

# 基于 MaxEnt 模型的青海省枸杞潜在适宜性区划<sup>①</sup>

王 涵<sup>1</sup>, 孙仲秀<sup>1\*</sup>, 姜荧荧<sup>2</sup>, 宋效东<sup>3</sup>, 王秋兵<sup>1</sup>

(1 沈阳农业大学土地与环境学院, 沈阳 110866; 2 沈阳工学院生命工程学院, 沈阳 113122; 3 土壤与农业可持续发展全国重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 211135)

**摘要:** 为了探明青海省枸杞种植的适宜区域, 并识别出限制枸杞生长的关键环境因子, 采用 MaxEnt 模型, 通过相关性分析从气候、土壤、地形等多维度筛选出 16 项关键环境因子, 并结合 98 份枸杞分布点数据, 对青海省枸杞的潜在适生区进行了预测。研究结果通过受试者工作特征(Receiver operating characteristic, ROC)曲线验证, 模型精度高达 AUC=0.987, 确保了预测结果的可靠性。研究揭示,  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  年积温(贡献率 50.2%)、坡度(10.9%)、土壤有机碳含量(10.2%)、最干月份降水量(6.3%)、土壤全氮含量(5.1%)、8 月平均降水量(4.9%)、土壤全磷含量(4.8%)等核心环境因子对枸杞的分布具有决定性影响, 累计贡献率达 92.4%。预测结果表明, 高适宜区面积为  $1\ 769\text{ km}^2$ , 主要集中于海西蒙古族藏族自治州的都兰县、乌兰县和德令哈市; 中适宜区面积为  $2\ 659\text{ km}^2$ , 主要分布在都兰县和乌兰县; 低适宜区面积为  $6\ 065\text{ km}^2$ , 广泛分布于都兰县、格尔木市和共和县等地。这些空间分布特征揭示了枸杞在研究区域内不同行政与环境梯度上所展现的生态适应性层级结构。

**关键词:** 青海省; 枸杞; 最大熵模型; 适宜性分布

**中图分类号:** S567.1      **文献标志码:** A

## Zoning of Potential Suitable Areas for *Lycium barbarum* L. Based on MaxEnt Model in Qinghai Province

WANG Han<sup>1</sup>, SUN Zhongxiu<sup>1\*</sup>, JIANG Yingying<sup>2</sup>, SONG Xiaodong<sup>3</sup>, WANG Qiubing<sup>1</sup>

(1 College of Land and Environment, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China; 2 College of Life Engineering, Shenyang Institute of Technology, Shenyang 113122, China; 3 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 211135, China)

**Abstract:** To predicate the potential suitable areas for *Lycium barbarum* L. cultivation in Qinghai Province and identify the key environmental factors restricting its growth, in this study, the MaxEnt model was used, and in combination with 98 distribution point data of *Lycium barbarum* L., 16 key environmental factors were selected through correlation analysis from multiple aspects such as climate, soil and topography. The research results were verified through the receiver operating characteristic (ROC) curve, with a model accuracy of AUC=0.987, ensuring the reliability of the prediction results. The study disclosed that the core environmental factors, including the annual accumulated temperature above  $10^{\circ}\text{C}$  (contribution rate of 50.2%), slope (10.9%), soil organic carbon content (10.2%), the driest month precipitation (6.3%), total soil nitrogen content (5.1%), average rainfall in August (4.9%), and total soil phosphorus content (4.8%), with a cumulative contribution rate of 92.4%, have a decisive impact on the distribution of *Lycium barbarum* L. The prediction results indicated that the high-suitability zone for *Lycium barbarum* L. covered an area of  $1\ 769\text{ km}^2$ , primarily concentrated in Dulan County, Wulan County, and Delingha City within the Haixi Mongol and Tibetan Autonomous Prefecture. The medium-suitability zone spaned  $2\ 659\text{ km}^2$ , predominantly distributed across Dulan County and Wulan County. In contrast, the low-suitability zone, occupying  $6\ 065\text{ km}^2$ , exhibited a broader geographical distribution encompassing Dulan County, Golmud City, Gonghe County, and other regions. These spatial patterns highlight the hierarchical ecological adaptability of the target species across distinct administrative and environmental gradients.

**Key words:** Qinghai Province; *Lycium barbarum* L.; MaxEnt; Spatial suitability distribution

<sup>①</sup>基金项目: 国家自然科学基金面上项目(42277285)、辽宁省“兴辽英才计划”青年拔尖人才项目(XLYC2203085)和辽宁省教育厅基本科研项目(一般项目)(JYTYB2024007)资助。

\* 通信作者(zhongxiusun@syau.edu.cn)

作者简介: 王涵(2001—), 男, 辽宁大连人, 硕士研究生, 研究方向为土壤发生与分类。E-mail: a15542340702@163.com

枸杞在中国的医药文化中拥有悠久的历史,自古以来便被视为具有滋补强身、调理肝肾、明目养颜等多重功效。在古代医学经典如《神农本草经》《本草纲目》等著作中,均有关于枸杞的详细记载与应用方法。在药用方面,枸杞具有抗衰老、保护神经、消炎、促进代谢等功效。其含有丰富的生物活性成分,如枸杞多糖、类胡萝卜素、黄酮类化合物等,这些成分具有抗氧化、免疫调节、抗肿瘤等作用<sup>[1]</sup>。在食品领域,枸杞作为保健食品、饮料和调味品等深受消费者喜爱<sup>[2]</sup>。枸杞作为一种药食两用的珍贵品种,在我国已有超过 2000 年的种植历史<sup>[3]</sup>,其适应性强,尤其适合在盐碱地和退耕还林地种植,目前在我国宁夏、甘肃、青海、内蒙古等多个地区均有广泛种植<sup>[4]</sup>。

随着大健康时代的到来,人们的保健意识显著增强,枸杞的保健和药用价值得到了前所未有的关注<sup>[5]</sup>。与此同时,国家对中药材产业的发展也给予了高度重视<sup>[6]</sup>,为中药材产业带来了新的历史发展机遇。然而,随着国家粮食安全问题日益凸显,“不与粮争地”的农业政策持续推进,严格控制耕地转变为其他农业用地,导致枸杞种植用地矛盾日益突出<sup>[7]</sup>。青海省自 2000 年起通过防沙治沙等工程大力发展枸杞种植,现阶段已经成为全国枸杞种植面积最大的省份,但是仍然存在种植区域不稳定等问题<sup>[8]</sup>。因此,如何在有限的区域内科学地种植枸杞,成为了一个亟待解决的问题。其中,对枸杞种植适宜性进行准确评价,是解决这一问题的关键前提,相关研究成果有望为推动枸杞产业的健康发展提供有力支持。

近年来,物种分布模型在预测物种适宜性分布方面得到了广泛应用。该模型通过数学统计方法,建立物种发生数据与相应空间特征信息之间的关联,以深入分析物种对环境的耐受差异<sup>[9]</sup>。其中,最大熵(MaxEnt)模型凭借其操作简单、预测精确度高、数据种类易于获取等优势<sup>[10]</sup>,成为了当前较为常用的物种分布预测工具。例如,唐燕等<sup>[11]</sup>利用 MaxEnt 模型对中华枸杞在全国的适宜性分布概率进行了预测;孙莉等<sup>[12]</sup>借助该模型完成了全国枸杞的适宜性区划;申卓龙等<sup>[13]</sup>进一步利用 MaxEnt 模型预测了宁夏枸杞在全国的适宜性分布。然而,这些研究在指标选择上多局限于气候因素,本研究在此基础上,综合考虑气候、土壤、地形等多种因素,旨在通过 MaxEnt 模型对青海省枸杞的适宜性区划进行更为全面、准确的预测。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

青海省位于我国西部,总面积为 73.23 万 km<sup>2</sup>,

东部和北部与甘肃省接壤,西南方向同西藏自治区相连,西北和东南部分别与新疆维吾尔自治区和四川省相接。地势上呈现西高东低,西部主要是青藏高原和昆仑山脉,平均海拔在 4 000 m 以上,而东部主要是青藏高原和黄土高原的过渡地带,地形复杂,地貌多样。气候类型属于高原大陆性气候,气温日较差大,降雨量少,光照时间长,辐射强。境内年平均温度为 -5.1 ~ 9.0 °C,年平均降水量在 400 mm 以下,平均年辐射总量达 5 860 ~ 7 400 MJ/m<sup>2</sup>。境内土壤类型多样,主要有黑钙土、栗钙土、灰钙土等。现阶段青海省主要枸杞种植区分布在柴达木盆地等地区。

### 1.2 枸杞调查点数据收集

根据青海省多次野外实地调查,获得种植枸杞调查点经纬度信息 139 份;再根据中国数字植物标本馆(<http://www.cvh.org.cn>)和全球生物多样性数据库(<https://www.gbif.org/>)获得种植枸杞调查点经纬度信息 16 份,本研究共计获得枸杞调查点经纬度信息 155 份。将录有坐标点的 Excel 表格保存为 CSV 格式方便后续使用。为了排除样点空间自相关性对研究结果的影响,将收集信息导入 ENMTools 软件进行筛选,最终保留了 98 份枸杞调查点经纬度数据。

### 1.3 环境因子获取

19 个生物气候因子(年平均温度、平均温度日较差、等温性、温度季节性变化、最热月份最高温度、最冷月份最低温度、年均温度变化范围、最湿季度平均温度、最干季度平均温度、最热季度平均温度、最冷季度平均温度、年均降水量、最湿月份降水量、最干月份降水量、降水量变异系数、最湿季度降水量、最干季度降水量、最热季度降水量和最冷季度降水量)和地形因子(海拔、坡度、坡向)来源于世界气候数据库(<http://www.worldclim.org/>);6—9 月平均降水量和 6—9 月平均温度来源于国家地球系统科学数据中心黄土高原分中心(<http://loess.geodata.cn/>);全国 30 年累计日平均气温 ≥0、5、10、15 °C 积温数据来源于国际生态科学数据中心(<http://www.nesdc.org.cn/>);土壤因子(pH、阳离子交换量、全氮、全磷、全钾、有机碳、容重、砾石含量和土层厚度)来源于国家青藏高原科学数据中心(<http://data.tpdc.ac.cn>)。所有环境因子空间分辨率均为 1 km, 投影坐标系为 WGS\_1984\_Albers。在筛选环境变量的过程中,首先,将所有环境因子带入 MaxEnt 模型,去除贡献度为 0 的因子;其次,为了排除环境因子之间存在相关性,将 43 个环境因子导入 ArcGIS 中,将其由栅格的形式转换为 ASCII 格式;最后,利用 ENMTools 软件进行相

关性分析, 排除相关系数  $|r| \geq 0.85$  的环境因子。本研究最终获得由 16 个环境变量组成的数据集。

#### 1.4 模型构建

将 98 份枸杞调查坐标点和筛选的 16 个环境因子导入 MaxEnt 3.4.4 软件中, 对青海省枸杞潜在适宜区进行模拟预测。本研究将 75% 的坐标点作为训练集用于模型的预测, 25% 坐标点作为测试集用于测试模型的准确性, 重复次数设置为 10 次, 以增加模型的准确性和减少其随机性, 并通过受试者工作特征(Receiver operating characteristic, ROC)曲线验证模型的精度。其中, AUC 值(Area under the ROC curve, 即 ROC 曲线下面积)不受阈值影响, 其大小可作为模型预测准确度的衡量指标<sup>[14]</sup>。通常 AUC 值介于 0.5~0.6 时, 表明预测失败; 0.6~0.7 时, 预测结果较差; 0.7~0.8 时, 预测结果一般; 0.8~0.9 时, 预测结果较好; 0.9~1.0 时, 预测结果非常好<sup>[15]</sup>。

#### 1.5 适宜区划分

等间距适宜性分级是一种基于数据均匀划分区间的方法, 将数据的最大值和最小值之间的范围等分为若干区间, 每个区间代表不同的适宜性等级(如高适宜、中适宜、低适宜)。本研究将模型预测后的结果导入 ArcGIS 10.8.1 中, 其像素值范围 0~1 是生存概率  $P$  值。采用等间距法将生存概率  $P$  值分为 4 个等级:  $P < 0.25$  为非适宜区,  $0.25 \leq P < 0.5$  为低适宜区,  $0.5 \leq P < 0.75$  为中适宜区,  $P \geq 0.75$  为高适宜区。

#### 1.6 实地验证

本研究运用 SPSS 27.0 软件对高适宜区与低适宜区的枸杞品质指标(百粒重和果形指数)进行差异显著性分析, 判断两组枸杞品质数据是否具有显著性差异。若出现不同区域内的果形指数与百粒重间具有显著性差异, 且高适宜区枸杞果形指数与百粒重显著大于低适宜区, 则表明本研究适宜性分区结果具有准确性与可靠性。

## 2 结果与分析

### 2.1 MaxEnt 模型结果

本研究利用 MaxEnt 模型, 基于 16 个精选环境因子进行建模, 并输出 ROC 曲线(图 1)。通过分析该曲线, 得出本研究的平均 AUC 值为 0.987, 可见 MaxEnt 模型在预测青海省枸杞潜在适宜区方面有较高的准确性和可靠性, 本研究预测结果能够精确地反映青海省枸杞的适宜分布区域, 结果具有较高的可信度。

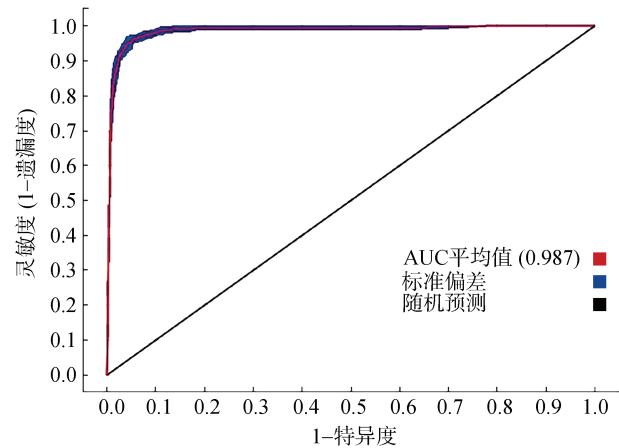


图 1 MaxEnt 结果 ROC 曲线

Fig. 1 ROC curve of MaxEnt results

### 2.2 影响青海省枸杞潜在分布的主要环境因子

**2.2.1 环境变量对模型构建结果的影响** 根据 MaxEnt 模型的输出结果(表 1), 本研究明确了影响青海省枸杞潜在分布的关键环境因子及其贡献度。其中,  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  年积温以 50.2% 的贡献度位居首位, 表明温度变化对枸杞生长具有至关重要的影响。紧随其后的是坡度(10.9%)和土壤有机碳含量(10.2%), 它们分别反映了地形特征和土壤肥力对枸杞分布的重要性。此外, 最干月份降水量(6.3%)、土壤全氮含量(5.1%)、8 月平均降水量(4.9%)以及土壤全磷含量(4.8%)也对模型构建结果产生了较为显著的影响。这 7 个主要环境因子的累计贡献率高达 92.4%, 充分说明了它们在决定青海省枸杞潜在分布中的核心作用。

相比之下, 其余环境因子的贡献率相对较小, 其中降水量变异系数、土壤容重、土壤阳离子交换量、坡向、土层厚度、土壤砾石含量以及最冷季平均温度的贡献度分别为 1.6%、1.2%、1.2%、1.1%、0.9%、0.8% 和 0.7%, 而土壤 pH 的贡献度最低, 仅为 0.1%。

此外, 本研究还采用置换重要值方法来进一步评估各环境因子在模型中的重要性。置换重要值通过衡量特征值随机打乱后模型性能的下降程度来估计特征的重要性。分析结果表明, 最冷季平均温度的置换重要值最高, 达到 19.3%, 其次是  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  年积温(14.4%)、8 月平均降水量(11.3%)和土壤全磷含量(9.9%), 这 4 个环境因子的累计置换重要值达到了 54.9%, 进一步验证了它们在预测青海省枸杞潜在分布中的关键作用。

**2.2.2 刀切法检验预测结果** 本研究通过刀切法对青海省枸杞分布的主要影响因子进行了深入分析(图 2)。正则化训练增益结果和测试增益结果均清晰地揭

表 1 环境因子对枸杞分布影响的贡献率及置换重要值  
Table 1 Contribution rates and permutation importance values of environmental factors on the distribution of *Lycium barbarum* L.

环境因子	贡献率(%)	置换重要值(%)	环境因子	贡献率(%)	置换重要值(%)
≥10℃年积温	50.2	14.4	土壤容重	1.2	9.4
坡度	10.9	5.5	土壤阳离子交换量	1.2	1.9
土壤有机碳含量	10.2	8.7	坡向	1.1	1.3
最干月份降水量	6.3	1.2	土层厚度	0.9	0.4
土壤全氮含量	5.1	5.9	土壤砾石含量	0.8	1.7
8月平均降水量	4.9	11.3	最冷季平均温度	0.7	19.3
土壤全磷含量	4.8	9.9	土壤 pH	0.1	0.1
降水量变异系数	1.6	9	土壤全钾含量	0	0.1

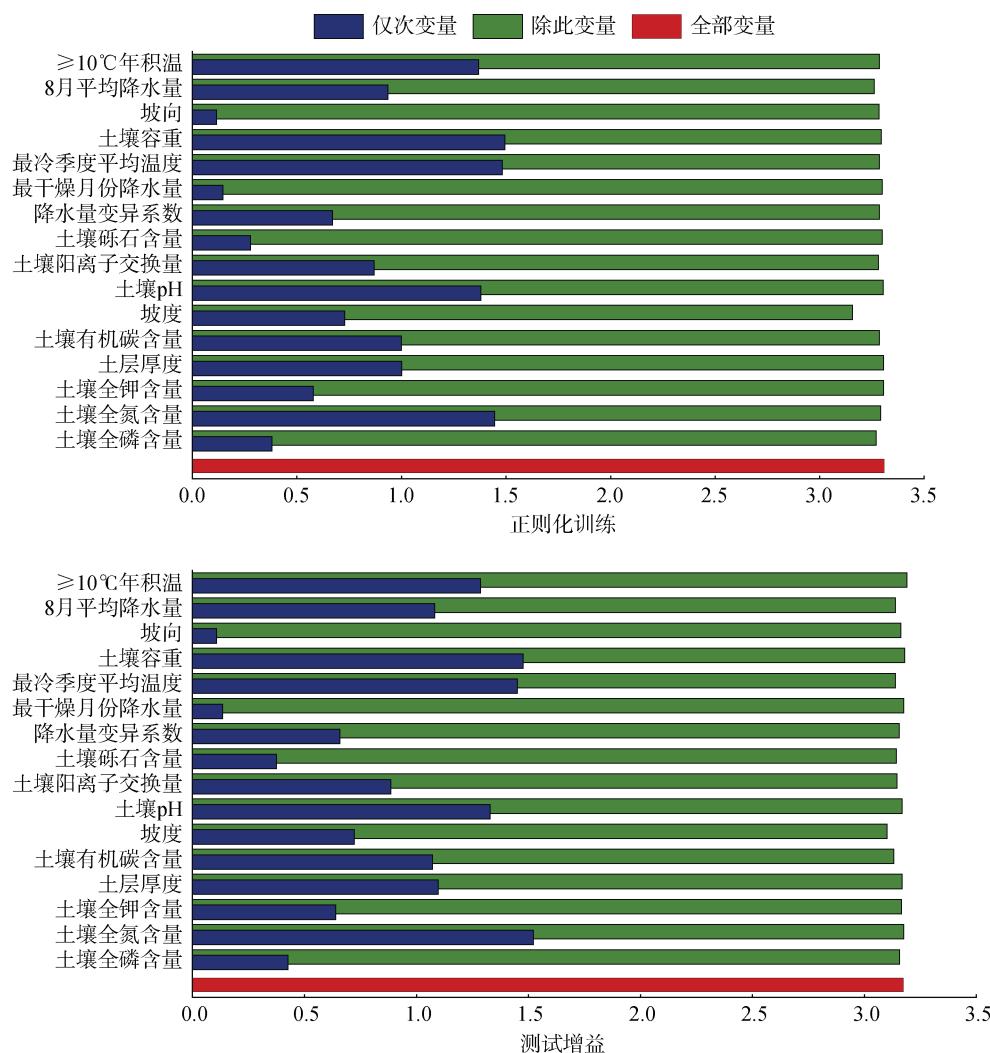


图 2 刀切法生态因子重要性分析  
Fig. 2 Importance analysis of ecological factors by cutting method

示了影响枸杞潜在分布的关键环境因子。具体而言，有 7 项环境因子对枸杞的分布具有显著影响，其重要性依据刀切法检验结果从高到低依次为：首位是土壤容重，反映了土壤物理性质对枸杞根系发育和分布的影响；其次是土壤全氮含量，其重要性凸显了土壤肥

力对枸杞生长的关键作用；最冷季度平均温度位列第三，表明气候条件中的温度因素对枸杞的分布具有重要影响；土壤 pH 紧随其后，显示了土壤酸碱度对枸杞生长环境的适应性要求；≥10℃ 年积温作为第五位重要因素，再次验证了温度条件对枸杞分布的决定

性作用; 土层厚度和土壤有机碳含量分别位列第六和第七, 它们共同体现了土壤结构和养分状况对枸杞生长的重要性。

可见, 通过刀切法检验预测结果的分析, 本研究明确了影响青海省枸杞分布的主要生态因子及其相对重要性, 可为后续的枸杞种植区划和生态适应性研究提供科学依据。

**2.2.3 影响枸杞分布的主要环境因子响应曲线** 通过对影响青海省枸杞潜在分布的主要环境因子进行深入分析, 本研究得出了各因子的响应曲线(图 3),

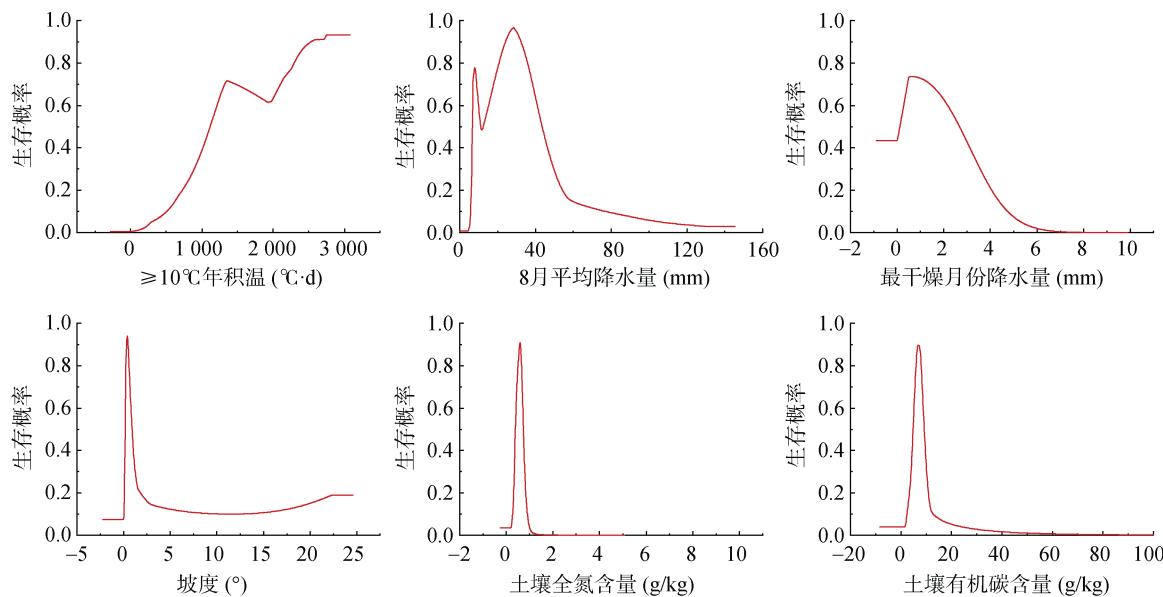


图 3 主要环境因子响应曲线  
Fig. 3 Response curves of major environmental factors

坡度对枸杞生存概率的影响表现为: 当生存概率大于 0.75 时, 坡度范围在  $0.71^{\circ} \sim 0.82^{\circ}$ , 说明枸杞更适合生长在地势相对平缓的地带。当坡度大于  $0.82^{\circ}$  时, 枸杞的生存概率逐渐降低; 当坡度达到  $22^{\circ}$  时, 生存概率稳定在 0.19, 表明此时坡度已成为限制枸杞生长的重要因素。

最干月份降水量对枸杞生存概率的影响呈现先增后减的趋势。当降水量为  $0.1 \text{ mm}$  时, 枸杞的生存概率快速增大; 降水量在  $0.94 \text{ mm}$  左右时, 生存概率达到最大值; 当降水量大于  $0.94 \text{ mm}$  时, 生存概率逐渐下降; 当降水量大于  $9 \text{ mm}$  时, 生存概率不再发生显著变化, 说明此时最干燥月份的降水量已不再是限制青海枸杞适宜性的主要环境因子。以枸杞生存概率大于 0.75 作为适宜范围, 最干燥月份的降雨量在  $0.22 \sim 2.38 \text{ mm}$  为适宜范围。

土壤有机碳含量对枸杞生存概率的影响表现为:

并明确了其对枸杞适宜性预测的贡献率, 本文选择贡献度前 6 位的环境因子进行分析。其中,  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  年积温对枸杞适宜性的预测贡献率最为显著。当积温小于  $337.6^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$  时, 枸杞的生存概率几乎为 0; 随后, 随着积温的上升, 枸杞的生存概率总体呈现上升趋势; 当积温达到  $2799.2^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$  时, 枸杞的生存概率达到最大值, 并且随着积温的继续上升, 生存概率不再发生显著变化。以生存概率大于 0.75 作为适宜范围, 枸杞对  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  年积温的适宜范围为大于  $1172.6^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 。

当有机碳含量大于  $1.57 \text{ g/kg}$  时, 枸杞的生存概率逐渐增加; 当有机碳含量在  $6.92 \text{ g/kg}$  左右时, 生存概率达到最大值; 随后生存概率逐渐降低并趋于平稳。以枸杞生存概率的变化为依据, 土壤有机碳含量在  $5.01 \sim 18.93 \text{ g/kg}$  为适宜范围。

土壤全氮含量对枸杞生存概率的影响呈现先上升后下降最后趋于平稳的趋势。当全氮含量在  $0.45 \sim 0.75 \text{ g/kg}$  时, 枸杞的生存概率最大。

8 月平均降水量与枸杞生存概率之间呈现双峰特征。随着降水量的增加, 枸杞生存概率先逐渐增大; 当平均降水量为  $7.91 \text{ mm}$  时, 生存概率开始逐渐下降; 当降水量大于  $11.29 \text{ mm}$  时, 生存概率又快速上升。以枸杞生存概率大于 0.75 作为适宜范围, 8 月平均降水量在  $6.84 \sim 10.21 \text{ mm}$  和  $14.21 \sim 42.02 \text{ mm}$  为适宜范围。

以上结果为深入理解枸杞的生态适应性和优化

种植区划提供了科学依据。

### 2.3 青海省枸杞适宜性区划

基于 MaxEnt 模型的预测结果,采用等间距法对青海省枸杞的生态适宜性进行了区划(图 4, 表 2)。结果显示,青海省范围内枸杞的高适宜区面积为 1 769 km<sup>2</sup>, 中适宜区面积为 2 659 km<sup>2</sup>, 低适宜区面积为 6 065 km<sup>2</sup>。

其中,高适宜区主要分布在海西蒙古族藏族自治州和海东市,面积分别为 1 633 km<sup>2</sup> 和 69 km<sup>2</sup>。在海西蒙古族藏族自治州内,高适宜区主要集中在都兰县、乌兰县和德令哈市;而在海东市,高适宜区主要集中在乐都区。

中适宜区的分布相对广泛,主要集中在海西蒙

古族藏族自治州和海东市,面积分别为 2 237 km<sup>2</sup> 和 225 km<sup>2</sup>。在海西蒙古族藏族自治州内,中适宜区主要分布在都兰县和乌兰县;在海东市,主要分布在乐都区。

低适宜区在青海省内的分布面积最大,主要集中在海西蒙古族藏族自治州和海南藏族自治州,面积分别为 4 586 km<sup>2</sup> 和 768 km<sup>2</sup>。在海西蒙古族藏族自治州内,低适宜区主要分布在都兰县和格尔木市;而在海南藏族自治州,低适宜区主要分布在共和县。

可见,通过对青海省枸杞适宜区的区划,本研究明确了不同适宜区在青海省内的分布范围和具体位置,可为枸杞的种植布局和生态适应性研究提供科学依据。

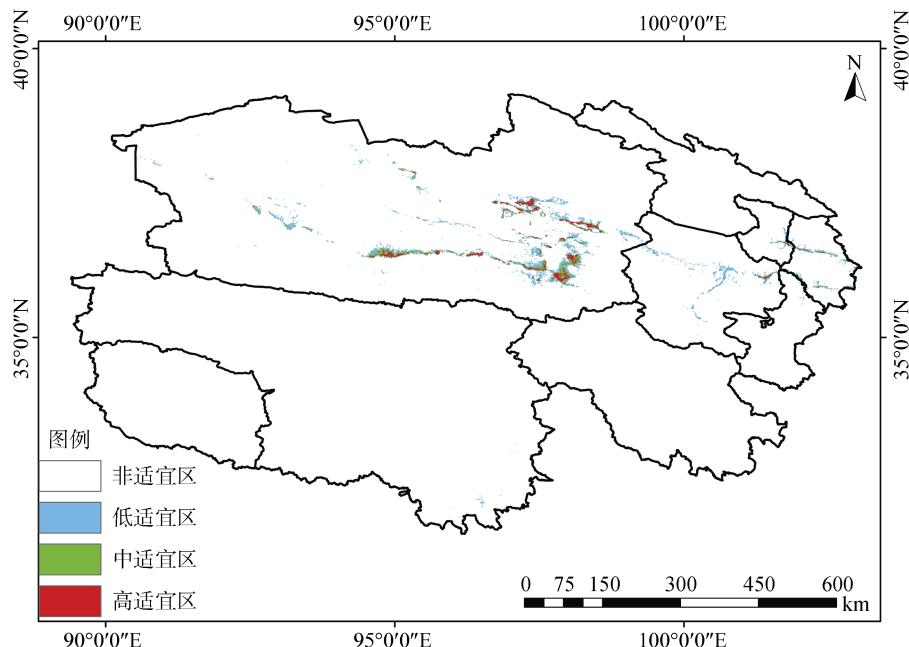


图 4 青海省枸杞适宜区分布图  
Fig. 4 Distribution map of suitable areas of *Lycium barbarum* L. in Qinghai Province

表 2 青海省各市(州)枸杞适宜区面积

Table 2 Suitable areas of *Lycium barbarum* L. in each city (continent) of Qinghai Province

市(州)	预测面积(km <sup>2</sup> )			
	非适宜区	低适宜区	中适宜区	高适宜区
海西蒙古族藏族自治州	294 635	4 586	2 237	1 633
玉树藏族自治州	199 945	59	2	-
果洛藏族自治州	72 308	-	-	-
海南藏族自治州	42 584	768	131	44
海东市	12 208	457	225	69
西宁市	7 478	126	46	21
海北藏族自治州	34 996	-	-	-
黄南藏族自治州	17 618	69	18	2
总计	681 772	6 065	2 659	1 769

### 2.4 实地验证分析

根据适宜性分区结果,在高适宜区与低适宜区内分别选择 5 个采样点对枸杞进行百粒重和果形指数的测定与分析,采样点分布和显著性统计结果见图 5。可见,不同区间枸杞果形指数与百粒重具有显著性差异,其中高适宜区枸杞果形指数与百粒重显著大于低适宜区,验证了预测结果的准确性。

## 3 讨论

### 3.1 模型评价

本研究采用 MaxEnt 模型对枸杞的潜在分布进行了预测,并取得了较高的预测精度(AUC 值为 0.987)。相较于其他生态位模型,MaxEnt 模型无需明确的物

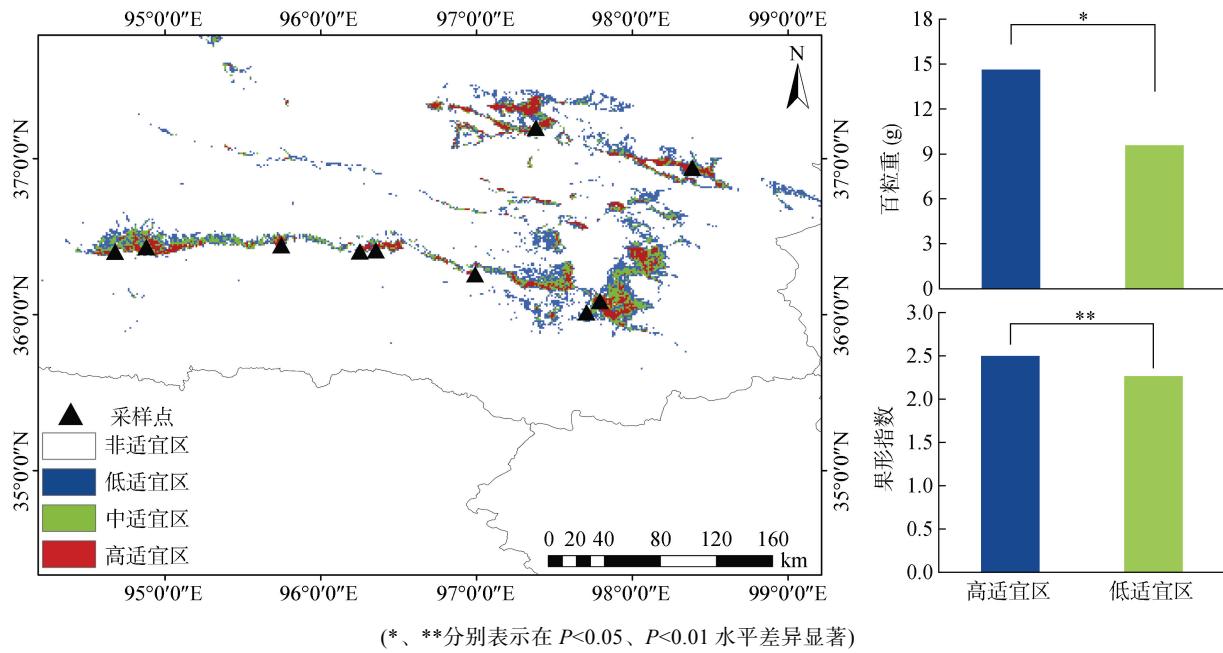


Fig. 5 枸杞采样点位置及差异显著性分析图  
Fig. 5 Sampling sites and significance analysis of differences of *Lycium barbarum* L.

种缺失数据,且能够适用于各种环境变量,而不只限于气候因素,在数据量较少的情况下,该模型仍能表现出色<sup>[16]</sup>。此外,本研究在环境因子的选择上相较于前人的研究更为全面,不仅考虑了气候因子,还加入了土壤因子和地形因子。同时,本研究通过多途径收集分布点数据,包括青海省多次野外实地调查、中国数字植物标本馆、全球生物多样性数据库等,进一步提升了预测结果的精确度和可靠性。

### 3.2 青海省枸杞潜在适宜区分布

预测结果显示,青海省枸杞的潜在适宜区主要分布在北部地区,南北地区呈现出明显的分异。这与已调查的青海枸杞主要分布在德令哈、格尔木、都兰县等地区的情况基本一致。枸杞在青海省的分布极不平衡,主要集中在柴达木盆地。该地区属于高原大陆性气候,光照充足、干旱少雨、土层深厚,这些环境特征与枸杞喜欢光照充足、耐旱、喜冷凉气候、忌水涝的生态特性相符。而青海省南部地区由于海拔较高(>4 000 m)、温度较低(<10 °C),不适合枸杞的生长。

### 3.3 影响枸杞分布的主要环境因子

本研究发现,影响枸杞分布的环境因子主要包括气候、土壤和地形等,且各因子的贡献率存在差异。其中,气候因子对枸杞分布的影响最为显著。

在气候因素中,≥10 °C 年积温的贡献率高达 50.2%,占据主导地位。积温是影响枸杞生长的重要限制因素,当≥10 °C 年积温在 2 799.2 °C·d 时最适合枸杞生长。积温有利于枸杞生长、矿物质及碳水化

合物的形成<sup>[17]</sup>。有研究表明,枸杞生长、开花、结果等生理过程与≥10 °C 有效积温关系密切,适宜的温度能够促进枸杞的整体生长,增强根系、茎叶等部位的发育,提升植株的健康度和生长潜力<sup>[18]</sup>。此外,最干燥月份降水量和 8 月平均降水量也是影响枸杞分布的重要因素。虽然枸杞具有较强的耐旱性,但仍需一定的水分来维持根系的正常功能<sup>[19]</sup>。而在生长期,适量的降水对枸杞的生长速度、根系健康、果实发育至关重要。降水量过多或过少都会对枸杞的生长产生不利影响<sup>[20-22]</sup>。

在土壤因素中,土壤全磷、全氮、有机碳对枸杞分布有重要影响。枸杞在生长过程中需要适量的磷元素来参与细胞的能量代谢、核酸合成以及光合作用等生理过程<sup>[23-24]</sup>。土壤氮素是枸杞生长所需的重要营养元素之一,它参与了叶绿素等重要物质的合成<sup>[25]</sup>。土壤有机碳可以改善土壤结构<sup>[26-27]</sup>,增加土壤的孔隙度和通气性,提高土壤的保水保肥能力,为枸杞提供适宜的生长环境<sup>[28]</sup>。

在地形因素中,坡度对枸杞分布的影响较大。坡度会影响土壤水分的分布和土壤养分的积累。适宜的坡度可以使水分在一定范围内分布,满足枸杞生长的需求。而坡度增加会导致土壤侵蚀的可能性增加<sup>[29]</sup>,土壤养分流失,从而限制枸杞的分布<sup>[30]</sup>。

## 4 结论

- 1) 本研究验证了 MaxEnt 模型的准确性。

MaxEnt 模型的模拟结果 AUC 值高达 0.987, 充分证明了该模型在预测青海省枸杞潜在适宜区方面的准确性和可靠性。这一高 AUC 值表明, 该模型的预测结果能够精确地反映青海省枸杞的实际适宜分布区, 预测结果的可信度高。

2) 本研究明确了影响青海省枸杞潜在分布的关键环境因子, 包括  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  年积温、坡度、土壤有机碳含量、最干燥月份降水量、土壤全氮含量、8 月平均降水量以及土壤全磷含量。这些因子对模型构建结果产生了显著影响, 其累计贡献率高达 92.4%, 充分揭示了它们在决定青海省枸杞潜在分布中的核心作用。

3) 本研究准确地预测了青海省枸杞的潜在分布区域。其中, 高适宜区面积为  $1\ 769\text{ km}^2$ , 主要集中在海西蒙古族藏族自治州的都兰县、乌兰县和德令哈市; 中适宜区面积为  $2\ 659\text{ km}^2$ , 主要分布在都兰县和乌兰县; 低适宜区面积为  $6\ 065\text{ km}^2$ , 广泛分布于都兰县、格尔木市和共和县等地。这些预测结果为青海省枸杞产业的合理布局和可持续发展提供了重要参考。

## 参考文献:

- [1] 李静, 余意, 郭兰萍, 等. 枸杞子品质区划研究[J]. 中国中药杂志, 2019, 44(6): 1156–1163.
- [2] 卢有媛, 郭盛, 张芳, 等. 枸杞属药用植物资源系统利用与产业化开发[J]. 中国现代中药, 2019, 21(1): 29–36.
- [3] 纳小凡, 郑国旗, 邢正操, 等. 连作对再植枸杞根际细菌群落多样性和群落结构的影响[J]. 土壤学报, 2017, 54(5): 1280–1292.
- [4] 纳小凡, 郑国琦, 彭励, 等. 不同种植年限宁夏枸杞根际微生物多样性变化[J]. 土壤学报, 2016, 53(1): 241–252.
- [5] 徐常青, 刘赛, 徐荣, 等. 我国枸杞主产区生产现状调研及建议[J]. 中国中药杂志, 2014, 39(11): 1979–1984.
- [6] 黄菊, 李耿, 张霄潇, 等. 新时期下中医药产业发展的有关思考[J]. 中国中药杂志, 2022, 47(17): 4799–4813.
- [7] 王红阳, 康传志, 张文晋, 等. 中药生态农业发展的土地利用策略[J]. 中国中药杂志, 2020, 45(9): 1990–1995.
- [8] 徐鹏. 建立健全枸杞产业标准体系[N]. 法治日报, 2025-01-26(7).
- [9] 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.
- [10] Tsoar A, Allouche O, Steinitz O, et al. A comparative evaluation of presence-only methods for modelling species distribution[J]. Diversity and Distributions, 2007, 13(4): 397–405.
- [11] 唐燕, 赵儒楠, 任钢, 等. 基于 MaxEnt 模型的中华枸杞潜在分布预测及其重要影响因子分析[J]. 北京林业大学学报, 2021, 43(6): 23–32.
- [12] 孙莉, 王山, 王正元, 等. 基于最大熵模型的枸杞生态适宜区预测[J]. 宁夏大学学报(自然科学版), 2018, 39(2): 143–147.
- [13] 申卓龙, 李捷, 何静, 等. 基于 MaxEnt 模型的宁夏枸杞潜在分布区预测[J]. 中国野生植物资源, 2023, 42(11): 101–107, 112.
- [14] 廖健, 李懿扬, 张水源, 等. 基于 MaxEnt 模型的中国鲎与圆尾鲎潜在栖息地评估与生态位特征分析[J]. 海洋与湖沼, 2025, 56(1): 175–185.
- [15] 王哲, 李波, 姜大成, 等. 基于 MaxEnt 模型和 GIS 技术的吉林省玉竹主导环境因子与生态适宜性区划研究[J]. 时珍国医国药, 2018, 29(9): 2250–2253.
- [16] 王健, 曾丹丹, 樊凯, 等. 气候变化背景下基于最大熵模型(MaxEnt)预测黄连的适生区分布[J]. 植物学研究, 2018(1): 7–14.
- [17] 雷玉红, 王发科, 颜亮东. 格尔木地区枸杞生长发育的气象条件及管理措施[J]. 青海草业, 2018, 27(3): 49–54.
- [18] 赵泽芳, 卫海燕, 郭彦龙, 等. 黑果枸杞(*Lycium ruthenicum*)分布对气候变化的响应及其种植适宜性[J]. 中国沙漠, 2017, 37(5): 902–909.
- [19] 雷淑琴, 金生仁, 常佳, 等. 甘肃省玉门市枸杞气候适宜性分析[J]. 中南农业科技, 2023(3): 118–121, 136.
- [20] 林丽, 晋玲, 王振恒, 等. 气候变化背景下藏药黑果枸杞的潜在适生区分布预测[J]. 中国中药杂志, 2017, 42(14): 2659–2669.
- [21] 李剑萍, 张学艺, 刘静. 枸杞外观品质与气象条件的关系[J]. 气象, 2004, 30(4): 51–54.
- [22] 陈珺, 沈富荣, 刘静. 枸杞气象研究进展[J]. 宁夏农林科技, 2009, 50(6): 76–79.
- [23] 潘晓华, 石庆华, 郭进耀, 等. 无机磷对植物叶片光合作用的影响及其机理的研究进展[J]. 植物营养与肥料学报, 1997, 3(3): 201–208.
- [24] 卢九斤, 华明秀, 盛海彦, 等. 磷肥用量对柴达木枸杞磷累积量及土壤有效磷含量的影响[J]. 西北农业学报, 2022, 31(4): 457–467.
- [25] Liang X J, An W, Li Y K, et al. Effects of different nitrogen application rates on root growth and distribution of fine root length across diameter classes of wolfberry (*Lycium barbarum* L.)[J]. Forests, 2023, 14(12): 2317.
- [26] 王钰皓, 庞津雯, 卫婷, 等. 旱作农田覆膜和秸秆碳投入对土壤团聚特性及作物产量的影响[J]. 土壤学报, 2024, 61(1): 272–284.
- [27] 王杰, 任少聪, 魏玉杰, 等. 不同土地利用方式砖红壤团聚体水稳定性及其对前期含水率的响应[J]. 土壤学报, 2024, 61(4): 978–988.
- [28] Wu R J, Liu B Q, Xue B, et al. Changes in soil organic carbon and nutrient pools in aggregate-sized fractions along a chronosequence of wolfberry (*Lycium barbarum* L.) plantations in arid areas of Northwest China[J]. Soil Use and Management, 2023, 39(3): 1109–1124.
- [29] 刘亦涵, 王浩天, 甄志磊, 等. 基于 RUSLE 模型的黄河流域山西段土壤侵蚀变化与驱动因子[J]. 土壤, 2025, 57(2): 452–460.
- [30] 洪云鹏, 陈沂岭, 苏燕燕, 等. 宁夏枸杞种植适宜性区划[J]. 土壤, 2024, 56(5): 1091–1100.