

DOI: 10.20103/j.stxb.202311262580

苏静, 李海洋, 王瑞, 张梦帆, 李家美. 外来入侵种地中海大麦在中国的潜在适生区预测. 生态学报, 2025, 45(3): 1379-1388.

Su J, Li H Y, Wang R, Zhang M F, Li J M. Prediction of potential suitable areas for *Hordeum murinum* subsp. *leporinum* as an emerging invasive plant in China. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(3): 1379-1388.

# 外来入侵种地中海大麦在中国的潜在适生区预测

苏 静<sup>1</sup>, 李海洋<sup>1</sup>, 王 瑞<sup>2</sup>, 张梦帆<sup>1</sup>, 李家美<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> 河南农业大学生命科学学院, 郑州 450002

<sup>2</sup> 中国农业科学院植物保护研究所植物病虫害综合治理全国重点实验室, 北京 100193

**摘要:** 地中海大麦 (*Hordeum murinum* subsp. *leporinum*) 原产欧洲, 2023 年首次在河南省发现其入侵种群。由于其繁殖能力强、生长速度快、一旦大面积入侵将会对当地农业生产造成危害。亟需探明其在我国的潜在入侵和分布区, 为建立全面的监测和预警系统提供支撑。基于查询的地中海大麦的分布数据 (453 个) 和环境因子 (19 个), 并利用 MaxEnt 模型模拟其适生生态位, 预测其在中国当前和未来气候变化背景下的潜在地理分布。结果表明: 年平均气温、温度季节性变化、最冷月最低温度、年降水量、最暖季度降水量和最冷季度降水量是影响地中海大麦分布的主要因子; 当前气候条件下适生区总面积为  $278.72 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 占中国国土面积的 29.03%, 高适生区主要分布在河南、陕西、甘肃、云南、贵州、四川等地; 未来气候条件下更利于地中海大麦扩张, 总适生区较当前有不同程度地扩展, 增幅最大的时期为 2050sSSP245 (7.97%); 中、高度适生区多集中在西南、华中、华东和西北等区域, 增幅最大的时期分别为 2050sSSP585 (7.40%)、2070sSSP126 (16.75%)。未来应加强植物检疫, 防止地中海大麦从焦作地区向外扩散蔓延; 同时在华中、华南、华东和西南地区完善引种与调运的管控制度, 不到疫区调种, 并提高人们的风险防范意识。

**关键词:** 大麦族; 农业生产; 生物入侵; 生态风险; 全球气候变化

## Prediction of potential suitable areas for *Hordeum murinum* subsp. *leporinum* as an emerging invasive plant in China

SU Jing<sup>1</sup>, LI Haiyang<sup>1</sup>, WANG Rui<sup>2</sup>, ZHANG Mengfan<sup>1</sup>, LI Jiamei<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> College of Life Sciences, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China

<sup>2</sup> State Key Laboratory for Biology of Plant Diseases and Insect Pests, Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China

**Abstract:** *Hordeum murinum* subsp. *leporinum* is an endemic species to Europe. It was found to have invaded Henan Province in 2023. Due to its highly reproductive capacity and rapid growth, it could pose a threat to local agricultural production if it were to become widely invasive. It is imperative to predict the distribution of potential invasion risk areas in China in order to establish a comprehensive monitoring and early warning system. Based on its 453 occurrence records and 19 environmental factors for *H. murinum* subsp. *leporinum*, we used the MaxEnt model to simulate its fitness ecological niche, as well as to study the potential suitable distribution areas in China under the current and future climate change scenarios. Our results indicated that the mean annual temperature, seasonal variation of temperature, minimum temperature of coldest month, annual precipitation, precipitation of the warmest quarter and precipitation of the coldest quarter were the primary bioclimatic factors affecting the distribution of *H. murinum* subsp. *leporinum*. Under current climatic conditions, the

**基金项目:** 国家重点研发计划项目 (2021YFC2600400); 信阳生态研究院开放基金 (2023XYMS05)

**收稿日期:** 2023-11-26; **网络出版日期:** 2024-10-21

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jiamei\_li@126.com

# 限于数据的可获取性, 本研究尚未含中国港澳台统计数据。

total suitable area of the potentially geographical distribution of *H. murinum* subsp. *leporinum* would be  $278.72 \times 10^4 \text{ km}^2$ , accounting for about 29.03% of the national land area. The highly suitability habitats were mainly distributed in the Henan, Shaanxi, Gansu, Yunnan, Guizhou, and Sichuan provinces. Future climate will become more conducive to the expansion of *H. murinum* subsp. *leporinum* than the current climate. The greatest increase occurs in the 2050s SSP245 scenario (7.97%). The highly and moderately suitable habitats were located in the areas of southwestern, central, eastern, and northwestern China with the greatest increases according to the 2050s SSP585 scenario (7.40%) and the 2070s SSP126 scenario (16.75%). In the future, plant quarantine measures should be strengthened to prevent the further invasion and spread of *H. murinum* subsp. *leporinum* from spreading outward from the Jiaozuo region. Meanwhile, it is essential to strengthen control measures for the introduction and transport of plants in central, southern, eastern and south-western China, to ensure that no plants are planted in susceptible regions and to raise public awareness of risk prevention.

**Key Words:** Triticeae; agricultural production; biological invasion; ecological risk; global climate change

我国是世界上遭受外来入侵物种危害最为严重的国家之一。由于人类活动和经济全球化的影响,生物入侵的速度加快。外来入侵物种长距离跨区域入侵和扩散趋势的增加,以及传播链条与扩散途径的多样化使得新发突发性入侵极易呈现局部暴发的态势,为外来入侵物种的防控带来了极大挑战。潜在和新发外来入侵物种的早期监测预警是防控其扩散成灾的前瞻性和主动性举措<sup>[1]</sup>。

物种分布模型(species distribution models, SDMs)基于生态位理论,通过物种的地理分布数据和环境变量,预测物种在当前和未来气候变化情境下的存在概率<sup>[2]</sup>。其中,MaxEnt 模型能较好地地区分物种在不同区域的适生程度,提供更准确的预测结果<sup>[3]</sup>。近年来,它已成为物种适生区预测与划分的重要工具,尤其在外来入侵植物的入侵风险分析应用方面较为广泛<sup>[4]</sup>,如对钻叶紫菀(*Symphytotrichum subulatum*)<sup>[5]</sup>、曼陀罗(*Datura stramonium*)<sup>[6]</sup>和印加孔雀草(*Tagetes minuta*)<sup>[7]</sup>在不同气候情景下的适生区预测,为这些入侵植物的风险评估与防治提供了重要依据,也证实了 MaxEnt 模型在预测外来入侵植物潜在地理分布方面的可行性和准确性。

地中海大麦 *Hordeum murinum* subsp. *leporinum* 种子具有高度休眠性,且发芽早、繁殖潜力强、生长旺盛、冠层发育早和抗除草剂特性等,该种原产于地中海地区,是大麦属中全球分布最广、危害最大、最具入侵性的杂草<sup>[8-9]</sup>。它的芒坚硬且密被刺毛,可粘在绵羊的皮毛上,渗入皮肤和眼睛,甚至导致绵羊死亡<sup>[10]</sup>。它也可作为病虫害的有利替代宿主,进而危害作物,对农业生产造成严重威胁<sup>[11]</sup>。2023 年,本研究在进行河南省外来入侵植物普查过程中,发现地中海大麦已入侵至河南焦作的沁阳市、孟州市、温县和武陟县等地。焦作地区地中海大麦在 29 个踏查点的入侵面积均在 0.0067—0.3333 hm<sup>2</sup> 之间,共计 4.08 hm<sup>2</sup>;其中入侵面积较大的踏查点主要集中在河堤、国道、省道、县道以及乡道的两侧,共计 3.63 hm<sup>2</sup>。焦作地区的地中海大麦广布于绿化带、马路两侧空地、麦田埂和堤坝等区域。地中海大麦与小麦亲缘关系较近,营养体极其近似,难以区分,不能人工拔除,也无有效除草剂。此外,其与小麦物候期相同,可与小麦争夺水肥,严重影响小麦产量和品质。一旦入侵物种被发现且造成重大危害时,对其进行控制和治理是极其困难的,而预测物种入侵比控制其暴发更为经济<sup>[12]</sup>。及时阻止或减缓地中海大麦在中国扩散蔓延,保护中国粮食生产安全,明确地中海大麦在中国的适生区迫在眉睫。基于此,本研究采用 MaxEnt 生态位模型预测和分析地中海大麦在中国的潜在适生区,划定预防和控制其进一步传入和扩散蔓延的高风险区,为开展早期监测预警提供支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 分布数据获取与筛选

2023 年 5 月,本研究在河南省焦作市进行农业外来入侵物种普查,获得地中海大麦 30 个地理分布信息;同时参考全球多样性信息网络数据库(<https://www.gbif.org>)和文献全面收集地中海大麦全球分布数据。为减少空间关联性,通过 R 软件中使用 spThin 包中的 thin 函数排除距离小于 5 km 的分布数据后最终收集到

453 个位点。从国家基础地理信息系统网站 (<http://nfgis.nsd.gov.cn>) 下载中国行政区划图作为底图, 审阅号为 GS(2024)0650。

## 1.2 气候因子数据获取与筛选

使用的当前(1970—2000 年)和未来 2050s、2070s 和 2090s 的 19 个气候因子于全球气候网站 (<http://www.worldclim.org>) 下载, 分辨率为 2.5min。采用中等分辨率气候系统模式(BCC-CSM2-MR)作为未来气候的数据源, 其对中国降水分布与气温的模拟较为可靠<sup>[13-14]</sup>。包括四种共享社会经济路径 SSP126(可持续发展路径)、SSP245(中等发展路径)、SSP370(局部发展路径)和 SSP585(常规发展路径)<sup>[15-16]</sup>。为避免气候因子间的多重共线性、自相关导致模型过拟合, 通过 Jackknife 刀切法剔除贡献率较低的因子<sup>[17]</sup>, 并利用 ArcGIS 10.7 和 SPSS 数据统计工具对 19 个气候因子进行 Spearman 相关性分析<sup>[18-19]</sup>。植物的实际分布与其生态极限密切相关, 地中海大麦隶属凉温性的植物类群, 广泛分布于除北欧外的世界温带地区。综合考虑地中海大麦的实际生存环境和生理特性, 在存在共线性关系(相关性系数 $\geq 0.75$ )的两个因子间选取与其分布紧密关联的生态因子用于最终建模<sup>[20-21]</sup>, 这些因子包括: 年平均气温(bio1)、温度季节性变化(bio4)、最冷月最低温度(bio6)、年降水量(bio12)、最暖季度降水量(bio18)和最冷季度降水量(bio19)。

## 1.3 模型设置及评价

MaxEnt 的复杂性和性能受模型中特征组合(feature combination, FC)和正则化乘数(regularization multiplier, RM)两个参数的影响较大<sup>[22]</sup>。为提高预测结果的准确性和可靠性, 基于 R 包“ENMeval”通过六种 FC 组合 H、L、LQ、LQH、LQHP、LQHPT(L 是线性、Q 是二次型、H 是片段化、P 是乘积型、T 是阈值型)和 RM(0.5、1、1.5、2、2.5、3、3.5、4、4.5、5、5.5 和 6)计算 Akaike 信息标准系数(AICc)评估模型的拟合度及复杂<sup>[23]</sup>, 选择具有最小 AICc 评分(DAICc=0)的最优参数组合用于提高模型的预测性能<sup>[24-25]</sup>。最终选用 FC=LQHP、RM=0.1 的参数组合建模。

将地中海大麦分布数据和筛选后的环境因子导入 MaxEnt 3.4.4 软件, 设置 75% 的分布数据作为训练集, 25% 作为测试集。最大迭代次数为 5000 次, 复制运行 10 次<sup>[26]</sup>; 输出格式为“Cloglog”<sup>[27]</sup>, 文件类型为“asc”, 重复迭代方式为“Subsample”<sup>[28]</sup>, FC=LQHP、RM=0.1; 其余参数为默认值。最后采用受试者工作特征曲线(Receiver Operating Characteristic Curve, ROC)评估模型预测精度, 并以 ROC 曲线下的面积值(Area Under Curve, AUC)作为评价指标<sup>[29]</sup>。AUC 值越接近于 1, 表示与随机分布相距越远, 预测结果越精确<sup>[30]</sup>。

## 1.4 适生区划分

将 MaxEnt 输出结果导入 ArcGIS 中, 将 minimum training presence cloglog threshold 作为最低存在阈值(the lowest presence threshold, LPT)<sup>[31-32]</sup>, 利用“Reclassify”功能, 对非适生区( $0 \leq P < LPT$ )、低适生区( $LPT \leq P < 0.12$ )、中适生区( $0.12 \leq P < 0.21$ )和高适生区( $P \geq 0.21$ )各等级面积进行统计<sup>[33]</sup>。

# 2 结果

## 2.1 MaxEnt 模型模拟精度评估

基于优化后的 FC=LQHP、RM=0.1 的参数组合设置运行模型后, 得到的当前和未来气候条件下 AUC 平均值均大于 0.92(标准误差为 0.003), 远大于随机预测分布模拟值 0.5(图 1)。表明模型对地中海大麦适生区分布的预测结果准确度很高。

## 2.2 气候因子重要性评估

如表 1 所示的 7 个气候因子中, 对模型预测结果贡献率排前三的依次为: 最冷月最低温度(bio6, 36.9%)、最冷季度降水量(bio19, 34.8%)、温度季节性变化

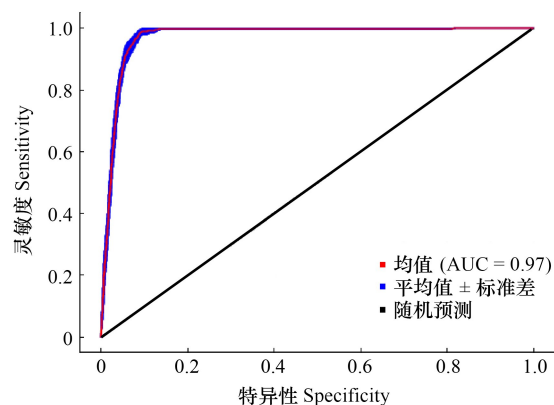


图 1 受试者工作特征曲线(ROC)

Fig.1 The working characteristic curve of the subjects (ROC)

(bio4,15.3%),累计达 87.0%;置换重要值水平最高的是最冷月最低温度(bio6,53.9%)、温度季节性变化(bio4,19.4%)、年平均气温(bio1,17.3%),累计达 90.6%。刀切法检验结果表明当只使用一个变量时,导致模型增益最大的变量为年平均气温(bio1)。可知温度(bio1、bio4、bio6)和降水(bio19)是影响地中海大麦现代潜在地理分布格局的两个主导生物气候因素。

表 1 主要气候因子的贡献率和置换重要值

Table 1 The percent contribution and permutation importance of major bio-climatic variables

| 描述<br>Description                               | 贡献率/%<br>Percent contribution | 置换值/%<br>Permutation importance |
|-------------------------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|
| 年平均气温 Annual mean temperature(bio1)             | 5.5                           | 17.3                            |
| 温度季节性变化 Temperature seasonality(bio4)           | 15.3                          | 19.4                            |
| 最冷月最低温度 Min temperature of coldest month(bio6)  | 36.9                          | 53.9                            |
| 年降雨量 Annual precipitation(bio12)                | 4.3                           | 5.8                             |
| 最暖季度降水量 Precipitation of warmest quarter(bio18) | 3.2                           | 2.7                             |
| 最冷季度降水量 Precipitation of coldest quarter(bio19) | 34.8                          | 0.9                             |

基于模型创建的每个气候因子单独对物种的发生概率起作用时的响应曲线(图 2),以发生概率 0.5 为阈值,可获得适宜地中海大麦生存的气候因子区间值<sup>[34]</sup>。地中海大麦适宜生长的年平均气温最适范围为 9.92—17.87(峰值 14.1℃)、最冷月最低温度范围为-3.58—6.60℃(峰值 1.98℃)、温度季节性变化范围为 507.99—698.43(峰值 550.40mm),最暖季度降水量范围为 49.93—208.154mm(峰值 111.21mm),最冷季度降水量范围为 118.35—363.84mm(峰值 186.84mm),年降水量范围为 440.03—1123.37mm(峰值 766.17mm)。

2.3 当前气候条件下在中国的潜在适生区

当前气候条件下地中海大麦的潜在适生区总面积为 258.59×10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>,主要分布在西北、西南和华中部分区域。此外,山西、河北、宁夏、上海、江西和西藏等省份也有零星分布(图 3)。其中,高适生区、中适生区和低适生区面积分别为 10.52×10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>、43.66×10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>和 204.41×10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>(表 2)。高适生区要分布于河南、陕西、甘肃、云南、贵州和四川等地。

表 2 不同时期适生区面积/(×10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>)

Table 2 Potential distribution areas under differ climate change scenarios

| 时期<br>Period | 情景<br>Scenarios | 低适生区<br>Low suitable habitats |                        | 中适生区<br>Moderate suitable habitats |                        | 高适生区<br>High suitable habitats |                        | 总适生区<br>Total suitable habitats |                        |
|--------------|-----------------|-------------------------------|------------------------|------------------------------------|------------------------|--------------------------------|------------------------|---------------------------------|------------------------|
|              |                 | 面积<br>Area                    | 增加面积<br>Expansion area | 面积<br>Area                         | 增加面积<br>Expansion area | 面积<br>Area                     | 增加面积<br>Expansion area | 面积<br>Area                      | 增加面积<br>Expansion area |
|              |                 |                               |                        |                                    |                        |                                |                        |                                 |                        |
| 当前 Current   | Current         | 204.41                        |                        | 43.66                              |                        | 10.52                          |                        | 258.59                          |                        |
| 2050s        | SSP126          | 116.81                        | -87.60                 | 68.38                              | 24.71                  | 123.48                         | 112.96                 | 308.67                          | 50.07                  |
|              | SSP245          | 94.11                         | -110.30                | 148.79                             | 148.79                 | 87.23                          | 76.7                   | 330.13                          | 71.54                  |
|              | SSP370          | 135.86                        | -68.54                 | 121.70                             | 121.70                 | 51.16                          | 40.64                  | 308.73                          | 50.14                  |
|              | SSP585          | 120.55                        | -83.86                 | 144.59                             | 144.59                 | 38.84                          | 28.31                  | 303.97                          | 45.38                  |
| 2070s        | SSP126          | 111.38                        | -93.02                 | 135.51                             | 135.51                 | 72.76                          | 62.24                  | 319.65                          | 61.06                  |
|              | SSP245          | 102.52                        | -101.89                | 129.82                             | 129.82                 | 85.97                          | 75.44                  | 318.31                          | 59.72                  |
|              | SSP370          | 162.35                        | -42.06                 | 105.5                              | 105.51                 | 35.22                          | 24.70                  | 303.08                          | 44.49                  |
|              | SSP585          | 105.92                        | -98.49                 | 116.43                             | 116.43                 | 84.53                          | 74.0                   | 306.87                          | 48.28                  |
| 2090s        | SSP126          | 111.81                        | -92.60                 | 129.59                             | 129.59                 | 81.23                          | 70.71                  | 322.63                          | 64.04                  |
|              | SSP245          | 157.20                        | -47.21                 | 124.87                             | 124.87                 | 30.80                          | 20.27                  | 312.86                          | 54.27                  |
|              | SSP370          | 212.19                        | 7.78                   | 71.46                              | 71.46                  | 12.85                          | 2.33                   | 296.50                          | 37.91                  |
|              | SSP585          | 196.73                        | -7.67                  | 97.44                              | 97.44                  | 12.04                          | 1.52                   | 306.21                          | 47.62                  |

“-”,表示与当前气候条件下相比减少的面积;SSP:共享社会经济路径 Shared socioeconomic pathways

2.4 地中海大麦未来在中国的适生区

与当代相比,随着气候持续变暖,未来不同气候条件下地中海大麦在我国的总适生区面积均增加,适生区

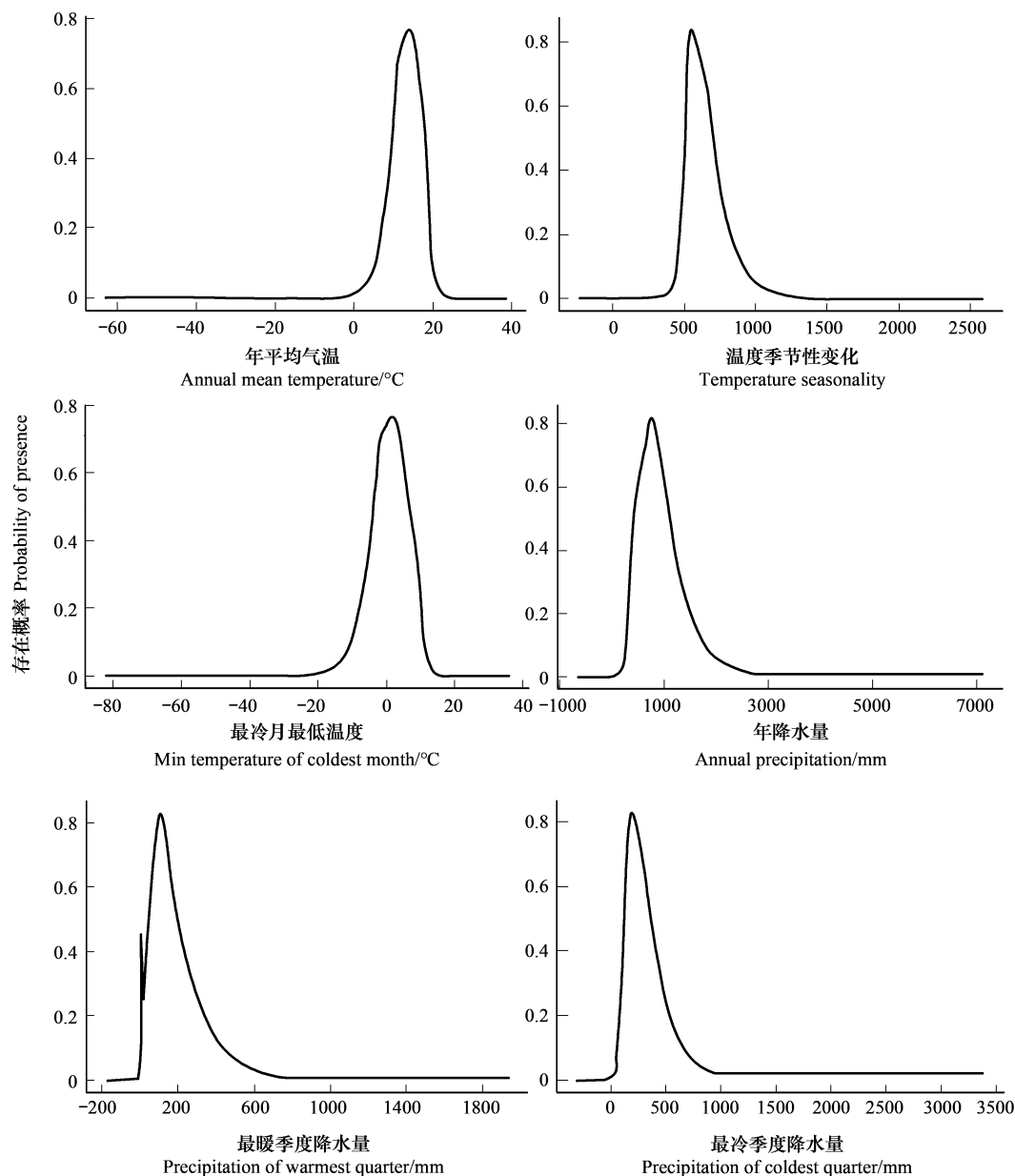


图2 关键生物气候变量的单一响应曲线

Fig.2 Single response curve of dominant environment factors

的范围整体向东和向北扩张。其中, SSP245 (2050s) 下总适生区面积增幅最大(表2), 增加量为  $71.54 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。未来不同情景模式下高适生区和中适生区面积均增加(图4), 增幅最大的时期分别为 SSP126 (2070s), 增加量为  $112.96 \times 10^4 \text{ km}^2$  和 SSP245 (2050s), 增加量为  $148.79 \times 10^4 \text{ km}^2$  (图5)。

未来不同气候情景模式下, 地中海大麦在甘肃、宁夏、陕西、山西、安徽、甘肃和河北等地的适生区向北扩张, 而在贵州、湖南、江西和福建等地向南小幅度扩张。在未来不同情景下, 河南、甘肃和陕西  $23^\circ\text{--}42^\circ\text{N}$  之间为高适生区, 而主要收缩区域在云南、四川、西藏及三省交界。

### 3 讨论

#### 3.1 地中海大麦分布的限制因子及其扩散趋势

温度 (bio1、bio4 和 bio6) 和降水 (bio12、bio18 和 bio19) 是本研究中影响地中海大麦在我国潜在分布格局

的主要气候因素,其中,各类温度环境因子累计贡献率 59.1%,可见温度对地中海大麦的潜在入侵风险区分布起关键作用。根据主导变量的响应曲线得到影响地中海大麦生存的各气候因子适宜范围和阈值,这与地中海大麦隶属凉温性的植物类群,抗旱性强,但适宜生长在冷季气候年降雨量>425mm 的湿润地区的生态特性相符<sup>[35]</sup>。由此可见,低温和降水共同制约其分布,这也可能是地中海大麦无法向气候更干旱的地区扩散的原因。

我国高适生区与地中海大麦原产地处于同一纬度(北纬 30°—40°)。可见,地中海大麦在我国的分布范围与其原产地生态气候条件密切对应。当前高适生区为四川、陕西、山西和河南等地区,未来将向北小范围扩张,符合全球气候变暖条件下,物种向高纬度地区迁移的这一趋势<sup>[36]</sup>。在本研究中,最冷月最低温度和温度季节性变化的贡献率累计超过 52%,这可能是因为温

度是影响植物生长、发育和开花的重要因素。大多植物在它们的生长周期中需要经历从暖到冷再到暖的阶段<sup>[37]</sup>。此外,有研究表明,地中海大麦种子于二月下旬至五月上旬发芽<sup>[38]</sup>,发芽最适温度为 8—25℃,在 35℃ 及以上温度下不能萌发,与野外实地调查的地中海大麦居群多分布于温良湿润环境中的生长特性相符。年平均气温、温度季节性变化和最冷月最低温度是本研究中影响地中海大麦分布最重要的温度因子,符合其适合在低温地区生存的生物学特性。未来气候变暖,地中海大麦在最冷季节需要较低的温度来满足打破种子休眠的需要以确保其生长和繁殖。大多数植物需要经历一个暖、冷、暖的过程来完成年生长周期。而我国北方地区冬季气温分布具有“南热北冷,南北温差大”的特征,冬季季节一般集中在 12—2 月,1 月份通常是冬季最冷月,可满足地中海大麦所需的春化温度条件。这与豚草(*Ambrosia artemisiifolia*)在未来气候变化情景下向寒冷、温度季节性更高的地区进一步扩散结论基本一致<sup>[39]</sup>。同时,未来气候变化下地中海大麦有继续向广西、广东、云南等地扩张的趋势。该区域低温多集中在冬季和早春,年平均气温为 15—22℃,最冷月平均气温在 0—15℃ 之间<sup>[40]</sup>。夏季雨水充沛,年降水量多在 800—1500mm,这有助于地中海大麦在冬季增加适当的湿度和提高温度以完成越冬;其次,作为一种喜暖湿植物,全球气候变暖导致的温度和降水的增加可为地中海大麦提供更适宜的生长环境,同时降水量的增加又能帮助其抵御高温的影响。此外,有研究表明,在高温、干旱条件下地中海大麦可通过 DNA 甲基化修饰调控基因表达,从而增加叶大小、比叶面积、种子质量等性状为适应新气候提供生物学基础<sup>[9]</sup>,从而促进其定殖和入侵。这将有助于地中海大麦向温度更高的地区扩散蔓延。综上,冬季的低温和降水可能是限制中海大麦分布的关键因素。

### 3.2 地中海大麦在我国入侵的早期预警

未来气候变化情境下,地中海大麦的总适生区较当前均有不同程度的扩张,这说明气候变暖利于地中海大麦的生存,与钟永德等得出的气候变暖会促进生物入侵的结论相符<sup>[41—42]</sup>,因此,未来气候变化条件下地中海大麦将更具入侵性。作为传播适应能力强的异域杂草,若不在其入侵早期及时加以防控,未来其分布范围会更为广泛。

当前气候条件下地中海大麦在中国的潜在适生区面积远大于实际分布区面积,说明其在我国的扩散潜力极大。地中海大麦最早是作为观赏植物或通过小麦种子贸易引入河南焦作,而后随车辆、人或动物携带扩散蔓延,入侵到交通要道和麦田。我国小麦种植生产区主要集中在甘肃、陕西、河南和四川等多个省域。其中,河南作为我国小麦种植第一大省,处于暖温带半湿润季风气候区,四季分明,雨水充足,有利于地中海大麦生长。未来地中海大麦可能通过麦类种子、粮食、饲料的调运和收割机机械作业等多种途径长距离传播,进而扩

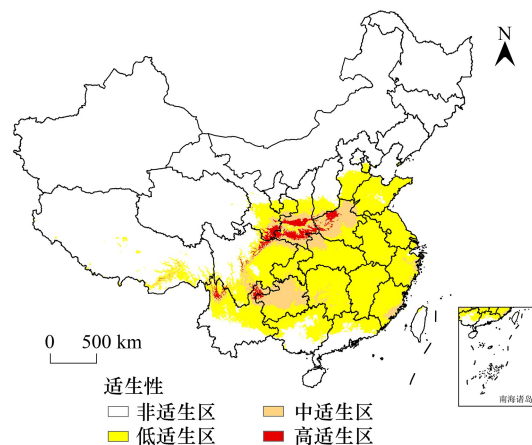


图 3 当前气候条件下地中海大麦适生区

Fig.3 Potential distribution of *Hordeum murinum* subsp. *leporinum* under the current climate condition

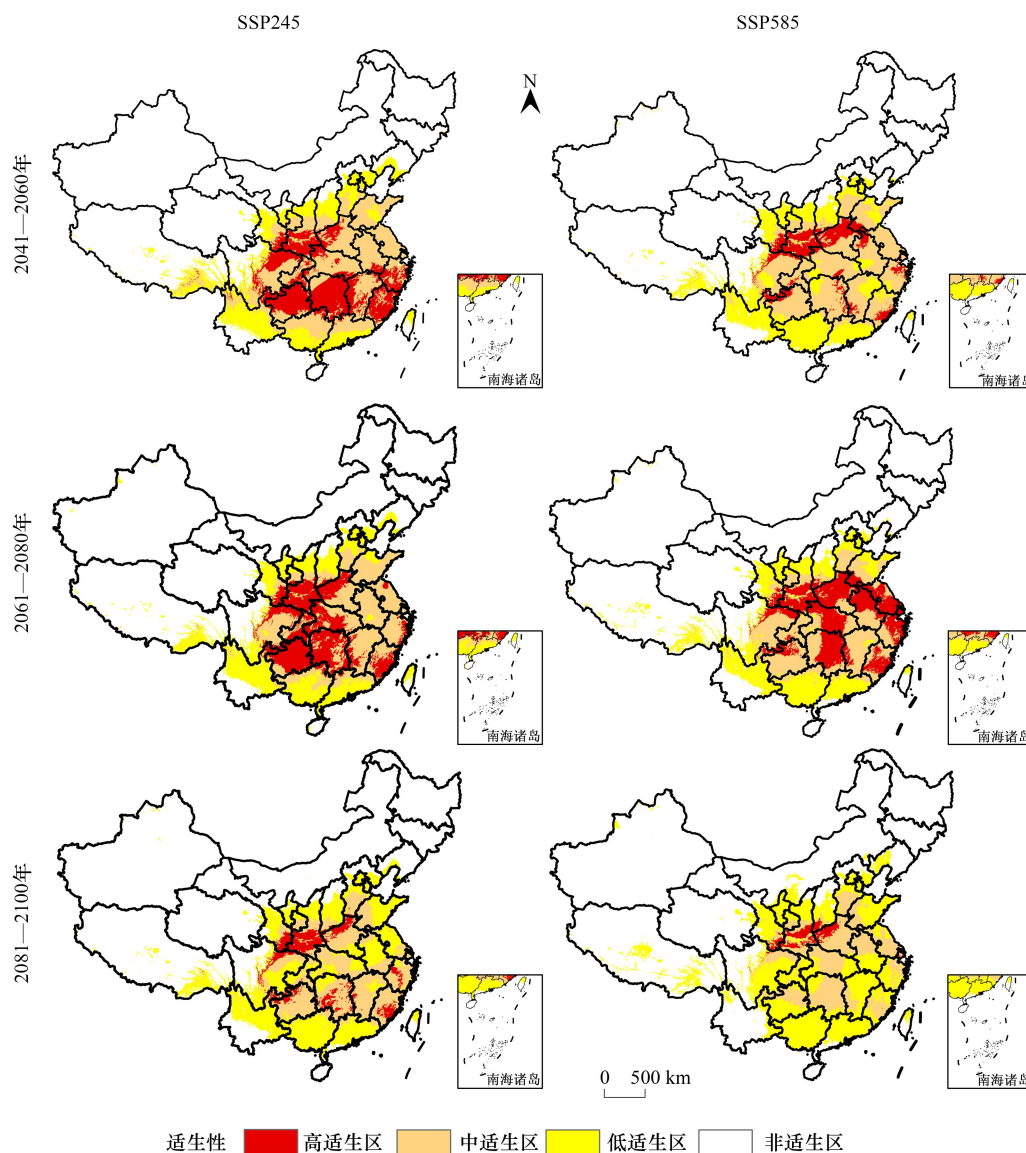


图4 未来气候情境下(SSP245,SSP585)潜在适生区

Fig.4 Potential suitable areas for future climate (SSP245,SSP585)

大入侵面积。而未来甘肃、陕西和河南等地均是地中海大麦的高适生区,表明地中海大麦在这些地区传入和扩散的风险较高。

人类活动强度是影响外来入侵植物扩散的关键因素,制定防控措施时需考虑其在人类活动影响下的分布情况。在野外调查过程中,本研究还发现地中海大麦的小穗极易粘满笔者的鞋和毛料衣物上;因此,本研究认为未来地中海大麦的种子仍有可能随人类活动长距离传播扩散。为防范地中海大麦在中国的扩散蔓延,现阶段应将甘肃南部、陕西南部 and 河南西北部等高适生区划为重点管控区域,尤其是在人类活动较为频繁的适生区加强监测避免其种子进一步传播,并在这些地区设立监测点;对有意引入栽培和进口粮食及种子(尤其是进口小麦)严格依法实施检验;同时规范开展产地检疫和调运检疫检验,不到地中海大麦发生的地区调种,避免地中海大麦种子携带进入危害农田。在实际分布区与潜在分布区之间建立生态阻隔带,阻断其所有可能的传播源,抑制其进一步扩散传播;在已发生区域采取积极有效措施防除,尽力降低对农业生产可能造成的经济损失,有效减缓向外扩散蔓延的速度。同时,在中适生区如重庆、湖南、安徽、浙江等有着不同入侵风险等级

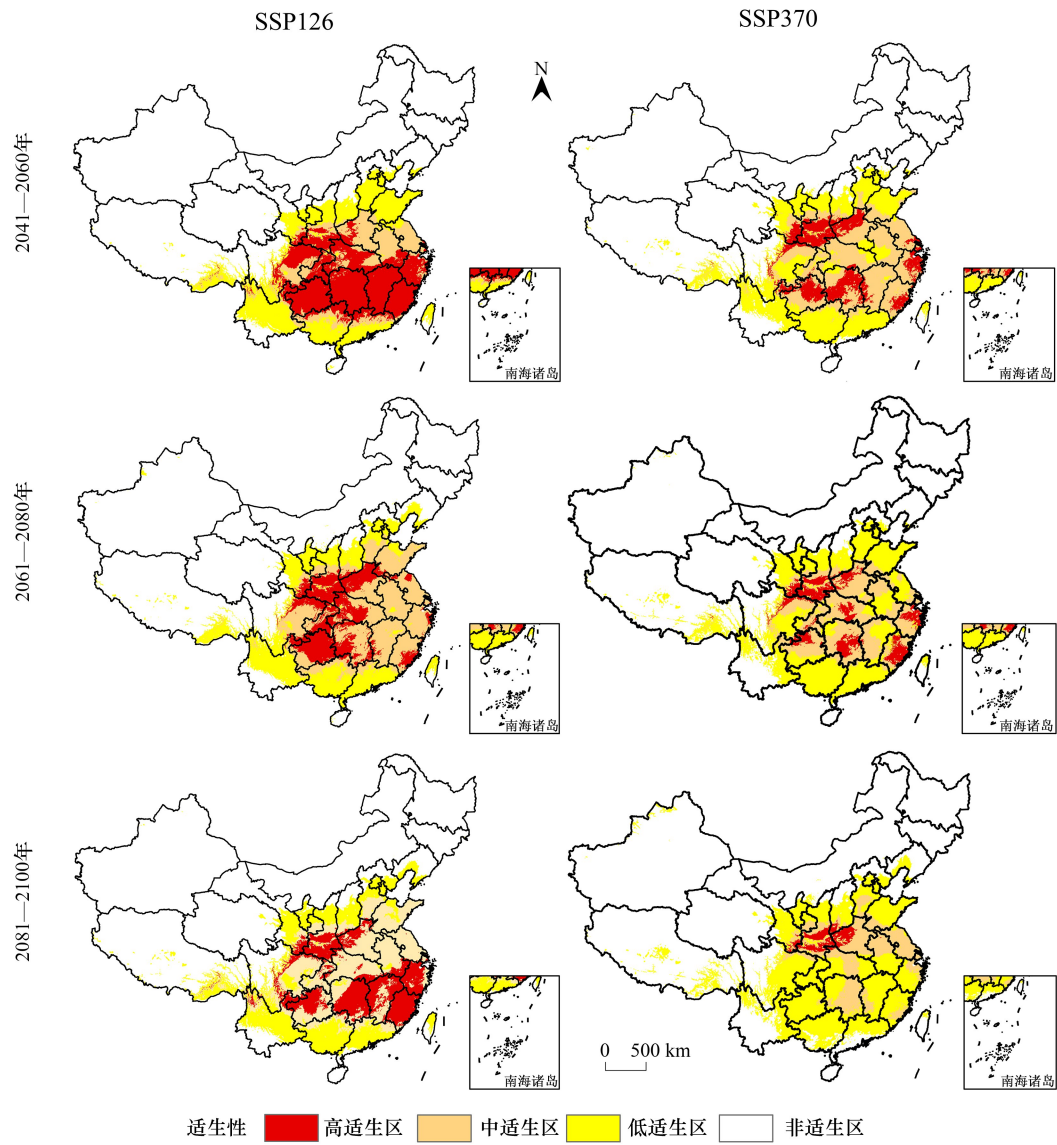


图 5 未来气候情境下(SSP126、SSP370)潜在适生区  
Fig.5 Potential suitable areas for future climate(SSP126、SSP370)

的地区,建立有效的预警机制,预防其进一步入侵。此外,我国的沿海边境省份如广西、广东、江苏、辽宁、台湾等地区是未来气候条件下地中海大麦的潜在扩增区域,为地中海大麦可能成灾及轻度发生区域,需在海关、港口等入境检查中加强对进口粮食及种子的排查,在其入侵初期从源头上遏制入侵,避免新物种的引进,防止由境外向中国境内传播。

本研究重点探讨了温度和降水对地中海大麦分布的影响,但未考虑到海拔、坡向、土壤等非生物因素和人类活动、物种迁移能力等生物因素。未来研究可结合多种因素,更全面地探索地中海大麦与环境的关系。此外,本研究仅选用了 2.5min 分辨率的气候因子,今后的研究可结合更精细的气候因子分析地中海大麦对不同研究尺度的响应机制,以获得更精准的区域划分。未来,本研究将持续关注地中海大麦在河南省的入侵动态,收集更详细的数据,对地中海大麦的入侵路径、入侵方式进行溯源调查,以期获得更准确的预测结果,并提出更具针对性的建议。

## 参考文献 (References):

- [ 1 ] 冼晓青, 陈宏, 蔡圣准, 谢骞, 刘万学, 张桂芬, 赵健. 潜在和新发外来入侵物种三维可视化预警监测系统构建与应用. 植物保护, 2022, 48(6): 49-57, 82.
- [ 2 ] Guisan A, Thuiller W. Predicting species distribution: offering more than simple habitat models. Ecology Letters, 2005, 8(9): 993-1009.
- [ 3 ] 邢丁亮, 郝占庆. 最大熵原理及其在生态学研究中的应用. 生物多样性, 2011, 19(3): 295-302.
- [ 4 ] Gillard M, Thiébaud G, Deleu C, Leroy B. Present and future distribution of three aquatic plants taxa across the world: decrease in native and increase in invasive ranges. Biological Invasions, 2017, 19: 2159-2170.
- [ 5 ] 李建宇, 陈燕婷, 郭燕青, 何玉仙, 傅建炜, 史梦竹. 基于 MaxEnt 预测未来气候条件下钻叶紫菀在中国的潜在适生区. 植物保护, 2023, 49(2): 92-102.
- [ 6 ] 王俊伟, 陈永豪, 许敏, 陈瑾芳, 拉琼. 气候变化背景下入侵植物曼陀罗在西藏的潜在风险区预测. 生态学报, 2023, 43(20): 8620-8630.
- [ 7 ] 徐文力, 李庆康, 杨潇, 王景升. 气候变化情景下西藏入侵植物印加孔雀草的潜在分布预测. 生态学报, 2022, 42(17): 7266-7277.
- [ 8 ] Shergill L S, Fleet B, Preston C, Gill G. Incidence of herbicide resistance, seedling emergence, and seed persistence of smooth barley (*Hordeum glaucum*) in South Australia. Weed Technology, 2015, 29(4): 782-792.
- [ 9 ] Mizianty M. Variability and structure of natural populations of *Hordeum murinum* L. based on morphology. Plant Systematics and Evolution, 2006, 261(1/4): 139-150.
- [ 10 ] Iqbal N, Bajwa A A, Manalil S, Khan A M, Kebaso L, Frimpong D, Ali H H, Jha P, Chauhan B S. Biology and management of two *Hordeum* weedy species: A review. Crop Protection, 2019, 125: 104908.
- [ 11 ] Jakob S S, Blattner F R. Two extinct diploid progenitors were involved in allopolyploid formation in the *Hordeum murinum* (Poaceae: Triticeae) taxon complex. Molecular Phylogenetics and Evolution, 2010, 55(2): 650-659.
- [ 12 ] Waage J K, Reaser J K. A global strategy to defeat invasive species. Science, 2001, 292(5521): 1486.
- [ 13 ] 李淑萍, 全文杰, 王正, 陈奕卓, 苏涛, 颜鹏程. BCC-CSM2-MR 全球气候模式对东亚地区降水和气温的模拟评估. 干旱气象, 2023, 41(6): 984-996.
- [ 14 ] Li S Y, Miao L J, Jiang Z H, Wang G J, Gnyawali K R, Zhang J, Zhang H, Fang K, He Y, Li C. Projected drought conditions in Northwest China with CMIP6 models under combined SSPs and RCPs for 2015 - 2099. Advances in Climate Change Research, 2020, 11(3): 210-217.
- [ 15 ] 周天军, 邹立维, 陈晓龙. 第六次国际耦合模式比较计划 (CMIP6) 评述. 气候变化研究进展, 2019, 15(5): 445-456.
- [ 16 ] 张丽霞, 陈晓龙, 辛晓歌. CMIP6 情景模式比较计划 (ScenarioMIP) 概况与评述. 气候变化研究进展, 2019, 15(5): 519-525.
- [ 17 ] Aguirre-Gutiérrez J, Carvalheiro Luísa G, Polce C, van Loon EE, Raes N, Reemer M, Biesmeijer J C. Fit-for-purpose: species distribution model performance depends on evaluation criteria - Dutch Hoverflies as a case study. PLOS ONE, 2013, 8(5): e63708.
- [ 18 ] 李丽鹤, 刘会玉, 林振山, 贾俊鹤, 刘翔. 基于 MAXENT 和 ZONATION 的加拿大一枝黄花入侵重点监控区确定. 生态学报, 2017, 37(9): 3124-3132.
- [ 19 ] Fourcade Y, Engler J O, Rödder D, Secondi J. Mapping species distributions with MAXENT using a geographically biased sample of presence data: a performance assessment of methods for correcting sampling bias. PLOS ONE 2014, 9(5): e97122.
- [ 20 ] Yang X Q, Kushwaha S P S, Saran S, Xu J, Roy P S. Maxent modeling for predicting the potential distribution of medicinal plant, *Justicia adhatoda* L. in Lesser Himalayan foothills. Ecological Engineering, 2013, 51: 83-87.
- [ 21 ] 叶兴状, 张明珠, 赖文峰, 杨森森, 范辉华, 张国防, 陈世品, 刘宝. 基于 MaxEnt 优化模型的闽楠潜在适宜分布预测. 生态学报, 2021, 41(20): 8135-8144.
- [ 22 ] 孔维尧, 李欣海, 邹红菲. 最大熵模型在物种分布预测中的优化. 应用生态学报, 2019, 30(6): 2116-2128.
- [ 23 ] Kass J M, Muscarella R, Galante P J, Bohl C L, Pinilla-Buitrago G E, Boria R A, Soley-Guardia M, Anderson R P. ENMeval 2.0: Redesigned for customizable and reproducible modeling of species' niches and distributions. Methods in Ecology and Evolution, 2021, 12: 1602-1608.
- [ 24 ] Muscarella R, Galante P J, Soley-Guardia M, Boria R A, Kass J M, Uriarte M, Anderson R P. ENMeval: An R package for conducting spatially independent evaluations and estimating optimal model complexity for Maxent ecological niche models. Methods in Ecology and Evolution, 2015, 5(11): 1198-1205.
- [ 25 ] 朱耿平, 乔慧捷. Maxent 模型复杂度对物种潜在分布区预测的影响. 生物多样性, 2016, 24(10): 1189-1196.
- [ 26 ] Phillips S J, Dudík M. Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. Ecography, 2008, 31(2): 161-175.
- [ 27 ] Phillips S J, Anderson R P, Dudík M, Schapire R E, Blair M E. Opening the black box: an open-source release of Maxent. Ecography, 2017, 40

- (7): 887-893.
- [28] 张彦静, 斯琴, 胡洁, 陈菁, 王晨彬, 谢锐, 马方舟. 气候变化情景下裸冠菊在中国的潜在适生区分布预测. 生态学报, 2023, 43(21): 8852-8864.
- [29] 王运生, 谢丙炎, 万方浩, 肖启明, 戴良英. ROC 曲线分析在评价入侵物种分布模型中的应用. 生物多样性, 2007, 15(4): 365-372.
- [30] Swets J A. Measuring the accuracy of diagnostic systems. Science, 1988, 240(4857): 1285-1293.
- [31] 刘洋, 石娟. 气候变化背景下埃及吹绵蚧在中国的适生区预测. 植物保护, 2020, 46(1): 108-117.
- [32] Liu C, White M, Newell G. Selecting thresholds for the prediction of species occurrence with presence - only data. Journal of Biogeography, 2013, 40(4): 778-789.
- [33] 李安, 李良涛, 高萌萌, 陈曦, 卢彤, 刘帅帅. 基于 MaxEnt 模型和气候变化情景入侵种黄顶菊在中国的分布区预测. 农学学报, 2020, 10(1): 60-67, 76.
- [34] Chen W, Wei J, Zhu K, Lu Y, Cai Y, Wu Q, Huang Z, Wang Y. Predicting potential distribution of *Emmenopterys henryi* in Southwest China based on the Maxent model and influencing factors. Tropical Ecology, 2022, 63: 572-583.
- [35] Giles B E, Lefkovich L P. A taxonomic investigation of the *Hordeum murinum* Complex (Poaceae). Plant Systematics and Evolution, 1986, 153: 181-197.
- [36] 宋金岳. 基于生态位模型的气候变化情景下红火蚁在中国的适生区预测[D]. 兰州: 西北师范大学, 2022.
- [37] Fleet B, Gill G. Seed dormancy and seedling recruitment in smooth barley (*Hordeum murinum* ssp. *glaucum*) populations in southern Australia. Weed Science, 2012, 60(3): 394-400.
- [38] Cocks P S, Donald C M. The germination and establishment of two annual pasture grasses (*Hordeum leporinum* Link and *Lolium rigidum* Gaud.). Crop and Pasture Science, 1973, 24(1): 1.
- [39] 孙燕, 周忠实, 王瑞, Heinz Müller-Schärer. 气候变化预计会减少东亚地区豚草的生物防治效果. 生物多样性, 2017, 25(12): 1285-1294.
- [40] 郑荣伟, 张越, 王庆明, 桂云鹏. 中国气候分区 ET0 未来演变趋势预测及归因分析. 长江科学院院报, 2023, 40(8): 44-50, 56.
- [41] 钟永德, 李迈和, Norbert Kraeuchi. 地球暖化促进植物迁移与入侵. 地理研究, 2004, (3): 347-356.
- [42] Lowen J B, DiBacco C. Range expansion and establishment of a non-indigenous tunicate (*Diplosoma listerianum*) in thermal refugia is mediated by environmental variability in changing coastal environments. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2023, 80(2): 330-345.