

# 基于最大熵模型和 ArcGIS 的陕西省单季稻种植 分布预测及适宜性

高蓓 高茂盛 董金芳

(陕西省农业遥感信息中心,西安 710015)

**摘要** 依据陕西省4个定点单季稻农气观测站长期观测数据、87个单季稻地理分布数据和14个与单季稻生长有关的环境指标(8个气候指标、4个土壤指标和3个地形指标)数据,运用 ArcGIS 空间分析模块与最大熵模型(MaxEnt),建立陕西省单季稻种植适宜性分布模型,对单季稻在陕西省的种植分布和适宜性进行预测。研究表明:单季稻最适宜种植区(适宜系数  $P \geq 0.69$ )面积为 8 949.24 km<sup>2</sup>;适宜种植区( $0.38 \leq P < 0.69$ )面积为 21 637.68 km<sup>2</sup>;边缘适宜区( $0.07 \leq P < 0.38$ )面积为 73 351.66 km<sup>2</sup>,不适宜区( $P < 0.07$ )面积 101 804.22 km<sup>2</sup>,陕西省单季稻生长区域狭窄,对生态环境要求苛刻,其中适宜种植区域主要集中在陕南的河谷川道、关中盆地的渭河冲积平原区域,适宜区内土层肥沃、水土资源好,土壤 pH 为弱酸性到中性,地形平坦、海拔高度为 230~800 m。ROC 曲线的 AUC=0.916,表明预测结果可信度高。影响陕西省单季稻种植分布的主要环境指标有  $\geq 10$  °C 积温(贡献率 28.97%)、年降水量(贡献率 25.99%)、年平均气温(贡献率 16.87%)、海拔(8.27%)、年日照时数(5.66%)和年湿润指数(4.12%),陕西省单季稻最适宜区环境参数为  $\geq 10$  °C 积温 4 865 °C·d、年降水量 762 mm、年平均气温 15 °C、海拔 436 m、年日照时数 1 573 h 和年湿润指数 1.6。结果显示基于最大熵模型与 ArcGIS 构建的种植适宜性分布模型可以准确地对陕西单季稻的种植适宜性做出科学综合评价。

**关键词** 单季稻;种植分布;MaxEnt 模型;ArcGIS

中图分类号 S 511

文章编号 1007-4333(2016)03-0008-08

文献标志码 A

## Planting distribution and suitability assessment of single-season rice based on MaxEnt and ArcGIS in Shaanxi Province

GAO Bei, GAO Mao-sheng, DONG Jin-fang

(Remote Sensing Information Center for Agriculture of Shaanxi Province, Xi'an 710015, China)

**Abstract** By adopting ArcGIS spatial analyst module and MaxEnt, long term observation data of four- single-season rice fixed-point agricultural meteorological stations, 87 occurrence records, 14 environmental factors (8 climatic, 4 soil and 3 topographic factors) were used to predict plant distribution and assess suitability. The results showed that highly suitable, moderately suitable, marginally suitable and unsuitable planting areas for single-season are 8 949.24 km<sup>2</sup>, 21 637.68 km<sup>2</sup>, 73 351.66 km<sup>2</sup> and 101 804.22 km<sup>2</sup> respectively. The marginally planting suitable area and highly planting suitable area are mainly located in valley and the bottom of some gullies of south of Shaanxi, alluvial plain of Guanzhong basin. These areas have good fertile soil, rich climate resources, soil texture ranged from weak acid to neuter. The land is flat and its sea level is from 230 to 800 meters. The AUC of ROC curve was 0.916, indicating that the predictive result with MaxEnt model was highly precise. The main environmental factors determining the suitable planting distribution were accumulate temperature above 10 °C (28.97%), annual precipitation (25.99%), annual average temperature (16.87%), altitude elevation (8.27%), annual sunshine duration (5.66%) and annual humid index (4.12%). The environmental variables in the highly suitable planting area were determined as accumulate temperature above 10 °C around 4 865 °C·d, annual precipitation around 762 mm, annual average temperature around 15 °C,

收稿日期: 2015-06-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31070293); 国家“863”计划(2002AA2121493)

第一作者: 高蓓, 硕士研究生, E-mail: gi\_gi\_sun@163.com

通讯作者: 顾蔚, 教授, 博士, 主要从事药用植物资源与评价研究, E-mail: weigu@snnu.edu.cn

altitude elevation around 436 m, annual sunshine duration around 1 573 h and annual humid index around 1.6. In conclusion, the planting suitability assessment model based on ArcGIS and Maxent could accurately evaluate the planting suitability of Rice, quantify the area of suitable habitat, and analyze the spatial distribution.

**Keywords** single-season rice; planting distribution; MaxEnt; ArcGIS

单季稻在我国播种面积最大、分布范围最广,我国 60% 以上的人口以稻米为主食<sup>[1]</sup>。光温水等影响单季稻生长发育的环境资源时空分布差异显著,单季稻的高产种植的不确定性增加。近年来,全球气候变暖促使单季稻种植范围向高纬度和高海拔地区推进<sup>[2]</sup>,单季稻的生长发育、产量和种植区域也受到重要影响<sup>[3-4]</sup>。

单季稻是陕西省第四大农作物,主要种植于陕西南部,种植面积占全省单季稻总面积的 88%<sup>[5]</sup>。目前,全省单季稻面积约有 1 209.3 km<sup>2</sup>,总产达 84.50 万 t<sup>[6]</sup>。近年来,气候变化对自然环境已造成影响<sup>[7]</sup>,全球气候变化已经并将继续对农业生产、种质资源、经济发展和人居环境带来严重影响。农业作为受气候变化影响最敏感和最脆弱的部分,气候变化对农作物生长、产量和栽培等带来的影响一直是政府和研究机构重点研究和关注的焦点<sup>[8]</sup>。为合理利用自然资源,确保单季稻高产稳产,国内外许多学者选择不同的评价指标开展单季稻种植区划研究<sup>[9-13]</sup>,但由于获取数据尺度在时间上、空间上的一致性,指标选取的难易程度,导致区划结果在实际应用上存在着一定的差距,很难发挥区划在实际工作中的指导意义。近年来,随着地理信息技术和统计学技术的发展,农业生产技术由经验转向科学,环境因子评价是其发展的新内容。一系列统计模型,如 BIOCLIM 模型、广义加法模型(GAM)、遗传算法预测模型(GARP)、分类回归模型(CART)和最大熵模型(MaxEnt)等广泛应用于物种分布模拟,并且取得较好的模拟效果<sup>[14-18]</sup>。其中,最大熵模型(MaxEnt)是模拟物种分布较为客观、准确,与自然分布格局相似,且可以反映出物种分布和潜在分布区与环境因子的关系<sup>[19]</sup>,近年来已被成功应用于管理和保护物种的生境分布预测。Warren 等<sup>[20]</sup>对 MaxEnt 模型的复杂性进行了研究,胡秀等<sup>[21]</sup>、张熙骛等<sup>[22]</sup>、何奇瑾等<sup>[23]</sup>、张颖等<sup>[24]</sup>、殷晓洁等<sup>[25]</sup>和齐增湘等<sup>[26]</sup>应用 MaxEnt 模型对 *Hypopterygium tamarisci* (孔雀藓科, Hypopterygiaceae)、檀香、2 种入侵性鱼类、玉米、春飞蓬、蒙古栎和秦岭山系黑熊等物种分布区进行了预测,取得了较高的预测精度,

但这些研究多以数理统计为主,或以行政区划为基本评价单元,精细化程度不够,或是仅单一考虑条件对物种分布的影响,根据水稻产量和生长期数据,综合考虑气候、土壤和地形的影响,还未见报道。

总结前人对于物种生态适应性相关研究,并基于陕西省各县单季稻 1961—2012 年种植面积和产量数据、4 个农气观测点 1983—2012 年单季稻发育期观测数据、87 个单季稻地理分布点数据、陕西省 DEM 数据、土壤数据和台站气象资料,结合最大熵模型(MaxEnt)和 ArcGIS 空间分析模块,建立陕西省单季稻种植适宜模型,对单季稻在陕西省的种植分布和适宜性进行预测。以期充分利用该区域丰富的自然资源,客观调控和指导单季稻的规模种植和当地经济的发展提供参考依据。

## 1 研究方法 with 数据

### 1.1 研究区

陕西地处我国西北内陆,位于北纬 31°43′~39°59′,东经 105°29′~111°14′,海拔 0~3 267 m。地形复杂多样,地势南北高中间低,有高原山地、平原和沙漠滩地等多种地貌,秦岭横贯东西,有亚热带大陆性气候、温带湿润性气候和温带半干旱半湿润气候 3 个气候带,复杂多样的气候类型必然对陕西省农业生产带来风险。近 52 年(1961—2012 年)来,陕西年平均气温呈增加趋势,但增加幅度逐年下降,平均每 10 年增加 0.36 °C;降水量多年平均值为 347~1 296 mm,降水量年际间变化大,干旱洪涝和突发性气象灾害频频发生,年降雨量呈下降趋势,平均每 10 年下降 16.3 mm;日照时数多年平均值为 1 281~2 687 h,年日照时数呈下降趋势,平均每 10 年下降 6.7 h。无霜期为 195~365 d,干燥度为 0.6~1.0。陕西主产小麦、油菜、单季稻和玉米,近年来,随着科学进步和政府农业投入的加大,陕西单季稻种植面积和单产呈上升趋势。

### 1.2 单季稻

陕西省各县 1961—2012 年单季稻种植面积和产量数据来源于陕西省统计局,4 个农气观测数据来源于陕西省农业遥感信息中心,包括物候期(播种

期、出苗期、移栽期、孕穗期、抽穗期、开花期和成熟期)日期和实测产量数据。

陕西省单季稻地理分布数据信息来源于3个方面:一是全省农气观测点数据;二是陕西省粮食作物生长发育和产量预测业务工作的每年实际调查,经过GPS实地定位获得分布点数据;三是查询文献资料、中国数字植物标本馆(<http://www.cvh.org.cn/>)、教学标本标准化整理整合与资源共享平台(<http://mnh.scu.edu.cn/>)和中国自然保护区资源平台(<http://www.papc.cn/bbqzy.aspx>)等数据库获得样本采集信息。对具有准确经纬度的标本信息直接使用,对已知具体分布地点的标本信息,借助GPS确定其经纬度坐标,去除重复和经纬度缺失点,最终获得87个具有准确的物种名、经度和纬度等准确信息的单季稻地理分布点数据,选取15个地理分布点数据作为种植适宜性分布区验证,72个地理分布点数据参与模型运算。

### 1.3 环境因子

所用的气候数据和气象站地理数据来源于陕西省气象信息中心,包括陕西省96个气象站1961—2012年的逐日观测地面数据,运用临近站点Jones网格插值法获取缺测气象站数据。陕西省土壤数据和地形地貌数据来源于中科院国际科学数据服务平台(ISDSP,<http://datamirror.csdb.cn>),土壤栅格数据的分辨率为1 km×1 km;高程数字模型(DEM)的分辨率为30 m,包括各区县的行政边界,各台站经度、纬度和海拔高程数据。陕西省土地利用现状图来自于陕西省国土资源厅。

### 1.4 研究方法

#### 1.4.1 环境指标选取

根据单季稻的生长特点和前人的研究成果,综合环境变量之间相关性的问题<sup>[27-29]</sup>,将单季稻产量和单季稻发育期的环境指标进行相关分析,挑选出通过显著性检验的环境指标(表1)。参照Yang等<sup>[30]</sup>获得的气候指标和不同属性的土壤图层进行多重共线性分析(Spss19.0)来检验之间的相关性,若2个气候指标间的相关性 $> \pm 0.8$ ,那么只能有一个指标被选入模型,最终选择15个环境指标(8个气候指标、4个土壤指标和3个地形指标)数据构建陕西省单季稻适宜生存环境(表1)。包括年平均气温(AT)、 $\geq 10$  °C积温(J10 d)、 $\geq 15$  °C持续日数(AADET)、 $\geq 10$  °C日数(AATT)、8—9月平均最高气温( $T_{89m}$ )、年降雨量(AP)、年湿润指数(MI)、年

日照时数(ASD)、土层深度(SD)、土壤有机质含量(SOM)、土壤pH、硅(Si)、海拔高度(EI)、坡向(Aспект)和坡度(Slope)。

表1 单季稻的环境指标

Table 1 Environmental indexes of single-season rice		
类型 Types	变量代码 Index code	描述 Describe of variable
气候要素	AT	年平均气温
	J10 d	$\geq 10$ °C 积温
	AADET	$\geq 15$ °C 持续日数
	AATT	$\geq 10$ °C 日数
	$T_{89m}$	8—9月平均最高气温
	AP	年降水量
	MI	年湿润指数
	ASD	年日照时数
土壤要素	SD	土层深度
	SOM	土壤有机质含量
	pH	土壤 pH
	Si	硅
地形要素	EI	海拔高度
	Aspect	坡向
	Slope	坡度

对于8个气候指标,参考前人关于山地无气象站地区气候要素的推算模拟方法,选用傅抱璞等<sup>[31]</sup>提出的回归统计方法和对比分析方法。依据陕西省的地理特征,以北山和秦岭为界,将陕西分为陕北、关中和陕南3部分,利用全省96个气象站的经度、纬度和海拔高度作为自变量,运用SPSS软件进行多元回归分析,建立不同区域的气象要素空间分布模型。基于地理信息系统平台(ArcGIS9.3),选择能够较好反映局地气候垂直变化的IDW法进行空间插值,并将生成的各部分栅格图进行图像叠加,最终生成分辨率为500 m×500 m的气候指标栅格图。

#### 1.4.2 MaxEnt 模型研究方法

按MaxEnt模型要求,将单季稻分布数据点存储为“物种-经度-纬度”的CSV格式,环境指标存储为ASCII格式,将单季稻分布点数据和环境指标导入MaxEnt3.3.3,定义输出结果的位置和环境指标

图层位置。参考 Moreno 等<sup>[32]</sup>研究方法,采取测试集为分布点的 25%,训练集为分布点的 75%。其余选项采用模型的默认设定,重复运行 100 次进行建模,采用 ROC 曲线(受试者工作特征曲线)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,AUC 值 0.50~0.60 为失败,0.61~0.70 为较差,0.71~0.80 为一般,0.81~0.90 为好,0.91~1.00 为非常好,越接近 1 说明环境变量与预测的物种地理分布之间的相关性越大,即模型预测的结果越准确<sup>[23]</sup>。

### 1.4.3 模型评价

采用均方根差(RMSE)<sup>[29]</sup>作为 MaxEnt 模型的评价检验指标,以检验 MaxEnt 模型在陕西的适用性。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - Q_i)^2}$$

式中: $N$ 为样本数, $P_i$ 是第 $i$ 个模拟值, $Q_i$ 代表第 $i$

个实测值。RMSE 表示模拟值与实测值的接近程度, RMSE 越小,模型模拟值与实测值越接近,模型效果越好。

## 2 结果与分析

### 2.1 单季稻潜在分布及其适宜性分区

利用最大熵模型,结合选定的影响单季稻适宜生长分布的 15 个环境指标,预测单季稻适宜生长分布的生境适宜性。将 MaxEnt 模型输出的栅格数据文件进行重分类,按照适宜生长指数  $P$  值从低到高将单季稻的生境适宜性区划分为 4 个等级: $P < 0.07$  为不适宜区, $0.07 \leq P < 0.38$  为边缘适宜区; $0.38 \leq P < 0.69$  为适宜区; $P \geq 0.69$  为最适宜区。同时利用 ArcGIS 9.3 空间分析模块,将 MaxEnt 模型输出的单季稻适宜性分布图与研究区行政区图叠加,并计算各市区生境的分布面积(表 2)。

表 2 单季稻适宜性分布区

Table 2 Distraction of suitability habitat of single-season rice

研究区 Region	面积/km <sup>2</sup> Area			
	最适宜区 Highly suitable	适宜区 Moderately suitable	边缘适宜区 Marginally suitable	不适宜区 Unsuitable
榆林		63.83	849.40	3 577.87
延安		63.13	752.61	2 987.99
铜川		103.11	2 990.80	801.01
渭南		496.60	717.54	5 398.72
宝鸡	1 002.31	2 712.34	758.22	6 578.49
咸阳	12.63	1 663.74	5 935.30	2 623.26
西安	237.78	1 519.95	3 530.18	4 703.63
商洛	213.93	2 292.20	1 288.48	3 803.03
安康	3 823.37	5 699.63	771.55	5 634.40
汉中	3 657.84	701.41	930.77	6 427.69
陕西省	8 949.24	21 637.68	73 351.66	101 804.22

图 1 给出了基于 ArcGIS9.3 的陕西省单季稻种植适宜性的等级划分,不同颜色代表不同环境条件下单季稻的种植适宜区。其中,单季稻的最适宜分布区面积占陕西省总面积的 4.35%;适宜区占 10.52%,边缘适宜区占 35.65%,不适宜区占

49.48%。比较单季稻地理分布数据和 MaxEnt 模型预测出的单季稻种植适宜分布图(图 1),可以看出,单季稻地理分布数据均位于种植适宜分布区,说明预测的种植适宜性分布区与实际分布高度一致。

单季稻种植最适宜区面积为 8 949.24 km<sup>2</sup>,分

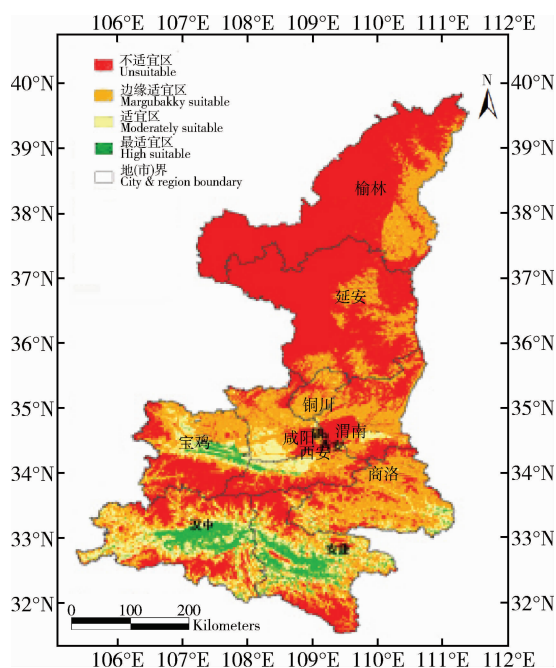


图1 单季稻适宜性分布图

Fig.1 Spatial distribution map of single-season rice

布在陕南中部的河谷川道区、宝鸡中部和西安西部部分区域。主要集中在亚热带大陆性季风气候区和暖温带半干旱、半湿润气候区,处于秦岭南部的汉江河谷区域和秦岭西北部的宝鸡东部到西安西部的渭河段。这些地区海拔220~600 m,土壤为沿江冲积性土壤,土壤有机质2.12%~3.87%,土壤pH为6.3~6.8,年平均气温均在14.0~16.0℃,年降水量为580~1100 mm,年日照时数为1200~800 h,≥10℃年积温为4100~5000℃·d,年湿润指数0.95~1.26,稳定通过15℃持续日数为102~141 d,8—9月平均最高气温为27.0~28.5℃。该区域生态环境条件较优,热量充足,水利设施较好,较适于单季稻生长,也是目前陕西单季稻的主要种植区,最适宜建立规模的单季稻种植区。

单季稻种植适宜区面积为21637.68 km<sup>2</sup>,分布在陕南中部的浅山区、关中西南部和榆林东南部局部。这些地区海拔600~800 m,为渭北川道、渭北高原、渭北高原和秦岭浅山区,土壤主要是绵黄土、褐土和沙壤土,土壤有机质0.92%~2.12%,土壤pH为5.9~6.3,年平均气温均在13.5~15.0℃,年降水量为450~700 mm,年日照时数为1300~2200 h,≥10℃年积温为3700~4100℃·d,年湿润指数0.80~0.95,稳定通过15℃持续日数为93~121 d,8—9月平均最高气温为26.0~

28.0℃。这些区域雨热同季,环境条件可以满足单季稻种植的要求,表现为大多数环境指标符合单季稻种植的生长条件,但存在个别指标不符合要求,比如夏季高温干旱、秋季连阴雨时有发生,这些地区可作为陕西省单季稻种植的推广发展区。

单季稻种植边缘适宜区面积为73351.66 km<sup>2</sup>,分布在陕南的丘陵区、关中大部分和陕北东部。这些地区海拔700~1100 m,为渭北高原、黄土高原和秦岭中山区,土壤主要是绵黄土、褐土和砂壤土,土壤有机质0.62%~0.81%,土壤pH为5.4~5.9,年平均气温均在11.0~13.5℃,年降水量为400~560 mm,年日照时数为1600~2300 h,≥10℃年积温为3300~3600℃·d,年湿润指数0.60~0.83,稳定通过15℃持续日数为63~102 d,8—9月平均最高气温为21.0~26.0℃。该区域生态环境勉强适宜单季稻生长,属于单季稻生存的界限条件。这些区域气温冬季寒冷、夏季凉爽,降雨较少,气候干燥,不能满足单季稻整个生长期的要求,即使种植也仅是能够成活,不推荐这些地区种植单季稻。

单季稻种植不适宜区面积为101804.21 km<sup>2</sup>,包括陕西北部、关中东北部和陕南的中山区(海拔≥1000 m)区域。该区域海拔800~1300 m,为长城沿线风沙区、黄土高原丘陵沟壑区和秦岭高山区,年平均气温均在9.0~12.6℃,年降水量330~650 mm,年日照时数为1100~2500 h,≥10℃年积温为3000~3300℃·d,稳定通过15℃持续日数为43~80 d,8—9月平均最高气温为19.0~25.0℃。该区域的环境条件不能满足单季稻生长的基本要求,这些地区不宜发展单季稻产业。

利用水稻地理分布点数据,本研究的RMSE检验结果为7.8%,RMSE值小于10%,表明模拟值与实际观测值一致性很高,模拟效果可以接受,该模型对评价陕西省单季稻种植适宜性是适用的。

## 2.2 单季稻种植适宜性分布环境指标

表3给出了影响陕西单季稻种植适宜性分布的前6个主要环境指标的贡献百分率和累计贡献百分率,分别为:J10d、AP、AT、EI、ASD和MI,贡献率分别为28.97%、25.99%、16.87%、8.27%、5.66%和4.12%,这6个指标的累计贡献率达到89.86%。表明这6个环境指标是影响单季稻种植分布的主要环境指标。由此可见水稻适宜的生态环境是气温温暖、降水较充沛、有机质较丰富、海拔高度低和具有一定的日照时间(图2)。

表 3 影响陕西单季稻种植适宜性分布的主要环境指标贡献率和累计贡献率

Table 3 Contribution rate of climate factor affecting %

环境指标 Environmental variable	贡献百分率 Percentage contribution	累计贡献百分率 Cumulative percentage contribution
J10d	28.97	28.97
AP	25.99	54.94
AT	16.87	71.81
EL	8.27	80.08
ASD	5.66	85.74
MI	4.12	89.86

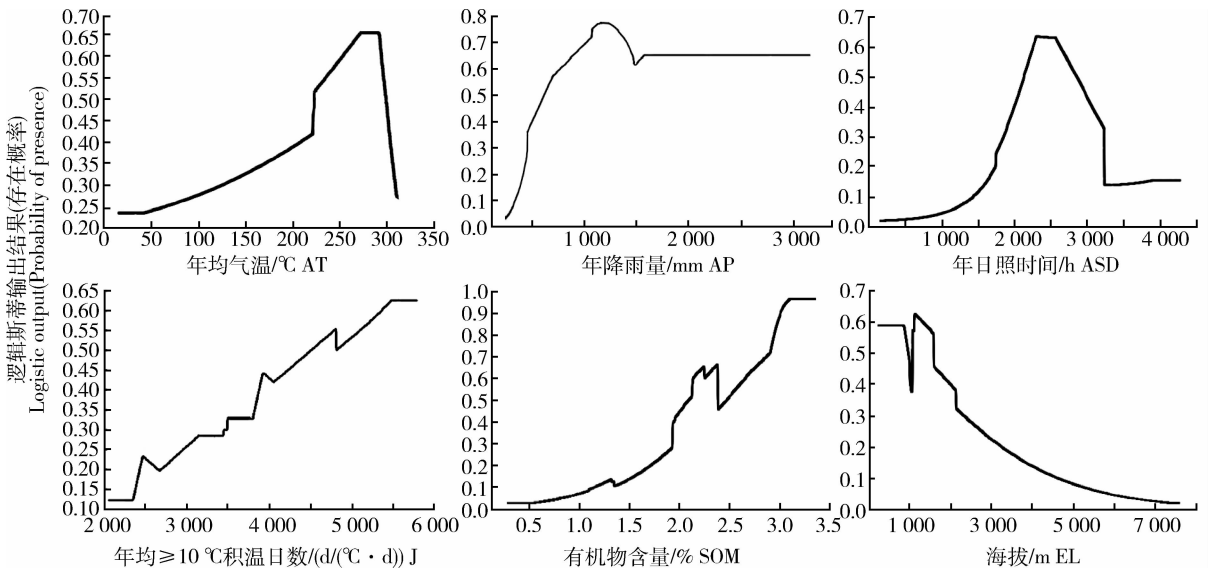


图 2 单季稻种植分布区存在概率与各环境指标的关系

Fig. 2 Relationship between single-season rice probability of presence and environment factors

通过最大熵模型,筛选出影响陕西单季稻种植分布的主要环境指标,应用主要环境指标构建陕西单季稻种植分布模型,得到陕西单季稻种植分布区划图。结果表明,基于主要环境指标的 AUC 值达 0.910,与基于 15 个环境指标模拟的 AUC 值接近,说明结果准确性达到好的标准,可以作为分析陕西单季稻种植适宜性分布的主要评价指标。并在此基础上计算各主要环境指标的阈值(存在概率>0.5): AT 为 12.8~15.9 °C、AP 为 600~1 290 mm、J10d 为 3 700~5 013 °C·d、ASD 为 12 00~2 200 h、EL 为 0~600 m 和 MI 为 0.8~1.2。

### 3 讨论与结论

根据陕西省 87 个单季稻地理分布数据、4 个农

气观测点观测数据和 15 个环境指标数据,结合最大熵模型和 ArcGIS 地理信息系统平台,分析了陕西省单季稻种植适宜性分布。结果表明:最大熵模型适宜于模拟陕西单季稻种植适宜性分布,基于最大信息熵模型构建的单季稻种植适宜性的分布与生态环境要素关系模型的准确性达到“好”的标准(AUC 值为 0.916),且单季稻种植适宜性分布与实际调查情况和中国植物分布图一致。陕西单季稻的种植适宜区(包括最适宜区和适宜区)面积为 30 586.92 km<sup>2</sup>,占陕西省总面积的 14.87%,表明研究区适宜于单季稻生长的环境较狭窄。

在进行单季稻种植适宜性分析的环境指标选取时,依据前人的研究成果,选取 52 年的气象台站观测数据作为气候指标,由于陕西省地形地貌复杂且

台站分布稀疏,为了提高结果精度,首先基于陕西省分辨率为  $30\text{ m} \times 30\text{ m}$  的 DEM 数据,对气候要素评价指标建立多元回归方程,应用 SPSS 进行各个气候指标运算;其次在 ArcGIS 空间分析模块中将 IDW、Sample Kriging、Spline 和 Natural Neighbour 4 种插值方法进行了比较,选取残差最小且综合考虑地形因素 IDW 插值方法对气候要素进行混合空间插值,即多元回归方程插值和残差插值结合,生成空间分辨率为  $100\text{ m} \times 100\text{ m}$  的栅格图。最后对分辨率为  $1\text{ km} \times 1\text{ km}$  的土壤要素评价指标进行重新采样,运用与气候要素评价指标栅格化相同的方法,重新进行土壤要素栅格化。

本研究在做单季稻种植适宜性分布时,考虑了气候条件、土壤条件和地形条件对单季稻种植适宜性分布的影响,具有一定的实际应用。

### 参 考 文 献

- [1] 段居琦,周广胜. 中国单季稻种植北界的初步研究[J]. 气象学报, 2012, 70(5): 1165-1172  
Duan J Q, Zhou G S. A preliminary study of planting northern boundary of single harvest rice in China[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2012, 70(5): 1165-1172 (in Chinese)
- [2] 段居琦,周广胜. 我国单季稻种植区的气候适宜性[J]. 应用生态学报, 2012, 23(2): 426-432  
Duan J Q, Zhou G S. A preliminary study of planting northern boundary of single harvest rice in China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(2): 426-432 (in Chinese)
- [3] Tao F L, Yokozawa M, Hayashi Y, Zhang Z. Climate changes and trends in phenology and yields of field crops in China: 1981-2000[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 138: 82-92
- [4] 刘珍环,李正国,唐鹏钦,李志鹏,吴文斌,杨鹏,游良,唐华俊. 近 30 年中国水稻种植区域与产量时空变化分析[J]. 地理学报, 2013, 68(5): 680-693  
Liu Z H, Li Z G, Tang P Q, Li Z P, Wu W B, Yang P, You L Z, Tang H J. Spatial-temporal changes of rice area and production in china during 1980-2010[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(5): 680-693 (in Chinese)
- [5] 吕从中. 陕西省农业气候区划[M]. 西安: 西安地图出版社, 1988: 1-4  
Lv C Z. *Agro-climatic Divisions of Shaanxi*[M]. Xi'an: Xi'an Map Publishing House, 1988: 1-4 (in Chinese)
- [6] 陕西省统计局,国家统计局陕西调查总队. 陕西省 2013 年统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2013: 228-234  
Shaanxi Bureau of Statistics, Henan Survey Organization National Bureau of Statistics Information Network. *Shaanxi Statistical Yearbook 2013*[M]. Beijing: China Statistics Press, 2013: 228-234 (in Chinese)
- [7] Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt K B, Tignor M, Miller H L. IPCC, Summary for policymakers markers of climate change 2007: The physical science basis [M]. In: *Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge and New York: Cambridge University Press, 2007: 30-31
- [8] 孙卫国. 气候资源学[M]. 北京: 气象出版社, 2008: 28-83  
Sun W G. *Science of Climatic Resources* [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2008: 28-83 (in Chinese)
- [9] 何燕,王斌,江立庚,孟翠丽,欧钊荣,徐世宏. 基于 GIS 的广西水稻种植布局精细化气候区划[J]. 中国水稻科学, 2013, 27(6): 658-664  
He Y, Wang B, Jiang L G, Meng C L, Ou Z R, Xu S H. Refined climatic division of rice planting distribution using gis in Guangxi, China[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2013, 27(6): 658-664 (in Chinese)
- [10] 赖纯佳,千怀遂,段海来,宋秋洪,俞芬,张轶秀,张静芬. 淮河流域小麦-水稻种植制度的气候适宜性[J]. 中国农业科学, 2011, 44(14): 2868-2875  
Lai C J, Qian H S, Duan H L, Song Q H, Yu F, Zhang Y X, Zhang J F. Climate suitability of wheat-rice double cropping system in Huaihe watershed[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(14): 2868-2875 (in Chinese)
- [11] 黄淑娥,田俊,吴慧峻. 江西省双季水稻生长季气候适宜度评价分析[J]. 中国农业气象, 2012, 33(4): 527-533  
Huang S E, Tian J, Wu H J. Evaluation on climatic suitability during growth season of double rice in Jiangxi Province[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2012, 33(4): 527-533 (in Chinese)
- [12] 段居琦,周广胜. 中国水稻潜在分布及其气候特征[J]. 生态学报, 2011, 31(22): 6659-6668  
Duan J Q, Zhou G S. Potential distribution of rice in china and its climate characteristic[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(22): 6659-6668 (in Chinese)
- [13] 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[J]. 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 [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2008, 28(4): 537-542 (in Chinese)
- [14] Beaumont L J, Hughes L, Poulsen M. Predicting species distributions: use of climatic parameters in BIOCLIM and its impact on predictions of species' current and future distributions[J]. *Ecological Modelling*, 2005, 186(4): 250-269
- [15] Lehmann A, Overton J M, Leathwick J R. GRASP: Generalized regression analysis and spatial prediction [J]. *Ecological Modelling*, 2002, 157: 189-207
- [16] Stockwell D R B. The GARP modeling system: Problems and solutions to automated spatial prediction [J]. *International Journal of Geographical Information System*, 1999, 13(2):

- 143-158
- [17] Breiman L, Friedman J, Stone C J, Olshen R A. *Classification And Regression Trees* [M]. New York: Chapman and Hall, 1984:368
- [18] Werber T C. Maximum entropy modeling of mature hardwood forest distribution in four U S states [J]. *Forest Ecology and Management*, 2011, 261(3):779-788
- [19] Phillips S J, Anderson, R P, Schapire R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions [J]. *Ecological Modeling*, 2006, 190:231-259
- [20] Warren D L, Seifert S N. Ecological niche modeling in MaxEnt: The importance of model complexity and the performance of model selection criteria [J]. *Ecological Applications*, 2010, 21(2):335-342
- [21] 胡秀, 吴福川, 郭微, 刘念. 基于 MaxEnt 生态学模型的檀香在中国的潜在种植区预测[J]. *林业科学*, 2014, 50(5):27-33  
Hu X, Wu F C, Guo W, Liu N. Identification of potential cultivation region for *Santalum album* in china by the MaxEnt ecologic niche model [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2014, 50(5): 27-33 (in Chinese)
- [22] 张熙鹭, 隋晓云, 吕植, 陈毅锋. 基于 MaxEnt 的两种入侵性鱼类(麦穗鱼和鲫)的全球适生区预测[J]. *生物多样性* 2014, 22(2):182-188  
Zhang X A, Sui X Y, Lv Z, Chen Y F. A prediction of the global habitat of two invasive fishes (*Pseudorasbora parva* and *Carassius auratus*) from East Asia using MaxEnt [J]. *Biodiversity Science*, 2014, 22(2):182-188 (in Chinese)
- [23] 何奇瑾, 周广胜. 我国玉米种植区分布的气候适宜性[J]. *科学通报*, 2012, 57(4):267-275  
He Q J, Zhou G S. Climatic suitability of potential maize cultivation distribution in China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(4):267-275 (in Chinese)
- [24] 张颖, 李君, 林蔚, 强胜. 基于最大熵生态位元模型的入侵杂草春飞蓬在中国潜在分布区的预测[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(11):2970-2976  
Zhang Y, Li J, Lin W, Qiang S. Prediction of potential distribution area *Erigeron philadelphicus* in china based on MaxEnt model [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(11):2970-2976 (in Chinese)
- [25] 殷晓洁, 周广胜, 隋兴华, 何奇瑾, 李荣平. 蒙古栎地理分布的主导气候因子及其阈值[J]. *生态学报*, 2013, 33(1):0103-0109  
Ying X J, Zhou G S, Sui X H, He Q J, Li R P. Dominant climatic factors of quercus mongolica geographical distribution and their thresholds [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(1): 0103-0109 (in Chinese)
- [26] 齐增湘, 徐卫华, 熊兴耀, 欧阳志云, 郑华, 甘德欣. 基于 MAXENT 模型的秦岭山系黑熊潜在生境评价[J]. *生物多样性*, 2011, 19(3):343-352  
Qi Z X, Xu W H, Xiong X Y, Ouyang Z Y, Zheng H, Gan D X. Assessment of potential habitat for ursus thibetanus in the Qinling mountains [J]. *Biodiversity Science*, 2011, 19(3):343-352 (in Chinese)
- [27] Sillero N. What does ecological modelling model? A proposed classification of ecological niche models based on their underlying methods [J]. *Ecological Modelling*, 2011, 222(8): 1343-1346
- [28] Mota J F, Pérez-García F J, Jiménez M L, Amate J J, Peñas J. Phytogeographical relationships among high mountain areas in the Baetic Ranges (South Spain) [J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2002, 11(6):497-504
- [29] 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[J]. *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 [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(11): 2502-2506 (in Chinese)
- [30] Yang X Q, Kushwaha S P S, Saran S, Xu J, Roy P S. Maxent modeling for predicting the potential distribution of medicinal plant, *Justicia adhatoda* L in Lesser Himalayan foothills [J]. *Ecological Engineering*, 2013, 51:83-87
- [31] 傅抱璞, 虞静明, 卢其尧. 山地气候资源与开发利用 [M]. 南京: 南京大学出版社, 1996:87-103  
Fu B P, Yu J M, Lu J Y. The development and utilization of mountain climate resources [M]. Nanjing: Nanjing University Press, 1996:87-103 (in Chinese)
- [32] Moreno R, Zamora R, Molina J R, Vasquez A, Herrera M A. Predictive modeling of microhabitats for endemic birds in South Chilean temperate forests using Maximum Entropy (MaxEnt) [J]. *Ecological Informatics*, 2011, 6(6):364-370
- [33] Lu C Y, Gu W, Dai A H, Wei H Y. Assessing habitat suitability based on geographic information system (GIS) and fuzzy: A case study of *Schisandra sphenanthera* Rehd et Wils in Qinling Mountains, China [J]. *Ecological Modelling*, 2012, 242:105-115

责任编辑: 王燕华