

## K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>和HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>对大豆幼苗光合作用的影响

郝建军,黄春花,卢环,于洋

(沈阳农业大学 生物科学技术学院,辽宁 沈阳 110866)

**摘要:**以大豆品种“铁丰31”为试材,在幼苗第二片复叶完全展开时分别以1 500 mg·L<sup>-1</sup>的KHCO<sub>3</sub>和NaHCO<sub>3</sub>喷施于叶片的正反两面,测定光合速率、可溶性糖、光合色素等生理指标,以探讨K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>和HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>对光合作用的影响。结果表明:与清水对照处理相比,K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>和HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>能提高大豆幼苗的光合速率、可溶性糖含量、叶绿素a、b和叶绿素总含量,增加叶绿素b在总叶绿素中的比例;促进光反应的电子传递为暗反应碳固定提供更多的同化力来促进大豆幼苗光合作用;提高大豆幼苗叶片的ATP合酶活性及光合磷酸化活性;增加大豆幼苗叶片PEPC酶活力和PEPC比活力;其中HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>对提高幼苗光合速率、叶绿素b合成及全链光合电子传递速率起到显著促进作用;NaHCO<sub>3</sub>显著增加了Rubisco含量。K<sup>+</sup>对Rubisco含量的促进作用小于Na<sup>+</sup>,对其它各指标的促进作用均大于Na<sup>+</sup>。

**关键词:**KHCO<sub>3</sub>;NaHCO<sub>3</sub>;大豆幼苗;光合作用;Rubisco

**中图分类号:**S565.1

**文献标识码:**A

**文章编号:**1000-9841(2012)03-0436-04

## Influence of K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup> and HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> on Photosynthesis of Soybean Seedlings

HAO Jian-jun, HUANG Chun-hua, LU Huan, YU Yang

(College of Biological Science and Technology, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, Liaoning, China)

**Abstract:** In this study, seedling of Tiefeng 31 were sprayed with 1500 mg·L<sup>-1</sup> KHCO<sub>3</sub> and NaHCO<sub>3</sub>, respectively, and determined the photosynthetic rate, soluble sugar, photosynthetic pigment and other physiological indexes to explore the effect of K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup> and HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> on photosynthesis of soybean seedlings. The results showed that: compared with water spraying control, K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup> and HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> improved photosynthetic rate, the content of soluble sugar, chlorophyll a, chlorophyll b, and the ratio of chlorophyll b in total chlorophyll; promoted soybean seedlings photosynthesis by providing more assimilatory power to dark reactions carbon fixation; and enhanced the activities of ATP enzyme, photophosphorylation and PEPC. In addition, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> played a more important role in promoting chlorophyll b synthesis and improving photosynthetic rate. NaHCO<sub>3</sub> significantly increased the content of Rubisco. For other physiological indexes but the content of Rubisco, the promotion effect of K<sup>+</sup> was higher than Na<sup>+</sup>.

**Key words:** KHCO<sub>3</sub>; NaHCO<sub>3</sub>; Soybean seedlings; Photosynthesis; Rubisco

CO<sub>2</sub>是光合作用的原料,植物进行光合作用的最佳CO<sub>2</sub>浓度为1 000 μL·L<sup>-1</sup>左右,C<sub>3</sub>植物进行光合作用需要CO<sub>2</sub>的最佳浓度为800~1 600 μL·L<sup>-1</sup>。陆生植物光合作用的碳源主要从空气中的CO<sub>2</sub>获得,而空气中的CO<sub>2</sub>含量约为360 μL·L<sup>-1</sup>,无法满足植物光合作用需求,因此增加CO<sub>2</sub>浓度可以显著提高植物的光合速率。但目前大气中CO<sub>2</sub>浓度过高,已经对人类生存环境造成各种各样的破坏。因此,如何科学的增施碳源来提高植物的光合速率,并避免对环境产生副作用具有重要意义。近年来,很多文献报道以大豆<sup>[1]</sup>、水稻<sup>[2]</sup>和黄瓜<sup>[3]</sup>幼苗为试材,通过在其叶面喷施KHCO<sub>3</sub>来补充空气中CO<sub>2</sub>的不足,提高了光合速率。该试验在王晗等<sup>[1]</sup>工作的基础上,从离子水平探讨K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>和HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>对大豆幼苗光合速率、Rubisco含量、PEPC酶活性和电子传递的影响,为KHCO<sub>3</sub>和NaHCO<sub>3</sub>在大豆生产上的

应用提供理论依据。

### 1 材料与方法

#### 1.1 试验设计

试验在沈阳农业大学园艺学院试验基地进行。选择“铁丰31”大豆为试材进行育苗。将种子清洗干净后均匀平铺在大培养皿(底部及顶部放2层湿纱布)进行浸泡,于恒温培养箱30℃催芽。大约2 d左右取出,选择幼芽长势一致的种子,种于多孔的苗盘中,在温室中进行培养。当大豆幼苗长至真叶展开时,将苗盘分割,移植到较大的花盆中,待到第二片复叶展开时即可作为试材使用。

试验设3个处理:A,清水(CK);B,1 500 mg·L<sup>-1</sup> KHCO<sub>3</sub>水溶液;C,1 500 mg·L<sup>-1</sup> NaHCO<sub>3</sub>水溶液,3次重复。当大豆幼苗第二片复叶完全展开时,用手压式喷雾器分别对其第一、二片复叶正反面进行喷

收稿日期:2012-03-24

基金项目:辽宁省教育厅科学技术研究项目(2004A011)。

第一作者简介:郝建军(1955-),男,教授,研究方向为植物光合作用。E-mail:haojianjun106@126.com。

施,使溶液在叶片表面形成均匀且细密的分布,无液流、无液滴即可。处理时间为下午 16:00 左右。在喷药后的第 6 天取第一、二片复叶,进行光合生理指标的测定。

### 1.2 测定项目与方法

采用氧电极法测定光合速率。以国产 CY-II 型测氧仪为主机,配以反应杯、磁力搅拌器、超级恒温水浴、自动记录仪、光源等,组装成测定溶解氧的成套设备。叶片可溶性糖含量参照张宪政<sup>[4]</sup>的方法,采用蒽酮法测定。叶绿素 a (Chla)、叶绿素 b (Chlb)、叶绿素总量 (Chl a + b) 及类胡萝卜素 (Car) 含量采用 Arnon 法测定。光合电子传递速率参照陈启林等<sup>[5]</sup>和王春梅等<sup>[6]</sup>的方法测定。植物叶绿体中 ATP 合酶活性采用李合生<sup>[7]</sup>的方法测定。Rubisco 酶含量采用考马斯亮兰 G-250 法测定。PEPC 酶活性的参照冯福生等<sup>[8]</sup>和董永华等<sup>[9]</sup>的方法测定。

### 1.3 数据分析

采用 Excel 2003 与 SPSS 13.0 进行数据分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 可溶性糖含量

由图 1 可以看出,  $KHCO_3$  和  $NaHCO_3$  处理都提高了大豆幼苗叶片的可溶性糖含量。其中,  $KHCO_3$  处理和  $NaHCO_3$  处理分别比 CK 处理提高了 74.65% 和 38.03%, 说明其共有的  $HCO_3^-$  对叶片可溶性糖含量有促进作用,  $KHCO_3$  处理的可溶性糖含量高于  $NaHCO_3$  处理, 说明  $K^+$  的促进作用高于  $Na^+$ 。

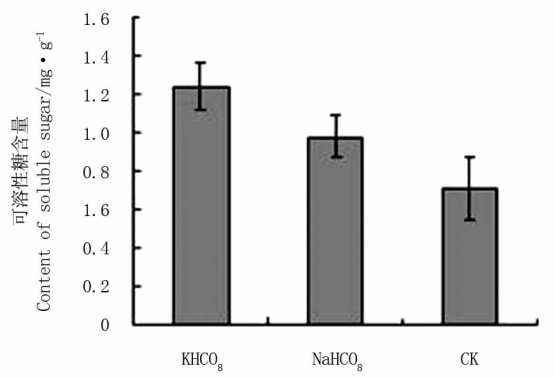


图 1  $Na^+$ 、 $K^+$  和  $HCO_3^-$  对大豆幼苗叶片可溶性糖含量影响

Fig. 1 Effects of  $Na^+$ ,  $K^+$  and  $HCO_3^-$  on soluble sugar content of soybean seedlings leaves

### 2.2 光合色素含量

由图 2 可知,  $KHCO_3$  和  $NaHCO_3$  处理的大豆幼苗叶片叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素及类胡萝卜素

的含量均高于 CK 处理,说明  $KHCO_3$  和  $NaHCO_3$  对大豆幼苗叶片各光合色素含量的增加有促进作用。相对于 CK 处理,  $KHCO_3$  和  $NaHCO_3$  处理的叶片叶绿素 a 的含量分别提高了 4.63% 和 0.94%, 叶绿素 b 含量分别提高了 21.86% 和 4.33%; 并且  $KHCO_3$  的促进作用高于  $NaHCO_3$ , 说明  $K^+$  的促进作用高于  $Na^+$ 。

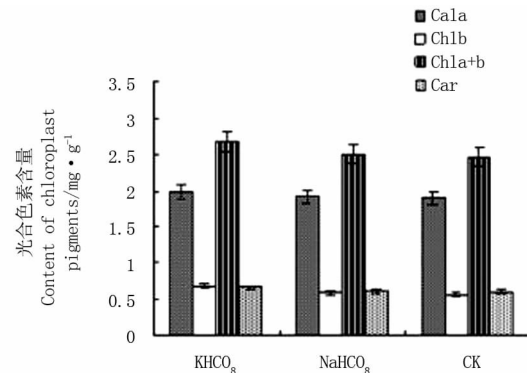


图 2  $Na^+$ 、 $K^+$  和  $HCO_3^-$  对大豆幼苗叶片光合色素含量影响

Fig. 2 Effects of  $Na^+$ ,  $K^+$  and  $HCO_3^-$  on photosynthetic pigments content of soybean seedlings leaves

### 2.3 光合电子传递速率

由图 3 可知,  $KHCO_3$  和  $NaHCO_3$  处理都不同程度的促进了大豆幼苗叶片光合电子传递速率, 相对于对照分别提高了 23.66% 和 20.1%, 说明  $KHCO_3$  和  $NaHCO_3$  水溶液共有的  $HCO_3^-$  对大豆幼苗叶片光合电子传递速率有促进作用,  $KHCO_3$  处理高于  $NaHCO_3$  处理, 说明  $K^+$  的促进作用大于  $Na^+$ 。

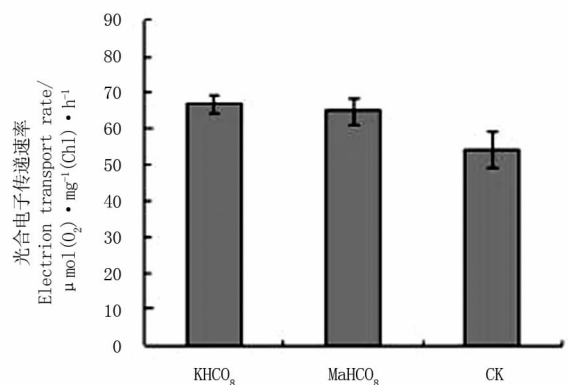


图 3  $Na^+$ 、 $K^+$  和  $HCO_3^-$  对大豆幼苗叶片光合电子传递速率的影响

Fig. 3 Effect of  $Na^+$ ,  $K^+$  and  $HCO_3^-$  on the electron transport rate of soybean seedlings leaves

## 2.4 ATP 合酶活性

由图 4 可知,  $\text{KHCO}_3$  和  $\text{NaHCO}_3$  处理均提高了大豆幼苗叶片 ATP 酶活性, 说明  $\text{KHCO}_3$  和  $\text{NaHCO}_3$  对大豆幼苗叶片的 ATP 酶活性有促进作用。  $\text{KHCO}_3$  的促进作用高于  $\text{NaHCO}_3$ , 由此可以看出对大豆幼苗叶片的 ATP 合酶活性有显著促进作用的主要因子是  $\text{HCO}_3^-$ , 其次是  $\text{K}^+$ 。此外,  $\text{KHCO}_3$  使光合磷酸化水平提高, 也会促进光合电子传递。

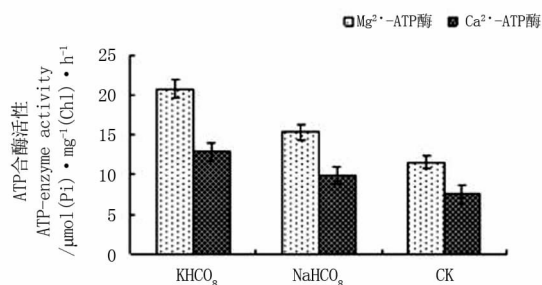


图 4  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$  和  $\text{HCO}_3^-$  对大豆幼苗叶片中 ATP 酶活性的影响

Fig. 4 Effects of  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  and  $\text{HCO}_3^-$  on ATP-enzyme activity of soybean seedlings leaves

## 2.5 Rubisco 含量

由表 1 可知,  $\text{KHCO}_3$  降低了大豆幼苗叶片中 Rubisco 的含量, 相对于 CK 处理降低了 5.17%;  $\text{NaHCO}_3$  处理显著提高了大豆幼苗叶片 Rubisco 含量, 与 CK 相比提高了 30.02%, 说明  $\text{K}^+$  对 Rubisco 的合成可能有抑制作用。

$\text{KHCO}_3$  处理降低了 Rubisco 占可溶性蛋白的百分比, 相对于 CK 处理降低了 18.06%; 相对于  $\text{NaHCO}_3$  处理降低了 28.21%。  $\text{K}^+$  可增加可溶性蛋白的含量, 钾在影响 Rubisco 合成的同时, 促进了其它蛋白的合成, 因此降低了 Rubisco 占可溶性蛋白的百分比。

## 2.6 PEPC 酶活性

由表 2 可知,  $\text{KHCO}_3$  和  $\text{NaHCO}_3$  处理均使大豆幼苗叶片 PEPC 酶活力和比活力显著增加, 相对 CK 分别提高了 45.60%、36.99% 和 44.38%、33.16%, 表明二者共有的  $\text{HCO}_3^-$  对 PEPC 活力和 PEPC 比活力的增加有显著的促进作用, 且  $\text{K}^+$  的促进作用大于  $\text{Na}^+$ 。

表 1  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$  和  $\text{HCO}_3^-$  对大豆幼苗叶片 Rubisco 含量的影响

Table 1 Effects of  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  and  $\text{HCO}_3^-$  on content of Rubisco of soybean seedlings leaves

处理 Treatment	Rubisco 含量 Rubisco content/ $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$	增幅 Increment/%	占可溶性蛋白的百分比 Rubisco to soluble protein/%	增幅 Increment/%
$\text{KHCO}_3$	$5.9270 \pm 1.1030$	-5.17	35.29	-18.06
$\text{NaHCO}_3$	$8.1260 \pm 2.2016^*$	30.02	49.16	14.14
CK	$6.2500 \pm 1.1450$	-	43.07	-

\* 表示与 CK 相比差异显著 ( $P < 0.05$ ), 下同。

\* means significant difference compared with CK ( $P < 0.05$ ), the same below.

表 2  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$  和  $\text{HCO}_3^-$  对大豆幼苗叶片 PEPC 酶活性的影响

Table 2 Effects of  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  and  $\text{HCO}_3^-$  on PEPC enzyme activities of soybean seedlings leaves

处理 Treatment	PEPC 酶活力 Enzyme activity/ $\text{nmol} \cdot \text{mL}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$	增幅 Increment/%	PEPC 酶比活力 Enzyme specific activity/ $\text{nmol} \cdot \mu\text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$	增幅 Increment/%
$\text{KHCO}_3$	$7.1200 \pm 1.0274^*$	45.60	$5.3700 \pm 0.6588^*$	36.99
$\text{NaHCO}_3$	$7.0600 \pm 0.8326^*$	44.38	$5.2200 \pm 0.8532^*$	33.16
CK	$4.8900 \pm 0.9266$	-	$3.9200 \pm 0.6285$	-

## 2.7 光合速率

如表 3 所示,  $\text{KHCO}_3$  和  $\text{NaHCO}_3$  处理的光合速率均高于对照, 说明各处理对大豆光合作用有促进作用。  $\text{KHCO}_3$  处理的大豆幼苗叶片光合速率最高, 比 CK 高 13.20%, 差异显著; 比  $\text{NaHCO}_3$  处理高 6.85%, 说明  $\text{K}^+$  对光合作用的促进作用比  $\text{Na}^+$  更强, 而二者水溶液共有的  $\text{HCO}_3^-$  起主要作用, 它可以作为叶片的碳源参加光合碳循环, 对叶片的光合作用有促进效果。

表 3  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$  和  $\text{HCO}_3^-$  对大豆幼苗叶片光合速率的影响

Table 3 Effects of  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  and  $\text{HCO}_3^-$  on photosynthetic rate of soybean seedlings leaves

处理 Treatment	光合速率 Photosynthetic rate/ $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	增幅 Increment/%
$\text{KHCO}_3$	$9.5200 \pm 0.3233^*$	13.20
$\text{NaHCO}_3$	$8.9100 \pm 0.1386$	5.95
CK	$8.4100 \pm 0.1848$	-

### 3 结论与讨论

钾元素能有效促进叶绿素的生物合成<sup>[10]</sup>, KHCO<sub>3</sub>也能提高植物叶绿素含量<sup>[11]</sup>。该研究表明, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>和K<sup>+</sup>均可提高叶绿素a、叶绿素b及叶绿素总含量,从而增强光合作用的原初反应。饶立华等<sup>[12]</sup>研究表明过量供钾,能够降低光合产物的输出速率,造成叶绿体破损,光合和产量降低。该试验中未发现钾元素有这种情况,可能是由于该试验中不存在钾元素过量问题,喷施适宜浓度的KHCO<sub>3</sub>能减少对叶绿体的伤害。

郑炳松<sup>[11]</sup>发现体外喷施适当浓度的钾可增多叶绿体内基粒,促进光合电子传递及光合磷酸化,提高植物的光合速率,激活Rubisco活化酶,提高Rubisco活性。该试验结果表明HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>和K<sup>+</sup>能显著提高大豆幼苗叶片总光合电子传递速率,提高ATP合酶的活性,进而加快了光合磷酸化的进程。

Camp等<sup>[13]</sup>研究认为,在C<sub>3</sub>植物中PEPC是补充C<sub>4</sub>有机酸的生物合成反应即回补代谢途径的一个关键酶,是C<sub>4</sub>微循环中的限速酶。该试验结果表明,大豆幼苗叶片中含有PEPC,叶面喷施KHCO<sub>3</sub>增加了大豆幼苗叶片PEPC活力和PEPC比活力,其原因是HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>可作为PEP羧化底物促进其羧化反应;HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>和K<sup>+</sup>通过提高Rubisco羧化活性、PEPcase的含量及活性,加快了光合作用暗反应的进程。K<sup>+</sup>在影响Rubisco合成的同时,增加了其PEPC蛋白的合成。

在该试验中,KHCO<sub>3</sub>处理降低了Rubisco的含量,推测其原因可能是Rubisco含量与空气中CO<sub>2</sub>有关。空气CO<sub>2</sub>浓度升高使植物体Rubisco含量减少<sup>[14-15]</sup>,这可能是植物适应外界环境过程中对Rubisco含量的调节,从而使CO<sub>2</sub>同化与电子传递能力相平衡。该试验在材料叶片上喷施KHCO<sub>3</sub>,间接的升高了CO<sub>2</sub>的浓度,从而使Rubisco含量下降;此外可能是由于K<sup>+</sup>增加了其它蛋白的合成,而在翻译水平上抑制了Rubisco的生物合成。

由于HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>和K<sup>+</sup>可加快原初反应进程,提高光合电子传递速率、ATP合酶活性,增加同化力的产出,并增加Rubisco羧化、PEP羧化酶活性,从而加强了CO<sub>2</sub>的固定与还原,进而提高了光合速率。在该试验中NaHCO<sub>3</sub>水溶液中的Na<sup>+</sup>对大豆幼苗光合作用的影响较小。

### 参考文献

- [1] 王晗,于洋,郝建军. KHCO<sub>3</sub>和NaHSO<sub>3</sub>对大豆幼苗光合速率的影响[J]. 大豆科学, 2008, 27(3): 546-550. (Wang H, Yu Y, Hao J J. Influence of KHCO<sub>3</sub> and NaHSO<sub>3</sub> on photosynthesis rate of soybean seedling [J]. Soybean Science, 2008, 27(3): 546-550.)
- [2] 张丽颖,于洋,郝建军. KHCO<sub>3</sub>对水稻幼苗光合速率的影响[J]. 安徽农业科学, 2007, 35(4): 1009-1010. (Zhang L Y, Yu

- Y, Hao J J. Influence of KHCO<sub>3</sub> on photosynthesis rate of rice seedling [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2007, 35(4): 1009-1010.)
- [3] 邢亚南,郑阳,郝建军,等. 不同浓度碳酸氢钾对黄瓜幼苗光合作用的影响[J]. 安徽农业科学, 2006, 34(3): 421-423. (Xing Y N, Zheng Y, Hao J J, et al. Influence of KHCO<sub>3</sub> on the cucumber seedling photosynthesis [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2006, 34(3): 421-423.)
- [4] 张宪政. 作物生理研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1992. (Zhang X Z. Crop physiology research [M]. Beijing: Agricultural Press, 1992.)
- [5] 陈启林,山仑,程智慧,等. 低温弱光对黄瓜类囊体膜偶联状态的影响[J]. 西北农业大学学报, 2000, 28(16): 6-11. (Cheng Q L, Shan L, Cheng Z H, et al. Influence of low temperature and weak light on cucumber thylakoid membrane coupling condition [J]. Journal of Northwest Agricultural University, 2000, 28(16): 6-11.)
- [6] 王春梅,施定基,朱水芳,等. 黄瓜花叶病毒对烟草叶片和叶绿体光合活性的影响[J]. 植物学报, 2000, 42(4): 388-392. (Wang C M, Shi D J, Zhu Y F, et al. Influence of cucumber mosaic virus on tobacco leaf and chloroplasts photosynthetically activity [J]. Acta Botanica Sinica, 2000, 42(4): 388-392.)
- [7] 李合生. 植物生理生化试验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000. (Li H S. Principle and technology of Plant physiological and biochemical experiments [M]. Beijing: Higher Education Press, 2000.)
- [8] 冯福生,马力耕. 低温对玉米叶片PEP羧化酶及其调节特性的影响[J]. 植物生理学报, 1992, 18(1): 45-49. (Feng F S, Ma L G. Influence of low temperature on PEP carboxylase and its control characteristics of corn leaf [J]. Journal of Plant Physiology, 1992, 18(1): 45-49.)
- [9] 董永华,史吉平,李广敏,等. 干旱条件下乙烯利对小麦幼苗PEP羧化酶活性的影响[J]. 河北农业大学学报, 1995, 18(3): 26-30. (Dong Y H, Shi J P, Li G M, et al. Influence of ethylene on wheat seedlings PEP carboxylase activity under drought conditions [J]. Journal of Hebei Agricultural University, 1995, 18(3): 26-30.)
- [10] 郑炳松,程晓建,蒋德安,等. 钾元素对植物光合速率、Rubisco和RCA的影响[J]. 浙江林学院学报, 2002, 19(1): 104-108. (Zheng B S, Cheng X J, Jiang D A, et al. Influence of K nutrition on plant photosynthesis rate, Rubisco and RCA [J]. Journal of Zhejiang Forestry College, 2002, 19(1): 104-108.)
- [11] 李颖畅,郝建军,于洋,等. 亚硫酸氢钠对茄子幼苗光合作用的影响[J]. 北方园艺, 2006(5): 11-13. (Li Y C, Hao J J, Yu Y, et al. Effect of NaHSO<sub>3</sub> on photosynthesis of eggplant seedling [J]. Northern Horticulture, 2006(5): 11-13.)
- [12] 饶立华,薛建明. 钾营养对番茄光合作用和产量形成的效应[J]. 浙江农业大学学报, 1989, 15(4): 341-348. (Rao L H, Xue J M. Effect of K nutrition on tomatoes photosynthesis and yield formation [J]. Journal of Zhejiang Agricultural University, 1989, 15(4): 341-348.)
- [13] Camp P J, Huber S C, Burke J J, et al. Biochemical changes that occur during senescence of wheat leaves [J]. Plant Physiology, 1982, 70: 1641-1646.
- [14] Chen G Y, Yong Z H, Liao Y, et al. Photosynthetic acclimation in rice leaves to free-air CO<sub>2</sub> enrichment related to both ribulose-1, 5-bisphosphate carboxylation limitation and ribulose-1, 5-bisphosphate regeneration limitation [J]. Plant Cell Physiology, 2005, 46: 1036-1045.
- [15] Spencer W, Bowes G. Photosynthesis and growth of water hyacinth under CO<sub>2</sub> enrichment [J]. Plant Physiology, 1986, 82: 528-533.