

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第33卷 第11期 Vol.33 No.11 **2013**

中国生态学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 33 卷 第 11 期 2013 年 6 月 (半月刊)

目 次

前沿理论与学科综述

- 新一代 Landsat 系列卫星: Landsat 8 遥感影像新增特征及其生态环境意义 徐涵秋, 唐 菲 (3249)
- 两种自然保护区设计方法——数学建模和计算机模拟 王宜成 (3258)
- 家域研究进展 张晋东, Vanessa HULL, 欧阳志云 (3269)
- 浅水湖泊生态系统稳态转换的阈值判定方法 李玉照, 刘 永, 赵 磊, 等 (3280)
- 辐射传输模型多尺度反演植被理化参数研究进展 肖艳芳, 周德民, 赵文吉 (3291)
- 微囊藻毒素对陆生植物的污染途径及累积研究进展 靳红梅, 常志州 (3298)

个体与基础生态

- 年龄、性别及季节因素对千岛湖岛屿社鼠最大活动距离的影响 叶 彬, 沈良良, 鲍毅新, 等 (3311)
- 寄主大小及寄生顺序对蝇蛹佣小蜂寄生策略的影响 詹月平, 周 敏, 贺 张, 等 (3318)
- 两种苹果砧木根系水力结构及其 PV 曲线水分参数对干旱胁迫的响应
..... 张林森, 张海亭, 胡景江, 等 (3324)
- 三种根系分泌脂肪酸对花生生长和土壤酶活性的影响 刘 苹, 赵海军, 仲子文, 等 (3332)

种群、群落和生态系统

- 象山港春季网采浮游植物的分布特征及其影响因素 江志兵, 朱旭宇, 高 瑜, 等 (3340)
- 洞头海域网采浮游植物的月际变化 朱旭宇, 黄 伟, 曾江宁, 等 (3351)
- 狗牙根与牛鞭草在三峡库区消落带水淹结束后的抗氧化酶活力 李兆佳, 熊高明, 邓龙强, 等 (3362)
- 三亚岩相潮间带底栖海藻群落结构及其季节变化 陈自强, 寿 鹿, 廖一波, 等 (3370)
- 长期围封对不同放牧强度下草地植物和 AM 真菌群落恢复的影响 周文萍, 向 丹, 胡亚军, 等 (3383)
- 北京松山自然保护区森林群落物种多样性及其神经网络预测 苏日古嘎, 张金屯, 王永霞 (3394)
- 藏北高寒草地生态补偿机制与方案 刘兴元, 龙瑞军 (3404)
- 辽东山区次生林生态系统不同林型树干茎流的理化性质 徐天乐, 朱教君, 于立忠, 等 (3415)
- 施氮对亚热带樟树林土壤呼吸的影响 郑 威, 闫文德, 王光军, 等 (3425)
- 人工高效经营雷竹林 CO₂ 通量估算及季节变化特征 陈云飞, 江 洪, 周国模, 等 (3434)
- 新疆典型荒漠区单食性天花吉丁虫磷元素含量对环境的响应 王 晶, 吕昭智, 宋 菁 (3445)
- 双斑长跗萤叶甲越冬卵在玉米田的空间分布型 张 聪, 葛 星, 赵 磊, 等 (3452)
- 舟山群岛四个养殖獐种群遗传多样性和遗传结构 林杰君, 鲍毅新, 刘 军, 等 (3460)

景观、区域和全球生态

- 乡镇尺度金塔绿洲时空格局变化 巩 杰, 谢余初, 孙 朋, 等 (3470)
- 合并与不合并: 两个相似性聚类分析方法比较 刘新涛, 刘晓光, 申 琪, 等 (3480)

资源与产业生态

基于投入产出表的中国水足迹走势分析 王艳阳,王会肖,张 昕 (3488)

基于 MRICES 模型的气候融资模拟分析 朱潜挺,吴 静,王 铮 (3499)

黄东海陆架区沉积物中磷的形态分布及生物可利用性..... 张小勇,杨 茜,孙 耀,等 (3509)

鄱阳湖采砂南移扩大影响范围——多源遥感的证据 崔丽娟,翟彦放,邬国锋 (3520)

温度、盐度及其互作效应对吉富罗非鱼血清 IGF-I 与生长的影响 强 俊,杨 弘,王 辉,等 (3526)

城乡与社会生态

福建省城镇-交通系统的景观分隔效应 张天海,罗 涛,邱全毅,等 (3536)

研究简报

青藏高原高寒草原区工程迹地面积对其恢复植物群落特征的影响 毛 亮,周 杰,郭正刚 (3547)

黄土山地苹果树树体不同方位液流速率分析..... 孟秦倩,王 健,张青峰,等 (3555)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 314 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 33 * 2013-06



封面图说: 清晨的天山马鹿群——家域是动物行为学和保护生物学的重要概念之一,它在动物对资源环境的适应与选择,种群密度及社会关系等生态学过程研究中有着重要的作用。马鹿属于北方森林草原型动物,在选择生境的各种要素中,隐蔽条件、水源和食物的丰富度是最重要的指标。野生天山马鹿是中国的特产亚种,主要分布在北天山深山海拔1500—3800m 地带的森林草原中,在高山至谷地之间不同高度的坡面上,马鹿按季节、昼夜变化的不同进行采食。

彩图及图说提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201203260407

王宜成. 两种自然保护区设计方法——数学建模和计算机模拟. 生态学报, 2013, 33(11): 3258-3268.

Wang Y C. Designing nature conservation reserves using mathematical modeling and computer simulation: a review. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(11): 3258-3268.

两种自然保护区设计方法 ——数学建模和计算机模拟

王宜成*

(青岛农业大学资源与环境学院, 青岛 266109)

摘要:传统的自然保护区设计方法是打分法和 Gap 分析法,这两种方法简单易行但可靠性不高;地理信息系统(GIS)在保护区设计领域的应用也为人熟悉。关注近年来快速发展而国内使用不多的两种方法——数学建模和计算机模拟。数学建模主要用来从一组备选地块中选择一部分组成自然保护区,包括线性和非线性模型,用启发式算法或最优化算法求解。启发式算法具有速度快、灵活等优点,但解通常不是最优的,不能保证稀缺资源的最优化利用。最优化算法运算效率低,变量较多比如数百时就可能遇到计算困难,但解是最优的。预计两种算法都将继续发展。计算机模拟主要用于保护区评价、功能区划分、预测特定环境比如空间特征和气候变化对物种的影响等,多用启发式算法,与其它软件结合把结果以图画显示出来。两种方法特别是计算机模拟均要求保护区设计者有较强的专业知识。讨论了两种方法面临的问题和新的研究方向,至少包括:1)基础数据依然需要完善;2)一些新的因素比如动态性和不确定性如何在模型中考虑并与其它因素结合;3)气候变化情景下模拟参数如何评估和调整;4)如何协调保护与发展的关系;5)方法的实际应用需要研究者与决策者之间建立交流机制;6)多领域专家和相关利益方应有机会参与保护区设计。

关键词:数学模型;最优化;启发式算法;线性整数规划;计算机模拟;区域规划

Designing nature conservation reserves using mathematical modeling and computer simulation: a review

WANG Yicheng*

College of Resources and Environment, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China

Abstract: Traditional methods for nature conservation reserve design include scoring and Gap analysis, which are simple and easy to use, but the results of these two methods lack reliability. Geographic Information System (GIS) is another widely used method in designing nature reserves nowadays. This paper focuses on two other methods which have been developed and gained popularity in the past two decades, but not used as widely in China. These two methods are mathematical modeling/programming and computer simulation. Mathematical modeling aims to select an optimal subset from a large set of potential sites to assemble a nature reserve which is expected to protect a set of targeted species while satisfying some specific biological and/or ecological constraints. The problem can be formulated as linear and nonlinear optimization models, and solution methods vary depending on the type of formulation. When formal optimization methods fail to solve these models, due to the model size or degree of nonlinearity, heuristics are employed instead of formal optimization. Heuristic methods are computationally convenient and flexible in finding multiple solutions, but the solutions can be significantly suboptimal; therefore this approach does not ensure an optimal allocation of scarce conservation resources.

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:2012-03-26; 修订日期:2012-08-20

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

Formal optimization, on the other hand, provides the best possible solution to the problem. However, solving a reserve selection problem to an exact optimum can be computationally challenging and modelers can easily encounter computation difficulties when the number of variables in the model is large. Computer simulation, the second method reviewed in this paper, is used mainly to evaluate a nature reserve in terms of its functionality, delineate functional areas, and predict the impact of specific circumstances such as spatial attributes or climate change on species' persistence. As the solution methods in computer simulation, generally heuristics are employed and the results are displayed in graphical form or even in animation by integrating the simulation software with other software. Results in such forms may look attractive but cautions should be taken in terms of model selection, parameter valuation, and interpretation of the results. Model validation is generally required in computer simulation and the results of a simulation process should be interpreted from a statistical perspective. Both methods, especially computer simulation, require and benefit from user's judgment, expertise, and especially ecological and biological knowledge. Using linear integer programming to guide optimal allocation of conservation resources is extremely important and valuable in China's nature reserve planning and design process, considering the conflict between conservation and development. In this review, relevant issues and potential new research directions are discussed, including: 1) original data needs to provide a basis on which these design methods can work; 2) some more challenging factors such as dynamics, uncertainty, and particularly spatial coherence of the reserve areas; 3) reevaluation and adjustment of model parameters under the projected climate change scenarios; 4) coordination issues of nature conservation and economic development; 5) communication mechanisms between scholars and decision-makers in applications of these design methods in real world reserve planning and design practices; and 6) participation of experts from multiple disciplines and other concerned parties in the reserve design process.

Key Words: mathematical modeling; optimization; heuristics; linear integer programming; computer simulation; regional planning

自然保护区是保护物种和生态系统的有效方式,如何设计^①一个自然保护区是学者和管理者都感兴趣的问题。传统的保护区设计方法也许要数打分法和 Gap 分析法。打分法根据一组指标对备选地块打分,选择得分较高的地块组成保护区;Gap 分析法识别保护的空白点,即应保护但没有保护的区域。这两种方法简单易行,但准确性和可靠性常受质疑,且难以满足更高的要求如空间特征和功能评估等^[1-3]。地理信息系统 (GIS) 以其良好的数据分析和显示功能在保护区设计领域有广泛和成熟的应用,比如确定保护区面积、功能区划分和评价、保护策略分析等^[4-7]。

数学建模和计算机模拟两种方法在保护区设计领域有 20 多年研究特别是近 10 年快速发展,但国内用计算机模拟的不多,用数学建模的更少。向国内同行系统地介绍这两种。本文讨论了两种方法的基本原理、研究进展、面临的问题和新的研究方向。

1 数学建模

数学建模是用数学模型解决自然保护区地块选择问题,即从一组备选地块中选择一部分组成自然保护区对一些物种或生境进行保护。两个基本的地块选择模型是物种的“集合覆盖问题 (SCP)”和“最大覆盖问题 (MCP)”。简单说,前者用最少的资源(指资金或土地)实现物种保护,后者用给定的资源保护尽可能多的物种。SCP 和 MCP 20 世纪 70 年代由 Toregas 和 Church 等人在运筹学文献中提出,用于解决设施定位(如消防站)问题,后来生态保护领域的学者引入保护区地块选择问题中^[8-12]。生物保护文献中两个基本的 SCP 和 MCP 模型可见文献^[13-14]。

① 本文不区分保护区“设计”与“规划”两个概念,介绍的方法可相似地用于保护区“规划”;用“设计”一词主要因为该领域很多文献都用这个词 (design), 这篇文章基于这些文献

最初的物种 SCP 和 MCP 模型提供了保护区设计特别是最优化设计的思想而不是实际可用的方法,因为这两个模型只考虑物种保护或资源限制条件而忽略了其它因素,导致被选中的地块通常分散在大范围彼此相距很远,这样的方案对指导保护区设计缺少实际意义,因为它不利于物种迁移和交流,管理和维护上也几乎不可行。现实中应当把其它因素比如空间特征结合到模型中。空间特征主要指保护区地块在空间上的相对位置,如连续、间隔、保护区边界等,这些特征结合到地块选择模型才更有现实指导意义^[14-16]。

结合了其它限制条件的保护区地块选择模型包括线性和非线性两种。线性和非线性由模型中变量的阶次决定。变量主要是地块选择变量,线性模型中方程式是变量的一次方程式即线性表达式,非线性模型是变量的二次或多次方程式即非线性表达式。主要介绍模型的两种解法:启发式算法和最优化算法。

1.1 启发式算法

启发式算法有多种,两个基本的是选择热点法和“贪婪迭代法”。选择热点法把备选地块按物种数量排序,从含物种最多的地块开始选择,直至所有物种都被保护或者保护资源用尽(以先发生的为准)^[17]。贪婪迭代法首先选定含物种最多的地块,然后对被保护物种进行整理,去掉那些已包含在第 1 个地块的物种,根据剩下的物种从其它备选地块中选择第 2 个地块,该地块含有最多的未保护物种,然后对物种再次整理,依此类推,直至所有物种都得到保护或资源用尽^[18]。最常用的启发式算法也许是模拟退火算法,该算法的基本程序是:指定或随机选择一组地块作为初始解,然后随机选择一个地块,如果该地块在已选择的一组中,从已选择的地块中去掉,否则加到已选择的地块中,这样得到第 2 个解,与初始解比较(是否满足限制条件,目标值相对初始解的大小),较好的那个取代原来的解成为初始解,依此类推,直至完成设定的迭代次数^[19-20]。应用非常广泛的一个保护区设计软件 Marxan 使用的主要算法就是模拟退火算法^[21]。其它启发式算法还有禁忌搜索、遗传算法等。

启发式算法的优点是灵活实用,可依据不同要求相应地制定选择程序,线性和非线性问题都能求解而且计算速度快,能方便地获得多个不同解供决策者选择。例如它可以根据连续的要求选择物种最多且与已选地块相连的地块^[22],其它空间特征如最小边界^[23]、空间距离^[24],以及非空间特征如物种稀有度^[25]、基因多样性^[26]、不确定性^[27-29]等也可结合进选择程序,大型的保护区地块选择问题(包含数千个地块)可在几分钟内求解。启发式算法也用来研究物种分布数据对保护区地块选择结果的影响^[30]。

但是启发式算法有个重大弱点,就是不能保证获得的解是最优的。Cocks 和 Baird 最早指出这个弱点^[31],后来其它学者也发现启发式算法多数情况下获得的是“近似最优解”,而且可能显著偏离最优解^[32]。显然用该法获得的解指导保护区设计可能导致土地、资金等稀缺资源的浪费,资源紧张或者发展与保护用地严重冲突时这个弱点尤其突出。

1.2 最优化算法

最优化算法,具体说是线性整数规划(LP/IP),把保护区设计问题看做有约束条件的目标优化问题,建立线性整数规划模型,用最优化软件求得最优解。Underhill 首先指出保护区地块选择问题可以表示成最优化问题并用最优化软件求解^[8]。最优解用于指导地块选择有助于稀缺资源最优化分配和有效利用,这可能是该方法吸引一些学者的主要原因。

传统的物种 SCP 和 MCP 模型中结合进空间特征曾经被认为是非常困难的,曾有学者认为模拟保护区空间特征需要非线性模型而这类模型难以求解^[33]。后来有学者借助图论和网络流理论成功建立了线性 IP 模型,近年来以 Önal 为代表的学者在这方面取得很大进步,分别在传统 SCP 和 MCP 中结合了空间特征如集约^[34]、边界最小^[35]、连续^[36-37]、间隔最小^[38-39]等。一些空间特征的组合也有可能在一个 LP 模型中实现。这证明了用线性 IP 模型模拟保护区一些空间特征是可行的。线性 IP 模型也用来研究对物种实现不同程度保护的问题^[40],另外还可模拟动态(选择是在一段时间而非某一时刻完成)或不确定(例如物种在地块上的出现概率不是 100%)的情形^[41-42]。

尽管用 IP 模拟上述特征可以实现,但这些模型基本上都存在计算困难,备选地块较多时要花费大量时间

才能求得最优解甚至无法求解。主要原因是模型定义了大量二元变量。例如 Önal 和 Briers 的模型含有 391 个备选地块,二元变量多达 32000 个,计算机运行两小时仍不能获得解^[38]。其他研究也遇到了同样的计算问题^[43]。现实中的保护区地块选择问题可包括数千或更多个备选地块,现在的 IP 模型对这样的大型问题仍不能在合理时间内求解。

线性 IP 模型容易遇到计算困难主要是因为软件用分支定界法求取最优解。用一个例子简要说明该方法的基本程序。假设备选地块是 100 个,每个都定义为二元变量(0 或 1)。软件求解时先规定变量 1 取值为 0 (也可 1),这样的取值称为“节点”,其它 99 个变量放宽限制,定义为连续的非负变量,求解(通常用单纯形法);如果解中这 99 个变量也取值为整数(分别是 0 或 1),则获得了一个整数解;如果不是,规定变量 2 也取值为 0,重复上面所述,如果获得另一个整数解,则与前一个整数解比较,较好的那一个暂时成为问题的解,如果其它 99 个变量有的取值不是整数,再规定变量 3 也取值为 0,依此类推,逐渐增加整数变量的数量,在此过程中逐步更新问题的解。可以看出,此过程要计算大量节点,在上面这个最简单的二元变量情形下,备选地块是 100 个时可能要计算的节点为 $2(2^{100}-1)$ 个。如果在一个节点上获得的解比现有的解差,则其下面的分支不再计算,尽管如此仍需要大量时间计算其它节点。有时可能很早就发现一个解甚至是最优解但证明这个解是最优的要花费大量时间。总之,这类线性整数规划问题属于 NP-hard 问题^[44],求取最优解通常需要大量计算和时间。

1.3 启发式与最优化之争

启发式与最优化孰优孰劣的问题其实上面已提到。启发式算法尽管获得的是近似最优解,但它处理其它要求具有灵活性,可解决大型问题,能方便地获得多个解供选择。最优化算法的引人之处在于最优解保证资源最优分配,但计算上的困难是其广泛应用的瓶颈。最优化算法也能产生多个解(如果存在),方法是:在已获得的最优解中令某一个取值为 1 的地块(即被选中的地块)取值为 0(即规定此地块不能选择),重新求解,如果存在另一个最优解,软件会在二次求解时发现它。重复该方法可获得多个不同的解。这个过程在一些计算机软件中可自动实现(比如 GAMS, General Algebraic Modeling System)^[45]。也可对程序进行设置,获得符合要求的近似最优解便停止运行,这种近似最优解一般要优于启发式算法的解。

空间特征、物种多样性、不确定性等限制因素结合到模型中以后,启发式算法用得较多,启发式有的没有建立数学模型,而是设置一套程序用于地块选择,有的建立了数学模型用启发式算法求解。预计启发式算法仍将是求解保护区地块选择问题的主要算法。线性整数规划模型及其最优化算法近年来进展很快,高速计算机技术实现了一些中小型问题的求解,但众所周知,即使现在最快的计算机求解大型的这类问题也需要上千上万年甚至更长时间。提高计算效率的有效途径不是计算速度的提高,而是模型和算法的改进,有效的算法可大幅缩短计算时间。另外由于经济发展等诸多原因,资源稀缺性日益突出,人们迫切需要以最有效的方式配置稀缺资源,这令最优化方法的现实意义更加突出。基于这两点,预计最优化算法将得到越来越多关注和发展。通常设计一个自然保护区需要耗费时间和资金,这是合理的,所以只要能获得最优解,花费几天甚至更长一点时间,相比在几分钟或几小时内获得非最优解,是更明智的选择。但地块最优化选择在图论中属于 NP-hard 问题,比如上面提到的分支定界法的计算复杂度 $n^2 2^n$ 级,就作者所知,这类问题还没有有效算法,甚至认为有效算法不存在,大型问题不可能在合理时间内求得最优解,所以保护区设计领域的最优化算法可能面临着艰难探索。

2 计算机模拟

计算机模拟是用计算机对一个系统或过程建立模型,用该模型进行试验,以理解该系统的行为或对该系统的各种方法进行评估。它始于 20 世纪五六十年代,以系统分析和运筹学为基础^[46]。模拟对象和用途均非常广泛,从简单到复杂,一个变量到多个变量,在交通、经济、医疗、社会科学、城市管理等方面均有应用。生态保护方面也发展了很多模型和方法,主要用于生态系统发育、物种分布、保护区空间特征、保护区功能等问题的模拟、分析和预测。

2.1 模型及其局限性

森林生长模型(比如 SORTIE)可模拟多达几十万棵树木的生长,体现系统中的异质性和随机性^[47],这为预测一个森林生态系统的发育和保护区的建立提供信息支持。集合种群模型用来检验廊道的作用和影响,研究分别在什么情况下廊道促进物种存活或导致物种灭绝^[48],为保护区设计中的廊道设计提供科学依据。Cumming 用模拟方法研究了不同栖息地形状对物种入侵速率的影响,发现物种入侵和扩散受栖息地形状影响显著^[49],结果可用来指导保护区形状设计应对物种入侵;Soares-Filho 等人模拟了亚马逊河流域在不同情景下到 2050 年的森林破坏、哺乳类物种损失和二氧化碳排放情况^[50]。他们使用的都是元胞自动机模型。另外,物种分布模型对物种分布进行绘图和监测,预测和评估环境变化(如气候变化)对物种的影响,确定易被入侵地区、预测疾病传播途径、识别可能的保护区等^[51]。

在国内,任文华等人用 Vortex 模型进行大熊猫种群生存力分析(PVA),预测在各种情况下一个自然保护区内大熊猫数量 100a 内的变化趋势,提出保护好廊道便于大熊猫迁移和繁殖等建议^[52]。李月臣用 BPNN-CA 模型结合遥感技术模拟草原保护区设计,兼顾草场适宜性和空间特征,针对不同的规划要求模拟相应的保护区格局^[53]。陈作志等人用生态空间模型模拟北部湾在不同管理策略下的生物量和渔获量,为当地海洋保护区的建立提供信息支持^[54]。梁犁丽和王芳用 SWAT 模型模拟鄂尔多斯遗鸥保护区的集水区生态水文过程,分析了湿地缺水的主要原因,量化提出植被建设、湿地保护和经济发展的规模,可辅助当地保护区设计和管理决策^[55]。另外,陈逸敏等人研究了城市扩张情形下农业保护区规划问题,他们用两个模型(AgentLA 和 GeoSOS)分别模拟农田保护区和城市扩张,用 GIS 空间分析方法识别两者相冲突的区域^[56],该方法可相似地用于自然保护区与经济活动区相冲突问题的研究。

很明显,计算机模拟都以模型为基础,包括数学模型、随机模型、统计模型、神经网络模型(ANN)等。这些模型以非线性居多,内置于模拟软件中,算法主要是启发式。有一点值得指出,“模拟”内含的一个重要概念是不确定性,因为模型是对现实世界的简化,基于模型的计算机模拟由于信息的不完善当然在描述现实世界时增加了不确定性。计算机模拟作为一种保护区设计方法,用来检验一种情形或一个假设,空间和时间上多是大尺度的(比如整个流域,100a),通常要经过反复多次计算,给出的是统计学意义上的结果和解释。总之,计算机模拟对拟建区域进行评估和预测,结合面积、空间特征、功能区布置等确定多个或最佳设计方案,特别是高速和功能强大的计算机技术使得模拟复杂和动态的生态系统成为可能,使模拟技术在保护区设计领域具有越来越重要的作用。

计算机模拟在一定意义上是把“双刃剑”,一方面是它的局限性,另一方面是它的优越性。局限性主要有两点。第一,该技术的应用除要求计算机具备足够的处理能力和计算速度外,还需要生物学和生态学等知识为模型提供理论框架,包括物种在特定环境中的行为、物种之间的互动关系、生态系统达到平衡的条件等,而这些知识通常情况下都没有准确把握,生态学模型中参数的生物学或生态学意义常常不够明确,导致它们为模拟提供的理论支持显得有些薄弱。第二,模型、假设和数据问题。模型和参数的选择对模拟结果有显著影响,理想情况下应根据地理和气候条件、保护目标、物种特点等进行选择和分析^[57-58],而这些信息往往不完整或不确定;所作的假设如果与具体情形不符可能导致模拟结果严重偏离实际;由于数据可获得性限制,模拟使用的数据数量有限,质量也常受质疑,这导致模型参数常常难以准确赋值。它的优越性体现在:模拟技术可看作上面这些问题的应对措施,比如模拟过程常运用线性回归和其它预测手段从有限的数据获得更多信息,还有多次计算提供统计学意义上的结果以应对不确定性,这些都是努力寻求对被模拟系统进行量化的、尽量准确的表达。

2.2 模拟结果的验证

计算机模拟通常结合绘图软件把结果以图画甚至动画的形式显示出来,这样的结果看似漂亮,但由于上面的局限性导致一个重要问题:模拟结果在多大程度上是可信的?一次模拟显然难以让人信服。这是计算机模拟的验证问题。解决这个问题的传统方法是用实际数据进行验证,即模拟结果与实际数据对比来验证模拟结果的准确性^[59],但在保护区设计领域该方法不适用,因为保护区建立以后再验证就没有意义了,而且由于

大范围的空间和时间尺度使得获取实际数据难以实现。在计算机模拟中,结果的验证常用灵敏度分析、不确定性分析、结构分析等^[60-61],主要手段是多次模拟。灵敏度分析是改变参数设置,检验多个不同取值对模拟结果的影响,哪些信息丢失,哪些误差被放大或缩小等。不确定性分析是进行 Monte Carlo 试验,多次模拟比如 1000 次或更多,设置一个置信区间,模拟结果以一个预先指定的概率(比如 95%)出现在这个置信区间。其实可信度这个问题前面所述的数学建模方法也存在,数学模型的解列出一组选中的地块,这些地块组成保护区,这样的解看上去是确定的,其实也有一些内在的数据问题比如不完整或不确定,所以对于数学模型的解也应审慎对待。

3 选用数学建模还是计算机模拟?

数学建模主要用于保护区地块选择,针对地块单元操作,而计算机模拟主要用于保护区和生态系统功能的评价和预测,对象是较大范围的地域。实际中可视具体情形选用。下面从 3 个角度进一步探讨两种方法的特点和适用条件。

(1)从数据的角度 相对来说,数学建模对数据的要求低一些,主要是各备选地块上的物种分布、生境适宜性、选择费用、各地块的空间关系等,基本上有了这些数据就可运行模型选择地块。计算机模拟除了这些数据,因为涉及生态学或生物学模型,通常还要输入其它参数比如死亡率和迁移率。确定参数要求相对完备的数据才能完成,通常根据经验数据或查阅数据库获得,数据缺失时则需要用估计方法比如线性回归进行估计。

(2)从设计者的角度 数学建模尽管建模和计算有困难,但利用已有模型就相对容易,比如已有的考虑了空间特征的各种模型,它们的程序语言可方便地用于不同软件,必要时略作修改,相应增加或减少限制条件。一个标准的程序用不同的求解器都可读取和运算。计算机模拟可能更难一些,因为应当视具体情形(比如地理和气候)对模型和算法进行选择,对参数进行赋值,这些在计算机模拟中也许是最重要也最困难的工作。模型的应用条件和局限,参数的赋值方法,这些问题都没有足够研究和适当答案,这可能导致模拟软件使用者与其他许多软件使用者一样的问题,就是可以操作但并不清楚其内部机制。所以可以说,计算机模拟对设计者提出了更高要求,不但要掌握相关生态学知识,还要熟悉所使用的模型和参数,否则模拟结果可能真的是好看却无用的卡通画。

(3)从有效性的角度 数学建模和计算机模拟哪种更有效,也就是设计出的保护区能更好地实现保护功能,作者没有发现文献中对这个问题的研究。作为方法,数学建模和计算机模拟都能够基于已有数据和信息,勾勒出保护区轮廓或对保护区功能进行预测和评价,在这个意义上它们都是有效的。但设计方法只是保护区有效性评价指标体系中的一个指标,还有许多其它指标参与保护区有效性评价。比较两种方法的有效性,途径很可能只能是理论分析而不是实际验证,因为设计方法在学术文献中研究得多而实践应用很少。保护区有效性问题这里不再讨论,可参阅其它文献^[62-63]。

总之,关注这两种方法,重点是理解它们的特点和问题以便相互补充和辅助。数学模型求解软件也可以进行灵敏度分析,现在一些软件也与其它软件结合把结果以图画形式显示出来,这在一定程度上使两种方法的区分不再重要。可以确定的是,两种方法都将继续得到研究和发展,并且从彼此的发展中获益,这将为保护区设计者提供更好的工具,使设计的自然保护区更科学合理。

4 讨论

本文综述了数学建模和计算机模拟这两种自然保护区设计方法的基本原理和研究进展。下面简要讨论两种方法在应用方面的几个问题。

(1)数据问题

数据也许是数学建模和计算机模拟最重要的基础。数据质量更高时结果具有更高的可信度,为决策提供更有力的信息支持。数据主要包括备选地块上目标物种情况(种类、密度、对生境的要求等)、地块选择费用和价值(即一个地块如果选择作为保护区的一部分,费用是多少,成为保护区会产生多少价值)、周边社会经济发展情况等。数据可能存在许多问题,如不完整和太旧,即使最新数据可靠性往往也值得怀疑。所以提高

数据质量和处理数据中可能存在的不确定性是保护区设计领域面临的一个重要问题。我国近年来在生物多样性监测方面取得了显著成就,特别在森林生物多样性方面积累了丰富数据^[64],但与发达国家获取数据的多途径以及数据完善程度相比仍有很大差距。我国是世界上生物多样性最丰富的国家之一,获取和整理生物多样性数据、提高数据质量是一个重要任务。

(2) 动态与不确定性

物种保护领域的不确定性几乎来自各个方面以及它们的组合,如物种分布、栖息地质量、外来干扰等均存在不确定性^[65]。需要一个在不确定情形下进行决策的机制。现有的保护区设计模型多假设物种在地块上的存在是确定的,即或者存在或者不存在,而实际情况可能是不确定,存在一个概率(比如鸟类等迁移能力强的物种)。已有研究把不确定性结合到数学模型和计算机模拟中^[66-67]。有的结合了不确定性但没有对保护区其它属性比如空间特征最优化,而考虑了空间特征最优化的模型没有考虑不确定性,把两者结合可能成为一个新的研究方向。也有研究考虑了地块选择的动态性,即地块选择不是在某个时刻完成,而是在多个阶段逐步选择地块建立起保护区,但这些研究也没有考虑空间特征,所以结合空间特征的地块动态选择可能成为另一个研究方向。国内近年来保护区设计领域在多个方面都有研究,例如保护区网络设计^[1]、保护区面积的确定^[68-69]、生境适宜性评价和承载力分析^[70-71]、生态连接度测量和评价^[72]、保护区管理及其有效性评价^[73-74]等。用线性整数规划进行地块选择的很少,徐海根等人为我国丹顶鹤设计保护区时用到整数规划^[75],近来有人开始在整数规划模型中结合空间特征并讨论了模型的计算效率问题^[76-77]。用整数规划进行保护区地块最优化选择可能成为国内学者另一个新的研究方向。

(3) 气候变化与物种保护

全球气候变化在过去 30 多年已导致全球动植物物种的分布和丰度发生了显著变化^[78],不同气候变化情景下物种均面临严重的灭绝风险^[79]。现有保护策略需要调整,现有保护区将不再具有很好的代表性因而也需要调整^[80-81]。一个值得思考的问题是:为应对气候变化现有的保护策略应如何调整?广泛推荐的策略之一是提高保护区“连续性”^[82-83],即组成保护区的各个部分在空间或功能上连续,便于物种迁移和基因交流,也有研究认为连续性的作用被高估^[84-85]。但无论如何,气候变化背景下的保护策略以及现有保护区的调整给保护区设计方法提出新挑战,这里讨论的数学模型和计算机模拟可能需要把大尺度空间乃至全球作为研究范围,这至少将导致如下问题:变量增加使得数学模型和计算机模拟都面临计算上的困难;增加的和未知的不确定性需要在模型中予以考虑;模型参数需要重新评估和调整;保护区一些重要属性比如空间特征在大尺度空间内可能需要重新定义等。

(4) 保护与发展

自然保护区设计,除了物种保护因素还受其它如经济、社会甚至政治因素影响,这些都可在设计方法中以某种方式(隐含地或明确地)考虑。例如 LP 模型的目标函数通常是保护区面积或总费用最小^[14],模拟不同程度的经济活动对保护区可能造成的影响^[50],考虑保护区对于居民的可到达性^[86],兼顾保护与渔业的保护区设计^[87-88]等。就我国情况看,目前各类自然保护区总面积达 149 万 hm^2 , 占国土面积近 15%, 如此高的比例在经济快速发展形式下可能导致保护与发展冲突。经济因素在我国保护区规划实践中通常占有重要甚至决定性地位,所以更有必要在方法研究中适当考虑经济和社会因素,进行保护与发展的权衡分析,在保护区规划和调整中合理配置资源,促进保护与经济协调发展。

(5) 研究与应用

生物多样性迅速消失,人们紧急建立保护区进行物种保护,没有充分运用相关理论和方法,所以保护区设计方法在实践中没有很好运用^[89-90]。这种情形国内同样。在中国知网上以“自然保护区”为题名(时间 1979—2012)可查到期刊论文和学位论文共 1 万多篇,从中选了 5 份一级学报共 278 篇文章^①,没有发现一篇

① 期刊和文章题目清单可向作者索取。

介绍我国现有保护区的实际设计过程,也就是说,保护区设计方法在实际中是如何应用的并不清楚。乐观的估计是,规划设计保护区时运用了有关理论和方法,只是文献中没有报道,比如有人 20 世纪 80 年代初提出北京地区的自然保护区规划建议^[91],有的现已成为保护区。但应该可以说,方法的实际应用与研究有很大差距。为促进研究成果更好地在实践中应用,可能需要学者与决策者之间建立一种交流机制,决策者知道有这些方法可以辅助保护区规划和设计决策,学者了解决策者的需要,调整模型使之更符合设计实际。

(6)多领域合作

自然保护区设计是一项非常复杂的工作,方法上涉及数学、运筹学、计算机技术等,理论上也有生态学、景观学、图论等多学科理论。设计过程不仅要考虑生态因素,还要考虑地理、社会、经济甚至历史文化等因素,不但要站在当地立场解决问题,还要有区域甚至全球眼光。所以自然保护区设计不单是生态学者的工作,还需要地理学家、经济学家、历史学家等的合作,需要学者、公众、组织、决策者共同参与,在经济资源、地理条件、保护要求等因素限制下,运用科学合理的设计方法,尽量寻求保护区的优化设计。面向未来的保护区设计需要一种参与机制,平衡相关方的利益和关心所在,各方面共同推进保护区设计和管理实践。

最后,本文关注设计方法,对相关理论的述评没有深入展开。与保护区设计相关的理论至少包括物种-面积关系、岛屿生物地理学、集合种群理论等,另外还有图论和网络流理论、系统论等,对这些理论进行综述,探讨它们在保护区设计领域的特殊问题和局限超出本文范围。但理论的进步无疑将促进方法的革新,我们期待着保护区设计方法继续从这些理论的发展中获益。

References:

- [1] 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.
- [2] Xiao H Y, Zhao J, Jiang F, Zeng H. GAP analysis and regional biodiversity conservation. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2006, 42(2) : 153-158.
- [3] Dai Q W, Zhao X Y, Xu W, Dong X, Bai R S. The research advances and perspectives of spatial selection of ecological compensation objects. *Journal of Natural Resources*, 2009, 24(10) : 1772-1784.
- [4] Song X L, Li X W, Zhang M X, Zhang L N, Li D L. Systematic conservation pattern for the wetland biodiversity in HuangHuaiHai region, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(15) : 3953-3965.
- [5] Li W J, Zhang S H. Research progress on GIS and remote sensing's application in ecological security assessment and Biodiversity conservation. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(23) : 6674-6681.
- [6] Gurrutxaga M, Lozano P J, Del Barrio G. GIS-based approach for incorporating the connectivity of ecological networks into regional planning. *Journal for Nature Conservation*, 2010, 18(4) : 318-326.
- [7] Wu X L, Murray A T, Xiao N C. A multiobjective evolutionary algorithm for optimizing spatial contiguity in reserve network design. *Landscape Ecology*, 2011, 26(3) : 425-437.
- [8] Underhill L G. Optimal and suboptimal reserve selection algorithms. *Biological Conservation*, 1994, 70(1) : 85-87.
- [9] Church R L, Stoms D M, Davis F W. Reserve selection as a maximal covering location problem. *Biological Conservation* 1996, 76(2) : 105-112.
- [10] Ando A, Camm J D, Polasky S, Solow A. Species distributions, land values and efficient conservation. *Science*, 1998, 279(5359) : 2126-2128.
- [11] Rodrigues A S L, Gaston K J. Optimisation in reserve selection procedures-why not? *Biological Conservation*, 2002, 107(1) : 123-129.
- [12] 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.
- [13] Wang Y C. A review on spatial attributes of nature reserves and optimal site-selection methods. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(14) : 4094-4106.
- [14] 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.
- [15] Williams J C, ReVelle C S, Levin S A. Using mathematical optimization models to design nature reserves. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2004, 2(2) : 98-105.
- [16] Beger M, Grantham H S, Pressey R L, Wilson K A, Peterson E L, Dorfman D, Mumby P J, Lourival R, Brumbaugh D R, Possingham H P. Conservation planning for connectivity across marine, freshwater, and terrestrial realms. *Biological Conservation*, 2010, 143(3) : 565-575.
- [17] Polasky S, Solow A R. Conserving biological diversity with scarce resources // Klopatek J M, Gardner R H, eds. *Landscape Ecological Analysis: Issues and Applications*. New York: Springer, 1999: 154-202.
- [18] Williams P H, Araújo M B. Apples, oranges, and probabilities: integrating multiple factors into biodiversity conservation with consistency. *Environmental Modeling and Assessment*, 2002, 7(2) : 139-151.

- [19] 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, 2000: 291-305.
- [20] 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.
- [21] Ball I R, Possingham H P, Watts M E. Marxan and relatives: software for spatial conservation prioritization // Moilanen A, Wilson K A, Possingham H P, eds. *Spatial Conservation Prioritisation: Quantitative Methods and Computational Tools*. Oxford: Oxford University Press, 2009: 185-195.
- [22] Briers R A. Incorporating connectivity into reserve selection procedures. *Biological Conservation*, 2002, 103(1): 77-83.
- [23] Pressey R L, Possingham H P, Day J R. Effectiveness of alternative heuristic algorithms for identifying indicative minimum requirements for conservation reserves. *Biological Conservation*, 1997, 80(2): 207-219.
- [24] 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.
- [25] Nicholls A O, Margules C R. An upgraded reserve selection algorithm. *Biological Conservation*, 1993, 64(2): 165-169.
- [26] Polasky S, Csuti B, Vossler C A, Meyers S M. A comparison of taxonomic distinctness versus richness as criteria for setting conservation priorities for North American Birds. *Biological Conservation*, 2001, 97(1): 99-105.
- [27] 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.
- [28] Haight R G, Travis L E. Reserve design to maximize species persistence. *Environmental Modeling and Assessment*, 2008, 13(2): 243-253.
- [29] Carwardine J, Wilson K A, Hajkiewicz S A, Smith R J, Klein C J, Watts M, Possingham H P. Conservation planning when costs are uncertain. *Conservation Biology*, 2010, 24(6): 1529-1537.
- [30] 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.
- [31] Cocks K D, Baird I A. Using mathematical programming to address the multiple reserve selection problem: an example from the Eyre Peninsula, South Australia. *Biological Conservation* 1989, 49(2): 113-130.
- [32] Önal H. First-best, second-best, and heuristic solutions in conservation reserve selection. *Biological Conservation*, 2004, 115(1): 55-62.
- [33] Pressey R L, Possingham H P, Margules C R. Optimality in reserve selection algorithms: when does it matter and how much? *Biological Conservation*, 1996, 76(3): 259-267.
- [34] 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.
- [35] 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(1523): 1487-1491.
- [36] Önal H, Briers R A. Optimum selection of a connected reserve network. *Operations Research*, 2006, 54(2): 379-388.
- [37] Williams J C. A zero-one programming model for contiguous land acquisition. *Geographical Analysis*, 2002, 34(4): 330-349.
- [38] Önal H, Briers R A. Designing a conservation reserve network with minimal fragmentation: a linear integer programming approach. *Environmental Modeling and Assessment* 2005, 10(3): 193-202.
- [39] Önal H, Wang Y C. A graph theory approach for designing conservation reserve networks with minimal fragmentation. *Networks* 2008, 52(2): 142-152.
- [40] Williams J C, ReVelle C S, Song W. Optimal reserve site selection with multiple levels of protection. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 2007, 34(4): 725-739.
- [41] Moilanen A, Wintle B A. Uncertainty analysis favours selection of spatially aggregated reserve networks. *Biological Conservation*, 2006, 129(3): 427-434.
- [42] Harrison P, Spring D, MacKenzie M, Nally R M. Dynamic reserve design with the union-find algorithm. *Ecological Modelling*, 2008, 215(4): 369-376.
- [43] 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.
- [44] Gilbert K C, Holmes D D, Rosenthal R E. A multiobjective discrete optimization model for land allocation. *Management Science*, 1985, 31(12): 1509-1522.
- [45] GAMS Development Corporation. *GAMS-The Solver Manuals*. Washington DC, 2011.
- [46] McHaney R. *Computer Simulation: A Practical Perspective*. California: Academic Press, 1991: 2-3.
- [47] Levin S A, Grenfell B, Hastings A, Perelson A S. Mathematical and computational challenges in population biology and ecosystems science. *Science*, 1997, 275(5298): 334-343.
- [48] Earn D J D, Levin S A, Rohani P. Coherence and conservation. *Science*, 2000, 290(5495): 1360-1364.
- [49] Cumming G S. Habitat shape, species invasions, and reserve design: insights from simple models. *Conservation Ecology*, 2002, 6(1): 3-3.
- [50] Soares-Filho B S, Nepstad D C, Curran L M, Cerqueira G C, Garcia R A, Ramos C A, Voll E, McDonald A, Lefebvre P, Schlesinger P.

- Modelling conservation in the Amazon basin. *Nature*, 2006, 440(7083): 520-523.
- [51] Miller J. Species distribution modeling. *Geography Compass*, 2010, 4(6): 490-509.
- [52] Ren W H, Yang G, Wei F W, Hu J C. A simulation model for population viability analysis of Giant Panda in Mabian Nature Reserve. *Acta Theriologica Sinica*, 2002, 22(4): 264-269.
- [53] Li Y C. Simulation of grassland protection areas using remote sensing and BPNN-CA model: a case of Xilingol temperate grassland. *Resources Science*, 2008, 30(4): 634-641.
- [54] Chen Z Z, Xu S N, Lin Z J, Huang Z R, Zhong Z H. Ecopath model and its implication in modelling the effects of spatial closure in the Beibu Gulf ecosystem. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2009, 48(4): 89-94.
- [55] Liang L L, Wang F. Simulation of water resources evolution driven by vegetation construction and control of eco-hydrological processes in Erdos Larus Relictus Nature Reserve. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(1): 109-119.
- [56] Chen Y M, Li X, Liu X P, Li S Y. Coupling geosimulation and optimization (GeoSOS) for zoning and alerting of agricultural conservation areas. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(9): 1137-1145.
- [57] Johnson C J, Gillingham M P. An evaluation of mapped species distribution models used for conservation planning. *Environmental Conservation*, 2005, 32(2): 1-12.
- [58] Guilhaumon F, Gimenez O, Gaston K J, Mouillot D. Taxonomic and regional uncertainty in species-area relationships and the identification of richness hotspots. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2008, 105(40): 15458-15463.
- [59] Rykiel E J. Testing ecological models: the meaning of validation. *Ecological Modelling*, 1996, 90(3): 229-244.
- [60] He H S, Hao Z Q, Larsen D R, Dai L M, Hu Y M, Chang Y. A simulation study of landscape scale forest succession in northeastern China. *Ecological Modelling*, 2002, 156(2/3): 153-166.
- [61] Winsberg E. *Science in the Age of Computer Simulation*. Chicago: The University of Chicago Press, 2010.
- [62] Ervin J. *Assessing Protected Area Management Effectiveness: A Quick Guide for Practitioners*. Arlington: The Nature Conservancy, 2007.
- [63] Stoll-Kleemann S. Evaluation of management effectiveness in protected areas: methodologies and results. *Basic and Applied Ecology*, 2010, 11(5): 377-382.
- [64] Ma K P. Assessing progress of biodiversity conservation with monitoring approach. *Biodiversity Science*, 2011, 19(2): 125-126.
- [65] Keith D A, Martin T G, McDonald-Madden E, Walters C. Uncertainty and adaptive management for biodiversity conservation. *Biological Conservation*, 2011, 144(4): 1175-1178.
- [66] 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.
- [67] Fuller T, Morton D P, Sarkar S. Incorporating uncertainty about species' potential distributions under climate change into the selection of conservation areas with a case study from the Arctic Coastal Plain of Alaska. *Biological Conservation*, 2008, 141(6): 1547-1559.
- [68] 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.
- [69] Zeng Y J, Xu J L, Li Y C. Research advances on spatial requirements of wild animals and its applications in setting minimum area of nature reserves. *World Forestry Research*, 2010, 23(4): 46-50.
- [70] Cai H S, Zhu D H, Zhang X L, Zhao X M. Dynamics analysis of the ecological capacity in Po-yang Lake Nature Reserve based on RS and GIS. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(11): 4751-4757.
- [71] Cao M C, Liu G H, Shan K, Hou Y X, Wang M C, Li D L, Shen W M. A multi-scale assessment of habitat suitability of red-crowned crane at the Yellow River Delta Nature Reserve, Shandong, China. *Biodiversity Science*, 2010, 18(3): 283-291.
- [72] 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.
- [73] Luan X F, Zhou J H, Zhou N, Wu B, Li D Q. Preliminary assessment on management effectiveness of protected area in Northeast China. *Journal of Natural Resources*, 2009, 24(4): 567-576.
- [74] 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.
- [75] 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.
- [76] Wang Y C. The optimal design of a connected nature reserve network. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(17): 5009-5016.
- [77] Wang Y C. A model for designing nature reserves with minimal fragmentation using a primal-dual graph approach. *Biodiversity Science*, 2011, 19(4): 404-413.
- [78] Root T L, Price J T, Hall K R, Schneider S H, Rosenzweig C, Pounds J A. Fingerprints of global warming on wild animals and plants. *Nature*, 2003, 421(6918): 57-60.
- [79] Thomas C D, Cameron A, Green R E, Bakkenes M, Beaumont L J, Collingham Y C, Erasmus B F N, Siqueira M F d, Grainger A, Hannah L, Hughes L, Huntley B, Jaarsveld A S v, Midgley G F, Miles L, Ortega-Huerta M A, Peterson A T, Phillips O L, Williams S E. Extinction risk from climate change. *Nature*, 2004, 427(6970): 145-148.
- [80] Conroy M J, Runge M C, Nichols J D, Stodola K W, Cooper R J. Conservation in the face of climate change: The roles of alternative models,

- monitoring, and adaptation in confronting and reducing uncertainty. *Biological Conservation*, 2011, 144(4): 1204-1213.
- [81] Ando A W, Hannah L. Lessons from finance for new land-conservation strategies given climate-change uncertainty. *Conservation Biology*, 2011, 25(2): 412-414.
- [82] Wilby R L, Perry G L W. Climate change, biodiversity and the urban environment: a critical review based on London, UK. *Progress in Physical Geography*, 2006, 30(1): 73-98.
- [83] Millar C I, Stephenson N L, Stephens S L. Climate change and forests of the future: managing in the face of uncertainty. *Ecological Applications*, 2007, 17(8): 2145-2151.
- [84] Hodgson J A, Thomas C D, Wintle B A, Moilanen A. Climate change, connectivity and conservation decision making: back to basics. *Journal of Applied Ecology*, 2009, 46(5): 964-969.
- [85] Hodgson J A, Moilanen A, Wintle B A, Thomas C D. Habitat area, quality and connectivity: striking the balance for efficient conservation. *Journal of Applied Ecology*, 2011, 48(1): 148-152.
- [86] Ruliffson J A, Haight R G, Gobster P H, Homans F R. Metropolitan natural area protection to maximize public access and species representation. *Environmental Science and Policy*, 2003, 6(3): 291-299.
- [87] Botsford L W, Brumbaugh D R, Grimes C, Kellner J B, Largier J, O'Farrell M R, Ralston S, Soulanille E, Wespestad V. Connectivity, sustainability, and yield: bridging the gap between conventional fisheries management and marine protected areas. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 2009, 19(1): 69-95.
- [88] Gaines S D, White C, Carr M H, Palumbi S R. Designing marine reserve networks for both conservation and fisheries management. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2010, 107(43): 18286-18293.
- [89] Prendergast J R, Quinn R M, Lawton J H. The gaps between theory and practice in selecting nature reserves. *Conservation Biology*, 1999, 13(3): 484-492.
- [90] Knight A T, Cowling R M, Rouget M, Balmford A, Lombard A T, Campbell B M. Knowing but not doing: selecting priority conservation areas and the research-implementation gap. *Conservation Biology*, 2008, 22(3): 610-617.
- [91] Bao X C, Cui H T. Suggestions on the establishment of nature reserves in Beijing. *Acta Phytocologica et Geobotanica Sinica*, 1982, 6(2): 153-156.

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 肖海燕, 赵军, 蒋峰, 曾辉. GAP 分析与区域生物多样性保护. *北京大学学报: 自然科学版*, 2006, 42(2): 153-158.
- [3] 戴其文, 赵雪雁, 徐伟, 董霞, 白如山. 生态补偿对象空间选择的研究进展及展望. *自然资源学报*, 2009, 24(10): 1772-1784.
- [4] 宋晓龙, 李晓文, 张明祥, 张黎娜, 李东来. 黄淮海地区湿地系统生物多样性保护格局构建. *生态学报*, 2010, 30(15): 3953-3965.
- [5] 李文杰, 张时煌. GIS 和遥感技术在生态安全评价与生物多样性保护中的应用. *生态学报*, 2010, 30(23): 6674-6681.
- [13] 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.
- [52] 任文华, 杨光, 魏辅文, 胡锦矗. 马边大风顶自然保护区大熊猫种群生存力模拟分析. *兽类学报*, 2002, 22(4): 264-269.
- [53] 李月臣. 基于遥感与 BPNN-CA 模型的草场保护区模拟——以锡林浩特温带典型草原为例. *资源科学*, 2008, 30(4): 634-641.
- [54] 陈作志, 徐姗姗, 林昭进, 黄梓荣, 钟智辉. 北部湾生态通道模型和保护区效应的模拟. *中山大学学报: 自然科学版*, 2009, 48(4): 89-94.
- [55] 梁犁丽, 王芳. 鄂尔多斯遗欧保护区植被-水资源模拟及其调控. *生态学报*, 2010, 30(1): 109-119.
- [56] 陈逸敏, 黎夏, 刘小平, 李少英. 基于耦合地理模拟优化系统 GeoSOS 的农田保护区预警. *地理学报*, 2010, 65(9): 1137-1145.
- [64] 马克平. 监测是评估生物多样性保护进展的有效途径. *生物多样性*, 2011, 19(2): 125-126.
- [68] 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.
- [69] 曾娅杰, 徐基良, 李艳春. 自然保护区面积与野生动物空间需求研究进展. *世界林业研究*, 2010, 23(4): 46-50.
- [70] 蔡海生, 朱德海, 张学玲, 赵小敏. 鄱阳湖自然保护区生态承载力. *生态学报*, 2007, 27(11): 4751-4757.
- [71] 曹铭昌, 刘高焕, 单凯, 侯银蓄, 王明春, 李东来, 申文明. 基于多尺度的丹顶鹤生境适宜性评价——以黄河三角洲自然保护区为例. *生物多样性*, 2010, 18(3): 283-291.
- [72] 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.
- [73] 栾晓峰, 周建华, 周楠, 吴波, 李迪强. 东北林区自然保护区管理有效性初步评估. *自然资源学报*, 2009, 24(4): 567-576.
- [74] 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.
- [75] 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.
- [76] 王宜成. 最优化设计连续的自然保护区. *生态学报*, 2011, 31(17): 5009-5016.
- [77] 王宜成. 用原图-对偶图法设计内部间隔最小的自然保护区. *生物多样性*, 2011, 19(4): 404-413.
- [91] 鲍显诚, 崔海亭. 对北京地区建立自然保护区的意见. *植物生态学与地植物学丛刊*, 1982, 6(2): 153-156.

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索自然奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

本期责任副主编 朱永官

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 33 卷 第 11 期 (2013 年 6 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 11 (June, 2013)

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	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
主 编	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
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	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
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	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
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	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



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 90.00 元