

## 陕西省设施农林用地适宜性潜力预测研究<sup>①</sup>

孙 昕<sup>1,2</sup>, 于东升<sup>2,3\*</sup>, 潘 月<sup>2,3</sup>, 徐志超<sup>2,3</sup>, 黄 标<sup>2,3</sup>, 李明阳<sup>1</sup>

(1 南京林业大学林学院, 南京 210037; 2 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008; 3 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:** 设施农林业是建设现代高效农林业的重点。掌握设施农林用地的潜力分布对高效农林业科学规划和合理布局具有指导意义。本研究以陕西省 220 个设施农林用地的地理分布点数据, 结合 10 个生态环境因子, 通过 Maxent 最大熵模型和 ArcGIS 软件的空间分析功能, 对陕西省设施农林用地的适宜性潜力分布进行了预测, 并分析了适宜性主导的环境因子。结果表明: Maxent 最大熵模型的预测精度较高, 夜间灯光亮度、海拔、坡度、年平均降水量和年平均气温 5 个因子是影响设施农林适宜性潜力分布的主要环境因子; 陕西省设施农林用地的发展潜力由大到小的城市依次为渭南市、西安市、咸阳市、榆林市、汉中市、延安市、安康市、商洛市、宝鸡市、铜川市, 位于关中地区的渭南市, 发展潜力最大面积可达  $4.77 \times 10^4 \text{ hm}^2$ , 占该市常用耕地总面积的 9.4%。

**关键词:** 设施农林业; 适宜性概率; 潜力分布; 最大熵模型; 陕西省

中图分类号: S315; S626.5; S628 文献标识码: A

设施农林业通过建造人工设施(主要包括温室和大棚), 为种植业、林业、养殖业调节温湿度以及产品的储藏保鲜等提供适当的环境条件, 以获得速生、高产、优质的农产品<sup>[1]</sup>, 已成为我国可持续发展总体战略的重要组成和优先领域<sup>[2]</sup>。掌握设施农林业可发展潜力, 对区域生产布局和可持续发展具有重要意义。

为揭示设施农林业区域空间分布特征, 学者们开展了大量研究工作。李静等人<sup>[3]</sup>利用 TM 影像, 在对地物光谱特征深入分析的基础上成功提取了大棚菜地的信息; 邹利东等人<sup>[4]</sup>利用面向对象和基于支持向量机的分类方法对设施农林业空间分布实现信息自动提取; 罗军等人<sup>[5-6]</sup>开发了基于高分辨率遥感影像的设施农林业信息采集系统, 并利用掌上电脑结合便携式 GPS 的方式对设施农林业进行野外移动测量, 解决了传统信息采集方式在设施农林业信息采集中存在的低效和低精度问题。Aguera 等人<sup>[7]</sup>在最大似然分类法的基础上加入纹理特征, 分别利用 QuickBird 和 IKONOS 影像对设施农林用地进行了分类。这些研究工作主要回答设施农林业用地区域发展现状问

题, 但对设施农林用地发展潜力和适宜性分布研究还是盲点。

近年来, 多种模型被研发用于适宜性分布预测, 如生态位模型(BIOCLIM、BLOMAPPER、DIVA、DOMAIN)、动态模拟模型(CLIMEX)、广义相加模型 GAM(generalized additive model)、广义线性模型 GLM(generalized linear model)、基于检验假设的分布预测模型 GARP(the genetic algorithm for rule-set prediction)以及最大熵模型(Maxent)等<sup>[8-10]</sup>。其中, Maxent 模型被证实具有最佳的预测能力和精度<sup>[11-14]</sup>。Maxent 模型<sup>[15-16]</sup>是基于最大熵理论的一种生态位模型, 它根据某一事物已知的现有实际分布点数据, 模拟其在自然环境中的基础生态位需求, 预测该事物在所研究区域的适宜分布范围<sup>[17]</sup>。该模型进行适宜性分布区预测时, 只需要输入实际“存在”的数据, 即使在实际“存在”数据较少的情况下, Maxent 模型也具有较高的预测能力<sup>[18]</sup>。该模型在濒危物种、外来入侵物种的潜在分布预测<sup>[19-23]</sup>, 不同地区小麦、玉米、水稻等作物的适宜性分布及其气候特征的研究<sup>[24-27]</sup>等方面, 都得到了成功应用。能否借用

基金项目: 陕西省科学院科技计划项目(2016K-07)、2017 年度陕西省重点研发专项(2017ZDXM-NY-049)及中国科学院科技服务网络计划(STS 计划)项目(KFJ-STG-QYZD-074)资助。

\* 通讯作者(dshyu@issas.ac.cn)

作者简介: 孙昕(1992—), 女, 辽宁丹东人, 硕士研究生, 主要从事遥感与 GIS 应用技术研究。E-mail: 3200849749@qq.com

该模型对区域设施农林业用地适宜性潜力分布开展预测研究,是本文拟研究回答的关键问题。

本研究通过陕西省 220 个设施农林业用地样点数据,结合样点环境因子信息,采用最大熵法(Maxent)生态位模型,预测陕西省设施农林业用地的适宜潜力分布,并对适宜发展设施农林业的生态环境因子进行分析,以为陕西省设施农林业发展和规划提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

陕西省位于中国内陆腹地,地处  $105^{\circ}29' \sim 111^{\circ}15' E$ ,  $31^{\circ}42' \sim 39^{\circ}35' N$ ,总面积为  $20.58 \times 10^4 km^2$ ,呈现南北高、中部低的地势特点,北为黄土高原,南为秦巴山地,中为关中平原,呈“两山夹一川”的大地貌结构。年降水量的分布是南多北少,由南向北递减,年平均降水量为  $576.9 mm^{[28]}$ 。温度由南向

北逐渐降低,年平均气温在  $7 \sim 16^{\circ}C$ ,其中陕北  $7 \sim 12^{\circ}C$ 、关中  $12 \sim 14^{\circ}C^{[29]}$ 。自 20 世纪 80 年代中期,陕西省逐步出现了一些以竹木结构为大棚主体的简易型设施农林业。2009 年陕西省实施百万亩设施蔬菜工程以来,设施农林业用地面积增长很快。据 2015 年年底的统计结果,全省常用耕地面积为  $290 \times 10^4 hm^2$ ,全省设施农林业面积达  $6 \times 10^4 hm^2$ ,占常用耕地面积的  $2.1\%^{[30]}$ 。

### 1.2 数据采集及预处理

2015 年 12 月至 2016 年 9 月分别在陕南、关中、陕北地区开展野外样点调查。每个样点调查内容主要包括设施农林业类型、种植年限、种植作物、海拔等,并用 GPS 记录地理坐标、行政区地址等。共调查获得 174 个设施农林业用地样点数据(图 1A),其中蔬菜大棚样点 153 个,果树大棚样点 21 个,种植年限  $1 \sim 15 a$  不等。

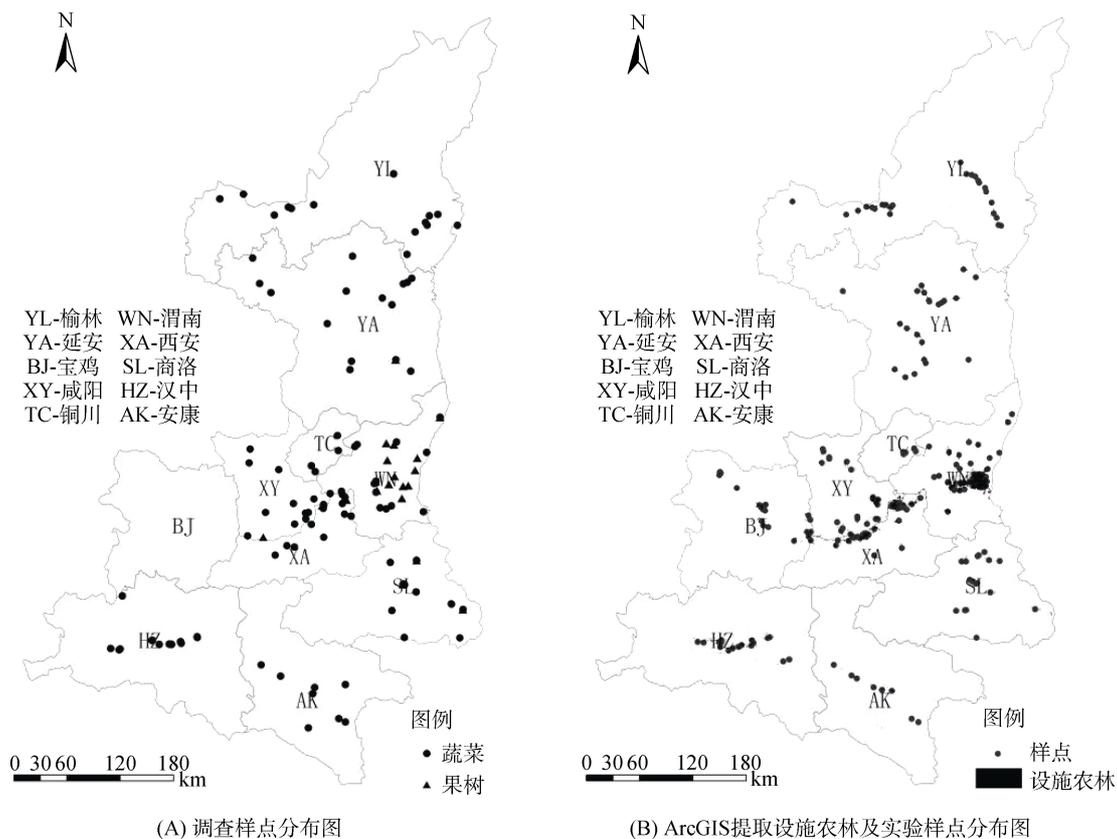


图 1 研究区样点分布图  
Fig. 1 Location of sampling sites in study area

以 174 个调查样点数据为标准建立解译标志,在 ArcGIS10.2 中利用谷歌影像地图插片用追踪的方法手工提取陕西省设施农林业用地情况,获得 2016 年的设施农林业总面积  $6.03 万 hm^2$ (图 1B),其中榆林市  $0.27 万 hm^2$ ,延安市  $0.29 万 hm^2$ ,铜川市  $0.02 万 hm^2$ ,咸

阳市  $0.79 万 hm^2$ ,宝鸡市  $0.39 万 hm^2$ ,渭南市  $2.82 万 hm^2$ ,西安市  $0.86 万 hm^2$ ,商洛市  $0.08 万 hm^2$ ,安康市  $0.06 万 hm^2$ ,汉中市  $0.45 万 hm^2$ 。在 ArcGIS10.2 用 feature to point 工具将设施农林业矢量图转化成点,共获得 5 700 个点。为提高计算效率,本研究随机抽

取 220 个设施农林作为样点数据。

选取与设施农林业密切相关的经济及生态环境因子用来 Maxent 建模。其中, 5 个为气候因子, 2 个为地形因子, 2 个为土壤因子, 1 个为社会经济条件因子, 共有 10 个因子(表 1)。使用的经济及生态环境因子空间分布数据有: 气候因子, 包括年平均降水、年平均温度、年平均蒸发量、年月均温度、年日照时数等(<http://www.geodata.cn/>), 空间分辨率为 1 km; 数字地形模型(DEM)及海拔、坡度等地形因子, 空间分辨率为 90 m(<http://www.gscloud.cn/>); 土壤因子, 包括有机质、机械组成、田间持水量等(<http://www.geodata.cn/>); 美国国防气象卫星(DMSP/OLS)获取的夜间灯光(light)数据(<https://ngdc.noaa.gov/eog/>), 用于反映区域人口密度及经济繁华度<sup>[31]</sup>。

将调查样点经纬度坐标信息按 Maxent 模型的识别格式\*csv 录入到 Excel 电子表格。以 ArcGIS 为平台, 采用 WGS1984 UTM 49N 坐标系统, 统一各环境因子图层的坐标系统、栅格大小和边界, 并利用经纬度坐标信息自动读取调查样点的环境因子信息。各图层用于模拟分析研究栅格大小统一为 150 m×150 m, 并转化成 Maxent 软件所要求的 ASCII 格式的文件。

### 1.3 Maxent 模型及检验

最大熵原理(the principle of maximum entropy, 简称 Maxent)起源于信息科学, 最早由著名数学家、物理学家 E.T. Jaynes 基于 Shannon 的信息熵概念<sup>[32-35]</sup>提出。Shannon 的信息熵是对信息的一种度量, 信息的增加会导致熵的减少; 在包含已有信息的前提下, 熵最大的概率分布是包含未知信息最少的分布。Maxent 模型应用于适宜性潜力分布预测时, 将研究区域栅格图像所覆盖的空间范围构成 Maxent 概率分布定义的总体, 样点数据集构成总体的一个抽样样本, 每个样点(样本单元)的环境因子如气候、海拔、坡度等, 构成了样本单元特征。Maxent 模型并不要求变量之间相互独立, 可以相对任意地加入对最终分类有用的环境因子, 而不需考虑它们之间的相互影响<sup>[36]</sup>。在掌握样本单元特征信息知识后, 选取符合这些知识但熵值最大的概率分布作为适宜性潜力分布。用  $A$  代表可能发生的事件的集合, 用  $B$  代表事件发生的环境的集合, 则模型  $p$  拥有最大熵为:

$$H(p) = - \sum_{x \in \varepsilon} p(x) \log p(x) \quad (1)$$

其中,  $x=(a,b)$ ,  $a \in A$ ,  $b \in B$ , 且  $\varepsilon=A \times B$ 。

Maxent 模型通过自动生成的 ROC 曲线(receiver operating characteristic curve)对模型进行模拟预测自检, 这种自检功能在适宜性分布预测评价中已得到广泛

应用<sup>[37-40]</sup>。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。灵敏度是指实际有分布且被预测为存在的概率, 反映了预测该事物分布的能力。特异度是指实际没有分布且被预测为不存在的概率, 反映了预测该事物没有分布的能力。以特异度为横坐标, 灵敏度为纵坐标生成 ROC 曲线, 利用曲线下面积(AUC)的大小作为模型预测准确度的衡量指标, 其取值范围为 0.5~1, 越接近 1 说明预测结果越好。一般认为, AUC 值为 0.5~0.6 表明模拟失败, 0.6~0.7 表明模拟较差, 0.7~0.8 表明模拟一般, 0.8~0.9 表明模拟好, 0.9~1.0 表明模拟非常好<sup>[41]</sup>。

将设施农林用地 220 个样点地理空间分布数据和环境因子数据导入 Maxent3.2.1 中, 随机选取 80% 的样点用于模型运行, 将剩余 20% 的样点用于模型验证。模型通过样点的地理空间位置, 从各环境因子图层中自动获取样点环境因子数值, 运算出约束条件, 探寻此约束条件下最大熵的可能分布, 生成设施农林用地潜在的适宜概率分布图。

### 1.4 适宜设施农林用地主导因子分析

Maxent 模型运算获得最大熵值概率分布时, 会给出每个环境因子相应的增益值(gain), 其占有所有环境因子增益值总和的比重即为该环境因子的贡献率<sup>[42]</sup>。依据环境因子贡献率大小确定影响设施农林用地适宜分布的主导环境因子。

### 1.5 设施农林用地适宜性分区

将模型输出的设施农林用地潜在适宜性概率分布值导入 ArcGIS 中生成 ASCII 图, 并转成栅格图层。按照专家经验法<sup>[43]</sup>, 依据概率分类阈值对适宜分布区进行类型分区。概率分类阈值根据设施农林业适宜分布区概率值(0~1)进行分割, 分为最适宜分布区(0.76~1)、较适宜分布区(0.7~0.76)、低适宜分布区(0.6~0.7)和不适宜分布区(0~0.6)4 类。其中, 最适宜和较适宜地区认为都是潜在的适宜发展区域, 因此, 概率分类阈值>0.7 的地区被认为是设施农林用地可发展的潜在适宜分布区。

将潜在适宜分布区栅格图层与行政区划矢量图层叠加, 通过 Zonal Statistic 计算出陕西省各地级市潜在适宜的设施农林用地面积。潜在面积与现有设施农林用地面积相减, 可得到陕西省各地级市的设施农林用地发展潜力。

## 2 结果与讨论

### 2.1 调查样点生态环境因子统计特征

Maxent 模型应用于预测陕西省设施农林用地适

宜性分布时,陕西省的栅格图像所覆盖的空间范围构成了 Maxent 概率分布定义的总体,220 个设施农林用地样点数据构成了总体的抽样样本,而每个样点的

10 个生态环境因子数据构成了样本单元特征。表 1 分别统计了 220 个样点数据和研究区的 10 个生态环境因子的取值范围、平均值和标准差。

表 1 区域总体和抽样样本的生态环境因子统计特征  
Table 1 Statistics of ecological environment factors of regional population and samples

因子类型	意义	研究区			抽样样点		
		范围	均值	标准差	范围	均值	标准差
气候因子	年平均降水量(mm)	296.2~1 310.2	658.5	205.1	320.2~1 021.9	662.9	156.4
	年平均温度(°C)	-6.1~26.9	9.4	3.0	5.7~16.2	12.2	2.2
	年平均蒸发量(mm)	823.2~2 402.6	1489.5	325.2	926.7~2 269.1	1 430.5	287.4
	年日均温度(°C)	-6.1~26.9	9.3	3.0	5.7~16.2	12.2	2.3
	年日照时数(h)	1 288.7~2 989.7	2 164.8	415.8	1 507.1~2 783.9	2 082.8	343.1
地形因子	坡度(°)	0~68.2	11.9	9.1	0~30.1	3.4	4.9
	海拔(m)	167~3748	1 125.7	407.4	249~2 004	648.1	300.9
土壤因子	土壤有机质(g/kg)	0~28.4	1.8	2.1	0.2~4.0	1.1	0.7
	田间持水量(W/W)	0.1~0.5	0.3	0.1	0.2~0.5	0.3	0.1
社会经济条件因子	夜间灯光亮度数据	0~63	4.2	9.9	0~61	12.3	12.2

2.2 Maxent 模型检验及预测结果

对 Maxent 模型预测的设施农林用地潜在适宜性分布结果验证表明,训练数据的 AUC 为 0.944,测试数据的 AUC 为 0.867,显著大于随机分布模型的 AUC (0.5),说明 Maxent 模型的拟合结果达到好的标准(图 2)。

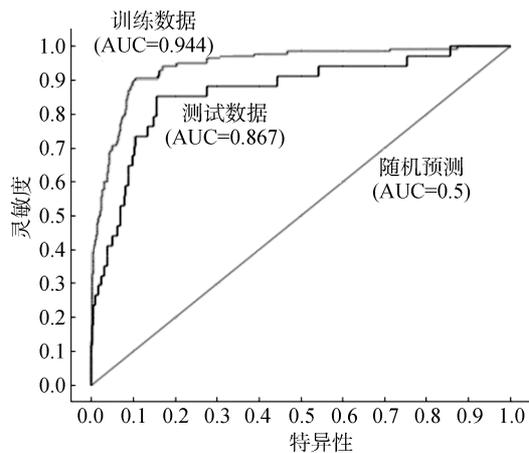


图 2 ROC 曲线及 AUC 值  
Fig. 2 ROC curve and AUC value

Maxent 模型预测得到的陕西省设施农林用地的适宜概率如图 3 所示。适宜概率值越大表示发展设施农林用地越适宜。图 3 适宜概率分布表明,陕西省设施农林用地潜在适宜性发展地区主要位于关中、陕南

地区,陕北地区分布较少。



图 3 陕西省设施农林用地的适宜概率分布  
Fig. 3 Suitability probability distribution of facility agriculture and forestry land in Shaanxi Province

### 2.3 潜在适宜性设施农林用地的环境因子

Maxent 模型分析结果表明,环境因子对最大熵模型的贡献率由大到小的顺序排列依次为:夜间灯光数据(28.8%)、海拔(24.8%)、坡度(18.5%)、年平均降雨量(10.1%)、年平均温度(7.1%)、年平均蒸发量(4.2%)、土壤有机质(2.8%)、年日照时数(1.8%)、田间持水量(1.3%)、年月平均温度(0.6%)。前 5 个环境因子的累积贡献率高达 90%,表明社会经济条件、气候和地形是影响设施农林用地潜在适宜性分布的主导环境因子。

从 Maxent 模型输出的各生态环境因子对设施农林用地潜在适宜概率的反应曲线图(图 4)可以看出,随着夜间灯光指数的增加,适宜概率逐渐增高,表明设施农林用地需设在有人类活动的地方;但当夜间灯光指数达到一定值后,随着它的增加,适宜概率呈下降趋势,表明人口密度大到一定程度时不适宜;当夜间灯光指数在 11~23 范围内时,设施农林用地的适宜概率最大,表明设施农林适宜建在有一定人口密度、经济较繁华的地区,因为温室大棚中多种植蔬菜瓜果等经济作物,需要设在居民点附近,便于农民的管理与出售。

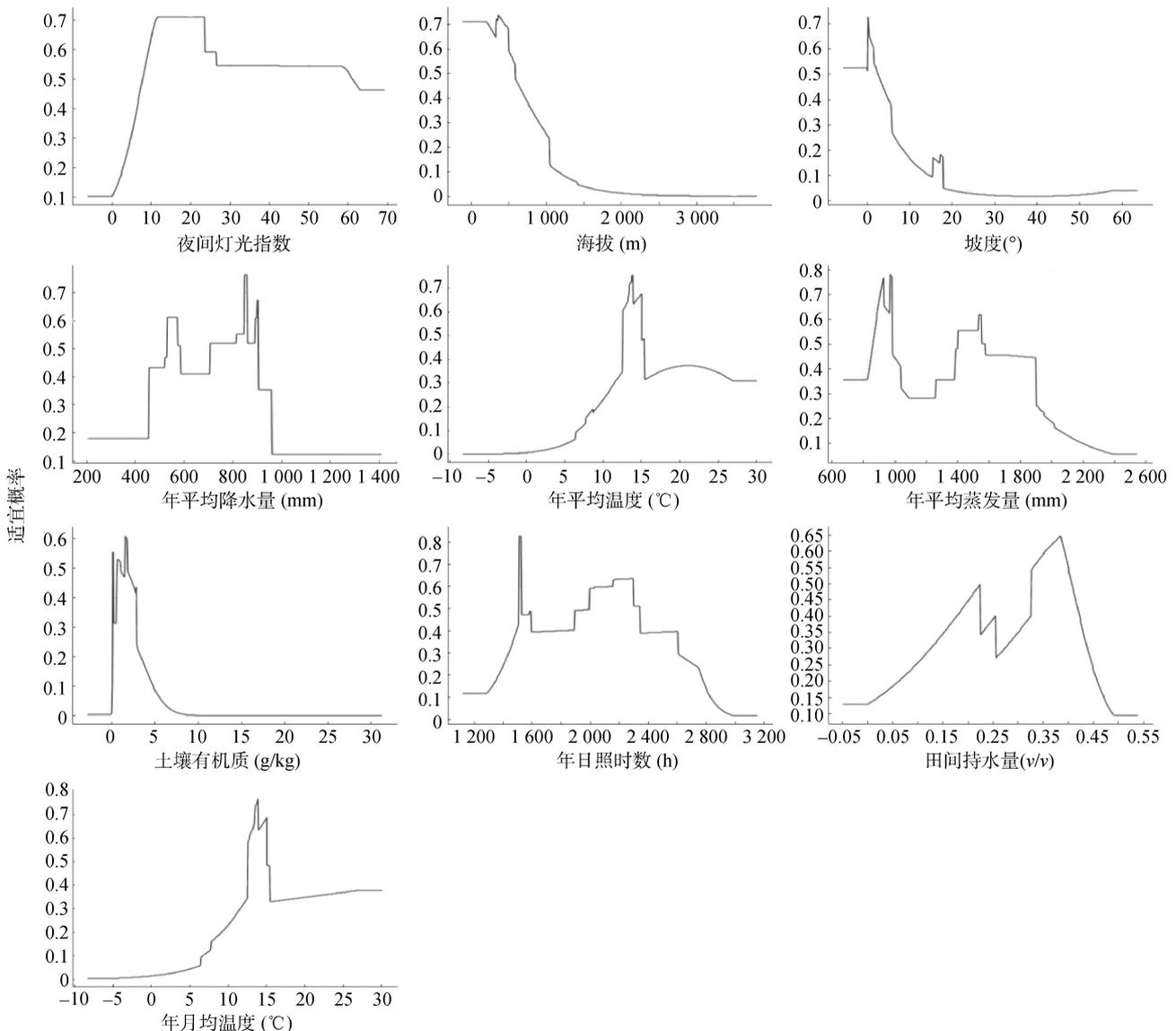


图 4 环境因子对设施农林用地适宜概率的反应曲线图

Fig. 4 Response curve of appropriate probability of environment factors to facility agriculture and forestry land

随着海拔坡度的增大,设施农林用地的适宜概率总体上呈现下降的趋势,表明它适宜建在海拔较低、坡度较小的地区。当年降水量在 500~600 mm 和 800~900 mm,年平均温度为 12~15℃,年月均温度为 13~

15℃,年平均蒸发量为 900~980 mm,年日照时数 1500~2300 h 时,适宜概率最高,表明设施农林用地的适宜性对气候条件有一定的要求,设施农林宜建在有合适的气温与充沛的降水地区,其塑料薄膜利用

太阳能具有保温的性能,其雨水收集装置可以进行雨水灌溉<sup>[44]</sup>。当土壤有机质约为 2.5 g/kg,田间持水量约为 0.38 时,适宜概率最大,表明设施农林适宜用地对土壤也有较高要求(图 4)。

2.4 区域适宜性设施农林用地潜力分布

利用 ArcGIS 软件按预设标准对适宜概率图进行分类,得到陕西省设施农林用地潜在适宜性分区图(图 5),计算各适宜等级区面积。最适宜、较适宜、低适宜、不适宜区的面积分别为  $5.90 \times 10^4$ 、 $12.60 \times 10^4$ 、 $116.97 \times 10^4$ 、 $1\ 922.63 \times 10^4$   $\text{hm}^2$ ,可发展潜在适宜(适宜概率>0.7)分布区总面积达  $18.50 \times 10^4$   $\text{hm}^2$ ,主要集中在关中的渭南市、西安市和咸阳市(表 2)。

去除现有设施农林用地面积,陕西省设施农林用地发展潜力总面积可  $12.47 \times 10^4$   $\text{hm}^2$ ,占常用耕地总面积的 4.3% 约为已有设施农林用地面积的 2 倍,主要位于关中地区( $9.71 \times 10^4$   $\text{hm}^2$ ),陕南地区和陕北地区分布较少,面积分别为  $1.40 \times 10^4$ 、 $1.36 \times 10^4$   $\text{hm}^2$ (表 2)。设施农林用地的发展潜力由大到小的城市依次为渭南市、西安市、咸阳市、榆林市、汉中市、延安市、安康市、商洛市、宝鸡市、铜川市,其中位于关中地区的渭南市的发展潜力最大,面积为  $4.77 \times 10^4$   $\text{hm}^2$ (表 2),占该市耕地面积的 9.4%。



图 5 陕西省设施农林用地潜在适宜分区  
Fig. 5 Regionalization of facility agriculture and forestry land in Shaanxi Province

表 2 陕西省设施农林用地发展潜力面积分布( $\times 10^4$   $\text{hm}^2$ )  
Table 2 Developing potentials of facility agriculture and forestry land in Shaanxi Province

地区	耕地面积	潜在适宜面积	现有发展面积	潜力	
陕南	汉中市(HZ)	20.41	1.02	0.45	0.57
	商洛市(SL)	13.36	0.40	0.08	0.32
	安康市(AK)	19.64	0.57	0.06	0.51
关中	西安市(XA)	23.79	4.66	0.86	3.80
	渭南市(WN)	50.53	7.59	2.82	4.77
	咸阳市(XY)	35.12	1.75	0.79	0.96
	宝鸡市(BJ)	29.73	0.49	0.39	0.10
	铜川市(TC)	6.47	0.10	0.02	0.08
陕北	延安市(YA)	24.72	0.85	0.29	0.56
	榆林市(YL)	65.37	1.07	0.27	0.80
全省	290	18.50	6.03	12.47	

3 结论

本研究以陕西省 220 个设施农林用地的样点数据,结合 10 个生态环境因子,通过 Maxent 最大熵模型成功预测了陕西省设施农林用地潜在适宜性分布,证明 Maxent 模型可应用于设施农林用地潜在适宜分布预测。

陕西省设施农林用地发展潜力地区主要位于陕

南的渭南市、西安市和咸阳市,关中地区和陕北地区分布较少,潜力总面积可达到  $12.47 \times 10^4$   $\text{hm}^2$ ,占总耕地面积的 4.3%,约为已有面积的 2 倍。影响陕西省设施农林用地潜在适宜性分布的主导环境因子有 5 个,即夜间灯光亮度、海拔、坡度、年平均降雨量和年平均温度。设施农林用地的潜在适宜发展区主要位于社会经济较发达、居民点附近、低海拔、坡度较小、有较充沛年降水量和较高年均温度的地区。

当然,陕西省设施农林用地的潜在适宜发展区分布不仅取决于社会经济条件、地形、气候、土壤因子,还取决于社会需求、经济效益、生产技术水平、水利条件、人文历史等因素的综合影响。在实际生产活动中,设施农林业种植区选择需要综合考虑各种因素的作用。因此,未来类似研究还需要引入更多的生态环境因子进行全面和深入分析。

#### 参考文献:

- [1] 汪军, 杨杉, 陈刚才, 等. 我国设施农业农膜使用的环境问题刍议[J]. 土壤, 2016, 48(5): 863–867
- [2] 范庆锋, 虞娜, 张玉玲, 等. 设施蔬菜栽培对土壤阳离子交换性能的影响[J]. 土壤学报, 2014(5): 1132–1137
- [3] 李静, 赵庚星, 李涛, 等. TM 影像中大棚菜地信息提取技术研究[J]. 水土保持学报, 2004, 18(1): 126–129
- [4] 邹利东, 郭航, 朱秀芳, 等. 设施农业空间分布信息自动提取方法研究[J]. 遥感技术与应用, 2014, 29(4): 669–674
- [5] 罗军, 潘瑜春, 王纪华, 等. 基于手持 GPS 的设施农业信息采集系统设计[J]. 微计算机信息, 2007, 23(32): 11–13
- [6] 罗军, 潘瑜春, 王纪华, 等. 基于高分辨率遥感影像的设施农业资源信息采集技术研究[J]. 地理与地理信息科学, 2007, 23(3): 51–54.
- [7] Agüera F, Aguilar F J, Aguilar M A. Using texture analysis to improve per-pixel classification of very high resolution images for mapping plastic greenhouses[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2008, 63(6): 635–646
- [8] Peterson A T. Predicting the geography of species' invasions via ecological niche modeling[J]. Quarterly Review of Biology, 2003, 78(4): 419
- [9] Kozak K H, Graham C H, Wiens J J. Integrating GIS-based environmental data into evolutionary biology[J]. Trends in Ecology & Evolution, 2008, 23(3): 141–148
- [10] 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[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(8): 2031–2040
- [11] 王运生, 谢丙炎, 万方浩, 等. 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
- [12] Giovanelli J G R, Haddad C F B, Alexandrino J. Predicting the potential distribution of the alien invasive American bullfrog, in Brazil[J]. Biological Invasions, 2008, 10(5): 585–590
- [13] Saatchi S, Buermann W, Steege H T, et al. Modeling distribution of Amazonian tree species and diversity using remote sensing measurements[J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(5): 2000–2017
- [14] 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[J]. 应用生态学报, 2010, 21(12): 3063–3069
- [15] Phillips S J, Anderson R P, Schapire R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions[J]. Ecological Modelling, 2006, 190(3/4): 231–259.
- [16] Phillips S J, Dudik M. Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation[J]. Ecography, 2008, 31(2): 161–175
- [17] Phillips S J, Dudik M, Schapire R E. A maximum entropy approach to species distribution modeling[C]//Proceedings of the twenty-first international conference on machine learning. ACM, 2004: 83
- [18] Townsend Peterson A, Papeş M, Eaton M. Transferability and model evaluation in ecological niche modeling: A comparison of GARP and Maxent[J]. Ecography, 2007, 30(4): 550–560
- [19] Adhikari D, Barik S K, Upadhaya K. Habitat distribution modelling for reintroduction of *Ilex khasiana*, Purk. a critically endangered tree species of northeastern India[J]. Ecological Engineering, 2012, 40(3): 37–43
- [20] Evangelista P H, Kumar S, Stohlgren T J, et al. Modelling invasion for a habitat generalist and a specialist plant species[J]. Diversity & Distributions, 2008, 14(5): 808–817
- [21] Wang J, Ni J. Modelling the distribution of five *Caragana* species in temperate Northern China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2009:12–24
- [22] Ming-Yang L I, Yun-Wei J U, Kumar S, et al. Modeling potential habitat for alien species of *Dreissena polymorpha* in the continental USA[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(9): 4253–4258
- [23] Ward D F, Ward DF. Modeling the potential geographic distribution of invasive ant species in New Zealand[J]. Biological Invasions, 2006, 9(6): 723–735
- [24] 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
- [25] 何奇瑾, 周广胜. 我国春玉米潜在种植分布区的气候适宜性[J]. 生态学报, 2012, 32(12): 3931–3939
- [26] 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[J]. 中国农业气象, 2012, 33(4): 481–487
- [27] 谢佰承, 杜东升, 陆魁东, 等. 基于 MaxEnt 模型湖南双季稻种植气候适宜性分布研究[J]. 中国农学通报, 2015, 31(9): 247–251
- [28] 单燕, 李茹, 石磊, 等. 陕西省玉米土壤肥力与施肥效应评估[J]. 土壤学报, 2015, 52(6): 1430–1437
- [29] 安彬, 孙虎, 刘宇峰, 等. 陕西省气候及其生产潜力时空变化特征[J]. 陕西师范大学学报(自科版), 2014(3): 103–108
- [30] 李鸿德, 任建利, 沈新元, 等. 陕西省设施农业发展现状及建议[J]. 现代农业科技, 2011(9): 247–250
- [31] 何春阳, 史培军, 李景刚, 等. 基于 DMSP/OLS 夜间灯光数据和统计数据的中国大陆 20 世纪 90 年代城市化空间过程重建研究[J]. 科学通报, 2006, 51(7): 856–861
- [32] Jaynes E T. Information theory and statistical mechanics[J]. Physical Review, 1957, 106(4): 620
- [33] Jaynes E T. Information theory and statistical mechanics. II[J]. Physical Review, 1957, 108(2): 171

- [34] Jaynes E T, Bretthorst G L. Probability theory: The logic of science. 2003[J]. Cambridge, UK: Cambridge University Press Google Scholar, 2009
- [35] Shannon C E. A mathematical theory of communication, Part I, Part II[J]. Bell Syst. Tech. J., 1948, 27: 623–656
- [36] Wiley E O, Mcnysset K M, Peterson A T, et al. Niche modeling and geographic range predictions in the marine environment using a machine-learning algorithm[J]. Oceanography, 2003, 16(3): 120–127
- [37] Manel, Stéphanie, Williams, H. Ceri, Ormerod, S.J. Evaluating presence–absence models in ecology: The need to account for prevalence[J]. Journal of Applied Ecology, 2001, 38
- [38] Brotons L, Thuiller W, Araújo M B, et al. Presence-absence versus presence-only modelling methods for predicting bird habitat suitability[J]. Ecography, 2004, 27(4): 437–448
- [39] Mcpherson J M, Jetz W, Rogers D J. The effects of species' range sizes on the accuracy of distribution models: Ecological phenomenon or statistical artefact?[J]. Journal of Applied Ecology, 2004, 41(5): 811–823
- [40] Elith J, Graham C H, Anderson R P, et al. Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data[J]. Ecography, 2006, 29(2): 129–151
- [41] Swets J A. Measuring the accuracy of diagnostic systems[J]. Science, 1988, 240(4857): 1285
- [42] Garcia K, Lasco R, Ines A, et al. Predicting geographic distribution and habitat suitability due to climate change of selected threatened forest tree species in the Philippines[J]. Applied Geography, 2013, 44(4):12–22.
- [43] 席庆. 基于 GIS 技术的白头叶猴潜在分布研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2009
- [44] 李云光, 王振华, 张金珠, 等. 滴灌条件下液体地膜覆盖土壤保温保湿效应及棉花生长响应[J]. 土壤, 2015(6): 1170–1175

## Prediction of Potential Suitability Distribution for Facility Agriculture and Forestry Land in Shaanxi Province

SUN Xin<sup>1,2</sup>, YU Dongsheng<sup>2,3\*</sup>, PAN Yue<sup>2,3</sup>, XU Zhichao<sup>2,3</sup>, HUANG Biao<sup>2,3</sup>, LI Mingyang<sup>1</sup>

(1 College of Forestry, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 2 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** As the focus of the construction of modern high-efficient agriculture and forestry, the potential distribution of facility agriculture and forestry can be a guide for its scientific planning and rational layout. Based on 220 geographical distribution sites data of facility agriculture and forestry in Shaanxi Province, together with 10 environment factors and the maximum entropy (Maxent) model and the ArcGIS spatial analysis platform, the potential distribution of facility agriculture and forestry in Shaanxi Province and its dominant environment factors were studied in this paper. The results showed that the evaluation Precision of the model is high, the night lights brightness data, elevation, slope, the average annual precipitation and the annual average temperature are the main environmental factors to affect the potential distribution of facility agriculture and forestry. The development potential of facility agriculture and forestry in Shaanxi Province is in an order of Weinan>Xi'an>Xianyang>Yulin>Hanzhong>Yan'an>Ankang>Shangluo>Baoji>Tongchuan. Among them, Weinan located in central Shaanxi Province has the greatest potential with an area of  $4.77 \times 10^4 \text{ hm}^2$ , accounting for 9.4% of the city's total conventional arable land.

**Key words:** Facility agriculture and forestry; Suitability probability; Potential distribution; Maximum entropy model (Maxent); Shaanxi Province