

DOI: 10.5846/stxb201707051214

蔺琛, 龚明昊, 刘洋, 潘旭, 朴正吉. 基于优势种的生物多样性保护价值空间异质性研究—以长白山生态功能区为例. 生态学报, 2018, 38(13):

Lin C, Gong M H, Liu Y, Pan X, Piao Z J. Spatial heterogeneity of biodiversity value based on dominant species—Changbaishan Ecological Function Zone as a case study. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(13):

## 基于优势种的生物多样性保护价值空间异质性研究 —以长白山生态功能区为例

蔺 琛<sup>1</sup>, 龚明昊<sup>2,\*</sup>, 刘 洋<sup>1</sup>, 潘 旭<sup>2</sup>, 朴正吉<sup>3</sup>

1 国家林业局调查规划设计院, 北京 100714

2 中国林业科学研究院湿地研究所, 湿地生态功能与恢复北京市重点实验室, 北京 100091

3 长白山科学研究院 长白山生物资源与生物多样性联合重点实验室, 吉林 133613

**摘要:** 生物多样性保护是生态系统的主导功能之一, 对生物多样性空间异质性的研究有助于准确认识区域的保护价值及重要性, 但目前可借鉴的生物多样性价值空间异质性评价方法和经验偏少。本研究以长白山生态功能区核心区为研究区域, 基于生物多样性丰富区域优势物种的分布及其环境因子, 通过 Maxent 评估生物多样性保护价值, 将研究区域分为生物多样性保护高价值区、中价值区和一般价值区, 并开展景观分析与评估。研究表明: 研究区域内生物多样性保护高价值区域占总面积的 42.9%, 主要分布于长白山保护区内, 保护区内的高价值斑块也较保护区外完整、面积大; 研究区域内生物多样性高价值斑块的平均面积和最大斑块面积远高于中价值区和一般价值区, 其斑块景观较完整、破碎化水平相对较低, 是研究区域生物多样性保护价值和生态系统稳定性的重要基础。植被是对研究区域生物多样性影响最大的环境因子, 其次是土层厚度和海拔。从生态系统完整性和过程连续性保护的需要, 保护区南部缓冲区可考虑调整为核心区, 保护区外还有较大面积的生物多样性高价值和中价值区域也应纳入保护区进行保护; 长白山西坡是生物多样性高价值斑块最破碎的区域, 应在未来的保护工作中予以特别关注。本研究表明关联优势种空间分布及环境因子是认识生物多样性价值及空间异质性的有效手段, 本研究可为生态红线划定和国家公园设计提供参考。

**关键词:** 生物多样性价值; 生态服务; 空间格局; 优势种

## Spatial heterogeneity of biodiversity value based on dominant species— Changbaishan Ecological Function Zone as a case study

LIN Chen<sup>1</sup>, GONG Minghao<sup>2,\*</sup>, LIU Yang<sup>1</sup>, PAN Xu<sup>2</sup>, PIAO Zhengji<sup>3</sup>

1 Academy of Forestry Inventory and Planning, State Forestry Administration, Beijing 100714, China

2 Research Institute of Wetland, Beijing Key Laboratory of Wetland Services and Restoration, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

3 Changbaishan Academy of Science; Changbaishan of Biological Resources and Diversity Joint Key Laboratory, Jilin 133613, China

**Abstract:** Understanding spatial heterogeneity, which is a dominant function in ecosystem biodiversity, can help to highlight the conservation value and importance of a given area. However, there are limited available methods to assess the spatial heterogeneity of biodiversity value. We chose the kernel area of the Changbaishan Ecological Function Zone as the study site and constructed an assessment model of biodiversity value based on the dominant species in an area with high species richness and environmental variables, by using Maxent. Based on the aggregation of the dominant species and results of the biodiversity assessment, we partitioned the study area as into three areas of high, medium, and normal biodiversity

基金项目: 长白山管委会项目“长白山生态红线划定”

收稿日期: 2017-07-05; 网络出版日期: 2018-00-00

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: gongmh2005@hotmail.com

values. Our study showed that the area with a high biodiversity value occupied 42.9% of the total study area and was mainly located within the Changbaishan Reserve; and the areas with high and normal biodiversity values comprised the main range of the Changbaishan Reserve. The mean and largest patch sizes of high biodiversity value were much larger than those of the medium and normal biodiversity values, reflecting the integrity and low fragmentation level in the landscape pattern, suggesting the competent function and robust stability of ecosystem and biodiversity values in our study. Together, the patches of high biodiversity value in the reserve were also larger and more integrated than those outside the reserve, and the order of the mean size with sub-function areas of the reserve was as follows: kernel area > buffer area > experimental area. Among the environmental factors, vegetation was the most important for the biodiversity value, followed by the soil depth and elevation in the study area. Based on the needs of protecting the ecosystem integrity and eco-process connectivity, the south buffer zone of the reserve should be incorporated into kernel areas; the large area with high and medium biodiversity values should be managed for more efficient conservation; and western Changbaishan Mountain was the most fragmented area with high diversity values and should be the focus of future conservation and management efforts. Our study also indicated that this method was effective to examine the spatial heterogeneity of biodiversity by associating the presence of dominant species with environmental variables and could be applied to biodiversity studies in other ecological function areas to delineate ecological conservation redlines and effectively design national parks.

**Key Words:** biodiversity value; ecological service; spatial pattern; dominant species

生物多样性是生态系统的主导功能,是水源涵养、土壤保持、气候调节等其它功能得以实现的基础,也是自然保护的主要目标和成效。随着生态文明建设上升为国家战略,我国政府先后推出了生态功能区划、主体功能区划、生态红线划定、国家公园建设等一系列重大举措<sup>[1-2]</sup>。尽管这些生态保护与建设措施出台的背景、目的各不相同,开展生态功能及服务价值评价是实施这些战略的重要基础,认识其生物多样性价值则是完成生态功能价值评价不可或缺的内容。

已有生物多样性研究主要基于一些样方、样线调查和统计,通过一些指数以点带面地反映一个区域的多样性状况<sup>[3-4]</sup>,其结果多为一些定性结论,缺乏空间格局和异质性方面的确切信息,难以在实际工作中根据不同区域的价值提出针对性的保护对策和措施。目前,尚无针对生物多样性价值评价的方法和经验可借鉴,对生物多样性价值评价多参考生态系统服务价值评价方法<sup>[5-6]</sup>;尽管提出了支付意愿调查法、收益资本化法、直接市场价值法、机会成本法<sup>[7-9]</sup>等方法,但从不同主导功能所得出的生态服务评价结果差异巨大<sup>[10]</sup>,也无法通过市场交换实现<sup>[9]</sup>,且均不能提供生物多样性的空间异质性信息,导致以上方法未得到普遍应用。

考虑到生物多样性评价方法存在的问题和已有评价结果无法从空间格局上给保护实践提供直接指导。本研究拟以长白山生态功能区的核心区域为例,开展其生物多样性保护价值的空间异质性研究,评估其生物多样性价值的空间格局和景观特征,探索基于物种对生物多样性价值空间异质性定量评价的模型和指标体系,丰富和完善生物多样性评价方法,为优化长白山生态功能区区划和提升保护成效提供参考。

## 1 研究内容

### 1.1 研究区域

本研究以长白山保护开发区管理委员会(以下简称管委会)所辖范围为研究区域,该区域位于我国吉林省的东南部,为长白山生态功能区的核心区域<sup>[11]</sup>,包括长白山国家级自然保护区(以下简称保护区)的全部范围及周边地区,涉及安图、长白、抚松三县,总面积 3278 km<sup>2</sup>(图 1)。研究区域属于温带大陆性山地气候,最高海拔 2619 m;境内天池是研究区域内全部水系的源头,主要河流有头道、二道、三道、四道白河,均沿天池放射状分布。研究区域是我国境内唯一具有高山冻原的山地,也是东北植物区系唯一拥有明显植被垂直带谱、保存完整自然生态系统,具有重要的生态和科研价值。

## 1.2 研究方法

本研究根据优势种对群落的代表性,拟基于群落优势种的分布格局及环境要素特征来认识研究区域生物多样性保护价值的空间格局和景观特征。在该区域生物多样性长期研究和监测成果基础上,开展实地调查,研究并确定生物多样性丰富区域的群落主要优势物种,通过优势物种分布与所在区域环境因子的关联建立生物多样性保护价值评估模型,认识研究区域生物多样性价值的空间异质性。

### 1.2.1 数据来源

研究数据来自长白山保护区综合科学考察报告、长白山管委会森林资源调查成果、长白山保护区资源监测数据和 2016 年 4—6 月研究团队对研究区域生物多样性概况的实地调查结果。区域优势种通过随机样线法完成,分别在长白山北坡、西坡和南坡沿海拔梯度布设 10 条、200 m 长的垂直样线,根据保护工作人员和专家经验,沿样线踏查、确定物种多样性丰富区域的群落优势物种,并记录优势种所在区域的经纬度、海拔、坡度、坡向、土壤等环境因子。同时结合长白山保护区长期资源监测数据、区域森林资源调查数据和长白山保护区已有生物多样性研究成果,最终确定研究区域生物多样性高的植物群落优势树种主要为冷杉(*Abies nephrolepis*)、云杉(*Picea jezoensis*)、红松(*Pinus koraiensis*)、紫椴(*Tilia amurensis*)、枫桦(*Betula costata*)和蒙古栎(*Quercus mongolica*)6 种<sup>[3-4, 12]</sup>。

研究环境因子共选取了海拔、坡度、坡向、河流、植被、土壤类型和土壤厚度 7 个因子。海拔数据来自国家测绘地理信息局数据库 DEM;坡度、坡向数据基于该 DEM 生成;河流数据来自 1:10 万地形图提取;植被、土壤数据由长白山保护区所提供的林地及森林资源调查成果生成,植被分类到群系组水平共 21 类;土壤根据其类型分为 12 类;土壤厚度分为 7 类(10、25、40、50、70、120 cm)。以上数据基于 ArcGIS 10.0 转化为 30 m×30 m 的栅格,投影坐标系统为 UTM\_WGS 84。

### 1.2.2 方法

主要优势分布数据除了来自实地调查中发现的优势种分布点外,还将以上 6 种树种所在林班的几何中心作为优势种的分布点。考虑到同类型林班集中分布可能产生分布点局部聚集导致的空间自相关影响,根据对长白山最小群落面积的研究成果<sup>[13]</sup>,对距离相近的分布点以 500 m 为最小距离进行再次筛选,最后得出 1660 个优势树种分布点。

分布点数据与整理后的环境因子数据一起导入 Maxent,生成研究区域生物多样性价值评价图层。选择 70%的样点作为训练数据,30%的样点用于对结果进行检验。模型有效性采用 AUC 检验模型进行准确性判别, AUC>0.70 说明结果的准确率较高<sup>[14]</sup>。环境数据中海拔、坡度、坡向设定为连续变量,河流基于(Euclidean distance)生成栅格图层、也为连续变量,植被、土壤类型和土壤厚度为分类变量。

生成的生物多样性价值图层为指数 0—1 之间的连续栅格(0 为生物多样性价值最低值、1 为最高值),不能确定不同价值的区域和分布,需要对其重分类后进行定量评价和景观分析。本研究将优势种局限为区域生物多样性丰富群落的优势种,优势种的空间格局对群落多样性水平及分布具有代表性,优势种聚集程度越高的区域其生物多样性价值也越高。因此,根据优势树种分布点落入不同评估值区间的比例,建立多样性价值评估标准,对生成的生物多样性价值栅格图层进行再分类。参考野生动物栖息地适宜性评价经验,将覆盖 70%优势种分布点的评估值所在区域划为生物多样性高价值区(简称高价值区)、覆盖 20%分布点的区域为中价值区、其余为一般价值区<sup>[15-16]</sup>。在价值分类的基础上,分别计算 3 类价值斑块的斑块数、平均斑块面积、最大斑块面积等指数,以此评价各类型价值区的景观完整性和破碎化水平。

## 2 研究结果

### 2.1 长白山生物多样性概况

综合长白山地区已有生物多样性研究和保护区最近的监测数据,研究区域最新的生物多样性概况为:野生植物 2639 种 4 亚种 198 变种 46 变型,分属于 260 科 877 属(其中维管束植物 124 科 504 属 1496 种),植物

区系地理成分复杂, 以北温带分布属为主; 野生动物 1586 种 10 亚种, 分属于 52 目 260 科 1116 属( 脊椎动物 32 目 88 科 201 属 331 种 10 亚种), 动物区系以古北界为主; 主要地带性植被类型有: 山地冻原植被、岳桦林、岳桦云冷杉林、典型云冷杉林、红松云冷杉林、红松阔叶林混交林。

2.2 生物多样性的空间格局

研究区域内有生物多样性高价值区域 140605.6 hm<sup>2</sup>、占研究区域总面积 42.9%, 长白山保护区内的高价值区占整个研究区域的 29.5% (图 1, 表 1), 保护区外高价值斑块主要分布于望天鹅西南、维东保护站以西、池西保护站以西和双目峰保护站东南( 13.4%); 中价值区占总面积的 34.7%, 主要分布于保护区外、占整个研究区域的 24.8%, 保护区内零星分布( 9.9%), 仅在西南和东南部有一些较大的斑块; 一般价值斑块占 22.4%, 主要分布于长白山自然保护区内( 20.5%), 主要分布于天池以东、天池西南和保护区头西保护站周边地区。

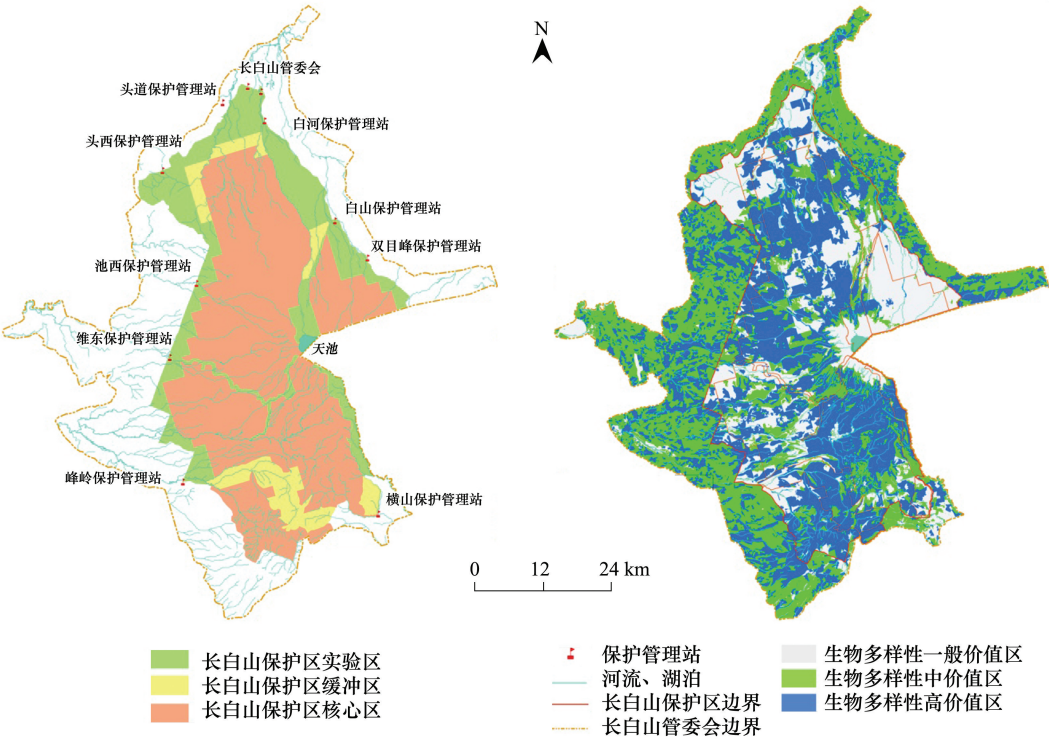


图 1 研究区域生物多样性价值空间格局

Fig.1 The study area and the current status of biodiversity value in spatial pattern

表 1 研究区域及长白山自然保护区生物多样性价值构成表

Table 1 the proportion of biodiversity value in Changbaishan reserve and study area

| 类别<br>Type                                 | 研究区域 Study area            |                     |                                                   |                                                        | 保护区 Reserve                |                                            |                                                |
|--------------------------------------------|----------------------------|---------------------|---------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|----------------------------|--------------------------------------------|------------------------------------------------|
|                                            | 面积/hm <sup>2</sup><br>Area | 比例<br>Proportion /% | 平均斑块面积<br>Mean area of<br>patches/hm <sup>2</sup> | 最大斑块面积<br>Area of the largest<br>patch/hm <sup>2</sup> | 面积/hm <sup>2</sup><br>Area | 在保护区内占比<br>Proportion within<br>reserve /% | 在研究区域内占比<br>Proportion within<br>study area /% |
| 高价值区<br>Area of high, biodiversity value   | 140605.6                   | 42.9                | 50                                                | 53478                                                  | 96875.0                    | 49.3                                       | 29.5                                           |
| 中价值区<br>Area of medium biodiversity value  | 113706.6                   | 34.7                | 28                                                | 31962                                                  | 32248.8                    | 16.4                                       | 9.9                                            |
| 一般价值区<br>Area of normal biodiversity value | 73487.8                    | 22.4                | 21                                                | 28128                                                  | 67341.2                    | 34.3                                       | 20.5                                           |
| 合计<br>Total                                | 327800                     |                     |                                                   |                                                        | 196465                     |                                            |                                                |

根据长白山自然保护区内外生物多样性价值差异比较,保护区外主要由高价值斑块(33.3%)和中价值斑块(62.0%)组成,一般价值斑块仅占4.7%,表明保护区外还有较多具有高生物多样性保护价值的区域。保护区内主要由高价值斑块和一般价值斑块组成,保护区内高价值斑块的73%分布在核心区内;一般价值斑块主要分布于保护区东部;中价值斑块在保护区内分布较少。同时,各保护区功能区划中不同价值类型斑块的组成比例差异较大,核心区内还有29.2%的区域为一般价值区,缓冲区内有超过一半的区域为高价值区(54.0%)。

2.3 生物多样性的景观特征

根据所生成的景观指数,研究区域内高生物多样性价值斑块平均面积为50 hm<sup>2</sup>、远高于中价值区和一般价值区(表1),最大斑块面积为53478 hm<sup>2</sup>、也远大于中价值区和一般价值区的最大斑块面积,表明高价值区斑块景观较完整、破碎化水平相对较低,是研究区域生物多样性价值和生态系统稳定性的重要基础;保护区内高价值斑块完整、面积较大,保护区外高价值斑块面积较小、景观破碎。根据保护区各功能区内不同生物多样性价值斑块的景观指数(表2),各功能区内高价值斑块平均面积顺序依次为核心区>缓冲区>实验区,高价值大斑块均分布于核心区内、以东南部最为完整,保护区内高价值斑块最破碎的区域为长白山西坡。中价值斑块在核心区和缓冲区的平均面积和最大斑块面积均接近,破碎化水平没有显著差异。

表2 长白山自然保护区内生物多样性价值斑块的景观特征  
Table 2 The landscape characteristic of the patches of biodiversity value in Changbaishan reserve

| 分区及斑块类型<br>Area partition and patches type | 斑块数/个<br>Number of patches | 平均斑块面积/hm <sup>2</sup><br>Mean area of patches | 斑块总面积/hm <sup>2</sup><br>Total area of patches | 最大斑块面积/hm <sup>2</sup><br>Area of the largest patch |
|--------------------------------------------|----------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| 核心区 Kernel area                            | 4244                       | 30.8                                           | 130871.5                                       | 35596.6                                             |
| 一般价值区 Area of normal biodiversity value    | 1550                       | 24.7                                           | 38208.3                                        | 11121.1                                             |
| 中价值区 Area of medium biodiversity value     | 2298                       | 9.6                                            | 21949.3                                        | 1809.0                                              |
| 高价值区 Area of high, biodiversity value      | 396                        | 178.6                                          | 70713.8                                        | 35596.6                                             |
| 缓冲区 Buffer area                            | 1010                       | 16.9                                           | 17039.5                                        | 6796.5                                              |
| 一般价值区 Area of normal biodiversity value    | 309                        | 17.6                                           | 5449.7                                         | 1073.6                                              |
| 中价值区 Area of medium biodiversity value     | 636                        | 3.8                                            | 2397.0                                         | 197.0                                               |
| 高价值区 Area of high, biodiversity value      | 65                         | 141.4                                          | 9192.9                                         | 6796.5                                              |
| 实验区 Experimental area                      | 1455                       | 33.4                                           | 48554.0                                        | 10267.3                                             |
| 一般价值区 Area of normal biodiversity value    | 430                        | 55.1                                           | 23683.2                                        | 8713.0                                              |
| 中价值区 Area of medium biodiversity value     | 770                        | 10.3                                           | 7902.6                                         | 1462.2                                              |
| 高价值区 Area of high, biodiversity value      | 255                        | 66.5                                           | 16968.3                                        | 10267.3                                             |
| 总计                                         | 6709                       | 29.3                                           | 196465.0                                       |                                                     |

2.4 模型的有效性

本模型评价结果的 Training AUC=0.87、Test AUC=0.86,说明本研究所选择的评估参数和结果均具有较高的可信度。在所有环境因子中贡献值最大的是植被,其次是土层厚度和海拔对生物多样性价值的影响较大(表3)。

表3 生物多样性价值建模主要环境因子及其贡献值与重要性

| Table 3 Variables and their contribution and percent permutation importance in modeling of biodiversity assessment reported by Maxent |                       |                                 |                               |                       |                                 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|---------------------------------|-------------------------------|-----------------------|---------------------------------|
| 环境因子<br>Environmental factors                                                                                                         | 贡献值<br>Contribution/% | 重要值<br>Permutation importance/% | 环境因子<br>Environmental factors | 贡献值<br>Contribution/% | 重要值<br>Permutation importance/% |
| 坡向 Aspect                                                                                                                             | 0.1                   | 0.2                             | 土层厚度 Soil depth               | 7.2                   | 14.4                            |
| 海拔 Elevation                                                                                                                          | 2.5                   | 2.3                             | 土壤类型 Soil type                | 0.3                   | 0.7                             |
| 河流 River                                                                                                                              | 0.2                   | 0.9                             | 植被 Vegetation                 | 89.4                  | 80.0                            |
| 坡度 Slope contribution                                                                                                                 | 0.3                   | 1.6                             |                               |                       |                                 |

3 讨论与建议

本研究基于区域优势种来认识生物多样性的空间异质性。根据长白山地区生物多样性的长期研究,红松

阔叶林混交林一直是该区域地带性顶级森林生态系统<sup>[12, 17-18]</sup>, 理应被作为该区域的代表优势种。落叶松 (*Larix olgensis*) 在研究区域分布面积较大, 但多以纯林形式存在, 郁闭度高、林下物种种类较少; 根据长白山保护区 40 年的资源监测成果, 近年来受全球气候变化影响和人类干扰, 冷杉已超越落叶松成为研究区域的首要共建种, 并导致针阔混交林的多样性指数呈增高态势, 但针叶混交林的指数则呈下降趋势, 落叶松为优势种的群落其多样性水平处于相对较低水平<sup>[12]</sup>, 本研究基于现状和演替考虑未将落叶松作为优势种。值得注意的是决定区域生物多样性丰富程度除了生态系统多样性外, 还有物种多样性。本研究方法主要适用于类似长白山地区以乔木为主的生态系统和景观, 对以灌丛和草本为主的生态系统由于优势种难以确定, 沿用本方法就难以有效评估其生物多样性价值和格局。因此, 本研究方法具有较为特定的适用对象和区域, 在实际应用中应充分考虑研究区域景观和生态系统类型的适合性。

与已有生物多样性研究侧重定性结论不同, 本研究实现了从空间上对研究区域生物多样性价值的定量评估, 明确了不同区域的保护价值和重要性, 可直观认识其完整性和破碎化水平, 以上结果可直接指导保护管理工作。本方法中优势种的代表性、环境因子全面性和准确性对评价结果影响较大, 本研究中植被数据若能深入到群系水平将使结果更具说服力。研究区域内有三处生物多样性价值较低的区域, 其成因与其植被现状和立地条件关系密切: 长白山东坡核心区分布落叶松纯林、林班平均郁闭度 > 0.83, 生物多样性较低; 头西保护站周边主要为阔叶混交林, 物种种类简单; 长白山西坡维东保护站与峰岭保护站之间的区域水系密度高、立地条件受河流侵蚀较大<sup>[19]</sup>, 多样性水平也较低, 也可能与海拔对多样性的负影响相关<sup>[20]</sup>。

本研究拓展和丰富了生物多样性评估的研究方法和思路。物种多样性是生物多样性的主要特征及内容, 是生物多样性和生态系统的基本构建单元, 还是生态系统功能和服务得以表达的载体。在长期进化和演替过程中, 一定区域内的群落或生态系统自然形成了以某一种或几种优势种构建的生物多样性体系, 并成为所在区域的旗舰物种 (Flagship species)、关键物种 (Key species) 或保护伞物种 (Umbrella species) 等, 这些物种持续生存面临的问题成为制定和实施该区域生态保护与建设的主要决策依据。针对这些物种实施的保护项目成功地保护了所在区域的生物多样性, 如大熊猫 (*Ailuropoda melanoleuca*)、科莫多巨蜥 (*Varanus komodoensis*)<sup>[21-23]</sup>。我们希望本研究的方法可应用于其他区域生物多样性的研究与评价, 也可为生态红线划定、国家公园设计提供参考。

基于本研究结果, 长白山自然保护区外还有大面积的生物多样性保护高价值和中价值区域, 从生态系统完整性保护的需要, 这些区域也应纳入保护区进行保护。保护区南部缓冲区主要由高价值斑块组成, 与周边核心区的高价值斑块相连, 考虑到景观和生态过程的连续性, 可考虑将该区域调整为核心区。保护区头西保护站周边的区域可以考虑在未来保护管理中开展一些提升其物种多样性的科学实验, 以探索有效管理生态系统和生物多样性的技术途径; 西坡维东保护站与峰岭保护站之间的区域为破碎高价值斑块和一般价值斑块镶嵌分布的区域, 过多的边缘效应可能影响该区域生态系统的功能和稳定性。

#### 参考文献 (References):

- [1] 邹长新, 王丽霞, 刘军会. 论生态保护红线的类型划分与管控. 生物多样性, 2015, 23(6): 716-724.
- [2] 高吉喜. 探索我国生态保护红线划定与监管. 生物多样性, 2015, 23(6): 705-707.
- [3] 牟长城, 罗菊春, 王襄平, 韩景军. 长白山林区森林/沼泽交错群落的植物多样性. 生物多样性, 1998, 6(2): 132-137.
- [4] 郝占庆. 长白山北坡植物群落多样性及其梯度格局分析. 沈阳: 中国科学院沈阳应用生态研究所, 2000.
- [5] 靳芳, 鲁绍伟, 余新晓, 饶良懿, 牛建植, 谢媛媛, 张振明. 中国森林生态系统服务功能及其价值评价. 应用生态学报, 2005, 16(8): 1531-1536.
- [6] 钱迎倩, 马克平. 生物多样性研究的原理与方法. 北京: 中国科学技术出版社, 1994.
- [7] 欧阳志云, 王如松, 赵景柱. 生态系统服务功能及其生态经济价值评价. 应用生态学报, 1999, 10(5): 635-640.
- [8] 赵同谦, 欧阳志云, 郑华, 王效科, 苗鸿. 中国森林生态系统服务功能及其价值评价. 自然资源学报, 2004, 19(4): 480-491.
- [9] 江波, 欧阳志云, 苗鸿, 郑华, 白杨, 庄长伟, 方瑜. 海河流域湿地生态系统服务功能价值评价. 生态学报, 2011, 31(8): 2236-2244.
- [10] 王根绪, 程国栋, 钱鞠. 生态安全评价研究中的若干问题. 应用生态学报, 2003, 14(9): 1551-1556.

- [11] 欧阳志云. 全国生态功能区划. 中国科技教育, 2008, (5): 21-22.
- [12] 白帆, 桑卫国, 刘瑞刚, 陈灵芝, 王昆. 保护区对生物多样性的长期保护效果: 长白山自然保护区北坡森林植物多样性 43 年变化分析. 中国科学 C 辑: 生命科学, 2008, 38(6): 573-582.
- [13] 代力民, 王青春, 邓红兵, 陈高, 王庆礼. 二道白河河岸带植物群落最小面积与物种丰富度. 应用生态学报, 2002, 13(6): 641-645.
- [14] Rebelo H, Tarroso P, Jones G. Predicted impact of climate change on European bats in relation to their biogeographic patterns. *Global Change Biology*, 2010, 16(2): 561-576.
- [15] Store R, Kangas J. Integrating spatial multi-criteria evaluation and expert knowledge for GIS-based habitat suitability modelling. *Landscape and Urban Planning*, 2001, 55(2): 79-93.
- [16] Gong M H, Guan T P, Hou M, Liu G, Zhou T Y. Hopes and challenges for giant panda conservation under climate change in the Qinling Mountains of China. *Ecology and Evolution*, 2017, 7(2): 596-605.
- [17] 倪瑞强. 长白山典型针阔混交林群落结构与动态研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2014.
- [18] 吴刚, 梁秀英, 张旭东, 郝占庆, 周永斌, 尹若波. 长白山红松阔叶林主要树种高度生态位的研究. 应用生态学报, 1999, 10(3): 262-264.
- [19] 张丽红, 刘永顺, 彭年, 聂保锋. 长白山火山区放射状水系分形特征研究. 首都师范大学学报: 自然科学版, 2011, 32(3): 83-88.
- [20] 王琪, 朱卫红, 付婧, 王有文. 长白山不同海拔湿地植物群落结构及其物种多样性研究. 延边大学学报: 自然科学版, 2010, 36(1): 78-83.
- [21] Xu W H, Viña A, Qi Z X, Ouyang Z Y, Liu J G, Liu W, Wan H. Evaluating conservation effectiveness of nature reserves established for surrogate species: case of a giant panda nature reserve in Qinling Mountains, China. *Chinese Geographical Science*, 2014, 24(1): 60-70.
- [22] Ariefiandy A, Purwandana D, Seno A, Chrismiawati M, Ciofi C, Jessop T S. Evaluation of three field monitoring-density estimation protocols and their relevance to Komodo dragon conservation. *Biodiversity and Conservation*, 2014, 23(10): 2473-2490.
- [23] 国家林业局. 全国第三次大熊猫调查报告. 北京: 科学出版社, 2006.