

## 不同海拔对帕拉英达杧果光合特性及果实品质的影响

张翠仙, 陈于福, 尼章光, 王永芬, 柏天琦, 张惠云, 章 勇, 解德宏\*

(云南省农业科学院热带亚热带经济作物研究所, 云南保山 678000)

**摘要:**【目的】探究海拔对帕拉英达杧果物候期、光合特性、果实外观性状及内在品质的影响, 为帕拉英达杧果最适宜栽培海拔范围及生产提供依据。【方法】以杧果主产区潞江镇4个海拔(685、850、1034、1194 m)的帕拉英达杧果为研究对象, 观察帕拉英达杧果物候期, 测定帕拉英达杧果光合相关参数、果实外观性状及品质。【结果】海拔对帕拉英达杧果花期及果实收获期均有影响。净光合速率、叶肉瞬时羧化效率随着海拔的升高而降低, 蒸腾速率随着海拔升高先升高后降低, 果实的单果质量随着海拔的升高逐渐增加, 总糖、维生素C含量随着海拔的升高而降低, 总酸、可溶性固形物含量随着海拔升高先增加后降低。通径分析表明, 大气温度、水分利用效率、CO<sub>2</sub>浓度和蒸腾速率等4个光合因子的82.2%, 单果质量及果实纵径2个果实外观性状的79.9%, 维生素C、总糖2个果实内在性状的97.4%受海拔变化的影响。【结论】海拔的变化综合影响了帕拉英达杧果的物候期、光合特性、果实外观性状及品质性状, 海拔685 m果实总糖和维生素C含量最高, 海拔1194 m果实成熟期最晚, 生产上应根据环境及市场的需要, 选择适宜的帕拉英达杧果种植区域。

关键词: 帕拉英达杧果; 海拔; 物候期; 光合特性; 果实品质

中图分类号:S667.7

文献标志码:A

文章编号:1009-9980(2021)05-0749-11

## Effects of different altitudes on leaf photosynthetic characteristics and fruit quality in Myahinthia mango

ZHANG Cuixian, CHEN Yufu, NI Zhangguang, WANG Yongfen, BAI Tianqi, ZHANG Huiyun, ZHANG Yong, XIE Dehong\*

(Institute of Tropical and Subtropical Cash Crops, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Baoshan 678000, Yunnan, China)

**Abstract:**【Objective】The effects of altitude on phenological periods, leaf photosynthetic characteristics, fruit appearance and internal quality with Myahinthia mango was studied to provide the basis for choosing the most suitable cultivation altitude range and guiding practical production of Myahinthia mango. 【Methods】In the study, four altitudes (685 m, 850 m, 1034 m, 1194 m) in Lujiang town were selected to measure the phenological periods, leaf photosynthetic parameters, and external and internal fruit quality. 12 photosynthetic parameters, 10 fruit appearance traits and 7 internal quality traits were analyzed by difference, correlation, gradual regression and path analysis. 【Results】1. The altitude had an effect on the flowering and fruit harvest periods of Myahinthia mango. With the increase of altitude, the initial flowering period, full flowering period, final flowering period and fruit harvest period of each altitude section were delayed 10 days. 2. The altitude was negatively correlated with water content, CO<sub>2</sub> concentration, atmospheric temperature, leaf surface temperature, stomatal conductance, water use efficiency, stomatal limitation value and mesophyll instantaneous carboxylation rate. There was no significant correlation between altitude and atmospheric radiation intensity, intercellular CO<sub>2</sub> concentration and

收稿日期:2020-10-26 接受日期:2021-01-29

基金项目: 云南省科技计划基础研究青年项目(2019FD079)

作者简介: 张翠仙, 女, 助理研究员, 硕士, 研究方向: 热带果树种质资源评价与育种。Tel: 0875-2136906, E-mail: zhangcuixian1570@126.com

\*通信作者 Author for correspondence. Tel: 0875-2136906, E-mail: xiedehong@163.com

transpiration. Net photosynthetic rate was positively correlated with CO<sub>2</sub> concentration, air temperature, leaf surface temperature and stomatal conductance, but negatively correlated with transpiration rate. Net photosynthetic rate and instantaneous carboxylation rate in mesophyll decreased with the increase of altitude. Net photosynthetic rate and instantaneous carboxylation rate in mesophyll at 685 m and 850 m were significantly higher than those at other altitudes ( $p < 0.05$ ). The concentration of intercellular CO<sub>2</sub> increased first and then decreased with altitude. The concentration of intercellular CO<sub>2</sub> at altitude of 1194 m was significantly higher than that of other altitudes. The transpiration rate increased first and then decreased with the increase of altitude. The stomatal conductance at 850 m was significantly higher than that at other altitudes. The variation of atmospheric temperature and leaf surface temperature was consistent, and the atmospheric temperature at 850 m was significantly higher than that at other altitudes. Photosynthetically active radiation (PAR) increased first and then decreased with altitude. The PAR at 850 m and 1034 m was significantly higher than that at 685 m and 1194 m. Path analysis further showed that the change of altitude affected atmospheric temperature, water use efficiency, CO<sub>2</sub> concentration and transpiration rate, and the water use efficiency and air temperature showed negative effects on CO<sub>2</sub> concentration and air temperature and 82.2% of these four photosynthetic factors were affected by altitude change.

3. There was a significant positive correlation between altitude and single fruit weight, pericarp weight, longitudinal and transverse diameters in fruit, fruit thickness, seed weight, seed length and width, but had no effect on seed thickness and edible rate. With the increase of altitude, the single fruit weight increased gradually, and the average fruit weight at high altitude was significantly higher than that at other altitudes. The changes of peel weight, longitudinal and transverse diameters in fruit, fruit thickness, seed weight, seed length and width as well as single fruit weight increased with the elevation. The seed thickness at 850 m and 1034 m was significantly higher than that at 685 m and 1034 m, and the edible rate was not significantly different among various altitudes. The results of path analysis showed that the single fruit weight and fruit longitudinal diameter were affected by the change of altitude, and 79.9% of these two variables were affected by the change of altitude.

4. Altitude was negatively correlated with soluble solids, total sugar, vitamin C and total acid contents. With the increase of altitude, the total sugar and vitamin C contents decreased. The total sugar and vitamin C contents at 685 m were significantly higher than those at other altitudes. The total acid and soluble solid contents increased first and then decreased with the increase of altitude. The protein content increased first and then decreased with the increase of altitude, and reached the highest at 1034 m. The crude fiber content at 850 m was significantly higher than that at 1034 m and 685 m. The crude fat content decreased first and then increased with the increase of altitude, and reached the highest at 1194 m. Path analysis also further showed that the change of altitude mainly affected two characteristics like fruit vitamin C and total sugar contents, and 97.4% of two variables were affected by the change of altitude.

【Conclusion】The changes of altitude had a comprehensive effect on the phenological periods, photosynthetic characteristics, and external and internal fruit quality. The net photosynthetic rate was the lowest at 1194 m, the fruit ripening stage was the latest, and the average fruit weight was the highest; the total acid and soluble solids contents at 850 m altitude were higher than those at other altitudes; the total sugar and vitamin C contents at 685 m were higher than those at other altitudes, the fruit quality at 685 m and 850 m in Lujiang town was better than that at other altitudes, but the ripening period of fruits at 1194 m was the latest. Therefore, suitable planting areas should depend upon the needs of environment and market.

**Key words:** Myahinthra mango; Altitude; Phenological period; Photosynthetic characteristics; Fruit quality

帕拉英达杧果是云南杧果主栽品种之一,果实形状似鹰嘴,肉质细腻、产量高、耐储运,深受广大果农及消费者喜爱,目前在云南的种植面积超过1.67万hm<sup>2</sup>。云南省热区气候类型多样,具有光照充足、终年气温较高、干湿季分明等特点,热区分布海拔为76~1600 m,其中海拔300~1600 m均有杧果种植,是全国独有的优质杧果产区。近年来,由于种植帕拉英达杧果产生较高的经济效益,云南不同生态类型区均进行引种试种,生产种植区域逐渐由低海拔区向高海拔区扩展。但不同海拔帕拉英达杧果果实生长发育及品质性状如何、所有热区是否均适宜种植帕拉英达杧果,这些问题尚不清楚。因此,立足云南多样化气候条件,科学分析影响杧果果实生长发育及品质的关键因子,差异化的发展种植杧果品种,合理布局品种结构是云南杧果产业急需解决的问题。

海拔对果树的生态影响主要是通过光、热、水、气等生态因子起作用的。随着海拔梯度的变化,温度、湿度和光照度等都会有不同程度的变化,从而导致植物光合作用等一系列生理生态特性发生变化,导致果实性状和品质表现出差异性<sup>[1]</sup>。帕拉英达杧果作为云南主栽品种之一,围绕叶片养分变化及营养诊断<sup>[2-3]</sup>、套袋对果实品质的影响<sup>[4-5]</sup>、不同生态区综合性的表现<sup>[6]</sup>开展了一些研究,在其他杧果品种上也仅限于品种间光合作用的比较研究<sup>[7]</sup>,UV-B(户外紫外线)辐射对杧果果实品质、光合作用及产量的影响<sup>[8-9]</sup>,尚未有海拔对杧果光合作用和果实品质方面的研究,但在其他作物上已有诸多报道。孙文泰等<sup>[10]</sup>对不同海拔的红富士苹果果实品质研究发现,随着海拔的升高,果实的单果质量和大小均呈现逐渐下降的趋势。叶宏达等<sup>[11]</sup>研究发现不同海拔的马铃薯品种的光合生理特性因海拔而异,随着海拔、光照度等环境因素的变化,不同马铃薯地方品种在光合生理方面都发生了不同程度的变化,但发生变化的趋势基本一致。徐亮<sup>[12]</sup>研究发现高海拔区域油菜的净光合速率高于低海拔地区,但生长发育时间长于低海拔区,千粒质量、含油量、小区产油量均显著高于低海拔。孙小红等<sup>[13]</sup>研究表明海拔的变化综合影响了香榧种子的部分外观性状和营养成分,主要影响香榧种子的种蒲质量和种子长度,其中对种蒲质量和二十碳二烯酸变异的直接作用最大。白婷等<sup>[14]</sup>研究表明海拔对青稞籽粒的品质影响显著;对青稞品种籽粒淀粉、脂肪、蛋白质等的积累有显著影

响,而对灰分、含水量影响不显著。

笔者通过观察不同海拔梯度的帕拉英达杧果物候期变化、测定叶片光合生理指标及果实品质性状,对叶片光合生理指标及果实品质性状与海拔进行相关分析和逐步回归分析,建立多元回归方程,探究这些指标随海拔梯度的变化规律,分析海拔对帕拉英达杧果生长、光合特性和果实性状的影响,为不同海拔区段帕拉英达杧果生产提供理论和实践依据,进一步揭示杧果栽培同海拔梯度因子的响应关系,避免盲目种植造成经济损失。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验地概况

试验在云南省保山市隆阳区潞江镇新城村4个不同海拔梯度(685、850、1034、1194 m)的杧果园进行。试验地所处怒江干热河谷区,年均温度21.3 ℃,最冷月均温13.9 ℃,最热月均温26.4 ℃,极端最低温0.2 ℃,极端最高温40.3 ℃;≥10 ℃积温7800 ℃;日照时数2 329.7 h,年均辐射138 449 cal·a<sup>-1</sup>·cm<sup>-2</sup>;年均降雨量为755.3 mm。试验地土质为燥红土。

### 1.2 试验材料

试验材料为潞江镇海拔685、850、1034、1194 m进入盛产期的帕拉英达杧果树,株行距为4.0 m×5.0 m,510株·hm<sup>-2</sup>,树龄10 a,砧木为本地品种三年杧,植株长势相对一致,常规栽培管理。

### 1.3 试验方法

物候期观察:在同一海拔随机选取5株长势相同的杧果树,参照NYT 1808—2009杧果种质资源描述规范,跟踪调查花期时间(从初花期至末花期)和果实收获(果实第1次采收至最后1次采收)的时间。

光合作用指标测定:于2018年10月,使用LCpro-SD便携式光合测定仪(英国),进行光合作用测定,连续测定3 d。测定时间为上午10:00—11:30,每个果园随机测定5株杧果树,选取树冠中上部向阳面当年成熟老叶,测定时每株树测定5枚叶片,每片叶片重复测定3次,取平均值。测定参数包括净光合速率( $P_n$ )、气孔导度( $G_s$ )、蒸腾速率( $T_r$ )、胞间CO<sub>2</sub>浓度( $C_i$ )等。

果实品质测定:果实采样时间为6月30日(海拔685 m)、7月10日(海拔850 m)、7月20日(海

拔1034 m)、7月30日(海拔1194 m)。每个海拔段果园随机选定5株杧果树,在果树的东、西、南、北4个方向,随机采集12个成熟果实进行果实品质测定。平均单果质量、种子质量使用电子天平测定;果实纵径、果实横径、果实厚度、果皮厚度、种子长度、种子宽度、种子厚度使用游标卡尺测定;总糖、维生素C、蛋白质、粗纤维、粗脂肪、总酸、可溶性固形物含量由云南省保山市质量技术监督综合检测中心测定,可溶性固形物含量采用GB/T 12143—2008方法测定,总酸含量采用GB/T 12456—2008方法测定,蛋白质含量采用GB 5009.5—2016方法测定,总糖含量采用GB 5009.5—2016方法测定,粗纤维含量采用GB 5009.10—2003方法测定,粗脂肪含量采用GB 5009.6—2016方法测定。

#### 1.4 数据处理

叶片水分利用效率( $WUE = P_n / T_r$ (净光合速率/蒸腾速率)),气孔限制值( $L_s = 1 - C_i / C_a$ ( $CO_2$ 浓度/大气 $CO_2$ 浓度)),叶肉瞬时羧化效率( $MCE = P_n / C_i$ (净光合速率/胞间二氧化碳浓度))。试验数据采用Excel和SPSS 19.0软件进行处理。

## 2 结果与分析

### 2.1 海拔对物候期的影响

如表1所示,海拔对帕拉英达杧果花期及果实收获期均有影响,海拔对花期产生了明显的延迟作用,随着海拔升高,每个海拔段的初花期、盛花期、末花期延迟10~15 d。每个海拔段果实采收期为30~40 d,果实开始采收时间和最后采收时间随着海拔的升高向后延迟10 d左右,海拔1194 m果实采收时

表1 海拔对帕拉英达杧果物候期的影响

Table 1 Effect of altitude on phenophase of Myahinthu mango

海拔 Altitude/ m	初花期 Initial flowering stage	盛花期 Blooming stage	末花期 Last flowering stage	果实收获期 Fruit harvest period
685	1月中旬 Mid Jan.	2月上旬 Early Feb.	2月下旬 Late Feb.	6月下旬~7月下旬 Late Jun. to late Jul.
	Late Jan.	Mid Feb.	Early Mar.	Early Jul. to early Aug.
850	1月下旬 Late Jan.	2月中旬 Mid Feb.	3月上旬 Early Mar.	7月上旬~8月上旬 Early Jul. to mid Aug.
	Early Feb.	Late Feb.	Mid Mar.	Mid Jul. to mid Aug.
1034	2月上旬 Early Feb.	2月下旬 Late Feb.	3月中旬 Mid Mar.	7月中旬~8月中旬 Mid Jul. to late Aug.
	Mid Feb.	Early Mar.	Late Mar.	7月下旬~8月下旬 Late Jul. to late Aug.
1194	2月中旬 Mid Feb.	3月上旬 Early Mar.	3月下旬 Late Mar.	7月下旬~8月下旬 Late Jul. to late Aug.

间比685 m晚30 d左右。

### 2.2 海拔对帕拉英达杧果光合指标的影响

2.2.1 不同海拔光合指标比较 从表2可以看出,大气 $CO_2$ 浓度、净光合速率、叶肉瞬时羧化效率随着海拔的升高而降低,其中低海拔685 m处大气 $CO_2$ 浓度显著高于其他海拔段,685、850 m海拔段净光合速率、叶肉瞬时羧化效率显著高于其他海拔段( $p < 0.05$ )。大气温度和叶面温度变化一致,海拔850 m处大气温度显著高于其他海拔段。光合有效辐射随海拔的升高先升高后降低,850 m和1034 m海拔光合有效辐射显著高于685 m和1194 m海拔段。

胞间 $CO_2$ 浓度随着海拔的升高先升高后降低,1194 m处胞间 $CO_2$ 浓度显著高于其他海拔段。蒸腾速率随着海拔升高先升高后降低,850 m处显著高于其他海拔段。气孔导度大小为:850 m>685 m>1194 m>1034 m,其中海拔850 m处气孔导度显著高于其他海拔段。不同海拔叶片水分利用效率没有明显的变化规律,海拔685 m处水分利用效率显著高于其他海拔段。

2.2.2 海拔与光合指标的相关性 将海拔与光合指标进行相关性分析,结果(表3)可以看出,海拔与 $CO_2$ 浓度、大气温度、叶面温度、气孔导度、净光合速率、水分利用效率、气孔限制值、叶肉瞬时羧化效率呈极显著负相关。海拔与大气辐射强度、胞间 $CO_2$ 浓度、蒸腾速率无显著相关性。净光合速率与 $CO_2$ 浓度、大气温度、叶面温度、气孔导度呈极显著正相关,与蒸腾速率呈显著负相关。

2.2.3 海拔对帕拉英达杧果光合指标影响的逐步回归分析 以海拔变化( $Y$ )为因变量,光合指标为自变量( $X_i$ ),采用逐步引入-剔除法进行逐步多元回归分析。 $F$ 显著水平值 $\leq 0.05$ 时,选择自变量; $F$ 显著水平值为 $\geq 0.01$ 时,剔除自变量。按照显著程度,逐步引入大气温度、水分利用率、 $CO_2$ 浓度、蒸腾速率,得到以下回归方程:

$$Y = 4152.523 - 36.544X_4 - 97.374X_{10} - 4.033X_2 - 48.985X_7 \quad (X_4 \text{ 大气温度}; X_{10} \text{ 水分利用率}(WUE); X_2 \text{ } CO_2 \text{ 浓度}; X_7 \text{ 蒸腾速率})$$

$F=89.269$ ,  $p=0.000 < 0.01$ , 回归方程达到极显著水平,有统计意义。大气温度、水分利用率、 $CO_2$ 浓度、蒸腾速率偏回归系数都小于0.01,均达到极显著水平,表明海拔变化综合影响了大气温度、水

表2 不同海拔帕拉英达杧果光合指标  
Table 2 Photosynthetic parameters of *Myahinthia* mango at different altitudes

海拔 Altitudes/ m	H <sub>2</sub> O 参考值 H <sub>2</sub> O reference/ mBar	CO <sub>2</sub> 浓度 CO <sub>2</sub> concentration/ (μmol·mol <sup>-1</sup> )	光合有效辐射 Photosynthetically active radiation/ (μmol·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	大气温度 Atmospheric temperature/ ℃	叶面温度 Leaf surface temperature/ ℃	胞间 CO <sub>2</sub> 浓度 Intercellular CO <sub>2</sub> concentration/ (μmol·mol <sup>-1</sup> )	蒸腾速率 Transpiration/ rate/ (mmol·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	气孔导度 Stomatal conductance/ (mol·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	净光合速率 Photosynthetic rate/ (μmol·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	叶片水分 利用效率 Leaf water use efficiency, <i>LWUE</i>	叶肉瞬时 羧化效率 Instantaneous carboxylation efficiency of mesophyll
685	15.89±1.54 a	432.32±9.48 a	1 560.88±101.74 b	30.02±2.05 b	31.60±2.27 b	307.52±18.01 ab	2.46±0.70 c	0.21±0.06 b	11.18±1.86 a	4.76±1.11 a	0.29±0.04 a
850	14.69±1.00 b	414.12±6.31 b	1 705.00±139.76 a	31.51±1.54 a	33.22±1.51 a	303.92±16.68 ab	5.43±0.79 a	0.25±0.05 a	9.99±1.90 a	1.87±0.44 c	0.27±0.04 ab
1034	16.22±1.08 a	415.28±11.84 b	1 698.16±92.84 a	29.26±1.54 b	30.81±1.55 b	297.16±19.46 b	3.54±0.64 b	0.17±0.05 b	8.71±1.41 b	2.50±0.38 b	0.28±0.03 a
1194	14.3±0.89 b	409.60±4.17 b	1 498.32±162.29 b	25.57±2.07 c	27.08±2.03 c	310.84±17.94 a	2.78±0.54 c	0.18±0.05 b	7.44±1.69 c	2.76±0.80 b	0.24±0.04 b

注:不同小写字母表示在  $p < 0.05$  差异显著。下同。

Note: Different small letters indicate significant difference at  $p < 0.05$ . The same below.

表3 海拔与帕拉英达杧果光合指标的相关性分析  
Table 3 Correlation analysis of photosynthetic parameters of *Myahinthia* mango with altitude

<i>Y</i>	<i>X<sub>1</sub></i>	<i>X<sub>2</sub></i>	<i>X<sub>3</sub></i>	<i>X<sub>4</sub></i>	<i>X<sub>5</sub></i>	<i>X<sub>6</sub></i>	<i>X<sub>7</sub></i>	<i>X<sub>8</sub></i>	<i>X<sub>9</sub></i>	<i>X<sub>10</sub></i>	<i>X<sub>11</sub></i>
<i>Y</i>	1										
<i>X<sub>1</sub></i>	-0.247*	1									
<i>X<sub>2</sub></i>	-0.621**	-0.013	1								
<i>X<sub>3</sub></i>	-0.138	0.180	-0.092	1							
<i>X<sub>4</sub></i>	-0.617**	0.219*	0.135	0.235*	1						
<i>X<sub>5</sub></i>	-0.615**	0.206*	0.135	0.276**	0.992**	1					
<i>X<sub>6</sub></i>	0.014	-0.289**	0.293**	-0.144	-0.210*	-0.217*	1				
<i>X<sub>7</sub></i>	-0.086	-0.134	-0.356***	0.415**	0.571***	0.588***	-0.108	1			
<i>X<sub>8</sub></i>	-0.300**	-0.083	0.085	0.218*	0.189	0.213*	0.264**	0.538**	1		
<i>X<sub>9</sub></i>	-0.637**	0.157	0.438***	0.167	0.323***	0.338***	-0.249*	0.186	0.595**	1	
<i>X<sub>10</sub></i>	-0.457**	0.160	0.628**	-0.246*	-0.227*	-0.238*	0.033	-0.712**	-0.036	0.459**	
<i>X<sub>11</sub></i>	-0.314**	0.296**	0.180	0.107	0.282**	0.289**	-0.887***	-0.059	-0.231*	0.469**	0.267**
<i>X<sub>12</sub></i>	-0.589**	0.207*	0.328***	0.183	0.347***	0.362***	-0.456***	0.203*	0.488***	0.973***	0.404**

注: \*表示显著相关( $p < 0.05$ )。 \*\*表示极显著相关( $p < 0.01$ )。 *Y*:海拔; *X<sub>1</sub>*: H<sub>2</sub>O 参考值; *X<sub>2</sub>*: CO<sub>2</sub>浓度; *X<sub>3</sub>*: 大气辐射; *X<sub>4</sub>*: CO<sub>2</sub>浓度; *X<sub>5</sub>*: 叶面温度; *X<sub>6</sub>*: 胞间 CO<sub>2</sub>浓度; *X<sub>7</sub>*: 气孔导度; *X<sub>8</sub>*: 净光合速率; *X<sub>9</sub>*: 水分利用率(*WUE*); *X<sub>10</sub>*: 气孔限制值(*LS*); *X<sub>12</sub>*: 叶肉瞬时羧化率(*MCE*)。

Note: \* indicates significant correlation ( $p < 0.05$ ), \*\* indicates very significant correlation ( $p < 0.01$ ). *Y*: Altitudes; *X<sub>1</sub>*: H<sub>2</sub>O reference; *X<sub>2</sub>*: CO<sub>2</sub> concentration; *X<sub>3</sub>*: Photosynthetically active radiation; *X<sub>4</sub>*: Intercellular CO<sub>2</sub> concentration; *X<sub>5</sub>*: Transpiration rate; *X<sub>6</sub>*: Stomatal conductance; *X<sub>7</sub>*: Leaf surface temperature; *X<sub>8</sub>*: Leaf water use efficiency; *X<sub>9</sub>*: Water use efficiency; *X<sub>10</sub>*: Limitation of porosity; *X<sub>12</sub>*: Instantaneous carboxylation efficiency of mesophyll.

分利用率、 $\text{CO}_2$ 浓度、蒸腾速率,建立的回归方程可靠。

**2.2.4 海拔对帕拉英达杧果光合指标影响的通径分析及决定程度分析** 海拔变化( $Y$ )对光合相关指标( $X_i$ )的直接作用和通过其他因子( $X_j$ )而产生的间接作用如表4所示,海拔变化对大气温度、水分利用效

率和蒸腾速率的直接作用大于其间接作用,对 $\text{CO}_2$ 浓度间接作用大于其直接作用,表明海拔的变化主要影响大气温度、水分利用效率和蒸腾速效率。海拔对大气温度、水分利用效率、 $\text{CO}_2$ 浓度、蒸腾速率均为直接负作用,对水分利用效率的直接作用最大,其他依次为大气温度、蒸腾速率、 $\text{CO}_2$ 浓度。通过分

表4 帕拉英达杧果光合指标与海拔的通径分析结果

Table 4 The path analysis between altitude and photosynthetic parameter of Myahinthia mango

光合指标 Photosynthetic index	相关系数 Correlation coefficient	直接通径系数 Direct path coefficient	间接通径系数 Indirect path coefficient				
			$X_4$	$X_{10}$	$X_2$	$X_7$	合计 Total
$X_4$	-0.617	-0.539		0.151	-0.034	-0.194	-0.077
$X_{10}$	-0.457	-0.663		0.122	-0.158	0.242	0.206
$X_2$	-0.621	-0.252		-0.073	-0.416	0.121	-0.368
$X_7$	-0.086	-0.34		-0.308	0.472	0.090	0.254

注: $X_4$  大气温度; $X_{10}$  水分利用效率( $WUE$ ); $X_2$   $\text{CO}_2$ 浓度; $X_7$  蒸腾速率。

Note:  $X_4$ , Atmospheric temperature;  $X_{10}$ , Water use efficiency( $WUE$ );  $X_2$ ,  $\text{CO}_2$  concentration;  $X_7$ , Transpiration rate.

析间接通径系数发现,海拔变化对水分利用效率、蒸腾速率为间接正作用,对大气温度、 $\text{CO}_2$ 浓度为间接负作用。通过逐步回归分析得到回归方程,其多元相关系数为 $R=0.906$ ,总决定系数为 $R^2=0.822$ ,表明这4个变量的82.2%受海拔变化的影响。

### 2.3 海拔变化对帕拉英达杧果果实外观性状的影响

#### 2.3.1 不同海拔帕拉英达杧果果实外观性状比较

由表5可以看出,单果质量随着海拔的升高而增大,海拔1194 m处单果质量显著高于其他海拔段,在所有海拔段中平均单果质量最大,为390.07 g,比海拔685 m高31.95%,且各个海拔段之间平均单果质量差异显著。果皮质量、果实纵径、果实横径、果实厚度、种子质量、种子长度、种子宽度与单果质量变化趋势一致,均随海拔的升高而增加,除果实厚度外,其他性状在各个海拔段之间均有显著性差异。850 m、

表5 不同海拔帕拉英达杧果果实外观性状

Table 5 The fruit external characteristics of Myahinthia mango at different altitudes

海拔 Altitude/ m	平均单果质量 Average fruit mass/ g	果皮质量 Peel mass/g	果实纵径 Fruit longitudinal diameter/mm	果实横径 Fruit diameter/ mm	果实厚度 Fruit thickness/ mm	种子质量 Seed mass/g	种子长度 Seed length/ mm	种子宽度 Seed width/ mm	种子厚度 Seed thickness/ mm	可食率 Edible rate/%
685	254.23± 28.42 d	30.63± 5.90 d	115.07± 3.65 c	64.07± 3.18 c	61.28± 2.76 c	30.04± 1.23 d	89.36± 3.25 c	27.69± 0.69 c	15.66± 2.40 b	76.07± 1.63 a
	12.13 c	3.54 c	115.13± 5.37 c	65.7± 2.89 c	62.4± 1.91 b c	33.87 ±2.04 c	93.97± 3.58 c	30.63± 0.88 b	18.33± 1.87 a	75.6± 0.76 a
1034	335.49± 23.57 b	42± 3.91 b	133.52± 10.60 b	70.46± 3.46 b	64.14± 3.53 b	36.92± 4.43 b	108.9± 10.63 b	32.79± 2.75 a	18.24± 2.12 a	76.5± 1.08 a
	32.86 a	47.79± 6.27 a	143.28± 7.40 a	74.1± 3.68 a	67.28± 2.54 a	43.31± 3.79 a	119.89± 9.68 a	33.88± 1.71 a	16.63± 2.44 ab	76.62± 0.95 a

1034 m海拔段种子厚度显著高于685 m海拔段,可食率在各个海拔段之间差异不显著。

**2.3.2 不同海拔与帕拉英达杧果果实外观性状相关性分析** 将海拔与帕拉英达杧果果实外观性状进行相关性分析,由表6可以看出,海拔与单果质量、果皮质量、果实纵径、果实横径、果实厚度、种子质量、种子长度、种子宽度呈显著正相关,随着海拔升高,平均单果质量、果皮质量、种子质量增加,果实纵径、

果实横径、果实厚度等增大。海拔与种子厚度、可食率无显著相关性,说明海拔对种子厚度和可食率无影响。

**2.3.3 海拔对帕拉英达杧果果实外观性状影响的逐步回归分析** 以海拔变化( $Y$ )为因变量,果实外观性状为自变量( $X_i$ ),采用逐步引入-剔除法进行逐步多元回归分析。 $F$ 显著水平值 $\leq 0.05$ 时,选择自变量; $F$ 显著水平值 $\geq 0.01$ 时,剔除自变量。按照显著

表6 不同海拔与帕拉英达杧果果实外观性状的相关性分析

Table 6 Correlation analysis of fruit external characteristics of Myahinthia mango at different altitudes

	$Y$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$	$X_8$	$X_9$	$X_{10}$
$Y$	1										
$X_1$	0.878**	1									
$X_2$	0.795**	0.926**	1								
$X_3$	0.834**	0.851**	0.755**	1							
$X_4$	0.755**	0.867**	0.847**	0.674**	1						
$X_5$	0.621**	0.732**	0.648**	0.439**	0.804**	1					
$X_6$	0.806**	0.876**	0.760**	0.789**	0.664**	0.507**	1				
$X_7$	0.833**	0.909**	0.786**	0.886**	0.706**	0.547**	0.926**	1			
$X_8$	0.779**	0.832**	0.789**	0.690**	0.679**	0.522**	0.828**	0.826**	1		
$X_9$	0.067	0.022	0.010	0.071	-0.018	0.023	0.234	0.168	0.231	1	
$X_{10}$	0.231	0.285*	0.013	0.251	0.294*	0.469**	0.033	0.197	0.055	-0.266	1

注: \*表示显著相关( $p < 0.05$ )。 \*\*表示极显著相关( $p < 0.01$ )。  $Y$  海拔;  $X_1$ . 平均单果质量;  $X_2$ . 果皮质量;  $X_3$ . 果实纵径;  $X_4$ . 果实横径;  $X_5$ . 果实厚度;  $X_6$ . 种子质量;  $X_7$ . 种子长度;  $X_8$ . 种子宽度;  $X_9$ . 种子厚度;  $X_{10}$ . 可食率。

Note: \* indicates significant correlation ( $p < 0.05$ ), \*\* indicates very significant correlation ( $p < 0.01$ ).  $Y$ . Altitude;  $X_1$ . Average fruit mass;  $X_2$ . Peel mass;  $X_3$ . Fruit longitudinal diameter;  $X_4$ . Fruit diameter;  $X_5$ . Fruit thickness;  $X_6$ . Seed mass;  $X_7$ . Seed length;  $X_8$ . Seed width;  $X_9$ . Seed thickness;  $X_{10}$ . Edible rate.

程度,逐步引入单果质量、果实纵径,得到以下回归方程:

$$Y = -268.939 + 2.079X_1 + 4.353X_3$$
 ( $X_1$ . 平均单果质量;  $X_3$ . 果实纵径),  $F = 89.269$ ,  $p = 0.000 < 0.01$ , 平均单果质量、果实纵径偏回归系数的显著性都小于0.01, 均达到极显著水平, 表明海拔变化综合影响了单果质量、果实纵径。

2.3.4 海拔对帕拉英达杧果果实外观性状影响的通径分析及决定程度分析 海拔变化( $Y$ )对帕拉英达杧果果实外观性状( $X_i$ )的直接作用和通过其他因子

( $X_j$ )的间接作用如表7所示, 海拔变化对单果质量、果实纵径的直接作用大于其间接作用。海拔对单果质量、果实纵径均为直接正作用, 对单果质量的直接作用大于果实纵径。通过分析间接通径系数发现, 海拔变化对单果质量、果实纵径为间接正作用, 对果实纵径的间接作用大于单果质量。通过逐步回归分析得到回归方程, 其多元相关系数  $R=0.894$ , 总决定系数  $R^2=0.799$ , 表明这2个果实外观性状及它们的交互效应受海拔影响, 即这2个变量的79.9%受到海拔变化的影响。

表7 帕拉英达杧果果实外观性状与海拔的通径分析

Table 7 The path analysis between altitude and fruit external characteristics of Myahinthia mango

外观性状指标 Morphological index	相关系数 Correlation coefficient	直接通径系数 Direct path coefficient	间接通径系数 Indirect path coefficient		
			$X_1$	$X_3$	合计 Total
$X_1$	0.878	0.612		0.266	0.266
$X_3$	0.834	0.313	0.521		0.521

注: $X_1$ . 平均单果质量;  $X_3$ . 果实纵径。

Note:  $X_1$ . Average fruit mass;  $X_3$ . Fruit longitudinal diameter.

## 2.4 海拔变化对帕拉英达杧果果实内在品质的影响

2.4.1 不同海拔帕拉英达杧果果实内在品质比较 由表8可知, 总糖、维生素C含量随着海拔升高而降低, 685 m 海拔段总糖、维生素C含量均显著高于其他海拔段。总酸、可溶性固形物含量变化趋势一致, 均随着海拔升高先增加后降低, 在850 m 海拔段最

高, 1194 m 处总酸、可溶性固形物含量显著低于其他海拔段。蛋白质含量随着海拔升高先升高后降低, 在1034 m 海拔段最高。850 m 粗纤维含量显著高于1034 m 和685 m 海拔段。粗脂肪含量随着海拔升高先降低后增加, 在1194 m 海拔段最高。

2.4.2 不同海拔帕拉英达杧果果实内在品质性状相关性分析 将海拔与帕拉英达杧果果实内在品质性

表 8 不同海拔帕拉英达杧果果实内在品质

Table 8 The internal quality of Myahinthia mango at different altitudes

海拔 Altitude/m	w(可溶性固形物) Soluble solids content/%	w(总糖) Total sugar content/ (g·100 g <sup>-1</sup> )	w(维生素C) Vitamin C content/ (mg·100 g <sup>-1</sup> )	w(蛋白质) Protein content/ (g·100 g <sup>-1</sup> )	w(粗纤维) Crude fiber content/%	w(粗脂肪) Crude fat content/%	w(总酸) Total acid content/%
685	19.53±0.12 b	18.08±0.39 a	65.32±3.67 a	0.70±0.03 b	0.36±0.09 c	1.80±0.14 ab	1.06±0.10 ab
850	20.27±1.24 a	17.70±0.45 ab	54.44±4.45 b	0.74±0.06 ab	0.65±0.07 a	1.35±0.13 c	1.15±0.09 a
1034	18.84±0.49 bc	16.98±0.45 b	38.40±2.21 c	0.83±0.08 a	0.42±0.07 bc	1.59±0.10 bc	0.93±0.08 b
1194	17.44±0.44 c	15.82±0.49 c	37.65±0.83 c	0.46±0.06 c	0.52±0.09 ab	2.1±0.25 a	0.76±0.05 c

状进行相关性分析,结果由表9可以看出,海拔与可溶性固形物、总糖、维生素C、总酸含量呈显著负相关,随着海拔升高,可溶性固形物、总糖、维生素C、总酸含量降低。海拔对蛋白质、粗纤维、粗脂肪含量无影响。

2.4.3 海拔对帕拉英达杧果果实内在品质性状影响的逐步回归分析 以海拔的变化( $Y$ )为因变量,果实内在品质性状为自变量( $X_i$ ),采用逐步引入-剔除法进行逐步多元回归分析。 $F$ 显著水平值 $\leq 0.05$ 时,选择自变量; $F$ 显著水平值 $\geq 0.01$ 时,剔除自变

表 9 海拔与帕拉英达杧果果实内在品质的相关性分析

Table 9 Correlation analysis of internal quality of Myahinthia mango at different altitudes

	$Y$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$
$Y$	1							
$X_1$	-0.726**	1						
$X_2$	-0.896**	0.709**	1					
$X_3$	-0.939**	0.679*	0.735**	1				
$X_4$	-0.467	0.696*	0.594*	0.260	1			
$X_5$	0.205	0.178	-0.173	-0.102	-0.126	1		
$X_6$	0.413	-0.634*	-0.529	-0.229	-0.688*	-0.221	1	
$X_7$	-0.776**	0.749**	0.828**	0.622*	0.561	0.135	-0.744**	1

注: $Y$ :海拔;  $X_1$ :可溶性固形物含量;  $X_2$ :总糖含量;  $X_3$ :维生素C含量;  $X_4$ :蛋白质含量;  $X_5$ :粗纤维含量;  $X_6$ :粗脂肪含量;  $X_7$ :总酸含量。

Note:  $Y$ : Altitude;  $X_1$ : Soluble solids contents;  $X_2$ : Total sugar contents;  $X_3$ : Vitamin C contents;  $X_4$ : Protein contents;  $X_5$ : Crude fiber contents;  $X_6$ : Crude fat contents;  $X_7$ : Total acid contents.

量。按照显著程度,逐步引入维生素C、总糖,得到以下回归方程:

$$Y = 2992.618 - 9.853X_3 - 91.54X_2 \quad (X_3: \text{维生素C含量}; X_2: \text{总糖含量}), F=170.847, p=0.000 < 0.01.$$

维生素C、总糖含量偏回归系数的显著性都小于0.01,均达到极显著水平,表明海拔变化综合影响了维生素C、总糖含量。

2.4.4 海拔对帕拉英达杧果果实内在品质性状影响的通径分析及决定程度分析 海拔变化( $Y$ )对帕拉英达杧果果实内在品质( $X_i$ )的直接作用和通过其他因子( $X_j$ )的间接作用如表10所示,海拔变化对维生素C、总糖含量均为负作用,其中对维生素C含量的直接作用最大,对总糖含量的间接作用最大,对维生素C含量的直接作用大于其间接作用,对总

表 10 帕拉英达杧果果实内在品质与海拔的通径分析

Table 10 The path analysis between altitude and internal quality of Myahinthia mango

内在品质 指标	相关系数 Correlation coefficient	直接通径系数 Direct path coefficient	间接通径系数 Indirect path coefficient		
			$X_2$	$X_3$	合计 Total
$X_2$	-0.896	-0.447		-0.449	-0.449
$X_3$	-0.939	-0.611		-0.329	-0.329

注: $Y$ :海拔;  $X_2$ :总糖含量;  $X_3$ :维生素C含量。

Note:  $Y$ : Altitude;  $X_2$ : Total sugar contents;  $X_3$ : Vitamin C contents.

糖含量的直接作用小于其间接作用。通过逐步回归分析得到回归方程,其多元相关系数 $R=0.987$ ,总决定系数 $R^2=0.974$ ,表明这2个果实内在品质性状的97.4%受海拔变化的影响。

### 3 讨 论

温度因子是影响植物生长重要且复杂的因素之一,而海拔对温度的影响最大,随着海拔的升高,植物的光合能力也下降,其营养生长和生殖生长也随之缩短<sup>[15-16]</sup>。徐胜涛等<sup>[17]</sup>对不同海拔的蕉园研究的结果表明,不同海拔延长了香蕉营养生长和生殖生长的周期。郭铭等<sup>[18]</sup>对不同海拔地区大麦品种的农艺性状和产量的研究也表明,海拔的升高延长了大麦的生育期。樊莹等<sup>[19]</sup>对长白山自然保护区不同海拔的林下蒙古栎幼树生理生长特征的研究发现,蒙古栎幼树的年生长量随海拔的增加而下降。笔者在本研究中对4个海拔段帕拉英达杧果的物候期观察发现,随着海拔的升高,杧果的初花期、盛花期、末花期、果实成熟期均延迟,其中海拔1194 m果实收获期比海拔685 m晚30 d。此外,除了温度,不同海拔段的水分、光照、风向,以及果园的坡向、地形等综合环境因子对植物的生长也有重要影响,本文没有系统对不同海拔段光照度、空气温度、土壤湿度和温度土壤湿度进行监测,只简单观测物候期,没有深层次揭示海拔对杧果生长发育的关键影响因子,因此,下一步将加强对光照度、有效积温、空气温度和昼夜温差等因素的监测,增加土壤湿度、温度和理化性质等的测定与分析,进而明确不同海拔对杧果生长和品质影响的关键因子。

环境是植物赖于生存和发展的条件,海拔变化会导致光照、温度、湿度、大气压及CO<sub>2</sub>分压等环境的变化,从而影响植物的生态和生理特征<sup>[1]</sup>。光合作用是植物物质代谢和能量代谢的重要基础,同时也是受环境影响变化最显著的生理过程之一<sup>[20]</sup>。本研究结果表明,海拔对光合有效辐射、大气温度、叶片温度、大气CO<sub>2</sub>浓度、胞间CO<sub>2</sub>浓度等环境因子均有影响。叶片净光合速率、叶肉瞬时羧化效率随着海拔的升高而降低,说明海拔升高,大气温度降低,因此潜在蒸散下降,限制了帕拉英达杧果叶片的光合作用,这与前人对黄果柑<sup>[21]</sup>、柠檬<sup>[22]</sup>、茶树<sup>[23]</sup>等不同作物净光合速率随海拔的升高而升高的研究结果不同,这可能与作物之间的差异性、果园立地条件及生态环境等有关。蒸腾速率的变化规律与大气温度变化一致,在海拔850 m处最高,气孔导度也在海拔850 m处最高。在海拔685 m及850 m处,气孔导度的增高、胞间CO<sub>2</sub>浓度的减小使蒸腾速率上升,与此

同时叶片水分利用效率及净光合速率明显降低。气孔导度对海拔的响应受大气温度、CO<sub>2</sub>浓度、水分等多种环境因子的综合影响,这可能与作物生长的环境条件之间存在密切关联<sup>[24]</sup>。通径分析进一步表明海拔变化影响大气温度、水分利用效率、CO<sub>2</sub>浓度、蒸腾速率,这4个光合指标的82.2%受海拔变化的影响。光合作用是极其复杂的生理过程,受植物特性和环境因子的双重影响,且大田实验受外界影响的因素更多,下一步将侧重不同海拔光合作用的动态变化差异研究,分析影响杧果生长和品质的光照和温度差异。

海拔变化引起的温度变化不仅对作物生长发育、功能结构等方面有影响,也对作物的品质性状有显著影响。本研究对帕拉英达杧果果实外观性状分析的结果表明,随着海拔的升高,果实的单果质量逐渐增加,海拔与单果质量、果皮质量、果实纵径、果实横径、果实厚度、种子质量、种子长度、种子宽度呈显著正相关,但对种子厚度、可食率无影响。通径分析结果也表明海拔变化影响帕拉英达杧果的单果质量及果实纵径。郑顺林等<sup>[25]</sup>研究不同海拔对紫色马铃薯产量和品质影响的结果表明,紫色马铃薯产量及粗蛋白、淀粉、花青素含量随着海拔的升高而呈增加趋势。曹永华等<sup>[26]</sup>对不同海拔段长富2号苹果研究发现,单果质量及可溶性固形物、可溶性糖、果皮花青苷、脯氨酸含量均呈先增大后减小的趋势,果实硬度及可滴定酸、维生素C含量呈不断增加。王頓等<sup>[27]</sup>对贵州山地不同海拔区域种植的4个蓝莓品种果实性状及生理指标进行比较发现,不同品种果实性状和生理指标均存在不同程度的海拔差异。毛如志等<sup>[28]</sup>研究发现高海拔产区的美乐葡萄浆果的可溶性固形物、单宁和还原糖含量增加,总酚和花青素含量减少,品质优于低海拔区域。本研究表明海拔对帕拉英达杧果果实的总糖、维生素C、总酸、可溶性固形物含量有显著影响,对蛋白质、粗纤维、粗脂肪含量无影响。总糖、维生素C含量随着海拔升高而降低,685 m海拔处总糖、维生素C含量显著高于其他海拔段。

### 4 结 论

总体来说,海拔对帕拉英达杧果的光合作用、生长发育及品质都有很大的影响,随着海拔的升高,净光合速率下降,物候期延迟,平均单果质量增加,海

拔850 m处总酸、可溶性固形物含量高于其他海拔段,海拔685 m处总糖、维生素C含量高于其他海拔段,说明帕拉英达杧果在潞江镇685 m、850 m海拔段的果实内在品质相对较好,但1034 m、1194 m海拔段果实收获期比685 m、850 m海拔段晚,生产上应根据环境及市场的需要,选择适宜的帕拉英达杧果种植区域,以期获得高效益。

### 参考文献 References:

- [1] 潘红丽,李迈和,蔡小虎,吴杰,杜忠,刘兴良.海拔梯度上的植物生长与生理生态特性[J].生态环境学报,2009,18(2):722-730.  
PAN Hongli, LI Maihe, CAI Xiaohu, WU Jie, DU Zhong, LIU Xingliang. Plant growth, physiological and ecological characteristics on altitudinal gradient[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2009, 18 (2): 722-730.
- [2] 康专苗,白亭玉,王艺蓉,林电.云南保山‘帕拉英达’杧果叶片营养规律研究[J].中国南方果树,2016,45(1):66-69.  
KANG Zhanmiao, BAI Tingyu, WANG Yirong, LIN Dian. Study on the leaf nutrition of mango ‘palayingda’ in Baoshan, Yunnan[J]. South China Fruits, 2016, 45 (1): 66-69.
- [3] 康专苗,姚智,白亭玉,焦森,王艺蓉,仇海威,林电.‘帕拉英达’芒果叶片养分变化规律及营养诊断[J].南方农业学报,2017,48(4):686-691.  
KANG Zhanmiao, YAO Zhi, BAI Tingyu, JIAO Miao, WANG Yirong, QIU Haiwei, LIN Dian. Nutrient changes and nutrient diagnosis of Palayingda mango leaves[J]. Journal of Southern Agriculture, 2017, 48 (4): 686-691.
- [4] 王美存,尼章光,龙亚芹,陈华蕊,陈于福,俞艳春,解德宏.套袋对帕拉英达芒果可溶性固形物含量的影响[J].江西农业学报,2010,22(10):40-41.  
WANG Meicun, NI Zhangguang, LONG Yaqin, CHEN Huarui, CHEN Yufu, YU Yanchun, JIE Dehong. Effect of bagging on soluble solids content of Palayingda mango[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2010, 22 (10): 40-41.
- [5] 王美存,尼章光,龙亚芹,陈于福,陈华蕊,俞艳春.不同套袋材料对帕拉英达单果质量的影响[J].热带农业科学,2010,30(7):14-16.  
WANG Meicun, NI Zhangguang, LONG Yaqin, CHEN Yufu, CHEN Huarui, YU Yanchun. Effects of different bagging materials on single fruit weight of Palayingda[J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 2010, 30 (7): 14-16.
- [6] 解德宏,张永超,张翠仙,陈于福,尼章光,柏天琦.‘帕拉英达’杧在云南不同区域的综合性状表现[J].中国南方果树,2019,48(6):77-80.  
XIE Dehong, ZHANG Yongchao, ZHANG Cuixian, CHEN Yufu, NI Zhangguang, BAI Tianqi. Comprehensive performance of Palayingda mango in different regions of Yunnan[J]. South China Fruits, 2019, 48 (6): 77-80.
- [7] 蔡楚雄,邓雄,曹洪麟,刘世平,叶万辉.8个芒果品种的光合作用比较研究[J].广东农业科学,2003(2):13-16.  
CAI Chuxiong, DENG Xiong, CAO Honglin, LIU Shiping, YE Wanhai. Comparative study on photosynthesis of eight mango varieties[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2003 (2): 13-16.
- [8] 周开兵,李世军,袁孟玲.增强UV-B辐射对芒果株产和果实品质及光合作用的影响[J].热带作物学报,2018,39(6):1102-1107.  
ZHOU Kaibing, LI Shijun, YUAN Mengling. Effects of enhanced UV-B radiation on plant yield, fruit quality and photosynthesis of mango[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2018, 39 (6): 1102-1107.
- [9] 袁孟玲,岳堃,王红,郭钰東,周开兵.增强UV-B辐射对芒果成年树光合作用及其产量与常规品质的影响[J].南方农业学报,2018,49(5):930-937.  
YUAN Mengling, YUE Kun, WANG Hong, GUO Yulan, ZHOU Kaibing. Effects of enhanced UV-B radiation on photosynthesis and yield and conventional quality of mango grown trees[J]. Journal of Southern Agriculture, 2018, 49 (5): 930-937.
- [10] 孙文泰,尹晓宁,刘兴禄,董铁,牛军强,马明.不同海拔对‘红富士’苹果果实品质的影响[J].北方园艺,2013(6):12-15.  
SUN Wentai, YIN Xiaoning, LIU Xinglu, DONG Tie, NIU Junqiang, MA Ming. Effects of different altitudes on fruit quality of ‘Red Fuji’ Apple[J]. Northern Horticulture, 2013 (6): 12-15.
- [11] 叶宏达,达布·希拉图,沙本才,王文祥,刘佳,叶怡然,海梅荣.海拔梯度对马铃薯光合特性和荧光特性的影响[J].作物杂志,2017(5):93-99.  
YE Hongda, Dabu · Xilatu, SHA Bencai, WANG Wenxiang, LIU Jia, YE Yiran, HAI Meirong. Effects of altitude gradient on photosynthetic and fluorescence characteristics of potato[J]. Crops, 2017 (5): 93-99.
- [12] 徐亮.不同海拔条件下春油菜光合生理和产油量的响应[J].江苏农业科学,2017,45(1):92-94.  
XU Liang. Response of photosynthetic physiology and oil production of spring rape at different altitudes[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2017, 45 (1): 92-94.
- [13] 孙小红,周瑾,胡春霞,吕洪飞,储开江,王国夫.不同海拔对香榧种子外观性状及营养品质的影响[J].果树学报,2019,36(4):476-485.  
SUN Xiaohong, ZHOU Jin, HU Chunxia, LÜ Hongfei, CHU Kaijiang, WANG Guofu. Effects of different altitudes on seed appearance and nutritional quality of *Torreya grandis*[J]. Journal of Fruit Science, 2019, 36 (4): 476-485.
- [14] 白婷,靳玉龙,朱明霞,王波.海拔差异对青稞品质影响的研究[J].中国粮油学报,2019,34(2):34-39.  
BAI Ting, JIN Yulong, ZHU Mingxia, WANG Bo. Effect of altitude difference on quality of highland barley[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2019, 34 (2): 34-39.
- [15] CRIDDLE R S, HOPKIN M S, MCARTHUR E D, HANSEN

- L D. Plant distribution and the temperature coefficient of metabolism[J]. *Plant, Cell and Environment*, 1994, 17(3): 233-243.
- [16] LOEHLE C. Height growth rate tradeoffs determine northern and southern range limits for trees[J]. *Journal of Biogeography*, 1998, 25(4): 735-742.
- [17] 徐胜涛,何翔,杨佩文,白亭亭,番华彩,尹可锁,杨宝明,郑泗军. 不同海拔气候因子对香蕉生长和果实品质的影响[J]. 云南农业大学学报(自然科学),2020,35(1):102-107.
- XU Shengtao, HE Xiang, YANG Peiwen, BAI Tingting, FAN Huacai, YIN Kesuo, YANG Baoming, ZHENG Sijun. Effects of climate factors at different altitudes on banana growth and fruit quality[J]. *Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science)*, 2020, 35 (1): 102-107.
- [18] 郭铭,闫栋,马增科,孟亚雄,王化俊. 不同海拔地区对大麦农艺性状和品质的影响[J]. 大麦与谷类科学,2017,34(6):22-29.
- GUO Ming, YAN Dong, MA Zengke, MENG Yaxiong, WANG Huajun. Effects of different altitudes on agronomic traits and quality of barley[J]. *Barley and Cereal Sciences*, 2017, 34 (6): 22-29.
- [19] 樊莹,乔雪涛,赵秀海. 长白山自然保护区蒙古栎幼树生理生长特性随海拔梯度的变化[J]. 北京林业大学学报,2019,41(11):1-10.
- FAN Ying, QIAO Xuetao, ZHAO Xuhai. Changes of physiological growth characteristics of *Quercus mongolica* saplings with altitude gradient in Changbai Mountain Nature Reserve[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2019, 41 (11): 1-10.
- [20] 杨志长,沈涛,胡宇倩,宋海星. 低氮密植对机插晚稻产量形成和光合特性的影响[J]. 南方农业学报,2019,50(3):546-553.
- YANG Zhichang, SHEN Tao, HU Yuqian, SONG Haixing. Effects of low nitrogen and dense planting on yield formation and photosynthetic characteristics of machine transplanted late rice [J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2019, 50 (3): 546-553.
- [21] 孙国超,曹淑燕,李清南,廖玲,熊博,古咸杰,曾海琼,汪志辉. 不同海拔对黄果柑光合作用及果实品质的影响[J]. 湖南农业科学,2019(1):48-51.
- SUN Guochao, CAO Shuyan, LI Qingnan, LIAO Ling, XIONG Bo, GU Xianjie, ZENG Haiqiong, WANG Zhihui. Effects of different altitudes on photosynthesis and fruit quality of huangguogan[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2019(1): 48-51.
- [22] 井锐锐,张赛赛,张子豪,李文祥. 不同海拔区域尤力克柠檬光合特性的比较研究[J]. 云南农业大学学报(自然科学),2018,33(6):1016-1023.
- JING Ruirui, ZHANG Saisai, ZHANG Zihao, LI Wenxiang. Comparative study on photosynthetic characteristics of Eureka lemon in different altitude regions[J]. *Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science)*, 2018, 33 (6): 1016-1023.
- [23] 程冬梅,张丽,韦红飞,江新凤,周赛霞,张志勇,彭焱松. 庐山不同海拔茶树光合响应差异研究[J]. 茶叶科学,2019,39(4):447-454.
- CHENG Dongmei, ZHANG Li, WEI Hongfei, JIANG Xinfeng, ZHOU Saixia, ZHANG Zhiyong, PENG Yansong. Differences in photosynthetic response of tea plants at different altitudes in Lushan Mountain[J]. *Journal of Tea Science*, 2019, 39 (4): 447-454.
- [24] 宋璐璐,樊江文,吴绍洪. 植物叶片性状沿海拔梯度变化研究进展[J]. 地理科学进展,2011,30(11):1431-1439.
- SONG Lulu, FAN Jiangwen, WU Shaohong. Research progress of plant leaf traits along altitude gradient[J]. *Progress in Geography*, 2011, 30 (11): 1431-1439.
- [25] 郑顺林,张仪,李世林,李德林,李文光,王晓琴,郭刚金,袁继超. 不同海拔对紫色马铃薯产量、品质及花青素含量的影响[J]. 西南农业学报,2013,26(4):1420-1423.
- ZHENG Shunlin, ZHANG Yi, LI Shilin, LI Delin, LI Wenguang, WANG Xiaoqin, GUO Gangjin, YUAN Jichao. Effects of different altitudes on yield, quality and anthocyanin content of purple potato[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2013, 26 (4): 1420-1423.
- [26] 曹永华,金高明,刘兴禄,董铁,牛军强,马明. 不同海拔红富士苹果叶片生理及果实品质的研究[J]. 西北农业学报,2016,25(12):1821-1828.
- CAO Yonghua, JIN Gaoming, LIU Xinglu, DONG Tie, NIU Junqiang, MA Ming. Study on leaf physiology and fruit quality of Red Fuji apple at different altitudes[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2016, 25 (12): 1821-1828.
- [27] 王頓,周荧,聂飞. 贵州4个蓝莓品种的海拔适应性研究[J]. 亚热带植物科学,2018,47(4):333-338.
- WANG Di, ZHOU Ying, NIE Fei. Study on altitude adaptability of four blueberry varieties in Guizhou[J]. *Subtropical Plant Science*, 2018, 47 (4): 333-338.
- [28] 毛如志,张国涛,邵建辉,杜飞,邓维萍,赵新节,朱书生,朱有勇,何霞红. 低海拔和高海拔产区气象因子对‘美乐’葡萄浆果品质和代谢组的影响[J]. 中国生态农业学报,2016,24(4):506-516.
- MAO Ruzhi, ZHANG Guotao, SHAO Jianhui, DU Fei, DENG Weiping, ZHAO Xinjie, ZHU Shusheng, ZHU Youyong, HE Xiahong. Effects of meteorological factors on berry quality and metabonomics of ‘Meile’ grape in low and high altitude production areas[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2016, 24 (4): 506-516.