

施氮对春玉米氮素利用及农田氮素平衡的影响

叶东靖¹, 高强², 何文天², 何萍^{1*}

(1 农业部作物营养与施肥重点开放实验室, 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081

2 吉林农业大学资源与环境学院, 吉林长春 130118)

摘要: 田间试验研究了玉米对不同土壤氮素供应水平下作物氮素吸收利用、土壤氮素供应以及农田氮素平衡的影响。结果表明, 玉米产量随施氮量的增加而显著提高, 当施氮量高于 N 240 kg/hm² 时, 产量有减少趋势; 氮素当季利用率随施氮量的增加逐渐降低。土壤中硝态氮含量在玉米整个生育时期呈现先迅速下降后缓慢升高的趋势; 玉米成熟期, 施氮处理的各层土壤中硝态氮含量显著高于不施氮处理, 各层硝态氮含量基本随施氮量的增加而升高。适量施氮促进玉米对氮素的吸收和利用, 进而提高玉米生物量和产量; 过量施氮导致硝态氮在土壤中大量累积, 提高了硝态氮淋溶风险。施氮处理显著提高了收获后土壤中残留无机氮 (N_{min}), 土壤残留 N_{min} 随施氮量的增加而增加; 当施氮量高于 N 240 kg/hm² 时, 残留 N_{min} 有下降趋势。氮素表现损失随施氮量的增加而增加。在本试验条件下, 综合产量、氮肥利用率和土壤硝态氮累积情况考虑, 合理施氮量应控制在 N 180~240 kg/hm² 左右。

关键词: 春玉米; 施氮量; 土壤硝态氮; 氮肥利用率

中图分类号: S531.06

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2010)03-0552-07

Effect of N application on N utilization and N balance in spring maize

YE Dong-jing¹, GAO Qiang², HE Wen-tian², HE Ping^{1*}

(1 Ministry of Agriculture Key Lab of Crop Nutrition and Fertilization/ Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China;

2 College of Resource and Environment, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China)

Abstract: Field experiment was carried out to investigate N application on plant N uptake and utilization, soil N supply and N balance in spring maize. Results obtained showed that, maize yield increased significantly with the increment of N application rate, and with the trend of decreasing when the nitrogen application rate was higher than N 240 kg/ha. N recovery efficiency decreased with the N application rate. Nitrate content in the soil profile throughout the growth stages showed the trends of decreasing rapidly first, and then rose slowly. Nitrogen application significantly increased nitrate content in all layers of soil profile, and nitrate content rose with N application rate. Appropriate rate of nitrogen promoted plant N uptake and utilization, and plant biomass and yields as well. Over use of N resulted in luxury nitrate accumulation in soils, and therefore enhanced the risk of nitrate leaching into the underground water. At harvest, nitrogen application significantly increased residue mineral N (N_{min}) in soils. The residue N_{min} in soils rose with N application rate, but the value decreased when N application rate was over N 240 kg/ha. Under the experimental conditions, with the consideration of yield, nitrogen utilization and soil nitrate accumulation, a reasonable amount of nitrogen application should be controlled at about N 180 - 240 kg/ha.

Key words: maize; N application; soil NO_3^- -N; N recovery efficiency

吉林省是我国重要的玉米生产基地, 合理施肥尤其是合理施氮对于玉米高产优质具有重要意义。

然而, 近年来玉米氮肥不合理施用问题严重, 氮肥过量与不足施用同时并存, 不仅导致氮肥利用率低下,

收稿日期: 2009-04-27 接受日期: 2009-09-17

基金项目: 国家重点基础研究发展计划课题(2007CB109306); 国家科技支撑计划课题(2006BAD02A10); 沃土工程关键支撑技术研究(2006BAD25B05)资助。

作者简介: 叶东靖(1984—), 男, 北京人, 硕士研究生, 主要从事作物营养与施肥研究。* 通讯作者 Tel: 010-82105638, E-mail: phe@caas.ac.cn

肥料增产效益下降,同时造成了水体污染,对生态环境构成潜在威胁,直接影响到农田可持续利用^[1-7]。已有研究多集中在氮肥施用的农学效应方面,明确了在一定范围内玉米产量随着施氮量的增加而提高,但超过一定范围,增加施氮量并不能使产量继续增加,反而有所下降。目前,越来越多的研究在关注农学效应的同时,更多关注氮肥施用的环境效应^[8-13]。如 Ju 等^[12]比较研究了太湖流域水稻-小麦体系和华北地区冬小麦-夏玉米轮作体系氮肥施用的环境效应,指出轮作体系(N) 550—600 kg/hm²的氮肥投入不能显著提高产量,反而增加了氮素的环境损失。有关氮肥施用对玉米的氮素利用以及环境效应方面多集中在华北夏玉米上,东北春玉米生长发育的温度、水热等环境条件不同于夏玉米,而施氮对东北春玉米农学效应和环境效应方面的研究较少。为此,开展了不同氮肥用量对春玉米产量、氮素吸收和利用、土壤硝态氮累积以及氮素平衡的影响试验,为东北地区协调玉米持续高产、提高氮素利用率和保护环境目标下的合理施氮提供依据。

1 材料与方 法

1.1 试验设计

试验于2008年5月至2008年10月在吉林省公主岭市范家屯镇进行,该区属寒温带半湿润大陆性气候区。该区平均气温为18.2℃,降水量515 mm,积温3331.1℃,无霜期140 d左右。供试土壤为中等肥力黑土,试验前0—20 cm土层土壤养分含量:pH 6.2、土壤有机质18.3 g/kg、全氮1.47 g/kg、碱解氮140.1 mg/kg、速效磷(Olsen-P)14.8 mg/kg、速效钾(NH₄Ac-K)132.0 mg/kg。播前0—30、30—60和60—90 cm土壤剖面硝态氮含量分别为12.2、12.4和7.3 mg/kg,铵态氮含量分别为1.6、1.5和1.6 mg/kg。

试验设置7个氮肥用量水平:N 0、60、120、180、240、300和360 kg/hm²,分别用N0、N60、N120、N180、N240、N300和N360表示,随机区组排列,3次重复。各处理均施磷肥(普钙)、钾肥(氯化钾),施用量为P₂O₅ 90 kg/hm²、K₂O 100 kg/hm²全部以基肥形式施入;氮肥用尿素,其中1/3作基肥,2/3在拔节期(6月26日)作追肥施用。试验小区面积为40 m²,6垄宽,10 m长。玉米品种选择当地主栽玉米高产品种郑单958,种植密度为6×10⁴株/hm²。5月2日播

种,9月29日收获。

1.2 样品采集与测定

土壤样品分别于玉米主要生育期,即苗期(37 DAS, DAS为播种后天数)、拔节期(55 DAS)、抽雄期(79 DAS)、吐丝期(90 DAS)、灌浆期(117 DAS)和成熟期(150 DAS)采取每个小区0—90 cm土壤样品,每30 cm为一层。每小区随机取2点,同层次的土壤混合为1个土样,置于-20℃冷冻保存。样品解冻后,称取12 g土样,用100 mL 0.05 mol/L CaCl₂溶液浸提,震荡40 min过滤,用德国产Foss型流动注射分析仪测定NO₃⁻-N含量,并根据各层土壤容重将NO₃⁻-N含量换算成0—90 cm土体NO₃⁻-N积累量。测定NO₃⁻-N含量的同时测定土壤含水量。

植株样品在采集土壤样品的同时按玉米不同生育期每次采3株植株样品,在105℃下烘至恒重后称重,计算地上部干物重。同时每小区选取30株玉米,用日本产SPAD-502测定最上完全展开叶和穗位叶SPAD值,取30个叶片的平均值为小区的SPAD值。收获时取中间四垄玉米子粒进行计产。玉米植株样品全氮含量采用国际GB2905-82方法,用半微量凯式定氮法测定。

1.3 相关参数的计算

氮肥利用率是指施入的氮肥被当季作物吸收利用的百分率,采用差值法计算,公式为:

$$\text{氮肥利用率}(\%) = (\text{施氮区植株地上部吸氮量} - \text{无氮区植株地上部吸氮量}) / \text{施氮量} \times 100$$

$$\text{收获指数}(\%) = \text{子粒产量} / \text{总生物量} \times 100$$

氮素矿化根据无氮区作物吸氮量与试验前后土壤无机氮的净矿化加以计算^[18],由于不考虑氮肥的激发效应,故假定施肥处理的土壤氮素矿化量和无氮区相同,即:

$$\text{土壤氮素净矿化量} = \text{不施氮肥区植株地上部分氮积累量} + \text{不施氮肥区土壤残留无机氮量} - \text{不施氮肥区土壤起始无机氮量}$$

根据氮平衡模型计算氮的表现损失^[19],即根据氮素输入输出平衡的原理:

$$\text{氮素表现损失量}(\text{kg}/\text{hm}^2) = \text{氮输入量} - \text{作物吸收量} - \text{土壤残留无机氮量};$$

$$\text{其中,氮输入量} = \text{氮肥用量} + \text{起始无机氮量} + \text{氮素矿化量}。$$

所有数据采用SAS8.0和Excel 2003进行处理、统计分析。

2 结果与分析

2.1 玉米产量与氮肥利用率

表1看出,施用氮肥能显著提高玉米子粒产量,增产幅度为25.8%—54.7%,其中以N240处理产量最高,但继续增加施氮量并不能进一步提高玉米产量。依据产量(Y , kg/hm^2)与施氮量(X , kg/hm^2)的关系可建立一元二次回归方程: $Y = -0.0581X^2 + 29.308X + 8342.3 (R^2 = 0.7789^{**})$,计算得到最高产量 $12038 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 和最佳经济产量 $12031 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 下的施氮量分别为 $N252 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 和 $226 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 。

施用氮肥可显著提高玉米收获指数,但当施氮量超过 $N120 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 后各施氮水平差异不显著。与 $N0$ 相比,施氮极显著促进了收获期玉米地上部对氮素的吸收,玉米地上部氮素吸收表现出随施氮量的增加而增加的趋势,但当施氮量超过 $N120 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 后各施氮水平差异也不显著。说明过量施氮既不能进一步提高玉米子粒产量,也没有提高玉米植株对氮素养分的吸收,氮素利用率下降,导致不被作物吸收利用的养分进入环境,直接或间接地产生对环境的潜在威胁。

表1 玉米产量及氮素利用率

Table 1 Grain yield and nitrogen recovery efficiency of maize

处理 Treat.	产量 Yield (kg/hm^2)	收获指数 HI (%)	总吸氮量 TNU (kg/hm^2)	氮素利用率 NRE (%)
$N0$	8176 d	52.6 b	97.0 c	
$N60$	10285 c	51.7 b	142.1 b	75.2 a
$N120$	10861 bc	58.8 a	175.4 a	65.1 b
$N180$	11397 b	54.4 a	180.0 a	46.1 c
$N240$	12649 a	59.5 a	205.2 a	45.1 cd
$N300$	11433 b	58.2 a	206.0 a	36.3 de
$N360$	11508 b	58.4 a	203.2 a	29.5 e

注 (Note): HI—Harvest index; TNU—Total N uptake; NRE—N recovery efficiency. 同列数据后不同字母表示处理间差异达5%显著水平 Different letters within a column are significant at 5% level.

2.2 干物质及氮素积累动态

对春玉米地上部生长发育和氮素积累的动态监测表明,从播种到苗期玉米地上部的生物量不超过全生育期的1%,拔节期以后生长迅速,吐丝期地上部生物产量达总生物量的45.0%—58.1%,灌浆期已达86%以上,随后缓慢增加至成熟期最高。各施氮处理干物质积累自拔节期以后之间出现分异,施

氮各处理的干物质积累量显著高于不施氮处理,且随生育期的推进,施氮各处理分异明显,成熟期以 $N240$ 处理干物质积累量最大(图1)。玉米地上部氮素积累趋势与生物量动态基本一致(图2),玉米拔节期前施氮与不施氮处理间的氮素积累量无显著差异;拔节后各施氮处理氮素积累量明显高于不施氮处理。氮素积累量总体趋势是随施氮量的增加而增加,以 $N240$ 、 $N300$ 和 $N360$ 处理氮素积累量最高。

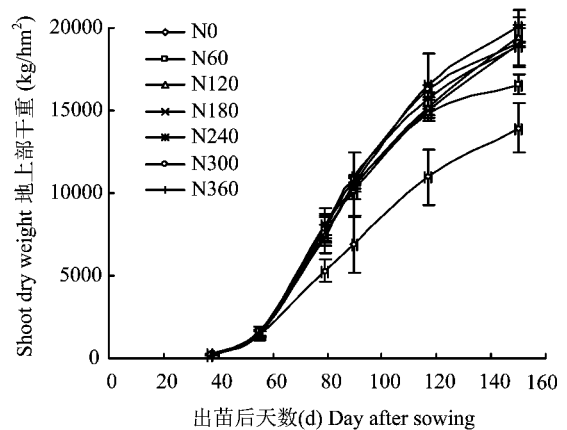


图1 玉米地上部干物质积累动态

Fig.1 Dynamic dry matter accumulation in maize shoot

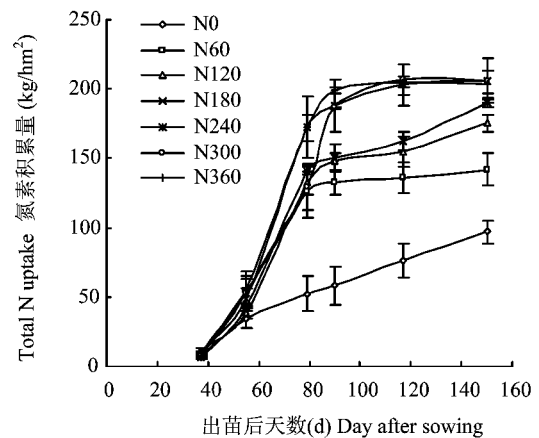


图2 玉米地上部氮素积累动态

Fig.2 Dynamic N accumulation in maize shoot

2.3 土壤硝态氮含量及积累量的变化

本试验条件下,春玉米整个生育期0—90 cm各土层土壤铵态氮含量较低,因此评价土壤矿质氮(N_{\min})时忽略铵态氮的影响,只计算硝态氮的贡献。由图3可见,施氮处理0—30、30—60和60—90 cm土层硝态氮含量在各生育期均高于不施氮处理($N0$);且随玉米生育期推进呈现出先降后升的趋势。0—30和30—60 cm土壤的硝态氮含量在苗期

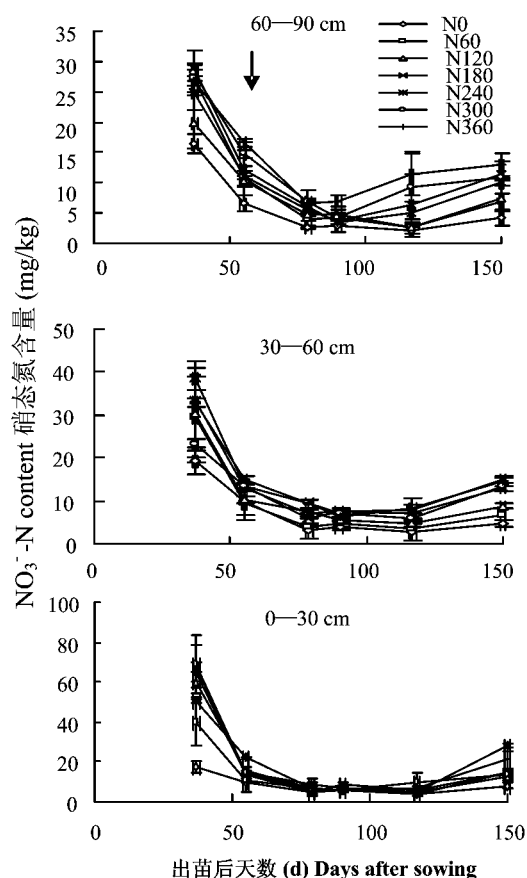


图3 玉米不同生育期各土层硝态氮含量
Fig.3 NO_3^- -N content in different soil layers
at different growth stages

[注(Note): 箭头为追肥时间 Arrow means top dressing time,
为出苗后 56 d, 56 days after sowing]

最高,随后开始降低,至抽雄和吐丝期开始接近最低点,灌浆期达到最低,成熟期稍有回升。60—90 cm 硝态氮含量变化为,抽雄和吐丝期硝态氮含量降至最低点,灌浆期有所回升,直至成熟期。

玉米苗期由于植株小,基本靠种子营养即可维持生长,吸收土壤养分较少;拔节期玉米地上部生物量显著增长,养分吸收增加,使土壤硝态氮养分含量下降;抽雄期至吐丝期是玉米从营养生长向生殖生长的转折时期,此期玉米生长由营养生长进入生殖生长,植株生长茂盛,大量吸收土壤中的养分,因而土壤中硝态氮含量显著下降。灌浆期正值雨季,土壤 0—60 cm 的硝态氮由于满足玉米植株旺盛生长而被消耗导致其含量下降,而不能被作物根系直接吸收的多余的养分则随降雨移至 60—90 cm 土层,因而 60—90 cm 土层灌浆期开始升高。尤其是 N300 和 N360 处理灌浆期和成熟期 60—90 cm 土层硝态

氮含量均较高,增加了向深层土壤移动的风险。各土层硝态氮变化总体趋势为随施氮量的增加而增加;成熟期 0—30 cm 土层 N240 处理硝态氮含量最高。

由图 4 可知,各施氮处理在玉米整个生育期的硝态氮积累量存在明显差异。苗期 N0 处理各土层中硝态氮积累最少,N240 处理 0—30 cm 土层和 0—90 cm 土体硝态氮积累量最高,过量施氮并没有增加苗期各土层硝态氮的积累。苗期各处理 0—30 cm 土层硝态氮积累量高于 30—90 cm 土层,可能主要源于苗期玉米生长矮小对土壤养分消耗不多。拔节期由于植株迅速增长,各土层硝态氮积累量显著降低,硝态氮积累量基本随施氮量的升高而升高;至抽雄期、吐丝期和灌浆期,由于玉米植株已经由营养生长进入生殖生长,对土壤养分消耗增加,导致硝态氮积累继续降低。成熟期伴随植株衰老成熟硝态氮含量又逐渐升高。生育后期土壤硝态氮积累基本随施氮量的增加而增加,但 N240 处理始终能够保持耕层(0—30 cm)较高的硝态氮积累量,保证作物生育期的养分需求,而过量施氮的 N300 和 N360 处理则降低了耕层土壤硝态氮积累量,使作物地上部并没有因为养分的过量供应而满足对养分的需求,同时还增加了硝态氮向深层土壤淋溶的风险。

2.4 土壤氮素平衡

运用氮素平衡原理,根据土壤 N_{\min} 和玉米氮素吸收,计算了玉米播种至成熟期氮肥的利用和平衡状况。氮素输入包括施氮量、播前土壤起始 N_{\min} 和氮素矿化三部分;氮素输出包括作物吸收、收获时土壤残留 N_{\min} 和表观损失三部分。其中,表观损失是氮素输入总量与作物吸收和土壤残留 N_{\min} 两项输出之差,即指各处理肥料氮相对于对照处理(N0)的损失数量。在氮素平衡计算中,将土壤 N_{\min} 所在层次定义为 0—90 cm 深度,即作物根系吸收养分的主要层次。

表 2 看出,从播种到成熟期,氮素表观损失随施氮量的增加而增加,以施氮量 N360 处理氮素损失最多,达 $N 147.9 \text{ kg/hm}^2$ 。这主要是作物氮素吸收并没有因氮素养分过量供应而明显增加;而产量最高的 N240 处理因生育期氮素养分供应充足而能满足植株生长期的养分需求,因而氮素表观损失较低,仅为 $N 22.8 \text{ kg/hm}^2$ 。而 N60、N120 和 N180 处理则因氮素供应不足而表现为表观损失为负值,使养分供应和需求明显不同步,导致产量降低。

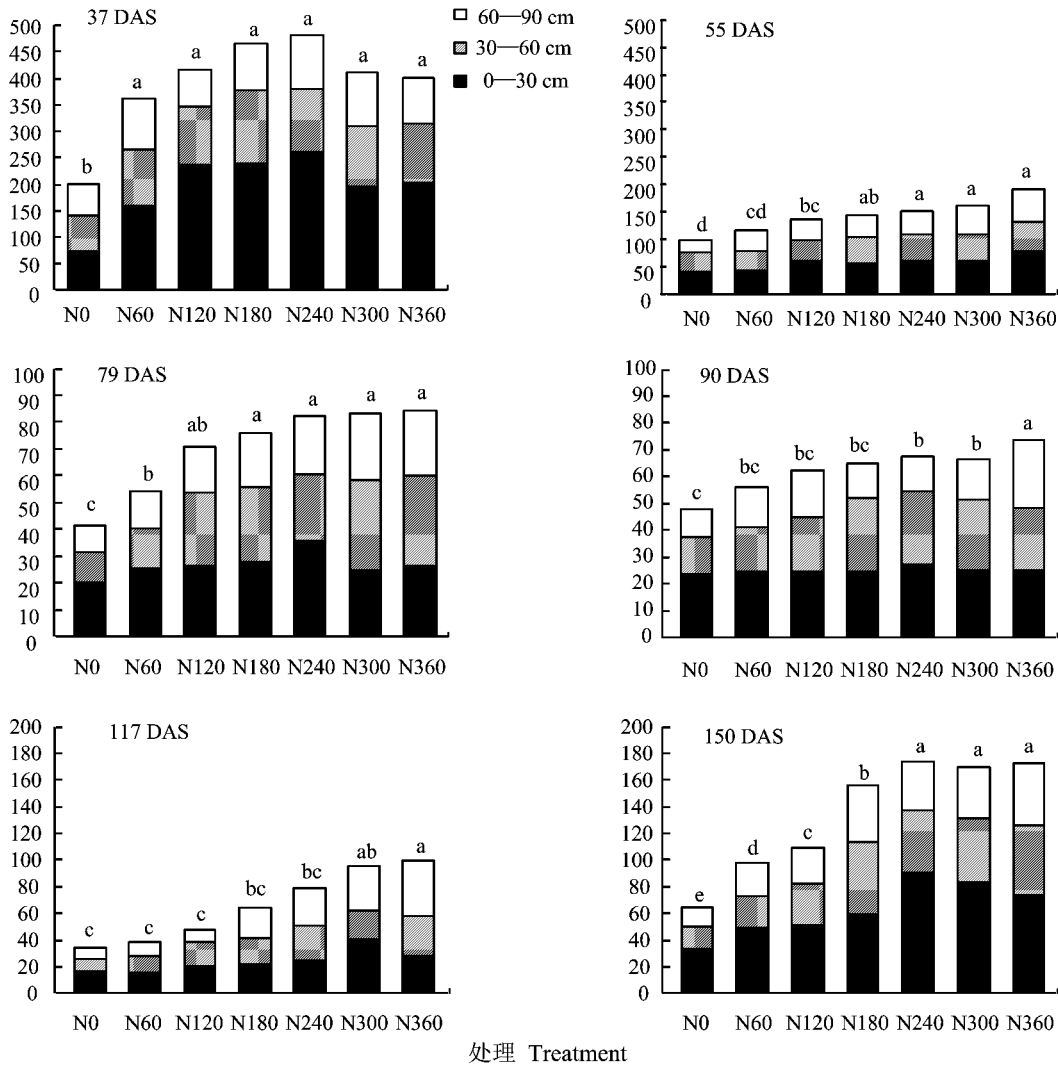


图 4 不同层次土壤硝态氮累积动态

Fig.4 Dynamic of soil nitrate accumulation in different layers of soil profile

[注(Note): 柱上不同字母表示差异达 5% 显著水平 Different letters above the bars indicate significant at 5% level. DAS—Days after sowing]

表 2 玉米整个生育阶段的土壤氮素平衡(kg/hm²)

Table 2 Nitrogen balance during entire growing season of maize

处理 Treatment	N 输入 N input			N 输出 N output		N 表观损失量 Apparent N loss
	施氮量 N fertilizer	起始无机氮 Initial N _{min}	净矿化 Net mineralization	吸氮量 N uptake	残留无机氮 Residual N _{min}	
N0	0	163.4	26.8	97.0 c	93.2 c	0.0 d
N60	60	163.4	26.8	142.1 b	128.5 b	- 20.4 e
N120	120	163.4	26.8	175.4 a	142.3 a	- 7.6 de
N180	180	163.4	26.8	180.0 a	187.4 a	2.8 de
N240	240	163.4	26.8	205.2 a	202.1 a	22.8 c
N300	300	163.4	26.8	206.0 a	197.0 a	87.1 b
N360	360	163.4	26.8	203.2 a	199.1 a	147.9 a

注(Note): 同列数据后中不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters within a column are significant at 5% level.

3 讨论与结论

氮肥施用时期和用量对作物产量和氮肥利用率有显著影响。有报道认为,适量施氮可以提高子粒灌浆速率,增加粒重;缺氮或过量施氮都会降低粒重^[14];但也有认为,施氮对夏玉米子粒有显著的增产作用,但随施氮量的增加产量变化不大,氮肥利用率在随施氮量的增加而降低^[15]。郭红梅等^[16]研究表明,氮肥运筹对春玉米产量和经济效益影响显著,以1/2 N作基肥+1/2 N作追肥处理可获得最高产量。Tanaka等^[17]认为,随着施氮量的增加,植株和收获器官的含氮量增加,但氮的吸收效率、利用效率和收获指数降低。本研究结果表明,玉米产量随施氮量增加而显著增加,当施氮量高于N 240 kg/hm²时,产量反而有降低的趋势。过量施氮也并不能增加玉米对氮素的吸收,因而氮素当季利用率随施氮量的增加而逐渐降低。

土壤剖面硝态氮的含量变化随土壤类型、施氮量和生育时期不同而异。许多研究指出,土壤长期大量施用氮肥会造成硝态氮在土壤中的累积,土体硝态氮含量随施氮量的增加显著增加^[18-22]。当施氮量超过最佳施氮量时,土壤硝态氮的含量随施氮量增加线性增强,相关系数可达0.98^[23-25];也有研究报道,不同施氮量对粘壤土及沙壤土硝态氮移动没有影响^[26],施氮量高于最佳施氮量时,收获后土壤无机氮含量没有变化^[27]。王启现^[8]等研究表明,土壤NO₃⁻-N含量在夏玉米季的变化因土层深度而异,0—20 cm的NO₃⁻-N含量在大口期以前下降、大口期以后上升;20—200 cm各层的NO₃⁻-N含量均在吐丝以前下降,吐丝以后上升。与此不同,Dou等^[28]在美国宾夕法尼亚州研究结果为:0—25和25—45 cm土层NO₃⁻-N含量均在玉米播种后4周上升到最大值,此后下降。本研究表明,0—90 cm土壤的硝态氮含量在抽雄期以前下降,此后增加。与王启现^[8]报道的夏玉米相比,本研究硝态氮出现的最低点要延迟一些,可能的原因是春玉米春季低温,氮素吸收速率延迟^[29]。施氮处理显著增加了各层硝态氮含量,其中各施氮处理中以N240处理能保持成熟期0—30 cm较高的土壤硝态氮含量和累积量,有利于供应生育期作物对养分的需求。而N300和N360处理并没有因氮素供应过量而增加表层土壤硝态氮的累积,作物未吸收的氮素进入环境则对环境造成潜在威胁。

玉米吸收利用土壤氮素的比例高于对氮肥的吸

收利用,氮肥合理施用与否,除了考虑到氮肥的增产效应和氮肥利用率外,还应考虑土壤残留无机氮的高低。研究表明,华北小麦-玉米轮作收获夏玉米后土壤0—90 cm残留的硝态氮为473±125 kg/hm²,而优化施肥则能够降低硝态氮在土壤剖面的残留^[3]。欧盟的许多国家^[25]都要求0—90 cm土体中残留硝态氮要低于90 kg/hm²。钟茜^[30]结合保护环境兼顾高产的实情,认为我国北方冬小麦/夏玉米轮作区,土壤中无机氮的适当残留有利于下季作物的吸收利用,但残留量不宜超过150 kg/hm²。也有研究表明,我国北方玉米-小麦轮作土壤对氮肥的环境承受范围在150—200 kg/hm²的范围内^[31-32],适量减少施氮量可以在保证产量的同时,降低硝态氮在土壤中残留。本研究得出,不同施氮量下东北春玉米土体残留的无机氮变化在93—202 kg/hm²之间,玉米生育期氮素净矿化量和播前起始的矿质氮量为190 kg/hm²。各施氮处理中以N 180和N 240处理氮素输入和氮素输出基本保持平衡,因此氮素表观损失最低。综上所述,综合产量、氮肥利用率及氮素平衡,本试验条件下,氮肥适宜施用量维持在N 180—240 kg/hm²范围较为适宜。

参考文献:

- [1] 杨学云,张树兰,袁新民,同延安. 长期施肥对土硝态氮分布、累积和移动的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2001,7(2): 134-138.
Yang X Y, Zhang S L, Yuan X M, Tong Y A. A long-term experiment on effect of organic manure and chemical fertilizer on distribution accumulation and movement of NO₃⁻-N in soil [J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2007, 7(2): 134-138.
- [2] 刘春增,寇长林,王秋杰. 长期施肥对砂土肥力变化及硝态氮积累和分布的影响[J]. 土壤通报,1996,27(5): 216-218.
Liu C Z, Kou G L, Wang Q J. A long-term experiment on effect of fertilizer on distribution accumulation of NO₃⁻-N in sand soil [J]. Chinese J. Soil Sci., 1996, 27(5): 216-218.
- [3] Zhao R F, Chen X P, Zhang F S *et al.* Fertilization and nitrogen balance in wheat-maize rotation system in North China [J]. Agron. J., 2006, 98: 938-945.
- [4] He P, Li S T, Jin J Y *et al.* Performance of an optimized nutrient management system for double-cropped wheat-maize rotations in North Central China[J]. Agron. J. 2009, 101: 1489-1495
- [5] Zhu Z L, Chen D L. Nitrogen fertilizer use in China-contributions to food production, impacts on the environment and best management strategies[J]. Nutr. Cycl. Agroecosyst. 2002, 63: 117-127.
- [6] Liu J G, Diamond J. China's environment in a globalizing world [J]. Nature, 435, 1179-1186.
- [7] Liu J G, Diamond J. Revolutionizing China's environmental protection [J]. Science, 2008, 319: 37-38.
- [8] 王启现,王璞,申丽霞,等. 施氮时期对玉米土壤硝态氮含量变化及氮盈亏的影响[J]. 生态学报,2004,24(8): 1582-1588.

- Wang Q X, Wang P, Shen L X *et al.* Effect of nitrogen application time on dynamics of nitrate content and apparent nitrogen budget in the soil of summer maize fields [J]. *Acta Ecol. Sin.*, 2004, 24(8): 1582-1588.
- [9] 王志勇, 红梅, 杨殿林, 等. 供氮水平和有机无机配施对夏玉米产量及土壤硝态氮的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2008, (6): 11-14.
- Wang Z Y, Hong M, Yang D L *et al.* Effects of nitrogen fertilizer rate and combined application of organic manure and chemical fertilizer on yield in summer maize and on soil NO_3^- -N [J]. *Soil Fert. Sci. China*, 2008, (6): 11-14.
- [10] 王林学, 杨义, 刘帮银, 等. 施氮量对玉米植株硝态氮含量及产量的影响[J]. *安徽农业科学*, 2008, 36(15): 6604-6606.
- Wang L X, Yang Y, Liu B Y *et al.* Effect of N application rate on nitrate-N content in corn plant and yield of corn [J]. *J. Anhui Agric. Sci.*, 2008, 36(15): 6604-6606.
- [11] 易镇邪, 王璞, 刘明, 等. 不同类型氮肥与施氮量下夏玉米水、氮利用及土壤氮素表观盈亏[J]. *水土保持学报*, 2006, 20(1): 63-67.
- Yi Z X, Wang P, Liu M *et al.* Water and nitrogen utilization and apparent budget of soil nitrogen under different types of nitrogen fertilizer and different application rates in summer maize [J]. *J. Soil Water Conserv.*, 2006, 20(1): 63-67.
- [12] Ju X T, Xing G X, Chen X P *et al.* Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems [J]. *PNAS*, 2009, 106(9): 1-7.
- [13] 朱兆良, David Norse, 孙波. 中国农业面源污染控制对策[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2007
- Zhu Z L, David N, Sun B. Policy for reducing non-point pollution from crop production in China [M]. Beijing: China Environment Science Press, 2007.
- [14] 何萍, 金继运, 林葆, 等. 不同氮、磷、钾用量下春玉米生物产量及其组分动态与养分吸收模式研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 1998, 4(2): 123-130.
- He P, Jin J Y, Lin B *et al.* Dynamic of biomass and its components and nutrients absorption model under different N, P and K application rates [J]. *Plant Nutr. Fert. Sci.*, 1998, 4(2): 123-130.
- [15] 赵营, 同延安, 赵护兵. 不同供氮水平对夏玉米养分累积、转运及产量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2006, 12(5): 622-627.
- Zhao Y, Tong Y A, Zhao H B. Effects of different N rates on nutrients accumulation, transformation and yield of summer maize [J]. *Plant Nutr. Fert. Sci.*, 2006, 12(5): 622-627.
- [16] 郭红梅, 王宏庭, 王斌, 赵萍萍. 氮肥运筹对春玉米产量及经济效益的影响[J]. *山西农业科学*, 2008, 36(11): 67-70.
- Guo H M, Wang H T, Wang B, Zhao P P. Influence of the distribution of nitrogen fertilizer applied on maize yield and net income [J]. *J. Shanxi Agric. Sci.*, 2008, 36(11): 67-70.
- [17] Tanaka A, Yamaguchi J, Miura S. Comparison of fertilizer nitrogen efficiency among field crops [J]. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 1984, 30(2): 199-208.
- [18] 李晓欣, 胡春胜, 程一松. 不同施肥处理对作物产量及土壤中硝态氮积累的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2003, 21(3): 38-42.
- Li X X, Hu C S, Cheng Y S. Different fertilizer treatments on crop yield and soil nitrate accumulation [J]. *Agric. Res. Arid Areas*, 2003, 30(2): 199-208.
- [19] Guillard K, Griffin G F, Allinson D W *et al.* Nitrogen utilization of selected cropping system in the U.S. northeast: Soil profile nitrate distribution and accumulation [J]. *Agron. J.*, 1995, 87: 199-207.
- [20] 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 Crop Res.*, 2003, 83: 111-124.
- [21] Malhi S S, Brandt S A, Ulrich D *et al.* Accumulation in the soil profile under various alternative cropping systems [J]. *J. Plant Nutr.*, 2002, 25: 2499-2520.
- [22] Malhi S S, Harapiak J T, Nyborg M *et al.* Light fraction organic N, ammonium, nitrate and total N in a thin black chernozemic soil under brome grass after 27 annual applications of different N rates [J]. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.*, 2003, 65: 201-210.
- [23] Liang B C, Mackenzie A F. Changes of soil nitrate-nitrogen and denitrification as affected by nitrogen fertilizer on two Quebec soils [J]. *J. Environ. Qual.*, 1994, 23(3): 521-525.
- [24] 袁新民, 杨学云, 同延安, 等. 不同施氮量对土壤 NO_3^- -N 累积的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2001, 19(1): 7-13.
- Yuan X M, Yang X Y, Tong Y A *et al.* Effect of N fertilizer rate on soil nitrate nitrogen accumulation [J]. *Agric. Res. Arid Areas*, 2001, 19(1): 7-13.
- [25] 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 Nutr. Fert. Sci.*, 2004, 10(3): 286-291.
- [26] Ottman M J, Pope N V. Nitrogen fertilizer movement in the soils influenced by nitrogen rate and timing in irrigated wheat [J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2000, 64: 1883-1892.
- [27] Raun W R, Johnson G V. Soil-plant buffering of inorganic nitrogen in continuous winter wheat [J]. *Agron. J.*, 1995, 87: 827-834.
- [28] Dou Z, Fox R H, Toth J D. Seasonal soil nitrate dynamics in corn as affected by tillage and nitrogen source [J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1995, 59(3): 858-864.
- [29] 高伟, 金继运, 何萍, 李书田. 我国北方不同地区玉米养分吸收及累积动态研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2008, 14(4): 623-629.
- Gao W, Jin J Y, He P, Li S T. Dynamic of maize nutrient uptake and accumulation in different regions of northern China [J]. *Plant Nutr. Fert. Sci.*, 2008, 14(4): 623-629.
- [30] 钟茜, 巨晓棠, 张福锁. 华北平原冬小麦/夏玉米轮作体系对氮素环境承受力分析[J]. *植物营养与肥料学报*, 2006, 12(3): 285-293.
- Zhong Q, Ju X T, Zhang F S. Analysis of environmental endurance of winter wheat / summer maize rotation system to nitrogen in North China Plain [J]. *Plant Nutr. Fert. Sci.*, 2006, 12(3): 285-293.
- [31] 王兴仁, 张福锁, Odowski R. 石灰性潮土对氮肥连续施用的环境承受力[J]. *北京农业大学学报*, 1995, 21(增刊): 95-98.
- Wang X R, Zhang F S, Odowski R. Environment capacity of calcareous meadow soil to nitrogen fertilizer applied continuously [J]. *Acta Agric. Univ.*, 1995, 21(S2): 95-98
- [32] 蔡祖聪, 钦绳武, 华北潮土长期试验中的作物产量、氮肥利用率及其环境效应[J]. *土壤学报*, 2006, 43(6): 286-291.
- Cai Z C, Qin S W. Crop yield, N use efficiency and environmental impact of a long-term fertilization experiment in fluvo-aquic soil in north China [J]. *Acta Pedol. Sin.*, 2006, 43(6): 286-291.