

我国玉米育种与生产中 189 份自交系 氮利用效率评价

马庆¹, 李猛², 王慧³, 吴永升⁴

(1. 安徽农业大学生命科学院, 合肥 230036; 2. 宿州市农业科学院, 安徽 宿州 234000;
3. 中国农业科学院作物科学研究所, 北京 100081; 4. 广西农业科学院玉米研究所, 南宁 530007)

摘要: 以子粒产量的氮敏感指数和耐低氮系数为评价指标并结合株高和吐丝期等二级性状, 对我国玉米育种与生产上重要的 189 份玉米自交系进行氮利用效率评价。分析结果表明, 低氮与正常供氮条件下, 子粒产量均存在极显著的基因型与环境差异, 基因型差异是氮利用效率差异的重要原因之一。将正常供氮条件与低氮胁迫下的产量进行分析并结合株高和吐丝期等二级性状, 鉴定出郑 58、郑 28、中 106、7595-2 和昌 7-2 等 20 份玉米自交系较耐低氮且二级性状更符合当前玉米育种需要。

关键词: 玉米; 产量; 氮敏感指数; 耐低氮系数; 基因型

中图分类号: S513.035

文献标识码: A

Nitrogen Use Efficiency of 189 Maize Inbred Lines in Breeding and Production in China

MA Qing¹, LI Meng², WANG Hui³, WU Yong-sheng⁴

(1. *School of Life Sciences Anhui Agricultural University, Hefei 230036;*
2. *Suzhou Academy of Agricultural Sciences, Suzhou 234000;*
3. *Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081;*
4. *Maize Research Institute, Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanning 530007, China*)

Abstract: Nitrogen sensitive index and nitrogen tolerance coefficient of grain yield as the evaluation index, and combined with second level traits such as plant height, anthesis to silking interval(ASI) to investigate the nitrogen use efficiency of 189 maize inbred lines, which were widely used in maize breeding and production in China. The variance analysis results showed that the grain yield was significantly difference of genotype and environment in both the low and normal nitrogen treatments. The genetic variance was one of the most important reasons of the difference in nitrogen sensitivity among inbred lines. Based on analyzing the yielding data, plant height and silking day information of maize inbred lines, twenty inbred lines such as Zheng 58, Zheng 28, Zhong 106, 7595-2 and Chang7-2 were identified as highly low-nitrogen resistant materials.

Key words: Maize; Yield; Nitrogen-sensitive index; Nitrogen-tolerance index coefficient; Genotype

氮是玉米生长的重要营养元素之一, 氮肥施用量逐年增加, 氮肥施用量增长的幅度远远大于玉米

增产的幅度^[1], 导致氮肥利用效率下降, 平均玉米氮肥利用效率仅约 33%^[2]。我国氮肥年消耗量约 3 000 万 t 纯氮。氮肥的大量使用, 会引起地下水硝酸盐含量超标, 地表水体富营养化^[3,4]。因此研究玉米氮利用效率具有重要意义。

在玉米氮利用效率的评价鉴定方面, 前人开展了大量的探索性工作。研究发现, 美国温带玉米种质、南美热带玉米材料和欧洲玉米种质在氮利用效率方面存在显著的基因型差异^[5~7]。我国研究人员发现, 我国玉米自交系、农家品种和杂交种分别对低

收稿日期: 2015-06-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(31361140364)、国家农业科技成果转化项目(2013GB2C300202)

作者简介: 马庆(1977-), 男, 安徽宿州人, 副教授, 博士, 主要从事玉米育种研究。Tel: 13955157477

E-mail: mqmmq@126.com

吴永升为本文通讯作者。

氮胁迫的耐性表现出很大差异,利用氮高效的玉米自交系容易组配出氮高效的玉米杂交组合^[8-10]。前人关于玉米氮利用效率方面的评价,为田间试验设计、评价指标体系的建立、生理测定等积累了大量有益的经验。这些研究试验规模比较小,只是反映少数玉米杂交种或自交系的生理差异和遗传变异^[11,12],对我国玉米育种和生产上利用的自交系材料氮利用效率评价方面缺乏系统研究,限制了我国玉米氮利用效率的遗传育种与改良。本研究以189份我国主要玉米自交系为材料,在低氮和正常氮水平下进行评价,丰富玉米自交系耐低氮相关的表型数据,为基于这些材料的遗传和育种研究提供参考。

1 材料与试验方法

1.1 田间试验设计

试验地点为海南崖城基地,试验地本试验前连续3年不施肥种植玉米等高秆作物,并于成熟后全株拔除,土壤基础含氮量低。供试材料为189份玉

米自交系,于2007年、2008年冬季种植,采用完全随机区组试验设计,设施氮与不施氮2个处理,每个处理设置3次重复。试验小区行长为3.6 m,行距为60 cm,株距20 cm。施氮处理施60 kg/hm²的P₂O₅和45 kg/hm²的K₂O作底肥,3叶期施69 kg/hm²纯氮,大喇叭口期追施172.5 kg/hm²纯氮;不施氮处理施60 kg/hm²的P₂O₅和45 kg/hm²的K₂O作底肥,全生育期不施氮肥。

1.2 土壤养分含量分析

施肥前采用5点取样法进行取样,测定土壤养分含量,测定指标包括全氮含量、全磷含量、有机质含量、有效磷含量、速效钾含量、缓效钾含量和pH值等,土壤的养分含量取测定均值(表1)。

1.3 株高和散粉期

收获前每个供试材料连续测量5株计算平均株高,株高为地面至雄穗第一分枝的高度;吐丝期为播种到吐丝的天数,吐丝期以田间调查每个供试材料50%以上植株吐丝当天为基准。

表1 供试土壤基本状况

Table 1 Basic properties of tested soils

年份 Year	全氮(g/kg) Total-N	全磷(g/kg) Total-P	有机质(g/kg) Organic matter	有效磷(mg/kg) Available-P	速效钾(mg/kg) Available-K	缓效钾(mg/kg) Slowly available-K	pH值 pH value
2007	0.52	0.41	9.09	25.34	209.51	409.59	6.16
2008	0.55	0.49	9.20	24.17	215.61	419.35	5.91

1.4 小区产量

成熟后以小区为单位收获测产,为避免边际效应影响,每小区去行头行尾各2株,取中间连续10株样本,风干后室内脱粒称重,分别测定每小区子粒水分含量,以含水量为13.0%进行矫正,计算每个供试材料产量。

1.5 数据统计分析

采用META-R3.0(Multi Environment Trial Analysis for R)进行基本统计量分析,根据2年试验获得的玉米自交系小区产量,用META-R3.0计算低氮和正常氮条件下小区产量、株高和生育期的BLUP值。

2 结果与分析

2.1 主要表型性状的基本统计量分析

两年的表型数据基本统计量分析结果表明(表2),在低氮胁迫下,各性状都不同程度地发生变化,具体表现为玉米自交系小区产量和株高降低,吐丝期变长。各性状受低氮胁迫影响程度不一,小区产量的变化幅度最大。低氮胁迫下,2007年试验小

区产量平均为1.52 t/hm²,比正常供氮水平降低了38.2%;2008年在同样的试验点低氮胁迫下小区产量为1.74 t/hm²,比正常供氮水平降低41.2%。低氮胁迫下,2007年平均株高为112.6 cm,比正常供氮水平降低了15.6%;2008年在同样的试验点低氮胁迫下平均株高为96.4 cm,比正常供氮水平降低19.1%。低氮胁迫下,2007年吐丝期平均59.9 d,比正常供氮水平增加4.1%;2008年在同样的试验点低氮胁迫下吐丝期平均64.9 d,比正常供氮水平增加3.4%。

2.2 低氮与施氮条件下玉米自交系表型性状的基因型差异

联合方差分析表明(表3),在低氮和正常氮条件下,所有性状基因型间的差异、年份间的差异和基因型和年份互作差异都达到了极显著水平;除了在低氮条件下株高的差异在区组间的差异达显著水平外,其他性状在低氮和正常氮条件下都未达到显著水平。

2.3 玉米自交系耐低氮二级性状分析

本研究对供试的189份自交系株高和吐丝期进

行分析,结果表明,株高和吐丝天数都低于低氮和正常氮条件下平均值的玉米自交系有郑58、昌7-2、502、4379和8001等25份(表4)。为了适应玉米收获

机械化对育成品种的要求,后续育种中选择亲本组配育种组合分离二环系时应选择株高适中和生育期偏短的玉米自交系材料。

表2 189份玉米自交系表型性状的主要参数统计分析

Table 2 Analysis of phenotype of 189 inbred lines in maize

性状 Trait	年份 Year	低氮 Low nitrogen				正常氮 Normal nitrogen			
		最小值 Minimum	最大值 Maximum	均值 Mean±SD	遗传力 Heritability	最小值 Minimum	最大值 Maximum	均值 Mean±SD	遗传力 Heritability
产量(t/hm ²)	2007	0.159 4	4.003 6	1.52±0.72	0.908 4	0.429 2	5.226 7	2.46±0.86	0.9034
	2008	0.078 5	3.689 3	1.74±0.70	0.854 1	0.267 5	5.483 8	2.96±0.93	0.8882
株高(cm)	2007	57.6	178.4	112.60±21.81	0.811 4	70	197.2	133.45±21.71	0.9451
	2008	45	170.4	96.35±18.23	0.869 7	68	177.2	119.14±20.05	0.9151
吐丝期(d)	2007	40	75	59.87±5.14	0.911 5	39	73	57.48±4.80	0.917
	2008	49	78	64.94±5.05	0.927 8	49	76	62.79±5.26	0.9222

表3 各性状联合方差分析F值表

Table 3 The F value of the analysis of variance for traits investigated

处理 Treatment	变异来源 Source	产量 Yield	株高 Plant height	吐丝期 Silking stage
低氮	重复	12.5	4.74*	1.31
	基因型	13.87**	10.03	21.30**
	年份	88.86**	480.60**	329.17**
	基因型×年份	3.18**	1.53**	3.21**
正常氮	重复	3.88	1.72	2.04
	基因型	15.34**	26.52**	20.90**
	年份	344.90**	734.05**	448.80**
	基因型×年份	3.71**	2.69**	2.72**

注:*和**分别表示显著性水平为0.05和0.01。

Note: * and ** indicated the difference significant at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively.

表4 株高和吐丝期都低于平均值的玉米自交系

Table 4 The maize inbred lines with lower plant height and silking stage

名称 Name	株高(cm) Plant height	吐丝期(d) Silking stage	名称 Name	株高(cm) Plant height	吐丝期(d) Silking stage
502	97.4	51.7	吉4112	111.7	61.2
4379	99.2	61.2	冀53	104.0	60.3
8001	104.0	58.8	临系11	98.5	53.9
48-2	94.6	58.5	鲁原133	89.8	59.3
7595-2	114.1	58.1	沈118	105.5	56.4
77	100.6	60.1	四至四	101.7	57.2
CA335	109.4	59.7	汶黄	85.9	59.5
DH212	99.4	54.0	早49	99.1	53.8
H21	98.0	56.7	郑28	109.8	60.4
H3	114.7	60.9	郑58	107.0	56.7
昌7-2	107.7	60.2	中106	107.8	61.2
东91	84.0	56.5	中黄68	93.8	57.5
获唐黄	108.0	60.1			

2.4 玉米自交系氮利用效率评价

供试玉米自交系在低氮和正常氮条件下的氮效率如图1所示。不同玉米自交系在低氮和正常氮条件下产量差异较大。以供试玉米自交系在低氮和正常氮条件下的平均产量为界限,把供试的玉米自交系材料划分为4种不同的类型:双高效型,玉米自交系在低氮和正常氮水平下的产量均高于平均值,如图中的I区,这一类型的玉米自交系包括郑58、掖478、农大178、OH43、PI143、丹340、齐319和丹340等93份玉米自交系;高氮高效型,玉米自交系在正常氮水平下的产量高于平均值,在低氮水平下低于

平均值,如图中的II区,这一类型的玉米自交系包括65232宽、B104、Lx9801、早23、黄早四、吉465、鲁原92和掖52106等17份玉米自交系;双低型,玉米自交系在低氮和正常氮水平下的产量均低于平均值,如图中的III区,这一类型的玉米自交系包括自330、中自01、中黄64、中451、长3、早49、武314和掖107等70份玉米自交系;低氮高效型,玉米自交系在低氮水平下的产量高于平均值,在正常氮水平下低于平均水平,如图中的IV区,这一类型的玉米自交系包括昌7-2、金黄59、辽2345、H3、CA339和7167-1等9份玉米自交系。

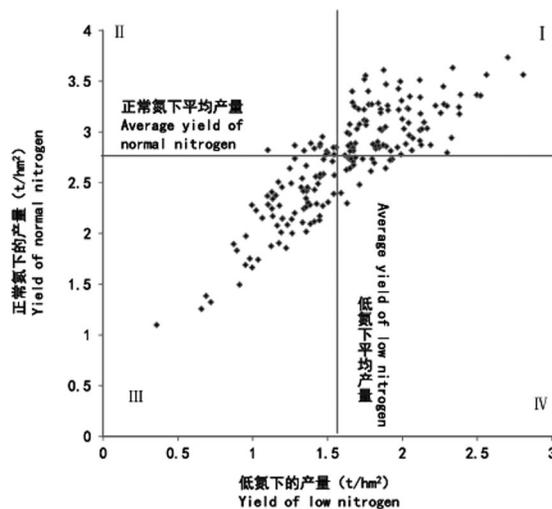


图1 不同玉米自交系的氮效率

Fig. 1 Nitrogen efficiency of different maize inbred lines

考虑到育种实际,比较适合当前育种方向的自交系类型应该为双高效型和低氮高效型。如果同时考虑到玉米育种中对株高和生育期的要求,属于双高效型且株高和吐丝期都比总平均BLUP值低的玉米自交系有郑58、郑28、中106、7595-2、D黄212、502、8001、77、CA335、获唐黄、吉4112、冀53、临系11、鲁原133、沈118、四至四和中黄68共17份;属于低氮高效型且株高和吐丝期都比总平均BLUP值低的玉米自交系有昌7-2、48-2和H3共3份。

3 结论与讨论

3.1 玉米自交系耐低氮评价指标

玉米耐低氮性是复杂的数量性状。在低氮胁迫下,植株经过生理生化适应性反应后,最终在形态和产量上体现^[14]。缺氮会引起同化物积累少,株高降低、ASI延长等应激反应^[15],同时花期同化物积累量降低,向穗部转移的物质减少^[16],从而增加子粒败育率,最终引起子粒产量降低^[17]。目前,国内外对玉米

氮利用效率研究主要集中在形态指标、生理生化、分子标记、基因功能鉴定等方面^[18]。现有玉米耐低氮鉴定指标较多,至今并未形成统一的评价玉米氮利用效率的简单、有效和实用的指标体系^[19]。

氮效率的定义和类型划分是一个比较复杂的问题,许多研究者对多种作物进行研究,结论不一^[20]。按照Moll等^[21]的定义,在低氮水平下生物量或产量较高时,某些基因型耐低氮能力较强,但施氮量增加时,其生物量或产量增加得较少。如果只以基因型在某供氮水平下的生物量或产量来划分,则该基因型在低氮时高效,正常施氮时低效;在低氮胁迫下产量较低时,某些基因型耐低氮能力较弱,当施肥量增加时,生物量或产量增加较多,则该基因型在低氮时低效,正常供氮时高效。但是,同一基因型在不同肥力水平下表现不一样,不同基因型产量潜力也有差异。由此可见,单纯以作物在某一养分浓度时的生物量或产量来定义氮效率并不完整。低氮胁迫条件下子粒产量是最主要、最直接的选择指标。但随着

氮胁迫程度的增加,子粒产量的遗传力逐步下降,单纯以产量为指标的选择效率也随之下降。如果同时适当利用部分次级形态或生理性状,则会明显提高选择效率^[19]。本研究以不同氮水平下玉米自交系小区产量差异为主要指标,结合株高、ASI值和吐丝期来对玉米自交系的耐低氮性进行评价,能显著地提高评价的准确性。

3.2 玉米自交系耐低氮评价

我国拥有丰富的玉米遗传资源,对不同自交系进行氮利用效率评价,不仅为耐低氮遗传研究提供信息,而且为玉米传统育种提供理论依据。玉米的耐低氮性受多基因控制、多途径影响的数量性状,全面评价玉米耐低氮性,需要结合多指标综合鉴定^[22]。玉米育种中除了要求自交系一般配合力好且自身产量较高外,还要求株高不能太高,生育期不能太长,以较好地满足机械化收获的要求。玉米自交系耐低氮鉴定以及评价一直以来都是耐低氮育种的难题,多年来各国学者分别提出了水培和盆栽并通过监测植株各部位氮素转运效率等自交系鉴定评价的方法^[23,24]。这些玉米耐低氮鉴定的方法结果较精确,但却很难大规模实施。本研究通过比较各玉米自交系在低氮和正常氮条件下的产量表现,最终筛选出郑58、郑28和中106等耐低氮且比较适合当今玉米育种发展方向的玉米自交系。玉米耐低氮是复杂的数量性状,易受环境影响,因此进行玉米耐低氮种质筛选时,应确保试验条件的一致性,进行多性状筛选,提高筛选的准确性,只有在多种环境条件下能够重复的材料才能确定是真正耐低氮的材料。

3.3 耐低氮玉米自交系在育种中的应用

进行氮利用效率评价的最终目的是把研究结果应用于育种,氮高效育种应积极创造和充分利用氮高效利用基因和稳产基因重组表达的条件。近年来,玉米氮高效育种取得了一些重要进展,利用大量玉米自交系鉴定和评价的信息,育成一些氮高效的品种^[25,26]。氮高效育种可考虑以下几种策略:培育氮高效回交导入系,在准确耐低氮鉴定的基础上,选择耐低氮基因供体和需要改良的受体;在氮胁迫条件下,于各个回交世代选择耐低氮单株,入选材料进行配合力测定,配制杂交组合进行多点鉴定。自交系进行回交改良时,根据育种目标要求,选择同一杂种优势类群内2个或2个以上自交系,通过杂交、回交和自交等育种手段,选育出综合性状明显优于原材料的新自交系。氮高效群体改良,在准确耐低氮鉴定基础上,选择氮高效自交系,遵循杂种优势模式,组建窄基群体,进行轮回选择,重组后组建下一

轮群体。

本研究的189份玉米自交系中,经产量氮敏感指数和耐低氮系数评价为高度耐低氮和中度耐低氮且株高较矮和生育期较短的自交系有17份,这些自交系可用来筛选耐低氮的近等基因系,在氮高效育种中,这些自交系可用作改良氮素利用效率的供体亲本,遵循杂种优势原理,通过与具有优良农艺性状属同一类群的轮回亲本回交对相关性状进行改良,产生高氮素利用效率的自交系。中黄68可以和吉4112相互改良,它们都属于BSSS种质,然后再与氮高效的四平头(如昌7-2)组配组合,这样有可能产生高氮素利用效率、具高产潜力的玉米新品种;或者把多份比较耐低氮的属于同一杂种优势类群的自交系组成一个群体,在隔离条件下让它们充分自由授粉,打破不良基因连锁,让有利基因充分重组,然后选择优良单株自交选系,结合低氮和高密度,选出耐低氮的优良自交系。如7595-2、临系11、郑58、中黄68和吉4112等都属于BSSS种质,这些自交系组成一个窄基群体,充分自由授粉后选系,与耐低氮的四平头自交系组配,有可能产生高效氮利用率、具高产潜力的玉米新品种。因此,玉米自交系的耐低氮综合指数及相应的耐低氮类型为玉米氮利用效率育种提供了直观的依据,减少育种的盲目性及工作量。

参考文献:

- [1] Sherrard J H, Lambert R J, Below F E. Use of physiological traits, especially those of nitrogen metabolism for selection in maize[J]. In: C A. Beyra (Eds), *Biochemical Basis of Plant Breeding*, Vol.2, Nitrogen Metabolism. CRC Press, Boca Raton, FL, 1986: 109-130.
- [2] William R R, Gordon V J. Improving nitrogen use efficiency for cereal production[J]. *Agron. J.*, 1999, 91(3): 357-363.
- [3] 张维理,武淑霞,冀宏杰. 中国农业面源污染形势估计及控制对策—21世纪初期中国农业面源污染的形势估计[J]. *中国农业科学*, 2004, 37(7): 1008-1017.
Zhang W L, Wu S X, Ji H J. Estimation of agricultural non-point source pollution in China and the alleviation strategies[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(7): 1008-1017. (in Chinese)
- [4] 孙志梅,武志杰,陈利军,等. 农业生产中的氮肥施用现状及其环境效应研究进展[J]. *土壤通报*, 2006, 37(4): 782-786.
Sun Z M, Wu Z J, Chen L J, et al. Research advances in nitrogen fertilization and its environmental effects[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2006, 37(4): 782-786. (in Chinese)
- [5] Balko L G, Russell W A. Effects of rate of nitrogen fertilizer on maize inbred lines and hybrid progeny[J]. *Prediction of Yield Response Maydica*, 1980, 25: 65-79.
- [6] Lafitte H R, Edmeades G O. Improvement for tolerance to low soil nitrogen in tropical maize. Variation in yield across environments[J]. *Field Crop Res.*, 1994c, 39: 27-38.

- [7] Bertin P, Gallais A. Genetic variation for nitrogen use efficiency in a set of recombinant maize inbred lines I[J]. *Agrophysiological Results Maydica*, 2000, 45: 53-66.
- [8] 王 艳, 米国华, 陈范骏, 等. 玉米氮素吸收的基因型差异及其与根系形态的相关性[J]. *生态学报*, 2003, 23(2): 297-302.
Wang Y, Mi G H, Chen F J, et al. Genotypic differences in nitrogen uptake by maize inbred lines its relation to root morphology[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(2): 297-302. (in Chinese)
- [9] 陈范骏, 米国华, 张福锁, 等. 华北区部分主栽玉米杂交种的氮效率分析[J]. *玉米科学*, 2003, 11(2): 78-82.
Chen F J, Mi G H, Zhang F S, et al. Nitrogen use efficiency in some of main maize hybrids grown in north China[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2003, 11(2): 78-82. (in Chinese)
- [10] 曹敏建, 衣 莹, 佟占昌, 等. 耐低氮胁迫玉米的筛选与评价[J]. *玉米科学*, 2000, 8(4): 64-69.
Cao M J, Yi Y, Tong Z C, et al. Selection and evaluation of low-nitrogen resistant maize[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2000, 8(4): 64-69. (in Chinese)
- [11] Presterl T, Groh S, Landbeck M, et al. Nitrogen uptake and utilization efficiency of European maize hybrids developed under conditions of low and high nitrogen input[J]. *Plant Breeding*, 2002, 121: 480-486.
- [12] Presterl T, Seitz G, Landbeck M, et al. Improving nitrogen-use efficiency in European maize: estimation of quantitative genetic parameters[J]. *Crop Sci.*, 2003, 43: 1259-1265.
- [13] Wu Y S, Liu W G, Li X H, et al. Low-nitrogen stress tolerance and nitrogen agronomic efficiency among maize inbred: comparison of multiple indices and evaluation of genetic variation[J]. *Euphytica*, 2011, 180(2): 281-290.
- [14] Lafitte H R, Edmeades G O. Improvement for tolerance to low soil nitrogen in tropical maize I selection criteria[J]. *Field Crops Research*, 1994, 39: 1-14.
- [15] 黎 亮, Longin C H, 孙文涛, 等. 华北平原夏玉米氮利用效率的遗传参数估计[J]. *中国农业大学学报*, 2007, 12(6): 50-56.
Li L, Longin C H, Sun W T, et al. Estimation of quantitative genetic parameters for improving nitrogen use efficiency in north China summer maize[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2007, 12(6): 50-56. (in Chinese)
- [16] Uhart S A, Andrade F H. Nitrogen deficiency in maize: I. Effects on crop growth, development, dry matter partitioning and kernel Set[J]. *Crop Sci.*, 1995, 35: 1376-1383.
- [17] Mozafar A. Kernel abortion and distribution of mineral elements along the maize ear[J]. *Agron. J.*, 1990, 82: 511-514.
- [18] 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]. *农业生物技术学报*, 1999, 7(3): 248-254.
Liu J A, Mi G H, Zhang F S. Genotypic difference in nitrogen efficiency of five maize inbred lines as affected by nitrate levels[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 1999, 7(3): 248-254. (in Chinese)
- [19] Edmeades G O, Bänziger M, Mickelson H R. Developing drought and low N tolerant maize[J]. *Cimmyt*, 1996: 557-563.
- [20] Cassman KG. Ecological intensification of cereal production systems: yield potential, soil quality, and precision agriculture[J]. *P. Natl. Acad. Sci. USA*, 1999, 96: 5952-5959.
- [21] Moll R H, KamPrath E J, Jacson W A. Analysis and interpretation of factors which contribute to efficiency of nitrogen utilization agron[J]. *P. Natl. Acad. Sci. USA*, 1982, 74: 562-564.
- [22] 米国华, 陈范骏, 春 亮, 等. 玉米氮高效品种的生物学术特征[J]. *植物营养与肥料学报*, 2007(1): 155-159.
Mi G H, Chen F J, Chun L, et al. Biological characteristics of nitrogen efficient maize genotypes[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2007(1): 155-159. (in Chinese)
- [23] William R R, Gordon V J. Improving nitrogen use efficiency for cereal production[J]. *Agron. J.*, 1999, 91(3): 357-363.
- [24] Tsai C Y, Huber D M, Glover D V. Relationship of N deposition to grain yield and response of three maize hybrids[J]. *Crop Sci.*, 1984, 24: 277-281.
- [25] Hirel B, P Bertin, Quiller I, et al. Towards a better understanding of the genetic and Physiological basis for nitrogen use efficiency in maize[J]. *Plant Physiol*, 2001, 125: 1258-1270.
- [26] 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 Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 915-924. (in Chinese)

(责任编辑:高 阳)