植物营养与肥料学报 2013,19(1):37-44
Plant Nutrition and Fertilizer Science doi:10.11674/zwyf.2013.0105

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

石德杨[1,2],张海艳[1,2*],董树亭[2]
(1 青岛农业大学农学与植物保护学院,山东省旱作农业技术重点实验室,山东青岛 266109;
2 山东农业大学农学院,作物生物学国家重点实验室,山东泰安 271018)

摘要:土壤残留氮是不容忽视的土壤氮素资源。通过田间小区试验研究了土壤高残留氮下不同施氮量(0、80、160、240 和 320 kg/hm^2)对夏玉米土壤硝态氮积累、氮素平衡、氮素利用及产量的影响,分析了夏玉米的经济效益。结果表明,土壤剖面硝态氮积累量随施氮量的增加而增加,且施氮处理硝态氮积累量显著高于不施氮处理;各施氮处理土壤硝态氮在 0—60 cm 土层含量最高,在 0—180 cm 剖面呈先减少后增加的变化趋势。不施氮处理夏玉米收获后土壤无机氮残留量高达 378 kg/hm^2,随施氮量的增加,无机氮残留和氮表观损失显著增加。作物吸氮量、氮表观损失量与总氮输入量呈显著正相关,总氮输入量每增加 1 kg 作物吸氮量增加 0.156 kg,而表观损失量增加 0.369 kg,是作物吸氮量的 2.4 倍。高残留氮土壤应严格控制氮肥用量,以免造成氮素资源的大量浪费。夏玉米籽粒吸氮量随施氮量的增加呈增加的趋势,氮收获指数呈降低的趋势。氮肥农学效率、氮肥生理利用率、氮肥利用率和氮素利用率在施氮量 80 kg/hm^2 时最高,随施氮量的增加降低;增施氮肥能降低高残留氮土壤中氮肥的增产效果和利用率。综合考虑产量、氮素利用和环境效应,N 80 kg/hm^2 是氮素高残留土壤上玉米的合理施氮量。

关键词:夏玉米;残留氮;施氮量;氮素平衡;氮素利用;经济效益
中图分类号:S153.6+1;S513.062 **文献标识码**:A **文章编号**:1008-505X(2013)01-0037-08

Effects of nitrogen application on nitrogen balance and use efficiency and yield of summer maize in soil with high residual nitrogen

SHI De-yang[1,2], ZHANG Hai-yan[1,2*], DONG Shu-ting[2]
(*1 College of Agronomy and Plant Protection/Shandong Key Laboratory of Dry Farming Technique, Qingdao Agricultural University, Qingdao Shandong 266109, China; 2 College of Agronomy/State Key Laboratory of Crop Biology, Shandong Agricultural University, Taian Shandong 271018, China*)

Abstract: Residual mineral nitrogen (N_{min}) is an important nitrogen resource in soils. A field experiment was carried out to study the effects of different nitrogen application rates (0, 80, 160, 240 and 320 kg/ha) on soil NO_3^--N accumulation, nitrogen balance and use efficiency and yield of summer maize in soil with high residual nitrogen. The results indicate that soil NO_3^--N accumulation are increased with the increase of nitrogen application rates. NO_3^--N accumulations of the nitrogen treatments are significantly higher than that of the non-nitrogen treatment. The highest NO_3^--N accumulation appears at 0-60 cm soil layers. The NO_3^--N accumulations are decreased at first, and then increased with the depth of soil profile. The residual N_{min} of the non-nitrogen treatment is high as 378 kg/ha after summer maize harvest. With the increase of nitrogen application rates, the residual N_{min} and nitrogen apparent loss are increased significantly. There are positively correlation between crop nitrogen uptake, nitrogen apparent loss and total nitrogen input. As total nitrogen input is increased by 1 kg, crop nitrogen

收稿日期:2012-03-20 **接受日期**:2012-10-23
基金项目:山东省优秀中青年科学家科研奖励基金(BS2009NY034);作物生物学国家重点实验室开放课题(2010KF05);国家自然科学基金(31101100);青岛市科技计划[11-2-4-5-(8)-jch];山东省泰山学者建设工程项目资助。
作者简介:石德杨(1987—),男,山东临沂人,硕士研究生,主要从事作物生理生态研究。E-mail:shideyang888@163.com
*通信作者 E-mail:hyzhang608@126.com

uptake and nitrogen apparent loss are increased by 0.156 and 0.369 kg, respectively. Nitrogen fertilizer application rates must be controlled strictly in high residual nitrogen soils to avoid the waste of nitrogen resources. With the increase of nitrogen application rates, grain nitrogen uptake of summer maize increases, while the nitrogen harvest index decreases. Nitrogen fertilizer agronomic efficiency, physiological use efficiency, and nitrogen use efficiency are the highest in the treatment of N 80 kg/ha, and they decrease with the increase of nitrogen application rates. The nitrogen application reduces the yield-increasing effect and nitrogen utilization in high residual nitrogen soils. In view of the yield, nitrogen utilization and environmental benefit, N 80 kg/ha is the reasonable nitrogen application rate in soils with high residual nitrogen.

Key words: summer maize; residual nitrogen; nitrogen application rate; nitrogen balance; nitrogen use efficiency; economic efficiency

20世纪80年代以后,中国成为世界上氮肥消费最多的国家,在占世界9%的耕地上消耗了全球氮肥的30%以上。这一方面是维持作物高产稳产的需要,同时也与传统水肥管理的不合理有关。统计表明,1977年至2005年期间,中国每年的粮食产量从2.83×10^{11} kg增加到4.84×10^{11} kg,增长了71%;农作物的单位产量也从2348 kg/hm^{2}增长到4642 kg/hm^2,增长了98%。与此同时,氮肥的应用则从7.07×10^9 kg增加到26.21×10^9 kg,增长了271%,远远超过前两者[1]。Fang等[2]在华北地区的研究表明,施氮量超过N 200 kg/hm^{2}时产量不再显著增加,施氮量与作物产量的关系呈线性加平台或二次抛物线关系。Sexton等[3]研究了"氮输入-产量响应-淋失量"函数关系,表明当施肥量比最大产量时的额定用量少5%时,淋失量可显著减少35%。华北平原夏玉米-冬小麦轮作体系中,每年氮肥投入在550~600 kg/hm^{2}左右,氮肥超量施用现象十分普遍[4],而氮素损失及对生态环境的破坏主要发生在夏玉米季[5-6]。因此对夏玉米的氮素利用与氮素损失的研究意义重大。

中国农田氮素平衡的计算结果表明,自80年代以后,中国农田氮素开始盈余,而且盈余量越来越大,1998年盈余量达5.85×10^9 kg[7]。这些盈余的氮素绝大部分以不同形态贮存于土体中。在^{15}N标记氮肥的田间试验中,当季作物收获时化肥氮在土壤中的残留率一般为15%~30%[8]。北方旱作条件下,施入的铵态氮肥和酰胺态氮肥在土壤中1~2周会转化为硝态氮;高量施氮条件下,收获后土壤中累积的氮素绝大部分以硝态氮的形态存在[9]。根据中国农业大学植物营养系在河北辛集的调查结果,20块小麦田收获后0—90 cm土层土壤中的残留无机氮(其中95%是硝态氮)为75~510 kg/hm^2,超过200 kg/hm^{2}的田块占到40%[9]。因此在现有的氮肥管理条件下,土壤剖面累积了大量的硝态氮,这是不容忽视的土壤氮素资源。然而,目前为止的氮肥管理却很少将土壤残留氮素考虑在内[10]。本研究通过田间试验,充分考虑土壤残留氮的存在,探讨在高残留氮土壤上施氮对夏玉米氮素平衡、氮素利用及产量的影响,分析高残留氮条件下夏玉米的经济效益,以引起并提高氮肥研究中对土壤残留氮的重视,真正实现氮肥的合理施用,并为集约化农业生产实现资源高效和环境友好提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于2010年6~10月在山东农业大学玉米科技创新园(116°20′~117°59′E,35°38′~36°28′N)进行,试验田位于黄淮海平原地区,属半湿润温带大陆性季风气候区,多年平均降水量为697 mm,且多集中在夏季,年平均气温12.9 ℃,无霜期195 d。供试土壤为中性沙壤土,地力均匀,播种前土壤剖面无机氮含量为444 kg/hm^2,0—180 cm土层土壤的理化性质见表1。

试验设5个氮肥(尿素)水平,即N 0、80、160、240和320 kg/hm^2,分别以N0、N80、N160、N240、N320表示,采用完全随机区组设计。磷、钾肥为常规固定处理,即150 kg/hm^2。试验地前茬作物为小麦,2010年6月12日小麦收获后翻地、播种,供试品种选用郑单958,种植密度67500 plant/hm^2,行距60 cm,株距25 cm,小区面积30 m^2(3 m×10 m),重复3次,小区间隔1 m。7月8日定苗,7月23日追肥,10月8日收获。播种前施50%的氮肥及全量的磷、钾肥作底肥,剩余的50%于大口期追施,田间管理按夏玉米高产田进行。

表 1　试验地 0—180 cm 土层土壤基础理化性状

Table 1　Basic soil physicochemical properties of the experiment(0 -180 cm)

土层 Depth (cm)	pH	有机质 OM (g/kg)	全氮 Total N (g/kg)	铵态氮 NH_4^+-N (mg/kg)	硝态氮 NO_3^--N (mg/kg)	速效磷 Available P (mg/kg)	速效钾 Available K (mg/kg)	容重 Bulk density (g/cm^3)
0—30	7.52	19.70	1.12	2.05	28.20	45.23	81.78	1.35
30—60	7.33	15.26	0.85	1.86	16.71	15.35	69.14	1.47
60—90	7.08	13.23	0.65	1.81	9.15	10.42	66.45	1.50
90—120	6.72	7.21	0.60	1.77	11.51	3.59	60.12	1.52
120—150	6.35	7.04	0.51	1.74	13.18	1.04	57.25	1.54
150—180	6.10	4.42	0.48	1.70	11.71	0.05	41.18	1.52

1.2　测定项目与方法

于播种前及收获后按每层 30 cm 采集 0—180 cm 土层的土壤样品,每小区取 3 钻,按土壤层次等层混合均匀。称取新鲜土样 6 g,加入 50 mL 1 mol/L的 KCl 浸提,振荡 60 min,过滤后保存在 4 ℃冰箱中,用 AA3(Auto Analyzer 3)型流动分析仪(德国 SEAL 公司)测定土壤硝态氮和铵态氮含量,并根据不同容重将单位换算成 kg/hm^2。根据鲍士旦[11]的方法,测定土壤有机质、土壤全氮、速效磷、速效钾、土壤容重。土壤 pH 用酸度计法测定[12]。

分别于玉米拔节期、大口期、开花期、乳熟期、蜡熟期、完熟期在每个处理小区选取代表性植株 3 株,分为茎(含叶鞘和雄穗)、叶、苞叶、籽粒、穗轴(开花后)5 部分,置于烘箱中,105 ℃杀青 30 min,80 ℃烘干至恒量。样品粉碎,过 0.42 mm 筛,用浓 H_2SO_4 - H_2O_2 消解,稀释后用 KDY-9820 型凯氏定氮仪测定含氮量[11]。成熟期收获,考种测产。

1.3　计算方法及数据分析

土壤硝态氮积累量(kg/hm^2) = 土层厚度(cm) × 土壤容重(g/cm^3) × 土壤硝态氮含量(mg/kg)/10[13];

土壤矿化氮量(kg/hm^2) = 不施氮区地上部分吸氮量 + 不施氮区土壤残留无机氮量 - 不施氮区土壤起始无机氮量[13-14];

氮表观损失量(kg/hm^2) = 氮输入量 - 氮输出量 =(施氮量 + 播前土壤起始矿质氮量 + 氮表观矿化量) -(施氮区地上部分吸氮量 + 收获后土壤残留矿质氮量)[13-14];

氮肥表观损失率(%) = 氮表观损失量/施氮量 ×100[14];

氮剖面损失量(kg/hm^2) = 播前土壤起始无机氮量 - 收获后土壤残留无机氮量[13];

氮肥土壤残留率(%) = 100 - 氮肥利用率 - 表观损失率[14];

氮收获指数(NHI,%) = 籽粒吸氮量/植株吸氮量 ×100[13];

氮肥农学效率(NAE,kg/kg) =(施氮区产量 - 不施氮区产量)/施氮量[13];

氮肥生理利用率(NPUE,kg/kg) =(施氮区产量 - 不施氮区产量)/(施氮区地上部分吸氮量 - 不施氮区地上部分吸氮量)[13];

氮肥利用率(NFUE,%) =(施氮区地上部分吸氮量 - 不施氮区地上部分吸氮量)/施氮量 ×100[6, 10, 14];

氮素利用率(NUE,%) = 施氮区地上部分吸氮量/(土壤残留硝态氮量 + 施氮量) ×100[10];

土壤氮依存率(SNDR,%) = 不施氮区地上部分吸氮量/施氮区地上部分吸氮量 ×100[14]。

试验数据采用 DPS 3.01 和 Microsoft Excel 2003 进行统计分析。产量、经济效益与"土壤残留氮 + 施入氮"的函数方程采用 OriginPro 7.5 拟合。

2　结果与分析

2.1　高残留氮下施氮对硝态氮积累量的影响

播种前,0—180 cm 土层硝态氮积累量为 396 kg/hm^2,说明夏玉米播种前供试土壤的硝态氮水平高(表 2)。方差分析表明,施氮处理对收获后各土层及 0—180 cm 土层硝态氮积累量影响达到显著水平($P<0.05$);各土层及 0—180 cm 土层硝态氮积

累量表现为 N320 > N240 > N160 > N80 > N0 处理，即各土层均以不施氮处理硝态氮积累量最低，随施氮量的增加硝态氮积累量增加。与播种前比较，N0、N80 处理收获后 0—180 cm 土层硝态氮积累量显著降低，而 N160、N240 和 N320 处理显著升高（表2）。说明低施氮量（<80 kg/hm^2）能在一定程度上降低土壤硝态氮的累积；高施氮量（>160 kg/hm^2）则进一步加重土壤硝态氮的累积。各土层之间比较，各处理土壤硝态氮积累量在 0—60 cm 土层最高。随土层深度的增加，收获后各施氮处理土壤硝态氮积累量呈现先减少后增加的变化趋势；且各施氮处理土壤硝态氮积累量的低谷均出现在 60—90 cm（表2）。可见硝态氮主要分布于土壤上层，且会因灌溉及降雨等因素导致部分硝态氮往下层土壤淋洗，由此加剧了对地下水污染的风险。

表2 不同施氮量下土壤剖面硝态氮积累量（kg/hm^2）

Table 2 NO_3^--N accumulation in soil profile under different nitrogen application rates

土层 Depth	播种前 Before planting	收获后 After harvest				
		N0	N80	N160	N240	N320
0—30	114 Da	97 Fa	105 Ea	125 Ca	141 Ba	167 Aa
30—60	74 CDb	70 Db	73 CDb	76 BCb	79 Bb	84 Ab
60—90	41 De	37 Ed	41 Df	44 Cf	50 Bf	54 Ae
90—120	52 Bd	47 Dc	49 Cde	50 Ce	53 Be	61 Ad
120—150	61 Ac	48 Dc	52 Cd	55 Bd	56 Bd	61 Ad
150—180	53 Dd	46 Ec	55 Dc	59 Cc	65 Bc	68 Ac
0—180	396 D	346 F	375 E	410 C	443 B	495 A

注（Note）：同一列数据后不同小写字母表示不同土层间差异达5%显著水平，同一行数据后不同大写字母表示处理间差异达5%显著水平 Values followed by different small letters in the same column are significantly different at the 0.05 probability level, values followed by different capital letters in the same row are significantly different at the 0.05 probability level.

2.2 高残留氮土壤施氮对氮素平衡的影响

土壤无机氮（N_{min}）包括铵态氮和硝态氮。在本试验中计算氮素平衡时，将土壤无机氮累积量指定在 0—180 cm 土层范围，即玉米根系的主要分布范围，且不考虑氮素的激发效应；假定施氮区与不施氮区土壤矿化氮量相同；因土壤中含有较高水平的残留氮，降雨带入土壤中的氮素不予考虑。

从表3 可以看出，夏玉米全生育期土壤氮素的矿化量（184 kg/hm^2）与播前土壤起始无机氮量之和达 628 kg/hm^2，土壤自身供氮量可以满足作物对氮素的需求。从收获后土壤残留的无机氮来看，各施氮处理无机氮的残留量高达 413 ～ 543 kg/hm^2，即使不施氮处理的残留量也高达 378 kg/hm^2，这主要与土壤起始无机氮含量很高有关。大量残留的无机氮特别是硝态氮极易通过淋洗或硝化-反硝化途径从土壤-作物体系中损失掉，对环境产生危害。

当施氮量为 N 80、160、240 和 320 kg/hm^2 时，氮表观损失依次为 18、45、72 和 108 kg/hm^2，对应的表观损失率为23%、28%、30% 和 34%，氮肥土壤残留率为 44%、47%、46% 和 52%（表3）。

将作物吸氮量、表观损失量与总氮输入量进行回归分析，得出作物吸氮量回归方程为：$y = 0.156x + 161.64$（$R^2 = 0.891^*$），即总氮输入量每增加 1 kg 作物吸氮量增加 0.156 kg。表观损失量回归方程为：$y = 0.369x - 245.03$（$R^2 = 0.997^{**}$），即总氮输入量每增加 1 kg 氮素表观损失量增加 0.369 kg。说明总氮输入量每增加 1 kg，氮素的表观损失量是作物吸氮量的 2.4 倍左右。

2.3 高残留氮土壤施氮对夏玉米产量和氮素利用的影响

从表4 可以看出，不施氮处理夏玉米产量达到 11.6×10^3 kg/hm^2。随着施氮量的增加，当施氮量为 80 kg/hm^2、160 kg/hm^2 和 240 kg/hm^2 时，籽粒产量显著高于不施氮处理，但 3 个处理间差异没有达到显著水平；施氮量 320 kg/hm^2 时，籽粒产量显著降低，与不施氮处理间差异不显著。可见，在本试验高残留氮土壤条件下，80 ～ 240 kg/hm^2 施氮量均能提高夏玉米产量，并且在此范围内随施氮量增加产

表 3　不同施氮量下土壤氮素平衡及损失

Table 3　Soil N balance under different nitrogen application rates

处理 Treat.	氮输入 N input(kg/hm²)				氮输出 N output(kg/hm²)			氮肥表观损失率(%) Apparent loss rate	氮肥土壤残留率(%) Residual rate
	施氮量 N rates	起始 N_{min} Initial N_{min}	矿化氮 Net Mineralization	总输入 Total input	作物吸收 Crop uptake	残留 N_{min} Residual N_{min}	表观损失 Apparent loss		
N0	0	444	184	628	250 e	378 e			
N80	80	444	184	708	277 d	413 d	18 d	23 c	44 c
N160	160	444	184	788	291 c	452 c	45 c	28 b	47 b
N240	240	444	184	868	308 a	489 b	72 b	30 b	46 b
N320	320	444	184	948	297 b	543 a	108 a	34 a	52 a

注(Note): 同列数据后不同小写字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different small letters in the same column are significantly different at the 5% level among the treatments.

表 4　不同施氮量对夏玉米产量和氮素利用的影响

Table 4　Effects of different nitrogen application rates on yield and nitrogen use efficiency of summer maize

处理 Treatment	籽粒产量 Grain yield ($\times10^3$ kg/hm²)	籽粒吸氮量 Grain N uptake (kg/hm²)	氮收获指数 NHI (%)	氮肥农学效率 NAE (kg/kg)	氮肥生理利用率 NPUE (kg/kg)	氮肥利用率 NFUE (%)	氮素利用率 NUE (%)	土壤氮依存率 SNDR (%)
N0	11.6 c	172.0 d	68.7 a					
N80	12.0 ab	186.2 c	67.2 b	4.6 a	13.9 a	33.3 a	58.2 a	90.4 a
N160	12.2 ab	191.2 b	65.8 c	3.6 ab	14.2 a	25.1 b	52.3 b	86.2 b
N240	12.3 a	193.9 a	63.0 d	2.7 b	11.2 b	23.9 b	48.4 c	81.4 d
N320	11.9 bc	186.4 c	62.7 d	0.8 c	5.3 c	14.7 c	41.6 d	84.2 c

注(Note): NHI—Nitrogen harvest index; NAE—Nitrogen fertilizer agronomic efficiency; NPUE—Nitrogen fertilizer physiological use efficiency; NFUE—Nitrogen fertilizer use efficiency; NUE—Nitrogen use efficiency; SNDR—Soil nitrogen dependent rate. 同列数据后不同小写字母表示处理间差异达5%显著水平 Values followed by different small letters in the same column are significantly different at the 5% level among the treatments.

量差异不明显。

施氮处理夏玉米籽粒吸氮量显著高于不施氮处理,且随施氮量的增加而增加; 但当施氮量超过 240 kg/hm² 时,籽粒吸氮量不再显著增加,而是显著降低(表 4)。氮收获指数(NHI)能反映出氮素向籽粒转移的效率。由表 4 还可以看出,不同施氮处理的氮收获指数介于 62.7%～68.7% 之间,且随着施氮量的增加而降低。

氮肥农学效率(NAE)可以用来评价氮肥的增产效果,氮肥生理利用率(NPE)指因施氮增加的吸氮量转化为产量或干物质的效率,氮肥利用率(NFUE)表述对氮肥的利用情况,氮素利用率(NUE)反映对土壤残留氮和氮肥的利用情况。从表 4 还可以看出,施氮量 N 80 kg/hm² 时,氮肥农学效率、氮肥生理利用率、氮肥利用率和氮素利用率均最高,分别为 4.6 kg/kg、13.9 kg/kg、33.3% 和 58.2%; 随施氮量的增加,氮肥农学效率、氮肥生理利用率、氮肥利用率和氮素利用率降低。说明在高残留氮土壤上增施氮肥会降低氮肥的增产作用和利用率。

土壤氮依存率(SNDR)是指土壤氮对作物氮营养的贡献率。表 4 显示,各施氮处理土壤氮依存率较高,介于 81.4%～90.4%,这与土壤起始无机氮水平较高有关。

2.4　夏玉米的经济效益分析

采用二次多项式 $Y = a + bX + cX^2$,模拟"籽粒产量"与"土壤残留氮 + 施入氮"的关系(图 1A),籽粒产量 Y 最大时施氮量 $X = -b/2c$。经拟合,得

方程 $Y = 5.99763 + 0.02143X - 0.0000184152X^2$。计算可知,最大籽粒产量时"土壤残留氮+施入氮"为 582 kg/hm^2,去除土壤残留氮,需要施氮量为 186 kg/hm^2。综合考虑产量利润和氮肥施用成本,模拟"毛利润-氮肥价格"与"土壤残留氮+施入氮"的关系(图1B),得方程 $Y = 1.31395 + 0.00383X - 0.00000359842X^2$,最大经济效益时"土壤残留氮+施入氮"为 532 kg/hm^2,施入氮 136 kg/hm^2。

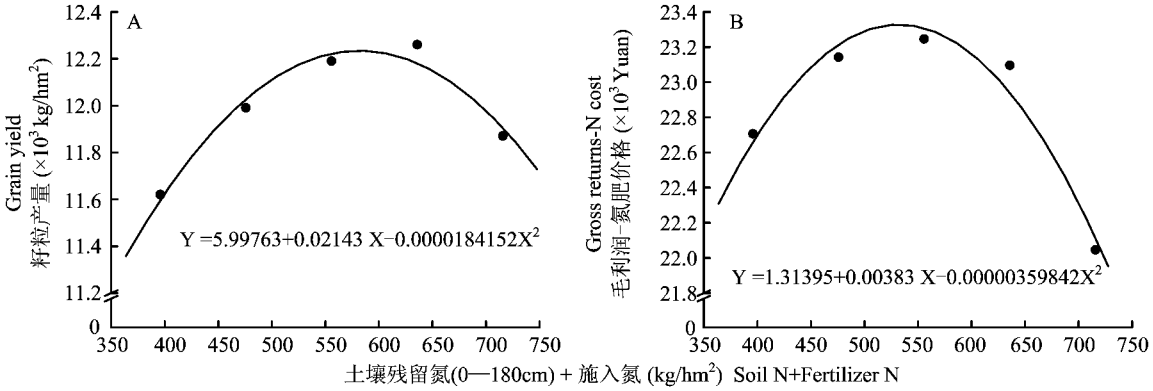

图1 "土壤残留氮+施入氮"与籽粒产量(A)和经济效益(B)的模型拟合

Fig. 1 The models describing relationships between soil N + fertilizer N, and grain yield (A) and economic benefit (B)

[注(Note):玉米市场价按 1954.05 Yuan/吨,尿素按 1.65 Yuan/kg 计
The prices of maize and urea are 1954.05 Yuan/t and 1.65 Yuan/kg, respectively.]

3 讨论与结论

植物通过吸收土壤中氮素来满足其生长发育的需要,其中包括土壤氮及肥料氮,巨晓棠等[15]认为,氮素残留是对土壤氮库的一种补偿,是肥料氮与土壤氮的交换作用,但土壤中残留过多的氮素,尤其是硝态氮不仅会造成氮素资源的浪费,还会对环境造成某种程度的威胁。欧美许多国家对土壤中残留氮的含量有十分严格的规定,一般要求 0—90 cm 土体中残留硝态氮低于 45 kg/hm^2 或无机氮不高于 50 kg/hm^2[16]。本试验中,夏玉米播种前 0—180 cm 土体硝态氮积累量为 396 kg/hm^2,达到极高水平。因此,土壤高残留氮是本试验夏玉米氮肥研究中不可忽视的一个重要因素。

硝态氮是氮素在土壤中存在和作物吸收利用的主要形式[7]。高亚军等[17]研究认为,施氮是造成土壤中硝态氮积累的主要原因。大量研究表明,硝态氮积累量随施氮量的增加而增加[13,18]。从本试验中可以看出,受播前土壤残留硝态氮的影响,即使不施氮处理夏玉米收获后土壤中硝态氮积累量仍保持较高水平(346 kg/hm^2)。随施氮量增加,土壤硝态氮积累量增多,0—180 cm 土层土壤硝态氮积累量与施氮量呈极显著线性关系($R^2 = 0.994^{**}$)。因此,本试验条件下,播前土壤残留氮和施氮是造成土壤硝态氮积累的两个重要因素。

玉米收获后氮平衡计算结果表明,随着施氮量的增加,氮素的表观损失量增加[13,19]。本试验中,夏玉米生育期土壤氮素的矿化量加上播前无机氮量,土壤自身供氮量达到628 kg/hm^2,远高于当季夏玉米的吸氮量,这可能是各施氮处理土壤残留无机氮和表观损失量增加的一个原因。施用氮肥能促进植株对氮素的吸收[20]。杨荣等[18]研究表明,随施氮量增加,玉米总吸氮量增加。本试验条件下,施氮量小于 240 kg/hm^2 时,作物和籽粒吸氮量随施氮量增加而增加,当施氮量超过 240 kg/hm^2 时,作物和籽粒吸氮量均有降低趋势,可能是由于部分硝态氮淋溶出玉米根系吸收范围而无法被作物吸收,导致吸氮量降低。

梁冬丽等[21]研究认为,玉米吸收利用土壤氮素的比例高于对肥料氮的吸收利用,这与本研究的结果是一致的。因此,合理的氮肥配置除了考虑施氮的增产效应外还必须将土壤残留氮考虑在内。过量施氮导致玉米叶片早衰及光合能力下降,最终可能影响到正在发育籽粒的碳、氮代谢,不利于产量形成和氮肥利用率的提高[22]。本试验中,土壤自身供氮水平较高,施氮能显著提高玉米的产量,但施氮量在 80～240 kg/hm^2 时,增施的氮肥对产量没有明显的增产作用,施氮量超过 240 kg/hm^2 时产量反而下

降。本研究中,氮收获指数、氮肥农学效率、氮肥生理利用率、氮肥利用率、氮素利用率均以 80 kg/hm^2 施氮处理最高,且随施氮量增加呈降低的趋势。因此在本试验的高残留氮土壤条件下,综合考虑产量、氮素利用和环境效应,合理的施氮量为 N 80 kg/hm^2。由于本研究仅为一年的试验结果,对土壤高残留氮条件下氮肥的合理施用量及氮素吸收利用等尚需进一步验证。

从另一角度出发,中国人多地少,粮食生产压力大,只能追求在保持较高产量水平下的合理的氮肥利用率,而不应该一味追求高的氮肥利用率而降低产量[15]。此外,一味地强调过低的氮肥投入,还将导致土壤无法满足作物正常生长的氮素需求而不利于作物产量的稳定[18]。因而在本试验的高残留氮土壤条件下,综合考虑玉米产量利润和氮肥成本,夏玉米获得最大产量和最大经济效益时的施氮量分别为 186 kg/hm^2 和 136 kg/hm^2。

参 考 文 献:

[1] 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): 3041-3046.

[2] Fang Q X, Yu Q, Wang E L *et al*. Soil nitrate accumulation, leaching and crop nitrogen use as influenced by fertilization and irrigation in an intensive wheat-maize double cropping system in the North China Plain[J]. Plant Soil, 2006, 284(1-2): 335-350.

[3] Sexton B T, Moncrief J F, Rosen C J *et al*. Optimizing nitrogen and irrigation inputs for corn based on nitrate leaching and yield on a coarse-textured soil[J]. J. Environ. Qual., 1996, 25(5): 982-992.

[4] Zhao R F, Chen X P, Zhang F S *et al*. Fertilization and nitrogen balance in a wheat-maize rotation system in North China[J]. Agron. J., 2006, 98(4): 938-945.

[5] 巨晓棠, 刘学军, 张福锁. 冬小麦/夏玉米轮作中 NO_3^--N 在土壤剖面的累积及移动[J]. 土壤学报, 2003, 40(4): 538-546.
Ju X T, Liu X J, Zhang F S. Accumulation and movement of NO_3^--N in soil profile in winter wheat-summer maize rotation system[J]. Acta Pedol. Sin., 2003, 40(4): 538-546.

[6] 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.

[7] 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. Agroecosys., 2002, 63(2-3): 117-127.

[8] 朱兆良. 中国土壤肥力[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998.
Zhu Z L. Soil fertility of China[M]. Beijing: China Agricultural Press, 1998.

[9] 巨晓棠, 张福锁. 中国北方土壤硝态氮的累积及其对环境的影响[J]. 生态环境, 2003, 12(1): 24-28.
Ju X T, Zhang F S. Nitrate accumulation and its implication to environment in north China[J]. Ecol. Environ., 2003, 12(1): 24-28.

[10] Ardell D H, Frank C S, Michael E B, Curtis A R. Corn response to nitrogen fertilization in a soil with high residual nitrogen[J]. Agron. J., 2005, 97(4): 1222-1229.

[11] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2000.

[12] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
Lu R K. Soil and agricultural chemistry analysis methods[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.

[13] 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[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(6): 1358-1365.
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[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2010, 16(6): 1358-1365.

[14] 刘学军, 赵紫娟, 巨晓棠, 张福锁. 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 X J, Zhao Z J, Ju X T, Zhang F S. Effect of N application as basal fertilizer on grain yield of winter wheat, fertilizer N recovery and N balance[J]. Acta Ecol. Sin., 2002, 22(7): 1122-1128.

[15] 巨晓棠, 张福锁. 关于氮肥利用率的思考[J]. 生态环境, 2003, 12(2): 192-197.
Ju X T, Zhang F S. Thinking about nitrogen recovery rate[J]. Ecol. Environ., 2003, 12(2): 192-197.

[16] Raun W R, Johnson G V, Westerman R L. Fertilizer nitrogen recovery in long-term continuous winter wheat[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1999, 63(3): 645-650.

[17] 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[J]. 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[J]. J. Soil Water Conserv., 2005, 19(6): 61-64.

[18] 杨荣, 苏永中. 水氮配合对绿洲沙地农田玉米产量、土壤硝态氮和氮平衡的影响[J]. 生态学报, 2009, 29(3): 1459-1469.
Yang R, Su Y Z. Effects of nitrogen fertilization and irrigation rate on grain yield, nitrate accumulation and nitrogen balance on sandy farmland in the marginal oasis in the middle of Heihe River

basin[J]. Acta Ecol. Sin., 2009, 29(3): 1459-1469.

[19] 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[J]. 土壤肥料, 2006, (2): 30-33.
Zhao Y, Tong Y A, Zhao H B. Effect of diferent N rates on yield of summer maize, fertilizer N recovery and N balance[J]. Soil Fert., 2006, (2): 30-33.

[20] 赵俊晔, 于振文. 不同土壤肥力条件下施氮量对小麦氮肥利用和土壤硝态氮含量的影响[J]. 生态学报, 2006, 26(3): 815-822.
Zhao J Y, Yu Z W. Effects of nitrogen rate on nitrogen fertilizer use of winter wheat and content of soil nitrate-N under different fertility condition[J]. Acta Ecol. Sin., 2006, 26(3): 815-822.

[21] 梁东丽, 同延安, Ove E, 等. 黄土性土壤剖面中 N_2O 排放的研究初报[J]. 土壤学报, 2002, 39(6): 802-809.
Liang D L, Tong Y A, Ove E *et al*. In-situ measurement of N_2O emissions from profile of loess soil[J]. Acta Pedol. Sin., 2002, 39(6): 802-809.

[22] Osaki M, Iyoda M, Tadano T. Ontogenetic changes in the contents of ribulose-1, 5-bisphosphate carboxylase/oxygenase, phosphoenolpyruvate carboxylase, and chlorophy Ⅱ in individual leaves of maize[J]. Soil Sci. Plant Nutr., 1995, 41(2): 285-293.