

DOI: 10.12101/j.issn.1004-390X(n).202010015

玉溪烤烟气候适宜性分析的方法研究*

杨继周¹, 谢新乔¹, 朱安琪², 李湘伟¹, 罗丽华¹,
张坤兰¹, 李家志¹, 景元书^{2**}

[1. 红塔烟草(集团)有限责任公司原料部, 云南玉溪 653100;
2. 气象灾害预报预警与评估协同创新中心/南京信息工程大学 应用气象学院, 江苏南京 210044]

摘要:【目的】为有效利用气候资源因地制宜合理布局烤烟生产, 对烤烟气候适宜性进行划分。【方法】(1) 利用玉溪市各标准站 2009—2018 年的地面观测数据及地理信息数据, 选用符合玉溪地方特色的评价指标(海拔、7月平均气温、4—9月日照时间和4—9月降水量), 结合气候适宜性指数与小网格推算模型对烤烟进行气候适宜性区划。(2) 利用 155 个烤烟分布数据和 23 个环境变量数据, 选用相同的 4 个区划指标和 MaxEnt 模型自带刀切法筛选的 6 个区划指标, 结合 ArcGIS 对烤烟进行气候适宜性区划, 并使用 ROC 曲线检验模型有效性。【结果】MaxEnt 模拟结果有效性较高, 2 次模拟结果 ACU 值(ROC 曲线下的面积)分别为 0.792 和 0.826。对比以上不同方法的烤烟气候适宜性区划结果发现: 在高海拔地区 MaxEnt 模拟结果优于小网格推算模型结果, 基于 6 个指标 MaxEnt 模型区划结果相较于 4 个指标区划结果更加精确。【结论】小网格推算模型与 MaxEnt 模型可应用于烤烟气候适宜性分析, MaxEnt 模型结果提高了玉溪地区烤烟气候适宜性区划的精确化程度。

关键词:烤烟; MaxEnt 模型; 气候适宜性区划

中图分类号: S 572.01

文献标志码: A

文章编号: 1004-390X (2021) 05-0832-09

Study on the Method of Climate Suitability Analysis for Flue-cured Tobacco in Yuxi

YANG Jizhou¹, XIE Xinjiao¹, ZHU Anqi², LI Xiangwei¹, LUO Lihua¹,
ZHANG Kunlan¹, LI Jiazhī¹, JING Yuanshu²

[1. Raw Material Department, Hongta Tobacco (Group) Co., Ltd., Yuxi 653100, China; 2. Collaborative Innovation Center of Meteorological Disaster Forecasting Warning and Assessment, College of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China]

Abstract: [Purpose] To make effective use of climate resources, the production of flue-cured tobacco is rationally arranged according to local conditions, and the climate suitability of flue-cured tobacco is divided. [Method] (1) We used the ground observation data and geographic information data of Yuxi standard stations from 2009 to 2018 to select the evaluation index altitude, average temperature in July, Sunshine hours from April to September and precipitation from April to September that meet the local characteristics of Yuxi, combined climate fitness index and small grid calculation

收稿日期: 2020-10-12 修回日期: 2021-04-17 网络首发时间: 2021-10-14 19:24:14

*基金项目: 国家自然科学基金项目(41575111); 红塔烟草(集团)有限责任公司项目(S-6019001); 江苏省高校优势学科建设工程(PAPD)项目(2017-NY-038)。

作者简介: 杨继周(1984—), 女, 云南玉溪人, 硕士, 农艺师, 主要从事烟叶品质生态研究与烟叶基地建设。E-mail: yjz73@163.com

**通信作者 Corresponding author: 景元书(1968—), 男, 江苏镇江人, 博士, 教授, 主要从事农业气象和生态环境研究。E-mail: jingyshu@163.com

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/53.1044.S.20211014.1302.010.html>



model to carry out zoning of flue-cured tobacco climate suitability. (2) We used 155 flue-cured tobacco distribution data and 23 environmental variable data, selected the same four zoning indicators and six zoning indexes selected by cutting method of MaxEnt model (maximum entropy model), combined with ArcGIS to make the flue-cured tobacco climate suitable and used ROC curve to test the validity of the model. [Result] The MaxEnt simulation results were effective, and the ACU values (area under the ROC curve) of the two simulation results were 0.792 and 0.826, respectively. By comparing and analyzing the above-mentioned different methods of flue-cured tobacco climate suitability zoning results, it was found that the MaxEnt simulation results were better than the small grid calculation model results in high altitude areas, and the MaxEnt model zoning results based on six indicators were more accurate than the four indicators zoning results. [Conclusion] The small-grid calculation model and MaxEnt model can be used to analyze the climate suitability of flue-cured tobacco. The results of MaxEnt model improve the accuracy of flue-cured tobacco climate suitability zoning in the high-altitude area of Yuxi.

Keywords: flue-cured tobacco; MaxEnt model; climate suitability zoning

玉溪是中国优质烤烟主产区和中式中高档卷烟的主要原料基地, 被誉为“云烟之乡”^[1]。气候条件是影响烤烟品质和产量最主要的环境因素。玉溪市地形复杂, 山地、峡谷、高原和盆地交错分布, 立体气候的特征十分明显^[2-3]。因此, 对玉溪烤烟进行气候适宜性分析有重要意义。已有研究主要通过选取区划指标, 利用气候适宜性指数结合 GIS 技术对烤烟进行气候适宜性区划, 如董谢琼等^[4]选用气候条件、土壤类型和坡度等区划指标体系, 在利用 ArcGIS 对云南烤烟进行气候适宜性分区研究上迈出了第一步; 程江珂等^[5]采用 GIS 及模糊神经网络技术对烤烟质量以及生产烤烟的生态条件进行相关性分析, 确定评估西南山地烤烟生态适宜性的因子, 并对攀枝花西南山地烤烟生态进行适宜性评估。但现有的烤烟气候适宜性区划结果比较粗糙, 其评价指标对玉溪烤烟气候的针对性不足, 对玉溪烤烟的生产实用指导性不强^[6]。

在大尺度地理空间下, 气候因子不仅影响植物的生长发育, 还会影响其分布, 并且每个因子影响植物分布的程度不同^[7-8]。随着 GIS 技术的发展和生态位理论的完善, 物种分布模型 (species distribution models, SDMs) 成为评估植物潜在分布、定量分析环境变量影响植物分布程度的重要工具, 广泛应用于植物气候适宜性区划^[9-10]。在物种分布模型中, 由于 MaxEnt 模型的预测结果稳定性和精确度皆优于其他模型, 因而在气候适宜

性分析中备受青睐^[11-12]。但利用 MaxEnt 进行烤烟气候适宜性分析的研究不多见。据此, 本研究选用符合玉溪地方特色的评价指标, 结合气候适宜性指数与小网格推算模型对烤烟进行气候适宜性区划, 同时利用 MaxEnt 模型对烤烟进行气候适宜性区划, 对比分析基于不同方法得到的区划结果, 旨在为玉溪地区烤烟种植布局的优化、卷烟工业企业烟叶原料的精准采购提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 数据来源

1.1.1 模糊数学方法数据来源

玉溪市多年的气候资料由玉溪市气象局提供, 13个站点作为模糊数学样本(图1), 站点数据包括2009—2018年气温、日照时间和降水量等气象数据。DEM 地形数据玉溪地区底图来源于地理空间数据云, 分辨率为30 m×30 m, 应用 GIS 技术提取海拔、经度、纬度、坡度和坡向等栅格数据。

1.1.2 MaxEnt 模型数据来源

根据玉溪市红塔集团工作人员实地调查, 得到156个烤烟采样点(图1)。从WorldClim-Global Climate Data 获取所需的生物气候数据, 其图像分辨率为1 km×1 km。选取玉溪地区的图像数据, 包括19个气候环境变量, 分别为Bio1(年平均温度)、Bio2(年平均日较差)、Bio3(等温性)、Bio4(温度季节变化)、Bio5(最暖月最高温度)、

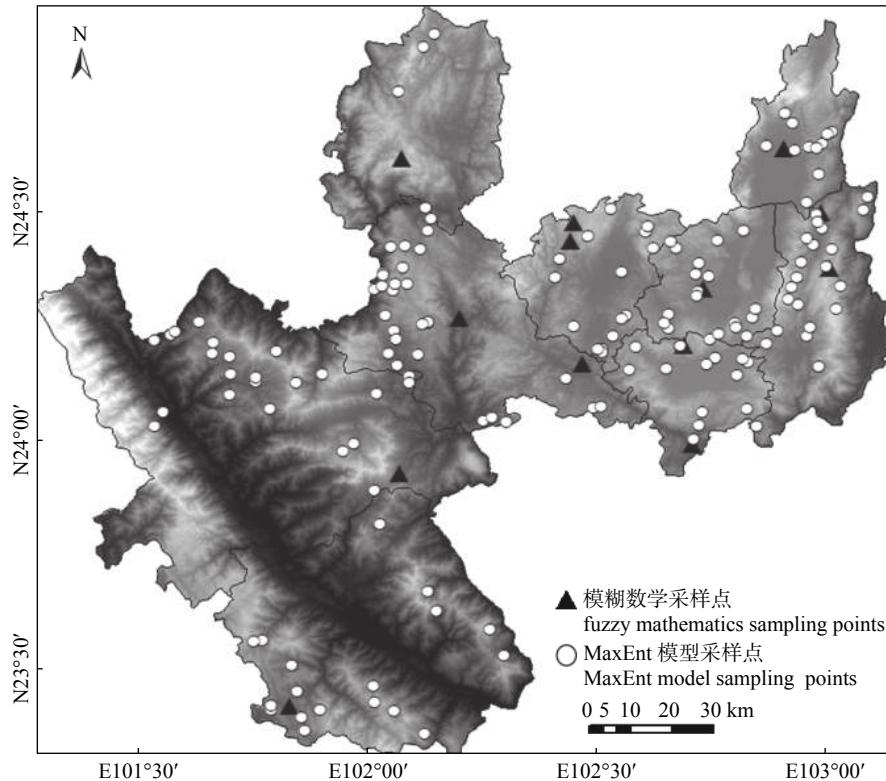


图1 采样点分布图
Fig. 1 Sampling points distribution

Bio6(最冷月最低温度)、Bio7(平均气温年较差)、Bio8(最湿季平均温度)、Bio9(最干季平均温度)、Bio10(最暖季平均温度)、Bio11(最冷季平均温度)、Bio12(年降水量)、Bio13(最湿月降水量)、Bio14(最干月降水量)、Bio15(降水量季节变化)、Bio16(最湿季降水量)、Bio17(最干季降水量)、Bio18(最暖季降水量)和Bio19(最冷季降水量);通过小网格推算模型得到海拔、7月平均气温、4—9月日照时间和4—9月降水量数据。

1.2 研究方法

1.2.1 烤烟区划指标选取及权重计算

烤烟生长的气候环境是受多因素影响的综合系统,根据以往研究^[1,13]与实践经验,采用4项影响烤烟生长发育的环境变量(海拔、7月平均气温、4—9月日照时间和4—9月降水量)作为玉溪烤烟区划指标,通过客观赋权(criteria importance through intercrieria correlation, CRITIC)权重法计算得出各区划指标的权重^[14]。权重计算时,将对比强度与冲突性指标相乘,并进行归一化处理,即得到最终权重。其中,对比强度使用标准差表示,其值越大说明波动越大,权重就越高;

冲突性使用相关系数表示,其值越大说明冲突性越小,权重也就越低(表1)。

1.2.2 烤烟区划指标的小网格推算模型

基于玉溪市各标准站2009—2018年的地面观测数据及地理信息数据,运用数理统计方法建立区划指标(7月平均气温、4—9月日照时间、4—9月降水量、经度、纬度、海拔、坡度、坡向和日照百分率)的多元回归模型,即区划指标的小网格推算模型显著性检验水平均为0.001。其中对各站点年降水量与站点归一化后的地理变量进行相关分析,发现相较于线性拟合,三阶拟合更能解释降水量的空间变异性,因此,本研究以4—9月降水量为因变量,参考焦志敏等^[15]对龙岩汛期降水量空间精细化分布研究所用模型,建立三阶趋势面模型(表2)。

1.2.3 气候适宜性指数计算

气候适宜性指数(climate fitness index, CFI)可反映环境变量对烤烟品质及产量的综合影响,CFI值越大说明该地区越适宜烤烟生长发育^[16]。根据归一化的区划指标值(海拔、7月平均气温、4—9月日照时间、4—9月降水量)和指标权重值

表1 区划指标选取及其权重
Tab. 1 Selection of zoning indexes and their weight

区划指标 zoning index	最适宜 most suitable	适宜 suitable	次适宜 sub-suitable	不适宜 unsuitable	权重/% weight
海拔/m altitude	≥1400~1800	≥1250~1400 ≥1800~2050	≥1000~1250 ≥2050~2200	<1000 >2200	28.02
7月平均气温/℃ average temperature in July	≥20.0~22.5	≥18.5~20.0 ≥22.5~24.0	≥17.0~18.5 ≥24.0~26.0	<17.0 >26.0	23.39
4—9月日照时间/h sunshine hours from April to September	≥700	≥500~700	≥400~500	<400	25.17
4—9月降水量/mm precipitation from April to September	≥500~1000	≥400~500 ≥1000~1400	<400 >1400	23.42	

表2 玉溪烤烟气候区划指标的小网格推算模型
Tab. 2 Small grid calculation model of climatic zoning indexes for flue-cured tobacco in Yuxi

区划指标 zoning index	地理关系模型 geographic relationship model	R ²	F 值 F-value
7月平均气温 (Y_1) average temperature in July	$Y_1=1.607J-0.785W-5.269H-1.771\alpha+0.662\beta+0.455S+21.960$	0.931	32.693**
4—9月日照时间 (Y_2) sunshine hours from April to September	$Y_2=64.706J+47.739W-22.337H-101.957\alpha-105.985\beta+179.973S+670.340$	0.873	13.868**
4—9月降水量 (Y_3) precipitation from April to September	$Y_3=-775.341J+1.614.874J^2-958.752J^3-1.227.516W+1.698.485W^2-954.936W^3+643.278H+180.387H^2-322.851H^3+753.260$	0.682	4.526**

注: J. 经度, °; W. 纬度, °; H. 海拔, m; α. 坡度, %; β. 坡向, °; S. 日照百分率, %; **. 通过可信度 0.001 的显著性检验。

Note: J. longitude, °; W. latitude, °; H. altitude, m; α. slope, %; β. aspect, °; S. percentage of sunshine, %; **. pass the significance test of reliability 0.001.

即可计算 CFI 值。

$$CFI = \sum_{i=1}^m (N_i \cdot W_i) \quad (1)$$

式中, N_i 和 W_i 分别表示第 i 个归一化的区划指标值和权重值。

1.2.4 MaxEnt 模型的区划指标筛选

为了提高模型的准确度, 避免因区划指标之间较高的相关性而降低模拟精度, 本研究利用 YI 等^[17]的方法对区划指标进行筛选。首先利用 MaxEnt 自带的刀切法 (Jackknife test) 计算出 1.1.2 节中 23 个区划指标对烤烟气候适宜性区划的贡献率, 舍去贡献率为 0 的区划指标^[18]; 利用 Pearson 相关系数分析剩余的区划指标的共线性关系, 若其中 2 个区划指标的相关系数小于 0.8, 则全都选取; 若其相关系数大于等于 0.8, 则选取贡献率较大者进行模拟分析。其中, 贡献率表示使用所有变量时该区划指标对建模的贡献百分率; 置换重要性表示该区划指标被替换后对建模的影响程度。最终确定 6 个玉溪特色区划指标, 包括年平均温度、海拔、4—9 月日照时间、最干季降水量、4—9 月降水量和最暖月最高温度, 在此基础上重建烤烟的 MaxEnt 模型。

1.2.5 MaxEnt 模型的有效性评价

将整理好的烤烟采样点的分布 CSV 文件与筛

选出的区划指标导入 MaxEnt 中, 模型参数设置: 测试集为随机抽取 25% 的分布数据, 剩余 75% 为训练集; 重复运行 15 次进行建模; 最大迭代次数为 10; 采用刀切法 (Jackknife test) 计算区划指标贡献率; 其余选项设置为模型默认值^[19-21]。

受试者工作特征曲线 (receiver operating characteristic curve, ROC 曲线) 分析方法被广泛应用于物种潜在分布区预测, ROC 曲线下的面积即为 AUC 值 (area under curve)。由于 ACU 值不受诊断阈值的影响, 可对模型的有效性进行综合评价, 是目前公认的最佳评价环境变量^[22]。因此, 本研究选取 ROC 曲线对 MaxEnt 模拟结果进行有效评价, ROC 曲线的横坐标为实际物种不存在、但模型预测为存在的单元数; 纵坐标为模型正确预测物种存在的单元数, 下部面积为 ACU 值。MaxEnt 模型的 AUC 值越大, 表示区划指标与 MaxEnt 模型之间相关性越好, 越能将该物种存在分布和不存在分布区分开, 其预测效果也就越好。一般认为 ACU 值在 ≥0.5~0.6 为预测结果失败, ≥0.6~0.7 为预测结果较差, ≥0.7~0.8 为预测结果一般, ≥0.8~0.9 为预测结果好, ≥0.9~1.0 为预测结果非常好^[23]。

1.2.6 烤烟气候适宜性等级区划标准

小网格推算模型: 利用 ArcGIS 软件自带的

自然断点法对气候适宜指数(CFI)进行划分,即通过分析区域内所有站点数据值与平均值之差的原则来寻找特征点,并结合实地调查,通过多次试验划分,得出CFI值在 $>0.92\sim1.00$ 为最适宜区, $>0.83\sim0.92$ 为适宜区, $>0.71\sim0.83$ 为次适宜区, ≤0.71 为不适宜区。

MaxEnt模型:根据MaxEnt模型进行烤烟气候适宜性区划标准,参照《IPCC第四次评估报告中对不确定性的处理方法》^[24],存在概率在 $>0.66\sim1.00$ 为最适宜区, $>0.33\sim0.66$ 为适宜区, $>0.05\sim0.33$ 为次适宜区, ≤0.05 为不适宜区。

2 结果与分析

2.1 基于小网格推算模型的烤烟气候适宜性分析

由表3可知:玉溪大部分地区都非常适合种植烤烟,8个站点都达到了最适宜区的标准。易门底尼站的气候适宜性指数(CFI)最低为0.60,是玉溪唯一的烤烟种植不适宜区。通过比较表1和表3的数据可知:制约底尼烤烟种植的主要指标是海拔,这种制约在黄草坝、波衣、红岩和四寨也均有不同程度的体现。

2.2 基于MaxEnt模型的烤烟气候适宜性分析

2.2.1 MaxEnt模型的有效性

为了明确4个传统区划指标(海拔、7月平均气温、4—9月日照时间和4—9月降水量)和筛选后6个玉溪特色区划指标(年平均温度、海拔、4—9月日照时间、最干季降水量、4—9月降水量和最暖月最高温度)的差异性,将2组指标带入MaxEnt模型。由图2、3可知:4个区划指标的模拟结果ACU=0.792,6个区划指标的模拟结果ACU=0.826,说明2组指标模拟结果良好,可以利用MaxEnt模型对玉溪烤烟进行气候适宜性区划。其中6个区划指标的模拟结果优于4个区划指标。

2.2.2 MaxEnt模型主导区划指标的筛选

由表4可知:在海拔、7月平均气温、4—9月日照时间和4—9月降水量这4个区划指标中对烤烟气候适宜性区划影响最大的是海拔,其贡献率高达45.4%;4—9月日照时间和7月平均气温的贡献率分别为22.2%和19.3%,这3个区划指标的贡献率之和为86.9%(超过85%是玉溪地区影响烤烟生产的主导区划指标)。而由于玉溪独特的气候,其整个地区的降水条件都适合种植烤

表3 玉溪13个站点烤烟气候适宜性区划统计

Tab. 3 Statistics of climatic suitability of flue-cured tobacco at 13 stations in Yuxi

县区 county	站名 site name	海拔/m altitude	7月平均气温/℃ average temperature in July	4—9月日照时间/h sunshine hours from April to September	4—9月降水量/mm precipitation from April to September	CFI	区划类型 zoning type
澄江 Chengjiang	吉里村 Jilicun	1692	21.35	877.49	689.04	1.00	最适宜 most suitable
峨山 Eshan	河外 Hewai	1313	22.83	889.57	630.31	0.93	最适宜 most suitable
峨山 Eshan	兴旺 Xingwang	1510	21.80	889.27	650.36	1.00	最适宜 most suitable
红塔区 Hongta District	黄草坝 Huangaoba	1940	18.87	790.99	764.07	0.84	适宜 suitable
红塔区 Hongta District	波衣 Boyi	2218	20.59	674.97	827.55	0.75	次适宜 sub-suitable
华宁 Huaning	大村 Dacun	1892	19.97	936.12	708.37	0.95	最适宜 most suitable
华宁 Huaning	红岩 Hongyan	2057	18.49	719.89	934.06	0.74	次适宜 sub-suitable
江川区 Jiangchuan District	前卫 Qianwei	1728	21.03	917.59	677.83	1.00	最适宜 most suitable
通海 Tonghai	高大 Gaoda	1380	22.63	849.34	750.42	0.96	最适宜 most suitable
通海 Tonghai	四寨 Sizhai	1993	19.25	739.53	695.63	0.83	适宜 suitable
新平 Xinping	尼鮈 Nizha	1689	20.93	887.15	834.74	1.00	最适宜 most suitable
易门 Yimen	底尼 Dini	2240	17.61	787.35	731.44	0.60	不适宜 unsuitable
元江 Yuanjiang	因远 Yinyuan	1640	21.06	757.36	965.67	1.00	最适宜 most suitable

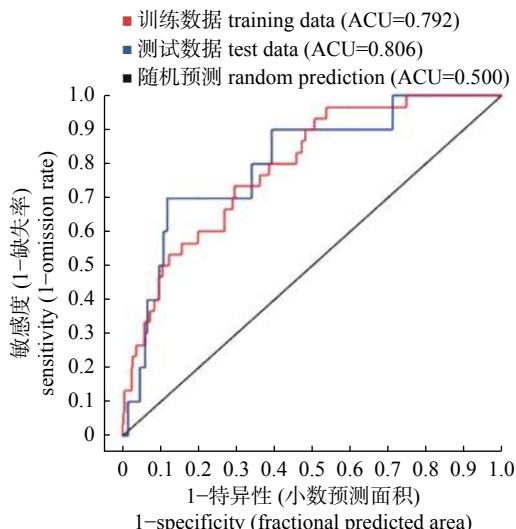


图2 4个区划指标MaxEnt模型的ROC值

Fig. 2 ROC value of MaxEnt model of four zoning indicators

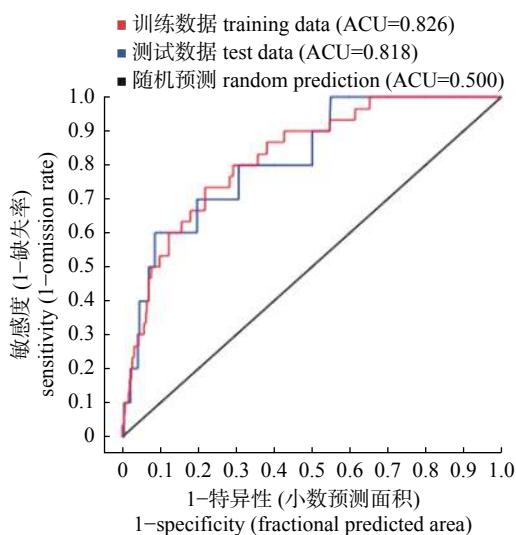


图3 6个区划指标MaxEnt模型的ROC值

Fig. 3 ROC value of MaxEnt model of six zoning indicators

表4 4个区划指标MaxEnt模型的贡献率及置换重要性

Tab. 4 Contribution rate and replacement importance of the MaxEnt model of four zoning indicators

区划指标 zoning index	贡献率/% contribution rate	置换重要性/% importance of replacement
海拔 altitude	45.4	41.0
4—9月日照时间 sunshine hours from April to September	22.2	14.7
7月平均气温 average temperature in July	19.3	32.0
4—9月降水量 precipitation from April to September	13.2	12.4

烟, 所以4—9月的降水量贡献率最低(13.2%)。海拔和4—9月降水量的置换重要性均与其贡献率相差很小, 4—9月日照时间的置换重要性低于贡献率, 而7月平均气温则与之相反, 说明7月平均气温对建模有重要影响。

由表5可知: 年平均温度的贡献率最大(34.0%), 最暖月最高温度贡献率最小(6.4%)。这2个与气温相关的区划指标总贡献率达到40.4%, 说明玉溪烤烟对于气温条件的要求较高。海拔和4—9月日照时间的贡献率分别为27.7%和15.3%, 与降雨量相关的2个区划指标最干季降水量和4—9月降水量贡献率之和为16.7%, 说明玉溪种植烤烟的日照充足且降水适宜。最暖月最高温度与7月平均气温的相关系数为0.81, 决定系数为0.70, 因此其置换重要性也与7月平均气温的情况相同, 即明显高于贡献率。

表5 6个区划指标MaxEnt模型的贡献率及置换重要性

Tab. 5 Contribution rate and replacement importance of the MaxEnt model of six zoning indicators

区划指标 zoning index	贡献率/% contribution rate	置换重要性/% importance of replacement
年平均温度 annual average temperature	34.0	21.5
海拔 altitude	27.7	21.1
4—9月日照时间 sunshine hours from April to September	15.3	1.6
最干季降水量 rainfall in the driest quarter	9.6	6.6
4—9月降水量 precipitation from April to September	7.1	8.2
最暖月最高温度 the highest temperature in the hottest month	6.4	41.0

2.3 不同方法的烤烟气候适宜性区划结果对比分析

为了更直观地显示区划结果和实际的相符程度, 引入玉溪海拔分布(图4)。将上述不同方法得到的结果导入ArcGIS, 得到玉溪烤烟气候适宜性区划结果(图5~7), 发现大体区划结果基本一致。最适宜区位于江川、华宁和通海一带; 较适宜和适宜区主要分布于峨山、新平、易门和元江的部分区域; 不适宜区相对集中, 位于元江到新平的狭长地带, 其海拔均在1000 m以下, 不适合烤烟生长发育。

通过分析图5~7 烤烟气候适宜性区划结果之间存在的差异发现：综合来看，MaxEnt模型的模拟结果优于小网格推算模型结果，更加适用于玉溪烤烟气候适宜性分析，筛选后6个玉溪特色区划指标相比4个传统区划指标能够有效提高MaxEnt模型模拟结果的精确度。其中，小网格推算模型区划结果对于个别气象站点的烤烟气候适宜性划分更加准确，在高海拔和处于适宜区的低海拔地区区划精度有待提高。4个传统区划指标MaxEnt模型对于高海拔(>2200 m)烤烟生长状况模拟效果更好，对处于不适宜区的低海拔地区烤烟生长模拟效果还有待加强。考虑到玉溪地

区整体的降水与光照条件充足而产生对于海拔高度不足的补偿效应，6个玉溪特色区划指标MaxEnt模型在低海拔区域区划精度更高。

3 讨论

本研究除采用常用的海拔和经纬度指标外^[25~26]，还引入了对区划指标产生影响的坡向、坡度和日照百分率，对区划指标中的4—9月降水量采用符合玉溪生产实际的三阶趋势面模型进行模拟，有效提高了小网格推算模型拟合优度。考虑到以往研究使用的4个传统区划指标对玉溪地区针对性不强的问题^[1, 4]，且区划指标间存在高

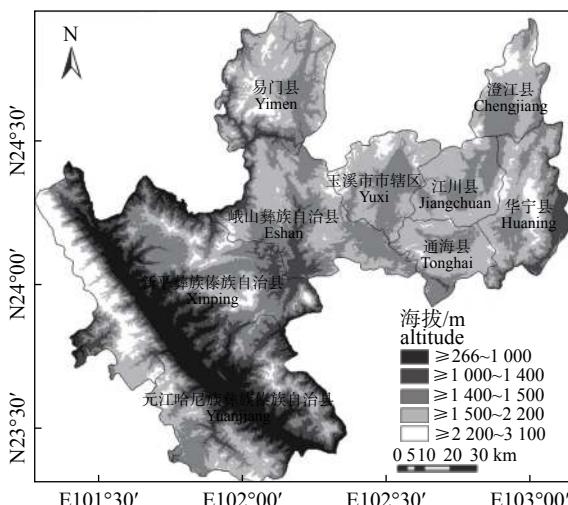


图4 玉溪海拔高度分布图

Fig. 4 Yuxi altitude map

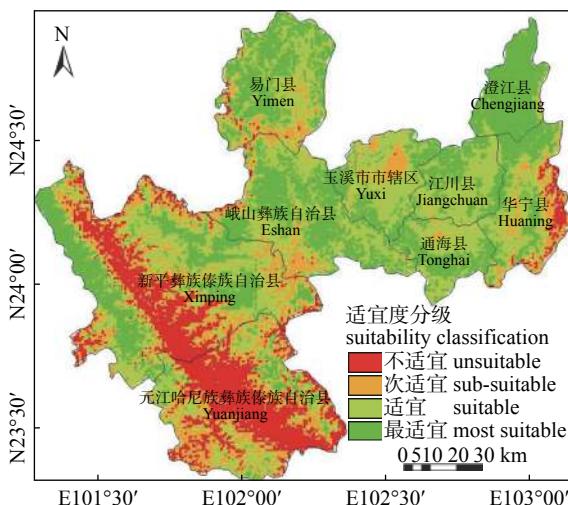


图5 基于小网格推算模型的烤烟适宜性区划图

Fig. 5 Zoning map of flue-cured tobacco suitability based on small grid calculation model

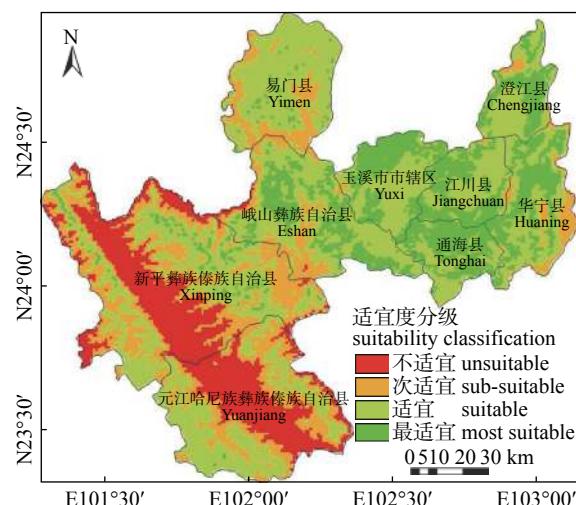


图6 4个区划指标 MaxEnt 模型烤烟适宜性区划图

Fig. 6 Four zoning indicators MaxEnt model

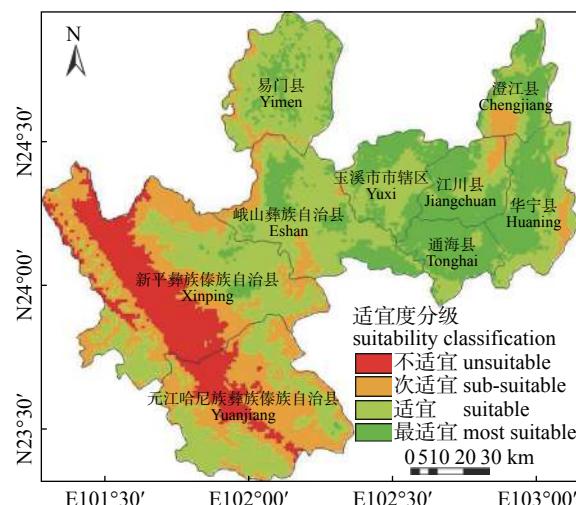


图7 6个区划指标 MaxEnt 模型烤烟适宜性区划图

Fig. 7 Six zoning indicators MaxEnt model

度相关而带来的冗余信息对预测结果可靠性产生的负面影响^[27], 所以通过 MaxEnt 模型与统计方法结合, 在 23 个环境变量中筛选出 6 个玉溪特色区划指标(年平均温度、海拔、4—9 月日照时间、最干季降水量、4—9 月降水量和最暖月最高温度)重建 MaxEnt 模型。通过 MaxEnt 模型自带的刀切法, 得出重建模型后各个区划指标的贡献率与置换重要性, 找出制约玉溪烤烟生产的主要因素为海拔和气温。

在以往有关云南省烤烟气候适宜性分析的研究中玉溪地区都被划分为最适宜区^[28-29], 这与本研究的结论相符, 然而在玉溪实际生产应用中这种划分略显粗糙, 对此本研究对玉溪地区进行了更加精细化的烤烟气候适宜性区划。为找到更加准确的区划结果, 本研究除了进行不同方法之间的对比外, 还在同一方法中使用不同的区划指标进行对比, 并对其各自的优缺点进行总结, 方便在实际生产运用中根据不同的需求选取不同的区划结果。在考虑大范围烤烟气候适宜性时, 可以选用综合效果较好、考虑补偿效应的 6 个区划指标 MaxEnt 模型区划结果; 在考虑小范围烤烟气候适宜性时, 可以选用在小区域范围内区划结果更精确的小网格推算模型区划结果; 在高海拔地区则选取在此区域表现良好的 4 个区划指标 MaxEnt 模型区划结果。

随着温室气体的持续排放和维持, 全球气候异常升温^[30], 将导致气温对玉溪烤烟生产限制作用减轻进而影响烤烟生长和分布格局的变化。除此之外, 生产技术的进步与革新, 如地膜保温、小苗抗旱保温技术和移栽期的调整等也会对烤烟生长和分布产生影响^[31]。在今后工作中应更全面地考虑各种因素及其之间的相互影响, 进一步提高区划结果准确度。

4 结论

(1) 玉溪大部分地区都非常适合种植烤烟, 易门底尼站是唯一的烤烟种植不适宜区。小网格推算模型和 MaxEnt 模型的烤烟气候适宜性区划结果大体一致, 均呈现出明显的地区差异性。最适宜区位于江川、华宁和通海一带; 适宜和次适宜区主要分布于峨山、新平、易门和元江的部分区域; 不适宜区相对集中, 位于元江到新平的狭长地带。

(2) MaxEnt 模型模拟结果有效性较高, 可应用于烤烟气候适宜性分析。利用 MaxEnt 模型自带刀切法与统计方法结合, 筛选出 6 个玉溪特色区划指标, 即: 年平均温度、海拔、4—9 月日照时间、最干季降水量、4—9 月降水量和最暖月最高温度。通过 MaxEnt 模型得出贡献率和置换重要性, 发现玉溪主导区划指标为海拔、气温和日照时间。

(3) MaxEnt 模型的模拟气候适宜性区划结果优于小网格推算模型结果, 更加适用于玉溪烤烟气候适宜性分析, 而经过筛选的 6 个玉溪特色区划指标相比于传统的 4 个区划指标能够有效提高 MaxEnt 模型模拟结果的精确度。

[参考文献]

- [1] 李秀, 付东灵, 解福燕, 等. 玉溪市烤烟种植气候指标分析[J]. 云南科技管理, 2017, 30(3): 54. DOI: [10.3969/j.issn.1004-1168.2017.03.016](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-1168.2017.03.016).
- [2] 陈发荣. 红塔品牌导向玉溪特色烟叶评价体系构建及应用[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2012.
- [3] 孙惠玲, 李天艳, 周晓娟, 等. 近54年来玉溪市气候变化特征分析[J]. 云南师范大学学报(自然科学版), 2016, 36(5): 67. DOI: [10.7699/j.ynnu.ns-2016-070](https://doi.org/10.7699/j.ynnu.ns-2016-070).
- [4] 董谢琼, 徐虹, 杨晓鹏, 等. 基于GIS的云南省烤烟种植区划方法研究[J]. 中国农业气象, 2005(1): 17. DOI: [10.3969/j.issn.1000-6362.2005.01.004](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-6362.2005.01.004).
- [5] 程江珂, 王胜男. GIS 及模糊神经网络对西南山地烤烟的评估研究[J]. 中国农业资源与区划, 2017, 38(8): 74. DOI: [10.7621/cjarrp.1005-9121.20170810](https://doi.org/10.7621/cjarrp.1005-9121.20170810).
- [6] 刘友杰. 基于GIS的延边烤烟种植生态适宜性区划研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2009.
- [7] KOO K A, KONG W S, NIBBELINK N P, et al. Potential effects of climate change on the distribution of cold-tolerant evergreen broadleaved woody plants in the Korean Peninsula[J]. PLoS One, 2015, 10(8): e0134043. DOI: [10.1371/journal.pone.0134043](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0134043).
- [8] WALTHER G R, POST E, CONVEY P, et al. Ecological responses to recent climate change[J]. Nature, 2002, 416(6879): 391. DOI: [10.1038/416389a](https://doi.org/10.1038/416389a).
- [9] 刘想, 龚熹, 陈思斯, 等. 基于MaxEnt和ArcGIS模拟檫木分布格局及其栖息地的变化[J]. 植物科学学报, 2018, 36(3): 322. DOI: [10.11913/PSJ.2095-0837.2018.30320](https://doi.org/10.11913/PSJ.2095-0837.2018.30320).
- [10] 刘晓彤, 袁泉, 倪健. 中国植物分布模拟研究现状[J]. 植物生态学报, 2019, 43(4): 273. DOI: [10.17521/cjpe.2018.0237](https://doi.org/10.17521/cjpe.2018.0237).
- [11] ESTRADA A S, ORTIZ E, VILLASEÑOR J L, et al. The distribution of cultivated species of *Porophyllum* (Asteraceae) and their wild relatives under climate change[J]. Systematics and Biodiversity, 2016, 14(6): 572. DOI: [10.1080/14772000.2016.1205678](https://doi.org/10.1080/14772000.2016.1205678).

- [12] 张颖, 李君, 林蔚, 等. 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. DOI: [10.13287/j.1001-9332.2011.0415](https://doi.org/10.13287/j.1001-9332.2011.0415).
- [13] 王连喜, 尹远渊, 朱勇, 等. 云南省烤烟品质与气象条件的关系及综合评价研究[J]. 中国农学通报, 2012(10): 103. DOI: [10.3969/j.issn.1000-6850.2012.10.019](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-6850.2012.10.019).
- [14] 管新建, 刘文康, 胡栋. 基于CRITIC权的污染指数法在清潩河水质评价中的应用[J]. 水电能源科学, 2017, 35(8): 49.
- [15] 焦志敏, 邓宇阳, 林晓君, 等. 基于GIS的龙岩汛期降水量空间精细化分布研究[C]//第35届中国气象学会年会: S1 灾害天气监测、分析与预报, 2018.
- [16] 谭智勇, 许龙, 徐天养, 等. 文山烟区烤烟气候适宜性评价及其变化特征分析[J]. 中国烟草科学, 2015, 36(1): 78. DOI: [10.13496/j.issn.1007-5119.2015.01.015](https://doi.org/10.13496/j.issn.1007-5119.2015.01.015).
- [17] YI Y J, CHENG X, YANG Z F, et al. Maxent modeling for predicting the potential distribution of endangered medicinal plant (*H. riparia* Lour) in Yunnan, China[J]. Ecological Engineering, 2016, 92: 260. DOI: [10.1016/j.ecoleng.2016.04.010](https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.04.010).
- [18] WORTHINGTON T A, ZHANG T J, LOGUE D R, et al. Landscape and flow metrics affecting the distribution of a federally-threatened fish: improving management, model fit, and model transferability[J]. Ecological Modelling, 2016, 342: 4. DOI: [10.1016/j.ecolmodel.2016.09.016](https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2016.09.016).
- [19] 车乐, 曹博, 白成科, 等. 基于MaxEnt和ArcGIS对太白米的潜在分布预测及适宜性评价[J]. 生态学杂志, 2014, 33(6): 1623. DOI: [10.13292/j.1000-4890.20140327.001](https://doi.org/10.13292/j.1000-4890.20140327.001).
- [20] 徐军, 曹博, 白成科. 基于MaxEnt濒危植物独叶草的中国潜在适生分布区预测[J]. 生态学杂志, 2015, 34(12): 3354. DOI: [10.13292/j.1000-4890.2015.0307](https://doi.org/10.13292/j.1000-4890.2015.0307).
- [21] 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[J]. 云南农业大学学报 (自然 科学), 2019, 34(3): 524. DOI: [10.12101/j.issn.1004-390X\(n\).201711039](https://doi.org/10.12101/j.issn.1004-390X(n).201711039).
- [22] 戴良英, 谢丙炎, 万方浩, 等. ROC曲线分析在评价入侵物种分布模型中的应用[J]. 生物多样性, 2007, 15(4): 365. DOI: [10.3321/j.issn: 1005-0094.2007.04.005](https://doi.org/10.3321/j.issn: 1005-0094.2007.04.005).
- [23] 胡秀, 吴福川, 郭微, 等. 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. DOI: [10.11707/j.1001-7488.20140504](https://doi.org/10.11707/j.1001-7488.20140504).
- [24] MANNING R M. IPCC第四次评估报告中对不确定性的处理方法[J]. 气候变化研究进展, 2006, 2(5): 233. DOI: [10.3969/j.issn.1673-1719.2006.05.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-1719.2006.05.005).
- [25] 金垚, 熊士斌, 刘琰琰, 等. 基于GIS的旺苍县红心猕猴桃生态适宜性区划[J]. 西南农业学报, 2019, 32(9): 2141. DOI: [10.16213/j.cnki.scjas.2019.9.027](https://doi.org/10.16213/j.cnki.scjas.2019.9.027).
- [26] 郭兆夏, 梁轶, 王景红, 等. GIS技术支持下的陕西核桃精细化气候适宜性区划[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(1): 196. DOI: [10.16302/j.cnki.1000-7601.2015.01.032](https://doi.org/10.16302/j.cnki.1000-7601.2015.01.032).
- [27] 高蓓, 卫海燕, 郭彦龙, 等. 应用GIS和最大熵模型分析秦岭冷杉潜在地理分布[J]. 生态学杂志, 2015, 34(3): 843.
- [28] 云南省烟草农业科学研究院. 基于GIS的云南烤烟种植区划研究[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [29] 胡雪琼, 黄中艳, 朱勇, 等. 云南烤烟气候类型及其适宜性研究[J]. 大气科学学报, 2006, 29(4): 563. DOI: [10.3969/j.issn.1674-7097.2006.04.019](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-7097.2006.04.019).
- [30] ZHANG K L, YAO L J, MENG J S, et al. Maxent modeling for predicting the potential geographical distribution of two peony species under climate change[J]. Science of the Total Environment, 2018, 634: 1326. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2018.04.112](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.112).
- [31] 蒋样明, 崔伟宏, 董前林. 基于空间技术的烤烟种植生态环境综合评价分析[J]. 植物生态学报, 2012, 36(1): 47. DOI: [10.3724/SP.J.1258.2012.00047](https://doi.org/10.3724/SP.J.1258.2012.00047).

责任编辑: 何馨成