

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2013.00449

玉米区域试验中误差方差的异质性及其对品种评价的影响

王春平^{1,*} 胡希远^{2,*} 沈琨仑²

¹ 河南科技大学农学院, 河南洛阳 471003; ² 西北农林科技大学农学院, 陕西杨凌 712100

摘 要: 为了研究我国玉米区域试验中误差方差的异质性存在状况及其对品种评价的作用, 以 2003—2006 年东北和华北 16 组玉米区域试验资料为依据, 对玉米区域试验各环境试验误差方差差异状况及误差方差同质模型和异质模型的拟合效果进行了验证, 并对品种效应差异显著性测验在误差同质模型和误差异质模型分析结果的差异状况进行了比较。结果表明, 在分析的所有试验中, 试验误差方差在环境间具有较大差异; 误差方差异质模型比误差方差同质模型对试验数据拟合效果普遍较好; 模型是否考虑误差方差的异质性的品种-环境交互效应测验结果有较大影响, 而对品种主效应测验结果影响极小; 误差方差异质模型比误差方差同质模型测验效率高。

关键词: 玉米; 区域试验; 误差变异; 模型

Heterogeneity of Error Variance and Its Effect on Variety Evaluation in Corn Regional Trials

WANG Chun-Ping^{1,*}, HU Xi-Yuan^{2,*}, and SHEN Kun-Lun²

¹ College of Agronomy, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China; ² College of Agronomy, Northwest A&F University, Yangling 712100, China

Abstract: The objective of this study was to improve the method for statistical analysis in corn regional trials by inspecting error variance. Based on the 16 data sets of the corn regional trials in the Northeast and North China from 2003 to 2006, we assessed the error variation between the environments and the fit-goodness of models for homogeneous and heterogeneous errors, and compared the statistical tests for trial effects from the two models. The results showed that the error variance largely varied between environments in all of the considered trials. The model for heterogeneous errors fitted the trial data better than the model for homogeneous errors. Whether the heterogeneity of error variance was considered in the models considerably impacted the test about variety-environment interaction effects and little did the test about variety effects. The model for heterogeneous errors had higher test efficiency than the model for homogeneous errors.

Keywords: Corn; Regional trial; Error variation; Model

由于统计理论不完善和计算工具不发达的制约或者习惯使然, 联合方差分析作为作物品种区域试验(或称多环境试验)的经典统计方法在实际分析中一直普遍沿用。众所周知, 方差分析除了一般不能分析非平衡数据外, 对试验资料还有 3 个条件要求^[1-2], 其中之一就是假设各环境的试验误差方差相等, 在统计学上也称为试验各环境的误差方差同质^[3]。然而, 实际上由于区域试验各环境中自然条件和试验操作的差异, 不同环境的误差方差未必同质^[4-5]。这使方差分析在区域试验实际分析的适用性和分析效

果不免受到限制。近年来, 统计理论的不断发展和完善以及统计分析软件的开发和普遍应用, 为非常容易地应用更加合理的模型分析各种试验提供了条件, 其中依据线性混合模型原理处理各种试验误差特性就是试验分析研究的一个重要方面^[6-10]。本文以我国近年玉米区域试验资料为依据, 揭示玉米区域试验各环境误差方差的变异状况, 在线性混合模型分析原理的框架下, 比较假设误差方差同质的传统方差分析模型和与该模型均值结构相同的误差方差异质模型在玉米区域试验数据拟合效果及其试验效

本研究由陕西省自然科学基金项目(2012JM3009)和河南科技大学人才基金项目(09001595)资助。

* 通讯作者(Corresponding authors): 胡希远, E-mail: xiyuanhu@yahoo.com.cn; 王春平, E-mail: chunpingw@163.com

Received(收稿日期): 2012-05-18; Accepted(接受日期): 2012-10-05; Published online(网络出版日期): 2012-12-11.

URL: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1809.S.20121211.1613.004.html>

应测验等方面的差异状况,以期引起人们在作物区域试验分析中对误差方差异质性及其对品种评价影响问题的重视。

1 材料与方法

1.1 数据来源

所用数据为中国玉米新品种动态国家级玉米品种区试报告中2003年至2006年东北华北地区春玉米不同组区域试验产量资料。该区每年有不同组别的玉米区域试验,本文选用其中4个组别,不同组别参试的品种(品系)不同,每组试验品种15~17个,每组试验的环境数21~23个。所有组别试验设计为随机完全区组排列,重复3次,小区面积12 m²。

1.2 分析方法

对于作物区域试验随机区组设计,其统计模型常表示为 $y_{ijk} = \mu + b_{jk} + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + e_{ijk}$, 其中, y_{ijk} ($i = 1, 2, \dots, i; j = 1, 2, \dots, j; k = 1, 2, \dots, k$) 为第 i 个品种在第 j 个环境中第 k 次重复的观测值, μ 为总体平均值, b_{jk} 为第 j 个环境中第 k 个区组的效应, α_i 为第 i 个品种的主效应, β_j 为第 j 个环境的主效应, $(\alpha\beta)_{ij}$ 为第 i 个品种与第 j 个环境的品种-环境互作效应, e_{ijk} 为与 y_{ijk} 对应的试验剩余误差。除剩余误差 e_{ijk} 外,原则上该模型中的所有效应既可为固定效应也可为随机效应,本文都按固定效应处理,这意味着试验分析的目的主要是进行各种效应差异显著性的测验。

针对上述模型中剩余误差 e_{ijk} 的不同假设,本文进行2种不同误差结构模型的分析。一种是所谓误差方差同质模型的分析,即认为所有环境中误差 e_{ijk} 的方差为一常数,通常表示为 $e_{ijk} \sim N(0, \sigma^2)$, 采用普通最小二乘估计(OLSE)试验效应,此模型及其分析法相当于传统方差分析法。另一种为所谓误差方差异质模型的分析,这种模型在均值结构部分与前述的误差方差同质模型相一致,只是在试验误差结构部分不同,即认为试验误差的方差随着试验环境的不同而变化,可表示为 $e_{ijk} \sim N(0, \sigma_j^2)$, 且 e_1, e_2, \dots, e_j 不全相等,这时适用的试验效应估计方法应为加权最小二乘估计(WLSE)^[3]。

无论误差方差同质模型还是误差方差异质模型,都是线性混合模型误差不同方差协方差结构的特例^[11-12],因此可将两模型统一在线性混合模型原理的框架下进行分析,这时试验固定效应的估计为最佳线性无偏估计(BLUE)^[13]。当误差方差同质时,BLUE等于OLSE,当误差方差异质时,BLUE等于

WLSE。两模型统一在线性混合模型原理框架下分析的优点是,不仅能得到试验效应的最佳线性无偏估计,而且能对试验误差特性与模型的适用性进行评价和方便地取得不同误差特性时试验效应差异显著性测验的结果^[14]。本文采用SAS中的PROC MIXED程序进行不同误差结构线性混合模型的分析,有关线性混合模型分析效应估计与测验的原理见文献^[15]。

为了考察不同环境试验误差方差异质的程度,对各个环境的试验数据分别进行单因素区组设计方差分析,求得各环境试验误差的方差,取其方差最大值和最小值予以比较。

1.3 不同误差结构的评判与测验

关于误差方差同质与异质两种误差结构模型对试验数据拟合的效果,可采用线性混合模型拟合信息量准则AIC(Akaike's Information Criterion)予以评判^[16]。

$$AIC = -2 \ln L + 2q$$

式中 $\ln L$ 为模型拟合极大似然值的自然对数值, q 为模型中待估计方差协方差参数的数目。相应于本研究, q 在误差方差同质模型等于1,在误差方差异质模型等于试验环境的数目。AIC值越小,则对应的误差结构模型对试验数据拟合效果越好。

由于误差方差异质和误差方差同质区域试验模型的均值结构部分相同,仅误差的结构组成有所不同,误差方差同质模型是误差方差异质模型的子模型,因此,关于误差方差同质和误差方差异质2个模型之间的差异显著性问题可采用似然比测验(Likelihood-Ratio Test, 简称LRT)来检验^[17-18]。

$$LRT = -2 (\ln L_0 - \ln L_s)$$

其中, $\ln L_0$ 和 $\ln L_s$ 分别为误差方差同质模型和误差方差异质模型对试验数据拟合的极大似然值的自然对数。在零假设条件下(模型差异不显著),LRT服从 χ^2 分布,其自由度 df 为2个模型误差方差参数数目之差。

2 结果与分析

2.1 误差方差差异状况与不同误差结构模型的拟合效果

从表1可以看出,所有玉米区域试验不同环境误差方差的差异很大,即使误差方差差异最小的2003年第3组区域试验,其环境误差方差最大值也达到最小值的6.2倍,2006年第4组区域试验不同环境误差方差最大值则达到最小值的65.5倍。说明玉米区域试验各环境的试验误差很难达到方差分析要

求试验误差方差同质的条件。这一结论可通过误差方差同质和异质的两个模型对各个区域试验数据的拟合效果(表 2)及两模型差异的 LRT 测验结果(表 3)得到进一步验证。由表 2 可以看出,在所有区域试验中,误差方差异质模型的 AIC 值均明显比误差方差同质模型的小。由表3 则可知,所有区域试验中误

差方差异质模型与误差方差同质模型的差异均达到了极显著水平($P < 0.001$)。这些结果足以说明玉米区域试验一个问题的两个方面,即玉米区域试验不同环境的误差方差存在着异质性,误差方差异质模型比误差方差同质模型对玉米区域试验数据的拟合效果更好。

表 1 各组玉米区域试验不同环境误差方差的最大、最小值及其比值
Table 1 Maximum and minimum error variances across environments and their ratio in the regional corn trials

年份 Year	统计量 Statistics	1 组 Group 1	2 组 Group 2	3 组 Group 3	4 组 Group 4
2003	最大 Max.	2.205	1.483	1.331	1.719
	最小 Min.	0.208	0.139	0.213	0.176
	最大/最小 Max./Min.	10.6	10.7	6.2	9.8
2004	最大 Max.	2.160	3.508	1.985	2.707
	最小 Min.	0.237	0.200	0.103	0.202
	最大/最小 Max./Min.	9.1	17.5	19.3	13.4
2005	最大 Max.	1.100	2.303	2.187	2.228
	最小 Min.	0.094	0.102	0.093	0.104
	最大/最小 Max./Min.	11.7	22.5	23.6	21.5
2006	最大 Max.	1.469	1.291	1.498	4.572
	最小 Min.	0.120	0.091	0.069	0.070
	最大/最小 Max./Min.	12.2	14.2	21.8	65.5

表 2 误差方差同质模型与误差方差异质模型对各组玉米区域试验数据拟合的 AIC 值
Table 2 AIC values of data fitting of the models for homogeneous (Hom) and heterogeneous (Het) errors in the corn regional trials

年份 Year	1 组 Group 1		2 组 Group 2		3 组 Group 3		4 组 Group 4	
	同质 Hom	异质 Het	同质 Hom	异质 Het	同质 Hom	异质 Het	同质 Hom	异质 Het
2003	2201.6	2134.1	2032.5	1988.0	2001.8	1944.1	1836.3	1777.2
2004	2577.0	2474.8	2815.2	2579.0	2668.8	2543.3	2817.8	2675.9
2005	2075.1	1994.3	1901.8	1769.6	1920.3	1819.7	2035.9	1889.3
2006	1968.9	1880.0	1884.4	1794.1	1824.9	1701.6	2199.5	1954.0

表 3 各组玉米区域试验中误差方差同质模型与误差方差异质模型差异显著性 LRT 测验结果
Table 3 LRT results from the models for homogeneous (Hom) and heterogeneous (Het) errors in the corn regional trials

年份 Year	统计量 Statistics	1 组 Group 1	2 组 Group 2	3 组 Group 3	4 组 Group 4
2003	χ^2	109.5	86.5	97.7	77.0
	df	21	21	20	20
	$P > \chi^2$	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
2004	χ^2	144.2	278.2	167.5	184.0
	df	21	21	21	21
	$P > \chi^2$	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
2005	χ^2	122.8	174.2	142.5	188.6
	df	20	21	21	21
	$P > \chi^2$	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
2006	χ^2	133.0	134.3	167.3	289.5
	df	22	22	22	22
	$P > \chi^2$	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001

P 指概率。 P denotes probability.

2.2 不同误差结构模型对品种评价的影响

表 4 表明,就品种主效应测验来看,在所分析的试验中 F 值在误差方差同质与误差方差异质模型间不变或仅有很小的变化。但是,对于环境主效应及品种-环境交互效应,所有试验 F 值在两种模型间均有较大的差异。这说明,在玉米区域试验分析中是否考虑不同环境试验误差方差的异质性不会明显影响品种主效应测验的结果,但对环境主效应及品种-环境交互效应的测验结果有较大的影响。还可以看出,对环境主效应及品种-环境交互效应, F 值在所有试验分析中均存在着一致的趋势,即 F 值在误差方差异质模型都大于在误差方差同质模型。此结果说明,误差方差异质模型对环境主效应及品种-环境交互效应 F 测验的效率比误差方差同质模型的高。

除了 F 测验外,品种效应估计及其差异比较 t 测验也是区域试验分析的重要内容之一,因而有必要对品种效应估计及其差异比较 t 测验在误差方差同质与异质模型间的异同作进一步的比较。与前述 F 测验结果相对应,品种主效应的 t 测验结果在误差方差同质与异质模型之间基本一致,品种效应的估计值在两种模型间也一致(结果略)。这里只对 F 测验在两种模型间有差异的品种-环境交互效应 t 测验做进一步比较分析。前面分析中品种-环境交互效应 F 测验结果在 2 种模型间的不同,一方面意味着在各个具体的环境中品种效应测验结果在两模型间不同,另一方面也可能意味着对各个具体的品种,环境效应测验结果在两模型间不同。一般在区域试验分析中,人们更多关心的是品种效应的比较

测验,所以这里只给出各环境中品种效应比较 t 测验的结果。

由于每组试验的每一个环境都有一 t 测验的结果,数据较多,这里仅以 2005 年第 1 组和 2006 年第 3 组试验的分析为例说明误差方差同质与异质模型在各环境下对品种 t 测验的差异状况。表 5 为该两组区域试验各个环境中品种比较 t 测验达到显著($\alpha = 0.05$)和极显著($\alpha = 0.01$)水平的品种对数。从该表可以看出,采用误差方差异质模型还是采用误差方差同质模型对各环境品种比较 t 测验结果有着较大的影响。对一些环境,误差方差异质模型中品种效应差异显著和极显著的品种对数大于误差方差同质模型的,而对另一些环境,则出现与此相反的结果。两种模型 t 测验的这种差异显然是不同环境试验误差方差不同而误差同质模型未能考虑其误差方差变异采用平均方差导致的。环境间误差方差差异越大,两种模型分析的结果差异将越大,例如 2005 年第一组试验各环境方差最大值是最小值的 11.7 倍(表 1),两种模型 t 测验差异显著品种对数的比例变化在 0.34~1.93 ($\alpha = 0.05$)和 0.24~3.05 ($\alpha = 0.01$)之间,2006 年第 3 组各环境方差最大值与最小值比例增加到 21.8 倍(表 1),2 种模型 t 测验差异显著品种对数的比例则变化在 0.45~2.52 ($\alpha = 0.05$)和 0.13~3.62 ($\alpha = 0.01$)之间。就所有环境中效应差异 t 测验显著的品种对数之和来看,以误差方差异质模型的大于以误差方差同质模型的,说明误差方差异质模型 t 测验的效率高于误差方差同质模型的,此结果与前述 F 测验的结论相呼应。

表 4 误差方差同质模型与误差方差异质模型在各组玉米区域试验效应差异显著性测验的 F 值
Table 4 F -values from the models for homogeneous (Hom) and heterogeneous (Het) errors in corn regional trials

年份 Year	效应 Effect	1 组 Group 1		2 组 Group 2		3 组 Group 3		4 组 Group 4	
		同质 Hom	异质 Het	同质 Hom	异质 Het	同质 Hom	异质 Het	同质 Hom	异质 Het
2003	品种 Variety	20.60	20.61	15.11	15.09	41.00	41.00	37.07	37.07
	环境 Environment	335.49	511.30	300.66	471.05	282.95	345.47	203.46	280.59
	品种×环境 Interaction	4.41	7.71	6.41	8.66	3.91	5.61	4.92	6.08
2004	品种 Variety	39.89	39.89	27.63	28.05	37.52	37.82	72.55	72.36
	环境 Environment	139.97	228.06	150.34	283.05	163.24	286.86	153.87	314.58
	品种×环境 Interaction	3.82	6.22	3.42	6.96	5.45	8.10	6.86	9.22
2005	品种 Variety	20.45	20.45	31.65	31.65	28.83	28.83	36.68	36.68
	环境 Environment	442.36	933.28	354.59	782.62	426.09	856.43	379.73	878.30
	品种×环境 Interaction	4.39	6.69	4.46	7.03	4.40	5.87	4.64	6.55
2006	品种 Variety	26.14	26.72	30.87	32.72	31.23	31.12	24.94	25.06
	环境 Environment	199.84	299.41	246.54	376.25	221.31	345.51	132.28	472.09
	品种×环境 Interaction	5.73	8.71	5.14	7.50	5.29	5.99	3.49	7.13

表 5 误差方差同质模型和误差方差异质模型在各环境品种两两比较 t 测验效应差异达到显著($\alpha = 0.05$)与极显著($\alpha = 0.01$)的品种对数及其比值
Table 5 The number of significant ($\alpha = 0.05$) and extremely significant ($\alpha = 0.01$) variety pairs from the models for homogeneous (Hom) and heterogeneous (Het) errors in various environments

No.	2005, 第 1 组 Group 1						2006, 第 3 组 Group 3					
	$\alpha = 0.05$			$\alpha = 0.01$			$\alpha = 0.05$			$\alpha = 0.01$		
	同质 Hom	异质 Het	异质/同质 Het/Hom	同质 Hom	异质 Het	异质/同质 Het/Hom	同质 Hom	异质 Het	异质/同质 Het/Hom	同质 Hom	异质 Het	异质/同质 Het/Hom
1	53	26	0.49	34	8	0.24	55	68	1.24	41	56	1.37
2	59	60	1.02	42	42	1.00	40	33	0.83	28	20	0.71
3	26	30	1.15	9	9	1.00	64	56	0.88	50	42	0.84
4	45	50	1.11	31	32	1.03	35	65	1.86	25	50	2.00
5	45	40	0.89	29	27	0.93	51	63	1.24	39	51	1.31
6	40	26	0.65	15	11	0.73	38	34	0.89	25	17	0.68
7	64	70	1.09	51	55	1.08	23	26	1.13	15	17	1.13
8	70	67	0.96	63	44	0.70	23	26	1.13	8	9	1.13
9	82	87	1.06	66	70	1.06	40	18	0.45	27	15	0.56
10	55	81	1.47	35	65	1.86	25	17	0.68	13	2	0.15
11	40	45	1.13	22	28	1.27	19	13	0.68	13	12	0.92
12	50	53	1.06	25	28	1.12	45	38	0.84	39	19	0.49
13	68	58	0.85	48	39	0.81	25	20	0.80	18	10	0.56
14	41	20	0.49	24	10	0.42	43	59	1.37	21	48	2.29
15	43	83	1.93	22	67	3.05	61	55	0.90	43	34	0.79
16	59	20	0.34	40	9	0.23	32	25	0.78	16	2	0.13
17	45	35	0.78	24	12	0.50	47	47	1.00	33	33	1.00
18	67	97	1.45	37	91	2.46	36	61	1.69	21	48	2.29
19	55	53	0.96	35	31	0.89	25	63	2.52	13	47	3.62
20	26	41	1.58	11	21	1.91	41	59	1.44	33	47	1.42
21	57	67	1.18	37	50	1.35	58	48	0.83	42	38	0.90
22							48	34	0.71	35	16	0.46
23							39	66	1.69	30	58	1.93
Σ	1090	1109	1.02	700	749	1.07	913	994	1.09	628	691	1.10

表中第 1 列数据为试验各环境的编号。The number in the first column is the environment number.

3 讨论

在之前计算条件有限的情况下，联合方差分析不失为作物区域试验分析最佳的选择，发挥了极其重要的作用。从本文分析结果来看，玉米区域试验的误差普遍不符合方差分析模型对误差方差同质性的要求，Casanoves 等^[4]对大豆区域试验的研究也得到类似的结果，因此，不同环境误差方差的异质性可能是作物区域试验中普遍存在的现象。忽略误差方差的异质性会导致试验效应测验，特别是品种-环境交互效应测验的偏差。如今的统计软件，例如 SAS 和 SPSS 都可如同方差分析一样方便地进行线性混合模型原理的分析。鉴于此，建议在作物区域试验中利用线性混合模型原理处理不同环境误差方差的

异质现象，以提高试验效应测验结果和品种评价的可靠性。本文研究的对象虽是一年多区域试验，但研究结果对于多年单点以及多年多点试验分析也有借鉴意义，因为它们都属于多环境试验。

由于作物多环境试验的复杂性，关于该试验分析模型与方法的研究与讨论从未停止^[10,19]。就模型而言就有很多种，如早期提出的 Wricke-Shukla 模型和 Finlay-Wilkinson 模型及近年提出的 AMMI 模型和 GGE 模型等^[19-21]，其中尤以 AMMI 模型在近年相关研究论文中得到更普遍的应用。相对于方差分析模型或方法，这些模型的改进之处在于考虑了品种-环境交互效应方差的异质性或对该效应的分解，更适用于多环境试验数据的特点，利用其不仅可以对品种的高产性，而且可以对品种的稳产性进行评

价。这些模型仍然存在的问题是,每一模型都有一定的假设前提,它们未必对任何多环境试验资料分析效果均好,对任一试验资料采用哪种模型更好不能确定。近年来,我们以线性混合模型分析理论为基础,进行了多种方差协方差结构在作物多环境试验中分析效果的探讨^[22-23],提出了基于方差协方差结构优选的作物多环境试验分析法,不仅能考虑品种-环境交互效应方差协方差的异质性,而且也解决了作物多环境试验分析模型选用的主观随意性问题。然而,前人及我们已有的研究都是在假设试验误差方差同质基础上进行的,本文则是进一步对多环境试验误差方差异质性及其对品种评价影响的探讨,下一步则需要同时进行考虑品种-环境交互效应方差异质性和误差方差异质性的研究。

需要指出的是,本文针对玉米的高产性评价进行了研究,品种区域试验往往要兼顾稳产性和多个性状。关于玉米区域试验误差方差异质性的对稳产性和其他多个性状评价的影响也有待进一步研究。

4 结论

玉米区域试验不同环境误差的方差存在着较大的差异,考虑环境间误差方差异质的模型比同质模型更适用于玉米区域试验数据的分析,从而提高试验效应测验的效率。各环境误差方差的异质性对品种-环境交互效应测验及每一环境中品种间比较的测验有较大影响,而对品种主效应测验很少有影响。因此,为了鉴别品种-环境交互效应和品种的特殊环境适用性,尤应注意误差方差异质模型的选用。

References

- [1] Mo H-D(莫惠栋). Statistics for Agricultural Experiments (农业试验统计), 2nd edn. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 1992. pp 260-278 (in Chinese)
- [2] Gai J-Y(盖钧镛). Statistic Methods for Experiments (试验统计方法). Beijing: China Agriculture Press, 2000. pp 120-124 (in Chinese)
- [3] Wang S-G(王松桂), Chen M(陈敏), Chen L-P(陈立萍). Linear Statistical Model (线性统计模型). Beijing: Higher Education Press, 2007. pp 164-178 (in Chinese)
- [4] Casanoves F, Macchiavelli R, Balzarini M. Error variation in multi-environment peanut trials: within-trial spatial correlation and between-trial heterogeneity. *Crop Sci*, 2005, 45: 1927-1933
- [5] Zimmerman D L, Harville D A. A random field approach to the analysis of field-plot experiments and other spatial experiments. *Biometrics*, 1991, 47: 223-239
- [6] Schabenberger O, Pierce F J. Contemporary Statistical Models for the Plant and Soil Sciences. Boca Raton London New York Washington, D.C.: CRC Press, 2002. pp 599-648
- [7] Stroup W W. Power analysis based on spatial effects mixed models: a tool for comparing design and analysis strategies in the presence of spatial variability. *J Agric Biol Environ Stat*, 2002, 7: 491-511
- [8] Hu X-Y(胡希远), Spilke J. Spatial variability and its statistical control in field experiment. *Acta Agron Sin* (作物学报), 2007, 33(4): 620-624 (in Chinese with English abstract)
- [9] Smith A B, Cullis B R, Thompson R. Analyzing variety by environment data using multiplicative mixed models and adjustments for spatial field trend. *Biometrics*, 2001, 57: 1138-1147
- [10] Smith A B, Cullis B R, Thompson R. The analysis of crop cultivar breeding and evaluation trials: an overview of current mixed model approaches. *J Agric Sci*, 2005, 143: 449-462
- [11] Little R C, Milliken G A, Stroup W W, Wolfinger R D. SAS System for Mixed Models. Cary, NC: SAS Institute, Inc. 1996. pp 303-326
- [12] Verbeke G, Molenberghs G. Linear Mixed Models in Practice. New York: Springer-Verlag, 1997. pp 185-210
- [13] Henderson C R. Applications of Linear Models in Animal Breeding. University of Guelph, Guelph, AB, 1984
- [14] Denis J B, Phipps H P, van Eeuwijk F A. Modeling expectation and variance for genotype by environment data. *Heredity*, 1997, 79: 162-171
- [15] Brady T W, Kathleen B W, Andrzej T G. Linear Mixed Models. New York: CRC Press, 2002
- [16] Bozdogan H. Akaike's information criterion and recent developments in information complexity. *J Math Psychol*, 2000, 44: 62-91
- [17] Wolfinger R. Covariance structure selection in general mixed models. *Commun Stat Simuln Comput*, 1993, 22: 1079-1106
- [18] Gauch H G. Model selection and validation for yield trials with interaction. *Biometrics*, 1988, 44: 705-715
- [19] Gauch H G. Statistical analysis of yield trials by AMMI and GGE. *Crop Sci*, 2006, 46: 1488-1500
- [20] Finly K W, Wilkinson G N. The analysis of adaptation in a plant breeding program. *Aust J Agric Res*, 1963, 14: 742-754
- [21] Eberhart S A, Russell W A. Stability parameters for comparing varieties. *Crop Sci*, 1966, 6: 36-40
- [22] Hu X-Y(胡希远), You H-L(尤海磊), Ren C-H(任长宏), Wu D(吴冬), Li J-P(李建平). Analysis of crop variety regional trials based on selection of covariance structures. *Acta Agron Sin* (作物学报), 2009, 35(11): 1981-1989 (in Chinese with English abstract)
- [23] Hu X Y, Spilke J. Variance-covariance structure and its influence on variety assessment in regional crop trials. *Field Crops Res*, 2011, 120: 1-8