

气候变化与人类活动对盐生植被的影响—以柽柳为例

郭富印^{1,2,3}, 刘晓煌^{1,3,*}, 赵晓峰^{1,3}, 祖皮艳木·买买提², 王玉刚⁴, 林涛⁵, 赵传燕⁶,

邢莉圆^{1,3}, 王然^{1,3}, 赵宏慧^{1,3}, 王超^{1,3}, 周致冻^{1,7}, 许一波^{1,8}

(1.自然资源要素耦合过程与效应重点实验室, 北京 100055; 2.新疆大学地理与遥感科学学院, 新疆乌鲁木齐 830017; 3.中国地质调查局自然资源综合调查指挥中心, 北京 100055; 4.中国科学院新疆生态与地理研究所, 荒漠与绿洲生态国家重点实验室, 新疆乌鲁木齐 830011; 5.新疆维吾尔自治区国土综合整治中心, 新疆乌鲁木齐 830002; 6.兰州大学草地农业科技学院, 甘肃兰州 730020; 7.海南大学生态学院, 海南海口 570228; 8.中国地质大学(北京)经济管理学院, 北京 100083)

摘要: 【研究目的】中国盐渍土分布广、成因复杂, 深刻影响着区域生态系统的可持续发展, 气候变化和人类活动进一步加剧了盐渍化区域生态系统的不确定性, 因此, 研究气候变化和人类活动影响下典型盐生植被的分布特征, 探索其潜在分布区对维护盐渍化区域生态安全至关重要。【研究方法】本研究以典型盐生植被柽柳为例, 综合地理信息系统、遥感、物种分布模型和生态位模型等理论与技术, 基于 ENMeval 包建立优化的 MaxEnt 模型, 采用 371 条分布记录和 13 个环境变量模拟柽柳现代与未来不同气候情景潜在分布区, 综合环境因子变量贡献度、刀切法评估制约现代柽柳潜在地理分布的重要因子, 定量评估柽柳受威胁潜在地理分布区域和面积。【研究结果】结果表明: (1)RM = 1.5 和 FC = LQHPT 是最优模型参数, AUC 平均值为 0.906±0.005, 模型预测结果可信度高, 环境因子影响下的现代柽柳潜在适生区的面积为 32.69×10⁵ km², 人类活动影响下适生区面积 28.48×10⁵ km²。(2)柽柳现代高度适生区集中分布在新疆、甘肃东北部、内蒙古西部、宁夏北部、北京东南部、天津、河北东部和山东北部。年平均气温、气温季节性变动系数、碱化度、距河流距离、年均日照时数是制约柽柳分布的主要环境因子。(3)柽柳各个时期的地理分布范围存在差异, 未来气候情景下柽柳分布的平均中心向东南移动, 新疆、甘肃、内蒙古西部、青海北部、河北西部和山东北部是柽柳的稳定适生区。【结论】随着全球变暖的加剧, 人类活动持续增强, 本研究对应对未来多种气候情景下的柽柳保护具有借鉴意义。

关键词: 柽柳; MaxEnt; 未来气候; 地理分布; 潜在适生区; 地质调查工程

创新点: (1) 研究使用 ENMeval 包优化了 MaxEnt 模型, 降低了模型的过拟合, 提高了模型精度; (2) 研究构建现代人类活动影响和无人人类活动影响两个模型探索柽柳分布特征; (3) 模拟四种气候情景下柽柳 2030—2070 年柽柳空间分布格局, 分析其分布中心变化和发展趋势。

Impacts of climate change and human activities on saline vegetation-an example of *Tamarix chinensis*

GUO Fuyin^{1,2,3}, LIU Xiaohuang^{1,3,*}, ZHAOXiaofeng^{1,3}, Zulpiya-Mamat², WANG Yugang⁴, LIN Tao⁵, ZHAO Chuanyan⁶, XING Liyuan^{1,3}, WANG Ran^{1,3}, ZHAO Honghui^{1,3}, WANG Chao^{1,3}, ZHOU Zhiluo^{1,7}, XU Yibo^{1,8}

(1. Key Laboratory of Natural Resource Coupling Process and Effects, Beijing 100055, China; 2. College of Geography and Remote Sensing Science, Xinjiang University, Urumqi 830017, Xinjiang, China; 3. Natural Resources Comprehensive Survey Command Center, China Geological Survey, Beijing 100055, China; 4. State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, Xinjiang, China; 5. Xinjiang Land

基金项目: “基于地表基质的新疆自然资源适宜性评价与应用研究”项目 (LTSJ-ZFCG-2024-021); 中国地质调查局自然资源综合调查指挥中心科技创新基金 (KC20230003); Technology Innovation Center for Ecological Monitoring and Restoration of Desert-Oasis, MNR(2023KFKTA001); “塔里木河源区典型区域野外观测监测数据采集与分析服务—新疆自然资源监测预警体系构建试点研究”项目 (地方横向); “典型地貌-地质-生态系统基础地质填图技术方法探索与研究”项目 (地方横向);

作者简介: 郭富印, 男, 硕士研究生, 1997 年出生, 主要从事地理信息和生态遥感方向研究。Email: yinfunan@163.com。

通信作者: 刘晓煌, 男, 正高级工程师, 1972 年出生, 新疆维吾尔自治区“天池英才”引进计划人才, 主要从事自然资源观测研究。Email: liuxh19972004@163.com。

Consolidation and Rehabilitation, Unmqi 830002, Xinjiang China; 6. College Of Pastoral Agriculture Science And Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730020, Gansu, China; 7. College of Ecology, Hainan University, Haikou 570228, Hainan, China; 8. School of Economics and Management, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: This paper is the result of geological survey engineering.

[Objective] The widely distributed and complex genesis of saline soils in China deeply affects the sustainable development of regional ecosystems. Climate change and human activities exacerbate the ecological uncertainty of saline ecosystems in these regions. It is crucial to characterize the distribution of saline vegetation affected by climate change and human activities and explore potential distribution areas to maintain the ecological security of saline regions. **[Methods]** In this study, the ecological niche model of *T. chinensis*, a typical saline vegetation, was established using the MaxEnt model optimized by the ENMeval package. Based on 371 *T. chinensis* distribution data and 13 environmental variables, the potential distribution areas of *T. chinensis* in different climate scenarios in the present and future were simulated. The key factors constraining the potential geographic distribution of *T. chinensis* in the present era were assessed through the contribution of variables and the Jackknife test. Ultimately, a quantitative assessment of the potential area and size at risk of *T. chinensis* was conducted. **[Results]** The results show that: (1) $RM = 1.5$ and $FC = LQHPT$ are the optimal model parameters. The average value of AUC is 0.906 ± 0.005 , and the model prediction results have high credibility. The potentially suitable area of modern *T. chinensis* under the influence of environmental factors is $32.69 \times 105 \text{ km}^2$, and the suitable area under the influence of human activities is $28.48 \times 105 \text{ km}^2$. (2) The modern highly suitable area for *T. chinensis* is concentrated in Xinjiang, northeastern Gansu, western Inner Mongolia, northern Ningxia, southeast Beijing, Tianjin, eastern Hebei, and northern Shandong. Mean annual temperature, coefficient of seasonal variation of temperature, alkalinity, distance from rivers, and average annual sunshine hours are the main environmental factors governing the distribution of *T. chinensis*. (3) Geographic range of tamarisk varies with time. The mean center of *T. chinensis* distribution under the future climate scenario moves towards southeastward, and Xinjiang, Gansu, western Inner Mongolia, northern Qinghai, western Hebei, and northern Shandong are stable and suitable areas for *T. chinensis*. **[Conclusion]** As global warming intensifies and human activities continue to increase, this study is relevant to the conservation of *T. chinensis* under various climate scenarios in the future.

Key words: *Tamarix chinensis* Lour.; MaxEnt; future climate; geographic distribution; potential habitat areas; geological survey engineering

Highlights: (1) The study optimized the MaxEnt model using ENMeval package, which reduced the overfitting of the model and improved the model accuracy; (2) The study constructed two models to explore the distribution characteristics of tamarisk under modern anthropogenic impacts and no anthropogenic impacts; (3) Simulated the spatial distribution pattern of tamarisk under four climate scenarios in the period of 2030-2070, and analyzed its distribution center changes and development trend.

About the first author: Guo Fuyin, male, master's degree student, born in 1997, mainly engaged in the research of geographic information and ecological remote sensing. Email: yinfunan@163.com.

About the corresponding author: Liu Xiaohuang, male, Senior Engineer, born in 1972, is mainly engaged in the research of natural resources observation under the "Tianchi Talent" introduction program of Xinjiang Uygur Autonomous Region. Email: liuxh19972004@163.com.

Fund support: Project "Evaluation of Natural Resource Suitability and Application Research in Xinjiang Based on Surface Matrix" (LTSJ-ZFCG-2024-021); Science and Technology Innovation Fund of the Integrated Natural Resources Survey Command Center of the China Geological Survey (KC20230003); Technology Innovation Center for Ecological Monitoring and Restoration of Desert-Oasis, MNR (2023KFKTA001); "Field Observation and Monitoring Data Acquisition and Analysis Service for Typical Areas in the Tarim River Headwaters Area - Xinjiang Pilot Study on the Construction of Natural Resources Monitoring and Early Warning System" (local horizontal); "Exploration and Research on Technical Methods of Basic Geological Mapping of Typical Landforms, Geology and Ecosystems" (local horizontal);

1 引言

受全球变暖、区域性气候变化与人类活动的交互影响,世界盐渍化土地面积以每年 10% 的速度增加(潘晶等, 2018; Liu et al., 2023), 区域生态安全和可持续发展受到巨大挑战(陈武迪等, 袁江龙等)。近年生物学特别是分子生物学的发展促进了盐渍化生物改良方法的发展(杨劲松等, 2022), 种植盐生植物, 作为盐碱地改良、开发利用的可持续途径, 受到国内外专家学者广泛关注(Zhou et al., 2021, Jianrong et al., 2022)。对典型盐生植物的生境适生区研究有利于为适生区的盐渍化治理提供参考。柽柳是少数广泛分布于干旱半干旱盐渍区的本土灌木树种之一, 常见于河畔、海滨、沙地、盐碱地区域, 被认为是盐渍土植被恢复的优良盐生植物, 同时是中国“南红北柳”生态工程的重要组成部分(Qixin et al., 2022)。柽柳具有较强的抗盐、抗旱特性, 在维持盐碱地生态系统稳定方面发挥着关键作用(Yang et al., 2021)。因此, 在区域土壤盐渍化加剧的背景下, 探索柽柳适生区的分布格局, 将有助于制定优势盐生植被的保护策略及种质资源的保存计划, 改良盐渍化土壤, 维持人类赖以生存的生态环境安全。

气候变化和人类活动是全球变化的两个重要方面, 对生物多样性和生态系统可持续性产生重大影响(付宇佳等, 2022; 朱帅等, 2023)。随着全球变暖的加剧, 气候变化对物种分布产生了非常显著的影响, 物候、栖息地分布、种间关系和范围的变化使生物多样性面临巨大风险(Pecl et al., 2017, Sun et al., 2022)。同时, 随着人类社会的发展, 人类活动范围、方式和强度的不同造就了不同的土地利用格局, 这些用地类型不同程度上对物种原有生存环境分割, 对物种的空间分布和多样性产生直接影响(Boivin et al., 2016)。人类活动导致生物资源被过度利用, 进而导致物种生存环境恶化, 适宜栖息地缩小和破碎, 使得物种结构和分布格局发生了变化(Xiong et al., 2023, Ye et al., 2022)。基于以上问题, 研究气候变化和人类活动对物种地理分布格局的影响, 有利于制定科学有效的保护措施。

生态位模型(Ecological Niche Models, ENM)是利用特定算法通过物种的实际范围和环境变量来分析物种实际分布区域和潜在地理位置的模型(Sillero et al., 2021)。近年来越来越多的生态位模型被应用于物种分布研究, 以估计环境和气候变化对物种的影响。其中最大熵(MaxEnt)模型的预测结果准确度较高, 仅利用少量数据和环境变量即可获得较准确的物种分布预测, 并在近些年的实践中被证明具有较好的效果(Ahmadi et al., 2023)。因此, 本研究以柽柳为研究对象, 基于 MaxEnt 模型探讨气候变化和人类活动对柽柳栖息地分布的影响。具体目标是: (1)比较有人类干扰和无人干扰的情况下柽柳栖息地分布的差异; (2)探索未来多种气候情景下柽柳栖息地分布格局的变化; (3)明确柽柳的空间分布格局的发展趋势。本研究结果将有助于进一步解释柽柳在我国的分布特征和发展趋势, 也将为柽柳保护提供一定科学依据。

2 材料与方法

2.1 物种分布数据

2.1.1 物种位置信息获取与预处理

查阅相关文献, 搜集柽柳分布记录 118 条(方欧娅等, 2017; 张道远等, 2003; 韩福贵等, 2022; 朱绪超等, 2015; 杨维康等, 2002; 张华等, 2014; 张更权, 2018); 检索全球物种多样性信息库(<https://www.gbif.org>)、国家标本平台(<http://www.nsii.org.cn>)、中国数字植物标本馆

(<https://www.cvh.ac.cn>)、中国自然标本馆(<https://cfh.ac.cn>)共搜集柽柳记录 400 条, 合计 518 条。对于缺乏精确的地理坐标记录的标本, 本研究依据标本记录的位置信息结合谷歌地球确定标本经度和纬度, 去除描述不够具体和经纬度重复的分布点。通过空间稀疏方法删选密集分布的点位以降低样点间的空间自相关性, 并删除 1980 年之前的记录点, 最终得到有效样本 371 个(图 1)。

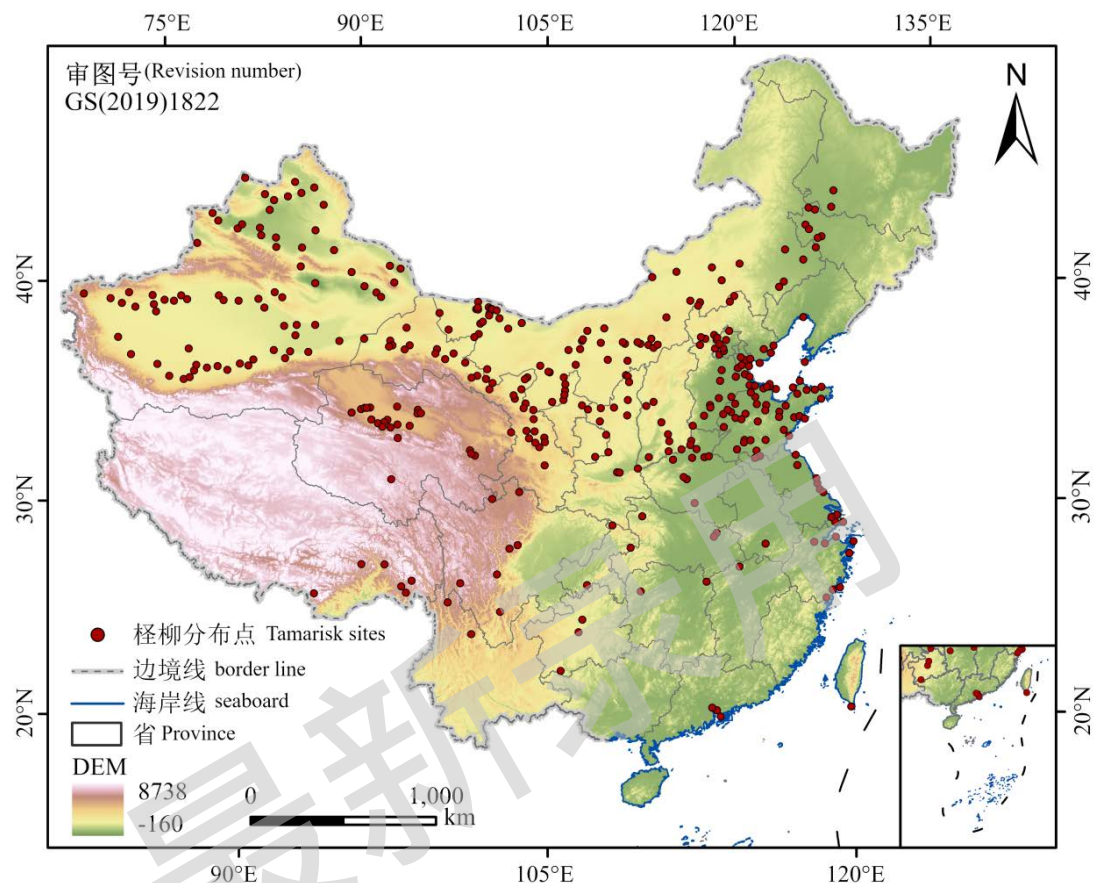


图 1 筛选后的柽柳分布记录

Fig.1 Distribution records of screened *T. chinensis*

2.1.2 数据来源与筛选

本研究选择了可能影响柽柳分布的 26 个环境变量, 包括生物气候、土壤、地形、日照时数和人类足迹数据。生物气候数据高程数据来自 WorldClim 数据集 2.1 版(<https://worldclim.org/>)(Fick and Hijmans, 2017), 未来生物气候数据来自 WorldClim 数据集的 BCC-CMS2-MR 全球环流模型(General Circulation Model; GCM), 研究使用 1970 年至 2000 年的年均生物气候数据代表现代生物气候数据, 选取 2030 年(2021-2040)、2050 年(2041-2060)和 2070 年(2061-2080)的四个共享社会经济路径(SSP)即 SSP126、SSP245、SSP370 和 SSP585 数据进行预测(Lepore et al., 2021), 4 种发展路径如表 1 所示, 生物气候数据空间分辨率为 2.5 弧分(赤道约 4.6 km), 包含气温和降水变化等 19 个数据。土壤数据和人类足迹数据从 Figshare 数据库中获取(<https://figshare.com/>)。中国的行政边界数据来自资源环境科学与数据中心 (<https://www.resdc.cn/>)。对于未来情景的预测, 研究假设未来的地形和土壤与现在相比不会发生明显变化。为了避免某些变量之间的自相关和多重共线性重复问题, 本文采用 Pearson 相关系数和刀切法来筛选变量(Xu et al., 2019)。选择相关系数 <0.8 的变量且对模型贡献度高的变量进行建模(Shi et al., 2023a), 筛选得到 13 个变量(表 2)。

表 1 SSP 四种排放情景内容

Table 1 Content of the four SSP emission scenarios

情景	路径	描述
SSP126	可持续路径	弱碳排放，减少全球变暖和气候变化的影响，有助于经济和社会的可持续发展
SSP245	中间路径	适度减排，代表着相对稳定的未来，有助于减少全球变暖和气候变化的影响
SSP370	区域竞争路径	中高排放，区域竞争增大，各国关注区域竞争问题。政策逐渐转向国家和地区安全问题
SSP585	化石燃料发展路径	高排放，代表着更加不稳定和不可持续的未来，可能导致更严重的气候变化和环境问题

SSP: 共享社会经济路径 Shared Socioeconomic Pathways, SSPs

表 2 模型变量

Table 2 Model variables

数据名称	数据描述	单位
Bio1	年平均温度	°C
Bio2	昼夜温差月均值	°C
Bio3	等温性	%
Bio4	气温季节性变动系数	-
Bio5	最暖月的最高温度	°C
Bio14	最干季水量	mm
Bio15	降水季节性(变异系数)	mm
DEM	地面高程数据	m
WD	河流矢量	km
ECe	饱和土壤浸提液电导率	MS/m
ESP	交换性钠百分比	%
SUN	年均日照时数	h
HF	人类足迹数据	-

Bio: 生物气候 Bioclimatic

2.2 模型分析

选定变量采用最邻近法进行重采样，统一变量空间分辨率为 4.6 km。本研究构建三种模型来探讨环境变化和人类干扰对桤柳分布格局的影响：模型 A：当前气候情景下环境变量(生物气候+土壤+地形+年日照时数)的预测；模型 B：当前气候情景下环境变量(生物气候+土壤+地形+年日照时数)+人类足迹的预测；模型 C：未来气候情景下环境变量(未来生物气候+土壤+地形)的预测。其中，模型 A 和模型 B 均基于当前气候模型预测，模型 C 基于未来气候模型预测。模型 A 和 B 比较分析人类活动对桤柳适生区的影响，模型 A 和 C 比较分析气候变化对桤柳适生区的影响。我们使用 75% 的桤柳分布点作为训练数据，25% 作为测试数据来创建模型。为了避免模型运行时发生过拟合，使用 Rv4.3.1 中的 ENMeval 数据包优化 MaxEnt 模型，将调控倍频(RM)设置为 0.5—6，每次运行增量为 0.5，一共 12 组调控倍频；依据 MaxEnt 模型提供的 5 种特征，分别是线性特征(L)，二次型特征(Q)，片段化特征(H)，乘积型特征(P)，阈值性特征(T)，采用 5 种特征组合(FC)，分别是 L、LQ、LQH、LQHP、LQHPT，一共设置 60 组特征参数来优化 MaxEnt 模型(Xu et al., 2024)，最终选择 $\Delta AICc = 0$ ($AICc$ 为小样本校正的赤池信息量准则)，即最佳参数组合进行 MaxEnt 建模。在 MaxEnt 模型中进行 10 次运行，使用折刀法检测每个变量的重要性(Li et al., 2023)，并生成响应曲线。

参考相关专家知识、将桤柳栖息地适应的适宜性结果分为四组(Yang et al., 2022), 即不适宜 (<0.2)、低适宜栖息地(0.2-0.4)、中等适宜栖息地(0.4-0.6)和高度适宜栖息地(0.6-1)。

2.3 模型评估与验证

受试者工作特征(ROC)曲线是评估潜在物种分布模型的重要方法之一(Zhao et al., 2022)。曲线下面积(AUC)范围为 0 到 1, 用于评估模型的预测性能。ROC 曲线与横轴覆盖的面积越大, 表明模型的预测能力越强(Shi et al., 2023b)。AUC 水平的评价标准包括: 无意义($0 < AUC \leq 0.5$)、差($0.5 < AUC \leq 0.7$)、中等($0.7 < AUC \leq 0.8$)、良($0.8 < AUC \leq 0.9$)、优秀($0.9 < AUC \leq 1$)。

2.4 物种适生区空间格局变化

本研究采用适宜性逻辑阈值来划分潜在适生区(张殷波等, 2019)。具体而言, 我们将逻辑值大于 40% 的区域视为潜在适生区, 用“1”表示; 将逻辑值小于 40% 的区域视为非适生区, 用“0”表示(叶兴状等, 2021)。根据这一划分, 我们得到了各个时期的适生/非适生二值图, 其中定义如下: 0—0 为不适生区、0—1 为新增适生区、1—0 为丧失适生区、1—1 为保留适生区。在此基础上, 我们计算了中高适生区桤柳适生区在不同气候情景下相对于现代(模型 A)的变化。运用 SDMtoolbox 工具箱计算了不同时期潜在适生区的几何中心位置变化, 并比较了不同时期桤柳核心适生区总体变迁趋势, 以反映不同时期环境变化对其分布的影响。

3 结果与分析

3.1 模型优化结果及准确性评价

本研究基于 371 个桤柳分布点和 13 个生态环境因子对桤柳适宜区进行预测, 在此过程中, 使用空间稀疏工具降低数据的空间自相关, 通过 ENMeval 包筛选最优特征组合和调控倍频。由表 3 可知, 当模型为默认参数, 即 $RM = 1$, $FC = LQHPT$ 时, $Dealt.AICc = 34.29$, 当 $RM = 1.5$, $FC = LQHPT$ 时, $Dealt.AICc = 0$, 与默认参数相比, $Avg.diff.AUC$ 下降了约 28.57%, 这表明模型优化后降低了建模过程的复杂性和过拟合程度, 模型精度有所提高。参数优化后得到的 AUC 平均值为 0.906 ± 0.005 , 表明模型预测结果可信度高。

表 3 MaxEnt 模型 Enmeval 优化评价指标

Table3 MaxEnt model Enmeval optimization evaluation metrics

参数设置	特征组合	调控倍频	最小信息准则 AICc	Dealt.AICc	训练集 AUC 与测试集 AUC 差值 avg.diff.AUC
默认	LQHPT	1	34.29		0.037
优化	LQHPT	1.5	0		0.026

3.2 当前气候和人为干扰下桤柳的栖息地预测

相关研究用累计贡献度筛选影响物种潜在栖息地的主要变量(Jones et al., 2019), 本研究选择当变量的累计贡献>85%时的变量为主要变量(Xu et al., 2024)。MaxEnt 模型预测结果表明, 环境变量影响下(模型 A), 影响柽柳潜在地理分布的主要变量为 Bio1(38.3%)、Bio4(16.8%)、ESP(9.4%)、距河流距离(7.6%)、Bio5(7%)、ECe(6.1%)、SUN(6.1%), 累计贡献为 85.2%。人类活动影响下(模型 B), 影响柽柳潜在地理分布的主要变量是 Bio1(37.1%), Bio4(13.4%), 距河流距离(10.5%), ESP(9.7%)、人类足迹(5.4%)和 Bio5(5.4%), 累计贡献为 87.6%。贡献度大于 5%且在加入人类活动后变化率较大的变量是 Bio4(减少 3.4%)、距河流距离(增加 2.9%)、ECe(减少 2.9%)、Bio5(减少 1.6%)和 Bio2(减少 1.2%), 这表明人类活动通过对温度、距河流距离、土壤盐度的作用间接影响了柽柳的生境, 值得关注是人类活动影响下, 距河流距离对柽柳生境影响力增加(图 2)。

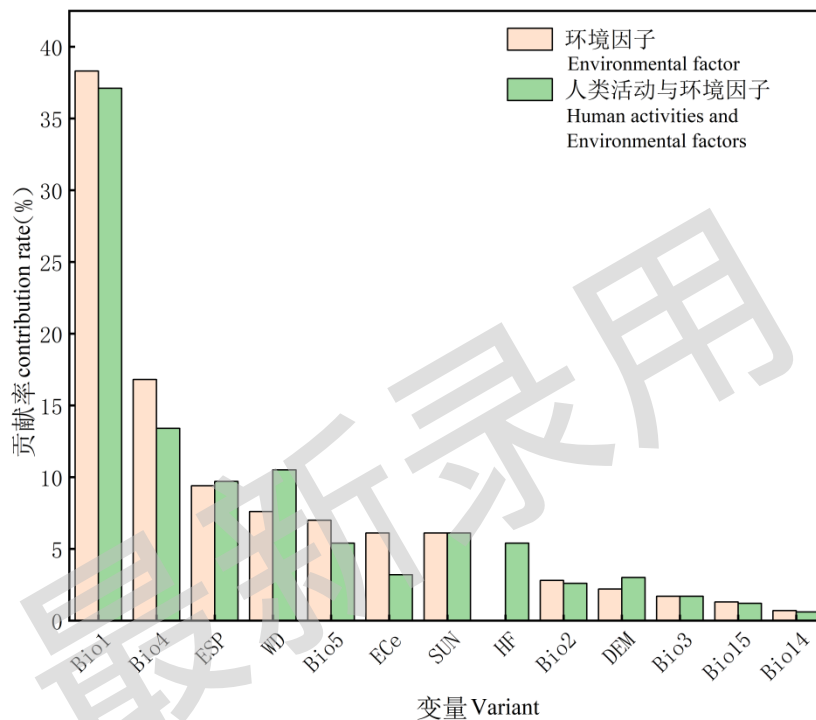


图 2 MaxEnt 模型中变量的贡献度: A(绿色)代表环境变量的贡献度, B(橙色)代表人类活动影响下变量的贡献度

Fig.2 Contribution of variables in the MaxEnt model: A (green) represents the contribution of environmental variables, B (orange) represents the contribution of variables under the influence of human activities

利用 MaxEnt 模型预测有人类活动干扰和无人类活动干扰情况下柽柳的分布面积(图 3), 并分级得到各等级适生区面积(表 4)。现行气候模式下, 仅环境因子影响下, 我国柽柳的适宜栖息地总面积为 $32.69 \times 10^5 \text{ km}^2$, 分布在新疆、青海、甘肃、宁夏、内蒙古、北京、河北、天津、山东等地(图 3A)。高度适生区面积为 $3.82 \times 10^5 \text{ km}^2$, 分布在新疆南部、河北东部、山东西北部。中等适生区面积 $10.20 \times 10^5 \text{ km}^2$, 分布在新疆南部、甘肃西北部、内蒙古西部和中部、天津西南部和山东东北部。低度适生区面积为 $18.67 \times 10^5 \text{ km}^2$, 除中高适生区边缘外, 分布于新疆北部、青海西北部、陕西北部、河南北部、河北北部、内蒙古中南部和东部、吉林西部、山西、江苏、辽宁等地。在人类活动影响下, 我国柽柳总适生区面积为 $28.90 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。与仅受环境因素影响相比, 人类活动影响下柽柳的适生区面积总量减少了 $3.79 \times 10^5 \text{ km}^2$, 且各级适生区面积均减少(图 3B): 高适生区减少 $0.50 \times 10^5 \text{ km}^2$, 主要集中在新疆南部地区; 中等适生区面积减少 $2.11 \times 10^5 \text{ km}^2$, 主要分布在新疆南部、内蒙古中南部、甘肃中部、宁夏、河北中南部和山东等地。低适生区面积减少 $1.10 \times 10^5 \text{ km}^2$, 主要分布在新

疆东部、甘肃东北部、山西东北部、江苏东北部等地区。然而，在人类活动影响下，宁夏北部和甘肃南部的高度适生区面积有所增加。

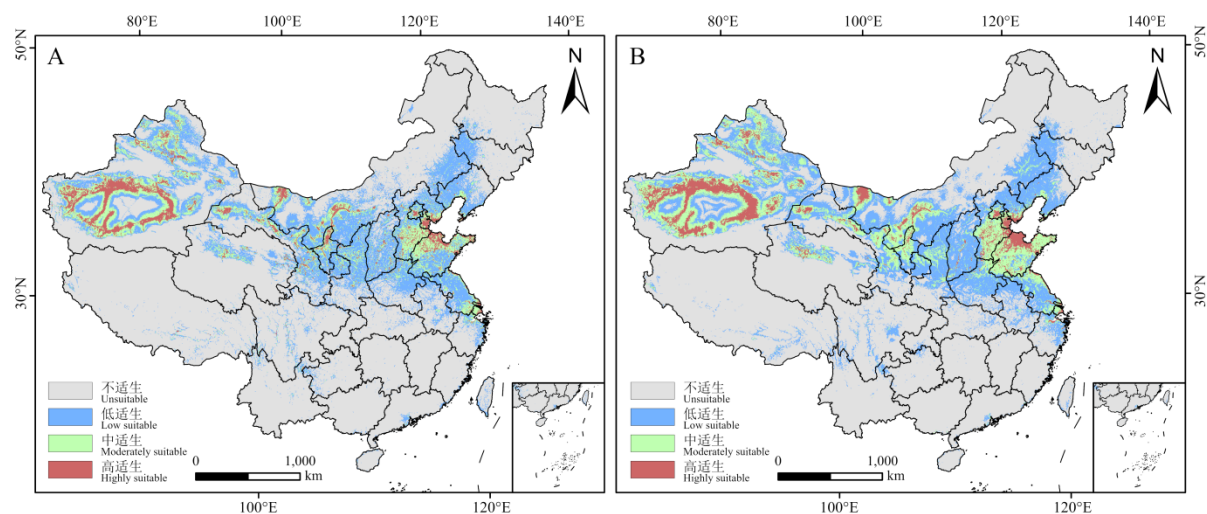


图 3 现代气候模式下有(A)和无(B)人类活动干扰的柽柳适生区分布

Fig.3 Distribution of *T. chinensis* suitability zones with (A) and without (B) anthropogenic disturbance under modern climate models

表 4 人类活动干扰与无人人类活动干扰情况下柽柳适生区面积/($\times 10^5 \text{ km}^2$)

Table 4 Area of suitable habitat for *T. chinensis* with and without anthropogenic disturbance

人类活动	高适生区	中适生区	低适生区	不适生区
有人类活动	3.32	8.10	17.57	67.01
无人人类活动	3.82	10.20	18.67	63.31

3.3 不同气候变化情景下柽柳空间分布格局的变化

未来气候情景下，柽柳适生区与当前气候下柽柳的适生区基本一致(图 4)，适生区分布在新疆、甘肃、宁夏、内蒙古、河北、北京、天津、山东、青海等地。未来不同气候情景下，柽柳高度和中等适生区主要分布在新疆南部、甘肃东北部、内蒙古西部、天津东部、河北西南部、山东北部，低适生区分布在新疆南部和东北部、青海西北部、陕西北部、河南北部、河北北部、内蒙古中南部和东部、吉林西部、山西、江苏和辽宁等地。

当前气候模式下柽柳栖息地面积百分比分析表明(图 5)，随着时间的推移，SSP126 气候情景下柽柳高适生区面积呈现减小趋势、SSP245 气候情景下柽柳高适生区面积呈现先减小后增大趋势、SSP370 和 SSP585 两种气候情景下柽柳高适生区面积呈现增大趋势。其中，SSP126 途径下高适生区面积变化率最为明显，SSP585 途径次之，而 SSP245 途径下变化相对平稳。4 种气候模式下柽柳高适生区面积变化率最大值为 0.65%，最小值为 0.27%，这表明在不同 CO_2 浓度排放水平下，柽柳高适生区面积变化存在差异。预测的柽柳适生区面积与当前气候情景下柽柳的适生区面积差异也较小。当前气候情景下柽柳中高适生区总面积为 $14.02 \times 10^5 \text{ km}^2$ ，占柽柳适生区总面积的 42.88%，预测气候情景下柽柳中高适生区面积范围为 $11.76 \times 10^5 \text{ km}^2$ — $13.54 \times 10^5 \text{ km}^2$ ，其中 C6 模型(SSP245-2070)预测的柽柳适生区面积最大，C10 模型(SSP585-2030)预测的柽柳适生区面积最小，C12 模型(SSP585-2070)与 A 模型预测结果差异最大，C8 模型(SSP370-2070)的预测结果最接近 A 模型。

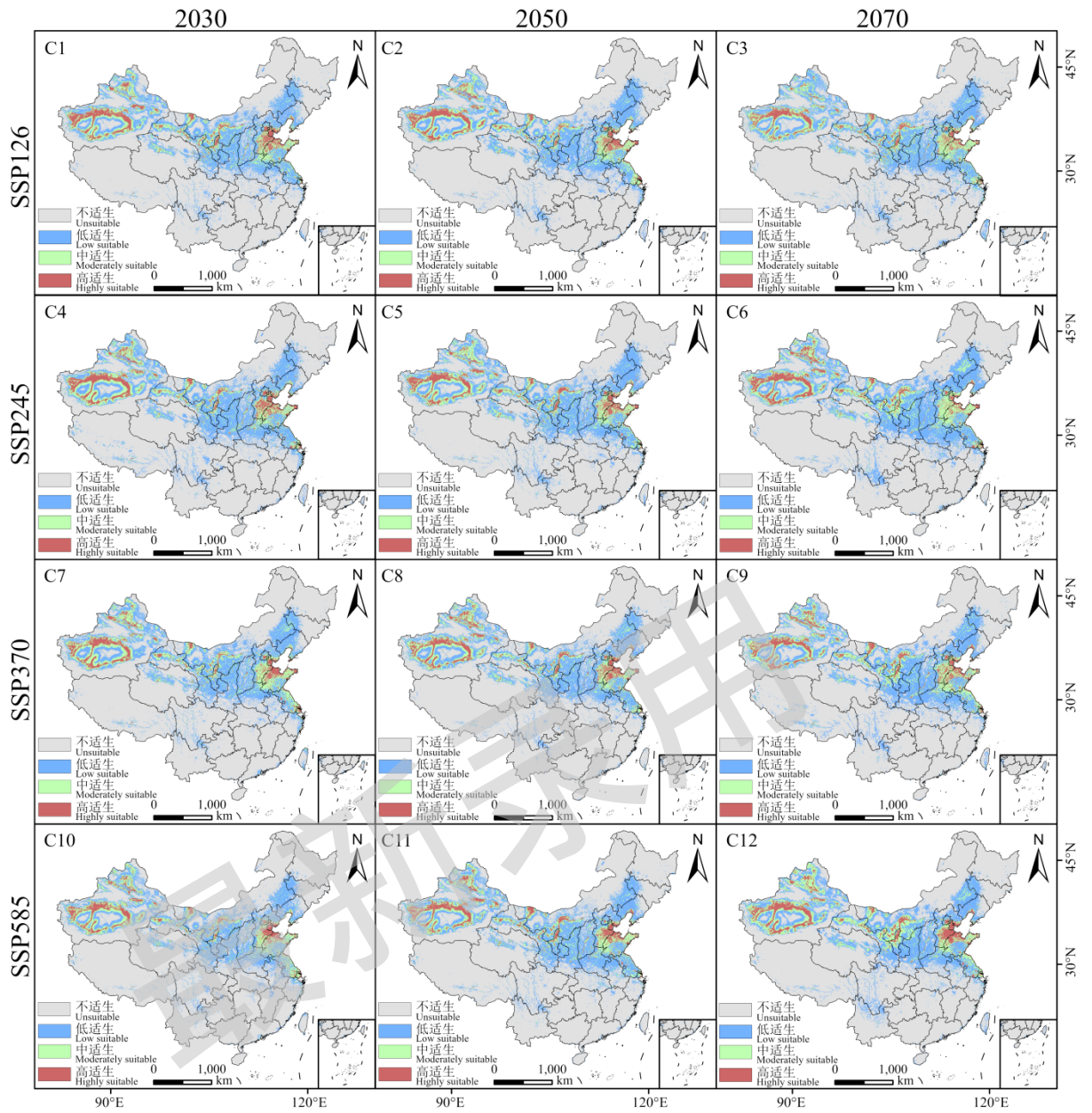


图4 未来不同气候情景下怪柳的潜在适生区

Fig.4 Potential suitable areas for *T. chinensis* under different future climate scenarios

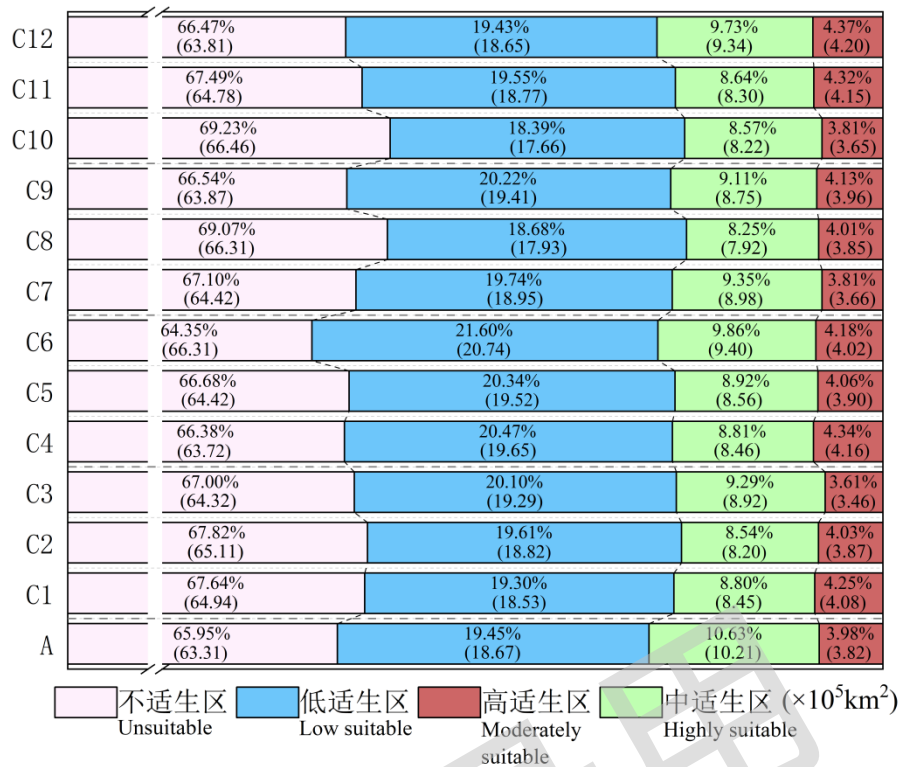


图5 不同气候变化情景下柽柳的适生区面积及其占比

Fig.5 Area and percentage of *T. chinensis*'s suitable habitat under different climate change scenarios

未来4种气候情境下柽柳适生区面积变化存在差异,结果如图6和表5所示,空间上,4种气候模式下,柽柳适生区的增加或减少的空间分布存在共性,即气候变化会导致河北北部、山东西南、江苏沿海、内蒙古南部、新疆北部、甘肃中部和宁夏北部的柽柳适生区面积增加,而新疆南部、青海西北部、陕西北部和江苏南部地区适生区面积减少。不同气候模式柽柳适生区面积增减量均值方面存在差异,相对于柽柳现有适生区(模型A),SSP126气候情景下柽柳适生区扩张面积最小,为 $2.17 \times 10^5 \text{ km}^2$;SSP245气候情景下柽柳适生区扩张面积最大,为 $2.67 \times 10^5 \text{ km}^2$;SSP245气候情景下柽柳适生区收缩面积最小,为 $1.23 \times 10^5 \text{ km}^2$,SSP370气候情景下柽柳适生区收缩面积最大,为 $1.58 \times 10^5 \text{ km}^2$;SSP370气候情景下柽柳适生区不变区域面积最小,为 $9.83 \times 10^5 \text{ km}^2$,SSP245气候情景下柽柳适生区不变区域面积最大,为 $10.18 \times 10^5 \text{ km}^2$,适当减排的经济发展路径有利于柽柳的生存与自然保护。时间上,相对于柽柳现有适生区(模型A),SSP126气候情景下柽柳适生区扩张区域面积变化最小,为 $0.34 \times 10^5 \text{ km}^2$,SSP580气候情景下柽柳适生区扩张区域面积变化最大,为 $1.79 \times 10^5 \text{ km}^2$;SSP126气候情景下柽柳适生区收缩区域面积变化最小,为 $0.24 \times 10^5 \text{ km}^2$,SSP370气候情景下柽柳适生区收缩区域面积变化最大,为 $0.57 \times 10^5 \text{ km}^2$;SSP126气候情景下柽柳适生区不变区域面积变化最小,为 $0.24 \times 10^5 \text{ km}^2$,SSP370气候情景下柽柳适生区不变区域面积变化最大,为 $0.58 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。柽柳适生区面积变化在弱碳排放经济发展路径下最为稳定。

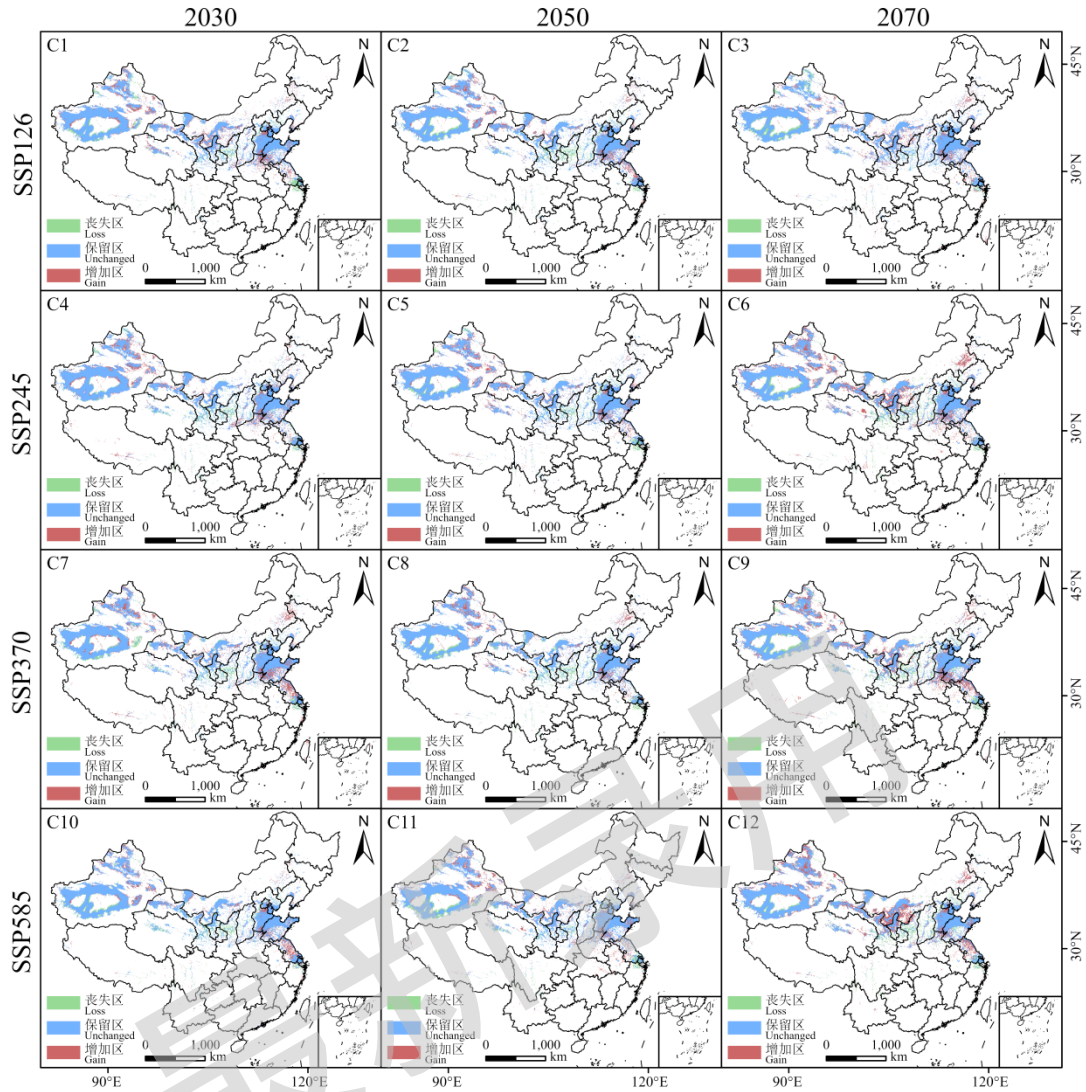


图 6 不同气候情境下柽柳适生区空间变换格局

Fig.6 Spatial transformation pattern of *T. chinensis* habitat under different climatic scenarios

表 5 不同气候条件下柽柳的空间变化/($\times 10^5$ km²)

Table 5 Spatial variation of *T. chinensis* under different climatic conditions

模型	气候模式	扩张	收缩	不变
C1	SSP126-2030	2.38	1.27	10.15
C2	SSP126-2050	2.04	1.39	10.03
C3	SSP126-2070	2.11	1.15	10.27
C4	SSP245-2030	2.28	1.07	10.34
C5	SSP245-2050	2.19	1.14	10.28
C6	SSP245-2070	3.55	1.48	9.93
C7	SSP370-2030	2.49	1.28	10.14
C8	SSP370-2050	1.96	1.61	9.81
C9	SSP370-2070	3.15	1.85	9.56
C10	SSP585-2030	1.84	1.38	10.35
C11	SSP585-2050	2.39	1.36	10.06
C12	SSP585-2070	3.63	1.51	9.91

3.4 桤柳潜在分布中心的转移

研究将桤柳潜在的中适生和高适生分布区以几何中心点来定义,以此方法来模拟在不同时期气候情景下桤柳适生区域的位置变化,利用 SDMtoolbox 的“质心变化”工具计算 2030 年代、2050 年代和 2070 年代四种共享社会经济路径下适宜栖息地相对于当前质心的质心变化,并检测了总体范围变化的趋势。结果表明,桤柳的分布中心位于银川西南部,四种共享社会经济路径下桤柳分布中心向东南迁移。

在 SSP126 和 SSP585 路径下,桤柳的潜在分布中心在水平梯度上呈现先向南方再向东方迁移的趋势;在 SSP245 和 SSP370 路径下,桤柳的分布中心在水平梯度上呈现向西南方向和东北方向波动,但总体向东南迁移的趋势。SSP245 和 SSP585 路径下存在垂直梯度向更高海拔移动的趋势(图 7)。当前气候情景下桤柳的分布中心位于银川市兴庆区西北角,坐标 38.44°N, 106.29°E, 海拔 309 m。在 SSP126 路径中,2030 年的分布中心坐标为 38.24°N, 106.29°E, 海拔 1111 m, 2050 年的分布中心坐标为 38.13°N, 106.35°E, 海拔 1122 m, 2070 年的分布中心坐标为 37.83°N, 106.48°E, 海拔 1320 m, 分布中心水平梯度向东南移动 89.30 km, 垂直梯度向更高海拔移动 209 m(图 7b)。在 SSP370 路径中,2030 年的分布中心坐标为 38.04°N, 东经 106.18°E, 海拔 1118 m; 2050 年的分布中心坐标为 38.50°N, 107.00°E, 海拔 1380 m; 2070 年分布中心坐标为 37.90°N, 107.44°E, 海拔 1304 m, 分布中心周围水平梯度向东南移动 149.09 km, 垂直梯度向高海拔地区移动 186 m(图 7d)。

在 SSP245 路径中,2030 年的分布中心坐标为 38.25°N, 106.64°E, 海拔 1278 m; 2050 年的分布中心坐标为 37.84°N, 105.89°E, 海拔 1188 m; 2070 年分布中心坐标为 37.42°N, 105.89°E, 海拔 1561m, 分布中心周围水平梯度向东南移动 210.47 km, 垂直梯度向高海拔地区移动 283 m(图 7c)。在 SSP585 路径中,2030 年的分布中心坐标为 37.86°N, 106.28°E, 海拔为 1118 m; 2050 年的分布中心坐标为 37.86°N, 106.76°E, 海拔为 1380 m, 2070 年分布中心坐标为 37.68°N, 107.98°E, 海拔 1304 m, 分布中心周围水平梯度向东南移动 216.71 km, 垂直梯度向高海拔地区移动 186 m(图 7e)。

4 讨论

4.1 模拟结果精度

MaxEnt 模型通常会保留一个随机子集进行数据建模,然后使用 AUC 值来评估模型的预测能力,虽然该方法能较好地检验预测结果的准确度,但是模型模拟结果受运算样点分布和参数设置的影响可能会产生过拟合等问题(Yackulic et al., 2013, 李苍柏等, 2020),首先,当训练数据和测试数据受到采样偏差的影响时,AUC 可能会高估模型的能力;其次,MaxEnt 模型是一个高度复杂的机器学习模型。在模拟物种潜在分布时,会导致模型过拟合,直接影响物种分布结果的实际精度(Merow et al., 2013)。尽管国内外一些学者基于 MaxEnt 模型开展了物种分布的预测研究并取得了较好的预测结果,但部分研究没有考虑 MaxEnt 建模过程中产生的过拟合问题,导致模型的泛化能力有限(Li et al., 2020)。模型的复杂度可以通过调整 MaxEnt 模型中的正则化乘数并使用 AICc 选择适当的特征组合来进行约束。本研究使用空间稀疏工具、Pearson 相关系数和 ENMeval 包来选择过拟合效应最小的最佳 MaxEnt 模型。结果表明,RM=1.5 和 FC=LQHTP 的过拟合程度最低,模型可信度提高。使用优化后的参数重建模型后,得到不同时期桤柳栖息地的预测,预测精度优于默认参数。

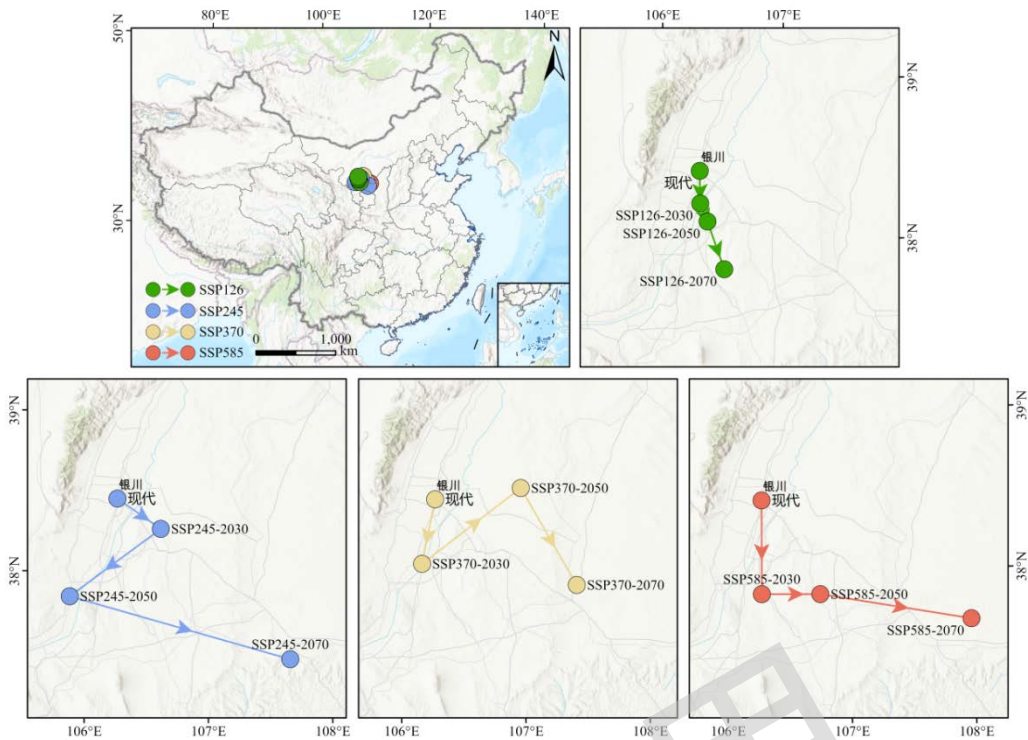


图 7 不同气候情景下柽柳适生区分布中心迁移位置

Fig.7 Location of the center of distribution of tamarisk fitness zone migration under different climate scenarios

4.2 主要影响因素分析

MaxEnt 模型预测结果表明气候变化和人类干扰下影响柽柳潜在地理分布的最重要变量是年平均气温(Bio1)、气温季节性变动系数(Bio4)、可交换钠百分比(ESP)、距河流距离、最热月份最高温度(Bio5)、饱和土壤浸提液电导率(ECe), 温度和可交换钠百分比是影响柽柳适宜生长环境的主要因素。虽然温度是影响柽柳适生区的最主要因素, 但本研究发现适宜碳排放情境下的柽柳适生区相对于中高碳排放增温下的柽柳适生区更稳定, 这表明持续增温可能会超过柽柳生长最适宜温度的阈值, 从而影响柽柳生长。人类活动是影响物种分布变化的重要因素, 对于不同类型的物种分布变化, 人类活动既有促进作用也有抑制作用(Zhang et al., 2022)。本研究表明, 人类活动干扰下, 柽柳高度适宜的栖息地减少了 $0.50 \times 10^5 \text{ km}^2$, 虽然柽柳在其可耐受的盐碱环境下占据着优势生态位, 但由于干旱、半干旱地区和东部沿海水陆交接地区生态的脆弱性, 灌溉农业发展加剧了区域盐渍化进一步加重, 部分区域土壤盐离子浓度可能超出柽柳耐受度, 以及经济社会的发展导致盐生植被自然栖息地破碎化和部分区域自然植被的水补给被削减, 从而导致人类活动干扰下柽柳适生区域面积减少。由此推论人类活动在柽柳地理分布演替过程中整体起负面作用, 当然柽柳的分布也可能与动物食用和种子传播等因素密切相关。

4.3 适宜栖息地的地理分布

柽柳的适宜栖息地主要分布在中国北方地区, 华北与西北的盐渍化区域是其主要分布区, 主要包括塔里木盆地边缘、河西走廊、内蒙古高原南缘、华北平原中北部和山东半岛北部地

区。在未来 4 种温室气体排放情景下, Maxent 模型预测的怪柳潜在分布中心向东南移动。SSP245-2070 情景下, 其潜在适生区面积扩大较明显, 怪柳为喜光耐盐碱乔木, 这可能是由于在 SSP245 的发展路径下, 温度小幅度增加(21 世纪末, 温度增加 2.7°), 北方地区降水增加, 可能为其提供了适宜且稳定的生长环境。在 SSP370 和 SSP585 发展情境下, 怪柳生境破碎化有加剧的趋势, 特别是 SSP585-2030 情景下, 怪柳丧失的潜在适生区面积占现代适生区(模型 A)面积的 9.65%, 适生区中心南移和生境破碎化严重说明中高排放路径带来的气候变化对怪柳分布构成较大威胁。本研究表明, 4 种未来气候情景下, 新疆南部、青海西北部、陕西北部和江苏南部适生区减少, 西北干旱区中北部和华北平原地区适生区增加, 这可能与气候变化背景下盐渍土壤面积增加有关。

5 结论

本研究基于 MaxEnt 模型, 整合生物气候、土壤、地形和人类足迹数据, 建立怪柳的物种分布模型, 研究气候变化和人类活动对怪柳地理分布的影响。主要结论如下:

(1)环境因子影响下(模型 A)的现代怪柳潜在适生区的面积为 $32.69 \times 10^5 \text{ km}^2$, 中高适生区面积 $14.02 \times 10^5 \text{ km}^2$; 人类活动影响下(模型 B)现代怪柳适生区面积为 $28.90 \times 10^5 \text{ km}^2$, 中高适生区面积 $11.42 \times 10^5 \text{ km}^2$; 人类活动影响下, 怪柳中高适生区面积减少 $2.6 \times 10^5 \text{ km}^2$, 减少区域集中在新疆南部、内蒙古中南部、甘肃中部、宁夏、河北中南部和山东等地。整体上, 人类活动加剧了怪柳核心适生区面积的消减。

(2)未来气候情境下怪柳中高适生区面积范围为 $11.76 \times 10^5 \text{ km}^2$ — $13.54 \times 10^5 \text{ km}^2$, 相对于现代怪柳适生区面积 ($14.02 \times 10^5 \text{ km}^2$) 有所下降, 未来怪柳核心适生区域主要分布在新疆南部、甘肃西北部、内蒙古西部和中部、天津西南部和山东东北部, 与现代怪柳中高适生区潜在分布范围一致。

(3)现代人类活动抑制怪柳在中国适宜栖息地的扩散, 但未来气候变化可能促进其向西北和华北扩散。随着时间的推移, 全球气温和降水量的增加, 西北地区与华北地区的生态承载力进一步加强, 未来怪柳可能会在水平梯度上进一步向东南迁移。

References

- AHMADI M, HEMAMI M-R, KABOLI M, SHABANI F. 2023. MaxEnt brings comparable results when the input data are being completed; Model parameterization of four species distribution models[J]. *Ecology and Evolution*, 13(2): e9827.
- BOIVIN N L, ZEDER M A, FULLER D Q, CROWTHER A, LARSON G, ERLANDSON J M, DENHAM T, PET RAGLIA M D. 2016. Ecological consequences of human niche construction: Examining long-term anthropogenic shaping of global species distributions[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(23): 6388-6396.
- FICK S E, HIJMANS R J. 2017. WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas[J]. *International Journal of Climatology*, 37(12): 4302-4315.
- JIANRONG G, CHANGDAN S, YIFAN Z, XINLEI W, HUAYING T, GUOLIANG H, YI Z, BAOSHAN W. 2022. Mechanisms of Salt Tolerance and Molecular Breeding of Salt-Tolerant Ornamental Plant[J]. *Frontiers in Plant Science*, 13: 854116-854116.
- JONES P J, WILLIAMSON G J, BOWMAN D M J S, LEFROY E C. 2019. Mapping Tasmania's cultural landscapes: Using habitat suitability modelling of archaeological sites as a landscape history tool[J]. *Journal of Biogeography*, 46(11): 2570-2582.
- LEPORE C, ABERNATHEY R, HENDERSON N, ALLEN J T, TIPPETT M K. 2021. Future Global Convective Environments in CMIP6 Models[J]. *Earth's Future*, 9(12): e2021EF002277.

- LI S, WANG Z, ZHU Z, TAO Y, XIANG J. 2023. Predicting the potential suitable distribution area of *Emeia pseudosauteri* in Zhejiang Province based on the MaxEnt model[J]. *Scientific Reports*, 13(1): 1806.
- LI Y, LI M, LI C, LIU Z. 2020. Optimized Maxent Model Predictions of Climate Change Impacts on the Suitable Distribution of *Cunninghamia lanceolata* in China[J]. *Forests*, 11(3): 302.
- LIU G-D, WEI M-H, YANG Z, XIAO H-Y, ZHANG Y-H, FANG N-N. 2023. Relationship between spatio-temporal evolution of soil pH and geological environment/surface cover in the eastern Nenjiang River Basin of Northeast China during the past 30 years[J]. *China Geology*, 6(3): 369-382.
- MEROW C, SMITH M J, SILANDER JR J A. 2013. A practical guide to MaxEnt for modeling species' distributions: what it does, and why inputs and settings matter[J]. *Ecography*, 36(10): 1058-1069.
- PECL G T, ARAÚJO M B, BELL J D, BLANCHARD J, BONEBRAKE T C, CHEN I C, CLARK T D, COLWELL R K, DANIELSEN F, EVENGÅRD B, FALCONI L, FERRIER S, FRUSHER S, GARCIA R A, GRIFFIS R B, HOBDAI A J, JANION-SCHEEPERS C, JARZYNA M A, JENNINGS S, LENOIR J, LINNET VED H I, MARTIN V Y, MCCORMACK P C, MCDONALD J, MITCHELL N J, MUSTONENT, PANDOLFI J M, PETTORELLI N, POPOVA E, ROBINSON S A, SCHEFFERS B R, SHAW J D, SORTI C J B, ST RUGNELL J M, SUNDAY J M, TUANMU M-N, VERGÉS A, VILLANUEVA C, WERNBERG T, WAPSTRA E, WILLIAMS S E. 2017. Biodiversity redistribution under climate change: Impacts on ecosystems and human well-being[J]. *Science*, 355(6332): eaa19214.
- QIXIN D, ZHIHUI Z, BAOSHAN W, MIN C. 2022. Recent Progress on the Salt Tolerance Mechanisms and Application of *Tamarisk*[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(6): 3325-3325.
- SHI F, LIU S, AN Y, SUN Y, ZHAO S, LIU Y, LI M. 2023a. Climatic factors and human disturbance influence ungulate species distribution on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Science of The Total Environment*, 869: 161681.
- SHI X, WANG J, ZHANG L, CHEN S, ZHAO A, NING X, FAN G, WU N, ZHANG L, WANG Z. 2023b. Prediction of the potentially suitable areas of *Litsea cubeba* in China based on future climate change using the optimized MaxEnt model[J]. *Ecological Indicators*, 148: 110093.
- SILLERO N, ARENAS-CASTRO S, ENRIQUEZ - URZELAI U, VALE C G, SOUSA-GUEDES D, MARTÍNEZ-FREIRE A F, REAL R, BARBOSA A M. 2021. Want to model a species niche? A step-by-step guideline on correlative ecological niche modelling[J]. *Ecological Modelling*, 456: 109671.
- SUN A, YANG Q-H, LIU Z, CHEN H, HAN L, JIANG S-M, MENG Y-Y, BIAN Y, YANG Y-P. 2022. Distribution of wetlands and salt lakes in the Yadong region of Tibet based on remote sensing, and their geo-climatic environmental changes[J]. *China Geology*, 5(4): 637-648.
- XIONG M, LI F, LIU X, LIU J, LUO X, XING L, WANG R, LI H, GUO F. 2023. Characterization of Ecosystem Services and Their Trade-Off and Synergistic Relationships under Different Land-Use Scenarios on the Loess Plateau[J]. *Land*, 12(12): 2087.
- XU D, ZHUO Z, WANG R, YE M, PU B. 2019. Modeling the distribution of *Zanthoxylum armatum* in China with MaxEnt modeling[J]. *Global Ecology and Conservation*, 19: e00691.
- XU L, FAN Y, ZHENG J, GUAN J, LIN J, WU J, LIU L, WU R, LIU Y. 2024. Impacts of climate change and human activity on the potential distribution of *Aconitum leucostomum* in China[J]. *Science of The Total Environment*, 912: 168829.
- YACKULIC C B, CHANDLER R, ZIPKIN E F, ROYLE J A, NICHOLS J D, CAMPBELL GRANT E H, VERAN S. 2013. Presence-only modelling using MAXENT: when can we trust the inferences?[J]. *Methods in Ecology and Evolution*, 4(3): 236-243.
- YANG H, XIA J, CUI Q, LIU J, WEI S, FENG L, DONG K. 2021. Effects of different *Tamarix chinensis*-grass patterns on the soil quality of coastal saline soil in the Yellow River Delta, China[J]. *Science of The Total Environment*, 772: 145501.
- YANG S, WANG H, TONG J, BAI Y, ALATALO J M, LIU G, FANG Z, ZHANG F. 2022. Impacts of environment and human activity on grid-scale land cropping suitability and optimization of planting structure, measured based on the MaxEnt model[J]. *Science of The Total Environment*, 836: 155356.

- YE S, PEI L, HE L, XIE L, ZHAO G, YUAN H, DING X, PEI S, YANG S, LI X, LAWS E A. 2022. Wetlands in China: Evolution, Carbon Sequestrations and Services, Threats, and Preservation/Restoration[J]. *Water*, 14(7): 1152-1152.
- ZHANG L, ROHR J, CUI R, XIN Y, HAN L, YANG X, GU S, DU Y, LIANG J, WANG X, WU Z, HAO Q, LIU X. 2022. Biological invasions facilitate zoonotic disease emergences[J]. *Nature Communications*, 13(1): 1762.
- ZHAO X, LEI M, WEI C, GUO X. 2022. Assessing the suitable regions and the key factors for three Cd-accumulating plants (*Sedum alfredii*, *Phytolacca americana*, and *Hylotelephium spectabile*) in China using MaxEnt model[J]. *Science of The Total Environment*, 852: 158202.
- ZHOU H, XIAO F, ZHENG Y, LIU G, ZHUANG Y, WANG Z, ZHANG Y, HE J, FU C, LIN H. 2021. PAMP-INDUCED SECRETED PEPTIDE 3 modulates salt tolerance through RECEPTOR-LIKE KINASE 7 in plants[J]. *The Plant Cell*, 34(2): 927-944.

附中文参考文献

- 陈武迪, 刘晓煌, 李洪宇, 孙兴丽, 王玉刚, 刘晓洁, 邢莉圆, 王然, 雒新萍, 王超, 赵宏慧. 新疆天山 1990-2050 年生态系统服务功能及安全格局[J]. *中国地质*: 1-22.
- 方欧娅, 贾恒锋, 邱红岩, 任海保. 2017. 青海省同德县乔木状甘蒙柽柳的年龄及其生长对环境的响应[J]. *植物生态学报*, 41(07): 738-748.
- 付宇佳, 谭昌海, 刘晓煌, 孙兴丽, 袁泽民, 郑艺文. 2022. 自然资源定义、分类, 观测监测及其在国土规划治理中的应用[J]. *中国地质*, 49(04): 1048-1063.
- 韩福贵, 满多清, 郑庆钟, 肖斌, 张裕年, 付贵全, 杜娟. 2022. 石羊河中下游不同生境柽柳群落物种多样性及土壤水分、盐分关系[J]. *水土保持研究*, 29(03): 49-56.
- 李苍柏, 肖克炎, 李楠, 宋相龙, 张帅, 王凯, 楚文楷, 曹瑞. 2020. 支持向量机、随机森林和人工神经网络机器学习算法在地球化学异常信息提取中的对比研究[J]. *地球学报*, 41(02): 309-319.
- 潘晶, 黄翠华, 罗君, 彭飞, 薛娴. 2018. 盐胁迫对植物的影响及 AMF 提高植物耐盐性的机制[J]. *地球科学进展*, 33(04): 361-372.
- 杨劲松, 姚荣江, 王相平, 谢文萍, 张新, 朱伟, 张璐, 孙瑞娟. 2022. 中国盐渍土研究: 历程、现状与展望[J]. *土壤学报*, 59(01): 10-27.
- 杨维康, 张道远, 尹林克, 张立运. 2002. 新疆柽柳属植物(*Tamarix L.*)的分布与群落相似性聚类分析[J]. *干旱区研究*, (03): 6-11.
- 叶兴状, 张明珠, 赖文峰, 杨淼淼, 范辉华, 张国防, 陈世品, 刘宝. 2021. 基于 MaxEnt 优化模型的闽楠潜在适宜分布预测[J]. *生态学报*, 41(20): 8135-8144.
- 袁江龙, 赵宏慧, 刘晓煌, 李洪宇, 江东, 赵传燕, 邢莉圆, 雒新萍, 王然, 王超. 2000—2020 年昆仑山植被覆盖度时空变化驱动力分析及生态评价[J]. *中国地质*: 1-17.
- 张道远, 杨维康, 潘伯荣, 尹林克. 2003. 刚毛柽柳群落特征及其生态、生理适应性[J]. *中国沙漠*, (04): 112-117.
- 张更权. 2018. 格尔木市野生柽柳资源调查与评价[J]. *林业调查规划*, 43(04): 85-88+98.
- 张华, 张兰, 赵传燕, 彭守璋, 郑祥霖. 2014. 黑河下游绿洲植被优势种生物量空间分布及蒸腾耗水估算[J]. *地理科学*, 34(07): 876-881.
- 张殷波, 刘彦岚, 秦浩, 孟庆欣. 2019. 气候变化条件下山西翅果油树适宜分布区的空间迁移预测[J]. *应用生态学报*, 30(02): 496-502.
- 朱帅, 曹建华, 杨慧, 梁建宏, 劳昌玲. 2023. 岩溶区植被与岩石地球化学背景间相互作用机制研究进展[J]. *岩矿测试*, 42(01): 59-71.
- 朱绪超, 袁国富, 邵明安, 易小波, 杜涛. 2015. 塔里木河下游河岸带植被的空间结构特征[J]. *植物生态学报*, 39(11): 1053-1061.