

DOI: 10.11766/trxb201509060378

# 不同氮水平下有机碳对蕹菜碳氮代谢及生长的影响\*

桂 丕<sup>1,2</sup> 陈 娴<sup>1</sup> 廖宗文<sup>1</sup> 汪立梅<sup>1</sup> 钟秀娟<sup>1</sup> 毛小云<sup>1†</sup>

(1 华南农业大学资源环境学院新肥料资源研究中心, 广州 510642)

(2 深圳市铁汉生态环境股份有限公司, 广东深圳 518040)

**摘 要** 碳是植物必需的首要营养元素,但在植物营养、平衡施肥等理论和技术层面上长期被忽略,碳营养已成为影响作物高产优质的短板。本研究分别在三个氮水平下,研究了外源喷施两种不含氮的有机碳对蕹菜鲜重、干重、分枝数、碳氮代谢及营养品质指标的影响。结果表明,在不同氮水平下喷施有机碳有促进蕹菜生长的作用,效果因不同的氮水平及有机碳源而异。中氮(100 mg kg<sup>-1</sup>)水平下,以丙三醇的效果最好,其鲜重、干重、全碳含量及全氮含量与CK相比均有显著提高,增幅分别为12.88%、15.48%、7.05%和8.33%,且铁(Fe)含量与CK相比也显著提高,增幅高达16.2%,亚硝酸盐及钾(K)含量显著降低。高氮(120 mg kg<sup>-1</sup>)水平下,以 $\alpha$ -酮戊二酸的效果最好,其鲜重、干重、全碳及全氮与CK相比均差异显著,增幅分别为17.97%、20.91%、7.97%和9.56%,蕹菜中的锌(Zn)与CK相比也显著提高,增幅高达16.18%,亚硝酸盐及K含量显著降低。在试验的三种氮水平下,有机碳处理可使蕹菜叶片中水溶性碳占全碳的百分比(WC/TC)及水溶性氮占全氮的百分比(WN/TN)下降,表明外源有机碳可促进蕹菜碳氮的合成代谢,从而促进生长,改善品质。研究结果提供了一条通过施肥补碳调控碳氮平衡实现蔬菜高产优质的新途径。

**关键词** 氮水平;有机碳;蕹菜;碳氮代谢;营养品质

**中图分类号** S143.8 **文献标识码** A

蕹菜(*Ipomoea aquatica* Forsk)属旋花科甘薯属植物,又名空心菜、藤菜、竹叶菜、通菜及过河菜,原产中国热带多雨地区,适宜生长在潮湿地带,西南、华南、华东及华中栽培普遍,是我国夏秋两季主栽的绿色蔬菜之一<sup>[1]</sup>,通过栽培和营养管理具有较大高产优质潜力。长期以来,作物平衡施肥关注的重点是氮(N)、磷(P)和钾(K)肥,而碳(C)营养的补充却被忽略<sup>[2]</sup>。碳在17种植物必需营养元素中居首位,约占植物干物质的50%<sup>[3]</sup>,数倍于氮、磷和钾元素之和。经典植物营养原理的最小因子律表达为木桶原理图,但是碳在经典理论上虽有其名而在木桶图中却无其位。

长期以来,植物对碳素的获取主要靠吸收空气中CO<sub>2</sub>,但仅为其需求量的1/5<sup>[4-5]</sup>,远未能满足作物的需求而成为碳短板,化肥工业也鲜有以补碳为目的的产品出现,亦尚未有公认的有机碳肥定义。为区别于气态无机碳,廖宗文等<sup>[2]</sup>提出了“能提供水溶性高、易被植物吸收的液体或固体有机碳营养的肥料即有机碳肥”的概念,以期开发非气态的有机碳肥提供思路。已有研究发现,叶面喷施5%蔗糖可提高春小麦穗粒数和千粒重并实现增产<sup>[6]</sup>;在弱光条件下对水稻幼苗喷施低浓度(50 mg L<sup>-1</sup>)不含氮的三种有机碳(蔗糖、 $\alpha$ -酮戊二酸和丙三醇)发现,外源有机碳营养可大幅度降低

\* 国家科技支撑计划项目(2011BAD11B05)、广东省科技计划项目(2015B020215012)和广州市科技计划项目(201508030039)资助 Supported by the National Key Technology R&D Program of China (No. 2011BAD11B05), the Science & Technology Planning Project of Guangdong Province (No. 2015B020215012) and the Science & Technology Planning Project of Guangzhou City (No. 201508030039)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: xymao@scau.edu.cn

作者简介: 桂 丕(1989—),男,湖南永州人,硕士,主要从事固体废弃物资源化利用研究。E-mail: guipipi@163.com

收稿日期: 2015-09-06; 收到修改稿日期: 2015-11-29

弱光下光合产物不足对水稻生长的抑制，生物量增加幅度可高达33%<sup>[7]</sup>。碳短板对薤菜生长有哪些影响？补充有机碳营养对于薤菜产量、碳氮代谢及品质有何作用？深入探讨这些问题对植物营养理论及高产栽培的平衡施肥均有重要意义。

为避免外源有机碳中氮的影响，本文以 $\alpha$ -酮戊二酸和丙三醇两种不含氮的有机碳为供试肥料，在温室盆栽条件下研究外源有机碳营养对薤菜碳氮代谢及生长的影响。试验内容包括：（1）不同氮水平下，有机碳营养对薤菜分枝数及生物量的影响；（2）不同氮水平下，有机碳对于薤菜氮、磷和钾素的吸收及相关碳氮代谢的影响；（3）不同氮水平下，有机碳对薤菜营养品质指标铁、锌及亚硝酸盐的影响。

## 1 材料与方 法

### 1.1 供试材料

试验于2014年4月16日至5月13日在华南农业大学网室内进行，整个生育期共28天。供试薤菜品种为泰国薤菜。供试土壤为菜园土（肥熟旱耕人为土，Fimi-orthic anthrosols），取自广州华南农业大学教学试验区，基本理化性状如下：pH 7.07，有机质 5.32 g kg<sup>-1</sup>，全氮 1.03 g kg<sup>-1</sup>，碱解氮 37.5 mg kg<sup>-1</sup>，有效磷12.32 mg kg<sup>-1</sup>，速效钾61.4 mg kg<sup>-1</sup>。

### 1.2 试验设计

试验设9个处理：CK1、CK2和CK3分别为三个施氮量（60 mg kg<sup>-1</sup>、100 mg kg<sup>-1</sup>和120 mg kg<sup>-1</sup>）下喷蒸馏水（Distilled water）的对照；T1、T2和T3分别为三个施氮量下喷施50 mg L<sup>-1</sup>  $\alpha$ -酮戊二酸（ $\alpha$ -ketoglutarate）的处理；B1、B2和B3分别为三个施氮量下喷施50 mg L<sup>-1</sup>丙三醇（Glycerol）的处理。每个处理设4个重复。每盆称4 kg土，三穴，每穴1株薤菜幼苗。各处理磷肥和钾肥的施用量相等，分别为磷150 mg kg<sup>-1</sup>，钾150 mg kg<sup>-1</sup>。各处理氮肥采用尿素，以KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>和KCl的形式补充磷和钾。

4月20日（生长第4天）第1次叶面喷施有机碳，以后每隔7 d叶面喷施一次，共喷3次，每次喷施有机碳体积为2.00 mL Pot<sup>-1</sup>。5月13日收获植株。在收获前，采顶叶下第2、3和4片叶进行碳氮指标测定，剩余样品进行其他相关指标测定。

### 1.3 测定指标及方法

叶片全氮（TN）和水溶性氮（WN）的测定：TN按照文献[8]中植株全氮的方法测定。WN浸提方法参照杨廷梅等<sup>[9]</sup>的方法：称取4.000 g叶片鲜样，捣碎并加入20 mL蒸馏水，震荡30 min，离心（5 000 r min<sup>-1</sup>，5 min）后过滤得第一次浸提液；将滤纸及滤渣再浸提得到第二次浸提液，合并两次滤液即得叶片WN提取液。用硫酸—过氧化氢消煮后，以凯氏定氮法测浸提液中WN。

叶片全碳（TC）和水溶性碳（WC）测定：TC采用重铬酸钾—浓硫酸外加热法测定；WC的浸提方法采用WN测定中的方法，浸提液中碳含量的测定方法与TC同。

植株全钾的测定采用浓硫酸—过氧化氢消煮，火焰光度法测定；植株Fe和Zn的测定采用干灰化—原子吸收法测定；植株亚硝酸盐含量采用食品安全国家标准GB5009.33-2010中的盐酸萘乙二胺法测定。

### 1.4 数据处理

试验数据采用Microsoft Excel 2003和SAS 9.0进行统计分析，多重比较采用Duncan法（ $p < 0.05$ ）；各处理WC/TC、WN/TN与薤菜生物量的相关性分析采用SPSS 13.0分析软件。

## 2 结 果

### 2.1 有机碳对薤菜分枝数及生物量的影响

由表1可知，喷施两种有机碳均能提高薤菜的分枝数、鲜重和干重。在施加60 mg kg<sup>-1</sup>氮条件下，T、B处理的分枝数、鲜重及干重与CK相比，均有增加的趋势。在中氮（100 mg kg<sup>-1</sup>）条件下，T、B处理的分枝数、鲜重及干重与CK相比，均有显著性提高，B处理效果最好，其分枝数、鲜重及干重增幅分别为19.12%、12.88%和15.48%，T处理分枝数、鲜重及生物量增幅分别为16.18%、11.86%和14.43%。在高氮（120 mg kg<sup>-1</sup>）条件下，以T处理的分枝数、鲜重及生物量增加效果最好，与CK相比差异显著，增幅分别高达26.56%、17.97%和20.91%。可见，随着氮浓度的升高，喷施有机碳各处理的分枝数、鲜重及干重呈增加趋势。随施氮量增加而补充有机碳有利于调整碳氮平衡，因而比相应氮水平的对照（不施有机碳）长势好、产量高。

表1 有机碳对菠菜分枝数、鲜重及干重的影响

Table 1 Effects of foliar spray of organic carbon on number of branches, fresh weight and dry weight of water spinaches

处理 Treatment	分枝数 Number of branch		鲜重 Fresh weight		干重 Dry weight	
	数量 Number (No. pot <sup>-1</sup> )	较CK增幅 Increment over CK (%)	质量 Mass (g pot <sup>-1</sup> )	较CK增幅 Increment over CK (%)	质量 Mass (g pot <sup>-1</sup> )	较CK增幅 Increment over CK (%)
CK1	14.50 ± 0.27d	—	56.79 ± 1.71c	—	11.26 ± 0.41d	—
T1	15.50 ± 0.29cd	6.89	59.99 ± 0.89c	5.63	11.71 ± 0.38cd	3.99
B1	15.25 ± 0.11cd	5.17	61.09 ± 1.76c	7.57	11.95 ± 0.56cd	6.13
CK2	17.00 ± 0.11cd	—	72.04 ± 0.76b	—	14.21 ± 0.28b	—
T2	19.75 ± 0.25ab	16.18	80.59 ± 0.66a	11.86	16.26 ± 0.62a	14.43
B2	20.25 ± 0.25a	19.12	81.33 ± 1.05a	12.88	16.41 ± 0.48a	15.48
CK3	16.00 ± 0.41cd	—	70.63 ± 1.22b	—	13.58 ± 0.44bc	—
T3	20.25 ± 0.15a	26.56	83.32 ± 2.98a	17.97	16.42 ± 0.58a	20.91
B3	17.50 ± 0.35bc	9.38	78.00 ± 3.03ab	10.44	15.00 ± 0.75ab	10.46

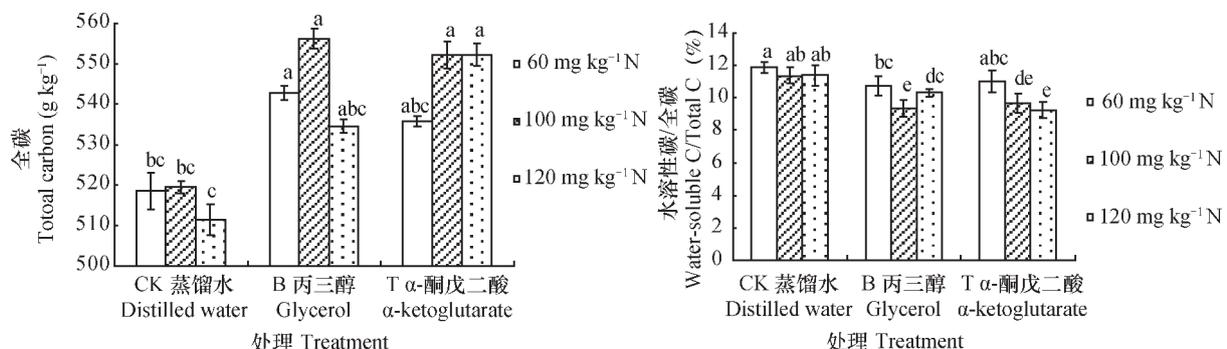
注: CK1、CK2和CK3分别为三个氮水平 (60、100、120 mg kg<sup>-1</sup>) 下喷蒸馏水的处理, T1、T2和T3为三个氮水平下喷 α-酮戊二酸的处理, B1、B2和B3为三个氮水平下喷丙三醇处理; 表中同列不同字母表示处理间差异显著 ( $p < 0.05$ ), 下同 Note: CK1, CK2 and CK3 stands for the treatments different in N level (60 mg kg<sup>-1</sup>, 100 mg kg<sup>-1</sup> and 120 mg kg<sup>-1</sup>, respectively) and sprayed with distilled water only; T1, T2 and T3 for the treatments different in N level (the same as in Treatments CK1, CK2 and CK3) and sprayed with α-ketoglutarate; B1, B2 and B3 for the treatments different in N level (the same as in Treatments CK1, CK2 and CK3) and sprayed with Glycerol. Different letters represent significant difference between treatments in this table ( $p < 0.05$ ). The same below

## 2.2 有机碳对菠菜叶片碳氮代谢的影响

水溶性碳(氮)/全碳(氮)(WC/TC、WN/TN), 是反映作物碳氮代谢的重要生理参数, 其值高低反映菠菜合成代谢的强弱。水溶碳(或氮)比例低, 表明其转化为大分子养分或自身组织(淀粉、木质素)的合成过程强, 促进了生长因而产量增加。

2.2.1 有机碳对菠菜叶片TC及WC/TC影响 如图1所示, 喷施有机碳均可提高菠菜叶片TC的含

量; 随着氮浓度的升高, CK及B处理的叶片TC含量呈现先升高后降低的规律, 而T处理TC则是先升高再保持不变的趋势。其中在60 mg kg<sup>-1</sup>氮条件下, 以B处理TC增加效果最为明显, 与CK相比差异显著, 增幅为4.70%; 在100 mg kg<sup>-1</sup>氮条件下, B、T两个处理的TC含量与CK相比均有显著性增加, 增幅依次为7.05%和6.29%。高氮120 mg kg<sup>-1</sup>条件下, 以T处理TC增加效果最为明显, 与CK相比差异显著, 增幅为7.97%。



注: 图中不同字母表示处理间差异显著 ( $p < 0.05$ ) Note: Different letters represent significant difference between treatments ( $p < 0.05$ )

图1 喷施有机碳对菠菜叶片全碳及水溶性碳/全碳的影响

Fig. 1 Effect of foliar spray of organic carbon on total C and WC/TC in leaves of the water spinach

不同施氮条件下，喷施有机碳可使蕹菜叶片中 WC 占 TC 的百分比明显降低（图1）。其中60 mg kg<sup>-1</sup> 氮条件下，以B处理降低效果最为明显，WC/TC 降幅达9.56%，T处理也有降低趋势；在100 mg kg<sup>-1</sup> 氮条件下，B和T两个处理的WC/TC与CK相比均有显著降低，降幅分别高达17.69%和14.97%；在高氮120 mg kg<sup>-1</sup> 氮条件下，B和T两个处理的WC/TC与CK相比均有显著降低，T处理降幅高达18.78%，B处理降幅为9.34%。

**2.2.2 有机碳对蕹菜叶片TN及WN/TN的影响** 喷施有机碳处理后蕹菜叶片TN含量均有不同程度的增加（图2），其中60 mg kg<sup>-1</sup> 氮条件下，T和B处理全氮与CK相比略有增加，但差异不显著；100 mg kg<sup>-1</sup> 氮条件下，喷施有机碳的T和B两个处理叶片的TN含量与CK相比均显著性提高，增幅分别为

6.60%和8.33%；在120 mg kg<sup>-1</sup> 氮条件下，以T处理叶片TN含量最大，与CK相比差异显著，增幅高达9.56%，表明喷施有机碳具有促进蕹菜对氮素吸收的作用。

随施氮量的增加蕹菜叶片中WN/TN有降低的趋势（图2）。与CK相比，喷施有机碳处理的叶片WN/TN均显著降低，B处理在中氮（100 mg kg<sup>-1</sup>）条件下降低幅度最大，而T处理则是在高氮条件下降低最为明显。在低氮（60 mg kg<sup>-1</sup>）条件下，B处理叶片WN/TN与CK相比降幅为12.28%，T处理降幅为8.43%；在中氮（100 mg kg<sup>-1</sup>）条件下，B处理叶片WN/TN与CK相比降幅为21.93%，T处理降幅为16.63%；高氮（120 mg kg<sup>-1</sup>）条件下，T处理叶片WN/TN与CK相比降幅高达25.43%，B处理降幅则为6.19%。

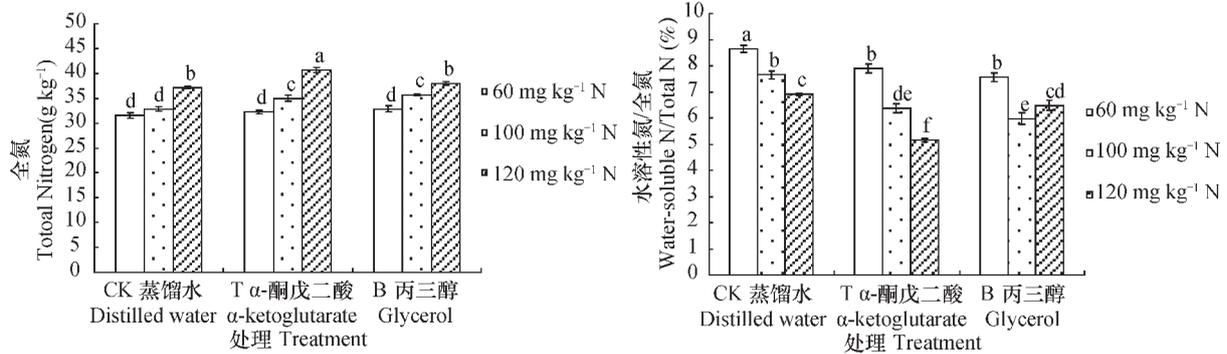


图2 喷施有机碳对蕹菜叶片全氮及水溶性氮全氮的影响

Fig. 2 Effect of foliar spray of organic carbon on total N and WN/TN in leaves of the water spinach

**2.3 各处理WC/TC、WN/TN与蕹菜生物量的关系**

如图3所示，在三种施氮水平下，蕹菜各处理的叶片WC/TC、WN/TN与生物量之间均存在负相关，表明WC/TC和WN/TN越小，碳氮合成代谢越强，生物量越高。其中，在60 mg kg<sup>-1</sup>的施氮水平

下，各处理蕹菜叶片WN/TN与生物量之间的相关系数为0.987 2，在0.05水平（双侧）上存在显著负相关性；在120 mg kg<sup>-1</sup>的施氮水平下，各处理蕹菜叶片WC/TC与生物量之间的相关系数为0.970 1，在0.01水平（双侧）上存在极显著负相关性。

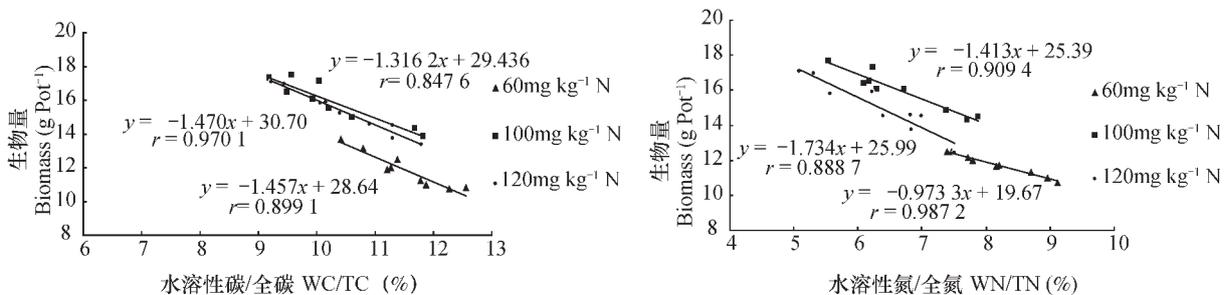


图3 蕹菜叶片水溶性碳/全碳及水溶性氮/全氮与生物量的相关性

Fig. 3 Correlation of WC/TC and WN/ TN in water spinach leaves with biomass of the plant

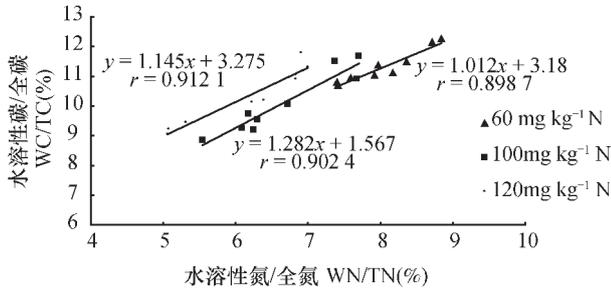


图4 菠菜叶水溶性氮/全氮与水溶性碳/全碳的相关性  
Fig. 4 Correlation of WN/TN with WC/TC in water spinach leaves

由图4可知，相同施氮水平下，各处理菠菜叶片WC/TC与WN/TN之间均存在正相关。这说明两者分别从碳和氮方面均反映了合成代谢的状况，与生物量的相关性是一致的。

2.4 有机碳对菠菜植株全磷和全钾的影响

喷施有机碳降低菠菜的全磷和全钾的含量，随着氮浓度的升高，B和T处理的全磷和全钾含量呈现逐渐降低的规律（表2）。在低氮（60 mg kg<sup>-1</sup>）条件下，T和B处理全磷含量与CK相比降幅显著，

表2 喷施有机碳对菠菜植株全磷和全钾的影响

Table 2 Effects of foliar spray of organic carbon on total P and total K in water spinach

处理 Treatment	全磷Total phosphorus		全钾Total potassium	
	含量Content (g kg <sup>-1</sup> )	较CK降低 Decrement below CK (%)	含量Content (g kg <sup>-1</sup> )	较CK降低 Decrement below CK (%)
CK1	3.80 ± 0.07a	—	25.91 ± 0.23a	—
T1	3.61 ± 0.06b	5.00	21.03 ± 0.15b	18.82
B1	3.62 ± 0.03b	4.74	20.84 ± 0.09b	19.58
CK2	2.88 ± 0.07c	—	20.32 ± 0.25b	—
T2	2.79 ± 0.05cd	3.13	16.23 ± 0.1c	20.13
B2	2.78 ± 0.02cd	3.47	16.23 ± 0.33c	20.13
CK3	2.63 ± 0.06de	—	18.01 ± 0.15bc	—
T3	2.57 ± 0.05e	2.28	13.81 ± 0.22d	23.33
B3	2.51 ± 0.06e	4.56	14.03 ± 0.17d	22.10

降幅分别为5%和4.74%；另两个氮水平下，喷施有机碳的处理全磷含量与CK相比有降低趋势。全钾的含量则因不同的碳源而异：低氮（60 mg kg<sup>-1</sup>）条件下，B处理全钾降低最为明显，降幅为19.58%；在中氮（100 mg kg<sup>-1</sup>）条件下，B和T处理全钾均降低，与CK相比均差异显著，降幅均为20.13%；在高氮（120 mg kg<sup>-1</sup>）条件下，以T处理全钾降幅最大，与CK相比有显著性差异，降幅为23.33%。菠菜全钾含量降低，但其生物量与CK相比是增加的，这可能与减少了养分奢侈吸收有关。

2.5 有机碳对菠菜品质的影响

2.5.1 有机碳对菠菜亚硝酸盐含量的影响 喷施有机碳能降低菠菜亚硝酸盐含量，效果因有机碳而异（图5）。在低氮（60 mg kg<sup>-1</sup>）条件下，喷施有机碳的处理亚硝酸盐有降低趋势，但与CK相比无显著性差异；中氮（100 mg kg<sup>-1</sup>）条件下，B和

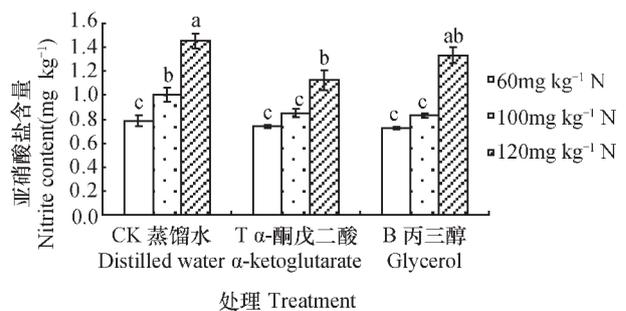


图5 喷施有机碳对菠菜亚硝酸盐的影响  
Fig. 5 Effect of foliar spray of organic carbon on nitrite in water spinach

T处理亚硝酸盐含量与CK相比均有显著性降低，降幅分别为17.37%和15.0%；高氮（120 mg kg<sup>-1</sup>）条件下，以T处理亚硝酸盐降低最为明显，与CK有显著性差异，降幅高达22.73%，B处理亚硝酸盐含量也有所降低，但与CK无显著性差异。上述结果表明，喷施有机碳促进了菠菜对亚硝态氮的转化，更

多地合成高分子有机物，从而使得亚硝酸盐含量降低，进而提高菠菜品质。

**2.5.2 有机碳对菠菜微量元素铁和锌含量的影响** 在低氮 ( $60 \text{ mg kg}^{-1}$ ) 及高氮 ( $120 \text{ mg kg}^{-1}$ ) 条件下，喷施有机碳的处理对铁有微弱的提高，但与CK相比无显著差异；在中氮 ( $100 \text{ mg kg}^{-1}$ ) 条件下，B和T处理能显著提高菠菜铁含量，与CK相比差异显著，增幅分别为16.20%和11.22%

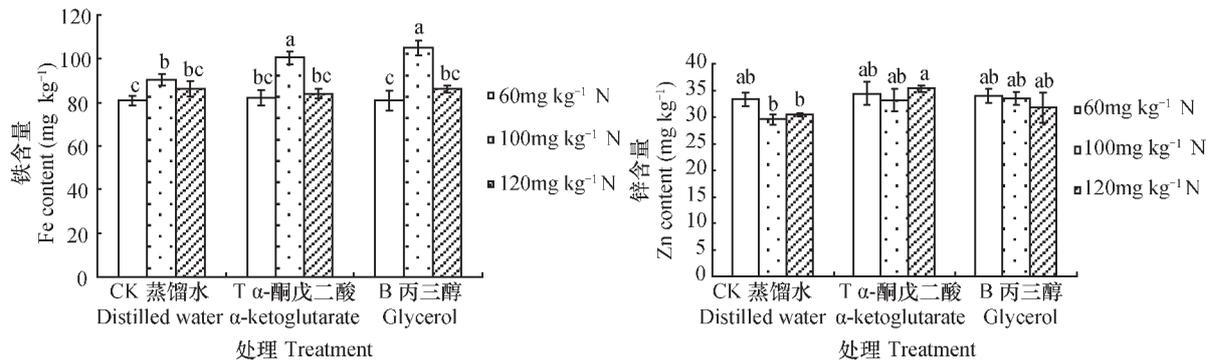


图6 喷施有机碳对菠菜中铁和锌含量的影响

Fig. 6 Effect of foliar spray of organic carbon on Fe and Zn contents in water spinach

### 3 讨论

#### 3.1 有机碳对菠菜碳氮代谢及生物量的影响

碳氮代谢是作物最基本的代谢过程，其变化动态直接影响着光合产物的形成、转化以及矿质营养的吸收和蛋白质的合成<sup>[10-11]</sup>，对作物的生长发育及产量和品质的形成有很大的影响<sup>[12]</sup>。氮代谢需要依赖碳代谢提供碳源和能量，而碳代谢则需要氮代谢提供酶和光合色素，二者需要共同的还原力、ATP和碳骨架<sup>[13-14]</sup>，其协调对作物生长发育和产量形成非常重要<sup>[15-17]</sup>。现有研究表明，光照<sup>[18-19]</sup>、施肥<sup>[11, 20-21]</sup>和外源一氧化氮(NO)、氨基酸和糖等<sup>[22-24]</sup>均对调控作物的碳氮代谢有显著影响。 $\alpha$ -酮戊二酸是氨基酸合成的前体，是植物同化 $\text{NO}_3^-$ 和 $\text{NH}_4^+$ 所必需的有机酸<sup>[25]</sup>，是碳氮代谢的枢纽<sup>[26]</sup>。已有文献报道，喷施 $\alpha$ -酮戊二酸能提高氮肥偏生产力<sup>[27]</sup>。

本研究结果表明喷施有机碳对菠菜碳氮代谢有调节作用，菠菜碳氮代谢对产量构成至关重要。在此基础上，本研究进一步以WC/TC和WN/TN作为碳氮代谢的量化指标，揭示其值低、高与产量高低成反比的规律。从生物化学的角度看，植物生长快，即合成反应强，水溶性小分子合成大分子以构

(图6)。在低氮 ( $60 \text{ mg kg}^{-1}$ ) 及中氮条件 ( $100 \text{ mg kg}^{-1}$ ) 下，喷施有机碳的处理对锌无显著影响；高氮 ( $120 \text{ mg kg}^{-1}$ ) 条件下，T处理的锌含量较CK有显著提高，增幅高达16.18%，B处理的锌也有一定程度的升高，但与CK无显著性差异(图6)。上述结果表明，在适宜的氮水平，喷施有机碳可提高菠菜中的微量元素铁和锌的含量，进而提高菠菜品质。

成自身组织(如纤维素、蛋白质、淀粉等)的过程加强，反应物(水溶性小分子)更多地转化为植物的组织(全碳量增加)，进而WC/TC下降，同样地WN/TN下降。因此，这一生理参数可用于表征施肥对植物生长的促进作用。该值低，则反映植物的合成代谢强，植物生长快，因而增产；反之亦然。今后深入研究外源有机碳对植物碳氮代谢的作用机理，阐明其作用的生理机制，将对优选外源有机碳种类和浓度等具有重要的理论指导意义。

随氮浓度升高，有机碳的增产幅度也增大(表1)。这表明随施氮量升高，碳营养也需要相应地提高以调整碳、氮两者的比例平衡，这样才有利于高产。通常条件下，植物依靠大气 $\text{CO}_2$ 补碳营养，但远低于需求，仅能满足约1/5<sup>[4-5]</sup>，这一原来就存在的碳短板，在氮量增高时，亏缺更为明显。此时补充有机碳，能更好地消除碳短板而促进生长。施氮量增加时，相应地增施有机碳，其促长增产效果更明显。这表明了碳氮平衡在养分平衡中的重要地位，值得进一步研究。

#### 3.2 有机碳对作物吸收碳、氮、磷和钾养分的影响

本试验显示，施用有机碳对碳、氮、磷和钾均有影响，碳和氮均增加，而磷和钾则下降(表2)。

各元素中碳的增长极其明显。喷施有机碳处

理的叶片碳含量增加量为2%~3%，但其生物量增加达4%~20%，因此其干物质中碳的增长大大超出所喷入的少量碳，增加的碳量高达喷施碳量的3 000多倍。少量施用有机碳可大量增碳的“杠杆”作用，值得深入研究。本研究认为，这一大量增长的碳来源主要是空气中的CO<sub>2</sub>，喷碳处理的有机碳调整了碳-氮平衡，加速了光合作用，因而促进了CO<sub>2</sub>的同化而使碳大增。

有机碳处理的增氮作用也十分明显，喷碳增氮的增幅超过施氮增氮的增幅。究其原因，是碳对氮平衡有重要作用。增施的氮若无相应的碳架以合成各类有机物（如氨基酸和酶等），则所吸收的离子态氮（如NH<sub>4</sub><sup>+</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>）等会逐渐积滞，影响吸收和转化。有机碳的补充则可加速氮的合成，减少无机态氮在植株体内的积滞浓度，作物对土壤氮的吸收、同化将加快，因而促进了生长。

与增加养分吸收相反的是，喷施有机碳，蔬菜的磷钾含量显示了降低的趋势。不同的氮水平下，磷钾下降程度不同，但其生物量与CK相比是增加的。其中磷含量略低于CK，但无显著性差异；钾的降幅大于磷，各有机碳的处理降幅与CK相比均有显著性差异。这一现象，可能与养分奢侈吸收有关。碳-氮不平衡时，往往会发生养分奢侈吸收而导致磷钾含量较高，但喷碳后改善了碳-氮平衡，有助于消除奢侈吸收而使磷钾含量下降。由此引发一个值得思考的问题：施用有机碳是否可以减少对钾的奢侈吸收而不降低其产量及品质？很值得今后试验作进一步验证。

### 3.3 有机碳对蔬菜营养品质的影响

铁和锌不仅是人体必需且最易缺乏的微量元素，而且对作物产量和品质有重要影响<sup>[28-29]</sup>。Samuel等<sup>[30]</sup>在*Nature*上发文提出，大气CO<sub>2</sub>浓度的升高，会导致小麦、水稻、大豆等C<sub>3</sub>作物铁、锌和粗蛋白含量显著降低。

本研究对喷施外源有机碳的蔬菜中铁、锌及亚硝酸盐进行分析，发现在高、中、低氮水平下，喷施有机碳均能不同程度的提高铁、锌的含量（图6），这与其调节碳-氮平衡改善了体内代谢有关。作物对微量元素养分吸收是主动吸收过程，它受到体内代谢的影响，有机碳处理的代谢状况得到改善，使其对铁、锌的主动吸收更为顺畅，因而含量增加。Samuel等<sup>[30]</sup>报道高浓度CO<sub>2</sub>使铁、锌下降，而本研究所施用是有机碳，显示了增加铁、

锌的效果，这也说明了有机碳的优越性。与此同时在不同氮水平下，亚硝酸盐的含量也有不同程度降低，表明施加有机碳提高了蔬菜的食用安全性。

营养品质提升的效果与氮素施用水平和有机碳种类有关。例如，中氮（100 mg kg<sup>-1</sup>）条件下，喷施丙三醇的处理铁含量显著增加，增幅达16.20%，亚硝酸盐含量显著降低，降幅为17.37%；高氮（120 mg kg<sup>-1</sup>）条件下，喷施α-酮戊二酸的处理锌含量显著增加，增幅高达16.18%，亚硝酸盐降幅为22.73%。这一研究结果表明，外源有机碳不会降低作物的营养品质，同时该研究结果暗示外源有机碳促进作物生长的机制与提高大气CO<sub>2</sub>的增产机制不同。今后深入研究二者的作用机制差别，不仅将为外源有机碳在农业高产中发挥更大的作用，而且可为提高作物或蔬菜的营养品质提供新的思路。

## 4 结 论

通过有机碳试验，本研究得出结论如下：有机碳可明显提高蔬菜的生物量，其增产效果与碳氮配合有关。在不同氮水平下喷施有机碳对蔬菜的生长有不同程度的促进作用。适宜氮水平下，有机碳能提高蔬菜的生物量。WC/TC、WN/TN分别从碳和氮两方面反映了合成代谢的状况，与生物量的相关性是一致的，其值的低和高与蔬菜生物量的高和低密切相关。有机碳可增加蔬菜的铁和锌含量，降低亚硝酸盐含量，提升了营养品质，显示了有机碳的优越性。有机碳在增产情况下可降低蔬菜的磷和钾含量，有可能减少奢侈吸收，值得进一步研究。

## 参 考 文 献

- [1] 崔新卫, 肖苏林, 彭福元, 等. 不同基质栽培对蔬菜品质的影响. 安徽农学通报, 2009, 15(17): 97-98
- Cui X W, Xiao S L, Peng F Y, et al. Effects of the different culture matrixes on qualities in water spinach (In Chinese). Auhui Agricultural Science Bulletin, 2009, 15(17): 97-98
- [2] 廖宗文, 毛小云, 刘可星. 有机碳肥对养分平衡的作用初探——试析植物营养中的碳短板. 土壤学报, 2014, 51(3): 656-659
- Liao Z W, Mao X Y, Liu K X. Effect of organic carbon fertilizer on nutrient balance—Analysis of carbon, a shortboard, in plant

- nutrition (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51 (3): 656—659
- [ 3 ] 郑唯婕, 包维楷, 辜彬, 等. 陆生高等植物碳含量及其特点. *生态学杂志*, 2007, 26 (3): 307—313  
Zheng W J, Bao W K, Gu B, et al. Carbon concentration and its characteristics in terrestrial higher plants (In Chinese). *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26 (3): 307—313
- [ 4 ] 陈平平. 大气二氧化碳浓度升高对植物的影响. *生物学杂志*, 2002, 37 (3): 20—22  
Chen P P. Effect of elevated atmospheric concentration of CO<sub>2</sub> on plants (In Chinese). *Botanical Journal*, 2002, 37 (3): 20—22
- [ 5 ] 杨连新, 李世峰, 王余龙, 等. 开放式空气二氧化碳浓度增高对小麦产量形成的影响. *应用生态学报*, 2007, 18 (1): 75—80  
Yang L X, Li S F, Wang Y L, et al. Effects of free-air CO<sub>2</sub> enrichment (FACE) on yield formation of wheat (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18 (1): 75—80
- [ 6 ] 李建伟, 于立河, 郭伟, 等. 外源糖和氮对春小麦花后物质生产的影响. *麦类作物学报*, 2015, 35 (8): 1127—1133  
Li J W, Yu L H, Guo W, et al. Effect of exogenous application of sugar and nitrogen on post-anthesis matter assimilation in spring wheat (In Chinese). *Journal of Triticeae Crops*, 2015, 35 (8): 1127—1133
- [ 7 ] 桂丕, 廖宗文, 汪立梅, 等. 弱光照条件下有机碳营养对水稻生长的影响. *土壤通报*, 2015, 46 (4): 936—939  
Gui P, Liao Z W, Wang L M, et al. Effects of organic carbon nutrition on rice growth under weak light conditions (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 2015, 46 (4): 936—939
- [ 8 ] 鲁如坤. *土壤农业化学分析方法*. 北京: 中国农业科技出版社, 2000  
Lu R K. *Analytical methods for soil and agro-chemistry* (In Chinese). Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000
- [ 9 ] 杨廷梅. 易利用碳的添加对厨余堆肥水溶性碳氮的影响. *安徽农业科学*, 2012, 40 (9): 5409—5412  
Yang T M. Effects of available carbon on water soluble carbon and water soluble nitrogen during composting of food wastes (In Chinese). *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2012, 40 (9): 5409—5412
- [ 10 ] 史宏志, 韩锦峰. 烤烟碳氮代谢几个问题的探讨. *烟草科技*, 1998 (2): 34—36  
Shi H Z, Han J F. Discussion on several issues of flue-cured carbon and nitrogen metabolism (In Chinese). *Tobacco Technology*, 1998 (2): 34—36
- [ 11 ] 李志, 史宏志, 刘国顺, 等. 施氮量对皖南砂壤土烤烟碳氮代谢动态变化的影响. *土壤*, 2010, 42 (1): 8—13  
Li Z, Shi H Z, Liu G S, et al. Changes of carbon-nitrogen metabolism of flue-cured tobacco with sweet aroma in south Anhui under different fertilization rates (In Chinese). *Soils*, 2010, 42 (1): 8—13
- [ 12 ] 何欣, 张攀伟, 丁传雨, 等. 弱光照下硝铵比对小白菜氮吸收和碳氮分配的影响. *土壤学报*, 2009, 46 (3): 452—458  
He X, Zhang P W, Ding C Y, et al. Effects of nitrate/ammonium ratio on ntrate absorption and distribution of carbon and nitrogen in pakchoi growing under low light intensity (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46 (3): 452—458
- [ 13 ] 申丽霞, 王璞. 玉米穗位叶碳氮代谢的关键指标测定. *中国农学通报*, 2009, 25 (24): 155—157  
Shen L X, Wang P. Determination of C-N metabolism indices in ear-leaf of maize (*Zea mays* L.) (In Chinese). *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, 25 (24): 155—157
- [ 14 ] 王强, 钟旭华, 黄农荣, 等. 光、氮及其互作对作物碳氮代谢的影响研究进展. *广东农业科学*, 2006 (2): 37—40  
Wang Q, Zhong X H, Huang N R, et al. Interactions of nitrogen with light in the photosynthetic traits and metabolism of carbon and nitrogen of crop (In Chinese). *Guangdong Agricultural Sciences*, 2006 (2): 37—40
- [ 15 ] Uhart S A, Andrade F H. Nitrogen deficiency in maize: II. Carbon-nitrogen interaction effects on kernel number and grain yield. *Crop Science*, 1995, 35: 1384—1389
- [ 16 ] Zhao H J, Li P W, Li G M, et al. Studies on the carbon/nitrogen metabolism of rape. *Scientia Agricultura Sinica*, 1994, 27 (6): 1—7
- [ 17 ] Pan W L, Camberato J J, Jackson W A, et al. Utilization of previously accumulated and concurrently absorbed nitrogen during reproductive growth in maize: Influence of prolificacy and nitrogen source. *Plant Physiology*, 1986, 82: 247—253
- [ 18 ] 周卫霞, 董朋飞, 王秀萍, 等. 弱光胁迫对不同基因型玉米籽粒发育和碳氮代谢的影响. *作物学报*, 2013, 39 (10): 1826—1834  
Zhou W X, Dong P F, Wang X P, et al. Effects of lo-light stress on kernel setting and metabolism of carbon and nitrogen in different maize (*Zea mays* L.) genotypes (In Chinese). *Acta Agronomica Sinica*, 2013, 39 (10): 1826—1834

- [19] 云菲, 刘国顺, 史宏志. 光氮互作对烟草气体交换和部分碳氮代谢酶活性及品质的影响. 作物学报, 2010, 36 (3): 508—516  
Yun F, Liu G S, Shi H Z. Interaction effects of light intensity and nitrogen supply on gas exchange, some enzyme activities in carbon-nitrogen metabolism and quality in flue-cured tobacco (In Chinese). *Acta Agronomica Sinica*, 2010, 36 (3): 508—516
- [20] 贺军军, 胡吟胜, 林钊沫, 等. 不同施磷水平对橡胶幼苗营养根碳氮代谢的影响. 土壤通报, 2009, 40 (5): 1123—1126  
He J J, Hu Y S, Lin Z M, et al. Carbon and nitrogen metabolism of rubber seedling roots at different phosphorous fertilizer levels (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 2009, 40 (5): 1123—1126
- [21] 蔡妙珍, 刘鹏, 徐根娣, 等. 钼、锰营养对大豆碳氮代谢的影响. 土壤学报, 2008, 45 (1): 180—183  
Cai M Z, Liu P, Xu G D, et al. Effect of molybdenum and manganese application on metabolism of carbon and nitrogen in soybean (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45 (1): 180—183
- [22] 郑春芳, 姜东, 戴廷波, 等. 外源一氧化氮供体硝普钠浸种对盐胁迫下小麦幼苗碳氮代谢及抗氧化系统的影响. 生态学报, 2010, 30 (5): 1174—1183  
Zheng C F, Jiang D, Dai T B, et al. Effects nitroprusside, a nitric oxide donor, on carbon and nitrogen metabolism and the activity of the autoxidation system in wheat seedlings under salt stress (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30 (5): 1174—1183
- [23] 曹小闯, 吴良欢, 马庆旭, 等. 高等植物对氨基酸态氮的吸收与利用研究进展. 应用生态学报, 2015, 26 (3): 919—929  
Cao X C, Wu L H, Ma Q X, et al. Advances in studies of absorption and utilization of amino acids by plants: A review (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26 (3): 919—929
- [24] 冯艳, 王富国, 张相松, 等. 外源糖调节不同C/N比对苋菜幼苗碳/氮代谢的影响. 青岛农业大学学报(自然科学版), 2008, 25 (4): 272—275  
Feng Y, Wang F G, Zhang X S, et al. Effects of different C/N ratio on nitrogen and carbon metabolism of amaranth seedlings (In Chinese). *Journal of Qingdao Agricultural University (Natural Science)*, 2008, 25 (4): 272—275
- [25] Britto D T, Kronzucker H J.  $\text{NH}_4^+$  toxicity in higher plants: A critical review. *Journal of Plant Physiology*, 2002, 159: 567—584
- [26] Hodges M. Enzyme redundancy and the importance of 2-oxoglutarate in plant ammonium assimilation. *Journal of Experimental Botany*, 2002, 53 (370): 905—916
- [27] 孙倩, 梁威威, 贾琳, 等.  $\alpha$ -酮戊二酸对低水氮下冬小麦产量相关性状的影响. 安徽农业科学, 2014, 42 (3): 671—674  
Sun Q, Liang W W, Jia L, et al. Effects of exogenous  $\alpha$ -oxoglutarate on yield traits of wheat under low water potential and low nitrogen stress (In Chinese). *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2014, 42 (3): 671—674
- [28] 袁玲. 水稻籽粒铁锌生物强化农艺调控因子及机理研究. 杭州: 浙江大学, 2008  
Yang L. Study on agronomic regulation factors and their mechanisms of rice iron and zinc biofortification (In Chinese). Hangzhou: Zhejiang University, 2008
- [29] 吴慧贞, 刘德辉, 王培燕, 等. 铜锌不同施用方式对栽培丹参生长和丹参酮类物质积累的影响. 土壤, 2011, 43 (5): 781—786  
Wu H Z, Liu D H, Wang P Y, et al. Effects of different applying methods of Cu and Zn on growth and tanshinone of *Salvia miltiorrhiza bunge* (In Chinese). *Soils*, 2011, 43 (5): 781—786
- [30] Samuel S M, Antonella Z, Itai K, et al. Increasing  $\text{CO}_2$  threatens human nutrition. *Nature*, 2014, 510 (7503): 139—142

## Effect of Organic Carbon on Carbon and Nitrogen Metabolism and the Growth of Water Spinach as Affected by Soil Nitrogen Levels

GUI Pi<sup>1, 2</sup> CHEN Xian<sup>1</sup> LIAO Zongwen<sup>1</sup> WANG Limei<sup>1</sup> ZHong Xiujuan<sup>1</sup> MAO Xiaoyun<sup>1†</sup>

(*1 New Fertilizer Resources Research Centre, College of Natural Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China*)

(*2 Shenzhen Techand Ecology & Environment Co., Ltd, Shenzhen, Guangdong 518040, China*)

**Abstract** Carbon is the number one of the 17 essential nutrient elements, but over the past 100 years, little has been reported about carbon fertilizer products produced by the chemical fertilizer industry. It is usually believed that the carbon nutrient plants absorb comes from the air in the form of carbon dioxide, which as a matter of fact meets only 1/5 of the demand of a plant. Therefore, plants are always in the state of “hunger for carbon”. Organic carbon used as fertilizer can eliminate plants’ hunger for carbon that is caused by depending mainly on carbon dioxide in the air as carbon source. Water Spinach was cultivated in solutions different in nitrogen level in a batch system in this research. Effects of two kinds of nitrogen-free organic C ( $\alpha$ -ketoglutarate and Glycerol) on fresh weight, dry weight, number of branches, carbon and nitrogen metabolism (expressed as water soluble N/total N or water soluble C/total C) and nutrition quality indices (Zinc, Iron and Nitrites) of the water spinaches were analyzed.

Results show that foliar spray of organic carbon promoted growth of the Water Spinach regardless of nitrogen level in the solution. However, the effect varied with nitrogen level and source of organic carbon. The effect of foliar spray of Glycerol was the best on the water spinaches growing in the solution moderate in nitrogen level ( $100 \text{ mg kg}^{-1}$ ), raising the fresh weight, dry weight, total carbon and total nitrogen of the plants 12.88%, 15.48%, 7.05% and 8.33% higher than that in CK, respectively. Besides it also increased Fe content in the plant by 16.20% while decreasing Nitrite significantly, which indicates that nutrition quality of the plants was greatly improved. K content in the plant was found decreased significantly, which implies that the spray may help reduce luxury absorption of K in the soil. The effects of foliar spray of  $\alpha$ -ketoglutarate was the best on the water spinach growing in the solution high in nitrogen level ( $120 \text{ mg kg}^{-1}$ ), increasing the fresh weight, dry weight, total carbon and total nitrogen by 17.97%, 20.91%; 7.97% and 9.56% and the content of Zn, a nutritional quality indicator, by 16.18%, too, while decreasing Nitrite content significantly, which indicates that the plants were greatly improved in nutrition quality. K content was also found decreased in the plants, implying that the spray may help reduce luxury K absorption from the soil.

In the experiment, the spray of organic carbon fertilizer, either Glycerol or  $\alpha$ -ketoglutarate, lowered WC/TC and WM/TN in leaves of the water spinach, regardless of N content in the solution, which indicates that extraneous organic carbon can promote synthesis and metabolism of carbon and nitrogen in the plants, thus stimulating growth and improving nutritional quality of the Water Spinach.

The findings in this study demonstrate that it is organic C, rather than organic N, that raises crop yield and improves quality of the crop. Meanwhile crop yield is found to be related by a certain degree to SN/TN and SC/TC in the plant, which show that these parameters can be used as important physiological indicators for high-yield-oriented fertilization. Currently high yield of a crop is restricted by the crop’s dependence mainly on the air for carbon supply, or hunger for carbon. It is, therefore, quite obvious that how to solve the problem of “Hunger for carbon” is the key to high yield agriculture. This study

has found that organic carbon fertilizers may help satisfy crops' hunger for carbon. So it is feasible to use organic C to balance fertilization, rather than just using NPK in balanced fertilization. Further research in this aspect is of important significance to balanced fertilization and has some profound academic meaning for further developing theories of modern plant nutrition.

**Key words** Nitrogen levels; Organic carbon; Water spinach; Carbon and nitrogen metabolism; Nutrition quality

(责任编辑: 陈荣府)