

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2026.03.006

翁倩文, 陈伟强, 苑钰珂, 等. 基于最大熵模型的大理州红花大金元烟叶种植适宜性评价 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2026, 48(2): 59-69.

# 基于最大熵模型的大理州 红花大金元烟叶种植适宜性评价

翁倩文<sup>1</sup>, 陈伟强<sup>1</sup>, 苑钰珂<sup>1</sup>, 史宏志<sup>2</sup>,  
王德勋<sup>3</sup>, 李纪伟<sup>1</sup>, 马月红<sup>1</sup>, 于滢<sup>1</sup>

1. 河南农业大学 资源与环境学院, 河南 郑州 450046; 2. 河南农业大学 烟草学院, 河南 郑州 450046;  
3. 云南省烟草公司大理州公司, 云南 大理 671000

**摘要:** 开展云南省大理白族自治州红花大金元烟叶种植适宜性评价, 可为当地烤烟合理种植、优化生产空间提供科学参考。本研究基于 19 个气候指标、8 个地形指标和 11 个土壤理化性状指标, 以及 309 个红花大金元烟叶种植区采样点数据, 应用最大熵模型(Maximum Entropy Model, MaxEnt)构建红花大金元烟叶种植适宜评价模型。结果表明: ① 影响大理州红花大金元烟叶种植的关键环境因子按照贡献率从大到小依次为坡度、地形湿度指数、降水量季节性变化、年降水量、相对坡位、海拔、日均温差、坡长因子、最干季降水量、植被指数、土壤 pH 值。② MaxEnt 模型模拟大理州红花大金元烟叶种植分布的精度较高( $AUC=0.933$ )。③ 适宜区划研究表明, 红花大金元烟叶种植优势区主要分布在大理州鹤庆县南部、祥云县中部、洱源县中部等地区, 占全州耕地总面积的 45.24%。经 48 个样品评吸数据验证, 区划结果符合实际。

**关键词:** 红花大金元; 最大熵模型; 环境变量; 适宜性评价;

大理州

中图分类号: S572

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



文章编号: 1673-9868(2026)03-0059-11

## Suitability Evaluation of Honghuadajinyuan Tobacco in Dali Prefecture Based on Maximum Entropy Model

WENG Qianwen<sup>1</sup>, CHEN Weiqiang<sup>1</sup>, YUAN Yuke<sup>1</sup>,  
SHI Hongzhi<sup>2</sup>, WANG Dexun<sup>3</sup>, LI Jiwei<sup>1</sup>,  
MA Yuehong<sup>1</sup>, YU Ying<sup>1</sup>

1. College of Resources and Environment, Henan Agricultural University, Zhengzhou Henan 450046, China;  
2. College of Tobacco, Henan Agricultural University, Zhengzhou Henan 450046, China;  
3. Yunnan Tobacco Company Dali Prefecture Company, Dali Yunnan 671000, China

收稿日期: 2025-05-24

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD1700900); 中国烟草总公司云南省公司科技项目(30802431)。

作者简介: 翁倩文, 硕士研究生, 主要从事土地利用管理研究。

通信作者: 陈伟强, 教授。

**Abstract:** Evaluating the suitability of Honghuadajinyuan in Dali prefecture can provide scientific references for the rational cultivation of flue-cured tobacco and the optimization of the production space in the local area. Based on 19 climatic indicators, 8 topographic indicators, 11 physical and chemical property indicators of soil, as well as the data from 309 sampling points in the Honghuadajinyuan planting areas, the maximum entropy model (MaxEnt) was applied to construct the suitability evaluation model for Honghuadajinyuan planting. The results showed that: ① The key environmental factors affecting Honghuadajinyuan in Dali prefecture, ranked by descending order of contribution rate, were slope, topographic wetness index, precipitation seasonality, annual precipitation, relative position index, elevation, average daily temperature range, slope length factor, precipitation in the driest season, vegetation index, and soil pH value. ② The MaxEnt model demonstrated high accuracy in simulating the distribution of Honghuadajinyuan in Dali prefecture ( $AUC=0.933$ ). ③ The research on suitable zoning indicated that the advantageous planting areas of Honghuadajinyuan were mainly distributed in southern Heqing County, central Xiangyun County, central Eryuan County and other regions, accounting for 45.24% of the total cultivated land area of the whole prefecture. The zoning results were validated by sensory evaluation data from 48 samples, confirming their consistency with the actual situation.

**Key words:** Honghuadajinyuan; maximum entropy model; environmental variables; suitability evaluation; Dali prefecture

云南省大理白族自治州(以下简称“大理州”)烟叶产业已被纳入支撑农户增收致富、实施乡村振兴战略的发展规划<sup>[1]</sup>。红花大金元作为大理州特色优质烤烟品种之一,凭借其香气量足、品质好等特点<sup>[2]</sup>,成为大理州烟叶产业高质量发展的核心品种<sup>[3]</sup>。然而,部分地区在烟区规划中过度追求短期经济价值,烟田常年连作与套作现象普遍,从而引发了土壤养分衰退、病虫害加剧等问题,严重制约了烟叶产业的可持续发展。因此,科学遴选烟叶种植适宜区,成为当前亟需解决的关键问题。

作物种植适宜性评价是通过研究作物生长所需要的环境要素与区域实际生境条件之间的契合度,系统分析作物生长适宜性的空间分布特征<sup>[4]</sup>。传统的作物适宜性评价方法主要包括层次分析法(Alytic Hierarchy Process, AHP)<sup>[5]</sup>、模糊数学法<sup>[6-7]</sup>、优化分析法<sup>[8]</sup>以及加权综合评分法<sup>[9-10]</sup>等,虽然在一定程度上能够反映种植区的环境适宜性,但在数据处理的客观性、变量选择的灵活性及结果的精度方面仍存在一定局限性<sup>[11]</sup>。随着人们对农用地生态问题的重视以及农业信息化水平的快速提升,地理信息系统(Geographic Information System, GIS)技术日趋成熟,越来越多的学者借助其强大的空间分析能力对作物种植的生态适宜性进行量化研究<sup>[12-13]</sup>,但其在处理复杂环境变量关系及预测空间分布动态变化方面仍存在不足。物种分布模型(Species Distribution Models, SDMs)是一种将物种空间位置与环境因子信息相结合的模型,通过分析物种分布数据与环境变量之间的关系对物种潜在分布进行预测,已成为评估生物多样性的重要工具<sup>[14]</sup>。MaxEnt模型是SDMs中应用最为广泛的模型之一,最初主要应用于野生动植物的潜在栖息地预测<sup>[15-16]</sup>。该模型在物种分布数据较少且环境变量关系不明确的情况下仍可精准模拟物种分布<sup>[17]</sup>,近年来已被成功应用于作物潜在种植区域预测。烟叶种植适宜性评价研究多集中于利用气候因子<sup>[18-19]</sup>或土壤养分因子<sup>[20-21]</sup>等单一维度评价指标进行分析,整合地形地貌、气候特征及土壤理化性状的系统性研究仍显不足。

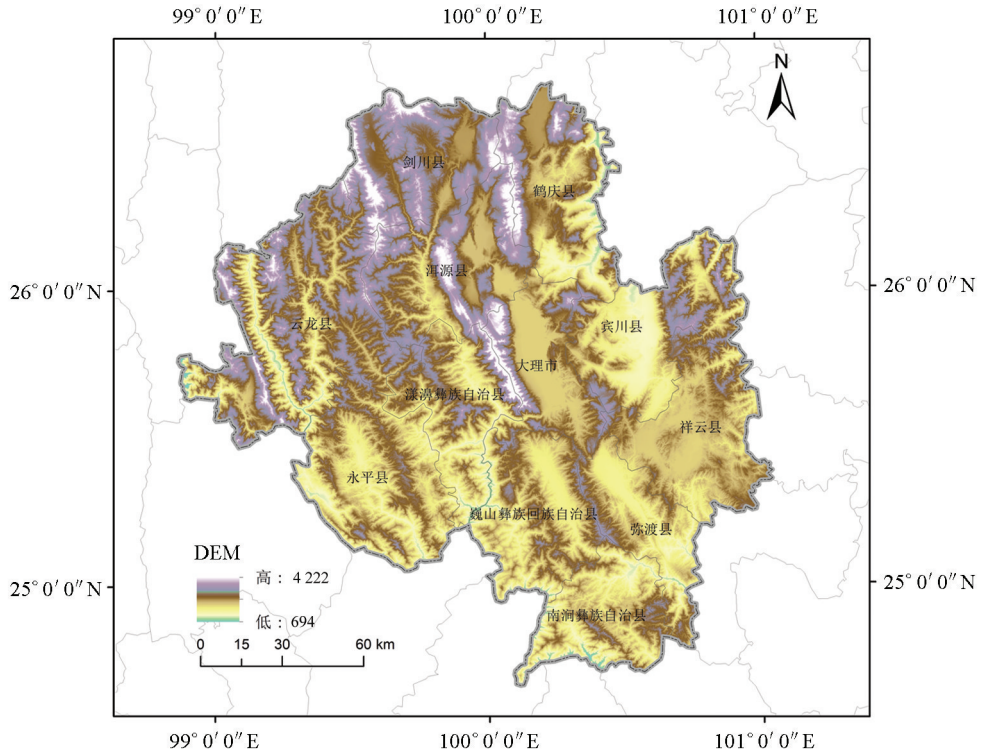
本研究基于MaxEnt模型,通过解构大理州气候数据、数字高程模型及土壤理化性状数据库,揭示了影响红花大金元烟叶品质形成的主导环境因子。研究成果可为优化烟叶生产布局、发展区位优势提供科学依据,对维护“云烟”品牌核心竞争力、促进高原特色农业可持续发展具有一定的价值。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区概况

研究区位于云南省大理州,经纬度范围 $24^{\circ}41'N-26^{\circ}42'N$ 、 $98^{\circ}52'E-101^{\circ}03'E$ ,海拔 $694\sim 4\,222\text{ m}$ ,

总面积为 29 459 km<sup>2</sup>; 研究区地处云贵高原与横断山脉接合部, 属低纬高原季风气候, 立体气候特点显著(图 1)。根据大理州气象站多年统计资料: 其年均气温为 15.8 °C, 年均日照时数 2 332 h, 年均降水 835.7 mm, 烟田土壤主要以水稻土、红壤、紫色土、潮土和黄壤为主。全州常年烤烟种植面积约为 323 km<sup>2</sup>。



审图号: GS(2024)0650 号, 底图边界无修改。下同。

图 1 研究区域所处位置

## 1.2 数据来源与处理

### 1.2.1 物种分布数据

本研究所使用的红花大金元烟叶空间分布数据来源于课题组实地调研。通过筛选, 最终得到由 309 个样点构成的红花大金元烟叶空间分布数据集(图 2), 保存为“.csv”格式备用。

### 1.2.2 环境变量数据

气候因子数据来源于 World Clim(<https://worldclim.org/>), 该数据集涵盖 1970—2000 年间 19 项气候因子数据。数字高程数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>), 分辨率为 12.5 m。土壤养分数据来自课题组于 2023 年 6 月在大理州开展的实地调研, 共采集土壤样点 2 128 个, 并对样品进行系统的理化性质分析, 采用经典贝叶斯克里金插值法插值得到土壤 pH 值、有机质含量、土壤速效钾含量等栅格数据。借助 ArcGIS 10.8 软件对以上 3 类环境变量数据进行坐标系匹配、重采样、掩膜提取等数据标准化处理, 最后得到大理州环境因素数据集(表 1), 导出为“.asc”格式备用。

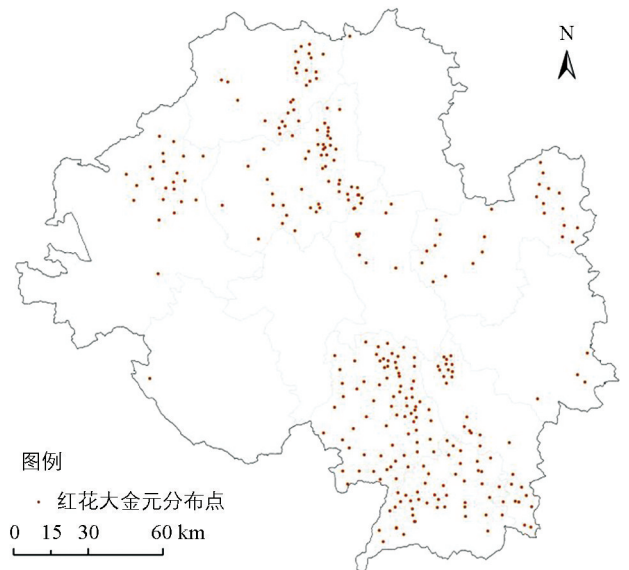


图 2 红花大金元分布点

表 1 环境变量及相关信息

变量缩写	描述	单位	原始分辨率
Bio_1	年均温度	°C	1 km
Bio_2	日均温差	°C	1 km
Bio_3	等温性	ratio	1 km
Bio_4	温度季节性	—	1 km
Bio_5	最暖月的最高温度	°C	1 km
Bio_6	最冷月的最低温度	°C	1 km
Bio_7	年温差	°C	1 km
Bio_8	最湿季的平均温度	°C	1 km
Bio_9	最干季的平均温度	°C	1 km
Bio_10	最暖季的平均温度	°C	1 km
Bio_11	最冷季的平均温度	°C	1 km
Bio_12	年降水量	mm	1 km
Bio_13	最湿月的降水量	mm	1 km
Bio_14	最干月的降水量	mm	1 km
Bio_15	降水量季节性变化	—	1 km
Bio_16	最湿季的降水量	mm	1 km
Bio_17	最干季的降水量	mm	1 km
Bio_18	最暖季的降水量	mm	1 km
Bio_19	最冷季的降水量	mm	1 km
dem	海拔	m	12.5 m
slope	坡度	°	12.5 m
Is_f	坡长因子	m	12.5 m
end	最近水道距离	m	12.5 m
twi	地形湿度指数	—	12.5 m
vd	谷深	m	12.5 m
rsp	相对坡位	—	12.5 m
aspect	坡向	°	12.5 m
ndvi	植被指数	—	30 m
clay	土壤黏粒含量	mm	30 m
sand	土壤砂粒含量	mm	30 m
silt	土壤粉粒含量	mm	30 m
OM	有机质	g/kg	30 m
AK	速效钾	mg/kg	30 m
AP	有效磷	mg/kg	30 m
TN	全氮	g/kg	30 m
EC	电导率	$\mu\text{s}/\text{cm}$	30 m
CEC	阳离子交换率	cmol/kg	30 m
pH	土壤 pH 值	—	30 m

### 1.3 研究方法

#### 1.3.1 模型构建与评估

MaxEnt 模型是一种基于有限已知信息对未知分布进行无偏推断的数学方法<sup>[22]</sup>,其核心原理是给定某些已知约束条件,寻找熵最大的物种概率分布,预测物种的实际概率分布。本研究使用 MaxEnt 3.4.4k 模型预测红花大金元烟叶在大理州的潜在分布。将红花大金元烟叶分布点位数据和环境因子数据导入 MaxEnt 软件中,随机选 75% 红花大金元烟叶分布数据集作为训练样本用来训练模型,另外的 25% 作为验证样本<sup>[23]</sup>,勾选“随机种子”选项,“重复次数”设置为 10 次。模型的构建受到正则化乘数(RM)和特征组合(FC)这两个关键参数的影响<sup>[24]</sup>,研究采用 R 语言软件的 ENMeval 包对正则化乘数值与特征组合进行优化模拟,提高模型评估准确度。共测试了 6 种不同的特征组合,分别为 L、H、LQ、LQH、LQHP、LQHPT,其中,L 为线性、Q 为二次型、H 为片段化、P 为乘积型、T 为阈值型;8 个正则化参数值分别为 0.5、1、1.5、2、2.5、3、3.5、4。

研究采用受试者工作特征曲线(Receiver Operating Characteristic Curve, ROC)及其与横坐标围成的面积(AUC 值)对模型预测能力进行评估<sup>[25]</sup>。AUC 值越接近 1,表明环境变量与预测的物种地理分布之间的相关性越强,模型预测的准确性越高<sup>[26]</sup>。0.5 < AUC 值 < 0.7 时,判定模型预测结果存在较大误差,可靠性较低;0.7 ≤ AUC 值 < 0.9 时,则表明模型具备一定预测能力,模拟结果可靠性处于中等水平;AUC 值 ≥ 0.9 时,认为模型具有优异的预测效能,其评价结果可信度极高。

#### 1.3.2 环境变量筛选方法

相关性分析是构建物种分布模型的关键步骤之一<sup>[27]</sup>。Pearson 相关系数作为评估两个变量之间线性关联程度的统计指标,其值域限定在[-1, 1],其中,-1 表示完全负相关,1 表示完全正相关。绝对值越接近 1,表明两个变量之间的线性相关性越强。本研究选取 38 个环境因子指标,为减少模型的复杂性以及多重共线性问题,采用阶梯式变量筛选方法。首先通过 MaxEnt 模型对所有环境因子进行了 10 次迭代计算,得到各环境因子的贡献率,剔除贡献率低于 0.5 的变量;然后对保留变量进行 Pearson 相关性检验,将相关系数绝对值超过 0.8 的变量依据贡献率高低进行二次筛选,最终保留 18 个环境因子;最后通过量化正则化训练增益、贡献率及排列重要性等指标,并结合领域专业知识,构建多维度评估体系,最终筛选出 11 个对红花大金元烟叶种植分布具有显著解释力的关键环境因子参与建模。

#### 1.3.3 评价单元划分

本研究根据大理州的实际情况,从大理州土地利用与覆被(LUCC)中提取出耕地图层,再将耕地图层与村级行政区划图进行叠加,将同属于同一村庄的耕地划分为一个评价单元,利用 Arcgis 10.8 软件,经过相交、融合、消除等空间处理,最终得到 1 148 个基本评价单元。

#### 1.3.4 红花大金元烟叶适宜区划分

使用 ArcGIS 软件中的“栅格分析工具-重分类”工具将预测概率( $p$ )重新进行分级。基于研究使用的观测数据、模拟结果和大理州实际植烟情况,将种植适宜性的等级划分为 3 个等级: $p \geq 0.8$  时,为优势区;0.7 ≤  $p$  < 0.8 时,为适宜区; $p < 0.7$  时,为不适宜区。

## 2 结果与分析

### 2.1 关键环境因子分析

根据 Jackknife 检验结果可知(图 3),坡度、相对坡位和地形湿度指数是对模型预测效果增益最大的 3 个变量,表明上述 3 个环境因子对红花大金元烟叶在大理州的适生种植区域具有显著影响。

为深入探究环境变量对红花大金元烟叶种植分布的影响贡献程度,本研究通过分析环境因子对红花大

金元烟叶种植潜在分布的贡献百分率,并结合置换重要性这一指标进行综合评价(表 2)。结果显示,影响红花大金元烟叶种植分布的各环境变量因子按贡献率排序依次为坡度、地形湿度指数、降水量季节性变化、年降水量、相对坡位、海拔、日均温差、坡长因子、最干季降水量、植被指数、土壤 pH 值。其中,坡度对红花大金元烟叶种植分布影响最大,而土壤 pH 值影响最小。坡度和地形湿度指数的置换重要性最高,分别为 24.9%和 18.2%,表明这两个因子包含了其他因子无法替代的信息,是制约大理州红花大金元烟叶种植分布的关键限制性因素。

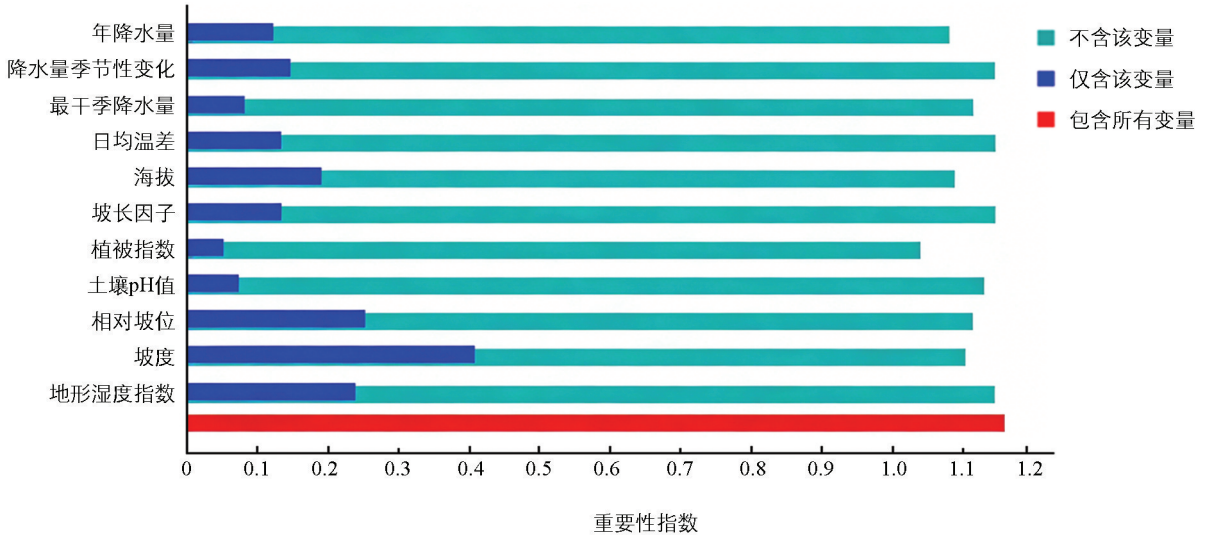


图 3 环境变量对大理州红花大金元烟叶种植分布的重要性

各关键环境变量的响应曲线(图 4)表明,红花大金元烟叶在坡度为  $0^{\circ}$  时适宜种植概率最大。海拔为 750~1 750 m 时,适宜种植概率随海拔的升高而增加;海拔为 2 200~4 000 m 时,适宜种植概率随海拔的升高而下降。坡度的适宜范围为  $0^{\circ}\sim 15^{\circ}$ ,  $0^{\circ}\sim 50^{\circ}$  适宜种植概率随着坡度的增加而下降,  $50^{\circ}$  趋于平稳。年降水量为 1 000~1 600 mm 时适宜种植概率最大。日均温差在  $12.75\sim 13.50^{\circ}\text{C}$  时适宜分布概率最大且趋于平稳。植被指数为 0.15~0.25 时适宜种植红花大金元烟叶的概率最大。

表 2 大理州红花大金元烟叶种植区潜在分布的关键环境因子累积贡献率和置换重要性

关键环境变量	贡献率	累计贡献率	置换重要性
坡度	33.7	33.7	24.9
地形湿度指数	13.7	47.4	18.2
降水量季节性变化	13.0	60.4	16.6
年降水量	9.6	70.0	9.7
相对坡位	7.4	77.4	7.2
海拔	7.2	84.6	11.6
日均温差	5.3	89.9	3.8
坡长因子	4.2	94.1	2.3
最干季降水量	2.9	97.0	2.1
植被指数	1.8	98.8	2.1
土壤 pH 值	1.1	99.9	1.5

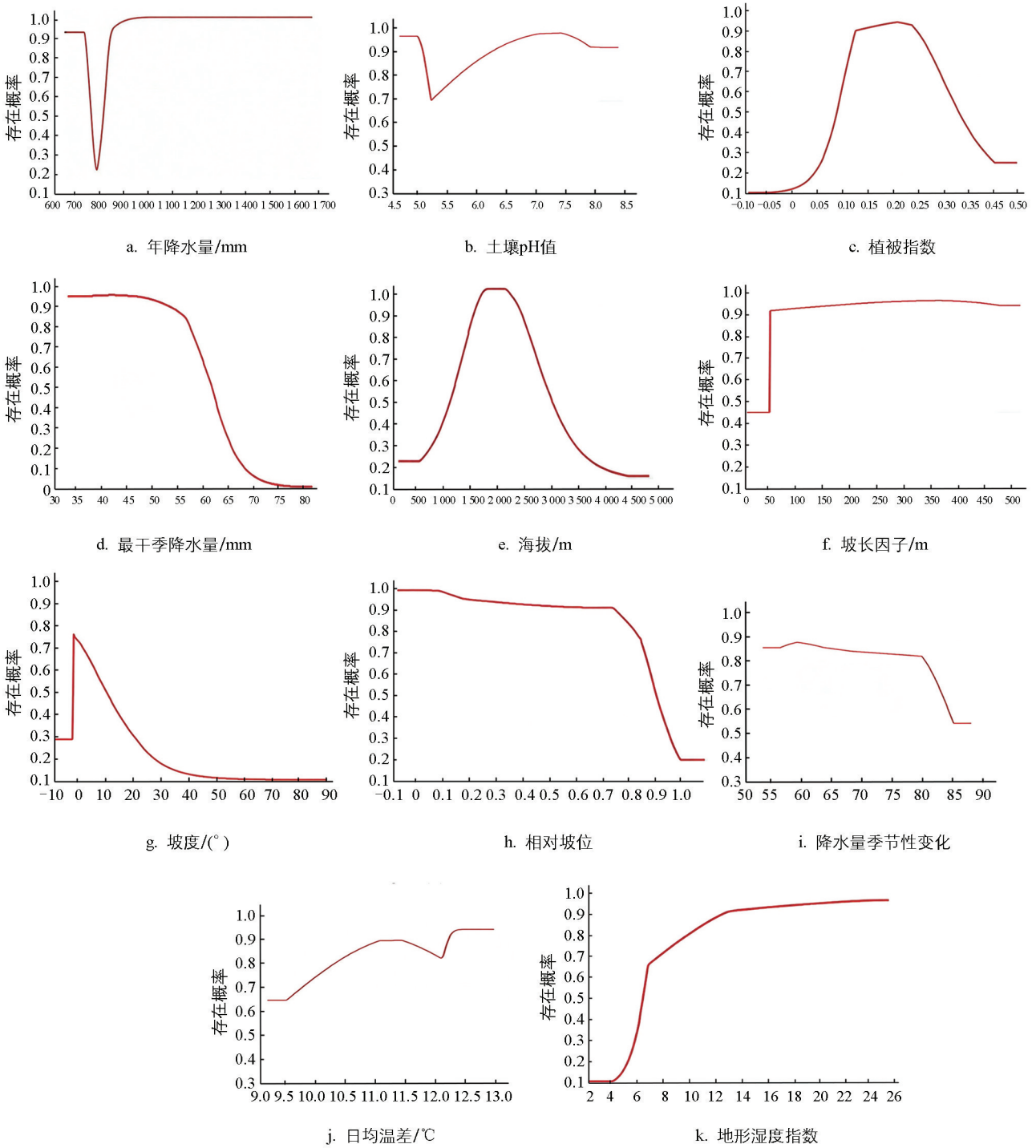


图 4 关键环境变量的响应曲线

## 2.2 模型精度评价

根据 309 条红花大金元烟叶点位分布数据和 11 个环境因子数据, 采用 R 语言 ENMeval 包进行模型优化, 特征组合(FC)为 LQHPT 组合, 正则化乘数(RM)为 4, 此时的 delta. AICc 值最小。使用优化后的最大熵模型参数对红花大金元烟叶潜在分布进行模拟, 由图 5 可知, AUC 值为 0.933, 表明模型能够较好捕捉红花大金元烟叶潜在适生环境的总体分布状况。

## 2.3 红花大金元烟叶适宜区分布

由表 3 可以看出, 各适宜等级面积及比例依次为优势区(1 952.88 km<sup>2</sup>, 占比 45.24%)、适宜区



表 3 大理州红花大金元烟叶适宜性区域等级分布面积及比例

县(市)	不适宜区		适宜区		优势区	
	面积/km <sup>2</sup>	比率/%	面积/km <sup>2</sup>	比率/%	面积/km <sup>2</sup>	比率/%
宾川县	305.97	37.27	263.19	32.06	251.81	30.67
大理市	47.51	24.17	60.24	30.65	88.81	45.18
洱源县	39.35	9.70	108.28	26.69	258.06	63.61
鹤庆县	134.09	20.73	197.11	30.47	315.77	48.80
剑川县	40.90	18.80	46.85	21.54	129.76	59.66
弥渡县	87.39	24.29	124.35	34.56	148.08	41.15
南涧彝族自治县	24.77	13.96	58.42	32.94	94.20	53.10
巍山彝族回族自治县	19.96	8.22	91.24	37.55	131.75	54.23
祥云县	198.86	37.87	27.90	5.31	298.42	56.82
漾濞彝族自治县	64.83	33.49	58.43	30.18	70.32	36.33
永平县	40.66	15.64	148.96	57.31	70.32	27.05
云龙县	62.87	23.30	111.38	41.28	95.58	35.42

表 4 红花大金元样品评吸分区统计

适宜区分类	样品个数/个	样品比率/%	品吸得分
优势区	27	56.25	77.29
适宜区	20	41.67	76.75
不适宜区	1	2.08	73.45

### 3 讨论与结论

#### 3.1 讨论

本研究利用 MaxEnt 模型对红花大金元烟叶在大理州的潜在适生种植区域进行空间模拟预测。将模拟结果与基于品吸数据所确定的红花大金元烟叶实际种植区域进行空间叠加分析。结果表明,二者在地理空间分布格局上高度吻合,充分验证了 MaxEnt 模型在红花大金元烟叶种植适宜性评价研究中的可行性与有效性。在烟叶品种分布点位数据不足的情况下,MaxEnt 模型能够利用机器学习算法深度挖掘有限样本数据与环境变量之间的潜在关联,以概率量化的形式精准定位红花大金元烟叶在大理州不同区域的适生程度。这种基于概率分布的量化评估体系,不仅能够为烟草种植区划提供科学依据,还能通过识别高概率适宜种植区域,为优化种植资源配置、制定差异化栽培管理策略提供决策支持,对推动大理州红花大金元特色烟叶产业的可持续发展具有重要的实践指导价值。

本研究基于 MaxEnt 模型得到不同环境因子对红花大金元烟叶种植的影响程度。研究结果表明,坡度是模型贡献率最高的影响因子,原因在于坡度直接关系到水分与养分的积累与流失状况<sup>[28]</sup>。在坡度过陡的区域,雨水径流增强,易造成土壤侵蚀和肥力流失,不利于烟叶根系的稳定生长及土壤微生物生态系统的维持。张伯浩等<sup>[29]</sup>研究发现,坡度增大会导致坡面土壤持水性不佳,破坏了烤烟土壤的水热平衡环境。坡度不仅影响土壤水分和养分的积累状况,还直接关系到机械化耕作的可行性及土壤侵蚀风险,在大理州以山地丘陵为主的地貌背景下,其作用尤为突出。

大理州所处地区地形起伏大,水文过程复杂,局地湿度受地形影响显著。地形湿度指数可反映因地形影响而导致的土壤水分时空分布差异,进而间接影响烟株的生长环境适宜性。地形湿度指数过低的区域可能土壤干燥,难以维持正常的水分供需平衡。地形湿度指数偏高的区域往往具有良好的水分保持能力,尤

其在降水分布不均的地区,对作物生长水分条件的保障具有重要意义。因此,地形湿度指数作为烟叶生态适宜性评价的重要补充因子,不仅弥补了传统气候水分指标对微观水文过程分析的不足,还提升了模型对复杂地形区域水分空间异质性的响应能力,为科学识别适宜种植区域提供了更精准的地形水文信息支撑。

日均温差作为影响优质烤烟生长的重要因素之一,在烟株物质代谢调控与品质形成过程中具有关键作用。白天气温高有利于光合作用合成更多的有机物质,夜间气温低可减少呼吸消耗,因此,较大的昼夜温差使得烟叶内干物质尤其是糖分积累多<sup>[30]</sup>。对于大理州烟区来说,日均温差大于 12.5℃时,烟草的品质会得到显著提升。土壤 pH 值对烟叶的品质有重要影响,土壤 pH 值为 5.5~7.5 时适宜烤烟生长;优质烟叶生产要求微酸性土壤,pH 值 5.5~6.5 时最适宜烤烟生长<sup>[31]</sup>;pH 值过高,会抑制烤烟根系的生长,研究表明,土壤 pH 值与还原糖、钾含量、氮碱比和两糖比呈显著负相关<sup>[32]</sup>,这意味着在 pH 值过高的土壤中,烟叶的总植物碱含量会增加,而还原糖、钾含量等会降低,导致烟叶的化学成分失衡,影响烟叶的燃烧性和口感。大理州烟区土壤 pH 值均在适宜范围内,但各养分值范围和变异强度有一定差异。

模型结果揭示了红花大金元烟叶对复杂生态因子具有多维度响应特征,尤其依赖于合理的地形条件与适宜的水热分布,为区域种植布局优化与科学管理提供了理论依据。

### 3.2 结论

本研究基于 MaxEnt 模型,评估了影响红花大金元烟叶种植的主导环境因子及其适宜范围,并评价了大理州红花大金元烟叶种植适宜区空间分布。主要结论如下:

- 1) 影响大理州红花大金元烟叶种植的主导环境变量按贡献率大小依次为坡度、地形湿度指数、降水量季节性变化、年降水量、相对坡位、海拔、日均温差、坡长因子、最干季降水量、植被指数、土壤 pH 值。
- 2) ROC 验证结果显示,模型 AUC 值为 0.933,表明 MaxEnt 模型具有较高的准确性和可信度。
- 3) 大理州红花大金元烟叶适宜种植区主要分布在宾川县、鹤庆县、弥渡县、永平县等地区,优势区主要分布在鹤庆县南部、祥云县中部、洱源县中部等地区,占全州耕地总面积的 45.24%。
- 4) 经 48 个样品评吸数据验证,区划结果符合实际。

### 参考文献:

- [1] 陈兴,张天栋,邓国宾,等. 红大烟花香料挥发性成分分析及其在卷烟中的应用 [J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2018, 33(4): 663-668.
- [2] 徐兴阳,罗华元,欧阳进,等. 红花大金元品种的烟叶质量特性及配套栽培技术探讨 [J]. 中国烟草科学, 2007, 28(5): 26-30.
- [3] 孙计平,吴照辉,李雪君,等. 21 世纪中国烤烟种植区域及主栽品种变化分析 [J]. 中国烟草科学, 2016, 37(3): 86-92.
- [4] 周冬梅,张仁陟,孙万仓,等. 甘肃省冬油菜种植适宜性及影响因子评价 [J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(6): 697-704.
- [5] 陈芳淼,李艺,杨光. 豫东南地区玉米种植适宜性空间分析和综合评价研究 [J]. 遥感技术与应用, 2025, 40(1): 38-46.
- [6] 刘少军,周广胜,房世波. 中国橡胶树种植气候适宜性区划 [J]. 中国农业科学, 2015, 48(12): 2335-2345.
- [7] 习文勇,傅佩红. 基于模糊数学的柑橘种植土地适宜性评价 [J]. 浙江农业学报, 2022, 34(1): 141-152.
- [8] 王珑,何英彬,王向一,等. 基于动态过程导向的马铃薯种植适宜性时空精细化评价研究 [J]. 中国农业资源与区划, 2023, 44(9): 179-188.
- [9] 刘琰琰,李海燕,陈超,等. 攀西地区烤烟气候适宜性评价指标建立及应用 [J]. 四川农业大学学报, 2015, 33(3): 299-305.
- [10] 曹杰,何鹏,陈春燕,等. 川西高原典型作物土地适宜性评价及其影响因素 [J]. 中国农业资源与区划, 2024, 45(4): 204-221.
- [11] 王珑,何英彬,尤飞,等. 作物种植适宜性评价尺度及评价方法分析 [J]. 中国农业资源与区划, 2024, 45(9):

- 214-221.
- [12] 张静怡, 王双银, 王正中, 等. 基于 GIS 的陕北农作物适宜性精细化评价及布局研究 [J]. 干旱地区农业研究, 2022, 40(6): 224-231.
- [13] 邓利君, 姚远, 黄梦奇, 等. 基于 GIS 的四川省李子气候适宜性区划研究 [J]. 四川农业大学学报, 2024, 42(3): 554-560.
- [14] 许仲林, 彭焕华, 彭守璋. 物种分布模型的发展及评价方法 [J]. 生态学报, 2015, 35(2): 557-567.
- [15] GUIAN A, THUILLER W. Predicting Species Distribution: Offering More than Simple Habitat Models [J]. Ecology Letters, 2005, 8(9): 993-1009.
- [16] 高惠, 滕丽微, 汪洋, 等. 阿拉善马鹿(*Cervus alashanicus*)生境适宜性评价 [J]. 生态学报, 2017, 37(11): 3926-3931.
- [17] GEBREWAHID Y, ABREHE S, MERESA E, et al. Current and Future Predicting Potential Areas of *Oxytenanthera abyssinica* (A. Richard) Using MaxEnt Model under Climate Change in Northern Ethiopia [J]. Ecological Processes, 2020, 9(1): 6.
- [18] 贾文茜, 陈英英, 陈正洪, 等. 基于 MaxEnt 模型的湖北烟区潜在适宜性分布及其环境特征分析 [J]. 华中农业大学学报, 2024, 43(1): 100-107.
- [19] 杨继周, 谢新乔, 朱安琪, 等. 玉溪烤烟气候适宜性分析的方法研究 [J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2021, 36(5): 832-840.
- [20] 谢新乔, 陆俊平, 田育天, 等. 玉溪市 100 m 级植烟土壤质地品质的区划研究 [J]. 土壤学报, 2023, 60(4): 1113-1122.
- [21] 吴杰, 李向鹏, 陈鑫, 等. 重庆市涪陵区植烟土壤养分的适宜性评价及变异分析 [J]. 土壤, 2020, 52(1): 106-112.
- [22] 孔维尧, 李欣海, 邹红菲. 最大熵模型在物种分布预测中的优化 [J]. 应用生态学报, 2019, 30(6): 2116-2128.
- [23] 姚莉, 邓春秀, 唐彪, 等. 基于最大熵模型(MaxEnt)和地理信息系统(GIS)的四川省眉山市东坡区晚熟柑橘适宜性评价 [J]. 中国农业科学, 2025, 58(4): 748-758.
- [24] 杨佳悦, 丁国玉, 田秀君. 最大熵模型在物种生境预测中的应用研究进展 [J]. 应用生态学报, 2025, 36(2): 614-624.
- [25] GNEITING T, VOGEL P. Receiver Operating Characteristic (ROC) Curves: Equivalences, Beta Model, and Minimum Distance Estimation [J]. Machine Learning, 2022, 111(6): 2147-2159.
- [26] HANLEY J A, MCNEIL B J. The Meaning and Use of the Area under a Receiver Operating Characteristic (ROC) Curve [J]. Radiology, 1982, 143(1): 29-36.
- [27] 赵佳丽, 兰措卓玛, 王伟, 等. 基于 MaxEnt 模型的青藏高原青稞适生区对气候变化响应的分析 [J]. 中国生态农业学报(中英文), 2024, 32(10): 1626-1638.
- [28] 袁淑杰, 谷晓平, 向红琼, 等. 基于 GIS 的贵州高原复杂地形下积温的精细空间分布 [J]. 资源科学, 2010, 32(12): 2427-2432.
- [29] 张伯浩, 宋娅丽, 王克勤, 等. 不同坡度坡位下滇中烤烟地土壤呼吸的变化特征 [J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2018, 47(3): 281-290.
- [30] 窦小东, 侯胜芳, 李蒙, 等. 云南烤烟适宜种植区对气候变化的响应 [J]. 高原气象, 2024, 43(4): 1076-1086.
- [31] 付亚丽, 黄坤, 陈泽斌, 等. 红河烟区土壤养分丰缺状况研究 [J]. 西南农业学报, 2020, 33(9): 2042-2047.
- [32] 邓小华, 向清慧, 刘勇军, 等. 施用改良剂对山地土壤 pH 和烤烟生长及产质量的效应 [J]. 核农学报, 2020, 34(7): 1568-1577.