•研究报告•

钱江源国家公园体制试点区功能分区对黑麂保护的有效性评估

余建平¹ 申云逸² 宋小友¹ 陈小南¹ 李 晟² 申小莉^{3*}¹ (钱江源国家公园生态资源保护中心, 浙江开化 324300)² (北京大学生命科学学院, 北京 100871)³ (中国科学院植物研究所植被与环境变化国家重点实验室, 北京 100093)

摘要: 功能分区是统一协调国家公园不同保护管理目标的主要措施, 对于国家公园的有效管理有重要意义。钱江源国家公园是我国首批国家公园体制试点区之一, 被分为核心保护区、生态保育区、游憩展示区和传统利用区4个部分, 对应不同的保护管理措施。本研究分析了钱江源国家公园体制试点区现有功能分区与其首要保护对象黑麂(*Muntiacus crinifrons*)的适宜栖息地之间的空间关系。在红外相机调查获取的94个黑麂分布点的基础上, 结合海拔、地形、植被特征、人为活动干扰等15个环境特征变量, 采用MaxEnt模型预测国家公园内黑麂适宜栖息地的空间分布。结果表明, 黑麂倾向于出现在森林较为原始和道路密度较低的区域, 其适宜栖息地面积42.5 km², 占国家公园总面积的16.9%。其中, 69.3%的黑麂适宜栖息地位于核心保护区, 30.4%位于生态保育区, 表明国家公园现有功能分区能很好地满足黑麂栖息地保护的需求。此结果也证明黑麂可以作为其分布范围内保存较好的亚热带森林生态系统的指示性物种。通过生境恢复、廊道建设和跨省共建促进黑麂栖息地的完整性保护, 是加强该区域黑麂栖息地保护的关键措施。

关键词: 国家公园; 功能分区; 黑麂; 物种分布模型; 廊道

Evaluating the effectiveness of functional zones for black muntjac (*Muntiacus crinifrons*) protection in Qianjiangyuan National Park pilot site

Jianping Yu¹, Yunyi Shen², Xiaoyou Song¹, Xiaonan Chen¹, Sheng Li², Xiaoli Shen^{3*}¹ Center of Ecology and Resources, Qianjiangyuan National Park, Kaihua, Zhejiang 324300² School of Life Sciences, Peking University, Beijing 100871³ State Key Laboratory of Vegetation and Environmental Change, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093

Abstract: Functional zoning is a method of classifying areas to define human use and is of great significance for the effective management of protected areas. Qianjiangyuan National Park is one of the ten national park pilot sites in China and is divided into four functional zones, the core protection zone, ecological conservation zone, recreation zone and traditional utilization zone. Each zone is assigned a different level of protection and corresponding management measures. This study examined the spatial overlap of existing functional zones in Qianjiangyuan and suitable habitats for its target conservation species, the endangered black muntjac (*Muntiacus crinifrons*). We constructed distribution models based on 94 occurrence locations obtained from camera-trapping surveys from 2014–2018 using MaxEnt. Fifteen covariates related to altitude, topography, vegetative characteristics and human disturbance were used in the MaxEnt models to predict suitable habitats for the black muntjac. The results showed that the black muntjac tended to inhabit areas with intact forest and low road density. We identified 42.5 km² of suitable habitat, which accounted for 16.9% of the land in Qianjiangyuan National Park. Of this suitable habitat, 69.3% and 30.4% were located in the core protection zone and ecological conservation zone, respectively, which indicated that the existing zone designations can protect black muntjac habitat appropriately. These results also indicated that the black

收稿日期: 2018-09-13; 接受日期: 2019-01-02

基金项目: 科技部重点研发项目(2017YFC0503802)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: xlsen@ibcas.ac.cn

muntjac may serve as an indicator species of the subtropical primary forests where it lives. Promoting habitat integrity for the black muntjac by restoring habitat, constructing corridors and managing across provinces will be key to strengthening the protection of the black muntjac in the region.

Key words: national park; functional zones; black muntjac; species distribution model; corridor

建立国家公园体制试点和以国家公园为主体的自然保护地体系是解决我国现有保护地管理碎片化问题的关键举措。《建立国家公园体制总体方案》中提出国家公园体制建设的三大理念,即“生态保护第一、国家代表性、全民公益性”(杨锐, 2017)。国家公园以保护大尺度生态过程和生态系统为首要目标,同时坚持全民共享,着眼于提升生态系统服务功能,为公众提供亲近自然、体验自然的机会,以及开展不损害生态系统的原住民生产生活设施改造,以此阐明了国家公园以保护为主,兼顾科研、教育、游憩和社区发展等综合功能的总体定位(王毅, 2017; 杨锐, 2017; 中办发〔2017〕55号)。

功能分区是实现保护地自然资源保护和可持续利用的技术保障(虞虎等, 2017)。通过将国家公园在空间上划分为不同的功能区,将保护、游憩、社区发展等不同的管理目标限定在不同的功能分区范围内,达到有效协调和监管保护和利用双重目标的目的。科学划定功能分区,是实现国家公园多目标管理的重要基础。目前,各个国家公园体制试点区尚未采用统一的功能分区方案,各自划定的分区名称、数量、面积和措施不尽相同(唐芳林等, 2017)。2018年2月,国家林业局发布《国家公园功能分区规范》,提出国家公园可划分为严格保护区、生态保育区、传统利用区和科教游憩区的功能分区方案,为国家公园的功能分区提供了指导和参照。

钱江源国家公园体制试点区(以下简称钱江源国家公园)建立于2016年6月,位于浙江省衢州市开化县境内,总面积252 km²,空间范围包括原古田山国家级自然保护区(81 km²)、钱江源国家森林公园(45 km²),以及连接两地的生态区域。该国家公园以保护钱塘江水源地、中亚热带低海拔常绿阔叶林自然生态系统,以及国家一级重点保护野生动物黑麂(*Muntiacus crinifrons*)、白颈长尾雉(*Syrnaticus ellioti*)及其栖息地为主要目标。钱江源国家公园设置核心保护区、生态保育区、游憩展示区及传统利用区4个功能分区,分别占国家公园总面积的

28.7%、53.8%、3.2%和14.3%。此分区方案的划定依据土地利用类型,居民点、人口和道路分布,数字高程模型,以及分等级的重点保护动植物资源分布图层,并综合考虑土地权属等管理需求(虞虎等, 2017)。其中,核心保护区包括了古田山国家级自然保护区的核心区和缓冲区,以及钱江源国家森林公园的特级保护区和一级保护区,以保护亚热带常绿阔叶林为主的生态系统、珍稀动植物种类及其栖息地为主要目标;生态保育区作为核心保护区的生态屏障,主要目标为维持较大的原生生境或已遭受不同程度破坏而需要自然恢复的区域;游憩展示区的主要目标是满足户外体验、生态休闲、环境教育、科普活动等小体量生态游憩项目的开展;传统利用区的目标则是在国家公园自然资源和生态环境得到良好保护的前提下,引导社区传统农林业经济可持续发展,保存特有文化及其遗存物。

本研究拟评估钱江源国家公园现有功能分区是否能满足区内首要保护物种黑麂的生态需求。根据钱江源国家公园总体规划,其核心保护区与生态保育区是保护黑麂及其栖息地的主要分区。黑麂是我国东部地区的特有种,仅分布在安徽、江西、浙江、福建等4省39县,分布区总面积7.65万km²(盛和林, 1987)。黑麂同时也是受威胁物种,为国家一级重点保护野生动物,被IUCN物种红色名录评估为“易危VU”物种。黑麂主要分布在海拔1,200 m以下、较少受到人为干扰的常绿阔叶林和针阔叶混交林(盛和林, 1987; 陈声文等, 2016)。中国科学院植物研究所和古田山国家级自然保护区管理局合作,从2014年起建立覆盖古田山保护区全域的红外相机监测网络,积累了区内黑麂分布的一手数据(陈声文等, 2016)。本研究拟采用物种分布模型(species distribution model, SDM)预测钱江源国家公园内的黑麂适宜栖息地,并将分布预测结果与国家公园功能分区叠加进行空间分析,计算核心保护区与生态保育区对黑麂适宜栖息地的覆盖度,从能否满足保护目标生态需求的角度,评估当前功能分区划分的合理性与有效性。

1 材料与方法

钱江源国家公园位于浙江省开化县,与安徽省休宁县和江西省婺源县、德兴市毗邻,包括苏庄、长虹、何田、齐溪4个乡镇的19个行政村和72个自然村,区内总人口9,744人(截至2017年)。国家公园海拔最低点位于苏庄镇双溪口,最高点位于石耳山,海拔跨度为170–1,260 m。按气候植被带划分,该区域属于中亚热带常绿阔叶林植被带,随海拔上升依次分布有常绿阔叶林、常绿落叶阔叶混交林、针阔叶混交林、针叶林4种天然森林植被类型,以及低海拔人工种植的杉木(*Cunninghamia lanceolata*)林、油茶(*Camellia oleifera*)等经济林木。区内低海拔地区保存着以甜槠(*Castanopsis eyrei*)、木荷(*Schima superba*)和青冈栎(*Cyclobalanopsis glauca*)为优势种的大面积中亚热带常绿阔叶林典型地带性植被,是国家公园重点保护的自然资源生态系统类型。

黑麂种群密度较低,活动隐秘,红外相机调查技术是能够大量获取此类野生动物野外分布数据的最有效方法之一(李晟等, 2014)。本研究的黑麂分布数据来自古田山国家级自然保护区2014年5月至2018年4月红外相机网格化监测项目(陈声文等, 2016)。古田山保护区被分为93个1 km × 1 km网格,每个网格内布设1台红外相机,单轮调查周期4个月;4个月后,工作人员将相机移动至同一网格内的下一位点(图1)。将一年时间里单个网格内的调查位点依次记为调查点A、B、C。所有调查位点之间的间隔距离大于300 m。2015年5月至2016年4月期间,相机持续安放在同一位点(即调查点A);而在其他调查年里,红外相机轮流安放在调查点A、B、C。在后续的分析中,我们将0.5 h内同一位点上多次拍摄到的黑麂记录合并为1次独立探测。

根据已有研究,植被类型、海拔、坡度、人为活动干扰是影响黑麂分布的主要因素(盛和林, 1987; 鲍毅新等, 2006),因此,选择与之相关的16个变量作为可能影响黑麂分布的环境因子(表1),用于构建后续的物种分布模型。具体包括以下几类:(1)根据浙江省2014年森林资源二类调查数据提取的5个与地表覆被和植被类型相关的分类变量,分别为土地利用类型、森林类型、森林完整性、林龄、优势树种(参照国家林业局《国家森林资源连续清查技术规范》(办资字〔2014〕42号)标准划分);(2)基于

图1 古田山国家级自然保护区2014–2018年红外相机调查网格与黑麂记录位点

Fig. 1 Camera-trapping survey grids and the occurrence locations of black muntjac in the Gutianshan National Nature Reserve, 2014–2018

1:10,000矢量化地形图提取的海拔和地形地貌特征,后者包括坡度、坡向(方位角45–225度划分为阳坡,225–360度和0–45度划分为阴坡)、地表崎岖度(Riley, 1999)、河流密度和最近河流距离等6个连续变量;(3)根据1:10,000矢量化地形图提取的5个反映人为活动干扰的连续变量,分别为主干道、总道路和居民点的密度,以及调查点与最近道路和居民点的距离。使用ArcGIS 10.3.1生成以上各环境因子空间分辨率为50 m的栅格数据,用于栖息地质量评估。使用Pearson相关系数检查连续变量之间的相关性,使用Spearman相关系数检验分类变量与其他变量之间的相关性。如果任意两变量之间相关系数的绝对值大于0.7(即 $r^2 > 0.5$),则仅保留其中之一。

采用MaxEnt模型(Phillips & Dudík, 2008)预测钱江源国家公园内的黑麂适宜栖息地。使用5折交叉检验,即在模型构建过程中,随机选择20%的数据作为测试集,剩余80%的数据作为训练集。其他参数保持模型默认值,结果以Logistic形式输出各栅格的黑麂分布概率。取5次模型预测结果的平均值作为最终黑麂分布预测的结果。采用Jackknife方法评估各环境因子对黑麂分布影响的重要性和贡献率。采用受试者工作特征曲线(receiver operating characteristic curve, ROC)下面积(area under the

表1 用于钱江源国家公园体制试点区内黑麂适宜栖息地评估的环境因子

Table 1 Environmental variables used to construct the distribution models of black muntjac in the Qianjiangyuan National Park pilot site

变量 Variables	代码 Code	变量类型 Data type	范围/类型 Range/Content
海拔 Elevation (m)	ELE	连续 Continuous	170–1,260
坡度 Slope (°)	Slope	连续 Continuous	0–53.2
坡向 Aspect	Aspect	分类 Categorical	阳坡/阴坡 Warm/cold aspect
地表崎岖度 Ruggedness (m)	TRI	连续 Continuous	0–52.7
土地利用类型 Land use type	LU	分类 Categorical	乔木林、竹林、疏林、特殊灌木林地、苗圃等13类 Forest, bamboo forest, shrub, special shrub land, nursery etc.
森林类型 Forest type	FOR_type	分类 Categorical	针叶林、阔叶林、针阔混交林、非林地 Conifer, broadleaf, conifer and broadleaf mixed forest, and non-forest
森林完整性 Forest intactness	FOR_int	分类 Categorical	无干扰的原始林、轻度干扰的天然林、重度干扰的天然林或人工林 Primary forest, natural forest with light disturbance, natural forest with heavy disturbance/planted forests
林龄 Age of stand	FOR_age	分类 Categorical	幼龄林、中龄林、近熟林、成熟林、过熟林、非林地 Young forest, middle-aged forest, near-mature forest, mature forest, over-ripe forest, non-forest land
优势树种 Dominant species	FOR_spp	分类 Categorical	马尾松, 黄山松, 池杉等共60类 <i>Pinus massoniana</i> , <i>Pinus taiwanensis</i> , <i>Taxodium ascendens</i> , etc.
主干道密度 Density of large roads (m/km ²)	LRD_den	连续 Continuous	0–2.01
总道路密度 Density of all roads (m/km ²)	TRD_den	连续 Continuous	0.04–4.37
与最近道路距离 Distance to nearest road (m)	TRD_dist	连续 Continuous	0–3,750
居民点密度 House density (m ² /km ²)	HOU_den	连续 Continuous	0–75,100
与最近居民点距离 Distance to nearest house (m)	HOU_dist	连续 Continuous	0–2,650
河流密度 River density (m/km ²)	RIV_den	连续 Continuous	0.40–2.22
与最近河流距离 Distance to nearest river (m)	RIV_dist	连续 Continuous	0–1,150

curve, AUC)评估模型预测精度。AUC取值范围通常在0.5–1之间, 越接近1表明模型预测结果的精度越高, 采用MaxEnt方法计算所得的AUC值在0.80–0.90为良好, 0.90–1.00为优秀(Phillips & Dudík, 2008)。

模型输出结果为0–1连续分布的栅格数值, 表示黑麂的分布概率。选取最大化训练敏感性和特异性(maximum training sensitivity and specificity, MTSS)阈值法(Phillips & Dudík, 2008)将最终预测结果二值化, 重分类为0和1, 其中, 0为不适宜栖息地, 1为适宜栖息地, 导入ArcGIS中作进一步的分析。将黑麂分布预测结果与钱江源国家公园边界图层和功能分区图层叠加, 计算不同分区内黑麂适宜栖息地的面积与占比。采用FRAGSTATS3(McGarigal et al, 2002)计算适宜栖息地斑块面积、数量及破碎化程度等景观生态学参数(表2)。其中, 核心栖息地定义为单个栖息地斑块在去除距离边缘100 m区域后的剩余部分, 核心栖息地面积比例定义为单个栖息地斑块内核心栖息地面积占该斑块总面积的百分比。

2 结果

经过4年的持续监测, 共在42个调查网格的94个调查位点上记录到435次黑麂独立探测。在模型构建的变量筛选中, 仅坡度与地表崎岖度之间的相关系数绝对值大于0.7, 因此删去地表崎岖度, 采用其他15个变量进行后续分析。

模型ROC曲线显示, 5次模型预测结果的AUC平均值为 0.864 ± 0.03 , 达到良好水平, 因此采用5次模型预测结果的平均值作为最终黑麂分布概率的预测结果。模型预测的黑麂适宜栖息地面积为42.5 km², 占钱江源国家公园面积的16.9%, 其中, 29.4 km² (69.3%)的适宜栖息地位于核心保护区, 13.0 km² (30.4%)的适宜栖息地位于生态保育区, 另有0.3%的适宜栖息地位于传统利用区。从空间分布来看, 黑麂适宜栖息地主要分布在古田山国家级自然保护区的核心区和缓冲区, 以及与其相连的部分外围地区, 面积占全部适宜面积的52.6%; 其次分布在钱江源国家森林公园的特级和一级保护区。除

此外，黑麂在长虹乡西北侧与江西婺源县交界的部分地区、古田山保护区的实验区、齐溪镇东南部也有分布(图2)。

Jackknife检验在5次模型重复预测过程中得到一致结果。结果显示，单因素模型中，使用总道路

密度训练模型的效果最好，该模型可以获得包含所有预测变量模型52.8% (SE = 1.4%)的信息；其次是使用森林完整性变量训练的模型，可以获得全模型47.1% (SE = 0.6%)的信息；这两个变量对模型的贡献率均明显高于其他变量。在剔除单个变量的模型

表2 钱江源国家公园体制试点区内黑麂适宜栖息地及6个最大斑块的特征
Table 2 Characteristics of the suitable habitat patches, including the six largest patches, of black muntjac in the Qianjiangyuan National Park pilot site

斑块编号 Patch ID	斑块面积 Area (ha)	核心栖息地面积 Core area (ha)	核心栖息地数量 Number of core area	核心栖息地面积比例 Core area percentage (%)
所有斑块 All patches	4,254	1,992	92	46.8
1	52	10	2	19.4
2	68	13	5	20.0
3	262	171	1	65.2
4	273	92	13	33.9
5	660	195	14	34.9
6	2,395	1,457	28	60.8

图2 钱江源国家公园体制试点区内黑麂适宜栖息地分布图。编号1–6为面积最大的6个栖息地斑块，以不同颜色显示，绿色斑块为其余的适宜栖息地。
Fig. 2 Distribution of black muntjac suitable habitat patches in the Qianjiangyuan National Park pilot site. Number 1–6 marks the 6 largest suitable habitat patches, represented in different colors; the left patches are shown in green.

图3 Jackknife检验评估制约黑麂分布的主要环境因子及其相对贡献。代码含义见表1。

Fig. 3 Results of Jackknife evaluation on the relative importance of environmental variables to the presence of black muntjac. Please refer to Table 1 for code definition.

中,剔除森林完整性变量时模型解释量下降最大,降至全模型的76.2% (SE = 0.52%);其次是剔除总道路密度变量后的模型,解释量下降至全模型的87.9% (SE = 1.5%)。此结果表明,总道路密度和森林完整性是黑麂分布的重要预测因子。黑麂倾向于分布在森林较为原始、道路密度较低的地区(图3)。

FRAGSTATS分析结果表明,钱江源国家公园内共有黑麂适宜栖息地斑块412块,面积从0.25 ha至2,395 ha,平均斑块面积13.7 ha。所有黑麂适宜栖息地斑块包含的核心栖息地面积为1,992 ha,占适宜栖息地总面积的46.8%。核心栖息地面积超过1 ha的栖息地斑块共有16个,其中,面积最大的为古田山保护区核心区内的栖息地斑块(见图2编号1),总面积为2,395 ha,核心面积为1,457 ha。共有6个斑块的核心栖息地面积大于10 ha,详细信息见表2。从空间分布来看(图2),斑块1、2、4、5依次相邻,而斑块3与6相对独立,但不排除斑块3、4、6在钱江源国家公园区外西北一侧通过白际山脉相互连通。

3 讨论

我国国家公园、自然保护区等保护地普遍采用功能分区的方式对区内进行差异化管理,以实现生态系统和生物多样性的保护和可持续利用的目的。我国第一个自然保护区成立于1956年,保护区功能分区也经历了早期依据专家知识人为划定到采用

ArcGIS等空间分析工具辅助决策划分的过程(呼延佼奇等, 2014)。目前,较多的学者对国内保护地的功能分区方法进行了探讨,主要采用了物种适宜栖息地评估(Li et al, 1999; 陈利顶等, 2000; Xu et al, 2014)、最小费用距离算法(Liu & Li, 2008; 徐卫华等, 2010)和聚类分析(史军义等, 1998; 陶晶等, 2012)等评估方法。国际上,目前普遍采用系统保护规划软件,如Marxan (Ball & Possingham, 2000)、Marxan with Zones (Watts et al, 2009)等,综合考虑保护目标及保护成本的空间分布特征,采用选址优化算法,获得在满足设定保护目标前提下保护成本最低的空间配置,作为保护地的功能分区方案。国内保护地往往面临保护对象空间分布信息缺乏的限制,因而此类方法还应用较少。

钱江源国家公园主要依据土地利用类型,居民点、人口和道路数据,数字高程模型,重点保护动植物资源分布图层等多个空间信息图层划定功能分区。其中,重点保护动植物资源被定性地划分为一般、中等、较多、极多4个等级。黑麂作为中国东部地区的特有濒危物种,同时也是钱江源国家公园首要的保护对象,有必要专门评估钱江源国家公园功能分区能否满足区内黑麂保护的需求。我们的研究发现,钱江源国家公园的核心保护区和生态保育区覆盖了99.7%的黑麂适宜栖息地,有利于区内黑麂适宜栖息地的保护。同时,研究结果显示,黑麂倾向于出现在森林较为原始和道路密度较低的地区,表明黑麂可以作为其分布区域内较少受到人为干扰的森林生态系统的指示性物种。

栖息地丧失和破碎化是黑麂面临的主要威胁之一(郑祥等, 2006)。受人口增长、经济发展的影响,以常绿阔叶林为代表的原生地带性植被遭到破坏,造成黑麂栖息地面积减少,也加剧了不同栖息地斑块之间的隔离,将会限制黑麂种群的增长和扩散。我们的分析表明,钱江源国家公园内的黑麂适宜栖息地的平均斑块面积(13.7 ha)小于单只黑麂的家域面积(雄性 200 ± 25 ha, 雌性 68 ± 22 ha^①),较为破碎。因此,国家公园的管理应着眼于黑麂栖息地的恢复和廊道建设,通过栖息地改造提高低海拔人工杉木林的物种多样性,促进人工林和次生林的演替,以

① 陈小南 (2014) 基于粪便 DNA 的黑麂婚配制及家域的研究. 硕士学位论文, 浙江师范大学, 浙江金华。

增加黑麂适宜栖息地的面积;同时通过建立廊道等措施,加强栖息地斑块之间的连通性,促进黑麂在不同斑块之间的移动,以及斑块间种群的基因交流,以达到促进黑麂种群数量增长的目的。恢复黑麂栖息地同时也能促进该地区森林生态系统的恢复,提高森林的水土涵养、碳存储等生态系统功能(Liu et al, 2018)。

本研究使用的黑麂分布数据集中在古田山保护区,有偏差的空间取样可能影响预测结果的准确性。为实现更可靠的物种分布预测及保护成效评估,需要建立覆盖钱江源国家公园全区的监测网络。同时,在解读本研究结果时需要注意,钱江源国家公园在西北一侧毗邻安徽和江西省,在区外连接沿白际山脉分布的森林。因此,现有分析显示的多个黑麂栖息地斑块(如斑块3、4、6)尽管在国家公园境内被隔离,实则可能通过区外沿白际山脉分布的森林相互连通。因此,需要在更大的空间尺度上(如以白际山脉为研究区域)预测黑麂适宜栖息地的分布,才能全面准确地掌握该地区黑麂栖息地的空间分布特征,制定科学有效的保护管理措施。钱江源国家公园在区外临近安徽省休宁县岭南省级自然保护区和江西省婺源国家级鸟类自然保护区,通过跨省共建实现对国家公园区外、白际山脉沿线地区的森林生态系统的保护,是促进国家公园内黑麂保护,以及实现生态系统完整性保护的重要措施。

4 保护管理建议

基于本研究的结果与讨论,我们针对钱江源国家公园试点区今后的监测规划和保护管理提出以下3点建议:(1)将已有的覆盖古田山自然保护区范围的红外相机网格化监测体系扩展到整个国家公园,以监测全区范围内黑麂的分布与活动特征;(2)将钱江源国家公园周边,特别是沿白际山脉分布的区域纳入监测和研究范围,从区域景观尺度评估黑麂栖息地斑块的分布和连通性,为景观廊道的规划、栖息地管理和恢复提供指导;(3)国家公园牵头与周边地区的保护地、林场、社区开展广泛的跨区合作与共建,开展联合监测、联合巡护等活动并建立长效机制,对这一区域的黑麂种群所赖以生存的栖息地进行整体保护与管理,控制国家公园内外对黑麂及其栖息地的各类威胁,以确保黑麂种群的长期续存和发展。

致谢:感谢钱江源国家公园专项课题项目为古田山国家级自然保护区网格化红外相机监测项目提供部分经费支持。赖祯熙、赖正淦、姜永清、江福春、汪树龙、赖森炎、赖洪焰、曹正维、吴元根、余淦奎、汪先德、程生建、余华有和汪灶生长期参与该监测项目的外业工作,在此一并表示感谢!

参考文献

- Ball IR, Possingham H (2000) Marxan (V1.8.2): Marine Reserve Design Using Spatially Explicit Annealing. http://courses.washington.edu/cfr590/software/Marxan1810/marxan_manual_1_8_2.pdf. (accessed on 2019-01-01)
- Bao YX, Zheng X, Ge BM (2006) An assessment and protective strategy of black muntjac (*Muntiacus crinifrons*) habitat in Zhejiang Province. *Acta Ecologica Sinica*, 26, 2425–2431. (in Chinese with English abstract) [鲍毅新, 郑祥, 葛宝明 (2006) 浙江黑麂栖息地评价及保护对策. *生态学报*, 26, 2425–2431.]
- Chen LD, Fu BJ, Liu XH (2000) Landscape pattern design and wildlife conservation in nature reserve—Case study of Wolong Nature Reserve. *Journal of Nature Resources*, 15, 164–169. (in Chinese with English abstract) [陈利顶, 傅伯杰, 刘雪华 (2000) 自然保护区景观结构与物种保护——以卧龙自然保护区为例. *自然资源学报*, 15, 164–169.]
- Chen SW, Yu JP, Chen XN, Shen XL, Li S, Ma KP (2016) Camera-trapping survey on the diversity of mammal and pheasant species in Gutianshan National Nature Reserve, Zhejiang Province. *Acta Theriologica Sinica*, 36, 292–301. (in Chinese with English abstract) [陈声文, 余建平, 陈小南, 申小莉, 李晟, 马克平 (2016) 利用红外相机网络调查古田山自然保护区的兽类及雉类多样性. *兽类学报*, 36, 292–301.]
- Huyan JQ, Xiao J, Yu BW, Xu WH (2014) Research progress in function zoning of nature reserves in China. *Acta Ecologica Sinica*, 34, 6391–6396. (in Chinese with English abstract) [呼延俊奇, 肖静, 于博威, 徐卫华 (2014) 我国自然保护区功能分区研究进展. *生态学报*, 34, 6391–6396.]
- Li S, Wang DJ, Xiao ZS, Li XH, Wang TM, Feng LM, Wang Y (2014) Camera-trapping in wildlife research and conservation in China: Review and outlook. *Biodiversity Science*, 22, 685–695. (in Chinese with English abstract) [李晟, 王大军, 肖治术, 李欣海, 王天明, 冯利民, 王云 (2014) 红外相机技术在我国野生动物研究与保护中的应用与前景. *生物多样性*, 22, 685–695.]
- Li WJ, Wang ZJ, Ma ZJ, Tang HX (1999) Designing the core zone in a biosphere reserve based on suitable habitats: Yancheng Biosphere Reserve and the red crowned crane (*Grus japonensis*). *Biological Conservation*, 90, 167–173.

- Liu XH, Li JH (2008) Scientific solutions for the functional zoning of nature reserves in China. *Ecological Modelling*, 215, 237–246.
- Liu XJ, Trogisch S, He JS, Niklaus PA, Bruelheide H, Tang ZR, Erfmeier A, Scherer-Lorenzen M, Pietsch KA, Yang B, Kuhn P, Scholten T, Huang YY, Wang C, Staab M, Leppert KN, Wirth C, Schmid B, Ma KP (2018) Tree species richness increases ecosystem carbon storage in subtropical forests. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 285, 20181240.
- McGarigal K, Cushman SA, Neel MC, Ene E (2002) FRAGSTATS: Spatial pattern analysis program for categorical maps. www.umass.edu/landeco/research/fragstats/fragstats.html. (accessed on 2019-01-01)
- Phillips SJ, Dudík M (2008) Modeling of species distributions with MaxEnt: New extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography*, 31, 161–175.
- Riley SJ (1999) Index that quantifies topographic heterogeneity. *Intermountain Journal of Sciences*, 5, 23–27.
- Sheng HL (1987) China's endemic species: Black muntjac. *Chinese Journal of Zoology*, 52(2), 48–51. (in Chinese) [盛和林 (1987) 中国特产动物——黑鹿. *动物学杂志*, 52(2), 48–51.]
- Shi JY, Ma LS, Yang KL, Fan JC, Shi RH (1998) Fuzzy division of functional areas in Wolong Nature Reserve. *Journal of Sichuan Forestry Science and Technology*, 19, 6–16. (in Chinese with English abstract) [史军义, 马丽莎, 杨克珞, 范继才, 史蓉红 (1998) 卧龙自然保护区功能区的模糊划分. *四川林业科技*, 19, 6–16.]
- Tang FL, Wang MJ, Li GQ (2017) Discussion on zoning for national park function. *Forest Construction*, (6), 1–7. (in Chinese with English abstract) [唐芳林, 王梦君, 黎国强 (2017) 国家公园功能分区探讨. *林业建设*, (6), 1–7.]
- Tao J, Zang RG, Hua CL, Wen QZ (2012) Discussion on the functional zoning of forest ecosystem nature reserve. *Forest Resources Management*, (6), 47–50, 56. (in Chinese with English abstract) [陶晶, 臧润国, 华朝朗, 温庆忠 (2012) 森林生态系统类型自然保护区功能区划探讨. *林业资源管理*, (6), 47–50, 56.]
- Wang Y (2017) Practice and innovation for overarching institution design of China's national park. *Biodiversity Science*, 25, 1037–1039. (in Chinese) [王毅 (2017) 中国国家公园顶层制度设计的实践与创新. *生物多样性*, 25, 1037–1039.]
- Watts ME, Ball IR, Stewart RS, Klein CJ, Wilson K, Steinback C, Lourival R, Kircher L, Possingham HP (2009) Marxan with Zones: Software for optimal conservation based land- and sea-use zoning. *Environmental Modelling and Software*, 24, 1513–1521.
- Xu WH, Luo C, Ouyang ZY, Zhang L (2010) Designing regional nature reserves group: The case study of Qinling Mountain Range, China. *Acta Ecologica Sinica*, 30, 1648–1654. (in Chinese with English abstract) [徐卫华, 罗翀, 欧阳志云, 张路 (2010) 区域自然保护区群规划——以秦岭山系为例. *生态学报*, 30, 1648–1654.]
- Xu WH, Vina A, Qi ZX, Ouyang ZY, Liu JG, Liu W, Wan H (2014) Evaluating conservation effectiveness of nature reserves established for surrogate species: Case of a giant panda nature reserve in Qinling Mountains, China. *Chinese Geographical Science*, 24, 60–70.
- Yang R (2017) Conservation first, national representative, and commonwealth: The three concepts of China's National Park System Construction. *Biodiversity Science*, 25, 1040–1041. (in Chinese) [杨锐 (2017) 生态保护第一、国家代表性、全民公益性——中国国家公园体制建设的三大理念. *生物多样性*, 25, 1040–1041.]
- Yu H, Chen T, Zhong LS, Zhou R (2017) Functional zoning of the Qianjiangyuan National Park System Pilot Area. *Resources Science*, 39, 20–29. (in Chinese with English abstract) [虞虎, 陈田, 钟林生, 周睿 (2017) 钱江源国家公园体制试点区功能分区研究. *资源科学*, 39, 20–29.]
- Zheng X, Bao YX, Ge BM, Zheng RQ (2006) Seasonal changes in habitat use of black muntjac (*Muntiacus crinifrons*) in Zhejiang. *Acta Theriologica Sinica*, 26, 201–205. (in Chinese with English abstract) [郑祥, 鲍毅新, 葛宝明, 郑荣泉 (2006) 黑鹿栖息地利用的季节变化. *兽类学报*, 26, 201–205.]

(责任编辑: 李俊生 责任编辑: 闫文杰)