北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

R程序包ForestStatTool在林学单木和林分因子统计中的应用

何潇 雷相东 周超凡 段光爽 周梦丽 史景宁

Application of R program package ForestStatTool in statistics of individual tree and stand factors in forestry

He Xiao, Lei Xiangdong, Zhou Chaofan, Duan Guangshuang, Zhou Mengli, Shi Jingning

引用本文:
何潇, 雷相东, 周超凡, 段光爽, 周梦丽, 史景宁. R程序包ForestStatTool在林学单木和林分因子统计中的应用[J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(10):125–135. doi: 10.12171/j.1000–1522.20240076
He Xiao, Lei Xiangdong, Zhou Chaofan, Duan Guangshuang, Zhou Mengli, Shi Jingning. Application of R program package ForestStatTool in statistics of individual tree and stand factors in forestry[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(10):125–135. doi: 10.12171/j.1000–1522.20240076

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240076

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于气候因子的兴安落叶松天然林单木直径生长模型构建
Development of individual–tree diameter increment model for natural *Larix gmelinii* forests based on climatic factors
北京林业大学学报, 2022, 44(8): 1–11. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210353

激光雷达辅助的样地调查单木定位
LiDAR based individual tree localization for sample plot inventory
北京林业大学学报, 2023, 45(1): 99–108. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220106

基于随机森林算法的落叶松云冷杉混交林单木胸径生长预测
Individual tree DBH growth prediction of larch–spruce–fir mixed forests based on random forest algorithm
北京林业大学学报, 2019, 41(9): 9–19. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20180266

基于贝叶斯方法的蒙古栎林单木枯死模型
Individual–tree mortality model of Mongolian oak forests based on Bayesian method
北京林业大学学报, 2019, 41(9): 1–8. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20180260

基于Mask R–CNN和迁移学习的无人机遥感影像杉木单木树冠提取
UAV remote sensing image extraction of single tree crown of Chinese fir based on Mask R–CNN and transfer learning
北京林业大学学报, 2024, 46(3): 153–166. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210343

基于树冠和竞争因子的杉木胸径估测
Estimating DBH of *Cunninghamia lanceolata* based on crown and competition factors
北京林业大学学报, 2023, 45(9): 42–51. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230011

DOI:10.12171/j.1000−1522.20240076

R 程序包 ForestStatTool 在林学单木和林分因子统计中的应用

何 潇[1] 雷相东[1] 周超凡[1] 段光爽[2] 周梦丽[3] 史景宁[4]

（1. 林木资源高效生产全国重点实验室，国家林业和草原局森林经营与生长模拟实验室，中国林业科学研究院资源信息研究所，北京 100091；2. 信阳师范大学数学与统计学院，河南 信阳 464000；3. 河南农业大学林学院，河南 郑州 450046；4. 河北农业大学经济管理学院，河北 保定 071000）

摘要:【目的】为了实现林学中单木和林分指标的快速、准确计算，开发了通用的 R 包 ForestStatTool，并通过具体示例介绍其在单木和林分因子统计计算中的应用。**【方法】**在 R 语言环境中，编写了 12 个实用函数，涵盖重复标签处理、重复坐标处理、样地分割、空间结构指标计算、竞争指标计算、生物多样性指标计算和林分因子统计这 7 大类。以北京十三陵林场的侧柏纯林 0.06 hm^2 圆形样地和吉林省汪清林业局金沟岭林场的云冷杉针阔混交林 1 hm^2 方形大样地的数据为例，介绍了 ForestStatTool 包的主要功能及使用方法。**【结果】**ForestStatTool 包通过分析各类样地数据，成功计算了林木的空间结构、竞争指数和生物多样性等指标。结果表明：ForestStatTool 包可有效识别林木的空间分布特征，量化林木的竞争压力，并揭示了林分结构和多样性分布的特征；还能够满足大样地和复杂林分的快速统计分析需求，适用于多种林业应用场景。**【结论】**ForestStatTool 包可方便、快速、准确地完成样地数据检查与预处理，并完成林学单木和林分因子的相关统计计算。ForestStatTool 包可应用于森林经理、森林培育、森林生态等领域。

关键词：数据分析；统计；R 程序包；ForestStatTool；单木因子；林分因子；样地调查数据

中图分类号：S72；TP317 **文献标志码：**A **文章编号：**1000−1522(2024)10−0125−11

引文格式：何潇，雷相东，周超凡，等. R 程序包 ForestStatTool 在林学单木和林分因子统计中的应用［J］. 北京林业大学学报，2024，46(10)：125−135. He Xiao, Lei Xiangdong, Zhou Chaofan, et al. Application of R program package ForestStatTool in statistics of individual tree and stand factors in forestry［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(10): 125−135.

Application of R program package ForestStatTool in statistics of individual tree and stand factors in forestry

He Xiao[1] Lei Xiangdong[1] Zhou Chaofan[1] Duan Guangshuang[2] Zhou Mengli[3] Shi Jingning[4]

(1. State Key Laboratory of Efficient Production of Forest Resources, Key Laboratory of Forest Management and Growth Modelling, National Forestry and Grassland Administration, Institute of Forest Resource Information Techniques, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China;
2. College of Mathematics and Statistics, Xinyang Normal University, Xinyang 464000, Henan, China;
3. College of Forestry, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450046, Henan, China;
4. College of Economics and Management, Hebei Agricultural University, Baoding 071000, Hebei, China)

Abstract: ［**Objective**］To achieve fast, accurate calculation of individual tree and stand factors in forestry, a general R program package called ForestStatTool was developed. Specific examples were provided to demonstrate its application in statistical calculation of individual tree and stand factors in forestry. ［**Method**］In the R environment, 12 practical functions were developed, covering 7 categories including duplicated labels processing, duplicated coordinates processing, plot segmentation, spatial structure index

收稿日期: 2024−03−18 **修回日期:** 2024−09−20

基金项目: 国家重点研发计划课题（2022YFD2200501），国家自然科学基金青年科学基金项目（32301588、32301582）。

第一作者: 何潇，博士，助理研究员。主要研究方向：森林碳汇经营。Email: hexiaonuist@163.com 地址：100091 北京市海淀区东小府 1 号中国林业科学研究院资源信息研究所。

责任作者: 周超凡，博士，助理研究员。主要研究方向：森林可持续经营。Email: zhouchaofan@ifrit.ac.cn 地址：同上。

本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn; http://journal.bjfu.edu.cn

calculation, competition index calculation, biodiversity index calculation, and stand factor calculation. Using data from a 0.06 ha circular sample plot of *Platycladus orientalis* pure forest in Beijing's Shisanling Forest Farm and a 1 ha square big sample plot of spruce-fir conifer-broadleaf mixed forest in the Jingouling Forest Farm, Wangqing Forestry Bureau, Jilin Province of northeastern China, the main functions and usage of ForestStatTool package were demonstrated. [**Result**] Through the analysis of various sample plot data using ForestStatTool package, spatial structure, competition index, biodiversity and other indicators were successfully calculated. The results indicated that the package can effectively identify tree spatial distribution characteristics, quantify tree competition pressure, and reveal stand structure and diversity features. This tool is able to quickly handle the statistical analysis of large and complex sample plots, making it suitable for various forestry applications. [**Conclusion**] ForestStatTool package can enable convenient, fast, accurate data checking and preprocessing, and complete the calculation of multiple individual tree and stand factors in forestry. It can be applied in the fields such as forest management, silviculture, and forest ecology.

Key words: data analysis; statistics; R program package; ForestStatTool; individual tree factors; stand factors; sample plot survey data

林学研究和林业生产实践，经常通过样地调查数据统计单木和林分因子（如林分密度、断面积、树种组成、生物多样性、竞争和空间结构等），用于生长建模、现状分析、因子关系分析等。大部分统计计算工作具有高复现性，因此有必要设计一系列通用的可复现程序，这可以极大地方便林业科研与基层工作者，减少内业处理的工作量，提高数据分析效率。目前已有一些相关的工具，如：沈剑波等[1]利用 C#和 VB6.0 开发了县级林业数据服务平台系统，实现了森林健康评价；孟黎黎等[2]利用 VB6.0 开发了近自然森林经营目标树作业体系辅助设计系统，对样地数据进行管理；孙建军等[3]利用 VB6.0 开发了具有林分统计等功能的样地调查统计分析系统；国红等[4]利用 VB6.0 开发了多期森林调查样地数据的逻辑检查工具，它可以检查和纠正多期调查数据中的逻辑错误。上述工具非开源且计算指标有限，因此其应用受到了限制。

R 语言专为统计计算和图形绘制而设计，是一款易上手的开源、免费、通用的编程软件。现已汇聚了大量优秀的 R 语言工具包（R package，下文简称 R 包）用于解决各方面的问题，如包含了各种植被统计分析功能的 vegan 包[5]等。Lai 等[6]通过分析影响因子超过 3.0 的 8 种林学期刊，发现约 45.7% 的文章明确提到使用 R 语言作为数据分析的统计软件，使用 R 语言的文章比例从 2013 年的 28.3% 逐步攀升到 2022 年的 60.9%。Atkins 等[7]比较了排名前 20 的生态学和林业期刊 2009—2019 年间发表的研究论文，研究结果显示：超过 30% 的生态学文章使用了 R 语言，但只有不到 10% 的林业文章使用了 R 语言。近些年用于林学领域的 R 包有增长的趋势，如：rFIA 包实现了美国森林调查分析生态数据集对森林各类属性的估计[8]；StemAnalysis 包[9]实现了树干解析；MtreeRing 包[10]使用形态学图像处理和边缘检测算法自动计算树芯或圆盘扫描图像上的年轮宽度，实现了年轮的识别与分析；forestat 包[11]实现了基于潜在生产力的立地质量评价。在指标计算方面，计算群落生物多样性因子的 R 包较多，如 vegan 包[5]、adiv 包[12]等，但这些 R 包只关注物种（树种）多样性指标的计算，并不支持林分结构多样性指标的计算。计算空间结构指标的 R 包较少，forestSAS 包[13]实现了空间结构指标的计算，但是该包对于边缘校正的方法有限，仅支持缓冲区方法。目前还没有计算单木竞争指标（尤其是与距离有关的竞争指数）的 R 包。此外，逻辑检查与处理对于林业调查样地的数据分析至关重要，但上述计算各项指标的 R 包中，均没有设计逻辑检查与处理的函数。如果输入未经检查的数据，会导致计算结果不可信，从而降低数据分析的质量。总体来说，林学领域的 R 包比较少，目前能同时统计多类单木或林分因子计算指标的 R 包则更少，R 包集成度较低，且样地计算中缺少检查因子的专项工具包，这些都限制了森林样地调查数据分析的深度和广度。

因此，本研究开发了具备多种数据输入方式和分析方法的高集成度开源 R 包 ForestStatTool，用于计算林学中的常用指标。这些指标从层次上可划分为单木和林分因子，从属性上可划分为林分因子（如平均胸径、密度、林分高等）、生物多样性、竞争指标和空间结构指标等。这些指标被集成在每类因子的特定函数中，只需要输入一条命令即可一站式完成所有指标的计算。本文以北京十三陵林场的侧柏

(*Platycladus orientalis*)纯林的 0.06 hm^2 圆形样地和吉林省汪清林业局金沟岭林场的云冷杉针阔混交林 1 hm^2 大样地的数据为例，介绍了 ForestStatTool 包的功能及其使用方法。

1　ForestStatTool 包的结构

ForestStatTool 包的函数和核心功能见图 1，核心功能主要包括数据检查和预处理、单木层次因子和林分层次因子计算，12 个主要函数可分为重复标签处理、重复坐标处理、样地分割、空间结构指标计算、竞争指标计算、林分因子统计和生物多样性指标计算这 7 大类。

2　ForestStatTool 包示例数据

示例数据均为输入数据，由 3 部分组成，分别来源于吉林省汪清林业局金沟岭林场的云冷杉针阔混交林样地(数据结构见表 1)、北京市十三陵林场的侧柏纯林样地(数据结构见表 2)、含有空值的问题数据(仅做说明使用)。这 3 个数据集均已内置于 ForestStatTool 包中。

云冷杉针阔混交林样地为 100 m × 100 m 的 1 hm^2 方形大样地，位于吉林省汪清林业局金钩岭林场。2013 年 8 月进行数据调查，对样地内胸径 1 cm(含)以上的树木进行编号，记录了位置、树种、胸径、树高和冠幅等。数据包含 14 个乔木树种(组)——白桦(*Betula platyphylla*)、椴树(*Tilia amurensis*)、枫桦(*Betula costata*)、红豆杉(*Taxus cuspidata*)、红松(*Pinus koraiensis*)、黄菠萝(*Phellodendron amurense*)、冷杉(*Abies fabri*)、长白落叶松(*Larix olgensis*)、色木(*Acer mono*)、水曲柳(*Fraxinus mandschurica*)、杨树(*Populus* spp.)、榆树(*Ulmus pumila*)、云杉(*Picea asperata*)和杂木，并用数值 1 ~ 14 来表示。该数据在 R 语言环境中的数据格式为数据框，被命名为“bigplot”，其变量名见表 1。

侧柏纯林样地为 3 块 0.06 hm^2 圆形样地(半径 13.82 m)，位于十三陵林场长陵分场 15 小班。2021 年 8 月进行数据调查，对样地中胸径 ≥ 5 cm 的乔木进行编号，记录其位置、树种和胸径。数据包含 5 个乔木树种——侧柏(*Platycladus orientalis*)、油松(*Pinus tabuliformis*)、栓皮栎(*Quercus variabilis*)、蒙古栎

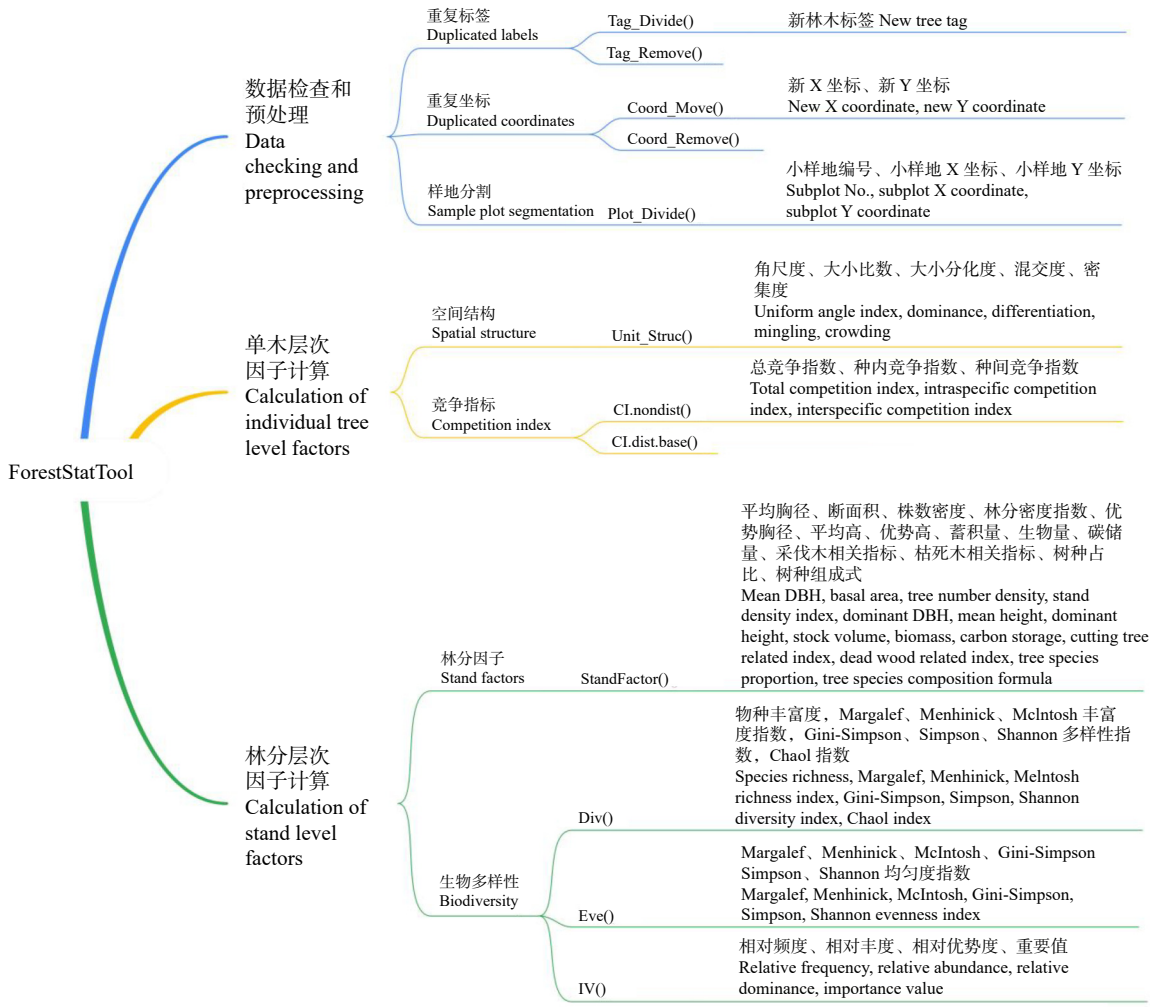


图 1　ForestStatTool 包的核心功能、主要函数和输出结果

Fig. 1　Core features, main functions and output results of ForestStatTool package

表 1 云冷杉针阔混交林 1 hm² 方形大样地输入数据结构

Tab. 1 Input data structure of 1 ha rectangular big sample plot of spruce-fir conifer-broadleaf mixed forest

项目 Item	样地号 Sample plot No.	林木标签 Tree label	横坐标 Abscissa	纵坐标 Ordinate	树种 Tree species	胸径 DBH/cm	树高 Tree height/m	枝下高 Height under branch/m	树冠半径 Crown radius/m
R包中变量名 Variable name in R package	Plot	Tag	X	Y	SP	D	H	HCB	CR
输入数据 Input data	B-10	1	0.671	9.274	5	39.2	23.0	12.3	2.03
	B-10	2	1.933	7.402	5	10.1	7.6	4.4	1.76
	B-10	3	1.149	5.214	14	5.2	5.9	4.0	1.61
	B-10	4	1.262	4.148	9	32.4	18.5	5.3	2.42
	B-10	5	2.323	4.600	3	13.6	16.9	11.2	2.08
	B-10	6	2.391	4.804	3	25.7	21.9	7.9	2.41
	B-10	7	6.017	5.648	7	19.5	15.0	5.9	3.09
	B-10	8	5.367	1.903	3	13.0	17.3	11.6	2.29
	B-10	9	5.973	1.488	6	11.5	11.0	8.6	2.16
	B-10	10	6.110	1.838	7	15.8	11.6	6.1	2.37
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

表 2 侧柏纯林 0.06 hm² 圆形样地输入数据结构

Tab. 2 Input data structure of 0.06 ha circular sample plot of *Platycladus orientalis* pure forest

项目 Item	样地号 Sample plot No.	林木标签 Tree label	胸径 DBH/cm	树高 Tree height/m	横坐标 Abscissa	纵坐标 Ordinate	树种 Tree species	单木材积 Individual tree volume/m³	单木地上生物量 Individual tree aboveground biomass/kg	单木地下生物量 Individual tree underground biomass/kg	单木地上碳储量 Individual tree aboveground carbon storage/kg	单木地下碳储量 Individual tree underground carbon storage/kg
R包中变量名 Variable name in R package	Plot	Tag	D	H	X	Y	SP	V	BIO_A	BIO_ROOT	CAR_A	CAR_ROOT
输入数据 Input data	A1	1	17.7	8.6	0	0	4	0.10	121.61	37.80	67.60	18.99
	A2	2	10.3	6.3	3.473	−10.374	3	0.03	43.40	13.93	24.13	7.00
	A3	2	10.5	6.4	−1.564	1.911	4	0.03	45.07	14.43	25.05	7.25
	A2	3	21.1	9.9	−12.610	−2.256	2	0.15	171.48	52.26	95.33	26.25
	A3	3	10.9	6.5	−2.074	−0.873	4	0.03	48.32	15.46	26.86	7.77
	A1	4	10.1	7.4	−2.810	0.632	1	0.03	43.53	13.42	24.20	6.74
	A2	4	10.0	6.2	4.938	12.188	5	0.02	41.04	13.19	22.81	6.63
	A1	1	17.7	8.6	0	0	4	0.10	121.61	37.80	67.60	18.99
	A2	1	16.7	8.3	0	0	5	0.08	108.81	33.96	60.49	17.06
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

(*Quercus mongolica*)和黄栌(*Cotinus coggygria*),并用数值 1 ~ 5 来表示。

每株样木的树高使用 Richards 树高曲线计算,单木材积使用文献 [14] 中的模型计算,单木生物量和碳储量使用文献 [15] 中的模型计算。需要说明的是,为了使所有指标在各个样地中都可以计算,本研究对该示例数据中的个别数据进行了改动,比如增加侧柏纯林中其他树种的个数,即将侧柏修改为其他树种,但单木树高、材积和生物量等指标仍然为原树种的结果。该数据在 R 语言环境中的数据格式为数据框,被命名为"cdf",其变量名见表 2。

为了更好地演示 ForestStatTool 包的数据检查和预处理功能,该包还内置了问题数据,该数据在 R 语言环境中的数据格式为数据框,被命名为"rawdata"。此外,如果输入的数据存在空值,系统根据空值特征会自动处理空值数据,具体包括提示数据有问题,需要使用预处理函数处理,或者在计算中被自动剔除等。

3 ForestStatTool 包的功能与应用

ForestStatTool 包中包含 7 大功能模块,分别用于重复标签处理、重复坐标处理、样地分割、空间结构指标计算、竞争指标计算、林分因子统计和生物多样性指标计算。具体来说,Tag_Divide 和 Tag_Remove 函数用于处理样地数据中的重复标签问题,Coord_Move 和 Coord_Remove 函数用于处理样地数据中的重复坐标问题,确保数据可进一步分析;Plot_Divide 函数可将大样地分割为多个小样地,便于多尺度分析;Unit_Struc 函数用于计算林木的空间结构指标,揭示

林木属性的空间分布模式; CI.nondist 和 CI.dist.base 函数分别计算与距离无关的、有关的竞争指数，评估种内和种间竞争强度; Div、Eve 和 IV 函数分别计算树种多样性、均匀度和重要值，反映样地内的生物多样性水平; StandFactor 函数统计常见的林分因子，如平均胸径、林分高和生物量等(图 1)。其中，样地分割功能仅适用于方形大样地，其他 6 项功能在数据完整的方形和圆形样地中均可使用。

3.1　数据检查与预处理

在常规的样地调查中，每一株林木都会被赋予唯一的标签用于区分不同的个体。除去从纸质调查数据录入到电子表格数据这一阶段可能造成的标签重复，样地调查会遇到林木在胸高以下发生分叉或者树种无性繁殖时产生大量萌生植株的情况，从而将同根或一丛的林木赋予相同标签; 此外，同根或一丛的林木在记录位置时，群丛内所有林木一般也会被记录成同一个坐标。上述情况会导致相关指标的计算出现错误。因此，设计数据检查与预处理功能对于数据检查和各类指标的正确统计非常重要。

3.1.1　重复标签

标签(Tag)是林木在一个样地中的唯一标识符，是查询、调用单个林木属性信息以及追加新的林木属性数据的必备属性。当林木的标签存在重复时，以上功能都会受到影响，从而造成数据混乱以及后续分析代码无法执行。重复标签处理函数包括“Tag_Divide”和“Tag_Remove”两种，前者通过在重复标签后添加新标注来解决重复标签问题，后者通过保留重复标签中最大胸径的林木且删除其他林木来解决重复标签问题。函数输出“There are no duplicated Tags!”提醒，说明所有样地不存在重复标签。如果样地存在重复标签，函数会新增没有重复标签的新列 newTag，并出现“Duplicated Tags found! Column of ‘newTag’ was provided in output dataframe.”提醒。

3.1.2　重复坐标

空间坐标是林木在样地中的相对位置信息，用于反映林木之间的空间分布关系。一些指标的计算依赖于坐标信息，重复坐标会造成林木竞争和角尺度等参数判断错误，因此需要进行处理。重复坐标处理函数包括“Coord_Move”和“Coord_Remove”两种，前者通过随机抖动重复坐标来解决问题，后者通过保留重复坐标中最大胸径的林木且删除其他林木来解决问题。函数输出“There are no duplicated coordinates!”提醒，说明所有样地都不存在重复坐标; 如果样地存在重复坐标，函数会新增没有重复坐标的新坐标列 newX 和 newY，并出现“Duplicated coordinates found! Column of ‘newX’ and ‘newY’ were provided in output dataframe.”提醒。

3.1.3　样地分割

将大样地划分为若干不同大小的小样地，可以从不同尺度上分析生态过程的关系，还可以在一定程度上增加样本量。Plot_Divide 函数实现了将方形样地划分为面积相等的若干小样地的功能，可按照 X 和 Y 坐标方向上设置的小样地数量或长度划分。大样地 bigplot 使用 Plot_Divide 函数进行分割，subplot1、subplot2 和 subplot3 中保存了对大样地 bigplot 进行样地分割后的结果(图 2)，其中 subplot1 和 subplot2 是一样的划分方式。样地分割后得到的结果是在原始数据中增加了分割后的样地号 subplot、样木横坐标 subX 和纵坐标 subY 这 3 个变量。可以将 subplot 作为新的样地号来统计林分层次的因子，也可以结合 subX 和 subY 计算和分析小样地的空间结构指标和竞争指标。

3.2　单木水平因子计算

3.2.1　空间结构指标

空间结构是一种反映林木空间位置关系的单木结构指标，通过判断林木的相邻关系分析不同属性。通过角尺度、大小比数、大小分化度、混交度和密集度等空间结构指标量化林木的空间分布格局、大小竞争态势、大小分化程度、物种混交程度和树冠密集程度[16]。其中，大小比数可以分别基于胸径、树高、冠幅半径进行计算。Unit_Struc 函数实现了用结构单元(由一株中心木和 k 株最近相邻木构成)计算单木和林分空间结构的功能。此函数适用于方形和圆形样地(通过参数 Shape 调整)，并内置 3 种边缘校正方法(通过参数 Correct 调整)。

使用 Unit_Struc 函数计算方形大样地 bigplot 和圆形样地 cdf 中每株林木的空间结构指标和林分空间结构指标。图 3 显示: 方形大样地中，无论是胸径(Avg_U_Udm)、树高(Avg_U_Uht)还是冠幅的大小比数均值(Avg_U_Ucr)都在 0.5 附近，大小分化度均值中 Avg_T_Udm > Avg_T_Uht > Avg_T_Ucr，混交度均值(Avg_M_Usp)为 0.72，角尺度均值(Avg_W_Upa)为 0.53，密集度均值(Avg_C_Ucr)为 0.91。因此，方形大样地中，具有大小优势的林木数量适中; 林木大小分化程度，胸径最大，树高次之，而冠幅最小; 各树种处于强度混交的状态; 林木分布格局属于聚集分布，林木较为拥挤，已经没有多余的生长空间。圆形样地中，A1 样地中具有大小优势的林木数量适中，而 A2 和 A3 样地中具有大小优势的林木较少; 此外，无论是胸径还是树高，A3 样地的林木大小分化程度最高，其次 A1 样地，A2 样地最低; 混交度

```
#bigplot是一个100m×100m的大样地数据框，用于分割小样地
#横纵坐标各划分5份，结果为划分后的25个20m×20m的小样地的合并数据框。
#输入方式
subplot1 <- Plot_Divide(Data = bigplot, Plot = bigplot$Plot, X = bigplot$X, Y = bigplot$Y,
                        Num_xy = c(5,5), Range_xy = c(100,100))
head(subplot1)
```

```
  Plot Tag     X     Y SP    D    H  HCB    CR subplot  subX  subY
1 B-10   1 0.671 9.274  5 39.2 23.0 12.3 2.028 B-10-00 0.671 9.274
2 B-10   2 1.933 7.402  5 10.1  7.6  4.4 1.765 B-10-00 1.933 7.402
3 B-10   3 1.149 5.214 14  5.2  5.9  4.0 1.611 B-10-00 1.149 5.214
4 B-10   4 1.262 4.148  9 32.4 18.5  5.3 2.421 B-10-00 1.262 4.148
5 B-10   5 2.323 4.600  3 13.6 16.9 11.2 2.082 B-10-00 2.323 4.600
6 B-10   6 2.391 4.804  3 25.7 21.9  7.9 2.413 B-10-00 2.391 4.804
```

```
levels(factor(subplot1$subplot))
```

```
 [1] "B-10-00" "B-10-01" "B-10-02" "B-10-03" "B-10-04" "B-10-10" "B-10-11" "B-10-12" "B-10-13" "B-10-14" "B-10-20" "B-10-21" "B-10-22" "B-10-23"
[15] "B-10-24" "B-10-30" "B-10-31" "B-10-32" "B-10-33" "B-10-34" "B-10-40" "B-10-41" "B-10-42" "B-10-43" "B-10-44"
```

```
#一样的结果
subplot2 <- Plot_Divide(Data = bigplot, Plot = bigplot$Plot, X = bigplot$X, Y = bigplot$Y,
                        Length_xy = c(20,20), Range_xy = c(100,100))
head(subplot2)
```

```
  Plot Tag     X     Y SP    D    H  HCB    CR subplot  subX  subY
1 B-10   1 0.671 9.274  5 39.2 23.0 12.3 2.028 B-10-00 0.671 9.274
2 B-10   2 1.933 7.402  5 10.1  7.6  4.4 1.765 B-10-00 1.933 7.402
3 B-10   3 1.149 5.214 14  5.2  5.9  4.0 1.611 B-10-00 1.149 5.214
4 B-10   4 1.262 4.148  9 32.4 18.5  5.3 2.421 B-10-00 1.262 4.148
5 B-10   5 2.323 4.600  3 13.6 16.9 11.2 2.082 B-10-00 2.323 4.600
6 B-10   6 2.391 4.804  3 25.7 21.9  7.9 2.413 B-10-00 2.391 4.804
```

```
levels(factor(subplot2$subplot))
```

```
 [1] "B-10-00" "B-10-01" "B-10-02" "B-10-03" "B-10-04" "B-10-10" "B-10-11" "B-10-12" "B-10-13" "B-10-14" "B-10-20" "B-10-21" "B-10-22" "B-10-23"
[15] "B-10-24" "B-10-30" "B-10-31" "B-10-32" "B-10-33" "B-10-34" "B-10-40" "B-10-41" "B-10-42" "B-10-43" "B-10-44"
```

```
#横坐标划分5份纵坐标各划分4份，结果为划分后的16个15m×20m的小样地的合并数据框
subplot3 <- Plot_Divide(Data = bigplot, Plot = bigplot$Plot, X = bigplot$X, Y = bigplot$Y,
                        Num_xy = c(5,4), Length_xy = c(15,20), Range_xy = c(100,100))
head(subplot3)
```

```
  Plot Tag     X     Y SP    D    H  HCB    CR subplot  subX  subY
1 B-10   1 0.671 9.274  5 39.2 23.0 12.3 2.028 B-10-00 0.671 9.274
2 B-10   2 1.933 7.402  5 10.1  7.6  4.4 1.765 B-10-00 1.933 7.402
3 B-10   3 1.149 5.214 14  5.2  5.9  4.0 1.611 B-10-00 1.149 5.214
4 B-10   4 1.262 4.148  9 32.4 18.5  5.3 2.421 B-10-00 1.262 4.148
5 B-10   5 2.323 4.600  3 13.6 16.9 11.2 2.082 B-10-00 2.323 4.600
6 B-10   6 2.391 4.804  3 25.7 21.9  7.9 2.413 B-10-00 2.391 4.804
```

```
levels(factor(subplot3$subplot))
```

```
 [1] "B-10-00" "B-10-01" "B-10-02" "B-10-03" "B-10-10" "B-10-11" "B-10-12" "B-10-13" "B-10-20" "B-10-21" "B-10-22" "B-10-23" "B-10-30" "B-10-31"
[15] "B-10-32" "B-10-33" "B-10-40" "B-10-41" "B-10-42" "B-10-43"
```

图 2 应用 Plot_Divide 函数分割方形大样地 bigplot

Fig. 2 Utilizing Plot_Divide function to divide the rectangle bigplot

```
## 加载内置数据
data(ForestStatTool)
#使用参数逐个输入林木信息
a1 <- Unit_Struc (Plot = bigplot$Plot, Tag = bigplot$Tag, X = bigplot$X, Y = bigplot$Y, D = bigplot$D,
 SP = bigplot$SP, H = bigplot$H, Shape = "rectangle", Correct = "translation", Range_xy = c(100,100))
```

```
Start calculating:

  |
  |                                                  |   0%
Calculated 1 : Plot = B-10

  |
  |==================================================| 100%
```

```
head(a1[['tree_value']])
```

```
  Plot Tag in_out U_Udm T_Udm M_Usp W_Upa U_Uht T_Uht
1 B-10   1     in  0.00  0.56  0.75  0.50  0.25  0.38
2 B-10   2     in  0.75  0.56  0.75  0.50  0.75  0.52
3 B-10   3     in  1.00  0.68  1.00  0.50  1.00  0.57
4 B-10   4     in  0.00  0.64  1.00  0.50  0.25  0.45
5 B-10   5     in  0.50  0.48  0.75  0.75  0.50  0.38
6 B-10   6     in  0.25  0.52  0.75  0.75  0.00  0.44
```

```
head(a1[['stand_value']])
```

```
  Avg_U_Udm Avg_T_Udm Avg_M_Usp Avg_W_Upa Avg_U_Uht
1 0.4984227 0.4995457 0.7269716 0.5309148 0.5006309
  Avg_T_Uht Plot
1 0.4584921 B-10
```

```
#使用Data直接输入林木信息，Data中需要至少包括Plot，Tag，X，Y，D，SP等变量名，H和CR可选。
#缓冲区进行边缘矫正
a2 <- Unit_Struc (Data = bigplot, Shape = "rectangle", Correct = "buffer",
                  Range_xy = c(100,100), Buf_dist = 2, Bind = TRUE)
```

```
Start calculating:

  |
  |                                                  |   0%
Calculated 1 : Plot = B-10

  |
  |==================================================| 100%
The buffer distance is 2m.
```

```
head(a2[['tree_value']])
```

```
  Plot Tag     X     Y SP    D    H  HCB    CR in_out U_Udm
1 B-10   1 0.671 9.274  5 39.2 23.0 12.3 2.028    out  0.00
2 B-10   2 1.933 7.402  5 10.1  7.6  4.4 1.765    out  0.75
3 B-10   3 1.149 5.214 14  5.2  5.9  4.0 1.611    out  1.00
4 B-10   4 1.262 4.148  9 32.4 18.5  5.3 2.421    out  0.00
5 B-10   5 2.323 4.600  3 13.6 16.9 11.2 2.082     in  0.50
6 B-10   6 2.391 4.804  3 25.7 21.9  7.9 2.413     in  0.25
  T_Udm M_Usp W_Upa U_Uht T_Uht C_Ucr U_Ucr T_Ucr
1  0.65  0.75  1.00  0.00  0.43  0.25  0.50  0.13
2  0.52  0.75  0.50  0.75  0.52  1.00  0.75  0.16
3  0.68  1.00  0.50  1.00  0.57  1.00  1.00  0.25
4  0.58  1.00  0.75  0.25  0.38  1.00  0.00  0.19
5  0.48  0.75  0.75  0.50  0.38  1.00  0.50  0.16
6  0.52  0.75  0.75  0.00  0.44  1.00  0.25  0.19
```

```
head(a2[['stand_value']])
```

```
  Avg_U_Udm Avg_T_Udm Avg_M_Usp Avg_W_Upa Avg_U_Uht
1 0.4987779 0.4985822 0.7268704 0.5317737 0.5006983
  Avg_T_Uht Avg_C_Ucr Avg_U_Ucr Avg_T_Ucr Plot
1 0.4556145  0.909567 0.4905726 0.3471369 B-10
```

```
#城市化区进行边缘矫正
a3 <- Unit_Struc (Data = bigplot, k = 6, Shape = "rectangle", Correct = "single",
                  Range_xy = c(100,100), Buf_dist = 5, Bind = TRUE)
```

```
Start calculating:

  |
  |                                                  |   0%
Calculated 1 : Plot = B-10

  |
  |==================================================| 100%
```

```
head(a3[['tree_value']])
```

```
  Plot Tag     X     Y SP    D    H  HCB    CR in_out U_Udm
1 B-10   1 0.671 9.274  5 39.2 23.0 12.3 2.028    out  0.00
2 B-10   2 1.933 7.402  5 10.1  7.6  4.4 1.765    out  0.83
3 B-10   3 1.149 5.214 14  5.2  5.9  4.0 1.611    out  1.00
4 B-10   4 1.262 4.148  9 32.4 18.5  5.3 2.421    out  0.00
5 B-10   5 2.323 4.600  3 13.6 16.9 11.2 2.082    out  0.50
6 B-10   6 2.391 4.804  3 25.7 21.9  7.9 2.413    out  0.17
  T_Udm M_Usp W_Upa U_Uht T_Uht C_Ucr U_Ucr T_Ucr
1  0.65  0.83  1.00  0.00  0.38  0.17  0.67  0.17
2  0.54  0.83  0.50  0.83  0.53  1.00  0.83  0.22
3  0.72  1.00  0.50  1.00  0.61  0.67  1.00  0.28
4  0.55  1.00  0.83  0.17  0.29  1.00  0.17  0.17
5  0.38  0.67  0.33  0.50  0.28  1.00  0.67  0.18
6  0.47  0.67  0.33  0.00  0.38  1.00  0.33  0.17
```

```
head(a3[['stand_value']])
```

```
  Avg_U_Udm Avg_T_Udm Avg_M_Usp Avg_W_Upa Avg_U_Uht
1 0.4985984 0.5028623 0.7419089  0.566585 0.5007356
  Avg_T_Uht Avg_C_Ucr Avg_U_Ucr Avg_T_Ucr Plot
1 0.4584632 0.8401311 0.4927604 0.3527021 B-10
```

```
# cdf是一个圆形样地的林木信息
a4 <- Unit_Struc (Plot = cdf$Plot, Tag = cdf$Tag, X = cdf$X, Y = cdf$Y, D = cdf$D, SP = cdf$SP,
                  H = cdf$H, k = 3, Shape = "circle", Correct = "single", Radius = 13.82,
                  Bind = FALSE)
```

```
Start calculating:

  |
  |                                                  |   0%
Calculated 1 : Plot = A1

  |==========                                        |  33%
Calculated 2 : Plot = A2

  |====================                              |  67%
Calculated 3 : Plot = A3

  |==================================================| 100%
```

```
head(a4[['tree_value']])
```

```
  Plot Tag in_out U_Udm T_Udm M_Usp W_Upa U_Uht T_Uht
1   A1   1     in  0.00  0.28     1  0.67  0.33  0.19
2   A1   2     in  0.33  0.16     1  1.00  0.00  0.25
3   A1   4     in  0.33  0.24     1  1.00  0.00  0.21
4   A1   6     in  1.00  0.43     1  0.33  1.00  0.19
5   A1   7     in  0.00  0.06     1  0.33  1.00  0.19
6   A1   8     in  0.67  0.22     1  0.33  0.67  0.23
```

```
head(a4[['stand_value']])
```

```
  Avg_U_Udm Avg_T_Udm Avg_M_Usp Avg_W_Upa Avg_U_Uht
1 0.4973585 0.2481132 0.8941509 0.5145283 0.4905660
2 0.5263158 0.2202632 0.8436842 0.4984211 0.5263158
3 0.5197674 0.2890698 0.7448837 0.4869767 0.5197674
  Avg_T_Uht Plot
1 0.1984906   A1
2 0.1886842   A2
3 0.2362791   A3
```

图 3 应用 Unit_Struc 函数计算方形大样地和圆形样地的空间结构指标

Fig. 3 Utilizing Unit_Struc function to calculate the spatial structure index of rectangle big sample plot and circle sample plots

均值显示 3 个样地树种混交程度都较高，且 A1 > A2 > A3；角尺度均值显示 3 个样地的林木都处于随机分布状态。

3.2.2　竞争指标

竞争指标可以量化林木受到的外界竞争压力，还可以反映林木本身的竞争能力。根据是否包含空间信息，竞争指标分为与距离有关、与距离无关两种。

CI.nondist 函数实现了利用单木测量因子计算 9 个与距离无关的竞争指数。CI.dist.base 函数实现了利用单木胸径和位置计算 3 个与距离有关的竞争指数。函数对方形样地和圆形样地均适用(通过参数 Shape 调整)。CI.dist.base 函数还内置 3 种边缘校正方法(利用参数 Correct 进行调整)。每个竞争指数都计算了总竞争以及种内和种间竞争(样地中树种数量 > 1，且参数 SP 输入不为空时才计算种内和种间竞争，输出变量分别用后缀“_intra”和“_inter”加以区分)，以方便后续分析。使用 CI.nondist 函数计算方形大样地 bigplot 和圆形样地 cdf 中每株林木与距离无关的竞争指数(图 4)。以 CI1(大于对象木胸径的断面积和)为例，方形大样地中 CI1 在 0 ~ 28.88 m^2 之间，其频数直方图呈现“右侧切边型”，随着胸径的增加，CI1 逐渐降低，即大树受到的竞争较小，表明林木竞争压力分布不均；从种内和种间竞争来看，CI1_inter 均值为 21.07，CI1_intra 均值为 2.60，说明该地区天然云冷杉针阔混交林中的林木主要受到种内竞争的压力。圆形样地中 CI1 的频数直方图也呈现类似的“右侧切边型”特征，CI1 均值表现为 A3 样地 > A1 样地 > A2 样地；从种内和种间竞争来看，3 个样地的 CI1_intra 均值均小于 CI1_inter 均值，说明圆形样地的林木主要受到种内竞争的压力，这与纯林的特性是一致的。

使用 CI.dist.base 函数计算方形大样地 bigplot 和圆形样地 cdf 中每株林木与距离有关的竞争指数(图 5)。以 CI15(Hegyi 竞争指数)为例，bigplot 和 cdf 中 CI15 的频数直方图呈现 “左侧切边型”，其余特征表现出与 CI1 类似的特点，即随着胸径的增加，CI15 逐渐降低，且种内竞争压力大于种间竞争压力，且主要受到种内竞争的压力。

3.3　林分水平因子计算

3.3.1　林分因子

常见的林分因子可利用单木测量数据计算，包括平均胸径、密度、林分高、林分蓄积量、生物量和碳储量、各树种的占比以及树种组成式等，并且可以分树种计算各项林分因子。如果是多期复测样木数据，则可根据检尺类型分别统计活立木、枯死木、采伐木的各种林分因子。StandFactor 函数实现了输入

```
## 加载内置数据
data(ForestStatTool)
#bigplot是一个100m×100m的矩形样地的林木信息，使用参数逐个输入林木信息，计算与距离无关的竞争指数
a1 <- CI.nondist (Plot = bigplot$Plot, Tag = bigplot$Tag, D = bigplot$D, SP = bigplot$SP, S = 1)
```

```
The 'CI8' not calculate because 'H' don't input.
The 'CI9' not calculate because 'H', 'HCB' or 'CR' don't input.
Start calculating:

  |
  |                                                                      |   0%
Calculated 1 : Plot = B-10

  |
  |======================================================================| 100%
```

```
head(a1)
```

```
  Plot Tag       CI1       CI2       CI3       CI4       CI5       CI6       CI7
1 B-10   1  1.837660  487.7449 2.5733367 0.8200837 6.6220620 0.67253725   238.3514
2 B-10   2 26.927726 1891.9109 0.6630281 0.2112971 0.4396062 0.04464645  3600.4993
3 B-10   3 28.557343 3679.3846 0.3413610 0.1087866 0.1165273 0.01183453 13596.9593
4 B-10   4  6.472066  590.3210 2.1269416 0.6778243 4.5238805 0.45944574   349.3629
5 B-10   5 24.758294 1404.7353 0.8927903 0.2845188 0.7970745 0.08095096  1984.5217
6 B-10   6 12.018581  743.4786 1.6871111 0.5376569 2.8463438 0.28907495   554.8547
  CI1_intra CI2_intra CI3_intra CI4_intra CI5_intra  CI6_intra CI7_intra  CI1_inter
1 1.1831772  43.21429 1.9508762 0.8200837 3.8059178 0.67253725  27.90236  0.6544825
2 3.2966915 169.60396 0.5026492 0.2112971 0.2526562 0.04464645 433.37418 23.6310340
3 1.5155389 281.05769 0.4305791 0.1524927 0.1853984 0.02325401 726.16161 27.0418038
4 0.4635035  39.61111 2.5479855 0.9000000 6.4922300 0.81000000  21.02633  6.0085630
5 4.9964738 248.72794 0.7018791 0.3333333 0.4926343 0.11111111 382.65176 19.7618202
6 1.9933924 131.15175 1.3263450 0.6299020 1.7591912 0.39677648 106.43574 10.0251882
  CI2_inter CI3_inter CI4_inter CI5_inter  CI6_inter  CI7_inter
1  444.5306 2.6474179 0.9377990 7.0088216 0.87946705   210.4491
2 1722.3069 0.6821153 0.2416268 0.4652813 0.05838351  3167.1251
3 3398.3269 0.3356067 0.1087866 0.1126319 0.01183453 12870.7977
4  550.7099 2.0956704 0.6778243 4.3918346 0.45944574   328.3366
5 1156.0074 0.9326588 0.2845188 0.8698524 0.08095096  1601.8700
6  612.3268 1.7624508 0.5376569 3.1062328 0.28907495   448.4190
```

```
#使用Data参数直接输入，由于Data中除了必须输入的变量外，还含有SP、H、HCB和CR,会计算更多竞争指数
a2 <- CI.nondist (Data = bigplot, S=1)
```

```
Start calculating:

  |
  |                                                                      |   0%
Calculated 1 : Plot = B-10

  |
  |======================================================================| 100%
```

```
head(a2)
```

```
  Plot Tag       CI1       CI2       CI3       CI4       CI5       CI6       CI7
1 B-10   1  1.837660  487.7449 2.5733367 0.8200837 6.6220620 0.67253725   238.3514
2 B-10   2 26.927726 1891.9109 0.6630281 0.2112971 0.4396062 0.04464645  3600.4993
3 B-10   3 28.557343 3679.3846 0.3413610 0.1087866 0.1165273 0.01183453 13596.9593
4 B-10   4  6.472066  590.3210 2.1269416 0.6778243 4.5238805 0.45944574   349.3629
5 B-10   5 24.758294 1404.7353 0.8927903 0.2845188 0.7970745 0.08095096  1984.5217
6 B-10   6 12.018581  743.4786 1.6871111 0.5376569 2.8463438 0.28907495   554.8547
        CI8       CI9 CI1_intra CI2_intra CI3_intra CI4_intra CI5_intra  CI6_intra
1 0.5676749 21388.512 1.1831772  43.21429 1.9508762 0.8200837 3.8059178 0.67253725
2 8.3182939  4939.560 3.2966915 169.60396 0.5026492 0.2112971 0.2526562 0.04464645
3 8.8217020  2972.706 1.5155389 281.05769 0.4305791 0.1524927 0.1853984 0.02325401
4 1.9992981 17872.373 0.4635035  39.61111 2.5479855 0.9000000 6.4922300 0.81000000
5 7.6481308 15450.980 4.9964738 248.72794 0.7018791 0.3333333 0.4926343 0.11111111
6 3.7126821 20723.814 1.9933924 131.15175 1.3263450 0.6299020 1.7591912 0.39677648
  CI7_intra CI8_intra CI9_intra  CI1_inter CI2_inter CI3_inter CI4_inter CI5_inter
1  27.90236 0.3654975  1633.4821  0.6544825  444.5306 2.6474179 0.9377990 7.0088216
2 433.37418 1.0183871   337.1562 23.6310340 1722.3069 0.6821153 0.2416268 0.4652813
3 726.16161 0.4681679   437.7237 27.0418038 3398.3269 0.3356067 0.1087866 0.1126319
4  21.02633 0.1431817  1389.8077  6.0085630  550.7099 2.0956704 0.6778243 4.3918346
5 382.65176 1.5434700  2593.6359 19.7618202 1156.0074 0.9326588 0.2845188 0.8698524
6 106.43574 0.6157826  4135.4795 10.0251882  612.3268 1.7624508 0.5376569 3.1062328
   CI6_inter  CI7_inter CI8_inter CI9_inter
1 0.87946705   210.4491 0.2021774 19755.029
2 0.05838351  3167.1251 7.2999068  4602.404
3 0.01183453 12870.7977 8.3535341  2534.982
4 0.45944574   328.3366 1.8561164 16482.565
5 0.08095096  1601.8700 6.1046607 12857.344
6 0.28907495   448.4190 3.0968996 16588.334
```

```
#cdf是一个半径13.82m的圆形样地的林木信息，使用参数逐个输入林木信息，计算与距离无关的竞争指数
a3 <- CI.nondist (Plot = cdf$Plot, Tag = cdf$Tag, D = cdf$D, SP = cdf$SP, S = 0.06)
```

```
The 'CI8' not calculate because 'H' don't input.
The 'CI9' not calculate because 'H', 'HCB' or 'CR' don't input.
Start calculating:

  |
  |                                                                      |   0%
Calculated 1 : Plot = A1

  |
  |========================                                              |  33%
Calculated 2 : Plot = A2

  |
  |================================================                      |  67%
Calculated 3 : Plot = A3

  |
  |======================================================================| 100%
```

```
head(a3)
```

```
  Plot Tag       CI1       CI2       CI3       CI4       CI5       CI6       CI7
1   A1   1  0.9109179  53.89266 1.4010511 0.9315789 1.9629441 0.8678393  39.26455
2   A1   2 10.4680747  72.82836 1.0606827 0.7052632 1.1250479 0.4973961  70.99694
3   A1   4 14.5221691  96.95050 0.7994698 0.5315789 0.6391520 0.2825762 125.73042
4   A1   6 15.9551412 114.03488 0.6807367 0.4526316 0.4634024 0.2048753 173.79408
5   A1   7  8.2421123  67.66429 1.1081760 0.7368421 1.2280540 0.5429363  62.95801
6   A1   8 14.9122895  97.94898 0.7757232 0.5157895 0.6017465 0.2660388 131.60818
  CI1_intra CI2_intra CI3_intra CI4_intra CI5_intra CI6_intra CI7_intra  CI1_inter
1 0.000000  9.169492 1.5030729 1.0000000 2.2592282 1.0000000  6.082065  0.9109179
2 2.498835 22.246269 1.1221683 0.7052632 1.2592618 0.4973961 20.441134  7.9712416
3 4.051791 29.041584 0.8458134 0.5315789 0.7154004 0.2825762 26.741104 10.4703705
4 4.549864 35.220930 0.7201976 0.4526316 0.5186846 0.2048753 51.054759 11.4052772
5 1.471915 11.614286 1.0793207 0.7909605 1.1649331 0.6256184 11.017857  6.7701976
6 2.429420 17.367347 0.8322099 0.5536723 0.6925733 0.3065530 22.102249 12.4828697
  CI2_inter CI3_inter CI4_inter CI5_inter CI6_inter CI7_inter
1  44.72316 1.3789702 0.9315789 1.9015588 0.8678393  33.18248
2  50.58209 1.0335021 0.7570621 1.0681266 0.5731431  50.55580
3  67.10891 0.7789829 0.5706215 0.6068144 0.3256089  88.98931
4  78.01395 0.6632924 0.4958757 0.4399568 0.2360752 122.73932
5  56.05000 1.1145032 0.7368421 1.2421174 0.5429363  51.94015
6  80.58163 0.7634976 0.5157895 0.5829286 0.2660388 109.50594
```

图 4　应用 CI.nondist 函数计算方形大样地和圆形样地与距离无关的竞争指数

Fig. 4　Utilizing CI.nondist function to calculate the distance-independent competition indices of rectangle big sample plots and circle sample plots

```
## 加载内置数据
data(ForestStatTool)
##bigplot是一个100m×100m的矩形样地的林木信息，使用Data参数直接输入林木信息，输入的数据框中需要至少包括Plot，Tag，X，Y，D等变量名，SP可选。
b1 <- CI.dist.base (Data = bigplot, Shape = "rectangle", Neighbor = "number", k = 4,
                    Correct = "translation", Origin = c(0,0), Range_xy = c(100,100))
```

```
Start calculating:

  |
  |                                                                      |   0%
Calculated 1 : Plot = B-10

  |
  |======================================================================| 100%
```

```
head(b1)
```

```
       CI15 CI15_intra CI15_inter       CI17  CI17_intra CI17_inter      CI18 CI18_intra
1 0.6401926   0.114124  0.5260687 11.4101138 10.12383801 11.6891551  4.016263  0.5361012
2 3.5376469   1.719120  1.8185269  1.8286403  0.67207200  2.9219865 30.680918  8.0756261
3 12.4009326  0.000000 12.4009326  0.2780007  0.00000000  0.2780007 49.712029  0.0000000
4 1.1462689   0.000000  1.1462689  2.3324392  0.00000000  2.3324392  2.253784  0.0000000
5 11.4047550  8.787904  2.6168510  0.3431565  0.01739644  1.4371235 11.815991  2.0625998
6 3.7300879   2.460916  1.2691715  0.9164370  0.06212249  2.5729481  4.059840  0.5775991
  CI18_inter N_intra N_inter in_out Plot Tag
1   3.480162       1       3     in B-10   1
2  22.605292       1       3     in B-10   2
3  49.712029       0       4     in B-10   3
4   2.253784       0       4     in B-10   4
5   9.753391       1       3     in B-10   5
6   3.482241       1       3     in B-10   6
```

```
#cdf是一个半径13.82m的圆形样地的林木信息，使用Data参数直接输入林木信息，输入的数据框中需要至少包括Plot，Tag，X，Y，D等变量名，SP可选。
b2 <- CI.dist.base (Data =cdf, Shape = "circle", Neighbor = "number", k = 6,
                    Correct = "buffer", Origin = c(0,0), Radius = 13.6, Buf_dist = 2)
```

```
Start calculating:

  |
  |                                                                      |   0%
Calculated 1 : Plot = A1

  |
  |=======================                                               |  33%
Calculated 2 : Plot = A2

  |
  |===============================================                       |  67%
Calculated 3 : Plot = A3

  |
  |======================================================================| 100%
```

```
head(b2)
```

```
      CI15 CI15_intra CI15_inter     CI17 CI17_intra CI17_inter     CI18 CI18_intra CI18_inter
1 1.637364  0.0000000   1.637364 7.586071   0.000000   7.586071 18.44298   0.00000   18.44298
2 3.642600  0.0000000   3.642600 2.712249   0.000000   2.712249 24.14175   0.00000   24.14175
3 2.482302  0.3861355   2.096166 5.283143   6.850848   4.994355 63.03726  13.76422   49.27303
4 4.635953  0.0000000   4.635953 2.416529   0.000000   2.416529 65.91881   0.00000   65.91881
5 3.012716  0.0000000   3.012716 3.411896   0.000000   3.411896 22.18271   0.00000   22.18271
6 2.897834  0.0000000   2.897834 4.212654   0.000000   4.212654 55.63256   0.00000   55.63256
  N_intra N_inter in_out Plot Tag
1       0       6     in   A1   1
2       0       6     in   A1   2
3       1       5     in   A1   4
4       0       6     in   A1   6
5       0       6     in   A1   7
6       0       6     in   A1   8
```

图 5 应用 CI.dist.base 函数计算方形大样地和圆形样地与距离有关的竞争指数

Fig. 5 Utilizing CI.dist.base function to calculate the distance-dependent competition indices of rectangle big sample plots and circle sample plots

调查样地单木测树因子，输出常用林分(样地)因子。StandFactor 函数计算的方形大样地 bigplot 划分的 25 个 20 m × 20 m 小样地 subplot1 和圆形样地 cdf 的常见林分因子结果见图 6，25 个小样地的平均胸径(Dg)在 15.8 ~ 20.2 cm 之间，每公顷株数(N)在 650 ~ 1 475 株/hm^2 之间；圆形样地中的 3 个样地的平均胸径(Dg)分别为 12.6、12.4 和 14.1 cm，每公顷株数(N)分别为 1 350、950 和 1 083 株/hm^2，平均高(Hmean)分别为 7.4、7.1、7.8 m，每公顷蓄积(V)分别为 64.51、42.71 和 67.26 m^3/hm^2，每公顷地上生物量(Bio_1)分别为 87.23、59.29 和 85.73 t/hm^2，每公顷地下生物量(Bio_2)分别为 27.14、18.55 和 26.52 t/hm^2，每公顷地上碳储量(Car_1)分别为 48.49、32.96 和 47.66 t/hm^2，每公顷地下碳储量(Car_2)分别为 13.63、9.31 和 13.32 t/hm^2。

3.3.2 生物多样性

生物多样性是一定地域内的基因、物种、生态系统多样性的总和，由物种、结构和功能所组成。生物多样性的数值度量可用多样性指数、均匀度指数和重要值来表达。多样性指数反映了单位面积群落内物种或结构的多样性程度；均匀度指数反映了单位面积群落内物种或结构占据的优势程度；重要值通过将相对多度、相对频度、相对优势度的数值综合，反映植物物种在群落中的相对重要性。乔木层各树种比例可用株数占比或断面积占比来表达，一般而言，与株数占比相比较，断面积占比能更好地反映每个树种或结构拥有立地的程度。由于理解上的差别，生物多样性指标衍生出不同的测定方法和计算公式[17]。ForestStatTool 包主要包括 4 个方面：树种多样性/均匀度指数、(非空间)结构多样性/均匀度指数、(非空间)树种结构综合多样性/均匀度指数、重要值。在计算(非空间)多样性/均匀度指数或(非空间)树种结构综合多样性/均匀度指数时，径阶宽度可以是 2 cm，也可以是 4 cm；径阶宽度输入参数不同，相应的输出结果会有差异。

Div、Eve 和 IV 函数通过输入单木胸径和树种

```
## 加载内置数据
data(ForestStatTool)
#bigplot是一个100m×100m的矩形样地的林木信息，首先利用Plot_Divide函数将bigplot划分为后的25个20m×20m的小样地的合并数据框。
#除原始变量外，还包含的新列有：分割后的新样地名subplot，小样地的新X坐标subX和小样地的新Y坐标subY
subplot1 <- Plot_Divide(Data = bigplot, Plot = bigplot$Plot, X = bigplot$X, Y = bigplot$Y,
                        Num_xy = c(5,5), Range_xy = c(100,100))
#计算不同小样地的林分因子
#输出了4个数据框，分别是样地林分因子、断面积占比与组成、株数占比与组成
a1 = StandFactor(Plot = subplot1$subplot, SP=subplot1$SP, S=0.04, D=subplot1$D)
head(a1[[1]])
```

```
    Plot   Dg    Ba    N  SDI aSDI  Dgd
1 B-10-00 18.7 34.31 1250 1122 1063 33.6
2 B-10-01 19.4 28.12  950  905  869 30.4
3 B-10-02 17.2 29.58 1275 1001  938 34.3
4 B-10-03 16.3 20.92 1000  720  675 27.8
5 B-10-04 18.7 24.72  900  808  752 32.5
6 B-10-10 20.2 30.38  950  965  891 35.0
```

```
#cdf是一个半径13.82m的圆形样地的林木信息，计算圆形样地的林分因子
#输出了5个数据框，分别是样地林分因子、断面积占比与组成、株数占比与组成、蓄积占比与组成
a2 = StandFactor(Plot = cdf$Plot, SP=cdf$SP, S=0.06,
                 D=cdf$D, H=cdf$H, V=cdf$V,
                 Biomass=data.frame(cdf$BIO_A,cdf$BIO_ROOT),
                 Carbon=data.frame(cdf$CAR_A, cdf$CAR_ROOT))
head(a2[[1]])
```

```
  Plot   Dg    Ba    N SDI aSDI  Dgd Hmean Hmean_w_SP
1   A1 12.6 16.92 1350 643  633 17.8   7.4         7.4
2   A2 12.4 11.54  950 441  434 17.9   7.1         7.1
3   A3 14.1 16.82 1083 618  602 21.0   7.8         7.9
   Ht Ht_Counts   Hd Hd_Counts        V    Bio_1
1 10.7         6  9.8         6 64.51169 87.23392
2 10.0         6  8.7         6 42.70893 59.28593
3 11.6         6 10.2         6 67.26332 85.73035
     Bio_2    Car_1     Car_2
1 27.13897 48.49333 13.631905
2 18.55131 32.95705  9.318321
3 26.51549 47.65750 13.318730
```

图 6　应用 StandFactor 函数计算小样地和圆形样地的林分因子

Fig. 6　Utilizing StandFactor function to calculate the indices of stand factor of subplots and circle sample plots

等调查变量，统计乔木层树种多样性指数、均匀度指数、相对频度、相对丰度、相对优势度和重要值。Div 函数主要输出了树种多样性和(非空间)结构多样性指数；Eve 函数主要输出了物种均匀度和(非空间)结构均匀度指数。

使用 Div 函数计算方形大样地 bigplot 划分的 25 个 20 m × 20 m 的小样地后的多样性指数(图 7)，使用 Eve 函数计算小样地的均匀度指数(图 8)。基于株数比例的树种香农多样性指数(N_Shannon_Species_Div)在 1.84 ~ 2.24 之间，均值为 2.04；Chao1 指数在 8 ~ 20 之间，均值为 11.83；基于株数比例的 4 cm 划分径阶的直径大小香农多样性指数(N_Shannon_Size4_Div)在 1.66 ~ 2.01 之间，均值为 1.84。这表明方形大样地的树种多样性较高，直径分布较为广泛。基于株数比例的树种香农均匀度指数(N_Shannon_Species_Eve)在 0.80 ~ 0.95 之间，均值为 0.88；基于株数比例的 4 cm 划分径阶的直径大小的香农均匀度指数(N_Shannon_Size4_Eve)在 0.59 ~ 0.89 之间，

```
#bigplot是一个100m×100m的矩形样地的林木信息，首先利用Plot_Divide函数将bigplot划分为后的25个20m×20m的小样地的合并数据框。
#除原始变量外，还包含的新列有：分割后的新样地名subplot，小样地的新X坐标subX和小样地的新Y坐标subY
subplot1 <- Plot_Divide(Data = bigplot, Plot = bigplot$Plot, X = bigplot$X, Y = bigplot$Y,
                        Num_xy = c(5,5), Range_xy = c(100,100))
#计算不同小样地的多样性指标
a1 = Div(Plot = subplot1$subplot, D = subplot1$D, SP = subplot1$SP, dClass = NULL, Index = 'ALL')
head(a1)
```

```
    Plot Richness N_GiniSimpson_Species_Div N_Simpson_Species_Div N_Shannon_Species_Div Margalef_Div Menhinick_Div McIntosh_Div
1 B-10-00       11                0.8384000              6.188119              2.072182   2.556222    1.555635    0.6965058
2 B-10-01        9                0.8337950              6.016667              1.940601   2.199261    1.459993    0.7070097
3 B-10-02       11                0.8688966              7.627566              2.159276   2.543348    1.540308    0.7417892
4 B-10-03        8                0.8262500              5.755396              1.867349   1.897595    1.264911    0.6926907
5 B-10-04        9                0.8009259              5.023256              1.847975   2.232443    1.500000    0.6645874
6 B-10-10       10                0.8642659              7.367347              2.126014   2.474168    1.622214    0.7538734
  BA_GiniSimpson_Species_Div BA_Simpson_Species_Div BA_Shannon_Species_Div Chao1 N_GiniSimpson_Size2_Div N_Simpson_Size2_Div N_Shannon_Size2_Div
1                  0.8035169              5.089496              1.937151 11.25              0.9024000            10.245902            2.453190
2                  0.8219753              5.617200              1.868190 12.00              0.9099723            11.107692            2.507133
3                  0.8469055              6.531914              2.095026 12.50              0.9004229            10.042471            2.437979
4                  0.7778297              4.501052              1.669020  8.00              0.8862500             8.791209            2.299452
5                  0.8371621              6.141076              1.921875 10.50              0.8780864             8.202532            2.328951
6                  0.8684323              7.600651              2.103929 10.50              0.9058172            10.617647            2.481415
  BA_GiniSimpson_Size2_Div BA_Simpson_Size2_Div BA_Shannon_Size2_Div N_GiniSimpson_Size4_Div N_Simpson_Size4_Div N_Shannon_Size4_Div
1                0.8910085             9.175028             2.380477              0.8312000             5.924171            1.906273
2                0.8877075             8.905313             2.341732              0.8282548             5.822581            1.844926
3                0.9121451            11.382403             2.505756              0.8143022             5.385093            1.827705
4                0.8672540             7.533182             2.216561              0.7937500             4.848485            1.704259
5                0.8686221             7.611629             2.242679              0.8070988             5.184000            1.826422
6                0.8580169             7.043089             2.259926              0.8365651             6.118644            1.967032
  BA_GiniSimpson_Size4_Div BA_Simpson_Size4_Div BA_Shannon_Size4_Div N_GiniSimpson_SS2_Div N_Simpson_SS2_Div N_Shannon_SS2_Div
1                0.8384086             6.188449             1.983165              0.9632000            27.17391            3.454275
2                0.7942111             4.859349             1.691784              0.9639889            27.76923            3.404928
3                0.8601122             7.148588             2.062768              0.9734717            37.69565            3.721030
4                0.7728438             4.402257             1.701005              0.9562500            22.85714            3.233748
5                0.8243913             5.694478             1.858545              0.9382716            16.20000            3.039309
6                0.8300929             5.885570             1.949117              0.9612188            25.78571            3.354677
  BA_GiniSimpson_SS2_Div BA_Simpson_SS2_Div BA_Shannon_SS2_Div N_GiniSimpson_SS4_Div N_Simpson_SS4_Div N_Shannon_SS4_Div BA_GiniSimpson_SS4_Div
1              0.9529130             21.23731             3.278720              0.9520000            20.83333            3.241548              0.9439574
2              0.9496574             19.86388             3.158400              0.9570637            23.29032            3.272772              0.9405867
3              0.9573479             23.44550             3.456927              0.9627067            26.81443            3.432286              0.9537307
4              0.9331546             14.95989             2.920742              0.9375000            16.00000            2.921831              0.9164788
5              0.9298929             14.26389             2.885403              0.9243827            13.22449            2.897082              0.9296313
6              0.9442271             17.92984             3.068390              0.9501385            20.05556            3.193160              0.9360559
  BA_Simpson_SS4_Div BA_Shannon_SS4_Div
1           17.84356            3.117437
2           16.83125            3.012048
3           21.61263            3.294411
4           11.97300            2.699086
5           14.21086            2.867647
6           15.63866            2.958246
```

图 7　应用 Div 函数计算大样地划分成小样地后的多样性指数

Fig. 7　Using Div function to calculate the diversity index after dividing a large sample plot into subplots

```
#bigplot是一个100m×100m的矩形样地的林木信息，首先利用Plot_Divide函数将bigplot划分为后的25个20m×20m的小样地的合并数据框。
#除原始变量外，还包含的新列有：分割后的新样地名subplot，小样地的新X坐标subX和小样地的新Y坐标subY
subplot1 <- Plot_Divide(Data = bigplot, Plot = bigplot$Plot, X = bigplot$X, Y = bigplot$Y,
                        Num_xy = c(5,5), Range_xy = c(100,100))
#计算不同小样地的均匀度指标
a2 = Eve (Plot = subplot1$subplot, D = subplot1$D, SP = subplot1$SP, dClass = NULL, Index = 'ALL')
head(a2)
```

```
     Plot N_GiniSimpson_Species_Eve N_Simpson_Species_Eve N_Shannon_Species_Eve  Help_Eve McIntosh_Eve SmithWilson_Eve BA_GiniSimpson_Species_Eve
1 B-10-00                0.9222400              0.5625563              0.8641669 0.6942132  0.8561413       0.6220068                0.4626815
2 B-10-01                0.9380194              0.6685185              0.8832056 0.7453668  0.8884763       0.5955975                0.6241333
3 B-10-02                0.9557862              0.6934151              0.9004882 0.7664866  0.9132832       0.5957283                0.5938104
4 B-10-03                0.9442857              0.7194245              0.8980051 0.7815886  0.9021112       0.6504692                0.5626315
5 B-10-04                0.9010417              0.5581395              0.8410498 0.6683695  0.8307342       0.5856207                0.6823418
6 B-10-10                0.9602955              0.7367347              0.9233162 0.8201548  0.9236686       0.7233856                0.7600651
  BA_Simpson_Species_Eve BA_Shannon_Species_Eve N_GiniSimpson_Size2_Eve N_Simpson_Size2_Eve N_Shannon_Size2_Eve BA_GiniSimpson_Size2_Eve
1              0.8078548              0.5938956              0.7318501          0.9295706          0.8173364              0.6553591
2              0.8502498              0.6845702              0.7934066          0.9500108          0.8669002              0.6360938
3              0.8736937              0.7125653              0.7173194          0.9238069          0.8038369              0.8130288
4              0.8026292              0.6152809              0.7326007          0.9253675          0.8153379              0.6277651
5              0.8746830              0.7292200              0.6309640          0.9079911          0.7722639              0.5855100
6              0.9137247              0.7998130              0.7584034          0.9402658          0.8429366              0.5030778
  BA_Simpson_Size2_Eve BA_Shannon_Size2_Eve N_GiniSimpson_Size4_Eve N_Simpson_Size4_Eve N_Shannon_Size4_Eve BA_GiniSimpson_Size4_Eve
1            0.9020178            0.7546195              0.6582412          0.8675821          0.7159956              0.6876055
2            0.8873366            0.7230179              0.8317972          0.9481046          0.8879390              0.6941927
3            0.9494890            0.8656014              0.5983437          0.8318242          0.6524493              0.7942875
4            0.8920098            0.7432474              0.6926407          0.8758157          0.7495515              0.6288939
5            0.8743560            0.7015441              0.6480000          0.8783233          0.7445174              0.7118098
6            0.8563382            0.6601827              0.6798493          0.8952348          0.7686782              0.6539522
  BA_Simpson_Size4_Eve BA_Shannon_Size4_Eve N_GiniSimpson_SS2_Eve N_Simpson_SS2_Eve N_Shannon_SS2_Eve BA_GiniSimpson_SS2_Eve BA_Simpson_SS2_Eve
1            0.9025771            0.7832125              0.7548309          0.9639337          0.8752954              0.5899252            0.9149441
2            0.8694052            0.7381933              0.8677885          0.9824545          0.9391008              0.6207461            0.9113215
3            0.9388063            0.8584650              0.8567194          0.9833097          0.9373706              0.5328523            0.9135184
4            0.8741435            0.7465749              0.8163265          0.9704529          0.9027619              0.5342817            0.8765193
5            0.8937713            0.7734854              0.6480000          0.9442143          0.8287831              0.5705558            0.8964010
6            0.8870814            0.7528106              0.8317972          0.9769043          0.9212116              0.5783820            0.8935355
  BA_Shannon_SS2_Eve N_GiniSimpson_SS4_Eve N_Simpson_SS4_Eve N_Shannon_SS4_Eve BA_GiniSimpson_SS4_Eve BA_Simpson_SS4_Eve BA_Shannon_SS4_Eve
1          0.7297648              0.6720430          0.9439605          0.8191095          0.5755988              0.9078183            0.7196134
2          0.7268680              0.8031146          0.9719288          0.9065847          0.5803880              0.8945004            0.6903208
3          0.7144035              0.7661267          0.9653866          0.8808027          0.6175036              0.9266072            0.7635745
4          0.6501868              0.7272727          0.9452576          0.8369178          0.5442274              0.8731959            0.6602919
5          0.7046163              0.5749778          0.9239635          0.7782360          0.6178634              0.9145759            0.7543443
6          0.6835746              0.7162698          0.9582724          0.8653813          0.5585237              0.8877744            0.6764500
```

图 8 应用 Eve 函数计算大样地划分成小样地后的均匀度指数

Fig. 8 Utilizing Eve function to calculate the indices of evenness of big sample plot data after dividing into subplots

均值为 0.74。这表明 bigplot 中各树种的数量分布较为均匀，但各径阶的数量分布不太均匀，整体上也比较符合天然林的特征。

使用 IV 函数计算方形大样地 bigplot 各树种的重要值(图 9)，首先利用样地分割函数将 bigplot 划分为 25 个 20 m × 20 m 的小样地，然后计算各树种的重要值。方形大样地中的 14 个树种(组)的相对频度在 0.79 ~ 0.84 之间，相对丰度在 0.18 ~ 17.97 之间，相对优势度在 0.37 ~ 19.48 之间；其中枫桦(树种 3)的生态位最大，其重要值为 15.33，其次是冷杉(树种 7)，红豆杉(树种 4)重要值最小。

4 讨 论

ForestStatTool 包具有多指标集成、开源性和多应用场景等优势，用户能够更方便地调用相关函数，一站式完成多种分析任务，为森林资源管理领域的研究和应用提供一个强大的基础工具平台。

与其他 R 包相比，ForestStatTool 包覆盖了更广泛的指标范围，多参数的集成允许了更灵活的数据输入和输出。与同样可以计算多种空间结构指标的 forestSAS 包相比，ForestStatTool 的 Unit_Struc 函数将各个独立的空间结构指标计算函数、边缘校正方法、样地形状和大小等参数集成一体，这些指标的计算在一个函数中即可完成，另外，在平移法和缓冲区法的基础上，该函数增加了实用性较强的最近邻体边缘校正方法，且将样地形状扩展至圆形样地，使函数的适用性和功能性更强。与 vegan 包中的传统多样性指标计算函数相比，ForestStatTool 包中的 Div 和 Eve 函数不仅可以计算树种多样性和均匀度指标，还可以计算新兴的结构多样性和均匀度指标。此外，ForestStatTool 包首次将林学中常用的竞争指数集成在两个不同的函数中，目前还未见可以一次实现众多竞争指数计算的 R 包。

归功于 R 语言的开源性，ForestStatTool 包同样可供用户自由获取，而无须支付费用，同时还可以根据用户需求进行功能定制和及时更新。虽然已经有一些工具可以处理林业外业样地调查数据，如中国林业科学研究院资源信息研究所森林经理研究室利用 EXCEL 的 VBA 宏编写的“样地数据统计工具(PlotStatV1.0)”，但是工具的未公开限制了其应用。当前，对数据和代码的共享已经成为趋势，将已有的多种常用计算功能集成，用户无须重复基础统计和计算工作(包括重复编写程序)，只需要一行代码即可完成相关指标的计算，减小了研究成果的复现难度，提高了计算效率。这一特性为森林资源管理领域的科研人员、森林管理者和学生等提供了极大的

```
#计算bigplot重要值
a1 = IV(Plot = subplot1$Plot, SubPlot = subplot1$subplot, SP = subplot1$SP, D = subplot1$D)
head(a1)
```

```
     Plot     Fr_1    Fr_10    Fr_11    Fr_12    Fr_13    Fr_14     Fr_2     Fr_3     Fr_4     Fr_5     Fr_6     Fr_7     Fr_8     Fr_9     Dr_1
B-10 B-10 4.724409 4.330709 2.755906 8.267717 9.448819 9.448819 9.84252 9.84252 0.7874016 8.661417 4.724409 9.84252 7.874016 9.448819 1.145374
      Dr_10    Dr_11    Dr_12    Dr_13    Dr_14     Dr_2     Dr_3     Dr_4     Dr_5     Dr_6     Dr_7     Dr_8     Dr_9     Pr_1    Pr_10    Pr_11
B-10 2.114537 0.7048458 3.524229 4.140969 10.7489 15.50661 16.65198 0.1762115 7.84141 2.46696 17.97357 10.04405 6.960352 2.272958 2.456082 1.358799
      Pr_12    Pr_13    Pr_14     Pr_2     Pr_3     Pr_4     Pr_5     Pr_6     Pr_7     Pr_8     Pr_9     IV_1    IV_10    IV_11    IV_12    IV_13
B-10 3.141196 5.39699 5.34103 13.40574 19.48437 0.3701194 12.14376 2.273565 13.58047 12.58311 6.191821 2.714247 2.967109 1.606517 4.977714 6.328926
       IV_14     IV_2     IV_3     IV_4     IV_5     IV_6     IV_7     IV_8     IV_9
B-10 8.512916 12.91829 15.32629 0.4445775 9.548862 3.154978 13.79885 10.16706 7.533664
```

图 9 应用 IV 函数计算大样地的树种重要值

Fig. 9 Utilizing IV function to calculate the importance value of tree species in big sample plots

便利。此外,R 语言的开源性也促进了 ForestStatTool 包与其他程序包的兼容使用,为相关研究和应用提供了更多的选择和可能性,比如借助 R 语言的 Shiny 平台将 ForestStatTool 包由代码驱动转换为用户友好型的界面操作,进一步简化使用难度。

ForestStatTool 可供从事林学和生态学教学、科研和生产人员使用,应用场景包括样地数据逻辑检查和修正处理、样地基本因子统计、森林生长建模、森林采伐作业设计、生物多样性、林分结构和竞争分析等。

5　总结与展望

本文系统介绍了 R 程序包 ForestStatTool 的结构和功能,以 1 hm^2 方形大样地数据和 0.06 hm^2 圆形样地数据为例对 ForestStatTool 包的应用进行了说明。ForestStatTool 包可对样地调查数据进行数据检查和预处理,并方便、快速地计算林学中多项单木和林分指标。ForestStatTool 包进一步拓展了 R 语言在林学中的应用,值得进一步推广。

在未来的研究中,ForestStatTool 包将在广大用户的反馈中不断完善其原有功能,并添加用户需求的新功能,包括但不限于增加已有函数的相关出图功能,完善与距离有关的竞争指数计算函数 CI.dist.base,支持多边形样地的空间结构指数计算,添加空间坐标数据转换函数、邻域多样性计算函数和邻域组成计算函数等。

R 程序包 ForestStatTool 下载地址:https://github.com/JingningShi/ForestStatTool。

致谢　感谢研究室中各位参与函数测试的研究生,他们为 ForestStatTool 程序包的开发作出了重要贡献。感谢审稿专家对此项研究的认可和肯定。细致的论文审查、专业的审稿意见和出色的编辑润色使论文更加完善。

参　考　文　献

[1] 沈剑波, 雷渊才, 王功明, 等. 面向县级林业的数据集成技术研究 [J]. 计算机应用与软件, 2018, 35(6): 64−69.
Shen J B, Lei Y C, Wang G M, et al. Research on technology of forestry data integration for county-level[J]. Computer Applications and Software, 2018, 35(6): 64−69.

[2] 孟黎黎, 陆元昌, 赵天忠, 等. 近自然森林经营目标树作业体系辅助设计系统的研究与开发 [J]. 世界科技研究与发展, 2007, 29(3): 66−70.
Meng L L, Lu Y C, Zhao T Z, et al. Development of a supporting system of target tree oriented stand operation for practice of close to natural forest management[J]. World Sci-Tech R & D, 2007, 29(3): 66−70.

[3] 孙建军, 雷相东, 洪玲霞, 等. 通用森林样地调查统计分析系统设计与开发 [J]. 计算机技术与发展, 2009, 19(8): 193−196.
Sun J J, Lei X D, Hong L X, et al. Design and development of universal forest sample plot statistical analysis system[J]. Computer Technology and Development, 2009, 19(8): 193−196.

[4] 国红, 尤磊, 雷相东, 等. 多期森林调查样地数据的逻辑检查方法研究 [J]. 林业资源管理, 2019(5): 84−88.
Guo H, You L, Lei X D, et al. Research on logical checking methods for plot data of multi-period forest investigation[J]. Forest Resources Management, 2019(5): 84−88.

[5] Dixon P. VEGAN, a package of R functions for community ecology[J]. Journal of Vegetation Science, 2003, 14(6): 927−930.

[6] Lai J, Zhu W, Cui D, et al. The use of R in forestry research[J]. Journal of Plant Ecology, 2023, 16(6): 47.

[7] Atkins J W, Stovall A E, Silva C A. Open-source tools in R for forestry and forest ecology[J]. Forest Ecology and Management, 2022, 503: 119813.

[8] Stanke H, Finley A O, Weed A S, et al. rFIA: an R package for estimation of forest attributes with the US Forest Inventory and Analysis Database[J]. Environmental Modelling & Software, 2020, 127: 104664.

[9] Wu H, Sun S, Forrester D I, et al. StemAnalysis: an R-package for reconstructing tree growth and carbon accumulation with stem analysis data[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 210: 107924.

[10] Shi J, Xiang W, Liu Q, et al. MtreeRing: an R package with graphical user interface for automatic measurement of tree ring widths using image processing techniques[J]. Dendrochronologia, 2019, 58: 125644.

[11] Xie D, Feng L, Yan X, et al. Forestat: an R package for computing forest carbon sequestration and potential productivity[J]. Ecological Indicators, 2024, 166: 112477.

[12] Pavoine S. Adiv: an R package to analyse biodiversity in ecology[J]. Methods in Ecology and Evolution, 2020, 11(9): 1106−1112.

[13] 柴宗政. 基于相邻木关系的森林空间结构量化评价及 R 语言编程实现 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
Chai Z Z. Quantitative evaluation and R programming of forest spatial structure based on the relationship of neighborhood trees[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2016.

[14] 蒲莹, 曾伟生, 阳帆. 北京市树高胸径回归模型研建及一元立木材积表检验 [J]. 林业资源管理, 2021(3): 62−66.
Pu Y, Zeng W S, Yang F. Tree height-diameter regression models development and one-variable tree volume tables examination in Beijing[J]. Forest Resources Management, 2021(3): 62−66.

[15] 周国逸, 尹光彩, 唐旭利. 中国森林生态系统碳储量——生物量方程 [M]. 北京: 科学出版社, 2018.
Zhou G Y, Yin G C, Tang X L. Carbon storage in forest ecosystems in China: biomass equation[M]. Beijing: Science Press , 2018.

[16] 惠刚盈, 赵中华, 胡艳波, 等. 基于结构参数均值的林分空间结构综合评价研究 [J]. 林业科学研究, 2023, 36(2): 12−21.
Hui G Y, Zhao Z H, Hu Y B, et al. Comprehensive evaluation of forest spatial structure based on the mean values of structural parameters[J]. Forest Research, 2023, 36(2): 12−21.

[17] 雷相东, 唐守正. 林分结构多样性指标研究综述 [J]. 林业科学, 2002, 38(3): 140−146.
Lei X D, Tang S Z. Indicators on structural diversity within-stand: a review[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2002, 38(3): 140−146.

(责任编辑　吴　娟
责任编委　张会儒)