

doi:10.3969/j.issn.1000-6362.2021.02.001

刘园,刘布春,马钧,等.西南冷凉高地苹果最大可能生育期内气候生产潜力评价:以云南昭通为例[J].中国农业气象,2020,41(2):87-101

西南冷凉高地苹果最大可能生育期内气候生产潜力评价 ——以云南昭通为例*

刘园¹, 刘布春^{1**}, 马钧², 程存刚³, 王珂依¹, 毛留喜⁴, 何延波⁴, 邱美娟¹, 杨晓娟¹

(1. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所/作物高效用水与抗灾减损国家工程实验室/农业农村部农业环境重点实验室, 北京 100081; 2. 云南省农业科学院园艺研究所, 昆明 650205; 3. 中国农业科学院果树研究所/农业农村部园艺作物种质资源利用重点实验室, 兴城 125100; 4. 国家气象中心, 北京 100081)

摘要: 基于云南昭通 1958–2019 年逐日气象观测数据、1978–2018 年苹果种植统计数据 and 2010–2018 年果园生产调查和观测数据, 采用线性趋势分析、逐级订正等方法, 探讨云南昭通苹果最大可能生育期内农业气候资源和农业气象灾害的变化特征, 估算当地气候生产潜力, 以高效合理利用农业气候资源、科学布局苹果产业。结果表明: (1) 1958–2019 年, 云南昭通无霜期、稳定通过 10℃ 的持续时间分别显著增加 3.5d 和 4.5d, 理论上能满足苹果生育所需, 但昭通苹果花芽膨大期与终霜日和稳定通过 10℃ 起始日期不匹配, 成熟期与初霜日和稳定通过 10℃ 终止日期不匹配。(2) 根据云南昭通 2010–2018 年苹果实际生育期, 明确了当地苹果最大可能生育期为稳定通过 3℃ 起始日期–稳定通过 13℃ 终止日期。1958–2019 年, 云南昭通苹果最大可能生育期内平均最低气温、平均气温和平均最高气温分别为 11.8、16.1 和 22.6℃, 分别以 0.1、0.04 和 0.05℃·10a⁻¹ 的速率增加; 气温日较差平均为 10.89℃, 以 0.2℃·10a⁻¹ 的速率减少。降水量和日照时数分别以 1.0mm·10a⁻¹ 和 6.7h·10a⁻¹ 的速率减少。(3) 过去 62a, 云南昭通苹果花期低温发生风险较低, 不是当地苹果生长期内的主要农业气象灾害, 连阴雨发生风险较高, 且主要分布在苹果关键生育期 6–9 月。(4) 在当地气候背景下, 苹果最高理论产量约为 94t·hm⁻², 光温、气候生产潜力分别占光合生产潜力的 83.0% 和 76.0%, 研究期内昭通果园实际产量仅为光合生产潜力的 35.0%, 统计产量仅为光合生产潜力的 10.0%。随着技术进步和品种选育, 果园实际产量与生产潜力的差距逐渐缩小。云南昭通气象条件能充分满足苹果生长发育, 通过合理、高效栽培技术应用及对农业气候资源的充分挖掘, 可进一步提高苹果产量, 提升品质。

关键词: 苹果; 生育期; 农业界限温度; 气候生产潜力; 气候风险; 西南冷凉产区

Evaluation of Potential Climatic Production of Apple during the Possible Growing Period at Zhaotong, Yunnan across Cool Highland of Southwest China

LIU Yuan¹, LIU Bu-chun¹, MA Jun², CHENG Cun-gang³, WANG Ke-yi¹, MAO Liu-xi⁴, HE Yan-bo⁴,
QIU Mei-juan¹, YANG Xiao-juan¹

(1. Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences/National Engineering Laboratory of Efficient Crop Water Use and Disaster Reduction/Key Laboratory of Agricultural Environment, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100081, China; 2. Institute of Horticulture, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Kunming 650205; 3. Research Institute of Pomology, Chinese Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Horticultural Crop Germplasm Resources Utilization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Liaoning Xingcheng 125100; 4. National Meteorological Center, Beijing 100081)

* 收稿日期: 2020-05-14

基金项目: 国家重点研发计划“重大自然灾害监测预警与防范”重点专项(2017YFC1502803); 中国农业科学院科技创新工程(CAAS-ASTIP-2014-IEDA)

** 通讯作者: 刘布春, 研究方向灾害风险评估与转移, E-mail: liubuchun@caas.cn

第一作者联系方式: 刘园, E-mail: liuyuan@caas.cn

Abstract: Based on the daily meteorological data (1958–2019), the statistical production data (1978–2018) and the observed planting data of apple (2010–2018) at Zhaotong in Yunnan, the change of agricultural climatic resources and meteorological disaster were analyzed, while the local climatic potential production on apple was estimated using linear trend analysis and step by step correction. The aim of this paper can make more efficient and rational use of agricultural climate resources and scientifically guide to the apple industry layout. The results showed that: (1) during 1958–2019, the duration days of frost-free period and stable passing through 10°C significantly increased by 3.5 and 4.5 days, respectively. Theoretically, the duration can match the apple needs. However, the starting date of flower bud expansion and mature were more advanced than the last frost date and the ending date of stable passing through 10°C; (2) According to the actual phenology of apple at Zhaotong from 2010 to 2018, we calculated the most possibility phenological from the starting date of stable passing through 3°C and the ending date of stable passing 13°C. So in this period of 1958–2019, average minimum temperature, average temperature and maximum temperature were 11.8, 16.1 and 22.6°C respectively, with different increase rate of 0.1, 0.04 and 0.05°C·10y⁻¹. The average daily temperature range was 10.89°C with decreased rate of 0.2°C·10y⁻¹. The precipitation and sunshine hours decreased with 1.0mm·10y⁻¹ and 6.7h·10y⁻¹, respectively; (3) In the past 62 years, the risk of low temperature during flowering period was less, which was not the main agricultural meteorological disaster at Zhaotong. The risk of continuous rain was higher from June to September, which occur in the key growth period of apple; (4) The maximum theoretical yield of apple was about 100t·ha⁻¹. With the restrictions of temperature and water, the production potential of light temperature and climate accounted for 83.0% and 76.0% of the photosynthetic production potential, respectively. However, the actual apple yield and the statistical yield across the whole county were only 35% and 10% of the photosynthetic production potential. With the development of technology and breeding of varieties, the gap is gradually narrowed. Generally, the meteorological conditions at Zhaotong can fully meet the needs of apple growth and development. Through the application of reasonable and efficient planting techniques and the full excavation of agricultural climate resources, the difference in apple yield can be further reduced and the quality of apple can be improved.

Key words: Apple; Agro-climatic resources; Potential production; Meteorological risk; Southwest cool highland; Agricultural threshold temperature

苹果是中国最重要的果树之一^[1-3]。中国幅员辽阔, 苹果生长环境多样, 经多年发展, 除黄土高原和环渤海湾两大传统主产区, 黄河故道和秦岭北麓、新疆、西南冷凉高地等气候鲜明地区也逐渐成为苹果特色产区^[2-3]。据统计, 2018 年中国苹果种植面积为 1.94×10⁹hm², 占果园面积的 16.3%; 苹果总产 3.92×10⁷t, 占园林水果产量的 22.3%^[1]。随着国家脱贫攻坚战略的实施, 以云南、贵州等地为主的西南高海拔冷凉地区苹果种植业发展迅猛, 已成为西南优质苹果生产基地, 尤以云南昭通为典型示范点^[1, 4-6]。21 世纪以来, 云南昭通苹果种植面积、产量均占西南高海拔冷凉产区的 25%左右; 昭通苹果单产远超西南高海拔冷凉产区的苹果单产, 稳定在 10t·hm⁻²左右^[1, 4-5]。

苹果种植、生产与产地环境、品种、管理措施关系密切, 其中, 气候环境起到了至关重要的作用^[7-8]。

一方面气象因子影响苹果生育期长短、产量高低及品质优劣; 另一方面, 气候资源^[9-10]、农业界限温度^[11]等可影响苹果种植区划、品种选择, 对苹果产业可持续发展具有重要的指导意义。一般而言, 日平均气温 0°C 以上的持续时期称为农耕期, 中国长江以南地区常用 10°C 作为当地作物生长的起始温度^[11], 苹果生长最适宜温度为 5.0~25.0°C^[10]。国内外专家学者研究发现, 当春季温度上升 1°C 或 ≥10°C 年积温增加时^[12-14], 苹果始花期均可提前 6~18d^[15-19]; 但花芽膨大期、始花期等苹果关键生育期提前, 使得花期冻害、开花期连阴雨和着色期连阴雨等常见气象灾害发生风险增大^[20], 影响苹果品质^[21]。20 世纪 80 年代, 李世奎等^[22]首次提出指导中国苹果产业布局 and 优质高效栽培的 7 项区划最适气象指标, 程籍等^[23]明确了川藏高海拔地区苹果实际生育期内关键气象

因子及阈值对苹果品质的影响，经科学研究和栽培实践，专家学者认为西南冷凉高地产区最适合栽培“新红星”品种^[6, 9-10]。赵德英等^[24-26]着重分析了苹果生长发育的光合特性及光能利用率，为西南冷凉产区选育适宜品种、规避农业气象灾害提供了参考。

气候资源作为评估气候生产潜力的重要指标，在区域主粮种植结构、优质高效栽培措施选择等方面已得到广泛应用^[27-29]。苹果属多年生木本，生物学特性较一年生粮食作物复杂，影响苹果气候生产潜力的因素更多。20世纪90年代初，段晓凤等^[30-31]陆续提出了苹果气候生产潜力估算方法，并在宁夏、河北昌黎等地应用，评价效果较好^[30-33]。西南高海拔冷凉地区小气候独特，热量资源丰富，降水和日照充沛，是其成为优质苹果产区的气候资源保障。本研究以云南昭通主栽苹果为研究对象，明确当地苹果生长最大可能生育期的基础上，摸清气候变化背景下昭通苹果最大可能生育期内光、温、水资源及农业气象灾害发生特征，进而估算苹果各级生产潜力，以期为高效合理利用当地有限的气候资源，指导西南产区苹果产业发展布局提供参考。

1 资料与方法

1.1 研究站点

昭通（103.3°E，27.7°N）地处云南北部，平均海拔2000m左右。该地区属低纬度、高海拔的高原气候，年平均气温11.8℃，≥10℃年平均活动积温3723.7℃·d，年平均降水量699.6mm，日照时数1843.4h，无霜期221d。研究站点具体位置如图1所示。

1.2 数据来源

云南昭通逐日气象数据来自中国气象局，包括1958–2019年逐日平均气温、最高气温、最低气温、日照时数和降水量；昭通苹果生产统计数据来自国家统计局年鉴及地方统计年鉴，包括1978–2018年苹

果种植面积和产量统计数据^[1]；昭通苹果试验观测数据，包括2010–2018年“富士系”苹果的花芽膨大期（生长开始）、开花始期、幼果期和果实成熟期（生长结束）等关键生育期观测记录（表1），因幼果期观测数据仅2018年有记载，故定义云南昭通苹果平均幼果期为4月15日。

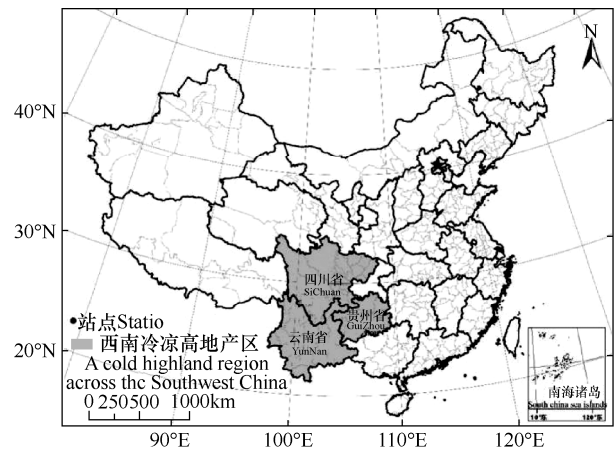


图1 研究站点所处地理位置

Fig. 1 Location of Zhaotong site in China

1.3 研究方法

1.3.1 气候资源指标

(1) 稳定通过某温度的起止日期

为了消除温度变化带来的不稳定性波动，采用5日滑动平均法计算稳定通过某温度的初始和终止日期。具体方法为，建立5日滑动平均温度新序列，选取新序列第一个≥某一温度的日期，定义为稳定通过该温度的起始日期；选取新序列最后一个≥某一温度的日期，定义为稳定通过该温度的终止日期^[34]。

(2) ≥10℃活动积温

累加≥10℃的当日平均温度，用于衡量某一地区某一时段的热量资源^[35]，即

$$AAT_{10} = \sum T_{\text{avg}} \quad (1)$$

式中， T_{avg} 为≥10℃日平均温度。

表1 2010–2018年云南昭通苹果实际观测生育日期记录与平均生育期（月-日）
Table 1 The actual phenology of apple at Zhaotong site, in Yunnan in 2010–2018 (mm-dd)

	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
花芽膨大期 Flower bud expanding	02–20	02–25	03–02	02–13	02–25	02–22	03–06	03–04	02–22
幼果期 Young fruit stage	–	–	–	–	–	–	–	–	04–15
果实成熟期 Fruit maturity	09–16	09–18	10–08	09–29	10–13	09–20	09–28	10–02	09–27

(3) 无霜期

无霜期也是描述某一地区热量资源的重要指标之一。日最低气温第一次≤2℃的日期定义为初霜日，日最低气温最后一次≤2℃的日期定义为终霜日；无霜期为初霜日日序与终霜日日序之差^[36]。

(4) 低温灾害

苹果开花期日平均气温≤-2.0℃，苹果花、花房容易冻伤冻死，进而影响产量和品质。选取苹果开花期日平均温度≤-2.0℃为低温灾害指标。

(5) 连阴雨

根据西南连续降水持续时间和累计降水量，定义昭通连续降水日数≥5d，连续降水日平均降水量≥4.0mm，且平均日照时数≤3h 为一次连阴雨天气过程^[38]。

1.3.2 苹果生产潜力估算

在环境、管理均充分满足且无病虫害发生前提下，依据苹果理想群体、树冠形态和气候环境，所形成的最大可能产量为苹果气候生产潜力^[30-33]。应用逐级订正模型，按照光、温、水逐级衰减的方式计算气候生产潜力^[30-33]。

(1) 光合生产潜力

指气温、水分、土壤、品种及管理充分满足条件下，仅由光合有效辐射大小决定苹果潜在生产潜力，形成苹果理论产量，即当地苹果理论产量上限^[30-33]。根据苹果群体冠层结构特点，将苹果生育期分为幼果前后两个阶段，即花芽膨大期-幼果期和幼果期-成熟期，赋以不同冠层反射、漏光率，估算苹果的光合生产潜力。计算式为

$$Y_q = \sum_{i=1}^n \left[\frac{1}{N} Q_p (1-\alpha)(1-\beta)(1-\gamma)(1-\delta) (1-\rho)(1-\omega) Q D k_1 k_2 \right] \quad (2)$$

式中，Y_q为苹果光合生产潜力 (kg·hm⁻²)；n为当地苹果生长天数 (d)；N为 1g 干物质形成需消耗的热量，取值为 17765J·g⁻¹；Q_p为苹果生育期内光合有效辐射 (MJ·m⁻²)；D为量纲换算系数，取值为 10；k₁为经济系数，取值为 0.4；k₂为鲜果折算系数，取值为 6.7；其它参数意义和取值见表 2^[30]。

苹果生育期内光合有效辐射，通常取值为太阳总辐射的 45%，太阳总辐射的计算方法为^[39-40]

$$R_a = \frac{24(60)}{\Pi} G_{sc} dr [\omega_s \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega_s] \quad (3)$$

$$dr = 1 + 0.033 \cos \left(\frac{2\Pi J}{365} \right) \quad (4)$$

$$\delta = 0.409 \sin \left(\frac{2\Pi J}{365} - 1.39 \right) \quad (5)$$

$$\omega_s = \arccos(-\tan \varphi \tan \delta) \quad (6)$$

$$N = \frac{24\omega_s}{\Pi} \quad (7)$$

$$R_{ns} = \left(a_s + b_s \frac{n}{N} \right) R_a (1-k) \quad (8)$$

式中，R_a为太阳天顶辐射 (MJ·m⁻²)；G_{sc}为太阳常数，取 0.082 (MJ·m⁻²·min⁻¹)；d_r为日地间相对距离；ω_s为太阳时角 (rad)；Φ为地理纬度 (rad)；δ为太阳磁偏角 (rad)；R_{ns}为太阳辐射 (MJ·m⁻²)；n为实际日照时间 (h)；N为最大可能的日照时数 (h)；R_a为天顶辐射 (MJ·m⁻²)；k为反射率或冠层反射系数，取值为 0.23，a_s和 b_s为回归系数，建议取值为 0.25 和 0.75；J是年内某天的日序数，以 1 月 1 日为 1^[30, 36]。

表 2 苹果光合生产潜力估算参数及意义^[30]

Table 2 Definition and value of parameters about calculate apple photosynthesis potential production^[30]

参数 Parameter	物理意义 Physical meaning	发芽-幼果期	幼果-成熟期
		Germination-young fruit	Young fruit-maturity
α	苹果树反射率 Reflectivity of apple tree	0.25	0.15
β	树冠漏光率 Canopy light leak rate	0.50	0.15
γ	超过光饱和点的比例 Proportion of light beyond saturation point	0.10	0.10
δ	果园裸露率 Bare rate of apple orchard	0.25	0.25
ρ	非光合器官吸收光能率 Non-photosynthetic organs absorb light energy	0.10	0.10
ω	呼吸消耗率 Respiratory consumption rate	0.50	0.50
Q	光能转化率 Conversion rate of light energy	0.25	0.25

(2) 苹果光温生产潜力

光温生产潜力指在水、土壤、品种及管理充分满足条件下, 仅由太阳光合有效辐射和当地温度大小决定的苹果生产力。结合当地光温实际, 将温度的日变化订正至苹果光合生产力, 即得到苹果光温生产潜力。即

$$Y_t = Y_q \cdot K_t \quad (9)$$

式中, Y_t 为苹果光温生产潜力 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); K_t 为温度订正系数。考虑云南昭通苹果最大可能生育期内 $\geq 10^\circ\text{C}$ 活动积温和最低气温对苹果生长发育的影响^[30], 具体订正公式为

$$K_t = K_{\geq 10^\circ\text{C}} \cdot K_{T_{\min}} \quad (10)$$

$$K_{\geq 10^\circ\text{C}} = \begin{cases} \frac{\text{AAT}_{10}}{\text{AAT}_m} & \text{AAT}_{10} < \text{AAT}_m \\ 1 & \text{AAT}_{10} \geq \text{AAT}_m \end{cases} \quad (11)$$

$$K_{T_{\min}} = \begin{cases} \frac{T_{\min}}{T_{\min m}} & T_{\min} < T_{\min m} \\ 1 & T_{\min} \geq T_{\min m} \end{cases} \quad (12)$$

式中, $K_{\geq 10^\circ\text{C}}$ 为 $\geq 10^\circ\text{C}$ 活动积温订正系数, $K_{T_{\min}}$ 为最低气温订正系数。AAT_m 为 $\geq 10^\circ\text{C}$ 活动积温的临界积温 ($^\circ\text{C} \cdot \text{d}$), 高于 AAT_m 的积温条件为最适宜当地苹果生长, 订正系数赋值为 1。 $\geq 10^\circ\text{C}$ 活动积温的临界取值通过云南昭通 1958–2019 年 $\geq 10^\circ\text{C}$ 活动积温累积序列的 50% 保证率确定。 T_{\min} 为生育期内最低气温 ($^\circ\text{C}$)。 $T_{\min m}$ 为昭通苹果生育期内最低温度的订正临界值 ($^\circ\text{C}$), $T_{\min m}$ 高于临界值为最适宜当地苹果生长, 订正系数赋值为 1。最低温度临界值的取值通过云南昭通 1958–2019 年最冷气温累积序列的 50% 保证率确定。

(3) 苹果气候生产潜力

气候生产潜力指在土壤、品种及管理充分满足条件下, 由光照、温度和水分决定的苹果生产力。当水分条件不能充分满足时, 苹果光温生产潜力也会有所降低。结合云南昭月光温水实际情况, 将降水变化订正至苹果光温生产力, 得到苹果气候生产潜力。水分订正式为

$$K_w = \begin{cases} \frac{R}{R_m} & R < R_m \\ 1 & R \geq R_m \end{cases} \quad (13)$$

式中, K_w 为水分订正系数。 R_m 为昭通降水量临界值 (mm), 降水量高于 R_m 说明降水条件最适宜当

地苹果生长, 订正系数赋值为 1。降水量临界值的取值通过云南昭通 1958–2019 年苹果最大可能生育期内累积序列的 50% 保证率确定。

1.4 数据处理

采用 Excel 进行数据统计分析, 研究方法采用线性倾向率、Pearson 相关系数和 t 检验等数学统计方法。

2 结果与分析

2.1 云南昭通苹果最大可能生育期的确定

2.1.1 无霜期和 $\geq 10^\circ\text{C}$ 起止日与苹果实际生育期的匹配度分析

1958–2019 年云南昭通无霜期、稳定通过 10°C 的起止日期及 2010–2018 年苹果关键生育期的变化特征如图 2 所示。由图 2a 可见, 1958–2019 年云南昭通终霜日平均日序为第 92 天 (4 月 2 日), 在第 65 (3 月 6 日)–125 天 (5 月 5 日) 区间波动, 每 10a 提前 1.5d; 稳定通过 10°C 起始日序平均为第 105 天 (4 月 15 日), 最早始于第 79 天 (3 月 20 日), 最晚出现于第 142 天 (5 月 22 日), 每 10a 仍提前 0.8d; 2010–2018 年, 苹果实际花芽膨大期平均日序为第 56 天 (2 月 25 日), 最早始于第 44 天 (2 月 13 日), 受气候变化影响, 每 10a 推迟 0.82d。由图 2b 可见, 过去 62a, 云南昭通初霜日平均日序为第 313 天 (11 月 8 日), 在第 276 (10 月 3 日)–347 天 (12 月 13 日) 区间波动, 每 10a 极显著推迟 3d ($P < 0.01$); 稳定通过 10°C 结束日序平均为第 303 天 (10 月 30 日), 最早出现于第 272 天 (9 月 29 日), 每 10a 极显著推迟 2.7d ($P < 0.01$); 苹果实际成熟期平均日序在第 271 天 (9 月 27 日), 最晚结束于第 287 天 (10 月 13 日), 每 10a 推迟 0.95d。

综上所述, 云南昭通无霜期平均为 221.0d, 在 171~257d 区间波动, 研究期内平均每 10a 极显著增加 3.5d ($P < 0.01$); 稳定通过 10°C 的持续日数平均为 200.3d, 最短为 161.0d, 最长为 236.0d, 每 10a 极显著增加 4.5d ($P < 0.01$); 2010–2018 年, 苹果实际生育期平均为 215.8d, 在 206~231d 区间波动, 每 10a 增加 0.1d。无霜期、稳定通过 10°C 持续日数均可满足苹果生长需求, 但昭通苹果实际花芽膨大期与终霜日、稳定通过 10°C 起始日期比较后并不匹配, 分别平均提前 36d 和 49d; 苹果实际成熟期与初霜日、稳定通过 10°C 结束日期比较也呈提前特征,

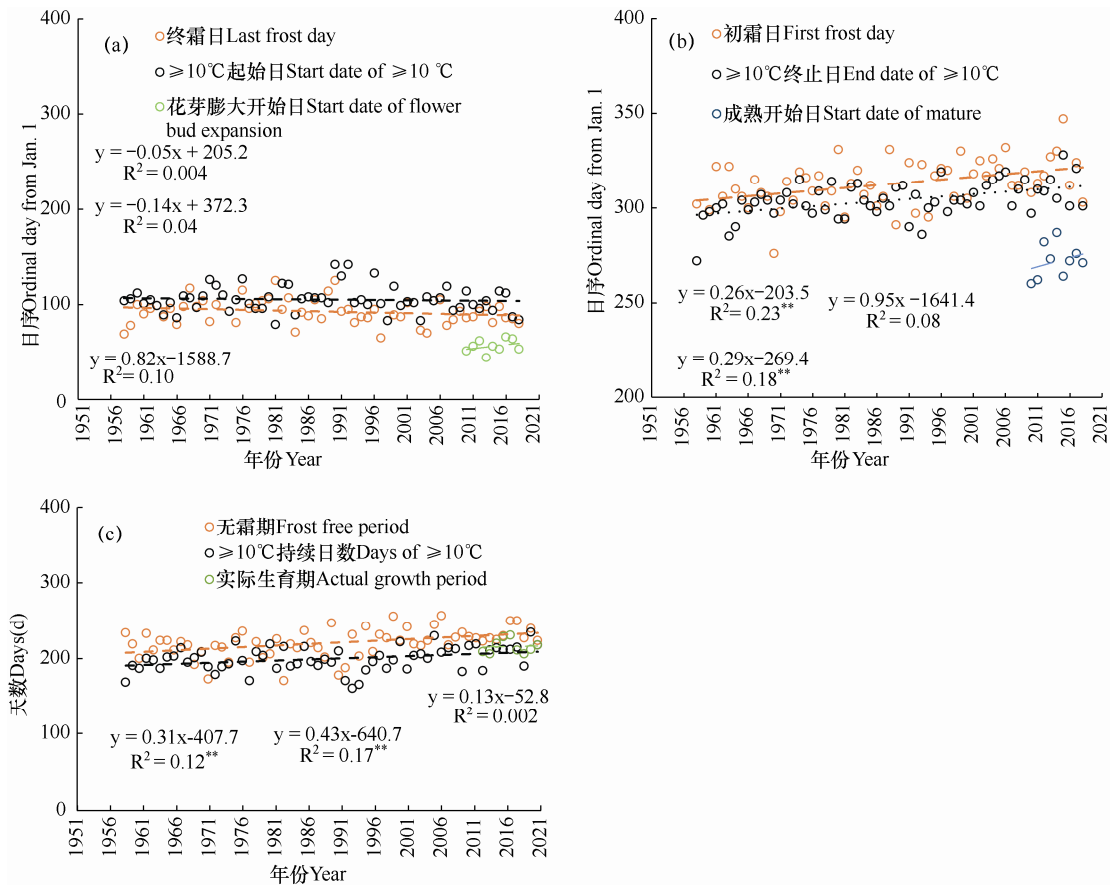


图 2 1958–2019 年云南昭通无霜期、稳定通过 10℃ 日期及 2010–2018 年苹果实际生育期的年际变化

Fig. 2 The interannual variation of the frost-free, stable through 10°C and actual growth period from 2010 to 2018 at Zhaotong site in Yunnan province

注：*、**分别表示相关系数通过 0.05、0.01 水平的显著性检验。R 为相关系数。下同。

Note: * is $P < 0.05$, ** is $P < 0.01$. R is the correlation coefficient. The same as below.

分别平均提早 42d 和 32d。因此，苹果实际生育期均早于无霜期、稳定通过 10℃ 的起止日期，容易导致苹果早期旺长，后期抵御低温能力降低。

2.2 苹果最大可能生育期分析

一般而言，稳定通过 0℃ 的持续时间为适宜农耕地，稳定通过 5℃、10℃ 等界限温度的持续时间作为中国长江流域以南地区的广义作物可能生长期或生长季^[41]。图 3 为云南昭通苹果花芽膨大期、成熟期与不同界限温度起止日期的相关关系。由图 3a 可见，2010–2018 年云南昭通苹果花芽膨大期与稳定通过 0℃、3℃ 的起始日期相关性最佳，相关系数分别为 0.70 ($P < 0.05$) 和 0.67 ($P < 0.05$)；苹果实际花芽膨大期日序与稳定通过 3℃ 起始日序的差值最小，因此，选取稳定通过 3℃ 起始日序作为苹果花芽膨大期日序。由图 3b 可见，

2010–2018 年云南昭通苹果成熟期与稳定通过 13℃ 的终止日期相关性最高，相关系数为 0.68 ($P < 0.05$)。因此，将稳定通过 13℃ 结束日序作为苹果成熟期日序。

由图 4 可见，1958–2018 年，云南昭通苹果花芽膨大期（稳定通过 3℃ 起始日期）平均始于第 59.9 天，在第 18–94 天区间变化，过去 62a，苹果花芽膨大期呈显著提前趋势，每 10a 提前 2.8d ($P < 0.05$)；苹果成熟期（稳定通过 13℃ 的终止日期）平均结束于第 270.5 天，在第 243–301 天区间变化，过去 62a，苹果成熟期呈极显著推迟趋势，每 10a 推迟 2.7d ($P < 0.01$)。研究期内，苹果可能最大生育期平均为 211.6d，在第 162–260 天区间波动，过去 62a，苹果可能最大生育期呈极显著延长趋势，每 10a 延长 5.6d ($P < 0.01$)。

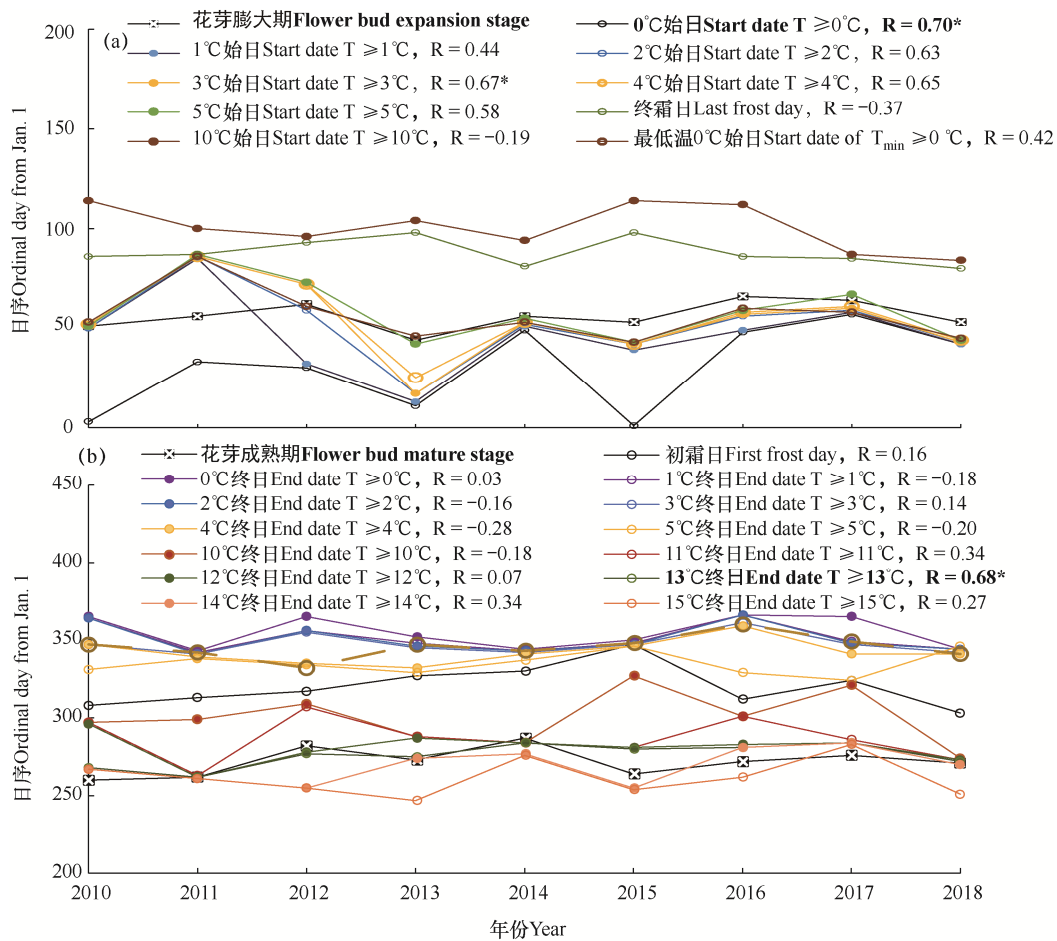


图 3 2010–2018 年云南昭通苹果花芽膨大期 (a) 和成熟期 (b) 与不同阈值温度起始/终止日及初/终霜日的变化相关关系
 Fig. 3 Relationship between flower bud expands date(a) and actual fruit maturity date(b) and related temperature factors at Zhaotong site in Yunnan from 2010 to 2018

注：图中 T 为日平均气温。下同。Note: T in the figure is the daily average temperature. The same as below.

2.3 苹果最大可能生育期内农业气候资源变化特征

气温和气温日较差均是影响苹果发育进程和品质的重要气象因子^[42]。图 5 是 1958–2019 年云南昭通苹果最大可能生育期内气温、降水及日照时数的变化。由图 5a 可见，1958–2019 年云南昭通苹果最大可能生育期内最低气温、平均气温和最高气温分别为 11.8、16.1 和 22.6℃，分别以 0.1、0.04 ($P < 0.05$) 和 0.05℃·10a⁻¹ ($P < 0.05$) 速率增加，仅最低温度变化未通过 95% 显著性检验；气温日较差平均为 10.9℃，在 9.8~12.8℃ 区间波动，每 10a 减少 0.2℃。降水对苹果生长同样具有重要影响，李世奎等^[22]认为，年平均降水量在 501~800mm 最适合苹果生长。由图 5b 可见，1958–2019 年内，昭通苹果最大可能生育期内降水量平均为 596.4mm，波动浮动较大，在

241.9~861.2mm 区间波动，过去 62a 间，以 1.0mm·10a⁻¹ 速率下降。最大可能生育期内日照时数平均为 1209.0h，在 811.5~1575.1h 区间波动，并以 6.7h·10a⁻¹ 速率下降。可见，研究期内苹果最大可能生育期内光、温、水资源基本可满足苹果生长发育需求。

2.4 苹果最大可能生育期内农业气象灾害变化特征

2.4.1 开花期低温

1958–2019 年，苹果花期 (3–4 月) 低温灾害发生次数和相应年份如表 3 所示。由表可知，研究期内云南昭通苹果最大可能生育期内花期低温灾害发生总天数为 20d，共计 10 次，其中，1988 年为最严重的一年，本次低温事件持续 7d。但总体而言，过去 62a，云南昭通苹果低温灾害并不是主要农业气象灾害。

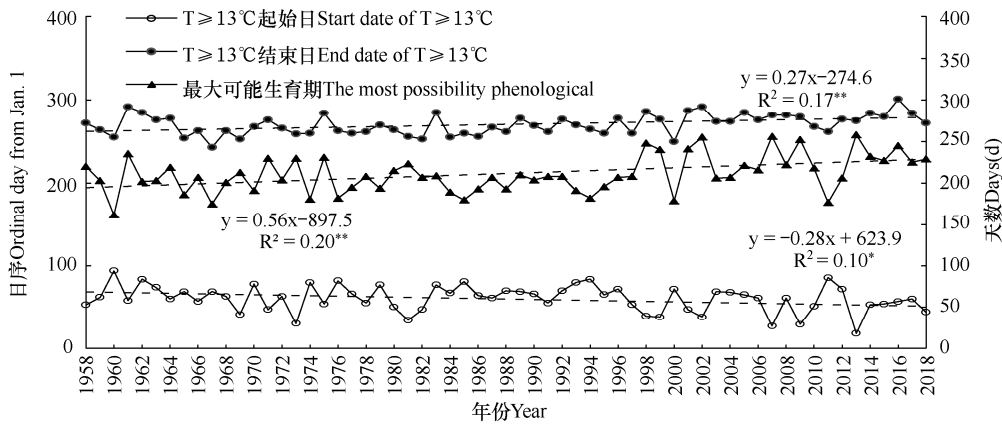


图 4 1958–2018 年云南昭通苹果最大可能生育期的年际变化

Fig. 4 Interannual variation of the most possibility phenological of apple at Zhaotong site in Yunnan from 1958 to 2018

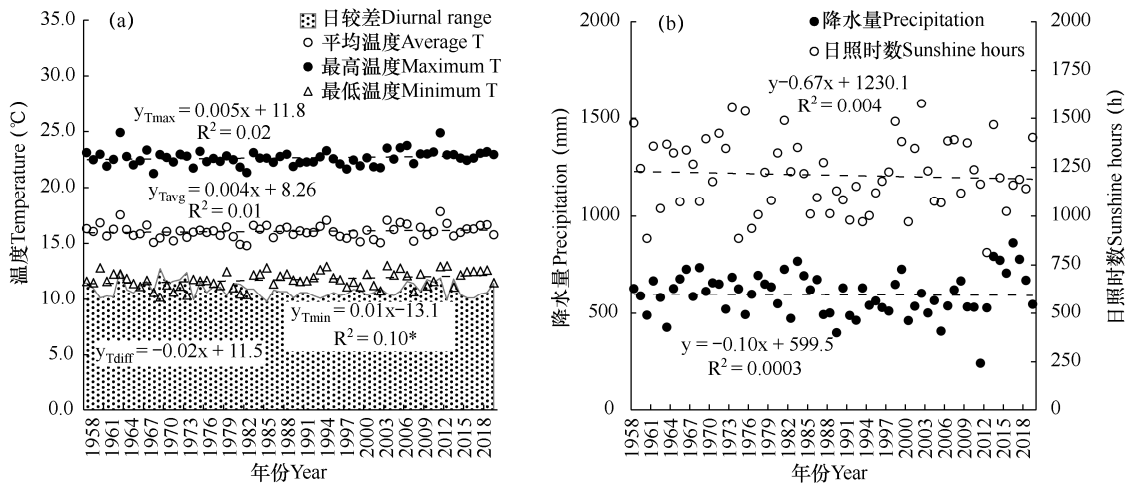


图 5 1958–2019 年昭通苹果最大可能生育期内气候资源的年际变化

Fig. 5 The interannual variation of most possibility phenological climatic factors at Zhaotong site in Yunnan from 1958 to 2019

表 3 云南昭通 3–4 月苹果花期低温灾害统计

Table 3 Low temperature disaster during apple flowering period from March to April in Zhaotong

年份 Year	天数 Days(d)	次数 Times
1967	2	1
1969	1	1
1972	1	1
1976	2	1
1986	2	1
1988	7	1
1989	3	2
1992	1	1
2006	1	1

2.4.2 连阴雨

花期、着色期的连阴雨均会影响苹果品质，降水量大，持续时间长，极易诱发裂果、烂果及病虫

害。据文献可知^[41-42]，连阴雨>3d 对苹果品质有负面影响。1958–2019 年，云南昭通连阴雨发生次数和天数的变化趋势如图 6 所示。由图 6a 可知，连阴雨天气出现年份占总年份 84%左右，共计 101 次，过去 62a，每 10a 减少 0.1 次。连阴雨发生 1~2 次和>2 次事件分别占总次数的 69%和 31%。统计表明，连阴雨主要集中在 6–9 月，占总次数的 80%，而该阶段正是苹果品质形成关键期。由图 6b 可见，近 62a，云南昭通连阴雨灾害总计发生 617d，平均年发生天数在 4~28d，每 10a 减少 1d；年总发生天数≥20d 的年份有 1964、1978、1979 和 1999 年；年连阴雨总降水量在 32.7~308.6mm，平均为 131.9mm。总体而言，研究期内当地连阴雨有所减少。

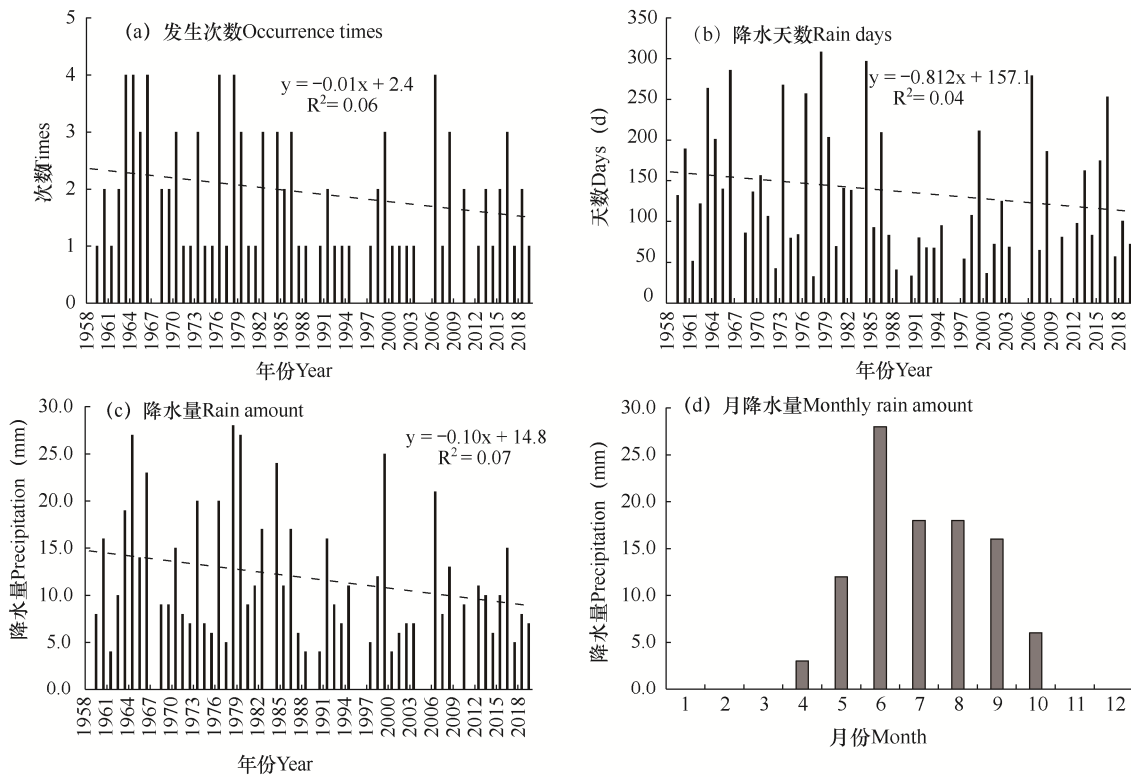


图 6 云南昭通历年连阴雨发生情况统计 (1958–2019 年)

Fig. 6 Statistic of the occurrence times, days and rain amount of continuous rain at Zhaotong site in Yunnan from 1958 to 2019

2.5 苹果可能生长期内气候生产潜力

2.5.1 气温、降水量的订正系数取值

热量条件是影响苹果生长发育的重要指标之一，尤其是 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温和最低气温^[34–35]。苹果生长期积温条件不足或最低气温过低 ($< -2^{\circ}\text{C}$)，会导致苹果生产潜力下降。估算云南昭通苹果光温生产潜力时，需考虑最大可能生育期内 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温、最

低气温及降水量变化对产量潜力的影响。图 7 是云南昭通最大可能生育期内 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 活动积温、最低气温和降水序列的累积频率。由图 7a 可见，最大可能生育期内 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 活动积温在 2624.6~3753.1 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 间波动，平均为 3202 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 。当 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 活动积温的累计频率高于 50% 时 ($\text{AAT}_{10} \geq 3125^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$)，光温生产潜力的积温订正系数赋值为 1，低于 50% 时 ($\text{AAT}_{10} <$

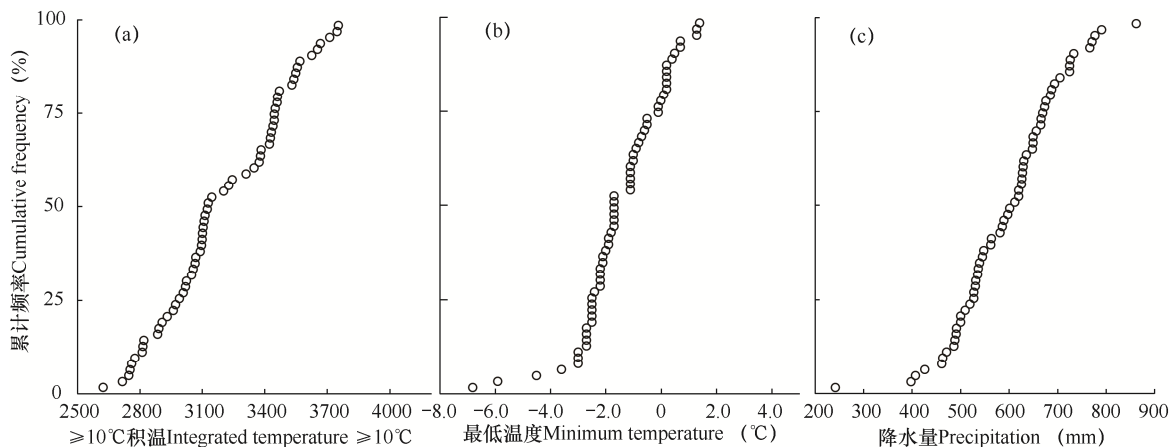


图 7 1958–2019 年云南昭通 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 活动积温 (a)、最低气温 (b) 和降水量 (c) 的累积频率

Fig. 7 Cumulative frequency of active integrated temperature(a), minimum temperature(b) and precipitation(c) at Zhaotong site in Yunnan from 1958 to 2019

3125°C·d), 光温生产潜力的积温订正系数由式 (11) 计算而得。由图 7b 可见, 云南昭通苹果最大可能生育期内最低气温在 -6.8~1.4°C 间波动, 平均为 -1.5°C; 当最低气温的累计频率高于 50% 时 ($T_{min} \geq -1.7^\circ\text{C}$), 光温生产潜力的最低气温订正系数赋值为 1, 低于 50% 时 ($T_{min} < -1.7^\circ\text{C}$), 光温生产潜力的最低气温订正系数由式 (12) 计算而得。由图 7c 可知, 云南昭通苹果最大可能生育期内降水量在 242.1~862.2mm 间波动, 平均为 596.3mm; 当降水量累计频率高于 50% 时 ($\text{Rain} \geq 606\text{mm}$), 气候生产潜力的降水订正系数赋值为 1, 低于 50% 时 ($\text{Rain} < 606\text{mm}$), 气候生产潜力的降水订正系数由式 (13) 计算而得。

2.5.2 气候生产潜力

1958-2019 年, 经过对温度和降水逐级订正, 云南昭通苹果各级生产潜力如图 8 所示。由图可见,

在温、水、肥等不受限且无病虫害时, 光合生产潜力估算值平均为 $9.40 \times 10^4 \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; 随着日照时数的波动, 每 10a 仅增加 $297 \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; 经 $\geq 10^\circ\text{C}$ 活动积温、最低温度等修订系数的订正, 苹果光温生产潜力平均值为 $7.96 \times 10^4 \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 近 62a 来, 每 10a 增加约 $2008 \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; 光温生产潜力平均占光合生产潜力的 83.0% 左右。依照云南昭通苹果最大可能生育期内降水变化, 气候生产潜力平均为 $7.26 \times 10^4 \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 每 10a 增加 $1096 \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 气候生产潜力分别占光合生产潜力和光温生产潜力的 76% 和 91.9% 左右。在云南昭通果园现有种植品种和栽培管理下, 实际苹果产量平均为 $3.45 \times 10^4 \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 仅占光合生产潜力的 36% 左右。而全国和云南昭通苹果统计单产分别仅占光合生产潜力的 4% 和 10%, 实际果园产量、统计产量与理论产量差距较大。可见, 栽培技术的提高、优良品种的推广应用等的增产潜力较大。

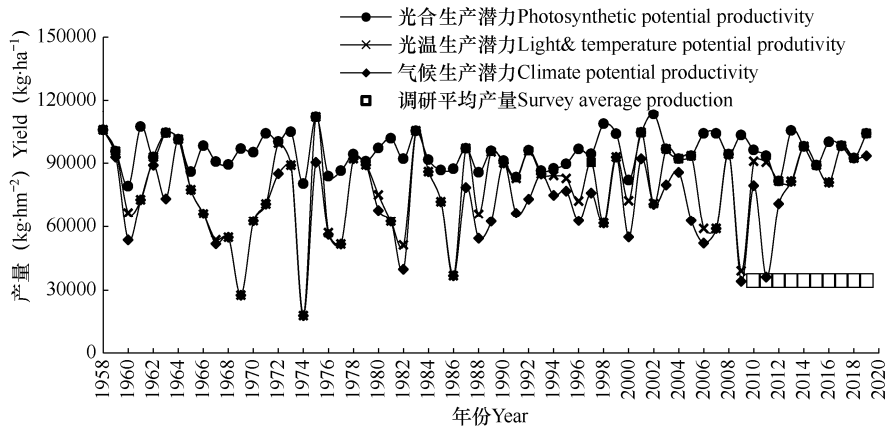


图 8 1958-2019 年昭通苹果最大可能生长期气候生产潜力的年际变化

Fig. 8 Interannual variation of climatic potential productivity of Zhaotong apple in the maximum possible growth period from 1958 to 2019

3 结论与讨论

3.1 结论

(1) 云南昭通地区无霜期、稳定通过 10°C 的持续天数能满足苹果生长所需, 且均呈显著增加趋势 ($P < 0.05$), 但结合当地苹果实际生育期, 定量分析得出苹果最大可能生育期为稳定通过 3°C 起始日期-稳定通过 13°C 的终止日期。

(2) 云南昭通苹果最大可能生育期内, 农业气候资源丰富, 满足苹果生长发育要求, 最高理论产量, 即光合生产潜力约为 $94 \text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 经过对温度和降水量的逐级订正, 得出该地区光温、气候生产潜力分别为 7.96×10^4 和 $7.26 \times 10^4 \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 但云南实际苹果产量平均为 $3.45 \times 10^4 \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 各级理论产量与实

际果园产量、统计产量间差异较大。同时, 苹果低温灾害发生频次较低, 推荐该地区种植萌芽较早的品种, 以进一步合理高效利用农业气候资源, 采用可控因素缩小苹果产量差, 提高苹果品质。

3.2 讨论

随着苹果种植结构调整、种植方式优化及优良品种选育, 苹果在中国果业生产中占据了举足轻重的地位^[43-44]。自 20 世纪 80 年代以来, 中国苹果种植面积和产量均有了质的飞跃, 种植区域呈“西移北扩、高海拔”的发展态势^[45-46]。昭通地区作为云南苹果产业发展的中心, 中国农业科学院果树研究所在全国苹果区划意见中, 将昭通划入全国苹果生长最适宜区之一^[2]。从种植面积和产量来讲, 西南冷

凉高地苹果产区与黄土高原、环渤海产区相比规模较小,但增长速度较快^[2, 45]。

气候变暖背景下,各地区农业气候资源均发生了改变^[11]。1958–2019年,云南昭通无霜期、稳定通过10℃的持续天数均呈显著增加特征,每10a分别增加3.5d和4.5d。理论上无霜期和稳定通过10℃的持续天数均满足苹果生长所需。但本研究显示,昭通苹果花芽膨大期、果实成熟期从时间上均早于当地初、终霜日和稳定通过10℃起始、终止日期。在中国南方农业生产中,多将5℃、10℃等界限温度定义为作物可能生长期^[37]。为了更加合理、高效利用农业气候资源,本研究根据云南昭通2010–2018年苹果实际生育期,明确了当地苹果最大可能生育期为稳定通过3℃起始日期–稳定通过13℃终止日期。这与庞继先^[11, 34, 47]等的广义生长期比较,更加符合当地果园的实际情况,1958–2019年云南昭通苹果最大可能生育期平均为211.6d,在162~260d,过去62a,每10a极显著延长5.6d ($P < 0.01$)。

中国不同苹果产区的环境条件各有特色,苹果对气象因子的响应程度也各不相同^[47]。张山清等^[48]从光、热、水等方面分析了新疆地区气候资源变化特征,发现苹果次适宜种植区明显扩大,不适宜种植区有所减少。李星敏等^[49]分析了陕西地区气温上升、降水减少等气候变化环境下,苹果适宜种植区的变化,表现为开花期明显提前、冻害频率增加等。云南昭通苹果最大可能生育期内平均气温为16.1℃,并以 $0.04\text{℃}\cdot 10\text{a}^{-1}$ 的速率显著增加,同时期内,气温日较差呈微弱减少的变化,每10a下降0.2℃,但这样的趋势并不利于苹果生长后期糖分累积。李世奎等^[22]认为,年降水量在501~800mm最适宜苹果生长,云南昭通最大可能生育期内降水量平均为596.4mm,以 $1.0\text{mm}\cdot 10\text{a}^{-1}$ 速率下降。当地降水资源基本满足苹果生长发育所需。但某些年份降水偏少。李新和等^[50]指出,苹果最佳日照时数在2200h以上,云南昭通最大可能生育期内日照时数年平均仅为1209h,每10a显著减少6.7h,日照时数的逐年减少并不利于苹果果形、风味和硬度等品质的形成。从目前资源来看,云南昭通光、热、水等资源条件基本满足苹果生长发育所需,这与王学峰等^[51]的研究结果一致,魏钦平等^[52–53]亦认为,光、热、水对苹果种植区划、产量高低、品质优劣等有至关重要影响。

热量资源不足,降水资源超过苹果生长发育的需求,会影响苹果的产量及品质,降水量大,持续时间长,极易诱发裂果、烂果以及病虫害^[37]。1958–2019年云南昭通苹果最大可能生育期内,花期低温灾害共计发生10次,总发生天数为20d。总体而言,发生风险较低,不是当地苹果主要农业气象灾害。另一方面,连阴雨灾害共计发生101次,总发生天数617d,占年连阴雨发生次数的80%,发生风险高,且集中发生在6–9月,正是苹果品质形成关键期。该研究结果与周鹏康^[38]的研究结果一致。

气候生产潜力是评价农业气候资源的依据之一,对合理利用气候资源、指导农业生产具有重要意义^[53]。苹果属多年生木本植物,其生长影响因素复杂多样^[53]。过去62a,云南昭通苹果最大可能生育期内,最高理论产量,即光合生产潜力约为 $100\text{t}\cdot \text{hm}^{-2}$,与杨永岐等^[33]研究结果相似;经温度、降水资源等相关系数订正后,云南昭通苹果光温、气候生产潜力均有所下降,分别占光合生产潜力的83.0%和76.0%。基于统计资料,昭通果园实际产量仅占光合生产潜力的36%,区域统计产量仅占光合生产潜力的10%,理论产量与实际产量差异大。实际产量的高低主要受限于管理技术、栽培模式、苹果品种及当地气候资源条件^[54],也有研究认为是因苹果不同生长阶段的光能利用率不同导致,发芽–幼果期远比幼果–成熟期利用率低得多。另一方面,由于云南昭通实际果园生产数据记载有限,本研究并未分析苹果品种、灌溉、施肥等因素对当地苹果生产潜力的影响,今后将并深入研究,同时,未来还应充分考虑如何提高气候资源利用效率。随着苹果栽培技术的进步、高产抗逆品种的应用、节水灌溉技术的推广,苹果气候生产潜力可实现程度将越来越高。

参考文献 References

- [1] 中华人民共和国统计局.中国统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2018.
National Bureau of Statistics.China statistical yearbook[M]. Beijing:China Statistics Press,2018.(in Chinese)
- [2] 程存刚,赵德英.新形势下我国苹果产业的发展定位与趋势[J].中国果树,2019(1):1-7.
Cheng C G,Zhao D Y.Development orientation and trend of the apple industry under the new situation[J].China Fruits, 2019(1): 1-7.(in Chinese)

- [3] 邓秀新,束怀瑞,郝玉金,等.果树学科百年发展回顾[J].农学学报,2018,8(1):24-34.
Deng X X,Shu H R,Hao Y J,et al.Review on the centennial development of pomology in China[J]. Journal of Agriculture, 2018,8(1):24-34.(in Chinese)
- [4] 李坤明,胡忠荣,陈伟,等.云南省苹果产区及品种构成[J].中国果树,2011(2):66-67.
Li K M,Hu Z R,Chen W,et al.Apple production area and variety composition in Yunnan Province[J].China Fruits, 2011(2): 66-67.(in Chinese)
- [5] 姜丽,汪腾.云南昭通酒渔乡苹果产业考察报告及经验启示[J].兴义民族师范学院学报,2016(1):120-124.
Jiang L,Wang T.Investigations reports of apple industry in Zhaotong Sayu village and their guidance to apple production[J]. Journal of Southwest Guizhou Teachers College for Nationalities,2016(1):120-124.(in Chinese)
- [6] 余优森,李光华.苹果优质气候资源与区域性研究[J].应用气象学报,1995,6(1):76-82.
Yu Y S,Li G H.A study on the climatic resources and regions of apple quality[J].Journal of Applied Meteorology, 1995,6(1):76-82.(in Chinese)
- [7] 中国农林作物气候区划协作组.中国农林作物气候区划[M].北京:气象出版社,1987:174-184.
China Agricultural and Forestry Crop Climate Division Cooperation Group.Climatic division of agricultural and forestry crops in China[M].Beijing: China Meteorological Press,1987:174-184.(in Chinese)
- [8] 陈尚谟,黄寿波,温福光.果树气象学[M].北京:气象出版社,1988:225-241.
Chen S M,Huang S B,Wen F G.Fruit meteorology[M]. Beijing: China Meteorological Press,1988:225-241.(in Chinese)
- [9] 屈振江,周广胜.中国富士苹果种植的气候适宜性研究[J].气象学报,2016,74(3):479-490.
Qu Z J,Zhou G S.Climate suitability for potential Fuji apple cultivation in China[J].Acta Meteorologica Sinica,2016, 74(3): 479-490.(in Chinese)
- [10] 魏钦平,张继祥,毛志泉,等.苹果优质生产的最适气象因子和气候区划[J].应用生态学报,2003(5):713-716.
Wei Q P,Zhang J X,Mao Z Q,et al.Optimum meteorological factors and climate divisions of apple for good quality[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2003(5): 713-716.(in Chinese)
- [11] 庞继先.农业生产的界限温度[J].吉林农业,1994(4):19.
Pang J X.Boundary temperature of agricultural production[J]. Jilin Agriculture,1994(4):19.(in Chinese)
- [12] 白秀广,李小盼.气候变化对中国苹果主产区生产布局变迁的影响分析[J].北方园艺,2016(1):204-209.
Bai X G,Li X P.Impact of climate change on the layout of apple production in China[J].Northern Horticulture,2016(1): 204-209.(in Chinese)
- [13] Wolfe D W,Schwartz M D,Lakso A N.Climate change and shifts in spring phenology of three horticultural woody perennials in northeastern USA[J].International Journal of Biometeorology,2005,49:303-309.
- [14] Chmielewski F M,Muller A,Bruns E.Climate changes and trends in phenology of fruit trees and field crops in Germany,1961-2000[J].Agricultural and Forest Meteorology,2004,121:69-78.
- [15] Grabs S,Craparo A.Advance of apple and pear tree full bloom dates in response to climate change in the southwestern Cape,South Africa:1973-2009[J].Agricultural and Forest Meteorology,2011,151:406-413.
- [16] 樊晓春,王位泰,杨晓华,等.六盘山东西两侧苹果物候期对气候变化的响应[J].生态学杂志,2010,29(1):50-54.
Fan X C,Wang W T,Yang X H,et al.Responses of apple tree's phenology in east and west sides of Liupanshan Mountain to climate change[J].Chinese Journal of Ecology, 2010, 29(1):50-54.(in Chinese)
- [17] 蒲金涌,姚小英,姚晓红,等.气候变暖对甘肃黄土高原苹果物候期及生长的影响[J].中国农业气象,2008, 29(2): 181-183.
Pu J Y,Yao X Y,Yao X H,et al.Impacts of climate warming on phenological period and growth of apple tree in Loess Plateau of Gansu province[J].Chinese Journal of Agrometeorology,2008,29(2):181-183.(in Chinese)
- [18] 杨小利,江广胜.陇东黄土高原典型站苹果生长对气候变化的响应[J].中国农业气象,2010,31(1):74-77.
Yang X L,Jiang G S.Responses of apple trees growth to climate change in typical stations of Longdong Loess Plateau province[J].Chinese Journal of Agrometeorology, 2010,31(1):74-77.(in Chinese)
- [19] 李美荣,杜继稳,李星敏,等.陕西果区苹果始花期预测模型[J].中国农业气象,2009,30(3):417-420.
Li M R,Du J W,Li X M,et al.Prediction model for beginning

- of apple flowering period in fruit growing areas of Shaanxi province[J].Chinese Journal of Agrometeorology,2009, 30(3): 417-420.(in Chinese)
- [20] 尹贞铃,雪婷,辛博,等.白水苹果始花期预测模型研究[J].陕西气象,2019(2):34-36.
- Yin Z Q,Xue T,Xin B,et al.Study on the predicting model of the apple initial flowering period at Baishui County[J].Journal of Shaanxi Meteorology, 2019(2):34-36. (in Chinese)
- [21] 徐吉花,赵政阳,王雷存,等.苹果果实品质评价因子的选择研究[J].干旱地区农业研究,2011,29(6):269-273.
- Xu J H,Zhao Z Y,Wang L C,et al.Selection of factors for apple fruit quality evaluation[J].Agricultural Research in the Arid Areas,2011,29(6):269-273.(in Chinese)
- [22] 李世奎,朱佳满,周远明,等.我国苹果种植区划研究[J].山西果树,1985(4):2-7.
- Li S K,Zhu J M,Zhou Y M,et al.Study on apple planting division in China[J].Shanxi Fruits,1985(4):2-7.(in Chinese)
- [23] 程籍,谢红江,廖明安,等.川藏高海拔地区金冠苹果品质与气象因子的关系[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2016,44(3):70-74.
- Cheng J,Xie H J,Liao M A,et al.Relationship between fruit quality of Golden Delicious apple and meteorological factors in high altitude area of Sichuan-Tibet[J].Journal of Northwest A & F University(Natural Science Edition),2016, 44(3): 70-74.(in Chinese)
- [24] 赵德英,吕德国,刘国成,等.冷凉气候区‘寒富’苹果及其亲本光合特性的研究[J].园艺学报,2009,36(7): 945-952.
- Zhao D Y,Lv D G,Liu G C,et al.Studies on the photosynthetic characteristics of ‘Hanfu’ apple in cool climate regions[J].Acta Horticulturae Sinica,2009,36(7): 945-952.(in Chinese)
- [25] 张良英,刘林,牛歆雨.四个苹果品种在高海拔地区光合特性研究[J].北方园艺,2012(9):20-22.
- Zhang L Y,Liu L,Niu X Y.Study on photosynthetic characteristics of four apple cultivars in high altitude region[J].Northern Horticulture,2012(9):20-22.(in Chinese)
- [26] 杨文渊,谢红江,陶炼,等.川西高海拔不同生态区金冠苹果光合特性研究[J].西南农业学报,2016,29(6):1291-1295.
- Yang W Y,Xie H J,Tao L,et al.Research on photosynthesis of ‘Golden Delicious’ apple in 4 different ecological zones of western Sichuan plateau[J].Southwest China Journal of Agricultural Sciences,2016,29(6): 1291-1295.(in Chinese)
- [27] 田展,梁卓然,史军,等.近 50 年气候变化对中国小麦生产潜力的影响分析[J].中国农学通报,2013,29(9):61-69.
- Tian Z,Liang Z R,Shi J,et al.Analysis of impact on China wheat potential productivity of climate change during 1961-2010[J].Chinese Agricultural Science Bulletin,2013,29(9): 61-69. (in Chinese)
- [28] 郭建平.气候变化对中国农业生产的影响研究进展[J].应用气象学报,2015,26(1):1-11.
- Guo J P.Advances in impacts of climate change on agricultural production in China[J].Journal of Applied Meteorology,2015,26(1):1-11.(in Chinese)
- [29] 周广胜.气候变化对中国农业生产影响研究展望[J].气象与环境科学,2015,38(1):80-94.
- Zhou G S.Research prospect on impact of climate change on agricultural production in China[J].Meteorological and Environmental Sciences,2015,38(1):80-94.(in Chinese)
- [30] 段晓凤,张磊,马国飞,等.宁夏澳洲青苹光温生产潜力的计算与分析[J].浙江农林大学学报,2017,34(3):443-448.
- Duan X F,Zhang L,Ma G F,et al.Calculation and analysis of light and temperature potential productivity of Malus domestica ‘Granny Smith’[J].Journal of Zhejiang A & F University,2017,34(3):443-448.(in Chinese)
- [31] 赵建国,白敏.苹果气候土壤生产潜力估算方法研究[J].北方园艺,1990(1):1-3.
- Zhao J G,Bai M.Study on the estimation method of apple climate and soil productivity potential[J].Northern Horticulture, 1990(1): 1-3.
- [32] 杨振伟.昌黎地区辐射资源与苹果生产潜力的研究[J].中国农业气象,1993,14(4):12-14.
- Yang Z W.Study on radiation resources and apple production potential in Changli area[J].Chinese Journal of Agrometeorology, 1993,14(4):12-14.(in Chinese)
- [33] 杨永岐,戴阁文.苹果气候生产力研究[J].气象与环境学报,1993(4):18-20.
- Yang Y Q,Dai G W.Study on apple climate productivity[J].Journal of Meteorology and Environment,1993(4): 18-20. (in Chinese)
- [34] 王树廷.关于日平均气温稳定通过各级界限温度初终日期的统计方法[J].气象,1982(6):29-30.
- Wang S T.The statistical method of the beginning and ending date of the daily average temperature passing through the boundary temperature at all levels steadily[J]. Meteorological Monthly,1982(6):29-30.(in Chinese)

- [35] 缪启龙,丁园圆,王勇,等.气候变暖对中国热量资源分布的影响分析[J].自然资源学报,2009,24(5):934-944.
Miao Q L,Ding Y Y,Wang Y,et al.Impact of climate warming on the distribution of China's thermal resources[J].Journal of Natural Resources,2009,24(5): 934-944. (in Chinese)
- [36] 叶殿秀,张勇.1961-2007 年我国霜冻变化特征[J].应用气象学报,2008,19(6):661-665.
Ye D X,Zhang Y.Characteristics of frost changes from 1961 to 2007 over China[J].Journal of Applied Meteorological Science,2008,19(6):661-665.(in Chinese)
- [37] 陆秋农.我国苹果的分布区划与生态因子[J].中国农业科学,1980,13(1):46-51.
Lu Q N.Apple distribution division and ecological factors in China[J].Scientia Agricultura Sinica,1980,13(1):46-51.(in Chinese)
- [38] 周鹏康,秦金梅,孙秀芬,等.云南 1981-2010 年 5-10 月连阴雨时空分布特征[J].干旱气象,2015,33(5):796-801.
Zhou P K,Qin J M,Sun X F,et al. Spatial-temporal distribution of continuous rain from May to October in recent 30 years in Yunnan [J].Journal of Arid Meteorology, 2015,33(5):796-801.(in Chinese)
- [39] 刘园,王颖,杨晓光.华北平原参考作物蒸散量变化特征及气候影响因素[J].生态学报,2010,30(4):923-932.
Liu Y,Wang Y,Yang X G.Trends in reference crop evapotranspiration and possible climatic factors in the North China Plain[J].Acta Ecologica Sinica,2010,30(4):923-932.(in Chinese)
- [40] Allen R G,Pereira L S,Rates D.Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirement[M]. Irrigation and Drainage Paper,1998.
- [41] 段若溪,姜会飞.农业气象学[M].北京:气象出版社,2002.
Duan R X,Jiang H F.Agricultural meteorology[M]. Beijing: Meteorological Press,2002.(in Chinese)
- [42] 魏婵婵.影响苹果花粉萌发率的相关因素研究[D].杨凌:西北农林科学大学,2016.
Wei C C.Study on the factors which affect apple pollen germination rate[D].Yangling:Northwest A&F University, 2003.(in Chinese)
- [43] 刘军弟,霍学喜,韩明玉,等.中国苹果产业发展现状及趋势分析[J].北方园艺,2012(20):164-168.
Liu J D,Huo X X,Han M Y,et al.Status,trend and suggestions for development of apple industry in China[J]. Northern Horticulture,2012(20):164-168.(in Chinese)
- [44] 王璇,刘军弟,邵砾群,等.我国苹果产业年度发展状况及其趋势与建议[J].中国果树,2018(3):101-104.
Wang X,Liu J D,Shao L Q,et al.Annual development of apple industry in China and its trend and suggestions[J]. China Fruits,2018(3):101-104.(in Chinese)
- [45] 张定红,彭吉垒,王永刚,等.云南昭通苹果园土壤成分检测分析[J].农业与技术,2018,38(13):14-17.
Zhang D H,Peng J L,Wang Y G,et al.Analysis of soil components in Zhaotong apple orchard[J].Agriculture and Technology,2018,38(13):14-17.(in Chinese)
- [46] 刘天军,范英.中国苹果主产区生产布局变迁及影响因素分析[J].农业经济问题,2012(10):36-42.
Liu T J,Fan Y.Analysis of the influencing factor and layout of major apple production in China[J]. Issues in Agricultural Economy,2012(10):36-42.(in Chinese)
- [47] 魏钦平,张继祥,毛志泉,等.苹果优质生产的最适气象因子和气候区划[J].应用生态学报,2003,14(5):713-716.
Wei Q P,Zhang J X,Mao Z Q,et al.Optimum meteorological factors and climate divisions of apple for good quality[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2003,14(5): 713-716. (in Chinese)
- [48] 张山清,普宗朝,李新建,等.气候变化对新疆苹果种植气候适宜性的影响[J].中国农业资源与区划,2018, 39(80): 255-264.
Zhang S Q,Pu Z C,Li X J,et al.Impact of climate change on apple-planting climatic suitability in Xinjiang[J].Journal of China Agricultural Resources and Regional Planning,2018, 39(80):255-264.(in Chinese)
- [49] 李星敏,柏秦凤,朱琳.气候变化对陕西苹果生长适宜性影响[J].应用气象学报,2011,22(2):241-248.
Li X M,Bai Q F,Zhu L.The influence of climate change on suitability of Shaanxi apple growth[J].Quarterly Journal of Applied Meteorology,2011,22(2):241-248.(in Chinese)
- [50] 李新和.商丘市苹果种植气候条件分析[J].现代农业科技,2017(14):239-241.
Li X H.Analysis on the climatic conditions of apple planting in Shangqiu City[J].Modern Agricultural Science and Technology,2017(14):239-241.(in Chinese)
- [51] 王学锋,吉文娟,张茂松,等.近 53 年来云南干热河谷热量资源变化的比较性特征[J].长江流域资源与环境,2015, 24(S1):92-97.

- Wang X F, Ji W J, Zhang M S, et al. Comparative characteristics of heat resource in the dry-hot valleys in Yunnan province in percent 53 years[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015, 24(S1): 92-97. (in Chinese)
- [52] 魏钦平, 李嘉瑞, 程述汉. 乔纳金苹果品质与气象因子的关系[J]. 山东农业大学学报, 1999, 30(4): 436-440.
- Wei Q P, Li J R, Cheng S H. Relationships between fruit quality and meteorological factors in 'Jonagold' apples[J]. Journal of Shandong Agricultural University, 1999, 30(4): 436-440. (in Chinese)
- [53] Narasimham P, Dhanaraj S, Krishnaprakash M S. Effect of meteorological factors on fruit maturation and the prediction of optimum harvest for apples[J]. Scientia Horticulturae, 1988, 35(3-4): 217-226.
- [54] 李秀芬, 赵慧颖, 朱海霞, 等. 黑龙江省玉米气候生产力演变及其对气候变化的响应[J]. 应用生态学报, 2016, 27(8): 2561-2570.
- Li X F, Zhao H Y, Zhu H X, et al. Evolution of maize climate productivity and its response to climate change in Heilongjiang Province[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(8): 2561-2570. (in Chinese)
- [55] 胡德玉, 刘雪峰, 王克健, 等. 郁闭柑橘园改造对植株光化学参数及果实品质的影响[J]. 果树学报, 2017, 34(5): 552-566.
- Hu D Y, Liu X F, Wang K J, et al. Effects of tree pruning in a closed citrus orchard on some parameters of photochemical reactions and fruit quality[J]. Journal of Fruit Science, 2017, 34(5): 552-566. (in Chinese)