# 浙江九龙山国家级自然保护区黑熊活动监测 及其华东地区潜在分布区预测

郑伟成<sup>①</sup>陈智强<sup>②#</sup>郑子洪<sup>①</sup>王宇<sup>①</sup>冯磊<sup>②</sup>郭坤<sup>③</sup>
马力<sup>②\*</sup>丁国骅<sup>②</sup>余著成<sup>④</sup>上官海平<sup>⑤</sup>郭洪兴<sup>⑥</sup>
①浙江九龙山国家级自然保护区管理中心 遂昌 323300; ②丽水学院生态学院 丽水 323000;
③温州大学生命与环境科学学院 温州 325035; ④江山仙霞岭省级自然保护区管理中心 江山 324100;
⑤福建君子峰国家级自然保护区管理局 明溪 365200; ⑥江西武夷山国家级自然保护区管理局 铅山 334500

**摘要:** 2017 至 2020 年,在浙江九龙山国家级自然保护区内及周边网格化布设 63 台 Ltl-6210 MC 红外 相机,对区内的黑熊(*Ursus thibetanus*)及其同域物种进行调查。监测期间,5 台红外相机共拍摄到9 张黑熊活动照片和 6 次黑熊活动视频,提取到 7 次黑熊有效照片。根据本次监测到的黑熊位点与文献 记录,共确定华东地区黑熊出现位点 14 个。基于黑熊栖息地特征选择土地利用和 7 个生境因子为预测 背景,利用物种分布模型预测黑熊在华东地区的潜在分布区。为提高预测的精准度,采用了 biomod 2 软件包中的 10 种模型算法,并用真实技能统计值(TSS)和曲线下面积值(AUC)来评估这 10 种算法, 只有当 TSS 值超过 0.8 且 AUC 值大于 0.9 时,才使用该模型算法预测物种的潜在分布区。结果表明: (1) 推测保护区内现存 2 或 3 只黑熊;(2) 最冷月份最低温(Bio6)和最湿季节降水量(Bio16)是限 制黑熊分布的主要环境因子;(3) 黑熊在华东地区存在 3 个主要潜在分布区,即浙-赣潜在分布区、浙 -赣-皖潜在分布区和浙-皖潜在分布区,适生区面积约为 317 km<sup>2</sup>。综上所述,这些结果可为加强华东 地区黑熊的保护提供一定的资料。

关键词:黑熊;浙江九龙山国家级自然保护区;红外相机;物种分布模型;潜在分布 中图分类号:Q958 文献标识码:A 文章编号:0250-3263(2021)04-509-13

# Monitoring of Activity of the Asiatic Black Bear (*Ursus thibetanus*) in Zhejiang Jiulongshan National Natural Reverse and Prediction of Potential Suitable Distribution in East China

ZHENG Wei-Cheng<sup>①</sup> CHEN Zhi-Qiang<sup>®#</sup> ZHENG Zi-Hong<sup>①</sup> WANG Yu<sup>①</sup> FENG Lei<sup>®</sup> GUO Kun<sup>®</sup> MA Li<sup>®\*</sup> DING Guo-Hua<sup>®</sup> YU Zhu-Cheng<sup>®</sup> SHAUNGGUAN Hai-Ping<sup>®</sup> GUO Hong-Xing<sup>®</sup>

\* 通讯作者, E-mail: lmahz2011@163.com;

基金项目 浙江省环境保护专项资金项目(浙财建[2018]121号),遂昌县县校合作项目(No. 2020-H11);

第一作者介绍 郑伟成,男,高级工程师;研究方向: 生物多样性保护; E-mail: jlszwc@126.com;

<sup>#</sup> 共同第一作者 陈智强, 男, 硕士研究生; 研究方向: 动物学; E-mail: zqchen96@qq.com。

收稿日期: 2020-12-21, 修回日期: 2021-03-28 DOI: 10.13859/j.cjz.202104004

 Administration Center of Zhejiang Jiulongshan National Nature Reserve, Suichang 323300; 
 <sup>(2)</sup> College of Ecology, Lishui University, Lishui 323000; 
 <sup>(3)</sup> College of Life and Environmental Science, Wenzhou University, Wenzhou 325035; 
 <sup>(4)</sup> Administration Center of Jiangshan Xianxialing Provincial Nature Reserve, Jiangshan 324100; 
 <sup>(5)</sup> Administration Bureau of Fujian Junzifeng National Nature Reserve, Mingxi 365200; 
 <sup>(6)</sup> Administration Bureau of Jiangxi Wuyishan National Nature Reserve, Yanshan 334500, Chian

Abstract: From 2017 to 2020, 63 Ltl-6210 MC infrared cameras were grid-deployed in and around the Zhejiang Jiulongshan National Nature Reserve (Fig. 1) to study the Asiatic Black Bear (Ursus thibetanus) and other sympatric species. During the monitoring period, we obtained nine photographs and six videos of the activity of U. thibetanus from five infrared cameras and extracted seven effective pieces of information regarding U. thibetanus (Fig. 3). Based on our monitoring site data and records of U. thibetanus from literature, a total of 14 locations of U. thibetanus were confirmed in East China. Based on the habitat characteristics of U. thibetanus and correlation of climate factors, land use and seven habitat factors (mean diurnal range, Bio2; maximum temperature of the warmest month, Bio5; minimum temperature of the coldest month, Bio6; mean temperature of the wettest quarter, Bio8; precipitation of the driest month, Bio14; precipitation seasonality, Bio15; and precipitation of the wettest quarter, Bio16) (Fig. 2) were selected as the prediction background, and the potential distribution areas of U. thibetanus in East China were predicted through species distribution models. To develop an accurate projection for U. thibetanus, we used an ensemble modeling approach with 10 algorithms (artificial neural networks, ANN; classification tree analysis, CTA; flexible discriminant analysis, FDA; generalized additive model, GAM; generalized boosting model, GBM; generalized linear model, GLM; multiple adaptive regression splines, MARS; maximum entropy, MaxEnt; random forests, RF; and surface range envelope) using the package 'biomod 2.' We evaluated predictive performances of the 10 algorithms using two criteria parameters, true skill statistics (TSS > 0.8) and area under the curve (AUC > 0.9) (Fig. 4). Then, we selected nine algorithms (ANN, CTA, FDA, GAM, GBM, GLM, MARS, MaxEnt, and RF) to estimate the potential suitable distribution of U. thibetanus in East China. Our results showed that (1) 2 - 3 U. thibetanus are speculated to inhabit the nature reserve; (2) the minimum temperature of the coldest month (Bio6) and precipitation of the wettest quarter (Bio16) were the main environmental factors limiting the distribution of U. thibetanus (Fig. 5); and (3) there are three potential distribution areas of U. thibetanus in East China, including Zhejiang-Jiangxi, Zhejiang-Jiangxi-Anhui, and Zhejiang-Anhui (Fig. 6). In conclusion, these results can serve as basic information for strengthening the protective measures for U. thibetanus conservation in East China.

Key words: Ursus thibetanus; Zhejiang Jiulongshan National Nature Reserve; Infrared camera; Species distribution models; Potential distribution

生物多样性是实施可持续发展的保证和基础。生物多样性保护作为时代主旋律,是减缓物种灭绝速度、保障生态安全以及促进可持续发展的重要措施(蒋志刚等 2020)。大型哺乳类食肉动物处于陆地生态系统食物链的顶端, 其可通过捕食、竞争、食物网级联效应等方式 对食物网结构及生态系统功能产生巨大影响 (Wang et al. 2014,邵昕宁等 2019)。因气候 变化以及人为干扰所引起的栖息地破碎化、丧 失,加上偷猎以及国际贸易带来的病菌传播等 因素,使全球范围内的大型哺乳类食肉动物种 群数量急剧下降,分布的地理范围急剧收缩 (Ripple et al. 2014,邵昕宁等 2019)。目前, 大型哺乳类食肉动物已是我国受威胁比例最高 的动物类群之一(蒋志刚等 2016a)。了解某一 物种的适宜生境分布格局及质量在目标物种保 护中具有重要作用,其可促进区域生物多样性 保护(和梅香等 2018)。因此,亟需开展针对 大型哺乳类食肉动物的栖息地质量评价与分布 预测相关研究。

黑熊(Ursus thibetanus) 隶属于食肉目熊 科熊属,是我国 II 级重点保护野生动物,已被 《中国脊椎动物红色名录》列为易危级(蒋志 刚等 2016b)。该物种曾广泛分布于我国黑龙江 至海南岛和喜马拉雅山南坡等广大区域,但因 全球气候变化和人类活动所造成的栖息地破碎 化与丧失以及偷猎等因素,导致其在约50%~ 75%的历史分布地区内绝迹(Servheen 1990, 齐增湘等 2011)。早期有关黑熊的资源调查主 要依靠样带法和访问调查法,但随着红外线触 发自动数码相机陷阱技术(以下简称红外相机 技术)的开发,越来越多的红外相机技术被运 用在黑熊监测与研究中。凭借红外相机监测时 的诸多优点(李晟等 2014,肖治术等 2014), 该技术已成为研究黑熊等珍稀野生动物的重要 方法 (李晟等 2014, 刁鲲鹏等 2017)。目前, 国内各地采用红外相机技术陆续监测到黑熊活 动,如四川王朗国家级自然保护区(田成等 2018)、云南高黎贡山国家级自然保护区(杨强 等 2018)、皖南山区 (刘凯 2017) 和广西猫儿 山国家级自然保护区(汪国海 2016)等地,丰 富了黑熊在我国的野外分布区记录,为我国野 生黑熊资源保护提供了基础性数据。

物种分布模型(species distribution models, SDM)可通过量化环境因素与物种分布之间的 相互关联性,来了解和评估生物如何以及为何 在不同生存空间分布(许仲林等 2015)、预测 某一物种的潜在适生区(陈智强等 2021)或分 析气候变化对珍稀野生动植物未来分布的影响 (许仲林等 2015, 雷军成等 2016)。目前,数 学模型在黑熊研究上的应用主要集中在四川省 的卧龙国家级自然保护区(侯万儒等 2001)、 九顶山省级自然保护区(侯万儒等 2003a)和 唐家河国家级自然保护区(侯万儒等 2003b) 等地黑熊种群生存力研究中。生境评价和物种 潜在分布区的预测可为物种有效保护提供科学 支撑(罗翀等 2011)。因此,本研究以浙江九 龙山国家级自然保护区为研究区域,采用红外 相机技术监测并分析该区域内黑熊活动范围。 同时,收集已报道的黑熊分布点数据,采用集 成物种分布模型预测华东区域内黑熊潜在栖息 地,以期为现有黑熊种群资源的保护和管理提 供科学依据。

## 1 材料与方法

#### 1.1 研究区域

浙江九龙山国家级自然保护区(以下简称 九龙山保护区)属武夷山系仙霞岭山脉分支(刘 菊莲等 2013, 刘立伟等 2015), 总面积为 5 525 hm<sup>2</sup>,海拔跨度 420~1 724 m。该地气候 为中亚热带湿润季风气候, 四季分明且地貌以 中山山地为主, 垂直气候变异明显 (刘菊莲等 2013)。九龙山保护区地带性植被是中亚热带常 绿阔叶林, 植被保存较为完整, 从低海拔向高 海拔植被类型主要有常绿阔叶林、暖性针叶林、 针阔叶混交林、常绿落叶阔叶混交林、落叶林、 温性针叶林、山地矮曲林、山顶灌丛等多种植 被类型 (刘菊莲等 2013)。区内野生动物资源 丰富,分布有17种两栖动物(郑伟成等2020)、 165 种鸟类(郑英茂等 2020)以及 13 种中大 型兽类(郑伟成等 2014)。2018年,采用红外 相机技术首次在保护区监测到黑熊活动。

华东地区位于我国东部,包括7省1市, 属亚热带湿润性季风气候和温带季风气候,植 被类型多样,具有较丰富的生物资源。华东地 区黑熊主要历史分布区在浙江西部和南部(诸 葛阳 1990)、安徽南部和其与浙赣交界山区(胡 小龙等 1995)等地。但因人为干扰、栖息地丧 失等因素,黑熊的野外种群数量逐渐下降,加 之其较为隐蔽的生活习性以及传统调查方法的

4 期

局限性,导致 20 世纪 90 年代之后鲜有黑熊的 活动记录。近几年随着动物监测技术的发展, 在华东多个区域陆续监测到黑熊的活动,如浙 江古田山、仙霞岭、九龙山和常山、福建武夷 山、江西武夷山等地(章书声等 2012,徐露霞 等 2020)。

#### 1.2 红外相机数据获取及数据分析

2017 至 2020 年,以九龙山保护区的地形 图为基础将整个保护区划出 1 km × 1 km 的网 格图,在保护区布设红外相机进行网格化监测。 每 1 km × 1 km 网格布设 1 台 Ltl-6210 MC 红 外相机,共布设 63 台红外相机(图 1)。监测 期间,每 1 km × 1 km 网格内选取 3 个监测点, 每4个月换一次相机位置,同时检查与更新相机 SD 卡和电池。红外相机多固定于大型乔灌木上,距地面40~80 cm。相机镜头与地面大致平行,测试方向保持在30°之内,以确保视野的开阔性和能感应并拍摄到黑熊及其他动物的活动。红外相机统一设置,包括拍摄模式(照片加视频)、灵敏度(中)、连拍(3 张)和时间间隔(1 s),并详细记录相机布设地点的地理坐标、与相机配对的树牌号、蓄电池编号、镜头方向及相机测试结果等。

通过红外相机拍摄到照片及录制的视频辅助对所拍摄物种进行分析与鉴定。根据《浙江动物志: 兽类》(诸葛阳 1990)对黑熊的描述



图 1 浙江九龙山国家级自然保护区保护区红外相机布设位点



图中代码表示发现黑熊的相机编号。

The code in the figure indicates the ID of camera which found the Asian Black Bear.

• 512 •

进行照片判定。参考薛亚东等(2014)的标准 提取独立有效照片,以降低同一物种的照片相 关性,独立有效照片的判定标准如下:(1)相 同或不同物种的不同个体的连续照片和视频;

(2)相同物种的连续照片和视频之间时间间隔 大于 30 min; (3)相同物种的不连续照片或者 视频。符合以上任意一条标准,视为独立有效 照片。同时,对相机经纬度、海拔等信息进行 汇总。

# 1.3 黑熊分布区预测

本研究通过实地监测、网上新闻报道、调查访问、保护区数据共享等方式获取华东地区 黑熊出现年份及坐标信息,累计16个位点,其 中,九龙山的2个位点为重复监测位点(表1)。

表1	浙江九龙山黑熊监测数据及华东地区黑熊实际分布点

Table 1	The monitoring	data of Ursus	<i>thibetanus</i> in	Jiulongshan of

相机编号 ID of camera	日期(年-月-日) Date (Year- month-date)	发现地点 Location	经度 Longitude	纬度 Latitude	海拔 Elevation (m)	数量 Amount (ind)	外部显著特征 Morphological characters	数据来源 Data sources
JL04	2017-09-12	浙江遂昌九龙山 Jiulongshan, Suichang, Zhejiang	118°50′03″ E	28°22′21″ N	1 388	1	左前肢受损 Left forelimb damaged	本研究 This study
JL04	2017-09-17		118°50′03″ E	28°22′21″ N	1 388	2	1 只左前肢受损, 另 1 只右前肢受损 One left forelimb and one right forelimb were damaged	
JL31	2018-03-26		118°51′37″ E	28°21′58″ N	937	1		
JL15	2018-07-28		118°51′41″ E	28°21′39″ N	823	1	左前肢受损 Left forelimb damaged	
JL35	2019-06-01		118°51′48″ E	28°19′38″ N	1 403	1	左前肢受损 Left forelimb damaged	
JL15	2019-06-10		118°51′41″ E	28°21′39″ N	823	1	左前肢受损 Left forelimb damaged	
JL32	2020-04-23		118°51′51″ E	28°21′14″ N	1 093	1	左前肢受损 Left forelimb damaged	
	2016	浙江绍兴柯桥区 Keqiao, Shaoxing, Zhejiang	120°39′17″ E	29°52′46″ N				
	2020	浙江江山仙霞岭 Xianxialing, Jiangshan, Zhejiang	118°38′14″ E	28°18′16″ N				
	2019	江西武夷山叶家厂 Yejiachang, Wuyishan, Jiangxi	117°43′59″ E	27°50′31″ N				
	2020	福建武夷山大安源 Da'anyuan, Wuyishan, Fujian	117°51′52″ E	27°52′24″ N				
	2018	福建明溪君子峰	117°28′20″ E	26°21′41″ N				
	2020 Junzifeng, Mingxi, Fujian	117°11′50″ E	26°31′46″ N					
	2020		117°12′48″ E	27°52′24″ N				
	2011	浙江开化古田山 Gutianshan, Kaihua, Zhejiang	118°7′38″ E	29°16′34″ N				刘祺然等 2011
	2017	浙江开化南华山 Nanhuashan, Kaihua, Zhejiang	118°10′4″ E	29°0′46″ N				程磊等 2018

选择 2011 至 2020 年间华东地区黑熊出现的 14 个坐标位点进行模型运算。从 WorldClim 数据 库(http://www.worldclim.org/, version 2.1, Fick et al. 2017)中下载地理坐标系为 WGS84、空 间分辨率为 30"的(约 1970 至 2000 年)气候 数据中的 19 个生物气候数据包。

19 个生物气候因子中有诸多因子间存在 密切的共线性,为避免其中的冗余气候因子造 成因子的权重不均衡,利用 R 3.5.0 软件中的 dismo(Hijmans et al. 2011a)、raster(Hijmans et al. 2011b)、rgdal(Bivand et al. 2018a)、rgeos (Bivand et al. 2018b)、rgl(Adler et al. 2018)、 rJava(Urbanek 2018)、sp(Pebesma et al. 2018) 和 virtualspecies(Leroy et al. 2018)等软件包, 在华东区域内随机选择10 000个位点并提取该 位点的 19 个气候因子数据,分别为年平均温度

(Bio1)、均温日较差(Bio2)、等温性(Bio3)、 温度季节变动系数(Bio4)、最热月份最高温 (Bio5)、最冷月份最低温(Bio6)、温度年较 差(Bio7)、最湿季度均温(Bio8)、最干季度 均温(Bio9)、最暖季度均温(Bio10)、最冷季 度均温(Bio11)、年降水量(Bio12)、最湿月 份降水量(Bio13)、最干月份降水量(Bio14)、 降水量季节变化(Bio15)、最湿季节降水量 (Bio16)、最干季节降水量(Bio17)、最暖季 节降水量(Bio18)、最冷季节降水量(Bio19)。 然后对这些气候数据进行相关性分析,将相关 系数的阈值设置为 0.7 (Duan et al. 2014), 19 个气候因子被聚为8类(图2)。每个聚类气候 因子中选出一个因子作为预测物种分布的环境 变量。由于温度季节变动系数(Bio4)与其他 7 个因子的相关性较高,故本研究根据黑熊主



#### 图 2 19 个气候因子的皮尔森相关性聚类

Fig. 2 The clustering of 19 climatic factors for Pearson's correlation

黑色框表示聚为一类的气候因子。

The black boxes in the figure represent climatic factors that cluster into one group.

要生活习性,选取均温日较差(Bio2)、最热月 份最高温(Bio5)、最冷月份最低温(Bio6)、 最湿季度均温(Bio8)、最干月份降水量 (Bio14)、降水量季节变化(Bio15)和最湿季 节降水量(Bio16)共7个气候因子和土地利用 作为物种分布预测分析的环境变量。土地利用 数据来源于空间分辨率为30"的(2010至2100 年)全球暖化背景下四种代表性温室气体浓度 路径(four representative concentration pathway, RCP)—RCP2.6、RCP 4.5、RCP 6.0和 RCP 8.5 下的土地利用数据(Li et al. 2016)。本研究采 用四种代表性温室气体浓度路径下土地利用的 平均值作为因子,来探究土地利用对黑熊潜在 分布区的影响。

在R 3.5.0 软件中,以 biomod 2(Thuiller et al. 2016) 软件包为主要软件包,以 maptools (Bivand et al. 2018c)、maps (Becker et al. 2018a)、mapdata (Becker et al. 2018b)、dismo (Hijmans et al. 2011a)、raster (Hijmans et al. 2011b)、rgdal (Bivand et al. 2018a)、rgeos (Bivand et al. 2018c)、rgl (Adler et al. 2018)、 rJava(Urbanek 2018)、sp(Pebesma et al. 2018)、 virtualspecies (Leroy et al. 2018)、reshape (Wickham 2017)及ggplot2 (Wickham et al. 2018) 软件包为辅助软件包,进行黑熊潜在分 布区的建模和评估。

在 biomod 2 软件包中的人工神经元网络 (artificial neural networks, ANN)、分类树分 析(classification tree analysis, CTA)、柔性判 别分析(flexible discriminant analysis, FDA)、 广义相加模型(generalized additive model, GAM)、推进式回归树(generalized boosting model, GBM)、广义线性模型(generalized linear model, GLM)、多元适应回归样条函数 (multiple adaptive regression splines, MARS)、 最大熵模型(maximum entropy, MaxEnt)、随 机森林(random forests, RF)和表面分布区分 室模型(surface range envelope, SRE)这 10 个模型算法中,有些模型算法是仅仅需要物种 记录出现点的坐标值,而有些模型算法还需要 物种未出现点的坐标值。所以为了满足不同模 型算法的要求,除了记录物种出现点的坐标数 据之外,大多数模型算法还需要缺失或伪缺失 记录。其中,缺失记录是指物种不分布的记录, 这些记录在大多数物种通常不适用,通常使用 伪缺失记录作为替代。伪缺失是指物种对环境 条件可用的记录,无论其存在与否。

在华东区域内无法知道每个地点黑熊的确 切分布情况。在范围内选取 10 000 个随机点作 为伪缺失记录数据集(Duque-Lazo et al. 2016), 然后再随机选取其中的 9 000 个作为背景点 (background points)。所有的模型都使用 "biomod 2" 软件包中的默认设置运行 (Thuiller et al. 2016)。每种模型的交叉验证程 序层数设置为5,重复次数为10,其中,随机 抽取所有数据中的80%部分(存在和伪缺失数 据)用于模型算法训练,剩余数据用于模型算 法测试 (Acosta et al. 2016, Thuiller et al. 2016, Gama et al. 2017)。模型算法的预测性能通过真 实技能统计值(true skill statistics, TSS) (Allouche et al. 2006) 和受试者操作特征曲线 下面积 (area under the curve, AUC) (Fielding et al. 1997)进行评估。而只有当作为评估值的 TSS 和 AUC 都达到最优时(TSS 超过 0.80 且 AUC 大于 0.90) (Duan et al. 2014), 该模型算 法才能被用来后续的估算环境变量的贡献率并 构建模型(Zhang et al. 2019)。最后所有记录出 现和伪缺失的数据用来预测黑熊的分布区,显 示的潜在分布区的地图是多种模型算法潜在分 布值的平均值得到的,旨在减少预测值的偏差 和方差。以 TSS 等于 0.8 为标准将潜在分布区 转换成 0/1 型(适宜和非适宜)二元分布地图, 并计算华东地区黑熊的适生区面积。

# 2 结果

#### 2.1 黑熊红外相机拍摄概况

在 63 台相机里有 5 台监测到黑熊活动,其 中,核心区 3 台 (JL15、JL31、JL32)、缓冲区

4 期

1 台 (JL35)、实验区 1 台 (JL04) (图 1)。2017 至 2020 年间,共有 5 台相机拍摄到 9 张黑熊活动照片和 6 次黑熊活动视频,提取到 7 次黑熊 有效照片 (图 3),其中,JL15 和 JL04 相机各 监测到 2 次黑熊活动。监测到的黑熊活动海拔 范围在 823~1 403 m 之间。根据体型及其外部 形态特征,1 只左前肢受损个体 (图 3a~e)共 监测到 6 次,1 只右前肢受损个体 (图 3f) 被 监测到 1 次,另有1 只被监测到的个体因移动 较快,无法确认其明显形态特征 (图 3g),据 此推断在浙江九龙山国家级自然保护区内现存 黑熊数量可能 2 或 3 只。

#### 2.2 模型的选择和变量的贡献率

10 个模型算法在黑熊预测模型中都表现 出较高的可信度。其中,在黑熊分布区预测模 型中,TSS 值超过 0.80,属于优化的有 ANN、 CTA、FDA、GAM、GBM、GLM、MARS、 MaxEnt 和 RF 这 9 种模型算法,用于检验算法 优化性的 AUC 值超过 0.90 的也是这 9 种模型 算法最优 (图 4),均具有好的预测能力。因此, 在黑熊预测模型中这 9 种模型算法将被用于下 一步的潜在分布区预测。其中,MARS、 MaxEnt、RF 和 GBM 模型算法 TSS 超过 0.90, 在 9 个模型中具有较高的预测精度。MARS、 RF 和 GBM 模型算法的 AUC 大于 0.95,在 9 个模型算法中具有较高的预测精度(图 4)。

在对黑熊潜在分布区预测中,最冷月份最低温(Bio6)和最湿季节降水量(Bio16)两个 气候因子的相对贡献率较高,是影响黑熊分布 的最主要的气候因素(图5)。因此,最冷月份 最低温和最湿季节降水量是限制黑熊分布的主 要环境因子。

#### 2.3 分布区的预测

根据模型预测,黑熊在华东地区存在3个



图 3 2017 至 2020 年间浙江九龙山国家级自然保护区内 7 次监测到的黑熊照片

Fig. 3 Monitoring photos of Ursus thibetanus in Zhejiang Jiulongshan National Natural Reverse from 2017 to 2020

a~e. 左前肢受损个体; f. 右前肢受损个体; g. 无法确认个体。

a - e. Left forelimb damaged; f. Right forelimb damaged; g. Unable to identify.

56卷







# 图 5 用于预测分布区的土地利用和 7 个气候变量的贡献率

# Fig. 5 Importance of the land use and seven environmental variables used to predict the potential distribution

Land use. 土地利用; Bio2. 均温日较差; Bio5. 最热月份最高温; Bio6. 最冷月份最低温; Bio8. 最湿季度均温; Bio14. 最干月份 降水量; Bio15. 降水量季节变化; Bio16. 最湿季节降水量。 Bio2. Mean Diurnal Range; Bio5. Max Temperature of Warmest Month; Bio6. Min Temperature of Coldest Month; Bio8. Mean Temperature of Wettest Quarter; Bio14. Precipitation of Driest Month; Bio15. Precipitation Seasonality; Bio16. Precipitation of Wettest Quarter. 主要潜在分布区,即浙-赣潜在分布区(武夷山 北段-仙霞岭)、浙-赣-皖潜在分布区(天目山-白际山-怀玉山-千里岗)和浙-皖潜在分布区。 3 个主要潜在分布区所占华东地区总面积的比 例小,且各分布区呈岛屿状分布在华东各省 (图 6)。TSS 为 0.8 时,黑熊在华东地区的潜



Fig. 6 Potential distribution of *Ursus thibetanus* in East China

黑点. 华东地区收集到的黑熊发现位点。

Black dots. the collected location of *Ursus thibetanus* found in East China.

#### 3 讨论

#### 3.1 遂昌九龙山黑熊的种群现状

根据 2017 至 2020 年监测到黑熊的体型及 外部形态特征,九龙山保护区内现存约 2 或 3 只黑熊。在监测到黑熊活动的 5 台相机中,有 4 台位于九龙山北面,有 1 台位于九龙山南面, 保护区的其他研究区域未监测到黑熊活动。因 此,在相应区域通过增加红外相机监测位点和 采用样线、样带或样区调查法可加强黑熊的监 测力度,确定保护区内黑熊活动范围。同时, 在保护区外围区域也应增加红外相机的布设, 以在九龙山保护区及其周边区域建立长期的黑 熊及其他野生动物监测网络,以期为九龙山保 护区内黑熊及其他野生动物资源保护提供科学 依据。

在九龙山保护区内,黑熊仅在 823~1403 m 的高海拔区间内被监测到,这一结果与广西元 宝山自然保护区(原宝东等 2010)、黑龙江龙 口自然保护区(陈洋等 2011)、唐家河自然保 护区(侯万儒等 2003b)等地黑熊分布海拔高 度类似。在九龙山海拔 800 m 以上区域的植被 类型主要是针阔混交林和针叶林。这种植被类 型具有较高的郁闭度以及林下存在一些坚果、 浆果类植物(如橡子、核桃、猕猴桃、松子等), 而黑熊偏好栖息于高郁闭度生境以及喜食坚 果、浆果类植物(王文等 2008,夏茜等 2009)。 因此,黑熊的这种生境选择可为其提供良好的 隐蔽条件和较为丰富的食物资源。

#### 3.2 黑熊的分布区预测

我国虽有丰富的大型哺乳类食肉动物资源,但黑熊是受威胁比例最高的动物类群之一 (蒋志刚等 2016a)。随着我国的一系列动物保 护政策的出台,针对野生动物保护与管理的工 作力度不断加大。而扩大濒危野生动物保护成 效的首要工作是要明确该物种的分布情况以及 其生境选择与环境间的关系(苏比奴尔·艾力等 2019)。因此,生境评价和潜在分布区预测是对 物种进行有效保护的基础(罗翀等 2011)。

本研究共获得华东地区已报道的黑熊分布 点 14 个,以土地利用和评估后的 7 个气候因子 (均温日较差 Bio2、最热月份最高温 Bio5、最 冷月份最低温 Bio6、最湿季度均温 Bio8、最干 月份降水量 Bio14、降水量季节变化 Bio15 和 最湿季节降水量 Bio16)为因子,运用物种分 布模型(SDM)中的9种模型算法对黑熊在华 东地区的潜在分布区进行预测。用多种模型算 法预测物种的潜在分布区可以进一步提升预测 结果的准确率。已有的研究结果表明,多种模 型算法可以提高模型预测的准确度,例如,陈 智强等(2021)根据黑麂(Muntiacus crinifrons) 少量分布点(16个)在4个省份进行黑麂的潜 在分布区预测,并得到准确模型预测结果。本 研究结果显示,最冷月份最低温(Bio6)和最 湿季节降水量(Bio16)是限制黑熊分布的主要 环境因子。已有对黑熊潜在分布区的预测研究, 人为和自然因素对黑熊潜在分布区有较大影 响,如 Liu 等(2009)通过黑熊分布点和未分 布点的人为干扰因素和环境因素等进行分析, 发现道路和土地利用对其分布区的影响较大; 齐增湘等(2011)利用 MAXENT 模型对秦岭 山系的黑熊潜在分布区进行预测,人类干扰和 土地利用类型是影响黑熊生境选择的主要生态 因子。这些研究结果均支持环境因子对黑熊分 布的影响,本研究结果则进一步证明,气候暖 化所带来的极端气候对哺乳动物的存续有较大 影响(Zhao et al. 2020)。

本研究结果显示,黑熊在华东地区主要分 布区在武夷山山脉北段-仙霞岭山脉、天目山山 脉以及洞宫山山脉的部分地区,适宜黑熊分布 的面积为 317 km<sup>2</sup>。这结果表明,黑熊在华东 地区的分布区狭小且呈岛屿状分布,各个适宜 区被人口密集区域所分割。而黑熊的活动范围 较大,平均家域面积为 5.1~36.5 km<sup>2</sup>(马逸清 等 1994,侯万儒等 2001),狭小的岛屿状分布, 无法满足维持野生黑熊种群所需的家域面积, 且栖息地岛屿状破碎化分布可能引起的边际效 应、隔离效应、拥挤效应等,将进一步加剧华 东地区黑熊的灭绝风险。

#### 3.3 黑熊的保护建议

4 期

基于本研究的物种分布模型预测结果提出 以下黑熊保护建议。(1)建立3个主要分布区 之间的生态廊道。建立生态廊道在消除生境破 碎化对生物多样性的影响中具有极其重要的作 用(单楠 2019)。因此,利用遥感与地理信息 技术,在3个主要分布区,尤其是高适宜分布 区之间构建正确的生态廊道。(2)加强分布区 内黑熊资源的监测与保护。在分布区内可通过 布置红外相机,建立黑熊及其他动物的监测网 络,加强华东地区黑熊野外资源的监测,为黑 熊野外分布区保护提供科学依据。(3)建立黑 熊的保护网络。政府应加大黑熊保护的宣传力 度,对黑熊造成的经济损失进行补偿,以减少 人熊冲突;加大执法力度,严厉打击偷猎行为, 保护黑熊资源。

## 参考文献

- Acosta A L, Giannini T C, Imperatriz-Fonseca V L, et al. 2016. Worldwide alien invasion: a methodological approach to forecast the potential spread of a highly invasive pollinator. PLoS One, 11(2): e0148295.
- Adler D, Murdoch D, Nenadic O, et al. 2018. rgl: 3D visualization using openGL. [CP /OL]. [2020-12-01]. https://CRAN.R-project. org/package=rgl.
- 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(6): 1223–1232.
- Becker R A, Wilks A R. 2018a. Maps: draw geographical maps. [CP/OL]. [2020-11-12]. https://cran.r-project.org/web/packages/ maps/index.html.
- Becker R A, Wilks A R. 2018b. Mapdata: extra map databases. [CP/OL]. [2020-11-12]. https://cran.r-project.org/web/packages/ mapdata/index.html.
- Bivand R, Keitt T, Rowlingson B, et al. 2018a. rgdal: bindings for the 'geospatial' data abstraction library. [CP/OL]. [2020-11-12]. https://CRAN.R-project.org/package=rgdal.

- Bivand R, Lewin-Koh N, Pebesma E, et al. 2018c. maptools: tools for handling spatial objects. [CP/OL]. [2020-11-12]. http://r-forge. r-project.org/projects/maptools/.
- Bivand R, Rundel C, Pebesma E, et al. 2018b. rgeos: interface to geometry engine. [CP/OL]. [2020-11-12]. https://CRAN.R-project. org/package=rgeos.
- Duan R Y, Kong X Q, Huang M Y, et al. 2014. The predictive performance and stability of six species distribution models. PLoS One 9(11): e112764.
- Duque-Lazo J, van Gils H, Groen T A, et al. 2016. Transferability of species distribution models: The case of *Phytophthora cinnamomi* in Southwest Spain and Southwest Australia. Cological Modelling, 320(24): 62–70.
- Fick S E, Hijmans R J. 2017. WorldClim 2: new 1 km spatial resolution climate surfaces for global land areas. International Journal of Climatology, 37(12): 4302–4315.
- Fielding A H, Bell J F. 1997. A review of methods for the assessment of prediction errors in conservation presence/absence models. Environmental Conservation, 24(1): 38–49.
- Gama M, Crespo D, Dolbeth M, et al. 2017. Ensemble forecasting of *Corbicula fluminea* worldwide distribution: projections of the impact of climate change. Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems, 27(3): 675–684.
- Hijmans R J, Etten J, Cheng J, et al. 2011b. raster: geographic data analysis and modeling. [CP/OL]. [2020-11-12]. https://CRAN. R-project.org/package=raster.
- Hijmans R J, Phillips S, Leathwick J, et al. 2011a. Dismo: species distribution modeling. [CP/OL]. [2020-11-12]. http://CRAN. R-project.org/package=dismo.
- Leroy B, Meynard C N, Bellard C, et al. 2018. virtualspecies: generation of virtual species distributions. [CP/OL]. [2020-12-01]. https://CRAN.R-project.org/package=virtualspecies.
- Li X, Yu L, Sohl T, et al. 2016. A cellular automata downscaling based 1 km global land use data sets (2010–2100). Science Bulletin, 61: 1651–1661.
- Liu F, McShea W, Garshelis D, et al. 2009. Spatial distribution as a measure of conservation needs: an example with Asiatic black bears in south-western China. Diversity and Distributions, 15(4): 649–659.

- Pebesma E, Bivand R, Rowlingson B, et al. 2018. sp: classes and methods for spatial data. [CP/OL]. [2020-12-01]. https://CRAN. R-project.org/package=sp.
- Ripple W J, Estes J A, Beschta R L, et al. 2014. Status and ecological effects of the world's largest carnivores. Science, 343: 1241484.
- Servheen C. 1990. The status and conservation of the bears of the world. International Conference Bear Research and Management Monograph, 2: 1–32.
- Thuiller W, Georges D, Engler R, et al. 2016. Biomod 2: ensemble platform for species distribution modeling. [CP/OL]. [2020-12-01]. https://r-forge.r-project.org/R/?group\_id=302.
- Urbanek S. 2018. rJava: low-level R to Java interface. [CP/OL]. [2020-12-01]. http://cran.wustl.edu/web/packages/rJava/index.html.
- Wang J, Laguardia A, Damerell PJ, Riordan P, Shi K. 2014. Dietary overlap of snow leopard and other carnivores in the Pamirs of Northwestern China. Chinese Science Bulletin, 59(25): 3162– 3168.
- Wickham H, Chang W, Henry L, et al. 2018. ggplot2: create elegant data visualisations using the grammar of graphics. [CP/OL]. [2020-12-01]. http://cran-r.c3sl.ufpr.br/web/packages/ggplot2/index. html.
- Wickham H. 2017. Reshape: flexibly reshape data. [CP/OL]. [2020-12-01]. http://had.co.nz/reshape.
- Zhang Z X, Capinha C, Weterings R, et al. 2019. Ensemble forecasting of the global potential distribution of the invasive Chinese mitten crab, *Eriocheir sinensis*. Hydrobiologia, 826: 367–377.
- Zhao Z J, Hambly C, Shi L L, et al. 2020. Late lactation in small mammals is a critically sensitive window of vulnerability to elevated ambient temperature. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 117(39): 24352–24358.
- 陈洋,夏茜,王文,等.2010.黑龙江龙口自然保护区黑熊春季生 境选择.野生动物学报,31(2):63-68.
- 陈智强,赵增辉,王远飞,等.2021. 基于红外相机技术和 MaxEnt 模型的黑麂(*Muntiacus crinifrons*)活动节律分析和潜在适生 区预测. 生态学报,41(9): DOI: 10.5846/stxb201906041185.
- 程磊, 王燕珍, 郑雯. 2018. 开化南华山再次发现新黑熊. [EB/OL]. [2020-12-01]. http://news.qz828.com/system/2018/10/31/011497364.

shtml.

- 单楠,周可新,潘扬,等. 2019. 生物多样性保护廊道构建方法研 究进展. 生态学报, 39(2): 411-420.
- 刁鲲鹏,李明富,潘世玥,等. 2017. 基于红外相机研究脊椎动物 在唐家河国家级自然保护区动物尸体分解过程中的作用.四 川动物,36(6): 616-623.
- 和梅香,陈俪心,罗概,等. 2018. 凉山山系大熊猫和黑熊适宜生 境预测及重叠分析. 生物多样性, 26(11): 1180-1189.
- 侯万儒,任正隆,胡锦矗. 2003b. 唐家河自然保护区黑熊种群生 存力初步分析. 广西科学, 10(4): 301-304.
- 侯万儒, 任正隆, 喻晓钢, 等. 2003a. 四川九顶山自然保护区野生 黑熊种群生存力初步分析. 西华师范大学学报: 自然科学版, 24(4): 381–384.
- 侯万儒,张泽钧,胡锦矗. 2001. 卧龙自然保护区黑熊种群生存力 初步分析. 动物学研究, 22(5): 357-361
- 胡小龙, 王保洲. 安徽省黑熊资源调查. 安徽大学学报:自然科学 版, 1995, 19(2): 105-109.
- 蒋志刚, 江建平, 王跃招, 等. 2016b. 中国脊椎动物红色名录. 生物多样性, 24(5): 500-551.
- 蒋志刚, 江建平, 王跃招, 等. 2020. 国家濒危物种红色名录的生物多样性保护意义. 生物多样性, 28(5): 558-565.
- 蒋志刚, 李立立, 罗振华, 等. 2016a. 通过红色名录评估研究中国 哺乳动物受威胁现状及其原因. 生物多样性, 24(5): 552-567.
- 雷军成,王莎,王军围,等. 2016. 未来气候变化对我国特有濒危动物黑麂适宜生境的潜在影响. 生物多样性, 24(12): 1390-1399.
- 李晟, 王大军, 肖治术, 等. 2014. 红外相机技术在我国野生动物 研究与保护中的应用与前景. 生物多样性, 22(6): 685-695.
- 刘菊莲,周莹莹,潘建华,等. 2013. 浙江九龙山国家级自然保护 区伯乐树群落特征及种群结构分析. 植物资源与环境学报, 22(3):95-99.
- 刘凯. 2017. 利用红外相机技术调查皖南山区大中型兽类资源以 及黑麂和小麂的活动节律. 芜湖: 安徽师范大学硕士学位论文.
- 刘立伟, 潘成椿, 刘菊莲, 等. 2015. 九龙山国家级自然保护区蝶 类资源与区系. 生态学杂志, 34(12): 3438-3442.
- 刘祺然, 郑东红, 李土云. 2011. 黑熊出没开化 浙江省兽类研究 人员 11 年的担忧终于在古田山被打破. [EB/OL]. [2020-12-01]. http://khnews.zjol.com.cn/khnews/system/2011/09/09/014213235. shtml.

- 罗翀, 徐卫华, 周志翔, 等. 2011. 基于生态位模型的秦岭山系林 麝生境预测. 生态学报, 31(5): 1221-1229.
- 马逸清, 胡锦矗, 翟庆龙. 1994. 中国黑熊. 成都: 四川科学技术 出版社.
- 齐增湘, 徐卫华, 熊兴耀, 等. 2011. 基于 MAXENT 模型的秦岭山 系黑熊潜在生境评价. 生物多样性, 19(5): 343-352.
- 邵昕宁, 宋大昭, 黄巧雯, 等. 2019. 基于粪便 DNA 及宏条形码技 术的食肉动物快速调查及食性分析. 生物多样性: 27(5), 543-556.
- 苏比奴尔·艾力, 热木图拉·阿卜杜克热木, 于苏云江·吗米提敏, 等. 2019. 基于 MaxEnt 模型的新疆鹅喉羚生境适宜性评价. 野生动物学报, 40(1): 27-32.
- 田成,李俊清,杨旭煜,等. 2018. 利用红外相机技术对四川王朗 国家级自然保护区野生动物物种多样性的初步调查. 生物多 样性,26(6): 620-626.
- 汪国海. 2016. 红外相机技术在广西花坪和猫儿山保护区动物监测中的应用比较. 桂林: 广西师范大学硕士学位论文.
- 王文,马建章,余辉亮,等. 2008. 小兴安岭地区黑熊的食性分析.兽类学报,28(1): 7-13.
- 夏茜,王文,沈广爽.2009.小兴安岭南坡黑熊植物性食物营养分析.野生动物杂志,30(3):121-123.
- 肖治术, 李欣海, 姜广顺. 2014. 红外相机技术在我国野生动物监

测研究中的应用. 生物多样性, 22(6): 683-684.

- 徐露霞, 吴佳彬. 2020. 常山首次发现黑熊! 成为浙江第4个"熊 出没"地点. [EB/OL]. [2020-12-01]. https://zj.zjol.com.cn/news. html?id=1469057.
- 许仲林, 彭焕华, 彭守璋. 2015. 物种分布模型的发展及评价方法. 生态学报, 35(2): 557-567.
- 薛亚东,刘芳,郭铁征,等. 2014. 基于相机陷阱技术的阿尔金山 北坡水源地鸟兽物种监测. 兽类学报, 34(2): 164-171.
- 杨强, 郭明珠. 2018. 红外相机在云南高黎贡山国家级自然保护区 赛格管理站野生动物调查的应用. 农家科技, (3): 272-273.
- 原宝东, 蒋爱伍. 2011. 广西元宝山自然保护区黑熊春季觅食生境 特征. 南京林业大学学报: 自然科学版, 35(5): 64-68.
- 章书声, 鲍毅新, 王艳妮, 等. 2012 不同相机布放模式在古田山兽 类资源监测中的比较. 生态学杂志, 31(8): 2016-2022.
- 郑伟成,曹志浩,郑子洪,等. 2020. 浙江丽水白云山与九龙山两 栖动物多样性时空分布的比较. 生态与农村环境学报, 26(6): 697-705.
- 郑伟成,章书声,潘成椿,等. 2014. 红外相机技术监测九龙山国 家级自然保护区鸟兽多样性. 浙江林业科技,34(1):17-22.
- 郑英茂,刘娟,潘成椿,等. 2020. 九龙山国家级自然保护区鸟类 组成特征分析.浙江农林大学学报,37(1):1167–1176.

诸葛阳.1990. 浙江动物志: 兽类. 杭州: 浙江科学技术出版社.

4 期