植物营养与肥料学报 2007,13(6):1068 - 1073
Plant Nutrition and Fertilizer Science

不同玉米基因型的磷效率和相对生物性状的差异及其回归模型研究

陈俊意，蔡一林*，徐德林，吕学高，陈天青
（西南大学农学与生物科技学院，重庆 400716）

摘要：以32个不同玉米基因型为材料，在低磷和高磷两个供磷水平下，分析不同玉米基因型生物学性状和磷效率的基因型差异，根据相对生物学性状与磷效率，磷吸收效率和磷利用效率与磷效率进行多元线性回归分析，分别建立它们的最优回归方程，同时进行耐低磷基因型的筛选。结果表明，相对株高、相对地上部干重、相对地下部干重和相对叶龄基因型间变异范围分别为0.309～0.978、0.314～0.947、0.367～1.400和0.455～0.790；磷效率、磷吸收效率和磷利用效率基因型间变异范围分别为0.196～0.935、0.879～4.235和0.621～1.764。相对地下部干重对磷效率的回归系数显著，建立磷效率与相对地下部干重的最优回归模型为：$Y = -0.087 + 0.702X_3$，($P < 0.05$；$R^2 = 0.6549$)；磷吸收效率和磷利用效率对磷效率的偏回归系数均显著，建立磷效率与磷吸收效率和磷利用效率二者的最优回归模型为：$Y = -0.379 + 0.274\ X_1 + 0.301\ X_2$，($P < 0.05$；$R^2 = 0.7390$)。耐低磷基因型的筛选结果表明，待选材料中，磷效率和相对生物性状都优良的只有178和082两个基因型，其他大部分基因型的磷效率和相对生物性状都是中低类型。

关键词：玉米基因型；生物学性状；磷效率；最优回归模型
中图分类号：S513；S147.5　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1008-505X(2007)06-1068-06

Maize genotype differences in phosphorus efficiency and relative biological characteristics and regression modeling analysis

CHEN Jun-yi, CAI Yi-lin*, XU De-lin, LÜ Xue-gao, CHEN Tian-qing
(*College of Agronomy & Biotechnology, Southwest University, Chongqing 400716, China*)

Abstract: Under low and high P application, 32 Maize genotypes were selected to study the genotypic differences in biological characteristics and P efficiency. Multiple linear regression analyses and clustering of maize genotypes for P efficiency and relative biological characteristics were conducted, and seedling for tolerance to low phosphate stress was screened. The main results were summarized as follows: 1) The variation of relative plant height (RPH), relative plant dry weight (RPW), relative root dry weight (RRW) and relative leaf age (RLA) among genotypes were 0.309 - 0.978, 0.314 - 0.947, 0.367 - 1.400 and 0.455 - 0.790, respectively, the variation of P efficiency, absorption efficiency and utilization efficiency among genotypes were 0.196 - 0.935, 0.879 - 4.235 and 0.621 - 1.764, respectively. 2) Partial regression coefficient of relative root dry weight (RRW) to P efficiency was significant and the optimum regression equation was $Y = -0.087 + 0.702X_3$ ($P < 0.05$, $R^2 = 0.6549$). Partial regression coefficients of absorption efficiency and utilization efficiency to P efficiency were also significant and the optimum regression equation was $Y = -0.379 + 0.2749\ X_1 + 0.301\ X_2$ ($P < 0.05$, $R^2 = 0.7390$). 3) Only inbred lines 178 and 082 had the characteristics of high P efficiency and high relative biological characteristics, while most of studied inbred lines belonged to moderate and low ones.

Key words: maize genotypes; biological characteristics; phosphorus efficiency; optimum regression model

收稿日期：2006-12-24　　**修改稿收到日期**：2007-03-20
基金项目：重庆市动植物良种创新工程项目(8317)资助。
作者简介：陈俊意(1973—)，男，重庆开县人，博士研究生，主要从事作物遗传育种研究。E-mail: chenjunyi3@126.com
* 通讯作者

土壤缺磷，加之土壤对磷素有强烈的固定作用，导致土壤磷素不能满足作物生长需要。为了提高作物产量，需要选育高磷效率作物品种，提高作物对土壤中难溶态磷的利用能力。玉米是重要的粮食作物之一，目前选育玉米品种主要集中在产量和品质性状，选育的品种磷效率一般不高，绝大部分品种不耐低磷土壤。在常用的玉米基因型中，通过挖掘玉米本身的遗传潜力，筛选或培育高磷效率玉米基因型，需要对玉米耐低磷特性进行研究。而玉米耐低磷研究多集中在玉米苗期[1-2]，主要研究了耐低磷玉米种质资源的筛选办法[3]；低磷胁迫下玉米的形态、生理和根系特征等的变化[4-5]；玉米磷效率与磷吸收效率和磷利用效率的关系等[6-13]；但大多数的研究采用的基因型材料较少，不具有普遍性。不同玉米基因型间的相对生物性状差异，以及磷效率与多个相对生物性状的关系及其线性回归模型等研究较少，且单纯强调玉米植株的磷效率，忽视低磷土壤条件下植株的生物性状。

本试验选取常用的玉米四大骨干自交系和西南地方种质自交系共32个不同玉米基因型进行研究，试图通过研究多个相对生物性状以及磷吸收效率、磷利用效率和磷效率的基因型差异及其回归模型，筛选出磷效率和相对生物性状都优良的基因型，为玉米育种研究提供中高磷效率材料以及为提高玉米磷吸收利用效率，培育高磷效率玉米品种提供理论依据。

1　材料和方法

1.1　试验材料

试验利用常用的玉米四大骨干自交系和西南地方种质自交系，共32个不同玉米基因型，即，1）改良Reid群：5003、7922、32；2）Lan群：48-2、M017、77、3H-2、自330；3）四平头群：黄早四、黄C；4）旅大红骨群：丹340、郑22；5）西南地方种质：贞367、8535、5311、502196、木6、52106、7146、E28、B8金、488、286、7331、3189、7327、9195；6）其它：178、082、S37、掖107、095。试材由西南大学玉米研究所提供。

1.2　试验方法

盆栽试验于2006年在西南大学玉米研究所内进行。供试土壤采于重庆北碚缙云山，为黄砂壤土。供试土壤养分状况：pH 6.4，有机质4.57g/kg，全P 0.123 g/kg，全K 12.1 g/kg，碱解N 15.3 mg/kg，速效P未检出，速效K 20.0 mg/kg（由西南大学资源环境学院土壤与生命元素分析室测定）。

试验采用随机区组设计，重复3次。每个重复中，每个玉米基因型种2盆，低磷和高磷各1盆。所用盆直径120 mm，高240 mm，每盆装土2.5 kg。施N 0.2 g/kg、K 0.2 g/kg作底肥，肥源为尿素和氯化钾；高磷盆施P 0.2 g/kg，低磷盆不施P，肥源为20%过磷酸钙。播种前分别用2%次氯酸钠和20 g 20%多菌灵可湿性粉剂兑水2 L对试验种子消毒2次，每次时间1 h，清水冲洗后，恒温25℃催芽至种子芽长1～2 cm，选取均匀一致的出芽种子进行点播，每盆播种2粒，每组的高低磷2盆对应点播同种材料。每天早晨浇水，浇水量一致，常规管理。出苗后培育25d采收，采收前2 h测量株高和记录叶龄，采收材料时，完整地挖取具有全部根系的植株，洗净。根系、地上部剪断分开，105℃杀青30 min，80℃恒温烘干，测定根系、地上部干重。粉碎后按钒钼黄法测定磷含量[14]。

由于不同玉米基因型苗期忍耐低磷的能力，采用低高磷之间生物学的相对值较单纯采用低磷条件下的绝对生物学数值更为合理[15]。因此，本试验各项生物指标的相对值用低磷与高磷的相应生物指标的比值表示。磷吸收效率用低磷条件下的植株全株磷积累量表示；磷利用效率用低磷条件下的全株干重与全株磷积累量比值的十分之一表示；磷效率用低磷与高磷的植株全株的磷积累量相对值表示。

1.3　统计分析方法

采取逐步淘汰不显著自变量的方法进行多元线性逐步回归分析，建立最优回归模型。具体方法如下：建立多元线性回归方程，检验各个自变量对因变量的偏相关系数的显著性，淘汰最不显著的自变量，建立少一个自变量的多元线性回归方程；重复以上步骤，直到所有的自变量对因变量的偏相关系数的均显著为止，建立最优回归模型。以磷效率、磷吸收效率和磷利用效率为指标，采用最长距离法，对32个材料的磷效率进行系统聚类分析；以相对株高、相对地上部干重、相对叶龄和相对地下部干重为指标，采用最长距离法，对32个材料的相对生物性状进行系统聚类分析。试验数据用DPS 3.0专业版和EXCEL2003数据处理系统进行分析。

2　结果与分析

2.1　不同玉米基因型相对生物量差异分析

32个不同玉米基因型低、高磷间的相对株高、相对地上部干重、相对地下部干重和相对叶龄见表1（各个数据均为3次重复的平均值，下同）。其中相

对株高的变幅为0.309～0.978,平均值为0.694,排在前六位的基因型依次是:082、77、178、7146、自330、丹340。相对地上部干重的变幅为0.314～0.947,平均值为0.742,排在前六位的基因型依次是:082、48-2、178、5311、52106、7146。相对地下部干重的变幅为0.367～1.400,平均值为0.934,排在前六位的基因型依次是:黄C、5311、7331、48-2、178、082。相对叶龄的变幅为0.455～0.790,平均值为0.674,排在前六位的基因型依次是:48-2、488、5311、178、8535、286。方差分析表明,不同玉米基因型间相对株高(RPH)、相对地上部干重(RPW)、相对地下部干重(RRW)和相对叶龄(RLA)F值分别为:174.107、4.727、60.430和4.727,均达极显著差异。

表1 不同玉米基因型相对生物量和磷效率

Table 1 Relative biomass and P efficiency in maize genotypes

基因型 Genotypes	相对株高 RPH	相对地上部干重 RPW	相对根干重 RRW	相对叶龄 RLA	磷吸收效率 PAE(mg/plant)	磷利用效率 PUE(g/mg)	磷效率 PE(mg/mg)
178	0.965 A	0.896 A	1.133 A	0.760 A	3.460 A	0.795 BC	0.935 A
贞367 Zhen 367	0.706 C	0.621 C	1.100 A	0.607 C	3.608 AB	0.629 D	0.863 B
8535	0.563 D	0.808 AB	1.016 A	0.745 A	3.539 AB	0.723 C	0.830 C
502196	0.731 C	0.835 A	1.111 A	0.700 A	3.008 B	0.888 B	0.783 C
77	0.970 A	0.714 B	0.767 C	0.622 B	0.879 F	1.764 A	0.411 F
7146	0.906 A	0.853 A	0.968 A	0.636 B	1.981 C	1.418 AB	0.662 D
木6 Mu 6	0.741 C	0.663 B	0.904 AB	0.608 C	2.872 BC	0.738 C	0.670 D
5311	0.824 B	0.884 A	1.300 A	0.761 A	4.235 A	0.621 E	0.835 C
52106	0.400 E	0.859 A	0.945 AB	0.778 A	2.738 C	1.012 B	0.510 E
3H-2	0.365 EF	0.670 B	0.800 B	0.455 E	1.742 C	1.269 AB	0.347 G
M017	0.365 EF	0.507 C	0.571 D	0.455 E	1.392 D	1.186 B	0.258 G
S37	0.773 B	0.738 B	0.945 AB	0.680 B	3.764 AB	0.640 D	0.730 D
082	0.978 A	0.947 A	1.111 A	0.698 AB	3.400 B	0.727 C	0.845 B
48-2	0.309 G	0.924 A	1.238 A	0.790 A	3.329 B	0.700 CD	0.798 C
9195	0.313 F	0.669 B	0.714 C	0.588 D	2.315 C	0.877 B	0.391 G
掖107 Ye 107	0.309 G	0.340 DE	0.367 F	0.650 B	1.262 D	0.888 B	0.197 H
7922	0.328 F	0.314 E	0.419 E	0.625 B	1.139 E	0.921 B	0.196 H
B8金 B8Jin	0.677 C	0.713 B	0.857 B	0.635 B	1.734 C	1.292 AB	0.335 G
488	0.780 B	0.850 A	0.943 AB	0.790 A	1.675 C	1.176 B	0.425 F
32	0.587 D	0.743 B	0.925 AB	0.673 B	2.329 C	1.005 B	0.468 F
5003	0.875 B	0.794 B	1.067 A	0.638 B	2.094 C	1.113 B	0.637 D
3189	0.809 BC	0.733 B	0.800 BC	0.667 B	2.105 C	1.012 B	0.588 E
7327	0.726 C	0.778 B	1.000 A	0.714 A	2.237 C	0.899 B	0.636 D
E28	0.774 C	0.751 B	0.917 AB	0.700 A	1.948 C	1.186 B	0.565 E
095	0.830 B	0.759 B	0.909 AB	0.679 B	1.900 C	1.292 AB	0.607 D
丹340 Dan 340	0.878 B	0.780 B	0.875 B	0.700 A	1.990 C	1.176 B	0.390 G
黄早四 Huang ZS	0.804 BC	0.769 B	0.833 B	0.700 A	2.140 C	1.005 B	0.475 F
黄C Huang C	0.865 B	0.751 B	1.400 A	0.700 A	1.740 C	1.196 B	0.619 D
7331	0.843 B	0.747 B	1.286 A	0.714 A	1.574 C	1.315 AB	0.669 D
郑22 Zheng 22	0.571 D	0.747 B	1.111 A	0.700 A	2.659 C	0.888 B	0.635 D
286	0.745 C	0.803 AB	0.771 C	0.720 A	1.783 C	1.352 AB	0.467 F
自330 Zi 330	0.891 A	0.776 B	0.800 BC	0.679 B	1.721 C	1.418 AB	0.432 F
平均值 Mean	0.694	0.742	0.934	0.674	2.322	1.035	0.569

注(Note):不同字母表示差异达1%显著水平。Different letters means significant at 1% levels; RPH—Relative plant height; RPW—Relative plant dry weight; RRW—Relative root dry weight; RLA—Relative leaf age; PAE—P absorption efficiency; PUE—P utilization efficiency; PE—P efficiency, same as follows.

可以看出,178 和 082 等玉米基因型具有较高的相对地下部干重,提高了根系分解吸收土壤中磷的能力,因此相对地上部干重也较高;而掖 107、7922 等玉米基因型,相对地上部干重和相对地下部干重均不高。相关分析(表 2)表明,相对地下部干重与相对地上部干重相关系数为 0.7416,达高度正相关。

表 2　不同玉米基因型相对生物量间的相关系数

Table 2　Correlation coefficients among relative biomasses in maize genotypes

相关系数 r	X_1	X_2	X_3	X_4
X_2	0.5342**	1		
X_3	0.4573**	0.7416	1	
X_4	0.3089	0.5984**	0.5095**	1

注(Note):X_1—相对株高 RPH;X_2—相对地上部干重 RPW;X_3—相对地下部干重 RRW;X_4—相对叶龄 RLA。

2.2　不同玉米基因型磷效率差异分析

低磷条件下,32 个玉米基因型在的磷吸收效率变幅为 0.879～4.235,平均值为 2.322,排在前六位的基因型依次是 5311、S37、贞 367、8535、178、082;磷利用效率变幅为 0.621～1.764,平均值为 1.035,排在前六位的基因型依次是 77、7146、自 330、286、7331、095;磷效率的变幅为 0.196～0.935,平均值为 0.569,排在前六位的基因型依次是 178、贞 367、082、5311、8535、48-2(表 1)。方差分析表明,不同玉米基因型间磷吸收效率(PAE)、磷利用效率(PUE)和磷效率(PE)的 F 值分别为 174.601、187.958 和 2214.458,均达极显著差异水平。

2.3　磷效率与相对生物学性状的最优回归模型分析

不同玉米基因型磷效率与相对株高、相对地上部干重、相对地下部干重、相对叶龄有着复杂的关系。通过多元线性逐步回归分析,建立最优回归模型。

磷效率(Y)依相对株高(X_1)、相对地上部干重(X_2)、相对地下部干重(X_3)、相对叶龄(X_4)四个自变量的四元线性回归方程为:

$$Y = -0.215 + 0.064X_1 + 0.131X_2 + 0.593X_3 + 0.132X_4, R^2 = 0.66956 (P < 0.05)$$

自变量 X_1、X_2、X_3 和 X_4 对 Y 的偏相关分别为:$r(y, X_1) = 0.1007$, $r(y, X_2) = 0.0938$, $r(y, X_3) = 0.6181$, $r(y, X_4) = 0.0711$,与临界 r 值($r_{0.05,27} = 0.367$, $r_{0.01,27} = 0.471$)比较,X_3 对 Y 的偏相关 $r(y, X_3)$极显著,X_1、X_2 和 X_4 对 Y 的偏相关 $r(y, X_1)$、$r(y, X_2)$和 $r(y, X_4)$都不显著,而 X_4 对 Y 的偏相关 $r(y, X_4)$最不显著,故舍去 X_4,建立 Y 依 X_1、X_2 和 X_3 的三元线性回归方程:

$$Y = -0.159 + 0.063X_1 + 0.168X_2 + 0.599X_3, R^2 = 0.6679 (P < 0.05)$$

自变量 X_1、X_2 和 X_3 对 Y 的偏相关分别为:$r(y, X_1) = 0.0984$, $r(y, X_2) = 0.1286$, $r(y, X_3) = 0.6244$,与临界 r 值($r_{0.05,28} = 0.361$, $r_{0.01,28} = 0.463$)比较,X_3对 Y 的偏相关 $r(y, X_3)$极显著,X_1 和 X_2 对 Y 的偏相关 $r(y, X_1)$和 $r(y, X_2)$都不显著,而 X_1 对 Y 的偏相关 $r(y, X_1)$最不显著,故舍去 X_1,建立 Y 依 X_2 和 X_3 的二元线性回归方程:

$$Y = -0.1534 + 0.210X_2 + 0.607X_3, R^2 = 0.6646 (P < 0.05)$$

自变量 X_2 和 X_3 对 Y 的偏相关分别为:$r(y, X_2) = 0.1682$, $r(y, X_3) = 0.6298$,与临界 r 值($r_{0.05,29} = 0.355$, $r_{0.01,29} = 0.456$)比较,X_3 对 Y 的偏相关 $r(y, X_3)$极显著,X_2 对 Y 的偏相关 $r(y, X_2)$不显著,故舍去 X_2,建立 Y 依 X_3 的一元线性回归方程:

$$Y = -0.087 + 0.702X_3; R^2 = 0.6549 (P < 0.05)$$

自变量 X_3 对 Y 的相关 $r(y, X_3) = 0.8092$,与临界值 r ($r_{0.05,30} = 0.349$, $r_{0.01,30} = 0.449$)比较,X_3 对 Y 的相关 $r(y, X_3)$极显著,该方程即为磷效率与相对生物学性状的最优回归模型。

2.4　磷效率与磷吸收效率和磷利用效率的最优回归模型分析

建立二元线性回归模型,磷效率(Y)依磷吸收效率(X_1)和磷利用效率(X_2)的二元线性回归方程:

$$Y = -0.379 + 0.274X_1 + 0.301X_2, R^2 = 0.7390 (P < 0.05)$$

自变量 X_1 和 X_2 对 Y 的偏相关分别为:$r(y, X_1) = 0.8021$, $r(y, X_2) = 0.4338$,与临界 r 值($r_{0.05,29} = 0.355$, $r_{0.01,29} = 0.456$)比较,X_1 和 X_2 对 Y 的偏相关 $r(y, X_1)$和 $r(y, X_2)$极显著或显著,该方程即为磷效率与磷吸收效率和磷利用效率的最优回归模型。

2.5　不同玉米基因型磷效率的分类与评定

以磷效率、磷吸收效率和磷利用效率为指标,采用最长距离法,对不同玉米基因型进行系统聚类分析。当取阀值 T = 1.50 时,将 32 个材料磷效率分为三类(图 1),即:

第一类:178、082、48-2、贞 367、8535、S37、5311;

第二类：502196、木 6、52106、郑 22、7146、E28、095、丹 340、3H-2、B8 金、488、286、自 330、黄 C、7331、9195、32、5003、3189、黄早四、7327；

第三类：77、M017、掖 107、7922；

第一类为高磷效率基因型，第二类为中磷效率基因型，第三类为低磷效率基因型。

以相对株高、相对地上部干重、相对叶龄和相对地下部干重为指标，采用最长距离法，对不同玉米基因型进行系统聚类分析。当取阀值 = 0.50 时，将 32 个材料的相对生物性状分为六类(图 1)，即：

第一类：178、082、7146、5003、77、3189、黄早四、自 330、095、丹 340、286；

第二类：贞 367、木 6、B8 金、32、8535、郑 22、502196、S37、E28、7327、488；

第三类：5311、黄 C、7331；

第四类：52106、48-2；

第五类：3H-2、9195、M017；

第六类：掖 107、7922；

第一类为相对生物性状优良基因型，第二、三、四、五类为相对生物性状中基因型，第六类为相对生物性状差基因型。

综合磷效率和相对生物性状的分类结果，可以将 32 个不同玉米基因型分为七类：(1)高磷效率相对生物性状优良的基因型有 2 个 178 和 82；(2)高磷效率相对生物性状中的基因型有 5 个为 48-2、贞 367、8535、S37、5311；(3)中磷效率相对生物性状优良基因型有 8 个，7146、5003、3189、黄早四、自 330、095、丹 340、286；(4)中磷效率相对生物性状中的基因型有 13 个，木 6、B8 金、32、郑 22、502196、7327、488、黄 C、7331、52106、48-2、3H-2、9195；(5)低磷效率相对生物性状优良基因型有 Y77 1 个；(6)低磷效率相对生物性状中的基因型有 M017 1 个；(7)低磷效率相对生物性状差的基因型有掖 107、7922 2 个。

综上看出，178 和 082 基因型的磷效率和相对生物性状表现优良，掖 107 和 7922 基因型的磷效率和相对生物性状表现最差，其他绝大部分基因型的磷效率和相对生物性状是中间类型。

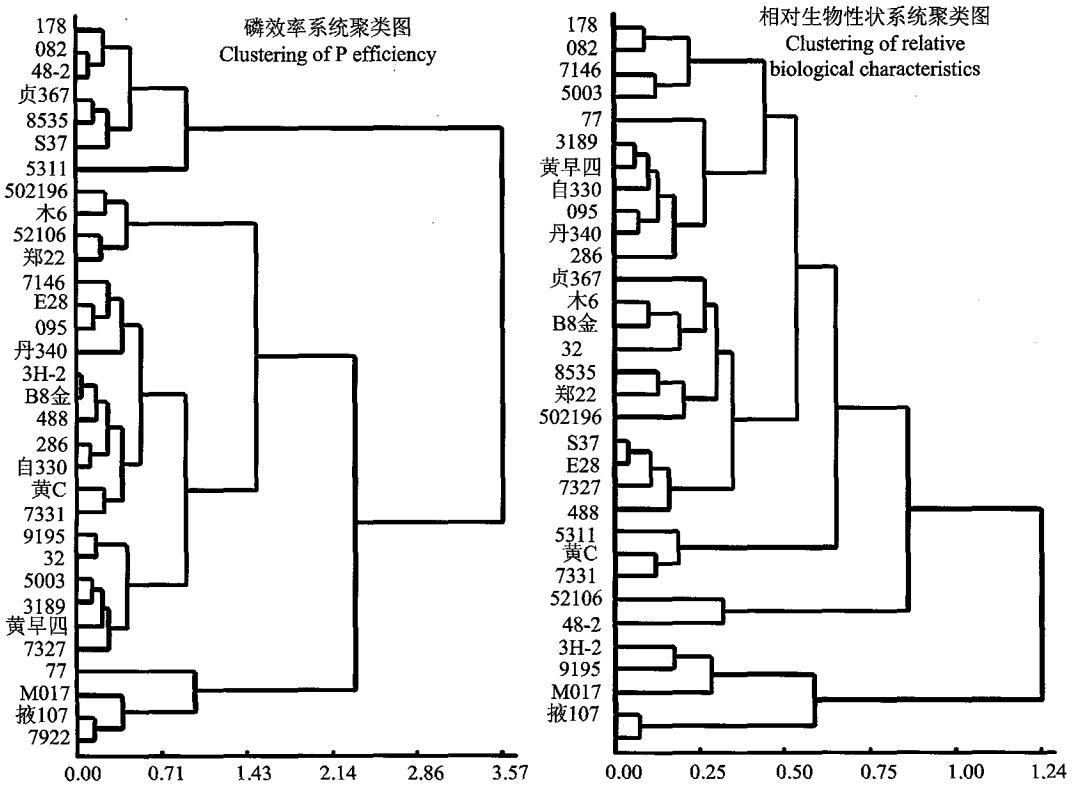

图 1 系统聚类分析图

Fig.1 Clustering of 32 maize genotypes for P efficiency and relative biological characteristics

3 讨论

在进行多变量分析时,变量之间不一定都存在确定的函数关系,但往往存在一定的统计相关性,多元偏回归分析就是找到这种相关性并作定量分析的方法。通过偏回归分析建立线性回归模型,常用于分析各气候因子对作物产量的影响[16],也用于利用各产量构成因子来预测玉米产量。本试验通过建立相对生物性状与磷效率最优回归方程表明,相对地下部干重对磷效率的回归系数显著。通过磷效率与磷吸收效率和磷利用效率的最优回归模型分析,表明玉米基因型的磷吸收效率和磷利用效率都能影响磷效率,吸收和利用二者协调作用才能保证玉米基因型具有较高的磷效率。在重视考察材料磷效率的同时,也要强调考察低磷条件下植株生长的相对生物性状是否优良,否则选出的材料虽然具有高磷效率,但相对生物性状不够优良。李绍长等[3]将聚类分析方法用于玉米苗期耐低磷基因型的筛选,选出磷高效吸收高效利用的玉米基因型90-148;聚类分析方法也常常用于分析玉米基因型之间的遗传距离[17]。本试验利用聚类分析法筛选磷效率高同时相对生物性状优良的玉米基因型,结果看出,待选的32个不同玉米基因型中,具备高磷效率和相对生物性状优良的材料较少。经过筛选,基因型178和082的相对株高、相对地上部干重、相对叶龄和相对地下部干重都比较高,相对生物性状良好,磷效率性状表现稳定,在玉米育种研究中,可以作为高磷效率材料加以应用;基因型掖107和7922的磷效率和相对生物性状在供试玉米基因型中均最差,在玉米遗传研究中,可以作为低磷效率的遗传材料。

参考文献:

[1] 明凤,米国华,张福锁. 水稻对低磷反应的基因型差异及生理适应机制的初步研究[J]. 应用与生物学报, 2000,6(2): 138-141.
Ming F, Mi G H, Zhang F S. Studies on varietal difference of rice in response to low-P stress and its physiological adaptive mechanism[J]. Chin. J. Appl. Environ. Biol., 2000, 6(2):138-141.

[2] 王艳,孙杰,王荣萍. 不同玉米基因型苗期生物学性状与磷效率的相关性[J]. 山西农业大学学报, 2003,23(1): 28-31.
Wang Y, Sun J, Wang R P. Correlation between biologic characteristics and P efficiency in seedling of difference maize genotypes[J]. J. Shanxi Agric. Univ., 2003, 23(1): 28-31.

[3] 李绍长,龚江,王军. 不同玉米基因型苗期耐低磷基因型的筛选[J]. 玉米科学, 2003,11(3): 85-89.
Li S C, Gong J, Wang J. Screened on maize genotypes with tolerance to low phosphate stress[J]. Maize Sci., 2003, 11(3): 85-89.

[4] Gaume A, Machler F, De Leon C *et al*. Low-P tolerance by maize genotypes: Significance of root growth, and organic acids and acid P root exudation[J]. Plant Soil, 2001, 228:253-264.

[5] Gerloff G C. Intact-plant screening for tolerance of nutrient deficiency stress[J]. Plant Soil, 1987, 99: 3-16.

[6] Silva A E, Cabelman W H. Screening maize genotypes for tolerance to low-P stress condition[J]. Plant Soil, 1972, 146: 181-187.

[7] Bake D E, Jarrell A E. Phosphorus uptake from soils by corn hybrids selected for high and low phosphorus accumulation[J]. Agron. J., 1970, 62: 103-106.

[8] Bonser A M, Lynch J P, Snapp S. Effect of phosphorus deficiency on growth angle of basal roots of *Phaseolus vulgaris* L[J]. New Phytol., 1996, 132: 281-288.

[9] Borch K, Bouma T J, Lynch J P, Brown K M. Ethylene: A regulator of root architectural responses to soil phosphorus availability[J]. Plant Cell Environ., 1999, 22: 425-431.

[10] De Willigen P, M. van Noordwijk. Roots, plant production and nutrient use efficiency[D]. Ph D thesis. Wageningen Agric. Univ., Wageningen, the Netherlands, 1987.

[11] Eissenstat D M. Costs and benefits of constructing roots of small diameter[J]. J. Plant Nutr., 1992, 15:763-782.

[12] Fairhust T, Lefroy R, Mutert E, Batjes N. The importance, distribution and causes of phosphorus deficiency as a constraint to crop production in the tropics[J]. Agrofor. Forum., 1999, 9: 2-8.

[13] Fan M S, Zhu J M, Richards C *et al*. Physiological roles for aerenchyma in phosphorus-stressed roots[J]. Funct. Plant Biol., 2003, 30:493-506.

[14] 张志良. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 1990. 36-39.
Zhang Z L. Physiology experiment guidance[M]. Beijing: High Education Press, 1990. 36-39.

[15] Sattelmacher B, Horst W J, Becker H C. Factors of contribute to genetic variation for nutrient efficiency of crop plants[J]. Plant Soil, 1994, 157: 215-224.

[16] 钱妙芬. 大蒜产量波动的气候因素[J]. 中国辣椒, 2001, 23(6):507-509.
Qian M F. Analysis of meteorological factors influence the yield of garlic[J]. J. China Bot Peppers, 2001, 23(6): 507-509.

[17] 刘世建,荣廷昭,扬俊品,潘光堂. 四川地方种质的SSR聚类分析[J]. 作物学报, 2004,30(3),221-226.
Liu S J, Rong T Z, Yang J P, Pan G T. Cluster analysis of local maize germplasm in Sichuan based on SSRs[J]. Acta Agrin. Sin., 2004, 30(3): 221-226.