

DOI: 10.5846/stxb201809041882

马琳,李俊清.基于系统保护规划的长白山阔叶红松林保护网络优化研究.生态学报,2019,39(22): - .

Ma L, Li J Q. Systematic conservation planning optimization for the broad-leaved Korean pine mixed forest conservation network system in the Changbai Mountain Region, China. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(22): - .

基于系统保护规划的长白山阔叶红松林保护网络优化研究

马 琳¹, 李俊清^{2,*}

1 北京建筑大学人事处,北京 102616

2 北京林业大学森林资源与生态系统过程北京市重点实验室,北京 100083

摘要:阔叶红松林是北温带物种最丰富的地带性群落之一,长白山地区是其在我国范围内的中心分布区。中国政府已建立保护网络(24个自然保护区组成)来保护阔叶红松林及其重要的物种资源,但成效不显著,本研究将优化保护网络。利用系统保护规划软件 C-Plan,以集水区为规划单元,计算保护网络外规划单元的不可替代性值,识别出保护网络外高保护价值空缺,评估现有保护网络与纳入空缺后的优化保护网络的保护效率。研究结果显示,现有保护网络外的高保护价值规划单元呈集中沿山岭分布的特征,现有保护网络使 24 种物种的生境(共 75 种)实现其设定的保护目标,其他 51 种未能实现保护目标,且 20 种保护对象未能达到其设定保护目标的 50%,保护成效低。纳入空缺后的优化保护网络,可使 64 种保护对象实现保护目标,其余 11 种保护对象的保护贡献值也不同程度提高,保护成效显著增强。结合人为干扰情况提出三种不同保护策略情景下的优先保护方案,并根据生态威胁强度提出各方案的保护建议,为长白山阔叶红松林保护管理提供决策依据,并为山地生态区保护网络优化研究提供方法指导。

关键词:系统保护规划;保护网络;阔叶红松林;C-Plan;长白山

Systematic conservation planning optimization for the broad-leaved Korean pine mixed forest conservation network system in the Changbai Mountain Region, China

MA Lin¹, LI Jingqing^{2,*}

1 Human resource department of Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 102616, China

2 Key Laboratory for Forest Resources & Ecosystem Processes of Beijing, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Abstract: The broad-leaved Korean pine (*Pinus koraiensis*) mixed forest (BKPF) is one of most biodiverse zonal communities in the North Temperate Zone. Changbai Mountain in northeastern China contains one of the largest BKPFs in the region. The national government has established a network of 24 nature reserves to protect the BKPF and its vital species. So far, however, these reserves have performed with low efficiency. This paper attempts to optimize the conservation network. It proposes utilizing conservation planning software C-Plan to calculate the irreplaceability value (Ir) of each planning unit and identify high conservation value (HCV) gap areas. The overall goal of this approach was to assess the efficiency and comprehensiveness of the existing conservation network in supporting species biodiversity in the BKPF. The study also identifies specific gap areas that could optimize the network's protection capability if they were integrated into the

基金项目:国家科技攻关项目,极小种群野生植物回归技术研究示范(2016YFC0503106);极小种群野生植物野外回归技术规范(2018-LY-048);北京建筑大学基金(ZF16061)

收稿日期:2018-09-04; 网络出版日期:2019-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lijq@bucea.edu.cn

network. The results show a number of HCV planning units concentrated along certain ridges. The habitats of 24 species (out of a total of 75) achieved their identified conservation targets in the existing conservation network. The other 51 species did not achieve the conservation target, and the habitats of 20 of these 51 species achieved less than 50% of their conservation targets. This low conservation efficiency can be greatly optimized by including certain HCV gap areas. The network could be configured to ensure that 64 species achieve their conservation targets by adding certain gap areas. Including the habitats of the other 11 species provides different degrees of protection, and efficiency is improved. Conservation strategies for a given ecosystem typically are derived by considering the needs of the human inhabitants against three different priorities. Using C-Plan software to analyze the conservation management of the BKPF in the Changbai Mountain region could guide decision making for optimizing the conservation network in this most precious of mountainous ecological zones.

Key Words: Systematic Conservation Planning; conservation network; broad-leaved Korean pine mixed forest; C-Plan; Changbai Mountain

气候变化和栖息地丧失导致物种灭绝^[1],生物多样性面临严重威胁。建立自然保护区是保护生物多样性的有效途径,然而人口快速增长所产生的一系列土地利用问题给保护区选址带来了压力,保护区与商业、社会占地的矛盾日益显现^[2]。世界上仍有许多关键的生态区域没有被保护网络覆盖^[3],湿地、森林、草原等生态系统锐减。有研究显示,温带混交林的保护水平处于地球上 20 种自然森林类型中第二低的位置^[4],急需保护。然而,在欧洲温带地区,仅有 3000,000ha(占林区总面积的 0.4%)的原始森林被自然保护区和其他保护地严格保护^[5],亚洲的保护状况也不理想,全球森林覆盖损失的第二大区域位于亚洲^[6],作为森林生物群落损失的一部分,温带生物群落的损失位居第二,加强保护地球上特别是亚洲的温带森林非常迫切^[7]。在中国长白山地区,分布着以红松和多种阔叶树种混合组成的针阔混交林,它是北温带物种最丰富的地带性群落之一,是东北虎(*panthera tigris altaica*)、远东豹(*Panthera pardus orientalis*)等濒危物种的重要栖息地,极具保护价值。长白山随着海拔的增加,气温和降水量发生明显变化,依次呈现 5 条不同的植被带,是欧亚大陆从中温带带到寒带主要植被类型的缩影。

中国政府在长白山地区建立了 24 个自然保护区,用以保护这一地区的森林植被和濒危野生动植物,取得了积极的作用,但仍未能减缓濒危物种的灭绝速度^[8]。事实上,在长白山地区,20 世纪 90 年代还可见的濒危种岩高兰(*Empetrum nigrum var. japonicum*)、草苳蓉(*Boschniakia rossica*)等,现在已难见踪迹^[9],野生东北虎数量更是处于极度濒危状态^[10]。保护网络外人为干扰严重,盗猎、森林砍伐、药用植物采挖、过度旅游等现象普遍存在^[7,11],它们导致生境丧失,严重威胁生物多样性的可持续发展。这些现象也反映了现有保护网络仍存在漏洞的现状,或具有较低的保护效率。2002 年,长白山地区被中国政府确立为具有全球性保护意义的生物多样性关键地区^[12],为这一地区的保护工作带来了新的机遇与挑战,东北虎栖息地的跨国界生态保护优先区和基于濒危植物的小尺度阔叶红松林生态保护关键区研究取得了一定的成果^[10,13],但基于多物种综合考虑的长白山地森林生态区保护网络研究仍不足,这正是本研究关注的热点。

在土地资源和资金有限的情况下,具有高保护效率的地点单元能够先被保护起来,优先纳入保护网络^[17]成为研究关注的核心问题,因此如何界定保护效率的高低显得尤为重要^[15],基于不可替代性分析的系统保护规划理论为我们提供了方法指导^[16],它指出保护效率体现在保护网络对实现保护目标的贡献程度上^[17],保护目标是根据保护对象的重要程度来定量确定的^[16,18-19]。这种量化的保护目标避免了保护效率评价的主观性,更具合理性,这一方法已得到了广泛的应用^[20-23]。

本文将根据长白山地区生物多样性特征,制定量化的保护目标,通过不可替代性分析方法在系统保护规划理论框架指导下,识别未被保护网络覆盖的生物多样性高保护价值区域(保护空缺),并根据量化的人为干扰情况,针对保护空缺设计三个情景方案,即:以保护价值优先的保护方案,以抢救优先的保护方案,及以经济

发展优先的保护方案,并对各方案提出保护管理措施,为提高长白山地区自然保护网络保护效率及山地生态区可持续发展提供科学依据。

1 研究区概况

研究区位于吉林省东部的长白山系(40°41'N—44°30'N;125°20'E—130°20'E),总面积 105151.89km²,这个地区共有 2 座山,8 条岭,从西到东依次为老爷岭、哈达岭、威虎岭、牡丹岭、甑峰岭、哈尔巴岭、盘岭(图 1),长白山是最高山,主峰海拔 2691m。该区属于大陆性季风气候带,年降水量 550—910mm,无霜期为 120—160 天,年最低温度在一月,−28℃,最高温度在七月,30℃。

长白山地区的珍稀濒危物种接近 300 种^[24],地带性植被是以红松和多种阔叶树种,如椴(*Tilia*)、栎(*Oak*)、槭(*Acer*)等组成的混交林。随着海拔的增加,气温和降水量发生明显变化,依次呈现不同的山地垂直分布带,720—1100m 是阔叶红松林带,1100—1800m 是暗针叶林带,1800—2100m 为高山植被带,2100m 以上是高山苔原带^[25]。

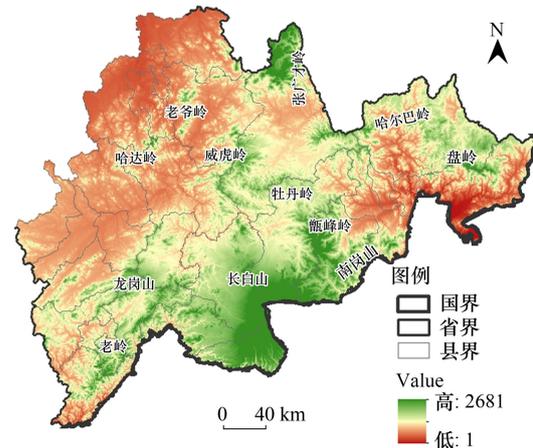


图 1 研究区概况

Fig.1 Location of study area

2 研究方法

2.1 优先保护物种及保护目标

本研究优先保护物种的选择标准至少满足下列中的一项:(1)中国特有种;(2)中国物种红色名录^[26]中的濒危物种或国家 I 级、II 级保护物种(3)对红松种子扩散起传播作用的鸟类、兽类(4)红松的主要伴生种和长白山各垂直植被带上的优势种。(5)具有多种经济价值的物种。共 75 个物种(附录 1),其中兽类 21 种、鸟类 16 种、植物 38 种。

物种濒危程度、生境信息等来源于已出版文献及自然保护区科考报告^[26-30]。自然保护区空间分布由保护区总体规划图数字化得到或实地勘察描绘范围运用地理信息系统(GIS)数字化得到。土地利用数据来源于 1:1000000 中国土地利用图^[31],研究区行政区划、道路、居民点数据来源于国家基础地理信息中心网站中的导航地理框架数据集 1:250000 全国地形数据^[32],30m 分辨率数字高程模型(DEM) 26 幅、2010 年的 LandsatTM 卫星影像数据 26 幅(分辨率为 30m×30m)来源于地理空间数据云^[33],影像时相均集中在 6 月份到 9 月份林木生长茂盛期。植被分布根据 1:1000000 中国植被图获得^[30]。

利用上述数据,初步确定物种分布的行政县范围,然后根据物种生境特征确定其偏好的植被类型和海拔,在 Arcgis9.3 支持下叠加高程、植被类型这两个生境图层,以此预测各物种适宜栖息地分布,得到物种潜在分布图^[23]。

根据长白山地区生物多样性特征咨询专家意见,对上述保护物种的保护目标进行量化计算,公式为:

$$T_{Sp} = (I_{En} + I_{Pr} + I_{Kp} + I_{Sp} + I_{Ar}) / 5 \quad [34]$$

T_{Sp} 是物种的保护目标指数; I_{En} 按物种的濒危程度打分; I_{Pr} 按国家保护等级和特有性打分; I_{Kp} 按对阔叶红松林恢复作用打分; I_{Sp} 按兽类的空间需求打分; I_{Ar} 按物种潜在栖息地面积打分,认为保护物种的稀有性通过该物种生境面积大小 I_{Ar} 来反映,栖息地面积小的物种应具有更高的保护优先级。

鸟类不考虑空间需求,所以公式去掉 I_{Sp} 后四项取平均值。对于植物来说,公式中 I_{Sp} 替换为 I_{EA} ,长白山地区很多植物具有药用、色素、野菜、观赏、油脂、纤维、蜜源、香料、野果等经济价值,因此制定优先保护植物的保护目标时,将 I_{EA} 按照植物的经济用途打分,同时具有多种经济用途的植物具有更高的分值。将得到的 T_{Sp} 值与物种的栖息地面积相乘,得到保护目标 A_{Target} 值。

2.2 地点选择软件

本研究按照自然地形地貌,采用 Arcgis 中的 Hydrology 分析模块,将 30m 的 DEM 模型在细胞值 2000 的模式下建立集水区规划单元,共划分出 15,871 个规划单元(平均面积为 6.625km²)。系统保护规划软件 C-Plan 在 GIS 系统支持下被用来识别优先保护网络^[35],利用规划单元的不可替代性程度对选择算法进行参数设置。不可替代性指在区域生物多样性保护研究中,根据保护对象的空间分布,计算每个规划单元在实现这些保护对象之保护目标过程中的重要性,即:体现特定规划单元实现保护目标的可能性^[18]。通过计算规划单元的不可替代性值来体现,它是 0—1 范围内的连续值,值越高,代表所在规划单元的保护价值越高,能够替代该规划单元完成保护目标的其他规划单元数量越少^[34]。运行 C-plan 软件前,应用 ERDAS IMAGINE 9.2 遥感影像处理系统,对研究区域 2010 年的 26 幅卫星遥感影像进行处理,获取土地利用/土地覆被数据。在对原始影像进行波段合成、投影变换、几何校正、直方图匹配、增强、裁剪等预处理之后,对景观类型信息进行解译。首先通过 GPS 野外调查数据、森林资源二类调查数据等辅助数据人工选取训练样区,用最大似然比分类法对各期影像进行监督分类。然后在监督分类基础上,加入 ndvi 植被指数、海拔和坡度等因子,通过专家分类器实施分类。最终将研究区分为林地、灌草丛、耕地、水田、建设用地、水体、未利用地 6 大类。将此分类图矢量化,挑选出非林地,将建设用地、旱地、未利用地等非物种生境在 C-plan 软件操作界面中设置成“excluded”,不参与不可替代性值计算。由于本研究不更改现有保护区的边界,所以现有保护网络不参与不可替代性值的计算,设置成“existing reserved”(图 2),其他规划单元可参与优先保护网络选址,设置成“available”。然后根据 C-Plan 数据格式要求,在 C-Plan 表格编辑器中建立数据库。计算规划单元的不可替代性值,并将 C-Plan 与 ArcView3.3 连接,生成不可替代性分布图,直观的看出研究区域的高保护价值规划单元分布。

2.3 不同保护策略情景下的优先保护方案

不同保护策略情景下的优先保护方案以人类干扰为依据^[23]。本研究选择道路和居民点密度来作为反映人类干扰程度的指标。人为干扰对生态的威胁过程由于干扰源向外辐射,其外沿缓冲区形成影响域,不同等级的干扰源对生物多样性的影响范围也不同。本研究根据不同的干扰源确定其影响范围,并以如下公式计算每个规划单元的人为干扰指数:

$$HTI_i = \left(\sum W_{ij} J_{ij} + W_{ij} R_{ij} \right) / 2 \quad [36]$$

HTI_i为第*i*个规划单元的人类活动指数,*J_{ij}*为第*i*个规划单元中第*j*个居民点影响阈所占的面积百分比,*R_{ij}*为第*i*个规划单元中第*j*个道路影响阈所占的面积百分比,*W_{ij}*表示不同等级居民点和道路的权重(表 1)。

表 1 干扰因素及权重

Table 1 Disturbance factors and weight

干扰因素 Disturbance factor	影响范围/km Range of buffers	赋值权重 Assigned weight
高速路、铁路、国道	1.50	0.40
省级道路	0.50	0.30
市县级道路	0.25	0.20
简易道路及其他低等级道路	0.10	0.10
省市级居民点	8.00	0.40
县级居民点	5.00	0.30
乡镇级居民点	3.00	0.20
乡镇以下居民点	1.00	0.10

将不可替代性值较高的规划单元与现有保护区分布图对比,确定现有保护网络的保护空缺,并结合人为干扰指数,针对保护空缺设计三种不同保护策略情景下的优先保护方案,即(1)以生态价值优先的保护方案,该方案不考虑人为干扰,将高保护价值规划单元(0.8<Ir≤1)建立优先保护网络(2)以抢救优先的保护方案,以人为干扰强烈的高保护价值区域建立优先保护网络(0.8<Ir≤1 and HTI_i>0.2), (3)以经济发展优先的保护

方案,将人类经济活动强度高的地区剔除,即以人为干扰低而保护价值高的区域建立优先保护网络($0.8 < Ir \leq 1$ and $0 < HTI_i \leq 0.2$),为决策者提供依据。

2.4 保护效率评估

本研究以保护贡献值 T_i 来评估被保护物种在被保护区域中实现保护目标的程度,即:若一种保护对象 i , 分布在 k 个规划单元中,并且这些规划单元被保护,那么保护区域(由这 k 个规划单元组成)对保护对象 i 实现其设定的保护目标的贡献值为 $T_i = A_{\text{Protected}}/A_{\text{Target}}$, $A_{\text{Protected}}$ 表示保护对象 i 在这 k 个规划单元中的分布面积, A_{Target} 为保护对象 i 的保护目标(2.1 中已设定的)。 T_i 值由 C-Plan 软件中“Features to Target”模块^[35] 计算获得, $T_i \geq 100$ 表示保护目标实现。

3 研究结果

3.1 高保护价值规划单元及保护空缺

可以进行保护优先网络选址的规划单元其不可替代性指数(Ir)被分为五个等级(表 2),分布情况(图 2),其中 $0.8 < Ir \leq 1$ 的规划单元具有高保护价值,面积百分比为 15.94%,它们呈现沿山岭集中分布的特征(图 2)。高保护价值区域集中分布在:甑峰岭、长白山、长白山南坡鸭绿江流域、威虎岭、张广才岭及哈尔巴岭等山地。这些地区未被现有保护网络覆盖,是保护空缺地带,具有保护优先性。

表 2 长白山地区可利用的规划单元不可替代性值分布

Table 2 Irreplaceability classification in available site of Changbai Mountain

不可替代性值 Irreplaceability	保护价值 Conservation value	面积/km ² Area	面积百分比/%Percentage
$0.8 < Ir \leq 1$	高保护价值	10725.06	15.94
$0.6 < Ir \leq 0.8$	较高保护价值	5772.58	8.58
$0.4 < Ir \leq 0.6$	一般保护价值	6691.47	9.94
$0.2 < Ir \leq 0.4$	较低保护价值	10917.07	16.22
$0 < Ir \leq 0.2$	低保护价值	33193.44	49.32

3.2 三种不同策略需求下的保护方案

人为干扰分析结果显示,长白山地区人为干扰强烈的规划单元较集中分布在龙岗山、牡丹岭、威虎岭北部,老爷岭西部,哈达岭东部和龙岗山地区。这些地区有长图线、沈吉线、梅集线等铁路线,延吉、敦化、吉林、通化等市级居民点。

综合上述人为干扰和保护价值情况提出三种保护策略的情景方案(图 2、图 3A、3B):

(1) 以生态价值优先的保护方案。该方案以生态保护为优先策略,不考虑人为干扰对保护效果的影响,将未纳入现有保护网络的所有高保护价值空缺地区全部保护(图 2 中的 GAP 区域),该方案可以涵盖所有保护对象,且具有较高的保护效率。红松、梅花鹿等 64 种保护对象的生境达到 100% 保护。保护措施主要以新建、扩建保护区为主,位于保护区内的居民点可以考虑适当迁出。

(2) 以抢救优先的保护方案(图 3A)。该方案以人为干扰程度高的高保护价值空缺建立优先保护网络,抢

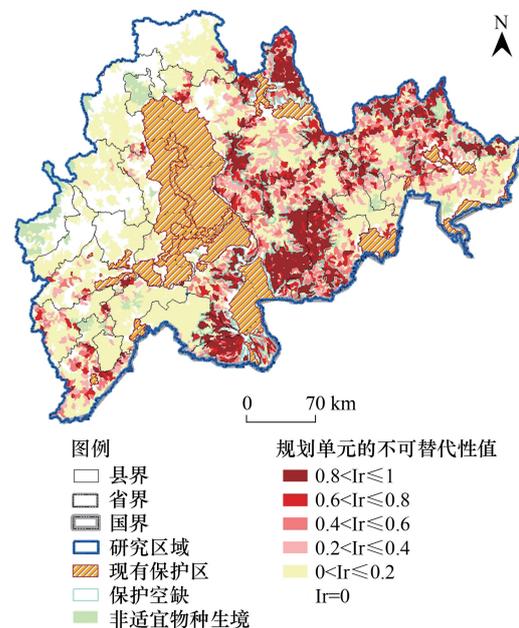


图 2 长白山地区规划单元不可替代性值分布

Fig.2 Irreplaceability distribution of Changbai Mountain

救这些高保护价值区域,避免物种生境因公路、铁路威胁进一步被破坏。

(3)以经济发展优先的保护方案(图 3B)。该方案将人类经济活动强度高的地区剔除,以人为干扰低而保护价值高的区域建立优先保护网络,环境保护与经济发展可同步进行。

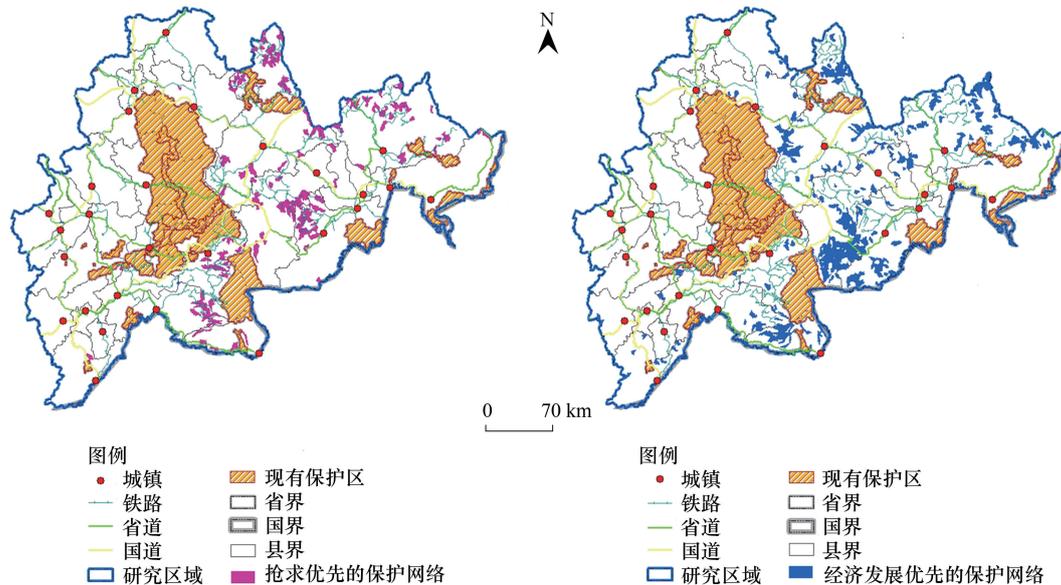


图 3 不同情境模式的保护策略(A.抢救优先;B.经济发展优先)

Fig.3 Conservation scenarios combined with Human disturbance (A. Rescue prioritized scenario; B. Economical development prioritized scenario)

3.3 保护贡献评估

现有保护网络面积为 17125km^2 ,占研究区总面积的 16%(图 4),长白落叶松(*Larix olgensis*)、豺(*Cuon alpinus*)等 22 种保护对象的生境被现有保护网络覆盖,实现其保护目标,占保护对象种类的 32%。东北虎、梅花鹿(*Cervus nippon*)、红松、远东豹等 16 种保护对象的生境没有完全被现有保护网络覆盖,达到保护目标的比例不足 50%(附录 1)。这表明现有保护网络保护效果仍不满足需要,应扩大保护网络使更多的保护对象可以实现保护目标。

将现有保护网络外的高保护价值规划单元纳入保护网络(即在生态价值优先的保护情景),新保护网络面积为 27897km^2 ,占研究区域总面积的 26%,能够使 64 种保护对象实现其各自的保护目标(附录 1),占保护对象总种类数的 85%(一共 75 种保护对象),其他未能完全实现保护目标的 11 种保护对象,其保护贡献值 T_i 也不同程度的提高(图 5),能够被更好的保护。

纳入生态价值优先保护情景后所形成的新保护网络较原已建保护网络,其面积占研究区总面积的比例增加 10%(图 4),保护对象实现其保护目标占保护对象种类数的比例较原保护网络同比提高 53%(图 4),这说明用科学的选址方法增加保护面积可提高保护网络对保护对象的保护贡献。

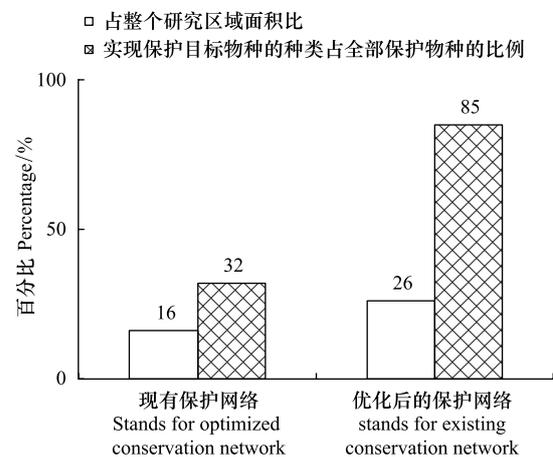


图 4 保护效果对比

Fig.4 Comparison of conservation efficiency

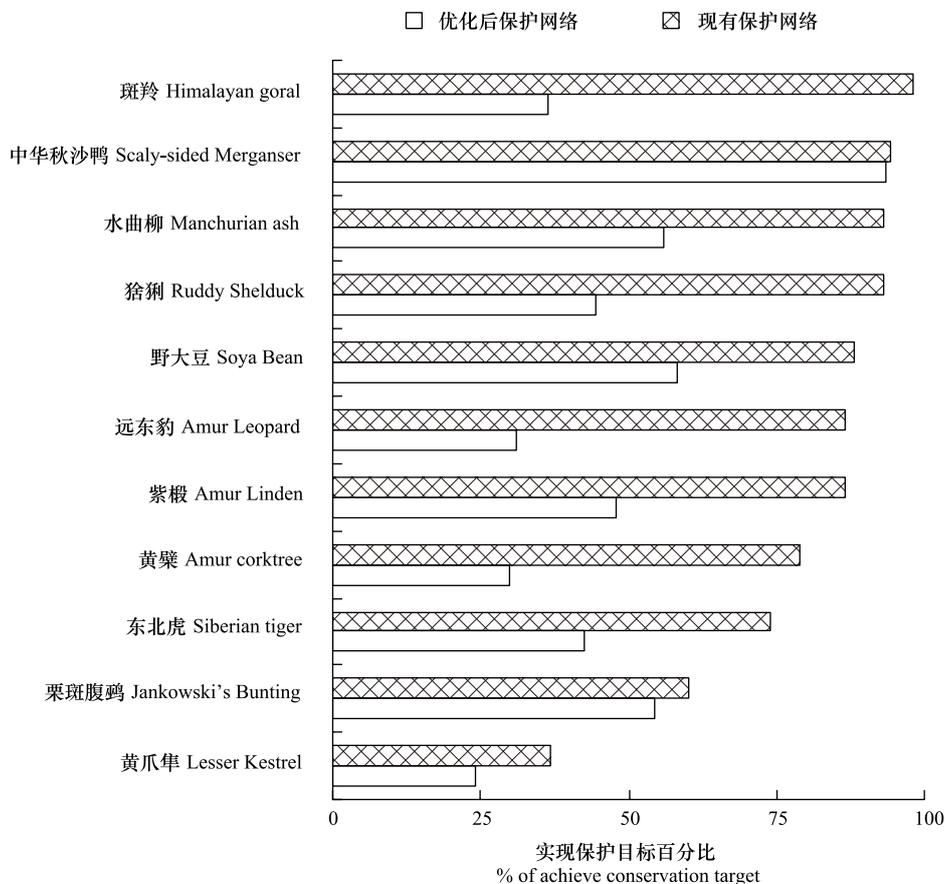


图 5 11 种保护对象在现有保护网络和优化后的保护网络中实现保护目标情况

Fig. 5 Percentage of conservation target achieved by 11 protected species in the existing conservation network and after optimization additions

4 结论与讨论

保护区选址方法在地理信息系统和物种生境模型的支持下得到很快的发展,选择区域物种丰富度高的热点地区,并结合空缺分析,可有效识别大尺度生物多样性保护优先区^[3]。系统保护规划方法综合保护物种、生态系统、生态过程多尺度生物多样性特征,通过量化的保护目标对研究区域进行保护区选址,它不仅重视保护网络的优化,更重视保护效果的实施^[16],国际上该方法应用较早取得一些研究成果^[18,37-39],近些年我国学者也开始尝试将该方法应用到湿地^[2,39]、森林生态系统^[8]^[36]以及区域^[23,40]、国家尺度^[41-42]的保护网络优化研究中。

不可替代性分析方法与以往多种指标反映一个地区的生物多样性方法不同,它是一个综合的指标,反映规划单元在完成整体保护目标中的重要性^[18]。不可替代性指数受研究区域生物多样性特征和保护目标双重驱动,针对不同研究区域,所选择的保护对象应具有代表性和典型性,能够反映当地的生物多样性特征。本研究针对长白山地区阔叶红松林的特点,选取的保护对象以森林植被居多,包括长白山地区濒危、特有物种;能传播红松种子的生态关键种,如松鼠、星鸦、普通鹀;能维持阔叶红松林生态系统稳定与平衡的食物链顶端的大型哺乳动物东北虎、远东豹等;红松的伴生种;长白山各垂直带的建群种、优势种等。对湿地植被、鸟类等关注较少,所以研究结果显示山地的不可替代性较高(图 2),而河流、湿地、草原等其他生态系统类型并不突出,由此可见,基于不可替代性的生物多样性保护规划方法具有很高的灵活性和一定的主观性,保护对象选择以及保护目标的设定差异会导致不同的研究结果。在今后的研究过程中选取保护对象时应考虑的更加全面,确

保研究结果的客观性。考虑到长白山地区居民以采挖药用、蜜源等经济植物为生计的现实,本研究在设定植物的保护目标时,将经济价值作为了一个指标,若这些经济植物的生境得到保护,同时也能减弱人为干扰对其他物种生境的破坏。优化后的保护网络面积 27897km²,占研究区总面积的百分比较现有保护网络所占比例提高 10%,可使 85%的保护对象(64 种)达到保护目标,而现有保护网络,此比例仅有 32%(34 种)(图 4),提高了 53%,这说明保护效率的提高与保护面积增加有关,但保护效率的增加量远大于保护面积的增加量,我们仅需要将那些不可替代性值高的规划单元纳入保护网络,就可以大大增加保护效率,这正是我们研究意义所在。

针对人为干扰情况,设计不同策略的三种保护网络优化方案,应根据实际情况和决策需要确定实施计划,分期调整。以抢救优先的保护方案,人为干扰强烈,应及时建立保护区及生态廊道,特别是长白山东部地区跨境廊道,加强物种在中俄、中朝几个国家破碎化生境之间自由迁徙、扩散和基因交流。针对人为干扰和生态威胁进行严格管理,制定完善的管理措施,避免森林砍伐、盗猎、采药、过度旅游和基础设施及城市化扩张引起的生物多样性丧失。生态价值优先的保护方案,未考虑人为干扰的影响,该方案的保护措施以新建、扩建保护区为主,位于保护区内的居民点可以考虑适当迁出,并建立完善的生态补偿机制,根据资源、资金、政策情况延缓建立保护区的时限,有选择的先建立起一些保护区,但必须制定相应措施控制人为干扰的进一步恶化。以经济发展优先的保护方案,保护网络分布在长白山海拔较高、人烟稀少的地区,生态环境保持在比较原始的状态,这些保护空缺应给予长期监测,尽量维持其现有的生物多样性水平。

森林生态系统优先保护网络体系优化,不仅与这一地区的生物多样性丰富程度密切相关,还与森林生态系统所提供的生态系统服务价值、气候变化趋势、保护区建设管理成本、历史文化多样性等有紧密联系^[34,43],这些因素未在本文中深入研究,将生态系统服务价值和建立保护区的机会成本、土地成本、政府政策等纳入系统保护规划^[2],分别构建与生物多样性相结合的保护网络,是未来研究的方向。森林生物多样性保护规划应考虑全面的生态脆弱性评估指标^[34]。本文受资料限制,仅选择了公路、居民点两项人为干扰因素作为生态脆弱性评估的代表指标,希望在今后的研究中,可加入其他诸如气候、水资源、森林覆盖率、外来物种入侵、人口密度、人均 GDP、人均耕地面积、城市化、污染状况、水电站开发、森林采伐、放牧、旅游、农业扩张和政策效应等生态脆弱性指标^[44-46],建立更加合理有效的生态脆弱性评估体系。

参考文献 (References):

- [1] Pimm S, Jenkins C, Abell R, Brooks T M, Gittleman J L, Joppa L N, Raven P H, Roberts C M, Sexton J O. The biodiversity of species and their rates of extinction, distribution, and protection. *Science*, 2014, 344(6187): 1246-752.
- [2] 曲艺, 李佳珊, 王继丰, 崔福星, 孙工棋, 栾晓峰, 倪红伟. 基于系统保护规划的三江平原湿地保护网络体系优化. *生态学报*, 2015, 35(19): 6394-6404.
- [3] Scott J M, Davis F, Csuti B, Noss R, Butterfield B, Groves C, Anderson H, Caicco S, D'Erchia F, Edwards T C Jr, Ulliman J, Wright R G. Gap analysis: a geographic approach to protection of biological diversity. *Wildlifemonographs*, 1993, 123: 3-41.
- [4] Schmitt, C B, Burgess N D, Coad L, Belokurov A, Besançon C, Boisrobert L, Campbell A, Fish L, Gliddon D, Humphries K, Kapos V, Loucks C, Lysenko I, Miles L, Mills C, Minnemeyer S, Pistorius T, Ravilious C, Steining M, Winkel G. Global analysis of the protection status of the world's forests. *Biological Conservation*, 2009, 142(10): 2122-2130.
- [5] Parviainen J. Virgin and natural forests in the temperate zone of Europe. *Forest Snow and Landscape Research*, 2005, 79(1/2): 9-18.
- [6] Hansen M C, Stehman S V, Potapov P V. Quantification of global gross forest cover loss. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2010, 107(19): 8650-8655.
- [7] Tang L N, Li A X, Shao G F. Landscape-level Forest Ecosystem Conservation on Changbai Mountain, China and North Korea (DPRK). *Mountain Research and Development*, 2011, 31(2): 169-175.
- [8] 马琳, 曲艺, 孙工棋, 肖静, 苏日娜, 李俊清. 基于 C-Plan 系统保护规划软件的长白山阔叶红松林保护效率. *生态学报*, 2015, 35(13): 4547-4557.
- [9] 陈霞, 王绍先, 王振国. 长白山保护开发区生物多样性保护与可持续发展. 长春: 吉林科学技术出版社, 2010.
- [10] Luan X F, Qu Y, Li D Q, Liu S R, Wang X L, Wu B, Zhu C Q. Habitat evaluation of wild Amur tiger (*Panthera tigris altaica*) and conservation priority setting in north-eastern China. *Journal of Environmental Management*, 2011, 92(1): 31-42.
- [11] Yang X, Xu M. Biodiversity conservation in Changbai Mountain Biosphere Reserve, northeastern China: status, problem, and strategy. *Biodiversity & Conservation*, 2003, 12(5): 883-903.

- [12] 中华人民共和国环境保护部. 中国生物多样性保护行动计划. 北京: 中国环境科学出版社, 2011.
- [13] 于琳倩, 李景文, 赵秀海, 马琳, 吴尚, 白雪琪. 长白山阔叶红松林生态保护关键区的确定. 应用生态学报, 2014, 25(5): 1250-1258.
- [14] Rouget M. Measuring conservation value at fine and broad scales: implications for a diverse and fragmented region, the Agulhas Plain. *Biological Conservation*, 2003, 112(1/2): 217-232.
- [15] Wiersma Y F, Nudds T D. Efficiency and effectiveness in representative reserve design in Canada: The contribution of existing protected areas. *Biological Conservation*, 2009, 142(8): 1639-1646.
- [16] Margules C R, Pressey R L. Systematic conservation planning. *Nature*, 2000, 405(6783): 243-253.
- [17] Pressey R L, Whish G L, Barrett T W, Watts M E. Effectiveness of protected areas in north-eastern New South Wales: recent trends in six measures. *Biological Conservation*, 2002, 106(1): 57-69.
- [18] Ferrier S, Pressey R L, Barrett T W. A new predictor of the irreplaceability of areas for achieving a conservation goal, its application to real-world planning, and a research agenda for further refinement. *Biological Conservation*, 2000, 93(3): 303-325.
- [19] Pressey R L, Cowling M R, Rouget M. Formulating conservation targets for biodiversity pattern and process in the Cape Floristic Region, South Africa. *Biological Conservation*, 2003, 112(1/2): 99-127.
- [20] Lourival R, McCallum H, Grigg G, Arcangelo Caudia, Machado R, Possingham H. A systematic evaluation of the conservation plans for the Pantanal wetland in Brazil. *Wetlands*, 2009, 29(4): 1189-1201.
- [21] Cowling R M, Pressey R L, Sims-Castley R, le Roux A, Baard E, Burgers C J, Palmer G. The expert or the algorithm? -comparison of priority conservation areas in the Cape Floristic Region identified by park managers and reserve selection software. *Biological Conservation*, 2003, 112(1/2): 147-167.
- [22] Cowling R M, Pressey R L, Rouget M, Lombard A T. A conservation plan for a global biodiversity hotspot-the Cape Floristic Region, South Africa. *Biological Conservation*, 2003, 112(1/2): 191-216.
- [23] Zhang L, Xu W H, Ouyang Z Y, Zhu C Q. Determination of priority nature conservation areas and human disturbances in the Yangtze River Basin, China. *Journal for Nature Conservation*, 2014, 22(4): 326-336.
- [24] Ogureeva G N, Dudov S V, Karimova T Y. Diversity and protection of Korean pine broad-leaved forests in the Manchurian natural area. *Contemporary Problems of Ecology*, 2012, 5(7): 621-632.
- [25] Shao G F, Shugart H H, Zhao G, Zhao S D, Wang S X, Schaller J. Forest cover types derived from Landsat thematic mapper imagery for Changbai Mountain Area of China. *Canadian Journal of Forest Research*, 1996, 26(2): 206-216.
- [26] 汪松, 解焱. 中国物种红色名录-第二卷, Vol. II-脊椎动物. 北京: 高等教育出版社, 2009.
- [27] 汪松. 中国濒危动物红皮书. 北京: 科学出版社, 1998.
- [28] 周繇. 中国长白山植物资源志. 北京: 中国林业出版社, 2010.
- [29] 高玮. 中国东北地区鸟类及其生态学研究. 北京: 科学出版社, 2006.
- [30] 中国科学院中国植被图编辑委员会. 1:1000000 中国植被图集. 北京: 科学出版社, 2001.
- [31] 吴传钧, 郭焕成. 1:1000000 中国土地利用图. 北京: 科学出版社, 1994.
- [32] 国家基础地理信息中心. 导航地理框架数据集. [2017-12-06]. <http://www.ngcc.cn/article/xxfw/slgg/>
- [33] 地理空间数据云. DEM 数字高程数据. [2017-11-22]. <http://www.gscloud.cn/>
- [34] 马琳. 长白山地区森林生物多样性保护体系研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2015.
- [35] New South Wales National Parks and Wildlife Service (2001) C-Plan Conservation Planning Software User Manual for C-Plan Version 3.06. [2017-11-22]. <http://marxan.net/cplan>
- [36] Ma L, Sun G Q, Qu Y, Li J Q. Applying systematic conservation planning to constitute a protection strategy for broad-leaved Korean pine forests in Changbai Mountains, China. *Journal of Mountain Science*, 2016, 13(3): 493-507.
- [37] Cowling RM, Pressey RL. Introduction to systematic conservation planning in the Cape Floristic Region. *Biological Conservation*, 2003, 112(1/2): 1-13.
- [38] Kukkala A S, Moilanen A. Core concepts of spatial prioritisation in systematic conservation planning. *Biological Reviews*, 2013, 88(2): 443-464.
- [39] 曲艺, 罗春雨, 张弘强, 曾星雨, 崔玲, 李海燕, 倪红伟. 基于历史生物多样性与湿地景观结构的三江平原湿地恢复优先性研究. *生态学报*, 2018, 38(16): 5709-5716.
- [40] 黄心一, 李帆, 陈家宽. 基于系统保护规划法的长江中下游鱼类保护区网络规划. *中国科学: 生命科学*, 2015, 45(12): 1244-1257.
- [41] 李卓. 中国濒危植物保护网络优化研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2016.
- [42] 郭柳琳. 基于系统保护规划的我国生物多样性优先保护及空缺分析[D]. 山西: 山西大学, 2015.
- [43] Popescu V D, Rozyłowicz L, Cogălniceanu D, Niculae I M, Cucu A L. Moving into protected areas? Setting conservation priorities for Romanian reptiles and amphibians at risk from climate change. *PLoS One*, 2013, 8(11): e79330.
- [44] Buschke F T, Vanschoenwinkel B. Mechanisms for the inclusion of cumulative impacts in conservation decision-making are sensitive to vulnerability and irreplaceability in a stochastically simulated landscape. *Journal for Nature Conservation*, 2014, 22(3): 265-271.
- [45] Shokri M R, Gladstone W. Integrating vulnerability into estuarine conservation planning: does the data treatment method matter? *Estuaries and Coasts*, 2013, 36(4): 866-880.
- [46] 田亚平, 常昊. 中国生态脆弱性研究进展的文献计量分析. *地理学报*, 2012, 67(11): 1515-1525.