

文章编号: 1001-1498(2008)03-0279-10

德国北部挪威云杉林可持续经营计划中空间目标的优化

陈伯望¹, Klaus von Gadow²

(1. 中国林业科学研究院林业研究所, 北京 100091; 2. Institut für Waldinventur und
Waldwachstum der Universität Göttingen, B Ügenweg 5, D-37077, Göttingen, Germany)

摘要:根据德国北部挪威云杉林相邻林分间的特定地理关系,包括林分重心间的距离和共同边界的长度,建立了德国北部挪威云杉林经营的一个空间优化模型,该模型是一种新的空间优化方法。地理数据从GIS中获得并保存到数据库中,数据库还包括林分选项和相应的目标方程值等内容。首先使用了一个由41个林分组成的林班,每个林分21个选项,采用模拟退火的方法来分别和综合优化经济模型、均衡产出模型和空间模型,并将它们的结果方案与具最大净现值的方案进行比较。当均衡产出和空间2个组成部分逐一加入到目标方程后,它们显著地改进了结果方案,而经济目标只有中等程度的下降。

关键词:挪威云杉;模拟退火;收获计划;均衡产出;空间模型

中图分类号: S791.18

文献标识码: A

Optimisation of Spatial Objectives in Planning for Sustainable Forest Medium-term Management of Norway Spruce from Northern Germany

CHEN Bor-wang^{1, 2}, Klaus von Gadow²

(1. Research Institute of Forestry, CAF, Beijing 100091; 2. Institut für Waldinventur und Waldwachstum der
Universität Göttingen, B Ügenweg 5, D-37077, Göttingen, Germany)

Abstract: The paper presents a planning model for a Spruce forest in northern Germany with a three-component objective function (economic, even flow and spatial). The spatial modeling approach followed in this analysis relies on specific geographic relations among neighboring stands, including the distance between stand centroids and the length of the common boundary between adjoining stands, representing a new approach in spatial optimization. The geographic data are derived from a GIS system and stored in a database, which includes also all stand options and the corresponding objective function coefficients. The method is first applied, using a relative small forest with 41 stands. 21 alternative options are developed for each stand and the Simulated Annealing algorithm is used to produce an optimum schedule of operations. Solutions are presented for different objective function components and compared with maximum net present worth. When the even flow and spatial components are added in the objective function, the effects of these two components considerably improved the solution, while the economic objective is only moderately reduced.

Key words: Norway spruce; Simulated Annealing; harvest schedule; even flow; spatial model

森林经营计划的基本要求之一就是能够针对一些特定的森林区域或地理单元提出森林发展的各种选项并对它们进行评选。对于一个包含若干林分的

林区来说,经营目标既有经济方面的要求,也有生态和环保方面的限制,还会有营林作业施工难易方面的考虑。后二者都涉及到空间目标的优化组合,例

收稿日期: 2006-02-09

基金项目: 本研究得到德国德意志学术交流中心(DAAD)资助

作者简介: 陈伯望(1965—),男,福建古田人,副研究员,博士。

如,控制保护区附近的林分每年的皆伐面积、分散安排每年的采伐林分分布、每年的间伐林分又相对集中在一起便于施工,等等。在以往的林分空间模型优化研究中,林分的形状常常是被简化了的矩形或其它有规律的形状。Yoshimoto等^[1]使用简化成矩形或阶梯形的林分形状来产生空间约束条件。Hof等^[2-4]在研究林分位置时把它们模拟成细胞似的格子。Murray^[5]在木材收获计划中应用空间约束条件时,使用不规则的空间单位的地图。Carter等^[6]和Yoshimoto^[7]在模拟野生动物栖息地和木材生产时,使用了实际的地图。van Deusen^[8]在优化空间问题时把林分和湖泊模拟成矩形。上述所有研究对于相邻关系都只在质的水平上考虑(即接触或不接触)。Barrett等^[9]在应用四色原理研究最大同龄收获单位时,使用了不规则多边形,但林分间的距离没有纳入计算。Chen等^[10]在他们的研究中也使用过格子形林分图,但是考虑了相邻林分间的距离。Öhman等^[11]在考虑保护核心林区时使用了较精确的不规则多边形的地理数据,他们用一个像素表示实际 32 m的大小,这样的地图已经很接近现实的森林地图。

本文用德国北部现实挪威云杉林的地理信息系统数据,考虑了现实林分的不规则形状,林分间的关系不仅仅是接触或不接触,而是量化地考虑了林分间共同边界的长度以及重心之间的距离,首次以此为基础建立森林空间模型指标,作为林分间相互关系的量化依据。

1 材料

本文使用德国北部 Solling 林区(51°44'0"N, 9°36'0"E)的南 Winnefeld 林班来解释空间模型。该林班包括 41 个年龄不同的林分(小班),总面积 123.87 hm²,详细情况林分状况和生长模型见参考文献[11]。该林区的地理数据都已经输入 ArcView GIS(地理信息系统),因此,每个林分的详细地理数据(如面积、周长、几何重心坐标等)以及生长数据(如树种年龄、优势高、立地指数、株数和胸高断面积等),都可以从地理信息系统中获取。结合生长模型和疏伐模型,可以推算出不同经营选项的木材产出和剩余蓄积,以及疏伐之后的后续生长量。

2 方法

2.1 空间模型指标的定义

本文定义森林空间指标(FSV),要求它能够

衡量在计划期限内营林选项的聚集或分散程度。例如,1 a内的作业林分相对集中并有利于作业机械或临时建筑,而在水源涵养林或特定保护区附近的林分又要尽量减少或不允许皆伐或其它某类作业。在现实森林中的 FSV 要比理论的有规律的网格形的林分复杂得多^[10],因此,对现实林分的 FSV 定义如下:

$$FSV = \frac{N}{i=1} NV_i = \frac{N}{i=1k=1} \frac{R_{ik}L_{ik}}{D_{ik}} (i, k) \quad (1)$$

式(1)中: N 是林分的数目; NV_i 为第*i*个林分的相邻关系值; R_{ik} 是一个用来确定在 2 个相邻林分*i*和*k*里面所采用的营林措施选项间关系的值; L_{ik} 是 2 个相邻林分*i*和*k*之间的共同边界长度(the common boundary length, CBL); D_{ik} 是 2 个林分*i*和*k*之间的距离,以 2 个多边形的重心间的距离来计算。

对于每个特定林分,每个营林选项都包含了木材采伐中特定的疏伐方式。例如,第 1 个选项在所有林分中都不进行任何疏伐,第 2 个选项总是在计划期限内的第 1、6 和 11 年进行疏伐,第 3 个选项总是在第 2 年和第 7 年进行疏伐。这种方法使相同选项在林分空间分布上聚集,从而便于森林作业,也可以用来调整过大面积的连续皆伐次数。根据目标方程的倾向性,相邻的林分可以采用或不采用相同的选项(相同选项的聚集或离散)。在本研究中,空间优化目标要求在同一年度内间伐的林分相对集中。2 个林分间的关系用它们的选项来表达:

如果在第*i*个林分和第*k*个林分采用了相同的选项,则 $R_{ik} = 1$

如果在第*i*个林分和第*k*个林分采用了不同的选项,则 $R_{ik} = 0$

例如,本研究中希望相邻每年的疏伐作业林分相对集中,就设定所有的 $R_{ik} = 1$ 。相邻的林分间如果有相同的选项,它们对于目标方程就会有正面的贡献值,在优化过程中容易被筛选保留下来。

2.2 空间模型中林分间地理关系的获得

在考虑具有各种可变选项的林分空间布局时,计算两两林分间的共同边界长度(CBL)经常是个有用的方法。CBL 不仅提供了相邻林分间的相互间质的关系,即相连邻(CBL > 0)或不相邻(CBL = 0),而且还提供了数量的指标。这个数量指标可以用来评价相邻林分间所采用的营林选项间的关系。

在典型的 ArcView GIS 中,可以获得一些林分的基本信息,例如林分面积和林分多边形重心的坐标,但是林分间的共同边界长度却不易直接获得。

在 ArcView 中似乎没有简单的方法来获得两两林分间的共同边界长度,用 Arc/INFO 系统来计算这个数值更容易。在 Arc/INFO 中有几种方法都可以把 ArcView 的 shape 文件转换成 ArcInfo 的 coverage 格式。图 1 是已经被转换成 Arc/INFO 格式的 41 个林分的图形,注意转换过程产生了编号为 1 和 7 的 2 个新的多边形,其中 1 号多边形是整个环绕的外界,而 7 号(被 5 号多边形包围)也不是一个森林林分。每个 Arc/INFO 的层都包含 2 个属性,即多边形和折线,后者包含了多边形间的共同边界长度的信息,即所需要的林分间的共同边界长度。

在 Arc/INFO 中,多边形的信息保存在 AAT (Arc attribute table) 中,折线的信息保存在 PAT (Point attribute table or polygon attribute table) 中。

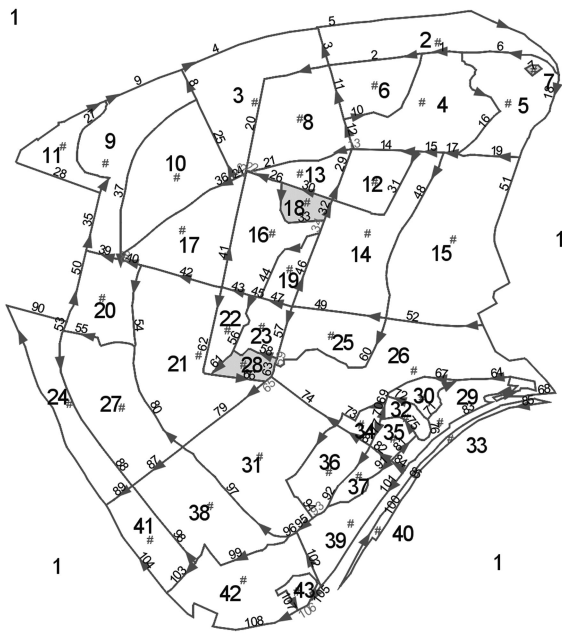


图 1 已转换成 Arc/INFO 格式的 41 个林分图形 (大数字代表多边形;小数字代表折线;#代表重心;阴影部分为池塘或其它用地)

图中共有 108 条折线,可从中获得林分间的共同边界长度。2 个多边形间的距离定义为二者重心间的欧氏距离。重心坐标可以在 ArcView 中用标准的函数求得。表 1 的例子说明了所需数据内容。

表 1 两两林分多边形间的共同边界长度 (CBL) 和重心间的距离 (DBC)

多边形 1	多边形 2	共同边界长度 /m	重心间的距离 /m
2	3	92.589668	454.855557430048
2	4	95.072601	145.953599219067
2	5	246.552750	220.364470820502
2	6	221.435530	180.748487199755
2	7	0.000000	232.710019391087
2	8	0.000000	370.464088171850
...
40	41	0.000000	537.670089367076
40	42	0.000000	337.693023506557
40	43	0.000000	241.650218549456
41	42	96.831612	241.666124281001
41	43	0.000000	365.784110678690
42	43	252.303050	125.822295321616

2.3 生长模型和经济指标

根据下萨克森州林业试验站的永久生长试验地的数据,模拟了估算挪威云杉 (*Picea abies* (L.) Karst) 生长和疏伐的模型^[12-14]。模型包括了林分优势高、自然枯死率(最大密度)、断面积生长和林分蓄积的计算公式。根据不同的疏伐时间、强度和类型为各个林分定义了不同的经营选项。疏伐强度表示有多少断面积可以被伐除。根据 Spelmann 等^[15]的模型,疏伐强度规则可以分 3 个阶段来描述,由林分优势高来确定。确定疏伐强度的前提是已知最大胸高断面积 G_{max} 。这个疏伐规则可以总结为:

当林分优势高大于 14 m 且可伐断面积 $G_{maxent} > 0$ 时,允许进行疏伐;

在不同的林分优势高阶段 (14 ~ 20 m; 20 ~ 26 m; > 26 m) 具有不同的可采伐断面积。

如果定义 w 为从可伐断面积 G_{maxent} 中实际伐除的百分数,那么,“ $w = 100$ ”表示伐除的全部可伐断面积。

计划年限为 20 a,假设利率为 4%,木材价格为 $100 \text{ €} \cdot \text{m}^{-3}$ 。为每个林分准备了 21 种相同的可选的经营方案^[12]。第 1 个选项总是空白对照(不采取任何措施),其它的选项包括:1 次疏伐、2 次疏伐、3 次疏伐和 4 次疏伐。相同的选项编号对于不同的林分具有相同的疏伐方式和时间的含义,这对实现相同年度相邻林分出现相同选项群聚效应是很重要的。

2.4 目标方程的优化

本研究以空间模型优化为主,即追求每年疏伐作业尽量在相邻相近的林分间进行,同时兼顾经济指标(净现值)以及均衡的木材产出量^[12]。也就是说,希

望在计划年限内在给定的利率条件下获得足够大的经济收益,每年的木材产出量处于比较均衡的状态,即变动程度较小,而且从地图上看到每年的疏伐面积相对均等且分布相对集中,便于作业实施。如果每年的木材产出量波动越大,其对于总体目标方程就有较大的负面影响,这种选项组合在优化过程中的生存几率较小。作者采用模拟退火(Simulated annealing)的方法来搜寻该林分最优的选项组合^[16]。

3 结果与分析

在给定林分空间指标、生长状况、木材价格和银行利率等因子之后,可以多次运行模拟退火以获得稳定的优化结果。图 2 显示了其中 1 次模拟退火的优化过程。经过 100 次迭代后所有目标方程的组成部分都收敛了。在 P3-500/W indow98/VB6 的软硬件环境下求解这个问题耗费的时间小于 1 min。

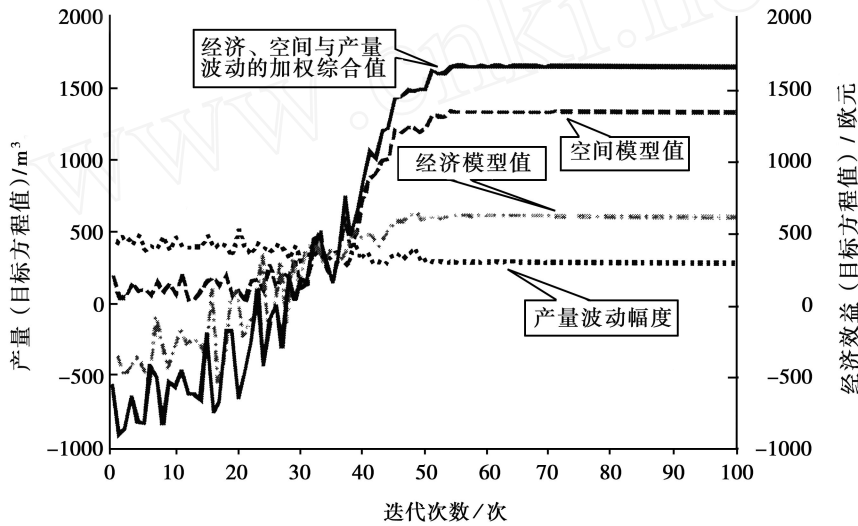


图 2 包含 3 个部分 (经济、均衡产出和空间) 的目标方程的 1 次模拟退火的优化过程

从优化结果中,可利用地理信息系统将得到的具体营林措施分年度显示在地图上,得到林分营林计划分布图。在图 3 中,对含有不同组成部分的目标方程的优化结果进行了比较。如果只考虑经济指

标,可以获得最高的经济指标 NPW,而其它要求被忽略了。这个方案的年度木材供应量波动明显很大,如在第 2 年没有木材产出,而第 16 年又有很多林分要进行作业(图 4,第 1 行)。

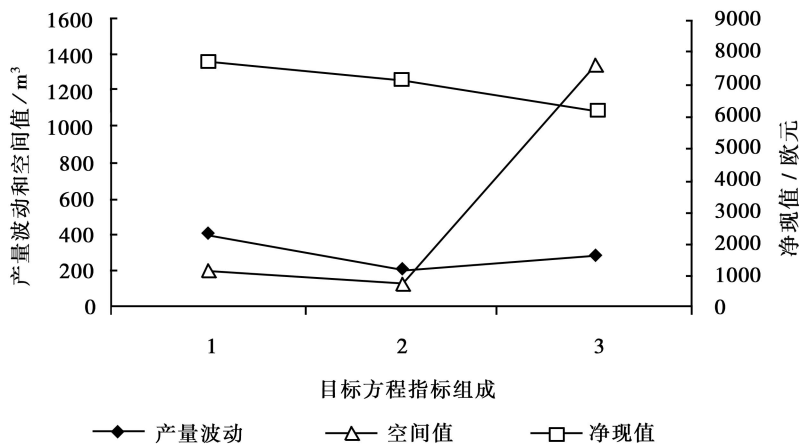


图 3 不同组成部分的目标方程优化结果的比较 (1:只有经济指标;2:经济指标+均衡产出指标;3:经济指标+均衡产出指标+空间指标)

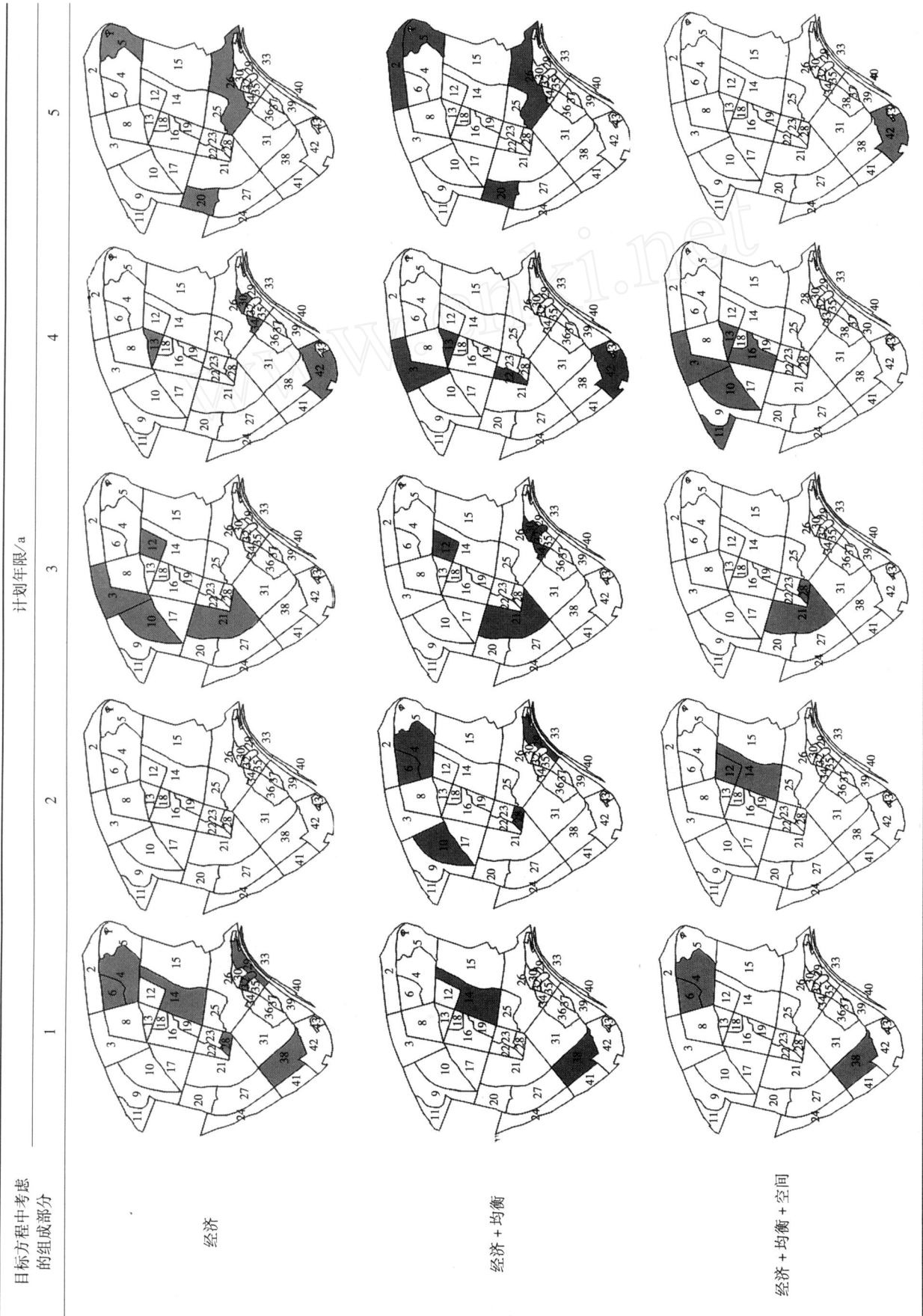


图 4 在目标方程中考虑了不同组成部分后获得的采伐区域经营方案的比较(阴影部分表示每个年度的作业小班区;采伐或疏伐)



图 4 在目标方程中考虑了不同组成部分后获得的采伐区域经营方案的比较(阴影部分表示每个年度的作业小班区块,采伐或疏伐)(续)

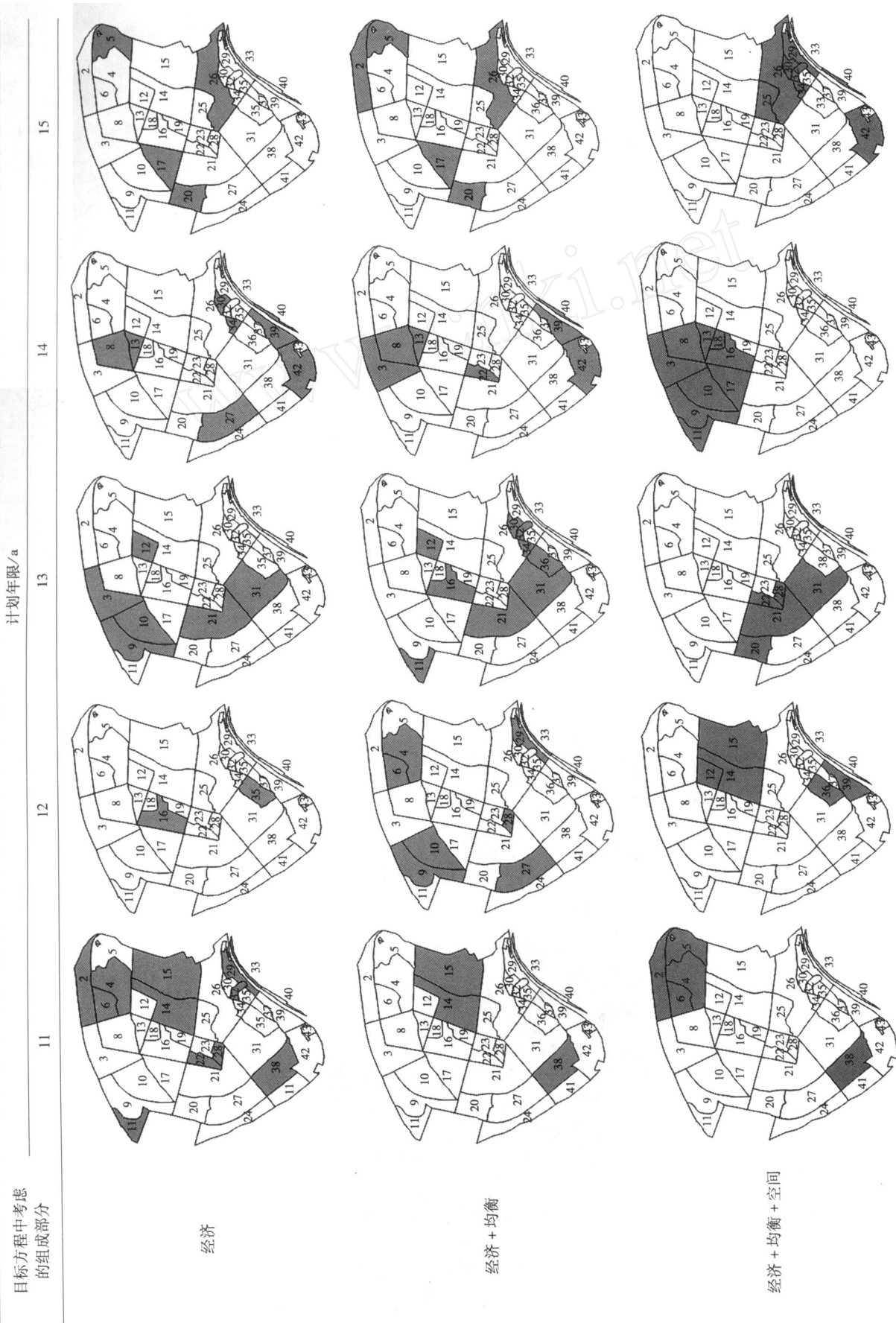


图 4 在目标方程中考虑了不同组成部分后获得的采伐区域经营方案的比较(阴影部分表示每个年度的作业小班区域;采伐或疏伐)(续)

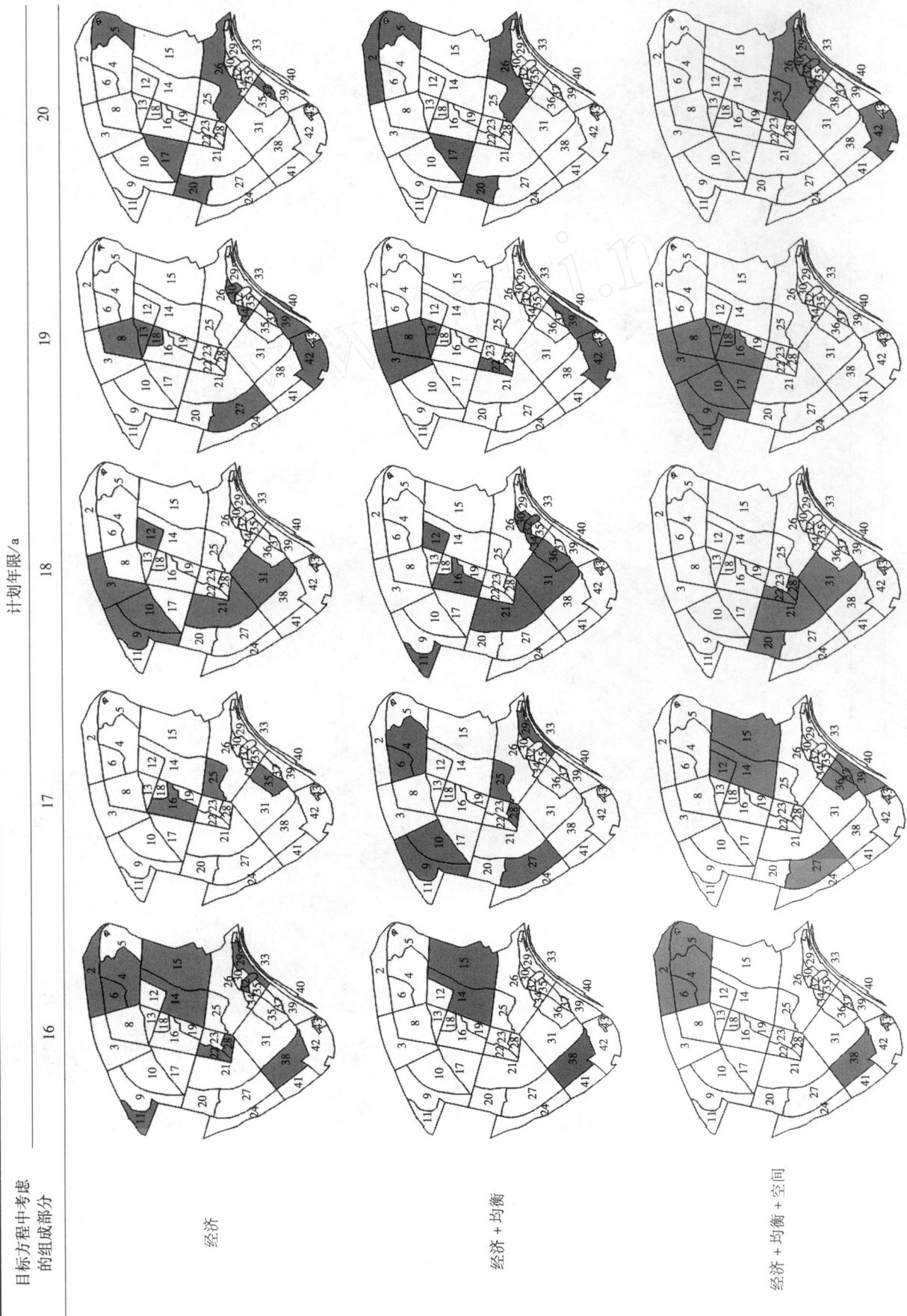


图 4 在目标方程中考虑了不同组成部分后获得的采伐区域经营方案的比较(阴影部分表示每个年度的作业小班区块:采伐或疏伐)(续)

在目标方程中逐一加入均衡产出和空间部分后,对应的指标得到了相应的改进,其中经济指标有所下降。二者在每年的作业区域图上有一定的相似之处(图 4,第 2 行)。当在目标方程中加入了空间组成部分后,年度作业区域的聚集性得到了改善(图 4,第 3 行),但是经济指标继续有所下降且年度木材产量波动略微上升(图 3)。

4 讨论与结论

对于整个林区来说,每个小区域的所有处理选项组合起来的数目可能大得难以处理,因此任务就是确定最优的组合。多林分发展模型的基本问题^[16]已经被用多种方法阐述过。也有人对此提出过各种解决方案,通常涉及到界面友好和交互式数学应用程序和相应的方法。最有效的是那些结合了林分水平的目标和全林水平的约束条件并能够应用到任何森林类型的应用程序^[17-22]。

与过去的模拟研究相比,本文介绍的方法更具有现实性。本文利用从地理信息系统获得的现实林分的不规则边界的数据,首次考虑相邻林分的实际地理关系,包括 2 个林分重心间的距离和共同边界的长度,对现实森林中林分间的关系进行了量化的分析。

为了实现空间的聚集性,即对近邻的林分采取相同的选项,就有必要在 2 个相邻林分采取相同的选项时赋予它们较高的林分间关系值(R_{ik})。仅如此还不够,还要确保它们在相同的年份或时间系列进行收获(疏伐)。相同选项的时间空间聚集性,也就是相邻相近林分在相同年度采用相同的经营措施,其优点是可以明显节省开支。例如在一个年度里的疏伐主要集中在某(几)地区,抚育主要集中在另外某(几)个地区,可以节省很多物资和机械的运输移动费用和时间。诚然,如果希望每年的疏伐区域相互隔离开,也可以通过调整 R_{ik} 的符号和大小来实现,在杉木(*Cunninghamia lanceolata* (Lamb) Hook)林模拟数据中曾经实现过^[10]。

对于包含多个组成部分的目标方程的优化过程,实际上也是各个指标间的竞争过程,不同的组成部分的优化方向不同。权重参数的选择对于平衡目标方程组成部分的重要性无疑是很重要的,对于多目标的目标方程,其结果决定于权重参数间的平衡,本研究中权重参数的确定采用了敏感性分析和通常经验相结合的方法来调整权重。

有些文章^[11-9]对空间模型的理解与本文作者有

相当大的区别。对于空间模型,本文主要考虑林分经营选项在时间上的聚集或离散,有些作者考虑的是公路系统或野生动物栖息地与林区面积的关系,Bettinger等^[23-24]用一个目标方程来评价维护公路费用的 NPV(净现值),这也是一条值得借鉴的思路。

本文通过多次大量的重复模拟,得出的结论是:一个林区的林分数目越多、每个林分的选项越多,就越可能获得精确的全局最优组合。诚然,这些林分数目和选项的增多都会增加求解时间和计算资源,同时也显示了营林措施在时间和空间上的聚集以及评价 3 个目标方程组成都是可能的,模拟退火这种启迪式的方法可以作为优化经营计划的有力工具。

参考文献:

- [1] Yoshimoto A, Bridie J D, Sessions J. A new heuristic to solve spatially constrained long-term harvest scheduling problems[J]. Forest science, 1994, 40: 365 - 396
- [2] Hof J G, Joyce L A. Spatial optimization for wildlife and timber in managed forest ecosystems[J]. Forest science, 1992, 38 (3): 489 - 508
- [3] Hof J G, Joyce L A. A mixed integer linear programming approach for spatially optimising wildlife and timber in managed forest ecosystems[J]. Forest science, 1993, 39(4): 816 - 834
- [4] Hof J G, Bevers M, Joyce L A, et al An integer programming approach for spatially and temporally optimising wildlife population[J]. Forest science, 1994, 39(4): 816 - 834
- [5] Murray A T. Spatial restrictions in harvests scheduling[J]. Forest science, 1999, 45: 45 - 52
- [6] Carter D R, Vogitazis M, Moss C B, et al Ecosystem management or infeasible guidelines? Implications of adjacency restrictions for wildlife habitat and timber production[J]. Can J For Res, 1997, 27: 1302 - 1310
- [7] Yoshimoto A. Potential use of a spatially constrained harvest scheduling model for biodiversity concerns: exclusion periods to create heterogeneity in forest structure[J]. J For Res, 2001, 6(1): 21 - 30
- [8] van Deusen P C V. Scheduling spatial arrangement and harvest simultaneously[J]. Silva Fennica, 2001, 35(1): 85 - 92
- [9] Barnett T M, Gilles J K Even-aged restriction with sub-graph adjacency[J]. Annals of operations research, 2000, 95: 259 - 175
- [10] Chen B W, von Gadow K. Timber harvest planning with spatial objectives, using the method of simulated annealing[J]. Forest W Cbl, 2002, 121: 25 - 34
- [11] Özman K, Eriksson L O. The core area concept in forming contiguous areas for long-term forest planning[J]. Can J For, 1998, 28: 1032 - 1039
- [12] 陈伯望, v Gadow K, Frantisek Vilcko, 等, 德国北部挪威云杉林可持续经营中期计划的实例分析[J]. 林业科学研究, 2006, 19(5): 541 - 546

- [13] Schübeler D. Untersuchungen zur standortabhängigen Wachstumsmodellierung bei der Fichte [M]. Goettingen: Diss Univ Göttingen, 1997: 155
- [14] Sánchez-Orois S, Gurjanov M, Schröder J. Analyse des Grundflächenzuwachses gleichaltriger Fichtenreinbestände [J]. Allg Forst- & Jagd-Ztg, 2001, 172 (3): 51 - 59
- [15] Spellmann H, u Nagel J, Böckmann T. Summarische Nutzungsplanung auf der Basis von Betriebsinventurdaten [J]. Allgemeine Forst und Jagdzeitung, 1999, 170 (7): 122 - 128
- [16] 陈伯望, 惠刚盈, v Gadow K. 线性规划、模拟退火和遗传算法在杉木人工林可持续经营中的应用和比较 [J]. 林业科学, 2004, 40 (3): 80 - 87
- [17] v Gadow K, Puumalainen J. Scenario planning for sustainable forest management [C] // v Gadow K, Pukkala T, Tomé M. Sustainable Forest Management Managing Forest Ecosystems [C]. Goettingen: Kluwer Series, 2000, 1: 319 - 356
- [18] Ware GO, Clutter J L. A mathematical programming system for the management of industrial forests [J]. Forest Science, 1971, 17: 428 - 445
- [19] Hoganson H M, Rose D W. A simulation approach for optimal timber management scheduling [J]. Forest Science, 1984, 30 (1): 200 - 238
- [20] v Gadow K. Integration von Einzel- und Gesamtnutzungsplanung in der Forsteinrichtung [J]. Allg Forst u JagdZtg, 1991, 162 (4): 72 - 75
- [21] Lappi J. JLP-a linear programming package for management planning [J]. The Finnish Forest Res Inst Res Paper, 1992, 414: 131
- [22] Rodriguez L A. Microcomputer Program for Solving Forest Scheduling Problems with Heuristic Approaches [C] // Päävinen R, Roihuvuo L, Siitonen M. Large-scale forestry scenario models-experiences and requirements Joensuu Finland: European Forest Institute, 1996, (5): 153 - 166
- [23] Bettinger P, Sessions J, Boston K. Using tabu search to schedule timber harvests subject to spatial wildlife goals for big game [J]. Ecological Modelling, 1997, 94: 111 - 123
- [24] Bettinger P, Seccions J, Johnson K N. Ensuring the compatibility of aquatic habitat and commodity production goals in eastern Oregon with a Tabu search procedure [J]. Forest science, 1998, 44 (1): 96 - 112