

袁宏霞, 孙 胜, 张振花, 等. 日光温室 CO₂ 加富对番茄叶片光合特性的影响[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(7): 136–139.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.07.032

日光温室 CO₂ 加富对番茄叶片光合特性的影响

袁宏霞, 孙 胜, 张振花, 刘 洋, 李 靖, 郑金英, 邢国明

(山西农业大学园艺学院, 山西晋中 030801)

摘要:为探讨 CO₂ 施肥对番茄光合作用的影响, 确定有利于番茄生长发育的最适 CO₂ 浓度。以“兴海 12 号”番茄为试材, 设 4 个 CO₂ 处理, 分别为 (400 ± 25) μmol/mol (CK)、(600 ± 25) μmol/mol (T1)、(800 ± 25) μmol/mol (T2)、(1 000 ± 25) μmol/mol (T3), 用 Li-6400 光合仪测定不同 CO₂ 浓度下, 相同叶位叶片的光合参数, 研究不同浓度 CO₂ 对番茄叶片光合特性的影响。结果显示: (1) 随着处理天数的增加, 光合速率呈先增大后减小的趋势, 生长前期以 T2、T3 处理下光合速率最大, 30 d 以后 T2 条件下光合速率最大。 (2) CO₂ 浓度对气孔导度和蒸腾速率的影响无规律性变化, 可能是不同叶龄受 CO₂ 影响不同, 也可能与处理时间有关。 (3) 高 CO₂ 浓度下水分利用效率明显高于对照, T3 处理优势明显。 (4) 高 CO₂ 浓度对叶绿素 a 含量影响显著, 对叶绿素 b、类胡萝卜素而言, 处理 50 d 时 T3 条件下明显低于对照, 其他处理与对照无显著差异。结果表明, 一定范围内提高 CO₂ 浓度可以弥补环境 CO₂ 不足, (800 ± 25) μmol/mol CO₂ 浓度更有利于番茄光合作用积累有机物。

关键词:番茄; CO₂ 浓度; 光合作用; 色素含量

中图分类号: S641.201 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2018)07-0136-03

番茄 (*Lycopersicon esculentum* Mill.) 为茄科草本植物, 喜温喜光且种类繁多, 因其营养丰富而备受广大消费者青睐。随着蔬菜产业不断发展, 温室番茄栽培面积日益增大, 但由于温室密闭结构妨碍了与外界气体交换, 造成温室 CO₂ 亏缺严重, 进而影响了番茄品质与产量。光合作用是植物生长发育的基础, 它不仅与自身因素 (叶绿素含量、叶龄等) 密切相关, CO₂ 作为光合作用的唯一碳源, 对植物光合作用有着重要的影响^[1]。有研究表明, CO₂ 浓度增加在引起光合速率增加的同时, 会使气孔导度、蒸腾速率降低^[2]。而张仟雨等的研究表明, 大豆鼓粒期气孔导度对 CO₂ 浓度增加没有明显反应^[3]。邵在胜等在 CO₂ 浓度对水稻光合作用影响的研究中也发现, CO₂ 处理对不同生长时期叶片的气孔导度和蒸腾速率的影响不同, 拔节期和抽穗期显著降低, 而灌浆期的气孔导度和蒸腾速率无明显影响^[4]。近年来我国在小麦、大豆、水稻、玉米、甜瓜及黄瓜等众多作物中都开展了 CO₂ 加富的研究, 但有关高 CO₂ 浓度不同叶龄对番茄光合作用影响的研究鲜有报道。植物长期生活在高 CO₂ 浓度下会导致光合能力下降的现象称为对 CO₂ 的光合适应现象^[5]。关于长期高 CO₂ 浓度处理对植物光合作用的影响, 前人所得的结果不尽一致。有研究表明, 长期高 CO₂ 浓度条件下, 植物光合速率的促进作用会消失, 有的甚至还会降低^[6-7]。但也有研究

表明, 植物长期处在高 CO₂ 浓度条件下会促进其光合作用^[8]。叶龄是影响植物光合作用的内在因素, 不同叶龄对 CO₂ 的利用率不同, 因此它是反映植物连续生长发育过程的重要指标^[9]。本研究通过研究番茄不同叶龄的光合能力对高 CO₂ 浓度的响应, 进而明确高 CO₂ 浓度对植物生长发育的影响, 为日后 CO₂ 精准施肥提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料与试验设计

本试验在山西农业大学园艺站日光温室中进行。以“兴海 12 号”番茄为试材。CO₂ 释放采用 GM220 传感器自动控制系统 (芬兰 VAISALA 公司和邯郸冀南新区盛炎电子科技有限公司), 通过管道和循流风机均匀施气, 自动检测温室内 CO₂ 浓度、温湿度。温室分为 4 个隔间, 分别通入不同浓度的 CO₂, 以 CO₂ 浓度 (400 ± 25) μmol/mol 为对照 (CK), 其他处理依次为 (600 ± 25) μmol/mol (T1)、(800 ± 25) μmol/mol (T2) 和 (1 000 ± 25) μmol/mol (T3)。通施时间为每天 08:00—10:30, 施肥期间温室密闭, 阴雨天不补气。除施用的 CO₂ 浓度不同外每个隔间其他条件基本一致。

于 2017 年 3 月 17 日将 4 叶 1 心的番茄苗移栽到长 7 m、宽 0.8 m 用黑色地膜覆盖的垄上, 双行栽培, 株距为 0.3 m, 行距 0.8 m, 每个隔间栽 216 株, 缓苗 10 d 后进行 CO₂ 施肥。每个隔间选生长健康、长势基本一致的番茄 5 株, 并做好标记。2017 年 4 月 7 日, 选择每株从下往上第 5 片真叶进行光合参数及叶绿素测定, 之后每隔 10 d 测定 1 次, 每次均选相同部位叶片, 共记录处理 50 d 的数据。

1.2 方法

1.2.1 番茄光合参数的测定 选择晴天 09:00—10:30, 用 Li-6400 (Li-Cor, NE, USA) 光合仪测定净光合速率 (P_n)、气

收稿日期: 2017-11-14

基金项目: 山西煤基重点攻关项目 (编号: FT201402、FT201402-08); 山西农业大学博士科研启动项目 (编号: 2015ZZ16)。

作者简介: 袁宏霞 (1990—), 女, 山西岚县人, 硕士研究生, 研究方向为蔬菜栽培生理与生态。E-mail: 1174705493@qq.com。

通信作者: 邢国明, 教授, 博士生导师, 主要从事园艺植物种质资源创新与生物技术应用研究。E-mail: xingguoming@163.com。

孔导度(G_s)、蒸腾速率(T_r)。并计算水分利用效率(WUE, $WUE = P_n/T_r$)。测定时使用红蓝光源,设光合有效辐射(PAR)为 $1\ 100\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,叶温为 $28\ ^\circ\text{C}$, CO_2 浓度用小钢瓶控制。

1.2.2 叶绿素含量测定 采用 80% 的丙酮提取,比色法^[10]进行测定。

1.3 数据处理

数据用 Excel 2007、SAS 软件进行分析。

2 结果与分析

2.1 不同 CO_2 浓度下净光合速率比较

由图 1 可知,不同 CO_2 浓度下,番茄叶片光合速率先增后减。处理 20 d 时光合速率最大,T1、T2、T3 分别比对照高出 23.07%、29.08%、29.36%;20 d 后光合速率开始下降,但 T2 浓度下光合速率高于对照及其他处理。可见一定范围内提高 CO_2 浓度有利于植物光合作用,但不同叶龄对 CO_2 的利用能力有所不同,整个生长阶段以 $800\ \mu\text{mol}/\text{mol}$ 浓度更有利于番茄进行光合作用。

2.2 不同 CO_2 浓度下气孔导度比较

由图 2 可见,处理 10 d 时 T3 条件下气孔导度高于对照,其他处理均低于对照。处理 20 d 时气孔导度达到最大,各处理均高于对照。随后开始下降,高 CO_2 浓度下降明显。30 d 后对照及 T3 条件下气孔导度迅速下降,T1、T2 下降缓慢,到 40 d 时气孔导度均高于对照。50 d 时各处理及对照气孔导度差异不大。

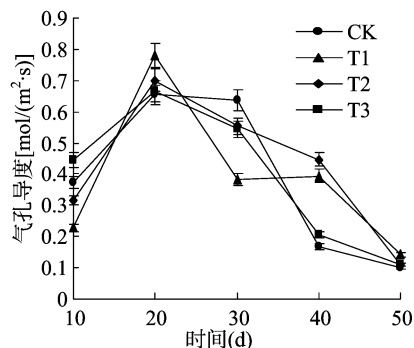


图2 不同 CO_2 浓度对番茄气孔导度的影响

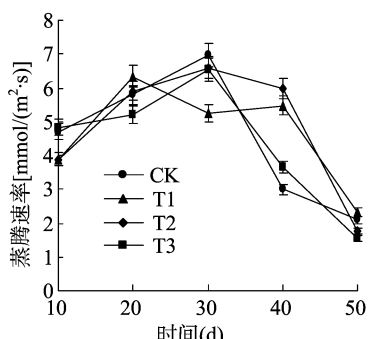


图3 不同 CO_2 浓度对番茄蒸腾速率的影响

2.5 不同 CO_2 浓度下叶绿素含量比较

叶绿素在光合作用光吸收中起着重要的作用。在一定范围内,叶绿素含量与光合能力呈正相关^[11]。由表 1 可知:叶绿素 a、叶绿素 b 及类胡萝卜素含量随着处理天数先增大后减小,处理 40 d 时最大。叶绿素 a 在处理 10 d 和 30 d 时各处理之间及与对照无明显差异;处理 20 d 时 T2 叶绿素 a 含量显著高于 CK 和 T3,较对照高出 13.82%。处理 40 d 时 T1 含量达到最大与对照差异显著。可见一定生长时期提高 CO_2 浓度有利于叶绿素 a 的形成;处理 50 d 时 T3 处理下叶绿素 a 含量较对照低 25.24%,且显著低于其他处理。可能是由于高浓度 CO_2 促进了叶绿素 a 的分解。叶绿素 b 在前 40 d 内各处理及对照之间差异不明显,处理 50 d 后 T1 含量最低,与 T3 相比出现极显著差异,说明 CO_2 浓度对叶绿素 b 含量影响不大,但在叶片生长后期高浓度 CO_2 可能会加快叶绿素 b 的分解。类胡萝卜素在处理 30 d 内与对照比较无差异,处理

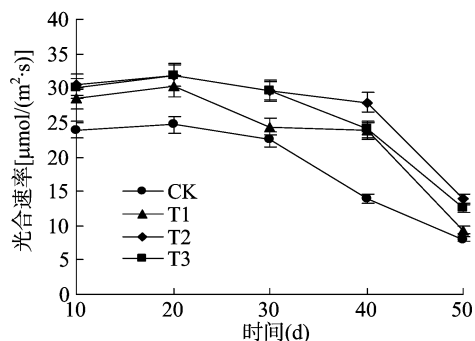


图1 不同 CO_2 浓度对番茄净光合速率的影响

2.3 不同 CO_2 浓度下蒸腾速率比较

由图 3 可见,蒸腾速率的大小与气孔导度表现出一致性,即气孔导度大的蒸腾速率也大。但蒸腾速率最大值出现在处理 30 d 时。这可能与叶面积有关,处理 20 d 时虽然气孔导度最大但叶面积较小,气孔数目及大小均小于 30 d 时,导致蒸腾速率较小。

2.4 不同 CO_2 浓度下水分利用效率(WUE)比较

图 4 表明,水分利用效率随处理天数的增加表现出先降后升的趋势,高浓度下水分利用效率高于对照。除处理 10 d 时 T2 条件下最大外,其他时期均以 T3 条件下最大。30 d 时水分利用效率降到最小,且各处理之间几乎无差异。30 d 后水分利用效率开始增大,对照和 T3 处理下增加明显。40 ~ 50 d 时 T2、T3 处理下水分利用效率继续增大且 50 d 时大小基本相等,而 CK 和 T1 条件下水分利用效率略有下降。

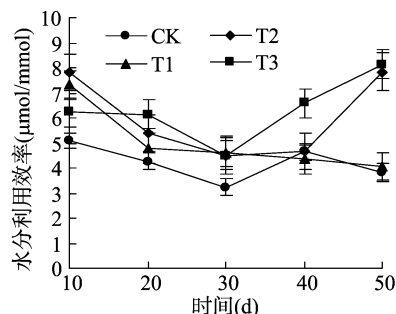


图4 不同 CO_2 浓度对番茄水分利用效率的影响

40 d T1、T2 高于对照且存在显著差异;处理 50 d T3 含量最低,与对照相比差异明显。叶绿素 a、叶绿素 b 总量及叶绿素 a/叶绿素 b 均在处理 40 d 和 50 d 后表现出一定的差异。综上,不同 CO_2 浓度在不同叶龄阶段表现出不同程度的影响,较高浓度的 CO_2 有利于嫩叶叶绿素 a 的积累,但会促进老叶中叶绿素 a、叶绿素 b 及类胡萝卜素的分解,可能与高浓度 CO_2 加快叶片衰老有关。

3 结论与讨论

在植物生长发育过程中,光合作用起到至关重要的作用。本试验对不同 CO_2 浓度下不同叶龄番茄光合作用参数及叶绿素含量进行测定,结果显示,高 CO_2 浓度条件下番茄光合速率均高于对照,这与前人的研究结果^[12-13]一致。气孔是植物进行 CO_2 交换的通道,植物主要通过调节气孔开闭来协调对 CO_2 的吸收和水分的消耗,气孔导度作为影响光合作用的

表 1 不同 CO₂ 浓度处理对番茄叶片叶绿素含量的影响

处理天数 (d)	CO ₂ 浓度 (μmol/mol)	叶绿素 a (mg/g)	叶绿素 b (mg/g)	类胡萝卜素 (mg/g)	叶绿素总量 (mg/g)	叶绿素 a/叶绿素 b
10	CK	1.34 ± 0.04a	0.34 ± 0.02a	0.25 ± 0.15a	1.67 ± 0.06a	3.94 ± 0.12a
	T1	1.49 ± 0.23a	0.38 ± 0.24a	0.27 ± 0.16a	1.87 ± 0.04a	3.93 ± 4.42a
	T2	1.42 ± 0.37a	0.33 ± 0.10a	0.26 ± 0.08a	1.75 ± 0.47a	4.26 ± 0.13a
	T3	1.31 ± 0.05a	0.32 ± 0.02a	0.23 ± 0.02a	1.64 ± 0.06a	4.06 ± 0.08a
20	CK	1.52 ± 0.01bB	0.43 ± 0.26a	0.31 ± 0.15a	1.75 ± 0.13b	3.07 ± 0.30a
	T1	1.56 ± 0.20abAB	0.40 ± 0.07a	0.27 ± 0.05a	1.96 ± 0.25ab	3.90 ± 0.74a
	T2	1.73 ± 0.30aA	0.46 ± 0.06a	0.34 ± 0.12a	2.19 ± 0.09a	3.81 ± 0.09a
	T3	1.49 ± 0.11bB	0.36 ± 0.04a	0.25 ± 0.01a	1.85 ± 0.15b	4.20 ± 0.21a
30	CK	1.42 ± 0.16a	0.32 ± 0.00a	0.30 ± 0.20a	1.75 ± 0.17a	4.41 ± 0.34a
	T1	1.39 ± 0.15a	0.32 ± 0.13a	0.29 ± 0.10a	1.70 ± 0.04a	4.37 ± 2.52a
	T2	1.47 ± 0.11a	0.32 ± 0.04a	0.34 ± 0.03a	1.79 ± 0.13a	4.56 ± 0.39a
	T3	1.57 ± 0.06a	0.37 ± 0.01a	0.35 ± 0.01a	1.95 ± 0.07a	4.20 ± 0.11a
40	CK	1.50 ± 0.16b	0.37 ± 0.07a	0.31 ± 0.17b	1.88 ± 0.23b	4.02 ± 0.45a
	T1	2.04 ± 0.29a	0.49 ± 0.06a	0.41 ± 0.14a	2.53 ± 0.35a	4.13 ± 0.36a
	T2	1.87 ± 0.29ab	0.48 ± 0.05a	0.41 ± 0.06a	2.34 ± 0.33ab	3.90 ± 0.24a
	T3	1.71 ± 0.14ab	0.40 ± 0.05a	0.38 ± 0.02ab	2.11 ± 0.18ab	4.28 ± 0.14a
50	CK	1.03 ± 0.41aA	0.28 ± 0.36abAB	0.22 ± 0.27aA	1.31 ± 0.10aA	3.66 ± 2.02abAB
	T1	1.00 ± 0.07aA	0.30 ± 0.03aA	0.23 ± 0.06aA	1.29 ± 0.37aA	3.37 ± 0.21bB
	T2	1.05 ± 0.34aA	0.27 ± 0.08abAB	0.19 ± 0.03abAB	1.32 ± 0.42aA	3.84 ± 0.06aA
	T3	0.77 ± 0.03bB	0.21 ± 0.01bB	0.17 ± 0.01bB	0.98 ± 0.03bB	3.58 ± 0.26abAB

注:同列数据后不同大写字母表示不同处理间在 0.01 水平上的差异显著,不同小写字母表示在 0.05 水平上的差异显著。

重要参数,前人已做了大量研究。王建林等、欧英娟等分别对北方粳稻、龙血树、春羽进行研究,结果表明随着 CO₂ 浓度的升高,气孔导度和蒸腾速率表现出降低的趋势^[14-15]。张明等的研究表明,高 CO₂ 浓度条件下大豆光合作用和气孔导度均有增加^[16]。胡晓雪等对野生大豆的研究结果显示,气孔导度对 CO₂ 浓度升高无显著变化^[17]。而梁建萍等对高 CO₂ 条件下丁香的研究表明,一定的光合有效辐射,不同的 CO₂ 浓度范围内气孔导度变化不一^[18]。本研究结果显示,在不同 CO₂ 浓度条件下,不同叶龄 CO₂ 浓度对气孔导度的影响不同。处理 10 d 时气孔导度在 CO₂ 浓度 1 000 μmol/mol 下最大且明显高于对照,其他处理下均低于对照。处理 20、40 d 时各处理气孔导度均高于对照。可能原因是高 CO₂ 浓度促进光合酶活性,从而提高植物光合能力,对 CO₂ 的需求增加,使气孔通透性增大。处理 30 d 时各处理气孔导度均低于对照,可能由于 CO₂ 浓度过高条件下,植物很容易吸收外界 CO₂,为了维持胞间 CO₂ 分压低于外界,植物会自动调节使气孔关闭,气孔导度降低。蒸腾速率与气孔导度的变化基本相似,随着处理天数的增加,蒸腾速率先增大后减小,在处理 30 d 时达到最大。水分利用效率在处理 30 d 时最小,各处理的水分利用效率均高于对照,可见一定时期提高 CO₂ 浓度有利于降低植物蒸腾增大水分利用效率,这与杨克彬等对红掌的研究^[19]相符。

叶绿素在电子吸收、传递及转化过程中起着重要作用,直接影响植物的光合能力。赵天宏等对大豆的研究发现 CO₂ 浓度增大能够提高草本植物叶片叶绿素含量^[20];赵薏等对蒙古栎的研究表明,CO₂ 浓度增加在一定程度上促进了叶绿素 a 的合成,而对叶绿素 b 及总叶绿素的形成基本无影响^[21];赵国锦对番茄的研究表明,高浓度 CO₂ 处理,番茄叶片中叶绿素 a 和叶绿素 b 含量降低^[22]。前人的研究大多只针对部分

生长时期,本试验在此基础上进一步研究了不同 CO₂ 浓度处理下,番茄叶片从幼叶到老叶整个生长阶段的叶绿素变化,进一步完善前人研究结果。结果表明在一定的生长阶段,适当增加 CO₂ 浓度有利于番茄叶片叶绿素 a 含量的提高;对叶绿素 b 和类胡萝卜素的影响主要出现在叶片衰老阶段,高浓度 CO₂ 条件下二者含量明显低于对照,可见高浓度 CO₂ 会促进叶绿素降解,加速叶片衰老。

综上,CO₂ 作为植物光合作用的唯一碳源,不同叶龄对 CO₂ 的需求不同,在自然条件无法满足植物光合所需 CO₂ 的情况下,提高 CO₂ 浓度可以促进番茄光合作用。本试验结果显示 CO₂ 浓度(800 ± 25) μmol/mol 时番茄光合速率高,叶绿素积累多,水分利用效率高,适宜番茄生长发育。但关于提高 CO₂ 促进叶片光合、加速叶片衰老的机理尚不明确,需要进一步深入研究。

参考文献:

[1]叶子飘,于强. 光合作用光响应模型的比较[J]. 植物生态学报,2008,32(6):1356-1361.

[2]Mamatha H,Rao N K S,Laxman R H,et al. Impact of elevated CO₂ on growth, physiology, yield, and quality of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill) cv. Arka Ashish[J]. Photosynthetica, 2014, 52(4):519-528.

[3]张仟雨,宗毓铮,董琦,等. 大气 CO₂ 浓度升高对大豆光合生理的影响[J]. 山西农业科学,2016,44(11):1675-1679.

[4]邵在胜,赵铁鹏,宋琪玲,等. 大气 CO₂ 和 O₃ 浓度升高对水稻‘汕优 63’叶片光合作用的影响[J]. 中国生态农业学报,2014, 22(4):422-429.

[5]Gunderson C A,Wulschleger S D. Photosynthetic acclimation in trees to rising atmospheric CO₂: a broader perspective[J]. Photosynthesis research,1994,39(3):369-388.

[6]韩文军,廖飞勇,何平. 大气二氧化碳浓度倍增对闽楠光合性

窦超银, 孟维忠. 结果期滴灌施肥频率对黄瓜生长和产量的影响[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(7): 139–141.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.07.033

结果期滴灌施肥频率对黄瓜生长和产量的影响

窦超银^{1,2}, 孟维忠¹

(1. 扬州大学水利与能源动力工程学院, 江苏扬州 225009; 2. 辽宁省水利水电科学研究院, 辽宁沈阳 110003)

摘要:以大棚黄瓜为对象,在结果期分别每隔 3、6、9、12、15 d 膜下滴灌施肥 1 次,共设置 5 种滴灌施肥频率,以传统沟灌为对照,研究不同滴灌施肥频率对黄瓜株高、茎粗、叶片数和产量的影响。结果表明,与传统沟灌相比,采用滴灌施肥有利于黄瓜的生长并获得高产;不同滴灌施肥频率条件下,各处理间茎粗、叶片数和产量有明显的变化趋势,但相互间差异不显著($P>0.05$);随滴灌施肥间隔时间的增加,植株相对越高大粗壮,叶片相对越多,当间隔时间超过 12 d 时,趋势相反,不利于作物的营养生长;滴灌施肥 3 d/次的产量相对最高,为 117.6 t/hm²,故大棚黄瓜结果期滴灌施肥频率以 3 d/次为宜。

关键词:黄瓜;滴灌;产量;施肥频率;结果期;沟灌

中图分类号: S642.206 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2018)07-0139-03

随着微灌技术的快速发展和普及,滴灌技术在设施农业中得到越来越多的应用^[1]。在滴灌条件下,传统的单一施肥制度与现代灌溉技术已不相适应,水肥一体化技术的应用成为必然趋势,水肥一体化可根据作物生长过程中对水分和养分的需求实现适时适量供给,以保证作物在吸收水分的同时吸收养分^[2],而滴灌技术的管道化输配水、精确控制和均匀灌溉等均为水肥一体化的实现提供了条件。在水肥一体化技术应用中,合

理的施肥制度是其效果发挥的关键,为此,研究者们从肥料用量、肥料配比、肥料类型和施肥时间等不同角度^[3-8]开展了大量研究,为施肥制度的制定提供了依据。但是,在现阶段设施农业仍以分散经营为主的条件下,农户缺乏技术指导,往往沿袭传统的集中施肥方式,多将滴灌系统作为施肥工具,从而导致肥效低,且肥液浓度过高不利于作物的生长。因此,研究更为简单实用的施肥制度具有重要的现实意义。

以施肥频率为控制指标的施肥制度可实现对水肥的调控,发挥其技术优势。有研究表明,香蕉、一串红、草坪草分别每 3、8、10 d 施肥 1 次,其产量可明显提高,且方法简单易行,便于农户接受^[9-11]。本试验以辽宁地区种植的大棚黄瓜为研究对象,研究结果期不同施肥频率对黄瓜生长和产量的影

收稿日期:2016-09-28

基金项目:辽宁省科技攻关计划(编号:2015103030)。

作者简介:窦超银(1982—),男,江苏如皋人,博士,高级工程师,主要从事节水灌溉原理与技术研究。E-mail:chydou@163.com。

状的影响[J]. 中南林业学院学报,2003,23(2):62-65.

[7] Chen G Y, Yong Z H, Liao Y, et al. Photosynthetic acclimation in rice leaves to free-air CO₂ enrichment related to both ribulose-1,5-bisphosphate carboxylation limitation and ribulose-1,5-bisphosphate regeneration limitation[J]. Plant and Cell Physiology, 2005, 46(7): 1036-1045.

[8] 周玉梅, 韩士杰, 张军辉, 等. CO₂ 含量升高对水曲柳幼苗净光合与水分利用的影响[J]. 东北林业大学学报, 2001, 29(6): 29-31.

[9] Kikuzawa K, Lechowicz M J. Ecology of leaf longevity[M]. Springer Tokyo, 2011, 23-30.

[10] Arnon D I. Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*[J]. Plant Physiology, 1949, 24(1): 1.

[11] 石冰, 王开运, 邹春静, 等. 大气 CO₂ 浓度和温度升高对草本植物生长的影响[J]. 现代农业科技, 2008, (15): 15-16.

[12] Cruz J L, Alves A C, LeCain D R, et al. Effect of elevated CO₂ concentration and nitrate: ammonium ratios on gas exchange and growth of cassava (*Manihot esculenta* Crantz)[J]. Plant and soil, 2014, 374(1-2): 33-43.

[13] 王晨光, 郝兴宇, 李红英, 等. CO₂ 浓度升高对大豆光合作用和叶绿素荧光的影响[J]. 核农学报, 2015, 29(8): 1583-1588.

[14] 王建林, 于贵瑞, 王伯伦, 等. 北方梗稻光合速率、气孔导度对光

强和 CO₂ 浓度的响应[J]. 植物生态学报, 2005, 29(1): 16-25.

[15] 欧英娟, 彭晓春, 董家华, 等. CO₂ 浓度升高对龙血树和春羽生长及光合生理的影响[J]. 西北植物学报, 2013, 33(11): 2265-2272.

[16] 张朋, 张文会, 苗秀莲, 等. CO₂ 浓度倍增对大豆生长及光合作用的影响[J]. 大豆科学, 2010, 29(1): 64-67.

[17] 胡晓雪, 杜维俊, 杨珍平. 大气 CO₂ 浓度和气温升高对野生大豆光合作用的影响[J]. 山西农业科学, 2015, 43(7): 798-801, 853.

[18] 梁建萍, 刘咏梅, 牛远. CO₂ 浓度升高对丁香光合生理特性的影响[J]. 山西农业科学, 2007, 35(7): 10-12.

[19] 杨克彬, 孟凡志, 郭先锋, 等. 日光温室冬季增施 CO₂ 对切花红掌光合作用及生长发育的影响[J]. 应用生态学报, 2017, 28(6): 1941-1947.

[20] 赵天宏, 史奕, 王春乙, 等. CO₂ 浓度和 O₃ 浓度倍增及其复合作用对大豆叶绿素含量的影响[J]. 生态学杂志, 2003, 22(6): 117-120.

[21] 赵蕊, 王秀伟, 毛子军. 不同氮素浓度下 CO₂ 浓度、温度对蒙古栎幼苗叶绿素含量的影响[J]. 植物研究, 2006, 26(3): 337-341.

[22] 赵国锦. 高浓度 CO₂ 对温室番茄光合特性的影响[J]. 北方园艺, 2007(9): 79-81.