

DOI: 10.5846/stxb201511072257

屈振江,周广胜.中国富士苹果种植气候适宜区的年代际变化.生态学报,2016,36(23):7551-7561.

Qu Z J, Zhou G S. Dynamics of decadal changes in the distribution of cultivation regions with climate suitable for the Fuji apple in China. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(23): 7551-7561.

中国富士苹果种植气候适宜区的年代际变化

屈振江¹, 周广胜^{2,*}

¹ 陕西省经济作物气象服务台, 西安 710015

² 中国气象科学研究院, 北京 100081

摘要: 苹果是中国种植面积最大的水果, 分析气候变化背景下其种植气候适宜区的年代际变化, 可为合理利用气候资源、科学应对气候变化提供参考。基于中国主栽的富士苹果地理分布信息和 1961—2010 年中国区域 2084 个气象台站资料, 利用最大熵模型 (MaxEnt) 和 ArcGIS 软件, 通过构建富士苹果种植分布与气候因子的关系模型, 分析 1961—2010 年中国富士苹果种植分布的年代际变化特征及其对气候变化响应的敏感区。结果表明, 气候变化导致中国富士苹果种植分布的气候界限和气候适宜区明显北移, 其中气候适宜区范围伴有西扩趋势。富士苹果种植的各气候适宜区分布年代际变化特征明显, 适宜气候种植面积显著增加, 特别是 1990s 变化最为突出, 2010s 气候种植适宜面积较 1960s 增加 36%。但高气候适宜区面积则呈年代际波动, 2010s 虽略高于 1960s, 但较 1970s—1980s 减少 25%。富士苹果种植适宜区对气候变化响应最为敏感的地区主要分布在辽宁南部、鲁南、苏北、豫东南、黄土高原西北部和川陕接壤区。除热量条件外, 年日照时数对富士苹果种植的气候适宜区面积影响显著, 气候资源变化有助于富士苹果种植的气候适宜范围增加, 但不利于高气候适宜区的稳定。

关键词: 气候变化; 富士苹果; 适宜区; 年代际

Dynamics of decadal changes in the distribution of cultivation regions with climate suitable for the Fuji apple in China

QU Zhenjiang¹, ZHOU Guangsheng^{2,*}

¹ Shaanxi Meteorological Service Station for Economic Crops, Xi'an 710015, China

² Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China

Abstract: Apple has larger planting area than any other fruit in China. Analyzing the decadal changes in the distribution of cultivation areas with climate suitable for apple under the background of climate change can provide a reference for the rational use of climate resources and adaptation to climate change. In this paper, we established a model by examining the relationship between Fuji apple cultivation distribution and climate, based on meteorological data from 1961 to 2010 at 2084 meteorological stations and the geographic planting distribution of Fuji apple in China together with the maximum entropy (MaxEnt) model and the ArcGIS spatial analysis technique. The decadal change characteristics of the distribution of Fuji apple cultivation areas in China from 1961 to 2010 and areas sensitive to climate change were explored using the model. The results showed that climate change has led to the northward movement of planting boundaries and areas with climate suitable for Fuji apple, with westward expansion of the areas with suitable climate. There was an obvious decadal change in areas with climate suitable for the cultivation of Fuji apple and this area increased significantly, especially in the 1990s. The cultivation area with suitable climate was 36% higher in the 2010s than in the 1960s; however, the optimum cultivation

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 973 项目 (2010CB951300); 中国气象局气象关键技术集成与应用项目 (CMAGJ2015M60); 中国气象局气候变化专项 (CCSF201621)

收稿日期: 2015-11-07; 修订日期: 2016-04-25

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: gszhou@cams.cma.gov.cn

area fluctuated with decadal change. The optimum cultivation area in the 2010s was slightly higher than that in the 1960s, but was 25% lower than those in the 1970s—1980s. The most climate change-sensitive cultivation area of Fuji apple was principally found in southern Liaoning, southern Shandong, and northern Jiangsu, and on the southeastern Henan northwestern Loess Plateau and the contiguous area of the Sichuan-Shaanxi province. Annual sunshine hours and thermal conditions had significant effects on the areas with climate suitable for the cultivation of Fuji apple. Overall, climate change can act to increase the area suitable for cultivation of Fuji apple, but can adversely affect the stability of the optimum cultivation area.

Key Words: climate change; Fuji apple; climate suitable area; inter decadal

作物种植分布受气候条件的制约^[1],政府间气候变化专门委员会(IPCC)第五次评估报告(AR5)指出,1880—2012 年全球平均地表温度大约上升了 0.85℃,1983—2012 年可能是过去 1400a 中最暖的 30a^[2]。已有的观测事实表明,中国范围的增温速率高于全球且具有明显的区域和季节特征^[3],从而使得已有利用气候背景划分的自然区域界限产生了不同程度的变化^[4],将显著影响作物的种植分布。年代际是气候变化研究中重要的时间尺度,它既迭加了长期变化趋势上的扰动,又是年际变率的重要背景^[5-6],基于年代际尺度评估作物种植分布的变化有助于深化气候变化对农业影响的认识,并可服务于作物种植规划。

目前,关于作物种植分布对气候变化的响应研究主要集中在小麦、玉米、水稻等^[7-8]大宗粮食作物,Sharma^[9]和 Fujisawa^[10]针对气候变化对苹果的生育期及产量的影响进行过研究。现有的研究认为气候变化对作物的种植界限、生育进程、产量及灾害性因子均有较大影响,但不同作物及在不同区域的影响差异明显。苹果是中国栽培规模最大的水果,约占水果总产的 25%,是农业经济的重要组成部分,主栽品种以富士为主,占 70%以上^[11],其种植布局的变化与全球苹果市场和种植地农民的收入关系密切。李星敏^[12]、郭海英^[13]、刘敬强^[14]等分别研究了陕西、甘肃、新疆等主产地苹果物候期、气候资源及主要气象灾害的时空变化特征,白秀广^[15]分析了气候变化对中国苹果主产区产量的影响,但已有研究均未涉及苹果种植适宜区分布对气候变化的响应。随着全球气候变暖,作物种植界限不同程度北移、生长季延长,种植分布及品种也有较大的变化,特别是夏季区域气候的年代际变化特征增强^[16],从而将对苹果的产量和品质形成产生严重影响。但是,面向全国范围的苹果气候适宜性划分自 20 世纪 80 年代后就没有更为全面的研究,同时苹果种植品种复杂,不同品种种植的气候适宜性差异较大,针对苹果主栽品种,从全国尺度和年际变率来评估气候变化对其种植分布的影响尚未见报道。

在研究全球变化背景下作物分布和气候的关系中,物种分布模型作为一种重要工具被广泛应用^[17]。其中,最大熵(MaxEnt)模型可在已知较少样本点和对应环境变量的基础上对物种潜在分布的概率大小做出估计,在众多生态位模型中具有较好的性能表现和操作性^[18-20]。Duan^[21]、He^[22]和 Sun^[23]等分别利用最大熵模型对中国区域的水稻、玉米和冬小麦等作物种植分布的年代际变化进行了研究,取得了较好的模拟效果。本研究试图以中国主栽的富士苹果为研究对象,基于地理分布信息和 1961—2010 年中国区域 2084 个气象台站资料,利用最大熵模型和 ArcGIS 软件,构建富士苹果种植分布与气候因子的关系模型,从区域尺度和年尺度筛选影响富士苹果分布的主导气候因子,分析 1961—2010 年中国富士苹果种植分布的年代际变化特征及其对气候变化响应的敏感性,以期优化苹果种植布局及科学应对气候变化提供参考。

1 资料与方法

1.1 研究资料

1.1.1 地理分布数据

富士苹果地理分布数据主要来自中国农业统计年鉴、国家苹果产业体系共享数据库、中国苹果优势区域布局规划(2008—2015)及各地年鉴统计资料。通过统计年鉴获取有苹果产量统计信息的 25 个省区约 500 个

县级分布信息,对年鉴分品种统计中苹果种植面积较少或富士品种种植比例低于 10% 的内蒙、吉林、黑龙江、上海、福建、湖北、西藏等地分布资料予以剔除。通过查阅文献,并对照产业体系共享数据库提取的 180 个苹果生产重点县区的种植详细资料进行了品种区分,重点对种植面积较大但品种较为复杂的辽宁、新疆、河北、甘肃和四川省的分布资料进行了筛选甄别,依据是资料或文献中明确有富士品种的种植信息,共提取以县域为单位的富士苹果种植分布数据 203 个。

1.1.2 气象资料

气象资料来源于国家气象信息中心最新制作的“中国国家级地面气象站基本气象要素日值数据集(V3.0)”,包括中国区域 1961—2010 年逐日平均气温、最高气温、最低气温、日照时数、降水量和相对湿度数据,该数据集制作中已进行了严格的质量控制,其中气温、降水和相对湿度等要素均进行了均一化处理。通过对各类数据相互对应的连续性、完整性检验,共提取 2084 个站点资料,其中 1961—1970 年共 1939 站、1971—1990 年共 2073 站,1991—2010 年共 2084 站。从分布来看,站点密度基本能够体现气候的区域性差异,而资料较为稀疏的区域基本在青藏高原地区。参考已有气候要素空间插值方法^[24-25],基于 ArcGIS9.3 和中国区域的 DEM 数据,分别对气温、日照时数采用多元回归插值,降水、相对湿度采用样条函数插值的方法,将气象要素插值到 10km×10km 网格作为背景数据。

研究区域、所用气象站点及富士苹果的地理分布见图 1。

1.2 研究方法

1.2.1 最大熵模型

最大熵模型是基于有限的已知信息对未知分布进行无偏推断的一种数学方法^[18]。该理论认为在已知条件下,熵最大的事物最可能接近它的真实状态,通过计算作物环境系统最大熵时的状态参数确定作物和环境之间的关系,从符合条件的分布中选择熵最大的分布作为最优分布,同时输出存在概率,可通过存在概率的大小对作物分布的适宜程度进行定量的分区评价。研究用于模拟富士苹果种植年代际分布的模型是最大熵(MaxEnt)模型 3.3.3k 版^[18-20]。该模型通过输入作物分布的地理信息和预测区域的环境数据,可以输出预测地区物种分布的概率 P ,根据概率的大小判断作物在某个区域存在的可能性大小。参考 IPCC 报告中关于评估可能性的划分标准^[26],将种植区及气候适宜性按如下标准分区: $P < 0.05$ 为不适宜区, $0.05 \leq P < 0.33$ 为次适宜区, $0.33 \leq P < 0.66$ 为适宜区, $P \geq 0.66$ 为高适宜区。

1.2.2 模拟精度检验

模型的适用性及模拟的精度可以采用输出的受试者工作特征曲线(receiver operating characteristic curve, ROC)的下面积(area under curve, AUC)来评价。AUC 的取值范围为 $[0, 1]$,越接近 1 说明环境变量与预测作物地理分布之间的相关性越大,即模型预测的结果越准确。其评估标准为:0.50—0.60(失败)、0.60—0.70(较差)、0.70—0.80(一般)、0.80—0.90(好)、0.90—1.0(非常好)。

1.2.3 主导因子选取

通过对现有研究成果进行总结,筛选影响富士苹果种植分布及品质形成的潜在气候影响因子,将各因子 1981—2010 年的 30 年气候背景数据组合作为环境因子与富士苹果种植的地理分布数据输入到最大熵模型,



图 1 研究区域、气象台站及富士苹果的地理分布

Fig.1 Study region and geographical distribution of the weather stations and the counties with Fuji apple plantation in China

通过精度检验,提取 AUC 值最大的因子组合提取为主导因子组合。以 1961—1970 年、1971—1980 年、1981—1990 年、1991—2000 年、2001—2010 年划分时间段,分别代表 20 世纪 60 年代(1960s)、70 年代(1970s)、80 年代(1980s)、90 年代(1990s)和 21 世纪前 10 年(2000s)。以 1981—2010 年的 30 年气候数据作为背景数据,将按照年代际划分统计的气候数据作为预测数据,模拟各年代富士苹果在中国区域分布的概率,按照适宜度划分标准,在 ArcGIS 中对各适宜区的年代际变化及适宜度变化敏感区进行分析。

根据已有研究成果,结合自然植被区划^[27],筛选出最冷月平均气温、年平均温度、4—10 月平均温度、温量指数、 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温、年降水量、夏季平均相对湿度、气温年较差、夏季日较差、年日照时数、夏季平均温度、夏季平均最低温度、夏季平均最高温度等 13 个有明确生物学意义可能会影响富士苹果种植分布和品质形成的潜在影响因子^[28],计算获取 1981—2010 年各潜在影响因子的年均值。其中,年平均气温和年较差作为反映区域年总热量资源及其变幅,最冷月平均气温反映果树是否能够正常越冬及休眠,降水反映维持果树生长和冠层平衡的水分需求。生长季(4—10 月)的平均气温、 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温及温量指数均反映主要生长季的长短即能否保证果实正常成熟,年日照时数、夏季的平均气温、最高气温、最低气温、气温日较差和空气相对湿度用来反映富士苹果品质形成的基本气象条件保证。在建模前对变量分类进行相关分析,将各因子组合构成环境变量层与地理分布数据输入模型进行计算,通过随机取样设置总数据集的 75% 作为训练子集用于训练模型,25% 作为验证子集,构建富士苹果种植分布与气候因子关系模型。对比确定 AUC 值最大的 8 个主导因子组合为:年日照时数、年降水量、夏季平均气温日较差、年平均气温、最冷月平均气温、 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温、夏季平均空气相对湿度和夏季平均气温(表 1)。8 个主导因子中 5 个与温度有关,表明富士苹果的生长及品质形成对温度有较高的要求,在年尺度上无论生长季或者休眠期的温度都会对落叶果树产生影响,其中最冷月平均温度的置换重要性较高,过低则不能安全越冬,过高会导致果树不能正常休眠,直接影响其生理存在。日照时数除影响果树的花芽分化和枝叶生长外,也是苹果着色及糖度累积的重要保证,对品质影响显著。苹果喜冷凉干燥气候,对空气湿度和降水要求严格,尤其是在花芽分化时期和果实成熟期间,湿度过大会对果实的膨大及果实硬度有较为明显的影响。

模型计算训练样本和测试样本的 AUC 值分别为 0.960 和 0.930,表面最大熵模型的适用性及模拟结果的精度达到了“非常好”的程度。同时,所选主导因子对富士苹果种植分布模拟结果的累积贡献率达到了 99.9%,表明利用以上 8 个主导因子与地理分布所建的模型可以用于中国富士苹果种植的气候适宜分布模拟。

表 1 影响中国富士苹果种植分布的主导气候因子

Table 1 Dominant climate factors affecting plantation distribution of Fuji apple in China

主导气候因子 Dominant climate factors	文献来源 Reference	影响分布的贡献百分率 Percent contribution/%
最冷月平均气温 Mean temperature of the coldest month(T_C , $^{\circ}\text{C}$)	[29, 31, 33, 36, 42-44]	4.1
年平均温度 Mean annual temperature(T , $^{\circ}\text{C}$)	[29-34, 38, 40-43, 45-48]	7.9
$\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温 Accumulated temperature of not less than 10°C ($\sum T_{10}$, $^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$)	[32-33, 35, 38, 40, 43, 46-47]	7.3
年降水量 Annual precipitation(P , mm)	[29-30, 34, 42, 36, 38, 31, 43, 45, 48]	29.4
夏季平均相对湿度 Mean relative humidity in summer(RH_s , %)	[30, 35, 40-41, 44-46, 48]	2.1
夏季平均温度日较差 Summer range of temperature(SRT, $^{\circ}\text{C}$)	[35, 40, 43-44, 47]	11.2
年日照时数 Annual sunshine hours(S , h)	[29, 33, 36, 42, 44]	35.6
夏季平均温度 Mean temperature in summer(T_s , $^{\circ}\text{C}$)	[29, 35, 38, 40]	2.3

2 结果分析

2.1 气候适宜分布的年代际变化

利用最大熵模型模拟分析 1961—2010 年富士苹果种植的不同气候适宜区年代际变化(图 2)。1961—

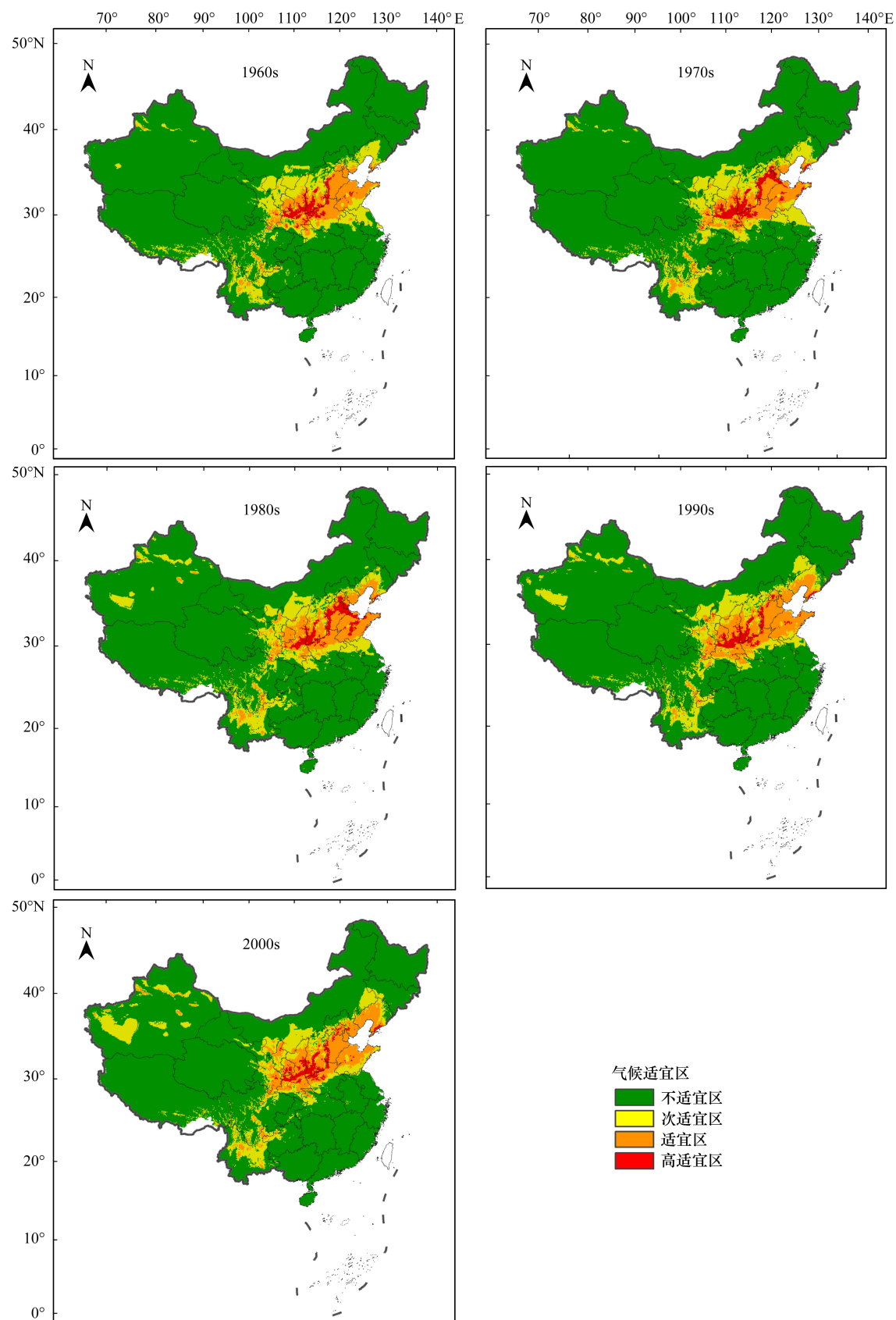


图2 中国富士苹果种植气候适宜区的年代际变化

Fig.2 Decadal dynamics of Fuji apple climate suitable cultivation distribution in China

2010 年气候的年代际变化导致富士苹果在中国种植分布的界限呈明显的北移趋势,特别是 1990s 变化最为明显,与中国区域的气温变化趋势基本一致^[49],1980s 中期前气温始终在较小的范围内上下波动,之后增温趋势开始明显,到 1990s 增温最强。到 2010s,富士苹果种植的北界(辽宁和内蒙)和南界(豫南、皖北和苏北)分别较 1960s 向北移动了 2°和 1°左右;气候适宜种植范围的界限北移更为明显且伴有西扩趋势,特别是黄土高原西北部的气候适宜区西移北扩均达到了 2°左右,而西南种植区的云贵川气候适宜区也有扩大趋势;各气候适宜区的地带分布和面积的年代际变化较为显著,次气候适宜和气候适宜以上范围增加明显,而高气候适宜区的分布年代际波动较大。

从气候适宜区面积的年代际变化看(表 2),次适宜面积和适宜以上合计面积均随年代际明显增加,到 2000s 次适宜面积增加了 20%,适宜以上合计面积增加 36%,占国土面积的 $8075 \times 10^3 \text{ km}^2$,而高适宜面积则呈先递增后递减再递增的动态变化,其中 1970s 高适宜区面积最高达 $1632 \times 10^3 \text{ km}^2$,而后开始递减,到 1990s 达到最低,随后略有增加,但 2000s 与 1970s 相比高适宜区面积减少了近 25%。

表 2 中国富士苹果种植适宜面积的年代际变化

Table 2 Decadal dynamics of Fuji apple climate suitable cultivation area in China

适宜等级 Suitable grade	1960s	1970s	1980s	1990s	2000s
不适宜 Unsuitable area/(10^3 km^2)	79113	78592	77954	76916	75914
次适宜 Less suitable area/(10^3 km^2)	9629	9661	9839	9910	10667
适宜 Suitable area	4780	4771	5445	6634	6858
高适宜 Optimum area/(10^3 km^2)	1134	1632	1418	1196	1217
适宜以上面积合计/(10^3 km^2)	5914	6403	6863	7830	8075
Above suitable area					

从相邻年代际的交替变化看,与 1960s 相比,1970s 富士苹果种植的次适宜区略有北移,其中河南、安徽和苏北等省的次适宜区南界北移较为明显,辽宁省的次适宜区则北移至长白山沿线,云贵高地的次适宜区略有增加,次适宜区面积较 1960s 增加了约 $32 \times 10^3 \text{ km}^2$ 。适宜区的面积及分布都没有发生较为明显的变化,而高适宜区的分布则变化显著,其中河北省的高适宜区由沿太行山脉向环京津区延伸,关中高适区连片面积扩大并西扩至陇东,平凉地区的适宜度明显增加,同时晋陕豫三省交界区出现了大面积的气候高适宜区,1970s 富士苹果种植的气候高适宜区面积增加最为显著且达到各年代际最高,占到了国土面积 $1632 \times 10^3 \text{ km}^2$,较 1960s 增加了 44%,而适宜以上合计面积较 1960s 也递增约 10%。

1980s 与 1970s 比较,次适宜区在川北、豫东南和苏北的南界继续北移,但种植分布的北界除陕蒙交界地带稍有北移外其余地区均无较为明显的变化,同时南疆的次适宜区面积有所增加。而适宜区则发生了明显的整体北移,其中辽宁、河北、陕西及甘肃等省的适宜区北移明显,特别是辽宁省的适宜区面积增加最为显著,适宜南界的河南中部适宜区北移 1°,陕南、鲁南的适宜区面积也有所减少。除河北省的太行山麓外,其余高适宜区都发生了变化,特别是黄土高原区和豫西北的高适宜区萎缩严重,陇东的高适宜区基本消失,而河北省的高适宜区则继续向环渤海湾延伸,山东省的高适宜区面积明显增加。与 1970s 相比,适宜以上合计面积增加了约 7%,但其中高适宜的面积则有所减少,种植分布的面积没有发生较为明显的变化。

相较于 1980s,1990s 次适宜区整体北移且趋势较为明显,其中种植北界的辽宁省北部北移 2°到达内蒙古南部,种植南界的苏北和安徽北部北移近 1°,云南高地的分布区明显萎缩。但气候适宜区除以上区域随次适宜的变化发生北移外,在西北地区却分别向西和向南扩展,其中宁夏西北部和陇东的适宜区面积增加明显,同时晋陕豫及陕南的适宜区分布也向南有所扩大。高适宜区的分布也发生了较为明显的变化,环渤海湾区域的高适宜区基本消失,河北省的高适宜区基本沿太行山麓分布,黄土高原区的高适宜区向西扩展至陇东且高适宜区的集中连片面积扩大,晋中和豫西北的高适宜区面积也有所增加。总体而言,与 1980s 相比气候适宜区的面积增加最为明显,达到了 22%,所以虽然高适宜区的面积继续减少,但适宜以上合计面积依然增加了 14%。

2000s 延续了 1990s 的变化趋势,次适宜区北界的辽宁省、内蒙古自治区东南部继续北抬至吉林省境内,而南界基本北移至苏皖鲁三省交界地带,河南省境内的种植界限北移至驻马店以北,黄土高原种植区略向西北移动。相比于次适宜区,适宜区范围的北移则更为明显,与 1990s 相比整体北移近 1° 左右,同时处于黄土高原适宜区明显向西北扩展。高适宜区的分布没有发生较为明显的变化,关中高适宜区分布整体向北有所抬升。与 1990s 比较,适宜区及高适宜区的面积均有小幅增加,但增幅并不明显。

2.2 种植气候适宜分布对气候变化响应的敏感区

将相邻两个年代气候条件下的适宜区分布相比较,提取年代际之间富士苹果种植气候适宜性区域的变化,可分析种植气候适宜分布对气候变化响应的敏感区域(图 3)。

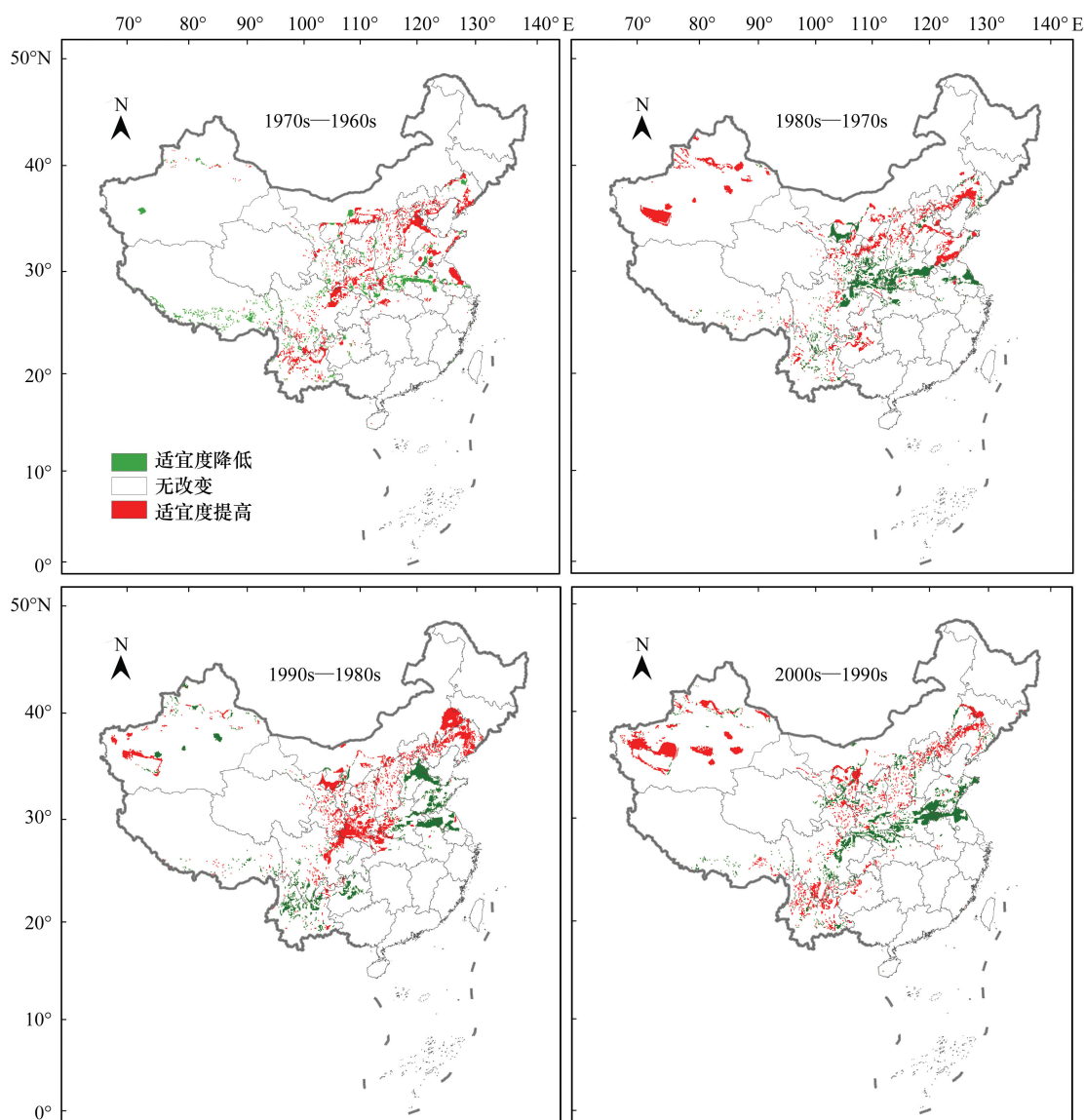


图 3 富士苹果种植气候适宜区对气候变化响应的敏感区

Fig.3 Sensitive region of Fuji apple climate suitable cultivation distribution in China

结合图 2,1970s 较 1960s 与 1980s 较 1970s 的气候适宜区分布发生变化的区域面积相当,约占到国土面积的 5%,年代际之间的适宜区面积变化大致相当且更加明显,约占国土面积 7% 左右,苹果种植气候适宜区发生较为明显变化在 1990s,这与中国区域气候变化的基本特点和趋势吻合^[50]。其中,适宜区分布面积减少最明显的年代是 1990—2010s,约占国土面积 $2730 \times 10^3 \text{ km}^2$,其次是 1970—1980s。适宜区分布面积增加最为

明显的是 1980—1990s, 约占国土面积的 $4179 \times 10^3 \text{ km}^2$, 其次是 1990—2000s。而适宜区分布面积增加或减少最不明显的均是 1960—1970s, 与这两个年代际的气候变化趋势较缓有关。

从区域分布看, 适宜区分布面积转换交替最为集中的区域主要在辽宁南部、豫东南、鲁南、苏北、黄土高原西北部和川陕接壤区。其中, 种植北界区域的气候适宜区分布面积有所提高而南界的气候适宜区分布面积基本以降低为主。在主产区中, 气候适宜区分布面积变化敏感的区域主要集中在环渤海湾的鲁南及河北环京津一线, 变化交替出现。而在黄土高原的西北部、南疆的阿克苏及云贵川交界地区, 气候适宜区有逐年代际提高的趋势。

2.3 气候因子与各适宜区年代际变化的关系

表 3 给出了主导气候因子与各气候适宜区面积的相关性。最冷月平均气温、年平均气温和 $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温等表征热量条件的气候因子对次适宜区分布的面积显著正相关, 表明热量条件在限制作物生理存在分布的决定性作用。而最冷月平均气温、年平均气温和日照时数等光热组合因子对气候适宜范围的面积及适宜以上合计面积相关性明显, 表明在生理存在前提下日照条件对富士苹果种植适宜性的影响显著。同时, 所有主导因子与高适宜区面积的相关性均未通过显著性检验, 表明单个气候因子对高适宜区的影响有限, 达到较高气候适宜度需要光热水等气候条件的合理匹配。而降水因子及影响苹果品质形成的夏季气候因子与适宜范围面积的相关均未通过显著检验, 可能与全国平均降水量的年际变化不太明显有关^[51], 同时也表明对品质影响较为显著的夏季气候因子之间的关系较为复杂, 且需在生理适宜存在的基础下有适宜的匹配组合。

表 3 中国富士苹果种植气候适宜面积的年代际变化与主导气候因子的关系

Table 3 Relationships between the dominant climate factors and the area of Fuji apple climate suitable cultivation in China

	次适宜区 Less suitable area	适宜区 Suitable area	高适宜区 Optimum area	适宜以上面积 Above suitable area	次适宜以上面积 Above less suitable area
$T_c/^\circ\text{C}$	0.901 *	0.961 **	-0.252	0.985 **	0.998 **
$T/^\circ\text{C}$	0.929 *	0.930 *	-0.513	0.894 *	0.943 *
$\Sigma T_{10}/(^{\circ}\text{C} \cdot \text{d})$	0.977 **	0.871	-0.370	0.861	0.935 *
P/mm	-0.607	-0.102	-0.391	-0.198	-0.340
$RH_s/\%$	-0.671	-0.220	0.355	-0.159	-0.333
$\text{SRT}/^\circ\text{C}$	-0.347	-0.770	0.127	-0.806	-0.689
S/h	-0.785	-0.949 *	0.281	-0.965 **	-0.947 *
$T_s/^\circ\text{C}$	0.815	0.729	-0.730	0.628	0.715

* $P < 0.05$; * * $P < 0.01$

3 讨论

物种分布机理的研究认为, 植物的地理分布取决于其能够忍受的最低温度、完成生活史所需的生长季长度和热量供应及用于植物冠层形成和维持的水分供应^[27], 即主要是水热资源的供应。但不同作物对环境因子的要求存在差异, 作为经济作物种植的苹果, 除生理满足外, 产量和品质是种植中必须要考虑的因素^[52], 现有的地理分布也是在人类种植选择的基础上形成的。因此, 本研究中引入了对产量及果实品质形成关系较为密切的气候因子。研究表明, 除温热因子外, 年日照时数对富士苹果种植分布的贡献率较大, 特别是对适宜范围的分布面积相关性极其显著。区别于已有研究认为年尺度中水热资源对分布的决定作用, 年际变化中对富士苹果种植分布影响最大的是光热资源的供应, 这也与所选研究区域和时段中这两种气候因子的年际及空间分布的变化较大有关。通过对富士苹果种植分布的模拟结果与中国大苹果主产区域 1980s—2000s 分省区产量布局的结果进行对比, 模拟分析的结果是基本合理和可信的。

种植气候适宜度分布的年代际变化归因于气候资源的变化及匹配, 通过对中国区域光、热、水资源的年际及年代际变化分析, 1961—2010 年中国区域热量和光照资源的年代际变化特征明显(图 4)。温度是限制作物分布的重要因子, 其中最冷月的温度过低影响果树安全越冬, 已有研究中也作为苹果种植北界的指标^[53],

而越冬期温度过高果树则不能正常休眠,影响种植的南界,同时积温作为生长季长度和热量供应的重要表征,既要保证果实正常成熟但过高又会影响发育进程和果实品质^[47],因此,温度年代际及区域变化对种植的分布和适宜界限均有显著影响。温度相关的气候因子变化从 1990s 开始趋势加剧同时带有明显的区域特征,其中中高纬度地区的响应最为敏感^[49],特别是东北、西北地区东部及华北,本研究给出的种植界限变化及气候敏感区与温度的变化特征基本吻合,种植分布区整体北移,同时适宜区带有西扩趋势,中高纬度地区气候适宜的交替变化也最为明显。而日照时数对于果树的花芽分化、产量和品质有重要影响^[29]。从年际变化看,中国区域的日照时数近年来减少明显,特别是华北、华东及新疆部分地区,日照对于适宜以上范围的面积相关性极高,本研究结果也显示适宜及以上范围的地带分布变化体现了日照变化的区域性差异。夏季气候因子中日较差是影响果实品质形成的重要因子^[29],与全球日较差呈现下降趋势一致,中国区域夏季气温日较差从 1970s 开始有所迅速下降到 2000s 趋于平缓,同时表现出中高纬度减小幅度较大的特点,夏季日较差的变化对种植分布影响有限,但对果实品质应有不利的影响。虽然全国平均降水量没有发生明显的年代际波动,但区域的年代际变化特征较为显著,西部地区降水增加而环渤海湾地区的降水减少明显^[51],降水的区域性变化在其它光热因子的适宜条件下对分布的高适宜区产生影响,应是环渤海湾地区和黄土高原西北部苹果种植高适宜区交替变化的重要原因。

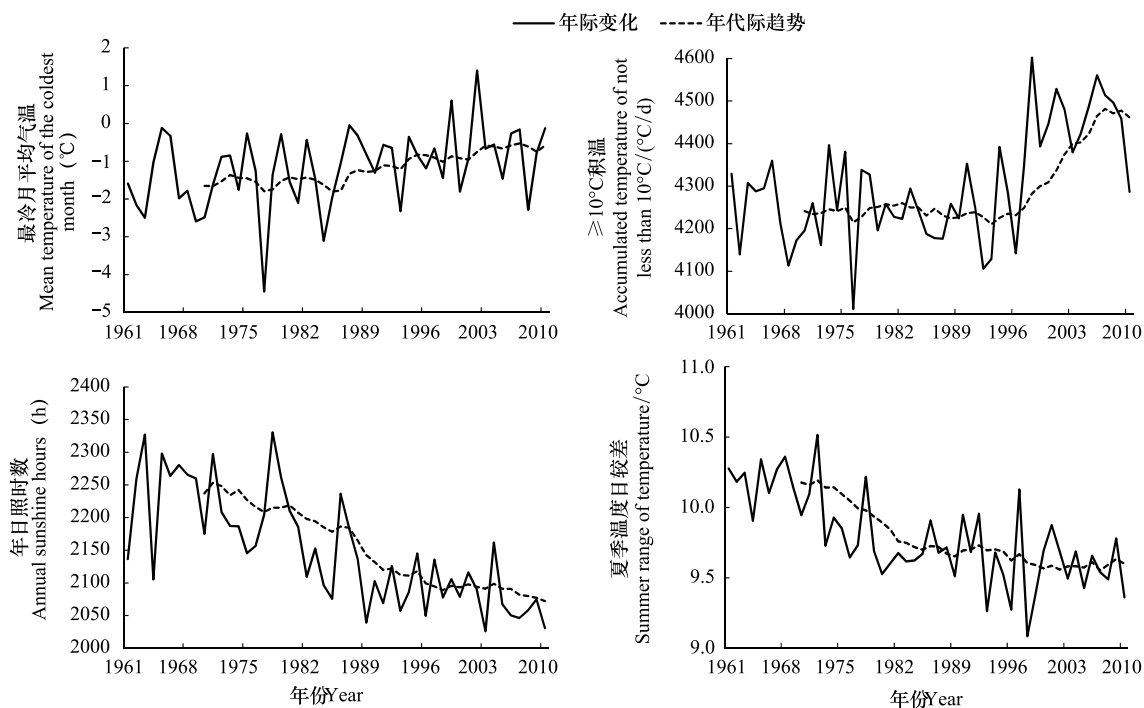


图4 中国区域主要气候因子的年代际变化

Fig.4 Decadal dynamics of dominant climate factors in China

从气候适宜度的空间变化来看,气候变化对富士苹果种植及适宜区分布有较好的正效应,特别是在东北南部和黄土高原西北部,而对高适宜区的影响则有较大的不确定性。同时,种植分布的变化一方面受到大气环境的制约,另一方面受到人类活动、政策因素及品种更新等的影响^[54]。本研究仅从气候变化背景下富士苹果的气候适宜性方面讨论其种植分布的变化,而气候变化对农业生产的影响较为复杂,极端天气气候事件对种植适宜的影响风险、气候适宜性与其它生产环境的协同效应在未来应做进一步的深入研究和讨论。

4 结论

(1)利用最大熵模型构建的富士苹果种植分布与气候因子的关系模型模拟的准确性达到“非常好”水平,

影响富士苹果种植气候适宜区分布的主导气候因子包括年日照时数、年降水量、夏季平均气温日较差、年平均气温、最冷月平均气温、 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温、夏季平均空气相对湿度和夏季平均气温,8 个主导因子对富士苹果种植分布模拟结果的累积贡献率达到了 99.9%,表明利用主导因子与地理分布所建的模型可以用于中国富士苹果种植的气候适宜分布模拟。

(2) 气候变化导致富士苹果种植分布的气候界限和适宜区明显北移,其中适宜区范围伴有西扩趋势。各适宜区分布的年代际变化特征明显,适宜以上面积显著增加,到 2010s 适宜面积较 1960s 增加约 26%。但高适宜区面积则呈现年代际波动,2010s 较 1970s—1980s 减少明显。富士苹果种植适宜度对气候变化响应最为敏感的地区主要在辽宁南部、豫东南、鲁南、苏北、黄土高原西北部和川陕接壤区。

(3) 影响富士苹果气候适宜区分布年代际变化的主要气候因子是光热资源的供应,而降水和夏季气候因子的区域性变化对高适宜区的分布有潜在影响。总体上,气候变化对富士苹果种植的适宜范围有正效应,但对高适宜种植区的影响有较大的不确定性。同时,日照时数的减少和夏季气温日较差的降低趋势是中国富士苹果品质提升过程应该关注的气象问题。

参考文献 (References):

- [1] 周广胜,王玉辉. 全球变化与气候-植被分类研究和展望. 科学通报, 1999, 44(24): 2587-2593.
- [2] IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Cambridge: Cambridge University Press. (2013-09-30). http://www.climatechange2013.org/images/uploads/WGIAR5_WGI-2Doc2b_FinalDraft_All.pdf.
- [3] 屠其璞,邓自旺,周晓兰. 中国近 117 年年平均气温变化的区域特征研究. 应用气象学报, 1999, 10(S1): 35-43.
- [4] 沙万英,邵雪梅,黄玫. 20 世纪 80 年代以来中国的气候变暖及其对自然区域界线的影响. 中国科学(D 辑), 2002, 32(4): 317-326.
- [5] 王绍武,朱锦红. 国外关于年代际气候变率的研究. 气象学报, 1999, 57(3): 376-384.
- [6] 江志红,李建平,屠其璞,张强. 20 世纪全球温度年代和年代际变化的区域特征. 大气科学, 2004, 28(4): 545-558.
- [7] 孙爽,杨晓光,赵锦,陈阜. 全球气候变暖对中国种植制度的可能影响 XI. 气候变化背景下中国冬小麦潜在光温适宜种植区变化特征. 中国农业科学, 2015, 48(10): 1926-1941.
- [8] 赵锦,杨晓光,刘志娟,吕硕,王静,陈阜. 全球气候变暖对中国种植制度的可能影响 X. 气候变化对东北三省春玉米气候适宜性的影响. 中国农业科学, 2014, 47(16): 3143-3156.
- [9] Sharma N C, Sharma S D, Verma S, Sharma C L. Impact of changing climate on apple production in Kotkhai area of Shimla district, Himachal Pradesh. International Journal of Farm Sciences, 2013, 3(1): 81-90.
- [10] Fujisawa M, Kobayashi K. Climate change adaptation practices of apple growers in Nagano, Japan. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 2011, 16(8): 865-877.
- [11] 程存刚,赵德英,宣景宏. 对我国苹果品种发展的几点建议. 北方果树, 2015, (3): 52-53.
- [12] 李星敏,柏秦凤,朱琳. 气候变化对陕西苹果生长适宜性影响. 应用气象学报, 2011, 22(2): 241-248.
- [13] 郭海英,赵建萍,索安宁,杨兴国,黄斌,葛剑平. 陇东黄土高原农业物候对全球气候变化的响应. 自然资源学报, 2006, 21(4): 608-614.
- [14] 刘敬强,瓦哈甫·哈力克,哈斯穆·阿比孜,党建华,邓宝山,张玉萍. 新疆特色林果业种植对气候变化的响应. 地理学报, 2013, 68(5): 708-720.
- [15] 白秀广,陈晓楠,郑少锋. 气候变化对苹果主产区单产及单产增长的贡献研究. 中国农业大学学报, 2015, 20(4): 82-91.
- [16] 周连童,黄荣辉. 关于我国夏季气候年代际变化特征及其可能成因的研究. 气候与环境研究, 2003, 8(3): 274-290.
- [17] 许仲林,彭焕华,彭守璋. 物种分布模型的发展及评价方法. 生态学报, 2015, 35(2): 557-567.
- [18] Phillips S J, Anderson R P, Schapire R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. Ecological Modelling, 2006, 190(3/4): 231-259.
- [19] Elith J, Phillips S J, Hastie T, Dudík M, Chee Y E, Yates C J. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. Diversity and Distributions, 2011, 17(1): 43-57.
- [20] Peterson A T, Papeş M, Eaton M. Transferability and model evaluation in ecological niche modeling: a comparison of GARP and MaxEnt. Ecography, 2007, 30(4): 550-560.
- [21] Duan J Q, Zhou G S. Dynamics of decadal changes in the distribution of double-cropping rice cultivation in China. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(16): 1955-1963.

- [22] He Q J, Zhou G S. The climatic suitability for maize cultivation in China. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(4): 395-403.
- [23] Sun J S, Zhou G S, Sui X H. Climatic suitability of the distribution of the winter wheat cultivation zone in China. *European Journal of Agronomy*, 2012, 43: 77-86.
- [24] 刘新安, 于贵瑞, 范辽生, 李正泉, 何洪林, 郭学兵, 任传友. 中国陆地生态信息空间化技术研究(Ⅲ)——温度、降水等气候要素. *自然资源学报*, 2004, 19(6): 818-825.
- [25] 范泽孟, 岳天祥, 陈传法, 孙晓芳. 中国气温与降水的时空变化趋势分析. *地球信息科学学报*, 2011, 13(4): 526-533.
- [26] IPCC. *Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment. Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Geneva: IPCC, 2007.
- [27] Woodward F I. *Climate and Plant Distribution*. London: Cambridge University Press, 1987.
- [28] 魏钦平, 程述汉, 唐芳, 李嘉瑞, 张德林. 红富士苹果品质与生态气象因子关系的研究. *应用生态学报*, 1999, 10(3): 289-292.
- [29] 陆秋农. 我国苹果的分布区划与生态因子. *中国农业科学*, 1980, 13(1): 46-51.
- [30] 李世奎, 朱佳满, 周远明, 祁国选. 我国苹果种植区划研究. *山西果树*, 1985, 22(4): 2-6.
- [31] 王宇霖. 论我国苹果生产的发展. *果树科学*, 1986, 3(4): 1-2.
- [32] 魏钦平, 张继祥, 毛志泉, 李嘉瑞. 苹果优质生产的最适气象因子和气候区划. *应用生态学报*, 2003, 14(5): 713-716.
- [33] 李保国, 郭素平, 齐国辉, 杨彬云, 谷永利, 崔惠英. 红富士苹果生态适宜栽培区评价方法研究. *西北林学院学报*, 2006, 21(5): 78-80.
- [34] 朱琳, 郭兆夏, 李怀川, 张林森. 陕西省富士系苹果品质形成气候条件分析及区划. *中国农业气象*, 2001, 22(4): 50-53.
- [35] 刘健国, 唐意辉, 张佩昌, 穆信芳. 山东黄淮海平原苹果品质气候区划. *西北林学院学报*, 1992, 7(4): 43-49.
- [36] 李倩, 王莹, 林毅, 李晶, 李辑, 张晓月, 李雨鸿. 基于 GIS 辽宁省‘红富士’苹果农业气候区划. *中国农学通报*, 2013, 29(28): 173-178.
- [37] 赵瑞雪. 山东省苹果优势产区的发展研究. *落叶果树*, 2007, (3): 15-18.
- [38] 陈凯, 胡国谦, 周维灼, 李玉泉, 朱友泉, 许成跃. 我国优质苹果分布区域与适宜生态指标的研究. *农业现代化研究*, 1992, 13(6): 343-345.
- [39] 王菱. 黄土高原地区苹果品质气候区划. *中国农业气象*, 1993, 14(6): 5-8.
- [40] 朱立武, 李绍稳, 冯庆水, 乔克智, 王静. 安徽苹果生态区划的模糊聚类分析. *生物数学学报*, 1998, 13(1): 111-117.
- [41] 曹兵, 宋丽华. 相似优先比在宁夏红富士苹果气候区划中的应用. *宁夏农学院学报*, 1994, 15(4): 59-62.
- [42] 张义, 谢永生, 郝明德. 黄土沟壑区王东沟流域苹果品质限制性生态因子探析. *中国农业科学*, 2011, 44(6): 1184-1190.
- [43] 马跃, 李小宁. 红富士苹果品质与气候生态因素的相关分析研究. *烟台果树*, 1992, (3): 12-14.
- [44] 郭碧云. 陕西生态因子与苹果品质相关性研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2006.
- [45] 张国海, 张妙霞, 孔祥生, 张益民. 豫西地区红富士苹果生态适应性研究. *河南农业大学学报*, 1998, 32(1): 76-81.
- [46] 张光伦. 苹果生态适宜条件与四川阿坝州苹果生态适宜性研究. *果树科学*, 1987, 4(3): 10-16.
- [47] 朱佳满, 李世奎, 周明远. *中国农林作物气候区划*. 北京: 气象出版社, 1987, 173-184.
- [48] 魏钦平, 李嘉瑞, 束怀瑞. 苹果品质与生态因子关系的研究. *山东农业大学学报: 自然科学版*, 1998, 29(4): 532-536.
- [49] 任国玉, 郭军, 徐铭志, 初子莹, 张莉, 邹旭凯, 李庆祥, 刘小宁. 近 50 年中国地面气候变化基本特征. *气象学报*, 2005, 63(6): 942-956.
- [50] 王遵娅, 丁一汇, 何金海, 虞俊. 近 50 年来中国气候变化特征的再分析. *气象学报*, 2004, 62(2): 228-236.
- [51] 王英, 曹明奎, 陶波, 李克让. 全球气候变化背景下中国降水量空间格局的变化特征. *地理研究*, 2006, 25(6): 1031-1040.
- [52] 李嘉瑞, 邹养军, 任小林. 刍议中国苹果产业现代化. *果树学报*, 2008, 25(3): 378-381.
- [53] 周远明, 李世奎. 我国大苹果经济栽培北界的探讨. *中国果树*, 1985, (1): 6-10.
- [54] 谢立勇, 李悦, 徐玉秀, 赵迅, 宋艳玲, 姜彤, 林而达. 气候变化对农业生产与粮食安全影响的新认知. *气候变化研究进展*, 2014, 10(4): 235-239.