

DOI: 10.5846/stxb201304220768

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): 1284-1295.

Zhang L, Ouyang Z Y, Xu W H. Theory, work frame and hot issues of systematic conservation planning. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(4): 1284-1295.

系统保护规划的理论、方法及关键问题

张 路, 欧阳志云*, 徐卫华

中国科学院生态环境研究中心, 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

摘要: 为了减缓生物多样性丧失的趋势、将有限的保护资源用于关键区域, Margules 等提出了系统保护规划 (Systematic Conservation Planning) 概念和方法, 目前该方法已成为国际主流保护规划方法。与传统基于专家决策的保护体系规划方法不同, 系统保护规划拥有量化的保护目标、保护成本, 并综合考虑保护体系连通性、人为干扰因素, 使用优化算法计算, 从而获得空间明晰的生物多样性保护体系。在阐述规划理念、规划流程与方法的基础上, 重点评述了生物多样性替代指标的选择、保护规划成本的计算、保护目标的设置、规划结果的可靠性评估等关键问题, 并结合我国的具体情况, 探讨了该方法在我国的应用前景, 以期为推进我国生物多样性与生态服务功能的保护做出贡献。

关键词: 系统保护规划; 保护优先区; 生物多样性; 保护成本; 保护目标

Theory, work frame and hot issues of systematic conservation planning

ZHANG Lu, OUYANG Zhiyun*, XU Weihua

State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

Abstract: Biodiversity provides numerous essential services to humanity. But in past few decades, a large number of species have become increasingly threatened by anthropogenic disturbances. The current rates of extinction are estimated to be 100—1000 times greater than pre-human rates. In order to decrease the biodiversity loss rate and maximize the limited protection resources in key biodiversity areas, Margules raised the idea of Systematic Conservation Planning (SCP). It was widely used in conservation planning. In contrast to traditional method of conservation planning by expert decision, quantitative conservation targets, costs synthesized network connectivity, human disturbances and optimal algorithm were considered in SCP for obtaining a spatial-explicit conservation system. After analysis of planning theory, procedure, methods and review of existing SCP tools, four key issues in SCP research were summarized. The first issue is biodiversity indicators selection which means biodiversity mapping or quantification at genes, species, and ecosystems level to generates a biodiversity distribution matrix. It was demonstrated, at large scale, that quantification of biodiversity importance for species and ecosystems are more suitable than genes method, especially for a combination of species and ecosystems. The second is the estimation of cost that can be calculated in monetary and non-monetary terms. Many methods of cost quantification were reviewed in these paper and it indicated that conservation cost should not only incorporates socioeconomic data, but also biological features. The most important destination of SCP is to achieve some minimum representation of biodiversity features for the smallest possible cost by optimization. So an explicit conservation target is required. However, obtaining a rational target depends largely on the experiences of the experts who are forming these targets and that will inevitable bring about bias due to poor knowledge of the area and taxa. Our review suggests that a convective method should take both static and dynamic factors into account and to construct heterogeneity target for different conservation feature (ecosystem services,

基金项目: 国土资源部公益性行业科研专项项目 (2010111018)

收稿日期: 2013-04-22; 网络出版日期: 2014-04-11

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zyouyang@rcees.ac.cn

vulnerability, e.g.) as the target in SCP is worthy of further study. Once outcomes of SCP were generated from mathematical algorithm, the reliability and performability are still indeterminacy. Therefore, as the fourth key issue, how to evaluate result and error from SCP are given in our context. Summing up these issues, its foreground for further application in China was also analyzed under current biodiversity situation. Distinctly, Chinese scientists need to realize that the development of ecological productive mode in China have failed to keep pace with rapid economic development. In the face of heterogeneous land use pattern, target function should take various context into consideration during planning procedure. In addition, the expropriation for biodiversity conservation means that the government expropriate land of rural collective economy organization because of dual system of state ownership and collective ownership. For this reason, the estimation of conservation opportunity cost is more meaningful than land purchase cost. This paper, therefore, by reviewing a large amount of past literatures, makes a summary and a commentary on the theory, work frame and key topics on SCP that might promote the conservation of biodiversity and ecosystems in China in the future.

Key Words: systematic conservation planning; priority area; biodiversity; conservation target; conservation cost

生物多样性资源不仅可以被直接用作食物、药物、能源、工业原料,其价值还通过提供大量生态系统服务功能间接体现出来。这些功能可能包括调节气候、维持自然生态系统稳定性、降解废物、维持自然基因库和美学价值等^[1]。然而,以物种多样性为例,全球平均每年约有 1000 个野生物种灭绝,并在未来的几十年中有可能达到每年 5000 个^[2],这种灭绝速率比人类出现前大 100—1000 倍^[3]。生物多样性的丧失受多种因素共同驱动,包括全球气候变化、土地利用变化、物种入侵、传染病扩散及物种的自然更替等,很多因素都与人类活动强度加大密切相关。

为控制物种灭绝速度,保护生物多样性资源,已出现大量保护方法和政策性研究^[4-5]。这些方法大致可以分为就地保护和迁地保护两类。相对于迁地保护而言,就地保护更强调生物多样性与生态系统间的相互作用,具有更积极的意义。为此,全球陆地表面的 10%—11%已经建立为自然保护地,但全球生物多样性资源丰富,不可能将所有具有保护意义的区域划为保护区。所以,保护体系规划和补充保护地选择就显得尤为重要。这需要合理的保护规划来选择、组织保护区域,使生物多样性和其它自然资源得以延续。保护规划的本质是结合自然、社会、经济特征解决重要的资源、空间配置和管理问题,将有限的保护资源合理分配到最具保护意义的区域并实施切实有效的管理措施。生物多样性资源丰富的地区通常自然资源丰富,这些区域的居民需要生活空间、生活资料并排放垃圾^[6],这就带来了保护和发展的冲突。故而保护规划不仅要考虑生物多样性空间分布,还应考虑经济发展的空间异质性,而传统保护规划方法比较侧重于前者,对后者的分析不足,这可能是由于经济发展和人类影响机制过程过于复杂,难以模拟。

针对传统保护规划方法的不足,Margale 等提出了系统保护规划概念,其中指出保护规划不仅应当考虑自然性质和生物学范式,还应系统地考虑到保护区大小、连通性、边界长度以及建立保护区所需的经济和社会成本^[7]。系统保护规划是一种基于模拟运算模型的规划方法,规划过程需要量化的保护目标、保护成本及边界紧密度。同时,系统保护规划也极为重视区域生物多样性数据的系统累积,以此获得的生物多样性空间分布根据在规划中是必不可少的。近些年,保护生物学领域对系统保护规划的研究发展迅速,并已经用于一些生物多样性保护优先区的规划实践^[8-10]。本文通过对系统保护规划相关文献的综合,评述了系统保护规划的理论基础、研究中出现的热点问题以及在我国的应用前景,以期为我国保护规划提供借鉴。

1 系统保护规划理念与方法

1.1 系统保护规划的理论基础

为尝试解决生物多样性保护与资源利用的冲突,系统保护规划引用选址优化算法,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。基本思路是,首先将研究区划为若干独立的

规划单元,通过目标函数为每个单元赋值,通过迭代运算选择备选单元集合中的最优解,结果代表在达到既定保护目标的同时保护成本最低的规划单元集合。

在传统的保护区分类体系中涉及物种层次的大多仅根据某些旗舰物种建立保护体系,并未系统考虑生物多样性或其它综合性生态指标。而系统保护规划为每个生物多样性衡量指标都设立了明确的保护目标,同时在规划前默认,除已建保护区外,其它任何区域都是新建保护区的备选区域。系统保护规划还需要量化每个备选区参与保护体系建设的经济成本,从而选择满足保护目标的最低成本备选区集合,这类似于经济学中效率前缘的搜寻过程。如果保护成本和选区数量呈线性关系,则该过程可以用整数线性规划来描述。

设保护被选规划单元总数为 m , 保护目标物种总数(或其他保护目标因素,如植被型)为 n , 根据物种信息构建物种分布矩阵 A , 矩阵中数值为 a_{ij} , 则有:

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{如果物种 } j \text{ 在规划单元 } i \text{ 中出现} \\ 0, & \text{如果物种 } j \text{ 未在规划单元 } i \text{ 中出现} \end{cases}$$

其中, $i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n$

设 m 维向量 X 表示规划单元是否被选入保护体系, 其中元素为 x_{ij} ,

$$x_i = \begin{cases} 1, & \text{如果物种 } j \text{ 在规划单元 } i \text{ 中出现} \\ 0, & \text{如果物种 } j \text{ 未在规划单元 } i \text{ 中出现} \end{cases}$$

其中, $i = 1, \dots, m$

由此, 目标函数为:

$$\text{Min} \left(\sum_{i=1}^m X_i \right), (\text{最小规划成本集合}) \text{ 限制条件为 } \sum_{i=1}^m a_{ij} x_i \geq 1, \text{ 其中, } j = 1, \dots, n (\text{每个物种至少出现 } 1 \text{ 次})$$

式中^[11], $a_{ij}, x_i \in [0, 1]$

当保护规划中难以为每个保护目标要素确定明确的保护目标时, 可以采用另一种思路, 在既定保护成本下, 使保护效果最大化。此时的模型为目标函数:

$$\text{Max} \left(\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m a_{ij} \right), (\text{最大化保护目标})$$

$$\text{限制条件为: } \sum_{i=1}^m x_i \geq a_{ij}$$

$$\sum_{i=1}^m x_i \leq b$$

式中, b 为成本预算^[12]

根据模型可以建立待优化矩阵, 优化过程则需要介入优化算法。其最大的特点是从运筹学领域借鉴计算方法, 使保护目标和保护成本得到量化, 可以提供空间明晰的保护优先区选择结果。算法内容多样, 使用较多的包括启发式算法模型、线性模型、概率算法模型^[13-15]等, 对于算法的选择, 早在 1996 年就由 Blair Csuti 等分析了五类主要算法在解决保护优先区选址问题上的性能^[16], 并提出针对不同的目标变量选择合适的算法。作为系统保护规划的核心, 优化算法为保护体系规划和现有保护网络评价提供了更强的可操作性理论支持。但值得注意的是, 在规划操作中, 优化选址并不是系统保护规划的全部, 上述数学模型也仅仅是最简化模型, 如何根据规划区特点适当加入描述保护体系空间特征、植被珍稀度、土地利用等相关项, 建立内容更加丰富、更有针对性的目标函数将对结果的质量起到至关重要的作用。而对保护体系的评价, 建立长期管理及监测方案也是系统保护规划的重要内容。

1.2 系统保护规划工作流程

系统保护规划过程透明, 公众可以直接监督和理解规划决策过程。结果易于解释和修改, 能包容保护生物学、生态学、经济学的多元数据输入, 并具有解释生态过程和人为干扰威胁的能力, 被广泛认为是当前保护体系设计的最优方法^[17]。作为一个当前的热点研究课题, 基于系统保护规划理念的保护体系设计有很多问

题还需要继续研究并展开深入探讨。但同样作为一项完整的规划工作,又具有明确的工作框架和流程指导保护体系规划。

系统保护规划流程包括收集生物多样性数据及生物多样性制图、确定规划目标、评价现存保护体系、选择补充区域、保护规划的实施管理及监测等步骤(图 1)。

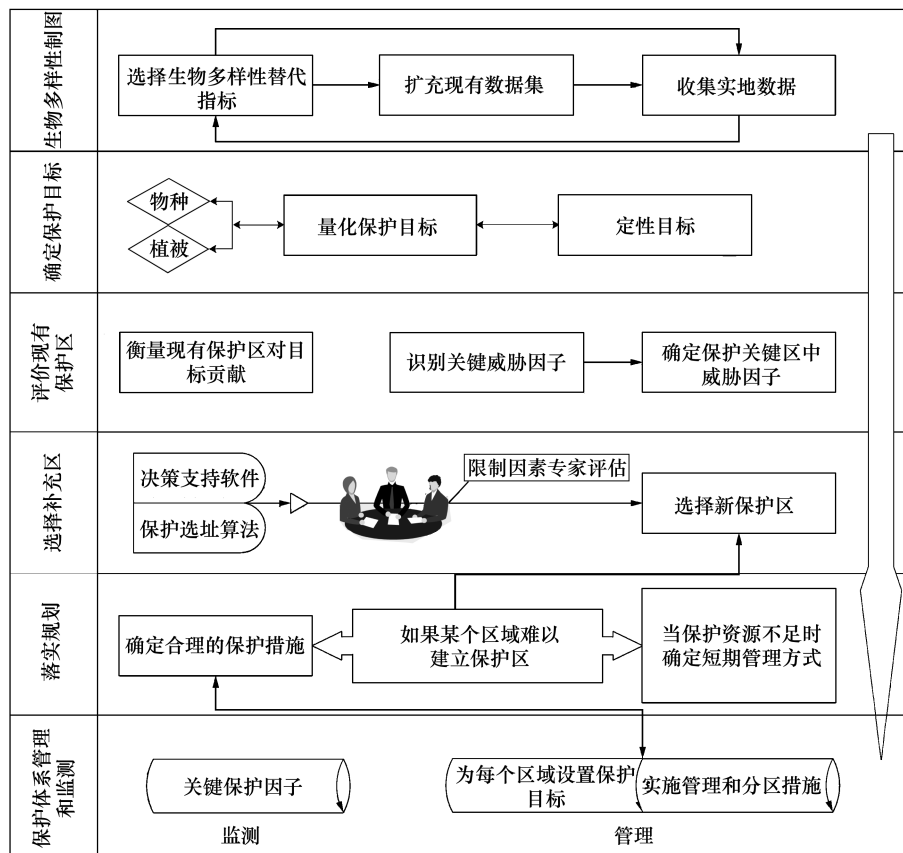


图 1 系统保护规划工作流程

Fig.1 Workflow of Systematic Conservation Planning

1.3 几种主要的系统保护规划工具

当描述规划过程的模型函数建立后,可以使用 MATLAB、1stOpt 等科学计算软件或其它编程语言进行计算,但对于大多数非数学专业的人员而言确实存在一定难度。为简化工作过程,提高效率,多个研究机构已经开发了诸如 SITES、WORLD MAP、PANDA、C-Plan、CLUZ、MARXAN、ZONATION^[18-24]等嵌入模拟算法的决策支持软件,并逐渐完善。多数都具有交互操作界面,便于操作,可以免费下载。其中,SITES 较早用于系统保护规划,使用贪婪算法在较小尺度上选择备选单元中具有保护意义的集合作为保护优先区。WORLD MAP 多用于解决较大尺度上的保护生物学保护优先集合问题,输入数据通常覆盖大尺度生物地理范围。CLUZ (Conservation Land Use Zoning) 用于保护优先区的区划和保护体系连接度的测量,与其它多个模型有动态连接界面,可以利用 CLUZ 与其它软件联合运算。PANDA (Protected Areas Network Design Application) 软件是用 Visual Basic 语言在 ArcObjects 软件中编写的用来建立保护网络的系统保护规划工具,具有较强的计算和可视化功能,可以独立完成系统保护规划,具有完整的运行框架。C-Plan 与 MARXAN 是当前系统保护规划主流软件,在研究中都得到广泛应用。C-Plan 采用启发式算法自动完成选择运算,首先用于南非 Floristic 地区政府保护体系规划中,具有完整规划功能,能够在量化的保护目标下获得最优集运算结果。MARXAN (Marine Reserve Design using Spatially Explicit Annealing) 采用模拟退火算法,最早用于海洋保护网络规划,随着模型的

完善,在陆地保护规划中也得到了较多应用,其后续版本 MARXAN ZONE 将土地利用类型作为参数之一正可体现此趋势。ZONATION 是近年新开发的系统保护规划软件,相比之前的软件,ZONATION 应用更为灵活,内置 4 个运算函数,其中的 Target-based planning 模块支持固定成本,将保护目标最大化的思路,可以在一定程度上降低制定保护目标的难度。软件之间并无绝对的优劣之分,规划中应当进一步探究各软件内置算法所体现的生态过程,选择与目标区域生态特征相符的软件。

2 系统保护规划中的热点问题

在系统保护规划研究中始终贯穿着几个关键问题,包括如何选择生物多样性量化指标作为规划基础;保护备选单元的经济社会成本如何计算;明确的保护目标如何量化并确定;如何评估规划结果。这些问题如何解决将决定最终研究结果的准确性和可靠性,而对于这些问题的探讨也将不断完善系统保护规划的应用。

2.1 生物多样性替代指标的选取

开展系统保护规划遇到的首个问题是如何量化生物多样性资源的空间分布,即规划者首先要明确对何种生态要素进行保护,该要素将作为每个备选规划单元的综合评价价值参与选址运算。当前的研究多从基因、物种、景观 3 个方面量化生物多样性空间分布。

基因层次是当前衡量生物多样性的最微观层次,对基因多样性的测量结果是说明物种进化潜力的最直观论据。将基因多样性作为生物多样性替代指标能够确保保护体系包含了能够保有物种最大进化潜力的地区。基因多样性可采用样带捕捉或土壤样方取样-分子生物学实验的方式测得^[25-26]。该方法有较高的确定性,比较适合小尺度规划,但在一级流域、地理区域、山系等大尺度,由于其高技术、高成本、采样时空选择复杂性等特点而难以实施。

相对而言,从物种层次量化生物多样性更容易理解、数据更容易获得也更加适合大尺度规划。物种层次又包括多种方法:一是物种数量,可以通过样方调查,计算每个备选单元的物种丰富度,也可根据数量进一步计算丰富度指标^[27],如 α 、 β 多样性^[28],并统计每个单元内出现的物种数量^[29-33]或科、属的数量^[34],该类方法比较适合以植物多样性为保护目标。对野生动物通常需要根据物种的濒危程度或特有性选择目标物种^[35],统计每个规划单元出现各目标物种的数量。该方法主要问题在于物种分空间分布的确定大部分依靠经验数据,这些数据的时间幅度通常较大,所以应当对比多元数据,并分析数据误差^[36-38]。二是为提高数据精度,选择一种或几种旗舰种^[39-40]作为替代指标,这种物种受到关注较多,且活动范围较广,通常是大型哺乳动物。通过对该物种的保护可以同时保护活动范围内的生态系统以及其他物种。但该方法所选择的物种并不能完全代表区域内生物多样性分布,因此在选择物种时应根据生态环境特征添加其他保护目标要素^[41]。三是模拟目标物种的综合栖息地质量,例如 InVest 模型中,考虑地块生态系统类型、人为干扰、目标物种行为的栖息地质量和珍稀度^[42]。这种方法突出了物种对栖息地内不同地块的利用强度,有助于识别保护核心区域。主要问题是对某些目标物种的研究不足导致行为模式不能确定,当量化某类干扰对该物种的隔离程度时主观性较强。

在大尺度生物多样评估中,从景观层次出发,使用珍稀生态系统多样性或面积作为替代指标较为适合,数据可以来自遥感解译、实地调查或使用生态系统模型模拟^[43],尤其在海洋保护规划中,水生物种与生态系统分布相关性极高,独立的物种数据难以获得,替代指标主要选择珍稀生态系统分布^[44-47]或基底、水深、温度等影响生态系统功能的重要生态因子^[48]。

另有观点提到物种、生态系统和景观均需保护^[2],同时考虑以上两种保护目标属性更为合理^[49-50],并且可以保证研究区内数据得到最大限度利用^[51]。在规划中应注意生态系统类型与物种栖息地属于不同层次,将某类生态系统等同于物种带入运算则显得不合理,因此可以分别运行选址运算并进一步综合分析识别保护优先区。生物多样性空间丰富度决定于生态系统类型、气候、地形、土壤、人为干扰等因素,与生物量和生态系统服务功能相关^[52],在保护规划中选用区域内最具代表性的服务功能替代表示生物多样性^[53-55]具有更强的

综合性,也更加适合保护规划的决策支持。

2.2 保护规划成本模拟

任何一个保护规划的实施都需要付出一定经济、社会成本。系统保护规划需要指导保护资源分配,也必需考虑经济社会因素^[56],这需要使用某种方法量化保护成本,将量化的成本带入选址运算。保护成本的计算关系到如何权衡保护规划中的成本-效益关系,并影响到未来潜在投资量^[57]。在保护规划中量化成本的空间分布与目标因素制图起着同等重要的作用^[58]。当前,在系统保护规划的成本计算中主要采用货币计量方法和非货币计量方法两种。

2.2.1 货币计量法

使用货币成本计量方法可以在规划中明确提出保护工程的总成本,对出资方有重要的参考价值。为得到尽量精确的成本,规划中需要从土地和管理两方面衡量成本。

土地方面的成本包括土地购置成本和该土地用于其它经济目的的机会成本。保护体系建设需要向土地所有人购买土地所有权,土地购置成本可以用土地价格替代^[59-60]。在缺乏地价数据的地区可用该区域土地机会成本作为模拟对象,建立土地价值模型。主要方法是提取区域内土壤类型、气候、土地覆被等数据作为模型变量,结合 GIS 模拟土地价值空间差异^[61],进而估算土地在不同利用方式下可能产生的经济收益^[62]。这方面农业机会成本研究较多,主要通过计算农业生产力,根据农产品的市场价值计算农业机会成本^[63]。Naidoo^[64]计算了家畜养殖承载力、不同家畜市场价格、养殖人员工资、灌溉作物总产值、雨水自然浇灌作物总产值、种植人员工资等因素模拟出了全球农业机会成本。除农业以外,机会成本还包括林业采伐、捕捉野生生物所获得的经济价值、珍稀物种在动物园的拍卖价格、开展旅游活动等。海洋保护体系则可以考虑禁止通航和捕捞业造成的损失^[65-66]。

保护体系的管理成本由运行成本、交易成本、赔偿需求三个部分构成。运行成本指保护区员工工资、建设保护站点、购买监测设备等投入。该价值与当地经济发展状况和保护区面积以及保护对象有关。例如海洋保护区需要定期坐船寻护,船只的燃料消耗量通常高于陆地保护区常用的摩托车和汽车。该类信息可以问卷或政府资料查询的方式获得^[67]。交易成本是指保护管理者为让生态环境得到改善从而与利益相关群体所做的经济交易^[68]。例如保护区为与社区和谐发展所做的补偿项目甚至生态移民投入、造林和修复河岸等生态修复项目。保护体系建立后,野生动物生境改善,数量可能增加或由于野生动物啃食或毁坏作物、伤人所做出的赔偿。在实际计算中很难全部考虑以上因素,应从研究区主要问题入手。

2.2.2 非货币计量法

货币成本计量涉及的范围广,需要复杂、多样的计算数据,而有些很难获得。因此,有研究采用非货币计量方法模拟保护成本。这种方法相对简单,容易理解。具体替代指标的选取可分两方面,分别为土地面积和经济发展程度。使用最多的是采用保护单元面积替代表示保护成本,这种方法假设单元土地价格相等,成本只与单元面积有关^[69-71]。这种方法虽然简单易行,却并不能反映区域间成本差异。为突出这种差异,可以使用道路密度、人口密度或综合考虑住宅、公路、工业等人造景观的密度和数量等描述区域经济发展状况的指标被替代表示保护成本^[72-76]。经济发展替代指标假设干扰较大的区域保护成本也较高,而实际上在有些地区保护效益高,同时面临很高的人类干扰压力,这种地区对生物多样性保护具有不可替代的意义,但可能因为保护成本较高而被排除在规划结果之外。为防止这种情况出现,规划应当单独考虑人类威胁因素,而不是直接作为成本使用^[62]。

2.3 保护目标设置

量化的保护目标以优化模型中限制条件的形式出现。但此类保护目标在规划任务中通常不会明确给出,因为很难在规划前就能确定规划后的保护体系所要达到生物多样性总量的比例。要确定这一数值首先要明确其出发点,根据不同保护内容及其时空变异性,从静态和动态两方面入手。

静态理论认为区域内物种数量随面积的增大而增加。该假说建立在岛屿生物多样性的研究基础上,这在

热带地区的研究中已经得到充分证实^[77-78]。Preston^[79]公式常被用来反应物种面积之间的关系:

$$S = cA^z$$

式中, c 、 z 均为参数, S 为物种数, A 为面积。

而另有研究显示^[80]对于大型脊椎动物的保护,相互连通的小生境斑块有更好的保护效果。同时,生物地理学上认为保护区越接近圆形保护效果越好,各保护区之间应有相连的通道,保证物种基因交流,形成健康的保护体系。这些都为保护目标的设置提供了依据,包括保护区大小、形状、廊道设计等内容。

动态理论认为有些物种在不同的生活史阶段需要不同的资源和空间^[81],例如洄游鱼类和候鸟。忽视不同类型生境间的连通性对这些物种是致命的危害,保护目标需建立在对物种习性的了解之上,将物种所需的各种生境和利用该生境的时间作为整体考虑,保证其繁殖、越冬等行为顺利进行^[82]。除了物种自身行为,还应认识到区域内生境质量的空间差异,在保护目标设置时应考虑物种威胁因素,尤其是土地利用方式的改变会影响原地区水热条件、小气候和植被结构,若生境被农田或牧场所取代,还会造成生境隔离,形成更多边缘地带。而随着经济活动的发展,对物种的影响还会进一步扩大,规划中应更多考虑物种对各种土地利用方式的响应机制,在威胁高发区单独设定保护目标。若有些人类干扰难以清除,则可以考虑针对潜在生境设立保护目标,为受威胁物种保留一定潜在迁移空间。

根据区域特征确定保护要素后,目标数值的确定仍是难点。在以往研究中,有的为简化操作,多个保护属性保护目标相同^[83-84],此方法过于绝对,没有考虑具有特殊意义保护目标的保护优先性。为弥补不足,除采用保护物种栖息地适宜性或物种濒危等级分设保护目标的方法外^[85-86],也可变换思路,先将保护目标设置为100%,在成本固定情况下计算单位成本的保护贡献^[87]。

相对于各种保护目标设置方法,目前最为合理的是综合分析各个层次的动态和静态因素,建立等级化的保护目标,对各类保护要素先设定不同的保护目标情景,再根据保护资源量确定最优规划方案^[88]。目标确立后也并非一成不变,还需要不断根据数据的更新重新审订保护目标,确保其合理性^[8]。

2.4 规划结果的可靠性评估

选址运算产生的解集代表保护体系所包含的规划单元。这只是理论上的结果,距离实际操作、成为具有可操作性的保护规划决策还有很大差距。Ferrier 等^[89]为此提出了两种评价结果的方法,第一种是通过运算模型参数的调试,不断重新运算,确定每个选中单元对总目标的贡献,这可称为规划单元的不可替代性分析。另一种方法是评价规划区内威胁因素,若规划单元之间具有同等不可替代性,则可以认为威胁因素越多或威胁程度越大的单元中物种或生境丧失的可能性越高,优先性越强。

对规划结果还需要回答所选择的优先区域是否完成了保护目标,误差是多少。可用的方法是统计规划结果中出现的目标物种数量^[10]、某些极重要物种的栖息地面积^[90]、目标生态系统受到保护的面积^[91]或借鉴以往的保护体系规划效果评估方法,通过输入数据构建保护效果评价指标^[92]。但是系统保护规划的输入数据主要来自经验数据累积,一方面,实地调查的时间不同,不能体现出生物多样性动态,另一方面,不同研究的实验设计不同以及调查时间和强度都不相同,对输入数据的精度很难评估。若使用输入数据评价输出结果则等同于评价算法结果而规划结果的总体误差仍然难以确定,这也将使保护决策过程变得更加混乱^[93]。为解决这个问题,有研究选择不同数据库的物种信息,对比保护结果,并对每个结果计算成本-收益指数评价保护效果^[94]。这有助于直观地发现输入结果不同造成的差异,对误差有总体把握。如果数据允许,还可以通过区域内已建保护区不同时期的物种丰富度建立物种更新模型,预测规划结果对物种更新的贡献^[95]。保护规划本身就是一项预测性工作,不可能得到完全准确的结果,因此对于规划结果的评估应对各种影响因素做全面考虑,不仅应当包括保护目标的出现量,还应分析保护体系的连通性、人为干扰的限制情况,并结合专家经验、保护资源预算和社区居民、政府机构、工商业开发商等利益相关群体提出意见等分析规划可行性,得到尽量可行的可靠的保护体系。

保护体系建成后,为保证新体系能够持久满足保护目标,需要分区制定管理措施,通过对关键保护目标因

素的长期监测,掌握生态系统格局和过程的变化。一旦发生某些人为、自然干扰因素,应当立即做出反应,重新评估保护体系并做出修改。

3 系统保护规划在我国的应用现状及前景

在我国,2011 年制定的中国生物多样性保护战略与行动计划已将生物多样性保护上升到国家战略高度,并明确划定我国重点保护的 8 大区,35 小区,为全国生物多样性就地保护提供了宏观指导^[96]。但纵观我国保护规划研究,仍然比较侧重保护效益,例如通过目标物种分布空间聚类,分析生物多样性保护的空間密集区^[97-98]或按照生态系统珍稀程度划分优先保护小区^[99-101]。这类方法可以直观地选择物种丰度最高的区域规划保护体系,虽然缺乏人类活动干扰威胁和保护成本估算,但是为保护规划和优先区选择提供了重要的保护目标分布资料,仍然是其他评价方法的组成部分和重要参照。

我国另外一个应用较多的方法是空缺分析,其主要思路是利用物种分布数据与现存保护区及其他管理属性图层叠合,分析当前保护体系的保护空缺。作为保护优先区研究中最为成熟的方法,GAP 分析在全球领域已经得到了广泛的应用^[102-104]。在我国也有多个研究案例^[105-106]。但 GAP 分析方法也存在一些限制和不足,包括:(1)不能判别植被的演替阶段;(2)不能显示植被类型间的过渡带;(3)物种的分布图是预测性的,而不是野外严格证实的;(4)没有指示生境质量^[107]。同时,也没有考虑保护成本的空间分配问题。

近些年,随着我国经济迅猛发展,与生物多样性保护的冲突越加凸显,发达地区的保护体系面积已基本饱和,很难建立新的自然保护区。而越来越多的西部欠发达地区也希望将土地留做经济作物种植或旅游开发,带动当地经济发展。面对这些问题,保护体系的建立或修订仅考虑保护效益已经不够,必须更多地考虑保护成本的空间分布,将规划应考虑的各种因素视为整体考虑。而系统保护规划的优势就在于将保护成本、保护效益、保护体系的空间布局加以整合,并以数学模型的形式联系起来。

系统保护规划在协调保护与发展的冲突方面具有优势,在我国有很好的应用前景,也已经在几个区域^[108-111]做过一些尝试,效果尚可,但对系统保护规划中的热点问题仍值得开展更加深入的探讨。首先,我国是土地国有制及集体所有制国家,建立保护区不需要购买土地,这省去了大量土地购置成本,因此,保护区的管理运营成本和机会成本成为主要内容。这与国外有很大不同,如何根据我国国情量化保护成本的空间分布将是系统保护规划在国内的研究重点。另外,有很多国家在制定保护体系规划时,明确的给出了保护目标,而我国国土面积广阔,生态系统类型极为复杂,提出明确的保护目标相当困难。如何根据既定的保护成本最大限度的达到保护效益,提出新的目标函数模型也将是未来研究的主要方向之一。在管理策略方面,考虑到有些珍稀物种的生境有动态性,例如分布于我国东部的湿地珍禽,根据季节不同在三江平原湿地、渤海湾湿地、江苏盐城湿地间反复迁徙。针对此类情况,能够提出不同季节珍稀物种生境的保护体系选择方法和管理手段也非常值得重视。将系统保护规划与生物多样性、生态系统服务功能相结合将对我国未来保护体系修编起到重要的参照作用。服务功能这不仅包括对自然生态系统调节功能,还包括文娱、产品提供等多项社会经济功能,而服务功能与生物多样性之间也存在内在关系。综合考虑二者的空间格局,更加注重生态系统过程和功能保护也将成为提高我国保护体系有效性的一个重要途径。

参考文献(References):

- [1] Hooper D U, Chapin F S III, Ewel J J, Hector A, Inchausti P, Lavorel S, Lawton J H, Lodge D M, Loreau M, Naeem S, Schmid B, Setälä H, Symstad A J, Vandermeer J, Wardle D A. Effects of biodiversity on ecosystem functioning: a consensus of current knowledge. *Ecological Monographs*, 2005, 75(1): 3-35.
- [2] Franklin J F. Preserving biodiversity: species, ecosystems, or landscapes? *Ecological Applications*, 1993, 3(2): 202-205.
- [3] Lawton J H, May R M. *Extinction Rates*. Oxford: Oxford University Press, 1995.
- [4] Rands M R W, Adams W M, Bennun L, Butchart S H M, Clements A, Coomes D, Entwistle A, Hodge I, Kapos V, Scharlemann J P W, Sutherland W J, Vira B. Biodiversity conservation: Challenges beyond 2010. *Science*, 2010, 329(5997): 1298-1303.
- [5] Van Jaarsveld A S, Freitag S, Chown S L, Muller C, Koch S, Hull H, Bellamy C, Krüger M, Endrödy-Younga S, Mansell M W, Scholtz C H.

- Biodiversity assessment and conservation strategies. *Science*, 1998, 279(5359): 2106-2108.
- [6] Terborgh J. Requiem for Nature. Washington DC: Island Press, 1999.
- [7] Margules C R, Pressey R L. Systematic conservation planning. *Nature*, 2000, 405(6783): 243-253.
- [8] 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.
- [9] Venevsky S, Venevskaya I. Hierarchical systematic conservation planning at the national level: Identifying national biodiversity hotspots using abiotic factors in Russia. *Biological Conservation*, 2005, 124(2): 235-251.
- [10] Tognelli M F, Silva-García C, Labra F A, Marquet P A. Priority areas for the conservation of coastal marine vertebrates in Chile. *Biological Conservation*, 2005, 126(3): 420-428.
- [11] Possingham H, Ball I, Andelman S. Mathematical methods for identifying representative reserve networks // Ferson S, Burgman M. *Quantitative Methods for Conservation Biology*. Berlin: Springer, 2000: 291-306.
- [12] Ando A, Camm J, Polasky S, Solow A. Species distributions, land values, and efficient conservation. *Science*, 1998, 279(5359): 2126-2128.
- [13] Moore J L, Folkmann M, Balmford A, Brooks T, Burgess N, Rahbek C, Williams P H, Krarup J. Heuristic and optimal solutions for set-covering problems in conservation biology. *Ecography*, 2003, 26(5): 595-601.
- [14] Poulin M, Belisle M, Cabeza M. Within-site habitat configuration in reserve design: a case study with a peatland bird. *Biological Conservation*, 2006, 128(1): 55-66.
- [15] Vanderkam R P D, Wiersma Y F, King D J. Heuristic algorithms vs. linear programs for designing efficient conservation reserve networks: Evaluation of solution optimality and processing time. *Biological Conservation*, 2007, 137(3): 349-358.
- [16] Csuti B, Polasky S, Williams P H, Pressey R L, Camm J D, Kershaw M, Kiester A R, Downs B, Hamilton R, Husoi M, Sahr K. A comparison of reserve selection algorithms using data on terrestrial vertebrates in Oregon. *Biological Conservation*, 1997, 80(1): 83-97.
- [17] Pressey R L, Cabeza M, Watts M E, Cowling R M, Wilson K A. Conservation planning in a changing world. *Trends in Ecology and Evolution*, 2007, 22(11): 583-592.
- [18] Church R, Stoms D, Davis F, Okin B J. Planning Management Activities to Protect Biodiversity with a GIS and an Integrated Optimization Model. (1996) [2013-06-09]. http://www.ncgia.ucsb.edu/conf/SANTA_FE_CD-ROM/sf_papers/church_richard/my_paper.html.
- [19] Williams P H. WORLDMAP 4. 1. Priority areas for biodiversity. London: The Natural History Museum, 1996.
- [20] CLUZ- Conservation Land-Use Zoning Software. Durrell Institute of Conservation and Ecology (DICE). (2011-2-10) [2013-06-09]. <http://ebmtoolsdatabase.org/tool/cluz-conservation-land-use-zoning-software>.
- [21] Riolo F. PANDA- Protected Areas Network Design Application for ArcGIS 9.x. (2005) [2013-06-09]. <http://www.mappamondogis.it/panda.htm>.
- [22] C-Plan version 3.40. New South Wales National Parks and Wildlife Services in Australia. (2008) [2013-06-09]. <http://www.ozemail.com.au/~cplan>.
- [23] Ball I R, Possingham H P, Watts M. Marxan and relatives: Software for spatial conservation prioritization // Moilanen A, Wilson K A, Possingham H P, eds. *Spatial Conservation Prioritization: Quantitative Methods and Computational Tools*. Oxford: Oxford University Press, 2009: 185-195.
- [24] Moilanen A. Landscape Zonation, benefit functions and target-based planning: Unifying reserve selection strategies. *Biological Conservation*, 2007, 134(4): 571-579.
- [25] Vandergast A G, Bohonak A J, Hathaway S A, Boys J, Fisher R N. Are hotspots of evolutionary potential adequately protected in southern California? *Biological Conservation*, 2008, 141(6): 1648-1664.
- [26] Trindade-Filho J, Landa S F, Cianciaruso M V, Loyola R D. Using indicator groups to represent bird phylogenetic and functional diversity. *Biological Conservation*, 2012, 146(1): 155-162.
- [27] Scholes R J, Biggs R. A biodiversity intactness index. *Nature*, 2005, 434(7029): 45-49.
- [28] Marsh C J, Lewis O T, Said I, Ewers R M. Community-level diversity modelling of birds and butterflies on Anjouan, Comoro Islands. *Biological Conservation*, 2010, 143(6): 1364-1374.
- [29] Pinto M P, Diniz-Filho J A F, Bini L M, Blamires D, Rangel T F L V B. Biodiversity surrogate groups and conservation priority areas: birds of the Brazilian Cerrado. *Diversity and Distributions*, 2008, 14(1): 78-86.
- [30] Moreno C E, Rojas G S, Pineda E, Escobar F. Shortcuts for biodiversity evaluation: a review of terminology and recommendations for the use of target groups, bioindicators and surrogates. *International Journal of Environment and Health*, 2007, 1(1): 71-86.
- [31] Jenkins C N, Alves M A S, Pimm S L. Avian conservation priorities in a top-ranked biodiversity hotspot. *Biological Conservation*, 2010, 143(4): 992-998.
- [32] Pain D J, Fishpool L, Byaruhanga A, Arinaitwe J, Balmford A. Biodiversity representation in Uganda's forest IBAs. *Biological Conservation*, 2005, 125(1): 133-138.
- [33] Bombi P, Luiselli L, D'Amen M. When the method for mapping species matters: defining priority areas for conservation of African freshwater turtles. *Diversity and Distributions*, 2011, 17(4): 581-592.
- [34] Balmford A, Lyon A J E, Lang R M. Testing the higher-taxon approach to conservation planning in a megadiverse group: the macrofungi. *Biological*

- Conservation, 2000, 93(2): 209-217.
- [35] Lamoreux J F, Morrison J C, Ricketts T H, Olson D M, Dinerstein E, McKnight M W, Shugart H H. Global tests of biodiversity concordance and the importance of endemism. *Nature*, 2006, 440(7081): 212-214.
- [36] Ponder W F, Carter G A, Flemons P, Chapman R R. Evaluation of museum collection data for use in biodiversity assessment. *Conservation Biology*, 2001, 15(3): 648-657.
- [37] Rondinini C, Wilson K A, Boitani L, Grantham H, Possingham H P. Tradeoffs of different types of species occurrence data for use in systematic conservation planning. *Ecology Letters*, 2006, 9(10): 1136-1145.
- [38] Fiorella K, Cameron A, Sechrest W, Winfree R, Kremen C. Methodological considerations in reserve system selection: A case study of Malagasy lemurs. *Biological Conservation*, 2010, 143(4): 963-973.
- [39] Williams P H, Burgess N D, Rahbek C. Flagship species, ecological complementarity and conserving the diversity of mammals and birds in sub-Saharan Africa. *Animal Conservation*, 2000, 3(3): 249-260.
- [40] Rodríguez-Soto C, Monroy-Vilchis O, Maiorano L, Boitani L, Faller J C, Briones M á, Núñez R, Rosas-Rosas O, Ceballos G, Falcucci A. Predicting potential distribution of the jaguar (*Panthera onca*) in Mexico: identification of priority areas for conservation. *Diversity and Distributions*, 2011, 17(2): 350-361.
- [41] Possingham H P, Andelman S J, Burgman M A, Medellín R A, Master L L, Keith D A. Limits to the use of threatened species lists. *Trends in Ecology and Evolution*, 2002, 17(11): 503-507.
- [42] Tallis H T, Ricketts T, Nelson E, Olwero N, Vigerstol K, Pennington D, Mendoza G, Aukema J, Foster J, Forrest J, Cameron D, Arkema K, Lonsdorf E, Kennedy C. InVEST 1.004 beta User's Guide. The Natural Capital Project, Stanford, 2010: 21-39.
- [43] Staus N L, Strittholt J R, Dellasala D A. Evaluating areas of high conservation value in Western Oregon with a decision-support model. *Conservation Biology*, 2004, 18(3): 711-720.
- [44] Weeks R, Russ G R, Bucol A A, Alcalá A C. Shortcuts for marine conservation planning: The effectiveness of socioeconomic data surrogates. *Biological Conservation*, 2010, 143(5): 1236-1244.
- [45] Shih Y C, Chiau W Y. Planning a marine protected area at Chinwan, Penghu, Taiwan. *Ocean & Coastal Management*, 2009, 52(8): 433-438.
- [46] Fraschetti S, Terlizzi A, Bussotti S, Guarnieri G, D'Ambrosio P, Boero F. Conservation of Mediterranean seascapes: analyses of existing protection schemes. *Marine Environmental Research*, 2005, 59(4): 309-332.
- [47] Edwards H J, Elliott I A, Pressey R L, Mumby P J. Incorporating ontogenetic dispersal, ecological processes and conservation zoning into reserve design. *Biological Conservation*, 2010, 143(2): 457-470.
- [48] Howell K L. A benthic classification system to aid in the implementation of marine protected area networks in the deep/high seas of the NE Atlantic. *Biological Conservation*, 2010, 143(5): 1041-1056.
- [49] Lombard A T, Cowling R M, Pressey R L, Rebelo A G. Effectiveness of land classes as surrogates for species in conservation planning for the Cape Floristic Region. *Biological Conservation*, 2003, 112(1/2): 45-62.
- [50] Gordon A, Simondson D, White M, Moilanen A, Bekessy S A. Integrating conservation planning and landuse planning in urban landscapes. *Landscape and Urban Planning*, 2009, 91(4): 183-194.
- [51] Game E T, Grantham H S, Hobday A J, Pressey R L, Lombard A T, Beckley L E, Gjerde K, Bustamante R, Possingham H P, Richardson A J. Pelagic protected areas: the missing dimension in ocean conservation. *Trends in Ecology and Evolution*, 2009, 24(7): 360-369.
- [52] Mace G M, Norris K, Fitter A H. Biodiversity and ecosystem services: A multilayered relationship. *Trends in Ecology and Evolution*, 2012, 27(1): 19-26.
- [53] Rogers H M, Glew L, Honzák M, Hudson M D. Prioritizing key biodiversity areas in Madagascar by including data on human pressure and ecosystem services. *Landscape and Urban Planning*, 2010, 96(1): 48-56.
- [54] Oetting J B, Knight A L, Knight G R. Systematic reserve design as a dynamic process: F-TRAC and the Florida Forever program. *Biological Conservation*, 2006, 128(1): 37-46.
- [55] Rees S E, Rodwell L D, Attrill M J, Austen M C, Mangi S C. The value of marine biodiversity to the leisure and recreation industry and its application to marine spatial planning. *Marine Policy*, 2010, 34(5): 868-875.
- [56] Possingham H P, Wilson K A. Turning up the heat on hotspots. *Nature*, 2005, 436(7053): 919-920.
- [57] Ferraro P J, Pattanayak S K. Money for nothing? A call for empirical evaluation of biodiversity conservation investments. *PLoS Biology*, 2006, 4(4): e105.
- [58] Polasky S, Camm J D, Garber-Yonts B. Selecting biological reserves cost-effectively: an application to terrestrial vertebrate conservation in Oregon. *Land Economics*, 2001, 77(1): 68-78.
- [59] Pence G Q K, Botha, M A, Turpie J K. Evaluating combinations of on-and off-reserve conservation strategies for the Agulhas Plain, South Africa: a financial perspective. *Biological Conservation*, 2003, 112(1/2): 253-273.
- [59] Jongeneel R, Polman N, Slangen L. Cost-benefit analysis of the dutch nature conservation policy: direct, indirect effects and transaction costs of the ecological main structure in the Netherlands. 12th Congress of the European Association of Agricultural Economists—EAAE Ghent, 2008, 1-9.

- [60] Strange N, Rahbek C, Jepsen J K, Lund M P. Using farmland prices to evaluate cost-efficiency of national versus regional reserve selection in Denmark. *Biological Conservation*, 2006, 128(4): 455-466.
- [61] Chomitz K M, Alger K, Thomas T S, Orlando H, Nova P V. Opportunity costs of conservation in a biodiversity hotspot: the case of southern Bahia. *Environment and Development Economics*, 2005, 10(3): 293-312.
- [62] Naidoo R, Adamowicz W L. Modeling opportunity costs of conservation in transitional landscapes. *Conservation Biology*, 2006, 20(2): 490-500.
- [63] Bryan B A, King D, Ward J R. Modelling and mapping agricultural opportunity costs to guide landscape planning for natural resource management. *Ecological Indicators*, 2011, 11(1): 199-208.
- [64] Naidoo R, Iwamura T. Global-scale mapping of economic benefits from agricultural lands: Implications for conservation priorities. *Biological Conservation*, 2007, 140(1/2): 40-49.
- [65] Sinden J A. Estimating the opportunity costs of biodiversity protection in the Brigalow Belt, New South Wales. *Journal of Environmental Management*, 2004, 70(4): 351-362.
- [66] Smith R J, Easton J, Nhancale B A, Armstrong A J, Culverwell J, Dlamini S D, Goodman P S, Loffler L, Matthews W S, Monadjem A, Mulqueeney C M, Ngwenya P, Ntumi C P, Soto B, Leader-Williams N. Designing a transfrontier conservation landscape for the Maputaland centre of endemism using biodiversity, economic and threat data. *Biological Conservation*, 2008, 141(8): 2127-2138.
- [67] Frazee S R, Cowling R M, Pressey R L, Turpie J K, Lindenberg N. Estimating the costs of conserving a biodiversity hotspot: a case-study of the Cape Floristic Region, South Africa. *Biological Conservation*, 2003, 112(1/2): 275-290.
- [68] Michaelow A, Stronzik M, Eckermann F, Hunt A. Transaction costs of the Kyoto mechanisms. *Climate Policy*, 2003, 3(3): 261-278.
- [69] Cook R, Auster P J. Use of simulated annealing for identifying essential fish habitat in a multispecies context. *Conservation Biology*, 2005, 19(3): 876-886.
- [70] Rondinini C, Chiozza F, Boitani L. High human density in the irreplaceable sites for African vertebrates conservation. *Biological Conservation*, 2006, 133(3): 358-363.
- [71] Zielinski W J, Carroll C, Dunk J R. Using landscape suitability models to reconcile conservation planning for two key forest predators. *Biological Conservation*, 2006, 133(4): 409-430.
- [72] Nel J L, Reyers B, Roux D J, Cowling R M. Expanding protected areas beyond their terrestrial comfort zone: Identifying spatial options for river conservation. *Biological Conservation*, 2009, 142(8): 1605-1616.
- [73] Williams P H, Morre J L, Toham A K, Brooks T M, Strand H, D'Amico J, Wisz M, Burgess N D, Balmford A, Rahbek C. Integrating biodiversity priorities with conflicting socio-economic values in the Guinean-Congolian forest region. *Biological Conservation*, 2003, 12(6): 1297-1320.
- [74] Rouget M, Cowling R M, Lombard A T, Knight A T, Kerley G I H. Designing large-scale conservation corridors for pattern and process. *Conservation Biology*, 2006, 20(2): 549-561.
- [75] Banks S A, Skilleter G A. The importance of incorporating fine-scale habitat data into the design of an intertidal marine reserve system. *Biological Conservation*, 2007, 138(1/2): 13-29.
- [76] Wilson K A, Pressey R L, Newton A N, Burgman M, Possingham H P, Weston C. Measuring and incorporating vulnerability into conservation planning. *Environmental Management*, 2005, 35(5): 527-543.
- [77] Noss R F, Quigley H B, Hornocker M G, Merrill T, Paquet P C. Conservation biology and carnivore conservation in the Rocky Mountains. *Conservation Biology*, 1996, 10(4): 949-963.
- [78] Pimm S L, Raven P. Extinction by numbers. *Nature*, 2000, 403(6772): 843-854.
- [79] Preston R D. The sub-microscopic morphology of cellulose. *Polymer*, 1962, 3: 511-528.
- [80] Noss R F. Assessing and monitoring forest biodiversity: a suggested framework and indicators. *Forest Ecology and Management*, 1999, 115(2/3): 135-146.
- [81] Holt R D, Gaines M S. *Patch Dynamics*. Berlin: Springer, 1993: 260-276.
- [82] Hazlitt S L, Martin T G, Sampson L, Arcese P. The effects of including marine ecological values in terrestrial reserve planning for a forest-nesting seabird. *Biological Conservation*, 2010, 143(5): 1299-1303.
- [83] Ban N C, Hansen J A, Jones M, Vincent A C J. Systematic marine conservation planning in data-poor regions: Socioeconomic data is essential. *Marine Policy*, 2009, 33(5): 794-800.
- [84] Klein C J, Wilson K A, Watts M, Stein J, Carwardine J, Mackey B, Possingham H P. Spatial conservation prioritization inclusive of wilderness quality: A case study of Australia's biodiversity. *Biological Conservation*, 2009, 142(7): 1282-1290.
- [85] Ieroux S J, Schmiedel F K A, Nagy J A. Potential spatial overlap of heritage sites and protected areas in a boreal region of northern Canada. *Conservation Biology*, 2007, 21(2): 376-386.
- [86] Wilhere G F, Goering M, Wang H L. Average optimacy: An index to guide site prioritization for biodiversity conservation. *Biological Conservation*, 2008, 141(3): 770-781.
- [87] Murdoch W, Polasky S, Wilson K A, Possingham H P, Kareivad P, Shaw R. Maximizing return on investment in conservation. *Biological*

- Conservation, 2007, 139(3-4): 375-388.
- [88] Justus J, Fuller T, Sarkar S. Influence of representation targets on the total area of conservation-area networks. *Conservation Biology*, 2008, 22(3): 673-682.
- [89] 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.
- [90] Warman L D, Sinclair A R E, Scudder G G E, Klinkenberg B, Pressey R L. Sensitivity of systematic reserve selection to decisions about scale, biological data, and targets: Case study from southern British Columbia. *Conservation Biology*, 2004, 18(3): 655-666.
- [91] Sala E, Aburto-Oropeza O, Paredes G, Parra I, Barrera J C, Dayton P K. A general model for designing networks of marine reserves. *Science*, 298(5600): 1991-1993.
- [92] Pressey R L, Nicholls A O. Efficiency in conservation evaluation: scoring versus iterative approaches. *Biological Conservation*, 1989, 50(1-4): 199-218.
- [93] Langford W T, Gordon A, Bastin L, Bekessy S A, White M D, Newell G. Raising the bar for systematic conservation planning. *Trends in Ecology and Evolution*, 2011, 26(12): 634-640.
- [94] Carvalho S B, Brito J C, Pressey R L, Crespo E, Possingham H P. Simulating the effects of using different types of species distribution data in reserve selection. *Biological Conservation*, 2010, 143(2): 426-438.
- [95] Langpap C, Kerkvliet J. Endangered species conservation on private land: Assessing the effectiveness of habitat conservation plans. *Journal of Environmental Economics and Management*, 2012, 64(1): 1-15.
- [96] 薛达元.《中国生物多样性保护战略与行动计划》的核心内容与实施战略. *生物多样性*, 2011, 19(4): 387-388.
- [97] 于晓东, 罗天宏, 戴强, 伍玉明, 周红章. 长江流域爬行动物物种多样性大尺度格局研究. *生物多样性*, 2005, 13(4): 298-314.
- [98] 张有瑜, 周立志, 王岐山, 王新建, 邢雅俊. 安徽省繁殖鸟类分布格局和热点区分析. *生物多样性*, 2008, 16(3): 305-312.
- [99] 赵淑清, 方精云, 雷光春. 全球 200: 确定大尺度生物多样性优先保护的一种方法. *生物多样性*, 2000, 8(4): 435-440.
- [100] 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.
- [101] 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(2): 271-280.
- [102] Oldfield T E E, Smith R J, Harrop S R, Leader-Williams N. A gap analysis of terrestrial protected areas in England and its implications for conservation policy. *Biological Conservation*, 2004, 120(3): 303-309.
- [103] Yip J Y, Corlett R T, Dudgeon D. A fine-scale gap analysis of the existing protected area system in Hong Kong, China. *Biodiversity and Conservation*, 2004, 13(5): 943-957.
- [104] Dietz R W, Czech B. Conservation deficits for the continental United States: an ecosystem Gap analysis. *Conservation Biology*, 2005, 19(5): 1478-1487.
- [105] 李迪强, 蒋志刚, 王祖望. 青海湖地区生物多样性的空间特征与 GAP 分析. *自然资源学报*, 1999, 14(1): 47-54.
- [106] 李晓文, 郑钰, 赵振坤, 黎聪. 长江中游生态区湿地保护空缺分析及其保护网络构建. *生态学报*, 2007, 27(12): 4979-4989.
- [107] 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.
- [108] 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.
- [109] 张路, 欧阳志云, 徐卫华, 李智琦, 朱春全. 基于系统保护规划理念的长江流域两栖爬行动物多样性保护优先区评价. *长江流域资源与环境*, 2010, 19(9): 1020-1028.
- [110] 张路, 欧阳志云, 肖燧, 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.
- [111] 栾晓峰, 孙工棋, 曲艺, 黄维妮, 李迪强, 刘世荣, 吴波. 基于 C-Plan 规划软件的生物多样性就地保护优先区规划——以中国东北地区为例. *生态学报*, 2012, 32(3): 715-722.