

6个薄壳山核桃品种的果实发育过程及果实结构和性状变化

许梦洋, 贾晓东^①, 罗会婷, 翟敏, 郭忠仁

[江苏省中国科学院植物研究所(南京中山植物园) 江苏省农业种质资源保护与利用平台, 江苏 南京 210014]

摘要:以江苏南京地区广泛栽培的薄壳山核桃 [*Carya illinoensis* (Wangenh.) K. Koch] 品种‘波尼’(‘Pawnee’)、‘马罕’(‘Mahan’)、‘威奇塔’(‘Wichita’)、‘斯图尔特’(‘Stuart’)、‘金华’(‘Jinhua’)和‘绍兴’(‘Shaoxing’)为研究对象,对果实发育过程中果实形状以及果实横切面和纵切面的结构进行观察,并对果实质量、果核质量、种仁质量、出仁率、果实横径、果实纵径和果形指数7个指标进行分析。结果显示:6个薄壳山核桃品种的果实发育期历时149~169 d,均可分为缓慢生长期(约60 d)、快速膨大期(40~45 d)、硬核期(30~45 d)和种仁成熟期(10~15 d)4个时期,但6个品种果实发育各时期的持续时间略有差异。缓慢生长期果实的质量和横径增长较慢,纵径增长较快;快速膨大期果实的质量、横径和纵径均增长较快;硬核期胚乳逐渐硬化,果实质量小幅增长,果核质量基本不变,外果皮不断加厚;种仁成熟期果实的质量和大小基本稳定,外果皮出现分离或脱落的现象。6个品种的果实形状可分为狭倒卵状(‘马罕’)、倒卵状(‘威奇塔’)、卵状(‘波尼’和‘金华’)和近椭圆状(‘斯图尔特’和‘绍兴’),其果形指数总体依次减小。随果实的生长发育,薄壳山核桃果实的质量、横径和纵径总体呈逐渐增大的趋势,而果形指数总体呈减小的趋势;从硬核期中期至种仁成熟期,种仁质量和出仁率总体呈先逐渐升高后降低的趋势。总体上看,6个品种中,‘马罕’、‘金华’和‘波尼’的果实质量、果核质量、种仁质量和出仁率的最大值均较大,‘绍兴’果实的这4项指标的最大值均最小;‘波尼’的果实横径最大,‘马罕’的成熟果实纵径最大。经过综合分析,6个品种在南京地区的最佳采收期应该在9月底至10月初;‘波尼’和‘马罕’可作为南京地区主栽品种的优选对象。

关键词:薄壳山核桃;果实发育过程;果实质量;出仁率;果形指数

中图分类号: Q945.6⁺5; S664.1 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2020)02-0046-09

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2020.02.06

Fruit development process and variations of fruit structure and character of six cultivars of *Carya illinoensis* XU Mengyang, JIA Xiaodong^①, LUO Huiting, ZHAI Min, GUO Zhongren (The Jiangsu Provincial Platform for Conservation and Utilization of Agricultural Germplasm, Institute of Botany, Jiangsu Province and Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210014, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2020, 29(2): 46–54

Abstract: Taking cultivar ‘Pawnee’, ‘Mahan’, ‘Wichita’, ‘Stuart’, ‘Jinhua’, and ‘Shaoxing’ of *Carya illinoensis* (Wangenh.) K. Koch widely cultivated in Nanjing of Jiangsu as research objects, fruit shape and fruit structures of transverse section and longitudinal section during fruit development process were observed, and seven indexes including fruit mass, nut mass, kernel mass, kernel rate, fruit transverse diameter, fruit longitudinal diameter, and fruit shape index were analyzed. The results show that fruit development periods of six cultivars of *C. illinoensis* last for 149–169 d, and can be divided into four stages of slow-growth stage (about 60 d), rapid expansion stage (40–45 d), core-harden stage (30–45 d), and kernel mature stage (10–15 d), but the duration of each fruit development stage of six

收稿日期: 2019-09-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31200502); 江苏省林业三新工程重大集成示范项目(LYSX201644); 江苏省现代农业项目(BE2019385); 江苏省2018年中医药公共卫生服务补助专项(财社[2018]43号)

作者简介: 许梦洋(1993—),女,江苏南京人,硕士研究生,主要从事果树种质资源及果树品种研究。

^①通信作者 E-mail: 32704955@qq.com

cultivars is slightly different. At slow-growth stage, fruit mass and transverse diameter grow relatively slow, but longitudinal diameter does relatively fast; at rapid expansion stage, fruit mass, transverse diameter, and longitudinal diameter all grow relatively fast; at core-harden stage, endosperm gradually hardens, fruit mass grows slightly, nut mass is almost invariant, and exocarp keeps thickening; at kernel mature stage, fruit mass and size are basically stable, and exocarp appears separation or abscission phenomenon. Fruit shape of six cultivars can be classified into narrowly obovate (‘Mahan’), obovate (‘Wichita’), oviform (‘Pawnee’ and ‘Jinhua’), and almost ellipsoidal (‘Stuart’ and ‘Shaoxing’), and their fruit shape indexes successively decrease in general. With the growth and development of fruit, fruit mass, transverse diameter, and longitudinal diameter of *C. illinoensis* show a tendency of gradual increase, while fruit shape index shows a tendency of decrease in general; from mid stage of core-harden to kernel mature stage, kernel mass and kernel rate show a tendency of first gradual increase and then decrease in general. In general, among six cultivars, the maximum of fruit mass, nut mass, kernel mass, and kernel rate of ‘Mahan’, ‘Jinhua’, and ‘Pawnee’ are all relatively large, while those of ‘Shaoxing’ are all the smallest; fruit transverse diameter of ‘Pawnee’ is the largest, while longitudinal diameter of mature fruit of ‘Mahan’ is the largest. Taken together, the optimum harvest period of six cultivars in Nanjing should be from the end of September to early October; ‘Pawnee’ and ‘Mahan’ can be selected as optimal objects of main cultivars in Nanjing.

Key words: *Carya illinoensis* (Wangenh.) K. Koch; fruit development process; fruit mass; kernel rate; fruit shape index

薄壳山核桃 [*Carya illinoensis* (Wangenh.) K. Koch] 是一种优良的木本油料作物^[1-3], 其果实富含油脂和酚类, 具有保护心脑血管健康和抗炎等多种保健功效^[4-5]。薄壳山核桃原产于北美洲, 在原产地选育品种达上千个, 但其中大面积栽培的品种仅数十个^[6]。近年来, 中国的薄壳山核桃产业发展较快, 特别是在江苏和安徽, 其种植面积快速增加^[7-8]。通过多年栽培实践, 目前已筛选出一批在江苏适生的薄壳山核桃品种。

果实发育特性研究是科学栽培管理及果实品质调控的研究基础。目前, 对薄壳山核桃果实品质已经有较多的研究报道^[9-11], 但仅对一些品种果实发育中后期的部分特性进行了研究^[12-14], 例如: 陈文静等^[14]对种植于南京地区的薄壳山核桃品种‘马罕’(‘Mahan’)和‘金华’(‘Jinhua’) 在6月中旬至10月中旬的果实发育状况进行了比较; 贾晓东等^[13]对种植于南京地区的薄壳山核桃品种‘波尼’(‘Pawnee’) 花后95~165 d的果实发育动态进行了分析。薄壳山核桃果实发育期较长, 集中于5月初至10月中旬^[15], 历时约160 d, 同一品种因栽培条件以及气候和土壤等环境因子的差异而导致果实发育期推迟或提前; 董润泉^[12]比较了2个产地的薄壳山核桃开花及果实发育时间, 认为气温的差异是导致2个产地薄壳山核桃开花和幼果膨大期差异的原因。但迄今为止人们对薄壳山核桃果实发育特性及其影响

因子还缺乏足够的认知, 特别是对薄壳山核桃果实成熟过程中果实外观形态和内部结构与果实品质的关联性缺乏系统研究。

鉴于此, 作者选择在江苏南京地区广泛栽培的薄壳山核桃品种‘波尼’、‘马罕’、‘威奇塔’(‘Wichita’)、‘斯图尔特’(‘Stuart’)、‘金华’和‘绍兴’(‘Shaoxing’) 为研究对象, 从受粉后(5月初)开始对发育过程中果实外观形态和内部结构的变化进行观察, 并对部分果实性状指标进行取样测定, 分析各品种果实性状的生长发育规律, 以明确薄壳山核桃果实发育期与其最佳采收期的关系, 为薄壳山核桃的优良品种选育、适栽品种选择和果实最佳采收期确定提供基础研究数据。

1 研究地概况和研究方法

1.1 研究地概况

供试薄壳山核桃样树均种植于江苏省中国科学院植物研究所薄壳山核桃实验基地。该基地位于江苏省南京市六合区雄州镇, 具体地理坐标为东经118°22′~119°14′、北纬31°14′~32°36′, 面积约为3.33 hm²。该区域属北亚热带季风气候, 年平均气温15.4℃, 年最高气温39.7℃, 年最低气温-13.1℃, 年降水量1 106 mm, 空气相对湿度76%。实验地土壤为灌耕黄棕壤, 沙壤土质地, 土壤pH 6.5。

供试‘波尼’、‘马罕’、‘威奇塔’、‘斯图尔特’、‘金华’和‘绍兴’6个品种的样树株龄均为8~10 a, 树体生长健康且发育良好、长势基本一致, 株距和行距分别为5.0和7.0 m, 每个品种选取3株, 视为3个重复。

1.2 方法

1.2.1 样品采集 于2017年5月1日起对各样树的生长情况进行观察, 于5月24日(各品种果实均进入缓慢生长期)至10月11日(各品种果实均完全成熟)采集果实样品, 每隔7 d采样1次。在各样树的东、南、西、北4个方向分别采集健康且无病虫害的果实2枚, 即每株样树采集8枚果实。将采集的新鲜果实置于冰盒中带回实验室, 拍照后置于-20℃条件下过夜, 次日进行果实性状指标的测定。

1.2.2 果实性状指标测定 用佳能EOS 5D相机(日本Canon公司)对样品果实外观以及横切面(用水果刀在果实纵径1/2处进行横切)和纵切面(用水果刀从果实顶部向基部进行纵切)进行拍照。各品种随机抽取8个果实, 用千分之一电子天平称量果实质量(含外果皮)、果核质量(去除外果皮)和种仁质量(去除内果皮), 结果取平均值; 根据公式“出仁率=(种仁质量/果核质量)×100%”计算出仁率。采用数显游标卡尺(精度0.01 mm)测量果实的横径和纵径, 结果取平均值; 根据公式“果形指数=果实纵径/果实横径”计算果形指数。

由于5月初至5月24日果实变化较小, 因而, 果实发育状况及果实性状指标从5月24日开始观察和测量, 每隔14 d(特殊发育期每隔7 d)观测1次; 从9月6日开始种仁由乳状变为固体状, 故果核质量、种仁质量和出仁率从9月6日开始测量, 每隔7 d测量1次。

1.3 数据处理和分析

采用EXCEL 2016软件对获得的实验数据进行统计和分析, 采用SPSS 25.0软件对各表型性状指标进行单因素方差分析, 并采用Duncan's新复极差法进行多重比较。

2 结果和分析

2.1 果实外观形态和内部结构的变化

2.1.1 果实外观的变化 观察结果显示: 6个薄壳山核桃品种的果实发育经历了缓慢生长期、快速膨大

期、硬核期和种仁成熟期4个时期。其中, 5月24日至7月5日为缓慢生长期, 且在5月24日至6月21日果实上仍有未完全脱落的萼片; 7月5日以后至8月16日为快速膨大期, 果实外观和大小较前期变化明显; 8月16日以后至9月27日为硬核期, 9月27日以后为种仁成熟期, 这2个时期果实外观和大小变化不明显。外果皮颜色从快速膨大期的前期开始逐渐变绿, 至种仁成熟期变黄并皱缩, 出现褐色斑点。6个品种的果实形状差异较大, 其中, ‘波尼’和‘金华’的果实呈卵状, ‘马罕’的果实呈狭倒卵状, ‘威奇塔’的果实呈倒卵状, ‘斯图尔特’和‘绍兴’的果实呈近椭圆球状。

2.1.2 果实横切面的结构变化 由果实横切面(图1)可见: 6个薄壳山核桃品种果实的横切面总体呈近圆形或矩圆形; 果实包括外果皮、内果皮、胚乳和隔膜等结构, 从7月5日开始均可观察到各部分的结构及其变化。

从外果皮看, 各品种的外果皮从7月5日以后逐渐增厚。波尼’、‘马罕’、‘威奇塔’和‘斯图尔特’的外果皮从8月16日以后明显增厚, 但9月13日以后外果皮厚度变化较小, 至9月27日与果核分离或脱落; 而‘金华’和‘绍兴’的外果皮从9月13日以后明显增厚, 但未出现与果核分离的现象。

从内果皮看, 从7月5日开始可清晰地观察到各品种的内果皮结构。5月24日至9月13日, 内果皮厚度逐渐增加, 但9月13日以后内果皮厚度无明显变化, 甚至9月27日以后内果皮厚度小幅减小。而内果皮硬度从8月2日开始逐渐增加, 至10月11日内果皮硬度达到最大。

从果核的结构看, 7月5日至8月16日果核快速增大, 但8月16日以后果核大小无明显变化。从6月7日开始可观察到胚珠和隔膜, 7月19日左右各品种的果核内可观察到浆状胚乳, 且随果实生长发育, 浆状胚乳含水量逐渐降低, 其中, ‘波尼’、‘威奇塔’和‘斯图尔特’的胚乳分别在8月23日、8月30日和9月6日变为硬质胚乳, 而其他3个品种的胚乳在9月13日完全变为硬质胚乳。

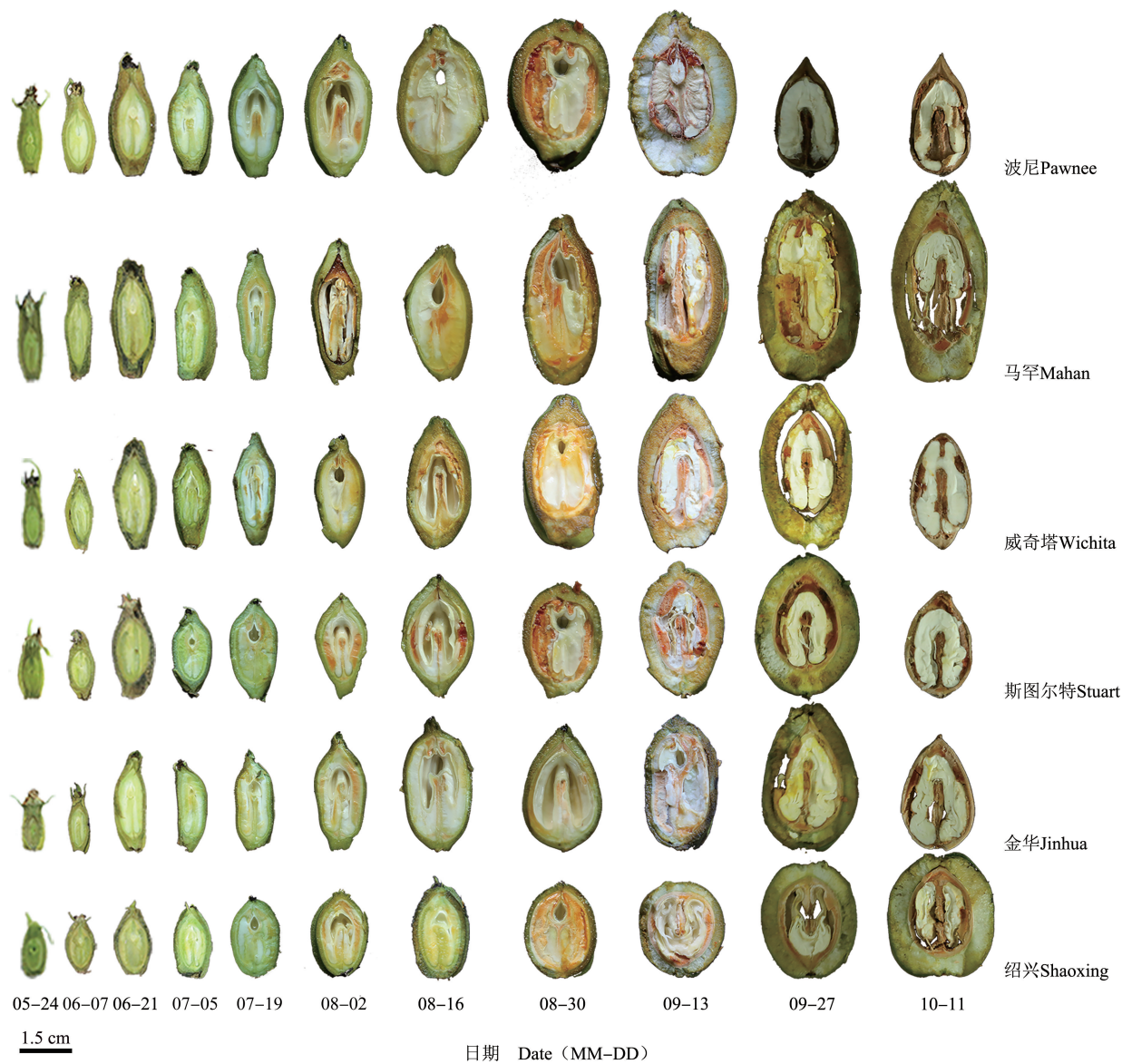
2.1.3 果实纵切面的结构变化 由果实纵切面(图2)可见: 6个薄壳山核桃品种果实纵切面形状差异较大, 其中, ‘波尼’和‘金华’为卵形, ‘马罕’为狭长的倒卵形, ‘威奇塔’为倒卵形, ‘绍兴’和‘斯图尔特’为近圆形; 果实包括外果皮、内果皮、胚乳和隔膜等结

构,从 7 月 5 日开始均可观察到各部分的结构及其变化。外果皮和内果皮的生长规律与果实横切面的观察结果基本一致,即外果皮和内果皮的厚度从 7 月 5 日以后快速增长,9 月 13 日以后增长幅度较小。随果实逐渐成熟,一些品种的外果皮开裂并脱落,其中,‘威奇塔’的外果皮在 9 月 27 日与果核分离;‘波尼’的外果皮脱落最早(9 月 27 日);而‘威奇塔’、‘斯图尔特’和‘金华’的外果皮在 10 月 11 日脱落,但‘马罕’和‘绍兴’的外果皮在 10 月 11 日仍未脱落。

果核结构的变化规律与果实横切面的观察结果基本一致,但在纵切面上可以观察到内果皮和胚乳的变化:从 7 月 19 日开始近果顶端形成浆状胚乳并逐渐向下延伸和硬化,而内果皮则在 8 月 2 日开始从顶端逐渐向下硬化。另外,10 月 11 日,由于种仁含水量降低,‘马罕’的种仁出现明显的不饱满现象,‘金华’和‘绍兴’的种仁也有轻微的不饱满现象。

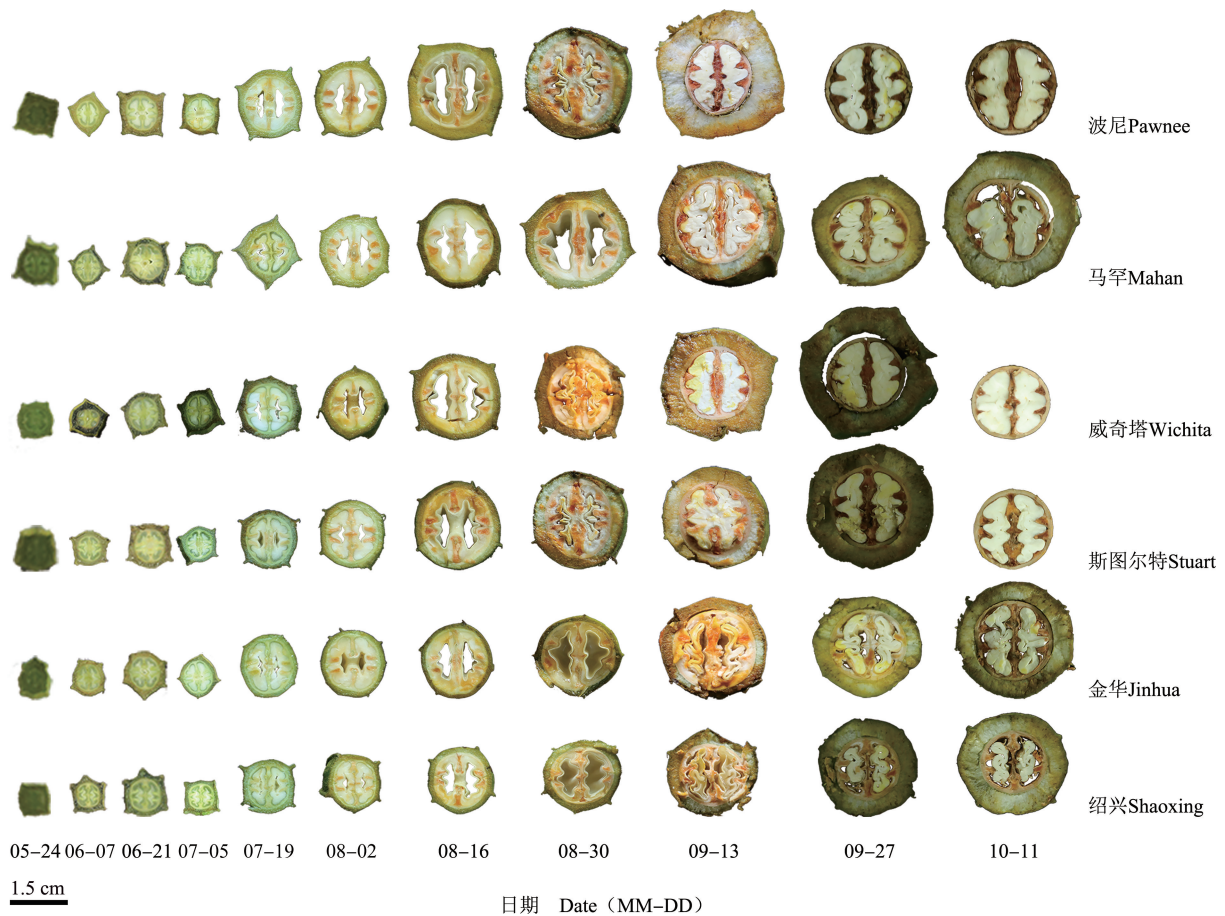
2.2 果实质量相关指标的变化

果实发育过程中 6 个薄壳山核桃品种果实质量



5 月 24 日的果实图片较原尺寸放大 4 倍,6 月 7 日和 6 月 21 日的果实图片较原尺寸放大 2 倍 The images of fruits on May 24th are 4 times larger than original size, and those of fruits on June 7th and June 21st are 2 times larger than original size.

图 1 果实发育过程中 6 个薄壳山核桃品种果实横切面的变化
Fig. 1 Change of fruit transverse section of six cultivars of *Carya illinoensis* (Wangenh.) K. Koch during fruit development process



5月24日的果实图片较原尺寸放大4倍,6月7日和6月21日的果实图片较原尺寸放大2倍 The images of fruits on May 24th are 4 times larger than original size, and those of fruits on June 7th and June 21st are 2 times larger than original size.

图2 果实发育过程中6个薄壳山核桃品种果实纵切面的变化

Fig. 2 Change of fruit longitudinal section of six cultivars of *Carya illinoensis* (Wangenh.) K. Koch during fruit development process

的变化见表1,果核质量、种仁质量和出仁率的变化见表2。

2.2.1 果实质量的变化 由表1可见:随果实的生长发育,6个薄壳山核桃品种的果实质量总体逐渐升高,但不同时期的增速不同,呈“缓慢—快速—缓慢”的生长规律。5月24日至7月5日为果实缓慢生长期,同一品种的果实质量增长均较缓慢且总体无显著差异;7月5日以后进入快速膨大期,7月5日至9月27日同一品种的果实质量总体差异显著;在9月27日和10月11日,除‘马罕’和‘威奇塔’外,其他4个品种的果实质量在这2个时段内均无显著差异。

6个品种的果实质量达到峰值的时间不一致,其中,‘马罕’的果实质量在9月27日最大(45.10 g),而‘波尼’、‘威奇塔’、‘斯图尔特’、‘金华’和‘绍兴’的果实质量在10月11日最大,分别为54.41、41.50、

41.63、44.10和36.12 g。总体上看,‘波尼’的果实质量在整个发育过程中均高于其他5个品种,而‘绍兴’的果实质量在多数时段低于其他品种。6个品种的果实质量依据其最大值由高到低依次为‘波尼’、‘马罕’、‘金华’、‘斯图尔特’、‘威奇塔’、‘绍兴’。

2.2.2 果核质量的变化 由表2可见:9月6日至10月11日(硬核期的中期至种仁成熟期),6个薄壳山核桃品种的果核质量呈小幅的波动变化,但果核质量总体降低。与9月6日相比,9月13日‘波尼’、‘马罕’、‘金华’和‘绍兴’的果核质量小幅降低,‘威奇塔’和‘斯图尔特’的果核质量则小幅升高,仅‘金华’的果核质量显著升高。9月13日至10月4日,除‘斯图尔特’的果核质量在9月20日和9月27日小幅降低外,6个品种的果核质量总体升高,且均在10月4日最大。10月11日,‘马罕’和‘斯图尔特’

表 1 果实发育过程中 6 个薄壳山核桃品种果实质量的变化 ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾
Table 1 Change of fruit mass of six cultivars of *Carya illinoensis* (Wangenh.) K. Koch during fruit development process ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

日期 Date (MM-DD)	各品种的果实质量/g Fruit mass of each cultivar					
	波尼 Pawnee	马罕 Mahan	威奇塔 Wichita	斯图尔特 Stuart	金华 Jinhua	绍兴 Shaoxing
05-24	0.11±0.02g	0.06±0.01h	0.05±0.04h	0.05±0.01h	0.05±0.01f	0.03±0.01g
06-07	0.33±0.07g	0.11±0.07h	0.19±0.02h	0.10±0.02h	0.13±0.01f	0.11±0.03g
06-21	1.07±0.14g	0.57±0.03gh	0.50±0.03h	0.41±0.09h	0.38±0.04f	0.33±0.06g
07-05	3.00±0.42g	1.71±0.10gh	1.84±0.13h	1.28±0.16g	1.14±0.14f	1.21±0.06fg
07-19	11.37±0.95f	3.70±0.26g	4.68±0.73g	3.15±0.94f	3.00±0.22f	3.08±0.83f
08-02	18.73±2.38e	14.45±3.44f	8.00±1.68f	8.27±0.27e	8.54±1.12e	7.75±0.94e
08-16	36.80±2.12d	28.33±3.82e	18.53±1.63e	16.30±1.19d	14.53±1.78d	13.26±1.73d
08-30	42.68±3.09c	30.21±2.59d	27.55±0.77d	26.83±2.48c	24.23±1.69c	19.33±1.58c
09-13	51.54±2.64b	44.51±3.71c	31.79±3.23c	32.91±0.93b	37.93±0.85b	31.35±2.28b
09-27	52.73±2.66a	45.10±1.65a	37.73±1.49b	41.00±2.61a	41.64±2.37a	34.34±1.92a
10-11	54.41±2.71a	44.68±0.22b	41.50±3.88a	41.63±1.43a	44.10±1.47a	36.12±1.81a

¹⁾ 同列中不同的小写字母表示在 0.05 水平上差异显著 Different lowercases in the same column indicate the significant difference at 0.05 level.

表 2 果实发育过程中 6 个薄壳山核桃品种果核质量、种仁质量和出仁率的变化 ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾
Table 2 Changes of nut mass, kernel mass and kernel rate of six cultivars of *Carya illinoensis* (Wangenh.) K. Koch during fruit development process ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

日期 Date (MM-DD)	各品种的果核质量/g Nut mass of each cultivar					
	波尼 Pawnee	马罕 Mahan	威奇塔 Wichita	斯图尔特 Stuart	金华 Jinhua	绍兴 Shaoxing
09-06	10.90±0.83ab	15.46±0.29a	8.80±0.30b	10.42±0.43ab	16.59±0.90a	9.11±0.20ab
09-13	10.83±0.41ab	14.79±0.73a	9.10±0.15ab	11.12±0.01ab	13.36±0.70b	8.78±0.01b
09-20	10.85±0.52ab	15.37±0.65a	9.15±0.72ab	9.44±0.73b	14.25±0.48ab	10.20±0.92ab
09-27	11.17±0.51ab	15.38±0.57a	9.92±0.23ab	9.93±0.61ab	14.45±0.11ab	10.11±0.45ab
10-04	11.87±0.98a	16.76±0.25a	11.00±0.85a	11.79±0.84a	14.75±0.42ab	10.98±0.08a
10-11	9.04±0.94b	12.98±0.55a	8.70±0.36b	10.53±0.95ab	9.95±0.08c	8.34±0.50b

日期 Date (MM-DD)	各品种的种仁质量/g Kernel mass of each cultivar					
	波尼 Pawnee	马罕 Mahan	威奇塔 Wichita	斯图尔特 Stuart	金华 Jinhua	绍兴 Shaoxing
09-06	4.07±0.43a	4.65±0.11b	3.35±0.11b	3.78±0.13b	4.98±0.30bc	2.71±0.20a
09-13	4.70±0.41a	4.59±0.23b	3.58±0.05ab	5.22±0.04a	3.52±0.20c	2.63±0.01a
09-20	5.30±0.22a	7.35±0.27a	3.70±0.02ab	4.58±0.33ab	6.32±0.18ab	3.10±0.42a
09-27	5.80±0.23a	7.86±0.37a	4.83±0.02ab	4.98±0.21ab	7.14±0.07a	3.41±0.35a
10-04	6.71±0.48a	8.77±0.24a	5.41±0.25a	6.04±0.44a	7.66±0.22a	4.18±0.13a
10-11	4.44±0.45a	6.66±0.55ab	3.98±0.26ab	4.60±0.15ab	3.54±0.38c	3.48±0.23a

日期 Date (MM-DD)	各品种的出仁率/% Kernel rate of each cultivar					
	波尼 Pawnee	马罕 Mahan	威奇塔 Wichita	斯图尔特 Stuart	金华 Jinhua	绍兴 Shaoxing
09-06	37.34±0.33d	30.08±0.21c	38.07±0.51b	36.28±0.13d	30.02±0.44d	29.69±0.32d
09-13	43.40±0.44c	31.95±0.73c	39.34±0.55b	46.94±0.04bc	26.35±1.70e	29.98±0.36d
09-20	48.85±1.37b	47.84±0.67b	40.40±1.52b	48.52±1.33ab	44.35±3.66b	30.41±1.41cd
09-27	51.92±2.33b	51.16±1.57ab	48.70±2.02a	50.15±1.21ab	49.41±2.32a	33.73±1.29bc
10-04	56.53±1.68a	52.31±1.54a	49.18±1.25a	51.23±2.44a	51.93±1.92a	38.07±1.91a
10-11	49.12±0.45b	50.85±0.75ab	45.76±0.66a	43.68±0.15c	35.59±1.88c	37.24±0.93ab

¹⁾ 同列中不同的小写字母表示在 0.05 水平上差异显著 Different lowercases in the same column indicate the significant difference at 0.05 level.

的果核质量与 10 月 4 日无显著差异,其他 4 个品种的果核质量较 10 月 4 日显著降低。

6 个品种的果核质量依据其最大值由高到低依次为‘马罕’、‘金华’、‘波尼’、‘斯图尔特’、‘威奇塔’、‘绍兴’。

2.2.3 种仁质量的变化 由表 2 可见:9 月 6 日至

10月11日,6个薄壳山核桃品种的种仁质量总体呈先逐渐升高后降低的趋势,且均在10月4日最大,之后在10月11日降低;其中,‘波尼’和‘绍兴’的种仁质量在各时段间均无显著差异,而其他4个品种的种仁质量仅在少数时段间有显著差异。与9月6日相比,9月13日‘马罕’、‘金华’和‘绍兴’的种仁质量小幅降低,‘波尼’和‘威奇塔’的种仁质量小幅升高,‘斯图尔特’的种仁质量则显著升高;与9月13日相比,9月24日至10月4日6个品种的种仁质量均不同程度升高,仅‘马罕’和‘金华’的种仁质量显著升高;10月11日,6个品种的种仁质量均不同程度降低,仅‘金华’的种仁质量显著降低。

6个品种的种仁质量依据其最大值由高到低依次为‘马罕’、‘金华’、‘波尼’、‘斯图尔特’、‘威奇塔’、‘绍兴’。

2.2.4 出仁率的变化 由表2可见:9月6日至10月11日,6个薄壳山核桃品种出仁率总体呈先逐渐升

高后降低的趋势,且均在10月4日最大,之后在10月11日降低。总体上看,6个品种的出仁率差异显著。6个品种中,‘绍兴’的果实出仁率较低,与其他品种有明显差异。

6个品种的出仁率依据其最大值由高到低依次为‘波尼’、‘马罕’、‘金华’、‘斯图尔特’、‘威奇塔’、‘绍兴’。

2.3 果实形状相关性状指标的变化

果实发育过程中6个薄壳山核桃品种果实的横径和纵径以及果形指数的变化见表3。

2.3.1 果实横径的变化 由表3可见:随果实的生长发育,6个薄壳山核桃品种的果实横径呈逐渐增大的趋势,且总体差异显著。其中,5月24日和6月7日,6个品种的果实横径均较小且无显著差异;8月30日至10月11日,6个品种的果实横径总体显著高于8月30日之前,且9月27日以后各时段果实横径虽然小幅增大但差异不显著。

表3 果实发育过程中6个薄壳山核桃品种果实横径、纵径和果形指数的变化($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

Table 3 Changes of fruit transverse diameter, fruit vertical diameter and fruit shape index of six cultivars of *Carya illinoensis* (Wangenh.) K. Koch during fruit development process ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

日期 Date (MM-DD)	各品种的果实横径/mm Fruit transverse diameter of each cultivar					
	波尼 Pawnee	马罕 Mahan	威奇塔 Wichita	斯图尔特 Stuart	金华 Jinhua	绍兴 Shaoxing
05-24	3.79±0.43g	2.82±0.15e	2.83±0.23i	2.86±0.13i	2.82±0.36i	2.83±0.26i
06-07	5.32±0.73g	3.71±0.67e	4.89±0.36h	3.73±0.43i	4.04±0.12i	4.17±0.37i
06-21	8.66±0.14f	6.76±0.22de	7.23±1.13g	6.95±0.40h	6.35±0.43h	6.76±0.50h
07-05	13.62±0.92e	9.87±0.39d	11.10±1.70f	10.23±0.51g	9.22±0.59g	10.98±0.45g
07-19	20.75±0.60d	12.88±0.40c	15.07±0.74e	14.89±1.27f	13.26±0.38f	17.44±1.12f
08-02	26.83±0.76c	22.52±1.71c	19.62±1.29d	21.31±0.34e	19.13±0.97e	24.36±1.00e
08-16	33.45±1.46b	30.88±1.48b	24.38±1.40c	28.05±0.36d	24.16±1.88d	29.71±2.69d
08-30	35.32±2.62a	29.78±0.83b	29.49±0.16b	31.68±1.18c	29.96±0.97c	31.17±1.68c
09-13	35.28±3.96a	34.99±2.18a	30.91±1.98b	34.66±0.43b	34.96±1.91b	34.81±2.43b
09-27	36.56±1.29a	35.48±0.66a	34.11±0.75a	37.60±1.69a	39.39±2.29a	37.21±0.39a
10-11	38.26±3.67a	36.66±1.98a	34.77±1.44a	38.44±2.51a	40.36±1.20a	39.32±1.18a

日期 Date (MM-DD)	各品种的果实纵径/mm Fruit vertical diameter of each cultivar					
	波尼 Pawnee	马罕 Mahan	威奇塔 Wichita	斯图尔特 Stuart	金华 Jinhua	绍兴 Shaoxing
05-24	12.18±0.97f	9.44±0.99h	8.47±0.58h	8.04±0.68h	9.04±1.27g	6.98±0.29i
06-07	15.21±1.89f	11.30±3.31g	13.95±0.39g	10.30±1.04h	12.19±0.55g	9.76±0.18h
06-21	21.63±1.76e	23.27±1.19f	19.66±1.08f	17.02±0.95g	18.20±0.31f	14.08±1.46g
07-05	31.55±1.35d	32.53±1.91e	30.26±1.52e	24.10±0.97f	25.32±0.64e	19.84±0.48f
07-19	44.45±2.09c	41.47±2.26d	40.45±1.30d	30.53±2.51e	33.68±0.34d	31.08±1.75e
08-02	52.98±2.40b	59.23±4.14c	45.54±4.28c	39.62±1.62d	44.38±3.22c	36.09±1.53d
08-16	56.06±2.31b	62.63±5.93c	52.69±2.26b	45.99±2.75c	49.62±3.00b	35.57±1.81d
08-30	57.34±2.62a	66.30±2.06b	59.00±0.23a	51.34±2.37b	52.79±2.85b	42.07±1.61c
09-13	58.08±3.41a	76.44±1.48a	59.72±4.48a	51.24±1.14b	61.67±2.74a	46.01±2.89b
09-27	59.43±3.98a	78.32±2.65a	63.60±0.91a	53.35±2.12ab	61.57±2.52a	45.04±2.29b
10-11	59.72±2.31a	75.05±2.48a	61.80±2.23a	55.16±1.13a	60.56±3.57a	47.71±2.07a

续表3 Table 3 (Continued)

日期 Date (MM-DD)	各品种的果形指数 Fruit shape index of each cultivar					
	波尼 Pawnee	马罕 Mahan	威奇塔 Wichita	斯图尔特 Stuart	金华 Jinhua	绍兴 Shaoxing
05-24	3.41±0.35a	3.83±0.12a	3.00±0.21a	2.81±0.21a	3.20±0.14a	2.48±0.22a
06-07	2.84±0.04b	3.72±0.15a	2.85±0.05a	2.77±0.18a	3.02±0.07ab	2.35±0.20b
06-21	2.65±0.21b	3.55±0.14ab	2.72±0.17b	2.45±0.14b	2.87±0.15bc	2.08±0.08c
07-05	2.38±0.08c	3.51±0.17ab	2.73±0.20b	2.36±0.11b	2.75±0.19c	1.81±0.05d
07-19	2.17±0.04cd	3.23±0.02bc	2.69±0.04b	2.05±0.10c	2.54±0.08d	1.78±0.01d
08-02	1.97±0.08d	2.81±0.14cd	2.27±0.11c	1.86±0.09cd	2.32±0.13e	1.48±0.09d
08-16	1.65±0.04e	2.71±0.09d	2.17±0.13cd	1.64±0.10de	2.05±0.08f	1.20±0.07e
08-30	1.53±0.05e	2.96±0.11cd	2.03±0.01de	1.61±0.04de	1.76±0.08g	1.35±0.02ef
09-13	1.71±0.16e	2.90±0.01cd	1.94±0.20de	1.45±0.01e	1.77±0.14g	1.32±0.07ef
09-27	1.52±0.15e	2.97±0.17cd	1.84±0.02e	1.45±0.08e	1.64±0.04h	1.21±0.06f
10-11	1.73±0.24e	2.85±0.06cd	1.87±0.07e	1.42±0.07e	1.56±0.08h	1.21±0.04f

1) 同列中不同的小写字母表示在 0.05 水平上差异显著 Different lowercases in the same column indicate the significant difference at 0.05 level.

5 月 24 日至 9 月 13 日, ‘波尼’ 的果实横径在 6 个品种中最大; 而 9 月 27 日以后, ‘金华’ 的果实横径最大, 其次为 ‘绍兴’, ‘威奇塔’ 的果实横径最小。

2.3.2 果实纵径的变化 由表 3 可见: 随果实的生长发育, 6 个薄壳山核桃品种的果实纵径呈逐渐增大的趋势, 且总体差异显著。与果实发育前期和中期相比, 在果实发育后期 (8 月 30 日以后) 6 个品种的果实纵径总体显著增大, 且在 9 月 13 日至 10 月 11 日的各时段间总体差异不显著。

在果实发育早期, ‘波尼’ 的果实纵径总体最高; 但在果实发育中后期 (8 月 2 日以后), ‘马罕’ 的果实纵径明显高于其他品种, ‘绍兴’ 的果实纵径在整个发育过程中均低于其他品种。总体上看, 6 个品种中, ‘马罕’ 的成熟果实纵径最大, 其次为 ‘威奇塔’ 和 ‘金华’, ‘绍兴’ 的成熟果实纵径最小。

2.3.3 果形指数的变化 由表 3 可见: 随果实的生长发育, 6 个薄壳山核桃品种的果形指数总体呈波动减小的变化趋势。5 月 24 日至 7 月 5 日, 果实纵径的增幅大于果实横径, 果形指数较大; 且除 ‘马罕’ 外, 其他 5 个品种的果形指数总体差异显著。7 月 5 日以后至 8 月 16 日, 果实纵径的增幅小于果实横径, 果形指数减小, 且各品种的果形指数总体差异显著; 8 月 16 日以后, 各品种的果形指数也小幅减小, 且除 ‘金华’ 外, 其他 5 个品种的果形指数总体无显著差异。

6 个品种中, ‘马罕’ 的果形指数在整个发育过程中均最高, 而 ‘绍兴’ 和 ‘斯图尔特’ 的果形指数低于其他品种。10 月 11 日, 6 个品种的果形指数由大至

小依次为 ‘马罕’、‘威奇塔’、‘波尼’、‘金华’、‘斯图尔特’、‘绍兴’。

3 讨论和结论

尽管在同一区域内气候和土壤等环境因子相似, 但由于薄壳山核桃各品种间存在遗传和适应性的差异, 因而在同一时段不同品种可能对应不同的发育时期。在南京地区栽培的薄壳山核桃, 其果实发育历时 149~169 d, 大多可分为缓慢生长期 (约 60 d)、快速膨大期 (40~45 d)、硬核期 (30~45 d) 和种仁成熟期 (10~15 d)。供试 6 个薄壳山核桃品种中, ‘马罕’ 的盛花期在 4 月 26 日左右, ‘威奇塔’ 在 4 月 28 日左右, 其他品种在 5 月 2 日左右^[16], 但 ‘波尼’ 却早于其他品种结束果实横径和纵径的快速生长阶段^[13], 较早进入种仁成熟期, 其外果皮脱落也早于其他品种, 这可能与 ‘波尼’ 为早熟品种有关^[17]。

受粉后 (5 月 24 日) 至 7 月初 (7 月 5 日) 为薄壳山核桃的缓慢生长期, 此阶段果实质量和横径的增长均较为缓慢, 但纵径增长较快。观察结果显示: 薄壳山核桃开花受粉后雌花柱头变黑, 子房开始膨大, 至 6 月初 (6 月 7 日) 可明显观察到胚珠, 此时中隔膜已形成, 但胚乳还未形成, 此时期主要体现为内部结构的变化, 因而果实质量增长较慢。7 月初 (7 月 5 日以后) 至 9 月底 (9 月 27 日) 为薄壳山核桃果实发育中期, 此阶段包含 2 个时期: 7 月初至 8 月中旬 (8 月 16 日) 为果实的快速膨大期, 历时约 45 d, 这一时期果实的横径和纵径同时快速增长, 果实质量也快速增

加,7月19日左右可观察到浆状胚乳,包裹在由胚珠珠被发育而成的内种皮中且体积迅速扩大,内果皮开始硬化;8月中旬(8月16日以后)至9月27日为硬核期,这一时期果实的横径和纵径仍小幅增大,外果皮仍不断加厚^[13],浆状胚乳快速转变并硬化,但果核质量基本不变,且内果皮硬化完成。9月27日以后为种仁成熟期,这一时期外果皮与内果皮分离甚至脱落,种仁硬质化,果实质量最大,而果实的纵径和横径则无显著变化,但果形指数降至最小。

在果实发育过程中,供试6个薄壳山核桃品种的果实形状差异明显,从果实横径和纵径以及果形指数也佐证了这种差异性。‘斯图尔特’和‘绍兴’的果实近椭球状,在果实发育过程中这2个品种的果实纵径总体低于其他品种,但果实横径与其他品种无明显差异,导致其果形指数也低于其他品种。‘马罕’的果实纵径总体较大,但其果实横径则较小,导致其果形指数在6个品种中最大,其果实呈狭倒卵状。

董润泉^[12]的研究结果显示:在云南省,薄壳山核桃的最佳采收期在10月中旬至11月初。本研究结果显示:根据果实质量、果核质量、出仁率和果形指数综合推断,供试6个品种的最佳采收期应该在9月底至10月初。显然,南京地区种植的薄壳山核桃的最佳采收期较早,一方面与品种本身的遗传特性有关;另一方面也与栽培区域的气候和土壤等环境因子有关。南京属于北亚热带湿润气候,四季分明,9月中旬即进入秋季且气温迅速下降,10月中旬大部分品种落叶;而云南省主要以亚热带高原季风气候为主,特别是其东部和中部,四季如春,气温下降迟,因而,2个种植区薄壳山核桃的采收期存在差异。

综合分析结果显示:供试6个薄壳山核桃品种的果形差异较大,且果实质量、果核质量、种仁质量、出仁率、果实横径和果实纵径均随果实发育总体增大,果形指数总体下降;且在10月4日果核质量、种仁质量和出仁率均最大。从不同发育期的果实发育状况看,缓慢生长期果实的质量和横径均增长较慢但其纵径增长较快,快速膨大期果实的质量、横径和纵径均增长较快,而硬核期果核和种仁成熟期果实质量基本不变且种仁成熟。综合果实质量、果核质量、出仁率以及果形指数,建议供试6个薄壳山核桃品种可在9月底至10月初采收果实;‘波尼’和‘马罕’可作为南京地区主栽品种的优选对象。薄壳山核桃不同品种的开花期和果熟期不同,尤其是进入快速膨大期后

对于土壤肥水的需求迅速增长^[18],因而,在实际栽培过程中应该对栽培品种的生长特性及生境条件进行综合分析,制定合理的栽培管理措施。

参考文献:

- [1] 贾晓东,王涛,张计育,等.美国山核桃的研究进展[J].中国农学通报,2012,28(4):74-78.
- [2] 杨先裕,袁紫倩,凌骅,等.薄壳山核桃‘Mahan’受粉品种选择及其结实性状分析[J].果树学报,2014,31(5):776-783.
- [3] 李永荣,靳栋梁.薄壳山核桃果用林产业发展思考及栽培关键技术[J].林业科技开发,2015,29(1):1-4.
- [4] DOMÍNGUEZ-AVILA J A, ALVAREZ-PARRILLA E, LÓPEZ-DÍAZ J A, et al. The pecan nut (*Carya illinoensis*) and its oil and polyphenolic fractions differentially modulate lipid metabolism and the antioxidant enzyme activities in rats fed high-fat diets[J]. Food Chemistry, 2015, 168: 529-537.
- [5] ROBBINS K S, GREENSPAN P, PEGG R B. Effect of pecan phenolics on the release of nitric oxide from murine RAW 264.7 macrophage cells[J]. Food Chemistry, 2016, 212: 681-687.
- [6] THOMPSON T E, YOUNG F. Pecan Cultivars: Past and Present [M]. College Station: Texas Pecan Growers Association, 1985: 220-240.
- [7] 仲磊,董筱昀.江苏薄壳山核桃和油用牡丹发展现状与对策[J].江苏林业科技,2018,45(3):46-50.
- [8] ZHANG R, PENG F, LI Y. Pecan production in China [J]. Scientia Horticulturae, 2015, 197: 719-727.
- [9] 邹伟烈,习学良,范志远.3个优良薄壳山核桃品种在云南中南亚热带的引种表现[J].林业调查规划,2010,35(6):130-133,136.
- [10] 习学良,范志远,邹伟烈,等.10个美国山核桃品种的引种研究初报[J].浙江林学院学报,2006,23(4):382-387.
- [11] 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.
- [12] 董润泉.美国薄壳山核桃果实发育研究[J].云南林业科技,2002(3):66-70.
- [13] 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.
- [14] 陈文静,刘翔如,邓秋菊,等.薄壳山核桃果实发育及脂肪酸累积变化规律[J].经济林研究,2016,34(2):50-55.
- [15] 姚小华,常君,王开良,等.中国薄壳山核桃[M].北京:科学出版社,2014:70-84.
- [16] 莫正海,张计育,翟敏,等.薄壳山核桃在南京的开花物候期观察和比较[J].植物资源与环境学报,2013,22(1):57-62.
- [17] 薛红燕,田献润,赵春磊,等.薄壳山核桃品种波尼的引种表现与栽培技术[J].落叶果树,2019,51(3):37-39.
- [18] 朱海军,生静雅,刘广勤,等.基于Logistic模型的薄壳山核桃果实生长发育研究[J].西南农业学报,2015,28(3):1231-1235.

(责任编辑:郭严冬)