

DOI: 10.5846/stxb202109032495

赵增辉, 余水生, 龚笑飞, 陈智强, 王远飞, 赵家乐, 韦力, 樊晓丽, 林植华. 气候变化对黄腹角雉潜在栖息地的影响. 生态学报, 2023, 43(8): 3157-3167.

Zhao Z H, Yu S S, Gong X F, Chen Z Q, Wang Y F, Zhao J L, Wei L, Fan X L, Lin Z H. Effects of climate change on potential suitable habitat of *Tragopan caboti*. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(8): 3157-3167.

气候变化对黄腹角雉潜在栖息地的影响

赵增辉^{1,3}, 余水生², 龚笑飞², 陈智强³, 王远飞³, 赵家乐¹, 韦力³, 樊晓丽³, 林植华^{3,*}

1 浙江农林大学动物科技学院·动物医学院, 临安 311300

2 遂昌县生态林业发展中心, 遂昌 323300

3 丽水学院生态学院, 丽水 323000

摘要: 气候变化直接影响物种赖以生存的栖息地环境条件, 进而影响物种的分布、数量和存活率。基于优化后最大熵(MaxEnt)模型预测气候变化下黄腹角雉(*Tragopan caboti*)过去、当前、未来时期的潜在栖息地格局。结果表明, 降水量、温度、海拔是栖息地的主要影响因子。当前时期适宜栖息地面积较过去时期下降 24.69%; 未来 2041—2060 年间, 共享社会经济路径(SSP)3-7.0 与 SSP5-8.5 情景下黄腹角雉适宜栖息地面积较当前时期分别下降 55.19%、58.10%。浙江、江西和福建是当前以及未来黄腹角雉核心适宜栖息地, 适宜栖息地面积呈现下降的趋势, 并往高纬度区域移动。

关键词: 黄腹角雉; 最大熵模型(MaxEnt); 气候变化; 潜在栖息地

Effects of climate change on potential suitable habitat of *Tragopan caboti*

ZHAO Zenghui^{1,3}, YU Shuisheng², GONG Xiaofei², CHEN Zhiqiang³, WANG Yuanfei³, ZHAO Jiale¹, WEI Li³, FAN Xiaoli³, LIN Zhihua^{3,*}

1 College of Animal Science and Technology·College of Veterinary Medicine, Zhejiang Agriculture and Forestry University, Lin'an 311300, China

2 Suichang Ecological Forestry Development Center, Suichang 323300, China

3 College of Ecology, Lishui University, Lishui 323000, China

Abstract: Climate change has direct impact on the environment of habitats where different species live, and thereby influences the distribution, population and survival of the species. In this paper, based on the optimized MaxEnt model, the past, present and future patterns of potential habitats for *Tragopan caboti* under climate change are predicted. According to the results, precipitation, temperature and altitude are main influencing factors of their habitats. At present, the area of suitable habitats is reduced by 24.69% than the past. In the future in 2041—2060, under such conditions as Shared Socio-economic Pathways 3-7.0 and Shared Socio-economic Pathways 5-8.5, the area of suitable habitats for *Tragopan caboti* will be 55.19% and 58.10% smaller than the present, respectively. Zhejiang, Jiangxi and Fujian are core suitable habitats for *Tragopan caboti* at present and in the future. The suitable habitats show a declining trend in area and the shift towards higher latitudes.

Key Words: *Tragopan caboti*; MaxEnt; climate change; potential habitat

基金项目: 国家自然科学基金项目(31500329); 生态环境部南京环境科学研究所委托项目(21-12-08); 丽水市重点研发计划项目(2020ZDYF07); 遂昌县林业发展中心委托项目(21-12-01)

收稿日期: 2021-09-03; **网络出版日期:** 2022-12-30

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhlin1015@126.com

全球变暖带来的气候变化直接影响物种赖以生存的栖息地环境条件,例如水热环境、植被状况,进而影响物种的分布、数量和存活率^[1-2]。栖息地适宜环境的改变是当前威胁物种生存的重要因素之一^[3],许多学者通过当前和未来情景的气候数据的分析,认为气候变化下物种适宜栖息地范围将缩小^[1,4]或者扩大^[5-6],使动物向高纬度、高海拔区域扩散^[7-8],而低纬度区域栖息地收缩可能妨碍物种的扩散与交流,导致种群规模下降^[9-10]。珍稀物种栖息地通常相对较小,对栖息环境要求较高,面对气候变化带来的影响更缺乏适应性^[11],了解气候变化对濒危物种潜在栖息地的影响是濒危物种保护的基础^[12]。

不同算法的生态位模型中,最大熵(MaxEnt)模型可通过少量物种分布数据准确推断物种潜在栖息地范围^[13],以及预测未来气候变化影响下物种潜在栖息地格局变化。例如在未来碳排放量加剧情景下,马可波罗盘羊(*Ovis polii*)潜在适宜栖息地面积萎缩近半^[6]、红腹锦鸡(*Chrysolophus pictus*)潜在适宜栖息地缩减并向北和高海拔地区转移^[14]。采用模型预测其潜在栖息地和分布格局,揭示影响潜在适宜栖息地的因素,有利于物种的保护与管理^[15]。

黄腹角雉(*Tragopan caboti*),隶属于鸡形目(Galliformes)雉科(Phasianidae)角雉属(*Tragopan*),是中国特有的国家 I 级重点保护野生动物,《中国脊椎动物红色名录》评级为濒危(EN),分布在浙闽赣湘粤桂六省局部地区^[16-17]。前人对黄腹角雉研究表明,除了飞行能力不足、繁殖力低等自然因素限制了种群发展以外^[18],人为因素干扰导致的栖息地破坏使其生存日益艰难^[19]。本文基于实地红外相机监测以及全球生物多样性交换平台(GBIF)数据,使用优化后 MaxEnt 模型预测黄腹角雉的过去、当前以及未来潜在栖息地的变化格局,主要探讨:(1)影响黄腹角雉栖息地的主要环境因素,(2)气候变化情景下,黄腹角雉适宜栖息地的改变。

1 研究区域与方法

1.1 红外相机布置及信息读取

根据研究区域的具体环境,综合植被类型、动物踪迹、居民目击描述、地形等不同因素,按照样线法布置 Ltlacorn 红外相机,两台相机之间距离不小于 200m^[20]。于 2018 年 5 月至 2021 年 6 月间在浙江遂昌县布设 83 台红外相机,具体为白马山 11 台、千佛山 18 台、九龙山 16 台、牛头山 28 台、湖山 10 台(图 1)。研究区域海拔区间为 529—1414m,相机监测地植被主要有落叶阔叶林、针叶林、常绿阔叶林和针阔混交林 4 种类型。选择有明显动物活动痕迹(例如动物足迹、排泄物)附近的大中型乔灌木,离地面垂直高度约 50 cm 安装红外相机。相机拍摄模式调整为三连拍(间隔 1s)加 10s 视频,每 4 个月及时更换相机内存卡与电池,并检查相机运行情况和拍摄信息记录。

1.2 物种位点数据获取

黄腹角雉位点来源包括 12 条遂昌县实地红外相机观测位点记录,GBIF 数据搜索获 517 条(搜索时添加限制:中国大陆、人类观察)。为保证数据时效性,使用 Excel 筛选出 2015 年之后观测数据,并用数据工具中重复项功能删除重复经纬度数据,根据《中国雉类》所记载省份对比数据地点^[21],最终保留 70 条数据,合并实地相机观察点位数据共 82 条。传统建立缓冲区的方式不能彻底删除冗余数据,为避免空间自相关性,本文采用 ENMTools 工具去除冗余点,ENMTools 工具将自动匹配分析所用的环境因子栅格大小,而不再基于距离法删除数据^[22],最终保留 49 个有效点位(图 2)。

1.3 环境数据选择和筛选

经查阅相关文献^[19,21],黄腹角雉主要栖息于我国东部亚热带山地中的常绿阔叶林、针阔混交林等林地,栖息地年均气温约 15℃,年降水量约 2000mm,活动海拔区间为 800—1800m,森林开发、城市化建设等人为活动影响栖息地的适宜性。本文探讨气候变化对黄腹角雉潜在栖息地的影响,降水和温度的改变皆会影响其栖息地环境,继而影响黄腹角雉生存,因此选取三个时期(当前、过去、未来)的 19 个气候因子。当前时期采用 WorldClim 环境数据库 2.1 版本基准期(1970—2000 年间均值)气候数据(<https://www.worldclim.org/data/worldclim21.html>),1.4 版本(1960—1990 年间均值)气候数据作为过往时期对照(<https://www.worldclim.org/>

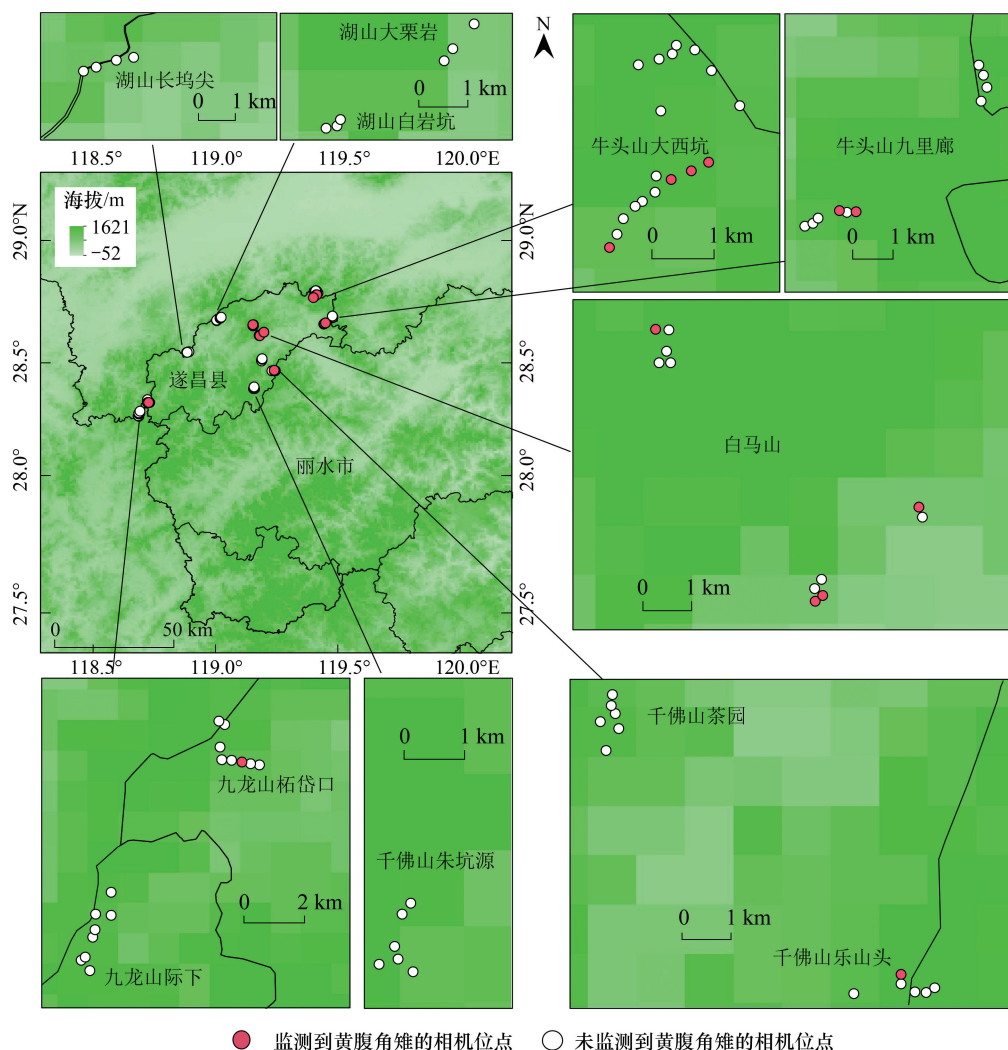


图1 红外相机安置位点

Fig.1 Infrared camera placement point

data/v1.4/worldclim14.html), 分辨率皆为 30 弧秒(约为 1km), 未来时期采用联合国政府间气候为化专门委员会(IPCC)的第六次评估报告(AR6)报告中最新气候模式共享社会经济路径(SSP)3-7.0、5-8.5 两种气候数据(2041—2060 年间均值), 分别代表未来时期中、温室气体排放情景, 由国家(北京)气候中心气候系统提供, 分辨率皆为 5km。此外, 还应考虑加入参与其生境构建的海拔、干扰、植被因子。海拔因子来自中国科学院科学数据库, 分辨率为 1km。干扰因子采用野生动物保护协会制作的人类足迹指数, 该数据集成了人类活动影响, 囊括人口密度、土地规划、交通设施、电力设施、夜间灯光(<https://wchumanfootprint.org/>), 并有 1993 年和 2009 年两时期数据, 分辨率均为 1km。植被因子采用归一化植被指数(NDVI), 选取 1998—2003 年和 2015—2020 年两个年段的数据, 经 ArcGIS10.4.1 栅格计算器平均处理后应用于不同时期预测, 来自中国科学院科学数据库, 分辨率均为 1km。将所有用于模型预测数据分辨率经 ArcGIS10.4.1 重采样统一转变为 5km, 地理坐标系设置为 WGS1984。

为避免环境变量相关性影响结果, 本文利用 ENMTTools 工具对 19 个气候因子进行 Pearson 相关系数检验(表 1), 剔除相关性过高($|r| > 0.80$)的因子^[23]。最终保留 7 个气候因子(BIO2、BIO3、BIO5、BIO6、BIO12、BIO14、BIO18)与其他类型因子参与模型运行(表 2)。

表 1 气候因子相关性分析

Table 1 Correlation test of climatic factors																		
BIO1	BIO2	BIO3	BIO4	BIO5	BIO6	BIO7	BIO8	BIO9	BIO10	BIO11	BIO12	BIO13	BIO14	BIO15	BIO16	BIO17	BIO18	BIO19
1																		
BIO1																		
BIO2	1																	
BIO3	0.66	1																
BIO4	-0.72	0.27	1															
BIO5	0.45	0.24	-0.15	1														
BIO6	0.95	-0.36	0.76	-0.88	1													
BIO7	-0.72	0.46	-0.81	0.98	0.29	1												
BIO8	0.85	-0.33	0.53	-0.61	0.32	0.82	1											
BIO9	0.91	-0.21	0.72	-0.79	0.27	0.92	0.74	1										
BIO10	0.73	-0.08	0.06	-0.06	0.91	0.52	0.62	0.55	1									
BIO11	0.96	-0.27	0.80	-0.88	0.20	0.99	0.82	0.93	0.52	1								
BIO12	0.25	-0.07	0.31	-0.37	-0.13	0.29	0.10	0.33	-0.02	0.31	1							
BIO13	0.35	-0.05	0.44	-0.47	-0.12	0.40	0.21	0.43	0.03	0.42	0.89	1						
BIO14	-0.49	0.18	-0.68	0.70	0.21	-0.61	0.69	-0.56	-0.04	-0.61	0.15	-0.05	1					
BIO15	0.66	-0.19	0.77	-0.80	-0.14	0.75	-0.80	0.64	0.65	0.75	0.34	0.61	-0.70	1				
BIO16	0.44	-0.06	0.50	-0.53	-0.08	0.47	-0.50	0.31	0.47	0.49	0.87	0.95	-0.09	0.68	1			
BIO17	-0.55	0.25	-0.70	0.75	0.21	-0.68	0.76	-0.62	-0.53	-0.67	0.13	-0.08	0.95	-0.74	-0.12	1		
BIO18	0.58	-0.35	0.64	-0.76	-0.24	0.68	-0.77	0.62	0.57	0.68	0.65	0.74	-0.50	0.82	0.79	-0.54	1	
BIO19	-0.38	0.36	-0.46	0.54	0.22	-0.50	0.59	-0.54	-0.27	-0.47	0.29	0.12	0.88	-0.60	0.04	0.87	-0.45	1

BIO1: 年平均气温 Annual mean temperature; BIO2: 平均日较差 Mean diurnal range; BIO3: 等温性 Isothermality; BIO4: 温度季节性变化标准差 Temperature seasonality; BIO5: 最暖月最高温度 Max temperature of warmest month; BIO6: 最冷月最低温度 Min temperature of coldest month; BIO7: 年均温变化范围 Temperature annual range; BIO8: 最湿季度平均温度 Mean temperature of wettest quarter; BIO9: 最干季度平均温度 Mean temperature of driest quarter; BIO10: 最冷季度平均温度 Mean temperature of coldest quarter; BIO11: 最冷季度平均温度 Mean temperature of coldest quarter; BIO12: 年降水量 Annual precipitation; BIO13: 最湿月降水量 Precipitation of wettest month; BIO14: 最干月降水量 Precipitation of driest month; BIO15: 降水量变异系数 Precipitation seasonality; BIO16: 最湿季度降水量 Precipitation of wettest quarter; BIO17: 最干季度降水量 Precipitation of driest quarter; BIO18: 最暖季度降水量 Precipitation of warmest quarter; BIO19: 最冷季度降水量 Precipitation of coldest quarter

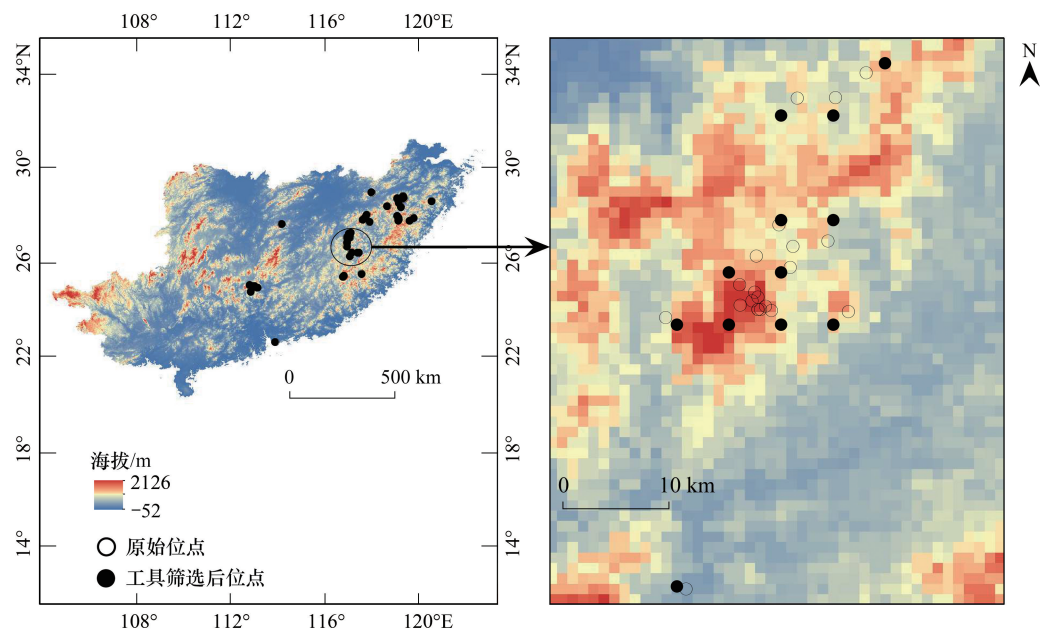


图 2 黄腹角雉分布点
Fig.2 Distribution point of *Tragopan caboti*

1.4 模型优化、预测以及评价

基于模型默认参数进行物种分布预测时,不仅结果存在偏差,而且可能导致无法解释^[24]。MaxEnt 模型中提供了两种可调整设置,倍频(RM)与特征组合(FC),特征组合分别为线性(L)、二次(Q)、乘积(P)、片段(H)、阈值(T)^[25]。位点数据经 R 语言 Devtools 包随机拆分成 75%训练集,25%测试集,之后采用 Kuenm 包进行模型优化,RM 从 0.10 开始,每次增加 0.10,直至 4,分别与特征组合进行排列组合(例如:RM = 0.10,FC = L;RM = 2.50,FC = L、Q、T),最后得到 1240 种组合。最优模型参数判断标准需要同时满足三个条件:(1)具有统计学意义的显著;(2)遗漏率低于 5%;(3)校正后赤池信息量准则(AICc)值小于 2^[26]。AICc 值与遗漏率越低,代表模型拟合效果越好,并以受试者工作特征曲线(ROC)评价验证模型精度^[23]。接受者操作特征曲线下与坐标轴围成面积(AUC)值评价标准为:差(0—0.70);标准(0.70—0.90);优秀(0.90—1)。选取 25%的黄腹角雉分布点作为测试集,设置 10000 个背景点,重复方式为自举法。将重复运行 10 次的平均结果载入 ArcGIS10.4.1 进行下一步分析。

表 2 不同时期的环境因子变量描述

Table 2 Description of environmental factor variables at different periods					
环境因子 Environment factors	描述 Description	过去 Ago (1960—1990 年)	当前 Current (1970—2000 年)	SSP3-7.0 (2041—2060 年)	SSP5-8.5 (2041—2060 年)
气候因子 Climatic factor	平均日较差	BIO2	BIO2	BIO2	BIO2
	等温性	BIO3	BIO3	BIO3	BIO3
	最暖月最高温度	BIO5	BIO5	BIO5	BIO5
	最冷月最低温度	BIO6	BIO6	BIO6	BIO6
	年降水总量	BIO12	BIO12	BIO12	BIO12
	最干月降水量	BIO14	BIO14	BIO14	BIO14
	最暖季度降水量	BIO18	BIO18	BIO18	BIO18
地形因子 Terrain factor	海拔	Elv	Elv	Elv	Elv
植被因子 Vegetation factor	归一化植被指数	1998—2003 年 NDVI	2015—2020 年 NDVI	2015—2020 年 NDVI	2015—2020 年 NDVI
干扰因子 Interference factor	人类足迹指数	1993 年 HFP	2009 年 HFP	2009 年 HFP	2009 年 HFP

SSP:共享社会经济路径 Shared Socio-economic Pathways; Elv:海拔 Elevation; HFP:人类足迹指数 Human Footprint

2 结果

2.1 优化后模型参数设置与评估

经 Kuenm 包模拟所有参数设置后,从中选取最为满足相关要求的模型参数进行栖息地预测。优化后模型特征组合为 Q、P、T,倍频为 2, AICc 值为 0,遗漏率为 0;默认参数模型特征组合为 L、Q、P、H,倍频为 1, AICc 值为 261.34,遗漏率为 0。模型经优化后 AICc 值显著下降,表现较默认更为优异,当前模型 AUC 值大于 0.90 (图 3),预测结果精度优秀。

2.2 黄腹角雉潜在栖息地主要影响因子

环境因子贡献率输出结果显示,年降水总量、海拔是黄腹角雉模型预测中贡献率最高的环境因子,分别占比 40.90%和 35.70%。模型置换重要性中,最暖月最高温度占比 51.50%,说明温度也对黄腹角雉潜在栖息地有重要影响(表 3)。刀切法检验结果显示,使用单一环境因子构建 MaxEnt 模型时,年降水总量、最暖月最高温度、海拔的 AUC 值最高,均高于 0.85(图 4)。响应曲线结果表明,年降水总量从 800mm 逐渐上升,增至约 2000mm 达最高适宜程度;最暖月最高温度约在 20.50℃至 25℃达到适宜程度峰值,随后开始下降;海拔从 0m 增至约 1300m,达到黄腹角雉适宜程度峰值,随后呈下降趋势(图 5)。

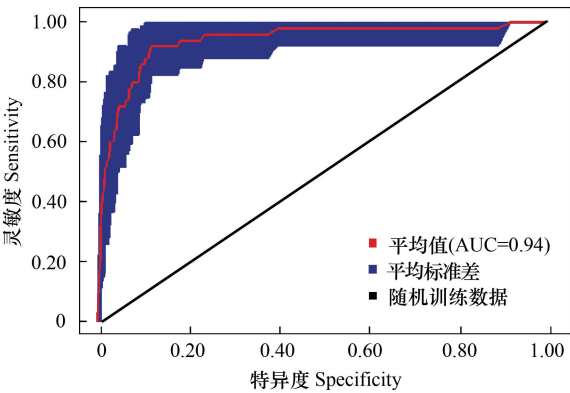


图 3 受试者工作特征曲线 (ROC)

Fig.3 Receiver operating characteristic curve

AUC: 曲线下与坐标轴围成面积

表 3 环境因子贡献率及其置换重要性

Table 3 Contribution rate and replacement value of environmental factor

环境因子 Environmental factors	贡献率 Contribution rate/%	置换重要性 Replacement value/%
BI012 年降水总量 Annual precipitation	40.90	28.80
Ele 海拔 Elevation	35.70	0.30
BI05 最暖月最高温度 Maximum temperature of warmest month	7.60	51.50
BI06 最冷月最低温度 Minimum temperature of coldest month	7.20	1.40
BI02 平均日较差 Mean diurnal range	3.20	8.80
BI03 等温性 Isothermality	1.50	1.20
BI014 最干月降水量 Precipitation of driest month	1.50	2.20
HFP 人类足迹指数 Human foot print	1.40	5.10
NDVI 归一化植被指数 Normalized difference vegetation index	0.90	0.40
BI018 最暖季度降水量 Precipitation of warmest quarter	0.10	0.30

2.3 黄腹角雉潜在栖息地变化格局

黄腹角雉不同时期潜在适宜栖息地变化表明(图 6),当前时期黄腹角雉潜在栖息地在六省均有分布,其中适宜性较高的区域主要为浙江西南部、福建北部和江西东部(浙江千里岗-仙霞岭-洞宫山、福建洞宫山-武夷山北段、江西武夷山)以及湖南罗霄山脉南段,其余各地均有零散分布。采用自然断点法将栖息地分类,分别为不适宜栖息地(值<0.10)、极低适宜栖息地(0.10<值<0.24)、低适宜栖息地(0.24<值<0.50)、适宜栖息地(值>0.50)^[27]。通过 ArcGIS10.4.1 计算占比得出,过去潜在适宜栖息地面积为 32786.03km²,占比六省面积 3.20%,当前黄腹角雉潜在适宜栖息地面积为 24725.41km²,占比六省面积 2.41%,同比过去潜在适宜栖息地面积下降 24.69%;SSP3-7.0、SSP5-8.5 情景下,潜在适宜栖息地面积分别为 11085.93km²和 10809.03km²,约占比六省面积 1.08%、1.01%,同比当前潜在适宜栖息地面积下降 55.19%和 58.10%(表 4)。

使用 SDMTTools 工具比较不同时期适宜栖息地格局变化(表 4)。当前潜在适宜栖息地面积较过去新增 19.15%,54.54%的潜在适宜栖息地面积得到保留,丧失面积率达 44.72%。SSP3-7.0 情景下,潜在适宜栖息地面积新增率为 4.30%,丧失率达 58.33%。SSP5-8.5 情景潜在适宜栖息地面积变化趋势与 SSP3-7.0 一致,潜在适宜栖息地面积新增率为 5.01%,丧失率为 60.92%。结合图 7 可知,黄腹角雉潜在适宜栖息地保留与新增主要发生在浙江、福建、江西三省,低纬度适宜栖息地丧失严重。

使用 SDMTTools 工具叠加分析相应预测结果图层^[28],得出各情景潜在适宜栖息地质心(图 8),结果表明黄腹角雉不同时期潜在适宜栖息地质心均在福建省北部,当前时期较过去时期往东北方向移动 55.28km,未来两情景 SSP3-7.0、SSP5-8.5 质心分别向东北方移动 56.04km 和 86.24km。

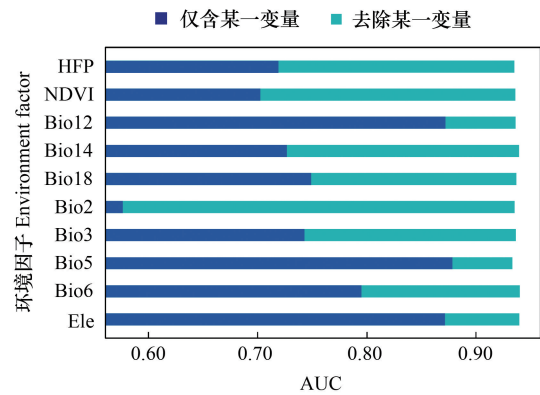


图 4 刀切法检验

Fig.4 Jackknife testing

HFP:人类足迹指数;NDVI:归一化植被指数;Bio12:年降水总量;Bio14:最干月降水量;Bio18:最暖季度降水量;Bio2:平均日较差;Bio3:等温性;Bio5:最暖月最高温度;Bio6:最冷月最低温度;Ele:海拔

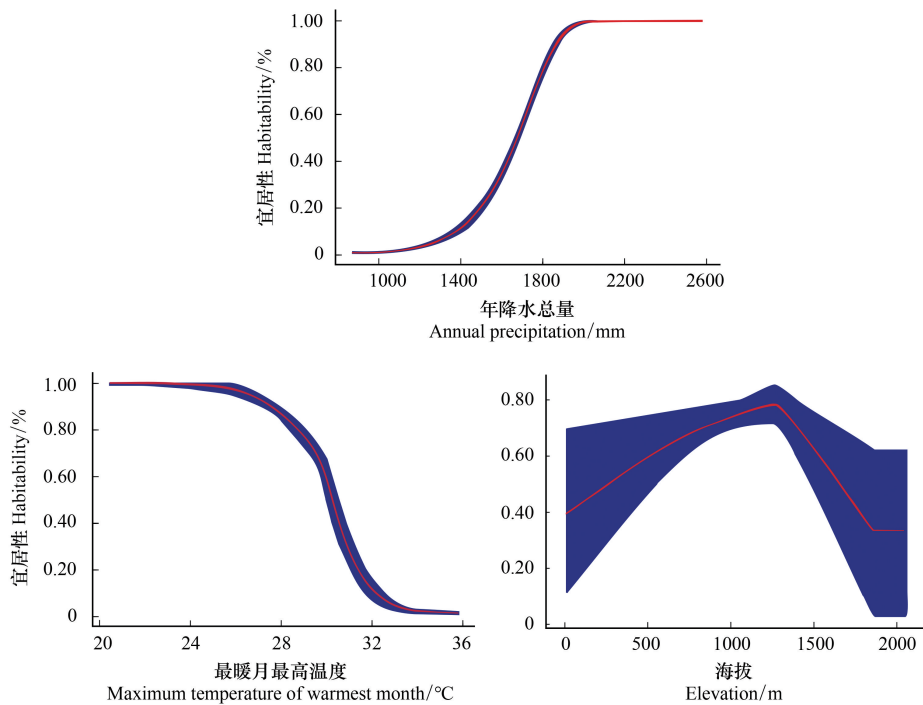


图 5 主要因子响应曲线

Fig.5 The response curves of major factor

3 讨论

3.1 影响黄腹角雉潜在栖息地的主要环境因子

结合模型贡献率、置换重要性以及刀切法结果说明,年降水总量、最暖月最高温度、海拔为影响黄腹角雉栖息地的主要因子。降水量主要是以间接方式影响黄腹角雉栖息地环境,黄腹角雉主要以植物为食,其中交让木(*Daphniphyllum macropodum*)和壳斗科(Fagaceae)植物为秋冬季主要取食来源^[21,29],已有文献证实了降水量、温度皆会影响交让木、壳斗科植物生长^[30-31]。年降水总量响应曲线(图 5)表明,年降水总量在 2000mm

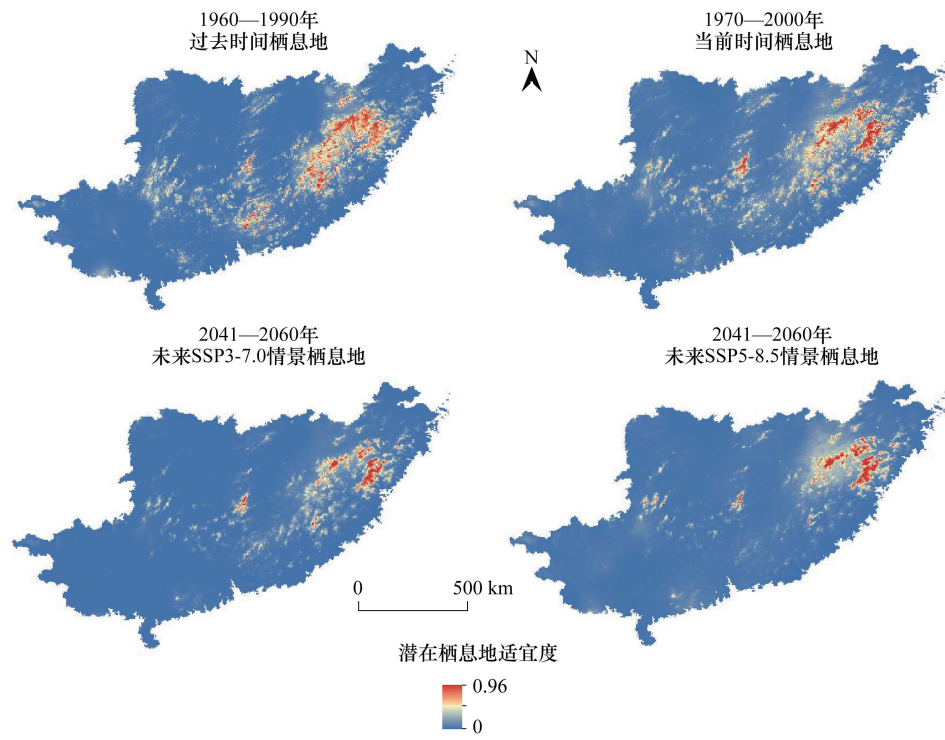


图 6 黄腹角雉不同时期潜在栖息地变化
Fig.6 Potential habitat changes of *Tragopan caboti* in different periods

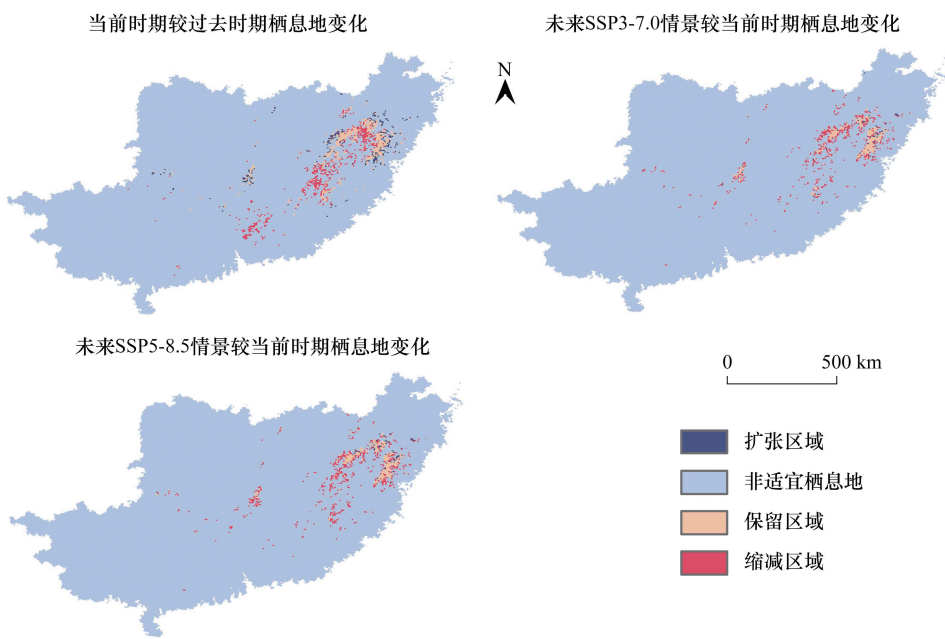


图 7 不同时期黄腹角雉潜在适宜栖息地空间分布格局
Fig.7 Spatial distribution pattern of potential suitable habitat of *Tragopan caboti* in different periods

以上达最高适宜程度,这与当前黄腹角雉分布较多的武夷山、乌岩岭自然保护区年降水量相符^[32—33]。温度直接影响黄腹角雉繁育,低温环境下雌鸟为留巢暖蛋而长时间不摄食,也不利于体温调节机制尚未完善的幼雏生长^[21,34]。最暖月最高温响应曲线显示,环境温度超过 28℃,栖息地适宜性快速下降,过高环境温度会导致热应激,引发生理功能紊乱^[35]。海拔响应曲线呈先升后降趋势,这可能与海拔超过一定上限影响植物生长,

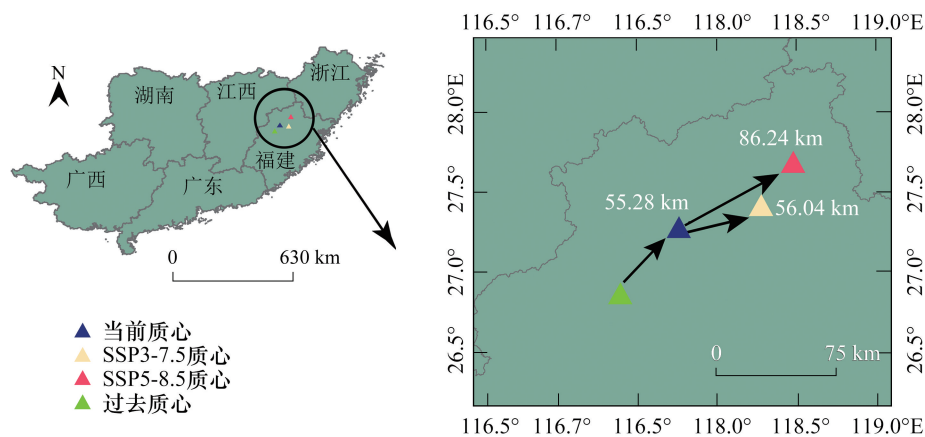


图 8 不同时期质心转移

Fig.8 Center of mass transfer under different periods

导致黄腹角雉在高海拔地区缺乏合适栖身场所有关。海拔上升引起的水分、温度、光照强度、氧含量、风力等因素制约了植物生长^[36—37],高海拔处乔灌木高度和盖度低,黄腹角雉活动次数明显下降^[38],为躲避天敌,黄腹角雉惯于利用灌木盖度来隐蔽自身活动,其巢穴也常建在粗大树木之上^[21,39]。

表 4 不同时期下适宜栖息地面积变化

Table 4 Changes of suitable habitat area in different periods

时期 Period	排放情景 Concentration pathway	面积 Area/ km ²	占比六省面积 Occupying the area of six provinces/%	总体变化率 Overall rate of change/%	新增率 Increase rate/%	保留率 Retention rate/%	丧失率 Lost rate/%
过去 Ago		32786.03	3.20				
当前 Current		24725.41	2.41	-24.69	19.15	54.54	44.72
未来 Future	SSP3-7.0	11085.93	1.08	-55.19	4.30	39.39	58.33
	SSP5-8.5	10809.03	1.01	-58.10	5.01	36.81	60.92

3.2 黄腹角雉潜在栖息地变化格局

气候变化改变了野生动物分布格局,而栖息地面积的缩减是野生动物面对气候变化最直观的表现形式^[6],当前黄腹角雉潜在栖息地格局与《中国雉类》中分布图大体相近^[21],过去时期适宜栖息地范围明显大于当前时期,而未来 SSP3-7.0 和 SSP5-8.5 情景下,其适宜栖息地范围收缩明显。Li 等认为气候变化背景下,未来中国 108 种保护鸟类适宜栖息地面积都将发生削减^[11],近来也有学者证明蓑羽鹤 (*Anthropoides virgo*)、灰鹤 (*Grus grus*)、丹顶鹤 (*G. japonensis*) 等鸟类潜在适宜栖息地面积在未来发生缩减^[40],与本文结果一致。黄腹角雉适宜栖息地面积减少主要与植被生境改变有关,水热条件变化打破了植物原本生存格局^[41—42]。例如黄腹角雉喜食的猕猴桃 (*Actinidia chinensis*)、白栎 (*Quercus fabri*)^[21],均在气候变化情景下呈现出低纬度适宜生境收缩,总体生境向北移动,导致黄腹角雉适宜栖息地的质量下降甚至消失^[43—44]。当前时期较过去时期碳排放量增加幅度较少,高纬度或高海拔地区因温度小幅上升等原因出现了少量适宜栖息地^[6],导致当前时期新增栖息地面积大于未来两情景,而未来两情景碳排放量增幅巨大使得更多低纬度区域不再适宜栖息,表现出潜在适宜栖息地面积收缩更明显^[6]。在未来气候变暖情景下,中国大多数鸡形目鸟类潜在栖息地会发生缩小,并往北移动,与本研究潜在适宜栖息地质心转移结果(图 8)相近^[45]。根据结果推断,浙江、江西和福建三省是当前以及未来气候变化下黄腹角雉核心适宜栖息地区域,而低纬度地区的适宜栖息地质量将逐渐下降。由于黄腹角雉不善飞行、种群扩散距离短、繁殖力低下等原因^[19],相关部门筹备规划工作时应优先考虑

就地保护、调整原有的保护区规划范围、邻近栖息地之间建立生态廊道等措施应对气候变化带来的影响^[4,14],此外加大对人工繁育基地的支持,确保一定规模的人工种群补充到自然种群中^[19,21]。

3.3 合理模型构建与缺陷

使用 MaxEnt 模型预测物种栖息地情况应当考虑合理的物种分布数据,MaxEnt 依赖于无偏样本,收集全面、有时效性的存在记录并处理偏差至关重要^[46],仅凭自身有限相机监测数据无法良好反应客观存在,故本文使用实际相机观测点位结合 GBIF 观测数据,尽可能保证原始数据覆盖黄腹角雉近代生活区域,采用 ENMTTools 工具针对图层分辨率筛选位点,保证物种位点均化。其次,采用默认参数进行潜在栖息地预测,易使模型过度拟合^[47],本研究使用了 R 语言 Kuenm 包进行参数调整, AUC 值与最优模型评估指标均优秀,模型运行相对稳健。同时,栖息地预测应充分考虑影响物种栖息地的环境因子^[48],因此本研究仍加入非气候因子参与运行。因子贡献率及置换重要性分析中, NDVI 指数与人类足迹指数占比并不大,而刀切法检验中 NDVI 指数、人类足迹指数单一建模的 AUC 值均超过 0.70,说明对模型预测黄腹角雉潜在栖息地有一定作用,而黄腹角雉多生活于自然保护区,区域内植被保护良好、人为干扰少,因此空间差异的响应不显著,与降水、温度、海拔大尺度上影响栖息地的因子相比,影响较小^[49]。另外, WorldClim 尚未发布更高精度的未来气候数据,精度对大尺度上预测结果影响不大,却会明显影响响应曲线分析^[48],尽管海拔响应曲线给出了合理趋势,但模型运行时浮动范围较大。因此,研究结果有一定局限性,但对未来黄腹角雉保护规划工作仍具有一定参考价值。

综上所述,气候变化背景下,浙江、江西和福建是当前以及未来黄腹角雉核心适宜栖息地,影响栖息地的主要环境因子为降水量、温度、海拔,适宜栖息地面积呈现下降的趋势并往高纬度区域移动。

参考文献 (References):

- [1] Raman S, Shameer T T, Sanil R, Usha P, Kumar S. Protrusive influence of climate change on the ecological niche of endemic brown mongoose (*Herpestes fuscus fuscus*): a MaxEnt approach from Western Ghats, India. *Modeling Earth Systems and Environment*, 2020, 6(3): 1795-1806.
- [2] Hall L S, Krausman P R, Morrison M L. The habitat concept and a plea for standard terminology. *Wildlife Society Bulletin*, 1997, 25(1): 173-182.
- [3] Zhang J J, Jiang F, Li G Y, Qin W, Li S Q, Gao H M, Cai Z Y, Lin G H, Zhang T Z. Maxent modeling for predicting the spatial distribution of three raptors in the Sanjiangyuan National Park, China. *Ecology and Evolution*, 2019, 9(11): 6643-6654.
- [4] 杨蕾, 杨立, 李婧昕, 张超, 霍兆敏, 栾晓峰. 东北地区 5 个物种潜在栖息地变化与优化保护规划. *生态学报*, 2019, 39(3): 1082-1094.
- [5] 乔雪丽, 林峻, 吴建国, 赵雪迷, 巨喜锋, 郑江华. 气候变化情景下大沙鼠潜在地理分布. *生态学报*, 2021, 41(17): 6904-6912.
- [6] 汪沐阳, 张楚婕, 宓春荣, 韩雷, 李美玲, 徐文轩, 杨维康. 气候变化对中国马可波罗盘羊适宜生境的潜在影响. *应用生态学报*, 2021, 32(9): 3127-3135.
- [7] 夏昕, 李媛, 杨道德, 皮扬焱. 气候变化下寒露林蛙在中国的潜在地理分布. *应用生态学报*, 2021, 32(12): 4307-4314.
- [8] Jiang F, Li G Y, Qin W, Zhang J J, Lin G H, Cai Z Y, Gao H M, Zhang T Z. Setting priority conservation areas of wild Tibetan gazelle (*Procapra picticaudata*) in China's first national park. *Global Ecology and Conservation*, 2019, 20: e00725.
- [9] 陈智强, 赵增辉, 王远飞, 韦力, 丁国骅, 林植华. 基于红外相机技术和 MaxEnt 模型的黑麝 (*Moschus moschiferus*) 活动节律分析和潜在适生区预测. *生态学报*, 2021, 41(9): 3535-3547.
- [10] Joshi K, Kumar D. Avian species composition and distribution along elevational zone in forest habitat of nainital district (western himalaya) of uttarakhand, india. *Trees, Forests and People*, 2022, 7: 100177.
- [11] Li X Y, Clinton N, Si Y L, Liao J S, Liang L, Gong P. Projected impacts of climate change on protected birds and nature reserves in China. *Science Bulletin*, 2015, 60(19): 1644-1653.
- [12] Jiménez L, Soberón J. Estimating the fundamental niche: Accounting for the uneven availability of existing climates in the calibration area. *Ecological Modelling*, 2022, 464: 109823.
- [13] Phillips S J, Anderson R P, Schapire R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 2006, 190(3/4): 231-259.
- [14] 叶维佳, 杨楠, 杨彪, 李云, 张晋东, 陈冬梅, 周材权, 钟雪, 张君. 气候变化对我国特有种红腹锦鸡潜在地理分布的影响. *生态学杂志*, 2021, 40(6): 1783-1792.
- [15] 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.
- [16] 钱法文, 郑光美. 黄腹角雉的栖息地研究. *北京师范大学学报: 自然科学版*, 1993, 29(2): 256-264.
- [17] 蒋志刚, 江建平, 王跃招, 张鸷, 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. 中国脊椎动物红色名录. 生物多样性, 2016, 24(5): 500-551.
- [18] 张军平, 郑光美. 黄腹角雉的种群数量及其结构研究. 动物学研究, 1990, 11(4): 291-297.
- [19] 张正旺, 丁长青, 丁平, 郑光美. 中国鸡形目鸟类的现状与保护对策. 生物多样性, 2003, 11(5): 414-421.
- [20] 卜向丽, 王静, 吴佳忆, 孙太福, 向荣伟, 鲁庆斌, 郝映红, 崔绍朋, 盛岩, 孟秀祥. 太行山东北部哺乳动物区系及多样性. 生物多样性, 2021, 29(3): 331-339.
- [21] 郑光美. 中国雉类. 北京: 高等教育出版社, 2015.
- [22] Warren D L, Glor R E, Turelli M. ENMTools: a toolbox for comparative studies of environmental niche models. Ecography, 2010, 33(3): 607-611.
- [23] 江晓萍, 徐基良, 李建强, 徐迎寿, 李忠. 基于 MaxEnt 生态位模型分析江西省人与野猪冲突的空间分布. 森林与环境学报, 2018, 38(3): 334-340.
- [24] 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.
- [25] Li Y C, Li M Y, Li C, Liu Z Z. Optimized maxent model predictions of climate change impacts on the suitable distribution of *cunninghamia lanceolata* in China. Forests, 2020, 11(3): 302.
- [26] Cobos M E, Peterson A T, Barve N, Osorio-Olvera L. kuenm: an R package for detailed development of ecological niche models using Maxent. PeerJ, 2019, 7: e6281.
- [27] 秦媛媛, 鲁客, 杜忠毓, 史建国, 柴乖强, 张宇, 雷凯宇, 段义忠. 气候变化情景下孑遗植物绵刺在中国的潜在地理分布变化. 生态学报, 2022, 42(11): 4473-4484.
- [28] Zhao G H, Cui X Y, Sun J J, Li T T, Wang Q, Ye X Z, Fan B G. Analysis of the distribution pattern of Chinese *Ziziphus jujuba* under climate change based on optimized biomod2 and MaxEnt models. Ecological Indicators, 2021, 132: 108256.
- [29] 郑光美, 赵欣如, 宋杰, 刘宗行, 周洪青. 黄腹角雉的食性研究. 生态学报, 1986, 6(3): 283-288.
- [30] 张凤英, 廖梓延, 潘开文, 张萌, 赵玉林, 张林. 西南地区壳斗科物种丰富度和特有性分布格局模拟及其环境解释. 应用生态学报, 2021, 32(7): 2290-2300.
- [31] Kim J, Lee D K, Kim H G. Suitable trees for urban landscapes in the Republic of Korea under climate change. Landscape and Urban Planning, 2020, 204: 103937.
- [32] 赵青, 刘爽, 陈凯, 王世君, 吴承祯, 李键, 林勇明. 武夷山自然保护区不同海拔甜槠天然林土壤有机碳变化特征及影响因素. 生态学报, 2021, 41(13): 5328-5339.
- [33] 仲磊, 张杨家豪, 卢品, 顾雪萍, 雷祖培, 蔡延奔, 郑方东, 孙义方, 于明坚. 次生常绿阔叶林的群落结构与物种组成: 基于浙江乌岩岭 9 ha 森林动态样地. 生物多样性, 2015, 23(5): 619-629.
- [34] 李晶, 李庆芬, 郑光美. 黄腹角雉静止代谢率的研究. 动物学研究, 1993, 14(4): 341-345.
- [35] Vandana G D, Sejian V, Lees A M, Pragna P, Silpa M V, Maloney S K. Heat stress and poultry production: Impact and amelioration. International Journal of Biometeorology, 2021, 65(2): 163-179.
- [36] 樊莹, 乔雪涛, 赵秀海. 长白山自然保护区蒙古栎幼树生理生长特性随海拔梯度的变化. 北京林业大学学报, 2019, 41(11): 1-10.
- [37] 谭一波, 申文辉, 田红灯, 付孜, 叶建平, 郑威, 黄善琪. 猫儿山不同海拔植物群落树木构型差异及其影响因子. 应用生态学报, 2019, 30(8): 2614-2620.
- [38] 程松林, 毛夷仙, 胡尔夷, 雷平, 袁荣斌, 邹思成. 江西武夷山自然保护区黄腹角雉种群生物学及海拔分布特征. 林业科学, 2017, 53(10): 160-167.
- [39] 丁长青, 郑光美. 黄腹角雉的巢址选择. 动物学报, 1997, 43(1): 27-33.
- [40] 蒋丽华, 高俊琴, 万基中. 气候变化下大兴安岭地区鹤类潜在分布及优先保护区. 应用生态学报, 2019, 30(7): 2457-2469.
- [41] 周天军, 任俐文, 张文霞. 2020 年梅雨期极端降水的归因探讨和未来风险预估研究. 中国科学: 地球科学, 2021, 51(10): 1637-1649.
- [42] Alola A A, Kirikkaleli D. Global evidence of time-frequency dependency of temperature and environmental quality from a wavelet coherence approach. Air Quality, Atmosphere & Health, 2021, 14(4): 581-589.
- [43] 赵金鹏, 王闫利, 陆兴利, 沈沾红, 王明田, 李庆, 王茹琳. 软枣猕猴桃在中国的适生区分析及对未来气候变化的响应. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(10): 1523-1532.
- [44] 李璇, 李垚, 方炎明. 基于优化的 Maxent 模型预测白栎在中国的潜在分布区. 林业科学, 2018, 54(8): 153-164.
- [45] Li R Q, Tian H D, Li X H. Climate change induced range shifts of Galliformes in China. Integrative Zoology, 2010, 5(2): 154-163.
- [46] Elith J, Phillips S J, Hastie T, Dudík M, Chee Y E, Yates C J. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. Diversity and Distributions, 2011, 17(1): 43-57.
- [47] 朱耿平, 原雪蛟, 范靖宇, 王梦琳. MaxEnt 模型参数设置对其所模拟物种地理分布和生态位的影响——以茶翅蝽为例. 生物安全学报, 2018, 27(2): 118-123.
- [48] 郭彦龙, 赵泽芳, 乔慧捷, 王然, 卫海燕, 王璐坤, 顾蔚, 李新. 物种分布模型面临的挑战与发展趋势. 地球科学进展, 2020, 35(12): 1292-1305.
- [49] 刘红彩, 赵纳勋, 庄钰琪, 杨梅玲, 赵惠茹, 叶新平. 基于 MaxEnt 模型的秦岭山地斑羚生境适宜性评价. 生态学报, 2022, 42(10): 4181-4188.