浙 江 农 林 大 学 学 报，2022，**39**(2)：262–271
Journal of Zhejiang A&F University
doi: 10.11833/j.issn.2095-0756.20210171

林分树种组成多样性指数的构建

朱锦迪[1,2]，韦新良[1,2]，汤孟平[1,2]，杨晶晶[1,2]，张继艳[1,2]

(1. 浙江农林大学 环境与资源学院, 浙江 杭州 311300；2. 浙江农林大学 省部共建亚热带森林培育国家重点实验室, 浙江 杭州 311300)

摘要：【**目的**】构建数量化指标以定量表达林分树种组成特征，是精准经营管理森林的技术基础。【**方法**】应用生物多样性理论，根据树种组成的特性和经营管理要求，构建了林分树种组成多样性指数 (I_{SCD})。采用“十分法”，分析了不同树种数下指数的变化规律及基本特性。以国家森林资源连续清查中浙江省 322 个针阔混交林样地为应用对象，对 I_{SCD} 与现有的 α 多样性指数进行了对比分析。【**结果**】I_{SCD} 涵盖了林分中树种数、树种相对多度和树种蓄积比例等信息，突出体现树种数的同时，充分表达了树种组成的均匀性与混交程度。I_{SCD} 可完整、独立和有效地表达树种组成的变化特性。与 α 多样性指数相比，I_{SCD} 提高了对树种数判别的分异性和灵敏性，可严密地评价树种结构的均匀度和混交度，合理有效地反映树种多样性。【**结论**】与 α 多样性指数相比，构建数量化指标能更细致、全面、有针对性地定量化表征林分树种组成多样性，解决了低丰富度高均匀度、高丰富度低均匀度等不同林分树种组成类型难于有效区分的难题。图 7 表 7 参 28

关键词：林分；树种组成多样性指数 (I_{SCD})；多样性指数；树种数；均匀度

中图分类号：S718.5　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**2095-0756(2022)02-0262-10

Construction of diversity index of tree species composition

ZHU Jindi[1,2], WEI Xinliang[1,2], TANG Mengping[1,2], YANG Jingjing[1,2], ZHANG Jiyan[1,2]

(1. College of Environment and Resources, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China; 2. State Key Laboratory of Subtropical Silviculture, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China)

Abstract: [**Objective**] This study aims to construct quantitative indicators to quantitatively express the composition characteristics of tree species, which is the technical basis for accurate forest management. [**Method**] Based on the theory of biodiversity and the characteristics of tree species composition and management requirements, the diversity index of tree species composition (I_{SCD}) was constructed. The variation pattern and basic characteristics of index under different tree species were analyzed by "ten method". 322 coniferous and broad-leaved mixed forest plots in the inventory of national forest resources of Zhejiang Province were selected as the application objects. I_{SCD} and existing major α-diversity indices were compared. [**Result**] I_{SCD} covered information on the number of tree species, the relative abundance of tree species and the proportion of tree species in the stand, which not only highlighted the number of tree species, but also fully expressed the uniformity and mixing degree of tree species composition. I_{SCD} could express the changing characteristics of tree species composition completely, independently and effectively. Compared with the major α-diversity indices, I_{SCD} improved the differentiation and sensitivity of tree species, closely evaluated the uniformity and mixing degree of tree species structure, and reasonably and effectively reflected the tree species

收稿日期：2021-02-08；修回日期：2021-07-01

基金项目：国家自然科学基金资助项目 (31870617)

作者简介：朱锦迪 (ORCID: 0000-0003-3006-4622)，从事森林及其环境评价与规划设计研究。E-mail: 2890301692@qq.com。通信作者：韦新良 (ORCID: 0000-0003-3902-8855)，教授，博士，从事森林及其环境评价与规划设计研究。E-mail: weixl@zafu.edu.cn

diversity. [**Conclusion**] Compared with the majorα-diversity indices, the construction of quantitative index can quantitatively characterize the diversity of tree species composition in a more detailed, comprehensive and targeted manner, and solve the problem that it is difficult to effectively distinguish the composition types of tree species in different stands, such as low richness and high uniformity, high richness and low uniformity. [Ch, 7 fig. 7 tab. 28 ref.]

Key words: forest stand; diversity index of tree species composition (I_{SCD}); diversity index; number of tree species; uniformity

树种结构指森林中树种的组成、数量及彼此之间的关系[1]，是反映森林结构与功能关系的重要内容之一。树种组成是树种结构中最为重要的内容，是构成树种结构的基础。树种组成多样性反映了林分中树种构成的复杂程度和对光热水等自然资源的均衡利用程度，以及固碳释氧、生物种质资源保存等功能的有效性，具有重要生态学意义。树种组成信息丰富，为尽可能全面表达，往往需要使用详尽的语言或借助表格形式进行呈现[2−5]，根据各树种蓄积量所占比例表示树种组成式，满足了人们对树种组成概要描述的需求，但不适用于森林多样性、精准经营、定量分析、对比评价和数字化管理等工作。汤孟平等[6] 引入了 Shannon 物种多样性指数，提出了树种组成指数，并将树种组成式进行数量化。树种组成指数值与树种组成式的系数构成一一对应关系，间接体现了主要树种间的蓄积比例，但未涵盖稀疏树种、树种株数及其分布等信息。可见，树种组成指数值用于定量化表征树种组成多样性是不够全面的。

目前，对于树种组成多样性的定量表述，往往借助于 α 多样性指数，但依旧存在局限性。王寿兵[7] 和赵中华等[8] 研究发现：多样性指数本身存在不足与缺陷，一般的多样性指数无法全面客观地反映林分树种组成的重要林学属性。如何科学定量化表达林分树种组成，构建数量化指标的问题值得深入研究[9]。鉴于此，本研究对树种组成多样性的数量化方法进行了探究，构建了树种组成多样性指数，以期为树种组成的表征提供新的度量角度与多样性评价方法，为森林质量评价、森林结构优化调控和森林质量精准提升提供理论和技术依据。

1　林分树种组成多样性指数的构建

1.1　理论基础

林分树种组成多样性指数构建既要遵循生物多样性表征的基本规律和要求，又要充分体现林分树种组成的具体特征和经营管理要求。满足树种丰富度越大，树种分布越均匀，指数值就越高这一基本思想。

树种组成多样性指数的构建首先应满足生物多样性意义，指数值应分别与树种丰富度、分布均匀度呈相应的正向等比关系。其次，应以科学合理的方式结合丰富度、均匀度等多方面信息。最后构建的指数值体现相应的树种组成特征，反映树种总数、树种密度以及树种蓄积 (生物量) 比例和分布等多方面的内在相关信息。

构建指数选用指标时应兼顾科学性和可操作性 2 条重要原则[10]。科学性主要从指标的构建方法考虑，涉及构建的指标参数应当准确客观，具有指征性、代表性和可比性。参数之间应相互补充、相对独立，尽可能全面而不重复地反映树种组成特征。可操作性体现在计算指标的原始数据要容易收集，指标计算方法不宜太复杂，要容易被理解接受并易于推广使用等。

1.2　树种结构多样性指数模型

基于树种组成多样性指数构建的基本理论和要求，对体现树种丰富度的信息与各树种均匀度的信息进行分解使其相对独立，并通过和式进行综合。用树种数体现树种丰富度的信息，用现实林分各个树种的实际株数、蓄积比例与理想林分中完全均匀分布时的树种株数、蓄积所占比例值 ($1/s$，s 为树种数) 进行较差，并赋予树种株数均匀度、蓄积均匀度相同的权重关系，用平方消除正负值偏差，以体现各树种均匀度的信息，并使之与丰富度信息之间不产生交互和干扰作用。构建的林分树种组成多样性指数 (I_{SCD}) 计算模型为：

$$I_{SCD}=s-\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{s}\left[\left(\frac{v_i}{v}-\frac{1}{s}\right)^2+\left(\frac{n_i}{n}-\frac{1}{s}\right)^2\right]。\qquad(1)$$

式 (1) 中：I_{SCD} 为树种组成多样性指数；s 为树种数；v 为森林总蓄积量；v_i 为森林中树种 i 的蓄积量；n 为森林总株数；n_i 为森林中树种 i 的株数。

1.3 林分树种组成多样性指数内涵

I_{SCD} 与树种数、树种株数和树种蓄积比例分布均匀性呈正相关。作为正向指标，I_{SCD} 直接体现林分树种组成多样性的特征，并具有以下意义：①I_{SCD} 表达了林分中树种数这一重要特征。绝对纯林时，树种数 s 为 1，I_{SCD} 为 1。非绝对纯林时，树种数 $s≥2$，I_{SCD} 为 $(s-1，s]$，林分的丰富度或树种数可由 I_{SCD} 向上取整得到，即可以根据数值所处范围直接确定树种数。当林分中树种数相等时，树种混交程度越高，各树种的株树、蓄积分布越均匀，其比例越接近于 $1/s$，则 I_{SCD} 越大；当林分中所有树种在株数和蓄积 2 个方面都呈均匀分布时，I_{SCD} 达到最大值 s。②I_{SCD} 表达了林分中各树种的株数、蓄积比例及分布均匀性，体现出混交程度。林分树种均匀度、混交度由 I_{SCD} 值的小数部分体现。当林分中树种间均匀度、混交度越小，I_{SCD} 值的小数部分就越小；反之就越大。小数部分与数值 1 的差值体现在一定树种数下，实际林分与分布最均匀、混交度最高时的理想林分之间的差异程度。由于同时考虑了不同树种的株数占比和蓄积占比，I_{SCD} 更能全面反映树种的分布及混交情况。

2 林分树种组成多样性指数的变化规律

2.1 2 个树种时 I_{SCD} 的变化规律

从图 1 可以看出：当 2 个树种的株数、蓄积比例分布越不均匀，即某个树种的株数、蓄积占比越接近 100%，另一个树种的株数、蓄积占比越接近 0 时，I_{SCD} 就越小，其值就越接近于 $s-1$；当 2 个树种的株数、蓄积分布越平均，即占比各自越接近 50% 时，树种结构多样性指数就越趋近最大值 2。

2.2 3 个树种时 I_{SCD} 的变化规律

当树种数大于 2 个时，将各树种的株数和蓄积比例按照其分布均匀程度，进行相应的等级 (状态) 划分，并以此作为 x 轴、y 轴和 z 轴数据。设当树种数为 3 个时，对树种 a、b、c 存在的株数 (或蓄积) 分布等级按“3 等份”进行划分，并根据 Simpson 均匀度指数进行分级，株数 (或蓄积) 分布等级见表 1。其中，均匀度等级越大，表明株数 (或蓄积) 分布的均匀程度越高，Ⅶ为最理想的完全均匀状态。根据表 1，对树种的均匀性分布类型组合进行汇总，得到表 2。对现实林分中不同均匀度等级之间还存在的连续过渡类型，拟合 I_{SCD} 变化趋势曲面图 (图 2) 表明：森林中各树种的株数与蓄积的分布均匀度等级越高，I_{SCD} 越大，越接近最大值 3。与树种数为 2 个时的规律一致，株数和蓄积分布不均都会导致最终的指数值远小于最大值，I_{SCD} 越接近于 $s-1$。

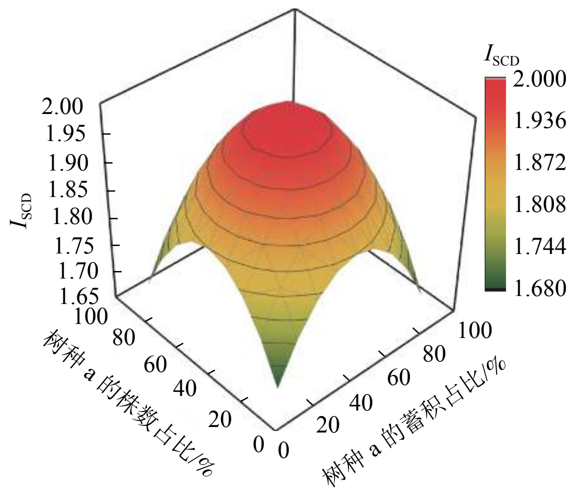

图 1 树种数为 2 个时的树种组成多样性指数 (I_{SCD}) 变化趋势

Figure 1 Trend of diversity index of tree species composition (I_{SCD}) for two species

表 1 树种数为 3 个时的株数 (或蓄积) 分布均匀度等级

Table 1 Distribution uniformity grade of plants number (or volume) of 3 tree species

分布均匀度等级	树种a占比	树种b占比	树种c占比	Simpson均匀度指数
Ⅰ	1/9	1/9	7/9	0.622
Ⅱ	1/9	2/9	6/9	0.773
Ⅲ	1/9	3/9	5/9	0.853
Ⅳ	1/9	4/9	4/9	0.879
Ⅴ	2/9	2/9	5/9	0.906
Ⅵ	2/9	3/9	4/9	0.966
Ⅶ	3/9	3/9	3/9	1.000

表 2　树种均匀性分布类型

Table 2　Summary of tree species uniformity distribution types

树种株数分布均匀度等级	树种蓄积分布均匀度等级						
	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ	Ⅵ	Ⅶ
Ⅰ	(Ⅰ，Ⅰ)	(Ⅰ，Ⅱ)	(Ⅰ，Ⅲ)	(Ⅰ，Ⅳ)	(Ⅰ，Ⅴ)	(Ⅰ，Ⅵ)	(Ⅰ，Ⅶ)
Ⅱ	(Ⅱ，Ⅰ)	(Ⅱ，Ⅱ)	(Ⅱ，Ⅲ)	(Ⅱ，Ⅳ)	(Ⅱ，Ⅴ)	(Ⅱ，Ⅵ)	(Ⅱ，Ⅶ)
Ⅲ	(Ⅲ，Ⅰ)	(Ⅲ，Ⅱ)	(Ⅲ，Ⅲ)	(Ⅲ，Ⅳ)	(Ⅲ，Ⅴ)	(Ⅲ，Ⅵ)	(Ⅲ，Ⅶ)
Ⅳ	(Ⅳ，Ⅰ)	(Ⅳ，Ⅱ)	(Ⅳ，Ⅲ)	(Ⅳ，Ⅳ)	(Ⅳ，Ⅴ)	(Ⅳ，Ⅵ)	(Ⅳ，Ⅶ)
Ⅴ	(Ⅴ，Ⅰ)	(Ⅴ，Ⅱ)	(Ⅴ，Ⅲ)	(Ⅴ，Ⅳ)	(Ⅴ，Ⅴ)	(Ⅴ，Ⅵ)	(Ⅴ，Ⅶ)
Ⅵ	(Ⅵ，Ⅰ)	(Ⅵ，Ⅱ)	(Ⅵ，Ⅲ)	(Ⅵ，Ⅳ)	(Ⅵ，Ⅴ)	(Ⅵ，Ⅵ)	(Ⅵ，Ⅶ)
Ⅶ	(Ⅶ，Ⅰ)	(Ⅶ，Ⅱ)	(Ⅶ，Ⅲ)	(Ⅶ，Ⅳ)	(Ⅶ，Ⅴ)	(Ⅶ，Ⅵ)	(Ⅶ，Ⅶ)

说明：组合(Ⅰ，Ⅰ)中，表示树种株数的均匀度等级为Ⅰ，树种蓄积的均匀度等级为Ⅰ，林分株数(或蓄积)的分布均匀度等级见表1。其他组合依次类推

2.3　10 个树种以内时 I_{SCD} 的变化规律

对树种数 10 个以内的 I_{SCD} 的变化规律，可以采用“十分法”的分级方法进行均匀度等级划分，即将各树种的株数或蓄积比例的范围划分为 10 个等份，每变化 10% 作为一级进行组合。对树种数处于 [1，10] 的森林，计算其各自不同分布情况下的 I_{SCD} 值 (表 3)。

当森林具有 a、b 2 个树种时，“十分法”下 2 个树种株数 (或蓄积) 的比例可以分为 9∶1、8∶2、7∶3、6∶4、5∶5 这 5 种中任意一种，即树种组成形式[6] 数为 5。此外，每种类型还需考虑蓄积 (或株数) 比例，则又各自有 5 种可能性，故理论上所有可能的树种混交组合形式应为 25 种。但由于 I_{SCD} 赋予树种株数均匀度、蓄积均匀度相同的权重关系，且在考量株数、蓄积均匀度时都是基于树种占比与 1/s 较差取平方的计算方式，故 a 树种株数占比为 x、蓄积占比为 y 的森林与株数占比为 y、蓄积占比为 x 的森林拥有相同的 I_{SCD} 指数值，可认为两者属于同一均匀度分布水平，可进行合并。故 25 个类型又

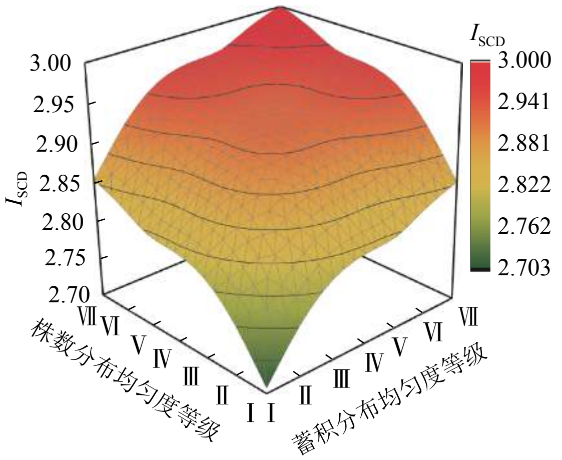

图 2　树种数为 3 个时的树种组成多样性指数 (I_{SCD}) 变化趋势

Figure 2　Trend of diversity index of tree species composition (I_{SCD}) for three species

表 3　不同树种组合类型的树种组成多样性指数 (I_{SCD}) 值

Table 3　Diversity index of tree species composition (I_{SCD}) value of different tree specie composition types

树种数/个	树种组成形式数/个	树种组成类型数/个	I_{SCD}					
			均值	中位数	最小值	最大值	极差	标准差
1	1	1	1.000	1.000	1.000	1.000	0.000	−
2	5	15	1.880	1.900	1.680	2.000	0.320	0.093
3	8	36	2.883	2.893	2.673	2.993	0.320	0.075
4	8	36	3.895	3.905	3.730	3.970	0.240	0.058
5	7	28	4.926	4.935	4.800	5.000	0.200	0.048
6	5	15	5.935	5.938	5.867	5.987	0.120	0.031
7	3	6	6.956	6.958	6.923	6.983	0.060	0.022
8	2	3	7.975	7.975	7.965	7.985	0.020	0.010
9	1	1	8.991	8.991	8.991	8.991	0.000	−
10	1	1	10.000	10.000	10.000	10.000	0.000	−
总计	41	142						

说明：−表示标准差缺失，仅有1个数值无法进行标准差计算

最终归并为 15 个，即树种组成类型数为 15。

由图 3 可见：142 个树种混交组合中，I_{SCD} 随树种数增加呈线性增长趋势，且不同树种数之间 I_{SCD} 互不重叠。

综上所述，I_{SCD} 随树种数增加呈明显增大趋势。当树种数不变时，I_{SCD} 能随树种株数及蓄积 (生物量) 比例和分布的均匀度、混交度变化而有相应的同向变化。同理，对树种数 10 个以上的 I_{SCD} 值，经推论也有相同的规律和特性。

3　林分树种组成多样性指数的实际应用及比较分析

以浙江省 2009 年森林资源连续清查数据中 322 个针阔混交林样地为材料，计算分析 I_{SCD} 模型的实际应用情况，并比较 I_{SCD} 与其他多样性指数在反映林分树种组成中树种丰富度、均匀度及多样性等方面的实用表现。

3.1　林分树种组成多样性指数对丰富度的度量

选取 Margalef 指数[11]、Menhinick 指数[11] 与 I_{SCD} 对样地林分丰富度进行计算和对比分析。从图 4 可见：I_{SCD} 随树种数的增多呈上升趋势，具有明显的“分段”现象，表明 I_{SCD} 对树种数的分异性能强；Margalef 指数与 Menhinick 指数值聚集在较小范围内，随树种数增多呈上升趋势，但变化幅度不大。

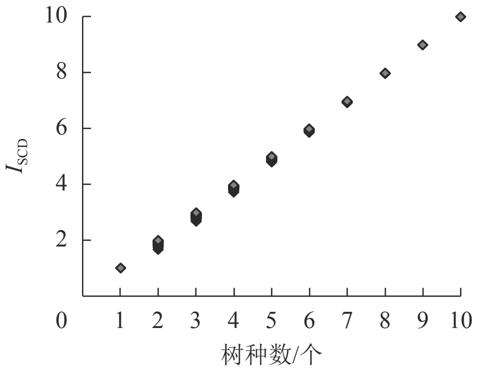

图 3　树种组成多样性指数 (I_{SCD}) 与树种数的关系

Figure 3　Relationship between diversity index of tree species composition (I_{SCD}) and the number of tree species

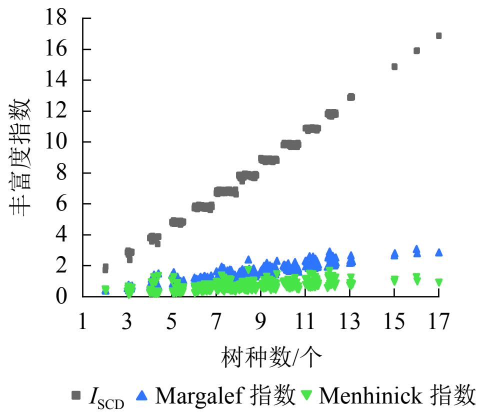

图 4　样地树种丰富度分布

Figure 4　Species richness of sample plots

根据不同树种数时各指数的分布形态 (图 5)，对其进行指数函数、线性函数、对数函数、多项式函数以及幂函数等多种函数拟合，并选择最优拟合模型。结果显示：I_{SCD}、Margalef 指数以及 Menhinick 指数与树种数均呈正相关。I_{SCD} 的线性拟合决定系数 (R^2) 达 0.999，斜率接近于 1，与树种丰富度相关性十分紧密，可信度高。Margalef 指数的线性拟合 R^2 为 0.869，斜率为 0.185 1，与树种丰富度相关性较为紧密，可信度较高。Menhinick 指数与树种数的拟合模型 R^2 均未超过 0.4，线性斜率为 0.006 1，与树种丰

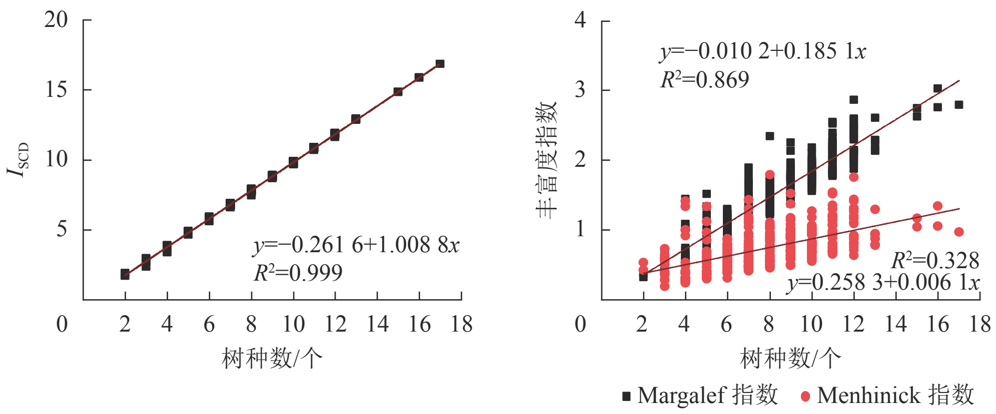

图 5　各丰富度指数与树种数的关系

Figure 5　Relationship between each diversity indices and the number of tree species

富度相关性不明显。表明 I_{SCD} 比 Margalef 指数和 Menhinick 指数对树种丰富度变化的反映更敏感，更具有一致性。

3.2　林分树种组成多样性指数对均匀度的度量

基于 I_{SCD} 指数的构造特性，其值中的小数部分 ($I_{SCD\text{-}U}$) 仅反映树种分布的均匀度，故可单独提取用于比较分析，以消除树种丰富度的影响。$I_{SCD\text{-}U}$ 指标计算公式为：

$$I_{SCD\text{-}U}=I_{SCD}-s+1=1-\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{s}\left[\left(\frac{v_i}{v}-\frac{1}{s}\right)^2+\left(\frac{n_i}{n}-\frac{1}{s}\right)^2\right]。\qquad (2)$$

选取 α 多样性指数中的 Shannon 均匀度指数[12]、Simpson 均匀度指数[12]、Alatalo 均匀度指数[13] 等与 $I_{SCD\text{-}U}$ 进行均匀度计算和对比分析。各均匀度指数统计结果见表 4，依 $I_{SCD\text{-}U}$ 进行升序排列结果见图 6。

由表 4 和图 6 可知：$I_{SCD\text{-}U}$ 与 Simpson 均匀度指数、Shannon 均匀度指数以及 Alatalo 均匀度指数具有较强一致性，且 $I_{SCD\text{-}U}$ 与 Simpson 均匀度指数分布较为接近，两者均值分别为 0.808、0.801，中位数分别为 0.824、0.829，最大值和最小值有所差异，且 $I_{SCD\text{-}U}$ 的变动幅度小于 Simpson 均匀度指数。此外，$I_{SCD\text{-}U}$、Simpson 均匀度指数的均值、中位数明显大于 Shannon 均匀度指数、Alatalo 均匀度指数。从分布范围来看，$I_{SCD\text{-}U}$ 的分布最为集中，对树种均匀程度的评价最为严密。

表 4　针阔混交林样地均匀度指数值

Table 4　Uniformity index values of coniferous and broad-leaved mixed forest

变量名	$I_{SCD\text{-}U}$	Simpson均匀度指数	Shannon均匀度指数	Alatalo均匀度指数
均值	0.808	0.801	0.722	0.730
中位数	0.824	0.829	0.737	0.742
方差	0.007	0.013	0.012	0.010
标准差	0.086	0.112	0.111	0.102
标准误	0.005	0.006	0.006	0.006
最小值	0.361	0.052	0.091	0.339
最大值	0.968	0.992	0.994	0.992
极差	0.607	0.940	0.903	0.652

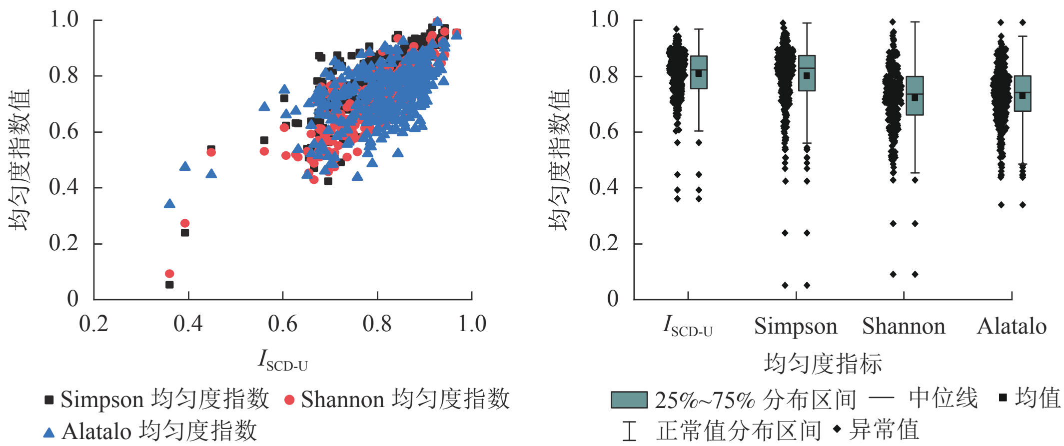

图 6　样地树种均匀度分布

Figure 6　Evenness of tree species in the sample plot

对 $I_{SCD\text{-}U}$、Shannon 均匀度指数、Simpson 均匀度指数及 Alatalo 均匀度指数进行 Pearson 相关分析 (表 5) 表明：$I_{SCD\text{-}U}$ 与 Simpson 均匀度指数相关系数为 0.840，与 Shannon 均匀度指数相关系数为 0.825，与 Alatalo 均匀度指数相关系数为 0.555。4 个指数两两之间相关性均达到极显著水平 (P<0.01)。Simpson 均匀度指数与 Shannon 均匀度指数相关性最高，其次是 $I_{SCD\text{-}U}$ 与 Simpson 均匀度指数、$I_{SCD\text{-}U}$ 与 Shannon 均匀度指数。相关性最低的为 $I_{SCD\text{-}U}$ 与 Alatalo 均匀度指数。$I_{SCD\text{-}U}$ 与 Shannon 均匀度指数、Simpson 均

表 5　均匀度指数之间的相关系数

Table 5　Correlation coefficient between uniformity indexes

均匀度指标	$I_{SCD\text{-}U}$	Simpson 均匀度指数	Shannon 均匀度指数	Alatalo 均匀度指数
$I_{SCD\text{-}U}$	1			
Simpson 均匀度指数	0.840**	1		
Shannon 均匀度指数	0.825**	0.934**	1	
Alatalo 均匀度指数	0.555**	0.668**	0.622**	1

说明：**表示在0.01水平上相关极显著(双尾)

匀度指数在反映林分树种组成均匀度方面具有比较一致的灵敏性和分异性。

3.3 林分树种组成多样性指数对多样性的度量

选取具有代表性的 Simpson 多样性指数[12]、修正 Simpson 多样性指数[14]、Shannon 多样性指数[12]、Shannon 多样性幂指数[14]、Hill 多样性指数[15]、Mclntosh 指数[16] 等与 I_{SCD} 进行多样性的对比分析。

由表 6 和图 7 可知：多样性指数按指数范围从大到小依次为 I_{SCD}、Shannon 多样性幂指数、Hill 多样性指数、Shannon 多样性指数、修正 Simpson 多样性指数、Simpson 多样性指数、Mclntosh 多样性指数，7 个指数的均值、中位数、最大值、最小值等都有明显差异。分布形态上，I_{SCD} 呈分段聚集，与其他 6 个指数的分布形态明显不同。Shannon 多样性幂指数与 Hill 多样性指数分布较为接近，Shannon 多样性指数与修正 Simpson 多样性指数分布较为接近，Simpson 多样性指数与 Mclntosh 多样性指数分布较为接近。

表 6 针阔混交林样地的多样性指数值

Table 6 Diversity index values of coniferous and broad-leaved mixed forest

变量名	I_{SCD}	Simpson多样性指数	修正Simpson多样性指数	Shannon多样性指数	Mclntosh多样性指数	Shannon多样性幂指数	Hill多样性指数
均值	7.774	0.688	1.228	1.456	0.499	4.576	3.635
中位数	7.776	0.712	1.243	1.468	0.509	4.341	3.467
方差	7.497	0.014	0.128	0.134	0.012	2.662	1.704
标准差	2.738	0.117	0.357	0.366	0.110	1.631	1.305
标准误	0.153	0.007	0.020	0.020	0.006	0.091	0.073
最小值	1.724	0.035	0.035	0.100	0.019	1.106	1.036
最大值	16.860	0.870	2.044	2.291	0.727	9.889	7.719
极差	15.136	0.836	2.009	2.191	0.708	8.783	6.684

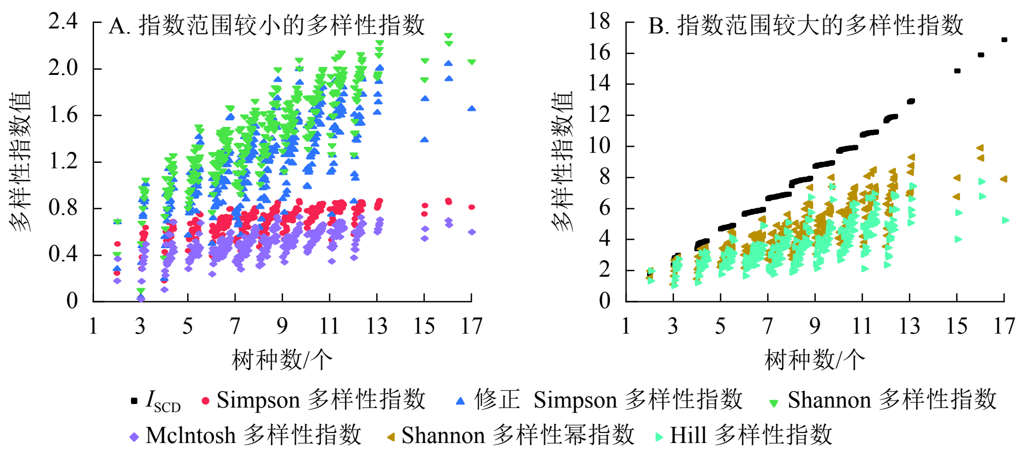

图 7 样地树种多样性分布

Figure 7 Species diversity of the sample plots

由表 7 可知：7 个指数间相关性都达到极显著水平 (P<0.01)。I_{SCD} 与其他多样性指数具有极显著的相关性 (P<0.01)，与 Shannon 多样性幂指数的相关系数最大，为 0.840，其次是 Shannon 多样性指数、修正 Simpson 指数、Hill 多样性指数、Simpson 多样性指数以及 Mclntosh 多样性指数。α 多样性指数中，各指数之间普遍具有显著相关性 (P<0.01)，对多样性的评价具有一致性。

由图 7 可知：同一树种数时，I_{SCD}、Simpson 多样性指数、修正 Simpson 多样性指数、Shannon 多样性指数、Shannon 多样性幂指数、Mclntosh 多样性指数以及 Hill 多样性指数均对样地林分多样性水平具有较为一致的评价；由于对稀有种的不同看法，一旦树种数增加，就会产生 2 种截然不同的变化：I_{SCD} 重视树种数的重要性，强调树种的“存在价值”，认为树种数多，多样性便高，指数就呈不断上升趋势，稀有树种与富集树种的差异更多反映在小数部分。而其余指数则倾向于对树种多度分布均匀的样地赋予更大的指数值。稀有树种的出现并不一定直接提高林分多样性。

表 7　多样性指数之间的相关系数

Table 7　Correlation coefficient between diversity indexes

多样性指标	I_{SCD}	Simpson多样性指数	修正Simpson多样性指数	Shannon多样性指数	Mclntosh多样性指数	Shannon多样性幂指数	Hill多样性指数
I_{SCD}	1						
Simpson多样性指数	0.684**	1					
修正Simpson多样性指数	0.724**	0.967**	1				
Shannon多样性指数	0.839**	0.943**	0.965**	1			
Mclntosh多样性指数	0.635**	0.967**	0.965**	0.929**	1		
Shannon多样性幂指数	0.840**	0.878**	0.952**	0.974**	0.891**	1	
Hill多样性指数	0.719**	0.891**	0.975**	0.934**	0.914**	0.967**	1

说明：**表示在0.01水平上相关极显著(双尾)

在多样性指数中，普遍存在 1 个指数值对应多种树种数的现象，即存在指标难以区分低丰富度高均匀度群落与高丰富度低均匀度群落的问题，指数的大小并不能有效反映具体的多样性信息，只在相对比较中具有意义。I_{SCD} 在反映树种组成多样性上弥补了现有多样性指数的缺陷，更有利于实现对林分树种组成的定量化表征。

4　讨论

4.1　I_{SCD} 与物种多样性指数

在对树种组成的定量化描述上，不论是 Margalef 指数、Menhinick 指数，还是 Shannon 指数、Simpson 指数，亦或是 Hill 指数，都各有其优势与不足。Margalef 指数和 Menhinick 指数等试图权衡丰富度与总丰度的关系，却缺少考虑物种内个体的同质性 (均匀性)；在测度树种的丰富度时，以树种数和林分总株数的关系为基础，虽然肯定了稀疏树种与富集树种对群落林分中树种多度的贡献，但对于描述林分树种组成而言仍显不足，其数值具有较大不确定性，即只能判断相对抽象的树种丰富性程度，却无法给出具体丰富度信息等 (如林分树种数)。

基于丰度的多样性指数 (如 Shannon 指数和 Simpson 指数) 在物种丰富度的基础上增加了个体数量的信息，考虑了异质性，却依旧无法代表一个群落的真正“多样性”。对于均匀性的度量方案似乎是无穷无尽的，有许多方法可以根据“均匀性”的不同定义来估计，这使得对均匀性的概念并不十分清晰[17]。目前常用的 Simpson 均匀度指数与 Shannon 均匀度指数将均匀度定义为群落的实测多样性与理论最大多样性的比率。

Shannon 指数和 Simpson 指数及变体往往被认为可以将物种丰富度和均匀度巧妙地整合成全方位的衡量标准而广泛使用。然而，这些复合指数对多样性的度量依旧有限：①Shannon 指数植根于信息理论，是一种熵，量化的是随机挑选得到的某个个体物种身份的不确定性强弱 (不确定性强，多样性高)。Simpson 指数也是广义的熵[18]，量化的是从数据集中随机挑选的 2 个个体不代表同一物种的概率。指数作为熵，反映的是物种集合体与多样性有关的不同特性，衡量的是不确定性，并不是真正的多样性[19]。虽然熵的变化在数学上与物种丰富度相关，但在很大程度上它们与丰富度的关系已被证明是不一致的[20−21]。此外，熵及其变化因其可能掩盖多样性各组成部分之间的差异而显得不足，致使有学者认为复合指数在很大程度上是没有意义[22]。②物种丰富度和均匀度之间可能存在反向关系，在复合指数中会相互抵消，并不能得到与直观感觉一致的结果[23]。③复合指数对多样性和均匀性的权重高于丰富性，且对稀有物种与丰富物种赋予不同的权重，这掩盖了物种丰富度的重要性。

HILL[24] 提出希尔数 (hill numbers)，即有效物种数，用以量化多样性。有效物种数借助参数实现对丰富物种与稀有物种的权重控制，并能服从生物学家多样性概念中隐含的复制原则或加倍性质，被认为是物种多样性丰度的最佳选择[25]。然而同样有学者提出，有效物种数的使用存在一定局限性[17]。

I_{SCD} 以树种数量直接作为多样性丰富度，指数值接近实际树种数显得更加简洁、直观、有效，可根据指数值快速反推单个样地树种数。这是其他 α 多样性指数无法实现的。

I_{SCD} 对均匀度的评价方法以林分中树种的个数及各树种的属性比例作为变量，从树种的株数分布和蓄积分布 2 个方面衡量森林中树种分配的均匀性。通过各树种株数以及蓄积比例的不同，对两者的作用有了明确区分。此外，$I_{SCD\text{-}U}$ 指标以现有林分与同一树种数下的理想林分 (树种完全均匀分布) 之间存在的差距进行均匀性评价，是一种新视角下的均匀性度量方式。

从指数构造角度而言，I_{SCD} 也具有科学性。物种丰富度和均匀度之间存在一定关系[26]。许多学者倾向于认为物种丰富度与均匀度应该是相对独立的[20, 27]，但实际发现均匀度总是不可避免地受到丰富度的制约，两者依旧存在相关关系。I_{SCD} 将指数丰富度信息与均匀度信息进行了明确分离，使其各自独立而不再相互作用。

4.2 I_{SCD} 实际应用

从指数表现来看，I_{SCD} 对林分树种丰富度反映灵敏，有着很好的区分性，弥补了现有指数对林分树种数反映表征模糊、指数范围重叠、区分不灵敏等不足。在反映树种组成多样性综合效应时，比其他指数有更好的区分性，同时与其他指数存在显著相关性，表明 I_{SCD} 具有与其他多样性指数相同的理论基础，其本质相同但形式与侧重点不同。

对于 α 多样性指数而言，当用直径、树高或其他结构分类变量来代替物种时，它就可以反映林分结构多样性，体现对应林分组成结构属性特征[9]，例如 Simpson 大小多样性指数、Shannon 大小多样性指数、Simpson 大小分化度指数、Shannon 大小分化度指数等林木大小多样性指数[28] 以及树高多样性指数等。同理，I_{SCD} 在后续应用时，亦可衍生类似指数，例如以胸高断面积、生物量、生产力替代蓄积使用，I_{SCD} 指数同样具有一定的可拓展性。但对于描述复杂树种结构而言，依旧存在不足。如何体现树种结构的空间分布，如何对不同树种属性进行合理的权重设置，仍是 I_{SCD} 未来需要攻克的难点。

5 结论

I_{SCD} 在数量化表达林分树种组成多样性时，有效地将树种丰富度与树种株数、蓄积均匀性既分离又融合在一起，是一个较全面反映树种组成多样性信息的综合指标。它对林分树种组成的丰富度反映比其他多样性指数更加灵敏，分异性更强，对林分树种组成的均匀度有着与其他多样性指数一致的灵敏度和区分度，其数值大小还体现出现有林分与理想林分的差距，这也为评价林分树种组成均匀程度提供了一种新思路。相互独立的丰富度、均匀性信息使得指数值本身具有意义，解决了对低丰富度高均匀度、高丰富度低均匀度等不同林分树种组成类型难以有效区分这一难题，有利于准确描述树种组成多样性。

6 参考文献

[1] 亢新刚. 森林经理学[M]. 4 版. 北京: 中国林业出版社, 2011.
KANG Xingang. *Forest Management*[M]. 4 ed. Beijing: China Forestry Publishing House, 2011.

[2] 陈云, 王婷, 李培坤, 等. 河南木札岭温带落叶阔叶林群落特征及主要乔木空间分布格局[J]. 植物生态学报, 2016, **40**(11): 1179 − 1188.
CHEN Yun, WANG Ting, LI Peikun, *et al*. Community characteristics and spatial distribution of dominant tree species in a deciduous broad-leaved forest of Muzhaling, Henan, China [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2016, **40**(11): 1179 − 1188.

[3] 胡跃华, 曹敏, 林露湘. 西双版纳热带季节雨林的树种组成和群落结构动态[J]. 生态学报, 2010, **30**(4): 949 − 957.
HU Yuehua, CAO Min, LIN Luxiang. Dynamics of tree species composition and community structure of a tropical seasonal rain forest in Xishuangbanna, Southwest China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2010, **30**(4): 949 − 957.

[4] 姜萍, 赵光, 叶吉, 等. 长白山北坡森林群落结构组成及其海拔变化[J]. 生态学杂志, 2003, **22**(6): 28 − 32.
JIANG Ping, ZHAO Guang, YE Ji, *et al*. Structure of forest communities on the northern slope of Changbai Mountain and its variation along elevation gradients [J]. *Chin J Ecol*, 2003, **22**(6): 28 − 32.

[5] 周君璞, 郑小贤. 将乐林场栲类次生林物种组成与多样性研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2014, **34**(10): 70 − 75.
ZHOU Junpu, ZHENG Xiaoxian. Study on species composition and species diversity of *Castanopsis* secondary forest in Jiangle forest farm [J]. *J Cent South Univ For Technol*, 2014, **34**(10): 70 − 75.

[6] 汤孟平, 唐守正, 李希菲, 等. 树种组成指数及其应用[J]. 林业资源管理, 2003, **24**(2): 33 − 36.
TANG Mengping, TANG Shouzheng, LI Xifei, *et al*. Tree species composition index and its application [J]. *For Resour Manage*, 2003, **24**(2): 33 − 36.

[7] 王寿兵. 对传统生物多样性指数的质疑[J]. 复旦学报 (自然科学版), 2003, **42**(6): 867 − 868.
WANG Shoubing. A question on the traditional biodiversity index [J]. *J Fudan Univ Nat Sci*, 2003, **42**(6): 867 − 868.

[8] 赵中华, 惠刚盈. 林分结构多样性研究进展[J]. 林业科学, 2020, **56**(9): 143 − 152.
ZHAO Zhonghua, HUI Gangying. Advances in structural diversity of stand structure [J]. *Sci Silv Sin*, 2020, **56**(9): 143 − 152.

[9] 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 Xiangdong, TANG Shouzheng. Indicators on structural diversity within-stand: a review [J]. *Sci Silv Sin*, 2002, **38**(3): 140 − 146.

[10] 周彬, 郑小贤, 钟艳, 等. 林分物种多样性指标体系的研究[J]. 北京林业大学学报, 2002, **24**(2): 24 − 28.
ZHOU Bin, ZHENG Xiaoxian, ZHONG Yan, *et al*. Synthetic indices for stand species diversity [J]. *J Beijing For Univ*, 2002, **24**(2): 24 − 28.

[11] 张金屯. 植被数量生态学方法[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1995.
ZHANG Jintun. *Quantitative Ecology*[M]. Beijing: Science and Technology of China Press, 1995.

[12] 许晴, 张放, 许中旗, 等. Simpson 指数和 Shannon-Wiener 指数若干特征的分析及“稀释效应”[J]. 草业科学, 2011, **28**(4): 527 − 531.
XU Qing, ZHANG Fang, XU Zhongqi, *et al*. Some characteristics of Simpson index and the Shannon-Wiener index and their dilution effect [J]. *Pratacultural Sci*, 2011, **28**(4): 527 − 531.

[13] ALATALO R V. Problems in the measurement of evenness in ecology [J]. *Oikos*, 1981, **37**(2): 199 − 204.

[14] 唐守正, 郎奎建, 李海奎. 统计和生物数学模型计算: ForStat 教程[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2009.
TANG Shouzheng, LANG Kuijian, LI Haikui. *Statistical and Biomathematical Model Calculations*: *ForStat Tutorial*[M]. Beijing: Science and Technology of China Press, 2009.

[15] KEMPTON R A. The structure of species abundance and measurement of diversity [J]. *Biometrics*, 1979, **35**(1): 307 − 321.

[16] MCINTOSH R P. An index of diversity and the relation of certain concepts to diversity [J]. *Ecology*, 1967, **48**(3): 392 − 404.

[17] CAO Y, HAWKINS C P. Weighting effective number of species measures by abundance weakens detection of diversity responses [J]. *J Appl Ecol*, 2019, **56**(5): 1200 − 1209.

[18] KEYLOCK C J. Simpson diversity and the Shannon-Wiener index as special cases of a generalized entropy [J]. *Oikos*, 2005, **109**(1): 203 − 207.

[19] JOST L. Entropy and diversity [J]. *Oikos*, 2006, **113**(2): 363 − 375.

[20] STIRLING G, WILSEY B. Empirical relationships between species richness, evenness, and proportional diversity [J]. *Am Nat*, 2001, **158**(3): 286 − 299.

[21] WILSEY B J, CHALCRAFT D R, BOWLES C M, *et al*. Relationships among indices suggest that richness is an incomplete surrogate for grassland biodiversity [J]. *Ecology*, 2005, **86**(5): 1178 − 1184.

[22] HURLBERT S H. The nonconcept of species diversity: a critique and alternate parameters [J]. *Ecology*, 1971, **52**(4): 577 − 586.

[23] MACDONALD Z G, NIELSEN S E, ACORN J H. Negative relationships between species richness and evenness render common diversity indices inadequate for assessing long-term trends in butterfly diversity [J]. *Biodiversity Conserv*, 2017, **26**(3): 617 − 629.

[24] HILL M O. Diversity and evenness: a unifying notation and its consequences [J]. *Ecology*, 1973, **54**(2): 427 − 432.

[25] PIERSON K. Building a richer understanding of diversity through causally consistent evenness measures [J]. *Ecol Evol*, 2020, **10**(20): 10965 − 10973.

[26] SU Qiang. A relationship between species richness and evenness that depends on specific relative abundance distribution[J/OL]. *PeerJ*, 2018, **6**: e4951[2020-12-08]. doi: 10.7717/peerj.4951.

[27] TUOMISTO H. An updated consumer’s guide to evenness and related indices [J]. *Oikos*, 2012, **121**(8): 1203 − 1218.

[28] 娄明华, 白超, 惠刚盈, 等. 7 个林木大小多样性指数表达能力比较[J]. 生物多样性, 2019, **27**(4): 449 − 456.
LOU Minghua, BAI Chao, HUI Gangying, *et al*. Comparison of distinguishing ability on seven tree size diversity indices [J]. *Biodiversity Sci*, 2019, **27**(4): 449 − 456.