

文章编号:1000-8551(2020)05-1020-08

杨梅果实生长指标的数学模型及各指标间的相关性分析

张淑文 梁森苗 郑锡良 朱婷婷 任海英 戚行江*

(浙江省农业科学院园艺研究所,浙江 杭州 310021)

摘要:为揭示白杨梅果实颜色和单果质量等相关性状的变化规律,以及各指标间的相互关系,本研究以10年生水晶种为试材,测定其果实生长发育过程中各生长指标的动态变化,选择3种理论生长方程对单果质量、纵径、横径、果形指数、果实明度(L^*)、红绿值/黄蓝值(a^*/b^*)、柠檬酸、草酸、葡萄糖、蔗糖和果糖等11个指标进行拟合,并根据拟合结果确定合适的生长方程确立数学模型;同时,对果实生长各指标间的相关性进行分析。结果表明, L^* 、果形指数、柠檬酸和蔗糖等指标适合选择三项式方程, a^*/b^* 、草酸、果糖和葡萄糖等指标符合二项式方程,单果质量、纵径和横径等指标符合 Logistic 方程。在果实发育过程中, a^*/b^* 与单果质量、纵径、横径、蔗糖、葡萄糖、果糖和明度之间呈极显著正相关, a^*/b^* 与果形指数和柠檬酸之间呈显著负相关,草酸与 L^* 和 a^*/b^* 之间呈极显著负相关。本研究结果为基于颜色对杨梅品质进行无损检测 and 模拟、预测果实发育奠定了理论基础。

关键词:杨梅;果实生长指标;数学模型;动态变化;相关性分析

DOI:10.11869/j.issn.100-8551.2020.05.1020

杨梅(*Myrica rubra* Sieb. et Zucc.)为被子植物门双子叶植物纲(Dicotyledoneae)杨梅目(Myricales)杨梅科(Myricaceae)杨梅属(*Myrica*)果树,依果实颜色分为着色种和白色种两大类,着色种又可分为乌梅类、红梅类和粉红梅类。白色种果实成熟后呈白色或乳白色,以浙江上虞的水晶种为主要代表,其果实完熟时果面呈白玉色,肉柱先端稍带红点,肉质柔软细嫩、汁多,味甜稍酸,风味较浓,具有独特香味^[1]。目前,对着色种梅类果实发育各时期的颜色与主要营养物质的变化规律研究较多^[2],根据果实大小和颜色的变化可分为幼果期、硬核期、转白期、转红期、成熟期和后期6个时期,并证实转白期是果实颜色变化、糖类物质积累和酸类物质下降的关键时期^[3]。白杨梅在转白期后果实颜色变化无明显节点,且果实颜色的变化规律、单果质量相关性状的动态变化与主要营养物质的积累相关性尚不明确。

植物生长模拟是以系统分析和数学模拟来定量描述植物生长发育和形态建成过程以及对生长环境变化

的反应,有助于了解不同生理生态条件下植物生育期的进程,可对其生长过程进行定量描述^[4-5]。生长方程作为一种表达有机体大小随时间变化的模型,可反映某些生物生长的规律^[6]。已有对苹果^[7]、板栗^[8]、杂交榛^[9]、杏^[10]、龙眼^[11]等果实生长的数学模型的研究,主要以生长时间为变量,采用多项式拟合和理论方程等方法构建果实生长的数学模型。本研究以水晶种杨梅为试材,对其转白期后的果实颜色值、单果质量相关性状和品质指标与果实生长发育时间进行动态分析,并对各个生长指标间的相关性进行分析,以期为了了解杨梅果实的生长发育规律和过程的定量描述提供依据,为白杨梅的精细化管理奠定理论基础以及提供技术指导。

1 材料与方法

1.1 材料

试验材料取自浙江省绍兴市上虞区张家岙杨梅基

收稿日期:2018-11-20 接受日期:2019-02-24

基金项目:浙江省农业(果品)新品种选育重大科技专项(2016C02052-2),浙江省农业科学院地方科技合作项目(SY20170005)

作者简介:张淑文,女,助理研究员,主要从事杨梅分子育种研究。E-mail: hizhangshuwen@163.com

*通讯作者:戚行江,男,研究员,主要从事果树科学研究。E-mail: qixj@mail.zaas.ac.cn

地。基地土壤中 8 种元素、有机质及 pH 值情况如表 1 所示,有机质含量 1.03%~2.76%、氮 33.60~77.50 mg·kg⁻¹、磷 2.30~3.20 mg·kg⁻¹、钾 104.70~131.90 mg·kg⁻¹,pH 值 4.11~4.62,符合杨梅生长的栽培条件。基地内树体统一管理,样树均为长势良好的 10 年生果树。

表 1 基地土壤中各元素含量及 pH 值
Table 1 Content of elements and pH value in base soil

土壤深度 Depth/cm	有机质 Organic matter/%	磷 P /(mg·kg ⁻¹)	硼 B /(mg·kg ⁻¹)	锌 Zn /(mg·kg ⁻¹)	锰 Mn /(mg·kg ⁻¹)	钙 Ca /(mg·kg ⁻¹)	镁 Mg /(mg·kg ⁻¹)	钾 K /(mg·kg ⁻¹)	氮 N /(mg·kg ⁻¹)	pH 值 pH value
0~20	2.76	2.30	0.56	4.80	2.70	108.60	14.40	131.90	77.50	4.11
20~40	1.03	3.20	0.34	4.00	2.40	156.80	13.80	104.70	33.60	4.62

1.2 果实外观及品质的测定

2017 年 5 月 26 日,在水晶种转白期开始时,分别采集 3 株白杨梅果实,每次每株树取样 30 颗果实,重复 2 次,共计样品 6 个。第一次取样记为转白期第 1 天,间隔 1 d 取样一次,直至果实完全成熟,共取样 16 次(1、3、5、7、9、11、13、15、17、19、21、23、25、27、29、31 d)。每次样品采集后,当天带回实验室,将相同植株的样品混合,用电子天平随机称取 10 个不同果实的质量,并计算单果质量(single fruit weight),重复称量 6 次,下同;用电子数显游标卡尺测定其果实的纵径(lengthwise diameter)和横径(broadwise diameter);果形指数(fruit shape index)=纵径/横径;采用 CR-400 便携式色差仪(日本柯尼卡美能达公司)进行色差测定,记录明度(L*)、红绿值(a*)和黄蓝值(b*),并计算红绿值/黄蓝值(a*/b*)。

选择上述 16 次样品中的 8 次样品(1、5、9、13、17、21、25、29 d)进行主要营养物质的测定:柠檬酸(citric acid)和草酸(oxalic acid)含量参照胡静等^[12]的方法,利用离子色谱法进行分离测定,重复 3 次,下同。葡萄糖(glucose)、蔗糖(sucrose)和果糖(fructose)含量,依据 GB/5009.8-2016^[13]进行测定。

1.3 模型建立

运用多项式回归的方法,以不同时期的单果质量、纵径、横径、果形指数、L*、a*/b*、柠檬酸、草酸、葡萄糖、蔗糖和果糖为指标,对白杨梅果实发育的生长曲线进行拟合,建立动态方程,即为白杨梅果实生长的动态模型。

1.4 数据处理

利用 Microsoft Excel 2012 分别计算 3 株白杨梅各时期各指标的平均值;多项式回归分析、生长曲线及图像绘制采用 Origin 8.0 软件完成;SPSS 21 软件完成各生长指标间的相关性分析、逐步线性回归分析。草酸(Y)的回归方程采用的线性模型如下:Y=b₀+b₁X₁+b₂X₂+……+b_iX_i,Y 为因变量,b₀是常数,b_i是偏回归系数,X_i是 b_i对应的自变量^[14]。

2 结果与分析

2.1 果实发育过程中颜色的动态变化

由图 1-A 可知,在转白期开始 1~15 d 时,L* 值迅速上升;在第 17~第 31 天时,基本保持稳定。由于果实色泽是各种单色的综合表现,单一颜色不足以代表

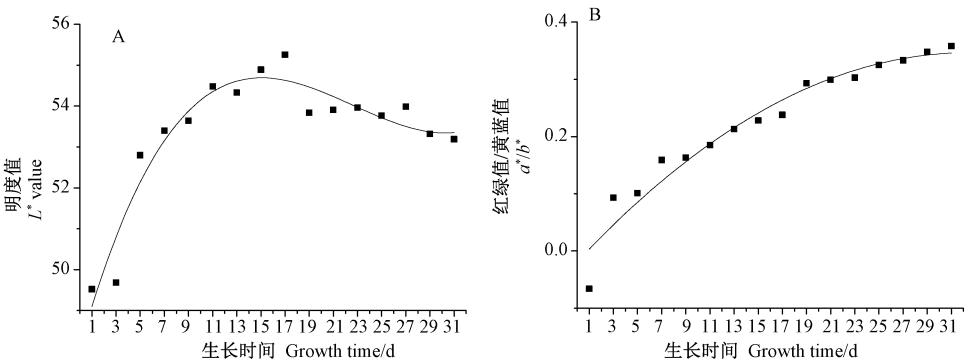


图 1 果实发育中颜色值的动态变化

Fig.1 The dynamic accumulation of fruit color

果实的真正色泽,因此可用 a^*/b^* 表示果实的真实色泽^[15-16]。由图 1-B 可知,在转白期开始 1~5 d 时, a^*/b^* 由负值(-0.066)变为正值(0.093~0.101);在第 19~第 31 天时,缓慢增加直至稳定。

对果实发育中颜色值 L^* 和 a^*/b^* 值与果实生长时间进行拟合,结果如表 2 所示。 L^* 的动态方程: $y = 48.100 + 1.049x - 0.052x^2 + 7.673E^{-4}x^3$, 方程达极显著

水平, F 值为 42.795, 决定系数(R^2) 为 0.893, 拟合曲线如图 1-A 所示; a^*/b^* 的动态方程: $y = -0.019 + 0.023x - 3.480E^{-4}x^2$, 方程达极显著水平, F 值为 122.058, R^2 为 0.942, 拟合曲线如图 1-B 所示。表明, L^* 的变化模型符合三项式方程, a^*/b^* 的变化模型符合二项式方程, 拟合度均良好。

表 2 果实颜色性状的动态模型
Table 2 The dynamic model of fruit color traits

性状 Traits	模型 Model	决定系数 R^2	F 值 F value
明度值 L^*	$y = 48.100 + 1.049x - 0.052x^2 + 7.673E^{-4}x^3$	0.893 **	42.795
红绿值/黄蓝值 a^*/b^*	$y = -0.019 + 0.023x - 3.480E^{-4}x^2$	0.942 **	122.058

注: R^2 为决定系数, ** 表示极显著 ($P < 0.01$)。下同。
Note: R^2 indicate determination coefficient, ** indicate extremely significant difference at 0.01 level. The same as following.

2.2 果实质量相关性状的动态变化

果实发育过程中,单果质量(图 2-A)、纵径和横径(图 2-B)在转白期后呈现一个渐增期、快增期、缓增期的 S 形增长曲线,且横径的增长速度高于纵径。果形指数是表示果实形状指标,在转白期开始时果形指数大于 1(1.061),为高圆形果实;而后逐渐减小至小于 1(0.929),呈扁圆形果实;继而又增加至接近 1(0.998),变为圆形果实(图 2-C)。

由表 3 可知,单果质量、纵径和横径的动态增长模

型符合 Logistic 方程,分别为: $y = 12.927 - 11.176/[1 + (x/20.792)^{2.075}]$, $y = 5778.955 - 5763.026/[1 + (x/57545.777)^{0.858}]$ 和 $y = 28.212 - 12.547/[1 + (x/15.844)^{2.111}]$; R^2 分别为 0.998、0.995 和 0.996, 方程均达到极显著水平, 拟合曲线如图 2-A、B 所示。果形指数的拟合曲线如图 2-C 所示, 其动态模型符合三项式方程: $y = 1.063 + 0.002x - 8.706E^{-4}x^2 + 2.395E^{-5}x^3$, 方程达极显著水平, F 值为 120.194, R^2 为 0.960。

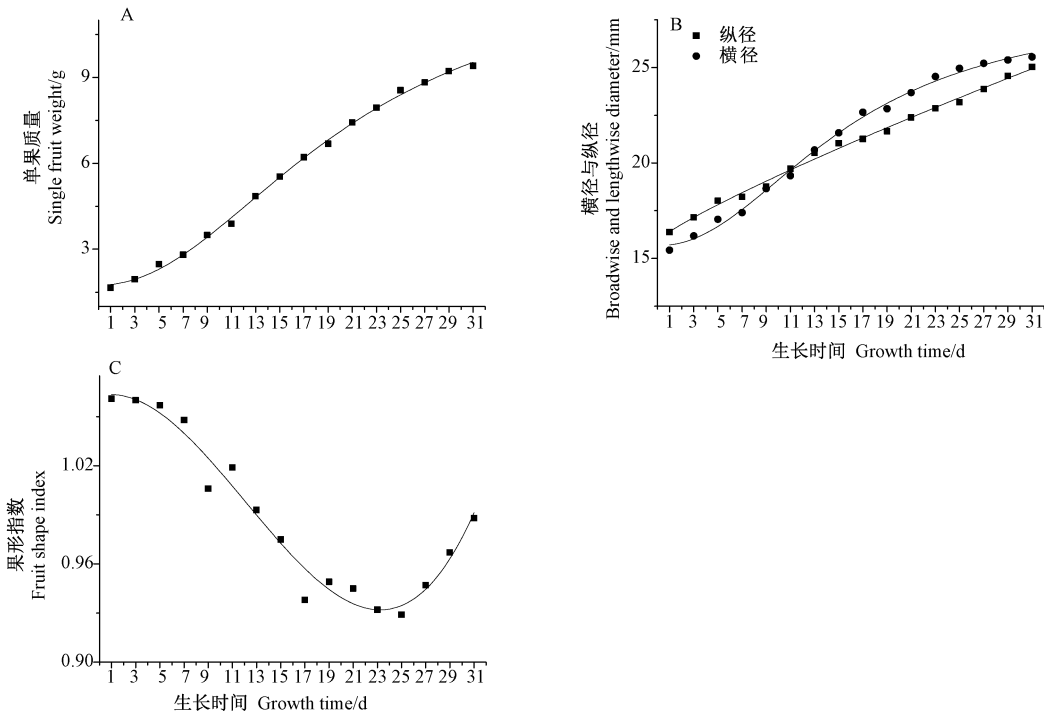


图 2 果实发育中质量相关性状的动态变化
Fig.2 The dynamic accumulation of fruit weight traits

表 3 果实质量相关性状的动态模型
Table 3 The dynamic model of fruit weight traits

性状 Traits	模型 Model	决定系数 R^2	F 值 F value
单果质量 Single fruit weight	$y = 12.927 - 11.176 / [1 + (x/20.792)^{2.075}]$	0.998 **	11 876.629
纵径 Lengthwise diameter	$y = 5\,778.955 - 5\,763.026 / [1 + (x/57\,545.777)^{0.858}]$	0.995 **	45 039.299
横径 Broadwise diameter	$y = 28.212 - 12.547 / [1 + (x/15.844)^{2.111}]$	0.996 **	33 567.612
果形指数 Fruit shape index	$y = 1.063 + 0.002x - 8.706E-4x^2 + 2.395E-5x^3$	0.960 **	120.194

2.3 果实发育中主要营养物质的动态变化

在果实发育过程中,转白期开始后草酸含量呈逐渐减小趋势直至稳定(图 3-A);柠檬酸含量在转白期开始后 1~9 d 不断增加,在 9~29 d 逐渐降低直至稳定(图 3-B)。葡萄糖和果糖在果实发育过程中均逐渐增加,且含量相当(图 3-C);蔗糖在转白期开始先迅速增加,成熟后期略有降低(图 3-D)。

将果实主要的营养物质与果实生长时间进行拟合,结果如表 4 所示。草酸、果糖和葡萄糖的动态变化

模型符合二项式方程: $y = 312.914 - 21.864x + 0.431x^2$ 、 $y = 0.143 - 0.001x + 0.002x^2$ 和 $y = 0.153 + 0.002x + 0.001x^2$, R^2 分别为 0.950、0.991 和 0.981, F 值分别为 68.103、386.070 和 185.999。柠檬酸和蔗糖的动态模型符合三项式方程: $y = 22.617 + 2.119x - 0.206x^2 + 0.004x^3$ 和 $y = 0.273 - 0.190x + 0.030x^2 - 7.008E-4x^3$, R^2 为 0.939 和 0.967, F 值分别为 36.630 和 68.727。以上方程均达极显著水平,拟合度良好。

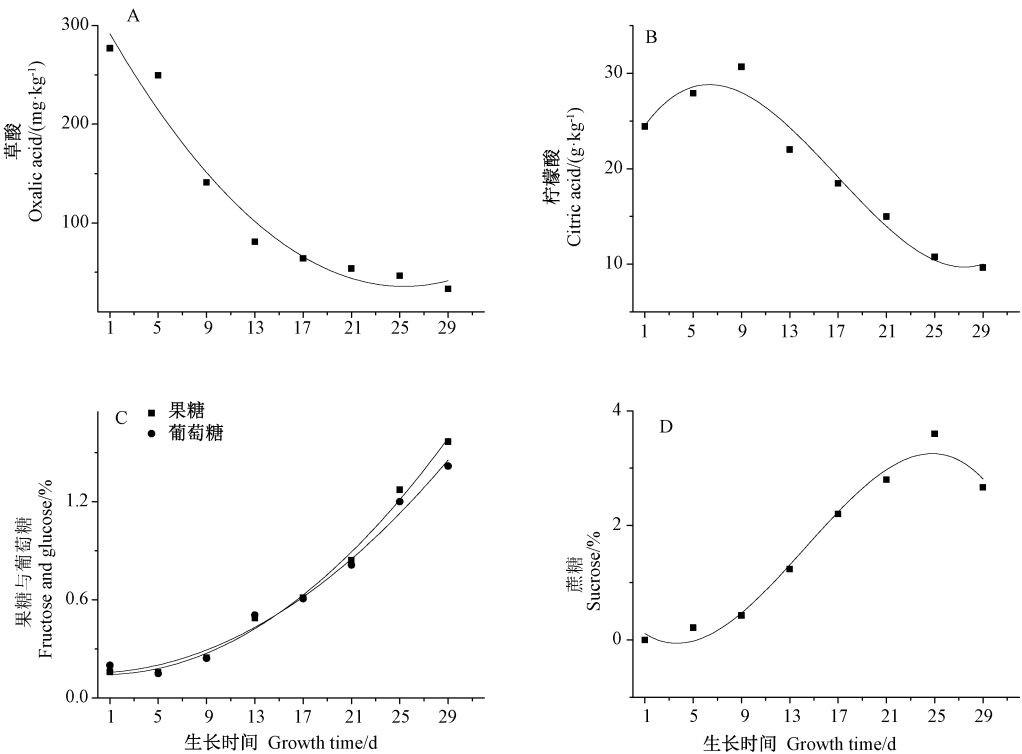


图 3 果实发育中主要营养物质的动态变化
Fig.3 The dynamic accumulation of main nutrients

2.4 果实发育中各性状间的相关性分析

由表 5 可知,在果实发育过程中,单果质量与纵径和横径之间极显著正相关。纵径与横径之间为极显著正相关。果糖、葡萄糖和蔗糖与果形指数、草酸和柠檬

酸之间均达到显著负相关,与 a^*/b^* 、单果质量、纵径和横径之间为极显著正相关。 a^*/b^* 与 L^* 、单果质量、纵径和横径之间均呈现显著正相关。果形指数、草酸和柠檬酸的相互之间均为显著正相关。果糖、葡萄

糖和蔗糖的相互之间均为极显著正相关。 $L^*(X_1)$ 和 $a^*/b^*(X_2)$ 均与草酸(Y)间存在极显著负相关性,且 X_1 和 X_2 与 Y 间的相关系数分别为 $R_{1y} = -0.774, R_{2y} = -0.947$ 。

表 4 果实主要营养物质的动态模型
Table 4 The dynamic model of main nutrients

营养物质 Nutriment	模型 Model	决定系数 R^2	F 值 F value
草酸 Oxalic acid	$y = 312.914 - 21.864x + 0.431x^2$	0.950 **	68.103
柠檬酸 Citric acid	$y = 22.617 + 2.119x - 0.206x^2 + 0.004x^3$	0.939 **	36.630
蔗糖 Sucrose	$y = 0.273 - 0.190x + 0.030x^2 - 7.008E^{-4}x^3$	0.967 **	68.727
果糖 Fructose	$y = 0.143 - 0.001x + 0.002x^2$	0.991 **	386.070
葡萄糖 Glucose	$y = 0.153 + 0.002x + 0.001x^2$	0.981 **	185.999

表 5 果实发育中各性状间的相关性分析
Table 5 The correlation analysis of different traits in fruit development

性状 Traits	明度值 $L^*(X_1)$	红绿值/ 黄蓝值 $a^*/b^*(X_2)$	单果质量 Single fruit weight	纵径 Lengthwise diameter	横径 Broadwise diameter	果形指数 Fruit shape index	草酸 Oxalic acid	柠檬酸 Citric acid	果糖 Fructose	葡萄糖 Glucose	蔗糖 Sucrose
明度值 L^*	1										
红绿值/黄蓝值 a^*/b^*	0.535 *	1									
单果质量 Single fruit weight	0.376	0.938 **	1								
纵径 Lengthwise diameter	0.402	0.953 **	0.992 **	1							
横径 Broadwise diameter	0.462	0.952 **	0.994 **	0.988 **	1						
果形指数 Fruit shape index	-0.634 **	-0.835 **	-0.858 **	-0.222	-0.900 **	1					
草酸 Oxalic acid(Y)	-0.774 **	-0.947 **	-0.915 **	-0.928 **	-0.950 **	0.937 **	1				
柠檬酸 Citric acid	-0.278	-0.751 *	-0.922 **	-0.889 **	-0.889 **	0.758 *	0.745 *	1			
果糖 Fructose	0.344	0.840 **	0.958 **	0.945 **	0.920 **	-0.736 *	-0.792 *	-0.941 **	1		
葡萄糖 Glucose	0.349	0.840 **	0.962 **	0.947 **	0.927 **	-0.755 *	-0.805 *	-0.952 **	0.999 **	1	
蔗糖 Sucrose	0.547	0.885 **	0.960 **	0.927 **	0.962 **	-0.930 **	-0.874 **	-0.919 **	0.885 **	0.899 **	1

注: * 表示在 0.05 水平显著相关; ** 表示在 0.01 水平显著相关。
Note: * indicates for significant correlation at 0.05 level. ** indicates for extremely significant correlation at 0.01 level.

2.5 果实颜色值与草酸间的线性回归分析

相关性研究只能揭示不同性状间相互影响的关系,不能明确具体关系^[17],因此,本试验进行了不同自变量即 L^* 和 a^*/b^* 对草酸的逐步线性回归分析,结果如表 6 所示。模型 1 是将变量 X_1 和 X_2 引入方程中,模型方程的决定系数(R^2)为 0.902,剩余因子 $e = \sqrt{1 - R^2}$

$(1 - R^2) = \sqrt{1 - 0.902} = 0.313$ 。对模型 1 进行方差分析(表 7),显示模型 1 的 F 值达到极显著水平,说明以 X_1 和 X_2 为自变量建立的线性方程稳定可靠。经逐步线性回归分析后,得到自变量与 Y 的偏回归系数、直接通径系数及显著性检测的结果,由表 8 得出该线性方程为: $Y = 562.820 - 6.045X_1 - 603.581X_2$ 。

表 6 模型输出结果
Table 6 The result of model

模型 Model	相关系数 R	决定系数 R^2	调整后的决定系数 Adjusted R^2	预估标准差 Estimated SD
1	0.950	0.902	0.862	0.817

注:模型 1:引入自变量 X_1 和 X_2 。下同。
Note: Model 1: Introducing variables X_1 and X_2 . The same as following.

表 7 输出模型的方差分析结果
Table 7 The result of variance analysis of model

模型 Model		平方和 Sum of square	df	均方 Mean square	F 值 F value
1	回归	57 517.890	2	28 758.945	22.904 **
	残差	6 278.131	5	1 255.626	
	总计	63 796.022	7		

表 8 颜色值对草酸的逐步线性回归分析
Table 8 Stepwise linear regression analysis of color value for oxalic acid

模型 Model	变量 Variables	偏回归系数 Partial regression coefficient	直接途径系数 Direct path coefficient	标准误差 Standard error	显著水平 Sig.
1	常量	562.820		38.577	0.004
	X_1	-6.045	-0.107	12.420	0.006
	X_2	-603.581	-0.864	53.946	0.001

3 讨论

水晶种的适应能力较差,需要精细管理。本研究发现,果实 L^* 符合三项式方程,在转白期开始不断升高,直至成熟期时逐渐稳定,这与朱婷婷等^[3]的研究结果相同。 a^*/b^* 是各种单色的综合表现,当 $a^*/b^* < 0$ 时,果实色泽为绿色;当 $a^*/b^* \approx 0$ 时,果实颜色由绿转为黄色;当 $a^*/b^* > 0$ 时,果实颜色为黄色(或红色)^[18]。本研究发现 a^*/b^* 在转白期开始后由负变正,果实颜色经历了由绿变黄或白色的过程;随着果实发育 a^*/b 缓慢增大,最终稳定在 0.358。在对早佳和荸荠种 2 个乌梅类品种果实颜色变化规律的研究中发现,2 个乌梅类品种在成熟期的 a^*/b^* 约为 2^[2],远大于本研究中白杨梅的 a^*/b^* 值,推测红梅类与粉红梅类成熟期果实的 a^*/b^* 可能介于白杨梅与乌梅类之间,且红梅类 a^*/b^* 大于粉梅类,具体结果有待于进一步研究验证。

杨梅果实质量相关性状中单果质量、纵径和横径的动态模型符合 Logistic 方程,其增长曲线呈“慢-快-慢”的 S 型曲线,这与猕猴桃^[19]、葡萄^[20]、甜瓜^[21] 和

核桃^[22] 等的单果质量、纵径和横径的增长模型相同。本研究中,根据草酸、柠檬酸、葡萄糖、果糖和蔗糖的生长曲线,草酸和柠檬酸在整个果实发育期基本呈下降趋势;葡萄糖和果糖含量相当,蔗糖的变化符合三项式方程,3 种糖类的变化呈上升趋势,而且与乌梅类^[2] 和红梅类^[3] 的研究进行比较,发现白杨梅果实中主要营养物质的变化规律与着色种梅类相似。

果实颜色是农产品重要的品质特征之一,其与营养性状之间存在密切相关性^[23-24]。在杨梅果实发育过程中,各指标间相关性研究发现, a^*/b^* 与果糖、葡萄糖和蔗糖之间为极显著正相关,与柠檬酸之间为显著负相关; L^* 和 a^*/b^* 与草酸间均为极显著负相关,这与芒果^[25-26] 和李^[27] 等水果中的研究结论一致,说明果实颜色的变化与糖酸的积累间存在显著相关关系,为基于杨梅果实颜色进行品质的无损检测奠定了理论基础。本研究中,以 L^* 和 a^*/b^* 为自变量,以草酸为因变量的线性回归方程中,剩余因子 e 为 0.313,数值较大,表明还有影响草酸的颜色因子未考虑到,需对其影响因素进行全面研究。此外,单果质量、纵径、横径、果形指数、草酸、柠檬酸、葡萄糖、果糖和蔗糖等果实生长指标间的相关性与梁森苗等^[28] 在

红梅类的相关性分析中的结论相同,说明上述生长指标与果实品质间存在稳定的相关性,不局限于果实的颜色。

4 结论

通过对杨梅果实颜色、重量、营养指标的动态变化规律以及各指标间相关性的研究,建立了果实生长指标的数学模型: L^* 、果形指数、柠檬酸和蔗糖等指标的变化符合三项式方程, a^*/b^* 、草酸、果糖和葡萄糖等指标的变化符合二项式方程,单果质量、纵径和横径等指标的变化符合 Logistic 方程;草酸与 L^* 和 a^*/b^* 之间均为极显著负相关,经回归分析得到以 L^* 和 a^*/b^* 为自变量,草酸为因变量的线性方程。本研究结果为基于颜色对杨梅品质进行无损检测 and 模拟、预测果实发育奠定了理论基础。

参考文献:

- [1] 戚行江. 杨梅生态栽培[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2016: 1-16
- [2] 梁森苗, 徐云焕, 王伟, 郑锡良, 任海英, 彭娟, 张启, 戚行江. 杨梅果实发育过程中外观及主要营养品质形成规律研究[J]. 核农学报, 2016, 30(6): 1135-1142
- [3] 朱婷婷, 梁森苗, 张淑文, 郑锡良, 任海英, 戚行江. 早鲜杨梅果实发育和品质形成规律的研究[J]. 浙江农业学报, 2018, 30(5): 764-770
- [4] 张彩琴, 杨持. 植物生长模拟与数学模型研究[J]. 内蒙古大学学报, 2006, 37(4): 435-440
- [5] 谭美, 王四清. 观赏植物生长模拟模型研究进展[J]. 园艺学报, 2010, 37(9): 1523-1530
- [6] 薛林, 郑国清, 戴廷波. 植物生长模拟模型研究进展[J]. 河南农业科学, 2011, 40(3): 19-24
- [7] 徐臣善, 徐爱红, 高东升, 程述汉. 苹果果实生长的数学模型及各生长指标间的相关性分析[J]. 植物科学学报, 2015, 33(1): 72-80
- [8] 董敏, 丁之恩, 闫晗, 尹良凡, 汪青, 高健. 板栗种实生长发育中营养物质积累及动态模型建立[J]. 核农学报, 2016, 30(6): 1143-1148
- [9] 韩强, 董玉芝, 宋锋惠, 史彦江, 韩俊威, 哈地尔·依沙克. 新疆杂交榛果实生长发育动态及模型研究[J]. 果树学报, 2014, 31(2): 258-264
- [10] 赵世荣, 廖康, 安晓芹, 李楠, 刘娟, 章世奎. 极晚熟杏品种冬杏果实生长发育动态及模型研究[J]. 新疆农业大学学报, 2013, 36(3): 207-212
- [11] 邱宏业, 朱建华, 刘冰浩, 潘介春, 朱松生, 秦献泉, 徐宁, 李鸿莉, 彭宏祥. 四季蜜龙眼果实生长发育动态及其数学模型研究[J]. 南方农业学报, 2016, 47(6): 960-964
- [12] 胡静, 赵瑞峰, 施文庄, 李峰, 沈光林. 烟草中 9 种有机酸的梯度离子色谱法测定研究[J]. 分析测试学报, 2011, 30(10): 1171-1174
- [13] 中华人民共和国国家食品药品监督管理总局. GB5009.8-2016 食品安全国家标准食品中果糖、葡萄糖、蔗糖、麦芽糖含量的测定方法 液相色谱示差折光检测法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016
- [14] 张淑文, 梁森苗, 郑锡良, 任海英, 朱婷婷, 戚行江. 杨梅果实主要性状与单果重的相关性及回归分析[J]. 中国果树, 2018(6): 14-18
- [15] 马培怡, 吴文, 王平, 唐小浪, 黄永敬. 贡柑采收期果肉颜色变化与果实成熟度的关系研究[J]. 广东农业科学, 2010, 37(10): 63-64
- [16] 杨国顺, 石雪晖, 刘昆玉, 卢向阳, 熊兴耀, 倪建军, 徐萍. 柑橘果实着色机理研究进展[J]. 湖南农业大学学报, 2005, 31(1): 106-110
- [17] 李玉全. 线性回归法实现半滑舌鲷幼鱼表型性状与体重的通径分析[J]. 生物数学学报, 2014, 29(1): 185-191
- [18] Rodrigo M, Zacarias L. Effect of postharvest ethylene treatment on carotenoid accumulation and the expression of carotenoid biosynthetic genes in the flavedo of orange (*Citrus sinensis* L. Osbeck) fruit [J]. Postharvest Biology and Technology, 2007(43): 14-22
- [19] 钟彩虹, 张鹏, 韩飞, 李大卫. 猕猴桃种间杂交新品种金艳的果实发育特征[J]. 果树学报, 2015, 32(6): 1152-1160
- [20] 吴翔, 高晓阳, 陈天雨, 颜仁喆, 李红岭, 武季玲. 兰州露地红提叶和果实生长规律研究[J]. 上海农业学报, 2018, 34(4): 85-90
- [21] 马二磊, 黄芸萍, 臧全宇, 丁伟红, 王毓洪. 甜瓜植株和果实生长模型的拟合与分析[J]. 南方农业学报, 2018, 49(7): 1358-1363
- [22] 刘娇, 杜春花, 范志远, 张雨, 邹伟烈, 赵廷松, 潘莉. 云新高原核桃果实生长发育规律研究[J]. 西北林学院学报, 2017, 32(3): 113-115
- [23] Baiano A, Terracone C, Peri G, Romaniello R. Application of hyperspectral imaging for prediction of physico-chemical and sensory characteristics of table grapes [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2012, 87(9): 142-151
- [24] Abdullah M, Guan L, Lim K C, Karim A. The applications of computer vision system and tomographic radar imaging for assessing physical properties of food [J]. Journal of Food Engineering, 2004, 61(1): 125-135
- [25] 李敏, 高兆银, 苏增建, 朱迎迎, 弓德强, 张正科, 郑淑英, 胡美姣. 基于芒果果肉颜色的品质检测技术[J]. 热带作物学报, 2017, 38(1): 166-170
- [26] Nambi V, Thangavel K, Jesudas D. Scientific classification of ripening period and development of color grade chart for Indian mangoes (*Mangifera indica* L.) using multivariate cluster analysis [J]. Scientia Horticulturae, 2015, 193(7): 90-98
- [27] 张义, 刘敏. 不同颜色李果实成熟期果皮色素的变化及与糖酸含量的相关性[J]. 北方园艺, 2012(10): 16-19
- [28] 梁森苗, 张淑文, 郑锡良, 任海英, 朱婷婷, 戚行江. 杨梅生长指标与果实品质间的相关分析[J]. 核农学报, 2019, 33(4): 751-758

Mathematical Model and Correlation Analysis of Chinese Bayberry Fruit Growth Indexes

ZHANG Shuwen LIANG Senmiao ZHENG Xiliang ZHU Tingting REN Haiying QI Xingjiang*

(Institute of Horticulture, Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou, Zhejiang 310021)

Abstract: In order to certify the variation regularity of fruit color, fruit quality and other related traits, as well as the relation among each indexes, Chinese bayberry cultivar Shuijingzhong (*Myrica rubra* cv. Shuijingzhong) of ten years old tree was used as test material to determine dynamic changes in growth indexes of fruit during the growth and development period. Three theoretical growth equations were adopted to fit 11 indexes including single fruit weight, lengthwise diameter, broadwise diameter, fruit shape index, L^* , a^*/b^* , citric acid, oxalic acid, glucose, sucrose and fructose. The appropriate growth equation was established based on the fitting results. Meanwhile, the correlation among fruit growth indexes was analyzed. It was indicated that the relation of L^* , fruit shape index, citric acid and sucrose were in lines with trinomial equations, the relation of a^*/b^* , oxalic acid, fructose and glucose were in lines with binomial equations, and the relation of single fruit weight, lengthwise diameter and broadwise diameter are in lines with Logistic equations. During fruit development, positive correlations between a^*/b^* and single fruit weight, lengthwise diameter, broadwise diameter, glucose, sucrose, fructose and L^* were found to be statistically significant, while significant negative correlations between a/b and fruit shape index and citric acid were found, oxalic acid was significant negative correlated with L^* and a^*/b^* . This study provided a theoretical foundation for non-destructive detection, simulation and prediction of fruit development.

Keywords: Chinese bayberry, fruit growth indexes, mathematical model, dynamic variation, correlation analysis