ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica

第 31 卷 第 14 期 Vol.31 No.14 2011

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版

中国科学院科学出版基金资助出版

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 31 卷 第 14 期　　2011 年 7 月　(半月刊)

目　　次

厦门市三个产业土地利用变化的敏感性…… 黄　静,崔胜辉,李方一,等 (3863)
黄河源区沙漠化及其景观格局的变化…… 胡光印,董治宝,逯军峰,等 (3872)
岩溶山区景观多样性变化的生态学意义对比——以贵州四个典型地区为例……
…… 罗光杰,李阳兵,王世杰,等 (3882)
基于城市地表参数变化的城市热岛效应分析 …… 徐涵秋 (3890)
北京市土地利用生态分类方法…… 唐秀美,陈百明,路庆斌,等 (3902)
长白山红松臭冷杉光谱反射随海拔的变化…… 范秀华,刘伟国,卢文敏,等 (3910)
臭冷杉生物量分配格局及异速生长模型…… 汪金松,张春雨,范秀华,等 (3918)
渔山岛岩礁基质潮间带大型底栖动物优势种生态位…… 焦海峰,施慧雄,尤仲杰,等 (3928)
食物质量差异对树麻雀能量预算和消化道形态特征的影响…… 杨志宏,邵淑丽 (3937)
桂西北典型喀斯特区生态服务价值的环境响应及其空间尺度特征…… 张明阳,王克林,刘会玉,等 (3947)
隔沟交替灌溉条件下玉米根系形态性状及结构分布…… 李彩霞,孙景生,周新国,等 (3956)
不同抗病性茄子根系分泌物对黄萎菌的化感作用…… 周宝利,陈志霞,杜　亮,等 (3964)
镧在草-菇-土系统中的循环与生物富集效应 …… 翁伯琦,姜照伟,王义祥,等 (3973)
鄱阳湖流域泥沙流失及吸附态氮磷输出负荷评估 …… 余进祥,郑博福, 刘娅菲,等 (3980)
柠条细根的分布和动态及其与土壤资源有效性的关系…… 史建伟,王孟本,陈建文,等 (3990)
土壤盐渍化对尿素与磷酸脲氨挥发的影响…… 梁　飞,田长彦 (3999)
象山港海域细菌的分布特征及其环境影响因素…… 杨季芳,王海丽,陈福生,等 (4007)
近地层臭氧对小麦抗氧化酶活性变化动态的影响…… 吴芳芳,郑有飞,吴荣军,等 (4019)
抑制剂和安全剂对高羊茅根中酶活性和菲代谢的影响…… 龚帅帅,韩　进,高彦征,等 (4027)
南苜蓿高效共生根瘤菌土壤的筛选…… 刘晓云,郭振国,李乔仙,等 (4034)
汉江上游金水河流域土壤常量元素迁移模式…… 何文鸣,周　杰,张昌盛,等 (4042)
基于地理和气象要素的春玉米生育期栅格化方法 …… 刘　勤,严昌荣,梅旭荣,等 (4056)
日光温室切花郁金香花期与外观品质预测模型…… 李　刚,陈亚茹,戴剑锋,等 (4062)
冀西北坝上半干旱区南瓜油葵间作的水分效应…… 黄　伟,张俊花,李文红,等 (4072)

专论与综述

鸟类分子系统地理学研究进展 …… 董　路,张雁云 (4082)
自然保护区空间特征和地块最优化选择方法 …… 王宜成 (4094)
人类活动是导致生物均质化的主要因素…… 陈国奇,强　胜 (4107)
冬虫夏草发生的影响因子…… 张古忍,余俊锋,吴光国,等 (4117)
自然湿地土壤产甲烷菌和甲烷氧化菌多样性的分子检测…… 佘晨兴,仝　川 (4126)

研究简报

塔里木河上游典型绿洲不同连作年限棉田土壤质量评价 …… 贡　璐,张海峰,吕光辉,等 (4136)
高山森林凋落物分解过程中的微生物生物量动态…… 周晓庆,吴福忠,杨万勤,等 (4144)
生物结皮粗糙特征——以古尔班通古特沙漠为例…… 王雪芹,张元明,张伟民,等 (4153)
不同海拔茶园害虫、天敌种群及其群落结构差异 …… 柯胜兵,党凤花,毕守东,等 (4161)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 306 * zh * P * ￥70.00 * 1510 * 33 * 2011-07

封面图说:内地多呈灌木状的沙棘,在青藏高原就表现为高大的乔木,在拉萨河以及雅鲁藏布江沿岸常常可以看到高大的沙棘林和沼泽塔头湿地相映成趣的美丽景观。

彩图提供:陈建伟教授　国家林业局　E-mail:cites.chenjw@163.com

王宜成. 自然保护区空间特征和地块最优化选择方法. 生态学报,2011,31(14):4094-4106.
Wang Y C. A review on spatial attributes of nature reserves and optimal site-selection methods. Acta Ecologica Sinica,2011,31(14):4094-4106.

自然保护区空间特征和地块最优化选择方法

王宜成*

(青岛农业大学资源与环境学院, 青岛 266109)

摘要:自然保护区是保护物种和生态系统的有效方式,用于建立自然保护区的资源却是稀缺的,这就提出这样的问题:(1)自然保护区在空间上应具有什么特征才是有效的;(2)如何从许多备选地块中选择一部分组成自然保护区对稀缺资源进行最优化分配。为促进物种生存繁衍,在地块选择时应考虑保护区空间特征。综述了该领域最近的研究进展,重点介绍了结合各种空间特征的保护区地块最优化选择模型。介绍了 4 个主要的空间特征:(1)连续,(2)间隔和距离,(3)边界和集约,(4)面积以及核心区和缓冲区。以前用启发式算法求解这些问题,但研究已显示该法不能保证资源的最优化分配。空间特征也可用线性整数规划模拟,用最优化软件求得最优解。目前的线性整数规划模型和软件还不能有效解决大型的保护区地块选择问题,计算效率易成为实际应用的瓶颈。概括了我国目前自然保护区设计领域的研究状况和面临的问题,最后讨论了该领域新的研究方向。

关键词:保护区设计;最优化;线性整数规划;空间特征

A review on spatial attributes of nature reserves and optimal site-selection methods

WANG Yicheng*

(*College of Resources and Environment*, *Qingdao Agricultural University*, *Qingdao* 266109, *China*)

Abstract: Nature reserves are considered effective means for protecting endangered and threatened species and critical ecosystems. Unfortunately, resources devoted to nature reserves are scarce, therefore establishing an effective conservation plan is an economic issue as much as it is ecological. Spatial attributes have been found important to affect the protected species' migration patterns, genetic exchanges, outside disturbances, etc. To promote the survival chances of protected species, spatial coherence of the reserve should be taken into account when choosing reserve sites. This raises two important issues: (1) what spatial attributes a reserve should possess to be an effective reserve, and (2) how can we select a subset from a large number of potential habitat sites to optimally allocate limited conservation resources. Although existing studies in the biological conservation literature do not provide explicit information about specific effects of different spatial attributes on protected species, generally large, compact, and contiguous reserve configurations are believed to work better. In the last decade, especially in recent years, many linear and nonlinear models were presented in the literature to incorporate various spatial attributes of the selected sites and their computational efficiency was demonstrated using empirical or hypothetic data. This paper summarizes the recent literature in this area with a particular focus on the modeling methods that addressed spatial attributes of the selected sites using linear integer programming. Four major spatial attributes are considered: (1) connectivity, (2) fragmentation and distance between selected sites, (3) boundary length and compactness, and (4) reserve area and core and buffer zones. Earlier studies have addressed these issues using rule-based heuristic algorithms. However, it has been shown in the literature that this method is inefficient in terms of optimal utilization of conservation resources because solutions obtained from heuristic algorithms often deviate significantly from the

基金项目:青岛农业大学高层次人才科研基金资助项目(631018)
收稿日期:2010-03-07; **修订日期**:2010-10-26

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: qdwangyc@yahoo.com.cn

true optimal solutions. The spatial attributes mentioned above can also be modeled using linear integer programming that involves yes/no type decision variables, and small to medium scale reserve design models can be solved conveniently using off the shelf optimization software to find exact optimal solutions, and therefore to guide the optimal utilization of limited resources. Unfortunately, currently available optimization software have limited capability in solving large size site selection problems and their computational efficiency may be a bottleneck in practice. Furthermore, most of the models that incorporate spatial attributes are deterministic in the sense that they do not consider the uncertainty in species′ occurrence in potential reserve sites or the probability of urban development for potential reserve sites. Some other models incorporated both types of uncertainty but they excluded spatial attributes of the selected sites. Incorporating both uncertainty and spatial attributes emerges as a new and important research direction in this area. The paper also elaborates on potential research topics in biodiversity and ecosystem conservation and related problems in China. Inefficient data, both on the species presence in potential sites and the cost-benefit values associated with individual sites may become an obstacle for applications of site selection models in real conservation practices in China.

Key Words: nature reserve design, optimization, linear integer programming, spatial attributes

建立自然保护区是世界各国保护物种和生态系统普遍采用的方式。用于建立自然保护区的资源如土地、财政预算等都是稀缺的,这就要求人们以最优的方式利用稀缺资源。当给定一组物种必须进行保护时,人们希望用最少的土地面积或财政预算实现对这些物种的保护,而当财政上拨出一定的预算用于物种保护时,人们希望用这些预算实现对尽可能多的物种或尽可能大的面积的保护。这两种情形都涉及到一个共同问题,即自然保护区地块选择问题。

自然保护区地块选择问题是从一组备选地块中选择一部分组成自然保护区对一些特定物种或生态系统进行保护,这是设计自然保护区时面临的现实问题。为提高被保护物种的存活率,或者说为提高保护区的有效性,保护区空间特征应在地块选择时予以考虑。保护区空间特征简单说就是组成保护区的地块在空间上的相对位置,它影响物种迁移、基因交流、外界干扰等因而影响物种存活率。

十多年来,国外保护区设计领域发展了许多模型,把一些空间特征如连续、间隔等结合到地块选择中,并用最优化方法获得最优解指导资源分配,用许多地方的实际数据进行了验证。国内有学者早在十多年前就介绍了保护区设计的主要原理和方法包括最优化方法,但国内学者没有跟进研究,至今国内文献中还没有见到结合空间特征的保护区地块最优化选择模型。从实践上看,根据《中国环境状况公报》,2009 年底我国已有自然保护区 2500 多个,总面积达 147 万 km^2,我国社会经济快速发展导致巨大的土地需求,而这么大的自然保护区面积是否经过优化选择? 如何进行保护区地块优化选择以获得最好的效果? 这是相关学者、决策者和公众都关心和感兴趣的问题。介绍国外该领域研究进展,为国内学者在这方面开展研究工作提供基础信息,帮助促进我国自然保护区科学设计和有效管理,这是本文的主要目的。文章首先介绍了两个基本的保护区地块选择问题,概括了生态学上关于空间特征对物种影响的不同观点,接着介绍了国外文献中结合空间特征的地块最优化选择模型,讨论了模型的计算效率,并简述了我国该领域的研究现状和问题,最后讨论了当前模型的不足和新的研究方向。

1　保护区空间特征

1.1　两个基本的保护区地块选择问题

在物种保护文献中,前面所述的两种情形,即被保护物种作为限制条件或财政预算作为限制条件,分别称为物种的“集合覆盖问题(Set Covering Problem, 简称 SCP)”和“最大覆盖问题(Maximal Covering Problem, 简称 MCP)”。SCP 和 MCP 的概念来自运筹学[1-2],后来由生态学和相关领域的学者应用到自然保护区地块选择问题中[3-5]。生物保护文献中两个基本的 SCP 和 MCP 模型如下:

SCP 模型

$$\text{Min} \sum_i a_i U_i \tag{1}$$

$$\text{s. t.} \quad \sum_i \delta_{si} U_i \geqslant k_s \text{ 对所有 } s \in S \tag{2}$$

式中,i 为备选地块编号;s 和 S 为被保护物种编号和集合;a_i 为地块 i 的面积;U_i为二元变量,如果地块 i 被选择作为保护区的一部分,则 $U_i=1$,否则 $U_i=0$;δ_{si} 为参数,如果物种 s 在地块 i 上出现,则 $\delta_{si}=1$,否则 $\delta_{si}=0$;k_s 为为保证物种长期存活率,物种 s 在保护区内应出现的次数(即保护区内含有物种 s 的地块数量),k_s 可视物种重要性或濒危程度进行规定(1 或 2 或更多)。

目标函数(1)是保护区面积,要最小化(各地块面积相等时可简化为 $\sum_i U_i$ 。对预算最小化时可用 c_i代替 a_i ,c_i是选择地块 i 的费用)。(2)是物种保护约束条件,每个物种 s 应至少在保护区内出现 k_s 次。式(2)中当 $\delta_{si}=0$ 或 $U_i=0$ 时均对物种 s 的保护不起作用($\delta_{si}U_i=0$),只有当 $\delta_{si}=1$ 且 $U_i=1$ 时,即物种 s 在地块 i 上出现而且该地块被选择在保护区中,物种 s 得到保护($\delta_{si}U_i=1$)。

MCP 模型

$$\text{Max} \sum_S Os \tag{3}$$

$$\text{s. t.} \quad O_s \leqslant \sum_{i \in Is} U_i \text{ 对所有 } s \in S \tag{4}$$

$$\sum_i c_i U_i \leqslant B \tag{5}$$

式中,I_s为含有物种 s 的地块集合;O_s 为二元变量,如果物种 s 得到保护,$O_s=1$,否则 $O_s=0$。B 是财政预算,其它符号同 SCP 模型。

目标函数(3)是对受保护的物种数量最大化。约束条件(4)是说,如果保护区内没有地块含有物种 s(即物种 s 没有得到保护, $\sum_{i \in I_s} U_i=0$),则 $O_s=0$,如果至少有一个地块含有物种 s($\sum_{i \in I_s} U_i \geqslant 1$),目标最大化使 $O_s=1$。(5)是财政预算约束条件,即选择的地块总费用不超过预算 B。

在上面的 SCP 和 MCP 中,地块被选择与否只考虑地块上的物种丰度或者选择费用,而没有考虑保护区空间特征,比如两个物种多、费用低的地块可能都被选中而不管这两个地块之间距离如何。忽略空间特征导致选择的地块一般情况下彼此孤立且相距很远,这样的地块组成自然保护区不可行,一个明显的原因是分散的相距很远的保护区增加维护成本。另外的原因是下面所述的生态学观点。

1.2 来自生态学的观点

自 20 世纪 20 年代“物种-面积”关系提出以后,生态保护领域的学者开始注重保护区空间特征对物种存活率的影响,出现了许多研究并伴随激烈的争论。如 MacArthur 与 Wilson 的岛屿生物地理学和平衡理论认为,岛屿物种的迁入速率随隔离距离增加而降低,绝灭速率随面积减小而增加,岛屿物种数量是物种迁移速率与绝灭速率动态平衡的结果[6-8]。还有 Diamond 的自然保护区设计原则更是直接考虑了空间特征,可概括为:(1)大保护区比小保护区好;(2)一个大保护区比总面积相等的几个小保护区好;(3)几个小保护区彼此间隔近比间隔远好;(4)保护区间有廊道相连比无廊道相连好;(5)边界小的集约式保护区比长条式好。这些原则的直观图示可参见 Williams 等[9]。

关于保护区空间特征的争论最热烈的也许要数 SLOSS 争论(Single Large Or Several Small),即一个大保护区好还是面积相等的几个小保护区好,一些研究者得出与 Diamond 不同的结论[10-11]。对连续、间隔和边界也有不同观点。有人认为,保护区以廊道相连使得被保护系统中基因损失的可能性增加,疾病、火灾、外来物种等可通过廊道扩散[12-13],但有研究发现,许多物种能穿过不适合的生境到邻近的适合生境中生存繁衍[14],生境之间受保护的走廊使物种可在不同生境之间移动,连续的保护地块比非连续的保护地块更能促进物种分布[15-16]。关于间隔,有人指出较远的间隔可防止疾病和外来物种在保护区间扩散,可避免灾害事件如火灾和飓风对种群的毁灭性影响[17],但是间隔和破碎化却被认为是造成生境退化和生物多样性损失的重要原

因[18]。对于边界,有研究发现对于那些依赖边界、喜欢在边界活动的物种而言大的边界比小的边界好[19-20],而有人则指出减小边界可以减少外界因素如农药和污染等对物种的影响[21]。

另外,保护区面积应至少能够维持最小可存活种群(Minimal Viable Population,简称 MVP),关于 MVP 和保护区面积的讨论可参见文献[22]。现实中设计自然保护区时,除了不受干扰的核心区,往往还在外围设立缓冲区,降低外界活动对被保护系统的影响[11],尽管缓冲区的宽度并没有统一的标准[9]。

从以上对保护区空间特征研究和争论的简要概括看出,不同发现导致不同观点,没有一个理论或实例能提供统一答案,但是研究和争论正说明了空间特征的重要。生物多样性迅速减少,物种急需保护,一个现实而迫切的问题是,如何从方法上提高保护区设计中处理空间特征的能力以应对各种不同的需要? 于是提出了结合空间特征的保护区地块选择模型。

2　保护区空间特征的最优化模型

把空间特征结合到传统的 SCP 和 MCP 中曾经被认为是非常困难的,有人建立了难以求解的非线性整数规划模型达到此目的。一般采用启发式算法求解,该方法能结合各种空间特征而且运算速度高,但一般情况下获得的解不是最优解,偏差可达 15% 或更高,意味着稀缺资源不能有效利用。后来一些研究人员成功建立了线性整数规划模型,并用最优化方法求得最优解,尽管这些模型的计算效率还不够高。

本文关注最优化模型,即可求得最优解的线性整数规划模型。关于非线性整数规划和启发式算法可参阅文献[23-27]。下面的模型考虑保护区 4 个主要的空间特征,即(1)连续,(2)间隔和距离,(3)边界和集约,(4)面积以及核心区和缓冲区。

2.1　连续

保护区连续是指保护区内任两个地块均可通过保护区内的其它地块相连,即保护区只有一部分。建立这样的模型是借鉴图论概念。根据图论,一个图连续的充分必要条件是图中弧线数量等于点数量减 1 且没有循环。“弧线数量等于点数量减 1”用线性整数规划容易表达,难点是防止循环。生态保护文献中有 3 种方法防止循环。

2.1.1　尾长法

该法由 Önal 和 Briers 提出[28-29]。“尾长”是指一个点后面与该点相连的弧线数量(地块以点表示)。一个图如果其中任一点的尾长都大于该点后面其它点的尾长,则该图是连续的。一个循环中的尾长不满足这个条件,因此可以在模型中加入这个条件防止循环形成。

用图 1 说明。例如点 10 的尾长是 3,因为有 3 个弧线连接到该点,同样点 24 的尾长是 6。沿弧线方向,前面点的尾长大于后面点的尾长。图中右下角 8 个点和 8 个弧线形成一个循环,点的尾长不满足该条件。

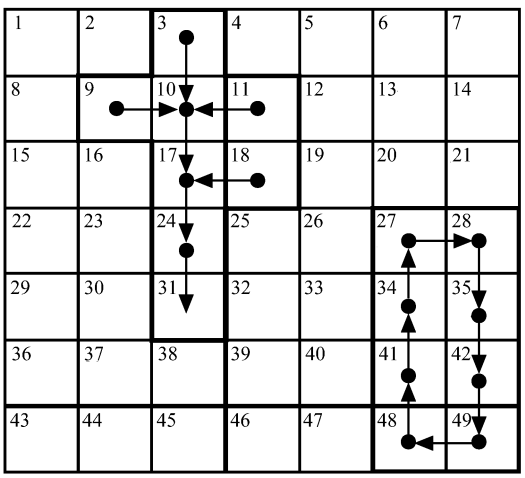

图 1　尾长法防止循环

Fig. 1　“Tail lenth” prevents loops

模型中对尾长的限制用下式实现(本文为符号一致性,对原文中的符号进行了改动,并省略了物种保护约束条件):

$$Z_{ij} \geqslant W_i + 1 - m(1 - X_{ij}) \quad \text{对所有 } i,j \quad i \neq j \tag{6}$$

$$W_j = \sum_i Z_{ij} \quad \text{对所有 } j \tag{7}$$

式中,i, j 为点(地块)编号,m 为指定的足够大的数,Z_{ij}为点 i 对点 j 尾长的贡献,W_j为点 j 的尾长,X_{ij}为二元变量,把点 i 与点 j 相连的弧线。如果点 i 不与点 j 相连,X_{ij}=0,由于 m 是足够大的数,此时式(6)右侧为负数,该式相当于 $Z_{ij} \geqslant 0$;如果点 i 与点 j 相连,X_{ij}= 1,

式(6)成为 $Z_{ij} \geqslant W_i + 1$,由式(7)可知 $W_j = \sum_i Z_{ij} \geqslant \sum_i (W_i + 1) > \sum_i W_i$,即点 j 的尾长大于其后面点 i 的尾长,无循环产生。他们用该方法为英国 Berkshire 县的 118 种鸟类设计了连续的保护区。

2.1.2 原图和对偶图法

该法由 Williams 提出[30],用于连续的土地规划,但该方法也可用于解决保护区地块选择问题。假设一个图有 n 个点,该图称为原图,其点和连接点的边(原边)把整个平面分成 r 个区域,其中(r-1)个区域由原边包围而成,另一个区域是原边包围之外的无边界区域。每个区域用一个对偶点表示。对应原图的每条原边,定义一条对偶边与原边交叉并连接两个由这条原边隔开的对偶点,这样就构成了对偶图。为建模目的,规定边是有方向的,如 X_{ij}是从点 i 发出而终止于点 j,而 X_{ji}连接这两点但方向相反(下面公式里的 Y_{ij}和 Z_{kl}同样)。

原图和对偶图结构可用来防止循环。基本思想是:在原图和对偶图中分别形成一个连续的图,两个图呈"互补"结构(图 2),防止循环形成,连续保护区是原图的一部分:

$$\sum_j Xij + \sum_j Yij = 1 \text{ 对所有原图中的点 } i=1, \cdots, n-1 \tag{8}$$

$$\sum_l Zkl = 1 \text{ 对所有对偶图中的点 } k=1, \cdots, r-1 \tag{9}$$

$$Xij + Yij + Xji + Yji + Zkl + Zlk = 1 \text{ 对交叉的原边和对偶边对} \tag{10}$$

式中,X_{ij}、Y_{ij}和 Z_{kl}均是二元变量。如果原图中弧线(i, j)被选择作为"互补"结构中原图的一部分同时也是保护区的一部分,X_{ij}= 1,否则 X_{ij} = 0。如果原图中弧线(i, j)被选择作为原图的一部分但不是保护区的一部分,Y_{ij}=1,否则 Y_{ij}=0。如果对偶图中弧线(k, l)被选择作为对偶图的一部分,Z_{kl}= 1,否则 Z_{kl}=0。

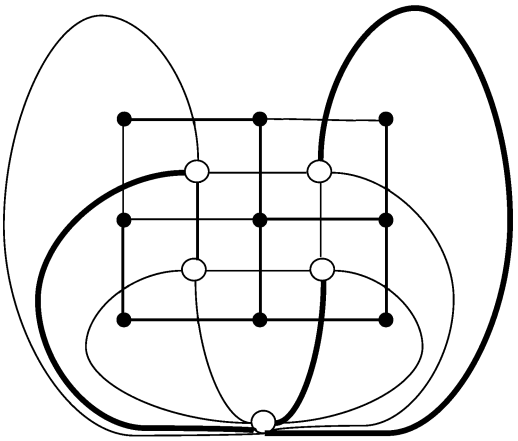

图 2 原图和对偶图法防止循环

Fig. 2 Interwoven structure of primal and dual graphs

式(8)是说,原图中除点 n 外(点 n 被指定为"汇点",无弧线发出),其它点均有一条弧线发出并终于相邻点,而且该弧线或者是保护区的一部分(X_{ij} = 1, Y_{ij} = 0),或者不是(X_{ij} = 0, Y_{ij} =1)。式(9)与(8)相似,规定对偶图中除点 r 外(点 r 被指定为对偶图中的"汇点"),其它对偶点均有一条弧线发出终于相邻点。式(10)规定,每对交叉的原弧和对偶弧中有且只有一条弧被选择,这样的限定保证了如图 2 所示的原图和对偶图"互补"结构。式(8)—(10)防止了循环形成,在原图和对偶图中分别确定一个连续的图,保护区是原图的一部分。

2.1.3 Dantzig 剪切法

Dantzig 剪切法 1954 年由 Dantzig 等人提出用于解决著名的"货郎担问题(Traveling Salesman Problem,简称 TSP)"[31],是 TSP 解法的一个重大突破。TSP 可表述为:一个售货员要到访 n 个城市,从其中一个城市出发,每个城市到访一次,最后回到出发城市,要求最短路径。Dantzig 等人的方法是,先求解一个松弛问题,保证每个城市到访一次,如果解中有循环(意味着不能满足回到出发城市的要求,如图 3 所示),对循环加一个不等式限制条件(称为"剪切")消除循环,重新求解,如果解中仍有循环,再加入剪切重新求解,直至解中无循环,就得到一条保证售货员回到出发城市的连续路径。

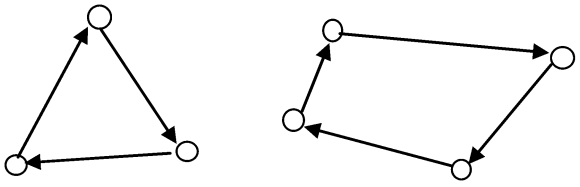

图 3 循环的存在导致路径不连续

Fig. 3 Disconnected tours containing a loop

以上思想可用来解决连续保护区地块选择问题。先求解一个松弛问题,即满足物种保护要求并满足连续

的必要条件,即弧线数量等于点数量减 1。对于形成的循环,点的数量与弧线数量相等,加入下面的不等式:

$$\sum_{i,j \in Nc} Xij \leqslant n_c - 1 \tag{11}$$

式中,N_c是形成一个循环的点的集合,n_c是该集合中点的数量。式(11)是对这些形成循环的点加入的剪切,即弧线数量必须小于或等于点数量减 1。对每个循环都加入这样的剪切,重新求解,直至解中无循环,即得到一个连续的图,对应一个连续的保护区。

上面 3 种方法定义的变量数量不同,方法 2 定义的变量最多,方法 1 次之,方法 3 最少。变量数量尤其是二元变量数量是模型计算效率的决定性因素。实际运行显示,前两种方法计算效率相互之间无明显优势,方法 3 虽然变量最少,但一般不能求解一次就确定连续的保护区,而需要多次求解,使时间增加。

2.2　间隔和距离

当保护区由几个部分组成,各部分之间就存在间隔。要求这些间隔尽可能地小以便于物种移动和基因交流,或者,要求间隔不低于某个距离以防止突发灾害造成整个种群毁灭。对于这些情形都有相应的地块选择方法。

2.2.1　最小间隔

方法 1

Önal 和 Briers 定义备选地块中所有两个地块之间的距离 d_{ij},如果两个地块(i, j)相邻(至少有一个公共顶点)则距离为 $d_{ij}=0$,两个地块间的间隔是把两个地块相连需要的地块最少数量[28](图 4)。

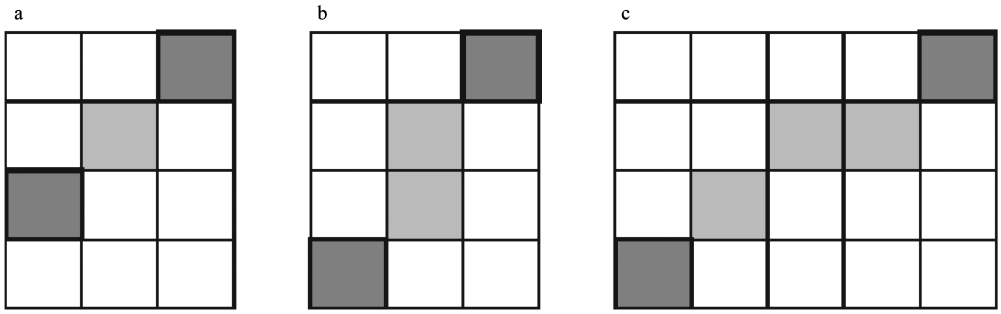

图 4　选中地块的间隔

Fig. 4　Fragmentation between selected sites. Darker shaded grids are selected sites, light shaded grids are fragmentation

a, b, c 间隔分别是 1,2,3; 深颜色地块被选中作为保护区,浅颜色地块是间隔

他们对选中地块之间的总间隔最小化:

$$\text{Min} \sum_{i,j \in I} d_{ij} X_{ij} \tag{12}$$

式中,I 是备选地块集合,d_{ij}是地块 i 与地块 j 的距离(间隔),其它符号同上。对于相邻地块(i, j),$d_{ij}=0$,所以不论(i, j)间有无弧线(X_{ij})均对目标函数没有影响;对不相邻的地块(i, j),$d_{ij}>0$,此时如果 $X_{ij}=0$,即(i, j)间无弧线形成,则对目标函数没有影响,如果 $X_{ij}=1$,即(i, j)间有弧线形成,则这两个地块间的距离被计入目标函数中。目标函数(12)就是确定这样的一组地块实现物种保护并使其中的间隔最小。该方法对每个备选地块定义一个二元变量 U_i,地块被选中则 $U_i=1$,否则 $U_i=0$. 他们同样以英国 Berkshire 县的 118 种鸟类为例进行了实例应用。

方法 2

Önal 和 Wang 用另一种与上述方法相似但有重要区别的方法确定一个间隔最小的保护区[32]。相似之处是都用地块数量表示被选中地块之间的间隔,区别在于二元变量的定义。他们不定义所有两个地块间的弧线 X_{ij},而是对每个备选地块定义两个二元变量 U_i和 V_i,用这两个变量的关系表示间隔:

$$\text{Min} \sum_{i} (V_i - U_i) \tag{13}$$

该方法确定一个由保护区组成的图(“小图”,如图 4 中由深颜色地块组成),同时确定一个由保护区和间隔共同组成的图(“大图”,如图 4 中由深颜色和浅颜色地块共同组成)。当一个备选地块被选中在小图中时它必然也在大图中,即 $U_i = 1$ 且 $V_i = 1$,但大图中的地块未必在小图中,即 $U_i = 0$ 且 $V_i = 1$,此时地块 i 就是保护区内的间隔。他们用该模型为美国伊利诺伊州的 32 种鸟类设计了间隔最小的保护区。

2.2.2 最小距离和最大距离

为便于物种进行基因交流,规定保护地块之间的距离不能超过某个给定的值。Willams 对这个问题进行了探讨[33]。在他的模型中,规定一些物种在保护区内的距离不能超过距离 $D2_s$:

$$\sum_{(i,j)\in I_s} X_{ij} \geqslant 1 \text{ 对所有 } d_{ij} \leqslant D2_s \tag{14}$$

I_s是含有物种 s 的地块集合。式(14)规定,对距离不能超过 $D2_s$的物种 s,模型必须在含有该物种的地块中选择至少一对,这对地块之间的距离不超过 $D2_s$。

一些情况下还要求保护区地块间的距离足够大,以避免物种在某些自然或人为灾害中全部灭绝。这时就要限定含有这些物种的地块之间的间隔不低于某个距离。Williams 对这个问题也进行了探讨,他用 $D1$ 表示这个距离:

$$U_i + U_j \leqslant 1 \text{ 对所有 } d_{ij} < D1 \tag{15}$$

式(15)是说,距离小于 $D1$ 的两个地块不能同时被选,这样的限制保证了选中地块之间的距离至少是 $D1$。

另外,Malcolm 和 ReVelle 为迁移的候鸟选择了迁移途中可以落脚休息和觅食的地块,也在模型中对距离进行限制[34]。已有落脚地块和备选落脚地块大致沿候鸟迁移方向分布,选择的落脚地块之间不超过一个给定的距离以保证候鸟飞到:

$$\text{Min} \quad \sum_i c_i U_i \tag{16}$$

$$U_i \leqslant \sum_{j\in F_i} U_j \text{ 对所有 } i \in I \tag{17}$$

式中,c_i是参数,如果地块 i 是备选落脚点,则 $c_i = 1$,如果 c_i是已存在的落脚点,则 $c_i = 0$. F_i是顺着迁移方向与落脚点 i 的距离不超过给定距离 D 的落脚点集合。式(17)是说,如果落脚点 i 被选中($U_i = 1$),则顺着迁移方向与 i 距离不超过 D 的落脚点至少有一个被选中。目标(16)是使选择的落脚地块数量最少。他们用一组假设的数据对模型进行了演示。

2.2.3 可到达性

城市扩张占用外围土地,这些土地上原有的物种特别是珍稀或濒危物种需要建立保护区进行保护,而这些保护区同时要求尽可能地方便附近居民,居民可到这些保护区进行休闲或教育活动(假设这些活动与物种保护不冲突)。这就提出这样的问题:选择哪些地块建立保护区满足物种保护要求并方便尽可能多的居民来此活动。Ruliffson 等人研究了这个问题[35]:

$$\text{Max} \sum_{j\in J} Z_j \tag{18}$$

式中,j 和 J 分别是城镇编号和集合,Z_j是二元变量,先指定一个距离 D 和数值 n,对城镇 j,如果有 n 个保护地块位于距离 D 之内,则 $Z_j = 1$,否则 $Z_j = 0$。目标函数最大化,使得有最多的城镇居民可以到达保护区。他们把模型用于芝加哥西北部 7890hm^2 的区域,包括 34 个城镇,68 个地块和 61 个物种。

2.3 边界和集约

保护区边界与保护区集约相互关联,小的边界意味着其中的各地块相互靠近,形成一个集约的保护区。Önal 和 Briers 研究了用线性整数规划确定一个边界最小即集约保护区的方法,并分别对英国 Oxfordshire 县 256 种无脊椎动物和 Berkshire 县 118 种鸟类进行了实例应用[36-37]。

方法 1

$$\text{Min}\sum_{j>i}^{S}\sum_{i=1}^{S} d_{ij}X_{ij} \tag{19}$$

$$\text{s. t.}\quad X_{ij} \geqslant U_i + U_j - 1 \text{ 对所有 } i \in I \text{ 和 } j \in I \text{,其中 } j > I \tag{20}$$

约束条件(20)是说,当备选地块 i 和 j 均未被选,$U_i=0$ 且 $U_j=0$,因 X_{ij}是二元变量而且目标是取最小值,所以 $X_{ij}=0$. 当 $U_i=1$ 且 $U_j=0$ 或者 $U_i=0$ 且 $U_j=1$ 时,同样有 $X_{ij}=0$。当 $U_i=1$ 并且 $U_j=1$ 时,$X_{ij}\geqslant 1$,因 X_{ij}上限为 1 所以 $X_{ij}=1$. 目标函数(19)是对选中地块中所有两个地块距离的总和求最小值。

式(12)是求保护区内地块间隔的最小值,选中的地块可能呈狭长排列,而式(19)是求所有地块之间距离总和的最小值,这使得选中的地块尽可能相互靠近,形成集约的保护区空间特征。

Rothley 提出一个相似的方法使保护地块之间尽可能靠近[38],模型如下:

$$\text{Max}\sum_{i\in I}\sum_{j>i}(1/d_{ij})X_{ij} \tag{21}$$

这里对选中地块两两之间距离的倒数总和最大化,与上面模型对距离总和最小化一致。

方法 2

$$\text{Min}D \tag{22}$$

$$\text{s. t.}\quad D \geqslant d_{ij}(U_i + U_j - 1) \text{ 对所有 } i \in I \text{ 和 } j \in I \text{,其中 } j > I \tag{23}$$

式中,D 是非负变量,代表选中地块之间的最大距离。当 $U_i=0$ 且 $U_j=0$ 时, $D \geqslant -d_{ij}$,因 D 是非负数,$D\geqslant 0$。当 $U_i=1$ 且 $U_j=0$,或 $U_i=0$ 且 $U_j=1$ 时,同样有 $D\geqslant 0$。当 $U_i=1$ 且 $U_j=1$ 时, $D\geqslant d_{ij}$,即 D 不小于所有选中地块中任何两个地块之间的距离,目标最小化使 D 取值为该距离可能的最小值。

上面 3 个模型均确定集约的保护区,即选中的地块尽可能地相互靠近。在 Önal 和 Briers 的应用实例中,两种方法确定的保护区地块间的最大距离相等,方法 1 确定的地块之间的距离总和较第二个小,保护区更集约,显示第一个模型较好。

方法 3

该方法直接对边界最小化:

$$\text{Min}\sum_{k\in K} Y_k + \sum_{k\in K'} Z_k \tag{24}$$

式中,K 是区域上所有地块的边组成的集合,包括区域边界上的边(如图 5 中的 a 和 e)和区域内部的边(如 b, c 和 d)。k 是边的编号, K' 是区域边界上边的集合, $K'\subset K$ 。Y_k和 Z_k都是二元变量,当边 k 是区域内部边也是保护区边界上的边时(如 b),$Y_k=1$,否则 $Y_k=0$(如 c 和 d),当边 k 是区域边界上的边并且属于保护区(如 e)时,$Z_k=1$,否则 $Z_k=0$(如 a).

式(24)是保护区边界总和,由两部分组成,一部分是区域内部边同时是保护区边界,另一部分是区域边界上的边同时也是保护区边界,Y_k和 Z_k取值由模型中的约束条件给出。目标函数最小化使保护区具有最小的边界。

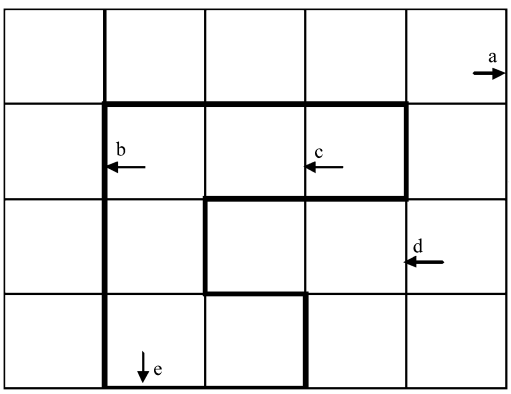

图 5　边界和由 6 个地块组成的保护区

Fig. 5　Boundaries and a reserve consisting of 6 selected sites

方法 4

Fischer 和 Church 建立了另一个模型对保护区边界最小化,确立一个集约的保护区[39]:

$$\text{Min}\sum_{i\in I} b_i U_i - \sum_{(i,j)\in B} 2s_{ij}X_{ij} \tag{25}$$

式中,b_i是地块 i 的边界长度,s_{ij}是地块 i 与地块 j 公共边界长度,U_i和 X_{ij}都是二元变量,定义如前。B 是相邻(即有公共边)地块的集合。一个保护区的边界是其中所有地块的边界之和减去两倍公共边界之和,该目标函数表达了这个关系。他们用该模型为美国加利福

尼亚州 Sierra Nevada 地区的植物群落选择边界最小的保护区。

2.4 其它空间特征

2.4.1 保护区面积

保护区面积在模型中一般作为目标函数或者约束条件。作为目标函数时,对保护区面积最小化以减少费用,或者在预算限制的条件下对面积最大化以保护更多的物种:

$$\text{Min or Max} \sum_{i \in I} a_i U_i \tag{26}$$

对面积作为约束条件的情形,选择的保护区面积不超过给定的值:

$$\sum_{i \in I} a_i U_i \leqslant A \tag{27}$$

式中, a_i 是地块 i 的面积,A 是给定的面积限值。

2.4.2 核心区和缓冲区

核心区是必须完全保护的关键区域,缓冲区与核心区相连,在核心区外围起缓冲外界影响的作用。文献中也有设计核心区和缓冲区的方法[40-41]。如果一个地块被选择为核心区的一部分,则它周围与其相连的所有地块必须都被选择把该地块包围起来。这用下面的约束条件实现:

$$\sum_{i} y_i \geqslant p \tag{28}$$

$$y_i \leq x_j \quad j \in B_i \tag{29}$$

式中,i 和 j 分别是关键地块和备选地块的编号,其中关键地块形成核心区,备选地块形成缓冲区。y_i 是二元变量,如果关键地块 i 被选中在核心区内, $y_i = 1$,否则 $y_i = 0$。p 是指定参数,式(28)是说至少应选择 p 个关键地块组成核心区。x_j 是二元变量,如果备选地块 j 被选中,则 $x_j = 1$,否则 $x_j = 0$。B_i 是关键地块 i 周围所有与其相连的备选地块集合。(29)是说,如果选择关键地块 i($y_i = 1$),则其周围所有与其相连的备选地块都必须选择($x_j = 1$),在 i 外围形成缓冲区。

上面介绍的模型都结合了保护区空间特征,从方法上提高了把物种对空间特征的需求结合进地块选择过程的能力,使理论研究与实际需要更接近。更重要的是,它们获得的解是最优的,这对于指导稀缺资源最优化分配非常重要,这恐怕也是最优化方法相对于启发式算法最大的优势。实际应用数据和假设数据均证明了这些模型的可行性。一些模型可以结合使用,比如连续模型与间隔模型结合使用,可以为被保护物种当中那些需要连续保护区的(如哺乳动物)确定连续的保护区,同时为那些只需间隔最小保护区的(如鸟类)确定间隔最小的保护区。一些模型还不能完美地解决现实问题,如最小间隔模型(2.2.1)对间隔总和最小化,没有考虑各间隔的相对位置,这使得间隔分散的情形等同于间隔总和相等但相互连接的情形,而这两种情形对物种生存的影响显然不同。

这些模型另外一个共同点是都定义二元变量,有的定义了大量的二元变量,这导致如下所述的计算效率问题。

3 模型的计算效率

结合了空间特征的地块选择模型在用最优化算法求解时容易遇到计算困难。例如,Önal 和 Briers 求解连续保护区和间隔最小保护区问题时,备选地块是 391 个,就遇到了严重的计算困难,软件运行两小时仍不能获得解。他们不得不分两步进行,先把相邻的 4 个备选地块整合成 1 个,减少备选地块的数量,对整合后的地块运用最优化模型求得初步解,然后对初步解中包含的地块再次运用最优化模型求得最优解。整合后地块减至 115 个,对于连续问题计算上仍有困难但可求得解,对于间隔最小问题仍然不可求解(即计算机在合理时间内没有求得解),他们不得不对模型中的变量进行限定以减少变量数量,并通过目视删除那些不太可能选择的地块使问题可解[28]。Fischer 和 Church 通过边界最小化确定集约的保护区,模型中包含 663 个备选地块,软件运行 99h 才获得解[39]。Williams 用原图和对偶图法规划一片连续的土地,包含 144 个备选地块,也遇到了计算困难[30]。

整数规划模型的计算效率主要受模型中的变量特别是二元变量数量的影响。上面的模型中,每个地块都定义为二元变量,连接地块的弧线也定义为二元变量,导致模型包含大量二元变量。尽管实际计算时可放宽对一些二元变量的限制,如只定义地块选择变量(U_i)为二元变量,其它变量为非负变量(如连接地块的弧线X_{ij}),二元变量数量仍是这些模型计算效率不高的主要原因。另外,计算效率还受数据结构(如物种分布数据和备选地块相对位置)的影响,好的数据结构可能使软件在"分支定界(branch and bound)"过程中较早地发现最优解[27]。

总之,最优化模型目前仍存在计算效率不高的问题,备选地块数量较大时难以在合理时间内求得最优解。所以,提高模拟空间特征的能力和模型的计算效率仍是保护区地块选择领域需要努力探索的问题。

4　我国研究概况和面临的问题

国内学者在自然保护区设计方面开展了许多工作,既有理论探讨也有实例展示,也有学者把国外该领域的研究进展系统地介绍到国内,比如俞孔坚提出的"景观生态安全格局"可用于指导保护区设计[42],欧阳志云等人对我国大熊猫保护区的核心区和缓冲区等进行了分析[43],徐基良等人探讨了保护区面积确定方法[22],崔国发讨论了保护区设计领域应解决的一些问题[44]等。近来的研究体现了国内该领域的研究方向,包括生态连接度测度和评价[45];自然保护区网络设计[46];3S(GIS, RS, GPS)的应用[47-49]等。自然保护区管理有效性评价也是国内学者研究的一个方向。管理有效性评价是为了保证自然保护区的管理质量而进行的评价,即评估通过管理在多大程度上实现了保护价值和预期的保护目标[50]。在保护区有效性评价指标体系中,保护区设计是影响保护区管理有效性的重要指标,而地块选择是保护区设计中一个重要内容,地块最优化选择使选择更理性,显然能够提高保护区管理的有效性。

在地块选择方法上,国内用整数规划进行最优化选择的极少,徐海根等人为我国丹顶鹤设计自然保护区时用到整数规划[51],但在整数规划模型中结合空间特征的还没有见到,更没有关于模型计算效率的研究。

我国自然保护区设计面临的一个重要问题是数据问题。主要包括两方面,一是备选地块上目标物种情况,包括种类、密度、习性等,二是备选地块的费用和价值,即一个地块如果选择作为保护区的一部分,费用是多少,成为保护区又会产生多少价值。前者需要进行资源本底调查,后者除资源本底调查外,还要进行费用效益分析,尤以效益分析为复杂。一些国家通过实地调查或卫星图片或航空拍片已积累了大量数据,我国数据相对缺乏。所以,收集数据并提高数据质量,为我国自然保护区设计提供科学的数据支持是一个现实的、亟待解决的问题。

我国自然保护区已有 2500 多个,国家级的有 300 多个,其中用保护区设计的理论和方法经过科学计算的为数不多。由于经济快速发展形成的压力以及缺乏系统规划的思想,我国生态保护依然面临非常严峻的形势,如何设计科学合理的自然保护区依然是摆在研究者和决策者面前富有挑战性的课题。

5　总结和讨论

相对于传统的 SCP 和 MCP 模型,结合了空间特征的最优化模型是自然保护区地块选择方法上的显著进步。这些模型更好地模拟了物种生存或人类活动的需求,它们的最优解在地块开发与保护日益冲突的今天对指导资源最优化分配也更有价值。最优化模型面临的困难是计算效率不够高。改进建模方法,提高运算效率,伴随计算机技术的进步,有望在不久的将来提高解决大型保护区地块选择问题的能力。

现有的结合空间特征的最优化模型都是"确定的",体现在两方面,一是假设物种在地块上的出现是确定的,即物种在某地块上或者出现或者不出现,而现实情况可能是物种有时出现有时不出现,是存在一个概率的,是不确定的;二是假设被选中的地块是一下子被全部选中,保护区是一下子确定下来,而现实中保护区可能随资金的可获得性逐步选择地块建立起来,是个动态过程,前一阶段没被选择的地块在下一阶段是否还可供选择存在不确定性。生态保护文献中已有对不确定性的研究,考虑了物种在地块上出现的概率,也有地块动态选择的研究,但这些研究都没有考虑保护区空间特征,而考虑空间特征的研究都没有考虑不确定性。所以,把空间特征与不确定性结合,研究在不确定情形下如何设计满足一定空间特征的保护区,也许将成为保护

区设计领域一个新的发展方向。

从方法上说,地块最优化选择方法无论在国外还是国内都适用,但由于国内外在社会经济等诸多方面有所不同,所以实践中的保护区地块选择可能也不一致。就这个问题进行论述需要深入调查和研究,这里就两点做浅要分析。首先,从社会经济方面看,国外在土地私有情况下,保护区所需地块由许多土地所有者根据市场价格以出售的形式提供。根据经济学上的外部性和公共物品理论可以推测,如果完全按照市场规律,自然保护区这种公共物品市场平衡数量(或面积)要比最优数量(面积)小,因为每个土地所有者提供公共物品的数量是不充分的,这时需要政府以补贴、财产权交易等方式干预。国内土地属国家所有,政府对土地有更大的支配权,可用征地、移民等形式获得所需要的土地,这单纯从保护区建设方面看是有利的,但是否在社会经济整体上有利需要深入研究。其次,价值取向似乎对保护区地块选择也有影响。例如许多国家对历史古迹的保护非常重视,适当情况下都会把历史古迹所在地纳入保护区网络,而国内做法就很不同,屡有历史古迹给开发建设让地的报道。原因可能除经济发展水平影响外,对历史古迹的价值认同也是一个重要的影响因素。总之,不同的社会经济、文化、价值取向等影响着地块最优化选择方法的实际运用。在这个意义上,自然保护区的最优化设计不单是生态学者的工作,还需要经济学家、社会学家、历史学家等的合作。

保护区空间特征和地块最优化选择方法不仅对指导自然保护区建设具有重要作用,还可用于其它领域如精准农业、森林管理、土地开发等,预计不久将见到地块选择方法在这些领域的应用和发展。

References:

[1] Toregas C, Swain R, ReVelle C, Bergman L. The location of emergency service facilities. Operations Research, 1971, 19(6): 1363-1373.

[2] Church R L, ReVelle C. The maximum covering location problem. Papers of the Regional Science Association, 1974, 32(1): 101-118.

[3] Underhill L G. Optimal and suboptimal reserve selection algorithms. Biological Conservation, 1994, 70(1): 85-87.

[4] Ando A, Camm J D, Polasky S, Solow A. Species distribution, land values and efficient conservation. Science, 1998, 279(5359): 2126-2128.

[5] Camm J D, Norman S K, Polasky S, Solow A R. Nature reserve site selection to maximize expected species covered. Operations Research, 2002, 50(6): 946-955.

[6] MacArthur R H, Wilson E O. An equibrium theory of insular zoogeography. Evolution, 1963, 17(4): 373-387.

[7] Li Y M, Li D M. Main principles and approaches of nature reserve design. Chinese Biodiversity, 1996, 4(1): 32-40.

[8] MacArthur R H, Wilson E O. The Theory of Island Biogeography. Princeton: Princeton University Press, 1967.

[9] Williams J C, ReVelle C S, Levin S A. Spatial attributes and reserve design models: a review. Environmental Modeling and Assessment, 2005, 10(3): 163-181.

[10] Simberloff D S, Abele L G. Island biogeography theory and conservation: strategy and limitations. Science, 1976, 193(4257): 1027-1029.

[11] SouléM E, Simberloff D. What do genetics and ecology tell us about the design of nature reserves? Biological Conservation, 1986, 35: 19-40.

[12] Simberloff D. The contribution of population and community biology to conservation science. Annual Review of Ecology and Systematics, 1988, 19: 473-511.

[13] Simberloff D, Farr J A, Cox J, Mehlman D W. Movement corridors: conservation bargains or poor investments? Conservation Biology, 1992, 6(4): 493-504.

[14] Bolger D T, Scott T A, Rotenberry J T. Use of corridor-like structures by bird and small mammal species. Biological Conservation, 2001, 102(2): 213-224.

[15] Kondo T, Nakagoshi N. Effect of forest structure and connectivity on bird distribution in a riparian landscape. Phytocoenologia, 2002, 32(4): 665-676.

[16] Haddad N M, Bowne D R, Cunningham A, Danielson B J, Levey D J, Sargent S, Spira T. Corridor Use by Diverse Taxa. Ecology, 2003, 84(3): 609-615.

[17] Shafer C L. Inter-reserve distance. Biological Conservation, 2001, 100(2): 215-227.

[18] Hanski I. Metapopulation dynamics. Nature, 1998, 396(6706): 41-49.

[19] Gibbs J P. Avian nest predation in tropical wet forest: an experimental study. Oikos, 1991, 60(2): 155-161.

[20] Qu C M, Han X G, Su B. Edge effects in fragmented forests: implications for design and management of natural reserves. Acta Ecologica Sinica, 2000, 20(1): 160-167.

[21] Possingham H, Ball I, Andelman S. Mathematical methods for identifying representative reserve networks // Ferson S, Burgman M, eds.

Quantitative Methods for Conservation Biology. New York: Springer-Verlag, 2000: 291-305.

[22] Xu J L, Cui G F, Li Z. Approaches for setting the minimum area of nature reserve. Journal of Beijing Forestry University, 2006, 28(5): 129-132.

[23] Hof J, Flather C H. Accounting for connectivity and spatial correlation in the optimal placement of wildlife habitat. Ecological Modelling, 1996, 88(1/3): 143-155.

[24] Nalle D J, Arthur J L, Sessions J. Designing compact and contiguous reserve networks with a hybrid heuristic algorithm. Forest Science, 2002, 48(1): 59-68.

[25] McDonnell M D, Possingham H P, Ball I R, Cousins E A. Mathematical methods for spatially cohesive reserve design. Environmental Modeling and Assessment, 2002, 7(2): 107-114.

[26] Williams J C, ReVelle C S, Bain D J. A decision model for selecting protected habitat areas within migratory flyways. Socio-Economic Planning Sciences, 2003, 37(4): 239-268.

[27] Önal H. First-best, second-best, and heuristic solutions in conservation reserve selection. Biological Conservation, 2003, 115(1): 55-62.

[28] Önal H, Briers R. Designing a conservation reserve network with minimal fragmentation: a linear Integer programming approach. Environmental Modeling and Assessment 2005, 10(3): 193-202.

[29] Önal H, Briers R A. Optimum selection of a connected conservation reserve network. Operations Research, 2006, 54(2): 379-388.

[30] Williams J C. A zero-one programming model for contiguous land acquisition. Geographical Analysis, 2002, 34(4): 330-349.

[31] Dantzig G B, Fulkerson D R, Johnson S. Solution of a large-scale traveling-salesman problem. Journal of the Operations Research Society of America 1954, 2(4): 393-410.

[32] Önal H, Wang Y C. A graph theory approach for designing conservation reserve networks with minimal fragmentation. Networks, 2008, 52(1): 142-152.

[33] Williams J C. Optimal reserve site selection with distance requirements. Computers and Operations Research, 2008, 35(2): 488-498.

[34] Malcolm S A, ReVelle C. Rebuilding migratory flyways using directed conditional covering. Environmental Modeling and Assessment, 2002, 7(2): 129-138.

[35] Ruliffson J A, Haight R G, Gobster P H, Homans F R. Metropolitan natural area protection to maximize public access and species representation. Entrronmental Sctence and Poilcy, 2003, 6: 291-299.

[36] Önal H, Briers R A. Incorporating spatial criteria in optimum reserve network selection. Proceedings of the Royal Society of London B, 2002, 269(1508): 2437-2441.

[37] Önal H, Briers R A. Selection of a minimum boundary reserve network using integer programming. Proceedings of the Royal Society of London B, 2003, 270: 1487-1491.

[38] Rothley K D. Designing bioreserve networks to satisfy multiple, conflicting demands. Ecological Applications, 1999, 9(3): 741-750.

[39] Fischer D T, Church R L. Clustering and compactness in reserve site selection: an extension of the biodiversity management area selection model. Forest Science, 2003, 49(4): 555-565.

[40] Williams J C, ReVelle C S. Reserve assemblage of critical areas: a zero-one programming approach. European Journal of Operational Research, 1998, 104(3): 497-509.

[41] Clemens M A, ReVelle C S, Williams J C. Reserve design for species preservation. European Journal of Operational Research, 1999, 112(2): 273-283.

[42] Yu K J. Landscape ecological security patterns in biological conservation. Acta Ecologica Sinica, 1999, 19(1): 8-15.

[43] Ouyang Z Y, Xiao Y, Wang X K. Geographic Information System and Nature Conservation Reserve Planning and Management. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.

[44] Cui G F. Special research fields and hot spots in science of nature reserves. Journal of Beijing Forestry University, 2004, 26(6): 102-105.

[45] Fu W, Liu S L, Cui B S, Zhang Z L. A review on ecological connectivity in landscape ecology. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(11): 6174-6182.

[46] Xu H G, Bao H S. On the methods of ecological security design for nature reserves. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(7): 1266-1270.

[47] Liu H B. Application study of the 3s technologies in the nature reserve. Journal of Shanxi Normal University(Natural Science Edition), 2007, 21(2): 100-104.

[48] Wang L Y, Kan A K, Wang X B, Gong J H. Research on ecological geographical information system for nature reserve. Science of Surveying and Mapping, 2009, 34(5): 176-177, 225-225.

[49] Lin L, Feng L M, Zhao J W, Guo X M, Dao J H, Zhang L. A preliminary study on designing ecological corridors in Xishuangbanna national nature

reserve with 3s techniques. Journal of Beijing Normal University: Natural Science, 2006, 42(4): 405-409.

[50] Quan J, Ouyang Z Y, Xu W H, Miao H. Comparison and applications of methodologies for management effectiveness assessment of protected areas. Biodiversity Science, 2010, 18(1): 90-99.

[51] Xu H G, Wang L L, Bao H S. Designing of nature reserve network — a case study of the red-crowned crane nature reserve. Rural Eco-Environment, 2003, 19(4): 5-9.

参考文献:

[7] 李义明, 李典谟. 自然保护区设计的主要原理和方法. 生物多样性, 1996, 4(1): 32-40.

[20] 渠春梅, 韩兴国, 苏波. 片断化森林的边缘效应与自然保护区的设计管理. 生态学报, 2000, 20(1): 160-167.

[22] 徐基良, 崔国发, 李忠. 自然保护区面积确定方法探讨. 北京林业大学学报, 2006, 28(5): 129-132.

[42] 俞孔坚. 生物保护的景观生态安全格局. 生态学报, 1999, 19(1): 8-15.

[43] 欧阳志云, 肖燚, 王效科. 地理信息系统与自然保护区规划和管理. 北京: 化学工业出版社, 2005.

[44] 崔国发. 自然保护区学当前应该解决的几个科学问题. 北京林业大学学报, 2004, 26(6): 102-105.

[45] 富伟, 刘世梁, 崔保山, 张兆苓. 景观生态学中生态连接度研究进展. 生态学报, 2009, 29(11): 6174-6182.

[46] 徐海根, 包浩生. 自然保护区生态安全设计的方法研究. 应用生态学报, 2004, 15(7): 1266-1270.

[47] 刘红兵. 3s 技术在自然保护区的应用研究——以山西省五鹿山为例. 山西师范大学学报(自然科学版), 2007, 21(2): 100-104.

[48] 汪刘艳, 阚瑗珂, 王绪本, 龚建辉. 自然保护区生态地理信息系统开发研究. 测绘科学, 2009, 34(5): 176-177, 225-225.

[49] 林柳, 冯利民, 赵建伟, 郭贤明, 刀剑红, 张立. 在西双版纳国家级自然保护区用3S 技术规划亚洲象生态走廊带初探. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2006, 42(4): 405-409.

[50] 权佳, 欧阳志云, 徐卫华, 苗鸿. 自然保护区管理有效性评价方法的比较与应用. 生物多样性, 2010, 18(1): 90-99.

[51] 徐海根, 王连龙, 包浩生. 我国丹顶鹤自然保护区网络设计. 农村生态环境, 2003, 19(4): 5-9.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 31, No. 14 July, 2011 (Semimonthly)

CONTENTS

The sensitivity of Xiamen's three industrial sectors to land use changes ····· HUANG Jing, CUI Shenghui, LI Fangyi, et al (3863)
Desertification and change of landscape pattern in the Source Region of Yellow River ····· HU Guangyin, DONG Zhibao, LU Junfeng, et al (3872)
Comparison of ecological significance of landscape diversity changes in karst mountains: a case study of 4 typical karst area in Guizhou Province ····· LUO Guangjie, LI Yangbing, WANG Shijie, et al (3882)
Analysis on urban heat island effect based on the dynamics of urban surface biophysical descriptors ····· XU Hanqiu (3890)
Primary exploration on the ecological land use classification in Beijing ····· TANG Xiumei, CHEN Baiming, LU Qingbin, et al (3902)
Changes of spectral reflectance of *Pinus koraiensis* and *Abies nephrolepis* along altitudinal gradients in Changbai Mountain ····· FAN Xiuhua, LIU Weiguo, LU Wenmin, et al (3910)
Biomass allocation patterns and allometric models of *Abies nephrolepis* Maxim ····· WANG Jinsong, ZHANG Chunyu, FAN Xiuhua, et al (3918)
Niche analysis of dominant species of macrobenthic community at a tidal flat of Yushan Island ····· JIAO Haifeng, SHI Huixiong, YOU Zhongjie, et al (3928)
The influence of different food qualities on the energy budget and digestive tract morphology of Tree Sparrows *passer montanus* ····· YANG Zhihong, SHAO Shuli (3937)
The response of ecosystem service values to ambient environment and its spatial scales in typical karst areas of northwest Guangxi, China ····· ZHANG Mingyang, WANG Kelin, LIU Huiyu, et al (3947)
Root morphology characteristics under alternate furrow irrigation ····· LI Caixia, SUN Jingsheng, ZHOU Xinguo, et al (3956)
Allelopathy of the root exudates from different resistant eggplants to verticillium wilt (*Verticillium dahliae* Kleb.) ····· ZHOU Baoli, CHEN Zhixia, DU Liang, et al (3964)
Biological cycle and accumulation of lanthanum in the forage-mushroom-soil system ····· WENG Boqi, JIANG Zhaowei, WANG Yixiang, et al (3973)
Evaluation of soil loss and transportation load of adsorption N and P in Poyang Lake watershed ····· YU Jinxiang, ZHENG Bofu, LIU Yafei, et al (3980)
Effects of soil resource availabilities on vertical distribution and dynamics of fine roots in a *Caragana korshinskii* plantation ····· SHI Jianwei, WANG Mengben, CHEN Jianwen, et al (3990)
Effects of soil salinization on ammonia volatilization characteristics of urea and urea phosphate ····· LIANG Fei, TIAN Changyan (3999)
Distribution of marine bacteria and their environmental factors in Xiangshan Bay ····· YANG Jifang, WANG Haili, CHEN Fusheng, et al (4007)
Concentration of O_3 at the atmospheric surface affects the changes characters of antioxidant enzyme activities in *Triticum aestivum* ····· WU Fangfang, ZHENG Youfei, WU Rongjun, et al (4019)
Effects of inhibitor and safener on enzyme activity and phenanthrene metabolism in root of tall fescue ····· GONG Shuaishuai, HAN Jin, GAO Yanzheng, et al (4027)
Screening of highly-effective rhizobial strains on Alfalfa (*Medicago polymorpha*) in soil ····· LIU Xiaoyun, GUO Zhenguo, LI Qiaoxian, et al (4034)
Geochemical evolution processes of soil major elements in the forest-dominated Jinshui River Basin, the upper Hanjiang River ····· HE Wenming, ZHOU Jie, ZHANG Changsheng, et al (4042)
Integrating geographic features and weather data for methodology of rasterizing spring maize growth stages ····· LIU Qin, YAN Changrong, MEI Xurong, et al (4056)
A model for predicting flowering date and external quality of cut tulip in solar greenhouse ····· LI Gang, CHEN Yaru, DAI Jianfeng, et al (4062)
Moisture effect analysis of pumpkin and oil sunflower intercropping in semi-arid area of northwest Hebei Province ····· HUANG Wei, ZHANG Junhua, LI Wenhong, et al (4072)

Review and Monograph

Theoretical backgrounds and recent advances in avian molecular phylogeography ····· DONG Lu, ZHANG Yanyun (4082)
A review on spatial attributes of nature reserves and optimal site-selection methods ····· WANG Yicheng (4094)
Human activities are the principle cause of biotic homogenization ····· CHEN Guoqi, QIANG Sheng (4107)
Factors influencing the occurrence of *Ophiocordyceps sinensis* ····· ZHANG Guren, YU Junfeng, WU Guangguo, et al (4117)
Molecular detection of diversity of methanogens and methanotrophs in natural wetland soil ····· SHE Chenxing, TONG Chuan (4126)

Scientific Note

Soil quality assessment of continuous cropping cotton fields for different years in a typical oasis in the upper reaches of the Tarim River ····· GONG Lu, ZHANG Haifeng, LÜ Guanghui, et al (4136)
Dynamics of microbial biomass during litter decomposition in the alpine forest ····· ZHOU Xiaoqing, WU Fuzhong, YANG Wanqin, et al (4144)
The aerodynamic roughness length of biologicalsoil crusts: a case study of Gurbantunggut Desert ····· WANG Xueqin, ZHANG Yuanming, ZHANG Weimin, et al (4153)
Differences among population quantities and community structures of pests and their natural enemies in tea gardens of different altitudes ····· KE Shengbing, DANG Fenghua, BI Shoudong, et al (4161)

2009 年度生物学科总被引频次和影响因子前 10 名期刊★

（源于 2010 年版 CSTPCD 数据库）

排序 Order	期刊 Journal	总被引频次 Total citation	排序 Order	期刊 Journal	影响因子 Impact factor
1	**生态学报**	**11764**	1	**生态学报**	**1.812**
2	应用生态学报	9430	2	植物生态学报	1.771
3	植物生态学报	4384	3	应用生态学报	1.733
4	西北植物学报	4177	4	生物多样性	1.553
5	生态学杂志	4048	5	生态学杂志	1.396
6	植物生理学通讯	3362	6	西北植物学报	0.986
7	JOURNAL OF INTEGRATIVE PLANT BIOLOGY	3327	7	兽类学报	0.894
8	MOLECULAR PLANT	1788	8	CELL RESEARCH	0.873
9	水生生物学报	1773	9	植物学报	0.841
10	遗传学报	1667	10	植物研究	0.809

★《生态学报》2009 年在核心版的 1964 种科技期刊排序中总被引频次 11764 次，**全国排名第 1**；影响因子 1.812，**全国排名第 14**；第 1—9 届连续 9 年入围中国百种杰出学术期刊；中国精品科技期刊

编辑部主任 孔红梅　　**执行编辑** 刘天星　段　靖

生　态　学　报
（SHENGTAI　XUEBAO）
（半月刊　1981 年 3 月创刊）
第 31 卷　第 14 期　（2011 年 7 月）

ACTA ECOLOGICA SINICA
（Semimonthly，Started in 1981）
Vol. 31　No. 14　2011

编　辑	《生态学报》编辑部 地址：北京海淀区双清路 18 号 邮政编码：100085 电话：（010）62941099 www. ecologica. cn shengtaixuebao@ rcees. ac. cn
主　编	冯宗炜
主　管	中国科学技术协会
主　办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址：北京海淀区双清路 18 号 邮政编码：100085
出　版	科学出版社 地址：北京东黄城根北街 16 号 邮政编码：100717
印　刷	北京北林印刷厂
发　行	科学出版社 地址：东黄城根北街 16 号 邮政编码：100717 电话：（010）64034563 E-mail：journal@ cspg. net
订　购	全国各地邮局
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址：北京 399 信箱 邮政编码：100044
广告经营许可证	京海工商广字第 8013 号

Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add：18，Shuangqing Street，Haidian，Beijing 100085，China Tel：（010）62941099 www. ecologica. cn Shengtaixuebao@ rcees. ac. cn
Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
Supervised by	China Association for Science and Technology
Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences，CAS Add：18，Shuangqing Street，Haidian，Beijing 100085，China
Published by	Science Press Add：16 Donghuangchenggen North Street， Beijing　100717，China
Printed by	Beijing Bei Lin Printing House， Beijing 100083，China
Distributed by	Science Press Add：16 Donghuangchenggen North Street，Beijing 100717，China Tel：（010）64034563 E-mail：journal@ cspg. net
Domestic	All Local Post Offices in China
Foreign	China International Book Trading Corporation Add：P. O. Box 399 Beijing 100044，China

ISSN 1000-0933　CN 11-2031/Q　　国内外公开发行　　国内邮发代号 82-7　　国外发行代号 M670　　定价 70.00 元