



未来气候变化对中国马铃薯种植气候适宜性的影响

张志良^{1,2,3}, 和志豪^{1,2}, 茹晓雅^{1,2}, 蒋腾聪^{1,2}, 何英彬³, 冯浩^{2,4}, 于强^{4,5}, 何建强^{1,2,5}✉

¹西北农林科技大学/旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西杨凌 712100; ²西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院, 陕西杨凌 712100; ³中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081; ⁴中国科学院水利部水土保持研究所/黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨凌 712100; ⁵陕西省气象局秦岭和黄土高原生态环境气象重点实验室, 西安 710016

摘要:【目的】马铃薯作为中国第四大主粮作物, 其适宜性评价对保障国家粮食安全具有重要意义。本研究基于气候数据, 构建集成物种分布模型预测中国未来时期马铃薯气候适宜区, 为优化中国马铃薯种植提供重要科学参考。【方法】利用6种全球气候模式(global climate models, GCMs)未来气候数据驱动5种物种分布模型(species distribution models, SDMs), 集成模拟预测未来4种温室气体排放情景(ssp126、ssp245、ssp370、ssp585)下, 中国历史上(1970—2000年)和4个未来时期(2021—2040、2041—2060、2061—2080、2081—2100年)的马铃薯气候适宜区时空分布特征。【结果】(1)最湿月份的降水量、最暖月份的最高温度, 以及最冷季度的平均温度是影响中国马铃薯气候适宜度的主要气象因子, 对模拟结果的贡献率分别为54.7%、21.4%和18.1%。(2)4种温室气体排放情景下对于各适宜等级区域的预测结果变化基本一致, 都呈现适宜区、低适宜区面积变大而高适宜区面积变小的趋势, 仅在海南、西藏、新疆等地局部存在种植气候不适宜区。马铃薯适宜种植区(适宜区和高适宜区)的面积在各种情况下均超过50%。(3)在未来各时期马铃薯种植低适宜区和适宜区面积将大幅增加, 而高适宜区面积则呈下降趋势, 各适宜等级区域面积总体依旧保持: 适宜区 > 低适宜区 > 高适宜区。(4)随着温室气体排放等级的提高, 中国马铃薯高适宜区将大幅减小。从空间分布上看, 中国马铃薯种植高适宜区主要以东北地区、甘肃地区、新疆西部, 以及西南部分区域为主; 从时间顺序上看, 陕西北部、长江中下游区域、内蒙古中西部等区域受未来气候变化影响较大, 马铃薯气候适宜度减小趋势明显。【结论】利用构建的集成物种分布模型预测了未来时期中国马铃薯气候适宜区时空分布特征。根据模型模拟结果, 建议东北、甘肃、西南等地区可以作为未来马铃薯的主要种植区域, 新疆等地区可以作为主要发展区域, 其他地区应按照当地情况优先发展其他粮食和经济作物。

关键词: 马铃薯; 气候变化; 全球气候模式; 物种分布模型; 气候适宜性

Influence of Future Climate Change on the Climate Suitability of Potato Cultivation in China

ZHANG ZhiLiang^{1,2,3}, HE ZhiHao^{1,2}, RU XiaoYa^{1,2}, JIANG TengCong^{1,2}, HE YingBin³, FENG Hao^{2,4}, YU Qiang^{4,5}, HE JianQiang^{1,2,5}✉

¹Northwest A&F University/Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Yangling 712100, Shaanxi; ²Institute of Water-Saving Agriculture in Arid Areas of China, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi; ³Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081; ⁴Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resource/State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Yangling 712100, Shaanxi; ⁵Key Laboratory of Eco-Environment and Meteorology, Qinling Mountains and Loess Plateau, Shaanxi Meteorological Bureau, Xi'an 710016

收稿日期: 2022-08-31; 接受日期: 2022-12-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(52079115)、陕西省重点研发计划重点产业创新链(群)-农业领域项目(2019ZDLNY07-03)、西北农林科技大学人才专项资金(千人计划项目)、高等学校学科创新引智计划(111计划)(B12007)、中国农业科学院农业资源与农业区划研究所创新工程(2021-2015)

联系方式: 张志良, E-mail: zhiliang_zhang@nwafu.edu.cn. 通信作者何建强, E-mail: jianqiang_he@nwafu.edu.cn

Abstract: 【Objective】 As the fourth staple food crop in China, potato suitability evaluation is of great significance to ensure national food security. Based on climate data, this study constructed an integrated species distribution model to predict the climate suitable area of potato in China in the future, and provided an important scientific reference for optimizing potato planting in China.

【Method】 In this study, the future climate data derived from six different global climate models (GCMs) were used to drive an ensemble of five different species distribution models (SDMs) to simulate the temporal and spatial distribution characteristics of climate suitable areas of potato cultivation in China in the historical (1970-2000) and four future (2021-2040, 2041-2060, 2061-2080, and 2081-2100) periods under four greenhouse gas emission scenarios (ssp126, ssp245, ssp370, and ssp585). **【Result】** (1) The precipitation in the wettest month, the highest temperature in the warmest month, and the average temperature in the coldest quarter were the main meteorological factors that affected the climate suitability of potato in China, with their contribution rates of 54.7%, 21.4% and 18.1%, respectively. (2) In four scenarios of greenhouse gas emission, the prediction results of various suitable areas were basically the same, showing the similar trends that the areas of suitable and low suitable would become larger, while the area of high suitable would become smaller. Only in Hainan, Tibet, Xinjiang and some other regions, the climate was not suitable for potato planting. The suitable potato planting areas (including both suitable and high suitable) exceed 50% in all cases. (3) In the future, the low suitable and suitable areas for potato planting will increase greatly, while the high suitable areas will decrease. The order of areas of different suitable grades would remain: suitable areas > low suitable areas > high suitable areas. (4) With the increase of greenhouse gas emission level, the high suitable area in China would be greatly reduced. For spatial distribution, the high suitable areas were mainly in Northeast China, Gansu, western Xinjiang, and some parts of southwest China. From the perspective of time, the future climate change would greatly affect the northwest of Shaanxi, the middle and lower reaches of the Yangtze River, the central and western Inner Mongolia and other regions. The climate suitability of potato planting would obviously decrease.

【Conclusion】 In this study, the integrated species distribution models were constructed to predict the temporal and spatial distribution characteristics of potato climate suitable areas in the future. Northeast, Gansu, Southwest and other regions of China could be the main potato planting areas, while Xinjiang and other regions could be the main development areas. The rest regions should be given priority to the development of other staple crops and cash crops according to local conditions.

Key words: potato; climate change; global climate model; species distribution model; climate suitability

0 引言

【研究意义】 马铃薯 (*Solanum tuberosum* L.) 是继水稻、玉米和小麦之后的世界第四大粮食作物, 马铃薯相关产业已成为保障我国粮食安全的重要途径^[1]。因此, 分析当前和未来气候条件下马铃薯气候适宜区的时空分布特征, 对于保障我国马铃薯产业稳定发展具有重要意义。**【前人研究进展】** 自工业革命以来, 全球气候问题日益突出。气候和自然环境的变化导致农业生产的不稳定性和无规律性增加, 从而对农作物的产量和时空分布格局产生潜在影响^[2]。马铃薯对气候因素的变化较为敏感^[3], 气候环境因子 (如温度、降水) 的变化可能会引发马铃薯叶片和花朵低温霜冻害等问题, 极有可能造成马铃薯植株不能正常生长和繁育, 从而对马铃薯产量造成较强的干扰效应^[4], 最终使得马铃薯在该地区的气候适宜度下降。气候适宜度是用于评估作物分布与气候因子之间关系的指标, 其只考虑气候条件而不考虑土壤类型、管理制度等其他因素。评估作物气候适宜度的一种有效方法是物种分布模型 (species distribution model,

SDM)^[5]。物种分布模型主要是利用物种的分布数据与环境因子数据, 依据特定的算法估计物种的生态位并投射到景观中, 以概率的形式反映物种对生境的偏好程度^[6]。WANG 等^[7]利用一种物种分布模型 MaxEnt 模型评估了 1961 年至 2017 年中国马铃薯气候适宜性的变化。**【本研究切入点】** 目前, 针对中国国内局部地区马铃薯适宜区的研究较多^[7-9], 但针对全国范围的研究还不多见, 且较少考虑未来气候情景下适宜区的变化, 此外利用多物种分布模型集成模拟马铃薯适宜区的研究也较少报道。**【拟解决的关键问题】** 本研究利用 6 种全球气候模式 (global climate models, GCMs) 的未来气候数据驱动 5 种物种分布模型 (species distribution models, SDMs), 集成模拟预测未来 4 种温室气体排放情景 (ssp126、ssp245、ssp370、ssp585) 下, 历史 (1970—2000 年) 上和 4 个未来时期 (2021—2040、2041—2060、2061—2080、2081—2100) 中国马铃薯气候适宜区的时空分布, 筛选影响中国马铃薯生产气候适宜性的关键气象因子以及高适宜区的分布特征, 有助于理解气候变化对中国马铃薯种植适宜度的影响, 从而为合理制定马铃薯种植区划和应

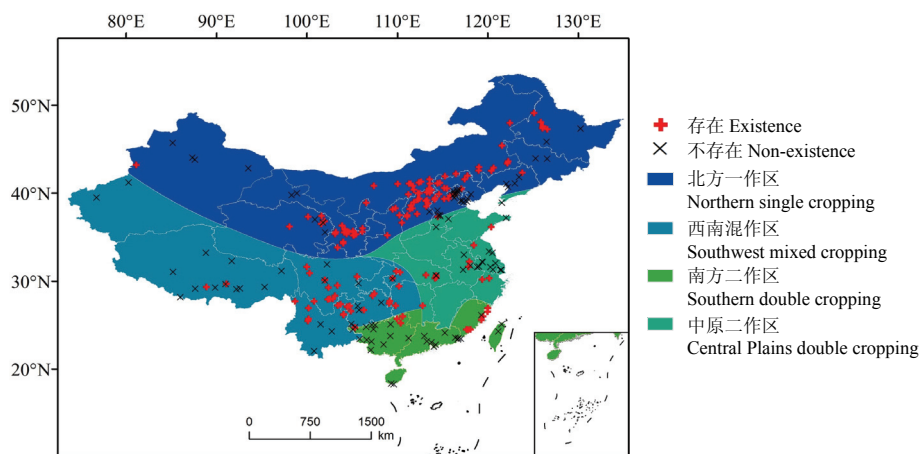
对气候变化提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域

滕宗璠等^[10]根据地理位置、气象条件等, 将中国分为 4 个不同的马铃薯种植区: 北方一作区、中原二作区、南方二作区以及西南混作区(图 1)。其中, 北方一作区一年只栽培一季, 一般 4 月或 5 月上旬播种, 9 月或 10 月上旬收获。中原二作区实行春秋两季栽培, 春季多种植商品薯, 2 月或 3 月下旬播种, 5 月下旬或 6 月中下旬收获; 秋季主要

种植种薯, 一般 8 月播种, 11 月收获。南方二作区实行秋播或冬播, 10 月下旬秋播, 12 月下旬至 1 月上旬收获; 1 月中旬冬播, 4 月上中旬收获。西南混作区一作、二作类型交错生产, 高寒山区与低山、平坝地区马铃薯种植差异较大。由于各种植区农户种植习惯各不相同, 基于此, 本研究提出这样的假定: 即在未来气候变化背景下, 各地农户的种植习惯不会发生大规模根本性的改变。因此, 历史上没有长时间种植马铃薯的区域, 未来也不会突变成为马铃薯的种植区, 也不是马铃薯种植区划调整的重要区域。



审图号: 京审字(2023)G第1636号。下同 Map content approval number: JINGSHENZI(2023)G1636. The same as below

“存在”是指实际马铃薯种植点, 该数据来源于中国气象局国家气象信息中心(<http://data.cma.cn/>), “不存在”是指实际不种植马铃薯的位置。The dots of ‘Existence’ refer to the actual potato planting sites, where data were from the National Meteorological Information Center of China Meteorological Administration (<http://data.cma.cn/>); the dots of ‘Non-existence’ refer to the sites where there was no potato cultivation

图 1 中国马铃薯种植区划分布

Fig. 1 Distributions of potato planting districts in China

1.2 数据来源及处理

1.2.1 马铃薯物种分布数据 物种分布数据包括马铃薯“存在”位置和“不存在”位置, 其中马铃薯“存在”位置包括中国农业气象观测站的经纬度(中国气象局国家气象信息中心, <http://data.cma.cn/>)和全球物种多样性信息库记录(<http://www.gbif.org>)两部分, 共收集到 150 条记录。根据 MASSIN 等^[11]研究, 为确保集成模型模拟的精准度, “不存在”位置记录应与“存在”位置记录的数量大体相当, 因此, 本研究通过查阅统计文献, 从收集到的 382 个未种植马铃薯的区县中随机抽取 150 个位置作为“不存在”位置记录。此外, 为了降低因集群效应造成的取样偏差, 剔除冗余数据避免过拟合, 采用简单高效且结果更合理的

ENMTools 工具对两部分数据进行处理, 最终分别获取 149 条存在“记录”位置和 114 条“不存在”位置记录(图 1)。

1.2.2 环境变量筛选和处理 气象数据来源于 WorldClim 数据库(<http://worldclim.org>)。为提高预测的准确性, 选取历史(1970—2000 年)和未来 4 个时期(2021—2040、2041—2060、2061—2080、2080—2100 年)在 4 种温室气体排放情景(ssp126、ssp245、ssp370、ssp585)下的 19 种环境因子(表 1)进行模拟, 各次模拟的空间分辨率均为 5 km×5 km。由于不同气候模式对未来温室气体排放的响应存在很大的不确定性^[12], 因此相关研究多采用多模式集合模拟来有效降低单模式预测的不确定性^[13]。本研究

表 1 SDM 模型输入气象环境因子

Table 1 SDM model inputs meteorological environmental factors

变量 Variable	定义 Definition	是否用于建模 Whether to use for modeling	单位 Unit
bio1	年平均温度 Annual mean temperature	否 No	℃
bio2	平均日变化范围（月平均（最高温度-最低温度）） Mean diurnal range (mean of monthly (max temp - min temp))	是 Yes	℃
bio3	等温性(BIO2/BIO7) Isothermality (BIO2/BIO7) ($\times 100$)	是 Yes	℃
bio4	温度季节性（标准偏差 $\times 100$ ） Temperature seasonality (standard deviation $\times 100$)	否 No	℃
bio5	最暖月份的最高温度 Max temperature of warmest month	是 Yes	℃
bio6	最冷月份的最低温度 Min temperature of coldest month	否 No	℃
bio7	温度年变化范围(BIO5-BIO6) Temperature Annual Range (BIO5-BIO6)	否 No	℃
bio8	最潮湿地区的平均温度 Mean temperature of wettest quarter	否 No	℃
bio9	最干燥季度的平均温度 Mean temperature of driest quarter	否 No	℃
bio10	最温暖季度的平均温度 Mean temperature of warmest quarter	否 No	℃
bio11	最冷季度的平均温度 Mean temperature of coldest quarter	是 Yes	℃
bio12	年降水量 Annual precipitation	否 No	mm
bio13	最湿月份的降水量 Precipitation of wettest month	是 Yes	mm
bio14	最干旱月份的降水量 Precipitation of driest month	否 No	mm
bio15	降水季节性（变异系数） Precipitation seasonality (coefficient of variation)	是 Yes	—
bio16	最潮湿地区的降水量 Precipitation of wettest quarter	否 No	mm
bio17	最干燥季度的降水量 Precipitation of driest quarter	否 No	mm
bio18	最热季度的降水量 Precipitation of warmest quarter	否 No	mm
bio19	最冷季度的降水量 Precipitation of coldest quarter	否 No	mm

采用 BCC-CSM2-MR、CanESM5、CNRM-CM6-1、CNRM-ESM2-1、MIROC6、MIROC-ES2L 共 6 种全球气候模式的气象数据来驱动不同 SDM 模型分别进行模拟，最终选用等权重法对不同 SFM 模型模拟结果进行集成预测。

首先，本研究用 19 个环境因子进行模型模拟，得出各因子对结果的贡献率。利用 R 语言中的“corrgram”包对环境因子进行皮尔逊相关性分析（图 2），根据相关性去除冗余数据以避免由此造成的误差^[14]。具体来说，当 2 个环境因子的相关性大于 0.8，保留贡献率高的一个环境因子，舍去贡献率低的一个环境因子，直至各因子之间的相关性均小于 0.8。最终，选择了 6 个环境因子（bio2、bio3、bio5、bio11、bio13 和 bio15）用于物种分布模型的构建与预测。

1.3 模型建立、优化和评估

1.3.1 模型建立 物种分布模型是一种有效模拟和预测物种分布的方法。根据各建模方法对数据的需求^[11]，本研究选用最大熵（Maxent）、增强回归树

（boosted regression trees, BRT）、多元自适应回归样条（multivariate adaptive regression splines, MARS）、支持向量机（support vector machines, SVM）、随机森林（random forest, RF）等 5 种模型（表 2）用于我国马铃薯气候适宜性的集成模拟预测。其中，最大熵 Maxent 模型是根据气候相似原理，计算熵最大（即一定生态位约束条件下物种分布最理想状态）时物种在研究区域可能分布的概率。增强回归树 BRT 模型是一种基于分类回归的可自主学习的机器学习算法，对于自变量和因变量之间的非线性关系分析较好，具有稳定性好、预测精度高等特点。多元自适应回归样条 MARS 模型是一种能自适应处理高维散乱数据的非线性回归方法，可以用于同一参数的时间序列仿真模拟，同时对于分类处理也具有较高的精度。支持向量机 SVM 模型是在统计学基础上发展的一种机器学习算法，在解决小样本、非线性和多维模式具有较高的精度。随机森林 RF 模型是基于决策树的一种集成学习算法，决策树是一种树状分类器，即通过在树

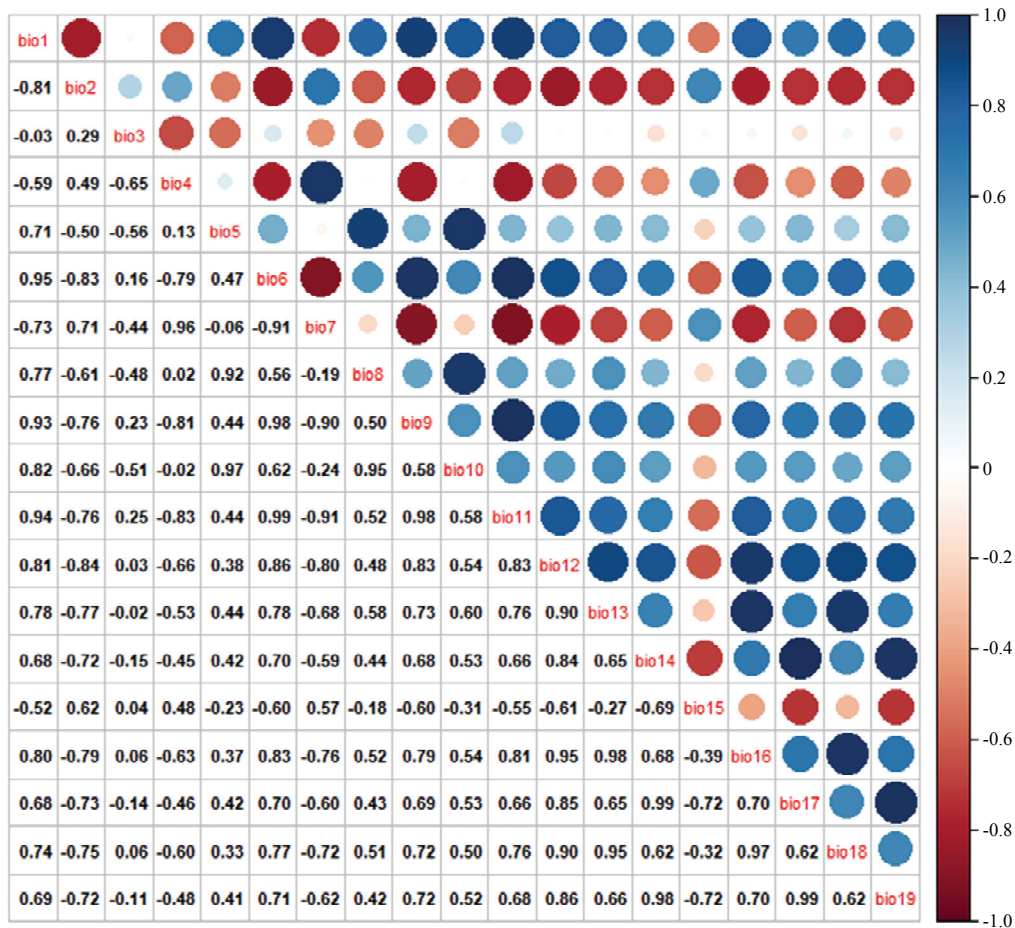


图 2 物种分布模型 SDMs 中输入环境因子之间的相关性图

Fig. 2 Correlation diagram of the input environment factors in the species distribution models (SDMs)

表 2 本研究中所采用物种分布模型的特点

Table 2 Characteristics of species distribution model used in this study

模型 Model	特征 Characteristics	参考文献 References
最大熵 Maxent	选择随机变量统计特性最符合客观情况的准则 Selection of statistical characteristics of random variables is the most suitable criterion for objective conditions	[15]
增强回归树 BRT	使用递归二元分割来消除预测因子之间的相互作用，建立一个小回归树的大集合来表示响应及其预测因子之间的非线性关联 Recursive binary segmentation is used to eliminate the interaction between predictors, and a large set of small regression trees is established to represent the nonlinear correlation between responses and their predictors	[16]
多元自适应回归样条 MARS	自适应处理高维数据的样条回归方法 Adaptive spline regression method for processing high-dimensional data	[17]
支持向量机 SVM	将数据从低维向量映射到高维向量，在高维空间中使正集和负集之间的距离最大化 Map data from low-dimensional vector to high-dimensional vector, and maximize the distance between positive set and negative set in high-dimensional space	[18]
随机森林 RF	在 Cart 决策树中引入 Bagging 算法进行多次有放回随机抽样，然后训练得到单个决策树分类器，完成对集成模型的构建 Bagging algorithm is introduced into Cart decision tree for multiple random sampling, and then a single decision tree classifier is trained to complete the construction of the integrated model	[19]

的每个节点选择最优的分裂特征进行分类，直到达到建树的停止条件。此外，随机森林是由数据驱动的一种非参数分类方法，只需通过对给定样本的学习训练分类规则，并不需要先验知识。

R 语言“sdm 包”是一个可扩展的框架，可以拟合基于个人和社区的各种 SDM 算法，同时支持明显不同的建模方法^[20]。本研究基于 R 语言 V4.1.1 调用“sdm 包”，来对我国马铃薯种植的适宜性进行相关模拟。

1.3.2 模型精度评估和未来情景模拟 以 70% 的数据作为训练数据，30% 的数据作为验证数据。利用 R 语言“sdm 包”对上述 5 种 SDM 模型算法进行训练；然后再利用二次抽样法进行集成模型训练 10 次，取平均值作为最终的预测模型，并以 AUC 值评估模型模拟结果的准确性。AUC (area under curve) 被定义为 ROC 曲线下与坐标轴围成的面积。ROC 曲线全称为受试者工作特征曲线 (receiver operating characteristic curve)，它是根据一系列不同的二分类方式 (分界值或决定阈)，以真阳性率 (敏感性) 为纵坐标，假阳性率 (1-特异性) 为横坐标绘制的曲线。显然 AUC 的数值不会大于 1，又由于 ROC 曲线一般都处于直线 $y=x$ 的上方，所以 AUC 的取值范围在 0.5 和 1.0 之间。AUC 越接近 1.0，检测方法真实性越高；等于 0.5 时，则真实性最低，无应用价值。AUC 值大于 0.8 表示模型模拟结果较为准确^[21]。

基于 6 种气候模式 (BCC-CSM2-MR、CanESM5、CNRM-CM6-1、CNRM-ESM2-1、MIROC6、MIROC-ES2L) 产生的 6 种环境因子 (bio2、bio3、bio5、bio11、bio13、bio15) 的未来气候数据驱动训练好的 5 种物种分布模型 (Maxent、BRT、MARS、SVM、RF)，集成模拟未来 4 个时期 (2021—2040、2041—2060、2061—2080、2081—2100 年) 的 4 种气候变化情景 (ssp126、ssp245、ssp370、ssp585) 下的中国区域各格点马铃薯潜在分布概率 P ，并采用等权重法对分布概率进行处理并按照不适宜区、低适宜区、适宜区、高适宜区的划分标准进行全国马铃薯种植适宜性的等级划分。

2 结果

2.1 模型模拟结果与检验

基于马铃薯 149 个“存在”点、114 个“不存在”点和 6 个环境因子，在当前气候环境 (1970—2000 年) 下，运用 R 语言“sdm 包”分别调用最大熵 Maxent、

增强回归树 BRT、多元自适应回归样条 MARS、支持向量机 SVM、随机森林 RF 等 5 种物种分布模型算法进行模型训练，所得测试的 AUC 值分别为 0.83、0.84、0.83、0.89、0.86。其次，以 AUC 为指标通过集合函数对这 5 个模型的模拟结果进行加权集成，模拟所得每个栅格点 (5 km×5 km) 马铃薯气候适宜度的概率 P 在 0—1 之间。根据政府间气候变化专门委员会 IPCC^[22] 的研究，可将作物气候适宜性分为四类： $P \leq 0.05$ 表示不适宜区， $0.05 < P \leq 0.33$ 表示低适宜区， $0.33 < P \leq 0.66$ 表示适宜区， $0.66 < P \leq 1$ 表示高适宜区。最终预测得到我国马铃薯潜在适宜区分布 (图 3)。

从图 3 中可以看出全国范围内基本都可以种植马铃薯，不适宜种植区域仅占 0.04%，主要包括广东省南部与海南省北部。低适宜区、高适宜区以及适宜区的面积占比依次增加，分别为 27.11%、30.64% 和 42.21% (图 3)。在全国范围内，整体上呈现从东北到西南马铃薯种植适宜度较高，从东南到西北马铃薯种植适宜度较低的空间格局。马铃薯种植气候适宜度北方整体高于南方，东部整体高于西部。其中，高适宜区主要分布在农牧交错带附近，以及新疆西部、长江中下游沿江地区等区域。此外，在模型每次运行时，计算各环境因子对集成模型模拟结果的相对贡献值，以 10 次模拟结果的平均值作为 6 个环境因子对集成模型模拟气候适宜性的影响程度。结果显示，最湿月份的降水量、最暖月份的最高温度、最冷季度的平均温度、等温性、平均日变化范围和降水季节性的影响占比分别为 54.7%、21.4%、18.1%、2.6%、1.9% 和 1.3%。

2.2 未来气候条件下马铃薯适宜区时空分布特征

对比分析未来 4 个时期和 4 种温室气体排放情景下全国马铃薯不同等级适宜区的时空变化特征 (图 4)，结果表明，中国在 2021—2100 年间绝大多数土地都适宜种植马铃薯，适宜区和高适宜区面积之和超过 50%，基本不存在不适宜区。从空间分布上来看，4 种温室气体排放情景下的预测结果基本一致，不同等级适宜区的分布和面积变化都呈现适宜区、低适宜区变大而高适宜区变小的趋势。具体来说，在低 CO_2 排放情景下 (ssp126、ssp245) 适宜度等级发生较大变化的主要区域为陕西北部、山西北部以及内蒙古中西部；在高 CO_2 排放情景下 (ssp370、ssp585) 适宜度等级发生较大变化的区域除在低 CO_2 排放情景下发生较大变化的区域以外，还包括东北、内蒙古西部、西南大部分区域以及东南部分区域。

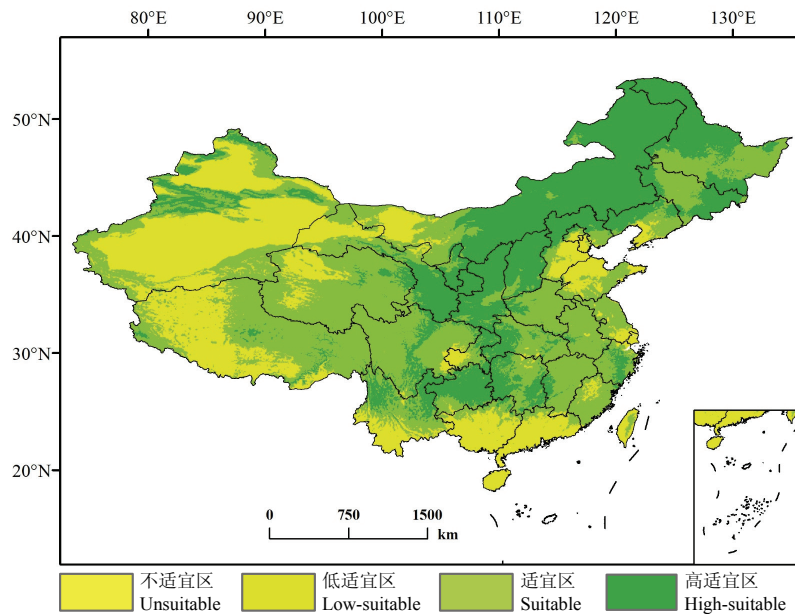


图3 历史时期（1970—2000）中国马铃薯种植的气候适宜性分布

Fig. 3 Distribution of climate suitability of potato cultivation in the historical period of 1970-2000 in China

2.3 未来气候变化下马铃薯适宜区面积变化特征

根据前文研究结果，对各等级马铃薯种植适宜区的面积进行统计分析（表3），结果表明，高适宜区面积变化与温室气体排放情景等级呈负相关关系，且高排放情景下面积减少趋势更为明显。低适宜区面积呈现增加趋势，增加幅度与温室气体排放情景之间呈正相关关系。具体来说，在 ssp126 情景下，低适宜区面积平均每 10 年约增长 $2.4 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，适宜区面积平均每 10 年约增长 $4.1 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，高适宜区面积平均每 10 年约减少 $6.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ ；在 ssp245 情景下，低适宜区面积平均每 10 年增长 $8.1 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，适宜区面积平均每 10 年增长 $3.8 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，高适宜区面积平均每 10 年减少 $11.9 \times 10^4 \text{ km}^2$ ；在 ssp370 情景下，低适宜区面积平均每 10 年增长 $13.1 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，适宜区面积平均每 10 年增长 $6.9 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，高适宜区面积平均每 10 年减少 $20 \times 10^4 \text{ km}^2$ ；在 ssp585 情景下，低适宜区面积平均每 10 年增长 $20.8 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，适宜区面积平均每 10 年增长 $4.1 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，高适宜区面积平均每 10 年减少 $24.9 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。此外，各等级马铃薯种植适宜区在不同年份面积占比排序基本保持一致，即适宜区 > 低适宜区 > 高适宜区。

2.4 马铃薯高适宜区时空分布特征

比较分析 2080—2100 与基准 1970—2000 年间全

表3 未来气候变化不同排放情景下不同时期内的全国马铃薯种植各等级适宜区面积统计

Table 3 Summary of the climate suitable areas of different grades for potato cultivation at different greenhouse gas emission scenarios in different periods under future climate change in China ($\times 10^4 \text{ km}^2$)

情景 Scenario	时期 Period	低适宜区 Low-suitable	适宜区 Suitable	高适宜区 High-suitable
历史时期 Historical	1970-2000	262	407	296
ssp126	2021-2040	270	479	216
	2041-2060	275	501	187
	2061-2080	287	500	177
	2081-2100	283	501	179
ssp245	2021-2040	275	476	214
	2041-2060	283	504	177
	2061-2080	301	507	156
	2081-2100	320	497	147
ssp370	2021-2040	272	473	219
	2041-2060	285	503	176
	2061-2080	314	510	141
	2081-2100	345	511	108
ssp585	2021-2040	273	484	207
	2041-2060	294	509	161
	2061-2080	339	509	116
	2081-2100	388	507	69

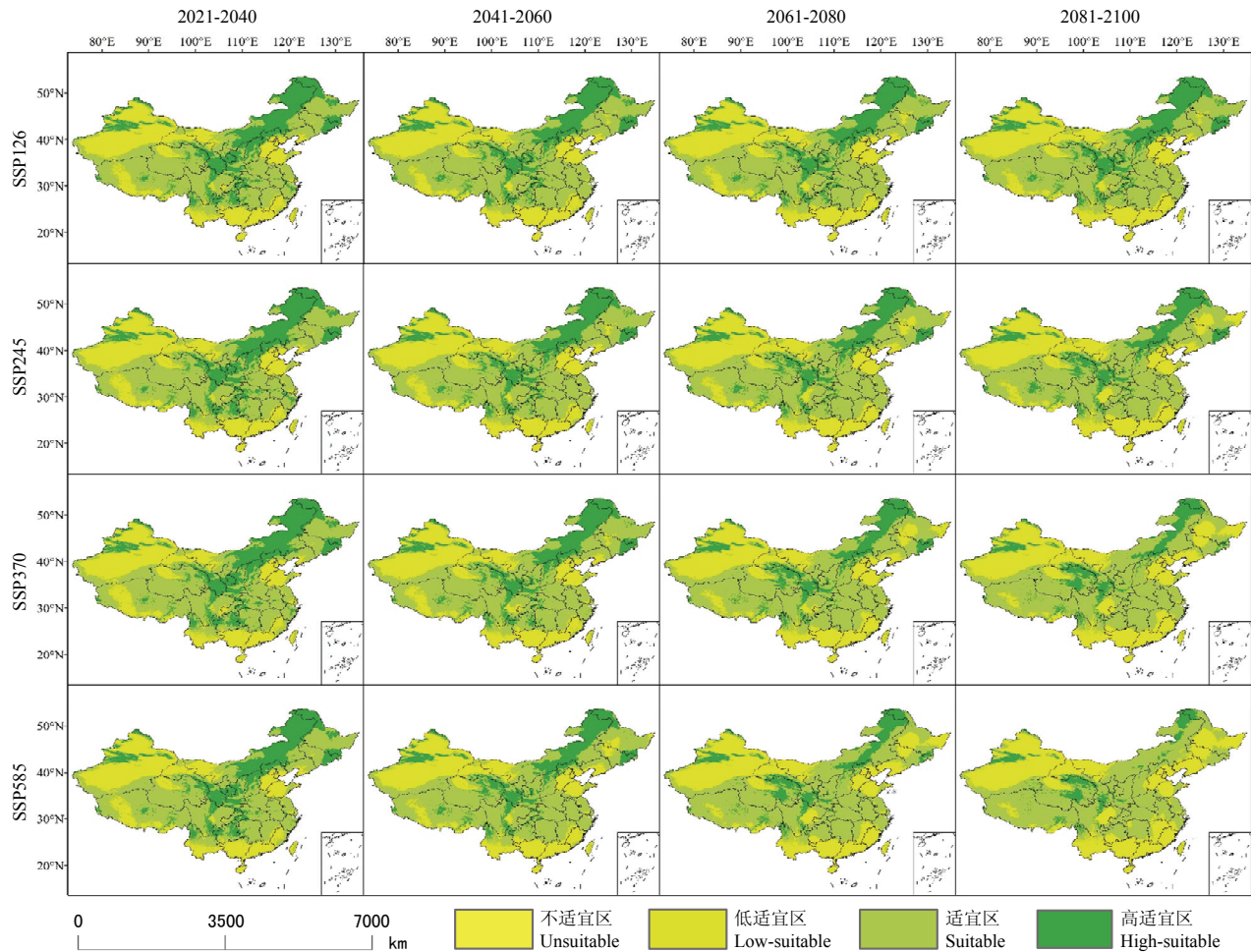


图 4 未来气候变化条件下 4 个时间段(2021-2040、2041-2060、2061-2080、2081-2100)内 4 种不同温室气体排放情景(ssp126、ssp245、ssp370、ssp585)下全国马铃薯潜在适宜区分布的时空变化特征

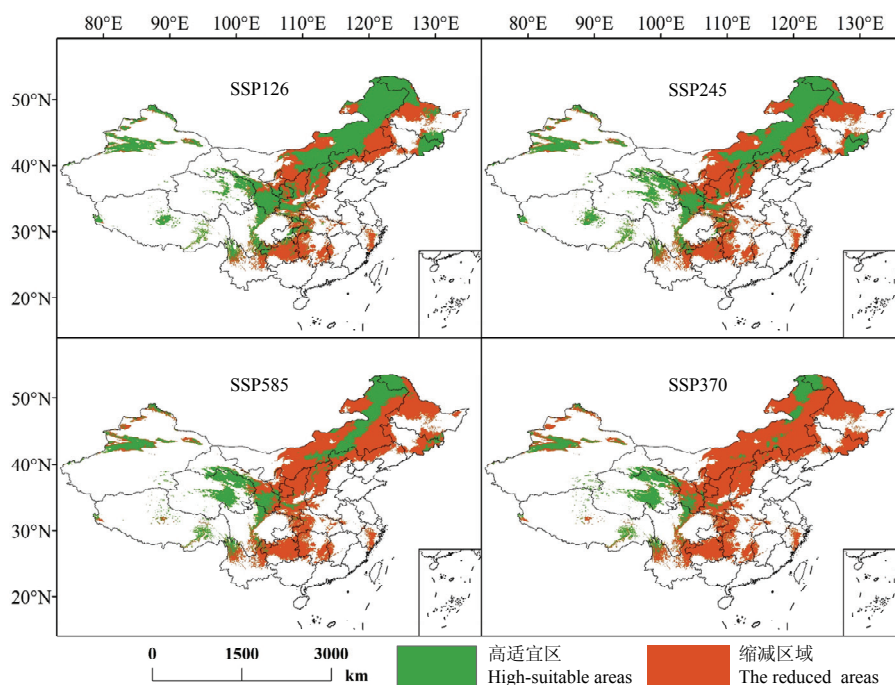
Fig. 4 Spatial and temporal distribution characteristics of potential climate-suitable areas for potato cultivation in China under four different greenhouse gas emission scenarios (ssp126, ssp245, ssp370, and ssp585) in four future periods (2021-2040, 2041-2060, 2061-2080, and 2081-2100) under future climate change

国马铃薯种植高适宜区在不同温室气体排放情景下模拟结果的时空变化特征(图 5), 结果表明, 随着温室气体排放等级的提高, 中国马铃薯高适宜区将大幅减少。在低、中等温室气体排放情景下(ssp126、ssp245), 马铃薯种植高适宜区的主要缩减区域将包括陕西北部、西南区域、东北南部以及长江中下游地区; 在中高等温室气体排放情景下, 缩减区域还将包括内蒙古地区、黑龙江南部以及吉林东部。一直保持马铃薯种植高适宜性的区域主要包括新疆天山区域、甘肃东南部、内蒙古西部以及黑龙江北部, 此外, 青海及甘肃西北部的马铃薯种植高适宜区有所增加。

3 讨论

3.1 影响马铃薯种植气候适宜性的气象因素

本研究选取筛选后的 6 个气象因子(包括平均日变化范围、等温性、最暖月份的最高温度、最冷季度的平均温度、最湿月份的降水量和降水季节性)来评价我国马铃薯种植的气候适宜性。这 6 个气象因子中对马铃薯种植气候适宜性影响较大的是最湿月份的降水量、最暖月份的最高温度, 以及最冷季度的平均温度, 这 3 个因子对马铃薯种植气候适宜性的影响分别占到 54.7%、21.4%和 18.1%。在本研究中, 最湿月份的降水量是评估马铃薯适宜度的重



图中绿色为未来时期（2081—2100）马铃薯高适宜区，红色为未来时期相较于历史时期（1970—2000）高适宜区减少区域
Green areas were the high-suitable areas for potato planting in the period of 2081-2100, while red areas were the reduced high-suitable areas in the future compared with the baseline period of 1970-2000

图 5 未来气候变化 4 种不同温室气体排放情景下 (ssp126、ssp245、ssp370、ssp585) 的全国马铃薯高适宜区时空变化特征
Fig. 5 Characteristics spatial and temporal distributions of high-climate-suitable areas for potato cultivation under four different greenhouse gas emission scenarios (SSP126, SSP245, SSP370, and SSP585) in China

要指标。马铃薯通常被认为是干旱敏感作物^[23]，在块茎形成阶段对水分胁迫更为敏感^[24]，而块茎膨大期受到干旱胁迫会导致块茎停止生长，即使生长后期再提供大量灌水或降雨也无法恢复^[25]。由于地下水资源匮乏，中国马铃薯主要种植区域一般采用无灌溉雨养种植^[26]，主要依靠降雨供马铃薯生长所需水分，生长季降水量不足会严重影响马铃薯的生长^[27]。TANG 等^[28]研究表明马铃薯产量的变化与生长季有效降水量的变化，以及与块茎期降水量与潜在蒸散量之比的变化之间显著相关；孙俊等^[29]的研究也表明了马铃薯产量随着生长季总降水量的增加而增加。

最暖月份的最高温度和最冷季度的平均温度也是评价马铃薯气候适宜性不可缺少的气象因素。高温会对马铃薯生长产生不利的影响，在块茎形成及块茎膨大期高温会降低同化物的转运速率和光合作用的能力，不利于马铃薯块茎形成和淀粉积累^[30]，同时高温也会导致马铃薯可溶性蛋白和可溶性糖含

量升高，降低马铃薯品质^[31]。最冷季度的平均气温越高表明无霜期越长，马铃薯生长期越长，造成的暖冬将会降低土壤的霜冻深度，提早解冻有助于提高土壤温度^[32]，会对马铃薯生长产生积极影响。马铃薯抵抗低温能力较差，当最冷季度的平均气温较低，气温下降到 $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ — $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时，地上部茎叶将受冻害， $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时植株死亡，块茎亦受冻害。马铃薯植株遭受低温冻害时会表现出茎干瘫软倒伏，叶片呈墨绿色水渍状，叶片丧失光合能力而停止生长，继而严重影响马铃薯产量^[33]。

3.2 未来气候变化背景下马铃薯种植气候适宜区的分布特征

马铃薯对气候因素的变化较为敏感，未来气候变化会对中国马铃薯种植的气候适宜区产生较大影响。本研究假定在未来气候变化背景下，各地农户的种植习惯不会发生根本性的变化。因此，假定历史上长时间没有种植马铃薯的区域，未来也不会突变成为马铃薯的种植区，也不是马铃薯种植区划调整的重点区域。

在此假设基础上，本研究首先对历史上中国马铃薯种植的气候适宜性进行模拟，结果表明马铃薯高适宜区主要分布在东北至西南，在新疆西部、长江中下游、东南等地区零星分布（图 3）。本研究主要针对气候变化对马铃薯分布的影响，因此并不考虑非气候因素对马铃薯分布的影响。在未来 4 种不同温室气体排放情景下，整体上我国马铃薯高适宜区面积均在减少，这主要是由于长江中下游、中北部以及贵州等区域的山马铃薯种植气候适宜度将下降（图 4）。在全球变暖的背景下，这些区域夏季易产生高温胁迫，高温与水分胁迫影响马铃薯正常生长发育^[34]，造成马铃薯减产。然而由于该区域商品薯的需求量增大，为合理利用土地资源以及获取更高的经济效益，利用该区域冬闲田种植马铃薯以实现自给自足，因而该区域应以改良品种，提高品质为主要目标^[35]。我国中北部地区整体上仍然存在水分亏缺的问题，降水量不能很好地满足马铃薯生长的需求且主要水资源用于灌溉冬小麦等作物^[36]，因此该区域需要根据马铃薯块茎形成期对水分胁迫敏感的特点^[25]，适当调整马铃薯播期和灌溉制度。

总体来看，不论何种排放情景下，东北、西北、西南地区都是马铃薯的主要气候高适宜区。东北地区昼夜温差大，气候凉爽，是马铃薯种植较为理想的条件。然而大多数区域（如三江平原、牡丹江平原等）主要种植小麦、玉米、水稻、大豆等其他重要粮食作物、油料作物，因而可适当扩大马铃薯种植面积。西北地区是马铃薯主产区，与传统的三大粮食作物相比，马铃薯能更好地在雨养条件下生长^[37]。因而西北地区应作为未来马铃薯食用薯的潜在扩增区域，一方面增加甘肃、青海，特别是新疆地区马铃薯的种植面积，另一方面需改良马铃薯品种，以获得单位面积马铃薯的产量。西南地区丘陵山地、平地坝等区域错综复杂，限制了多种主粮作物的生长，考虑到马铃薯自身的栽培特点，可以在该区域推广马铃薯种植。

3.3 物种分布模型的限制和不确定性

物种分布模型（SDMs）将物种的“存在”和“不存在”位置与环境因子相关联，估计给定物种对于环境的生态位包络范围，也即物种存在的适宜范围^[38]，进而评估物种在研究区域整体的发展情况。许多研究证明，物种分布模型可以有效模拟和预测我国物种的适宜性^[39-43]。本研究通过集成模型模拟和预测了全国马铃薯历史和未来时期的适宜区分布，但是

仍然存在以下问题。首先，受数据源的限制，在收集资料中容易造成抽样偏差^[44]，本研究选取的物种“存在”数据较少，训练样本均衡程度高，可能给模拟结果引入了一些误差和不确定性。此外，由于部分地区优质农田（如华北平原、长江中下游平原等）优先考虑了其他粮食作物和油料作物，马铃薯种植较少。因此，尽管本研究考虑了集群效应等的影响，模型对于这些区域的模拟结果依旧存在一定的偏差。其次，影响物种适宜性的因素有很多，选取的环境因子难以涉及所有的影响因素。以马铃薯为例，包括气候、土壤、经济条件、人为因素、地形地貌、品种等^[44-46]。本研究仅考虑了气象因素对马铃薯种植气候适宜性的影响，得到了全国马铃薯气候适宜区分布，但是未考虑其他因素对结果的影响，这也是后续研究中要继续进一步加强的。最后，SDM 模型本身的不可解释性增加了具体分析环境因子对物种适宜性影响的难度，同时也增加了模拟结果的不确定性^[47-48]。尽管存在以上不足，本研究训练所得集成模型依旧具有较高的精准度，绘制的历史时期马铃薯适宜区和实际马铃薯种植区域也较为吻合。本研究所预测的未来时期马铃薯气候适宜区时空分布特征对于我国马铃薯空间结构布局和种植调整具有一定的指导价值。

4 结论

本研究利用 6 种不同全球气候模式（GCMs）所得的未来气候数据驱动 5 种不同的物种分布模型（SDMs），集成模拟预测了历史和未来气候变化不同温室气体排放情景下我国马铃薯种植气候适宜区的时空分布。随着未来气候变化的加剧，中国马铃薯种植适宜区的时空分布格局将会发生较大变化，高适宜区面积在未来不同时段内不同温室气体排放情景下均呈现减小趋势。具体来说，东北地区作为我国马铃薯种薯和菜薯的主要种植区域，高适宜区面积基本保持不变；以陕西北部、甘肃东部为主的中北部区域的高适宜区面积减少较多，而该区域作为我国菜薯产区，需要增强应对气候变化的措施以保障该区域马铃薯产量；西北地区马铃薯高适宜区主要都依托于高山、河流区域，整体上高适宜区面积基本保持不变；西南地区高适宜区时空变化整体较小；东南地区由于全球气候变暖，导致温度对马铃薯生长的影响超过降水的影响，导致该区域高适宜区面积减小较多。

参考文献 References

- [1] ZHAO J F, ZHANG Y H, QIAN Y L, PAN Z H, ZHU Y J, ZHANG Y, GUO J P, XU L L. Coincidence of variation in potato yield and climate in Northern China. *Science of the Total Environment*, 2016, 573: 965-973.
- [2] MOLUA E L. The economic impact of climate change on agriculture in Cameroon. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2007(4364): 1-31.
- [3] WEI T Y, CHERRY T L, GLOMRØD S, ZHANG T Y. Climate change impacts on crop yield: Evidence from China. *Science of the Total Environment*, 2014, 499: 133-140.
- [4] HAVERKORT A J, FRANKE A C, ENGELBRECHT F A, STEYN J M. Climate change and potato production in contrasting South African agro-ecosystems 1. Effects on land and water use efficiencies. *Potato Research*, 2013, 56(1): 31-50.
- [5] HIRZEL A H, LE LAY G. Habitat suitability modelling and niche theory. *Journal of Applied Ecology*, 2008, 45(5): 1372-1381.
- [6] 李国庆, 刘长成, 刘玉国, 杨军, 张新时, 郭柯. 物种分布模型理论研究进展. *生态学报*, 2013, 33(16): 4827-4835.
- LI G Q, LIU C C, LIU Y G, YANG J, ZHANG X S, GUO K. Advances in theoretical issues of species distribution models. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(16): 4827-4835. (in Chinese)
- [7] WANG C, SHI X Y, LIU J G, ZHAO J C, BO X Z, CHEN F, CHU Q Q. Interdecadal variation of potato climate suitability in China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2021, 310: 107293.
- [8] 朱娅秋, 何英彬, 焦伟华, 徐飞, 李闯, 孙静, 罗善军, 段丁丁, 张远涛, 于金宽, 徐瑞阳, 赵畅. 基于 GIS 的吉林省马铃薯种植气候适宜性精细化区划. *中国农业资源与区划*, 2021, 42(7): 128-136.
- ZHU Y Q, HE Y B, JIAO W H, XU F, LI C, SUN J, LUO S J, DUAN D D, ZHANG Y T, YU J K, XU R Y, ZHAO C. Regionalization of the climate suitability on potato cultivation in Jilin Province based on GIS. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2021, 42(7): 128-136. (in Chinese)
- [9] 马力文, 刘静, 马金富, 张学艺. 海原县马铃薯气候适宜性精细化区划. *中国马铃薯*, 2017, 31(4): 210-215.
- MA L W, LIU J, MA J F, ZHANG X Y. A meticulous climatic division suitable for potato planting in Haiyuan County. *Chinese Potato Journal*, 2017, 31(4): 210-215. (in Chinese)
- [10] 滕宗璠, 张畅, 王永智. 我国马铃薯适宜种植地区的分析. *中国农业科学*, 1989, 22(2): 35-44.
- TENG Z F, ZHANG C, WANG Y Z. Study on China's potato-cultivation divisions. *Scientia Agricultura Sinica*, 1989, 22(2): 35-44. (in Chinese)
- [11] BARBET-MASSIN M, JIGUET F, ALBERT C H, THUILLER W. Selecting pseudo-absences for species distribution models: How, where and how many? *Methods in Ecology and Evolution*, 2012, 3(2): 327-338.
- [12] 周天军, 陈梓明, 邹立维, 陈晓龙, 俞永强, 王斌, 包庆, 鲍颖, 曹剑, 何编, 胡帅, 李立娟, 李建, 林岩鑫, 马利斌, 乔方利, 容新尧, 宋振亚, 唐彦丽, 吴波, 吴统文, 辛晓歌, 张贺, 张明华. 中国地球气候系统模式的发展及其模拟和预估. *气象学报*, 2020, 78(3): 332-350.
- ZHOU T J, CHEN Z M, ZOU L W, CHEN X L, YU Y Q, WANG B, BAO Q, BAO Y, CAO J, HE B, HU S, LI L J, LI J, LIN Y L, MA L B, QIAO F L, RONG X Y, SONG Z Y, TANG Y L, WU B, WU T W, XIN X G, ZHANG H, ZHANG M H. Development of climate and earth system models in China: Past achievements and new CMIP6 results. *Acta Meteorologica Sinica*, 2020, 78(3): 332-350. (in Chinese)
- [13] KANG H W, AN K H, PARK C K, SOLIS A L S, STITTHICHIVAPAK K. Multimodel output statistical downscaling prediction of precipitation in the Philippines and Thailand. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34: L15710.
- [14] MA J, CHEN H, GAO X, XIAO J H, WANG H B. African swine fever emerging in China: Distribution characteristics and high-risk areas. *Preventive Veterinary Medicine*, 2020, 175: 104861.
- [15] PHILLIPS S J, ANDERSON R P, SCHAPIRE R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 2006, 190(3/4): 231-259.
- [16] FRIEDMAN J H. Greedy function approximation: A gradient boosting machine. *The Annals of Statistics*, 2001, 29(5): 1189-1232.
- [17] FRIEDMAN J H. Multivariate adaptive regression splines. *The Annals of Statistics*, 1991, 19(1): 1-67.
- [18] VAPNIK V N. An overview of statistical learning theory. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 1999, 10(5): 988-999.
- [19] BREIMAN L. Random forests. *Machine Learning*, 2001, 45(1): 5-32.
- [20] NAIMI B, ARAÚJO M B. Sdm: A reproducible and extensible R platform for species distribution modelling. *Ecography*, 2016, 39(4): 368-375.
- [21] 邱浩杰, 孙杰杰, 徐达, 焦洁洁, 薛敏, 袁位高, 沈爱华, 江波, 李胜. 末次盛冰期以来红豆树在不同气候变化情景下的分布动态. *生态学报*, 2020, 40(9): 3016-3026.
- QIU H J, SUN J J, XU D, JIAO J J, XUE M, YUAN W G, SHEN A H, JIANG B, LI S. The distribution dynamics of *Ormosia hosie* under different climate change scenarios since the Last Glacial Maximum. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(9): 3016-3026. (in Chinese)
- [22] GRAY V. Climate change 2007: The physical science basis: summary

- for policymakers. *Energy & Environment*, 2007, 18(3/4): 433-440.
- [23] OPENA G B, PORTER G A. Soil management and supplemental irrigation effects on potato: II. Root growth. *Agronomy Journal*, 1999, 91(3): 426-431.
- [24] 任稳江, 任亮, 刘生学. 黄土高原旱地马铃薯田土壤水分动态变化及供需研究. *中国马铃薯*, 2015, 29(6): 355-361.
REN W J, REN L, LIU S X. Moisture dynamics and 'Supply and demand' on potato fields in arid areas of southern loess plateau. *Chinese Potato Journal*, 2015, 29(6): 355-361. (in Chinese)
- [25] QIN S H, LI L L, WANG D, ZHANG J L, PU Y L. Effects of limited supplemental irrigation with catchment rainfall on rain-fed potato in semi-arid areas on the Western Loess Plateau, China. *American Journal of Potato Research*, 2013, 90(1): 33-42.
- [26] WANG C, ZANG H D, LIU J G, SHI X Y, LI S, CHEN F, CHU Q Q. Optimum nitrogen rate to maintain sustainable potato production and improve nitrogen use efficiency at a regional scale in China. A meta-analysis. *Agronomy for Sustainable Development*, 2020, 40(5): 1-14.
- [27] YANG Y M, YANG Y H, MOIWO J P, HU Y K. Estimation of irrigation requirement for sustainable water resources reallocation in North China. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(11): 1711-1721.
- [28] TANG J Z, WANG J, WANG E L, YU Q, YIN H, HE D, PAN X B. Identifying key meteorological factors to yield variation of potato and the optimal planting date in the agro-pastoral ecotone in North China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 256/257: 283-291.
- [29] 孙俊, 李剑萍, 吴志歧, 杨美兰, 罗京云, 魏广汉. 气候条件对马铃薯产量的影响及产量预报模型研究. *安徽农业科学*, 2010, 38(23): 12400-12402.
SUN J, LI J P, WU Z Q, YANG M L, LUO J Y, WEI G H. Influence of climate conditions on potato yield and study on the forecasting model of potato yield. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2010, 38(23): 12400-12402. (in Chinese)
- [30] RAYMUNDO R, ASSENG S, PRASSAD R, KLEINWECHTER U, CONCHA J, CONDORI B, BOWEN W, WOLF J, OLESEN J E, DONG Q X, ZOTARELLI L, GASTELO M, ALVA A, TRAVASSO M, QUIROZ R, ARORA V, GRAHAM W, PORTER C. Performance of the SUBSTOR-potato model across contrasting growing conditions. *Field Crops Research*, 2017, 202: 57-76.
- [31] 黄家伟, 吴登峰, 张招娟. 高温对不同耐热性马铃薯生长特性的影响. *亚热带农业研究*, 2022, 18(2): 79-84.
HUANG J W, WU D F, ZHANG Z J. Effect of high temperature on growth characteristics of potato with contrasting heat tolerances. *Subtropical Agriculture Research*, 2022, 18(2): 79-84. (in Chinese)
- [32] IWATA Y, HAYASHI M, HIROTA T. Comparison of snowmelt infiltration under different soil - freezing conditions influenced by snow cover. *Vadose Zone Journal*, 2008, 7(1): 79-86.
- [33] 李飞, 金黎平. 马铃薯霜冻害及防御措施. *贵州农业科学*, 2007, 35(3): 121, 127.
LI F, JIN L P. Frost injury of potato and its controlling measures. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2007, 35(3): 121, 127. (in Chinese)
- [34] HANDAYANI T, WATANABE K. The combination of drought and heat stress has a greater effect on potato plants than single stresses. *Plant Soil and Environment*, 2020, 66(4): 175-182.
- [35] ZHOU Z J, ANDERSEN M N, PLAUBORG F. Radiation interception and radiation use efficiency of potato affected by different N fertigation and irrigation regimes. *European Journal of Agronomy*, 2016, 81: 129-137.
- [36] LI Q Q, DONG B D, QIAO Y Z, LIU M Y, ZHANG J W. Root growth, available soil water, and water-use efficiency of winter wheat under different irrigation regimes applied at different growth stages in North China. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(10): 1676-1682.
- [37] WANG C L, SHEN S H, ZHANG S Y, LI Q Z, YAO Y B. Adaptation of potato production to climate change by optimizing sowing date in the Loess Plateau of central Gansu, China. *Journal of Integrative Agriculture*, 2015, 14(2): 398-409.
- [38] GUI SAN A, ZIMMERMANN N E. Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological Modelling*, 2000, 135(2/3): 147-186.
- [39] 杜倩, 魏晨辉, 梁陈涛, 于景华, 王慧梅, 王文杰. 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. *生态学报*, 2022, 42(23): 9712-9725.
DU Q, WEI C H, LIANG C T, YU J H, WANG H M, WANG W J. Future climatic adaption of 12 dominant tree species in Northeast China under 3 climatic scenarios by using MaxEnt modeling. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(23): 9712-9725. (in Chinese)
- [40] 张欣雨, 朱泽群, 袁雅欣, 姬文翔, 宋岑雨, 陆洪伟, 赵茜蕾, 卞庆瑶, 孙子墨, 宣树华, 孙义. 基于组合物种分布模型的黄河源区鹅绒委陵菜适宜生境及其对气候变化的响应. *草业科学*, 2022, 39(2): 254-267.
ZHANG X Y, ZHU Z Q, YUAN Y X, JI W X, SONG C Y, LU H W, ZHAO X L, BIAN Q Y, SUN Z M, YI S H, SUN Y. Assessment of suitable of *Potentilla anserina* habitat and its response to climate change in the source region of the Yellow River based on ensemble species distribution modeling. *Pratacultural Science*, 2022, 39(2): 254-267. (in Chinese)
- [41] 张爱平, 王毅, 熊勤犁, 伍小刚, 孙晓铭, 黄艳蒙, 张林, 潘开文.

- 末次间冰期以来 3 种云杉属植物的历史分布变迁及避难所. 应用生态学报, 2018, 29(7): 2411-2421.
- ZHANG A P, WANG Y, XIONG Q L, WU X G, SUN X M, HUANG Y M, ZHANG L, PAN K W. Distribution changes and refugia of three spruce taxa since the last interglacial. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(7): 2411-2421. (in Chinese)
- [42] 沈涛, 张霁, 申仕康, 赵艳丽, 王元忠. 西南地区红花龙胆分布格局模拟与气候变化影响评价. 应用生态学报, 2017, 28(8): 2499-2508.
- SHEN T, ZHANG J, SHEN S K, ZHAO Y L, WANG Y Z. Distribution simulation of *Gentiana rubra* in Southwest China and assessment of climate change impact. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(8): 2499-2508. (in Chinese)
- [43] KRAMER-SCHADT S, NIEDBALLA J, PILGRIM J D, SCHRÖDER B, LINDENBORN J, REINFELDER V, STILLFRIED M, HECKMANN I, SCHARF A K, AUGERI D M, CHEYNE S M, HEARN A J, ROSS J, MACDONALD D W, MATHAI J, EATON J, MARSHALL A J, SEMIADI G, RUSTAM R, BERNARD H, ALFRED R, SAMEJIMA H, DUCKWORTH J W, BREITENMOSER-WUERSTEN C, BELANT J L, HOFER H, WILTING A. The importance of correcting for sampling bias in MaxEnt species distribution models. Diversity and Distributions, 2013, 19(11): 1366-1379.
- [44] YANG L T, ZHAO J F, JIANG X P, WANG S, LI L H, XIE H F. Effects of climate change on the climatic production potential of potatoes in Inner Mongolia, China. Sustainability, 2022, 14(13): 7836.
- [45] KÖHL K I, MULUGETA ANELEY G, HAAS M, PETERS R. Confounding factors in container-based drought tolerance assessments in *Solanum tuberosum*. Agronomy, 2021, 11(5): 865.
- [46] GERVAIS T, CREELMAN A, LI X Q, BIZIMUNGU B, DE KOEYER D, DAHAL K. Potato response to drought stress: Physiological and growth basis. Frontiers in Plant Science, 2021, 12: 698060.
- [47] MCHENRY J, WELCH H, LESTER S E, SABA V. Projecting marine species range shifts from only temperature can mask climate vulnerability. Global Change Biology, 2019, 25(12): 4208-4221.
- [48] JONES M C, CHEUNG W W L. Multi-model ensemble projections of climate change effects on global marine biodiversity. ICES Journal of Marine Science, 2015, 72(3): 741-752.

(责任编辑 杨鑫浩, 李莉)