

DOI: 10.5846/stxb201504040677

陶国庆, 欧晓昆, 郭银明, 徐倩, 遇翘楚, 张志明, 王崇云. 基于保护价值与保护成本分析的滇西北植被优先保护区识别研究. 生态学报, 2016, 36(18): - .

Tao G Q, Ou X K, Guo Y M, Xu Q, Yu Q C, Zhang Z M, Wang C Y. Priority area identification for vegetation in northwest Yunnan, based on protection value and protection cost. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(18): - .

基于保护价值与保护成本分析的滇西北植被优先保护区识别研究

陶国庆, 欧晓昆, 郭银明, 徐倩, 遇翘楚, 张志明^{1,*}, 王崇云

云南大学生态学与地植物学研究所, 昆明 650091

摘要:生物多样性丧失和保护资源不足是当前人类面临的严峻问题, 确定保护等级和优先保护区是当前一项重要工作。本研究以滇西北三江并流区为例, 基于多准则决策分析方法(MCDA), 以物种丰富度、植被稀有性、国家级濒危植物种数、省级濒危植物种数、濒危等级和生境特殊性 6 个因子为指标, 对滇西北 24 种植被亚型进行保护价值评分。并融合海拔、距居民点距离、距道路距离、距河流距离 4 个人为干扰因子分析了保护成本。对保护价值和保护成本进行叠加分析确定研究区植被的保护等级以及优先保护区。结果表明: 滇西北植被可分为 4 个保护等级, 其中等级 1 作为优先保护区面积 16983km², 占滇西北总面积 25.58%, 其主要保护的为季风常绿阔叶林, 寒温性针叶林, 高山、亚高山草甸, 寒温性灌丛, 积雪, 水体这 6 类植被亚型; 优先保护区作为综合的保护区能够对重要的森林、草地和湿地植被做到保护, 等级 2 是作为森林保护主体区。等级 3 可作为保护缓冲区, 等级 4 则作为传统的土地利用区。

关键词:优先保护区; 保护价值; 功能区划; 多准则决策; 人为干扰

Priority area identification for vegetation in northwest Yunnan, based on protection value and protection cost

TAO Guoqing, OU Xiaokun, GUO Yinming, XU Qian, YU Qiaochu, ZHANG Zhiming^{1,*}, WANG Chongyun

Institute of Ecology and Geobotany, Yunnan University, Kunming 650091, China

Abstract: Biodiversity losing and unreasonable use of nature resources are two important environmental issues. In order to protect biodiversity resources, many countries have established numerous nature reserves and other types of protected areas. However, degradation of natural resources is a big challenge in conservation projects, and we cannot prohibit all the activities associated with economic development in the conserved areas, particularly in southwest China. There is a serious conflict between two aspects. One aspect is the rich biodiversity, increasing its importance for conservation. The other is the backward economy that requires more resources for local development. Therefore, land zoning is an important approach that can reduce conflict by partitioning the landscape into various land use units that are managed according to different levels of human activity. Our research focuses on the Three Parallel Rivers of the Yunnan Protected Area. We present a systematic methodology that integrates vegetation plot data with Geographic Information Systems (GIS) using a multi-criteria decision analysis (MCDA) technique to guide a zoning scheme. The vegetation plot data include species richness, rarity of vegetation, number of endangered plant species, ranking of endangered species, and quality of habitat. Based on these data, the protection value scores for the sub-vegetation in northwest Yunnan were obtained. Then altitude, distance to

基金项目:国家自然科学基金项目(41361046); 科技部国家科技支撑计划项目(2011BAC09B07); 西部之光计划

收稿日期: 2015-04-04; 修订日期: 2016-03-21

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhiming_zhang76@hotmail.com

villages, distance to roads and distance to rivers were used as the impact factors to simulate the pattern of protection cost. The protection value and protection cost were integrated to generate a final combined suitability map. A K-means cluster analysis was performed to classify the suitability map into four priority levels. In this study, the area considered under level 1 was 16983 km², accounting for 25.58% of the total research area. The targeted areas for protection in level 1 included sub-vegetation of monsoon evergreen broad-leaved forest, cold-temperate coniferous forest, alpine and sub-alpine meadow, cold-temperate shrub, and areas covered by snow and water; level 1 accounts for the most important protection areas where important forest ecosystems, grassland ecosystems, and wetland ecosystems can be found. The areas under level 1 can be further divided into six parts. Part 1 is located northeast of Zhongdian; the average altitude is above 3000 m, and it is covered by cold-temperate coniferous forest. Part 2 comprises most areas of Denqing and northern Weixi, which include the Meili and Baima snowmountains. Part 3 forms the main part of the Nu mountains in Yunnan, and it appears as a line. Part 4 is located in Gongshan and Fugong, including the main part of Gaoligong National Nature Reserve. Part 5 comprises regions of southeast Zhongdian, northwest Ninglang, and northeast Lijiang. Although this part has a large area, its distribution is scattered. Part 6 comprises the Erhai Lake in Dali, which has a small area, and it is the only critical conservation region southeast of our research area. Level 2 accounts for the main areas for the conservation of forest ecosystems. Therefore, we suggested that an equal protection effort as level 1 should be made. Level 3 had a low protection value and we could use it as a buffer zone. Level 4 had no protection value and was considered the traditional land use area. According to the priority levels, we determined the area under level 1 as the priority area. We believe that our results will be useful as a reference for extension of reserves in northwest Yunnan in the future.

Key Words: priority area; protection value; zone division; MCDA; human disturbance

随着近年来人类对自然资源不合理开发利用的不断加剧,全球生物多样性资源正以前所未有的速度丧失^[1-3]。自上世纪 90 年代以来,全球平均每年约有 1000 个野生物种灭绝^[4],而近几年灭绝的速度仍在加剧。同时,生物多样性资源有着不可替代的价值,它不仅可以被直接用作食物、药物、能源、工业原料,更可以间接的调节地区气候、改善环境质量等,对人类自身的发展有着至关重要的作用^[5]。

由于全球生物多样性所面临丧失的严峻现状,很多国家对此越来越加以重视,并将其上升为影响全人类的全球问题之一^[6]。针对生物多样性保护的措施主要分为就地保护和迁地保护,其中以就地保护为主要保护手段^[7]。目前,全球陆地表面的 10%—11%已经建立为自然保护地^[5]。但是,由于缺乏系统的保护分区规划工作,很多自然保护地的保护效率较为低下^[8-9],特别是在发展中国家。主要原因一方面保护规划主观性强,很多规划仅依靠经验,没有系统的保护价值评价体系做支撑。另一方面由于生物多样性本身分布具有的不均匀性,而用于投入保护的资源有限,使得保护规划工作的难度加大,尤其是在考虑到对生态系统完整性的保护和涉及经济成本时,大多数自然保护地的规划方案都过于简单粗放^[10-12],保护地规划亟待寻找新的途径。

为了弥补以往保护地规划不合理的缺陷,对生物多样性保护的关键地区做到全面有效的保护,各国学者都在尝试寻找一种客观的,定量的,并能综合考虑生态保护与人类活动之间关系的保护规划方法,为决策提供保护优先区域序列作为参考。其中以 Myers 提出生物多样性热点地区为较早期的代表性研究^[10,13-14],生物多样性热点地区理论强调对地区特有物种和受威胁严重的物种加以优先保护。热点地区以占全球陆地 3.4%的面积涵盖了超过 60%的陆生物种^[15],其划分能够有效帮助人们确定保护行动的优先序列,对于有效使用和节省人力、物力和时间具有重要的意义^[16-17]。但是由于热点地区是基于全球尺度上的研究,并且其主要是基于物种层面上的保护价值判断,不能适应区域尺度上复杂保护地规划问题^[16]。因此在热点地区理论框架之上,逐渐发展了其他的一些定量研究方法。其中应用较广的有系统保护规划方法 (Systematic Conservation Planning, SCP)^[18-21],保护空缺分析方法 (Geographic approach to protect biological diversity, GAP)^[12,22-23]以及

多准则决策分析方法(Multi-criteria decision analysis, MCDA)等^[24-27]。

SCP 引用选址优化算法从保护成本与保护目标两方面出发,研究目标区域内有限的保护资源应当如何配置^[18],是目前应用较为广泛的一种保护地规划方法。其充分考虑从基因、物种和景观尺度上选择保护目标;同时量化保护规划实施的成本,并对规划结果进行可靠性评估,能够有效对保护地进行规划^[5]。GAP 主要是利用物种分部信息模拟物种的最适宜生境,并与已建立保护地进行对比寻找保护空缺的区域^[9,28-29]。很多国家都较早的使用了这一类规划方法,并取得一定成果。MCDA 是决策学领域一套较为成熟的研究方法,能够有效对于总体受多个因子之间权衡问题进行复杂决策制定^[24],它将保护目标和经济成本都试做决策因子,通过对决策因子赋予不同的权重形成多套决策方案,再进行多方案评价选择最佳方案。最近十年来它被广泛应用于森林资源管理^[30-31]和保护地规划^[32-33]的应用当中。目前 SCP 和 GAP 应用较为广泛,但也存在一定的缺陷,尤其是 GAP。它基于的是传统的图层叠加,对生态系统完整性、社会、经济因素考虑不全面,并且忽视了保护成本的分析^[16,29]。而 SCP 方法中对于保护目标的确定一直以来都是一个难点,缺少实地数据的积累,使得其还存在很多的不确定性^[5]。MCDA 通过选择多尺度多属性的生物多样性评价指标筛选替代了 SCP 中直接确定保护目标的程序,使得确定需要保护的目标更加客观;同时通过量化环境地理条件模拟出保护的经济成本,避免了 GAP 研究方法的不足。就近年来 MCDA 应用来看,Valente 等人选取森林邻近度、大斑块覆盖度,地表水临近度、距道路距离、距城市距离和土壤侵蚀性 6 个方面数据作为影响因子,确定了巴西圣保罗东部地区进行生物多样性关键保护区域^[34]。Poti 等人选用空间环境状况、生物多样性和生境质量 3 个方面的 15 个因子,基于 GIS 的多准则决策分析,对美国南加利福尼亚州的乔治城日趋城市化现状进行了生物多样性敏感区划分,并确定需优先保护的区域^[35]。

滇西北处在全球 34 个生物多样性热点地区^[14]和 233 个优先保护生态区之上^[11],是中国生物多样性资源最为丰富的地区之一。根据中华人民共和国环境保护部颁布的《全国自然保护区名录》记载,截止到 2012 年底,滇西北共建有自然保护区 22 个,总面积 7100 km²,占总面积的 10.69%^[36]。但是由于滇西北处在中国西南山区,当地 15 个县市中有 12 个是贫困县,居民的生产方式较为粗犷,而政府的发展战略也比较落后,导致的生物多样性遭受破坏的现状特别严峻^[37],现有保护体系不足以应对生物多样性保护面临的各种挑战^[38]。此前针对滇西北地区已有相关方面研究,张燕妮等基于层次分析法选择了物种和群落层次上 6 个指标评价了滇西北优先保护的植物群落类型及其分布^[39]。Zhang 等基于 MCDA 方法对梅里雪山植被保护、旅游开发以及社区发展三个决策目标进行了功能区划^[40]。但是就整个滇西北而言还没有明确的保护地规划方面的研究,Zhang 等基于物种分布模型的云南省优先保护地研究^[41]和杨飞龄等基于国家重点保护植物种为指示种的保护优先区分析均表明目前滇西北自然保护区仅能够代表当地少部分生物多样性^[42],因此急需构建滇西北自然保护区规划方案。而制定保护规划方案的前提基础是确定保护地的保护等级,在识别优先保护区的基础上才能进行有效的保护规划。

本研究以滇西北 15 个县市为研究区,结合张燕妮等^[39]开展的滇西北优先保护的植物群落类型及其分布的基础上,进行植被保护价值和保护成本分析,以确定优先保护区,为将来进行保护规划提供基础工作,为此需要达到以下 3 个具体研究目标:1)从物种、植被和生境方面搜集数据并确定了 6 个指标,确定滇西北 24 种植物亚型的保护价值;2)以海拔、距居民点距离、距道路距离和距河流距离为因子分析研究区的保护成本格局;3)根据保护价值和保护成本利用 MCDA 理论方法分析确定保护等级和优先保护区。利用本文取得的研究结果,期望对当前滇西北的保护方案提出改进意见,并对今后国内其他地方类似研究提供一定的借鉴价值。

1 研究区概况

本研究区位于云南省西北部(图 1)。其地理位置是 25°33'—29°16'N 和 98°7'—100°19'E 之间。研究区内包括迪庆藏族自治州的中甸、德钦和维西;怒江傈僳族自治州贡山、福贡、兰坪和泸水;大理白族自治州的大理、宾川、剑川、洱源和鹤庆和云龙;丽江地区的丽江和宁蒍共 15 个县市。海拔从 700 m 左右的怒江河谷到

6,742 m 的梅里雪山最高峰,高差达 6000 多米,地形起伏巨大,生境变化极为复杂,有近 7000 种高等植物,占云南省高等植物的 31.25%,特有种有 910 多种,国家级和省级濒危植物 70 种、动物 130 余种^[43]。根据滇西北植被图计算得知研究区总面积 66383 km²。

2 研究方法

多准则决策分析方法(MCDA)包含两大主要部分,多目标决策和多属性决策^[44]。本研究利用多属性分析中的层次分析法(Analytic Hierarchy Process, AHP)构建评价指标体系来评价滇西北 24 种植被亚型的保护价值。同时融合 ArcGIS 10.0 软件将保护价值与保护成本视作两个对立的决策目标进行叠加分析,并对叠加结果进行 K-means 聚类分析,根据聚类结果进行分区规划并确定优先保护区。

2.1 数据来源及处理

本研究的样方数据主要根据《云南植被》^[45]中的分类情况,结合《高黎贡山植物》^[46]、《干热河谷植被》^[47]、《梅里雪山植被研究》^[48]等研究资料,选出其中共有样方数据的群落 71 个,归入 16 种植被亚型。濒危物种数据来源于中国稀有濒危保护植物名录(I)^[49]、中国植物红皮书——稀有濒危植物(1-册)^[50]、《云南省第一批省级重点保护野生植物名录修订》^[51]、《滇西北生物、文化多样性保护与经济社会可持续发展研究》^[43]、中国植物物种信息数据库^[52]等,统计了滇西北珍稀濒危植物种分为国家级和省级,分别为 33 种和 37 种,濒危等级分为濒危、渐危和稀有三个级别。

空间数据主要包括本单位根据分辨率为 30m 的 TM 影像解译制成的 1:10 万的 Shape file 格式的滇西北植被图^[53]。此外还有滇西北的数字高程数据(DEM, 30m)^[54]。

2.2 AHP 方法构建保护价值评价体系

美国运筹学家 Saaty 于 20 世纪 70 年代初提出层次分析法(AHP),它的主要步骤是先把系统各因素之间的隶属关系由高到低排成若干层次,建立不同层次因素之间的相互关系,然后对每一层次因素的权重给予定量表示,最后根据因素排序对问题进行分析和决策^[55]。

以往不同研究中所使用的评价单元不一致,主要是基于物种^[56-57]、群落^[39]、群系^[20]、生态系统^[57]及生态区^[58]等几个层面。本研究以植被亚型作为评价单元,共 24 种。如表(1)所示是保护价值评价体系,该体系由“目标层”,“准则层”和“指标层”3 个层次构成^[59]。

参考前人相关研究方法,不同指标的权重设置采用判断矩阵方法计算^[39-40],如表(2)所示,是本研究构建的判断矩阵以及根据矩阵计算所得各指标的权重。判断矩阵中各指标的相对重要性度量规则选用“1-9”标度法^[39](表 3)。最后对指标权重进行一致性检验,一致性值(CR) < 0.1 表示构建矩阵合理。

各指标内涵及度量方法:

(1)物种丰富度:反映了各植被亚型中物种的丰富程度。物种丰富度高是植物群落、生态系统健康的重要表现,也是保护价值高的体现^[3,57]。本研究选用物种丰富度 $R = \text{物种数} / \text{面积} S$ 来统计。

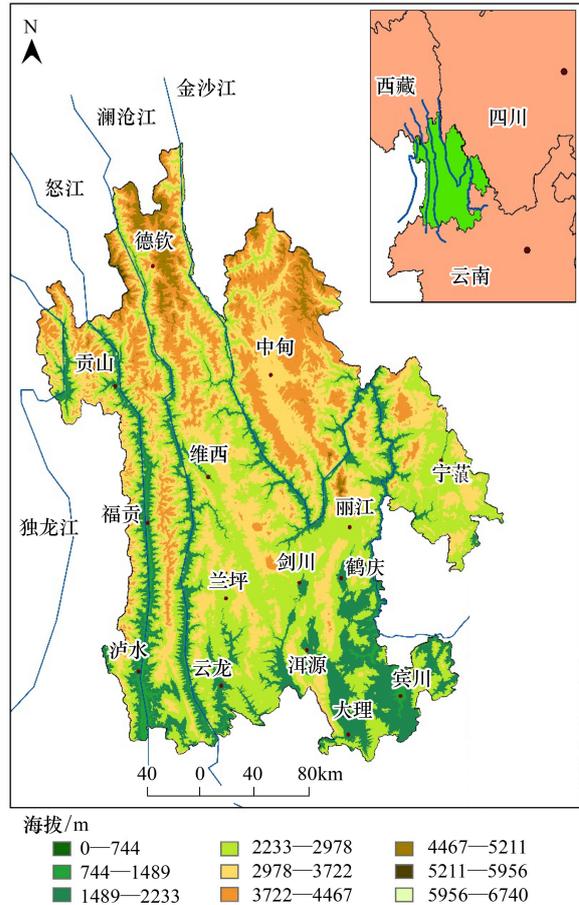


图 1 研究区位置图

Fig.1 The location of the research area

表 1 不同植被亚型保护价值评价指标体系

Table 1 The evaluation indicator system of protection score of different subvegetation types

| 目标层 Target (A) | 准则层 Criterion (B) | 指标层 Indicators (C) |
|---|-------------------|--------------------|
| 保护生物多样性资源 Protect biodiversity resources (A) | 植被资源 (B1) | 物种丰富度 (C1) |
| | 濒危物种资源 (B2) | 植被稀有性 (C2) |
| | | 国家级濒危植物种数 (C3) |
| | | 省级濒危植物种数 (C4) |
| 特殊生境资源 (B3) | 濒危等级 (C5) | |
| | | 生境特殊性 (C6) |

(2) 植被稀有性:是指某种植被亚型在该地区的分布面积比,比例越小稀有性越高,潜在的保护价值就较高^[39]。本研究采用某种植被亚型分布面积占滇西北总的面积比来衡量该植被亚型稀有性。

(3) 国家级濒危植物种数:珍稀濒危物种是保护工作的重点,植被中珍稀濒危植物物种数是衡量植被保护价值的一个重要依据^[60],以各植被亚型中所含国家级濒危植物的种类数来度量。

(4) 省级濒危植物种数:以各植被亚型所含省级濒危植物种数来度量。

(5) 濒危等级:不同等级濒危物种的保护紧迫程度不同^[39],根据所统计的濒危植物物种数据,参考中国植物红皮书将国家级濒危植物分为濒危 (Endangered)、渐危 (Vulnerable)、和稀有 (Rare) 三个级别^[50],同时根据《云南省第一批省级重点保护野生植物名录修订》将省级濒危植物也分为 1、2、3 三个级别^[51]。

(6) 生境特殊性:特殊生境为特殊物种,尤其是为珍稀濒危物种提供栖息环境,特别是高山生态系统和高原湖泊生态系统包含了大量的濒危物种^[43]和维持了滇西北特有的景观异质性以及文化价值,这些特殊生境的保护价值巨大^[40]。具体评分征求相关专家意见,无确定的分值度量方法。

表 2 判断矩阵法计算指标权重

Table 2 Pairwise comparison matrix among impact factors and calculated importance weights

| 代码 Code | 物种 丰富度 C1 | 植被 稀有性 C2 | 国家级濒危 植物种数 C3 | 省级濒危 植物种数 C4 | 濒危 等级 C5 | 生境 特殊性 C6 | 权重 Weights |
|----------------|--------------|--------------|------------------|-----------------|-------------|--------------|---------------|
| 物种丰富度 (C1) | 1 | | | | | | 0.3261 |
| 植被稀有性 (C2) | 1/5 | 1 | | | | | 0.0798 |
| 国家级濒危植物种数 (C3) | 1 | 2 | 1 | | | | 0.2141 |
| 省级濒危植物种数 (C4) | 1/3 | 1 | 1/2 | 1 | | | 0.0976 |
| 濒危等级 (C5) | 1/5 | 1 | 1/3 | 1/2 | 1 | | 0.0659 |
| 生境特殊性 (C6) | 1/2 | 3 | 1 | 3 | 3 | 1 | 0.2164 |

CR = 0.02 < 0.1; C1: 物种丰富度 Species diversity; C2: 植被稀有性 Rarity of the vegetation; C3: 国家级濒危植物种数 Number of national endangered plants; C4: 省级濒危植物种数 Number of provincial endangered plants; C5: 濒危等级 Endangered category; C6: 生境特殊性 Habitat specificity

表 3 “1-9 标度法”的评价标尺

Table 3 The 1-9 rating scale used to prepare the pairwise comparison matrix

| | | | | | | | | |
|----------|-----|-----|-----|----|----|---|----|---------|
| 1/9 | 1/7 | 1/5 | 1/3 | 1 | 3 | 5 | 7 | 9 |
| 极 不重要 | 非常 | 很 | 一般 | 相等 | 一般 | 很 | 非常 | 极 重要 |

2.3 确定 24 植被亚型的保护价值

本研究采用 Corel Draw X7 画图软件制作阿米巴平面图 (Amoeba-polts) 来计算不同植被亚型的保护价值分值。图 (2) 是阿米巴平面图,其构建于一个极坐标系内,有一个圆心和多个不同方向坐标轴,一般用在环境质量评价和气象服务信息系统等多指标影响下的最终决策方向问题研究当中^[61-63]。传统的对于多指标下的总得分计算问题通常采取加权求和的方式^[3,23,61],阿米巴平面图和传统的加权求和方法无本质区别;但是较

加权求和方法而言,其更能够直观反映全指标下得分受何指标所影响^[62-63],并且在一定程度上可以突出重要目标的分值和削弱非重要目标分值。

根据所收集数据的特征,同时参考 Zhang^[40]等对于梅里雪山国家公园功能区规划评分方法,拟采用 100 分制对各个指标进行赋值。即在指标数据统计后按照 100 进行标准化处理,即可得 100 分值下得分。图(3)是本研究构建的阿米巴平面图,其中 C_1 至 C_6 是各指标乘以相应权重所得的数值大小;即 $C_i = S_i * W_i$, S_i 为各指标在 100 分制下的度量值, W_i 为各指标权重值。连接 C_1 至 C_6 构成封闭六边形,计算此六边形面积来表示不同植被亚型在全指标下的保护价值分值。

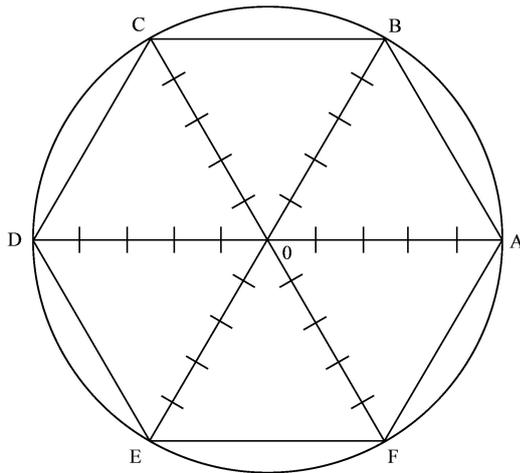


图 2 阿米巴平面图原型

Fig.2 Prototype of Amoeba-polts

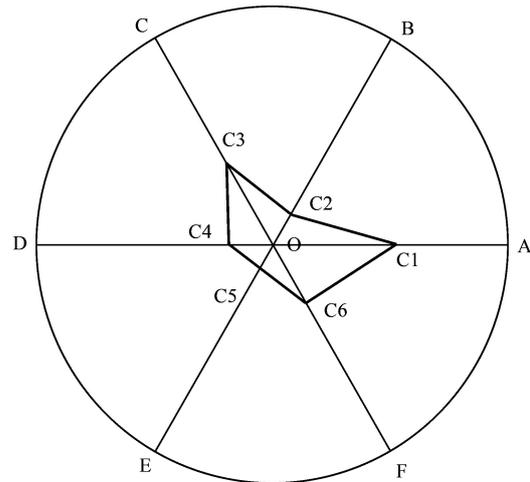


图 3 利用六边形面积计算保护价值

Fig.3 Use hexagon area to calculate the scores of protection value

2.4 保护成本格局分析

保护生物多样性要求购置土地,投入人员管理和建立保护设施等^[5]。而其中最为主要的就是被保护的不能再直接用以其他经济目的,只有少部分的生态服务功能可利用。保护成本较大的地方通常被认为是人为干扰强度较大的地区,迁走当地居民或者禁止和限制居民利用自然资源都会加大保护工作的难度^[23,40]。本研究根据所掌握资料,同时结合专家意见,以海拔、距居民点距离、距道路距离、距河流距离来模拟人为干扰强度^[34,40,64],干扰强度越大则保护成本越高。

人为干扰因子内涵:

(1) 海拔 (Altitude, ALT): 滇西北处在三江并流和横断山脉并行的复杂地形之上,从河谷至高山草甸之间人为活动的可达性递减^[40],以海拔高度可以有效反映人为干扰强度的分布规律。

(2) 距居民点距离 (Distance to villages, DVI): 居民点是人类生产生活的聚集区,人为活动干扰的强弱以居民点为中心而递减^[64],随着人口增长,人们对建筑用材、薪材、耕地等的需求增加,而距离居民点越近,受到的潜在威胁也就越大^[65]。保护成本也就越高。

(3) 距道路距离 (Distance to roads, DRO): 道路会对生态系统产生直接和间接的影响。直接的影响包括动植物生境的丧失和生境破碎化;间接的影响可能会致使生态系统退化^[66]。道路附近人为活动强度明显增大,保护成本越大。

(4) 距河流距离 (Distance to rivers, DRI): 河流具有涵养水源和改善地区小气候的作用^[3];但同时也是居民活动的聚集区;针对滇西北地区而言,其居民点主要是围绕着河流分布^[43],所以距河流越近,人为干扰强度越大。

本研究采用 IDRISI 制图软件中的 Distance 模块和 Fuzzy 模块实现人为干扰因子标准化^[40](图 4)。干扰因子权重设置采取判断矩阵法来确定,如表(4)所示。

表 4 干扰因子权重

Table 4 The weight of impact factors

| 干扰因子 Disturbance factors | 海拔 ALT | 距居民点距离 DSE | 距道路距离 DRO | 距河流距离 DRI | Weights |
|-----------------------------|-----------|---------------|--------------|--------------|---------|
| 海拔 (ALT) | 1 | | | | 0.3564 |
| 距居民点距离 (DVI) | 1 | 1 | | | 0.3257 |
| 距道路距离 (DRO) | 1/2 | 1/2 | 1 | | 0.1986 |
| 距河流距离 (DRI) | 1/3 | 1/2 | 1/2 | 1 | 0.1243 |

CR=0.02<0.1, ALT:海拔 Altitude; DSE:距居民点距离 Distance to villages; DRO:距居民点距离 Distance to roads; DRI:距河流距离 Distance to rivers

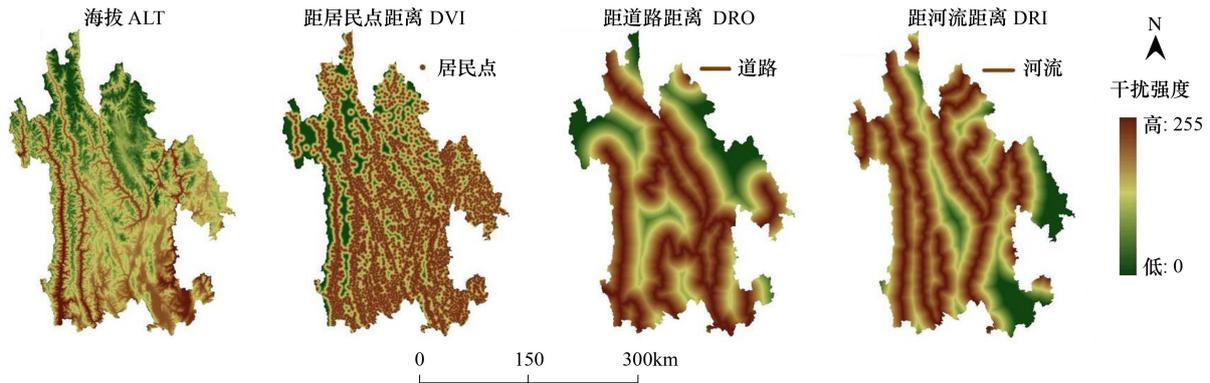


图 4 干扰因子标准化 Fig.4 Standardization of impact factors

2.5 保护分区规划及优先保护区确定

将保护价值与保护成本进行叠加分析,然后再进行 K-means 聚类分析。本研究将保护价值高同时保护成本低的地区作为最终保护优先地区。

K-means 聚类是利用欧式距离原理将 n 个数据对象通过迭代运算聚成设定的 k 个类别。相同类别之内的数据差异性小而不同类别之间的差异性大,以达到对数据对象进行归类的目的^[40,67]。本研究拟将研究区土地分成 4 个等级,不同等级保护优先性不同,称为保护优先序列,优先级别最高的则为最终的优先保护区。

3 研究结果

3.1 植被亚型的保护价值

根据所统计数据对有样方数据的 16 个植被亚型进行指标得分计算(表 5)。

表 5 各植被亚型权重前(后)的指标得分

Table 5 The score of different subvegetations before (after) weighting

| 植被亚型 Sub-vegetation types | 物种丰富度 C1 | 植被稀有性 C2 | 国家级濒危植物 物种数 C3 | 省级濒危植物 物种数 C4 | 濒危等级 C5 | 生境特殊性 C6 |
|--|-------------|-------------|-------------------|------------------|------------|-------------|
| 季风常绿阔叶林 Monsoon evergreen broad-leaved forest | 90(29.35) | 95(7.58) | 95(20.34) | 95(9.27) | 90(5.93) | 65(14.07) |
| 落叶阔叶林 Deciduous broad-leaved forest | 28(9.13) | 90(7.18) | 85(18.20) | 70(6.83) | 80(5.27) | 40(8.66) |
| 寒温性山地硬叶常绿阔叶林 Cold-temperate sclerophyllous evergreen broad-leaved forest | 52(16.96) | 60(4.79) | 30(6.42) | 20(1.95) | 30(1.98) | 35(7.57) |
| 山地湿性常绿阔叶林 Montane moist evergreen broad-leaved forest | 58(18.91) | 57(4.55) | 90(19.27) | 80(7.81) | 77(5.07) | 55(11.90) |

续表

| 植被亚型 Sub-vegetation types | 物种丰富度 C1 | 植被稀有性 C2 | 国家级濒危植物 物种数 C3 | 省级濒危植物 物种数 C4 | 濒危等级 C5 | 生境特殊性 C6 |
|---|-------------|-------------|-------------------|------------------|------------|-------------|
| 半湿润常绿阔叶林 Semi-humid evergreen broad-leaved forest | 15(4.89) | 85(6.78) | 75(16.06) | 65(6.34) | 75(4.94) | 45(9.74) |
| 温凉性针叶林 Cool-temperate coniferous forest | 33(10.76) | 38(3.03) | 70(14.99) | 60(5.86) | 70(4.61) | 60(12.98) |
| 寒温性针叶林 Cold-temperate coniferous forest | 50(16.31) | 20(1.60) | 80(17.13) | 70(6.83) | 80(5.27) | 80(17.31) |
| 暖温性针叶林 Worm-temperate coniferous forest | 30(9.78) | 18(1.44) | 55(11.78) | 40(3.90) | 55(3.62) | 20(4.33) |
| 寒温性灌丛 Cold-temperate shrub | 70(22.83) | 45(3.59) | 60(12.85) | 70(6.83) | 68(4.48) | 75(16.23) |
| 高山、亚高山草甸 Alpine and sub-alpine meadow | 90(29.35) | 82(6.54) | 55(11.78) | 75(7.32) | 30(1.98) | 80(17.31) |
| 亚高山沼泽草甸 Sub-alpine marsh meadow | 60(19.57) | 70(5.59) | 40(8.56) | 55(5.37) | 25(1.65) | 80(17.31) |
| 干热河谷硬叶常绿阔叶林 Dry-hot valley sclerophyllous evergreen broad-leaved forest | 15(4.89) | 90(7.18) | 20(4.28) | 20(1.95) | 10(0.66) | 15(3.25) |
| 干热河谷灌丛及灌丛 Dry-hot valley shrub | 20(6.52) | 75(5.99) | 20(4.28) | 25(2.44) | 15(0.99) | 15(3.25) |
| 暖热性灌丛 Worm-hot shrub | 20(6.52) | 90(7.18) | 30(6.42) | 25(2.44) | 20(1.32) | 15(3.25) |
| 暖温性灌丛 Worm-temperate shrub | 23(7.50) | 25(2.00) | 30(6.42) | 25(2.44) | 20(1.32) | 15(3.25) |
| 干热性灌丛 Dry-hot shrub | 35(11.41) | 75(5.99) | 30(6.42) | 25(2.44) | 20(1.32) | 15(3.25) |

通过 Amoeba-plots 构建的六边形得到各植被亚型的保护价值分值(图 5)。16 种植被亚型有样方数据可采用此方法计算, 剩余 8 种植被亚型以专家经验进行赋值, 本研究制作 28 份专家调查表, 取专家赋分的平均值。其中多数专家认为积雪和高原湖泊具有较高的保护价值。因为积雪是滇西北较为独特的自然景观和地质遗产; 而高原湖泊为很多高原动物提供栖息地, 特别是珍稀濒危禽类, 因此这两类的植被亚型保护价值很高。竹林由于其海拔较高, 保存度较好, 因此也具有一定保护价值。剩余 5 种植被亚型都是人为活动较大或是植被覆盖度较低地区, 保护价值低。

滇西北保护价值得分较高的植被亚型主要为季风常绿阔叶林、高山亚高山草甸、寒温性灌丛、寒温性针叶林、山地湿性常绿阔叶林以及亚高山沼泽草甸等。

利用滇西北植被图将不同植被亚型的保护价值得分进行数字化处理(图 6)。保护价值较高的为西北部高海拔地区, 这些地区通常植被完整度较高, 有着大面积的寒温性针叶林和高山生态系统。得分较低的地区位于滇西北南部和东南部的低海拔地区。

3.2 保护成本格局

将经过标准化后人为活动因子进行加权叠加得到保护成本格局图(图 7)。保护成本较大的地区位于研究区南部的低海拔地区以及西北部高海拔地区的河谷地带, 并有着河谷向高山递减的趋势; 在研究区南部的低海拔地区, 大部分地区的保护成本都较大。

3.3 滇西北保护分区规划

通过对保护价值和保护成本进行叠加分析, 确定滇西北植被保护优先值(图 8)。将保护优先值进行聚类分析得到保护优先等级(图 9)。

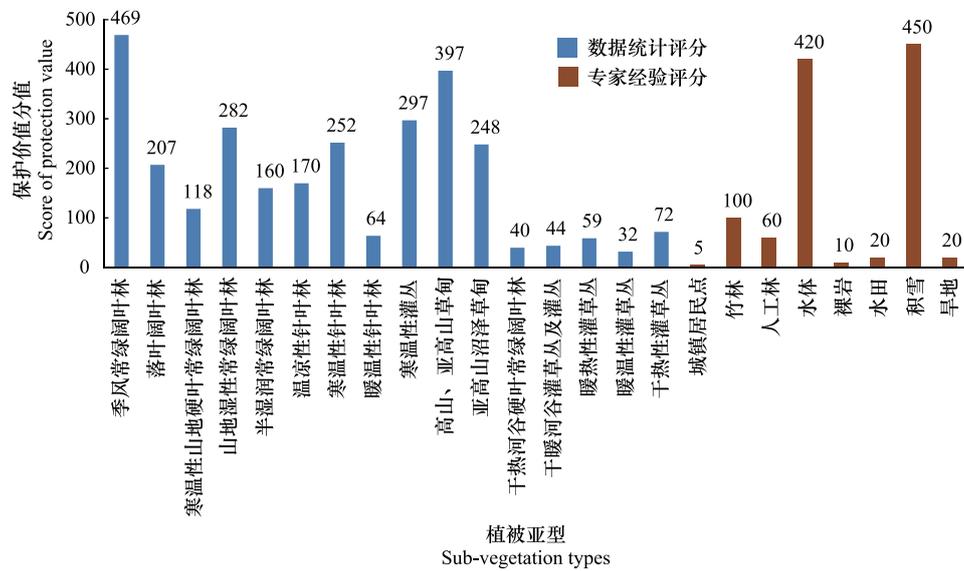


图5 不同植被亚型保护价值得分

Fig.5 The protection score of different subvegetation types

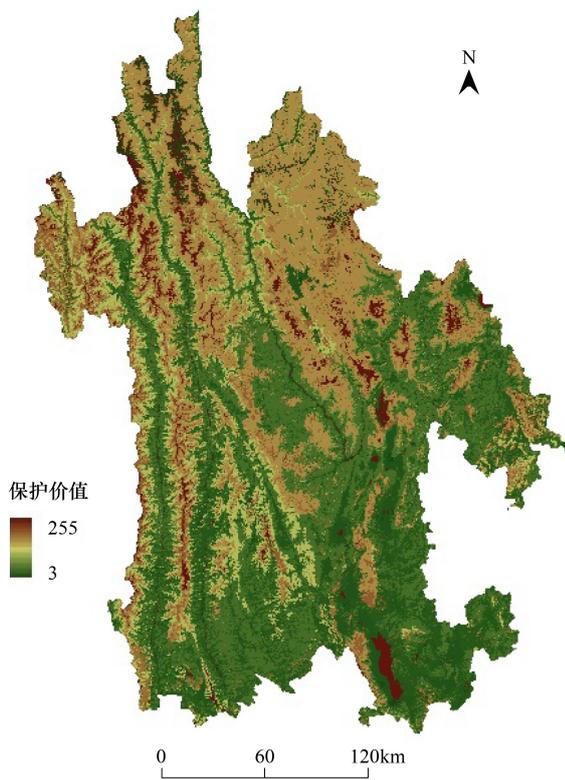


图6 保护价值得分适应性图

Fig.6 The suitability map of protection score

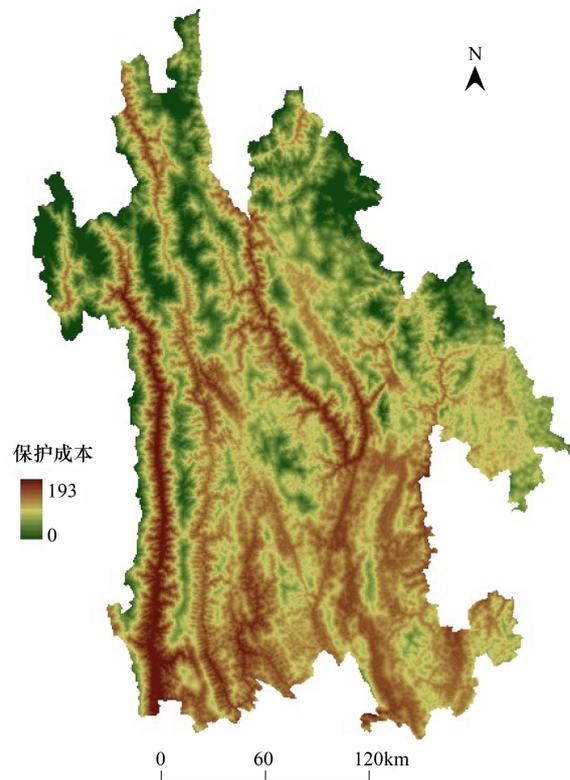


图7 保护成本格局图

Fig.7 The map of protection cost pattern

等级1是保护优先性最高的一个区,面积16983km²,占滇西北总面积的25.58%。基本上可分为六个片区,第一片区位于中甸县的东北部,该区域整体海拔较高,主要为中甸大雪山和小雪山。第二片区是以德钦县澜沧江两边的高山为主,主要是白马雪山和梅里雪山。第三片区为贡山县和福贡县的高黎贡山。第四片区为怒江与澜沧江之间的怒山和碧罗雪山。第五片区落在中甸县的南部、丽江的东北部和宁蒗西北部的部分区

域,但是分布较为零散,其中以中甸哈巴雪山、丽江玉龙雪山以及宁蒗绵绵山为代表。第六片区为大理洱海。等级 1 的分布区域是滇西北植被保护的核心区域,这一地区包含了滇西北主要的高山生态系统、湿地生态系统和部分森林生态系统。

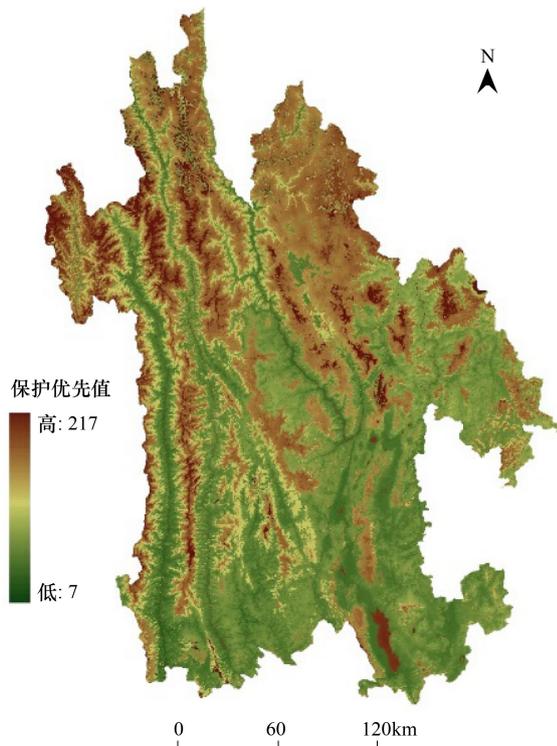


图 8 优先保护值图

Fig.8 The map of priority protection score

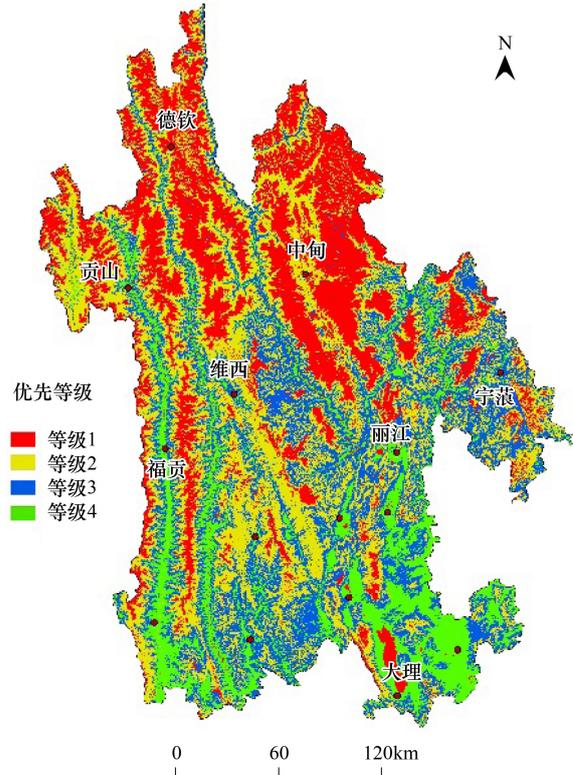


图 9 优先等级分区图

Fig.9 The map of priority protection class

等级 2 的保护优先性仅次于等级 1,其面积 23250 km²,占总面积的 35.02%。等级 2 所占的面积较大,包含了滇西北大部分的森林植被,保护优先性略低于等级 1,其对维持滇西北典型的地带性植被具有重要作用。

等级 3 面积 16694 km²,占总面积的 25.15%,其是介于植被保护和当地居民生产生活的过度区域,相当于我国自然保护区规划中缓冲区的作用。

等级 4 面积 9456 km²,占总面积的 14.25%,其主要位于研究区东南部低海拔地区,是当地居民开展生产活动较为聚集的地区,保护价值低同时保护成本高。其在西北部高海拔地区的河谷地带也分布着一定面积的,主要是位于河谷地带。

利用分区结果将等级 1 的区域作为本研究最终确定的优先保护区,其保护优先性最高,应施与最高的保护力度并限制人为开发活动。

3.4 保护空缺分析

利用本研究所确定的优先保护区与目前滇西北现存的自然保护区进行叠加对比分析,确定了目前保护体系的保护空缺地区(图 10)。优先保护区 16983 km²,其中被当前自然保护保护的面积 3651 km²,占总面积的 21.50%,则未被保护的面积占 78.50%。未受到保护的地区主要是位于中甸县和德钦县境内。这部分地区目前也面临急剧增加的旅游开发和矿产开发,保护生物多样性工作刻不容缓,需要扩增当地自然保护区面积。

4 讨论

高山积雪和高原湖泊是滇西北较为特殊的两类生境。滇西北有积雪的山体多被藏族人民视为神山,当地人禁止人为对其植被的破坏^[68-69],所以雪山有着较高的物种丰富度和生境完整性,因此保护价值较高,例如

白马雪山就属于国家级自然保护区。本研究中将海拔作为中重要的人为干扰因子也是考虑对滇西北雪山的保护,同时参考了 Zhang 对于梅里雪山国家公园功能区规划评分方法^[40]以及相关专家的意见,对积雪这个植被亚型值赋予较高保护价值。另外,高原湖泊是很多珍稀濒危禽类的栖息地,例如昆明动物所对于拉市海 1999 年 10 月至 2000 年 7 月的三期调查中,统计得到 158 种鸟类名录^[43]。同时考虑到高原湖泊在地区水源涵养方面具有重要的作用,所以对于其赋予较高的保护价值得分。

河流在水源涵养和地区气候调节方面有着积极的作用,在地区生物多样性保护方面应优先考虑其保护价值^[3]。目前也有很多研究强调对河流湿地优先保护^[57,70],对于滇西北地区而言,河流处在干热的河谷地带,气候干燥,植被稀缺。由于落石落沙等原因,河内水环境很不稳定,同时由于强烈的人为干扰加大了保护成本。所以本研究中河流的保护优先性并不高,这是与相关研究的不同之处。

此前,国内已有学者采用层次分析法从物种、植被和生态系统多个层面上选取评价指标来确定某一地区生物多样性保护价值和优先保护区,不同研究选取不同指标进行保护价值评价,这些研究对全指标下得分的计算主要采取加权累加的方式^[3,39,57]。本研究较之前研究不同的是利用 Amoeba-polts 构建多边形,以六边形面积表示全指标下得分,和之前计算方法结果相近,但更能够直观反映全指标下得分受单个指标影响的趋势并且在一定程度上突出重点保护目标的分值,这是本研究的创新之处。本研究是基于张燕妮等对滇西北优先保护群落研究之后的进一步研究,主要解决了其未考虑的人为干扰因子方面的影响,对其因数据受限未判定 11 种植被亚型进行了判定,并对滇西北进一步做了较为具体的功能区划分。

生物多样性保护策略制定与人为活动干扰强度之间的关系一直是保护规划工作中的一个热点问题^[71]。一些保护地评价研究中强调保护地的自然性,对活动弱的地区赋予较高的保护优先性,同时也降低的保护成本^[40,72]。而另外一些研究中强调保护物种受威胁的程度,将人为活动强的区域赋予较高的优先度^[21,60,73]。特别是系统保护规划理论强调保护目标的受威胁程度,并给予威胁程度高的优先保护^[5,20]。实际上就中国的保护区建设而言,东部地区保护地数量多而面积小,较为零碎化。而西部保护区平均面积较东部大,保护区的整体性高^[74]。东部人口密度大,人为干扰强度大,西部反之;对比东西部保护区可知东部多为抢救式保护而西部为前瞻性的保护。本研究对保护价值高而人为干扰弱的地区赋予高优先度。主要是出于保护的前瞻意识,因为目前滇西北地区目前人口密度相对较低但开发速度快,特别是旅游业和矿产采集业。对目前未开发的同时保护价值较大的地区建立保护区进行就地保护可积极避免后期经济发展带来的生物多样性破坏。

需要注意的是,要确定滇西北濒危物种数和濒危等级需要从濒危植物和濒危动物两个方面来进行考虑,但是由于本研究所能搜集到的数据有限,无法提供濒危动物方面的研究数据作为支撑。另外,在对濒危物种生境确定时,主要依据濒危物种信息库中提供的该濒危物种生境条件为主要信息,比对不同植被类型的生境条件,生境相同则认为该植被亚型中含有此濒危物种,而未能去野外进行实地考证,所以这方面的结果与现实可能有一定差距。

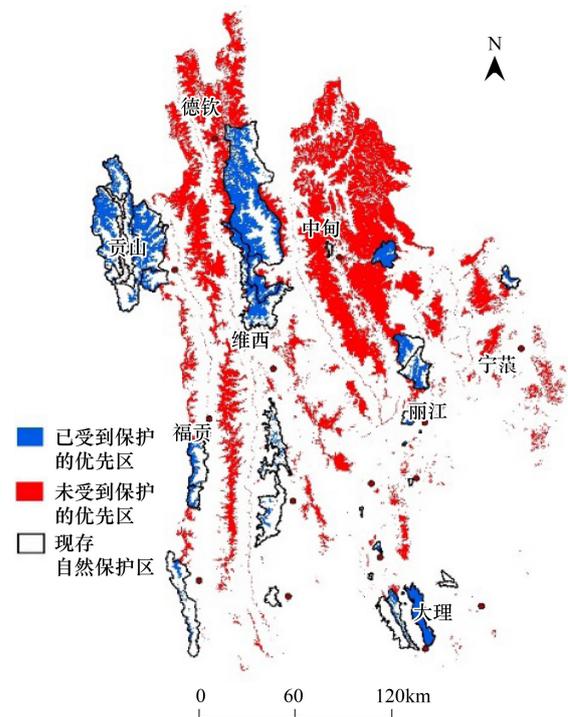


图 10 保护空缺分析图

Fig.10 The gaps of conservation area

参考文献 (References):

- [1] 马克平. 中国生物多样性热点地区 (Hotspot) 评估与优先保护重点的确定应该重视. 植物生态学报, 2001, 25(1): 125-125.
- [2] 马克平. 未来十年的生物多样性保护目标. 生物多样性, 2011, 19(01): 1-2.
- [3] 邢韶华, 林大影, 鲜冬娅, 崔国发. 北京山地植物多样性优先保护地区评价. 生态学报, 2009, 29(10): 5299-5312.
- [4] Franklin J F. Preserving biodiversity: species, ecosystems, or landscapes?. *Ecological Applications*, 1993, 3(2): 202-205.
- [5] 张路, 欧阳志云, 徐卫华. 系统保护规划的理论、方法及关键问题. 生态学报, 2015, 35(4): 1-17
- [6] 吕一河, 陈利顶, 傅伯杰. 生物多样性资源: 利用、保护与管理. 生物多样性, 2001, 9(4): 422-429.
- [7] IUCN .IUCN Red List of Threatened Species.the World Conservation Union, 2000
- [8] Porter-Bolland L, Ellis E A, Guariguata M R, Ruiz-Mallén I, Negrete-Yankelevich S, Reyes-García, V. Community managed forests and forest protected areas: An assessment of their conservation effectiveness across the tropics. *Forest Ecology and Management*, 2012, 268: 6-17.
- [9] Barber C P, Cochrane M A, Souza C Jr, Verissimo A. Dynamic performance assessment of protected areas. *Biological Conservation*, 2012, 149(1): 6-14.
- [10] Myers N. The biodiversity challenge: expanded hot-spots analysis. *Environmentalist*, 1990, 10(4): 243-256.
- [11] Olson D M, Dinerstein E. The Global 200: a representation approach to conserving the Earth's most biologically valuable ecoregions. *Conservation Biology*, 1998, 12(3): 502-515.
- [12] Scott J M, Davis F, Csuti B, Noss R, Butterfield B, Grove 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. *Wildlife monographs*, 1993: 3-41.
- [13] Myers N. Threatened biotas: "Hotspots" in tropical forests. *Environmentalist*, 1988, 8(3): 187-208
- [14] Myers N, Mittermeier R A, Mittermeier C G, da Fonseca G A B, Kent J. Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, 2000, 403(6772): 853-858.
- [15] 中华人民共和国环境保护部. 生物多样性热点地区, 2010. <http://www.zhb.gov.cn>
- [16] 李迪强, 宋延龄. 热点地区与 GAP 分析研究进展. 生物多样性, 2000, 8(2): 208-214.
- [17] Meffe G K, Carrol C R. *Principles of Conservation Biology* Sunderland;. Sinauer Associates, 1994
- [18] Margules C R, Pressey R L. Systematic conservation planning. *Nature*, 2000, 405(6783): 243-253.
- [19] Cowling R M, Pressey R L. Introduction to systematic conservation planning in the Cape Floristic Region. *Biological Conservation*, 2003, 112(1/2): 1-13.
- [20] 栾晓峰, 黄维妮, 王秀磊, 刘敏超, 刘世荣, 吴波, 李迪强. 基于系统保护规划方法东北生物多样性热点地区和保护空缺分析. 生态学报, 2009, 29(1): 144-150.
- [21] 张路, 欧阳志云, 肖焱, 徐卫华, 郑华, 江波. 海南岛生物多样性保护优先区评价与系统保护规划应用生态学报, 2011, 22(8): 2105-2112.
- [22] Noss R F, Cooperrider A Y, Schlickeisen R. *Saving Nature's Legacy: Protecting and Restoring biodiversity*. Washington, D.C.: Island Press, 1994.
- [23] 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.
- [24] Massam B H. Multi-Criteria Decision Making (MCDM) techniques in planning. *Progress in Planning*, 1988, 30(Part 1): 1-84.
- [25] Mendoza G A, Prabhu R. Multiple criteria decision making approaches to assessing forest sustainability using criteria and indicators; a case study. *Forest Ecology and Management*, 2000, 131(1/3): 107-126.
- [26] Mendoza G A, Martins H. Multi-criteria decision analysis in natural resource management: a critical review of methods and new modelling paradigms. *Forest Ecology and Management*, 2006, 230(1/3): 1-22.
- [27] Briceño-Elizondo E, Jäger D, Lexer M J, Garcia-Gonzalo J, Peltola H, Kellomäki S. Multi-criteria evaluation of multi-purpose stand treatment programmes for Finnish boreal forests under changing climate. *Ecological Indicators*, 2008, 8(1): 26-45.
- [28] Scott J M, Mountainspring S, Ramsey F L, Kepler C B. *Forest bird communities of the Hawaiian Islands: their dynamics, ecology, and conservation*. Camarillo, CA: Cooper Ornithological Society, 1986, 431.
- [29] 李霄宇. 国家级森林类型自然保护区保护价值评价及合理布局研究. 北京: 北京林业大学, 2011.
- [30] Diaz-Balteiro L, Romero C. Making forestry decisions with multiple criteria: a review and an assessment. *Forest Ecology and Management*, 2008, 255(8-9): 3222-3241.
- [31] Store R. Sustainable locating of different forest uses. *Land Use Policy*, 2009, 26(3): 610-618.
- [32] Pressey R L, Cabeza M, Watts M E, Cowling R M, Wilson K A. Conservation planning in a changing world. *Trends in Ecology & Evolution*, 2007, 22(11): 583-592.
- [33] Zucca A, Sharifi A M, Fabbri A G. Application of spatial multi-criteria analysis to site selection for a local park: A case study in the Bergamo Province, Italy. *Journal of Environmental Management*, 2008, 88(4): 752-769.
- [34] de Oliveira Averna Valente R, Vettorazzi C A. Definition of priority areas for forest conservation through the ordered weighted averaging method. *Forest Ecology and Management*, 2008, 256(6): 1408-1417.
- [35] Poti M. *Identifying Priority Conservation Areas in Georgetown County, South Carolina*. Durham, N.C.: Duke University, 2010.
- [36] 中华人民共和国环境保护部. 全国自然保护区名录, 2013. <http://sts.mep.gov.cn/zrbhq/zrbhq/>

- [37] 万晔, 司徒群, 李子海. 滇西北地理环境特征与区域水土流失相互作用机制研究. 水土保持通报, 2003, 23(5): 1-5.
- [38] 滇西北生物多样性保护联席会议. 滇西北生物多样性保护行动计划(2008-2012). 2009.
<http://www.ynepb.gov.cn>
- [39] 张燕妮, 张志明, 耿宇鹏, 欧晓昆, 彭声静, 王文礼, 冯欣, 吕靖雯. 滇西北地区优先保护的植物群落类型. 生物多样性, 2013, 21(3): 296-305.
- [40] Zhang Z M, Sherman R, Yang Z J, Wu R D, Wang W L, Yin M, Yang G H, Ou X K. Integrating a participatory process with a GIS-based multi-criteria decision analysis for protected area zoning in China. *Journal for Nature Conservation*, 2013, 21(4): 225-240.
- [41] Zhang M G, Zhou Z K, Chen W Y, Slik J W F, Cannon C H, Raes N. Using species distribution modeling to improve conservation and land use planning of Yunnan, China. *Biological Conservation*, 2012, 153: 257-264.
- [42] 杨飞龄, 胡金明, 武瑞东. 基于 NPWP 的云南植物保护优先区分. 地理学报, 2013, 68(11): 1538-1548.
- [43] 段森华, 何耀华. 滇西北生物、文化多样性保护与经济社会可持续协调发展研究. 昆明: 云南科技出版社, 2009.
- [44] Triantaphyllou E. *Multi-Criteria Decision Making Methods a Comparative Study*. Boston: Springer, 2000.
- [45] 吴征镒, 朱彦丞, 姜汉侨. 云南植被. 北京: 科学出版社, 1987.
- [46] 李恒, 郭辉军, 刀志灵. 高黎贡山植物. 北京: 科学出版社, 2000.
- [47] 欧晓昆, 金振洲. 干热河谷植被. 昆明: 云南大学出版社, 2000.
- [48] 欧晓昆, 张志明, 王崇云. 梅里雪山植被研究. 北京: 科学出版社, 2006.
- [49] 国务院环境保护委员会、国家环保局、中科院植物所. 中国稀有濒危保护植物名录, 2006. <http://jky.qz.edu.cn>, 2006.
- [50] 傅立国, 金鉴明. 中国植物红皮书——稀有濒危植物(1册). 北京: 科学出版社, 1992: 1-576.
- [51] 周彬. 云南省第一批省级重点保护野生植物名录修订. 云南植物研究, 2010, 32(3): 221-226.
- [52] 中科院昆明植物研究所、中科院植物所、中科院武汉植物园和中科院华南植物园. 中国植物物种信息数据库, 2014. . <http://www.plants.csdb.cn/eflora>. 2014
- [53] 彭明春. 云南植被遥感分类及动态研究. 昆明: 云南大学, 2007.
- [54] 国家测绘地理信息局. 测绘基准数据库, 2014. <http://www.sbsm.gov.cn/>.
- [55] Saaty R W. The analytic hierarchy process—what it is and how it is used. *Mathematical Modelling*, 1987, 9(3-5): 161-176.
- [56] 余文刚, 罗毅波, 金志强. 海南岛野生兰科植物多样性及其保护区域的优先性. 植物生态学报, 2006, 30(6): 911-918.
- [57] 徐卫华, 欧阳志云, 黄璜, 王效科, 苗鸿, 郑华. 中国陆地优先保护生态系统分析. 生态学报, 2006, 26(1): 271-280.
- [58] 吴波, 朱春全, 李迪强, 董珂, 王秀磊, 石培礼. 长江上游森林生态区生物多样性保护优先区确定——基于生态区保护方法. 生物多样性, 2006, 14(2): 87-97.
- [59] 卢镛. 连城国家级自然保护区次级自然单元(沟系)优先保护评价体系建设. 兰州: 甘肃农业大学, 2008.
- [60] 余昌元, 苏文华. 无量山国家级自然保护区植被保护价值评价. 林业调查规划, 2007, 32(5): 51-55.
- [61] Frangopoulos C A, Keramioti D E. Multi-criteria evaluation of energy systems with sustainability considerations. *Entropy*, 2010, 12(5): 1006-1020.
- [62] 郁云. 风玫瑰图在气象服务信息系统中的实现与应用. 电脑知识与技术, 2010, 6(35): 10035-10036.
- [63] 廖文珍, 王菲凤, 张江山. 基于多边形面积法的农田土壤重金属污染综合评价. 安全与环境学报, 2013, 13(4): 151-155.
- [64] Eastman J R. *Guide to GIS and Image Processing Volume*. Clark Labs, 2001.
- [65] Phua M H, Minowa M. A GIS-based multi-criteria decision making approach to forest conservation planning at a landscape scale: a case study in the Kinabalu Area, Sabah, Malaysia. *Landscape and Urban Planning*, 2005, 71(2-4): 207-222.
- [66] Geneletti D. A GIS-based decision support system to identify nature conservation priorities in an alpine valley. *Land Use Policy*, 2004, 21(2): 149-160.
- [67] Richards J A. *Remote Sensing Digital Image Analysis*. Berlin: Springer, 1999.
- [68] 邹莉, 谢宗强, 欧晓昆. 云南省香格里拉大峡谷藏族神山在自然保护中的意义. 生物多样性, 2005, 13(1): 51-57.
- [69] 向红梅, 张劲峰, 许慧敏, 郭华. 香格里拉县藏族神山与非神山植被比较研究. 西部林业科学, 2008, 37(2): 47-50.
- [70] 蔡燕, 鱼京善, 王会肖, 郭云慧. 黄河流域生态水文分区及优先保护级别. 生态学报, 2010, 30(15): 4213-4220.
- [71] 曲艺, 栾晓峰, 倪宏伟. 生物多样性保护规划方法研究进展. 黑龙江科学, 2013, 4(9): 42-45.
- [72] 郑允文, 薛达元, 张更生. 我国自然保护区生态评价指标和评价标准. 农村生态环境, 1994, 10(3): 22-25.
- [73] Wu R D, Long Y C, Malanson G P, Garber P A, Zhang S, Li D Q, Zhao P, Wang L Z, Duo H R. Optimized Spatial Priorities for Biodiversity Conservation in China: A Systematic Conservation Planning Perspective. *PLOS One*, 2014, 9(7): e103783.
- [74] Wu R D, Zhang S, Yu D W, Zhao P, Li L Z, Yu Q, Ma J, Chen A, Long Y C. Effectiveness of China's nature reserves in representing ecological diversity. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2011, 9(7): 383-389.