

江西烤烟香气成分特征及其与气象因子的关联分析

刘冰^{1,2}, 梁洪波¹, 张海伟³, 王建兵⁴, 刘光亮¹, 李立新³, 张启明³, 苑举民³, 陈爱国^{1*}

(1. 中国农业科学院烟草研究所, 农业农村部烟草生物学与加工重点实验室, 青岛 266101; 2. 中国农业科学院研究生院, 北京 100081; 3. 江西省烟叶科学研究所, 南昌 330025; 4. 江西中烟工业有限责任公司, 南昌 330096)

摘要: 为明确江西产区烤烟香气成分特征及其关键气象影响因子, 比较了我国 5 个不同中间香及浓香型产区烤烟香气物质含量, 明确了江西烤烟香气成分特征, 并分析了江西省烤烟香气成分特征的区域差异及与气象因子的关系。结果表明: (1) 江西烤烟中性香气物质含量较低, 但巨豆三烯酮含量较高、在中性香气物质中所占比例最高且代谢转化最强; (2) 江西烤烟中各巨豆三烯酮异构体含量及其总量存在较大的产地差异, 其异构体含量及总量均与大田中后期的气象因子密切相关, 尤其是成熟期的均温。总的来看, 巨豆三烯酮含量较高是江西烤烟重要的香气成分特征, 成熟期均温是影响江西烤烟巨豆三烯酮含量及其产地差异的关键气象因子。

关键词: 烤烟; 香气成分; 气象因子; 关联分析

中图分类号: S572.01

文章编号: 1007-5119 (2019) 06-0042-07

DOI: 10.13496/j.issn.1007-5119.2019.06.006

Aroma Component Characteristics of Jiangxi Tobacco Leaves and Association Analysis with Meteorological Factors

LIU Bing^{1,2}, LIANG Hongbo¹, ZHANG Haiwei³, WANG Jianbing⁴, LIU Guangliang¹,
LI Lixin³, ZHANG Qiming³, YUAN Jumin³, CHEN Aiguo^{1*}

(1. Tobacco Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Tobacco Biology and Processing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Qingdao 266101, China; 2. Graduate School, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 3. Tobacco Science Research Institute of Jiangxi Province, Nanchang 330025, China; 4. China Tobacco Jiangxi Industrial Co., Ltd., Nanchang 330096, China)

Abstract: To clarify aroma component characteristics of Jiangxi tobacco leaves and key meteorological impact factors, aroma component contents of flue-cured tobacco from five different pure-sweetness type or burnt-sweetness type tobacco-planting areas in China were compared, and regional differences of characteristic aroma components in flue-cured tobacco and their association with meteorological factors in Jiangxi were analyzed in this study. The results showed that: (1) Megastigmatrienone content was higher in Jiangxi tobacco leaves, which accounted for the highest proportion of neutral aroma components and had the strongest metabolic formation from 3-oxo- α -ionol to megastigmatrienone, although neutral aroma component content in Jiangxi tobacco leaves was lower than that in other areas. (2) There were obvious regional differences in the contents of megastigmatrienone isomers and their total amount in Jiangxi tobacco leaves, which were closely associated with meteorological factors during mid-late stages of growth in the field, especially with the average temperature at mature stage. Therefore, high content of megastigmatrienone is an important aroma component characteristic of Jiangxi tobacco leaves, and average temperature at mature stage is a key meteorological factor impacting on formation and accumulation of megastigmatrienone in tobacco leaves and regional differences of megastigmatrienone contents in Jiangxi.

Keywords: flue-cured tobacco; aroma component; meteorological factor; association analysis

植物中萜类化合物、多酚类化合物和生物碱类化合物等三大次生代谢产物是农产品香气风味的主要物质基础^[1]。在烤烟中, 香气物质的含量和组

成决定了烟叶原料的香气质量^[2], 其中, 萜类化合物是种类最丰富的香气前体物^[3], 一些重要的香气物质均来源于萜类化合物的降解, 如茄酮来源于类

基金项目: 中国农业科学院科技创新工程 (ASTIP-TRIC03); 中国烟草总公司江西省公司项目“江西烤烟提质增香栽培关键技术研究” (201701004)

作者简介: 刘冰 (1995-), 女, 在读硕士, 研究方向为作物生理生态。E-mail: liubing_g@163.com。*通信作者, E-mail: chenaiguo@caas.cn

收稿日期: 2019-05-22

修回日期: 2019-10-16

西柏烷类物质的降解,紫罗兰酮、大马酮、巨豆三烯酮等来源于类胡萝卜素类物质的降解^[4]。研究表明,环境因素是影响香气物质含量和组成的主要因素^[5],而不同烤烟品种的香气成分种类基本相同,其含量及组成比例的差异造就了不同的烤烟香型风格^[6]。我国烤烟主体香气成分为茄酮、大马酮和巨豆三烯酮^[7]。受不同生态因素影响,茄酮在浓香型烟叶中含量较高,大马酮在清香型烟叶中含量较高^[8],巨豆三烯酮作为香气底蕴物质,在我国烟叶原料中含量整体偏低,约为优质津巴布韦烟叶中含量的 1/3~1/2^[9]。这些主体香韵与不同产区烟叶的特征香韵共同形成了烟叶的地方风格,为中式卷烟风格特色提供了原料支撑。根据“浓香型特色优质烟叶开发”项目研究报告,江西烟叶除具备典型浓香型烟叶的特征外,还有自身的特色和特征,以干草香、焦甜香、正甜香、焦香、木香等为特征香韵,焦甜香韵突出,香气浓郁而沉溢,具有良好的甘甜特征。然而,目前江西烤烟香气成分特征研究未见报道。

烟草香气物质主要由香气前体物在烟叶成熟期间合成积累,在调制加工期间降解生成^[4],因而,提高烤烟香气物质含量的关键在于提高香气前体物的合成积累。在烟叶生长发育过程中,生态因素通过影响烟叶香气前体物质合成积累而最终决定烟叶的风格特色^[10]。研究表明,气候是造成烤烟香气物质含量出现区域差异的最重要的生态因素^[11-13],不同烟区的气候资源配置影响了香气物质的含量、组成及比例^[14]。因此,阐明江西烟区香气成分特征与生态因素,尤其是与气象因子的关系,对江西烟区特色优质烟叶开发具有重要的理论和实践意义。本研究通过不同中间香及浓香型烟区烟叶中性香气物质含量比较,明确江西烤烟的香气物质特征,分析了香气成分特征与气象因子的关系,探讨关键气象影响因子,以期江西特色优质烟叶原料生产与开发提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 烟叶样品和气象数据来源

国内 5 个中间香型及浓香型产区 25 份烟叶样品于 2013 年采集,品种为 K326, C3F 样品,各 2.5 kg。分别为江西(4 份)、湖南(8 份)、贵州(4 份)、河南(5 份)、和重庆(4 份)。

江西产区烟叶样品于 2016—2017 年采集,共 12 个植烟县 62 份 K326 品种的 C3F 烟叶样品,各 2.5 kg。分别为赣县(2 份)、石城(10 份)、瑞金(10 份)、安远(8 份)、信丰(7 份)、会昌(9 份)、广昌(1 份)、乐安(8 份)、黎川(1 份)、安福(4 份)、泰和(1 份)、万安(1 份)。江西日均气象数据(2007—2016)由国家气象局提供。

1.2 中性香气物质提取与检测

提取方法:烟叶去梗粉碎后过 60 目筛,在温度(22±1)℃和相对湿度(60±3)%的环境下平衡 24 h。采用同时蒸馏法萃取,添加正己烷内标定量。

检测条件:

仪器型号:Agilent 6890A GC/MS 5975 ;GC/MS 条件:毛细管柱 HP-5MS(30 m×0.25 mm×0.25 μm);载气:氦气;流速 1.0 mL/min;升温程序:50℃(保持 10 min)→4℃/min 的速度升温至 160℃(保持 2 min)→4℃/min 的速度升温至 240℃(保持 15 min);进样口温度 260℃,传输线温度 280℃;EI 离子源温度 200℃;扫描范围 35~455 amu,扫描速率 1.65 scan/s;NBS75 谱库检索定性。

1.3 数据处理与分析

数据整理采用 Excel 2016;SNK 多重比较采用 SAS 9.1,数据标准化(Z-score)后的层次聚类法热图分析采用 MeV 4.9.0;灰色关联度分析采用 DPS 7.5 进行,分辨系数(ρ)计算参照东亚斌^[15]的方法。

2 结果

2.1 江西烤烟香气成分特征

由表 1 可见,与我国其他中间香及浓香型产区烟叶中性香气物质含量相比,江西烟叶中茄酮、香叶基丙酮、降茄二酮、氧化紫罗兰酮、β-紫罗兰酮、二氢猕猴桃内酯、3-羟基大马酮、3-氧代-α-紫罗兰醇、β-法尼烯含量较低,而巨豆三烯酮含量较高,

表1 5个烤烟种植区烟叶不同香气物质含量的差异分析

香气成分 Aroma component	贵州 Guizhou	河南 Henan	湖南 Hunan	江西 Jiangxi	重庆 Chongqing
茄酮 Solanone	0.176±0.031b	0.335±0.013a	0.259±0.040ab	0.232±0.055b	0.309±0.146ab
香叶基丙酮 Geranyl acetone	0.092±0.012a	0.082±0.017a	0.090±0.020a	0.050±0.019b	0.056±0.011b
降茄二酮 ketone	0.075±0.011a	0.055±0.011ab	0.089±0.040a	0.036±0.016b	0.059±0.004ab
氧化紫罗兰酮 Oxidized ionone	0.059±0.006a	0.048±0.005ab	0.058±0.009a	0.039±0.007b	0.043±0.006ab
β -紫罗兰酮 β -ionone	0.105±0.002b	0.121±0.013a	0.122±0.026a	0.089±0.019b	0.093±0.012b
二氢猕猴桃内酯 Dihydroactinidiolide	0.320±0.012ab	0.351±0.036a	0.359±0.044a	0.280±0.050b	0.261±0.028b
巨豆三烯酮 1 Megastigmatrienone 1	0.008±0.001ab	0.007±0.001b	0.011±0.001a	0.011±0.007ab	0.007±0.001b
巨豆三烯酮 2 Megastigmatrienone 2	0.079±0.011b	0.069±0.007b	0.103±0.010a	0.103±0.045ab	0.075±0.014b
巨豆三烯酮 3 Megastigmatrienone 3	0.019±0.005ab	0.019±0.005ab	0.024±0.003a	0.017±0.006ab	0.013±0.002b
巨豆三烯酮 4 Megastigmatrienone 4	0.065±0.012ab	0.056±0.004b	0.079±0.007a	0.079±0.033ab	0.055±0.007b
巨豆三烯酮总量 Total megastigmatrienone	0.173±0.031ab	0.152±0.014b	0.218±0.017a	0.211±0.091ab	0.151±0.023b
3-羟基大马酮 3-hydrox-damascone	0.103±0.021a	0.064±0.017b	0.116±0.018a	0.064±0.016b	0.059±0.007b
3-氧代- α -紫罗兰醇 3-oxo- α -ionol	0.453±0.143ab	0.260±0.136bc	0.523±0.142a	0.251±0.105bc	0.282±0.014c
β -法尼烯 β -farnesene	1.373±0.054a	1.187±0.161ab	1.172±0.156ab	1.047±0.387bc	0.844±0.086c
香气成分总量 Total aroma component	2.932±0.149ab	2.661±0.289abc	3.025±0.262a	2.304±0.589bc	2.163±0.227c

注：同一行的不同小写字母代表差异显著 ($p<0.05$)

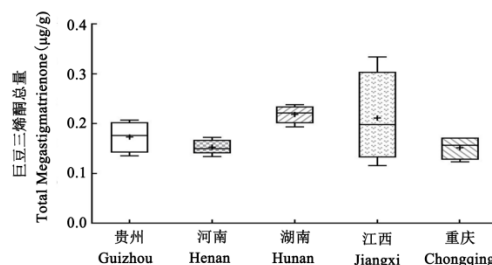
Note: Different lowercase letters in the same row represent significant difference ($p<0.05$)

其中，巨豆三烯酮（1、2、4及总量）含量仅次于湖南烤烟，但与其他产区比较均无显著差异。江西烤烟中巨豆三烯酮总量变异达43.282%，在5个产区中变异最大，高于湖南烤烟巨豆三烯酮总量上限值的占25%（图1），表明巨豆三烯酮可以较好地表征江西烤烟的特点。

此外，巨豆三烯酮主要由前体物质胡萝卜素经3-氧代- α -紫罗兰醇途径降解生成^[16]，巨豆三烯酮与3-氧代- α -紫罗兰醇的含量比值以江西显著较高（表2），达到了95.504%，说明江西烤烟中3-氧代- α -紫罗兰醇向巨豆三烯酮的转化最多。而且，5个产区中，江西烤烟中性香气物质中巨豆三烯酮所占比例最高，达到了9.166%（表2）。因此，尽管江西烤烟中性香气物质总量较低，但其巨豆三烯酮所占比例最高且代谢转化最强。

2.2 江西烤烟巨豆三烯酮含量的产地差异

为明确江西省内烤烟巨豆三烯酮含量的产地差异，对烤烟巨豆三烯酮含量数据进行标准化处理，



注：每个箱型图从上到下的横线依次代表上限，上四分位数，中位数，下四分位数，下限，+代表平均值。

Note: Horizontal line from top to bottom of each box plot represents ceiling, upper quartiles, Median, lower quartiles, floor, and + represents average value.

图1 5个烤烟种植区烤烟巨豆三烯酮总量箱型图

Fig. 1 Box-plots of megastigmatrienone contents in tobacco leaves from five different tobacco-planting areas

表2 5个烤烟种植区烟叶巨豆三烯酮与其他香气物的比值

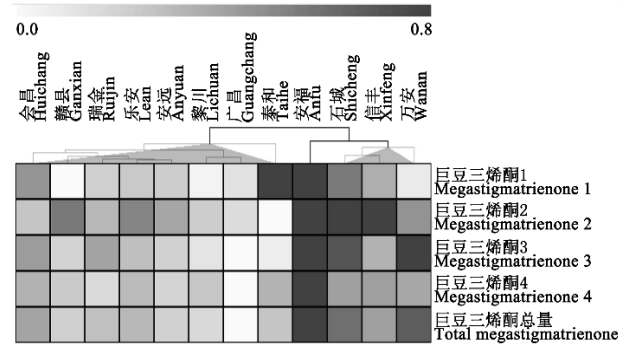
指标 Index	贵州 Guizhou	河南 Henan	湖南 Hunan	江西 Jiangxi	重庆 Chongqing
巨豆三烯酮 1/总香气物质 Megastigmatrienone 1/total aroma	0.307	0.282	0.373	0.448	0.332
巨豆三烯酮 2/总香气物质 Megastigmatrienone 2/total aroma	2.700	2.639	3.454	4.481	3.482
巨豆三烯酮 3/总香气物质 Megastigmatrienone 3/total aroma	0.657	0.724	0.796	0.741	0.628
巨豆三烯酮 4/总香气物质 Megastigmatrienone 4/total aroma	2.238	2.139	2.630	3.494	2.581
巨豆三烯酮总量/总香气物质 Total megastigmatrienone/total aroma	5.904	5.793	7.254	9.166	7.024
巨豆三烯酮总量/3-氧代- α -紫罗兰醇 Total megastigmatrienone/3-oxo- α -ionol	40.483	78.114	43.98	95.504	53.969

热图分析结果如图 2 所示。江西 12 个产地烤烟大体可聚为 3 类：第 1 类为巨豆三烯酮各异构体含量及总量均高的安福；第 2 类为部分巨豆三烯酮异构体含量较高、总量中等的石城、万安及信丰；第 3 类为各巨豆三烯酮异构体含量及总量均偏低的会昌、赣县、广昌、瑞金、乐安、安远、黎川及泰和。因此，江西烤烟的巨豆三烯酮含量具有明显的产地差异。

2.3 江西烤烟巨豆三烯酮含量与气象因子的关联分析

2.3.1 江西不同产地气象条件 根据江西烟叶移栽至中部叶成熟采收阶段(3—6月)各生育期的时间分布，伸根前期为3月上旬—3月中旬，伸根后期为3月下旬—4月上旬，旺长前期为4月中旬—4月下旬，旺长后期为5月上旬—5月中旬，下部叶

成熟期为5月下旬—6月上旬，中部叶成熟期为6月中旬—6月下旬。各气象指标在相应生育阶段的数值如表3所示。



注：数据为巨豆三烯酮含量标准化值
Note: Data were the normalized Z-scores of megastigmatrienone content

图 2 江西不同产地烤烟的聚类热图分析

Fig. 2 Clustering heatmap analysis of megastigmatrienone contents from different tobacco-planting counties in Jiangxi

表 3 江西烤烟移栽至中部叶成熟采收阶段不同气象因子数值

Table 3 Different meteorological factor values during the growth stages from transplanting to middle leaf ripening of flue-cured tobacco in Jiangxi

生育阶段	指标	信丰	安远	会昌	赣县	瑞金	万安	石城	泰和	安福	广昌	乐安	黎川
Growth stage	Factor	Xinfeng	Anyuan	Huichang	Ganxian	Ruijin	Wanan	Shicheng	Taihe	Anfu	Guangchang	Lean	Lichuan
伸根前期	降水量 Rainfall/mm	93.28	93.71	98.18	95.30	106.31	116.70	96.09	106.97	113.11	123.80	130.86	133.71
	日照时数 Sunshine hours /h	53.16	56.08	56.33	54.43	55.88	57.19	52.79	52.37	52.87	57.08	58.84	61.33
伸根后期	平均温度 Average temperature /°C	14.70	13.97	14.26	14.11	14.06	13.27	13.78	13.55	12.09	12.99	12.20	12.64
	降水量 Rainfall/mm	122.29	124.68	127.52	120.86	134.83	148.28	122.03	135.1	143.52	156.89	161.16	166.53
旺长前期	日照时数 Sunshine hours /h	57.84	59.77	60.33	60.34	60.16	60.60	59.51	58.83	58.43	60.85	64.87	64.38
	平均温度 Average temperature /°C	17.19	16.39	16.69	16.71	16.54	15.73	16.46	16.26	14.75	15.57	14.92	15.14
旺长后期	降水量 Rainfall/mm	133.90	138.13	139.27	129.17	144.05	129.20	156.40	138.51	149.33	164.90	159.13	172.78
	日照时数 Sunshine hours /h	62.52	63.46	64.34	66.25	64.44	66.22	64.01	65.29	64.00	64.62	70.89	67.43
下部叶成熟期	平均温度 Average temperature /°C	19.67	18.82	19.13	19.31	19.03	19.14	18.19	18.97	17.41	18.15	17.64	17.64
	降水量 Rainfall/mm	180.34	187.73	188.82	161.92	189.17	196.41	147.56	155.62	155.22	195.26	181.90	202.04
中部叶成熟期	日照时数 Sunshine hours /h	72.75	72.30	72.79	76.46	72.86	72.40	76.41	75.97	76.96	73.64	79.75	74.97
	平均温度 Average temperature /°C	23.60	22.63	23.01	23.50	23.07	22.34	23.52	23.45	22.05	22.51	22.29	22.12
下部叶成熟期	降水量 Rainfall/mm	173.40	180.48	185.95	164.42	193.08	204.14	158.93	166.52	165.93	206.79	198.06	219.44
	日照时数 Sunshine hours /h	78.39	77.49	77.07	79.95	76.06	74.07	78.12	77.17	76.70	74.32	78.62	72.92
中部叶成熟期	平均温度 Average temperature /°C	25.06	24.04	24.43	25.03	24.52	23.82	25.04	25.00	23.67	24.06	23.85	23.67
	降水量 Rainfall/mm	166.46	173.22	183.09	166.92	196.98	211.87	170.3	177.42	176.64	218.32	214.22	236.85
下部叶成熟期	日照时数 Sunshine hours /h	89.42	87.91	86.48	89.06	84.25	80.32	85.00	83.22	81.27	79.34	82.45	75.29
	平均温度 Average temperature /°C	26.52	25.44	25.84	26.56	25.98	25.30	26.56	26.56	25.30	25.61	25.41	25.22

2.3.2 江西烤烟巨豆三烯酮含量与气象因子的灰色关联度分析 田间生长阶段的气象因素对烤烟香气前体物合成积累的影响随时间累加愈发显著，而灰色关联度分析可以很好地解析具有时间序列变化特征的指标间的关系^[11,14]。通过 18 个气象因子与巨豆三烯酮含量的数值初值化，计算所有差值绝

对值的均值 (Δv) 与最大差值 (Δ_{max})，根据 ρ 取值规则，确定 ρ 的适宜取值为 0.37。

选取关联度排名前三的气象因子，结果如表 4 所示。巨豆三烯酮 1 主要受大田前期降水影响，尤其是伸根前期降水；巨豆三烯酮 2 主要受大田中后期光温影响，尤其是中部叶成熟期日照时数；巨豆

三烯酮 3 主要受大田后期均温与降水影响,尤其是中部叶成熟期均温;巨豆三烯酮 4 主要受大田中后期光热影响,尤其是中部叶成熟期日照时数;巨豆

三烯酮总量主要受大田中后期均温影响,尤其是下部叶成熟期均温。综合分析,大田中后期的气象条件对巨豆三烯酮影响较大,尤其是此期间的均温。

表 4 巨豆三烯酮含量与气象因子的灰色关联度分析

Table 4 Grey relational analysis between megastigmatrienone and meteorological factors

指标 巨豆三烯酮 1	指标 巨豆三烯酮 2	指标 巨豆三烯酮 3	指标 巨豆三烯酮 4	指标 巨豆三烯酮总量
Index Megastigmatrienone 1	Index Megastigmatrienone 2	Index Megastigmatrienone 3	Index Megastigmatrienone 4	Index Total megastigmatrienone
x_1 0.6795	x_{17} 0.6252	x_{18} 0.6559	x_{17} 0.7105	x_{15} 0.6974
x_4 0.6723	x_{18} 0.6149	x_{15} 0.6474	x_{12} 0.7094	x_{18} 0.6962
x_7 0.6416	x_{15} 0.6097	x_{13} 0.6394	x_{15} 0.7045	x_{12} 0.6862

注: x_1 -伸根前期降水量; x_4 -伸根后期降水量; x_7 -旺长前期降水量; x_{13} -下部叶成熟期降水量; x_{12} -旺长后期均温; x_{15} -下部叶成熟期均温; x_{17} -中部叶成熟期日照时数; x_{18} -中部叶成熟期均温

Note: x_1 -Rainfall in early stage of root spreading; x_4 -Rainfall in later stage of root spreading; x_7 -Rainfall in early stage of vigorous growth; x_{13} -Rainfall in mature stage of lower leaves; x_{12} - Average temperature in later stage of vigorous growth; x_{15} - Average temperature in mature stage of lower leaves; x_{17} -Sunshine hours in mature stage of middle leaves; x_{18} -Average temperature in mature stage of middle leaves.

3 讨论

本研究比较了全国 5 个不同中间香及浓香型产区烤烟香气物质的含量,认为江西烤烟中性香气物质含量总体较低,但巨豆三烯酮(1、2、4 及总量)含量较高,仅次于湖南烤烟,且区域间变异较大。王鹏泽等^[17]研究认为江西烟叶中类胡萝卜素降解产物低于河南烟叶,但赣中东烤烟中的巨豆三烯酮含量显著高于其他浓香型产区烟叶。研究结果有所差异,可能与烟叶香气物质的年际差异有关,但都表明了江西烤烟巨豆三烯酮含量较高。研究表明,江西烤烟中性香气物质中巨豆三烯酮所占比例最高(9.166%),且 3-氧代- α -紫罗兰醇向巨豆三烯酮的转化最强。王兵等^[18]研究认为,湖南、广东、江西、安徽烤烟以浓香型为主,巨豆三烯酮含量最高,是凸显该产区浓香型烟叶的独特香气风格特征。王能如等^[19]研究认为江西烤烟本香浓郁,而烟草本香受巨豆三烯酮影响极大。以上研究结论与本研究结果一致。因此,中性香气物质中巨豆三烯酮的高比例组成及强代谢转化,可能是江西烤烟香气物质形成的重要原因和表征。

依据聚类分析结果,本研究认为江西烤烟的巨豆三烯酮含量存在产地差异,并可大致分为 3 类。就地理位置而言,第一、二类产地多位于赣西,第三类产地散布于赣西及赣东,总体上西部烟叶的巨豆三烯酮含量较东部更为丰富。

陈颐等^[20]研究表明,苗期增温补光有利于巨豆三烯酮的积累。成熟期较长的日照时数、干旱和高温能显著促进类胡萝卜素的分解代谢^[21-24],从而生成更多的致香物质。因此,巨豆三烯酮的前体物类胡萝卜素的合成积累受光、温、水等生态因素影响较大。在本研究中,大田中后期的气象条件是影响江西烤烟巨豆三烯酮总量的关键生态因素,尤其是下部叶成熟期的均温。赵东杰等^[25]认为巨豆三烯酮 1、巨豆三烯酮 3 与抚州烟区高温强光条件下烟叶质量密切相关。李玲燕等^[26]认为巨豆三烯酮含量与成熟期均温显著正相关,这些与本研究结果较为一致。此外,苗春雨等^[27]认为巨豆三烯酮含量与大田中后期的降水量和日照时数有关,与本研究结果不一致,这可能与其使用的简单相关分析并不适宜于时间序列分析有关。

烤烟中香气物质及其前体物大都是次生代谢产物,因而生态因素影响香气物质的合成实际上是对次生代谢途径的调控^[28]。然而,目前对生态因素影响巨豆三烯酮代谢的关键通路及其前体物合成积累的调控机制的研究仍是空白。烟草中巨豆三烯酮的前体物类胡萝卜素主要是通过甲基赤藓醇-4-磷酸(MEP)途径合成,当前有关类胡萝卜素代谢途径上的中间产物、关键酶及编码酶的基因已基本明确^[29-32]。随着现代分子生物学和代谢工程技术的发展,未来有望揭示生态影响的烤烟巨豆三烯酮积累及其前体物合成代谢机制。

4 结 论

与我国其他4个中间香及浓香型产区烟叶相比，江西烤烟的中性香气物质总量较低，但其巨豆三烯酮（1、2、4及总量）含量较高、变异范围较大、占中性香气物质比例最大、代谢转化最强，可以较好地表征江西烤烟的香气特点。江西产区烤烟巨豆三烯酮异构体含量及总量均具有明显的产地差异，其各类异构体含量及总量与大田中后期的温度、光照及降水等气象因子的关联度较大，尤其是成熟期的均温。在此基础上进一步探讨成熟期温度影响烤烟巨豆三烯酮及其前体物的合成积累机制对改善我国烤烟巨豆三烯酮含量偏低现状具有重要意义。

参考文献

- [1] 刘立新, 梁鸣早. 植物次生代谢作用及其产物概述[J]. 中国土壤与肥料, 2009(5): 82-86.
LIU L X, LIANG M Z. Review of plant metabolism and secondary metabolites function[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2009(5): 82-86.
- [2] 王琛玮. 烤烟香气物质的研究进展[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(14): 8582-8584, 8587.
WANG C W. Research development of aroma components in flue-cured tobacco[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 39(14): 8582-8584, 8587.
- [3] 杨铁钊, 李钦奎, 李伟. 植物次生代谢与烟草香味物质[J]. 中国烟草科学, 2005, 26(4): 23-26.
YANG T Z, LI Q K, LI W. Plant secondary metabolism and aroma substances of tobacco[J]. Chinese Tobacco Science, 2005, 26(4): 23-26.
- [4] 叶荣飞, 赵瑞峰. 烟草香气物质来源[J]. 广东农业科学, 2011, 38(5): 51-53.
YE R F, ZHAO R F. Review on the sources of aroma components in tobacco[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2011, 38(5): 51-53.
- [5] ZHANG L, WANG X Y, GUO J Z, et al. Metabolic profiling of Chinese tobacco leaf of different geographical origins by GC-MS[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2013, 61(11): 2597-2605.
- [6] 金亚波, 韦建玉, 李桂湘. 烤烟香气风格的研究进展[J]. 南方农业学报, 2011, 42(12): 1540-1544.
JIN Y B, WEI J Y, LI G X. Research progress on aroma style of flue-cured tobacco[J]. Journal of Southern Agriculture, 2011, 42(12): 1540-1544.
- [7] 王能如, 李章海, 王东胜, 等. 我国烤烟主体香味成分研究初报[J]. 中国烟草科学, 2009, 30(3): 1-6.
WANG N R, LI Z H, WANG D S, et al. Preliminary study on principal aroma and flavor constituents of flue-cured tobacco in China[J]. Chinese Tobacco Science, 2009, 30(3): 1-6.
- [8] 韩锦峰, 宋娜娜. 烤烟香型表征研究[J]. 中国烟草学报, 2014, 20(6): 150-154.
HAN J F, SONG N N. Research on characterization of flue-cured tobacco flavor types [J]. Acta Tabacaria Sinica, 2014, 20(6): 150-154.
- [9] 赵铭钦, 陈秋会, 陈红华. 中外烤烟烟叶中挥发性香气物质的对比分析[J]. 华中农业大学学报, 2007, 26(6): 875-879.
ZHAO M Q, CHEN Q H, CHEN H H. Analysis on the volatile neutral flavor components of flue-cured tobacco from domestic and abroad[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2007, 26(6): 875-879.
- [10] 沈嘉, 薛宝燕, 姜超强, 等. 两种典型环境对烤烟香型风格及致香物质的影响[J]. 中国烟草科学, 2016, 37(3): 1-7.
SHEN J, XUE B Y, JIANG C Q, et al. Influence of two typical environments on flavor type and aroma substances of flue-cured tobacco[J]. Chinese Tobacco Science, 2016, 37(3): 1-7.
- [11] 陈爱国, 刘光亮, 周道金, 等. 龙岩烤烟特征香气成分及其关键生态影响因子研究[J]. 江西农业大学学报, 2018, 40(2): 295-305.
CHEN A G, LIU G L, ZHOU D J, et al. Studies on aroma component characteristics of Longyan tobacco leaves and their key ecological influencing factors[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2018, 40(2): 295-305.
- [12] 罗勇, 陈永安, 潘文杰, 等. 气候与土壤对烤烟香气前体物和香型风格的影响[J]. 贵州农业科学, 2012, 40(12): 76-79.
LUO Y, CHEN Y A, PAN W J, et al. Effects of climate and soil on leaf aroma precursors and style of flue-cured tobacco[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2012, 40(12): 76-79.
- [13] 陈伟, 熊晶, 陈懿, 等. 气候与土壤对烤后烟叶类胡萝卜素和表面提取物含量的影响[J]. 生态学报, 2012, 33(12): 3865-3877.
CHEN W, XIONG J, CHEN Y, et al. Effects of climate and soil on the carotenoid and cuticular extract content of cured tobacco leaves[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 33(12): 3865-3877.
- [14] 张小全, 张懿懿, 刘冰洋, 等. 不同气象条件对高香气烤烟品种中性香气成分含量的影响[J]. 河南农业大学学报, 2016(4): 460-467.
ZHANG X Q, ZHANG Y Y, LIU B Y, et al. Effect of meteorological conditions on contents of neutral aroma components in high aroma flue-cured tobacco variety[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2016(4): 460-467.
- [15] 东亚斌, 张小龙. 灰色关联度分辨系数的确定及其在机械故障诊断中的应用[J]. 装备制造技术, 2008, 34(3):

- 121-122.
DONG Y B, ZHANG X L. Determination method for identification coefficient of grey relational grade and applying in mechanical faults diagnosis[J]. *Equipment Manufacturing Technology*, 2008, 34(3): 121-122.
- [16] 吴彦辉, 薛立新, 许自成, 等. 烤烟巨豆三烯酮研究现状与展望[J]. *中国农业科技导报*, 2013, 15(3): 150-156.
WU Y H, XUE L X, XU Z C, et al. Research status and prospects of megastigmatrienone in flue-cured tobacco[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2013, 15(3): 150-156.
- [17] 王鹏泽, 赵铭钦, 刘鹏飞, 等. 浓香型产区烤烟中性致香成分与生物碱组成及含量[J]. *中国烟草科学*, 2014, 35(5): 98-102.
WANG P Z, ZHAO M Q, LIU P F, et al. Composition and contents of neutral aroma components and alkaloids in flue-cured tobacco from full flavor tobacco growing regions[J]. *Chinese Tobacco Science*, 2014, 35(5): 98-102.
- [18] 王兵, 杨凯, 陈磊, 等. 不同产地烟叶中半挥发性香气成分的指纹图谱[J]. *烟草科技*, 2014, 48(8): 36-40.
WANG B, YANG K, CHEN L, et al. Fingerprints of semi-volatile aroma constituents in tobacco leaves from different growing areas[J]. *Tobacco Science & Technology*, 2014, 48(8): 36-40.
- [19] 王能如, 何宽信, 惠建权, 等. 江西烤烟香气香韵及其空间特征[J]. *中国烟草科学*, 2012, 33(4): 7-12.
WANG N R, HE K X, HUI J Q, et al. Aromatic charms and its spatial characteristics of the flue-cured tobacco leaves in Jiangxi province [J]. *Chinese Tobacco Science*, 2012, 33(4): 7-12.
- [20] 陈颐, 杨红武, 杨虹绮, 等. 不同光温培养烟苗对浓香型初烤烟叶香气物质的影响[J]. *中国农学通报*, 2014, 30(13): 201-206.
CHEN Y, YANG H W, YANG H Q, et al. Effects of different light and temperature cultivation to fragrant substance of the strong-flavor and flue-cured tobacco leaves[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2014, 30(13): 201-206.
- [21] 张广普. 烟叶香味物质含量的生态差异及其气象因子响应分析[D]. 郑州: 河南农业大学, 2013.
ZHANG G P. Analysis of ecological diversity and response to meteorological factors on content of main aroma substances in flue-cured tobacco[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2013.
- [22] 赵宸楠, 赵二卫, 肖炳光, 等. 不同生态区烤烟质体色素生物合成规律及色素含量比较[J]. *西北农业学报*, 2010, 19(12): 68-71.
ZHAO C N, ZHAO E W, XIAO B G, et al. Comparative dynamic analyses of plastid pigment biosynthesis of flue-cured tobacco growing in different ecological regions of China[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2010, 19(12): 68-71.
- [23] 李爱军, 代惠娟, 娄本, 等. 烟草类胡萝卜素研究进展[J]. *安徽农业科学*, 2008, 36(6): 2364-2366.
LI A J, DAI H J, LOU B, et al. Research progress in tobacco carotenoid[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2008, 36(6): 2364-2366.
- [24] FU X M, CHENG S H, FENG C, et al. Lycopene cyclases determine high α - β -carotene ratio and increased carotenoids in bananas ripening at high temperatures[J]. *Food Chemistry*, 2019, 283: 131-140.
- [25] 赵东杰, 赵喆, 毛亚博, 等. 抚州地区高温逼熟烟叶化学成分与致香成分的相关性[J]. *山西农业科学*, 2017, 45(9): 1420-1425.
ZHAO D J, ZHAO Z, MAO Y B, et al. Correlation analysis between chemical composition and aroma components of high temperature induced maturity tobacco leaves in Fuzhou area[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2017, 45(9): 1420-1425.
- [26] 李玲燕. 烤烟典型产区烟叶香气物质关键指标比较研究[D]. 北京: 中国农业科学院研究生院, 2015.
LI L Y. Comparative Studies on key indices of aroma components in flue-cured tobacco leaves from different typical regions[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2015.
- [27] 苗春雨, 许自成, 黄凯, 等. 气候因子对烤烟香气物质含量的影响[J]. *现代农业科技*, 2017(23): 143-147.
MIAO C Y, XU Z C, HUANG K, et al. Effects of climatic factors on aroma substance content of flue-cured[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2017(23): 143-147.
- [28] 乔瑞丽. 生态因子对烟草中类萜代谢的影响[D]. 郑州: 郑州大学, 2011.
QIAO R L. Effect of ecological factor on the concentration of terpenoid in tobacco[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2011.
- [29] CORDOBA E, SALMI M, LEÓN P. Unravelling the regulatory mechanisms that modulate the MEP pathway in higher plants[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2009, 60(10): 2933.
- [30] 张松涛, 陈红丽, 崔红, 等. 植物 MEP 途径的代谢调控机制[J]. *西北植物学报*, 2012, 32(7): 1500-1504.
ZHANG S T, CHEN H L, CUI H, et al. Multiple regulation mechanisms of MEP pathway in plant[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2012, 32(7): 1500-1504.
- [31] BUSCH M, SEUTER A, HAIN R. Functional analysis of the early steps of carotenoid biosynthesis in tobacco[J]. *Plant Physiology*, 2002, 128(2): 439-453.
- [32] NUGROHO L H, VERPOORTE R. Secondary metabolism in tobacco[J]. *Plant Cell Tissue and Organ Culture*, 2002, 68(2): 105-125.