DOI: 10.5846/stxb201908081666
杨楠,马东源,钟雪,杨孔,周志强,周华龙,周材权,王彬.基于 MaxEnt 模型的四川王朗国家级自然保护区蓝马鸡栖息地适宜性评价.生态学报,2020,40(19):7064-7072.
Yang N, Ma D Y, Zhong X, Yang K, Zhou Z Q, Zhou H L, Zhou C Q, Wang B.Habitat suitability assessment of Blue Eared-Pheasant based on MaxEnt modeling in Wanglang National Nature Reserve, Sichuan Province.Acta Ecologica Sinica,2020,40(19):7064-7072.

基于 MaxEnt 模型的四川王朗国家级自然保护区蓝马鸡栖息地适宜性评价

杨 楠[1,2],马东源[3],钟 雪[4,5],杨 孔[1,2],周志强[6],周华龙[6],周材权[4],王 彬[4,*]

1 西南民族大学青藏高原研究院,成都 610064
2 西南民族大学青藏高原生态畜牧业协同创新中心, 成都 610064
3 四川大学生命科学学院,生物资源与生态环境教育部重点实验室,成都 610065
4 西华师范大学生态研究院,西南野生动植物资源保护教育部重点实验室,南充 637002
5 西华师范大学学报编辑部,南充 637009
6 王朗国家级自然保护区,平武 622550

摘要:明确野生动物栖息地的空间分布格局和影响因子,是有效的栖息地管理和物种保护的基础。基于王朗国家级自然保护区自 2001 至 2018 年间的野外调查记录,首次使用 MaxEnt 模型对蓝马鸡(*Crossoptilon auritum*)栖息地适宜性进行了分析和评价。结果显示:(1)地形特征和极端时期的气候是影响蓝马鸡栖息地适宜性的主要环境因子,年最低温高于-14.4℃、海拔约 2430—3100 m、坡度小于 40°、靠近河流且最干月降水低于 4.4 mm 的区域属于蓝马鸡的适宜栖息地;(2)保护区内共有蓝马鸡栖息地 102.28 km^2,约占保护区总面积的三分之一,其中适宜栖息地面积 59.41 km^2,次适宜栖息地面积 42.87 km^2,为该物种提供了面积巨大且连通性极好的栖息地;(3)在不适宜蓝马鸡分布的区域,海拔过高和最干月降水量较大是限制其栖息地适宜性的主要环境因子。目前保护区内主要的人为干扰类型是牦牛和马匹的放牧活动,并且放牧强度和区域有扩大趋势,潜在威胁着蓝马鸡种群及其栖息地。因此,基于模型结果和野外调查,为避免保护区内蓝马鸡栖息地的退化和破碎化,提出了控制放牧数量和面积、增强对放牧人员的宣传教育以及定期监测河流水质的保护建议,以期促进蓝马鸡的种群和栖息地保护。

关键词:蓝马鸡;栖息地评价;MaxEnt 模型;王朗保护区

Habitat suitability assessment of Blue Eared-Pheasant based on MaxEnt modeling in Wanglang National Nature Reserve, Sichuan Province

YANG Nan[1,2], MA Dongyuan[3], ZHONG Xue[4,5], YANG Kong[1,2], ZHOU Zhiqiang[6], ZHOU Hualong[6], ZHOU Caiquan[4], WANG Bin[4,*]

1 *Institute of Qinghai-Tibetan Plateau, Southwest Minzu University, Chengdu* 610041, *China*
2 *Collaborative Innovation Center for Ecological Animal Husbandry of Qinghai- Tibetan plateau, Southwest Minzu University, Chengdu* 610064, *China*
3 *Key Laboratory of Bio-Resource and Eco-Environmental of Ministry of Education, College of Life Sciences, Sichuan University, Chengdu* 610065, *China*
4 *Institute of Ecology, Key Laboratory of Southwest China Wildlife Resources Conservation (Ministry of Education), China West Normal University, Nanchong* 637002, *China*
5 *Editorial Department of Journal, China West Normal University, Nanchong* 637009, *China*
6 *Wanglang National Nature Reserve, Pingwu* 622550, *China*

基金项目:国家自然科学基金项目(31572293);四川省科技计划资助(2019YFS046);西南民族大学中央高校基本科研业务费专项资助(2020PTJS22001)
收稿日期:2019-08-08; **网络出版日期**:2020-07-31

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: wangbin513@outlook.com

Abstract: Understanding the distribution pattern of wildlife habitat and its influencing factors is crucial for effective habitat management and species conservation. Based on the records collected in field surveys from 2001 to 2018, we assessed the habitat suitability for Blue Eared-pheasant (*Crossoptilon auritum*) in Wanglang National Nature Reserve using MaxEnt modelling. Our results suggested that: (1) habitat suitability for Blue Eared-pheasant was mainly influenced by topographic features and climate conditions under extreme periods. Its suitable habitat was associated with annual minimum temperature higher than −14.4℃, elevation from 2430 m to 3100 m, slope lower than 40°, close to the nearest river, and precipitation in the driest month lower than 4.4 mm. (2) There was 102.28 km^2 Blue Eared-pheasant habitat in the nature reserve in total, covering about one third area of the nature reserve. The suitable and sub-suitable habitat for the species was predicted as 59.41 km^2 and 42.87 km^2, respectively, collectively providing ideal natural habitat with sufficient area and connectivity for the species. (3) Higher elevation and precipitation in the driest month that exceed corresponding suitability thresholds were two primary environmental factors limiting habitat suitability throughout the areas that were unsuitable for Blue Eared-pheasant. Recent years, livestock grazing (yaks and horses) has become a main type of human disturbance in the nature reserve, and grazing intensity and region were still in a trend of fast increasing, potentially threatening the population and habitat of Blue Eared-pheasant. Thus, based on our modelling results and field investigations, we provided some conservation suggestions for protecting Blue Eared-pheasant in Wanglang National Nature Reserve from habitat degeneration and fragmentation, including restriction grazing intensity and region, propaganda of wildlife protection concept and laws to local people, and periodical monitoring of water quality of rivers in the nature reserve.

Key Words: Blue Eared-pheasant; habitat assessment; MaxEnt modelling; Wanglang Nature Reserve

在人类活动不断加剧和气候变化的大背景下,全球生物多样性正处于持续的快速丧失中[1],而栖息地的减少和破碎化已经成为物种和局部种群绝灭的重要原因[2-3]。因此,栖息地的保护和维持是当前生物多样性保护的关键工作,而明确物种适宜栖息地的空间分布格局,了解不同环境因子对栖息地适宜性的影响,是科学有效的栖息地管理的基础[4]。

蓝马鸡(*Crossoptilon auritum*)属鸡形目(Galliformes)雉科(Phasianidae)马鸡属(*Crossoptilon*),为我国特有种,主要分布于内蒙古、宁夏、甘肃、青海和四川等地的亚高山森林和高山灌丛[5]。蓝马鸡为国家Ⅱ级重点保护野生动物,被《中国濒危动物红皮书》[6]和《中国物种红色名录》[7]列为易危种,具有极高的保护价值。我国学者对于蓝马鸡的栖息地已有一些研究,内容涉及不同季节的栖息地选择[8-11],以及对巢址[12]和夜栖地[13]的利用等。目前尚无该物种在大空间尺度下的栖息地适宜性评价研究,在一定程度上制约了针对性的栖息地保护工作的开展。

四川王朗国家级自然保护区地处全球生物多样性热点之一的中国西南山地[14],保持着丰富的生物多样性和较为完整的生态系统。从地理分布上看,王朗保护区是蓝马鸡在四川省的重要分布区之一[15]。早在 20 世纪 80 年代,李桂垣等[16]就在王朗保护区对蓝马鸡的生态习性进行了初步调查,报道了相对较高的蓝马鸡种群密度(0.98 只/hm^2),另一方面表明了保护区内具有丰富的蓝马鸡种群资源,一方面也强调了保护区在蓝马鸡保护中的重要地位。然而,王朗保护区乃至四川省的蓝马鸡研究在此后处于长期停滞状态,至今未见相关研究报道。基于此,本文整理了王朗保护区自 2001 年以来的巡护及监测资料中的蓝马鸡出现点数据,使用 MaxEnt 模型[17]对蓝马鸡的栖息地适宜性进行评价,以期了解(1)保护区内蓝马鸡的栖息地适宜性及空间分布格局,(2)蓝马鸡适宜栖息地的环境特征,(3)限制蓝马鸡栖息地分布的环境因子,从而为该物种的种群保护和栖息地管理策略的制定提供科学依据。

1　保护区概况

四川王朗国家级自然保护区始建于 1965 年,是我国最早的一批以大熊猫(*Ailuropoda melanoleuca*)等珍稀

野生动物及其栖息地为主要保护对象的自然保护区。保护区位于四川省绵阳市平武县境内(103°55′—104°10′E,32°49′—33°02′N),总面积322.97 km^2。保护区属深山切割型山地,海拔跨度2430—4896 m(图1),相对高差约2500 m。保护区属半湿润气候区,干湿季明显,年均温2.5—2.9℃,最热月7月均温12.7℃,最冷月1月均温-6.1℃,年降雨量859.9 mm[18]。护区内的野生动物资源非常丰富,除了大熊猫外,还分布有四川羚牛(*Budorcas tibetanus*)、川金丝猴(*Rhinopithecus roxellana*)和红喉雉鹑(*Tetraophasis obscurus*)等国家Ⅰ级重点保护野生动物,以及血雉(*Ithaginis cruentus*)、红腹角雉(*Tragopan temminckii*)、勺鸡(*Pucrasia macrolopha*)、蓝马鸡、黄喉貂(*Martes flavigula*)、黑熊(*Ursus thibetanus*)、中华斑羚(*Naemorhedus griseus*)和中华鬣羚(*Capricornis milneedwardsii*)等国家Ⅱ级重点保护野生动物[19]。保护区设牧羊场和豹子沟2个保护站,占地面积分别为1781和744 m^2,区内无常住居民(四川王朗自然保护区总体规划,2001;四川王朗国家级自然保护区综合科学考察报告,2018)。

2 研究方法

2.1 蓝马鸡出现点

本研究收集了王朗保护区22年(1997—2018年)来的野外巡护和监测数据,共整理出包含蓝马鸡的记录258条,包括实体、粪便、羽毛和尸体等痕迹类型,其中自2001年以来的174条记录包含有准确的经纬度信息。为避免模型的过度拟合,对蓝马鸡的出现点进行剔除[20]。蓝马鸡的漫游觅食距离可达200 m[16],故在ArcGIS 10.2中以174个出现点生成200 m半径的缓冲区,当若干出现点的缓冲区相互重叠,随机保留其中一个,其余剔除。最终,82个相互间距大于400 m的蓝马鸡出现点被保留进入MaxEnt模型构建(图1)。

2.2 环境变量

参考同属物种的相关研究[21],选择了气候、地形、植被和人为干扰4类共29个潜在影响蓝马鸡栖息地适宜性的环境变量作为MaxEnt模型的备选变量。气候通常对物种的地理分布和栖息地选择都有直接而显著的影响,是物种分布模型和生态位模型研究中常用的环境变量[22]。从WorldClim 2.0数据库下载19个空间分辨率1 km的当前时期(1970—2000年)生物气候变量,同时下载并计算生成年均太阳辐射、年均风速和年均水蒸气压图层[23]。为了避免气候变量间较高的空间共线性对模型效率的消极影响[24],当多个变量相关系数绝对值大于0.8,保留其中生态学意义最明确的一个。筛选过后保留了温度季节性、年最低温、年温差、最干月降水和降水季节性5个气候变量进入后续分析。下载ASTER GDEM V2数字高程图层(30 m分辨率),并提取海拔、坡向和坡度图层。对坡向进行二次计算,以其实际值减去180°后取绝对值,从而以数值的大小反映山坡靠近(0°)或远离(180°)正南向阳坡的程度[25]。基于保护区的河流分布图生成欧式距离图层,以反映各栅格到最近河流的距离。下载FROM-GLC version 2图层(30 m分辨率)[26],将研究区域的覆被系统重新分类为农田、阔叶林、针叶林、针阔混交林、草甸、灌丛、水体、湿地、荒地和冰雪共10个类型。为量化居民点和公路造成的人为干扰的强度,分别基于保护区内的居民点(即保护站)和公路图层生成距最近居民点和公路的欧氏距离图层。最终,将5个气候变量、4个地形变量和2个人为干扰变量以FROM-GLC植被图层为模板,使用双线性插值法统一重采样至30 m分辨率后进入MaxEnt模型分析。

2.3 模型构建

蓝马鸡栖息地适宜性模型的构建和分析在软件MaxEnt 3.4.1[27]中进行,将筛选后的82个蓝马鸡出现点和12个环境变量导入软件,从蓝马鸡出现点中随机选取80%作为模型训练集,剩余20%作为测试集,以Cloglog格式输出结果。模型调控倍率(regularization multiplier)、最大迭代次数(maximum iterations)和收敛阈值(convergence threshold)等都保持默认,因为此设置足以保证较好的模型效果[28]。为保证模型稳定性,对模型进行10次自举法(bootstrap)重复,以10次重复后的平均栖息地适宜性指数作为最终模型结果[29]。

同时使用受试者工作特征曲线下面积(AUC)和最大真实技能统计(TSS,True skill statistics)两个指标来评估模型表现。AUC是对出现点-背景点预测结果的不依赖阈值的秩检验,评估出现点分布概率高于背景点

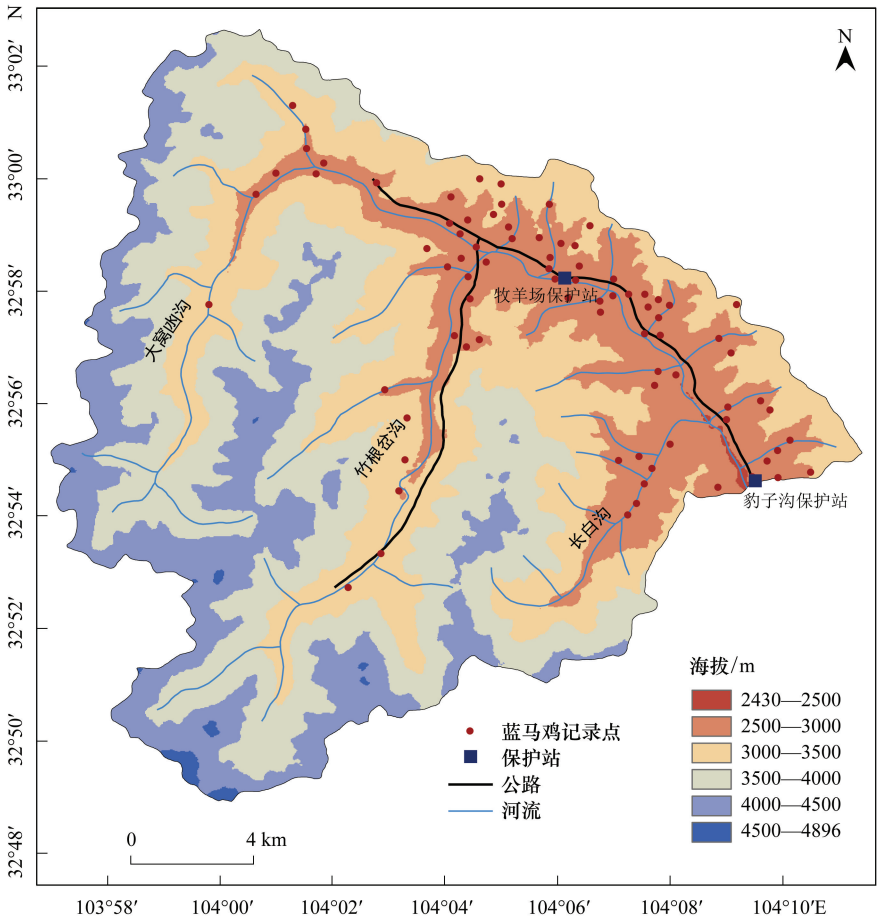

图 1　王朗国家级自然保护区地形及蓝马鸡记录点示意图

Fig.1　Blue Eared-pheasant presence points recorded in Wanglang National Nature Reserve

的程度[30];其标准为:0.5—0.6 为失败,0.6—0.7 为较差,0.7—0.8 为一般,0.8—0.9 为较好,0.9—1 为极好[31]。TSS 是敏感度(正确预测出现点的概率)与特异性(正确预测不出现点或背景点的概率)之和减 1,属于依赖阈值的评估指标[32],被认为有较好的评估能力[30];其标准为:0.2—0.5 为较差,0.5—0.8 为有效,0.8 以上为极好[33]。为计算 TSS,在研究区域内生成 200 个伪不出现点(pseudo-absence),伪不出现点随机分布于蓝马鸡已知出现点 1 km 缓冲区之外[34]。提取出现点和伪不出现点的栖息地适宜性指数,在 R 3.5.3 中使用包 PresenceAbsence[35]计算 TSS。

2.4　栖息地评价 Habitat suitability index

分别以最终模型的最大 TSS 阈值和 TPT 平衡阈值(Balance training omission, predicted area and threshold)为断点,将模型结果重分类为不适宜、次适宜和适宜栖息地 3 类[36],分别计算各等级栖息地的面积。进一步,使用限制因子分析(limiting factors analysis)生成限制因子分布图层,检验在每一栅格上限制蓝马鸡栖息地适宜性的主要环境因子[37]。使用软件内置的变量贡献性分析和刀切法检验(Jackknife test)来分析不同环境变量对于蓝马鸡栖息地适宜性的影响程度,并且绘制变量响应曲线分析各环境变量对栖息地适宜性的影响模式。

3　结果

3.1　模型表现评估

通过 10 次重复,得到最终的蓝马鸡栖息地适宜性模型,其训练集和测试集的 AUC 分别为 0.939 和 0.924,

最大 TSS 也达到了 0.807,表明 MaxEnt 模型效果达到了极好水平,能够较准确地预测蓝马鸡的栖息地适宜性分布格局。

3.2 栖息地影响因子

MaxEnt 模型的变量重要性分析显示,有 4 个环境变量对模型的贡献性达到了 5%以上,累计对蓝马鸡栖息地适宜性产生了 80.8%的影响,其中年最低温贡献性最高,其次是海拔、坡度和距最近河流距离;而刀切法检验显示,在使用单独环境变量构建 MaxEnt 模型时,海拔、年最低温和最干月降水得到了最高的 AUC 值,均超过了 0.85,表明这些变量在预测蓝马鸡栖息地适宜性时包含了比其他变量更多的有用信息(表 1)。

表 1 蓝马鸡栖息地适宜性影响因子重要性分析

Table 1 Importance analysis of environmental variables to habitat suitability of Blue Eared-pheasant

环境变量 Environmental variable	贡献性/%[1] Percent contribution	刀切法检验(AUC)[2] Jackknife test of AUC
年最低温 Annual minimum temperature	45.5	0.867
海拔 Elevation	20.0	0.890
坡度 Slope	7.7	0.741
距最近河流距离 Distance to the nearest river	7.6	0.767
植被 Vegetation	4.4	0.746
最干月降水 Precipitation in the driest month	3.6	0.867
坡向 Aspect	3.0	0.611
年温差 Temperature annual range	2.9	0.717
距最近道路距离 Distance to the nearest road	2.8	0.807
距最近居民点距离 Distance to the nearest residential point	1.1	0.806
降水季节性 Precipitation seasonality	1.0	0.663
温度季节性 Temperature seasonality	0.4	0.698

[1] MaxEnt 模型中各环境变量的相对贡献性,以 10 次模型重复后的平均值展示;[2]对各环境变量重要性的刀切法检验,即单独使用各变量建模时的 AUC 值,以 10 次模型重复后的平均值展示;AUC: 曲线下面积 Area under curve

对重要影响因子的响应曲线分析显示,蓝马鸡的栖息地选择受到年最低温的限制,年最低温高于-15℃的区域蓝马鸡才能够分布,高于约-14.4℃的栖息地比较适宜于蓝马鸡的生存,而当年最低温为-13℃时其栖息地适宜性达到最高;蓝马鸡的栖息地主要集中于保护区的低海拔带,其适宜性在约 2700 m 处达到最高值,当海拔大于约 3100 m 时栖息地适宜性降低,而大于 3300 m 的区域则不适宜蓝马鸡生存;蓝马鸡通常选择坡度小于 55°的栖息地,最喜好坡度小于 42°的栖息地,过于陡峭的山坡不适宜其活动;蓝马鸡栖息地适宜性与距最近河流距离呈负相关关系,越远离河流其适宜性指数越低;此外,蓝马鸡偏好选择最干月降水较少的环境,降水量约 3.3 mm 时其栖息地适宜性最高,小于 4.4 mm 为其适宜栖息地,高于 5.0 mm 时不适宜该物种分布(图 2)。

3.3 栖息地评价

模型结果显示,MaxEnt 模型的最大 TSS 阈值和 TPT 平衡阈值分别为 0.212 和 0.063,因此根据各栅格的适宜性指数将栖息地划分为不适宜(<0.063)、次适宜(0.063—0.212)和适宜栖息地(>0.212)3 类。在王朗保护区内,蓝马鸡的栖息地总面积高达 102.28 km^2,约占保护区总面积的三分之一。其中,适宜栖息地面积 59.41 km^2,覆盖了保护区东北部的牧羊场保护站至豹子沟保护站的大部分范围,并延伸至大窝凼沟、竹根岔沟和长白沟的主沟区域,占保护区面积的 18.39%;而次适宜栖息地面积 42.87 km^2,包裹在适宜栖息地的外围,占保护区面积的 13.27%(图 3)。限制因子分析显示,海拔和最干月降水是保护区内制约蓝马鸡栖息地适宜性的最主要因子:在蓝马鸡栖息地之外的大部分区域,海拔通常高于蓝马鸡的选择范围,限制了其栖息地的分布;而在长白沟和大窝凼沟的上游部分区域,最干月降水则是制约其栖息地选择的主要原因(图 3)。

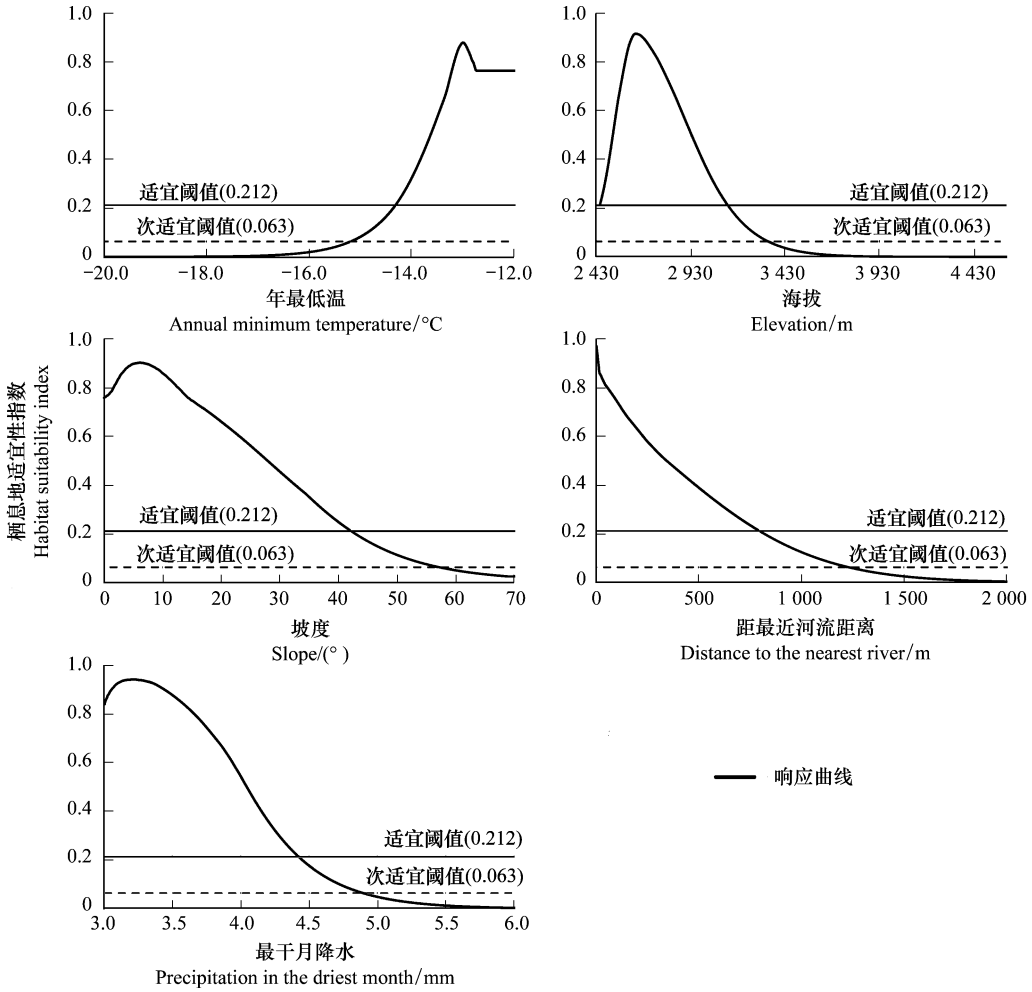

图 2　影响蓝马鸡栖息地适宜性的重要环境变量响应曲线

Fig.2　Response curves of habitat suitability of Blue Eared-pheasant to important environmental variables

4　讨论

在众多潜在的影响因子中,地形特征和极端时期的气候是影响保护区内蓝马鸡栖息地适宜性的最重要因素。海拔高度是蓝马鸡栖息地的重要影响因子,蓝马鸡属亚高山雉类,在海拔 2000—4000 m 均可见其分布,但主要栖息于 2500—3500 m 范围[10, 16, 38]。本研究发现,王朗保护区内的蓝马鸡栖息地集中于 2430—3300 m 海拔带,与此前的报道基本一致;而在蓝马鸡的不适宜栖息地中,绝大部分区域是由于海拔过高限制了蓝马鸡栖息地的分布(图 3)。蓝马鸡是典型的地栖性鸟类,过于陡峭的山坡不利于其行走和觅食,因而该物种通常选择在坡度小于 55°的栖息地内活动。河流是较为稳定的水源地,同时也能提供较为丰富的食物资源,因此蓝马鸡偏好选择靠近河流的栖息地,这与同属的藏马鸡(*Crossoptilon harmani*)[39] 和褐马鸡(*C. mantchuricum*)[40]等的研究结果相似,表明水源地对于雉类的栖息地至关重要。环境温度对雉类的代谢产热、体温调节[41]以及行为活动[42-43]都有影响,直接影响着野生雉类的地理分布和栖息地选择。蓝马鸡属亚高山雉类,虽然对于山区寒冷环境有一定的适应性,并且会通过季节性的垂直迁移来逃避冬季的严寒[38],但本研究发现该物种仍然对环境低温极其敏感,-15℃可能是该物种生理耐受的极限温度,年最低温低于这一温度的栖息地不适宜蓝马鸡生存。王朗保护区干湿季明显,全年最干月均在冬季,因而最干月降水多为降雪。在冬季,面积较大[38]或较厚[8]的积雪会不利于蓝马鸡的活动和觅食,因此蓝马鸡在这一时期偏好选择降雪较

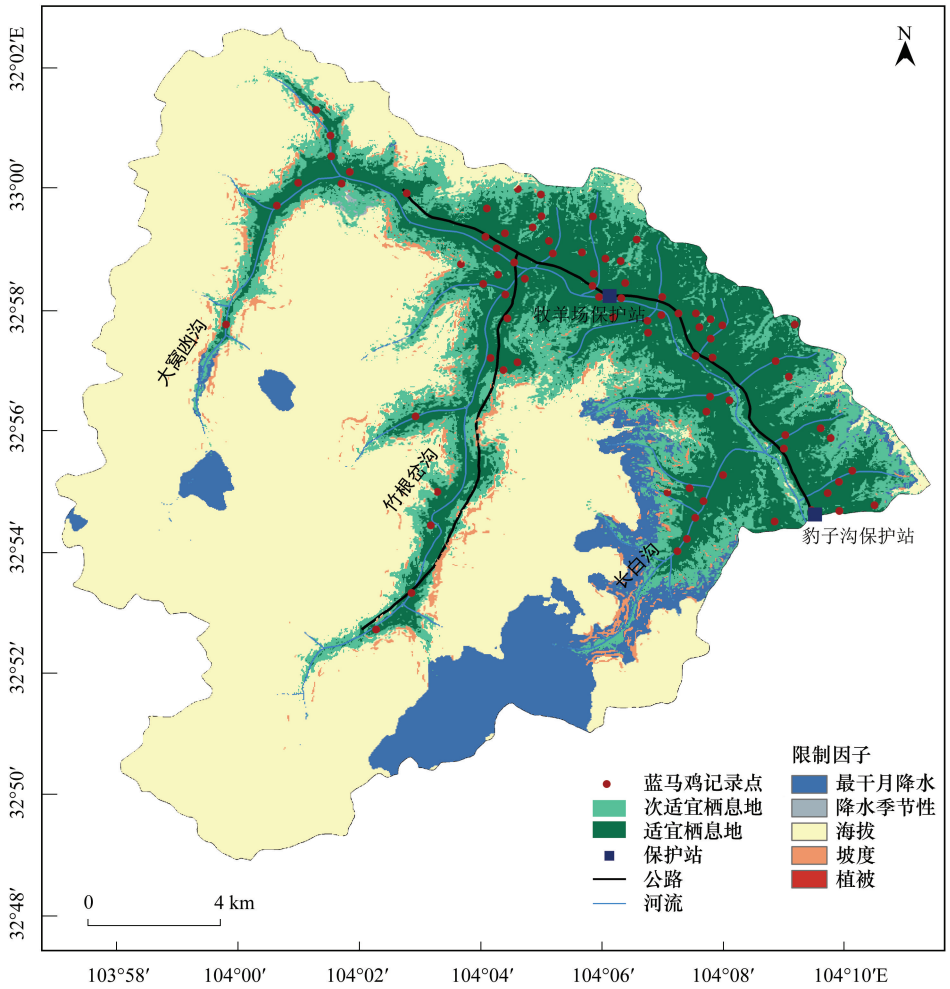

图 3 王朗国家级自然保护区蓝马鸡栖息地及限制因子分布图

Fig.3 Distribution of Blue Eared-pheasant habitat and limiting factors in Wanglang National Nature Reserve

少的栖息地。

本研究显示,王朗保护区内蓝马鸡栖息地面积巨大,适宜栖息地比例高,并且景观连通性较高。这一方面是由于王朗保护区地形和气候特点均较为适宜,为蓝马鸡提供了良好的自然条件,另一方面得益于保护区对于居民点和道路等较为强烈的人为干扰形式的有效管控。居民地的房屋建设和公路网络的延伸不但侵占并分隔野生动物的栖息地,还将带来高强度的持续性人为干扰,严重威胁野生雉类的生存[34]。而在王朗保护区内,除了牧羊场和豹子沟 2 个保护站外没有其他常住居民,同时区内公路较少且只在豹子沟保护站一侧与外界公路网相连,由居民活动和公路交通带来的持续性人为干扰并不强烈,因而蓝马鸡的栖息地并未展现出在绿尾虹雉(*Lophophorus lhuysii*)等雉类中发现的远离公路和居民点的分布模式[34],反而在保护站周边及道路两侧都记录了大量的蓝马鸡出现点(图 1)。然而,蓝马鸡的保护仍然存在威胁,放牧活动已经成为该区域最主要的人为干扰形式。王朗保护区位于白马藏族聚居地,放牧马匹和牦牛是该民族长期以来的传统生产方式。野外监测发现,近年来放牧牲畜数量逐渐增加,放牧范围也日益扩大,不但会直接侵占蓝马鸡的适宜栖息地,而且牲畜对林下植被的啃食和踩踏可能导致蓝马鸡栖息地的退化,是保护区内的蓝马鸡种群及其栖息地所面临的潜在威胁,亟需引起关注。

总体来说,王朗国家级自然保护区内存在面积巨大且连通性较好的蓝马鸡栖息地,为该物种的生存提供了良好的条件和基础,对于蓝马鸡的种群和栖息地保护至关重要。因此,保持现有的蓝马鸡栖息地,降低人为

干扰和威胁,避免栖息地的退化和破碎化,是保护区目前应该采取的针对性栖息地管理策略。基于模型分析和野外调查结果,为未来的蓝马鸡保护提出了以下建议:(1)减少放牧数量,控制牲畜活动区域,减少放牧活动对蓝马鸡带来的直接干扰;(2)控制进山放牧人员的数量并开展宣传教育,提升当地居民的保护意识,减少偷猎、捡蛋和破坏巢的可能性;(3)定期监测河流水质,避免牲畜粪便和兽用抗生素等对水源的污染,保证蓝马鸡以及其他野生动物的水源安全性。

参考文献(References):

[1] 徐炜, 马志远, 井新, 贺金生. 生物多样性与生态系统多功能性: 进展与展望. 生物多样性, 2016, 24(1): 55-71.

[2] 邓文洪. 栖息地破碎化与鸟类生存. 生态学报, 2009, 29(6): 3181-3187.

[3] Keinath D A, Doak D F, Hodges K E, Prugh L R, Fagan W, Sekercioglu C H, Buchart S H M, Kauffman M. A global analysis of traits predicting species sensitivity to habitat fragmentation. Global Ecology and Biogeography, 2017, 26(1): 115-127.

[4] 肖燚, 欧阳志云, 朱春全, 赵景柱, 何国金, 王效科. 岷山地区大熊猫生境评价与保护对策研究. 生态学报, 2004, 24(7): 1373-1379.

[5] 郑光美. 中国雉类. 北京: 高等教育出版社, 2015.

[6] 汪松, 郑光美, 王岐山. 中国濒危动物红皮书: 鸟类. 北京: 科学出版社, 1998.

[7] 汪松, 谢焱. 中国物种红色名录(第二卷)脊椎动物. 北京: 高等教育出版社, 2009.

[8] 刘振生, 曹丽荣, 李志刚, 李涛, 王小明. 贺兰山蓝马鸡越冬期栖息地的选择. 动物学杂志, 2005, 40(2): 38-43.

[9] 李志刚, 胡天华, 翟昊. 贺兰山蓝马鸡春夏季对栖息地的选择. 野生动物, 2009, 30(6): 310-313, 344-344.

[10] 郑生武, 廖炎发. 蓝马鸡的栖息地、活动、食性与繁殖研究. 动物学报, 1983, 29(1): 71-85.

[11] Wu Y Q, Xu X, Liu N F, Xu F. Seasonal changes in habitat use of blue-eared pheasant, *Crossoptilon auritum*. Pakistan Journal of Zoology, 2013, 45(6): 1699-1704.

[12] 吴逸群, 刘迺发. 甘肃南部蓝马鸡的巢址选择. 生态学杂志, 2010, 29(7): 1393-1397.

[13] 吴逸群. 蓝马鸡繁殖期的夜栖地选择. 安徽农业科学, 2011, 39(14): 8624-8626.

[14] Mittermeier R A, Gil P R, Hoffmann M, Pilgrim J, Brooks T, Mittermeier C G, Lamoreux J, Da Fonseca G A B. Hotspots Revisited: Earth′S Biologically Richest and Most Endangered Terrestrial Ecoregions. Mexico City: CEMEX, 2004.

[15] 郑光美. 中国鸟类分类与分布名录(第三版). 北京: 科学出版社, 2017.

[16] 李桂垣, 张瑞云, 刘昌宇, 张清茂, 胡铁卿, 王成华. 四川平武县王朗自然保护区蓝马鸡的初步观察. 四川动物, 1985, (1): 7-9, 33-33.

[17] Phillips S J, Anderson R P, Schapire R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. Ecological Modelling, 2006, 190(3/4): 231-259.

[18] 李成, 李娟, 梁春平, 赵联军, 王大军, 江建平. 王朗自然保护区地栖脊椎动物群落结构和生境类型的关系. 生态学报, 2017, 37(12): 4247-4257.

[19] 田成, 李俊清, 杨旭煜, 余鳞, 袁丹, 黎运喜. 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, 2018, 26(6): 620-626.

[20] 侯宁, 戴强, 冉江洪, 焦迎迎, 程勇, 赵成. 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, 2014, 20(6): 1039-1045.

[21] Li Y L, Li X H, Song Z T, Ding C Q. Determining the distribution loss of brown eared-pheasant (*Crossoptilon mantchuricum*) using historical data and potential distribution estimates. PeerJ, 2016, 4: e2556.

[22] Guisan A, Zimmermann N E. Predictive habitat distribution models in ecology. Ecological Modelling, 2000, 135(2/3): 147-186.

[23] Fick S E, Hijmans R J. Worldclim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. International Journal of Climatology, 2017, 37(12): 4302-4315.

[24] Swanepoel L H, Lindsey P, Somers M J, van Hoven W, Dalerum F. Extent and fragmentation of suitable leopard habitat in South Africa. Animal Conservation, 2013, 16(1): 41-50.

[25] Kalkhan M A. Spatial Statistics: GeoSpatial Information Modeling and Thematic Mapping. Boca Raton, U.S.: CRC Press, 2011.

[26] Yu L, Wang J, Gong P. Improving 30 m global land-cover map FROM-GLC with time series MODIS and auxiliary data sets: a segmentation-based approach. International Journal of Remote Sensing, 2013, 34(16): 5851-5867.

[27] Phillips S J, Dudík M, Schapire R E. Maxent software for modeling species niches and distributions (Version 3.4.1). http://biodiversityinformatics.amnh.org/open_source/maxent/, 2019.5.30.

[28] Phillips S J, Dudík M. Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. Ecography, 2008, 31(2): 161-175.

[29] Phillips S J, Anderson R P, Dudík M, Schapire R E, Blair M E. Opening the black box: an open - source release of Maxent. Ecography, 2017, 40(7): 887-893.

[30] 孔维尧, 李欣海, 邹红菲. 最大熵模型在物种分布预测中的优化. 应用生态学报, 2019, 30(6): 2116-2128.

[31] Swets J A. Measuring the accuracy of diagnostic systems. Science, 1988, 240(4857): 1285-1293.

[32] Allouche O, Tsoar A, Kadmon R. Assessing the accuracy of species distribution models: prevalence, kappa and the True Skill Statistic (TSS). Journal of Applied Ecology, 2006, 43(6): 1223-1232.

[33] Coetzee B W T, Robertson M P, Erasmus B F N, Van Rensburg B J, Thuiller W. Ensemble models predict Important Bird Areas in southern Africa will become less effective for conserving endemic birds under climate change. Global Ecology and Biogeography, 2009, 18(6): 701-710.

[34] Wang B, Xu Y, Ran J H. Predicting suitable habitat of the Chinese monal (*Lophophorus lhuysii*) using ecological niche modeling in the Qionglai Mountains, China. PeerJ, 2017, 5: e3477.

[35] Freeman E A, Moisen G G. A comparison of the performance of threshold criteria for binary classification in terms of predicted prevalence and kappa. Ecological Modelling, 2008, 217(1/2): 48-58.

[36] 余翔, 陈俊橙, 王彬, 严勇, 冉江洪, 贺飞, 彭波. 四川小寨子沟国家级自然保护区绿尾虹雉种群密度调查与栖息地评价. 四川动物, 2017, 36(4): 361-367.

[37] Elith J, Kearney M, Phillips S. The art of modelling range - shifting species. Methods in Ecology and Evolution, 2010, 1(4): 330-342.

[38] 李春秋, 李德浩. 青海省祁连林区的血雉(*Ithaginis cruentus*)与蓝马鸡(*Crossoptilon auritum*). 动物学研究, 1981, 2(1): 77-82.

[39] Lu X, Zheng G M. Habitat use of Tibetan Eared Pheasant *Crossoptilon harmani* flocks in the non - breeding season. IBIS, 2002, 144(1): 17-22.

[40] 李宏群, 廉振民, 陈存根, 贾生平, 王晋堂, 王永斌. 陕西黄龙山林区褐马鸡春季觅食地选择. 动物学杂志, 2007, 42(3): 61-67.

[41] 骆鹰. 笼养黑颈长尾雉和白颈长尾雉能量代谢的比较研究[D]. 桂林: 广西师范大学, 2007.

[42] 刘小斌, 韦伟, 郑筱光, 赵凯辉, 何少文, 周文良. 红腹锦鸡和红腹角雉活动节律——基于红外相机监测数据. 动物学杂志, 2017, 52(2): 194-202.

[43] 唐卓, 杨建, 刘雪华, 王鹏彦, 李周园, Liu C S. 利用红外相机研究卧龙国家级自然保护区绿尾虹雉的活动规律. 四川动物, 2017, 36(5): 582-587.