

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2025.06.010

CSTR:32310.14.stbxb.2025.06.010

石婧婧,王东丽,赵晓亮,等.基于MaxEnt模型黄河“几”字弯地区适生树种分布格局预测[J].水土保持学报,2025,39(6):330-343.

SHI Qiangqiang, WANG Dongli, ZHAO Xiaoliang, et al. Prediction of suitable tree species distribution patterns in Ji-shaped bend of Yellow River based on MaxEnt model[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(6):330-343.

基于MaxEnt模型黄河“几”字弯地区 适生树种分布格局预测

石婧婧¹, 王东丽¹, 赵晓亮¹, 谢伟², 郭建军²

(1. 辽宁工程技术大学环境科学与工程学院, 辽宁 阜新 123000; 2. 内蒙古神东天隆集团
股份有限公司, 内蒙古 鄂尔多斯 017000)

摘要: [目的] 基于MaxEnt模型预测气候变化对黄河“几”字弯地区适生树种分布范围的影响,对黄河“几”字弯地区造林选种具有指导意义。[方法] 选择树种地理分布数据,结合气候、地形和土壤等环境因子,利用MaxEnt模型预测当前气候情景下和2010s—2090s 4种气候情景下(SSP126、SSP245、SSP370和SSP585)树种适生区的地理分布格局和限制其分布的主导环境因子。[结果] 1)当前气候情景下,气候因子和地理因子elev(海拔)占比显著累计贡献率超过50%,是影响黄河“几”字弯地区树种分布的主导因子;土壤、地形为次要环境因子;干旱、植物归一化指数、地表太阳辐射量和人类足迹平均贡献率低于15%,为一般环境因子。2)未来气候变化下,油松、樟子松、柠条锦鸡儿、侧柏、黄耆、沙棘、刺槐、连翘、山桃、紫丁香、杨树、新疆杨、圆柏、酸枣、沙枣、金叶榆、柳树呈现面积扩张趋势,扩张面积变化幅度为319.29~181768.02 km²。沙地柏、文冠果、杏树面积呈收缩趋势,收缩面积变化幅度为1793.96~175118.54 km²。3)黄河“几”字弯地区树种在全球气候变暖趋势下高适生区分布质心有向西北迁移的趋势,沙地柏、文冠果、杏树面积收缩树种质心迁移距离为108.20~182.33 km;高适生区由黄土高原中南部和吕梁山南部迁移至库布齐沙漠,河套平原东部,吕梁山东部和黄土高原南部。其中,库布齐沙漠,河套平原东部高适生区所占面积比例较大,可达85%以上。[结论] 杏树、沙地柏、文冠果适生区面积呈收缩趋势,其他树种面积扩张较为稳定。在黄河“几”字弯地区生态修复造林时,可优先考虑种植油松、樟子松、柠条锦鸡儿、侧柏、黄耆、沙棘、刺槐、连翘、山桃、紫丁香、杨树、新疆杨、圆柏、酸枣、沙枣、金叶榆、柳树,未来气候变化下能够稳定扩张,为区域森林生态系统稳定与生态恢复效应维持提供保障。

关键词: 黄河“几”字弯; MaxEnt模型; 主导气候因子; 气候变化; 树种选择

中图分类号: F301.24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2025)06-0330-14

Prediction of Suitable Tree Species Distribution Patterns in Ω -Shaped Bend of Yellow River Based on MaxEnt Model

SHI Qiangqiang¹, WANG Dongli¹, ZHAO Xiaoliang¹, XIE Wei², GUO Jianjun²

(1. College of Environmental Science and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000, China;

2. Inner Mongolia Shendong Tianlong Group Co., Ltd., Ordos, Inner Mongolia 017000, China)

Abstract: [Objective] Based on the MaxEnt model, this study predicts the influence of climate change on the distribution range of suitable tree species in the Ω -shaped bend of the Yellow River, providing guidance for sustainable afforestation and tree species selection in this region. [Methods] The geographic distribution data of tree species were selected and combined with environmental factors such as climate, topography, and soil. The MaxEnt model was employed to predict the geographical distribution patterns of suitable habitats for tree species

收稿日期:2025-04-17 修回日期:2025-05-26 录用日期:2025-06-12 网络首发日期(www.cnki.net):2025-09-04

资助项目:鄂尔多斯市科技突围“揭榜挂帅”重大项目(JBGS2024010);辽宁省自然科学基金联合基金计划项目(2025-Z0008);辽宁省高校基本科研业务费项目(LJ212410147039)

第一作者:石婧婧(1998—),女,硕士研究生,主要从事生态恢复研究。E-mail:Xiaoshi1221@163.com

通信作者:王东丽(1986—),女,博士,副教授,硕士生导师,主要从事植被恢复与生态恢复研究。E-mail:starhome0522@163.com

http://stbxb.alljournal.com.cn

under current climatic scenarios and under four future climate scenarios (SSP126, SSP245, SSP370, and SSP585) from the 2010s to the 2090s, as well as to identify the dominant environmental factors constraining their distribution. [Results] 1) Under current climate scenarios, climatic factors and the geographical factor *elev* (elevation) exhibited significant cumulative contribution rates exceeding 50%, serving as the dominant factors influencing tree species distribution in the Yellow River's Ω -shaped bend. Soil and topography served as secondary environmental factors, while drought, normalized difference vegetation index (NDVI), surface solar radiation, and human footprint showed an average contribution rate of less than 15%, making them general environmental factors. 2) Under future climate change, species such as *Pinus tabulaeformis*, *Pinus sylvestris*, *Caragana korshinskii*, *Platycladus orientalis*, *Hedysarum fruticosum*, *Hippophae rhamnoides*, *Robinia pseudoacacia*, *Forsythia suspensa*, *Prunus davidiana*, *Syringa oblata*, *Populus spp*, *Populus bolleana*, *Juniperus chinensis*, *Ziziphus jujuba*, *Elaeagnus angustifolia*, *Ulmus pumila*, *Salix matsudana* showed expansion trends in area, with area expansion ranging from 319.29 to 181 768.02 km². Conversely, species including *Sabina vulgaris*, *Xanthoceras sorbifolium*, and *Armeniaca sibirica* showed contraction trends in area, with area reduction ranging from 1 793.96 km² to 175 118.54 km². 3) Under the global warming trend, the distribution centroid of highly suitable areas for tree species in the Yellow River's Ω -shaped bend demonstrated a northwestward migration trend. The centroid migration distances of species with shrinking suitable areas, including *Sabina vulgaris*, *Xanthoceras sorbifolium*, and *Armeniaca sibirica* ranged from 108.20 km to 182.33 km. The highly suitable areas shifted from the central-southern Loess Plateau and southern Lüliang Mountains to the Kubuqi Desert, eastern Hetao Plain, eastern Lüliang Mountains, and southern Loess Plateau. Notably, the Kubuqi Desert and eastern Hetao Plain accounted for a large proportion of highly suitable areas, exceeding 85%. [Conclusion] The suitable habitat areas of *Armeniaca sibirica*, *Sabina vulgaris*, and *Xanthoceras sorbifolium* showed a contraction trend, while other species exhibited relatively stable expansion. For ecological restoration and afforestation in the Yellow River's Ω -shaped bend, priority should be given to planting *Pinus tabulaeformis*, *Pinus sylvestris*, *Caragana korshinskii*, *Platycladus orientalis*, *Hedysarum fruticosum*, *Hippophae rhamnoides*, *Robinia pseudoacacia*, *Forsythia suspensa*, *Prunus davidiana*, *Syringa oblata*, *Populus spp*, *Populus bolleana*, *Juniperus chinensis*, *Ziziphus jujuba*, *Elaeagnus angustifolia*, *Ulmus pumila*, *Salix matsudana*. These species demonstrate stable expansion under future climate change, thereby providing support for the stability of regional forest ecosystems and the maintenance of ecological restoration effects.

Keywords: Ω -shaped bend of Yellow River; MaxEnt model; dominant climatic factors; climate change; tree species selection

Received: 2025-04-17

Revised: 2025-05-26

Accepted: 2025-06-12

Online(www.cnki.net): 2025-09-04

黄河“几”字弯作为国家生态安全屏障核心区正面临严重水土流失问题^[1]。基于CMIP6多模式集合预测,黄河“几”字弯地区正经历降水减少与积温加速上升的协同胁迫^[2]。这种水热失衡导致干旱指数(AI)突破0.25临界值,触发荒漠草原-沙地生态系统的非线性退化^[3]。卫星遥感反演显示,2020—2023年植被覆盖度变异系数达0.41,显著高于“三北”工程区平均水平^[4]。气候变化正重塑黄河“几”字弯等生态脆弱区的植被格局,其固有的生态适应机制与地理分布模式面临严峻的适应性危机。据调查^[5]统计,黄河“几”字弯地域现存木本植

物约326种,其中区域特有属7个(如四合木属 *Tetraena*、沙冬青属 *Ammopiptanthus*),特有种23种(如鄂尔多斯小檗 *Berberis caroli*、沙柳 *Salix psammophila* 等)。已有研究^[6]表明,在SSP585高排放气候情景下,本世纪末该区域年平均气温可能上升4.2~6.8℃,导致该区域现有树种适生区面积平均缩减42%、38%的乔木树种和51%的灌木物种将面临生态位压缩风险,局部灭绝率可能达到11%,水分胁迫和极端干旱事件频发正深刻重塑着树种的群落结构和演替轨迹。全球气候变暖驱动植被栖息地范围的迁移,并主导植物群落的动态平衡演变^[7]。

深入了解气候变化对树种的影响可以为“三北”防护林工程可持续造林树种选择提供指导,对黄河“几”字弯地区生态系统的稳定平衡和生物多样性具有重要意义。

物种分布模型(species distribution models, SDMs)是一种基于物种存在或丰富度数据与环境因子数据的数学模型。该模型通过在由环境因子构成的多维生态空间中,利用采样点的统计信息来估算物种的生态位需求^[8]。通过解析物种现存分布与环境变量的生态位关系,预测其地理分布格局及气候变化响应趋势^[9]。其中最大熵模型(MaxEnt)凭借其在数据稀缺条件下的稳定性(AUC值普遍 >0.85)和环境因子筛选能力,已得到广泛应用^[10]。目前,MaxEnt模型主要应用于气候变化下物种分布预测及其影响因子的研究,已有研究^[11]发现,通过结合37个环境因子划分胡颓子属植物全球适生区,得出其主要影响因子为降水量和温度;北重楼和杉木在未来气候变化下适生区逐渐北扩,年平均降水量为主要影响因子^[12],以及应用于中国东北地区建群树种对气候变化响应变化^[13]和云南干热河谷适生树种选择等^[14]。使用MaxEnt模型也可开展对入侵物种风险的评估,如毛竹属植物在欧洲地区的扩散趋势分析^[15]。MaxEnt模型应用于珍稀濒危物种的潜在分布预测及影响因子研究。

黄河“几”字弯作为北方防沙带与黄河生态廊道的战略交汇区,其植被恢复正面临暖干化(CSI指数 >2.5)与土壤侵蚀模数增大 $[10\ 000\ t/(km^2 \cdot a)]$ 的双重胁迫^[16],未来气候变化对树种适生区影响的预测研究亟待深化。目前该地区相关研究主要围绕生物多样性^[17]、濒危物种保护、退化生境修复技术^[18],及柠条(*Caragana korshinskii*)、沙冬青(*Ammopiptanthus*)等优势种的耐旱性评估。因此,本研究根据“三北”

工程造林主要树种苗木清单(2024年),按造林规模选取23种黄河“几”字弯地区主要造林树种,根据当前气候情景下的环境因子和物种分布预测造林树种的适生情况,同时预测未来气候变化情景下的造林树种适生区动态分布格局,为“三北”工程提供可持续造林选种提供参考,进而为黄河“几”字弯地区生态环境的改善与恢复及区域可持续发展提供保障。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

“三北区域”指中国西北、华北及东北的生态脆弱地带。据2025年度“三北”工程苗木供需分析报告^[20]统计,2024年造林绿化苗木约43亿株,其中乔木树种苗木(油松、侧柏、樟子松、杏树等)约31亿株,灌木树种苗木(柠条锦鸡儿、沙棘、紫穗槐、柳树、侧柏等)约12亿株。黄河“几”字弯地区($34^{\circ}37'05''\sim 41^{\circ}07'40''N$, $104^{\circ}56'15''\sim 111^{\circ}33'50''E$)以黄河流域边界裁切形成,南起黄土高原北缘(白于山),西接贺兰山-六盘山生态屏障,北抵阴山草原化荒漠区,东达吕梁山地森林区(管涔山支脉),总面积38.6万 km^2 ,地处青藏高寒区、黄土丘陵区与内蒙古高原草原区的生态交错带,海拔307~3 547 m^[21](图1)。该地区属干旱-半干旱气候区,年平均气温 $5.5\sim 8.7\ ^{\circ}C$,年平均降水量170~490 mm,沙尘暴日数 $>10\ d/a$,扬沙日数 $>20\ d/a$ 。该地区连续黄土分布约27万 km^2 (厚100~200 m),发育沟间地、沟谷及潜蚀地貌,为世界典型黄土区^[22];同时是库布其沙漠、毛乌素沙地全境及乌兰布和与腾格里沙漠部分区域,是黄河流域沙漠化主控区;该地区为黄河流域生态保护和高质量发展核心区、“三北”工程标志性战役实施地、京津及东部沙尘暴主要沙源区与传输路径、黄河中下游泥沙核心来源区及荒漠化防治攻坚核心带,其直接影响黄河流域水土保持与生态安全^[23]。

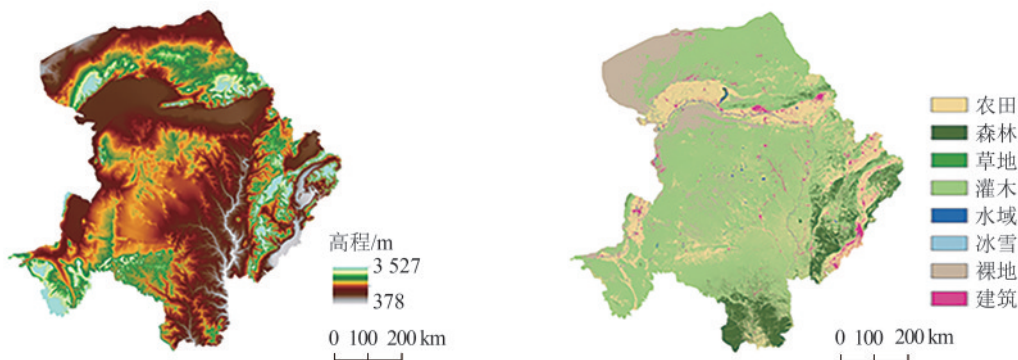


图1 黄河“几”字弯高程和土地利用

Fig. 1 Elevation and land use of Yellow River's Ω -shaped bend

1.2 数据来源

本研究依据“三北”工程造林主要树种苗木清单

(2024年)^[24]进行树种筛选,将苗木数量 ≥ 100 万株确

定为研究区主要造林树种,作为本研究的研究树种

(表1)。树种地理坐标数据来自全球生物多样性信息网络平台(<https://www.gbif.org/>)、中国数字植物标本馆(<http://www.cvh.ac.cn/>)、国家标本资源共享平台(<http://www.nsii.org.cn/2017/home.php>),分布数据年份为1970—2024年。使用ENMTools工具对树种分布数据进行筛选,设置空间去重阈值为1 km

(即每个1 km×1 km 栅格内仅保留1个分布点),以避免空间自相关对模型预测的干扰。同时剔除相邻分布点间距<5 km的冗余记录,保留空间分布均匀的样本点。最终清洗后的数据涵盖23种树种共12 358条有效分布记录,平均每个物种分布点数量为(537±82)个。

表1 造林主要树种汇总

Table 1 Summary of major tree species for afforestation

物种	拉丁名	代码	苗木数量/万株	科	属	特征
油松	<i>Pinus tabulaeformis</i>	PT	16 952.66	松科	松属	常绿乔木,喜光、耐寒、耐旱
樟子松	<i>Pinus sylvestris</i>	PM	8 030.93	松科	松属	常绿乔木,耐寒、耐旱、耐瘠薄
柠条锦鸡儿	<i>Caragana korshinskii</i>	CK	6 692.08	豆科	锦鸡儿	落叶灌木,耐寒、耐旱、耐瘠薄
杏树	<i>Armeniaca sibirica</i>	AS	3 025.51	蔷薇	杏属	落叶乔木或灌木,耐寒、耐旱
紫穗槐	<i>Amorpha fruticosa</i>	AF	2 593.24	豆科	紫穗槐属	落叶灌木,耐寒、耐旱、耐盐碱
侧柏	<i>Platycladus orientalis</i>	PO	2 217.65	柏科	侧柏属	常绿乔木,耐寒、耐旱、耐瘠薄
黄耆	<i>Hedysarum fruticosum</i>	HF	2 308.76	豆科	岩黄耆属	落叶半灌木,耐寒、耐旱、耐盐碱
沙棘	<i>Hippophae rhamnoides</i>	HR	1 698.25	胡颓子科	沙棘属	落叶灌木,耐寒、耐旱、耐盐碱
刺槐	<i>Robinia pseudoacacia</i>	RP	1 579.48	豆科	刺槐属	落叶乔木,耐寒、耐旱、耐瘠薄
连翘	<i>Forsythia suspensa</i>	FS	1 385.87	木犀科	连翘属	落叶灌木,耐寒、耐旱、耐瘠薄
山桃	<i>Prunus davidiana</i>	PD	1 375.93	蔷薇科	桃属	落叶乔木或灌木,耐寒、耐旱
紫丁香	<i>Syringa oblata</i>	SO	1 346.82	木犀科	丁香属	落叶灌木,耐寒、耐旱、耐瘠薄
落叶松	<i>Larix gmelinii</i>	LG	1 241.76	松科	落叶松属	落叶乔木,耐寒、耐旱、耐瘠薄
沙地柏	<i>Sabina vulgaris</i>	SV	1 111.32	柏科	圆柏属	常绿灌木,耐寒、耐旱、耐瘠薄
杨树	<i>Populus spp</i>	PS	827.96	杨柳科	杨属	落叶乔木,耐寒、耐旱、耐水湿
新疆杨	<i>Populus bolleana</i>	PB	468.75	杨柳科	杨属	落叶乔木,耐寒、耐旱、耐水湿
圆柏	<i>Juniperus chinensis</i>	JC	393.75	柏科	圆柏属	常绿乔木,耐寒、耐旱、耐瘠薄
沙冬青	<i>Ammopiptanthus mongolicus</i>	AM	301.25	豆科	沙冬青属	落叶半灌木,耐寒、耐旱、耐盐碱
酸枣	<i>Ziziphus jujuba</i>	ZS	278.66	鼠李科	枣属	落叶乔木,耐寒、耐旱、耐瘠薄
沙枣	<i>Elaeagnus angustifolia</i>	EA	248.29	胡颓子科	胡颓子属	落叶乔木,耐寒、耐旱、耐盐碱
金叶榆	<i>Ulmus pumila</i>	UP	243.52	榆科	榆属	落叶乔木,耐寒、耐旱、耐水湿
柳树	<i>Salix matsudana</i>	ST	213.44	杨柳科	柳属	落叶乔木,耐寒、耐旱、耐水湿
文冠果	<i>Xanthoceras sorbifolium</i>	XS	192.23	无患子科	文冠果属	落叶乔木,耐寒、耐旱、耐瘠薄

1.3 环境因子

为充分考虑树种适生区分布与环境因子的关系,选取气候因子、地理因子、土壤因子、干旱因子、地表太阳辐射量、植被类型、植被归一化指数和人类足迹(表2)用于模型运算,设置空间分辨率为30 s。当前气候数据及未来气候数据(2010s—2090s)均下载于(<http://www.woldclim.org>),未来气候数据模式选择第六次国际耦合模式比较计划(CMIP6)中国(北京)气候中心中等分辨率气候系统模式(BCC—CSM2—MR),未来气候变化情景包括4种共享社会经济路径情景SSP126、SSP245、SSP370和SSP585。SSP126气候情景是增温限制在2℃以内的可持续发展路径,表示低脆弱性、低减缓压力和低辐射强迫的综合影响;SSP245气候情景是增温限制在3℃以内的适度发展路径,表示中等社会脆弱性与中等辐射强迫的组合;SSP370气候情景是增温限制在4.1℃以内的局部发展路径,表示高社会脆弱性与相对高的人为辐射强迫的组合;SSP585气候情景是增温限制在5℃以内的常规发展路径,表示高强度情景。利用ArGIS表面分析工具从世界气候数

据的数字高程数据提取得到坡度和坡向数据,从国家冰川冻土沙漠科学数据中心获取土壤因子数据(<http://www.ncdc.ac.cn>)。国家青藏高原科学数据中心获取地表太阳辐射量数据(<http://data.pde.ac.cn>),资源环境科学与数据中心获取植被类型和植物归一化指数数据(<http://www.resde.cn>),国际地球科学信息网络中心获取人类活动强度数据(<http://cesin.org>)的人类足迹数据层,全国地理信息资源目录服务系统网站(www.webmap.cn)获取黄河“几”字弯底图数据。

1.4 模型构建与评价

1.4.1 环境因子筛选 环境变量间的相关性是制约MaxEnt模型预测精度的关键问题。初始建模阶段,基于贡献率阈值剔除贡献率为0的环境因子;对于剩余环境因子通过SPSS 27.0软件进行相关性分析,保留相关系数<0.8的环境因子;最终筛选出用于建模的17个环境因子,并通过R4.2.3构建环境因子相关性热图,结果见图2。模型构建中设定土壤因子为静态参数,提取出与当前气候情景下对应的环境因子用于未来时期模型构建。

表 2 环境因子
Table 2 Environmental factors

类型	字段	描述	类型	字段	描述
气候因子	bio1	年平均气温	土壤因子	t-cec-soil	土壤阳离子交换含量
	bio2	昼夜温差月均值		t-CaSO	土壤硫酸盐含量
	bio3	等温性		t-CaCO	土壤碳酸盐含量
	bio4	温度季节性		t-bs	土壤基本饱和度
	bio5	最暖月最高温度		l-grave*	土壤砾石含量
	bio6	最冷月最低温度		t-oc	土壤有机碳含量
	bio7	温度年度范围		l-ph-H0*	土壤酸碱度
	bio8	最湿季度平均温		t-ref-bulk	土壤体积质量
	bio9	最干季度平均温		t-sand	沙含量
	bio10	最暖季度平均温		t-silkt*	淤泥含量
	bio11	最冷季度平均温		t-teb	土壤交换性盐基
	bio12	年平均降水量		t-drainage	土壤排灌级别
	bio13	最湿月降水量		aspect*	坡向
	bio14	最干月降水量		elev*	海拔
	bio15	降水量季节变异系数		slope*	坡度
	bio16	最湿季度降水量		ai	干旱指数
	bio17	最干季度降水量		et0*	潜在蒸散
	bio18	最暖季度降水量		srad*	地表太阳辐射量
	bio19	最冷季度降水量		veg*	植物类型
土壤因子	t-esp	土壤可交换钠盐	ndvi*	植物归一化指数	
	t-clay*	黏土含量	hfp*	人类足迹	
	t-cec-soil	阳离子交换能力			

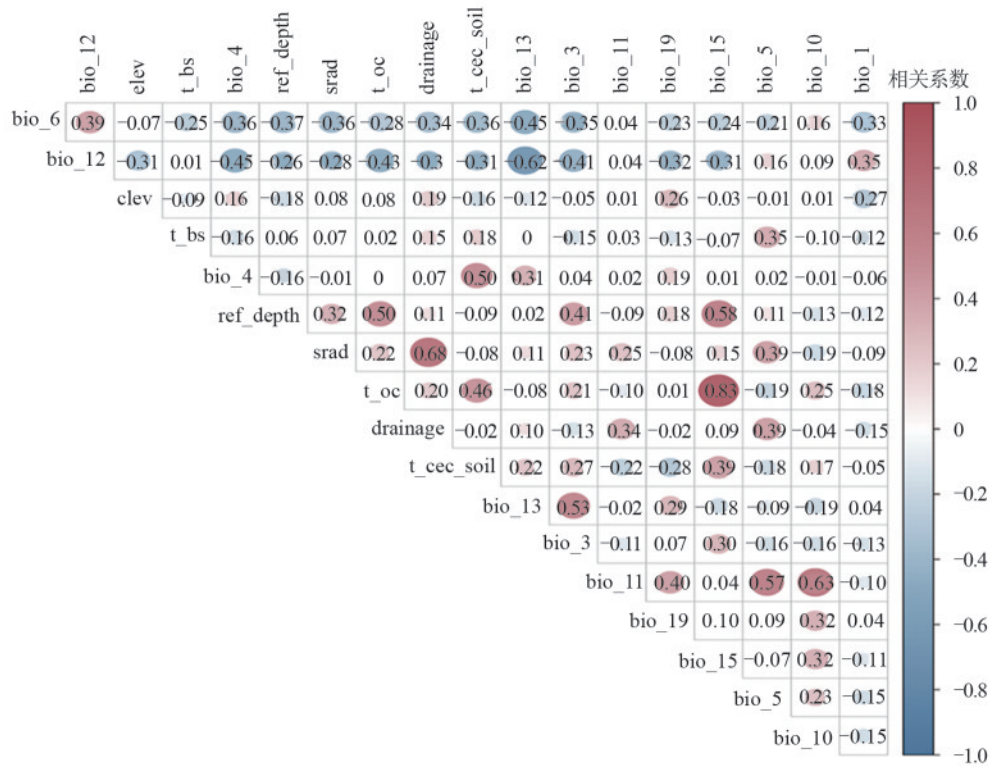


图 2 建模因子相关性热图

Fig. 2 Correlation heatmap of modeling factors

1.4.2 MaxEnt 模型设置 将树种分布数据和建模环境因子导入 MaxEnt(V3.4.4)模型,分布点数据的 75%用于建模,25%作为模型检验,重复 10 次,以 10 次运算的平均结果作为最终结果。其他参数均为软件默认值进行建模。受试者特征曲线 ROC 值 (receiver operating characteristic)与横坐标围成的面

积称为 AUC 值(area under the curve),可作为评价模型的指标^[25],其检验标准为:AUC 值为 0.9~1.0 表示非常准确,0.8~0.9 表示很准确,0.7~0.8 表示较准确,AUC 值≤0.6 表示模型预测结果失败^[26]。

1.4.3 潜在适生区分类 将模型预测结果导入 ArcGIS 10.8 软件,对其进行适宜性划分和可视化处理,

适生区最优阈值选择采用自然间断点分级法(Jenks)将适生区划分为非适生区、低适生区、中适生区和高适生区^[27]。依据树种低适生区、中适生区、高适生区总范围能否覆盖黄河“几”字弯地区和树种特性判断未来气候变化情景下树种的变化情况,树种适生区通过重分类、栅格运算统计得到未来树种适生区空间格局变化情况。

1.5 分布区域叠加与质心迁移

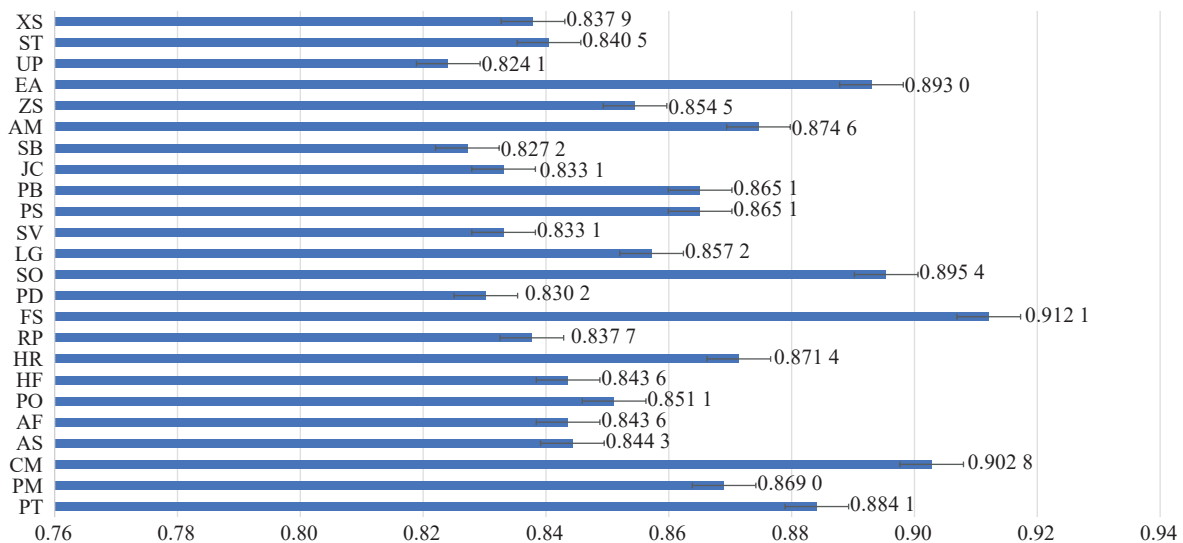
本文使用 ArcGIS 10.8 软件的相交工具进行分布区叠加,将图层添加到 ArcGIS 10.8 软件中。打开相交工具,设置参数,执行相交,计算多个图层的交集部分,ArcGIS 10.8 软件生成包含输入图层重叠部分的几何和属性信息的新图层。利用“Spatial Statistics Tools”工具中“平均中心”确定面积收缩树种质心位置,并使用“要素”工具中“点集转线”绘制

出面积收缩树种质心位置变化趋势,分析现代及 2010s—2090s 年 4 种气候情景下(SSP126、SSP245、SSP370 和 SSP585)5 个不同背景下质心的位置,用不同时期质心位置的变化反映面积收缩树种适生区空间迁移路线。

2 结果与分析

2.1 Maxent 模型评估和环境因子

本研究通过受试者特征曲线(ROC)评估模型精度,树种的 AUC 为 0.824(山桃)~0.912(连翘),平均值为 0.858(图 3)。结合图 4 可知,AUC>0.85 的树种(如油松、柠条锦鸡儿)均表现出对气候因子(bio12、bio4)较强的依赖性(累计贡献率>65%),而低 AUC 值物种(如山桃、柳树)则与土壤因子(t-drainage)的相关性更强。



注:图中缩写字母表示不同树种,见表 1。下同。

图 3 树种的 AUC 值

Fig. 3 AUC values of tree species

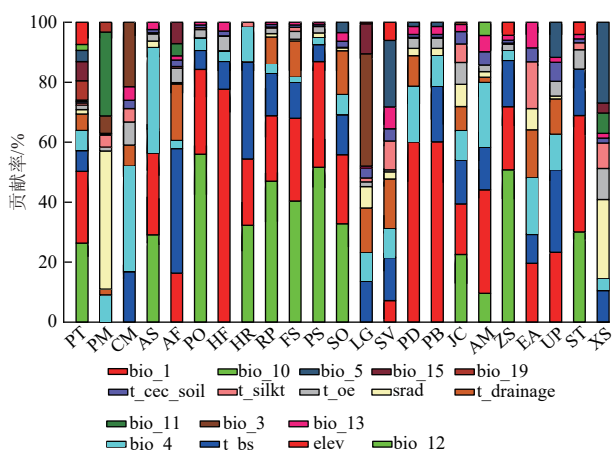


图 4 树种环境因子贡献率

Fig. 4 Contribution rates of environmental factors to tree species

用于建模的 17 种环境因子中(图 4),气候因子 bio12(年平均降水量)、bio4(温度季节性)、bio3(等温

性),地理因子 elev(海拔)占比显著且累计贡献率超过 50%,为影响黄河“几”字弯树种适生区分布的主导环境因子。T-bs(土壤阳离子交换量)、t-drainage(土壤排灌级别)在部分树种(如沙地柏、紫穗槐、落叶松)中贡献突出,为次要环境因子,反映特定树种对土壤理化性质有所依赖。剩余环境因子平均贡献率均低于 15%,为一般环境因子。金叶榆、黄耆等树种海拔因子贡献率超 25%,表明此类树种在黄河“几”字弯北部平均海拔升高地区面积呈现扩张趋势。气候因子总贡献高于土壤因子,表明黄河“几”字弯树种的适生区分布更依赖温度、降水等气候参数,而非土壤理化特性。地理因子 elev(海拔)与气候因子的叠加效应(累计贡献率 75.1%),进一步凸显区域地理与气候交互作用对生态格局的塑造。

2.2 当前气候情景下树种适生区和非适生区面积

由图5可知,当前气候情景下,落叶松、新疆杨、圆柏、沙枣、文冠果适生面积达80%以上,紫穗槐、刺槐、连翘、沙冬青、柳树适生区面积占比在50%以下,油松、樟子松、柠条锦鸡儿、杏树、侧柏、黄耆、沙棘、连翘、山桃、紫丁香、杨树等适生区面积占比为56.3%~74.5%。其中,紫丁香、文冠果高适生区面积占比分别为32.1%、

31.9%,油松、柠条锦鸡儿,黄耆、圆柏、沙枣高适生区面积占比20%以上。樟子松、杏树、紫穗槐、侧柏、沙棘、山桃、沙地柏、杨树、沙冬青、酸枣高适生区面积为10%~20%。刺槐、柳树高适生区面积占比不足5%,分别为3.8%、1.7%。刺槐中适生区面积占比相对较高,樟子松、新疆杨、落叶松、柳树低适生区面积占比相对较高,其他树种高适生区、中适生区、低适生区占比相近。

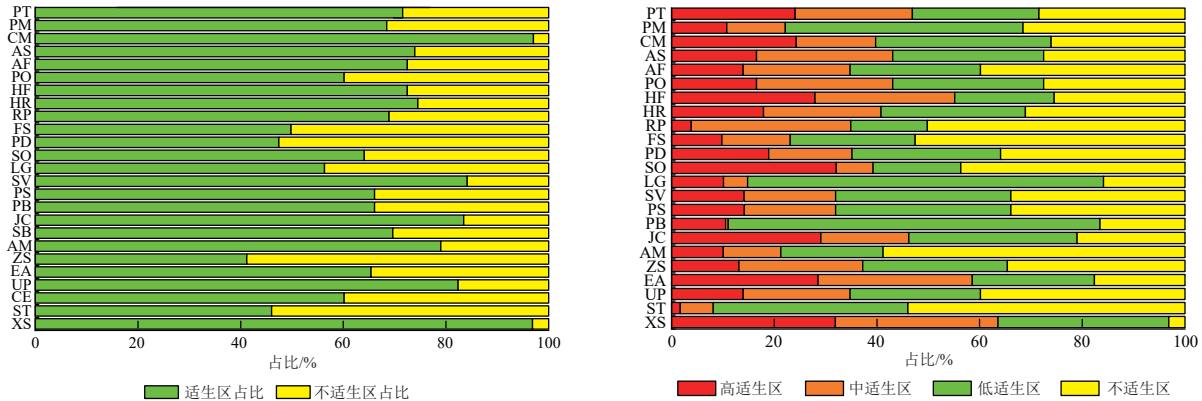


图5 当前气候情景下树种适生区和非适生区面积占比

Fig. 5 Area proportions of suitable and unsuitable habitats for tree species under current climate scenario

黄河“几”字弯地区总面积38.6万km²,由表3可知,柠条锦鸡儿不适生区仅占11 242.51km²,适生区面积367 344.99 km²,高适生区达156 151.77 km²,文冠果适生区面积366 790.73 km²,表明2种物种在当前气候情景下适生性较高,沙地柏,金叶榆适生区面积分别为318 497.23、311 778.44 km²,但近

63 375.1 km²区域不适宜生长,种植时需谨慎规划其范围。樟子松、杏树、紫穗槐、侧柏、黄耆、沙棘、刺槐、连翘、山桃、紫丁香、落叶松、沙地柏、杨树、新疆杨、圆柏、柳树、沙冬青、酸枣、沙枣、金叶榆、柳树不适生区面积较大,反映不同树种对气候敏感度差异显著。

表3 当前气候情景下树种适生区和非适生区面积

Table 3 Areas of suitable and unsuitable habitats for tree species under current climate scenario

物种	代码	不适生区	低适生区	中适生区	高适生区
油松	PT	107 770.42	93 224.97	86 552.76	91 120.17
樟子松	PM	119 382.41	175 311.81	43 149.03	40 725.91
柠条锦鸡儿	CK	11 242.51	94 962.23	116 230.99	156 151.77
杏树	AS	98 789.69	129 445.07	58 531.07	91 910.37
紫穗槐	AF	104 271.68	111 189.14	100 374.14	62 652.88
侧柏	PO	149 818.22	106 215.52	72 401.61	50 149.09
黄耆	HF	104 271.68	111 189.14	100 374.14	62 652.88
沙棘	HR	96 606.13	73 344.98	103 148.74	105 832.87
刺槐	RP	117 647.61	106 380.94	86 679.93	67 748.99
连翘	FS	263 976.96	78 324.78	163 578.38	20 020.91
山桃	PD	198 985.02	92 064.08	50 519.96	37 013.58
紫丁香	SO	136 363.82	109 843.83	61 508.61	71 855.46
落叶松	LG	165 331.32	64 722.36	27 077.23	121 585.49
沙地柏	SV	59 989.83	262 453.67	17 812.25	38 231.31
杨树	PS	118 745.59	139 138.61	60 982.65	59 717.57
新疆杨	PB	128 374.59	129 197.61	67 462.65	53 579.87
圆柏	JC	59 989.83	262 453.67	1 782.25	38 231.31
沙冬青	AM	79 543.83	124 001.87	64 877.82	110 159.71
酸枣	ZS	222 700.31	75 277.18	42 596.44	38 053.54
沙枣	EA	131 008.02	106 576.48	91 314.16	49 673.06
金叶榆	UP	66 760.37	90 131.86	113 562.82	108 083.76
柳树	ST	204 315.08	143 410.45	24 315.08	6 450.72
文冠果	XS	11 825.91	126 073.68	119 981.68	120 735.37

2.3 当前气候情景变化下树种的分布

由图 6 可知,树种适生区在当前气候情景下分布差异较为显著,整体来看,高适生区主要分布于黄土高原中南部、吕梁山南部,少数分布于鄂尔多斯以东、毛乌素沙地等地。柠条、刺槐、圆柏、杨树、酸枣、文冠果适生区呈现块状连续分布,其适生面积约占黄河“几”字弯地区

97% 以上;杏树、紫穗槐、侧柏、沙棘、山桃、紫丁香、新疆杨、沙冬青、酸枣、沙枣、柳树在鄂尔多斯高原地区适生区呈现散点分布;圆柏、樟子松高适生区呈现聚集在毛乌素沙地和鄂尔多斯高原地区;紫丁香高适生区呈现聚集在黄土高原西南部及吕梁山南部;文冠果高适生区聚集在河套平原、库布齐沙漠及鄂尔多斯南部。

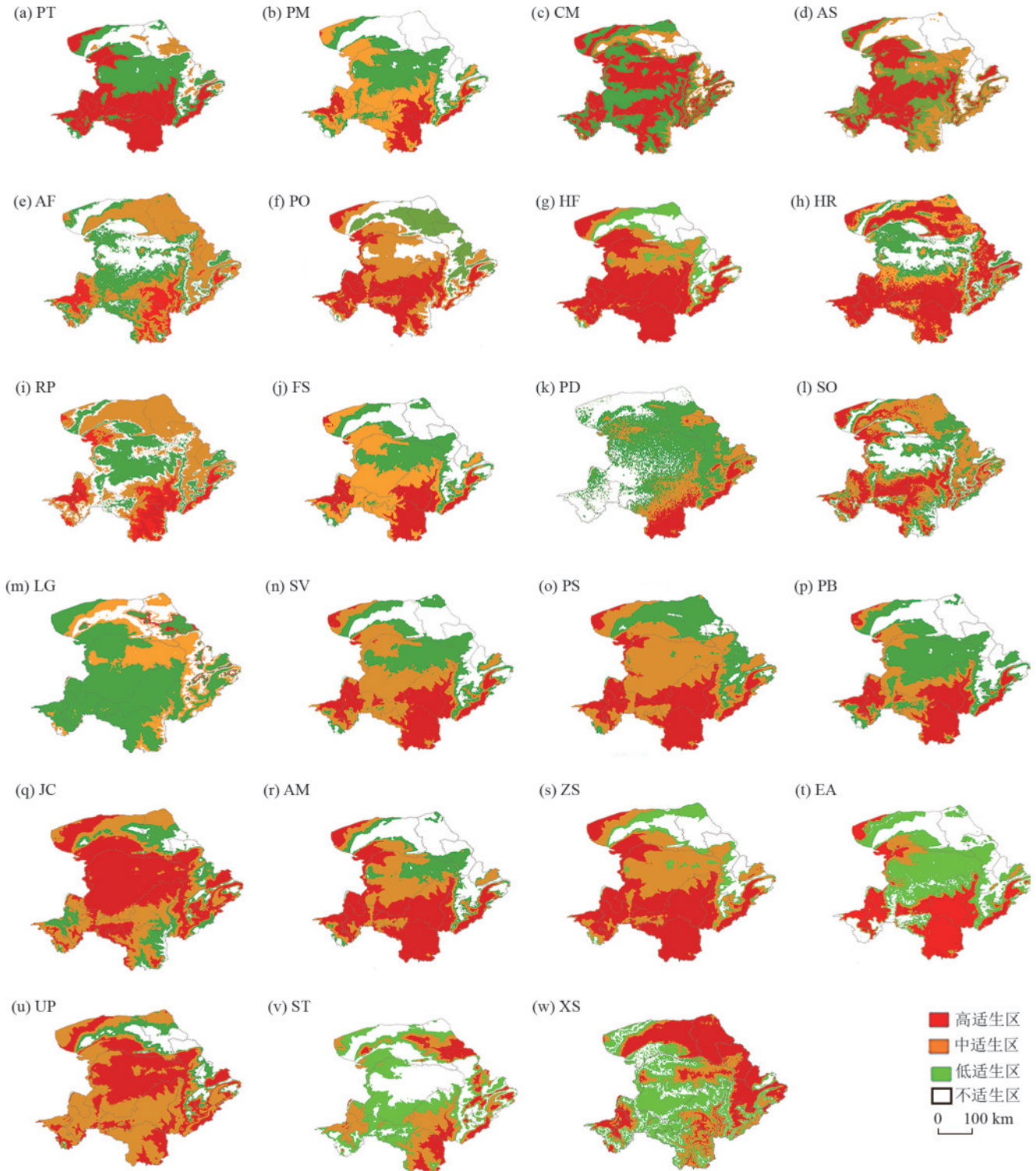


图 6 当前气候情景下树种适生区分布

Fig. 6 Distribution of suitable habitats for tree species under current climate scenario

2.4 未来气候变化对树种的影响

由表 4 可知,油松、紫穗槐、侧柏、连翘等树种在多个情景下呈现显著正相关,其中山桃在 SSP245 情况下扩张面积达到 191 608.15 km²,表明以上树种适生区可能随气候变暖向高纬度或平均高海拔地区扩张。同时,树种在低碳气候情景(SSP126)变化相对温和,如沙棘仅扩张 15 640.10 km²,印证全球减排对减缓生态退化的有效性;树种在高排放气候情景(SSP585)下,适生区整体面积变化幅度

最大,如沙地柏收缩近 175 118.54 km²,表明高温或降水格局可能使其分布区改变而严重萎缩,其变化幅度可能与升温 4.4 °C 引发的极端气候事件(如热浪、干旱)直接相关。此外,如油松、樟子松、柠条锦鸡儿等物种在 SSP585 气候情景下中适生区大幅北扩,可能抢占高纬度生态位,成为未来优势种,可优先考虑种植。而杏树、沙地柏、文冠果等物种对高温,干旱较为敏感,适生区严重萎缩,可考虑减少种植面积。

表 4 未来气候情景下树种适生区面积及变化

物种	当前气候情景下适生区		SSP126		SSP245		SSP370		SSP585	
	面积	面积	变化幅度	面积	变化幅度	面积	变化幅度	面积	变化幅度	
油松	270 897.14	344 743.63	73 846.49	439 078.48	168 181.34	433 946.63	163 049.49	444 346.63	173 449.49	
樟子松	259 186.75	312 314.91	53 128.16	337 426.19	78 239.34	355 093.58	95 906.83	345 093.58	85 906.83	
柠条锦鸡儿	367 344.99	251 056.59	72 942.57	341 278.73	67 062.57	340 443.73	66 227.57	338 443.73	64 227.57	
杏树	279 886.51	241 966.25	-37 920.25	237 300.14	-42 856.00	217 897.25	-61 989.25	227 689.24	-52 197.26	
紫穗槐	274 216.16	368 756.35	94 540.19	299 708.62	25 492.01	366 945.35	92 729.19	392 2631.34	118 415.18	
侧柏	227 850.84	290 343.71	62 492.87	283 929.47	56 078.63	282 437.71	54 586.87	279 437.71	51 586.87	
黄耆	274 216.16	292 088.61	17 872.45	280 354.62	6 138.46	280 446.61	6 230.45	287 369.78	13 153.62	
沙棘	282 326.59	297 966.69	15 640.10	291 124.75	8 798.11	292 027.69	9 701.11	289 027.69	6 701.10	
刺槐	260 809.86	314 343.87	32 017.28	302 728.30	20 401.71	299 893.87	17 567.28	297 893.87	15 567.28	
连翘	261 924.07	339 754.98	77 830.91	337 656.79	75 732.72	329 767.98	67 843.91	327 767.98	65 843.91	
山桃	179 597.62	325 642.27	146 044.65	323 333.37	143 735.75	371 205.77	191 608.15	317 875.27	138 277.65	
紫丁香	24 3207.99	292 366.10	49 158.20	288 770.78	45 562.88	369 904.10	126 696.20	369 704.10	126 496.20	
落叶松	213 385.08	332 323.20	118 938.12	221 879.57	8 494.49	360 051.20	146 666.12	356 051.20	142 666.12	
沙地柏	318 497.23	367 655.68	49 158.45	246 684.63	-71 812.59	183 378.68	-135 118.54	143 378.68	-175 118.54	
杨树	250 240.13	286 444.79	36 204.66	284 533.77	34 293.64	280 352.79	30 112.66	279 742.79	29 502.66	
新疆杨	250 240.13	310 406.59	60 166.46	302 242.27	52 002.14	300 272.59	50 032.46	299 272.59	49 032.46	
圆柏	302 467.23	376 579.46	74 112.23	376 047.52	73 580.29	375 638.46	73 171.23	375 538.46	73 071.23	
沙冬青	299 039.4	310 865.69	11 826.29	328 397.63	29 358.26	300 358.69	1 319.29	299 358.69	319.29	
酸枣	155 927.16	337 695.18	181 768.02	335 384.13	179 456.97	330 203.18	174 276.02	327 203.18	17 1276.02	
沙枣	247 563.70	322 379.42	74 815.72	319 042.97	71 479.27	310 688.42	63 124.72	307 688.42	60 124.72	
金叶榆	311 778.44	326 744.61	14 966.17	322 390.62	10 612.18	321 092.61	9 314.17	319 092.61	7 314.177	
柳树	174 176.25	327 792.88	153 616.63	325 407.29	151 231.04	319 766.88	145 590.63	318 766.88	144 590.63	
文冠果	366 790.73	364 996.76	-1 793.96	363 898.36	-2 892.36	337 002.76	-29 787.96	327 002.76	-39 787.96	

由图 7 可知,多数物种在 SSP126 气候情景下适生面积扩张,杏树在 SSP126 气候情景下面积减少 19.4%,文冠果在 SSP126 气候情景下面积减少 2.5%,沙地柏在 SSP126 气候情景下面积扩张 11.4%。在 SSP245 气候情景下,大部分树种适生面积扩张 20%~30%,落叶松、紫穗槐面积扩张较少,分别为 2.3% 和 8.5%。杏树、沙地柏、文冠果在 SSP245 气候情景下面积呈缩减趋势,分别缩减 21.4%、16.7%、4.3%。在 SSP370 气候情景下,杏树、沙地柏、文冠果面积分别缩减 32.2%、31.1%、40.4%。相较于 SSP245 气候情景下,沙地柏、文冠果面积缩减幅度较大。在 SSP585 气候情景下,大部分树种适生面积扩张 43%~65%,沙冬青面积仅扩张 1.3%,杏树、沙地柏、文冠果面积分别减少 27.3%、26.2%、54.3%。整体来看,油松、樟子松、柠条锦鸡儿、侧柏、黄耆、沙棘、刺槐、连翘、山桃、紫丁香、

杨树、新疆杨、圆柏、酸枣、沙枣、金叶榆、柳树在未来气候情景下面积扩张较为稳定。

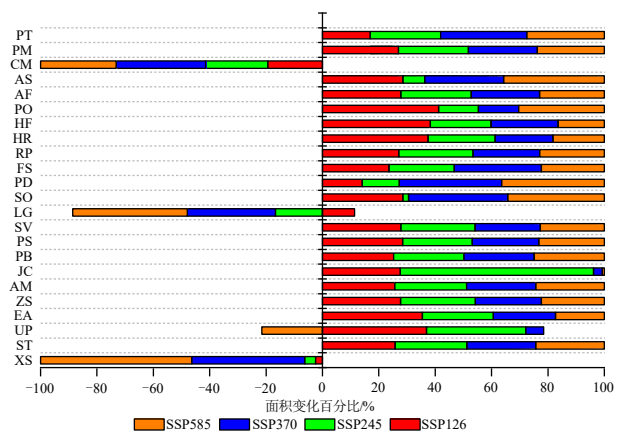


图 7 未来气候下种树种适生区面积变化

Fig. 7 Changes in suitable habitat areas of tree species under future climate scenarios

2.5 未来气候情景下树种分布区域

由图 8 可知,未来气候情景下,树种高适生区分布质心有向西北迁移的趋势,由主要集中于黄土高原中南部、吕梁山南部,鄂尔多斯东部,毛乌素沙地迁移至河套平原东部、库布齐沙漠地区,其中,库布齐沙漠,

河套平原东部高适生区所占面积比例较大,黄土高原中南部、吕梁山南部仍存在少量高适生区。SSP585 气候情景下,树种高适生区主要集中于黄土高原中南部的面积明显减少,主要迁移至河套平原南部和库布齐沙漠地区。



图 8 未来气候情景下树种分布区域

Fig. 8 Distribution areas of tree species under future climate scenarios

2.6 不同气候情景下适生区面积收缩树种的质心迁移路线

由图 9 可知,整体来看,沙地柏质心由毛乌素沙地北部迁移至鄂尔多斯高原南部区域,目前沙地柏适生区质心在伊金霍洛旗,SSP245 气候情景下,沙地柏适生区质心移至伊金霍洛旗和达拉特旗交界处,SSP370 和 SSP585 气候情景下则迁移至杭锦旗,较目前相比向北迁移 121.98 km。文冠果质心由鄂尔多斯高原北部迁移至河套平原区域,文冠果目前适生区质心在固阳县和达尔罕茂明安联合旗交界处,SSP245 至 SSP585 气候情景下迁移至乌拉特中旗,较目前相比向西北迁移 182.33 km。杏树质心由黄土高原迁移至黄土高原与毛乌素沙地边界处,杏树目前适生区质心在定边县,SSP126 气候情景下杏树适生区质心迁移至乌审旗南部,SSP245 至 SSP585 气候情景下迁移至鄂托克旗,较目前相比向北迁移 108.20 km。可见,沙地柏、文冠果和杏树 3 种气候情景下适生区面积收缩树种的质心均不同程度地向北迁移。

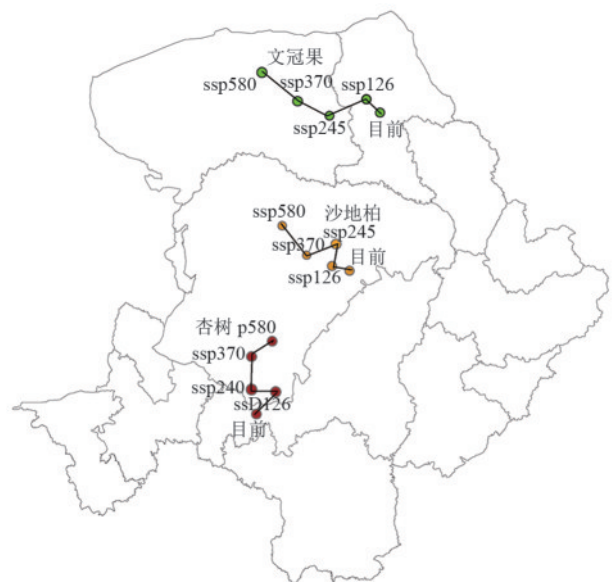


图 9 未来气候情景下适生区面积收缩树种的适生区质心变化

Fig.9 Changes in centroids of suitable habitats for tree species with shrinking suitable areas under future climate scenarios

3 讨论

3.1 影响树种分布的主导环境因子

植物空间分布格局主要取决于环境变量的综合性影响,影响不同植物分布的主导因子存在差异较为显著^[28]。黄河“几”字弯地区多为干旱-半干旱地区,气候干燥,降水量低,位于黄河流域中上游,是黄河流域发生沙漠化的主要区域,涉及库布其沙漠、毛乌素沙地的全部和乌兰布和沙漠、腾格里沙漠的部分^[29],年平均降水量仅有 170~490 mm,年蒸发量高达 2 100~2 300 mm,约是降水量的 10 倍^[30],在干热胁迫下,该区植被通过上调渗透调节剂合成路径和叶片角质层增厚、气孔密度优化等形态调整,实现蒸腾速率与光合效率的动态平衡,提升对极端高温的生态适应力^[31]。本研究通过对影响黄河“几”字弯地区环境因子的分析,明确气候因子 bio12(年平均降水量)、bio4(温度季节性)、bio3(等温性)和地理因子 elev(海拔)是影响黄河“几”字弯地区树种适生区分布的主导环境因子。段义忠等^[32]对四合木研究发现,年平均降水量因子、地理因子 elev(海拔)是影响树种的主导环境因子,明显大于地形、温度、土壤等相关变量,与本研究结果有相同之处;袁梓裕等^[33]研究表明,黄土高原地区植物多样性和群落稳定性的主要影响因素是降雨量;王涛等^[34]基于 MODIS 遥感数据,分析黄河流域近 20 a 植被覆盖的时空变化特征发现,气候变化是影响植被变化的主要驱动因素,并验证了本研究结论。同时,地理因子 elev(海拔)对黄河“几”字弯地区树种适生区分布影响也十分显著,黄河“几”字弯地区海拔 307~3 547 m,随着海拔的升高,气温逐渐降低,每升高 100 m,年平均气温下降约 0.6 °C^[35]。张雪等^[36]研究发现,海拔通过垂直梯度显著改变水热条件,直接影响树种生理阈值,与本研究结果存在相似之处。本研究发现,未来气候情景下,在黄河“几”字弯地区平均海拔偏高的北部大部分树种适生区面积呈现扩张规律。其中,海拔对树种平均贡献率高达 25% 以上,对黄耆贡献率高达 78%,对山桃、新疆杨贡献率高达 60%,黄耆等高原旱生植物对高海拔干旱环境的适应表现为叶片角质层增厚、气孔密度降低等形态调整,以减少蒸腾损失^[37]。而山桃、新疆杨等中低海拔树种可能依赖海拔梯度下的水分再分配,如阴坡土壤湿度较高,可缓解降水不足的限制。其次,植物归一化指数和人类活动将直接或间接影响温度及降水从而改变物种分布格局^[38]。剩余环境因子贡献率相对较低,对树种的分布起补偿作用。

3.2 树种适生区分布格局的变化

物种的地理迁移行为是其应对气候变化的适应性策略,旨在减少区域性灭绝的可能性^[35]。通过 MaxEnt 模型与 ArcGIS 10.8 相结合发现,当前气候情景下,柠条锦鸡儿和文冠果适生区所占比例高达 95% 以上,与吴家敏等^[39]研究发现的柠条锦鸡儿已扩展到黄土高原荒漠草原地带成为优势种相吻合;未来气候情景下树种适生区基本覆盖黄河“几”字弯地区,与前人^[40]研究结果相同。树种空间格局变化区域对于树种在黄河“几”字弯地区的可持续造林选种和树种种群的延续至关重要。目前,已有研究^[41]表明,部分树种的潜在适生区范围在未来气候情景下有向其他地区扩张的趋势,不同物种的潜在适生区分布范围对气候变化表现出不同的响应。本研究结果表明,未来气候情景下,树种在黄河“几”字弯地区适生区面积存在不同的扩张或缩减情况。已有研究^[42]表明,未来四合木在黄土高原新增适生区面积会逐步缩减,与本研究结果存在相同之处。本研究表明,未来气候情景下,沙地柏、文冠果、杏树适生区分布范围面积出现缩减。其他树种适生区分布范围面积均稳定扩张,可能与其耐寒、耐旱、耐贫瘠的习性有关。但在具体选择种植树种之前,仍需综合考虑造林成本、抗病虫害能力及生态功能等因素并与树种在未来气候情景下的适生区变化趋势相结合,进行实地考察,进一步确保 MaxEnt 模型用于树种选择的有效性和可适性。此外,树种在全球气候变暖趋势下高适生区分布质心有向西北转移的趋势,与陈美霖等^[31]研究结果一致。未来气候情景下,高适生区由黄土高原和吕梁山南部迁移至库布齐沙漠,河套平原东部,吕梁山东部和黄土高原南部。其中,库布齐沙漠,河套平原东部高适生区所占面积比例较大,可能是由于温度升高导致降雨量随之发生改变。

4 结论

MaxEnt 模型结果中 AUC 值均 > 0.824,准确地预测了黄河“几”字弯树种的地理分布范围,影响树种分布的主导环境因子为气候因子 bio12(年平均降水量)、bio4(温度季节性)、bio3(等温性)和地理因子 elev(海拔),这些环境因子显著且累计贡献率超过 50%。当前气候情景下,树种的高适生区主要集中于黄土高原中南部和吕梁山南部,少数集中于鄂尔多斯以东及毛乌素沙地等。气候变化对树种适生区及空间迁移的影响各异,大部分树种未来气候情景下适生区面积处于稳定扩张状态,但沙地柏、文冠果、杏树在全球气候变暖的趋势下潜在适生区存在大面积丧失的风

险,其中杏树、文冠果面积呈现持续缩减,3种树种在SSP585情况后面积缩减39 787.96~175 118.54 km²。面积收缩树种质心均不同程度地向北迁移,迁移距离变化在108.20~182.33 km,其他树种高适生区分布质心有向西北转移的趋势,尤其是SSP585气候情景下,其高适生区河套平原,库布齐沙漠地区将可能成为其未来气候情景下的避难所。本研究可为黄河“几”字弯地区可持续造林选种提供一定的参考价值,建议未来在黄河“几”字弯地区生态修复造林时可优先考虑油松、樟子松、柠条锦鸡儿、侧柏、黄耆、沙棘、刺槐、连翘、山桃、紫丁香、杨树、新疆杨、圆柏、酸枣、沙枣、金叶榆和柳树。

参考文献:

- [1] 韩球,陶德鑫,史鲁彦. 黄河流域两大区域的土地生态安全动态评价及比较[J]. 水土保持学报, 2024, 38(1): 255-266.
HAN L, TAO D X, SHI L Y. Dynamic evaluation and comparison of land ecological security in the two regions of the Yellow River basin [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(1): 255-266.
- [2] 刘义花,高歌,翟建青,等. 基于CMIP6气候模式和两种水文模型综合集成预估的黄河源区未来40 a流量变化[J]. 冰川冻土, 2024, 46(2): 675-687.
LIU Y H, GAO G, ZHAI J Q, et al. The discharge change in the source region of the Yellow River in the next 40 years based on the CMIP6 and two hydrological models [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2024, 46(2): 675-687.
- [3] 郭珊珊. 黄河流域生态系统健康与城镇化耦合协调研究[D]. 江苏 徐州: 中国矿业大学, 2022.
GUO S S. Study on coupling and coordination of ecosystem health and urbanization in the Yellow River basin [D]. Xuzhou, Jiangsu: China University of Mining and Technology, 2022.
- [4] 张平平,李滨,高浩源,等. 西藏林芝多雄河流域高位雪崩易发性评价[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2024, 35(6): 44-57.
ZHANG P P, LI B, GAO H Y, et al. Research on high-altitude avalanche susceptibility area zoning based on informativeness modeling in the Duoxiong River basin, Nyingchi area of Xizang Autonomous Region [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2024, 35(6): 44-57.
- [5] 李玉伟. 黄河“几字弯”沙化土地综合治理思路和举措探讨[J]. 内蒙古林业调查设计, 2024, 47(3): 78-80.
LI Y W. Exploration of comprehensive management approaches and measures for desertified land in the Yellow River "Jizi Bend" region [J]. Inner Mongolia Forestry Investigation and Design, 2024, 47(3): 78-80.
- [6] 窦佳慧. 青藏高原中高海拔森林碳汇动态及其对气候变化的响应[D]. 济南: 山东师范大学, 2024.
DOU J H. Dynamics of forest carbon sinks at middle and high altitudes in Qinghai-Tibet Plateau and its response to climate change [D]. Jinan: Shandong Normal University, 2024.
- [7] 米畅,彭羽. 植物物种网络特征及其应用研究进展[J/OL]. 应用与环境生物学报, 2025, <https://doi.org/10.19675/j.cnki.1006-687x.2024.09028>.
MI C, PENG Y. Research progress on characteristics and application of plant species network [J/OL]. China Industrial Economics, 2025, <https://doi.org/10.19675/j.cnki.1006-687x.2024.09028>.
- [8] RIVA F, MARTIN J C, GALÁN ACEDO C, et al. Incorporating effects of habitat patches into species distribution models [J]. Journal of Ecology, 2024, 112(10): 2162-2182.
- [9] 司雨蕙. 阔叶红松林中啄木鸟序贯取食对林木衰亡的影响[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2024.
SI Y H. Effects of woodpeckers' sequential feeding on forest decline in broad-leaved Korean pine forest [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2024.
- [10] 杨佳悦,丁国玉,田秀君. 最大熵模型在物种生境预测中的应用研究进展[J]. 应用生态学报, 2025, 36(2): 614-624.
YANG J Y, DING G Y, TIAN X J. Research progress on the application of the MaxEnt model in species habitat prediction [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2025, 36(2): 614-624.
- [11] DUAN Y Z, BAI H H, DU Z Y, et al. Maxent modeling for predicting the potential distribution of *Hippophae* Linn species [J]. Tropical Ecology, 2025, 66(1): 132-145.
- [12] 姬柳婷,郑天义,陈倩,等. 北重楼潜在适生区对气候变化的响应及其主导气候因子[J]. 应用生态学报, 2020, 31(1): 89-96.
JI L T, ZHENG T Y, CHEN Q, et al. Responses of potential suitable area of *Paris verticillata* to climate change and its dominant climate factors [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(1): 89-96.
- [13] 杜倩,魏晨辉,梁陈涛,等. 中国东北地区12个建群树种对气候变化响应的MaxEnt模型分析[J]. 生态学报, 2022, 42(23): 9712-9725.
DU Q, WEI C H, LIANG C T, et al. Future climatic adaptation of 12 dominant tree species in northeast China under 3 climatic scenarios by using MaxEnt modeling [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(23): 9712-9725.
- [14] 谢孟,张学星,罗燕,等. 基于MaxEnt模型的云南干热河谷适生树种选择[J]. 生态学报, 2024, 44(9): 3689-3707.
XIE M, ZHANG X X, LUO Y, et al. Application of

- MaxEnt model for selection of suitable tree species in dry-hot valley of Yunnan[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(9):3689-3707.
- [15] MIROSHNYK N, GRABOVSKA T, ROUBÍK H. The spread of the invasive species *Reynoutria japonica* Houtt. will both expand and contract with climate change: Results of climate modelling for 14 European countries [J]. *Pest Management Science*, 2025, 81(7): 3642-3653.
- [16] 王诗媛, 向洋, 魏唯一, 等. 黄河中游城市群水源涵养时空演变特征及影响机制分析[J]. *人民黄河*, 2025, 47(6):110-116.
- WANG S Y, XIANG Y, WEI W Y, et al. Spatiotemporal evolution characteristics and impact mechanisms of water conservation in the urban agglomeration of the middle Yellow River[J]. *Yellow River*, 2025, 47(6): 110-116.
- [17] LIU X F, MA Y P, WAN Y M, et al. Genetic diversity of phyllanthus emblica from two different climate type areas[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2020, 11:e580812.
- [18] 刘艳华, 刘磊, 陈红, 等. 基于 MaxEnt 模型的北极村国家级自然保护区紫貂栖息地适宜性评价[J]. *生态学报*, 2024, 44(2):559-569.
- LIU Y H LIU L, CHEN H, et al. Habitat suitability evaluation of sable (*Martes zibellina*) in arctic village national nature reserve based on MaxEnt model [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(2): 559-569.
- [19] 王雨, 刘振婷, 高广磊, 等. 干旱胁迫下枯草芽孢杆菌 (*Bacillus subtilis*) 对柠条 (*Caragana korshinskii*) 和沙冬青 (*Ammopiptanthus mongolicus*) 种子萌发及幼苗生长的影响[J]. *中国沙漠*, 2022, 42(5):73-81.
- WANG Y, LIU Z T, GAO G L, et al. Effects of *Bacillus subtilis* on seed germination, seedling growth of *Caragana korshinskii* and *Ammopiptanthus mongolicus* under drought stress [J]. *Journal of Desert Research*, 2022, 42(5):73-81.
- [20] 张晓艳, 聂慧荣. 久久为功在“三北”[N]. *鄂尔多斯日报*, 2025-06-12(001).
- ZHANG X Y, NIE H R. "Perseverance in the Three-North Shelterbelt Forest Program" [N]. *Ordos Daily*, 12 June 2025(Section 001).
- [21] 刘任涛, 程静. 黄河“几字弯”的地理界定及主要生态问题[J]. *应用生态学报*, 2025, 36(2):383-394.
- LIU R T, CHENG J. Geographical boundary line of the Yellow River's "Ji Zi Bend" and its main ecological issues [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2025, 36(2): 383-394.
- [22] 赵金彩, 潘涛. 基于多时间尺度的黄河流域植被 NPP 时空特征及其对气候变化的响应. *水土保持研究*, 2024, 31(4): 214-222.
- ZHAO J C, PAN T. Spatio-temporal characteristics of vegetation NPP in the Yellow River basin based on multi-time scales and its response to climate change [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2024, 31(4): 214-222.
- [23] 魏伟, 尹力, 谢波, 等. 国土空间规划背景下黄河流域“三区空间”演化特征及机制[J]. *经济地理*, 2022, 42(3): 44-55.
- WEI W, YIN L, XIE B, et al. Spatial-temporal evolution characteristics and mechanism of "three-function space" in the Yellow River basin under the background of territorial spatial planning [J]. *Economic Geography*, 2022, 42(3):44-55.
- [24] 张斌. 关于加强荒漠化综合防治和推进“三北”等重点生态工程建设情况的报告[N]. *包头日报*, 2024-12-13(006).
- ZHANG B. Report on strengthening comprehensive desertification prevention and control and advancing key ecological projects Including the "Three-North" shelterbelt program [N]. *Baotou Daily*, 2024-12-13(006).
- [25] 邱海燕, 王建赞, 赵菁, 等. 榴槿重要害虫: 马来异裂木虱 [*Allocarsidara malayensis* (Crawford)] 在中国的发现及其潜在适生区预测[J]. *热带作物学报*, 2025, 46(3): 725-733.
- QIU H Y, WANG J Y, ZHAO J, et al. First report of [*allocarsidara malayensis* (Crawford)] in China, an important durian pest and prediction of potential suitable habitats [J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2025, 46(3):725-733.
- [26] JIANG Z Y, ZHANG Y X, SU Q T, et al. MaxEnt modeling for predicting the potential geographical distribution of *camellia oleifera* abel under climate change [J]. *Forests*, 2025, 16(6):1026-1026.
- [27] 尹辉, 田聪, 马倩倩, 等. 气候变化和人类活动干扰下骆驼刺潜在分布格局变化特征[J]. *生态学报*, 2022, 42(18):7349-7361.
- YIN H, TIAN C, MA Q Q, et al. Variation characteristics of potential distribution patterns of *Alhagi sparsifolia* Shap. under climate change and human disturbance [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(18):7349-7361.
- [28] 杨铭鑫, 李俊, 同小娟, 等. 2001—2020 年中国森林植被 EVI 对气候因子的响应[J]. *生态学报*, 2024, 44(23): 10850-10863.
- YANG M X, LI J, TONG X J, et al. Response of forest vegetation EVI to climatic factors in China from 2001 to 2020 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(23): 10850-10863.
- [29] 申艳军, 杨博涵, 王双明, 等. 黄河几字弯区煤炭基地地质灾害与生态环境典型特征[J]. *煤田地质与勘探*, 2022, 50(6):104-117.

- SHEN Y J, YANG B H, WANG S M, et al. Typical characteristics of geological hazards and ecological environment of coal base in the bends area of the Yellow River [J]. *Coal Geology and Exploration*, 2022, 50(6): 104-117.
- [30] 李森, 杨宗英, 赵鸿雁, 等. 1975—2020年黄河“几字弯”沙漠化时空变化[J]. *中国沙漠*, 2024, 44(5): 13-22.
- LI S, YANG Z Y, ZHAO H Y, et al. Spatio-temporal changes of aeolian desertification in the Jiziwan of the Yellow River from 1975 to 2020 [J]. *Journal of Desert Research*, 2024, 44(5): 13-22.
- [31] 陈美霖, 韩海荣. 黄土高原地区4种常见树种适宜区对气候变化响应[J]. *北京林业大学学报*, 2023, 45(3): 21-33.
- CHEN M L, HAN H R. Response of four common tree species suitable areas to climate change in the Loess Plateau region of northern China [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2023, 45(3): 21-33.
- [32] 段义忠, 鱼慧, 王海涛, 等. 孑遗濒危植物四合木(*Tetraena mongolica*)的地理分布与潜在适生区预测[J]. *植物科学学报*, 2019, 37(3): 337-347.
- DUAN Y Z, YU H, WANG H T, et al. Geographical distribution and prediction of potentially suitable regions of endangered relict plant *Tetraena mongolica* [J]. *Plant Science Journal*, 2019, 37(3): 337-347.
- [33] 袁梓裕, 张路, 廖李容, 等. 黄土高原草地植物多样性与群落稳定性的关系及其驱动因素[J]. *生态学报*, 2023, 43(1): 60-69.
- YUAN Z Y, ZHANG L, LIAO L R, et al. Relationship between plant diversity and community stability in grasslands of the Loess Plateau and its driving factors [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(1): 60-69.
- [34] 王涛, 宋翔, 颜长珍, 等. 近35 a来中国北方土地沙漠化趋势的遥感分析[J]. *中国沙漠*, 2011, 31(6): 1351-1356.
- WANG T, SONG X, YAN C Z, et al. Remote sensing analysis on aeolian desertification trends in northern China during 1975—2010 [J]. *Journal of Desert Research*, 2011, 31(6): 1351-1356.
- [35] 王晓帆, 段雨萱, 金露露, 等. 基于优化的最大熵模型预测中国高山栎组植物的历史、现状与未来分布变化[J]. *生态学报*, 2023, 43(16): 6590-6604.
- WANG X F, DUAN Y X, JIN L L, et al. Prediction of historical, present and future distribution of *Quercus sect. Heterobalanus* based on the optimized MaxEnt model in China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(16): 6590-6604.
- [36] 张雪, 田丽慧, 杨宗雨, 等. 西宁市区不同配置模式人工林地树木的水分利用特征[J]. *生态学报*, 2025, 45(13): 6390-6405.
- ZHANG X, TIAN L H, YANG Z Y, et al. Water use characteristics of trees in artificial forests with different configuration patterns in Xining urban area [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2025, 45(13): 6390-6405.
- [37] 张钦弟, 卫伟, 陈利顶, 等. 黄土高原草地土壤水分和物种多样性沿降水梯度的分布格局[J]. *自然资源学报*, 2018, 33(8): 1351-1362.
- ZHANG Q D, WEI W, CHEN L D, et al. Distribution patterns of soil moisture and species diversity along a precipitation gradient in grasslands of the Loess Plateau [J]. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(8): 1351-1362.
- [38] NUHFER M W T, BRADLEY A B. Balancing risk and resilience: Which plant traits should inform managed relocation species selection? [J]. *Global Change Biology*, 2025, 31(3): e70145.
- [39] 吴家敏, 王亚欣, 孙斌, 等. 基于无人机的柠条锦鸡儿生物量遥感估测[J]. *林业科学*, 2025, 61(6): 13-24.
- WU J M, WANG Y X, SUN B, et al. Remote sensing estimation of *Caragana korshinskii* biomass using UAV-Based technology [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2025, 61(6): 13-24.
- [40] 吕增伟, 朱晓如, 叶兴状, 等. 气候变化对四合木适生区及空间迁移的影响[J]. *生态学报*, 2024, 44(3): 1164-1176.
- LÜ Z W, ZHU X R, YE X Z, et al. Impacts of climate change on the suitable habitats and spatial migration of *Tetraena mongolica* [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(3): 1164-1176.
- [41] SHEN C B, CHEN X, ZHOU C, et al. Predicting suitable spatial distribution areas for urban trees under climate change scenarios using species distribution models: A case study of *Michelia Chapensis* [J]. *Land*, 2025, 14(3): 638-638.
- [42] 张春华, 雷晨雨, 田瑞杰, 等. 用材树种高山栲潜在适生区分布区及影响因子[J]. *西部林业科学*, 2021, 50(3): 28-33.
- ZHANG C H, LEI C Y, TIAN R J, et al. Impact factors and potential distribution of timber plant, *Castanopsis delavayi* [J]. *Journal of West China Forestry Science*, 2021, 50(3): 28-33.