

水肥一体化配合硝化/脲酶抑制剂实现 油菜减氮增效研究

宋燕燕^{1,2}, 赵秀娟¹, 张淑香^{1*}, 白中科^{2,3}, 龙怀玉¹, 岳继生⁴, 赵来明⁴

(1 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081; 2 中国地质大学土地科学技术学院, 北京 100083;
3 国土资源部土地整治重点实验室, 北京 100035; 4 新疆慧尔农业集团股份有限公司, 新疆昌吉 831100)

摘要: 【目的】研究水肥一体化方式下减氮施肥并添加硝化和脲酶抑制剂对油菜生长及土壤硝态氮和铵态氮含量的影响, 旨在筛选出配合硝化/脲酶抑制剂施用的最适减氮量, 为减少氮素损失、提高蔬菜生产中氮素利用率和降低蔬菜硝酸盐含量提供理论依据。【方法】采用盆栽试验, 利用负压灌溉水肥一体化系统 $[-5 \pm 1] \text{ kPa}$, 设不施氮肥 (T1)、尿素 150 kg/hm^2 (T2)、尿素 $150 \text{ kg/hm}^2 + 10\% \text{DCD}$ (双氰胺) + $1\% \text{HQ}$ (氢醌) (T3)、尿素 $127.5 \text{ kg/hm}^2 + 10\% \text{DCD} + 1\% \text{HQ}$ (T4)、尿素 $105 \text{ kg/hm}^2 + 10\% \text{DCD} + 1\% \text{HQ}$ (T5) 共 5 个处理。监测了油菜生长期供水、土壤含水量、油菜生长指标及土壤硝态氮与铵态氮含量的变化, 分析调查了收获后油菜的产量、品质指标和养分含量。【结果】在油菜生长期, 负压灌溉各处理的总出水量非常接近 ($12174 \sim 13869 \text{ mL}$)。当施肥量相同时, 与不添加抑制剂处理 (T2) 相比, 施用硝化和脲酶抑制剂 (T3) 能够有效抑制土壤中铵态氮向硝态氮的转化, 提高叶长、叶宽和叶绿素含量, 显著提高油菜产量 25.2% , 提高氮肥利用率 85.2% , 硝酸盐含量显著降低 51.9% 。与不添加抑制剂处理 (T2) 相比, 减氮 $15\% \sim 30\%$ 同时添加硝化和脲酶抑制剂对油菜产量、品质、养分吸收也均有不同程度的促进效果, 并能够抑制硝化作用, 减少土壤中硝态氮累积, 减氮 30% 并添加硝化和脲酶抑制剂的处理 (T5) 能将油菜产量提高 15.9% , 氮、磷、钾含量分别提高 8.4% 、 21.5% 和 27.8% , 氮肥利用率提高 1.26 倍, 油菜体内硝酸盐含量降低 66.6% 。【结论】适当减氮并添加硝化和脲酶抑制剂对油菜产量和养分吸收均有明显的促进效果, 而且能减少油菜硝酸盐含量和土壤中硝态氮累积。在本试验负压水肥一体化条件下, 减氮 30% 并添加硝化和脲酶抑制剂, 即尿素 $105 \text{ kg/hm}^2 + 10\% \text{DCD} + 1\% \text{HQ}$ 不仅效果最佳, 还降低了因氮肥投入高而造成硝酸盐累积的风险。

关键词: 硝化抑制剂; 脲酶抑制剂; 负压灌溉; 产量; 氮肥利用率; 硝酸盐

Reducing nitrogen input and improving yield and quality of rape through combination of fertigation and nitrification/urease inhibitor addition

SONG Yan-yan^{1,2}, ZHAO Xiu-juan¹, ZHANG Shu-xiang^{1*}, BAI Zhong-ke^{2,3}, LONG Huai-yu¹,
YUE Ji-sheng⁴, ZHAO Lai-ming⁴

(1 Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China;
2 School of Land Science Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3 Key Lab of Land Consolidation,
Ministry of Land and Resources, Beijing 100035, China; 4 Xinjiang Huier Agriculture Group Co., Ltd., Changji 831100, China)

Abstract: 【Objectives】The paper was aimed at the selection of the optimum reduction of nitrogen with nitrification and urease inhibitors application, to provide theoretical basis for reducing nitrogen losses, improving nitrogen use efficiencies and reducing nitrate contents in vegetables with fertigation management. 【Methods】A pot experiment was carried out using negative pressure irrigation $[-5 \pm 1] \text{ kPa}$ method. Five treatments were set up as: no N (T1), urea 150 kg/hm^2 (T2), urea $150 \text{ kg/hm}^2 + 10\% \text{DCD}$ (dicyandiamide) + $1\% \text{HQ}$ (hydroquinone) (T3), urea $127.5 \text{ kg/hm}^2 + 10\% \text{DCD} + 1\% \text{HQ}$ (T4), and urea $105 \text{ kg/hm}^2 + 10\% \text{DCD} + 1\% \text{HQ}$

收稿日期: 2016-04-20 接受日期: 2016-10-13

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863 计划) (2013AA102901); 国家公益性行业 (农业) 科研专项 (201503120) 资助。

作者简介: 宋燕燕 (1992—), 女, 山西晋城人, 硕士研究生, 主要从事土壤学方面的研究。E-mail: songyy109@163.com

* 通信作者 E-mail: zhangshuxiang@caas.cn

(T5). Water supply amounts, soil moisture contents, rape growth indicators, soil nitrate nitrogen and ammonium nitrogen contents during the period of rape growth were analyzed, and the yield, quality, nutrient content of rape after the harvest were determined. The optimum formula was acquired through comprehensive analysis.

【 Results 】 During the rape growth, the total water yield amounts were very close among the treatments (12174–13869 mL). In the condition of the same fertilizing amount, compared with the no inhibitor added treatment (T2), T3 could effectively inhibit the conversion of ammonium nitrogen to nitrate nitrogen in the soil, increase the leaf length, leaf width and chlorophyll contents, promote rape plants to absorb nutrients, significantly increase the rape yield by 25.2% and nitrogen use efficiency significantly by 85.2%, and at the same time significantly reduce the nitrate content by 51.9%. Compared with the no inhibitor added treatment (T2), decreasing 15%–30% of nitrogen input rate and adding nitrification and urease inhibitors also had similar effect on rape yield, quality and nutrient absorption, and could restrain the nitrification process and reduce nitrate accumulation in the soil. Among them, the treatment T5 improved rape yield by 15.9%, increased total N, P and K contents by 8.4%, 21.5% and 27.8%, which led to 1.26 times of increase in the nitrogen use efficiency, and 66.6% of reduce in the nitrate content in rape. **【 Conclusions 】** Under the condition of negative pressure irrigation, moderate reduction of nitrogen with addition of nitrification and urease inhibitors have obvious promoting effect on yield and nitrogen use efficiency of rape, and reducing effect on the nitrate content of rape and soil nitrate accumulation. Under the experimental condition, urea 105 kg/hm² + 10%DCD + 1%HQ, reducing 30% of nitrogen with addition of 10%DCD and 1%HQ shows the best effect, reducing the risks of nitrate accumulation caused by high nitrogen input at the same time.

Key words: nitrification inhibitor; urease inhibitor; negative pressure irrigation; yield; nitrogen use efficiency; nitrate

蔬菜是人们生活中必不可少的食品,但是叶菜类蔬菜很容易富集硝酸盐^[1]。当前的蔬菜生产施肥量大,氨挥发和氮氧化物损失比例较大,加之频繁的灌水,不仅导致氮素以硝酸盐淋溶损失,造成地下水污染等环境问题,而且使得氮肥利用率降低,同时也会造成蔬菜对硝酸盐的过量吸收,进而对人体健康造成危害^[2–3]。应用硝化抑制剂和脲酶抑制剂来协调土壤中氮素转化过程是提高氮素利用率和减少蔬菜中硝酸盐富集的一种有效途径^[4–6]。目前对硝化抑制剂双氰胺(DCD)和脲酶抑制剂氢醌(HQ)组合的研究较多,国内外研究结果表明,两者同时施用,可以在减缓尿素水解的同时,保证NH₄⁺-N在土壤中存留较长时间,增加土壤氮素肥力和作物对氮素的吸收,并减少NO₃⁻-N累积,可以在一定程度上降低作物体内的硝酸盐含量^[6–10]。负压灌溉技术是一种新型的节水灌溉技术,与水溶肥配合使用可以实现持续供水供肥,能有效地节水节肥,并且使植物生长在一个稳定、适宜的水肥环境中^[11–12]。当前国内外对于硝化和脲酶抑制剂施用效果的研究多集中于以固体肥形式直接施入田间或盆栽土壤中,以及进行室内培养试验^[13–17],肥料接触面较小,肥效相对较差;少数研究将抑制剂以随水灌溉方式进行追肥^[18];但目

前在水肥一体化方式下对硝化和脲酶抑制剂施用效果的研究鲜见报道。本研究将负压灌溉水肥一体化方式与硝化和脲酶抑制剂结合起来,通过盆栽试验方法,研究负压灌溉下减施氮肥并添加硝化和脲酶抑制剂对油菜产量、品质、养分吸收及土壤硝态氮和铵态氮含量的影响,进而筛选出配合硝化/脲酶抑制剂施用的最适施氮量,为减少氮素损失、提高蔬菜生产中氮肥利用率和降低蔬菜硝酸盐含量提供理论依据,也为硝化/脲酶抑制剂与负压灌溉水肥一体化系统的合理应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验装置

采用负压灌溉水肥一体化装置进行供水供肥^[19](图1)。装置包括负压发生器、灌水器、储水器和输水管四部分。

负压发生器利用电磁阀和数显开关来控制压力。数显开关用来设置和显示负压值。当土水势小于负压发生器设定的压强时,灌水器中的水在土壤吸力作用下流入土壤,输水管内形成负压,储水器中的水被压入水管,补充流入土壤的水分,保证水在整个系统能不间断地运行。吸水后系统压强小于

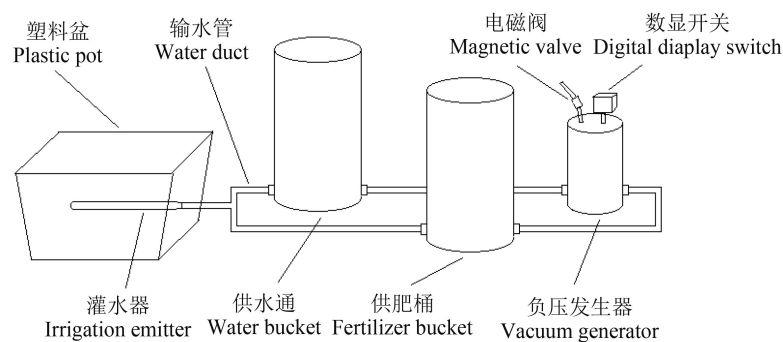


图 1 负压灌溉装置示意图

Fig. 1 Schematic description of the negative pressure irrigation device

负压发生器设定的负压值时，负压发生器上的电磁限压阀打开进气，直到系统压强达到设定的负压值时，电磁限压阀关闭，停止进气，使负压发生器维持恒压，从而保证灌水器的恒压供水。灌水器采用陶土头，是一种新型高分子陶瓷渗水材料，长 25 cm，外径 1.8 cm，具有透水不透气的性能，固定在盆的中部。储水器由供肥桶和供水桶组成，内径 19 cm，中间由三通连接，开关控制；供肥时开供肥开关，供水时开供水开关，负压值在换水换肥中不受影响，保证了在生长过程中负压值的稳定。各部分装置通过内径 12 mm 的输水管连接牢固，使得整个系统处于严格密封状态。

1.2 试验材料

试验于 2015 年 8 月至 9 月在中国农业科学院网室内 (E116.3°, N39.9°) 进行。试验采用油菜品种‘华绿 4 号’作为供试作物。供试土壤为褐土，质地为粘土，取自山东省诸城市贾悦镇，取土深度为 0—20 cm。土壤有机质含量 7.44 g/kg、全氮含量 0.53 g/kg、有效磷含量 16.67 mg/kg、速效钾含量 93.00 mg/kg、pH 6.52，土壤经风干挑选出杂物过

2 mm 筛。盆栽试验所用塑料盆长 41.5 cm、宽 26 cm、高 26 cm，每盆装土 28 kg。试验所用肥料为尿素 (N 46.2%)，磷酸二氢钾 (P_2O_5 52%、 K_2O 34%)，硫酸钾 (K_2O 50%)。硝化抑制剂采用双氰胺 (DCD)，施用量为氮肥用量的 10%；脲酶抑制剂采用氢醌 (HQ)，施用量为氮肥用量的 1%。

1.3 试验设计

试验以盆栽连接负压灌溉水肥一体化装置进行，根据不同负压下土柱试验所测定的土壤含水量结果，设定负压值为 (-5 ± 1) kPa。油菜于 2015 年 8 月 10 日播种，8 月 20 日移栽，每盆定苗 8 株，9 月 28 日收获，生长期共 49 天。试验期间其他管理栽培措施按照常规方法进行。

试验设置 5 个处理，所有处理均采用负压灌溉方式供水供肥，其中 T1 为无氮对照，T2 为常规施氮量配比，T3 为常规施氮量添加硝化和脲酶抑制剂，T4、T5 分别减氮 15%、30% 并添加硝化和脲酶抑制剂，所有处理磷、钾肥用量相同，具体肥料配方详见表 1。每个处理重复 3 次，随机区组排列。施肥量按照每公顷耕层土重 2250 吨来折算出每公斤土

表 1 不同处理养分量、折合肥料施用量

Table 1 Nutrient and equal fertilization amounts in the treatments

处理 Treatment	氮磷钾配比及抑制剂添加 N : P_2O_5 : K_2O and inhibitor addition	养分量 Nutrient input (kg/hm ²)			实物量 Fertilizer amount (g/pot)		
		N	P_2O_5	K_2O	Urea	KH_2PO_4	K_2SO_4
T1	0 : 0.5 : 1	0	75	150	0	1.79	2.52
T2	1 : 0.5 : 1	150	75	150	4.06	1.79	2.52
T3	(1 : 0.5 : 1) + 10%DCD + 1%HQ	150	75	150	4.06	1.79	2.52
T4	(0.85 : 0.5 : 1) + 10%DCD + 1%HQ	127.5	75	150	3.45	1.79	2.52
T5	(0.7 : 0.5 : 1) + 10%DCD + 1%HQ	105	75	150	2.84	1.79	2.52

注 (Note) : M—微量元素 Microelement; DCD—硝化抑制剂双氰胺 Nitrification inhibitor (dicyandiamide); HQ—脲酶抑制剂氢醌 Urease inhibitor (hydroquinone).

施肥量。所有处理在肥料中加入油菜生长所需的微量元素, 其中, 由于油菜需硼量高, 硼营养状况会对油菜营养生长、生殖生长和品质产生显著影响, 因此在阿农微量元素营养液配方的基础上增加硼的用量 (15 kg/hm^2), 每盆微量元素用量为硼酸 1200.08 mg 、四水氯化镁 50.68 mg 、七水硫酸锌 6.16 mg 、五水硫酸铜 2.24 mg 、四水锰酸 2.52 mg 。根据氮磷钾肥料的施用量, 配制浓度为 0.15% 的水溶性肥料, 并用 0.5 mol/L 稀盐酸将其 pH 调至 5.8 ± 0.1 。水溶性肥料分三次施入, 自 8 月 28 日开始施肥, 每 10 天施一次, 三次施肥比例分别为 30% 、 40% 、 30% 。

1.4 测定项目与方法

土壤基本理化性质: 有机质采用高温外热重铬酸钾氧化—容量法测定, 全氮采用半微量开氏法测定, 有效磷采用钼锑抗比色法测定, 速效钾采用乙酸铵提取法测定, pH 采用电位法 (土水比为 $1:2.5$) 测定。

供水量: 从储水器水位管上读出水位差, 根据储水器内径计算供水量。

土壤水分含量: 每 7 天取一次土, 用烘干法测定土壤水分含量。

油菜鲜重、干重: 收获时将地上部和地下部分分开, 测定每盆油菜产量 (鲜重), 并取一部分地上部鲜样测定品质指标, 剩余部分冲洗并称重后 105°C 杀青 30 min , 60°C 烘干至恒重, 称重并根据植株含水量折算出地上部总干重。

油菜生长发育指标: 自施肥 10 天后, 每隔 10 天测定一次, 株高用直尺测量植株从露出土壤根部至顶端的距离; 叶长用直尺测量植株顶部倒数第 3 片展开叶叶尖至叶基的距离; 叶宽用直尺测量倒数第 3 片叶最宽部分距离; 叶绿素用 SPAD-502 叶绿素仪测量倒数第三片叶。

油菜品质指标: 取新鲜的油菜地上部样品, 采用 2% 草酸溶液将油菜样品研碎, 定容并过滤, 以 2,6-二氯酚靛酚滴定法测定维生素 C 含量; 将油菜样品剪碎, 于沸水浴中提取 30 min 并提取 2 次, 采用蒽酮比色法在 630 nm 波长下测定可溶性糖含量; 将油菜样品剪碎并用沸水浴提取 30 min , 采用水杨酸比色法在 410 nm 波长下测定硝酸盐含量^[20]。

油菜养分含量: 将烘干的油菜地上部植株样品磨碎并过 0.25 mm 筛, 经浓 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{--H}_2\text{O}_2$ 高温硝化后, 以半微量开氏定氮法测定全氮含量, 以钼锑抗比色法在 700 nm 波长下测定全磷含量, 以火焰光度计法测定全钾含量^[21]。

土壤铵态氮和硝态氮含量: 在盆栽内距陶土头约 5 cm 的位置分 3 钻取土并混合, 用 2 mol/L KCl 溶液浸提, 利用瑞士 FOSS 公司制造的 FIAstar 5000 连续流动注射分析仪测定。

1.5 数据处理与分析

氮肥利用率 = (施氮区地上部吸氮量 - 不施氮区地上部吸氮量) / 施氮量 $\times 100\%$ ^[22]。

试验数据采用 Microsoft Excel 2003 软件进行数据统计和作图; 采用 SAS 9.0 软件进行单因素方差分析, 显著性水平设定为 $\alpha = 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 不同处理水肥供应特征和土壤含水量变化

在负压值为 -5 kPa 条件下, 各处理的总出水量在 $12174 \sim 13869 \text{ mL}$ 范围内, 处理间无显著差异 (图 2)。其中, 所有处理均在移栽后 1~8 天出水量较少; 移栽后第 9~18 天, 即开始施肥后, 油菜生长速度开始增快, 与移栽后第一周相比, 各处理出水量均明显增加; 到移栽后 19~28 天时, 各处理出水量均有所减少; 移栽后 29~38 天时, 各处理出水量达到最大。

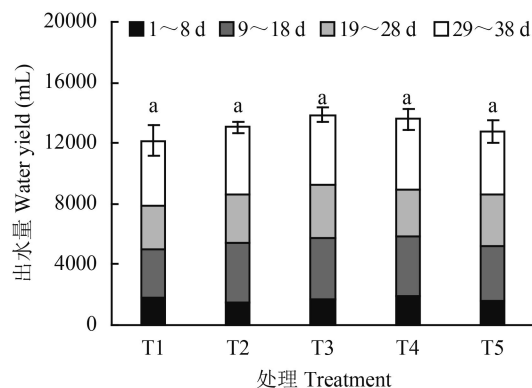


图 2 不同处理出水量

Fig. 2 Water yield amounts of different treatments

[注 (Note): 柱上不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平
Different letters above the bars mean significant among the treatments at the 5% level.]

在油菜生长期间, 土壤含水量的变化趋势与出水量变化趋势大体一致, 所有处理均在移栽后第 8 天, 即开始施肥时, 土壤含水量达到峰值, 之后整体呈逐渐降低趋势, 到第 36 天时, 土壤含水量比之前有所升高。且不同处理间的含水量差异不大, 在整个生长期, 含水量变化幅度均较小, 变化范围为 $9.8\% \sim 12.6\%$ (图 3)。这个结果也排除了水分对试验结果造成差异的可能, 为下文提供了依据。

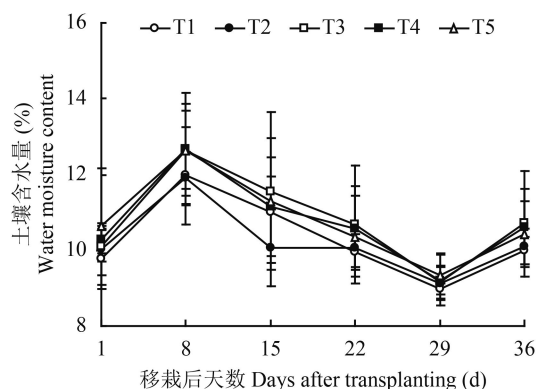


图3 不同处理土壤含水量变化

Fig. 3 Soil moisture content of different treatments

2.2 硝化和脲酶抑制剂对油菜产量的影响

在磷、钾量一致时，所有添加硝化和脲酶抑制剂处理的油菜产量均显著高于不施抑制剂的常规处理 T2 (图 4)。在施肥量相同时，添加硝化和脲酶抑制剂处理 T3 比 T2 油菜产量提高 25.2%，T4 和 T5 的油菜产量分别比 T2 提高了 11.1% 和 15.9% ($P < 0.05$)。

2.3 硝化/脲酶抑制剂对油菜生长指标的影响

所有处理油菜的株高、叶长、叶宽均在移栽后 28~38 天之间增加幅度较大，即第三次施肥后，但

叶绿素含量则是在 18~28 天之间快速增加 (图 5)。在磷钾量一致的情况下，无氮处理 T1 油菜的各项指标均明显低于施氮处理。3 个添加硝化和脲酶抑制剂处理 (T3、T4、T5) 的油菜株高、叶长、叶宽等生长指标均高于不施抑制剂处理 T2，但差异未达到 5% 显著水平 (图 5)。叶绿素含量的变化趋势是随着施氮量的增加而增加，其中减氮并添加抑制剂处理 T4、T5 的油菜叶绿素含量均低于不施抑制剂处理 T2；与

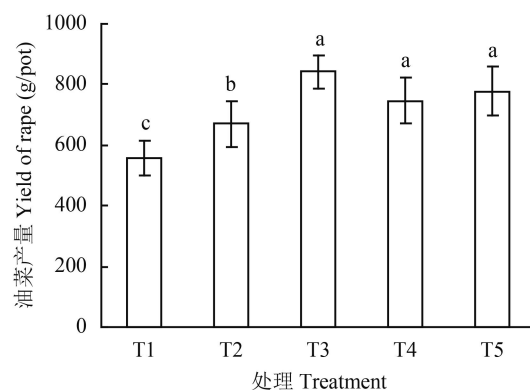


图4 不同处理的油菜产量

Fig. 4 Yields of rape under different treatments

[注 (Note): 柱上不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平
Different letters above the bars mean significant among the treatments at the 5% level.]

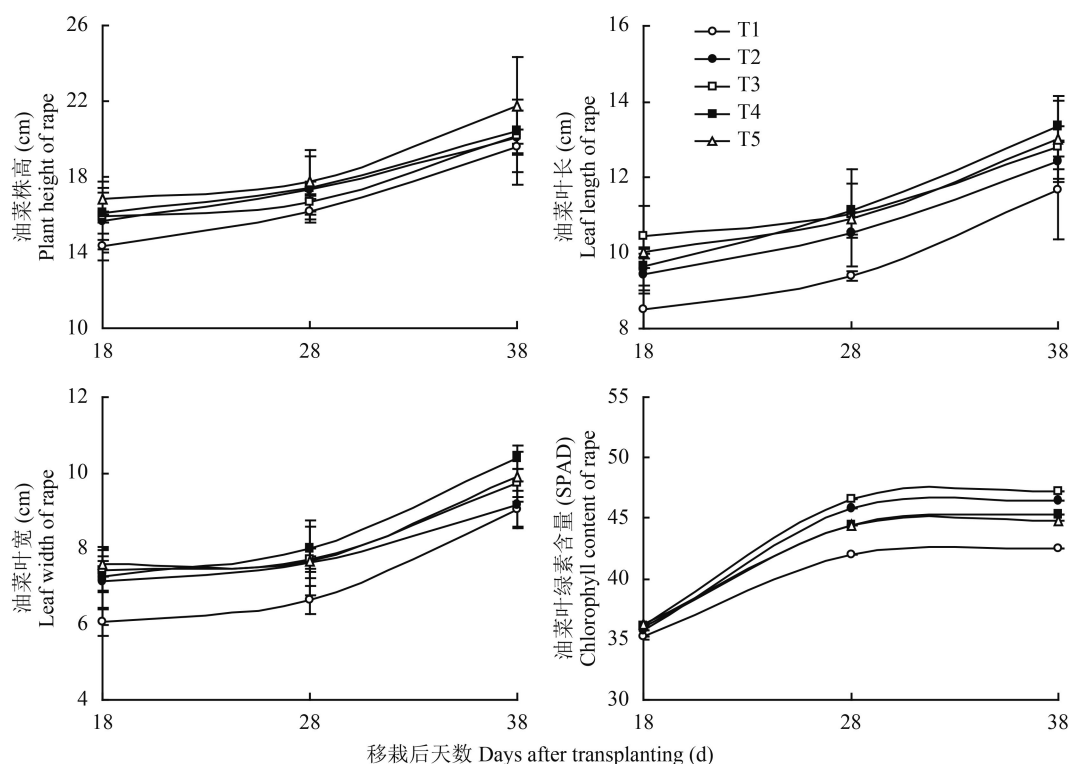


图5 不同处理油菜植株的生长指标

Fig. 5 Growth indices of rape plants under different treatments

不施抑制剂处理 T2 相比, 添加抑制剂处理 T3 可以将油菜叶绿素含量提高 1.8%。

2.4 硝化/脲酶抑制剂对油菜品质指标的影响

所有处理油菜的硝酸盐含量均未超过国家农产品安全质量无公害蔬菜安全要求 (叶菜类蔬菜硝酸盐 ≤ 3000 mg/kg)^[23], 其中常规处理 T2 的硝酸盐含量高于叶菜类蔬菜允许生食的硝酸盐安全残留量标准 (432 mg/kg)。与不施抑制剂的常规处理 T2 相比, 3 个添加硝化和脲酶抑制剂的处理均能提高油菜维生素 C 含量, 并显著降低油菜的硝酸盐含量, 差异达 5% 显著水平。处理 T3、T4、T5 的维生素 C 含量分别比 T2 提高了 15.6%、22.1%、40.1%, 硝酸盐含量分别降低了 51.9%、40.5%、66.6%, 均达到叶菜类蔬菜允许生食的标准 (432 mg/kg)。在这 3 个处理中, 减氮 30% 并添加抑制剂的处理 T5 油菜的维生素 C 含量和可溶性糖含量最高, 硝酸盐含量最低, 品质最好 (表 2)。

2.5 负压灌溉下硝化/脲酶抑制剂对油菜养分吸收的影响

与无氮处理 T1 相比, 施氮处理 T2 显著提高了

油菜植株内的氮素含量, 但对全磷和全钾含量无显著影响。与不施抑制剂的常规处理 T2 相比, 所有添加硝化和脲酶抑制剂的处理氮、磷、钾含量均有提高 (表 3)。其中减氮 30% 并添加抑制剂处理 T5 的氮、磷、钾含量均显著高于处理 T2, 分别提高了 8.4%、21.5% 和 27.8%; 减氮 15% 并添加抑制剂处理 T4 的氮、磷、钾含量也分别比 T2 提高了 0.2%、27.1%、20.7%。另外, T2 和 T3 所施氮、磷、钾量相同, 但添加抑制剂处理 T3 显著提高了油菜的全氮含量, 全磷和全钾含量也有所提高。

2.6 硝化/脲酶抑制剂对油菜氮肥利用率的影响

不同处理油菜的氮肥利用率在 30.7%~69.2% 范围内。与不施抑制剂的常规处理 T2 相比, 所有添加硝化和脲酶抑制剂的处理均显著提高了油菜的氮肥利用率 (图 6)。其中当氮、磷、钾施用量相同时, 添加硝化和脲酶抑制剂 (T3) 可将油菜的氮肥利用率在 T2 基础上提高 85.2%; 减氮 15% 并添加硝化和脲酶抑制剂处理 (T4) 可将氮肥利用率提高 41.9%; 在减氮 30% 并添加硝化和脲酶抑制剂 (T5) 时, 氮肥利用率达到最高, 比 T2 提高了 1.26 倍 (图 6)。

表 2 不同处理油菜的品质指标
Table 2 Quality indices of rape under different treatments

处理 Treatment	氮磷钾配比及抑制剂添加 N : P ₂ O ₅ : K ₂ O and inhibitor addition	Vc (mg/100g)	可溶性糖 (mg/g) Soluble sugar	硝酸盐 (mg/kg) Nitrate
T1	0 : 0.5 : 1	25.83 ± 3.22 a	26.26 ± 3.95 b	143.84 ± 9.33 d
T2	1 : 0.5 : 1	16.20 ± 2.46 c	33.22 ± 2.08 a	707.76 ± 89.73 a
T3	(1 : 0.5 : 1) + 10%DCD + 1%HQ	18.72 ± 0.98 bc	26.84 ± 2.42 b	340.52 ± 38.02 b
T4	(0.85 : 0.5 : 1) + 10%DCD + 1%HQ	19.78 ± 3.38 b	27.28 ± 3.14 b	421.02 ± 42.98 b
T5	(0.7 : 0.5 : 1) + 10%DCD + 1%HQ	22.69 ± 2.82 ab	30.17 ± 1.53 ab	236.24 ± 28.41 c

注 (Note): 表中值为平均值 + 标准差 The value = Mean + SD. 同列数字后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among the treatments at the 5% level.

表 3 不同处理油菜植株全氮、全磷、全钾含量 (%)
Table 3 Total N, P and K contents of rape plants under different treatments

处理 Treatment	氮磷钾配比及抑制剂添加 N : P ₂ O ₅ : K ₂ O and inhibitor addition	全氮 Total N	全磷 Total P	全钾 Total K
T1	0 : 0.5 : 1	4.22 ± 0.37 c	1.18 ± 0.08 bc	2.64 ± 0.34 ab
T2	1 : 0.5 : 1	4.88 ± 0.21 b	1.07 ± 0.08 c	2.41 ± 0.31 b
T3	(1 : 0.5 : 1) + 10%DCD + 1%HQ	5.31 ± 0.13 a	1.22 ± 0.07 abc	2.83 ± 0.32 ab
T4	(0.85 : 0.5 : 1) + 10%DCD + 1%HQ	4.89 ± 0.11 b	1.36 ± 0.12 a	2.91 ± 0.27 ab
T5	(0.7 : 0.5 : 1) + 10%DCD + 1%HQ	5.29 ± 0.14 a	1.30 ± 0.06 ab	3.08 ± 0.30 a

注 (Note): 表中值为平均值 + 标准差 The value = Mean + SD. 同列数据后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among the treatments at the 5% level.

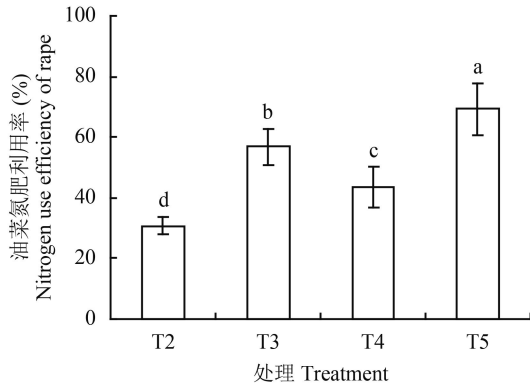


图 6 不同氮肥用量配合硝化/脲酶抑制剂处理油菜氮肥利用率

Fig. 6 Nitrogen use efficiency of rape under different nitrogen treatments

[注 (Note): 柱上不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平
Different letters above the bars mean significant among the treatments at the 5% level.]

2.7 硝化/脲酶抑制剂对土壤硝态氮和铵态氮含量的影响

在油菜生长过程中, 常规处理 (T2) 的土壤硝态氮含量始终处于最高水平, 而所有添加抑制剂处理土壤硝态氮含量均明显低于常规处理 (图 7)。其中在施肥开始后的第 8 天时, 各添加抑制剂处理 T3、T4、T5 土壤中硝态氮含量分别比 T2 降低了 67.7%、11.4%、29.5%, 其中 T3、T5 与 T2 差异达到 5% 显著水平。在油菜收获时, 各添加抑制剂处理 T3、T4、T5 土壤中硝态氮含量分别比 T2 降低了 42.2%、43.0%、10.0%, 其中 T3、T4 与 T2 差异达到 5% 显著水平。

与硝态氮含量的变化情况相反, 除无氮对照 T1 之外, 常规施氮处理 T2 的土壤铵态氮含量在油菜生长过程中始终处于最低水平, 而所有添加抑制剂处理的土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量均比 T2 明显提高 (图 7)。其中, 在施肥开始后的第 8 天时, 常规施氮处理 T2 的

铵态氮含量急剧下降, 而各添加抑制剂处理 T3、T4、T5 土壤铵态氮含量分别比 T2 提高了 99.1%、138.6%、95.8% ($P < 0.05$)。在油菜收获时, 各添加抑制剂处理 T3、T4、T5 土壤中铵态氮含量分别比 T2 (1 : 0.5 : 1) 提高了 13.9%、13.1%、40.1%。

3 讨论

有研究表明, 在温度湿度一定的室内土柱模拟条件下, 负压灌溉的入渗量随着时间的推移有逐渐减小的趋势^[12]。根据油菜盆栽试验的出水量和油菜生长指标结果, 在油菜生长速度较快的时期, 各处理出水量相应较大; 当油菜生长速度相对减缓时, 出水量有所减少, 这表明负压灌溉水肥一体化能够一定程度上实现水分与养分的同步供应主要由作物的生长速度控制。负压灌溉水肥一体化供肥方式是利用土壤基质势自动从供肥桶中吸收水分和养分的, 在同一负压值下 (-5 kPa), 各处理出水量和土壤含水量无显著差异, 表明负压灌溉水肥一体化系统是较为稳定的, 在同一负压值下可以保证稳定的水肥供应, 使油菜生长在一个相对稳定的含水量环境中, 且本次试验中每 10 天供一次水溶肥, 每次供肥持续 5~7 天, 在油菜生长过程中供肥较为均匀, 有利于油菜生长。

在目前的研究中, 硝化和脲酶抑制剂施用提高作物产量的效果有所争议。Pasda 等进行的百余个田间试验结果表明, 硝化抑制剂 DMPP 可显著提高粮食作物 (小麦、玉米、水稻等)、经济作物 (马铃薯、甜菜等)、蔬菜 (茼蒿、花椰菜、芹菜) 等多种作物的产量^[24]; 但也有研究表明, 施用 DCD 后, 小麦产量降低了 9%, 牧草的产量变化不大^[25]。这可能与氮肥施用量、土壤类型、质地、肥力和作物类型等因素有很大关系。在本试验条件下, 添加硝化和脲酶抑

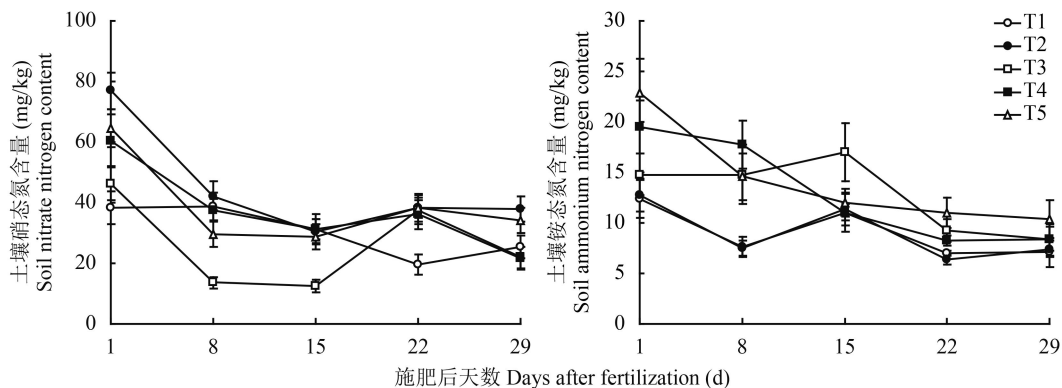


图 7 不同处理土壤硝态氮和铵态氮含量的动态变化

Fig. 7 Dynamic change of soil nitrate nitrogen and ammonium nitrogen contents under different treatments

制剂可以将油菜产量提高 11.1%~25.2%, 说明本试验的施肥量较为合适, 且由于硝化抑制剂 DCD 的存在, 抑制了亚硝化细菌的活性, 从而延缓了尿素水解后 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 向 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的转化, 提高了土壤中铵态氮含量, 加之脲酶抑制剂 HQ 抑制了尿素水解速度, 减少了 NH_4^+ 的挥发, 延长了尿素肥效, 使在油菜生长后期养分最大吸收期仍然有充足的肥力供油菜植株生长; 另一方面, 由于铵态氮供应量高, 油菜植株吸收铵态氮较多, 相对吸收硝态氮来说消耗的能量较少, 特别是铵态氮能直接用于蛋白质代谢, 有利于促进油菜植株生长^[26]。

硝化和脲酶抑制剂施用可以将油菜硝酸盐含量降低 40.5%~66.6%, 同时提高油菜植株体内全氮含量和提高氮肥利用率。这可能是由于尿素水解以后, 氮素以 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 形态在土壤中以较高浓度存在较长时间, 使油菜对氮肥的利用效率提高, 因此油菜吸收 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的比例高于对照处理, 而常规施肥处理则吸收更多的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ^[24]。 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 被植物吸收后会立即参与有机氮合成, 而且油菜植株吸收的少量硝态氮能够在体内不断地同化, 不致使硝态氮产生过量累积, 从而使植株体内硝态氮含量降低, 全氮含量上升^[26-27]。硝化和脲酶抑制剂的添加也会影响蔬菜的维生素 C 和可溶性糖含量等营养品质。许超等研究表明 ASN 和 DMPP 配合施用可使小白菜维生素 C 含量比常规尿素处理提高 3.6%, 可溶性糖含量提高 12.5%^[28]。Pasda 等的田间试验表明, 硝化抑制剂 DMPP 可使甜菜、马铃薯等淀粉含量提高, 但却降低了冬小麦籽粒的粗蛋白含量^[24]。在本试验中, 3 个添加硝化和脲酶抑制剂的处理能将油菜维生素 C 含量提高 15.6%~40.1%, 但可溶性糖含量与 T2 相比有所降低。

本试验结果表明, 添加硝化和脲酶抑制剂可以促进油菜对磷素的吸收, 与前人的结果相似^[29]。这是由于硝化抑制剂能够使土壤中保持较多的 NH_4^+ , 被作物吸收时会伴随着大量的 H^+ 释放, 导致作物根际周围变酸^[30], 酸性环境能改善土壤中磷素的有效性, 使土壤磷素活化, 促进作物对磷素的吸收^[31]。另外, 由于 NH_4^+ (0.286 nm) 和 K^+ (0.266 nm) 半径基本相等, 两者之间存在拮抗作用^[32], 在 NH_4^+ 被作物吸收时导致的酸性环境下, 加大了土壤 K^+ 的淋失风险, 不利于作物对 K^+ 的吸收。但在本试验中, 添加硝化和脲酶抑制剂能够不同程度地提高油菜全钾含量, 具体原因仍需进一步研究与论证。

4 结论

在本试验负压灌溉条件下, 当氮磷钾施用量相

同时, 与不施抑制剂处理相比, 添加硝化和脲酶抑制剂能够有效抑制土壤中铵态氮向硝态氮的转化, 提高油菜叶长、叶宽和叶绿素含量等生长指标, 油菜产量显著提高 25.2%, 并明显促进油菜植株对养分的吸收, 氮肥利用率显著提高 85.2%, 硝酸盐含量显著降低 51.9%。适当减氮并添加硝化和脲酶抑制剂对油菜产量和养分吸收也均有明显的促进效果, 并且减少油菜硝酸盐含量和土壤中硝态氮累积。综合油菜产量、氮肥利用率和品质分析, 在负压水肥一体化条件下, 减氮 30% 并添加 10%DCD 和 1%HQ 不仅产量效果最佳, 也提高了氮肥的利用率。

参 考 文 献:

- [1] 刘勤, 张新, 赵言文, 等. 土壤植物营养与农产品品质及人畜健康关系[J]. 应用生态学报, 2001, 12(4): 623-626.
Liu Q, Zhang X, Zhao Y W, *et al.* Relationships between soil-plant nutrition, quality of agricultural products and human and livestock health[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2001, 12(4): 623-626.
- [2] 曹兵, 贺发云, 徐秋明, 等. 南京郊区番茄地中氮肥的气态氮损失[J]. 土壤学报, 2006, 43(1): 62-68.
Cao B, He F Y, Xu Q M, *et al.* Gaseous losses from N fertilizers applied to a tomato field in Nanjing suburbs[J]. Acta Pedologica Sinica, 2006, 43(1): 62-68.
- [3] He F F, Jiang R F, Chen Q, *et al.* Nitrous oxide emissions from an intensively managed greenhouse vegetable cropping system in Northern China[J]. Environmental Pollution, 2009, 157(5): 1666-1672.
- [4] Di H J, Cameron K C. Reducing environmental impacts of agriculture by using a fine particle suspension nitrification inhibitor to decrease nitrate leaching from grazed pastures[J]. Agriculture Ecosystems and Environment, 2005, 109: 202-212.
- [5] Moir J L, Cameron K C, Di H J. Effects of the nitrification inhibitor dicyandiamide on soil mineral N, pasture yield, nutrient uptake and pasture quality in a grazed pasture system[J]. Soil Use and Management, 2007, 23: 111-120.
- [6] 徐星凯, 周礼恺, Oswald V C. 脲酶抑制剂/硝化抑制剂对土壤中尿素氮转化及形态分布的影响[J]. 土壤学报, 2000, 37(3): 339-345.
Xu X K, Zhou L K, Oswald V C. Effect of urease, nitrification inhibitors on the distribution of transformed urea-N forms in soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2000, 37(3): 339-345.
- [7] 邱永祥, 谢小珍, 蔡南通, 等. 不同氮素及硝化抑制剂对叶菜用甘薯光合特性、茎叶产量及硝酸盐含量的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2006, 34(12): 58-64.
Qiu Y X, Xie X Z, Cai N T, *et al.* Studies on the effects of different fertilizers and nitrification inhibitor on photosynthetic and vine yield and nitrate accumulation in vine-vegetable sweet potato[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2006, 34(12): 58-64.
- [8] 隗英华, 陈利军, 武志杰, 等. 脲酶/硝化抑制剂在土壤氮转化过程中的作用[J]. 土壤通报, 2007, 38(4): 773-780.
Juan Y H, Chen L J, Wu Z J, *et al.* Effect of urease and nitrification inhibitor on soil-N transformation[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2007, 38(4): 773-780.
- [9] 焦晓光, 梁文举, 陈利军, 等. 脲酶/硝化抑制剂对土壤有效态氮、微生物量氮和小麦氮吸收的影响[J]. 应用生态学报, 2004, 15(10):

- 1903–1906.
- Jiao X G, Liang W J, Chen L J, *et al.* Effects of urease/nitrification inhibitors on soil available N and microbial biomass N and on N uptake of wheat[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(10): 1903–1906.
- [10] 黄益宗, 冯宗炜, 王效科, 等. 硝化抑制剂在农业上应用的研究进展[J]. 土壤通报, 2002, 33(4): 310–314.
- Huang Y Z, Feng Z W, Wang X K, *et al.* Research progress of nitrification inhibitors applied in agriculture[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2002, 33(4): 310–314.
- [11] 江培福, 雷廷武, Vincent F Bralts, 等. 土壤质地和灌水器材材料对负压灌溉出水流量及土壤水运移的影响[J]. 农业工程学报, 2006, 22(4): 19–22.
- Jiang P F, Lei T W, Bralts V F, *et al.* Effects of soil textures and emitter material on the soil water movement and efficiency of negatively pressurized irrigation system[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(4): 19–22.
- [12] 梁锦陶. 负压灌溉土壤水分运移特征研究[D]. 山西太原: 太原理工大学硕士学位论文, 2011.
- Liang J T. The research on the characteristics of soil water movement under negatively pressurized irrigation system [D]. Taiyuan, Shanxi: MS Thesis of Taiyuan University of Technology, 2011.
- [13] Zerulla W, Pasda G, Hähndel R, *et al.* The new nitrification inhibitor DMPP (ENTEC®) for use in agricultural and horticultural crops—an overview[J]. Developments in Plant and Soil Sciences, 2001, 92: 754–755.
- [14] Guo Y J, Di H J, Cameron K C, *et al.* Effect of application rate of a nitrification inhibitor, dicyandiamide (DCD), on nitrification rate, and ammonia-oxidizing bacteria and archaea growth in a grazed pasture soil: An incubation study[J]. Journal of Soils and Sediments, 2014, 14(5): 897–903.
- [15] Di H J, Cameron K C. Inhibition of ammonium oxidation by a liquid formulation of 3,4-Dimethylpyrazole phosphate (DMPP) compared with a dicyandiamide (DCD) solution in six New Zealand grazed grassland soils[J]. Journal of Soils and Sediments, 2011, 11(6): 1032–1039.
- [16] 串丽敏, 赵同科, 安志装, 等. 添加硝化抑制剂双氰胺对油菜生长及品质的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(5): 870–874.
- Chuan L M, Zhao T K, An Z Z, *et al.* Effects of adding a nitrification inhibitor dicyandiamide (DCD) on the growth and quality of rape[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2010, 29(5): 870–874.
- [17] 孙志梅, 刘艳军, 梁文举, 等. 新型脲酶抑制剂 LSN 与双氰胺配合施用对菜田土壤尿素氮转化及蔬菜生长的影响[J]. 土壤通报, 2005, 36(5): 803–805.
- Sun Z M, Liu Y J, Liang W J, *et al.* Synergistic effect of a novel urease inhibitor LNS and a nitrification inhibitor DCD on urea-N transformation and vegetable growth[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2005, 36(5): 803–805.
- [18] 张琳, 孙卓玲, 马理, 等. 不同水氮条件下双氰胺(DCD)对温室黄瓜土壤氮素损失的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(1): 128–137.
- Zhang L, Sun Z L, Ma L, *et al.* Effects of dicyandiamide on nitrogen loss from cucumber planting soil in intensive greenhouse under different irrigation and nitrogen conditions[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015, 21(1): 128–137.
- [19] 龙怀玉, 张认连. 一种施肥装置及施肥方法[P]. 中国专利: 201110093923.2, 2011-10-19.
- Long H Y, Zhang R L. Fertilizing device and fertilizing method[P]. Chinese Patent: 201110093923.2, 2011-10-19.
- [20] 王学奎. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- Wang X K. Principle and technology of plant physiological and biochemical experiments [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [21] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- Lu R K. Soil agricultural chemical analysis method [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [22] 李韵珠, 王凤仙, 黄元仿. 土壤水分和养分利用效率几种定义的比较[J]. 土壤通报, 2000, 31(4): 150–155.
- Li Y Z, Wang F X, Huang Y F. Comparison for various definitions about soil water and nutrient use efficiency[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2000, 31(4): 150–155.
- [23] GB/T 18406.1-2001. 农产品安全质量无公害蔬菜安全要求[S]. GB/T 18406.1-2001. Safety qualification for agricultural product—safety requirements for non-environmental pollution vegetable[S].
- [24] Pasda G, Hähndel R, Zerulla W. Effects of fertilizers with the new nitrification inhibitor DMPP (3, 4-dimethyl pyrazole phosphate) on yield and quality of agriculture and horticultural crops[J]. Biology and Fertility of Soil, 2001, 34: 85–97.
- [25] Cookson W R, Cornforth I S. Dicyandiamide slows nitrification in dairy cattle urine patches: Effects on soil solution composition, soil pH and pasture yield[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2002, 34: 1461–1465.
- [26] 串丽敏. 硝化/脲酶抑制剂对土壤氮素迁移转化及油菜生长的影响[D]. 石家庄: 河北农业大学硕士学位论文, 2010.
- Chuan L M. Effects of nitrification/urease inhibitor on nitrogen migration, transformation and rape growth [D]. Shijiazhuang: MS Thesis of Agricultural University of Hebei, 2010.
- [27] 孙爱文, 石元亮, 张德生. 硝化/脲酶抑制剂在农业中的应用[J]. 土壤通报, 2004, 35(3): 357–361.
- Sun A W, Shi Y L, Zhang D S. Application of nitrification-urease inhibitors in agriculture[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2004, 35(3): 357–361.
- [28] 许超, 吴良欢, 张立民, 等. 含硝化抑制剂DMPP氮肥对小白菜硝酸盐累积和营养品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(1): 137–139.
- Xu C, Wu L H, Zhang L M, *et al.* Effect of nitrogen fertilizer with nitrification inhibitor DMPP on nitrate accumulation and nutritional quality of *Brassica campestris* L. ssp. *Chinensis*[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2005, 11(1): 137–139.
- [29] Rahmatullah, Gill M A, Wissemeier A H, *et al.* Phosphate availability from phosphate rock as related to nitrogen form and the nitrification inhibitor DMPP[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2006, 169: 675–678.
- [30] 伍少福. 硝化抑制剂DMPP对土壤硝酸盐淋失的影响及其蔬菜应用效果研究[D]. 杭州: 浙江大学硕士学位论文, 2006.
- Wu S F. Effects of nitrification inhibitor DMPP on soil nitrate leaching and vegetable production [D]. Hangzhou: MS Thesis of Zhejiang University, 2006.
- [31] 孙志梅, 武志杰. 硝化抑制剂的施用效果、影响因素及其评价[J]. 应用生态学报, 2008, 19(7): 1611–1618.
- Sun Z M, Wu Z J. Application effect, affecting factors, and evaluation of nitrification inhibitor: A review[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(7): 1611–1618.
- [32] Azam F, Farooq S. Nitrification inhibition in soil and ecosystem functioning: An overview[J]. Pakistan Journal of Biological Sciences, 2003, 6: 528–535.