloem-feeding insects. In: Slansky F, ed. Nutritional Ecology of Insects, Mites, Spiders and related Invertebrates. New York: John Wiley and Sons. 421~448
- 19 Rogers HH, Dahlman RC, Krupa SV. 1994. Plant responses to CO₂ enrichment. *Vegetatio*, **104**: 117~131
- 20 Scriber JM. 1982. The behavior and nutritional physiology of southern armyworm larvae as a function of plant species consumed in earlier instars. *IBID*, **31**: 359~369
- 21 Tottman DR, Broad H. 1997. The decimal code for growth stages of cereals, with illustrations. *Ann Appl Biol*, **110**: 441~454
- 22 Viskari EL, Surakka J, Pasanen P. 2000. Responses of spruce seedlings (*Picea abies*) to exhaust gas under laboratory conditions I. Plant-insect interactions. *Environ Poll*, **107**: 89~98
- 23 Walker BH, Steffen WL. 1999. The nature of global change. In: Walker BH, ed. The Terrestrial Biosphere and Global Change. IGBP Book Series 4. Cambridge: Cambridge University Press. 1~18
- 24 Wang X-L(王修兰), Xu S-H(徐师华), Li Y-X(李佑祥). 1996. The effects of CO₂ doubling on growing and developing characters and yields for wheat. *Acta Ecol Sin* (生态学报), **16**(3): 328~332 (in Chinese)
- 25 Watt AD, Whittaker JB, Docherty M. 1995. The impact of elevated atmospheric CO₂ on insect herbivores. In: Harrington R, ed. Insects in a Changing Environment: Symposium of the Royal Entomological Society. London: Academic Press. 198~217
- 26 Wu K-J(吴坤君). 1993. Effect of elevated level of atmospheric CO₂ on plants-insect interaction. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), **4**(2): 198~202 (in Chinese)
- 27 Zhai B-P(翟保平). 2004. Computing the day length for programming insect behavior. *Ent Knowl* (昆虫知识), **41**(2): 178~184 (in Chinese)
- 28 Zhang R-L(张汝霖), Yu S-Y(于锁英), Liu M-J(刘马俊), et al. 2001. Population dynamics of wheat aphid, *Sitobion avenae* Fabricius. *Chin J Wheat Res* (小麦研究), **22**(1): 35~36 (in Chinese)

作者简介 陈法军,男,1974年生,博士.主要从事昆虫害生态学方面的研究,发表论文10余篇. E-mail: chen-fj@ioz.ac.cn; chen-fajun@163.com
责任编辑 肖红