植物营养与肥料学报 2015,21(2): 527 - 534 doi: 10.11674/zwyf.2015.0229
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer http://www.plantnutrifert.org

氮肥形态及配比对菠菜生长和安全品质的影响

邢素芝[1], 汪建飞[2,3*], 李孝良[2], 邹海明[2]
(1 安徽科技学院农学院, 安徽凤阳 233100; 2 安徽科技学院城建与环境学院, 安徽凤阳 233100;
3 农业部生物有机肥创制重点实验室,安徽蚌埠 234000)

摘要:【目的】铵态氮肥和硝态氮肥是蔬菜生长过程中经常施用的氮肥种类,氮肥形态及配比对蔬菜生长和安全品质有着重要影响。菠菜是一种叶菜类蔬菜,富含矿质元素、维生素 C 和维生素 E。本文通过施用铵态氮和硝态氮肥,探究氮肥形态及其配比(NH_4^+-N/NO_3^--N)对菠菜生长和安全品质的影响。**【方法】**采用水培试验,设置 5 种不同氮素形态配比(NH_4^+-N/NO_3^--N 比值分别为 100∶0、75∶25、50∶50、25∶75 和 0∶100)的营养液,定期采集菠菜样品并测定菠菜的生物量、株高、根系长度、硝酸盐和亚硝酸盐、有机酸和氨基酸参数值。**【结果】**随着 NH_4^+-N/NO_3^--N 比值从 100∶0 变化到 0∶100,菠菜的生物量、株高、根系长度、硝酸盐和亚硝酸盐累积量以及有机酸含量均呈增加趋势,而氨基酸总量则明显下降;当 NH_4^+-N/NO_3^--N 比值为 0∶100 时,菠菜茎叶生物量为 6.2 g/plant,株高和根系长度分别为 16.3 cm 和 22.5 cm,分别是 NH_4^+-N/NO_3^--N 比值为 100∶0 时的 6 倍、2.2 倍和 2.0 倍,表明菠菜是一种喜硝酸盐氮的蔬菜;当 NH_4^+-N/NO_3^--N 比值由 0∶100 变为 25∶75 时,即在氮肥组合中增加 25% 的铵态氮肥,此时的硝酸盐和亚硝酸盐含量分别由 398.5 mg/kg、1.42 mg/kg 降为 249.1 mg/kg、0.98 mg/kg,降幅为 37.5% 和 8.0%,表明在菠菜生长过程中适当增施铵态氮肥可有效降低硝酸盐和亚硝酸盐在茎叶中的累积;当 NH_4^+-N/NO_3^--N 比值从 100∶0 变化到 0∶100,对 6 种有机酸(苹果酸、富马酸、琥珀酸、α-酮戊二酸、柠檬酸和丙酮酸)而言,增加幅度最大的是富马酸,约 8.6 倍,增加幅度最小的是柠檬酸,约 2.5 倍,苹果酸则在 NH_4^+-N/NO_3^--N = 25∶75 时达到最大值,为 985.3 mg/L;随着 NH_4^+-N 比例的减少,菠菜茎叶中的氨基酸总量呈下降趋势,NH_4^+-N/NO_3^--N 比值为 100∶0、75∶25、50∶50、25∶75 和 0∶100 的氨基酸总量分别为 21.80 μmol/g、12.92 μmol/g、9.20 μmol/g、8.30 μmol/g 和 7.50 μmol/g,表明菠菜的营养价值降低,这一趋势与上述所研究的指标(株高、根系长度、硝酸盐和亚硝酸盐含量以及有机酸含量)有着明显的区别。**【结论】**菠菜是一种典型的喜硝态氮类蔬菜,施用硝态氮肥可明显提高菠菜产量,但过高的施用量可导致菠菜安全品质下降。适当增施铵态氮肥可降低硝酸盐和亚硝酸盐在菠菜体内的累积,并有效调节氨基酸和有机酸的代谢。因此,在菠菜种植过程,应该合理地搭配铵态氮肥和硝态氮肥,以便在保证安全性和营养价值的基础上获取最大的生物量。

关键词: 铵态氮肥; 硝态氮肥; 菠菜; 生物量; 生理代谢
中图分类号: S606+.2; S636.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-505X(2015)02-0527-08

Different nitrogen fertilizers and ratios effect on growth, safety and quality of spinach

XING Su-zhi[1,2], WANG Jian-fei[2,3*], LI Xiao-liang[2], ZOU Hai-ming[2]
(*1 College of Agriculture, Anhui Science and Technology University, Fengyang, Anhui 233100, China;*
2 College of Urban Construction and Environment, Anhui Science and Technology University, Fengyang, Anhui 233100, China;
3 Key Laboratory of Bio-organic Fertilizer Creation, Ministry of Agriculture, Bengbu, Anhui 234000, China)

Abstract:【Objectives】 Aammonium fertilizer and nitrate fertilizer are two major types of fertilizers generally used for vegetables growth, and applying different types and ratios of nitrogen fertilizers have a significant impact on growth and nutrient value of vegetables. Spinach is an important leafy vegetable, which is rich in micronutrients,

收稿日期: 2014-07-04 **接受日期:** 2014-08-26
基金项目: 安徽省长三角联合科技攻关项目(1101c0603046);国家公益性行业(农业)专项经费项目(201103004);安徽省教育厅重大科研项目(KJ2012ZD04)资助。
作者简介: 邢素芝(1967—),女,安徽太和人,副教授,主要从事作物栽培和植物营养学等方面教学和研究。E-mail: wmz2415@sina.com
*通信作者 Tel: 0550-6733037, E-mail: jykwjf@sina.com

vitamin C and vitamin E. In this study, effects of ammonium fertilizer, nitrate fertilizer and NH_4^+-N/NO_3^--N on the growth, safety and quality of spinach were investigated in Fengyang, China. 【**Methods**】Water culture experiment was adopted in this study to investigate how ammonium fertilizer, nitrate fertilizer and NH_4^+-N/NO_3^--N affect on the growth, safety and quality of spinach. Based on the hydroponics experimental configuration designed by our research team, spinach was cultivated in nutrient solution containing different ratios (100∶0, 75∶25, 50∶50, 25∶75 and 0∶100) of NH_4^+-N/NO_3^--N. Spinach samples were periodically collected and analysed for spinach biomass, shoot height, root length, nitrate and nitrite accumulation, organic acids and amino acid content. 【**Results**】It was found that spinach biomass, shoot height, root length, nitrate and nitrite accumulation amount, organic acids content increased, and the amino acid content declined with the variations of NH_4^+-N/NO_3^--N from 100∶0 to 0∶100. Spinach biomass, shoot height and root length were 6.2 g/plant, 16.3 cm and 22.5 cm, respectively with the NH_4^+-N/NO_3^--N of 100∶0, which were 6.0, 2.2 and 2.0 times higher than those in the NH_4^+-N/NO_3^--N of 0∶100. These results suggested that spinach might be one of nitrate – philic plants. When NH_4^+-N/NO_3^--N changed from 0∶100 to 25∶75, the nitrate and nitrite content decreased from 398.5 mg/kg, 16.42 mg/kg to 249.1 mg/kg, 14.9 mg/kg, correspondingly, which indicated that increasing the ammonium fertilizer might contribute to the decrease of accumulation of nitrate and nitrite into spinach during its growth. Organic acids including Pyruvate, Citrate, α – Oxoglutarate, Succinate, Fumarate and Malate in spinach were also monitored when the NH_4^+-N/NO_3^--N varied from 100∶0 to 0∶100, where Fumarate showed the largest increase, up to 8.6 times, and Citrate showed the smallest increase with 2.5 times, and the maximum content of Malate reached to 985.3 mg/L with NH_4^+-N/NO_3^--N of 25∶75. Compared with shoot height, root length, nitrate and nitrite and organic acids content in spinach, amino acid content were significantly decreased with the variation of the NH_4^+-N/NO_3^--N from 100∶0 to 0∶100, showing 21.80 μmol/g, 12.92 μmol/g, 9.20 μmol/g, 8.30 μmol/g and 7.50 μmol/g, respectively, leading to an noticeable decrease in nutritional quality. 【**Conclusions**】Compared with ammonium, spinach may prefer to nitrate fertilizer, in which spinach biomass would increase with the increasing of nitrate fertilizer application. However, excessive application of nitrate fertilizer may lead to the decrease in safety and quality of spinach. Applying appropriate ratio of ammonium fertilizer into spinach cultivation can help reduce the accumulation of nitrate and nitrite into spinach, and also effectively regulate the metabolism of organic acids and amino acids. Therefore, it is rather important of applying an appropriate proportion of ammonium and nitrate fertilizer in growth of spinach to enhance its safety and quality based on the maximization of spinach production.

Key words: ammonium fertilizer; nitrate fertilizer; spinach; biomass; physiological metabolism

蔬菜是人们日常消费的主要食物之一,目前我国人均蔬菜消耗量约310 kg/a,远高于世界平均水平(105 kg/a)。然而,蔬菜(特别是叶菜类的蔬菜,如菠菜等)在生长过程中极易富集硝酸盐[1],人体内摄取的硝酸盐有70%～85%来自于食用蔬菜[2-3]。尽管硝酸盐本身对人体没有直接危害,但是其进入人体后被功能微生物代谢为亚硝酸盐而产生明显的毒害作用,主要表现为[4-6]:1)与血红蛋白结合影响氧的传输;2)与次级胺结合形成强致癌物质亚硝胺。由于亚硝酸盐和亚硝胺主要来源于硝酸盐,因此在蔬菜生长过程中对硝酸盐的摄取越来越受到众多研究者的关心。农业部颁布的《农产品安全质量无公害蔬菜安全要求》中,也将硝酸盐含量列为衡量蔬菜品质的重要指标之一。根据有关调查[7-9],目前我国部分地区市售蔬菜中硝酸盐含量普遍较高,其防控形势不容乐观。

蔬菜中硝酸盐主要来自于氮肥的施用,我国已成为全球氮肥消费第一大国,约占全世界的30%[10],而在长三角等地区其氮肥施用量远高于全国平均水平的2～3倍[11]。氮肥施用量是蔬菜体内硝酸盐累积的根本原因,如胡博[12]对大白菜,贾立茹[13]对彩椒和Eleni[14]对莴苣等的研究结果表明,氮肥施用量与蔬菜中硝酸盐含量有明显的正相关关系,而产量并没有显著提高,甚至有时会抑制蔬菜生长。因此,在保证蔬菜产量的情况下,尽可能地减少氮肥的施用量是降低蔬菜中硝酸盐累积量的有效方法之一。

此外,不同的氮肥形态也影响着蔬菜中硝酸盐

的累积量,目前农业生产中主要施用的氮肥为 NH_4^+-N 和 NO_3^--N[15]。对于蔬菜而言,当 NO_3^--N 的吸收速度大于其还原速度时就会造成 NO_3^--N 的累积,而 NH_4^+-N 的施用量对 NO_3^--N 整个代谢还原过程中有着重要的影响。在氮肥施用过程中,目前关于 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 配比对蔬菜生长和品质的影响已有相关报道,如荣秀连等[16]发现,不同 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 配比对不同品种的小白菜生物量和安全品质有着重要影响。

在前期研究中发现,菠菜对NO_3^--N的吸收有着明显偏好,属于典型的“喜硝态氮”蔬菜,但是过多地施用硝态氮肥会增加硝酸盐和亚硝酸盐的累积量,降低了安全性,甚至会造成氨基酸等营养成分流失[17-18]。因此,在保证一定菠菜生物量的前提下,必须要考虑到蔬菜的安全性以及营养价值。为此,本文在前期试验的基础上,进一步探讨不同的氮肥组合(即不同的 NH_4^+-N 与 NO_3^--N 配比)对菠菜生长和生理代谢的影响。通过水培试验,研究氮肥组成中不同 NH_4^+-N 与 NO_3^--N 配比对菠菜生物量、株高、根系长度、硝酸盐和亚硝酸盐含量、有机酸含量以及氨基酸含量的影响,以期为提高菠菜或同类蔬菜的产量和质量提供平衡施肥技术指导。

1　材料与方法

1.1　供试菠菜苗培育

供试菠菜品种为“银川大圆”,其育苗步骤为:1)种子消毒,将菠菜种子浸泡于 50℃ 的温水中 30min;2)种子清洗,将消毒后的菠菜种子用去离子水冲洗 3 次,再浸泡约 12h;3)种子催芽,将浸泡后的种子置于培养箱中 25℃ 催芽约 1 周;4)种苗培养,将催芽后的种子置于苗床上培育约 30 d,供试验时移栽。

1.2　水培试验装置

本试验采用自行设计的水培试验装置(图 1),该装置长、宽、高分别为 50 cm、30 cm、12 cm,有效容积为 12 L,为聚乙烯材质。每个栽培孔中移栽 3 棵菠菜,每批次试验共移栽 30 棵。试验过程中,每天用曝气泵曝气两次(8 时和 16 时),每次 30 min,保持溶液中溶解氧为 4 mg/L 左右,曝气流速为 1.5 L/min;pH 控制在 6.5 ± 0.1;营养液每 10 天更换一次。

1.3　营养液的配制

营养液元素含量为:N 12 mmol/L、P 1 mmol/L、K 6 mmol/L、Ca 5 mmol/L 和 Mg 2 mmol/L;微量元素为 B 0.5 mg/L、Fe 2.8 mg/L、Mn 0.5 mg/L、Zn 0.05 mg/L、Cu 0.02 mg/L 和 Mo 0.09 mg/L,此外,加入 7 μmol/L DCD 抑制硝化反应。

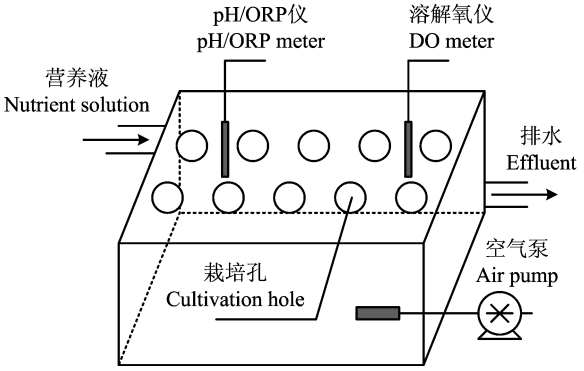

图 1　水培试验装置

Fig. 1　Hydroponics experimental configuration

试验过程中,保持营养液中氮总含量为 N 12 mmol/L 不变,设 NH_4^+-N/NO_3^--N 比例分别为 100%∶0、75%∶25%、50%∶50%、25%∶75% 和 0∶100%,分别以 100∶0、75∶25、50∶50、25∶75 和 0∶100 表示,每个处理 3 次重复。

1.4　测定项目和方法

菠菜移栽后 30d,采集菠菜样品用蒸馏水洗净,测量生长形态(株高和根系长);部分样品用于鲜重(Fresh weight, FW)条件下生物量、硝酸盐、亚硝酸盐、有机酸和氨基酸的测定;剩余样品置于烘箱中 105 ℃下杀青 30 min,然后在 65 ℃下烘干至恒重,约 48 h,用于干重生物量测定。

1.4.1 硝酸盐和亚硝酸盐的测定　按照《水果、蔬菜及其制品 亚硝酸盐和硝酸盐含量的测定》GB/T 15401 - 1994 国家标准处理样品,用德国布朗卢比 Bran + Luebbe 生产的 AutoAnalyzer 3 连续流动分析仪测定。

1.4.2 有机酸的测定　称取菠菜样品 2.0 g 于研钵中,加 5mL 超纯水研磨后无损地转移至离心管中,在 20,000 × g 4℃超速离心 20 min;转移上清液至新离心管,在冰箱 4 ℃下冷藏,测定前用 0.45μm 滤膜抽滤。

有机酸含量用高效液相色谱仪(美国 Waters 公司)测定;色谱柱为 Hibar® column RT 250 mm × 4.6 mm(德国 Merck 公司),柱温为 30℃;流动相为用 0.45 um 滤膜抽滤后的 pH 为 2.5 的 0.5% $(NH_4)_2HPO_4 - H_3PO_4$ 缓冲液,流速 1 mL/min、进样量约 20 μL、测定波长为 214 nm(紫外)。

1.4.3 氨基酸的测定 称取菠菜样品0.5 g于研钵中;加入液氮和5 mL 80%(v/v)预冷乙醇,充分研磨后离心,取上清液待测,测定前用0.45μm滤膜抽滤。

氨基酸含量用高效液相色谱仪(美国Waters公司)测定;色谱柱为HydrosphereTMC18柱,150 mm×4.6 mm,柱温为30℃,流动相为用0.45 μm滤膜抽滤后的pH为6.5的20 mmol/L KH_2PO_4-K_2HPO_4和pH为6.5的20 mmol/L KH_2PO_4-K_2HPO_4/乙腈(50/50)梯度淋洗,流速1 mL/min、进样量约20 μL、激发波长为470 nm、发射波长为530 nm。

2 结果与讨论

2.1 不同氮素形态配比对菠菜生物量和生长形态的影响

植物的生物量约92.5%来自光合作用结果,而氮肥的不合理施用往往会导致光合器官与植物器官生长不协调[19-20],姜琳琳等[21]也指出氮肥及其形态是影响植物生长及其产量的首要因素。本实验结果见图2、表1和图3。

由图2可以看出,随着NH_4^+-N/NO_3^--N比值的变化(100∶0、75∶25、50∶50、25∶75和0∶100),菠菜生物量鲜重明显增加,茎叶鲜重和根系鲜重增加趋势基本一致。当NH_4^+-N/NO_3^--N比值为0∶100时,菠菜茎叶生物量达到最大值(平均为6.2 g/plant),约为100∶0处理时茎叶生物量的6倍,表明菠菜是一种典型的喜硝酸盐氮植物,因此在种植菠菜时不宜施用大量的铵态氮肥料,这主要由于只有将NH_4^+-N转化为NO_3^--N后才能被菠菜吸收,有一定的滞后性,影响产量。尽管菠菜对NO_3^--N的吸收有偏好,但是对于喜硝作物来说,适当增加铵态氮肥,不仅能降低作物的能耗、增加对氮素的吸收速率[22],而且还可以降低作物组织中硝酸盐含量,这对无公害蔬菜生产来说尤为重要[23]。相对于鲜重来说,随着NH_4^+-N/NO_3^--N比值的增加,菠菜干重也呈明显增加趋势;但是当NH_4^+-N/NO_3^--N比值为25∶75和0∶100时,干重无显著差异,分别为0.99 g/plant和1.02 g/plant,这表明当铵态氮肥占总氮肥施用量的25%时,对菠菜生长过程中干物质的累积影响较小。

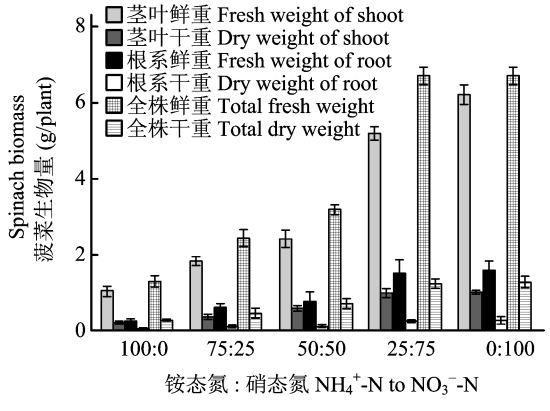

图2 不同铵态氮与硝态氮配比处理菠菜生物量的变化

Fig. 2 Variation of spinach biomass with ratio of NH_4^+-N to NO_3^--N

表1 不同氮素形态配比处理茎叶、根系鲜重与干重比以及根系长度与株高比

Table 1 Ratio of fresh weight to dry weight of shoot and root and root length to shoot height of spinach in different NH_4^+-N/NO_3^--N

铵态氮∶硝态氮 Ratios of NH_4^+-N/NO_3^--N	茎叶鲜重与干重比 RFDS	根系鲜重与干重比 RFDR	根长与株高比 RRLPH
100∶0	4.77	5.00	1.52
75∶25	5.23	5.55	1.14
50∶50	4.10	5.92	1.23
25∶75	5.23	5.85	1.40
0∶100	6.08	5.93	1.38

注(Note): RFDS—Ratios of fresh to dry yields of stem; RFDR—Ratios of fresh to dry yields of root; RRLPH—Ratios of root length to plant height.

不同氮素形态配比对菠菜生长过程中的株高和根系长度有一定影响。由图3可以看出,相比NH_4^+-N/NO_3^--N,比值为25∶75和0∶100,比值为100∶0和75∶25的菠菜株形明显矮小、根短而细。

不同氮素形态配比对株高和根系长度的影响趋势基本一致;NH_4^+-N/NO_3^--N比值为0∶100时株高为16.3 cm、根系长度为22.5 cm,分别是NH_4^+-N/NO_3^--N比值为100∶0时的2.2倍和2.0倍,这种铵态氮肥对喜硝植物生长形态的影响其他学者在研究中也被发现。王小丽等人[24]在研究氮肥形态对小白菜生长的影响时发现,在纯硝酸盐氮肥的作用下,小白菜地上和地下部分均可获得最大的鲜重和干重。

2.2 不同氮素形态配比对菠菜中硝酸盐和亚硝酸盐含量的影响

对绿叶类蔬菜来说,其安全性评价主要集中在

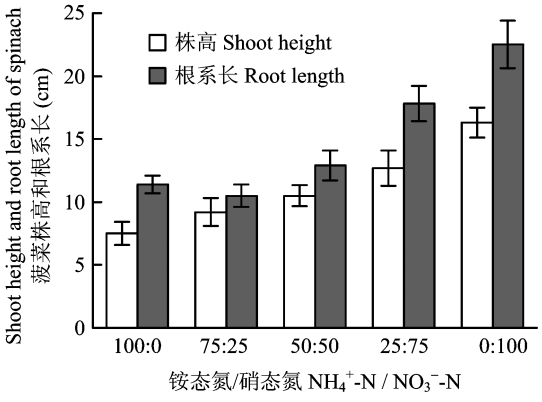

图 3　不同铵态氮与硝态氮配比处理菠菜株高和根系长度

Fig. 3　Variation of shoot height and root length of spinach with ratios of NH_4^+-N to NO_3^--N

硝酸盐、亚硝酸含量和农药残留上,而菠菜属于硝酸盐高累积型蔬菜之一[25],此外施用的氮肥形态对蔬菜硝酸盐累积程度有着直接且重要的影响[26]。研究不同氮肥(NH_4^+-N 和 NO_3^--N)配比对菠菜中硝酸盐和亚硝酸盐的影响见图 4。

由图 4 可以看出,随着 NO_3^--N 含量比例的提高,茎叶中硝酸盐和亚硝酸含量均呈上升趋势,这主要由于外源硝酸盐浓度的增加导致硝酸盐的吸收量增加,而菠菜体内的还原速率基本恒定,致使有更多

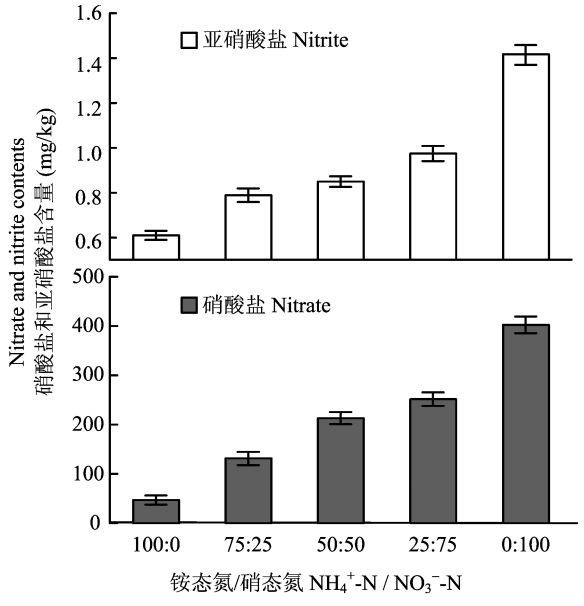

图 4　不同铵态氮与硝态氮配比处理菠菜茎叶中硝酸盐和亚硝酸盐含量的变化

Fig. 4　Variation of nitrate and nitrite content of shoot of spinach with ratios of NH_4^+-N to NO_3^--N

的硝酸盐和亚硝酸盐在蔬菜茎叶中累积。当 NH_4^+-N/NO_3^--N 比值为 100∶0 和 0∶100 时,菠菜茎叶中硝酸盐和亚硝酸盐含量分别为 46.1 mg/kg、0.61 mg/kg和 398.5 mg/kg、1.42 mg/kg。此外,当 NH_4^+-N/NO_3^--N 比值由 0∶100 变为 25∶75 时,即在氮肥组合中增加 25% 的铵态氮肥,此时硝酸盐和亚硝酸盐含量分别由 398.5 mg/kg、1.42 mg/kg 降为 249.1 mg/kg、0.98 mg/kg,降幅为 37.5% 和 31.0%,这表明在菠菜生长过程中适当增施铵态氮肥可有效降低硝酸盐和亚硝酸盐在茎叶内的累积,类似的实验现象也出现在大白菜和生菜的种植过程中[27-28]。

2.3　不同氮素形态配比对菠菜有机酸含量的影响

有机酸在植物组织中的含量要高于其他生物有机体,在植物体内发挥着重要的、基础性的生理代谢功能[29],如光合和呼吸作用、代谢活性溶质、调节渗透压和平衡阳离子等。为此,研究不同氮素形态配比条件下对菠菜有机酸含量的影响,探究氮肥形态及其配比对菠菜生理代谢机能的影响。

图 5 显示,不同氮素形态配比对有机酸含量有一定的影响,且对不同有机酸的影响程度不同。NH_4^+-N/NO_3^--N 比值从 100∶0 到 0∶100,除苹果酸外,富马酸、琥珀酸、α-酮戊二酸、柠檬酸和丙酮酸的含量均呈增加趋势,其中,增加幅度最大的是富马酸,约 8.6 倍(分别是 17.2 mg/kg 和 148.7 mg/kg),增加幅度最小的是柠檬酸,约 2.5 倍(分别是 247.6 mg/kg 和 617.8 mg/kg)。

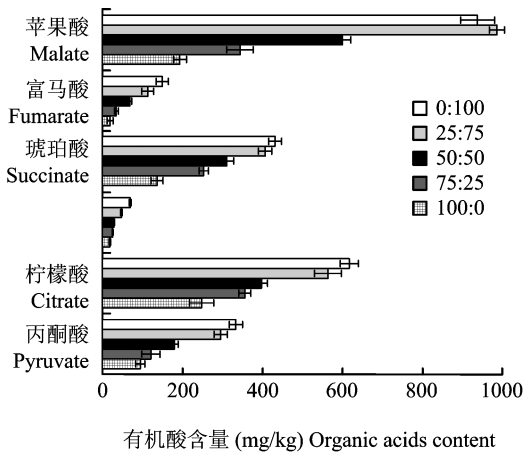

图 5　不同铵态氮与硝态氮配比条件下菠菜茎叶中有机酸含量的变化

Fig. 5　Variation of organic acids content of shoot of spinach with ratios of NH_4^+-N to NO_3^--N

苹果酸则在 NH_4^+-N/NO_3^--N 比值为 25∶75 时，其在菠菜茎叶中的含量达到最大(985.3 mg/kg)，而当 NH_4^+-N/NO_3^--N 比值为 0∶100 时，其含量略有下降。

当全部施用硝酸盐氮肥时(即 NH_4^+-N/NO_3^--N 比值为 0∶100)，这 6 种有机酸在菠菜茎叶中的含量是全部施用铵态氮肥料的 4.8 倍(苹果酸)、8.6 倍(富马酸)、3.2 倍(琥珀酸)、3.7 倍(α－酮戊二酸)、2.5 倍(柠檬酸)和 3.6 倍(丙酮酸)，表明在菠菜生长过程中硝酸盐的增加促进了菠菜的生理代谢进程，也说明了其偏好硝酸盐氮肥的本质。通过对硝酸盐氮在氮肥组合中的比例与 6 种有机酸含量的回归分析，其正相关关系显著(表 2)，也同样说明了菠菜的这种“喜硝”特性。

表 2 硝态氮的比例与有机酸含量回归分析

Table 2 Regression analysis of organic acids content by proportion of NO_3^--N in the nitrogen fertilizers

有机酸 Organic acids	回归方程 Regression equations	决定系数 Coefficient of determination
丙酮酸 Pyruvate	y = 2.622x + 73.22	0.9531**
柠檬酸 Citrate	y = 3.804x + 246.0	0.9683**
α－酮戊二酸 α-Oxoglutarate	y = 0.496x + 12.72	0.8975*
琥珀酸 Succinate	y = 2.968x + 158.7	0.9608**
富马酸 Fumarate	y = 1.366x + 8.06	0.9812**
苹果酸 Malate	y = 8.525x + 185.6	0.9205**

注(Note)：y—有机酸含量 Content of organic acids；x—硝态氮比例 The proportion of NO_3^--N. *—$P<0.05$；**—$P<0.01$.

2.4 不同氮素形态配比对菠菜中氨基酸含量的影响

氨基酸是蔬菜中重要的营养成分，其氨基酸种类、含量及其组成对蔬菜营养价值有着很重要的影响[30]。施用的氮肥形态不同，作物就会合成并累积不同的氨基酸类型[31]。

从图 6 可以看出，不同氮素形态配比对菠菜中总的氨基酸含量有显著的影响，随着 NH_4^+-N 比例的减少，菠菜茎叶中的氨基酸总量呈下降趋势，NH_4^+-N/NO_3^--N 比值为 100∶0、75∶25、50∶50、25∶75 和 0∶100 的氨基酸总量依次为 21.80 μmol/g、12.92 μmol/g、9.20 μmol/g、8.30 μmol/g 和 7.50 μmol/g，这一点与上述研究的指标(株高、根系长度、硝酸盐和亚硝酸盐含量以及有机酸含量)有着明显的区别。尽管氨基酸总量下降，但是本研究所涉及的 17 种氨基酸中，不同的氨基酸对 NH_4^+-N/NO_3^--N 比值变化的响应程度有明显差异。当 NH_4^+-N/NO_3^--N 比值从 100∶0 到 0∶100 时，氨基酸含量的情况为，显著降低精氨酸(从 4.40 μmol/降至 0.19 μmol/g)、谷氨酰胺(8.68 μmol/g 降至

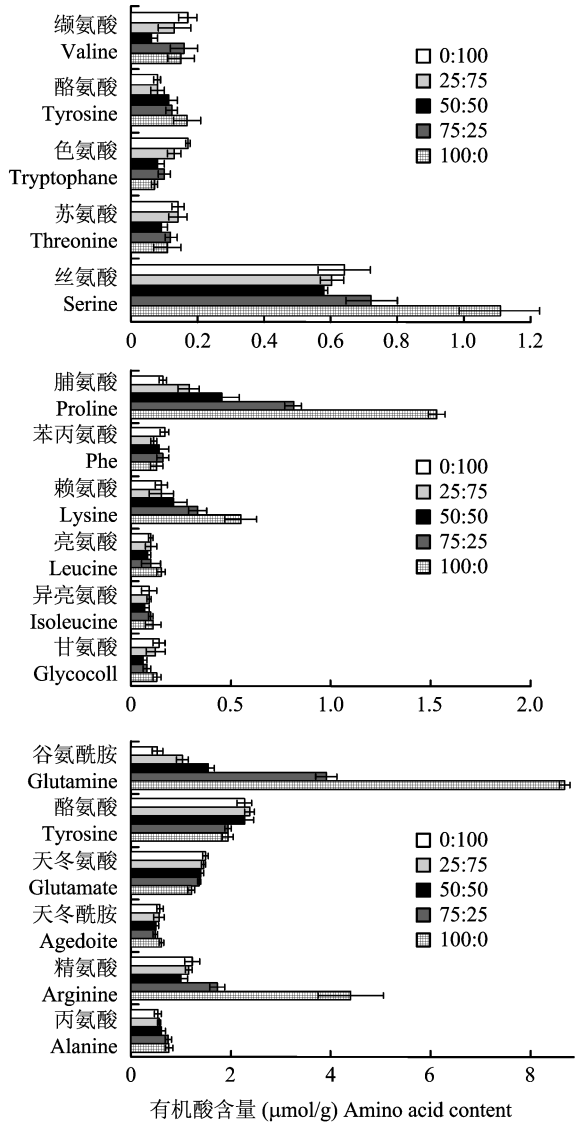

图 6 不同铵态氮与硝态氮配比条件下菠菜茎叶中游离氨基酸含量的变化

Fig. 6 Variation of free amino acids content of shoot of spinach with ratios of NH_4^+-N to NO_3^--N

0.53 μmol/g)、脯氨酸(1.53 μmol/g 降至 0.16 μmol/g)和丝氨酸(1.11 μmol/g 降至 0.64 μmol/g);降低幅度较小的为丙氨酸(0.76 μmol/g 降至 0.54 μmol/g);小幅上升的有谷氨酸(1.94 μmol/g 增加至 2.27 μmol/g)和天冬氨酸(1.20 μmol/g 增加至 1.40 μmol/g);其余 10 种氨基酸的含量变化不大。

在以铵态氮肥为主时,菠菜茎叶中氨基酸主要以谷氨酰胺(占 39.8%)、精氨酸(占 20.2%)和谷氨酸(占 8.9%)为主,总计占氨基酸总量的 68.9%;而在以硝态氮肥为主时,菠菜茎叶中有机酸主要以谷氨酸(30.3%)、天冬氨酸(18.6%)和丝氨酸(8.5%)为主,总计占氨基酸总量的 57.4%。此外,氨基酸总量与铵态氮肥的比例有着一定的正相关关系。

结合以上研究得知,当 NH_4^+-N/NO_3^--N 比值从 100∶0 到 0∶100 时,菠菜的生物量明显增加,但是硝酸盐、亚硝酸盐累积量也增加,这将导致蔬菜安全性降低,同时氨基酸含量降低,也降低了蔬菜的营养价值。因此,在菠菜种植过程,应该合理地搭配铵态氮肥和硝态氮肥,以便在保证安全性和营养价值的基础上获取最大的生物量。

3　结论

1) 随着 NH_4^+-N/NO_3^--N 比值从 100∶0 变化到 0∶100 时,菠菜的生物量、株高、根系长度、硝酸盐和亚硝酸盐累积量以及有机酸含量均呈增加趋势,而氨基酸总量则明显下降。

2)当 NH_4^+-N/NO_3^--N 比值为 0∶100 时,菠菜茎叶生物量、株高和根系长度分别是 NH_4^+-N/NO_3^--N 比值为 100∶0 时的 6 倍、2.2 倍和 2.0 倍,表明菠菜是一种喜硝酸盐氮的蔬菜。此外,在菠菜生长过程中适当增施铵态氮肥可有效降低硝酸盐和亚硝酸盐在茎叶中的累积。对 6 种有机酸(苹果酸、富马酸、琥珀酸、α-酮戊二酸、柠檬酸和丙酮酸)而言,增加幅度最大的是富马酸,约 8.6 倍; 增加幅度最小的是柠檬酸,约 2.5 倍。

3)随着 NH_4^+-N/NO_3^--N 比值从 100∶0 变化到 0∶100,菠菜茎叶中氨基酸总量呈下降趋势,NH_4^+-N/NO_3^--N 比值为 100∶0、75∶25、50∶50、25∶75 和 0∶100 的氨基酸总量分别为 21.80 μmol/g、12.92 μmol/g、9.20 μmol/g、8.30 μmol/g 和 7.50 μmol/g,表明菠菜的营养价值降低。

参 考 文 献:

[1] Parks S E, Irving D E, Milham P J. A critical evaluation of on-farm rapid tests for measuring nitrate in leafy vegetables[J]. Scientia Horticulturae, 2012, 134: 1-6.

[2] 于红梅, 龚元石, 李子忠, 张小兰. 不同水氮管理对苋菜和菠菜的产量及硝酸盐含量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(3): 302-305.
Yu H M, Gong Y S, Li Z Z, Zhang X L. Effect of different water and nitrogen management on yield and nitrate content of amaranth and spinach[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2004, 10(3): 302-305.

[3] 陶正平,尹凯丹. 环境因子对大白菜硝酸盐含量的影响[J]. 农业工程学报, 2008, 24(8): 245-248.
Tao Z P, Yin K D. Effects of environmental factors on nitrate content of Chinese cabbage[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(8): 245-248.

[4] Suh J H, Paek O J, Kang Y W *et al*. Risk assessment on nitrate and nitrite in vegetables available in korean diet[J]. Journal of Applied Biological Chemistry, 2013, 56(4): 205-211.

[5] Lidder S, Webb A J. Vascular effects of dietary nitrate (as found in green leafy vegetables and beetroot) via the nitrate-nitrite-nitric oxide pathway[J]. British Journal of Clinical Pharmacology, 2013, 75(3): 677-696.

[6] 王子云, 詹秀环, 郭晓云. 不同处理方式对几种根茎类蔬菜亚硝酸盐含量的影响[J]. 湖北农业科学, 2013, 52(21): 5268-5271.
Wang Z Y, Zhan X H, Guo X Y. Effects of different processing methods on nitrite contents in rootstalk vegetables[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2013, 52(21): 5268-5271.

[7] 孙敏红, 吕燕君. 长沙市售新鲜蔬菜中硝酸盐含量的测定[J]. 湖北农业科学, 2012, 51(13): 2834-2836.
Sun M H, Lü Y J. Determination of nitrate content in vegetables in Changsha's market[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2012, 51(13): 2834-2836.

[8] 朱兰保, 盛蒂, 江升明. 蚌埠市售新鲜蔬菜的硝酸盐污染[J]. 光谱实验室, 2013, 30(4): 1823-1826.
Zhu L B, Shen D, Jiang S M. Nitrate pollution of fresh vegetable in Bengbu's market[J]. Chinese Journal of Spectroscopy Laboratory, 2013, 30(4): 1823-1826.

[9] 谢国祥, 郭宝福, 赵士权, 等. 南京市市售蔬菜硝酸盐含量及居民暴露量评估[J]. 现代预防医学, 2013, 40(7): 1236-1238.
Xie G X, Guo B F, Zhao S Q *et al*. The nitrate contents in commercial vegetables and assessment of nitrate exposure in Nanjing residents[J]. Modern Preventive Medicine, 2013, 40(7): 1236-1238.

[10] 剧成欣, 张耗, 王志琴, 杨建昌. 水稻高产和氮肥高效利用研究进展[J]. 中国稻米, 2013, 19(1): 16-21.
Ju C X, Zhang H, Wang Z Q, Yang J C. Research progress in high yield of rice and efficient utilization of nitrogen in rice[J]. China Rice, 2013, 19(1): 16-21.

[11] 王波. 不同生菜品种对不同铵硝比反应差异及其机理的研究[D]. 南京: 南京农业大学博士学位论文, 2007.
Wang B. Lettuce cultivars response to ratios of NH_4^+-N/NO_3^--N and their mechanism[D]. Nanjing: PhD Dissertation of Nanjing Agricultural University, 2007.

[12] 胡博, 郝云凤, 樊明寿. 马铃薯-大白菜双季栽培体系中大

白菜氮肥施用量对其产量、氮肥利用、硝酸盐累积的影响[J]. 中国蔬菜, 2012, (10): 60-65.
Hu B, Hao Y F, Fan M S. Effects of Chinese cabbage nitrogen application rate on Chinese cabbage yields, nitrogen utilization, nitrate accumulation (soil & cabbage) of potato-Chinese cabbage double cropping system[J]. China Vegetables, 2012, 1(10): 60-65.

[13] 贯立茹, 张成军, 刘佳伟, 等. 氮肥施用量对温室彩椒产量及土壤硝酸盐含量的影响[J]. 中国蔬菜, 2011, (Z1): 104-107.
Guan L R, Zhang C J, Liu J W *et al*. Effects of nitrogen application quantity on geenhouse color pepper production and soil nitrate content[J]. China Vegetables, 2011, (Z1): 104-107.

[14] Konstantopoulou E, Kapotis G, Salachas G *et al*. Effect of nitrogen application on growth parameters, yield and leaf nitrate content of greenhouse lettuce cultivated during three seasons [J]. Journal of Plant Nutrition, 2012, 35(8): 1246-1254.

[15] 樊卫国, 罗燕, 吴素芳, 葛会敏. 氮肥形态及配比对铁核桃根际环境及幼苗生长的影响[J]. 园艺学报, 2014, 41(3): 437-446.
Fan W G, Luo Y, Wu S F, Ge H M. Effects of nitrogen fertilizer forms and ratios on rhizospheric environment and growth of the *Juglans sigillata* seedlings[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2014, 41(3): 437-446.

[16] 荣秀连, 王梅农, 宋采博, 王波. 不同铵态氮/硝态氮配比对白菜叶绿素含量的影响[J]. 江苏农业科学, 2010, (1): 298-300.
Rong X L, Wang M N, Song C B, Wang B. Effect of NH_4^+-N/NO_3^--N ratios on chlorophyll content of cabbage seedling[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2010, (1): 298-300.

[17] Wang J F, Zhou Y, Dong C X *et al*. Effects of NH_4^+-N/NO_3^--N ratios on growth, nitrate uptake and organic acid levels of spinach [J]. African Journal of Biotechnology, 2009, 8(15): 3597-3602.

[18] 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 NH_4^+-N/NO_3^--N ratio on growth, food safety and nutritional quality of spinach [J]. Acta Pedologica Sinica, 2007, 44(4): 683-688.

[19] 魏猛, 唐忠厚, 陈晓光, 等. 不同氮素水平对叶菜型甘薯光合作用及生长特性的影响[J]. 江苏农业学报, 2014, 30(1): 87-91.
Wei M, Tang Z H, Chen X G *et al*. Photosynthetic and growth characteristics of vegetable - use sweet potato responding to nitrogen application rates[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2014, 30(1): 87-91.

[20] Zhang L X, Qiang H, Li S Q *et al*. Effects of enhanced atmospheric ammonia on photosynthetic characteristics of two maize cultivars with various nitrogen supply across long - term growth period and their diurnal change patterns [J]. Photosynthetica, 2010, 48(3): 389-399.

[21] 姜琳琳, 韩立思, 韩晓日, 等. 氮素对玉米幼苗生长、根系形态及氮素吸收利用效率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(1): 247-253.
Jiang L L, Han L S, Han X R *et al*. Effects of nitrogen on growth, root morphological traits, nitrogen uptake and utilization efficiency of maize seedlings[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2011, 17(1): 247-253.

[22] 郭淑霞, 龚元石. 不同盐分和氮肥水平对菠菜水分及氮素利用效率的影响[J]. 土壤通报, 2011, 42(4): 906-910.
Guo S X, Gong Y S. Effect of different salinity and nitrogen on water and nitrogen use efficiency of spinach[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2011, 42(4): 906-910.

[23] Gutiérrez Rodríguez E, Lieth H J, Jernstedt J A *et al*. Texture, composition and anatomy of spinach leaves in relation to nitrogen fertilization[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2013, 93(2): 227-237.

[24] 王小丽, 杨丹妮, 黄丹枫. 氮素形态对小白菜生长和碳氮积累的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23(4): 1042-1048.
Wang X L, Yang D N, Huang D F. Effects of different applied nitrogen forms on pakchoi growth and its carbon and nitrogen accumulation[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(4): 1042-1048.

[25] Mondal S, Nad B K. Nitrate accumulation in spinach as influenced by sulfur and phosphorus application under increasing nitrogen levels[J]. Journal of Plant Nutrition, 2012, 35(14): 2081-2088.

[26] Abubaker S M, Abu - Zahra T R, Alzubi Y A *et al*. Nitrate accumulation in spinach tissues under different fertilization regimes[J]. Journal of Food, Agriculture & Environment, 2010, 8(2): 778-780.

[27] 别之龙, 徐加林, 杨小峰. 营养液浓度对水培生菜生长和硝酸盐积累的影响[J]. 农业工程学报, 2005, 21(增刊): 109-112.
Bie Z L, Xu J L, Yang X F. Effects of different nutrient solution concentrations on the growth and nitrate accumulation of hydroponic lettuce[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(Supp.): 109-112.

[28] Tang Y, Sun X, Hu C *et al*. Genotypic differences in nitrate uptake, translocation and assimilation of two Chinese cabbage cultivars[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2013, 70: 14-20.

[29] Koh E, Charoenprasert S, Mitchell A E. Effect of organic and conventional cropping systems on ascorbic acid, vitamin C, flavonoids, nitrate, and oxalate in 27 varieties of spinach[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2012, 60(12): 3144-3150.

[30] 欧行奇, 李新华, 朱彬甘. 薯茎尖与常见叶菜类蔬菜氨基酸含量及组成的比较分析[J]. 氨基酸和生物资源, 2007, 29(3): 70-74.
Ou X Q, Li X H, Zhu B G. Comparison of amino acid content and composition between vegetable sweet potato tips and leaf vegetables[J]. Amino Acids & Biotic Resources, 2007, 29(3): 70-74.

[31] Hall N G, Schönfeldt H C. Total nitrogen vs. amino - acid profile as indicator of protein content of beef [J]. Food Chemistry, 2013, 140(3): 608-612.