植物营养与肥料学报 2015,21(1): 128 - 137
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer doi: 10.11674/zwyf.2015.0114

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

张 琳[1], 孙卓玲[1], 马 理[2], 吉艳芝[1], 巨晓棠[3], 张丽娟[1*]
(1 河北农业大学资源与环境学院, 河北省农田生态环境重点实验室, 河北保定 071000;
2 河北省永清县蔬菜管理局, 河北廊坊 065600; 3 中国农业大学资源与环境学院/教育部植物 - 土壤相互作用重点实验室, 北京 100193)

摘要:【目的】设施蔬菜习惯"大水大肥"的传统管理模式,不仅影响蔬菜的品质和产量,造成严重的资源浪费,而且引起的环境污染问题日益受到人们的关注。本研究针对设施蔬菜生产中过量施用氮肥以及不合理的灌溉所导致的氮肥利用率低、氮素损失等资源浪费和环境的负效应问题,重点研究双氰胺(DCD)在设施蔬菜生产体系中的硝化抑制效果及其影响机制,并筛选出了适用于设施黄瓜生产的最优水氮管理方案。**【方法】**采用田间原位跟踪法,对温室黄瓜追肥期间土壤 N_2O 排放量、氨挥发损失量、无机氮含量等指标进行了测定。N_2O 气体样品用密闭式静态箱法采集,用 Agilent GC6820 气相色谱仪进行测定。氨挥发样品用密闭室法采集,硼酸溶液吸收,标准硫酸滴定法测定。新鲜土样用 1.0 mol/L KCl 浸提,滤液用 TRACCS 2000 型流动分析仪测定土壤的 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 含量。**【结果】**在不同水氮条件下[传统水氮(T)的施氮量为 N 988.6 kg/hm^2、灌溉量为 758.8 t/hm^2;推荐水氮Ⅰ(R1)的施氮量为 N 709.4 kg/hm^2,推荐水氮Ⅱ(R2)的施氮量为 N 746.9 kg/hm^2,灌溉量均为 531.2 t/hm^2]。加施 DCD 后,推荐水氮Ⅰ、推荐水氮Ⅱ处理 N_2O 的排放通量分别显著减少了 42.1% 和 64.1%,但氨挥发损失分别显著增加了 34.3% 和 40.4%; 0—10 cm 土层土壤硝态氮与 N_2O 排放通量呈极显著的正相关,铵态氮与氨挥发损失呈极显著正相关。传统水氮处理在 0—60 cm 土壤剖面均检测到大量的硝态氮,前两次追肥后尤为明显。在减氮基础上加施 DCD 有助于减少硝态氮的累积,对 0—30 cm 根区硝酸盐淋洗的抑制作用较为明显。在 0—30 cm 土壤 - 蔬菜体系中,传统水氮处理的氮素表观损失显著高于其他施氮处理。加施 DCD 后,推荐水氮Ⅰ、推荐水氮Ⅱ处理的氮素盈余和氮素损失率均有所降低。与传统水氮处理相比,推荐水氮Ⅱ + DCD 的处理增产 23.3%,经济效益增加 25560 yuan/hm^2。**【结论】**在本试验条件下,适度减氮控水措施是切实可行的,不仅满足了作物生长所需要的氮素,而且减少了氮素的盈余,提高了氮素的利用率,且不影响作物产量。在控水灌溉条件下,推荐施氮Ⅱ + DCD(氮素用量的 15%)不仅能减少土壤氮素的盈余量,而且可有效地增加经济效益和环境效益。

关键词: 减氮控水; N_2O 排放; 氨挥发; 无机氮; 产量; 经济效益
中图分类号: S153.6$^+$1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-505X(2015)01-0128-10

Effects of dicyandiamide on nitrogen loss from cucumber planting soil in intensive greenhouse under different irrigation and nitrogen conditions

ZHANG Lin[1], SUN Zhuo-ling[1], MA Li[2], JI Yan-zhi[1], JU Xiao-tang[3], ZHANG Li-juan[1*]
(1 College of Resources and Environmental Sciences, Agricultural University of Hebei/Key Laboratory for Farmland Eco-environment of Hebei Province, Baoding, Hebei 071001, China; 2 Vegetable Management Bureau of Yongqing County, Langfang, Hebei 065600, China; 3 College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University/Key Laboratory of Plant-Soil Interactions of Ministry of Education, Beijing 100193, China)

Abstract:【Objectives】 The traditional management mode of greenhouse vegetables is under "a large number of irrigation and fertilization". This mode not only affects quality and yield of vegetables, but also causes serious waste

收稿日期: 2013-11-17 **接受日期:** 2014-08-25
基金项目: 农业部"948"项目(2012-Z36);河北省教育厅项目(Q2012130)资助。
作者简介: 张琳(1989—),女,汉族,河北廊坊人,硕士研究生,主要从事环境质量评价与监控的研究。
Tel: 0312-7528210, E-mail: linzhang_2013@163.com。 * 通信作者 Tel: 0312-7528210, E-mail: lj_zh2001@163.com

of resources and environmental pollution. Aiming at excessive application of nitrogen fertilizer and low nitrogen fertilizer utilization rate caused by unreasonable irrigation, nitrogen loss and other waste of resources and negative effects of environmental problems in greenhouse vegetable production were studied with focusing on nitrification inhibition effect and its mechanism of dicyandiamide (DCD) to select the best water and nitrogen management program for greenhouse cucumber production. 【**Methods**】A field in-situ tracking experiment was carried out to determine N_2O emission, ammonia volatilization loss, inorganic nitrogen in soil and other indicators during the greenhouse cucumber dressing. N_2O gas samples were collected by enclosed static box method, and gas samples was analyzed by gas chromatography with Agilent GC6820. Ammonia volatilization samples were collected by closed chamber method, added 20 mL 2% boric acid solution into evaporating dish of 50 mL, and after 24 hours, absorption of ammonia in boric acid was titrated with standard sulfuric acid. Fresh soil samples were extracted with 1.0 mol/L KCl, and analyzed for NH_4^+-N and NO_3^--N using continuous flow analysis (TRAACS 2000) in laboratory. 【**Results**】Compared with the recommended water and nitrogen treatments of Ⅰ and Ⅱ, the applications of DCD with the recommended water and nitrogen treatments of Ⅰ and Ⅱ could reduce N_2O emission by 42.1% and 64.1%, while the applications increase ammonia volatilization loss by 34.3% and 40.4% respectively. Soil NO_3^--N and N_2O flux, NH_4^+-N and ammonia volatilization loss in 0–10 cm soil layer are positively correlated. The traditional water and nitrogen treatment has large amounts of NO_3^--N in 0–60 cm soil profiles, especially after the first two dressing. Based on the reduction of nitrogen, applying DCD helps reduce the NO_3^--N accumulation, and nitrate leaching inhibitory effect is more obvious in 0–30 cm root zone. The N apparent loss in 0–30 cm soil layer and vegetables system of the traditional water nitrogen treatment is significantly higher than those of the other nitrogen treatments. Compared with the recommended water and nitrogen treatments of Ⅰ and Ⅱ, the applications of DCD with the recommended water and nitrogen treatments of Ⅰ and Ⅱ could reduce nitrogen surplus and loss rate of nitrogen. Compared with the traditional water and nitrogen management, cucumber yield and economic benefit are increased by 23.3% and 25560 yuan/ha respectively under the addition of DCD with the recommended water and nitrogen treatment Ⅱ (traditional water and nitrogen, N application rate was N 988.6 kg/ha and irrigation volume was 758.8 t/ha, the recommended water and nitrogen treatments of Ⅰ and Ⅱ, N application were N 709.4 and 746.9 kg/ha, and irrigation volume was 531.2 t/ha). 【**Conclusions**】Under this experimental condition, moderate reduction of nitrogen and water is feasible to satisfy the need of nitrogen for crop, reduce the surplus of nitrogen and increase the efficiency of nitrogen, and does not affect the output of crops. The DCD application (15% of the nitrogen rate) with recommended nitrogen Ⅱ under the controlled irrigation condition could not only reduce soil nitrogen surplus capacity, but also increase the economic benefit and environmental benefit effectively.

Key words: reduction of nitrogen and water control; N_2O emission; ammonia volatilization; inorganic nitrogen; yield; economic profit

我国是世界设施蔬菜生产第一大国,截至到2010年底,设施蔬菜年种植面积约达 466.7×10^4 hm^2,分别占我国设施栽培面积的95%和世界设施园艺的80%[1]。与水田和旱作农业相比,设施菜田施肥量大,加之频繁的灌水,施入的氮肥只有小部分被作物吸收,氮肥利用率仅在14.5%～22.5%[2]。损失的氮素主要以硝酸盐的形式流失或淋溶到土壤深层,或经氨挥发、硝化—反硝化作用,以氨(NH_3)、氮氧化物(NO_x)等气体形式进入大气中[3],从而造成了地下水的污染、水体富营养化及土壤中温室效应气体 N_2O 的排放等[4-5]一系列环境问题。研究表明,适当的减氮控水措施能有效地控制氮素转化,减少氮素损失[6-7]。为了进一步提高氮肥利用率,许多国家已经将硝化抑制剂应用到生产实际中。在众多硝化抑制剂中,双氰胺(Dicyandiamide,简称DCD,化学式为 $C_2H_4N_4$,一般为白色结晶粉末)因具有价格低廉、易溶于水、含氮量高、降解产物无污染等优点而备受人们青睐[8]。N_2O 是一种重要的痕量气体,对全球气候变暖和臭氧层破坏具有十分重要的意义[9]。农田生

态系统因施氮引起的 N_2O 排放占大气 N_2O 总排放的13%[10]。设施蔬菜种植体系中,通常施入大量的肥料,不仅造成了肥料浪费,而且会导致温室气体排放量增加[11]。国内外研究表明,施用 DCD 对减少土壤中 N_2O 的排放有显著效果。Ding 等[12]研究表明,DCD 能减少小麦生长期 39.0% 的土壤 N_2O 排放;季加敏等[13]在室内培养的试验结果表明,与单施尿素相比,添加 DCD 能降低 N_2O 排放总量的97.1%。尽管 DCD 对减少 N_2O 排放和硝态氮的淋溶效果较为明显,但对氨挥发的影响还存在争议[14-15]。虽然双氰胺能有效减少氮素损失,但大多数研究集中在农田三大主要粮食作物,设施蔬菜生产中的相关研究较少。本研究小组针对设施蔬菜种植体系中 DCD 的施用效果进行了深入研究。聂文静等[16]研究表明,采取减氮控水同时配施 DCD(氮素用量的 10%)的方法能减少氮素损失;杨威等[17]在此基础上对 DCD 的配比浓度做了进一步研究,结果表明,DCD 用量为氮素投入量的15%时效果最显著。因此,本研究将 DCD 浓度设定为氮素用量的15%,采用田间原位跟踪的方法,在大幅度减氮和合理灌溉的基础上配施 DCD,通过监测追肥期间 N_2O 排放通量、氨挥发速率及土壤中无机氮的动态变化,明确氮肥与 DCD 配施对设施菜田土壤氮素损失的影响,进而筛选最佳的田间管理措施,为我国北方设施蔬菜的氮肥高效管理提供科学指导。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2012年9月至2013年1月在河北农业大学永清县现代蔬菜产业科技创新示范基地(E116°5′,N39°32′)进行。该试验地0—30 cm 土壤有机质含量12.5 g/kg、硝态氮145.7 mg/kg、铵态氮4.3 mg/kg、速效磷 70.2 mg/kg、速效钾 272.2 mg/kg、pH 8.1、土壤容重1.3 g/cm^3。

1.2 试验设计

供试蔬菜为黄瓜(*Cucumis sativus* L.),试验共设6个处理,每处理3次重复,具体处理及施氮情况见表1。试验小区面积26.4 m^2,田间随机区组排列。磷、钾肥均作为基肥在黄瓜种植前一次施入,所有处理磷、钾肥施用量相同,磷肥用量为386.2 kg/hm^2,钾肥用量为289.5 kg/hm^2。氮肥为尿素(含N 46%),磷肥用过磷酸钙(含 P_2O_5 12%),钾肥用硫酸钾(含 K_2O 50%)。灌溉情况:对照和传统处理按传统灌溉量,为758.8 t/hm^2,其他处理进行控水灌溉,灌水量为传统灌溉量的70%,为531.2 t/hm^2,整个生育期共进行7次灌溉,追肥期间肥料随水灌溉。本试验于2012年9月19日定植,定植前撒施基肥并翻耕,收获时间为2013年1月27日。试验地总面积587.7 m^2,黄瓜栽培模式为传统的畦栽,畦宽1.2 m,畦间0.4 m,株距0.3 m,行距0.8 m,种植密度为4.9 ×10^4 plant/hm^2。在黄瓜整个生长期,按照当地传统习惯进行田间管理。

表1 试验设计

Table 1 Experimental design

处理 Treatment	代号 Code	氮肥施用时期和用量(N kg/hm^2)N application time and rate				
		2012-09-06	2012-11-14	2012-12-10	2013-01-08	总计 Total
对照 CK	CK	0	0	0	0	0
传统水氮(T) Traditional water and nitrogen	T	584.4	161.7	161.7	80.8	988.6
推荐水氮Ⅰ(R1) Recom. water and nitrogen Ⅰ	R1	584.4	50.0	50.0	25.0	709.4
推荐水氮Ⅱ(R2) Recom. water and nitrogen Ⅱ	R2	584.4	65.0	65.0	32. 5	746.9
推荐水氮Ⅰ+DCD(R1+DCD) Recom. water and nitrogen Ⅰ with DCD	R1+DCD	584.4	50.0	50.0	25.0	709.4
推荐水氮Ⅱ+DCD(R2+DCD) Recom. water and nitrogen Ⅱ with DCD	R2+DCD	584.4	65.0	65.0	32.5	746.9

1.3　测定项目与分析

1.3.1 N_2O 气体的采集与测定　采用密闭式静态箱法测定。每次灌水施肥后第 1 天开始连续一周采样(若水肥管理间隔时间较长,酌情加密采样),采样时间为每天上午 9:00～11:00,每隔 20 min 采样 1 次,在 0、20、40 min 时采集气样并同步测定箱内温度。N_2O 气体样品用 Agilent GC6820 气相色谱仪进行分析。

N_2O 的排放通量的计算公式[18]为:

$$F = \rho \times V/A \times dc/dt \times 273/(273 + T) \times 60$$

式中:F 为 N_2O 排放通量[μg/(m^2·h)];ρ 为标准状态下 N_2O 的密度,其值为 1.25 kg/m^3;V 表示密闭箱内温室气体所能容纳的有效体积(m^3);A 为箱内土面面积(m^2);dc/dt 表示单位时间内密闭箱内 N_2O 浓度的变化量[/(10^9·min)];T 为测定时密闭箱内平均温度(℃)。

1.3.2 NH_3 挥发的采集与测定　采用密闭室法测定,与 N_2O 气体同步监测。试验时将 20 mL 2% 的硼酸溶液加入到 50 mL 的蒸发皿中,吸收 24 h 后用标准硫酸滴定硼酸中所吸收的氨。

氨挥发速率计算公式为[19]:$\upsilon = M/A/D \times 10^{-2}$

式中:υ 为氨挥发速率[kg/(hm^2·d)];M 为密闭法单个装置每次测得的氨量(NH_3-N,mg);A 为捕获装置的横截面积(m^2);D 为每次连续捕获的时间(d)。

1.3.3 土壤样品的采集与测定　每次追肥后第 1、3、5、7、9 d 采集 0—10 cm 表层鲜土,用于测定土壤中无机氮的变化情况;在前两次追肥后半个月左右分别采集 0—90 cm 土层(间隔 30 cm)样品,定植前和第 3 次追肥后半个月左右(即收获后)分别采集 0—180 cm 土层土样,用于测定土壤剖面中的硝态氮含量,研究其分布和淋移状况。采集的新鲜土样用 1.0 mol/L KCl 浸提,过滤后滤液放入 -20℃冰柜中保存,用连续流动分析仪(TRACCS 2000)测定滤液中的无机氮含量。

1.3.4 产量的测定　第一次采收前在各小区中间两畦标记 10 株黄瓜进行计产。每次采收时,对各试验小区标记的黄瓜植株进行采收,用电子台秤称重后,以小区为单位记录黄瓜产量。

1.3.5 土壤基本理化性质的测定　土壤容重采用环刀法;pH 用电位计(土水比为 1∶2.5)测定;有机质用重铬酸钾容量法;无机氮用 1.0 mol/L KCl 浸提,流动分析仪测定;速效磷用 0.5 mol/L $NaHCO_3$ 浸提,钼锑抗比色法测定;速效钾用 1.0 mol/L NH_4OAC 浸提,火焰光度法测定[20]。

1.4　数据处理与统计分析

N_2O 排放系数 = 以 N_2O 形式损失的氮量/所施用的氮量[21]。

氮素平衡计算公式:

氮素表观损失 = 氮素输入量 - 氮素输出量

氮素盈余量 = 氮素输入量 - 作物吸收的氮素

氮素损失率 = 1 - 氮素输出量/氮素输入量 ×100%

其中:氮素输入量包括种植前土壤中的氮素、有机氮素表观矿化量、肥料中的氮素和随灌溉水带入的氮素;氮素输出量包括作物吸收的氮素和土壤残留的氮素。

试验数据采用 Microsoft Excel 进行处理,用 SAS 8.0 统计软件进行单因素方差分析,显著性水平设定为 α = 0.05。

2　结果与分析

2.1　土壤 N_2O 排放通量

2.1.1 N_2O 排放通量的变化　在黄瓜生长期追施氮肥能显著提高 N_2O 排放(图 1),每次施用氮肥后,无论添加 DCD 与否,所有施氮处理的 N_2O 排放通量均呈先升高后降低的趋势。在整个监测期间,施氮处理土壤的 N_2O 排放高峰均出现在施肥灌水后的第 3d;与传统水氮处理相比,R1、R2、R1 + DCD 和 R2 + DCD 处理的 N_2O 排放通量的峰值范围分别降低了 65.3%～80.9%、48.7%～84.4%、74.3%～93.2% 和 91.4%～97.5%,说明在减氮基础上添加 DCD 能显著降低土壤 N_2O 的排放。

2.1.2 N_2O 累积排放量　由图 2 可知,在整个监测期间,对照处理(CK)土壤的 N_2O 排放总量较低,N_2O 累计排放量(以 N 计)只有 0.12 kg/hm^2。在各施氮处理中,传统水氮管理(T)显著高于其他减氮控水处理,N_2O 累积排放量达到 2.39 kg/hm^2。R1 和 R2 处理的土壤 N_2O 排放总量分别为 0.39 kg/hm^2 和 0.50 kg/hm^2,施用 DCD 后(R1 + DCD 和 R2 + DCD)减少至 0.23 kg/hm^2 和 0.18 kg/hm^2,分别减少了 42.1% 和 64.1% 的 N_2O 排放。进一步分析表明,T 处理的土壤 N_2O 排放系数比减氮控水处理高,排放系数(EF)为 0.56%。R1 和 R2 土壤 N_2O 的排放系数分别为 0.21% 和 0.24%,加施 DCD 后,R1 + DCD 和 R2 + DCD 的土壤 N_2O 排放系数减少至 0.08% 和 0.04%。

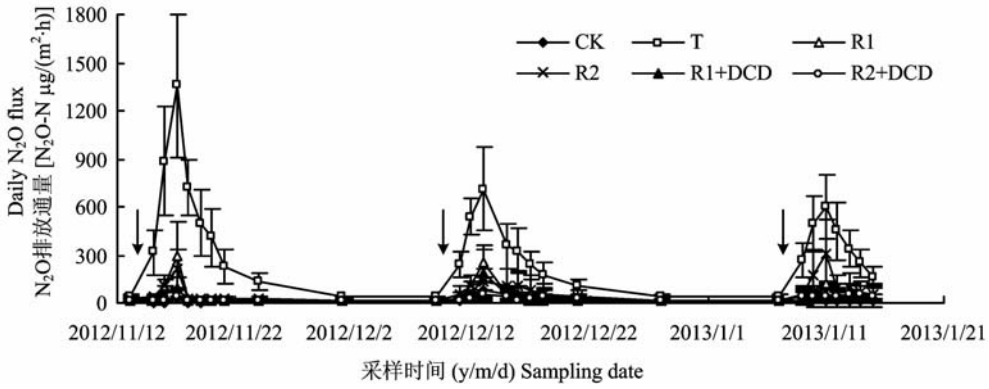

图1 不同水氮管理下土壤氧化亚氮的排放通量

Fig. 1 N_2O flux under different irrigation and fertilization strategies

[注(Note):箭头表示施肥日期 Arrows indicate the dates of the fertilization.]

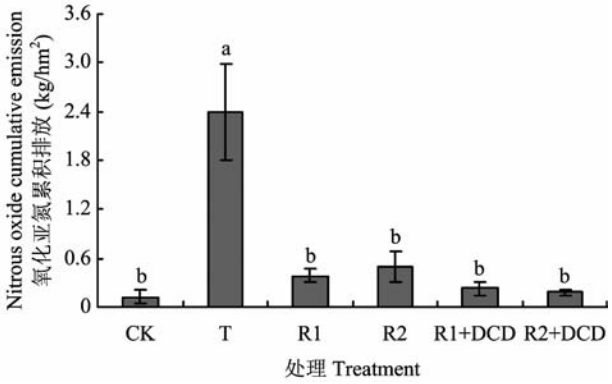

图2 设施黄瓜生育期内土壤氧化亚氮的累积排放量

Fig. 2 Accumulation amounts of N_2O emission in greenhouse for cucumber cultivation

[注(Note):柱上不同字母表示同一时期处理间差异达5%水平 Different letters above the bars mean significant at the same stage among treatments at the 5% level.]

2.2 土壤氨挥发损失

2.2.1 氨挥发速率的变化 氨挥发是氮肥损失的重要途径,氮肥施入土壤后会迅速溶解转化成铵态氮,有一部分以氨的形式挥发损失到大气中。本试验对黄瓜追肥期间氨挥发速率的动态变化进行了监测,由图3可以看出,每次追肥灌水后,各施氮处理的氨挥发速率均表现出相似的变化趋势,即在施肥灌水后第1～2 d达到最高峰,之后呈现逐渐降低的趋势。在整个监测期间,传统水氮处理(T)由于较高的氮输入量,因而氨挥发速率相对较高,变化范围为0.01～0.32 kg/(hm²·d);R1和R2的氨挥发峰值均为0.19 kg/(hm²·d),施加DCD后,R1+DCD和R2+DCD的氨挥发峰值显著增加至0.25 kg/(hm²·d)和0.35 kg/(hm²·d),这表明DCD在一定程度上增加了氨挥发损失的风险。

2.2.2 氨挥发损失量 分析黄瓜追肥期间土壤氨挥发累积排放量(图4),结果表明,CK的氨挥发累积

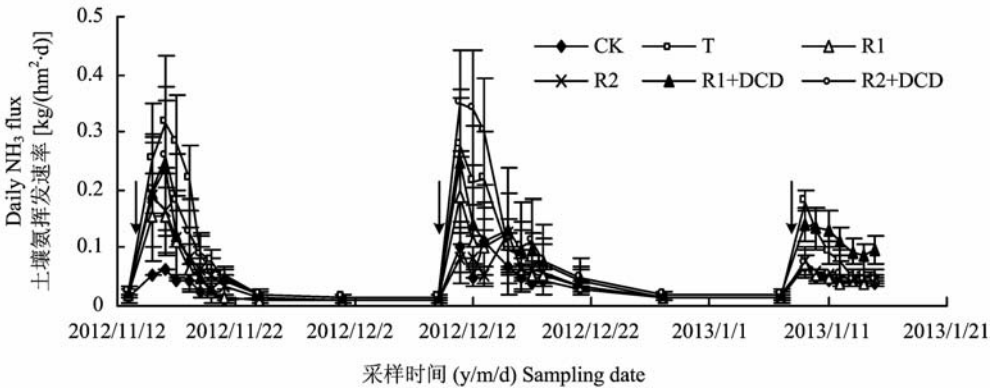

图3 不同水氮管理下土壤的氨挥发速率

Fig. 3 Rate of NH_3 volatilization under different irrigation and fertilization strategies

[注(Note):箭头表示施肥日期 Arrows indicate the dates of the fertilization.]

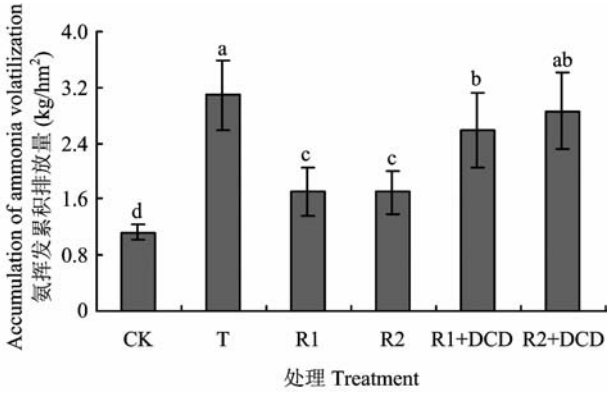

图 4　设施黄瓜生育期内土壤氨挥发的累积排放量

Fig. 4　Accumulation amounts of ammonia volatilization in greenhouse for cucumber cultivation

[注(Note):柱上不同字母表示同一时期处理间差异达 5% 水平 Different letters above the bars mean significant at the same stage among treatments at the 5% level.]

量为 1.13 kg/hm^2,显著低于各施氮处理。T 处理的氨挥发累积量为 3.09 kg/hm^2,显著高于 R1、R2 和 R1 + DCD 处理,但与 R2 + DCD 无显著差异。R1 和 R2 的氨挥发累积量分别为 1.70 kg/hm^2 和 1.71 kg/hm^2,施用 DCD 后,R1 + DCD 和 R2 + DCD 处理的氨挥发累积量显著增加至 2.59 kg/hm^2 和 2.86 kg/hm^2,分别增加了 34.3% 和 40.4% 的氨挥发损失。进一步分析表明,R1 和 R2 中施入的氮素以 NH_3 挥发形式损失的量分别占氮素总投入量的 0.46% 和 0.35%,施用 DCD 后这一比值增加至 1.17% 和 1.06%。

2.3　土壤剖面硝态氮的分布及淋移潜势

土壤硝态氮的剖面分布情况如图 5 所示。在整个监测期间,CK 处理的土壤剖面中硝态氮含量一直处于较低水平。T 处理在 0—60 cm 土壤剖面均检测到大量的硝态氮,与其他处理差异显著,在前两次追肥后尤为明显,表明传统施肥灌溉会导致表层土壤硝态氮的大量累积,存在较强的向下层淋溶趋势。各减氮处理均在不同土层出现硝态氮的累积峰,3 次追肥后累积峰分别出现在 30—60 cm、60—90 cm 和 90—120 cm 土层,表明在黄瓜生长期间,土壤硝态氮已经有向下层淋洗的趋势。在前两次追肥后,R1 处理 0—30 cm 和 30—60 cm 土层的硝态氮含量均显著高于 R1 + DCD 处理;R2 处理 0—30 cm 土层的硝态氮含量均显著高于 R2 + DCD 处理;在第 3 次追肥后,R1 处理在 0—30 cm 土层的硝态氮含量显著高于 R1 + DCD 处理,R2 处理也高于 R2 + DCD 处理。由此可见,DCD 有助于减少硝态氮的累积,对 0—30 cm 根区硝酸盐淋洗的抑制作用较为明显。

2.4　黄瓜生长期的氮素损失

从表 2 可以看出,在黄瓜生育期内,0—30 cm 土壤-蔬菜体系中,传统水氮处理(T)的氮素表观损失显著高于其他施氮处理。从氮素盈余量来看,T 处理的氮素盈余显著高于其他施氮处理,R1 和 R2 处理的氮素盈余量无显著差异;施用 DCD 后氮素盈余显著降低,表明加施 DCD 能够有效提高氮素的利用率,减少土壤氮素盈余。从氮素损失率来看,T 处理的氮素损失率为 53.3%,高于其他处理;其中 R1 + DCD 和 R2 + DCD 处理的氮素损失率比相应的 R1 和 R2 处理有所降低,表明加施 DCD 对减少土壤氮素损失有一定的作用。

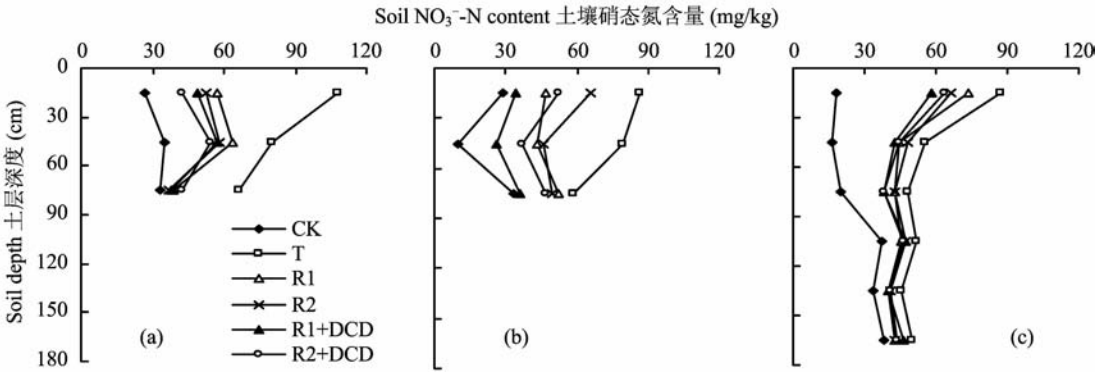

图 5　不同水氮管理下土壤剖面硝态氮的分布

Fig. 5　Distribution of NO_3^--N in soil profile under different irrigation and fertilization strategies

[注(Note):图(a)、(b)、(c)为三次追肥后土壤剖面硝态氮分布情况

Figures (a), (b) and (c) indicate NO_3^--N distribution in soil profile after fertilizer dressing for three times.]

表2 设施黄瓜生育期的氮素损失

Table 2 Nitrogen loss in greenhouse for cucumber cultivation

处理 Treatment	输入 Input(kg/hm²)				输出 Output(kg/hm²)		氮素表观损失 NAL (kg/hm²)	氮素盈余 NS (kg/hm²)	氮损失率 NLR (%)
	种植前 PP	肥料 Fertilizer	灌溉 Irrigation	净矿化 NM	作物吸收 CA	土壤残留 SR			
T	150.0	988.6	1.0	31.3	197.7	349.4	623.7 a	973.1 a	53.3
R1	150.0	709.4	0.7	31.3	125.7	296.7	468.9 b	765.7 b	52.6
R2	150.0	746.9	0.7	31.3	192.9	268.0	468.0 b	736.0 b	50.4
R1 + DCD	150.0	709.4	0.7	31.3	197.6	238.1	455.6 b	693.7 b	51.1
R2 + DCD	150.0	746.9	0.7	31.3	235.6	260.4	432.8 b	693.2 b	46.6

注(Note): PP—Pre-planting; NM—Net mineralization; CA—Crop absorption; SR—Soil residual; NAL—N apparent loss; NS—Nitrogen surplus; NLR—Nitrogen loss rate.

2.5 土壤无机氮与气态损失的相关性分析

通过对本试验表层土壤无机氮含量与气态损失的相关分析(图6)可以看出,在黄瓜追肥期间,表层土壤硝态氮含量与 N_2O 排放通量呈极显著的正相关($r=0.7654^{**}$);铵态氮与氨挥发损失呈极显著的正相关($r=0.6576^{**}$)。

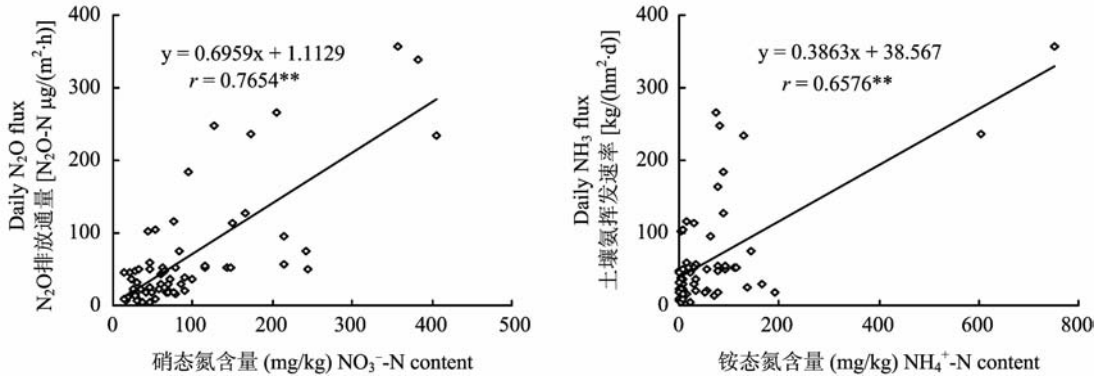

图6 土壤无机氮与气态损失的相关关系

Fig. 6 Correlation between soil inorganic nitrogen and gaseous loss of N

2.6 产量及经济效益分析

R2 + DCD 处理的小区黄瓜产量为 178.3 kg/plot,与T处理相比,增产率为23.3%,显著高于其他处理;T处理的小区黄瓜产量为144.6 kg/plot,与R1、R2和R1 + DCD处理间差异不显著。以上数据表明,各减氮处理基本达到稳产,其中R2 + DCD处理的增产效果明显。

从经济效益的角度分析,适当减氮控水能降低投入成本。表3显示,R2和R2 + DCD处理的经济效益分别为111700和131100 yuan/hm²,均高于其他处理;其中R2 + DCD处理的效果更明显,与T处理相比,经济效益增加25560 yuan/hm²。以上分析表明,在控水灌溉条件下,采用推荐施氮Ⅱ + DCD(施氮量的15%)的施肥管理措施能有效提高经济效益和生态效益。

3 讨论

目前硝化抑制剂在提高氮素利用率、减少 N_2O 排放等[22]方面起到了很好的效果。本试验研究表明,采取减量施氮和控水灌溉的措施是切实可行的,并在此基础上施用硝化抑制剂DCD,不仅保证蔬菜获得一定的产量,而且减少了氮素损失对生态环境的威胁。在整个监测期间,施氮处理土壤 N_2O 排放高峰均出现在施肥灌水后的第3 d。与郝小雨等人[23]的研究结果有所差异,其原因可能是种植季节不同,秋冬季由于棚内温度处于较低状态,土壤 N_2O 排放量降低且高峰期推迟[24]。在不考虑施肥种类

表 3　设施黄瓜生育期内黄瓜产量及经济效益分析

Table 3　Cucumber yield and economic analysis in greenhouse for cucumber cultivation

处理 Treatment	氮施用量 N appl. rate (kg/hm^2)	产量 Yield (kg/hm^2)	增产率 Incr. yield (%)	节氮 Reduction of N (%)	节水 Decrease of water (t/hm^2)	节本 Saving cost (yuan/hm^2)	增收 Incr. revenue (yuan/hm^2)	经济效益 Economic profit (yuan/hm^2)
T	988.6	54791 bc						105500
R1	709.4	51287 c	-6.4	28.2	227.6	1171.0	-7008.1	99700
R2	746.9	57339 b	4.7	24.4	227.6	1074.4	5096.8	111700
R1 + DCD	709.4	53842 bc	-1.7	28.2	227.6	268.7	-1897.9	103900
R2 + DCD	746.9	67533 a	23.3	24.4	227.6	79.0	25484.0	131100

注(Note):经济效益 = 总产出 - 总投入(包括施肥成本、DCD 成本和灌溉成本) The economic benefit is equal to the total output minus total investment (including fertilization, DCD and irrigation costs).

的情况下,低水平施肥能有效地减少 N_2O-N 的损失,通常情况下,N_2O 排放量占肥料使用量的 0.01%～2.00%[25]。邱炜红等[21]研究表明,施用 DCD 显著减少了菜地(小白菜和辣椒)农田土壤 N_2O 的排放。本研究中 R1 和 R2 施加 DCD 的处理显著减少了 42.1% 和 64.1% 的 N_2O 排放;N_2O 排放系数分别从 0.21% 和 0.24% 减少至 0.08% 和 0.04%。大量施用氮肥可显著促进土壤 N_2O 排放,并随着施氮量的增加而增加[24]。研究表明,超过正常施肥量,土壤中硝态氮浓度随施氮量的增加呈线性增长趋势[26]。本试验在不考虑各处理之间差异的条件下,表层土壤硝态氮含量与 N_2O 排放通量呈极显著正相关。

在本试验中,温室黄瓜土壤氨挥发损失的峰值出现在追肥后的第 1～2 d,之后呈现逐渐降低的趋势。原因可能是菜田土壤含水量长期保持在较高水平,含水量较高会加快氮肥的水解和硝化作用的进行[27]。在整个追肥期间,R1 和 R2 施用 DCD 的处理氨挥发累积量分别增加了 34.3% 和 40.4%,以 NH_3 形式损失的量占氮素总投入量的比值分别增加至 1.17% 和 1.06%。以上数据表明,DCD 的施用使土壤较长时间保持较高的铵态氮浓度,虽然有助于减少 N_2O 的排放量和硝酸盐的淋失,但却提高了氨挥发的威胁。Tao 等[28]认为添加 DCD 会降低土壤氨挥发损失量,与本试验结果有差异,原因在于作物生长体系和 DCD 设定浓度不同。习斌等[29]研究表明,在没有任何限制因素存在的条件下,表层土壤铵态氮含量与氨挥发速率之间呈显著正相关。本试验中氨挥发损失量随表层土壤铵态氮含量的增加而增大,两者呈极显著正相关。

从硝态氮剖面分布情况来看,各减氮控水处理土壤硝态氮累积峰逐渐下移,表明土壤硝态氮已经有向下层淋洗的趋势。施加 DCD 有助于减少硝态氮的累积,对根区硝酸盐淋洗抑制作用较为明显,可能由于施加 DCD 后,土壤对有效态氮的固持以及增加的氨挥发潜势占相对优势,最终使土壤中的硝态氮累积量降低[30]。寇长林等[31]研究结果表明,中国北方集约化大棚蔬菜种植体系氮素年盈余量介于 620～8084 kg/hm^2 之间,本试验中氮素年盈余量 2509～5132 kg/hm^2,与其平均值基本相当。传统水氮处理由于施氮量和灌溉量较大,因而在 0—30 cm 土层的氮素盈余量显著高于其他施氮处理。施用 DCD 后能有效地提高氮素的利用率,对减少土壤氮素损失有一定的作用。

适当减氮控水不仅能够满足作物生长所需要的氮素,而且有利于提高氮素利用率,减少资金的投入。研究表明,传统水氮并不能显著提高蔬菜的氮素吸收量,对增产无显著效果[32]。在本试验中,推荐水氮Ⅱ + DCD(R2 + DCD)处理的小区黄瓜产量为 178.3 kg/plot,增产高达 23.3%。与传统处理相比,推荐水氮Ⅱ + DCD 的处理节本增收效果最为明显,经济效益增加 25560 yuan/hm^2。有研究表明,DCD 浓度设定为氮素用量的 10% 时能显著抑制硝化作用进程[33],以往在农民的意识中,增施 DCD 等硝化抑制剂会大大增加成本,但实际生产中,适量施氮同时添加 DCD(氮素用量的 15%)不仅使产量和经济效益增加,而且对保护环境具有重大意义。

4 结论

1)在本试验条件下,适度减氮控水措施是切实可行的。既满足了作物生长所需要的氮素,又减少了氮素的盈余,提高了氮素的利用率,且不影响作物的产量。

2)减氮控水同时配施 DCD 的氮素管理措施,虽然增加了氨的挥发损失,但对减少土壤 N_2O 排放量和氮素盈余的效果更为明显。

3)在控水灌溉条件下,推荐施氮Ⅱ + DCD(氮素用量的 15%)处理效果最佳,黄瓜产量及经济和环境效益均高于其他水氮管理措施。

参 考 文 献:

[1] 喻景权."十一五"我国设施蔬菜生产和科技进展及其展望[J]. 中国蔬菜, 2011, (2): 11-23.
Yu J Q. Progress in protected vegetable production and research during 'The eleventh five-year plan' in China [J]. China Vegetables, 2011(2): 11-23.

[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] Fortuna A, Harwood R R, Robertson G P *et al*. Seasonal changes in nitrifiation potential associated with application of N fertilizer and compost in maize systems of southwest Michigan [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2003, 97: 285-293.

[5] 张丽娟, 巨晓棠, 刘辰琛, 等. 北方设施蔬菜种植区地下水硝酸盐来源分析—以山东省惠民县为例[J]. 中国农业科学, 2010, 43(21): 4427-4436.
Zhang L J, Ju X T, Liu C C *et al*. A study on nitrate contamination of ground water sources in areas of protected vegetables-growing fields—A case study in Huimin County, Shandong Province [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(21): 4427-4436.

[6] 郝小雨, 高伟, 王玉军, 等. 有机无机肥料配合施用对日光温室土壤氨挥发的影响[J]. 中国农业科学, 2012, 45(21): 4403-4414.
Hao X Y, Gao X W, Wang Y J *et al*. Effects of combined application of organic manure and chemical fertilizers on ammonia volatilization from greenhouse vegetable soil [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2012, 45(21): 4403-4414.

[7] 闫鹏, 武雪萍, 华珞, 等. 不同水氮用量对日光温室黄瓜季土壤硝态氮淋失的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(3): 645-653.
Yan P, Wu X P, Hua L *et al*. Effects of different water and nitrogen amounts on nitrate leaching in sunlight greenhouse during cucumber growing season [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2012, 18(3): 645-653.

[8] Di H J, Cameron K C, Sherlock R R. Comparison of the effectiveness of a nitrification inhibitor, dicyandiamide, in reducing nitrous oxide emissions in four different soils under different climatic and management conditions[J]. Soil Use and Management, 2007, 23: 1-9.

[9] Denman K L, Brasseur G, Chidthaisong A *et al*. The fourth assessment report-work group I, chapter 7: couplings betweet changes in the climate system and biogeochemistry[R]. New York: Intergovernment Panel on Climate Change (IPCC), 2007. 499-588.

[10] Olivier J G J, Bouwman A F, Van der Hoek K W *et al*. Global air emission inventories for anthropogenic sources of NO_x, NH_3 and N_2O in 1990 [J]. Environmental Pollution, 1998, 102 (Suppl. 1): 135-148.

[11] 姜宁宁, 李玉娥, 华珞, 等. 不同氮源及秸秆添加对菜地土壤 N_2O 排放影响[J]. 土壤通报, 2012, 43(1): 219-223.
Jiang N N, Li Y E, Hua L *et al*. Mitigation of nitrous oxide emissions in vegetable system by treating soil with nitrogen source and straw[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2012, 43(1): 219-223.

[12] Ding W X, Yu H Y, Cai Z C. Impact of urease and nitrification inhibitors on nitrous oxide emissions from fluvo-aquic soil in the North China Plain[J]. Biology and Fertility of Soils, 2011, 47 (1): 91-99.

[13] 季加敏, 喻瑶, 陆星, 等. 肥料添加剂降低 N_2O 排放的效果与机理[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(6): 1434-1440.
Ji J M, Yu Y, Lu X *et al*. The effects and mechanism of fertilizer additives on reduction of N_2O emission[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2012, 18(6): 1434-1440.

[14] 皮荷杰, 曾清如, 蒋朝晖, 等. 两种硝化抑制剂对不同土壤中氮素转化的影响[J]. 水土保持学报, 2009, 23(1): 68-73.
Pi H J, Zeng Q R, Jiang Z H *et al*. Effects of nitrification inhibitors on transformation of urea in different soils[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(1): 68-73.

[15] Clay D E, Malzer G L, Anderson J L. Ammonia volatilization from urea as influenced by soil temperature, soil water content, and nitrification and hydrolysis inhibitors [J]. Soil Science Society of America Journal, 1990, 54: 263-266.

[16] 聂文静, 李博文, 郭艳杰, 等. 氮肥与 DCD 配施对棚室黄瓜土壤 NH_3 挥发损失及 N_2O 排放的影响[J]. 环境科学学报, 2012, 32(10): 2500-2508.
Nie W J, Li B W, Guo Y J *et al*. Effects of nitrogen fertilizer and DCD application on ammonia volatilization and nitrous oxide emission from soil with cucumber growing in greenhouse[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, 32(10): 2500-2508.

[17] 杨威, 郭艳杰, 李博文, 等. 氮肥与 DCD 配施对温室番茄膨果期土壤 N_2O 排放和产量的影响[J]. 河北农业大学学报,

2013, 36(3): 25-29.

Yang W, Guo Y J, Li B W *et al*. Effects of nitrogen fertilizer and DCD application on nitrous oxide emission from soil during expand fruit stage and tomato yield[J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2013, 36(3): 25-29.

[18] Xing G X, Shi S L, Shen G Y *et al*. Nitrous oxide emissions from paddy soil in three rice-based cropping systems in China[J]. Nutrient Cycling in Agroecosysems, 2002, 64(1/2): 135-143.

[19] 王朝辉, 刘学军, 巨晓棠, 等. 田间土壤氨挥发的原位测定—通气法[J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(2): 205-209.

Wang Z H, Liu X J, Ju X T *et al*. Field in situ determination of ammonia volatilization from soil: Venting method[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2002, 8(2): 205-209.

[20] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2005.

Bao S D. Soil agricultural chemical analysis[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2005.

[21] 邱炜红, 刘金山, 胡承孝, 等. 硝化抑制剂双氰胺对菜地土壤 N_2O 排放的影响[J]. 环境科学, 2011, 32(11): 3188-3192.

Qiu W H, Liu J S, Hu C X *et al*. Mitigation of nitrous oxide emissions in vegetable system by treating soil with dicyandiamide, a nitrification inhibitor[J]. Environmental Science, 2011, 32(11): 3188-3192.

[22] Zaman M, Sagga S, Blennerhassett J D, Singh J. Effect of urease and nitrification inhibitors on N transformation, gaseous emissions of ammonia and nitrous oxide, pasture yield and N uptake in grazed pasture system[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2009, 41: 1270-1280.

[23] 郝小雨, 高伟, 王玉军, 等. 有机无机肥料配合施用对设施菜田土壤 N_2O 排放的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(5): 1073-1085.

Hao X Y, Gao W, Wang Y J *et al*. Effects of combined application of organic manure and chemical fertilizers on N_2O emission from greenhouse vegetable soil[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2012, 18(5): 1073-1085.

[24] 邱炜红, 刘金山, 胡承孝, 等. 不同施氮水平对菜地土壤 N_2O 排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(11): 2238-2243.

Qiu W H, Liu J S, Hu C X *et al*. Effects of nitrogen application rates on nitrous oxide emission from a typical intensive vegetable cropping system[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2010, 29(11): 2238-2243.

[25] 李虎, 王立刚, 邱建军. 农田土壤 N_2O 排放和减排措施的研究进展[J]. 中国土壤与肥料, 2007, 44(5): 1-5.

Li H, Wang L G, Qiu J J. Studies of N_2O emissions from croplands and strategies for reducing N_2O emission[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2007, (5): 1-5.

[26] 刘宏斌, 李志宏, 张维理, 林葆. 露地栽培条件下大白菜氮肥利用率与硝态氮淋溶损失研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(3): 286-291.

Liu H B, Li Z H, Zhang W L, Lin B. Study on N use efficiency of Chinese cabbage and nitrate leaching under open field cultivation[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2004, 10(3): 286-291.

[27] 贺发云, 尹斌, 金雪霞, 等. 南京两种菜地土壤氨挥发的研究[J]. 土壤学报, 2005, 42(2): 253-259.

He F Y, Yin B, Jin X X *et al*. Ammonia volatilization from urea applied to two vegetable fields in Nanjing suburbs[J]. Acta Pedologica Sinica, 2005, 42(2): 253-259.

[28] Tao X, Matsunaka T, Sawamoto T. Dicyandiamide application plus incorporation into soil reduces N_2O and NH_3 emissions from anaerobically digested cattle slurry[J]. Australian Journal of Experimental Agriculture, 2008, 48(1/2): 169-174.

[29] 习斌, 张继宗, 左强, 等. 保护地菜田土壤氨挥发损失及影响因素研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(2): 327-333.

Xi B, Zhang J Z, Zuo Q *et al*. Study on the losing of ammonia volatilization and its influencing factors on the protected vegetable fields soil[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2010, 16(2): 327-333.

[30] 陈振华, 陈利军, 武志杰. 脲酶-硝化抑制剂对减缓尿素转化产物氧化及淋溶的作用[J]. 应用生态学报, 2005, 16(2): 238-242.

Chen Z H, Chen L J, Wu Z J. Effects of urease and nitrification inhibitors on alleviating the oxidation and leaching of soil urea hydrolyzed product-ammonium[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(2): 238-242.

[31] 寇长林, 巨晓棠, 张福锁. 三种集约化种植体系氮素平衡及其对地下水硝酸盐含量的影响[J]. 应用生态学报, 2005, 16(4): 660-667.

Kou C L, Ju X T, Zhang F S. Nitrogen balance and its effects on concentration of nitrate in groundwater in three intensive cropping systems of north China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(4): 660-667.

[32] 何飞飞, 任涛, 陈清, 等. 日光温室蔬菜的氮素平衡及施肥调控潜力分析[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(4): 692-699.

He F F, Ren T, Chen Q *et al*. Nitrogen balance and optimized potential of integrated nitrogen management in greenhouse vegetable system[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2008, 14(4): 692-699.

[33] 石美, 张妹婷, 沈锋, 等. 石灰性土壤中不同硝化抑制剂的抑制效果及其对亚硝态氮累积的影响[J]. 中国农业科学, 2011, 44(3): 500-506.

Shi M, Zhang M T, Shen F *et al*. Effects of nitrification inhibitors on nitrification inhibition and nitrite accumulation in calcareous soil[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(3): 500-506.