

# 基于 MaxEnt 模型的绿孔雀适宜生境评价及廊道设计

李 绒 角媛梅\* 刘 歆 刘志林 高 璇

(云南师范大学旅游与地理科学学院, 昆明 650500)

**摘 要** 绿孔雀是国家 I 级保护动物, 人类活动导致的生境破碎化正在威胁其生存。本文在实地调查的基础上, 根据云南省恐龙河自然保护区观测到的 15 个绿孔雀出现点和 8 个环境变量数据, 用 MaxEnt 模型评价绿孔雀的生境适宜性, 使用最小费用模型设计生境廊道。结果表明: MaxEnt 模型的评价结果达到优秀水平 (训练集 AUC=0.951); 影响绿孔雀适宜生境的主要环境变量是河漫滩距离 (贡献率为 59.2%) 和海拔 (贡献率为 30.1%); 最适宜和较适宜生境呈条带状分布在恐龙河两侧, 较为破碎, 面积分别为 44.47 和 76.91 km<sup>2</sup>, 合计占总面积的 15%; 在海拔 500~1000 m 的河谷地区设计了 28 条 1000 m 宽的绿孔雀生境廊道, 廊道总长度 232.08 km, 面积 241.97 km<sup>2</sup>, 为绿孔雀保护提供了科学依据和参考。

**关键词** 绿孔雀; MaxEnt 模型; 最小费用模型; 生境适宜性; 生境廊道

**Suitability evaluation and corridor design of habitats for Green Peafowl based on MaxEnt Model.** LI Rong, JIAO Yuan-mei\*, LIU Xin, LIU Zhi-lin, GAO Xuan (College of Tourism and Geography, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China).

**Abstract:** Green Peafowl (*Pavo muticus*) is inscribed in the Chinese First-Class National Protected Animals list for its rarity and preciousness. Anthropogenic habitat fragmentation threatens its survival. Based on 15 occurrence records of Green Peafowl and eight environmental parameters in Konglong River nature reserve of Yunnan Province in southwestern China, we evaluated the habitat suitability using MaxEnt Model and designed habitat corridors using Minimum Cost Model. The results showed that the area under ROC curve (AUC) of MaxEnt Model was 0.951, indicating an excellent assessment result of the model. The distance to river bank and the elevation were dominant environmental variables for the suitability of Green Peafowl habitats, with a contribution rate of 59.2% and 30.1%, respectively. The habitats with very high (44.47 km<sup>2</sup>) and high (76.91 km<sup>2</sup>) suitability were elongated and fragmented on both sides of the Konglong River, which together accounted for 15% of the total area of the nature reserve. Furthermore, 28 habitat corridors with a width of 1000 m were designed in the river valley between the elevation of 500–1000 m a.s.l., of which the total length is 232.08 km and the area is 241.97 km<sup>2</sup>. Our results provided a scientific basis for the protection of Green Peafowl in China.

**Key words:** Green Peafowl; Maximum Entropy Model (MaxEnt); Minimum Cost Model; habitat suitability; habitat corridor.

野生动物生境的丧失和破碎化是导致物种灭绝和生物多样性下降的关键因素 (Fahrig, 2003), 保护野生动物及其生境首先要对物种进行生境评价 (刘振生等, 2013)。为了评价野生动物的生境, 有必要

弄清并分析野生动物的生境需要与当地自然环境的匹配关系, 然后分析种群的减少和危险的原因, 并为制定保护政策提供依据 (欧阳志云等, 2001)。近年来, 学者们使用多种模型对物种生境的分布进行预测, 如机理模型 (欧阳志云等, 2001; 徐卫华等, 2006)、回归模型 (Schadt *et al.*, 2002)、以及生态位

模型(Phillips *et al.*, 2006; 王学志等, 2008; 罗翀, 2010)等。其中,只需要物种“出现点”就可以进行预测的生态位模型(如 MaxEnt 模型)被认为是目前预测物种潜在分布较好的模型,即使“出现点”数据较少时预测精度也较高,并成功地应用于物种生境分布预测(Phillips *et al.*, 2006; 罗翀, 2010)。在预测物种生境分布之后要将破碎化和相互隔离的生境连接起来,生境廊道可以帮助被切割成孤岛状的生境完成种群间迁移、繁殖等过程,加强种群间的基因和物种交流,降低种群灭绝风险(Thulasiraman *et al.*, 1992; 李正玲等, 2009; 吴昌广等, 2009),是保护濒危物种及其生境的重要方法(吴昌广等, 2009)。根据动物行走时选择阻力最小、路径最短的习惯,设计生境廊道往往使用最小费用模型,被用在大熊猫等濒危物种的廊道设计中(李纪宏, 2006)。齐增湘等(2011)利用 MaxEnt 模型进行秦岭山系黑熊潜在生境预测,侯宁等(2014)和青菁等(2016)使用 MaxEnt 模型和最小成本路径法对大相岭及小相岭的大熊猫进行生境评价并设计廊道,诸葛海锦等(2014)用最小费用距离路径原理模拟识别青藏高原高寒荒漠区藏羚羊种群的潜在廊道分布。MaxEnt 模型与最小费用模型已经用于许多濒危物种的保护中,并取得一定成效,如大熊猫的“降级”少不了众多科研工作者对其生境的保护。

绿孔雀曾广泛地分布在东亚和东南亚地区,但 20 世纪 50 年代之后,绿孔雀的分布地区和数量急剧下降,只有马来西亚、印度、柬埔寨、印度尼西亚和中国有孤立的绿孔雀种群分布(Brickle, 2002)。绿孔雀在中国曾遍布华南、西南地区 and 海南岛等地(单鹏飞等, 2017),但到 20 世纪末仅见于云南中部、西部和南部等 34 个县市(文贤继等, 1995),2013 年调查显示仅在云南省的 11 个县市分布(文云燕等, 2016),其中云南楚雄双柏县的恐龙河州级自然保护区内大约有 60~70 只绿孔雀,是当前已知种群数量最大、分布最集中的绿孔雀栖息地(李旭, 2016; 文云燕, 2016)。但由于恐龙河自然保护区目前受水电开发、公路建设、居民地和农业用地扩张等高强度的人类活动影响,绿孔雀的生境破碎化严重,面临着生境的丧失、破碎化和退化的巨大威胁(徐晖, 1999),目前减缓或恢复已经破碎成块的生境是重中之重(Robinson *et al.*, 1992),急需对绿孔雀及其生境进行保护。

目前绿孔雀研究集中在分布调查(文贤继等,

1995; 文云燕, 2016),保护现状及措施(孔德军等, 2017),潜在生境选择和空间分布的监测(徐晖, 1999; 刘钊等, 2008)等方面,但其潜在生境的适宜性评价及保护设计尚未受到重视。因此,本研究以恐龙河自然保护区所在的恐龙河谷及周边地区为研究区,通过高程数据、土地覆被数据及绿孔雀出现点,用 MaxEnt 模型评价并预测其生境,分析绿孔雀的生境空间分布及主要影响因子,用最小费用模型设计生境廊道,以期为了保护绿孔雀及生物多样性提供科学依据和保护管理意见。

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 研究区概况

研究区为楚雄州双柏县恐龙河谷及周边地区,位于哀牢山东侧双柏县恐龙河流域(图 1)。研究区国土面积 996.97 km<sup>2</sup>,最高海拔 3017 m,最低海拔 589 m。区内年均降水量 1879.5 mm,蒸发量为 1174.0 mm,雨季相对湿度在 90%以上(徐晖, 1999; 李学红, 2006),主要河流有恐龙河、石羊江、绿汁江等 7 条,有小型水库 3 座,小型水力发电站 15 座,水资源丰富。在山地季风气候条件下,植被垂直带谱完整,主要分布着常绿阔叶林和季节雨林;区内有国家 I、II 级保护动植物 45 种,主要的濒危保护物种有绿孔雀、西黑冠长臂猿、黑颈长尾雉和苏铁,2009 年 IUCN 红色名录将绿孔雀保护等级定为全球濒危,中国将其列为国家 I 级重点保护野生动物和中国物种红色名录濒危物种(孔德军等, 2017)。

研究区的绿孔雀栖息于海拔 2500 m 以下的开阔的低山丘陵和河谷地带的热带雨林、常绿阔叶林和稀疏草地中,集中分布在石羊江河谷两侧,偏好选择沿山谷分布、坡度较缓且靠近水源的向阳坡面觅食,夜宿地多选择坡度大、落果多、乔木的盖度和胸径大的地区(刘钊等, 2008; 李旭等, 2016; 孔德军等, 2017)。但河谷内近期修建了 2 座中型水电站,并沿河谷建设了省级公路,使得绿孔雀的适宜生境受到严重干扰。该河谷的大部分地区已从恐龙河自然保护区中调整出去,进一步缩小了绿孔雀的适宜生境面积,产生了更严重的生境破碎化和边缘效应。此外,恐龙河谷周边的居民用地和农业用地扩张,更使绿孔雀生境面临着消失的威胁(谢以昌, 2009; 王恒颖等, 2013)。

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 数据来源及预处理 对绿孔雀进行生境适

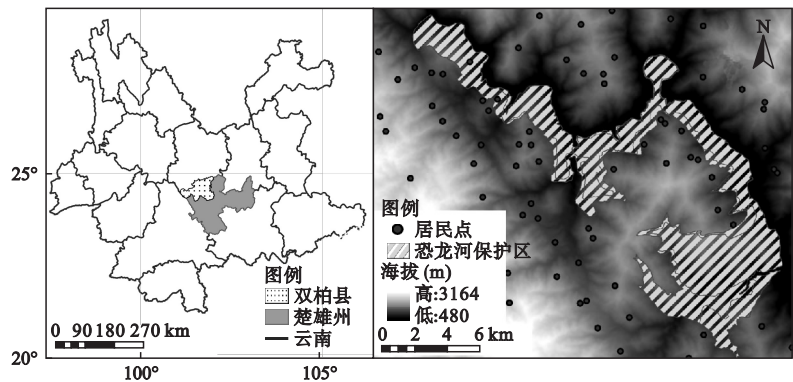


图 1 恐龙河自然保护区在云南省的位置

Fig.1 Location of Konglonghe Nature Reserve in Yunnan Province of southwestern China

宜性评价需要两方面数据:一是绿孔雀的现实地理分布点数据,二是研究区的环境变量数据。其中绿孔雀分布点数据来源于当地林业部门的实际调查,共得到 15 个绿孔雀出现的 GPS 坐标点。环境变量包括:①地形数据(海拔、坡向和坡度),由中国科学院科学数据库地理空间数据云下载的 30 m 分辨率 DEM(数字高程图),之后通过坡度和坡向计算提取得到;②土地利用数据,由国家基础地理信息中心的 TM、ETM+影像解译获得旱地、水田、林地、草地、园地、建筑用地、裸地、水域等 8 类;③水系数据,是根据恐龙河谷的 DEM 通过水文分析提取得到,④其他数据(包括居民点、道路和河漫滩),由于近期影像数据不完整,居民点、道路和河漫滩是从 2011 年 2 月 26 日的 Google Earth 影像中提取获得并进行验证之后,使用 ArcGIS 的空间分析工具计算各变量的欧氏距离栅格图层。以 ArcGIS 为平台,将全部的环境变量图层统一边界,统一坐标系为 WGS1984,栅格大小统一为 30 m×30 m,并将所有图层转化为 ASCII 格式。

### 1.2.2 最大熵生境适宜性评价模型(MaxEnt)

(1) MaxEnt 模型介绍 MaxEnt 是一种基于生态位原理的模型,是依据物种“出现点”的环境变量特征(如气候、海拔)得出限制条件,探讨限制条件下最大熵分布的可能性,从而预测研究区物种生境的分布(Phillips,2008;刘振生等,2013)。该模型在预测时只需要大于 5 个物种出现点的数据,同时模型带有自检验功能,可以生成 ROC 曲线(受试者工作特征曲线)下面积(AUC)来评价模型的模拟精度和各环境变量的重要性,操作简单快速(Haegeman *et al.*,2010;刘振生等,2013)。

(2) 模拟方法 将绿孔雀现实分布点的数据和

环境变量导入 MaxEnt 3.3 中,随机选取绿孔雀分布点中的 75%用于建立模型,其余分布点用于模型验证,选择利用 Jackknife(刀切法)来检测变量的重要性,并对各生境因子进行敏感性分析。模型的预测结果利用受试者工作特征曲线下的面积值进行检验,其评价标准为:AUC 的值在 0.5~0.6 为不及格,之后依次增加,0.9~1.0 为优秀(Swets,1988)。将模型输出的 ASCII 文件导入到 ArcGIS 10.0 中进行重分类分析,按照专家经验法(吴庆明等,2017),将绿孔雀适宜的生境分布区分为 3 个等级:0~0.50 是不适宜的生境,0.50~0.75 是较适宜的生境,0.75~1.00 是最适宜的生境,最终得到绿孔雀的生境适宜性分布图。

1.2.3 生境廊道设计模型 (1) 绿孔雀适宜生境关键区提取 在绿孔雀适宜生境分布图上,利用 ArcGIS 提取最适宜生境和较适宜生境包含的所有斑块,考虑到生境斑块过于破碎不利于廊道设计,根据绿孔雀的最大活动范围约是 0.557 km<sup>2</sup>(杨晓君等,2000;角媛梅等,2017),通过空间分析工具重新提取适宜生境关键区,只提取出面积大于 0.557 km<sup>2</sup>的生境斑块,得到绿孔雀的适宜生境关键区。

(2) 绿孔雀生境廊道构建 利用生境预测结果设计生境廊道,首先要建立阻力图层。阻力图层的栅格值大小能够反应物种通过该单元格时遇到的阻碍,值越大证明阻碍越大、耗费也越大,阻力值由单元格的植被、地形等共同确定(侯宁等,2014)。根据已确定研究区内绿孔雀的适宜生境,将 8 个环境变量根据适宜程度(即绿孔雀生境的最适宜区阻力最小,不适宜区阻力最大)得出影响绿孔雀生活的阻力图层,分为阻力最小、阻力适中和阻力最大 3 个等级,之后按 1、10 和 100 分别进行赋值(表 1)。之



表 1 绿孔雀适宜生境评价的环境因子及阻力值  
Table 1 Environmental factors and resistant value of Green Peafowl's suitable habitat assessment

类型	海拔 (m)	坡度 (°)	坡向 (°)	村庄距离 (m)	道路距离 (m)	水源距离 (m)	河漫滩距离 (m)	土地利用
阻力最小	<800	<18.6	-1~115.6	>1000	>2000	<1000	<1000	林地
阻力适中	800~2500	18.6~31.1	115.6~236.6	500~1000	1000~2000	1000~2000	1000~2000	草地
阻力最大	>2500	31.1~70.2	236.6~359.8	<500	<1000	>2000	>2000	其他用地

后在 ArcGIS 10.0 中做进一步分析,将 MaxEnt 模型预测得到的绿孔雀适宜生境关键区和阻力图层导入 Linkage Mapper 廊道设计软件中计算最小成本路径,得到绿孔雀生境廊道中心线。但是绿孔雀在廊道内繁衍、流动和扩散需要一定宽度,因此在生境廊道中心线两侧缓冲 500 m,得到绿孔雀的完整生境廊道范围。

2 结果与分析

2.1 绿孔雀生境适宜性评价结果

2.1.1 绿孔雀生境因子分析 MaxEnt 模型的 ROC 曲线评价结果表明:训练集与验证集的 AUC 值分别为 0.951 和 0.932(图 2),证明 MaxEnt 模型的预测结果达到了优秀的水平,该模型可以用于绿孔雀的生境预测。

Jackknife 检验模型中各个环境变量对绿孔雀的重要性分析表明(图 3),与河漫滩距离、海拔、与公路距离、土地利用和坡向是影响绿孔雀分布的主要环境变量。各个环境变量的贡献率说明,与河漫滩距离(59.2%)、海拔(30.1%)、与公路距离(4.5%)、土地利用(2.7%)和坡向(2.3%)等 5 个环境变量对 MaxEnt 模型的贡献率为 98.8%,这 5 个因子对绿孔雀的生境具有重要影响;坡度的贡献率为 1.2%,对绿孔雀的生境影响较小;村庄和水源距离对 MaxEnt

模型的贡献率为零。各个环境变量的贡献率不同,可能是由以下原因造成:绿孔雀一般栖息于海拔 2500 m 以下的开阔、远离人类活动的中低山丘陵和河谷地带的向阳坡面,偏好选择森林地区觅食,平时喜欢在河漫滩等开阔地带玩耍,因此与河漫滩距离、海拔、与公路距离、土地利用和坡向是主要环境变量;绿孔雀喜欢沿山谷分布且坡度较缓地区,但是研究区内河谷狭长,坡度缓的地区较少,因此坡度对绿孔雀生境有影响但影响较小;研究区内村庄较少,且距离绿孔雀生境较远,同时河流较多,水源充足,因此村庄和水源距离对绿孔雀的生境没有影响。

各环境因子的敏感性分析表明,绿孔雀的生境适宜度在 500~2500 m 时随海拔的增加而减小,当海拔大于 2500 m 时影响几乎为零,表明绿孔雀喜欢生活在低海拔地区;绿孔雀距离河漫滩越近时,生境适宜度越高,当距离大于 4000 m 时不影响绿孔雀的生境适宜度;对坡向和土地利用进行敏感性分析,坡向为北方时对绿孔雀影响最大,绿孔雀喜欢的土地利用类型是林地和草地;当公路距离在 0~5000 m 时对绿孔雀生境适宜度有影响,大于 5000 m 后将不会影响到绿孔雀的生境适宜度;村庄和水源地距离的增加对绿孔雀生境适宜度没有影响,可能是因为研究区内村庄较少,而适宜生境主要分布在河流两岸。

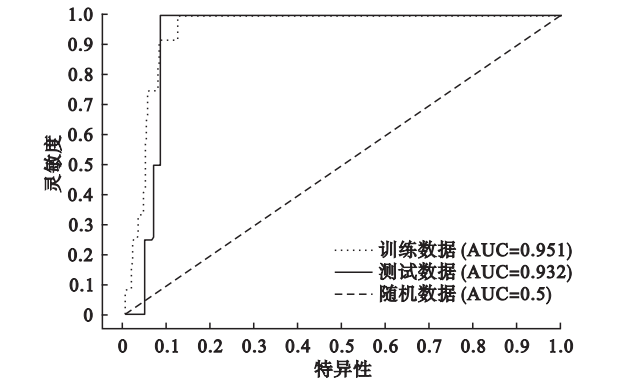


图 2 绿孔雀生境分布预测结果的 ROC 曲线验证  
Fig.2 ROC curve verification of habitat distribution of Green Peafowl

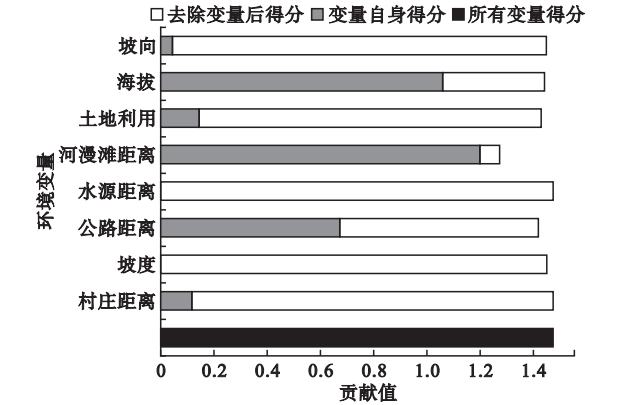


图 3 MaxEnt 模型训练数据各环境变量得分  
Fig.3 Score of environmental variables of training data in MaxEnt Model

**2.1.2 绿孔雀生境适宜性分区** 通过 ArcGIS 中的重分类对绿孔雀适宜生境划分 3 个等级之后,最终得到绿孔雀的生境适宜性分布图(图 4)。从图 4 可以看出,绿孔雀的适宜生境分布呈破碎化特点,即大面积的斑块不多,主要呈条带状分布在恐龙河流域,此外尚有一些呈孤立状态的小斑块。这是因为研究区位于哀牢山区的恐龙河谷,海拔 3000 m 以上的高山较多,而绿孔雀适宜栖息在小于 2500 m 的缓坡山地,因此高山区分布有大量的不适宜区。此外,水热条件好的低海拔河谷地区是绿孔雀的适宜生境分布区、也是人类活动频繁区,农业用地的扩张、省级公路的修建和水电站的建设进一步缩小并隔离了绿孔雀的适宜生境面积,从而使得绿孔雀生境不适宜区约占整个研究区的 80%。

在研究区内,绿孔雀最适宜生境面积最小为 44.47 km<sup>2</sup>, 占总面积的 4.48%;其次是较适宜生境面积为 76.91 km<sup>2</sup>, 占比 7.71%;不适宜生境面积最大为 875.56 km<sup>2</sup>, 占比 87.82%。最适宜生境和较适宜生境加起来不到 15%, 表明研究区的绿孔雀生境适宜性较差。其中,最适宜、较适宜和不适宜生境在研究区内交错分布,最适宜生境被分割成孤岛状和条带状,主要分布在恐龙河谷,较适宜生境呈条带状镶嵌在较适宜和不适宜生境之间,不适宜生境大面积分布在研究区的西部和南部,说明绿孔雀的适宜生境破碎化比较严重,迫切需要采取保护措施。

**2.2 绿孔雀生境廊道设计**

根据绿孔雀适宜生境分布图,用 ArcGIS 空间分析工具提取了 34 个面积大于 0.557 km<sup>2</sup> 的适宜生境作为绿孔雀的生境关键区(图 5)。生境关键区面积最大的是 19.32 km<sup>2</sup>、面积最小的是 0.56 km<sup>2</sup>, 共有 24 个大于 1 km<sup>2</sup> 的斑块,生境关键区总面积为

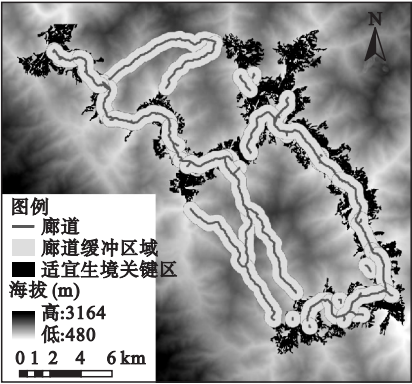


图 5 绿孔雀生境关键区与生境廊道及示意图  
Fig.5 Potential habitat core area and corridors of Green Peafowl

84.34 km<sup>2</sup>, 占研究区的 8.46%。生境关键区边缘破碎,小斑块较多,呈条带状的分布在恐龙河流域,不利于绿孔雀生存、繁衍与移动,需要合适的生境廊道将所有生境关键区连接起来。

根据动物行走时寻找最短路线的习惯,廊道设计要符合最小路径原理,使用最小费用模型设计生境廊道。基于绿孔雀适宜生境分布图、核心生境图和阻力图层(图 6),用 Linkage mapper 构建得到 28 条绿孔雀生境廊道,最长的廊道是 31.17 km,最短的是 2.2 km,其中长度小于 10 km 的廊道有 19 条,廊道总长度是 232.08 km,将所有核心生境斑块连接起来;缓冲 500 m 后廊道宽度是 1000 m,廊道总面积 241.97 km<sup>2</sup>, 占研究区面积的 26.35%, 如图 5。

研究区内的生境廊道沿海拔低、坡度小、河流经过的地区分布,除了恐龙河西南部和东北部的 3 条廊道较长,其余廊道就近连接,将原本破碎的适宜生境连接起来。设计的生境廊道基本上都在同一个海拔和坡度上,即都位于海拔 500~1000 m 的河谷地

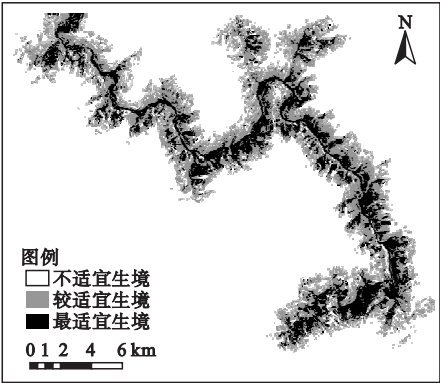


图 4 绿孔雀适宜生境分布图  
Fig.4 Suitable habitat distribution of Green Peafowl

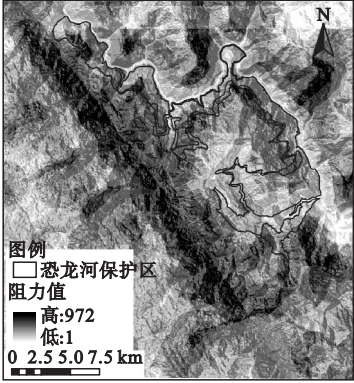


图 6 生境因子阻力值示意图  
Fig.6 Resistant value of habitat factors

区,尽量不给绿孔雀的迁移和移动造成较大的障碍。廊道内部大部分为不适宜生境和较适宜生境,也有少量最适宜生境,植被以阔叶林地、草地等为主。设计的多条廊道与河流重合、且最长的1条廊道是沿恐龙河分布,说明河流作为生境廊道,不仅能为绿孔雀提供水源,也为绿孔雀的迁移提供了方便,是其活动范围内重要的天然廊道。区域内有2个已经建成的水电站和1个正在建设中的水电站,还有1个铁矿,主要的人类活动有农作物种植和采蘑菇及木材砍伐等,在实地建设时应该尽量避免人类活动对廊道内部交流活动的产生障碍,同时应该限制影响绿孔雀生境及其廊道周围的人类活动。

### 3 讨论

目前关于绿孔雀的研究较少,与绿孔雀生境适宜性评价及生境廊道设计相关的研究几乎没有,但是已经用于大熊猫(戎战磊等,2015;青菁等,2016)、岩羊(刘振生等,2013)和藏羚羊(诸葛海锦等,2014)等物种的保护,丹顶鹤(吴庆明等,2016)、黑颈长尾雉(林源等,2017)等鸟类的生境评价也有部分研究。姚小刚等(2012)用谢尔福德限制性定律评价与绿孔雀生活习性及环境相似的哀牢山南华片黑颈长尾雉的生境适宜性,不考虑人类活动时,适宜、次适宜、较不适宜和不适宜生境分别占保护区面积的8.06%、10.96%、73.49%和7.49%;考虑人类活动时,适宜和次适宜生境减少27.30%和9.49%,而较不适宜和不适宜生境增加4.34%和0.68%。这个结果与绿孔雀生境适宜性评价结果相差不大,即绿孔雀生境的最适宜、较适宜和不适宜区分别占总面积的4.48%、7.71%和87.82%,这可能是绿孔雀与黑颈长尾雉同是留鸟,不仅生境相似,且研究区在同一区域的原因。黑颈长尾雉的生境适宜性评价较为成熟,但很少对生境廊道进行研究。而本研究不仅使用MaxEnt模型对绿孔雀生境适宜性评价,还依据最小费用模型设计生境廊道。

在选择绿孔雀环境因子时,确定生活习性至关重要。徐晖(1999)通过观察、调查访问可知绿孔雀生活在海拔小于2500 m河流两旁的落叶阔叶林、针阔混交林、林缘田边和稀疏草丛中,且多为阳光充足的向阳缓坡地带,平时喜欢在河漫滩玩耍,食物为植物的嫩芽、嫩叶、种子等。Brickle(2002)调查了越南

Dak Lak省的绿孔雀及其栖息地,发现绿孔雀喜欢生活在有永久水源的、不受人为干扰的开放干燥落叶林区,在小于水源地2 km、远离人类居住区2 km的地区绿孔雀最多。Sukumal等(2015)通过调查将越南中南部的绿孔雀与15年前进行比较,发现在靠近水源的地方绿孔雀最多,而牛的数量多且地表植被缺失的地方少。因此,本文选取了海拔、坡向、坡度、土地利用、水源地距离、河漫滩距离、村庄距离和道路距离等8个环境因子。常绿阔叶林及落叶阔叶林在研究区分布较广,有充足的虫子、落果等可以满足绿孔雀食用,所以没有将食物选取为环境因子。此外,绿孔雀喜欢到林缘田边觅食,人与绿孔雀相处尚为和谐,而研究区绿孔雀主要分散在各地,其中也包括恐龙河谷,人类活动影响略小,因此没有将更多的人类活动作为环境因子。

廊道的宽度对廊道的作用最为重要,廊道太窄难以满足物种的基本需求,不利于敏感物种的生存;廊道较宽会增加边缘物种和内部物种,以及物种对更多土地需求的增加会引起利益冲突(吴昌广等,2009)。Harrison(1992)提出根据物种的行动圈大小确定廊道的最小宽度,宽度相当于行动圈直径,因此,需要确定绿孔雀的活动半径。但是,绿孔雀的前期研究较少,目前尚未监测到绿孔雀的活动半径,根据活动范围可知哀牢山绿孔雀的活动半径为421 m(杨晓君等,2000;角媛梅等,2017),西双版纳绿孔雀的活动半径为400~900 m(罗爱东等,1998);国外研究中,越南绿孔雀喜欢生活在小于水源地2 km的地区,可知活动半径为1 km(Brickle,2002);此外,李伟等(2006)在研究与绿孔雀生境相似且研究区接近的黑颈长尾雉(*Syrnaticus humiae*)、白鹇(*Lophura nycthemera*)和红喉山鹧鸪(*Arborophila rufogularis*)等3种雉类的取食地时,3种雉类在距离耕地0~500 m时都会出现;本文在设计廊道时采用500 m作为廊道宽度半径的最小界限,在实际的建设廊道过程中,可根据廊道周围的实际情况适当拓宽。生境廊道设计在实践中可能有较大困难,如有廊道横穿公路等,研究区内水电站、矿区以及其他人类活动较多,因此需要结合实际情况处理,同时也需要后续的研究加以完善。

本研究目的是通过生境适宜性评价进行生境廊道设计,将破碎成块状的绿孔雀生境连接起来,最终



目的是为了促进绿孔雀的保护。结合研究的结果,提出以下保护措施:1)研究结果表明,研究区内生境较为破碎,应该在不适宜生境区植树造林、恢复植被、涵养水源,逐渐将不适宜生境变为适宜生境。2)根据各个环境变量对绿孔雀的重要性分析可知,河漫滩距离、海拔和公路距离是影响绿孔雀生境的主要因子,因此需要重点保护河漫滩,同时少修或者不修公路,尽量减少公路对绿孔雀生境的影响。3)恐龙河自然保护区不仅是绿孔雀的适宜生境区,还是现实中监测到绿孔雀较为集中的区域。因此,需要将该区域的村庄进行适当搬迁,原本耕种方式不变,在确保绿孔雀食物的同时,减少人类活动对绿孔雀的影响。4)建议政府加大投资,加强绿孔雀的保护,将部分理论上的生境廊道设计变为现实。同时,在当地大力宣传绿孔雀的保护,使村民认识并且自发地保护绿孔雀。

#### 参考文献

- 侯 宁,戴 强,冉江洪,等. 2014. 大相岭山系泥巴山大熊猫生境廊道设计. 应用与环境生物学报, **20**(6): 1039-1045.
- 角媛梅,刘 歆,李 绒,等. 2017. 基于绿孔雀潜在生境的楚雄哀牢山国家公园功能分区研究. 旅游科学, **31**(3): 75-84.
- 孔德军,杨晓君. 2017. 绿孔雀及其在中国的保护现状. 生物学通报, **52**(1): 9-11.
- 李 伟,周 伟,张兴勇,等. 2006. 哀牢山国家级自然保护区南华片三种雉类春季取食地利用比较. 动物学研究, **27**(5): 495-504.
- 李 旭,刘钊,周 伟,等. 2016. 云南楚雄恐龙河保护区绿孔雀春季栖息地选择和空间分布. 南京林业大学学报:自然科学版, **40**(3): 87-93.
- 李纪宏,刘雪华. 2006. 基于最小费用距离模型的自然保护区功能分区. 自然资源学报, **21**(2): 217-224.
- 李学红. 2006. 恐龙河自然保护区保护价值及保护措施. 林业调查规划, **31**(S1): 87-90.
- 李正玲,陈明勇,吴兆录. 2009. 生物保护廊道研究进展. 生态学杂志, **28**(3): 523-528.
- 林 源,徐雪怡,伊剑锋,等. 2017. 基于 MaxEnt 模型的广西黑颈长尾雉潜在栖息地预测与保护空缺分析. 四川动物, **36**(3): 328-333.
- 刘 钊,周 伟,张仁功,等. 2008. 云南元江上游石羊江河谷绿孔雀不同季节觅食地选择. 生物多样性, **16**(6): 539-546.
- 刘振生,高 惠,滕丽微,等. 2013. 基于 MAXENT 模型的贺兰山岩羊生境适宜性评价. 生态学报, **33**(22): 7243-7249.
- 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): 1211-1229.
- 罗爱东,董永华. 1998. 西双版纳野生绿孔雀种群数量及分布现状调查. 生态学杂志, **17**(5): 6-10.
- 欧阳志云,刘建国,肖 寒,等. 2001. 卧龙自然保护区大熊猫生境评价. 生态学报, **21**(11): 1869-1874.
- 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**(3): 343-352.
- 青 菁,胥 池,杨 彪,等. 2016. 小相岭山系大熊猫廊道规划. 生态学报, **36**(4): 1125-1133.
- 戎战磊,张晋东,洪明生,等. 2015. 蜂桶寨自然保护区大熊猫生境适宜性评价与保护管理对策. 生态学杂志, **34**(3): 621-625.
- 单鹏飞,吴 飞. 2017. 绿孔雀难得一见. 森林与人类, (2): 62-63.
- 王恒颖,孙鸿雁,黎国强. 2013. 恐龙河自然保护区的动植物资源现状及保护对策研究. 林业建设, (1): 49-53.
- 王学志,徐卫华,欧阳志云,等. 2008. 生态位因子分析在大熊猫(*Ailuropoda melanoleuca*)生境评价中的应用. 生态学报, **28**(2): 821-828.
- 文贤继,杨晓君,韩联宪,等. 1995. 绿孔雀在中国的分在现状调查. 生物多样性, **3**(1): 46-51.
- 文云燕,谢以昌,李学红. 2016. 恐龙河州级自然保护区绿孔雀监测探讨. 林业调查规划, **41**(4): 69-71.
- 吴昌广,周志翔,王鹏程,等. 2009. 基于最小费用模型的景观连接度评价. 应用生态学报, **20**(8): 2042-2048.
- 吴庆明,王 磊,朱瑞萍,等. 2016. 基于 MAXENT 模型的丹顶鹤营巢生境适宜性分析——以扎龙保护区为例. 生态学报, **36**(12): 3758-3764.
- 谢以昌. 2009. 恐龙河自然保护区生物资源现状及保护对策. 林业调查规划, (1): 10-12.
- 徐 晖. 1999. 云南楚雄绿孔雀的现状. 野生动物学报, (3): 12-13.
- 徐卫华,欧阳志云,蒋泽银,等. 2006. 大相岭山系大熊猫生境评价与保护对策研究. 生物多样性, **14**(3): 223-231.
- 杨晓君,文贤继,杨 岚,等. 2000. 春季绿孔雀的栖息地及行为活动的初步观察// 海峡两岸鸟类学术研讨会.
- 姚小刚,李明会,周 伟,等. 2012. 哀牢山自然保护区南华片黑颈长尾雉生境适宜性评价. 西南林业大学学报, **32**(2): 68-72.
- 诸葛海锦,李晓文,张 翔,等. 2014. 青藏高原高寒荒漠区藏羚适宜生境识别及其保护状况评估. 应用生态学报, **25**(12): 3483-3490.
- Brickle NW. 2002. Habitat use, predicted distribution and conservation of green peafowl (*Pavo muticus*) in Dak Lak

- Province, Vietnam. *Biological Conservation*, **105**: 189 – 197.
- Fahrig L. 2003. Effects of habitat fragmentation on biodiversity. *Annual Review of Ecology, Evolution & Systematics*, **34**: 487–515.
- Haegeman B, Etienne RS. 2010. Entropy maximization and the spatial distribution of species. *The American Naturalist*, **175**: 74–90.
- Harrison RL. 1992. Toward a theory of inter-refuge corridor design. *Conservation Biology*, **6**: 293–295.
- Phillips SJ, Anderson RP, Schapire RE. 2006. Maximum entropy modelling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, **190**: 231–259.
- Phillips SJ, Miroslav D. 2008. Modeling of species distributions with Maxent: New extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography*, **31**: 161–175.
- Robinson GR, Holt RD, Gaines MS, *et al.* 1992. Diverse and contrasting effects of habitat fragmentation. *Science*, **257**: 524–526.
- Schadt S, Revilla E, Wiegand T, *et al.* Assessing the suitability of central European landscapes for the reintroduction of Eurasian lynx. *Journal of Applied Ecology*, **39**: 189–203.
- Sukumal N, McGowan PJK, Savini T. 2015. Change in status of green peafowl *Pavo muticus* (Family Phasianidae) in Southcentral Vietnam: A comparison over 15 years. *Global Ecology & Conservation*, **3**: 11–19.
- Swets JA. 1988. Measuring the accuracy of diagnostic systems. *Science*, **240**: 1285–1293.
- Thulasiraman K, Swamy MNS. 2011. Graph algorithms// *Graphs: Theory and Algorithms*. John Wiley & Sons, Inc.: 306–389.

---

**作者简介** 李 绒,女,1994年生,硕士研究生,主要从事区域生态与景观规划工作。E-mail: 2279725082@qq.com

**责任编辑** 张 敏

---