

基于 GIS 技术的林木竞争指数计算系统的设计与开发

吴建强^{1,2}, 王懿祥^{1,2*}, 杨 峪³, 杨 一^{1,2}

(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. 浙江农林大学 环境与资源学院,浙江 临安 311300;3. 江苏扬州市邗江测量服务所,江苏 扬州 225012)

摘要:在 GIS 技术的支持下,以 C# 编程语言与 ArcEngine 组件库为开发工具,设计开发了融 4 种边缘校正方法、6 种竞争树判断方法、19 种竞争指数计算方法为一体的插件式林木竞争指数计算系统,具备了林木竞争指数的计算和林分竞争分析等功能。结果表明,该计算系统简单易用,计算科学,适用于林木竞争指数的研究和应用,具有推广价值。

关键词:竞争指数;GIS;ArcEngine;森林空间结构

中图分类号:S758 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2014)04-0175-07

Design and Development of Competition Index Calculation System Based on GIS Technology

WU Jian-qiang^{1,2}, WANG Yi-xiang^{1,2*}, YANG Yu³, YANG Yi^{1,2}

(1. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Carbon Cycling in Forest Ecosystems and Carbon Sequestration, Zhejiang A&F University, Lin'an, Zhejiang 311300, China; 2. School of Environmental & Resource Sciences, Zhejiang A&F University, Lin'an, Zhejiang 311300, China; 3. Measurements and Service Station of Hanjiang, Yangzhou, Jiangsu 225012, China)

Abstract:Competition index (CI) is an important indicator of forest spatial structure research and plays a core role in people's understanding of the dynamics of forest. But many CIs are difficult to calculate and expand due to the complex spatial relationship among trees. In this paper, a GIS based CI calculation system was developed with C# and ArcEngine. The system integrated 4 edge correction methods, 6 competitor identification methods and 19 CI calculation methods in a plug-in way, and contained the capacity of competition index calculation, and stand competition analysis. The results showed that this calculation system was easy to use, accurately to calculate, and was suitable for research and application of competition index. The CI calculation system was worth to popularize.

Key words:competition index; GIS; ArcEngine; forest spatial structure

林木竞争是由于林木个体之间因争夺有限的环境资源、生长空间而发生的互相施加不利影响的现象,竞争会引起林木个体的生长差异^[1-2],继而对林分的发展、物种多样性、群落结构及演替等方面产生巨大影响^[3-5],竞争指数是对林木之间竞争的一种定量描述,在形式上反映的是林木个体生长与生存空间的关系,实质是反映树木对环境资源需求及其争取环境资源所承受的竞争压力^[6]。林木竞争的定量研究经过 60 a 多发展,竞争指数被广泛应用于单木

生长模型研建^[7-11]、林分空间结构分析^[12-13]、群落种内种间关系分析^[14-16]、营林指导^[17-18]等方面,而且新的竞争指数不断出现,如生长空间竞争指数^[19]、追溯动态竞争指数^[5]和基于交角的林木竞争指数^[20]等,但是除了以 Hegyi 竞争指数为代表的简单竞争指数应用较普遍外^[21],许多其他竞争指数虽然有很多优势,但往往因其计算复杂尤其是与距离有关的竞争指数常涉及到空间分析^[22],在实际中并未应用,在一定程度上制约了该领域的发展。本研究

收稿日期:2013-10-25 修回日期:2013-12-30

基金项目:浙江省重点科技创新团队(2010R50030-15);国家“十二五”科技支撑项目(2012BAD22B0503);浙江农林大学科研启动项目(2013FR015)。

作者简介:吴建强,男,硕士研究生,研究方向:森林可持续经营理论与技术研究。E-mail:wx_wujq@126.com

* 通信作者:王懿祥,男,副教授,博士,研究方向:森林可持续经营与林业信息化研究。E-mail:w_yixiang@126.com

在充分利用 GIS 技术的基础上,将各种竞争指数集成在一个系统界面下,开发了林木竞争指数专业计算软件,以期推动相关领域的发展,为广大林业和生态研究人员提供专业化的竞争指数计算软件。

1 系统设计

1.1 系统说明

系统以 GIS 技术为基础,结合林木竞争指数计算理论,将竞争指数各计算步骤通过程序实现,以达到用户选择,系统自动计算与分析的目的,同时在满足系统专业性要求的基础上,系统也具备了良好的扩展性和可靠的稳定性。

1.2 系统目标

系统的目标是通过利用 GIS 强大的空间分析能力,以插件技术集成各种竞争指数,对样地林分进行多种竞争指数计算。通过该系统,可以查看每木的空间分布与胸径、树高、冠幅等基本信息;能通过

边缘校正、竞争树判断和竞争指数计算方法的不同组合方便快捷地计算出各种竞争指数;也能通过图表统计和空间统计插值查看竞争指数的分布、比例和林分竞争的空间分布,为森林空间结构分析提供参考。

1.3 系统功能模块设计

围绕竞争指数计算步骤将系统划分为六大功能模块,并设计了各模块的主要功能(图 1)。

1.3.1 数据导入模块 该模块实现从 Excel 数据文件经过字段匹配转换生成地理数据,或者从已生成好带有林木属性信息的 shape 文件导入,实现林木空间分布图,为后续计算提供可用的数据源。

1.3.2 边缘校正模块 该模块用于计算与距离有关的竞争指数时消除样地边缘林木的边缘效应,包括适用于矩形样地的矩形缓冲区校正法、八邻域样地平移校正法和八邻域样地对称校正法,以及适用于圆形样地的圆形缓冲区校正法 4 种边缘校正方法。

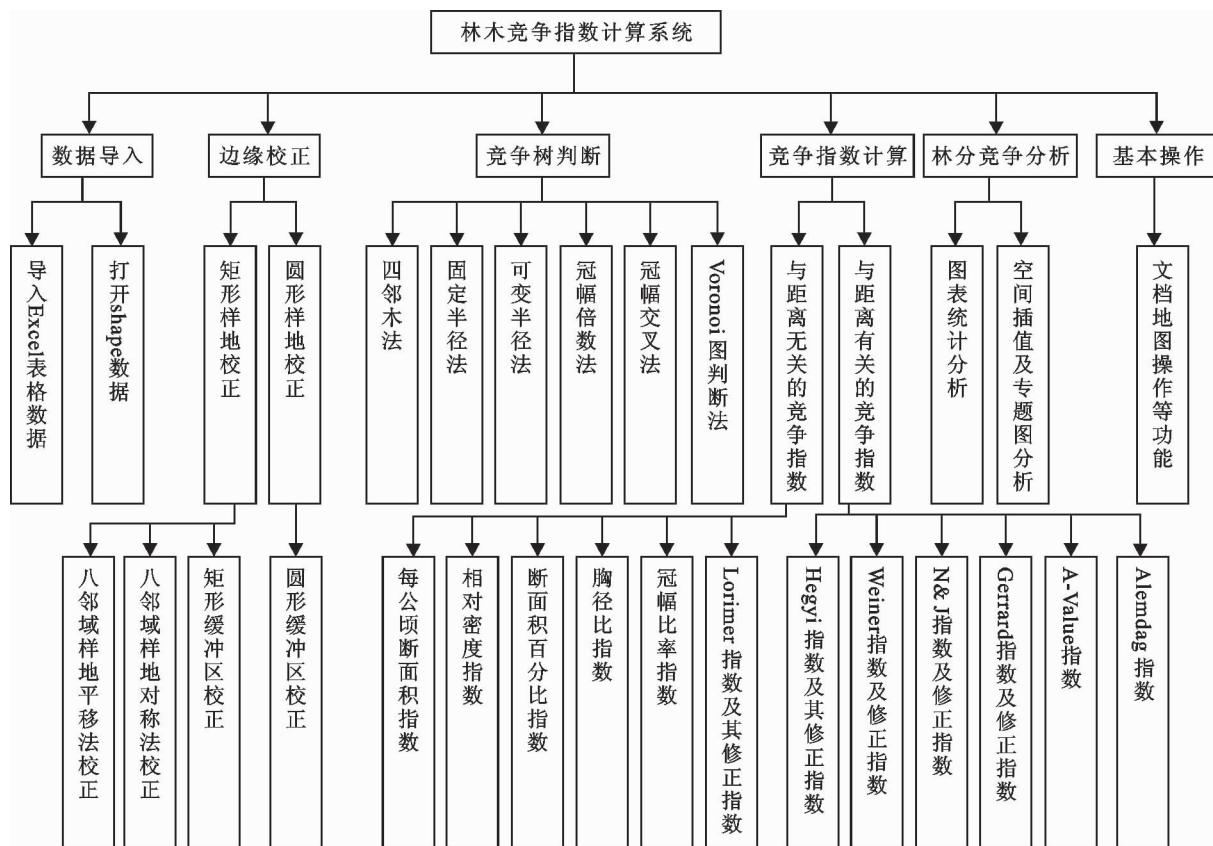


图 1 系统功能模块设计

Fig. 1 Function module design of the system

1.3.3 竞争树判断模块 不同竞争树判断方法判断的竞争树不同,计算同一种竞争指数的结果也不同。该模块提供了固定半径法、可变半径法、四邻木法、冠幅倍数法、冠幅交叉法和 Voronoi 图法 6 种方法用于寻找对象树的竞争树。

1.3.4 竞争指数计算模块 该模块是系统的核心

模块,分为与距离无关的竞争指数计算和与距离有关的竞争指数计算两大块。其中前者设计开发了每公顷断面积指数、Curtis^[23]的相对密度指数、断面积百分比指数、胸径比指数^[24]、冠比率指数、Lorimer 指数 I 型和 II 型^[25]等 7 种与距离无关的竞争指数计算功能;后者设计开发了 Hegyi 指数及其修正指

数^[26]、Weiner 指数及其修正指数^[27]、Newton and Jolliffe 指数及其修正指数^[28]、Gerrard 指数及其修正指数^[29-31]、Martin and EK 指数^[32]、A-Value 指数和 Alemdag 指数^[33]等 12 种与距离有关的竞争指数计算功能。

1.3.5 林分竞争分析模块 该模块通过统计图表和空间插值来分析林分竞争指数的分布、统计比例等, 提供直观的竞争力大小比例图、详细的折线分布图和林分竞争空间分布图。

1.3.6 基本操作模块 主要包括对地图图层的管理、要素的查询、属性文档编辑和结果输出打印等。

2 系统开发应用

2.1 系统开发环境

系统的开发选择 Visual Studio 2008 作为平台, 以面向对象的编程语言 C# 为工具, 利用 Esri 公司的 ArcGIS Engine 10 提供的组件库进行二次开发。

2.2 基于 GIS 的关键技术实现

系统研制将竞争指数计算理论和 GIS 中的空间分析技术相结合, 将复杂的计算过程通过 GIS 技术实现, 解决了竞争指数计算中空间分析的 4 点关键技术难点。简述 4 点关键性技术, 包括边缘校正模块和竞争树判断模块各 1 例, 竞争指数计算模块中最常用的竞争指数和与 GIS 结合紧密的典型竞争指数各 1 例。

2.2.1 八邻域样地平移校正 八邻域样地平移校正法是边缘校正中的常用方法, 与矩形缓冲区法相比具有不损失样地林木信息的优点。它是指分别在原样地的上、下、左、右、左上、左下、右上、右下 8 个方向复制原样地, 形成由 9 个相同样地组成的大样地, 以原样地为核心区, 核心区内所有林木均为对象树^[34], 适用于矩形样地。八邻域样地平移校正需要对样地边界和林木坐标重定位、计算、地图编辑操作较多。由于平移的 8 个样地大部分信息都用不上, 为了提高计算速度和提高效率, 可由用户指定平移的宽度以确保消除边缘木的边缘效应。实现步骤: 打开指定文件路径后, 根据用户输入的指定平移宽度来查找所需林木坐标数据, 启用 IworkspaceEdit 的 StartEditing() 和 StartEditOperation() 方法编辑林木属性数据, 坐标数据依据校正方法依次改变数值, 林木 ID 累加, 林木其余属性不变(图 2)。

2.2.2 可变距离法判断竞争树 可变距离法又称为 BAF 法, 由 BAF(Basal area factors, 断面面积因子)来确定半径(BAF 为 $2, 4, 6 \text{ m}^2 \cdot \text{hm}^{-2}$, 用户根据林分情况选择^[34])。如果对象树与邻近木之间的

距离小于标准距离, 则选为竞争树, 其中标准距离由公式(1)确定。

$$\text{标准距离} = \frac{D_i}{2 \times \sqrt{\text{BAF}}} \quad (1)$$

其中: D_i 第 i 棵邻近木的胸径。

标准距离与邻近木的胸径大小有关, 胸径越大, 标准距离越大, 离得近的邻近树不一定是竞争树。对于某一株对象树而言, 竞争树的数量也不确定, 离对象树多远的范围才有可能是竞争树也不确定, 需要反复动态计算。对于整个样地内的对象树进行逐株计算其工作量巨大。主要实现步骤: 通过对对象树和其它林木之间的距离和标准距离的计算, 判断两者的大小来确定对象树的竞争树, 主要由 public DataTable TargetWoodWithItsCompetitionWoods(IList trees, double maxDBH, int TheID, double baf) 方法来完成(图 3)。

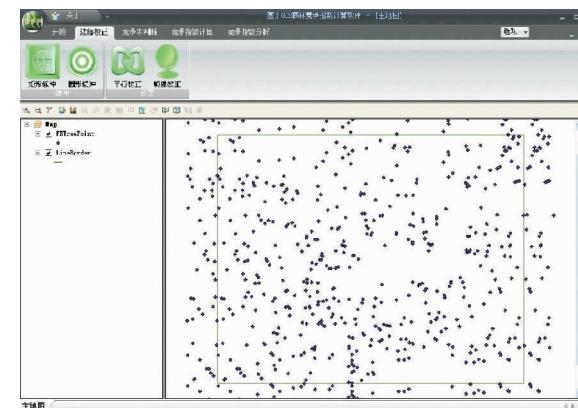


图 2 5 m 校正距离的八邻域平移校正

Fig. 2 Five-meter distance of eight neighborhood shifting edge correction

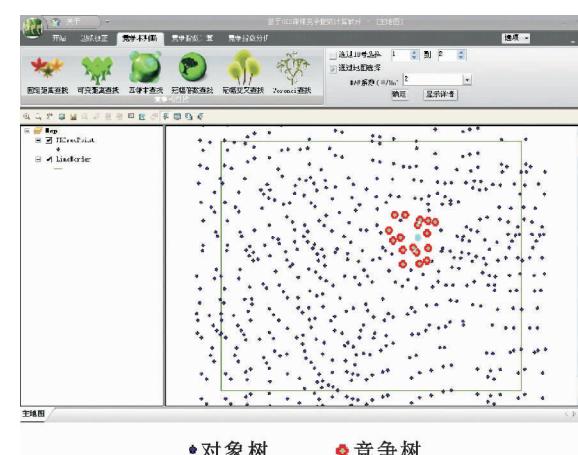


图 3 某一对象树的可变距离竞争树查找结果

Fig. 3 Competitors of one subject tree by BAF

2.2.3 Hegyi 竞争指数 也称为简单竞争指数, 由对象树与竞争树之间的距离及竞争树与对象树的胸径之比构成^[26], 该指数在实际应用中最为广泛。

$$CI_i = \sum_{j=1}^N (D_j/D_i)/(DIST)_{ij} \quad (2)$$

式中, CI_i 为对象树 i 的简单竞争指标, D_i 为对象树 i 的胸径, D_j 为对象树周围第 j 竞争树的胸径 ($j=1, 2, \dots, N$), $(DIST)_{ij}$ 为对象树 i 与竞争树 j 之间的距离。

Hegyi 竞争指数计算过程较为简单, 涉及因子

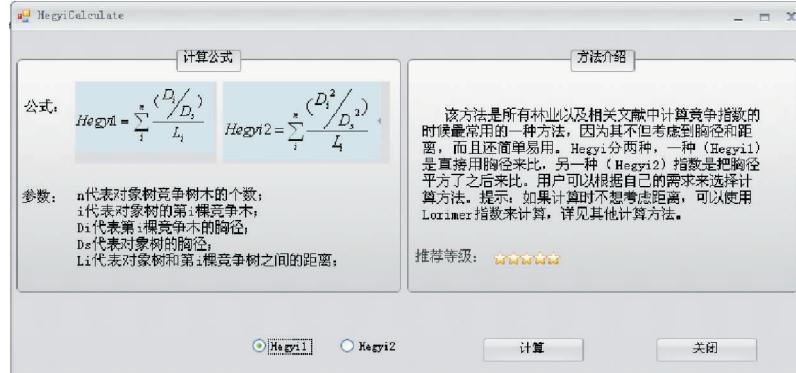


图 4 Hegyi 指数及其修正指数计算窗体

Fig. 4 Hegyi index and its amendment index calculation form

2.2.4 Gerrard 竞争指数 由 Gerrard(1969)提出的一个以对象树与竞争树冠幅重叠面积和对象树冠幅面积之比的竞争指数^[29]。

$$Gerrard = \sum_i \frac{a_i}{A_s} \quad (3)$$

式中, a_i 为对象树冠幅和第 i 棵邻近树冠幅重叠面积, A_s 为对象树冠幅影响区域的总面积。

Gerrard 竞争指数涉及对象树与邻近树之间的冠幅重叠面积计算和对象树各方向冠幅的拟合, 需要大量的空间拓扑关系分析, 与 GIS 技术结合紧

仅胸径和距离, 在竞争树判断模块确定竞争树后, 关键是要将对象树与竞争树距离计算得出。实现步骤: 判断对象树和竞争树是否具备竞争指数计算字段, 通过(HegyiCalculation)方法计算对象树和竞争树之间的距离并完成竞争指数计算, 最后将计算结果更新到相应属性表中(图 4)。

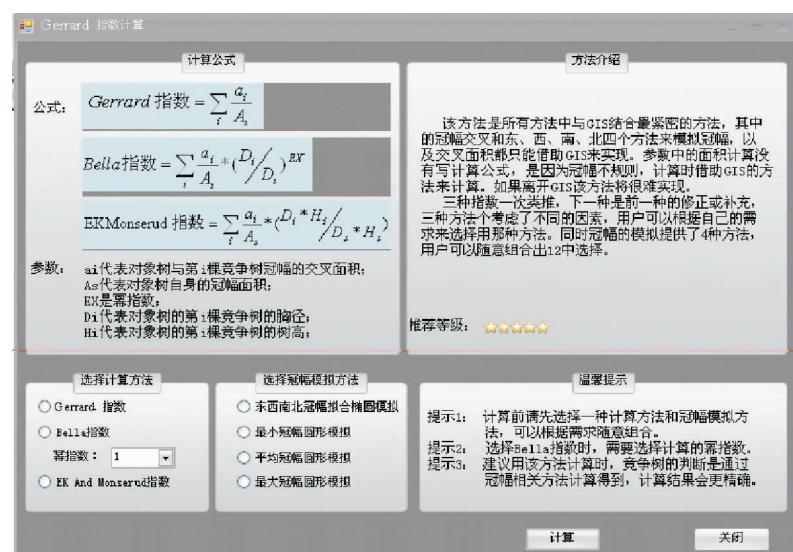


图 5 Gerrard 指数及其修正指数计算窗体

Fig. 5 Gerrard index and its amendment index calculation form

密。计算过程主要由 3 大步骤实现:首先根据林木东、西、南、北 4 个方向的冠幅值生成竞争树和对象树的冠幅, 调用 pTopologicalOperator. Intersect()方法获得竞争树和对象树冠幅交叉图形并求出面积, 其次根据对象树的冠幅数据(实际冠幅或平均冠幅)和坐标数据, 通过 topo. buffer()缓冲方法得到对象树冠幅影响区域图并求出面积, 最后由冠幅交叉图形面积除以对象树冠幅影响区域图面积得到竞争指数, 并更新到相应属性表中(图 5)。

2.3 应用实例

数据来源于临安昌化 2011 年马尾松人工纯林样地调查, 样地大小 $50\text{ m} \times 40\text{ m}$, 总计 428 棵。将 Excel 数据通过系统的数据导入模块生成地理数据, 以 Hegyi 指数和 A-value 指数为例进行样地林木竞争指标计算与分析。

使用缓冲区校正法对样地作边缘校正, 缓冲距

离为 5 m, 为保证 2 种竞争指数分析方法一致, 均采用四邻木法判断竞争树, 然后通过竞争指数计算模块计算 Hegyi 指数和 A-value 指数, 最后使用竞争指数分析模块对样地两种竞争指数结果进行分析。

使用竞争分析模块中图表统计分析功能的折线图(图 6)和竞争等级所占比例饼图(图 7)显示林分对象树 2 种竞争指数计算的结果。

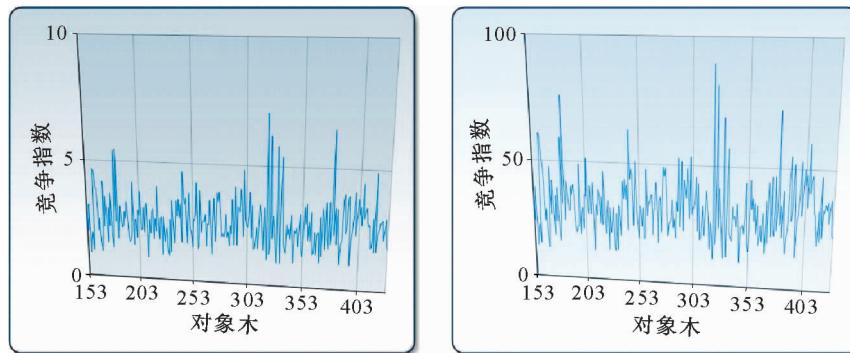


图 6 林分各对象树竞争指数折线图(左图为 Hegyi 指数, 右图为 A-value 指数, 下图同)

Fig. 6 Line charts of subject trees' competition index(the left is Hegyi index and the right is A-value index, ditto)

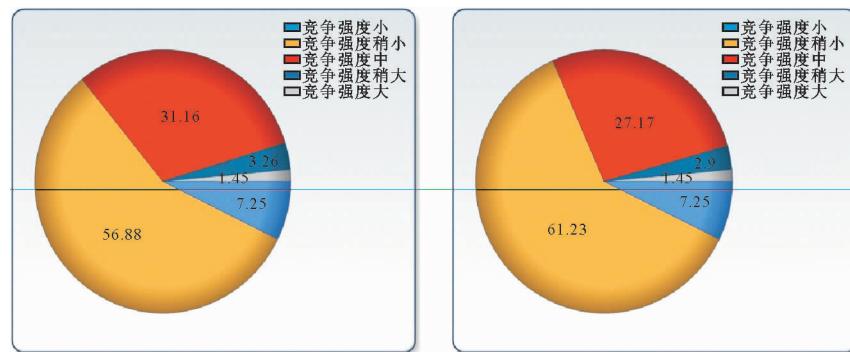


图 7 林分各竞争压力等级所占比例图

Fig. 7 Scale drawings of competitive pressure level

通过折线图(图 6)看出, 虽然 2 种竞争指数值的大小不同, 但对象树所受竞争压力大小的分布趋势基本一致, 同样可从林分各竞争压力等级所占比例(图 7)得到验证。在系统中竞争指数大小被划分为竞争强度小、稍小、中、稍大和大 5 个等级, 该林分

的 Hegyi 指数和 A-value 竞争指数各等级所占比例基本接近。

使用反距离插值法(IDW)对各对象树的竞争指数进行插值, 生成林分竞争空间统计图(图 8)。

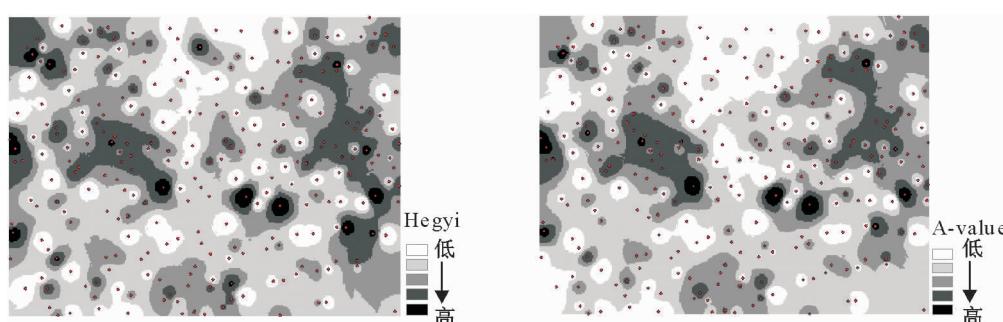


图 8 林分 2 种竞争指数的 IDW 插值图

Fig. 8 Interpolation figures of two indexes

从 2 张插值图中看出样地中林木所受竞争压力大小的分布区域基本一致, 样地东部、中部偏西, 以及西北部的林木所受竞争压力较大, 原因是该几个区域林木分布较密, 因此林木之间的竞争相对较为激烈。这些分析结果可以为营林提供指导, 考虑适当间伐一些林木, 调整区域内竞争强度, 促进保留木的生长。

通过图表统计图可以一目了然地分析出林木所受竞争压力大小的情况以及各竞争等级所占比例, 更能够通过林分竞争插值图反映林分各个区域的竞争情况, 从而为采取营林措施提供科学依据。竞争指数的选取不仅要考虑到理论上的合理性, 还需要综合考虑实际情况和可操作性, 系统提供了大量选择项以保证用户分析和实际林分的需要。

3 结论与讨论

竞争指数各步骤方法多样且计算复杂, 但未见相关软件的研究报道。本研究在查阅大量文献并经总结分析的基础上, 将林木竞争指数计算过程进行了梳理, 划分为边缘校正、竞争树判断、竞争指数计算等步骤, 采用 .Net 平台下的 COM 技术, 基于 C# 开发语言, 结合 ArcGIS Engine 10 组件开发包, 设计开发了基于 GIS 技术的林木竞争指数计算系统, 实现了林木之间竞争情况的分析。用户可以根据林分的实际情况将各竞争指数计算步骤的不同计算方法自由组合, 得到数百种林木竞争指数的计算结果, 也可以对林分各种竞争指数结果进行统计、分析。实践证明该系统具有功能强大、操作简单、可维护性好的特点。

林木竞争指数系统的研发为林分空间结构分析、单木生长模型研建、群落内种内种间关系分析等研究提供了有用的辅助工具。同时, 该系统使用了插件技术, 可随时将各种新的计算方法制成插件, 用户只需要增加或替换插件即可完成系统功能的扩展和升级, 极大地提高了系统的移植性和扩展性^[35]。随着测绘技术在林业上的应用越来越广, 具有林木空间坐标信息的林分数据将会越来越多, 林木竞争指数计算系统为这些数据的深度利用提供了可能和便利。用户只需要点击鼠标就能完成计算, 而不需要懂得 GIS 技术, 提高了系统的实用性和易用性。

参考文献:

- [1] 张思玉, 郑世群. 笔架山常绿阔叶林优势种群种内种间竞争的数量研究[J]. 林业科学, 2001, 37(1): 185-188.
- [2] ZI L B, YANG H, ZHAO G L, et al. A review on the competition indices of individual trees[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2012, 27(6): 152-158. (in Chinese)
- [3] LIU F Y, LI K, LIAO S X, et al. Interspecific competition, population structure and growth dynamics of endangered *Calocedrus macrolepis*[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2010, 46(10): 23-26. (in Chinese)
- [4] LIU J, HONG W, WU C Z, et al. A study on the law of competition in naturally regenerated sassafras tzumu forest [J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2001, 23(2): 240-243. (in Chinese)
- [5] WEBER P, BUGMANN H, FONTI P, et al. Using a retrospective dynamic competition index to reconstruct forest succession[J]. Forest Ecology and Management, 2008, 254(1): 96-106.
- [6] 汤孟平, 陈永刚, 徐文兵, 等. 森林空间结构分析[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 26-27.
- [7] MARTIN G L, EK A R. A comparison of competition measures and growth models for predicting plantation red pine diameter and height growth[J]. Forest Science, 1984, 30(3): 731-743.
- [8] DANIELS R F, BURKHART H E, CLASON T R. A comparison of competition measures for predicting growth of loblolly pine trees[J]. Canadian Journal of Forest Research, 1986, 16(6): 1230-1237.
- [9] 黄新峰, 亢新刚, 孙玲, 等. 红松单木断面积生长模型[J]. 西北林学院学报, 2011, 26(3): 143-146.
- [10] HUANG X F, KANG X G, SUN L, et al. Establishment of individual basal area growth model of korean pine[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2011, 26(3): 143-146. (in Chinese)
- [11] 任谊群. 基于 GIS 和 ANN 的时空相关单木生长模型研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2005: 22-23.
- [12] 刘平, 王玉涛, 杨帆. 基于单木生长模型的森林动态模拟系统研究进展[J]. 世界林业研究, 2011, 24(5): 25-30.
- [13] LIU P, WANG Y T, YANG F. Research advance of forest dynamics modeling system based on individual tree growth model[J]. Word Forestry Research, 2011, 24(5): 25-30. (in Chinese)
- [14] 李建军, 李际平, 刘素青, 等. 红树林空间结构均质性指数[J]. 林业科学, 2010, 46(6): 7-14.
- [15] LI J J, LI J P, LIU S Q, et al. Homogeneity index of stand spatial structure of mangrove ecological system[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2010, 46(6): 7-14. (in Chinese)
- [16] 汤孟平, 徐文兵, 陈永刚, 等. 天目山近自然毛竹林空间结构与生物量的关系[J]. 林业科学, 2011, 47(8): 1-6.

- TANG M P, XU W B, CHEN Y G, et al. Relationship between spatial structure and biomass of a close-to-nature *Phyllostachys edulis* Stand in Tianmu Mountain[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2011, 47(8): 1-6. (in Chinese)
- [14] 王政权, 吴巩胜, 王军邦. 利用竞争指数评价水曲柳落叶松种内种间空间竞争关系[J]. 应用生态学报, 2000, 11(5): 641-645.
- WANG Z Q, WU G S, WANG J B. Application of competition index in assessing intraspecific and interspecific spatial relations between manchurian ash and dahurian larch [J]. *Chinese Journal of Applied Ecologic*, 2000, 11(5): 641-645. (in Chinese)
- [15] 蒋国梅, 孙国, 张光富, 等. 濒危植物宝华玉兰种内与种间竞争[J]. 生态学杂志, 2010, 29(2): 201-206.
- JIANG G M, SUN G, ZHANG G F, et al. Intra and inter-specific competition of endangered plant *Magnolia zenii*[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29(2): 201-206. (in Chinese)
- [16] VON O G, LANG A C, BRUELHEIDE H, et al. Individual-tree radial growth in a subtropical broad-leaved forest: the role of local neighbourhood competition[J]. *Forest Ecology and Management*, 2011, 261(3): 499-507.
- [17] 邹春静, 韩士杰, 张军辉. 阔叶红松林树种间竞争关系及其营林意义[J]. 生态学杂志, 2001, 20(4): 35-38.
- ZOU C J, HAN S J, ZHANG J H. Competition relationship among tree species in broad-leaved korean pine mixed forest and its significance for managing the forest[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2001, 20(4): 35-38. (in Chinese)
- [18] 蒋子涵, 金光泽. 择伐对阔叶红松林主要组成树种种内, 种间竞争的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(9): 2179-2186.
- JIANG Z H, JIN G Z. Effects of selective cutting on intra- and interspecies competitions among major tree species in mixed broadleaved-korean pine forest[J]. *Chinese Journal of Applied Ecologic*, 2010, 21(9): 2179-2186. (in Chinese)
- [19] 马履一, 王希群. 生长空间竞争指数及其在油松, 侧柏种内竞争中的应用研究[J]. 生态科学, 2006, 25(5): 385-389.
- MA L Y, WANG X Q. Growth space competition index (GSCI) and application in the individual intraspecies competition of *Pinus tabulaeformis* and *Platycladus orientalis* forests [J]. *Ecologic Science*, 2006, 25(5): 385-389. (in Chinese)
- [20] 惠刚盈, 胡艳波, 赵中华, 等. 基于交角的林木竞争指数[J]. 林业科学, 2013, 49(6): 68-73.
- HUAI G Y, HU Y B, ZHAO Z H, et al. Forest competition index based on intersection angle[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2013, 49(6): 68-73. (in Chinese)
- [21] 胡刚, 梁士楚, 张忠华, 等. 桂林岩溶石山青冈栎种内与种间竞争的数量关系[J]. 西北林学院学报, 2007, 22(5): 32-36.
- HU G, LIANG S C, ZHANG Z H, et al. Quantitative relationships of intraspecific and interspecific competition in *Cylobalanopsis glauca* in Karst Hills in Guilin[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2007, 22(5): 32-36. (in Chinese)
- [22] 郭恩莹, 吴保国, 张瀚, 等. 杉木人工林缓冲区类竞争指数[J]. 东北林业大学学报, 2012, 40(10): 34-38.
- GUO E Y, WU B G, ZHANG H, et al. Buffer competition indices for Chinese fir plantation[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2012, 40(10): 34-38. (in Chinese)
- [23] CURTIS R O. Notes: a simple index of stand density for douglas-fir[J]. *Forest Science*, 1982, 28(1): 92-94.
- [24] GLOVER G R, HOOL J N. A basal area ratio predictor of loblolly pine plantation mortality[J]. *Forest Science*, 1979, 25(2): 275-282.
- [25] LORIMER C G. Tests of age-independent competition indices for individual trees in natural hardwood stands[J]. *Forest Ecology and Management*, 1983, 6(4): 343-360.
- [26] HEGYI F. A simulation model for managing jack-pine stands [J]. *Growth Models For Tree And Stand Simulation*, 1974 (30): 74-90.
- [27] WEINER J. Neighbourhood interference amongst *Pinus rigida* individuals[J]. *The Journal of Ecology*, 1984, 72(1): 183-195.
- [28] NEWTON P F, JOLLIFFE P A. Assessing processes of intraspecific competition within spatially heterogeneous black spruce stands[J]. *Canadian journal of forest research*, 1998, 28(2): 259-275.
- [29] GERRARD D J. Competition quotient: a new measure of the competition affecting individual forest trees[R]. Agricultural Experiment Station, Michigan State University, 1969;32.
- [30] BELLA I E. A new competition model for individual trees [J]. *Forest Science*, 1971, 17(3): 364-372.
- [31] DANIELS R F. Notes: simple competition indices and their correlation with annual loblolly pine tree growth [J]. *Forest Science*, 1976, 22(4): 454-456.
- [32] MARTIN G L, EK A R. A comparison of competition measures and growth models for predicting plantation red pine diameter and height growth[J]. *Forest Science*, 1984, 30(3): 731-743.
- [33] ALEMDAG I S. Evaluation of some competition indexes for the prediction of diameter increment in planted white spruce [R]. Canadian Forestry Service, Forest Management Institute, Ottawa, Inf. Rep., 1978.
- [34] PRETZSCH H. *Forest dynamics, growth, and yield*[M]. Springer Berlin Heidelberg, 2010: 291-299.
- [35] 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 Y X, CHEN Y G, TANG M P, et al. A plug-in analysis system for forest spatial structure based on GIS and .NET[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2011, 28(5): 720-725. (in Chinese)