

氮素形态对比对桔梗硝酸盐和亚硝酸盐 动态积累及营养品质的影响

段云晶, 王康才*, 李 柯, 牛灵慧

(南京农业大学 园艺学院, 南京 210095)

摘 要:以桔梗(*Platycodon grandiflorum*)为试验材料,通过盆栽试验研究了等氮条件下6种氮素形态及铵硝氮配比($\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{NO}_3^--\text{N}=100:0, 75:25, 50:50, 25:75, 0:100, \text{CO}(\text{NH}_2)_2$)对桔梗根中硝酸盐、亚硝酸盐动态积累以及营养、药用品质的影响。结果显示:(1)桔梗根中硝酸盐及亚硝酸盐积累量以铵硝比为25:75处理下最低;硝酸盐积累量随栽培时间的增长呈上升趋势,尤其在10月采收时显著增加,亚硝酸盐变化趋势则与之相反。(2)桔梗根中Vc含量在全硝态氮处理下最高,可溶性多糖含量在铵硝比为50:50处理下最高,而可溶性蛋白及总游离氨基酸含量均在铵硝比为75:25处理下达到最大值。(3)桔梗根中N、Cu、Mn、Zn积累量在酰胺态氮处理下最高,其Fe、Mg、Cu积累量在铵硝比为75:25处理下最大。(4)桔梗根中总黄酮含量随营养液中硝态氮比例增加而呈下降趋势,并在酰胺态氮处理下达到最大;桔梗多糖及桔梗总皂苷含量均在铵硝比为25:75处理下有最大值。研究发现,在铵硝比为25:75处理下,桔梗根中硝酸盐及亚硝酸盐含量最低,桔梗多糖及总皂苷积累量最高,且Vc、游离氨基酸等品质指标含量也较高,有利于桔梗品质的提升;由于10月采收时桔梗根中硝酸盐含量显著增高,桔梗采收前不宜大量追施氮肥。

关键词:桔梗;氮素形态;硝酸盐;亚硝酸盐;品质

中图分类号:Q945.79;Q753

文献标志码:A

Nitrate and Nitrite Accumulation and Nutritional Quality of *Platycodon grandiflorum* with Different Nitrogen Forms and Ratios

DUAN Yunjing, WANG Kangcai*, LI Ke, NIU Linghui

(College of Horticulture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: The pot culture experiment was conducted to study the effect of different nitrogen forms and ratios on the nitrate and nitrite accumulation and quality of *Platycodon grandiflorum*. The results showed that: (1) When $\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{NO}_3^--\text{N}$ was 25:75, the contents of nitrate and nitrite reached their minimum values. The nitrate accumulation increased constantly during the cultivation process of *P. grandiflorum*. In contrast, while the nitrite accumulation decreased during the cultivation process of *P. grandiflorum*. (2) The content of Vc was the highest at the $\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{NO}_3^--\text{N}$ ratio of 0:100. And the contents of soluble protein, amino acids, Fe, Mg, Cu were the highest at the $\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{NO}_3^--\text{N}$ ratio of 75:25. (3) The contents of N, Cu, Mn and Zn had their maximum values under amide-nitrogen treatment. (4) The total flavonoids content decreased with the increasing of NO_3^--N . At the $\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{NO}_3^--\text{N}$ ratio of 25:75, the platycodin contents and polysaccharide contents of *P. grandiflorum* reached its maximum values. Studies had shown

收稿日期: 2015-12-28; 修改稿收到日期: 2016-04-05

基金项目: 工信部桔梗规范化与规模化生产基地建设(2012)

作者简介: 段云晶(1991—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事药用植物栽培生理与质量分析研究。E-mail: 2014804168@njau.edu.cn

* 通信作者: 王康才, 教授, 硕士生导师, 主要从事药用植物栽培与生理方面的研究。E-mail: wangkc@njau.edu.cn

that: proper application of different nitrogen forms decreased the nitrate and nitrite contents and increased the quality of *P. grandiflorum* and the best treatment was the $\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{NO}_3^--\text{N}$ ratio of 25 : 75. It was worth noting that nitrogen fertilizers should not be used before the harvest time of *P. grandiflorum*.

Key words: *Platycodon grandiflorum*; different nitrogen forms; nitrate; nitrite; quality

桔梗 (*Platycodon grandiflorum*) 为桔梗科桔梗属植物, 别名铃铛花、包袱花、道拉基等, 以根入药, 具有宣肺、利咽祛痰、排脓等功效, 是中国传统大宗中药材之一。桔梗也是一种特色蔬菜, 尤其在朝鲜、韩国, 桔梗幼嫩茎叶及根可作蔬菜, 是传统的民族特色食品, 市场需求很大, 目前中国东北地区也开始食用。另外, 桔梗根还可以做成罐头、饮料、桔梗脯等。

近年来, 在蔬菜栽培研究中, 氮肥合理使用及硝酸盐累积控制受到人们重视。在实际生产中, 化肥过量施用普遍存在, 从而导致作物体内硝酸盐累积, 肥料利用率下降, 土壤理化性质变差, 引起一系列影响生态环境和人类健康的问题^[1-2]。尤其是根类植物, 极易富集硝酸盐^[3]。科学研究发现, 人体内摄入的硝酸盐有 70%~85% 来自于食用蔬菜^[4], 硝酸盐进入人体后经功能微生物代谢为亚硝酸盐, 亚硝酸盐进入血液后, 会与血红蛋白强有力地结合, 使其失去携氧能力; 亚硝酸盐还是强致癌物亚硝胺的前体, 可诱发消化系统癌变^[5]。氮肥使用对植物中硝酸盐的积累有直接影响, 有研究表明氮素形态组合及配比影响蔬菜硝酸盐含量, 硝态氮和铵态氮并用, 既可降低硝酸盐, 又使蔬菜生长良好^[6]。不同氮素形态影响不同植物对氮的吸收利用, 进而通过碳氮代谢过程影响其产量与品质。为此, 结合目前桔梗药用及蔬菜产品的要求, 本试验研究了不同氮素形态及配比处理对桔梗栽培过程中根部硝酸盐、亚硝酸盐的动态积累、品质指标及次生代谢产物含量的影响, 以为桔梗氮肥的合理施用提供依据。

1 材料和方法

1.1 材料培养及处理

以产自山东淄博的一年生桔梗种苗为供试材料, 经南京农业大学王康才教授鉴定为桔梗科桔梗 (*Platycodon grandiflorum*)。于 2014 年 3 月选择形态大小一致、无病虫害的种苗在南京农业大学内进行盆栽试验。盆高 29 cm, 直径 26 cm, 每盆装基质重 986 g, 栽培基质由蛭石和珍珠岩按照 5 : 1 混合而成。每盆种 10 株, 栽种时将种苗根部上端稍露出基质表面约 1 cm 左右, 栽种后置于校内日光温室。植物生长所需大量元素采用霍格兰营养液供

给, 微量元素以阿农营养液供给, 基本营养液 pH 6.0。所用试剂均为分析纯 (AR)。生长期管理措施一致。

出苗后每隔 10 d 浇 1 次基本营养液, 每次 500 mL。试验在总氮量一致 (N 浓度为 $15 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$) 的条件下, 设 6 组氮素形态及铵硝比处理, 即 $\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{NO}_3^--\text{N}=100 : 0, 75 : 25, 50 : 50, 25 : 75, 0 : 100$ 及 $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$, 其中的 NH_4^+-N 由 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 提供, NO_3^--N 由 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 提供, 各处理重复 6 次, 处理每 10 d 1 次。营养液中均加入 $7 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 二氰胺 (DCD) 以抑制硝化反应。

1.2 测定项目及方法

分别于 6、7、9、10 月中旬采集桔梗根部鲜样测定硝酸盐及亚硝酸盐含量, 10 月中旬桔梗收获, 取一部分鲜样测定生理指标, 剩余样品则烘干打粉进行营养元素含量测定。硝酸盐含量采用水杨酸-硫酸法测定; 可溶性多糖含量采用蒽酮比色法测定; 可溶性蛋白采用考马斯亮蓝 G-250 染色法测定; 游离氨基酸总量采用茚三酮显色法测定; Vc 含量采用 2,6-二氯酚靛酚滴定法测定^[7]; 亚硝酸盐含量采用国家标准 GB5009.33-2010 中的测定方法^[8]; N、Ca、Fe、Mg、Cu、Mn、Zn 含量用 $\text{H}_2\text{SO}_4-\text{H}_2\text{O}_2$ 联合消煮法与电感耦合等离子体质谱法 (ICP-MS) 测定; 总黄酮含量测定采用铝盐比色法^[9]; 总皂苷含量采用香草醛-硫酸比色法测定^[10]; 桔梗多糖含量采用苯酚-硫酸法^[11]测定。

1.3 数据处理

试验数据采用 Excel 2003 和 SPSS 13.0 软件进行统计分析, LSD 法检验差异显著性。

2 结果与分析

2.1 氮素形态及对比对桔梗根中硝酸盐和亚硝酸盐积累的影响

2.1.1 硝酸盐积累 在桔梗的整个生长过程中, 各处理桔梗根中硝酸盐含量变化趋势如表 1 所示。桔梗根中硝酸盐含量在单一氮素形态处理下表现为全硝处理 ($0 : 100$) > 酰胺态氮处理 [$\text{CO}(\text{NH}_2)_2$] > 全铵处理 ($100 : 0$); 在不同氮素形态对比处理下, 桔梗根中硝酸盐含量随硝态氮比例增加而呈先上升后下

降再上升的趋势,并均在铵硝比($\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{NO}_3^--\text{N}$) 50 : 50、全硝处理下达到最大值,而在铵硝比 25 : 75 处理下有显著下降趋势。例如,10 月收获时铵硝比 25 : 75 处理桔梗根中硝酸盐含量最低,分别较铵硝比 50 : 50、全硝处理显著降低了 46.55%、43.76%。同时,随栽培时间的延长,各处理桔梗根中硝酸盐含量基本呈增长趋势,尤其在采收期显著升高。其中,在 7~9 月,铵硝比为 75 : 25、50 : 50、25 : 75 及全硝处理下桔梗根中硝酸盐积累速度减缓,甚至有下降趋势,而全铵及酰胺态氮处理在整个桔梗生长过程中硝酸盐含量增长幅度均较大。以上结果说明硝态氮有

利于硝酸盐的转化,这可能与 NO_3^- 存在能诱导 NR 活性升高、促进 NO_3^- 的还原有关。

2.1.2 亚硝酸盐积累 氮素形态对桔梗根中亚硝酸盐的积累影响较显著(表 2)。其中,各处理根中亚硝酸盐含量在 6、7 月份时变化趋势一致,并以铵硝比 50 : 50 处理下最高,其次为全硝、全铵处理,而铵硝比 25 : 75 处理最低;在 9、10 月份时,酰胺态氮处理根中亚硝酸盐含量最高,其次为铵硝比 75 : 25 处理和全铵处理,而铵硝比 25 : 75 处理的亚硝酸盐含量最低,其较酰胺态氮、全铵、全硝处理分别降低了 57.67%、52.41%、34.29%。同时,与硝酸盐积

表 1 氮素形态及配比对桔梗根中硝酸盐积累的影响

Table 1 Effect of different nitrogen forms and the ratios on the nitrate accumulation in *P. grandiflorum* roots($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

$\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{NO}_3^--\text{N}$	6 月 June	7 月 July	9 月 September	10 月 October
100 : 0	2.74±0.53cd	4.12±0.35c	8.83±2.29ab	16.49±5.17c
75 : 25	3.07±0.29d	8.47±0.67a	6.57±0.57b	16.10±2.26c
50 : 50	7.73±2.79a	9.61±0.57a	10.03±0.58a	25.54±1.90a
25 : 75	5.29±1.32bc	9.19±0.15a	7.21±1.00b	13.65±2.93c
0 : 100	5.95±0.53ab	9.74±0.02a	8.44±0.42ab	24.27±1.46a
$\text{CO}(\text{NH}_2)_2$	4.60±0.46bcd	5.72±1.20b	8.21±0.04ab	18.67±0.57bc

注:同列数据后不同字母表示处理间在 0.05 水平存在显著性差异;下同。
Note: The different letters after data in the same column mean significant difference among treatments at 0.05 level;The same as follows.

表 2 氮素形态及其配比对桔梗根中亚硝酸盐积累的影响

Table 2 Effect of different nitrogen forms and the ratios on the nitrite accumulation in *P. grandiflorum* roots($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

$\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{NO}_3^--\text{N}$	6 月 June	7 月 July	9 月 September	10 月 October
100 : 0	2.60±0.08c	3.11±0.70ab	1.36±0.07b	1.45±0.45ab
75 : 25	2.42±0.04c	1.94±0.13bc	1.42±0.04b	1.54±0.27a
50 : 50	4.46±0.02a	3.32±0.27a	1.17±0.22b	1.30±0.23ab
25 : 75	1.91±0.66c	1.69±0.02c	1.36±0.01b	0.69±0.11c
0 : 100	3.58±0.16b	3.30±0.58a	1.19±0.23b	1.05±0.12bc
$\text{CO}(\text{NH}_2)_2$	1.94±0.14c	2.26±0.68abc	2.42±0.86a	1.63±0.14a

表 3 氮素形态及其配比对桔梗根中可溶性多糖、可溶性蛋白、游离氨基酸及 Vc 含量的影响

Table 3 Effect of different nitrogen forms and the ratios on the contents of soluble sugar, soluble protein, amino acids and Vc in *P. grandiflorum* roots

$\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{NO}_3^--\text{N}$	可溶性多糖含量 Soluble sugar/($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	可溶性蛋白含量 Soluble protein/($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	游离氨基酸含量 Amino acids/($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	维生素 C 含量 Vc/($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)
100 : 0	18.36±0.33a	19.59±3.66ab	0.16±0.05a	7.44±2.17ab
75 : 25	11.78±0.87bc	24.57±4.40a	0.18±0.03a	7.96±1.52ab
50 : 50	19.16±0.04a	18.25±1.03bc	0.10±0.05b	7.00±2.18b
25 : 75	12.81±0.60b	13.33±3.03cd	0.15±0.01ab	7.99±1.66ab
0 : 100	10.59±0.22c	12.47±1.66d	0.14±0.02ab	10.91±3.73a
$\text{CO}(\text{NH}_2)_2$	11.58±1.01bc	12.36±0.67d	0.13±0.02ab	6.52±0.86b

累趋势相反,各处理根中亚硝酸盐积累随栽培时间的延长基本呈下降趋势。除酰胺态氮处理外,其他铵硝比处理根中亚硝酸盐含量在 9 月有显著下降趋势,但在 10 月采收期全铵以及铵硝比为 75 : 25 和 50 : 50 处理亚硝酸盐含量有回升趋势,且在整个桔梗生长过程中全铵及酰胺态氮处理桔梗根中亚硝酸盐含量均较高,说明铵态氮处理下桔梗根中亚硝酸盐的还原减缓。

2.2 氮素形态及配比对桔梗根中营养品质的影响

由表 3 可看出,铵态氮较有利于桔梗根中可溶性多糖、可溶性蛋白及游离氨基酸的积累。其中,桔梗根中可溶性多糖含量在铵硝比 50 : 50、全铵处理下显著高于其他处理,其次为铵硝比 25 : 75 处理,全硝处理最低;铵硝比 50 : 50 处理下根中可溶性多糖含量分别为全铵、全硝及酰胺态氮处理的 1.04、1.81、1.65 倍。同时,桔梗根中可溶性蛋白含量在铵硝比 75 : 25 处理下最高,其次为全铵处理,全硝及酰胺态氮处理最低;铵硝比 75 : 25 处理可溶性蛋白含量分别较全铵、全硝及酰胺态氮处理提高了 25.42%、97.03%、98.79%。再次,氮素形态对桔梗根中游离氨基酸总量影响不明显;相比较而言,铵硝

比 75 : 25、全铵处理下游离氨基酸总量最大,其次为铵硝比 25 : 75、全硝及酰胺态氮处理,铵硝比 50 : 50 处理含量最低。另外,桔梗根中 Vc 含量在全硝处理下最高;而在酰胺态氮及铵硝比 50 : 50 处理下最低,分别较最高值降低了 40.24%、35.78%;铵硝比 25 : 75、75 : 25 处理的 Vc 含量仅次于全硝处理,三者无明显差异,说明硝态氮较有利于桔梗根中 Vc 的积累。

2.3 氮素形态及配比对桔梗根中含氮量及矿质元素积累量的影响

由表 4 可见,桔梗根中氮素(N)积累量随营养液中硝态氮比例的增加而呈先上升后下降再上升趋势,并以酰胺态氮处理桔梗根部氮素积累量最高,铵硝比 75 : 25 处理次之,铵硝比 50 : 50 处理最低。桔梗根中 Ca、Fe、Mg 元素积累量表现出与氮素积累量一致的变化趋势。其中,桔梗根中 Ca 的积累量在全硝处理下最大,铵硝比 25 : 75 处理次之,这可能与硝态氮供氮物质有关;桔梗根中 Fe 含量在铵硝比 75 : 25 处理有最大值,其次为酰胺态氮、全硝处理,且三者间差异显著;桔梗根中 Mg 积累量在全硝、铵硝比 75 : 25 处理下较高,其次为酰胺态处

表 4 氮素形态及其配比对桔梗根中 N、Ca、Fe、Mg、Cu、Mn、Zn 积累量的影响

Table 4 Effect of different nitrogen forms and the ratios on the contents of N,Ca,Fe,Mg,Cu,Mn and Zn in *P. grandiflorum* roots/(mg · plant⁻¹)

NH ₄ ⁺ -N/NO ₃ ⁻ -N	N	Ca	Fe	Mg	Cu	Mn	Zn
100 : 0	73.58±0.73e	33.45±0.09f	0.93±0.01e	2.28±0.00d	0.0100±0.00d	0.0942±0.00b	0.0111±0.00c
75 : 25	88.83±0.02b	65.69±0.11c	2.40±0.02a	4.59±0.04a	0.0182±0.00a	0.0884±0.00c	0.0091±0.00d
50 : 50	59.02±0.06f	44.36±0.32e	0.57±0.00f	3.06±0.02c	0.0113±0.00c	0.0542±0.00d	0.0104±0.00cd
25 : 75	83.92±0.09d	75.78±0.37b	0.96±0.00d	4.22±0.07b	0.0169±0.00b	0.0425±0.00e	0.0135±0.00b
0 : 100	86.22±0.11c	78.21±0.18a	1.26±0.00c	4.64±0.04a	0.0109±0.00cd	0.0421±0.00e	0.0094±0.00d
CO(NH ₂) ₂	103.29±0.94a	55.75±0.53d	1.91±0.02b	4.26±0.01b	0.0182±0.00a	0.1307±0.00a	0.0182±0.00a

表 5 氮素形态及其配比对桔梗根中桔梗多糖、总皂苷及总黄酮含量的影响

Table 5 Effect of different nitrogen forms and the ratios on the contents of polysaccharide, platycodin and flavonoid in *P. grandiflorum* roots

NH ₄ ⁺ -N/NO ₃ ⁻ -N	桔梗多糖 Polysaccharide/(mg · g ⁻¹)	桔梗总皂苷 Platycodin/(mg · g ⁻¹)	桔梗总黄酮 Flavone/(mg · g ⁻¹)
100 : 0	14.37±0.40a	12.99±0.37c	1.54±0.08ab
75 : 25	10.55±1.62b	15.90±0.99b	1.46±0.06b
50 : 50	9.24±2.49b	9.93±1.96d	1.45±0.09b
25 : 75	15.03±0.76a	19.50±1.60a	1.31±0.06c
0 : 100	10.49±1.93b	16.59±1.59b	1.28±0.13c
CO(NH ₂) ₂	14.06±2.41a	10.32±0.86d	1.62±0.02a

理、铵硝比 25 : 75 处理。另外,相比较而言,桔梗根中 Cu、Mn、Zn 元素积累量较少。其中,Cu 元素积累量在铵硝比 75 : 25 及酰胺态氮处理下有最大值(0.018 2 mg/株),铵硝比 25 : 75 处理次之;桔梗根中 Mn 含量随营养液中硝态氮比例增加而呈下降趋势,酰胺态氮处理最高,全铵处理次之,全硝处理最低;而桔梗根中 Zn 含量在酰胺态氮处理下最高,其次为铵硝比 5 : 75 处理,说明酰胺态氮较有利于桔梗根中营养元素的积累。

2.4 氮素形态及配比对桔梗根中总黄酮、总皂苷及桔梗多糖含量的影响

氮素形态对桔梗根中总黄酮、总皂苷及桔梗多糖含量影响较大(表 5)。其中,桔梗根中多糖含量在铵硝比 25 : 75、全铵及酰胺态氮处理下显著高于其他 3 组处理,分别为 15.03、14.37、14.06 mg · g⁻¹,但三者无显著差异;铵硝比 50 : 50 处理下桔梗多糖含量最低,较最高值显著降低了 38.52%。桔梗根中总皂苷含量在铵硝比 25 : 75 处理下最高(19.50 mg · g⁻¹)且显著高于其他处理,全硝、铵硝比 25 : 75 处理次之,铵硝比 50 : 50、酰胺态氮处理最低,较处理最高值分别显著降低了 49.08%、47.08%。桔梗根中总黄酮含量在酰胺态氮处理下达到最大值,但与全铵处理差异不显著;不同氮素形态配比处理中总黄酮含量随着硝态氮比例的增加而降低,全硝处理下最低,说明铵态氮较有利于桔梗根中总黄酮的积累。

3 讨论与结论

3.1 氮素形态与桔梗根中硝酸盐、亚硝酸盐动态积累的关系

硝酸盐、亚硝酸盐是衡量蔬菜安全品质的重要指标。世界卫生组织(WHO)和联合国粮农组织(FAO)1973 年规定硝酸盐、亚硝酸盐的 ADI 值(日允许摄入量)分别为 3.6 mg · kg⁻¹ · d⁻¹、0.13 mg · kg⁻¹ · d⁻¹。按中国人的平均体重 60 kg 计,则硝酸盐、亚硝酸盐日允许量分别为 216 和 7.8 mg,若以人均日食菜量 0.5 kg 鲜重计,则蔬菜的硝酸盐、亚硝酸盐允许量分别为 432 和 15.6 mg · kg⁻¹,其中蔬菜经过盐渍、煮熟后硝酸盐含量分别减少 45%、70%,依次折算,则硝酸盐限量可分别扩大为 785 和 1 440 mg · kg⁻¹,而人体中毒的硝酸盐浓度限量为 3 099 mg · kg⁻¹[12]。根据 WHO 规定,中国制定的蔬菜硝酸盐限量标准为:一级标准 432 mg · kg⁻¹(生食允许)、二级标准 785 mg · kg⁻¹

(生食不宜)、三级标准 1234 mg · kg⁻¹(生食、盐渍不宜)、四级标准 3 100 mg · kg⁻¹(生食、盐渍、熟食均不宜)[13]。中国对食品中亚硝酸盐限量卫生标准(GB18406.1-2001)规定,新鲜蔬菜中亚硝酸盐(以 NaNO₂ 计)含量应 ≤ 4 mg · kg⁻¹。本试验中桔梗根中硝酸盐、亚硝酸盐含量最高分别达 25.52 和 1.63 mg · kg⁻¹鲜重,远低于国家规定的限量标准。但由于营养液供氮量与田间大规模栽培施肥量存在较大差距,考虑到亚硝酸盐对人体危害较大,因此田间栽培时还需科学施肥,尽量降低桔梗根中亚硝酸盐含量。

已有不少研究表明,氮素形态对硝酸盐的积累具有显著影响。艾绍英等[14]利用 15N 示踪技术研究硝铵营养对蔬菜体内硝酸盐积累的影响发现,增加铵态氮的比例有利于降低蔬菜中硝酸盐的积累。汪建飞等[15]试验结果表明,菠菜茎叶中硝酸盐、亚硝酸盐含量随营养液铵硝比的降低而呈线性升高趋势。本试验研究表明不同氮素形态处理下桔梗根中硝酸盐、亚硝酸盐含量变化趋势一致,均随营养液中硝态氮比例增加而呈先上升后下降再上升的趋势,并以铵硝比 25 : 75 处理最小,且全铵、酰胺态氮处理下硝酸盐及亚硝酸盐含量均较高,说明以硝态氮为基础配施铵态氮有利于降低桔梗根中硝酸盐及亚硝酸盐含量,可能是较高含量的 NO₃⁻ 诱导 NR、GS 活性增强,促进桔梗根中氮素代谢的进行,加速了 NO₃⁻ 的还原;NH₄⁺ 的存在降低了营养液中 NO₃⁻ 的含量,且 NH₄⁺ 在根部吸收后直接参与含氮有机物的合成,不会转化为硝酸盐。全铵、酰胺态氮处理下硝酸盐及亚硝酸盐含量均较高,其原因可能是铵态氮处理下不利于诱导桔梗根中 NR 活性升高,过量 NH₄⁺ 的存在使 NO₃⁻ 的两步还原过程减缓,且 NO₃⁻ 的转化主要在根中进行。因此,铵态氮处理下 NO₃⁻ 在根部被吸收后,由于还原力不足,还原速率较小,使硝酸盐及亚硝酸盐在桔梗根中累积量增加。

另据报道,在蔬菜生育早期和中期施用氮肥对蔬菜硝酸盐积累影响较小,若采收期间施用氮肥可造成蔬菜硝酸盐大量积累[16]。本研究中也发现,随着栽培时间的延长,桔梗根中硝酸盐的积累呈增长趋势,尤其在 10 月采收期各处理硝酸盐含量均显著增加。因此,桔梗追肥适宜于 9 月初进行,之后施肥易引起桔梗根部硝酸盐的大量积累。由于植物体内亚硝酸还原酶的活性远高于硝酸还原酶的活性,当植物根系吸收的硝酸盐被硝酸还原酶还原成亚硝酸盐后,就会继续被活力较高的亚硝酸还原酶还原成

NH_4^+ 。因此,植物体一般不会积累过多的亚硝酸盐^[17]。本研究中桔梗根中亚硝酸盐的积累随栽培时间的增长而呈下降趋势可能与此有关,其具体作用机理还有待进一步研究。

3.2 氮素形态与桔梗营养品质及次生代谢的关系

蔬菜营养品质包括维生素、纤维素、氨基酸、糖分、蛋白质及矿质元素等因子。不同氮素形态处理下桔梗根中可溶性多糖、可溶性蛋白及游离氨基酸含量差异是氮素形态影响桔梗碳氮代谢的具体表现。本试验研究结果表明,桔梗根中可溶性多糖、可溶性蛋白及游离氨基酸含量均随营养液中硝态氮比例的增加而呈先上升后下降趋势,三者含量均在全铵处理下三者含量均较高,说明铵态氮有利于桔梗根中可溶性多糖、可溶性蛋白及游离氨基酸的积累,这与汪建飞等^[15]、王华静等^[18]在菠菜和小白菜上的研究结果一致。其原因可能是硝态氮被吸收后需进行还原消耗能量,而铵态氮被吸收后在根部直接进行氮素同化,合成含氮有机物,从而提高可溶性蛋白及游离氨基酸含量;另一方面根部的氨基酸可经转氨作用形成有机酸,从而为多种碳氮代谢提供碳架,提高可溶性多糖含量^[18]。Vc 作为人体必需营养物质,但人体内不能合成,需要从蔬菜和水果中摄取,且 Vc 可以阻断 N^- 亚硝基化合物的合成,具有抗癌作用。本试验研究发现,桔梗根中 Vc 含量在全硝处理下最高,铵硝比 25 : 75 处理次之,酰胺态氮处理最低,说明硝态氮较有利于 Vc 的积累,而铵态氮及酰胺态氮对 Vc 含量影响不明显,这与田霄鸿等^[19]在茼蒿上的研究结果一致。

同时,矿质元素与人体健康有直接关系,是蔬菜的一项重要品质指标。而植物体内的矿质元素主要来源于根部从外界吸收, NO_3^- 被吸收后根际 pH 值升高,易导致其他微量元素供应不足,且钙、镁、铁、铜、锰、锌等与植物碳氮代谢密切相关,对其他品质指标也有重要影响。本试验研究发现,桔梗根部氮

素积累量在酰胺态氮处理下最大,在全硝及铵硝比 25 : 75 处理积累量也较高,说明酰胺态氮及硝态氮较有利于桔梗对氮肥的吸收利用。同时,酰胺态氮处理下桔梗根部 Cu、Mn、Zn 单株积累量最高,铵硝比 75 : 25 处理下 Fe、Mg、Cu 单株积累量最高,铵硝比 25 : 75 处理下 Ca、Mg、Cu、Zn 单株积累量也较高,说明酰胺态氮及适当的铵硝比均有利于桔梗根中矿质元素的积累。

另外,总黄酮、总皂苷及多糖等次生代谢产物是桔梗药用品质的表现。本研究结果表明桔梗根中桔梗多糖含量以铵硝比 25 : 75 处理最高,其次为全铵及酰胺态氮处理,三者无显著差异;同时,铵硝比 25 : 75 处理下桔梗总皂苷含量达到最高,说明适当的氮素形态配比能有效提高桔梗根中桔梗多糖及总皂苷的含量。根据 C/N 平衡假说,植物体内碳水化合物含量升高可使植物的含氮量相对下降,引起非结构碳水化合物过剩,从而促进萜类物质的合成^[20]。桔梗皂苷属于三萜类化合物,铵硝比 25 : 75 及全硝处理下桔梗总皂苷含量较高,可能是由于氮素积累量相对降低,促进了桔梗皂苷的积累。另外,桔梗根中总黄酮含量随营养液中硝态氮比例的增加呈下降趋势,并以酰胺态处理最高,全铵处理次之,说明铵态氮较有利于桔梗根中总黄酮的积累。这可能与黄酮类化合物在植物体内合成代谢的起初源为光合产物^[21],而铵态氮较有利于桔梗根中可溶性多糖、可溶性蛋白及氨基酸等光合产物积累有关。

综上所述,适当的氮素形态配比有利于桔梗根中硝酸盐、亚硝酸盐含量的降低及相关食用、药用品质的提升;酰胺态氮较有利于桔梗根中营养元素的积累;铵硝比 25 : 75 处理下桔梗根中硝酸盐及亚硝酸盐含量最低,而桔梗多糖及总皂苷积累量高,且 Vc 等品质指标含量也较高,有利于桔梗品质的提升。同时,根据桔梗栽培过程中硝酸盐的动态积累变化特征,桔梗采收前不宜大量追施氮肥。

参考文献:

[1] BAI M, XU D, ZHANG S, *et al.* Spatial-temporal distribution characteristics of water-nitrogen and performance evaluation for basin irrigation with conventional fertilization and fertigation methods[J]. *Agricultural Water Management*, 2013, 126(8):75-84.

[2] MAHANTA D, BHATTACHARYYA R, GOPINATH K A, *et al.* Influence of farmyard manure application and mineral

fertilization on yield sustainability, carbon sequestration potential and soil property of gardenpea-french bean cropping system in the Indian Himalayas[J]. *Scientia Horticulturae*, 2013,164:414-427.

[3] 李会合,王正银. 施肥对叶类蔬菜硝酸盐含量的影响[J]. 磷肥与复肥, 2005, 16(3):65-67.

LI H H,WANG Z Y. Effect of fertilization on nitrate content in foliage greens [J]. *Phosphate & Compound Fertilizer*,

2005, **16**(3):65-67.

[4] SANTAMARIA P, ELIA A, PARENTE A, *et al.* Fertilization strategies for lowering nitrate content in leafy vegetables: chicory and rocket salad cases[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 1998, **21**(9):1 791-1 803.

[5] 王利群, 董 英, 黄达明, 等. 蔬菜硝酸盐的积累及其生理机制研究进展[J]. 江苏农业科学, 2002, (6):78-81.

WANG L Q, DONG Y, HUANG D M. Nitrate accumulation and the research progress of its physiological mechanism in vegetables [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2002, (6): 78-81.

[6] 田霄鸿, 李生秀, 王朝辉, 等. 莴笋对不同形态氮素的反应[J]. 应用生态学报, 2003, **14**(3):377-381.

TIAN X H, LI S X, WANG Z H, *et al.* Response of lettuce to different nitrogen forms[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, **14**(3):377-381.

[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: 134.

[8] 国家技术监督局. 中华人民共和国国家标准. GB5009. 33-2010 食品中亚硝酸盐与硝酸盐的测定[S]. 2010.

[9] 李 艳, 兰 卫, 孙 萍, 等. 新疆党参总黄酮和多糖的含量测定[J]. 中草药, 2004, **35**(2):214-215.

LI Y, LAN W, SUN P, *et al.* Determination of total flavonoids and polysaccharides content of radix codonopsis in Xinjiang [J]. *Chinese Traditional and Herbal Drugs*, 2004, **35**(2): 214-215.

[10] 李喜凤, 薛秋萍, 董诚明. 桔梗中总皂苷的含量测定[J]. 中医药学刊, 2006, **24**(12):2 232-2 234.

LI X F, XUE Q P, DONG C M. Determination of total saponins in radix platycodon grandiflorum by colorimetry [J]. *Chinese Archives of Traditional Chinese Medicine*, 2006, **24**(12):2 232-2 234.

[11] 李 妍, 魏建和, 许旭东, 等. 苯酚-硫酸法定量测定桔梗多糖的研究[J]. 时珍国医国药, 2009, **20**(1):5-7.

LI Y, WEI J H, XU X D, *et al.* Determination of polysaccharides in radix platycodonis[J]. *Lishizhen Medicine and Materia Medica Research*, 2009, **20**(1):5-7.

[12] 上海第一医学院, 等. 食品毒理[M]. 北京: 人民出版社 1978:365-396.

[13] 沈明珠, 翟宝杰, 东惠茹, 等. 蔬菜硝酸盐累积的研究—I. 不同蔬菜硝酸盐和亚硝酸盐含量评价[J]. 园艺学报, 1982, (4):41-47.

SHEN M Z, ZHAI B J, DONG H R, *et al.* Studies on nitrate accumulation in vegetable crops I. evaluation of nitrate and nitrite in different vegetables[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 1982, (4):41-47.

[14] 艾绍英, 姚建武, 黄小红, 等. 蔬菜硝酸盐的还原转化特性研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2002, **8**(1):40-43.

AI S Y, YAO J W, HUANG X H, *et al.* Study on the nitrate reduction characteristic of vegetables[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2002, **8**(1): 40-43 .

[15] 汪建飞, 董彩霞, 沈其荣. 不同铵硝比对菠菜生长、安全和营养品质的影响[J]. 土壤学报, 2007, **44**(4):683-688.

WANG J F, DONG C X, SHEN Q R. Effects of $\text{NH}_4^+ \text{-N/NO}_3^- \text{-N}$ ratio on growth, food safety and nutritional quality of spinach [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, **44**(4): 683-688.

[16] ROORDA Van EYSINGA J P N L. Nitrate and glasshouse vegetables[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1984, **5**(2): 149-156.

[17] 高祖明, 张耀栋, 严晓风, 等. 几种叶菜的硝酸盐和亚硝酸盐积累及其与有关酶活性的关系[J]. 植物生理学通讯, 1990, (3): 21.

GAO Y M, ZHANG Y D, YAN X F, *et al.* Accumulation of nitrate and nitrite in some vegetables and its relation to the activities of enzymes[J]. *Plant Physiology Communications*, 1990, (3): 21.

[18] 王华静, 吴良欢, 陶勤南. 氨基酸部分取代硝态氮对小白菜硝酸盐累积的影响[J]. 中国环境科学, 2004, **24**(1):19-23.

WANG H J, WU L H, TAO Q N. Influence of partial replacement of nitrate by amino acids on nitrate accumulation of pakchoi (*Brassica chinensis* L.) [J]. *China Environmental Science*, 2004, **24**(1):19-23.

[19] 田霄鸿, 王朝辉, 李生秀. 不同氮素形态及配比对蔬菜生长和品质的影响[J]. 西北农业大学学报, 1999, **27**(2):6-10.

TIAN X H, WANG Z H, LI S X. Effect of different nitrogenous forms and NO_3^- to NH_4^+ ratio on growth and quality of vegetables [J]. *Acta Univ. Agric. Boreali-Occidentalis*, 1999, **27**(2):6-10.

[20] 李继泉, 金幼菊. 环境因子对植物他感化化合物的影响[J]. 河北林果研究, 1999, **14**(3):285-292.

LI J Q, JIN Y J. The effect of environmental factors on the allelochemicals of plants[J]. *Hebei Journal of Forestry and Orchard Research*, 1999, **14**(3): 285-292.

[21] 程水源, 顾曼如, 束怀瑞. 银杏叶黄酮研究进展[J]. 林业科学, 2000, **36**(6):110-115.

CHENG S Y, GU M R, SHU H R. Advances in research on flavonoids in *Ginkgo biloba* leaf[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2000, **36**(6): 110-115.

(编辑:裴阿卫)