

浙江省水蜜桃物候、品质和产量对气候变化的响应

杨 栋^{1*} 朱佳敏² 丁烨毅¹ 金志凤³

(¹宁波市气象局, 浙江宁波 315012; ²北仑区气象局, 浙江宁波 315211; ³浙江省气候中心, 杭州 310017)

摘 要 基于 2003—2017 年奉化地区中、晚熟水蜜桃的生物学和气象资料, 利用 GA-BP 神经网络构建水蜜桃物候、品质和产量模型, 结合浙江省 67 个基本气象站 1971—2017 年观测资料, 反演和建立浙江省各地物候、品质和产量序列, 分析水蜜桃物候、品质和产量对气候变化的响应。结果表明: 集合模型对物候期模拟的绝对误差基本 ≤ 1.5 d, 对品质及产量模拟的相对误差分别为 5% 和 5%~7%; 近 47 年, 浙江中、晚熟水蜜桃始花期、成熟期和落叶期呈提前趋势, 中熟水蜜桃营养生长历期显著缩短, 晚熟水蜜桃生殖生长的历期显著延长; 20 世纪 80 年代起, 中、晚熟水蜜桃物候期年际波动增大; 中熟品种生殖生长历期呈北涨南降, 营养生长历期呈下降趋势; 晚熟品种生殖生长历期呈增长趋势, 其中, 显著增长区主要集中于宁波—金华—衢州一带, 营养生长历期整体波动相对较小; 中熟水蜜桃品质整体呈下降趋势, 气候倾向率为 $-0.01 \cdot 10 \text{ a}^{-1}$; 晚熟品种品质增长趋势极显著, 气候倾向率为 $0.032 \cdot 10 \text{ a}^{-1}$; 中熟水蜜桃气候品质显著下降区集中于宁波—绍兴—金华—衢州一带, 气候倾向率小于 $-0.015 \cdot 10 \text{ a}^{-1}$; 晚熟水蜜桃品质中北部增幅大于南部, 其中, 宁波和嘉兴地区气候倾向率大于 $0.04 \cdot 10 \text{ a}^{-1}$; 中、晚熟水蜜桃产量的气候倾向率分别为 $0.17 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$ 和 $-0.093 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$ 。东部沿海及杭州、绍兴、金华交界地区单产增长趋势显著, 气候倾向率大于 $0.18 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$; 浙江东北部地区晚熟水蜜桃单产降低显著, 其中, 嘉兴中部及宁波北部地区气候倾向率小于 $-0.2 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$, 增长区主要集中于浙江南部地区和西北部分地区。

关键词 水蜜桃; GA-BP; 集合模型; 气候变化; 响应

Responses of phenology, quality and yield of juicy peach to climate change in Zhejiang Province. YANG Dong^{1*}, ZHU Jia-min², DING Ye-yi¹, JIN Zhi-fen³ (¹Ningbo Bureau of Meteorology, Ningbo 315012, Zhejiang, China; ²Beilun District Meteorological Bureau, Ningbo 315211, Zhejiang, China; ³Zhejiang Climate Center, Hangzhou 310017, China).

Abstract: Based on biological and meteorological data of medium- and late-ripening juicy peaches in Fenghua, Zhejiang from 2003 to 2017, simulation models of phenology, quality and yield of juicy peaches were built using GA-BP neural network. The phenology, quality and yield series of juicy peaches in Zhejiang Province were established based on observation data from 67 basic meteorological stations from 1971 to 2017, then the responses of phenology, quality and yield of juicy peaches to climate change was analyzed. The absolute error of ensemble model for phenological simulation was less than 1.5 days, and the relative error of quality and yield simulation was 5% and 5%–7%, respectively. During the past 47 years, the initial flowering, mature and leaf fall periods of medium- and late-ripening peaches were advanced, the vegetative growth period of medium-ripening peaches was significantly shortened, and the period of reproductive growth of late-ripening peaches was significantly prolonged. Since the 1980s, the interannual phenological fluctuation of medium- and late-ripening peaches increased. Reproductive growth duration of medium-ripening varieties increased in the northern part of the province and decreased in the south, while the vegetative growth duration declined. Reproductive growth duration of late-ripe-

浙江省重点研发计划(2018C02011)和宁波市气象局一般项目(NBQX2017004B)资助。

收稿日期: 2019-03-22 接受日期: 2019-08-27

* 通讯作者 E-mail: yangdong_314@163.com

ning varieties increased. The areas with significant increase were mainly concentrated in Ningbo-Jinhua-Quzhou, while the vegetative growth duration had relatively small fluctuation across the province. The quality of medium-ripening peaches showed a downward trend, with a climatic tendency rate of $-0.01 \cdot 10 \text{ a}^{-1}$. The quality of late-ripening peaches showed a very significantly upward trend, with a climatic tendency rate of $0.032 \cdot 10 \text{ a}^{-1}$. The climatic quality of medium-ripening peaches decreased significantly in Ningbo-Shaoxing-Jinhua-Quzhou, with a climatic tendency rate less than $-0.015 \cdot 10 \text{ a}^{-1}$. The magnitude of the enhancement of the quality of late-ripening peaches in the north-central part was greater than that in the south, with the climatic tendency rate in Ningbo and Jiaxing was greater than $0.04 \cdot 10 \text{ a}^{-1}$. The climatic tendency rates of medium- and late-ripening peach yield were 0.17 and $-0.093 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$, respectively. In the eastern coastal areas and the border areas of Hangzhou, Shaoxing and Jinhua, the yield per unit area increased significantly, with a climatic tendency rate being greater than $0.18 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$. In the northeastern part of Zhejiang, the yield of late-ripening peaches decreased significantly, with the climatic tendency rate in central Jiaxing and northern Ningbo being less than $-0.2 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$, and the areas with increasing yield per unit area were mainly concentrated in the southern part of Zhejiang and the northwestern part of Ningbo.

Key words: juicy peach; GA-BP neural network; collection model; climate change; response.

气候变化背景下,光、温、水等资源变化会改变作物生长发育周期(Walther *et al.*, 2002),对作物产量(孟凡超等, 2015)和品质产生影响(金志凤等, 2015),使得植物成为全球气候变化的优秀指示器。目前关于植物对气候变化的响应的研究,主要集中在树木和大宗作物的物候及产量。李正国(2013)和刘玉洁等(2018)分别对东北三省春玉米及中国小麦的物候期时空分布特征进行系统研究。陈新光(2010)和杜尧东等(2018)评估了气候变化对广东省水稻种植区划的影响。刘文茹(2018)和刘江等(2018)分别对长江中下游地区稻麦和辽宁省玉米的气候生产潜力进行研究。武红(2015)和邓晨晖等(2017)分别对气候变化背景下秦岭地区植物和民勤绿洲胡杨林物候的变化特征进行研究。受观测资料数量、质量及作物模型模拟能力的限制,目前特色经济作物对气候变化响应特征的研究相对偏少,气候变化对品质影响的研究仍较罕见(金志凤等, 2015)。

植物活动对气候变化响应的研究存在诸多难点,受植物对气候变化胁迫的敏感性和适应性影响,植物响应特征与气候变化之间呈现出显著的非线性(Franzke *et al.*, 2014)。另外,气候变化对植被影响涉及光合、呼吸、蒸腾等多个生理生化过程,是多要素、多过程的综合效应,形成具有复杂过程和空间分布规律的气候—植被关系(Moles *et al.*, 2014)。目前对气候变化影响的研究主要基于作物模型和统计性模型,作物模型具有较强的机理性,但模型构建和

验证需要大量详细的观测数据,并且大量参数取值会增加模拟结果的不确定性;统计模型相对简单,可通过有限数据,潜在地抓住难以理解的某些过程的影响(张祎等, 2017)。目前特色经济作物观测数据较少,针对特色经济作物生长发育机理性的研究仍较缺乏,统计模型在特色经济作物研究中优势明显。人工神经网络具有强大的学习能力,能较好地表述和解决复杂的非线性问题,实现多气象要素综合输入模拟。近年来人工神经网络在全球气候变化及生态学的应用中得到迅速发展(Liu *et al.*, 2010; 卢志宏等, 2016)。BP神经网络是目前最成熟、应用最广泛的人工神经网络之一,但其网络结构、初始连接权值和阈值无法准确获得。遗传算法(GA)凭借强大的全局搜索能力,可对BP神经网络中的权值和阈值进行不断迭代运算,实现参数优化(Ding *et al.*, 2011)。气候变化不确定性较大,单一的模式模拟结果可信度较差,而集合预报模型能显著提高气候模拟的精度和稳定度(宋迎波等, 2008; 张祎等, 2017)。

水蜜桃是浙江省名优农产品,目前农业部门针对水蜜桃新品种引种、生化品质评价体系建立开展了系统研究,气象部门对水蜜桃的关键物候期模拟(姚日升等, 2014; 杨栋等, 2018a)、气候品质认证(杨栋等, 2018b)、产量模拟(蒋璐璐等, 2013)等开展了初步探究,但气候变化对水蜜桃生产影响的模拟和评估比较罕见。本研究拟利用奉化水蜜桃研究所 2003—2017 年期间中、晚熟水蜜桃的关键物候

期、产量及品质观测数据,采用 GA-BP 模型构建基于不同时间尺度气象要素的水蜜桃物候期、品质及产量的集合预报模型,并模拟 1971—2017 年浙江地区中、晚熟水蜜桃对气候变化的响应特征,以期水蜜桃生产科学应对气候变化提供一定的参考。

1 材料与方法

1.1 资料来源

浙江属于温暖湿润的亚热带季风气候,水蜜桃实验材料来自奉化水蜜桃研究所(121.27°E, 29.68°N),实验地土壤为微酸性的松软沙壤土,肥力中等,有机质含量 1% 左右。选择浙江地区常种品种“白凤”和“玉露”分别作为中、晚熟水蜜桃的代表。实验数据如下:2006—2017 年中、晚熟水蜜桃的关键物候期,包括叶芽萌动期、始花期、成熟期和落叶期;2006—2016 年品质生化指标,包括单果重、可溶性固形物、可滴定酸含量,具体观测方法可参考相关文献(吴大军等,2009);2003—2015 年奉化中、晚熟水蜜桃的产量和种植面积。

气象数据主要包括 1971—2017 年浙江省 67 个基本气象站逐日、候、旬、月的气象要素平均值,气象要素包括热量因子(平均气温、最高气温、最低气温、活动积温、有效积温、负积温、需冷量)、水分因子(累积降水量、平均相对湿度)、光照因子(日照时数、太阳总辐射)、光温综合因子(辐热积)。

1.2 预报模型构建

水蜜桃关键物候期、品质及单产预报模型主要由因子筛选模块、GA-BP 神经网络模块和集合预报模块组成(图 1)。关键因子筛选模块主要用于筛选水蜜桃物候期、品质和产量的关键气象影响因子,作为模型构建的输入因子;GA-BP 神经网络作为预报模型构建的核心模块,用于对模拟要素时空分布特征进行模拟;集合预报模块用于进一步提升 GA-BP 模块模拟精度和稳定度。

目前针对水蜜桃物候期、品质因子及单产的观测数据较少,选用自助法(Efron *et al.*, 1979)进行有放回的均匀抽样,抽样次数 1000 次,增加建模和检验的样本数。

1.2.1 关键气象因子筛选 气象因子主要包括候、旬、月尺度光、温、水气象要素平均值,关键物候期模拟气象因子还包括日尺度积温和需冷量。利用相关系数法筛选物候期、品质和产量的关键气象因子。气象因子统计时,候、旬、月尺度时间序列判定均以

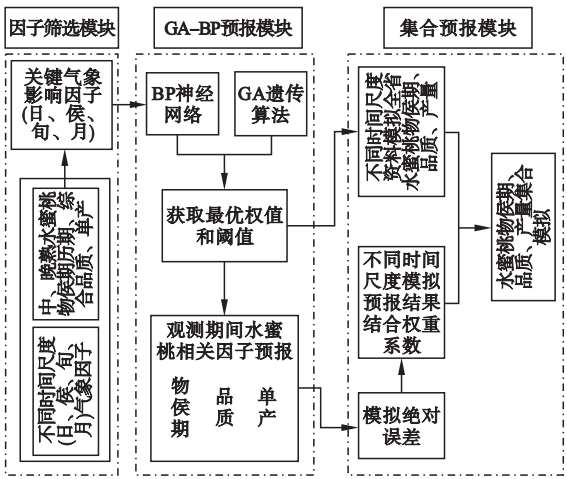


图 1 水蜜桃物候期、品质及产量预报模型框架
Fig.1 Framework for prediction model of phenological period, quality and yield of juicy peach

1 月 1 日起点。利用日尺度资料计算积温和需冷量时需同时考虑积温时间起点及生理下限温度,时间起点选择综合考虑关键物候期常年特性,最佳积温起点筛选步幅为 0.1 °C(杨栋等,2018a,2018b)。

1.2.2 GA-BP 神经网络 利用 GA-BP 神经网络模型分别对水蜜桃关键物候期、品质和产量进行模拟,GA-BP 模型的原理及优化步骤可参考相关文献(陈英义等,2018)。神经网络结构中输入层主要为上述模拟因子的某一时间尺度的关键气象影响因子。输出层为模型对上述因子的模拟结果,其中关键物候期输出结果为物候期相对于 1 月 1 日的历期,品质为基于单果重、可溶性固形物含量及可滴定酸含量构建的综合品质(杨栋等,2018b)。综合品质计算的具体方法如下:

利用“合理—满意度”分析法(马建江等,2017)对品质因子进行归一化(公式 1-2),对于越大越好的指标(单果重、可溶性固形物)满足公式(1),对越小越优的指标(可滴定酸)满足公式(2);结合品质评价因子权重系数,利用加权求和法构建水蜜桃综合品质(公式 3)。

$$M(b_i) = \frac{b_i - b_{\min}}{b_{\max} - b_{\min}} \tag{1}$$

$$M(b_i) = \frac{b_{\max} - b_i}{b_{\max} - b_{\min}} \tag{2}$$

$$V = \sum_{b=1}^n M_b \times W_b \tag{3}$$

式中, $M(b_i)$ 为对品质特性指标 b 的满意度, $0 < M(b_i) < 1$; b_{\min} 和 b_{\max} 分别为指标 b 的最低值和最高

值; V 为基于品质因子构建的水蜜桃综合品质, M_b 为第 b 个品质因子的满意度, W_b 为第 b 个品质因子的权重系数,参考相关文献(范芳娟,2014)及问卷调查,单果重、可溶性固形物含量和可滴定酸含量的权重系数分别为 0.4、0.4 和 0.2。

GA-BP 模型相关参数设置如下,个体数目 40,最大遗传代数 50,变量二进制位数 10,代沟 0.95,交叉概率 0.7,变异概率 0.01,最大训练次数 1000,最小均方根误差训练目标 0.001,学习速率 0.01。

1.2.3 集合预报 将各时间尺度气象因子模拟的结果与观测值对比分析,评估基于不同时间尺度资料构建的 GA-BP 模型准确率,利用绝对误差法确定不同时间尺度模型模拟结果的权重系数。

$$M_e = \sum_{i=1}^n \lambda_i \times M_i \quad (4)$$

$$\lambda_i = \frac{A_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (5)$$

$$A_i = \frac{1}{AE_i} \quad (6)$$

式中, M_e 为集合预报模型对水蜜桃物候期(品质、产量)的模拟结果; λ_i 为第 i 个时间尺度模型的权重; M_i 为第 i 个时间尺度模型对水蜜桃物候期(品质、产量)的模拟结果; n 为集合成员数目,即时间尺度数目; A_i 和 AE_i 分别为第 i 个集合成员对水蜜桃物候期(品质、产量)模拟的准确率和绝对误差。

1.3 气候倾向率

采用最小二乘法,计算物候期、产量和品质的气候倾向率。样本 X_i 与时间的线性回归系数 a 的计算公式如下:

$$X_i = at + b \quad (7)$$

式中, t 为年份, a 的 10 倍即为气候倾向率。基于 67 个基本站要素的气候倾向率,利用反距离权重法插值,获得其空间分布;利用 67 个基本站气候倾向率求取算数平均,构建全省整体的气候倾向率的时间序列。

2 结果与分析

2.1 GA-BP 神经网络的建立及实现

基于相关系数,挑选各模拟要素的不同时间尺度的关键气象因子,表 1 列出了各时间尺度通过显著性检验的光、温、水相关因子数目及各时间尺度因子中相关性最高的因子。由入选因子数目及相关系

数可知,热量因子是影响关键物候期的主要因子,其中积温是水蜜桃物候期模拟的理想因子。以成熟期为例,中、晚熟水蜜桃成熟期最佳预报因子分别为 12 月 1 日起 134 d 内 ≥ 16.3 °C 日活动积温和 12 月 1 日起 131 d 内 ≥ 18.3 °C 日活动积温,均呈现显著的负相关,即热量资源越丰富越有利于叶芽萌动提前;中、晚熟水蜜桃成熟期与休眠期打破前积温呈现较好的正相关,主要由于落叶果树打破休眠需要满足一定的需冷量(王海波等,2009)。

品质受光、温、水因子共同影响,中熟水蜜桃品质的关键气象影响因子中热量、光照、水分因子所占比重分别为 47%、24%和 29%,其中晚熟水蜜桃品质受热量资源的影响更显著,关键气象因子中约一半为热量因子,并且 3 个时间尺度中相关性最佳的因子均为热量因子。产量主要受热量因子影响,中熟和晚熟水蜜桃中热量相关气象因子占比均超 50%,3 个时间尺度最佳预报因子中以热量相关因子为主。对产量和品质的关键气象因子进行统计,中、晚熟水蜜桃品质关键气象影响因子中 30%左右集中于休眠—盛花期,70%左右集中于末花—成熟期;产量关键气象因子中,中熟品种 78%集中于休眠—盛花期,而晚熟品种 67%集中于末花—成熟期。浙江地区降水充沛,排水能力强不易产生渍害,水资源能较充分地满足水蜜桃生长发育,热量和光照成为影响浙江地区水蜜桃品质和产量的关键气象因子,该结果与相关研究(蒋璐璐等,2013;杨栋等,2018b)基本一致。

将上述气象因子作为模型输入因子,物候期、品质、产量作为模拟因子,分别构建不同时间尺度的 GA-BP 模型。结合各时间尺度模型预报的准确率,构建中、晚熟水蜜桃物候期、品质和产量的集合模型(表 2)。

2.2 模型模拟效果评估

基于 GA-BP 神经网络的集合模型对中、晚熟水蜜桃关键物候期、品质和产量模拟精度较高(表 3)。模型对叶芽萌动、始花期、成熟期及落叶期模拟的绝对误差基本在 1.5 d 以内,相对误差基本在 2% 以内,均方根误差 2 d 左右,相关系数 ≥ 0.91 。关键物候期模拟时成熟期的模拟精度最高,绝对误差 ≤ 0.9 d,相对误差 0.3%~0.4%;落叶期模拟误差相对偏大,但绝对误差 ≤ 1.9 d,相对误差 $< 1\%$ 。模型对中、晚熟水蜜桃综合品质模拟的绝对误差和均方根误差分别控制在 5% 和 7% 以内,相关系数 ≥ 0.98 。模型

表 1 与水蜜桃物候期、品质和产量相关显著的气象因子筛选结果

Table 1 Selecting results of meteorological factors significantly correlated with phenological period, quality and yield of juicy peach

模拟因子		时间尺度	中熟气象因子	晚熟气象因子
物候期	叶芽萌动	日	积温×16 12月1日起89 d内≥9.3℃日活动积温 $R=-0.99$	积温×17 12月1日起90 d内≥9.4℃日活动积温 $R=-0.97$
		候	热量×1 1月1日起第3候气温日较差平均值 $R=-0.76$	热量×1,水分×1 1月1日起第3候气温日较差平均值 $R=-0.77$
		旬	-	-
		月	热量×1,光照×2,光温综合×1 2月辐射热积因子 $R=-0.81$	热量×1,光照×2,光温综合×1 2月辐射热积 $R=-0.84$
	始花	日	积温×17 12月1日起94 d内≥4.9℃日活动积温 $R=-0.97$	积温×16 1月1日起66 d内≥10.3℃日活动积温 $R=-0.99$
		候	热量×2,水分×1 1月1日起第6候气温日较差平均 $R=-0.94$	热量×1,水分×2,光温综合×1 1月1日起第10候辐射热积 $R=-0.82$
		旬	热量×2,水分×2 1月1日起第7旬辐射热积 $R=-0.96$	热量×1,水分×1,光温综合×1 1月1日起第3旬辐射热积 $R=-0.82$
		月	光温综合×1 1月辐射热积因子 $R=-0.75$	光温综合×1 1月辐射热积 $R=-0.81$
	成熟	日	积温×26 12月1日起134 d内≥16.3℃日活动积温 $R=-0.99$	积温×29 12月1日起131 d内≥18.3℃日活动积温 $R=-0.99$
		候	热量×2,光照×4,水分×2,光温综合×1 1月1日起第34候降水量 $R=0.94$	热量×1,光照×4,水分×2,光温综合×2 1月1日起第34候平均相对湿度 $R=0.86$
		旬	热量×2,光照×2,水分×2 1月1日起第17旬降水量 $R=0.88$	热量×1,水分×1,光温综合×1 1月1日起第13旬气温日较差平均值 $R=-0.81$
		月	热量×1,光照×2 3月气温日较差平均值 $R=0.89$	热量×1,光照×2,水分×1 3月气温日较差平均值 $R=0.90$
	落叶	日	积温×39 7月1日起118 d内≥14℃的日活动积温 $R=-0.99$	积温×36 12月1日起125 d内≥12.8℃日活动积温 $R=-0.99$
		候	热量×1,光照×2,水分×4,光温综合×1 1月1日起第10候辐射热积 $R=-0.98$	光照×2,水分×4,光温综合×1 1月1日起第10候辐射热积 $R=-0.96$
		旬	热量×1,水分×3,光温综合×1 1月1日起第7旬降水量 $R=0.89$	热量×1,光照×4,水分×2,光温综合×2 1月1日起第12旬辐射热积 $R=0.86$
		月	热量×1,光温综合×1 1月辐射热积 $R=-0.84$	水分×1,光温综合×1 6月降水量 $R=0.81$
	品质	候	热量×3,光照×2,水分×2 1月1日起第35候日照时数 $R=0.84$	热量×3,光照×2,水分×2 1月1日起第18候平均气温 $R=0.93$
		旬	热量×2,光照×1,水分×2 1月1日起第12旬降水量 $R=-0.97$	热量×3,光照×2,水分×1 1月1日起第9旬平均气温 $R=0.98$
		月	热量×3,光照×1,水分×1 7月气温 $R=-0.72$	热量×2,光照×1,水分×1 3月平均气温 $R=0.79$
	产量	候	热量×7,光照×4,水分×4,光温综合×1 1月1日起第33候日最低气温平均 $R=0.96$	热量×7,光照×4,水分×3,光温综合×2 1月1日起第14候气温 $R=0.95$
		旬	热量×2,光照×4,水分×2,光温综合×1 1月1日起第7旬降水量 $R=0.83$	热量×6,光照×4,水分×2,光温综合×2 1月1日起第7旬日最高气温平均 $R=0.82$
		月	热量×3,光温综合×1 6月日最低气温平均 $R=0.76$	热量×2,光照×2,水分×2,光温综合×1 4月辐射热积 $R=0.76$

表 2 水蜜桃物候期、品质和产量的集合模型

Table 2 Collection models of phenological period, quality and yield for juicy peach

模拟因子	中熟	晚熟
物候期		
叶芽萌动期	$Y_e=0.59Y_r+0.41Y_y$	$Y_e=0.55Y_r+0.45Y_y$
始花期	$Y_e=0.34Y_r+0.35Y_h+0.31Y_x$	$Y_e=0.41Y_r+0.32Y_h+0.27Y_x$
成熟期	$Y_e=0.28Y_r+0.23Y_h+0.24Y_x+0.25Y_x$	$Y_e=0.30Y_r+0.22Y_h+0.25Y_x+0.23Y_x$
落叶期	$Y_e=0.38Y_r+0.32Y_h+0.30Y_x$	$Y_e=0.37Y_r+0.32Y_h+0.31Y_x$
品质	$Y_e=0.25Y_h+0.57Y_x+0.18Y_y$	$Y_e=0.27Y_h+0.57Y_x+0.16Y_y$
产量	$Y_e=0.48Y_h+0.31Y_x+0.21Y_y$	$Y_e=0.42Y_h+0.31Y_x+0.27Y_y$

Y_e 为集合模拟结果; Y_r, Y_h, Y_x, Y_y 分别日、候、旬、月尺度模型的模拟结果。

表 3 水蜜桃物候期、品质和产量集合模型模拟效果评估

Table 3 Assessment of phenological period, quality and yield of juicy peach by collection models

模拟因子	品种	AE	RE(%)	RMSE	R
物候期					
叶芽萌动	中熟	1.4 d	2.0	1.8 d	0.97
始花期		1.4 d	1.8	2.2 d	0.93
成熟期		0.7 d	0.4	0.9 d	0.92
落叶期		1.9 d	0.6	2.5 d	0.91
叶芽萌动	晚熟	1.5 d	2.1	2.0 d	0.96
始花期		1.5 d	1.8	2.0 d	0.96
成熟期		0.9 d	0.3	1.2 d	0.92
落叶期		1.5 d	0.6	2.0 d	0.91
品质					
	中熟	0.02	5	0.03	0.99
	晚熟	0.02	5	0.03	0.98
产量					
	中熟	1.14 t·hm ⁻²	7	1.37 t·hm ⁻²	0.92
	晚熟	1.17 t·hm ⁻²	5	1.46 t·hm ⁻²	0.95

表 4 不同水蜜桃品种生育期历期气候倾向率($d \cdot 10 a^{-1}$)
Table 4 Climate tendency rate of different peach varieties in different growth periods

	叶芽萌动期	始花期	成熟期	落叶期	生殖生长	营养生长	全生育期
中熟	0.007	-0.80 *	-0.019	-0.23 **	-0.027	-0.21 *	-0.23
晚熟	-0.47 **	-0.19	-0.062	-0.16 *	0.44 *	-0.10	0.34

生殖生长指叶芽萌动—成熟期,营养生长指成熟期—落叶期,全生育期指营养生长+生殖生长;* 指通过 0.05 水平显著性检验,** 指通过 0.01 水平显著性检验。

对中、晚熟水蜜桃产量模拟的绝对误差分别为 1.14 ± 1.37 和 $1.17 \pm 1.46 t \cdot hm^{-2}$, 相对误差分别为 7% 和 5%, 相关系数 ≥ 0.92 。

利用 GA-BP 集合模型, 结合 1971—2017 年浙江省 67 个基本气象站气象数据, 对浙江地区水蜜桃关键物候期、综合品质及产量进行模拟, 分析其时空变化特征, 探究气候变化对浙江地区水蜜桃关键物候期、品质及产量的影响。

2.3 气候变化对物候期的影响

2.3.1 时间变化特征 1971—2017 年, 浙江地区中、晚熟水蜜桃的始花期、成熟期和落叶期均呈提前趋势, 其中落叶期及中熟品种的始花期提前趋势显著(表 4), 中熟品种叶芽萌动期略有推迟, 晚熟品种叶芽萌发期以 $0.47 d \cdot 10 a^{-1}$ 的速度提前, 变化趋势极显著。中熟水蜜桃生殖生长和营养生长周期缩短, 其中营养生长历期气候变化趋势显著, 气候倾向率达 $-0.21 d \cdot 10 a^{-1}$; 晚熟品种营养生长期略缩短, 生殖生长期显著增长, 气候倾向率达 $0.44 d \cdot 10 a^{-1}$, 全生育期延长。中熟品种始花期气候变化速率较晚熟品种偏大 3 倍, 而叶芽萌动期和成熟期气候变化速率较晚熟品种明显偏小; 晚熟品种生殖生长和全生育期气候变化速率较中熟品种均明显偏大。

将不同时段各生育期历期的最大值和最小值相减, 计算其振幅, 评估各生育期历期的年代际波动大小(图 2)。受关键生育期积温等要素年际波动差异

影响, 水蜜桃关键物候期中叶芽萌动和始花期的年代际波动较大, 成熟期和落叶期较稳定, 生殖生长年代际波动较营养生长期明显。中熟品种关键物候期年代际波动整体大于晚熟品种。20 世纪 70 年代水蜜桃物候期波动较小, 80 年代开始显著增大, 并持续保持较高水平。

2.3.2 空间变化特征 图 3 可见, 近 47 年, 中熟品种生殖生长历期呈北涨南降, 其中嘉兴北部增长趋势最显著($P < 0.05$), 气候倾向率达 $0.81 d \cdot 10 a^{-1}$, 温州东部和台州东南沿海地区气候倾向率小于 $-0.7 d \cdot 10 a^{-1}$; 营养生长历期整体呈下降趋势; 全生育期历期高增长区主要集中于北部沿海及浙中的中部和西部部分地区, 显著减小区主要集中于浙江中南部沿海($P < 0.05$)。晚熟品种生殖生长历期整体呈增长趋势, 显著增长区主要集中于宁波—金华—衢州一带($P < 0.05$), 其中宁波中东部沿海及金华西部地区气候倾向率大于 $1 d \cdot 10 a^{-1}$, 湖州一带略有下降; 营养生长期历期增长区主要集中于浙北, 其余大部分地区呈下降趋势, 整体波动相对较小; 全生育期历期整体呈增长趋势, 气候倾向率空间分布与生殖生长的空间分布相近, 其中宁波地区增长趋势最显著($P < 0.05$), 气候倾向率大于 $0.8 d \cdot 10 a^{-1}$ 。

2.4 气候变化对品质影响

2.4.1 时间变化特征 图 4 可见, 1971—2017 年浙江地区中熟水蜜桃气候品质平均值为 0.40, 整体

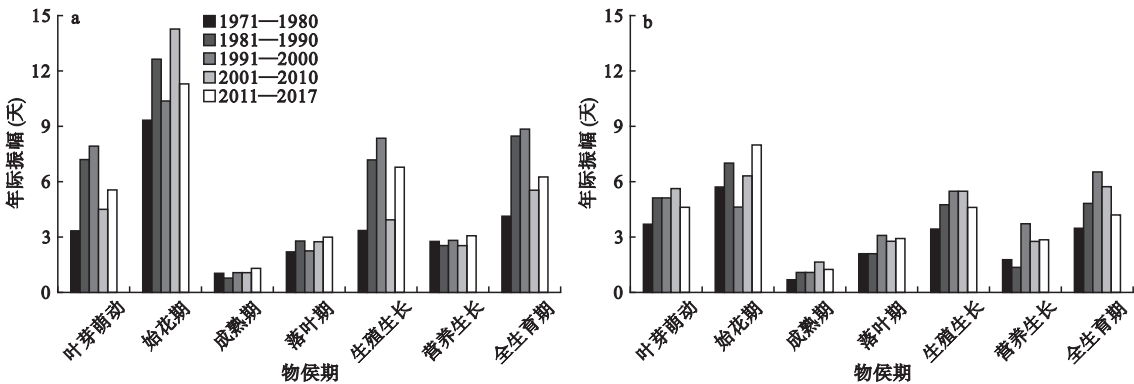


图 2 中熟(a)和晚熟(b)水蜜桃各生育期历期年际波动
Fig.2 Interannual fluctuation of medium (a) and late (b) ripening juicy peach in different growth periods

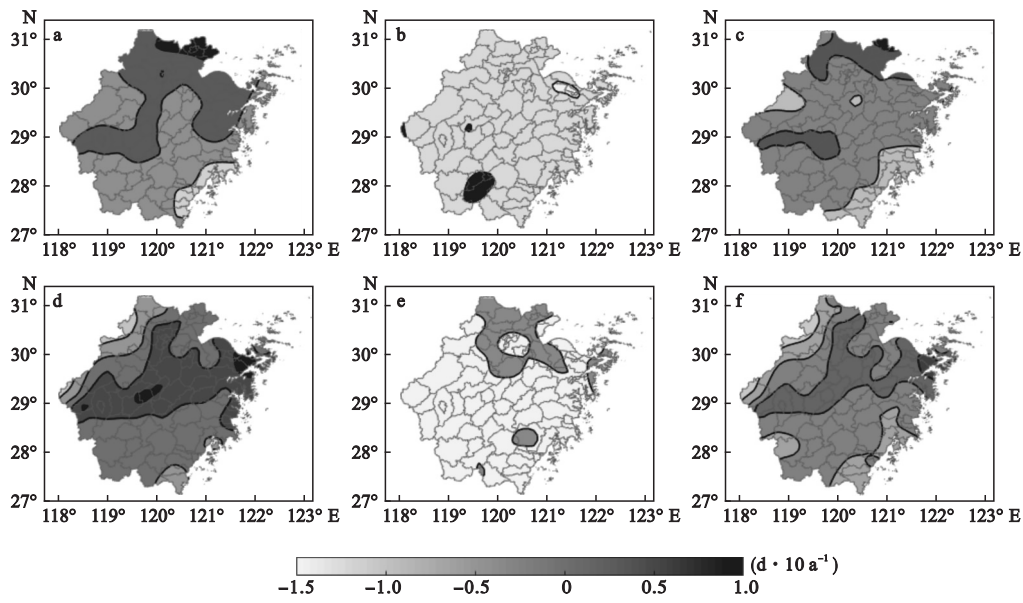


图 3 中熟(a-c)和晚熟(d-f)水蜜桃生育历期的气候倾向率空间分布
Fig.3 Spatial distribution of climate tendency rate in growth period of medium (a-c) and late-ripening (d-f) juicy peaches
a,d 生殖生长历期;b,e 营养生长历期;c,f 全生育期历期。

呈先增后减,其中 80 年代气候品质均值最高,达 0.52,2011—2017 年最低,仅 0.43;1971—2017 年气候倾向率为 $-0.01 \cdot 10 \text{ a}^{-1}$ 。晚熟水蜜桃气候品质平均值为 0.4,其时间变化趋势与中熟品种整体相反,80 年代最低,仅 0.33,21 世纪气候品质均值达 0.47;近 47 年品质的气候倾向率为 $0.032 \cdot 10 \text{ a}^{-1}$ ($P<0.01$),其中 1971—1990 年气候品质气候倾向率为 $-0.044 \cdot 10 \text{ a}^{-1}$,1991—2017 年为 $0.065 \cdot 10 \text{ a}^{-1}$,均通过 0.01 水平显著性检验。90 年代起中熟水蜜桃综合品质年际波动增大,极小值较 70—80 年代明显降低;晚熟水蜜桃气候品质年际波动也呈现增长趋势。

2.4.2 空间变化特征 由图 5 可知,中熟水蜜桃气

候倾向率整体呈现下降趋势,宁波—绍兴—金华—衢州一线的气候品质显著下降($P<0.05$),气候倾向率小于 $-0.015 \cdot 10 \text{ a}^{-1}$,温州东部沿海、丽水南部、衢州开化等部分地区品质略有提升。浙江地区晚熟水蜜桃品质随气候变化整体呈显著上升趋势,增幅空间上呈南低北高,其中宁波和嘉兴地区气候品质增幅尤为显著($P<0.01$),气候品质的气候倾向率基本在 $0.04 \cdot 10 \text{ a}^{-1}$ 以上,丽水南部和温州西南部品质的气候变化趋势相对较弱,气候倾向率基本在 $0.015 \cdot 10 \text{ a}^{-1}$ 以下。

2.5 气候变化对产量影响

2.5.1 时间变化特征 1971—2017 年,中熟水蜜桃单产随时间呈上升趋势,气候倾向率为 0.17

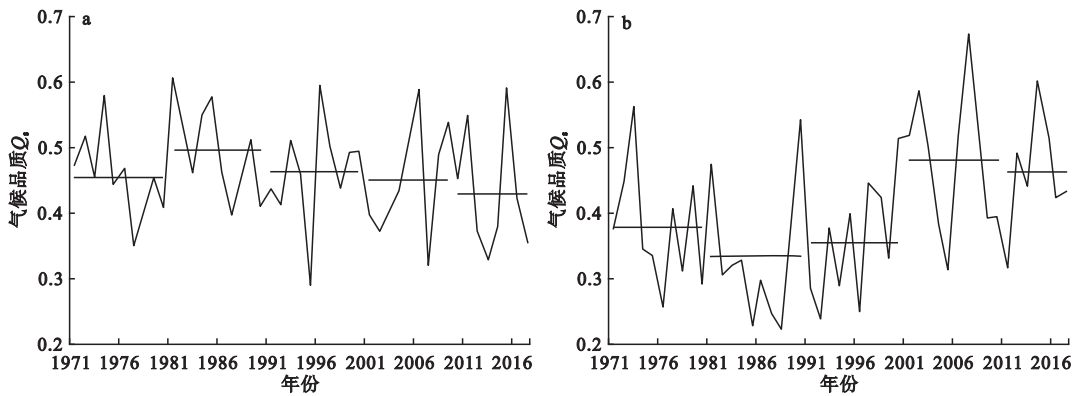


图 4 中熟(a)和晚熟(b)水蜜桃气候品质年际变化
Fig.4 Interannual variation of climate quality of medium (a) and late-ripening (b) juicy peaches

$t \cdot \text{hm}^{-2} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$ ($P < 0.01$) (图 6)。20 世纪 70 年代至 90 年代中熟水蜜桃单产保持较低水平,为 $16.3 \sim 16.5 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,进入 21 世纪后单产提升至 $16.91 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,并且年际波动增大约 40%。晚熟水蜜桃单产

随时间整体呈下降趋势,气候倾向率为 $-0.093 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$ 。晚熟品种在上世纪基本稳定在 $17.8 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 左右,进入 21 世纪后,单产降至 $17.4 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,并且年际波动较上世纪增大 1 倍左右。

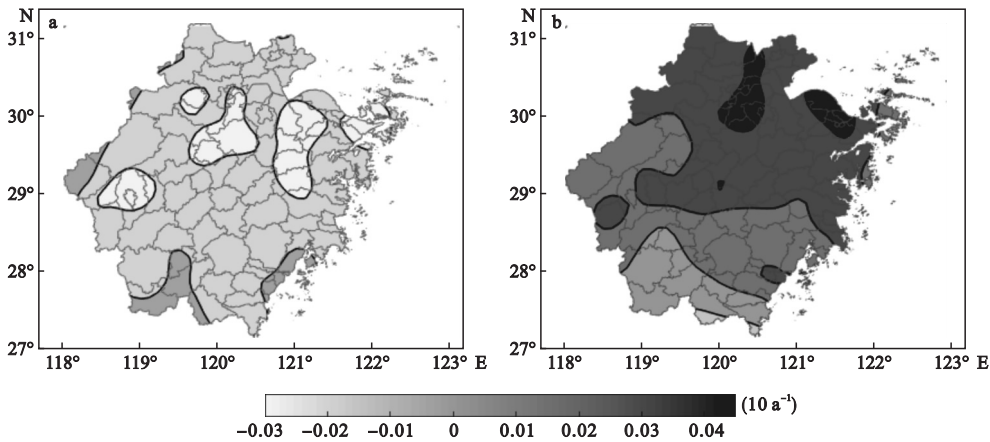


图 5 中熟 (a) 和晚熟 (b) 水蜜桃品质气候倾向率空间分布
Fig.5 Spatial distribution of climate tendency rate of medium (a) and late-ripening (b) juicy peach quality

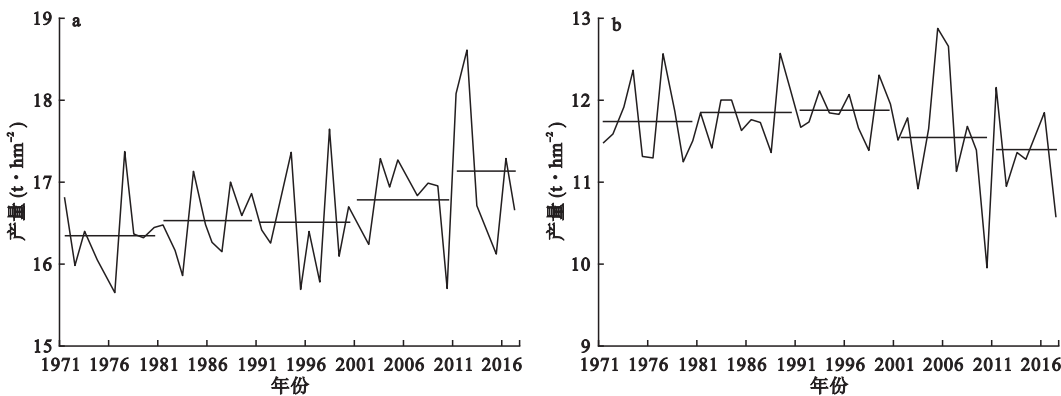


图 6 中熟 (a) 和晚熟 (b) 水蜜桃产量年际变化
Fig.6 Interannual variation of yield of medium (a) and late-ripening (b) juicy peaches

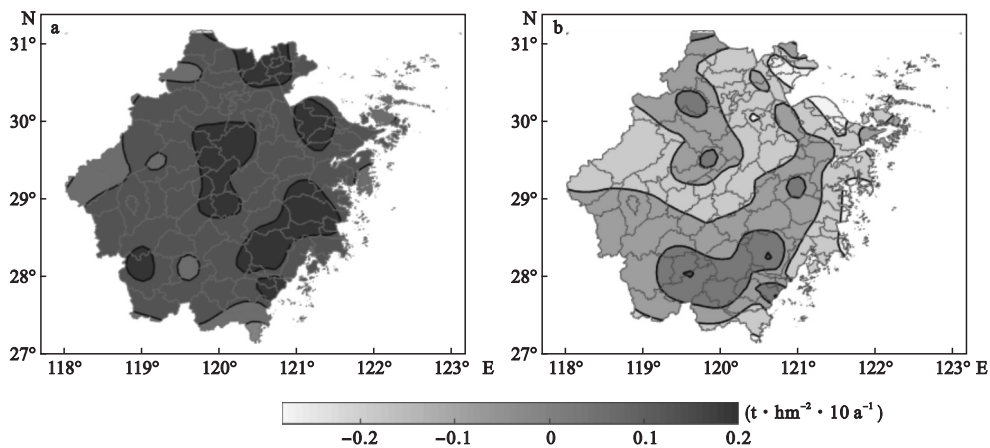


图 7 中熟 (a) 和晚熟 (b) 水蜜桃单产气候倾向率的空间分布
Fig.7 Spatial distribution of climate tendency rate of medium (a) and late-ripening (b) juicy peach yield

2.5.2 空间变化特征 近47年浙江地区中熟水蜜桃产量均呈现上升趋势,除浙西地区气候变化趋势不显著,其余地区的气候倾向率均通过0.05水平显著性检验,其中嘉兴、宁波西北部、台州中南部、绍兴西部、金华南部、丽水西南部及温州中东部增长率在 $0.18 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$ 以上,湖州和衢州西部、丽水中部、杭州东南部以及绍兴中东部增长趋势较弱基本在 $0.1 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$ 以下(图7)。晚熟水蜜桃增长区主要集中于丽水和温州中南部、台州西部、金华西部及杭州临安地区,浙江东北部地区如嘉兴中部、宁波慈溪和奉化东部以及绍兴部分地区水蜜桃单产受气候变化影响减产显著($P < 0.05$),气候倾向率基本小于 $-0.2 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$ 。

3 讨论

基于GA-BP神经网络的集合预报模型对中、晚熟水蜜桃的物候期、品质和产量的模拟均保持了较高的精度。物候期模拟绝对误差基本在1.5 d左右,气候品质和产量模拟的相对误差分别控制在5%和7%以内。基于GA-BP模型构建的集合模型对水蜜桃成熟期及气候品质的模拟精度与基于逐步回归模型构建的集合模型相当(杨栋等,2018a,2018b),对产量的模拟精度较单一的逐步回归模型明显提高(蒋璐璐等,2013)。虽然基于GA-BP的集合模型模拟精度较基于逐步回归的集合模型并未展示出明显的优势,但随着训练次数的增加及结构的优化,其模拟精度优势有望凸显。

关键物候期与水蜜桃生产安全及农事活动安排密切相关。20世纪80年代起,浙江地区中、晚熟水蜜桃的物候期年际波动增大,气候变化导致种植户对关键物候期的把握能力下降,调整管理制度的难度明显增大。近年来赏花活动逐渐受到人们关注,而气候变化背景下花期波动增大,加大了花期预报服务的难度。浙江地区水蜜桃成熟期整体呈提前趋势,有利于抢占市场,但生殖生长和营养生长历期缩短可能会导致树体和果实营养积累不足,影响作物产量和品质的稳定。水蜜桃打破休眠需要一定需冷量的积累(庄维兵等,2012),受全球气候变暖影响,浙江省晚熟水蜜桃叶芽萌动时间明显推迟,随着气候变暖加剧,水蜜桃打破休眠的时间可能进一步推迟,甚至阻碍水蜜桃休眠期的正常完成,影响生殖生长和营养生长(Darbyshire *et al.*, 2011)。为缓解气候变暖对生育期正常完成的威胁,可适当提高水蜜

桃种植的海拔高度或者更换为需冷量较低品种。

随着生活水平提高,人们对高品质水果需求日益增大,水果种植逐渐由“重产量”向“重品质”转变。随着气候变化,浙江地区中熟水蜜桃品种品质呈现下降趋势,其中宁波—绍兴—金华—衢州一线的气候品质下降显著,而这些地区是名优品种的重要分布区,不利于优质水蜜桃生产基地的建立和品牌战略的实施。浙江地区晚熟水蜜桃品质呈现上升趋势,并且中熟水蜜桃品质显著下降区域的晚熟水蜜桃品质却呈现显著的上升趋势,可适当提高宁波—绍兴—金华—衢州一带晚熟水蜜桃的种植比例来抵消气候变化对中熟水蜜桃品质的不利影响。

水蜜桃产量与农户效益及市场稳定密切相关。进入21世纪后,中、晚熟水蜜桃单产年际波动显著增大,晚熟品种单产呈下降趋势,其中嘉兴和宁波北部地区晚熟水蜜桃产量下降显著。相关研究表明,气候变化导致的极端灾害天气会对水蜜桃产量造成不利影响(许彦平等,2013;许彦平等,2016),近年来浙江地区高温干旱、极端低温、连阴雨等极端气象灾害频发,需加强气候变化对水蜜桃生产影响的评价及相关对策的研究。浙江地区主要种植中、晚熟水蜜桃,在气候变化背景下,中熟和晚熟品种的产量或品质变化趋势整体相反,一定程度可以优劣互补。综上所述,在浙江地区水蜜桃现有种植制度上,合理加强品种改良及中、晚熟水蜜桃种植比例调整,能够较好地应对气候变化影响。

水蜜桃物候期、品质和产量除了受气象要素影响外,还与品种、土壤、人工管理等因素密切相关,可能导致水蜜桃物候期、产量、品质模拟值与实际仍存在一定差异。本研究均以观测时段内水蜜桃品种、生产技艺为基准,模拟气候变化对水蜜桃关键物候期、产量和品质的影响,可以一定程度反映水蜜桃对气候变化的响应特征,对水蜜桃生产具有一定的指导意义。此外,浙江属于丘陵山地,局地小气候多样,随着高密度中尺度区域自动站数据的积累,模拟精度有望近一步提升。

参考文献

- 陈新光,王 华,邹永春,等. 2010. 气候变化背景下广东早稻播期的适应性调整. 生态学报, **30**(17): 4748–4755.
陈英义,程倩倩,成艳君,等. 2018. 基于GA-BP神经网络的池塘养殖水温短期预测系统. 农业机械学报, **48**(8): 172–178.
邓晨晖,白红英,翟丹平,等. 2017. 气候变化背景下1964—

- 2015 年秦岭植物物候变化. 生态学报, **37**(23): 7882–7893.
- 杜尧东, 沈 平, 王 华, 等. 2018. 气候变化对广东省双季稻种植气候区划的影响. 应用生态学报, **29**(12): 4013–4021.
- 范芳娟. 2014. 水蜜桃果实品质综合评价体系及数据库的建立与应用(硕士学位论文). 杭州: 浙江大学.
- 蒋璐璐, 曹艳艳, 朱万云, 等. 2013. 奉化市水蜜桃气候条件分析及产量预测. 中国农学通报, **29**(28): 183–188.
- 金志凤, 王治海, 姚益平, 等. 2015. 浙江省茶叶气候品质等级评价. 生态学杂志, **34**(5): 1456–1463.
- 李正国, 杨 鹏, 唐华俊, 等. 2013. 近 20 年来东北三省春玉米物候期变化趋势及其对温度的时空响应. 生态学报, **33**(18): 5818–5827.
- 刘 江, 潘宇弘, 王平华, 等. 2018. 1966—2015 年辽宁省玉米气候生产潜力的时空特征. 生态学杂志, **37**(11): 3396–3406.
- 刘文茹, 陈国庆, 曲春红, 等. 2018. RCP 情景下长江中下游麦稻二熟制气候生产潜力变化特征研究. 生态学报, **38**(1): 156–166.
- 刘玉洁, 陈巧敏, 葛全胜, 等. 2018. 气候变化背景下 1981—2010 中国小麦物候变化时空分异. 中国科学: 地球科学, **48**(1): 888–898.
- 卢志宏. 2016. 基于 BP 神经网络的荒漠啮齿动物群落对气候变化滞后响应(博士学位论文). 呼和浩特: 内蒙古大学.
- 马建江, 位 杰, 陈久红, 等. 2017. 不同产地库尔勒香梨果实品质差异及综合评价. 食品科学, **38**(19): 87–91.
- 孟凡超, 张佳华, 郝 翠, 等. 2015. CO₂ 浓度升高和不同灌溉量对东北玉米光合特性及产量的影响. 生态学报, **35**(7): 2126–2135.
- 宋迎波, 杨霏云, 郑昌玲, 等. 2008. 美国玉米产量业务预报方法研究. 中国农业气象, **29**(4): 446–449.
- 王海波, 刘凤之, 王宝亮, 等. 2009. 落叶果树的需冷量和需热量. 中国果树, (2): 50–53.
- 吴大军, 陈妙金, 陈克明, 等. 2009. 不同水蜜桃品种果实的生理品质评价. 浙江农业学报, **21**(4): 362–365.
- 武 红, 张松林, 季 云. 2015. 近 55 年来民勤绿洲胡杨林物候对气候变化的响应. 水土保持研究, **22**(1): 123–127.
- 许彦平, 姚晓红, 刘晓强, 等. 2016. 气象灾害对天水市蜜桃生产影响的评估. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, **44**(1): 149–154.
- 许彦平, 姚晓红, 万 信, 等. 2013. 天水蜜桃开花坐果期霜冻灾害气象风险评估. 中国农业气象, **34**(5): 606–610.
- 杨 栋, 丁烨毅, 金志凤, 等. 2018a. 浙江水蜜桃成熟期集合预报模型. 中国农业气象, **39**(6): 421–430.
- 杨 栋, 金志凤, 丁烨毅, 等. 2018b. 水蜜桃气候品质评价方法与应用. 生态学杂志, **37**(8): 2532–2540.
- 姚日升, 涂小萍, 丁烨毅, 等. 2014. 宁波桃树花期预报方法. 气象科技, **42**(1): 180–186.
- 姚晓红, 许彦平, 刘晓强, 等. 2014. 天水春夏季连阴雨天气对蜜桃生产影响的评估技术研究. 中国农学通报, **30**(31): 181–185.
- 张 炜, 赵艳霞. 2017. 多模式集合模拟气候变化对玉米产量的影响. 中国生态农业学报, **25**(6): 941–948.
- Darbyshire R, Webb L, Goodwin L, *et al.* 2011. Winter chilling trends for deciduous fruit trees in Australia. *Agricultural and Forest Meteorology*, **151**: 1074–1085.
- Ding S, Su C, Yu J. 2011. An optimizing BP neural network algorithm based on genetic algorithm. *Artificial Intelligence Review*, **36**: 153–162.
- Efron B. 1979. Bootstrap Methods: Another look at the Jackknife. *The Annals of Statistics*, **7**: 1–26.
- Franzke CLE. 2014. Warming trends: Nonlinear climate change. *Nature Climate Change*, **4**: 423–424.
- Liu ZL, Peng CH, Xiang WH, *et al.* 2010. Application of artificial neural networks in global climate change and ecological research: An overview. *Chinese Science Bulletin*, **55**: 3853–3863.
- Moles AT, Perkins SE, Laffan SW, *et al.* 2014. Which is a better predictor of plant traits: Temperature or precipitation. *Journal of Vegetation Science*, **25**: 1167–1180.
- Walther GR, Post E, Convey P, *et al.* 2002. Ecological responses to recent climate change. *Nature*, **416**: 389–395.
-
- 作者简介** 杨 栋,男,1988 年生,硕士研究生,工程师,主要从事特色农业气象和气候变化影响评估研究。E-mail: yangdong_314@163.com
- 责任编辑** 李凤芹