

DOI: 10.5846/stxb201903180507

王静, 周广胜. 中国欧亚种酿酒葡萄种植分布的主要气候影响因子与气候适宜性. 生态学报, 2021, 41(6): 2418-2427.

Wang J, Zhou G S. The climatic suitability and climatic impact factors affecting the wine grapes (*Vitis vinifera* L.) planting distribution in China. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(6): 2418-2427.

中国欧亚种酿酒葡萄种植分布的主要气候影响因子与气候适宜性

王 静^{1,2}, 周广胜^{3,*}

1 中国气象局旱区特色农业气象灾害监测预警与风险管理重点实验室, 银川 750002

2 宁夏气象科学研究所, 银川 750002

3 中国气象科学研究院, 北京 100081

摘要:开展酿酒葡萄气候适宜性研究对于优化酿酒葡萄布局、气候资源开发利用具有重要意义。基于欧亚种酿酒葡萄(*Vitis vinifera* L.)分布数据和影响其分布的气候因子,利用最大熵模型(MaxEnt)和地理信息系统(ArcGIS),研究影响欧亚种酿酒葡萄种植分布的主导气候因子及其气候适宜性。结果表明:MaxEnt模型能够很好地模拟我国欧亚种酿酒葡萄的潜在分布,模拟效果达到“非常好”(AUC平均值0.936)的水平。基于气候因子对欧亚种酿酒葡萄地理分布影响的贡献确定了主导气候因子,即无霜期、干燥度、极端最低气温、年降水量、生长季日照时数、 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 活动积温。当前,我国欧亚种酿酒葡萄种植分布的气候高适宜区、适宜区、次适宜区分别占次适宜及以上区域总面积的2.9%、20.4%和76.7%。欧亚种酿酒葡萄气候高适宜区主要分布在宁夏、山西、陕西、内蒙古、山东、河北、新疆、甘肃等省,只考虑气候因子,陕西、山西、内蒙古具有较大的发展空间。

关键词:酿酒葡萄;气候适宜性;最大熵模型;气候影响因子

The climatic suitability and climatic impact factors affecting the wine grapes (*Vitis vinifera* L.) planting distribution in China

WANG Jing^{1,2}, ZHOU Guangsheng^{3,*}

1 Key Laboratory for Meteorological Disaster Monitoring and Early Warning and Risk Management of Characteristic Agriculture in Arid Regions, China Meteorological Administration, Yinchuan 750002, China

2 Ningxia Meteorological Science Institute, Yinchuan 750002, China

3 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China

Abstract: Study of the climatic suitability for the wine grapes has great significance for optimizing the distribution of wine grapes and the utilization of climate resources. Based on the geographical distribution data of wine grapes (*Vitis vinifera* L.) and the climatic factors affecting the distribution of wine grapes, the Maximum Entropy model (MaxEnt) and Geographic Information Systems (ArcGIS) were used to identify the dominant climatic factors affecting the planting distribution and study the climatic suitability of wine grapes. The results indicated that the MaxEnt model could well simulate the potential distribution of wine grapes in China, and the assessment result was excellent with the average AUC 0.936. The contribution of climate factors to the geographical distribution of the wine grape was evaluated by Jackknife tests in the modeling analysis. The frost-free period, aridity index, annual extreme minimum temperature, annual precipitation, sunshine duration of growing season, and $\geq 10^{\circ}\text{C}$ accumulated temperature were the main dominant climatic factors affecting the spatial

基金项目:宁夏重点研发计划(国际合作)项目(2018BFH03012);宁夏青年拔尖人才项目;国家自然科学基金项目(31071323);宁夏自然科学基金项目(2020AAC03466)

收稿日期:2019-03-18; 网络出版日期:2021-01-15

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhousg@cma.gov.cn

distribution for wine grapes. At present, the areas of optimum, suitable and sub-suitable subregions for growing wine grapes (*Vitis vinifera* L.) accounted for 2.9%, 20.4% and 76.7%, respectively, to the total climate suitable planting area. The optimum area was mainly distributed in Ningxia, Shaanxi, Shanxi, Inner Mongolia, Shandong, Hebei, Xinjiang, and Gansu, considering only climatic factors, Shaanxi, Shanxi and Inner Mongolia had a large development room.

Key Words: wine grapes (*Vitis vinifera* L.); climatic suitability; the Maximum Entropy model; climatic impact factors

葡萄是世界范围内栽培最广泛的树种之一,在世界水果生产中占据重要地位^[1]。中国是世界葡萄生产大国,到 2014 年葡萄栽培面积居世界第二位,国际葡萄与葡萄酒组织(OIV)的数据显示 2017 年中国葡萄酒产量居世界第六位^[2]。葡萄生产在我国农业产业结构调整、区域经济发展和农民增收等方面发挥着重大作用^[1]。气候是影响葡萄经济栽培和品质的最重要的因子^[3],也是生态区划的最重要基础^[4]。葡萄按用途可分为鲜实葡萄、制干葡萄、制汁葡萄、酿酒葡萄等,不同用途的葡萄对气候条件的要求各异。尽管避雨栽培、设施促早栽培、设施延迟栽培等技术在我国鲜食葡萄上得到广泛应用,降低了其对气候的依赖程度,但酿酒葡萄能否经济栽培仍高度依赖于气候条件。中国酿酒葡萄主要包括欧亚种葡萄(*Vitis vinifera* L.)、原产于东北的山葡萄(*Vitis amurensis* Rupr.)、分布于湖南、广西等地的刺葡萄(*Vitis davidii*)、毛葡萄(*Vitis heyneana*)。近年来,中国葡萄和葡萄酒产业迅速发展的同时,产区发展缺乏科学统一规划、区域特点和优势未能充分发挥,市场竞争力弱仍然是我国酿酒葡萄产业发展中存在的主要问题^[2]。因此,开展酿酒葡萄种植区的潜在分布及气候适宜性研究,对于指导酿酒葡萄布局,充分挖掘气候资源,提高葡萄酒质量意义重大。国际上早在 20 世纪 30 年代就已开始了葡萄气候区划工作,从活动积温、有效积温指标^[5]、最热月平均气温^[6]等单一热量指标发展到基于温度、降水和光照等因子构建的综合指标,还有学者将土壤湿度^[7]引入葡萄适宜性区划,这些指标的建立多数基于地中海气候特点,并不适合中国大陆性气候的特点^[8]。在借鉴国际成果的基础上,我国学者提出了适宜中国气候特点的气候区划指标,从全国^[8-10]、中国北方^[11]、或者省级尺度^[12-14]上将我国葡萄划分为不同的气候区域,但是气候适宜性指标及阈值因研究的尺度不同而不同,且对专家经验的依赖度较高,不同尺度的研究结果存在差异,目前还没有一套完整的适宜我国的葡萄气候区划指标体系^[15]。另外,气候变暖导致世界优质酿酒葡萄栽培区发生空间位移,可能导致高纬度区域变的更适宜葡萄生长和葡萄酒生产,并对酒种和品种布局也产生较大影响^[16-19]。因此,迫切需要采用新的资料来分析葡萄种植的气候的适宜区。

最大熵模型(Maximum entropy, MaxEnt)以气候相似性为原理,利用已有的物种分布数据和环境数据产生以生态位为基础的物种生态需求,探索已知物种分布区的环境特征与研究区域环境特征的非随机关系^[20-21],在物种潜在分布区预测方面得到了广泛应用^[20-23]。以中国种植最广泛的欧亚种酿酒葡萄为研究对象,利用最大熵模型 MaxEnt,研究欧亚种酿酒葡萄分布与气候因子之间的关系,筛选影响欧亚种酿酒葡萄分布的主导气候因子,根据模型预测的存在概率对欧亚种酿酒葡萄潜在分布区进行预测,并对生态适宜性进行研究,以期为我国酿酒葡萄生产布局提供参考。

1 数据来源与方法

1.1 数据来源

1.1.1 欧亚种酿酒葡萄地理分布数据

本研究共收集到欧亚种酿酒葡萄分布点去除重复后共最终保留 302 个,包括来源于国家葡萄产业地理信息系统 235 个、实地调查测定 7 个、查阅相关文献获得 60 个(图 1)。

1.1.2 气象数据

气象数据来源于国家气象信息中心的《中国地面气候资料日值数据集》,包括全国 2419 个站点的逐日平均气温、日最高气温、最低气温、降水量、日照时数,剔除连续缺测 5 年以上的站点,最终保留 2317 个站点

(图 1)。数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)的分辨率为 90 m。

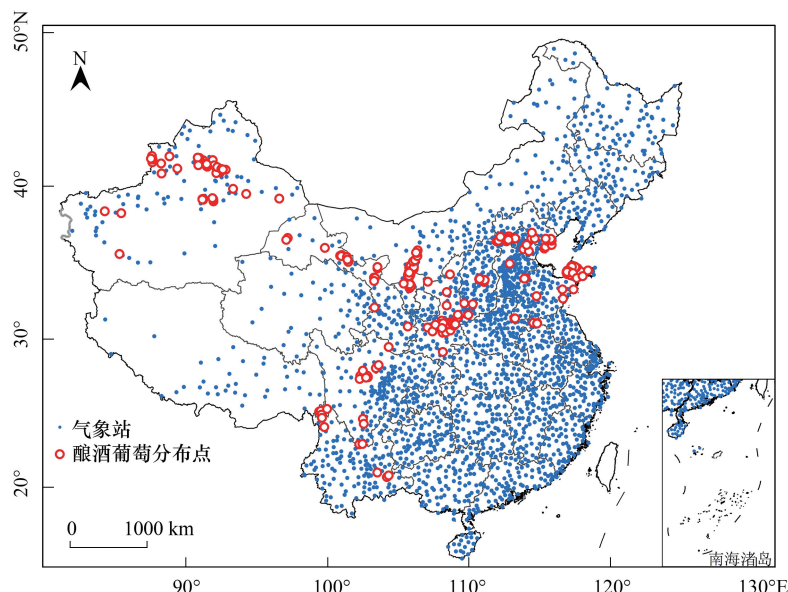


图 1 气象站点及葡萄种植点分布

Fig.1 Distribution of weather stations and wine grape planting locations in China

1.2 研究方法

1.2.1 气候影响因子的筛选

基于已有酿酒葡萄气候区划研究结果,从全国尺度筛选出具有生物学意义的气候影响因子 12 个(表 1)。其中,最冷月平均气温和年极端最低气温反映植物可以忍受的最低温度。无霜期表征葡萄完成生活史所需要的生长季长度; $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 活动积温、年平均气温表征葡萄完成生活史所需要的热量;年降水量表征水分的供应;干燥度是表示一个地区干湿程度的指标,表征降水对需水的满足程度;最热月平均气温、7—9 月平均气温等被认为是影响葡萄品质的重要因子;葡萄果实成熟阶段是果实品质形成的关键时段,葡萄耐旱,但抗湿力差,成熟阶段过多的降水容易造成裂果,引发病害,影响葡萄产量也是优良品质形成的主要限制因子^[8,24-25]。成熟期 7—9 月降水量、水热系数因子等被广泛应用于酿酒葡萄气候区划,因此本研究引入该因子,既可以反映可种植性,也可以反映葡萄产量及品质的优劣。我国北方地区生长季日照充足,日照时数不是北方酿酒葡萄种植的限制因子,但是南方地区仍存在日照不足的情况,因此生长季 4—9 月日照时数也作为潜在影响因子。

$\geq 10^{\circ}\text{C}$ 活动积温采用五日滑动平均法计算^[26];无霜期指一年中春季终霜日与秋季初霜日之间的持续日数,以日最低气温 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 的初终日间的持续日数来计算;最冷月、最热月平均气温分别为 1 月和 7 月平均气温;干燥度采用修正后的谢良尼诺夫公式^[27] 计算如下:

$$K = 0.16 \sum T_a / P \quad (1)$$

式中, $\sum T_a$ 为 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 活动积温($^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$), P 为日平均气温稳定通过 10°C 期间的降水量(mm)。

水热系数和干燥度互为倒数,成熟期 7—9 月水热系数计算如下:

$$DI = P / (0.1 \times \sum T_a) \quad (2)$$

$\sum T_a$ 为 7—9 月 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 活动积温($^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$), P_{7-9} 为 7—9 月降水量(mm)。

1.2.2 数据处理方法

计算各站点 1981—2016 年 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 活动积温、降水量、干燥度等潜在气候因子的平均值,利用 ArcGIS 10.2 将站点尺度的各气候要素插值到 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 的格点作为背景数据。积温、年平均气温、无霜期等热量指标和

日照时数采用趋势面+残差订正法插值^[30-31]。降水、干燥度、水热系数则采用普通克里金法进行插值。

表 1 影响欧亚种酿酒葡萄分布的潜在气候因子

Table 1 Potential climate factors affecting planting distribution of wine grape (*Vitis vinifera* L.)

类别 Category	潜在气候因子 Potential climate factors	变量 Variables	参考文献 References
安全越冬 Live through the winter	最冷月平均气温/℃	T_c	[11]
	极端最低气温/℃	T_{min}	[9-11]
热量资源 Heat resources	$\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 活动积温/($^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$)	T_a	[4,6,9,11,12]
	年平均气温/℃	T_{avg}	[12,29]
	无霜期/d	FFP	[8-11]
水分条件 Water conditions	年降水量/mm	P	[28]
	干燥度	K	[8-11]
光照 Sunshine	生长季 4—9 月日照时数/h	S_{4-9}	[10]
品质形成 Quality formation	最热月平均气温/℃	T_{hot}	[6]
	7—9 月月平均气温和/℃	T_{sum7-9}	[12,28]
	成熟期 7—9 月水热系数	DI_{7-9}	[4,12]
	成熟期 7—9 月降水量/mm	P_{7-9}	[10,13,28-29]

趋势面+残差订正法的步骤为:首先利用 SPSS 统计软件建立积温等气候要素和经度、纬度、海拔高度的多元回归模型,同时计算各气候要素的残差值,即模型预测值与实测值之差。其次基于 DEM 数据和经纬度利用 ArcGIS 10.2 的栅格计算功能和多元回归模型获得模型预测的各气候要素空间分布图;再利用反距离加权 (Inverse Distance Weighted, IDW) 方法对各气候要素的残差进行插值得到残差分布图。最后,将模型预测的气候要素空间分布图与残差分布图叠加得到订正后的气候要素栅格图,栅格大小为 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ ^[30-31]。

1.2.3 模型模拟及预测准确性评价

将酿酒葡萄地理分布点经纬度数据和影响酿酒葡萄分布的各潜在气候因子数据输入到模型中,随机选取 75% 的酿酒葡萄分布点数据作为训练子集 (training data) 进行建模,25% 的分布点数据作为验证子集 (test data) 用于验证,输出格式为 logistic。使用受试者工作特征曲线 (Receiver Operator Characteristic, ROC) 下的面积 (Area Under Curve, AUC) 值作为模型预测准确性的衡量指标,AUC 为 0—1 之间的值,值越大说明环境变量与预测物种分布之间的相关性越大,模型模拟效果越好。AUC<0.6 为“失败”;0.6—0.7 为“较差”;0.7—0.8 为“一般”;0.8—0.9 为“好”;0.9—1.0 为“非常好”^[32]。

综合分析百分贡献率、置换重要性和小刀法 (Jackknife 法) 两种方法的结果,共同确定影响欧亚种酿酒葡萄分布的主导气候因子。基于筛选出的主导气候因子的空间栅格图和欧亚种酿酒葡萄分布点地理信息数据再次输入模型迭代运行 10 次,将模型输出的欧亚种酿酒葡萄各格点存在概率 ASCII 文件导入 ArcGIS 10.2 中进行分级。基于酿酒葡萄产量数据和存在概率数据分析表明酿酒葡萄存在概率与产量之间并无较好的对应关系,因此参考 IPCC (2007) 关于评估可能性的划分方法将存在概率 $P < 0.05$ 为欧亚种酿酒葡萄气候不适宜区; $P \geq 0.05$ 划分为欧亚种酿酒葡萄可种植区, $0.05 \leq P < 0.33$ 为气候次适宜区, $0.33 \leq P < 0.66$ 为气候适宜区, $P \geq 0.66$ 为气候高适宜区^[20,33]。

2 结果与分析

2.1 影响欧亚种酿酒葡萄分布的主导气候因子及模型准确性检验

高度相关的环境因子会因各因子间的共线性对模型预测结果造成影响,因此基于 SPSS 软件对 12 个潜在气候因子进行相关分析,筛选出同一类因子中高度相关的因子,其中 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 活动积温和年平均气温、7—9 月平均气温和和最热月 7 月平均气温、7—9 月降水量和 7—9 月水热系数高度相关,因此将六个因子分成 8 组,

分别与剩下 6 的因子输入到最大熵模型中进行模拟。最终筛选出 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 活动积温、最热月平均气温、7—9 月降水量组合与其他六个因子的组合训练样本和测试样本的 AUC 值最高,分别为 0.957 和 0.917(表 2),其他六个因子包括最冷月平均气温、极端最低气温、无霜期、年降水量、干燥度和生育日照时数。最冷月平均气温贡献百分率和置换重要性均较低,因此剔除该因子后将 8 个气候因子重新进行建模,训练样本和测试样本的 AUC 值仍然达到 0.956 和 0.918,模型运行 10 次进行交叉检验的 AUC 平均达到了 0.936(图 2),模拟效果达到了非常好,说明模型能够较好的模拟中国欧亚种酿酒葡萄的潜在分布(图 2)。

表 2 各因子组合下 MaxEnt 模型模拟结果的 AUC 值
Table 2 AUC values simulated by MaxEnt for different combinations of climatic factors

因子组合 Factors combination	训练样本 Training data AUC	测试样本 Test data AUC
$T_{\text{avg}}, T_{\text{hot}}, P_{7-9}, T_{\text{c}}, T_{\text{min}}, \text{FFP}, P, K, S_{4-9}$	0.955	0.917
$T_{\text{avg}}, T_{\text{hot}}, \text{DI}_{7-9}, P_{7-9}, T_{\text{c}}, T_{\text{min}}, \text{FFP}, P, K, S_{4-9}$	0.954	0.915
$T_{\text{avg}}, T_{\text{sum}7-9}, P_{7-9}, T_{\text{c}}, T_{\text{min}}, \text{FFP}, P_{-}, K, S_{4-9}$	0.954	0.917
$T_{\text{avg}}, T_{\text{sum}7-9}, \text{DI}_{7-9}, T_{\text{c}}, T_{\text{min}}, \text{FFP}, P, K, S_{4-9}$	0.953	0.916
$T_{\text{a}}, T_{\text{hot}}, \text{DI}_{7-9}, T_{\text{c}}, T_{\text{min}}, \text{FFP}, P, K, S_{4-9}$	0.955	0.916
$T_{\text{a}}, T_{\text{sum}7-9}, \text{DI}_{7-9}, T_{\text{c}}, T_{\text{min}}, \text{FFP}, P, K, S_{4-9}$	0.954	0.915
$T_{\text{a}}, T_{\text{hot}}, P_{7-9}, T_{\text{c}}, T_{\text{min}}, \text{FFP}, P, K, S_{4-9}$	0.957	0.918
$T_{\text{a}}, T_{\text{sum}7-9}, P_{7-9}, T_{\text{c}}, T_{\text{min}}, \text{FFP}, P, K, S_{4-9}$	0.955	0.916

从影响酿酒葡萄潜在分布的气候因子贡献百分率来看,无霜期、干燥度、年降水量、年极端最低气温、4—9 月日照时数、 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温对模型贡献率较高,累积贡献率已达到 93.5%。置换重要性指将训练样本点上该气候因子随机替换后 AUC 减少值,值越多表明模型对该变量的依赖度越高。无霜期、年极端最低气温、生长季 4—9 月日照时数、干燥度置换重要性较高,说明模型对这些气候因子的依赖度较高。无霜期表征生长季的长度也间接反映出热量资源的供应,其贡献百分率和置换重要性均最高。极端最低气温的贡献百分率仅为 7.5%,但其置换重要性 18.4%,说明极端最低气温是影响欧亚种酿酒葡萄分布的不可缺少的因子。在表征水分的指标中,与年降水量相比,干燥度的贡献百分率和置换重要性均高于年降水,干燥度表征降水对葡萄需求的满足程度,比年降水量更能反映葡萄生长的状况(表 3)。

同样,Jackknife 法给出的影响欧亚种酿酒葡萄分布的各潜在气候因子对模型的贡献(图 3),黑色条带长度代表所有因子均参与模拟对模型的贡献;深灰色条带的长度表示仅使用某一个因子参与模拟对欧亚种酿酒葡萄分布的贡献。浅灰色条带长度表征去除该因子后,其他因子共同参与模拟对模型的贡献,浅灰色条带越短,说明该变量具有的其他变量不具有的信息越多,不宜被其他因子替代。从单因子参与模拟对模型的贡献来看,排在前几位的均为表征热量的因子,其次为水分因子,得分最小的为生长季日照时数。但是去除该变量后,浅灰色条带变短,说明日照时数具有的其他因子不具备的信息较多(图 3),不宜去除。去除最热月平均气温和 7—9 月降水量,浅蓝色条带并未变短,说明该因子可被其他因子替代,因此予以剔除。综合考虑影响酿酒葡萄分布的主导气候因子为无霜期、干燥度、年极端最低气温、年降水量、生长季 4—9 月日照时数、 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温。

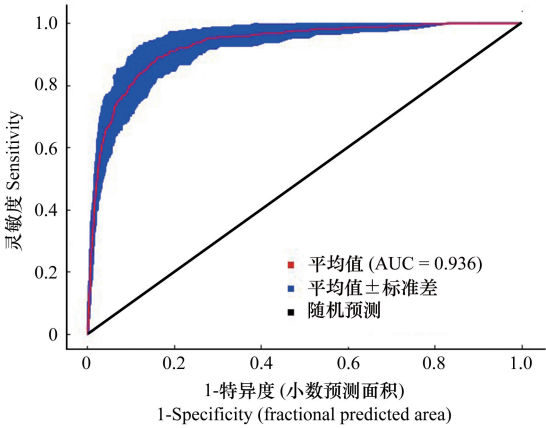


图 2 模型适用性检验的 ROC 曲线
Fig.2 ROC curve of model suitability test

表 3 影响酿酒葡萄种植分布各气候因子的贡献百分率和置换重要性

Table 3 The accumulated percent contribution and permutation importance of the climatic factors affecting the planting distribution of wine grape

变量 Variables	贡献百分率 Percent contribution/%	累积贡献百分率 Accumulated percent contribution/%	置换重要性 Permutation importance
FFP	36.2	36.2	31.2
K	21.3	57.5	12.5
P	16.9	74.4	9.9
T _{min}	7.5	81.9	18.4
S _{4—9}	6.3	88.2	16.4
T _a	5.3	93.5	5.0
T _{hot}	4.1	97.6	2.6
P _{7—9}	2.4	100	4.0

FFP:无霜期 Frost-free period (day); K:干燥度 Aridity index; P:年降水量 Annual precipitation (mm); T_{min}:极端最低气温 Annual extreme minimum temperature(℃); S_{4—9}:生长季 4—9 月日照时数 Sunshine duration of growing season during Apr. to Sep.(h); T_a:≥10℃活动积温 ≥10℃ Accumulated temperature(℃·d); T_{hot}:最热月平均气温 Mean temperature during the warmest month(℃); P_{7—9}:成熟期降水(7—9 月) The precipitation of the maturation stage during Jul. to Sep.(mm)

2.2 欧亚种酿酒葡萄气候适宜性分区

欧亚种酿酒葡萄高适宜区分布在新疆天山北麓准噶尔盆地南缘的沙湾、天山北麓伊犁河谷西北部的霍城、伊宁;伊犁河谷东端的新源;塔里木盆地西北边缘,天山南脉南麓的乌什;甘肃的靖远、景泰;宁夏平原;内蒙古乌海市南部、阿拉善左旗南部;陕北榆林与山西交汇处的府谷、保德、佳县、无定河流域的米脂、绥德、吴堡、靖边;陕西关中平原的兴平、秦都、泾阳、三原、富平、大荔、蒲城、澄城、合阳;山西省柳林、太谷、吕梁山西麓的洪洞县、襄汾县、侯马市、曲沃县、翼城县、万荣县、山西南部的芮城、平陆等地;河北省张家口市的怀来县、涿鹿县;秦皇岛市的昌黎县、卢龙县;山东半岛北部的莱州、龙口、蓬莱、福山、招远、烟台(图 4)。

最大熵模型输出 2 种响应曲线,第一种为仅使用某一种气候因子时物种存在概率对该因子的响应程度,第二种为所有因子均参与模拟,其他气候因子为平均状况时存在概率对该气候因子的响应。图 5 为仅使用该气候因子酿酒葡萄存在概率对该气候因子的响应曲线,可以反映模型对该因子的依赖性。以存在概率 $P \geq 0.66$ 为划分界限,获得气候最适宜区主导气候因子的阈值。

酿酒葡萄高适宜区内年极端最低气温在-19—-12℃之间,无霜期在 186—240 d 之间,≥10℃积温在 3500—3630℃·d 之间,干燥度在 3.5 左右(图 5)。基于 Jackknife 法分析结果表明单独使用日照时数对模型的贡献极小,因此图 5 为其他因子保持在平均状况时,生长季日照时数对模型的贡献,高适宜区生长季日照时数在 1355 h 以上。仅使用降水一个因子模拟的存在概率对降水量的响应结果表明:酿酒葡萄存在概率对降水量的响应呈双峰型,在灌溉区和雨养区均存在一定的适宜区。有灌溉条件的区域,降水量不是限制因子,在非灌溉区域,降水量在 600—650 mm 的范围内,欧亚种酿酒葡萄表现出较高的适宜性,年降水量高于 650 mm,存在概率随着降水量增加而降低。该区域热量适宜,日照充足,冻害较轻或无冻害,气候干燥,成熟季降水量少(图 5)。

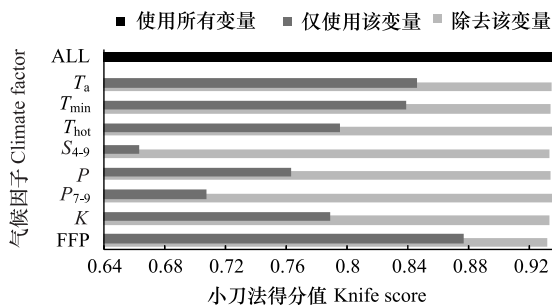


图 3 基于 Jackknife 法的气候因子对我国欧亚种酿酒葡萄种植分布的贡献

Fig.3 Contribution of climate factors to planting distribution of wine grapes (*Vitis vinifera* L.) in China by Jackknife test

ALL 为所有变量(All factors); FFP:无霜期 Frost-free period(day); K:干燥度 Aridity index; P_{7—9}:成熟期降水(7—9 月) The precipitation of the maturation stage during Jul. to Sep.(mm); P:年降水量 Annual precipitation (mm); S_{4—9}:生长季 4—9 月日照时数 Sunshine duration of growing season during Apr. to Sep.(h); T_{hot}:最热月平均气温 Mean temperature during the warmest month(℃); T_{min}:极端最低气温 Annual extreme minimum temperature(℃); T_a:≥10℃活动积温 ≥10℃ Accumulated temperature(℃·d)

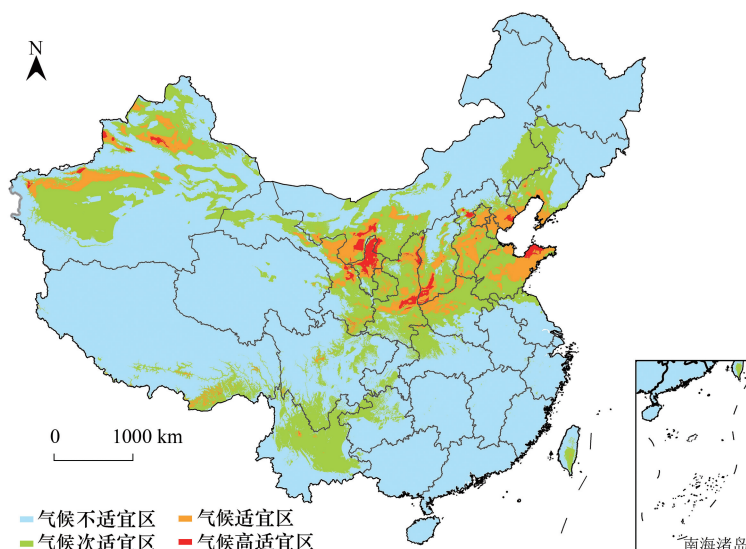


图4 欧亚种酿酒葡萄气候适宜性分区

Fig.4 Climate suitable of wine grapes (*Vitis vinifera* L.) in China

欧亚种酿酒葡萄气候适宜区分布在新疆南部塔里木盆地西侧、北缘的伽师、柯坪、阿克苏、新和、库车、轮台、拜城、和静;伊犁河谷盆地的大部包括(霍城、巩留等地);准噶尔盆地大部(昌吉、克拉玛依等地);吐鲁番盆地西北边缘的狭长地带;塔城、哈密;甘肃张掖(高台、临泽)、武威、民勤、白银、民和、永靖、兰州等地、天水、秦安、甘谷;陇南的成县、两当;与四川交接的武都、文县。青海循化;陕西与山西交接处两侧、榆林大部、关中平原大部、吕梁山东麓,太原盆地大部;忻州北部;陕西与湖北交界处的郧西县;山东半岛大部、山东丘陵中部、黄河三角洲北部;河北省中部及太行山东麓;天津中北大部、北京东部;河南西北部(三门峡及洛阳西部);内蒙古左旗、右旗、临河、磴口、乌拉特前旗;青海海南黄河流域,海东中部;四川产区主要分布在川西高原的河谷地区,热量充足,日照 ≥ 800 h,干燥度 ≥ 1.0 。包括小金、丹巴、金川、理县;川滇交界处的得荣、德钦等,云南宾川等地。该区域年极端最低气温在 -21 — -8°C 之间,年极端最低气温低于 -19°C ,随着极端最低气温的降低,酿酒葡萄存在概率逐渐降低。 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 活动积温 3000 — $4600^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 之间,无霜期在 168 — 242 d之间,干燥度在 1.1 — 5.9 之间,4—9月日照时数在 810 h以上;年降水量为 100 — 770 mm之间(图4)。

欧亚种酿酒葡萄气候次适宜区分布在新疆天山南北两侧,塔里木盆地西部,准格尔盆地大部、吐鲁番盆地外缘;甘肃酒泉中部、张掖北部,甘南以北的大部;宁夏南部及东部;山西陕西河南交界;河北东南部;鲁西北及鲁南,辽宁南部,内蒙古鄂尔多斯等地;内蒙古与辽宁、吉林交汇处;陕西西部及南部;湖北西北部;山西晋中长治东部;河南北部;河北西南部;四川南部与云南东北部;西藏东南部(图4)。

其他区域为欧亚种酿酒葡萄气候不适宜区(图4),热量资源不足是限制该区域北部酿酒葡萄发展的主要气候因子,而南方地区则主要因为成熟季降水量过多,病害频发,需要通过避雨栽培、或者设施栽培保证葡萄正常生长。同时光照不足也是该区域欧亚种酿酒葡萄能否经济栽培的限制因子。

2.4 欧亚种酿酒葡萄各气候适宜区的面积比例

气候次适宜区、适宜区、高适宜总称为适宜区,适宜区总面积 252 万 km^2 ,占研究区域总面积的 26.2% 。其中气候次适宜区、适宜区、高适宜区总面积分别为 7.4 万 km^2 、 52.4 万 km^2 、 193.5 万 km^2 ,面积分别占适宜区总面积的 2.9% 、 20.4% 和 76.7% 。图6为各省不同气候适宜区面积占该气候区总面积比例,可以看出酿酒葡萄气候高适宜区及适宜区主要分布在宁夏、山西、陕西、内蒙古、山东、河北、新疆、甘肃等省(图6)。据调查我国酿酒葡萄种植面积从大到小依次为新疆产区(新疆)、贺兰山东麓产区(宁夏)、河西走廊产区(甘肃)、京津冀产区(包括北京、天津、河北)和山东产区,前三大产区面积约占全国酿酒葡萄种植面积的 55% ^[34],而陕西、

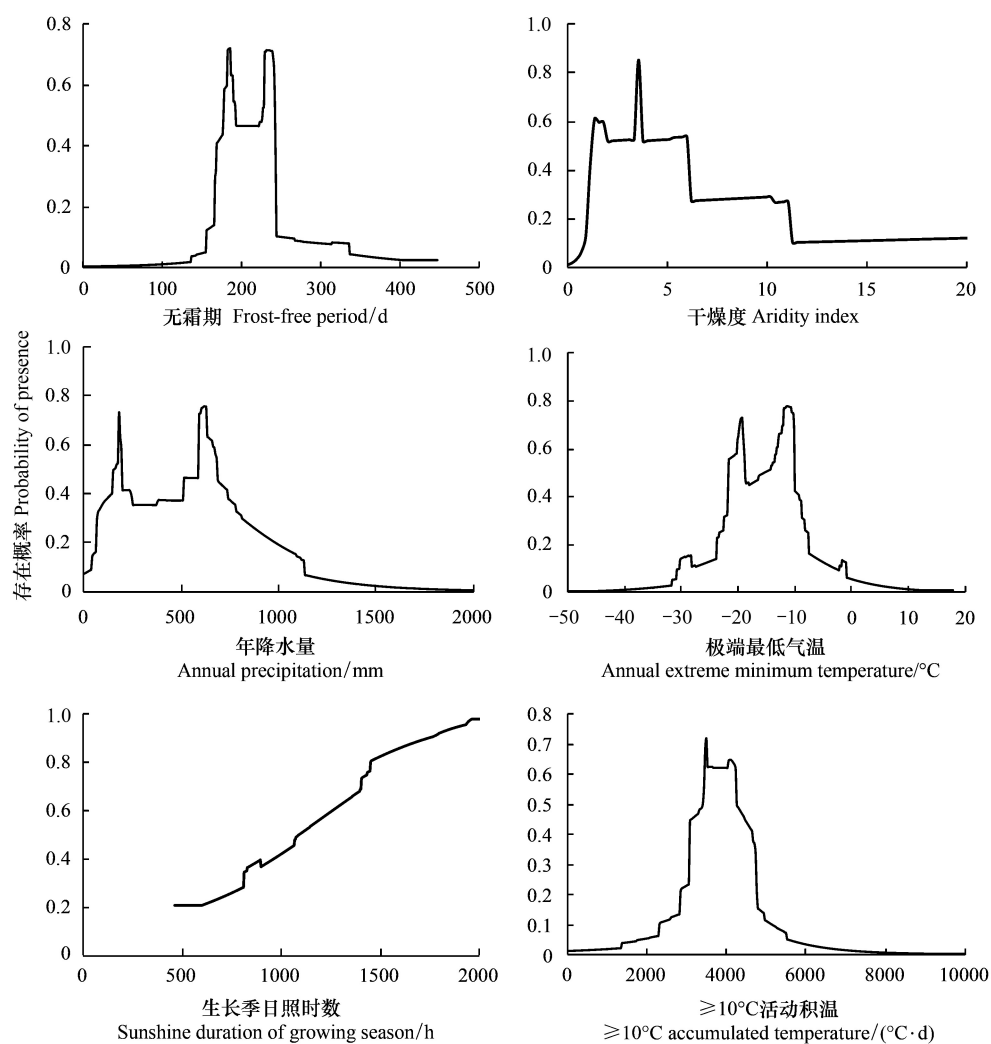


图5 主导气候因子对模型预测的响应曲线

Fig.5 Response curves of dominant climate factors to model prediction

山西、内蒙是我国酿酒葡萄栽培面积较小的产区^[34],说明只考虑气候因子的情况下,陕西、山西、内蒙古有较大的发展空间。同时需要注意的是本研究主要基于气候条件给出酿酒葡萄潜在分布区,而一个地方能否大规模发展酿酒葡萄还要受土壤条件、灌溉条件、交通条件、环境政策等方面的影响。

3 讨论

(1)本研究基于酿酒葡萄分布点数据和环境数据利用最大熵模型筛选影响酿酒葡萄潜在分布的主导气候因子,以受试者工作曲线对模型的适用性进行评价,避免了主导气候因子筛选的经验性和主观性。在分布点的选择上本研究排除了避雨栽培、设施栽培等人工调控区域,只选择了露地栽培酿酒葡萄分布点数据输入模型,研究给出了我国欧亚种酿酒葡萄经济栽培的气候适宜性,结果可为欧亚种酿酒葡萄经济栽培提供参考,气候次适宜及以上区域给出的范围与王蕾等人给出的酿酒葡萄可种植区接近^[9]。本研究在气候适宜区的基础上进一步划分出了高适宜区和适宜区,可为优质酿酒葡萄发展提供参考。

(2)一般认为,活动积温在 3000—3500°C·d 的地区是生产优质酿酒葡萄的适宜区^[35]。温和的气候条件下,年降水量 600—800 mm,较适宜酿酒葡萄生长^[13]。无霜期 150 d 为酿酒葡萄生长下限^[8],与本研究给出的阈值接近。葡萄是喜光植物,生长期要求日照时数必须在 800 h 以上才能满足正常的生长和结果^[9]。本研

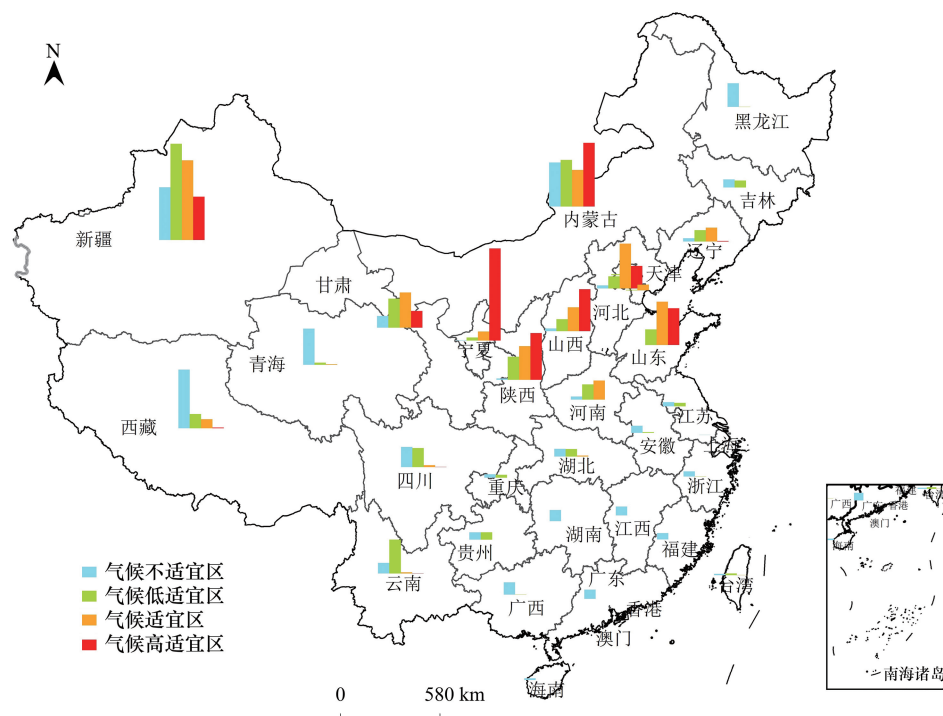


图6 不同气候适宜区面积占该区总面积的比例/%

Fig.6 The proportion of different climate suitable areas to the total climate suitable planting area

究表明,酿酒葡萄存在概率随着生长季内日照时数的增加而增加,气候适宜区酿酒葡萄生长季日照时数在810 h以上,气候高适宜区生长季日照时数在1355 h以上,说明日照时数810 h即可满足酿酒葡萄生长,但是较高的日照时数更利于葡萄生长。

需要注意的是本研究重点分析的适宜区各气候因子阈值是仅使用该因子进行模拟得出的适宜葡萄生长的阈值,影响葡萄生长是多因子协同作用的结果,多因子共同作用的响应曲线和阈值与仅使用单因子进行模拟得到的响应曲线和阈值并不完全一致。

(3)所选用的环境因子主要包括气候因子,而土壤类型、坡度、坡向等生态因子对酿酒葡萄产量和品质的影响仅次于气候因子^[3];另外,本研究基于酿酒葡萄分布点信息利用最大熵模型构建了酿酒葡萄分布与气候因子之间的关系,给出了酿酒葡萄各区域的存在概率,但未考虑分布点酿酒葡萄的品质,因此不是所有的气候高适宜区均具有较好的品质。因此,未来将在气候适宜区的基础上进一步考虑土壤类型、土壤养分、坡度、坡向、海拔等生态因子,同时建立品质和存在概率的关系对结果进行分级,重点从影响酿酒葡萄品质优劣的角度开展酿酒葡萄生态适宜性研究。

4 结论

基于欧亚种酿酒葡萄分布的地理数据及气候因子数据,利用最大熵模型筛选影响欧亚种酿酒葡萄分布的主导气候因子,研究欧亚种酿酒葡萄气候适宜性。结果表明,影响欧亚种酿酒葡萄经济栽培的主导气候因子为:无霜期、干燥度、年极端最低气温、年降水量、生长季4—9月日照时数、 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温。欧亚种酿酒葡萄最适宜气候区主要分布在新疆天山北麓准噶尔盆地南缘、伊犁河谷地区等地、宁夏平原、内蒙古中部的乌海、左旗、陕北与陕西交汇处、关中平原、山西南部、山东半岛北部、河北张家口及昌黎。对比现有酿酒葡萄面积和预测结果中各省适宜区所占比例,只考虑气候因子,陕西、山西、内蒙古等地有较大的发展空间。

致谢:感谢中国气象科学研究院的吕晓敏、汲玉河副研究员及中国气象局大气探测中心的朱永超副研究员在数据处理及模型使用方面给予的帮助。

参考文献 (References):

- [1] 姜建福, 马寅峰, 樊秀彩, 张颖, 孙海生, 王利军, 刘崇怀. 196 份葡萄属 (*Vitis* L.) 种质资源耐热性评价. 植物遗传资源学报, 2017, 18(1): 70-79.
- [2] 刘凤之. 中国葡萄栽培现状与发展趋势. 落叶果树, 2017, 49(1): 1-4.
- [3] Van Leeuwen C, Friant P, Choné X, Tregat O, Koundouras S, Dubourdieu D. Influence of climate, soil, and cultivar on terroir. American Journal of Enology and Viticulture, 2004, 55(3): 207-217.
- [4] 罗国光. 关于葡萄气候区划指标问题的探讨. 河北林业科技, 2004, (5): 61-63.
- [5] Winkler A J, Cook J A, Kliever W M, Lider L A. General Viticulture. Berkeley: University of California Press, 1974.
- [6] Coombe B G. Influence of temperature on composition and quality of grapes. Acta Horticulturae, 1987, 206: 23-33.
- [7] Budan C, Calistru G H, Metaxa G R. Le Microclimat et son influence sur la culture de la vigne dans quelques vignobles de Roumanid//Ler Sympo C R, ed. Ecologie de la Vigne, C R lerSympo. Interna Ecologie Vigne, 1978: 99-111.
- [8] 李华, 王华, 房玉林, 火兴三. 我国葡萄栽培气候区划研究(II). 科技导报, 2007, 25(19): 57-64.
- [9] 王蕾, 李华, 王华. 中国葡萄气候区划 I: 指标与方法. 科学通报, 2017, 62(14): 1527-1538.
- [10] 张春同. 中国酿酒葡萄气候区划及品种区域化研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2012.
- [11] 张晓煜, 李红英, 陈卫平, 张磊, 苏龙, 范锦龙, 曹宁. 中国北方干白葡萄酒用葡萄生态区划. 生态学杂志, 2014, 33(11): 3107-3111.
- [12] 李宏伟, 郁松林, 吕新, 王雪莲. 新疆酿酒葡萄气候区划的研究. 西北林学院学报, 2005, 20(1): 38-40.
- [13] 王华, 宋华红, 李华, 王兰改, 颜雨. 山东省酿酒葡萄气候区划. 科技导报, 2010, 28(21): 63-67.
- [14] 王艳君, 王蕾, 白文科, 郝燕, 王雪秋, 房玉林. 甘肃葡萄气候区划与栽培建议. 园艺学报, 2017, 44(4): 792-802.
- [15] 翟衡, 王赵盼, 杜远鹏. 我国葡萄气候区划及酿酒葡萄优势产区评价. 中国果树, 2018, (3): 5-12.
- [16] Butterfield R E, Harrison P A, Orr J L, Gawith M J, Lonsdale K G. Modelling climate change impacts on wheat, potato and grapevine in great Britain//Downing T E, Harrison P A, Butterfield R E, Lonsdale K G, eds. Climate Change, Climatic Variability and Agriculture in Europe: An Integrated Assessment. Oxford: University of Oxford, 2000: 265-288.
- [17] Jones G V, White M A, Cooper O R, Storchmann K. Climate change and global wine quality. Climatic Change, 2005, 73(3): 319-343.
- [18] Tate A B. Global warming's impact on wine. Journal of Wine Research, 2001, 12(2): 95-109.
- [19] Mozell M R, Thach L. The impact of climate change on the global wine industry: challenges & solutions. Wine Economics and Policy, 2014, 3(2): 81-89.
- [20] 何奇瑾, 周广胜. 我国春玉米潜在种植分布区的气候适宜性. 生态学报, 2012, 32(12): 3931-3939.
- [21] 熊巧利, 何云玲, 邓福英, 李同艳, 余岚. 基于 MaxEnt 模型西南地区高山植被对气候变化的响应评估. 生态学报, 2019, 39(24): 9033-9043.
- [22] 王书越, 潘少安, 王明睿, 王明馨, 叶吉. 基于 MaxEnt 模型评估刺五加在东北地区的空间分布. 生态学报, 2019, 39(9): 3277-3286.
- [23] Phillips S J, Dudík M, Schapire R E. A maximum entropy approach to species distribution modeling//Proceedings of the Twenty-First International Conference on Machine Learning. New York: ACM, 2004: 655-662.
- [24] 车灵, 王海英, 吉春容. 哈密垦区葡萄成熟期降水对葡萄品质、产量的影响. 沙漠与绿洲气象, 2010, 4(6): 47-49.
- [25] Sivilotti P, Christian B, Paladin M, Peterlunger E. Effect of soil moisture availability on merlot: from leaf water potential to grape composition. American Journal of Enology and Viticulture, 2005, 56(1): 9-18.
- [26] 曲曼丽. 农业气候实习指导. 北京: 北京农业大学出版社, 1991.
- [27] 孟猛, 倪健, 张治国. 地理生态学的干燥度指数及其应用评述. 植物生态学报, 2004, 28(6): 853-861.
- [28] 修德仁, 周润生, 晁无疾, 山立宏. 干红葡萄酒用品种气候区域化指标分析及基地选择. 葡萄栽培与酿酒, 1997, (3): 22-26.
- [29] 李记明, 吴清华, 边宽江. 陕西省酿酒葡萄气候区划初探. 干旱地区农业研究, 1999, 17(3): 126-129.
- [30] 石志华, 刘梦云, 常庆瑞, 季青, 刘效栋, 吴健利. 基于优化参数的陕西省气温、降水栅格化方法分析. 自然资源学报, 2015, 30(7): 1141-1152.
- [31] 蔡福, 于贵瑞, 祝青林, 何洪林, 刘新安, 李正泉, 郭学兵. 气象要素空间化方法精度的比较研究——以平均气温为例. 资源科学, 2005, 27(5): 173-179.
- [32] Phillips S J, Anderson R P, Schapire R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. Ecological Modelling, 2006, 190(3/4): 231-259.
- [33] IPCC. (2007) Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva: IPCC, 2007.
- [34] Wang, X Q, Xie, X L, Chen N, Wang H, Li H. Study on current status and climatic characteristics of wine regions in China. Vitis, 2018, 57: 9-16.
- [35] 翟衡, 杜金华, 管雪强, 乔旭光, 潘志勇. 酿酒葡萄栽培及加工技术. 北京: 中国农业出版社, 2001.