

DOI: 10.12357/cjea.20230415

吴立, 杜晓杰, 孙朝锋, 黄川容, 王加义, 陈家金, 林辉阳. 基于 GIS 的福建芙蓉李气候适宜性区划[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2024, 32(2): 321–329

WU L, DU X J, SUN C F, HUANG C R, WANG J Y, CHEN J J, LIN H Y. Climatic suitability regionalization of Furong plums based on GIS in Fujian Province[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2024, 32(2): 321–329

基于 GIS 的福建芙蓉李气候适宜性区划*

吴立¹, 杜晓杰², 孙朝锋¹, 黄川容¹, 王加义¹, 陈家金^{1**}, 林辉阳¹

(1. 福建省气象服务中心 福州 350008; 2. 福建省建瓯市气象局 建瓯 353100)

摘要: 为合理利用气候资源, 科学规划芙蓉李的种植布局, 基于福建省 67 个地面气象观测站 1971—2018 年的气象资料、2005—2014 年芙蓉李面积和产量资料以及地理信息数据, 采用 GIS 技术开展福建芙蓉李气候适宜性区划。根据福建省的气候特点和芙蓉李生长的环境条件, 构建福建芙蓉李气候适宜性区划指标体系; 采用层次分析法和熵权法确定各区划指标的权重; 通过多元线性回归分析, 建立区划指标与经度、纬度、海拔高度的地理推算模型; 采用加权求和法, 计算芙蓉李气候适宜性指数; 根据福建芙蓉李气候适宜性指数的分布规律、芙蓉李种植生长的实际情况和实地调查情况, 以及限制芙蓉李生长的区划指标的区划结果, 将芙蓉李在福建的气候适宜性区域划分为适宜区、次适宜区和不适宜区 3 个等级; 基于福建芙蓉李的种植现状和李果的单产高低, 对区划结果进行验证。结果表明: 适宜区主要集中在龙岩北部, 三明、南平和宁德 3 市的大部分地区以及福州北部这些中高海拔地区; 次适宜区主要分布在福建省中部的武平、漳平至罗源一带; 不适宜区主要集中在南部和东南部沿海这些低海拔地区以及北部山区的高海拔地区。区划结果与福建芙蓉李的种植现状和李果的单产高低吻合性高。研究结果可为福建芙蓉李的种植布局提供决策参考。

关键词: 芙蓉李; 气候适宜性; 气候区划; GIS; 福建

中图分类号: S166

Climatic suitability regionalization of Furong plums based on GIS in Fujian Province*

WU Li¹, DU Xiaojie², SUN Chaofeng¹, HUANG Chuanrong¹, WANG Jiayi¹, CHEN Jiajin^{1**}, LIN Huiyang¹

(1. Fujian Meteorological Service Center, Fuzhou 350008, China; 2. Fujian Jian'ou Meteorological Bureau, Jian'ou 353100, China)

Abstract: Fujian is located on the southeast coast of China, where superior climatic resources create conditions for the cultivation of Furong plums. However, the topography of Fujian is complex, the climate is changeable, and meteorological disasters in Fujian are of many different types and characterized by wide distribution, high frequency, high intensity, and heavy losses, which affect the yield and quality of Furong plums. To reasonably utilize climatic resources and scientifically plan the planting layout of Furong plums, climatic suitability regionalization of Furong plums in Fujian was conducted using GIS and based on meteorological data from 1971 to 2018 from 67 ground meteorological stations, area and yield data from 2005 to 2014 of Furong plums, and geographical information data. Based on the climatic characteristics of Fujian and the growing environmental conditions of the Furong plums, an indicator system for the climatic suitability regionalization of the Furong plums was established. The weights of the regionalization indicators were calculated using the analytic hierarchy process and the entropy weight method. Geographical reckoning models between the regional-

* 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201406027)资助

** 通信作者: 陈家金, 主要从事农业气象灾害风险研究。E-mail: cjj8284@163.com

吴立, 主要从事生态环境变化与农业气象灾害研究。E-mail: wuli_0506@163.com

收稿日期: 2023-07-31 接受日期: 2023-09-07

* This study was supported by the Special Scientific Research Fund of Meteorology in the Public Welfare Profession of China (GYHY201406027).

** Corresponding author, E-mail: cjj8284@163.com

Received Jul. 31, 2023; accepted Sep. 7, 2023

ization indicators, longitude, latitude, and altitude were established using multivariate linear regression analysis. The climatic suitability index of the Furong plums was calculated using the weighted summation method. The climatic suitability areas of Furong plums in Fujian were divided into suitable, sub-suitable, and unsuitable areas based on the distribution laws of the climatic suitability index, the actual conditions of growth and field investigation of Furong plums in Fujian, and the regionalization result of the regionalization indicator for limiting the growth of Furong plums. Finally, the regionalization results were verified based on the planting status of Furong plums and the per-unit area yield of the plums. The results of this study were as follows: The suitable areas were mainly distributed in the middle- and high-altitude areas of north of Longyan and Fuzhou, and most of Ningde, Sanming, and Nanping. The sub-suitable areas were mainly distributed in the middle of Fujian along Wuping and Zhangping to Luoyuan. The unsuitable areas were mainly concentrated in the low-altitude areas along the south and southeast coasts and the high-altitude areas of the northern mountain regions. The regionalization results were in good agreement with the planting status of Furong plums and the per-unit area yield of plums. The results of this study provide a decision reference for the planting of Furong plums in Fujian.

Keywords: Furong plums; Climatic suitability; Climatic regionalization; GIS; Fujian

芙蓉李 (*Prunus salicina* Lindl. cv. Furong) 是蔷薇科李属亚热带果树, 又名夫人李、浦李、永泰李、中国李, 是福建特产, 在福建省永泰县、福安市、古田县、永定区、武平县等地均有种植, 其果实美观鲜艳, 果肉汁多味甜, 营养丰富, 鲜食加工皆可, 深受消费者的喜爱^[1]。福建地处我国东南沿海, 属亚热带海洋性季风气候, 光照充足、雨量充沛、热量丰富, 优越的气候资源为芙蓉李的栽培种植创造了条件, 但福建地形地貌复杂, 气候多变, 境内气象灾害呈现种类多、分布广、频率高、强度大、损失重的特点, 影响芙蓉李产量和品质的形成^[2]。因此, 开展福建芙蓉李气候适宜性区划, 对趋利避害、合理利用气候资源和科学规划芙蓉李种植布局具有重要意义。

关于气候适宜性区划的研究, 前人已对各类水果、蔬菜、中药材、油料作物等做了相应研究^[3-8], 其中, 福建省的气候适宜性区划研究已有台湾青枣 (*Zizyphus mauritians* Lam.)、水蜜桃 (*Prunus persica* L. Batsch)、番木瓜 (*Carica papaya* L.)、番石榴 (*Psidium guajava* L.) 等^[9-12], 但在芙蓉李区划方面的研究鲜有报道, 仅见肖小永等^[13]对江西省井冈山市的芙蓉李进行了气候区划, 但选取的区划指标单一, 未做较全面的研究。目前针对芙蓉李的研究, 仍是多集中在芙蓉李高产栽培技术、化学成分分析等方面^[1, 14-15]。在区划研究方法上, 区划指标体系的建立是研究的关键, 前人多是从年平均气温、年积温、年降水量、年日照时数等因子中挑选因子作为区划指标, 本文通过综合考虑福建省的气候特点和芙蓉李生长的环境条件, 建立芙蓉李气候适宜性区划指标体系, 并将指标分为适宜芙蓉李生长的指标和限制芙蓉李生长的指标两类, 在绘制综合的区划图时, 排除了限制芙蓉李生长的区划指标对应的不适宜区, 并通过芙蓉李种植现状和李果的单产高低对区划结果进行验证,

使最终的区划结果不仅精细、可靠, 而且贴近实际。研究结果将为福建芙蓉李的种植布局规划提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 资料来源

气象资料来源于福建省气象信息中心, 包括福建省 67 个地面气象观测站 1971—2018 年的逐日平均温度、最低温度、降水量和 2008—2018 年的逐小时气温数据。

芙蓉李面积和产量资料来源于福建省统计局历年出版的《福建农村统计年鉴》, 具体包括 2005—2014 年各地市的芙蓉李采摘面积和产量。

地理信息数据来源于国家基础地理信息中心, 包括福建省高程模型 (DEM) 栅格数据和福建省地市级行政边界, 空间分辨率为 30 m×30 m 网格的经度、纬度等数据采用 ArcGIS 软件通过投影转换、插值和裁剪等处理获得。

1.2 数据处理

由于芙蓉李是多年生果树, 考虑其种植生长的稳定性, 对冬季极端低温进行 90% 保证率处理。极端低温的保证率是指一地的多年时间里高于某极端低温界限值的年数占有所有资料年数的比率。统计福建省 67 个地面气象观测站 1971—2018 年的冬季极端低温, 对各站点的极端低温序列进行正态检验, 发现仅上杭县气象站的极端低温序列不符合正态分布, 对该序列进行余弦变换处理后使变换后的序列符合正态分布。统计各气象站多年极端低温的平均值 ($\bar{x}$) 和标准差 (σ), 利用式 (1) 计算得到 90% 保证率的冬季极端低温 (T_{JDW})。

$$T_{JDW} = \bar{x} - 1.28\sigma \quad (1)$$

1.3 区划指标

芙蓉李作为亚热带果树,喜温暖而怕低温,适宜在年平均温度 15~19℃、极端最高温不超过 39℃、极端最低温不低于-9℃、 $\geq 10^\circ\text{C}$ 年活动积温 4500~6500℃、年降雨量 1200~2000 mm、海拔 100~800 m 的地方生长^[16]。福建省永泰县素有“李果之乡”的美誉,是芙蓉李的原产地,但气候条件的适宜与否仍是造成芙蓉李产量波动的重要因素。这些因素主要包括: 1) 开花期易遇低温阴雨天气,影响芙蓉李的授粉授精,导致落花落果率增加,产量下降; 2) 芙蓉李在冬季休眠期需要有充分的低温时间来保证花的孕育,一般要求 7.2℃ 以下的低温至少积累 300~500 h,否则会导致花的退化或败育; 3) 冬季冻害的发生制约芙蓉李这种抗寒力弱的亚热带果树的产量形成。芙蓉李对光照的要求不高,能够较好地利用漫射光或弱光。水分方面,芙蓉李在其主要生长季(3—7月)的月平均降水量不低于 50 mm 即可满足正常的生长

发育需要^[13,17-19]。

通过查阅文献、咨询芙蓉李种植专家以及实地调查,根据福建省的气候特点和芙蓉李生长的环境条件,认为^[16-17]年平均气温($\bar{T}$)、 $\geq 10^\circ\text{C}$ 年活动积温($\sum T_{\geq 10^\circ\text{C}}$)、90%保证率的冬季极端低温(T_{JDW})、冬季低温时数(12—2月,气温 $\leq 7.2^\circ\text{C}$ 的小时数, $\sum T_d$)、花期低温阴雨天数(2月下旬至3月,日平均气温 $\leq 13.0^\circ\text{C}$,日降水量 $\geq 2\text{ mm}$ 的最大持续天数, D_r)是决定芙蓉李种植气候适宜性的主要气象因子^[16-17],将这些因子作为福建芙蓉李气候适宜性区划指标。其中,年平均气温、 $\geq 10^\circ\text{C}$ 年活动积温、花期低温阴雨天数为适宜芙蓉李生长的指标,90%保证率的冬季极端低温、冬季低温时数为限制芙蓉李生长的指标。根据芙蓉李的生物学特性,结合实地调查、文献查阅等^[20],对区划指标等级进行划分,结果如表1所示。

表1 芙蓉李气候适宜性区划指标及等级划分

Table 1 Climatic suitability regionalization indicators and rank division of Furong plums

指标 Indicator	适宜 Suitable	次适宜 Sub-suitable	不适宜 Unsuitable
年平均气温 Annual mean temperature ($\bar{T}$, $^\circ\text{C}$)	$15 < \bar{T} \leq 20$	$13 < \bar{T} \leq 15$ $20 < \bar{T} \leq 22$	$\bar{T} \leq 13$ $\bar{T} > 22$
$\geq 10^\circ\text{C}$ 年活动积温 Annual cumulative temperature $\geq 10^\circ\text{C}$ ($\sum T_{\geq 10^\circ\text{C}}$, $^\circ\text{C}$)	$5500 < \sum T_{\geq 10^\circ\text{C}} \leq 6500$	$4000 < \sum T_{\geq 10^\circ\text{C}} \leq 5500$ $6500 < \sum T_{\geq 10^\circ\text{C}} \leq 8000$	$\sum T_{\geq 10^\circ\text{C}} \leq 4000$ $\sum T_{\geq 10^\circ\text{C}} > 8000$
花期低温阴雨天数 Low temperature rainy days in flowering period (D_r , d)	$D_r \leq 2$	$2 < D_r < 4$	$D_r \geq 4$
冬季极端低温 Extreme low temperature in winter (T_{JDW} , $^\circ\text{C}$)	$T_{\text{JDW}} > -5$	$-9 < T_{\text{JDW}} \leq -5$	$T_{\text{JDW}} \leq -9$
冬季低温时数 Low temperature hours in winter ($\sum T_d$, h)	$\sum T_d > 500$	$300 < \sum T_d \leq 500$	$\sum T_d \leq 300$

1.4 归一化方法

计算各站点对应的各指标值,如年平均气温,计算各站点的年平均气温多年均值,构成年平均气温序列。对各指标值序列进行归一化处理,处理方法主要包括3种^[21]:

1) 对于冬季极端低温、冬季低温时数这种数值越大越适宜的指标,采用越大越优型归一化处理方法,如下式所示:

$$\mu_{\sum T_d} = \frac{\sum T_d - \min(\sum T_d)}{\max(\sum T_d) - \min(\sum T_d)} \quad (2)$$

式中: $\mu_{\sum T_d}$ 为归一化后的冬季低温时数, $\sum T_d$ 为原始的冬季低温时数。

2) 对于花期低温阴雨天数这种数值越小越适宜的指标,采用越小越优型归一化处理方法,如下式所示:

$$\mu_{D_r} = \frac{\max(D_r) - D_r}{\max(D_r) - \min(D_r)} \quad (3)$$

式中: μ_{D_r} 为归一化后的花期低温阴雨天数, D_r 为原始的花期低温阴雨天数。

3) 对于年平均气温和 $\geq 10^\circ\text{C}$ 年活动积温这种既不属于数值越大越适宜,又不属于数值越小越适宜的指标,采用建立隶属函数的方法进行归一化,公式分别如下:

$$\mu_{\bar{T}} = \begin{cases} 1 & 15 < \bar{T} \leq 20 \\ \frac{\bar{T} - 13}{15 - 13} & 13 < \bar{T} \leq 15 \\ \frac{22 - \bar{T}}{22 - 20} & 20 < \bar{T} \leq 22 \\ 0 & \bar{T} \leq 13 \text{ 或 } \bar{T} > 22 \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\mu_{\bar{T}}$ 为归一化后的年平均气温, $\bar{T}$ 为原始的年平均气温。

$$\mu_{\sum T_{\geq 10}^{\circ}\text{C}} = \begin{cases} 1 & 5500 < \sum T_{\geq 10}^{\circ}\text{C} \leq 6500 \\ \frac{\sum T_{\geq 10}^{\circ}\text{C} - 4000}{5500 - 4000} & 4000 < \sum T_{\geq 10}^{\circ}\text{C} \leq 5500 \\ \frac{8000 - \sum T_{\geq 10}^{\circ}\text{C}}{8000 - 6500} & 6500 < \sum T_{\geq 10}^{\circ}\text{C} \leq 8000 \\ 0 & \sum T_{\geq 10}^{\circ}\text{C} \leq 4000 \text{ 或 } \sum T_{\geq 10}^{\circ}\text{C} > 8000 \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\mu_{\sum T_{\geq 10}^{\circ}\text{C}}$ 为归一化后的 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 年活动积温,

$\sum T_{\geq 10}^{\circ}\text{C}$ 为原始的 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 年活动积温。

1.5 权重计算方法

采用主观权重与客观权重结合的方法确定各区划指标的综合权重^[22-23]。主观权重的计算采用层次分析法,客观权重的计算采用熵权法,将两者的均值即综合权重作为各指标的最终权重。

层次分析法主要是通过咨询农业气象灾害研究、芙蓉李种植、气候适宜性区划等领域共 10 名专家,对芙蓉李气候适宜性区划指标进行打分构建判断矩阵,对判断矩阵进行最大特征根和特征向量计算、一致性检验等获得主观权重。专家打分结果如表 2 所示。

表 2 芙蓉李气候适宜性区划指标专家打分表

Table 2 Expert evaluating table for indicators of climatic suitability regionalization of Furong plums

区划指标 Regionalization indicator	$\bar{T}$	$\sum T_{\geq 10}^{\circ}\text{C}$	T_{JDW}	$\sum T_{\text{d}}$	D_{r}
年平均气温 Annual mean temperature ($\bar{T}$, $^{\circ}\text{C}$)	1	1	1/3	1/5	5
$\geq 10^{\circ}\text{C}$ 年活动积温 Annual cumulative temperature $\geq 10^{\circ}\text{C}$ ($\sum T_{\geq 10}^{\circ}\text{C}$, $^{\circ}\text{C}$)	1	1	1/3	1/5	5
冬季极端低温 Extreme low temperature in winter (T_{JDW} , $^{\circ}\text{C}$)	3	3	1	1/3	7
冬季低温时数 Low temperature hours in winter ($\sum T_{\text{d}}$, h)	5	5	3	1	9
花期低温阴雨天数 Low temperature rainy days in flowering period (D_{r} , d)	1/5	1/5	1/7	1/9	1

熵权法是根据各等级指标间的差异程度确定权重。若某指标归一化序列值相差较大时,熵值较小,说明该指标提供的有效信息量较大,其权重也应该较大,反之亦然^[24]。主要计算步骤如下:

定义熵。在 5 个指标、67 个评价对象的评估问题中,第 i 个指标的熵为:

$$h_i = -k \sum_{j=1}^n (f_{ij} \ln f_{ij}) \quad (6)$$

式中: r_{ij} 为归一化后的数据序列, $f_{ij} = r_{ij} / \sum_{j=1}^n r_{ij}$, $k = 1 / \ln n$, 当 $f_{ij} = 0$ 时,令 $f_{ij} \ln f_{ij} = 0$ 。本文 $n = 67$, i 取 1~5。

定义熵权。第 i 个指标的熵权由下式计算得到:

$$w_i = \frac{1 - h_i}{m - \sum_{i=1}^m h_i} \left(0 \leq w_i \leq 1, \sum_{i=1}^m w_i = 1 \right) \quad (7)$$

式中: m 为 5。

各区划指标的主客观权重和综合权重的计算结果如表 3 所示。

从表中可看出,各区划指标中,限制芙蓉李生长

的区划指标权重相对较大,其中,以冬季低温时数的权重最大,该指标决定了芙蓉李能否正常孕花,是影响芙蓉李气候适宜程度的最主要气象因子;冬季极端低温次之,该指标决定了芙蓉李能否安全越冬,对芙蓉李气候适宜程度影响较大;适宜芙蓉李生长的区划指标权重相对较小,对芙蓉李气候适宜程度的影响较小。

1.6 区划指标地理推算模型

为使区划结果更加精细,通过将 5 个区划指标分别与经度、纬度、海拔高度进行多元线性回归分析,建立区划指标的地理推算模型。由此,将基于气象站的指标信息推算到栅格,使指标信息由点至面,实现指标信息的空间连续分布。各区划指标的地理推算模型如表 4 所示。

1.7 气候适宜性指数计算方法

采用加权求和的方法,将各指标的归一化值与对应的指标综合权重加权求和,计算芙蓉李气候适宜性指数。公式如下:

表3 芙蓉李气候适宜性区划指标权重
Table 3 Weights for indicators of climatic suitability regionalization of Furong plums

指标 Indicator	主观权重 Subjective weight	客观权重 Objective weight	综合权重 Comprehensive weight
年平均气温 Annual mean temperature ($\bar{T}$, °C)	0.1092	0.1150	0.1121
≥ 10 °C年活动积温 Annual cumulative temperature ≥ 10 °C ($\sum T_{\geq 10}$, °C)	0.1092	0.1804	0.1448
冬季极端低温 Extreme low temperature in winter (T_{JDW} , °C)	0.2499	0.1055	0.1777
冬季低温时数 Low temperature hours in winter ($\sum T_d$, h)	0.5005	0.3667	0.4336
花期低温阴雨天数 Low temperature rainy days in flowering period (D_r , d)	0.0312	0.2324	0.1318

表4 芙蓉李气候适宜性区划指标地理推算模型
Table 4 Geographical reckoning models for indicators of climatic suitability regionalization of Furong plums

指标 Indicator	地理推算模型 Geographical reckoning model	R	F值 F value
年平均气温 Annual mean temperature ($\bar{T}$, °C)	$\bar{T} = -5.048 - 3.284 \times 10^{-7}x + 2.121 \times 10^{-6}y - 1.716 \times 10^{-4}z$	0.773	31.083
≥ 10 °C年活动积温 Annual cumulative temperature ≥ 10 °C ($\sum T_{\geq 10}$, °C)	$\sum T_{\geq 10} = -6.235 - 9.737 \times 10^{-7}x + 2.623 \times 10^{-6}y - 2.251 \times 10^{-4}z$	0.874	68.178
冬季极端低温 Extreme low temperature in winter (T_{JDW} , °C)	$T_{JDW} = 3.547 + 8.261 \times 10^{-7}x - 1.200 \times 10^{-6}y - 4.136 \times 10^{-4}z$	0.963	271.033
冬季低温时数 Low temperature hours in winter ($\sum T_d$, h)	$\sum T_d = -4.129 - 8.052 \times 10^{-7}x + 1.707 \times 10^{-6}y + 6.070 \times 10^{-4}z$	0.973	371.347
花期低温阴雨天数 Low temperature rainy days in flowering period (D_r , d)	$D_r = 5.330 + 1.870 \times 10^{-7}x - 1.731 \times 10^{-6}y - 2.729 \times 10^{-4}z$	0.928	131.096

表中, x 、 y 、 z 分别表示公里网经度坐标(m)、公里网纬度坐标(m)和海拔高度(m), R 为模型复相关系数。各模型均能通过信度 $\alpha=0.001$ 的显著性检验。In the table, x , y , and z respectively represent the longitude coordinate (m) of the kilometer network, the latitude coordinate (m) of the kilometer network and the altitude (m), and R is the model complex correlation coefficient. All the models pass the significance test with a reliability of 0.001.

$$I_j = \sum_{i=1}^m (\sigma_i \mu_{ij}) \quad (8)$$

式中: I_j 为第 j 个评价单元的气候适宜性指数, σ_i 为第 i 个指标的综合权重, μ_{ij} 为第 j 个评价单元第 i 个指标的归一化值。

1.8 气候适宜性等级划分

根据各区划指标的地理推算模型, 利用GIS软件的栅格计算器, 对经度、纬度和海拔高度的栅格与各模型的回归系数进行加权求和, 获得各区划指标的气候适宜性栅格。根据气候适宜性指数计算方法, 对各区划指标的气候适宜性栅格与综合权重进行加权求和, 获得芙蓉李气候适宜性指数栅格^[25]。

综合考虑芙蓉李气候适宜性指数的分布规律、芙蓉李种植生长的实际情况和实地调查情况, 利用GIS软件通过多次试验对气候适宜性指数进行等级划分^[26], 将芙蓉李气候适宜性指数栅格划分为适宜区、次适宜区和不适宜区, 气候适宜性指数等级划分结果如表5所示。

表5 基于气候适宜性指数(I)的芙蓉李气候适宜性区划等级标准

Table 5 Classification criteria of climatic suitability regionalization based on the climatic suitability index (I) of Furong plums

指数 Index	适宜 Suitable	次适宜 Sub-suitable	不适宜 Unsuitable
I	>0.53	0.49~0.53	<0.49

2 结果与分析

2.1 芙蓉李气候适宜性区划

根据获得的芙蓉李气候适宜性指数栅格和划分的芙蓉李气候适宜性指数等级, 利用GIS软件, 绘制芙蓉李气候适宜性指数区划图(图1a)。从图1a可见, 芙蓉李气候适宜性指数适宜区面积大, 主要位于福建中部和北部, 包括南平、宁德、三明以及龙岩、泉州和福州市北部等地, 该区域气候适宜性指数超过0.53; 芙蓉李气候适宜性指数不适宜区主要分布在南部和东南部沿海这些低海拔地区, 包括漳州、厦门、莆田、泉州中南部、福州中南部以及龙岩南

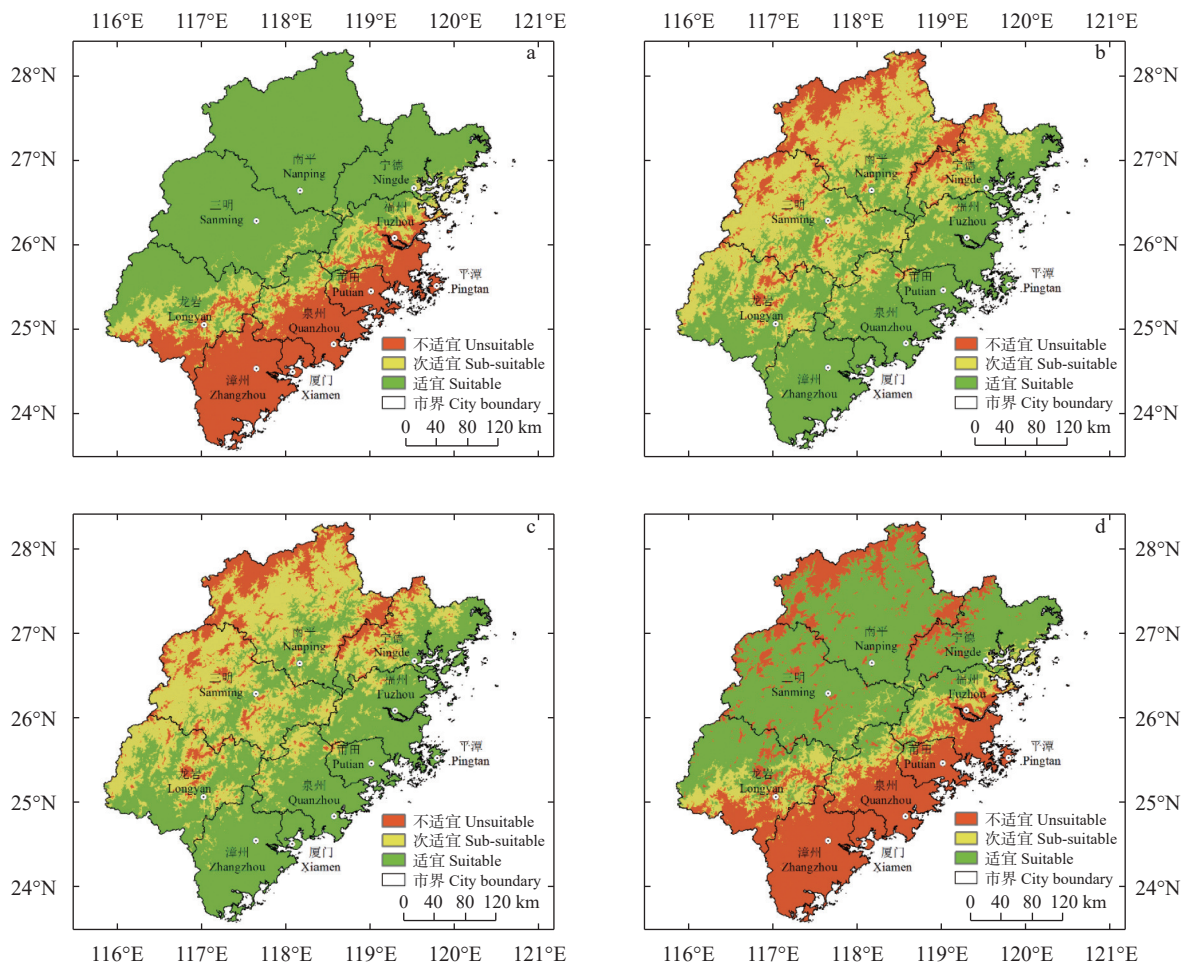


图 1 芙蓉李气候适宜性指数 (a)、冬季极端低温适宜性 (b)、冬季低温时数适宜性 (c) 和气候适宜性 (d) 区划

Fig. 1 Regionalization of climatic suitability index (a), extreme low temperature in winter (b), low temperature hours in winter (c) and comprehensive climatic suitability region (d) of Furong plums

部等地, 该区域气候适宜性指数低于 0.49; 其余地区为芙蓉李气候适宜性指数次适宜区, 面积小, 主要分布在福建中部的武平、漳平至罗源一带, 该区域气候适宜性指数介于 0.49~0.53。

在气候适宜性指数区划基础上, 结合考虑冬季极端低温和冬季低温时数这两个限制芙蓉李生长的指标, 排除掉不适宜生长区域, 最终形成芙蓉李气候适宜性区划图。

冬季极端低温过低将导致芙蓉李无法安全越冬, 冬季低温时数严重不足将导致芙蓉李孕花失败。因此, 为考察芙蓉李气候适宜性指数的不适宜区能否有效包含芙蓉李冬季极端低温过低和冬季低温时数

严重不足的区域, 通过分别划分冬季极端低温和冬季低温时数的气候适宜性等级 (表 6), 绘制芙蓉李冬季极端低温和冬季低温时数适宜性区划图 (图 1b 和图 1c)。

从图 1b-c 可看出, 芙蓉李冬季低温时数的不适宜区主要分布在福建省东南沿海, 分布范围总体能够被芙蓉李气候适宜性指数的不适宜区覆盖; 而冬季极端低温的不适宜区主要分布在福建北部的高海拔地区, 该区域冬季极端低温过低, 冻害发生较严重, 不适宜种植芙蓉李, 该区域未能被芙蓉李气候适宜性指数的不适宜区覆盖。为此, 利用 GIS 软件, 采用栅格掩膜叠加的方法将冬季极端低温的不适宜区叠

表 6 芙蓉李限制生长指标适宜性等级划分

Table 6 Suitability rank division of indicators for limiting the growth of Furong plums

分级指标 Classification indicator	适宜 Suitable	次适宜 Sub-suitable	不适宜 Unsuitable
冬季极端低温 Extreme low temperatures in winter	>0.35	0.15~0.35	<0.15
花期低温阴雨天数 Low temperature rainy days in flowering period	>0.50	0.33~0.50	<0.33

加到芙蓉李气候适宜性指数区划图中, 得出福建芙蓉李气候适宜性区划图(图1d)。

从图1d可见, 芙蓉李气候适宜区主要分布在龙岩北部、三明、南平和宁德3市的大部分地区以及福州北部这些中高海拔地区。这些地区海拔介于100~700 m, 气候适宜性指数超过0.53, 年平均气温介于15~20℃, ≥ 10 ℃年活动积温介于5500~6500℃, 冬季低温时数介于500~1300 h, 冬季极端低温大于-5℃, 这些温度条件均属于适宜范围, 花期低温阴雨天数次适宜, 介于2~4 d, 总体而言, 该区域总体适宜芙蓉李产量和优质品质的形成。

次适宜区主要分布在福建省中部的武平、漳平至罗源一带。该区域海拔介于100~300 m, 气候适宜性指数介于0.49~0.53; 年平均气温适宜, 介于15~20℃; ≥ 10 ℃年活动积温次适宜, 介于6500~8000℃; 花期低温阴雨天数次适宜, 介于2~4 d; 冬季低温时数次适宜, 在400 h左右; 冬季极端低温适宜, 在-4℃左右。该区域可适度开展芙蓉李种植。

不适宜区主要集中在南部和东南部沿海这些低海拔地区以及北部山区的高海拔地区。南部和东南部沿海大部分地区海拔在200 m以下, 气候适宜性指数低于0.49, 年平均气温和 ≥ 10 ℃年活动积温属于次适宜范围, 前者介于20~22℃, 后者介于7000~8000℃, 花期低温阴雨天数属于次适宜至适宜范围, 总体介于1~3 d。最南部的诏安、云霄、漳浦3县部分区域达到适宜标准, 花期低温阴雨天数少于2 d; 冬季极端低温适宜, 超过0℃; 冬季低温时数不适宜, 小于200 h; 芙蓉李孕花易失败。北部则主要是海拔在700 m以上的高山地区, 该区域气候适宜性指数超过0.6; 年平均气温适宜, 介于15~20℃; ≥ 10 ℃年活动积温次适宜, 在5000℃左右; 冬季低温时数适宜, 超过700 h; 花期低温阴雨天数不适宜, 超过4 d, 芙蓉李授粉授精易受影响; 冬季极端低温不适宜, 低于-9℃, 芙蓉李易遭受冻害。这些地区不适宜芙蓉李的种植。

2.2 区划结果验证

2.2.1 与福建芙蓉李种植现状对比验证

从福建芙蓉李的种植现状来看, 目前芙蓉李在福建的主产地包括永泰县、福安市、永安市、武平县、古田县和永定区等地, 以永泰县、福安市芙蓉李种植面积最大, 在4667 hm²以上, 武平县、古田县、永安市次之, 种植面积在1333 hm²以上, 永定区芙蓉李种植面积较小, 在200 hm²左右。永泰县芙蓉李主要种植在西南部的梧桐镇和嵩口镇, 这与嵩口镇南部和梧桐镇西部处于芙蓉李气候适宜区和次适宜区,

其余地区处于芙蓉李气候不适宜区的区划结果基本吻合。福安市、永安市、古田县芙蓉李种植面积大, 这与3县总体处于芙蓉李气候适宜区的区划结果相吻合; 武平县的西部和北部地区处于芙蓉李气候适宜区, 这与该县芙蓉李主要种植在西部东留乡的种植实际相吻合; 永定区芙蓉李种植规模小, 仅在北部的虎岗乡有种植, 这与永定市北部处于芙蓉李气候适宜区和次适宜区, 中部及南部地区处于芙蓉李气候不适宜区的区划结果相吻合。总体而言, 福建芙蓉李的种植现状与气候适宜性区划结果吻合性高, 区划结果可靠。

2.2.2 与李果单产高低对比验证

统计2005—2014年福建省芙蓉李果实的单产, 与划分的芙蓉李气候适宜性区划结果进行对比。福建省李果2005—2014年平均单产为9667.09 kg·hm⁻², 各地市李果平均单产介于5082.18~13 484.08 kg·hm⁻², 最低值出现在泉州市, 最高值出现在漳州市。区划结果显示, 莆田市、泉州市、漳州市为芙蓉李主要的气候不适宜区, 其中, 莆田市李果平均单产虽然达10 905.67 kg·hm⁻², 但李果种植面积小, 主要集中在仙游县, 这与莆田市仅仙游县北部地区为芙蓉李的气候适宜区和次适宜区的区划结果相吻合。泉州市李果平均单产最低, 李果种植主要集中在东北部的德化县, 这与泉州市的芙蓉李气候适宜区和次适宜区主要分布在德化县的区划结果相吻合。宁德市、三明市、南平市为芙蓉李主要的气候适宜区, 而三者李果平均单产较高, 分别为12 892.09 kg·hm⁻²、9980.11 kg·hm⁻²和9037.28 kg·hm⁻², 区划结果与李果单产情况基本一致。厦门市李果平均单产为8116.78 kg·hm⁻², 单产较低, 该市李果种植面积逐年减少, 且近几年几乎不再种植, 这与厦门市处于芙蓉李气候不适宜区的情况相吻合。龙岩市和福州市李果平均单产分别为8655.43 kg·hm⁻²和7213.12 kg·hm⁻², 单产均较低, 这与两市均具有差不多大小的芙蓉李气候适宜区面积和不适宜区面积的结果基本一致。永泰县作为芙蓉李种植大县, 其李果种植面积最大, 但平均单产不高, 仅为7451.37 kg·hm⁻², 这与该县目前芙蓉李的主要种植区有较大面积处于气候不适宜区的情况相吻合。总体而言, 福建李果的单产高低与芙蓉李气候适宜性区划结果较为吻合, 区划结果可信度高。

3 讨论与结论

本文以芙蓉李为研究对象, 基于气象数据、地理信息数据、芙蓉李面积和产量数据, 建立了芙蓉李气候适宜性区划指标体系, 分析了芙蓉李气候适

宜性指数的分布规律,从气候角度评估了芙蓉李在福建种植的适宜性。

泉州市西南部、厦门市北部属于芙蓉李气候不适宜区,目前该区域仍有小面积的芙蓉李种植,建议改种其他作物。福安市是芙蓉李的主产区之一,其芙蓉李种植面积仅次于永泰县,2005—2014年福安市李果单产达 $15\,576.00\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,大幅超过福建平均水平,该市以及其东部和西南部地区属于芙蓉李气候适宜区,这些区域气候条件接近,建议可在这些地区进一步扩种。武平县中部、漳平市西北部、德化县中南部等地为芙蓉李气候次适宜区,可根据当地经济发展需要适当开展芙蓉李的种植。永泰县芙蓉李种植面积在全省最大,但单产低,该县3个等级的气候适宜性区域皆有较大面积,建议单产较低的区域采取诸如改种能够避开早春阴雨天气的迟花芙蓉李品种等措施以提高产量。

区划指标的建立是气候适宜性区划研究的关键。本文在查阅文献、咨询芙蓉李种植专家以及实地调查的基础上,综合考虑了福建省的气候特点和芙蓉李生长的环境条件,建立的区划指标较大程度上提高了区划结果的准确性,但芙蓉李的种植区划除受气候条件影响以外,还受到土壤、地形、土地利用现状等因素的影响,未来可进一步补充这些影响因子指标,使区划结果更加贴近实际;另外,区划指标权重的计算采用主客观权重结合的方法,比以往研究采用的单纯依据专家经验或单纯根据概率统计方法获得的权重更具客观性,未来也可考虑应用多种权重计算方法进行对比分析,优选确定权重,使区划结果更准确。

何锦标^[1]研究发现,芙蓉李在武平县东留乡具有很强的适应性,生产的芙蓉李品质优、单产高,这与本文研究得出的东留乡处于芙蓉李气候适宜区的结果一致。汤碧婴^[16]研究指出,芙蓉李是古田县的主栽品种,其种植面积在福建省排名靠前,这与本文得出的古田县的气候适宜种植芙蓉李的结果一致。邱金忠^[27]研究认为,芙蓉李自引种至永定区虎岗乡后,表现出果大、外观漂亮、成熟期早、品质优等特点,这与本文研究得出的虎岗乡处于芙蓉李气候适宜区的研究结果也一致。目前鲜见针对芙蓉李的种植区划报道,对其他作物的气候区划研究也多是以点代面,本文通过应用GIS技术,建立区划指标与经度、纬度、海拔高度的地理推算模型,区划结果空间分辨率能够达到 $30\text{ m}\times 30\text{ m}$,相比以往的研究,区划结果具有更高的精细度。

本文通过建立福建芙蓉李气候适宜性区划指标、区划指标的地理推算模型和芙蓉李气候适宜性指数计算方法,应用GIS技术,开展福建芙蓉李气候适宜性区划研究。根据芙蓉李气候适宜性指数的分布规律、芙蓉李种植生长的实际情况和实地调查情况,划分出芙蓉李气候适宜性指数的适宜区、次适宜区和不适宜区,并根据限制芙蓉李生长的区划指标的区划结果,对芙蓉李气候适宜性指数区划结果进行修订,得到最终的福建芙蓉李气候适宜性区划。结论如下:适宜区主要集中在龙岩北部、三明、南平和宁德3市的大部分地区以及福州北部这些中高海拔地区;次适宜区主要分布在福建省中部的武平、漳平至罗源一带;不适宜区主要集中在南部和东南部沿海这些低海拔地区以及北部山区的高海拔地区。区划结果与福建芙蓉李的种植现状以及李果单产的高低情况吻合性高,区划结果可靠,可为福建芙蓉李的种植布局提供决策参考。

参考文献 References

- [1] 何锦标. 芙蓉李高产栽培技术[J]. *现代农业科技*, 2015(5): 120,122
HE J B. High-yield cultivation techniques of hibiscus plums[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2015(5): 120,122
- [2] 陈家金. 福建农业气象灾害及其防御[M]. 北京: 气象出版社, 2021
CHEN J J. Agrometeorological Disasters in Fujian and Their Prevention[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2021
- [3] 薛丽芳, 申双和, 王春林. 基于GIS的广东香蕉种植气候适宜性区划[J]. *中国农业气象*, 2010, 31(4): 575–581
XUE L F, SHEN S H, WANG C L. Climatic suitability and regionalization of banana planting in Guangdong based on GIS[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2010, 31(4): 575–581
- [4] 屈振江, 周广胜. 中国主栽猕猴桃品种的气候适宜性区划[J]. *中国农业气象*, 2017, 38(4): 257–266
QU Z J, ZHOU G S. Regionalization of climatic suitability for major kiwifruit cultivars in China[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2017, 38(4): 257–266
- [5] 王华, 胡飞, 黄俊. 基于GIS的广东冬种辣椒气候适宜性区划[J]. *气象与环境科学*, 2014, 37(3): 76–80
WANG H, HU F, HUANG J. Climatic suitability and regionalization of pepper planted in winter in Guangdong based on GIS[J]. *Meteorological and Environmental Sciences*, 2014, 37(3): 76–80
- [6] 范振涛, 马小军, 冯世鑫, 等. 广西壮族自治区青蒿生态气候适宜性区划[J]. *首都师范大学学报(自然科学版)*, 2009, 30(2): 91–96
FAN Z T, MA X J, FENG S X, et al. Regional planning of the ecological and climatic feasibility for *Artemisia annua* L. in Guangxi Zhuang Autonomous Region[J]. *Journal of Capital Normal University (Natural Science Edition)*, 2009, 30(2): 91–96
- [7] 闵程程, 马海龙, 王新生, 等. 基于GIS的湖北省油菜种植

- 气候适宜性区划[J]. *中国农业气象*, 2010, 31(4): 570-574
- MIN C C, MA H L, WANG X S, et al. Climatic adaptability division for rape planting in Hubei Province based on GIS[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2010, 31(4): 570-574
- [8] 张永红, 李星敏, 葛徽衍, 等. 基于GIS的棉花气候适宜性区划[J]. *陕西气象*, 2013(5): 29-32
- ZHANG Y H, LI X M, GE H Y, et al. Climatic suitability zoning of cotton based on GIS[J]. *Journal of Shaanxi Meteorology*, 2013(5): 29-32
- [9] 李丽纯, 陈福祥, 王加义, 等. 基于GIS的台湾青枣在福建引扩种的气候适宜性区划[J]. *中国生态农业学报*, 2017, 25(1): 47-54
- LI L C, CHEN F Z, WANG J Y, et al. Climate suitability regionalization for Taiwan green jujube introduction and expansion in Fujian Province using GIS[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, 25(1): 47-54
- [10] 孟冰祥, 江善赐, 陈贞宏. 基于GIS的福建省古田县水蜜桃种植气候适宜性区划[J]. *福建农业科技*, 2015(2): 34-36
- MENG B X, JIANG S C, CHEN Z H. GIS-based divisions for climatic adaptability of honey peach plantation in Gutian County of Fujian Province[J]. *Fujian Agricultural Science and Technology*, 2015(2): 34-36
- [11] 郑小琴, 杨锡琼, 许乾杰, 等. 引种马来西亚10号番木瓜气候适应性评估[J]. *中国农学通报*, 2010, 26(6): 304-308
- ZHENG X Q, YANG X Q, XU Q J, et al. On the assessments of climate adaptation of the 10th papaya introduced from Malaysia[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(6): 304-308
- [12] 徐宗焕, 陈家金, 张容焱, 等. 引种台湾珍珠芭乐的气候适应性评估[J]. *气象*, 2006, 32(1): 117-120
- XU Z H, CHEN J J, ZHANG R Y, et al. Evaluation on climate adaptability of pearl guava introduced from Taiwan Province[J]. *Meteorological*, 2006, 32(1): 117-120
- [13] 肖小永, 曾广香. 井冈山芙蓉李种植气候区划及防冻措施[J]. *现代农业科技*, 2009(19): 155-156
- XIAO X Y, ZENG G X. Climatic division and anti-freezing measures of hibiscus plum planting in Jinggangshan[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2009(19): 155-156
- [14] 于丽丽, 陈丹, 刘永静, 等. 芙蓉李中化学成分的分层分析[J]. *福建中医学院学报*, 2008, 18(5): 34-36
- YU L L, CHEN D, LIU Y J, et al. Study on the chemical constituents from *Prunus salicina* Lindl. cv. Furong[J]. *Journal of Fujian University of Traditional Chinese Medicine*, 2008, 18(5): 34-36
- [15] 任瑞琴, 陈丹, 程清, 等. 芙蓉李中抗氧化活性成分的高通量筛选评价[J]. *中药材*, 2013, 36(12): 2014-2017
- REN R Q, CHEN D, CHENG Q, et al. High throughput screening and evaluation of antioxidant active components in hibiscus plum[J]. *Journal of Chinese Medicinal Materials*, 2013, 36(12): 2014-2017
- [16] 汤碧婴. 古田芙蓉李大小年现象分析及对策[J]. *福建农业科技*, 2015(8): 55-57
- TANG B Y. Analysis and countermeasures on biennial fruit-bearing phenomenon of Furong plum in Gutian County[J]. *Fujian Agricultural Science and Technology*, 2015(8): 55-57
- [17] 章智勤. 李果产量与气候条件分析[J]. *广西热带农业*, 2002(3): 20-21
- ZHANG Z Q. Analysis of plum fruit yield and climate conditions[J]. *Guangxi Science & Technology of Tropical Crops*, 2002(3): 20-21
- [18] 石潇, 聂秋生, 庞现德. 芙蓉李宁冈产地与原产地气象条件对比分析[J]. *江西气象科技*, 1999, 22(1): 19-21
- SHI X, NIE Q S, PANG X D. Comparison and analysis of the climatic conditions between its original producing area and Ninggang County[J]. *Jiangxi Meteorology Science & Technology*, 1999, 22(1): 19-21
- [19] 陈清华. 永泰县气象条件对芙蓉李生产的影响[J]. *现代农业科技*, 2010(9): 310
- CHEN Q H. Influence of meteorological conditions on Furong plum production in Yongtai County[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2010(9): 310
- [20] 曾洪挺. 福建永泰主要李种质资源及其利用[J]. *中国果树*, 2012(6): 35-37
- ZENG H T. Germplasm resources and utilization of main plums in Fujian Yongtai[J]. *China Fruits*, 2012(6): 35-37
- [21] 陆添超, 康凯. 熵值法和层次分析法在权重确定中的应用[J]. *电脑编程技巧与维护*, 2009(22): 19-20, 53
- LU T C, KANG K. The application of entropy method and AHP in weight determining[J]. *Computer Programming Skills & Maintenance*, 2009(22): 19-20, 53
- [22] 陈家金, 王加义, 黄川容, 等. 台湾番石榴在福建引种的寒冻害风险分析与区划[J]. *生态学杂志*, 2015, 34(4): 967-973
- CHEN J J, WANG J Y, HUANG C R, et al. Risk evaluation and regionalization of cold and freezing damage on guava introduction in Fujian Province[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34(4): 967-973
- [23] 吴立, 黄川容, 孙朝锋, 等. 福建省林下铁皮石斛寒冻害危险性区划[J]. *生态学杂志*, 2021, 40(10): 3107-3113
- WU L, HUANG C R, SUN C F, et al. Hazard division of cold and freezing damage to undergrowth *Dendrobium officinale* in Fujian Province[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, 40(10): 3107-3113
- [24] 李志萍, 何雨江, 朱中道. 熵权法在农村安全饮水水质评价中的应用[J]. *人民黄河*, 2007, 29(5): 35-36
- LI Z P, HE Y J, ZHU Z D. Application of entropy weight method in rural safe drinking water quality evaluation[J]. *Yellow River*, 2007, 29(5): 35-36
- [25] 郭兆夏, 梁轶, 王景红, 等. GIS技术支持下的陕西核桃精细化气候适宜性区划[J]. *干旱地区农业研究*, 2015, 33(1): 194-198
- GUO Z X, LIANG Y, WANG J H, et al. Climate regionalization for walnut plant in Shaanxi Province based on GIS[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2015, 33(1): 194-198
- [26] 金志凤, 邓睿, 黄敬峰. 基于GIS的浙江杨梅种植区划[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(8): 214-218
- JIN Z F, DENG R, HUANG J F. Regional planning for planting *Myrica rubra* based on GIS in Zhejiang Province[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24(8): 214-218
- [27] 邱金忠. 芙蓉李高产优质栽培技术[J]. *农业与技术*, 2017, 37(1): 77-78, 83
- QIU J Z. High yield and high quality cultivation technology of Furong plums[J]. *Agriculture & Technology*, 2017, 37(1): 77-78, 83