

玉米滴灌栽培条件下尿素与氢醌、双氰胺配施方法及效果

邓兰生, 张承林*

(华南农业大学资源环境学院植物营养系, 广州 510642)

摘要: 本研究通过在滴灌栽培条件下将脲酶抑制剂氢醌(简称 HQ)、硝化抑制剂双氰胺(简称 DCD)和尿素在玉米盆栽试验中进行配施,以探求 HQ 和 DCD 在滴灌施氮肥条件下应用的可行性。试验共设 17 个处理。试验结果表明:在滴灌施尿素条件下,加入 0.3% HQ、0.5% HQ 和 5.0% DCD 于溶液中,尿素的氮素利用率分别为 74.8%、75.8% 和 75.3%,均显著高于单独施用尿素处理;当将 HQ 和 DCD 进行土壤施用并配合滴灌浇水时,HQ 对提高氮肥利用率无显著作用,但 DCD 的施用能显著提高尿素氮的利用率;HQ 和 DCD 在滴灌施肥条件下的施用效果要好于土壤施用效果。

关键词: 双氰胺; 氢醌; 滴灌施肥; 玉米

中图分类号: S143.1⁺6; S147.5; S275.6

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2007)03-0498-06

Effects and methods of urea application combined with urease or nitrification inhibitors under drip irrigation on maize

DENG Lan-sheng, ZHANG Cheng-lin*

(Department of Plant Nutrition, College of Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: In order to evaluate the feasibility of addition of urease inhibitor (hydroquinone, HQ) and nitrification inhibitors (DCD) into urea solution applied in drip fertigation, a pot experiment with maize as a test crop was conducted under greenhouse condition. HQ and DCD were supplied through drip fertigation and soil application before sowing, and the dosages were 0.3%, 0.5% and 1.0% of urea application rate for HQ and 2.5%, 5.0% and 10.0% of urea rate for DCD. The results indicated that, under drip fertigation with urea solution, 0.3% HQ, 0.5% HQ and 5.0% DCD could significantly increase N use efficiency (NUE) as compared to fertigation with urea alone, and the NUE were 74.8%, 75.8%, 75.3% respectively; When HQ and DCD were applied to soil under drip irrigation, HQ showed no positive effect on NUE. However, DCD increased significantly the NUE of urea with data as 61.9%, 54.6% and 58.4%, respectively. The NUE of urea with HQ and DCD application in drip fertigation system were higher than that with HQ and DCD applied into soil before sowing under drip irrigation.

Key words: dicyandiamide; hydroquinone; drip fertigation; maize

与传统的施肥方法相比,灌溉施肥对于实现精确灌溉和精量施肥有着重要的意义,它具有节约用肥、显著提高肥料利用率和施肥精确均匀等优点^[1]。虽然滴灌施肥后肥料特别是氮的利用率比

常规施肥显著提高^[2-3],但在滴施氮肥时同样存在氮的损失,如氨的挥发和硝态氮的淋失。如何进一步提高滴灌施用的氮利用率仍是一个有待探讨的问题。尿素是滴灌施肥中常用的氮肥之一。脲酶抑制

收稿日期: 2005-11-28

修改稿收到日期: 2006-08-21

基金项目: 广东省水利厅“广东省石灰岩地区水分高效利用研究”项目资助。

作者简介: 邓兰生(1971—),男,江西兴国人,硕士,主要从事作物营养与灌溉施肥方面的教学与研究工作。

Tel: 020-85281822, E-mail: lshdeng@scau.edu.cn. * 通讯作者 Tel: 020-85281822, E-mail: clzhang@scau.edu.cn.

剂可用来延缓脲酶对尿素的水解,使较多的尿素能扩散移动到土表以下的土壤中,从而减少旱地表层土壤或稻田田面水中铵态氮或氨态氮总浓度,以减少氨挥发损失;而硝化抑制剂的作用是抑制硝化速率,减缓铵态氮向硝态氮的转化^[4]。在以往的研究中,通常是把脲酶抑制剂或(和)硝化抑制剂加入到相关的氮肥中制成稳定肥料,或将脲酶抑制剂或(和)硝化抑制剂进行土壤施用^[5-7],而通过滴灌施肥系统施用脲酶抑制剂或硝化抑制剂的研究还未见报导。

本研究将脲酶抑制剂氢醌(HQ)和硝化抑制剂双氰胺(DCD)与尿素一起溶于水通过滴灌系统施用,通过调查和测定反映玉米生长情况的不同指标值,探讨了HQ和DCD对滴施氮肥利用率的影响,为滴灌施肥技术的推广应用提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于2004年9月至12月在华南农业大学资源环境学院温室进行。选用济单7号玉米进行盆栽试验;土壤为水稻土,pH 5.8,碱解氮45.6 mg/kg,有效磷37.8 mg/kg,速效钾55.8 mg/kg,土壤各项理化指标的测定方法参见《土壤农业化学分析方法》^[8]及《分析测试方法》^[9]。土壤风干后过2mm筛,每个塑料盆装土6.5 kg。滴灌系统采用压力补偿滴头,流量为4.0 L/h,每个滴头连接4个滴箭,每盆安装2个滴箭。试验用尿素(Urea)的含氮量为46.20%。脲酶抑制剂为氢醌(分子式为 $C_6H_6O_2$,简称HQ),硝化抑制剂为双氰胺(分子式为 $C_2H_4N_4$,简称DCD)。试验过程中由双氰胺带入的氮将在氮肥用量中予以扣除。

1.2 试验设计

本试验共设17个处理。尿素和抑制剂分两种施法,一种为通过滴灌系统施用(Drip fertigation,简称DF,即将尿素和抑制剂溶解于水后由滴头滴入土壤),另一种为播种前直接施入土壤(Preplant soil application,简称PSA,即将尿素和抑制剂全部与土壤混匀,装盆,之后再播种,滴清水)。尿素用量折合纯氮为N 0.15 g/kg土,即每盆施尿素2.11 g(加DCD时减去折算的氮量)。HQ和DCD分别用3个剂量,其用量以占尿素用量的百分比表示。具体处理为:1) CK(不施尿素和抑制剂);2) Urea;3) Urea + 0.3% HQ;4) Urea + 0.5% HQ;5) Urea + 1.0% HQ;6) Urea + 2.5% DCD;7) Urea + 5.0% DCD;8) Urea +

10.0% DCD;9) Urea + 0.5% HQ + 5.0% DCD。每处理重复5次。

1.3 试验实施

每盆土壤混施4.0 g过磷酸钙和1.6 g KCl作底肥。对土壤施用尿素和抑制剂的处理,将尿素和抑制剂与土壤拌匀。每盆播选好的玉米种子4粒,滴水,至盆底渗漏孔有水流为止。玉米出苗6 d后间苗,每盆留两株均匀的小苗。滴灌施肥处理(DF)是将设计用量的尿素及抑制剂分成10等份(即每次每盆施尿素为0.211 g,加DCD时减去折算的氮量),分别于玉米播种时、出苗后第7、12、16、20、24、28、32、35、38 d将尿素或尿素加抑制剂溶于200 mL水中,通过滴灌系统施入;对PSA处理滴相同量的水。试验期间的水分管理视土壤干湿情况而定。为防止氮的渗漏损失,盆底垫一托盘,渗漏水重新倒回盆中。

1.4 测定项目与方法

在植株生长到50 d时收获。收获时将植株沿茎、根相连处剪断,分成地上及地下(根系)两部分,同时将地下部根系全部检出、收集、用清水冲洗干净,各部分于75℃烘干后称重;测定地上部及根系的含氮量,用差值法计算各处理的氮肥利用率。氮肥利用率的计算公式为:[(玉米地上部的总吸氮量 + 根系的总吸氮量)/总施氮量] × 100%。植株样品的测定方法为常规分析方法,参见《土壤农业化学分析方法》^[8]。

2 结果与分析

2.1 两种施肥方式下玉米的地上部和根系干重

从表1看出,在滴灌施肥方式下,和单独滴施尿素相比,滴施尿素加不同剂量水平的脲酶抑制剂或硝化抑制剂后玉米的地上部和根系干重均没有显著的增加;与Urea + 0.3% HQ处理相比,Urea + 0.5% HQ处理可显著提高地上部和根系生物量;与单独滴施尿素相比,Urea + 2.5% DCD和Urea + 5.0% DCD的处理均对玉米生长的促进作用不显著,但当用量进一步增大如Urea + 10.0% DCD时,对玉米生长已产生抑制作用。

当土壤施用尿素和抑制剂时,HQ和DCD表现出不同的效果。与单独施尿素比较,土壤施用Urea + 0.3%,Urea + 0.5%和Urea + 1.0%的HQ均不能促进植株的生长,相反,根系生长还有显著下降的趋势,但施入硝化抑制剂DCD后,则可显著促进植株生长。

表 1 两种施肥方式下玉米的地上部和根系干重(g/pot)
Table 1 Dry weight of shoot and root of maize under two methods of fertilization

处 理 Treatment	地上部 Shoots		根系 Roots	
	滴灌施用(DF)	土壤施用(PSA)	滴灌施用(DF)	土壤施用(PSA)
CK	16.86 ± 0.29 f	16.86 ± 0.29 e	3.96 ± 0.18 d	3.96 ± 0.18 b
Urea	35.21 ± 0.79 abc	21.22 ± 0.90 d	5.01 ± 0.25 bc	2.93 ± 0.11 cd
Urea + 0.3% HQ	34.03 ± 0.44 bcd	19.63 ± 0.34 d	4.77 ± 0.22 bc	2.09 ± 0.04 f
Urea + 0.5% HQ	36.60 ± 0.69 a	19.53 ± 0.50 d	5.79 ± 0.34 a	2.36 ± 0.08 ef
Urea + 1.0% HQ	35.89 ± 0.86 ab	20.19 ± 0.41 d	5.43 ± 0.21 ab	2.73 ± 0.14 de
Urea + 2.5% DCD	33.91 ± 0.55 cde	29.56 ± 1.01 a	5.30 ± 0.21 abc	4.15 ± 0.11 a
Urea + 5.0% DCD	36.58 ± 0.48 a	26.67 ± 0.71 b	5.46 ± 0.20 ab	3.65 ± 0.20 b
Urea + 10.0% DCD	32.22 ± 0.60 de	24.41 ± 0.53 c	4.61 ± 0.14 c	2.61 ± 0.10 de
Urea + 0.5% HQ + 5.0% DCD	32.01 ± 0.80 e	25.90 ± 1.11 bc	4.65 ± 0.20 c	3.24 ± 0.20 c

注：表中数据为 5 次重复平均值，“±”后为标准误，每一列数据末具相同字母的表示差异不显著(DMRT 法， $P = 0.05$)，下同。
Note: Each value represents the mean of five repetition; The same letter with a line represents no significant(DMRT, $P = 0.05$). The same symbol is used for other tables.

同一尿素及抑制剂用量在两种施肥方式进行 t 检验的结果表明(图 1)，采用滴灌多次施用尿素及尿素加不同水平的脲酶抑制剂或硝化抑制剂，玉米地上部和根系的干重均显著大于土壤基础尿素及尿

素加不同水平的脲酶抑制剂或硝化抑制剂的处理。单独滴施尿素处理，地上部干重比土施尿素增加 65.9%，根系干重增加 70.9%。

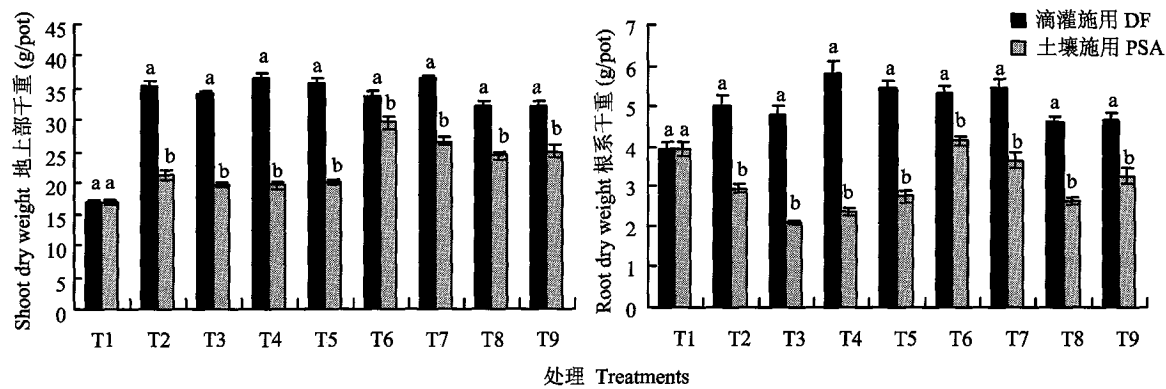


图 1 同一剂量尿素及抑制剂处理在两种施用方式下玉米地上部和根系干重的比较

Fig.1 The comparing of dry weight of shoot and root of maize under the same dosage of urea and inhibitor

(注：图 1 是同一处理两种施肥方法间 t 检验的结果，图标上具有相同字母的表示差异不显著($P = 0.05$)。T1-T9 分别代表 CK、Urea、Urea + 0.3% HQ、Urea + 0.5% HQ、Urea + 1.0% HQ、Urea + 2.5% DCD、Urea + 5.0% DCD、Urea + 10.0% DCD、Urea + 0.5% HQ + 5.0% DCD。下同。
Note: Fig. 1 is the result of T test between the two methods of fertilization under the same dosage of urea and inhibitor, the same letter means no significant ($P = 0.05$). T1 to T9 indicate CK, Urea, Urea + 0.3% HQ, Urea + 0.5% HQ, Urea + 1.0% HQ, Urea + 2.5% DCD, Urea + 5.0% DCD, Urea + 10.0% DCD, Urea + 0.5% HQ + 5.0% DCD, respectively. The same symbol is used for Fig.2.)

2.2 两种施肥方式下玉米地上部和根系的含氮量

表 2 表明，在两种施肥方式下，和对照相比，所有施用尿素处理的玉米地上部含氮量都显著提高 1 倍以上，根系含氮量提高 77% 以上。在滴灌施肥条件下，与单施尿素处理相比，滴施 Urea + 0.3% HQ

或 Urea + 10.0% DCD 可显著提高玉米地上部和根系的含氮量；在土壤施肥条件下，与单施尿素相比，施 Urea + 10.0% DCD 或 Urea + 0.5% HQ + 5.0% DCD 能显著提高玉米地上部和根系的含氮量。

表 2 两种施肥方式下玉米的地上部和根系含氮量 (g/kg)

处 理 Treatments	地上部 Shoots		根系 Roots	
	滴灌施用 (DF)	土壤施用 (PSA)	滴灌施用 (DF)	土壤施用 (PSA)
CK	10.40 ± 0.10 e	10.40 ± 0.10 d	7.06 ± 0.22 f	7.06 ± 0.22 e
Urea	22.57 ± 0.31 cd	24.99 ± 0.40 c	12.54 ± 0.19 e	16.22 ± 0.25 cd
Urea + 0.3% HQ	25.42 ± 0.23 a	25.36 ± 0.33 bc	14.29 ± 0.39 b	17.70 ± 0.55 b
Urea + 0.5% HQ	23.71 ± 0.44 bc	24.25 ± 0.31 c	12.92 ± 0.13 de	16.63 ± 0.12 c
Urea + 1.0% HQ	22.45 ± 0.35 d	24.78 ± 0.20 c	13.93 ± 0.23 bc	15.64 ± 0.24 cd
Urea + 2.5% DCD	22.11 ± 0.36 d	24.78 ± 0.31 c	15.37 ± 0.27 a	15.26 ± 0.39 d
Urea + 5.0% DCD	23.65 ± 0.54 bc	25.23 ± 0.31 bc	13.26 ± 0.28 de	16.38 ± 0.39 cd
Urea + 10.0% DCD	24.12 ± 0.38 b	29.57 ± 0.61 a	13.68 ± 0.28 bcd	19.40 ± 0.40 a
Urea + 0.5% HQ + 5.0% DCD	23.14 ± 0.38 bcd	26.14 ± 0.32 b	13.62 ± 0.39 bcd	18.01 ± 0.51 b

2.3 两种施肥方式下的氮肥利用率

从表 3 可以看出,在滴灌施肥条件下,滴施 Urea + 0.3% HQ、Urea + 0.5% HQ 和 Urea + 5.0% DCD 可以显著提高尿素的氮肥利用率,分别净增加 7.75%、8.76%和 8.22%。在土壤施用条件下,所有尿素加 HQ 处理与单施尿素处理相比,尿素的氮肥利用率均表现为差异不显著,Urea + 0.5% HQ 处理还显著降低氮的利用率达 6.81%;而土壤施用尿素

加 DCD 则可以大幅度提高氮的利用率,施用 2.5% DCD 的处理氮肥利用率最高,比单独施尿素增加 21.08%。

在两种施肥方式下进行 t 检验的结果表明(图 2),多次滴施尿素比土壤施用可显著提高氮肥利用率。HQ 处理的氮肥利用率可提高近 1 倍,DCD 处理的提高幅度为 3.71%~21.07%。

表 3 两种施肥方式下不同处理的氮肥利用率 (%)

处 理 Treatments	滴灌施用 (DF)	土壤施用 (PSA)
Urea	67.09 ± 1.62 cd	38.57 ± 2.12 c
Urea + 0.3% HQ	74.84 ± 1.15 ab	34.01 ± 1.06 cd
Urea + 0.5% HQ	75.85 ± 2.87 a	31.76 ± 1.13 d
Urea + 1.0% HQ	69.47 ± 1.93 bc	34.86 ± 1.31 cd
Urea + 2.5% DCD	64.36 ± 1.45 cd	60.65 ± 1.56 a
Urea + 5.0% DCD	75.31 ± 2.07 ab	54.24 ± 1.56 b
Urea + 10.0% DCD	65.30 ± 1.30 cd	58.38 ± 2.15 ab
Urea + 0.5% HQ + 5.0% DCD	61.69 ± 2.86 d	54.55 ± 2.93 b

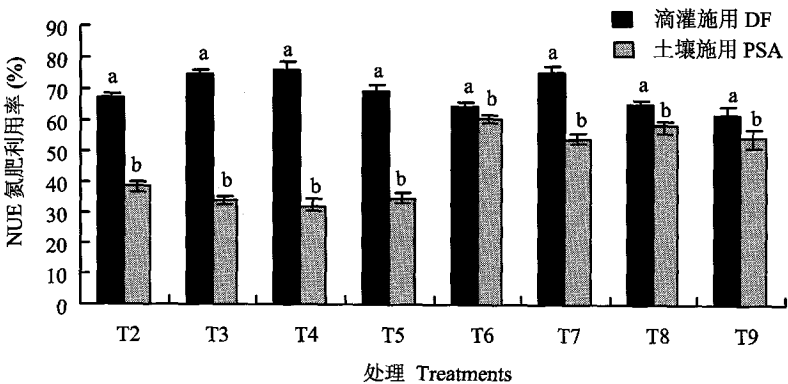


图 2 同一剂量尿素及抑制剂处理在两种施用方式下的氮肥利用率比较

Fig.2 The comparing of NUE under the condition that the same dosage of urea and inhibitor

3 讨论

脲酶抑制剂和硝化抑制剂的研究,在世界各国已经有了一段很长的历史,当然,主要还是集中在实验室里进行的产品筛选及机理方面的研究,而在农业生产中的推广应用还不十分普遍,仅在为数不多的几个国家有少量的推广应用。如双氰铵 1918 年首次被报道具有硝化抑制特性,但是直到七、八十年代美国才开始把它当作一种商品在农业上推广应用^[10]。

脲酶抑制剂或硝化抑制剂的使用效果与采用什么样的灌溉施肥方式关系密切,同时还受到抑制剂的使用剂量和不同的土壤环境条件等的深刻影响。土壤施用氢醌可以减缓尿素水解并提高氮肥利用率已得到广泛验证^[11-12],而氢醌的有效浓度则介于 0.01%~1.0% 之间^[13];双氰胺作为硝化抑制剂在多种作物上进行的试验也表明,双氰胺在促进植株的生长、降低土壤和植株中硝态氮含量、降低氮的挥发损失等方面具有显著的作用^[12,14]。本试验结果表明,尿素与氢醌混合在土壤上施用对玉米生长没有显著促进作用,但与双氰胺混合施用后,则可显著促进玉米植株的生长。然而,在滴灌施肥条件下将尿素与氢醌和双氰胺混合施用氢醌和双氰胺的增效作用不显著。这其中可能的原因,一是当与土壤施用相同用量的尿素及抑制剂均分成 10 次溶于水后滴施,此时 HQ 与 DCD 的浓度被大幅度稀释,可能低于 HQ 和 DCD 的有效浓度范围;二是在滴灌施肥条件下,尿素及抑制剂溶于水后,通过滴灌系统得以快速、及时地输送到作物的根部,氮肥很快被作物吸收利用,从而降低了脲酶抑制剂或硝化抑制剂对尿素等养分在土壤中转化、分解过程中所起的抑制作用,因而对植株生长的促进作用不显著。

本试验结果(图 2)表明,对于同一剂量水平的尿素及抑制剂在两种施用方式下的氮肥利用率表现出显著的差异性,而氮肥利用率的数值大小取决于植株含氮量的高低和植株干物重的多少。从植株的含氮量看,滴施尿素和土施尿素二者没有显著差别。氮肥利用率的显著差异是由两种施肥方法而致的生长量的差异引起的。仅考虑单独施用尿素的情况,两种施肥方法土壤水分状况是一致的。在施肥量上,本试验氮肥施用量是常规的推荐用量^[15],因而不会是玉米生长的限制因素。滴灌施尿素时,采取少量多次的原则,供应养分快速及时,根系吸收效率高;另外,滴灌施肥可以严格控制湿润范围,硝态氮

的淋溶损失很小,所以氮的利用率得到显著提高。

综合本试验结果,在滴灌施肥条件下,滴施尿素及 0.3% HQ、0.5% HQ 和 5% DCD 可显著提高尿素的利用率,三个处理的氮肥利用率显著高于单独滴施尿素处理,也显著高于土施尿素及抑制剂处理的氮肥利用率。当然,有关硝化抑制剂和脲酶抑制剂的使用问题应该考虑更多因素,如抑制剂的价格,作物收获器官的品质要求(氮蛋白质和硝态氮含量),抑制剂在土壤中的残留及可能存在的对作物生长的不良反应等;而在抑制剂的适用品种及使用剂量等方面也还有许多值得研究的问题。但从提高氮肥利用率、减少对环境的污染等方面考虑,所有相关的研究都是必要和必需的。

参考文献:

- [1] Bar-Yosef B. Advances in fertigation[J]. *Advan. Agron.*, 1999, 65: 3-5.
- [2] Miller R J, Rolston D E, Rauschkolb R S. Labeled N uptake by drip irrigated tomatoes[J]. *Agron. J.*, 1981, 73: 265-270.
- [3] Kee K K F, Deville J. Application of ¹⁵N-labeled urea to sugar cane through a drip irrigation system in Mauritius [J]. *Fert. Res.*, 1994, 39: 223-228.
- [4] 鲁如坤, 谢建昌, 蔡贵信, 等. 土壤-植物营养学原理和施肥 [M]. 北京: 化学工业出版社, 1998. 144.
Lu R K, Xie J C, Cai G X *et al.* Soil-principles of plant nutrition and fertilization [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1998. 144.
- [5] 唐建阳, 翁伯琦, 何萍, 等. 提高稻田尿素利用率若干方法与机理探讨 [J]. *植物营养与肥料学报*, 1998, 4(3): 242-248.
Tang J Y, Weng B Q, He P *et al.* Some methodological and mechanical exploration on increasing urea-N efficiency in paddy field [J]. *Plant Nutr. Fert. Sci.*, 1998, 4(3): 242-248.
- [6] Malzer G L, Kelling K A, Schmitt M A. Performance of diacyandiamide in the north central states [J]. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.*, 1989, 20(19-20): 2001-2022.
- [7] Pasda G, Hahndel R, Zerulla W. Effect of fertilizers with the new nitrification inhibitor DMPP (3, 4-dimethylpyrazole phosphate) on yield and quality of agricultural and horticultural crops [J]. *Biol. Fert. Soils*, 2001, 34(2): 85-97.
- [8] 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. 146-149, 181-182, 194-195, 308-312.
Lu R K. Analytical methods of soils and agr-chemistry [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000. 146-149, 181-182, 194-195, 308-312.
- [9] 徐静安, 潘振玉. 分析测试方法 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2000. 374-376, 379-382, 389-398, 407-409, 413-415, 444-446.
Xu J A, Pan Z Y. Methods of analysis and determination [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2000. 374-376, 379-382, 389-398, 407-409, 413-415, 444-446.
- [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

- 究进展[J]. 土壤通报, 2002, 33(4): 310-315.
- Huang Y Z, Feng Z W, Wang X K *et al.* Research progress of nitrification inhibitors applied in agriculture [J]. Chin. J. Soil Sci., 2002, 33(4): 310-315.
- [11] 李晓鸣. 氢醌在小麦吸收利用氮素中的作用[J]. 黑龙江农业科学, 2002(4): 4-5.
- Li X M. Effect of hydroquinone on the uptake of nitrogen by wheat [J]. Heilongjiang Agric. Sci., 2002 (4): 4-5.
- [12] 周礼恺, 徐星凯, 陈利军, 等. 氢醌和双氰胺对种稻土壤 N_2O 和 CH_4 排放的影响[J]. 应用生态学报, 1999, 10(2): 189-192.
- Zhou L K, Xu X K, Chen L J *et al.* Effect of hydroquinone and dicyandiamide on N_2O and CH_4 emission from lowland rice soil [J]. Chin. J. App. Ecol., 1999, 10(2): 189-192.
- [13] 王小彬, Bailey L D, Grant C A, 等. 关于几种土壤脲酶抑制剂的作用条件[J]. 植物营养与肥料学报, 1998, 4(3): 211-218.
- Wang X B, Bailey L D, Grant C A *et al.* The acting conditions of some urease inhibitors in soils[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 1998, 4 (3): 211-218.
- [14] 陈清, 郑兴耘, 温贤芳, 等. 双氰胺对肥料氮在土壤中的转化及硝酸盐在芥菜体内累积的影响[J]. 核农学通报, 1996, 17 (6): 269-272.
- Chen Q, Zheng X Y, Wen X F *et al.* Effect of dicyanamide on the transformation of fertilizer N in soils and accumulation of nitrate in mustard[J]. J. Nuc. Agric. Sci., 1996, 17(6): 269-272.
- [15] 毛达如, 申建波. 植物营养研究方法[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2005. 11.
- Mao D R, Shen J B. Methodology of plant nutrition[M]. Beijing: China Agric. Univ. Press, 2005. 11.