



陶蕾,包岩峰,赵媛媛,丁国栋,于明含. 中国北方农牧交错带典型固沙植被种植适宜性研究[J]. 中国农业大学学报,2026,31(04):59-72.

TAO Lei, BAO Yanfeng, ZHAO Yuanyuan, DING Guodong, YU Minghan. Study on the suitability of typical sand-fixing vegetation distribution in the agro-pastoral ecotone of Northern China[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2026, 31(04): 59-72.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2026.04.05

中国北方农牧交错带典型固沙植被种植适宜性研究

陶蕾¹ 包岩峰² 赵媛媛^{1*} 丁国栋¹ 于明含¹

(1. 北京林业大学水土保持学院/水土保持国家林业和草原局重点实验室,北京 100083;

2. 自然资源部国土整治中心,北京 100035)

摘要 为探究中国北方农牧交错带固沙植物的分布适宜性及其土壤水分植被承载力,选取3种乔木樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongholica*)、旱柳(*Salix matsudana* Koidz.)、沙枣(*Elaeagnus angustifolia* L.)和3种灌木梭梭(*Haloxyylon ammodendron* (C. A. Mey.) Bunge)、沙棘(*Hippophae rhamnoides* L.)、柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii* Kom.)为研究对象,结合28个环境因子,采用最大熵模型(MaxEnt),评估上述固沙植物的空间分布适宜性,并基于水分限制条件,采用承载力模型量化适宜区内各植物种的可承载阈值。结果表明:固沙植物适生区空间分异显著。其中:沙棘、旱柳和柠条锦鸡儿适生范围较广,适生区所占比例均高于50%,在区域东中西均有分布;樟子松和沙枣适生范围次之,主要分布在研究区西部和中部;而梭梭适生范围仅占区域面积四分之一,主要分布在区域西部。土壤水分植被承载力分析显示研究区内的固沙植物植被承载力分别为:樟子松,5.66万~18.19万株/km²;旱柳,7.20万~19.26万株/km²;沙枣,19.20万~48.60万株/km²;梭梭,10.50万~38.75万株/km²;沙棘,27.49万~62.87万株/km²;柠条锦鸡儿,11.85万~37.73万株/km²。综上,本研究可为农牧交错带生态恢复和土地可持续管理提供基础理论支撑。

关键词 农牧交错带;最大熵模型;植被承载力;适宜性评价;固沙植被

中图分类号 X171.1

文章编号 1007-4333(2026)04-0059-14

文献标志码 A

Study on the suitability of typical sand-fixing vegetation distribution in the agro-pastoral ecotone of Northern China

TAO Lei¹, BAO Yanfeng², ZHAO Yuanyuan^{1*}, DING Guodong¹, YU Minghan¹

(1. College of Soil and Water Conservation/Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration on Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. Land Consolidation and Rehabilitation Center, Ministry of Natural Resources, Beijing 100035, China)

Abstract To investigate the distribution suitability of sand-fixing plants and their soil moisture vegetation carrying capacity in the agro-pastoral ecotone of Northern China, three tree species (*Pinus sylvestris* var. *mongholica*, *Elaeagnus angustifolia* L., and *Salix matsudana* Koidz.) and three shrub species (*Haloxyylon ammodendron* (C. A. Mey.) Bunge, *Hippophae rhamnoides* L., and *Caragana korshinskii* Kom.) were selected as the research subjects. A total of 28 environmental factors and the Maximum Entropy model (MaxEnt) were combined to evaluate the spatial distribution suitability of the above-mentioned sand-fixing plants. This study focused primarily on water limitation conditions, and the carrying capacity model was used to quantify the carrying threshold of

收稿日期: 2025-06-16;接受日期: 2025-09-01

基金项目: 内蒙古自治区科技计划(2023YFHH0068);国家自然科学基金项目(U23A2014, M2242005);中央高校基本科研业务费专项(FTYX202526, FTYX202528, FTYX202533)

第一作者: 陶蕾(ORCID:0009-0007-4109-7530),硕士研究生,E-mail:taolei202506@163.com

通讯作者: 赵媛媛(ORCID:0000-0002-2986-2769),教授,主要从事荒漠化防治研究,E-mail:yuanyuan0402@bjfu.edu.cn

each plant species in the suitable area. The results show that the spatial variation of sand-fixing plant suitable areas is significant. Among them: The suitable ranges of *Hippophae rhamnoides* L., *Salix matsudana* Koidz. and *Caragana korshinskii* Kom. are the widest, accounting for more than 50%, and the three plants are found in the eastern, central, and western regions of the area; *Pinus sylvestris* var. *mongholica* and *Elaeagnus angustifolia* L. have a relatively smaller suitable distribution range, are mainly found in the western and central parts of the study area; In contrast, *Haloxylon ammodendron* (C. A. Mey.) Bunge has a suitable distribution range that covers only a quarter of the regional area, mainly distributed in the western part of the region. According to the soil moisture vegetation carrying capacity model, the vegetation carrying capacity per km² of sand-fixing plants in the study area is as follows: *Pinus sylvestris* var. *mongholica* 56 600-181 900, *Salix matsudana* Koidz. 72 000-192 600, *Elaeagnus angustifolia* L. 192 100-486 000, *Haloxylon ammodendron* (C. A. Mey.) Bunge 105 000-387 500, *Hippophae rhamnoides* L. 274 900-628 700 and *Caragana korshinskii* Kom. 118 500-377 300 trees per km². In conclusion, this study provided a theoretical basis for ecological restoration and sustainable land management in the agro-pastoral ecotone.

Keywords the agro-pastoral ecotone of Northern China; MaxEnt; vegetation carrying capacity; suitability evaluation; sand-fixing vegetation

中国北方农牧交错带作为连接东北、华北和西北的生态过渡区,不仅是农业与畜牧业活动的交错地带,更是我国重要的生态安全屏障^[1]。然而,受全球气候变化和人类活动干扰的叠加影响,该地区生态系统脆弱性加剧,土地退化和沙化问题日益突出,尤其是土壤风蚀和沙尘暴频发问题^[2],使得生态修复成为区域可持续发展的关键。植被建设作为生态修复的核心手段,其固沙、保水和碳汇等功能对抑制土地沙化、重建生态系统稳定性具有不可替代的作用。因此,科学规划植被建设,优化物种选择与空间配置,对实现生态-生产协同发展至关重要。

植被建设作为生态修复的重要手段,能够通过固沙、保水等功能有效抑制土地沙化,恢复生态系统的稳定性。在植被恢复的实践中,固沙植被的适宜性评估是确保生态工程实效的基础。当前常用的植物适宜性评估方法有多种,如最大熵模型^[3]、生态位因子分析模型^[4]、模糊综合评价方法^[5]、生物气候分析系统^[6]、层次分析法^[7]等。其中,最大熵模型因其数据偏差小、准确性高以及能够解决模型过度拟合的问题等优点^[8],成为使用最为广泛的生态位模型。已有研究应用该方法对部分固沙植物进行了研究。如:宋慧芳等^[9]利用最大熵模型对樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongholica*)在内蒙古地区的适宜分布区进行了预测,得出适生区主要集中在呼伦贝尔、兴安盟等地区。张晓芹等^[10]通过模型预测沙枣(*Elaeagnus angustifolia* L.)在未来气候情景下的适宜区扩展变化。然而,目前对于农牧交错带地

区典型固沙乔木和灌木植物种的适宜性研究,还缺乏全面的认识:一是多聚焦单一物种,缺乏多物种的综合对比与分析;二是仅考虑气候因子对植被分布的影响,而忽略了土壤特性、地形等环境因子的作用,导致评估结果与实际情况存在偏差。

除了区域适宜性,植物的种植密度也是影响生态恢复效果的一个关键参数。土壤水分被认为是干旱半干旱地区植被恢复和重建的关键限制因子,是决定植物种植密度的核心要素^[11]。土壤水分植被承载力,即土壤水分供给所能维持的最大植被生物量,是土地植被承载力的特殊形式^[12]。明确土壤水分植被承载力,能够在一定程度上避免过度种植导致资源浪费及生态失衡。量化土壤水分植被承载力的模型主要有经典的承载力模型^[13]、种群增长通用数学模型^[14]、水量平衡法^[15]和基于物理过程的土壤水分植被承载力模型^[16]。例如:何炎红^[17]在乌兰布和沙漠的研究表明,梭梭(*Haloxylon ammodendron* (C. A. Mey.) Bunge)和白刺(*Nitraria tangutorum* Bobrov)等植物的水分利用效率可作为树种选择的重要依据。然而,现有研究很少将适宜性分析与承载力评估进行耦合。如石莎等^[18]研究了和林格尔县的植被承载力但未结合适生区分析,段玉玺^[19]基于Penman-Monteith估算了沙枣(*Elaeagnus angustifolia* L.)的蒸散需求但未考虑空间适宜性。对于中国北方农牧交错带这样环境异质性高的区域,典型固沙植被在适生区内种植密度如何配置,仍然是生态工程设计中亟需解决的关键科学问题。

基于此,为探究中国北方农牧交错带固沙植物的分布适宜性及其最佳种植密度,本研究拟以中国北方农牧交错带为研究区,基于“适宜性-承载力”耦合评估思路,选取6种典型固沙植物,即樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongholica*)、旱柳(*Salix matsudana* Koidz.)和沙枣(*Elaeagnus angustifolia* L.)3种乔木;梭梭(*Haloxylon ammodendron* (C. A. Mey.) Bunge)、沙棘(*Hippophae rhamnoides* L.)和柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii* Kom.)3种灌木为研究对象,综合采用最大熵模型和土壤水分植被承载力方程,解析多植物种在研究区的适生区空间分异规律,并量化土壤水分约束下的植被承载阈值,从而提出分区优化的植被配置方案,以期干旱半干旱区生态恢复的精准施策提供理论支撑。

1 研究区概况

北方农牧交错带是我国重要的生态安全屏障

之一,是连接我国西部草原牧区和东部农耕区的生态过渡地带。具有独特的生态功能与区域特征。该区域跨越了黑龙江省、吉林省、辽宁省、内蒙古自治区、河北省、山西省、陕西省、宁夏回族自治区和甘肃省9个省份,总面积约为813 459.06 km²^[20],海拔高度约51~4 131 m,呈现西高东低的地势特征。区域内气候属于典型温带半干旱大陆性季风气候^[21],年均温0~10℃,年降水量300~500 mm。受区域气候特征影响,研究区植被生长面临显著的水热胁迫,导致植被类型及其空间分布呈现明显的环境梯度特征。研究区主要包括黑龙江省、吉林省和辽宁省的部分地区,得益于相对湿润的气候条件,樟子松、旱柳等乔木集中分布。西南部和东部地区受干旱气候制约,植被类型以耐旱固沙植物为主,常见的植物有沙枣、梭梭等。这些植物能够有效固沙,并为当地的生态恢复提供了基础(图1)。

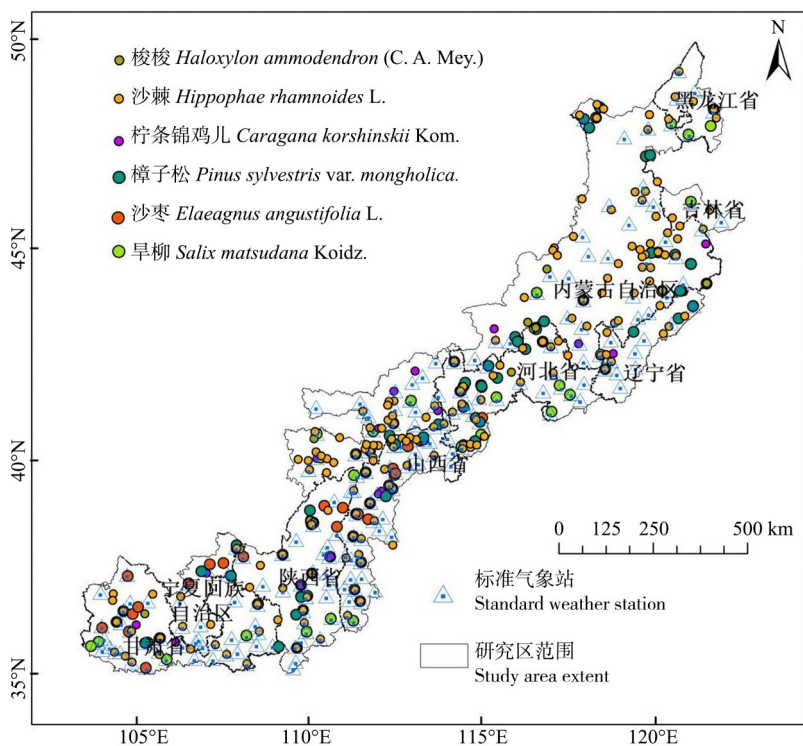


图1 研究区概况和标准气象站点分布

Fig. 1 General situation of the study area and distribution of the standard weather stations

2 研究方法与数据来源

2.1 研究方法

采用“适宜性-承载力”耦合评估思路,通过整合

物种分布适宜性与土壤水分植被承载力,解决干旱半干旱区植被恢复中“种什么、种多少”的关键问题。首先基于最大熵模型,根据物种分布点与环境变量(如气候、土壤、地形),通过机器学习预测物种

的生态适宜区。在此基础上,应用土壤水分植被承载力方程,计算植被蒸腾耗水与土壤水分供给的平衡点,确定最大可承载密度。定量评估各树种在特定区域内的水分需求与可承载能力,从而为植被密度的优化提供理论依据。

2.1.1 树种选择

植被建设过程中需要充分考虑当地气候、土壤、水源等自然条件,以及当地居民的生产生活需求,避免盲目引种和不合理的人工干预,优选耐干旱、耐寒冷、抗风沙的固沙植物,以确保植被能够在恶劣环境中存活并起到防风固沙的作用。

通过查阅资料拟定固沙乔木为樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongholica*)、沙枣(*Elaeagnus angustifolia* L.)、旱柳(*Salix matsudana* Koidz.),固沙灌木为梭梭(*Haloxylon ammodendron* (C. A. Mey.) Bunge)、沙棘(*Hippophae rhamnoides* L.)、柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii* Kom.)。这些植物具有重要的固沙作用,且在该区域生态恢复与植被建设中具有潜在应用价值。能够长期在干旱和极端气候条件下生长,耐旱、耐贫瘠、耐风沙能力较强。

2.1.2 固沙植物适生区评价

采用最大熵模型进行固沙植物适生区评价。该模型基于最大熵原理,通过已知样本点的分布情况和点位的环境因子数据进行分析得出分布概率,相较其他模型有更高的计算效率、预测精度和能力,并且能够解决模型过度拟合的问题^[22],被生态学研究广泛应用。

影响植被生长的因素较为复杂,包括气候条件(如温度、降水、湿度等)、土壤类型和结构(如土壤水分、酸碱度等)、地形特征(如坡度、海拔等)、水源情况及人类活动等。降水和温度被广泛认为是影响植被生长的主导气候因子^[23-24],而固沙植物的根系生长还受到根区土壤中全氮、全磷、pH等理化因素的显著影响^[25]。基于此,本研究选取了19个气候因子,包括不同类型的降水和温度数据,以及其他对植被生长具有重要影响的气候因子。此外,还选取了6个土壤因子和地形数据(表1),共同参与建模,以精准预测固沙植被的最适宜生长区域。

为了防止环境因子的过度拟合而影响最大熵模型结果的准确度,本研究采用系统筛选方法对初始收集的19个环境因子、高程数据以及6个土壤因

子进行筛选。首先,将所有环境变量导入最大熵模型进行初步分析,剔除对树种分布预测贡献率为0的非敏感性因子。随后,基于Pearson相关性分析方法对剩余环境变量进行共线性诊断,将相关性>|0.8|的2个变量,根据其在模型中的贡献率大小及与树种生长的生态学相关性进行取舍,保留贡献率较高的变量。剔除另一个变量^[26-27]。

基于Pearson相关性分析结果,本研究采用Origin 2021软件构建了环境因子间的相关系数矩阵热力图。筛选出与植被生长相关性强且冗余度最小的环境因子,结果见表2,并将这些因子用于最大熵模型建模,以确保模型的精度和可靠性。

将筛选得到的树木坐标点和环境因子数据导入最大熵模型中,根据郭飞龙^[28]的研究进行相应的参数设置。随机选择75%的数据作为模型训练集,用于适生区建模,剩余25%的数据作为测试集,用于检验,设置重复训练(Replicates)为10,其他参数为默认设置。

选用刀切法绘制响应曲线制作预测图。通过受试者工作特征曲线下的面积值(AUC)评估最大熵模型预测结果的精确度。根据AUC值的标准判定模型性能,通常认为,AUC值越接近1,模型的预测效果越好^[29];当AUC≤0.6时认为模型预测结果失败;0.6<AUC≤0.7时,模型预测结果较差;0.7<AUC≤0.8时,模型的预测结果一般;0.8<AUC≤0.9时,模型预测结果良好;0.9<AUC≤1.0时,模型预测结果优秀^[30-31]。将最大熵模型模拟的结果导入ArcGIS中,通过自然间断法将适生区划分为高适生区、中适生区、低适生区和非适生区4个等级。

2.1.3 土壤水分植被承载力计算

土壤水分植被承载力指在特定的干旱或半干旱地区,考虑到气候条件、土壤特性和管理措施的影响,土壤水分不受到影响且能够支持植被持续生长时,所能维持的最大植被数量^[32]。经典的土壤水分植被承载力模型,是根据土壤提供的有效水总量和单株树种消耗水分的数量,计算出土壤可以供树木生长的最大承载力^[33]。其计算公式为:

$$Q = \frac{C}{D}$$

式中:Q为土壤水分植被承载力;C为土壤的有效水分总量;D为单株树木水分消耗量。土壤的有效水

表 1 本研究用于最大熵模型的环境因子数据

Table 1 The environmental variables data used in this study for the MaxEnt model

环境因子 Environmental variable	代号 Code	环境因子 Environmental variable	代号 Code
年平均温度,℃ Annual average temperature	Bio1	降水量季节性变化,mm Seasonal variation in precipitation	Bio15
平均气温日较差,℃ Average diurnal temperature range	Bio2	最干季度降水量,mm Precipitation of the driest quarter	Bio16
等温性,℃ Isothermality	Bio3	最湿季度降水量,mm Precipitation of the wettest quarter	Bio17
气温季节性变动系数,℃ Coefficient of seasonal temperature variation	Bio4	最暖季度降水量,mm Precipitation of the warmest quarter	Bio18
最热月份最高温度,℃ Maximum temperature of the warmest month	Bio5	最冷季度降水量,mm Precipitation of the coldest quarter	Bio19
最冷月份最低温度,℃ Minimum temperature of the coldest month	Bio6	高程,m Altitude	Altitude
气温年较差,℃ Annual temperature range	Bio7	坡度,(°) Slope	Slope
最湿季度平均温度,℃ Average temperature of the wettest quarter	Bio8	坡向,(°) Aspect	Aspect
最干季度平均温度,℃ Average temperature of the driest quarter	Bio9	全氮,mg/kg Total Nitrogen	TN
最暖季度平均温度,℃ Average temperature of the warmest quarter	Bio10	全磷,mg/kg Total Phosphorus	TP
最冷季度平均温度,℃ Average temperature of the coldest quarter	Bio11	全钾,mg/kg Total Potassium	TK
年降水量,℃ Annual precipitation	Bio12	酸碱度	pH
最湿月份降水量,mm Precipitation of the wettest month	Bio13	土壤孔隙度,% Soil porosity	POR
最干月份降水量,mm Precipitation of the driest month	Bio14	土壤黏粒,% Soil clay content	CL

分总量(C)是指土壤中可供植物利用的水分,本研究用植被的实际蒸散量来表示^[34]。彭曼(Penman-Monteith)方程可以根据气象数据(如温度、降水等)较准确地计算出植被的参考蒸散量^[35]。根据年平均气象数据计算出年参考蒸散量。根据各植被的作物系数 K_c 得出其实际的蒸散量。计算公式如下:

$$E_{\text{ref}} = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}$$
$$E_t = E_{\text{ref}} \times K_c$$
$$C = 1 \times 10^6 \rho E_t$$

式中: E_{ref} 为参考蒸散量,mm; Δ 为空气温度与水蒸

气压强的关系斜率,kPa/°C; R_n 为净辐射,MJ/m²; G 为土壤热通量,MJ/m²; γ 为气压常数,kPa/°C; T 为平均气温,°C; U_2 为2 m高度处的风速,m/s; e_s 为饱和水蒸气压,kPa; e_a 为空气水蒸气压,kPa; E_t 为实际蒸散量,mm; K_c 为作物系数; C 为土壤有效水,kg; ρ 为水的密度,kg/m³。

根据徐军等^[36]的研究,单株树木水分消耗量(D)计算公式如下:

$$D = A \times B \times H \times S$$

式中: A 为土壤容重,kg/m³; B 为土壤可利用水,%; H 为植被吸水根系的土层深度,m; S 为单株植被生长所需最小面积,m²。各植被数据详见表3。

表 2 筛选出的参与最大熵模型各类固沙植被环境因子

Table 2 The environmental variables of different sand-fixing vegetation types used in the MaxEnt model.

植被类型 Vegetation type	环境因子 Environmental variable
樟子松 <i>Pinus sylvestris</i> var. <i>mongholica</i>	Bio2, Bio4, Bio12, Bio13, Bio14, Altitude, Aspect, TN, CL, POR
旱柳 <i>Salix matsudana</i> Koidz.	Bio1, Bio7, Bio10, Bio12, Bio13, Bio15, Bio19, Altitude, Aspect, TK, TN
沙枣 <i>Elaeagnus angustifolia</i> L.	Bio1, Bio2, Bio3, Bio7, Bio12, Bio14, Altitude, Aspect, TN, TK, pH, CL
梭梭 <i>Haloxylon ammodendron</i> (C. A. Mey.) Bunge	Bio1, Bio8, Bio12, Bio13, Bio15, Altitude, TN, CL, POR
沙棘 <i>Hippophae rhamnoides</i> L.	Bio1, Bio2, Bio11, Bio12, Bio13, Altitude, Slope, Aspect, pH, POR, CL
柠条锦鸡儿 <i>Caragana korshinskii</i> Kom.	Bio4, Bio10, Bio11, Bio13, Bio19, Altitude, Aspect, TK, TN, pH, CL

表 3 各植被作物系数及耗水量

Table 3 Crop coefficients and water consumption rates of different vegetation types

植被类型 Vegetation type	植被吸水根系的 土层深度/m Soil depth of vegetation water-absorbing root systems	单株植被生长所需 最小面积/m ² Minimum area required per plant for growth	作物系数 Crop coefficient	单株树木水分 消耗量/kg Water consumption per individual tree
樟子松 ^[37] <i>Pinus sylvestris</i> var. <i>mongholica</i>	0.55	3.0×3.0=9.0	1.06	386~1 226
旱柳 <i>Salix matsudana</i> Koidz.	0.60	4.0×4.0=16.0	0.90	749~2 378
沙枣 <i>Elaeagnus angustifolia</i> L.	0.70	1.5×2.0=3.0	0.70	163~520
梭梭 ^[38] <i>Haloxylon ammodendron</i> (C. A. Mey.) Bunge	0.60	1.5×2.0=3.0	0.34	141~456
沙棘 ^[38] <i>Hippophae rhamnoides</i> L.	0.45	1.5×2.0=3.0	0.67	133~336
柠条锦鸡儿 ^[37] <i>Caragana korshinskii</i> Kom.	0.90	1.5×2.0=3.0	0.47	211~669

2.2 数据来源

本研究使用的数据包括树木分布点数据以及环境因子数据。所选树种的地理分布信息主要通过中国数字植物标本馆(<https://www.cvh.ac.cn/index.Php>)、全球生物多样性信息平台(<https://www.gbif.org/>),以及查阅相关文献资料获得,已知具体分布地点的植物,通过Googleearth获得相应经纬度。在ArcGIS中使用基于Python的工具包SDMtoolbox

v2.4^[39]中的Spatially Rarefy Occurrence Data for SDMs剔除重复点坐标并去除相关性,减少分布点数据因自相关引发的环境偏差过度拟合^[40]。将筛选后的坐标在Excel中按照植物名、经度和纬度的样式保存为最大熵模型可以识别的.csv格式。

1970—2000年气象数据和数字高程数据均来源于世界气候数据库(<https://worldclim.org/>),分辨率为2.5'。气象数据包括年平均温度、平均气温

日较差等 19 个指标;数字高程数据在 ArcGIS 中,使用表面分析工具计算得到相应的坡度、坡向数据。2019 年土壤数据来自国家青藏高原科学数据中心(<https://data.tpd.cn>),包括最大熵模型所需要的土壤全氮、全磷和全钾含量,土壤酸碱度、土壤孔隙度和土壤黏粒数据和土壤水分植被承载力所需要的土壤容重、田间持水量和萎蔫系数数据。计算土壤水分植被承载力所需的作物系数 K。通过查阅文献^[37-38]、资料获得。在 ArcGIS 中将环境因子数据进行重采样,统一转换为 WGS_1984_UTM_Zone_50N 投影坐标系。

3 结果与分析

3.1 最大熵模型精度验证

各植被的最大熵模型精度验证结果见表 4,可见:AUC 值均>0.8,说明各固沙植被的预测结果准确性较高,具有较好的可靠性。影响樟子松生长的环境因子为气温季节性变动系数、最湿月份降水量和高程;影响旱柳生长的环境因子为最暖季度平均温度、最湿月份降水量和气温年较差;影响沙枣生

长的环境因子为年平均温度、高程和酸碱度;影响梭梭生长的环境因子为最湿月份降水量、高程、年降水量;影响沙棘生长的环境因子为最湿月份降水量、高程和酸碱度;影响柠条锦鸡儿生长的环境因子为高程、最湿月份降水量和酸碱度。最湿月份降水量、高程和酸碱度是影响固沙植被生长贡献率最大的环境因子,表明固沙植被的生长在很大程度上受降水和土壤质地条件的影响。

3.2 固沙植被适生区划分

根据最大熵模型得出了固沙植被在研究区内的适宜分布区结果见图 2。可见:研究区内不同固沙植物的适宜分布范围存在显著差异。其中,固沙乔木旱柳以及固沙灌木沙棘和柠条锦鸡儿表现出最优的适生性,其适宜种植区域可覆盖研究区大部分地域;樟子松和沙枣的适生性次之,而梭梭的适生范围最小,仅占研究区总面积的 24.1%。

由图 2(a)可见:樟子松的最适分布区主要集中在我国北方农牧交错带的陕西省北部、山西省西部及河北省西北部地区;中适宜区则分布于甘肃省西南部、宁夏回族自治区南部、陕西省北部、山西省西

表 4 各植被主要环境因子的贡献率及 AUC 值			
Table 4 The contribution rate and AUC value of the main environmental variables of sand-fixing vegetation			
植被类型 Vegetation type	环境因子 Environmental variable	贡献率/% Contribution rate	AUC 值 Area under the curve
樟子松 <i>Pinus sylvestris</i> var. <i>mongholica</i>	气温季节性变动系数	27.9	0.952
	最湿月份降水量	20.3	
	高程	17.4	
旱柳 <i>Salix matsudana</i> Koidz.	最暖季度平均温度	24.7	0.835
	最湿月份降水量	22.3	
	气温年较差	11.8	
沙枣 <i>Elaeagnus angustifolia</i> L.	年平均温度	30.3	0.834
	高程	16.5	
	酸碱度	14.1	
梭梭 <i>Haloxyylon ammodendron</i> (C. A. Mey.) Bunge	最湿月份降水量	23.6	0.889
	高程	21.9	
	年降水量	12.6	
沙棘 <i>Hippophae rhamnoides</i> L.	最湿月份降水量	23.7	0.950
	高程	19.8	
	酸碱度	15.3	
柠条锦鸡儿 <i>Caragana korshinskii</i> Kom.	高程	32.4	0.869
	最湿月份降水量	19.9	
	酸碱度	18.0	

部及内蒙古自治区南部等地;该树种总适生面积达 $35.9\times10^4\text{ km}^2$,占研究区总面积的47.9%,展现出较广的生态适应性。由图2(b)可见旱柳适生区面积占比高达60.3%,主要分布于甘肃省东部、陕西

省、山西省、河北省和辽宁省等区域。由图2(c)可见:沙枣的高适生区主要在甘肃省北部和宁夏回族自治区北部;中适生区在陕西省、河北省东部以及辽宁省;总适生区面积为 $31.4\times10^4\text{ km}^2$,占研究区

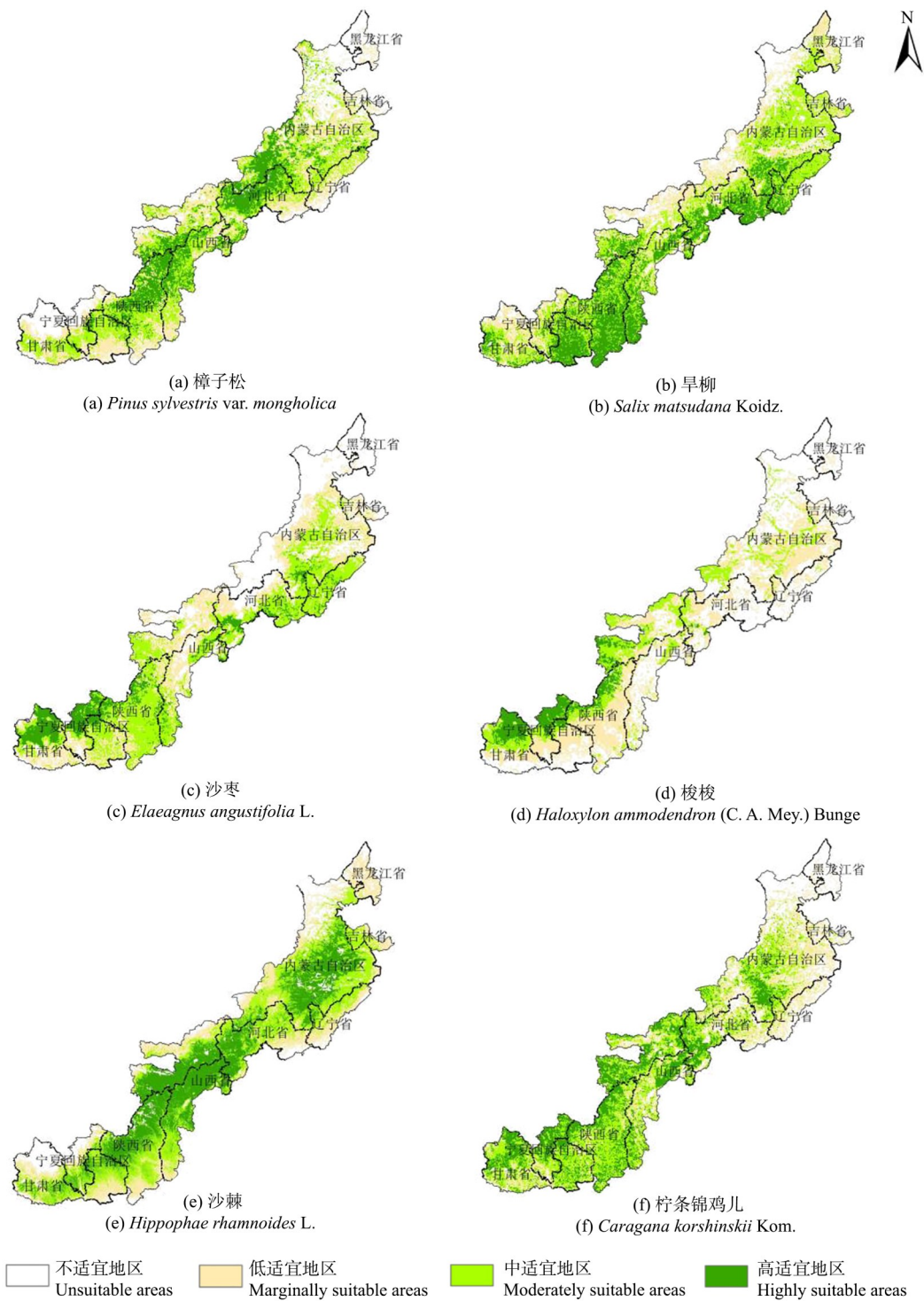


图 2 中国北方农牧交错带 6 种固沙植被适生区划分结果

Fig. 2 Division results of suitable growing areas for six fixed sand vegetation species in the agro-pastoral ecotone of Northern China

总面积的41.9%。由图2(d)可见:梭梭的高适生区分布在陕西省西北部及甘肃省、宁夏回族自治区北部;中适生区零星分布于内蒙古自治区西部、山西省北部等地;其适生区面积最小,仅为 $18.1 \times 10^4 \text{ km}^2$,占研究区总面积的24.1%。由图2(e)可见:沙棘适生区面积达 $46.8 \times 10^4 \text{ km}^2$,占研究区面积的62.4%;集中分布于陕西省、山西省及河北省西南部、内蒙古自治区东北部等中部地区;适生范围最广。由图2(f)可见柠条锦鸡儿主要集中于宁夏回族自治区和甘肃省北部及内蒙古自治区西南部,其适生区占比为53.7%。

总之,在研究区的西南部优先考虑种植旱柳、沙枣、梭梭、沙棘和柠条锦鸡儿;研究区的中部优先配置樟子松、旱柳、沙棘和柠条锦鸡儿;研究区的东北部优先选择樟子松、旱柳、沙枣和沙棘进行种植。

3.3 适生区土壤水分植被承载力

在明确各固沙植物的适宜分布区后,本研究进一步结合土壤水分植被承载力进行分析。量化了各固沙乔木(如樟子松、旱柳、沙枣)和固沙灌木(如梭梭、沙棘、柠条锦鸡儿)在特定区域内的水分需求与可承载能力。相关结果如图3所示。

研究结果表明,中国北方农牧交错带内各植被的土壤水分植被承载力存在显著差异。由图3(a)可见:固沙乔木樟子松的植被承载力 $5.66 \text{ 万} \sim 18.19 \text{ 万株}/\text{km}^2$,其中,在甘肃省南部和河北省北部的承载力较低,建议在这些地区将种植密度控制在 $10 \text{ 万株}/\text{km}^2$ 以下。而陕西省北部和内蒙古自治区东部的承载力较高,适宜种植密度可达到 $15 \text{ 万} \sim 18 \text{ 万株}/\text{km}^2$ 。由图3(b)可见:旱柳的植被承载力在 $7.20 \text{ 万} \sim 19.26 \text{ 万株}/\text{km}^2$,其在甘肃省和宁夏回族自治区南部的承载力较低,仅为 $7.2 \text{ 万} \sim 10.0 \text{ 万株}/\text{km}^2$ 。而陕西省北部的承载力较高,能够承载 $15 \text{ 万株}/\text{km}^2$ 以上。由图3(c)可见:沙枣的植被承载力为 $19.21 \text{ 万} \sim 48.60 \text{ 万株}/\text{km}^2$,是本研究所涉及固沙乔木中土壤水分承载力最高的树种。其在陕西省北部和内蒙古自治区东南部的承载力最高,超过 $45 \text{ 万株}/\text{km}^2$ 。在固沙灌木方面,由图3(d)可见:梭梭的植被承载力为 $32.70 \text{ 万} \sim 66.75 \text{ 万株}/\text{km}^2$,宁夏回族自治区北部、陕西省北部和内蒙古自治区部分地区的土壤水分植被承载力较高,超过 $55 \text{ 万株}/\text{km}^2$,可在这些区域根据生境条件适当提高种植密度。由图3(e)可见:沙棘的植被承载力在

$27.49 \text{ 万} \sim 62.87 \text{ 万株}/\text{km}^2$ 。其在陕西省、山西省、内蒙古自治区和吉林省等大部分地区承载力较高,超过 $45 \text{ 万株}/\text{km}^2$,因而可根据实际需要适度增加种植密度。由图3(f)可见:柠条锦鸡儿的植被承载力为 $11.85 \text{ 万} \sim 37.73 \text{ 万株}/\text{km}^2$,河北省东部和甘肃省南部的承载力较低,建议将种植密度控制在 $20 \text{ 万株}/\text{km}^2$ 以下。而陕西省西北部的承载力最高,可达到 $35 \text{ 万株}/\text{km}^2$ 以上。

综上所述,不同植物在不同区域的土壤水分植被承载力差异显著。结合实际土壤水分条件科学调控种植密度,将有助于推进区域生态恢复与沙漠化治理目标的实现。

4 讨 论

4.1 基于最大熵模型的典型固沙植被适生区

最大熵模型在植物种适宜性评价中得到较成熟的应用^[41]。本研究基于最大熵模型的适宜性研究表明,樟子松的高适生区广泛分布于温带区域,这与张日升等^[42]的研究结果一致,说明樟子松对气候条件表现出显著响应的生态适应特性。尤其是温度和降水量是影响其分布的核心因素。旱柳的生长则表现出对水热条件季节性变化的敏感性,高适生区集中分布于农牧交错带东南部,与郭美妙等^[43]提出的旱柳在半湿润区和半干旱区资源利用效率更高的结论相符。沙枣的高适生区分布与土壤pH呈显著相关性,揭示了该物种对土壤化学性质的特殊适应能力,因此土壤pH被确立为关键变量,尤其在甘肃省北部和宁夏回族自治区北部的分布中表现明显。此结果与张晓芹等^[44]的研究一致。本研究发现灌木树种中,梭梭的分布不仅受温度调控,还与土壤孔隙度显著相关。这一发现补充了常红等^[45]关于干旱区梭梭水分利用机制的研究结果。沙棘表现出典型的水分依赖性特征,其分布受最湿月降水量、海拔高度及土壤pH共同调控,反映出其对水分资源的高度依赖以及对环境梯度的综合响应。这与陈松清等^[46]的研究结果一致。柠条锦鸡儿的生态位特征则显示其对降水季节分配(最湿月降水量)和土壤pH具有特殊适应性,进一步强调了降水季节分配和土壤pH作为调控因素的重要性,表明其生长不仅依赖于总体水分量,更对水分的时间分布特征具有适应性^[47]。

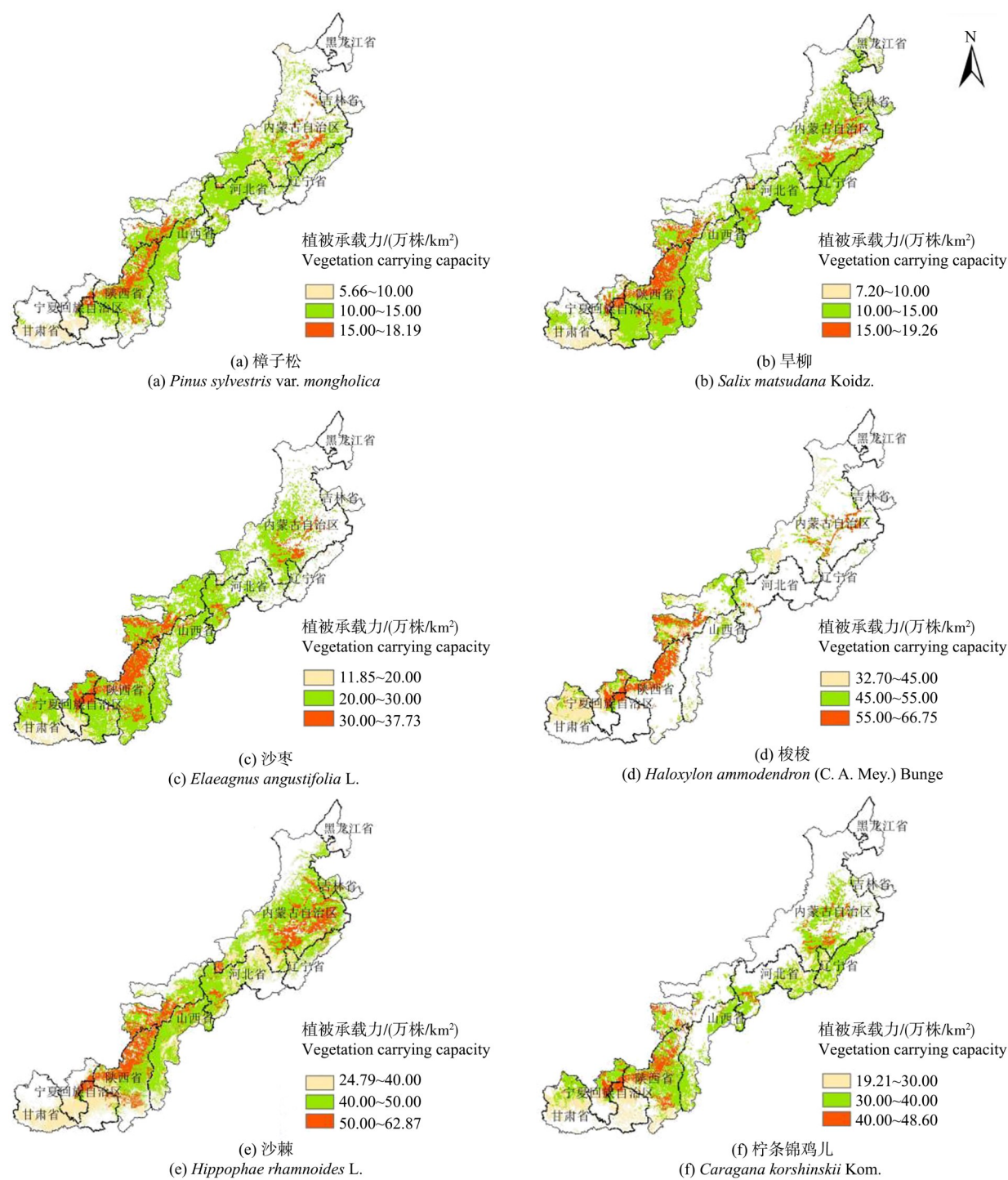


图3 中国北方农牧交错带典型固沙植物的土壤水分植被承载力

Fig. 3 Soil water-carrying capacity for typical sand-fixing plants in the agro-pastoral ecotone of Northern China

4.2 基于经典的土壤水分植被承载力方程的典型固沙植被承载力

本研究在适生区内,进一步采用土壤水分植被承载力模型,量化了各植被类型的合理种植密度。研究结果显示,不同植被的承载力存在显著差异且

与部分已有研究结果存在一定偏差。这些差异主要源于计算方法、环境条件及时间尺度等因素的综合影响,具体分析如下:樟子松植被承载力为5.66万~18.19万株/km²,与王晓蕊等^[48]的研究一致,但其较低的密度范围反映了浅根系树种对表层

土壤水分的依赖,易受干旱胁迫影响的特点。旱柳的植被承载力为7.20万~19.26万株/km²。结合黄土半干旱区年均降水量约为400 mm的情况,阔叶树种的造林密度在7.5万~9.0万株/km²较为合理^[49]。沙枣的植被承载力为19.21万~48.60万株/km²,这与其深根系高效利用地下水的的能力相关;梭梭虽然理论植被承载力为32.70万~66.75万株/km²,但综合考虑防风效益和成本,建议采用17.5万株/km²的优化密度^[50]。沙棘的植被承载力为27.49万~62.87万株/km²。本研究结果略低于张晨凤等^[51]在四川省若尔盖县的研究结果。究其原因可能与气候条件的不同有关,若尔盖地区降水更充沛,土壤持水能力更强,支持更高的种植密度。本研究得出柠条锦鸡儿的植被承载力为11.85万~37.73万株/km²,该研究结果高于薛艳春^[52]基于林下草本多样性及土壤理化性质的影响,建议种植10.8万~12.0万株/km²,原因为本研究计算的是初期存活密度,而不是考虑了成熟种内竞争的影响。由于本研究的植被承载力是基于最小生长面积计算得出的理论最大承载密度,因此密度相对较高。初期高密度可能有利于植被生长存活,但随植被长大,需通过间伐调整至适宜密度,以避免资源枯竭。

4.3 本研究局限及展望

本研究采用的“适宜性-承载力”耦合评估思路,虽然实现了从空间适宜区识别到种植密度量化的全过程评价,但仍存在一定的局限性。首先,当前的研究并未充分考虑人为干扰因素、种间竞争等对植被生长的影响,这可能在实际应用中影响评估结果的准确性;其次,研究主要聚焦于理论最大种植株数,未进一步扩展至生物量估算层面,计算生物量需要更多的实测数据,尤其是针对不同环境条件下的植被生长情况。然而,由于本研究未进行相关测量,缺乏足够的实地数据,因此无法准确提供生物量数据,限制了对生态系统服务功能的全面评估。

因此,进一步研究可以从以下3个方面深化:一是整合人类活动干扰因子,深入分析城市化、农业扩展等人类活动对植被生长和生态恢复的影响^[53];二是构建种间竞争模型,探索不同植物种类之间的相互作用及其对生态系统功能的影响^[54];三是针对不同生境下的生物量监测,结合遥感数据与实测数据,完善评估体系,为生态恢复提供更全面的定量支持^[55]。通过这些改进,能够更加精准地为生态修

复工程提供科学依据。

5 结 论

本研究为得出中国北方农牧交错带固沙植物的分布适宜性及土壤水分植被承载力,确定研究区内各类植被的适宜种植区域及最佳种植密度,以6种固沙植被为研究对象,根据最大熵模型和土壤水分植被承载力,综合探讨了中国北方农牧交错带固沙植物的适宜种植区域及合理种植密度。主要结论如下:

1)固沙乔木与灌木在研究区内大部分地区均表现出良好适生性。空间配置上,西南区域宜优先种植旱柳、沙枣、梭梭、沙棘和柠条锦鸡儿;中部地区适宜樟子松、旱柳、沙棘和柠条锦鸡儿;东北部地区则推荐以樟子松、旱柳、沙枣和沙棘为主。

2)不同植物在不同区域的土壤水分植被承载力差异显著。固沙乔木适宜种植密度约为5.66万~48.60万株/km²,固沙灌木适宜种植密度约为11.85万~66.75万株/km²。在甘肃省土壤水分植被承载力较低,陕西省西北部植被承载力较高。

本研究为干旱区与半干旱区的生态修复提供了科学依据,也为植被恢复与固沙植物种植策略的合理布局提供了指导。

参考文献 References

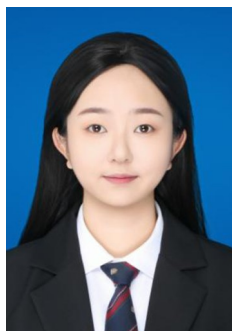
- [1] 侯智慧, 逢焕成. 中国北方农牧交错带农业资源可持续利用水平演变及趋势预测——以乌兰察布市为例[J]. 中国农业资源与区划, 2017, 38(4): 49-55
Hou Z H, Pang H C. Evolution and forecast of sustainable utilization level of agricultural resources in farming pastoral zone of Northern China: A case study of Wulanchabu City[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2017, 38(4): 49-55 (in Chinese)
- [2] 姜婧妍, 胡琦, 楚希雅, 周建翔, 张丽娜, 潘学标, 王靖, 黄彬香. 中国北方农牧交错带风蚀气候侵蚀力时空变化特征及其成因分析[J]. 中国农业气象, 2025, 46(4): 459-470
Jiang J Y, Hu Q, Chu X Y, Zhou J S, Zhang L N, Pan X B, Wang J, Huang B X. Spatiotemporal variation characteristics and causes of wind erosion climatic erodibility in the ecotone between agriculture and animal husbandry in Northern China[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2025, 46(4): 459-470 (in Chinese)
- [3] 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
- [4] 沈鹏, 李功权. 基于生态位因子模型的湖北省松材线虫病风险评估[J]. 浙江农林大学学报, 2021, 38(3): 560-566
Shen P, Li G Q. Risk assessment of *Bursaphelenchus xylophilus* in Hubei Province based on ecological niche factor analysis model[J]. *Journal of*

- Zhejiang A&F University*, 2021, 38(3): 560-566 (in Chinese)
- [5] 习文勇, 傅佩红. 基于模糊数学的柑橘种植土地适宜性评价[J]. 浙江农业学报, 2022, 34(1): 141-152
- Xi W Y, Fu P H. Land suitability evaluation of *Citrus* cultivation based on fuzzy mathematics[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2022, 34(1): 141-152 (in Chinese)
- [6] Busby J. BIOCLIM: A bioclimate analysis and prediction system[J]. *Plant Protection Quarterly*, 1991, 6: 8-9
- [7] 张英凡, 楚光明, 刘长青, 王小兵, 王俊刚, 杨振安, 吕露雨. 新疆焉耆垦区防护林主要树种适宜性评价研究[J]. 西北林学院学报, 2024, 39(4): 189-199
- Zhang Y F, Chu G M, Liu C Q, Wang X B, Wang J G, Yang Z A, Lv L Y. Suitability evaluation of the main tree species of shelterbelt in Yanqi agricultural areas of Xinjiang[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2024, 39(4): 189-199 (in Chinese)
- [8] Kaky E, Nolan V, Alatawi A, Gilbert F. A comparison between Ensemble and MaxEnt species distribution modelling approaches for conservation: A case study with Egyptian medicinal plants[J]. *Ecological Informatics*, 2020, 60: 101150
- [9] 宋慧芳, 党晓宏, 高永, 蒙仲举, 孙艳丽. 基于MaxEnt模型的内蒙古自治区樟子松潜在分布研究[J]. 四川农业大学学报, 2023, 41(2): 203-208, 248
- Song H F, Dang X H, Gao Y, Meng Z J, Sun Y L. Potential distribution of *Pinus sylvestris* in Inner Mongolia Autonomous Region based on MaxEnt model[J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2023, 41(2): 203-208, 248 (in Chinese)
- [10] 张晓芹, 李国庆, 杜盛. 未来气候变化对沙枣适宜分布区的影响预测[J]. 应用生态学报, 2018, 29(10): 3213-3220
- Zhang X Q, Li G Q, Du S. Predicting the influence of future climate change on the suitable distribution areas of *Elaeagnus angustifolia* [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(10): 3213-3220 (in Chinese)
- [11] Shaltout K, Sheded M, Salem A. Vegetation spatial heterogeneity in a hyper arid biosphere reserve area in North Africa. [J]. *ABCRA*, 2010, 69(25): 31-46
- [12] 郭忠升, 邵明安. 土壤水分植被承载力初步研究[J]. 科技导报, 2006, 24(2): 56-59
- Gou Z S, Shao M A. Preliminary study of vegetation carrying capacity of soil water[J]. *Science & Technology Review*, 2006, 24(2): 56-59 (in Chinese)
- [13] 郭忠升. 水资源紧缺地区土壤水分植被承载力论述[J]. 林业科学, 2011, 47(5): 140-144
- Guo Z S. A review of soil water carrying capacity for vegetation in water-limited regions [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2011, 47(5): 140-144 (in Chinese)
- [14] Price D. Carrying capacity reconsidered[J]. *Population and Environment*, 1999, 21(1): 5-26
- [15] 田有亮, 何炎红, 郭连生. 乌兰布和沙漠东北部土壤水分植被承载力[J]. 林业科学, 2008, 44(9): 13-19
- Tian Y L, He Y H, Guo L S. Soil water carrying capacity of vegetation in the northeast of Ulan Buh desert[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2008, 44(9): 13-19 (in Chinese)
- [16] Xia Y Q, Shao M A. Soil water carrying capacity for vegetation: A hydrologic and biogeochemical process model solution[J]. *Ecological Modelling*, 2008, 214(2-4): 112-124
- [17] 何炎红. 乌兰布和沙漠植被与水资源相互影响的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2006
- He Y H. The research on the interrelationship between the plants and water resource in Ulan Buh desert [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2006 (in Chinese)
- [18] 石莎, 付强, 韩富任, 冯金朝. 农牧交错生态脆弱地带植被构建水资源承载力估算: 以内蒙古和林格尔县为例[J]. 应用基础与工程科学学报, 2015, 23(S1): 1-10
- Shi S, Fu Q, Han F R, Feng J C. Estimation of water resources carrying capacity for vegetation restoration in vulnerable farming-pastoral zone: A case study of Horinger country, Inner Mongolia[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2015, 23(S1): 1-10 (in Chinese)
- [19] 段玉玺. 盐池县沙地造林的水分环境容量与区域生态用水研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2008
- Duan Y X. Study on environmental water capacity of sandy land for forest established and regionally ecological water use in Yanchi County[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2008 (in Chinese)
- [20] 刘欣, 查妮依, 王欣言, 王维奇, 王凯平, 张云路. 退耕还林(草)工程对中国北方农牧交错带生态系统健康的影响[J]. 生态学报, 2023, 43(15): 6392-6405
- Liu X, Zha N Y, Wang X Y, Wang W Q, Wang K P, Zhang Y L. Study of the impacts of the grain for green program on ecosystem health of the agro-pastoral ecotone of North China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(15): 6392-6405 (in Chinese)
- [21] 李文龙, 石育中, 鲁大铭, 刘倩, 乌铁红. 北方农牧交错带干旱脆弱性时空格局演变[J]. 自然资源学报, 2018, 33(9): 1599-1612
- Li W L, Shi Y Z, Lu D M, Liu Q, Wu T H. The spatio-temporal evolution of drought vulnerability in the ecotone between agriculture and animal husbandry in the north of China[J]. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(9): 1599-1612 (in Chinese)
- [22] 赵佳芮, 王鹏森, 苟扬, 曾园, 金雪梅, 刘刚, 其美拉姆, 周冀琼. 基于MaxEnt模型预测近现代和未来草地早熟禾的适宜分布区[J]. 草地学报, 2025, 33(9): 2992-3002
- Zhao J R, Wang P S, Gou Y, Zeng Y, Jin X M, Liu G, Qi M L M, Zhou J Q. The current and future potential distribution of *Poa pratensis* L in response to climate change based on MaxEnt model[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2025, 33(9): 2992-3002 (in Chinese)
- [23] 王艳召, 王泽根, 王继燕, 李伟. 近20年中国不同季节植被变化及其对气候的瞬时与滞后响应[J]. 地理与地理信息科学, 2020, 36(4): 33-40, 76
- Wang Y Z, Wang Z G, Wang J Y, Li W. Transient and lagged response of seasonal vegetation changes to climate in China during the past two decades [J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2020, 36(4): 33-40, 76 (in Chinese)
- [24] 包春兰, 陈华根. 东北平原植被对气候变化的滞后响应研究[J]. 测绘标准化, 2020, 36(3): 14-20
- Bao C L, Chen H G. On time-lag response of vegetation cover to climate change in northeast plain[J]. *Standardization of Surveying and Mapping*, 2020, 36(3): 14-20 (in Chinese)
- [25] 邓丽媛. 荒漠-绿洲过渡带斑块状典型植被根区土壤理化性质及其影响因子[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2022
- Deng L Y. Physicochemical properties of typical patch vegetation root zone soil and its influencing factors in desert-oasis ecotone[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2022 (in Chinese)
- [26] 刘逸夫, 王军辉, 谭灿灿, 袁艳超, 郭宇峰, 王志勇, 贾子瑞. 基于MaxEnt模型预测青杆和大果青杆潜在适生区[J]. 林业科学研究, 2025, 38(1): 169-180
- Liu Y F, Wang J H, Tan C C, Yuan Y C, Guo Y F, Wang Z Y, Jia Z R. Predicting the potential habitat of *Picea wilsonii* and *P. neoveitchii* based on the MaxEnt model[J]. *Forest Research*, 2025, 38(1): 169-180 (in Chinese)
- [27] 高蓓, 高茂盛, 董金芳. 基于最大熵模型和ArcGIS的陕西省单季稻种植分布预测及适宜性[J]. 中国农业大学学报, 2016, 21(3): 8-15
- Gao B, Gao M S, Dong J F. Planting distribution and suitability assessment

- of single-season rice based on MaxEnt and ArcGIS in Shanxi Province[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2016, 21(3): 8-15 (in Chinese)
- [28] 郭飞龙, 徐刚标, 卢孟柱, 孟艺宏, 袁承志, 郭恺琦. 基于MaxEnt模型分析胡杨潜在适宜分布区[J]. *林业科学*, 2020, 56(5): 184-192
- Guo F L, Xu G B, Lu M Z, Meng Y H, Yuan C Z, Guo K Q. Prediction of potential suitable distribution areas for *Populus euphratica* using the MaxEnt model[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2020, 56(5): 184-192 (in Chinese)
- [29] Khajoei Nasab F, Mehrabian A, Mostafavi H, Neemati A. The influence of climate change on the suitable habitats of *Allium* species endemic to Iran[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2022, 194(3): 169
- [30] 荣文文, 黄祥, 牛攀新, 刘津岐, 闫然, 苏金娟, 胡善超, 楚光明. 基于最大熵模型的中药材木贼麻黄潜在适生区[J]. *生态学报*, 2023, 43(20): 8631-8646
- Rong W W, Huang X, Niu P X, Liu J Q, Yan R, Su J J, Hu S C, Chu G M. Potentially suitable areas for traditional Chinese medicinal material *Ephedra equisetina* based on MaxEnt model[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(20): 8631-8646 (in Chinese)
- [31] 张童, 黄治昊, 彭杨靖, 王泳腾, 王萍, 王诗童, 崔国发. 基于Maxent模型的软枣猕猴桃在中国潜在适生区预测[J]. *生态学报*, 2020, 40(14): 4921-4928
- Zhang T, Huang Z H, Peng Y J, Wang Y T, Wang P, Wang S T, Cui G F. Prediction of potential suitable areas of *Actinidia arguta* in China based on Maxent model[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(14): 4921-4928 (in Chinese)
- [32] Shao M A, Wang Y Q, Xia Y Q, Jia X X. Soil drought and water carrying capacity for vegetation in the critical zone of the Loess Plateau: A review[J]. *Vadose Zone Journal*, 2018, 17(1): 170077
- [33] 马焕成, 吴延熊, 陈德强, Jack A. McConchie. 元谋干热河谷人工林水平平衡分析及稳定性预测[J]. *浙江林学院学报*, 2001, 18(1): 41-45
- Ma H C, Wu Y X, Chen D Q, McConchie J. Predicting the stability by water dynamics in plantation stand in dry hot valley of Yuanmou County[J]. *Journal of Zhejiang Forestry College*, 2001, 18(1): 41-45 (in Chinese)
- [34] 王宁, 毕华兴, 郭孟霞, 孔凌霄, 侯贵荣, 常译方. 晋西黄土残塬沟壑区刺槐人工林土壤水分植被承载力研究[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(6): 213-219
- Wang N, Bi H X, Guo M X, Kong L X, Hou G R, Chang Y F. Study on soil water vegetation carrying capacity of *Robinia pseudoacacia* plantation in the loess gully area of western Shanxi Province[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(6): 213-219 (in Chinese)
- [35] 胡金虎, 丁建丽, 张子鹏, 王娇, 刘景明. 近30年吐鲁番哈密地区植被生态需水估算[J]. *生态学报*, 2024, 44(19): 8699-8715
- Hu J H, Ding J L, Zhang Z P, Wang J, Liu J M. Estimation of vegetation ecological water demand in Tuha area in the past 30 years[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(19): 8699-8715 (in Chinese)
- [36] 徐军, 牛健植, 许陈韩, 潘振泰. 华北土石山区基于水分承载力的植被结构配置分析[J]. *西北林学院学报*, 2016, 31(3): 15-22
- Xu J, Niu J Z, Xu C H, Pan Z T. A study on the technology of vegetation horizontal and vertical structure configuration in secondary degeneration area based on the natural succession rule[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2016, 31(3): 15-22 (in Chinese)
- [37] 徐凯然. 典型草原矿区植被建设生态用水研究[J]. *内蒙古水利*, 2024(11): 99-100
- Xu K R. Study on ecological water use for vegetation construction in typical grassland mining area[J]. *Inner Mongolia Water Resources*, 2024(11): 99-100 (in Chinese)
- [38] 谢发兵, 米扛扛, 宋于洋. 无灌溉造林树种耗水特性的研究[J]. *节水灌溉*, 2022(12): 110-118
- Xie F B, Mi K K, Song Y Y. Study on water consumption characteristics of tree species in afforestation without irrigation[J]. *Water Saving Irrigation*, 2022(12): 110-118 (in Chinese)
- [39] Brown J L. SDMtoolbox: A Python-based GIS toolkit for landscape genetic, biogeographic and species distribution model analyses[J]. *Methods in Ecology and Evolution*, 2014, 5(7): 694-700
- [40] 薄晓智, 石晓宇, 赵炯超, 林倩, 史梦霞, 商蒙非, 褚庆全. 基于MaxEnt模型的中国裸燕麦种植气候适宜性评价[J]. *中国农业大学学报*, 2021, 26(9): 1-10
- Bo X Z, Shi X Y, Zhao J C, Lin Q, Shi M X, Shang M F, Chu Q Q. Climatic suitability of naked oat (*Avena Nuda* L.) planting in China based on MaxEnt model[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2021, 26(9): 1-10 (in Chinese)
- [41] Kong F, Tang L, He H, Yang F X, Tao J, Wang W C. Assessing the impact of climate change on the distribution of *Osmanthus fragrans* using Maxent[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28(26): 34655-34663
- [42] 张日升, 贾树海, 张国剑, 白金衡, 刘洪艳. 基于GIS的樟子松种植适宜性评价研究[J]. *土壤通报*, 2019, 50(3): 555-561
- Zhang R S, Jia S H, Zhang G J, Bai J H, Liu H Y. Suitability evaluation for *Pinus sylvestris* var *mongolica* planting based on GIS[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2019, 50(3): 555-561 (in Chinese)
- [43] 郭美妙, 张博纳, 汤璐瑶, 叶琳峰, 谢江波, 王忠媛. 降水梯度带共有种旱柳功能性状的区域分异规律[J]. *浙江农林大学学报*, 2025, 42(2): 281-290
- Guo M M, Zhang B N, Tang L Y, Ye L F, Xie J B, Wang Z Y. Regional differentiation patterns of common functional traits of *Salix matsudana* in precipitation gradient zones[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2025, 42(2): 281-290 (in Chinese)
- [44] 张晓芹, 李国庆, 杜盛. 未来气候变化对沙枣适宜分布区的影响预测[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(10): 3213-3220
- Zhang X Q, Li G Q, Du S. Predicting the influence of future climate change on the suitable distribution areas of *Elaeagnus angustifolia* [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(10): 3213-3220 (in Chinese)
- [45] 常红, 刘彤, 王大伟, 纪孝儒. 气候变化下中国西北干旱区梭梭(*Haloxylon ammodendron*)潜在分布[J]. *中国沙漠*, 2019, 39(1): 110-118
- Chang H, Liu T, Wang D W, Ji X R. *Haloxylon ammodendron*'s potential distribution under climate change in arid areas of Northwest China [J]. *Journal of Desert Research*, 2019, 39(1): 110-118 (in Chinese)
- [46] 陈松清, 东红芳, 岳怡锋, 郝媛媛, 刘新, 曹先宇, 马骏. 不同气候情景下中国沙棘的地理分布及动态变化预测[J]. *干旱区研究*, 2024, 41(9): 1560-1571
- Chen S Q, Dong H F, Yue Y F, Hao Y Y, Liu X, Cao X Y, Ma J. Geographical distribution and dynamic change prediction of *Hippophae rhamnoides* subsp *sinensis* under different climate scenarios[J]. *Arid Zone Research*, 2024, 41(9): 1560-1571 (in Chinese)
- [47] 邓迪, 赵泽斌, 马媛. 基于GIS的柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii*)分布模型[J]. *中国沙漠*, 2020, 40(5): 74-80
- Deng D, Zhao Z B, Ma Y. Modeling of species distribution with GIS in arid regions: Take *Caragana korshinskii* for example [J]. *Journal of Desert Research*, 2020, 40(5): 74-80 (in Chinese)
- [48] 王蕊蕊, 张馨月, 贾磊, 许中旗, 张菲, 付立华, 程顺. 抚育采伐对塞罕坝自然保护区樟子松人工林林分结构的影响[J]. *林业与生态科学*, 2024, 39(4): 357-363
- Wang X R, Zhang X Y, Jia L, Xu Z Q, Zhang F, Fu L H, Cheng S. Effects of thinning on the structure of *Pinus sylvestris* var *mongolica* plantation in Saihanba Nature Reserve[J]. *Forestry and Ecological Sciences*, 2024, 39(4): 357-363 (in Chinese)

- [49] 李超. 干旱半干旱地区抗旱造林技术探讨[J]. 中国水土保持, 2010(11): 26-29
Li C. Discussion on drought-resistant afforestation technology in arid and semi-arid areas[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2010(11): 26-29 (in Chinese)
- [50] 王湘莲, 张友焱, 韩政伟, 雷春英, 程金花, 朱美菲. 不同密度与配置梭梭林防风效果的风洞模拟试验[J]. 生态学报, 2025, 45(11): 5413-5425
Wang X L, Zhang Y Y, Han Z W, Lei C Y, Cheng J H, Zhu M F. Wind tunnel simulation test of wind protection effect of *Haloxylon ammodendron* forests with different density and configuration[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2025, 45(11): 5413-5425 (in Chinese)
- [51] 张晨凤, 贺丽, 董廷发, 邓东周, 刘俊雁. 基于Biome-BGC模型的若尔盖不同沙地类型土壤水分植被承载力对气候变化的响应[J]. 生态学杂志, 2024, 43(6): 1833-1840
Zhang C F, He L, Dong T F, Deng D Z, Liu J Y. Responses of soil water carrying capacity for vegetation in different sandy land types in Zoigê to climate change based on the Biome-BGC model[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2024, 43(6): 1833-1840 (in Chinese)
- [52] 薛艳春, 杨光, 陆乃静, 石默杰, 刘一, 代小琴. 林分密度对柠条人工林下物种多样性及土壤物理性质的影响[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2024, 52(10): 69-78
Xue Y C, Yang G, Lu N J, Shi M J, Liu Y, Dai X Q. Effects of afforestation density on species diversity and soil physical properties under *Caragana korshinskii* plantations[J]. *Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition*, 2024, 52(10): 69-78 (in Chinese)
- [53] 柴立夫, 田莉, 奥勇, 王小青. 人类活动干扰对青藏高原植被覆盖变化的影响[J]. 水土保持研究, 2021, 28(6): 382-388
Chai L F, Tian L, Ao Y, Wang X Q. Influence of human disturbance on the change of vegetation cover in the Tibetan Plateau[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021, 28(6): 382-388 (in Chinese)
- [54] 况小宝, 李婷, 林国江, 张称称, 徐佳文, 杨清培. 落叶木莲群落幼苗、幼树种内和种间竞争研究[J]. 西北林学院学报, 2025, 40(3): 225-232
Kuang X B, Li T, Lin G J, Zhang C C, Xu J W, Yang Q P. Intraspecific and interspecific competition of *Manglietia decidua* saplings[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2025, 40(3): 225-232 (in Chinese)
- [55] 娜玛罕, 李锦荣, 曹昱轩, 沈妍妃, 屈鹏程. 西鄂尔多斯荒漠灌木地上生物量估算模型构建[J]. 林业与环境科学, 2025, 41(3): 44-53
Na M H, Li J R, Cao Y X, Shen Y F, Qu P C. Study on estimation model of aboveground biomass of desert shrub in west Ordos[J]. *Forestry and Environmental Science*, 2025, 41(3): 44-53 (in Chinese)

责任编辑: 杨爱东



第一作者简介: 陶蕾, 北京林业大学水土保持学院林业专业硕士研究生。本科毕业于黑龙江八一农垦大学园艺园林学院。2023年、2024年连续2年获得北京林业大学硕士学业一等奖学金。参与内蒙古自治区科技计划项目(2023YFHH0068)、国家自然科学基金项目(M2242005)和国家自然科学基金项目(U23A2014)。



通讯作者简介: 赵媛媛, 博士, 北京林业大学水土保持学院教授。主要从事土地利用及覆盖变化监测与模拟、草地生态系统服务评估、荒漠化监测与防治等方向的科研教学工作。以第一或者责任作者在国内学术刊物发表研究论文40余篇, 其中SCI收录20篇。出版专著2部, 登记软件著作权3件。先后获国土资源科学技术奖二等奖、第八届现代生态学讲座暨第六届国际青年生态学者论坛优秀论文奖、全国林业硕士专业学位研究生优秀教学案例奖等科研和教学奖励。