植物营养与肥料学报 2016,22(1):30-39 doi: 10.11674/zwyf.14556
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer http://www.plantnutrifert.org

添加 DCD 对雨养区春玉米产量、氧化亚氮排放及硝态氮残留的影响

吴得峰[1], 姜继韶[3], 高 兵[2], 刘 燕[2], 王 蕊[1], 王志齐[4],
党廷辉[1,3,4*], 郭胜利[1,3,4], 巨晓棠[2*]

(1 西北农林科技大学资源环境学院,杨凌 712100; 2 中国农业大学资源与环境学院,北京 100193;
3 中国科学院水利部水土保持研究所,杨凌 712100; 4 西北农林科技大学水土保持研究所,杨凌 712100)

摘要:【目的】田间条件下氮肥中添加硝化抑制剂双氰胺(dicyandiamide,DCD)对氧化亚氮排放和硝态氮含量变化的影响尚不清楚,研究不同施氮模式对玉米产量、氧化亚氮排放以及对土壤深层硝态氮残留和氮肥农学效率等的影响,对提高氮肥利用效率、减少农业源温室气体排放具有重要意义。**【方法】**试验于 2013 年 4 月至 2014 年 9 月,在中国科学院长武黄土高原农业生态试验站进行,供试作物为春玉米,品种为先玉 335,半覆膜种植。试验设 4 个处理:传统施氮(Con)、减量施氮(Opt)、减量施氮+硝化抑制剂(Opt+DCD)、不施氮(N0),定期采集土样和氧化亚氮气体,利用流动分析仪和气象色谱仪测定土壤矿质氮和氧化亚氮的含量,采用 SAS 软件对不同处理的产量和各个指标进行方差分析。**【结果】**Opt 和 Opt+DCD 在保持产量的同时,显著影响氧化亚氮排放和硝态氮残留。Opt 处理的硝态氮含量峰值降低 13.7%,而 Opt+DCD 处理降低硝态氮峰值 19.0%。其次,施氮模式还影响硝态氮峰值出现的时间:Con(190.1 mg/kg)率先出现,其次是 Opt(164.0 mg/kg)和 Opt+DCD(132.9 mg/kg)。Opt 显著降低了氧化亚氮的排放,降幅为 29.4%,而在 Opt 基础上添加 DCD 可进一步降低氧化亚氮排放 28.1%。在雨季,硝态氮含量和氧化亚氮排放随降雨而出现波动。尽管 Opt 降低了铵态氮峰值,但在 Opt 基础上,添加 DCD 提高了铵态氮峰值。4 种施氮模式土壤剖面 0—100 cm 和 100—200 cm 的硝态氮残留量分别介于 33.5～148.9 和 24.8～92.8 kg/hm^2 之间,平均值分别为 78.5 和 56.4 kg/hm^2。土壤剖面 0—200 cm 的硝态氮残留量以 Con 最大,为 225.9 kg/hm^2,与 Con 相比,Opt 和 Opt+DCD 的硝态氮残留量降幅分别为 48.0%～59.0%、29.4%～57.5%。Opt 和 Opt+DCD 之间硝态氮残留差异不显著($P>0.05$)。**【结论】**不同施氮模式对玉米产量、矿质氮和氧化亚氮的动态变化以及氮肥农学效率具有显著影响,但是 Opt 和 Opt+DCD 在施氮量减少 20% 的同时,不仅没有显著降低玉米产量,还进一步降低了土壤剖面硝态氮的残留量和农业源温室气体的排放。因此在黄土高原雨养农业区,添加 DCD 是一种科学有效的施肥管理方式。

关键词: 春玉米; 氧化亚氮; 硝态氮动态; 硝化抑制剂

中图分类号: S511; S506.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-505X(2016)01-0030-10

Effects of DCD addition on grain yield, N_2O emission and residual nitrate-N of spring maize in rain-fed agriculture

WU De-feng[1], JIANG Ji-shao[3], GAO Bing[2], LIU Yan[2], WANG Rui[1], WANG Zhi-qi[4],
DANG Ting-hui[1,3,4*], GUO Sheng-li[1,3,4], JU Xiao-tang[2*]

(*1 College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2 College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 3 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 4 Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China*)

Abstract:【Objectives】The impacts of nitrate inhibitor (dicyandiamide, DCD) on crop yields and residuals of soil nitrate N in field have been less reported under field condition. It is of great importance to research its effects in

收稿日期: 2014-12-10 **接受日期:** 2015-01-26 **网络出版日期:** 2015-08-19

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201103039)资助。

作者简介: 吴得峰(1989—),男,甘肃张掖人,硕士研究生,主要从事土壤碳循环及生态环境研究。E-mail: dfwu315@163.com

* 通信作者 E-mail: dangth@ms.iswc.ac.cn; juxt@cau.edu.cn

different nitrogen (N) fertilization modes for high maize yield, low N_2O emission and high fertilizer-nitrogen use efficiency. 【**Methods**】A field experiment was conducted in the Changwu State Key Agro-Ecological Station from April 2013 to September 2014. Pioneer 335, a high-yield spring maize hybrid, was chosen and planted with half plastic film mulching. The experiment consisted of 4 N fertilization treatments with three replicates: conventional N fertilization rate (Con), optimal N fertilization (Opt), optimal N fertilization plus nitrification inhibitor (Opt + DCD) and control treatment (N0). Soil samples and N_2O were gathered at regular intervals, soil mineral N and N_2O were analyzed using continuous flow analyzer and gas chromatograph 【**Results**】The Opt and Opt + DCD treatments can maintained the maize yields, and simultaneously significantly influence the N_2O emission and the residuals of nitrate nitrogen. The peak values of nitrate nitrogen are significantly decreased by 13.7% and 19.0% in the Opt and Opt + DCD treatments, respectively. The nitrogen application modes also affect the time of peak values. The peak values of nitrate nitrogen are appeared in the Con treatment (190.1 mg/kg) firstly, and then the Opt (164.0 mg/kg) and Opt + DCD (132.9 mg/kg). The N_2O emission is significantly decreased in the Opt treatment (29.4%), whereas further decreased (28.1%) in the Opt + DCD treatment. The nitrate concentration is fluctuated with precipitation during rainy season. The peak value of ammonium nitrogen is increased in the Opt + DCD treatment, although it is decreased in the Opt treatment. The residuals of nitrate nitrogen at the depth of 0 – 100 cm and 100 – 200 cm of four nitrogen application modes are in the ranges of 33.5 – 148.9 kg/hm^2 and 24.8 – 92.8 kg/hm^2, with mean values of 78.5 mg/kg and 56.4 kg/hm^2, respectively. The highest accumulation of nitrate nitrogen in profile (0 – 200 cm) is in the Con treatment (225.9 kg/hm^2), and about 48.0% – 59.0% and 29.4% – 57.5% of the accumulation are decreased in the Opt and Opt + DCD treatments compare to that in the Con treatment, respectively. The residuals of nitrate nitrogen between Opt and Opt + DCD have not significant difference. 【**Conclusions**】Different N fertilization modes have significant impact on maize yields, dynamics of soil mineral N and N_2O emissions and agronomic efficiency of fertilizer-nitrogen. However, with the N application rate reduced by 20%, the treatments of Opt and Opt + DCD not only maintain the maize yields, but also further decrease the residuals of nitrate nitrogen in soil profile and emissions of greenhouse gas from agricultural sources. Therefore, DCD addition is a kind of scientific and effective fertilization management mode in rain-fed agricultural region of Loess Plateau.

Key words: spring maize; nitrous oxide; NO_3^--N dynamic; nitrification inhibitor

尿素施入石灰性土壤后迅速转化为铵态氮(NH_4^+-N),继而转变成硝态氮(NO_3^--N)[1-2]。土壤中 NO_3^--N 除少部分被作物吸收利用,大多或随灌溉或者雨水淋失,或由反硝化微生物转化为一系列的氮氧化物排放到大气中[3-4]。尿素中添加硝化抑制剂是减少土壤氮素残留量、降低温室气体排放、提高氮肥利用率的重要措施[5-6]。硝化抑制剂双氰胺(DCD)通过降低酶活性,抑制土壤硝化作用,进而影响作物对氮素的吸收和在土壤中的迁移转化[7-8]。氮肥中添加 DCD 能有效降低 NO_3^--N 损失量,延长肥效,提高产量[7-9]。在玉米、小麦、水稻上添加 DCD 增产幅度分别为 15%～20%、15%～20% 和 10%[10-12]。但也有研究表明,添加 DCD 对作物产量无显著影响[13]。添加 DCD 对土壤中硝、铵态氮动态变化和 N_2O 的排放影响会受到气候条件、土壤质地、有机质含量、土壤水分含量、pH 值、温度和作物种类的影响[3,14-16]。模拟研究发现 DCD 能使 NO_3^--N 含量显著降低 53%,从而抑制 NH_4^+-N 向 NO_3^--N 的转化进程[16]。在红壤中添加 DCD,由于其 pH 值较低从而明显提高氮肥利用率,降低土壤中 NO_3^--N 的含量,提高 NH_4^+-N 的含量[3,17]。土壤温度通过影响 DCD 的降解速率,影响其硝化抑制效果及有效抑制时间[18]。轻黏土中的硝化作用快于砂壤土、中壤土中的硝化作用[17]。但上述田间研究结果主要集中于南方酸性土壤[17,19],北方地区研究主要集中于模拟[16]或盆栽试验[20],田间条件下研究结果较少。

黄土高原农田面积 14.58 万 km^2[21],其中 70% 的农田属于雨养农业。土壤氮素含量仅为 0.042%～0.077%[22],氮肥投入是保证粮食生产的重要措施。冬小麦和春玉米是黄土高原地区主要粮食作物[23],春玉米对氮肥的需求量远远高于冬小麦。传

统施肥条件下,这一地区农田 NO_3^--N 残留与累积已引起广泛关注[24-25]。在连续施用氮肥的禾本科作物农田中,土壤 0—200 cm 剖面中 NO_3^--N 残留量 2013 年已达到了 336.8 kg/hm^2。筛选保产、减氮、减排的施肥管理措施对区域农业持续发展十分必要。但田间条件下 DCD 措施影响作物产量、N_2O 排放和土壤 NO_3^--N 动态变化的资料相对匮乏。

本研究基于 2 年田间观测,分析了尿素添加 DCD 对土壤 N_2O 排放、NO_3^--N 含量的动态变化以及对产量、氮肥农学效率等的影响,以期为筛选雨养区氮肥优化管理措施提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于陕西省长武县的中国科学院长武黄土高原农业生态试验站(东经 107°40′,北纬 35°12′,海拔 1220 m),属典型的雨养农业区。试验所在地为半干旱湿润性季风气候,年平均气温 9.2℃,大于 10℃积温为 3029℃,1985～2013 年均降水量为 560 mm,其中最高年份为 954 mm,最低年份为 296 mm。7～9 月的降水量占年总量的 57%。土壤为粘壤质黑垆土,0—20 cm 土层 SOC 含量 6.50 g/kg、全氮含量 0.80 g/kg、速效磷含量 5 mg/kg、pH 8.4,$CaCO_3$ 含量 10.5%、粘粒含量(<0.002 mm)24%。

1.2 试验设计与管理

试验于 2013 年 4 月至 2014 年 9 月进行,供试作物为春玉米,品种为先玉 335,一年一季。玉米采用半覆膜种植方式,供试地膜为 0.008 mm × 750 mm 微地膜,株行距 30 cm × 60 cm,密度 57000 株/hm^2。本研究共设 4 个处理:1)传统施氮(Con)每年施氮量为 N 200 kg/hm^2;2)减量施氮(Opt)每年施氮量为 N 160 kg/hm^2;3)减量施氮 + 硝化抑制剂双氰胺(Opt + DCD)施氮量同处理 Opt,DCD 添加量为所施氮肥含氮量的 10%,与尿素均匀混合后撒于土壤表面后翻耕;4)不施氮对照(N0)。每个处理重复 3 次,随机区组排列,小区长 17.5 m,宽 5.5 m,小区间距 0.5 m,区组距 1 m,四周保护行宽 1 m。供试肥料为尿素(N 46%),过磷酸钙(P_2O_5 12%)。各处理施磷肥 P_2O_5 26 kg/hm^2。所有肥料在播种前一次性作为基肥均匀撒施,然后翻入 0—20 cm 土壤。春玉米在 2013 年 4 月 24 日播种,当年 9 月 9 日收获;2014 年 4 月 30 日播种,当年 9 月 15 日收获。生长期间人工及时去除杂草,玉米收获后土壤休闲。2 年试验期间降雨量主要集中在 7～9 月份,年平均降雨量为 523.3 mm,平均气温 11.1℃。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤矿质氮含量及水分测定　每个小区用直径 3 cm 的土钻分别在膜上和膜间采集 0—20 cm 土壤样品,充分混匀后作为该区土壤样品,施肥后 2、4、6、8 天采集,之后每隔 10 天采集一次,较大降雨后(>40 mm)的第 1 天和 3 天取土,之后每隔 10 天采集一次。在玉米种植前和收获后按 20 cm 一层取 0—2 m 土样。土样过 3 mm 筛后,称取 5.0 g 土样,用 50 mL 1 mol/L KCl(分析纯)溶液浸提。振荡 1 h 后过滤,用连续流动分析仪测定 NO_3^--N 和 NH_4^+-N 含量,同时采用烘干称重法测定土壤含水量。

1.3.2 产量测定　玉米收获时期,每个小区选取 16 m^2(共 90 株玉米),掰下玉米后称重,然后从中选取 15 个(能代表本小区实际情况)带回脱粒后自然风干,称重,计算籽实产量。

1.3.3 N_2O 采集与测定　N_2O 采用 GC-静态箱法测定。采样箱体由不锈钢材料制成,规格分为两种:一种是无孔顶箱 60 cm × 50 cm × 50 cm,地箱 60 cm × 50 cm × 10 cm,当作物高度小于 30 cm 时,采用顶部无孔的箱子采气;另一种 60 cm × 30 cm × 30 cm,地箱 60 cm × 30 cm × 10 cm,当作物高度超过 30 cm 时,开始采用顶箱有孔的箱子采气。当作物穿过孔箱子顶部时,采用保鲜膜密封箱顶,该箱的目的是保证作物地上部正常生长。玉米收获后使用无孔的箱子采气。箱外层加泡沫以隔热,在顶箱内部的两个对角安装两个风扇,用来混匀箱内的气体。采气时顶箱和底座之间采用密封条密封,用两个铁夹将箱子与底座夹在一起,防止漏气。箱子上安装 1 m 长的平衡管,平衡箱内外气压。两种规格的箱子于采气样前一周小心打入每个小区土壤中并固定(整个采样期间,采样点固定,只在下茬玉米播种整地前挖出,整地播种后再将底座打入土壤)。在作物生长期,采气每 4 天 1 次,休闲季,每周 1 次(冬季 11、12 月,下年 1、2 月和 3 月根据天气情况和排放量每 10～20 天采集 1 次,4 月播种前一周一次),施肥后每天 1 次,根据排放峰的大小,连续监测 7～10 天;下大雨后(>20 mm),第 1、3、5 天采气。采样时间一般为上午 8:00 至 12:00 之间进行。气体采集时将采样箱盖 40 分钟,在关箱后的第 0、10、20、30 和 40 min 分别用 50 mL 注射器抽取箱内气体,带回室内用气相色谱(Agilent GC6820)测定 N_2O。

1.4　计算方法与数据分析

试验数据用 Microsoft Excel 2013 和 SAS 9.1 软件进行统计,利用 SAS 软件包中的 PROC GLM(SAS 9.1,SAS Institute)程序进行产量、氮肥农学效率、氮肥偏生产力、土壤硝、铵态氮及 0—2 m 剖面 NO_3^--N 残留量、N_2O 排放的方差分析,用以比较不同施氮处理对其的影响。用 Sigmaplot 10.0 绘制土壤硝、铵态氮、剖面 NO_3^--N 残留量和氧化亚氮排放的动态变化图。有关数值采用下列公式进行计算:

土壤 NO_3^--N 残留量(kg/hm^2) = 土层厚度(cm) × 土壤容重(g/cm^3) × 土壤硝态氮含量/10[26];

氮肥农学效率[N agronomic efficiency(AE), kg/kg] = (施氮区产量-不施氮区产量)/施氮量[27];

氮肥偏生产力[Partial efficiency of N (PFP), kg/kg] = 施氮区产量/施氮量[27];

N_2O 排放通量[F, μg/(m^2 · h)] = (273 × M × 60/10 × H)/[22.4 × (273 + T)] × dc/dt

其中, 22.4 为温度为 273K 时的 N_2O 摩尔体积(L/mol); T(℃)为盖箱时间内平均大气温度; M(28)代表每摩尔 N_2O 中 N_2 的分子量; H 为采样箱高度(cm), c 为 N_2O 气体浓度(μL/L); t 为关箱时间(min); dc/dt 为采样箱内 N_2O 气体浓度的变化率[μL/(L · min)]; dc/dt(t = 0)是指曲线在 0 时刻的初始斜率[28]。

2　结果与分析

2.1　施氮模式对玉米产量和氮肥农学效率的影响

与 Con 相比,Opt 和 Opt + DCD 的产量并没有显著降低($P > 0.05$)。2013 年,Opt 和 Opt + DCD 的产量变化范围为 9.61 ～ 10.5 t/hm^2, 与 N0(7.3 t/hm^2)相比,增加幅度为 31.6%～43.3%; 2014 年产量范围在 11.6 ～ 11.9 t/hm^2 之间, 与 N0(4.0 t/hm^2)相比,增加了 186.0%～206.5%。与 Con 相比,Opt 和 Opt + DCD 的施氮量减少了 20%,但产量保持稳定。从表 1 可以看出,氮肥偏生产力随着施氮量的增加而减小,统计检验呈显著水平,Opt、Opt + DCD 的氮肥偏生产力均大于 Con。从而也进一步印证了 2 种减量施氮模式既降低了氮肥用量,又保证了产量这一结果。不同施氮模式中,Opt 的氮肥农学效率最高,表明增产效果最显著。

表 1　施肥模式对玉米籽粒产量和氮肥农学效率的影响

Table 1　Effects of fertilization modes on grain yields and several agronomic indexes of corn

处理 Treatment	施氮量 N application rate (kg/hm^2)	2013			2014		
		产量 Yield (t/hm^2)	NAE (kg/kg)	PFP (kg/kg)	产量 Yield (t/hm^2)	NAE (kg/kg)	PFP (kg/kg)
N0	0	7.30 ± 0.94 b			3.99 ± 1.41 b		
Con	200	10.30 ± 0.44 a	14.99 a	51.51 b	12.23 ± 0.66 a	41.20 a	61.14 a
Opt	160	10.46 ± 0.33 a	19.73 a	65.37 a	11.63 ± 2.69 a	47.78 a	72.71 a
Opt + DCD	160	9.61 ± 0.84 a	14.40 a	60.05 ab	11.92 ± 0.94 a	49.56 a	74.49 a

注(Note): NEA—氮肥农学效率 N agronomic efficiency; PEP—氮肥偏生产力 Partial efficiency of N; 同列数据后不同字母表示差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in a column are significantly different among treatments at 5% level.

2.2　施氮模式对土壤表层矿质氮动态变化的影响

施氮模式间土壤表层 NO_3^--N 含量存在显著差异($P < 0.05$)(图 1)。2 年生长季 N0 处理土壤 NO_3^--N 含量较低,变化范围在 3 ～ 64 mg/kg 之间,平均值为 22 mg/kg。Con、Opt、Opt + DCD 的 NO_3^--N含量变化范围分别为 20 ～ 269.7、13.0 ～ 186.5、5.0 ～ 170.3 mg/kg,平均值为 112.6、92.6、68.8 mg/kg。各处理 NO_3^--N 含量对施氮均有较高的响应。施肥以后,0—20 cm 土层中 NO_3^--N 含量明显增加,并且在一段时期内维持较高的水平。在 5 月 23 日 NO_3^--N 含量达到最高峰,Con 的峰值最大(190.1 mg/kg),其次是 Opt(164.0 mg/kg),Opt + DCD(132.9 mg/kg)的最小。与 Con 相比,Opt 和 Opt + DCD 的 NO_3^--N 峰值显著降低。而在 Opt 基础上,添加 DCD 其峰值可进一步降低 19.0%,表明 DCD 能够有效抑制 NO_3^--N 的产生过程。此外,施氮还影响 NO_3^--N 峰值出现的时间: Con 率先出现,其次是 Opt,Opt + DCD 最后出现。之后随着作物生长,需氮量增加,玉米 NO_3^--N 的含量迅速下降到较低水平。此外,土壤表层 NO_3^--N 的含量变化还与大

于40 mm降雨有很高的正相关关系。除N0外,不同施氮模式的土壤表层 NO_3^--N 含量在2013年7月22日降雨量为120 mm后迅速增加,出现峰值,Con、Opt、Opt + DCD 处理的含量分别为217、276、37 mg/kg,之后会显著降低。同样的现象也出现在2014年8月6日(降雨量为40 mm)。

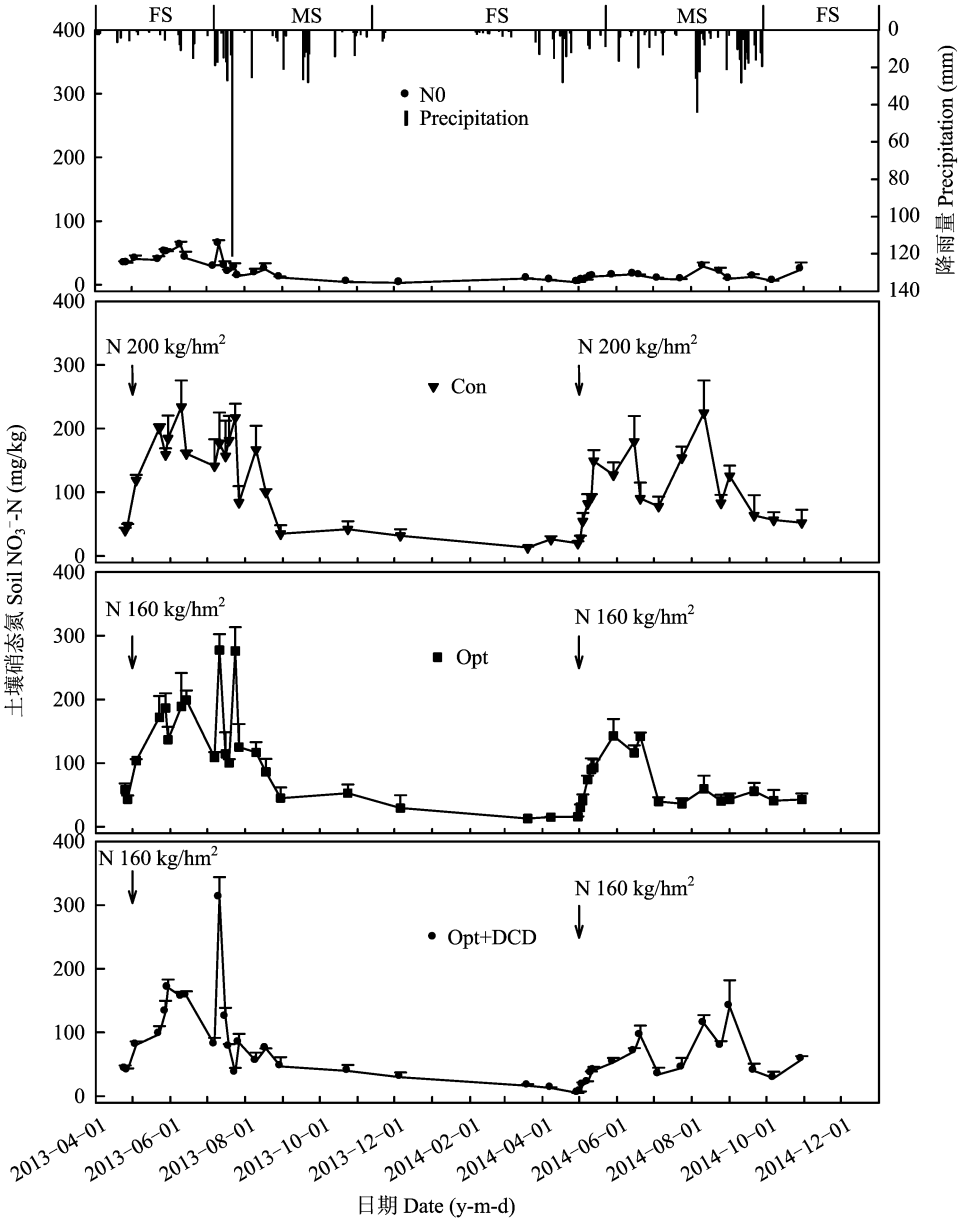

图1 施氮模式对土壤表层硝态氮动态变化的影响

Fig. 1 NO_3^--N in topsoil (0–20 cm) under N fertilization modes

[注(Note): FS—休闲季 Fallow season; MS—玉米生长季 Maize season; 箭头代表施肥时间 Arrows represent the time of fertilization.]

施氮能显著提高 NH_4^+-N 的含量($P<0.05$)(图2)。在N0处理中,土壤 NH_4^+-N 的含量变化范围在0.8～13.2 mg/kg,平均值为5.0 mg/kg,而Con、Opt、Opt + DCD 的 NH_4^+-N 含量变化范围分别为1.3～58.0、0.97～45.9、1.3～41.9 mg/kg,平均值为12.5、9.9、11.9 mg/kg。施氮后,Opt 和 Opt + DCD 的 NH_4^+-N 的含量率先达到峰值。与Con(12.5 mg/kg)相比,Opt、Opt + DCD 降低了土壤中 NH_4^+-N 的峰值,幅度分别为21%、5%,但是在Opt的基础上,添加DCD反而提高了 NH_4^+-N 的峰值20.2%。与硝态氮变化相反,铵态氮含量在降雨(>40 mm)后没有显著升高现象。

2.3 施氮模式对土壤氧化亚氮排放的影响

施氮显著增加了4种施氮模式的氧化亚氮的排放速率($P<0.05$)(图3),在施氮后的10天内 N_2O 排放速率维持在一个较高水平,10天以后显著降低。

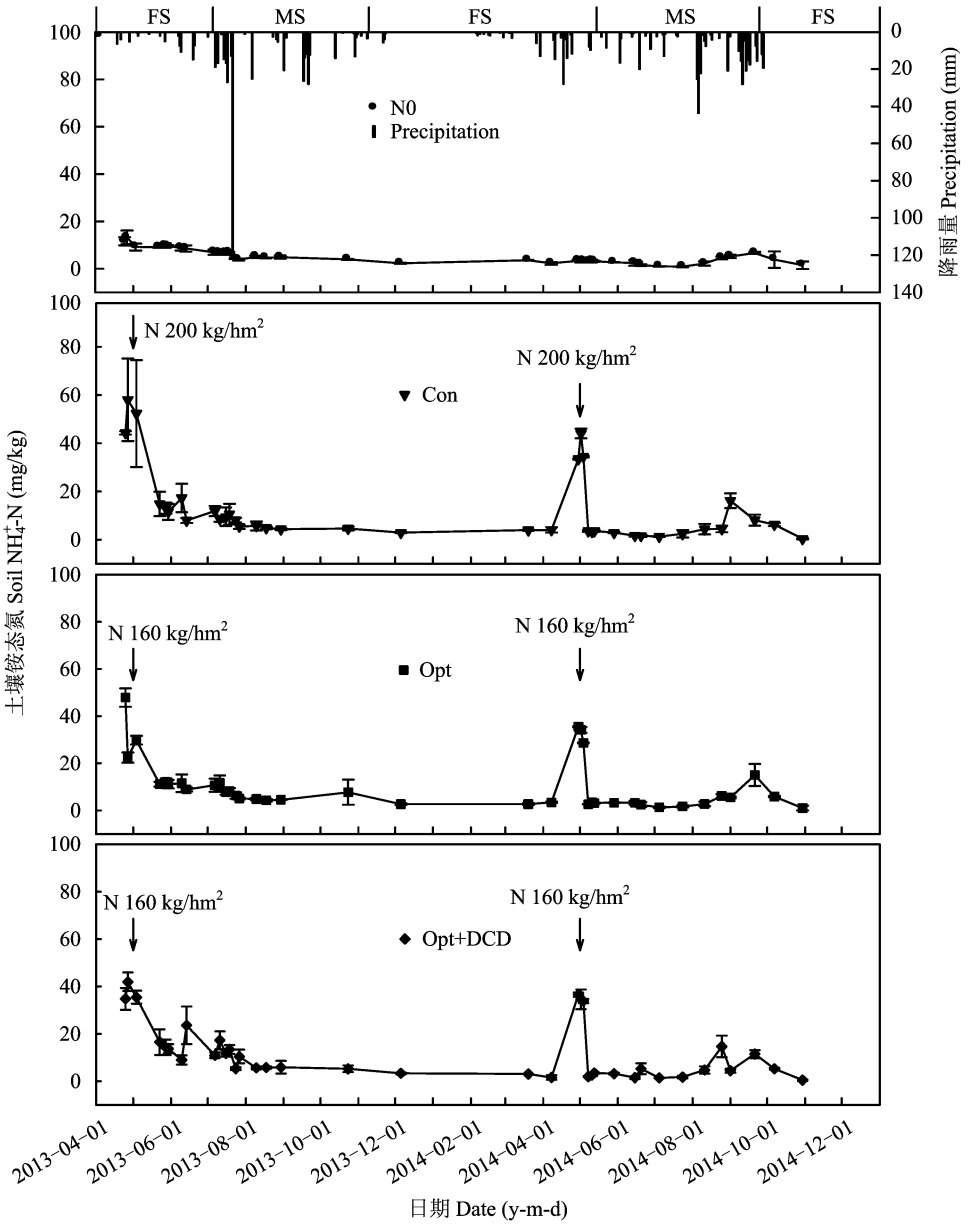

图 2　施氮模式对土壤表层铵态氮动态变化的影响

Fig. 2　Dynamic in NH_4^+-N in topsoil (0—20 cm) under the N fertilization practices

[注(Note): FS—休闲季 Fallow season; MS—玉米生长季 Maize season; 箭头代表施肥时间 Arrows represent the time of fertilization.]

在雨后(降雨量 >40 mm) N_2O 出现排放高峰。2 年试验期间,在 N0 处理中,N_2O 的排放变化范围 N_2O-N 2.5 ~ 37.6 μg/(m² · h),平均值为 N_2O-N 12.3 μg/(m² · h)。Con、Opt 和 Opt + DCD 的 N_2O 的排放变化范围分别为 N_2O-N 1.35 ~ 160.7、3.3 ~ 143.1 和 3.2 ~ 45.4 μg/(m² · h),平均值分别为 39.9、28.1 和 16.9 μg/(m² · h)。3 种施氮处理中,Opt + DCD 的 N_2O 排放最低,其次为 Opt,Con 最高。与 Con 相比,Opt 和 Opt + DCD 显著降低了 N_2O 的排放($P < 0.05$),降低幅度分别为 29.4%、57.5%。在施肥后的 10 天内,N_2O 排放速率的峰值出现在第二天,N0、Con、Opt、Opt + DCD 的氧化亚氮排放速率分别为 N_2O-N 26.5、160.7、143.1、52.3 μg/(m² · h)。2 年试验期间,N_2O 排放速率与降雨(降雨量 > 40 mm)有较高相关性。例如,在 2013 年 7 月 22 日,降雨量为 120 mm,此时 N0、Con、Opt、Opt + DCD 的 N_2O 排放速率均达到最大值,分别为 N_2O-N 31.4、77.7、58.5、33.0 μg/(m² · h)。相同的现象也在 2014 年 8 月 6 日和 9 月 30 日出现,降雨量分别为 44 mm 和 40.6 mm。降雨引起的 N_2O 排放累积量,2013 年为 6.4%,

2014 年为 12.5%。

施氮显著增加了 N_2O 的排放累积量($P<0.05$)(表2)。不施氮处理的 N_2O 排放累积量显著低于3种施氮处理,其变化范围为 N_2O-N 0.87～0.72 kg/hm^2,平均值为0.80 kg/hm^2。然而,与 Con(2013 年为 N_2O-N 1.97 kg/hm^2,2014 年为 1.88 kg/hm^2)相比,2 种减量施氮模式显著降低了 N_2O 的排放量($P<0.05$),2013 年降幅分别为 27.4% 和 45.2%,2014 年降幅分别为 27.7% 和 51.6%,2 年期间,3 种施氮处理的 N_2O 的排放量平均值介于 1.0～1.9 kg/hm^2 之间。Opt + DCD 的最低,其次为 Opt,Con 的最高。

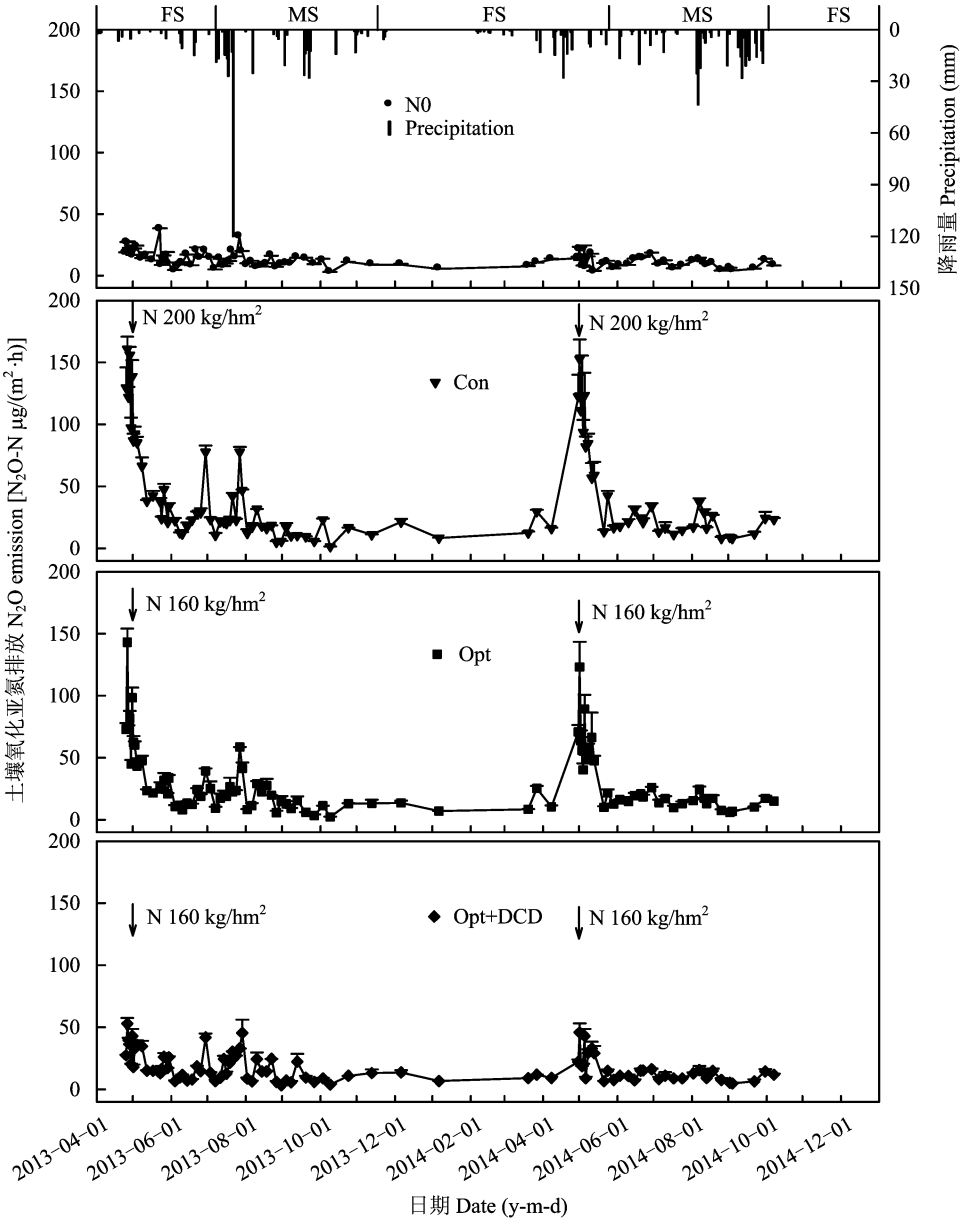

图3 不同施氮模式土壤氧化亚氮排放动态变化

Fig. 3 Dynamic in N_2O under different N fertilization modes

2.4 施氮模式对土壤剖面硝态氮残留的影响

施氮模式对土壤 0—200 cm 剖面 NO_3^--N 残留量有显著影响($P<0.05$)(表3)。2 年期间,0—100 cm 和 100—200 cm 的土层 NO_3^--N 残留量分别介于 33.5～148.9 和 24.8～92.8 kg/hm^2 之间,平均值分别为 78.5 和 56.4 kg/hm^2。可以看出硝态氮在 0—100 cm 的作物根系活动区域有较高的残留,同时在 100—200 cm 及以下区域也可能会有大量的残留,进而提高了向下层淋失的风险。

对 0—200 cm 土壤剖面硝态氮残留量分析,与

N0 相比,各施氮处理土壤剖面 NO_3^--N 残留量均显著增高。两年数据表明: 土壤剖面中 NO_3^--N 的残留量表现为: Con > Opt + DCD > Opt。与 Con(226 kg/hm^2)相比,Opt、Opt + DCD 处理的 NO_3^--N 的残留量分别降低了 58.9%、47.9%。Opt 和 Opt + DCD 土壤 NO_3^--N 的残留量差异不显著($P > 0.05$)。

表 2　施氮模式对土壤氧化亚氮排放年累积量的影响(kg/hm^2)

Table 2　Cumulative N_2O emission under the N fertilization practices

处理 Treatment	2013	2014
N0	0.87 ± 0.03 d	0.72 ± 0.03 c
Con	1.97 ± 0.09 a	1.88 ± 0.14 a
Opt	1.43 ± 0.14 b	1.36 ± 0.12 b
Opt + DCD	1.08 ± 0.11 c	0.91 ± 0.10 c

注(Note): 同列数据后不同字母表示差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters are significantly different among treatments at 5% level.

表 3　不同施氮模式土壤 0—200 cm 剖面硝态氮残留量(kg/hm^2)

Table 3　Residual amount of soil NO_3^--N in 0 –200 cm profile under different N fertilization modes

年份 Year	土层(cm) Soil profile	N0	Con	Opt	Opt + DCD
2013	0—100	33.46 c	148.89 a	80.10 b	68.18 b
	100—200	41.0 c	92.79 a	62.88 b	71.91 b
	0—200	74.46 c	241.70 a	143.0 b	140.10 b
2014	0—100	41.62 b	145.93 a	65.58 b	44.58 b
	100—200	24.81 b	70.25 a	34.72 b	52.57 b
	0—200	66.40 c	216.20 a	100.30 b	97.10 b

注(Note): 同列数据后不同字母表示差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters are significantly different among treatments at 5% level.

3　讨论

NO_3^--N 含量是影响土壤 N_2O 排放和 NO_3^--N 残留的重要因素。氮肥施入土壤后,在硝、铵态氮的相互转化中产生 N_2O[29-30]。同时,产生的 NO_3^--N 极易随着水分入渗进入土壤深层甚至淋洗出根区。因此,氮肥施入土壤后调控其转化成 NO_3^--N 的含量及其过程成为影响 N_2O 排放和 NO_3^--N 残留的重要环节。本研究中,N_2O 的排放量还与 NO_3^--N 的含量呈显著正相关关系($Y = 0.2924X + 2.6634$, $R^2 = 0.8552$)。添加 DCD 后,N_2O 排放量降低(2013 年降幅为 24.8%, 2014 年为 33.0%)与 DCD 影响 NO_3^--N 的转化过程有关。已有研究发现,DCD 能够有效抑制土壤中硝化作用和反硝化作用的进行,降低 NO_3^--N 的转化过程进而降低 N_2O 的产生。其次,在黄土旱塬区,由于作物施肥一般采用"一炮轰"模式(即在播种前将肥料一次性施入土壤),这与玉米旺盛需肥期发生错位,极易造成不必要损失有关。添加 DCD 后,延缓了 NO_3^--N 形成,进而有效地降低了淋失的风险。

除施肥初期耕层 NO_3^--N 含量较高外,黄土旱塬区降水少而多变,NO_3^--N 峰值与大于 40 mm 降雨也有高度一致性。其原因一可能是干湿交替提高了有机氮向无机氮的转化速率,进而提高 NO_3^--N 含量[31]; 二是微生物细胞裂解以及胞间溶质导致了微生物量碳、氮的释放[32-33]; 三是尿素的水解[34]。总之,与 Con(N 200 kg /hm^2)相比,Opt、Opt + DCD 在减量 20% 后,产量并没有随之降低。这与高素玲等在河南地区的研究结果一致[35-36]。

4　结论

1)减量施氮模式在施氮量减少 20% 的同时,并没有显著降低玉米产量,反而提高了氮肥偏生产力(32%)和氮肥农学效率(27%)。

2)与传统施肥模式相比,减量施肥显著降低了土壤剖面 NO_3^--N 的残留量和 N_2O 的排放量,降幅分别为 8.9% 和 27.4%。

3)在减量施肥模式的基础上添加施氮量 10% 的硝化抑制剂双氰胺不影响玉米产量,但能进一步降低土壤剖面 NO_3^--N 残留量,还能减少 N_2O 的排放量。

因此,在黄土高原雨养农业区使用 DCD 是一种保产、减氮、减排的有效措施,也是一种科学有效的施肥管理方式。

参 考 文 献:

[1]　Dawar K, Zaman M, Rowarth J S, *et al*. Urea hydrolysis and lateral and vertical movement in the soil: Effects of urease inhibitor and irrigation [J]. Biology and Fertility of Soils, 2011, 47(2): 139 –146.

[2]　习金根, 周建斌. 不同灌溉施肥方式下尿素态氮在土壤中迁移转化特性的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(3): 271 –275.

Xi J G, Zhou J B. Leaching and transforming characteristics of urea-N added by different ways of fertigation[J]. Plant Nutrition

and Fertilizer Science, 2003, 9(3): 271-275.

[3] 戴宇, 贺纪正, 沈菊培. 双氰胺在农业生态系统中的应用效果及其影响因素[J]. 应用生态学报, 2014, 25(1): 279-286.
Dai Y, He J Z, Shen J P. Effects and influence factors of dicyandiamide(DCD) application in agricultural ecosystem [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(1): 279-286.

[4] 李伟, 李絮花, 唐慎欣, 等. 控释掺混肥对夏玉米产量及土壤硝态氮和铵态氮分布的影响[J]. 水土保持学报, 2011, 25(6): 68-91.
Li W, Li X H, Tang S X, *et al*. Effect of controlled-release urea combined with common urea on the grain yields of summer maize and distribution of soil ammonium and nitrate content[J]. Journal of Soil Water Conservation, 2011, 25(6): 68-91.

[5] 刘瑜, 串丽敏, 安志装, 等. 硝化抑制剂双氰胺对褐土中尿素转化的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(12): 2496-2502.
Liu Y, Chuan L M, An Z Z, *et al*. Effects of nitrification inhibitor dicyandiamide on ammonium and nitrate nitrogen transformations in cinnamon soil [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2011, 30(12): 2496-2502.

[6] 孙志梅, 武志杰, 陈利军, 马星竹. 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, Chen L J, Ma X Z. Application effect, affecting factors, and evaluation of nitrification inhibitor [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(7): 1611-1618.

[7] 曾后清, 朱毅勇, 王火焰, 沈其荣. 生物硝化抑制剂——一种控制农田氮素流失的新策略[J]. 土壤学报, 2012, 49(2): 382-388.
Zeng H Q, Zhu Y Y, Wang H Y, Shen Q R. Biological nitrification inhibitor-A new strategy for controlling nitrogen loss from farmland [J]. Acta Pedologica Sinica, 2012, 49(2): 382-388.

[8] 刘倩, 褚贵新, 刘涛, 等. DCD在不同质地土壤上的硝化抑制效果和剂量效应研究[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(4): 765-770.
Liu Q, Chu G X, Liu T, *et al*. Nitrification inhibition and dose-dependent effect of dicyandiamide on sandy, loamy and clayey soils [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture. 2011, 19(4): 765-770.

[9] 俞巧钢, 陈英旭. 尿素添加硝化抑制剂DMPP对稻田土壤不同形态矿质态氮的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(7): 1357-1363.
Yu Q G, Chen Y X. Effect of the urea with nitrification inhibitor DMPP addition on different form nitrogen transformation in rice fields [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2011, 30(7): 1357-1363.

[10] 孙爱文, 石元亮, 朱志锋, 尹宏斌. 硫脲及抑制剂组合对土壤尿素氮转化和玉米产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(4): 481-486.
Sun A W, Shi Y L, Zhu Z F, Yin H B. Effect of combination of thiourea and inhibitors on soil urea-N transformation and corn yield [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2005, 11(4): 481-486.

[11] 华建峰, 蒋倩, 施春健, 等. 脲酶/硝化抑制剂对土壤脲酶活性、有效态氮及春小麦产量的影响[J]. 土壤通报, 2008, 39(1): 94-99.
Hua J F, Jiang Q, Shi C J, *et al*. Effects of urease/nitrification inhibitors on soil urease activity, soil available N and the yield of spring wheat [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2008, 39(1): 94-99.

[12] 张志明, 李继云, 冯元琦, 等. 长效碳酸氢铵理化特性及增产机理的研究[J]. 中国科学(B辑化学), 1996, 26(5): 452-459.
Zhang Z M, Li J Y, Feng Y Q, *et al*. Study of physical and chemical properties and yield mechanism on durably efficacious ammonium bicarbonate[J]. Science in China(Series B), 1996, 26(5): 452-459.

[13] 赵伦学, 肖厚军. 硝化抑制剂对白菜产量和硝酸盐含量的影响[J]. 农技服务, 2014, 31(6): 119-124.
Zhao L X, Xiao H J. Effects of nitrification inhibitors on the yield of cabbage and the content of nitrate [J]. Agricultural Machinery Service, 2014, 31(6): 119-124.

[14] Malla G, Bhatia A, Pathak H, *et al*. Mitigating nitrous oxide and methane emissions from soil in rice-wheat system of the indo-gangetic plain with nitrification and urease inhibitors [J]. Chemosphere, 2005, 58(2): 141-147.

[15] 李香兰, 徐华, 蔡祖聪. 氢醌、双氰胺组合影响稻田甲烷和氧化亚氮排放研究进展[J]. 土壤学报, 2009, 46(5): 917-924.
Li X L, Xu H, Cai Z C. Effect of combined use of hydroquinone and dicyandiamide on CH_4 and N_2O emissions from rice paddy field [J]. Acta Pedologica Sinica, 2009, 46(5): 917-924.

[16] 石美, 梁东丽, 满楠, 等. 不同浓度DMPP和DCD对石灰性土壤中氮素转化的影响[J]. 中国农业科学, 2012, 45(22): 4635-4642.
Shi M, Liang D L, Man N, *et al*. Effcts of different application rates of DMPP and DCD on nitrogen transformation in calcareous soil [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2012, 45(22): 4635-4642.

[17] 杨春霞, 李永梅. 双氰胺对不同质地红壤中尿素的硝化抑制作用研究[J]. 中国生态农业学报, 2006, 14(2): 111-113.
Yang C X, Li Y M. Nitrification inhibition of dicyandiamide on urea in the red soil of different textures[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture. 2006, 14(2): 111-113.

[18] Kawakami E M, Oosterhuis D M, Snider J L, *et al*. Physiological and yield responses of field-grown cotton to application of urea with the urease inhibitor NBPT and the nitrification inhibitor DCD [J]. European Journal of Agronomy, 2012, 43: 147-154.

[19] 李卓勇, 梁家作. 双氰胺对赤红壤中氯化铵硝化抑制效应研究[J]. 南方农业学报, 2011, 42(10): 1238-1240.
Li Z Y, Liang J Z. The inhibitory effect of dicyandiamide on nitrification in latosolic red soil [J]. Journal of Southern

Agriculture, 2011, 42(10): 1238-1240.

[20] 何盈, 蔡顺香, 何春梅, 罗涛. 施氮量和 DCD 对蕹菜生长、硝酸盐累积及土壤氮素形态的影响[J]. 北方园艺, 2007(12): 10-13.
He Y, Cai S X, He C M, Luo T. Effects of nitrogen rate and DCD on growth, nitrate accumulation of the water spinach and soil nitrogen [J]. Northern Horticulture, 2007(12): 10-13.

[21] Guobin L. Soil conservation and sustainable agriculture on the loess plateau: Challenges and prospects [J]. Ambio, 1999, 28(8): 663-668.

[22] 郭胜利, 吴金水, 郝明德, 党廷辉. 长期施肥对 NO_3^--N 深层积累和土壤剖面中水分分布的影响[J]. 应用生态学报, 2003, 14(1): 75-78.
Guo S L, Wu J S, Hao M D, Dang T H. Effect of long-term fertilization on NO_3^--N accumulation and moisture distribution in soil profile [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(1): 75-78.

[23] 李军, 王立祥, 邵明安, 樊延录. 黄土高原地区玉米生产潜力模拟研究[J]. 作物学报, 2002, 28(4): 555-560.
Li J, Wang L X, Shao M A, Fan Y L. Simulation of maize potential productivity in the Loess Plateau Region of China [J]. Acta Agronomica Sinica, 2002, 28(4): 555-560.

[24] 党廷辉, 郭胜利, 郝明德. 黄土旱塬长期施肥下硝态氮深层累积的定量研究[J]. 水土保持研究, 2003, 10(1): 58-75.
Dang T H, Guo S L, Hao M D. The amount and ratio of NO_3^--N accumulation under long-term fertilization in dry highland of Loess Plateau [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2003, 10(1): 58-75.

[25] 郭胜利, 张文菊, 党廷辉, 等. 干旱半干旱地区农田土壤 NO_3^--N 深层积累及其影响因素[J]. 地球科学进展, 2003, 18(4): 584-591.
Guo S L, Zhang W J, Dang T H, *et al*. Accmulation of NO_3^--N in deep layers of dry farmland and its affecting factors in arid and semi-arid areas [J]. Advance in Earth Sciences, 2003, 18(4): 584-591.

[26] 石德杨, 张海艳, 董树亭. 土壤高残留氮条件下施氮对夏玉米氮素平衡、利用及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(1): 37-44.
Shi D Y, Zhang H Y, Dong S T. Effects of nitrogen application on nitrogen balance and use efficiency and yield of summer maize in soil with high residual nitrogen [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2013, 19(1): 37-44.

[27] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 915-924.
Zhang F S, Wang J Q, Zhang W F, *et al*. Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement [J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(5): 915-924.

[28] Kroon P S, Hensen A, van den Bulk W C M, *et al*. The importance of reducing the systematic error due to non-linearity in N_2O flux measurements by static chambers [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2008, 82(2): 175-186.

[29] Khalil M I, Gutser R, Schmidhalter U. Effects of urease and nitrification inhibitors added to urea on nitrous oxide emissions from a loess soil [J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2009, 172(5): 651-660.

[30] 蔡延江, 丁维新, 项剑. 土壤 N_2O 和 NO 产生机制研究进展[J]. 土壤, 2012, 44(5): 712-718.
Cai Y J, Ding W X, Xiang J. Mechanisms of nitrous oxide and nitric oxide production in soils: A review [J]. Soils, 2012, 44(5): 712-718.

[31] Ma B, Wu T, Tremblay N, *et al*. Nitrous oxide fluxes from corn fields: On-farm assessment of the amount and timing of nitrogen fertilizer [J]. Global Change Biology, 2010, 16(1): 156-170.

[32] Halverson L J, Jones T M, Firestone M K. Release of intracellular solutes by four soil bacteria exposed to dilution stress [J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64(5): 1630-1637.

[33] Beare M H, Gregorich E G, St-Georges P. Compaction effects on CO_2 and N_2O production during drying and rewetting of soil [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2009, 41(3): 611-621.

[34] Liu X J, Ju X T, Zhang F S, *et al*. Nitrogen dynamics and budgets in a winter wheat-maize cropping system in the North China Plain [J]. Field Crops Research, 2003, 83(2): 111-124.

[35] 高素玲, 刘松涛, 杨青华, 常介田. 氮肥减量后移对玉米冠层生理性状和产量的影响[J]. 中国农学通报, 2013, 29(24): 114-118.
Gao S L, Liu S T, Yang Q H, Chang J T. Effect of reducing and postponing nitrogen fertilization on the yield and canopy physiological properties of corn [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2013, 29(24): 114-118.

[36] Liu J, Zhu L, Luo S, *et al*. Response of nitrous oxide emission to soil mulching and nitrogen fertilization in semi-arid farmland [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2014, 188: 20-28.