浙 江 农 林 大 学 学 报，2013，**30**(5)：633 – 639
*Journal of Zhejiang A & F University*

# 基于 GIS 的林分目标树经营辅助决策系统的研究与实现

沈振明[1,2]，王懿祥[1]，吴天航[1]，潘伟华[2]，童志鹏[2]，张华峰[2]

（1. 浙江农林大学 浙江省森林生态系统碳循环与固碳减排重点实验室，浙江 临安 311300； 2. 浙江省临安市林业局，浙江 临安 311300）

**摘要：**针对目标树经营实践中林分作业设计这一难题，在地理信息系统(GIS)技术支持和 C# 开发环境下，对林分进行了重建和可视化，探讨了林分作业设计中基于 GIS 的关键技术，根据林木个体差异和林木竞争模型，研究和开发了目标树经营可视化辅助决策系统，实现了目标树和干扰树的自动判定和林分作业前后场景模拟及林分作业评价。结果证明，该系统具有功能强大、操作简单、可维护性好的特点。该系统的研发使得目标树经营作业推广成为可能。图 4 表 1 参 20

**关键词：**森林经理学；目标树；干扰树；近自然森林经营；地理信息系统；林分作业法

**中图分类号：**S718.5　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**2095-0756(2013)05-0633-07

# A target tree management assistant decision-making system based on GIS

SHEN Zhenming[1,2], WANG Yixiang[1], WU Tianhang[1], PAN Weihua[2], TONG Zhipeng[2], ZHANG Huafeng[2]

(1. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Carbon Cycling in Forest Ecosystems and Carbon Sequestration, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China; 2. Forest Enterprise of Lin'an City, Lin'an 311300, Zhejiang, China)

**Abstract:** To assist with stand operation design in target tree management, the Target Tree Management Assistant Decision-Making System was developed using GIS technology and C sharp (C#) language based on a model for individual forest tree size differences and competition. The system involved construction and visualization of a stand, effective spatial structure analysis, automatic judgment of forest tree types, scene simulation of pre-and post-stand operations, and stand operation assessment. Key technologies based on GIS involvement in the system were also discussed. Results showed that the system was rigorous with easy manipulation and high maintainability. This system could allow widespread popularization and application of target tree management. [Ch, 4 fig. 1 tab. 20 ref.]

**Key words:** forest management; target tree; interference tree; close-to-nature silviculture; GIS; stand operation

近自然森林经营(close-to-nature silviculture)是实现森林的服务功能和木材生产功能之间利益平衡的森林经营模式[1-2]。近几十年来，近自然森林经营的理论和实践一直是德国、瑞士、法国和奥地利等中部欧洲国家共同探索的森林经营模式，在欧洲的许多国家都得到了广泛的接受和应用[3-6]。20 世纪 90 年代，近自然森林经营思想引入中国[7]。学者们分别在北京、云南、海南、四川、福建、陕西等省市对人工油松 *Pinus tabulaeformis* 林、杉木 *Cunninghamia lanceolata* 林、加勒比松 *Pinus caribaea* 林和退化常绿阔叶林等多种森林类型开展了近自然经营研究和实践[6,8-12]，并取得了显著成效。实现近自然森林经营，就需要制定相应的技术设计方案。目标树林分作业体系是以单株林木——目标树为对象进行的

收稿日期：2013-03-05；修回日期：2013-04-25

基金项目："十二五"国家科技支撑计划项目(2012BAD22B0503)；浙江省重点科技创新团队资助项目(2010R50030-15)；浙江农林大学科研启动项目(2009FR055)

作者简介：沈振明，高级工程师，从事森林可持续经营研究。E-mail：szm1198@sohu.com。通信作者：王懿祥，副教授，博士，从事森林可持续经营与林业信息化研究。E-mail：w_yixiang@126.com

近自然森林经营林分施业体系[1,13]。对于目标树经营作业者来说，正确识别和标记目标树，释放目标树的竞争非常重要，以便促使目标树达到最大生长率，维持和改进天然更新。森林经营者要实现从林分经营到单株经营的转变从而实施目标树作业体系就需要对林分中的树木进行分类，判断目标树和干扰树[6]。人为现场判断时都是依靠专家经验定性选择，普通的森林经营工作者很难做到。目标树和干扰树的选择结果因人而异，因时而异。特别是对于同龄林人工林这种个体差异不大的林分，而且对树木与邻近树的空间竞争关系在现场也很难考虑。本研究针对目标树经营实践中林分作业设计这一关键问题，根据林木个体差异和林木竞争关系，在地理信息系统(GIS)技术支持和 C# 开发环境下，探讨林分作业设计中基于 GIS 的关键技术，研究和开发目标树经营可视化辅助决策系统，为森林经营者和相关研究人员提供方便快捷的目标树林分作业设计工具，使得目标树经营科学、简单、易行，从而加速目标树作业体系在中国的推广。

## 1 系统设计

### 1.1 系统目标

系统的目标是开发近自然森林经营思想指导下的目标树经营辅助决策系统，对作业区域内的林分进行作业设计和模拟。通过该系统，森林经营管理者可以精确地查看林分中所有林木的分布位置和每棵树木的相关信息(如树种、胸径、树高等)，能对林分树种结构、林分水平结构和垂直结构进行分析，并可观察到每棵林木的冠幅状况，从而直观地认识和掌握林分的林木分布，高效方便地得到林分的统计数据，使森林经营管理者不但能从总体上把握林分的信息，还能从细部掌握树木个体的状况。通过该系统，森林经营管理者可以在只懂得一般林业知识的前提下快速地对所有林木进行自动分类判定，从而寻找到目标树，以及影响目标树生长的干扰树，增强目标树和干扰树判定的科学性和一致性，减少人为的主观性和随意性。在该系统中，森林经营管理者可以通过对间伐前后的冠幅专题图和各指标的计算结果进行比较分析，及时发现间伐作业方案的局限性或问题，从而可在计算机上重新制定作业方案。

### 1.2 系统设计的原则

系统设计主要遵循实用性原则和可扩展性原则。

实用性原则：系统的最终用户为县市林业局的人员和研究相关问题的专家学者。系统应贴近用户，为他们提供不同程度的技术支持。对于计算机层次相对薄弱的基层工作人员，系统能提供以解决实际问题为主切实可行的辅助决策，提高决策水平；对于专家层次的学者们来说，则提供多样化的角度和可视化方法来进行评价和模拟。

可扩展性原则：目标树单株经营系统还在进一步的理论探讨和实证研究中，对于这些领域出现的新成果，应该能纳入到系统中来。因此，采用基于插件技术的 GIS 框架，可以避免改变主程序，仅通过增减插件或修改插件即可增减或调整系统功能，满足未来发展的需要[14]。

### 1.3 系统架构设计

系统分为 3 层架构，分别为：数据管理层、逻辑处理层和结果表现层。数据管理层负责数据的管理与存储；逻辑处理层负责数学模型的建立和应用；结果表现层负责用户交互和数据处理结果展示等。

### 1.4 功能模块设计

根据林分目标树经营系统的设计原则和目标，首先对近自然森林经营过程进行分解。在进行林分结构分析的基础上，以各种方式和角度展现林分的空间状态；然后根据近自然森林经营中林木分类的方法，抽取目标树和干扰树的判断决策规则，在研究和分析目标树和邻近树之间关系的基础上，确定需要采伐的干扰树，并对伐前伐后的林分状态进行比较分析。系统的主要功能模块包括林分结构分析模块、目标树作业法模块、作业评价模块和基本功能模块 4 个主要功能模块。系统功能结构图及各模块所包含的具体功能如图 1 所示。

1.4.1 基本功能模块 ①地图浏览：地图的一般操作，包括放大、缩小、漫游、测距、图层管理等。②地图渲染：包括专题图制作、颜色配置等。③树木符号更换：模块提供了树种符号的批量替换的功能：即通过树木信息查询，获取样地内的树木树种信息，选择某一树种，将其树木符号替换成另外一种符号。并且考虑到不同用户个人喜好的不同，根据实际树木的外形，制作树木符号文件存储在树木符号库

中。④树木信息查询：为了便于用户了解森林的空间结构以及树种分布状况，把握森林的信息，该模块提供了图查属性和属性查图功能。图查属性功能包括点选查询、框选查询、圆选查询和不规则多边形选查询。属性查图功能包括：树高查询、胸径查询和树种查询，查询方式有单一条件查询和组合条件查询；精确查询和模糊查询。为了能使用户更加清晰地识别出查询出来的信息，本系统采用 2 种显示方式：一是高亮显示；二是仅显示满足条件的，不满足条件的则不显示。

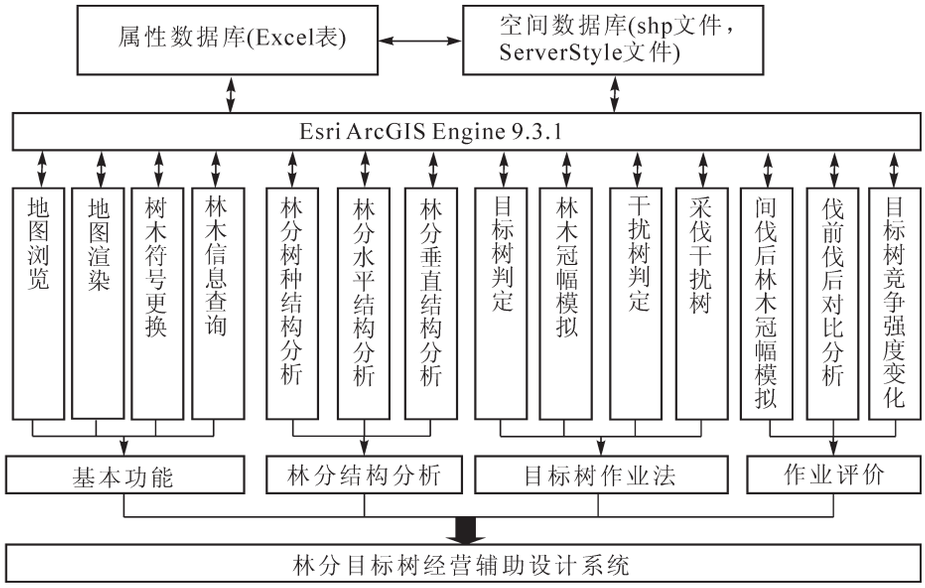


图 1　功能模块结构图

Figure 1　Module structure chart of the system

1.4.2　*林分结构分析模块*　该模块主要是让用户掌握林分的基本情况，更好地把握林分的总体状况。林分结构分析模块的分析主要包括：林分树种结构、垂直结构和水平结构分析。①林分树种结构分析：根据树种统计林木的多度、断面积和蓄积。②林分垂直结构分析：根据国际林业研究联盟组织(IUFRO)分级标准和林分的优势高，将林分分为上中下 3 层：上层林木为树高＞2/3 优势高，中层为介于 1/3~2/3 优势高之间的林木，下层为＜1/3 优势高之间的林木。林分垂直结构分析是对林分中所有林木先进行垂直层次的划分，然后分别统计不同层次上林木的株数、断面积和蓄积的分布状况。③林分水平结构分析：统计林分各径阶的株数、总胸高断面积和总蓄积，最后统计出各林分总断面积和总蓄积，得到林分水平结构统计表。模块提供了 1，2，4，5 cm 等 4 个径阶距供用户选择。

1.4.3　*目标树作业法模块*　该模块是系统的核心功能。根据林木个体差异，林分中的每一株林木划分为目标树、干扰树、一般树和生态目标树等 4 种类型[1]之一。目标树作业法的目的是抚育目标树，采伐干扰树。目标树作业法模块的主要功能是判断林分中的哪一株树是目标树，哪一株树是干扰树，并统计相应的属性信息。①目标树判定：目标树判定标准见表 1。如果某林木满足前面 5 个条件，则进行优势强度分析。通过固定距离法或创建 Voronoi 图来确定该林木的邻近树集合，然后使用大小比数计算该林木的优势度[15]。如果优势度符合用户要求，则该林木确定为目标树，需要重点抚育。②干扰树判定：系统提供了 2 种分析方法：1)分别计算目标树与其每一竞争树的竞争强度，如果竞争强度大于用户定义的临界值，则该竞争树判定为干扰树[16-17]；2)用 Hegyi 指数[18]计算目标树的竞争强度，如果竞争强度大于用户定义的临界值，则对竞争强度计算贡献最大的 1~2 株林木判定为干扰树。同时统计出所有干扰树信息。③干扰树采伐：将选择的干扰树砍伐，模拟间伐后场景。④树木冠幅模拟：对林分中所有林木进行单株冠幅模拟。

1.4.4　*作业评价*　①间伐后树木冠幅模拟：对间伐之后的所有保留木进行单株冠幅模拟，让用户直观掌握采伐后林分的覆盖情况。②伐前伐后对比分析：将伐前的分层冠幅与总冠幅和伐后的分层冠幅与总冠幅各自融合成为一个面对象，分别两两比较，从空间结构角度观察伐前伐后林分各层树木覆盖情况的变化，并对每层伐前伐后的覆盖面积和覆盖度进行统计，直接反映采伐干扰树后对整个林分的影响。统计

**表 1 目标树决策准则**

Table 1 Decision rules of target tree

| 树种 | 树干形状 | 冠长 | 健康状况 | 起源 | 林层中位置 | 优势度 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 混交林由用户指定，纯林不用选择 | 通直 | >1/4 树高 | 没有损伤，没有病虫害 | 实生 | 上层 | <临界值 |

伐前伐后的林分株数密度、郁闭度。计算断面积间伐强度、蓄积量间伐强度。③目标树竞争强度变化：根据 Hegyi 竞争指数分别计算间伐前后目标树的竞争强度。

### 1.5 接口设计

各模块之间的接口采用中间文件 Shp 格式文件进行，确保模块之间数据传递的稳定。为了扩展方便，采用插件式设计，在系统中提供扩展接口服务，通过配置文件 XML 定义已知接口，并充当插件的耦合点来实现功能扩展。

## 2 系统开发应用

### 2.1 系统开发环境

选择 Visual Stdio 2008 作为开发平台，结合面向对象的编程语言 C# 利用 ArcGIS Engine 提供的控件和对象接口进行二次开发。考虑价格、性能和目前开发的实际需要使用 Esri 公司的 PersonalGeoDatabase 作为数据库。

### 2.2 基于 GIS 的关键技术开发

系统在研制过程中利用了 GIS 中的拓扑关系、专题制图、空间分析等技术，与森林空间结构理论紧密结合，解决了目标树经营中林分作业设计的关键问题。系统主界面如图 2 所示。考虑篇幅关系，简述如下 4 点关键性技术。

2.2.1 林分空间结构可视化 林分空间结构的可视化是整个系统的基础。森林资源数据一般都存放在 Excel 文件(图 3A)中，需要将它们转化进行林分可视化表达。整个实现过程主要步骤如下：①导入 Excel 数据表。由于采用 OleDb 数据源的形式比较具有通用性，系统通过 OleDb 数据源的形式打开 Excel 表格。用户选择 Excel 源数据文件(图 3A)，对 Excel 中的列数据与预设字段配准(图 3B)；②新建 shp 数据文件。读入数据并逐列进行字段配准检查 Excel 数据是否符合要求，如果不符合则提示是哪一列数据出错，如果符合则新建 shp 数据文件。③生成林分边界和矩形面。在将林分中所有林木生成点要素后，需要生成林分的边界线和林分的面范围，方法与上面类似。只是林分的范围为创建一个类型为面的 shp 文件；林分边界是创建一个类型为线的 shp 文件；然后给各个树种自动加载树木符号(图 3C)。转换过程和转换效果如图 3 所示。

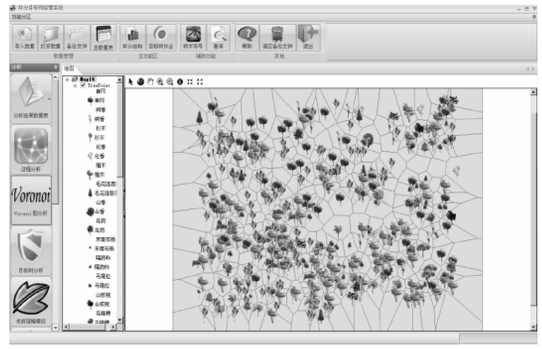

图 2 系统主界面

Figure 2 Main interface of the system

A B C

图 3 林分空间结构可视化

Figure 3 Visulization of stand spatial structure

2.2.2　基于 Voronoi 图的大小比数分析　根据目标树的判定标准从林分所有林木中自动选出目标树，其中的关键技术是基于 Voronoi 图的大小比数的计算。整个实现过程主要包括 5 个步骤：①先进行边缘校正，消除边缘效应。为校正靠近林分边缘位置林木的边缘效应，系统采用缓冲区校正法，要求用户根据林分情况输入边界缓冲的距离 $x$(m)，在林分面数据集上下左右向内各缩小 $x$(m)，生成一个较小矩形，较小矩形内的树是接下来要分析的对象。②把每株树看成 1 个点，创建基于离散点的 Voronoi 图[14]。③应用 Voronoi 图的最邻近特性，寻找对象树的邻近树。把 Voronoi 图中的树对应的 Voronoi 的面要素转为 IRelationalOperator；把所有 Voronoi 的面要素转为 IGeometry，用 IRelationalOperator 的 Touchs(IGeometry)方法判断是否邻接，得到每株可能成为目标树的所有邻近树。④用大小比数公式计算对象木的优势强度[16]。⑤对每一株树都进行③④步骤，直到计算出所有林木的大小比数为止。

2.2.3　基于椭圆的冠幅模拟　冠幅的准确模拟是干扰树判定的基础，是间伐前后冠幅对比分析的依据。先前的研究一般用东西和南北冠幅的平均值作为直径用圆面模拟。本系统用 4 个方向的半径分别拟合 1/4 椭圆，合并成一个完整的椭圆面作为单株林木冠幅的投影面。主要步骤是：以树木的东西南北 4 个方向的冠幅半径和树木坐标为基础数据，分别用东和北、西和北、西和南、东和南冠幅半径，以树木坐标为中心，确定冠幅所在的坐标轴后，用离心角公式求出 1/4 椭圆上的点(离心角按 1 度 1 个间隔，顺时针方向，求每 1/4 椭圆上的 90 个点坐标)，然后把 360 个 IPoint，用 IPointCollection 接口中的 AddPoint，加入到 IRing 中，再加入第 1 个点闭合 IRing，用现有 Ring 得到一个面，从而得到了冠幅的多边形几何对象。模拟后的效果如图 4 所示。

2.2.4　干扰树判定中的水平竞争指数计算　在干扰树判定中，可利用水平竞争指数(HCI)确定邻近树与目标树的竞争强度。水平竞争指数是指目标树冠幅和邻近树的冠幅之和减去两者之间的连线距离与目标树的冠幅的比值，它用来表示目标树和邻近树的水平竞争强度，公式为：$H_{CI}=(D_{ti}-C_{Wt}-C_{Wi})/C_{Wt}$。其中：$C_{Wt}$ 是目标树与在第 $i$ 棵邻近树方向上的冠幅长度；$C_{Wi}$ 是第 $i$ 棵邻近树在与目标树交叉方向的冠幅长度；$D_{ti}$ 是目标树与第 $i$ 棵邻近树的水平距离。在计算水平竞争指数指标时，往往邻近树不在目标树的正东、正西等正方向。不能简单的用东、西、南、北冠幅半径来计算 2 株树冠幅之间的距离，而是要先求出 2 株树中心连线方向的冠幅半径，这是干扰树判定的一个关键技术。主要步骤是：取出目标树和邻近树地址（ID)，利用 IQueryFilter，在生成的冠幅数据集合（见 2.2.3)中找到对应的冠幅多边形几何对象，并用拓扑(ITopologicalOperator)中的求多边形边界的方法(boundary)，求出冠幅的边界IPolyline，将其转为 ITopologicalOperator；用树木点的 $X$，$Y$ 属性值建立点(IPoint)，用目标树和邻近树的两个坐标值建立 ILine，得到 IPath 和 IPolyline，利用 ITopologicalOperator 中的 Intersect 方法分别求出两点的坐标；将目标树和邻近树的点坐标分别与求出的冠幅交点连线的长度就是 $C_{Wt}$ 和 $C_{Wi}$。

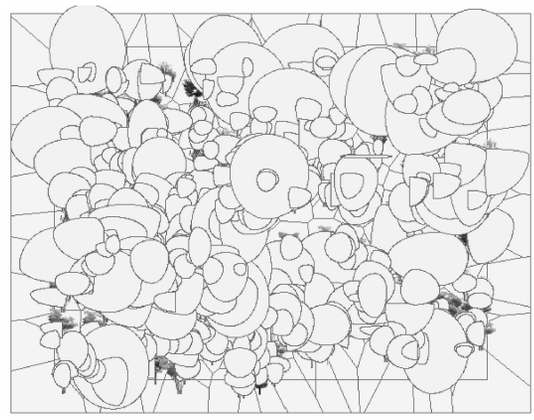

图 4　林分冠幅模拟

Figure 4　Stand crowns simulation

## 2.3　系统应用

2011 年 1 月在临安市青山街道选择杉木 *Cunninghamia lanceolata* 人工林作为系统应用林分，设置了 1 块大小为 50 m × 50 m 的样地。在采伐作业前，对胸径 5 cm 以上的林木全部编号和调查，调查内容包括林木的三维坐标、胸径、树高、枝下高、东西南北 4 个方向的冠幅、起源、林层位置、受损情况、干形质量等。用全站仪测量林木三维坐标，树高和枝下高用瑞典造的 VERTEX 超声波测高器测量。同时请专家在现场判断目标树和干扰树。

在室内把调查数据建立 Excel 文件，导入到系统中，系统自动判断出目标树 36 株和干扰树 52 株。结果证明与人工判断相比，系统能够更好地分析林木空间关系、准确识别目标树和确定干扰树，作业设计更准确和容易，不需要再借助于专家经验。

## 3 结论与讨论

目前，森林经营者已逐渐从传统的木材生产经营演变为调节木材生产和非木材生产矛盾的多功能森林经营[19]。传统的森林经营模式是森林经营者根据林分水平或景观水平的平均参数，如平均胸径、平均树高、断面积等作出决策[13,20]，属于林分水平的经营作业。进入 21 世纪以来，近自然森林经营在中国发展迅速。要进行近自然森林经营就离不开目标树林分作业体系。与传统经营不同，目标树林分作业需求根据单株林木的三维坐标、胸径、树高、枝下高、东西南北冠幅半径、生活力、受损状况和干形质量等参数来作出决策，是一种单水平的经营作业[1]。这种作业模式帮助森林经营者根据林木个体差异和林木竞争关系分别识别林分中应该保护、抚育或采伐的林木，从而提高了准确经营的准确度。

借助于近自然森林经营思想和基于 GIS 的技术方法进行了决策工具的研究。本研究采用.Net 平台下的 COM 技术，基于 C# 开发语言，结合 ArcGIS Engine 9.3 组件开发包, 建立了基于 GIS 技术的目标树经营系统，实现了 GIS 框架模式下的近自然森林经营辅助决策支持分析。在目标树经营辅助系统中，系统对整个林分结构进行了重建，利用树木点符号、树木符号、树木冠幅(林分总体冠幅)垂直分层显示表达同一林分空间结构状态，有助于森林经营管理者更好地理解和认识林分状态。森林经营者可以同时对所有林木进行统一考虑，因而有更高的概率确定目标树和干扰树选择的最优方案。同时，系统使用了多种空间分析方法进行定性和定量的综合判定，实现对以目标树单株经营的作业法的决策支持和模拟，并以直观可视的形式进行展现，用户只需要点击鼠标就能完成作业设计，而不需要懂得 GIS 技术和目标树经营知识和相关经验，提高了系统的实用性和易用性。此外，本研究还重点剖析了目标树经营系统开发的关键技术，并将该系统进行了成功的实际应用。

**参考文献：**


[1] 陆元昌. 近自然森林经营的理论与实践[M]. 北京: 科学出版社，2006.

[2] 陆元昌，甘敬. 21 世纪的森林经理发展动态[J]. 世界林业研究，2002，**15**(1): 1 – 11.
LU Yuanchang，GAN Jing. Development of forest management in the 21st century[J]. *World For Res*，2002，**15**(1): 1 – 11.

[3] 陆元昌，栾慎强，张守攻，等. 从法正林转向近自然林:德国多功能森林经营在国家、区域和经营单位层面的实践[J]. 世界林业研究，2010，**23**(1): 1 – 11.
LU Yuanchang，LUAN Shenqiang，ZHANG Shougong，*et al*. From normal forest to close-to-nature forest: multi-functional forestry and its practice at national，regional and forest management unit levels in Germany [J]. *World For Res*，2010，**23**(1): 1 – 11.

[4] FORSTVEREIN S. Naturnaher waldbau als gesetzlich verankerter standard für die Waldbewirtschaftung [J]. *Schweiz Z Forstwes*，2004，**155**(12): 555 – 557.

[5] STURM K. Was bringt die naturgemäβe Waldwirtschaft für den Naturschutz[J]. *NNA Berichte*，1989，**2**(3): 154 – 158.

[6] 陆元昌，雷相东，洪玲霞，等. 近自然森林经理计划体系技术应用示范 [J]. 西南林学院学报，2010，**30**(2):1 – 6.
LU Yuanchang，LEI Xiangdong，HONG Lingxia，*et al*. Demonstrative application of the close-to-nature forest management planning system to forestry practice [J]. *J Southwest For Univ*，2010，**30**(2)：1 – 6.

[7] 邵青还. 第 2 次林业革命："接近自然的林业" 在中欧兴起[J]. 世界林业研究，1991，**4**(4)：8 – 15.
SHAO Qinghai. The second forestry revolution: close-to-nature booming in central Europe[J]. *World For Res*，1991，**4**(4)：8 – 15.

[8] 张鼎华，叶章发，王伯雄. "近自然林业"经营法在杉木人工幼林经营中的应用[J]. 应用与环境生物学报，2001，**7**(3)：219 – 223.
ZHANG Dinhua，YE Zhangfa，WANG Boxiong. Application of "nature-approximating forestry" management method in Chinese fir plantation [J]. *Chin J Appl Environ Bio*，2001，**7**(3)：219 – 223.

[9] 蔡年辉，李根前，陆元昌. 云南松纯林近自然化改造的探讨[J]. 西北林学院学报, 2006，**21**(4)：85 – 88.
CAI Nianhui，LI Genqiang，LU Yuanchang. Discuss on the approaching-nature forestry management to *Pinus yunna-*

*nensis* pure forests [J]. *J Northwest For Univ*, 2006, **21**(4): 85 – 88.

[10] 王金锡，王启和，孙鹏，等. 退化天然常绿阔叶林近自然林经营技术(一)[J]. 四川林业科技，2007，**28**(2)：7 –14.

WANG Jinxi, WANG Qihe, SUN Peng, *et al*. Researches on near natural forest management techniques of retrograded natural evergreen broad-leaf forests (I) [J]. *J Sichuan For Sci Technol*, 2007, **28**(2): 7 – 14.

[11] 刘宪钊，陆元昌，周燕华，等. 加勒比松人工林近自然化改造中的发展类型设计[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版，2009，**33**(5)：46 – 50.

LIU Xianzhao, LU Yuanchang, ZHOU Yanhua, *et al*. Forest development type design in close-to-nature forest management of caribbean pine plantation [J]. *J Nanjing For Univ Nat Sci Ed*, 2009, **33**(5): 46 – 50.

[12] 宁金魁，陆元昌，赵浩彦，等. 北京西山地区油松人工林近自然化改造效果评价 [J]. 东北林业大学学报，2009，**37**(7)：42 – 44.

NING Jinkui, LU Yuanchang, ZHAO Haoyan, *et al*. Assessment on close-to-nature transformation of *Pinus tabulaeformis* plantations in Xishan Region, Beijing [J]. *J Northeast For Univ*, 2009, **37**(7): 42 – 44.

[13] 陆元昌，张守攻，雷相东，等. 人工林近自然化改造的理论基础和实施技术[J]. 世界林业研究，2009，**22**(1)：20 – 27.

LU Yuanchang, ZHANG Shougong, LEI Xiangdong, *et al*. Theoretical basis and implementation techniques on close-to-nature transformation of plantations [J]. *World For Res*, 2009, **22**(1): 20 – 27.

[14] 王懿祥，陈永刚，汤孟平，等. 基于 GIS 和NET 的插件式森林空间结构分析系统[J]. 浙江农林大学学报，2011，**28**(5)：720 – 726.

WANG Yixiang, CHEN Yonggang, TANG Mengping, *et al*. A plugin system for forest spatial structure based on GIS and .NET [J]. *J Zhejiang A & F Univ*, 2011, **28**(5): 720 – 726.

[15] HUI Gangying, von GADOW K, MATTGIAS A. A new parameter for stand spatial structure neighbourhood comparison[J]. *For Res*, 1999, **12**(1): 1 – 4.

[16] 赵浩彦. 近自然森林经营的辅助分析和决策工具开发[D]. 北京：北京林业大学，2008.

ZHAO Haoyan. *Development of Associate Analysis and Supporting System for Close-to-nature-forest Management*[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2008.

[17] 王懿祥. 人工马尾松和杉木林目标树经营理论与实践[D]. 北京: 中国林业科学研究院，2012.

WANG Yixiang. *Theory and Practice of Target Trees Management in Pinus massoniana and Cunninghamia lanceolata Plantation* [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2012.

[18] HEGYI F. A simulation model for managing Jack-pine stands[M]//FRIES J. *Growth Models for Tree and Stand Simulation*. Stockholm: Royal College of Forest, 1974: 74 – 90.

[19] EMIN Z B, SEDAT K, HACI A Y. Comparing multipurpose forest management with timber management, incorporating timber, carbon and oxygen values: a case study [J]. *Scandinavian J For Res*, 2008, **23**: 105 – 120.

[20] YOSHIMOTO A, BRODIE J D, SESSIONS J. A new heuristic to solve spatially constrained long-term harvest scheduling problems [J]. *For Sci*, 1994, **40**: 365 – 394