

• 研究报告 •

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

雷军成¹ 王 莎² 王军围³ 吴 军^{4*}

1 (赣南师范大学地理与规划学院, 江西赣州 341000)

2 (赣南师范大学化学化工学院, 江西赣州 341000)

3 (江苏第二师范学院美术学院, 南京 210013)

4 (环境保护部南京环境科学研究所, 南京 210042)

摘要: 了解气候变化情景下野生动物适宜生境的可能变化, 对未来有关保护策略的制定具有重要意义。本研究利用20世纪60年代至今记录的黑麂(*Muntiacus crinifrons*)分布数据和9种物种分布模型, 模拟了两种温室气体浓度情景(RCP2.6和RCP8.5)下未来两个时期(2050s和2080s)黑麂的适宜生境。结果表明, 到2050s和2080s: (1)在RCP2.6情景下, 黑麂适宜生境面积相对于基准气候条件下将分别减少11.9%和6.2%, 而在RCP8.5情景下, 则分别减少36.9%和52.0%; (2)在RCP2.6情景下, 黑麂适宜生境中的“核心区域”景观面积相对于基准气候条件将分别减少20.5%和10.5%, 而在RCP8.5情景下, 则分别减少55.2%和65.2%; (3)在RCP2.6情景下, 稳定不变适宜生境的面积占基准气候条件下适宜生境面积的比例分别为75.1%和84.2%, 而在RCP8.5情景下, 分别为48.3%和35.8%。总体而言, 在RCP2.6情景下, 与基准气候条件下相比气候变化对黑麂适宜生境的影响并不显著, 而在RCP8.5情景下则较为显著, 主要表现为适宜生境面积和适宜生境中“核心区域”景观的面积明显减少, 不变适宜生境面积占基准气候条件下适宜生境面积的比例大幅度降低。建议未来加强浙江、安徽、江西三省交界地区黑麂适宜生境的保护, 建立黑麂保护区之间的廊道。

关键词: 鹿科; 气候情景; 物种分布模型; 生境; 保护

Potential effects of future climate change on suitable habitat of *Muntiacus crinifrons*, an endangered and endemic species in China

Juncheng Lei¹, Sha Wang², Junwei Wang³, Jun Wu^{4*}

1 School of Geography and Planning, Gannan Normal University, Ganzhou, Jiangxi 341000

2 School of Chemistry and Chemical Engineering, Gannan Normal University, Ganzhou, Jiangxi 341000

3 School of Fine Art, Jiangsu Second Normal University, Nanjing 210013

4 Nanjing Institute of Environmental Science, Ministry of Environmental Protection, Nanjing 210042

Abstract: Understanding the possible changes of suitable habitats for wild animals in the context of climate change has important implications for creating relevant conservation policies in the future. Based on presence records of black muntjac (*Muntiacus crinifrons*), which were recorded from 1960s to current day, and nine species distribution models, we simulated black muntjac's suitable habitat under the future climate scenarios. Future climate scenarios were derived from two greenhouse gas concentrations scenarios (RCP2.6 and RCP8.5), and two future time slices (2050s and 2080s). Results show that, by the 2050s and 2080s, under the scenario of RCP2.6, areas of the suitable habitat of black muntjac will decrease by 11.9% and 6.2%, respectively, while under the scenario of RCP8.5, they will decrease by 36.9% and 52.0%, respectively. Under the scenario of RCP2.6, the areas of 'core' landscape for the suitable habitat of black muntjac will decrease by 20.5% and 10.5%, while under the scenario of RCP8.5, they will decrease by 55.2% and 65.2%, respectively.

收稿日期: 2016-06-06; 接受日期: 2016-11-02

基金项目: 中国清洁发展机制基金赠款项目(1213114)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: wujun@nies.org

Under the scenario of RCP2.6, the proportion of stable suitable habitat to the suitable habitat under baseline climate conditions are 75.1% and 84.2%, while under the scenario of RCP8.5, they are 48.3% and 35.8%, respectively. In general, using the scenario with RCP2.6, the effects of future climate change on suitable habitat of black muntjac are minimal. In contrast, under the scenario of RCP8.5, the future climate will have drastic effects on suitable habitat for black muntjac. In particular, the area of suitable habitat and its 'core' landscape will significantly decrease, and so will the proportion of stable suitable habitat to the suitable habitat under baseline climate conditions. Therefore, we propose to conserve suitable habitat for black muntjac in the border area of Zhejiang, Anhui, and Jiangxi provinces, and to build corridors to connect different nature reserves for black muntjac.

Key words: Cervidae; climate scenario; species distribution model; habitat; conservation

人为原因导致的气候异常变化正以空前的速度改变着地球上物种的分布格局, 物种分布范围向高纬度和(或)高海拔地区移动是最为明显的表现形式(Walther et al, 2002; Parmesan & Yohe, 2003)。根据IPCC第五次评估报告预估结果, 全球气候变化总体趋势在未来几十年间仍不会得到有效遏制, 因此气候变化被认为是21世纪全球生物多样性面临的最主要威胁之一(Dawson et al, 2011; CBD, 2014)。建立自然保护区保护物种赖以生存的生境是珍稀濒危野生动植物保护最为有效的手段(Liu et al, 2001; 张镱铨等, 2015), 但目前的自然保护区多是基于物种的现状分布而设计, 难以满足未来气候变化情景下物种的保护需求(Hole et al, 2011; 吴建国等, 2011)。因此, 了解未来气候变化对珍稀濒危物种适宜生境的影响, 并主动采取针对性的保护措施, 对于提高保护成效至关重要(Austin & Van Niel, 2011; Moritz & Agudo, 2013)。

物种分布模型(species distribution models)基于物种分布点位数据(presence records), 采用特定的算法构建物种分布与环境因子之间的关系, 并可将这一关系映射于不同的空间或(和)时间, 预测物种的适宜生境或潜在分布(Guisan & Thuiller, 2005; 乔慧捷等, 2013)。随着气候变化情景数据的发展, 利用物种分布模型探究未来气候变化背景下物种适宜生境的可能变化已成为相关学科的研究热点(Liu et al, 2011; Araújo & Peterson, 2012)。目前, 物种分布模型已被广泛应用于气候变化潜在影响评估(Elith & Leathwick, 2009; 朱耿平等, 2013)。随着对气候变化影响认识的日渐深入, 利用物种分布模型进行未来气候变化对有蹄类动物的潜在影响评估正逐渐受到重视, 并有许多成功的示例: 如Hu和Jiang (2011)利用物种分布模型评估未来气候变化

对我国特有物种普氏原羚(*Procapra przewalskii*)的潜在影响; Luo等(2015)利用物种分布模型评估未来气候变化对青藏高原32种有蹄类动物的潜在影响。

黑麂(*Muntiacus crinifrons*)俗称蓬头鹿、红头鹿、乌金鹿等, 属偶蹄目鹿科, 为中国特有种, 分布于浙江、安徽、江西、福建等4省(27.5°–31.0° N, 117.0°–121.5° E)约 $7.65 \times 10^4 \text{ km}^2$ 的狭小范围内(程宏毅等, 2008; 程松林等, 2012)。目前黑麂已被列为国家I级重点保护野生动物, 濒危野生动植物种国际贸易公约(CITES)附录I物种, IUCN濒危物种红色名录“易危”(VU)物种(郑伟成等, 2012)。截至目前, 针对黑麂的研究多集中在分子水平上的遗传特性分析、保护区尺度上的生境适宜性评价等方面(陈良等, 2010; 徐文辉等, 2013; Chen et al, 2015), 未见关于大尺度上未来气候变化对黑麂潜在影响的研究报道。本研究基于黑麂分布点位数据、气候数据和气候变化的情景数据, 借助物种分布模型和地理信息系统工具ArcGIS (V9.3, ESRI, 2009), 在了解影响黑麂分布的大尺度气候因子的基础上, 从适宜生境变化角度分析气候变化对其分布区的潜在影响, 以期为这一物种的保护提供基础资料。需要说明的是, 气候变化可通过影响物种生存(直接作用)和栖息地质量(间接作用)来决定动物的分布和迁移扩散, 本研究仅从直接作用的角度展开。

1 研究方法

1.1 黑麂分布数据

黑麂分布数据主要来源于《中国濒危动物红皮书: 兽类》(汪松, 1998), 辅以2010–2016年间公开发表的文献。文献中对黑麂分布的记录方式可分为两类: 一类是直接记录了黑麂的详细分布地(如经纬度、保护区等), 可直接利用; 另一类则仅记录了黑

鹿分布的县域单元,则需通过查询文献进一步确定黑鹿的详细分布地,若文献中无记载,则参照《中国濒危动物红皮书:兽类》中对黑鹿生境需求的描述,在该县域单元内查找黑鹿的适宜生境,作为黑鹿在该县域的分布地。最后在Google Earth中查询分布地点对应的经纬度信息,最终共整理获得黑鹿分布点位45个(附录1)。

1.2 预测环境变量

本研究初步选择受到广泛应用的19个生物气候因子作为基准气候条件下黑鹿适宜生境预测的气候因子(附录2, Hijmans et al, 2005),数据来源于Worldclim网站(<http://www.worldclim.org/>),空间分辨率选用30"×30" (约0.85 km×0.85 km)。由于这些因子间可能存在较强的相关性,本研究利用ArcGIS V9.3软件将它们均裁剪为中国行政区域范围后,利用R软件计算两两间的Spearman相关系数(附录2),相关系数绝对值≥0.7则认为2个气候因子间有强相关性(Braunisch et al, 2013; Olson et al, 2014)。由于极端气候条件对物种分布的限制更为显著(Giovanelli et al, 2010; Liu et al, 2012),因此,在相关性强的气候因子中按优先选择反映极值气候因子的原则,最终选择如下6个生物气候因子,即等温性、温度季节性变化标准差、最暖月最高温、最冷月最低温、最干月降水量和降水量季节性变异系数。

选择21世纪50年代和80年代两个气候变化情景。温室气体浓度情景选择RCP2.6和RCP8.5两种极端的浓度情景(IPCC, 2014),大气环流模型选择澳大利亚联邦科学与工业研究组织开发的CSIRO_MK3_6_0 (以下简称CSIRO)及美国国家航空航天局戈达德空间科学研究所开发的GISS_E2_h (以下简称GISS)(张芳等, 2014)。上述6个气候因子在未来各种气候情景下的数据均来源于国际农业研究磋商组织气候变化、农业和粮食安全研究项目网站(CCAFS, <http://www.ccafs-climate.org/>),空间分辨率与基准气候条件下的气候因子数据保持一致,并同样利用ArcGIS V9.3软件裁剪为中国行政区范围。

1.3 预测模型软件

选择集成了广义线性模型、广义相加模型及最大熵模型等10个物种分布模型的biomod2软件包(<https://cran.r-project.org/web/packages/biomod2/index.html>)作为黑鹿适宜生境预测的模型软件。

biomod2软件包基于R软件平台运行,可在单模型预测结果的基础上进行不同方式的加权集合预测,通常情况下可以提高预测结果的精度和可信度(Brown & Yoder, 2015)。各模型的参数均采用系统默认设置。

1.4 适宜生境预测和气候变化的影响分析

1.4.1 非分布点生成

除面域包络模型外,其他9个模型在进行物种适宜生境预测时,都需要物种非分布点的数据(absence records)。本研究参照Aranda和Lobo (2011)的方法,首先应用biomod2软件包中的面域包络模型生成黑鹿分布的气候包络,然后在气候包络外随机生成2组黑鹿伪非分布点(pseudo-absence records)数据。伪非分布点的数量参照Barbet-Massin等(2012)的建议,广义线性模型、广义相加模型及最大熵模型选择生成10,000个,其他模型均选择生成100个。

1.4.2 适宜生境预测

随机选取70%的分布数据(包括分布点和伪非分布点),分别用除面域包络模型外的其余9个物种分布模型建模,余下30%的分布数据用于模型验证,并进行3次交叉验证。在单模型预测结果的基础上选择受试者曲线(receiver operating characteristic, ROC)下面积(area under the curve, AUC)值≥0.8的模型预测结果,根据公式(1)方法进行加权集合预测(AUC值<0.8的模型不参与集合预测分析)(Biomod Team, 2012):

$$P = \frac{\sum_{i=1}^n (AUC_i \times M_i)}{\sum_{i=1}^n AUC_i} \quad (1)$$

式中, P 为加权平均后的适宜程度分值; AUC_i 为第 i 个模型的AUC值; M_i 为第 i 个模型预测的适宜程度分值; n 为AUC值≥0.8的模型的数量。

在不同气候情景下黑鹿适宜生境分别预测结果的基础上,对同一温室气体浓度情景、同一时期、两种不同大气环流模型下黑鹿适宜生境的预测结果,采用Thuiller (2004)的方法进行集合预测分析。

1.4.3 预测模型检验及气候因子重要性分析

本研究中模型的直接输出结果为取值从0-1,000的适宜度分值形式,其中0表示最不适宜,1,000表示最适宜,而进行气候变化影响分析需要二值化形式,即“适宜生境—1”、“不适宜生境—0”。本研究分别选择非阈值依赖的AUC值和阈值依赖

的真实技巧指数(true skill statistics, TSS)两种评价指标对模型的直接输出结果和阈值划分后的结果进行精度评价。AUC取值从0到1, 其中 $0.90 < \text{AUC} \leq 1.00$ 为“极好”, $0.80 < \text{AUC} \leq 0.90$ 为“好”, $0.70 < \text{AUC} \leq 0.80$ 为“一般”, $0.60 < \text{AUC} \leq 0.70$ 为“差”, $\text{AUC} \leq 0.60$ 为“失败”; TSS取值从-1到1, 其中 $0.85 < \text{TSS} \leq 1.00$ 为“极好”, $0.70 < \text{TSS} \leq 0.85$ 为“好”, $0.55 < \text{TSS} \leq 0.70$ 为“一般”, $0.40 < \text{TSS} \leq 0.55$ 为“差”, $\text{TSS} \leq 0.40$ 为“失败”(Cohen, 1960; Allouche et al, 2006)。阈值选择参考 Jiménez-Valverde 和 Lobo (2007)的建议, 选用基准气候条件下黑麂分布点最低出现概率作为基准气候条件下和未来气候情景下黑麂适宜生境和不适宜生境划分的阈值。

采用刀切法(Jackknife)分析在全国尺度上各气候因子对黑麂分布的重要性(钟良平等, 2009)。

1.4.4 气候变化影响分析

在进行气候变化影响分析前, 将所有结果均转化为同一投影(WGS_1984_Albers, 中央经线: 105.0°E), 栅格数据的分辨率设为 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 。

为反映黑麂适宜生境的空间变化特征, 参考雷军成等(2015)的研究方法, 用公式(2)所示地图代数方法, 计算未来某一气候情景下黑麂适宜生境相对于基准气候条件下黑麂适宜生境的转换关系:

$$SC = CS \times 10 + FS \quad SC \in (00, 01, 10, 11) \quad (2)$$

式中, CS 为基准气候条件下黑麂适宜生境栅格数据; FS 为未来某一气候情景下黑麂适宜生境栅格数据; SC 为黑麂适宜生境转换的栅格数据, $SC = 00$ 表示始终为不适宜生境, $SC = 01$ 表示不适宜生境转换为适宜生境, $SC = 10$ 表示适宜生境转换为不适宜生境, $SC = 11$ 表示始终为适宜生境。

统计基准气候条件下和未来4种气候情景下黑麂适宜生境面积、各种生境转换类型的面积, 并计算某一气候情景下稳定不变适宜生境面积相对于基准气候条件下适宜生境面积的比例。

本研究利用ArcGIS外挂的景观破碎化分析工具 Landscape Fragmentation Analysis (LFT v2.0, <http://clear.uconn.edu/>)进一步分析未来气候变化对黑麂适宜生境景观构成的影响。LFT建立在二元栅格数据基础上, 它通过对比每一栅格点上的景观类型与周围一定距离范围内景观类型的差异来将每一栅格点划分为核心区域(core)、贯穿区域(perforated)、边缘区域(edge)或斑块区域(patch)

(Vogt et al, 2007; 雷军成, 2014)。

2 结果

2.1 模型精度

9个模型分别预测结果的AUC平均值为 0.97 ± 0.04 , TSS平均值为 0.93 ± 0.03 (图1); 多个物种分布模型的集合模型的AUC值为0.98, TSS值为0.96。各模型的表现均达到“好”以上水平, 表明模型预测结果具有较高的精度和可信度。

2.2 气候因子的重要性

在6个气候因子影响黑麂分布的重要性方面, 9个物种分布模型并未得出完全一致的结论(表1), 但在影响黑麂分布最为重要的气候因子方面却高度统一, 均指向“最干月降水量”。另外, 有7个模型的分析结果表明最冷月最低温为仅次于最干月降水量的关键气候因子。

2.3 基准气候条件下黑麂适宜生境分布

基准气候条件下, 黑麂适宜生境主要分布在

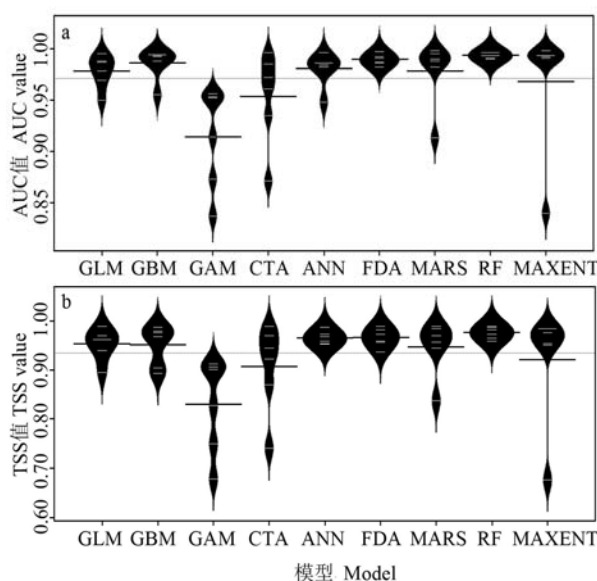


图1 9个物种分布模型对黑麂适宜生境预测结果的AUC值(a)和TSS值(b)。GLM: 广义线性模型; GBM: 广义增强模型; GAM: 广义相加模型; CTA: 分类树分析模型; ANN: 人工神经网络模型; FDA: 混合判别式分析模型; MARS: 多元自适应回归样条函数模型; RF: 随机森林模型; MAXENT: 最大熵模型。

Fig. 1 AUC values (a) and TSS values (b) for the nine models in predicting the suitable habitat for *Muntiacus crinifrons*. GLM, Generalized linear model; GBM, Generalized boosting model; GAM, Generalized additive model; CTA, Classification tree analysis; ANN, Artificial neural networks; FDA, Flexible discriminant analysis; MARS, Multiple adaptive regression splines; RF, Random forest; MAXENT, Maximum entropy.

表1 基于刀切法的各气候因子对黑麂分布的重要性百分比(%)
Table 1 Importance of each climatic factor to the distribution of *Muntiacus crinifrons* based on the Jackknife method (%)

	等温性 Isother- mality	温度季节性变化 标准差 Standard devia- tion of tempera- ture seasonality	最暖月最高温 Max. tempera- ture of warmest month	最冷月最低温 Min. temperature of coldest month	最干月 降水量 Precipitation of driest month	降水量季节性变异 系数 Coefficient of varia- tion of precipitation seasonality
广义线性模型 Generalized linear model	14	24	25	60	76	52
广义相加模型 Generalized additive model	52	44	46	45	88	57
广义增强模型 Generalized boosting model	4	0	0	15	96	1
分类树分析模型 Classification tree analysis	9	0	1	10	98	1
人工神经网络模型 Artificial neural networks	23	58	56	63	96	72
混合判别式分析模型 Flexible discriminant analysis	2	14	13	18	84	0
多元自适应回归样条函数模型 Multiple adaptive regression splines	9	43	10	19	94	6
随机森林模型 Random forest	3	4	3	7	62	7
最大熵模型 Maximum entropy	28	1	12	47	99	13
平均 Average	16	21	18	31	88	23

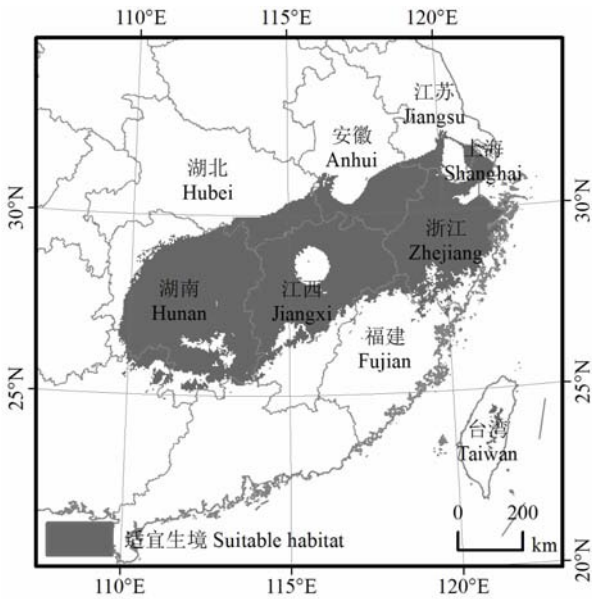


图2 基准气候条件下黑麂适宜生境
Fig. 2 Suitable habitats for *Muntiacus crinifrons* under baseline climate conditions

25°–32° N, 110°–123° E之间的区域, 包括浙江和湖南两省的大部、江西省中北部、安徽省南部以及湖北省东南部等地区, 适宜生境面积约44.9 × 10⁴ km² (图2)。

2.4 气候变化对黑麂适宜生境的潜在影响

2.4.1 适宜生境面积变化

未来两个时期, RCP2.6浓度情景下, 黑麂适宜生境面积相对于基准气候条件下均有所减少, 减少幅度分别为11.9% (2050s)和6.2% (2080s)(图3), 整体呈先减少后增加的趋势; RCP8.5浓度情景下, 黑麂适宜生境面积相对于基准气候条件下将分别减少36.9% (2050s)和52.0% (2080s), 整体呈持续减少的趋势(图3)。

2.4.2 适宜生境景观变化

两种温室气体浓度情景下, 黑麂适宜生境中核心区域面积的变化趋势与适宜生境面积的变化趋势一致。未来两个时期, RCP2.6浓度情景下, 核心区域面积相对基准气候条件下减少的幅度分别为20.5% (2050s)和10.5% (2080s), 整体呈先减少后增加的变化特征(图4); RCP8.5浓度情景下, 核心区域面积相对基准气候条件下将分别减少55.2% (2050s)和65.2% (2080s), 整体呈持续减少的趋势(图4)。

相对于核心区域, 两种温室气体浓度情景下, 黑麂适宜生境中贯穿区域、边缘区域及斑块区域的变化规律均不甚明显。

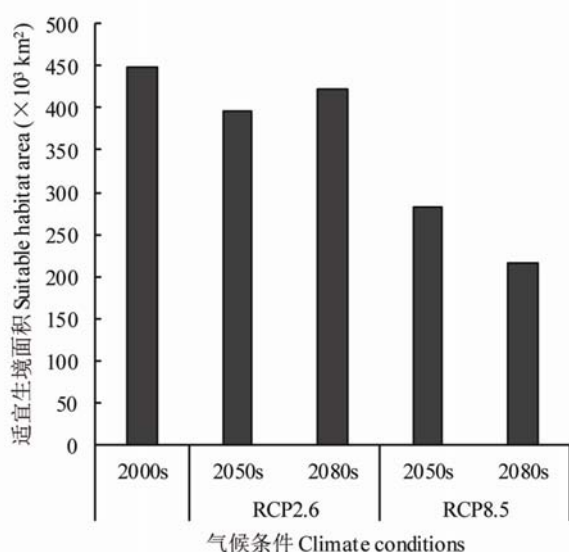


图3 不同气候条件下黑麂适宜生境面积。RCP2.6表示辐射强迫在2100年之前达到约 3W/m^2 的峰值, RCP8.5表示辐射强迫在2100年之前超过 8.5W/m^2 。

Fig. 3 Areas of suitable habitats for *Muntiacus crinifrons* under various climate conditions. RCP2.6 represents radiative forcing peaks at approximately 3W/m^2 before 2100, while RCP8.5 represents radiative forcing reaches $> 8.5\text{W/m}^2$ by 2100.

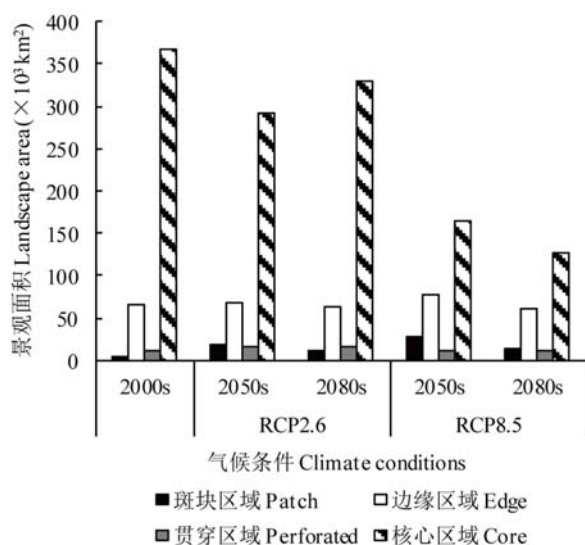


图4 不同气候条件下黑麂适宜生境的景观构成。RCP2.6表示辐射强迫在2100年之前达到约 3W/m^2 的峰值, RCP8.5表示辐射强迫在2100年之前超过 8.5W/m^2 。

Fig. 4 Landscape composition of suitable habitats for *Muntiacus crinifrons* under various climate conditions. RCP2.6 represents radiative forcing peaks at approximately 3W/m^2 before 2100, while RCP8.5 represents radiative forcing reaches $> 8.5\text{W/m}^2$ by 2100.

2.4.3 适宜生境转换关系

RCP2.6浓度情景下, 黑麂适宜生境的空间位置变化并不明显, 未来两个时期稳定不变适宜生境面积占基准气候条件下适宜生境面积的比例分别为75.1%和84.2% (图5)。RCP8.5浓度情景下, 黑麂适宜生境的空间位置发生较为明显的变化, 主要表现为适宜生境的整体萎缩和分布向高纬度地区移动, 未来两个时期不变适宜生境面积占基准气候条件下适宜生境面积的比例分别为48.3%和35.8% (图5)。

3 讨论

3.1 预测方法

目前, 有许多物种分布模型可以用于物种适宜生境的预测研究。在众多的物种分布模型中, 哪一种才是最优的模型, 或者说哪一种才是最适合特定研究对象的模型? 这往往成为困扰研究人员的一个难题(Elith et al, 2006)。虽然有很多学者设法回答这一问题, 但到目前为止尚未有一致的结论(Qiao et al, 2015)。很多学者认为受模型本身的局限和物种-环境关系复杂性的影响, 单一物种分布模型的预测结果通常会存在较多的不确定性, 进而影响模型预测结果的可信度(Thuiller et al, 2009; Guo & Liu, 2010; 翟天庆和李欣海, 2012)。本研究采用多模型集合预测的方法, 从AUC和TSS两种模型评价指标的对比可以看出, 集合模型预测结果的精度较单物种分布模型有较为明显的提高。

3.2 模型表现

本研究中, 虽然AUC和TSS两种模型评价指标均表明模型预测的黑麂适宜生境具有很高的精度和可信度, 但模型预测的基准气候条件下黑麂的适宜生境范围要明显大于其实际的分布区(图2)。造成这一差异的主要原因可能是由于决定物种分布的关键环境要素随空间尺度而异(Pearson & Dawson, 2003), 黑麂的分布除了受气候条件的影响外, 还受地形、植被、水源、干扰等多种因素的影响(陈良等, 2010; 徐文辉等, 2013)。另外, 受制于技术条件因素, 本研究仅仅考虑了气候因素对黑麂分布的直接影响, 而未考虑气候变化引起植被、食物、种间关系(吴伟伟等, 2012; 黎磊和陈家宽, 2014)等的变化对黑麂分布的间接影响。

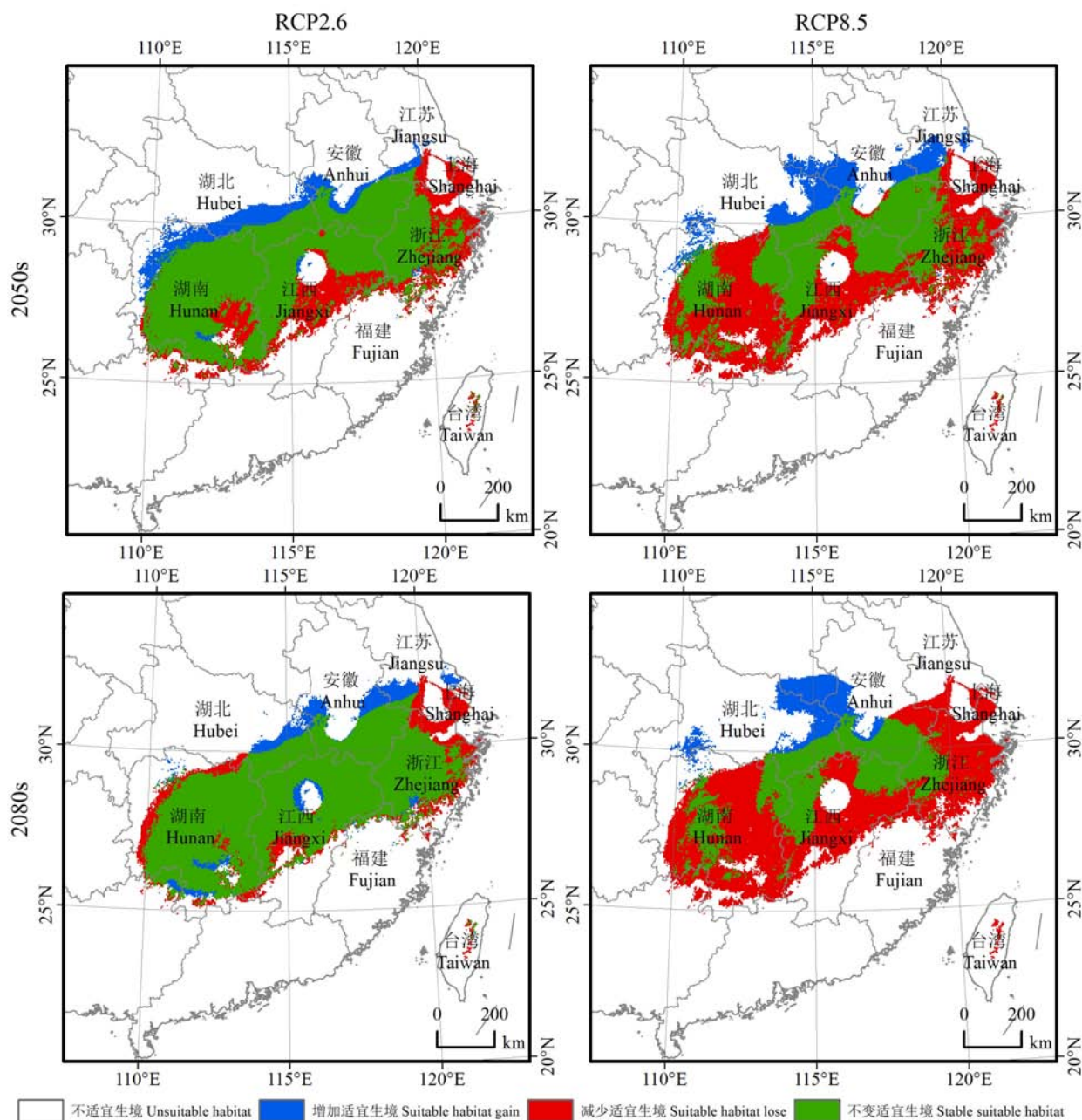


图5 不同气候情景下黑麂适宜生境空间变化。RCP2.6表示辐射强迫在2100年之前达到约 $3\text{W}/\text{m}^2$ 的峰值, RCP8.5表示辐射强迫在2100年之前超过 $8.5\text{W}/\text{m}^2$ 。

Fig. 5 Spatial changes of suitable habitats for *Muntiacus crinifrons* under various climate scenarios. RCP2.6 represents radiative forcing peaks at approximately $3\text{W}/\text{m}^2$ before 2100, while RCP8.5 represents radiative forcing reaches $> 8.5\text{W}/\text{m}^2$ by 2100.

更细致的微生境模型需要未来进一步的研究。

3.3 气候变化影响分析

本研究除了从面积变化角度, 更从景观特征变化角度深入分析了未来气候变化对黑麂适宜生境的潜在影响。对比黑麂适宜生境面积变化特征和景观变化特征可以发现: 同一温室气体浓度情景下,

同一时期黑麂适宜生境中核心斑块景观面积的变化幅度要明显高于同期适宜生境面积的变化幅度。由于生境景观特征能够在很大程度上反映生境质量的高低(张会儒和蔡小虎, 2008; 刘云珠等, 2013), 这要求在今后的相关研究中, 除了要分析气候变化对物种适宜生境面积的影响, 更要同时分析气候变

化对物种适宜生境景观特征的影响。

4 结论与建议

本研究基于黑麂分布点位数据和物种分布模型,研究了2种温室气体浓度情景下、未来2个时期黑麂适宜生境相对于基准气候条件下适宜生境的变化特征。结果表明2种温室气体浓度情景下,未来可能发生的气候变化均会对黑麂适宜生境产生影响,但影响程度和变化趋势并不一致。在RCP2.6浓度情景下,气候变化对黑麂适宜生境产生的影响较弱,且从本世纪中叶至本世纪末,这种影响将逐渐减小;在RCP8.5浓度情景下,气候变化对黑麂适宜生境产生的影响十分明显,且这种影响随着时间推移呈逐渐增强趋势。在同一时期,RCP8.5浓度情景下气候变化对黑麂适宜生境产生的影响要明显强于RCP2.6浓度情景。

虽然不同气候情景下黑麂适宜生境的变化特征并不一致,但所有气候情景下的预测结果均表明,浙江、安徽、江西三省交界地区为黑麂的适宜生境。因此,今后必须针对性地加强这一地区黑麂适宜生境的保护与恢复工作。这一地区目前已有浙江九龙山、古田山、临安清凉峰、安徽清凉峰、江西武夷山、福建武夷山等多个国家级自然保护区,并且在这些自然保护区中都有观察到黑麂的活动,但多数保护区之间空间距离较远,保护区之间缺乏廊道连接,不利于不同保护区之间黑麂种群的基因交流。2010年发布的《中国生物多样性保护与行动战略(2011–2030)》在全国内陆陆地及水域范围内划定了32个生物多样性保护优先区。浙江、安徽、江西三省交界区域的大部分位于32个保护优先区中的“黄山——怀玉山区”以及“武夷山区”,从客观上讲这将有益于未来黑麂和本区域其他物种的长期保护。

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.
- Aranda SC, Lobo JM (2011) How well does presence-only-based species distribution modelling predict assemblage diversity? A case study of the Tenerife flora. *Ecography*, 34, 31–38.
- Araújo MB, Peterson AT (2012) Uses and misuses of bioclimatic envelope modeling. *Ecology*, 93, 1527–1539.
- Austin MP, Van Niel KP (2011) Improving species distribution

- models for climate change studies: variable selection and scale. *Journal of Biogeography*, 38, 1–8.
- Barbet-Massin M, Jiguet F, Albert CH, Thuiller W (2012) Selecting pseudo-absences for species distribution models: how, where and how many? *Methods in Ecology and Evolution*, 3, 327–338.
- Biomod Team (2012) BIOMOD: Tutorial. <http://www.will.chez-alice.fr/pdf/BiomodTutorial.pdf>. (accessed on 2016-05-04)
- Braunisch V, Coppes J, Arlettaz R, Suchant R, Schmid H, Bollmann K (2013) Selecting from correlated climate variables: a major source of uncertainty for predicting species distributions under climate change. *Ecography*, 36, 971–983.
- Brown JL, Yoder AD (2015) Shifting ranges and conservation challenges for lemurs in the face of climate change. *Ecology and Evolution*, 5, 1131–1142.
- CBD (Convention on Biological Diversity) (2014) Global Biodiversity Outlook 4. <https://www.cbd.int/gbo/gbo4/publication/gbo4-en.pdf>. (accessed on 2016-02-22)
- Chen L, Bao YX, Zhang LL, Cheng HY, Zhang JY, Zhou YQ (2010) Seasonal changes in habitat selection by black muntjac (*Muntiacus crinifrons*) in Jiulong Mountain Nature Reserve. *Acta Ecologica Sinica*, 30, 1227–1237. (in Chinese with English abstract) [陈良, 鲍毅新, 张龙龙, 程宏毅, 张家银, 周元庆 (2010) 九龙山保护区黑麂栖息地选择的季节变化. *生态学报*, 30, 1227–1237.]
- Chen X, Jiang K, Bao Y, Wang H, Shi W, Zheng W, Liu J (2015) The mating system study of black muntjac (*Muntiacus crinifrons*) based on fecal DNA. *Acta Ecologica Sinica*, 35, 137–141.
- Cheng HY, Bao YX, Chen L, Zhou XW, Hu ZY, Ge BM (2008) Genetic diversity of the black muntjac *Muntiacus crinifrons* population in the central area of Anhui and Zhejiang Province. *Acta Zoologica Sinica*, 54, 96–103. (in Chinese with English abstract) [程宏毅, 鲍毅新, 陈良, 周襄武, 胡知渊, 葛宝明 (2008) 黑麂皖-浙分布中心种群的遗传多样性. *动物学报*, 54, 96–103.]
- Cheng SL, Yuan RB, Zou SC (2013) Black muntjac (*Muntiacus crinifrons*) found in Wuyishan, Jiangxi. *Acta Theriologica Sinica*, 33, 94. (in Chinese) [程松林, 袁荣斌, 邹思成 (2013) 江西武夷山发现黑麂. *兽类学报*, 33, 94.]
- Cheng SL, Zou SC, Yuan RB (2012) Preliminary report of *Muntiacus crinifrons* and its habitat survey in Wuyishan National Natural Reserve, Jiangxi, China. *Jiangxi Science*, 30, 594–598. (in Chinese with English abstract) [程松林, 邹思成, 袁荣斌 (2012) 江西武夷山国家级自然保护区黑麂及其生境调查初报. *江西科学*, 30, 594–598.]
- Cohen J (1960) A coefficient of agreement for nominal scales. *Educational and Psychological Measurement*, 20, 37–46.
- Dawson TP, Jackson ST, House JI, Prentice IC, Mace GM (2011) Beyond predictions: biodiversity conservation in a changing climate. *Science*, 332, 53–58.
- 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 ST, Richardson K, 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, Leathwick JR (2009) Species distribution models: ecological explanation and prediction across space and time. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 40, 677–697.
- Environmental Systems Research Institute (ESRI) (2009) ArcGIS Desktop 9.3 help. <http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/index.cfm?TopicName=welcome>. (accessed on 2016-04-15)
- Giovanelli JGR, de Siqueira MF, Haddad CFB, Alexandrino J (2010) Modeling a spatially restricted distribution in the Neotropics: how the size of calibration area affects the performance of five presence-only methods? *Ecological Modelling*, 221, 215–224.
- Guisan A, Thuiller W (2005) Predicting species distribution: offering more than simple habitat models. *Ecology Letters*, 8, 993–1009.
- Guo QH, Liu Y (2010) ModEco: an integrated software package for ecological niche modeling. *Ecography*, 33, 1–6.
- 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.
- Hole DG, Huntley B, Arinaitwe J, Butchart SH, Collingham YC, Fishpool LD, Pain DJ, Willis SG (2011) Toward a management framework for networks of protected areas in the face of climate change. *Conservation Biology*, 25, 305–315.
- Hu JH, Jiang Z (2011) Climate change hastens the conservation urgency of an endangered ungulate. *PLoS ONE*, 6, e22873.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2014) Climate Change 2014: Synthesis Report. http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/AR5_SYR_FINAL_All_Topics.pdf. (accessed on 2016-02-20)
- Jiménez-Valverde A, Lobo JM (2007) Threshold criteria for conversion of probability of species presence to either-or presence-absence. *Acta Oecologica*, 31, 361–369.
- Lei JC (2014) Study on the Change Characteristics of Suitable Habitat for Sichuan Hill-Partridge and Identification of the Critical Conserve Region under Future Climate Change. PhD dissertation, Nanjing Forestry University, Nanjing. (in Chinese with English abstract) [雷军成 (2014) 气候变化情景下四川山鹧鸪适宜生境变化特征研究与保护关键区识别. 博士学位论文, 南京林业大学, 南京.]
- Lei JC, Xu HG, Wu J, Guan QW (2015) IPCC AR5-based analysis of variation of potential suitable habitats for evergreen broadleaf forest in China. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 31(1), 69–76. (in Chinese with English abstract) [雷军成, 徐海根, 吴军, 关庆伟 (2015) 基于IPCC AR5的我国常绿阔叶林潜在适宜生境变化分析. 生态与农村环境学报, 31(1), 69–76.]
- Li L, Chen JK (2014) Influence of climate change on wild plants and the conservation strategies. *Biodiversity Science*, 22, 549–563. (in Chinese with English abstract) [黎磊, 陈家宽 (2014) 气候变化对野生植物的影响及保护对策. 生物多样性, 22, 549–563.]
- Liu H, Wang W, Song G, Qu Y, Li S, Fjeldsø J, Lei F (2012) Interpreting the process behind endemism in China by integrating phylogeography and ecological niche models of the *Stachyridopsis ruficeps*. *PLoS ONE*, 7, e46761.
- Liu J, Linderman M, Ouyang Z, An L, Yang J, Zhang H (2001) Ecological degradation in protected areas: the case of Wolong Nature Reserve for giant pandas. *Science*, 292, 98–101.
- Liu X, Guo Z, Ke ZW, Wang SP, Li YM (2011) Increasing potential risk of a global aquatic invader in Europe in contrast to other continents under future climate change. *PLoS ONE*, 6, e18429.
- Liu YZ, Shi LL, Duo HR, Peng BY, Lü C, Zhu Y, Lei GC (2013) Disturbance-driven changes to landscape patterns and responses of waterbirds at West Dongting Lake, China. *Biodiversity Science*, 21, 666–676. (in Chinese with English abstract) [刘云珠, 史林鹭, 朵海瑞, 彭波涌, 吕偲, 朱轶, 雷光春 (2013) 人为干扰下西洞庭湖湿地景观格局变化及冬季水鸟的响应. 生物多样性, 21, 666–676.]
- Luo Z, Jiang Z, Tang S (2015) Impacts of climate change on distributions and diversity of ungulates on the Tibetan Plateau. *Ecological Applications*, 25, 24–38.
- Moritz C, Agudo R (2013) The future of species under climate change: resilience or decline? *Science*, 341, 504–508.
- Olson LE, Sauder JD, Albrecht NM, Vinkey RS, Cushman SA, Schwartz MK (2014) Modeling the effects of dispersal and patch size on predicted fisher (*Pekania [Martes] pennanti*) distribution in the US Rocky Mountains. *Biological Conservation*, 169, 89–98.
- Parmesan C, Yohe G (2003) A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature*, 421, 37–42.
- Pearson RG, Dawson TP (2003) Predicting the impacts of climate change on the distribution of species: are bioclimate envelope models useful? *Global Ecology and Biogeography*, 12, 361–371.
- Qiao H, Soberón J, Peterson AT (2015) No silver bullets in correlative ecological niche modelling: insights from testing among many potential algorithms for niche estimation. *Methods in Ecology and Evolution*, 6, 1126–1136.
- Qiao HJ, Hu JH, Huang JH (2013) Theoretical basis, future directions, and challenges for ecological niche models. *Scientia Sinica Vitae*, 43, 915–927. (in Chinese with English abstract) [乔慧捷, 胡军华, 黄继红 (2013) 生态位模型的理论基础、发展方向与挑战. 中国科学: 生命科学, 43, 915–927.]
- Thuiller W (2004) Patterns and uncertainties of species' range shifts under climate change. *Global Change Biology*, 10,

- 2020–2027.
- Thuiller W, Lafourcade B, Engler R, Araújo MB (2009) BIOMOD—a platform for ensemble forecasting of species distributions. *Ecography*, 32, 369–373.
- Vogt P, Riitters KH, Estreguil C, Kozak J, Wade TG, Wickham JD (2007) Mapping spatial patterns with morphological image processing. *Landscape Ecology*, 22, 171–177.
- Walther G, Post E, Convey P, Menzel A, Parmesan C, Beebee TJC, Fromentin J, Hoegh-Guldberg O, Bairlein F (2002) Ecological responses to recent climate change. *Nature*, 416, 389–395.
- Wang S (1998) China Red Data Book of Endangered Animals: Mammalia. Science Press, Beijing. (in Chinese) [汪松 (1998) 中国濒危动物红皮书: 兽类. 科学出版社, 北京.]
- Wu JG, Wang L, Yang YW, Dai SF, Liu JQ, Zhu G (2011) Nature reserve need to face the challenge of climate change. *Environmental Protection*, (4), 30–32. (in Chinese) [吴建国, 王亮, 杨永伟, 代拴发, 刘建泉, 朱高 (2011) 自然保护区还需面对气候变化挑战. 环境保护, (4), 30–32.]
- Wu WW, Xu HG, Wu J, Cao MC (2012) The impact of climate change on birds: a review. *Biodiversity Science*, 20, 108–115. (in Chinese with English abstract) [吴伟伟, 徐海根, 吴军, 曹铭昌 (2012) 气候变化对鸟类影响的研究进展. 生物多样性, 20, 108–115.]
- Xu WH, Yue XL, Gao P, Xia SJ (2013) Potential ecological habitat of *Muntiacus crinifrons* within National Nature Reserve of Mount Tianmu, Zhejiang Province. *Journal of Zhejiang A & F University*, 30, 896–903. (in Chinese with English abstract) [徐文辉, 岳晓雷, 高鹏, 夏淑娟 (2013) 天目山国家级自然保护区黑麂潜在栖息地的生态适宜性. 浙江农林大学学报, 30, 896–903.]
- Zhai TQ, Li XH (2012) Climate change induced potential range shift of the crested ibis based on ensemble models. *Acta Ecologica Sinica*, 32, 2361–2370. (in Chinese with English abstract) [翟天庆, 李欣海 (2012) 用组合模型综合比较的方法分析气候变化对朱鹮潜在生境的影响. 生态学报, 32, 2361–2370.]
- Zhang F, Dong M, Wu TW (2014) Evaluation of the ENSO features simulations as done by the CMIP5 models. *Acta Meteorologica Sinica*, 72, 30–48. (in Chinese with English abstract) [张芳, 董敏, 吴统文 (2014) CMIP5 模式对 ENSO 现象的模拟能力评估. 气象学报, 72, 30–48.]
- Zhang HR, Cai XH (2008) Research advances in landscape pattern and dynamics. *Journal of Southwest Forestry College*, 28, 23–28. (in Chinese with English abstract) [张会儒, 蔡小虎 (2008) 景观格局动态研究进展. 西南林学院学报, 28, 23–28.]
- Zhang YL, Hu ZJ, Qi W, Wu X, Bai WQ, Li LH, Ding MJ, Liu LS, Wang ZF, Zheng D (2015) Assessment of protection effectiveness of nature reserves on the Tibetan Plateau based on net primary production and the large-sample-comparison method. *Acta Geographica Sinica*, 70, 1027–1040. (in Chinese with English abstract) [张镔锂, 胡忠俊, 祁威, 吴雪, 摆万奇, 李兰晖, 丁明军, 刘林山, 王兆锋, 郑度 (2015) 基于NPP数据和样区对比法的青藏高原自然保护区保护成效分析. 地理学报, 70, 1027–1040.]
- Zheng WC, Liu J, Pan CC, Bao YX, Lin JJ (2012) Review of research on black muntjac (*Muntiacus crinifrons*), an endemic species in China. *Chinese Journal of Wildlife*, 33, 283–288. (in Chinese with English abstract) [郑伟成, 刘军, 潘成椿, 鲍毅新, 林杰君 (2012) 中国特有动物黑麂的研究. 野生动物, 33, 283–288.]
- Zhong GP, Shen WJ, Wan FH, Wang JJ (2009) Potential distribution areas of *Solanum rostratum* in China: a prediction with GARP niche model. *Chinese Journal of Ecology*, 28, 162–166. (in Chinese with English abstract) [钟艮平, 沈文君, 万方浩, 王进军 (2009) 用GARP生态位模型预测刺萼龙葵在中国的潜在分布区. 生态学杂志, 28, 162–166.]
- Zhu GP, Liu GQ, Bu WJ, Gao YB (2013) Ecological niche modeling and its applications in biodiversity conservation. *Biodiversity Science*, 21, 90–98. (in Chinese with English abstract) [朱耿平, 刘国卿, 卜文俊, 高玉葆 (2013) 生态位模型的基本原理及其在生物多样性保护中的应用. 生物多样性, 21, 90–98.]

(责任编辑: 李义明 责任编辑: 闫文杰)

附录 Supplementary Material

附录1 黑麂分布点来源及处理方法

Appendix 1 Sources and processing methods for *Muntiacus crinifrons*' presence records
<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2016152-1.pdf>

附录2 19个生物气候因子之间的Spearman相关系数

Appendix 2 Pair-wise Spearman's correlation coefficient for the 19 bioclimatic factors
<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2016152-2.pdf>

附录 1 黑麂分布点来源及处理方法

Appendix 1 Sources and processing methods for *Muntiacus crinifrons*' presence records

县域名	资料来源	数据处理方法	文献来源
桐庐	《中国濒危动物红皮书》	县域单元内选择适生区	/
安吉	《中国濒危动物红皮书》	县域单元内选择适生区	/
余杭	《中国濒危动物红皮书》	县域单元内选择适生区	/
临安	《中国濒危动物红皮书》	文献记录的详细分布地	徐文辉等, 2013
富阳	《中国濒危动物红皮书》	县域单元内选择适生区	/
诸暨	《中国濒危动物红皮书》	县域单元内选择适生区	/
建德	《中国濒危动物红皮书》	县域单元内选择适生区	/
淳安	《中国濒危动物红皮书》	县域单元内选择适生区	/
东阳	《中国濒危动物红皮书》	县域单元内选择适生区	/
金华	《中国濒危动物红皮书》	县域单元内选择适生区	/
开化	《中国濒危动物红皮书》	文献记录的详细分布地	章书声, 鲍毅新, 王艳妮, 方平福, 叶彬 (2012) 基于红外相机技术的黑麂活动节律. 兽类学报, 32, 368–372.
常山	《中国濒危动物红皮书》	县域单元内选择适生区	/
衢县	《中国濒危动物红皮书》	县域单元内选择适生区	/
遂昌	《中国濒危动物红皮书》	文献记录的详细分布地	陈良, 鲍毅新, 张龙龙, 程宏毅, 张家银, 周元庆 (2010) 九龙山保护区黑麂栖息地选择的季节变化. 生态学报, 30, 1227–1237.
武义	《中国濒危动物红皮书》	县域单元内选择适生区	/
缙云	《中国濒危动物红皮书》	县域单元内选择适生区	/
松阳	《中国濒危动物红皮书》	县域单元内选择适生区	/
云和	《中国濒危动物红皮书》	县域单元内选择适生区	/
龙泉	《中国濒危动物红皮书》	文献记录的详细分布地	刘龙友, 周仁爱 (2015) 龙泉市天平山自然保护区保护与经营设想. 安徽农学通报, 21, 66–67.
庆元	《中国濒危动物红皮书》	文献记录的详细分布地	吴方兴, 姚德炉 (2003) 迷途黑麂放归自然. 浙江林业, (11), 40.
宁海	《中国濒危动物红皮书》	县域单元内选择适生区	/
临海	《中国濒危动物红皮书》	县域单元内选择适生区	/
仙居	杨德盛 (1998) 黑麂跑进农民家. 大自然, (5), 24.	文献记录的详细分布地	杨德盛 (1998) 黑麂跑进农民家. 大自然, (5), 24.
景宁	陈丽燕, 商良忠, 周贤兴, 柳海林 (2015) 景宁县野生动物的管理对策. 农业与技术, 35(23), 174–176.	县域单元内选择适生区	/
广德	《中国濒危动物红皮书》	县域单元内选择适生区	/
宁国	《中国濒危动物红皮书》	县域单元内选择适生区	/
泾县	《中国濒危动物红皮书》	县域单元内选择适生区	/

雷军成, 王莎, 王军围, 吴军. 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, 2016, 24 (12): 1390–1399.

<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016152>

青阳	《中国濒危动物红皮书》	县域单元内选择适生区	/	
贵池	《中国濒危动物红皮书》	县域单元内选择适生区	/	
石埭	《中国濒危动物红皮书》	文献记录的详细分布地		张应松 (2015) 生态明珠牯牛降大放异彩盼“统一”. 资源与人居环境, (12), 42–44.
太平	《中国濒危动物红皮书》	县域单元内选择适生区	/	
旌德	《中国濒危动物红皮书》	县域单元内选择适生区	/	
绩溪	《中国濒危动物红皮书》	县域单元内选择适生区	/	
歙县	《中国濒危动物红皮书》	县域单元内选择适生区	/	
休宁	《中国濒危动物红皮书》	文献记录的详细分布地		张海军, 李健, 施燕峰, 张晓梅, 徐春宏, 单祥年 (2004) 黑麂线粒体基因组序列分析. 中国生物化学与分子生物学报, 20, 513–518.
黟县	《中国濒危动物红皮书》	县域单元内选择适生区	/	
祁门	《中国濒危动物红皮书》	县域单元内选择适生区	/	
东至	《中国濒危动物红皮书》	县域单元内选择适生区	/	
婺源	《中国濒危动物红皮书》	县域单元内选择适生区	/	
玉山	《中国濒危动物红皮书》	县域单元内选择适生区	/	
铅山	程松林, 袁荣斌, 邹思成 (2013) 江西武夷山发现黑麂. 兽类学报, 33, 94–93.	文献记录的详细分布地		程松林, 袁荣斌, 邹思成 (2013) 江西武夷山发现黑麂. 兽类学报, 33, 93–94.
德兴	程松林, 袁荣斌, 邹思成 (2013) 江西武夷山发现黑麂. 兽类学报, 33, 94–93.	县域单元内选择适生区	/	
浮梁	程松林, 袁荣斌, 邹思成 (2013) 江西武夷山发现黑麂. 兽类学报, 33, 94–93.	县域单元内选择适生区	/	
浦城	《中国濒危动物红皮书》	县域单元内选择适生区	/	
建阳	张春英, 洪伟, 吴承祯, 陈平留, 林从华 (2009) 武夷山自然保护区珍稀动植物空间分布特征研究. 北华大学学报(自然科学版), 10, 258–264.	县域单元内选择适生区	/	

徐文辉, 岳晓雷, 高鹏, 夏淑娟 (2013) 天目山国家级自然保护区黑麂潜在栖息地的生态适宜性. 浙江农林大学学报, 30, 896–903.

雷军成, 王莎, 王军围, 吴军. 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, 2016, 24 (12): 1390–1399.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2016152>

附录 2 19 个生物气候因子之间的 Spearman 相关系数

Appendix 2 Pair-wise Spearman's correlation coefficient for the 19 bioclimatic factors

	bio_1	bio_2	bio_3	bio_4	bio_5	bio_6	bio_7	bio_8	bio_9	bio_10	bio_11	bio_12	bio_13	bio_14	bio_15	bio_16	bio_17	bio_18	bio_19
bio_1																			
bio_2	−0.60																		
bio_3	−0.13	0.39																	
bio_4	−0.29	0.32	−0.69																
bio_5	0.83	−0.32	−0.40	0.19															
bio_6	0.92	−0.59	0.15	−0.59	0.62														
bio_7	−0.42	0.53	−0.51	0.97	0.07	−0.69													
bio_8	0.87	−0.42	−0.36	0.10	0.94	0.67	−0.03												
bio_9	0.89	−0.49	0.24	−0.62	0.60	0.97	−0.70	0.63											
bio_10	0.92	−0.51	−0.39	0.04	0.97	0.74	−0.11	0.96	0.70										
bio_11	0.91	−0.53	0.21	−0.62	0.60	0.99	−0.71	0.65	0.98	0.71									
bio_12	0.52	−0.78	−0.13	−0.49	0.15	0.55	−0.62	0.28	0.48	0.37	0.55								
bio_13	0.51	−0.75	−0.14	−0.44	0.15	0.51	−0.57	0.30	0.45	0.37	0.52	0.98							
bio_14	0.56	−0.82	−0.31	−0.33	0.29	0.53	−0.49	0.37	0.47	0.47	0.51	0.90	0.85						
bio_15	−0.57	0.54	0.17	0.27	−0.44	−0.57	0.37	−0.39	−0.56	−0.50	−0.54	−0.39	−0.25	−0.60					
bio_16	0.51	−0.75	−0.11	−0.48	0.13	0.53	−0.60	0.28	0.46	0.35	0.53	0.99	0.99	0.86	−0.30				
bio_17	0.53	−0.82	−0.26	−0.38	0.24	0.53	−0.54	0.32	0.48	0.43	0.51	0.90	0.85	0.98	−0.61	0.86			
bio_18	0.49	−0.73	−0.10	−0.47	0.11	0.51	−0.59	0.27	0.44	0.33	0.52	0.98	0.99	0.85	−0.27	1.00	0.85		
bio_19	0.51	−0.81	−0.23	−0.41	0.22	0.53	−0.56	0.30	0.48	0.40	0.50	0.88	0.83	0.97	−0.62	0.85	1.00	0.83	

bio_1 = 年均温; bio_2 = 昼夜温差月均值; bio_3 = 等温性; bio_4 = 温度季节性变化标准差; bio_5 = 最暖月最高温; bio_6 = 最冷月最低温; bio_7 = 温度年较差; bio_8 = 最湿季均温; bio_9 = 最干季均温; bio_10 = 最暖季均温; bio_11 = 最冷季均温; bio_12 = 年降水量; bio_13 = 最湿月降水量; bio_14 = 最干月降水量; bio_15 = 降水量季节性变异系数; bio_16 = 最湿季降水量; bio_17 = 最干季降水量; bio_18 = 最暖季降水量; bio_19 = 最冷季降水量

bio_1 = Mean annual temperature; bio_2 = Mean diurnal range (Mean of monthly (max temperature – min temperature)); bio_3 = Isothermality (bio_2/bio_7 × 100); bio_4 = Standard deviation of temperature seasonality; bio_5 = Max. temperature of warmest month; bio_6 = Min. temperature of coldest month; bio_7 = Temperature annual range (bio_5 – bio_6); bio_8 = Mean temperature of wettest quarter; bio_9 = Mean temperature of driest quarter; bio_10 = Mean temperature of warmest quarter; bio_11 = Mean temperature of coldest quarter; bio_12 = Annual precipitation; bio_13 = Precipitation of wettest month; bio_14 = Precipitation of driest month; bio_15 = Coefficient of variation of precipitation seasonality; bio_16 = Precipitation of wettest quarter; bio_17 = Precipitation of driest quarter; bio_18 = Precipitation of warmest quarter; bio_19 = Precipitation of coldest quarter