

烤烟类胡萝卜素类致香物质与土壤理化性状之间的关系研究^①

孟琦¹, 叶协锋^{1*}, 于晓娜¹, 李亚娟², 李志鹏¹, 徐敏³, 卢迪¹

(1 河南农业大学烟草学院, 郑州 450002; 2 河南科技大学农学院, 河南洛阳 471003; 3 河南省烟草专卖局, 郑州 450008)

摘要:通过分析河南省 12 个地市土壤与烟叶各 337 个样品的测试数据, 采用典型相关分析方法对烤烟类胡萝卜素类致香物质与土壤理化性状之间的关系进行研究。结果表明: 烤烟中类胡萝卜素类致香物质中 β -大马酮、假紫罗兰酮、6-甲基-5-庚烯-2-酮和巨豆三烯酮 2 与土壤中 Fe、Mg、Al、Ca 的含量呈较高的相关性, 土壤 pH、有机质、颗粒组成、Na 含量也对类胡萝卜素类致香物质中这 4 个指标有很大影响。

关键词: 烤烟; 类胡萝卜素; 致香物质; 土壤理化性状; 典型相关

中图分类号: S572

烟叶质量包括外观质量、内在质量、化学成分、物理特性、吸食品质 and 安全性等方面, 是一个综合性的概念, 受生态因子的影响较大^[1]。土壤、营养、土壤水分和空气的相互作用是影响烟叶品质的首要因素^[2], 这些因素必须相互补充才能生产出优质烟叶。

香气质量是评价烟叶品质和工业可用性的一个重要指标^[3]。类胡萝卜素类色素是烟叶重要致香物质的前提物, 类胡萝卜素类降解香气物质的种类与含量直接决定着烟叶的品质, 因此对类胡萝卜素类致香物质的研究在国内外烟草行业一直是一个热点^[4], 但目前对类胡萝卜素类致香物质与土壤属性之间关系的研究还鲜见报道。本文对烤后烟叶类胡萝卜素类致香物质含量与土壤理化性状的关系进行了系统研究, 旨在为烤烟香气的提质增量提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 样品的采集

2008 年在河南省郑州、洛阳、三门峡、商丘、平顶山、许昌、漯河、周口、南阳、驻马店、信阳、济源 12 个植烟地市进行样品采集, 在综合考虑土壤类型、地形地貌、海拔高度、栽培品种和技术水平下选择有代表性的样点 337 个, 采用五点取样法在烟草移栽施肥前分别采集耕层(0~20 cm)土壤样品 337 个, 每个土壤样品 2.0 kg, 对应采集烟叶样品 337 个(烟株自上而下 8~12 叶位), 每个烟叶样品 5.0 kg。

1.2 分析方法

1.2.1 土壤指标分析方法 pH、有机质、全氮、有效氮、速效磷、速效钾、氯、阳离子交换量、颗粒组成、全钾、全磷、铝、钙、铁、镁、锰、钠、硅、钛均采用常规分析方法测定^[5]。

1.2.2 类胡萝卜素类致香物质的分析方法 类胡萝卜素类致香物质含量由气质联谱仪 HP5890GC/HP5972MSD(美国 HP 公司)测定。具体步骤: 烤后样粉碎样→水蒸气蒸馏→二氯甲烷萃取(10 g 烟叶粉末 + 1 g 柠檬酸 + 350 ml 蒸馏水 + 0.5 ml 内标于 500 ml 圆底烧瓶中, 再加 60 ml 二氯甲烷于另一 250 ml 圆底烧瓶中, 60℃ 水浴加热 250 ml 圆底烧瓶, 用同时蒸馏萃取方法提取)→无水硫酸钠干燥有机相→60℃ 水浴浓缩至 1 ml 左右即得烟叶的精油。经前处理制备得到的分析样品, 由 GC/MS 鉴定结果和 NIST 库检索定性。GC/MS 分析条件如下: 色谱柱: HP-5(60 m×0.25 mm.i.d.×0.25 μ m.d.f.); 载气及流速: He 0.8 ml/min; 进样口温度: 50℃, 2 min 后, 以 2℃/min 的速度升至 240℃, 30 min; 分流比和进样量 1:15, 2 μ l; 电离能 70 eV; 质量数范围 50~500 amu; MS 谱库 NIST02; 采用内标定量。

经过测定, 烟叶中类胡萝卜素类降解产物主要包括 6-甲基-5-庚烯-2 酮、 β -大马酮、假紫罗兰酮、香叶基丙酮、 β -紫罗兰酮、二氢猕猴桃内酯、巨豆三烯酮、3-羟基- β -二氢大马酮、法尼基丙酮等 12 种香气物质。

基金项目: 河南省烟草公司科技计划项目(HYKJ201301)资助。

* 通讯作者(yexiefeng@163.com)

作者简介: 孟琦(1990—), 男, 河南杞县人, 硕士研究生, 主要从事烟草栽培生理研究。E-mail: 15003899568@163.com

1.3 统计分析方法

采用 DPS 数据处理系统进行典型相关分析^[6]。

为了便于分析,将土壤 pH (x_1)、有机质(x_2)、全氮(x_3)、有效氮 (x_4)、速效磷 (x_5)、速效钾 (x_6)、氯离子 (x_7)、全钾 (x_8)、全磷 (x_9) 看作第一组变量,将土壤阳离子交换量 (y_1)、粒径 >0.1 mm(较粗砂粒或石砾)(y_2)、粒径 $0.1 \sim 0.05$ mm(细砂粒)(y_3)、粒径 $0.05 \sim 0.01$ mm(粗粉粒)(y_4)、粒径 $0.01 \sim 0.001$ mm(细粉粒和粗黏粒)(y_5)、粒径 <0.001 mm(黏粒)(y_6)看作第二组变量(以上土粒分级参照中国粒级制分级标准^[7]),将土壤矿质元素含量包括铝 (z_1)、钙 (z_2)、铁 (z_3)、镁 (z_4)、锰 (z_5)、钠 (z_6)、硅 (z_7)、钛 (z_8) 看作第三组变量,将类胡萝卜素类致香物质包括 6-甲基-5-庚烯-2 酮(t_1)、 β -大马酮(t_2)、假紫罗兰酮(t_3)、香叶基丙酮(t_4)、 β -紫罗兰酮(t_5)、二氢猕猴桃内酯(t_6)、巨豆三烯酮 1(t_7)、巨豆三烯酮 2(t_8)、巨豆三烯酮 3(t_9)、巨豆三烯酮 4(t_{10})、3-羟基- β -二氢大马酮(t_{11})、法尼基丙酮(t_{12})看作一组变量。

2 结果与分析

2.1 烟叶中类胡萝卜素类致香物质的数量特征

由表 1 可知,类胡萝卜素类致香物质在样品间均

存在较大变异,其中以巨豆三烯酮 3 的变异系数最大,达到 183.66%;其次为三羟基- β -二氢大马酮(158.09%)、巨豆三烯酮 1(149.05%); β -大马酮的变异系数最小,但也达到了 45.60%。类胡萝卜素类致香物质的峰度系数均大于 0,为尖峭峰,数据分布比较集中。12 种致香物质的偏度系数均为正值,为正向偏态峰。

2.2 第一组土壤性状(土壤属性)与类胡萝卜素类致香物质的关系分析

2.2.1 土壤属性的数量特征 由表 2 可知,土壤样品的 pH 变化范围为 5.15 ~ 8.30,均值为 7.18,土壤相对集中在偏中性至碱性,变异系数最小,为 10.57%;其次为全钾,变异系数为 12.01%;速效磷变异系数最大,为 75.45%。pH 的峰度系数小于 0,为平阔峰,数据比较分散,其余指标的峰度系数均大于 0,为尖峭峰,数据分布相对集中;pH 和全钾的偏度系数小于 0,为负向偏态峰,其余指标均大于 0,为正向偏态峰。

2.2.2 土壤属性与类胡萝卜素类致香物质的典型相关分析 土壤属性与类胡萝卜素类致香物质的典型相关分析结果见表 3,得到 9 组典型变量,其中第

表 1 烟叶中类胡萝卜素类致香物质的描述性统计分析($\mu\text{g/g}$)
Table 1 Descriptive statistics of aroma carotenoid contents in flue-cured tobacco leaves

致香物质	样本数	最小值	最大值	平均值	标准差	变异系数(%)	峰度系数	偏度系数
6-甲基-5-庚烯-2-酮	337	0.00	8.41	1.42	0.98	69.21	8.08	2.11
β -大马酮	337	2.15	95.30	31.58	14.40	45.60	0.26	0.94
假紫罗兰酮	337	2.82	113.89	23.17	15.15	65.38	3.11	1.44
香叶基丙酮	337	2.70	89.88	8.86	6.18	69.80	87.07	7.05
β -紫罗兰酮	337	0.00	40.44	2.94	2.98	101.48	86.75	7.76
二氢猕猴桃内酯	337	0.00	94.06	8.90	6.85	76.98	81.52	7.35
巨豆三烯酮 1	337	0.00	88.56	4.29	6.39	149.05	116.07	9.82
巨豆三烯酮 2	337	4.59	113.89	16.59	12.46	75.09	20.89	3.44
巨豆三烯酮 3	337	0.79	90.04	3.68	6.76	183.66	128.23	10.71
巨豆三烯酮 4	337	4.46	235.65	20.83	19.54	93.81	54.68	5.81
三羟基- β -二氢大马酮	337	0.00	99.79	3.50	5.54	158.09	273.46	15.73
法尼基丙酮	337	0.00	250.66	24.30	22.63	93.14	46.98	5.30

表 2 土壤养分含量的描述性统计分析
Table 2 Descriptive statistics of soil nutrient contents

土壤属性	样本数	最小值	最大值	平均	标准差	变异系数(%)	峰度	偏度
pH	337	5.15	8.30	7.18	0.76	10.57	-0.49	-0.70
有机质 (g/kg)	337	5.40	36.10	12.77	3.41	26.69	11.03	2.06
全氮 (g/kg)	337	0.23	2.03	0.73	0.18	24.37	8.99	1.66
有效氮 (mg/kg)	337	23.16	102.06	59.45	14.92	25.10	0.01	0.31
速效磷 (mg/kg)	337	2.13	101.21	13.53	10.21	75.45	18.21	3.15
速效钾 (mg/kg)	337	32.35	868.22	142.69	78.21	54.81	27.84	4.06
氯 (mg/kg)	336	7.10	88.24	35.91	14.86	41.39	1.22	0.98
全钾 (g/kg)	337	9.89	27.54	18.28	2.20	12.01	1.77	-0.07
全磷 (g/kg)	337	0.24	5.99	0.60	0.35	58.77	162.86	10.78

1 组、第 2 组的典型相关系数均达到了 $P < 0.01$ 显著水平, 相关系数 λ 分别为: 0.668 7 和 0.464 0, 后 7 组则均未达到显著水平, 因此, 选择前两组典型变量进行主要分析。

由于原始变量的计量单位不同, 不宜进行直接比较, 通过标准化的典型系数给出典型相关模型 m 和相关系数 $r^{[8]}$, 由表 3 可知, 第 1 组典型变量为:

$$u_1 = -0.712 7x_1 + 0.300 3x_2 + 0.019 6x_3 + 0.143 8x_4 + 0.082 7x_5 + 0.1756x_6 - 0.006 2x_7 - 0.185 6x_8 - 0.093 1x_9$$

$$v_1 = 0.135 4t_1 + 0.374 5t_2 + 0.346 8t_3 + 0.100 5t_4 - 0.076 4t_5 - 0.849 8t_6 + 1.327 5t_7 + 1.017 2t_8 - 1.204 8t_9 - 0.636 7t_{10} + 0.074 8t_{11} + 0.287 2t_{12}$$

在极显著相关典型变量 I 中, 由 u_1 与原始数据 x_i 的相关系数可以看出, u_1 与 x_1 , 即 pH 呈较显著负相关, 相关系数为 -0.865 1, 因此 u_1 可以理解为主要描述随 pH 高低变化的综合指标。同样, 由 v_1 与 t_i 的相关系数可知, v_1 与假紫罗兰酮(t_3)、 β -大马酮(t_2)和巨豆三烯酮 2(t_8)存在较高的正相关, 相关系数分别为 0.847 5、0.787 7、0.662 1, 因此 v_1 可以理解为主要描述烤烟中假紫罗兰酮、 β -大马酮和巨豆三烯酮 2 的综合指标。由于 u_1 与 v_1 呈极显著相关, 说明 pH 对烤烟中假紫罗兰酮和 β -大马酮含量影响较大, 具体表现为在一定范围内随着 pH 的升高, 假紫罗兰酮、 β -大马酮和巨豆三烯酮 2 含量有降低趋势。

达到极显著相关水平的典型变量 II 为:

$$u_2 = -0.513 7x_1 - 0.781 2x_2 + 0.133 2x_3 - 0.180 2x_4 - 0.257 7x_5 - 0.056 4x_6 + 0.479 0x_7 - 0.092 2x_8 + 0.210 5x_9$$

$$v_2 = 0.366 5t_1 - 0.328 1t_2 + 0.458 0t_3 + 0.501 9t_4 - 0.644 0t_5 + 0.220 4t_6 - 3.415 5t_7 + 1.265 6t_8 + 4.278 2t_9 - 1.731 7t_{10} - 0.822 3t_{11} + 0.190 3t_{12}$$

在典型变量 II 中, 由 u_2 与原始数据 x_i 的相关系数可得, u_2 与有机质(x_2)呈较显著负相关, 相关系数为 -0.720 1, 因此 u_2 可以理解为主要描述随着有机质含量高低变化的综合指标。由 v_2 与 t_i 的相关系数可知, v_2 与 6-甲基-5-庚烯-2-酮(t_1)呈较高正相关, 相关系数为 0.413 5, 因此 v_2 可以理解为主要描述烤烟中 6-甲基-5-庚烯-2-酮含量的综合指标。此线性组合说明土壤中有有机质含量和烤烟中 6-甲基-5-庚烯-2-酮的含量关系密切, 表现为在一定范围内, 随着有机质含量的升高, 6-甲基-5-庚烯-2-酮的含量呈降低趋势。

2.3 第二组土壤性状(阳离子交换量及颗粒组成)与类胡萝卜素类致香物质的关系分析

2.3.1 土壤阳离子交换量及颗粒组成的数量特征
由表 4 可知, 土壤阳离子交换量及颗粒组成的变异系数均较大, 其中粒径 > 0.1 mm 的颗粒和粒径在 $0.1 \sim 0.05$ mm 之间的颗粒含量变异系数最大, 分别为 175.26% 和 108.15%, 其他指标变异系数较为接近; 阳离子交换量的峰度系数小于 0, 为平阔峰, 数据比较分散, 其余指标的峰度系数均大于 0, 为尖峭峰, 数据分布相对集中; 粒径 $0.05 \sim 0.01$ mm 颗粒的偏度系数小于 0, 为负向偏态峰, 其余指标均大于 0, 为正向偏态峰。

表 4 土壤阳离子交换量及颗粒组成的描述性统计分析
Table 4 Descriptive statistics of CEC and particle size fraction

土壤属性	样本数	最小值	最大值	平均值	标准差	变异系数(%)	峰度系数	偏度系数
阳离子交换量(cmol/kg)	337	2.40	29.01	13.97	4.94	35.37	-0.35	0.09
粒径 > 0.1 mm(g/kg)	337	0.12	800.32	56.13	98.38	175.26	25.48	4.49
粒径 $0.1 \sim 0.05$ mm(g/kg)	337	0.18	326.45	44.90	48.56	108.15	6.13	2.13
粒径 $0.05 \sim 0.01$ mm(g/kg)	337	40.40	828.28	446.82	115.36	25.82	0.40	-0.33
粒径 $0.01 \sim 0.001$ mm(g/kg)	337	20.20	585.86	235.32	74.64	31.72	1.81	0.21
粒径 < 0.001 mm(g/kg)	337	18.65	523.23	217.02	99.90	46.03	0.12	0.66

2.3.2 土壤阳离子交换量及颗粒组成与类胡萝卜素类致香物质的典型相关分析
土壤阳离子交换量及颗粒组成与类胡萝卜素类致香物质的典型相关分析结果见表 5, 得到 6 组典型变量, 其中第 1 组、第 2 组的典型相关系数均达到了极显著相关水平, 相关系数 λ 分别为: 0.387 4 和 0.317 0, 后 4 组不显著。因此, 选择前两组典型变量进行主要分析。

第 1 组典型变量为:

$$u_1 = 0.049 6y_1 + 0.476 1y_2 + 0.091 3y_3 + 0.410 4y_4 + 0.952 5y_5 - 0.374 9y_6$$

$$v_1 = 0.164 1t_1 + 0.635 1t_2 + 0.042 4t_3 + 0.426 7t_4 - 0.065 1t_5 + 0.336 4t_6 + 3.442 5t_7 + 1.345 6t_8 - 2.137 4t_9 - 3.041 1t_{10} - 0.347 9t_{11} - 0.147 4t_{12}$$

在达到极显著相关的典型变量 I 中, 由 u_1 与原始数据 x_i 的相关系数可以看出, u_1 与粒径 < 0.001 mm 颗粒(y_6)存在较高的负相关, 相关系数为 -0.702 7, 和粒径 $0.01 \sim 0.001$ mm 颗粒(y_5)存在较高的正相关, 相关系数为 0.674 8, 因此 u_1 可以理解为主要描述粒径 < 0.001 mm 颗粒和粒径 $0.01 \sim 0.001$ mm 颗粒的综合指标。由 v_1 与 t_i 的相关系数可知, v_1 与 β -大马

表 5 土壤阳离子交换量及颗粒组成与烤烟类胡萝卜素类致香物质的典型相关分析

Table 5 Canonical correlation between soil CEC, particle components and aroma constituents of aroma carotenoids in flue-cured tobacco leaves

变量	典型变量		典型变量		典型变量		典型变量		典型变量		典型变量	
	<i>m</i>	<i>r</i>	<i>m</i>	<i>r</i>	<i>m</i>	<i>r</i>	<i>m</i>	<i>r</i>	<i>m</i>	<i>r</i>	<i>m</i>	<i>r</i>
<i>y</i> ₁	0.049 6	-0.127 5	-0.678 6	0.196 9	0.315 1	-0.084 2	-0.073 1	-0.115 9	1.192 8	0.951 2	0.167 0	0.140 1
<i>y</i> ₂	0.476 1	0.030 0	-1.360 6	-0.039 8	-0.199 6	0.827 7	-1.101 3	0.465 3	-0.868 2	-0.241 2	7.206 4	0.194 2
<i>y</i> ₃	0.091 3	-0.359 9	-1.027 2	-0.435 4	-0.038 4	0.332 0	-1.636 1	-0.650 8	-0.461 9	-0.333 9	3.285 0	-0.188 9
<i>y</i> ₄	0.410 4	0.289 3	-1.946 5	-0.648 4	-1.476 6	-0.638 1	-1.492 2	0.181 6	-1.048 4	-0.179 8	8.102 5	-0.153 1
<i>y</i> ₅	0.952 5	0.674 8	-0.464 6	0.554 2	-0.612 3	-0.208 8	-1.653 1	-0.301 9	-0.814 9	0.317 4	5.315 1	0.046 4
<i>y</i> ₆	-0.374 9	-0.702 7	-0.656 3	0.567 5	-1.241 9	-0.108 2	-1.397 6	-0.151 1	-1.231 1	0.347 8	7.034 7	0.169 4
<i>t</i> ₁	0.164 1	0.391 8	-0.069 6	-0.517 0	-0.282 5	-0.546 4	-0.026 2	-0.022 8	0.081 5	-0.091 0	0.118 7	-0.013 5
<i>t</i> ₂	0.635 1	0.650 6	0.269 7	-0.235 4	0.110 5	-0.491 3	-0.137 8	0.033 0	1.464 8	0.141 2	-1.207 7	-0.385 2
<i>t</i> ₃	0.042 4	0.587 2	0.342 0	-0.046 3	-0.564 8	-0.584 8	1.102 0	0.191 6	-0.568 7	-0.131 6	0.747 0	-0.225 6
<i>t</i> ₄	0.426 7	0.437 5	-1.414 5	-0.236 2	1.279 3	-0.320 3	0.512 1	0.045 1	-2.529 2	-0.329 7	-0.729 4	-0.267 8
<i>t</i> ₅	-0.065 1	0.230 1	0.900 1	-0.133 0	-1.961 0	-0.371 1	-1.473 6	-0.075 3	1.721 4	-0.045 0	3.644 1	-0.214 2
<i>t</i> ₆	0.336 4	0.275 9	-1.666 6	-0.228 4	1.249 7	-0.262	-0.526 3	-0.073 9	0.676 4	-0.000 4	0.414 0	-0.286 4
<i>t</i> ₇	3.442 5	0.183 3	2.038 7	0.040 0	1.871 3	-0.193 6	-0.912 8	-0.174 1	0.418 9	0.066 0	1.804 5	-0.222 0
<i>t</i> ₈	1.345 6	0.346 7	0.726 0	-0.112 1	1.663 6	-0.429 8	2.851 2	0.073 9	1.431 3	0.017 6	-0.178 1	-0.391 5
<i>t</i> ₉	-2.137 4	0.027 2	-1.184 4	-0.039 2	0.801 8	-0.204 7	3.517 8	-0.105 8	0.029 2	0.044 3	-3.177 8	-0.286 5
<i>t</i> ₁₀	-3.041 1	0.243 3	-1.247 5	-0.122 8	-3.534 3	-0.429 2	-4.925 0	-0.088 5	-2.978 7	0.057 1	-1.746 7	-0.330 7
<i>t</i> ₁₁	-0.347 9	0.154 7	1.449 6	0.182 9	-0.889 6	-0.202 3	-0.643 5	-0.012 4	-0.058 0	-0.322 1	-0.804 2	-0.339 8
<i>t</i> ₁₂	-0.147 4	0.086 4	0.098 4	-0.168 1	-0.310 6	-0.397 5	1.090 2	0.164 1	0.378 6	0.176 4	0.389 3	-0.055 0
λ	0.387 4**		0.317 0**		0.298 5		0.224 3		0.132 4		0.063 9	
<i>p</i>	0.000 1		0.002 5		0.063 7		0.632 3		0.971 1		0.987 5	

酮(*t*₂)、假紫罗兰酮(*t*₃)存在较高的正相关, 相关系数分别为 0.650 6 和 0.587 2, 因此 *v*₁ 可以理解为主要描述烤烟中 β-大马酮和假紫罗兰酮的综合指标。由于 *u*₁ 与 *v*₁ 呈极显著相关, 说明粒径 <0.001 mm 颗粒和粒径 0.01 ~ 0.001 mm 颗粒含量对烤烟中 β-大马酮和假紫罗兰酮含量影响较大, 具体表现为在一定范围内, 随着粒径 <0.001 mm 颗粒含量的升高, β-大马酮和假紫罗兰酮含量呈降低趋势; 随着粒径 0.01 ~ 0.001 mm 颗粒含量的升高, β-大马酮和假紫罗兰酮含量呈增加趋势。

第 2 组典型变量为:

$$u_2 = -0.678\ y_1 - 1.360\ y_2 - 1.027\ y_3 - 1.946\ y_4 - 0.464\ y_5 - 0.656\ y_6$$
$$v_2 = -0.069\ t_1 + 0.269\ t_2 + 0.342\ t_3 - 1.414\ t_4 + 0.900\ t_5 - 1.666\ t_6 + 2.038\ t_7 + 0.726\ t_8 - 1.184\ t_9 - 1.247\ t_{10} + 1.449\ t_{11} + 0.098\ t_{12}$$

在典型变量 II 中, 由 *u*₂ 与原始数据 *x_i* 的相关系数可得, *u*₂ 与粒径 0.05 ~ 0.01 mm 颗粒(*y*₄)呈较显著负相关, 相关系数为 -0.648 4, 因此 *u*₂ 可以理解为主要描述粒径 0.05 ~ 0.01 mm 颗粒含量的综合指标。由 *v*₂ 与 *t_i* 的相关系数可知, *v*₂ 与 6-甲基-5-庚烯-2-酮(*t*₁)呈较高负相关, 相关系数为 -0.517 0, 因此 *v*₂ 可以理

解为主要描述烤烟中 6-甲基-5-庚烯-2-酮含量的综合指标。此线性组合说明土壤中粒径 0.05 ~ 0.01 mm 颗粒含量和烤烟中 6-甲基-5-庚烯-2-酮的含量关系密切, 表现为在一定范围内, 随着粒径 0.05 ~ 0.01 mm 颗粒含量的升高, 6-甲基-5-庚烯-2-酮的含量呈增加趋势。

由表 5 可知, 阳离子交换量与类胡萝卜素类致香物质间关系不显著。

2.4 第三组土壤性状(矿质元素全量)与类胡萝卜素类致香物质的关系分析

2.4.1 土壤矿质元素含量的数量特征 由表 6 可知, Si 的变异系数最小, 仅为 7.53%; 其次为 Ti 和 Al, 分别为 12.14% 和 13.66%; Ca 的变异系数最大, 为 43.89%。Al、Ca 和 Fe 的峰度系数小于 0, 为平阔峰, 数据比较分散; 其他 5 种矿质元素的峰度系数均大于 0, 为尖峭峰, 数据较为集中。Al 和 Si 的偏度系数小于 0, 为负向偏态峰; 其余指标的偏度系数均大于 0, 为正向偏态峰。

2.4.2 土壤矿质元素与类胡萝卜素类致香物质的典型相关分析 土壤矿质元素与类胡萝卜素类致香物质的典型相关分析结果见表 7, 得到 8 组典型变量,

表 6 土壤矿质元素含量的描述性统计分析(mg/kg)
Table 6 Descriptive statistics of soil mineral element contents

矿质元素	样本数	最小值	最大值	平均值	标准差	变异系数(%)	峰度系数	偏度系数
Al	337	34.77	87.66	65.06	8.89	13.66	-0.05	-0.25
Ca	337	2.28	16.21	6.90	3.03	43.89	-0.56	0.60
Fe	337	15.81	49.11	31.05	6.84	22.02	-0.63	0.09
Mg	337	3.65	23.47	8.62	2.55	29.58	2.40	0.73
Mn	337	0.27	3.60	0.63	0.24	38.07	71.82	6.27
Na	337	3.09	31.19	11.24	4.18	37.18	6.81	2.17
Si	337	180.59	390.96	296.89	22.37	7.53	3.89	-0.70
Ti	337	2.17	8.17	4.39	0.53	12.14	9.49	0.87

其中第 1 组、第 2 组的典型相关系数均达到了极显著相关水平, 相关系数 λ 分别为: 0.542 6 和 0.489 9, 后 6 组则不显著, 因此, 选择前两组典型变量进行主要分析。

第 1 组典型变量为:

$$u_1 = -0.009 1z_1 - 0.196 1z_2 - 0.788 1z_3 - 0.156 6z_4 - 0.132 4z_5 - 0.196 1z_6 + 0.322 8z_7 + 0.196 7z_8$$
$$v_1 = 0.123 8t_1 - 0.005 8t_2 + 0.064 5t_3 + 0.866 2t_4 - 0.417 9t_5 + 0.053 0t_6 - 0.069 8t_7 + 1.418 2t_8 - 0.193 2t_9 - 0.852 7t_{10} - 0.747 6t_{11} + 0.399 4t_{12}$$

在典型变量 I 中, 由 u_1 与原始数据 x_i 的相关系数可以看出, u_1 与 $Fe(z_3)$ 、 $Mg(z_4)$ 、 $Al(z_1)$ 、 $Ca(z_2)$ 均存在较高的负相关, 相关系数分别为 -0.825 6、-0.809 6、-0.764 4、-0.624 1, 因此 u_1 可以理解为主要描述 Fe、Mg、Al、Ca 含量的综合指标。由 v_1 与 t_i 的相关系数可知, v_1 与 β -大马酮(t_2)、假紫罗兰酮(t_3)、6-甲基-5-庚烯-2-酮(t_1)、巨豆三烯酮 2(t_8) 均存在较高的正相关, 相关系数分别为 0.743 3、0.740 1、0.701 8 和 0.673 8, 因此 v_1 可以理解为主要描述烤烟中 β -大马酮、假紫罗兰酮、6-甲基-5-庚烯-2-酮和巨豆三烯酮 2 的综合指标。由于 u_1 与 v_1 呈极显著相关, 说明 Fe、Mg、Al、Ca 含量对烤烟中 β -大马酮、假紫罗兰酮、6-甲基-5-庚烯-2-酮和巨豆三烯酮 2 含量影响较大, 具体表现为在一定范围内, 随着土壤中 Fe、Mg、Al、Ca 含量的升高, 烤烟中 β -大马酮、假紫罗兰酮、6-甲基-5-庚烯-2-酮和巨豆三烯酮 2 含量呈降低趋势。

第 2 组典型变量为:

$$u_2 = 0.593 7z_1 + 0.501 0z_2 + 0.056 8z_3 - 0.798 7z_4 - 0.231 2z_5 + 0.921 7z_6 - 0.365 8z_7 - 0.020 9z_8$$
$$v_2 = 0.140 3t_1 - 0.555 3t_2 - 0.514 9t_3 + 0.535 7t_4 + 0.358 2t_5 + 0.334 8t_6 - 2.340 4t_7 - 3.533 0t_8 - 1.090 2t_9 + 6.042 5t_{10} + 0.028 4t_{11} + 0.142 9t_{12}$$

在典型变量 II 中, 由 u_2 与原始数据 x_i 的相关系数可得, u_2 与 $Na(z_6)$ 存在较高的正相关, 相关系数为 0.824 8, 因此 u_2 可以理解为主要描述 Na 含量的综合指标。由 v_2 与 t_i 的相关系数可知, v_2 与 6-甲基-5-庚

烯-2-酮(t_1)呈较高正相关, 相关系数为 0.412 2, 因此, v_2 可以理解为主要描述烤烟中 6-甲基-5-庚烯-2-酮含量的综合指标。此线性组合说明土壤中 Na 含量和烤烟中 6-甲基-5-庚烯-2-酮的含量关系密切, 表现为在一定范围内, 随着土壤中 Na 含量的升高, 烤烟中 6-甲基-5-庚烯-2-酮的含量呈增加趋势。

2.5 讨论

从以上分析结果来看, 烤烟中类胡萝卜素类致香物质中始终是某几个指标与土壤理化性状中的指标呈较高的相关性, 分别是 β -大马酮、假紫罗兰酮、6-甲基-5-庚烯-2-酮和巨豆三烯酮 2, 而土壤中 Fe、Mg、Al、Ca 的含量与这 4 个指标均关系密切, 且存在一致的负相关。此外, 土壤其他指标如 pH、有机质、颗粒组成、Na 含量也对类胡萝卜素类致香物质中这 4 个指标有很大影响。

2.5.1 pH 与有机质对类胡萝卜素类致香物质的影响 土壤 pH 和有机质是评价土壤肥力水平的重要的综合指标, 它们的变化将直接影响到整个烟田的土壤环境及烟叶生产^[9]。土壤 pH 对土壤养分转化及其有效性有巨大影响^[10-11], 不适宜的土壤 pH 还可能降低土壤微生物的活性, 进而影响烤烟对养分的吸收。本试验结果表明: 土壤 pH 在 5.15 ~ 8.30 范围内, 随着 pH 的升高, 假紫罗兰酮、 β -大马酮和巨豆三烯酮 2 含量呈降低趋势, 这说明土壤弱酸性环境有助于假紫罗兰酮、 β -大马酮和巨豆三烯酮 2 含量的提高。相对而言, 我国清香型烤烟的土壤一般酸性较高, 据赵铭钦等^[12]研究表明, 云南等清香型烤烟中 β -大马酮和巨豆三烯酮 2 含量明显高于河南、湖南等浓香型烤烟和贵州、吉林等中间香型烤烟, 这与我们的研究结果基本一致。

土壤有机质含量是衡量土壤肥力高低的一个重要指标, 它和矿物质紧密地结合在一起^[13], 尽管它所占土壤总量比例很小, 但它对土壤的形成、肥力和理化性质及土壤结构的影响很大, 并且是微生物活动

Table 7 Canonical correlation between soil mineral elements and aroma constituents of aroma carotenoids in flue-cured tobacco leaves

变量	典型变量 I			典型变量 II			典型变量 III			典型变量 IV			典型变量 V			典型变量 VI			典型变量 VII			典型变量 VIII		
	m	r		m	r		m	r		m	r		m	r		m	r		m	r		m	r	
z ₁	-0.009 1	-0.764 4	0.593 7	-0.127 5	0.907 3	0.411 8	2.412 4	-0.061 5	0.356 6	-0.282 0	-2.472 3	-0.358 7	0.438 7	0.130 5	0.004 2	-0.029 0								
z ₂	-0.196 1	-0.624 1	0.501 0	0.186 6	-0.814 1	-0.605 7	-0.473 5	0.093 8	0.125 9	-0.226 6	-0.931 5	-0.149 2	-0.506 3	-0.188 1	0.430 1	0.301 7								
z ₃	-0.788 1	-0.825 6	0.056 8	-0.236 9	-0.373 4	0.358 5	-3.614 4	-0.245 1	-0.206 3	-0.188 2	2.237 6	-0.189 2	0.630 9	-0.003 1	0.053 7	-0.049 7								
z ₄	-0.156 6	-0.809 6	-0.798 7	-0.152 5	0.263 6	-0.129 6	1.325 2	0.283 7	-0.578 4	-0.401 5	1.011 3	0.128 6	-0.343 6	-0.053 8	0.138 4	0.208 2								
z ₅	-0.132 4	-0.476 8	-0.231 2	-0.365 2	-0.398 8	0.010 9	0.393 8	-0.105 3	0.115 0	-0.028 4	-0.207 2	-0.237 3	-0.135 2	-0.266 8	-1.154 6	-0.707 0								
z ₆	-0.196 1	0.152 4	0.921 7	0.824 8	0.198 7	-0.021 2	-0.091 6	0.145 8	-0.163 2	-0.399 5	0.481 7	0.258 0	-0.049 6	-0.090 0	-0.463 6	-0.201 1								
z ₇	0.322 8	0.233 9	-0.365 8	-0.068 2	-0.362 7	0.082 9	-0.558 7	-0.178 0	-0.889 2	-0.894 0	-0.018 0	-0.281 5	0.427 6	0.046 2	-0.070 6	-0.146 4								
z ₈	0.196 7	-0.079 3	-0.020 9	-0.202 4	0.567 8	0.598 7	0.380 2	-0.298 7	-0.004 3	-0.263 0	-0.339 7	-0.261 5	-1.324 6	-0.581 8	0.444 3	-0.170 2								
t ₁	0.123 8	0.701 8	0.140 3	0.412 2	-0.223 6	-0.040 5	-0.915 4	-0.250 0	0.534 2	0.226 5	-0.094 3	0.078 4	0.331 4	0.112 2	0.653 5	0.272 8								
t ₂	-0.005 8	0.743 3	-0.555 3	-0.101 4	0.729 4	0.297 5	0.345 2	0.388 5	0.676 5	0.165 7	-0.680 8	0.099 7	1.077 4	0.274 8	-0.063 4	0.175 7								
t ₃	0.064 5	0.740 1	-0.514 9	-0.227 8	0.090 7	0.247 5	0.532 8	0.298 2	1.305 2	0.215 0	0.072 7	0.248 8	-0.761 2	0.024 5	-0.273 8	0.236 8								
t ₄	0.866 2	0.567 0	0.535 7	-0.027 4	-1.167 6	-0.051 2	0.244 7	0.317 0	-0.677 5	-0.033 7	2.171 4	0.342 2	-0.307 4	0.389 9	-2.672 6	0.177 9								
t ₅	-0.417 9	0.426 2	0.358 2	-0.034 9	1.288 0	0.067 7	0.668 5	0.356 0	-2.928 0	-0.122 8	-3.045 9	0.263 2	-1.573 0	0.452 3	3.663 9	0.426 9								
t ₆	0.053 0	0.459 8	0.334 8	-0.031 0	-1.360 0	-0.076 2	1.374 4	0.375 7	-0.282 0	-0.053 7	-0.100 2	0.286 6	0.887 0	0.540 9	0.160 3	0.408 3								
t ₇	-0.069 8	0.253 6	-2.340 4	-0.141 9	-2.546 0	0.007 8	0.252 3	0.305 8	-0.304 4	-0.076 5	0.790 8	0.399 0	-1.540 8	0.376 8	2.393 0	0.491 7								
t ₈	1.418 2	0.673 8	-3.533 0	-0.199 0	-1.443 8	0.173 7	-2.404 3	0.125 3	-1.471 8	-0.084 4	-2.013 0	0.292 4	0.821 8	0.326 6	0.424 5	0.373 2								
t ₉	-0.193 2	0.218 9	-1.090 2	-0.082 7	0.949 2	0.045 7	-1.420 6	0.272 7	2.489 3	-0.105 3	-0.359 1	0.327 4	3.654 9	0.522 5	-3.651 8	0.402 4								
t ₁₀	-0.852 7	0.534 4	6.042 5	-0.055 1	3.662 4	0.172 0	1.520 8	0.229 7	0.008 3	-0.060 2	4.123 8	0.349 7	-1.693 5	0.354 6	-0.853 6	0.437 2								
t ₁₁	-0.747 6	0.120 4	0.028 4	-0.176 0	0.651 6	-0.076 2	-0.631 3	0.214 3	1.130 6	0.098 5	0.279 2	0.338 0	0.269 9	0.476 1	1.014 9	0.318 6								
t ₁₂	0.399 4	0.457 0	0.142 9	0.129 6	-0.741 1	-0.199 6	0.144 7	0.302 1	0.659 4	0.140 4	-0.812 8	0.001 4	-0.271 0	0.328 4	-0.193 7	0.371 9								
λ	0.542 6**		0.489 9**		0.308 4		0.231 3		0.199 8		0.156 0		0.070 6		0.060 3									
p	0.000 1		0.000 1		0.098 4		0.600 5		0.841 2		0.966 0		0.996 7		0.946 2									

所需能量的源泉,能协调均衡营养的供给,保证烟株的生长发育。本试验结果表明:土壤有机质含量在 5.40 ~ 36.10 g/kg 范围内,随着有机质含量的升高,6-甲基-5-庚烯-2-酮的含量呈降低趋势。有机质含量过高会导致在烟叶生长中后期土壤氮素矿化过多,超出烟叶适宜营养水平,进而对烟叶品质产生不良影响,这可能是导致 6-甲基-5-庚烯-2-酮的含量呈降低趋势的原因。因此,我们在研究如何提高土壤有机质含量的时候,为使烤烟有较好的香气质量,应该保持土壤有机质含量在适宜范围内。

2.5.2 颗粒组成对类胡萝卜素类致香物质的影响 土壤颗粒组成情况与土壤的蓄水、导水、保肥、供肥、保温、导温和耕性等功能联系紧密,甚至起决定性作用,因此它也会对烟株生长和烟叶品质产生一定的影响^[14]。本试验结果表明:在一定范围内,粒径<0.001 mm 颗粒含量与 β -大马酮和假紫罗兰酮含量呈负相关;粒径 0.01 ~ 0.001 mm 颗粒含量与 β -大马酮和假紫罗兰酮含量呈正相关;粒径 0.05 ~ 0.01 mm 颗粒含量与 6-甲基-5-庚烯-2-酮的含量呈正相关。因此,粒径 0.001 ~ 0.05 mm 颗粒含量的增加有助于香气物质含量的增加,粒径<0.001 mm 颗粒含量的增加将导致香气物质含量的降低。中国粒级制中土壤粒径介于 0.05 mm 和 0.001 mm 之间的土壤颗粒属于粗粉粒、细粉粒和粗黏粒,粒径<0.001 mm 的颗粒属于黏粒^[7]。本试验测定结果中土壤粒径介于 0.05 mm 和 0.001 mm 之间的土壤颗粒百分含量变化范围在 8.08% ~ 92.93% 之间,随着百分含量的增加,土壤由黏土组中的重黏土逐渐过渡到壤土组, β -大马酮、假紫罗兰酮和 6-甲基-5-庚烯-2-酮的含量也随之增加。黏土类由于含黏粒多,粒间孔隙很小,导致其通气不良、透水性差,而且养分供应迟缓,烟株前、中期生长缓慢,导致烟叶贪青晚熟,不利于优质烟叶的生产^[15-16]。而壤土中黏粒、砂粒、粉粒的比例适当,保水保肥又有一定的排水通气性,是烟叶生产上比较理想的土壤质地^[17]。

2.5.3 矿质元素对类胡萝卜素类致香物质的影响 矿质元素对烟叶产量、质量有重大影响,在烟株生长发育过程中有着重要的生理作用。如 Fe 在光合作用和呼吸作用电子传递中都有不可替代的作用,而且缺 Fe 会使叶绿素、类胡萝卜素和核酸减少;Mg 是叶绿素的组成成分,多种酶的活化剂,而且能增加类胡萝卜素含量;Ca 能稳定膜结构,活化多种酶,促进根毛形成,除此之外还有助于保持烟草生长的理想土壤 pH;Al 是植物生长发育的有益元素;Na 能够影响植物水分平衡和细胞伸展^[3]。本试验结果表明:在一定范围内,随着土壤中 Fe、Mg、Al、Ca 含量的升高,

烤烟中 β -大马酮、假紫罗兰酮、6-甲基-5-庚烯-2-酮和巨豆三烯酮 2 含量呈降低趋势;随着土壤中 Na 含量的升高,烤烟中 6-甲基-5-庚烯-2-酮的含量呈增加趋势。这可能是由于河南烟区土壤的成土母质基本均是黄土或黄土性物质,石灰性较强,土壤富含 Ca、Mg 等元素^[16]。

3 结论

(1) 河南烤烟中类胡萝卜素类致香物质中 β -大马酮、假紫罗兰酮、6-甲基-5-庚烯-2-酮和巨豆三烯酮 2 与土壤性状中的 Fe、Mg、Al、Ca 的含量关系密切,且存在一致的负相关。此外,土壤其他指标如 pH、有机质、颗粒组成、Na 含量也对类胡萝卜素类致香物质中这 4 个指标有很大影响。

(2) 总体上看,在弱酸性、有机质含量适中、矿质元素协调的壤土土质上种植烤烟可一定程度上增加烤烟中类胡萝卜素类致香物质的含量。

(3) 如何剥离烤烟中类胡萝卜素类致香物质中 β -大马酮、假紫罗兰酮、6-甲基-5-庚烯-2-酮和巨豆三烯酮 2 与土壤 pH、有机质、颗粒组成、Fe、Mg、Al、Ca、Na 属性之间单一对应的关系,将是下一步研究的重点和难点。

参考文献:

- [1] 刘国顺. 烟草栽培学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003
- [2] Weybrew JA, Ismail W, Long RC. The cultural management of flue-cured tobacco quality[J]. Tobacco Science, 1983, 27: 56-61
- [3] 叶协锋, 李佳颖, 张腾, 孟琦, 王维超, 王英元, 孙永军, 于建军. 烤烟苯丙氨酸类致香物质与土壤理化性状的典型相关分析[J]. 土壤, 2013, 45(2): 277-284
- [4] 韦凤杰, 刘国顺, 杨永锋, 王芳, 李亚娟, 郭巧燕. 烤烟成熟过程中类胡萝卜素变化与其降解香气物质关系[J]. 中国农业科学, 2005, 38(9): 1 882-1 889
- [5] 张甘霖, 龚子同. 土壤调查实验室分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 2012
- [6] 唐启义, 冯明光. 实用统计分析及其 DPS 数据处理系统[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 393-400
- [7] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 74-77, 205-208
- [8] 许自成, 陈伟, 肖汉乾, 吴军, 黄平俊. 烤烟硝酸盐含量与土壤养分的关系[J]. 生态学报, 2006, 26(6): 1 889-1 895
- [9] 邓玉龙, 张乃明. 设施土壤 pH 值与有机质演变特征研究[J]. 生态环境, 2006, 15(2): 367-370
- [10] Tephenson MG, Parker MB. Manganese and soil pH effects on yield and quality of flue-cured tobacco[J]. Tobacco Science, 1987, 31: 104

- [11] 唐莉娜, 熊德中. 土壤酸度的调节对烤烟根系生长与烟叶化学成分含量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2002, 10(4): 65–67
- [12] 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
- [13] 沈其荣. 土壤肥料学通论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001
- [14] 胡国松, 郑伟, 王振. 烤烟营养原理[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 57–59
- [15] 闫克玉, 赵铭钦. 烟草原料学[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 89–91
- [16] 叶协锋, 刘国顺, 凌爱芬, 史宏志, 李亚娟, 朱海滨, 李世清. 烤烟巨豆三烯酮含量与土壤理化性状的典型相关分析[J]. 生态学报, 2009, 29(8): 4 223–4 230
- [17] 左天觉, 朱尊权. 烟草的生产、生理和生物化学[M]. 上海: 上海远东出版社, 1993

Relationship Between Aroma Carotenoid Contents in Flue-cured Tobacco Leaves and Soil Physicochemical Properties

MENG Qi¹, YE Xie-feng^{1*}, YU Xiao-na¹, LI Ya-juan², LI Zhi-peng¹, XU Min³, LU Di¹

(1 College of Tobacco Science, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China; 2 College of Agronomy, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471003, China; 3 Henan Tobacco Monopoly Administration, Zhengzhou 450008, China)

Abstract: 337 soil samples in 0 – 20 cm depth and the corresponding flue-cured tobacco samples from 8 to 12 leaf position were collected and analyzed from 12 regions in Henan Province in 2008 and canonical correlation analyses were conducted to study the relations between aroma constituent contents of aroma carotenoid in flue-cured tobacco leaves and soil physicochemical properties. Study found that beta Malaysia ketone, fake ionone, 6-methyl-5-heptene-2-ketone and megastigmatrienone 2 of carotenoid kind of aroma substances in flue-cured tobacco were significantly correlated with the contents of Ca, Fe, Mg and Al in soil. Soil pH, particle composition, organic matter and Na contents also had great effect on the four aroma indexes.

Key words: Flue-cured tobacco, Carotenoid, Aroma constituent, Soil physicochemical properties, Canonical correlation analysis