

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2013.00515

## 玉米产量-密度关系年代演化趋势的 Meta 分析

杨锦忠 张洪生 杜金哲

青岛农业大学农学与植保学院, 山东青岛 266109

**摘 要:** 为明确中国玉米产量-密度试验结果的年代演化趋势, 进一步探索提高玉米产量的突破方向和理论依据, 汇集从 1950s 到 2000s 中国玉米产量-密度的文献结果, 拟合产量-密度抛物线模型, 剔除异常后进行直方图、相关、通径等 Meta 分析。结果表明, 1950s 和 1960s 玉米产量明显低于 1970s 和 1980s, 1990s 以来产量持续增加, 2000s 最大, 为  $10.5 \text{ t hm}^{-2}$ , 1960s 以来年均增益  $150 \text{ kg hm}^{-2}$ 。最佳密度年代均值在  $4.5\sim 6.8 \text{ 株 m}^{-2}$  之间, 呈现(1950s 和 1960s)<(1970s 和 1980s)<1990s, 但是, 2000s 却小于 1990s。最佳密度下单株产量年代均值在  $0.08\sim 0.17 \text{ kg}$  之间, 呈现 1950s>(1960s 和 1970s)<1980s, 且 1990s 以来持续上升, 2000s 上升幅度更为明显。1990s 以来密度偏离最佳值引起的减产幅度呈现上升趋势。在持续增加密度的同时, 通过育种和栽培途径提高单株产量, 是玉米更高产的努力方向。

**关键词:** 玉米; 最高产量; 最佳密度; 单株产量; 年代趋势; Meta 分析

## Meta-Analysis of Evolution Trend from 1950s to 2000s in the Relationship between Crop Yield and Plant Density in Maize

YANG Jin-Zhong, ZHANG Hong-Sheng, and DU Jin-Zhe

Agronomy College, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China

**Abstract:** The relationship between crop yield and plant density in maize is essential for improving cropping system because of the fact that maize compensates for low plant density is less than other cereals such as wheat. To determine the evolution trend of yield-density relationships from maize plant density experiments reported in China, and to provide potential approaches to improve maize yield, based on requirements for meta-analysis, we collected the historical data of maize plant density experiments from the 1950s to 2000s in China containing values more than 1500 pairs of plant densities and their crop yield. Evolution trends of maximum crop yield, optimal plant density and yield per plant within six decades were examined after all eligible data sets were subject to fitting parabola model and further to statistical analyses such as histogram, correlation, and path. Crop yields in the 1970s and 1980s were considerably higher than those in the 1950s and 1960s. Crop yield steadily increased in recent three decades and reached the maximum of  $10.5 \text{ t ha}^{-1}$ . Annual yield increment was  $150 \text{ kg ha}^{-1}$  after 1960s. Optimum plant densities for different decades varied from  $4.5$  to  $6.8 \text{ plant m}^{-2}$ , showing (1950s and 1960s) < (1970s and 1980s) < 1990s > 2000s. Yield per plant for different decades varied from  $0.08$  to  $0.17 \text{ kg}$  and in the order: 1950s > (1960s and 1970s) < 1980s, then gradually increased after 1980s, with a great increase in 2000s. Crop yield loss due to departures from the optimal plant density appeared an increased trend in recent three decades. On the basis of increasing plant density, promoting yield per plant throughout breeding and cultivation approaches may lead to a higher level of maize production.

**Keywords:** Maize; Crop yield; Optimum plant density; Yield per plant; Evolution trend; Meta-analysis

从 1949 年到 2008 年, 中国玉米单产从  $961.5 \text{ kg hm}^{-2}$  提高到  $5556 \text{ kg hm}^{-2}$ , 增幅为 477.8%, 单产对中国玉米总产的贡献率占 68.4%<sup>[1-2]</sup>。玉米单产提高是品种遗传改良与优化栽培共同作用的结果, 探讨产量提高过程中产量构成因素的演进规律, 明确进一步提高产量的方向与途径, 具有重要理论和实践

意义。王守才<sup>[3]</sup>通过单一密度试验研究了辽宁省 30 年间 8 个代表性玉米品种的遗传改良效果及群体、个体农艺性状变化趋势。史新海等<sup>[4]</sup>利用山东省玉米新品种区域试验资料分析了全省 1976—1995 年中熟玉米高产杂交种的产量构成及农艺性状的演变规律。胡昌浩等<sup>[5]</sup>通过设置 3 种密度的试验考察了

本研究由国家自然科学基金项目(31271658)和山东省泰山学者建设项目资助。

第一作者联系方式: E-mail: jzyang@qau.edu.cn, Tel: 0532-88030340

Received(收稿日期): 2012-09-18; Accepted(接受日期): 2012-11-16; Published online(网络出版日期): 2013-01-04.

URL: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1809.S.20130104.1734.002.html>

1950s 以来中国 9 个代表性玉米品种的产量性状演进。李少昆等<sup>[1]</sup>基于统计年鉴、品种志及调查研究等分析了中国不同年代玉米产量增加的主要因素、技术特征和增产机理。Wang 等<sup>[6]</sup>采用中国 1964—2001 年广泛种植的 29 个玉米品种, 在 3 大生态区 4 个地点进行了 3 年的 3 个密度处理试验, 测算了遗传增益, 以及农艺性状的演变。上述大多数研究基于品种更替角度, 由于密度数目少而无法获得最佳密度, 基因型之间比较受到最佳密度不同的严重影响; 基于统计年鉴的分析则无法精确解析产量构成因素的作用。因此, 有必要根据实际密度试验结果开展中国玉米产量提高规律的研究。关于从 1950s 到 2000s 的中国玉米产量-密度研究文献的 Meta 分析, 我们将另文报道玉米产量-密度关系的农艺分析结果, 本文旨在探明: (1) 最高产量及密度和单株产量的年代演变规律; (2) 偏离最佳密度产量损失的年代演变; (3) 产量构成因素相对重要性的年代演变。

## 1 材料与方法

### 1.1 密度试验数据

采用关键词(密度、密植、耐密)检索和回溯检索相结合方法, 检索 CNKI 系列数据库中关于玉米密度试验的中文文献, 试验年限在 1950—2010 年之间, 共获得文献 110 篇。按照 Meta 分析要求进行数据审核, 同时要求包括至少 4 个密度处理以方便抛物线曲线的拟合, 最终得到 155 个有效数据集。

### 1.2 数据分析

Meta 分析是文献综述的一种量化方法, 对同一问题的多项研究结果作系统性评价和总结, 借助各种统计分析技术以获得一般规律性认识, 已在生命科学中得到广泛应用。

按所属年代分别分析数据, 为简便起见, 把 2010 年数据归入 2000s, 这样做并不会对结果造成实质性影响。使用抛物线拟合有效数据集的产量-密度模型, 获得最高产量及其构成因子, 逐年代进行汇总分析、相关和通径分析, 检验年代间差异显著性。为消除方差异质性干扰, 采用 Kruskal-Wallis 秩和检验分析年代效应。

## 2 结果与分析

### 2.1 最高产量的年代演化

最高产量的年代差异显著( $P < 0.0001$ ), 2000s 产量最大达  $10.5 \text{ t hm}^{-2}$ , 是产量最小 1960s 的 2.3 倍(图

1)。1970s 和 1980s 玉米产量明显高于 1950s 和 1960s, 1980s 以来产量持续增加, 同时, 产量变异幅度也持续增加。

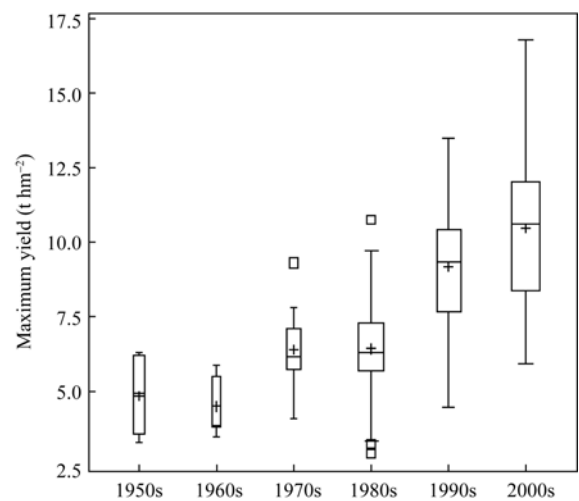


图 1 最高产量的年代演化盒形图

Fig. 1 Boxplots of the maximum kernel yield in maize for decades from 1950s to 2000s

### 2.2 最佳密度的年代演化

最佳密度的年代差异显著( $P < 0.0012$ ), 1990s 密度最大, 达  $6.8 \text{ 株 m}^{-2}$ , 是密度最小 1950s 的 1.5 倍(图 2)。最佳密度的大体趋势为(1950s 和 1960s)  $<$  (1970s 和 1980s)  $<$  1990s, 但是, 2000s 却小于 1990s。同时, 近 2 个年代的变幅也明显大于其他年代。

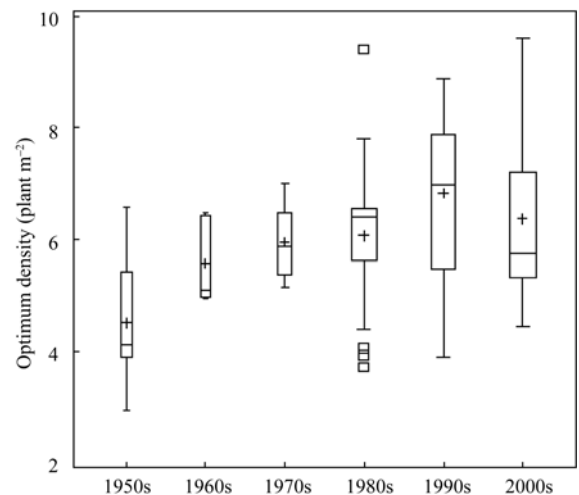


图 2 最佳密度的年代演化盒形图

Fig. 2 Boxplots of plant density corresponding to the maximum yield in maize for decades from 1950s to 2000s

### 2.3 单株产量的年代演化

最佳密度下单株产量的年代差异显著( $P < 0.0001$ ), 2000s 单株产量最大, 达  $0.17 \text{ kg}$ , 是单株产量最小

1960s 的 2.0 倍(图 3)。单株产量呈现(1950s>1960s)和 1970s<1980s, 且 1980s 以来持续上升, 2000s 上升更为明显, 且自身的变异也最大。

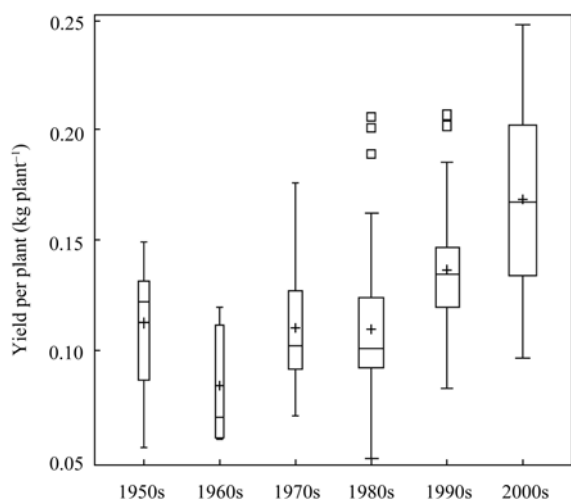


图 3 单株产量的年代演化盒形图

Fig. 3 Boxplots of kernel yield per plant corresponding to the maximum yield in maize for decades from 1950s to 2000s

## 2.4 产量损失的年代演化

密度偏离最佳值引起减产的幅度因年代而异(表 1 和图 4)。同样偏离 1 株  $\text{m}^{-2}$ , 1950s 和 1960s 减产值不超过 0.15  $\text{t hm}^{-2}$ , 1970s 和 1980s 不超过 0.21  $\text{t hm}^{-2}$ , 到 1990s 上升至 0.26  $\text{t hm}^{-2}$ , 2000s 则猛升至 0.41  $\text{t hm}^{-2}$ 。

如果用百分数表示, 则当密度偏离 15% 时, 从 1950s 到 2000s 减产百分率的中位数分别为 1.0%、1.6%、3.2%、2.7%、2.6% 和 3.7%。

## 2.5 产量因素关系的年代演化

在各个年代内最高产量与单株产量的正相关基本上都显著, 而与密度的相关仅在最近 2 个年代达到显著水平(表 2)。最高产量与构成因素的通径系数均显著, 而且除 1990s 的 2 个系数值相等外, 其余都表现出单株产量大于密度, 尤以 1960s 及 1970s 两个年代最为突出, 前者值约为后者的 3 倍。这些相关分析和通径分析的结果一致表明, 除 1990s 两个产量构成因素的作用相等外, 无论哪个年代, 都是单

株产量对产量的作用大于密度。

以年代平均数进行相关和通径分析发现, 最高产量与单株产量极显著正相关( $r = 0.936$ ), 与密度的正相关不显著( $r = 0.774$ ); 最高产量对单株产量通径系数为 0.732 ( $P = 3.1 \times 10^{-5}$ ), 对密度的为 0.405 ( $P = 2.9 \times 10^{-6}$ )。也就是说, 跨年代产量增加趋势的第一原因为单株产量, 第二为密度。

## 3 讨论

### 3.1 中国玉米产量增益速率

本研究根据平均产量关于年代的回归表明, 1960s 以来的玉米产量年均增益 150  $\text{kg hm}^{-2}$ (图 1)。根据李少昆等<sup>[7]</sup>汇总的区试和生产试验数据, 1960 以来的玉米产量年均增益 106  $\text{kg hm}^{-2}$ 。史新海等<sup>[8]</sup>汇总的山东省 1970s—1990s 玉米区试结果表明, 年均产量增加 148  $\text{kg hm}^{-2}$ 。戴景瑞等<sup>[9]</sup>认为 1980—1996 期间玉米单产年均增长 133  $\text{kg hm}^{-2}$ , 是中国历史上最快水平。Wang 等<sup>[6]</sup>认为 1964—2001 期间, 中国玉米产量年均遗传增益为 60  $\text{kg hm}^{-2}$ , 与上述历史试验产量增益有巨大差异, 有 2 个可能原因: 一是遗传增益研究在当代生产生态条件下实施, 无法反映生产技术改进的年代效应; 二是密度只有 3 个定额, 无法估算各品种最佳密度时的遗传产量潜力。李少昆等<sup>[1]</sup>根据统计年鉴得出, 1949—2007 期间玉米产量年均增益 86  $\text{kg hm}^{-2}$ 。中国玉米生产实际产量的增益速率, 明显低于试验产量的增益速率, 二者有明显的产量差。戴景瑞等<sup>[9]</sup>提出 2008—2020 年中国玉米单产年均递增 188.7  $\text{kg hm}^{-2}$  才能保证未来玉米消费需求。开发和筛选先进适用生产技术、提高这些技术的到位率, 是缩小产量差, 进一步提高中国玉米产量的重要栽培策略。

### 3.2 适宜密度是增产的重要因素

本研究发现 1950s—2000s 各年代的中国玉米最佳密度均值依次为 4.5、5.6、6.0、6.1、6.8 和 6.4 株  $\text{m}^{-2}$ (图 2)。李少昆等<sup>[7]</sup>报道中国同期生产密度依次大致为不足 3.0、3.4、3.4、4.1、5.3 和 5.5 株  $\text{m}^{-2}$ 。后者比前者分别偏少 34%、40%、43%、32%、23% 和

表 1 玉米密度偏离引起的减产幅度

Table 1 Yield losses due to the departure from optimum plant densities in maize ( $\text{t hm}^{-2}$ )

密度偏离 Density deviation	1950s	1960s	1970s	1980s	1990s	2000s
0.5 plant $\text{m}^{-2}$	0.04	0.02	0.05	0.05	0.06	0.10
1.0 plant $\text{m}^{-2}$	0.15	0.06	0.21	0.18	0.26	0.41
1.5 plant $\text{m}^{-2}$	0.34	0.15	0.48	0.41	0.58	0.93

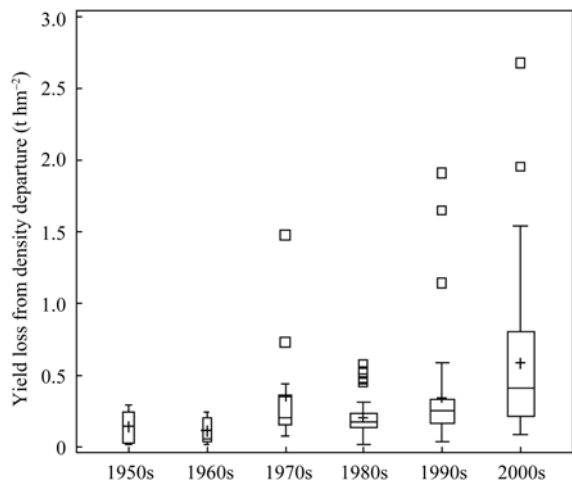


图 4 各年代密度偏离 1 株  $\text{m}^{-2}$  的产量损失的盒形图  
Fig. 4 Yield losses due to the departure of 1 plant  $\text{m}^{-2}$  from optimum plant densities in maize for decades from 1950s to 2000s

14%。近 30 年来, 生产密度低于试验密度的状况正在明显改善, 反映出生产上越来越重视密度对玉米产量的作用。

同期美国生产密度和本研究结果的差异依次为  $-20.5\%$ 、 $-49.0\%$ 、 $-32.5\%$ 、 $10.0\%$ 、 $-1.3\%$  和  $22.7\%$ 。显然, 1980s 之前, 中国的试验密度明显高于美国生产密度, 此后, 反而低于美国, 1990s 我国紧凑型玉米的推广明显消除了与美国的差距, 不过, 进入 21 世纪后, 差距又急剧扩大, 田间管理较好的试验密度远低于美国的生产密度, 反映了中国玉米无论育种还是栽培, 都远远没有充分利用密度在增产中的作用。

我国单产超  $15 \text{ t hm}^{-2}$  玉米的密度大多数在  $6.7\sim 11.3 \text{ 株 m}^{-2}$  之间<sup>[10]</sup>, 基本接近美国玉米高产竞赛获胜者  $8.55\sim 11.0 \text{ 株 m}^{-2}$  的水平。这说明目前高产技术原理上基本没有差距, 中美玉米生产水平的差距主要反映在生产技术上, 针对生产生态条件开发

和筛选先进适用技术对于进一步提高中国玉米产量具有重要意义。

3.3 单株产量也是增产的重要因素

本研究发现 1950s—1980s 期间, 获得最高产量时的单株产量一直徘徊在  $0.11 \text{ kg}$ , 然后从 1990s 的  $0.14$  上升到 2000s 的  $0.17 \text{ kg}$  (图 3)。单株产量的变化趋势与史新海等<sup>[4]</sup>、胡昌浩等<sup>[5]</sup>和 Ci 等<sup>[14]</sup>的结果相似。同期美国品种在  $7.9 \text{ 株 m}^{-2}$  高密度下的单株产量由  $0.06$  基本呈线性增长至  $0.13 \text{ kg}$ <sup>[16]</sup>(依原文图 6 导出)。

本研究发现玉米产量变化的原因是单株产量和密度, 并且以前者为主。对所有年代合并分析, 也获得了相同的结论。1964—2001 期间, 中国玉米产量遗传增益的主体是单株产量增益, 密度的效应不明显<sup>[6]</sup>。还有许多国内研究也有类似结果<sup>[5,9,11-14,16]</sup>。不过, 中国玉米界一般认为, 对于大田玉米, 自 1950s 以来, 密度的增大对产量的贡献应该高于单株产量的提高。试验结果与大田生产结果相左的原因可能有多: 第一, 试验数据与大田生产实际情况可能有偏差, 各年代的密度试验均在当时较好条件下开展的, 试验田管理较好, 最高产量的理论密度要高于大田, 因而突出了单株产量的贡献; 第二, 虽然密度试验和大田生产的密度都呈增长趋势, 但是前者变幅远小于后者(密度试验的  $4.5\sim 6.8 \text{ 株 m}^{-2}$  对比生产的  $3.0\sim 5.5 \text{ 株 m}^{-2}$ 、至单产超  $15 \text{ t hm}^{-2}$  的  $6.7\sim 11.3 \text{ 株 m}^{-2}$ ), 从而压缩了密度的贡献, 相对扩大了单株产量的贡献。第三, 栽培试验的适宜密度常常高于生产密度<sup>[17]</sup>, 从而在某种程度上夸大了单株产量的贡献。

玉米高产实践表明, 与  $15.0\sim 16.5 \text{ t hm}^{-2}$  群体相比,  $18 \text{ t hm}^{-2}$  以上群体在密度没有明显增加的情况

表 2 玉米产量因子的相关分析与通径分析  
Table 2 Correlation and path analysis of maximum yield to its density and yield per plant in maize

年代 Decade	相关系数 Correlation		通径系数 Path coefficient		
	密度	单株产量	密度	单株产量	决定系数
	Plant density	Yield per plant	Plant density	Yield per plant	$R^2$
1950s	0.154 <sup>ns</sup>	0.688 <sup>ns</sup>	0.852	1.188	0.949
1960s	-0.612 <sup>ns</sup>	0.966	0.425	1.304	1.000
1970s	-0.468 <sup>ns</sup>	0.948	0.445	1.269	0.995
1980s	0.107 <sup>ns</sup>	0.782	0.710	1.154	0.978
1990s	0.574	0.567	0.862	0.857	0.982
2000s	0.364	0.626	0.863	1.041	0.966

除标明“ns”者外, 全部相关系数均达到 5% 或者 1% 显著水平, 全部通径系数均达到 0.1% 显著水平。  
All correlations except for those with “ns” are significant at 5% or 1% probability level. So are all path coefficients at 0.1% probability level.

下, 其穗粒重都有明显提高, 显示出单株产量在高产更高产中的较大作用<sup>[18]</sup>。

从上述结果启示, 中国未来玉米更高产的途径是同时增加密度与提高单株产量, 二者不可偏废。

## 4 结论

中国玉米密度试验 6 个十年的历史文献表明, 随年代推进, 产量和单株产量均呈明显的上升趋势, 最佳密度整体呈上升趋势。玉米产量随年代不断增加的原因, 一是提高单株产量, 二是增加密度, 前者对增产的贡献与后者相近甚至更大。近 30 年来出现密度偏离最佳值后减产幅度增大的不良趋势。在持续增加密度的同时, 通过育种和栽培途径提高单株产量, 是玉米更高产的努力方向。

## References

- [1] Li S-K(李少昆), Wang C-T(王崇桃). Evolution and development of maize production techniques in China. *Sci Agric Sin* (中国农业科学), 2009, 42(6): 1941–1951 (in Chinese with English abstract)
- [2] Dai J-R(戴景瑞), E L-Z(鄂立柱). Scientific and technological innovation of maize breeding in China. *J Maize Sci* (玉米科学), 2010, 18(1): 1–5 (in Chinese with English abstract)
- [3] Wang S-C(王守才). Achievements in maize improvement in Liaoning province. *J Shenyang Agric Univ* (沈阳农业大学学报), 1988, 19(2): 22–28 (in Chinese with English abstract)
- [4] Shi X-H(史新海), Sui F-G(隋方功), Song Z-H(宋再华), Wang G-M(王广明), Zhang Y-S(张延胜), Fan S-W(范深问), Pan X-F(潘信芳), Su C-D(束春德). Studies on development rule for major agronomic characters of maize hybrid in mid-maturation and high-yield. *Acta Agron Sin* (作物学报), 1996, 22(6): 750–756 (in Chinese with English abstract)
- [5] Hu C-H(胡昌浩), Dong S-T(董树亭), Wang K-J(王空军), Sun Q-Q(孙庆泉). Yield advances of maize introduced in decades in China. *Maize Sci* (玉米科学), 1998, 6(2): 44–48 (in Chinese with English abstract)
- [6] Wang T Y, Ma X L, Li Y, Bai D P, Liu C, Liu Z Z, Tan X J, Shi Y S, Song Y C, Carlone M, Bubeck D, Bhardwaj H, Jones E, Wright K, Smith S. Changes in yield and yield components of single-cross maize hybrids released in China between 1964 and 2001. *Crop Sci*, 2011, 51: 512–525
- [7] Li S-K(李少昆), Wang C-T(王崇桃). Maize Production Techniques: Innovation and Transfer (玉米生产技术创新·扩散). Beijing: Science Press, 2010. pp 65–72, 304–305 (in Chinese)
- [8] Shi X-H(史新海), Li K-J(李可敬), Sun W-S(孙为森), Zhao Y-X(赵尧先), Wang J-J(王金蛟), Li Y(李勇). Studies on development law for main agronomic characters of maize hybrid in different areas in Shandong province. *J Maize Sci* (玉米科学), 2000, 8(2): 33–35 (in Chinese with English abstract)
- [9] Dai J-R(戴景瑞), E L-Z(鄂立柱). Scientific and technological innovation of maize breeding in China. *Maize Sci* (玉米科学), 2010, 18(1): 1–5 (in Chinese with English abstract)
- [10] Chen G-P(陈国平), Gao J-L(高聚林), Zhao M(赵明), Dong S-T(董树亭), Li S-K(李少昆), Yang Q-F(杨祁峰), Liu Y-H(刘永红), Wang L-C(王立春), Xue J-Q(薛吉全), Liu J-G(柳京国), Li C-H(李潮海), Wang Y-H(王永宏), Wang Y-D(王友德), Song H-X(宋慧欣), Zhao J-R(赵久然). Distribution, yield structure, and key cultural techniques of maize super-high yield plots in recent years. *Acta Agron Sin* (作物学报), 2012, 38(1): 80–85 (in Chinese with English abstract)
- [11] Yi H-K(衣洪坤), Li J-Z(李继竹), Liang Y-J(梁雨娟), Wang H(王贺), Shao B(邵冰), Yang W-G(杨伟光). Development tendency for agronomic traits of maize hybrids in Jilin province. *J Jilin Agric Univ* (吉林农业大学学报), 2011, 33(5): 473–477, 484 (in Chinese with English abstract)
- [12] Wang X-D(王晓东), Shi Z-S(史振声), Li M-S(李明顺), Lu J-T(鲁俊田). Ear traits evolution in process of northern maize cultivars substitution and their relationships with yield. *Agric Res Arid Areas* (干旱地区农业研究), 2011, 29(5): 13–18 (in Chinese with English abstract)
- [13] Li Y, Ma X L, Wang T Y, Li Y X, Liu C, Liu Z H, Sun B C, Shi Y S, Song Y C, Carlone M, Bubeck D, Bhardwaj H, Whitaker D, Wilson W, Jones E, Wright K, Sun S K, Niebur W, Smith S. Increasing maize productivity in China by planting hybrids with germplasm that responds favorably to higher planting densities. *Crop Sci*, 2011, 51: 2391–2400
- [14] Ci X K, Li M S, Liang X L, Xie Z J, Zhang D G, Li X H, Lu Z Y, Ru G L, Bai L, Xie C X, Hao Z F, Zhang S H. Genetic contribution to advanced yield for maize hybrids released from 1970 to 2000 in China. *Crop Sci*, 2011, 51: 13–20
- [15] Duvick D N. The contribution of breeding to yield advances in maize. *Adv Agron*, 2005, 86: 83–145
- [16] Xie Z-J(谢振江), Li M-S(李明顺), Xu J-S(徐家舜), Zhang S-H(张世煌). Contributions of genetic improvement to yields of maize hybrids during different eras in north China. *Sci Agric Sin* (中国农业科学), 2009, 42(3): 781–789 (in Chinese with English abstract)
- [17] Li F-H(李凤海), Shi Z-S(史振声), Zhang S-H(张世煌), Wang Z-B(王志斌), Wang H-W(王宏伟), Lü X-L(吕香玲), Zhu M(朱敏), Liu H-J(刘红军). Study and consideration on less normal density problem of maize in Liaoning Province. *Maize Sci* (玉米科学), 2010, 18(3): 113–116 (in Chinese with English abstract)
- [18] Wang Z-G(王志刚), Gao J-L(高聚林), Zhang B-L(张宝林), Luo R-L(罗瑞林), Yang H-S(杨恒山), Sun J-Y(孙继颖), Yu X-F(于晓芳), Su Z-J(苏治军), Hu S-P(胡树平). Productivity performance of high-yield spring maize and approaches to increase grain yield (above 15 t ha<sup>-1</sup>) in irrigated plain of Inner Mongolia. *Acta Agron Sin* (作物学报), 2012, 38(7): 1318–1327 (in Chinese with English abstract)