果 树 学 报 2026,43(8):2100-2111
Journal of Fruit Science

DOI:10.13925/j.cnki.gsxb.20260150

# 气候变化对中国柑橘产业生产空间演变的影响

王志伟[1,2],周佳琪[3],胡 田[1,2],董煌林[1,2],唐思琪[1,2],曾群华[1,2]

([1]湖南省农业装备研究所,长沙 410125;[2]岳麓山实验室,长沙 410128;[3]华中农业大学经济管理学院,武汉 430070)

**摘 要:【目的】**探究2002—2022年中国柑橘生产空间格局演变特征及气候因子驱动机制,为产业布局优化与气候适宜性策略制定提供科学依据。**【方法】**基于中国19个柑橘生产省(区、市)的气象数据和柑橘生产数据,采用空间自相关分析(Moran's I)和双向固定效应模型等方法开展研究。**【结果】**中国柑橘生产空间分布从2002—2004年的随机离散状态,逐步演进为2005—2015年的集聚形成强化状态,最终进入2016—2022年的高位稳定状态,Moran's I峰值达0.082 6且显著正相关;生产重心呈现显著"南移西扩"趋势,赣南-湘南-桂北柑橘带与长江上中游柑橘带成为核心产区,2022年产量占比高达61.5%;年均温度适宜区向西南拓展,降水年型对产量的影响存在显著区域异质性,平水年总体生产表现最优,赣南-湘南-桂北柑橘带丰水年易面临涝渍风险,鄂西-湘西柑橘带枯水年抗逆性较强;技术进步与抗逆品种的推广显著提升了产业气候适应性,在一定程度上抵消了极端降水的负面影响。**【结论】**研究揭示了气候变化与产业集聚共同驱动的柑橘生产空间演变规律,为分区域制定差异化种植策略与风险防控措施提供了关键支撑。

**关键词:**柑橘;全局莫兰指数;空间集聚演变;气候因子

**中图分类号:**S666 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-9980(2026)08-2100-12

# The impact of climate change on the spatial evolution of citrus industry production in China

Wang Zhiwei[1,2], Zhou Jiaqi[3], Hu Tian[1,2], Dong Huanglin[1,2], Tang Siqi[1,2], Zeng Qunhua[1,2]

*([1]Agricultural Equipment Institute of Hunan, Changsha 410125, Hunan, China;[2]Yuelushan Laboratory, Changsha 410128, Hunan, China;[3]College of Economics and Management, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, Hubei, China)*

**Abstract:**【Objective】As the largest producer and consumer of citrus in the world, China's citrus industry has undergone significant shifts in its spatial patterns in recent years under the influence of climate change, primarily reflected in the relocation and concentration of production areas. Investigating the key climatic factors driving the spatial evolution of citrus production is of great significance for optimizing industrial layout and ensuring sustainable development. This study aims to systematically analyze the spatial evolution of China's citrus industry from 2002 to 2022, identify the main climatic drivers of its spatial changes, and provide a scientific basis for policy formulation and industrial planning. 【Methods】This study takes 19 major citrus-producing provinces (regions) in China as the research subjects and utilizes panel data from 2002 to 2022. By integrating spatial econometric models and statistical analysis methods, it systematically explores the spatial agglomeration patterns of citrus production and its influencing factors. Specific methods include: first, using the global Moran's I to evaluate the spatial clustering characteristics of citrus production and revealing the positive correlation and temporal trends in its spatial distribution. The spatial correlation of citrus production in China is analyzed through the global Moran's I, while local Moran's I (LISA) is applied to identify high-high clusters and low-low clusters, further revealing spatial heterogeneity among regions. Second, a two-way fixed

**收稿日期:**2026-03-11 **接受日期:**2026-04-30

**基金项目:**长沙市社科联哲学社会科学规划课题研究成果(2025CSSKKT07);岳麓山实验室联合人才引进项目(2024RC2096);2026年度湖南省哲学社会科学成果评审委员会重点课题(XSP26ZDI023)

**作者简介:**王志伟,男,副研究员,博士,主要从事农机农艺融合研究工作。E-mail:wangzhiwei119@163.com

effects model is constructed to quantify the effects of climatic factors (annual average temperature, precipitation, frost days, hail days, average maximum temperature, and relative humidity) on the spatial distribution of citrus production. Through model fitting, the contribution of each factor to the spatial evolution of citrus production is determined, and regional differences are analyzed. Key climatic variables focus on annual average temperature and precipitation, exploring their impact on the spatial distribution of citrus yield. By classifying precipitation years into wet, normal, and dry years, the relationship between citrus production spatial distribution and precipitation is clarified. Based on these results, ArcMap 10.8.1 and Origin 2024 software are used to visualize the spatial distribution characteristics of different main producing areas and examine regional differences in climatic conditions, providing a basis for formulating regionally differentiated policies.【Results】(1) The spatial distribution of citrus production in China exhibited a three-stage evolutionary characteristic: "random dispersion - strengthened agglomeration - high stability." From 2002 to 2004, the distribution was random (Moran's I fluctuated between −0.009 5 and 0.012 3, $P>0.1$). From 2005 to 2015, the agglomeration effect continuously strengthened (Moran's I peaked at 0.0826, with $P < 0.05$ after 2007). From 2016 to 2022, it entered a highly stable state (Moran's I fluctuated between 0.055 and 0.079, showing a significant positive correlation). (2) The distribution of citrus-producing areas showed a clear trend of "shifting to southward and expanding to westward." Throughout the study period, high-high clusters remained anchored in the South China region at the junction of Guangdong, Guangxi, Hunan, and Jiangxi, while low-low clusters were consistently distributed in high-altitude areas of the north, northwest, and southwest. The Gannan-Xiangnan-Northern Guangxi citrus belt and the citrus belt in the middle and upper reaches of the Yangtze River have become the core production areas, accounting for 61.5% of total production in 2022. (3) The influence of climatic factors on changes in citrus production areas exhibited regional heterogeneity. The annual average temperature (Te) coefficient was 0.929, showing a significantly positive effect at the 10% level. In contrast, the average maximum temperature (Tmax) coefficient was −0.724, indicating a negative trend. Precipitation (Ra) had a coefficient of 0.310, which was significantly positive at the 5% level. The coefficient for hail days (Ha) was −0.193, reflecting a significant negative impact on citrus production layout. The coefficients for relative humidity (Hm) and frost days (Fr) were −0.141 and 0.063, respectively, and were not statistically significant. Regionally, the citrus belt in the upper and middle reaches of the Yangtze River was influenced by annual average temperature, average maximum temperature, relative humidity, and frost days ($P < 0.05$). The southern Jiangxi-southern Hunan-northern Guangxi citrus belt was primarily affected by annual average temperature, relative humidity, hail days, and frost days. The western Hubei-western Hunan citrus belt showed a significant response to hail days ($P < 0.1$). The characteristic citrus production zone was affected by the average maximum temperature and the number of frost days ($P < 0.1$), which was close to the significant level. (4) The effects of different precipitation years on yield varied significantly across regions. Overall, production performed best in normal precipitation years. The Gannan-Xiangnan-Northern Guangxi citrus belt was prone to waterlogging risks in wet years, while the Western Hubei-Western Hunan citrus belt exhibited strong drought resistance in dry years.【Conclusion】This study systematically reveals the spatial evolution of citrus production in China and its climatic influencing factors under climate change. Based on the findings, the following recommendations are proposed: In the Gannan-Xiangnan-Northern Guangxi citrus belt, we should focus on waterlogging prevention and optimizing drainage systems; in specialized citrus production zones, water conservancy infrastructure should be strengthened and rainwater-harvesting agriculture should be developed; in the citrus belt in the middle and upper reaches of the Yangtze River,

the water-saving irrigation needs to be improved; in the Western Hubei-Western Hunan citrus belt, the dry farming techniques can be promoted; in the Zhejiang-Fujian-Guangdong citrus belt, its current model should be maintained while emphasizing quality improvement.

**Key words:** Citrus; Moran's Index; Spatial agglomeration evolution; Climatic factors

中国是全球柑橘生产大国，柑橘产业在农业经济、农民增收和乡村振兴中扮演着重要角色。过去60年来，我国柑橘育种工作取得显著进展。品种结构不断优化，生产规模持续扩大，形成了以宽皮橘、橙类、柚类为主的多样化栽培体系[1]。与此同时，柑橘生产布局不断演变，从早期高度集中于中西部地区，逐步向东南沿海省份扩张，近年又呈现“西移内扩”的趋势，初步形成了赣南-湘南-桂北柑橘带、特色柑橘生产带、浙-闽-粤柑橘带、长江上中游柑橘带和鄂西-湘西柑橘带5条优势带[1]。在这一过程中，品种改良、技术进步、政策引导与市场需求共同推动了柑橘产业的转型升级。

农业产业空间演化实质上是指农业土地利用的变化，即农作物种植结构、种植品种、生产分布等信息在地区范围内的空间表达，受到自然资源环境的强烈制约，且气候又是影响农作物空间的主要自然因素之一。近年来，农业产业的区域格局变化和产业聚集特征引起广泛关注。李晓鹏等[2]通过分析气候对苹果生产空间的影响，表明降水量与各产区产量密切相关，霜冻和高温灾害是未来面临的主要气候风险，产业布局正向气候适宜区集聚。李晓鹏等[3]的研究还发现，成熟期降雨量是驱动中国枣产区迁移的主要因素之一。黄伟华等[4]研究表明，我国柑橘生产重心呈现向西南方向移动的趋势，且具有往复式变化的特征。生产布局的变迁受到温度、受灾面积等多方面因素的影响。蒋怡等[5]研究表明，自1978年以来柑橘生产经历了快速扩张期、波动发展期和稳定增长期3个阶段，生产空间格局由高度聚集且独立分布于中西部省份向东南沿海省份扩张，再逐渐西移内扩。林正雨等[6-8]分别研究了四川柑橘生产空间的演化特征以及中国柑橘生产空间变迁及驱动因素，结果表明中国柑橘生产空间主要集中在西南地区、中南地区、华东地区，具有“北冷南热”的空间结构。柑橘生产空间在省域尺度上具有显著的正向空间自相关特征，呈现显著的地理集聚现象，且集聚呈现先急剧下降后波动上升的变化趋势。胡友等[9]和蒲成伟等[10]分别从农户决策和成本效益视角等研究表明柑橘产业的优势和资源逐步向中部和西南地区转移。

柑橘生长需要适宜的气候条件。在温度方面，果实膨大期和转色期对高温尤为敏感，持续高温可抑制光合作用、阻碍叶绿素合成、导致果实品质下降，甚至引发落花落果[11]；而温度过低则易引起霜冻、低温等灾害。在降水方面。降水量过大易造成土壤积水或地下水位过高，导致果园排水不良，柑橘根系死亡；降水量过少则需要大量灌溉补水，增加生产成本，不利于空间扩张[8]。在全球气候变化及极端天气事件频发的背景下，系统探究气候变化与柑橘生产空间演变之间的关联，识别高风险区域并评估未来气候情景下的产业适应性，对柑橘产业的布局具有重要的理论与现实意义。不同于苹果等温带果树北移趋势，柑橘作为亚热带常绿果树，对水热条件的敏感性决定了空间演变具有独特的南移西扩特征及降水阈值效应。然而，现有研究对此尚缺乏系统的定量归因分析。本研究利用2002—2022年中国19个柑橘生产省（区、市）的面板数据，结合产业集聚理论和空间计量方法，通过分析产业集中度、空间自相关（莫兰指数）以及构建固定效应模型等方法，旨在揭示气候变化背景下我国柑橘生产空间格局的演变特征、集聚规律及其关键驱动因素，特别是评估温度、降水等气候因子对生产布局变迁的影响强度，以期为我国柑橘产业的布局优化、气候适应性战略制定、灾害风险防控与产业链可持续发展提供科学依据和决策支持。

## 1 材料和方法

### 1.1 数据来源

本研究基于2002—2022年我国19个柑橘生产省（区、市）的面板数据进行分析。气象数据（包括年降水量、温度、霜日数、冰雹日数、平均最高气温和相对湿度）来源于国家气象科学数据中心（http://data.cma.cn），数据为省级年度均值，个别年份缺失的气象数据采用均值替代法进行补全；农业生产数据（包括柑橘单产、果园面积、总产量等）取自2003—2023年

《中国农村统计年鉴》，生产数据为2002—2022年。

### 1.2　研究区概况

以中国五大柑橘优势产区为研究对象，包括长江上中游柑橘带（湖北秭归以西、四川宜宾以东，以重庆三峡库区为核心的长江上中游沿江区域）、赣南-湘南-桂北柑橘带（主要包括江西赣州，湖南郴州、永州、邵阳和广西桂林、贺州等地）、浙-闽-粤柑橘带（浙江、福建、广东）、鄂西-湘西柑橘带（湖北西部和湖南西部）以及特色柑橘生产基地（南丰蜜橘基地、岭南晚熟宽皮橘基地、云南特早熟柑橘基地、丹江库区北缘柑橘基地和柠檬基地）的19个柑橘生产省（自治区、直辖市）。分别选取以四川宜宾为代表的长江上中游柑橘带、以广西桂林为代表的赣南-湘南-桂北柑橘带、以广东为代表的浙-闽-粤柑橘带、以湖北宜昌为代表的鄂西-湘西柑橘带、以云南特早熟柑橘基地为代表的特色柑橘生产基地。

### 1.3　研究方法

1.3.1　空间自相关分析　空间自相关分析是揭示地理要素空间分布格局与关联特征的重要方法。本研究采用Moran's I揭示中国柑橘生产的空间分布格局与关联特征。空间权重矩阵W采用基于Queen邻接关系的一阶Rook邻接矩阵，若两省份共享边界则赋值为1，否则为0。Moran's I（I）计算公式[12]如下

$$I=\frac{n\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}w_{ij}(x_i-\bar{x})\quad(x_j-\bar{x})}{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}w_{ij}\sum_{i-1}^{n}(x_i-\bar{x})}。\qquad(1)$$

式中，$n$为中国柑橘生产省（区、市）的数量（$n$=19），$x_i$和$x_j$为第$i$和$j$个地区的柑橘产量；$\bar{x}$为所有省（区、市）柑橘产量的平均值；$w_{ij}$为空间权重值。

1.3.2　产量空间演变的气候因素分析　为探究气候因素对柑橘产区变迁的影响，本研究基于2002—2022年19个柑橘生产省（区、市）的面板数据进行实证分析。通过$F$检验和Hausman检验，确定双向固定效应模型为最优估计方法。该模型同时控制了个体固定效应和时间固定效应，能够消除不随时间变化的不可观测因素以及时间层面共同冲击对估计结果的影响，在一定程度上缓解内生性问题。此外，为控制组内自相关和异方差可能带来的估计偏误，本研究在模型中采用省份层面的聚类稳健标准误。具体计量模型设定如下：

$$Pr_{it}=x+x_1+Ra_{it}+x_2Te_{it}+x_3Fr_{it}+x_4Ha_{it}+x_5Mt_{it}+x_6Hm_{it}+u_i+\lambda_t+e_{it}。\qquad(2)$$

式中，$Pr_{it}$为被解释变量，表示柑橘生产布局变化；$Ra_{it}$、$Te_{it}$、$Fr_{it}$、$Ha_{it}$、$Mt_{it}$、$Hm_{it}$为解释变量，表示影响柑橘生产的气候因素；$x$为常数项；$x_1$~$x_6$均为模型的待估参数；$i$代表柑橘生产省（区、市），取值范围为1~19；$t$代表时间，取值范围为2002—2022年；$u_i$为个体固定效应；$\lambda_t$为时间固定效应；$e_{it}$为随机扰动项；各变量说明详见表1。

## 2　结果与分析

### 2.1　中国柑橘生产空间集聚演变分析

2.1.1　柑橘生产时空演变　2002—2022年，中国柑橘产业发展历程具有显著的阶段性特征（图1）。全国柑橘总产量从2002年的1 199.01万t增长到2022年的6 003.89万t，增长超过5倍，年均增长率较高。增长过程可划分为两个阶段：快速增长期（2002—2015）：产量持续攀升，尤其在2008年后增速明显加快；波动增长期（2016—2022）：增速放缓，但总体仍

**表1　变量设置和指标定义**

**Table 1　Variable settings and indicator definitions**

| 变量 Variables | 指标 Indicator | 代码 Code | 定义 Definition |
|---|---|---|---|
| 被解释变量 Dependent variable | 柑橘生产布局变化 citrus production layout changes | Pr | 各省（区、市）柑橘产量占全国产量的比值 The proportion of citrus yield between provinces and national production |
| 解释变量 Explanatory variable | 降水量 Rainfall | Ra | 年降水量 Annual precipitation |
| | 年均温度 Annual mean temperature | Te | 全年平均温度 Annual mean temperature |
| | 霜日数 Frost days | Fr | 全年平均霜日数 Average number of frost days per year |
| | 冰雹日数 Hail days | Ha | 全年平均冰雹日数 Average annual number of hail days |
| | 平均最高气温 Mean maximum temperature | Mt | 全年平均最高气温 The average maximum temperature throughout the year |
| | 相对湿度 Relative humidity | Hm | 全年平均相对湿度 The average relative humidity throughout the year |

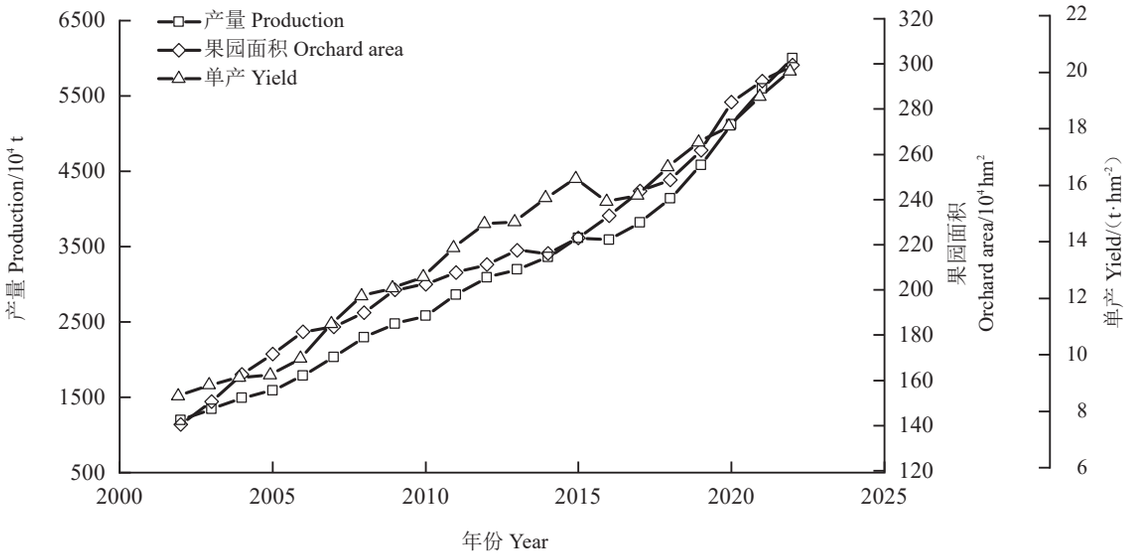
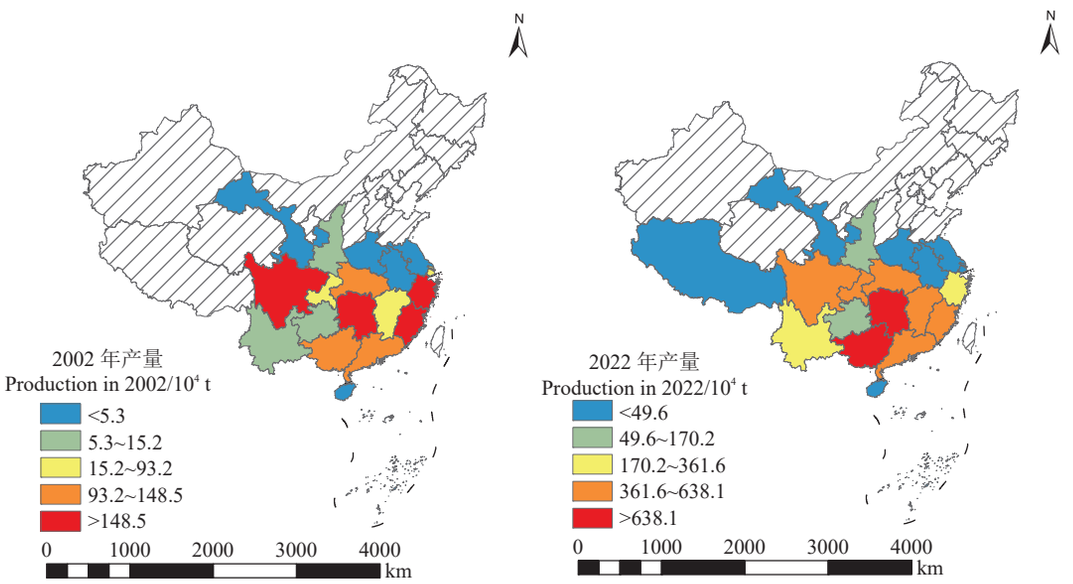



**图 1　2002—2022 年中国柑橘产量、单产和面积变化**

**Fig. 1　Changes of citrus yield per unit area and orchard area in China from 2002 to 2022**

保持上升趋势。平均单产水平显著提升，从2002年的8.54 t·hm$^{-2}$提升至2022年的20.04 t·hm$^{-2}$，年均增长率为4.35%。2014年以后，单产突破15.00 t·hm$^{-2}$，表明生产效率显著提高，可能与品种改良、种植技术水平的提升相关。

2002—2022年，中国柑橘生产呈现明显的空间聚集强化特征（图2）。2002年，产量超过100万t的省份为福建、四川、浙江、湖南、广西和广东，合计占全国总产量的77.81%。其中，福建产量（193.2万t）位居全国第一。2022年柑橘产业聚集特征显著，产量超过400万t的省份为广西、湖南、四川、广东、湖北、江西和福建，合计占全国总产量的83.59%，其中广西产量从2002年137.3万t跃升至2022年1808万t，增长超过13倍，产量接近全国总产量的1/3，成为全国第一大柑橘产区。湖南、湖北、江西、广东、四川等传统主产区，产量稳步增长，但增速低于广西。云南




审图号：GS（2024）0650 号，自然资源部监制。下同。

Approval number: GS (2024) No.0650, supervised by the Ministry of Natural Resources. The same below.

**图 2　2002—2022 年中国柑橘产量空间分布**

**Fig. 2　Spatial distribution of citrus yield in China from 2002 to 2022**

和贵州柑橘产业起步较晚，但近年来增长迅速。其中，云南产量从2002年11.8万t增至2022年247.7万t，增长超过20倍。柑橘种植面积和产量区域集中度变化显著。华东地区（浙江、福建）早期占比较高，但增速放缓，占比下降；华南地区（广西、广东）占比大幅上升，尤其是广西已成为全国柑橘生产的绝对核心；华中地区（湖南、湖北、江西）保持稳定增长，是全国柑橘生产的重要支撑；西南地区（四川、重庆、云南、贵州）后发优势明显，成为新的增长极。综上所述，柑橘产区重心南移，传统产区如福建、浙江占比下降，而广西、云南、贵州等西南省份快速崛起。

2.1.2　*柑橘生产布局的空间集聚演变*　基于2002—2022年中国省域柑橘生产数据，本研究采用ArcMap 10.8.1测算全局莫兰指数，以反映柑橘产业整体空间关联与集聚—离散趋势。该指数介于−1~1之间，当指数大于0时表示空间正相关（相似值集聚）；小于0时表示空间负相关（相异值集聚）；接近0时则表明空间随机分布。全局莫兰指数（Moran's I）及其显著性检验结果表明，研究期内中国柑橘产业的空间分布模式发生了显著变化，总体呈现“从随机分布转向显著集聚，并趋于高位稳定”的演化轨迹（表2）。具体表现为：

空间随机分布阶段（2002—2004年），此阶段Moran's I在零附近微弱波动（−0.009 5~0.012 3），且所有年份的*P*值均大于0.1，未通过10%显著性水平的检验。这表明在世纪之交，中国柑橘生产在省域尺度上尚未形成显著的空间关联性，空间分布呈现随机、离散特征，各省域间的生产布局相对独立。空间集聚形成与强化阶段（2005—2015年），自2005年起，Moran's I由0.035 0持续升高，并于2015年达到研究期内的峰值0.082 6。自2007年起，该指数对应的*P*值均小于0.05（2008年除外），Z得分稳定大于1.96临界值，表明该阶段的空间正自相关关系在95%的置信水平上统计显著。这一趋势揭示了中国柑橘产业空间格局的根本性转变：产业要素（如技术、资本、政策支持）向自然条件优越、产业基础良好的区域加速集中，形成了高-高（H-H）类型区与低-低（L-L）类型区并存的空间极化格局，即高产省份在空间上相邻集聚，低产省份同样相互邻近，产业的空间集聚效应显著增强并逐步固化。空间格局高位趋稳阶段（2016—2022），2015年后，Moran's I从峰值小幅回落，此后在0.055 0~0.079 0较高水平区间内窄幅波动。尽管指数值较峰值期略有下降，但各年份*P*值仍小于0.05，显著性并未改变，表明中国柑橘产业显著的空间集聚格局已经确立并趋于稳定。该阶段集聚程度的小幅调整，可能反映了产业内部的结构性优化（如品种更新、品质提升）、市场竞争加剧以及部分产区规模扩张趋缓等多重因素的动态平衡。

**表2　2002—2022年柑橘生产全局空间自相关分析（Moran’s I）**

**Table 2　Global spatial autocorrelation analysis of citrus industry from 2002 to 2022 (Moran’s Index)**

| 年份 Year | Moran’s I指数 Moran index | 方差 Variance | Z得分 Z-score | *P*值 *P*-value |
|---|---|---|---|---|
| 2002 | −0.009 5 | 0.003 5 | 0.830 1 | 0.406 5 |
| 2003 | −0.008 9 | 0.003 5 | 0.838 6 | 0.401 7 |
| 2004 | 0.012 3 | 0.003 5 | 1.196 1 | 0.231 7 |
| 2005 | 0.035 0 | 0.003 6 | 1.574 6 | 0.115 4 |
| 2006 | 0.048 2 | 0.003 6 | 1.792 8 | 0.073 0 |
| 2007 | 0.059 6 | 0.003 6 | 1.981 8 | 0.047 5 |
| 2008 | 0.057 6 | 0.003 6 | 1.945 3 | 0.051 7 |
| 2009 | 0.073 6 | 0.003 6 | 2.217 2 | 0.026 6 |
| 2010 | 0.026 6 | 0.003 6 | 2.147 2 | 0.031 8 |
| 2011 | 0.078 7 | 0.003 6 | 2.305 4 | 0.021 1 |
| 2012 | 0.071 4 | 0.003 5 | 2.188 0 | 0.028 7 |
| 2013 | 0.080 4 | 0.003 6 | 2.333 5 | 0.019 6 |
| 2014 | 0.075 1 | 0.003 6 | 2.245 8 | 0.024 7 |
| 2015 | 0.082 6 | 0.003 6 | 2.372 5 | 0.017 7 |
| 2016 | 0.078 5 | 0.003 5 | 2.308 5 | 0.021 0 |
| 2017 | 0.069 5 | 0.003 5 | 2.174 3 | 0.029 7 |
| 2018 | 0.071 8 | 0.003 4 | 2.241 8 | 0.025 0 |
| 2019 | 0.061 8 | 0.003 2 | 2.142 1 | 0.032 2 |
| 2020 | 0.056 1 | 0.003 0 | 2.090 8 | 0.036 5 |
| 2021 | 0.056 4 | 0.002 9 | 2.140 7 | 0.032 3 |
| 2022 | 0.055 1 | 0.002 8 | 2.151 7 | 0.031 4 |

2002—2022年中国柑橘产地的空间聚类特征与演变规律，直观反映了自然禀赋约束与产业发展驱动下的柑橘产业布局逻辑。从聚类分布来看，高-高聚类区（H-H）核心始终锚定粤桂湘赣交界的华南-华中南片区。这一区域兼具亚热带季风气候的热量与降水优势，以及数10年柑橘种植的产业基础，成为我国柑橘产业的核心集聚区；而低-低聚类区（L-L）长期稳定分布于北方、西北及西南高海拔非适宜种植区，印证了气候条件对柑橘产地分布的刚性约束，20年未出现显著空间位移。从时间演变维度，高值聚类呈现“点状集中→带状延伸→连片扩张”的特征。2002年核心区仅以粤桂湘交界点状分

布，2007—2012年向江西赣南、福建闽西带状延伸，2017—2022年进一步拓展至贵州黔南、云南文山等西南片区，形成跨省级的连片集聚区域。这一扩张趋势既源于核心产区柑橘种植的规模化、集约化发展，也体现了产业梯度转移下西南适宜区的种植潜力释放。此外，20年间全域未出现高-低（H-L）、低-高型（L-H）空间异常值，表明柑橘产地分布未形成孤岛式种植区，产业空间布局具有高度的连续性与均质化特征；不显著区域占比随核心聚类扩张持续下降，也反映出柑橘产业的集聚效应与区域专业化程度在不断提升（图3）。

### 2.2 气候变化对中国柑橘生产空间演变的影响分析

通过Stata 19软件的双向固定效应模型分析2002—2022年气候变化对中国柑橘生产空间演变的影响。通过*F*检验和Hausman检验，最终确定双向固定效应模型为最优估计方法。回归结果（表3）表明，气候变化对中国柑橘生产布局具有显著影响，且表现出明显的区域异质性。全国层面的回归结果显示：年均温度（Te）系数为0.929，在10%水平上正向显著，主要促进柑橘的花芽分化与果实膨大；平均最高

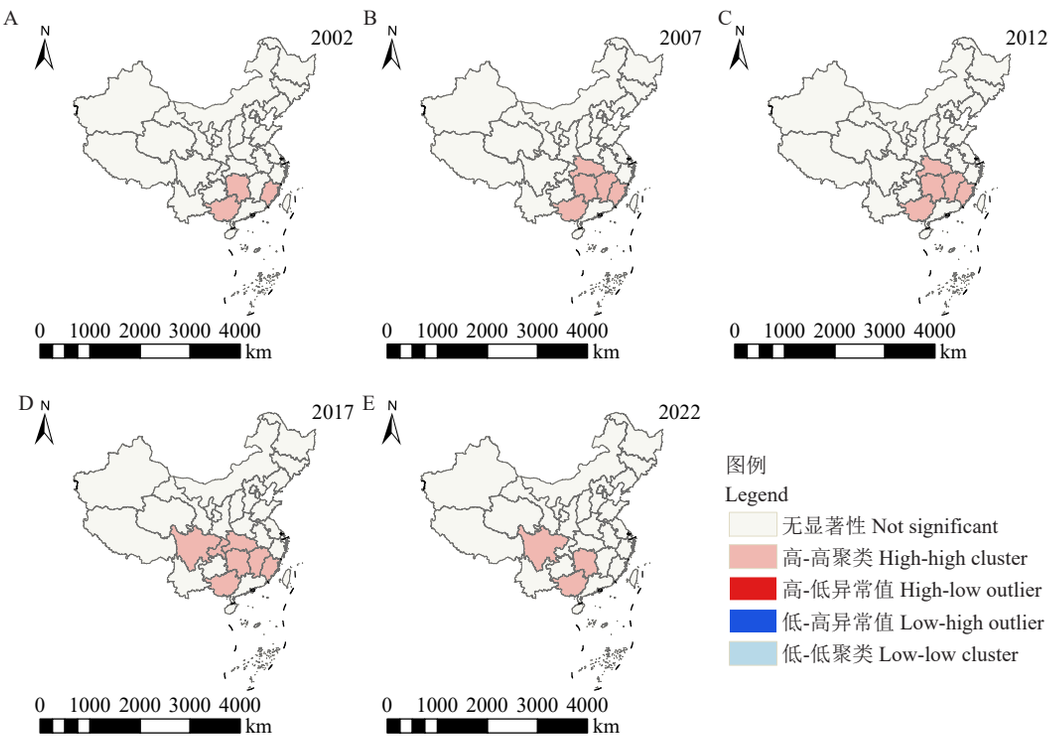



**图3 2002—2022年中国柑橘产地聚类和异常值分析**

**Fig. 3 Clustering and outlier analysis of citrus cultivation areas in China from 2002 to 2022**

**表3 气候因素变化对中国柑橘生产空间演变的影响**

**Table 3 The impact of climate change factors on the spatial evolution of citrus industry in China**

| 气候因子 Climatic factors | 全国 Nationwide | | 长江上中游柑橘带 Citrus belt in the upper and middle reaches of the Yangtze River | | 赣南-湘南-桂北柑橘带 Gannan-Xiangnan-Northern Guangxi citrus belt | | 浙-闽-粤柑橘带 Zhejiang-Fujian-Guangdong citrus belt | | 鄂西-湘西柑橘带 Western Hubei-Western Hunan Citrus Belt | | 特色柑橘生产带 Characteristic citrus production | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Coef. | P | Coef. | P | Coef. | P | Coef. | P | Coef. | P | Coef. | P |
| Te | 0.929 | 0.094 | 2.326 | 0.004 | 4.618 | 0.003 | −0.871 | 0.218 | −0.804 | 0.311 | −0.214 | 0.396 |
| Tmax | −0.724 | 0.113 | −1.602 | 0.006 | −1.326 | 0.181 | 0.388 | 0.461 | 0.056 | 0.906 | 0.318 | 0.057 |
| Hm | −0.141 | 0.251 | 0.246 | 0.003 | −0.743 | 0.059 | 0.013 | 0.819 | −0.185 | 0.293 | 0.004 | 0.967 |
| Ra | 0.310 | 0.022 | −0.022 | 0.808 | 0.355 | 0.222 | 0.132 | 0.127 | 0.004 | 0.973 | 0.065 | 0.481 |
| Ha | −0.193 | 0.027 | −0.048 | 0.013 | 0.964 | 0.055 | −0.019 | 0.644 | −0.113 | 0.082 | −0.005 | 0.932 |
| Fr | 0.063 | 0.605 | 1.941 | 0.066 | −1.174 | 0.064 | 0.745 | 0.446 | 0.037 | 0.750 | 0.090 | 0.082 |

温度（Tmax）系数为−0.724，呈负向趋势，表明高温可能对柑橘生产构成胁迫；降水量（Ra）系数为0.310，在5%水平上正向显著，表明适宜降水量利于柑橘生长与布局；冰雹日数（Ha）系数为−0.193，对柑橘生产布局具有显著负向影响，表明冰雹灾害是制约柑橘产区布局的重要气候因子；相对湿度（Hm）系数为−0.141，霜日数（Fr）系数为0.063，二者影响均不显著。

从各柑橘产区回归结果来看：长江上中游柑橘带受年均温度、平均最高温度、相对湿度、冰雹日数和霜日数的共同影响（$P<0.1$）；赣南-湘南-桂北柑橘带主要由年均温度、相对湿度、冰雹日数、霜日数主导变化；鄂西-湘西柑橘带受冰雹日数影响显著（$P<0.1$）；特色柑橘生产带受平均最高温度和霜日数影响显著（$P<0.1$），表明该区域对温度和霜冻较为敏感。综上所述，温度因子（尤其是年均温度和最高温度）是影响柑橘生产布局变化的关键气候因子，且不同产区对气候变化的响应存在明显差异。

2.2.1　基于年均温度变化的柑橘产区迁移特征分析　柑橘作为亚热带常绿果树，不同生育期对温度要求不同，温度异常会影响其生长、产量与品质。萌芽期、春梢生长期适宜温度为15~20 ℃，12 ℃以上芽萌动；低温延迟萌芽，春梢生长差；高温则导致春梢徒长，消耗养分。现蕾开花期适宜温度为17~20 ℃，低于13 ℃延迟开花，授粉受精不良，坐果率降低；大于30 ℃或异常高温则加剧花和幼果脱落。幼果发育与生理落果期是对温度最敏感的时期之一，适宜温度为20~25 ℃。果实膨大与夏梢、秋梢生长期是产量形成的关键期。果实快速膨大的最适温度为25~30 ℃，白天温度20~25 ℃，夜间温度10~15 ℃，形成较大的昼夜温差。花芽分化期需要10~15 ℃的低温诱导。冬季休眠期可耐短时低温，但持续低于−3 ℃易受冻害。

中国柑橘栽培的最适年均温度阈值为16~23 ℃。由图4可知，2022年的整体温度较2002年显著升高。2002年处于16.7~18.7 ℃区间的区域，2022年普遍升至18.0~19.2 ℃区间，部分区域甚至更高。2002年，温度适宜区主要分布在华东、华中和华南（江苏、安徽、河南、湖南、浙江、福建），2022年温度适宜区的范围发生明显变化，华中的湖北、西部的四川等地进入温度适宜区。温度变化对柑橘种植影响较大，特早熟温州蜜柑、杂柑等品种呈现明显的北移、西扩趋势，传统的华南产区可能面临温度过高（超过23 ℃）的风险，需要考虑调整种植结构或引入更耐热的品种，湖北、四川等新兴适宜区则迎来了柑橘种植的新机遇，可能成为未来产业布局的重点区域。

2.2.2　降雨量变化对柑橘气候适宜区的调节效应　柑橘生产受气候条件特别是降水变化的显著影响。我国五大柑橘优势产区地理气候条件不同，对降水变化的敏感性与适应性存在差异。基于对2002—2022年五大产区不同降水年型生产数据的分析，结果表明（图5）：长江上中游柑橘带对降水最敏感（丰/枯产量比=1.40）、赣南-湘南-桂北柑橘带降水驱动特征明显

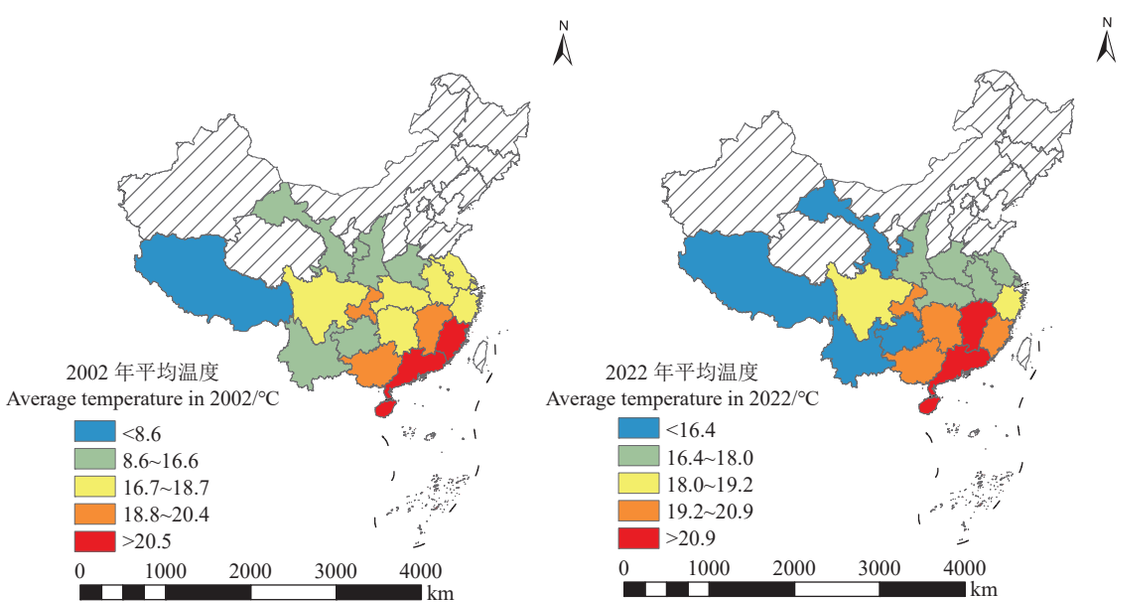
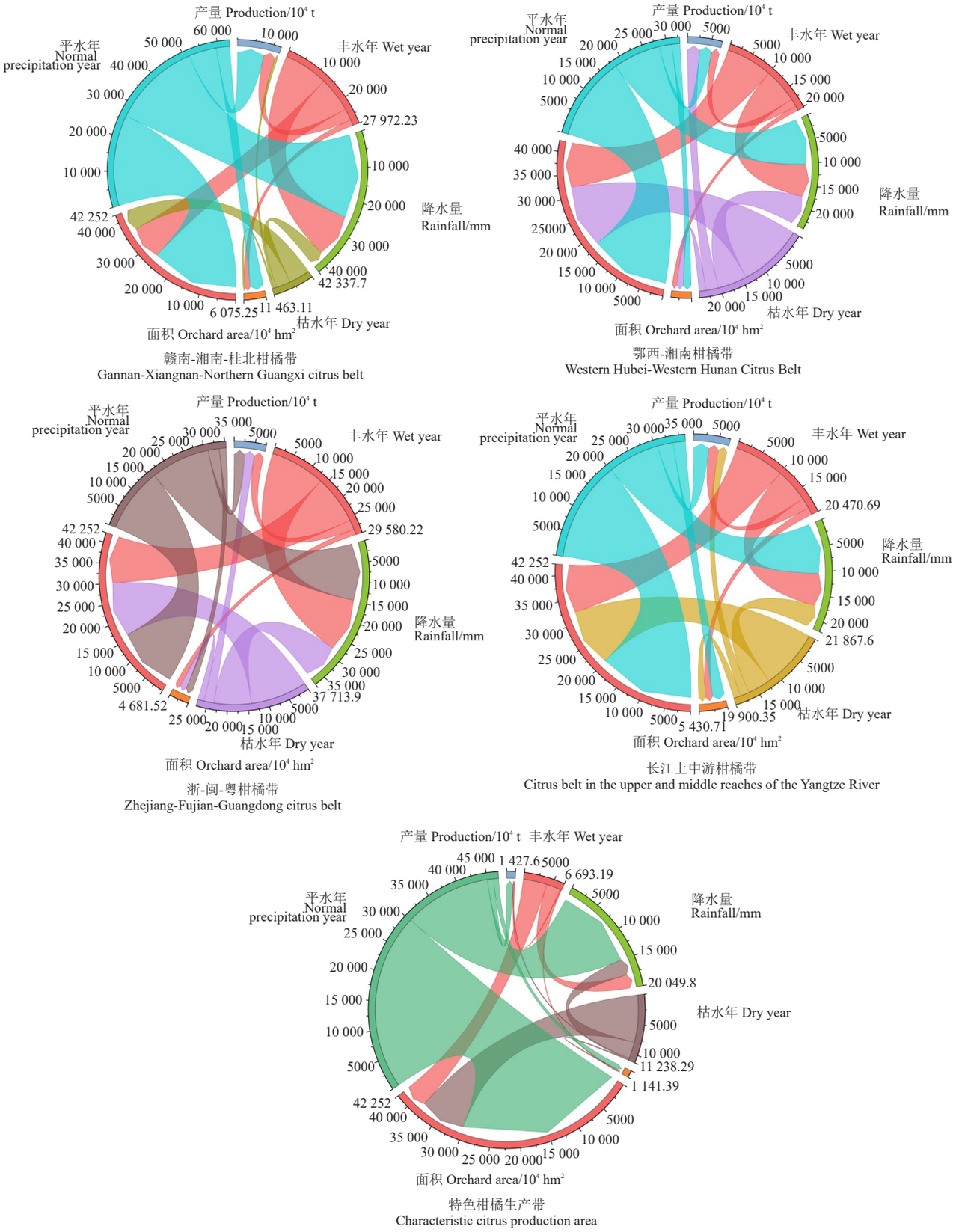



**图4　柑橘栽培适宜年均温度区域分布**

**Fig. 4　Distribution of regions suitable for citrus cultivation based on annual average temperature**




节点大小代表产量规模，连线粗细代表关联强度。

Node size represents yield scale, line thickness represents correlation strength.

**图 5　不同降水年型中五大柑橘主产区生产特征分析**

**Fig. 5　Analysis of production characteristics of five major citrus cultivation areas in different precipitation year types**

（丰/枯产量比=1.79）、鄂西-湘西柑橘带和浙-闽-粤柑橘带表现出强降水适应性（丰/枯产量比≈1.00~1.10）。

降水年型对产量的影响具有区域异质性，丰水年产量优势明显，除特色柑橘生产基地和鄂西-湘西产区外，其余3个产区均呈现“丰水年＞平水年＞枯水年”的产量规律。长江上中游柑橘带丰水年平均产量较平水年提高36.3%、较枯水年提高39.9%；浙-闽-粤柑橘带丰水年产量较平水年和枯水年分别增产14.5%和10.1%。赣南-湘南-桂北丰水年平均产量达942.22万t，是枯水年（367.80万t）的2.56倍，显示丰水年对提高该区域产量最为显著。赣南-湘南-桂北带因土壤黏重、排水不畅，丰水年易出现根系缺氧、营养流失等涝渍风险。其中，柚类较宽皮橘更为敏感。鄂西-湘西产区和特色柑橘生产基地，枯水年平均产量与丰水年几乎持平，可能与该带山地地形阻隔冷空气、灌溉设施覆盖率较高密切相关。

从生产连续性可知，赣南-湘南-桂北柑橘带的丰水年与平水年、长江上中游柑橘带的平水年与丰水年形成强关联集群，表明这些区域在不同降水年型间生产较为稳定。特色柑橘生产带在枯水年的节点连接较弱，表明干旱年份的生产模式与其他条件差异较大。浙-闽-粤柑橘带的丰水年与赣南-湘南-桂北的平水年存在中等强度关联，可能反映了两地相近的水分利用效率。

种植面积表现出较高的稳定性，且与产量变化不完全同步。各产区不同降水年型的面积波动较小，变异系数普遍低于0.15（产量变异系数普遍高于0.30），表明种植面积受短期降水影响较小，更多取决于长期规划与政策布局。赣南-湘南-桂北产区在种植面积（$296.02\times10^{3}$ $hm^{2}$）与产量（$594.80\times10^{4}$ t）上均居前列，单位面积产量（$2.01\times10^{4}$ t·$10^{-3}$ $hm^{-2}$）较高，资源利用效率最优；特色柑橘带种植面积（$53.76\times10^{3}$ $hm^{2}$）最小，单位面积产量（$1.22\times10^{4}$ t·$10^{-3}$ $hm^{-2}$）相对较低，具有进一步提升的潜力。

## 3　讨　论

经过60年（尤其近20年）的快速发展，中国柑橘产业在规模、形态和质量方面均发生了巨大变化。目前，中国柑橘产业规模位居世界首位，产量占世界的约1/3[1]。由空间演化机制可知，柑橘生产从随机分布到显著集聚的转变，是自然禀赋约束与人为干预协同作用的结果。研究期内高-高聚类区始终锚定粤桂湘赣交界的华南-华中南片区，低-低聚类区稳定分布于北方、西北及西南高海拔区域，印证了气候条件对柑橘产地分布的刚性约束，这与林正雨等[8]提出的柑橘生产“北冷南热”空间结构特征一致。2005年，集聚效应的持续强化，一方面源于核心产区亚热带季风气候带来的热量与降水优势，另一方面得益于品种改良、种植技术提升及政策对优势产区的扶持，推动产业要素向适宜区加速集聚，形成跨省级连片集群，这一过程体现了胡友等[9]提出的农户决策向资源优势区倾斜的内在逻辑。其中，广西依托优越的气候条件和丰富的降水量，充分发挥其低纬度长跨度地理位置优势[13]。2017年之后柑橘种植面积持续位居全国第一[14]，2022年产量达到了1 808万t，占全国总产量的30.1%。西南地区（云南、贵州）的后发崛起，既反映了气候适宜区的拓展潜力，也凸显了产业梯度转移的市场驱动效应。

自然因素是中国柑橘产业空间分布最关键的影响因素[15]。由气候驱动的区域异质性可知，温度与降水对柑橘生产空间演变的影响呈现差异化规律。年均温度适宜区（16~23 ℃）向西南拓展，与西南产区产量快速增长的趋势相呼应，表明温度条件的变化为柑橘种植范围的西扩提供了有利条件，这与黄伟华等[4]提出的柑橘生产重心向西南移动的结论相符；同时，温度变化也为柑橘病虫害传播创造了适宜环境，间接影响产区布局优化。在降水方面，丰水年总体利于增产，但赣南-湘南-桂北柑橘带因降水过量易出现涝渍风险，鄂西-湘西柑橘带因灌溉设施完善呈现枯水年产量略高的特殊情况，这一差异表明降水对柑橘生产的影响并非单一正向，而是与产区抗风险能力、水利设施条件密切相关。此外，近年来枯水年产量降幅减小，表明抗逆品种与节水技术的应用有效提升了产业气候韧性，这与卢晓鹏团队[16-17]揭示的干旱调控柑橘生长机制及科学灌溉的重要性研究结论一致；而极端高温干旱对四川、江西等主产省柑橘生产的显著影响[18-19]，进一步印证了气候因子对产区稳定性的关键作用。技术进步与气候适应的协同作用成为抵消极端气候负面影响的关键，为气候变化背景下的产业可持续发展提供了重要启示。与毛海欧等[15]提出的“Z字集聚特征”相比，本文进一步揭示了降水年型与温度适宜区西扩对五大优势带空间分异的差异化塑造作用；与蒲成伟等[10]的成本效益分析相比，本文主要聚焦于气候因子对生产

布局的驱动机制。

由于柑橘对低温敏感，栽培区域主要受限于极端低温及其出现的频率。气候升温对处于热带、亚热带的柑橘生产可能具有一定的有利影响，而气温和雨量波动幅度的增大对柑橘产业带来的风险可能远超过其有利影响。在气候变化背景下，柑橘冻害发生频率不减反增，早霜、晚霜及暖冬骤冷风险加大，可能是我国柑橘生产面临的最大风险；大气温度升高可能引起柑橘大实蝇[20]、木虱[21]等害虫繁殖和生活规律的改变，柑橘黄龙病等病害发生区域北扩，以及北部柑橘产区受毁灭性破坏；部分柑橘产区气温升高，特别是夏季温度升高可能造成泡皮果比例升高及品质下降；温度和降雨量的升高，可能加剧柑橘产区土壤养分的淋溶，特别是加快微量元素含量的降低，进而导致缺素症的发生[22]。

由产业优化路径可知，柑橘生产空间集聚的客观规律对政策制定具有明确导向意义。对于高-高聚类区的核心产区（赣南-湘南-桂北、长江上中游），应聚焦规模优势向质量优势转化，通过加强产业链协同、技术扩散与基础设施互联互通，进一步释放空间正外部性；对于低-低集聚的冷点区域，需规避同质化竞争，依托本地资源发展特色品种、错季上市或产后加工等细分环节，实现与核心产区的功能互补。同时，跨区域协调机制的建立至关重要，应通过技术共享、市场联动引导产业协同发展，平衡空间效率与区域公平，推动产业从“自然集聚”向“优化布局”转变，这一思路也得到了柑橘优势产区气象服务与产业协同发展实践的验证。

## 4 结 论

中国柑橘生产空间分布呈现“随机离散-集聚强化-高位稳定”的三阶段演化特征，生产重心显著向赣南-湘南-桂北及长江上中游等西南地区集中。气候因子是驱动柑橘生产空间演变的核心因子，表现为年均温度16~23 ℃的适宜区向西南拓展，不同降水年型的区域异质性影响。技术进步与气候适应性提升是产业稳定发展的重要支撑。抗逆品种与节水技术的应用，使近年枯水年产量降幅减小，产业气候韧性增强。据此，未来应实行差异化分区策略，赣南-湘南-桂北柑橘带需重点防范涝渍、优化排水系统，增加平水年的经济效益；特色柑橘生产带应加强水利建设、发展集雨农业；长江上中游柑橘带需提升节水灌溉水平，提高平水年生产稳定性；鄂西-湘西柑橘带可推广旱作技术，增强枯水年抗逆能力；浙-闽-粤柑橘带宜维持现有模式并注重品质提升，以保障产业可持续发展。

## 参考文献 References:


[1] 邓秀新 . 中国柑橘育种 60 年回顾与展望[J]. 园艺学报，2022，49(10)：2063-2074.
Deng Xiuxin. A review and perspective for citrus breeding in China during the last six decades[J]. Acta Horticulturae Sinica，2022，49(10)：2063-2074.

[2] 李晓鹏，刘霞，王玥，万闵喆，胡炜童 . 气候变化对中国苹果生产空间演变的影响[J]. 果树学报，2025，42(9)：2018-2027.
Li Xiaopeng，Liu Xia，Wang Yue，Wan Minzhe，Hu Weitong. Effects of climate change on spatial evolution of apple production in China[J]. Journal of Fruit Science，2025，42(9)：2018-2027.

[3] 李晓鹏，张永凯，李新岗 . 中国枣产区迁移及驱动力分析[J]. 西北林学院学报，2024，39(4)：267-275.
Li Xiaopeng，Zhang Yongkai，Li Xingang. Analysis on migration and driving forces of Chinese jujube production areas[J]. Journal of Northwest Forestry University，2024，39(4)：267-275.

[4] 黄伟华，祁春节 . 中国柑橘生产空间布局演化及驱动因素研究[J]. 华中农业大学学报(社会科学版)，2022(4)：90-103.
Huang Weihua，Qi Chunjie. Studies on the spatio-temporal variation and the driving forces of citrus production in China[J]. Journal of Huazhong Agricultural University (Social Sciences Edition)，2022(4)：90-103.

[5] 蒋怡，李宗南，董秀春，王小燕，王思，邱霞 . 1978—2020 年中国柑橘面积与产量格局演变研究[J]. 中国农业信息，2023，35(1)：43-54.
Jiang Yi，Li Zongnan，Dong Xiuchun，Wang Xiaoyan，Wang Si，Qiu Xia. Study on the evolution of citrus planting area and yield pattern in China from 1978 to 2020[J]. China Agricultural Informatics，2023，35(1)：43-54.

[6] 林正雨，邓良基，陈强，陈春燕，刘远利，陈章 . 四川省柑橘生产格局变化及驱动因素[J]. 西南农业学报，2020，33(11)：2591-2604.
Lin Zhengyu，Deng Liangji，Chen Qiang，Chen Chunyan，Liu Yuanli，Chen Zhang. Analysis on change of citrus production patterns and driving factors in Sichuan province[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences，2020，33(11)：2591-2604.

[7] 林正雨，陈春燕，刘远利，何鹏，廖桂堂，高文波，曹杰，邵周玲 . 四川柑橘生产空间的时空演化及驱动机制研究[J]. 中国农业资源与区划，2023，44(3)：58-69.
Lin Zhengyu，Chen Chunyan，Liu Yuanli，He Peng，Liao Guitang，Gao Wenbo，Cao Jie，Shao Zhouling. Spatial and temporal evolution and driving mechanism of citrus production area in Sichuan[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning，2023，44(3)：58-69.

[8] 林正雨，陈强，邓良基，李晓，何鹏，廖桂堂，费建波 . 中国柑橘

生产空间变迁及其驱动因素[J]. 热带地理，2021，41(2)：374-387.
Lin Zhengyu，Chen Qiang，Deng Liangji，Li Xiao，He Peng，Liao Guitang，Fei Jianbo. Spatial pattern changes and driving factors of citrus production in China[J]. Tropical Geography，2021，41(2)：374-387.

[9] 胡友，陈昕，祁春节 . 中国柑橘生产布局变迁驱动机制研究：基于农户决策视角[J]. 中国农业资源与区划，2022，43(5)：122-131.
Hu You，Chen Xin，Qi Chunjie. Research on the driving mechanism of the change of citrus production layout in China：Based on farmers' decision-making perspective[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning，2022，43(5)：122-131.

[10] 蒲成伟，张绩，周上铃，何发，周立，陈品文，杨贵川 . 2000 年以来我国柑橘产业变化与成本效益分析[J]. 中国农业资源与区划，2026，47(1)：185-200.
Pu Chengwei，Zhang Ji，Zhou Shangling，He Fa，Zhou Li，Chen Pinwen，Yang Guichuan. Changes and cost-benefit analysis of China’s citrus industry since 2000[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning，2026，47(1)：185-200.

[11] 帅斯樑 . 中国柑橘盛产地高温灾害风险评估与预估[D]. 南京：南京信息工程大学，2024.
Shuai Siliang. Risk assessment and prediction of high temperature disaster in citrus producing areas in China[D]. Nanjing：Nanjing University of Information Science & Technology，2024.

[12] 张振宇，武文卿，吴俊华，任红燕，李建军，李惠，马慧敏 . 山西苹果产业空间集聚差异及其影响因素分析[J]. 南方农业学报，2024，55(8)：2535-2546.
Zhang Zhenyu，Wu Wenqing，Wu Junhua，Ren Hongyan，Li Jianjun，Li Hui，Ma Huimin. Spatial agglomeration differences and its influencing factors of apple industry in Shanxi[J]. Journal of Southern Agriculture，2024，55(8)：2535-2546.

[13] 乔进超，李旭玮，施蕊 . 中国柑橘三大产区产业探究：以广西、湖南、湖北为例[J]. 云南科技管理，2021，34(1)：45-49.
Qiao Jinchao，Li Xuwei，Shi Rui. Research on the industry of three major citrus producing areas in China：Taking Guangxi，Hunan and Hubei as example[J]. Yunnan Science and Technology Management，2021，34(1)：45-49.

[14] 李佳欣，周琼 . 广西柑橘产业集中度和竞争力分析[J]. 安徽农业科学，2023，51(16)：217-220.
Li Jiaxin，Zhou Qiong. Analysis on the concentration and competitiveness of Guangxi citrus industry[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences，2023，51(16)：217-220.

[15] 毛海欧，杨楠楠，祁春节 . 中国柑橘产业空间演化特征及其影响因素[J]. 经济地理，2024，44(6)：146-153.
Mao Haiou，Yang Nannan，Qi Chunjie. Spatial evolution and influencing factors of citrus industry in China[J]. Economic Geography，2024，44(6)：146-153.

[16] 潘斌，李菲菲，文斌，熊江，马小川，唐超兰，刘恋，李泽航，卢晓鹏，谢深喜 . 不同果实发育期干旱胁迫对温州蜜柑果实品质形成的影响[J]. 果树学报，2019，36(6)：729-737.
Pan Bin，Li Feifei，Wen Bin，Xiong Jiang，Ma Xiaochuan，Tang Chaolan，Liu Lian，Li Zehang，Lu Xiaopeng，Xie Shenxi. Effect of drought stress at different development stages on fruit quality formation in Satsuma Mandarin[J]. Journal of Fruit Science，2019，36(6)：729-737.

[17] 周铁，潘斌，李菲菲，马小川，汤孟婧，廉雪菲，常媛媛，陈岳文，卢晓鹏 . 膨大期干旱对温州蜜柑品质形成的影响及复水后树体水分吸收转运规律[J]. 园艺学报，2022，49(1)：11-22.
Zhou Tie，Pan Bin，Li Feifei，Ma Xiaochuan，Tang Mengjing，Lian Xuefei，Chang Yuanyuan，Chen Yuewen，Lu Xiaopeng. Effects of drought stress at enlargement stage on fruit quality formation of Satsuma Mandarin and the law of water absorption and transportation in tree after re-watering[J]. Acta Horticulturae Sinica，2022，49(1)：11-22.

[18] 周立，陈品文，蒲成伟，杜晓秋，张绩，何发，周上铃，何震，杨贵川，冉晶 . 极端高温干旱气候对南充市柑橘生产的影响及建议[J]. 现代农业科技，2023(10)：67-70.
Zhou Li，Chen Pinwen，Pu Chengwei，Du Xiaoqiu，Zhang Ji，He Fa，Zhou Shangling，He Zhen，Yang Guichuan，Ran Jing. Effects and suggestions of extreme high temperature and drought climate on citrus production in Nanchong city[J]. Modern Agricultural Science and Technology，2023(10)：67-70.

[19] 张方亮，金国花，杨军，李翔翔，李迎春 . 江西省柑橘生育期内高温热害时空分布特征[J]. 中国农业气象，2024，45(7)：786-797.
Zhang Fangliang，Jin Guohua，Yang Jun，Li Xiangxiang，Li Yingchun. Spatial and temporal distribution of heat stress during citrus growth period in Jiangxi province[J]. Chinese Journal of Agrometeorology，2024，45(7)：786-797.

[20] 陈俊丞，乔羽，姜成红，潘龙其 . 温度对柑橘大实蝇越冬蛹基数和羽化的研究[J]. 华中昆虫研究，2024(1)：127-132.
Chen Juncheng，Qiao Yu，Jiang Chenghong，Pan Longqi. Study on the overwintering pupae and emergence of *Chinese citrus-fly* based on temperature[J]. Research on Insects in Central China，2024(1)：127-132.

[21] 王一帆，刘晓童，张振宇，张宏宇，郑薇薇 . 温度对柑橘木虱生长发育及生殖的影响[J]. 植物保护，2025，51(4)：182-193.
Wang Yifan，Liu Xiaotong，Zhang Zhenyu，Zhang Hongyu，Zheng Weiwei. Effects of temperature on the growth，development and reproduction of *Diaphorina citri*[J]. Plant Protection，2025，51(4)：182-193.

[22] 潘根兴，高民，胡国华，魏钦平，杨晓光，张文忠，周广胜，邹建文 . 气候变化对中国农业生产的影响[J]. 农业环境科学学报，2011，30(9)：1698-1706.
Pan Genxing，Gao Min，Hu Guohua，Wei Qinping，Yang Xiaoguang，Zhang Wenzhong，Zhou Guangsheng，Zou Jianwen. Impacts of climate change on agricultural production of China[J]. Journal of Agro-Environment Science，2011，30(9)：1698-1706.