

# 温室零浓度差 CO<sub>2</sub>施肥与送风耦合对番茄生长的影响

全宇欣,程瑞锋,辛敏,王君,杨其长

中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所,农业部设施农业节能与废气物处理重点实验室,北京 100081

**摘要** CO<sub>2</sub>匮乏与低风速是温室存在的普遍现象,即使在温室通风状态下也不例外。在温室通风时,为减少 CO<sub>2</sub>逸散、提高 CO<sub>2</sub>利用效率,采用零浓度差 CO<sub>2</sub>施肥法同时进行室内送风,并对试验温室与对照温室内番茄冠层净光合速率、CO<sub>2</sub>利用效率、番茄冠层蒸腾速率进行调查。结果表明,当太阳辐射强度从 383.5 W·m<sup>-2</sup>增加到 940.1 W·m<sup>-2</sup>时,试验温室番茄冠层净光合速率从 1.9 g·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>升高到 5.3 g·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>,比对照温室番茄冠层净光合速率高出 1.3~1.6 倍;而试验温室番茄冠层蒸腾速率从 0.17 kg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>升高到 0.56 kg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>,比对照温室番茄冠层蒸腾速率高出 1.2~1.4 倍;CO<sub>2</sub>利用效率近似于 1。研究表明,在温室通风状态下采用零浓度差 CO<sub>2</sub>施肥法同时进行室内送风是设施栽培增产的有效途径。

**关键词** 番茄;温室;CO<sub>2</sub>施肥;CO<sub>2</sub>利用效率

**中图分类号** S626.9

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.10.009

## Zero CO<sub>2</sub> Concentration Difference and Enhanced Air Current Speed Method for Tomato Plant Greenhouse

TONG Yuxin, CHENG Ruifeng, XIN Min, WANG Jun, YANG Qichang

Key Laboratory for Energy Saving and Waste Disposal of Protected Agriculture, Ministry of Agriculture; Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China

**Abstract** Depletion of CO<sub>2</sub> concentration during daytime together with a low air current speed was observed in a naturally ventilated greenhouse. In a ventilated greenhouse, a zero CO<sub>2</sub> concentration difference method together with an enhanced air current speed was introduced to decrease the CO<sub>2</sub> leakage to outside and improve the CO<sub>2</sub> use efficiency. Rates of canopy net photosynthesis and transpiration and CO<sub>2</sub> use efficiencies were investigated in tomato experiment greenhouse and control greenhouse, respectively. The results show that when solar radiation increases from 383.5 W·m<sup>-2</sup> to 940.1 W·m<sup>-2</sup>, the canopy net photosynthesis rate increases from 1.9 g·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup> to 5.3 g·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>, which is 1.3–1.6 times higher than that in the control greenhouse, and the canopy transpiration rate increases from 0.17 kg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup> to 0.56 kg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>, which is 1.2–1.4 times higher than that in the control greenhouse. The CO<sub>2</sub> use efficiency is around 1. The above result indicates that the null CO<sub>2</sub> balance concentration method together with enhanced air current speed should be considered as an efficient method for improving plant production in protected cultivation.

**Keywords** tomato; greenhouse; CO<sub>2</sub> enrichment; CO<sub>2</sub> use efficiency

CO<sub>2</sub>是植物进行光合作用的原料之一,其浓度是影响植物生长的一个很重要的环境因子。自200年前发现CO<sub>2</sub>施肥可以促进植物生长以来,有许多研究者致力于CO<sub>2</sub>施肥控制

技术研究<sup>[1-4]</sup>。近年来,随着温室技术与其综合环境控制技术的不断进步,CO<sub>2</sub>施肥技术正逐步受到重视,在一些国家(如荷兰、日本等)已较普遍应用,但因CO<sub>2</sub>施肥利用效率较低等

收稿日期:2014-01-10;修回日期:2014-01-20

基金项目:国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2013AA103007);中国农业科学院基本科研业务费项目(BSRF201405)

作者简介:全宇欣,助理研究员,研究方向为设施园艺环境工程、植物工厂等,电子信箱:tongyuxin@caas.cn;杨其长(通信作者),教授,研究方向为设施园艺环境工程、植物工厂、LED农业应用等,电子信箱:yangqichang@caas.cn

引用格式:全宇欣,程瑞锋,辛敏,等.温室零浓度差CO<sub>2</sub>施肥与送风耦合对番茄生长的影响[J].科技导报,2014,32(10):53-56.

原因限制了其进一步推广应用。

CO<sub>2</sub>施肥利用效率主要与温室密闭性有关。对于密闭性较好的温室(换气次数为0.5 h<sup>-1</sup>以下),CO<sub>2</sub>逸散速率小,即使室内CO<sub>2</sub>施加到较高浓度(如1000 μmol·mol<sup>-1</sup>),CO<sub>2</sub>利用效率也可维持在较高水平(0.6左右)。在通风状态下,温室换气次数一般在10次/h以上,若室内CO<sub>2</sub>浓度高于室外CO<sub>2</sub>浓度水平,则增施的CO<sub>2</sub> 90%以上会逸散到室外,经济效益低。为提高经济效益,在密闭性较差或通风状态下的温室,可进行零浓度差CO<sub>2</sub>施肥,即使室内外CO<sub>2</sub>浓度维持在同一水平,避免CO<sub>2</sub>的逸散。

在密闭性较好的温室中,室内风速很低,即使在温室通风状态下,室内风速亦常低于0.5 m·s<sup>-1</sup>。低风速常造成室内温湿气等分布不均,比如,在晴天的白天,风速较低常使植物群落内部CO<sub>2</sub>浓度得不到及时补充,从而影响植物的光合作用。因此,温室内适当增加风速(<1.0 m·s<sup>-1</sup>),不但可以减少室内温湿气等分布不均的现象,还可减少植物叶片的边界层阻力,增大气孔导度,从而增强植物的光合作用和蒸腾作用。

本实验主要分析零浓度差CO<sub>2</sub>施肥法和室内送风对番茄冠层净光合速率、蒸腾速率、CO<sub>2</sub>利用效率和番茄生长的影响。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验设置

试验在日本千叶大学(35°87'N,139°58'E)2栋南北走向的塑料温室内进行。2栋温室大小均为21 m×7.2 m×3.7 m。其中1栋为试验温室,内部安装了8台家用空调(每台制冷功率2.8 kW),空调在温室内均匀分布,试验期间空调只用于送风并使CO<sub>2</sub>在温室内均匀分布。2台循环风扇分别安装在温室南北两侧距离地面2 m处,在空调和循环风扇同时送风的情况下,温室内风速可达到1.0 m·s<sup>-1</sup>。在温室南侧放置2个带有CO<sub>2</sub>流量控制器的CO<sub>2</sub>钢瓶。温室内布置塑料管,在空调风扇的作用下均匀地向温室内释放CO<sub>2</sub>。室内外CO<sub>2</sub>浓度、CO<sub>2</sub>施肥速率均有计算机系统控制。另外1栋温室为对照温室,与试验温室相邻。试验期间栽培植物为番茄(*Solanum lycopersicum* cv. Momotaro York)。带有8~9片叶的番茄苗(高31~43 cm)于2010年3月1日移植到2栋温室内,栽培密度为2株/m<sup>2</sup>。番茄定植后,土壤表面用黑色塑料薄膜覆盖。CO<sub>2</sub>施肥试验于2010年5月1日至6月8日进行。

### 1.2 测定与计算

#### 1.2.1 温室换气次数

用温室能量平衡法计算温室换气次数<sup>[6]</sup>,计算公式为

$$Q_s + Q_i + Q_v + Q_g = 0 \quad (1)$$

其中, $Q_s$ 为温室内太阳能透过率,W; $Q_i$ 为温室覆盖材料由于室内外温差而产生的能量交换率,W; $Q_v$ 为冷风渗透能量交换率,W; $Q_g$ 为地面与温室空气能量交换率,W。

温室内太阳能透过率由式(2)计算

$$Q_s = E\theta A_g \quad (2)$$

其中, $E$ 为太阳辐射强度,W·m<sup>-2</sup>,由设置在温室顶部的太阳能辐射计测得; $\theta$ 为温室覆盖材料光能透过系数; $A_g$ 为温室面积,m<sup>2</sup>。

温室覆盖材料由于室内外温差而产生的能量交换率由式(3)计算

$$Q_i = A_c h_c (T_{in} - T_{out}) \quad (3)$$

其中, $A_c$ 为温室覆盖材料面积,m<sup>2</sup>; $h_c$ 为温室覆盖材料的传热系数,W·m<sup>-2</sup>·K<sup>-1</sup>; $T_{in}$ 为室内空气温度,°C; $T_{out}$ 为室外空气温度,°C。室内外空气温湿度由温湿度传感器(SHT-71, Sensirion AG, 瑞士)测得,测量精度为:温度±0.4°C,湿度±3%。

冷风渗透能量交换率由式(4)计算

$$Q_v = K_{air} NV(i_{in} - i_{out}) \quad (4)$$

其中, $K_{air}$ 为空气密度,kg·m<sup>-3</sup>; $N$ 为温室换气次数,h<sup>-1</sup>; $V$ 为温室体积,m<sup>3</sup>; $i_{in}$ 为室内空气含湿量,kJ·kg<sup>-1</sup>; $i_{out}$ 为室外空气含湿量,kJ·kg<sup>-1</sup>。

地面与温室空气能量交换率由式(5)计算

$$Q_g = A_g q \quad (5)$$

其中, $q$ 为土壤与空气能量交换率,W·m<sup>-2</sup>,由土壤热流计(MF-180 M, EKO, Co., Japan)测得,测量精度为0.001 mW。

#### 1.2.2 番茄冠层净光合速率

由温室内CO<sub>2</sub>平衡法计算番茄冠层净光合速率

$$P_n = dC/dt + R_{CO_2} + S - L_{CO_2} \quad (6)$$

其中, $P_n$ 为番茄冠层净光合速率,g·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>; $dC/dt$ 为 $t$ 时间内温室内CO<sub>2</sub>浓度变化率,g·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>; $R_{CO_2}$ 为土壤CO<sub>2</sub>释放率,g·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>,由于试验期间,土壤覆盖有塑料膜,因此可忽略不计; $S$ 为CO<sub>2</sub>施肥速率,g·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>,CO<sub>2</sub>施肥速率由质量流量计(CMS 0020/0050)控制,CO<sub>2</sub>施肥量由CO<sub>2</sub>施肥控制系统记录; $L_{CO_2}$ 为CO<sub>2</sub>逸散速率,g·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>,计算公式为

$$L_{CO_2} = K_{CO_2} NV(C_{out} - C_{in})/A \quad (7)$$

其中, $K_{CO_2}$ 为CO<sub>2</sub>密度,kg·m<sup>-3</sup>; $C_{in}$ 和 $C_{out}$ 分别为室内外CO<sub>2</sub>浓度,μmol·mol<sup>-1</sup>,由红外CO<sub>2</sub>传感器(model GMP 220, Vaisala Oyj, Helsinki, Finland)测定; $A$ 为栽培面积,m<sup>2</sup>。

#### 1.2.3 CO<sub>2</sub>利用效率

CO<sub>2</sub>利用效率(enhanced CO<sub>2</sub> use efficiency, ECUE)由式(8)计算。

$$ECUE = 1 - (L_{CO_2} + dC/dt)/S \quad (8)$$

#### 1.2.4 番茄冠层蒸腾速率

番茄冠层蒸腾速率( $T_r$ , kg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>)可通过分析室内水蒸气平衡测得。

$$T_r = dZ/dt + R_z - L_z \quad (9)$$

其中, $dZ/dt$ 为 $t$ 时间内室内水蒸气变化率,g·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>; $R_z$ 为土壤水分释放速率,g·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>,由于试验期间土壤覆盖有塑料膜,因此可忽略不计; $L_z$ 为室内外水蒸气通风换气的交换率,g·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>,计算公式为

$$L_z = K_z NV(AH_{in} - AH_{out})/A \quad (10)$$

其中, $K_z$ 为水蒸气密度,kg·m<sup>-3</sup>; $AH_{in}$ 和 $AH_{out}$ 分别为室内外绝对湿度,kg·kg<sup>-1</sup>。

## 2 结果与讨论

### 2.1 室内外环境条件

试验期间,分别选择不同天气条件下的数据进行调查分析。晴天如5月1日和17日,阴雨天如5月5日和9日(图1)。当试验温室天窗打开并且室内CO<sub>2</sub>浓度低于室外浓度时,CO<sub>2</sub>施肥系统即开始进行CO<sub>2</sub>施肥,直至达室外CO<sub>2</sub>浓度水平。由于CO<sub>2</sub>施肥采取的是ON/OFF控制,因此,如图1所示,试验室内CO<sub>2</sub>浓度等于或略低于室外CO<sub>2</sub>浓度。实验期间,对照温室侧窗打开,当其室内温度高于25℃时,天窗打开。因此,与对照温室CO<sub>2</sub>浓度相比,实验室内CO<sub>2</sub>浓度最多高出50 μmol·mol<sup>-1</sup>。试验期间,两温室内温度均高出室外

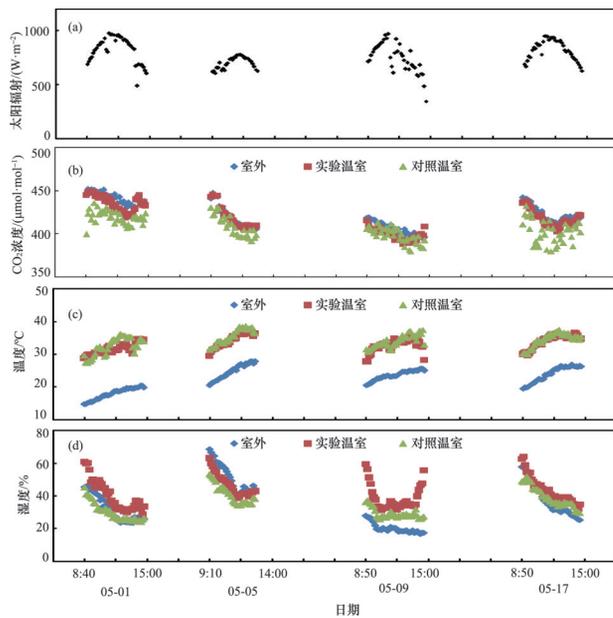


图1 试验期间室外太阳辐射(a),室内外CO<sub>2</sub>浓度(b),室内外温度(c)和室内外湿度(d)变化

Fig.1 Time course of outdoor solar radiation (a), indoor and outdoor CO<sub>2</sub> concentrations (b), air temperatures (c) and relative humidities (d)

温度10℃左右,室内外相对湿度相差不大。CO<sub>2</sub>施肥时间受太阳辐射强度和室外温度影响,太阳辐射强度和室外温度越高,CO<sub>2</sub>施肥时间越短。

### 2.2 番茄冠层净光合速率

番茄冠层净光合速率随着太阳辐射强度增加而升高(表1)。当太阳辐射强度从383.5 W·m<sup>-2</sup>增加到940.1 W·m<sup>-2</sup>时,试验温室番茄冠层净光合速率从1.9 g·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>升高到5.3 g·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>,比对照温室番茄冠层净光合速率高出1.3~1.6倍。随着试验的进行,两温室番茄的株高和叶片数逐渐增加(图2)。与对照温室相比,实验温室中番茄的株高和叶片数略高,但无显著性差异。

试验期间,两温室湿度基本相同,番茄冠层净光合速率大小主要受太阳辐射、室内CO<sub>2</sub>浓度和室内风速大小影响。在室内CO<sub>2</sub>浓度基本相同时,当太阳辐射强度从383.5 W·m<sup>-2</sup>增加到940.1 W·m<sup>-2</sup>时,番茄冠层净光合速率升高了2.8倍。研究表明<sup>[5,7]</sup>,在低CO<sub>2</sub>浓度时,植物光合速率与CO<sub>2</sub>浓度基本成直线关系。试验期间,虽然试验温室CO<sub>2</sub>浓度只比对照温室最多高出50 μmol·mol<sup>-1</sup>,试验温室番茄冠层净光合速率却是对照温室番茄冠层净光合速率的1.3~1.6倍。其原因除了试验温室CO<sub>2</sub>浓度稍高外,还可能与试验温室内空调和两台循环风扇送风增加了室内风速有关。试验表明<sup>[5,8]</sup>,适当增加室内风速可增加CO<sub>2</sub>浓度在植物冠层和群落内部分布的均匀性,减少植物叶片边界层阻力,从而增加叶片气孔导度。

由式(6)、式(7)可知,只要能求出实时动态换气次数,番茄冠层净光合速率、蒸腾速率和CO<sub>2</sub>利用效率即可连续测定。也就是说,结合计算机软件,此方法可使光合速率和蒸腾速率等不可视植物生长指标可视化,通过调整植物生长各环境因素,即可很容易找出其最适生长环境指标。因为光合速率和蒸腾速率等连续测定的准确性是由设施换气次数的准确性直接确定的,因此,本试验温室换气次数测定用的能量平衡法应运用其他换气次数测定方法(如F<sub>6</sub>、N<sub>2</sub>O等气体追踪法)进一步确定其准确性。

表1 试验温室和对照温室的P<sub>n</sub>和T<sub>e</sub>与太阳辐射的关系

Table 1 P<sub>n</sub> and T<sub>e</sub> of tomato plants in experiment greenhouse and control greenhouse as affected by solar radiation

太阳辐射/(W·m <sup>-2</sup> )	P <sub>ne</sub> / (g·m <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> )	P <sub>nc</sub> / (g·m <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> )	T <sub>ne</sub> / (kg·m <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> )	T <sub>nc</sub> / (kg·m <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> )
383.5±6.5	1.9±0.3	1.5±0.3	0.17±0.02	0.14±0.01
458.9±12.5	2.6±0.1	1.6±0.2	0.19±0.03	0.16±0.04
550.5±16.5	3.3±0.2	2.2±0.3	0.32±0.03	0.25±0.05
650.0±18.5	3.7±0.1	2.6±0.3	0.41±0.06	0.29±0.05
739.8±15.5	4.4±0.2	3.0±0.2	0.46±0.04	0.33±0.06
852.4±13.5	4.8±0.3	3.2±0.2	0.50±0.05	0.36±0.03
940.1±8.5	5.3±0.2	4.0±0.2	0.56±0.03	0.41±0.04

注:下标e代表试验温室,c代表对照温室。

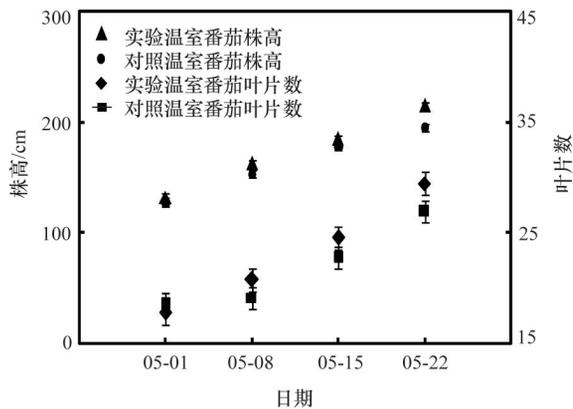


图2 温室内番茄株高和叶片数

Fig. 2 Plant height and leaf number of tomato plant in greenhouse

### 2.3 CO<sub>2</sub>利用效率

试验中,CO<sub>2</sub>利用效率由式(8)求得,结合式(7)可知,在零浓度CO<sub>2</sub>施肥法中,由于室内外CO<sub>2</sub>浓度基本相同,通风损失的CO<sub>2</sub>可以忽略。因此,零浓度CO<sub>2</sub>施肥法的CO<sub>2</sub>利用效率基本接近1。由式(7)可知,CO<sub>2</sub>利用效率主要受温室换气次数与室内外CO<sub>2</sub>浓度影响。温室换气次数主要随天窗、侧窗开度,室内外温差和室内外风速强度而改变。因此,在进行CO<sub>2</sub>施肥时,应先了解设施的换气次数,以便选择适宜的CO<sub>2</sub>施肥方法,提高经济效益。

### 2.4 番茄冠层蒸腾速率

与番茄冠层净光合速率相似,蒸腾速率随着太阳辐射强度增加而升高(表1)。当太阳辐射强度从383.5 W·m<sup>-2</sup>增加到940.1 W·m<sup>-2</sup>时,试验温室番茄冠层蒸腾速率从0.17 kg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>升高到0.56 kg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>,比对照温室番茄冠层蒸腾速率高出1.2~1.4倍。

番茄冠层蒸腾速率大小主要受太阳辐射,叶片-室内空气水蒸气饱和差和室内风速大小影响。试验结果表明,当太阳辐射强度从383.5 W·m<sup>-2</sup>增加到940.1 W·m<sup>-2</sup>时,试验温室番茄冠层蒸腾速率升高了2.3倍。与对照温室番茄冠层蒸腾速率相比,试验温室内番茄冠层蒸腾速率高出1.2~1.4倍的主要原因可能是试验温室内风速较大,从而减少了植物叶片边界层阻力,增加了叶片气孔导度。

## 3 结论

番茄冠层净光合速率和蒸腾速率随太阳辐射强度的增强而升高:当太阳辐射强度从383.5 W·m<sup>-2</sup>增加到940.1 W·m<sup>-2</sup>时,试验温室番茄冠层净光合速率从1.9 g·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>升高到5.3 g·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>,比对照温室番茄冠层净光合速率高出1.3~1.6倍;而试验温室番茄冠层蒸腾速率从0.17 kg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>升高到0.56 kg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>,比对照温室番茄冠层蒸腾速率高出1.2~1.4倍;试验期间,实验温室内CO<sub>2</sub>浓度等于或略低于室外CO<sub>2</sub>浓度,CO<sub>2</sub>利用效率近似于1。试验结果表明,在温室通风状态下采用零浓度差CO<sub>2</sub>施肥法同时进行室内送风是设施栽培增产的有效途径。

**致谢:**感谢日本千叶大学古在丰树教授和高桓美智子教授提供实验温室和技术指导。

### 参考文献 (References)

- [1] Mortensen, Leiv M. Review: CO<sub>2</sub> Enrichment in Greenhouses. *Crop Responses*[J]. *Scientia Horticulturae*, 1987, 33(1/2): 1-25.
- [2] Hao X, Wang Q, Khosla S. Responses of greenhouse tomato to summer CO<sub>2</sub> enrichment[J]. *Acta Horticulturae*, 2008(797): 241-246.
- [3] Linker R, Seginer I, Gutman P O. Optimal CO<sub>2</sub> control in a greenhouse modeled with neural networks[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 1998, 19(3): 289-310.
- [4] Sa'ñchez-Guerrero M C, Lorenzo P, Medrano E, et al. Effect of variable CO<sub>2</sub> enrichment on greenhouse production in mild winter climates[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 132(3/4): 244-252.
- [5] Tongbai P, Kozai T, Ohyama K. CO<sub>2</sub> and air circulation effects on photosynthesis and transpiration of tomato seedlings[J]. *Scientia Horticulturae*, 2010, 126(3): 338-344.
- [6] Tong Y, Kozai T, Nishioka N, et al. Greenhouse heating using heat pumps with a high coefficient of performance (COP) [J]. *Biosystems Engineering*, 2010, 106(4): 405-411.
- [7] Manderscheid R, Burkart S, Bramm A, et al. Effect of CO<sub>2</sub> enrichment on growth and daily radiation use efficiency of wheat in relation to temperature and growth stage[J]. *European Journal of Agronomy*, 2003, 19(3): 411-425.
- [8] Boulard T, Fatnassi H, Roy J C, et al. Effect of greenhouse ventilation on humidity of inside air and in leaf boundary-layer[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, 125(3/4): 225-239.

(责任编辑 王媛媛)

### 《科技导报》“研究论文”栏目征稿

“研究论文”栏目专门发表自然科学、工程技术领域具有创新性的研究论文,要求学术价值显著、实验数据完整、具有原始性和创造性,同时应重点突出、文字精炼、引证及数据准确、图表清晰,并附中、英文摘要以及作者姓名、所在单位、通信地址、关键词等信息。在线投稿:www.kjdb.org。