

# 亚硫酸氢钠和碳酸氢钾对甜菜 光合作用、块根产量及含糖率的影响

斯 琴<sup>1</sup> 魏 磊<sup>1</sup> 田自华<sup>1</sup> 邵金旺<sup>2</sup> 李国荣<sup>3</sup> 史树德<sup>1</sup>

(1. 内蒙古农业大学 农学院, 内蒙古 呼和浩特 010019; 2. 内蒙古农业大学 甜菜生理研究所, 内蒙古 呼和浩特 010018;  
3. 内蒙古呼伦贝尔市海拉尔区农业技术推广中心, 内蒙古 呼伦贝尔 021008)

**摘要:** 为了探讨外施低浓度亚硫酸氢钠和碳酸氢钾对甜菜光合碳代谢与块根产质量形成的内在机制及其在生产上应用的前景, 以甜菜品种农大甜研4号为试验材料, 在大田条件下, 研究了喷洒亚硫酸氢钠(200 mg/L)和碳酸氢钾(700 mg/L)对甜菜叶片光合作用、光合作用相关酶以及块根产量和含糖率的影响。结果表明:  $\text{NaHSO}_3$  和  $\text{KHCO}_3$  喷施甜菜叶片, 可显著提高甜菜叶片净光合速率、PEPCase 和 Rubisco 酶活性 ( $P < 0.01$ ); 气孔导度和胞间  $\text{CO}_2$  浓度表现为前期升高后期下降的趋势, 表明后期光合速率间的差异是非气孔因素占主导地位; 收获期块根重量及含糖率分别较对照增加 7.1% ~ 23.2% 和 10.5% ~ 20.3%。

**关键词:** 甜菜; 亚硫酸氢钠; 碳酸氢钾; 净光合速率; 含糖率; 产量

中图分类号: S566.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-7091(2010)03-0212-05

## The Effects of Sodium Bisulfite and Potassium Bicarbonate on the Photosynthesis, Yield and Sugar Content of Sugar Beet (*Beta vulgaris* L.)

SI Qin<sup>1</sup>, WEI Lei<sup>1</sup>, TIAN Zi-hua<sup>1</sup>, SHAO Jin-wang<sup>2</sup>, LI Guo-rong<sup>3</sup>, SHI Shu-de<sup>1</sup>

(1. College of Agronomy, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010019, China;

2. Institute of Sugar Beet Physiology, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010018, China;

3. The Hailaer Agro-Tech Extension and Service Center Inner Mongolia, Hulunbeier 021008, China)

**Abstract:** Sugar beet (*Beta vulgaris* L.) variety Nongdatianyan No.4 was chosen in this study. Under same conditions of field cultivation, the effects of spraying low concentration of  $\text{NaHSO}_3$  and  $\text{KHCO}_3$  on the leaves at growth stage were studied. As a result, we discussed the photosynthesis carbon metabolism and the intrinsic mechanism of the development of root yield and sugar content. The results showed that during sugar beet growth different stage, spraying  $\text{NaHSO}_3$  and  $\text{KHCO}_3$  on leaves increased the net photosynthesis PEPCase and Rubisco activity, which might result in the increase of root yield and sucrose content of roots in the end, 7.1% ~ 23.2% and 10.5% ~ 20.3% increase in root yield and sucrose content, respectively. However, the intercellular  $\text{CO}_2$  concentration and stomatal conductance of leaves showed an initial increase and then declined trend, indicating that the non-stomatal factor is the main reason for the difference in photosynthesis.

**Key words:** Sugar beet; Sodium bisulfite; Potassium bicarbonate; Net photosynthesis; Sugar content; Root yield

甜菜是以在块根中积累蔗糖为主的经济作物, 而糖分积累和块根产量形成的一个重要基础是叶片的光合作用, 因此提高甜菜叶片光合效率是甜菜获得丰产高糖的有效途径之一<sup>[1-3]</sup>。已有的研究表明, 亚硫酸氢钠 ( $\text{NaHSO}_3$ ) 处理可促进 PS II 的电子

传递速率, 低浓度  $\text{NaHSO}_3$  可能是通过促进围绕 PS I 的循环电子传递及其偶联的光合磷酸化而促进光合作用, 从而提高产量和改善品质以及提高抗逆性<sup>[4-10]</sup>; 碳酸氢钾 ( $\text{KHCO}_3$ ) 可以作为碳源来补充叶片细胞间隙  $\text{CO}_2$  的不足, 诱导和提高光合作用中磷

收稿日期: 2009-10-20

基金项目: 内蒙古自治区高等学校科学研究项目 (NJzy08045); 内蒙古农业大学博士科研启动基金资助

作者简介: 斯 琴 (1983-), 女, 内蒙古锡林浩特人, 硕士, 主要从事甜菜生理研究。

通讯作者: 史树德 (1973-), 男, 内蒙古呼和浩特人, 副教授, 博士, 硕士生导师, 主要从事甜菜生理研究。

酸烯醇式丙酮酸羧化酶(PEPCase)和核酮糖-1,5-二磷酸羧化/加氧酶(Rubisco)活性和含量,从而提高叶片的光合效率<sup>[11-15]</sup>。相关研究在甜菜上未见详细报道。

为此,本研究从甜菜的光合碳代谢化学调控入手,重点研究了喷洒低浓度NaHSO<sub>3</sub>和KHCO<sub>3</sub>后甜菜叶片净光合速率、气孔导度和胞间CO<sub>2</sub>浓度、光合作用重要相关的PEPCase和Rubisco酶活性、块根产量和含糖率的变化特点,旨在阐明外施KHCO<sub>3</sub>和NaHSO<sub>3</sub>提高甜菜叶片光合速率和产质量的生理机制,为甜菜丰产、高糖和优质栽培理论及实践提供参考与应用依据。

# 1 材料和方法

## 1.1 供试材料

供试材料为甜菜品种农大甜研4号,由内蒙古农业大学甜菜生理研究所提供。供试NaHSO<sub>3</sub>和KHCO<sub>3</sub>均为国产分析纯试剂。

## 1.2 试验设置及方法

1.2.1 试验设计 本试验于2006-2008年在内蒙古农业大学教学农场进行。分区按10行区种植,随机排列,3次重复。

根据2006年的预备试验结果,确定KHCO<sub>3</sub>处理浓度为700 mg/L,NaHSO<sub>3</sub>处理浓度为200 mg/L,于甜菜叶丛形成期至块根糖分积累期(6月1日至9月20日)用上述药剂进行喷施,每隔30 d喷施1次,用手压式喷雾器分别对其叶片正反两面进行喷施,使溶液在叶片表面形成均匀且细密的分布为度。处理时间为晴朗天气的傍晚。测定时间为喷施的第2天上午,CK为对照(喷施去离子水),试验设NaHSO<sub>3</sub>和KHCO<sub>3</sub>单独喷施和复合喷施(分别简称为Na、K和K+Na),每个重复选取长势一致6行区作为处理。

1.2.2 测定项目与方法 净光合速率和酶活性测定时选取上、中、下功能叶片,每片叶测其叶脉两侧中部分别求其平均值,PEPC活性参考郝建军等<sup>[16]</sup>的方法进行测定。RuBP羧化和加氧酶活性测定采用同位素法和氧电极法<sup>[17,18]</sup>。

光合速率采用美国COR公司生产的LI-6400光合测定系统,测定参数为净光合速率(Pn)、气孔导度(Gs)和胞间CO<sub>2</sub>浓度(Ci),连续测定7 d。测定时间为9:00-11:00,天气晴朗。采用密闭式气路,测定的环境条件为大气CO<sub>2</sub>浓度(350±3) μL/L,大气温度25℃,光强(PED)1 500 μmol/(m<sup>2</sup>·s)。

收获后测定块根的产量和含糖率,参照邵金旺

的<sup>[9]</sup>方法,含糖率采用垂度计法,产量采用称重法。

## 1.3 数据处理和分析

采用EXCEL2003和SPSS12.0软件进行数据处理和分析。

# 2 结果与分析

## 2.1 KHCO<sub>3</sub>和NaHSO<sub>3</sub>处理对甜菜叶丛形成期叶片净光合速率的影响

从图1可以看出,处理后前2 d时,各处理的光合速率比较接近,总体上略呈上升趋势,但明显较CK高,其中K处理较其他两处理略低;处理3 d时,Na和K+Na处理光合速率呈明显上升趋势,其中K+Na上升明显,K处理呈缓慢上升趋势;处理4 d时,各处理光合速率保持上升趋势,但上升幅度变小,其中K+Na光合速率明显高于Na、K和CK,K+Na处理的光合速率相对Na、K和CK光合速率分别提高13.7%、25.4%和54.6%,处理5 d时,各处理的光合速率达到最高值,K+Na光合速率最高,较CK提高54.7%,6 d后各处理呈下降趋势,但K+Na仅呈略下降趋势,7 d时各处理光合速率尽管呈下降趋势,但仍明显较CK高,其中K+Na 7 d后仍维持较高的光合速率,较CK高40.3%。总的来看,甜菜叶片喷施KHCO<sub>3</sub>和NaHSO<sub>3</sub>可使光合速率明显提高,两者复合后对光合速率的促进作用更加显著(P<0.01)。其他各生长时期的处理结果与叶丛形成期的结果趋势基本一致。

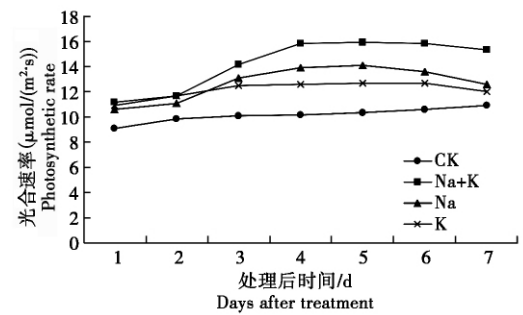


图1 各处理对甜菜叶丛形成期叶片光合速率的影响  
Fig.1 Effect of different treatments on net photosynthetic rate of sugar beet in phyllome formation stage

## 2.2 KHCO<sub>3</sub>和NaHSO<sub>3</sub>对叶丛形成期甜菜气孔导度(Gs)和胞间CO<sub>2</sub>(Ci)浓度的影响

气孔导度和胞间CO<sub>2</sub>浓度是反映光合特性的重要参数指标,图2是KHCO<sub>3</sub>和NaHSO<sub>3</sub>处理后甜菜叶片气孔导度的变化情况,各处理前2 d均表现为增大了气孔导度,这与外施Na<sup>+</sup>和K<sup>+</sup>促进气孔开放有关,从第3天以后各处理与CK间变化差异不显著,变化趋势基本一致,表明3 d后各处理对气孔导度影响不明显。从胞间CO<sub>2</sub>浓度来看(图3),

各处理前 2 d  $\text{CO}_2$  浓度高于 CK, 此时各处理气孔导度和光合速率也高于 CK, 由此可见, 在该时期气孔导度的差异可能是引发胞间  $\text{CO}_2$  浓度和光合速率差异的主要原因。从第 3 天开始, CK 与各处理胞间  $\text{CO}_2$  浓度差异不显著, 而在该时期各处理的光合速率却存在一定的差异, 表现为各处理均高于 CK, 说明在该时期造成光合速率间的差异是非气孔因素占主导地位<sup>[20]</sup>。同样的, 其他各生长时期的气孔导度 ( $G_s$ ) 和胞间  $\text{CO}_2$  ( $C_i$ ) 浓度变化规律与叶丛形成期基本一致。

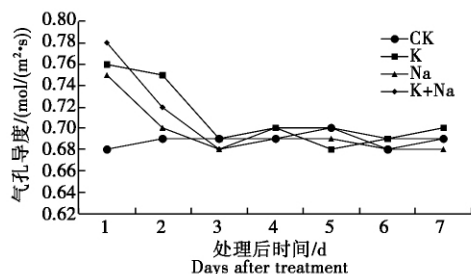


图 2 各处理对甜菜叶丛形成期叶片气孔导度的影响

Fig. 2 Effect of different treatments on stomatal conductance of sugar beet in phyllome formation stage

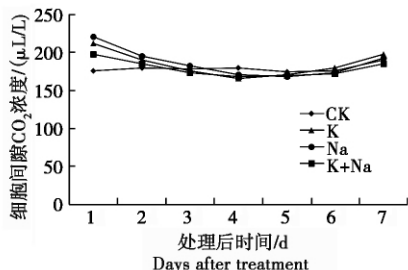


图 3 各处理对甜菜叶丛形成期叶片胞间  $\text{CO}_2$  浓度的影响

Fig. 3 Effect of different treatments on intercellular  $\text{CO}_2$  concentration of sugar beet in phyllome formation stage

### 2.3 $\text{KHCO}_3$ 和 $\text{NaHSO}_3$ 处理对甜菜叶丛形成期 PEPCase 和 Rubisco 活性的影响

从图 4 可以看出, 甜菜叶片中的 PEPCase 活性很低, 但其对光合作用会产生一定影响。本试验中 PEPCase 活性最低的是 CK。不同处理中 PEPCase 活性也有差异, 在处理的 7 d 内呈缓慢上升趋势。其中第 5 天时 K + Na 和 K 的 PEPCase 活性达到最高, K、Na 和 K + Na 处理的 PEPCase 活性分别比 CK 提高 40%、32% 和 56% ( $P < 0.01$ )。处理使 PEPCase 活性提高的可能原因是  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$  作为酶激活剂促进了 PEPCase 活性, 而  $\text{HCO}_3^-$  作为 PEPCase 的底物也可能诱导了该酶的合成, 叶片中的 PEPCase 可能利用  $\text{HCO}_3^-$  作为底物进行光合作用。Rubisco 的羧化活性变化如图 5 所示, 各处理都显著增加了 Rubisco 的羧化活性(以鲜质量计) ( $P < 0.01$ ), 第 5 天时 Rubisco 的羧化活性达到最大, Na 和 K 处理

Rubisco 的羧化活性较 CK 提高 28.1% 和 34.2%; K + Na 处理 Rubisco 羧化活性最高, 相对 CK Rubisco 羧化活性提高 47.9%。Rubisco 的加氧活性(以鲜质量计)变化如图 6 所示, 各处理第 1 天时 Rubisco 的加氧活性较 CK 提高, 随后各处理 Rubisco 的加氧活性低于 CK, 总体呈降低趋势, 至 7 d 时较 CK 明显降低。Rubisco 羧化活性/加氧活性变化如图 7 所示, 总体上呈先升高后降低的趋势, 第 4 天时 K + Na 达最大值, 2~7 d 内增加比较明显的是 K + Na 和 K 处理, 然后是 Na 处理。可以看出, Rubisco 羧化活性增加的因子是  $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{HSO}_3^-$  和  $\text{K}^+$ ; 使 Rubisco 加氧活性增加的主要因子是  $\text{HSO}_3^-$ 。Na + K 处理使 Rubisco 羧化活性提高, 加氧活性都降低, 且羧化活性/加氧活性明显高于 CK。同样道理, 其他各生长时期的处理结果与叶丛形成期的变化规律基本一致。

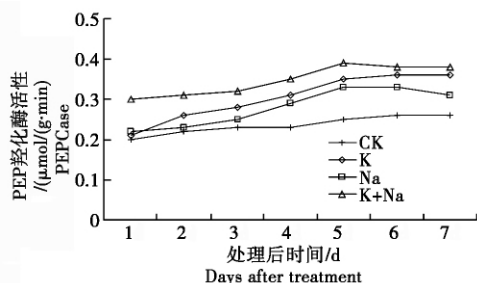


图 4 各处理对甜菜叶丛形成期叶片 PEPCase 活性的影响

Fig. 4 Effect of different treatments on PEPCase activity of sugar beet in phyllome formation stage

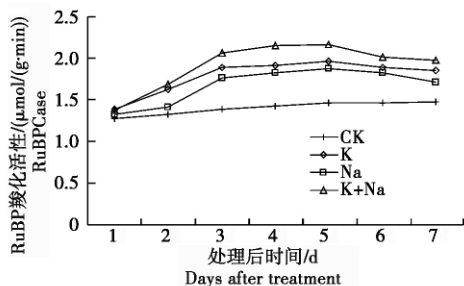


图 5 各处理对甜菜叶丛形成期叶片 RuBP 羧化活性的影响

Fig. 5 Effect of different treatments on RuBPCase activity of sugar beet in phyllome formation stage

### 2.4 $\text{KHCO}_3$ 和 $\text{NaHSO}_3$ 对收获期甜菜产量和含糖率的影响

按确定的  $\text{KHCO}_3$  和  $\text{NaHSO}_3$  浓度, 每隔 30 d 喷施 1 次, 对处理后的甜菜在 10 月 12 日进行采收后的测产检糖(产量和含糖率数据为 2008 和 2009 两年相同处理的均值)。结果表明, 各处理使甜菜块根产量较对照有显著增加 ( $P < 0.05$ ), 如图 8 所示, K + Na 处理甜菜块根产量达到最大, 比对照高 23.2%, 其次为 Na 和 K 处理, 较 CK 高 12.5% 和

7.1%。 $\text{KHCO}_3$ 和 $\text{NaHSO}_3$ 处理后甜菜的含糖率也明显增加,如图9所示,CK含糖率仅为15.2%,K、Na和K+Na处理后含糖率分别达到了16.8%,17.5%和18.3%,较CK分别提高了10.5%,15.1%和20.3%,由此可见,适当浓度的 $\text{KHCO}_3$ 和 $\text{NaHSO}_3$ 喷施,可明显提高甜菜块根的含糖率。

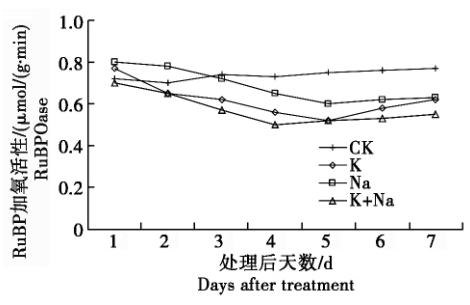


图6 各处理对甜菜叶丛形成期叶片 RuBP 加氧活性的影响

Fig.6 Effect of different treatments on RuBPase activity of sugar beet in phyllome formation stage

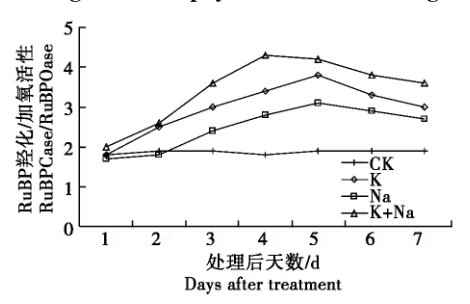


图7 各处理对甜菜叶丛形成期叶片 RuBP 羧化/RuBP 加氧活性的影响

Fig.7 Effect of different treatments on RuBPCase/ RuB Poase activity of sugar beet in phyllome formation stage

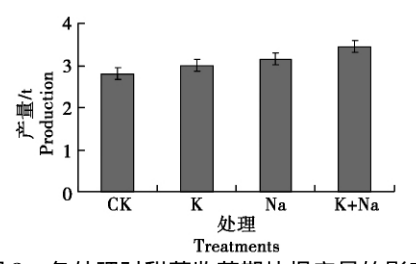


图8 各处理对甜菜收获期块根产量的影响

Fig.8 Effect of different treatments on sugarbeet root yield at harvest stage

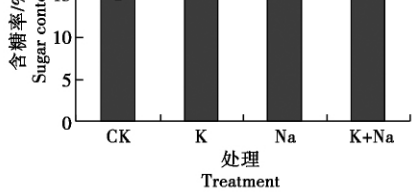


图9 各处理对甜菜收获期块根含糖率的影响

Fig.9 Effect of different treatments on sugarbeet root sugar content at harvest stage

### 3 讨论

对作物喷洒低浓度 $\text{KHCO}_3$ 和 $\text{NaHSO}_3$ 以提高其光合速率和增加产量的研究工作已有很多报道<sup>[4-15]</sup>。本试验结果表明,较低浓度的 $\text{KHCO}_3$ 和 $\text{NaHSO}_3$ 溶液处理后对甜菜叶片的光合速率有明显的促进作用( $P < 0.01$ ),且这种作用效果可以持续7 d左右,表现为光合作用相关酶活性的提高而促进光合作用,同时光合作用的提高又可诱导相关酶的活性;各处理的前期气孔导度和胞间 $\text{CO}_2$ 浓度是影响光合速率的主要因子,后期光合速率间的差异是非气孔因素占主导地位。

PEP羧化酶是 $\text{C}_4$ 植物光合作用的关键酶, $\text{C}_3$ 植物中的PEPCase对底物PEP和 $\text{HCO}_3^-$ 的亲合力比 $\text{C}_4$ 高6倍左右<sup>[21,22]</sup>。甜菜是 $\text{C}_3$ 作物,本研究发现甜菜叶片中存在PEP羧化酶, $\text{KHCO}_3$ 可以提高该酶活性,在各处理中K、Na和K+Na处理的PEP-Case活性高于CK,其原因可能是 $\text{HCO}_3^-$ 作为该酶的底物,通过底物诱导使PEPCase活性增加,另外 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 很可能作为该酶激活剂也对PEPCase有促进作用。同样的, $\text{K}^+$ 可活化Rubisco酶活性, $\text{HCO}_3^-$ 可提高 $[\text{CO}_2]/[\text{O}_2]$ 值而提高甜菜叶片中Rubisco的羧化活性,提高羧化反应和加氧反应的比值,有利于光合产物的积累,该作用对于甜菜丰产高糖可能更显重要。 $\text{NaHSO}_3$ 提高了Rubisco的羧化活性,可能与 $\text{NaHSO}_3$ 促进光合电子传递和光合磷酸化,加速光反应<sup>[11,13,23,24]</sup>有相似的作用机理,其对甜菜Rubisco活性影响的机理还需进一步研究。

综上所述,甜菜叶片喷施低浓度亚硫酸氢钠和碳酸氢钾后,甜菜叶片净光合速率增加,Rubisco的羧化活性和PEPCase活性提高,加之 $\text{HCO}_3^-$ 增加甜菜叶片光合作用暗反应的底物,这些因素共同作用合成更多的光合产物,同时 $\text{K}^+$ 参与糖运输和代谢,促进光合产物从叶片向块根的运输,最终表现在收获期甜菜块根产量和含糖率的提高,该措施在甜菜生产中具有很大的应用前景。

### 参考文献:

[1] 赵宏伟,邹德堂.不同类型甜菜品种叶部光合性状与产质量关系的研究[J].中国甜菜糖业,1997,6(3):14-17.

[2] 危常州,刘日明,高妙真,等.不同密度地膜甜菜光合与呼吸特性及与产质量间的关系[J].中国糖料,1998(2):16-19.

[3] 曲文章,赵宏伟,雷永雯,等.不同类型甜菜品种光合特性的研究[J].中国甜菜糖业,1995,1:12-17.

- [4] 王宏伟,魏家绵. 喷洒低浓度亚硫酸氢钠可促进小麦叶片光合磷酸化和光合作用 [J]. 科学通报, 2000, 45(4): 394–398.
- [5] 朱玉琴,季本华,焦德茂. 亚硫酸氢钠对转 PEPC 基因水稻叶片光合作用的促进作用 [J]. 科学通报, 2004, 20(6): 6–11.
- [6] 王宏伟,魏家绵,沈允钢. 低浓度  $\text{NaHSO}_3$  促进田间水稻的光合磷酸化和光合作用 [J]. 植物学报, 2000, 42(12): 1259–1299.
- [7] 郭延平,苏吉虎,王宏伟,等. 亚硫酸氢钠处理减轻低温对温州蜜柑光合作用的影响 [J]. 园艺学报, 2003, 30: 195–197.
- [8] 郭金华,牛志电,梅建设,等.  $\text{NaHSO}_3$  对桑树光合作用及蚕茧产量和质量的影响 [J]. 蚕业科学, 2001, 27: 83–86.
- [9] 刘 阳. 亚硫酸氢钠对蔬菜增产效果的探讨 [J]. 内蒙古农业科技, 2005(2): 26–28.
- [10] 彭玉梅. 抑制蒸腾剂(农气 1 号)在大豆和甜菜上生理效应及应用技术研究 [J]. 内蒙古农业科技, 1999(4): 11–13.
- [11] 张丽颖,于 洋,郝建军.  $\text{KHCO}_3$  对水稻幼苗光合速率的影响 [J]. 安徽农业科学, 2007, 35(4): 1009–1010.
- [12] 王可玢,娄世庆,匡廷云,等.  $\text{CO}_2$  浓度倍增对几种植物叶片的叶绿素蛋白质复合物的影响 [J]. 植物学报, 1997, 39(9): 867–873.
- [13] 张其德,卢从明. 大气  $\text{CO}_2$  浓度升高对光合作用的影响 [J]. 植物通报, 1992, 9(4): 18–23.
- [14] Idso S B, Kimball B A. Effects of atmospheric  $\text{CO}_2$  enrichment on photosynthesis, respiration and growth of sour orange trees [J]. Plant Physiol, 1992, 99(1): 341–343.
- [15] 魏锦成. 水稻叶片生育过程中 Rubisco 活性与光合、呼吸的关系 [J]. 植物生理学报, 1994, 20(3): 285–292.
- [16] 郝建军,刘延吉. 植物生理实验技术 [M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2001.
- [17] 张志良,吴光耀. 植物生物化学技术和方法 [M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- [18] 沈允钢,施教耐. 现代植物生理学实验指南 [M]. 北京: 科学出版社, 1999: 115–116.
- [19] 邵金旺,蔡 葆,张家骅,等. 甜菜生理学 [M]. 北京: 农业出版社, 1991: 37–47.
- [20] Farquhar G D, Sharkey T D. Stomatal conductance and photosynthesis [J]. Plant Physiology, 1982, 33: 317–345.
- [21] 李卫华,郝乃斌,戈巧英,等.  $\text{C}_3$  植物中  $\text{C}_4$  途径的研究进展 [J]. 植物学通报, 1999, 16(2): 97–106.
- [22] 李卫华,卢庆陶,郝乃斌,等. 大豆叶片  $\text{C}_4$  循环途径酶 [J]. 植物学报, 2001, 43(8): 805–808.
- [23] 魏家绵,沈允钢,李德耀,等.  $\text{NaHSO}_3$  在低光强下对叶绿体循环光合磷酸化的促进作用 [J]. 植物生理学报, 1989, 15: 101–104.
- [24] Mano J, Miyake C, Schreiber U *et al.* Photo activation of the electron flow from NADPH to plastoquinone in spinach chloroplasts [J]. Plant Cell Physiol, 1995, 36: 1589–1598.