

土壤类型和施氮量对连作春玉米产量及氮素平衡的影响*

冯国忠¹ 王寅¹ 焉莉¹ 米国华² 高强^{1†}

(1 吉林农业大学资源与环境学院/吉林省商品粮基地土壤资源可持续利用重点实验室, 长春 130118)

(2 中国农业大学资源环境与粮食安全研究中心, 北京 100193)

摘要 以吉林省春玉米连作体系为研究对象, 采用多因素方差分析的方法, 对多年田间定位试验结果进行分析比较, 以探讨土壤类型变异对土壤—作物系统氮素平衡的影响。通过在相同气候条件下, 2种土壤类型(黑土(黏化湿润均腐土)和风砂土(湿润冲积新成土))上开展的连续4年的氮肥施用量(0、168、312 kg hm⁻²)田间定位试验, 研究了不同土壤类型间玉米产量、氮素矿化、残留及氮素表观损失的差异。结果表明, 土壤类型显著影响玉米产量, 黑土的玉米籽粒产量较高(6 469~10 106 kg hm⁻²), 平均为8 623 kg hm⁻², 风砂土的玉米籽粒产量较低(1 386~8 196 kg hm⁻²), 平均为5911 kg hm⁻²; 黑土和风砂土玉米籽粒产量的年际间(2009—2012年)变异系数分别为13.4%和59.1%, 黑土的玉米籽粒产量稳定性显著大于风砂土; 黑土连续4季氮素总表观矿化量为328 kg hm⁻², 为风砂土的2.2倍; 受土壤质地影响, 黑土收获后0~100 cm土层土壤矿质氮残留量为99~321 kg hm⁻², 显著高于风砂土(38~77 kg hm⁻²); 在中等施氮(168 kg hm⁻²)条件下, 黑土与风砂土的氮肥表观损失量无显著差异, 分别为320 kg hm⁻²和315 kg hm⁻²; 当施氮量增加至312 kg hm⁻²时, 黑土和风砂土的氮肥表观损失量均显著增加, 且风砂土的氮肥表观损失量达到827 kg hm⁻², 显著高于黑土。由于受土壤质地和土壤供肥能力的影响, 土壤类型会对玉米产量、氮素矿化和表观损失有一定的影响, 因此, 在氮肥优化管理中应考虑土壤类型的变异。

关键词 玉米连作; 土壤类型; 产量; 氮素矿化; 氮平衡

中图分类号 S513; S158.3 **文献标识码** A

吉林省作为全国的粮食主产区和重要的商品粮基地, 2014年玉米产量为273.3 Mt, 占全国总产量的12.6%^[1], 其玉米产量对我国粮食安全具有举足轻重的作用。连作体系作为吉林省春玉米主要种植体系, 在农业生产中有着不可替代的作用。有关春玉米施肥现状的调查结果表明, 近年来随着玉米产量的增加, 农户的肥料施用量, 尤其是氮肥明显过量^[2]。过量施用氮肥不仅未大幅度增加作物产量, 反而造成土壤无机氮逐年累积和氮肥损失, 威

胁环境安全^[3-5]。

春玉米连作体系中, 氮素的来源主要以肥料带入和土壤矿化为主, 氮素的去向主要有三种: 一是被作物吸收; 二是以不同形态在土壤中残留; 三是通过不同的机制和途径由土壤—作物体系损失。东北春玉米连作区属于雨养农业区域, 雨养农业区的作物产量受当地光温和降水影响, 实际自然降水决定当地的作物产量^[6], 同时土壤类型及自然降水直接影响土壤有效含水量^[7-8], 进一步影响土

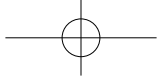
* 国家现代农业玉米产业技术体系项目(CARS-02)、农业部948计划项目(2011-G18)和公益性行业(农业)科研专项项目(201103003)共同资助 Supported by the Technology Program and National Maize Production System in China (No.CARS-02), 948 project of Ministry of Agriculture of China (No.2011-G18) and the Special Fund for Agro-scientific Research in the Public Interest of China (No. 201103003)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: gyt199962@163.com

作者简介: 冯国忠(1983—), 男, 山西大同人, 博士研究生, 主要从事养分资源综合管理研究。E-mail: guozhongf830621@126.com

收稿日期: 2016-03-23; 收到修改稿日期: 2016-09-27; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2016-10-27

<http://pedologica.issas.ac.cn>



壤氮素矿化、矿质氮残留量和氮素损失等^[3-5, 9]。土壤作为春玉米连作生产体系中的主体之一,大量研究表明,土壤类型的变异会引起土壤氮素矿化、作物产量及氮素吸收量、矿质氮残留量和氮素损失等方面的差异,进一步影响土壤—作物生产体系的氮素平衡。其中,Lu等^[10]在东北地区的研究显示,土壤类型的变异显著影响春玉米籽粒产量,黑土与风砂土的产量差会达到5~6 t hm⁻²;李玲等^[11]、王常慧等^[12]以及王帘里和孙波^[13]的研究结果显示,土壤质地和土壤类型显著影响氮素矿化能力,黑土的氮素矿化量明显高于潮土和红壤;同时受有机质含量和质地等因素的影响,土壤类型间矿质氮残留及氮素表观损失状况各异,砂壤土的氮素表观损失量明显高于黏土^[14-17]。为了了解东北地区春玉米雨养连作体系中土壤类型变异对春玉米产量、土壤氮素矿化、矿质氮残留及表观损失的影响,本研究设计了相同区域不同土壤类型及不同氮肥施用水平的4年定位试验,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的利用及损失情况,并在此基础上定量评价东北春玉米连作体系中,相同气候条件下不同土壤类型上氮肥

的环境效应。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地点位于吉林省梨树县四棵树乡三棵树村(43°20′17.4″N, 124°0′29.1″E)和付家街村(43°21′48.1″N, 124°05′01.6″E),两地的土壤类型分别为黑土(黏化湿润均腐土)和风砂土(湿润冲积新成土),各试验点的土壤基础理化性状见表1。两试验点间距离小于3千米,具有相同气候条件,均属北温带半湿润大陆性季风气候,四季分明。年均气温6.5℃,年日照时数2 541 h,作物生长期(5—9月)内为1 192 h。年积温>0℃积温3 244℃,>10℃积温3 030℃;无霜期155 d。该研究区域1986—2012年的平均降水量为486.1 mm,试验期间(2009—2012)玉米生育期降水及气温情况见图1,其中2009年降水量为240.6 mm,玉米抽雄至灌浆初期(7月22日—8月26日)降水量仅为5.6 mm,严重干旱;2010年、2011年和2012年降水量分别为583.2、432.8和437.2 mm。

表1 各试验点土壤基础理化性状

Table 1 Basic physical and chemical properties of the soils at the experiment sites

土壤类型 Soil type	砂粒Sand (g kg ⁻¹)	粉粒 Silt (g kg ⁻¹)	黏粒 Clay (g kg ⁻¹)	pH	有机质 Organic matter (g kg ⁻¹)	碱解氮 AlkalineN (mg kg ⁻¹)	有效磷 Olsen-P (mg kg ⁻¹)	速效钾 NH ₄ OAc-K (mg kg ⁻¹)
黑土(黏化湿润均腐土) Black soil (Argi-Udic Isohumosols)	325	252	423	6.2	25.3	128.2	43.9	122
风砂土(湿润冲积新成 土) Sandy soil (Udi-Alluvic Primosols)	796	96	108	6.7	13.2	58.8	13.6	43

1.2 试验设计

试验时间为2009—2012年,试验为两因素设计,主因素为2种土壤类型:黑土和风砂土,副因素为3个氮肥施用量:0、168和312 kg hm⁻²(即N0、N168和N312)。氮肥采用基肥加追肥的施用方式,基肥和追肥的比例为1:2;各处理的磷钾肥投入量一致,分别为100 kg hm⁻²(以P₂O₅计)和120 kg hm⁻²(以K₂O计),磷钾肥做基肥

一次性施入,其中氮肥为尿素(N46%),磷肥为重过磷酸钙(P₂O₅ 45%)和磷酸二铵(N18%, P₂O₅46%),钾肥为硫酸钾(K₂O 50%)。

试验小区面积为60 m²,3次重复,随机排列。两试验点种植的玉米品种均为先玉335。于5月上旬等行距播种(60 cm×26 cm),种植密度为6.5万株hm⁻²。播种后及时重镇压并封闭除草。6月下旬拔节期前,采用沟施覆土方法追肥,于10月初收

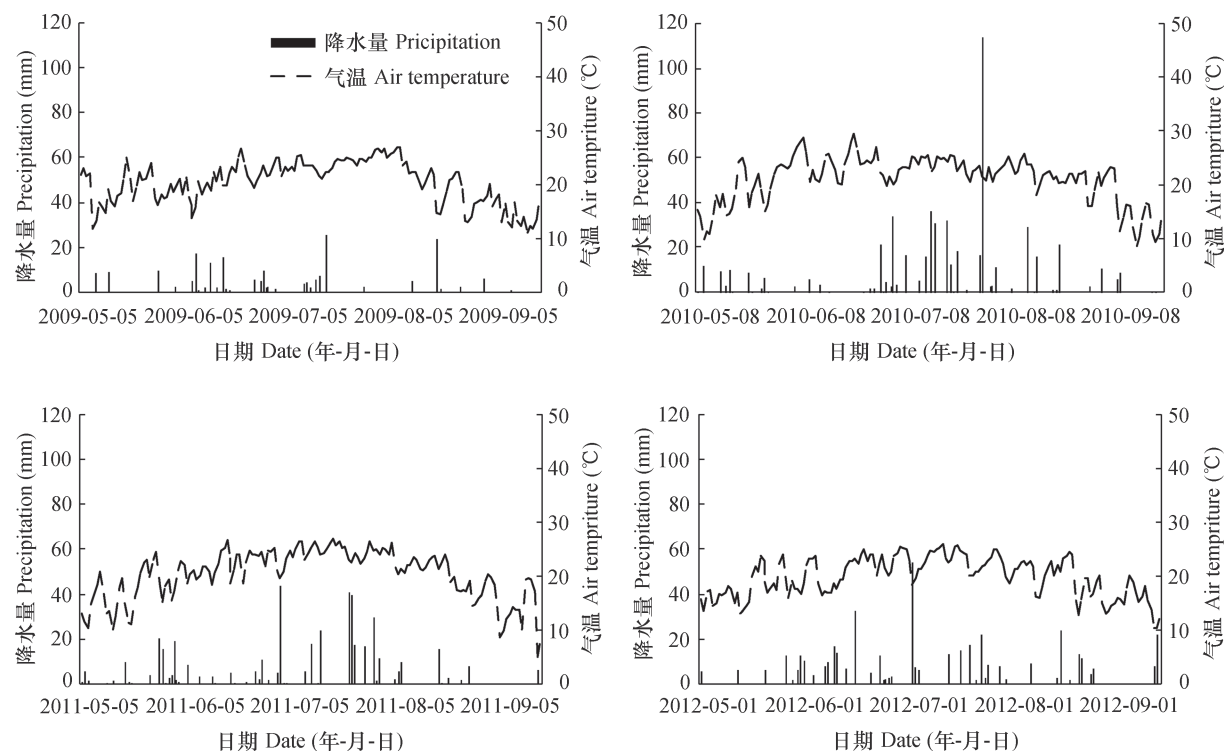


图1 2009—2012年试验地点玉米生育期内降水量及大气温度数据

Fig. 1 Precipitation and air temperature at the experimental sites during the maize growing season in 2009—2012

获。玉米种植区为雨养农业，无灌溉设施。

1.3 测定项目与方法

在成熟期，将试验小区两侧边行各2垄及小区两端各0.8 m去掉，其余部分作为收获区，面积为30.2 m²。记录测产面积内的穗数和果穗总鲜重，按平均单穗重取有代表性10穗（10穗的平均单穗重应接近收获区的平均单穗重），称取鲜重带回实验室，烤种后烘干至恒重，计算含水量，从而折算测产区域产量，最后得出每公顷产量。在产量测定的同时，每个小区选取代表性植株5株，分为秸秆和籽粒，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和籽粒含氮量。分别于每年播种前和收获后在每个小区采集0~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm土层的土壤样品（每个小区取2钻，相同土层混合），放入冰盒，带回实验室过4 mm筛，采用0.01 mol/L CaCl₂溶液浸提，TRACCS-2000型连续流动分析仪（Bran and LuebbeNorderstedt，德国）测定土壤无机氮含量。播前土壤基础理化性状采用常规法测定^[18]。

1.4 数据处理

本试验未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无机氮（N_{min}）累积量的净变化估计^[19]，不考虑氮肥激发效应，假定施氮处理土壤氮矿化量与不施氮处理相同，即：

生育期0~100 cm土层土壤氮素净矿化量（kg hm⁻²）= 不施氮肥区收获期作物吸氮量 + 不施氮肥区收获期0~100 cm土层土壤残留N_{min} - 不施氮肥区播种时0~100 cm土层土壤起始N_{min}

生育期土壤氮素表观损失（kg hm⁻²）= 生育期施氮量 + 播种时0~100 cm土层土壤起始N_{min} + 0~100 cm土层土壤氮素净矿化量 - 收获期作物携出 - 收获期0~100 cm土层土壤残留N_{min}

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0~100 cm土层土壤残留N_{min} - 不施氮肥区0~100 cm土层土壤残留N_{min}）/ 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

所有数据均采用Excel 2007处理后，用SAS 9.0软件三因素程序进行统计分析。

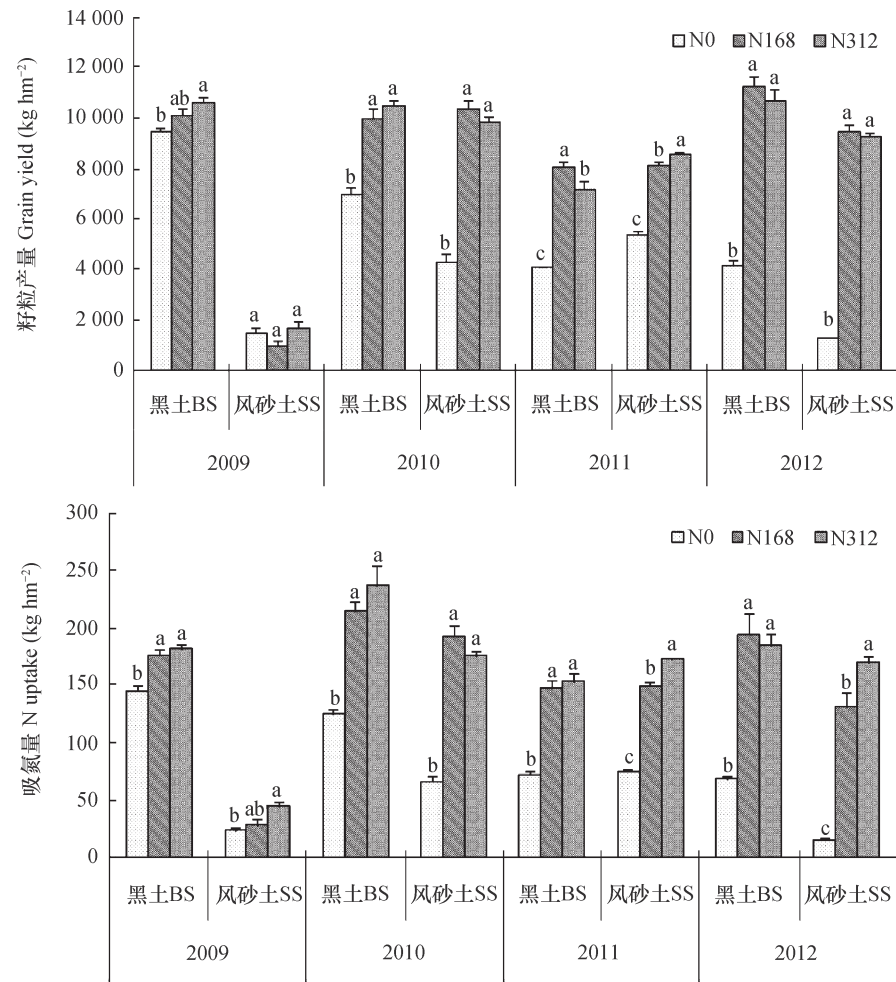
2 结 果

2.1 不同处理下玉米籽粒产量和植株吸氮量

2009—2012年不同土壤类型上各施氮处理玉米产量和植株吸氮量（图2）显示，黑土条件下，除了 2011年N312处理的玉米产量明显低于N168处理外，其他年份施氮处理间玉米产量无显著差异；风砂土上，2009年由于受干旱影响，玉米产量与施氮量间无明显关系，2011年玉米产量随施

氮量的增加而增加，N312处理的玉米产量最高（8 598 kg hm⁻²），2010年和2012年N168和N312处理的玉米产量均无显著差异。氮素吸收方面，黑土条件下，各年份施氮处理间无显著差异，且均显著高于不施氮处理；风砂土上，除2010年施氮处理间无显著差异外，其他年份植株吸氮量随施氮量的增加而增加。

土壤类型、年际和施氮量对玉米籽粒产量和植株吸氮量的3因素方差分析（表2）显示，土壤类型、年际和施氮量3因素及其交互作用显著影响籽粒产量和植株吸氮量。其中黑土的玉米籽粒产量为8 623 kg hm⁻²，明显高于风砂土（5 911 kg hm⁻²），黑土成熟期植株吸氮量为158.1 kg hm⁻²，明显高于



注：N0：不施氮，N168：施氮量为168 kg hm⁻²，N312：施氮量为312 kg hm⁻²；BS：黑土（黏化湿润均腐土），SS：风砂土（湿润冲积新成土）；图中相同土壤各处理间的不同字母表示差异显著（*p* < 0.05）；下同 Note: N0 stands for treatment applied with 0 kg hm⁻², N168 with 168 kg hm⁻², N312 with 312 kg hm⁻². BS for Black Soil (Argi-Udic Isohumosols), SS for Sandy Soil (Udi-Alluvic Primosols). Different letters in the same column of soil represent significant difference between treatments at *p* < 0.05, The same below

图2 2009—2012年不同土壤类型上各处理玉米产量和植株吸氮量
Fig. 2 Grain yield and N uptake in different soils from 2009 to 2012

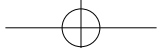


表2 玉米产量和植株吸氮量及其多因素方差分析结果

Table 2 Variance analysis of maize grain yield and nitrogen uptake in the four years relative to treatment and type of soil

处理Treatments		产量 Yield (kg hm ⁻²)	植株吸氮量 Nitrogen uptake (kg hm ⁻²)
土壤类型Soil	黑土Black soil	8 623a	158.1a
	风砂土Sandy soil	5 911b	103.3b
年际Year	2009	5 746d	99.6c
	2010	8 890a	168.2a
	2011	6 920c	128.0b
	2012	7 713b	127.0b
施氮量Nitrogen	0	4 663b	73.5c
	168	8 567a	154.0b
	312	8 572a	164.5a
变异来源Source of variation	年际Year (Y)	**	**
	土壤Soil (S)	**	**
	施氮量Nitrogen (N)	**	**
	年际 × 土壤Y × S	**	**
	年际 × 施氮量Y × N	**	**
	土壤 × 施氮量S × N	*	NS
年际 × 土壤 × 施氮量Y × S × N		**	**

注：土壤、施氮量和年际间不同字母代表差异显著 ($p < 0.05$)；NS：无明显差异 ($p > 0.05$)；*差异显著 $p < 0.05$ ；** 差异极显著 $p < 0.01$ Note: Within the column of soil, nitrogen or year, data followed by different letters indicate significant differences ($p < 0.05$)，NS: Not significant ($p > 0.05$)，*Significant at $p < 0.05$ ，** Significant at $p < 0.01$

风砂土；2010年和2012年两年的玉米产量较高，分别为8 890 kg hm⁻²和7 713 kg hm⁻²，2009年和2011年的玉米籽粒产量较低，分别为5 746 kg hm⁻²和6 920 kg hm⁻²，年际间吸氮量变化规律与产量一致；与不施氮处理相比，施氮可以显著提高玉米产量，增产率达到83.8%，而施氮处理（N168和N312）间玉米籽粒产量无显著差异；施氮也可以显著促进植株对氮素的吸收，且随施氮量的增加植株吸氮量显著增加（表2）。

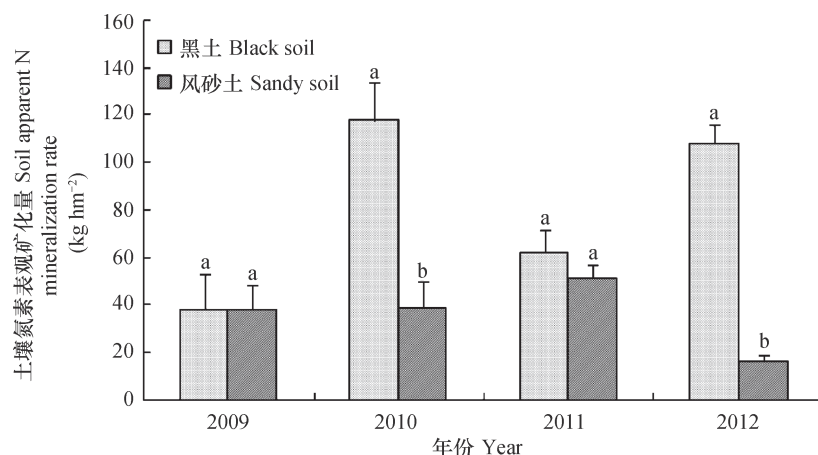
土壤类型与年际的交互作用显著影响玉米产量和植株吸氮量，其中2009年、2010年和2012年黑土上的产量和植株吸氮量均显著高于风砂土，而在2011年，受倒伏影响，黑土的产量为6 469 kg hm⁻²，明显低于风砂土的7 370 kg hm⁻²，且两土类间吸氮量无显著差异。

2.2 玉米生长期土壤氮素表观矿化量

不同土壤类型玉米连作体系中的土壤氮素表观矿化量（图3）表明，黑土显著高于风砂土，年平均矿化量分别为82 kg hm⁻²和37 kg hm⁻²。年际也显著影响玉米连作的土壤氮素表观矿化，其中2010年和2012年较高，分别为79 kg hm⁻²和63 kg hm⁻²；2011年次之，为57 kg hm⁻²；2009年最低，为39 kg hm⁻²。年际和土壤类型的交互作用显著影响土壤氮素表观矿化，其中2009年和2011年两土类间无显著差异，而2010年和2012年黑土显著高于风砂土。

2.3 玉米收获后土壤矿质氮残留

2009—2012年玉米连作体系中收获后土壤矿质氮残留量（图4）显示，黑土显著高于风砂土，年平均土壤矿质氮残留量分别为135.4 kg hm⁻²和



注：图中相同年份的各土壤间的不同字母表示差异显著 ($p < 0.05$) Note: Different letters in the same column of year represent significant difference between soils at $p < 0.05$

图3 2009—2012年不同土壤类型上的氮素表观矿化量

Fig. 3 Apparent N mineralization rate in 2009—2012 relative to type of soil

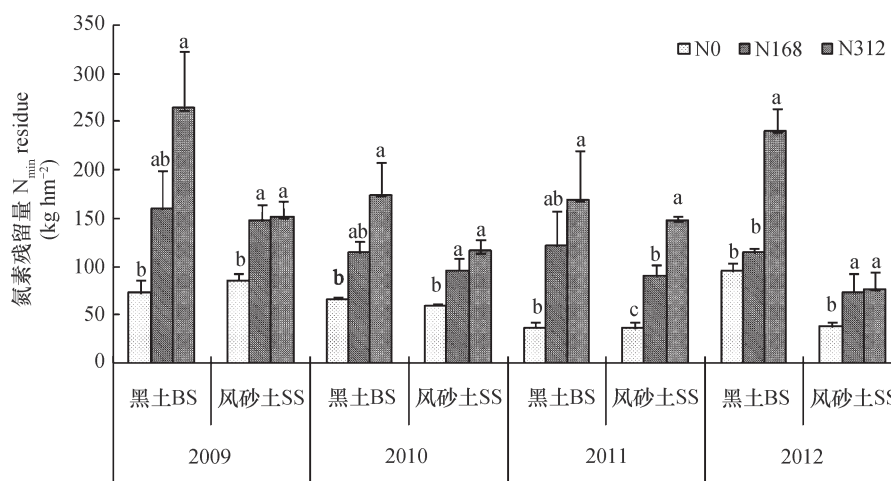


图4 2009—2012年不同土壤类型上各处理玉米收获后土壤矿质氮残留量

Fig. 4 Soil residual of mineralized N after harvest in 2009—2012 relative to type of soil

93.1 kg hm⁻²。年际显著影响玉米连作体系中收获后土壤矿质氮残留量，其中2009年为147 kg hm⁻²，显著高于2010年、2011年和2012年，平均增加44 kg hm⁻²。随着施氮量的增加，玉米连作体系中收获后土壤矿质氮残留量显著增加，其中不施氮处理平均为61 kg hm⁻²，N168和N312处理分别为115 kg hm⁻²和167 kg hm⁻²，分别增加88%和173%。土壤类型和施氮的交互作用显著影响收获后土壤矿质氮残留，其中黑土上N168处理与不施氮处理间无显著差异，而风砂土上N168处理显著高于不施氮处理。

2.4 玉米连作体系中的矿质氮损失

2009—2012年玉米连作体系的土壤氮素平衡（表3）显示，氮素输入方面，施氮量所

占比例较大（57.0% ~ 85.2%），播种时N_{min}和表观矿化氮所占比例较小（4.8% ~ 15.1%、10.0% ~ 27.8%），且土壤类型间差异显著。黑土播种时N_{min}和表观矿化氮分别占总输入项的10.1% ~ 15.1%和18.7% ~ 27.8%，显著高于风砂土4.8% ~ 7.9%和10.0% ~ 16.4%。在氮素的输出方面，收获后矿质氮残留和氮素表观损失均随着施氮量的增加而增加，但是不同土壤类型上增加的比例各异，当施氮量从168 kg hm⁻²增加至312 kg hm⁻²时，黑土收获后矿质氮残留增加152.8%，而风砂土仅增加5.4%；黑土氮素表观损失增加111.9%，而风砂土增加的比例高达162.5%。各个生长季的氮素平衡情况（表3）显示，在干旱

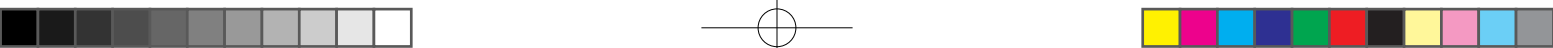
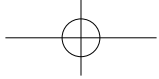


表3 2009—2012年不同土壤类型上玉米连作体系中的氮素平衡

Table 3 Nitrogen balance in the spring maize monocropping system in 2009—2012 relative to type of soil (kg hm ⁻²)							
年份 Year	项目Item	黑土 Black soil			风砂土 Sandy soil		
		N0	N168	N312	N0	N168	N312
2009	A. 氮素投入N input						
	1.氮肥N fertilizer	0	168	312	0	168	312
	2.播前土壤无机氮N _{min} at sowing	178	178	178	70	70	70
	3.氮素矿化量Apparent N mineralization	39	39	39	39	39	39
	总投入Total input: 1+2+3	217	385	529	109	277	421
	B. 氮素输出N output						
	4.作物吸收N removed by grain and straw	145	176	182	23	28	44
	5.收获后无机氮残留N _{min} at harvest	73	160	263	85	148	151
	6.氮素表观损失Apparent N losses	0	49	84	0	101	225
	氮盈余N surplus (5+6)	73	209	348	85	249	377
2010	A. 氮素投入N input						
	1.氮肥N fertilizer	0	168	312	0	168	312
	2.播前土壤无机氮N _{min} at sowing	73	160	263	85	148	151
	3.氮素矿化量Apparent N mineralization	118	118	118	40	40	40
	总投入Total input: 1+2+3	191	446	693	125	355	503
	B. 氮素输出N output						
	4.作物吸收N removed by grain and straw	125	215	237	66	192	176
	5.收获后无机氮残留N _{min} at harvest	66	115	174	59	70	115
	6.氮素表观损失Apparent N losses	0	117	283	0	93	212
	氮盈余N surplus (5+6)	66	231	457	59	163	327
2011	A. 氮素投入N input						
	1.氮肥N fertilizer	0	168	312	0	168	312
	2.播前土壤无机氮N _{min} at sowing	66	115	174	59	70	115
	3.氮素矿化量Apparent N mineralization	63	63	63	52	52	52
	总投入Total input: 1+2+3	129	345	549	111	290	479
	B. 氮素输出N output						
	4.作物吸收N removed by grain and straw	72	147	153	75	149	172
	5.收获后无机氮残留N _{min} at harvest	57	120	167	36	91	148
	6.氮素表观损失Apparent N losses	0	78	229	0	50	159
	氮盈余N surplus (5+6)	57	198	396	36	141	307
2012	A. 氮素投入N input						
	1.氮肥N fertilizer	0	168	312	0	168	312
	2.播前土壤无机氮N _{min} at sowing	57	120	167	36	91	148
	3.氮素矿化量Apparent N mineralization	109	109	109	17	17	17



		续表					
年份 Year	项目Item	黑土 Black soil			风砂土 Sandy soil		
		N0	N168	N312	N0	N168	N312
2009—2012	总投入Total input: 1+2+3	165	397	588	53	275	514
	B. 氮素输出N output						
	4.作物吸收N removed by grain and straw	69	194	185	15	131	169
	5.收获后无机氮残留N _{min} at harvest	97	127	321	38	73	77
	6.氮素表观损失Apparent N losses	0	76	82	0	72	268
	氮盈余N surplus (5+6)	97	203	403	38	145	345
	A. 氮素投入N input						
	1.氮肥N fertilizer	0	672	1 248	0	672	1 248
	2.播前土壤无机氮N _{min} at sowing	178	178	178	70	70	70
	3.氮素矿化量Apparent N mineralization	328	328	328	146	146	146
	总投入Total input: 1+2+3	506	1 178	1 754	216	888	1 464
	B. 氮素输出N output						
	4.作物吸收N removed by grain and straw	410	732	755	179	500	561
	5.收获后无机氮残留N _{min} at harvest	99	127	321	38	73	77
	6.氮素表观损失Apparent N losses	0	320	678	0	315	827
	氮盈余N surplus (5+6)	97	447	999	38	388	903

年份（2009年），相同施氮量条件下，风砂土的氮盈余量较黑土增加29 ~ 40 kg hm⁻²，增加的比例为8.3% ~ 19.1%；在正常降水年份（2010—2012年），相同施氮量条件下，黑土的氮盈余量较风砂土增加57 ~ 130 kg hm⁻²，增加的比例为16.8% ~ 41.7%。

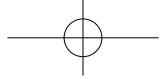
2009—2012年玉米连作体系中氮肥的表观利

用率、残留率及损失率（表4）显示，4年的连作体系中，黑土和风砂土的氮肥表观利用率随施氮量的增加而降低，且二者无显著差异，分别为37.8%和39.2%；表观残留率和表观损失率均随施氮量的增加而增加，土壤类型间差异明显，风砂土的表观残留率仅为2.7%，显著低于黑土（11.0%）；风砂土的表观损失率为58.2%，高于黑土（51.2%）。

表4 2009—2012年不同土壤类型上氮肥表观利用、残留、损失率

Table 4 Apparent N recovery by crop, apparent N residual in the soil, and apparent N loss from the system in 2009—2012 relative to type of soil

土壤类型 Soil type	处理 Treatments	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 (%)
		(%)		
黑土	N168	47.9	4.2	47.9
Black soil	N312	27.6	17.8	54.6
风砂土	N168	47.8	5.2	47.0
Sandy soil	N312	30.6	0.1	69.3



3 讨 论

连续4年的定位试验结果显示,土壤类型显著影响地上部玉米产量,黑土的玉米籽粒产量平均为 $8\,623\text{ kg hm}^{-2}$,显著高于风砂土($5\,911\text{ kg hm}^{-2}$) (表2)。相关研究^[20-21]表明,土壤质地和土壤保水能力等土壤特性会导致地上部作物产量差异,其中Ziadi等^[20]和Cambouris等^[21]的研究表明土壤质地较黏、保水能力较强的土壤地上部作物产量明显较高。本研究中供试的黑土和风砂土质地分别为黏土和砂土(表1)。不施氮处理的作物产量是反映土壤供氮能力的重要指标,本研究发现,黑土不施氮处理的产量平均为 $6\,215\text{ kg hm}^{-2}$,显著高于风砂土的 $3\,115\text{ kg hm}^{-2}$ 。Luce等^[22]研究表明土壤供氮能力较高的土壤地上部作物产量明显较高。研究还发现,年际显著影响玉米产量,受干旱(2009年)和台风(2011年)影响,2009年和2011年玉米产量显著低于2010年和2012年(表2),同时年际与土壤类型的交互作用显著影响玉米产量,2009年在干旱(生育期降水量仅为 206 mm)的条件下,受土壤保水能力差异的影响,风砂土施氮处理的产量仅为 $1\,336\text{ kg hm}^{-2}$,明显低于黑土的 $10\,396\text{ kg hm}^{-2}$;2010年在降水较高(生育期降水量为 583 mm)的条件下,风砂土施氮处理的产量达到 $10\,146\text{ kg hm}^{-2}$,与黑土($10\,268\text{ kg hm}^{-2}$)无显著差异(图2),表明风砂土上的水分管理尤为重要。

土壤氮素矿化是作物—土壤系统重要的氮素输入途径。本研究结果显示,黑土连续4年累计氮矿化量为 328 kg hm^{-2} ,为风砂土的2.2倍(表3),原因可能是黑土较高的土壤黏粒含量(表1),有助于土壤有机质的累积^[11]。王常慧等^[12]的研究表明,氮素矿化量受土壤有机质含量影响较大,且有机质含量高的土壤其氮素矿化量较大。本研究发现,土壤水分也会影响土壤氮素矿化量,其中在正常降水年份,土壤有机质含量显著影响土壤氮素矿化量,如2010—2012年,黑土的氮矿化量显著高于风砂土,但是在干旱年份(2009年,生育期降水量仅为 206 mm),黑土和风砂土的氮素矿化量无差异,均为 39 kg hm^{-2} (图3)。该结果与王艳杰等^[23]的研究结论一致,即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

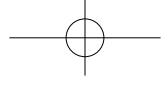
包括含水量等因素有关。

土壤无机氮残留是农田氮肥的主要氮素盈余项,如果将残留的无机氮控制在一定的范围内,则可兼顾产量与环境效益^[24]。钟茜等^[25]认为土壤残留的无机氮限定在 150 kg hm^{-2} 以下对环境污染风险较小。本研究中,黑土和风砂土4年定点试验后残留的土壤无机氮范围分别为 $115\sim 321\text{ kg hm}^{-2}$ 和 $70\sim 148\text{ kg hm}^{-2}$,平均为 218 和 109 kg hm^{-2} ,黑土的土壤无机氮残留较高,风险较大。同延安等^[14]的研究表明,土壤质地显著影响作物收获后土壤无机氮残留量,其中黏土对无机氮的吸附能力较强,会导致残留较高,与本研究结果一致,即:相同氮素投入的条件下,黑土作物收获后无机氮残留量显著高于风砂土(表3)。本研究中连续4年的结果显示,黑土与风砂土氮肥表观残留率低于其他研究者的结果^[13],原因可能与土壤供肥及保肥能力有关,其中黑土无氮区收获后矿质氮残留量(99 kg hm^{-2} ,表3)较高,导致施氮区收获后矿质氮残留率降低;风砂土由于受土壤性状限制,施氮区和无氮区作物收获后无机氮残留量均较低($38\sim 77\text{ kg hm}^{-2}$,表3)。

氮肥损失是作物—土壤系统重要的氮素输出途径。本研究氮肥表观损失率是采用差减法计算得出,结果不同于利用 ^{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,如土壤的生物固定、淋洗和氨挥发等。同延安等^[14]的研究表明,土壤质地显著影响作物—土壤系统氮素表观损失;同时,Sogbedji等^[17]在砂壤土上的研究显示,由于土壤孔隙较大,氮素容易以氨挥发和硝态氮淋洗的方式增加氮素表观损失。但是在本研究中,当施氮量较低(168 kg hm^{-2})时,黑土与风砂土的氮素表观损失量无显著差异($315\sim 320\text{ kg hm}^{-2}$,表3),只有过量施氮(312 kg hm^{-2})条件下,风砂土的氮素表观损失量显著高于黑土。综上,在推荐施肥过程中,综合考虑土壤类型和气候条件对作物产量、土壤氮素矿化及氮素表观损失的影响,可以在一定程度上减少作物—土壤系统中氮素的损失。

4 结 论

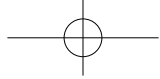
连续4年的定位试验结果表明,在相同气候条件下,黑土的生产力显著高于风砂土,并且黑土年



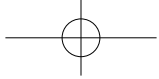
际间的产量稳定性大于风砂土；土壤有机质和降水量显著影响土壤氮素矿化量，在正常降水条件下，土壤有机质含量较高的黑土的氮素矿化量显著高于风砂土，但是在干旱条件下，黑土和风砂土的氮素矿化量无显著差异。受土壤质地影响，黑土收获后0~100 cm土层土壤无机氮残留量显著高于风砂土。过量施氮导致两种土壤的氮肥表观损失量明显增加，而且风砂土的氮肥表观损失量显著高于黑土。

参考文献

- [1] 中华人民共和国农业部. 中国农业年鉴. 北京：中国农业出版社，2015
The Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. China agriculture yearbook (In Chinese). Beijing: China Agriculture Press, 2015
- [2] 高强，冯国忠，王志刚. 东北地区春玉米施肥现状调查. 中国农学通报，2010，26（14）：229—231
Gao Q, Feng G Z, Wang Z G. Present situation of fertilizer application on spring maize in Northeast China (In Chinese). Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26（14）：229—231
- [3] 蔡红光，米国华，张秀芝，等. 不同施肥方式对东北黑土春玉米连作体系土壤氮素平衡的影响. 植物营养与肥料学报，2012，18（1）：89—97
Cai H G, Mi G H, Zhang X Z, et al. Effect of different fertilizing methods on nitrogen balance in the black soil for continuous maize production in Northeast China (In Chinese). Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2012, 18（1）：89—97
- [4] 蔡红光，米国华，陈范骏，等. 东北春玉米连作体系中土壤氮矿化、残留特征及氮素平衡. 植物营养与肥料学报，2010，16（5）：1144—1152
Cai H G, Mi G H, Chen F J, et al. Characteristics of nitrogen mineralization and residual in the soil and nitrogen balance in the continuous spring maize cultivation system in Northeast China (In Chinese). Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2010, 16（5）：1144—1152
- [5] 高强，蔡红光，黄立华，等. 吉林省半干旱地区春玉米连作体系氮素平衡研究. 西北农林科技大学学报（自然科学版），2009，37（8）：127—132
Gao Q, Cai H G, Hang L H, et al. Study on soil nitrogen balance of spring maize continuous cropping in semi-arid area of Jilin Province (In Chinese). Journal of Northwest A&F University (Natural Sciences Edition), 2009, 37（8）：127—132
- [6] 王静，杨晓光，吕硕，等. 黑龙江省春玉米产量潜力及产量差的时空分布特征. 中国农业科学，2012，45（10）：1914—1925
Wang J, Yang X G, Lü S, et al. Spatial-temporal characteristics of potential yields and yield gaps of spring maize in Heilongjiang Province (In Chinese). Sientia Agricultura Sinica, 2012, 45（10）：1914—1925
- [7] Calviño PA, Andrade FH, Sadras VO. Maize yield as affected by water availability, soil depth and crop management. Agronomy Journal, 2003, 95（2）：275—281
- [8] Monzon J P, Sadras V O, Andrade F H. Fallow soil evaporation and water storage as affected by stubble in sub-humid (Argentina) and semi-arid (Australia) environments. Field Crops Research, 2006, 98（2/3）：83—90
- [9] 刘新宇，巨晓棠，张丽娟，等. 不同施氮水平对冬小麦季化肥氮去向及土壤氮素平衡的影响. 植物营养与肥料学报，2010，16（2）：296—303
Liu X Y, Ju X T, Zhang L J, et al. Effects of different N rates on fate of N fertilizer and balance of soil N of winter wheat (In Chinese). Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2010, 16（2）：296—303
- [10] Lu X J, Li Z Z, Bu Q G, et al. Effects of rainfall harvesting and mulching on corn yield and water use in the corn belt of Northeast China. Agronomy Journal, 2014, 106（6）：2175—2184
- [11] 李玲，张少凯，吴克宁，等. 基于土壤系统分类的河南省土壤有机质时空变异. 土壤学报，2015，52（5）：979—990
Li L, Zhang S K, Wu K N, et al. Analysis on spatio-temporal variability of soil organic matter in Henan Province based on soil taxonomy (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2015, 52（5）：979—990
- [12] 王常慧，邢雪荣，韩兴国. 草地生态系统中土壤氮素矿化影响因素的研究进展. 应用生态学报，2004，15（11）：2184—2188
Wang C H, Xin X R, Han X G. Advances in study of factors affecting soil N mineralization in grassland ecosystems (In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15（11）：2184—2188
- [13] 王帘里，孙波. 温度和土壤类型对氮素矿化的影响. 植物营养与肥料学报，2011，17（3）：583—591
Wang L L, Sun B. Effects of temperature and soil type on nitrogen mineralization (In Chinese). Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2011, 17（3）：583—591
- [14] 同延安，石维，吕殿青，等. 陕西三种类型土壤剖面硝



- 酸盐累积分布与土壤质地的关系. 植物营养与肥料学报, 2005, 11 (4): 435—441
- Tong Y A, Shi W, Lü D Q, et al. Relationship between soil texture and nitrate distribution and accumulation in three types of soil profile in Shaanxi (In Chinese). Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2005, 11 (4): 435—441
- [15] 串丽敏, 赵同科, 安志装, 等. 土壤硝态氮淋溶及氮素利用研究进展. 中国农学通报, 2010, 26 (11): 200—205
- Chuan L M, Zhao T K, An Z Z, et al. Research advancement in nitrate leaching and nitrogen use in soils (In Chinese). Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26 (11): 200—205
- [16] 习金根, 周建斌, 赵满兴, 等. 滴灌施肥条件下不同种类氮肥在土壤中迁移转化特性的研究. 植物营养与肥料学报, 2004, 10 (4): 337—342
- Xi J G, Zhou J B, Zhao M X, et al. Leaching and transforming characteristics of different nitrogen fertilizers added by fertigation (In Chinese). Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2004, 10 (4): 337—342
- [17] Sogbedji J M, Vanes H M, Hutson J L. N fate and transport under variable cropping history and fertilizer rate on loamy sand and clay loam soil: I. calibration of the LEACHMN model. Plant and Soil, 2001, 229 (1): 57—70
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 2005
- Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis (In Chinese). Beijing: China Agriculture Press, 2005
- [19] 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 XX, 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
- [20] Ziadi N, Cambouris A N, Nyiraneza J. Across a landscape, soil texture controls the optimum rate of N fertilizer for maize production. Field Crops Research, 2013, 148: 78—85
- [21] Cambouris A N, Nolin M C, Zebarth B J, et al. Soil management zones delineated by electrical conductivity to characterize spatial and temporal variations in potato yield and in soil properties. American Journal of Potato Research, 2006, 83 (5): 381—395
- [22] St. Luce M, Whalen J K, Ziadi N. et al. Nitrogen dynamics and indices to predict soil nitrogen supply in humid temperate soils. Advances in Agronomy, 2011, 112: 55—102
- [23] 王艳杰, 邹国元, 付桦, 等. 土壤氮素矿化研究进展. 中国农学通报, 2005, 21 (16): 203—208
- Wang Y J, Zou G Y, Fu H, et al. Development and advance of soil nitrogen mineralization (In Chinese). Chinese Agricultural Science Bulletin, 2005, 21 (16): 203—208
- [24] Jemison J M, Fox R H. Nitrate leaching from nitrogen-fertilized and manured corn measured with zero-tension pan lysimeters. Journal of Environmental Quality, 1994, 23 (2): 337—343
- [25] 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. 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 (In Chinese). Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2006, 12 (3): 285—293



Effect of Soil Type and Nitrogen Application Rate on Yield of Monocropping Spring Maize and Nitrogen Balance in Crop Field

FENG Guozhong¹ WANG Yin¹ YAN Li¹ MI Guohua² GAO Qiang^{1†}

(¹ College of Resources and Environment Sciences, Key Laboratory of Jilin Province Commodity Grain Base Soil Resources Sustainable Utilization, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China)

(² Center for Resources, Environment and Food Security, College of Resources and Environmental Science, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract 【Objective】Jilin Province is a major maize producing area and a key commodity grain production base of China. In the province, monocropping of spring maize prevails in various types of soils. However, it is still not so clear how type of the soil affects yield of the crop, nitrogen mineralization and nitrogen residue in the soil and apparent loss of soil nitrogen from the maize monocropping system. Therefore, this study was performed to explore effects of the same nitrogen fertilization strategy in different types of soils under the maize monocropping system in an attempt to provide a certain basis for optimization nitrogen management. 【Method】Based on a long-term fertilization experiment on the spring maize monocropping in Jilin Province, multi-factor variance analysis was done of the data of the recent four years of the long-term experiment to determine effect of the soil, in terms of soil type, on N balance in the soil-crop system in Northeast China. During the four years, maize was monocropped in black soil (Argi-Udic Isohumosols) and sandy soil (Udi-Alluvic Primosols) and applied with three rates of N (0 kg hm⁻², 168 kg hm⁻² and 312 kg hm⁻², separately) under the same climate condition. Maize yields were monitored and soil samples analyzed for N mineralization rate, N residue and apparent N loss. 【Result】Maize grain yield varied with type of the soil and in the range of 6 469 ~ 10 106 kg hm⁻² (8 623 kg hm⁻² on average) in black soil and in the range of 1 386 ~ 8 196 kg hm⁻² (5 911 kg hm⁻²) in sandy soil. Furthermore, grain yield stability also differed sharply between the soils. In the four years (2009—2012), variation coefficient of the yield in black soil was 13.4% and in sandy soil 59.1%. Obviously the crop in black soil was more stable in yield than that in sandy soil. Total N mineralization rate was 328 kg hm⁻² in black soil, 2.2 times that in sandy soil. As affected by soil texture, the total residue of mineralized N residue in the 0 ~ 100 cm soil layer after harvest of the crop was in the range of 99 ~ 321 kg hm⁻² in black soil, much higher than that (38 kg hm⁻² ~ 77 kg hm⁻²) in sandy soil. Apparent N loss did not varied much between black soil and sandy soil applied with N at a medium rate (168 kg hm⁻²) and was 320 kg hm⁻² and 315 kg hm⁻², respectively. However, apparent N loss increased significantly or by 111.9% and 162.5%, or by 358 kg hm⁻² and 512 kg hm⁻², respectively in black soil and sandy soil. The apparent N loss in sandy soil reached up to 827 kg hm⁻², which was remarkably higher than that in black soil. 【Conclusion】Due to differences in soil texture and nutrient supplying capacity, soils of different types would differ significantly in maize grain yield, N mineralization rate, accumulated N residue and apparent N loss. Therefore, type of a soil should be taken into consideration in optimizing N fertilization management.

Key words Maize monocropping system; Soil type; Grain yield; Nitrogen mineralization; Nitrogen balance

(责任编辑：陈荣府)

<http://pedologica.issas.ac.cn>