

铵态氮和硝态氮肥配施对娃娃菜养分吸收 利用及产量的影响

苏金昌,何志强,李 杰,吕 剑,郁继华,张国斌
(甘肃农业大学园艺学院,甘肃 兰州 730070)

摘 要: 在大田试验条件下,以娃娃菜(*Brassica pekinensis*)栽培品种‘金城夏黄’为试验材料,研究了铵态和硝态氮肥配施比例对娃娃菜生长、养分吸收利用及产量的影响。结果表明,与单一氮源施肥相比较,铵态和硝态氮肥配施可以提高娃娃菜结球期各器官干物质、全氮、全磷、全钾的积累和根系伤流强度,显著地增加氮素利用效率和产量。当 $\text{NO}_3^- - \text{N}:\text{NH}_4^+ - \text{N} = 3:7$ 时,有利于娃娃菜根部干物质和养分的积累,增强根系伤流强度,在采收时,根部干物质达到 $2.16 \text{ g}\cdot\text{株}^{-1}$, NPK 分别达到 $5.92, 4.44, 6.05 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 结球期根系伤流强度为 $8.09 \text{ g}\cdot\text{h}^{-1}$; $\text{NO}_3^- - \text{N}:\text{NH}_4^+ - \text{N} = 5:5$ 时,能够促进娃娃菜结球期各器官的养分向叶球转运积累,显著增加叶球干物质重量、氮素利用效率和产量,在采收时,叶球干物质重量、氮肥利用率 and 经济产量分别达到 $34.50 \text{ g}\cdot\text{株}^{-1}$ 、 6.89% 和 $114.16 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。因此, $\text{NO}_3^- - \text{N}:\text{NH}_4^+ - \text{N} = 5:5$ 是适宜高原夏季娃娃菜生产的最佳铵硝配施比例。

关键词: 娃娃菜; 铵硝配施比例; 根系伤流液; 干物质积累; 养分吸收
中图分类号: S634.06 **文献标志码:** A

Effect of combined application of ammonium and nitrate on nutrient utilization and yield of mini Chinese cabbage

SU Jin-chang, HE Zhi-qiang, LI Jie, LU Jian, YU Ji-hua, ZHANG Guo-bing
(College of Horticulture, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: A field experiment was carried out to investigate the effect of combined application of ammonium and nitrate on the growth, nutrient utilization and yield of mini Chinese cabbage (*Brassica pekinensis* vs Jinchengxiahuang). Results showed that combined application of ammonium and nitrate fertilizer could increase the accumulation of dry matter in all parts of the mini Chinese cabbage in the heading stage compared with single nitrogen fertilizer. The combined application also significantly increased yield, total nitrogen, total phosphorus, total potassium content in each part of the plant treatment, nutrient use efficiency, the root bleeding intensity during every growth period. Additionally, when ratio of the ammonium and nitrate fertilizer was 7:3, the root dry matter accumulation, NPK uptake and root bleeding intensity of the mini Chinese cabbage were significantly higher than that in single nitrogen fertilizer. The root dry matter accumulation was $2.16 \text{ g}\cdot\text{plant}^{-1}$, and NPK uptake was $5.92 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, $4.44 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, $6.05 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ in the harvesting stage. The root bleeding intensity were $8.09 \text{ g}\cdot\text{h}^{-1}$ in the heading stage. When the ratio was 5:5, yield and nitrogen use efficiency significantly increased, and the transfer of nutrients from different organs of to leaf ball was promoted. In the harvesting stage the dry matter weight, nitrogen use efficiency, economic output were 34.50 g , 6.89% , $114.16 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$. We concluded that the optimal ratio of the ammonium and nitrate fertilizer was 5:5 to promote the mini Chinese cabbage production.

Keywords: mini Chinese cabbage; ammonium nitrate ratio; root bleeding; dry matter accumulation; nutrient uptake

收稿日期: 2016-05-10
基金项目: 国家自然科学基金(31260473); 甘肃省自然科学基金(145RJZA201); 国家大宗蔬菜产业体系项目(CARS-25-C-07)
作者简介: 苏金昌(1991—), 男, 甘肃平凉人, 硕士研究生, 主要研究方向为蔬菜栽培与生理。E-mail: SJCgsau@163.com。
通信作者: 张国斌(1977—), 男, 甘肃武威人, 博士, 副教授, 主要从事蔬菜栽培生理及设施作物栽培方面的研究。E-mail: zhanggb@gsau.edu.cn。

近年来,西北冷凉地区高原夏季蔬菜成为弥补东南沿海地区夏季蔬菜缺口的主要源头。兰州市地处青藏高原、内蒙古高原和黄土高原的交汇处,水资源较为充足,光热条件好,昼夜温差大,适合以高原夏菜为代表的多种蔬菜瓜果的生长。目前,娃娃菜是高原夏菜产区的主要栽培蔬菜之一^[1-2],其营养价值已被越来越多的消费者认可和接受,也成为西北冷凉高原夏菜产区广大菜农创收的重要菜种之一。同时当地主要以单一氮源施肥为主,大量施用尿素是增产的主要途径,致使氮肥利用效率低,并且伴随着土壤酸化、温室气体排放和地下水硝酸盐污染等问题^[3]。

氮素作为植物生长和发育的必需营养元素,供植株吸收利用的形态有:硝态氮、铵态氮、亚硝态氮、单质态氮和酰胺态氮等。早在十九世纪,Liebig 就推测高等植物吸收氮素的主要形态是 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$,并被后人证实^[4]。而关于氮素形态对植物生理代谢的影响,有研究认为植物对铵态氮和硝态氮的吸收相同^[5-6],也有研究提出作物幼苗吸收铵态氮大于硝态氮^[7]。但是从肥效看,较多研究证明铵态氮和硝态氮配合施用较单施效果好^[4]。硝态氮和铵态氮作为植物从土壤中吸收和利用的最主要氮源^[8],对植物的生长有较大的影响^[9]。不同植物对不同形态氮素的吸收利用不同,同一植物在不同生育期对不同形态氮素的吸收利用也不同,Fried 等^[10]用¹⁵N 试验证明,铵态氮与硝态氮等量存在于营养基质中时,水稻幼苗一般对铵态氮的吸收大于硝态氮。而生菜^[11]、黄瓜^[12]、苹果^[13]和冬枣^[14]等都在硝态氮较高的环境中能够更好地生长发育。郭传友等^[15]研究得出,彩椒在幼苗期和发棵期,吸收氮素以铵态氮为主,从盛果期开始,氮素吸收则以硝态氮为主。胡琳莉等^[16]研究发现,在弱光条件下,

适当的铵硝配比施肥,可以提高娃娃菜幼苗的生物量,增加叶片气孔导度、叶绿素含量,增大根系吸收面积;牛振明等^[17]和刘赵帆等^[18]在甘蓝和花椰菜的研究中也有类似报道。适宜的铵硝配施可以一定程度上影响作物的光合、呼吸、代谢等^[19-22],进而影响作物的产量和品质。

由于施入旱地土壤中的铵态氮肥和酰胺态氮肥(尿素)在短期内会在土壤硝化细菌的作用下转化生成硝酸盐。该过程可分为两步进行,第一步是通过亚硝化细菌将氨氧化成亚硝酸盐的过程,第二步是亚硝酸盐在硝化细菌的作用下生成硝酸盐的过程,该过程是在土壤通气良好的条件下进行的。虽然表面上是向土壤中施入铵态氮,但作物根系实际上吸收的则主要是硝态氮,为了避免铵态氮向硝态氮转化的影响,所以大多研究集中在水培等实验室模拟操作。对高原夏季蔬菜产区娃娃菜的田间试验操作较少,因此,本试验在高原夏季蔬菜产区开展不同铵硝配比施肥的田间试验,研究 $\text{NO}_3^- - \text{N}:\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 在 0~1 之间娃娃菜的生长,探索不同铵硝比对娃娃菜干物质积累、根系伤流液强度、养分吸收、氮素利用效率及产量的影响,旨在探索娃娃菜对不同氮素形态的吸收规律,并筛选适宜娃娃菜生长发育的施肥配比,为高原夏季蔬菜产区娃娃菜的生产提供科学的理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2015 年 4—8 月在兰州市榆中县三角城乡化家营村进行。该地区年平均气温 6.57℃,年降雨量 400 mm 以上,无霜期 160 d 左右,平均海拔 1 717 m,地势平坦,地力均一,土壤质地为壤土,适合蔬菜栽培。土壤耕层(0~20 cm)理化性质见表 1。

表 1 土壤耕层理化性质

Table 1 The physical and chemical properties of plough layer

全氮 Total N /(g·kg ⁻¹)	全磷 Total P /(g·kg ⁻¹)	全钾 Total K /(g·kg ⁻¹)	碱解氮 Available N /(mg·kg ⁻¹)	速效磷 Available N /(mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available K /(mg·kg ⁻¹)	pH	EC /(ms·cm ⁻¹)
0.30	0.88	4.17	178.00	54.53	67.70	7.66	0.54

1.2 试验材料

供试材料为娃娃菜,品种为‘金城夏黄’。供试肥料为硝酸钾(N 13%、K₂O 46%)、碳酸氢铵(N 17.2%)、过磷酸钙(P₂O₅ 16%)、硫酸钾(K₂O 25%)、尿素(N 46%)、复合肥(总养分 54%,N-P₂O₅-K₂O=18-18-18)、磷酸二铵(N18%,P₂O₅ 46%)。

1.3 试验设计

试验共设 8 个处理,3 次重复,共 24 个小区,采用随机区组排列。小区面积为 4 m×6 m=24 m²,两边各设 1 m 保护行。按当地施肥习惯各处理施入纯氮 275 kg·hm⁻²,施肥配比和施肥量见表 2,氮肥 30%作为底肥,35%在莲座期追施,35%在结球初期

追施。用过磷酸钙和硫酸钾平衡各处理间磷肥和钾肥,并作为底肥一次性施入。于 3 月下旬开始育苗,4 月 30 日定植,6 月 26 日采收,采用一垄双行半膜覆盖栽培模式,每小区起四垄,垄宽 60 cm,沟宽 40

cm,株距 25 cm,行距 30 cm,每小区定植 192 株,整个生育期灌水和病虫害防治等田间管理措施与当地传统管理措施保持一致。

表 2 试验设计
Table 2 Experiment design

处理 Treatment	铵硝比例 Ammonium nitrate ratio	肥料用量 Fertilizer rate	氮素用量 Nitrogen rate
CK1	对照空白 Blank control	不施肥 No fertilizer	不施肥 No fertilizer
T1	NO ₃ ⁻ - N:NH ₄ ⁺ - N = 10:0	KNO ₃ (5.09 kg)	NO ₃ ⁻ - N (0.66 kg)
T2	NO ₃ ⁻ - N:NH ₄ ⁺ - N = 7:3	KNO ₃ (3.56 kg) + NH ₄ HCO ₃ (1.15 kg)	NO ₃ ⁻ - N(0.46) + NH ₄ ⁺ - N(0.20 kg)
T3	NO ₃ ⁻ - N:NH ₄ ⁺ - N = 5:5	KNO ₃ (2.55 kg) + NH ₄ HCO ₃ (1.92 kg)	NO ₃ ⁻ - N(0.33 kg) + NH ₄ ⁺ - N(0.33 kg)
T4	NO ₃ ⁻ - N:NH ₄ ⁺ - N = 3:7	KNO ₃ (1.53 kg) + NH ₄ HCO ₃ (2.69 kg)	NO ₃ ⁻ - N(0.20 kg) + NH ₄ ⁺ - N(46 kg)
T5	NO ₃ ⁻ - N:NH ₄ ⁺ - N = 0:10	NH ₄ HCO ₃ (3.85 kg)	NH ₄ ⁺ - N(0.66 kg)
T6	CO(NH ₂) ₂ - N	Urea(1.44 kg)	CO(NH ₂) ₂ - N(0.66 kg)
CK2	当地施肥 Local fertilization	复合肥 Compound fertilizer(1.44 kg) + (NH ₄) ₂ HPO ₄ (2.34 kg)	当地施肥 Local fertilization

注:CK1 不施任何肥料,其余各处理施入氮素量相同。
Note: contents of N in the other seven treatments were the same except for CK1(no fertilizer).

1.4 测定项目和方法

1.4.1 土壤基础理化性质的测定 施基肥前用 S 法采 0~20 cm 混合土样,风干,过 0.25 mm 筛测定土壤基础理化性质。全氮含量应用海能 K1100 型凯氏定氮仪测定;碱解氮采用碱解扩散法;全磷含量采用磷钼蓝比色法测定;速效磷采用碳酸氢钠提取—钼锑抗比色法;全钾和速效钾含量采用火焰光度法测定;pH 值用 pH 计测定;EC 用电导率仪测定。

1.4.2 根系伤流强度 根系伤流液的采集参考邓宏中^[23]、章笑赞^[24]、孙苗苗^[25]等方法,即分别在幼苗期、莲座期、结球期 9:00—11:00 取样,用清洗干净的干燥刀片切去地上部分,并用蒸馏水冲洗切口,套上装有脱脂棉的保鲜袋(W1),让脱脂棉贴紧切口,用橡皮筋扎紧袋口,采集 2 h 后开始称重(W2)。根系伤流液伤流强度计算公式如下:

伤流强度(g·h⁻¹) = $\frac{W2 - W1}{2}$

1.4.3 植株 N、P、K 的测定 全氮采用 H₂SO₄ - H₂O₂ 消煮,凯氏定氮法;全磷采用 H₂SO₄ - H₂O₂ 消煮,钼锑抗比色法;全钾采用 H₂SO₄ - H₂O₂ 消煮,火焰光度法。

1.4.4 植株氮素利用效率的计算^[26]

氮素积累总量(kg·hm⁻²) = 干物质量(kg·hm⁻²) × 植株含氮量(g·kg⁻¹)/1000;

氮肥偏生产力(PFP) = 施氮处理经济产量/施氮量;

氮肥农学效率(NUE) = (施氮处理经济产量 - 不施氮处理经济产量)/施氮量;

氮素回收效率(RE) = (施氮处理植株吸氮量 - 不施氮处理植株吸氮量)/施氮量 × 100%

1.4.5 干物质积累 从结球初期(6 月 10 日)开始,每 4 天采样 1 次,采收期结束(6 月 26 日),总共采样 5 次。每次每小区随机选取 3 株,保证根系完整,洗净,分为根、外叶、叶球三部分,105℃ 杀青 15 min,80℃ 烘至恒重,称重。

1.4.6 植株产量的测定和计算 在采收时每小区随机选取 30 株娃娃菜测其单株重、生物产量和经济产量,最后计算各小区经济系数和产投比。

经济系数 = $\frac{\text{经济产量}}{\text{生物产量}} \times 100\%$;

产投比 = $\frac{\text{小区总产出/元}}{\text{小区总投入/元}}$

1.5 数据分析

采用 Excel 2010 作图,SPSS19.0 软件进行单因素分析,采用 Duncan's 法进行差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 铵硝配施对娃娃菜根系伤流强度的影响

如图 1 所示,娃娃菜在整个生育期的根系伤流强度表现为结球期>莲座期>幼苗期。在配施处理之间,各生育期娃娃菜根系伤流强度随着铵态氮肥比例的增加呈现先上升后下降的趋势,其中 T4 处理在各时期均达到最高值,且分别较 CK2 提高了 152.73%,130.76%和 16.99%,且差异显著,说明 T4 处理更有利于娃娃菜植株将吸收的养分运输到地上部,与单一氮源施肥处理相比较,T4 显著高于 T1、T5

和 T6 处理,但与 T5 未达显著性差异水平。

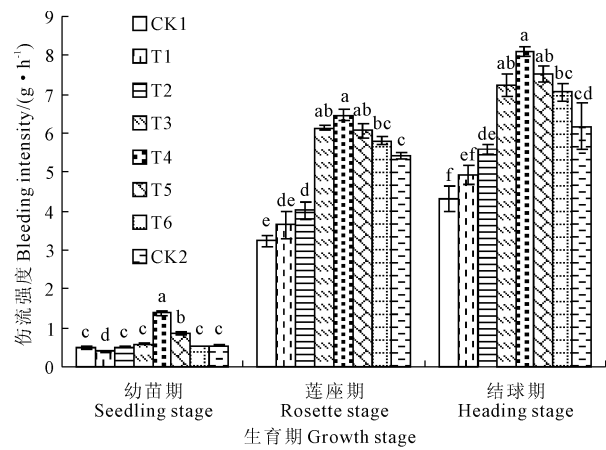


图 1 铵硝配施对娃娃菜根系伤流强度的影响
Fig.1 Effect of combined application of ammonium and nitrate on root bleeding intensity of the mini Chinese cabbage

2.2 铵硝配施对娃娃菜不同时期不同部位养分吸收的影响

2.2.1 铵硝配施对娃娃菜不同时期不同部位氮素吸收的影响 如表 3 所示,全生育期内不同部位的含氮量表现为:叶球>外叶>根,且随着生育期的推进差异加大。结球初期 T4 处理娃娃菜各个部位的含氮量高于其它处理,与除 T5 处理外的其它处理均

达到显著性差异,分别较 CK2 增加了 32.63%,5.40%和 8.88%。采收期地上部 T3 处理含氮量最高,叶球与除 T4 外的其它处理达到显著性差异,较 CK2 增加了 26.22%,说明 T3 处理更有利于氮素在叶球中积累;地下部 T4 处理含氮量最高,高于 CK2,但没有达到显著性差异水平。单一氮源施肥处理之间相比较,T5 高于 T1 和 T6,但差异不显著。
2.2.2 铵硝配施对娃娃菜不同时期不同部位磷素吸收的影响 如表 4 所示,全生育期内不同部位的含磷量表现为叶球>外叶>根,且随着生育期的推进差异加大。结球初期随着铵态氮肥比例的增加,植株同一部位的磷含量呈先增加后降低的趋势,叶球 T4 达到最大值,与除 T3 的其它处理均达显著性差异,较 CK2 提高 7.36%;根部 T3 达到最大值,高于 CK2,但没达到显著性差异。采收期娃娃菜地上部分磷含量随着铵态氮肥比例的增加呈先增加后降低的趋势,叶球和外叶 T4 处理的磷含量均达到最大值,较 CK2 增加了 7.29%和 14.88%,均达到显著性差异水平,说明 T4 处理更有利于娃娃菜地上部磷素的积累;根部各处理间差异不明显。单一氮源施肥处理之间相比较,T6 高于 T1 和 T5,但没达到显著性差异水平。

表 3 铵硝配施对娃娃菜不同时期不同部位氮素吸收的影响						
Table 3 Effect of combined application of ammonium and nitrate on nitrogen absorption in different parts of mini Chinese cabbage in different stages						
处理 Treatment	结球初期 Starting heading stage			采收期 Mature stage		
	叶球/(g·kg ⁻¹) Ball-leaf	外叶/(g·kg ⁻¹) Outer-leaf	根/(g·kg ⁻¹) Roots	叶球/(g·kg ⁻¹) Ball-leaf	外叶/(g·kg ⁻¹) Outer-leaf	根/(g·kg ⁻¹) Roots
CK1	2.79±0.01e	2.53±0.01e	2.49±0.06d	6.76±0.13f	5.46±0.06e	5.27±0.01d
T1	4.95±0.05d	4.77±0.13d	4.64±0.17c	8.60±0.11cde	5.66±0.02d	5.54±0.04c
T2	5.40±0.18bcd	4.96±0.08cd	4.87±0.10bc	8.14±0.16de	5.77±0.01bc	5.70±0.01b
T3	5.66±0.08bc	5.29±0.11bc	4.96±0.06bc	10.11±0.36a	6.20±0.04a	5.53±0.02c
T4	6.87±0.30a	5.86±0.05a	5.52±0.15a	9.46±0.10ab	6.11±0.01a	5.92±0.03a
T5	5.76±0.03b	5.73±0.10a	5.19±0.03ab	9.17±0.37bc	5.68±0.03cd	5.46±0.03c
T6	5.11±0.07d	4.75±0.25d	4.62±0.11c	8.75±0.21cd	5.80±0.01b	5.50±0.03c
CK2	5.18±0.23cd	5.56±0.08b	5.07±0.10b	8.01±0.18e	6.14±0.03a	5.86±0.01a

注:表中同列数据后不同小写字母表示差异显著(P<0.05),下同。
Note: different lowercase letters indicate the significant difference at P<0.05 level, the same below.

2.2.3 铵硝配施对娃娃菜不同时期不同部位钾素吸收的影响 如表 5 所示,全生育期内娃娃菜钾素积累表现为地上部分>地下部分,结球初期>采收期。结球初期地上部的钾含量随铵态氮肥比例的增加呈先上升后下降的趋势,叶球 T3 达到最高值,较 CK2 增加 13.50%,达到显著性差异;地下部钾素含量随铵态氮肥比例的增加呈下降的趋势,T1 达到最

大值,但与各配施处理无显著性差异。采收期植株钾含量随铵态氮肥比例的增加呈先上升后下降的趋势,叶球 T3 处理达到最大值,较 CK2 增加了 21.73%,达显著性差异;根 T4 达到最大值,显著高于其他处理,较 CK2 增加了 50.50%。单一氮源施肥处理之间相比较 T1 和 T5 之间无显著差异,但均显著高于 T6。

表 4 铵硝配施对娃娃菜不同时期不同部位磷素吸收的影响

Table 4 Effect of combined application of ammonium and nitrate on phosphorus absorption in different parts of mini Chinese cabbage in different stages

处理 Treatment	结球初期 Starting heading stage			采收期 Mature stage		
	叶球/(g·kg ⁻¹) Ball – leaf	外叶/(g·kg ⁻¹) Outer – leaf	根/(g·kg ⁻¹) Roots	叶球/(g·kg ⁻¹) Ball – leaf	外叶/(g·kg ⁻¹) Outer – leaf	根/(g·kg ⁻¹) Roots
CK1	3.84 ± 0.06e	3.87 ± 0.11bc	3.43 ± 0.19bc	5.19 ± 0.16d	3.91 ± 0.07e	3.91 ± 0.04ab
T1	4.36 ± 0.14d	3.38 ± 0.22c	3.16 ± 0.13c	5.26 ± 0.20d	3.81 ± 0.04e	3.38 ± 0.23b
T2	4.64 ± 0.08cd	4.20 ± 0.11ab	3.84 ± 0.07ab	5.21 ± 0.01d	4.66 ± 0.02ab	4.33 ± 0.08a
T3	5.23 ± 0.15ab	4.35 ± 0.33ab	3.98 ± 0.05a	6.54 ± 0.03ab	4.78 ± 0.08a	4.36 ± 0.39a
T4	5.54 ± 0.08a	4.09 ± 0.27b	3.75 ± 0.08ab	6.77 ± 0.07a	4.94 ± 0.01a	4.44 ± 0.27a
T5	4.91 ± 0.14bc	3.78 ± 0.28bc	3.54 ± 0.08abc	6.09 ± 0.11c	4.02 ± 0.04de	3.73 ± 0.27ab
T6	4.91 ± 0.05bc	4.12 ± 0.08b	3.85 ± 0.03ab	6.29 ± 0.07bc	4.41 ± 0.05bc	4.21 ± 0.13a
CK2	5.16 ± 0.17b	4.84 ± 0.09a	3.82 ± 0.30ab	6.31 ± 0.18bc	4.30 ± 0.25cd	4.38 ± 0.29a

表 5 铵硝配施对娃娃菜不同时期不同部位钾素吸收的影响

Table 5 Effect of combined application of ammonium and nitrate on the absorption of potassium in different parts of mini Chinese cabbage in different stages

处理 Treatment	结球初期 Starting heading stage			采收期 Mature stage		
	叶球/(g·kg ⁻¹) Ball – leaf	外叶/(g·kg ⁻¹) Outer – leaf	根/(g·kg ⁻¹) Roots	叶球/(g·kg ⁻¹) Ball – leaf	外叶/(g·kg ⁻¹) Outer – leaf	根/(g·kg ⁻¹) Roots
CK1	9.83 ± 0.11cd	7.58 ± 0.14c	4.77 ± 0.02d	7.92 ± 0.10d	7.65 ± 0.16c	3.92 ± 0.28c
T1	9.93 ± 0.47cd	10.82 ± 0.11a	6.85 ± 0.09a	8.87 ± 0.16bc	9.13 ± 0.09b	5.25 ± 0.17b
T2	11.10 ± 0.06ab	11.37 ± 0.02a	6.68 ± 0.06a	7.82 ± 0.18d	8.88 ± 0.20b	4.05 ± 0.10c
T3	11.60 ± 0.20a	11.55 ± 0.23a	6.75 ± 0.13a	9.58 ± 0.10a	10.42 ± 0.32a	5.28 ± 0.44b
T4	10.65 ± 0.10bc	11.42 ± 0.16a	6.60 ± 0.13a	9.18 ± 0.25ab	10.57 ± 0.10a	6.05 ± 0.16a
T5	11.02 ± 0.32ab	11.00 ± 0.35a	5.73 ± 0.31b	8.62 ± 0.14c	9.55 ± 0.26b	4.45 ± 0.10c
T6	9.30 ± 0.21d	8.82 ± 0.54b	4.12 ± 0.27d	7.22 ± 0.07e	7.35 ± 0.35c	3.20 ± 0.15d
CK2	10.22 ± 0.45bc	9.62 ± 0.39b	5.00 ± 0.03c	7.87 ± 0.09d	7.35 ± 0.05c	4.02 ± 0.06c

2.3 铵硝配施对娃娃菜氮素利用效率的影响

如表 6 所示,在配施处理中,随着铵态氮肥比例的增加,娃娃菜氮素积累总量、PFP、NUE 和 RE 的变化呈先增加后降低的趋势,且均为 T3 处理最大,分别为 48.01 kg·hm⁻²、413.82 kg·kg⁻¹、133.32 kg·kg⁻¹、

6.83%,较 CK2 增加了 24.54%、33.26%、343.81%和 103.24%,差异显著。与单一氮源施肥处理相比较,配施处理娃娃菜氮素积累总量、PFP、NUE 和 RE 均显著提高。单一氮源施肥处理之间相比较,氮素积累总量、PFP、NUE 和 RE 无显著差异。

表 6 铵硝配施对娃娃菜氮素利用效率的影响

Table 6 Effect of combined application of ammonium nitrate on nitrogen use efficiency of mini Chinese cabbage

处理 Treatment	氮素积累总量 Total nitrogen accumulation /(kg·hm ⁻²)	氮肥偏生产力(PFP) Nitrogen partial productivity /(kg·kg ⁻¹)	氮肥农学效率(NUE) Nitrogen use efficiency /(kg·kg ⁻¹)	氮素回收效率(RE) Efficiency of nitrogen recovery /%
CK1	28.98 ± 0.26c	—	—	—
T1	39.54 ± 0.29b	401.35 ± 20.72abc	120.86 ± 20.72abc	3.82 ± 0.10b
T2	39.96 ± 0.66b	362.76 ± 10.39c	82.27 ± 10.39c	3.97 ± 0.24b
T3	48.01 ± 0.86a	413.82 ± 22.09a	133.32 ± 22.09a	6.89 ± 0.31a
T4	47.80 ± 0.54a	409.69 ± 12.87ab	129.20 ± 12.87ab	6.81 ± 0.20a
T5	40.97 ± 3.97b	367.18 ± 10.21bc	86.69 ± 10.21bc	4.34 ± 1.44b
T6	40.42 ± 0.65b	388.78 ± 5.45abc	108.29 ± 5.45abc	4.14 ± 0.24b
CK2	38.35 ± 0.53b	310.53 ± 0.94d	30.04 ± 0.94d	3.39 ± 0.19b

2.4 铵硝配施对娃娃菜不同部位干物质积累的影响

如表 7 所示,各处理娃娃菜叶球的干物质积累的变化均呈上升趋势。在 6 月 14 日之前,各处理干物质积累增加的比较缓慢,在 6 月 14 日至 22 日之间,各处理干物质积累增加的幅度较大,在 6 月 22

日之后干物质积累增加的幅度减缓。在整个结球期配施处理 T3 叶球的干物质积累增加的最明显,在采收时达到最大值,显著高于除 T2 外的其它处理,较 CK2 增加了 16.63%。单一氮源施肥处理之间相比较,T1 干物质积累高于 T5 和 T6,但没达显著性差异。

表 7 铵硝配施对娃娃菜结球期干物质积累的影响

Table 7 Effect of combined application of ammonium and nitrate on dry matter accumulation of mini Chinese cabbage in heading stage		采样日期 Sampling date(M - d)				
植株部位 Plant parts	处理 Treatment	06 - 10	06 - 14	06 - 18	06 - 22	06 - 26
叶球/(g·株 ⁻¹) Ball - leaf /(g·plant ⁻¹)	CK1	14.64 ± 0.23e	18.82 ± 0.08bc	22.78 ± 1.20d	25.90 ± 0.92d	25.06 ± 0.31e
	T1	17.40 ± 0.20b	17.42 ± 0.76c	27.76 ± 0.10a	30.97 ± 0.39ab	32.13 ± 1.11d
	T2	16.32 ± 0.20d	18.66 ± 0.83bc	24.83 ± 0.20bc	31.33 ± 0.55ab	34.19 ± 0.27a
	T3	17.03 ± 0.30bc	20.48 ± 0.21a	27.19 ± 0.39a	32.35 ± 1.08a	34.50 ± 0.43a
	T4	17.82 ± 0.08a	20.21 ± 0.70ab	25.33 ± 0.39bc	31.41 ± 0.71ab	31.65 ± 0.26b
	T5	16.37 ± 0.30cd	18.13 ± 0.38c	26.11 ± 0.33ab	29.50 ± 0.07bc	30.61 ± 0.45bc
	T6	14.51 ± 0.05e	18.24 ± 0.46c	24.01 ± 0.67cd	28.44 ± 0.70c	29.11 ± 0.10cd
	CK2	16.52 ± 0.18cd	18.35 ± 0.18c	27.93 ± 0.49a	29.55 ± 0.88bc	29.58 ± 0.24cd
外叶/(g·株 ⁻¹) Outer - leaf /(g·plant ⁻¹)	CK1	21.71 ± 0.21e	27.69 ± 0.16d	30.03 ± 0.48c	33.12 ± 0.93d	32.87 ± 0.58e
	T1	24.30 ± 0.12c	28.61 ± 0.41bcd	37.89 ± 1.18ab	40.14 ± 0.95ab	38.77 ± 0.28bc
	T2	27.42 ± 0.27a	28.02 ± 1.04cd	37.41 ± 0.85ab	43.79 ± 0.59a	40.77 ± 0.28a
	T3	26.90 ± 0.44ab	29.50 ± 0.13bcd	40.45 ± 1.02a	42.03 ± 1.04ab	39.66 ± 0.18ab
	T4	24.24 ± 0.41c	28.35 ± 0.68bcd	35.56 ± 0.77b	40.25 ± 0.74abc	38.74 ± 0.93bc
	T5	22.61 ± 0.24d	30.49 ± 0.36abc	36.56 ± 0.57ab	39.18 ± 2.90bc	37.73 ± 0.31cd
	T6	26.20 ± 0.13b	32.42 ± 1.73a	38.62 ± 2.42ab	39.41 ± 0.77bc	38.99 ± 0.42bc
	CK2	23.32 ± 0.27d	30.93 ± 0.85ab	36.83 ± 0.46ab	37.24 ± 0.43c	36.74 ± 0.41d
根/(g·株 ⁻¹) Roots /(g·plant ⁻¹)	CK1	1.07 ± 0.01d	1.15 ± 0.02d	1.29 ± 0.05f	1.45 ± 0.02f	1.50 ± 0.04c
	T1	1.14 ± 0.01cd	1.33 ± 0.05ab	1.46 ± 0.05de	1.88 ± 0.03d	1.79 ± 0.03b
	T2	1.17 ± 0.04cd	1.11 ± 0.02d	1.51 ± 0.03cd	1.92 ± 0.04cd	1.91 ± 0.06b
	T3	1.26 ± 0.02ab	1.36 ± 0.03ab	1.69 ± 0.04ab	2.15 ± 0.09ab	2.10 ± 0.05b
	T4	1.30 ± 0.01a	1.38 ± 0.01a	1.75 ± 0.07a	2.29 ± 0.05a	2.16 ± 0.06a
	T5	1.26 ± 0.01ab	1.26 ± 0.05bc	1.58 ± 0.05cd	1.93 ± 0.04cd	1.83 ± 0.03b
	T6	1.20 ± 0.04bc	1.29 ± 0.04abc	1.62 ± 0.05abc	2.03 ± 0.03bc	1.94 ± 0.07b
	CK2	1.14 ± 0.04cd	1.21 ± 0.01cd	1.35 ± 0.02ef	1.68 ± 0.03e	1.59 ± 0.05c

如表 7 所示,结球期各处理娃娃菜外叶的干物质积累均呈先上升后下降的趋势。在 6 月 14 日之前,干物质积累增加的比较快,6 月 14 日至 22 日之间增加的幅度有所下降,6 月 22 日之后干物质开始减少。在整个结球期,T2 处理外叶的干物质积累较其它处理增加的趋势更加明显,且在 6 月 22 日达到最大值,显著高于单一氮源施肥处理和当地施肥处理,较 CK2 高出 17.59%,达显著性差异水平。在采收时,T2 较 CK2 高出 10.97%,达到显著性差异。单一氮源施肥处理之间相比较,无显著差异。

如表 7 所示,各处理娃娃菜根的干物质积累的变化趋势均呈现先增加后下降的趋势。在整个结球

期,配施处理的干物质积累明显高于单一氮源施肥处理和当地施肥处理,T4 的根干物质积累最高,且在 6 月 22 日时,各处理均达到最大值,较 CK2 增加了 36.31%,达到显著性差异水平。采收时,T4 显著高于其它各处理。在整个结球期单一氮源施肥之间,T5 和 T6 处理根干物质积累上升趋势和最高峰值高于单施 T1 处理。

2.5 铵硝配施对娃娃菜产量的影响

如表 8 所示,随着铵态氮肥比例的增加,产投比呈先增大后降低的趋势,T3 达到最大值,较 CK2 增加了 13.98%,达显著性差异水平。T2 单株重和生物产量最大,分别较 CK2 增加了 3.23% 和 2.91%,

达显著性差异水平。T3 经济产量最大,较 CK2 处理增加了 33.27%,达显著性差异水平,且 T2 与 T3 处理无显著差异;铵硝配施处理单株重、经济产量和生物产量均高于单一氮源施肥处理,说明铵硝配比施

肥对娃娃菜的增产效果优于单一形态氮肥的施用。在单一氮源施肥处理之间,T1 处理单株重、生物产量均显著高于 T5 和 T6,经济产量高于 T5 和 T6,没达显著性差异水平,但是 T5 和 T6 产投比显著高于 T1。

表 8 铵硝配施对娃娃菜产量的影响					
Table 8 Effect of combined application of ammonium nitrate on yield of mini Chinese cabbage					
处理 Treatment	单株重/kg Single plant weight	生物产量/(t·hm ⁻²) Biomass yield	经济产量/(t·hm ⁻²) Economic yield	经济系数/% Marketable coefficient	产投比 Ratio of output to input
CK1	1.96 ± 0.01d	159.43 ± 0.51d	77.38 ± 3.82d	48.53	2.04 ± 0.10ab
T1	2.19 ± 0.01ab	178.10 ± 0.51ab	101.29 ± 2.82b	56.88	1.54 ± 0.04c
T2	2.24 ± 0.02a	181.77 ± 1.52a	113.02 ± 3.55a	62.18	1.93 ± 0.06ab
T3	2.21 ± 0.03ab	179.20 ± 2.74ab	114.16 ± 6.09a	63.70	2.12 ± 0.11a
T4	2.19 ± 0.01b	176.94 ± 0.89b	100.07 ± 2.87c	56.56	2.04 ± 0.06ab
T5	2.11 ± 0.01c	171.35 ± 0.66c	97.18 ± 2.44b	56.71	2.11 ± 0.05a
T6	1.97 ± 0.02d	160.06 ± 1.62d	93.71 ± 1.21b	58.54	2.09 ± 0.03a
CK2	2.17 ± 0.01b	176.63 ± 0.99b	85.66 ± 0.26cd	48.50	1.86 ± 0.07b

3 讨 论

3.1 铵硝配施对娃娃菜根系伤流强度的影响

根系是植株从外界环境中吸收养分的最主要器官,其活性直接影响植株的生长发育,根系伤流液作为衡量植株根系活力的一个指标^[27],其强度和成分,也是根系活力的一种表现。而外部条件的改变,会对植株根系伤流液造成一定的影响,本试验通过不同铵硝配施处理,对娃娃菜根系伤流液伤流强度做了一个比较,得出铵硝配施处理较硝态氮处理根系伤流强度更大。Marcus^[28]通过分根试验也得出,铵硝混合氮源生长的植物根系要优于单一供给铵态氮或硝态氮,这可能是铵态氮肥施入土壤初期,硝化作用尚未完成前,作物根系可能会吸收一些铵态氮;李永梅等^[29]研究表明,不同铵硝配比的肥料施入土壤后,硝化时间和硝化速率的高低受土壤质地、氮肥浓度的影响较大,施肥后 30 d 内完成硝化作用,而酰胺态氮肥(尿素)经过脲酶的催化水解后($\text{CO}(\text{NH}_2) + \text{H}_2\text{O} + \text{H}^+ \rightarrow 2\text{NH}_4^+ + \text{HCO}_3^-$),其他过程和铵态氮肥相似,由于铵态氮有利于植株根系根毛的生长发育或植物根系水通道蛋白的合成,因为有研究证明植物根系运输水分的主要通道是水通道蛋白^[30],从而对外界营养吸收效果更好。而本试验中当 $\text{NO}_3^- - \text{N}:\text{NH}_4^+ - \text{N} = 3:7$ 时,植株各个生育期的根系伤流强度最大,说明该处理娃娃菜的根系从土壤中吸收和运输养分的能力最强,而全铵处理中铵态氮浓度太大,可能对植株造成氨毒作用^[31]。

3.2 铵硝配施对娃娃菜不同时期不同部位养分吸收的影响

对作物施一定量的氮、磷、钾肥料,可以有效地促使增产增收,还可以提高产品品质^[32]。本试验研究发现,施肥处理娃娃菜各部位的氮、磷、钾的含量明显高于不施肥处理,说明施肥可以提高娃娃菜对养分的积累,尤其是铵硝的配施处理,对娃娃菜植株氮、磷、钾的吸收和积累有显著影响,明显高于不施肥处理和单一氮源的处理,这与牛振明等^[17]在甘蓝中的研究结果一致;刘赵帆等在花椰菜^[18]中研究提出, $\text{NO}_3^- - \text{N}:\text{NH}_4^+ - \text{N} = 5:5 \sim 3:7$ 时,花椰菜各生育时期植株体内氮、磷、钾含量均较多,这与本试验在娃娃菜研究中获得结果相似,尤其在铵硝比在 5:5 时,娃娃菜各个部位的氮、磷、钾含量均较多,且显著高于当地施肥习惯。所以,铵硝配比在 5:5 时,有利于娃娃菜各部位对矿质养分的吸收和积累。

3.3 铵硝配施对娃娃菜氮肥利用效率的影响

氮肥偏生产力、氮肥农学效率和氮肥回收效率都是表示氮肥利用效率的指标^[33],氮肥利用效率的提高,不仅可以促使增产增收,还可以减少肥料残留对环境造成的污染^[34]。本试验研究表明, $\text{NO}_3^- - \text{N}:\text{NH}_4^+ - \text{N} = 5:5$ 时,小区娃娃菜氮肥偏生产力、氮肥农学效率和氮肥回收效率均达到最大值,显著高于当地施肥和单一氮源施肥,说明铵硝配施可以有效地增加娃娃菜对氮素的吸收利用效率。巨晓棠等^[35-36]运用盆栽模拟试验探讨了氮肥施入土壤后氮库的变化特征,得出尿素、硫酸铵和碳酸氢铵在

14 d 内完成硝化作用,说明铵硝配施处理既能在施肥初期为娃娃菜供应硝态氮肥,又能随着铵态氮肥的硝化,为娃娃菜提供源源不断的可吸收的硝态氮。而与前人在小麦等的报道相比较,本试验中叶菜类蔬菜娃娃菜氮素回收效率普遍较低,这可能是肥料的施入量过大,或者是试验用地中碱解氮含量过高的原因,所以合理适量的配施,可能是解决当地蔬菜种植氮素利用效率偏低的一个办法。

3.4 铵硝配施对娃娃菜不同部位干物质积累和产量的影响

干物质积累是产量形成的基础和关键^[37],植株干物质生产和合理的分配利用可以有效增加植株干物质积累和产量。本试验研究得出, $\text{NO}_3^- - \text{N} : \text{NH}_4^+ - \text{N} = 7:3$ 时娃娃菜地上部分外叶干物质积累和生物产量达到最大值, $\text{NO}_3^- - \text{N} : \text{NH}_4^+ - \text{N} = 5:5$ 时娃娃菜地上部叶球干物质积累、经济产量和产投比达到最大值, $\text{NO}_3^- - \text{N} : \text{NH}_4^+ - \text{N} = 3:7$ 时娃娃菜地下部分干物质积累达到最大值,而且在整个生育期娃娃菜叶球干物质积累量一直呈增加的趋势,外叶和根部在后期呈下降的趋势,说明铵硝配施更有利于娃娃菜植株对吸收同化的营养物质的分配利用,同时还有利于娃娃菜各部位干物质积累和产量的形成。Cox^[38]和 Wang^[39]曾报道,在对小麦同时供应硝态氮和铵态氮时,地上部生长速率显著高于单一铵态氮和硝态氮源,最终产量也要高于单一氮源处理。而高青海等^[40]在黄瓜中研究得出,硝态氮处理地上部分干物质积累显著高于铵态氮处理,证明硝态氮更有利于植株地上部分干物质积累,也与本试验结果相似;还有董佳等^[41]在翠菊中研究得出,高浓度的铵态氮和硝态氮都会抑制根系的生长发育,所以本试验中全硝和全铵处理中铵态氮和硝态氮浓度可能过高,对娃娃菜地下部生长有一定抑制作用。 $\text{NO}_3^- - \text{N} : \text{NH}_4^+ - \text{N} = 5:5$ 时娃娃菜地上部分叶球的干物质积累和经济产量达到最大值,这可能是适合娃娃菜植株生长发育的铵硝配比。而 $\text{NO}_3^- - \text{N} : \text{NH}_4^+ - \text{N} = 3:7$ 时娃娃菜地下部分的干物质积累最高,这可能是铵态氮更有利于植株地下部的生长发育,并且在本实验中,铵态氮比例高的处理,娃娃菜植株根系伤流强度和对养分的吸收都会增大。

4 结 论

综上所述,铵硝配施能够有效地增加娃娃菜各部位干物质积累、根系活力、对矿质营养的吸收利用和产量,并且 $\text{NO}_3^- - \text{N} : \text{NH}_4^+ - \text{N} = 5:5$ 有利于娃娃

菜叶球的干物质积累、经济产量、经济系数、产投比和氮肥利用效率的提高; $\text{NO}_3^- - \text{N} : \text{NH}_4^+ - \text{N} = 7:3$, 有利于娃娃菜外叶的干物质积累和生物产量的提高; $\text{NO}_3^- - \text{N} : \text{NH}_4^+ - \text{N} = 3:7 \sim 5:5$ 时,有利于娃娃菜植株对养分的吸收和地下部物质向地上部的运输。所以 $\text{NO}_3^- - \text{N} : \text{NH}_4^+ - \text{N} = 5:5$ 是适合高原夏季蔬菜产区娃娃菜生产的铵硝配施比例。

参 考 文 献:

- [1] 冯毓琴,李国峰,李 梅.兰州高原夏菜产业现状与发展思路[J].中国蔬菜,2009,(11):9-12.
- [2] 张 凯,张玉鑫,陈年来,等.甘肃省高原夏菜种植气候区划[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2012,40(5):180-185.
- [3] 李生秀.提高旱地土壤氮肥利用效率的途径和对策[J].土壤学报,2002,39(增刊):56-76.
- [4] 李比希(德).刘更另译.化学在农业和生理学上的应用[M].北京:农业出版社,1983.
- [5] Amon DI. Ammonium and nitrate nitrogen nutrition of barley at different seasons in relation to hydrogenion concentration, manganese, copper and oxygen supply[J]. Soil Sci, 1973,44:91-120.
- [6] Schrader LE, Domska D, Jung PE, et al. Uptake and assimilation of ammonium-N and nitrate-N and their influence on the growth of corn (*Zea mays* L.)[J]. Agron J, 1972,64:690-695.
- [7] 杨肖娥,孙 羲.不同水稻品种 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 吸收的动力学[J].土壤通报,1991,22(5):222-224.
- [8] Murphy D V, Macdonald A J, Stockdale E A, et al. Soluble organic nitrogenin agricultural soils[J]. Biology Fertility Soils, 2000,30:374-387.
- [9] J R. Evans. Nitrogen and photosynthesis in the leaf of wheat(*Triticum ae stivum* L.)[J]. Plant Physiol, 1983,72:297-302.
- [10] Fried M, Zsoldos F, Vose P B et al. Characterising the NO_3^- and NH_4^+ uptake process in rice roots by use of ^{15}N labled NH_4NO_3 [J]. Physiol Plant, 1965,18:313-320.
- [11] 徐加林,别之龙,张盛林.不同氮素形态配比对生菜生长、品质和保护酶活性的影响[J].华中农业大学学报,2005,24(3):290-294.
- [12] 伍松鹏,张秀娟,吴 楚,等.不同氮素形态比例对黄瓜幼苗生长和光合特性的影响[J].安徽农业科学,2004,34(12):2697,2707.
- [13] 顾曼如,张若杆,束怀瑞,等.苹果氮素研究初报—植株中氮素营养的年周期变化特性[J].园艺学报,1981,8(4):21-28.
- [14] 彭 勇,彭福田,周 鹏,等.冬枣对不同形态氮素的吸收与利用[J].应用生态学报,2007,18(6):1265-1269.
- [15] 郭传友,余庆波.不同形态氮素营养对彩椒生理特性的影响[J].安徽师范大学学报,2003,26(1):55-58.
- [16] 胡琳莉,郁继华,廖伟彪,等.遮荫条件下不同铵硝比对小白菜幼苗生长、光合及根系结构的影响[C]//中国园艺学会2014年学术年会论文摘要集.南昌:中国园艺学会,2014.
- [17] 牛振明,张国斌,刘赵帆,等.氮素形态及配比对甘蓝养分吸收、产量以及品质的影响[J].草业学报,2013,22(6):68-76.

[18] 刘赵帆,张国斌,郁继华,等. 氮肥形态及配比对花椰菜产量、品质和养分吸收的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(7): 1923-1930.

[19] 杨 阳,郑秋玲,裴成国,等. 不同硝铵比对霞多丽葡萄幼苗生长和氮素营养的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(2): 370-375.

[20] 曹翠玲. 氮素及形态对作物的生理效应[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2002: 1-105.

[21] 陈 磊,朱月林,杨立飞,等. 氮素不同形态配比对菜用大豆生长、种子抗氧化酶活性及活性氧代谢的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(3): 768-772.

[22] 郭晓惠,金亚波,韦建玉,等. 不同形态氮配施对烤烟碳氮代谢及烟叶产质量的影响[J]. 安徽农业科学, 2013, 41(3): 1055-1057, 1245.

[23] 邓宏中,李 鑫,徐克章,等. 不同年代大豆品种根系伤流液中可溶性糖含量的变化及与叶片光合的关系[J]. 华南农业大学学报, 2013, 34(2): 197-202.

[24] 章笑赞,祁百福,宋世威,等. 不同铵硝配比对芥蓝伤流液组分及植株氮磷钾积累的影响[J]. 中国蔬菜, 2014(1): 31-36.

[25] 孙苗苗,邓宏中,徐克章,等. 不同年代大豆品种根系伤流液重量变化及其与叶片光合的关系[J]. 大豆科学, 2011, 30(5): 795-799.

[26] 谢迎新,刘 超,朱云集,等. 氮、硫配施对冬小麦氮素利用效率及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(1): 64-71.

[27] 常 江,张自立,郗红建,等. 外源稀土对水稻伤流组分的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(5): 522-525.

[28] Marcus S, Boy F, Peter S. Root morphology and nitrogen uptake of maize simultaneously supplied with ammonium and nitrate in a split-root system[J]. Annals of Botany, 1993, 72: 107-115.

[29] 李永梅,杜彩琼,林春苗,等. 铵态氮肥施入土壤中的转化[J]. 云南农业大学学报, 2003, 18(1): 26-29.

[30] 于秋菊,吴 琦,林忠平,等. 植物水孔蛋白研究进展[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2002, 38(6): 855-866.

[31] Rodrigues M Â, Santos H, Ruivo S, et al. Slow-release N fertilizers are not an alternative to urea for fertilization of autumn-grown tall cabbage[J]. European Journal of Agronomy, 2010, 32(2): 137-143.

[32] 周箬涵,郁继华,杨兵丽,等. 不同氮素形态及配比对娃娃菜产量、品质及其养分吸收的影响[J]. 华北农学报, 2015, 30(3): 216-222.

[33] 李方敏,樊小林,陈文东. 控释肥对水稻产量和氮肥利用效率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(4): 494-500.

[34] 薛利红,俞映琼,杨林章. 太湖流域稻田不同氮肥管理模式下的氮素平衡特征及环境效应评价[J]. 环境科学, 2011, 32(4): 1133-1138.

[35] 巨晓棠,刘学军,张福锁. 不同氮肥施用后土壤各氮库的动态研究[J]. 中国生态农业学报, 2004, 12(1): 92-95.

[36] 巨晓棠,刘学军,张福锁. 小麦苗期施入氮肥在土壤不同氮库的分布和去向[J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(3): 259-264.

[37] 宋 慧,冯佰利,高小丽,等. 不同品种(系)小豆花后干物质积累与转运特性[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2011, 39(10): 94-100.

[38] Cox W J, Reisenauer H M. Growth and ion uptake by wheat supplied nitrogen as nitrate, or ammonium, or both[J]. Plant Soil, 1973, 38: 363-380.

[39] Wang X T, Below F E. Cytokinins in enhanced growth and tillering of wheat induced by mixed nitrogen source[J]. Crop Sci, 1996, 36: 121-126.

[40] 高青海,魏 珉,杨凤娟,等. 黄瓜幼苗干物质积累、膨压及光合速率对铵态氮和硝态氮的响应[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(1): 120-125.

[41] 董 佳,牟 溥. 硝态氮和铵态氮对翠菊根系生长的影响[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2013, 49(4): 374-378.

(上接第 9 页)

[26] 郭腾飞,梁国庆,周 卫,等. 施肥对稻田温室气体排放及土壤养分的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(2): 337-345.

[27] 兰雅萍,黄月清,李丽容. 施氮量对稻田 CH₄ 排放的影响[J]. 福建热作科学, 2014, 39(1): 8-12.

[28] 郑土英,杨彩玲,徐世宏,等. 耕作方式和氮肥对稻田 CH₄ 排放的影响及与还原物质间的关系[J]. 广东农业科学, 2014, (13): 49-53.

[29] 齐玉春,董云社,章 申. 华北平原典型农业区土壤甲烷通量研究[J]. 农村生态环境, 2002, 18(3): 56-58, 60.

[30] 李秀云,张洪培,沈玉芳,等. 生物炭与氮肥对旱作玉米农田 CO₂ 和 CH₄ 排放特征的影响[J]. 西北植物学报, 2016, 36(6): 1216-1224.

[31] Sun B F, Zhao H, Lv Y Z, et al. The effect of nitrogen fertilizer application on methane and nitrous oxide emission/uptake in Chinese croplands[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2016, 15(2): 440-450.

[32] Hutsch B W, Webster C P, Powlson D S. Methane oxidation as affected by land use, soil PH and nitrogen fertilization[J]. Soil Biology & Biochemistry, 1994, 26: 1613-1622.

[33] Adamsen A P S, King G M. Methane consumption in temperate and subarctic forest soils: rates, vertical zonation, and responses to water and nitrogen[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1993, 59(2): 485-490.

[34] Wang Z P, Ineson P. Methane oxidation in a temperate coniferous forest soil: effects of inorganic N[J]. Soil Biology Biochemistry, 2003, 35(3): 427-433.

[35] 张 辉,张蓓蓓. 长武县 1979—2008 年水面蒸发量与温度、降雨量关系通径分析[J]. 中国农学通报, 2017, 33(9): 89-93.