

基于产量及环境友好的玉米氮肥投入阈值确定

张 君^{1,2,3,4,5}, 赵沛义^{2,3,4,5}, 潘志华^{1,4,5*}, 段 玉^{2,3,4,5},
李焕春^{2,3,4,5}, 王 博^{2,3,4,5}, 景宇鹏^{2,3,4,5}, 董智强^{1,4,5}

(1. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193; 2. 内蒙古农牧业科学院资源环境与检测技术研究所, 呼和浩特 010031;
3. 内蒙古旱作农业重点实验室, 呼和浩特 010031; 4. 农业部武川农业环境科学观测实验站, 呼和浩特 011705;
5. 农业部内蒙古耕地保育科学观测实验站, 呼和浩特 011705)

摘 要: 为了寻求河套灌区玉米高产与环境友好双赢的氮肥投入阈值, 该文采用田间试验和室内分析化验相结合的方法, 在内蒙古五原县连续三年定位研究了不同施氮水平对河套灌区玉米产量、土壤 N 素残留量及氮平衡的影响。结果表明: 随着施氮量的增加, 籽实产量呈先增加后下降的趋势, 2 m 土壤矿质氮质量分数呈指数增加趋势。随着施氮量及施氮年限的增加, 土壤剖面 N 素含量呈增加趋势。随着土壤深度的增加, 在 0~80 cm 土层间土壤 N 素含量呈下降趋势。盈余率为 0 时, 施氮量为 237 kg/hm², 籽实产量为 13.7 t/hm², 2 m 土壤矿质氮为 478 kg/hm², 土壤氮素回收率为 24%, 植株氮素回收率为 41%, 土壤-玉米系统总回收率为 65%; 95%最高产量到最高产量为 13.2~13.9 t/hm², 对应施氮量为 193~291 kg/hm², 2 m 土壤矿质氮为 419~563 kg/hm², 氮素盈余率为-19%~23%, 土壤氮素回收率为 21%~26%, 植株氮素回收率为 41%, 土壤-玉米系统总回收率为 62%~67%。施氮量 193~291 kg/hm² 是既保证玉米产量又满足土壤氮素盈余较少、土壤-玉米系统氮素回收较高的合理施氮阈值。该研究为河套灌区玉米合理施用氮肥提供了科学依据。

关键词: 作物; 氮; 土壤; 玉米产量; 施氮水平; 氮素残留; 投入阈值; 环境友好

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.12.020

中图分类号: S513

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2016)-12-0136-08

张 君, 赵沛义, 潘志华, 段 玉, 李焕春, 王 博, 景宇鹏, 董智强. 基于产量及环境友好的玉米氮肥投入阈值确定[J]. 农业工程学报, 2016, 32(12): 136—143. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.12.020 http://www.tcsae.org
Zhang Jun, Zhao Peiyi, Pan Zhihua, Duan Yu, Li Huanchun, Wang Bo, Jing Yupeng, Dong Zhiqiang. Determination of input threshold of nitrogen fertilizer based on environment-friendly agriculture and maize yield[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(12): 136—143. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.12.020 http://www.tcsae.org

0 引 言

氮是植物生长发育所需的必须元素之一, 在玉米养分管理中, 氮素是影响玉米产量的主要限制因子, 氮的施用量与玉米的养分吸收特性、产量形成等有密切的关系^[1-2]。研究表明, 当施氮水平较低时, 产量随氮肥用量的增加而增加, 但当施氮水平达到一定值时, 再增加施用氮素, 产量提高并不显著, 甚至造成减产^[3-7]。长期以来, 由于人类为追求产量而不合理施用氮肥以及对氮肥环境负效应的忽视, 氮素已给环境带来严重威胁, 包括温室气体排放、生物多样性衰减、土地和淡水资源退化等^[8-10]。氮肥施入土壤后, 在尿酶的作用下转化成 NO₃⁻和 NH₄⁺, 一部分被作物吸收利用, 一部分 NO₃⁻盐通过淋

溶、反硝化、NH₃挥发以及 NO₂⁻的化学分解等途径从土壤中损失掉, 剩余大部分以无机氮的形态残留于土壤剖面中, 其中 NO₃⁻-N 是无机氮的主要存在形态^[11-12]。在农田系统中, 氮素的利用率约为 20%~35%, 约有 5%~10%的氮素以气态形式挥发, 约 20%~25%的氮素以径流和渗漏形式损失^[11]。而水分在土壤剖面中的垂直运移又导致残留土壤氮素的向下淋溶, 研究表明, 土壤剖面中 NO₃⁻-N 的分布特征在一定程度上能表征地下水 NO₃⁻-N 污染的潜力, 而且水分移动与 NO₃⁻-N 下移呈相关关系^[13-15]。有关施氮量对土壤中 NO₃⁻累积和运移的影响已有许多报道^[15-21], 但在不同区域、不同作物、不同土壤类型以及不同农业管理措施下, 得出结果也不尽相同。如何合理施用氮肥, 实现提高粮食产量与环境友好是当前农业可持续发展与生态环境建设面临的重要科学问题。

河套灌区是内蒙古重要的粮食生产基地, 近年来玉米播种面积在 11 万 hm² 以上, 占该地区农作物播种面积的 20.5%、产量达到 104 万 t^[22]。河套灌区土壤类型以灌淤土为主, 据内蒙古自治区土壤肥料工作站调查研究, 河套灌区耕地土壤全氮 0.13~2.85 g/kg, 平均 0.86 g/kg, 其中 52.5%的耕地全氮集中在 0.75~1.27 g/kg; 碱解氮 17~239 mg/kg, 平均 79 mg/kg, 其中 66.3%的耕地碱解

收稿日期: 2016-02-25 修订日期: 2016-04-18

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201503120, 201003014-04); 国家自然科学基金项目(41271110, 41371232); 国家科技支撑计划(2012BAD09B02); 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201506016)。

作者简介: 张 君, 男, 博士生, 主要从事旱作农业可持续发展方面研究。北京 中国农业大学资源与环境学院, 100193。Email: 64359906@qq.com
*通信作者: 潘志华, 博士, 教授, 研究方向为全球变化与旱地农业生态系统演变、陆面水文过程与机理、生态恢复与重建。北京 中国农业大学资源与环境学院, 100193。Email: panzhihua@cau.edu.cn

氮小于 100 mg/kg。通过对种植玉米的 27 000 户农民调查，在河套灌区种植玉米平均施氮量（N）为 258 kg/hm²，其中 49.3%的农户施氮量（N）在 150~300 kg/hm²，29%的农户施氮量（N）在 300~450 kg/hm²，农民盲目施肥、过量施肥现象普遍^[23]。由于灌区独特气候条件、地理条件和农业管理措施，灌溉方式还是以传统的黄河水漫灌为主，且由于灌区引水系统老化失修，黄河水分期放水，灌水排盐、压盐等因素，导致农田氮素以径流、淋溶等形式大量损失，造成河套灌区农业面源污染持续蔓延，乌梁素海水体重度富营养化，严重影响了河套灌区生态环境的可持续发展^[7,19]。

因此，在不影响产量的前提下，研究河套灌区种植玉米的适宜施氮量，确定节约型施氮阈值对指导当地农民科学施肥，实现玉米高产，环境友好及农业可持续发展具有重要的意义。本文通过 3 a 定位试验，系统研究了

不同施氮水平对河套灌区玉米产量、土壤铵态氮和硝态氮积累运移以及土壤氮素平衡的影响，以期为河套灌区玉米合理施肥提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验点基本情况

本试验在巴彦淖尔市五原县农业技术推广中心水地进行（41°5'38"N，108°17'17"E），试验地位于河套平原中部，属于半干旱中温带季风气候，多年平均降水量 144 mm，年平均蒸发量 2 237 mm，平均气温 6.8 ℃，大于 10 ℃积温为 3 200 ℃·d，昼夜温差大，日照时间长，年日照时数 3 229 h，光、热、水同期，无霜期 150 d。降水量少而不均，寒暑变化剧烈，冬季长而寒冷，昼夜温差极大。土壤类型为灌淤土，成土母质为黄河冲积沉积物，基本理化性质见表 1。

表 1 供试土壤的基本理化性质
Table 1 Physiochemical characteristics of tested soil

土层 Soil depth/cm	有机质 Organic matter/ (g·kg ⁻¹)	速效磷 Olsen-P/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available K/ (mg·kg ⁻¹)	铵态氮 NH ₄ ⁺ -N/ (mg·kg ⁻¹)	硝态氮 NO ₃ ⁻ -N/ (mg·kg ⁻¹)	容重 Bulk density/ (g·cm ⁻³)	田间持水量 Field water capacity/%	pH 值 pH value
0~20	16.17	18.76	149	6.59	16.20	1.49	27.10	8.5
>20~40				7.63	6.86	1.41	28.13	
>40~60				7.63	3.04	1.41	31.77	
>60~80				6.49	2.79	1.41	31.79	
>80~100				6.39	5.09	1.42	30.94	
>100~120				8.63	4.88	1.40	29.85	
>120~140				8.63	5.64			
>140~160				9.72	4.15			
>160~180				7.57	4.69			
>180~200				8.69	4.41			

1.2 试验设计

试验设 6 个处理，小区面积 30 m²，3 次重复，随机区组排列。试验所用肥料为尿素（N 46%）、重过磷酸钙（P₂O₅ 46%）、磷酸二铵（N 18%、P₂O₅ 46%）、氯化钾（K₂O 60%），不施有机肥，全部磷钾肥和 40%氮肥在覆膜前基施，60%氮肥在大喇叭口期追施。磷肥（P₂O₅）3a 施用量均为 150 kg/hm²；钾肥（K₂O）3a 施用量均为 75 kg/hm²；氮肥（N）设 6 个梯度水平，具体施肥方案见表 2。试验选用玉米品种为豪丹 168，先覆膜后播种，膜上小行距 40 cm，膜间大行距 60 cm，株距 33 cm。

表 2 玉米氮肥适宜用量研究施肥方案
Table 2 Fertilization program with appropriate N amount for maize
kg·hm⁻²

处理 Treatment	2011 年	2012 年	2013 年
N0	0	0	0
N1	135	180	180
N2	180	240	240
N3	225	300	300
N4	270	360	360
N5	360	480	480

1.3 田间试验过程、种植情况

2011 年 4 月 27 日施肥、耕翻、覆膜，5 月 6 日播种，6 月 15 日追肥，9 月 20 日收获，生育期降雨量 60.4 mm，灌水 3 次，总灌溉量 360 mm，灌水时间分别为 6 月 15 日，7 月 6 日，7 月 28 日。2012 年 5 月 3 日施肥、耕翻、覆膜，5 月 9 日播种，7 月 15 日追肥，9 月 23 日收获，生育期降雨量 321.3 mm，灌水 2 次，总灌溉量 240 mm，灌水时间分别为 6 月 14 日，7 月 15 日。2013 年 4 月 23 日施肥、耕翻、覆膜，4 月 28 日播种，7 月 1 日追肥，9 月 11 日收获，生育期降雨量 238.4 mm，生育期灌水 4 次，总灌溉量 480 mm，灌水时间分别为 6 月 8 日，7 月 1 日，7 月 22 日，8 月 11 日。3a 土壤翻耕深度均为 30 cm，灌溉量每次 80 mm。

1.4 测定项目与方法

试验开始前和每年秋季玉米收获后各小区采用 5 点取样法用土钻采集 0~200 cm 土壤样品，每 20 cm 一个样品分层混合制样，测定土壤含水量、铵态氮及硝态氮含量。土壤铵态氮用靛酚蓝比色法测定；土壤硝态氮用 0.01 mol/L CaCl₂ 浸提，紫外分光光度计法测定。

收获时各小区单独收获测产并随机取样 3 株，测定茎叶、籽实干物质质量，然后将各部分混匀后粉碎，过

2 mm 筛备用。植株样品全氮用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消煮, 凯氏定氮法测定。

各指标采用的计算方法^[11,24]:

植株 N 素回收利用率=

$$\frac{\text{施N区植株N素吸收量}-\text{对照区植株N素吸收量}}{\text{施N量}} \times 100\%, \quad (1)$$

土壤 N 素回收率=

$$\frac{\text{施肥区土壤中N素量}-\text{对照区土壤中N素量}}{\text{施N量}} \times 100\%, \quad (2)$$

$$\text{N 素表观平衡值} = \text{施N量} - \text{植株N素吸收量}, \quad (3)$$

$$\text{N 素盈余率} = \frac{\text{施N量} - \text{植株N素吸收量}}{\text{植株N素吸收量}} \times 100\%。 \quad (4)$$

2 结果与分析

2.1 施氮水平对玉米产量的影响

施氮水平对玉米产量的影响结果表明(表3), 2011年N3处理产量显著高于N0、N1和N5处理($P<0.05$); N2、N3及N4处理间, N1与N5处理间差异不显著($P>0.05$)。2012、2013年N2处理产量显著高于N0、N1、N4、N5处理($P<0.05$); N2与N3处理间, N3与N4处理间, N4与N5处理间差异不显著($P>0.05$), 3a总产量N3处理最高, 与N0、N1、N4及N5处理差异显著($P<0.05$), N2与N3处理间, N1与N5处理间差异不显著($P>0.05$)。同时表明, 施用氮肥较不施氮肥(N0)增产效果显著($P<0.05$), 3a分别增产16.2%~30.8%, 110.8%~133.1%, 144.3%~175.0%, 3a总增产69.4%~85.0%。

表3 施氮水平对玉米产量的影响
Table 3 Effect of N supply on maize yield

处理 Treatment	籽实产量 Grain yield/(t·hm ⁻²)			
	2011 年	2012 年	2013 年	合计 Total
N0	11.57c	6.67d	4.22e	22.46d
N1	13.49 b	14.46bc	10.32d	38.27c
N2	14.14ab	15.54a	11.62a	41.30a
N3	15.14a	15.15ab	11.26ab	41.55a
N4	14.53a	14.68bc	10.82bc	40.03b
N5	13.44b	14.05c	10.56cd	38.05c

注: 不同小写字母表示 0.05 水平差异显著, 下同。

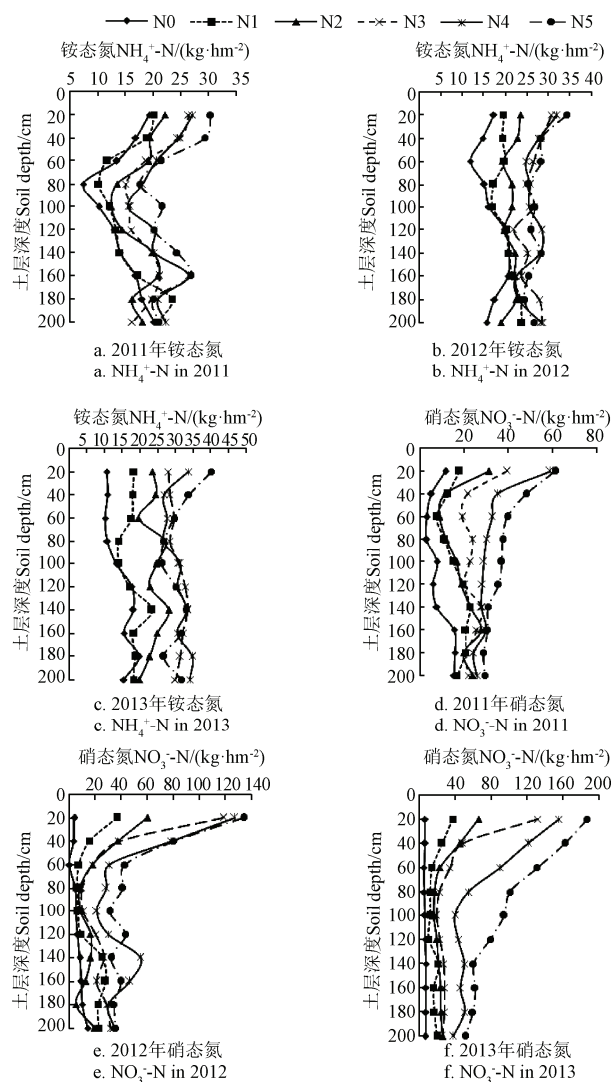
Note: Different letters indicate significant difference at 0.05 level, same as below.

2.2 施氮水平对土壤无机氮残留及氮回收的影响

2.2.1 施氮水平对土壤无机氮残留的影响

图1显示了不同施氮水平下0~200 cm土壤3a的铵态氮和硝态氮剖面变化特征: 耕层0~20 cm土壤铵态氮和硝态氮积累量最高, 随着土层深度增加, 土壤铵态氮在0~80 cm呈下降趋势, >80~200 cm变化规律不明显; 土壤硝态氮在0~120 cm呈下降趋势, >120~200 cm变化规律不明显。各处理间随着施氮量及施肥年的增加,

土壤铵态氮和硝态氮积累量在逐渐增加, 0~80 cm土壤尤为明显。



注: N0~N5表示不同的施氮处理, 具体施氮量见表2。

Note: N0~N5 represent the different nitrogen application, detailed amount see table 2.

图1 不同施氮水平下土壤剖面氮素变化特征

Fig.1 Variety of N in soil profile under different N levels

2.2.2 施氮水平对氮素回收、氮平衡的影响

不同施氮量对土壤氮素的影响明显(表4), 随施氮量增加, 2 m土壤无机氮和土壤氮素残留量呈增加趋势。3a平均结果表明, 2 m土壤无机氮积累量N5处理最高, 与N0、N1、N2和N3处理差异显著($P<0.05$), N4处理与N0、N1和N2处理差异显著($P<0.05$), N0、N1和N2之间、N3和N4之间差异不显著($P>0.05$); 2 m土壤N素残留量N5处理最高, 与N0、N1和N2处理间差异显著($P<0.05$), N0、N1和N2, N3与N4, N4与N5之间差异不显著($P>0.05$)。植株氮素吸收量N3处理最高, 施氮处理间差异不显著($P>0.05$), 施氮处理与N0处理差异显著($P<0.05$)。氮回收结果表明, 土壤氮素回收率N4处理最高, 与N3、N5处理间差异不显著($P>0.05$), 与N1、N2处理间差异显著($P<0.05$); 植

株氮素回收利用率 N2 处理最高，与其他处理间差异显著 ($P<0.05$)；N2 处理土壤-玉米系统氮素回收率最高，与 N3 处理差异不显著 ($P>0.05$)，与 N1、N4、N5 处理间差异显著 ($P<0.05$)；氮表观平衡和盈余率结果表明，施肥量 \leq N2 处理，表观平衡量和盈余率均为亏缺，施肥量 $>$ N2 为盈余。

表 4 施氮水平对土壤氮回收及氮平衡的影响
Table 4 Effect of N rate on soil N recovery and N balance

处理 Treatment	年份 Year	2 m 土壤无机氮 残留量 Soil mineral N residual in 2m/(kg·hm ⁻²)	2 m 土壤 N 素 残留量 Soil N residual in 2 m/(kg·hm ⁻²)	植株 N 吸收量 N absorption of plant/(kg·hm ⁻²)	土壤 N 素回收 Soil N recovery/%	植株回收利用率 Ground plant recovery/%	回收合计 Total recovery/%	N 表观平衡 N balance/ (kg·hm ⁻²)	N 盈余率 N surplus rate/%
N0	2011	241.03	137.68	180.42				-180.42	-100.00
	2012	235.34	147.67	127.04				-127.04	-100.00
	2013	206.28	125.45	55.72				-55.72	-100.00
	平均值	227.55d	136.93d	121.06b				-121.06	-100.00
N1	2011	326.76	164.32	217.27	19.73	26.06	45.79	-82.27	-37.71
	2012	383.55	199.79	230.85	16.54	44.12	60.67	-50.85	-21.73
	2013	361.63	180.59	168.44	11.14	50.85	61.99	11.56	7.04
	平均值	357.31cd	181.56d	205.52a	15.80b	40.34b	56.15c	-40.52	-17.47
N2	2011	370.31	182.38	234.98	24.83	37.13	61.96	-54.98	-23.29
	2012	416.78	213.80	289.61	15.75	54.62	70.36	-49.61	-17.09
	2013	519.60	250.28	222.37	18.91	60.01	78.92	17.63	8.00
	平均值	435.56cd	215.49cd	248.99a	19.83b	50.59a	70.42a	-28.99	-10.79
N3	2011	438.52	207.73	250.43	31.13	31.10	62.24	-25.43	-10.07
	2012	588.61	280.91	273.93	25.38	41.31	66.69	26.07	9.58
	2013	693.46	327.50	246.79	24.49	49.45	73.94	53.21	21.57
	平均值	573.53bc	272.05bc	257.05a	27.00a	40.62b	67.62ab	17.95	7.03
N4	2011	538.93	243.04	237.23	39.02	21.02	60.04	32.77	13.96
	2012	728.81	314.10	263.55	26.42	30.68	57.10	96.45	36.64
	2013	997.79	400.04	244.01	27.74	38.54	66.28	115.99	47.62
	平均值	755.18ab	319.06ab	248.26a	31.06a	30.08c	61.14bc	81.74	32.74
N5	2011	613.02	269.46	206.02	36.61	7.11	43.71	153.98	75.45
	2012	790.08	332.35	241.65	21.99	16.69	38.67	238.35	98.97
	2013	1299.69	469.61	239.02	26.07	24.51	50.58	240.98	101.15
	平均值	900.93a	357.14a	228.90a	28.22a	16.10d	44.32d	211.10	91.86

2.3 盈余率与施氮量、产量及氮回收的关系

3a 试验结果 (图 2) 表明：盈余率与施氮量呈极显著线性正相关 ($P<0.01$, $R^2=0.954$)；与玉米籽实产量呈极显著二次相关 ($P<0.01$, $R^2=0.475$)；与 2 m 土壤矿质氮残留量呈极显著指数相关 ($P<0.01$, $R^2=0.841$)；与氮素回收率呈二次曲线相关，其中土壤-玉米系统总回收率呈极显著相关 ($P<0.01$, $R^2=0.589$)，植株回收率呈显著相关 ($P<0.05$, $R^2=0.390$)，土壤回收率相关性不显著 ($P>0.05$, $R^2=0.179$)。将回归方程联立并通过内插法计算，盈余率为 0 时，施氮量为 237 kg/hm²，籽实产量为 13.7 t/hm²，2 m 土壤矿质氮为 478 kg/hm²，土壤氮素回收率为 24%，植株氮素回收率为 41%，土壤-玉米系统总回收率为 65%；以籽实 95%产量与最高产量作为置信区间，计算产量为 13.2~13.9 t/hm²，对应氮素盈余率为-19%~23%，施氮量为 193~291 kg/hm²，2 m 土壤矿质氮为 419~563 kg/hm²，土壤氮素回收率为 21%~26%，植株氮素回收率为 41%，土壤-玉米系统总回收为 62%~67%。

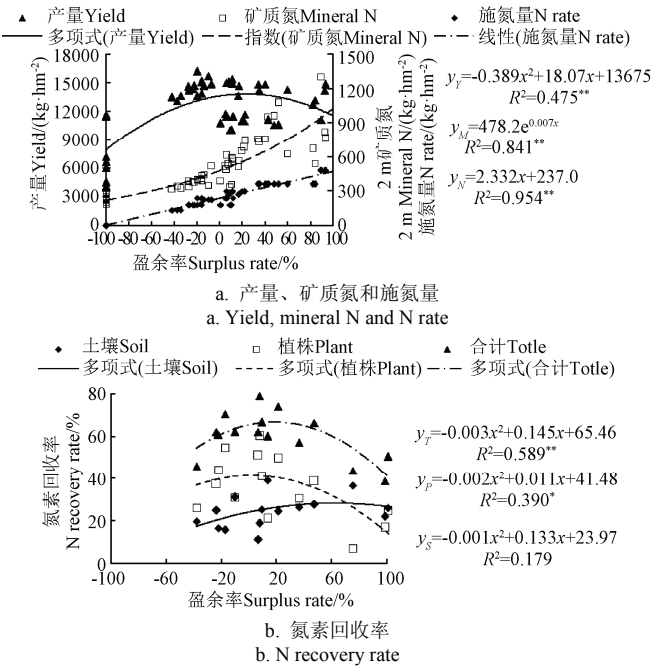


图 2 盈余率与施氮量、产量、矿质氮及氮回收的关系
Fig.2 Relationship between surplus rate, N-fertilizer application rate, yield, mineral N and N recovery

3 讨 论

研究表明,在较瘠薄的土壤上施氮水平较低时,产量对氮肥效应反应迅速,呈直线增加趋势,当施氮水平达到一定阈值时,由于其他因子的限制,产量反应开始变缓,再增加施用氮素,产量提高并不显著,甚至造成减产^[3-7,19,25],本试验结果表明,N₂、N₃处理产量最高,再增加施氮量产量下降。由于受环境条件、气候条件的影响,产量年际间变异较大,2013年玉米产量显著低于2011和2012年,但施氮处理间仍呈相似的规律。试验采用3a定位设计,考虑到氮肥的后效作用及年际的影响,总投入和总产出更能反映氮肥的施肥效应,结果表明,N₃处理3a总产量最高,为41.55 t/hm²,对应总施氮量为825 kg/hm²,年平均施氮量为275 kg/hm²,但N₃与N₂处理总产量差异不显著,N₂处理总施氮量为660 kg/hm²,年平均施氮量为220 kg/hm²,由此也说明施氮量在220~275 kg/hm²是玉米获得高产的施氮阈值。

玉米收获后土壤剖面铵态氮和硝态氮质量分数研究表明,在0~20 cm土壤铵态氮和硝态氮积累量最高,这是由于0~20 cm土层以黏土为主,土壤紧实度高(容重为1.49 g/cm³),同时含有大量根毛,腐殖质较丰富,施入的氮肥在转化分解后大部分被吸附固定在土壤表层。土壤铵态氮和硝态氮在0~80 cm呈下降趋势,主要由于>40~80 cm土层为黄色风沙土,质地较粗,保水保肥能力差,N素容易随水下渗,因此造成0~80 cm土层逐渐下降的趋势,前人的研究结果也呈现相似的趋势^[15,21]。在>80~160 cm土层间土体构成以淤泥、红泥为主,层间夹杂有腐殖质,土体对氮素吸附能力增强,2011年和2012年结果表明,随着深度的增加,土壤N素的积累量呈增加趋势。>160~200 cm土层以蓝泥为主,含有少量腐殖质,结构较紧实,随着深度增加,土体N素储量有逐渐下降的趋势,但是差异不显著。随氮肥用量和施氮年限增加,土壤剖面铵态氮和硝态氮相对残留量增加,2013年,由于投入氮肥的累积影响,规律尤为明显。施氮后土壤铵态氮和硝态氮主要在0~80 cm土层累积,过量氮肥投入后,铵态氮和硝态氮向80 cm以下土层移动,也增加了铵态氮和硝态氮向下淋洗的风险。另外,土壤剖面的硝态氮质量分数显著高于铵态氮,施入土壤的氮肥,除被作物吸收利用及以各种途径损失外,N素主要以硝态氮形态残留于土壤剖面中,这可能与土壤铵态氮在水分充足下易发生硝化作用有关,前人也得到相同的结果^[12,26]。

由于氮肥用量在年际间有差异,而施氮量与氮素表现盈余率呈极显著线性正相关($P<0.01$, $R^2=0.954$),因此研究盈余率与玉米产量、土壤氮残留和氮素回收率的关系更直观,结果表明,盈余率与玉米产量呈极显著二次相关($P<0.01$, $R^2=0.475$),与2 m土壤矿质氮残留量呈极显著指数相关($P<0.01$, $R^2=0.841$),与氮素回收率呈二次曲线相关,田昌玉等^[27]在山东陵县潮土上的玉米试验也得到了相似的结果。将回归方程联立并通过内插法计算,盈余率为0时,施氮量为237 kg/hm²,籽实产量为13.7 t/hm²,2 m土壤矿质氮为478 kg/hm²,土壤氮素

回收率为24%,植株氮素回收率为41%,土壤-玉米系统总回收率为65%,计算所得籽实产量、土壤氮素回收率、植株氮素回收率和土壤-玉米系统总回收率与所对应的拟合方程的最大值间无显著差异($P>0.05$),其中玉米籽实最高产量为13.9 t/hm²,土壤氮素最高回收率为28%,植株N素最高回收率为41.5%,土壤-玉米系统总回收率最高为65.5%。2010年2 m基础土样矿质氮为385 kg/hm²,施氮量为237 kg/hm²的2 m土壤矿质氮较基础土样矿质氮增加93 kg/hm²,土壤相对增加矿质氮量较少,由此可以确定施氮量237 kg/hm²为最优施氮量。以籽实95%产量与最高产量作为置信区间,计算产量为13.2~13.9 t/hm²,对应氮素盈余率为-19%~23%,施氮量为193~291 kg/hm²,2 m土壤矿质氮为419~563 kg/hm²,土壤氮素回收率为21%~26%,植株氮素回收率为41%,土壤-玉米系统总回收率为62%~67%,约有33%~38%的氮素以气态或淋溶形式损失。而以氮素最高回收率的95%与最高回收率作为置信区间,植株氮素回收率39.4%~41.5%,土壤-玉米系统回收率63%~67%,施氮量为193~291 kg/hm²时计算的植株氮素回收率和土壤-玉米系统总回收率均在氮素最高回收率的95%与最高回收率置信区间内。同时,施氮量为360和480 kg/hm²时,计算得籽实产量分别为13.5和11.3 t;2 m土壤矿质氮量分别为692和992 kg/hm²;盈余率分别为53%和104%;土壤回收率分别为28.2%和26.9%;植株回收率分别为36.5%和20.9%;土壤-玉米系统总回收率分别为64.7%和47.9%。玉米籽实产量及回收率均显著下降($P<0.05$),土壤矿质氮量及盈余率均显著增加($P<0.05$),土壤矿质氮量较基础土壤分别增加307和607 kg/hm²,分别是基础土样的1.8倍和2.6倍。刘学军等^[28]将夏季作物吸收利用考虑在内的土壤中无机氮的残留值为100 kg/hm²,本试验结果中,在施氮量为193~291 kg/hm²时的2 m土壤矿质氮较2010年基础土样增加34~178 kg/hm²,施氮量超过291 kg/hm²时,2 m土壤矿质氮量将更高,大量残留的矿质氮对地下水环境造成了潜在的威胁。由此可以确定施肥量193~291 kg/hm²为既保证玉米产量又实现氮素最低损失的施肥阈值,当施氮量超过阈值,盈余率增加,土壤氮素总残留增加,植株回收率、土壤-玉米系统总回收率降低,农田氮素损失风险增加。

本试验仅在河套灌区五原县单点进行了三年定位研究,试验设计中的几个氮肥处理均采用4:6的基追比形式,考虑到肥料种类、施用方式等多种因素的影响,结果的普遍性还需要进一步试验验证。但试验地的土壤类型及基础土壤养分状况均处于河套灌区的平均水平,氮肥品种及施肥方式均按照当地的农民习惯施用,具有一定的代表性,试验确定的优化施氮量和施氮阈值仍可作为一种兼顾产量及环境效益的优化施氮参照值。

4 结 论

1) 供氮水平对玉米产量的影响。随着施氮量的增加,玉米籽实产量呈先增加后下降的趋势,3a总施氮量825 kg/hm²产量最高,总产量为41.55 t/hm²,施用氮肥较

不施氮肥增产效果显著 ($P<0.05$), 3a 分别增产 16.2%~30.8%, 110.8%~133.1%, 144.3%~175.0%, 3a 总增产 69.4%~85.0%。

2) 供氮水平对土壤无机氮残留及氮回收的影响。随着施氮量及施氮年限的增加, 0~200 cm 土壤铵态氮和硝态氮剖面质量分数均呈增加趋势。土壤铵态氮和硝态氮主要在 0~80 cm 土层间累积, 土壤剖面的硝态氮质量分数显著高于铵态氮, 施入土壤的氮肥主要以硝态氮形态残留于土壤剖面, 过量氮肥投入后, 铵态氮和硝态氮向 ≥ 80 cm 土层移动, 也增加了铵态氮和硝态氮向下淋洗的风险。随着土壤深度的增加, 在 0~80 cm 土层间土壤铵态氮和硝态氮质量分数呈下降趋势。

3) 盈余率与施氮量、产量及氮回收的关系。施氮量 193~291 kg/hm² 是既保证玉米产量又满足土壤 N 素盈余量较小的合理施氮阈值, 对应玉米产量为 13.2~13.9 t/hm², 2 m 土壤矿质氮为 419~563 kg/hm², 氮素盈余率为 -19%~23%, 土壤氮素回收率为 21%~26%, 植株氮素回收率为 41%, 土壤-玉米系统总回收为 62%~67%。

[参 考 文 献]

- [1] 孙文涛, 孙占祥, 王聪翔, 等. 滴灌施肥条件下玉米水肥耦合效应的研究[J]. 中国农业科学, 2006, 39(3): 563—568.
Sun Wentao, Sun Zhanxiang, Wang Congxiang, et al. Coupling effect of water and fertilizer on corn yield under drip fertigation[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2006, 39(3): 563—568. (in Chinese with English abstract)
- [2] 叶优良, 李隆, 张福锁, 等. 灌溉对大麦-玉米带田土壤硝态氮累积和淋失的影响[J]. 农业工程学报, 2004, 20(5): 105—109.
Ye Youliang, Li Long, Zhang Fusuo, et al. Effect of irrigation on soil NO₃-N accumulation and leaching in maize/barley intercropping field[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2004, 20(5): 105—109. (in Chinese with English abstract)
- [3] 巨晓棠. 氮肥有效率的观念及意义——兼论对传统氮肥利用率的误解[J]. 土壤学报, 2014, 51(5): 921—933.
Ju Xiaotang. The concept and meanings of nitrogen fertilizer availability ratio- discussing mis-understanding of traditional nitrogen use efficiency[J]. Acta Pedologica Sinica, 2014, 51(5): 921—933. (in Chinese with English abstract)
- [4] 张祥明, 王文军, 凌国宏, 等. 不同氮量水平下冷浸田水稻氮和钾的吸收特征研究[J]. 土壤通报, 2014, 45(1): 180—184.
Zhang Xiangming, Wang Wenjun, Ling Guohong, et al. Characteristics of nitrogen and potassium absorption of rice at different nitrogen levels in cold waterlogged paddy fields[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2014, 45(1): 180—184. (in Chinese with English abstract)
- [5] 邱建军, 李虎, 王立刚. 中国农田施氮水平与土壤氮平衡的模拟研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(8): 40—44.
Qiu Jianjun, Li Hu, Wang Ligang. Simulation of nitrogen level and balance in cropland in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 24(8): 40—44. (in Chinese with English abstract)
- [6] 郭鸿鹏, 朱静雅, 杨印生. 农业非点源污染防治技术的研究现状及进展[J]. 农业工程学报, 2008, 24(4): 290—295.
Guo Hongpeng, Zhu Jingya, Yang Yinsheng. Research status and development of technologies for controlling the agricultural non-point source pollution[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 24(4): 290—295. (in Chinese with English abstract)
- [7] 杜军, 杨培岭, 李云开, 等. 不同灌期对农田氮素迁移及面源污染产生的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(1): 66—74.
Du Jun, Yang Peiling, Li Yunkai, et al. Effect of different irrigation seasons on the transfer of N in different types farmlands and the no-point pollution production[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(1): 66—74. (in Chinese with English abstract)
- [8] Vitousek P M, Aber J D, Howarth R W, et al. Human alteration of the global nitrogen cycle: sources and consequences[J]. Ecology Application, 1997, 7(3): 737—750.
- [9] Giles J. Nitrogen fertilizers fears of pollution[J]. Nature, 2005, 433(7028): 791.
- [10] Chen Xinping, Cui Zhenling, Fan Mingsheng, et al. Producing more grain with lower environmental costs[J]. Nature, 2014, 514(7523): 486—489.
- [11] 郭建华, 赵春江, 孟志军, 等. 北方旱作条件下玉米施用氮肥对氮吸收和淋溶的影响[J]. 土壤通报, 2008, 39(3): 562—565.
Guo Jianhua, Zhao Chunjiang, Meng Zhijun, et al. The effect of nitrogen on nitrate leaching and absorption under spring corn in dry areas of north China[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2008, 39(3): 562—565. (in Chinese with English abstract)
- [12] 徐钰, 江丽华, 林海涛, 等. 不同氮肥运筹对玉米产量、效益及土壤硝态氮含量的影响[J]. 土壤通报, 2011, 42(5): 1196—1199.
Xu Yu, Jiang Lihua, Lin Haitao, et al. Effects of different nitrogen regulation on maize yield, economic benefit and the content of soil nitrate-N[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2011, 42(5): 1196—1199. (in Chinese with English abstract)
- [13] Jabro J D, Lotse E G, Simmons K E. A field study of macropore flow under saturated conditions using a bromide tracer[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1991, 46(5): 376—380.
- [14] Sharma S K, Manchanda H R. Influence of leaching with different amount of water on desalinization and permeability: behavior of chloride and sulphate-dominated saline soils[J]. Agricultural Water Management, 1996, 31(3): 225—235.
- [15] 商放泽, 杨培岭, 李云开, 等. 不同施氮水平对深层包气带土壤氮素淋溶累积的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(7): 103—110.

- Shang Fangze, Yang Peiling, Li Yunkai, et al. Effects of different inorganic nitrogenous fertilizer application rates on soil nitrogen leaching and accumulation in deep vadose zone[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(7): 103—110. (in Chinese with English abstract)
- [16] 韦剑锋, 韦冬萍, 陈超君, 等. 不同氮水平对甘蔗氮素利用及土壤氮素残留的影响[J]. 土壤通报, 2013, 44(1): 168—172.
- Wei Jianfeng, Wei Dongping, Chen Chaojun, et al. Effects of nitrogen fertilizer levels on nitrogen utilization and residue in sugarcane-planted soil[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2013, 44(1): 168—172. (in Chinese with English abstract)
- [17] 刘宏平, 田长彦, 马英杰. 滴灌棉田氮肥用量对土壤无机氮的动态影响[J]. 土壤, 2007, 39(4): 599—603.
- Liu Hongping, Tian Changyan, Ma Yingjie. Effect of nitrogen fertilizer on dynamics of soil mineralized nitrogen in cotton field under drip irrigation[J]. Soils, 2007, 39(4): 599—603. (in Chinese with English abstract)
- [18] 张宏威, 康凌云, 梁斌, 等. 长期大量施肥增加设施菜田土壤可溶性有机氮淋溶风险[J]. 农业工程学报, 2013, 29(21): 99—107.
- Zhang Hongwei, Kang Lingyun, Liang Bin, et al. Long-term heavy fertilization increases leaching risk of soil soluble organic nitrogen in vegetable greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(21): 99—107. (in Chinese with English abstract)
- [19] 李玉英, 余常兵, 孙建好, 等. 蚕豆/玉米间作系统经济生态施氮量及对氮素环境承受力[J]. 农业工程学报, 2013, 24(3): 223—227.
- Li Yuying, Yu Changbing, Sun Jianhao, et al. Nitrogen environmental endurance and economically-ecologically appropriate amount of nitrogen fertilizer in faba bean/maize intercropping system[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 24(3): 223—227. (in Chinese with English abstract)
- [20] 杜军, 杨培岭, 李云开, 等. 灌溉、施肥和浅水埋深对小麦产量和硝态氮淋溶损失的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(2): 57—64.
- Du Jun, Yang Peiling, Li Yunkai, et al. Influence of the irrigation, fertilization and groundwater depth on wheat yield and nitrate nitrogen leaching[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(2): 57—64. (in Chinese with English abstract)
- [21] 叶优良, 李隆. 水氮量对小麦/玉米间作土壤硝态氮累积和水氮利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(1): 33—39.
- Ye Youliang, Li Long. Effects of nitrogen fertilizer application and irrigation level on soil nitrate nitrogen accumulation and water and nitrogen use efficiency for wheat/maize intercropping[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(1): 33—39. (in Chinese with English abstract)
- [22] 张君, 赵沛义, 妥德宝, 等. 磷肥用量对河套灌区玉米产量·土壤磷含量的影响[J]. 安徽农业科学, 2013, 41(27): 10997—11000.
- Zhang Jun, Zhao Peiyi, Tuo Debao, et al. Effects of different phosphorus application amounts on yield of maize and soil phosphorus content in Hetao Irrigation District of Inner Mongolia[J]. Journal of Anhui Agri. Sci. 2013, 41(27): 10997—11000. (in Chinese with English abstract)
- [23] 李文彪, 刘荣乐, 郑海春, 等. 内蒙古河套灌区春玉米推荐施肥指标体系研究[J]. 中国农业科学, 2012, 45(1): 93—101.
- Li Wenbiao, Liu Rongle, Zheng Haichun, et al. Study on index system of optimal fertilizer recommendation for spring corn in Hetao Irrigation area of Inner Mongolia[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2012, 45(1): 93—101. (in Chinese with English abstract)
- [24] 刘瑞, 戴相林, 郑险峰, 等. 半旱地不同栽培模式及施氮下农田土壤养分表观平衡状况研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(4): 934—941.
- Liu Rui, Dai Xianglin, Zheng Xianfeng, et al. Net nutrient balance in soil under different cultivation pattern and nitrogen application rate in semiarid region[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2011, 17(4): 934—941. (in Chinese with English abstract)
- [25] 杜东东, 赵京考, 肖同玉, 等. 运用直线加平台法确定黑土区玉米氮磷施肥量[J]. 土壤通报, 2011, 42(3): 607—611.
- Du Dongdong, Zhao Jingkao, Xiao Tongyu, et al. Determination of nitrogen and phosphorus rate in the corn field of mollisol by linear-plateau method[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2011, 42(3): 607—611. (in Chinese with English abstract)
- [26] 徐杰, 石维, 同延安. 不同氮肥形态对土壤释放 N_2O 的影响[J]. 土壤通报, 2009, 40(2): 325—329.
- Xu Jie, Shi Wei, Tong Yan'an. Effect of different N-fertilizer forms on N_2O emission in anthrosol[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2009, 40(2): 325—329. (in Chinese with English abstract)
- [27] 田昌玉, 左余宝, 林治安, 等. 有机肥与无机肥氮素平行施用对土壤硝态氮积累与玉米产量的影响[J]. 土壤通报, 2010, 41(6): 1418—1422.
- Tian Changyu, Zuo Yubao, Lin Zhian, et al. Corn yield and nitrate-N accumulation in the soil as influenced by organic and inorganic fertilizer[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2010, 41(6): 1418—1422. (in Chinese with English abstract)
- [28] 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[J]. 生态学报, 2002, 22(7): 1122—1128.
- Liu Xuejun, Zhao Zijuan, Ju Xiaotang, et al. Effect of N application as basal fertilizer on grain yield of winter wheat, fertilizer N recovery and N balance[J]. Acta Ecologica Sinica, 2002, 22(7): 1122—1128. (in Chinese with English abstract)

Determination of input threshold of nitrogen fertilizer based on environment-friendly agriculture and maize yield

Zhang Jun^{1,2,3,4,5}, Zhao Peiyi^{2,3,4,5}, Pan Zhihua^{1,4,5*}, Duan Yu^{2,3,4,5}, Li Huanchun^{2,3,4,5},
Wang Bo^{2,3,4,5}, Jing Yupeng^{2,3,4,5}, Dong Zhiqiang^{1,4,5}

(1. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 2. Institute of Resources and Environment and Testing Technology Sciences, IMAAHS, Hohhot 010031, China; 3. Inner Mongolia Key laboratory of Dryland Farming, Hohhot 010031, China; 4. Wuchuan Scientific Observing and Experimental Station of Agro-Environment, Ministry of Agriculture, Hohhot 011705, China; 5. Scientific Observing and Experimental Station of Arable Land Conservation (Inner Mongolia), Hohhot 011705, China)

Abstract: The purpose of this study was to get a win-win input threshold value of nitrogenous fertilizer. The three-year fertilization experiment was carried out in Wuyuan County, Hetao irrigated area, Inner Mongolia to study the effect of different nitrogen usage rate on maize yield, soil nitrogen residues and nitrogen balance. The experiment was conducted on the anthropogenic-alluvial soil with pH value of 8.5, organic matter content of 16.17 g/kg, 18.76 mg/kg Olsen phosphorus (P) content, 149 mg/kg available potassium (K) content, 6.95 mg/kg ammonium nitrogen ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) content, 16.20 mg/kg nitrate nitrogen ($\text{NO}_3^-\text{-N}$) content, and soil bulk density of 1.49 g/cm³. The supplied variety of maize was Haodan 168. Six N treatments (0, 135, 180, 225, 270 and 360 N kg/hm² in 2011; 0, 180, 240, 300, 360 and 480 N kg/hm² in 2012 and 2013) were randomly placed in 18 plots with 3 repetitions. Forty percentage of N fertilizer was incorporated into 0-20 cm surface soil before sowing. Meanwhile, concentrated superphosphate (150 P₂O₅ kg/hm²) and potassium chloride (75 K₂O kg/hm²) as P and K fertilizer were applied to soil before sowing. Sixty percentage of N fertilizer was applied to soil at the huge bellbottom period. After harvest, soil N ($\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$) was monitored, grain yield and straw yield were calculated according to the weighed results from sampling small plot (30 m²). N recovery was calculated by the method of difference. N balance between N input and N output was calculated during the whole growth stage of maize. Results showed that the grain yield increased first and then decreased with the increase of N application rate. Moreover, the N storage in 2 m soil showed an exponentially increasing trend with the increase of N application rate. In addition, the soil profile N had an increasing trend with the increase of N application rate and year. However, the N content of soil layer showed a decreasing trend in 0-80 cm with the increase of soil depth. The N application rate, the grain yield, the mineral N in 2 m soil, the N recovery rate of soil, the N recovery rate of plant, and the N recovery rate of soil-maize system were 237 kg/hm², 13.7 t/hm², 478 kg/hm², 24%, 41%, and 65%, respectively, and with these the N surplus was 0. The value between 95% of the highest yield and the highest yield was 13.2-13.9 t/hm², whose N application rate, the mineral N in 2 m soil, the N surplus, the N recovery rate of soil, the N recovery rate of plant, and the N recovery rate of soil-maize system were 193-291 kg/hm², 419-563 kg/hm², -19%-23%, 21%-26%, 41%, and 62%-67%, respectively. As a result, the reasonable N input threshold of maize is 193-291 kg/hm² in Hetao irrigated area, which can ensure the crop yield and low N surplus, and high N recovery rate in soil-maize system. This research can provide scientific basis for N application for maize production in Hetao irrigated area.

Keywords: crops; nitrogen; soils; maize yield; nitrogen levels; nitrogen residual; input threshold; environment-friendly