河南农业科学,2020,49(12):33-40
Journal of Henan Agricultural Sciences
doi:10.15933/j.cnki.1004-3268.2020.12.005

镁、锰对烤烟 DXP 途径中间物质及部分有机酸、高级脂肪酸含量的影响

李国明[1],祖庆学[2],冯裕祥[2],廖　恒[3],张　涵[1],陆引罡[1,4]
(1.贵州大学 农学院,贵州 花溪 550025;2.贵阳市烟草公司开阳县分公司,贵州 开阳 550300;
3.贵州省土壤肥料研究所,贵州 花溪 550025;4.贵州省烟草品质研究重点实验室,贵州 贵阳 550025)

摘要:为探究烤烟烟叶香气物质产生的调控方法,选取贵州烟区主栽品种云烟 87,分析镁、锰不同施用量条件下烤烟 1-脱氧-D-木酮糖-5-磷酸(DXP)途径相关物质(丙酮酸、DXP、IPP、西柏三烯二醇)及部分有机酸、高级脂肪酸含量的变化。结果表明:烤烟西柏三烯二醇及部分高级脂肪酸(油酸、亚油酸)含量随生育进程均表现出先增加后降低的趋势,苹果酸含量表现出逐渐升高的趋势,柠檬酸含量表现为先降低后升高的趋势;就 DXP 途径相关产物而言,施镁条件下,β-西柏三烯二醇含量与 DXP、IPP 含量无显著相关性,但其余各项指标间均呈显著或极显著正相关关系;施锰条件下,DXP 含量与丙酮酸、IPP、β-西柏三烯二醇含量无显著相关性,但其余各项指标间呈显著或极显著正相关关系;与 CK 相比,施用镁、锰均在不同程度上提高烟叶 DXP 途径相关物质及部分有机酸、高级脂肪酸的含量,且在施用量 0~20 g/株内随施用量增加而增加,施硫酸镁比施硫酸锰效果更好;硫酸镁施用量 20 g/株时,成熟期烤烟(α、β)-西柏三烯二醇含量较 CK(不施镁、锰)分别提高了 11.99%、36.72%,苹果酸、柠檬酸含量分别提高 21.77%、19.71%,油酸、亚油酸含量分别提高 27.46%、43.38%,整体效果最好。综上所述,施用镁、锰有利于烤烟 DXP 途径相关物质和有机酸的累积,有望促进烤烟香气物质的合成,改善烤烟品质。

关键词:烤烟;镁;锰;1-脱氧-D-木酮糖-5-磷酸;有机酸;高级脂肪酸
中图分类号:S572　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1004-3268(2020)12-0033-08

Effects of Magnesium and Manganese on Contents of DXP Pathway Intermediate Substances, Some Organic Acids and Advanced Fatty Acids in Flue-cured Tobacco

LI Guoming[1], ZU Qingxue[2], FENG Yuxiang[2], LIAO Heng[3], ZHANG Han[1], LU Yingang[1,4]
(1. College of Agriculture, Guizhou University, Huaxi 550025, China; 2. Kaiyang Branch of Guiyang Tobacco Company, Kaiyang 550300, China; 3. Guizhou Soil and Fertilizer Research Institute, Huaxi 550025, China; 4. Guizhou Key Laboratory of Tobacco Quality Research, Guiyang 550025, China)

Abstract: In order to explore the regulation methods for the production of aroma substances in flue-cured tobacco leaves, Yunyan 87, the main planting variety in Guizhou tobacco area, was selected to analyze the content change of the related substances of flue-cured tobacco DXP pathway(pyruvate, DXP, IPP, cembra triene diol) and some organic acids and higher fatty acids under different application rates of magnesium and manganese. The results showed that the contents of flue-cured tobacco cembra triene diol and some

收稿日期:2020-06-05
基金项目:贵州省烟草公司贵阳市公司科技项目〔筑烟科(2019)2 号〕;贵州省烟草公司遵义市公司科技项目〔遵烟计(2016)1 号〕
作者简介:李国明(1995-),男,河南漯河人,在读硕士研究生,研究方向:植物营养学。E-mail:2510974557@qq.com
通信作者:陆引罡(1962-),男,江苏启东人,教授,博士,主要从事植物生理与遗传研究。E-mail:agr.yglu@gzu.edu.cn

higher fatty acids(oleic acid, linoleic acid) showed a trend of first increasing and then decreasing with the growth process, the content of malic acid showed a gradually increasing trend, and the content of citric acid showed a tend of first decreasing and then increasing; Regarding the related products of the DXP pathway, under the condition of magnesium application, the content of β-cembra triene diol had no significant correlation with the content of DXP and IPP, but there was a significant or extremely significant positive correlation between the other indicators; Under the condition of manganese application, there was no significant correlation between the content of DXP and the contents of pyruvate, IPP, and β-cembra triene diol, but there was a significant or extremely significant positive correlation among the other indicators. Compared with CK, applying magnesium and manganese could increase the content of DXP pathway related substances and some organic acids and higher fatty acids in tobacco leaves to varying degrees, and increase with the increase of application rate within the application range of 0—20 g/plant, magnesium sulfate was more effective than manganese sulfate; It was the best effect when the application rate of magnesium sulfate was 20 g/plant, the content of(α, β)-cembra triene diol in mature flue-cured tobacco increased by 11.99% and 36.72%, respectively, and the content of malic acid and citric acid contents increased by 21.77% and 19.71%, respectively; The content of oleic acid and linoleic acid increased by 27.46% and 43.38%, respectively. In summary, the application of magnesium and manganese are beneficial to the accumulation of related substances in the DXP pathway and organic acid of flue-cured tobacco, which is expected to promote the synthesis of aroma substances in flue-cured tobacco and improve the quality of flue-cured tobacco.

Key words: Flue-cured tobacco; Magnesium; Manganese; DXP; Organic acids; Higher fatty acid

镁(Mg)和锰(Mn)是烤烟正常生长必需的营养元素。镁是叶绿素组分中的唯一金属元素,锰通过影响叶绿体膜的合成进而影响叶绿素的合成,二者是多种酶的辅助因子,可以激活酶的活性,促进植物体内多种酶促反应的进行,对烟草生理代谢及品质形成均有重要作用[1-6]。一方面,镁、锰通过活化酶,影响烤烟萜类化合物的合成。萜类化合物是烟草的重要化学成分之一,不仅对烟草的生长发育具有重要的生理意义,而且对烟草品质的形成尤其是香气的产生具有重要作用[7]。二萜类物质是其中一种极为重要的香气前提物质,而西柏烷类化合物是烤烟二萜类物质的重要组成成分,在一定程度上影响烤烟的香气质量和烟气特征[8-12]。异戊烯焦磷酸(IPP)是合成萜类化合物的直接前提物质,IPP的合成通过 2 个途径进行,即位于细胞质中的甲羟戊酸(MVA)途径[13]和位于质体中的 1-脱氧-D-木酮糖-5-磷酸(DXP)途径[14]或甲基赤藓醇- 4-磷酸(MEP)途径[15]。MVA 途径主要合成植物细胞质中的倍半萜、三萜及多萜,DXP/MEP 途径主要合成植物质体中的单萜、二萜和四萜[16-18]。烤烟通过 DXP 途径形成 IPP,IPP 进一步衍化形成萜类物质,进而影响香气质量。另一方面,镁、锰通过影响叶绿素的合成以及对多种酶的活化作用对三羧酸循环产生影响,进而影响烟草有机酸及高级脂肪酸的含量。烟草中的有机酸对烟草生长过程中的生理代谢起着重要作用[19]。有机酸与生物碱反应生成盐类物质,或以脂类的形态存在于烟叶中,通过调节化合态和游离态 2 种类型烟碱的比例,影响烤烟生物量,进一步影响烤烟的吸味、劲头及刺激性[20-21]。高级脂肪酸通过酶或非酶作用降解转化成低分子的致香成分[20,22],不饱和脂肪酸能够增加卷烟的丰满度和粗糙感[23],是衡量烤烟品质的重要指标之一。陈思昂等[24]研究认为,不同部位烟叶挥发性有机酸含量均对烤后烟叶 pH 值、香气、刺激性具有显著影响。

目前,不同海拔、温度、光照、品种等对烤烟香气质量的影响较多,关于烤烟镁、锰肥的研究主要集中在对烤烟产量的影响方面,对香气质量的影响研究鲜有报道。鉴于此,以贵州烟区主栽品种云烟 87 为研究对象,研究了镁、锰不同施用量条件下烤烟 DXP 途径中关键物质及部分有机酸、高级脂肪酸含量的变化,为贵州烟区主栽品种云烟 87 烟叶品质的提升提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验地点和供试材料

试验于 2019 年 4—9 月在贵州大学南校区盆栽场进行,供试烤烟品种为云烟 87,由贵州省开阳县

烟草公司提供。硫酸镁（$MgSO_4 \cdot 7H_2SO_4$）、硫酸锰（$MnSO_4$）均为分析纯，由成都金山化学试剂有限公司提供。供试肥料为贵阳市现行施用的烤烟专用基肥［$m(N):m(P_2O_5):m(K_2O)=9:10:27$］和烟草专用追肥［$m(N):m(P_2O_5):m(K_2O)=13:0:26$］，由湖北香青化肥有限公司提供。供试土壤取自贵州大学西校区农学院后山（106°39′35″E，26°26′54″N），主要理化性质为全氮 1.39 g/kg，碱解氮 54.41 mg/kg，有效磷 23.56 mg/kg，速效钾 124.37 mg/kg，有机质 15.22 g/kg，pH 值 6.54。

1.2　试验设计

设置 5 个处理，分别记作 CK（硫酸镁 = 0 g/株，硫酸锰 = 0 g/株）、T1（硫酸镁 = 10 g/株）、K1（硫酸锰 = 10 g/株）、T2（硫酸镁 = 20 g/株）、K2（硫酸锰 = 20 g/株）。试验常规氮肥基追肥比为 7∶3，盆栽试验施肥量为大田施肥量的 3 倍，基肥和追肥用量分别为 136.6 g/株和 41.0 g/株；根据 CK、T1、T2、K1、K2，将不同施用量硫酸镁、硫酸锰与基肥和土壤一起充分混匀装盆，每盆 20 kg。试验采取随机区组排列，重复 3 次，每个处理 3 盆，每盆植烟 1 株，共计 45 盆。4 月 20 日，选取健壮、整齐的烟苗进行移栽，各处理均采用相同的施肥手段和烤烟管理标准，并于烤烟移栽后 35 d 统一施入烟草专用追肥。

1.3　样品采集与测定分析

1.3.1　烤烟 DXP 途径中间产物含量的测定　DXP 途径中间产物（主要包括丙酮酸、DXP、IPP）含量采用 GC-MS 进行测定。取各处理成熟期中部叶片（从下往上数第 9 片），所取样品经 105 ℃ 杀青 0.5 h，65 ℃ 烘干，经磨碎后过 1 mm 筛，装袋编号后备用，称取 3.000 0 g 粉末样品于 50 mL 离心管中，加入 15 mL 二氯甲烷，涡旋 1 min，混匀，超声提取 20 min，重复提取 2 次，将所得提取液过无水硫酸钠层于 100 mL 圆底烧瓶中旋转蒸发至近干，用二氯甲烷定容至 5 mL，过滤膜，上机分析。利用 Shimadzu GCMS-QP2020 气相色谱质谱联用仪分析。由于送样检测时，测试公司未能买到对应指标的标准药品，故以峰面积的形式表示含量。

1.3.2　烤烟西柏烯二萜醇含量的测定　分别于团棵期、旺长期、成熟期选定烟株的功能叶片（从下往上数第 9 片），样品经 105 ℃ 杀青 0.5 h，65 ℃ 烘干，经研磨后过 1 mm 筛，装入自封袋编号备用。准确称取 0.500 0 g 烟末，置于 100 mL 锥形瓶中，加入 50 mL 提取溶液（0.005 g/mL 正十七烷醇-二氯甲烷溶液），超声振荡 10 min 后，用装有 5 g 无水硫酸钠的滤纸滤去烟末。取 10 mL 滤液至浓缩瓶中，在 500 mba、40 ℃ 条件下浓缩去除溶剂。加入 500 μL N，O-双（三甲基硅基）三氟乙酰胺（BSTFA）和 500 μL N，N-二甲基甲酰胺（DMF），洗涤浓缩瓶内壁，将所得溶液转入色谱瓶。在 75 ℃ 水浴中进行衍生化反应 60 min，得到 GC/MS 分析样品溶液[25]。利用 Shimadzu GCMS-QP2020 气相色谱质谱联用仪分析。

1.3.3　烤烟部分有机酸及高级脂肪酸含量的测定　采用 H_2SO_4-CH_3OH 溶液衍生化反应进行样品处理，用气相色谱仪进行测定[26]。称取 0.500 g 烟末于干燥三角瓶中，加入 25 mL 7% H_2SO_4-CH_3OH 溶液，准确抽取 100 μL 内标溶液（0.05 g/mL 己二酸-甲醇溶液），摇匀，室温放置 20 h 进行甲酯化反应，用滤纸过滤到盛有 50 mL 蒸馏水的分液漏斗中，二氯甲烷萃取（100 mL×3），萃取液加无水硫酸钠干燥后，直接取 1.0 μL 进样分析。有机酸和脂肪酸标样采用完全相同的处理过程，以制备内标法校正工作曲线并对各酸进行保留时间对照法定性。采用 GC-14B 气相色谱仪分析。

1.4　数据处理与统计分析

采用 Excel 2016、Origin 2018 和 DPS 7.05 进行数据整理及统计分析。

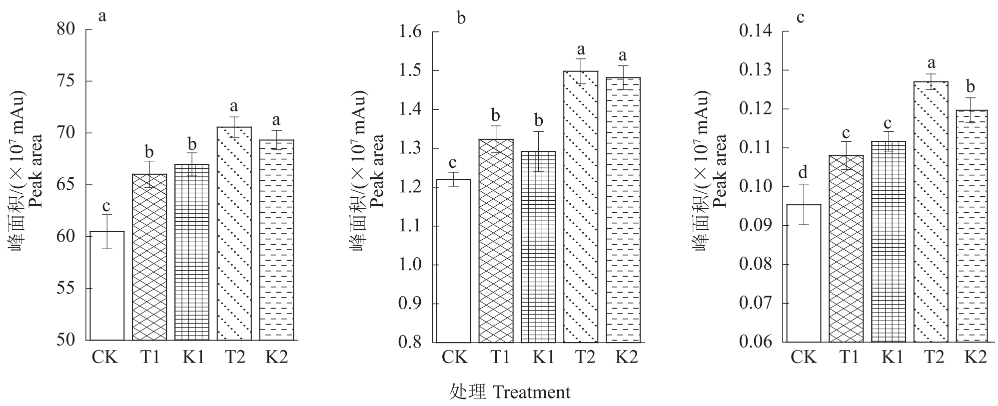
2　结果与分析

2.1　镁、锰对烤烟 DXP 途径中间物质含量的影响

2.1.1　丙酮酸　图 1a 显示，施用镁、锰后，成熟期烟叶丙酮酸含量较 CK 显著增加。T1、K1、T2、K2 较 CK 分别提高 9.14%、10.72%、16.65%、14.59%，以 T2 处理烟叶丙酮酸含量最高。可能是因为丙酮酸主要由糖酵解产生，镁、锰作为糖酵解中磷酸果糖激酶的催化物，可以促进糖酵解的进行，进而增加丙酮酸的含量。

2.1.2　DXP　图 1b 显示，施用镁、锰后，成熟期烟叶 DXP 含量较 CK 显著增加。T1、K1、T2、K2 较 CK 分别提高 8.44%、5.87%、22.78%、21.44%，以 T2 处理烟叶 DXP 含量最高，相同施用水平条件下，镁对烤烟叶片 DXP 含量的增加效果较锰更明显。一方面可能与镁、锰作为 1-脱氧-5-木酮糖-5-磷酸合成酶（DXS）的催化剂相关，另一方面可能与丙酮酸含量增加有关。

2.1.3　IPP　图 1c 显示，施用镁、锰后，成熟期烟叶 IPP 含量较 CK 显著增加。T1、K1、T2、K2 较 CK 分别提高 13.29%、17.13%、33.68%、25.52%，以 T2 处理烟叶 IPP 含量最高。可能与镁、锰促进相关反应酶活性及上游物质含量增加有关。



不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$),下同

Different lowercase letters indicate significant differences among treatments($P<0.05$),the same below

图 1 镁、锰对成熟期烟叶丙酮酸(a)、DXP(b)、IPP(c)峰面积的影响

Fig. 1 Effects of magnesium and manganese on peak area of pyruvate(a),DXP(b) and IPP(c) in mature tobacco leaves

2.2 镁、锰对烤烟西柏三烯二醇含量的影响

2.2.1 α-4,8,13-西柏三烯-1,3-二醇 图 2a 表明,烤烟 α-4,8,13-西柏三烯-1,3-二醇含量随生育时期的推进呈先增加后降低的趋势,整体表现为旺长期>成熟期>团棵期。与 CK 相比,施用镁、锰离子可以显著提高烤烟叶片 α-4,8,13-西柏三烯-1,3-二醇的含量,且在一定范围内随施用量的增加而增加。在施用量 20 g/株条件下,旺长期施镁的烟株 α-4,8,13-西柏三烯-1,3-二醇含量显著高于施锰的烟株,其余同水平施用条件下,分施镁、锰对烤烟 α-4,8,13-西柏三烯-1,3-二醇含量的影响无显著差异。团棵期,T1、K1、T2、K2 处理 α-4,8,13-西柏三烯-1,3-二醇含量分别较 CK 提高 12.8%、15.14%、31.48%、33.37%;旺长期分别较 CK 提高 8.56%、6.31%、26.46%、17.13%;成熟期分别提高 6.22%、5.19%、11.99%、10.06%。

2.2.2 β-4,8,13-西柏三烯-1,3-二醇 图 2b 表明,烤烟 β-4,8,13-西柏三烯-1,3-二醇含量与 α-4,8,13-西柏三烯-1,3-二醇含量的变化规律相似,团棵期,T1、K1、T2、K2 处理 β-4,8,13-西柏三烯-1,3-二醇含量分别较 CK 提高 25.54%、26.14%、46.79%、52.24%;旺长期分别提高 10.4%、8.68%、39.57%、35.62%;成熟期分别提高 27.61%、25.76%、36.72%、34.71%。

综上,施用镁、锰均能有效提高烤烟西柏三烯二醇的分泌和积累,施镁处理效果更佳。

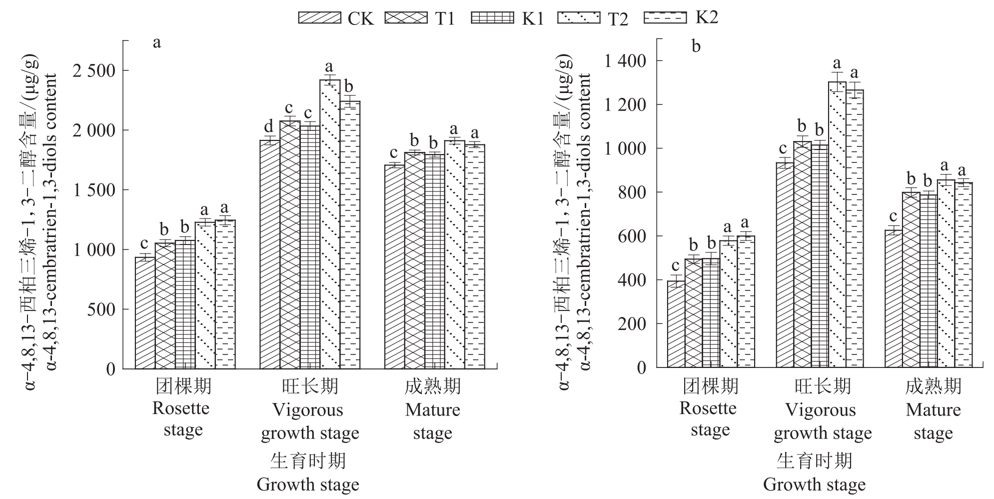


图 2 镁、锰对烤烟 α-4,8,13-西柏三烯-1,3-二醇(a)、β-4,8,13-西柏三烯-1,3-二醇(b)含量的影响

Fig. 2 Effects of magnesium and manganese on the content of α-4,8,13-cembratrien-1,3-diol(a) and β-4,8,13-cembratrien-1,3-diol(b) in flue-cured tobacco

2.3 DXP 途径中间物质含量的相关性分析

由表 1 可知,对镁、锰不同施用量条件下烤烟 DXP 途径各项产物含量进行相关性分析,结果表明,烤烟 DXP 途径各级反应产物含量正相关。施镁条件下,丙酮酸、IPP 含量与 α-4,8,13-西柏三烯-1,3-二醇含量,DXP 含量与 IPP 含量均呈极显著正

相关关系；施锰条件下，丙酮酸含量与 IPP、β-4,8,13-西柏三烯-1,3-二醇含量，IPP 含量与 β-4,8,13-西柏三烯-1,3-二醇含量均呈极显著正相关关系。DXP 途径自上而下，由丙酮酸到 DXP、IPP 再到 2 种西柏三烯二醇，含量均随镁、锰施用量的增加而增加。综上，施用镁、锰可以促进烤烟 DXP 反应途径的进行，对烤烟主要香气物质的产生起到调控作用。

表 1　施用镁、锰后烤烟 DXP 途径中间物质含量相关性分析

Tab. 1　Correlation analysis of intermediate substances in DXP pathway of flue-cured tobacco after application of magnesium and manganese

肥料处理 Fertilizer treatment	指标 Index	丙酮酸 Pyruvic acid	DXP 1-deoxy-D-xylose-5-phosphate	IPP Isopentene pyrophosphate	α-4,8,13-西柏三烯-1,3-二醇 α-4,8,13-cembratrien-1,3-diols
镁 Magnesium	DXP 1-deoxy-D-xylose-5-phosphate	0.98*			
	IPP Isopentene pyrophosphate	0.99*	1.00**		
	α-4,8,13-西柏三烯-1,3-二醇 α-4,8,13-cembratrien-1,3-diols	1.00**	0.98*	0.99**	
	β-4,8,13-西柏三烯-1,3-二醇 β-4,8,13-cembratrien-1,3-diols	0.97*	0.90	0.92	0.97*
锰 Manganese	DXP 1-deoxy-D-xylose-5-phosphate	0.87			
	IPP Isopentene pyrophosphate	1.00**	0.89		
	α-4,8,13-西柏三烯-1,3-二醇 α-4,8,13-cembratrien-1,3-diols	0.97*	0.96*	0.98*	
	β-4,8,13-西柏三烯-1,3-二醇 β-4,8,13-cembratrien-1,3-diols	1.00**	0.86	1.00**	0.97*

注：*、** 分别表示在 0.05、0.01 水平显著、极显著相关。

Note：*，** are significantly and extremely significantly correlated at 0.05 and 0.01 levels, respectively.

2.4　镁、锰对烤烟部分有机酸含量的影响

2.4.1　苹果酸　图 3a 显示，烤烟苹果酸含量随生育期的推进呈增加趋势。与 CK 相比，施用镁、锰总体上显著提高苹果酸的积累量，在一定范围内随施用量增加而增加，且同水平施用条件下，分施镁、锰效果差异不显著。团棵期，T1、K1、T2、K2 处理烤烟苹果酸含量分别较 CK 提高 4.89%、3.83%、14.91%、17.79%，旺长期分别提高 6.13%、5.53%、17.95%、16.52%，成熟期分别提高 6.99%、6.03%、21.77%、17.20%。

2.4.2　柠檬酸　图 3b 显示，烤烟柠檬酸含量随生育期的推进呈先减后增的趋势。与 CK 相比，施用镁、锰总体上显著提高柠檬酸的积累量，在一定范围内随施用量增加而增加。在 20 g/株施用水平下，施锰效果更好。团棵期，T1、K1、T2、K2 处理烤烟柠檬

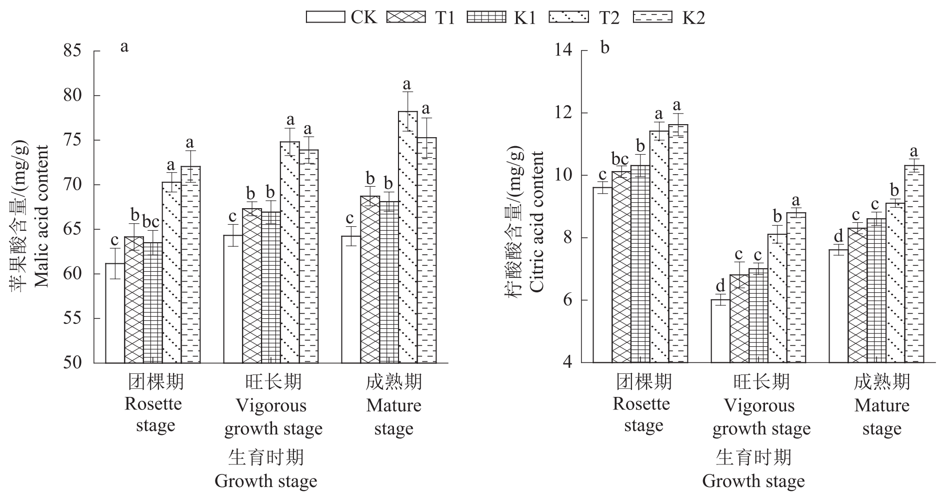


图 3　镁、锰对烤烟苹果酸(a)和柠檬酸(b)含量的影响

Fig. 3　Effects of magnesium and manganese on malic acid(a) and citric acid(b) contents in flue-cured tobacco

酸含量分别较 CK 提高 5.31%、7.28%、18.83%、20.92%;旺长期分别提高 13.30%、16.64%、34.94%、46.42%;成熟期分别提高 9.20%、13.40%、19.71%、35.48%。

综上,镁、锰处理均有利于烤烟苹果酸和柠檬酸的积累,施镁处理更有利于苹果酸的积累,施锰处理更有利于柠檬酸的积累。

2.5 镁、锰对烤烟部分高级脂肪酸含量的影响

2.5.1 油酸 图 4a 显示,烤烟油酸含量随生育期推进呈先增后减的趋势。与 CK 相比,施用镁、锰可以显著增加烤烟油酸含量,且在一定范围内随施用量的增加而增加。团棵期,T1、K1、T2、K2 处理烤烟油酸含量分别较 CK 提高 15.21%、18.43%、35.02%、52.53%;旺长期分别提高 18.16%、16.88%、38.36%、34.27%;成熟期分别提高 18.66%、9.51%、27.46%、24.30%。

2.5.2 亚油酸 图 4b 显示,不同处理烤烟亚油酸含量的变化规律与油酸基本相同。团棵期,T1、K1、T2、K2 处理烤烟亚油酸含量分别较 CK 提高 1.76%、25.29%、46.47%、52.94%;旺长期分别提高 19.17%、9.22%、33.74%、28.88%;成熟期分别提高 25.37%、12.87%、43.38%、36.76%。

综上,镁、锰均可促进烤烟油酸、亚油酸的积累,施镁处理更有利于 2 种高级脂肪酸的积累。

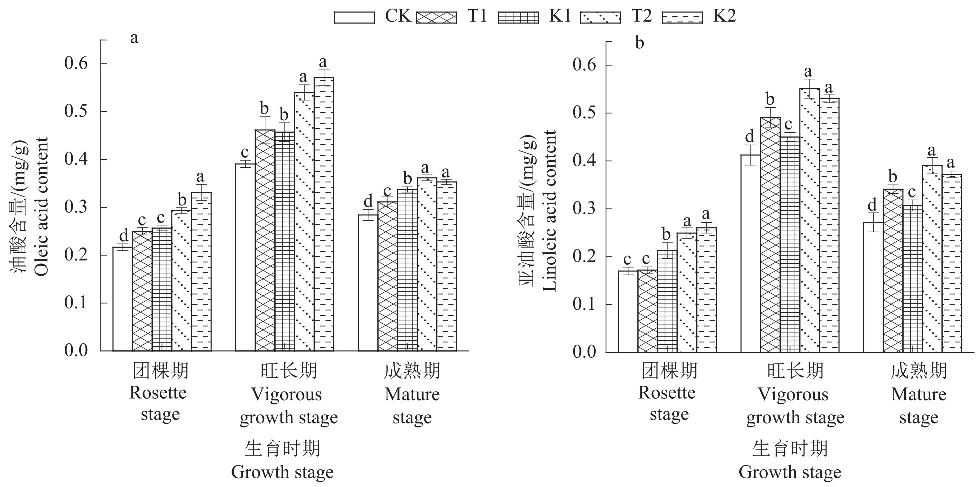


图 4 镁、锰对烤烟油酸(a)和亚油酸(b)含量的影响

Fig. 4 Effects of magnesium and manganese on oleic acid(a) and linoleic acid(b) contents in flue-cured tobacco

3 结论与讨论

西柏烷类致香物质是烟叶中重要的致香前体物,通过一定的降解途径可形成多种醛、酮等致香成分,从一定程度上影响烤烟的香气质及香气量[27]。本研究结果表明,烤烟在生育过程中,中部烟叶 α-4,8,13-西柏三烯-1,3-二醇和 β-4,8,13-西柏三烯-1,3-二醇含量呈先升后降的趋势,即旺长期>成熟期>团棵期,与赵华新等[28]的研究结果一致。可能是因为烟叶成熟后烤烟西柏三烯二醇易降解形成茄酮等致香类物质导致西柏三烯二醇含量下降。韩锦峰等[8]研究表明,提高烤烟中西柏三烯二醇含量,可以有效改善烤烟的香气质,提高其香气量。本研究表明,施镁条件下,丙酮酸含量与 DXP、IPP、(α、β)-4,8,13-西柏三烯-1,3-二醇含量、DXP 含量与 IPP、α-4,8,13-西柏三烯-1,3-二醇含量、IPP 含量与 α-4,8,13-西柏三烯-1,3-二醇含量、α-与 β-4,8,13-西柏三烯-1,3-二醇含量均呈显著或极显著正相关关系;施锰条件下,丙酮酸含量与 IPP、(α、β)-4,8,13-西柏三烯-1,3-二醇含量、DXP 含量与 α-4,8,13-西柏三烯-1,3-二醇含量、IPP 与 (α、β)-4,8,13-西柏三烯-1,3-二醇含量、α-与 β-4,8,13-西柏三烯-1,3-二醇含量均呈显著或极显著正相关关系,可见,施用镁、锰肥均可以促进烤烟 DXP 途径的顺利进行,促进烤烟西柏三烯二醇含量的积累,且施镁比施锰效果更佳,其中,在 20 g/株的施用水平下,相对效果最好。可能是因为镁、锰均作为糖酵解途径、DXP 途径关键酶的催化剂,能够活化反应所需要的磷酸激酶,但锰的催化效果不如镁好。同时,镁作为叶绿素组分中的唯一金属元素[1],施用镁肥更有利于提高烤烟叶绿素含量,增加光合产物含量,提高叶片淀粉积累量,为糖酵解产生丙酮酸提供充足的原料。丙酮酸作为 DXP 途径的起始物质,其含量增加可以促进下游关键产物 DXP、IPP 含量增加,进而更有利于烤烟西柏三烯二醇含量的积累。

苹果酸能够降低烟气的 pH 值,改善高生物碱的烟草烟气;而柠檬酸含量较高则会降低烟叶质

量，导致吃味变差；不饱和脂肪酸能够增加烟气的丰满度和粗糙感。烟草生长发育过程中，苹果酸、柠檬酸等非挥发性有机酸的生物合成和降解主要发生在三羧酸循环中[19]。符新妍等[29]研究表明，烤烟在叶龄 40 d 前，代谢旺盛，呼吸作用产生大量苹果酸，一定程度抑制了苹果酸脱氢酶的活性，导致柠檬酸含量降低，随叶龄增加，苹果酸积累速度下降，底物反馈抑制效应削弱，苹果酸脱氢酶活性逐步增加，最终表现为苹果酸含量呈现缓慢增加趋势；而柠檬酸含量则先降低后缓慢增加，与本试验结果一致。本研究发现，施用镁、锰肥之后，烤烟的苹果酸、柠檬酸含量均有不同程度的提升。姚莉等[30]认为，施镁可以显著提高烟叶中非挥发性有机酸和高级脂肪酸的含量，与本研究结果一致。

综上所述，施用镁、锰可以调控烤烟中 DXP 途径的进行，显著提高烤烟西柏三烯二醇及部分有机酸、高级脂肪酸的含量，施镁效果优于施锰，硫酸镁施用量为 20 g/株效果最好。但由于试验设计及条件的限制，对于是否存在更佳的镁肥、锰肥施用量有待进一步研究。

参考文献：

[1] 魏秋兰，刘高，张学伟，等. 不同种类镁肥对烤烟中微量元素含量和产质量的影响[J]. 生态科学，2018，37(1)：49-54.
WEI Q L，LIU G，ZHANG X W，*et al.* Effects of different magnesium fertilizers on contents of medium and trace elements and yield and quality of flue-cured tobacco[J]. Ecological Science，2018，37(1)：49-54.

[2] 曾睿，张果，何忠俊，等. 土壤锰素营养及锰在烟草上的应用研究进展[J]. 江西农业学报，2009，21(9)：105-109.
ZENG R，ZHANG G，HE Z J，*et al.* Research advance in soil manganese nutrition and application of manganese in flue-cured tobacco[J]. Acta Agriculturae Jiangxi，2009，21(9)：105-109.

[3] 殷宪强，王国栋，孙慧敏，等. 干旱条件下锌、锰肥对玉米叶绿素含量的影响[J]. 中国农学通报，2004，20(6)：196-198，226.
YIN X Q，WANG G D，SUN H M，*et al.* Effects of zinc and manganese fertilizers on maize growth and chlorophyllous contents under drought condition[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin，2004，20(6)：196-198，226.

[4] POSSINGHAM J V，SPENCER D. Manganese as a functional component of chloroplasts[J]. Biol Sci，1962，15(1)：58-61

[5] 熊桦，张志丽，陈林，等. 金属离子对茯苓液态发酵合成三萜的调控效应研究[J]. 广东化工，2019，46(8)：26-27，63.
XIONG H，ZHANG Z L，CHEN L，*et al.* Effects of metal ions on poria cocos triterpenoids biosynthesis in submerged fermentation system[J]. Guangdong Chemical Industry，2019，46(8)：26-27，63.

[6] TEICHLER-ZALLEN D. The effect of manganese on chloroplast structure and photosynthetic ability of *Chlamydomonas reinhardi* [J]. Plant Physiol，1969，44(5)：701-710.

[7] 彭国岗，白晓莉. 烟草二萜类化合物的降解及其在烟草香精中的应用[J]. 食品工业，2009，30(3)：52-54.
PENG G G，BAI X L. The degradation of diterpenoids and its application in tobacco flavor[J]. The Food Industry，2009，30(3)：52-54.

[8] 韩锦峰，张志勇，刘华山，等. 烟草腺毛及其分泌物西柏三烯醇类物质的研究进展[J]. 中国烟草学报，2013，19(5)：118-124.
HAN J F，ZHANG Z Y，LIU H S，*et al.* Research advance in tobacco glandular trichomes and their secretion substance cembranoids[J]. Acta Tabacaria Sinica，2013，19(5)：118-124.

[9] JOHNSON A W，SEVERSON R F，HUDSON J，*et al.* Tobacco leaf trichomes and their exudates[J]. Tob Sci，1985，29(1)：67-72.

[10] BENTLEY N J，WOLF F A. Glandular leaf hairs of tobacco trichomes[J] Bull Torrey Bot Club，1945，72(4)：345-360.

[11] SEVERSON R F，JOHNSON A W，JACKSON D M. Cuticular constituents of tobacco：Factors affecting their production and their role in insect and disease resistance and smoke quality[J]. Rev Adv Tob Sci，1985，11：105-174.

[12] 张思琦，何佳，周方，等. 不同烤烟品种(系)二萜类物质合成关键基因的表达及代谢差异[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版)，2019，47(9)：25-32，43.
ZHANG S Q，HE J，ZHOU F，*et al.* Difference in expression and metabolism of key genes for diterpenoid biosynthesis between different flue-cured tobacco[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)，2019，47(9)：25-32，43.

[13] 孙丽超，李淑英，王凤忠，等. 萜类化合物的合成生物学研究进展[J]. 生物技术通报，2017，33(1)：64-75.
SUN L C，LI S Y，WANG F Z，*et al.* Research progresses in the synthetic biology of terpenoids[J]. Biotechnology Bulletin，2017，33(1)：64-75.

[14] CHAPPELL J，WOLF F，PROULX J，*et al.* Is there action catalysed by 3-hydroxy-3-methylglutaryl coenzyme a reductase a rate-limiting step for isoprenoid biosynthesis in

plants? [J]. Plant Physiol,1995,109(4):1337-1343.

[15] ROHMER M,KNANI M,SIMONIN P,*et al.* Isoprenoid biosynthesis in bacteria: A novel pathway for the early steps leading to isopentenyl diphosphate[J]. The Biochemical Journal,1993,295(Pt2):517-524.

[16] 张长波,孙红霞,巩中军,等. 植物萜类化合物的天然合成途径及其相关合酶[J]. 植物生理学通讯,2007,43(4):779-786.
ZHANG C B,SUN H X,GONG Z J,*et al.* Plant terpenoid natural metabolism pathways and their synthases[J]. Plant Physiology Communications,2007,43(4):779-786.

[17] BOUVIER F,RAHIER A,CAMARA B. Biogenesis,molecular regulation and function of plant isoprenoids[J]. Progress in Lipid Research,2005,44(6):357-429.

[18] LIAO P,HEMMERLIN A,BACH T J,*et al.* The potential of the mevalonate pathway for enhanced isoprenoid production[J]. Biotechnology Advances,2016,34(5):697-713.

[19] 王瑞新. 烟草化学[M]. 北京:中国农业出版社,2003.
WANG R X. Tobacco chemistry[M]. Beijing:China Agriculture Press,2003.

[20] 易江,屠乃美,张炜,等. 有机酸对烟叶品质的影响及其在烟叶中的分布差异[J]. 作物研究,2013,27(6):695-699.
YI J,TU N M,ZHANG W,*et al.* Effects of organic acids on the quality of tobacco leaves and their distributional differences in tobacco leaves[J]. Crop Research,2013,27(6):695-699.

[21] 胡荣海. 云南烟草栽培学[M]. 北京:科学出版社,2007.
HU R H. Yunnan tobacco culture[M]. Beijing:Science Press,2007.

[22] 史宏志,刘国顺. 烟草香味学[M]. 北京:中国农业出版社,1998:63.
SHI H Z,LIU G S. Tobacco aroma science[M]. Beijing:China Agriculture Press,1998:63.

[23] DAVIS D L. Waxes and lipids in leaf and their relation to smoking quality and aroma[J]. Rec Adv Tob Sci,1976,9(2):80-106.

[24] 陈思昂,张环纬,陈彪,等. 不同部位烤烟挥发性有机酸含量与烟叶品质的关系分析[J]. 河南农业科学,2019,48(2):54-62.
CHEN S A,ZHANG H W,CHEN B,*et al.* Analysis of the relationship between volatile organic acid content and quality of different parts of flue-cured tobacco[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences,2019,48(2):54-62.

[25] 刘翠翠. 烟草西柏三烯二醇检测方法及其积累动态、分布研究[D]. 北京:中国农业科学院,2016.
LIU C C. Establishment and application of a detection method for investigating the accumulation,distribution of cembratrien-diols in tobacco[D]. Beijing:Chinese Academy of Agricultural Sciences,2016.

[26] 刘百战,徐亮,詹建波,等. 云南烤烟中非挥发性有机酸及某些高级脂肪酸的分析[J]. 中国烟草科学,1999,20(2):28-31.
LIU B Z,XU L,ZHAN J B,*et al.* Analysis of nonvolatile organic acids and some higher fatty acids in Yunnan flue-cured tobacco[J]. Chinese Tobacco Science,1999,20(2):28-31.

[27] 甄才红,刘国顺,王彦亭,等. 海拔对恩施州烤烟中性致香物质含量的影响[J]. 河南农业科学,2010,39(6):49-53.
ZHEN C H,LIU G S,WANG Y T,*et al.* Effects of altitudes on contents of aroma components of flue-cured tobacco in Enshi Prefecture[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences,2010,39(6):49-53.

[28] 赵华新,武丹风,姬小明,等. 海拔对不同基因型烤烟西柏三烯二醇含量的影响[J]. 河南农业科学,2014,43(5):56-61.
ZHAO H X,WU D F,JI X M,*et al.* Effects of altitude on duvatrienediol content in different genotypes of flue-cured tobacco[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences,2014,43(5):56-61.

[29] 符新妍,张小全,杨铁钊,等. 烤烟生育期间主要非挥发性有机酸含量及相关酶活性变化特征[J]. 西北植物学报,2014,34(2):325-331.
FU X Y,ZHANG X Q,YANG T Z,*et al.* Main non-volatile organic acid concentrations and the relative enzymatic activity changes during the growth periods of flue-cured tobacco[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica,2014,34(2):325-331.

[30] 姚莉,刘海涛,王谢,等. 镁肥对烤烟烟叶中主要化学成分和有机酸含量的影响[J]. 云南农业大学学报(自然科学),2017,32(4):712-717.
YAO L,LIU H T,WANG X,*et al.* Effect of magnesium fertilizer on the main chemical compositions and organic acids content in flue-cured tobacco leaves[J]. Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science),2017,32(4):712-717.