

中国双季稻种植区的气候适宜性研究

段居琦^{1,2}, 周广胜^{1,3}

(¹ 中国气象科学研究院, 北京 100081; ² 南京信息工程大学大气物理学院, 南京 210044; ³ 中国科学院植物研究所植被与环境变化国家重点实验室, 北京 100093)

摘要:【目的】从国家层次和年尺度阐明影响中国双季稻种植分布的主导气候因子, 揭示中国双季稻种植分布及其气候适宜性, 可为优化双季稻生产布局、改进种植制度和确保粮食生产安全提供科学依据。【方法】从中国区域和年尺度选取影响中国水稻种植分布的潜在气候因子, 利用双季稻的地理分布信息及其对应的气候资料, 结合最大熵模型和 ArcGIS 软件的空间分析功能, 阐明影响中国双季稻种植分布的主导气候因子并构建中国双季稻种植分布与气候的关系模型。【结果】影响中国双季稻种植分布的主导气候因子有: 年降水量、最暖月平均气温和稳定通过 18℃ 持续日数, 它们对双季稻种植分布的累积贡献率达潜在气候因子的 99.1%; 基于主导气候因子和最大熵模型构建的中国双季稻种植分布与气候的关系模型能够很好地模拟中国双季稻种植区分布; 中国适宜种植双季稻的国土面积达 174 万 km², 远大于目前种植面积; 根据待预测区双季稻的存在概率给出了中国双季稻种植区的气候适宜性分区, 并分析了各气候适宜区的主导气候因子特征。【结论】利用最大熵模型构建的中国双季稻分布与气候的关系模型揭示了中国双季稻种植区的潜在分布及其气候适宜性, 从气候适宜性角度来说, 中国双季稻种植面积还有很大的扩展潜力。

关键词: 双季稻; 潜在分布; 气候适宜性; 主导气候因子; 最大熵模型

Climatic Suitability of Double Rice Planting Regions in China

DUAN Ju-qi^{1,2}, ZHOU Guang-sheng^{1,3}

(¹ Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081; ² School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044; ³ State Key Laboratory of Vegetation and Environmental Change, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093)

Abstract: 【Objective】 The objectives of this study are to clarify major climate factors affecting the distribution of double rice planting regions in China based on national and annual scales, and to give the distribution of double rice planting regions and their climate suitability divisions, in order to provide a scientific basis for optimizing double rice allocation of production, modifying cropping pattern and ensuring food security. 【Method】 In terms of potential climate factors selected from the related literatures based on national and annual scales, double rice geographic information from national agrometeorological observation stations of China Meteorological Administration (CMA), together with the maximum entropy model (MaxEnt) and the spatial analysis function of ArcGIS software, major climate factors affecting the distribution of double rice planting regions in China were clarified, and the relationship between the distribution of double rice planting regions and climate were discussed. 【Result】 The results show that annual precipitation (P), mean temperature of the warmest month (T_w) and days of not less than 18℃ stably (N_{18}) are dominant climate factors affecting the distribution of double rice planting regions in China, contributing 99.1% of all the potential climate factors. The distribution of double rice planting regions in China is simulated well in terms of the maximum entropy model and the selected dominant climate factors. The suitable land area for planting double rice in China is 1.74 million km², and it is more than the

收稿日期: 2011-06-14; 接受日期: 2011-10-14

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (2010CB951303)、公益性行业 (农业) 科研专项经费 (200903003)、中国气象局经常性业务经费

联系方式: 段居琦, E-mail: duanjq09@163.com. 通信作者周广胜, E-mail: gszhou@cma.gov.cn

practical cultivated area (60 105 km²). Furthermore, the climatic suitability divisions of double rice planting regions in China are given based on its appearance frequency. The climate characteristics of double rice in each climatic suitability region are analysed, respectively. 【Conclusion】 The relationship between the distribution of double rice planting regions and climate based on the maximum entropy model is able to reveal the distribution of double rice planting regions and its climatic suitability divisions in China. The results indicate that double rice could be largely developed in China due to its huge climate suitable planting regions. The results can provide reference for double rice planting pattern and countermeasures to cope with climate change in China.

Key words: double rice; potential distribution; climatic suitability; dominant climate factors; maximum entropy model (MaxEnt)

0 引言

【研究意义】中国是世界上最大的水稻生产国，稻谷产量在中国各粮食作物中居于首要地位^[1]。根据稻作制度的不同，中国水稻可分为单季稻和双季稻，其种植区域决定于种植区的农业气候资源^[2]。充分利用农业气候资源，科学地种植双季稻，提高复种指数，是保证农作物播种面积稳定增加和提高粮食生产能力的重要途径之一^[3-4]。中国位于欧亚大陆东南部季风气候区，兼具季风性和大陆性气候的特点，气候类型多样，全球变化背景下，其农业气候资源和农业生产受到的影响甚为明显^[2,5-6]。近年来，气候变化已经对农作物种植结构及水稻的分布界限、物候期、产量等产生了重要的影响^[7-10]，粮食生产安全受到国内外高度重视。研究中国双季稻种植区的潜在分布及其气候适宜性，可以为改进双季稻的生产布局、评估双季稻生产对气候变化的适应性和脆弱性及制定适应气候变化的政策等提供参考。【前人研究进展】尺度本质上是自然界固有的特征或规律，人类对现象的研究是在一定的观测和分析尺度下进行的，不同的观测和分析尺度将检测到不同的现象，根据适宜的测量尺度可以揭示和把握现象尺度中的规律性^[11-12]。为促进水稻生产，确保稳产高产，已有研究基于气候指标、地形地貌和生产水平等在全国、省、市级区域等不同空间尺度和水稻关键生育时期、生长季和年内种植制度等不同时间尺度上开展了水稻区划研究^[13-17]，并进行了局地的基于现实水稻生长关键期的水稻气候适宜性研究^[18-19]。但是，现有的水稻气候区划研究在研究区域的空间尺度、影响因子选取的时间尺度方面存在很大的不一致，制约着水稻气候区划在实际指导中的作用发挥。为充分利用气候资源服务于农业生产、确保粮食稳产高产，迫切需要从不同空间尺度研究影响水稻分布的主导气候因子，给出不同空间尺度的水稻气候区划及其适宜性。同时，近年来用于预测物种分布的模型技术取得了快速发展^[20-23]，为研究作物种植区的气候适宜性提

供了新途径。其中，Phillips 等根据最大熵原理建立的最大熵模型是一种机器学习模型，在同等条件下对物种潜在分布模拟的精度高于其它生态位模型^[24-25]，特别是，它可以预测物种存在的概率。【本研究切入点】目前在中国区域、年尺度上影响双季稻种植区潜在分布的主导气候因子尚未明确，且以存在概率揭示双季稻气候适宜性的研究尚未见报道。【拟解决的关键问题】本研究利用 ArcGIS 的空间分析功能，对最大熵模型给出的双季稻存在概率进行分析。揭示中国区域和年尺度上影响双季稻种植分布的主导气候因子，旨在阐明中国双季稻潜在种植区及其扩展潜力，给出中国双季稻气候适宜性分区及主导气候因子的空间配置差异。

1 材料与方法

1.1 数据的收集与处理

本研究使用的数据主要有中国双季稻的地理分布数据和气候数据，来自于国家气象信息中心，包括 46 个具有明确地理信息（经纬度）记录的双季稻农业气象观测站，1971—2000 年一个气候标准年的中国地面气候资料日值数据集中的 741 个气象站点。采用空间卷积算法，结合气象站点位置的截断高斯滤波算子作为距离权重方程^[26-27]，将日平均气温和日降水量 2 个气候要素插值到空间分辨率 10 km×10 km，作为基础气候数据。研究区域、气象台站和双季稻站点地理分布信息如图 1 所示。数据处理软件为 ArcGIS 9.3。

1.2 研究方法

1.2.1 影响因子筛选 研究表明，在区域及全球中大尺度上，水热气候因子是影响植被分布的主要环境因子^[28-29]。空间尺度以中国区域为基准，时间尺度以年为基准，基于已有的水稻区划，结合自然植被区划，筛选出以下 9 个具有明确生物学意义的可能影响水稻种植分布的潜在气候因子（表 1）。

表 1 中， ≥ 0 °C 积温 ($\sum T_0$) 反映了某一地区广义的适宜农耕期内的热量累积； ≥ 10 °C 积温 ($\sum T_{10}$) 反

表 1 影响中国水稻种植分布的潜在气候因子
Table 1 Potential climate factors affecting distribution of rice planting regions in China

| 潜在气候因子 Potential climate factors | 文献出处 Reference |
|---|----------------|
| ≥0℃积温 Accumulated temperature of not less than 0℃ ($\sum T_0$, °C d) | [30, 31] |
| ≥10℃积温 Accumulated temperature of not less than 10℃ ($\sum T_{10}$, °C d) | [15, 32] |
| 稳定通过 10℃持续日数 Days of not less than 10℃ stably (N_{10} , d) | [14] |
| 稳定通过 18℃持续日数 Days of not less than 18℃ stably (N_{18} , d) | [14] |
| 最冷月平均气温 Mean temperature of the coldest month (T_C , °C) | [15, 30, 31] |
| 最暖月平均气温 Mean temperature of the warmest month (T_W , °C) | [13, 15, 30] |
| 气温年较差 Annual range of temperature (ART, °C) | [30, 33] |
| 年降水量 Annual precipitation (P , mm) | [13, 30] |
| 湿润指数 Moisture index (MI) | [30, 34] |

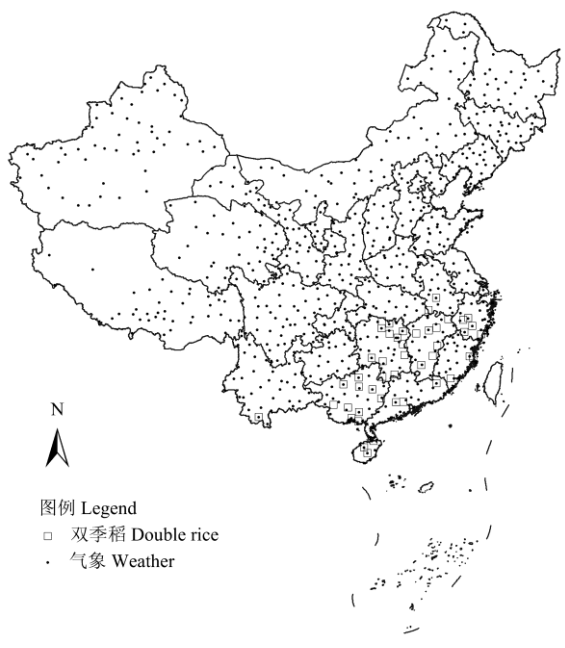


图 1 研究区域、气象台站及双季稻站点地理分布
Fig. 1 Location of the weather, double rice stations in China

映了喜温作物生长期内的热量累积；稳定通过 10℃持续日数 (N_{10}) 为喜温作物生长期，稳定通过 18℃持续日数 (N_{18}) 反映水稻幼穗分化到抽穗扬花期所要求的高温期；最冷月平均温度 (T_C) 表示寒冷程度，反映最差热量条件对植物的限制；最暖月平均温度 (T_W) 表示温暖程度，反映最好热量条件对植物的满足程度；气温年较差 (ART) 是气温年变化的幅度，反映了气候的大陆性；年降水量 (P) 用来反映水分资源的绝对数量，可作为一些作物的分界线；湿润指数 (MI) 是水分的收支比率，反映了气候的湿润程度。

≥0℃积温、≥10℃积温从累积程度方面反映热量资源；稳定通过 10℃持续日数、稳定通过 18℃持续日数从持续时间方面反映热量资源；最冷月平均温度、最暖月平均温度和气温年较差从强度方面反映热量资源；年降水量和湿润指数从绝对数量和收支平衡方面反映水分资源。可以认为，所选指标合理反映了研究区域的水热气候资源。

各界限温度积温采用累积法计算：
$$Y = \sum_{i=1}^n t_B$$

式中， Y 为活动积温， B 为各界限温度， t_B 为高于 B 的活动温度， i 为稳定通过 t_B 的第 i 天， n 为 t_B 出现的总日数^[35]。稳定通过界限温度的日数采用中国气象局规定的全国各气象台站计算界限温度起止日期的五日滑动平均法计算^[35]。最冷月平均气温 (T_C) 为 1 月平均气温；最暖月平均气温 (T_W) 为 7 月平均气温；气温年较差 (ART) 为 $T_W - T_C$ 。湿润指数 (MI) 采用 Holdridge 生命地带系统方法^[34]计算：

$$MI = \frac{P}{PET} = \frac{P}{58.93 \times BT}, \quad BT = \frac{\sum t}{365}$$

式中， P 为年降水量， PET 为生物温度的潜在蒸散， BT 为年平均生物温度， t 为 ≤30℃ 与 ≥0℃ 的日平均气温，当 $t > 30℃$ 时，取 $t = 30℃$ ；当 $t < 0℃$ 时，取 $t = 0$ 。

据此，求取气候标准年（1971—2000 年）9 个气候因子的年平均值。

1.2.2 研究方法 本研究所用的最大熵模型是 Phillips 等^[24]建立的模拟物种分布的 MaxEnt 模型 3.3.3a 版，来自于该软件的官方网站 (<http://www.cs.princeton.edu/~schapire/maxent/>)。利用 ArcGIS 的空间分析功能，对最大熵模型给出的双季稻存在概率进行分析。具体研究方法如下：

(1) 模型输入资料的格式转换。将基于 $10\text{ km}\times 10\text{ km}$ 格点数据计算的 9 个潜在气候因子,作为最大熵模型的环境变量层输入;将双季稻站点地理分布信息整理成 CSV 格式,作为最大熵模型的训练样本数据。

(2) 初始模型的构建。选中 Create response curves 选项,其它选项采用模型的默认设置,构建双季稻种植区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)对建立的最大熵模型模拟结果精度进行评价。

(3) 主导因子的选取。根据各潜在气候因子对双季稻种植区潜在分布影响贡献率的大小,揭示影响中国双季稻种植区潜在分布的主导气候因子。在此基础上,重建中国双季稻种植区潜在分布的最大熵模型,并进行模拟结果精度评价。

(4) 双季稻种植区及气候适宜性分区。利用 ArcGIS 的格式转换工具 Conversion Tools 将预测结果的 ASC II 转化为 Raster 格式;最大熵模型预测结果给出的是作物在待预测地区的存在概率 P ,取值范围在 0—1 之间,为得到中国双季稻种植区的气候适宜性分区,利用 Spatial Analysis Tools 的 Reclassify 功能选择合适的阈值进行气候适宜性分区。参考 IPCC 报告^[36]关于评估可能性的划分方法,结合双季稻实际情况,双季稻种植区及气候适宜性按如下标准分区: $P\geq 0.05$ 为双季稻可种植区; $P<0.05$ 为气候不适宜区, $0.05\leq P$

<0.33 为气候低适宜区, $0.33\leq P<0.66$ 为气候中适宜区, $P\geq 0.66$ 为气候高适宜区。同时给出最大熵模型方法和 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温 $5\,300\text{ }^{\circ}\text{C d}$ 方法^[37]确定的双季稻种植北界。

(5) 以双季稻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,量化分析双季稻种植区各气候适宜性分区气候因子的阈值。

2 结果

2.1 模拟精度评价

应用最大熵模型模拟输出的 ROC 曲线评估模型模拟的准确性。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,取值范围为[0, 1]^[24]。AUC 值的评估标准为: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)^[38]。ROC 曲线绘制及 AUC 值的具体计算由最大熵模型直接输出。结果表明(表 2),基于 9 个潜在气候因子的最大熵模型的 AUC 值达 0.960,对照 AUC 值的评判标准,模拟结果达到非常好,表明所构建模型可用于双季稻种植区的潜在分布模拟。

表 2 中国双季稻种植区模拟结果的 AUC 值
Table 2 AUC values of maximum entropy model of double rice planting regions in China

| | AUC | |
|-----------------|---|--|
| | 基于潜在气候因子 Based on potential climate factors | 基于主导气候因子 Based on dominant climate factors |
| 双季稻 Double rice | 0.960 | 0.956 |

2.2 主导气候因子筛选及其对双季稻种植分布的影响

对生物生长发育起作用的因子,都是生物所必需的,但在一定条件下,必有起主导作用的主导因子,确定主导气候因子有助于揭示气候变化对水稻生产的影响。表 3 给出了 4 个气候因子对中国双季稻种植区潜在分布的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年降水量(81.0%)、最暖月平均气温(12.4%)、稳定通过 $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 持续日数(5.7%)和稳定通过 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 持续日数(0.5%)。一般认为,当特征值的累积贡献率超过 85%且其后某一因

子的贡献率低于 5%时不再累积,这些因子反映了主导因子。因此,可以认为年降水量、最暖月平均气温和稳定通过 $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 持续日数是 $10\text{ km}\times 10\text{ km}$ 空间分辨率下影响中国双季稻种植区潜在分布的主导气候因子。

基于筛选的主导气候因子,结合最大熵模型,重新构建双季稻潜在分布模拟模型。结果显示(表 2),基于主导气候因子的 AUC 值达 0.956,模拟结果准确性达到非常好的标准,表明基于筛选的主导气候因子构建的模型可用于双季稻种植分布模拟。

表 3 影响中国双季稻种植区的气候因子的贡献率

Table 3 Contribution rate of climate factors affecting double rice planting region in China

| 气候因子 | 贡献百分率 | 累积贡献百分率 |
|--|--------------------------|--------------------------------------|
| Climate factors | Percent contribution (%) | Accumulated percent contribution (%) |
| 年降水量 Annual precipitation (mm) | 81.0 | 81.0 |
| 最暖月平均气温 Mean temperature of the warmest month (°C) | 12.4 | 93.4 |
| 稳定通过 18℃持续日数 Days of not less than 18℃ stably (d) | 5.7 | 99.1 |
| 稳定通过 10℃持续日数 Days of not less than 18℃ stably (d) | 0.5 | 99.6 |

就双季稻存在概率与单个气候因子的关系来看,双季稻适宜种植区需要较充沛的降水、较高的最暖月平均气温和一定的稳定通过 18℃持续日数(图 2)。当年降水量、最暖月平均气温和稳定通过 18℃持续日数低于约 1 000 mm、20℃和 100 d 时,水稻存在概率低于 0.05,此时单个气候因子会成为双季稻种植分布的限制因子;高于相应值后,双季稻存在概率开始升高,并最终趋于最大,此时单个气候因子对双季稻种植的满足程度达到最大。

2.3 双季稻种植区

根据筛选出的影响中国双季稻种植分布的 3 个主

导气候因子,再次进行最大熵模型模拟,以 $P\geq 0.05$ 作为双季稻可种植区的划分标准,给出了中国双季稻的种植北界(图 3)。BJ_MaxEnt 以南地区为双季稻潜在种植区,与 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温确定的双季稻种植北界(BJ_ΣT₁₀)相比,在云南、贵州、广西三省区交界以东地区偏北 1—6 个纬度,以西地区偏南 0—1 个纬度。中国双季稻种植区的潜在分布区主要位于江苏、安徽、湖南、湖北、云南南部,四川盆地东部、重庆大部,台湾和长江中下游以南的广大地区,包括浙江、江西、湖南、福建、广东、广西和海南等地区,其国土面积达 174 万 km²。

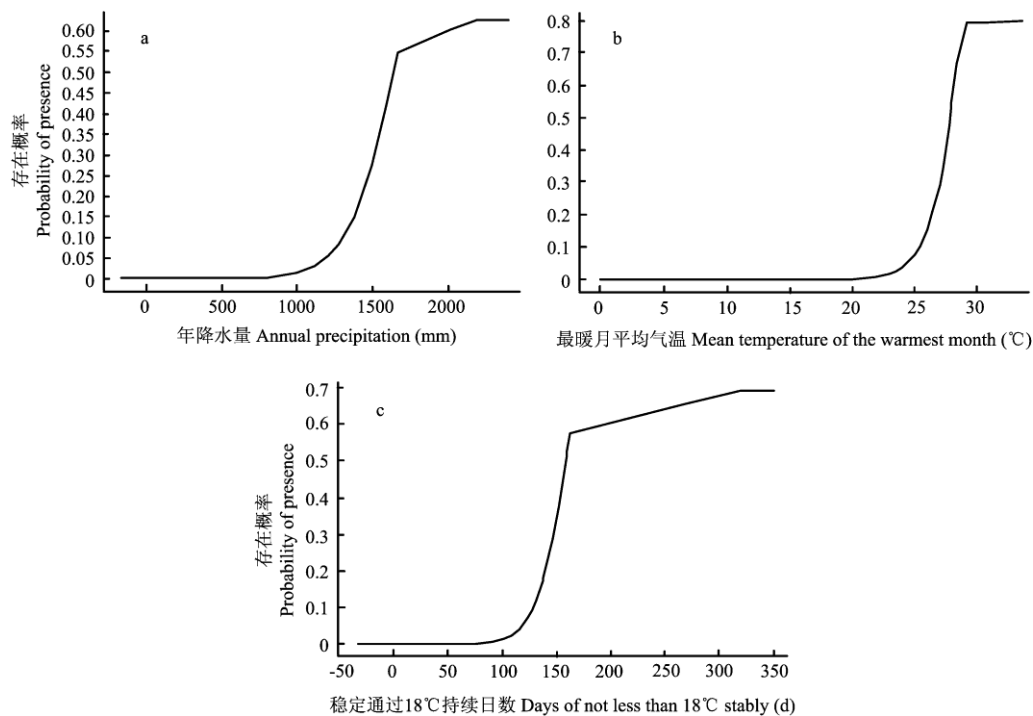


图 2 双季稻存在概率与各气候因子的关系图

Fig. 2 Relationships between presence probability of double rice and climate factors

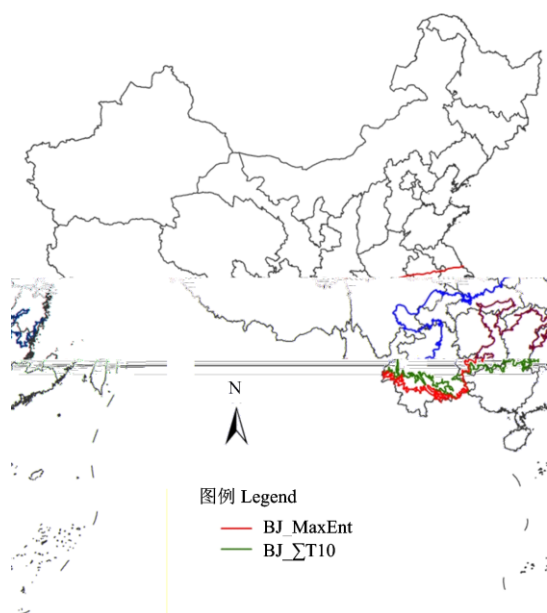


图3 中国双季稻种植区北界

Fig. 3 Double rice planting northern boundary in China

2.4 双季稻种植区的气候适宜性

根据双季稻-主导气候因子关系的最大熵模型模拟结果,结合双季稻种植区气候适宜性分区划分标准,给出了中国双季稻种植区的气候适宜性分区(图4)。

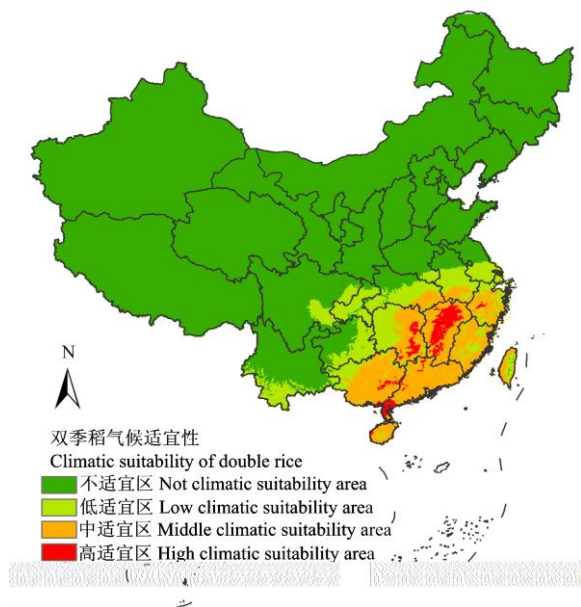


图4 中国双季稻种植区的气候适宜性

Fig. 4 Climatic suitability of double rice planting regions in China

各气候适宜性分区及其主要气候特征如下:

双季稻种植区的气候低适宜区,主要分布于江苏南部、安徽中部、河南南部、湖北中部、湖南西部、重庆大部、四川东部、贵州东部、广西西部、云南南部和浙江、福建部分地区等地区,其国土面积达 80 万 km^2 ,该适宜区的主要气候特征为年降水量 1 132—1 840 mm,最暖月平均气温 21.3—28.1℃,稳定通过 18℃持续日数 97—227 d;

双季稻种植区的气候中适宜区,主要分布于湖北、安徽南部,湖南东部、江西周边地区、福建、浙江、广西、广东、海南和台湾西部等地区,其国土面积达 82 万 km^2 ,该适宜区的主要气候特征为年降水量 1 463—2 114 mm,最暖月平均气温 26.1—28.6℃,稳定通过 18℃持续日数 139—275 d;

双季稻种植区的气候高适宜区,主要分布于江西中部、湖南东部、雷州半岛及广西局部等地区,其国土面积达 12 万 km^2 ,该适宜区的主要气候特征为年降水量 1 629—1 988 mm,最暖月平均气温 28.4—29.1℃,稳定通过 18℃持续日数 158—266 d;

中国其它地区为双季稻种植区的气候不适宜区,其主要气候特征为年降水量 65—1 244 mm,最暖月平均气温 6.6—26.9℃,稳定通过 18℃持续日数 0—142 d。

3 讨论

3.1 主导气候因子的筛选

本研究在已有研究的基础上,筛选了影响水稻种植分布的潜在气候因子,结合最大熵模型方法,给出了各气候因子对双季稻种植区潜在分布的贡献率,确定了影响双季稻分布的主导气候因子,进行再建模,结果表明,用主导气候因子作为环境变量模拟的中国双季稻种植区潜在分布的模拟精度达到了原来的 99.6%,说明所选主导气候因子能够反映影响中国双季稻种植区潜在分布的气候状况。最大熵模型可以利用当前种植制度下双季稻地理分布信息和主导气候因子数据,进行中国双季稻种植区潜在分布的较好预测,主要原因可能是该模型算法明确,而且其规则化程序可以阻止在小样本的情况下发生过拟合^[24,39]。模型用物种存在数据预测到的潜在分布区,代表了与分布区具有相似环境条件的地区^[40]。

3.2 双季稻种植区的界定

试验结果表明,耐寒性较强的粳稻,抽穗扬花期要求日平均气温稳定在 20℃以上,但中国西南的云贵

高原夏季高温不足,水稻常在 20°C 以下, 18°C 以上仍能抽穗扬花。因此,采用试验与实践相结合的热量指标才能更符合于实际^[14]。本研究通过对各潜在气候因子影响双季稻种植分布贡献率大小的分析表明,稳定通过 18°C 持续日数是影响双季稻种植分布的一个重要指标,将其作为影响中国双季稻种植分布指标反映了能够满足水稻抽穗扬花期高温需求的持续时间^[14]。有研究把 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温 $5\,300^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 作为双季稻分布的安全北界^[37]。本研究根据影响中国双季稻种植分布的3个主导气候因子,即年降水量、最暖月平均气温和稳定通过 18°C 日数,结合最大熵模型方法,分析了中国农业气候资源与目前种植制度下双季稻种植区气候条件的相似程度,确定的双季稻种植北界(BJ_MaxEnt)与 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温确定的双季稻种植北界(BJ_ΣT₁₀)相比,在云南、贵州、广西三省区交界以东地区偏北1—6个纬度,以西地区偏南0—1个纬度(图3)。实际的双季稻种植北界也已到达江苏、安徽的中北部地区^[41],超过了以 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温 $5\,300^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 确定的双季稻种植北界,与本研究确定的双季稻种植北界更接近,说明最大熵模型方法确定的双季稻种植北界明显优于已有方法确定的双季稻种植北界。可能的原因是以 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温 $5\,300^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 作为双季稻分布的安全北界,是基于调查资料,没有考虑气候因子之间的综合作用,从而导致气候指标阈值选取及区划的误差。

从研究结果来看,本研究在中国区域和年尺度上,给出了双季稻种植区的潜在分布区,比 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温确定的双季稻可种植区范围更广,适宜种植双季稻的国土面积达 174万 km^2 。2008年中国双季晚稻的种植面积为 $61\,105\text{ km}^2$ ^[42],远小于双季稻可种植区国土面积。因此,从气候适宜性角度来说,中国双季稻种植面积还有很大扩展潜力。

3.3 双季稻种植区的气候适宜性分析

中国农林气候区划协作组^[14]在考虑气候、水利与地形条件的基础上,给出了中国水稻气候生态区划,其中双季稻作区主要分布于中国华南地区,西南、华中地区属于单双季稻作区,东北、西北、华北则属于单季稻作区。其中,华南大陆双季稻区早稻易受“龙舟水”洪涝危害,晚稻易受“寒露风”低温冷害;西南、华中地区种植双季稻则多存在热量不足问题,未达到双季稻生产的最佳适宜气候条件,这些地区为本研究结果中的气候中低适宜区。本研究还表明,中国双季稻种植区潜在分布的气候最适

宜区分布于江西中部、湖南东部、雷州半岛及广西局部等地区,这些地区也属于中国水稻气候生态区划的双季稻作区。

通过对双季稻种植区潜在分布的气候适宜性分区的气候特征分析,本研究显示双季稻种植区需要较多降水,双季稻气候低适宜区以上潜在分布区具有年降水量在 $1\,132\text{ mm}$ 以上的气候特征,这与中国双季稻主要分布于年降水量在 $1\,000\text{ mm}$ 以上地区的认识一致。中国双季稻种植区主要潜在分布于东亚季风气候区,该区是年降水量超过 $1\,000\text{ mm}$ 的地区,也是热量资源充沛的地区。双季稻种植区气候最适宜分布区的气候特征是年降水量 $1\,629—1\,988\text{ mm}$,最暖月平均气温 $28.4—29.1^{\circ}\text{C}$,稳定通过 18°C 持续日数 $158—266\text{ d}$,这些气候因子阈值处于各因子对应的双季稻存在概率大的气候因子量值(图2),显示了其气候资源空间配置对双季稻种植较为有利。由于气候因子作用的综合性,因而气候因子不同值之间的组合能够得出同样的气候适宜性等级;由于水热资源空间匹配的不协调,使得一些地区,即使满足了某一气候因子,但由于受其它气候因子的限制,仍为双季稻种植潜在分布的气候不适宜区,这也是不同气候适宜性分区之间气候因子阈值具有交叉的原因。

必须指出,本研究结果是基于中国区域和年尺度、当前双季稻种植制度的自然气候条件下得出的,对于改善灌溉条件、温室育秧等人为调节气候对双季稻种植潜在分布区及其气候适宜性的影响未作考虑。

4 结论

4.1 影响中国双季稻种植分布的主导气候因子为年降水量、最暖月平均气温和稳定通过 18°C 持续日数,它们对双季稻种植分布的累积贡献率达潜在气候因子的99.1%;

4.2 从气候适宜性角度来说,中国双季稻种植面积还有很大扩展潜力;

4.3 给出了中国双季稻气候适宜性分区,即双季稻种植区的气候不适宜区、低适宜区、中适宜区和高适宜区,气候低适宜区以上等级的双季稻种植区具有水热资源丰富的气候特征,双季稻不同气候适宜性等级之间主导气候因子空间配置存在差异。

References

- [1] 程式华, 胡培松. 中国水稻科技发展战略. 中国水稻科学, 2008,

- 22(3): 223-226.
- Cheng S H, Hu P S. Development strategy of rice science and technology in China. *Chinese Journal of Rice Science*, 2008, 22 (3): 223-226. (in Chinese)
- [2] 郭建平. 气候变化背景下中国农业气候资源演变趋势. 北京: 气象出版社, 2010: 1-36.
- Guo J P. *Chinese Agroclimate Resource Changing Trend Under Global Change*. Beijing: China Meteorological Press, 2010: 1-36. (in Chinese)
- [3] 成尚廉. 江汉平原双季稻种植比例试析. 湖北农业科学, 1984(9): 5-7.
- Cheng S L. To analyze ratio of double rice planting in Jiangnan plain. *Journal of Hubei Agricultural Sciences*, 1984(9): 5-7. (in Chinese)
- [4] 梁书民. 我国各地区复种发展潜力与复种行为研究. 农业经济月刊, 2007, 28(5): 85-90.
- Liang S M. Probing potentials of multiple cropping in the selected provinces in China. *Issues in Agriculture Economy*, 2007, 28(5): 85-90. (in Chinese)
- [5] 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.
- Zhou G S, Wang Y H. Study and preview of global change and vegetation-climatic classification. *Chinese Science Bulletin*, 1999, 44(24): 2587-2593. (in Chinese)
- [6] 王石立, 庄立伟, 王馥棠. 近 20 年气候变暖对东北农业生产水热条件影响的研究. 应用气象学报, 2003, 14(2): 152-164.
- Wang S L, Zhuang L W, Wang F T. Impacts of climate warming on thermal and moisture conditions in Northeast China in recent 20 years. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2003, 14(2): 152-164. (in Chinese)
- [7] 云雅如, 方修琦, 王媛, 陶军德, 乔佃锋. 黑龙江省过去 20 年粮食作物种植格局变化及其气候背景. 自然资源学报, 2005, 20(5): 697-705.
- Yun Y R, Fang X Q, Wang Y, Tao J D, Qiao D F. Main grain crops structural change and its climate background in Heilongjiang province during the past two decades. *Journal of Nature Resources*, 2005, 20(5): 697-705. (in Chinese)
- [8] Tao F L, Yokozawa M, Xu Y L, Hayashi Y, Zhang Z. Climate changes and trends in phenology and yields of field crops in China, 1981-2000. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 138(1-4): 82-92.
- [9] Welch J R, Vincent J R, Auffhammer M, Moya P F, Dobbermann A, Dawe D. Rice yields in tropical/subtropical Asia exhibit large but opposing sensitivities to minimum and maximum temperatures. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2010, 107(33): 14562-14567.
- [10] Zhang T Y, Zhu J, Wassmann R. Responses of rice yields to recent climate change in China: An empirical assessment based on long-term observations at different spatial scales (1981-2005). *Agricultural and Forest Meteorology*, 2010, 150(7-8): 1128-1137.
- [11] 吕一河, 傅伯杰. 生态学中的尺度及尺度转换方法. 生态学报, 2001, 21(12): 2096-3015.
- Lu Y H, Fu B J. Ecological scale and scaling. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(12): 2096-3015. (in Chinese)
- [12] McGill B J. Matters of scale. *Science*, 2010, 328(5978): 575-576.
- [13] 丁颖. 中国水稻栽培学. 北京: 农业出版社, 1961: 101-180.
- Ding Y. *Rice Cultivation Science in China*. Beijing: Agriculture Press, 1961: 101-180. (in Chinese)
- [14] 中国农林作物气候区划协作组. 中国农林作物气候区划. 北京: 气象出版社, 1987: 36-55.
- Cooperative Agricultural and Forest Crop Regionalization Group in China. *Agricultural and Forest Crop Climate Regionalization in China*. Beijing: China Meteorological Press, 1987: 36-55. (in Chinese)
- [15] 中国水稻研究所. 中国水稻种植区划. 杭州: 浙江科学技术出版社, 1989: 1-155.
- China National Rice Research Institute. *Rice Cropping Regionalization in China*. Hangzhou: Zhejiang Science and Technology Press, 1989: 1-155. (in Chinese)
- [16] 高永刚, 张凌云, 姚克敏. 我国水稻生育期的生态规律及其区划. 南京气象学院学报, 1998, 21(2): 181-188.
- Gao Y G, Zhang L Y, Yao K M. Regularity of ecological impact on growing period of rice and its regionalization in China. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 1998, 21(2): 181-188. (in Chinese)
- [17] 郑美秀, 蒋宗孝, 伍毓柏, 林玉琪, 张冬松. 三明市水稻气候条件分析与气候区划. 气象科技, 2004, 32(增): 77-79.
- Zheng M X, Jiang Z X, Wu Y B, Lin Y Q, Zhang D S. Climatic condition analysis and agro-climatological regionalization of rice planting in Sanming. *Meteorological Science and Technology*, 2004, 32(S): 77-79. (in Chinese)
- [18] 俞芬, 千怀遂, 段海来. 淮河流域水稻的气候适宜度及其变化趋势分析. 地理科学, 2008, 28(4): 537-542.
- Yu F, Qian H S, Duan H L. Climate suitability of rice and its changes in Huaihe watershed. *Scientia Geographica Sinica*, 2008, 28(4): 537-542. (in Chinese)
- [19] 赖纯佳, 千怀遂, 段海来, 宋秋洪. 淮河流域双季稻气候适宜度及其变化趋势. 生态学杂志, 2009, 28(11): 2339-2346.
- Lai C J, Qian H S, Duan H L, Song Q H. Climate suitability and its

- change trend of double-cropping rice in Huaihe river basin. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, 28(11): 2339-2346. (in Chinese)
- [20] Peterson A T. Predicting the geography of species' invasions via ecological niche modeling. *The Quarterly Review of Biology*, 2003, 78(4): 419-433.
- [21] Kozak K H, Graham C H, Wiens J J. Integrating GIS-based environmental data into evolutionary biology. *Trends in Ecology and Evolution*, 2008, 23(3): 141-148.
- [22] 曹铭昌, 周广胜, 翁恩生. 广义模型及分类回归树在物种分布模拟中的应用与比较. *生态学报*, 2005, 25(8): 2031-2040.
- Cao M C, Zhou G S, Weng E S. Application and comparison of generalized models and classification and regression tree in simulating tree species distribution. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(8): 2031-2040. (in Chinese)
- [23] 马松梅, 张明理, 张宏祥, 孟宏虎, 陈曦. 利用最大熵模型和规则集遗传算法模型预测子遗植物裸果木的潜在地理分布及格局. *植物生态学报*, 2010, 34 (11): 1327-1335.
- Ma S M, Zhang M L, Zhang H X, Meng H H, Chen X. Predicting potential geographical distributions and patterns of the relic plant *Gymnocarpus przewalskii* using maximum entropy and genetic algorithm for rule-set prediction. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34 (11): 1327-1335. (in Chinese)
- [24] Phillips S J, Anderson R P, Schapire R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 2006, 190(3-4): 231-259.
- [25] 王运生, 谢丙炎, 万方浩, 肖启明, 戴良英. 相似穿孔线虫在中国的适生区预测. *中国农业科学*, 2007, 40(11): 2502-2506.
- Wang Y S, Xie B Y, Wan F H, Xiao Q M, Dai L Y. Potential geographic distribution of *Radopholus similis* in China. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(11): 2502-2506. (in Chinese)
- [26] Thornton P E, Running S W, White M A. Generating surfaces of daily meteorological variables over large regions of complex terrain. *Journal of Hydrology*, 1997, 190(3/4): 214-251.
- [27] 刘宇, 陈泮勤, 张稳, 胡非. 一种地面气温的空间插值方法及其误差分析. *大气科学*, 2006, 30(1): 146-152.
- Liu Y, Chen P Q, Zhang W, Hu F. A spatial interpolation for surface air temperature and its error analysis. *Chinese Journal of Atmospheric Science*, 2006, 30(1): 146-152. (in Chinese)
- [28] Holdridge L R. Determination of world plant formations from simple climatic data. *Science*, 1947, 105(2727): 367-368.
- [29] Woodward F I. *Climate and Plant Distribution*. Cambridge: Cambridge University Press, 1987: 62-107.
- [30] 翁恩生, 周广胜. 用于全球变化研究的中国植物功能型划分. *植物生态学报*, 2005, 29(1): 81-97.
- Weng E S, Zhou G S. Defining plant functional types in China for global change studies. *Plant Phytoecologica Sinica*, 2005, 29(1): 81-97. (in Chinese)
- [31] 全国种植制度气候研究南方协作组. 我国南方稻区种植制度的气候生态区划. *中国农业科学*, 1982, 15(4): 35-42.
- Associate Research Group for Agroclimatological Study of Cropping System in South China. Regionalization of cropping systems in rice growing regions in South China. *Scientia Agricultura Sinica*, 1982, 15(4): 35-42. (in Chinese)
- [32] 朱勇, 段长春, 王鹏云. 云南杂交水稻种植的气候优势及区划. *中国农业气象*, 1999, 20(2): 21-24, 34.
- Zhu Y, Duan C C, Wang P Y. The agroclimatic advantages to growing hybrid rice and its zoning in Yunnan province. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 1999, 20(2): 21-24, 34. (in Chinese)
- [33] 刘洪顺, 梁红, 王继新. 滇中高原气候资源与水稻、小麦生长的协调性. *中国农业气象*, 1997, 18(1): 21-26.
- Liu H S, Liang H, Wang J X. Compatibility of climate resource and rice, wheat growth in Dianzhong Plateau. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 1997, 18(1): 21-26. (in Chinese)
- [34] 张新时, 杨奠安, 倪文革. 植被的 PE (可能蒸散) 指标与植被气候分类 (三) — 几种主要方法与 PEP 程序介绍. *植物生态学与地植物学学报*, 1993, 17(2): 97-109.
- Zhang X S, Yang D A, Ni W G. The potential evapotranspiration (PE) index for vegetation and vegetation-climatic classification (III) — an introduction of main methods and PEP program. *Acta Phytoecologica et Geobotanica Sinica*, 1993, 17(2): 97-109. (in Chinese)
- [35] 曲曼丽. 农业气候分析方法 30 例. 北京: 北京农业大学出版社, 1991: 1-9.
- Qu M L. *Agro-climatic Internship Guide*. Beijing: Beijing Agricultural University Press, 1991: 1-9. (in Chinese)
- [36] 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: 1-104.
- [37] 中国农业科学院. 中国稻作学. 北京: 中国农业出版社, 1986, 85-122.
- The Chinese Academy of Agricultural Sciences. *Chinese Rice Cultivation Science*. Beijing: China Agriculture Press, 1986: 85-122. (in Chinese)
- [38] Swets K A. Measuring the accuracy of diagnostic systems. *Science*, 1988, 240(4857): 1285-1293.
- [39] Phillips S J, Dud K M. Modeling of species distributions with MaxEnt:

- new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography*, 2008, 31(2): 161-175.
- [40] 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.
- [41] Froking S, Qiu J J, Boles S, Xiao X M, Liu J Y, Zhuang Y H, Li C S, Qin X G. Combining remote sensing and ground census data to develop new maps of the distribution of rice agriculture in China. *Global Biogeochemical Cycles*, 2002, 16(4): 1-10.
- [42] 中国农业年鉴编辑委员会. 中国农业年鉴 2009. 北京: 中国农业出版社, 2009: 185-202.
- China Agriculture Yearbook Editorial Board. *China Agriculture Yearbook 2009*. Beijing: China Agriculture Press, 2009: 185-202. (in Chinese)
- (责任编辑 郭银巧)