



## 研究论文 ORIGINAL PAPERS

## 基于集合模型的中国白鹇栖息地适宜性研究

孙 雪<sup>1</sup>, 龙泽旭<sup>1\*</sup>, 谭成江<sup>2</sup>(1. 贵州师范学院生物科学学院, 贵阳 550018;  
2. 贵州茂兰国家级自然保护区管理局, 荔波 558400)

## 稿件运行过程

收稿日期: 2025-07-28

修回日期: 2025-11-24



## 关键词: 白鹇;

栖息地适宜性;

集合模型;

物种分布模型;

环境因子

**Keywords:** Silverpheasant (*Lophura nycthemera*);  
Habitat suitability;  
Ensemble model;  
Species distribution model;  
Environmental factors

中图分类号: Q958.1

文献标志码: A

文章编号:

2310-1490(2026)-03-0384-10

DOI: 10.12375/ysdwxb.202507030

## 摘 要

白鹇(*Lophura nycthemera*)是国家二级重点保护野生动物,因目前缺乏区域尺度的栖息地适宜性评价,制约了其大尺度保护管理措施的制定,故本研究采用集合物种分布模型(整合 GAM、GLM、GBM、MaxEnt 和 RF 五种算法)建立白鹇分布与环境变量之间的函数关系,并预测中国白鹇栖息地适宜性及其空间分布范围。结果显示:集合模型的预测性能(AUC、TSS 和 BOYCE 分别为 0.90、0.63 和 0.99)显著优于单算法模型;影响白鹇栖息地适宜性的主要因子为年降水总量、坡度、海拔和人类足迹指数;集合模型预测中国白鹇适宜栖息地面积约  $4.11 \times 10^5 \text{ km}^2$ ,主要分布于云南、福建、江西、四川、广东、浙江、湖南和广西,江苏适宜栖息地面积最小且破碎化程度最高。研究结果可为白鹇在区域尺度上的保护规划、栖息地管理与生态修复提供科学依据。

Habitat Suitability of Chinese  
Silver Pheasant Based on Ensemble ModelSUN Xue<sup>1</sup>, LONG Zexu<sup>1\*</sup>, TAN Chengjiang<sup>2</sup>(1. School of Biological Sciences, Guizhou Education University,  
Guiyang 550018, China;2. Guizhou Maolan National Nature Reserve Administration Bureau,  
Libo 558400, China)

**基金项目:** 贵州省科技计划项目(黔科合支撑[2023]一般225);贵州师范学院自然科学研究基金项目(2021BS041, 2021BS042, 2024YB005);  
贵州省教育厅高等学校科学研究青年项目(黔教技[2022]254号);茂兰保护区雉类种群专项调查

**第一作者简介:** 孙雪(1989—),女,博士研究生;主要从事野生动物保护与利用研究。E-mail:sunxue0320@163.com

**\* 通信作者:** 龙泽旭, E-mail:longzexu1990@gznc.edu.cn

**Abstract:** The silver pheasant (*Lophura nycthemera*) is a national second class key protected wildlife in China, the lack of habitat suitability assessment for the silver pheasant at regional scale restricts the development of large-scale conservation and management measures. An ensemble species distribution model (GAM, GLM, GBM, MaxEnt, and RF) was used to establish the functional relationship between the silver pheasant and environmental variables, and to predict the habitat suitability and spatial distribution of the silver pheasant in China. The results showed that the ensemble model's predictive performance (AUC, TSS and BOYCE values were 0.90, 0.63 and 0.99, respectively) was significantly better than that of single-algorithm model. The main factors affecting habitat suitability included annual precipitation, slope, elevation and the human footprint index. The ensemble model predicted that the suitable habitat area for the silver pheasant in China was approximately  $4.11 \times 10^5 \text{ km}^2$ , were primarily distributed in Yunnan, Fujian, Jiangxi, Sichuan, Guangdong, Zhejiang, Hunan, and Guangxi, with Jiangsu being the smallest and the most fragmented. These results would provide a scientific basis for conservation planning and habitat management and ecological restoration of the silver pheasant at regional-scale.

栖息地是野生动物生存与繁衍的场所,也是维持物种生命活动所需各类资源的总和<sup>[1]</sup>。适宜的栖息环境是物种持续生存和成功繁衍的基础,对适宜栖息地的识别是科学保护管理决策的重要依据。

白鹇 (*Lophura nycthemera*) 属鸡形目 (Galliformes) 雉科 (Phasianidae) 鹇属 (*Lophura*), 主要分布于中国、东南亚及南亚部分地区, 且在中国南方山区分布较广<sup>[2]</sup>。白鹇以其优雅的羽色和形态受到人们的关注。然而, 受人类活动、土地利用变化和气候变迁的影响, 其栖息地正面临破碎化和退化的威胁, IUCN 评估全球白鹇种群数量呈下降趋势<sup>[3],[4]377</sup>。作为国家二级重点保护野生动物<sup>[5]</sup>, 白鹇的栖息地保护对于维护区域生物多样性和生态平衡具有重要意义。目前, 针对白鹇的研究主要集中在种群数量<sup>[2]</sup>、行为特征<sup>[6]</sup>、活动节律<sup>[6-10]</sup>和栖息地选择<sup>[11-13]</sup>等方面, 其中栖息地选择相关研究虽相对较多, 但多集中于保护区尺度, 缺乏区域尺度上的栖息地适宜性评价, 制约了大尺度保护管理策略的制定与实施。已有研究指出, 白鹇倾向于回避人为干扰<sup>[14]</sup>、偏好斑块面积大、植被盖度高的生境<sup>[15]</sup>, 并选择食物资源丰富的区域<sup>[12]</sup>。这些结论为开展大尺度栖息地建模中的环境因子筛选提供了重要参考。

物种栖息地评价有多种方法, 常使用的方法包括栖息地适宜性指数 (habitat suitability index, HSI)、生态位因子分析 (ecological niche factor analysis, ENFA) 和最大熵模型 (maximum entropy model, Max-

Ent) 等。HSI 模型在了解物种栖息地需求的基础上, 结合 GIS 技术加权得到栖息地适宜性值<sup>[16-17]</sup>, 其操作简便但依赖专家经验, 具有一定的主观性<sup>[18]</sup>, 而其他方法可统称为物种分布模型 (species distribution models, SDMs)。SDMs 通过模拟物种生态位, 建立物种与环境变量之间的函数关系, 然后将该函数关系映射到地理空间, 从而得到物种的时空分布<sup>[19]</sup>。经过近 40 年的发展, SDMs 理论与工具已较为成熟, 成为生态学、生物多样性保护和生物地理学等领域的主流方法<sup>[20-21]</sup>。基于不同的算法, 物种分布建模结果差异较大<sup>[22]</sup>, 这种不确定性可能影响基于模型制定的保护管理措施的有效性。为降低不确定性的影响, 可采用集合多种算法的模型集合方法<sup>[23]</sup>。本研究基于全球生物多样性信息机构 (global biodiversity information facility, GBIF) 的开放数据、文献资料及实地调查数据, 运用广义加性模型 (generalized additive model, GAM)、广义线性模型 (generalized linear model, GLM)、最大熵模型、随机森林模型 (random forest model, RF) 和推进回归树模型 (generalized boosting model, GBM) 等多种主流 SDM 算法, 对中国白鹇栖息地的适宜性进行了模拟与评价, 旨在为区域尺度的白鹇栖息地保护管理提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

根据《中国鸟类分类与分布名录》(第 4 版)<sup>[24]</sup>,

白鹇在中国分布于四川、云南、贵州、广西、广东、海南、湖南、江西、福建、浙江、湖北、江苏、安徽和重庆共14个省级行政区。研究区面积约 $2.59 \times 10^6 \text{ km}^2$  ( $18.16^\circ\text{--}35.11^\circ\text{N}$ ,  $97.35^\circ\text{--}122.12^\circ\text{E}$ ), 区内海拔梯度大( $-10 \sim 6\,233 \text{ m}$ ), 人口总数约8.0亿, 人口密度高。土地利用类型以林地为主, 约占研究区面积的51.4%, 其次为耕地, 约占38.5%。

1.2 白鹇出现点信息

本研究使用的白鹇出现点数据来自4个途径: (1)全球生物多样性信息机构。选取1980—2025年中国境内的白鹇出现点, 仅保留人为观测来源的eBird数据库(<https://ebird.org/>)记录, 并剔除位置精度误差大于1 000 m的记录, 共获得418个有效点。(2)中国观鸟记录中心。因该平台记录普遍缺少经纬度坐标, 本研究对其他来源未覆盖区域的用户观测报告进行地图位置矢量化提取, 共得到91个点。(3)文献资料检索。在中国知网以篇名“白鹇”进行检索, 筛选学术期刊文献129篇, 逐一提取研究区位

置, 在Google Earth平台手动添加白鹇出现点, 每个研究区域仅标记一点, 共获取18点。(4)红外相机监测。2024年1月—2025年1月, 在贵州省茂兰国家级自然保护区布设42台红外相机, 其中23个点位记录到白鹇。为保障数据准确性, 进一步对所有出现点进行土地利用类型提取, 去除非森林或草地覆盖的位点<sup>[25]</sup>。此外, 使用R中spThin包对全部出现点进行空间稀疏处理(设置距离阈值为2 km), 以降低采样偏差对模型的影响<sup>[26]</sup>。经上述预处理后, 最终获得434个白鹇出现点用于建模。

1.3 环境变量

为全面刻画白鹇的栖息地适宜性, 参照已有研究<sup>[4]376–388</sup>, 选取气候、地形、植被和人为干扰四大类共10个环境变量参与建模(表1)。所有变量均在ArcGIS Pro中经过裁剪、重采样和投影转换等操作, 统一为具有相同分辨率(1 000 m)、坐标系(Krasovsky\_1940\_Albers)的栅格图层, 以保证空间一致性。

表1 白鹇栖息地适宜性建模所用的环境变量

Table 1 Environmental variables used for modeling the habitat suitability of silver pheasant

| 环境变量<br>Environmental variable                | 变量名称<br>Variable name | 描述<br>Description | 数据来源<br>Data source                                                                                                                                                                                                                                     |
|-----------------------------------------------|-----------------------|-------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 气候因子<br>Climatic variable                     | bio1                  | 年平均气温             | CHELSA V2.1 <sup>[27]</sup> ( <a href="https://chelsa-climate.org/">https://chelsa-climate.org/</a> )                                                                                                                                                   |
|                                               | bio4                  | 气温季节性             |                                                                                                                                                                                                                                                         |
|                                               | bio6                  | 最冷月日均气温           |                                                                                                                                                                                                                                                         |
|                                               | bio7                  | 年气温变化范围           |                                                                                                                                                                                                                                                         |
|                                               | bio12                 | 年降水总量             |                                                                                                                                                                                                                                                         |
|                                               | bio15                 | 降水季节性             |                                                                                                                                                                                                                                                         |
| 地形因子<br>Topographic variable                  | elevation             | 海拔                | EarthEnv ( <a href="https://www.earthenv.org/">https://www.earthenv.org/</a> )                                                                                                                                                                          |
|                                               | slope                 | 坡度                |                                                                                                                                                                                                                                                         |
| 植被因子<br>Vegetation variable                   | NPP                   | 年均净生产力            | MODIS MOD17A3H V6 ( <a href="https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/mod17.php">https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/mod17.php</a> , 2010)                                                                                                 |
| 人为干扰因子<br>Human-induced interference variable | hfp                   | 人类足迹指数            | EARTHDATA Last of The Wild Project, Version 3 <sup>[28]</sup> ( <a href="https://www.earthdata.nasa.gov/data/catalog/sedac-ciesin-sedac-lwp3-hf-2009-2018.00">https://www.earthdata.nasa.gov/data/catalog/sedac-ciesin-sedac-lwp3-hf-2009-2018.00</a> ) |

为避免多重共线性对模型参数估计的影响, 对所有环境变量进行Pearson相关分析(图1)。若两个变量间相关系数绝对值大于0.75, 则只保留其中一个参与建模。最终保留7个变量用于建模, 分别是bio4、bio12、bio15、elevation、hfp、NPP和slope。

1.4 物种分布建模

建模算法的选择是影响物种分布模型结果的关键因素之一<sup>[29]</sup>。为了降低由单一算法带来的不确定性, 本研究采用集合模型框架来预测白鹇栖息地适宜性。选取的算法包括GLM、GAM、MaxEnt、RF和

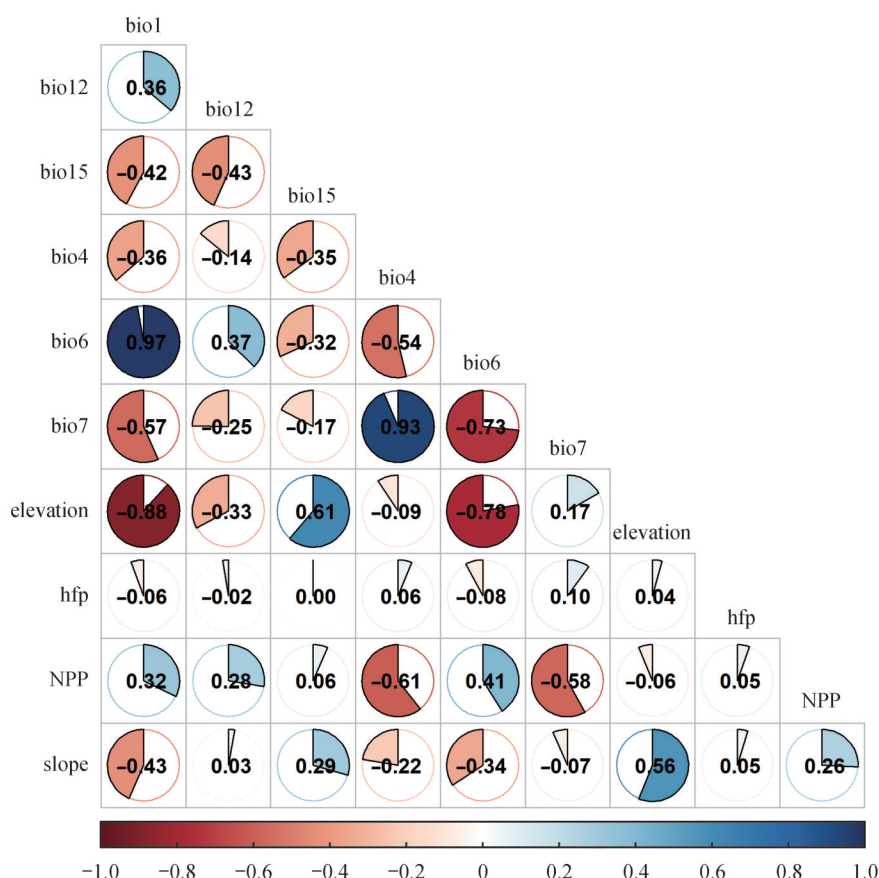


图1 环境变量间皮尔逊相关系数矩阵

Figure 1 Pearson correlation coefficient plot among environmental variables

GBM, 这几种方法在同类基准研究中表现出较好的预测性能<sup>[30]</sup>。由于仅获取到白鹇出现点数据, 本研究采用背景点(伪不出现点)方法建模。在研究区内随机选取 10 000 个背景点, 为降低背景点随机性带来的不确定性, 重复选取 3 套背景点。每个算法的参数设置采用 biomod2 包开发团队推荐的 bigboss。为评估模型性能及计算模型集合时的权重, 选取 AUC、TSS 和 BOYCE 三个指标从不同角度评价模型的表现。AUC 是一个非阈值依赖型指标, 取值范围 [0, 1], 值越大表明模型的预测能力越出色, 通常认为 0.500 ~ <0.600 为预测失败, 0.600 ~ <0.700 为较差, 0.700 ~ <0.800 为一般, 0.800 ~ <0.900 为良好, 0.900 ~ 1.000 为优秀<sup>[31]</sup>。TSS 是一个阈值依赖型指标, 取值范围 [-1, 1], 通常认为 TSS > 0.4 表示模型结果可以接受<sup>[32]</sup>。BOYCE 特别适合评价基于仅存在数据的模型, 它通过比较预测适宜度与实际分布的一致性来衡量预测性能, 取值范围 [0, 1], 值越大表明模型预测与实际分布越吻合<sup>[33]</sup>。模型评估采用 5 折交叉验证, 并重复分割数据 3 次以降低数据分

割随机性导致的结果不确定性。

模型集合采用加权平均法<sup>[34]</sup>, 权重由各单模型的 AUC 决定, 计算公式为

$$\omega_i = \frac{A_{uc,i}}{\sum_{i=1}^m A_{uc,i}}, \quad (1)$$

式中:  $\omega_i$  为第  $i$  个模型的权重;  $A_{uc,i}$  为第  $i$  个模型的 AUC;  $m$  为参与集合的模型总数。为保障集成模型质量, 仅纳入  $A_{uc} > 0.7$  的单模型。

环境变量重要性通过置换法评估, 即随机打乱某一变量的取值后, 计算模型预测准确度的下降程度, 下降幅度越大, 表明该变量对模型预测的贡献越重要。为了可视化白鹇栖息地适宜性与环境变量之间的响应模式, 按照 Elith *et al.*<sup>[35]</sup> 提出的 evaluation strip 方法绘制单变量响应曲线。该方法是将  $n-1$  个变量控制在其中值, 剩下的一个变量值从小到大排列, 然后计算每个序列值的栖息地适宜性, 最终将各点连接形成响应曲线。

集合模型最终的结果是一幅值在 [0, 1] 的连续

栖息地适宜性值图,为了便于保护管理,进一步将该图二值化为适宜栖息地与非适宜栖息地。选择使TSS最大时的栖息地适宜性值作为切断点,将连续栖息地适宜性值图转换为二类图层。栖息地建模在R中使用biomod2包<sup>[36]</sup>完成。

为了量化白鹳适宜栖息地的景观格局特征,使用Fragstats v4.2<sup>[37]</sup>软件计算整个研究区和各省级行政区的栖息地平均斑块面积(mean patch area, AREA\_MN)及集聚度指数(aggregation index, AI)。其中,AREA\_MN表征景观的破碎化程度,其值越小表明破碎化程度越高,反之下降;AI反映适宜栖息地

斑块的集聚程度,其取值为[0,100],越接近100表示斑块聚集越紧密,景观内部以少量大斑块为主或斑块高度联通;反之则表明斑块离散程度越大。

2 结果

根据AUC指标,各单算法模型均具有良好的预测能力,其平均AUC均在0.78以上。从TSS指标来看,RF模型的表现相对最弱,其TSS为0.24,其余模型均表现较好,平均TSS均高于0.41,表明其预测结果较为可靠。BOYCE指标显示,单算法模型表现一般至良好水平,平均BOYCE均高于0.82(图2)。

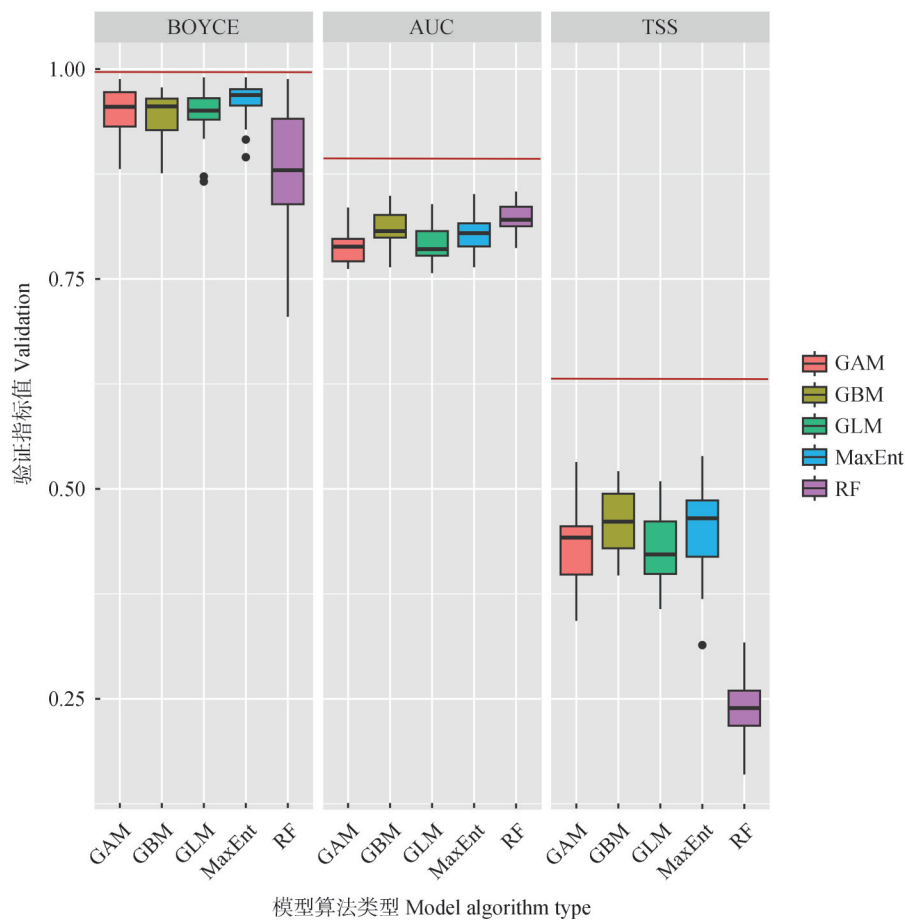


图2 单算法模型与集合模型(红色横线)性能评价指标

Figure 2 Boxplot of three validation metric value of single algorithm model and the ensemble model (red horizontal lines)

经过模型加权,集合模型在3个指标上都有较大程度的提升,AUC、TSS和BOYCE分别为0.90、0.63和0.99,模型表现优秀。

变量重要性分析结果显示,bio12、slope、elevation和hfp对白鹳栖息地适宜性的影响较为显著,其余环境变量的贡献则相对较小(表2)。

白鹳栖息地适宜性与环境变量的响应曲线显示,适宜性与bio12呈单峰型关系,适宜性随bio12的增加先上升后下降,在bio12约为3 000 mm时达到峰值;与坡度呈正向关联,随坡度的增加而增加,当坡度增加约至20°时适宜性趋于稳定;与海拔的响应曲线为驼峰形,在海拔1 500~2 000 m时适宜性较

表2 集合模型中环境变量重要性排序

Table 2 Ranking of environmental variable importance in ensemble model

| 变量名称<br>Variable name | 重要性<br>Importance value |
|-----------------------|-------------------------|
| bio12                 | 0.572                   |
| slope                 | 0.331                   |
| elevation             | 0.121                   |
| hfp                   | 0.073                   |
| bio4                  | 0.066                   |
| NPP                   | 0.021                   |
| bio15                 | 0.014                   |

高;与人类足迹指数呈正相关关系(图3)。集合模型TSS最大时对应的概率切断点为0.381,使用该切断

点将连续栖息地适宜性值图分为适宜栖息地与非适宜栖息地(图4),统计研究区适宜栖息地面积约为 $4.11 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。使用 ArcGIS Pro 中“以表格显示分区统计”工具分别统计各省级行政区白鹇适宜栖息地面积,结果显示,云南省适宜栖息地面积最大(约 $58\,879 \text{ km}^2$ ),其后依次为福建、江西、四川、广东、浙江、湖南、广西、湖北、安徽、重庆、贵州、海南和江苏,其中江苏适宜栖息地面积最小,仅约 $59 \text{ km}^2$ 。景观格局分析表明,研究区整体适宜栖息地平均斑块面积为 $5\,097 \text{ hm}^2$ ,集聚度指数为84。从省(区)级尺度看,安徽与四川的适宜栖息地平均斑块面积相对较大,江苏的平均斑块面积最小、集聚度指数最低,其余省级行政区的适宜栖息地集聚度相差不大,AI指数为64~87(表3)。

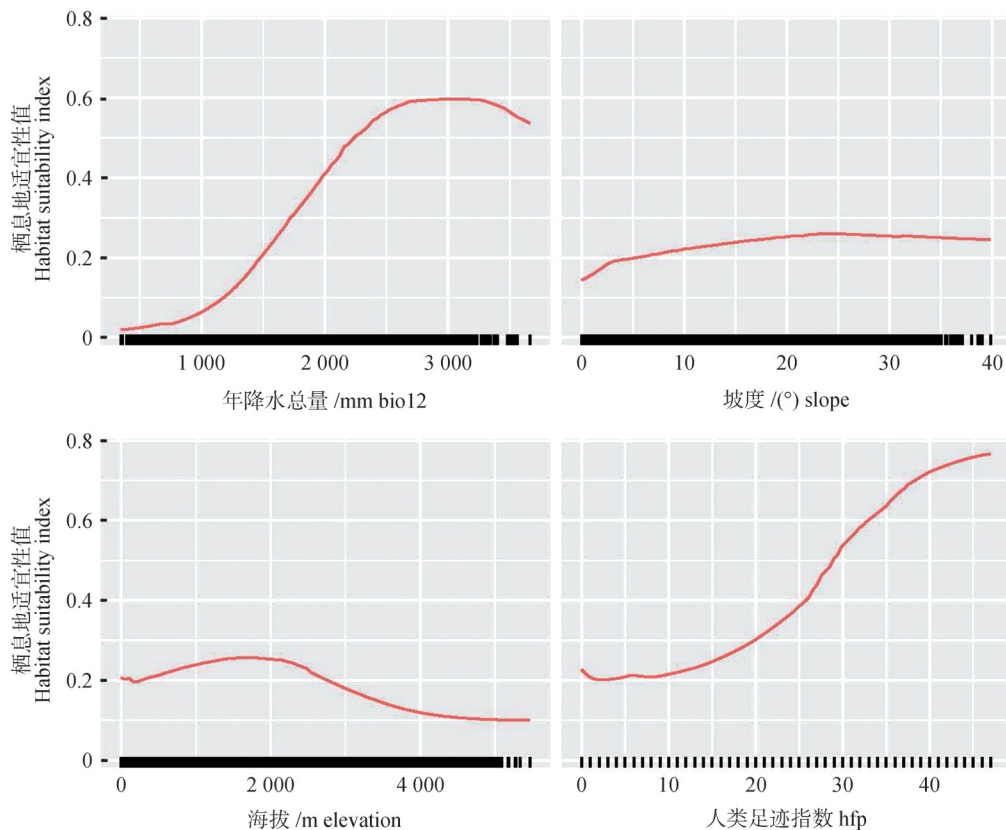


图3 白鹇栖息地适宜性与环境变量的响应曲线

Figure 3 Response curve of silver pheasant habitat suitability and environmental variables

### 3 讨论

本研究使用集合物种分布模型对中国白鹇栖息地适宜性进行了模拟,结果显示集合模型具有非常出色的预测能力,且整体表现优于各单算法模

型。RF在BOYCE和TSS上的表现均不够理想,这种情形可能与背景点和物种出现点数量严重不符有关,今后可考虑采用降采样(down-sampling)方法解决<sup>[38]</sup>。本研究在biomod2包中完成模型集合,各算法参数设置保持默认,但默认参数未必完全适应

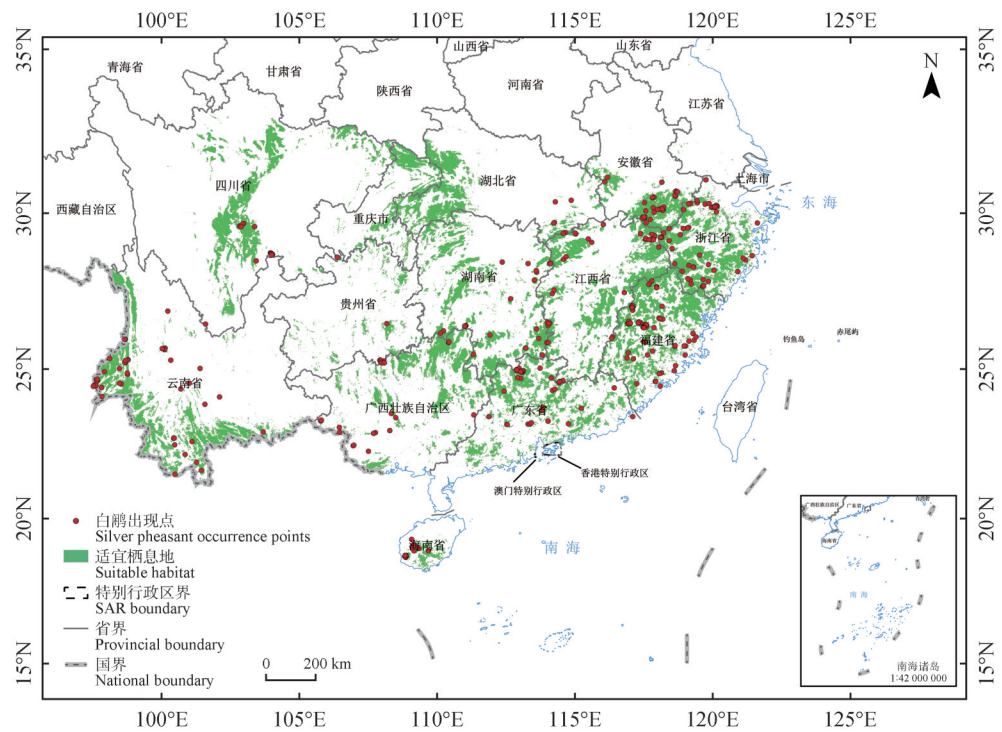


图4 白鹇适宜栖息地分布

Figure 4 Map of suitable habitat distribution of silver pheasant

表3 研究区及各省级行政区白鹇适宜栖息地景观指数

Table 3 Landscape index of suitable habitat for silver pheasant in the study area and each provincial-level administrative division

| 省级行政区<br>Provincial-level administrative division | 适宜栖息地面积 /km <sup>2</sup><br>Suitable habitat area | 平均斑块面积 /hm <sup>2</sup><br>AREA_MN | 集聚度指数<br>AI |
|---------------------------------------------------|---------------------------------------------------|------------------------------------|-------------|
| 云南 Yunnan                                         | 58 879                                            | 5 338                              | 83          |
| 福建 Fujian                                         | 47 322                                            | 5 785                              | 84          |
| 江西 Jiangxi                                        | 42 328                                            | 6 161                              | 84          |
| 四川 Sichuan                                        | 41 790                                            | 7 280                              | 86          |
| 广东 Guangdong                                      | 38 792                                            | 3 922                              | 80          |
| 浙江 Zhejiang                                       | 38 395                                            | 6 085                              | 87          |
| 湖南 Hunan                                          | 36 689                                            | 4 809                              | 83          |
| 广西 Guangxi                                        | 36 537                                            | 3 778                              | 82          |
| 湖北 Hubei                                          | 26 896                                            | 6 057                              | 84          |
| 安徽 Anhui                                          | 18 894                                            | 9 172                              | 87          |
| 重庆 Chongqing                                      | 11 901                                            | 4 220                              | 79          |
| 贵州 Guizhou                                        | 6 971                                             | 973                                | 64          |
| 海南 Hainan                                         | 5 542                                             | 4 904                              | 84          |
| 江苏 Jiangsu                                        | 59                                                | 268                                | 31          |
| 合计 Total                                          | 410 995                                           | 5 097                              | 84          |

目标物种,未来研究若能在集成前对各模型进行系统调参,有望进一步提升集合模型的稳健性与预测精度<sup>[30]</sup>。

本研究发现白鹇栖息地适宜性与坡度总体上呈正相关,这主要是由于低坡度的平坦区域被人类用于种植粮食,使得白鹇更多选择坡度约20°的区域栖息;适宜性与年降水总量(bio12)之间呈单峰响应关系,表明白鹇偏好湿润生境,水源的可获得性是其栖息地选择的重要因素之一<sup>[12,14]</sup>;适宜性与人类足迹指数之间存在正相关关系(图3),这与以往在保护区尺度上白鹇回避人为干扰大的栖息地的结论<sup>[14]</sup>不符。这一矛盾可能源于本研究使用的白鹇出现点数据大部分来自eBird和中国观鸟记录中心等公民科学平台,该类数据的特点是对人易到达区域的采样强度更高,使很多物种出现点分布在人类足迹指数较高的地区<sup>[39]</sup>。尽管本研究已通过背景点调整和空间稀疏处理等方法尽量降低采样偏差的影响,但其无法根除<sup>[40]</sup>。

本研究预测中国白鹇适宜栖息地面积约为 $4.11 \times 10^5 \text{ km}^2$ ,其中云南省占比最高( $58\,879 \text{ km}^2$ ,占比达14.3%),且该省内适宜栖息地破碎化程度相对较低。需要指出的是,本研究可能高估了白鹇适宜栖息地的破碎化程度,因为景观指数的计算仅基于结构上分离的栖息地斑块。虽然这些斑块在空间上并不直接相连,但在功能上可能通过白鹇个体之间的迁移保持连通。因此,未来的研究应进一步考虑白鹇的功能连通性,对栖息地的破碎化程度进行更客观地评价<sup>[41]</sup>。模型预测在湖北、重庆和湖南交界处有较大面积的潜在适宜栖息地,但目前该区域白鹇的实地记录较少。随着气候的持续变暖,这片位于研究区北部的区域或将成为白鹇未来扩散的重要潜在栖息地。

此外,本研究也具有一定的局限性:白鹇出现点的观测时间与气候因子(年降水总量和年气温变化范围)、人类足迹指数和年均净生产力变量的数据产出时间不完全匹配,可能影响模型对白鹇生态位的准确拟合,增加结果的不确定性。

基于本研究结果,区域尺度的白鹇保护可从三方面开展:(1)识别并优先保护白鹇的核心栖息地;(2)划定生态保护红线,减少对栖息地的过度开发利用;(3)保持和恢复栖息地之间的景观连通性。

## 4 结论

本研究使用集合物种分布模型,较为可靠地预测了中国白鹇栖息地适宜性及其空间分布格局。结果显示,中国白鹇适宜栖息地面积约 $4.11 \times 10^5 \text{ km}^2$ ,主要分布于云南、福建、江西、四川、广东、浙江、湖南和广西,区域尺度的白鹇栖息地适宜性主要受年降水总量、坡度、海拔和人类足迹指数的影响。其中,人类足迹指数与栖息地适宜性呈现的正相关关系,可能受到公民科学数据采样偏差的影响,未来需结合更系统的地面调查进一步验证。本研究结果可为区域尺度上白鹇栖息地的识别、保护规划及生态廊道建设提供科学依据。

## 参考文献:

- [1] Jones J. Habitat selection studies in avian ecology: A critical review [J]. The Auk, 2001, 118(2): 557-562.
- [2] 熊志斌,谭成江,余登利,等. 贵州茂兰自然保护区白鹇种群数量与保护对策 [J]. 四川动物, 2002, 21(4): 244-247.  
Xiong Zhibin, Tan Chengjiang, Yu Dengli, et al. Population size and protection countermeasures of silver pheasant at Maolan National Nature Reserve, Guizhou Province [J]. Sichuan Journal of Zoology, 2002, 21(4): 244-247.
- [3] BirdLife International. *Lophura nycthemera* (amended version of 2016 assessment) [J/OL]. The IUCN Red List of Threatened Species, 2016: e. T22679220A92808107[2025-07-30]. <https://www.iucnredlist.org/species/22679220/280964662>.
- [4] 郑光美. 中国雉类 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2015.  
Zheng Guangmei. Pheasants in China [M]. Beijing: Higher Education Press, 2015.
- [5] 国家重点保护野生动物名录(2021年2月1日修订)[J]. 野生动物学报, 2021, 42(2): 605-640.  
List of national key protected wild animals in China (revised on February 1, 2021) [J]. Chinese Journal of Wildlife, 2021, 42(2): 605-640.
- [6] 刘佳,李生强,汪国海,等. 喀斯特生境中白鹇的活动节律、时间分配及集群行为 [J]. 广西师范大学学报(自然科学版), 2019, 37(3): 156-165.  
Liu Jia, Li Shengqiang, Wang Guohai, et al. Activity rhythm, time budgets and flocking behavior of silver pheasant (*Lophura nycthemera*) in the karst habitat [J]. Journal of Guangxi Normal University (Natural Science Edition), 2019, 37(3): 156-165.
- [7] 苏英钰,黎敏灵,程彬彬,等. 江西官山国家级自然保护区白鹇活动节律及时间分配研究 [J]. 四川动物, 2021, 40(5): 517-524.  
Su Yingyu, Li Minling, Cheng Binbin, et al. Activity rhythm and time budget of *Lophura nycthemera* in the Guanshan National Na-

- ture Reserve, Jiangxi [J]. Sichuan Journal of Zoology, 2021, 40 (5): 517–524.
- [8] 唐佳敏, 杨道德, 曹越, 等. 基于红外相机技术的白鹇日活动节律分化研究: 以都庞岭和大围山种群为例 [J]. 生态学报, 2024, 44(6): 2621–2631.
- Tang Jiamin, Yang Daode, Cao Yue, et al. Daily activity rhythm differentiation of silver pheasant (*Lophura nycthemera*) by using infrared camera: studying Dupangling and Daweishan populations in Hunan Province, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44 (6): 2621–2631.
- [9] 余建平, 钱海源, 陈小南, 等. 基于红外相机技术的白鹇日活动节律研究 [J]. 动物学杂志, 2017, 52(6): 937–944.
- Yu Jianping, Qian Haiyuan, Chen Xiaonan, et al. Daily activity pattern of silver pheasant (*Lophura nycthemera*) using camera-traps [J]. Chinese Journal of Zoology, 2017, 52(6): 937–944.
- [10] 张燕婷, 吴林芳, 张志坚, 等. 紫金白溪自然保护区白鹇活动节律分析 [J]. 江西师范大学学报(自然科学版), 2024, 48 (1): 105–110.
- Zhang Yanting, Wu Linfang, Zhang Zhijian, et al. The analysis of *Lophura nycthemera* activity rhythm in Zijin Baixi Nature Reserve [J]. Journal of Jiangxi Normal University (Natural Science Edition), 2024, 48(1): 105–110.
- [11] 古定豪, 吴必锋, 余德会, 等. 基于红外相机技术的雷公山自然保护区白鹇生境选择研究 [J]. 安徽农业科学, 2025, 53 (8): 79–82.
- Gu Dinghao, Wu Bifeng, Yu Dehui, et al. Research on habitat selection of *Lophura nycthemera* in Leigongshan Nature Reserve based on infrared camera technology [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2025, 53(8): 79–82.
- [12] 韩婉诗, 王德良. 湖南九龙江国家森林公园白鹇栖息地选择的季节变化 [J]. 林业科学, 2017, 53(8): 71–80.
- Han Wanshi, Wang Deliang. Seasonal variation in habitat selection of the silver pheasant (*Lophura nycthemera*) in Jiulongjiang National Forest Park, Hunan [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2017, 53(8): 71–80.
- [13] 邵晨, 胡一中. 白鹇的夜栖息地选择及夜栖息行为 [J]. 浙江林学院学报, 2005, 22(5): 562–565.
- Shao Chen, Hu Yizhong. *Lophura nycthemera*'s choice of night roosts and their night-roosting behavior [J]. Journal of Zhejiang Forestry College, 2005, 22(5): 562–565.
- [14] 游卫云, 高欣, 梅爱君, 等. 基于红外触发相机技术的白鹇栖息地选择研究 [J]. 四川动物, 2019, 38(5): 564–570.
- You Weiyun, Gao Xin, Mei Aijun, et al. Habitat selection research of *Lophura nycthemera* using infrared-triggered camera technology [J]. Sichuan Journal of Zoology, 2019, 38 (5): 564–570.
- [15] 郑家文, 丁平, 徐肖江, 等. 白鹇种群分布与栖息地斑块特征的关系 [J]. 应用生态学报, 2006, 17(5): 951–953.
- Zheng Jiawen, Ding Ping, Xu Xiaojian, et al. Effects of habitat patch on *Lophura nycthemera* population [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17(5): 951–953.
- [16] 郭殿繁, 臧淑英, 那晓东. 扎龙保护区丹顶鹤栖息地适宜性评价 [J]. 地理与地理信息科学, 2015, 31(1): 54–58.
- Guo Dianfan, Zang Shuying, Na Xiaodong. Habitat suitability evaluation of red-crowned crane in Zhalong National Nature Reserve [J]. Geography and Geo-Information Science, 2015, 31 (1): 54–58.
- [17] 王虹博, 符明利, 韦玲艳, 等. 海南大田国家级自然保护区海南坡鹿生境适宜性动态评价 [J]. 野生动物学报, 2025, 46 (2): 237–250.
- Wang Hongbo, Fu Mingli, Wei Lingyan, et al. Habitat suitability dynamic evaluation of Hainan eld's deer in Hainan Datian National Nature Reserve [J]. Chinese Journal of Wildlife, 2025, 46(2): 237–250.
- [18] Hirzel A H, Le Lay G, Helfer V, et al. Evaluating the ability of habitat suitability models to predict species presences [J]. Ecological Modelling, 2006, 199(2): 142–152.
- [19] Elith J, Leathwick J R. Species distribution models: ecological explanation and prediction across space and time [J]. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 2009, 40: 677–697.
- [20] Franklin J. Species distribution modelling supports the study of past, present and future biogeographies [J]. Journal of Biogeography, 2023, 50(9): 1533–1545.
- [21] Elith J, Graham C H, Anderson R P, et al. Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data [J]. Ecography, 2006, 29(2): 129–151.
- [22] Araújo M B, New M. Ensemble forecasting of species distributions [J]. Trends in Ecology & Evolution, 2007, 22 (1): 42–47.
- [23] Hao T X, Elith J, Guillera-Aroita G, et al. A review of evidence about use and performance of species distribution modelling ensembles like BIOMOD [J]. Diversity and Distributions, 2019, 25(5): 839–852.
- [24] 郑光美. 中国鸟类分类与分布名录 [M]. 4版. 北京: 科学出版社, 2023: 3–4.
- Zheng Guangmei. A checklist on the classification and distribution of the birds of China [M]. 4th ed. Beijing: Science Press, 2023: 3–4.
- [25] Lumbierres M, Dahal P R, Soria C D, et al. Area of Habitat maps for the world's terrestrial birds and mammals [J]. Scientific Data, 2022, 9: 749.
- [26] Aiello-Lammens M E, Boria R A, Radosavljevic A, et al. spThin: an R package for spatial thinning of species occurrence records for use in ecological niche models [J]. Ecography, 2015, 38(5): 541–545.
- [27] Karger D N, Zimmermann N E. Climatologies at high resolution for the earth land surface areas CHELSA V1. 2: technical speci-

- fication [M]. Birmensdorf: Swiss Federal Research Institute WSL, 2021: 31–32.
- [28] Venter O, Sanderson E W, Magrach A, et al. Global terrestrial human footprint maps for 1993 and 2009 [J]. *Scientific Data*, 2016, 3: 160067.
- [29] Buisson L, Thuiller W, Casajus N, et al. Uncertainty in ensemble forecasting of species distribution [J]. *Global Change Biology*, 2010, 16(4): 1145–1157.
- [30] Valavi R, Guillera-Aroita G, Lahoz-Monfort J J, et al. Predictive performance of presence-only species distribution models: a benchmark study with reproducible code [J]. *Ecological Monographs*, 2022, 92(1): e01486.
- [31] 赵唱. 贺兰山马麝的营养采食策略和微生境选择及评价研究 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2017.
- Zhao Chang. Nutrition diet strategy micro-habitat selection and evaluation of Alpine musk deer (*Moschus sifanicus*) in Helan Mountains, China [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2017.
- [32] Engler R, Waser L T, Zimmermann N E, et al. Combining ensemble modeling and remote sensing for mapping individual tree species at high spatial resolution [J]. *Forest Ecology and Management*, 2013, 310: 64–73.
- [33] Bogdanović N, Zedrosser A, Hertel A G, et al. Where to go? Habitat preferences and connectivity at a crossroad of European brown bear metapopulations [J]. *Global Ecology and Conservation*, 2023, 43: e02460.
- [34] Marmion M, Parviainen M, Luoto M, et al. Evaluation of consensus methods in predictive species distribution modelling [J]. *Diversity and Distributions*, 2009, 15(1): 59–69.
- [35] Elith J, Ferrier S, Huettmann F, et al. The evaluation strip: a new and robust method for plotting predicted responses from species distribution models [J]. *Ecological Modelling*, 2005, 186(3): 280–289.
- [36] Thuiller W, Georges D, Gueguen M, et al. biomod2: ensemble platform for species distribution modeling [CP/OL]. (2025-01-24) [2025-01-28]. [https://www.researchgate.net/publication/308177094\\_biomod2\\_Ensemble\\_platform\\_for\\_species\\_distribution\\_modelling](https://www.researchgate.net/publication/308177094_biomod2_Ensemble_platform_for_species_distribution_modelling).
- [37] Mcgarigal K, Cushman S A, Ene E. FRAGSTATS v4: spatial pattern analysis program for categorical and continuous maps [J]. Computer software program produced by the authors at the University of Massachusetts, Amherst, 2012, 15: 153–162.
- [38] Valavi R, Elith J, Lahoz-Monfort J J, et al. Modelling species presence-only data with random forests [J]. *Ecography*, 2021, 44(12): 1731–1742.
- [39] Backstrom L J, Callaghan C T, Worthington H, et al. Estimating sampling biases in citizen science datasets [J]. *Ibis*, 2025, 167(1): 73–87.
- [40] Phillips S J, Dudík M, Elith J, et al. Sample selection bias and presence-only distribution models: Implications for background and pseudo-absence data [J]. *Ecological Applications*, 2009, 19(1): 181–197.
- [41] Diniz M F, Cushman S A, Machado R B, et al. Landscape connectivity modeling from the perspective of animal dispersal [J]. *Landscape Ecology*, 2020, 35(1): 41–58.