

春玉米产量、氮素利用及矿质氮平衡对施氮的响应*

隽英华 汪仁[†] 孙文涛 邢月华

(辽宁省农业科学院环境资源与农村能源研究所, 沈阳 110161)

摘要 通过在辽宁省昌图县的田间试验,研究了不同施氮水平(0、60、120、180、240和300 kg hm⁻²)对春玉米产量、氮素利用及农田矿质氮平衡的影响。结果表明:春玉米产量随施氮量增加而显著提高,当施氮量高于N 240 kg hm⁻²时,产量有减少趋势;氮素当季利用率随施氮量增加先增加后降低,在施氮量180 kg hm⁻²时达到最大,为27.95%。随着施氮量增加,氮肥农学利用率、氮素吸收效率和氮素偏生产力均显著降低,而氮肥生理利用率和氮肥表观残留率均先增加后降低,这与氮肥表观损失率的变化正好相反。作物吸氮量随施氮量增加而显著增加,氮盈余主要以土壤残留为主,表观损失在氮盈余中的比例虽小,但随着施氮量增加而明显增加。低量施氮(<180 kg hm⁻²)主要引起土壤矿质氮残留量的显著增加,而高量施氮(240 kg hm⁻²和300 kg hm⁻²)主要引起土壤氮素表观损失量的显著增加。在本试验条件下,合理施氮量应控制在180~209 kg hm⁻²左右。

关键词 春玉米;产量;施氮水平;氮素利用;矿质氮平衡

中图分类号 S1 **文献标识码** A

东北地区是我国重要的春玉米生产基地,合理施肥尤其是合理施氮对于春玉米优质高产具有重要意义。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,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,直接影响到农田的可持续利用^[1-2]。研究表明,目前我国水稻、小麦、玉米3大作物的氮肥利用率平均只有27.5%^[3],与1992年的35%相比^[4],存在明显的下降趋势。

在农田生态系统中,氮素输入项包括化肥、有机肥、生物固氮、降水、种子等,输出项包括农作物收获携出、氨挥发、反硝化、淋溶、侵蚀、氮蒸散;以氮素总输入等于总输出为基础,计算我国农田氮素平衡表明,80年代以后,我国农田氮素开始盈余,且盈余量越来越大;90年代以后,我国农田氮素盈余每年保持在360万~546万t,相当于N 24~35 kg hm⁻²^[5]。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施氮量增加而提高,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^[6-7]。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^[8-9]。有关氮肥施用对玉米的氮素利用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益和环境方面的研究较少。为此,开展了施氮对春玉米产量、氮素吸收利用及矿质氮平衡的影响,为东北地区协调春玉米持续高产,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amp;方法

1.1 试验地概况

试验于2010年在辽宁省昌图县老城镇(42°46'33" N, 123°57'39" E)进行,该区属于中温带亚湿润季风大陆性气候,四季分明,雨热同季,日照充足,昼夜温差大,年均温度7.0℃,年均日照总数为2 700 h,4~9月有效日照总数1 700 h,年均降雨量500~600 mm,无霜期148 d,≥10℃有效积温3 200℃。2010年平均温度6.7℃,日照总数2 934 h,

* 国家科技支撑项目“粮食丰产科技工程(2011BAD16B12)”和国际植物营养研究所(IPNI)项目资助

[†] 通讯作者, E-mail: lntfswr@yahoo.com.cn

作者简介:隽英华(1979—),男,山东莒南人,博士,助理研究员,主要从事肥料、植物营养和土壤酶学研究。Tel: 024-31028698;

E-mail: juanyong-001@yahoo.com.cn

收稿日期:2011-05-22;收到修改稿日期:2011-08-25

4~9月有效日照总数1 607 h,降雨量557 mm,无霜期145 d, $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 有效积温3 000 $^{\circ}\text{C}$,年均太阳辐射总量约585 600 J m^{-2} 。可见,2010年与常年差别不大,在当地气候条件中出现的频率较高,具有一定的代表性。供试土壤为中等肥力棕壤。常规方法测定0~20 cm表层土壤的理化性质^[10]为:pH6.1、有机质18.5 g kg^{-1} 、全氮1.23 g kg^{-1} 、全磷1.08 g kg^{-1} 、全钾13.8 g kg^{-1} 、碱解氮114.0 mg kg^{-1} 、有效磷18.2 mg kg^{-1} 、速效钾156.0 mg kg^{-1} 。播前0~20、20~40、40~60、60~80、80~100和100~120 cm土层硝态氮含量分别为13.6、10.5、9.58、6.80、4.01和2.70 mg kg^{-1} ,铵态氮含量分别为4.19、2.66、1.77、1.25、1.26和0.94 mg kg^{-1} 。

1.2 试验设计

试验设置6个氮肥用量水平:0、60、120、180、240和300 kg hm^{-2} ,分别用N0、N60、N120、N180、N240和N300表示,随机区组排列,3次重复。各处理均施磷肥(磷酸二铵)、钾肥(氯化钾),施用量为 P_2O_5 97.5 kg hm^{-2} 、 K_2O 105.0 kg hm^{-2} ,全部以基肥形式施入;氮肥用尿素,其中20%作基肥,40%作拔节期追肥(6月28日),40%作大喇叭口期追肥(7月31日)。试验小区面积为30 m^2 (5.6 m \times 5.4 m)。玉米品种选择当地主栽高产品种郑单958,种植密度为 6.2×10^4 株 hm^{-2} 。4月23日播种,9月23日收获。

1.3 样品采集及分析

土壤样品分别于播种前和收获后采取每个小区0~120 cm土层,每20 cm为一层。每小区随机采取3点,同层次的土壤混合为1个土样,装入自封袋中。带回实验室将新鲜土壤混匀过2 mm筛,经四分后,一部分用烘干法测定土壤水分含量;一部分用于测定土壤矿质氮含量。具体方法^[10]如下:称取10 g鲜土,用100 ml 2 mol L^{-1} KCl溶液浸提,160 r min^{-1} 振荡1 h,过滤后将滤液保存于 -18°C 冰箱中,采用连续流动分析仪(AA3,德国布朗卢比公司)测定 NO_3^- -N和 NH_4^+ -N含量。收获时每个小区选取2行(约6.7 m^2)测定生物产量,然后选取整齐一致具有代表性的5穗玉米和3株秸秆带回实验室,分茎、叶、籽粒和穗轴测定其鲜质量。再分别剪碎,取一部分装入信封烘干至恒重,并测定其干质量。样品烘干粉碎过筛后,用 H_2SO_4 - H_2O_2 消解,采用半微量凯氏法测定植株全氮含量^[10]。

1.4 数据处理

本试验没有考虑降水输入的氮素,作物生长期间土壤矿化氮根据不施氮处理作物吸氮量与试验前后土壤矿质氮(N_{min})累积量的净变化估计^[11],不考虑氮肥激发效应,假定施氮处理土壤矿化量与不施氮处理相同,即:

$$\text{土壤氮素净矿化量} = \text{不施氮处理作物吸氮量} + \text{不施氮处理土壤残留 } N_{\text{min}} - \text{不施氮处理土壤起始 } N_{\text{min}} \quad (1)$$

根据氮素输入输出平衡的原理,有关氮肥利用率和氮平衡参数的计算方法^[12-14]如下:

$$\text{土壤氮素表观损失量} = \text{生育期施氮量} + \text{土壤起始 } N_{\text{min}} + \text{土壤氮素净矿化量} - \text{作物携出量} - \text{收获后土壤残留 } N_{\text{min}} \quad (2)$$

$$\text{氮肥表观利用率(NAUE, \%)} = (\text{施氮处理作物吸氮量} - \text{不施氮处理作物吸氮量}) / \text{施氮量} \times 100 \quad (3)$$

$$\text{氮肥表观残留率(NARR, \%)} = (\text{施氮区土壤残留 } N_{\text{min}} - \text{无氮区土壤残留 } N_{\text{min}}) / \text{施氮量} \times 100 \quad (4)$$

$$\text{氮肥表观损失率(NALR, \%)} = 100 - \text{氮肥表观利用率} - \text{氮肥表观残留率} \quad (5)$$

$$\text{氮肥农学利用率(NAE, kg kg}^{-1}\text{)} = (\text{施氮处理产量} - \text{不施氮处理产量}) / \text{施氮量} \quad (6)$$

$$\text{氮肥生理利用率(NPUE, kg kg}^{-1}\text{)} = (\text{施氮处理产量} - \text{不施氮处理产量}) / \text{作物吸氮量} \quad (7)$$

$$\text{氮收获指数(NHI, \%)} = (\text{籽粒吸氮量} / \text{植株吸氮量}) \times 100 \quad (8)$$

$$\text{氮素偏生产力(NPP, kg kg}^{-1}\text{)} = \text{施氮处理籽粒产量} / \text{施氮量} \quad (9)$$

$$\text{氮素吸收效率(NUE, kg kg}^{-1}\text{)} = \text{植株吸氮量} / \text{施氮量} \quad (10)$$

土壤剖面中各土层矿质氮(硝态氮或铵态氮)累积量(N_{min} , N kg hm^{-2})按下式计算:

$$N_{\text{min}} = d \times P_b \times C \times 0.1 \quad (11)$$

式中, d 为土层厚度(20 cm); P_b 为土壤容重(g cm^{-3}); C 为土壤中硝态氮或铵态氮含量(N, mg kg^{-1});0.1为换算系数。剖面矿质氮累积量为硝态氮和铵态氮累积量之和。经测定0~20 cm土壤容重为1.15 g cm^{-3} ,20~40 cm土层容重为1.23 g cm^{-3} ,下层土层容重为1.38 g cm^{-3} 。

试验数据均采用Microsoft Excel 2003软件进行处理,采用SPSS 11.5软件进行统计分析。

2 结果

2.1 春玉米产量及氮素吸收利用

随着施氮量增加,春玉米籽粒产量明显增加,当施氮量为 240 kg hm^{-2} 时,籽粒产量达到最大,之后继续增加施氮量并不能进一步提高籽粒产量(表 1)。进一步分析表明,春玉米籽粒产量 ($Y, \text{ kg hm}^{-2}$) 与施氮量 ($X, \text{ kg hm}^{-2}$) 呈二次曲线关系(图 1),回归方程为: $Y = -0.045 3X^2 + 18.95X + 8 866$ ($R^2 = 0.763 6^{**}$),当施氮量为 $N 209 \text{ kg hm}^{-2}$ 时获得最高产量 $10 850 \text{ kg hm}^{-2}$,与实际最高产量差异不大。综合分析施氮量对产量的影响表明,适宜施氮量在 $N 180 \sim 209 \text{ kg hm}^{-2}$ 之间。

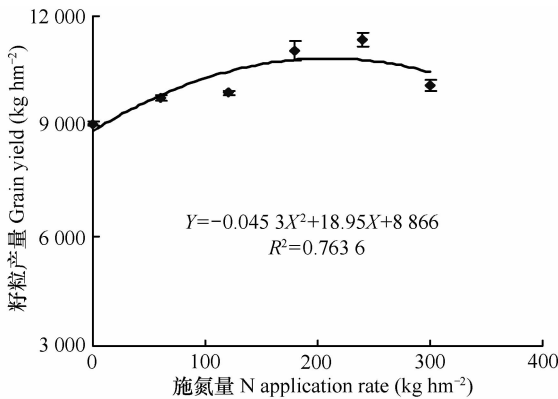


图 1 施氮量对春玉米产量的影响

Fig. 1 Effect of N application rate on yield of spring maize

施用氮肥可显著降低春玉米氮收获指数,但当施氮量超过 240 kg hm^{-2} 后各施氮水平差异不显著,

这或许是由于土壤本身较高的供氮能力引起的。刘建安等^[15]研究认为,玉米氮收获指数主要受生育后期干物质和氮素转移的影响。本试验条件下,NO 处理的氮收获指数最大,为 68.55%,说明植株吸收的氮素更多地转移至籽粒中。从表 1 中看出,本试验中氮肥表观利用率在 19.77%~27.95%,低于朱兆良等^[4]报道的全国平均氮利用率(30%~51%),这是由于玉米根系分布浅、土壤供氮能力强和难以避免的氮素淋洗下渗引起的。随着施氮量增加,氮肥表观利用率先增加后减小,当施氮量为 180 kg hm^{-2} 时,利用率达到最大(27.95%),且与其他施氮处理呈显著水平。氮肥农学利用率随施氮量增加而减小,即氮肥增产效益随施氮量增加而降低。氮肥生理利用率随施氮量增加先增加后降低,与氮肥表观利用率的变化趋势一致。当施氮量为 180 kg hm^{-2} 和 240 kg hm^{-2} 时,生理利用率达到峰值,且两者之间无显著差异。氮肥农学利用率和氮肥生理利用率的变化趋势相反,是因为氮素利用率不仅与氮肥品种有关,还受土壤条件、作物品种、气候特征等因素的影响^[16]。氮肥表观残留率随施氮量增加先增加后降低,与氮肥表观损失率的变化趋势正好相反,当施氮量为 180 kg hm^{-2} 时,表观残留率达到最大,为 42.19%,而表观损失率正好最小,为 29.86%。各施氮处理氮肥表观残留率和表观损失率远远大于氮肥表观利用率,说明春玉米对肥料氮的利用率很低,大部分肥料氮残留于土壤或损失了。氮素吸收效率和氮素偏生产力均随施氮量增加而显著降低,两者均在 $N60$ 处理时达到最大,说明施氮水平与氮素效率两者之间影响显著。

表 1 不同施氮水平下春玉米产量和氮效率

Table 1 Grain yield and N use efficiency of spring maize as affected by N application rate

处理 Treatment	籽粒产量 Grain yield (kg hm^{-2})	氮收获 指数 N harvest index (%)	氮肥农学 利用率 N agronomic efficiency (kg kg^{-1})	氮肥生理 利用率 N physiological use efficiency (kg kg^{-1})	氮肥表观 利用率 N apparent utilization efficiency (%)	氮肥表观 残留率 N apparent residual rate (%)	氮肥表观 损失率 N apparent loss rate (%)	氮素吸 收效率 N uptake efficiency (kg kg^{-1})	氮素偏 生产力 N partial productivity (kg kg^{-1})
N0	9 060a	68.5c	—	—	—	—	—	—	—
N60	9 760b	67.9bc	11.7b	4.0a	21.3a	23.9a	54.8	3.0e	163.0e
N120	9 910b	65.8b	7.1b	4.4a	23.8a	35.6b	40.6	1.6d	82.6d
N180	11 060c	65.8b	11.1b	9.3b	28.0b	42.2d	29.9	1.2c	61.5c
N240	11 360c	62.7a	9.6b	10.5b	22.2a	40.2cd	37.6	0.9b	47.3b
N300	10 120b	60.8a	3.5a	4.7a	19.8a	37.9bc	42.4	0.7a	33.7a

注:同列中不同小写英文字母表示差异达显著水平 ($p < 0.05$);下同 Note: Values with the different lowercase letters in the same column mean significant difference ($p < 0.05$). The same below

2.2 土壤氮素平衡

施用氮肥不仅明显影响土壤矿质氮含量,对矿质氮在土壤剖面的分布也有明显影响。从表2中可以看出,随着施氮量增加,土壤剖面矿质氮含量显著增加,且硝态氮远远高于铵态氮。随着土层深度加深,铵态氮含量降低,而硝态氮含量先增加后降低,并且在20~60 cm处都有一个明显的累积峰。说明经过玉米生长季后,无论施氮还是不施氮,土壤剖面的硝态氮均可向土壤深层淋洗。

通过对春玉米整个生育期矿质氮平衡进行分析可以看出(表3),在生育期有效氮项中,施肥区域肥力均一,播种前的土壤矿质氮累积量与土壤在整个生育期的净矿化氮量相同,有效氮总量随着施氮量增加而增加。而在收获后有效氮支出项中,除N60处理外,其余施氮处理的作物吸氮量均显著高于不施氮处理,且随施氮量增加而明显增加,当施氮量为300 kg hm⁻²时,作物吸氮量达到最大(224.8 kg hm⁻²)。相关分析表明,作物吸氮量(Y , kg hm⁻²)与施氮量(X , kg hm⁻²)呈线性正相关(图2),回归方程为: $Y = 0.2257X + 164.2$ ($R^2 = 0.9454^{**}$),即施氮量每增加1 kg 作物吸氮量仅增加0.2257 kg。春玉米对氮肥的利用程度不高可能是因为春玉米整个生育期均处在降雨比较丰富的季节,难以避免氮素淋溶下渗。土壤残留 N_{\min} 随有效氮总量增加而显著增加,只有在不施氮和施氮

量60 kg hm⁻²的条件下土壤矿质氮残留量低于播种之前的157.7 kg hm⁻²(平均值),并且在施氮量300 kg hm⁻²时达到最高值,为244.7 kg hm⁻²。将土壤矿质氮残留量(Y , kg hm⁻²)与施氮量(X , kg hm⁻²)进行回归分析,得出回归方程为: $Y = 0.4036X + 127.8$ ($R^2 = 0.9875^{**}$)(图3),即施氮量每增加1 kg 土壤残留矿质氮量增加0.4036 kg。氮素表观损失量随施氮量增加而增加,以施氮量N300处理的氮素表观损失量最多,为131.0 kg hm⁻²;当施氮量较小时,氮素表观损失量的增加量很低,但当施氮量增至240 kg hm⁻²和300 kg hm⁻²时,表观损失量的增加量较土壤残留量的增加量更加迅速,即相应地表观损失在矿质氮平衡中的比例则随施氮量增加而显著提高。氮素表观损失量(Y , kg hm⁻²)与施氮量(X , kg hm⁻²)之间的回归方程为: $Y = 0.3948X + 2.972$ ($R^2 = 0.9493^{**}$),即施氮量每增加1 kg 土壤氮素表观损失量增加0.3948 kg。说明每增加1 kg 氮素的表观损失量是作物吸收氮量的1.7倍左右。

从整个肥料水平的矿质氮平衡来看,土壤残留 N_{\min} 是氮盈余的主要部分。此外,从表中可以看出播前土壤矿质氮残留量与春玉米整个生育期氮矿化量之和已经超过作物携出量。这表明,土壤本身的供氮量很高,少量或者不进行氮素投入既可以满足作物对氮素的需求,又可以减少土壤中矿质氮的累积量,进而减少对环境的影响。

表2 收获后不同施氮水平下土壤矿质氮含量

Table 2 Soil N_{\min} content after harvest as affected by N application rate (mg kg⁻¹)

指标 Index	处理 Treatment	土层 Soil layer					
		0~20 cm	20~40 cm	40~60 cm	60~80 cm	80~100 cm	100~120 cm
硝态氮 Nitrate N	N0	6.4a	7.7a	6.9a	5.9a	2.5a	5.1b
	N60	10.1b	9.3b	8.8a	6.7a	7.8c	7.0c
	N120	11.6bc	13.5d	12.7bc	5.9a	4.9b	3.4a
	N180	13.5cd	11.5c	15.1c	10.0b	6.1bc	7.7cd
	N240	14.3cd	14.8d	11.6b	13.3c	12.8d	8.6d
	N300	15.7d	16.9e	15.4c	14.2c	11.3d	9.9e
铵态氮 Ammonium N	N0	4.1a	3.1a	2.9a	2.7ab	2.2a	1.0a
	N60	4.6a	3.0a	3.4a	2.3a	3.2ab	2.2bc
	N120	5.3ab	3.2a	3.1a	4.4c	3.4ab	3.7d
	N180	5.2ab	4.5b	3.6a	3.9bc	2.8ab	3.3d
	N240	6.1b	4.7b	3.5a	4.8c	3.6b	2.7cd
	N300	6.4b	5.0b	3.2a	2.4a	3.7b	1.5ab

表3 春玉米整个生育期矿质氮平衡

Table 3 Mineral N balance during the entire growth period of spring maize (kg hm^{-2})

处理 Treatment	生育期有效氮 Available N at growing stage			有效氮总量 Total available N (I + II + III)	收获后有效氮支出 Available N expend after harvesting			矿质氮平衡 N_{\min} balance (V + VI)
	施氮量 N application rate (I)	播前矿质氮 N_{\min} before sowing (II)	净矿化氮 N net mineralization (III)		作物吸收 N uptake by crop (IV)	残留矿质氮 Residual N_{\min} (V)	氮素表观损失 N apparent loss (VI)	
N0	0	152a	141	293a	162a	131a	0.0a	+ 131a
N60	60	160a	141	361b	176ab	146a	39.5b	+ 185b
N120	120	153a	141	414c	191b	174b	49.8bc	+ 224c
N180	180	160a	141	481d	216c	207c	58.2c	+ 265d
N240	240	162a	141	543e	220c	228d	94.7d	+ 322e
N300	300	160a	141	601f	225c	245d	131e	+ 376f

注: + 表示有效氮总量大于作物吸收氮量,有效氮盈余;Note: + represents that compared with uptake N by crop, total available N is surplus

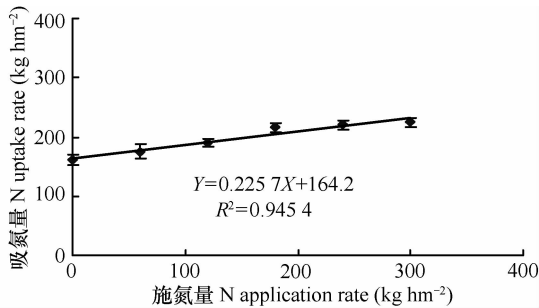


图2 作物吸氮量与施氮量之间的关系拟合

Fig.2 Simulation of the relationship between crop N uptake and N application rate

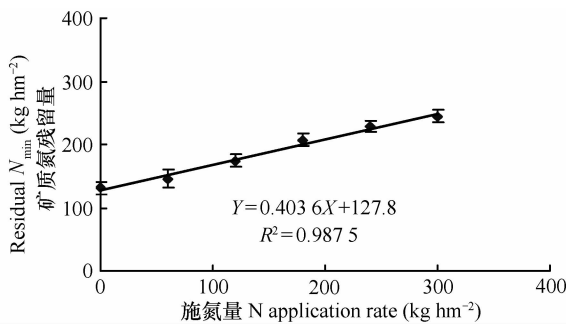


图3 收获后土壤矿质氮残留量与施氮量之间的关系拟合

Fig.3 Simulation of the relationship between soil residual N_{\min} after harvest and N application rate

3 讨论

氮肥施用量和施用时期对作物产量和氮肥利用率影响显著。大多研究表明,适宜施氮可提高籽粒产量,且随施氮量增加而增加。当施氮量超过一

定限度后,籽粒产量没有显著增加,甚至降低^[17]。赵士诚等^[18]研究表明,氮肥运筹对夏玉米产量和氮肥利用率影响显著,以氮肥减量后移(1/5N作基肥+3/5N大喇叭口肥+1/5N吐丝肥)的产量和利用率最高。本研究结果表明,春玉米籽粒产量随着施氮量增加而增加,当施氮量高于 240 kg hm^{-2} 时,籽粒产量反而有降低的趋势。过量施氮并不能增加春玉米对氮素的吸收利用,因而氮素表观利用率和表观残留率随着施氮量增加先增加后降低,遵循“报酬递减”规律。

土壤剖面矿质氮素的残留量因土壤类型、施氮量、施用时期和降水量而异。有研究表明,连续多年施用氮肥,氮肥残效将叠加,在半干旱农田生态系统表现为土壤剖面中残留矿质氮的累积量增加^[19]。也有研究报道,不同施氮量对黏壤土及沙壤土硝态氮移动没有影响^[20],施氮量高于最佳施氮量时,收获后土壤矿质氮含量没有变化^[21]。土壤剖面硝态氮累积量随施氮量增加而增加^[22],也会随土壤供水量增加而淋溶^[17]。高亚军等^[23]和栗丽等^[17]研究表明,施氮是造成土壤中硝态氮累积的主要原因,灌水量对硝态氮累积量的影响较小。本研究表明,春玉米生长季的氮肥利用率19.77%~27.95%,氮肥残留率23.92%~42.19%,氮肥损失率29.86%~54.78%。氮肥利用率不仅与氮肥品种有关,还受土壤条件、作物品种、气候特征等因素的影响。春玉米生长季的高温多雨天气有利于土壤有机氮的矿化,加之前季作物的残留氮肥后效,使当季氮肥的利用率很低,而残留率和损失率很高。本试验中,春玉米生育期土壤氮素矿化量加上播前矿质氮量,土壤自

身供氮量介于 292.9 ~ 302.4 kg hm⁻² 之间, 远高于当季春玉米的吸氮量, 这可能是土壤剖面中矿质氮累积量与氮素表观损失量增加的主要原因。为了做好氮肥的优化管理, 进一步研究这些残留 N_{\min} 对后季作物的贡献及其运移情况是必要的。

长期过量施用氮肥造成了土壤氮素的大量盈余, 这些氮素一部分残留于土壤中, 可为后季作物吸收利用; 另一部分氮素通过硝态氮淋溶、氨挥发和反硝化作用而损失, 使氮肥利用率降低并污染环境。考虑到玉米根系的最大根深为 1.2 m^[24], 玉米根重的 95% 分布在 0 ~ 80 cm 土层, 而 1 m 土层以下的根系不足 1%^[25], 玉米根区以下的土壤氮素很难被玉米吸收利用, 故本研究将 0 ~ 120 cm 土层作为作物对养分的有效吸收层来评价春玉米土壤矿质氮素平衡。结果发现, 土壤残留 N_{\min} 对作物产量和氮肥效果有重要影响, 前季残留土壤 N_{\min} 可以促进后季作物生长, 使后季作物的当季氮肥利用率显著降低, 大量或过量施氮甚至导致作物减产。因为土壤起始矿质氮含量与作物吸氮量有密切关系, 过量供氮会促进茎叶等营养体生长, 引发贪青晚熟, 说明在施用氮肥时必须考虑到土壤自身的供氮能力。本研究发现, 随施氮量增加, 氮素表观残留量和表观损失量明显增加, 这与刘学军等^[26] 用 0 ~ 100 cm 土层作为作物有效吸收层得出的结果一致。低量施氮 (< 180 kg hm⁻²) 主要引起土壤矿质氮残留量的显著增加, 而高量施氮 (240 kg hm⁻² 和 300 kg hm⁻²) 主要引起土壤氮素表观损失量的显著增加。

参考不同施氮水平对春玉米产量、氮利用效率及矿质氮平衡的影响, 本试验条件下, 氮肥适宜用量维持在 180 ~ 209 kg hm⁻² 范围内就可以兼顾经济和环境效益。

4 结 论

施氮水平明显影响农田土壤中的氮素利用及矿质氮素平衡。春玉米产量在施氮量低于 240 kg hm⁻² 时随施氮量增加而显著增加, 并在 240 kg hm⁻² 时达到最高产量。作物吸氮量随施氮量增加而显著增加, 且两者呈线性正相关 ($R^2 = 0.9454$)。不同施氮水平的氮肥表观利用率在 19.77% ~ 27.95% 之间, 在 180 kg hm⁻² 时达到最高, 为 27.95%。随着施氮量增加, 氮肥农学利用率、氮素吸收效率和氮素偏生产力均显著降低, 而氮肥生理利用率和氮肥表观残留率均先增加后降低, 这与氮肥表观损失率

的变化正好相反。综合考虑春玉米产量、氮利用效率等因子, 初步得出春玉米的适宜施氮量在 180 ~ 209 kg hm⁻² 之间。

土壤氮盈余主要以土壤残留 N_{\min} 为主, 且土壤残留 N_{\min} 与施氮量呈正相关关系, 施氮量越大, 土壤矿质氮在 120 cm 土层范围内的残留累积量越大。氮素表观损失量在氮盈余中的比例虽小, 但随施氮量增加而显著增加。低量施氮 (< 180 kg hm⁻²) 主要引起土壤矿质氮残留量的显著增加, 而高量施氮 (240 kg hm⁻² 和 300 kg hm⁻²) 主要引起土壤氮素表观损失量的显著增加, 具有向下淋洗的趋势, 对环境形成一定的威胁。

参 考 文 献

- [1] Liu J G, Diamond J. China's environment in a globalizing world. *Nature*, 2005, 435: 1 179—1 186
- [2] Liu J G, Diamond J. Revolutionizing China's environmental protection. *Science*, 2008, 319: 37—38
- [3] 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. *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 (In Chinese), *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45 (5): 915—924
- [4] 朱兆良, 文启孝. 中国土壤氮素. 南京: 江苏科学技术出版社, 1992. Zhu Z L, Wen Q X. Nitrogen in soil of China (In Chinese). Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1992
- [5] 张福锁, 巨晓棠. 对我国持续农业发展中氮肥管理与环境问题的几点认识. *土壤学报*, 2002, 39 (增刊): 41—55. Zhang F S, Ju X T. Discussion on nitrogen management and environment in agro-ecosystems of sustained development of agriculture (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39 (Suppl.): 41—55
- [6] 赵营, 同延安, 赵护兵. 不同施氮量对夏玉米产量、氮肥利用率及氮平衡的影响. *中国土壤与肥料*, 2006 (2): 30—33. Zhao Y, Tong Y A, Zhao H B. Effect of different N rates on yield of summer maize, fertilizer recovery and N balance (In Chinese). *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2006 (2): 30—33
- [7] 王西娜, 王朝辉, 李生秀. 施氮量对夏季玉米产量及土壤水氮动态的影响. *生态学报*, 2007, 27 (1): 197—204. Wang X N, Wang Z H, Li S X. The effect of nitrogen fertilizer rate on summer maize yield and soil water-nitrogen dynamic (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27 (1): 197—204
- [8] 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. *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 NO₃⁻ - N (In Chinese). *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2008 (6): 11—14

- [9] Ju X T, Xing G X, Chen X P, et al. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems. *PNAS*, 2009, 106(9): 1—7
- [10] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000. Lu R K. Analytical methods for soil and agricultural chemistry (In Chinese). Beijing: China Agricultural Science Technology Press, 2000
- [11] 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累积的影响. 干旱地区农业研究, 2003, 21(3): 38—42. Li X X, Hu C S, Cheng Y S. Effects of different fertilizers on crop yields and nitrate accumulation (In Chinese). *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2003, 21(3): 38—42
- [12] 刘学军, 赵紫娟, 巨晓棠, 等. 基施氮肥对冬小麦产量、氮肥利用率及氮平衡的影响. 生态学报, 2002, 33(7): 1 122—1 128. Liu X J, Zhao Z J, Ju X T, et al. Effect of N application as basal fertilizer on grain yield of winter wheat, fertilizer N recovery and N balance (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 33(7): 1 122—1 128
- [13] 张树兰, 同延安, 梁东丽, 等. 氮肥用量及施用时间对土体中硝态氮移动的影响. 土壤学报, 2004, 41(2): 270—276. Zhang S L, Tong Y A, Liang D L, et al. Nitrate-N movement in the soil profile as influenced by rate and timing of nitrogen application (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(2): 270—276
- [14] 吕丽华, 陶洪斌, 王璞, 等. 施氮量对夏玉米碳、氮代谢和氮利用效率的影响. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(4): 630—637. Lv L H, Tao H B, Wang P, et al. The effect of nitrogen application rate on carbon and nitrogen metabolism and nitrogen use efficiency of summer maize (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2008, 14(4): 630—637
- [15] 刘建安, 米国华, 陈范骏, 等. 玉米杂交种氮效率基因型差异. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(3): 276—287. Liu J A, Mi G H, Chen F J, et al. Genotype differences on nitrogen use efficiency among maize hybrids (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2002, 8(3): 276—287
- [16] 张国梁, 章申. 农田氮素淋失研究进展. 土壤, 1998(6): 291—297. Zhang G L, Zhang S. Advance on farm ecology nitrogen leaching loss (In Chinese). *Soils*, 1998(6): 291—297
- [17] 栗丽, 洪坚平, 王宏庭, 等. 施氮与灌水对夏玉米土壤硝态氮积累、氮素平衡及其利用率的影响. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(6): 1 358—1 365. Li L, Hong J P, Wang H T, et al. Effects of nitrogen application and irrigation on soil nitrate accumulation, nitrogen balance and use efficiency in summer maize (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(6): 1 358—1 365
- [18] 赵士诚, 裴雪霞, 何萍, 等. 氮肥减量后移对土壤氮素供应和夏玉米氮素吸收利用的影响. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(2): 492—497. Zhao S C, Pei X X, He P, et al. Effects of reducing and postponing nitrogen application on soil N supply, plant N uptake and utilization of summer maize (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(2): 492—497
- [19] 樊军, 邵明安, 郝明德, 等. 黄土旱塬塬面生态系统土壤硝酸盐累积分布特征. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(1): 8—11. Fan J, Shao M A, Hao M D, et al. Nitrate accumulation and distribution in soil profiles in ecosystem of upland on the Loess Plateau (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2005, 11(1): 8—11
- [20] Ottman M J, Pope N V. Nitrogen fertilizer movement in the soils influenced by nitrogen rate and timing in irrigated wheat. *Soil Sci Soc Am J*, 2000, 64: 1 883—1 892
- [21] Raun W R, Johnson G V. Soil-plant buffering of inorganic nitrogen in continuous winter wheat. *Agron J*, 1995, 87: 827—834
- [22] 周顺利, 张福锁, 王兴仁. 土壤硝态氮时空变异与土壤氮素表观盈亏研究 I. 冬小麦. 生态学报, 2001, 21(11): 1 782—1 784. Zhou S L, Zhang F S, Wang X R. Studies on the spatio-temporal variations of soil NO_3^- -N and apparent budget of soil nitrogen I. Winter wheat (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(11): 1 782—1 784
- [23] 高亚军, 李生秀, 李世清, 等. 施肥与灌水对硝态氮在土壤中残留的影响. 水土保持学报, 2005, 19(6): 61—64. Gao Y J, Li S X, Li S Q, et al. Effect of fertilization and irrigation on residual nitrate N in soil (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(6): 61—64
- [24] Kindu M, Roland J B, Bashir J. Root and inorganic nitrogen distribution in sesbania fallow, natural fallow and maize fields. *Plant and Soil*, 1997, 188: 319—327
- [25] 吴永成, 周顺利, 王志敏, 等. 华北地区夏玉米土壤硝态氮的时空动态与残留. 生态学报, 2005, 25(7): 1 620—1 625. Wu Y C, Zhou S L, Wang Z M, et al. Dynamics and residue of soil nitrate in summer maize field of North China (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(7): 1 620—1 625
- [26] 刘学军, 巨晓棠, 潘家荣, 等. 冬小麦-夏玉米轮作体系中的氮素平衡与损失途径. 土壤学报, 2002, 39(增刊): 228—237. Liu X J, Ju X T, Pan J R, et al. Nitrogen balance and nitrogen loss pathways in winter wheat-summer maize rotation (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(Suppl.): 228—237

RESPONSE OF SPRING MAIZE TO NITROGEN APPLICATION IN GRAIN YIELD, NITROGEN UTILIZATION AND MINERAL NITROGEN BALANCE

Juan Yinghua Wang Ren[†] Sun Wentao Xing Yuehua

(*Institute of Environmental Resource and Agricultural Energy, Liaoning Academy of Agricultural Sciences, Shenyang 110161, China*)

Abstract A field experiment, designed to have 6 levels of nitrogen application rates (0, 60, 120, 180, 240 and 300 kg hm⁻²), was conducted at Changtu county of Liaoning province to investigate effects of nitrogen application on spring maize in yield, nitrogen utilization and maize field mineral nitrogen (N_{\min}) balance. Results show that the yield of spring maize increased significantly with increasing nitrogen application rate, but once the rate exceeded 240 kg N hm⁻², yield of the crop began to show a declining trend. In the current season, N recovery rate (NRR) increased first and then decreased with increasing N application rate, and reached the highest, 27.95%, when 180 kg N hm⁻² was applied. With the nitrogen application rate further rising on agronomic N use efficiency (ANUE), nitrogen uptake efficiency (NUE) and nitrogen partial productivity (NPP) all decreased significantly, however, physiological N use efficiency (PNUE) and nitrogen apparent residual rate (NARR) both first increased and then decreased, which is just contrary to the changes in nitrogen apparent loss rate (NALR). The crop nitrogen uptake increased significantly with increasing nitrogen application rate, and surplus nitrogen remained in the soil mainly in residue form. Though apparent nitrogen loss accounted only for a small proportion of the nitrogen surplus, its increase with increasing nitrogen application rate was significant. Low nitrogen application rate (<180 kg hm⁻²) mainly induced significant increase in soil residual N_{\min} , while high nitrogen application rate (240 kg hm⁻² and 300 kg hm⁻²) did in nitrogen apparent loss. Under the experimental conditions, a reasonable nitrogen application rate should be controlled at about N 180 ~ 209 kg hm⁻².

Key words Spring maize; Yield; Nitrogen application rate; Nitrogen utilization; Mineral nitrogen balance