

籼型杂交水稻根系活力及其衰退特性的配合力及杂种优势分析

曹树青¹ 邓志瑞¹ 翟虎渠¹ 唐运来¹ 韩国标¹ 张荣铣^{1,*} 盛生兰² 龚红兵² 杨图南²

(¹南京农业大学 水稻研究所, 江苏南京 210095; ²江苏省镇江市农业科学研究所, 江苏句容 212400; *通讯联系人, Email: rxzhang@njau.edu.cn)

Analysis on Heterosis and Combining Ability for Root Activity and Its Declined Properties in Indica Hybrid Rice

CAO Shu-qing¹, DENG Zhi-rui¹, ZHAI Hu-qu¹, TANG Yun-lai¹, HAN Guo-biao¹, ZHANG Rong-xian^{1,*}, SHENG Sheng-lan², GONG Hong-bing², YANG Tu-nan²

(¹Rice Research Institute, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; ²Zhenjiang Agricultural Sciences Institute, Jurong 212400, Jiangsu Province, China; *Corresponding author, Email: rxzhang@njau.edu.cn)

Abstract: The heterosis and combining ability of root activity and its declined properties in indica hybrid rice were investigated by way of 4×4 incomplete diallel cross design with four sterile lines and four restorer lines. The results showed that h^2 in root activity and its declined value was higher than 85 percentage, suggesting that they may be used as the indexes of selecting excellent root in rice breeding. The estimates of both combining ability (GCA and SCA) variances were highly significant for two traits, showing root activity and declined value existed for both additive and non-additive effects, but the former was affected mainly by non-additive effect, while the latter mainly by additive effect. Longtefu A and Zhenhui 048 had higher GCA and larger variance values of SCA, which implies that they can be utilized as superior parents in rice breeding. The mean heterosis of root activity and declined value were positive (it was excellent for the negative mean heterosis of the latter), showing it was difficult to improve root physiological activity trait, but the quality hybrid might be obtained because of the difference among crosses.

Key words: hybrid rice; root activity; heterosis; combining ability

摘要: 利用籼型水稻4个不育系和4个恢复系配组的4×4不完全双列杂交, 对其根系活力及其衰退特性进行了杂种优势和配合力分析。结果表明,(1)根系活力及其衰退值的广义遗传力均大于85%, 说明两者可以作为育种指标。(2)两个性状的一般配合力及特殊配合力方差均极显著, 说明基因加性效应和非加性效应均起重要作用, 但根系活力以非加性效应为主, 而其衰退值以加性效应为主。(3)龙特甫A和镇恢048具有较高的配合力和较大的特殊配合力方差, 可作为优良亲本利用。(4)根系活力及其衰退值均表现正向优势(衰退值负向优势为好), 表明利用杂种优势改良根系生理活性这一性状比较困难, 但通过亲本的适当选配仍能获得强优势组合。

关键词: 杂交水稻; 根系活力; 杂种优势; 配合力

中图分类号: Q943; S511.032

文献标识码: A

文章编号: 1001-7216(2002)01-0019-05

根系是作物吸收水分、养分及固定植株的器官, 它不仅具有吸收功能, 而且是重要的代谢器官。根系对植株地上部的生命活动具有巨大的调节作用¹。已有研究表明, 水稻生育后期根系活力及不同层次根量与籽粒灌浆结实密切相关, 杂交水稻叶片早衰也与生育后期根系活力衰退有关, 通过栽培措施调节生育后期根系活力可以有效防止叶片早衰从而增加产量^{2~8}。随着水稻超高产育种的进展, 理想株型和产量结构优化的研究进展较快, 产量也有较大幅度提高⁹, 要进一步实现水稻高产乃至超高产, 必须将根系活力及其衰退快慢程度作为水稻育种的目标性状并纳入常规育种程序, 以利于高产乃至超高产水稻品种(或组合)的选育。有关杂交水稻的农艺、品质等性状的遗传效应等方面研究^{10,11}已有较

多报道, 但迄今为止对杂交水稻根系活力及其衰退特性的遗传规律尚未见报道。

根系活力的测定方法较多, 如 TTC 还原法、萘胺法、活跃叶面积吸收法、伤流量法等, 由于前3种测定方法比较繁琐, 不便在育种上运用, 而根系伤流量可以比较准确反映根系活力的变化^{5~8,12}, 故本文中的根系活力以根系伤流量大小表示, 并将抽穗期与抽穗后30 d的根系伤流量的差值与抽穗期根系伤流量的百分比定义为根系活力衰退值。

本文对根系活力及其衰退值的配合力及杂种优

收稿日期: 2001-03-12; 修改稿收到日期: 2001-04-16。

基金项目: 农业部跨越计划项目; 国家重点基础研究发展计划项目(G19980100)。

第一作者简介: 曹树青(1966-), 男, 在读博士研究生。

势进行分析,以期为水稻超高产育种及根系遗传特性提供参考。

1 材料与方法

用4个籼稻不育系(P_1)珍汕97A(A_1)、协青早A(A_2)、II-32A(A_3)、龙特甫A(A_4)和4个籼稻恢复系(P_2)明恢63(R_1)、镇恢129(R_2)、盐恢559(R_3)、镇恢084(R_4)于1999年在江苏省镇江市农业科学研究所试验田按NC II设计方案配制16个组合。 F_1 代和亲本于2000年种植在江苏省镇江市农业科学研究所试验田。5月15日播种,6月15日移栽。株行距13.5 cm × 25.0 cm,每小区60穴,单本插,随机区组排列,3次重复,按大田常规栽培技术管理,各小区土壤肥力和管理措施保持一致。

记载生育期,于抽穗期选择具代表性植株挂牌并分别在抽穗期和抽穗后30 d测定根系活力。根系活力大小以根系伤流量来表示,根系伤流量的测定按文献12的方法。

根系活力衰退值按下式计算:根系活力衰退值 = [(抽穗时根系伤流量 - 抽穗后30 d的根系伤流量) / 抽穗时根系伤流量] × 100%。

F_1 的杂种优势计算按下列公式进行:中亲优势 = $(F_1 - MP) / MP \times 100\%$,超亲优势 = $(F_1 - HP) / HP \times 100\%$ 。式中, F_1 、MP 和 HP 分别表示杂种一代、双亲平均和高值亲本的根系伤流量及其衰退值。

试验数据按文献13~15的方法进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 方差分析及遗传力的估算

F 测验表明(表1),在根系活力及其衰退值两

个性状中,父母本的一般配合力及特殊配合力的 F 值均达到极显著水平,说明本试验材料间存在真实差异,因此,可进行遗传参数估算和配合力等分析。

遗传力是育种上用来衡量某一性状作为育种指标可靠程度的依据¹⁴。为明确根系活力及其衰退值能否作为育种指标,通过方差分量计算对其遗传力进行估算(表2),结果表明,根系活力及其衰退值的广义遗传力均达到85%以上,而狭义遗传力在42%以上。说明根系活力及其衰退值可以作为育种指标。

2.2 配合力分析

根系活力及其衰退值的母本一般配合力、父本一般配合力及母本×父本的特殊配合力均达到极显著水平(表1),表明根系活力及其衰退值同时受加性和非加性基因效应的共同作用,但其重要性不同。进一步分析父母本及其互作的基因型方差对 F_1 性状方差的贡献(表3),发现父母本特殊配合力效应对根系活力的基因型方差影响较大($V_{P12}/V_T > 50\%$),而父母本的一般配合力效应对其衰退值的基因型方差影响较大 [$(V_{P1} + V_{P2})/V_T > 50\%$]。表明在根系活力上基因非加性效应对杂种一代的影响较大,而在衰退值上基因加性效应对杂种一代起主导作用。在一般配合力基因型方差中,父本基因型方差对两个性状的影响均较大,因此,在育种中应重视父本的选择,同时,由于根系活力的特殊配合力方差占总基因型方差比重较大,不育系也不能忽视。

亲本一般配合力及其差异显著性如表4所示。从根系活力这一性状来看,母本4个不育系中一般配合力以龙特甫A最高且为正值,其余3个不育系均为负值且差异不显著,这表明与龙特甫A配组的 F_1 一般表现为根系活力强。父本4个恢复系中盐恢559的一般配合力效应显著高于其他3个恢复系,表明以盐恢559为父本配组时其 F_1 表现较强的根系

表1 根系活力及其衰退值的配合力方差分析

Table 1 Analyses of variance for combining ability of root activity and declined value

变异来源 Source of variation	Df	根系活力 Root activity (root exudate)		衰退值 Declined value ¹⁾	
		M S	F	M S	F
重复 Replication	2	2.19	1.38	81.00	2.08
组合 Combination	15	32.44	20.48 ^{**}	633.89	16.27 ^{**}
母本一般配合力 GCA ^{-p}	3	36.29	22.91 ^{**}	797.43	20.47 ^{**}
父本一般配合力 GCA ^{-q}	3	68.57	43.30 ^{**}	1299.20	33.35 ^{**}
特殊配合力 SCA	9	19.10	12.06 ^{**}	357.62	9.18 ^{**}
误差 Error	30	1.58		38.95	

^{**} 达0.01显著水平。

^{**} Significant at the 0.01 level.

¹⁾ Declined value = [(Root exudate at heading stage - Root exudate at 30 d after heading) / Root exudate at heading stage] × 100%.

表 2 根系活力及其衰退值的遗传力

Table 2 Heritability of root activity and its declined value %

性状 Character	狭义遗传力 h_N^2	广义遗传力 h_B^2
根系活力 Root activity	42.81	87.79
衰退值 Declined value	44.23	85.03

活力。这与杂种优势的分析结果相一致(表 7)。从选育强根系杂交组合来看, 配合力效应越大越好, 因此, 龙特甫 A 和盐恢 559 的一般配合力较好, 可作为亲本加以利用。从根系活力衰退值来看, 母本 4 个不育系中一般配合力大小依次为 A₄(龙特甫 A)、A₁(珍汕 97A)、A₃(II-32A) 和 A₂(协青早 A), 而 4 个恢复系中的一般配合力大小依次为 R₃(盐恢 559)、R₁(明恢 63)、R₂(镇恢 129) 和 R₄(镇恢 084)。由于根系衰退值配合力越小越好, 所以, 亲本中以 A₂(协青早 A) 和 R₄(镇恢 084) 为好。

表 5 显示根系活力及其衰退值的特殊配合力效应及其差异显著性。8 个组合在根系活力上的特殊配合力为正值, 表现为正效应, 其余组合表现为负效应。在表现为正效应的组合中以 A₄R₄(龙特甫 A / 镇恢 084) 的正效应为最大, 在表现为负效应的组合中以 A₄R₁(龙特甫 A / 明恢 63) 的负效应为最大; 9 个组合在根系活力衰退值上的特殊配合力(越小越好)表现为负效应, 以 A₃R₄(II-32A / 镇恢 084) 和 A₁R₃(珍汕 97A / 盐恢 559) 表现最好。

一个亲本在杂种优势育种中的利用价值, 主要

取决于两个方面: (1) 与一般配合力效应有关, 如果性状的反应量是越大(小)越好, 则一般配合力大(小)的亲本才有较大的利用价值。(2) 与特殊配合力方差有关, 此方差大, 说明该亲本在与其他亲本杂交时, 可望出现偏离由一般配合力效应所估计的较极端的后代, 反之, 则说明该亲本在与其他亲本杂交时其 F₁ 的反应都较为一致, 与由一般配合力预期的相仿, 并无突出的类型¹⁶。本试验中亲本 A₄(龙特甫 A)、R₄(镇恢 084) 和 R₁(明恢 63) 的根系活力的特殊配合力方差均显著大于平均方差, 而在衰退值上 A₂(协青早 A) 和 R₃(盐恢 559) 也显著大于平均方差(表 6), 说明在其与其他亲本杂交所产生的后代中可偏离由一般配合力效应所估算的较极端的组合, 因此, 可作为亲本利用。

2.3 杂种优势

根系活力的中亲平均优势均表现正值, 而其超亲平均优势为负值(表 7), 说明水稻的根系活力属于倾高亲遗传, 但其也存在一些低中亲组合。根系活力有 12 个组合表现正向中亲优势, 占 75.0%, 其中达到显著水平的有 10 个。

由于根系活力衰退值越大, 其根系衰退越快, 说明在根系活力衰退值这一性状的遗传中以中亲优势表现负值为好。从表 7 可以看出, 根系活力衰退值的中亲平均优势表现为正值, 而其超亲平均优势为负值, 说明水稻根系活力衰退值也是倾高亲遗传, 但存在一些负向优势的组合, 如组合 A₁R₂(珍汕 97A / 镇

表 3 父母本及其互作对 F₁ 性状方差的贡献率Table 3 The contribution ratio of the male, female and their interaction to the total variance in F₁ hybrids %

性状 Character	贡献率 Contribution ratio		
	$(V_{P1} + V_{P2})/V_T$	V_{P1}/V_T	V_{P2}/V_T
根系活力 Root activity	48.76	12.57	36.19
衰退值 Declined value	52.01	16.56	35.45

V_{P1} , V_{P2} , V_{P12} 和 V_T ($V_T = V_{P1} + V_{P2} + V_{P12}$) 分别表示母本、父本、父母本互作及 F₁ 的总方差。

V_{P1} , V_{P2} , V_{P12} 和 V_T ($V_T = V_{P1} + V_{P2} + V_{P12}$) were expressed as female, male, female × male and F₁ total variance, respectively.

表 4 亲本根系活力及其衰退值的一般配合力效应及其差异显著性

Table 4 GCA effects of the parent root activity and its declined value and their significance

亲本 Parent	根系活力 Root activity	衰退值 Declined value	亲本 Parent	根系活力 Root activity	衰退值 Declined value
珍汕 97A Zhenshan 97A (A ₁)	- 0.97 b	- 1.80 b	明恢 63 Minghui 63 (R ₁)	- 1.97 c	5.98 b
协青早 A Xieqingzao A (A ₂)	- 0.79 b	- 6.57 b	镇恢 129 Zhenhui 129 (R ₂)	1.13 b	- 8.71 c
II-32A (A ₃)	- 0.84 b	- 4.39 b	盐恢 559 Yanhui 559 (R ₃)	2.83 a	12.28 a
龙特甫 A Longtefu A (A ₄)	2.61 a	12.76 a	镇恢 084 Zhenhui 084 (R ₄)	- 1.99 c	- 9.56 c
$S_{(g_i - g_j)}$	0.51	2.55	$S_{(g_i - g_j)}$	0.51	2.55
LSD _{0.05}	1.04	5.20	LSD _{0.05}	1.04	5.20

同一列数据后带不同小写英文字母者表示差异达 0.05 显著水平。

Means within the same line followed by the different small letters are significantly different at the 5% level

表5 不同组合根系活力及其衰退值的特殊配合力效应及其差异显著性

Table 5. SCA effects of different cross root activity and declined value and their significance

组合	根系活力	衰退值
Cross	Root activity	Declined value
A ₁ R ₁	2 919 ab ¹⁾	2 636 abcd
A ₁ R ₂	- 0 881 cdef	4 039 abc
A ₁ R ₃	0 419 bcde	- 10 541 ef
A ₁ R ₄	- 2 456 f	3 866 abc
A ₂ R ₁	1 644 bc	- 14 756 ef
A ₂ R ₂	- 0 656 cdef	- 2 864 bcdef
A ₂ R ₃	0 344 cde	8 946 ab
A ₂ R ₄	- 1 331 def	8 674 ab
A ₃ R ₁	- 1 606 ef	4 289 abc
A ₃ R ₂	1 093 bcd	- 4 069 cdef
A ₃ R ₃	1 094 bcd	10 741 a
A ₃ R ₄	- 0 581 cdef	- 10 961 ef
A ₄ R ₁	- 2 956 f	7 831 abc
A ₄ R ₂	0 444 bcde	2 894 abcd
A ₄ R ₃	- 1 856 ef	- 9 146 def
A ₄ R ₄	4 369 a	- 1 579 abcde
S (sif. skd)	1 258	6 240
L SD _{0.05}	2 567	12 729

同一列数据后带不同小写英文字母者表示差异达0.05显著水平。

Means within the same lines followed by the different small letters are significantly different at the 5% level

表6 亲本根系活力及其衰退值的特殊配合力方差分析

Table 6. Variances of SCA for root activity and its declined value of parents

亲本 Parent	根系活力	衰退值
	Root activity	Declined value
不育系 Sterile line		
珍汕97A Zhenshan 97A (A ₁)	5.096	46.26
协青早A Xieqingzao A (A ₂)	1.603	123.56
II-32A (A ₃)	1.690	86.64
龙特甫A Longtefu A (A ₄)	10.417	48.43
平均方差 Mean variance	6.272	114.52
恢复系 Restorer line		
明恢63M minghui 63(R ₁)	7.442	97.96
镇恢129 Zhenhui 129(R ₂)	0.795	12.96
盐恢559 Yanhui 559(R ₃)	1.573	126.54
镇恢084 Zhenhui 084(R ₄)	9.005	67.43
平均方差 Mean variance	6.272	114.52

恢129)、A₂R₂(协青早A/镇恢129)、A₃R₂(II-32A/镇恢129)、A₃R₃(II-32A/盐恢559)和A₃R₄(II-32A/镇恢084)等5个,占31.3%,均达到极显著水平。

3 讨论

随着水稻超高产研究的深入,人们逐渐认识到根系生理功能的重要性,尤其是生育后期,并发现其与产量的形成密切相关⁹。由于作物产量是由许多

表7 杂种一代根系活力及其衰退值的杂种优势

Table 7. F₁ heterosis on root activity and its declined value %

组合 Cross	根系活力 Root activity		衰退值 Declined value	
	中亲优势 HMP	超亲优势 HHP	中亲优 HMP	超亲优势 HHP
A ₁ R ₁	46.87**	42.42**	16.09**	- 17.33**
A ₁ R ₂	0.00	- 23.43**	9.33*	- 13.39*
A ₁ R ₃	25.19**	- 2.96	17.70**	- 10.19*
A ₁ R ₄	- 32.56**	- 47.27**	19.62**	1.98
A ₂ R ₁	29.36**	27.45**	- 10.39*	- 50.33**
A ₂ R ₂	- 0.36	- 21.14**	- 11.56*	- 37.33**
A ₂ R ₃	21.77**	- 2.37	70.07**	16.99**
A ₂ R ₄	- 25.09**	- 39.39**	35.78**	2.08
A ₃ R ₁	0.52	- 2.02	19.22**	18.73**
A ₃ R ₂	15.24**	- 11.43*	- 13.81*	- 35.34**
A ₃ R ₃	30.79**	1.78	71.41**	24.32**
A ₃ R ₄	- 17.37**	- 35.15**	- 26.59**	- 41.10**
A ₄ R ₁	22.28**	19.19**	80.20**	12.08*
A ₄ R ₂	36.06**	4.57	70.83**	14.11*
A ₄ R ₃	34.60**	4.73	83.13**	19.26**
A ₄ R ₄	47.49**	15.77**	77.21**	24.52**
平均Mean	14.64	- 4.18	31.76	- 4.43

, ** 分别达0.05和0.01显著水平。

, ** Significant at the P = 0.05 and 0.01 levels, respectively.

HMP- Heterosis over mid-parent; HHP- Heterosis over high-parent

复杂因素决定的,因而其遗传力较低,因此,如果某些具有遗传力较高的简单性状与产量相关,就可以将这些性状作为选择产量的间接指标,借以提高选择效果¹⁷。迄今为止,在育种程序上很少有人将这些性状作为育种指标。据此,本研究对该性状的遗传力进行估算,结果表明,根系活力及其衰退值的广义遗传力均达85%以上,说明两者均可作为水稻超高产育种指标。

进一步分析表明,根系活力及其衰退值的一般配合力和特殊配合力差异均达极显著水平,说明这些性状的遗传是由加性和非加性基因共同控制的。亲本的基因非加性效应对杂种一代根系活力性状形成起主导作用,而基因的加性效应对杂种一代衰退值这一性状具有较大的影响。父本、母本及其互作对F₁贡献率进行分析,发现根系活力及其衰退值受恢复系的影响要比不育系大,而衰退值也同时受父母本互作影响较大。因此,在育种中,在重视恢复系选育的同时,不育系的根系活力及其衰退值也不能忽视。

亲本选配实质上是一般配合力育种,组合选育实质上是特殊配合力育种,双列杂交目的之一就在于配合力分析。张向群¹⁶认为,选择亲本配合力的适宜指标是配合力类型,即一般配合力与特殊配合力方差的结合类型,最佳亲本类型是具有高的一

般配合力和大的特殊配合力方差。本试验中, 从根系活力大小角度来看, 最佳亲本为龙特甫A 和盐恢559, 用其配组可望获得强根系的组合; 从根系活力衰退特性来看, 最佳亲本应为II-32A 和镇恢129, 用其配组可望获得根系活力衰退慢的组合; 由于两个性状的不一致性, 如果将其综合起来考虑, 难以确定最佳亲本。因此, 在育种上, 可对根系活力及其衰退值进行逐步改良或广泛筛选以寻找两者均最佳的亲本。

已有研究表明, 杂种小麦的TTC还原力、呼吸强度和可溶性蛋白具有明显的杂种优势¹⁸。本研究表明, 根系活力及其衰退值在杂种优势上的表现不一。从平均中亲优势来看, 根系活力及其衰退值均为正值(衰退值为负向优势), 说明根系活力具有较强的杂种优势, 而衰退值虽没有杂种优势, 但也存在一些负向优势的组合。因此, 从总体上看, 利用杂种优势改良根系生理活性这一性状比较困难, 但由于组合间杂种优势存在着显著差异, 故通过亲本的适当选配仍能获得强优势组合。

本试验中, 根系活力的特殊配合力较好的组合汕优63, 其在全国推广面积最大, 说明其具有较强的适应性, 但其根系衰退速率特殊配合力较差, 这可能是其叶片早衰的重要因素之一; 组合II优129等均属于高产品种¹⁹, 但适应性不如汕优63, 这可能与其根系活力衰退值的特殊配合力较好而根系活力的特殊配合力较差有关。由此说明, 将根系活力大小与衰退快慢结合起来考虑, 可望获得理想根系的高产乃至超高产组合。

谢辞: 本文承蒙南京农业大学万建民教授审阅并提出宝贵意见, 特致谢意。

参考文献

- Davies W J, Jianhua Z. Root signals and the regulation of growth and development of plants in drying soil. *Annu Rev Plant Physiol Mol Biol*, 1991, 42: 55- 76.
- Ling Q H (凌启鸿). Advances in Research on Rice and Wheat (稻麦研究新进展). Nanjing: Southeast China University Press (东南大学出版社), 1991. 181- 214 (in Chinese).
- Ling Q H (凌启鸿), Ling L (凌励). Studies on the functions of roots at different node positions and their relation to the yield formation in rice plants. *Sci Agric Sin* (中国农业科学), 1984, 17 (4): 3- 11. (in Chinese with English abstract)
- Wu Y X (吴岳轩), Wu Z Q (吴振球). Studies on the relationship between root metabolic activity and leaf senescence course in hybrid rice. *Hybrid Rice* (杂交水稻), 1992, 7(6): 36- 39. (in Chinese with English abstract)
- Liang J S (梁建生), Cao X Z (曹显祖). Relationship between some physiological indexes in leaf and root bleeding sap in hybrid rice. *J Jiangsu Agric College* (江苏农学院学报), 1993, 14(4): 25- 30. (in Chinese with English abstract)
- Qiu H B (邱鸿步), Lu D Z (陆定志). Studies on leaf aging and plant bleeding sap and yield in indica rice. *J Zhejiang Agric Sci* (浙江农业科学), 1981, (4): 175- 178. (in Chinese)
- Lu D Z (陆定志), Qiu H B (邱鸿步). Studies on bleeding sap in hybrid rice cv. Shanyou 6. *J Zhejiang Agric Sci* (浙江农业科学), 1982, (4): 194- 196. (in Chinese)
- Shen B (沈波), Wang X (王熹). Changes of root exudate of indica-japonica hybrid rice and its relation to leaf physiological traits. *Chinese J Rice Sci* (中国水稻科学), 2000, 14(2): 122- 124. (in Chinese with English abstract)
- Cheng S H (程式华), Zhai H Q (翟虎渠). Comparison of some plant type components in super high-yielding hybrids of inter-subspecies rice. *Aeta Agron Sin* (作物学报), 2000, 26(6): 713- 718. (in Chinese with English abstract)
- Tan Z B (谭震波), Zhu H C (祝浩池), Yin G D (阴国大), et al. Primarily studies on combining ability of grain quality traits in hybrid rice. *Hybrid Rice* (杂交水稻), 1993, 8(2): 34- 36. (in Chinese with English abstract)
- Gong G M (龚光明), Zhou G F (周国锋), Yin C Q (尹楚球), et al. Analysis on the combining ability of main agronomic traits of indica double-functional genic male-sterile lines. *Chinese J Rice Sci* (中国水稻科学), 1993, 7(3): 137- 142. (in Chinese with English abstract)
- Shandong Agricultural College (山东农学院). Experimental Technology of Plant Physiology (植物生理实验技术指导). Jinan: Shandong Scientific and Technical Publishers (山东科学技术出版社), 1980. 162- 190. (in Chinese)
- Mo H D (莫惠栋). The analysis of combining ability in p × q mating pattern. *J Jiangsu Agric College* (江苏农学院学报), 1982, 33(3): 51- 57. (in Chinese with English abstract)
- Ma Y H (马育华). Basis for Plant Quantitative Genetics (植物数量遗传学基础). Nanjing: Jiangsu Scientific and Technical Publishers (江苏科学技术出版社), 1982. 280- 473. (in Chinese)
- Guo Z P (郭平仲). Analysis of Quantitative Genetics (数量遗传分析). Beijing: Capital Normal University Press (首都师范大学出版社), 1993. 75- 310. (in Chinese)
- Zhang X Q (张向群). General and special combining ability of F_1 hybrid in maize inbred lines. *Aeta Agron Sin* (作物学报), 1987, 13(2): 135- 142. (in Chinese with English abstract)
- Pei X S (裴新澍). Quantitative Genetics and Breeding (数理遗传与育种). Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers (上海科学技术出版社), 1987. 308- 309. (in Chinese)
- Xiao K (肖凯), Zhang R X (张荣锐), Qian W P (钱维朴). Studies on declined characteristics of leaf and root physiological function after heading in wheat. *Sci Agric Sin* (中国农业科学), 1998, 31(6): 25- 32. (in Chinese with English abstract)
- Cao S Q (曹树青), Zhai H Q (翟虎渠), Zhang R X (张荣锐), et al. Photosynthetic carbon assimilating properties in high-yield hybrid rice cv. II you 129. *Hybrid Rice* (杂交水稻), 2001, 16 (1): 46- 50. (in Chinese with English abstract)