

玉米苗期耐低铁能力的综合评价及其预测

龙文靖^{1,2}, 万年鑫¹, 辜涛¹, 查丽¹, 钟蕾¹, 孔凡磊^{1,2}, 袁继超^{1,2}

(¹四川农业大学农学院, 温江 611130; ²农业部西南作物生理生态与耕作重点实验室, 四川温江 611130)

摘要: 为了筛选和鉴定耐低铁玉米品种应用于生产, 本研究以 23 个玉米品种为材料, 测定低铁胁迫和正常供铁(对照)玉米幼苗的株高、茎粗、可见叶、展叶、叶面积、根长、根体积、总干重、活性铁、含铁量、铁积累量和叶绿素含量等 15 个性状, 以各性状的相对值作为衡量指标, 利用主成分分析、隶属函数分析和聚类分析对其进行耐低铁能力的综合评价。结果表明不同玉米品种耐低铁能力存在明显的基因型差异; 祁玉 1 号、福康玉 909、正大 619、正红 102、福得 2 号、正红 2 号耐低铁能力较强; 展叶数、叶面积、根长、根干重、铁积累量可作为玉米耐低铁品种苗期筛选指标; 可利用玉米苗期耐低铁能力的回归模型: $D = (-384.23 + 2.71X_4 + 2.50X_5 + 3.22X_6 + 1.70X_9 + 4.86X_{14}) \times 10^{-3}$ 对玉米苗期耐低铁能力进行预测。

关键词: 玉米; 苗期; 耐低铁; 综合评价; 预测

Comprehensive Evaluation and Forecast of Low Iron Tolerant Ability in Maize Seeding Stage

LONG Wen-jing^{1,2}, WAN Nian-xin¹, GU Tao¹, ZHA Li¹, ZHONG Lei¹,
KONG Fan-lei^{1,2}, YUAN Ji-chao^{1,2}

(¹College of Agronomy, Sichuan Agricultural University, Wenjiang 611130; ²Key Laboratory of Crop Ecophysiology and Farming System in Southwest China, Ministry of Agriculture, Wenjiang 611130)

Abstract: In order to screen and identify maize cultivars tolerant to low iron stress applied in production, 23 maize cultivars were cultured in low and regular iron supply conditions, then low iron tolerance comparative values of plant height, stem diameter, visible leaf number, expanded leaf number, leaf area, root length, root volume, chlorophyll content, shoot dry weight, root dry weight, root shoot ratio, total dry weight, active iron, iron content and iron accumulation were evaluated by the principal component analysis, subordinate function analysis and clustering analysis. The results showed that the tolerance to low iron stress among 23 cultivars were markedly different, and Fangyu1, Fukangyu909, Zhengda619, Zhenghong102, Fude2 and Zhenghong2 had strong resistance to low iron. Comparative values of expanded leaf number, leaf area, root length, root dry weight and iron accumulation could be considered as low iron-tolerance selection indexes in maize seedling stage. The regression equation $D = (-384.23 + 2.71X_4 + 2.50X_5 + 3.22X_6 + 1.70X_9 + 4.86X_{14}) \times 10^{-3}$, can be used to predict the low iron - tolerance ability of maize cultivars in seedling stage.

Key words: maize; seedling stage; tolerant to low iron stress; comprehensive evaluation; forecast

玉米(*Zea mays* L.)是世界上主要的粮、经、饲、能多用途作物,需求量大。铁是植物叶绿素形成、光合作用、呼吸作用、氮素代谢、生物固氮、细胞解毒以及氮、磷吸收利用中不可缺少的微量元素^[1-2]。玉

米缺铁时,叶片脉间失绿,呈条纹花叶,心叶症状重;严重时心叶不出,植株生长不良,矮缩,生育延迟,甚至不能抽穗。全世界有 1/3 的土壤是石灰性土壤,约 40% 的土壤缺铁。尽管玉米属于机理 II 植物,可

收稿日期:2014-07-27 修回日期:2014-09-04 网络出版日期:2015-06-11

URL: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.4996.S.20150611.0945.009.html>

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2012BAD04B13-2); 公益性行业(农业)科研专项(201503127)

第一作者研究方向为玉米铁营养。E-mail: longjing9012@163.com

通信作者: 袁继超, 主要从事作物栽培与耕作学。E-mail: yuanjichao5@163.com

以合成和分泌螯合 Fe^{3+} 的高铁载体 PS, 吸收土壤中的铁^[3]。然而在于干旱半干旱的石灰性土壤中, 玉米的缺铁问题依然严重^[4]。目前利用生物技术手段解决植物缺铁的报道并不多见, 而传统的根系输液法、茎秆注射法和叶面喷施法, 所用材料主要是人工螯合剂及微肥, 均费工费时, 且治标不治本, 不能够从根本上长远解决玉米缺铁黄叶病问题^[5-7]。研究表明, 不同植物种类或同一植物的不同品种之间耐低铁能力存在显著的基因型差异^[8-12]。因此, 鉴定不同玉米品种的耐低铁能力, 筛选耐低铁玉米品种, 对于实现石灰性土壤地区玉米的高产稳产具有重要的现实意义。

耐低铁特性是一个非常复杂的性状, 与一些形态和生理性状密切相关, 极易受环境条件影响。目前, 有关植物的耐低铁能力研究主要集中在低铁胁迫下的生理生化指标变化方面, 许多学者也从形态学、生理学等方面提出了相应的鉴定指标。高丽等^[13]采用盆栽试验系统研究了石灰性土壤中 16 个花生品种在各个生育时期新叶的黄化度、叶绿素值、活性铁含量的差异及其动态变化。结果表明, 在生长前期叶绿素值与黄化度、活性铁及荚果产量之间均呈极显著的相关关系, 新叶叶绿素值可作为花生耐低铁品种筛选的一个可靠指标。翟衡等^[14]对 14 个葡萄砧木品种进行研究, 张凌云等^[15]对 11 种苹果砧木缺铁胁迫的适应性反应进行研究, 初步确定铁吸收动力学、根际 pH 值、根系的铁还原能力可作为评价铁高效砧木的指标。李式军等^[16]采用缺铁培养液对 3 个生菜品种进行 2 年的比较营养试验, 结果表明, 不同生菜品种耐缺铁胁迫能力差异显著, 并从中筛选出 2 个耐缺铁胁迫品种。前人研究均集中在机理 I 植物, 而机理 II 植物玉米的评价方法和筛选指标尚缺乏研究。根据前人研究结果, 本试验采用营养液水培方法, 分析 23 个玉米品种在苗期缺铁条件下多项形态和生理指标的变化, 利用主成分分析方法对玉米品种的耐低铁能力进行综合评价, 并建立重要指标的回归模型, 以期筛选出玉米苗期耐低铁能力的主要评价指标和耐低铁能力较强的玉米品种, 为进一步研究和生产应用提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 供试品种

选用的供试材料为西南地区较大面积推广应用

或最新育成的 23 个优良杂交玉米品种。由四川省农业科学院和四川农业大学提供, 品种编号及名称见表 1。

表 1 供试玉米品种编号及名称

Table 1 Number and name of maize varieties in test

编号 No.	名称 Name	编号 No.	名称 Name
1	荣玉 1210	13	雅玉 10 号
2	必胜 6 号	14	珍禾玉 1 号
3	长玉 19	15	正大 619
4	成单 30	16	正红 102
5	川单 189	17	正红 2
6	川单 418	18	正红 212
7	郝玉 1 号	19	正红 311
8	福得 2 号	20	正红 505
9	福康玉 909	21	正红 532
10	汉单 999	22	正田 1 号
11	佳禾 158	23	中单 808
12	先玉 508		

1.2 试验设计

试验为温室大棚内水培试验, 玉米种子用清水漂洗数次, 除去原有包衣, 用 70% 酒精消毒 30 s, 清洗数次后用蒸馏水浸泡 10 h, 再将种子均匀播于粒径为 1~2 mm 的湿润石英砂上, 上面再覆盖一层薄石英砂, 早晚浇蒸馏水 1 次, 种子于 12000 Lx 光强、每天 14 h/10 h (26 °C/22 °C) 的光温周期以及 60% 相对湿度的人工气候箱内培养。9 d 后将 2 叶 1 心的幼苗除去胚乳分别移至改良 Hoagland 营养液 (含 100 $\mu\text{mol/L}$ $\text{Fe}(\text{III})$ -EDTA) 中培养, 待幼苗长至 3 叶 1 心时进行低铁胁迫处理 (营养液含 10 $\mu\text{mol/L}$ $\text{Fe}(\text{III})$ -EDTA), 以正常 Hoagland 营养液作为对照。营养液用 0.1 mol/L NaOH 或 0.1 mol/L HCl 调整至 pH5.8 \pm 0.2, 并使用通气泵通气, 保证培养液通气良好。水培容器为 45 cm \times 33 cm \times 20 cm 的白色塑料方盆, 上面覆有 20 个孔、2 cm 厚的泡沫板, 每孔定植 1 株玉米苗, 用海绵包茎以固定植株。每处理重复 3 次, 低铁胁迫处理 7 d 后取样测定各指标。

1.3 测定项目和方法

株高: 用直尺测量胚芽鞘节至最长叶叶尖的长度。茎粗: 用游标卡尺测量玉米幼苗基部离根 1 cm 处的最大直径和最小直径, 取其平均值。可见叶数:

包括心叶在内的所有可见叶片数。展叶数:叶枕已伸出下一叶叶鞘的叶片数。叶面积:测量每一片绿叶的最大叶长、最大叶宽。若在一片叶中有部分叶是黄的,则同样测量绿叶部分的最大叶长、最大叶宽,长宽系数法计算绿叶面积。根长:用直尺测量各株根系中最长的一条根长度。根体积:采用排水法测定。叶绿素含量:采用 SPAD 仪测定玉米最上一片定型叶的中上部的叶绿素相对含量。总干重和根冠比:取整株玉米苗,将植株分成地上茎叶和地下根两部分,于 105 °C 杀青,80 °C 烘干至恒重,称量茎叶和根干重,再计算出总干重和根冠比。活性铁含量^[17]:叶片鲜样切碎后用 1 mol/L HCl 按 1:10 的比例浸提(连续振荡 5 h),过滤后,用原子吸收分光光度计测定浸提液中 Fe 的含量。含铁量^[18]:称取 1.000 g 经烘干粉碎玉米植株样品于塑料瓶中,加入 25.0 mL Vc-HCl (0.40 g 维生素 C 溶解后,加入 166.0 mL 浓盐酸定容至 1 L),置于 80 °C 恒温振荡器上振荡 2h,用蒸馏水补至原重后过滤,用原子吸收分光光度计测定浸提液中 Fe 的含量。铁积累量 = 含铁量 × 植株干物质重。

1.4 数据处理与分析

用 Excel2007 进行数据整理并计算各处理性状的平均值;用 DPSv6.55 软件进行方差分析、相关性分析、主成分分析、逐步回归分析和聚类分析。

2 结果与分析

2.1 低铁胁迫对不同玉米品种苗期的影响

10 μmol/L 低铁胁迫处理 7 d 后,除根冠比外,其他指标都较对照降低,不同品种降低的幅度不同。各处理株高为 15.9 ~ 47.6 cm,茎粗为 2.4 ~ 6.4 mm,可见叶为 3 ~ 7 片,展叶为 1 ~ 5 片,叶面积为 22.2 ~ 256.4 cm²,根长为 10.5 ~ 39.2 cm,根体积为 0.4 ~ 6.3 cm³,茎叶干重为 0.06 ~ 1.51 g,根干重为 0.03 ~ 0.56 g,总干重为 0.09 ~ 2.07 g,根冠比为 0.22 ~ 1.25,活性铁为 6.1 ~ 28.2 mg/kg,含铁量为 142.0 ~ 920.2 mg/kg,铁积累量为 17.4 ~ 509.4 μg,叶绿素含量为 4.9 ~ 51.4。为了消除试验材料本身间存在的差异,使用各性状的相对值(低铁胁迫下该性状的测定值与对照的百分比)进行分析,较各性状的绝对值来说,能更好地反映不同品种的耐低铁能力。由表 2 可知,株高、茎粗、可见叶、展叶、叶面积、根长、根体积、茎叶干重、根干重、根冠比、总干重、活性铁、含铁量、铁积累量、叶绿素含量的相对值变化范围分别为

60.85% ~ 103.27%、60.61% ~ 98.90%、66.67% ~ 100.00%、50.00% ~ 122.22%、25.93% ~ 103.33%、47.93% ~ 98.37%、27.83% ~ 83.15%、45.44% ~ 89.72%、57.75% ~ 93.06%、75.61% ~ 166.38%、54.12% ~ 90.30%、56.35% ~ 98.80%、25.95% ~ 50.47%、16.45% ~ 35.28%、19.96% ~ 81.16%。其中叶绿素含量、叶面积、铁积累量、根体积和根长变异系数较大,分别为 36.43%、33.67%、25.08%、24.63% 和 20.91%。

2.2 低铁胁迫下玉米品种各性状相对值的相关性分析

对低铁胁迫下玉米品种 15 个性状的相对值进行相关性分析,结果见表 3。除活性铁与其他各指标间无显著的相关性外,其余各指标间均存在着显著或极显著的相关性,总干重和茎叶干重、株高和叶面积相关性最高,分别达到了 0.94、0.91,其次是总干重和根体积、叶面积和茎粗、叶面积和可见叶,相关系数分别为 0.78、0.77、0.70。铁积累量与叶绿素含量以及株高、茎粗、叶面积、根长的呈极显著正相关,与含铁量呈显著正相关,而含铁量与茎叶干重、总干重表现为显著负相关。

2.3 低铁胁迫下玉米各性状相对值的主成分分析

主成分分析法就是在尽可能不损失信息或少损失信息的情况下,将多个变量减少为少数几个潜在因子,且这几个因子可以高度概括大量数据中的信息,这样既减少了变量的个数,又能再现变量间的内在联系^[19]。利用 DPSv6.55 软件对 15 个指标的相对值进行主成分分析(表 4),前 5 个主成分的贡献率分别为 42.278%、15.550%、12.613%、8.306%、6.637%,累积贡献率达 85.386%,可见前 5 个主成分足以说明该数据的变化趋势,故取前 5 个主成分作为数据分析的有效成分。这 5 个主成分与 15 个耐低铁性状的相对值(即因子负荷量),反映了它们之间的相关性(表 5)。由此可计算出个各主成分得分。

第 I 主成分:

$$C1 = 0.350X_1 + 0.267X_2 + 0.278X_3 + 0.224X_4 + 0.346X_5 + 0.257X_6 + 0.285X_7 + 0.308X_8 + 0.192X_9 - 0.174X_{10} + 0.324X_{11} - 0.032X_{12} - 0.112X_{13} + 0.227X_{14} + 0.282X_{15}$$

(X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 、 X_5 、 X_6 、 X_7 、 X_8 、 X_9 、 X_{10} 、 X_{11} 、 X_{12} 、 X_{13} 、 X_{14} 、 X_{15} 分别代表株高、茎粗、可见叶、展叶、叶面积、根长、根体积、茎叶干重、根干重、总干重、根冠比、活性铁、含铁量、铁积累量、叶绿素含量的相对值,下同。)

表 2 不同耐低铁相关指标的相对值

Table 2 Different tolerance to low iron related indexes of comparative value

品种 Cultivar	株高 Plant height	茎粗 Stem diameter	可见叶 Visible leaf	展叶 Expanded leaf	叶面积 Leaf area	单株根长 Root length	根体积 Root volume	茎叶干重 Shoot dry weight	根干重 Root dry weight	根冠比 Root shoot ratio	总干重 Total dry weight	活性铁 Active iron	含铁量 Iron content	铁积累量 Iron accumulation	叶绿素含量 Chlorophyll content
荣玉1210	71.79 ghi	77.64 efg	80.00 d	83.33 bed	42.07 ijkl	71.23 cdefg	53.14 def	63.74 bedef	81.91 abc	133.43 bc	68.17 bc	56.35 j	49.51 ab	28.58 bc	51.41 cdefg
必胜6号	74.29 efg	80.47 de	86.67 bed	66.67 def	47.36 hi	89.35 ab	71.31 abcd	66.83 bedef	89.90 a	133.60 bc	73.84 abc	89.39 abc	30.68 jk	19.89 fgh	58.56 bcde
长玉19	73.07 fgh	71.07 gh	86.67 bed	75.00 cde	58.69 g	60.48 efg hij	78.84 ab	68.62 abcde	77.94 abcd	119.44 cde	70.44 abc	78.14 cdefg	34.34 hij	17.38 h	45.22 efg
成单30	60.85 k	60.61 k	66.67 e	55.56 f	25.93 m	55.52 hij	27.83 g	54.24 def	57.75 e	116.15 cdef	54.65 c	77.33 cdefg	43.94 bcde	17.92 gh	36.99 fghijk
川单189	65.32 ijk	77.91 defg	75.56 de	50.00 f	38.69 jkl	47.93 j	44.59 fg	60.95 cdef	73.09 bcde	121.28 bcde	64.55 bc	67.70 fghij	36.70 fghij	22.99 ef	53.81 bedef
川单418	62.55 jk	69.29 hij	75.56 de	63.89 ef	37.23 l	73.79 cdef	59.23 bedef	50.83 ef	72.53 bcde	151.07 ab	56.72 c	64.86 ghij	48.60 ab	21.22 efg	28.50 hijk
邢玉1号	81 bcde	84.73 cd	94.44 ab	122.22 a	67.27 ef	98.37 a	59.48 bedef	64.94 bedef	71.96 bcde	110.17 cdef	67.15 bc	82.88 bcde	44.94 abcde	30.29 bc	52.88 bedefg
福得2号	87.85 b	77.47 efg	100.00 a	100.00 b	75.54 cd	74.99 bcde	58.09 cdef	74.00 abcd	72.05 bcde	96.31 efg	73.02 abc	63.91 ghij	47.57 abc	30.82 bc	81.16 a
福康玉909	84.32 bed	80.14 def	93.33 abc	100.00 b	73.07 cde	98.15 a	83.15 a	86.28 ab	72.88 bcde	86.66 fg	82.28 ab	96.46 ab	40.56 defgh	28.14 c	69.46 ab
汶单999	77.49 defg	77.16 efg	87.78 abcd	91.67 bc	65.16 fg	56.79 ghij	52.42 def	61.41 cdef	68.53 bcde	116.35 cdef	63.27 bc	80.12 cdef	38.63 efg hi	18.82 gh	40.80 fghij
佳禾158	69.59 hij	67.5 hij	93.33 abc	75.00 cde	41.63 ijkl	54.89 ij	75.86 abc	79.71 abc	66.96 cde	75.61 g	76.10 abc	63.97 ghij	40.50 defgh	16.50 h	49.24 defg
先玉508	74.43 efg	62.81 jk	80.00 d	100.00 b	44.7 hijk	78.43 bcd	45.21 fg	62.77 cdef	77.06 abcd	127.82 bcd	67.22 bc	87.47 abcd	36.50 fghij	17.83 gh	23.97 jk
雅玉10号	75.15 efg	69.92 hi	75.56 de	66.67 def	37.42 kl	69.96 cdefgh	41.61 fg	61.34 cdef	58.71 e	107.13 cdef	59.63 c	89.90 abc	45.73 abcd	18.46 gh	27.37 jk
珍禾玉1号	86.35 bc	78.15 def	100.00 a	75.00 cde	65.72 efg	69.67 defghi	78.77 ab	72.79 abcde	68.56 bcde	100.98 defg	70.94 abc	61.27 ij	41.34 cdefg	19.54 fgh	35.25 ghijk
正大619	103.27 a	92.67 ab	95.24 ab	93.33 bc	103.33 a	84.65 abc	83.08 a	89.72 a	93.06 a	104.08 cdefg	90.30 a	72.43 defghi	25.95 k	23.83 de	65.61 abcd
正红102	80.18 cdef	96.19 ab	94.44 ab	91.67 bc	72.69 de	95.13 a	66.52 abcde	64.53 bedef	79.08 abcd	123.36 bcde	67.84 bc	62.02 hij	45.01 abcde	32.31 ab	45.87 efg
正红2	88.46 b	89.87 bc	83.33 bed	75.00 cde	89.00 b	74.96 bcde	67.65 abcde	65.24 bedef	78.46 abcd	121.00 bcde	68.39 abc	76.35 cdefgh	46.12 abcd	35.28 a	67.51 abc
正红212	71.33 ghi	80.47 de	81.11 cd	75.00 cde	50.72 h	52.11 j	66.86 abcde	72.92 abcde	72.17 bcde	108.13 cdef	71.73 abc	87.13 abcd	35.40 ghij	17.98 gh	29.18 hijk
正红311	81.95 bcde	98.90 a	100.00 a	100.00 b	80.42 c	67.44 defghi	45.81 fg	52.44 def	59.52 e	113.85 cdef	54.12 e	69.01 efg hij	47.76 abc	27.25 cd	42.28 efg hi
正红505	69.11 hij	83.25 cde	100.00 a	100.00 b	62.14 fg	59.98 fghij	50.00 ef	57.88 cdef	59.31 e	102.38 cdefg	58.26 e	60.60 ij	32.94 ij	16.45 h	21.24 k
正红532	72.36 ghi	73.44 fgh	87.78 abcd	75.00 cde	45.08 hij	57.23 ghij	45.83 fg	55.70 def	64.14 de	117.00 cdef	58.32 e	91.22 abc	42.02 cdef	21.35 efg	19.96 k
正田1号	69.84 ghij	63.91 ijk	83.33 bed	83.33 bed	43.65 hijkl	61.51 efg hij	60.31 bedef	45.44 f	81.10 abc	166.38 a	57.52 e	80.49 cdef	50.47 a	19.21 gh	40.38 fghij
中单808	67.55 hijk	81.63 de	86.67 bed	88.89 bc	45.15 hij	72.52 cdef	70.12 abcde	55.37 def	84.54 ab	151.17 ab	64.75 bc	98.80 a	36.44 fghij	19.61 fgh	47.04 efg
平均	76.00	78.05	87.28	82.56	57.07	70.66	60.25	64.68	73.10	117.54	66.92	76.43	40.94	22.68	44.94
Average															
最大值	103.27	98.90	100.00	122.22	103.33	98.37	83.15	89.72	93.06	166.38	90.30	98.80	50.47	35.28	81.16
Max.															
最小值	60.85	60.61	66.67	50.00	25.93	47.93	27.83	45.44	57.75	75.61	54.12	56.35	25.95	16.45	19.96
Min.															
变异系数 (%) CV	12.81	13.04	10.65	20.30	33.67	20.91	24.63	16.92	13.16	17.62	13.29	16.42	15.95	25.08	36.43

同一列中相同字母表示5%水平差异不显著

The same letters at the same column indicate no significance at 5% level

表 3 各指标的相关系数矩阵

Table 3 Correlation matrix of every single index

指标 Index	株高 Plant height	茎粗 Stem diameter	可见叶 Visible leaf	展叶 Expanded leaf	叶面积 Leaf area	根长 Root length	根体积 Root volume	茎叶干重 Shoot dry weight	根干重 Root dry weight	根冠比 Root shoot ratio	总干重 Total dry weight	活性铁 Active iron	含铁量 Iron content	铁积 累量 Iron accumulation
茎粗 Stem diameter	0.60 **													
可见叶 Visible leaf	0.61 **	0.59 **												
展叶 Expanded leaf	0.49 *	0.38	0.66 **											
叶面积 Leaf area	0.91 **	0.77 **	0.70 **	0.55 **										
根长 Root length	0.53 **	0.42 *	0.34	0.56 **	0.46 *									
根体积 Root volume	0.49 *	0.31	0.49 *	0.21	0.49 *	0.40								
茎叶干重 Shoot dry weight	0.64 **	0.25	0.40	0.23	0.51 *	0.34	0.67 **							
根干重 Root dry weight	0.33	0.22	0.03	0.12	0.27	0.44 *	0.60 **	0.30						
根冠比 Root shoot ratio	-0.40	-0.17	-0.46 *	-0.19	-0.35	-0.01	-0.19	-0.71 **	0.42 *					
总干重 Total dry weight	0.65 **	0.26	0.36	0.25	0.51 *	0.44 *	0.78 **	0.94 **	0.60 **	-0.46 *				
活性铁 Active iron	-0.07	-0.19	-0.26	0.06	-0.16	0.16	0.04	-0.02	0.12	0.16	0.04			
含铁量 Iron content	-0.17	-0.13	-0.14	0.00	-0.18	0.03	-0.35	-0.46 *	-0.34	0.22	-0.51 *	-0.25		
铁积累量 Iron accumulation	0.53 **	0.62 **	0.28	0.36	0.59 **	0.58 **	0.13	0.17	0.23	-0.06	0.21	-0.21	0.43 *	
叶绿素 Chlorophyll content	0.56 **	0.37	0.29	0.21	0.53 **	0.44 *	0.47 *	0.55 **	0.49 *	-0.22	0.63 **	-0.08	0.00	0.64 **

* 和 ** 分别代表各指标相关性达 5% 和 1% 显著水平

* means significant at $P < 0.05$, ** means significant at $P < 0.01$

第Ⅱ主成分:

$$C2 = 0.076X_1 + 0.260X_2 + 0.149X_3 + 0.216X_4 + 0.166X_5 + 0.132X_6 - 0.264X_7 - 0.304X_8 - 0.213X_9 + 0.096X_{10} - 0.337X_{11} - 0.246X_{12} + 0.490X_{13} + 0.426X_{14} + 0.030X_{15}$$

第Ⅲ主成分:

$$C3 = -0.056X_1 - 0.010X_2 - 0.285X_3 - 0.040X_4 - 0.082X_5 + 0.301X_6 + 0.109X_7 - 0.189X_8 + 0.536X_9 + 0.581X_{10} + 0.023X_{11} + 0.253X_{12} + 0.086X_{13} + 0.195X_{14} + 0.187X_{15}$$

第Ⅳ主成分:

$$C4 = 0.026X_1 + 0.111X_2 + 0.266X_3 + 0.508X_4 + 0.092X_5 + 0.198X_6 - 0.031X_7 - 0.194X_8 - 0.0556X_9 + 0.125X_{10} - 0.162X_{11} + 0.480X_{12} - 0.268X_{13} - 0.249X_{14} - 0.404X_{15}$$

第Ⅴ主成分:

$$C5 = -0.020X_1 - 0.360X_2 - 0.226X_3 + 0.174X_4 - 0.177X_5 + 0.312X_6 - 0.170X_7 + 0.209X_8$$

$$-0.265X_9 - 0.326X_{10} + 0.097X_{11} + 0.498X_{12} + 0.300X_{13} + 0.172X_{14} + 0.181X_{15}$$

第Ⅰ主成分可以解释 15 个耐低铁性状 42.278% 的变化,其与株高、叶面积、茎叶干重、总干重相关系数最大,都在 0.3 以上,主要反映的是植株整体的生长状况;第Ⅱ主成分可以解释 15 个耐低铁性状 15.550% 的变化,与含铁量、铁积累量具有较大的正相关关系,相关系数均在 0.4 以上,主要反映玉米铁含量的状况。第Ⅲ主成分可以解释 15 个耐低铁性状 12.613% 的变化,其与根长、根干重、根冠比相关系数最大,分别为 0.301、0.536、0.581,主要反映玉米根部生长状况;第Ⅳ主成分可以解释 15 个耐低铁性状 8.306% 的变化,其与可见叶、展叶、活性铁含量相关系数较大,分别为 0.266、0.508、0.480,主要反映玉米叶片的生长状况;第Ⅴ主成分可以解释 15 个耐低铁性状 6.637% 的变化,其与根长、活性铁和含铁量相关系数较大。

表 4 各综合指标的系数、特征值、贡献率

Table 4 Correlation and characteristic value of comprehensive indexes and their contribution

指标 Index	主成分 1 Component 1	主成分 2 Component 2	主成分 3 Component 3	主成分 4 Component 4	主成分 5 Component 5
株高 Plant height	0.350	0.076	-0.056	0.026	0.020
茎粗 Stem diameter	0.267	0.260	-0.010	0.111	-0.360
可见叶 Visible leaf	0.278	0.149	-0.285	0.266	-0.226
展叶 Expanded leaf	0.224	0.216	-0.040	0.508	0.174
叶面积 Leaf area	0.346	0.166	-0.082	0.092	-0.177
根长 Root length	0.257	0.132	0.301	0.198	0.312
根体积 Root volume	0.285	-0.264	0.109	-0.031	-0.170
茎叶干重 Shoot dry weight	0.308	-0.304	-0.188	-0.194	0.209
根干重 Root dry weight	0.192	-0.213	0.536	-0.056	-0.265
根冠比 Root shoot ratio	-0.174	0.096	0.581	0.125	-0.326
总干重 Total dry weight	0.324	-0.337	0.023	-0.162	0.097
活性铁 Active iron	-0.032	-0.246	0.253	0.480	0.498
含铁量 Iron content	-0.112	0.490	0.086	-0.268	0.300
铁积累量 Iron accumulation	0.227	0.426	0.195	-0.249	0.172
叶绿素 Chlorophyll content	0.282	0.030	0.187	-0.404	0.181
特征值 Eigenvalues	6.342	2.333	1.892	1.246	0.996
贡献率(%) Contribution rate	42.278	15.550	12.613	8.306	6.637
累积贡献率(%) Accumulative contribution rate	42.278	57.829	70.442	78.748	85.386

2.4 综合评价

2.4.1 隶属函数分析 低铁胁迫后,从各指标的相对值及其相关性来看,不同玉米品种苗期生长特性的响应数据比较离散,利用模糊数学隶属函数法进行分析,可将各品种各主成分得分扩展到 $[0,1]$ 闭区间上,从而把离散的数据标准化处理,以便对样品的相似性进行明显的评价^[20]。隶属函数值 $u(x) = (x - x_{\min}) / (x_{\max} - x_{\min})$, 式中 x 为各主成分得分值, x_{\min} 、 x_{\max} 为所有参试材料某一主成分得分的最小值和最大值。由表 5 可知,对于同一主成分如 C1 而言,正大 619 的 u_1 值最大,为 1,表明正大 619 在 C1 这一主成分上表现为耐低铁能力最强;成单 30 的 u_1 值最小,为 0,说明成单 30 在 C1 这一主成分上表现为最不耐低铁。

2.4.2 权重的确定 根据各主成分贡献率的大小(分别为 42.278%、15.550%、12.613%、8.306%、6.637%),计算各主成分的权重 $q = x / \sum x$, 式中 x

为各主成分的贡献率, $\sum x$ 为 5 个主成分贡献率之和。经计算,5 个主成分的权重分别为 0.495、0.182、0.148、0.097、0.078(表 5)。

2.4.3 综合评价 使用公式 $D = \sum_{i=1}^{k(5)} [u(X_i) \times qi]$, 计算各玉米品种耐低铁能力的综合评价 D 值,并对其耐低铁能力进行强弱排序:其中郁玉 1 号的 D 值最大,表明其耐低铁能力最强;其次为福康玉 909;成单 30 的 D 值最小,表明其耐低铁能力最差。采用欧氏最大距离法对 D 值进行聚类分析,可将 23 个基因型划分为 3 类:郁玉 1 号、福康玉 909、正大 619、正红 102、福得 2 号、正红 2 号为一类,属较耐低铁型;正红 311、中单 808、必胜 2 号、先玉 508、荣玉 1210、汉单 999、珍禾玉 1 号、正田 1 号、正红 505、长玉 19 作为一类,属一般耐低铁型;其余的 7 个品种属不耐低铁型。(表 5)。

表 5 各品种的综合指标值、权重、U(X)、D 值及综合评价

Table 5 Comprehensive index value, index weight, U(X), D value and comprehensive valuation of each variety

品种 Varieties	主成分 Component					隶属函数值 Subordinate function value					综合评 价值 D	综合评价 Comprehensive valuation
	1	2	3	4	5	u(C1)	u(C2)	u(C3)	u(C4)	u(C5)		
荣玉 1210	182.68	35.13	137.53	64.98	-12.52	0.381	0.562	0.709	0.241	0.153	0.431	一般耐低铁 General
必胜 2 号	199.48	6.57	153.44	80.41	-6.62	0.508	0.065	0.927	0.515	0.274	0.472	一般耐低铁 General
长玉 19	192.28	6.78	123.90	77.41	-13.63	0.454	0.068	0.522	0.462	0.130	0.369	一般耐低铁 General
成单 30	132.07	21.86	115.60	64.61	6.92	0.000	0.331	0.408	0.234	0.552	0.186	不耐低铁 Sensitive
川单 189	161.05	16.87	122.60	51.48	-16.11	0.218	0.244	0.504	0.000	0.079	0.233	不耐低铁 Sensitive
川单 418	151.48	30.45	145.74	75.13	-19.97	0.146	0.481	0.822	0.421	0.000	0.322	不耐低铁 Sensitive
郁玉 1 号	220.68	46.19	125.92	107.60	14.33	0.667	0.755	0.550	1.000	0.704	0.701	较耐低铁 Resistant
福得 2 号	229.68	40.43	108.28	67.55	6.94	0.735	0.655	0.308	0.286	0.552	0.600	较耐低铁 Resistant
福康玉 909	244.00	15.02	117.91	87.31	28.77	0.843	0.212	0.440	0.638	1.000	0.661	较耐低铁 Resistant
汉单 999	185.99	28.43	112.78	91.57	-7.88	0.406	0.446	0.370	0.714	0.248	0.426	一般耐低铁 General
佳禾 158	195.25	2.86	85.83	58.34	3.32	0.476	0.000	0.000	0.122	0.478	0.285	不耐低铁 Sensitive
先玉 508	173.60	20.24	131.78	105.87	6.51	0.313	0.303	0.630	0.969	0.543	0.440	一般耐低铁 General
雅玉 10 号	158.50	22.10	112.33	83.45	13.73	0.199	0.335	0.363	0.570	0.691	0.322	不耐低铁 Sensitive
珍禾玉 1 号	207.60	20.99	99.83	75.41	-15.58	0.569	0.316	0.192	0.426	0.090	0.416	一般耐低铁 General
正大 619	264.82	12.27	121.47	80.52	-13.86	1.000	0.164	0.489	0.517	0.125	0.657	较耐低铁 Resistant
正红 102	217.95	46.59	131.80	86.49	-15.79	0.647	0.762	0.630	0.624	0.086	0.620	较耐低铁 Resistant
正红 2	219.99	38.51	134.46	68.68	-10.09	0.662	0.621	0.667	0.306	0.203	0.585	较耐低铁 Resistant
正红 212	182.13	5.48	111.35	83.14	-6.71	0.377	0.046	0.350	0.564	0.272	0.323	不耐低铁 Sensitive
正红 311	197.54	60.26	105.17	94.00	-17.27	0.493	1.000	0.265	0.758	0.055	0.543	一般耐低铁 General
正红 505	182.20	37.35	88.27	100.85	-19.21	0.378	0.601	0.033	0.880	0.016	0.388	一般耐低铁 General
正红 532	160.41	25.72	113.50	95.45	-2.23	0.213	0.398	0.379	0.783	0.364	0.339	不耐低铁 Sensitive
正田 1 号	158.25	31.72	158.76	89.85	-19.59	0.197	0.503	1.000	0.684	0.008	0.404	一般耐低铁 General
中单 808	182.16	18.31	157.86	102.04	-11.29	0.377	0.269	0.988	0.901	0.178	0.483	一般耐低铁 General
权重 Index weight						0.495	0.182	0.148	0.097	0.078		

2.5 回归分析

为分析玉米耐低铁鉴定指标与耐低铁能力之间的关系,筛选有效的耐低铁鉴定指标,建立耐低铁能力评价的数学模型,进行耐低铁能力预测,将 23 个玉米品种的 15 个鉴定指标进行了逐步回归分析,以耐低铁综合评价(D 值)作因变量,各单项指标相对值作自变量建立最优回归方程,得到玉米低铁胁迫的回归方程: $D = (-384.23 + 2.71X_4 + 2.50X_5 + 3.22X_6 + 1.70X_9 + 4.86X_{14}) \times 10^{-3}$ 。回归方程中, X_4 、 X_5 、 X_6 、 X_9 、 X_{14} 分别代表了玉米低铁胁迫下展叶、叶面积、根长、根干重、铁积累量相关指标的相对值。方程决定系数 $R^2 = 0.9821$, $F = 186.50$, 方程极显著。对 23 个品种的耐低铁综合评价与预测值进行相关分析后发现,二者相关系数 $r = 0.9821$, 达极显著水平,说明使用此方程预测玉米苗期耐低铁能力可行。由方程可知,15 个指标中,上述 5 个指标对耐低铁能力有显著影响,因此在鉴定中可有选择地测定这些指标,使鉴定工作简单化;同时亦可在相同条件下测定其他品种的上述 5 个指标,利用该方程预测其耐低铁能力。

3 讨论

苗期是玉米缺铁黄化较敏感的时期之一,是决定品种在石灰性土壤中后续能否正常生长的关键。在筛选耐性品种时,为了缩短筛选时间、加快筛选速度,常采用液培法在苗期进行大量的筛选鉴定。用这种方法时首先要确定适宜的筛选浓度,筛选浓度太低,各基因型之间的差异不明显;浓度太高则会加重植株的筛选压力,优良基因型的遗传优势又得不到充分发挥。为此在试验前进行了筛选浓度的预备试验,本试验确定的低铁浓度与石荣丽等^[9]采用的一致。

选择(育)耐低铁能力强的品种是缓解玉米低铁胁迫的重要手段,筛选耐低铁玉米材料是玉米耐低铁遗传学研究和品种选育的前提,而选择适宜的鉴定指标是评价玉米品种(材料)耐低铁能力的重要基础。前人对机理 I 植物耐低铁品种筛选指标有一定研究,翟衡等^[14]、张凌云等^[15]的研究将铁的吸收动力学、根际酸化能力、根系还原能力作为评价铁高效砧木的指标。高丽等^[13]的研究表明在生长前期叶绿素含量与花生叶片黄化度、活性铁及荚果产量之间均呈极显著的相关关系;夏友霖等^[22]研究也表明叶绿素含量与花生单株果重近于呈二次抛物线关系;叶绿素含量可作为花生耐低铁品种筛选的一个可靠指标。邹春琴等^[23]的研究表明活性铁含量

比全铁含量能更准确地反映植物的铁营养状况,尤其是对于双子叶植物,可作为诊断植物铁营养状况的可行指标。前人对机理 I 植物研究并未取得较一致的结果;叶绿素含量、活性铁、铁的吸收动力学、根际酸化能力、根系还原能力仅仅从单方面对植物耐低铁能力作出评价,由于铁在植物体内的同化运转涉及复杂的生理生化过程,耐低铁特性又是由多基因控制的复杂性状,因此从单方面评价难免会出现判断上的错误。另外,机理 I 植物和机理 II 植物吸收铁的机理不同^[24-25];机理 I 植物是通过增加 H^+ 等还原物质的分泌或提高根系铁还原系统的活性来增强植物对铁的吸收;机理 II 植物则分泌麦根酸类植物铁载体(PS, phyto siderophore)来适应低铁胁迫,因此评价机理 I 植物耐低铁能力的筛选指标并不完全适用于机理 II 植物。本试验选择了与铁素利用直接相关的叶绿素含量、铁含量相关指标以及部分生长发育相关指标,采用主成分分析法^[19, 26]综合评价玉米品种耐低铁能力,将原来的 15 个性状综合成为 5 个相互独立的综合指标;然后对 5 个综合指标进行隶属函数分析、对综合得分进行聚类分析,筛选出耐低铁品种;将测定指标相对值做自变量,综合得分 D 值做因变量进行逐步回归分析,利用所建立的回归方程最终筛选出 5 个显著影响玉米耐低铁能力的指标,分别为展叶数、叶面积、根体积、根干重和铁积累量。入选的这些指标对耐低铁综合得分都有显著影响。除根干重外其他 4 个指标的变异系数都超过 20%,韩璐等^[21]在其研究中也指出基因型变异程度是衡量筛选指标是否适宜的重要依据,变异程度越大,说明该性状指标越有利于基因型差异的显示。

目前关于全铁含量作为铁营养状况的诊断指标尚存在争议,有研究认为缺铁失绿叶片中全铁含量一般等于或略高于正常叶片,产生“黄化悖论现象”^[27]。目前比较公认的观点是,叶片中活性铁含量能较好地反映植株铁营养状况,但由于对活性铁的形态及存在位置缺乏了解,活性铁的测定方法尚存在争议^[28]。本研究发现低铁胁迫下,虽然植株的全铁含量和叶片活性铁含量都明显降低,但植株全铁含量和叶片活性铁含量与叶绿素含量相关性均不显著,而铁积累量与叶绿素含量以及株高、茎粗、叶面积、根长的相关性达到极显著水平。铁积累量可能比全铁含量和活性铁含量更能代表植物的铁营养状况,但植物的铁营养状况也因植物本身的特性而有所不同^[22]。因此铁积累量在其他植物中是否表现一致还需进一步研究。

参考文献

- [1] 任小平, 姜慧芳, 黄家权, 等. 水培条件下花生对缺铁的生理反应[J]. 植物遗传资源学报, 2010, 11(4): 491-497
- [2] Hell R, Stephan U W. Iron uptake, trafficking and homeostasis in plants[J]. *Planta*, 2003, 216(4): 541-551
- [3] Marschner H, Mheld V R. Strategies of plants for acquisition of iron[J]. *Plant Soil*, 1994, 165(2): 261-274
- [4] Urbany C, Benke A, Marsian J, et al. Ups and downs of a transcriptional landscape shape iron deficiency associated chlorosis of the maize inbreds B73 and Mo17[J]. *BMC Plant Biol*, 2013, 13: 213
- [5] Chakraborty B, Singh P N, Shukla A, et al. Physiological and biochemical adjustment of iron chlorosis affected low-chill peach cultivars supplied with different iron sources[J]. *Physiol Mol Biol Plant*, 2012, 18(2): 141-148
- [6] Lopez-Rayo S, Hernandez D, Lucena J J. Chemical evaluation of HBED/Fe³⁺ and the novel HJB/Fe³⁺ chelates as fertilizers to alleviate iron chlorosis[J]. *J Agric Food Chem*, 2009, 57(18): 8504-8513
- [7] 付力成, 王人民, 孟杰, 等. 叶面锌、铁配施对水稻产量、品质及锌铁分布的影响及其品种差异[J]. 中国农业科学, 2010, 43(24): 5009-5018
- [8] 韩振海, 王永章, 孙文彬. 铁高效及低效苹果基因型的铁离子吸收动力学研究[J]. 园艺学报, 1995(4): 313-317
- [9] 石荣丽, 张福锁, 邹春琴. 不同基因型小麦铁营养效率差异及其可能机制[J]. 植物营养与肥料学报, 2010(6): 1306-1311
- [10] 高丽, 史衍玺. 石灰性土壤中花生耐低铁基因型差异的研究[J]. 中国油料作物学报, 2003, 25(4): 89-92
- [11] Clark R B. Internal root control of iron uptake and utilization in maize genotypes[J]. *Plant Soil*, 1974, 40(3): 669-677
- [12] Barton L L, Abadia J, Hansen N C, et al. Iron nutrition in plants and rhizospheric microorganisms [M]. Berlin: Springer Netherlands, 2006, 23-59
- [13] 高丽, 史衍玺, 周健民. 花生缺铁黄化的敏感时期及耐低铁品种的筛选指标[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(4): 917-922
- [14] 翟衡, 李佳. 抗缺铁葡萄砧木的鉴定及指标筛选[J]. 中国农业科学, 1999, 32(6): 34-39
- [15] 张凌云, 翟衡, 张宪法, 等. 苹果砧木铁高效基因型筛选[J]. 中国农业科学, 2002, 35(1): 68-71
- [16] 李式军, 江李平. 水培生菜耐缺铁胁迫品种的筛选及其生理特性研究[J]. 园艺学报, 1995, 22(02): 147-152
- [17] Zuo Y, Zhang F, Li X, et al. Studies on the improvement in iron nutrition of peanut by intercropping with maize on a calcareous soil[J]. *Plant Soil*, 2000, 220(1-2): 13-25
- [18] 鲁如坤. 土壤农业化学分析[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999: 337
- [19] 李丰先, 周宇飞, 王艺陶, 等. 高粱品种萌发期耐碱性筛选与综合鉴定[J]. 中国农业科学, 2013, 46(9): 1762-1771
- [20] 宋江峰, 李大婧, 刘春泉, 等. 甜糯玉米软罐头主要挥发性物质主成分分析和聚类分析[J]. 中国农业科学, 2010, 43(10): 2122-2131
- [21] 韩璐, 张薇. 棉花苗期氮营养高效品种筛选[J]. 中国农学通报, 2011, 27(1): 84-88
- [22] 夏友霖, 廖伯寿, 毛金雄, 等. 四川丘陵紫色土花生品种耐缺铁性鉴定与评价[J]. 中国油料作物学报, 2013, 35(3): 326-330
- [23] 邹春琴, 陈新平. 活性铁作为植物铁营养状况诊断指标的相关研究[J]. 植物营养与肥料学报, 1998, 4(4): 399-406
- [24] 段立红, 丁红, 李文学, 等. 机理 I 植物铁吸收与运输的分子机制[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(4): 739-744
- [25] 申红芸, 熊宏春, 郭笑彤, 等. 植物吸收和转运铁分子生理机制研究进展[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(6): 1522-1530
- [26] 殷冬梅, 张幸果, 王允, 等. 花生主要品质性状的主成分分析与综合评价[J]. 植物遗传资源学报, 2011, 12(4): 507-512
- [27] 刘泽军, 赵越, 殷文娟, 等. 果树“铁素黄化悖论”现象探讨[J]. 北方园艺, 2013(18): 174-178
- [28] 白亚君, 母树宏. 植物对铁的吸收运转及铁与叶绿素的关系[J]. 河北农业大学学报, 1994(17): 121-125

(上接第 733 页)

参考文献

- [1] 禹山林. 中国花生品种及其系谱[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2008: 647-648
- [2] 耿健, 刘立峰, 崔顺立, 等. 冀鲁豫花生育成品种的遗传多样性分析[J]. 植物遗传资源学报, 2012, 13(2): 201-206
- [3] 陈静, 胡晓辉, 苗华荣, 等. SSR 标记分析国家北方花生区试品种的遗传多样性[J]. 植物遗传资源学报, 2009, 10(3): 360-366
- [4] 王传堂, 王秀贞, 唐月异, 等. 花生区组间杂交新品种花育 31 号的选育[J]. 花生学报, 2009, 38(3): 29-30
- [5] 李卫青. “丰花”系列花生品种特异 SSR 标记筛选及其生理性状的遗传分析[D]. 泰安: 山东农业大学, 2009
- [6] Hopkins M S, Casa A M, Wang T, et al. Discovery and characterization of polymorphic simple sequence repeats (SSRs) in peanut [J]. *Corp Sci*, 1999, 39(4): 1243-1247
- [7] 禹山林. 中国花生品种及其系谱[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2008: 19-44
- [8] 陈静, 胡晓辉, 苗华荣, 等. CTAB 法提取花生总 DNA 在 SSR 和 SRAP 中的扩增效果[J]. 花生学报, 2008, 37(1): 29-32
- [9] 康红梅, 李保云, 孙毅. 花生表型及 SSR 遗传多样性的研究[J]. 植物遗传资源学报, 2012, 13(1): 66-71, 76
- [10] Brown A H D. The ease for core collection[M]//Brown A H D, Frankel O H, Marshall R D, et al. The use of plant genetic resources. Cambridge: Cambridge University Press, 1989: 136-156
- [11] 李自超, 张洪亮, 曹永生, 等. 中国地方稻种资源初级核心种质取样策略研究[J]. 作物学报, 2003, 29(1): 20-24
- [12] Rohlf F J. NTSYS—pc, Numerical Taxonomy and Multivariate Analysis System[M]. Version 2.0. Exeter Software, New York, 1998
- [13] Nei M, Li W H. Mathematical model for studying genetic variation in terms of restriction endonucleases[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 1979, 76: 5269 - 5273
- [14] 陈永水, 陈剑洪, 郭陞垚, 等. 福建省审(认)定花生品种系谱及主要性状遗传改良分析[J]. 中国农学通报, 2014, 30(18): 136-144
- [15] He G, Meng R, Newman M, et al. Microsatellites as DNA markers in cultivated peanut (*Arachis hypogaea* L.) [J]. *BMC Plant Biol*, 2003, 3: 1-3
- [16] 任小平, 张晓杰, 廖伯寿, 等. ICRISAT 花生微核心种质资源 SSR 标记遗传多样性分析[J]. 中国农业科学, 2010, 43(14): 2848-2858
- [17] 邱庆树, 李正超, 申馥玉, 等. 花生辐射与杂交相结合的育种效果[J]. 中国农业科学, 1999, 32(2): 39-42
- [18] 邱庆树. 花生辐射遗传育种的研究[J]. 中国农业科学, 1982, 15(6): 25-30
- [19] 申馥玉, 王在序, 甘信民. 花生种间三倍体杂种染色体加倍技术的研究[J]. 中国农业科学, 1984, 17(4): 21-25
- [20] 孙大容. 花生育种学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998: 190-217