

基于随机森林模型的中国黑麦草适生区分布变化预测

赵春滢

华北电力大学环境科学与工程学院，北京

收稿日期：2025年12月26日；录用日期：2026年1月23日；发布日期：2026年2月2日

摘要

黑麦草(*Lolium perenne L.*)是禾本科一般入侵性植物，由于其具有强大的环境适应能力和竞争能力，对生态系统造成了一定的不良影响，为了有效防控黑麦草，利用随机森林模型(Random Forest)和ArcGIS，对黑麦草在当前以及2050年代(2041~2060)、2070年代(2061~2080)、2090年代(2081~2100)的SSP126、SSP370、SSP585三种气候情景下潜在的适生区分布格局和影响因素进行预测。结果表明：人类活动(hfp)和气候因子(尤其是温度相关因子)是影响黑麦草分布的关键因子。当前黑麦草适生区主要集中在我国东部、中部地区。在未来三种气候情景下，黑麦草的适生区呈现持续扩张的趋势，适生区显著向东北部、南部及高海拔地区迁移；此外，未来中、高适生区的面积逐渐增加，扩张区域面积显著增加，非适生区逐渐转化为适生区，尤其在SSP585情景下表现最为显著。本研究揭示了气候变化背景下黑麦草潜在适生区时空格局的变化，为入侵物种的防控与生态环境的保护提供科学依据。

关键词

黑麦草，气候变化，随机森林模型，适生区变化

Prediction of Changes in the Suitable Habitat Distribution of *Lolium perenne L.* in China Based on the Random Forest Model

Chunying Zhao

College of Environmental Science and Engineering, North China Electric Power University, Beijing

Received: December 26, 2025; accepted: January 23, 2026; published: February 2, 2026

Abstract

Lolium perenne L. is a commonly invasive plant species in the Poaceae family. Due to its strong

environmental adaptability and competitive ability, it exerts certain adverse impacts on ecosystems. To support effective prevention and control of this species, this study employed the Random Forest model along with ArcGIS to predict the potential suitable habitat distribution patterns and influencing factors for *Lolium perenne L.* under current conditions and under three future climate scenarios (SSP126, SSP370, and SSP585) for the 2050s (2041~2060), 2070s (2061~2080), and 2090s (2081~2100). The results indicate that human activities (hfp) and climatic factors, particularly temperature-related variables, are key determinants affecting the distribution of *Lolium perenne L.* At present, suitable habitats for *Lolium perenne L.* are mainly concentrated in eastern and central China. Under all three future climate scenarios, the suitable habitats show a continuous expansion trend, with a notable shift toward northeastern and southern regions as well as higher altitude areas. Moreover, the extent of moderately and highly suitable habitats gradually increases, the area of expansion grows significantly, and non-suitable areas gradually transition into suitable habitats, a pattern most pronounced under the SSP585 scenario. This study reveals the spatiotemporal changes in potential suitable habitats for *Lolium perenne L.* under climate change, providing a scientific basis for the management of invasive species and the conservation of ecological environments.

Keywords

***Lolium perenne L.*, Climate Change, Random Forest Model, Changes in Suitable Habitats**

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

黑麦草(*Lolium perenne L.*)是一种多年生禾本科黑麦草属植物，广泛分布于全球温带地区[1]，因其萌发生长快、营养价值高、再生与分蘖能力强而被广泛引种用作牧草、草坪草及水土保持植物[2]。由于我国农业牧业不断发展[3]、城市绿化和生态修复工程[4]广泛推进，黑麦草在许多地区大面积种植[5]，随之而来的是逸生记录不断增加。由于黑麦草具有强大的环境适应能力和竞争能力，所以其生态系统中更容易生存并且扩散，对本地物种组成、群落结构和生态系统的稳定造成一定不良影响，也可能流入农田中成为恶性杂草。所以系统评估黑麦草在我国的潜在适生范围、影响因素及迁移方向，对入侵性物种风险预警和资源合理利用有重要意义。

全球变暖、降水格局改变以及极端气候事件频发，造成许多物种的地理分布与适生格局发生改变[6]。经大量学者研究发现，气候变暖可能促使部分温带物种向高纬度、高海拔地区迁移，同时导致低纬度适生区面积缩小[7]-[9]。此外，土地利用变化[10][11]、城市扩张[12][13]等人为因素也在不断改变着生态环境，从而影响着物种分布与扩散。地形起伏、土壤理化性质与水热条件共同决定着物种建群与扩散，所以需要综合气候、人类活动、地形、土壤等多种影响因子预测物种分布。

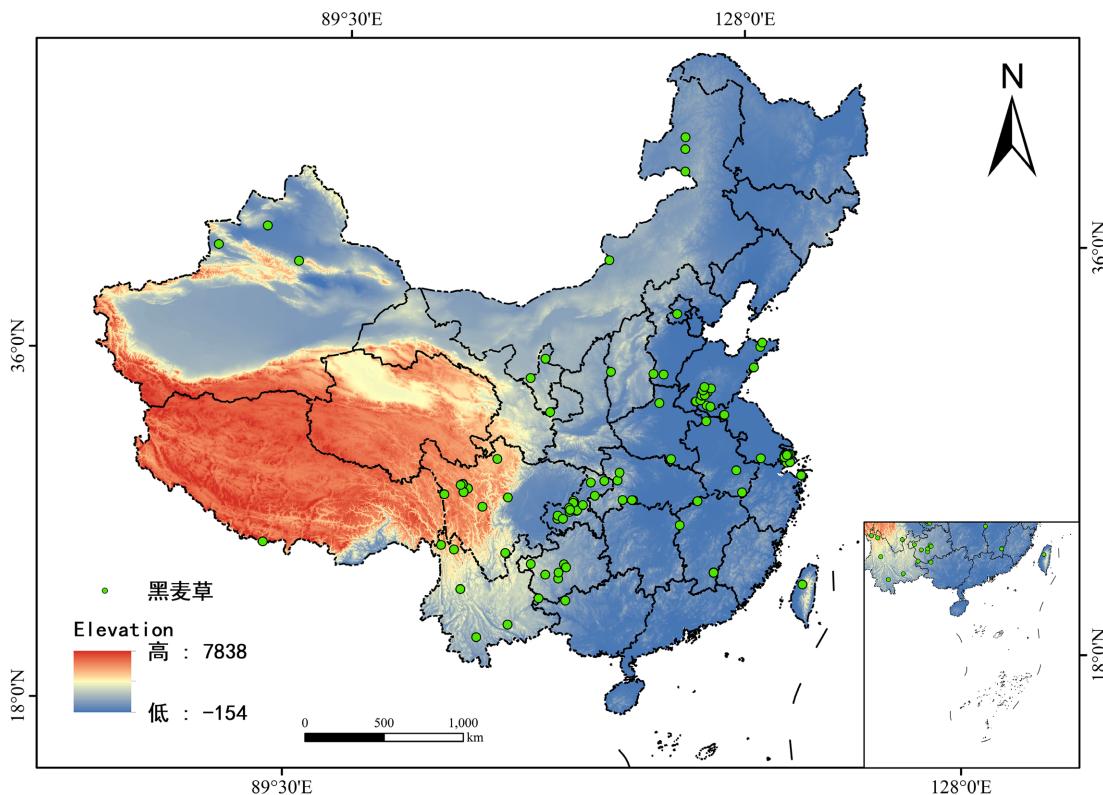
物种分布模型是预测物种适生区分布的重要方法[14][15]，基于物种分布数据及影响物种分布的环境因子进行建模，并通过概率的形式预测物种的适宜生境[16]，在多个学科领域有重要应用价值。例如研究气候变化的影响[17][18]、保护濒危物种[19][20]、确定可能易受入侵的区域[21][22]以及绘制传播和风险的病分布图[23]。现在物种分布模型出现了多种方法，包括基于回归的广义线性模型(GLM)、广义相加模型(GAM)[24]；基于规则的遗传算法(GARP)[25]、多元自适应样条回归模型(MARS)[26]以及机器学习算法，如：最大熵模型(MaxEnt)[27]、分类回归树模型(CART)[28]、人工神经网络(ANN)[29]、随机森林模

型(RF) [30]等。RF 模型由多个决策树组成，每个决策树都依赖于一个独立抽取的随机向量的值，通过对多个决策树的结果进行集成投票，从而进行分类或回归[31]。与传统经验方法或单一线性模型相比，RF 在处理复杂生态数据时具有显著优势：RF 模型通过集成多个决策树，能有效降低过拟合风险，增强模型的泛化能力。在大数据环境下，RF 模型能够处理高维数据[32]；同时该模型对数据中的缺失值与异常值不敏感，能有效处理数据中的噪声问题[33]；此外，RF 模型可以评估变量的重要性，为识别影响物种分布的关键环境因子提供直观依据[34]。

以往学者对黑麦草在气候变化影响下的预测多是基于 CMIP5 气候情景(RCP4.5、RCP8.5)，例如：Garcia [35]的研究中发现新西兰牧场部分区域气候适宜性下降；Meyer 等[36]发现澳大利亚东南部气候变暖与降雨减少的背景下，黑麦草春季产量下降，冬季增加，可能向水分条件更稳定、热应激较轻的地区收缩；Streethran 等[37]的预测中，爱尔兰黑麦草在春季生长量可能增加，但夏季和秋季生长量将普遍减少，干旱和高温导致东南部及中西部部分地区黑麦草夏季的生长量出现明显下降。然而，CMIP6 框架下提出的共享社会经济路径(SSP)情景，不仅更新了气候模型与辐射强迫估算，更整合了社会经济因素，使得未来气候预测更具综合性与现实性。为此，本研究采用 CMIP6 的 SSP126、SSP370、SSP585 情景，对比以往基于 RCP 的研究，旨在揭示不同情景框架下黑麦草适生区预测的异同，提升预测结果的稳健性，并为入侵物种管理提供更科学的依据。

2. 材料与方法

2.1. 数据筛选和处理



注：该图基于自然资源部标准底图服务网站下载的审图号为 GS(2024)0650 号的标准地图制作，底图无修改。

Figure 1. Distribution map of sampling Sites for *L. perenne* in China

图 1. 中国黑麦草的样点分布图

本研究中使用的中国底图边界数据来自中国科学院资源环境科学与数据中心(RESDC, <https://www.resdc.cn>)；黑麦草的分布数据取自全球物种多样性信息库(<https://www.gbif.org/>)和中国数字植物标本馆(<https://www.cvh.ac.cn/>)，消除重复和无效数据后，再利用 ArcGIS10.8 的缓冲区分析工具设置 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 的缓冲区，使半径为 1 km 的缓冲区内仅保留一个物种分布点。物种点分布均匀，可以避免因物种生境相似导致模型过拟合。最后共保留了 140 个黑麦草样本分布点(见图 1)，将物种分布点数据根据“物种名称、经度、纬度”输入 Excel，并以“.CSV”格式保存。

本研究共选取了 35 个环境变量(包括 19 个生物气候变量，3 个地形变量，12 个土壤变量，1 个人类活动变量)作为初始环境变量[38]。生物气候变量来自 World Clim (<https://worldclim.org/>)，包括当前和未来相对应气候情景相对应的 19 个生物气候变量，空间分辨率为 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ ；未来气候变量选用的 BCC-CSM2-MR 的三个共享社会经济路径(SSP126、SSP370 和 SSP585)。三个情景的排放轨迹和温度升高预期从高到低分别是：SSP126：最低排放、低气候变化；SSP370：高排放、大幅气候变化；SSP585：极高排放、极端气候变化。在这些情景下分析了 2041~2060、2061~2080 以及 2081~2100 三个时期。

此外，还从 World Clim 获取了高程变量，并用 arcgis 提取了坡度和坡向，空间分辨率为 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 。土壤变量来源于世界土壤数据库(HWSD2.0) (<https://www.fao.org/land-water/databases-and-software/hwsd/en/>)，空间分辨率为 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 。人类活动变量来自社会经济数据和应用中心(SEDAC, <https://sedac.ciesin.columbia.edu>)，空间分辨率为 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 。

本研究使用 ArcGIS10.8 将所有环境变量进行提取、裁剪、重投影，将空间分辨率统一调整为 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ ，坐标系都设置为 WGS_1984_UTM_Zone_47N，以便后续研究。

2.2. 物种分布数据与环境变量筛选

环境驱动因素的识别使用 Biomod2 软件包为 R 环境提供的 RF 模型对环境驱动因素进行识别。模型共纳入了 140 个物种分布记录和 35 个环境变量。为了提高模型的预测能力，在 R 中随机生成了 1000 个伪存在点。然后，选择 75% 的样本点包含在训练集中，25% 包含在测试集中，并且设置模型重复十次，以提高重要性评估的准确性。为了防止环境变量之间的自相关和多重共线性对模型过程的不利影响，用 SPSS 对 35 个环境变量进行皮尔逊相关性分析，当两个或多个环境变量的绝对值相关性 > 0.8 时，选用重要性最高的因素，最终为建模选出 13 个环境变量(见表 1)。

Table 1. System resulting data of standard experiment
表 1. 随机森林模型采用的环境变量

种类	缩写	环境变量
生物气候	bio2	Mean Diurnal Range (Mean of monthly (max temp – min temp))
	bio3	Isothermality (BIO2/BIO7) ($\times 100$)
	bio5	Max Temperature of Warmest Month
	bio7	Temperature Annual Range (BIO5-BIO6)
	bio9	Mean Temperature of Driest Quarter
	bio12	Annual Precipitation
	bio15	Precipitation Seasonality (Coefficient of Variation)
	bio17	Precipitation of Driest Quarter

续表

地形	ele	Elevation
	ph_water	pH in water
土壤	root_depth	Rootable Soil Depth
	drainage	Reference Soil Drainage
人类活动	hfp	Human Footprint

2.3. 黑麦草适生区面积变化计算

将筛选出的 13 个环境变量和物种分布点纳入模型中运行，预测十种气候情景下黑麦草的适生区。模型运行十次后输出结果，输出数据格式为栅格图层，数值大小代表黑麦草栖息地适宜性指数(HIS)。将 RF 模型的结果输入 ArcGIS10.8 中，使用空间分析工具中的重分类工具，将分类方法设置为自然间断点分级法(Jenks)，对结果进行分类。将适生区分为四类：非适生区(0~0.048)、低适生区(0.048~0.138)、中适生区(0.138~0.272)、高适生区(0.272~1)。随后计算了每个类型的面积并分析了适生区的收缩扩张趋势。

模型结果使用两个指标进行评估：真实技能统计 (TSS) 和受试者工作特征曲线下面积(ROC)。AUC 用于评估模型的预测性能；AUC 的值在 [0, 1] 的范围内。AUC 值接近 1 表示模型具有更好的预测能力[39]。此外，TSS ($TSS = \text{敏感性} + \text{特异性} - 1$) 是一个简单直观的统计值，用于评估 [-1, 1] 范围内物种分布模型的性能。一般来说，如果 $AUC > 0.9$ 且 $TSS > 0.85$ ，则认为模型表现良好[40]。本研究 TSS 值为 0.982，ROC 值为 0.999，模型预测结果理想。

3. 结果

3.1. 黑麦草分布的影响因子评估

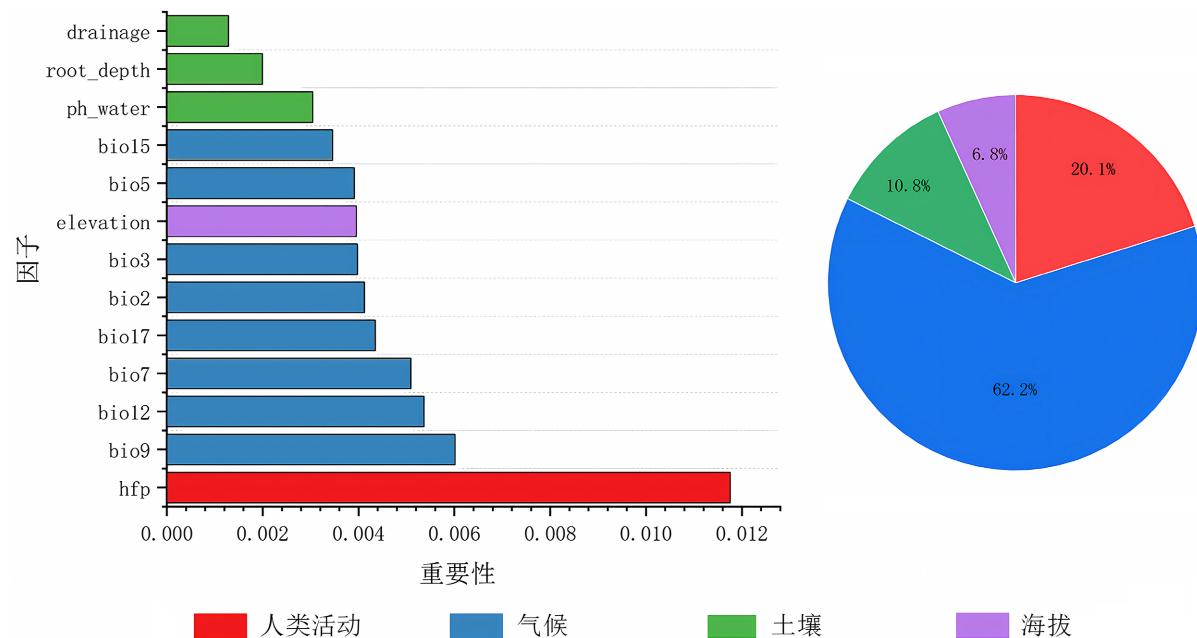


Figure 2. The importance of environmental factors in the RF model

图 2. 随机森林模型中环境因子的重要性

模型结果表明，影响黑麦草分布的主要驱动因子有 8 个气候因子、4 个土壤因子和 1 个人类活动因子。其中影响最大的是 hfp，单独贡献了 20.1% 的重要性，气候因子累计重要性占比 62.2%（见图 2），可以认为气候因子是黑麦草分布的主要影响因子。在影响黑麦草分布的八个主要气候因子中，温度相关因子的累积重要性(63.7%)远高于降水相关因子(36.3%)，这反映出黑麦草对温度的反应更加敏感。除气候因子和人类活动，土壤因子也会影响黑麦草的分布产生影响，累积重要性为 10.8%，海拔对黑麦草的分布影响较小，重要性仅 6.8%（见图 2）。

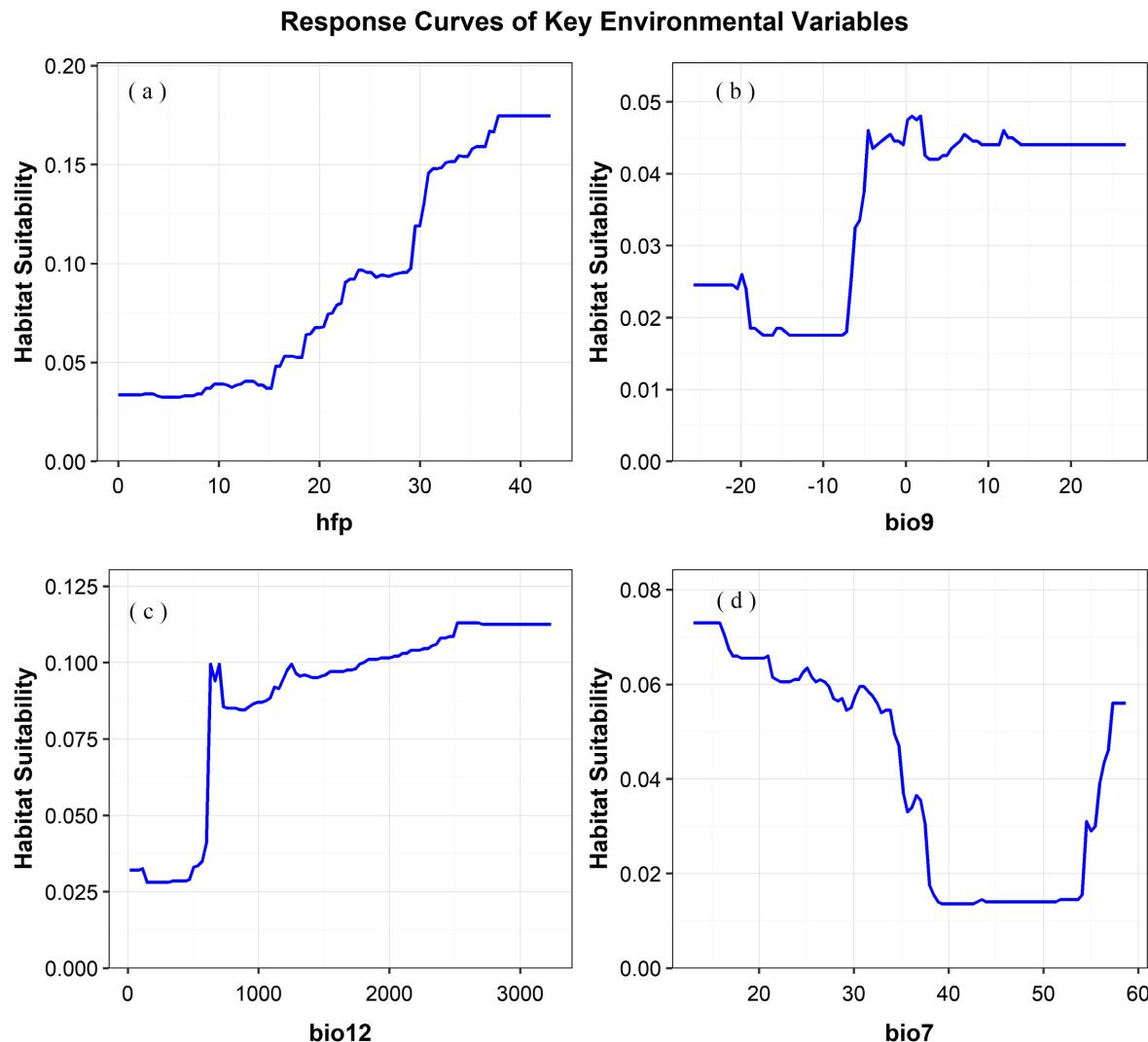


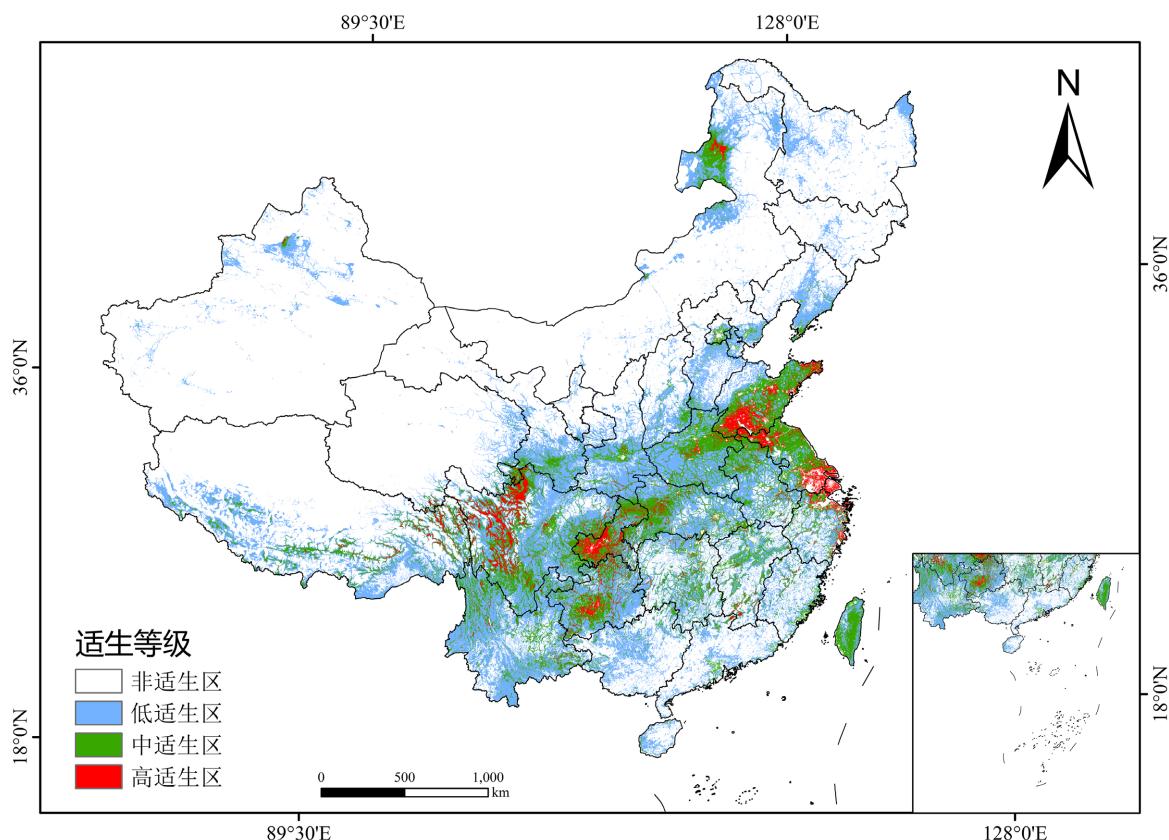
Figure 3. Response curve of key environmental factors: (a)~(d) correspond to the response curves for Human Hootprint, Mean Temperature of Driest Quarter, Annual Precipitation, and Temperature Annual Range, respectively

图 3. 重要环境因子响应曲线：(a)~(d) 分别对应人类活动、最干季度平均温度、年降水量、气温年较差的响应曲线

为了更深入地了解黑麦草对环境因子的响应，并预测在当前气候情景下黑麦草的适生范围，绘制了人类活动(hfp)、最干季度平均温度(bio9)、年降水量(bio12)、温度年较差(bio7)，四个重要性最高的环境变量的响应曲线(见图 3)。经研究发现，人类活动指数在 38 左右时适生性最优，适度人为干扰(如农田、绿化带)更利于其生长，但高强度开发无显著增益。最干季度均温在-7.5 至-5℃时适生性骤增，表现出黑麦

草对干季极端寒冷敏感，对温带寒冷气候适应性高，可以作为耐寒牧草。年降水量大于 500 mm 时更适合黑麦草生长，但年降水量超过 2500 mm 无额外益处，由此可见黑麦草能适应较湿润的环境，但在我国降水过于丰沛地区可能会出现扩散受限的情况。气温年较差呈现双峰响应：0℃~40℃区间适生性持续下降，超过 54℃时显著回升，可能与高纬度地区强季节性适应有关。

3.2. 当前时期我国黑麦草的适生区分布



注：该图基于自然资源部标准底图服务网站下载的审图号为 GS (2024) 0650 号的标准地图制作，底图无修改。

Figure 4. Distribution of suitable habitats for *L. perenne* in China under current climate change
图4. 当前气候变化下中国黑麦草的适生区分布

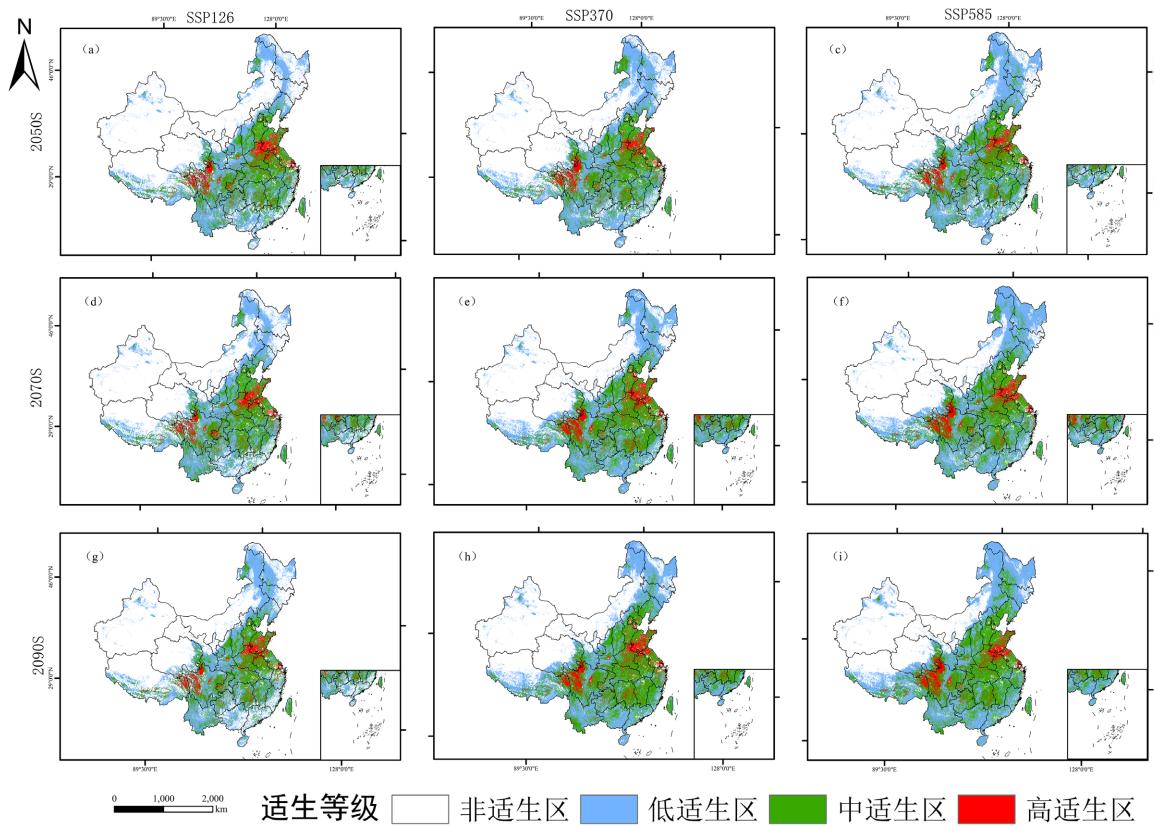
Table 2. Area of suitable habitats for *L. perenne* in China across different periods
表2. 不同时期中国黑麦草的适生区面积

适生等级 ($\times 10^4 \text{ km}^2$)	当前	SSP126 (2050)	SSP370 (2050)	SSP585 (2050)	SSP126 (2070)	SSP370 (2070)	SSP585 (2070)	SSP126 (2090)	SSP370 (2090)	SSP585 (2090)
非适生区	661.84	503.30	463.31	449.59	489.68	418.43	390.06	499.27	393.86	355.07
低适生区	184.66	245.60	278.49	289.01	260.83	282.03	312.76	260.80	276.35	310.79
中适生区	84.04	166.81	175.04	180.02	167.17	207.14	207.85	158.80	237.44	245.45
高适生区	23.20	38.09	36.96	35.18	36.11	46.20	43.16	34.92	46.15	42.54
总适生区	291.90	459.50	490.49	504.21	464.11	535.37	563.77	454.52	559.94	598.78

黑麦草主要分布在我国东部、中部地区以及内蒙古及西藏局部地区(见图4), 适生区面积约为 $2.92 \times 10^4 \text{ km}^2$; 不同适生区面积差异明显, 低适生区面积最大, 为 $184.66 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占总适生区面积的63.26%, 在我国各省份均有分布, 主要聚集在中部地区; 中适生区面积为 $84.04 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占比28.79%, 主要分布在我国中部及江南地区, 如山东、江苏、河南、重庆、贵州、四川、台湾等地; 而高适生区面积仅 $23.20 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占比约7.95%, 主要分布在山东、江苏、浙江、重庆、四川、贵州等地(见表2)。

3.3. 未来气候情景下我国黑麦草的适生区分布

本研究通过RF模型对未来不同气候条件下黑麦草的适生区进行了预测(见图5)。2050年代, 在SSP126情景下, 黑麦草的适生区总面积为 $459.50 \times 10^4 \text{ km}^2$, 是当前的1.57倍, 适生区面积大幅增加, 中适生区面积变化最大, 从当前的 $84.04 \times 10^4 \text{ km}^2$ 扩张到了 $166.81 \times 10^4 \text{ km}^2$, 面积几乎翻倍; 低适生区为面积为当前的1.33倍, 高适生区为当前的1.64倍。可以看出大面积非适生区转化为适生区。在SSP370情景下, 适生区总面积为 $490.49 \times 10^4 \text{ km}^2$, 是当前的1.68倍, 高适生区面积是当前高适生区的1.59倍, 中适生区2.08倍, 低适生区1.51倍。SSP585情景下, 适生区总面积 $504.21 \times 10^4 \text{ km}^2$, 是当前适生区总面积的1.73倍, 高适生区面积是当前的1.52倍, 中适生区2.14倍, 低适生区1.57倍。



注: 该图基于自然资源部标准底图服务网站下载的审图号为GS(2024)0650号的标准地图制作, 底图无修改。

Figure 5. Potential suitable habitat distribution of *L. perenne* in China under future climate scenarios: ((a)~(c)) Distribution maps of suitable habitats under SSP126, SSP370, and SSP585 climate scenarios for the 2050s; ((d)~(f)) Distribution maps of suitable habitats under SSP126, SSP370, and SSP585 climate scenarios for the 2070s; ((g)~(i)) Distribution maps of suitable habitats under SSP126, SSP370, and SSP585 climate scenarios for the 2090s

图5. 未来不同气候情景下的中国黑麦草的适生区分布: ((a)~(c)) 2050年代 SSP126、SSP370、SSP585 气候情景下适生区分布图; ((d)~(f)) 2070年代 SSP126、SSP370、SSP585 气候情景下适生区分布图; ((g)~(i)) 2090年代 SSP126、SSP370、SSP585 气候情景下适生区分布图

2070 年代，在 SSP126 情景下，黑麦草的适生区总面积为 $464.11 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，是当前的 1.59 倍，依旧是中适生区面积增加最多，是当前的 1.99 倍，高、低适生区分别是当前的 1.56 倍、1.41 倍。在 SSP370 情景下，适生区总面积为 $535.37 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，是当前的 1.83 倍，高中低适生区面积分别是当前的 1.99 倍、2.46 倍、1.53 倍。SSP585 情景下，适生区总面积 $563.77 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，高适生区面积是当前的 1.86 倍，中适生区 2.47 倍，低适生区 1.69 倍。

2090 年代，SSP126 情景下，适生区总面积为 $454.52 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，是当前的 1.56 倍，高中低适生区面积分别是当前的 1.51 倍、1.89 倍、1.41 倍，与 2070 年代相比，适生区总面积略微缩小，其中，高中适生区面积较 2070 年代均有所降低，低适生区面积基本保持不变。在 SSP370 情景下，适生区总面积为 $559.94 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，是当前的 1.92 倍，高适生区是当前的 1.99 倍，中适生区 2.83 倍，低适生区 1.50 倍，与 2070 年代相比，高适生区面积几乎不变，中低适生区面积增加。在 SSP585 情景下，适生区总面积为 $598.78 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，是当前的 2.05 倍，面积达到最大，高中低适生区面积分别是当前的 1.83 倍、2.92 倍、1.68 倍，中适生区面积增加量最大。

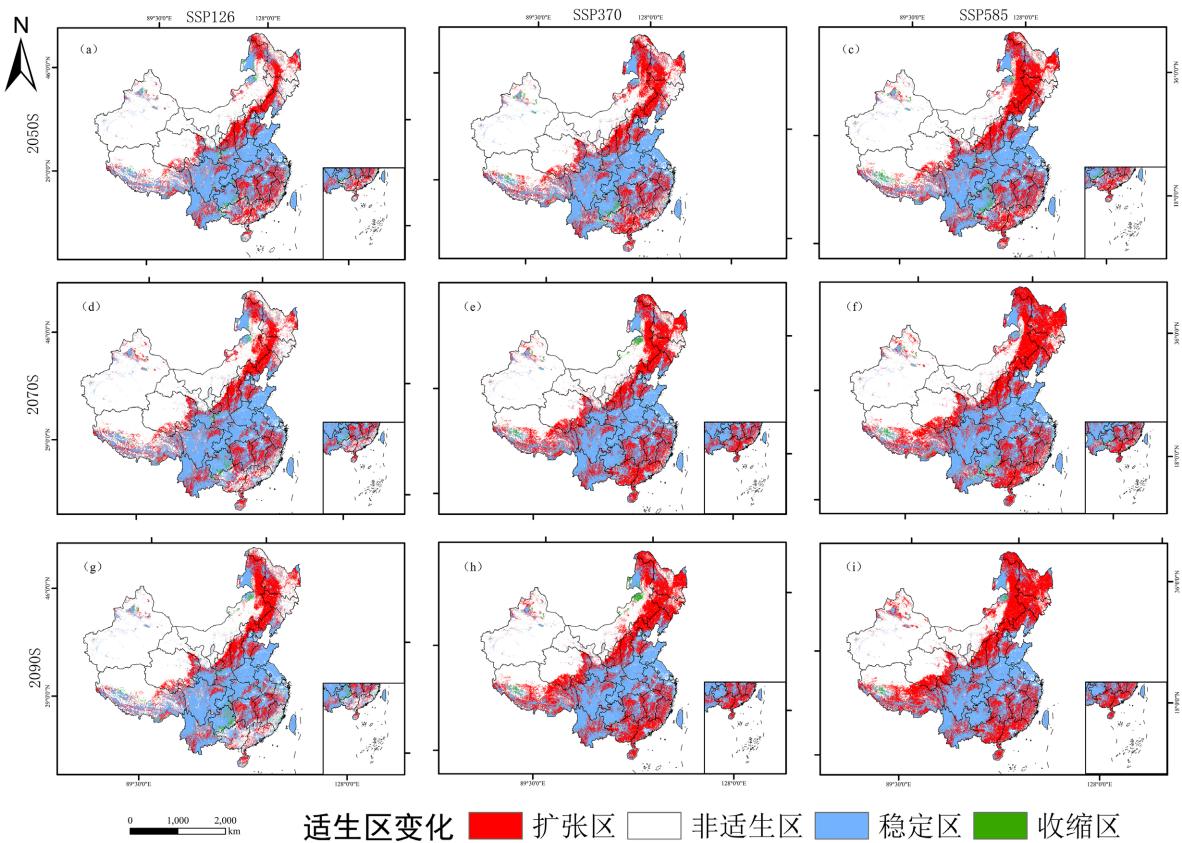
综上所述，未来黑麦草适生区面积将显著扩大，非适生区大量转化为适生区，中适生区面积增加占比最大。低排放情景下适生区面积变化较小，且 2090 年代较 2070 年代面积有所缩小，缩小类型集中在中高适生区；较高排放情景下适生区扩张更为明显，且持续扩张。

3.4. 黑麦草潜在适生区变化分析

在未来 2050 年代、2070 年代、2090 年代，SSP126、SSP370、SSP585 气候情景下，中国黑麦草的潜在适生区整体呈现扩张趋势，高排放情景下适生区扩张趋势更加明显(见图 6 和表 3)。2050 年代，在 SSP126 气候情景下，扩张区、稳定区、收缩区面积分别为 $76.83 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、 $137.91 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、 $3.54 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，随着气候情景的改变，越高排放情景下扩张区、稳定区、收缩区的面积越大，但收缩区占比非常小，面积变化率也非常小，始终在 1.6% 以内；扩张主要发生在东三省、内蒙古东北部、河北、陕西、山西等北方地区，以及江西、湖南、福建、两广等南部省份，青藏高原也有零星扩张区存在；稳定区集中在我国中部；收缩区主要分布在贵州 - 广西交界、内蒙古东北部、西藏西部，山西、陕西、甘肃地区亦有零星收缩区存在。

Table 3. Changes in the distribution patterns of suitable habitat for *L. perenne* in China under different climate scenarios
表 3. 不同气候情景下中国黑麦草的适生区分布格局变化

气候时期	气候情景	面积($\times 10^4 \text{ km}^2$)			面积变化率(%)		
		扩张区	稳定区	收缩区	扩张区	稳定区	收缩区
2050s	SSP126	76.83	137.91	3.54	26.32	47.24	1.21
	SSP370	103.64	150.50	3.50	35.50	51.56	1.20
	SSP585	114.15	153.81	4.50	39.11	52.69	1.54
2070s	SSP126	85.27	142.84	2.88	29.21	48.93	0.99
	SSP370	136.71	164.87	3.22	46.83	56.48	1.10
	SSP585	159.76	174.13	2.87	54.73	59.66	0.98
2090s	SSP126	80.14	138.50	4.20	27.46	47.45	1.44
	SSP370	158.22	172.00	3.81	54.20	58.92	1.30
	SSP585	190.38	186.34	1.66	65.22	63.84	0.57



注：该图基于自然资源部标准底图服务网站下载的审图号为 GS (2024) 0650 号的标准地图制作，底图无修改。

Figure 6. Changes in suitable habitats of *L. perenne* in China under future climate scenarios: ((a)~(c)) Changes in suitable habitats under SSP126, SSP370, and SSP585 climate scenarios for the 2050s; ((d)~(f)) Changes in suitable habitats under SSP126, SSP370, and SSP585 climate scenarios for the 2070s; ((g)~(i)) Changes in suitable habitats under SSP126, SSP370, and SSP585 climate scenarios for the 2090s

图 6. 未来不同气候情景下中国黑麦草的适生区变化图：((a)~(c)) 2050 年代 SSP126、SSP370、SSP585 气候情景下适生区变化图；((d)~(f)) 2070 年代 SSP126、SSP370、SSP585 气候情景下适生区变化图；((g)~(i)) 2090 年代 SSP126、SSP370、SSP585 气候情景下适生区变化图

2070 年代，扩张区、稳定区面积持续增大，且越高排放情景下面积越大；SSP370 气候情景下收缩区面积最大，为 $3.22 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，高、低排放情景下收缩区面积基本相同，收缩区面积相较于 2050 年代有所缩小，扩张区、稳定区面积均增大。稳定区仍分布在我国中部；扩张区持续向北扩展，覆盖东三省、内蒙古东北部、黄河中下游地区、青藏高原；向南仍分布在江西、湖南、福建、两广等南部省份，在东三省和内蒙古的扩张最为明显；收缩区分布位置与 2050 年代相同。

2090 年代，扩张区、稳定区面积仍持续增大，越高排放情景下面积越大；SSP126 情景下收缩区面积 $4.20 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，达到三个时期最大面积，SSP370 收缩区面积 $3.81 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，也高于前两个时期，SSP585 气候情景下收缩区面积仅 $1.66 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，面积变化率仅 0.57，是所有时期、所有气候情景下面积最小的。扩张区仍向东三省、内蒙古、青藏高原等地推进，东北地区扩张明显，南部省份扩张区位置基本不变。SSP126 情景下收缩区位置无明显改变，贵州、内蒙古北部地区的收缩区面积扩大，分布更加集中。SSP370 情景下收缩区集中于内蒙古东北部、西藏西部，新疆北部亦有小面积分布。SSP585 气候情景下收缩区面积大幅减小，几乎仅剩内蒙古东北部及西藏西部有收缩区。

综上可知稳定区占适生区的大部分，扩张区分布在南北两侧，有明显向高纬度高海拔地区推进的趋

势，南部扩张区面积亦呈现增大趋势，但位置几乎不变，扩张区、稳定区面积均随气候情景排放升高而显著增大，收缩区面积及位置受气候影响较大。

4. 讨论与结论

4.1. 随机森林模型在黑麦草分布预测应用中的评估

在本研究基于中国黑麦草的分布记录，结合地形、土壤、气候和人类活动因素，利用 RF 预测了黑麦草适生区的分布及收缩扩张情况。模型表现出了极佳的效果($TSS > 0.9$, $ROC > 0.85$)，表明模型的预测精度非常高。RF 模型通过集成多个决策树进行分类，具有较高的精确度和鲁棒性，能够有效处理复杂的生态数据，并且对缺失值和异常值不敏感。此外，RF 模型能够评估各环境变量对物种分布的影响，为理解物种适生区提供了直观的依据。虽然 RF 模型对变量的重要性评估具有一定的优势，但它的解释性较差，无法揭示各环境因子之间的复杂关系和因果机制。因此，未来可以通过结合其他解释性较强的模型，如回归分析或贝叶斯模型，进一步提高模型的解释性和预测精度。

4.2. 环境变量对黑麦草适生区分布的影响

众多研究表明，气候是影响植物生长、分布和发展的关键因素。模型结果显示，人类活动(hfp)和气候因子是影响黑麦草分布的两大主导因素。人类活动因子单独贡献率达 20.1%，说明城市绿化、农业开垦、生态工程等人为干扰显著改变了黑麦草的适生环境，尤其在中东部人口密集、经济活跃区域，人类活动为其扩散提供了有利条件。进一步从响应曲线来看，人类活动指数在 38 左右时适生性达到峰值并维持稳定，表明适度人为干扰更利于其生长，但高强度开发无显著增益，这提示在城市化进程中应关注中度干扰区域的黑麦草扩散风险。

气候驱动力方面，温度相关因子的累积重要性远高于降水相关因子，表明热量条件是限制黑麦草地理分布的决定性自然因素。具体来说，最干季度平均温度(bio9)的响应曲线在 -7.5°C 至 -5°C 区间出现适生性骤增的现象，存在明显低温阈值，这说明冬季极端低温是制约黑麦草向更高纬度扩展的主要生理瓶颈；同时，气温年较差(bio7)呈现双峰响应， 0°C ~ 40°C 适生性持续下降，超过 54°C 显著回升，可能与高纬度地区强季节性适应有关，说明黑麦草在年温差极大的区域仍具备一定的生态适应策略。在降水方面，年降水量(bio12)大于 500 mm 时更适合黑麦草生长，但超过 2500 mm 无额外益处，说明黑麦草能适应较湿润的环境，但在我国降水过于丰沛地区可能会出现扩散受限的情况，这与实际中黑麦草集中分布于我国湿润、半湿润地区的格局相符，只要满足基本水热条件，黑麦草便能存活。

土壤因子虽累计重要性仅为 10.8%，但土壤理化性质对黑麦草的建群与存活具有不可忽视的影响。地形因子中海拔的重要性较低，可能与黑麦草较强的适应性有关，但其在高海拔地区的扩张趋势仍值得关注。总体来看，黑麦草的分布是气候、人为干扰与立地条件共同作用的结果，未来预测中需继续重视多因子协同效应。

4.3. 未来气候变化对黑麦草地理分布的影响

黑麦草喜温凉湿润气候，宜在夏季凉爽、冬季不太寒冷的地区生长，耐寒耐热性差。在未来不同气候情景下，黑麦草的适生区均呈现持续向东北、向南、向高海拔扩张的趋势，且扩张幅度随排放强度增加而显著提升。SSP585 情景下至 2090 年代，适生区总面积可达当前时期的 2.05 倍，表明未来气候变暖将极大促进黑麦草向更高纬度、更高海拔地区迁移。尤其是中适生区面积增长最为显著，反映出原本不适宜区域将逐步转化为适宜生境。从空间格局看，扩张区主要分布于东北、内蒙古、青藏高原等当前非适生或低适生区域，而稳定区仍集中于中东部传统适生区。南部地区如两广、江西等地也始终呈现明显

扩张趋势，但稳定性较高，说明这些区域在当前与未来均具备较好的适生条件。值得注意的是，在低排放情景下，2090 年代适生区面积较 2070 年代略有收缩，提示若全球减排措施有效实施，黑麦草的扩张趋势可能在一定程度上受到抑制。

相较于以往 RCP 情景下的研究，本研究在 SSP585 情景下模拟出的适生区扩张更为剧烈，高适生区的增加面积更为显著。这种差异的主要原因在于 CMIP6 模型对温室气体浓度的气候敏感度更高，且 SSP 情景综合考虑了社会经济发展路径，其中 SSP585 代表的化石燃料驱动型发展模式隐含了更强的人类活动干扰，这与模型中 *hfp* 因子的高贡献率相呼应，从而在预测中强化了适生区的扩张效应。相比之下，RCP 情景主要关注辐射强迫，可能低估了社会经济因素对生物入侵的复合影响。此外，本研究还发现气温年较差的适应性阈值在未来气候变暖背景下可能发挥更重要的作用，进一步解释了黑麦草在东北地区能够持续扩张的生态机制。

4.4. 黑麦草的入侵风险性分析及预防建议

黑麦草是一种广泛引种栽培的牧草，不仅具有一定经济价值，还能用于生态修复，在关注其价值的同时，我们也应当发现其广泛栽培后的隐患，目前黑麦草已经被列为我国一般入侵性植物，其逸生记录也在持续增加。黑麦草具有较强竞争力和环境适应性，其适生区扩张可能加剧其对生态系统的入侵风险，尤其在农牧交错带、高寒草甸等生态脆弱区，黑麦草的侵入可能影响本地物种组成、降低生物多样性，甚至改变群落结构与生态系统功能。此外，黑麦草向农田周边扩散的可能性也极大，可能会对农业生产造成干扰。

为此，建议从以下几方面加强防控与管理：首先，筛选黑麦草适生区的生态脆弱区，并建立黑麦草动态监测与预警体系，重点关注扩张趋势明显的东北、西北及青藏高原边缘区域；其次，在生态修复与绿化工程中谨慎使用黑麦草，优先选择乡土草种，降低其人为传播风险；最后，加强科普宣传与政策引导，提升公众与管理部门对入侵物种的认知与防范意识。

参考文献

- [1] Beddows, A.R. (1967) *Lolium perenne* L. *The Journal of Ecology*, **55**, 567-587. <https://doi.org/10.2307/2257894>
- [2] Luo, H., Li, H., Zhang, X. and Fu, J. (2011) Antioxidant Responses and Gene Expression in Perennial Ryegrass (*Lolium perenne* L.) under Cadmium Stress. *Ecotoxicology*, **20**, 770-778. <https://doi.org/10.1007/s10646-011-0628-y>
- [3] 孙蕊, 钟鹏, 刘泽东, 等. 黑麦草的生产技术及其利用价值[J]. 饲料博览, 2023(3): 35-38.
- [4] 冯阳, 吴程, 李祖然, 等. 多年生黑麦草对锌和 2-巯基苯并噻唑复合胁迫的响应[J]. 草地学报, 2025, 33(8): 2548-2557.
- [5] 鄂燕, 张新全, 张新跃. 黑麦草种子生产研究现状及发展对策[J]. 草业科学, 2003(2): 16-19.
- [6] Aitken, S.N., Yeaman, S., Holliday, J.A., Wang, T. and Curtis-McLane, S. (2008) Adaptation, Migration or Extirpation: Climate Change Outcomes for Tree Populations. *Evolutionary Applications*, **1**, 95-111. <https://doi.org/10.1111/j.1752-4571.2007.00013.x>
- [7] 吕玉玲, 潘文豪, 饶鑫媛, 等. 基于优化 MaxEnt 模型的火炬树在我国潜在适生区预测[J]. 生物安全学报(中英文), 2025, 34(3): 249-257.
- [8] 袁艳超, 肖文发, 刘逸夫, 等. 气候变化下黄枝油杉与江南油杉的潜在适生区预测[J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(6): 30-42.
- [9] Li, Y., Shao, W. and Jiang, J. (2022) Predicting the Potential Global Distribution of *Sapindus mukorossi* under Climate Change Based on Maxent Modelling. *Environmental Science and Pollution Research*, **29**, 21751-21768. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17294-9>
- [10] 刘赛静. 气候和土地利用变化对中国山茶科植物分布格局的影响[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江师范大学, 2024.
- [11] 罗梦萍. 气候与土地利用变化下中国丹霞梧桐潜在适生区研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 中南林业科技大学,

- 2024.
- [12] 翟心语. 城市化影响下驻马店市植物物种多样性分布格局[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 河南农业大学, 2024.
- [13] 梁红. 城市化背景下青岛城市森林植被多样性格局成因及其维持[D]: [博士学位论文]. 上海: 华东师范大学, 2014.
- [14] 柴思雨, 徐剑莹, 李铁华, 等. 基于优化 MaxEnt 模型的细叶桢楠潜在适生区预测[J]. 中南林业科技大学学报, 2025, 45(9): 94-105.
- [15] 李政升, 马玉寿, 李有鑫, 等. 气候变化下青藏高原中亚紫菀木潜在适生区的时空动态变化[J]. 生态学杂志, 2024, 43(6): 1566-1575.
- [16] Guisan, A., Thuiller, W. and Zimmermann, N.E. (2017) Habitat Suitability and Distribution Models: With Applications in R. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781139028271>
- [17] 刘逸夫, 王军辉, 谭灿灿, 等. 基于 MaxEnt 模型预测青杆和大果青杆潜在适生区[J]. 林业科学, 2025, 38(1): 169-180.
- [18] 路文静, 彭佳, 陈鹏峯, 等. 气候变化对白及适生区分布的影响[J]. 西南农业学报, 2025, 38(1): 209-216.
- [19] Gao, X., Liu, J. and Huang, Z. (2022) The Impact of Climate Change on the Distribution of Rare and Endangered Tree *Firmiana kwangsiensis* Using the Maxent Modeling. *Ecology and Evolution*, **12**, e9165. <https://doi.org/10.1002/ece3.9165>
- [20] Zhang, H., Li, J., Zou, H., Wang, Z., Zhu, X., Zhang, Y., et al. (2024) Distribution Pattern of Suitable Areas and Corridor Identification of Endangered Ephedra Species in China. *Plants*, **13**, Article 890. <https://doi.org/10.3390/plants13060890>
- [21] 陈瑜, 杨毅哲, 陈丽丽, 等. 基于生态位模型的多花黑麦草入侵风险分析[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2024, 52(1): 2+70-78.
- [22] Wu, K., Wang, Y., Liu, Z., Huo, W., Cao, J., Zhao, G., et al. (2024) Prediction of Potential Invasion of Two Weeds of the Genus Avena in Asia under Climate Change Based on Maxent. *Science of The Total Environment*, **950**, Article 175192. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.175192>
- [23] Miller, J. (2010) Species Distribution Modeling. *Geography Compass*, **4**, 490-509. <https://doi.org/10.1111/j.1749-8198.2010.00351.x>
- [24] Guisan, A., Edwards, T.C. and Hastie, T. (2002) Generalized Linear and Generalized Additive Models in Studies of Species Distributions: Setting the Scene. *Ecological Modelling*, **157**, 89-100. [https://doi.org/10.1016/s0304-3800\(02\)00204-1](https://doi.org/10.1016/s0304-3800(02)00204-1)
- [25] Stockwell, D. (1999) The GARP Modelling System: Problems and Solutions to Automated Spatial Prediction. *International Journal of Geographical Information Science*, **13**, 143-158. <https://doi.org/10.1080/136588199241391>
- [26] O'Sullivan, F. (1991) Discussion: Multivariate Adaptive Regression Splines. *The Annals of Statistics*, **19**, 1-67. <https://doi.org/10.1214/aos/1176347968>
- [27] Phillips, S.J., Dudík, M. and Schapire, R.E. (2004) A Maximum Entropy Approach to Species Distribution Modeling. *Twenty-First International Conference on Machine Learning*, Banff, 4-8 July 2004, 83. <https://doi.org/10.1145/1015330.1015412>
- [28] Loh, W. (2011) Classification and Regression Trees. *WIREs Data Mining and Knowledge Discovery*, **1**, 14-23. <https://doi.org/10.1002/widm.8>
- [29] Linderman, M., Liu, J., Qi, J., An, L., Ouyang, Z., Yang, J., et al. (2004) Using Artificial Neural Networks to Map the Spatial Distribution of Understorey Bamboo from Remote Sensing Data. *International Journal of Remote Sensing*, **25**, 1685-1700. <https://doi.org/10.1080/01431160310001598971>
- [30] 贾一航, 舒会淋, 雷刚, 等. 物种分布模型: 概念类型、建模预测及生态系统管理应用[J/OL]. 中国水土保持科学(中英文), 2025: 1-13. <https://link.cnki.net/urlid/10.1449.S.20250811.1129.002>, 2025-12-05.
- [31] Biau, G. (2012) Analysis of a Random Forests Model. *The Journal of Machine Learning Research*, **13**, 1063-1095.
- [32] 金宇, 周可新, 方颖, 等. 基于随机森林模型预估气候变化对动物物种潜在生境的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2014, 30(4): 416-422.
- [33] Breiman, L. (2001) Random Forests. *Machine Learning*, **45**, 5-32. <https://doi.org/10.1023/a:1010933404324>
- [34] Buskirk, T.D. (2018) Surveying the Forests and Sampling the Trees: An Overview of Classification and Regression Trees and Random Forests with Applications in Survey Research. *Survey Practice*, **11**, 1-13. <https://doi.org/10.29115/sp-2018-0003>
- [35] Garcia, S.C., Kemp, S., Clark, C., Ota, N., Islam, M. and Kriticos, D. (2021) What's Next for the New Zealand Dairy Feed-Base? Learnings from Climate Analogues. *NZGA: Research and Practice Series*, **17**, 149-162. <https://doi.org/10.33584/rps.17.2021.3486>

-
- [36] Meyer, R., Sinnett, A., Perera, R., Cullen, B., Malcolm, B. and Eckard, R.J. (2021) The Potential of Deep Roots to Mitigate Impacts of Heatwaves and Declining Rainfall on Pastures in Southeast Australia. *Plants*, **10**, Article 1641. <https://doi.org/10.3390/plants10081641>
 - [37] Streethran, N., Hickey, K., Wingler, A., et al. (2024) ClimAg: Multifactorial Causes of Fodder Crises in Ireland and Risks due to Climate Change. *Agricultural Economics*, 1-30. <http://www.epa.ie>
 - [38] Yang, J., Huang, Y., Jiang, X., Chen, H., Liu, M. and Wang, R. (2022) Potential Geographical Distribution of the Endangered Plant Isoetes under Human Activities Using Maxent and Garp. *Global Ecology and Conservation*, **38**, e02186. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2022.e02186>
 - [39] 张劳模, 罗鹏, 庞丽峰, 等. 运用最大熵模型和随机森林模型对东北红松分布的模拟[J]. 东北林业大学学报, 2020, 48(3): 60-66.
 - [40] Zhang, H., Zhou, Y., Ji, X., Wang, Z. and Liu, Z. (2025) Climate Change Drives the Adaptive Distribution and Habitat Fragmentation of Betula Albosinensis Forests in China. *Forests*, **16**, Article 184. <https://doi.org/10.3390/f16010184>