



•数据论文•

# 全球变化情景下的中国木本植物受威胁物种名录

彭蔚嘉<sup>ID</sup>, 罗源, 蔡宏宇, 张晓玲, 王志恒<sup>ID\*</sup>

北京大学城市与环境学院生态研究中心、地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京 100871

**摘要:** 生物多样性正面临快速丧失的风险, 气候和土地利用变化已成为生物多样性的主要威胁之一。受威胁物种名录是区域和全球生物多样性保护的重要基础数据, 也是保护区规划的基础。作为一个生物多样性大国, 中国已开展了高等植物受威胁状况的系统性评估, 建立了受威胁植物名录, 为植物多样性保护规划提供了支撑。但由于数据和方法限制, 现有受威胁植物名录制定时未定量考虑全球变化对植物分布的潜在影响, 因而可能低估物种的受威胁等级及未来生物多样性的丧失风险。本研究基于高精度的木本植物分布数据和物种分布模型, 评估了未来气候和土地利用变化对木本植物分布的潜在影响。基于每个物种适宜分布区大小的变化, 并依据IUCN红色名录评估指标A3c的阈值标准, 更新了木本植物的受威胁等级, 补充了未来中国潜在受威胁木本植物名录。结果显示: 综合不同的气候变化情景(RCP 2.6、RCP 6.0和RCP 8.5)和扩散情景(完全扩散、20 km/10年、不扩散), 约12.9%–40.5%的木本植物被评估为受威胁物种。该名录将为制定木本植物保护优先级、开展保护区规划、提升全球变化情景下的生物多样性保护成效提供基础数据, 也为其他类群制定全面的受威胁物种名录提供参考。

**关键词:** IUCN红色名录; 木本植物; 濒危等级; 全球变化; 中国

## 数据库(集)基本信息简介

数据库(集)名称	全球变化情景下的中国木本植物受威胁物种名录
作者	彭蔚嘉, 罗源, 蔡宏宇, 张晓玲, 王志恒
通讯作者	王志恒(zhiheng.wang@pku.edu.cn)
时间范围	现在至2070年
地理区域	中国
文件大小	2.06 MB
数据格式	*.xlsx
数据链接	<a href="http://dataopen.info/home/datafile/index/id/256">http://dataopen.info/home/datafile/index/id/256</a> <a href="http://doi.org/10.24899/do.202205002">http://doi.org/10.24899/do.202205002</a> <a href="https://www.biodiversity-science.net/fileup/1005-0094/DATA/2021459.zip">https://www.biodiversity-science.net/fileup/1005-0094/DATA/2021459.zip</a>
数据库(集)组成	该数据集共包含2个数据库: (1)中国11,405种木本植物现在(覃海宁等, 2017)和未来不同气候变化与扩散情景下的受威胁状况(是否为受威胁物种; 1: 是受威胁物种; 0: 不是受威胁物种); (2)中国11,405种木本植物现在(覃海宁等, 2017)和未来不同气候变化与扩散情景下的受威胁水平(EX: 灭绝; CR: 极危; EN: 濒危; VU: 易危; LC: 无危)。

彭蔚嘉, 罗源, 蔡宏宇, 张晓玲, 王志恒 (2022) 全球变化情景下的中国木本植物受威胁物种名录. 生物多样性, 30, 21459. doi: 10.17520/biods.2021459.  
Peng SJ, Luo Y, Cai HY, Zhang XL, Wang ZH (2022) A new list of threatened woody species in China under future global change scenarios. Biodiversity Science, 30, 21459. doi: 10.17520/biods.2021459.

## A new list of threatened woody species in China under future global change scenarios

Shijia Peng<sup>ID</sup>, Yuan Luo, Hongyu Cai, Xiaoling Zhang, Zhiheng Wang<sup>ID\*</sup>*Institute of Ecology and Key Laboratory for Earth Surface Processes of the Ministry of Education, College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871*

收稿日期: 2021-11-15; 接受日期: 2022-05-10

基金项目: 国家自然科学基金(32125026; 32101401; 31988102)

\* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: zhiheng.wang@pku.edu.cn

<https://www.biodiversity-science.net>

ABSTRACT

The world is currently experiencing a biodiversity crisis, and climate and land-cover changes are now recognized as two major threats to biodiversity. China is one of the mega-biodiversity countries and the threatened species list of China's higher plants was reported in 2017. This list provided important data for biological conservation and protected area planning from regional to global scales. However, it was mainly based on the past and current status of species population and distribution, while future responses of species to climate and land-cover changes were rarely considered. This will lead to an underestimation of future local extinction risks. Using high-resolution species distribution data of woody plants and species distribution models, we evaluated the impacts of climate and land-cover changes on woody species distributions and estimated changes in the extent of occurrence (EOA) for each species. Our results indicate that 12.9%–40.5% of woody species will be threatened under different climate and dispersal scenarios. Based on these results, we updated the list of threatened woody species in China based on the IUCN Red List Criteria. This new list of threatened woody species provides important data for assessing the conservation priorities of woody plants, for the planning of future nature reserve extension, for improving the performance of nature reserves under future global change scenarios, and for updating the list of threatened species of other taxa.

**Key words:** IUCN Red List; woody plant species; threatened categories; global changes; China

Database/Dataset Profile

Title	A new list of threatened woody species in China under future global change scenarios
Authors	Shijia Peng, Yuan Luo, Hongyu Cai, Xiaoling Zhang, Zhiheng Wang
Corresponding author	Zhiheng Wang (zhiheng.wang@pku.edu.cn)
Time range	Current–2070
Geographical scope	China
File size	2.06 MB
Data format	*.xlsx
Data link	<a href="http://dataopen.info/home/datafile/index/id/256">http://dataopen.info/home/datafile/index/id/256</a> <a href="http://doi.org/10.24899/doi.202205002">http://doi.org/10.24899/doi.202205002</a> <a href="https://www.biodiversity-science.net/fileup/1005-0094/DATA/2021459.zip">https://www.biodiversity-science.net/fileup/1005-0094/DATA/2021459.zip</a>
Database/Dataset composition	The dataset consists of two data files: (1) The classification of 11,405 woody plant species as threatened or non-threatened under current (Qin et al, 2017) and future climate and dispersal change scenarios in China (1: Threatened species; 0: Non-threatened species); (2) The conservation status of 11,405 woody species under current (Qin et al, 2017) and future climate and dispersal change scenarios (EX: Extinction; CR: Critically Endangered; EN: Endangered; VU: Vulnerable; LC: Least Concern).

近半个世纪以来, 随着人类活动的加剧, 全球生态环境正经历着前所未有的变化并日益威胁着全球的生物多样性。有研究表明, 地球正经历第六次物种大灭绝(Barnosky et al, 2011)。其中, 气候和土地利用变化被认为是生物多样性面临的最主要威胁, 它们的改变可能会导致未来100年内物种的大量灭绝(Hof et al, 2011; Pimm et al, 2014)。评估气候和土地利用变化对物种分布、灭绝风险以及生物多样性的影响, 对于生物多样性保护政策制定、自然保护区规划以及生态系统管理至关重要, 一直是生物多样性领域的研究热点。

中国地形复杂、生态环境多样, 是全球生物多样性最为丰富的国家之一。然而随着近年来人口的持续增长和人类干扰的不断加强, 生态系统退化不断加剧, 自然生境逐渐破碎化, 生物资源过度使用, 使得一些物种的种群数量日益减少乃至消失。因此,

中国也是全球生物多样性受威胁情况最为严重的国家之一(王伟和李俊生, 2021)。据统计, 中国脊椎动物受威胁物种的比例远高于世界平均水平, 其中, 两栖动物受威胁物种比例高达43.1%, 高于世界平均水平的31%; 其他几个类群受威胁物种比例分别为: 爬行动物29.7%, 哺乳动物26.4%, 鱼类20.4%以及鸟类10.6% (蒋志刚等, 2016)。

在中国受威胁植物的研究中, 近年来的里程碑式成果就是中国高等植物受威胁物种名录的发布。覃海宁等(2017)根据IUCN濒危物种红色名录标准, 评估了35,784种中国高等植物的受威胁情况。该名录的发布对制定高等植物保护优先级以及自然保护区规划起到了积极作用。然而, 该名录主要根据物种过去的种群及其变化情况而制定, 未定量考虑未来全球变化对物种分布可能产生的影响。这可能低估全球变化情景下物种受威胁等级和生物多样

性丧失风险。同时, 在未来进行保护区扩容时, 如果忽略未来全球变化对受威胁物种的影响, 可能会降低未来气候变化情景下保护区对受威胁物种的保护成效(Peng et al, 2022)。

目前, IUCN红色名录定量评估指标体系已较为完善, 共包括5类指标: 标准A, 分布范围内种群大小下降; 标准B, 有限的地理分布范围; 标准C, 种群内成熟个体数下降或减少; 标准D, 极小种群或分布十分受限; 标准E, 未来野外灭绝概率增加。其中标准A包括物种过去(A1指标和A2指标)、未来(A3指标)或从过去到未来(A4指标)的种群动态。在标准A中, 种群动态变化可采用以下5种方式评估: (a)直接观测(不适用于A3); (b)适合研究类群的多度指标; (c)分布范围(extent of occurrence, EOA)、占有面积(area of occupancy, AOO)和/或生境质量; (d)实际或潜在的利用强度; (e)外来类群、杂交、病原菌、污染、竞争者或寄生等对种群大小的影响(IUCN, 2012)。尽管现有的评估指标体系包括了未来种群动态改变, 然而, 由于数据和方法限制, 现有的相关研究很少量化这一要素对物种濒危等级的影响。

本研究利用中国11,405种木本植物的高精度分布数据(20 km × 20 km), 结合物种分布模型, 评估了未来气候和土地利用变化对中国木本植物分布的影响。基于物种未来潜在分布区的变化情况, 并参考IUCN的A3阈值标准, 将物种划分为不同的受威胁等级; 对比现有的受威胁物种与未来全球变化情景下的潜在受威胁物种, 对现有的受威胁物种名录进行有效补充, 拟为进一步开展中国生物多样性与保护生物学的研究提供基础数据。需要指出的是, 本研究旨在现有红色名录基础上增加全球变化情景下的受威胁物种, 而非否定现有名录。

## 1 数据采集与处理方法

### 1.1 数据来源

木本植物是指根和茎含有木质部的植物。中国木本植物分布数据主要来自于《中国木本植物分布图集》(Wang et al, 2009; Fang et al, 2011)。该图集基于目前已出版的全部国家级和省级植物志以及大量地方植物志和区域考察报告, 记录了中国11,405种木本植物的县级分布数据, 其中乔木3,165种, 灌木7,205种, 木质藤本1,035种, 分类系统与*Flora of*

*China*一致。近年来, 通过进一步收集整理2009–2018年间出版的40余卷国家和地方植物志以及大量的文献资料, 结合最新公布的标本记录数据: 主要来源于中国数字标本植物馆(<http://www.cvh.ac.cn/frps>)和中国国家标本资源共享平台(<http://www.nsii.org.cn/2017/home.php>), 我们对该图集的物种分布数据进行了补充与更新。所有木本植物学名和中文名主要参考*Flora of China*, 并用《中国生物物种名录》进行补充(详细请见数据表)。

县级尺度的木本植物分布数据往往会高估物种的实际分布区面积。为了得到更精细的物种分布数据, 本研究从*Flora of China*、《中国植物志》及部分省级植物志收集整理了每种植物的分布海拔范围和分布生境信息, 结合高分辨率数字高程模型和中国1:1,000,000植被图(Hou, 2001), 将物种的县级分布数据降尺度为20 km × 20 km的网格分布, 降尺度方法和过程详见Peng等(2022)。当去除边界或沿海地区面积不足200 km<sup>2</sup> (栅格大小的一半)的栅格后, 共有23,718个栅格用于后续分析。

构建物种分布模型所需的现代和未来气候数据均来自于全球气候数据库(WorldClim, <http://www.worldclim.org/>), 数据分辨率为2.5' × 2.5'。由于不同环境变量之间存在较强的共线性, 可能会造成模型冗余。因此, 本研究根据变量间的Pearson相关系数, 并考虑其对物种分布的影响, 选取了Pearson相关系数小于0.7的6个气候变量, 包括温度季节性(Bio4)、最暖季均温(Bio10)、最冷季均温(Bio11)、降水季节性(Bio15)、最湿季降水量(Bio16)以及最干季降水量(Bio17)。利用ArcGIS 10.2的zonal工具计算20 km × 20 km网格内各个气候变量的平均值。未来气候数据采用BBC-CSM1-1模型预测的2070年(2061–2080年平均)的气候数值, 包括3个温室气体排放情景。温室气体排放情景用代表性的浓度路径(representative concentration pathways, RCPs)来表示, 从低到高分别为RCP 2.6、RCP 6.0和RCP 8.5。

现代和未来土地利用数据来自Li等(2017)发表的2010和2100年全球1 km土地利用与土地覆盖数据(LUCC)产品。该产品将全球的土地利用和土地覆盖划分为6个类型, 分别为水体、森林、草地、农田、城市用地以及裸地。我们计算了20 km × 20 km网格内每种土地利用类型所占的比例作为土地利用变

量,用于建立物种分布模型。由于水体对陆地植物分布的影响较小,本研究未将水体用于建模分析。未来土地利用与土地覆盖数据包含4个SRE情景(special report on emissions scenarios),分别为A1B, A2, B1和B2。本研究选取B1、A1B和A2这3种情景,并与3个RCPs情景对应(IPCC, 2014; Peng et al, 2022)。此外,由于仅能获得2100年的土地覆盖数据,因此我们将2100年的LUCC与2070年的气候数据相匹配。

植物的分布可能受土壤条件的影响,因此在进行物种分布预测时,我们也选择了多个能够反映土壤理化性质的土壤变量。表层土壤(0–15 cm)数据来源于SoilGrid250m (<https://www.soilgrid.org>)数据库,精度为250 m。本研究选取了4个土壤理化性质指标:沙土/黏土比例、容积密度、土壤pH值以及土壤有机质含量。我们同样计算了20 km × 20 km网格内4个土壤变量的平均值,与6个气候因子、5个土地利用与土地覆盖因子一起用于建立物种分布模型,并预测未来气候和土地利用与土地覆盖变化下的木本植物分布。

## 1.2 数据处理方法

采用R语言中的biomod2包进行物种分布模型的构建(Thuiller et al, 2009)。Biomod2是目前比较常用的物种分布模型软件包,提供了多种物种分布模型算法以及模型集成方法来提高模型预测的精确度。本研究共采用5种物种分布模型:广义线性模型(GLM)、分类回归树(CTA)、广义提升回归模型(GBM)、随机森林(RF)和最大熵(MaxEnt)模型,涵盖分类、回归和机器学习等不同算法。5种算法的参数设置均采用biomod2包中的默认值。

对于每个物种和每种物种分布模型,我们将完整的分布数据随机分割成两部分,80%用来建模,20%用来评价模型的表现,这一过程重复10次。因此,每个物种共生成50个模型,用于预测物种的现代潜在分布以及未来不同气候和土地利用变化情景下的潜在分布。利用真实技巧统计(true skill statistics, TSS)来评价模型的表现。TSS的值介于–1到1之间。当TSS > 0时,证明模型优于随机;而当TSS > 0.5时,认为模型表现良好(Allouche et al, 2006)。为了减小由于模型拟合度差而导致的不确定性,在每个物种的50个模型中,只有TSS > 0.5的模

型预测结果会被用于最终的模型集成。模型集成采用中位数法。由于模型集成的结果是介于0–1之间的概率值,我们采用MaxTSS为阈值的方法将概率值转换为0和1的二项分布。

当物种的分布记录太少时,模型预测精度通常较差且易出现过拟合现象。之前相关研究通常删除分布记录较少的物种。然而,分布区较小的狭域物种更容易受到气候变化和人类活动的影响。对于分布范围大于5而小于20个网格的物种,本研究采用集成小模型(ensembled small models)的方法(Breiner et al, 2018)。研究显示,当物种分布记录与预测变量个数的比值为10 : 1时,模型的拟合效果最好(Brun et al, 2020)。因此,我们对15个预测变量进行两两组合,共有105对变量组合。对每个物种构建105个二元模型,同样采用5种模型算法,最终每个物种共525个模型纳入分析。参数的设置、后续模型的筛选以及阈值的选择等均与对广域物种(分布记录大于20个网格的物种)的处理方式一致。对于分布区小于5个网格的物种来说(共560个物种),由于> 90%的模型拟合度都较差(TSS < 0.5),因此,这部分物种未包括在本次研究中。

物种分布模型倾向于高估物种的分布区。因此,本研究利用最小凸多边形缓冲区来切割物种的潜在分布区(Zhang et al, 2017)。根据前人的研究,我们在每种植物的现代实际分布区外构建一个给定宽度的缓冲区(以往研究多用200 km),并将物种的实际分布区和缓冲区与模型预测的现代潜在分布区进行叠加分析,将重叠部分作为模型最终预测结果(Kremen et al, 2008; Peng et al, 2022)。

对于未来气候变化情景下的物种分布,本研究假设了3种扩散情景:(1)完全扩散。该情景下物种可以扩散到未来气候变化情景下所有合适的栖息地。(2) 20 km/10年。即物种每10年扩散20 km。该扩散速度根据IPCC报告和其他研究中植物所能达到的最大扩散速度而确定(Chen et al, 2011, IPCC, 2014)。因此,到2070年,中国木本植物最大可以扩散200 km。(3)无扩散。该情景下物种不能扩散,在未来气候变化情景下物种只能继续存在于原来分布的栅格里或消失。在无扩散情景下,我们直接将模型预测得到的物种现在和未来的潜在分布范围进行叠加,所得的重叠部分即为物种在未来的分布范围。

关于本文中物种分布模型的建立、检验和预测方法详见Peng等(2022)。

为评估在不同扩散情景和未来气候和土地利用变化情景下中国木本植物的受威胁程度及灭绝风险,本研究基于物种分布范围的变化,参考IUCN物种红色名录评估指标(A3c指标) (IUCN, 2012),将物种划分为不同的受威胁等级,分别为灭绝(Extinction, EX)、极危(Critically Endangered, CR)、濒危(Endangered, EN)、易危(Vulnerable, VU)和无危(Least Concern, LC)。其中,本文所关注的受威胁物种包括前4个等级(VU + EN + CR + EX)。我们建立了不同情景下的根据A3c指标确定的受威胁物种名录及各类受威胁物种占全部物种的比例,并与覃海宁等(2017)发布的受威胁物种名录进行了对比分析。

## 2 数据描述

结果显示,到2070年,在不同气候和土地利用变化情景以及不同扩散情景下,潜在受威胁物种的数量具有显著差异。在RCP 8.5情景下,受威胁物种的比例高于RCP 2.6与RCP 6.0情景。在相同的气候和土地利用变化情景下,随着物种扩散能力的降低,受威胁物种的比例也随之增加。在完全扩散情景下,平均约有14.0%的木本植物将会受到威胁(RCP 2.6: 12.9%; RCP 6.0: 14.0%; RCP 8.5: 15.2%),其中,平均4.8% (3.6%–5.5%)的物种被评为灭绝,2.9% (2.4%–3.5%)为极危,3.4% (3.2%–3.5%)为濒危,2.9% (2.4%–3.5%)为易危;在20 km/10年的扩散情景下,平均约有19.8%的木本植物将会受到威胁(RCP 2.6: 17.8%; RCP 6.0: 20.2%; RCP 8.5: 21.5%),其中,6.4% (5.3%–7.3%)的物种将会灭绝;3.9% (3.3%–4.6%)的物种极危;4.9% (4.6%–5.1%)的物种濒危,4.6% (4.0%–5.3%)的物种易危;在不扩散的情景下,平均约有37.6%的木本植物受到威胁(RCP 2.6: 33.7%; RCP 6.0: 38.8%; RCP 8.5: 40.5%),其中,8.0% (6.3%–9.2%)的物种灭绝;5.8% (5.2%–6.5%)的物种极危;10.7% (8.8%–12.7%)的物种濒危,13.1% (11.1%–15.7%)的物种易危。我们选取一个代表性物种锐角槭(*Acer acutum*),给出了其在当前和未来情景下的潜在分布图(附录1)。

覃海宁等(2017)的评估结果显示,中国共有

1,514种受威胁木本植物。与之相比,本研究参考IUCN物种红色名录评估指标中的A3c阈值标准,评估了木本植物受威胁等级,在评估中考虑了未来气候和土地利用变化对物种分布范围的影响,并综合了不同的气候和扩散情景。通过这一评估,本研究在覃海宁等(2017)的基础上,补充了新的潜在受威胁物种,这些新增受威胁物种多集中于杜鹃花属(*Rhododendron*)、蔷薇属(*Rosa*)、悬钩子属(*Rubus*)以及柳属(*Salix*)等一些关键类群中,未来进行生物多样性保护时需重点关注。

## 3 数据质量控制与评估

本研究的数据来源包括: (1)《中国木本植物分布图集》(*Atlas of Woody Plants in China: Distributions and Climate*) (Fang et al, 2011); (2)中国其他已发表的植物志、地图集和文献,包括*Flora of China* (25卷)、《中国植物志》(126卷)、《中国高等植物》,以及目前所能收集到的省级植物志(共计27个省149卷/册),已发表的区域尺度的植物志和各种名录,如昆仑山脉、南岭、秦岭和青藏高原等地区,共计42卷/册; (3)中国国家标本资源共享平台近年来发布的标本数据。为了确保分布数据的精确度,收集过程仅筛选了县级水平,或者有明确经纬度记录的标本数据。此外,对于面积相对较大的县(如新疆塔克拉玛干沙漠地区),本研究将其细分成2–4个小区域,在此基础上,根据每种植物的海拔分布范围和生境信息对县级分布进行降尺度,从而提高分布数据的精确度。

在构建模型以及模型筛选方面,本研究采用多个算法、多种情景的模型集成方法,在一定程度上减少了由于算法不同而导致的結果的不确定性,显著改善了模型的预测能力,得到更可靠的预测结果(Araujo & New, 2007)。此外,对于狭域物种(分布区网格数为5–20),我们采用最新的集合小模型方法进行模拟,拓展了对狭域物种的模型模拟能力,也为认识未来全球变化下狭域物种的分布区变化提供了新数据。

值得注意的是,随着植物系统学的发展,近年来人们发表了部分新物种(如希陶木, *Tsaiodendron dioicum*),目前中国木本植物的总数量略高于本研究数据库中所包含的物种。由于这些新类群大多生

境独特、分布狭窄且数量较少, 很多可能面临比较高的威胁。由于部分新发表物种的分布范围尚存在不确定性, 部分物种也未被收录至*Flora of China*或*Catalog of Life* (COL)中, 其分类地位也可能存在不确定性。因此, 本研究并未完全包含这些新发表物种。随着野外调查和文献调研的深入, 未来可根据最新的数据, 定量评估气候变化和人类活动对其分布的影响, 进而确定其受威胁等级。

#### 4 数据使用方法和建议

已有研究显示, 物种分布模型的预测精度受物种分布区大小的影响较大(Wisz et al, 2008)。尽管本研究采用集成小模型的方法对狭域物种的分布区进行了模拟, 但仍有560种物种因分布区过小(小于5个网格)而无法进行模型拟合。这些物种可能也会受到未来气候变化和人类活动的威胁。经统计, 这560种物种约有1/4已被包括在覃海宁等(2017)的受威胁植物名录中。但值得注意的是, 这部分狭域物种中仍有3/4未被以往评估确定为受威胁物种, 也未被包括在本研究的评估中。这些物种大部分为潜在受威胁物种。在本研究中, 分布区小于5个网格的物种被标记为“?”。在今后研究中, 要集中开展对这些信息缺乏的潜在受威胁物种的野外调查, 并采集和保存其种质资源, 为未来开展生物多样性监测与保护工作提供参考。尽管如此, 本研究旨在通过评估未来气候和土地利用变化情景下物种分布范围大小的变化情况, 对现有的木本植物受威胁物种名录进行补充, 即在现有红色名录的基础上增加未来全球变化情景下的受威胁物种, 而非否定现有名录。因此, 这些少数缺失的狭域物种不会影响本研究的主要结论。同时, 本研究也统计了所有气候和扩散情景下都将受到威胁的物种, 共870种, 其中灭绝的有313种。相较于只在少数几种情景下受威胁的物种, 这些共同出现的物种在未来的保护规划中则需重点关注。此外, 本研究中所有物种分布数据的空间分辨率为20 km × 20 km, 该精度对于未来的保护规划仍显粗糙。随着相关文献数据与标本资料的不断数字化, 未来可结合新的数据和野外调查进一步细化物种分布数据(Peng et al, 2022)。

**作者分工:** 彭蔚嘉负责初步科学问题的提出、数据分

析和文章的撰写; 罗源负责模型的构建; 蔡宏宇负责部分文字的撰写; 张晓玲负责分布数据的处理; 王志恒负责科学问题的升华、研究设计指导及文稿统筹。

#### ORCID

彭蔚嘉  <https://orcid.org/0000-0002-3510-119X>

王志恒  <https://orcid.org/0000-0003-0808-7780>

#### 参考文献

- Allouche O, Tsoar A, Kadmon R (2006) Assessing the accuracy of species distribution models: Prevalence, Kappa and the true skill statistic (TSS). *Journal of Applied Ecology*, 43, 1223–1232.
- Araujo MB, New M (2007) Ensemble forecasting of species distributions. *Trends in Ecology and Evolution*, 22, 42–47.
- Barnosky AD, Matzke N, Tomiya S, Wogan GOU, Swartz B, Quental TB, Marshall C, McGuire JL, Lindsey EL, Maguire KC, Mersey B, Ferrer EA (2011) Has the Earth's sixth mass extinction already arrived? *Nature*, 471, 51–57.
- Breiner FT, Nobis MP, Bergamini A, Guisan A (2018) Optimizing ensemble of small models for predicting the distribution of species with few occurrences. *Methods in Ecology and Evolution*, 9, 802–808.
- Brun P, Thuiller W, Chauvier Y, Pellissier L, Wuest RO, Wang Z, Zimmermann N (2020) Model complexity affects species distribution projections under climate change. *Journal of Biogeography*, 47, 130–142.
- Chen IC, Hill JK, Ohlemüller R, Roy DB, Thomas CD (2011) Rapid range shifts of species associated with high levels of climate warming. *Science*, 333, 1024–1026.
- Fang J, Wang Z, Tang Z (2011) *Atlas of Woody Plants in China: Distribution and Climate*. Higher Education Press, Beijing & Springer, Berlin.
- Hof C, Levinsky I, Araújo MB, Rahbek C (2011) Rethinking species' ability to cope with rapid climate change. *Global Change Biology*, 17, 2987–2990.
- Hou X (2001) 1 : 1000000 Vegetation Atlas of China. Science Press, Beijing.
- IPCC (2014) *Climate Change 2014: Synthesis report*. In: Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (eds Team CW, Pachauri RK, Meyer LA). IPCC, Geneva, Switzerland.
- IUCN (2012) *IUCN Red List Categories and Criteria, Version 3.1 (second edition)*. IUCN, Gland Switzerland and Combidge, UK.
- Jiang ZG, Jiang JP, Wang YZ, Zhang E, Zhang YY, Li LL, Xie F, Cao B, Cao L, Zheng GM, Dong L, Zhang ZW, Ding P, Luo ZH, Ding CQ, Ma ZJ, Tang SH, Cao WX, Li CW, Hu HJ, Ma Y, Wu Y, Wang YX, Zhou KY, Liu SY, Chen YY, Li JT, Feng ZJ, Wang Y, Wang B, Li C, Song XL, Cai L,

- Zang CX, Zeng Y, Meng ZB, Fang HX, Ping XG (2016) Red List of China's Vertebrates. Biodiversity Science, 24, 500–551. (in Chinese and in English) [蒋志刚, 江建平, 王跃招, 张鹗, 张雁云, 李立立, 谢锋, 蔡波, 曹亮, 郑光美, 董路, 张正旺, 丁平, 罗振华, 丁长青, 马志军, 汤宋华, 曹文宣, 李春旺, 胡慧建, 马勇, 吴毅, 王应祥, 周开亚, 刘少英, 陈跃英, 李家堂, 冯祚建, 王燕, 王斌, 李成, 宋雪琳, 蔡蕾, 臧春鑫, 曾岩, 孟智斌, 方红霞, 平晓鸽 (2016) 中国脊椎动物红色名录. 生物多样性, 24, 500–551.]
- Kremen C, Cameron A, Moilanen A, Phillips SJ, Thomas CD, Beentje H, Dransfield J, Fisher BL, Glaw F, Good TC (2008) Aligning conservation priorities across taxa in Madagascar with high-resolution planning tools. Science, 320, 222–226.
- Li X, Chen G, Liu X, Liang X, Wang S, Chen Y, Pei F, Xu X (2017) A new global land-use and land-cover change product at a 1-km resolution for 2010 to 2100 based on human–environment interactions. Annals of the American Association of Geographers, 107, 1040–1059.
- Peng S, Zhang J, Zhang X, Li Y, Liu Y, Wang Z (2022) Conservation of woody species in China under future climate and land-cover changes. Journal of Applied Ecology, 59, 141–152.
- Pimm SL, Jenkins CN, Abell R, Brooks TM, Gittleman JL, Joppa LN, Raven PH, Roberts CM, Sexton JO (2014) The biodiversity of species and their rates of extinction, distribution, and protection. Science, 344, 1246752.
- Qin HN, Yang Y, Dong SY, He Q, Jia Y, Zhao LN, Yu SX, Liu HY, Liu B, Yan YH, Xiang JY, Xia NH, Peng H, Li ZY, Zhang ZX, He XJ, Yin LK, Lin YL, Liu QR, Hou YT, Liu Y, Liu QX, Cao W, Li JQ, Chen SL, Jin XH, Gao TG, Chen WL, Ma HY, Geng YY, Jin XF, Chang CY, Jiang H, Cai L, Zang CX, Wu JY, Ye JF, Lai YJ, Liu B, Lin QW, Xue NX (2017) Threatened species list of China's higher plants. Biodiversity Science, 25, 696–744. (in Chinese and in English) [覃海宁, 杨永, 董仕勇, 何强, 贾渝, 赵莉娜, 于胜祥, 刘慧圆, 刘博, 严岳鸿, 向建英, 夏念和, 彭华, 李振宇, 张志翔, 何兴金, 尹林克, 林余霖, 刘全儒, 侯元同, 刘演, 刘启新, 曹伟, 李建强, 陈世龙, 金效华, 高天刚, 陈文俐, 马海英, 耿玉英, 金孝锋, 常朝阳, 蒋宏, 蔡蕾, 臧春鑫, 武建勇, 叶建飞, 赖阳均, 刘冰, 林秦文, 薛纳新 (2017) 中国高等植物受威胁物种名录. 生物多样性, 25, 696–744.]
- Thuiller W, Lafourcade B, Engler R, Araújo MB (2009) BIOMOD—A platform for ensemble forecasting of species distributions. Ecography, 32, 369–373.
- Wang W, Li J (2021) *In-situ* conservation of biodiversity in China: Advances and prospects. Biodiversity Science, 29, 133–149. (in Chinese with English Abstract) [王伟, 李俊生 (2021) 中国生物多样性就地保护成效与展望. 生物多样性, 29, 133–149.]
- Wang Z, Brown JH, Tang Z, Fang J (2009) Temperature dependence, spatial scale, and tree species diversity in eastern Asia and North America. Proceedings of the National Academy of Sciences, USA, 106, 13388–13392.
- Wisz MS, Hijmans RJ, Li J, Peterson AT, Graham CH, Guisan A, Nceas Predicting Species Distributions Working Group (2008) Effects of sample size on the performance of species distribution models. Diversity and Distributions, 14, 763–773.
- Zhang J, Nielsen SE, Chen Y, Georges D, Qin Y, Wang S, Svenning JC, Thuiller W (2017) Extinction risk of North American seed plants elevated by climate and land-use change. Journal of Applied Ecology, 54, 303–312.

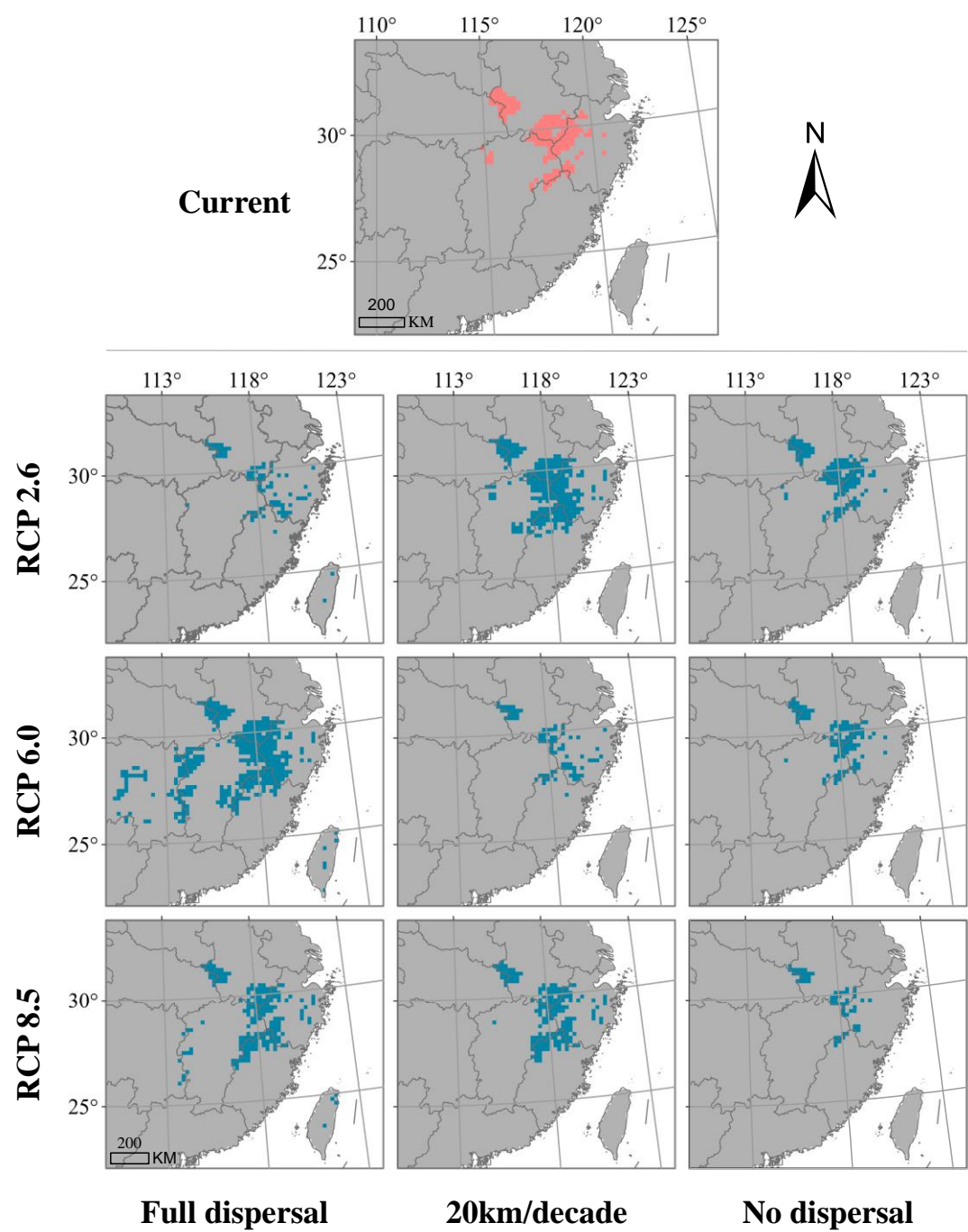
(责任编辑: 严岳鸿 责任编辑: 黄祥忠)

## 附录 Supplementary Material

附录1 锐角枫(*Acer acutum*)在当前与未来不同气候变化和扩情情景下的分布情况

Appendix 1 The distribution area of *Acer acutum* under current and future climate and dispersal scenarios

<https://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2021459-1.pdf>



附录1 锐角枫(*Acer acutum*)在当前与未来不同气候变化和扩情情景下的分布情况  
Appendix 1 The distribution area of *Acer acutum* under current and future climate and dispersal scenarios