

# 未来气候情景下河南烤烟潜在种植分布 气候适宜性分析

刘晓迎<sup>1</sup> 吴璐<sup>2</sup>

(1 河南省气象服务中心, 郑州 450003; 2 河南省气候中心, 郑州 450003)

**摘要:** 气候变化对作物种植格局改变的影响正受到广泛关注。基于河南烤烟种植地理分布信息, 利用最大熵模型和ArcGIS空间分析技术, 从生育期尺度筛选出了8个影响烤烟潜在种植分布的主导气候因子(累积贡献率超过85%), 即伸根期 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 活动积温、伸根期降雨量、大田期降雨量、旺长期降雨量、成熟期 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 活动积温、大田期相对湿度、成熟期日较差和旺长期 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 活动积温, 构建了河南烤烟种植分布-气候关系模型, 对河南省烤烟不同种植分布区的气候特征、1961—2010年以及未来气候变化情景下2050s和2070s烤烟潜在种植分布年代际变化规律进行了分析。结果表明, 最大熵模型适于模拟河南烤烟的潜在种植分布, 基于最大熵模型构建的河南烤烟潜在种植分布与气候因子关系模型的准确性达到“好”的标准(AUC值为0.821)。1981—2010年河南烤烟潜在可种植区占全省面积的57.7%, 大于当前烤烟的种植范围。年代际变化显示, 20世纪70年代后, 河南烤烟潜在可种植区总体呈增加趋势, 表明河南烤烟生产还有较大的发展空间。相对于基准时段, 在未来气候情景下, 河南烤烟潜在可种植区面积呈增加趋势, 两种情景, 以RCP4.5情景影响较大。未来气候变化有利于河南烤烟种植区扩大。

**关键词:** 气候变化, 烤烟, 最大熵模型, 潜在种植分布, 气候适宜性

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2022.00.004

## Analysis of Potential Cultivation of Flue-Cured Tobacco in Henan under Future Climate Scenarios

Liu Xiaoying<sup>1</sup>, Wu Lu<sup>2</sup>

(1 Henan Service Center of Meteorological Science and Technology, Zhengzhou 450003 2 Henan Climate Centre, Zhengzhou 450003)

**Abstract:** The impact of climate change on crop pattern changes is attracting widespread attention. Based on the geographical distribution information of flue-cured tobacco planting in Henan Province, the maximum entropy model and ArcGIS spatial analysis technology are used to screen out eight leading climate factors (cumulative contribution rate of more than 85%) affecting the potential planting distribution of flue-cured tobacco from the growth period scale. The factors are the active accumulated temperature at root extension stage  $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , rainfall at root extension stage, rainfall at field stage, rainfall during growing period, active accumulated temperature at maturity stage  $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , relative humidity at field stage, daily range at maturity stage and active accumulated temperature at growing period  $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ . The relationship model between planting distribution and climate of flue-cured tobacco in Henan Province is established accordingly. The climatic characteristics of different planting distribution areas of flue-cured tobacco in Henan Province, the interdecadal variation during 1961—2010 and the interdecadal variation of potential planting distribution in 2050s and 2070s under climate change scenarios are analyzed. The results show that the maximum entropy model is suitable for simulating the potential planting distribution of flue-cured tobacco in Henan Province, and that the accuracy of the relationship model reaches the standard of “good” (AUC value was 0.821). From 1981 to 2010, the potential growing area of flue-cured tobacco in Henan Province accounted for 57.7% of the total area, which was larger than the current growing area. The decadal change shows that the potential growing area of flue-cured tobacco in Henan Province has been increasing since 1970s, which indicates that there is still a large development space for flue-cured tobacco production in Henan Province. In the future climate scenario in Henan Province, the potential planting area of flue-cured tobacco will also increase and will be significantly affected by the RCP4.5 scenario. Hence the future climate change will be beneficial to the expansion of flue-cured tobacco growing areas in Henan.

收稿日期: 2021年11月22日; 修回日期: 2022年3月23日

第一作者: 刘晓迎(1984—), Email: lxy0811@126.com

资助信息: 中国气象局气候变化专项项目(CCSF201524)

**Keywords:** climate change, flue-cured tobacco, maximum entropy model, potential planting distribution, climatic suitability

## 0 引言

气候系统的变化毋庸置疑,根据政府间气候变化专门委员会(IPCC)第5次评估报告,进一步确认气候变化对海洋和陆地的人类和自然系统已经产生了广泛影响<sup>[1]</sup>。气候条件与作物的生产关系密切相关,气候要素的改变必然导致作物种植格局的变化。物种分布模型是基于物种分布信息及周边环境信息模拟物种分布的主要方法<sup>[2]</sup>。近年来,物种分布模型逐渐发展并成为研究气候变化背景下作物分布和气候之间关系的重要工具<sup>[3]</sup>。比如最大熵(MaxEnt)模型、GARP模型、ANN模型、GAM模型、Domain模型和Bioclim模型已用于物种当前与未来气候条件下分布区研究<sup>[4-6]</sup>,其中,由Phillips等<sup>[7-8]</sup>提出的MaxEnt模型,在模拟的精度方面优于其他生态位模型<sup>[9]</sup>,且只需要较小样本的物种分布数据即可得到较好的模拟效果,已在中国水稻<sup>[10-12]</sup>、玉米<sup>[13-16]</sup>、冬小麦<sup>[17-18]</sup>、黑沙蒿<sup>[2]</sup>、黄顶菊<sup>[6]</sup>、寒兰<sup>[19]</sup>、木梨<sup>[20]</sup>、油松<sup>[21]</sup>、蒙古黄芪<sup>[22]</sup>、猕猴桃<sup>[23]</sup>、胡杨<sup>[24]</sup>、薄皮山核桃<sup>[25]</sup>、云杉<sup>[26]</sup>、山毛榉<sup>[27]</sup>、富士苹果<sup>[28-29]</sup>等植物的气候适宜性分布及评价中得到应用。

中国是世界烟叶生产第一大国,每年种植烟草140多万hm<sup>2</sup>,烟叶年产量达170多万t。烟草是我国重要的经济作物,也是主要的税收来源。我国历史上已经进行了3次全国性的烟草区划,第1次是在20世纪60年代,第2次是在20世纪80年代初期到中期,第3次是在21世纪初<sup>[30]</sup>。河南烤烟种植历史悠久,自1913年在许昌襄城引种以来,至今已有百年烤烟种植历史<sup>[30]</sup>。统计资料显示,2018年河南省烤烟种植面积

达9.5万hm<sup>2</sup>,总产量为25.3万t,占全国烤烟总产量的11.3%<sup>[31]</sup>。目前,不少学者研究者采用不同的气候指标组合,开展了河南<sup>[32-33]</sup>或部分地区<sup>[34-35]</sup>烤烟种植的气候适宜性区划研究。但大多研究中气候指标选择及权重确定大多依赖专家经验而导致区划结果的误差。同时,针对未来气候变化对河南烤烟种植气候适宜性的影响研究较少。

本研究试图利用由国家气候中心提供的使用区域气候模式RegCM4在全球模式BCC\_CSM1.1驱动下,给出的RCP4.5和RCP8.5<sup>[36-38]</sup>排放情景下2041—2060年(2050年代)和2061—2080年(2060年代)的气候预估资料以及基准时段(1981—2010年)的气候资料,结合最大熵模型(MaxEnt)和ArcGIS平台,构建河南烤烟种植分布与气候因子的关系模型,确定影响河南烤烟种植的主导气候因子,探讨河南烤烟种植气候适宜性的区域划分及其对未来气候变化的响应,以期河南烤烟应对气候变化和种植布局调整提供决策依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 数据来源及分析

本研究使用的数据主要包括河南烤烟种植区的地理分布数据和气候数据。其中,河南烤烟种植点的地理分布数据来自中国数字植物标本馆、河南省烟草志和实地调查数据等,共587个(图1)。研究所用的耕地数据来源于中科院地理所,其空间分辨率为1 km×1 km,利用ArcGIS软件重采样得到分辨率为0.8 km×0.8 km栅格数据。

气候数据取自于河南省气象局1961—2010年111

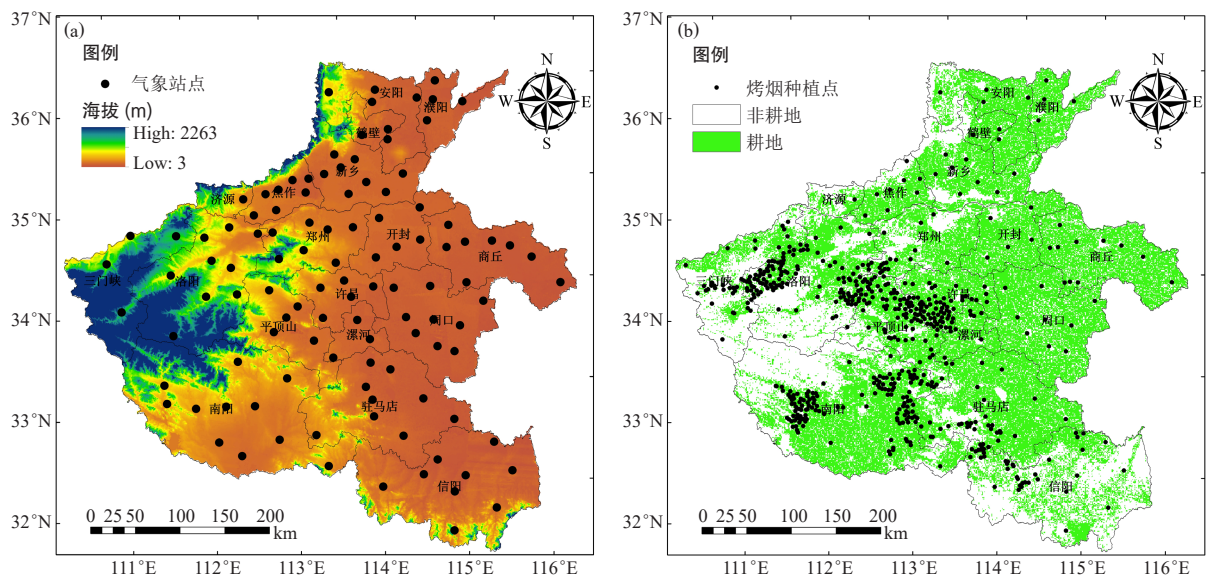


图1 河南省气象站(a)和烤烟种植点的地理分布(b)

Fig. 1 Distribution of meteorological stations (a) and flue-cured tobacco planting sites (b) in Henan

个气象站的逐日数据,包括:站点经纬度、降雨量(mm)、平均气温( $^{\circ}\text{C}$ )、最高气温( $^{\circ}\text{C}$ )、最低气温( $^{\circ}\text{C}$ )、日照时数(h)、相对湿度(%)等。太阳总辐射( $R_a$ ,  $\text{MJ}/\text{m}^2$ )利用日照时数推算得到<sup>[39]</sup>。采用截断高斯滤波算子空间插值算法,与数字地面高程(DEM)数据结合,将逐日的气候数据插值成 $0.8\text{ km}\times 0.8\text{ km}$ 分辨率的空间栅格数据。气象站点的空间分布见图1。

未来气候变化预估数据是由中国气象局国家气候中心提供的使用区域气候模式RegCM4在全球模式BCC\_CSM1.1驱动下的模拟结果,站点为111个,数据序列为2020—2099年。气候变化情景为IPCC第5次评估报告(AR5)融入政策因素的代表性浓度路径RCP4.5和RCP8.5情景<sup>[36-38]</sup>,未来河南省年平均气温和降雨量均呈现增加趋势(表1)。

表1 2种排放情景下河南省20世纪50年代和70年代年平均气温和降雨量的变化

Table 1 Changes of average temperature and precipitation in 2050s and 2070s under two emission scenarios in flue-cured tobacco-growing areas in Henan

| 年代    | RCP4.5                      |               |                          | RCP8.5                      |               |                          |
|-------|-----------------------------|---------------|--------------------------|-----------------------------|---------------|--------------------------|
|       | $\Delta T/^{\circ}\text{C}$ | $\Delta P/\%$ | $\text{CO}_2/\text{ppm}$ | $\Delta T/^{\circ}\text{C}$ | $\Delta P/\%$ | $\text{CO}_2/\text{ppm}$ |
| 2050s | +1.7                        | +30.0         | +487.2                   | +2.1                        | +27.4         | +454.5                   |
| 2070s | +2.0                        | +25.9         | +523.5                   | +2.8                        | +38.0         | +682.3                   |

注:表中 $\Delta T$ 和 $\Delta P$ 分别代表平均气温和降雨量相对于1981—2010年定为基准时段(气候基准期)的变化值,“+”表示增加。

由于河南各地气候条件具有差异,因而烤烟在各地的生长发育期起止日期略有差异。本研究将洛阳和三门峡两个地市烤烟大田生长期定为5月10日—9月20日,其中,5月10日—6月20日为伸根期,6月21日—8月10日为旺长期,8月11日—9月20日为成熟期;其余地市大田期定为5月1日—8月31日,其中,5月1日—6月10日为伸根期,6月11日—7月20日为旺长期,7月21日—8月31日为成熟期;同时假定未来气候变化下各地烤烟生育期时段的划分不变。以1961—1970年表示20世纪60年代,记作1960s;类似地,以1971—1980年、1981—1990年、1991—2000年、2001—2010年分别表示20世纪70年代、80年代、90年代和21世纪的前10年,分别记作1970s、1980s、1990s和2000s。未来气候变化情景下,以2041—2060年表示2050年代,记作2050s;以2061—2080年表示2070年代,记作2070s。

## 1.2 研究方法

### 1.2.1 潜在气候因子筛选

通过文献调研,综合考虑光温水三个要素,结合烤烟生产区域的气候特征,筛选出以下6个具有明确生物学意义的可能影响烤烟种植分布的潜在气候因子,其中,温热因素包括 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 活动积温( $AT_{10}$ ,

日平均气温 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的和, $^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ )、 $\geq 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 平均气温日数( $N_{20}$ ,日平均气温 $\geq 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的日数和,d)、气温差( $DTR$ , $^{\circ}\text{C}$ ,通过最高气温( $T_{\max}$ , $^{\circ}\text{C}$ )和最低气温( $T_{\min}$ , $^{\circ}\text{C}$ )之差获得);水湿因素包括降雨量( $Pre$ ,mm)和相对湿度( $RH$ ,%) ;光照因素为太阳总辐射( $R_a$ ,  $\text{MJ}/\text{m}^2$ )。并基于生育期尺度,分别计算了伸根期、旺长期、成熟期和大田期的指标,获得累计24个指标(表2)。

表2 基于生育期尺度筛选的影响烤烟种植分布的潜在气候因子  
Table 2 Climate factors affecting potential distribution of flue-cured tobacco planting regions in Henan based on the growth period scale

| 潜在气候因子    | 意义            | 文献                     |
|-----------|---------------|------------------------|
| $AT_{10}$ | 喜温作物生长期内的热量累积 | [30, 32, 34-35, 40-41] |
| $N_{20}$  | 喜温作物生长期,高温条件  | [30, 32, 40-41]        |
| $DTR$     | 变化幅度          | [34]                   |
| $Pre$     | 水分条件          | [30, 32-35, 40-41]     |
| $R_a$     | 光照条件          | [30, 32-35, 40-41]     |
| $RH$      | 水分条件          | [30, 33-34, 40-41]     |

### 1.2.2 最大熵模型原理

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,烤烟种植的适宜区预测采用的最大熵模型是Phillips等<sup>[7]</sup>建立的模拟物种分布的MaxEnt模型,使用的版本是3.3.3k。该模型在物种保护区规划、入侵物种的潜在分布预测以及物种的空间分布对气候变化的响应等研究方面被广泛应用<sup>[3]</sup>,通过建立物种潜在分布的最大熵模型,输出预测地区物种分布的概率,根据存在概率的大小及一定的阈值,可以判断在某个区域物种存在的可能性大小<sup>[8]</sup>。

### 1.2.3 最大熵模型应用

基于最大熵模型和ArcGIS空间分析功能等技术的具体研究方法如下:

#### 1) 模型输入资料的格式转换

利用ArcGIS,将影响烤烟潜在分布的24个因子平均值转换为ASCII文件,格点大小为 $0.8\text{ km}\times 0.8\text{ km}$ ,作为最大熵模型的环境变量层输入;将烤烟587个地理分布信息按经度和纬度顺序整理成CSV格式,作为最大熵模型的样本输入数据。

#### 2) 初始模型的构建

选中Create response curves选项,其他选项采用模型的默认设置,构建烤烟潜在分布的最大熵模型,并采用受试者工作特征曲线(Receiver operating characteristic curve, ROC曲线)的曲线下面积(Area under curve, AUC)值对建立的最大熵模型模拟结果精度进行评价。

### 3) 主导气候因子的选取

以1981—2010年一个气候标准年的基础数据作为模型训练的基准气候数据,以587个具有地理信息(经纬度)记录的烤烟种植点作为样本站点,其中75%作为训练数据,25%作为验证数据,随机采样10次求平均值,根据Jackknife模块给出的各潜在气候因子对烤烟分布影响贡献率的大小,提出影响烤烟分布的主导气候因子。在此基础上,再重建烤烟分布的最大熵模型,并进行模拟结果精度评价。基于筛选出的影响烤烟分布的8个主导气候因子,构建基于主导气候因子的烤烟种植分布—气候模型,再次进行最大熵模型模拟,结合烤烟气候适宜性等级划分标准,给出了烤烟潜在分布(低适宜区以上等级分布区)及其气候适宜分区。

### 4) 烤烟气候适宜等级分区

利用ArcGIS的格式转换工具Conversion Tools将预测结果的ASCII转化为Raster格式;最大熵模型预测结果给出的是烤烟在待预测地区的存在概率 $p$ ,取值范围在0~1。为得到烤烟的气候适宜等级分区,利用Spatial Analysis Tools的Reclassify功能选择合适的阈值进行气候适宜等级分区。根据统计学原理,参考政府间气候变化专门委员会(IPCC)第4次评估报告<sup>[42]</sup>关于评估可能性的划分方法,结合烤烟实际情况,设定河南烤烟潜在种植分布区的气候适宜性等级: $p < 0.05$ 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; $p \geq 0.66$ 为最适宜区。

### 5) 量化分析烤烟潜在分布与各气候适宜区气候因子的阈值

利用ArcGIS软件中的空间分析模块,将主导气候因子栅格数据与烤烟潜在分布区及各气候适宜区的数据叠加,提取烤烟潜在分布区与各气候适宜区的气候因子值,并统计分析这些气候因子范围内的烤烟栅格数,绘制折线图,进而分析烤烟各气候适宜性分区的气候因子阈值及其气候特征。以烤烟种植区各气候适宜性分区潜在分布面积的95%代表该适宜性分区,量化分析烤烟种植区各气候适宜性分区气候因子的阈值。

### 6) 潜在种植分布的年代际动态变化

利用基于1981—2010年气候资料建立的烤烟潜在种植分布—气候关系预测模型,结合1961—2010年每10年平均以及2050年代和2060年代的主导气候因子值,模拟历史和未来河南烤烟潜在种植分布的年代际动态变化。气候适宜区的划分方法同上。

## 1.2.4 模型适用性检验

最大熵模型的精度检验采用受试者工作特征曲线

(ROC)与横坐标围成的面积(即AUC值)来评价模型预测结果的精准度。ROC曲线是以预测结果的每一个值作为可能的判断阈值,由此计算得到相应的灵敏度和特异度。以假阳性率即(1-特异度)为横坐标,以真阳性率即灵敏度(1-遗漏率)为纵坐标绘制ROC曲线,其AUC值的大小作为模型预测准确度的衡量指标,其取值范围为[0, 1],值越大表示模型判断力越强。由于AUC不受诊断阈值的影响,且对物种发生率不敏感,因此目前被公认为是最佳的评价指标,其评估标准为:0.50~0.60(失败, fail)、0.60~0.70(较差, poor)、0.70~0.80(一般, fair)、0.80~0.90(好, good)、0.90~1.0(非常好, excellent)。

## 2 结果

### 2.1 模型模拟的准确性评价

为检验最大熵模型在预测烤烟种植分布区的适用性,以1981—2010年的气候数据为基础,随机选取75%的烤烟分布点数据用于构建模型,剩下25%的烤烟分布点用于模型的验证(图2)。随机采样10次求平均值,通过最大熵模型和气候因子构建的烤烟种植分布—气候关系模型,基于潜在气候因子的平均AUC值达0.801,表明所构建模型的预测精度达到“好”和“预测较准确”的标准,可以用于预测烤烟种植区范围。

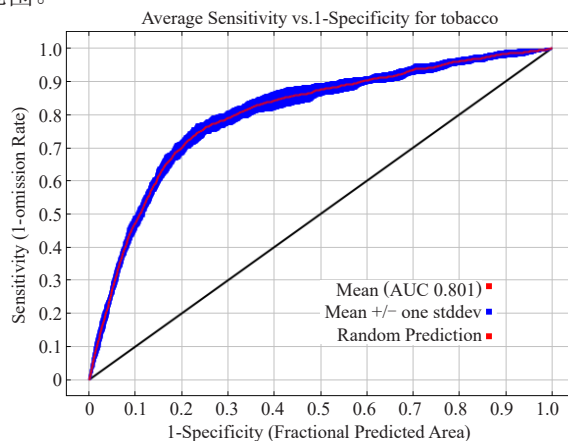


图2 河南烤烟潜在分布模型模拟的AUC值

Fig. 2 AUC values of maximum entropy model of flue-cured tobacco potential distribution in Henan

### 2.2 主导气候因子筛选及其与存在概率关系

基于最大熵模型中Jackknife模块给出的各潜在气候因子对烤烟种植分布影响的重要性排序以及累积贡献百分率大小,筛选出影响河南烤烟种植分布的主导气候因子(表3, 图3)。表3给出了影响河南烤烟分布的8个主要气候因子贡献百分率和累计贡献百分率。按照贡献百分率由大到小排序依次为:伸根期 $\geq 10$  °C

活动积温 (23.0%)、伸根期降雨量 (16.7%)、大田期降雨量 (9.1%)、旺长期降雨量 (9.0%)、成熟期  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  活动积温 (8.4%)、大田期相对湿度 (7.5%)、成熟期日较差 (6.7%) 和旺长期  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  活动积温 (5.0%)，累积贡献率超过85%。段居琦等<sup>[12]</sup>指出，一般认为，累积贡献率超过85%，且其后某一因子的贡献率低于5%时不再累积，累积因子反映了主导因子。因此，可以认为这8个气候因子是影响烤烟分布的主导气候因子。其中，对烤烟种植分布影响最大的是大田期降雨量，其次为伸根期  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  活动积温。

表3 影响河南烤烟分布的主导气候因子贡献百分率和累积贡献百分率

Table 3 Contribution rate of dominant climate factors affecting flue-cured tobacco distribution in Henan

| 气候因子                | 贡献百分率/ % | 累积贡献百分率/ % |
|---------------------|----------|------------|
| AT <sub>10</sub> -1 | 23.0     | 23.0       |
| Pre-1               | 16.7     | 39.7       |
| Pre-4               | 9.1      | 48.8       |
| Pre-2               | 9.0      | 57.8       |
| AT <sub>10</sub> -3 | 8.4      | 66.2       |
| RH-4                | 7.5      | 73.7       |
| DTR-3               | 6.7      | 80.4       |
| AT <sub>10</sub> -2 | 5.0      | 85.4       |

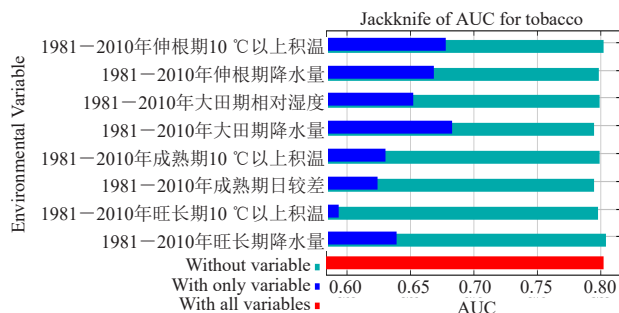


图3 基于Jackknife的影响河南烤烟种植分布的主导气候因子贡献

Fig. 3 Contribution of the dominant climatic factors to the cultivation distribution of flue-cured tobacco in Henan based on Jackknife

## 2.3 不同种植分布区的气候特征分析

在自然气候条件下，河南烤烟种植区存在概率较高的地区，需要适宜的主导气候因子条件，其值过高或过低，都不利于发展烤烟种植（图4，表4）。由于烤烟的适应性强、分布广泛，河南省各地历史上多有种植；但受气候条件和农业规划限制，烤烟种植区当前主要集中在我省许昌、平顶山、洛阳等地，可种植区占全省面积的57.7%，各气候适宜区的气候特征存在一定差异。

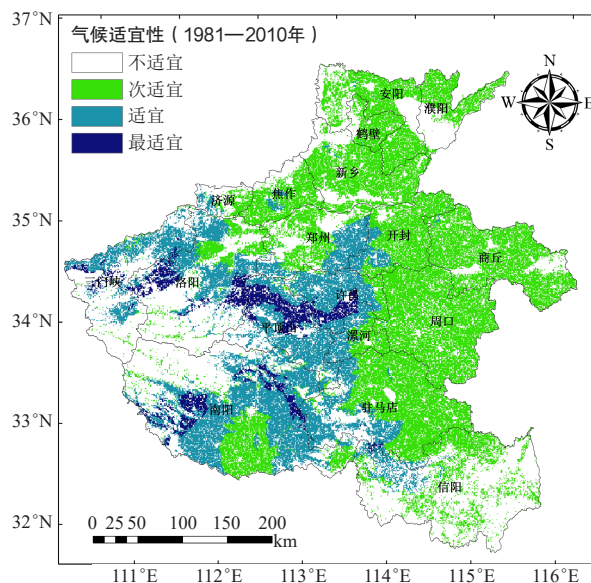


图4 1981—2010年河南烤烟潜在种植分布及其气候适宜性分区

Fig. 4 Potential distribution of flue-cured tobacco planting regions and its climatic suitability divisions in Henan from 1981 to 2010

1) 最适宜区：主要分布在三门峡、洛阳、平顶山、许昌、南阳等地局部。本区成熟期  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  活动积温  $774.9 \sim 1117.9^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 、成熟期日较差  $7.9 \sim 9.9^{\circ}\text{C}$ 、大田期降雨量  $400.7 \sim 618.1\text{ mm}$ 、大田期相对湿度  $64.9\% \sim 76.8\%$ 、伸根期  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  活动积温  $885.8 \sim 973.0^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 、伸根期降雨量  $83.7 \sim 141.7\text{ mm}$ 、旺长期  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  活动积温  $1054.2 \sim 1342.7^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 、旺长期降雨量  $157.0 \sim 245.5\text{ mm}$ 。该地区的热量和水分条件充足，最适宜烤烟种植区面积占全省面积的3.4%，产量和质量水平最高。

2) 适宜区：主要分布在三门峡、洛阳、南阳、漯河、许昌、平顶山等地大部以及驻马店、信阳、郑州、开封、焦作、济源等地局部。本区成熟期  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  活动积温  $741.4 \sim 1137.9^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 、成熟期日较差  $7.6 \sim 9.9^{\circ}\text{C}$ 、大田期降雨量  $348.7 \sim 662.1\text{ mm}$ 、大田期相对湿度  $63.7\% \sim 80.4\%$ 、伸根期  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  活动积温  $864.8 \sim 984^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 、伸根期降雨量  $63.5 \sim 163.1\text{ mm}$ 、旺长期  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  活动积温  $1053.5 \sim 1369^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$  和旺长期降雨量  $134.0 \sim 273.9\text{ mm}$ 。该地区的热量和水分条件次之，烤烟种植适宜区面积占全省面积的18.0%，产量和质量水平次之。

3) 次适宜区：主要分布在郑州、焦作、开封、周口、商丘、驻马店、新乡、鹤壁、安阳、濮阳等地大部和南阳、信阳等地局部，该烤烟次适宜种植区面积占全省面积的36.3%。本区成熟

表4 1981—2010年河南烟区烤烟潜在种植区8个主导气候要素对应的阈值

Table 4 The threshold values of the dominant climatic factors affecting the cultivation distribution of flue-cured tobacco in Henan from 1981 to 2010

| 主导气候要素              | 最适宜区   |        |        | 适宜区    |        |        | 次适宜区   |        |        | 不适宜区   |        |        |
|---------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                     | 最大     | 最小     | 平均     | 最大     | 最小     | 平均     | 最大     | 最小     | 平均     | 最大     | 最小     | 平均     |
| AT <sub>10</sub> -3 | 1117.9 | 774.9  | 1028.7 | 1137.9 | 741.4  | 1051.0 | 1141.1 | 708.6  | 1093.8 | 1141.7 | 502.3  | 1014.2 |
| DTR-3               | 9.9    | 7.9    | 8.7    | 9.9    | 7.6    | 8.5    | 9.8    | 7.4    | 8.3    | 9.9    | 7.3    | 8.5    |
| Pre-4               | 618.1  | 400.7  | 466.2  | 662.1  | 348.7  | 491.0  | 730.6  | 348.4  | 480.3  | 787.1  | 349.0  | 515.1  |
| RH-4                | 76.8   | 64.9   | 73.1   | 80.4   | 63.7   | 73.9   | 80.6   | 61.7   | 75.1   | 80.5   | 51.0   | 72.6   |
| AT <sub>10</sub> -1 | 973.0  | 885.8  | 911.2  | 984.0  | 864.8  | 907.3  | 985.9  | 839.8  | 895.0  | 986.5  | 799.9  | 893.6  |
| Pre-1               | 141.7  | 83.7   | 100.8  | 163.1  | 63.5   | 105.8  | 175.3  | 63.5   | 95.0   | 184.5  | 63.5   | 109.4  |
| AT <sub>10</sub> -2 | 1342.7 | 1054.2 | 1150.4 | 1369.0 | 1053.5 | 1121.0 | 1370.8 | 1053.0 | 1074.1 | 1374.7 | 1052.9 | 1124.6 |
| Pre-2               | 245.5  | 157.0  | 189.5  | 273.9  | 134.0  | 198.4  | 310.4  | 133.6  | 191.3  | 339.7  | 134.1  | 212.1  |

期 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 活动积温708.6~1141.1 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 、成熟期日较差7.4~9.8 $^{\circ}\text{C}$ 、大田期降雨量348.4~730.6 mm、大田期相对湿度61.7%~80.6%、伸根期 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 活动积温839.8~985.9 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 、伸根期降雨量63.5~175.3 mm、旺长期 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 活动积温1053~1370.8 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 和旺长期降雨量133.6~310.4 mm。考虑地区产业布局政策,该区域主要以调整农业产业结构为主。

4) 不适宜区: 主要集中分布在豫西、豫南和豫北的高海拔地区, 该烤烟不适宜种植区面积占全省面积的42.3%。本区成熟期 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 活动积温502.3~1141.7 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 、成熟期日较差7.3~9.9 $^{\circ}\text{C}$ 、大田期降雨量349.0~787.1 mm、大田期相对湿度51.0%~80.5%、伸根期 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 活动积温799.9~986.5 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 、伸根期降雨量63.5~184.5 mm、旺长期 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 活动积温1052.9~1374.7 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 和旺长期降雨量134.1~339.7 mm。该区域海拔较高, 种植烤烟经济价值较低, 可调整为当地其他优势作物。

## 2.4 潜在种植分布的年代际变化

根据烤烟种植分布—气候关系模型可以给出1961—2010年河南烤烟潜在种植分布的年代际变化(图5, 表5)。结果表明, 近50年来, 烤烟可种植面积

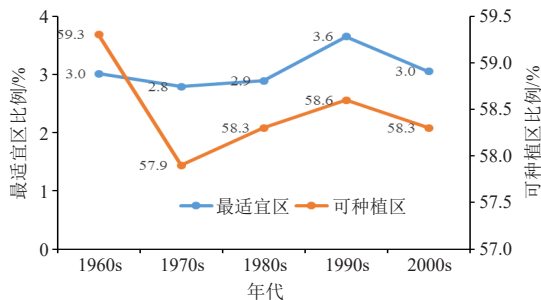


图5 1961—2010年河南烤烟潜在最适宜区和可种植区面积百分比的年代际变化

Fig. 5 Decadal dynamics of potential and most suitable flue-cured tobacco cultivation distribution in Henan from 1961 to 2010

比例( $p\geq 0.05$ 的范围)以20世纪60年代最大, 70年代最小, 80年代以后均在58%以上。其中, 烤烟最适宜种植面积呈波动式变化, 20世纪90年代比70年代最适宜种植面积比例增加8%, 近10年最适宜种植面积达3.0%。

表5 河南烤烟潜在种植面积百分比的年代际变化

Table 5 Decadal dynamics of potential flue-cured tobacco cultivation distribution in Henan

| 年代         | 最适宜区 | 适宜区  | 次适宜区 | 不适宜区 | 可种植区 | AUC   |
|------------|------|------|------|------|------|-------|
| 1961—1970年 | 3.0  | 18.2 | 38.1 | 40.7 | 59.3 | 0.823 |
| 1971—1980年 | 2.8  | 17.2 | 37.9 | 42.1 | 57.9 | 0.825 |
| 1981—1990年 | 2.9  | 17.7 | 37.7 | 41.7 | 58.3 | 0.818 |
| 1991—2000年 | 3.6  | 16.9 | 38.1 | 41.4 | 58.6 | 0.824 |
| 2001—2010年 | 3.0  | 19.9 | 35.4 | 41.7 | 58.3 | 0.813 |

## 2.5 潜在种植分布对未来气候变化的响应

分析显示(表6), 未来气候变化下, 活动积温增加、日较差增大, 降雨量总体呈增加, 相对湿度呈下降。在这些主导气候要素变化的综合影响下, 河南烟区烤烟可种植面积增加, 增幅在1.4%~2.3%; 适宜区和不适宜区面积缩小, 最适宜区面积呈小幅波动变化, 次适宜区面积扩大较多, 增幅在1.9%~4.1%; 两种情景下, 以RCP4.5情景对潜在种植面积的影响较大; 2个年代之间, 以2050年代的变化幅度较大; 三门峡、洛阳、平顶山、许昌、南阳等地仍然是河南烤烟潜在种植适宜区和最适宜区(图6, 图7, 表7)。

## 3 结论与讨论

本研究基于河南烤烟种植地理分布信息, 利用最大熵模型和ArcGIS空间分析技术, 从生育期尺度筛选出了影响烤烟潜在种植分布的主导气候因子, 构建了烤烟种植分布—气候关系模型, 分析了1961—2010年以及未来气候变化情景(RCP4.5和RCP8.5)下2050年代(2041—2060年)和2070年代(2061—2080年)河南烤烟潜在种植分布气候适宜性的年代际变化规律。

表6 2050年代和2070年代河南烤烟潜在种植分布的主导气候因子年代际变化

Table 6 Decadal dynamics of the dominant climatic factors affecting the cultivation distribution of flue-cured tobacco in Henan in 2050s and 2070s

| 年代               | AT <sub>10</sub> -2 | AT <sub>10</sub> -1 | Pre-1  | DTR-3 | AT <sub>10</sub> -3 | RH-4 | Pre-2 | Pre-4  |
|------------------|---------------------|---------------------|--------|-------|---------------------|------|-------|--------|
| 1981—2010年       | 1093.2              | 900.5               | 97.0   | 8.4   | 1080.3              | 74.6 | 191.8 | 477.5  |
| 2041—2060年RCP4.5 | +93.9               | +103.2              | +81.4  | +3.3  | +103.6              | -4.5 | -1.3  | +24.8  |
| 2041—2060年RCP8.5 | +115.8              | +121.8              | +83.1  | +3.6  | +141.4              | -4.8 | -5.3  | +31.1  |
| 2061—2080年RCP4.5 | +109.9              | +112.6              | +69.3  | +3.5  | +128.6              | -5.8 | 0.0   | +6.4   |
| 2061—2080年RCP8.5 | +141.9              | +132.7              | +123.2 | +3.1  | +153.1              | -1.7 | +3.9  | +100.3 |

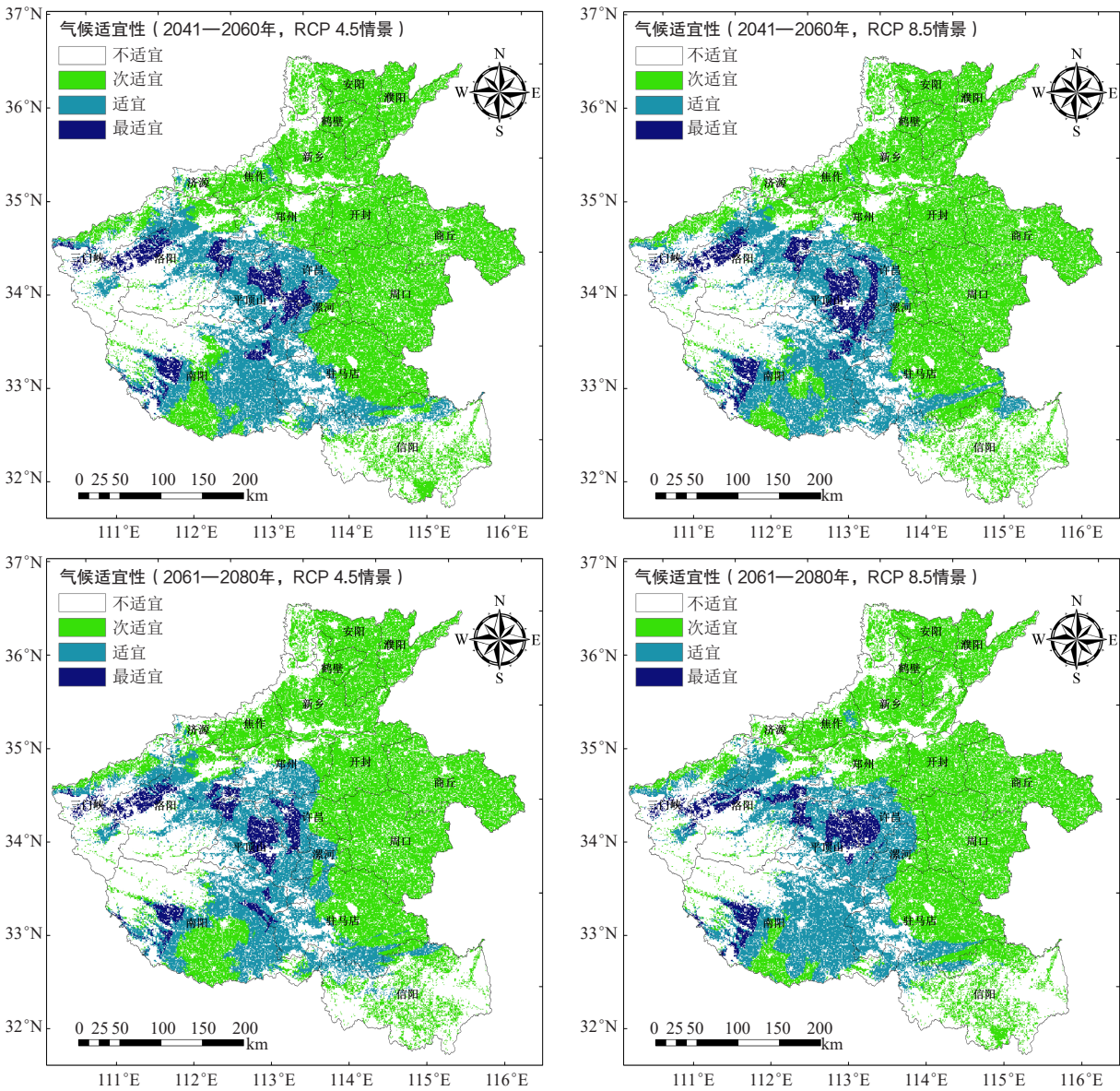


图6 2050年代和2070年代河南烤烟潜在种植区气候适宜性

Fig. 6 Changes of potential flue-cured tobacco cultivation areas in Henan in 2050s and 2070s

研究表明，最大熵模型适于模拟河南烤烟的潜在种植分布，基于最大熵模型构建的河南烤烟潜在种植分布与气候因子关系模型的准确性达到“好”的标准（AUC值为0.821）。影响河南烤烟潜在种植分布的主导气候因子有8个：伸根期 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 活动积温（23.0%）、伸

根期降雨量（16.7%）、大田期降雨量（9.1%）、旺长期降雨量（9.0%）、成熟期 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 活动积温（8.4%）、大田期相对湿度（7.5%）、成熟期日较差（6.7%）和旺长期 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 活动积温（5.0%），累积贡献率达到85.4%。根据河南烤烟的存在概率，可将河南烤烟潜在种植

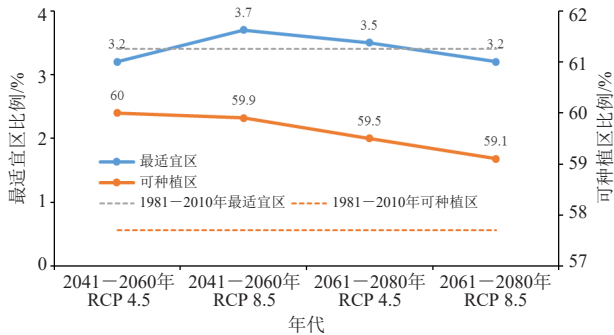


图7 2050年代和2070年代河南烤烟潜在最适宜区和可种植区面积百分比的年代际变化

Fig. 7 Decadal dynamics of potential and most suitable flue-cured tobacco cultivation distribution in Henan in 2050s and 2070s

表7 2050年代和2070年代河南烟区烤烟潜在种植区面积比例的年代际变化

Table 7 Decadal dynamics of percentage of potential flue-cured tobacco cultivation distribution in Henan in 2050s and 2070s

| 年代               | 最适宜区 | 适宜区  | 次适宜区 | 不适宜区 | 可种植区 | 平均AUC |
|------------------|------|------|------|------|------|-------|
| 1981—2010年       | 3.4  | 18.0 | 36.3 | 42.3 | 57.7 | 0.821 |
| 2041—2060年RCP4.5 | -0.2 | -1.6 | +4.1 | -2.3 | +2.3 | 0.818 |
| 2041—2060年RCP8.5 | +0.3 | -2.0 | +3.9 | -2.2 | +2.2 | 0.809 |
| 2061—2080年RCP4.5 | +0.1 | -1.5 | +3.2 | -1.8 | +1.8 | 0.814 |
| 2061—2080年RCP8.5 | -0.2 | -0.3 | +1.9 | -1.4 | +1.4 | 0.812 |

区划分成4个等级：不适宜区（占全省面积的42.3%）、次适宜区（36.3%）、适宜区（18.0 %）和最适宜区（3.4 %）。河南烤烟的可种植区（包括气候次适宜区、适宜区和最适宜区）占全省面积的57.7%，大于当前烤烟的种植范围。这是因为本研究主要考虑该气候条件下烤烟是否能够存在，并未考虑诸如农业规划等因素。另外，年代际变化显示，20世纪70年代后，河南烤烟潜在可种植区总体呈增加趋势，进一步表明，河南烤烟生产还有较大的发展空间。

RCP4.5和RCP8.5情景下，2050年代和2070年代河南烤烟的总气候适宜区面积（次适宜、适宜、最适宜）较1981—2010年种植适宜面积有所增加，主要原因在于RCP情景下2050年代和2070年代的气候预估与1981—2010年数据相比，RCP情景下预估的8个主导气候要素在空间上存在差异，导致可种植区在空间分布上与1981—2010年河南烤烟气候适宜区发生变化。总体而言，在未来气候情景下，烤烟潜在可种植区面积呈增加趋势，最适宜区和次适宜区的面积均有增加趋势，而适宜区面积呈减少趋势。

以往关于河南烤烟区划<sup>[32-35]</sup>都是基于多个限制因子的阈值来逐步确定其分布区。由于影响烤烟生长因子的多样性及相互间关系的复杂性，特别是限制

因子阈值的选择存在一定误差，这种累积误差可能导致最后确定的分布区与实际分布差异较大。为减小这一误差，本研究选取作物在待预测地区的存在概率这一综合指标来划分作物的潜在种植分布区。该方法考虑了所有主导因子的综合影响，有助于更加准确地进行河南烤烟区划或分区，从而可为准确评估烤烟对气候变化的适应性及脆弱性，制定应对气候变化的科学策略提供依据。根据河南省烟草气候适宜性评价图（图8）<sup>[33]</sup>，对比分析1981—2010年河南烤烟种植的气候适宜区划分，可以发现利用最大熵模型获取的结果与已有结果具有较好的一致性，从一定程度上说明该方法是可行的。

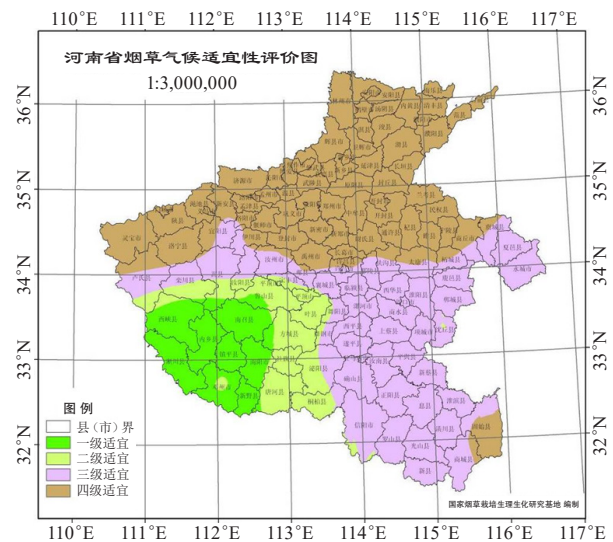


图8 河南省烟草气候适宜性评价分区

Fig. 8 Evaluation map of climate suitability for tobacco planting in Henan

需要注意的是，本研究给出的是河南烤烟的潜在种植区分布，现实中河南烤烟种植实际分布不仅取决于平均的气候条件，还受到极端天气气候事件、农业气象灾害以及社会经济结构、土壤类型、品种的差异、生产技术水平、农业规划等影响。因此，在实际应用时需要根据具体情况作进一步的深入研究。

研究中使用的RCP4.5和RCP8.5数据是区域气候模式输出的对未来气候变化情景的模拟，虽然相比全球气候模式，区域气候模式对区域气候模拟表现出明显的优势，并且已较过去有较大幅度的完善，但其对类似本文研究的局地尺度上的数据预估仍存在不确定性，同时这也是IPCC在全球气候变化预测中被广泛认可的数据集，但仍具有一定的不确定性<sup>[43-44]</sup>。

## 参考文献

- [1] 姜彤,李修仓,巢清尘,等.《气候变化2014: 影响、适应和脆弱性》的主要结论和新认知.气候变化研究进展,2014,10(3): 157-166.

- [2] 鲁克, 贺一鸣, 毛伟, 等. 未来气候变化下黑沙蒿在中国的潜在地理分布及变迁. 应用生态学报, 2020, 31 (11): 3758-3766.
- [3] 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.
- [4] Tanaka N, Nakao K, Tsuyama I, et al. Predicting the impact of climate change on potential habitats of fir (*Abies*) species in Japan and on the East Asian continent. *Procedia Environmental Sciences*, 2012, 13: 455-466.
- [5] 李焱, 张兴旺, 方炎明. 气候变暖对中国栓皮栎地理分布格局影响的预测. 应用生态学报, 2014, 25(12): 3381-3389.
- [6] 曹向锋, 钱国良, 胡白石, 等. 采用生态位模型预测黄顶菊在中国的潜在适生区. 应用生态学报, 2010, 21(12): 3063-3069.
- [7] Phillips S J, Andetson R P, Schapire R E. Maximum entropy modeling of species geographic distribution. *Ecological Modelling*, 2006, 190(3): 231-259.
- [8] Elith J, Phillips S J, Hastie T, et al. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and Distributions*, 2011, 17(1): 43-57.
- [9] Peterson A T, Papes M, Eaton M. Transferability and model evaluation in ecological niche modeling: a comparison of GARP and MaxEnt. *Ecography*, 2007, 30(4): 550-560.
- [10] 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.
- [11] 段居琦, 周广胜. 中国单季稻种植北界的初步研究. 气象学报, 2012, 70(5): 1165-1172.
- [12] 段居琦, 周广胜. 我国单季稻种植区的气候适宜性. 应用生态学报, 2012, 23(2): 426-432.
- [13] He Q J, Zhou G S. Studies on the climatic suitability for maize cultivation in China. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(43): 395-403.
- [14] 何奇瑾, 周广胜, 隋兴华, 等. 1961-2010年中国春玉米潜在种植分布的年代际动态变化. 生态学杂志, 2012, 31(9): 2269-2275.
- [15] 何奇瑾, 周广胜. 我国夏玉米潜在种植分布区的气候适宜性研究. 地理学报, 2011, 66(11): 1443-1450.
- [16] 许翰林, 刘瑶, 袁晓峰, 等. 气候变化对冀西北青贮玉米种植布局影响的预测. 作物杂志, 2020(1): 124-129.
- [17] 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.
- [18] 孙敬松, 周广胜. 利用最大熵法(MaxEnt)模拟中国冬小麦分布区的年代际动态变化. 中国农业气象, 2012, 33(4): 481-487.
- [19] 陈衍如, 谢敏慧, 罗火林, 等. 气候变化对寒兰分布的影响及其分布格局模拟. 应用生态学报, 2019, 30(10): 3419-3425.
- [20] 刘超, 霍宏亮, 田路明, 等. 不同气候情景下木梨潜在地理分布格局变化的预测. 应用生态学报, 2020, 31(12): 4073-4079.
- [21] 张星星, 张炜, 徐晶晶, 等. 基于GIS和最大熵模型的河北省油松适宜性分布分析. 地理与地理信息科学, 2020, 36(6): 18-25.
- [22] 王莉, 韦翡翠, 成希, 等. 基于MaxEnt和ArcGIS的定西市蒙古黄芪适宜性区划研究. 中国药房, 2020, 31(3): 321-324.
- [23] 王茹琳, 王明田, 罗家栋, 等. 基于MaxEnt模型的美味猕猴桃在中国气候适宜性分析. 云南农业大学学报(自然科学), 2019, 34(3): 522-531.
- [24] 厉静文, 郭浩, 王雨生, 等. 基于MaxEnt模型的胡杨潜在适生区预测. 林业科学, 2019, 55(12): 133-139.
- [25] 程晋昕, 段长春, 闫生杰. 基于MaxEnt模型的薄壳山核桃气候适宜性区划. 应用气象学报, 2020, 31(5): 631-640.
- [26] 李宁宁, 张爱平, 张林, 等. 气候变化下青藏高原两种云杉植物的潜在适生区预测. 植物研究, 2019, 39 (3): 395-406.
- [27] Yin X J, Zhou G S. Climatic suitability of the potential geographic distribution of *Fagus longipetiolata* in China. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 73: 1143-1149.
- [28] 屈振江, 周广胜. 中国富士苹果种植的气候适宜性研究. 气象学报, 2016, 74(3): 479-490.
- [29] 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.
- [30] 王彦亭, 谢剑平, 李志宏. 中国烟草种植区划. 北京: 科学出版社, 2010.
- [31] 中国种植业信息网农作物数据库. 2015-12-20. <http://www.zzys.gov.cn/nongqing.aspx>.
- [32] 杨扬. 河南省烟草的生态适宜性评价及种植区划研究. 郑州: 河南农业大学, 2006.
- [33] 叶协锋. 河南省烟草种植生态适宜性区划研究. 西安: 西北农林科技大学, 2011.
- [34] 周俊学. 洛阳烟区烤烟化学成分与生态因素的关系. 郑州: 河南农业大学, 2009.
- [35] 张笛. 基于GIS的豫中烟区区划研究. 郑州: 河南农业大学, 2012.
- [36] van Vuuren D P, Edmonds J A, Kainuma M, et al. A special issue on the RCPs. *Climatic Change*, 2011, 109: 1-4.
- [37] van Vuuren D P, Edmonds J A, Kainuma M, et al. The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change*, 2011, 109: 5-31.
- [38] 王绍武, 罗勇, 赵宗慈, 等. 新一代温室气体排放情景. 气候变化研究进展, 2012, 8 (4): 305-307.
- [39] 王雅婕. 中国地表太阳辐射变化与模型研究. 北京: 中国科学院, 2008.
- [40] 陈海生, 刘国顺, 刘大双, 等. GIS支持下的河南省烟草生态适宜性综合评价. 中国农业科学, 2009, 42(7): 2425-2433.
- [41] 刘国顺. 烟草栽培学. 北京: 中国农业出版社, 2003.
- [42] 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.
- [43] 石英, 高学杰, 吴佳, 等. 华北地区未来气候变化的高分辨率数值模拟. 应用气象学报, 2010, 21(5): 580-589.
- [44] 王美丽, 高学杰, 石英, 等. RegCM4模式对云南及周边地区干旱化趋势的预估. 高原气象, 2015, 34(3): 706-713.