

# 小叶栎分布格局对末次盛冰期以来气候变化的响应

李 垚 张兴旺 方炎明\*

南京林业大学南方现代林业协同创新中心, 南京 210037; 南京林业大学生物与环境学院, 南京 210037

**摘 要** 小叶栎(*Quercus chenii*)是华东植物区系的代表树种, 具有很高的生态、经济价值。为重建冰期以来小叶栎地理分布格局的变迁历史、了解环境因子对潜在地理分布的制约机制, 为小叶栎种质资源保护和管理提供科学依据, 该研究基于55条分布记录和8个环境变量, 利用MaxEnt模型模拟小叶栎在末次盛冰期、全新世中期、现代和2070年(温室气体排放情景为典型浓度目标8.5)的潜在分布区, 利用多元环境相似度和最不相似变量分析探讨气候变迁过程中环境异常区域和引起潜在地理分布改变的关键因素, 综合应用贡献率及置换重要值比较、Jackknife检验评估制约现代地理分布的主要因子, 采用响应曲线确定环境变量的适宜区间。研究结果表明: MaxEnt模型的预测准确度极高, 受试者工作特征曲线下的面积(AUC值)达 $0.986\ 9 \pm 0.004\ 5$ ; 现代高度适宜区在安徽南部、浙江西部、江西东北部和湖北东部; 影响小叶栎地理分布的主要气候因子为气温和降水量, 气温更重要; 最干季平均气温可能是制约小叶栎向北分布的关键因素; 末次盛冰期时, 小叶栎高度适宜区位于东海大陆架内; 全新世中期适宜分布区轮廓已与现代近似; 2070年适宜分布区向北移, 高度适宜区面积增大, 与末次盛冰期、全新世中期和现代相比, 这一时期的气候异常程度最高。气温季节变化和降水季节变化可能是引起地理分布变迁的重要气候因素。

**关键词** 小叶栎; MaxEnt模型; 末次盛冰期; 气候变化; 分布格局

引用格式: 李垚, 张兴旺, 方炎明 (2016). 小叶栎分布格局对末次盛冰期以来气候变化的响应. 植物生态学报, 40, 1164–1178. doi: 10.17521/cjpe.2016.0032

## Responses of the distribution pattern of *Quercus chenii* to climate change following the Last Glacial Maximum

LI Yao, ZHANG Xing-Wang, and FANG Yan-Ming\*

Co-Innovation Center for the Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; and College of Biology and the Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China

### Abstract

**Aims** *Quercus chenii* is a representative species of the flora in East China, with high ecological and economic values. Here, we aim to simulate the changes in the distribution pattern of this tree species following the Last Glacial Maximum (LGM) and to explore how climatic factors constrain the potential distribution, so as to provide scientific basis for protection and management of the germplasm resources in *Q. chenii*.

**Methods** Based on 55 presence point records and data on eight environmental variables, we simulated the potential distribution of *Q. chenii* during the Last Glacial Maximum, mid-Holocene, present and the year 2070 (the scenario of greenhouse gas emission is Representative Concentration Pathway 8.5) with MaxEnt model. The novel climate area and main factors influencing the changes in distribution pattern were evaluated by multivariate environmental similarity surface analysis and the most dissimilar variable analysis. The importance of environmental variables was evaluated by percent contribution, permutation importance and Jackknife test. Response curves were used to estimate the suitable value range of each variable.

**Important findings** The accuracy of MaxEnt model is very high, as indicated by the value of the area under the receiver operator characteristic curve of  $0.986\ 9 \pm 0.004\ 5$ . The highly suitable region for the present distribution covers southern Anhui, western Zhejiang, northeastern Jiangxi and eastern Hubei. The main factors affecting the potential distribution of *Q. chenii* are temperature and precipitation, with the former being more important. Mean temperature of the driest quarter is likely the main factor restricting *Q. chenii* growing in the north. During the LGM, the East China Sea Shelf occurs as the highly suitable region for the distribution of *Q. chenii*. In the mid-Holocene, the outline of the suitable area for the distribution of *Q. chenii* is similar to the present. The potential distribution region will likely move northward and experience an area expansion under the climate condition

收稿日期Received: 2016-01-17 接受日期Accepted: 2016-05-09

\* 通信作者Author for correspondence (E-mail: jwu4@njfu.edu.cn)

in 2070. At that time, climate anomaly will also be most severe compared to the LGM, mid-Holocene and present. Temperature seasonality and precipitation seasonality may be the main climatic factors promoting changes in the distribution pattern of *Q. chenii*.

**Key words** *Quercus chenii*; MaxEnt model; Last Glacial Maximum; climate change; distribution pattern

**Citation:** Li Y, Zhang XW, Fang YM (2016). Responses of the distribution pattern of *Quercus chenii* to climate change following the Last Glacial Maximum. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 40, 1164–1178. doi: 10.17521/cjpe.2016.0032

末次盛冰期以来地球气候系统的剧烈变化改变了全球大部分地区的植被、冰盖体积和海洋表面状况(中国第四纪孢粉数据库小组, 2000), 冰期和间冰期的反复交替对现代生物区系的地理分布格局和遗传结构产生了巨大的影响(Hewitt, 2004)。在末次盛冰期(21 ka BP)全球大降温背景下, 草原大面积向南扩张, 抵达现在的中亚热带北界, 华南热带地区热带植被消失, 演变为亚热带常绿阔叶林(中国第四纪孢粉数据库小组, 2000; 刘金陵和王伟铭, 2004)。中全新世(6 ka BP)是距今最近的一个暖期, 当时我国东部森林生态系统向北推进, 温带落叶阔叶林向北推进约4个纬度(中国第四纪孢粉数据库小组, 2000)。而在未来全球气候持续变暖的情境下, 中国气温升幅在1.6–5.0 °C, 年降水量将增加1.5%–20% (江志红等, 2008)。对某些物种而言, 适宜分布范围可能逐渐减小, 气候变化也成为威胁生物多样性的新因素, 已有证据支持某些物种的灭绝即由此导致(Bellard *et al.*, 2012)。因此, 研究植物分布格局对气候变化的响应对于揭示物种形成、迁移和扩散历史, 提出合理有效的生物多样性保护措施有着重要的理论与实践意义。

MaxEnt模型被广泛地应用于气候变化条件下物种潜在分布区的预测。它基于现代分布记录和环境数据构建物种分布模型, 并可以推广到诸如气候变化等新的情境, 其假设训练数据代表了现有分布区的环境状况, 并且在这种情境下物种处于平衡状态(Elith *et al.*, 2010)。该模型预测的对象非常广泛, 狭义的“物种”包括濒危物种(Kumar & Stohlgren, 2009; Matyukhina *et al.*, 2015)、入侵物种(Padalia *et al.*, 2014; 张熙骛等, 2014)和传染病原(Feidas *et al.*, 2014)等, 广义的“物种”则涉及珍稀动物的栖息地或生境(侯宁等, 2014; 颜文博等, 2015)、梯田等农业景观(Galletti *et al.*, 2013)和森林破坏(Souza & Marco, 2014)等生态退化过程, 预测尺度包括小尺度、中尺度或大尺度, 在样本量很小(<20)的情况下也有良好

效果(Kumar & Stohlgren, 2009)。值得注意的是, 在气候数据完整的情况下, MaxEnt模型还可投射到史前地质时期(末次间冰期、末次盛冰期和全新世中期等), 在谱系地理学研究中提供与遗传学、孢粉学、古生物学证据独立的额外信息。将MaxEnt模型同时应用于冰期和间冰期时, 研究人员可结合ArcGIS软件识别气候变迁过程中生态稳定性高的地区, 推断物种避难所位置(Chan *et al.*, 2011), 也可将物种分布模型转换为生境阻力模型, 运用最小成本路径法等算法识别物种迁移路线(于海彬等, 2014); 当单独应用于冰期时, 可通过识别适宜度较高的地区辅助推断可能的避难所位置(白伟宁和张大勇, 2014), 进而从生态位模型角度对分子谱系地理学研究结论给予佐证(Chen *et al.*, 2012; Shi *et al.*, 2014; Wang *et al.*, 2015; Zhang *et al.*, 2015)。因此, MaxEnt模型在进化生物学、谱系地理学、保护生物学和生态学等领域有着广泛的应用。

小叶栎(*Quercus chenii*)为中国特有的落叶栎类、华东植物区系代表树种之一(祁承经, 1984), 是研究地方区系形成、演化历史的重要材料。其生态、经济价值也很高, 木材密度大于 $0.8 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , 抗压强度和硬度高, 是优良的硬质用材树种(汪师孟和夏美君, 1986); 根系发达, 萌芽力强, 耐干旱瘠薄, 是优良的水土保持树种; 生物量大, 燃烧热值高, 是优良的薪炭林树种(北京林业大学落叶栎树研究组, 1988; 王连珍等, 2013)。科学营建小叶栎林对于调整我国单一的人工林林种结构、提高人工林生物多样性、促进林业可持续发展有着重要意义。但目前关于小叶栎的研究报道尚少, 多集中于地理分布(王良民等, 1985)、木材特性(汪师孟和夏美君, 1986)和繁殖技术(胡婉仪和涂炳坤, 1992)等, 以往学者曾使用Bioclim模型预测其潜在分布区(田佳倩, 2007), 但该模型与MaxEnt相比性能较差(Elith *et al.*, 2006; Tsoar *et al.*, 2007), 且过去和未来气候变迁背景下小叶栎分布格局如何变化? 限制地理分布的主要气

候因子是什么? 这些因子如何引起地理分布改变? 这些问题尚未解决, 依旧制约着小叶栎种质资源保护、管理工作的科学开展。

本研究基于MaxEnt模型预测小叶栎在末次盛冰期、全新世中期、现代(1950–2000年)和2070年的潜在分布区, 利用多元环境相似度面(multivariate environmental similarity surface, MESS)和最不相似变量(the most dissimilar variable, MoD)分析探讨气候变迁过程中环境异常区域和引起潜在地理分布改变的关键因素, 综合应用贡献率(percent contribution)及置换重要值(permutation importance)比较、Jackknife检验评估制约现代地理分布的主要因子, 采用响应曲线(response curves)确定环境变量的适宜区间, 以期重建冰期以来小叶栎地理分布格局的变迁历史, 了解环境因子对潜在地理分布的制约机制, 为小叶栎种质资源保护和管理提供科学依据, 也为华东植物区系或麻栎组物种形成演化研究奠定理论基础。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究区域

小叶栎仅产于中国, 为落叶栎类中的中布型(北京林业大学落叶栎树研究组, 1988)或南方广布型(刘茂松和洪必恭, 1999)。其天然分布北界自河南沿伏牛山、桐柏山、大别山直至安徽、江苏南部山丘, 南界为南岭以北的湖南、江西南部低山丘陵, 东界为浙江天目山至福建西部丘陵, 西界为云贵高原东缘的湖南西部山区。小叶栎在华东植物区系常见, 至华中植物区系渐趋不见(吴征镒, 1979), 两区分界线(湖北宜昌至湖南邵阳一线)一带如湖南桃源、道县(吴诗霞等, 2011)有天然分布, 故其分布西界也可认为是华东到华中植物区的过渡带。小叶栎天然分布区的地理坐标范围为111.0°–121.5° E, 25.0°–32.5° N, 考虑到为科学引种提供参考, 以70°–140° E, 17°–57° N为预测区域。

### 1.2 样本数据的搜集与筛选

笔者于2014–2015年对安徽、江苏、浙江、江西、湖南、湖北六省的小叶栎天然居群进行了实地调查, 搜集分布记录16条; 查阅已出版的文献资料, 搜集小叶栎分布记录20条; 检索全球生物多样性信息网络(<http://www.gbif.org>)、中国数字植物标本馆(<http://www.cvh.org.cn>)、教学标本资源共享平台

(<http://mnh.scu.edu.cn/main.aspx>)和中国植物图像库(<http://www.plantphoto.cn/>), 分别搜集小叶栎标本记录34条、232条、287条和59条, 合计648条。参照李焱等(2014)的方法确定标本地理坐标并对全部分布记录进行筛选, 去除人工引种栽培记录, 考虑到气候数据精度为2.5', 为尽量降低群集效应带来的误差, 在每个2.5' × 2.5'网格中只取唯一分布点, 最终得到有效样本55个(附录I)。

### 1.3 环境变量筛选和数据处理

末次盛冰期、全新世中期、现代和未来气候数据均下载自WorldClim数据库(<http://worldclim.org>), 空间分辨率为2.5'。现代气候数据以1950–2000年全球不同气象站的每月气象数据为基础, 在空间分辨率为30"的网格内经插值法生成(Hijmans *et al.*, 2005); 末次盛冰期、全新世中期、2070年气候数据采用通用气候系统模式CCSM4生成, 其中未来温室气体排放情景为典型浓度目标8.5 (RCP 8.5), 该情景假定人口最多、技术革新率较低、能源改善缓慢, 长时间内能源需求较高, 至2100年辐射强迫上升至8.5 W·m<sup>-2</sup>(王绍武等, 2012)。

每个时间段的原始气候数据包括19个生物气候变量, 它们在解释植物生理生态耐受性方面有着良好效果(Hijmans *et al.*, 2005)。利用DIVA-GIS软件提取55个样本点的19个现代气候变量数值, 采用皮尔逊相关系数(*r*)检验气候变量之间的多重共线性(Yang *et al.*, 2013), 在一组相关性很高(*r* > 0.8)的气候变量中, 仅选择一个与物种分布关联紧密或便于模型解释的变量用于模型预测(Kumar & Stohlgren, 2009), 筛选得到8个环境变量(表1)。最终用于模型预测的环境图层数据包括4个时间段的32个文件, 经ArcGIS 10.0软件转换为MaxEnt软件可用的ASCII格式。

### 1.4 模型预测和准确性评价

用MaxEnt 3.3.3k软件(<http://www.cs.princeton.edu/~schapire/maxent>)预测不同时期小叶栎潜在分布区, 重复10次。用交叉验证(cross-validation)方法抽取测试样本。该方法将全部分布记录随机分为10个子集, 每次重复依次使用其中1个子集作为验证集(test set), 剩余9个子集作为训练集(train set), 数据利用度高。软件其余参数保持默认设置。最终输出的ASCII文件是10次重复的平均值, 栅格数值为以逻辑值形式给出的生存概率。将其导入ArcGIS



表1 环境变量及其贡献率和适宜区间

Table 1 Environmental variables and their contributions and suitable value ranges

代码 Code	环境变量 Environmental variable	单位 Unit	贡献率 Percent contribution (%)	置换重要值 Permutation importance (%)	适宜区间 Suitable range
bio9	最干季平均气温 Mean temperature of driest quarter	℃	1.5	51.0	1.0–14.9
bio4	气温季节变化(标准偏差) Temperature seasonality (standard deviation)	℃	23.3	23.0	6.7–9.6
bio18	最暖季降水量 Precipitation of warmest quarter	mm	4.8	12.1	430–830
bio15	降水季节变化(变异系数) Precipitation seasonality (coefficient of variation)	%	15.4	8.2	41.0–66.8
bio1	年平均气温 Annual mean temperature	℃	3.6	3.8	11.9–20.8
bio12	年降水量 Annual precipitation	mm	49.7	1.7	1 050–2 520
bio3	等温性 Isothermality	%	1.6	0.1	21.7–32.7
bio8	最湿季平均气温 Mean temperature of wettest quarter	℃	0.1	0.1	17.1–29.6

10.0软件后采用平均间隔法将适宜度分为5级, 某点的适宜度为该点的逻辑值占整个预测区域内最高逻辑值的百分比, 以最高逻辑值的80%–100%为高度适宜区, 60%–80%为中度适宜区, 40%–60%为一般适宜区, 20%–40%为低度适宜区, 0–20%为不适宜区, 统计各级栅格数量计算面积变化的百分比。

使用受试者工作特征曲线(receiver operator characteristic curves, ROC curves)对模型的准确性进行评价。该曲线以预测结果的每一个值作为可能的判断阈值, 计算得到相应的灵敏度和特异度, 以假阳性率即(1–特异度)为横坐标, 以真阳性率即灵敏度为纵坐标。曲线下的面积(AUC)因不受判断阈值的影响, 可用于不同模型的比较, 因而成为目前公认的诊断试验最佳评价指标(Phillips *et al.*, 2006; 王运生等, 2007)。AUC值的取值范围为[0, 1], 值越大表示模型判断力越强, 衡量标准为0.7–0.8较准确, 0.8–0.9很准确, 0.9–1.0极准确。

### 1.5 多元环境相似度面和最不相似变量分析

以小叶桉现代天然分布区(111.0°–121.5° E, 25.0°–32.5° N)的环境变量为参考图层, 采用多元环境相似度面和最不相似变量分析探讨过去和未来情境中的气候异常区域和引起潜在地理分布改变的关键因素。令 $\min_i$ 和 $\max_i$ 为环境变量 $V_i$ 在参考图层中的最大值和最小值,  $p_i$ 为某一情境中环境变量 $V_i$ 在研究区域内某一点 $P$ 上的值,  $f_i$ 是参考图层中环境变量 $V_i$ 小于 $p_i$ 的点的百分比, 如果 $f_i = 0$ , 那么相似度为100  $(p_i - \min_i) / (\max_i - \min_i)$ ; 如果 $0 < f_i \leq 50$ , 那么相似度为 $2f_i$ ; 如果 $50 < f_i < 100$ , 那么相似度为 $2(100 - f_i)$ ; 如果 $f_i = 100$ , 那么相似度为100  $(\max_i - 100) / (\max_i - \min_i)$ 。最终 $P$ 点的多元相似度为各变量相似度中的最小值, 该变量则为最不相似变量。多元相

似度如果是负值, 表明该点至少有一个变量的数值超出了参考图层范围, 称之为气候异常点, 以红色表示; 如果是正值, 那么以蓝色表示, 得分100表示该点气候完全正常(Elith *et al.*, 2010)。该操作在命令窗口运行maxent.jar文件中的density.tools.Novel工具实现。

### 1.6 环境变量的重要性评估

综合使用贡献率、置换重要值和Jackknife检验来评估环境变量在限制小叶桉现代地理分布格局中的重要性。贡献率依赖于求取最优解的特定途径, 通过逐步修正单一要素的系数来提高增益值, 将增益值增额分配给决定该要素的环境变量, 并将其转化为百分比后给出。在用贡献率评估环境变量的重要性时, 如果存在高相关性变量, 评估结果可能难以反映真实情况。置换重要值与具体算法无关, 仅取决于最终结果, 通过随机置换训练点集(包括存在点和背景点)上环境变量的数值并测定由此导致的训练AUC值降低幅度, 经归一化后以百分比形式给出。Jackknife检验则通过依次使用某一变量或依次排除某一变量来创建一系列新的模型, 比较模型间正则化训练增益(regularized training gain)、测试增益(test gain)和AUC值的差异来评估环境变量的重要性。

### 1.7 响应曲线分析

当模型只使用一个变量运行时, 适宜度随着变量的改变而改变, 以该变量为横坐标, 以适宜度为纵坐标, 得到单变量响应曲线。以每次重复中区域内最高逻辑值的20%作为阈值, 将单变量响应曲线中阈值点对应的变量平均值作为小叶桉适宜生长条件的上下限, 据此确定每一环境变量的适宜范围。当模型使用全部变量运行, 但仅某一变量改变, 其余变

量均取分布点上的平均值时, 得到边缘响应曲线。

## 2 结果

### 2.1 模型的准确性

基于55条分布记录利用MaxEnt模型对小叶栎现代潜在分布区进行预测, 10次重复的训练AUC值的最大值为0.989 6, 最小值为0.988 2, 平均值为0.988 7 ( $\pm 0.000 5$ , 标准偏差), 测试AUC值的最大值为0.994 3, 最小值为0.981 0, 平均值为0.986 9 ( $\pm 0.004 5$ , 标准偏差), 表明模型预测极准确。

### 2.2 现代潜在分布区

55条分布记录的平均逻辑值为0.56, 最高值为0.83 (江西鄱阳), 最低值为0.07 (河南桐柏), 分别属于高度适宜区、中度适宜区、一般适宜区、低度适宜区和不适宜区的分布点比例为32.7%、27.3%、27.3%、9.1%和3.6%。适宜分布区涵盖浙江、江西、湖南大部, 江苏和安徽南部, 湖北西部和南部, 福建北部, 河南南部、广东北部、广西北部少数地区和重庆局部。高度适宜区为安徽南部、浙江西部、江西东北部和湖北东部, 包括黄山、九华山、天目山、怀玉山、大别山南坡、幕阜山北坡和鄱阳湖平

原等。此外, 朝鲜半岛南端和日本西端局部地区也可能适宜小叶栎生存(图1C)。

### 2.3 过去和未来潜在分布区

在末次盛冰期, 小叶栎高度适宜区显著东移, 位于江苏、浙江以东的东海大陆架内; 大陆架边缘为中度至低度适宜区; 现代适宜区在当时适宜度降低, 原有高度适宜区变为中度乃至不适宜区(图1A)。在全新世中期, 除湖南西南部适宜度降低和现代适宜区北界外侧适宜度略有升高外, 小叶栎潜在分布区轮廓与现代近似; 高度适宜区分散于湖北西部、江西北部、浙江西部和湖南局部; 中度适宜区面积比现代增加近54% (图1B)。在2070年, 小叶栎潜在分布区将整体北移; 高度适宜区则向东、东北、西南方向扩张, 面积增加64%, 江西东北部变为中度乃至不适宜区; 中度适宜区向北、东、西南方向扩张, 面积增加138% (图1D)。

### 2.4 多元环境相似度面和最不相似变量分析

在末次盛冰期、全新世中期和2070年, 小叶栎55个现代分布点的平均多元相似度分别为-0.72、2.37和-3.92, 多元相似度为负值的点比例分别为31%、22%和47%, 表明2070年气候异常程度最高,

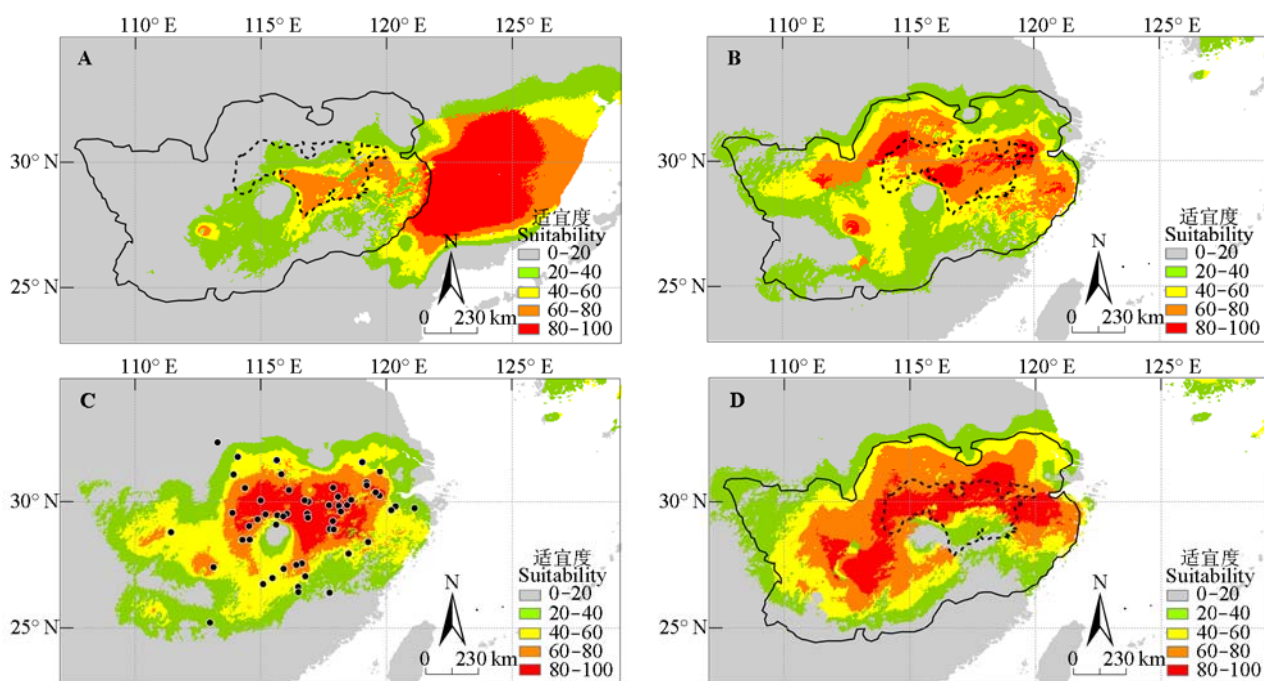


图1 小叶栎现代分布点(黑色点)和MaxEnt模型预测的不同历史时期潜在分布区。实线代表现代适宜区轮廓, 虚线代表现代高度适宜区轮廓。A, 末次盛冰期。B, 全新世中期。C, 现代。D, 2070年。

Fig. 1 Extant occurrence points (black dots) and potential distribution for *Quercus chenii* during different periods predicted by the MaxEnt model. The solid line and dashed line represent the outline of modern suitable area and highly suitable area, respectively. A, Last Glacial Maximum. B, Mid-Holocene. C, Present. D, In 2070.

末次盛冰期次之, 全新世中期气候异常程度最低。在末次盛冰期, 现代适宜区内的主要气候异常区域出现在东北部和南端, 最不相似变量分别为气温季节变化和降水季节变化。在全新世中期, 现代适宜区内的主要气候异常区出现在北部, 最不相似变量为气温季节变化。在2070年, 现代适宜区内的主要气候异常区出现在北部和南部, 最不相似变量分别为最湿季平均气温和降水季节变化(图2)。

## 2.5 环境变量的重要性

表1表明, 贡献率排前三位的变量为年降水量、气温季节变化和降水季节变化, 累积值为88.4%;

置换重要值排前三位的变量为最干季平均气温、气温季节变化和最暖季降水量, 累积值为86.1%。图3表明, 仅使用单独变量时, 正则化训练增益和测试增益最高的3个变量依次为最干季平均气温、年平均气温和最暖季降水量, AUC值最高的3个变量依次为最干季平均气温、气温季节变化和年平均气温, 表明这些变量包含更多的有效信息; 使用除此变量以外的其他变量时, 正则化训练增益、测试增益和AUC值降低最多的3个变量依次为气温季节变化、降水季节变化和最暖季降水量, 表明这些变量包含更多其他变量所不具有的信息。综合来看, 影响小

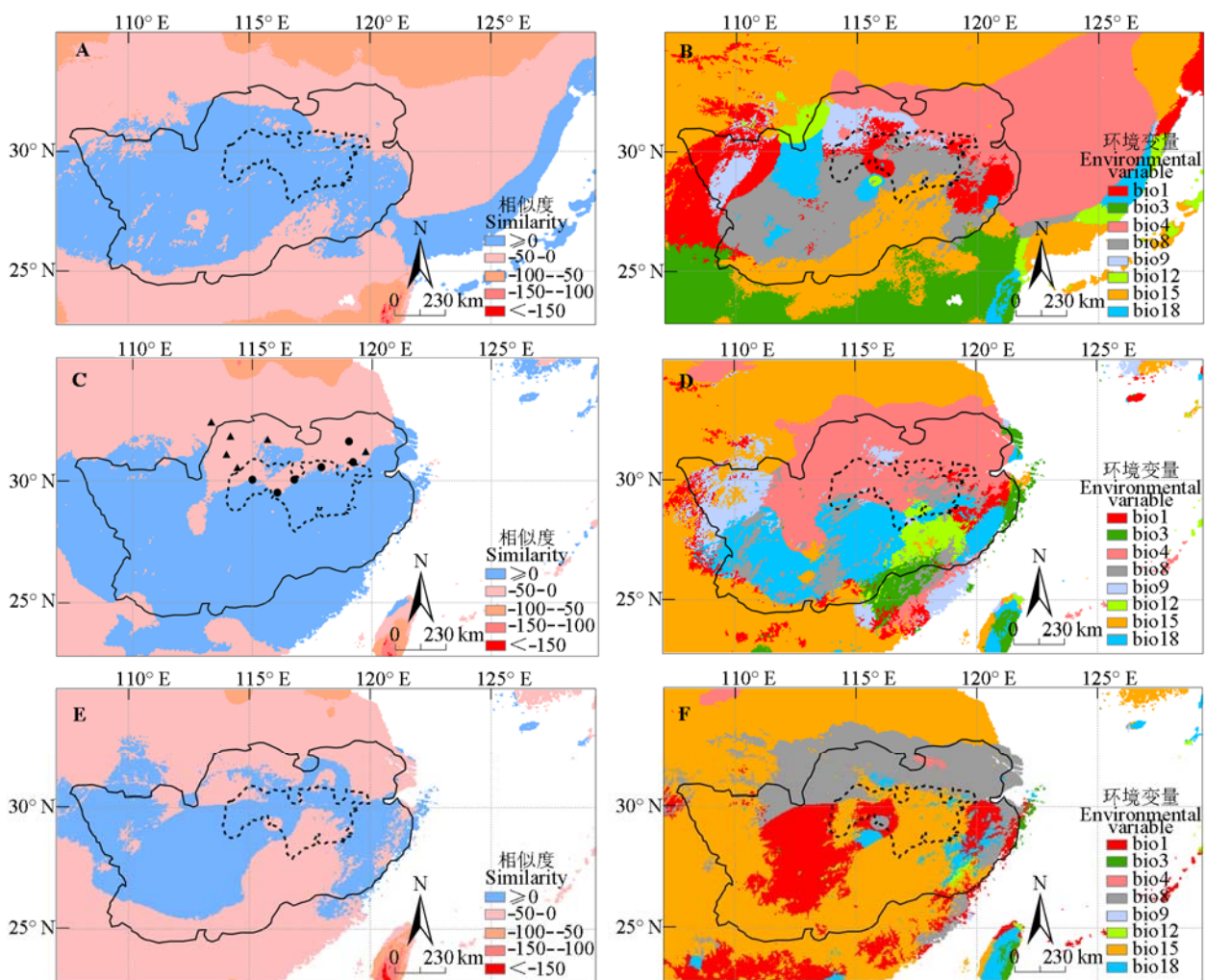


图2 小叶桤不同时期的多元环境相似度面(MESS)和最不相似变量(MoD)。实线代表现代适宜区轮廓, 虚线代表现代高度适宜区轮廓。图2C中, 圆形代表适宜度比现代低的气候异常点, 三角形代表适宜度比现代高的气候异常点。A, 末次盛冰期MESS。B, 末次盛冰期MoD。C, 全新世中期MESS。D, 全新世中期MoD。E, 2070年MESS。F, 2070年MoD。环境变量代码同表1。

**Fig. 2** Multivariate environmental similarity surface (MESS) and the most dissimilar (MoD) variable analysis for *Quercus chenii* during different periods. The solid line and dashed line represent the outline of modern suitable area and highly suitable area, respectively. In Fig. 2C, the circles represent novel climate points with suitability lower than present, and the triangles represent novel climate points with suitability higher than present. A, MESS for the Last Glacial Maximum (LGM). B, MoD for LGM. C, MESS for mid-Holocene. D, MoD for mid-Holocene. E, MESS for 2070. F, MoD for 2070. The codes of environmental variables see Table 1.



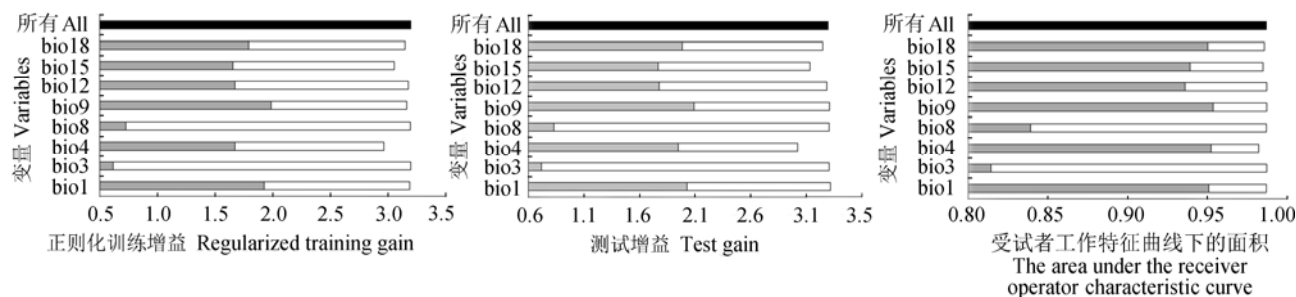


图3 环境变量重要性的Jackknife检验。灰色、白色、黑色条形图分别表示使用单独变量、除该变量外的所有变量和所有变量用于模型预测。变量代码同表1。

Fig. 3 Jackknife test of the importance of variables. Grey, white, and black bars represent running the MaxEnt model with only the variable, without the variable and with all variables, respectively. The codes of variables see Table 1.

叶栎现代地理分布的主要因子为气温因子(气温季节变化、最干季平均气温和年平均气温)和降水因子(最暖季降水量、降水季节变化和年降水量)。

## 2.6 响应曲线分析

8个变量的边缘响应曲线和单变量响应曲线见附录II和附录III。单变量响应曲线均呈单峰型,即随着变量增大,适宜度不断升高,当达到最高值后,适宜度又不断降低,小叶栎的适宜生长条件如表1所示。

## 3 讨论和结论

### 3.1 四个时期潜在分布区的变化

MaxEnt预测小叶栎在末次盛冰期的高度适宜区位于东海大陆架。当时东海海平面下降120–130 m左右,绝大部分大陆架露出海面。许多学者通过冲绳海槽钻孔孢粉分析来揭示该地区的古植被和古环境状况。徐红艳等(2009)研究显示冰期时大陆架上发育了以蒿属(*Artemisia*)为主的草地植被,周边可能存在包括落叶栎在内的稀疏落叶阔叶林。郑卓等(2013)研究表明末次盛冰期时东海大陆架可能是巨大的长江冲积平原,但并非由半干旱地带性草原所覆盖,而是以泛滥平原草地和隐域性湿地为主,在丘陵区有亚热带-温带林木的分布。而在中国东部,末次盛冰期时草原南界已到达长江三角洲以南和浙江北部(刘金陵和王伟铭, 2004),江汉平原阔叶类栎属虽然一直存在,但有所减少(李文漪, 1998),太湖地区2.1–1.5万年前为森林草原-草原或干草原植被(方炎明等, 2011),所以在末次盛冰期东海陆架有可能成为小叶栎的高度适生区。至全新世中期气候趋于暖湿,在9 ka BP中国南方植被与气候就有可能接近现代,亚热带落叶阔叶林迅速发展(李文漪,

1998),孢粉证据表明,巢湖地区在8 250–7 550年前栎属达到极盛,并于6 050–3 750年前经历波动后重新恢复(Chen *et al.*, 2009),鄱阳湖地区在全新世中期发展了以栎属(*Quercus*)、锥属(*Castanopsis*)和枫香树属(*Liquidambar*)为主的森林(Jiang & Piperno, 1999),所以小叶栎也可能在该时期恢复生长。

田佳倩(2007)曾使用Bioclim模型预测小叶栎的现代潜在分布,揭示其核心分布区为长江中下游地区,现代分布格局相对稳定,本文结果与其一致。此外,本文作者还指出在种源传播不受阻碍的情况下,小叶栎有可能向贵州、重庆以及四川东部等潜在边缘分布区扩展。在未来温室气体排放情景为RCP 8.5时,MaxEnt预测小叶栎潜在分布区整体北移,面积扩大。这是因为作为一种喜暖湿树种,未来气温和降水的增加可能为其提供了更适宜的生长环境。相关研究也表明蒙古扁桃(*Amygdalus mongolica*)在2020年、2050年和2080年的潜在分布面积分别是当前分布面积的176%、137%和142% (马松梅等, 2014),马尾松分布区将逐渐向北迁移且面积将逐渐增加(张雷等, 2011)。但预测植物潜在分布还需结合土壤、地形、植被和竞争者等因素,综合生物与非生物因子,才能有效地揭示小叶栎的未来潜在适宜区。

### 3.2 气候因子对现代地理分布的制约

麻栎(*Quercus acutissima*)、栓皮栎(*Q. variabilis*)与小叶栎同属栎属麻栎组,但前两者均为东亚广布型,而小叶栎分布狭窄,表明小叶栎与麻栎和栓皮栎的生态适应性有显著区别。MaxEnt分析结果显示气温和降水因子共同限制小叶栎潜在地理分布格局,在本研究的8种评估途径中气温因子重要性列入第一位7次,第二位5次,而降水因子列入第一位

1次, 第二位3次, 所以相对来说气温因子比降水因子影响更大。田佳倩(2007)曾对16种落叶栎的水热指标进行主成分分析, 也发现热量(气温)是在大尺度上决定落叶栎类地理分布的首要气候因子, 水分(降水)次之, 本文结论与之一致。

置换重要值和仅使用单独变量的Jackknife检验均提示最干季平均气温是影响小叶栎潜在地理分布的首要因素, 相关分析表明最干季平均气温与最冷季平均气温具有极显著相关性, 相关系数为0.71 ( $p < 0.01$ ), 两者均可指示冬季陆地的寒冷程度。田佳倩(2007)同样发现寒冷指数和最冷月最低气温在落叶栎类南方广布型种的第一主成分中具有较高的因子载荷。综合结果说明冬季低温可能是制约小叶栎向北扩散的关键因子, 低温限制了小叶栎的种子萌发或生长季长度, 寒冷逆境也对其耐寒能力提出了严峻的考验, 最终导致其在北方地区难以正常生长发育。在我国东部, 从热带、亚热带到温带气温变化逐渐剧烈, 以最高逻辑值的20%为阈值时, 气温季节变化(标准差)适宜区间为6.7–9.6。接近于中亚热带或北亚热带, 表明气温季节变化处于中等水平时适宜小叶栎生长。

MaxEnt分析结果还显示年降水量的贡献率最高, 而降水季节变化包含了较多其他变量所不具有的信息; 基于倪健和宋永昌(1998)的方法计算得到小叶栎的温暖指数(WI)为148, 湿润指数(HI)为10, 属于低中温湿润型(WI 140–160; HI 9–12), 同类树种大多分布于我国东部湿润常绿阔叶林中部和北部亚热带。这说明虽然气温在制约小叶栎分布方面起主要作用, 但降水因子也不能忽视。

### 3.3 气候因子与地理分布变迁的关联

2070年气候异常程度最高, 最湿季平均气温、年平均气温成为湖南东部、湖北东部、安徽中部、浙江中部、江苏南部的最不相似变量, 与此同时, 这些区域内的适宜度普遍升高, 以致高度适宜区面积增加64%, 中度适宜区面积增加138%, 说明未来气温的升高可能有利于小叶栎分布区的扩大, 年平均气温的边缘响应曲线(附录II)也表明, 随着气温的升高, 适宜度不断升高。末次盛冰期气候异常程度中等, 多种因素的改变导致现代分布区的适宜度普遍降低, 其中北部主要与气温季节变化有关, 中部主要与年平均气温和最湿季平均气温有关, 南部主要与降水季节变化有关。全新世中期气候异常程度最

低, 北部主要受气温季节变化影响, 而南部主要受最暖季降水影响。总体来看, 现代分布区北部和南部的适宜度变化分别与气温、降水因子关系更密切。

但是, 气候因子并非相互独立地影响适宜度。多元环境相似性面和最不相似变量分析表明, 在末次盛冰期、全新世中期和2070年, 现代适宜区内气候异常的关键因子是气温季节变化、降水季节变化和最湿季平均气温。以气温季节变化为例, 其边缘响应曲线(附录II)表明, 当取值较低或较高时, 该变量不会影响适宜度, 而在一定范围内, 随着取值的增加, 适宜度不断升高。但在实际情况中, 如在全新世中期, 现代适宜区北部6个气候异常分布点气温季节变化平均升高9.2%, 适宜度也平均升高33.2%, 而另外6个气候异常分布点气温季节变化升高9.0%, 适宜度却下降20.3%, 说明小叶栎地理分布变迁是多因子综合作用的结果, 主导因子的作用效果受其他因子影响。

### 3.4 结论

小叶栎有可能在麻栎组植物起源后扩散到现在华东植物区系时分化形成, 末次盛冰期时主要集中于东海大陆架上的落叶阔叶林中, 随着后期气候转暖和海平面上升, 逐步退缩至中国南方, 形成麻栎与其特有衍生种小叶栎共生的分布格局。气温因子和降水因子共同影响小叶栎现代地理分布, 最干季平均气温制约着小叶栎向北分布, 未来气候变暖可能引起其适宜区扩张。气温季节变化和降水季节变化代表着水热分布格局的改变, 小叶栎地理分布变迁是多因素综合作用的结果。

**基金项目** 国家自然科学基金(31370666)、江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)和江苏省研究生培养创新工程项目(KYLX15\_0922)。

### 参考文献

- Bai WN, Zhang DY (2014). Current status and future directions in plant phylogeography. *Chinese Bulletin of Life Sciences*, 26, 125–136. (in Chinese with English abstract) [白伟宁, 张大勇 (2014). 植物亲缘地理学的研究现状与发展趋势. *生命科学*, 26, 125–136.]
- Bellard C, Bertelsmeier C, Leadley P, Thuiller W, Courchamp F (2012). Impacts of climate change on the future of biodiversity. *Ecology Letters*, 15, 365–377.
- Chan LM, Brown JL, Yoder AD (2011). Integrating statistical genetic and geospatial methods brings new power to phylogeography. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 59,



- 523–537.
- Chen DM, Zhang XX, Kang HZ, Sun X, Yin S, Du HM, Yamana N, Gapare W, Wu HX, Liu CJ (2012). Phylogeography of *Quercus variabilis* based on chloroplast DNA sequence in East Asia: Multiple glacial refugia and mainland-migrated island populations. *PLOS ONE*, 7, e47268. doi:10.1371/journal.pone.0047268.
- Chen W, Wang WM, Dai XR (2009). Holocene vegetation history with implications of human impact in the Lake Chaohu area, Anhui Province, East China. *Vegetation History & Archaeobotany*, 18, 137–146.
- Elith J, Graham CH, Anderson RP, Dudík M, Ferrier S, Guisan A, Hijmans RJ, Huettmann F, Leathwick JR, Lehmann A, Li J, Lohmann LG, Loiselle BA, Manion G, Moritz C, Nakamura M, Nakazawa Y, Overton JM, Peterson AT, Phillips SJ, Richardson KS, Scachetti-Pereira R, Schapire RE, Soberón J, Williams S, Wisz MS, Zimmermann NE (2006). Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography*, 29, 129–151.
- Elith J, Kearney M, Phillips S (2010). The art of modelling range-shifting species. *Methods in Ecology and Evolution*, 1, 330–342.
- Fang YM, Wang T, Zhang JC (2011). Analysis of quaternary vegetation changes along the Beijing-Hangzhou Grand Canal. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences)*, 35, 109–115. (in Chinese with English abstract) [方炎明, 王挺, 张金池 (2011). 京杭大运河沿线第四纪植被变迁分析. 南京林业大学学报·自然科学版, 35, 109–115.]
- Feidas H, Kouam MK, Kantzoura V, Theodoropoulos G (2014). Global geographic distribution of *Trichinella* species and genotypes. *Infection, Genetics and Evolution*, 26, 255–266.
- Galletti CS, Ridder E, Falconer SE, Fall PL (2013). Maxent modeling of ancient and modern agricultural terraces in the Troodos foothills, Cyprus. *Applied Geography*, 39, 46–56.
- Hewitt GM (2004). Genetic consequences of climatic oscillations in the Quaternary. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 359, 183–195.
- Hijmans RJ, Cameron SE, Parra JL, Jones PG, Jarvis A (2005). Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 25, 1965–1978.
- Hou N, Dai Q, Ran JH, Jiao YY, Cheng Y, Zhao C (2014). A corridor design for the giant panda in the Niba Mountain of China. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 20, 1039–1045. (in Chinese with English abstract) [侯宁, 戴强, 冉江洪, 焦迎迎, 程勇, 赵成 (2014). 相岭山系泥巴山大熊猫生境廊道设计. 应用与环境生物学报, 20, 1039–1045.]
- Hu WY, Tu BK (1992). Research on cutting propagation of *Quercus variabilis*, *Quercus acutissima*, *Quercus chenii*, *Castanopsis sclerophylla* and *Lithocarpus glaber*. *Hubei Forestry Science and Technology*, (2), 35–36. (in Chinese) [胡婉仪, 涂炳坤 (1992). 栓皮栎、麻栎、小叶栎、苦槠、石栎扦插繁殖简报. 湖北林业科技, (2), 35–36.]
- Jiang Q, Piperno DR (1999). Environmental and archaeological implications of a late quaternary palynological sequence, Poyang Lake, Southern China. *Quaternary Research*, 52, 250–258.
- Jiang ZH, Zhang X, Wang J (2008). Projection of climate change in China in the 21st century by IPCC-AR4 Models. *Geographical Research*, 27, 787–799. (in Chinese with English abstract) [江志红, 张霞, 王冀 (2008). IPCC-AR4模式对中国21世纪气候变化的情景预估. 地理研究, 27, 787–799.]
- Kumar S, Stohlgren TJ (2009). Maxent modeling for predicting suitable habitat for threatened and endangered tree *Canacomyrica monticola* in New Caledonia. *Journal of Ecology and Natural Environment*, 1(4), 94–98.
- Li WY (1998). *Vegetation and Environment of China During the Quaternary*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [李文漪 (1998). 中国第四纪植被与环境. 科学出版社, 北京.]
- Li Y, Zhang XW, Fang YM (2014). Predicting the impact of global warming on the geographical distribution pattern of *Quercus variabilis* in China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 25, 3381–3389. (in Chinese with English abstract) [李珪, 张兴旺, 方炎明 (2014). 气候变暖对中国栓皮栎地理分布格局影响的预测. 应用生态学报, 25, 3381–3389.]
- Liu JL, Wang WM (2004). A discussion on the vegetation types during LGM time in South China. *Quaternary Sciences*, 24, 213–216. (in Chinese with English abstract) [刘金陵, 王伟铭 (2004). 关于华南地区末次冰盛期植被类型的讨论. 第四纪研究, 24, 213–216.]
- Liu MS, Hong BG (1999). The analysis of distribution pattern of *Fagaceae* in China. *Journal of Nanjing Forestry University*, 23(5), 18–22. (in Chinese with English abstract) [刘茂松, 洪必恭 (1999). 中国壳斗科的分布格局类型分析. 南京林业大学学报, 23(5), 18–22.]
- Ma SM, Nie YB, Geng QL, Wang RX (2014). Impact of climate change on suitable distribution range and spatial pattern in *Amygdalu smongolica*. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 38, 262–269. (in Chinese with English abstract) [马松梅, 聂迎彬, 耿庆龙, 王荣学 (2014). 气候变化对蒙古扁桃适宜分布范围和空间格局的影响. 植物生态学报, 38, 262–269.]
- Matyukhina DS, Miquelle DG, Murzin AA, Pikunov DG, Fomenko PV, Aramilev VV, Litvinov MN, Salkina GP, Serdyodkin IV, Nikolaev IG, Kostyria AV, Gaponov VV, Yudin VG, Dunishenko YM, Smirnov EN, Korkishko VG, Marino J (2015). Assessing the influence of environmental

- parameters on Amur tiger distribution in the Russian far east using a MaxEnt modeling approach. *Achievements in the Life Sciences*, 8(2), 95–100.
- Members of China Quaternary Pollen Data Base (2000). Pollen-based biome reconstruction at Middle Holocene (6ka BP) and Last Glacial Maximum (18 ka BP) in China. *Acta Botanica Sinica*, 42, 1201–1209. (in Chinese with English abstract) [中国第四纪孢粉数据库小组 (2000). 中国中全新世(6 ka BP)和末次盛冰期(18 ka BP)生物群区的重建. *植物学报*, 42, 1201–1209.]
- Ni J, Song CY (1998). Relationship between Kira's indexes and distribution of dominants and companions of subtropical evergreen broadleaved forest in China. *Acta Ecologica Sinica*, 18, 248–262. (in Chinese with English abstract) [倪健, 宋永昌 (1998). 中国亚热带常绿阔叶林优势种及常见种的分布与Kira指标的关系. *生态学报*, 18, 248–262.]
- Padalia H, Srivastava V, Kushwaha SPS (2014). Modeling potential invasion range of alien invasive species, *Hyptis suaveolens* (L.) Poit. in India: Comparison of MaxEnt and GARP. *Ecological Informatics*, 22, 36–43.
- Phillips SJ, Anderson RP, Schapire RE (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190, 231–259.
- Qi CJ (1984). The fundamental pattern of the geographic distribution of vegetation in Hunan Province. *Acta Botanica Yunnanica*, 6, 403–416. (in Chinese with English abstract) [祁承经(1984). 湖南植被地理分布的基本规律. *云南植物研究*, 6, 403–416.]
- Shi MM, Michalski SG, Erik W, Chen XY, Durka W (2014). Phylogeography of a widespread Asian subtropical tree: Genetic east-west differentiation and climate envelope modelling suggest multiple glacial refugia. *Journal of Biogeography*, 41, 1710–1720.
- Souza RAD, Marco PD (2014). The use of species distribution models to predict the spatial distribution of deforestation in the western Brazilian Amazon. *Ecological Modelling*, 291, 250–259.
- The Research Group of the Deciduous Oaks (1988). A synoptic summary of the researches on Chinese deciduous oaks. *Journal of Beijing Forestry University*, (3), 77–83. (in Chinese with English abstract) [北京林业大学落叶栎树研究组 (1988). 中国落叶栎树的综合研究. *北京林业大学学报*, (3), 77–83.]
- Tian JQ (2007). *Differentiated Distribution of Deciduous Quercus spp. and Controlling Climatic Factors in China*. Master degree dissertation, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing. (in Chinese) [田佳倩 (2007). 落叶栎树在中国的地理替代分布及其气候制约. 硕士学位论文, 中国科学院植物研究所, 北京.]
- Tsoar A, Allouche O, Steinitz O, Rotem D, Kadmon R (2007). A comparative evaluation of presence-only methods for modelling species distribution. *Diversity and Distributions*, 13, 397–405.
- Wang LM, Ren XW, Liu YQ (1985). Geographic distribution of deciduous oaks in China. *Journal of Beijing Forestry University*, (2), 57–69. (in Chinese with English abstract) [王良民, 任宪威, 刘一樵 (1985). 我国落叶栎的地理分布. *北京林业大学学报*, (2), 57–69.]
- Wang LZ, Lang QL, Xia XH, Sun J, Gao W, Li LF (2013). Research advances in oak germplasm resources. *Science of Sericulture*, 39, 805–811. (in Chinese with English abstract) [王连珍, 郎庆龙, 夏兴宏, 孙娟, 高伟, 李立峰 (2013). 栎树种质资源研究进展. *蚕业科学*, 39, 805–811.]
- Wang SM, Xia MJ (1986). Wood structure and some physical-mechanical properties of four Chinese oaks. *Journal of Beijing Forestry University*, (1), 53–61. (in Chinese with English abstract) [汪师孟, 夏美君 (1986). 中国栎属木材的构造及物理-力学性质(三). *北京林业大学学报*, (1), 53–61.]
- Wang SW, Luo Y, Zhao ZC, Wen XY, Huang JB (2012). New generation of scenarios of greenhouse gas emission. *Advances in Climate Change Research*, 8, 305–307. (in Chinese with English abstract) [王绍武, 罗勇, 赵宗慈, 闻新宇, 黄建斌 (2012). 新一代温室气体排放情景. *气候变化研究进展*, 8, 305–307.]
- Wang YH, Jiang WM, Comes HP, Hu FS, Qiu YX, Fu CX (2015). Molecular phylogeography and ecological niche modelling of a widespread herbaceous climber, *Tetrastigma hemsleyanum* (Vitaceae): Insights into plio-pleistocene range dynamics of evergreen forest in subtropical China. *New Phytologist*, 206, 852–867.
- Wang YS, Xie BY, Wan FH, Xiao QM, Dai LY (2007). Application of ROC curve analysis in evaluating the performance of alien species' potential distribution models. *Biodiversity Science*, 15, 365–372. (in Chinese with English abstract) [王运生, 谢丙炎, 万方浩, 肖启明, 戴良英 (2007). 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*, 15, 365–372.]
- Wu SX, Tian J, Yu XL, Cao FX (2011). A preliminary study of the natural forest vegetation in the limestone regions of Southern Hunan. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 31(6), 55–64. (in Chinese with English abstract) [吴诗霞, 田径, 喻勋林, 曹福祥 (2011). 湘南石灰岩地区天然林植被初步研究. *中南林业科技大学学报*, 31(6), 55–64.]
- Wu ZY (1979). The regionalization of Chinese flora. *Acta Botanica Yunnanica*, 1(1), 1–20. (in Chinese) [吴征镒 (1979). 论中国植物区系的分区问题. *云南植物研究*, 1, 1–20.]
- Xu HY, Chang FM, Luo YL, Sun XJ (2009). Palaeoenvironmental changes from pollen record in deep sea core PC-1

- from northern Okinawa Trough, East China Sea during the past 24 ka. *Chinese Science Bulletin*, 54, 3117–3126. (in Chinese) [徐红艳, 常凤鸣, 罗运利, 孙湘君 (2009). 冲绳海槽北部PC-1岩芯24 ka BP以来孢粉记录的古环境信息. *科学通报*, 54, 3117–3126.]
- Yan WB, Wang Q, Wang C (2015). Evaluation of potential breeding habitat distribution with Maxent model for crested ibis in the Qinling-Bashan region. *Chinese Journal of Zoology*, 50, 185–193. (in Chinese with English abstract) [颜文博, 王琦, 王超 (2015). 应用Maxent模型分析秦巴地区朱鹮适宜繁殖地的分布. *动物学杂志*, 50, 185–193.]
- Yang XQ, Kushwaha SPS, Saran S, Xu J, Roy PS (2013). Maxent modeling for predicting the potential distribution of medicinal plant, *Justicia adhatoda* L. in Lesser Himalayan foothills. *Ecological Engineering*, 51, 83–87.
- Yu HB, Zhang YL, Li SC, Qi W, Hu ZJ (2014). Predicting the dispersal routes of alpine plant *Pedicularis longiflora* (Orobanchaceae) based on GIS and species distribution models. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 25, 1669–1673. (in Chinese with English abstract) [于海彬, 张懿锂, 李士成, 祁威, 胡忠俊 (2014). 基于GIS和物种分布模型的高山植物长花马先蒿迁移路线模拟. *应用生态学报*, 25, 1669–1673.]
- Zhang L, Liu SR, Sun PS, Wang TL (2011). Comparative evaluation of multiple models of the effects of climate change on the potential distribution of *Pinus massoniana*. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 35, 1091–1105. (in Chinese with English abstract) [张雷, 刘世荣, 孙鹏森, 王同立 (2011). 气候变化对马尾松潜在分布影响预估的多模型比较. *植物生态学报*, 35, 1091–1105.]
- Zhang XA, Sui XY, Lü Z, Chen YF (2014). A prediction of the global habitat of two invasive fishes (*Pseudorasbora parva* and *Carassius auratus*) from East Asia using Maxent. *Biodiversity Science*, 22, 182–188. (in Chinese with English abstract) [张熙鹭, 隋晓云, 吕植, 陈毅峰 (2014). 基于Maxent的两种入侵性鱼类(麦穗鱼和鲫)的全球适生区预测. *生物多样性*, 22, 182–188.]
- Zhang XW, Li Y, Liu CY, Xia T, Zhang Q, Fang YM (2015). Phylogeography of the temperate tree species *Quercus acutissima* in China: Inferences from chloroplast DNA variations. *Biochemical Systematics and Ecology*, 63, 190–197.
- Zheng Z, Huang KY, Deng Y, Cao LL, Yu SH, Suc JP, Berne S, Guichard F (2013). A ~200 ka pollen record from Okinawa Trough: Paleoenvironment reconstruction of glacial-interglacial cycles. *Science China: Earth Sciences*, 43, 1231–1248. (in Chinese) [郑卓, 黄康有, 邓韞, 曹玲珑, 余少华, Suc JP, Berne S, Guichard F (2013). 冲绳海槽200 ka的孢粉记录及冰期-间冰期旋回古环境重建. *中国科学: 地球科学*, 43, 1231–1248.]

责任编辑: 倪 健 责任编辑: 王 薇



植物生态学报官网



微信订阅号  
期刊及学科  
相关信息发布



微信服务号  
稿件状态查询  
全文检索浏览



## 附录I 用于模型预测的小叶桫分布记录

Appendix I Presence point records of *Quercus chenii* for model prediction

序号 Code	居群位置 Location of populations	经度 Longitude	纬度 Latitude	来源 Source
1	安徽省太湖县天华镇 Tianhua Town, Taihu County, Anhui Province	116.13° E	30.45° N	实地调查 Field survey
2	安徽省东至县响岭村 Xiangling Village, Dongzhi County, Anhui Province	116.91° E	30.00° N	CVH PE 00296660
3	安徽省青阳县朱备镇 Zhubei Town, Qingyang County, Anhui Province	117.88° E	30.55° N	CVH NAS 00203812
4	安徽省黄山市焦村镇 Jiaocun Town, Huangshan City, Anhui Province	118.08° E	30.19° N	实地调查 Field survey
5	安徽省祁门县棕里村 Zongli Village, Qimen County, Anhui Province	117.72° E	29.85° N	CVH NAS 00203826
6	安徽省歙县 She County, Anhui Province	118.44° E	29.87° N	CVH NAS 00203796
7	安徽省休宁县齐云山 Qiyun Mountain, Xiuning County, Anhui Province	118.11° E	29.84° N	实地调查 Field survey
8	安徽省休宁县五城镇 Wucheng Town, Xiuning County, Anhui Province	118.19° E	29.61° N	CVH NAS 00203816
9	安徽省金寨县金刚台国家地质公园 Jingangtai National Geopark, Jinzhai County, Anhui Province	115.64° E	31.68° N	Fang, 2012
10	安徽省金寨县天堂寨镇 Tiantangzhai Town, Jinzhai County, Anhui Province	115.82° E	31.15° N	实地调查 Field survey
11	安徽省广德县金龙山 Jinlong Mountain, Guangde County, Anhui Province	119.21° E	30.76° N	CVH NAS 00203814
12	安徽省广德县七里冲 Qilichong, Guangde County, Anhui Province	119.22° E	30.65° N	CVH NAS 00203819
13	安徽省绩溪县华阳镇 Huayang Town, Jixi County, Anhui Province	118.60° E	30.07° N	CVH NAS 00203813
14	福建省浦城县 Pucheng County, Fujian Province	118.50° E	27.94° N	SRSPE 2151C0001H00006202
15	福建省沙县洞天岩 Dongtianyan, Sha County, Fujian Province	117.74° E	26.39° N	CVH PE 00296673
16	福建省泰宁县 Taining County, Fujian Province	115.10° E	26.73° N	CVH PE 00296672
17	河南省桐柏县太白顶 Taibaiding, Tongbai County, Henan Province	113.29° E	32.38° N	SRSPE 2151C0001400004887
18	河南省信阳市鸡公山 Jigong Mountain, Xinyang City, Henan Province	114.09° E	31.81° N	Ye <i>et al.</i> , 2014
19	湖北省大冶市 Daye City, Hubei Province	115.00° E	30.05° N	SRSPE 2151C0001M07001199
20	湖北省武汉市珞珈山 Luojia Hill, Wuhan City, Hubei Province	114.38° E	30.54° N	CVH WUK 0310424
21	湖北省崇阳县桂花林场 Guihua Forest Farm, Chongyang County, Hubei Province	113.88° E	29.55° N	Lü <i>et al.</i> , 2013
22	湖北省孝感市钱家垅 Qianjialong, Xiaogan City, Hubei Province	113.92° E	31.07° N	CVH LBG 00066761
23	湖南省桃源县桃花源 Taohuayuan, Taoyuan County, Hunan Province	111.44° E	28.79° N	实地调查 Field survey
24	湖南省株洲县砖桥乡 Zhuanqiao Township, Zhuzhou County, Hunan Province	113.13° E	27.40° N	实地调查 Field survey
25	湖南省宜章县栗源镇 Liyuan Town, Yizhang County, Hunan Province	112.99° E	25.21° N	实地调查 Field survey
26	江苏省南京市溧水林场 Lishui Forest Farm, Nanjing City, Jiangsu Province	119.04° E	31.60° N	实地调查 Field survey
27	江苏省宜兴市磬山 Qingshan Mountain, Yixing City, Jiangsu Province	119.75° E	31.19° N	CVH NAS 00102536
28	江西省广昌县塘坊乡 Tangfang Township, Guangchang County, Jiangxi Province	116.49° E	26.62° N	CVH LBG 00018225
29	江西省乐安县茅岗村 Maogang Vallige, Le'an County, Jiangxi Province	115.91° E	27.34° N	实地调查 Field survey
30	江西省黎川县河樟村 Hezhang Vallige, Lichuan County, Jiangxi Province	116.78° E	27.04° N	CVH LBG 00018220
31	江西省南城县 Nancheng County, Jiangxi Province	116.64° E	27.56° N	CVH KUN 504150
32	江西省宜黄县 Yihuang County, Jiangxi Province	116.42° E	27.49° N	PPBC 232584
33	江西省石城县丰山乡 Fengshan Township, Shicheng County, Jiangxi Province	116.50° E	26.42° N	CVH LBG 00018202
34	江西省吉水县白沙镇 Baisha Town, Jishui County, Jiangxi Province	115.47° E	26.98° N	实地调查 Field survey
35	江西省九江市庐山区白鹿洞 Bailudong, Lushan District, Jiujiang City, Jiangxi Province	116.05° E	29.52° N	CVH LBG 00018208

doi: 10.17521/cjpe.2016.0032

附录I (续) Appendix I (continued)

序号 Code	居群位置 Location of populations	经度 Longitude	纬度 Latitude	来源 Source
36	江西省九江县岷山乡 Minshan Township, Jiujiang County, Jiangxi Province	115.66° E	29.46° N	CVH HHBG HZ003664
37	江西省彭泽县钱家湾 Qianjiawan, Pengze County, Jiangxi Province	116.75° E	30.05° N	CVH NAS 00203760
38	江西省武宁县鲁溪镇 Luxi Town, Wuning County, Jiangxi Province	115.20° E	29.50° N	实地调查 Field survey
39	江西省武宁县甫田乡 Futian Township, Wuning County, Jiangxi Province	114.88° E	29.30° N	实地调查 Field survey
40	江西省星子县温泉镇 Wenquan Town, Xingzi County, Jiangxi Province	115.90° E	29.42° N	CVH KUN 504149
41	江西省修水县 Xiushui County, Jiangxi Province	114.54° E	29.03° N	CVH NAS 00203795
42	江西省永修县 Yongxiu County, Jiangxi Province	115.62° E	29.09° N	实地调查 Field survey
43	江西省德兴市大茅山 Damao Mountain, Dexing City, Jiangxi Province	117.75° E	28.92° N	CVH LBG 00018216
44	江西省鄱阳县侯岗村 Hougang Village, Poyang County, Jiangxi Province	116.86° E	29.53° N	CVH LBG 00018224
45	江西省鄱阳县千秋河 Qianqiuhe, Poyang County, Jiangxi Province	116.88° E	29.36° N	CVH NAS 00203763
46	江西省宜丰县官山自然保护区 Guanshan Nature Reserve, Yifeng County, Jiangxi Province	114.57° E	28.50° N	CVH LBG 00018217
47	江西省婺源县鹤溪村 Hexi Village, Wuyuan County, Jiangxi Province	117.87° E	29.23° N	实地调查 Field survey
48	江西省玉山县陇首村 Longshou Village, Yushan County, Jiangxi Province	117.91° E	28.90° N	CVH LBG 00018218
49	江西省铜鼓县大汾山 Dawei Mountain, Tonggu County, Jiangxi Province	114.28° E	28.49° N	CVH LBG 00018203
50	浙江省临安市太庙山 Taimiao Mountain, Lin'an City, Zhejiang Province	119.73° E	30.24° N	SRSPE 2151C0001T00066148
51	浙江省临安市指南村 Zhinan Village, Lin'an City, Zhejiang Province	119.57° E	30.36° N	实地调查 Field survey
52	浙江省松阳县香奶山 Xiangnai Mountain, Songyang County, Zhejiang Province	119.28° E	28.40° N	SRSPE 2151C0001S60002828
53	浙江省余姚市四明山 Siming Mountain, Yuyao City, Zhejiang Province	121.12° E	29.74° N	CVH PE 00296654
54	浙江省诸暨市七家龙 Qijialong, Zhuji City, Zhejiang Province	120.37° E	29.81° N	CVH NAS 00203798
55	浙江省诸暨市外陈村 Waichen Village, Zhuji City, Zhejiang Province	120.19° E	29.66° N	CVH PE 00296650

CVH, 中国数字植物标本馆, 其后代码为标本的馆藏条码; PPBC, 中国植物图像库, 其后代码为图片编号; SRSPE, 教学标本资源共享平台, 其后代码为标本的平台资源号。

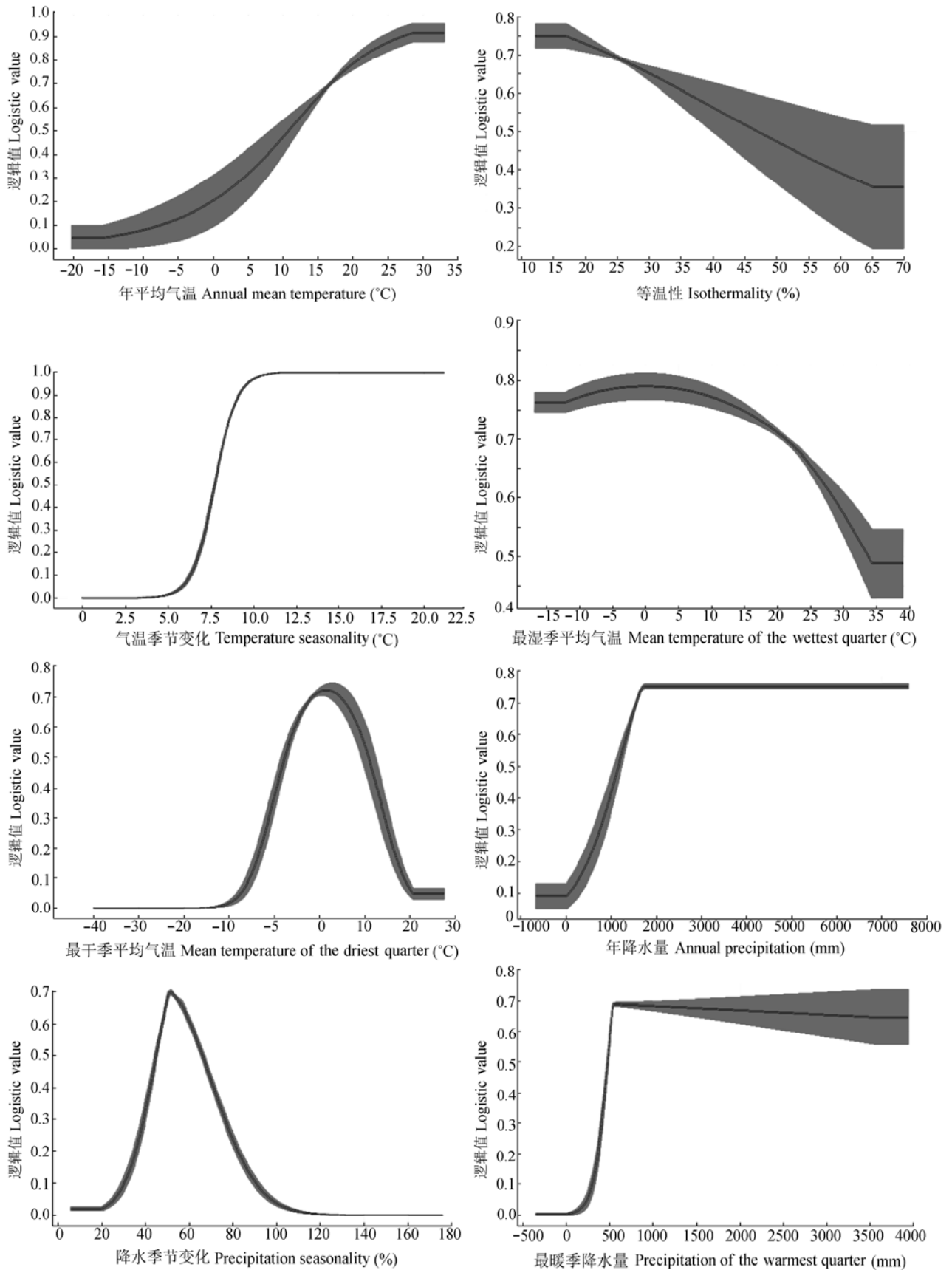
CVH, Chinese Virtual Herbarium, subsequent code represents the specimen bar code in the herbarium; PPBC, Plant Photo Bank of China, subsequent code represents the photo ID; SRSPE, Specimen Resources Sharing Platform for Education, subsequent code represents the resource number in the platform.

参考文献

- Fang TQ (2012). Preliminary report on the regional botanical resources survey of Jingangtai National Geopark in Jinzhai County. *Anhui Forestry Science and Technology*, 38(4), 19–21. (in Chinese with English abstract) [方泰泉 (2012). 金刚台国家地质公园(金寨)区域植物资源调查初报. 安徽林业科技, 38(4), 19–21.]
- Lü Y, Zhang J, Zang H (2013). Analysis of *Castanopsis sclerophylla* mixed stand's natural compose index. *Scientia Silvae Sinicae*, 49(7), 86–90. (in Chinese with English abstract) [吕勇, 张江, 臧颢 (2013). 苦槠混交林自然构成指数分析. 林业科学, 49(7), 86–90.]
- Ye YZ, Li PX, Qu WY (2014). *Science Survey of Henan Jigongshan Nature Reserve*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [叶永忠, 李培学, 瞿文元 (2014). 河南鸡公山国家级自然保护区科学考察集. 科学出版社, 北京.]

附录II 八个环境变量的边缘响应曲线

Appendix II Marginal response curves for eight environmental variables



doi: 10.17521/cjpe.2016.0032



附录III 八个环境变量的单变量响应曲线

Appendix III Single variable response curves for eight environmental variables

