

吉林省主要类型农田土壤中玉米产量和氮肥利用率的研究

李梦瑶¹, 王永¹, 吉凡¹, 王开爽¹, 高淑青¹, 王莉¹, 曹志远¹, 张晋京^{1*}, 王立春^{2*}

(1. 吉林农业大学资源与环境学院, 长春 130118; 2. 吉林省农业科学院农业资源与环境研究所, 长春 130033)

摘要:通过盆栽试验,比较吉林省6种主要类型农田土壤在不同施氮量(0、0.10、0.14、0.16和0.18 g N/kg土,相当于田间施用量0、168、240、270和312 kg N/hm²)条件下的玉米产量及氮肥利用率,分析了玉米子粒产量和氮肥偏生产力与土壤性质之间的关系。结果表明:随施氮量的增加,玉米子粒产量也趋于增加,而氮肥偏生产力(PFP_N)趋于降低;不同类型土壤相比,平均玉米子粒产量为白浆土>暗棕壤>草甸土>冲积土>黑土>风沙土,平均PFP_N为暗棕壤>白浆土>草甸土>冲积土>黑土>风沙土。相关分析指出,玉米子粒产量和PFP_N与土壤粉粒(0.02~0.002 mm)含量、总孔隙度、毛管孔隙度和田间持水量之间呈线性正相关,与土壤细砂粒(0.2~0.02 mm)含量、0.25~0.05 mm微团聚体含量、容重、pH值、脲酶和酸性磷酸酶活性之间呈线性负相关。

关键词:施氮量;氮肥偏生产力;玉米产量;土壤性质

中图分类号:S158.062

文献标识码:A

文章编号:1003-8701(2016)04-0053-05

Studies on Maize Yield and Nitrogen Use Efficiency on Major Types of Arable Soils in Jilin Province

LI Mengyao¹, WANG Yong¹, JI Fan¹, WANG Kaishuang¹, GAO Shuqing¹, WANG Li¹, CAO Zhiyuan¹, ZHANG Jinjing^{1*}, WANG Lichun^{2*}

(1. College of Resource and Environmental Science, Jilin Agricultural University, Changchun 130118; 2. Institute of Agricultural Resources and Environment Research, Jilin Academy of Agricultural Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: A pot-cultured experiment was carried out to investigate the grain yield and nitrogen use efficiency of spring maize in six major types of farmland under different nitrogen fertilizer rates (i.e., 0, 0.10, 0.14, 0.16 and 0.18 g N/kg soil, equivalent to 0, 168, 240, 270 and 312 kg N/hm² in the field experiment). The correlations between maize grain yield and partial factor productivity of nitrogen fertilizer (PFP_N) with soil properties were evaluated. The results showed that the maize grain yield tended to increase whereas the PFP_N tended to decrease with the increasing nitrogen fertilizer rates. For the different types of soil, the average of maize grain yield was in such order: albic soil > dark brown soil > meadow soil > alluvium soil > black soil > aeolian sandy soil. The average of PFP_N was dark brown soil > albic soil > meadow soil > alluvium soil > black soil > aeolian sandy soil. The maize grain yield and PFP_N were positively correlated with the silt (0.02–0.002 mm) content, total porosity, capillary porosity, and field capacity of soils, and negatively correlated with the fine sand (0.2–0.02 mm) content, microaggregate (0.25–0.05 mm) content, bulk density, pH value, and urease and acid phosphatase activities of soils.

Key word: Nitrogen application rate; Nitrogen partial factor production; Maize yield; Soil property

收稿日期:2016-02-27

基金项目:国家科技支撑计划项目(2013BAD07B02);吉林省科技发展计划项目(LFGC14301)

作者简介:李梦瑶(1990-),女,在读硕士,主要从事土壤肥力研究。

通讯作者:张晋京,男,教授,E-mail: zhangjinjing@126.com

王立春,男,研究员,E-mail: wlc1960@163.com

随着全球人口的增长,粮食安全问题已经受到广泛关注^[1]。玉米是世界产量最高的粮食作物^[2],同时也是我国第二大粮食作物^[3]。研究表明,自20世纪60年代以来,我国玉米产量呈现增加趋势^[3]。然而,为了满足快速增长的食品、饲料和燃料需求,玉米产量还必须保持持续的增长^[3-6]。

已有的研究表明,化肥在增加玉米产量方面起着十分重要的作用^[7]。但目前,我国的化肥利用率仍然很低,其中氮肥的表观利用率仅为29.1%,显著低于世界平均水平^[8]。因此,在确保粮食安全的前提下提高氮肥利用率,一直以来都是我国科学家关注的焦点^[8]。

明确影响玉米产量和氮肥利用率的因素,是提高玉米产量和氮肥利用率的关键。以往的研究中,主要报道氮肥用量、施肥方式、作物品种和土壤肥力等对玉米产量和氮肥利用率的影响^[8-14]。土壤性质是影响作物生长以及肥料氮素转化、残留和损失过程的关键因素,因此不同类型土壤在物理、化学和生物学性质上的差异必将对玉米产量和氮肥利用率产生重要影响^[15-16]。但目前,关于土壤性质与玉米产量和氮肥利用率之间的关系尚缺乏系统和深入的研究。为此,本研究通过盆栽试验,研究吉林省主要类型农田土壤的玉米产量和氮肥利用率,分析玉米产量和氮肥利用率与土壤物理、化学和生物学性质之间的关系,以期为提高玉米产量和合理施用氮肥提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 试验设计

供试土壤为暗棕壤、白浆土、黑土、草甸土、冲积土和风沙土,其中暗棕壤和白浆土取自吉林省东部延吉市,黑土和草甸土取自吉林省中部长春市,冲积土取自吉林省中部四平市梨树县,风沙土取自吉林省西部松原市长岭县。供试氮、磷和钾肥分别为尿素、过磷酸钙和硫酸钾,供试玉米品种为先玉335。

盆栽试验于2013年5~10月在吉林农业大学培养场进行,此期间的平均气温约为20℃,降雨量约为548 mm。试验设置5个不同的施氮处理,即0、0.10、0.14、0.16和0.18 g N/kg土(相当于田间施

氮量0、168、240、270和312 kg N/hm²,分别用N0、N0.10、N0.14、N0.16和N0.18表示),各处理磷、钾肥用量保持一致(即0.18 g P₂O₅/kg土和0.12 g K₂O/kg土)。氮肥的三分之一及所有的磷、钾肥都做基肥施用,其余的三分之二氮肥做追肥施用。将土样与肥料充分混匀后,装入米氏盆中,每盆装土13 kg。每个处理设3次重复,随机排列。

1.2 测定和计算方法

土壤物理性质(容重、孔隙度、机械组成、团聚体组成、水分常数等)、化学性质(pH值、总有机碳、易氧化有机碳、腐殖质碳等)和生物学性质(脲酶、过氧化氢酶、酸性磷酸酶活性等)以及土壤养分(碱解氮、有效磷、速效钾等)采用常规方法^[17-19]测定;待玉米成熟后,分别测定穗长、秃尖长度、穗粗、果穗重、穗轴重、穗粒数和穗粒重;用氮肥偏生产力(PFP_N,为玉米子粒产量与氮肥施用量的比值)表示氮肥的利用效率。

1.3 数据处理和统计分析

数据处理用Excel 2003软件,统计分析用DPS 7.05软件。采用双因素方差分析考察土壤类型、施氮量及其交互作用对玉米子粒产量和氮肥利用率的影响,单因素方差分析考察每种土壤类型不同施氮量之间的差异显著性,线性相关分析考察玉米子粒产量和氮肥利用率与土壤性质之间的关系。

2 结果与分析

2.1 玉米产量及产量构成因素

双因素方差分析结果(表1)表明,土壤类型和施氮量对玉米穗长、穗粗、果穗重、穗轴重和穗粒数和穗粒重都有显著的影响;两者的交互作用对玉米秃尖长、穗粗、穗轴重和穗粒数有显著的影响,而对玉米穗长、果穗重和穗粒重则没有显著的影响。

表1 土壤类型、施氮量及其交互作用对玉米穗长、穗粗、果穗重、穗轴重、穗粒数和穗粒重影响的双因素方差分析

因素	穗长		秃尖长		穗粗		果穗重		穗轴重		穗粒数		穗粒重	
	F	P	F	P	F	P	F	P	F	P	F	P	F	P
土壤类型(A)	41.74	**	19.72	**	11.29	**	60.62	**	41.13	**	28.02	**	57.94	**
施氮量(B)	42.05	**	10.90	**	32.88	**	83.17	**	48.28	**	27.19	**	78.70	**
A×B	1.42	ns	2.37	**	2.48	**	1.55	ns	2.04	*	1.81	*	1.53	ns

注:**代表P<0.01,*代表P<0.05,ns代表P>0.05

不同类型土壤相比,平均玉米穗长的顺序为白浆土(19.9 cm)>暗棕壤(19.5 cm)>草甸土(18.8 cm)>冲积土(18.7 cm)>黑土(18.3 cm)>风沙土

(15.2 cm),其中冲积土、草甸土和黑土、白浆土和暗棕壤以及草甸土和暗棕壤之间的差异不显著;平均秃尖长为风沙土(3.99 cm)>黑土(2.58 cm)>

暗棕壤(1.89 cm)>冲积土(1.86 cm)>草甸土(1.77 cm)>白浆土(1.67 cm),其中冲积土、白浆土、草甸土和暗棕壤之间的差异不显著;平均穗粗为暗棕壤(14.8 cm)、草甸土(14.8 cm)、白浆土(14.8 cm)>黑土(14.6 cm)>冲积土(14.2 cm)>风沙土(13.7 cm),其中白浆土、草甸土、黑土和暗棕壤之间的差异不显著;平均果穗重为白浆土(207.1 g)>暗棕壤(205.8 g)>草甸土(197.0 g)>冲积土(188.7 g)>黑土(178.0 g)>风沙土(109.6 g),其中白浆土、草甸土和暗棕壤、冲积土和草甸土以及冲积土和黑土之间的差异不显著;平均穗轴重为暗棕壤(24.3 g)>白浆土(24.2 g)>草甸土(23.4 g)>冲积

土(22.8 g)>黑土(22.6 g)>风沙土(15.4 g),其中冲积土、白浆土、草甸土和暗棕壤以及冲积土、草甸土和黑土之间的差异不显著;平均穗粒数为草甸土(540粒)>白浆土(533粒)>暗棕壤(523粒)>冲积土(496粒)>黑土(474粒)>风沙土(305粒),其中冲积土、白浆土、草甸土和暗棕壤以及冲积土、黑土和暗棕壤之间的差异不显著。由表2可见,与不施氮肥(即N0)处理相比,施用氮肥后玉米的穗长、穗粗、果穗重、穗轴重和穗粒数都明显增加,而秃尖长明显减小;随施氮量的增加,玉米的穗长、穗粗、果穗重、穗轴重和穗粒数呈现增加趋势,而秃尖长趋于减少(除风沙土外)。

表2 6种类型土壤中不同施氮量下的玉米产量构成因素

土壤类型	处理	穗长(cm)	秃尖长(cm)	穗粗(cm)	果穗重(g)	穗轴重(g)	穗粒数(粒)
白浆土	N0	18.2 b	2.93 a	13.8 b	145.6 b	18.8 b	436 b
	N0.10	20.0 ab	1.00 bc	14.6 ab	210.5 a	24.8 a	570 a
	N0.14	21.2 a	1.93 ab	15.2 a	228.1 a	26.7 a	551 ab
	N0.16	20.1 ab	1.70 bc	15.3 a	230.6 a	24.9 a	576 a
	N0.18	20.2 a	0.77 c	15.1 a	220.7 a	25.8 a	531 ab
暗棕壤	N0	17.8 b	3.33 a	13.6 b	133.5 c	21.1 b	378 c
	N0.10	20.1 a	1.70 ab	15.1 a	221.9 ab	24.9 a	598 a
	N0.14	20.5 a	1.43 b	15.3 a	233.6 a	25.1 a	594 a
	N0.16	18.6 b	1.20 b	14.7 a	203.5 b	23.5 ab	477 b
	N0.18	20.4 a	1.80 ab	15.4 a	236.6 a	26.7 a	566 ab
草甸土	N0	16.1 b	3.83 a	14.1 c	122.6 c	17.8 d	359 c
	N0.10	18.9 a	1.73 b	14.8 b	203.4 b	22.4 c	594 a
	N0.14	19.5 a	0.93 b	14.6 bc	211.6 b	23.9 bc	596 a
	N0.16	20.0 a	1.87 b	14.9 b	208.0 b	25.4 ab	510 b
	N0.18	19.6 a	0.50 b	15.6 a	239.3 a	27.5 a	640 a
冲积土	N0	14.7 b	3.00 a	13.0 b	102.1 b	14.6 c	312 c
	N0.10	19.2 a	1.87 b	14.6 a	207.4 a	21.7 b	580 a
	N0.14	20.2 a	1.75 b	14.5 a	222.2 a	29.1 a	571 a
	N0.16	20.4 a	1.10 b	14.5 a	226.1 a	24.2 b	576 a
	N0.18	19.1 a	1.60 b	14.3 a	185.8 a	24.1 b	441 b
黑土	N0	15.3 b	3.33 a	13.8 d	117.1 d	17.3 b	312 c
	N0.10	18.9 a	3.25 a	14.6 bc	174.4 c	22.2 a	466 b
	N0.14	19.2 a	2.40 ab	14.4 c	188.1 bc	23.2 a	500 ab
	N0.16	18.8 a	2.43 ab	14.8 b	200.5 ab	25.7 a	522 ab
	N0.18	19.4 a	1.50 b	15.4 a	209.8 a	24.5 a	572 a
风沙土	N0	12.1 b	3.23 a	11.1 b	48.6 b	9.06 b	230 a
	N0.10	16.0 a	4.80 a	14.4 a	119.7 a	15.7 a	328 a
	N0.14	16.1 a	4.40 a	14.7 a	125.8 a	16.9 a	304 a
	N0.16	15.2 a	3.40 a	13.9 a	122.9 a	16.5 a	320 a
	N0.18	16.5 a	4.10 a	14.4 a	130.9 a	18.9 a	345 a

注:不同的小写字母表示同一土壤不同施氮量之间差异显著($P<0.05$)

不同类型土壤相比,平均玉米子粒产量(即穗粒重)的顺序为白浆土(182.7 g/盆)>暗棕壤(181.6 g/盆)>草甸土(173.4 g/盆)>冲积土(165.9 g/盆)>黑土(155.2 g/盆)>风沙土(92.9 g/盆),其中白浆土、暗棕壤和草甸土,草甸土和冲积土以及冲积土和黑土之间的差异不显著。从图 1a 可以看到,与 N0 处理相比,施用氮肥后玉米子粒产量均显著增加,其中在白浆土、暗棕壤、草甸土、冲

积土、黑土和风沙土中的最大增加幅度分别为 63.3%、85.7%、102.6%、130.6%、86.5% 和 182.5%; 随施氮量的增加(N0.10 ~ N0.18),玉米子粒产量呈现增加趋势,但在白浆土、冲积土和风沙土中几种施氮量处理间都没有显著差异。已有研究结果表明,施用氮肥能够提高玉米产量,土壤肥力越低则氮肥增产效应越大^[8],这与本结果基本一致。

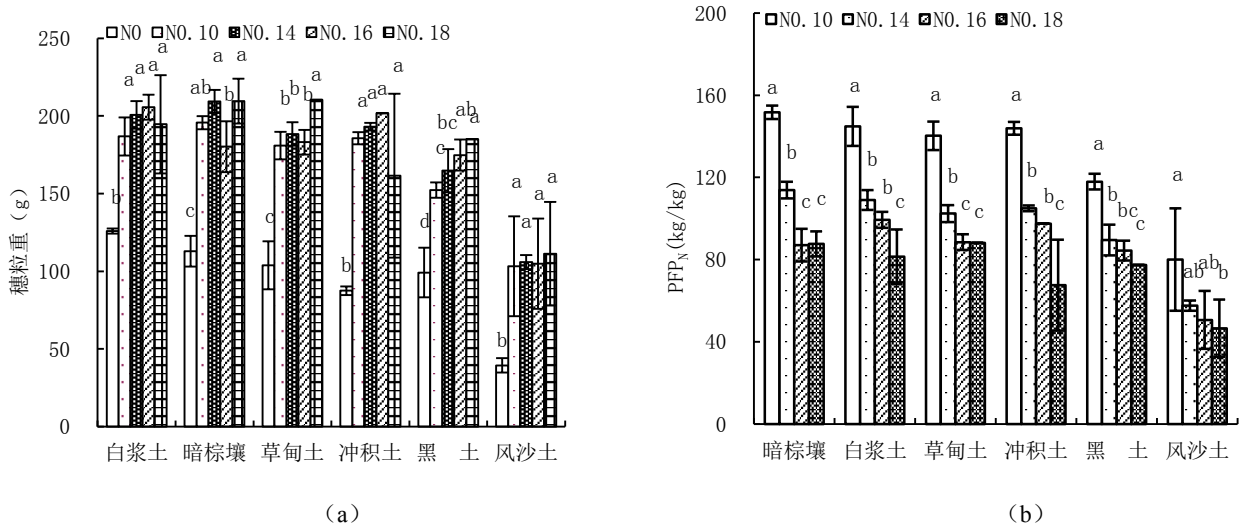


图 1 6 种类型土壤中不同施氮量下的玉米子粒产量(a)和氮肥偏生产力(b)

2.2 氮肥利用率

研究指出,偏生产力是现阶段评价我国氮肥效应的适宜指标^[8]。双因素方差分析的结果表明,土壤类型、施氮量及其交互作用对 PFP_N 都有显著影响(P<0.05)。不同类型土壤相比,平均 PFP_N 的顺序为暗棕壤(110.1 kg/kg)>白浆土(108.7 kg/kg)>草甸

土(104.8 kg/kg)>冲积土(103.5 kg/kg)>黑土(92.3 kg/kg)>风沙土(58.7 kg/kg),其中暗棕壤、白浆土、草甸土和冲积土之间的差异不显著。由图 1b 可见,与 N0 处理相比,施用氮肥后 PFP_N 均明显降低,其中在暗棕壤、白浆土、草甸土、冲积土、黑土和风沙土中的降低幅度分别为 42.6%、43.7%、

表 3 6 种类型土壤中玉米子粒产量和氮肥偏生产力与土壤性质的相关分析

	PFP _N	脲酶活性	酸性磷酸酶活性	pH	细砂粒	粉粒	微团聚体	容重	总孔隙度	毛管孔隙度	田间持水量
玉米子粒产量	0.996**	-0.923**	-0.928**	-0.936**	-0.891*	0.846*	-0.864*	-0.861*	0.860*	0.911*	0.980**
PFP _N		-0.906*	-0.927**	-0.928**	-0.863*	0.846*	-0.840*	-0.858*	0.858*	0.870*	0.976**
脲酶活性			0.955**	0.937**	0.848*	-0.918**	0.801	0.973**	-0.972**	-0.910*	-0.969**
酸性磷酸酶活性				0.987**	0.817*	-0.910*	0.675	0.982**	-0.982**	-0.858*	-0.986**
pH					0.822*	-0.846*	0.676	0.952**	-0.952**	-0.915*	-0.996**
细砂粒						-0.853*	0.874*	0.763	-0.760	-0.877*	-0.841*
粉粒							-0.726	-0.945**	0.943**	0.720	0.874*
微团聚体								0.678	-0.675	-0.913*	-0.841*
容重									-1.000**	-0.790	-0.936**
总孔隙度										0.789	0.936**
毛管孔隙度											0.904*

注:土壤细砂粒指粒径 0.2 ~ 0.02 mm 的颗粒,粉粒指粒径 0.02 ~ 0.002 mm 的颗粒,微团聚体指 0.25 ~ 0.05 mm 的团聚体。**代表 P<0.01,*代表 P<0.05

37.2%、53.0%、34.4%和41.8%;随施氮量的增加, PFP_N呈现降低趋势,这与已有的研究结果也是一致的^[8]。

2.3 玉米子粒产量和氮肥利用率与土壤性质的关系

为了解影响玉米子粒产量和氮肥利用率的因素,笔者进一步分析玉米子粒产量和PFP_N与初始土壤的物理、化学和生物学性质之间的线性相关关系。限于篇幅,本文只列出与玉米子粒产量和PFP_N呈显著线性相关的土壤性质指标。由表3可知,玉米子粒产量与土壤田间持水量之间呈极显著正相关($P<0.01$),与粉粒(0.02~0.002 mm)含量、总孔隙度和毛管孔隙度呈显著正相关($P<0.05$),与pH值、脲酶和酸性磷酸酶活性呈极显著负相关,与细砂粒(0.2~0.02 mm)含量、0.25~0.05 mm微团聚体含量和容重呈显著负相关;PFP_N与土壤田间持水量呈极显著正相关,与粉粒含量、总孔隙度和毛管孔隙度呈显著正相关,与pH值和酸性磷酸酶活性呈极显著负相关,与细砂粒含量、0.25~0.05 mm微团聚体含量、容重和脲酶活性呈显著负相关。

以往通过田间长期定位试验的研究表明,氮磷钾肥配施条件下,玉米氮肥利用率与初始土壤pH值呈线性负相关^[16],这与本研究结果一致;然而以往研究也表明,玉米氮肥利用率与初始土壤有机质含量呈线性正相关^[16];此外,还有研究发现,玉米氮肥利用率与土壤有机碳、全氮、全磷和速效钾含量呈线性负相关^[20]。这可能是由于,不同研究者所采用的氮肥利用率指标不同;另一方面,也可能是由于土壤性质对氮肥利用率的影响本身就是一个复杂的过程,必须综合考虑各因子之间的相互作用。

3 结 论

通过盆栽试验的研究表明,随施氮量增加,玉米子粒产量趋于增加,而PFP_N趋于降低。不同类型土壤相比,平均玉米子粒产量为白浆土>暗棕壤>草甸土>冲积土>黑土>风沙土,平均PFP_N为暗棕壤>白浆土>草甸土>冲积土>黑土>风沙土。相关分析指出,玉米子粒产量和PFP_N与土壤粉粒(0.02~0.002 mm)含量、总孔隙度、毛管孔隙度和田间持水量之间呈线性正相关,与土壤细砂粒(0.2~0.02 mm)含量、0.25~0.05 mm微团聚体含量、容重、pH值、脲酶和酸性磷酸酶活性之间呈线性负相关。

参考文献:

- [1] Smyth S J, Phillips P W B, Kerr W A. Food security and the evaluation of risk [J]. *Global Food Security*, 2015(4): 16-23.
- [2] Arvanitoyannis I S, Tserkezos P. Corn and rice waste: a comparative and critical presentation of methods and current and potential uses of treated waste [J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 2008(43): 958-988.
- [3] Meng Q, Hou P, Wu L, et al. Understanding production potentials and yield gaps in intensive maize production in China [J]. *Field Crop Research*, 2013(143): 91-97.
- [4] Rosegrant M W, Paisner M S, Meijer S, et al. Global food projections to 2020: emerging trends and alternative futures [J]. *IFPRI*, 2001, 1(2): 251-263.
- [5] Edgerton M D. Increasing crop productivity to meet global needs for feed, food, and fuel [J]. *Plant Physiology*, 2009(149): 7-13.
- [6] Grassini P, Thorburn J, Burr C, et al. High-yield irrigated maize in the Western U.S. Corn Belt: I. On-farm yield, yield potential, and impact of agronomic practices [J]. *Field Crop Research*, 2011(120): 142-150.
- [7] Chen X, Cui Z, Vitousek P, et al. Integrated soil-crop system management for food security [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011(108): 6399-6404.
- [8] 于 飞,施卫明.近10年中国大陆主要粮食作物氮肥利用率分析[J]. *土壤学报*, 2015, 52(6): 1311-1324.
- [9] 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.
- [10] 朱兆良,张绍林,尹 斌,等.太湖地区单季晚稻产量-氮肥施用量反应曲线的历史比较[J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(1): 1-5.
- [11] 张 军,张洪程,段祥茂,等.地力与施氮量对超级稻产量、品质及氮素利用率的影响[J]. *作物学报*, 2011, 37(11): 2020-2029.
- [12] 王引荣,褚彦朝,李晋陵.我国粮食作物氮肥利用率及其影响因素分析[J]. *山西农业科学*, 2014, 42(7): 711-713, 738.
- [13] 焉 莉,冯国忠,高 强,等.丰水年施钾量对不同肥力土壤玉米产量的影响[J]. *吉林农业科学*, 2014, 39(2): 37-41, 56.
- [14] 方向前,邱 萍,李 姝,等.吉林省湿润冷凉区玉米品种产量研究[J]. *吉林农业科学*, 2012, 37(4): 4-6, 9.
- [15] 孙传范,曹卫星,戴廷波.土壤-作物系统中氮肥利用率的研究进展[J]. *土壤*, 2001, 33(2): 64-69, 97.
- [16] 李虹儒.长期施肥下我国粮食作物氮肥利用率变化特征[D].哈尔滨:东北农业大学,2008.
- [17] 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: 278-282.
- [18] 劳家桢.土壤农化分析手册[M].北京:农业出版社,1988: 101-297.
- [19] 关松荫.土壤酶及其研究法[M].北京:农业出版社,1986: 296-323.
- [20] 李 慧,徐明岗,朱 平,等.长期培肥我国典型黑土玉米氮肥效应的演变趋势[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(6): 1506-1513.

(责任编辑:王 昱)