

薄壳山核桃果实发育后期油脂和矿质养分动态变化分析

常君¹, 任华东^{1*}, 姚小华¹, 杨水平², 王开良¹

(1. 中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 浙江 杭州 311400; 2. 西南大学资源与环境学院, 重庆 400716)

摘要: [目的] 研究薄壳山核桃果实发育后期油脂积累与果实矿质元素变化规律, 为进一步开展薄壳山核桃油脂转化与调控研究提供理论依据。 [方法] 以薄壳山核桃‘马罕’、‘28号’品种为研究对象, 在果实发育后期取样测定果实大小与质量、粗脂肪含量及脂肪酸组成和果实不同部位矿质元素含量, 分析油脂积累和矿质元素动态变化规律及其相关性。 [结果] 结果表明: 薄壳山核桃果实发育后期种仁不饱和脂肪酸含量不断增加, 饱和脂肪酸含量逐渐减少; 种仁粗脂肪含量和脂肪酸含量随果实发育变化品种间表现出差异, ‘28号’品种种仁粗脂肪含量不断提高, 而‘马罕’品种粗脂肪含量却表现出先不断提高后出现小幅下降; ‘28号’品种油酸、硬脂酸含量表现出不断上升的趋势, 花生酸和棕榈酸含量逐步降低, ‘马罕’品种亚油酸和亚麻酸含量先增加后又逐渐降低, ‘28号’品种亚油酸和亚麻酸含量则逐步降低; 薄壳山核桃果实种仁粗脂肪累积与矿质元素氮、磷、钾和钙含量成显著或极显著负相关。 [结论] 薄壳山核桃果实发育后期种仁脂肪含量随果实发育而提高, 油脂中脂肪酸组成比例随果实发育而变化, 存在饱和脂肪酸向不饱和脂肪酸转化趋势; 种仁粗脂肪含量及油脂中脂肪酸含量随果实发育变化品种间存在差异; 薄壳山核桃果实发育后期矿质元素氮、磷、钾和钙含量与油脂积累存在显著相关性, 这些矿质元素可能在薄壳山核桃种仁油脂积累和脂肪酸转化中发挥作用。

关键词: 薄壳山核桃; 油脂积累; 矿质元素; 相关性

中图分类号: S759.3

文献标识码: A

文章编号: 1001-1498(2019)06-0122-08

薄壳山核桃 (*Carya illinoensis* (Wangenh.) K. Koch) 又名美国山核桃, 原产于美国、墨西哥, 为胡桃科 (Juglandaceae) 山核桃属 (*Carya* Nutt.) 物种^[1-3], 是世界著名的干果油料树种; 其果实种仁富含脂肪酸和蛋白质, 种仁含油率 51.57% ~ 69.47%, 种仁蛋白含 17 种氨基酸, 其中, 含 7 种人体必需氨基酸。薄壳山核桃材质优良, 树体高大, 冠形优美, 也是良好的材用和庭院绿化树种^[4]。我国于 20 世纪初开始引种薄壳山核桃, 前期引种研究证明具有良好的适应性、丰产性。近年来, 随着薄壳山核桃产业在我国快速发展, 有关薄壳山核桃的产量、品质形成规律与机理研究已成为学者关注的重点研究方向。

矿质营养是果树生长发育、产量品质形成的物

质基础^[5], 矿质营养的缺乏或不平衡影响果树树势、光合作用、产量、果实品质和抗性, 从而影响产业的经济效益^[6]。研究表明, 矿质营养的施用与果实油脂积累及脂肪酸组成有关, 适量施氮能增加高油玉米籽粒油脂含量及不饱和脂肪酸、亚油酸和油酸含量^[7], 磷元素缺乏可促进其细胞内的油脂积累^[8-9], 缺钾会影响玉米淀粉与脂肪酸合成。油脂是薄壳山核桃的重要营养成分, 陈文静等^[10-12]以‘马罕’、‘金华’、‘波尼’品种为材料研究表明, 薄壳山核桃种仁油脂主要由油酸、亚油酸、棕榈酸和硬脂酸等组成, 随着果仁的成熟, 粗脂肪含量呈不断上升趋势, 饱和脂肪酸含量逐渐减少, 不饱和脂肪酸含量则逐渐增加。张志华等^[13]研究核桃 (*Juglans regia* L.) 果实成熟期间种仁中脂肪的积累与青皮中钾含量的

收稿日期: 2018-01-15 修回日期: 2019-07-11

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目 (CAFYBB2017ZA004-8); 浙江省农业(果品)新品种选育重大科技专项 (2016C02052-13)

* 通讯作者: 任华东. E-mail: renhd@163.com

变化,认为脂肪的累积与果实青皮中的钾含量呈极显著正相关,青皮是生理活动最活跃的部位,可能在将糖分输入胚的过程中起着重要作用。目前,关于薄壳山核桃及其同属山核桃矿质元素含量、营养成分和脂肪酸组成研究较多^[14-20],而薄壳山核桃果实发育后期种仁油脂和果实矿质元素动态变化未见报道。本文以我国薄壳山核桃主栽品种‘马罕’和‘28号’为研究材料,对其果实发育后期的油脂和矿质元素含量进行跟踪取样分析,旨在揭示薄壳山核桃果实发育后期种仁油脂和果实矿质元素的动态变化规律,为进一步开展矿质营养调控油脂积累研究提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验地概况

取样地位于浙江省建德市更楼街道洪宅村营建的12年生薄壳山核桃无性系测定试验林内,试验林株行距6 m×6 m,地理位置为29°28′ N,119°23′ E,海拔100 m,年均气温16.7℃,无霜期254 d,年降水量1 500 mm,土壤为紫砂土,属中亚热带北缘季风气候带。

1.2 试验材料与方 法

采用生产上栽培面积较大的薄壳山核桃品种‘马罕’和‘28号’为试验材料,选取13年生、生长健壮、无病虫害的‘马罕’和‘28号’品种进行定株采样,从树冠外围中部取样,果实要求无病虫害、大小基本一致。取样时间为2016年9月7日、9月14日、9月19日、9月25日、9月30日和10月9日,共6次,每次取样30个,重复3次。果实洗净后采用游标卡尺分别测定果实大小,采用电子天平称量果实总鲜质量,将果实青皮、坚果果壳在105℃下杀青30 min,同种仁在55℃下烘至恒质量,采用电子天平分别称量其干质量,粉碎过筛分别密闭于样品袋中,用于分析测定粗脂肪含量和氮、磷、钾、钙等营养元素含量。单个青果鲜质量=青果总鲜质量/果实个数,单个青果干质量=(种仁干质量+果实青皮干质量+坚果果壳干质量)/果实个数。

1.3 测定方 法

粗脂肪含量按照 GB/T14772-2008《食品中粗脂肪的测定》方法测定,脂肪酸甲酯参照 GB/T 17376-2008《动植物油脂脂肪酸甲酯制备》和 GB/T17377-2008《动植物油脂脂肪酸甲酯的气相色谱分析》方法测定,采用凯氏定氮法测定 N 含量,钼蓝比色法测

定 P 含量,原子吸收分光光度法测定 K、Ca 含量。

1.4 数据处 理

所有数据采用 Excel 2007、DPS 14.5 数据处理软件进行统计分析。

2 结果与分 析

2.1 薄壳山核桃果实发育后期果实大小与质量变化

测定结果表明:薄壳山核桃不同品种果实发育后期果实长度、宽度均呈现出缓慢上升的趋势,从9月7日至10月9日,‘马罕’品种青果长度和青果宽度分别增加16.56%和32.42%,‘28号’品种青果长度和青果宽度分别增加17.33%和20.70%(图1)。果实发育后期,薄壳山核桃不同品种果实干质量均呈现缓慢上升的趋势,‘马罕’品种青果鲜质量表现出缓慢上升的趋势,‘28号’品种青果鲜质量在9月25日达到最大,随后又缓慢下降;10月9日‘马罕’品种青果鲜质量和青果干质量分别是9月7日的1.85倍和2.85倍,10月9日‘28号’品种青果鲜质量和青果干质量分别是9月7日的1.49倍和2.21倍(图1)。

2.2 薄壳山核桃果实发育后期油脂积累和脂肪酸组成分析

试验结果(表1)表明:果实发育后期薄壳山核桃品种‘马罕’和‘28号’种仁粗脂肪含量极显著提高($p < 0.01$),2品种10月9日的含量比9月7日的分别增加47.71%和31.78%。随着果实不断发育成熟,脂肪酸组成也发生变化,油酸含量基本表现出不断上升的趋势,9月7日‘马罕’和‘28号’品种油酸含量分别为59.40%和53.90%,到10月9日,油酸含量分别提高至76.50%和71.70%;亚油酸和亚麻酸含量变化两参试品种间也表现出不同,‘马罕’品种表现出先增加后减小,而‘28号’品种亚油酸和亚麻酸含量则表现出先下降后增加;顺-11-二十碳烯酸含量较小,在果实发育过程中其变化也不大;两参试品种硬脂酸含量变化动态存在一定的差异,‘马罕’品种先小幅下降后又小幅提高,而‘28号’先提高后又小幅降低;两参试品种花生酸与棕榈酸含量都表现出随着果实发育逐步降低的总趋势,但‘28号’品种的棕榈酸含量后期出现了小幅上升。综合2个薄壳山核桃品种的饱和与不饱和脂肪酸总量的变化动态可以看出,两参试品种不饱和脂肪酸总量均表现出逐步增加的趋势,而饱和脂肪酸总量则表现出逐步降低

的趋势,9月7日到10月9日,‘马罕’品种不饱和脂肪酸总量由77.90%增加到91.70%,饱和脂肪酸总量由20.80%降低至8.30%,‘28号’品种不

饱和脂肪酸总量由87.10%增加到91.40%,饱和脂肪酸总量由12.90%降低至8.60%。

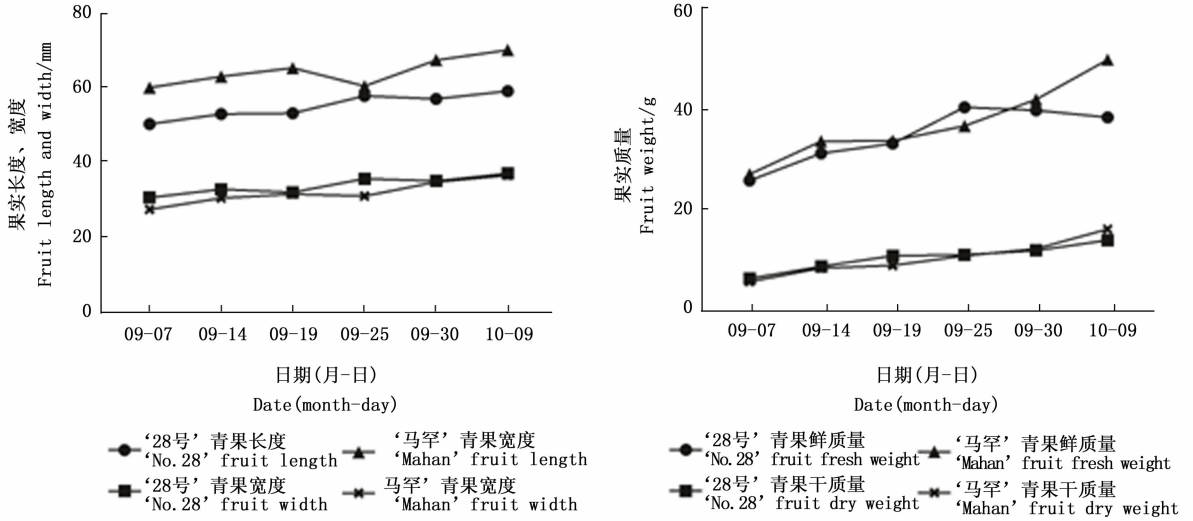


图1 薄壳山核桃果实发育后期果实大小和质量变化

Fig. 1 Changes of fruit size and weight at the later stage of fruit development of pecan

表1 薄壳山核桃果实发育后期油脂积累和脂肪酸组成变化

Table 1 Changes of oil accumulation and fatty acid composition at the later stage of fruit development of pecan

品种 Variety	日期(月-日) Date (month-day)	种仁粗脂肪 Seed fat /%	不饱和脂肪酸 Unsaturated fatty acid/%				总量 Total /%	饱和脂肪酸 Saturated fatty acid/%			总量 Total /%
			油酸 Oleic acid	亚油酸 Linoleic acid	亚麻酸 Linolenic acid	顺-11-二十碳烯酸 Cis-11-20c		硬脂酸 Stearic acid	花生酸 Arachic acid	棕榈酸 Palmitic acid	
‘马罕’ ‘Mahan’	09-07	16.61	59.40	17.60	0.50	0.40	77.90	2.30	0.40	18.10	20.80
	09-14	38.85	51.70	32.70	2.70	0.20	87.30	2.10	0.20	10.20	12.50
	09-19	54.32	64.30	23.20	1.70	0.20	89.40	2.50	0.20	7.90	10.60
	09-25	62.63	72.30	17.00	1.20	0.20	90.70	2.70	0.10	6.40	9.20
	09-30	64.81	76.40	13.70	1.00	0.20	91.30	2.70	0.00	5.90	8.60
	10-09	64.32**	76.50**	14.20**	0.80**	0.20**	91.70	2.80**	0.10**	5.40**	8.30
‘28号’ ‘No. 28’	09-07	38.46	53.90	30.90	2.00	0.30	87.10	2.30	0.20	10.40	12.90
	09-14	58.73	62.10	25.40	1.30	0.30	89.10	2.50	0.00	8.30	10.80
	09-19	63.34	73.10	16.00	1.00	0.20	90.30	2.90	0.00	6.80	9.70
	09-25	68.05	77.10	13.30	0.70	0.30	91.40	2.90	0.10	5.50	8.50
	09-30	70.24	77.00	13.50	0.70	0.30	91.50	2.80	0.10	5.60	8.50
	10-09	73.32**	71.70**	18.50**	0.90**	0.30	91.40	2.70**	0.10**	5.80**	8.60

注:显著水平为5%, * 为差异显著, ** 为差异极显著。

Notes: At the significant level of 5%, * mean the differences was significant, ** mean the difference was extremely significant.

2.3 薄壳山核桃果实发育后期矿质元素比较分析

由表2可以看出:矿质元素在薄壳山核桃果实种仁、青皮和坚果壳中的含量和分布不同,氮、钾元素含量相对较高,钙和磷元素次之。种仁中氮、磷元素的含量较青皮和坚果壳中高,种仁与青皮中的氮、磷元素含量随着果实成熟期的延长呈现出逐渐降低的趋势,而坚果壳中的氮、磷元素含量表现出先降低

后升高的趋势;在果实发育前期种仁和青皮中的钾元素含量较高,后期坚果壳中钾元素含量较高,种仁中钾含量表现出逐渐降低的趋势,青皮中的钾含量表现出先升后降的趋势,坚果壳中钾含量则表现出先缓慢降低后又极显著升高的趋势;钙元素在青皮和坚果壳中含量较高,种仁中钙元素含量相对较低,在果实发育过程中,钙元素未表现出规律性变化。

薄壳山核桃果实发育到10月9日,其种仁、青皮中的氮、磷、钾元素含量均显著降低,如与9月7日取样测定结果相比,10月9日采收的‘马罕’品种果实种仁中氮元素含量由17.60 mg · g⁻¹下降到12.40 mg · g⁻¹,青皮中氮元素含量由7.04 mg · g⁻¹下降到3.09 mg · g⁻¹,种仁中磷元素含量由3.63 mg · g⁻¹下降到2.56 mg · g⁻¹,青皮中磷元素含量由1.07 mg · g⁻¹下降到0.42 mg · g⁻¹,种仁中钾元素含量由15.86

mg · g⁻¹下降到3.82 mg · g⁻¹,青皮中钾元素含量由14.20 mg · g⁻¹下降到3.29 mg · g⁻¹;坚果壳中氮、磷、钾元素含量均显著增加,果实发育末期采收的‘马罕’品种果实坚果壳中氮、磷、钾元素含量分别是果实发育初期的1.45、1.62和10.60倍;与果实发育初期相比,果实发育末期果实种仁、青皮和坚果壳中钙元素含量均极显著降低,分别由3.67、10.15和10.15mg · g⁻¹下降到0.41、4.45和2.63 mg · g⁻¹。

表2 薄壳山核桃果实发育后期青皮与种仁中矿质元素含量的变化

Table 2 Changes of mineral elements contents in green peel and seed at the later stage of fruit development of pecan

品种 Variety	日期 (月-日) Date (month-day)	氮 N/(mg · g ⁻¹)			磷 P/(mg · g ⁻¹)			钾 K/(mg · g ⁻¹)			钙 Ca/(mg · g ⁻¹)		
		种仁 Seed	青皮 Green peel	坚果壳 Nutshell	种仁 Seed	青皮 Green peel	坚果壳 Nutshell	种仁 Seed	青皮 Green peel	坚果壳 Nutshell	种仁 Seed	青皮 Green peel	坚果壳 Nutshell
‘马罕’ ‘Mahan’	09-07	17.60	7.04	4.30	3.63	1.07	0.65	15.86	14.20	3.52	3.67	10.15	10.15
	09-14	17.28	6.59	3.49	3.60	1.06	0.62	13.03	14.80	2.73	2.25	7.85	9.40
	09-19	14.67	6.03	2.71	3.05	0.92	0.39	9.99	16.00	1.99	1.80	9.50	11.75
	09-25	14.30	2.98	4.62	2.81	0.56	1.00	5.92	3.77	19.25	0.86	7.48	6.63
	09-30	11.00	2.84	4.94	2.92	0.57	1.04	3.75	4.50	24.45	0.70	6.37	3.45
	10-09	12.40**	3.09**	6.22**	2.56*	0.42**	1.05**	3.82**	3.29**	37.30**	0.41**	4.45**	2.63**
‘28号’ ‘No. 28’	09-07	14.66	5.86	3.75	3.97	0.80	0.64	14.08	15.25	3.32	1.74	4.78	8.91
	09-14	12.50	5.71	2.80	3.26	0.79	0.49	9.59	17.55	2.77	1.49	5.71	8.36
	09-19	12.58	6.20	2.98	3.16	0.94	0.52	6.60	21.00	3.41	1.11	3.15	6.63
	09-25	8.65	2.45	4.92	2.43	0.35	0.66	4.45	3.71	19.40	0.73	5.63	2.58
	09-30	8.39	2.40	4.94	2.52	0.30	0.62	3.55	3.90	24.25	0.52	5.72	2.98
	10-09	8.51**	2.60**	5.25**	2.48**	0.29**	0.72*	3.83**	3.28**	38.20**	0.49**	7.63**	5.31

**注:显著水平为5%, * 为差异显著, ** 为差异极显著。

Notes: At the significant level of 5%, * mean the differences was significant, ** mean the difference was extremely significant.

2.4 薄壳山核桃果实种仁矿质元素含量与油脂积累的相关性

果实发育后期,薄壳山核桃不同品种果实种仁中油脂含量的合成与积累和矿质元素含量(氮、磷、钾和钙)呈显著或极显著负相关(表3、4),‘马罕’品种种仁中粗脂肪含量与钾元素和钙元素相关度较高,相关系数分别为-0.948 9和-0.979 4,‘28号’品种种仁中粗脂肪含量与钾元素和磷元素相关度较高,相关系数分别为-0.977 3和-0.955 1;

‘28号’品种不饱和脂肪酸含量与氮、磷、钾和钙元素含量均表现出极显著负相关,饱和脂肪酸含量与氮、磷、钾和钙元素含量表现出极显著正相关;‘马罕’品种不饱和脂肪酸含量与氮、磷、钾和钙元素含量均表现出负相关,其中,与钾元素含量表现出显著负相关,与钙元素含量表现出极显著负相关,饱和脂肪酸含量与磷、钾元素含量表现出显著正相关,与钙元素含量表现出极显著正相关。

表3 ‘马罕’品种果实种仁矿质元素含量与油脂积累的相关性

Table 3 Correlation analysis of mineral elements and oil accumulation in seeds of ‘Mahan’

项目 Item	粗脂肪 Crude fat	不饱和脂肪酸 Unsaturated fatty acid	饱和脂肪酸 Saturated fatty acid	N	P	K	Ca
粗脂肪 Crude fat	1.000 0						
不饱和脂肪酸 Unsaturated fatty acid	0.972 0**	1.000 0					
饱和脂肪酸 Saturated fatty acid	-0.976 6**	-0.999 7**	1.000 0				
N	-0.878 3*	-0.793 0	0.802 4	1.000 0			
P	-0.902 0*	-0.807 8	0.817 7*	0.934 3**	1.000 0		
K	-0.948 9**	-0.875 1*	0.886 9*	0.873 6*	0.932 1**	1.000 0	
Ca	-0.979 4**	-0.951 4**	0.958 6**	0.884 3*	0.914 0*	0.974 8**	1.000 0

注: **表示在0.01水平上显著相关, *表示在0.05水平上显著相关。下同。

Notes: ** Mean significant correlation at 0.01 level, * mean significant correlation at 0.05 level. The same below.

表4 ‘28号’品种果实种仁矿质元素含量与油脂积累的相关性

Table 4 Correlation analysis of mineral elements and oil accumulation in seeds of No. 28

项目 Item	粗脂肪 Crude fat	不饱和脂肪酸 Unsaturated fatty acid	饱和脂肪酸 Saturated fatty acid	N	P	K	Ca
Ca 粗脂肪 Crude fat	1.000 0						
不饱和脂肪酸 Unsaturated fatty acid	0.976 7 **	1.000 0					
饱和脂肪酸 Saturated fatty acid	-0.977 3 **	-0.999 6 **	1.000 0				
N	-0.888 7 *	-0.923 6 **	0.924 4 **	1.000 0			
P	-0.955 1 **	-0.978 2 **	0.980 9 **	0.972 3 **	1.000 0		
K	-0.977 3 **	-0.998 3 **	0.996 3 **	0.924 9 **	0.972 7 **	1.000 0	
Ca	-0.916 4 *	-0.956 1 **	0.949 9 **	0.952 9 **	0.952 6 **	0.966 1 **	1.000 0

3 讨论

薄壳山核桃果实发育后期(9月7日至10月9日),本研究2个参试无性系果实大小均呈现继续缓慢上升的趋势,与陈文静等^[10]及贾晓东等^[21]的研究结果基本一致,说明薄壳山核桃果实发育后期其果实形态大小还依然在增长,但贾晓东等^[21]在对‘波尼’品种青果长度观测中发现,在果实发育后期又出现略微下降的趋势,这可能是果实完全成熟后的果壳出现缩水引起的缩减;相对于果实形态大小的变化,2个参试无性系在果实发育后期其质量增加幅度较大,陈文静等^[10]、贾晓东等^[21]对其他品种的研究也得出了相似的结果,说明薄壳山核桃果实发育后期是果实质量增长最快的时期。

在果实发育后期(9月7日至10月9日),2个参试品种的粗脂肪含量总体呈持续快速增加态势,与陈文静等^[10]对薄壳山核桃果实脂肪酸的积累研究结果一致,说明果实发育后期是薄壳山核桃油脂积累的关键阶段,但在本研究中发现‘马罕’品种粗脂肪含量从9月30日至10月9日出现了小幅下降,这与贾晓东等^[11]、袁紫倩^[12]等研究结果一致,出现这一现象是否与品种自身相关有待进一步研究。果实发育后期也是油脂组份转化的关键时期^[22],薄壳山核桃脂肪酸组成比例在果实发育后期也在发生变化,油酸、硬脂酸含量表现出不断上升的趋势,但硬脂酸含量上升幅度相对较小,说明薄壳山核桃种仁脂肪积累过程中积累的脂肪酸是油酸。本研究发现,‘马罕’品种亚油酸和亚麻酸含量表现出先增加再减小的趋势,而‘28号’品种亚油酸和亚麻酸含量则表现出逐步下降的趋势,说明2个主要的不饱和脂肪酸变化在品种间存在差异;研究发现,果实发育后期不饱和脂肪酸总量逐步增加,饱和脂肪酸总量逐步降低,不饱和脂肪酸与饱和脂肪酸含量

变化表现极显著负相关,说明随着果实发育成熟,存在饱和脂肪酸向不饱和脂肪酸转化的现象:脂肪酸以糖代谢的中间产物乙酰辅酶A为底物,在脂肪酸合成酶系的作用下首先合成棕榈酸,然后碳链延长2个碳原子转变为硬脂酸,由硬脂酸去饱和转变为油酸,油酸脱氢去饱和转变为亚油酸,亚油酸脱氢去饱和转变为亚麻酸^[22-25]。

本研究发现,‘28号’品种不饱和脂肪酸和饱和脂肪酸与矿质元素含量均表现出极显著相关性,‘马罕’品种不饱和脂肪酸含量与钾元素含量表现出显著负相关,与钙元素含量表现出极显著负相关,饱和脂肪酸含量与磷、钾元素含量表现出显著正相关,与钙元素含量表现出极显著正相关,说明薄壳山核桃果实发育后期油脂的积累与氮、磷、钾、钙元素的含量具有相关性。在藻类^[8,26-27]研究中普遍认为,氮缺乏会导致微藻细胞内大量积累油脂,在缺氮情况下藻细胞形成的蛋白质量减少,硅藻光合作用形成的能量物质有可能更多地转向合成油脂,这可能是因为氮元素缺乏对藻类是一种环境胁迫,它刺激藻类启动抗逆生理反应,即通过过量积累油脂来度过不利环境。本文也表现出与藻类一致的规律,不同薄壳山核桃品种种仁粗脂肪含量与氮元素含量均表现出显著负相关,随着氮元素含量的减少,种仁粗脂肪含量不断增加,这也与贾晓东^[4]等研究结果一致,在脂肪的形成过程中,蛋白质和可溶性糖等营养物质转变为脂肪,使种仁脂肪含量不断增加。因此,可借助分子生物学的研究方法,深入了解薄壳山核桃油脂形成及转化机理,为提高油脂含量、改善油脂品质提供理论依据。

果树的正常生长需要大量的钾,钾主要集中在植物最活跃的部位,缺钾使淀粉与脂肪酸无法合成^[13]。本试验结果表明,从果实发育初期9月7日到9月19日,薄壳山核桃果实种仁、青皮中钾元素

含量相对较高,坚果壳中钾含量相对较低,种仁与坚果壳中钾含量逐渐降低,而青皮中钾元素含量不断升高至最高值,从9月19日到10月9日,果实种仁中钾元素含量继续降低,青皮中钾元素含量开始降低,而坚果壳中钾元素含量开始急剧增加至最高值,可见薄壳山核桃果实中的钾元素在种仁、坚果壳和青皮间存在转运,这与核桃^[13]、油茶^[22]研究结果一致,这可能是因为青皮与坚果壳是较为活跃的生理部位,钾元素含量的增加,能促进糖分的转化和运输,使光合产物迅速运输到种仁中转化为油脂。

磷是构成生物体的重要元素之一,与作物体内脂肪代谢密切相关,是脂肪合成不可缺少的营养元素。磷在薄壳山核桃果实种仁中的含量,远高于果实青皮和坚果壳中的含量,在果实发育后期果实种仁中磷元素含量不断下降,也可能与油脂合成消耗了部分磷元素有关,这与油茶^[22]、核桃^[28]研究结果一致。本试验结果表明,磷元素含量与薄壳山核桃种仁粗脂肪含量、不饱和脂肪酸含量呈负相关,与饱和脂肪酸含量呈正相关,可见磷元素含量可以影响薄壳山核桃果实脂肪酸含量及组成。在藻类^[29-30]研究中认为,磷含量显著影响细胞内多不饱和脂肪酸的含量,主要是因为细胞中的多不饱和脂肪酸多以极性脂肪酸的形式存在(如磷脂),低磷浓度限制了藻类的生长,却有利于总脂的提高,因此,可以设法通过控制对磷元素的吸收来改善薄壳山核桃果实脂肪酸含量及比例。钙是偶联胞外信号与胞内生理反应的第二信使,当植物受到低温、盐渍、高温及厌氧等逆境胁迫时,能够参与植物对胁迫的应答,从而提高植物的抗性^[31-32]。本试验结果表明,不同薄壳山核桃品种钙元素含量与粗脂肪含量、不饱和脂肪酸含量呈显著负相关,与饱和脂肪酸含量呈极显著正相关。在胁迫条件下,对草莓(*Fragaria × ananassa* Duch.)叶片^[32]、大豆叶片膜脂^[33]脂肪酸含量及组成研究认为,钙处理可以影响其脂肪酸含量及组成比例,钙对膜脂的这种影响,增加了膜流动性,从而提高了植株的抗胁迫能力。在正常抚育管理措施下,钙元素含量在薄壳山核桃果实油脂积累过程中的作用,还有待于进一步研究与探讨。

4 结论

薄壳山核桃果实发育后期,果实大小与干质量均呈现出缓慢上升的趋势,不同品种果实鲜质量变

化趋势略有不同,‘马罕’品种青果鲜质量表现出缓慢上升的趋势,‘28号’品种青果鲜质量先达到最大,随后又缓慢下降。果实发育后期是薄壳山核桃油脂积累的关键时期,粗脂肪含量和脂肪酸组成均发生变化,不饱和脂肪酸与饱和脂肪酸表现出极显著负相关,不饱和脂肪酸总量逐步增加,饱和脂肪酸总量逐步降低,存在饱和脂肪酸向不饱和脂肪酸转化趋势。薄壳山核桃不同品种果实发育后期油脂积累和氮、磷、钾、钙元素的含量存在显著或极显著相关性,这些矿质元素可能在薄壳山核桃种仁油脂积累和脂肪酸转化中发挥作用。

参考文献:

- [1] 胡芳名,谭晓凤,刘惠民,等. 中国主要经济树种栽培与利用[M]. 北京:中国林业出版社,2006:66-71.
- [2] 李川,姚小华,王开良,等. 薄壳山核桃无性系果实性状指标简化研究[J]. 江西农业大学学报:自然科学版,2011,33(4):696-700.
- [3] 陈芬,姚小华,高焕章,等. 薄壳山核桃不同无性系开花物候特性观测和比较[J]. 林业科学研究,2015,28(2):209-216.
- [4] 张日清,吕芳德. 优良经济树种——美国山核桃[J]. 广西林业科学,1998,27(4):202-206.
- [5] 刘慧,王为木,杨晓华,等. 我国苹果矿质营养研究现状[J]. 山东农业大学学报:自然科学版,2001,32(2):245-250,255.
- [6] 史永江,杨少辉,张志华,等. 核桃果实发育过程中青皮和果仁中矿质元素含量的变化[J]. 河北林果研究,2007,22(2):177-179.
- [7] 黄绍文,孙桂芳,金继运,等. 不同氮水平对高油玉米吉油一号籽粒产量及其营养品质的影响[J]. 中国农业科学,2004,37(2):250-255.
- [8] 蔡佳佳,费小雯,李亚军,等. 元素缺乏和外加碳源对小球藻(*Chlorella* sp KMMCC FC-21)生长和油脂积累的影响[J]. 热带作物学报,2011,32(11):2029-2036.
- [9] 余世金,胡昊,申晓菲,等. 不同氮和磷培养条件下等鞭金藻的生长、磷吸收和油脂品质的分析[J]. 植物资源与环境学报,2016,25(4):8-17.
- [10] 陈文静,刘翔如,邓秋菊,等. 薄壳山核桃果实发育及脂肪酸积累变化规律[J]. 经济林研究,2016,34(2):50-55.
- [11] 贾晓东,罗会婷,翟敏,等. 薄壳山核桃营养物质变化及相关性研究[J]. 果树学报,2016,33(9):1120-1130.
- [12] 袁紫倩. 薄壳山核桃‘马罕’品种营养元素周年动态变化规律研究[D]. 临安:浙江农林大学,2014.
- [13] 张志华,高仪,王文江,等. 核桃果实成熟期间主要营养成分的变化[J]. 园艺学报,2001,28(6):509-511.
- [14] 张鹏,钟海雁,姚小华,等. 四种山核桃种仁含油率及脂肪酸组成比较分析[J]. 江西农业大学学报,2012,34(3):499-504.
- [15] 常君,任华东,姚小华,等. 山核桃不同无性系果实性状及营养成分分析[J]. 林业科学研究,2017,30(1):166-173.

- [16] 余兆硕,丁宏武,唐琦,等.山核桃油提取工艺优化及脂肪酸组成分析[J].农产品加工,2016(1):19-23.
- [17] 俞春莲,王正加,夏国华,等.10个不同品种的薄壳山核桃脂肪含量及脂肪酸组成分析[J].浙江农林大学学报,2013,30(5):714-718.
- [18] 张汇慧,吴彩娥,李永荣,等.不同品种薄壳山核桃营养成分比较[J].南京林业大学学报:自然科学版,2014,38(3):55-58.
- [19] 于敏,徐宏化,王正加,等.6个薄壳山核桃品种的形态及营养成分分析[J].中国粮油学报,2013,28(12):74-77.
- [20] 夏国华,黄坚钦,解红恩,等.山核桃不同器官矿质元素含量的动态变化[J].果树学报,2014,31(5):854-862.
- [21] 贾晓东,罗会婷,翟敏,等.‘波尼’薄壳山核桃果实发育动态分析[J].果树学报,2015,32(2):247-253.
- [22] 曹永庆,姚小华,任华东,等.油茶果实矿质元素含量和油脂积累的相关性[J].中南林业科技大学学报,2013,33(10):38-41.
- [23] 曹仪植,宋占年.植物生理学[M].兰州:兰州大学出版社,1998.
- [24] 张党权,谭晓风,陈鸿鹏.油茶油脂的生物合成及调控基因的特性[J].中南林业科技大学学报,2007,27(5):106-111.
- [25] 徐杰,胡国华,张大勇,等.大豆籽粒发育过程中脂肪酸组分的累积动态[J].作物学报,2006,32(11):1759-1763.
- [26] 程军,葛婷婷,冯佳,等.硅藻生长优化富集油脂的促进机理[J].能源工程,2010(4):27-32.
- [27] 王瑶华,吴洪喜,黄振华,等.氮磷硅对咖啡双眉藻和缢缩菱形藻繁殖速度和油脂积累的影响[J].海洋科学,2015,39(4):48-55.
- [28] 段洪喜.核桃成熟期间主要营养变化及其相关性的研究[D].保定:河北农业大学,2005:44-45.
- [29] 罗梦柳,桑敏,张成武,等.氮、磷对缺刻缘绿藻生长、总脂及花生四烯酸积累的影响[J].天然产物研究与开发,2010,22(3):378-382.
- [30] 梁晶晶,蒋霞敏,叶丽,等.氮、磷、铁对三角褐指藻诱变株生长、总脂及脂肪酸的影响[J].生态学杂志,2016,35(1):189-198.
- [31] 李玲,李丽杰,孙靖,等.变温条件下钙对山定子叶片氮代谢的影响[J].北方果树,2017(1):9-12.
- [32] 李青云,葛会波,胡淑明,等.盐胁迫下钙对草莓叶片脂肪酸含量及组成的影响[J].河北农业大学学报,2004,27(6):56-59.
- [33] 高向阳,许志强,徐凤彩.水分胁迫下钙对大豆叶片膜脂过氧化程度的影响[J].华南农业大学学报,1999,20(3):67-71.

Analysis of Dynamic Changes of Oil and Mineral Nutrients in Pecan at the Late Stage of Fruit Development

CHANG Jun¹, REN Hua-dong¹, YAO Xiao-hua¹, YANG Shui-ping², WANG Kai-liang¹

(1. Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Hangzhou 311400, Zhejiang, China;

2. College of Resource and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China)

Abstract: [Objective] To study the oil accumulation and the changes of mineral elements in the pecan (*Carya illinoensis*) fruit during the late development stage, and provide a theoretical basis for further research on the transformation and regulation of pecan oil. [Method] The pecan varieties ‘Mahan’ and ‘No. 28’ were used as experimental materials. Through studying the fruit quality, the oil transformation and the dynamic change of crude fat content, fatty acid composition and mineral elements content in different part of fruit in the later stage of fruit development, the relationship between oil accumulation and mineral elements was investigated. [Result] The results showed that the unsaturated fatty acid content of fruit kernel increased and then decreased in the later stage of pecan fruit development. The crude fat content and fatty acid content of fruit kernel were different with fruit development, for ‘No. 28’, the crude fat content in fruit kernel increased continuously, while for ‘Mahan’, after increasing, the crude fat content showed a slight decreasing trend. The content of oleic acid and stearic acid increased, while the arachidic acid and palmitic acid decreased gradually. The content of linoleic acid and linolenic acid increased at first and then decreased in ‘Mahan’, but decreased in ‘No. 28’. There was a significant or extremely significant negative correlations between the crude fat accumulation and the mineral elements content such as nitrogen, phosphorus, potassium and calcium in fruit kernels. [Conclusion] The fat content in fruit kernel increases and the fatty acid composition in the oil changes with the development, and There is a tendency of conversion from saturated fatty acid to unsaturated fatty acid. There are differences among varieties in the changes of crude fat content of fruit kernel and fatty acid content of oil during the development of fruit. The contents of mineral elements such as nitrogen, phosphorus, potassium and calcium in the late stage of pecan fruit development are significantly correlated with the accumulation of oil, and these mineral elements may play a role in the accumulation of oil and fatty acid transformation of pecan fruits.

Keywords: *Carya illinoensis*; oil accumulation; mineral elements; correlation

(责任编辑:金立新)