植物营养与肥料学报 2010,16(5):1144-1152
Plant Nutrition and Fertilizer Science

东北春玉米连作体系中土壤氮矿化、残留特征及氮素平衡

蔡红光[1,2], 米国华[1], 陈范骏[1], 张秀芝[3], 高 强[2*]
(1 中国农业大学植物营养系,农业部植物营养学重点实验室,教育部植物-土壤相互作用重点实验室,北京 100193;
2 吉林农业大学资源与环境学院,吉林长春 130118; 3 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所,北京 100081)

摘要: 通过2年田间试验,在2种肥力、3种氮肥施用水平(不施氮 N0,中量施氮 N1,高量施氮 N2)下,研究了吉林省春玉米连作体系中土壤氮素的矿化、残留特征及氮素平衡,并比较了种植不同玉米品种的效应。结果表明,德惠高肥力土壤中氮素两季总矿化量为203 kg/hm^2,是新立城低肥力土壤的2.7倍。中量氮(N1)处理,2试验点2年土壤累计的氮素残留量为103～112 kg/hm^2,对环境威胁较小;高量氮(N2)处理,新立城低肥力条件下土壤的氮素残留量为174 kg/hm^2,且有下移趋势,而在德惠高肥力条件下,土壤的氮素残留量仅为107 kg/hm^2。在新立城低肥力土壤上,施氮量在氮素输入项中起主要作用,在氮素输出项中,作物携出量并不随输入量的增加而有显著的变化,从而导致氮素盈余随着施氮量的增加而显著增加。氮盈余主要以残留 Nmin 积累在土壤剖面中,变幅为34.0%～88.4%。在德惠高肥力土壤上,土壤矿化氮在2个施氮处理中分别占氮素输入的28.3%和36.5%,在氮素输出中,氮肥表观损失量显著高于新立城,且氮盈余中以表观损失为主,变幅为54.3%～70.8%,平均为65.5%。两个试验点的氮素表观损失可能主要是由生物固持作用引起的肥料氮向土壤氮的转换。不同玉米品种对氮素矿化和表观利用率有一定的影响,在优化施肥中应加以考虑。

关键词: 春玉米; 连作; 氮素矿化; 氮肥残留; 氮平衡
中图分类号: S513; S158.3　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1008-505X(2010)05-1144-09

Characteristics of nitrogen mineralization and residual in the soil and nitrogen balance in the continuous spring maize cultivation system in Northeast China

CAI Hong-guang[1,2], MI Guo-hua[1], CHEN Fan-jun[1], ZHANG Xiu-zhi[3], GAO Qiang[2*]
(*1 Department of Plant Nutrition, China Agricultural University/Key Lab of Plant Nutrition, MOA/ Key Laboratory of Plant-Soil Interactions, MOE, Beijing 100193, China;*
2 College of Resources and Environmental Sciences, Jilin Agricultural University, Changchun, Jilin 130118, China;
3 Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: A two-year field experiment was conducted to understand the characters of nitrogen(N) mineralization, residue in the soil and N balance in the continuous spring maize cultivation system in northeast China at two locations with three N fertilization levels N0: no N; N1: moderate N; N2: high N. The effect of different maize hybrids on N mineralization and N loss was also evaluated. The results indicated that accumulated mineralized N during the two years was 203 kg/ha in the fertile soil at Dehui, which was as twice as in the infertile soil at Xinlicheng. The residual N across the two sites was 103-112 kg/ha with N1 treatment within two years, which should be safe for the environment. Under the N2 treatment, however, the residual N at Xinlicheng was 174 kg/ha and it had a risk to be leached out. The residual N was only 107 kg/ha in the fertile soil at Dehui. Crop N uptake did not increase with increasing N input, leading to high N surplus at N2 level. At Xinlicheng, The contribution of residual Nmin was

收稿日期: 2009-10-14　　**接受日期**: 2010-03-30
基金项目: 农业部公益性行业科研专项(200803030); 农业部科技支撑计划(2008BADA4B02)项目; 农业部"948"项目(2003Z53)资助
作者简介: 蔡红光(1981—),男,吉林舒兰市人,博士研究生,主要从事植物营养高效生理与遗传研究。
Tel: 010-62733374, E-mail: caihongguang1981@163.com。　　* 通讯作者 E-mail: gyt199962@163.com

34.0%-88.4% to N surplus in the soil. At Dehui, the proportion of N mineralization was 28.3% and 36.5% for N1 and N2, respectively. The apparent N loss in Dehui was 54.3%-70.8% with an average of 65.5%, much higher than that in Xinlicheng. It was supposed that the apparent N loss at both sites reflected the transfer of fertilizer N to soil N by the way of biological immobilization. Maize cultivars had an effect on N mineralization and apparent recovery, and therefore, should be taken into consideration to optimize N application.

Key words: spring maize; continuous cropping; N mineralization; N residual; N balance

增施氮肥是提高粮食单产最有效的方法之一。目前农民为提高作物产量,往往向农田中投入过量氮肥。研究表明,目前我国水稻、小麦和玉米等主要粮食作物的氮肥利用率不足30%[1],这意味着氮肥对生态环境造成的污染和潜在污染非常严重[2]。我国因不同作物种植体系及当地土壤环境的差异,其氮素损失途径及对环境造成的威胁也有所不同。在太湖地区的稻麦轮作系统中,降水—径流过程引起的氮肥从轮作系统中大量流失,造成作物对上季残留氮的利用率很低,同时也是该地区水体富营养化的主要因素之一[3]。而在华北地区和西北地区的小麦-玉米轮作系统中,施入的氮素主要以硝态氮的形式残留于土壤剖面,这些硝态氮如不被作物及时吸收,则会随灌水或降雨,通过重力和扩散作用进入地下水[3-6]。同时,由于当地气候等因素的影响,氨挥发、硝化、反硝化作用也是氮素损失的主要途径[3,7-8]。

东北春玉米连作体系以松辽平原玉米带为核心,属季风区温带半湿润地区。该区主要土壤类型为黑土,具有有机质含量高、腐殖质层深厚、养分丰富、团粒发达、保水保肥能力及抗逆性强等优越的肥力特点[9]。目前,有关该地区玉米连作体系中氮素施入土壤后的去向及对环境的影响报道相对较少。基于此,为了了解东北地区春玉米连作体系中氮素的吸收、残留、矿化及损失特征,本研究设计了不同土壤肥力,不同氮肥施用水平及不同品种的2年定点试验,以期从氮素表观平衡的角度来揭示该地区春玉米连作体系中氮素在土壤中的矿化、残留及损失特征;并在此基础上定量评价东北春玉米连作体系中氮肥的农学和环境效应。

1　材料与方法

1.1　试验地概况

田间试验于2004年4月至2005年10月在吉林省中部的德惠市布海镇和长春市新立城镇(以下简称德惠和新立城)进行。该地区为松嫩平原黑土带中部,玉米连作区。年均降水量为520.1mm,无霜期平均为114 d,年均积温为2916.2℃。试验田均为玉米连作区,土壤主要性状为:新立城的黑土土层较薄,pH偏酸性,土壤全氮、速效磷、速效钾含量较低,属于低肥力土壤;德惠的黑土土层较厚,pH偏中性,土壤全氮、速效磷、速效钾含量较高,属于高肥力土壤(表1)。2004、2005年玉米生育期内总降水量新立城分别为410.1、642.5mm;德惠为337.4、554.4mm。

表1　供试土壤基本理化性状

Table 1　The major chemical characteristics of the experimental soil

地点 Sites	pH (1:2.5)	有机质 OM (g/kg)	全氮 Total N (g/kg)	速效磷 Olsen-P (mg/kg)	速效钾 NH_4COOH-K (mg/kg)	容重 Volume weight (g/m^3)
新立城 Xinlicheng (LF)	5.73	28.5	1.84	19.6	139.1	1.34
德惠 Dehui (HF)	7.44	34.0	2.62	41.3	172.9	1.25

注(Note): LF—低肥力 Low fertile soil; HF—高肥力 High fertile soil.

1.2　试验设计

试验为两因素设计,设3个玉米品种,每个品种3个施氮水平(表2),重复3次,随机区组排列。2年试验不更换各品种小区位置。小区面积新立城为60 m^2,德惠为80 m^2。各小区均施P_2O_5 69 kg/hm^2、K_2O 50 kg/hm^2。磷肥为过磷酸钙(含P_2O_5 12%)和磷酸二铵(18-46-0),钾肥为硫酸钾(含K_2O 50%),均一次性基施;氮肥为尿素(N46%),其中N 30 kg/hm^2基施,其余于拔节期开沟(6～9 cm)追施。4月下旬播种,10月上旬收获。

结合吴巍[10]等对玉米品种喜肥等级的划分及刘建安等[11]对玉米品种氮效率的划分方法,3个供

表2 各试验区施氮水平及代号

Table 2 Nitrogen fertilizer rate and their codes in the two-years experiment at two sites

地点 Sites	施氮水平 N rate(N kg/hm^2)					
	2004			2005		
	N0	N1	N2	N0	N1	N2
新立城 Xinlicheng	0	190	300	0	150	200
德惠 Dehui	0	190	300	0	100	150

试玉米品种中 SM25 属高度喜肥、氮低效,ND108 属低度喜肥、氮高效,JD180 属低度喜肥、氮中效。

1.3 测定项目与方法

产量采用常规方法测定。成熟期每小区取代表性植株5株,分为秸秆和子粒,分别称其鲜重,烘干,称干重,然后全部粉碎,用四分法取出分析样,采用凯氏定氮法测定秸秆及子粒中含氮量。分别于每年播种前和收获后在每小区取0—30、30—60、60—90 cm 的土壤(每小区取2钻,等层混合),放入冰盒,带回实验室过4 mm 筛,采用0.01 mol/L $CaCl_2$ 浸提,TRACCS2000 型连续流动分析仪测定,其他项目采用常规法测定。

1.4 计算方法[12-13]

生育期土壤氮素净矿化量=不施氮肥区作物吸氮量+不施氮肥区土壤残留 Nmin-不施氮肥区土壤起始 Nmin;

生育期土壤氮素表观损失=生育期施氮量+土壤起始 Nmin +土壤氮素净矿化量-作物携出-收获后土壤残留 Nmin;

氮肥表观利用率(%)=(施氮区作物吸氮量-不施氮肥区作物吸氮量)/施氮量×100;

氮肥表观残留率(%)=(施氮区土壤残留 Nmin-不施氮肥区土壤残留 Nmin)/施氮量×100;

氮肥表观损失率(%)= 100-氮肥表观利用率-氮肥表观残留率;

氮肥表观损失率计算值不同于利用^{15}N 实测的氮损失,实质上包括了所有的未知去向的肥料氮(包括土壤的生物固定、淋洗、氨挥发等)。

所有数据均采用 Excel 处理后,用 SAS 软件按双因素程序进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 土壤肥力和施氮水平对玉米产量和吸氮量的影响

在新立城低肥力条件下,施氮后增产效果明显(图1-A),但 N1 和 N2 处理间无显著差异。品种间以 SM25 对氮肥的响应最高。在 N0 水平下,2005 年 ND108 和 JD180 的产量和 2004 年大体相同;而 SM25 的产量和吸氮量比 2004 年显著降低,这可能是 SM25 对土壤中的氮素利用能力较弱,不耐低氮。在 N1 和 N2 水平下,ND108 的产量均低于其它品种的产量。这是由于 ND108 在东北地区生育期较长(约130 d),而 2005 年新立城霜期来临较早,影响子粒灌浆,造成产量下降。在德惠高肥力条件下,2004 年3个氮水平间品种产量和吸氮量差异均不显著,无法评价品种间对氮素吸收利用的差异(图1-B)。2005 年各品种的产量和吸氮量较 2004 年显著下降。在不施氮条件下,SM25、ND108 和 JD180 的产量分别下降了46%、42%和49%;在施氮量较 2004 年下调50%水平下,3个氮水平下的产量仍无差异,仅在 N0 水平下,ND108 的吸氮量显著高于 SM25 和 JD180。

2.2 土壤氮素矿化特征

因东北春玉米连作体系属一年一季种植方式,所以在两年的土壤氮素平衡中,可将土壤氮素的矿化分解为两个部分:一部分是 2004 年和 2005 年玉米生长季的土壤氮素矿化过程(图2);另一部分为 2004 年至 2005 年秋末春初冻融交替作用下的土壤氮素矿化过程(表3)。在新立城低肥力条件下(图2-A),玉米生长季的土壤有机氮矿化量较小,两年总矿化量变化为50～89 kg/hm^2,以 ND108 最高。SM25、ND108 和 JD180 在 2005 年的矿化量分别较 2004 年增加6、11 和26 kg/hm^2。德惠高肥力条件下土壤有机氮的矿化量要显著高于低肥力条件下的(图2-B),两季总矿化量为185～218 kg/hm^2,以 ND108 最高。2004 年玉米生长季土壤氮素矿化量平均为119 kg/hm^2,显著高于 2005 年。

在秋末春初冻融交替的作用下,新立城低肥力土壤的有机氮矿化较为强烈,2005 年播前的土壤无机氮显著高于 2004 年收获后的(表3)。3个氮水平下土壤无机氮含量增加40～63 kg/hm^2,平均增幅82.2%。将硝态氮与铵态氮分别计算,冻融交替作用后,3个氮水平下土壤中硝态氮分别增加3.3、0.8 和0.4 倍;铵态氮分别增加1.5、1.6 和1.7 倍。从中看出,德惠高肥力土壤中,即使不施氮肥,2004 年收获时土壤中的矿化氮也可维持较高含量,冬季的氮素矿化量很少(13 kg/hm^2),且主要是硝态氮;而施肥后,土壤净矿化氮为负值,这可能是由于土壤中的生物固持所造成的。

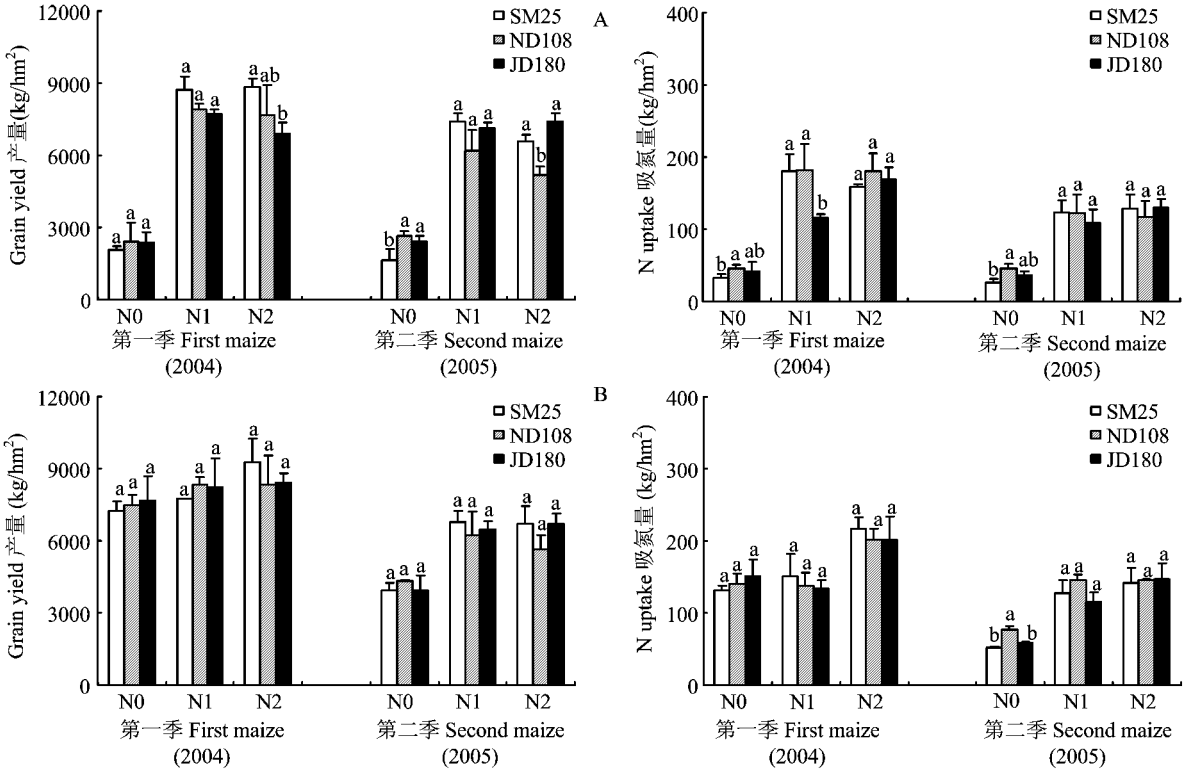

图 1　在 2 种土壤上不同氮肥施用水平下 3 个玉米品种的产量和吸氮量

Fig. 1　Grain yield and N uptake of three spring maize cultivars with three N levels at two locations

[注(Note):A—新立城 Xinglicheng, B—德惠 Dehui; 柱上不同字母表示差异达 5% 显著水平
Different letters above the bars mean significant at 5% level.]

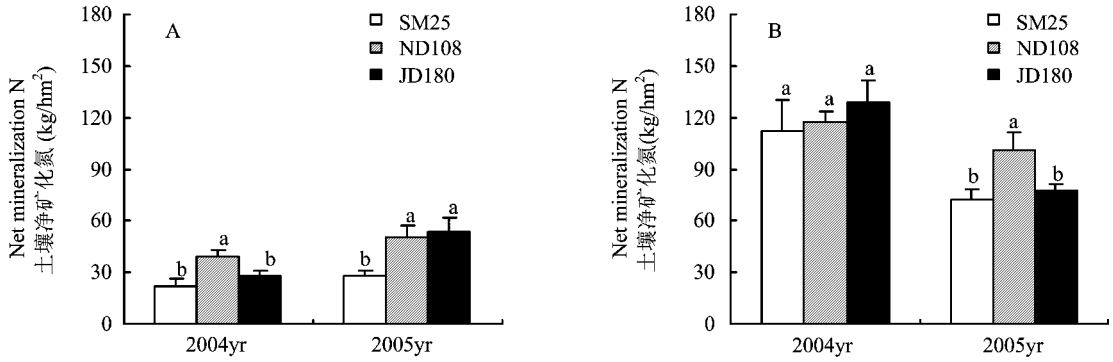

图 2　在两种土壤上种植 3 个玉米品种后土壤净矿化氮

Fig. 2　Net mineralization N in two-year's cultivation of three spring maize cultivars at two locations

[注(Note):A—新立城 Xinglicheng, B—德惠 Dehui; 柱上不同字母表示差异达 5% 显著水平
Different letters above the bars mean significant at 5% level.]

2.3　土壤氮素的残留

总体来讲,施氮显著增加了土壤中无机氮的残留量。在新立城低肥力条件下,0—90cm 土壤残留的无机氮量随施氮量的增加而显著增加(图 3-A)。2004 年 N1 和 N2 水平下土壤无机氮的残留量分别为 30～60 和 94～103 kg/hm²; 2005 年 N1 和 N2 水平下土壤无机氮的残留量分别为 78～125 和 153～189 kg/hm²。在德惠高肥力条件下,施氮处理间的差异不明显(图 3-B)。2004 年 N1 和 N2 水平下土壤无机氮的残留量分别为 116～143 和 110～175 kg/hm²; 2005 年 N1 和 N2 水平下土壤无机氮的残留量分别为 106～119 和 91～132 kg/hm²。这主要是由于德惠土壤自身的肥力掩盖了氮水平间的差异。

表3 越冬期间0—90 cm土层铵态氮和硝态氮累积量的变化(kg/hm²)

Table 3 Change of ammonium-N and nitrate-N accumulation in 0-90 cm soil during winter

地点 Sites	项目 Item	2004(收获后 After harvest)			2005(播种前 Before sowing)			净矿化量 Net mineralized N		
		N0	N1	N2	N0	N1	N2	N0	N1	N2
新立城	NO_3^--N	4.1	25.6	78.7	17.6	45.0	107.6	13.5	19.4	28.9
Xinlicheng	NH_4^+-N	17.4	15.9	19.7	44.0	42.2	53.8	26.6	26.3	34.1
	Total-N	21.5	41.5	98.4	61.6	87.2	161.4	40.1	45.7	63.0
德惠	NO_3^--N	23.0	115.7	112.0	36.0	99.1	101.3	13.0	-16.6	-10.7
Dehui	NH_4^+-N	18.4	18.0	20.7	18.5	25.3	21.0	0.1	7.3	0.3
	Total-N	41.4	133.7	132.7	54.5	124.4	122.3	13.1	-9.3	-10.4

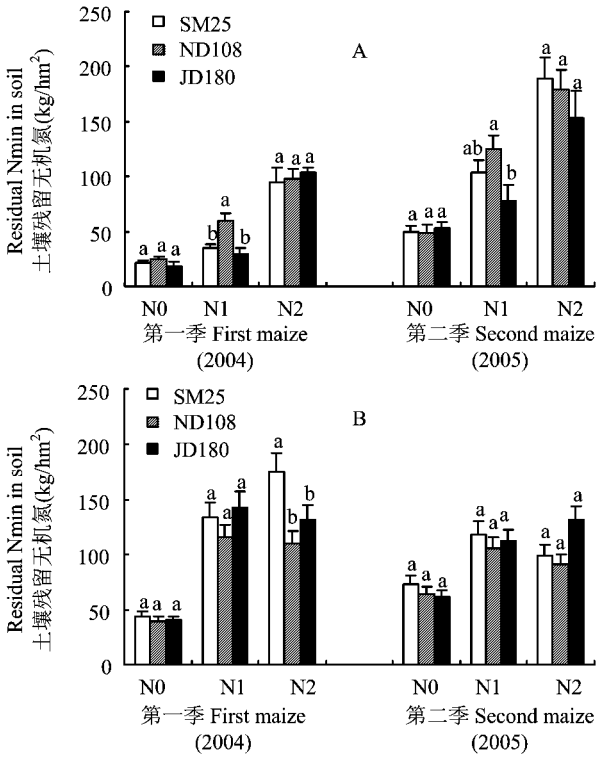

图3 在两种土壤上种植3个玉米品种两季连作下土壤残留无机氮

Fig. 3 Residual Nmin in two continuous cultivation of three spring maize cultivars at two locations

[注(Note): A—新立城 Xinglicheng, B—德惠 Dehui; 柱上不同字母表示差异达5%显著水平 Different letters above the bars mean significant at 5% level.]

两种土壤肥力间比较,2004年,德惠高肥力土壤无机氮残留量显著高于新立城低肥力土壤;但2005年,新立城低肥力条件下的2个施氮处理土壤无机氮残留量则超过了德惠高肥力土壤。这是由于新立城试验区在2005年施氮量较德惠高出50 kg/hm²;而且新立城试验区土壤属薄层黑土,固氮能力差,施入土壤中的肥料氮不能有效地转化,随着年限的增加,其累积量逐渐加大。品种间比较可以看出,在新立城N1水平下,种植不同品种玉米对土壤的残留无机氮有一定的影响。ND108处理下土壤的残留无机氮量最高,2004年和2005年土壤残留的无机氮量分别为60和125 kg/hm²;但在N2水平下,品种间无明显差异。在德惠高肥力条件下,3个品种的土壤残留的无机氮均无显著差异。

2.4 玉米连作体系中的氮素平衡

从新立城两季玉米总的氮素平衡结果(表4)可以看出,在氮素的总输入项中,施氮量起着主要的作用,2个施氮处理中,播前Nmin和矿化氮仅占总输入项的23.6%和17.4%。在氮素的输出项中,植株携出量并不随输入量的增加而增加,土壤中残留Nmin和表观损失量均随氮素总输入量的增加而显著增加,导致氮盈余增加;在两季玉米连作总的氮盈余中,残留Nmin和氮素表观损失的比例分别为53.4%和46.6%。分析各个生长季的氮素平衡情况可以看出,2005年氮盈余量较2004年增加了41.2%~70.0%,这主要是由于2005年降水量较大,其中6月中下旬的降水量比2004年同期增加了约1.7倍,追肥施入的氮素向土壤深层移动,使土壤残留Nmin增加,同时也降低了植物对氮素的吸收,从而导致氮盈余的增加。两季中高量施氮(N2)处理较中量施氮(N1)处理下的氮素残留和损失分别增加了68.9%和110.8%。

表4还看出,德惠试验的氮素平衡与新立城有所不同,由于土壤肥力较高,其两生长季土壤氮素净矿化量达203 kg/hm²,占到总输入项的28.3%~36.5%,与不施氮时作物的携出量大体相当。土壤残留氮在2个施氮处理间无差异,N2处理下的氮盈余较N1处理的仅增加了27.6%,增加的部分主要来自氮素的表观损失。2005年2个施氮水平下氮输

表 4　两种肥力条件下春玉米连作体系中的氮素平衡

Table 4　Nitrogen balance of spring maize under three N inputs at two sites

项目 Item		新立城 Xinlicheng			德惠 Dehui		
		N0	N1	N2	N0	N1	N2
第一季春玉米 Spring maize in the first year (2004)							
氮输入 N input	1 施氮量 Nitrogen fertilizer rate	0	190	300	0	190	300
	2 播前 Nmin Nmin before sowing	31	31	31	63	63	63
	3 矿化氮 Net mineralization N	30	30	30	119	119	119
	总输入 Total input (1+2+3)	61	251	361	182	372	482
氮输出 N output	4 作物吸收 Crop uptake	39	159	169	141	141	206
	5 残留 Nmin Residual Nmin	22	41	98	41	131	139
	6 表观损失 Apparent losses N	0	50	93	0	100	137
	氮盈余 Nitrogen surplus (5+6)	22	92	192	41	231	276
第二季春玉米 Spring maize in the second year (2005)							
氮输入 N input	1 施氮量 Nitrogen fertilizer rate	0	150	200	0	100	150
	2 播前 Nmin Nmin before sowing	43	73	152	45	111	123
	3 矿化氮 Net mineralization N	44	44	44	84	84	84
	总输入 Total input (1+2+3)	87	267	396	129	294	356
氮输出 N output	4 作物吸收 Crop uptake	36	118	125	62	129	144
	5 残留 Nmin Residual Nmin	50	103	174	66	112	107
	6 表观损失 Apparent losses N	0	46	98	0	53	105
	氮盈余 Nitrogen surplus (5+6)	50	149	271	66	165	212
两季春玉米 Across the two years (2004~2005)							
氮输入 N input	1 施氮量 Nitrogen fertilizer rate	0	340	500	0	290	450
	2 播前 Nmin Nmin before sowing	31	31	31	63	63	63
	3 矿化氮 Net mineralization N	74	74	74	203	203	203
	总输入 Total input (1+2+3)	105	445	605	266	556	716
氮输出 N output	4 作物吸收 Crop uptake	76	278	294	203	270	351
	5 残留 Nmin Residual Nmin	50	103	174	66	112	107
	6 表观损失 Apparent losses N	-21	65	137	-4	174	258
	氮盈余 Nitrogen surplus (5+6)	29	168	311	63	286	365

出项中的各项均较 2004 年有所下降,下降幅度为 8.3%～47.1%。其主要原因是 N1 和 N2 处理分别较上一季减少了氮肥用量 90 和 150 kg/hm^2。

2.5　氮肥的表观利用率、表观残留率和表观损失率

表 5 看出,新立城低肥力条件下,2 年的连作体系中,植株氮肥表观利用率为 41.2%～72.3%,平均 51.5%,且均随施氮量的增加而降低;而表观残留率和表观损失率则随施氮量的增加而增加(JD180 除外)。3 个品种中以 SM25 表观利用率最高,在 N1 和 N2 水平下的氮肥表观利用率分别达 72.3% 和 45.6%;以 JD180 的氮肥表观损失率最高,2 个施氮水平下,分别为 49.3% 和 35.8%。

德惠由于土壤肥力较高,所以氮肥的表观利用率最高为 39.0%,最低仅为 13.3%,明显低于低肥力土壤条件下的氮肥表观利用率。同时氮肥表观损

表5 两种肥力条件下氮肥表观利用、残留和损失率

Table 5 The percentage of apparent N recovery by crop, apparent N residual in the soil, and apparent N loss after cultivation of three cultivars under two N application rates

地点 Sites	处理 Treatment	品种 Cultivar	氮肥表观利用率(%) Apparent N recovery	氮肥表观残留率(%) Apparent N residual	氮肥表观损失率(%) Apparent N loss
新立城 Xinlicheng	N1	SM25	72.3	15.9	11.8
		ND108	62.4	22.7	14.9
		JD180	43.2	7.5	49.3
		平均 Avg.	59.3	15.4	25.3
	N2	SM25	45.6	27.8	26.7
		ND108	41.2	26.2	32.6
		JD180	44.2	20.0	35.8
		平均 Avg.	43.6	24.7	31.7
德惠 Dehui	N1	SM25	33.0	15.4	51.6
		ND108	22.9	14.4	62.7
		JD180	13.3	17.5	69.2
		平均 Avg.	23.1	15.8	61.2
	N1	SM25	39.0	5.7	55.3
		ND108	28.6	6.0	65.4
		JD180	30.7	15.6	53.7
		平均 Avg.	32.8	9.1	58.2

失率大幅增加,3个品种的氮肥表观损失率均超过50%,2年累计的表观损失量平均为215.7 kg/hm^2,平均约为新立城表观损失量的2.1倍。

3 讨论

土壤中氮素的矿化既与原有有机态氮含量有关,又与土壤自身的理化性质、温度、含水量、肥料及种植的作物品种有关[14]。本研究中的土壤氮净矿化量是以不施氮时植物吸收的氮量作为土壤氮素的矿化量,属于表观矿化量。研究表明,土壤氮矿化量受自身肥力水平影响较大。德惠高肥力条件下,2年总计土壤氮净矿化量是新立城低肥力条件下的2.7倍;玉米生长季平均氮矿化量(101 kg/hm^2)略高于华北地区(80 kg/hm^2)和西北半干旱地区(84 kg/hm^2)玉米生长季的氮矿化量[4-5]。同时,矿化氮中的铵态氮亦占到一定比例,尤其在不施用氮肥处理下,新立城铵态氮的比例超过50%,施入氮肥后,铵态氮的比例也可达到20%左右。这与华北土壤中以硝态氮为主的情况有所不同[15]。所以在考虑土壤中无机氮的矿化及其变异时,需要根据不同的土壤类型、肥力及施氮水平来综合考虑。

残留在土壤中的氮素是氮肥进入农田的主要损失途径之一,如果将残留的硝态氮控制在一定的范围内,则可兼顾产量与环境[4, 16]。钟茜等[4]认为,在华北地区将土壤残留的氮限定在150 kg/hm^{2}左右较好。本研究中,德惠和新立城2年定点试验后残留的土壤Nmin范围分别在91～132和78～189 kg/hm^2,约占总输入项的19.7%和20.5%。相比而言,施氮后德惠高肥力土壤无机氮残留变异较小,从我国目前的产量与环境兼顾的角度来看是相对安全的[4];但新立城低肥力土壤则变异很大,其残留无机氮的增加主要来自施氮量的增加,高量施氮(N2)处理较中量施氮(N1)处理下增加了42.9%～95.7%,平均达73.3%。这部分增加的氮素如不能有效地利用将会对环境造成潜在的威胁。

氮肥进入土壤后的表观损失包括氨挥发、硝化-反硝化、淋洗及土壤的生物固持等。乔云发等[17]对东北黑土农田氨挥发的计算结果表明,在施肥深度为6～9cm时尿素的氨挥发量为2.5%～4.0%。根据巨晓棠等[12]对华北夏玉米季旱地土壤2年的田间原位测定结果看出,反硝化总损失量仅有1～14 kg/hm^2,相当于当季施氮量的1%～5%。从新立城和德惠2年定点试验土壤0—90 cm土层硝态氮的变化情况来看,新立城60—90 cm土壤残留的硝态氮略有增加(20.2～31.8 kg/hm^2),且这种趋势是来自冻融交替作用的结果;而德惠则无差异。

高强等[18]在黑土长期定位试验的结果表明,NPK 处理下 100—200 cm 土壤剖面中硝态氮呈下降趋势。根据两季玉米连作体系的氮素平衡结果(表 4)可以看出,连作体系中氮素表观损失的数量与土壤氮素净矿化量较为接近。而东北地区耕层土壤有机质及全氮在长期玉米连作体系下均无明显变化[19-20],且 NPK 肥的施用明显地促进了黑土的矿化作用[21]。巨晓棠等[22]研究认为,土壤有机质对肥料氮的固定最高可达 44.6%。由此推断,东北春玉米连作体系的氮素平衡中,氮素表观损失可能主要是由生物固持作用引起的肥料氮向土壤氮的转换[23]。

在两季玉米连作体系氮素平衡的各项指标中,同一氮处理下的变异幅度最高达 80.2%,其主要原因是不同品种对氮素吸收和利用上的差异造成土壤的矿化及残留有所异同(图 2、图 3),从而影响整个体系的氮素平衡[24]。由于东北土壤常年采用垄沟式的种植方式,使得耕层土壤厚度仅为 10—20 cm,且下层土壤较硬,玉米根系下扎困难[9]。本试验中 3 个品种对土壤硝态氮的利用差异主要集中在 0—30 cm,而对于土壤深层则无显著差异。在新立城和德惠,2 个施氮水平下,种植 SM25 时氮肥表观利用率最高,且土壤矿化氮较低,使得氮盈余明显降低,从而降低了氮素向环境输出的风险。在德惠高肥力条件下,种植 ND108 后土壤净矿化氮达 218 kg/hm^2,可能与其根系较大[25],根茬残留量多,促进了土壤微生物活动有关。所以针对不同氮效率品种而制定施肥策略,可以在一定程度上减少作物-土壤系统中氮素的损失。

参 考 文 献:

[1] 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 Pedol. Sin., 2008, 45(5): 915-924.

[2] 张玲敏,马文奇,刘克桐. 河北省小麦玉米施肥状况的评价[J]. 中国农业科技导报,2003,(增刊): 115-120.
Zhang L M, Ma W Q, Liu K T. Evaluation of the current status of fertilizer application in Hebei province[J]. J. Agric. Sci. Tech., 2003,(Suppl): 115-120.

[3] 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.

[4] 钟茜,巨晓棠,张福锁. 华北平原小麦/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.

[5] 王西娜,王朝辉,李生秀. 黄土高原旱地冬小麦/夏玉米轮作体系土壤的氮素平衡[J]. 植物营养与肥料学报,2006,12(6): 759-764.
Wang X N, Wang Z H, Li S X. Soil nitrogen balance in winter wheat and summer maize rotation system on dryland of loess plateau[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2006, 12(6): 759-764.

[6] Zhang W L, Tian Z X, Zhang N, Li X Q. Nitrate pollution of groundwater in northern China[J]. Agric. Ecosys. Environ., 1996, 59(3): 223-231.

[7] Mosier A R, Zhu Z. Changes in patterns of fertilizer nitrogen use in Asia and its consequences for N_2O emissions from agricultural systems[J]. Nutr. Cycl. Agroecosyst., 2000, 57(1): 107-117.

[8] Li Y, Lin E. Emissions of N_2O, NH_3 and NO_x from fuel combustion, industrial processes and the agricultural sectors in China[J]. Nutr. Cycl. Agroecosyst., 2000, 57(1): 99-106.

[9] 赵兰坡,张志丹,王鸿斌,等. 松辽平原玉米带黑土肥力演化特点及培育技术[J]. 吉林农业大学学报,2008,30(4): 511-516.
Zhao L P, Zhang Z D, Wang H B *et al*. Fertility evolution characteristics and fertilizing technologies of black soil in the corn belt of the Songliao Plain[J]. J. Jilin Agric. Univ., 2008, 30(4): 511-516.

[10] 吴巍,王秀芳,张宽,等. 突破传统研究模式实现高效农业研究新途径[J]. 中国农业科技导报,2001,3(4): 38-42.
Wu W, Wang X F, Zhang K *et al*. A new approach for high-efficiency agricultural research that break through the traditional models[J]. Rev. China Agric. Sci. Tech., 2001, 3(4): 38-42.

[11] 刘建安,米国华,张福锁. 不同基因型玉米氮效率差异的比较研究[J]. 农业生物技术导报,1999,7(3): 248-254.
Liu J A, Mi G H, Zhang F S. Difference in nitrogen efficiency among maize genotypes[J]. J. Agric. Biot., 1999, 7(3): 248-254.

[12] 巨晓棠,刘学军,张福锁. 冬小麦与夏玉米轮作体系中氮肥效应及氮素平衡研究[J]. 中国农业科学,2002,35(11): 1361-1368.
Ju X T, Liu X J, Zhang F S. Study on effect of nitrogen fertilizer and nitrogen balance in winter wheat and summer maize rotation system[J]. Sci. Agric. Sin., 2002. 35(11): 1361-1368.

[13] 巨晓棠,刘学军,邹国元,等. 冬小麦/夏玉米轮作体系中氮素的损失途径分析[J]. 中国农业科学,2002,35(12): 1493-1499.
Ju X T, Liu X J, Zou G Y *et al*. Evaluation of nitrogen loss way in winter wheat and summer maize rotation system[J]. Sci. Agric. Sin., 2002, 35(12): 1493-1499.

[14] 王艳杰,邹国元,付桦,刘宏斌. 土壤氮素矿化研究进展[J]. 中国农学通,2005,21(16): 203-208.

Wang Y J, Zou G Y, Fu H, Liu H B. Development and advance of soil nitrogen mineralization [J]. Chin. Agric. Sci. Bull., 2005, 21(16): 203-208.

[15] 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.

[16] Jemison Jr J M, Fox R H. Nitrate leaching from nitrogen-fertilized and manured corn measured with zero-tension pan lysimeters [J]. J. Environ. Qual., 1994, 23(2): 337-343.

[17] 乔云发,韩晓增,赵兰坡,王树起. 黑土氮肥氨挥发损失特征研究[J]. 水土保持学报,2009,23(1): 198-201.
Qiao Y F, Han X Z, Zhao L P, Wang S Q. Researches on ammonia volatilization loss characters of nitrogen fertilizer from black soil[J]. J. Soil Water Conserv., 2009, 23(1): 198-201.

[18] 高强,唐艳凌,巨晓棠,赵明宪. 长期施肥处理对土壤活性氮库的影响[J]. 水土保持学报,2009,23(2): 95-99.
Gao Q, Tang Y L, Ju X T, Zhao M X. Effect of long-term fertilization on soil reactive nitrogen pool[J]. J. Soil Water Conserv., 2009, 23(2): 95-99.

[19] 杨学明,张晓平,方华军,梁爱珍. 20年来部分黑土耕层有机质和全氮含量的变化[J]. 地理科学,2004,24(6): 710-714.
Yang X M, Zhang X P, Fang H J, Liang A Z. Changes in organic matter and total nitrogen of black soils in Jilin province over the past two decades[J]. Sci. Geogr. Sin., 2004, 24(6): 710-714.

[20] 孟凯,王德录,张兴义,等. 黑土有机质分解、积累及其变化规律[J]. 土壤与环境,2002,11(1): 42-46.
Meng K, Wang D L, Zhang X Y *et al*. Decomposition, accumulation and their variant pattern of organic matter in black soil area [J]. Soil Environ. Sci., 2002, 11(1): 42-46.

[21] 王斯佳,韩晓增,侯雪莹. 长期施肥对黑土氮素矿化与硝化作用特征的影响[J]. 水土保持学报,2008,22(2): 170-174.
Wang S J, Han X Z, Hou X Y. Impact of long-term fertilization on nitrogen mineralization and nitrification in black soil[J]. J. Soil Water Conserv., 2008, 22(2): 170-174.

[22] 巨晓棠,潘家荣,刘学军. 高肥力土壤冬小麦生长季肥料氮的去向研究Ⅰ.冬小麦生长季肥料氮的去向[J]. 核农学报,2002,16(6): 397-402.
Ju X T, Pan J R, Liu X J. The fate of nitrogen fertilizer in winter wheat growth season under high soil fertility condition[J]. Acta Agric. Nucle Sin., 2002, 16(6): 397-402.

[23] 朱兆良,文启孝. 中国土壤氮素[M]. 南京: 江苏科技出版社,1992. 37-59.
Zhu Z L, Wen Q X. Soil nitrogen in China[M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1992. 37-59.

[24] 刘建安,米国华,张福锁. 玉米基因型与土壤氮素表观平衡[J]. 生态农业研究,2000,8(2): 38-41.
Liu J A, Mi G H, Zhang F S. Maize genotypes and soil nitrogen apparent balance[J]. Eco-Agric. Res., 2000, 8(2): 38-41.

[25] 春亮,陈范骏,张福锁,米国华. 不同氮效率玉米杂交种的根系生长、氮素吸收与产量形成[J]. 植物营养与肥料学报,2005,11(5): 615-619.
Chun L, Chen F J, Zhang F S, Mi G H. Root growth, nitrogen uptake and yield formation of hybrid maize with different N efficiency[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2005, 11(5): 615-619.