

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.
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2024.01.011

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

贾文茜¹,陈英英¹,陈正洪¹,李建平²,敖银银³

1.湖北省气象服务中心,武汉 430205; 2.湖北省烟草科学研究院,武汉 430030;
3.湖北省公众气象服务中心,武汉 430074

摘要 为全面评价生态气候因子对湖北省烟叶生长发育的影响,利用2008—2020年中国气象局陆面数据同化系统(CMA land data assimilation system,CLDAS)数据集和其他环境因子,基于最大熵模型(MaxEnt),利用湖北省西部烟区实际种植点位模拟湖北省烟区的潜在适宜性分布,并评估影响适宜性分布的主导环境因子。结果显示:MaxEnt模型对烟草适宜性分布的模拟预测精度较高(AUC=0.854)。海拔(650~1 750 m)、土壤类型(黄壤)、团棵期平均最低气温(8.9~15.0℃)、旺长期平均气温(16.0~22.9℃)、成熟期平均气温(18.8~25.6℃)是影响湖北烟草分布的主导环境因子。烟草的高适生区主要分布在恩施、十堰和襄阳南部及宜昌东南部,占湖北省总面积的18.2%,80%区域的海拔为700~1 350 m、团棵期平均最低气温11.2~14.5℃、旺长期平均气温19.2~22.8℃、成熟期平均气温22.0~25.4℃。在所有环境因子中,海拔高度起决定性作用,温度则是影响烟草生长发育的重要气象因子。研究表明,本研究结果与湖北烟区实际空间分布基本相符。

关键词 湖北烟区;最大熵模型;生育期;潜在分布;主导环境因子;生态适宜性;地理信息系统(GIS)

中图分类号 P49 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2024)01-0100-08

烟草是湖北省重要的经济作物,烟叶主产区主要位于湖北省西部山区,烟区海拔分布在78~1 900 m^[1]。鄂西立体环境特征明显,烟叶对环境变化十分敏感^[2],不同地理和气候条件下,烟叶产量和品质有明显差异。因此,在当前全球气候变暖背景下,有必要了解目前已存烟区的适生程度和湖北省境内潜在的适宜性烟区,以及不同适生区内环境因子的适宜范围。

目前有关湖北省烟草的研究,主要集中在土壤、海拔等因子对烟叶适生性和品质的影响方面。王得强等^[3]指出十堰低海拔烟区烟叶的适生性高于中海拔和高海拔区域;尹忠春等^[4]指出宣恩烟区出现酸化(pH 5.5~7.0)趋势,适合种植烟草的面积占35.4%。也有不少研究分析了不同生育期适宜的气候条件,发现鄂西烟区大田中期气温低、降水多,成熟期降水少、日照充足有利于提高烟草的品质^[5]。近年来,有关气象灾害的风险评价与区划已逐渐成熟,一些学

者利用气候条件或者气象灾害作为指标开展了烟草种植区划的研究^[6-7]。孟丹等^[8]指出鄂西北种植区气象灾害风险表现为东高西低,鄂西南为南高北低。以上有关烟草方面的研究大多只针对地理、土壤特性或气象因子对烟草生长发育的影响,且目前有关湖北烟区类型的划分也仅停留在单一气候因子的区划研究上,较少考虑地理、土地利用类型等环境因子,并且烟草区划侧重于不同种植区的划分,很少与不同环境因子的影响和适宜范围联合分析。

本研究基于湖北省已知的烟区分布点,选用高分辨率气象格点数据、地形、土壤等相关环境因子,应用MaxEnt模型和GIS技术^[9-10],考察湖北省烟区分布与环境变量之间的关系,揭示影响烟区分布的主导环境因子,并进一步分析烟叶在湖北省的潜在适生区分布,以期为湖北省烟草空间布局规划和科学种植提供技术参考。

收稿日期:2022-07-13

基金项目:湖北省烟草公司科技项目(027Y2021-020)

贾文茜,E-mail:1719515481@qq.com

通信作者:陈正洪,E-mail:447183633@qq.com

1 材料与方法

1.1 烟草物种点和生育期的确定

烟草物种点主要分布在湖北省西部的恩施、宜昌、十堰和襄阳地区(图 1)。本研究根据以往对鄂西多年平均烟叶生育时期的研究,确定了烟叶不同生育期时段,具体时间划分为团棵期(4 月 25 日—5 月 31 日)、旺长期(6 月 1 日—6 月 30 日)、成熟期(7 月 1 日—8 月 31 日)。

1.2 环境变量

本研究选用的环境变量包括地形数据、土地利用类型、土壤类型、土壤湿度以及相关的气候变量。地形数据包括海拔、坡度、坡向 3 个要素,其中海拔来源于地理空间数据云(<https://www.gscloud.cn/>),空间分辨率为 30 m×30 m,坡度和坡向根据 GIS 技术计算得到。土地利用类型包括耕地、林地、草地、水域、居民地和未利用土地 6 个一级类型以及 25 个二

级类型,数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/>),空间分辨率为 1 km×1 km。土壤类型数据来自于中国科学院南京土壤研究所,共分为 57 大类。

土壤湿度和气候变量数据来源于中国气象局陆面数据同化系统(CMA land data assimilation system,CLDAS),空间分辨率为 0.062 5°×0.062 5°,时间分辨率为逐小时。其中,气候变量根据不同生育期受不同气象因子的影响程度进行确定,包括大田期平均气温、平均降水量、气温日较差,团棵期的平均气温、平均降水量、平均最低气温、日较差等共 25 个气候指标数据。土壤湿度分为[0~5)、[5~10)、[10~40)、[40~100)和[100~200) cm 共 5 层,本研究选用了大田期和不同生育期 5 个层次共 25 个土壤湿度指标。从国家基础地理信息系统(<http://www.ngcc.cn/ngcc/>)下载 1:100 万的中国矢量地图作为分析底图。

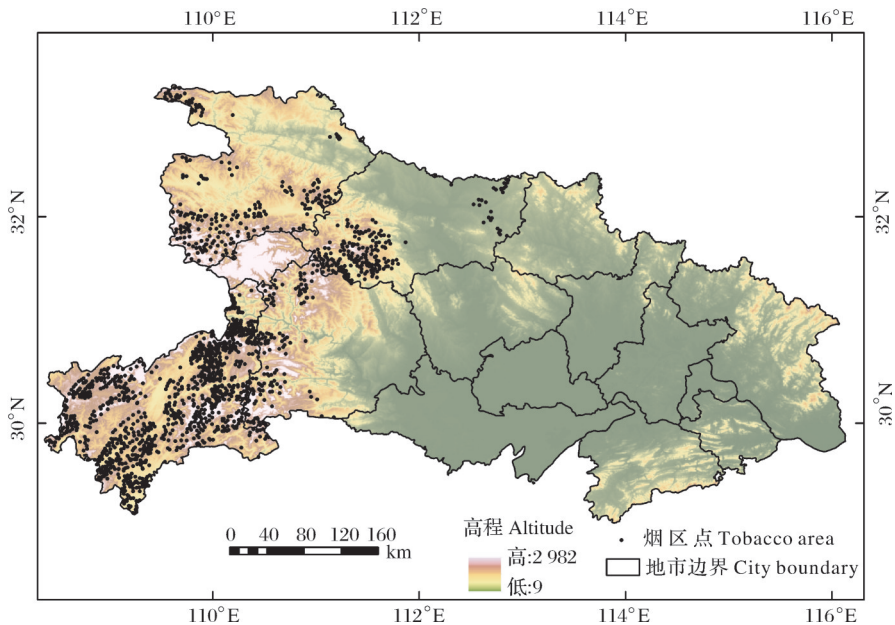


图 1 湖北省烟区点分布
Fig.1 Distribution of tobacco area in Hubei Province

1.3 数据处理

为保证 MaxEnt 软件顺利运行,所有环境变量均通过 GIS 技术的空间分析模块处理,坐标系统一为 WGS_1984_Albers,分辨率为 90 m×90 m,输出格式 ASCII,用于 MaxEnt 软件对烟草适生区的模拟。

1.4 环境变量相关性的检验和筛选

为提高模型预测的精准度,考虑到并非所有的环境变量都对烟草的分布存在明显影响,利用 Max-Ent 软件中的刀切法评价上述 50 个环境变量对模型

预测的贡献率,对 50 个环境因子进行多次运算,直到所有环境变量的贡献率均大于 0。最后得到 15 个对烟草不同生育期影响较高的环境因子(表 1),在此基础上重建鄂西烟草分布的最大熵模型。

1.5 MaxEnt 参数设置和结果评价

MaxEnt 软件 V3.4.1 是基于 Java 平台设计的一款用于预测物种潜在分布软件,将烟草物种点和筛选后的 15 个环境变量导入模型,随机选择 75% 的烟草物种分布点作为训练集,剩余 25% 的分布点作为

表 1 研究采用的环境因子

Table 1 Environmental factors used in this study

环境变量 Environment variable	含义 Meaning
bio1	海拔/m Dem
bio2	土地利用类型 Land use type
bio3	团棵期降水量/mm Precipitation at rosette stage
bio4	旺长期降水量/mm Precipitation at prosperously growing stage
bio5	坡度/(°) Slope
bio6	团棵期 0~10 cm 土壤湿度/(m ³ /m ³) 0-10 cm soil moisture at rosette stage
bio7	大田期 40~100 cm 土壤湿度/(m ³ /m ³) 40-100 cm soil moisture at field stage
bio8	土壤类型 Soil type
bio9	成熟期日照强度/(W/m ²) Sunshine intensity at maturing stage
bio10	成熟期平均气温/°C Average temperature at maturing stage
bio11	团棵期气温日较差/°C Temperature daily range at rosette stage
bio12	旺长期气温日较差/°C Temperature daily range at prosperously growing stage
bio13	团棵期平均最低气温/°C Average minimum temperature at rosette stage
bio14	旺长期平均气温/°C Average temperature at prosperously growing stage
bio15	成熟期平均最高气温/°C Average maximum temperature at maturing stage

测试集验证结果,正则化乘数(regularization multiplier)设置为 1.1,模型重复运行 10 次^[11]。利用刀切法(jackknife)测试各环境变量权重,同时选择创建响应曲线(create response curves)和制作预测图(make pictures of predictions),其他参数为模型的默认值。

本研究采用接收者操作特征曲线(ROC)下面积值,即 AUC 值来评估 MaxEnt 模型模拟预测效果,其中 ROC 曲线由 MaxEnt 模型多次运行平均值所得。AUC 取值范围 0~1,AUC 越接近 1 表示模型预测的物种分布结果的精度和可靠性越高,评估标准为:0.6~0.7 一般,0.7~0.8 较准确,0.8~0.9 准确,0.9~1.0 极准确^[12]。

2 结果与分析

2.1 MaxEnt 模型预测能力评价

图 2 为 MaxEnt 模型模拟 10 次输出的 ROC 曲线图,AUC 均值为 0.854,明显高于随机预测结果 0.5,根据 AUC 分级标准,本次构建模型的预测准确性达

到“准确”标准,说明利用湖北省现有的烟草物种分布点数据和筛选过的环境变量能较好地模拟烟草的适生区分布。

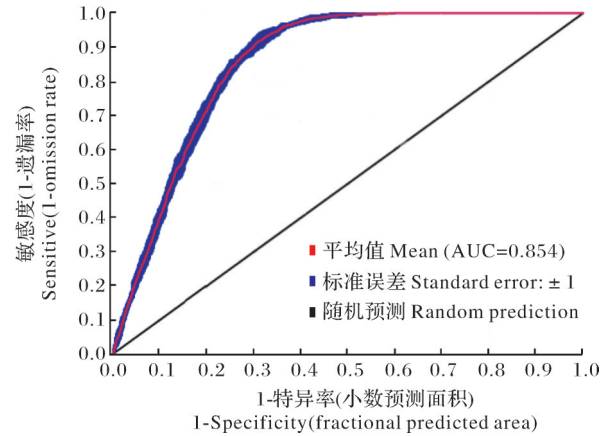


图 2 不同环境变量组合下的湖北烟区预测结果 ROC 曲线
Fig.2 ROC curve of tobacco area potential habitat under different combinations of environmental factors

2.2 影响烟草分布的环境因子

根据 MaxEnt 模型计算得到的各环境变量贡献率来确定对烟草分布产生影响的主要因子(表 2),其中 bio1(海拔)贡献率达到 80.0% 以上,bio8(土壤类型)、bio2(土地利用类型)、bio4(旺长期降水量)、bio13(团棵期平均最低气温)、bio14(旺长期平均气温)贡献率在 1.5% 以上,以上 6 个环境因子的累计贡

表 3 影响湖北烟区潜在分布的环境因子贡献率和置换重要性

Table 3 Percent contribution and permutation importance of environmental factors affecting the potential distribution of tobacco in Hubei Province %		
环境变量 Environment variable	贡献率 Percent contribution	置换重要性 Permutation importance
bio1	82.8	63.1
bio2	2.1	1.2
bio3	1.1	1.3
bio4	1.9	4.5
bio5	0.4	0.3
bio6	0.7	5.0
bio7	1.3	1.8
bio8	3.3	0.3
bio9	0.4	0.9
bio10	1.1	5.7
bio11	0.8	5.5
bio12	0.2	2.5
bio13	1.7	1.8
bio14	1.6	6.2
bio15	0.6	0.2

献率达到 90.0% 以上。

根据刀切法检验环境变量对烟区分布的影响程度,其中蓝色表示单独考虑该变量,增益值越高表示重要性越高,对物种分布贡献较大,淡蓝色表示排除这个环境因子后对结果的影响^[13]。图 3 结果显示,

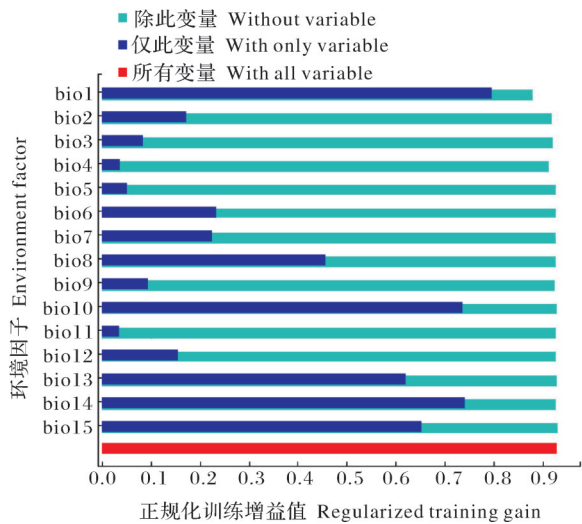


图 3 刀切法表示各类环境因子对湖北烟区潜在分布的重要性测试图

Fig.3 Regularized training gain of environmental factors to the potential distribution for the tobacco area in Hubei Province by the Jackknife method

“仅此变量”建模时 bio1(海拔)、bio10(成熟期平均气温)、bio14(旺长期平均气温)、bio15(成熟期平均最高气温)、bio13(团棵期平均最低气温)对模型的增益效果比较显著,“除此变量”建模时,bio1(海拔)对模型结果影响最显著,说明海拔具有其他环境变量不具备的重要信息。

结合 MaxEnt 模型中各变量因子的贡献率和刀切法共同结果,得出 bio1(海拔)、bio8(土壤类型)、bio13(团棵期平均最低气温)、bio14(旺长期平均气温)、bio10(成熟期平均气温)对影响烟草分布的影响较大。其中,地理因子海拔对烟草分布起到了决定性作用,气候因子中气温对烟草生长更为重要,降水影响其次。一般认为,当分布概率大于 0.5 时,对应的环境因子范围适合物种生长^[14],根据上述 5 个重要环境变量与烟草分布概率的响应曲线(图 4)可以看出,海拔在 650~1 750 m 适宜烟草的生长,最适宜范围为 1 150~1 450 m,其中 650~1 150 m 范围内,烟草分布概率随着海拔而增加,高于 1 450 m 时,则随海拔升高而降低;团棵期平均最低气温适宜范围为 8.9~15.0 ℃,其中,10.5 ℃ 为最适宜温度;旺长期平均气温在 16.0~22.9 ℃ 范围内有利于烟草的生长,最佳温度为 18.1 ℃;成熟期的最适宜气温范围为 18.8~25.6 ℃,20.5 ℃ 最有利于烟草的生长。

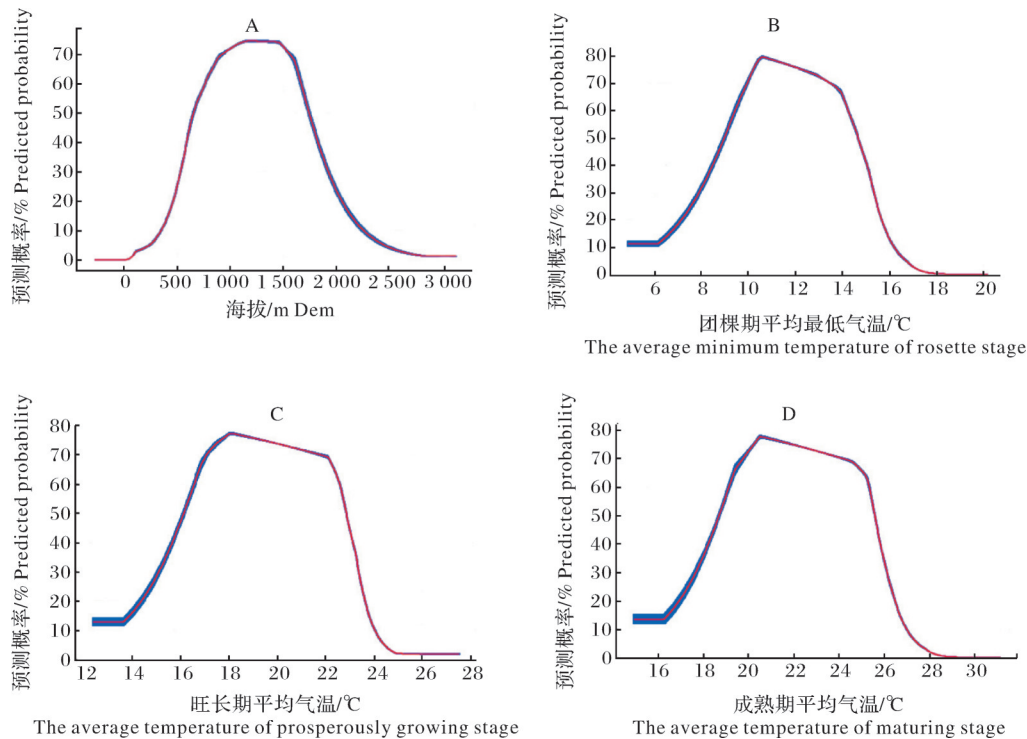


图 4 主导环境因子对湖北烟草潜在分布的响应曲线

Fig.4 Response curve of dominant environmental factors to potential distribution of tobacco area in Hubei Province

2.3 烟草适宜性空间分布

利用GIS空间分析技术对MaxEnt模型多次运算的适生区进行等级划分和面积计算,参照秦委等^[15]适生区等级划分方法,将烟草的潜在适生区划分为:非适生区($P < 0.05$)、低适生区($0.05 \leq P < 0.25$)、中适生区($0.25 \leq P < 0.5$)、高适生区($P \geq 0.5$) 4类。MaxEnt模型结果显示(图5),在目前的气候条件下,湖北省烟草适生区主要分布在鄂西以及鄂北和鄂东的高海拔地区,面积为79 146.3 km²,占全省总面积的42.5%。烟草高适生区主要分布在恩施境内以及十堰和襄阳市南部、宜昌市西部,面积为33 907.3 km²,占全省总面积的18.2%,80%区域的海拔为700~1 350 m、团棵期平均最低气温11.2~14.5℃、旺长期平均气温19.2~22.8℃、成熟期平均

气温22.0~25.4℃。烟草中适生区分布在高适生区周围,主要为十堰市、宜昌西北部,占全省总面积的11.2%,80%区域的海拔为500~1 000 m、团棵期平均最低气温11.6~15.0℃、旺长期平均气温20.3~23.7℃、成熟期平均气温23.0~26.5℃。烟草低适生区零散分布在鄂西北和鄂东部分山区,占全省总面积的13.1%,基本分布在海拔600 m以下、团棵期平均最低气温13.3~16.8℃、旺长期平均气温22.5~26.0℃、成熟期平均气温25.2~28.0℃。

目前湖北省的烟区集中分布在鄂西区域,从适宜性区划上可以看出,随州北部的桐柏山、鄂东北的大别山和鄂东南的幕阜山周围局部地区也存在基本适宜烟草生长的环境条件。

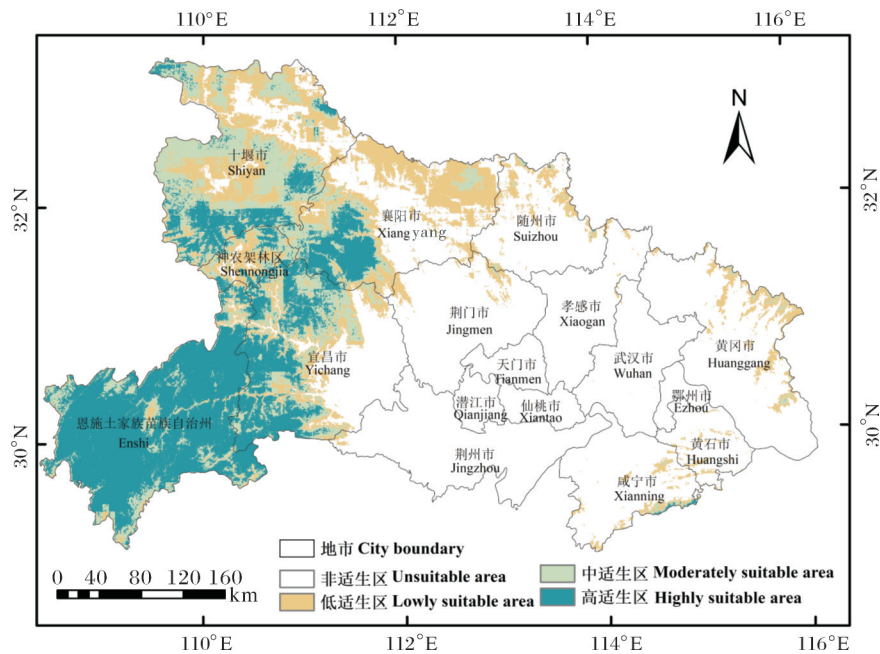


图5 湖北省烟草潜在分布区其适宜性等级分布

Fig.5 Potential distribution and suitability grades distribution of tobacco area in Hubei Province

3 讨论

本研究根据湖北省现有的烟区种植点,利用MaxEnt模型评估了影响烟草生长的主导环境因子及其适宜范围,并评价了湖北省烟草潜在适宜性空间分布。研究结果显示,海拔因子是最主要的环境因子,团棵期平均最低气温(8.9~15.0℃)、旺长期平均气温(16.0~22.9℃)和成熟期平均气温(18.8~25.6℃)则是影响烟草生长发育的主导气象因子。湖北省烟草适生区主要分布在鄂西,高适生区主要分布在恩施州、十堰市和襄阳市南部以及宜昌市西部,

占全省总面积的18.2%。

本研究基于MaxEnt模型输出结果进而评价了不同环境因子对烟草各个生长期的影响程度。团棵期长时间的低温阴雨会降低光合作用,且在以后的发育阶段难以弥补,进而引起早花,影响烟叶的产量和质量^[16]。鄂西烟区团棵期的最低温度低于9.0℃,降水量达到231 mm以上,土壤湿度高于40 m³/m³,不利于烟草的正常生长。旺长期是烟草生长最快的生育时段,气象因素对烟草的生长发育极为重要,此时段若气温较低,不利于叶绿体的分解和类胡萝卜素的降解,若持续时间较长,烟株容易出现早花,不

利于烟叶的正常成熟^[17]。旺长期对降雨量的需求比较大,降水较少,易发生干旱,也不利于“香气物质”形成的营养生长,影响烟叶的感官质量^[18]。本研究得出旺长期平均气温低于16.1℃或高于22.9℃,同时降水量低于320 mm,对烟草的生长将会产生抑制作用。

成熟期的温度对烟叶的品质有重要影响,温度过高,呼吸作用大于光合作用,干物质消耗大于积累,影响烟株的生长和成熟,导致中上部烟叶“高温逼熟”现象发生,同时对烟叶的品质也会产生影响,烟叶的烟碱含量将明显增加,经济价值将会大大降低^[19]。鄂西烟区成熟期平均温度高于25.6℃,最高温度高于30.9℃,不利于烟草的生长,当平均温度高于28.5℃或者最高温度高于33.2℃,烟草生长概率为0。地表温度日较差也是盛产优质烤烟的重要因素之一,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^[20]。对于湖北省烟区来说,旺长期的日较差在6.9~10.7℃,成熟期的日较差大于8.0℃,都会对烟草的品质产生正向反馈。

本研究结合烟草潜在适宜性空间分布、主导环境因子及其适宜范围,根据湖北省行政单元进一步探讨了湖北省潜在低适生区的环境因子,并对目前位于低适生区的烟草种植点提出了合理种植建议。神农架林区大部被定义为低适生区,80%区域的团棵期平均最低气温(6.7~11.2℃)低于适宜范围,旺长期和成熟期平均气温也均低于适宜范围4.0℃以内。该地区平均海拔在2 000 m以上,未来规划种植烟草主要考虑团棵期的低温冷害对烟苗的伤害,以及旺长期和成熟期温度过低会抑制烟草正常生长发育。湖北省西部和东部其他低适生区不同生育期的平均气温则高于适宜范围0~3.0℃,该地区烟草的种植要考虑温度过高带来的早花、高温逼熟等现象。针对目前的烟草种植点,恩施土家族苗族自治州来凤县、丹江口市、十堰市竹山县西部和枣阳市烟草种植区不同生育期的平均气温高于适宜范围,其中枣阳市气温相对更高,旺长期平均气温高出适宜温度2.1~3.2℃,降水量在150 mm以下,西北部种植区降水量低于130 mm。因此,该地区烟草在旺长期容易出现高温干旱,烟农应结合当地精细化气象预报,注意观察烟草生长状态,可以提前进行人工干预,及时对烟草浇水灌水,避免烟田缺水导致烟株生长缓慢。

湖北省烟区分布主要受地形和气候限制,对一定范围地区,海拔、土壤、土地利用类型等环境因子是相对固定的,而气象条件不断在变化,且随着气候变暖和人类活动的影响,近几年极端气候出现频率也在不断增加。研究指出,在RCPs不同情景下未来30 a湖北省南部高温热害增幅最大明显,尤其是鄂西南低山地带,鄂西北局部高温有减缓趋势,尤其是在RCP8.5路径下^[21-22]。同时鄂西极端强降水事件也逐渐增多,随着CO₂含量上升,极端强降水强度也在增加^[23]。在这样的未来气候背景下,湖北省烟区不同程度适生区的空间分布有何变化以及烟草对气候变化的具体响应还值得进一步研究。

参考文献 References

- [1] 王欣,赵云飞,闫铁军,等.湖北烟区烤烟感官质量评价及与津巴布韦烤烟的相似性分析[J].烟草科技,2010,43(11):5-8. WANG X, ZHAO Y F, YAN T J, et al. Sensory quality evaluation of Hubei flue-cured tobacco and its similarity with zimbabwean fluecured tobacco [J]. Tobacco science & technology, 2010, 43(11): 5-8 (in Chinese with English abstract).
- [2] MARCHETTI R, CASTELLI F, CONTILLO R. Nitrogen requirements for flue-cured tobacco [J]. Agronomy journal, 2006, 98(3): 666-674.
- [3] 王得强,许自成,毕庆文,等.湖北十堰烟区不同海拔高度烤烟气候适生性分析[J].江西农业学报,2012,24(10):118-121. WANG D Q, XU Z C, BI Q W, et al. Analysis of flue-cured tobacco climate feasibility in different altitudes for Shiyan tobacco-growing areas of Hubei Province [J]. Acta agriculturae Jiangxi, 2012, 24(10): 118-121 (in Chinese).
- [4] 尹忠春,施河丽,向必坤,等.湖北宣恩烟区植烟土壤pH状况及与其他土壤指标的关系[J].湖北农业科学,2021,60(S2):129-135. YIN Z C, SHI H L, XIANG B K, et al. Relationship between pH value and other soil indexes in Xuanen tobacco growing area, Hubei [J]. Hubei agricultural sciences, 2021, 60(S2): 129-135 (in Chinese with English abstract).
- [5] 操筠.恩施烟草与气象条件的关系及气象灾害风险评估[D].武汉:华中农业大学,2014. CAO J. Relationship between tobacco and meteorological conditions in Enshi and risk assessment of meteorological disasters [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2014 (in Chinese with English abstract).
- [6] 谢新乔,李湘伟,朱云聪,等.我国不同尺度烤烟种植区划与思考[J].土壤,2020,52(6):1105-1112. XIE X Q, LI X W, ZHU Y C, et al. Regionalization and thinking of flue-cured tobacco planting in different scales in China [J]. Soils, 2020, 52(6): 1105-1112 (in Chinese with English abstract).
- [7] 何飞,陈正洪,李全忠,等.我国烟草种植区划研究与展望[J].华中师范大学学报(自然科学版),2013,42(1):47-52. HE F,

- CHEN Z H, LI Q Z, et al. Progress and prospects of tobacco plantating division in China[J]. Journal of Central China Normal University (natural sciences), 2013, 42(1): 47-52 (in Chinese with English abstract).
- [8] 孟丹, 陈正洪, 李建平, 等. 基于GIS的湖北西部烟草种植气象灾害危险性分析[J]. 中国农业气象, 2015, 36(5): 625-630. MENG D, CHEN Z H, LI J P, et al. Analysis on meteorological disasters risk of tobacco planting based on GIS in Western Hubei Province[J]. Chinese journal of agrometeorology, 2015, 36(5): 625-630 (in Chinese with English abstract).
- [9] 张玉芳, 王茹琳, 吕秀兰, 等. 基于最大熵模型研究四川省鲜食葡萄种植潜在分布区及其气候特征[J]. 中国农业气象, 2021, 42(10): 836-844. ZHANG Y F, WANG R L, LÜ X L, et al. Potential distribution of table grape in Sichuan Province and its climatic characteristics based on MaxEnt model[J]. Chinese journal of agrometeorology, 2021, 42(10): 836-844 (in Chinese with English abstract).
- [10] 杭行, 康立冬, 方国斌, 等. 入侵湖北的红火蚁鉴定、发生特征及适生区分析[J]. 华中农业大学学报, 2022, 41(6): 111-117. HANG X, KANG L D, FANG G B, et al. Identification, occurrence characteristics and suitable area analysis of red imported fire ant, *Solenopsis invicta* in Hubei Province[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2022, 41(6): 111-117 (in Chinese with English abstract).
- [11] HUANG Z D, BAI Y, ALATALO J M, et al. Mapping biodiversity conservation priorities for protected areas: a case study in Xishuangbanna Tropical Area, China[J/OL]. Biological conservation, 2020, 249: 108741 [2022-07-13]. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2020.108741>.
- [12] 姜明鑫, 钟文玉, 陈李林. 茶园重要捕食性天敌白斑猎蛛在中国的潜在适生区预测[J]. 生态学报, 2022, 42(10): 4225-4235. JIANG M X, ZHONG W Y, CHEN L L. Prediction of potential geographical distribution of predatory enemy *Evarcha albaria* in tea plantations in China[J]. Acta ecologica sinica, 2022, 42(10): 4225-4235 (in Chinese with English abstract).
- [13] 王茹琳, 李庆, 封传红, 等. 基于MaxEnt的西藏飞蝗在中国的适生区预测[J]. 生态学报, 2017, 37(24): 8556-8566. WANG R L, LI Q, FENG C H, et al. Predicting potential ecological distribution of *Locusta migratoria* tibetensis in China using MaxEnt ecological niche modeling[J]. Acta ecologica sinica, 2017, 37(24): 8556-8566 (in Chinese with English abstract).
- [14] 廖剑锋, 易自力, 李世成, 等. 基于Maxent模型的双药芒不同时期潜在分布研究[J]. 生态学报, 2020, 40(22): 8297-8305. LIAO J F, YI Z L, LI S C, et al. Maxent modeling for predicting the potentially geographical distribution of *Miscanthus nudipes* under different climate conditions[J]. Acta ecologica sinica, 2020, 40(22): 8297-8305 (in Chinese with English abstract).
- [15] 秦委, 张虹, 杨明霞, 等. 基于MaxEnt模型和ArcGIS的东南茜草潜在分布研究[J]. 中国中医药信息杂志, 2022, 29(5): 1-4. QIN W, ZHANG H, YANG M X, et al. Study on potential distribution of *Rubia argyi* (levl. et van.) Hara ex L. A. Lauener et D. K. based on MaxEnt model and ArcGIS[J]. Chinese journal of information on traditional Chinese medicine, 2022, 29(5): 1-4 (in Chinese with English abstract).
- [16] 沈少君, 郭学清, 郑玉木, 等. 低温胁迫对烤烟生长和产质量的影响[J]. 中国烟草科学, 2010, 31(6): 35-37. SHEN S J, GUO X Q, ZHENG Y M, et al. Effects of low temperature stress on the growth and yield of flue-cured tobacco[J]. Chinese tobacco science, 2010, 31(6): 35-37 (in Chinese with English abstract).
- [17] 彭新辉, 易建华, 周清明. 气候对烤烟内在质量的影响研究进展[J]. 中国烟草科学, 2009, 30(1): 68-72. PENG X H, YI J H, ZHOU Q M. Advance in effects of climatic conditions on internal quality of flue-cured tobacco[J]. Chinese tobacco science, 2009, 30(1): 68-72 (in Chinese with English abstract).
- [18] 刘学勇. 土壤水势对烤烟生长、耗水特点及生理活性的影响[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2013. LIU X Y. Effects of soil water potential on growth, water consumption characteristics and physiological activity of flue-cured tobacco[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2013 (in Chinese with English abstract).
- [19] 程林仙, 王安柱. 渭北旱作区干旱对烤烟产量和品质的影响及覆盖抗旱栽培技术[J]. 中国农业气象, 1996, 17(2): 18-21. CHENG L X, WANG A Z. The effect of drought on the yield and quality of flue-cured tobacco in the Weibei dry farming area and the cultivation techniques of drought resistance with mulching[J]. Agricultural meteorology, 1996, 17(2): 18-21 (in Chinese).
- [20] 张家智. 云烟优质适产的气候条件分析[J]. 中国农业气象, 2000, 21(2): 17-21, 39. ZHANG J Z. Study on the climatic conditions for production of high quality and moderate yield of tobacco in Yunnan Province[J]. Agricultural meteorology, 2000, 21(2): 17-21, 39 (in Chinese with English abstract).
- [21] 叶佩, 刘可群, 刘凯文, 等. 未来RCPs情景下湖北省中稻高温热害风险研究[J]. 湖北农业科学, 2022, 61(5): 205-213. YE P, LIU K Q, LIU K W, et al. Study on high temperature and heat damage risk of mid-season rice in Hubei Province under future RCPs scenarios[J]. Hubei agricultural sciences, 2022, 61(5): 205-213 (in Chinese with English abstract).
- [22] 陈英英, 王雅新, 陈正洪, 等. 鄂西烟草种植区气象灾害的时空变化分析[J]. 华中农业大学学报, 2023, 42(2): 186-193. CHEN Y Y, WANG Y X, CHEN Z H, et al. Temporal and spatial changes of meteorological disasters in tobacco growing areas in western Hubei Province[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2023, 42(2): 186-193 (in Chinese with English abstract).
- [23] 井源源, 方建, 史培军. 未来气候变化情景下湖北省极端降水的人口暴露分析[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2020, 56(5): 700-709. JING Y Y, FANG J, SHI P J. Analysis of population exposure to extreme precipitation Hubei Province under the climate change scenarios[J]. Journal of Beijing Normal University (natural science), 2020, 56(5): 700-709 (in Chinese with English abstract).

Distribution of potential suitability and environmental characteristics of tobacco areas in Hubei Province based on MaxEnt model

JIA Wenqian¹, CHEN Yingying¹, CHEN Zhenghong¹, LI Jianping², AO Yinyin³

1. *Hubei Provincial Meteorological Service Center, Wuhan 430205, China;*

2. *Hubei Provincial Tobacco Science Institute, Wuhan 430030, China;*

3. *Hubei Provincial Public Meteorological Service Center, Wuhan 430074, China*

Abstract The distribution of potential suitability of tobacco areas in Hubei Province was simulated by using the CLDAS data set of land data assimilation system of China Meteorological Administration from 2008 to 2020 and other environmental factors, and the actual planting sites based on the maximum entropy model (MaxEnt) to comprehensively evaluate the effects of ecological climate factors on the growth and development of tobacco leaves in Hubei Province. The dominant environmental factors that affect its distribution were studied. The results showed that MaxEnt model had a high accuracy in predicting the suitability distribution of tobacco areas with AUC of 0.854. Altitude (650-1 750 m), soil type (yellow soil), minimum temperature at the rosette stage (8.9-15.0 °C), temperature in the prosperously growing period (16.0-22.9 °C), and temperature in the maturing period (18.8-25.6 °C) were the dominant environmental factors affecting the distribution of tobacco areas in Hubei Province. The highly suitable areas of tobacco are mainly distributed in Enshi, Shiyan, southern Xiangyang and southeastern Yichang, accounting for 18.2% of the total area of Hubei Province. The climate characteristics of 80% of the region are at an altitude of 700 to 1350 m, with an average minimum temperature of 11.2 to 14.5 °C in the cluster period, an average temperature of 19.2 to 22.8 °C in the peak period, and an average temperature of 22.0 to 25.4 °C in the mature period. Among all environmental factors, altitude plays a decisive role, while temperature is an important meteorological factor affecting the growth and development of tobacco. It is indicated that the results are basically consistent with the actual spatial distribution of tobacco growing areas in Hubei Province. It will provide a theoretical reference for the scientific planting and layout of tobacco in Hubei Province.

Keywords tobacco areas of Hubei Province; maximum entropy model; the growth and development period; potential distribution; dominant environmental factors; ecological suitability; geographic information system (GIS)

(责任编辑:陆文昌)