



烤烟钾含量的基因型及环境效应分析

吴兴富, 焦芳婵, 张谊寒, 曾建敏, 李永平

云南省烟草农业科学研究院, 云南昆明, 650021

摘要: 为了解烤烟基因型及环境对烟叶钾含量的影响, 采用 AMMI 模型对 8 个环境试点 11 个基因型烟叶的钾含量进行了分析。结果表明: 基因型、环境、基因型 × 环境互作对烤烟钾含量的影响达极显著水平, 烤烟钾含量受环境的影响效应大于基因型和基因型 × 环境互作, AMMI 模型分析在分解烤烟钾含量的基因型与环境互作效应方面优于回归模型。基因型 V5 (云烟 110) 中部叶和上部叶钾含量高于其它基因型, 差异具有极显著意义, 该基因型具有钾含量高的特点, 可作为钾高效基因型供烟叶生产选择种植, 也可作为育种材料用于高钾基因型选育。

关键词: 烤烟; 钾; 基因型效应; 环境效应; AMMI 模型

引用本文: 吴兴富, 焦芳婵, 张谊寒, 等. 烤烟钾含量的基因型及环境效应分析 [J]. 中国烟草学报, 2017, 23 (4)

钾是烟株生长发育必需的营养元素, 烟叶钾含量是评价烟叶品质的重要指标之一。钾元素对烟叶燃烧性、香吃味以及卷烟制品的安全性有重要影响^[1-4]。国内烤烟钾含量普遍较低, 20 世纪 60、70 年代烟叶钾含量平均为 0.8%~1.0%, 1994 年达 1.8%^[5]。近年来, 窦玉清等^[6]研究表明, 国内烤烟烟叶钾含量呈上升趋势, 2012 年和 2013 年烟叶钾含量达 2%, 但与美国、津巴布韦等国外优质烟叶钾含量 4%~6%^[5] 的差距仍较大。有效提高烟叶钾含量一直是困扰国内烟叶生产的难题之一, 有学者提出钾高效 (或富钾) 基因型是提高烟叶钾含量的有效途径^[5, 7-8], 有关烤烟不同基因型钾含量的报道主要集中在烟叶化学成分含量分析, 而基因型、环境及其互作效应对烤烟钾含量影响研究的报道较少^[9]。

基因型与环境互作是一个普遍存在的复杂生物学现象, 分析基因型、环境及其互作效应的方法很多, 其中 AMMI 模型 (主效可加互作可乘) 分析在基因型和环境的加性模型中加入了乘积形式的交互作用, 能更多地解释基因型与环境的交互作用^[10], 该模型已广泛用于分析水稻、小麦、谷子等作物的基因型、环境及其互作效应对产量或品质的影响^[11-15]。本研究

以钾积累量和烟叶中钾含量较高的 K326^[16] 为对照, 应用 AMMI 模型对云南、四川、福建三个烤烟产区 8 个环境试点 11 个烤烟基因型的中部和上部初烤烟叶钾含量进行分析。旨在了解烤烟基因型、环境及其互作效应对烟叶钾含量的影响, 为提高烟叶钾含量及培育钾高效 (或富钾) 基因型提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料和地点

2014 年, 在云南、四川和福建烤烟产区 8 个环境试点开展了 11 个烤烟基因型钾含量的小区比较试验。8 个环境试点为云南华宁大兴寨 (E1) 和青龙 (E2)、云南宁洱勐先和平村曼片 (E3) 和旱滩 (E4)、四川会理内东 (E5)、福建永定湖雷 (E6) 和陈东 (E7) 以及福建建阳莒口 (E8), 各试点基本情况见表 1。参试 11 个烤烟基因型为对照 K326 (V1)、云烟 87 (V2)、云烟 97 (V3)、云烟 105 (V4)、云烟 110 (V5)、云烟 116 (V6)、云烟 117 (V7)、云烟 119 (V8)、云烟 207 (V9)、NC71 (V10)、PVH1452 (V11)。

基金项目: 农业部公益性行业 (农业) 专项 (201203091), 云南科技厅项目 (2015BB022), 国家烟草专卖局科技项目 (110201502011), 云南省烟草公司科技项目 (2015YN01), 云南中烟科技项目 (2012YL03)

作者简介: 吴兴富 (1970—), 本科, 副研究员, 主要从事烤烟品种与品质研究, Email: ynyxwxf@sina.com

通讯作者: 李永平 (1966—), Tel: 0871-65113766, Email: liyongping@yntsti.com

收稿日期: 2017-03-06; **网络出版日期:** 2017-07-25

表 1 8 个试点基本情况
Tab.1 Background information of eight tested areas

试点	海拔 /m	经纬度	常年均温 /°C	常年降雨量 /mm	土壤类型	前茬作物
E1	1772	E102° 51' 30.8" , N24° 2' 35"	16.5	950	红壤	油菜
E2	1900	E102° 59' 2.9" , N24° 28' 55.4"	15.5	900	壤土	豌豆
E3	1358	E101° 8' 17.2" , N23° 6' 15.2"	18.3	1400	红壤	玉米
E4	1370	E101° 7' 25.7" , N23° 1' 23.2"	18.3	1400	砂壤土	玉米
E5	1825	E102° 19' 39.2" , N26° 38' 43.9"	15.3	1100	紫色土	小麦
E6	208	E116° 50' 104" , N24° 47' 57"	20.1	1600	水稻土	水稻
E7	358	E116° 54' 18.9" , N24° 42' 16.2"	20.1	1600	水稻土	水稻
E8	165	E117° 57' 16.3" , N27° 21' 49.9"	18.6	1800	水稻土	水稻

1.2 试验设计

各试验点均采用随机区组设计，每个基因型为 1 个处理，3 次重复共 33 个小区，小区栽烟不少于 70 株。各试点参试基因型的施氮量及氮磷钾配比相同，行株距、栽培调制技术及田间管理措施按当地优质烟叶生产技术要求操作。各小区烟株中心花开放时打顶，烟叶成熟后分小区挂牌标记采烤。每个小区分别取中部 C3F 和上部 B2F 初烤烟叶各 1kg，由云南省烟草农业科学研究院按 YC/T 217—2007 进行烟叶钾含量检测。

1.3 数据分析

利用 DPS v10.15^[17] 中 AMMI(主效可加交互可乘)模型分别对 8 个环境试点 11 个基因型的中部烟叶和上部烟叶钾含量进行分析，即：

$$y_{ve} = \mu + \alpha_v + \beta_e + \sum_{n=1}^N \lambda_n \gamma_{vn} \delta_{en} + \theta_{ve} \quad (1)$$

式中 y_{ve} 是环境 e 中基因型 v 的烟叶钾含量， μ 代表总体平均值， α_v 是基因型平均偏差（各个基因型平均值减去总体平均值）， β_e 是环境平均偏差（各个环境试点平均值减去总体平均值）， λ_n 为第 n 个交互效应主成分分析轴的特征值， γ_{vn} 是第 n 个主成分的基因型主成分得分， δ_{en} 是第 n 个主成分的环境主成分得分， N 是主成分轴的总个数， θ_{ve} 为残差。

在 AMMI 模型分析的基础上，利用 AMMI 双标图初步分析基因型与环境试点的交互。同时，根据吴为人对 AMMI 模型稳定性参数分析的改进方法^[18]，对各个交互效应主成分 (IPCA) 轴的得分进行加权后计算基因型稳定性和环境试点分辨力参数 $D_{v(e)}$ ，并计算特殊适应性参数 D_{ve} ^[19]，公式如下：

$$D_{v(e)} = \sqrt{\sum_{k=1}^m (IPCA)_{v(e)}^2} \quad k=1,2, \dots, m \quad (2)$$

$$D_{ve} = \sum_{k=1}^m \lambda_k \gamma_{vk} \delta_{ek} \quad (3)$$

式中 m 为显著的 IPCA 个数， $D_{v(e)}$ 为第 v 个基因型或第 e 个环境试点在 m 个 IPCA 上的得分。(2) 式中的距离 $D_{v(e)}$ 之大小度量了第 v 个基因型或第 e 个环境试点的相对稳定性，基因型 D_v 值越小越稳定，环境 D_e 值越大对基因型的分辨力越强（即 D_e 值越大，基因型在环境中表现的遗传差异越大，越有利于基因型特性的发挥）。(3) 式中的 D_{ve} 表示相应基因型与环境互作的性质和大小，即表达了基因型对环境的特殊适应性。

2 结果与分析

2.1 参试基因型烟叶钾含量

参试基因型不同部位烟叶在 8 个环境试点的钾含量分析 (表 2) 表明，基因型间钾含量差异达极显著水平，具有统计学意义，V5 中部叶和上部叶钾含量均极显著高于其它基因型，V6 和 V3 钾含量较低，V5 中部叶和上部叶钾含量分别比 V3 高出 1.08% (占比 48.4%) 和 0.97% (占比 49.7%)。

不同环境试点烟叶钾含量差异达极显著水平，具有统计学意义，E7 中部叶和上部叶钾含量极显著高于其它 7 个试点，E2 中部叶和上部叶钾含量较低，E7 中部叶和上部叶钾含量分别比 E2 高出 1.24% (占比 64.6%) 和 1.32% (占比 79.0%)。可见，不同环境试点烟叶的钾含量差异有大于基因型的趋势。

表 2 不同环境试点各基因型烟叶钾含量
Tab.2 The potassium content of 11 genotypes planted at 8 sites

%

部位	基因型	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	均值	变异系数 /%
中部	V1	2.22	1.84	2.76	2.84	2.42	2.80	3.10	2.48	2.56 ^{eDE}	15.8
	V2	2.36	1.84	2.50	2.40	2.25	2.69	2.97	2.42	2.43 ^{fE}	13.6
	V3	2.40	1.77	2.36	2.21	1.87	2.71	2.50	1.98	2.23 ^{gF}	14.8
	V4	2.53	1.93	3.18	2.67	2.63	2.69	3.32	2.78	2.72 ^{bcdBCD}	15.6
	V5	2.49	2.27	3.75	3.75	3.23	3.27	4.26	3.44	3.31 ^{aA}	20.0
	V6	2.15	1.59	2.48	2.33	2.01	2.28	2.62	2.28	2.22 ^{gF}	14.2
	V7	2.28	2.09	3.11	3.20	3.08	2.82	3.09	2.79	2.81 ^{bB}	14.8
	V8	2.34	2.11	2.81	2.62	1.96	2.96	3.69	2.43	2.62 ^{deCD}	21.0
	V9	2.77	2.12	3.59	2.68	2.42	2.78	3.05	2.65	2.76 ^{bcBC}	15.8
	V10	2.59	1.80	2.41	2.39	2.01	2.71	3.15	2.29	2.42 ^{fE}	17.3
	V11	2.43	1.82	2.87	2.65	2.50	2.92	3.04	2.87	2.64 ^{cdeBCD}	14.9
	均值	2.41 ^{eE}	1.92 ^{fF}	2.89 ^{bb}	2.70 ^{cd}	2.40 ^{eE}	2.79 ^{bc}	3.16 ^{aA}	2.58 ^{dD}	/	16.2
上部	V1	1.65	1.38	2.84	2.55	2.32	2.55	3.29	2.25	2.35 ^{cdCDE}	26.2
	V2	2.36	1.54	2.61	2.32	2.16	2.37	2.68	1.98	2.25 ^{deEF}	16.1
	V3	1.87	1.38	2.32	2.27	1.83	2.03	2.37	1.54	1.95 ^{gG}	18.9
	V4	2.59	1.94	2.96	2.39	2.33	2.54	3.13	2.20	2.51 ^{bcBC}	15.6
	V5	2.40	1.86	3.37	3.29	2.56	3.07	4.02	2.82	2.92 ^{aA}	22.8
	V6	2.04	1.53	2.34	2.26	2.03	2.06	2.79	1.93	2.12 ^{fF}	17.0
	V7	2.46	1.70	3.21	2.60	1.92	2.49	3.12	2.23	2.47 ^{bcBCD}	21.3
	V8	2.27	1.69	2.43	2.30	2.09	2.31	3.24	2.41	2.34 ^{cdDE}	18.4
	V9	2.61	2.29	3.16	3.13	2.35	2.17	2.53	2.41	2.58 ^{bB}	14.4
	V10	2.38	1.58	2.43	2.39	1.75	2.36	2.96	1.80	2.20 ^{efEF}	20.8
	V11	2.28	1.45	2.68	2.43	2.44	2.51	2.76	2.35	2.36 ^{cdCDE}	17.1
	均值	2.26 ^{eE}	1.67 ^{fF}	2.76 ^{bb}	2.54 ^{cC}	2.16 ^{eE}	2.41 ^{dD}	2.99 ^{aA}	2.17 ^{eE}	/	19.0

注：均值后未标有相同大、小写字母分别表示在 1%、5% 水平上的差异具有统计学意义。

2.2 烤烟钾含量的联合方差分析和线性回归模型分析

不同部位烟叶钾含量联合方差分析（表 3）表明，基因型、环境试点、基因型 × 环境均达极显著水平，具有统计学意义，三者引起的中部叶钾含量变异平方和分别占总平方和的 30.1%、43.4%、15.4%，且上部叶钾含量变异平方和分别占总平方和的 21.9%、52.5%、15.6%，表明环境试点是引起烤烟钾含量差异

的主要原因，基因型次之，基因型与环境互作也有影响。

从中部叶和上部叶钾含量的回归分析结果看，联合回归、基因型回归、环境回归共解释了中部叶钾含量基因型与环境互作效应的 42.3%，残差占 57.7%，上部叶仅解释了 31.2%，残差占 68.8%。可见，回归分析解释的基因型与环境互作效应少，回归模型拟合不够好。

表 3 不同部位烟叶钾含量的联合方差分析、线性回归分析和 AMMI 模型分析

Tab.3 Comparison among three statistical methods for analysis of potassium content in middle and upper leaves, including combined analysis of variance, linear regression and AMMI model

变异来源	df	中部叶			上部叶		
		SS	F	占比 /%	SS	F	占比 /%
总计	263	74.445			72.354		
处理	87	66.182	16.205**	88.9	65.080	18.099**	89.9
联合方差分析							
基因型	10	22.412	47.741**	30.1	15.813	38.259**	21.9
环境	7	32.332	98.392**	43.4	38.007	131.369**	52.5
基因型 × 环境	70	11.439	3.481**	15.4	11.260	3.892**	15.6
线性回归分析							
联合回归	1	1.244	26.500**	10.9	0.540	13.064**	4.8
基因型回归	9	0.714	1.689	6.2	2.556	6.871**	22.7
环境回归	6	2.880	10.223**	25.2	0.531	2.140*	4.7
残差	54	6.602	2.604**	57.7	7.633	3.420**	67.8
AMMI 分析							
PCA1	16	5.533	7.366**	48.4	5.644	8.535**	50.1
PCA2	14	3.038	4.623**	26.6	2.134	3.688**	19.0
PCA3	12	1.694	3.007**	14.8	1.615	3.256**	14.3
PCA4	10				0.890	2.152*	7.9
残差	28(18)	1.174		10.3	0.977		8.7
误差	176	8.262		11.1	7.274		10.1

注：表中括号内数字为上部叶钾含量 AMMI 分析中的残差自由度。

2.3 AMMI 模型分析

AMMI 模型对不同部位烟叶钾含量的基因型与环境互作效应分析表明（表 3），中部叶 3 个 IPCA 轴达极显著水平，解释了烟叶钾含量的基因型与环境互作效应的 89.7%，残差占 10.3%，上部叶前 3 个 IPCA 轴达极显著水平，第 4 个 IPCA 轴达显著水平，4 个 IPCA 轴共解释了上部叶钾含量的基因型与环境互作效应的 91.3%，残差占 8.7%。可见，AMMI 模型分析对分解烤烟钾含量的基因型与环境互作效应明显优于回归模型。

2.3.1 基因型稳定性分析

双标图是解释 AMMI 分析结果，了解基因型与环境互作的直观工具。在 AMMI1 双标图中，环境试点和基因型在水平方向的分散程度反映其效应变异情况，离坐标原点越远效应越大，反之，效应越小。基因型在垂直方向上的分布反映了基因型与环境互作的

大小及方向上的差异，IPC1 绝对值越大稳定性越差，反之，稳定性越好。

从图 1 可见，水平方向上，中部叶和上部叶环境试点图标比基因型图标分散，说明环境引起烤烟钾含量的变异比基因型大，环境试点 E7 钾含量最高，E2 最低；V5 中部叶和上部叶钾含量均最高，V6 和 V3 中部叶钾含量最低，且 V3 上部叶钾含量也最低。

垂直方向上，中部叶钾含量 V5、V3 和 V7 稳定性较差，V11 和 V6 稳定性较好，上部叶钾含量 V9、V5 和 V1 稳定性较差，V11、V7、V6 稳定性较好。

在 AMMI2 双标图中，根据基因型图标离坐标原点距离越小稳定性越好的原理，从图 2 可直观看出 V1、V4、V11、V6、V2 中部叶钾含量稳定性较好，V5、V8、V7、V3、V9 稳定性较差，V11、V7、V6、V3 上部叶钾含量稳定性较好，V9、V1、V5 稳定性较差。

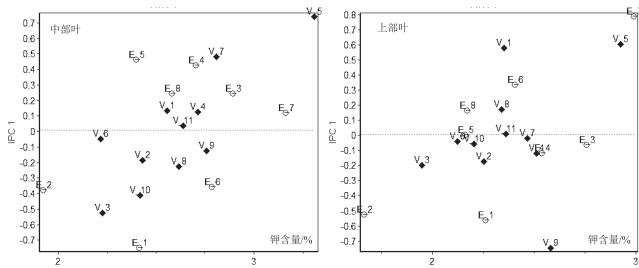


图 1 不同部位烟叶钾含量 AMMI1 双标图

Fig.1 AMMI1 biplot of potassium content in middle and upper leaves

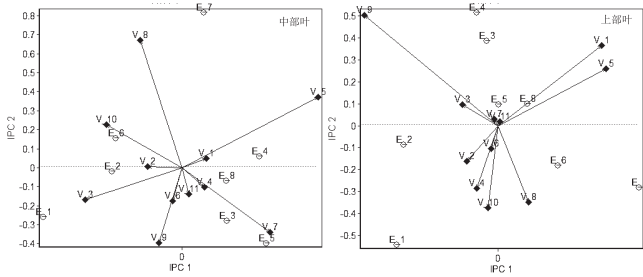


图 2 不同部位烟叶烟叶钾含量 AMMI2 双标图

Fig.2 AMMI2 biplot of potassium content in middle and upper leaves

AMMI2 双标图具有简明直观的特点，但只是定性描述，且图中只表达了前 2 个显著轴得分的信息，其它显著或极显著轴的信息未能得到反映。从表 2 可知，中部叶钾含量的基因型与环境交互变异平方和的 14.8% 为 IPCA3 所有，上部叶基因型与环境交互变异平方和的 18.4% 为 IPCA3-4 所有。在统计学上，忽略经检验达显著或极显著水平的其它轴对基因型稳定性影响的评价会有失偏颇。因此，依据公式 (2) 计算了参试基因型不同部位烟叶钾含量的稳定性参数 D_v 列于表 4，结合表 2 和表 4 看，V1 钾含量中等、中部叶稳定性较好、上部叶稳定性较差，V2 钾含量中等、稳定性较好，V3 钾含量较低、上部叶稳定性较好、中部叶稳定性较差，V4 钾含量较高、稳定性较好，V5 钾含量高、稳定性差，V6 钾含量较低、稳定性较好，V7 钾含量较高、上部叶稳定性中等、中部叶稳定性较差，V9 钾含量较高、中部叶稳定性中等、上部叶稳定性较差，V8、V10 和 V11 钾含量及其稳定性中等。

表 4 基因型在显著交互轴上的得分及稳定性参数 (D_v)

Tab.4 Scores and stability index (D_v) of significant interaction principal component axis (IPCA) of genotype

品种	中部叶						上部叶						
	均值	离差	PCA1	PCA2	PCA3	D_v	均值	离差	PCA1	PCA2	PCA3	PCA4	D_v
V1	2.56	-0.051	0.134	0.047	-0.196	0.072	2.35	-0.018	0.577	0.365	-0.160	-0.065	0.305
V2	2.43	-0.179	-0.183	0.008	-0.201	0.094	2.25	-0.117	-0.175	-0.163	-0.166	-0.254	0.119
V3	2.23	-0.382	-0.524	-0.169	-0.186	0.259	1.95	-0.420	-0.199	0.097	-0.030	-0.121	0.103
V4	2.72	0.107	0.125	-0.102	0.247	0.076	2.51	0.141	-0.119	-0.285	0.010	-0.152	0.082
V5	3.31	0.699	0.740	0.371	0.111	0.372	2.92	0.553	0.602	0.259	0.246	0.100	0.324
V6	2.22	-0.392	-0.049	-0.177	-0.019	0.053	2.12	-0.246	-0.041	-0.104	-0.150	0.223	0.073
V7	2.81	0.200	0.480	-0.340	-0.313	0.254	2.47	0.096	-0.021	0.031	0.487	-0.223	0.211
V8	2.62	0.007	-0.226	0.672	0.173	0.211	2.34	-0.029	0.170	-0.347	-0.126	0.469	0.126
V9	2.76	0.151	-0.124	-0.397	0.636	0.154	2.58	0.212	-0.747	0.503	0.055	0.244	0.387
V10	2.42	-0.190	-0.410	0.226	-0.124	0.208	2.20	-0.166	-0.057	-0.375	0.321	0.002	0.158
V11	2.64	0.029	0.037	-0.140	-0.128	0.045	2.36	-0.007	0.010	0.019	-0.487	-0.222	0.211

2.3.2 环境试点鉴别力分析

在 AMMI1 双标图中，环境试点图标离 IPCA 零值线越近，鉴别力越弱，反之，鉴别力越强。在 AMMI2 双标图中，环境试点图标离坐标原点越近，鉴别力越弱，反之，鉴别力越强。从图 1 可直观看出，E1 和 E5 对中部叶钾含量鉴别力较强，E7 和 E1 对上部叶钾含量鉴别力较强，E7 对中部叶钾含量鉴别力较弱，E5 对上部叶钾含量鉴别力较弱。从图 2 可直观看出，E7 和 E1 对中部叶和上部叶钾含量鉴别力较强，E8 和 E2 对中部叶钾含量鉴别力较弱，E5 和 E8

对上部叶钾含量鉴别力较弱。这与基因型稳定性分析相似，双标图 AMMI1、AMMI2 表达的环境试点鉴别力信息不够完全。因此，依据公式 (2) 计算出各环境试点在所有显著轴上得分的稳定性参数 D_e 值列于表 5，从表中可知，E1 对中部叶钾含量鉴别力最强、E5 和 E7 次之，E8 鉴别力最弱。E7 对上部叶钾含量鉴别力最强、E1 和 E5 次之，E8 鉴别力最弱。可见，E1、E7、E5 对烤烟钾含量鉴别力较强，E8 鉴别力最弱。

表 5 环境在显著轴上的得分及稳定性参数 (D_e)
Tab.5 Scores and stability index (D_e) of significant IPCA for environment

环境	中部叶						上部叶						
	均值	离差	PCA1	PCA2	PCA3	D_e	均值	离差	PCA1	PCA2	PCA3	PCA4	D_e
E1	2.41	-0.194	-0.751	-0.259	0.061	0.370	2.26	-0.106	-0.565	-0.542	0.119	-0.104	0.306
E2	1.92	-0.684	-0.378	-0.022	-0.053	0.183	1.67	-0.703	-0.528	-0.088	0.069	0.289	0.268
E3	2.89	0.285	0.244	-0.281	0.693	0.173	2.76	0.389	-0.066	0.384	0.318	-0.364	0.161
E4	2.70	0.095	0.423	0.060	-0.242	0.209	2.54	0.168	-0.122	0.514	0.197	0.157	0.144
E5	2.40	-0.210	0.460	-0.399	-0.325	0.251	2.16	-0.207	0.001	0.096	-0.663	-0.111	0.287
E6	2.79	0.178	-0.359	0.155	-0.270	0.183	2.41	0.036	0.333	-0.181	-0.056	-0.382	0.175
E7	3.16	0.556	0.118	0.817	0.164	0.226	2.99	0.620	0.786	-0.281	0.265	0.214	0.414
E8	2.58	-0.027	0.243	-0.071	-0.028	0.119	2.17	-0.197	0.161	0.099	-0.249	0.300	0.137

2.3.3 基因型与环境试点的最佳适应性分析

基因型与环境的交互效应是确定基因型推广的重要依据，在选择或引进基因型时尽量利用有利的交互，避免负互作的不利影响。依据公式 (3) 计算出 11 个基因型与 8 个环境试点的特殊适应性参数 (交互效应值) D_{ve} ，综合中部叶和上部叶钾含量交互效应值 (表 6) 看，9 个基因型在以下试点有具有特殊适应性，即 V1 在 E5、E7、E8，V2、V3 在 E1、E2，V5 在 E3、E7、E8，V7 在 E3、E4，V8 在 E7，V9 在 E1、E2、E3，V10 在 E1、E2，V1 在 E5、E8，而 V4 和 V6 在

各试点的特殊适应性不明显。

图 3 是基于环境 IPCA1 (横坐标) 和 IPCA2 (纵坐标) 的基因型最佳适应图，从图中可直观看出中部叶和上部叶钾含量的基因型最佳适应性。11 个基因型中，V5 中部叶钾含量在 7 个环境试点 E2、E3、E4、E5、E6、E7、E8 具有最佳适应性，上部叶钾含量在 6 个环境试点 E3、E4、E5、E6、E7、E8 具有最佳适应性。V9 中部叶和上部叶钾含量在 E1 具有最佳适应性，V4 上部叶在 E1 有较好适应性。11 个基因型不同部位烟叶钾含量的最佳适应性与其在 8 个环境试点钾含量的试验结果 (表 1) 相符。

表 6 基因型 and 环境的交互效应值 (D_{ve})
Tab.6 Values of genotype \times environment interaction (D_{ve})

部位	E/V	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10	V11
中部叶	E1	-0.025	0.032	0.095	-0.020	-0.137	0.012	-0.079	0.028	0.030	0.068	-0.004
	E2	-0.012	0.016	0.047	-0.011	-0.066	0.005	-0.042	0.019	0.011	0.036	-0.003
	E3	0.004	-0.014	-0.029	0.013	0.036	0.000	0.029	-0.024	0.011	-0.030	0.003
	E4	0.015	-0.017	-0.052	0.011	0.074	-0.005	0.048	-0.020	-0.017	-0.039	0.004
	E5	0.015	-0.019	-0.050	0.015	0.068	0.000	0.064	-0.045	-0.007	-0.050	0.009
	E6	-0.010	0.017	0.043	-0.013	-0.059	0.002	-0.042	0.025	0.002	0.038	-0.004
	E7	0.006	-0.005	-0.025	-0.002	0.042	-0.012	-0.007	0.033	-0.024	0.001	-0.008
	E8	0.008	-0.010	-0.029	0.007	0.040	-0.002	0.029	-0.016	-0.005	-0.024	0.003
上部叶	E1	-0.092	0.025	0.026	0.023	-0.085	0.004	0.013	-0.020	0.097	0.022	-0.012
	E2	-0.080	0.021	0.025	0.017	-0.077	0.004	0.009	-0.022	0.099	0.013	-0.008
	E3	-0.014	-0.009	0.003	-0.001	0.008	-0.010	0.030	-0.016	0.022	0.015	-0.028
	E4	-0.017	-0.004	0.007	-0.001	-0.004	-0.006	0.019	-0.016	0.034	0.007	-0.018
	E5	0.021	0.020	0.004	-0.002	-0.029	0.018	-0.060	0.014	-0.005	-0.041	0.060
	E6	0.048	-0.011	-0.017	-0.008	0.046	-0.002	-0.007	0.017	-0.067	-0.006	0.006
	E7	0.102	-0.041	-0.042	-0.020	0.128	-0.014	0.019	0.032	-0.149	0.008	-0.022
	E8	0.032	0.000	-0.007	-0.007	0.014	0.005	-0.024	0.012	-0.030	-0.018	0.023

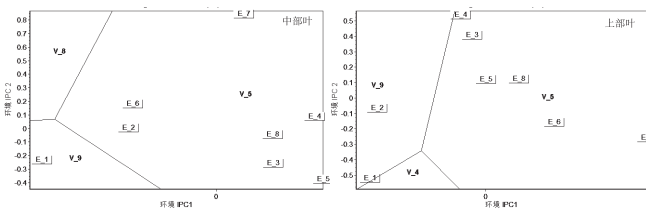


图 3 AMMI2 双标图的基因型最佳适应图

Fig.3 AMMI2 biplot of the best fit figure for genotype

3 结论和讨论

烤烟不同部位烟叶的钾含量一般表现为下部叶高于中部叶，中部叶高于上部叶，因此，烟叶生产中主要关注中部叶和上部叶的钾含量，尤其是上部叶。国内有关烤烟高钾品种（材料）已有研究，徐文军等^[20]报道了 YZ99-2、9411、9306、岩烟 97 等可作为高钾亲本应用于高钾烤烟新品种选育，其上部叶钾含量平均值分别比 K326 (2.32%) 高出 34.1%、29.3%、12.5%、-0.9%，中部叶和上部叶钾含量平均值分别比

K326 (2.66%) 高出 33.8%、31.8%、9.4%、14.3%。吴成林等^[21]报道的高钾新品系 GK5 中部叶钾含量 (3.24%) 比 K326 (2.53%) 高出 28.1%。本研究基因型 V5 中部叶和上部叶钾含量极显著高于其它基因型，8 个试点中部叶钾含量平均值 (3.31%) 比 K326 (2.56%) 高出 29.3%，与吴成林等^[21]报道的高钾新品系相当，上部叶钾含量 (2.92%) 比 K326 (2.35%) 高出 24.3%，中部叶和上部叶钾含量平均值 (3.12%) 比 K326 (2.46%) 高出 26.6%，基因型 V5 钾含量比徐文军等^[20]报道的高钾材料 9306 和岩烟 97 高，低于 YZ99-2 和 9411。可见，基因型 V5 具有钾含量高的特点，可作为钾高效型基因型供生产选择种植，也可作为育种材料用于高钾基因型选育。

烤烟化学成分含量是遗传因素和种植环境等共同作用的结果，本研究 AMMI 模型分析表明，基因型、环境试点、基因型与环境互作对烤烟不同部位烟叶钾含量的影响具有统计学意义，钾含量受环境试点的影响效应 (中部叶 43.4%、上部叶 52.5%) 大于基因型 (中

部叶 30.1%、上部叶 21.9%) 和基因型 × 环境试点交互效应 (中部叶 15.4%、上部叶 15.6%)，这与史跃伟等^[9]报道的烤烟钾含量的基因效应、环境效应、基因与环境交互效应达极显著或显著水平，环境效应 (61.9%) 大于基因效应 (23.5%) 和基因与环境交互效应 (14.6%) 的结果相符，与肖炳光^[22]研究的烤烟氧化钾等化学成分含量易受环境条件影响的结果相符。同时，本研究联合回归、基因型回归、环境回归分析解释了中部叶钾含量基因型与环境交互效应的 42.3%、残差占 57.7%，上部叶仅解释了 31.2%、残差占 68.8%，而 AMMI 模型分析解释了中部叶钾含量基因型与环境交互效应的 89.7%、残差占 10.3%，上部叶钾含量基因型与环境交互效应的 91.3%、残差占 8.7%，即 AMMI 模型分析对分解烤烟钾含量的基因型与环境交互效应明显优于回归模型分析。

基因型与环境的交互效应是确定基因型推广的重要依据，本研究基因型最佳适应图直观地描绘出基因型 V5 中部叶钾含量在 7 个环境试点 (E1 除外) 具有最佳适应性，上部叶钾含量在 6 个环境试点 (E1 和 E2 除外) 具有最佳适应性，V9 中部叶钾含量在 E1、上部叶钾含量在 E1 和 E2 具有最佳适应性，V4 上部叶在 E1 有较好适应性，这与根据基因型 × 环境交互效应值 D_{ve} 得出的基因型最佳适应性存在一些不同，如中部叶钾含量：V3 在 E1、E2、E6 具有最佳适应性，V5 在 E3、E4、E5、E7、E8 具有最佳适应性，上部叶钾含量：V9 在 E1、E2、E4 具有最佳适应性，V7 在 E3、V11 在 E5、V5 在 E7、V1 在 E8 具有最佳适应性，V1 和 V5 在 E6 具有最佳适应性。导致这种偏差的主要原因可能与 AMMI 模型侧重于分析基因型与环境的交互效应，侧重于稳定性分析有关，选择的往往是稳定高产或稳定低产的基因型，一些高产但稳定性较差的基因型可能会受到忽略^[23]，同时，针对具体的试验数据，统计分析模型在不同的应用方面具有局限性^[24]。此外，本研究不同基因型中部叶钾含量的最佳适应性与试验结果的吻合性好于上部叶，其原因是否与烤烟不同部位烟叶的钾含量由不同基因控制，而不同基因受相同环境的影响程度不同有关，这还有待进一步研究。

基因型的稳定性与适应性密切相关，但二者并不等同。实际生产中，高产前提下稳产的基因型具有广泛适应性，低产基因型即使稳定性很好也不适宜在各地推广种植，有些基因型稳定性较差，但在较广泛的环境条件下仍可获得较高产量，也符合生产需求^[25]。本研究基因型 V5 钾含量极显著高于其它基因型，且

在 8 个环境试点中，7 个点的中部叶钾含量高于其它基因型，6 个点的上部叶钾含量高于其它基因型，但 V5 不同部位烟叶钾含量的稳定性较差，属钾含量丰产性好但稳定性较差的基因型。就提高烟叶钾含量而言，基因型 V5 在本研究多数环境试点条件下种植有利于提高烟叶钾含量，但该基因型在本研究环境试点区域外的钾含量及其适应性还有待进一步的研究。

参考文献

- [1] 李国栋, 于建军, 董顺德, 等. 河南烤烟化学成分与烟气成分的相关性分析 [J]. 烟草科技, 2001(8):28-30.
LI Guodong, YU Jianjun, DONG Shunde, et al. Correlation analysis on components in flue-cured tobacco grown in Henan province with its smoke components [J]. Tobacco Science & Technology, 2001, 8:28-30.
- [2] 于建军, 章新军, 毕庆文, 等. 烤烟烟叶理化特性对烟气烟碱、CO、焦油量的影响 [J]. 中国烟草科学, 2003(3):5-8.
YU Jianjun, ZHANG Xinjun, BI Qingwen, et al. Effects of physiological and biochemical characteristics of flue-cured tobacco leaves on discharge rate of harmful composition in smoke [J]. Chinese Tobacco Science, 2003, 3:5-8.
- [3] 汤朝起, 窦玉青, 张俊. 烤烟物理特性和化学成分与烟气组分的关系 [J]. 四川农业大学学报, 2009, 27(4):427-432.
TANG Zhaoqi, DOU Yuqing, ZHANG Jun. Studies on the relationship between physical and chemical characteristics and smoke components of flue-cured tobacco [J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2009, 27(4):427-432.
- [4] 邓小华, 周冀衡, 周清明, 等. 不同焦油量烤烟化学成分差异 [J]. 中国烟草学报, 2011, 17(2):1-7.
DENG Xiaohua, ZHOU Jiheng, ZHOU Qingming, et al. Differences in chemical components in flue-cured tobacco leaf with different tar delivery [J]. Acta Tabacaria Sinica, 2011, 17(2):1-7.
- [5] 王华, 戴林建, 潘著, 等. 钾高效基因型烤烟选育及其钾素营养特性研究进展 [J]. 湖南农业科学, 2012(11):14-16, 17.
WANG Hua, DAI Linjian, PAN Zhu, et al. Advances in breeding of potassium-efficient genotypes tobacco and its characteristics of potassium nutrition [J]. Hunan Agricultural Sciences, 2012, 11:14-16, 17.
- [6] 窦玉清, 张伟峰, 刘新民, 等. 全国初烤烟叶常规化学成分年度间变化 [J]. 中国烟草科学, 2015, 36(2):26-31.
DOU Yuqing, ZHANG Weifeng, LIU Xinmin, et al. Main chemical composition changes of flue-cured tobacco among years in China [J]. Chinese Tobacco Science, 2015, 36(2):26-31.
- [7] 石屹, 牛佩兰, 窦玉清, 等. 培育富钾烟草品种降低烟叶焦油产生量 [J]. 中国烟草科学, 1997(4):15-17.
SHI Yu, NIU Peilan, DOU Yuqing, et al. Cultivation of potassium rich tobacco varieties to reduce tar content [J]. Chinese Tobacco Science, 1997, 4:15-17.
- [8] 蔡长春, 余君, 李进平, 等. 烟草富钾低焦油育种概况与展望 [J]. 湖北农业科学, 2012, 51(17):3669-3673.
CAI Changchun, YU Jun, LI Jinping, et al. Summary and prospect on potassium-enriched low-tar tobacco breeding [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2012, 51(17):3669-3673.
- [9] 史跃伟, 王志红, 王轶, 等. AMMI 模型在评价烤烟主要化学成分稳定性中的应用 [J]. 江西农业学报, 2011, 23(12):104-106.
SHI Yuewei, WANG Zhihong, WANG Yi, et al. Application of AMMI model in evaluating stability of main chemical components in flue-cured tobacco [J]. Acta Agricultura Jiangxi, 2011, 23(12):104-106.
- [10] 杨仕华, 沈希宏, 王磊, 等. 水稻品种区域试验的 AMMI 模型分析 [J]. 江西农业大学学报, 1998, 20(4):422-426.
YANG Shihua, SHEN Xihong, WANG Lei, et al. The use of AMMI model to analyze regional rice trial data [J]. Acta Agriculturae

- Universitatis Jiangxiensis, 1998, 20(4):422-426.
- [11] 李艳艳, 丰震, 赵兰勇. 用 AMMI 模型分析玫瑰品种产花量的稳定性 [J]. 中国农业科学, 2008, 41(6):1761-1766.
LI Yanyan, FENG Zhen, ZHAO Lanyong. Analysis of stability of flower yield of Rugosa rose cultivars with AMMI model[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008, 41(6):1761-1766.
- [12] 王军, 郭二虎, 袁峰, 等. 基于 AMMI 模型分析谷子基因型与环境互作效应 [J]. 河北农业科学, 2010, 14 (13) :107-111.
WANG Jun, GUO Erhu, YUAN Feng, et al. Analysis of genotype-environment interaction effect of milled based on AMMI model[J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 2010, 14(11):107-111.
- [13] 杨仕华, 程本义. 应用 AMMI 模型评价水稻区试点对品种的判别力 [J]. 江西农业大学学报, 2000, 22(4):479-481.
YANG Shihua, CHENG Benyi. Evaluation of the discriminating ability of locations for rice cultivars trial by AMMI model[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2000, 22(4):479-481.
- [14] 马冬云, 郭天财, 王晨阳, 等. 用 AMMI 模型分析小麦品种品质性状的稳定性 [J]. 西北农林科技大学学报 (自然科学版), 2005, 33(4) : 74-78.
MA Dongyun, GUO Tiancai, WANG Chenyang, et al. Analyzing the stability of wheat quality traits with AMMI model[J]. Jour. Of Northwest Sci-Tech Univ. of Agri. And For.(Nat. Sci. Ed.), 2005, 33(4):74-78.
- [15] 吴兴富, 肖炳光, 巫升鑫, 等. 基因型及环境对烤烟清香型风格的感官质量的效应分析 [J]. 江西农业大学学报, 2013, 35(5) : 929-934.
WU Xingfu, XIAO Bingguang, WU Shengxin, et al. genotype and environmental effect on aroma type and sensory taste quality of flue-cured tobacco[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2013, 35(5):929-934.
- [16] 徐秀秀. 2015. 烟草品种 (系) 富钾能力的遗传差异研究 [D]. 贵州大学硕士学位论文 :60.
XU Xiuxiu. 2015. Study on genetic differences in potassium rich capacity of Tobacco Varieties (lines) [D]. Master Dissertation of Guizhou University:60.
- [17] 唐启义著. DPS 〇 CC 数据处理系统 [M]. 北京: 科学出版社, 2010(第二版):552-559.
Tang Qiyi. et al. 2010, DPS 〇 CC data processing system(v10.15) [M]. Science Press, Beijing, China, the second edition:552-559.
- [18] 吴为人. 对基于 AMMI 模型的品种稳定性分析方法的一点改进 [J]. 遗传, 2000, 22(1):31-32.
WU Weiren. An improvement on the method of variety stability analysis based on the AMMI model[J]. HEREDITAS(Beijing), 2000, 22(1):31-32.
- [19] 徐良年, 高三基, 邓祖湖, 等. AMMI 模型在甘蔗区域试验中的应用 [J]. 江西农业大学学报, 2004, 26(5):735-739.
XU Liangnian, GAO Sanji, DENG Zuhu, et al. Application of AMMI model in data analysis of regional trial of sugarcane[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2004, 26(5):735-739.
- [20] 徐文军, 胡日生, 郭清泉, 等. 烟草钾营养的基因型差异及烤烟育种中应用研究 I . 烟叶钾含量的基因型差异 [J], 作物研究, 2006(1):68-70,74.
XU Wenjun, HU Risheng, GUO Qingquan, et al. Studies on genotype variation of potassium in tobacco and their application in the breeding of flue-cured tobacco I .difference of potassium contents in leaf tobacco among genotypes of tobacco[J]. Crop Research, 2006,(1):68-70,74.
- [21] 吴成林, 钟军, 潘著, 等. 烤烟高钾新品系主要性状的优势分析及灰色关联分析 [J], 作物研究, 2012, 26(3):236-242.
WU Chenglin, ZHONG Jun, PAN Zhu, et al. Advantage analysis and grey correlation analysis on main traits of new line flue-cured tobacco with high potassium content[J]. Crop Research, 2012, 26(3):236-242.
- [22] 肖炳光. 2005. 烤烟农艺性状和烟叶化学成分的遗传分析 [D]. 浙江大学博士学位论文 :30-31.
XIAO Bingguang. 2005. Genetic analysis for Agronomical traits and chemical constituents in the flue-cured tobacco(*Nicotiana tabacum*)[D]. Doctor Dissertation of Zhejiang University:30-31.
- [23] 汪洲涛, 苏炜华, 阙友雄, 等. 应用 AMMI 和 HA-GGE 双标图分析甘蔗品种产量稳定性和试点代表 [J], 中国生态农业学报, 2016, 24(6):790-800.
WANG Zhoutao, SU Weihua, QUE Youxiong, et al. Analysis of yield stability and test site representativeness of sugarcane trails using combined AMMI and HA-GGE biplot modes[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(6):790-800.
- [24] 李亚杰, 范士杰, 张俊莲, 等. AMMI 在马铃薯产量及农艺性状分析中的应用 [J], 干旱地区农业研究, 2013, 31(3):48-60.
LI Yajie, FAN Shijie, ZHANG Junlian, et al. Application of AMMI model in evaluation of yield and agronomic traits of potato[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2013, 31(3):48-60.
- [25] 常磊, 柴守玺. AMMI 模型在旱地春小麦稳定性分析中的应用 [J], 生态学报, 2006, 26(11):3677-3684.
CHANG Lei, CHAI Shouxi. Application of AMMI model in the stability analysis of spring wheat in rainfed areas[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(11):3677-3684.

Analysis of genotypic and environmental effects on potassium contents in flue-cured tobacco

WU Xingfu, JIAO Fangchan, ZHANG Yihan, ZENG Jianmin, LI Yongping*
Yunnan Academy of Tobacco Agricultural Sciences, Kunming 650021, China

Abstract: The aim of this study is to understand effects of genotype and environment on potassium contents in flue-cured tobacco leaves. AMMI model was used to analyze potassium contents in leaves from eleven genotypes planted in eight environments. The results showed that genotype, environment and genotype \times environment interaction significantly influenced potassium content in flue-cured tobacco. Environment exhibited larger effects than genotype and genotype \times environment interaction. As for analyzing the genotype \times environment interaction effects on potassium content, the AMMI model was better than the regression model. The potassium content in V5 (Yunyan110) middle and upper leaf were significantly higher than that of others genotypes. Therefore, V5 can be used as a potassium efficient genotype in tobacco leaf production, and also be used as a breeding material for high potassium content.

Keywords: flue-cured tobacco; potassium; genotypic effect; environmental effect; AMMI model

Citation: WU Xingfu, JIAO Fangchan, ZHANG Yihan, et al. Analysis of genotypic and environmental effects on potassium contents in flue-cured tobacco [J]. Acta Tabacaria Sinica, 2017, 23(4)

*Corresponding author. Email: liyongping@yntsti.com