

# 森林群落复杂性分析：以广东黑石顶森林为例

覃林 余世孝\*

(中山大学生命科学院, 广州 510275)

摘要：本文将森林群落复杂性定义为消除群落中任意一个树木个体的种名及层次不确定性所需的平均信息量，提出用联合熵  $H(X, Y)$  测度群落复杂性。  $H(X, Y) = H(X) + H(Y|X)$ ，其中  $H(X) = -\sum_{i=1}^S \frac{n_i}{N} \log_2(\frac{n_i}{N})$ ， $H(Y|X) = -\sum_{i=1}^S \frac{n_i}{N} \sum_{j=1}^4 \frac{n_{ij}}{n_i} \log_2(\frac{n_{ij}}{n_i})$ ，分别为树种组成复杂性和树种结构复杂性。式中  $S$  为森林群落树种数， $N$  为森林群落的树木总株数， $n_i$  ( $i=1, 2, \dots, S$ ) 为第  $i$  个树种的株数， $n_{ij}$  ( $j=1, 2, 3, 4$ ) 为第  $i$  个树种在第  $j$  层次的株数。用联合熵分析了广东省封开县黑石顶自然保护区针叶林、针阔混交林和常绿阔叶林等 3 种典型森林类型的复杂性。结果表明，群落复杂性的顺序为：常绿阔叶林 > 针阔混交林 > 针叶林。同时，各森林类型的群落复杂性  $H(X, Y)$  与取样尺度之间具有较好的分形关系。

关键词：森林群落，群落复杂性，联合熵

中图分类号：Q94-332

文献标识码：A

文章编号：1005-0094(2004)03-0354-07

## Complexity of forest communities : a case study of three different forest types in Heishiding Nature Reserve , Guangdong

QIN Lin , YU Shi-Xiao \*

School of Life Sciences , Sun Yat-sen University , Guangzhou 510275

**Abstract** : The complexity of a forest community is defined as having the average amount of its information by eliminating the uncertainties of species and layers of a tree individual randomly selected from all trees in the forest community. The joint entropy  $H(X, Y)$  is proposed to measure the complexity of a forest community  $H(X, Y) = H(X) + H(Y|X)$ , in which  $H(X) = -\sum_{i=1}^S \frac{n_i}{N} \log_2(\frac{n_i}{N})$  and  $H(Y|X) = -\sum_{i=1}^S \frac{n_i}{N} \sum_{j=1}^4 \frac{n_{ij}}{n_i} \log_2(\frac{n_{ij}}{n_i})$ , where  $S$  stands for the number of tree species ( $X$ ),  $N$  for the total number of individuals in the forest community,  $n_i$  for the number of the  $i$ th tree species, and  $n_{ij}$  for the number of the  $i$ th tree species in the  $j$ th layer.  $H(X)$  is defined as the compositional complexity of tree species and  $H(Y|X)$  as the structural complexity of tree species. The higher the  $H(X, Y)$  value, the greater the complexity in the forest community. A case study is presented based on the survey data from three types of forest communities in Heishiding Nature Reserve, Guangdong Province. Three sampling plots were established, each with a size of 60 m × 60 m, representing coniferous forest, mixed coniferous broad-leaved forest and evergreen broad-leaved forest. Each plot was divided into 36 quadrats with a size of 10 m × 10 m. The data for all trees with DBH ≥ 1 cm were gathered, including their coordinates in the sampling plots. Tree sizes were divided into four categories based on their DBH: DBH ≥ 1, 5, 10, and 30 cm. Using computer simulation, 13 types of quadrat sizes (12 m × 12 m, 16 m × 16 m, ..., 60 m × 60 m) within a plot were objectively selected based on the method of nested quadrat sampling. The results show that the order of  $H(X, Y)$  of three typical forest types is as follows: evergreen broad-leaved forest > mixed coniferous broad-leaved forest > coniferous forest. At the same time, the fractal relationships between  $H(X, Y)$  and sampling size among the three forest types reveal that  $H(X, Y)$  has a statistical self-similarity feature.

**Key words:** forest communities, complexity of forest communities, joint entropy

生态复杂性(ecological complexity)是指生态系统内不同层次上的结构与功能的多样性、自组织及有序性,是生态学研究的重要内容(张知彬等,1998)。群落作为生态系统的一个组织层次,其复杂性的直观概念已较好地建立。植物群落的复杂性主要用多组分(many-partedness)、时间/空间异质性(spatial/temporal heterogeneity)和响应与相互作用的非线性(nonlinearity of response, interactions)来表征(Allen & Wyleto, 1983; Phillips, 1985)。Pimm (1984)曾采用物种丰富度、连接度(connectance)、相互作用强度(interaction strength)和均匀度来表征群落的复杂性。尽管复杂性的这些特征在直观上似乎相当简单,但是其概念的操作性和定量化却远非一件简单事情,原因有以下几个方面(Anand & Orlóci, 1996) (1)复杂性有许多种表现形式。这显然是由于复杂性的各种定义,并因此带来了诸如设计(design)、功能(function)、组织性(organization)、多样性(diversity)和异质性(heterogeneity)等各种各样的特征 (2)包含在若干个时空尺度上的特征交织(convolutions)在一起 (3)现有的工具不够。

1965年Kolmogorov提出了一种关于数据串复杂性的理论。若令 $x$ 是有限长度二元字符串, $\mu$ 表示一个通用计算机, $l(x)$ 表示字符串 $x$ 的长度, $\mu(p)$ 表示计算机在程序 $p$ 之下的输出,则字符串 $x$ 相对于通用计算机 $\mu$ 的Kolmogorov复杂性定义为:

$$K_{\mu}(x) = \min_{p, l(\mu(p))=x} l(p)$$

就是说 $K_{\mu}(x)$ 等于打印出 $x$ 后所有程序中最短的长度,换句话说,也等于由计算机 $\mu$ 给出的关于 $x$ 精确描述的最短程序长度,即把数据串的复杂性定义为计算机产生这个数据串所需的最短二元程序的长度。这种复杂性理论构成了客体描述理论的基础(仇佩亮,1999)。Kolmogorov复杂性后来被称为算法复杂性(algorithmic complexity)(Löfgren, 1977)。对于一个系统状态的复杂度,就是“用最佳的算法表示系统的状态序所需的最短程序的长度”,它度量的是系统的某一确定状态的复杂程度,而不是系统状态的不确定程度(王彬,1994),并预测会应用于生物学各研究领域(Wicken, 1979)。

对植物群落而言,虽然算法复杂性的两个初始条件可相应地转变为群落组分(例如种群)的数目

和各组分个体的分布比例,但仍很难用于测度群落的复杂性,仅是一个定性的术语(Anand & Orlóci, 1996)。

群落的复杂性曾采用基于熵函数的多样性测度公式来测度(McIntosh, 1967),主要有:

Shannon(1948)熵函数

$$H = - \sum_{j=1}^q p_j \log_2 p_j$$

式中 $q$ 表示群落组分(如树种,生长型)数, $p_j$ 为第 $j$ 组分的比例;

Rényi(1961)广义熵函数

$$H_{\alpha} = \frac{1}{1-\alpha} \log_2 \sum_{j=1}^q p_j^{\alpha}$$

式中 $\alpha$ 称为熵阶数, $\alpha \neq 1$ 。

然而,群落多样性与复杂性是不同的(Hinegardner, 1983),用多样性测度式虽然可以提供关于群落复杂性的某些认识,但是却不充分(Anand & Orlóci, 1996)。

Anand和Orlóci(1996)在更广的意义上考虑群落复杂性的概念,提出群落总复杂性(total complexity)可分为基于无序的复杂性(disorder-based complexity)和结构复杂性(structural complexity),并用描述群落的最小剩余码(parsimonious code)的平均码长( $L$ )来测度群落总复杂性,即

$$L = \sum_{j=1}^q p_j l_j$$

式中 $p_j$ 表示第 $j$ 个物种的相对多度, $l_j$ 为 $p_j$ 的码字长度(0,1字符的数目); $q$ 为群落的物种数。而基于无序的复杂性可采用Shannon熵( $H$ )或Rényi广义熵( $H_{\alpha}$ )来测度,群落结构复杂性则用群落总复杂性与基于无序的复杂性的差值( $\Delta = L - H$ )来表示。但是,用最小剩余码的平均码长( $L$ )测度的群落总复杂性属于算法复杂性范畴(Anand & Orlóci, 2000)。从本质上来说, $L$ 度量的是群落某一状态的确定复杂程度,而 $H$ 或 $H_{\alpha}$ 则是度量群落某一状态的不确定复杂程度,因此,群落总复杂性与基于无序的复杂性是不同性质的复杂性,那么,用 $\Delta$ 测度群落结构复杂性是欠妥的。

本文在前人的研究基础上,对森林群落的复杂性重新进行定义并提出具体的测度公式,进而利用分形方法对群落复杂性测度中的尺度效应进行探

讨,旨在为今后进一步比较和分析不同森林群落的组成和结构的整体信息提供量化的工具。

## 1 研究样地

黑石顶自然保护区位于广东省封开县,地理位置为  $23^{\circ}25' - 23^{\circ}30' N$ ,  $111^{\circ}48' - 111^{\circ}55' E$ ,海拔  $150 - 927 m$ ;气候属亚热带湿润季风气候,年均气温  $19.6^{\circ}C$ ,年均降水量  $1743.8 mm$ ;土壤多为红壤和山地黄壤,水平地带性植被为亚热带常绿阔叶林(余世孝等 2000)。

在保护区内的针叶林、针阔混交林和常绿阔叶林中分别设置一块大小为  $60 m \times 60 m$  的样地,对样地中所有乔、灌木(胸径  $DBH \geq 1 cm$ )进行每木调查,包括种名、胸径、树高和冠幅,并记录个体在样地中的坐标位置。

对每个样地的资料进行内业整理时,首先将样地虚拟地划分为 225 个  $4 m \times 4 m$  的小样方用以统计种群的频数,取重要值最高的前 3 个树种作为群落的主要优势种,重要值 = 相对多度 + 相对频度 + 相对显著度。各样地具体情况见表 1。然后,采用巢式排列法取样,即从坐标原点(样地左下角)开始逐步增加取样大小,第一个样方为  $12 m \times 12 m$ ,第二个为  $16 m \times 16 m$ ,依此类推至  $60 m \times 60 m$ 。

## 2 分析方法

### 2.1 复杂性的测度方法

森林群落的主要实体是树木个体,个体的种名及胸径、树高和冠幅等因子的差异构成了森林群落

树种繁多和结构复杂的特征,因此,在探讨森林群落复杂性时,不仅要考虑各树种的株数多少,而且还应考虑各树种株数在不同层次中的分布比例。森林群落的分层标准有多种,但相对而言,树木胸径量测比较准确,依树木的胸径大小对森林群落分层较适宜,本文参照余世孝等(2001)的方法,将树木按照胸径(DBH)大小划分为 4 个层次,即  $5 cm > DBH \geq 1 cm$ 、 $10 cm > DBH \geq 5 cm$ 、 $30 cm > DBH \geq 10 cm$  和  $DBH \geq 30 cm$ 。

基于上述认识,森林群落复杂性可理解为消除群落中任意一个树木个体的种名及层次不确定性所需的平均信息量,信息量愈大,复杂性愈高,反之,则愈低。因此,可采用联合熵(王彬,1994)来测度森林群落复杂性,即

$$H(X, Y) = H(X) + H(Y|X) \quad (1)$$

其中:

$$H(X) = - \sum_{i=1}^S \frac{n_i}{N} \log_2 \left( \frac{n_i}{N} \right)$$

$$H(Y|X) = - \sum_{i=1}^S \frac{n_i}{N} \sum_{j=1}^4 \frac{n_{ij}}{n_i} \log_2 \left( \frac{n_{ij}}{n_i} \right)$$

式中  $S$  为森林群落包含的树种数,  $N$  为森林群落内的树木总株数,  $n_i$  ( $i = 1, 2, \dots, S$ ) 为第  $i$  个树种的株数,  $n_{ij}$  ( $j = 1, 2, 3, 4$ ) 为第  $i$  个树种在第  $j$  层次( $Y$ )的株数。 $H(X)$  即为 Shannon 熵,它测度了森林群落基于无序的复杂性,可称为树种组成复杂性(一定意义上的树种多样性);  $H(Y|X)$  称为已知种名条件下层次不确定性的条件熵,它测度了消除森林群落中任意一个树种的个体层次分布不确定性所需的平均

表 1 黑石顶各样地的森林类型及主要优势种

Table 1 Dominant species of three forest types in Heishiding Nature Reserve, Guangdong

样地序号 Plot No.	海拔 Altitude (m)	坡度 Slope	物种数 No. of species	个体数 No. of individuals	森林类型 Forest type	主要优势种 Dominant species	
						种名 Species	重要值 Importance value
P1	170	35 - 40°	54	1105	针叶林 Coniferous forest	马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	136.74
						三叉苦 <i>Evodia leptota</i>	26.43
						桃金娘 <i>Rhodomyrtus tomentosa</i>	15.57
P2	615	35 - 40°	81	2065	针阔混交林 Mixed coniferous and broad-leaved forest	马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	68.70
						桃金娘 <i>Rhodomyrtus tomentosa</i>	23.04
						鼠刺 <i>Itea chinensis</i>	19.59
P3	540	30 - 35°	93	1800	常绿阔叶林 Evergreen broad-leaved forest	黄枝木 <i>Xanthophyllum hainanensis</i>	29.58
						水栗 <i>Castanopsis nigrescens</i>	22.14
						长叶木姜子 <i>Litsea elongata</i>	21.33

信息量,这在一定程度上度量了森林群落的层次结构复杂性,可称之为树种结构复杂性。

显然,当森林群落中没有一个树种分布在两层或两层以上时  $H(Y|X)=0$ , 则  $H(X,Y)=H(X)$ , 表明用树种组成复杂性反映群落复杂性并不充分,但这仅是一种特例。

为了考察公式(1)对森林群落复杂性的测度效果,假设群落内有5个树种,总株数为100,分4层,分别设计3种不同类型,并用(1)式计算3个模拟森林群落的复杂性,结果见表2。

从表2看出,因群落A和群落B的共有树种的株数相同,两者的树种组成复杂性  $H(X)$  相等,但两者的共有树种的株数在不同层中的分布状况不同( $X_1$  除外),它们的树种结构复杂性  $H(Y|X)$  不等,从而导致群落A和群落B的复杂性  $H(X,Y)$  不相等,群落C无论是各树种株数还是树种在各层中的分布都与群落A和群落B有较大差异,因此,其  $H(X)$ 、 $H(Y|X)$  和  $H(X,Y)$  均与群落A和群落B不同。全面比较有  $H(X)_A = H(X)_B > H(X)_C$ , 表明  $H(X)$  的确只能测度群落的树种组成复杂性;  $H(Y|X)_A > H(Y|X)_B > H(Y|X)_C$ , 表征  $H(Y|X)$  可以度量群落的树种结构复杂性;  $H(X,Y)_A > H(X,Y)_B > H(X,Y)_C$ , 说明  $H(X,Y)$  能够敏感地反映群落复杂性。因而用公式(1)测度森林群落复杂

性是有效可行的。

### 2.2 分形分析方法

采用分形分析方法(Zeide,1991)分析森林群落复杂性  $H(X,Y)$  是否随取样尺度变化而变化,若  $H(X,Y)$  值与取样尺度  $r$  ( $r$  为样方边长)之间存在统计意义上的幂律关系,即

$$H(X,Y) = kr^D$$

式中  $k$  为常数,  $D$  为分形维数(自相似规律的数量化表征),则表明森林群落复杂性在二维空间的分布具自相似规律。可用  $H(X,Y)$  与  $r$  在双对数坐标上进行直线拟合,若所得拟合方程的回归检验达显著性水平,则表明  $H(X,Y)$  与尺度  $r$  之间存在着很好的分形关系。所得拟合直线斜率的绝对值即为分形维数的估计值,这是一个独立于尺度的特征值,是群落不同尺度上复杂性测度的一种共性,从而可以揭示不同尺度上群落复杂性之间的联系和规律性。

### 3 结果

用公式(1)分别计算黑石顶3种森林类型的复杂性结果列于表3。可以看出,在一定的尺度域内,针叶林、针阔混交林和常绿阔叶林的树种组成复杂性  $H(X)$  和树种结构复杂性  $H(Y|X)$  均随着取样尺度的不同而不同,表明  $H(X)$  和  $H(Y|X)$  具有空间变异。比较而言,在各个取样尺度上针阔混交林  $H(X)$

表2 三种模拟森林群落的复杂性(单位:比特)

Table 2 The complexities in three simulated forest communities (unit: bits)

森林群落 Forest community	物种 Species	各层个体数 Individual number in each layer				合计 Total	$H(X)$	$H(Y X)$	$H(X,Y)$
		$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	$Y_4$				
A	$X_1$	5	5	5	5	20	2.322	2.000	4.322
	$X_2$	5	5	5	5	20			
	$X_3$	5	5	5	5	20			
	$X_4$	5	5	5	5	20			
	$X_5$	5	5	5	5	20			
B	$X_1$	5	5	5	5	20	2.322	1.791	4.113
	$X_2$	4	3	6	7	20			
	$X_3$	2	8	1	9	20			
	$X_4$	5	6	7	2	20			
	$X_5$	8	3	4	5	20			
C	$X_1$	6	0	0	0	6	2.103	1.326	3.429
	$X_2$	0	8	2	0	10			
	$X_3$	0	0	17	12	29			
	$X_4$	0	4	7	11	22			
	$X_5$	12	9	7	5	33			

$H(X)$ : 树种组成复杂性;  $H(Y|X)$ : 树种结构复杂性;  $H(X,Y)$ : 群落复杂性

$H(X)$ , Complexity of tree species composition;  $H(Y|X)$ , Complexity of tree species structure;  $H(X,Y)$ , Complexity of forest community

表 3 广东黑石顶三种森林类型的复杂性(单位:比特)  
Table 3 Complexities of three forest types in Heishiding Nature Reserve, Guangdong (unit: bits)

Table with 10 columns: Quadrat size (m²), H(X), H(Y|X), H(X,Y) for three forest types: Coniferous forest, Mixed coniferous and broad-leaved forest, and Evergreen broad-leaved forest. Rows list quadrat sizes from 12x12 to 60x60.

和常绿阔叶林 H(X)均大于针叶林 H(X),而常绿阔叶林 H(X)和针阔混交林 H(X)的关系较复杂,在取样面积大于 32 m × 32 m 以后常绿阔叶林 H(X) > 针阔混交林 H(X)。同时,这 3 种森林类型 H(Y|X) 的关系也表现出类似规律。

3 种森林类型的群落 H(X,Y)也具有空间变异性(表 3),但在各个取样面积上常绿阔叶林 H(X,Y) 和针阔混交林 H(X,Y)均大于针叶林 H(X,Y),而针阔混交林 H(X,Y)与常绿阔叶林 H(X,Y)在取样面积为 36 m × 36 m 处有一交点(图 1),当取样面积小于 36 m × 36 m 时,针阔混交林 H(X,Y) > 常绿阔叶林 H(X,Y),取样面积大于 36 m × 36 m 时,常绿阔叶林 H(X,Y) > 针阔混交林 H(X,Y)。考虑到南亚热带常绿阔叶林最小取样面积应不小于 1200 m² (王伯荪等,1982),可以认为这 3 种森林类型的 H(X,Y)关系是:常绿阔叶林 > 针阔混交林 > 针叶林。按空间演替序列代替时间演替序列的观点(彭少麟和方炜,1995)这一结果表明群落演替初期随着演替的进程群落复杂性逐渐增加,到常绿阔叶林达到最大。

分形分析结果表明(图 2),针叶林、针阔混交林和常绿阔叶林的 lgH(X,Y)与 lgr 直线拟合的相关系数分别为 0.9372、0.8549 和 0.9677,F 检验均达极显著性水平(P < 0.01),说明线性关系极显著,表

明在取样尺度范围内,这 3 种森林类型的群落复杂性 H(X,Y)自相似规律非常明显,因而用 H(X,Y)测度森林群落复杂性可以有效地揭示森林群落复杂性的部分与整体之间的内在联系。

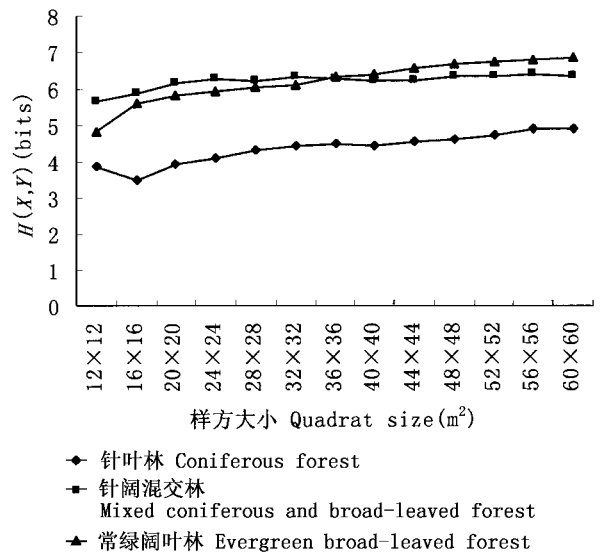


图 1 三种森林类型的群落复杂性随样方大小的变化  
Fig. 1 Complexities relative to quadrat size in three forest communities in Heishiding Nature Reserve, Guangdong

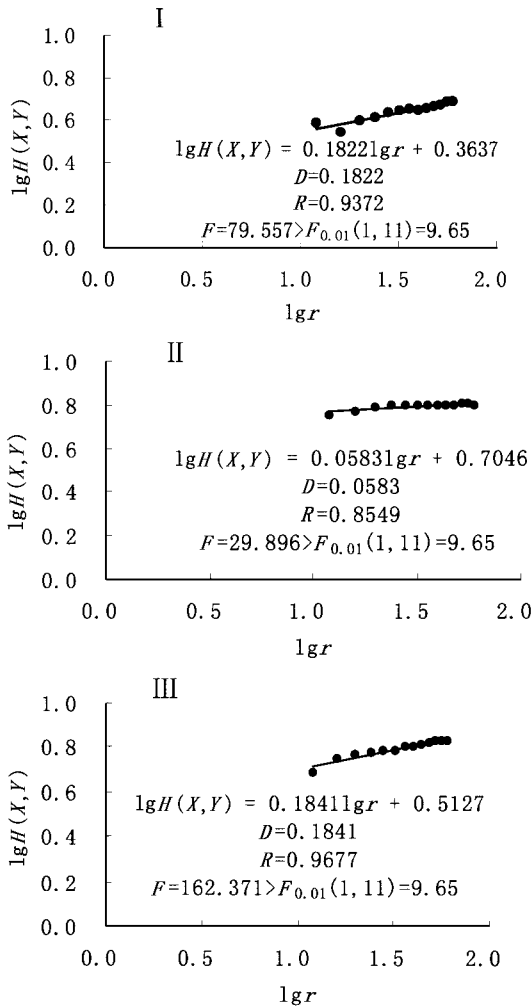


图2 三种森林群落的  $\lg H(X, Y)$ - $\lg r$  关系

Fig. 2 The  $\lg H(X, Y)$ - $\lg r$  relationships of three types of forest I, 针叶林 Coniferous forest; II, 针阔混交林 Mixed coniferous and broad-leaved forest; III, 常绿阔叶林 Evergreen broad-leaved forest

## 4 结论

森林群落复杂性是生态复杂性的重要组成部分。群落复杂性的直观概念虽然已经建立,但对它进行定量描述而不只是给出一个替代的术语却远不是一件简单的事(李镇清 2001)。本文提出将森林群落复杂性理解为消除群落中任意一个树木个体的种名及层次不确定性所需的平均信息量,并用联合熵  $H(X, Y)$  对其测度;而  $H(X, Y)$  的两个组成部分  $H(X)$  和  $H(Y|X)$  分别表征了树种组成复杂性和树种结构复杂性。该方法不仅具有严格的数学论证,而且既反映了物种决定的复杂性,也反映了层次的

复杂性,将会比单考虑物种提供更多的信息。

黑石顶自然保护区 3 种典型森林类型的群落复杂性  $H(X, Y)$  排序为常绿阔叶林 > 针阔混交林 > 针叶林,但考虑到空间异质性的影响,这一结果是否具有普遍性,尚需森林群落次生演替永久样地的长期观测数据予以验证。另外,3 种森林类型的群落复杂性  $H(X, Y)$  与取样之间具有较好的分形关系,表明  $H(X, Y)$  在取样范围内的尺度不变性,但森林群落是通过物种相互作用而有机联系的整体,在森林群落结构的组建过程中,环境、空间、生物和随机因素都不同程度地起作用,因此,关于森林群落复杂性的维持机制仍有待深入探讨。

不同植被类型由于各自的组成结构特征不同,应采用不同的方法测度其复杂性,试图用一个统一的标准是不现实的。用本文提出的方法比较不同森林群落复杂性时,应保证群落间取样面积和分层标准的一致性,否则  $H(X, Y)$  就不具可比性。

## 参考文献

- Allen, T. F. H. and Wyleto, E. P. 1983. A hierarchical model for the complexity of plant communities. *Journal of Theoretical Biology*, **101**: 529–540.
- Anand, M. and Orlóci, L. 1996. Complexity in plant communities: the notion and quantification. *Journal of Theoretical Biology*, **179**: 179–186.
- Anand, M. and Orlóci, L. 2000. On hierarchical partitioning of an ecological complexity function. *Ecological Modelling*, **132**: 51–62.
- Hinegardner, R. 1983. Biological complexity. *Journal of Theoretical Biology*, **104**: 7–20.
- Li, Z. Q. (李镇清). 2001. Partitioning out the species interaction component of ecological variation. *Journal of Biomathematics (生物数学学报)*, **16**: 320–333. (in Chinese with English abstract)
- Löfgren, L. 1977. Complexity of descriptions of systems: a foundational study. *International Journal of General System*, **3**: 197–214.
- McIntosh, R. P. 1967. An index of diversity and the relation of certain concepts to diversity. *Ecology*, **48**: 392–404.
- Peng, S. L. (彭少麟) and Fang, W. (方炜). 1995. Studies on dynamics of *Castanopsis chinensis* and *Schima superba* population in forest succession of Dinghushan mountain. *Acta Phytocologica Sinica (植物生态学报)*, **19**: 311–318. (in Chinese with English abstract)
- Phillips, J. D. 1985. Measuring complexity of environmental

- gradients. *Vegetatio*, **64**: 95 – 102.
- Pimm, S. L. 1984. The complexity and stability of ecosystems. *Nature*, **307**: 321 – 326.
- Qiu, P. L. (仇佩亮). 1999. *Information Theory and Its Applications* (信息论及其应用). Zhejiang University Press, Hangzhou, 273 – 276. (in Chinese)
- Rényi, A. 1961. On measures of entropy and information. In: Neyman, J. (ed.), *Proceedings of the 4th Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*. University of California Press, Berkeley.
- Shannon, C. E. 1948. A mathematical theory of communication. *Bell System Technology Journal*, **27**: 397 – 423.
- Wang, B. (王彬). 1994. *Entropy and Information* (熵与信息). Northwestern Polytechnical University Press, Xi'an. (in Chinese)
- Wang, B. S. (王伯荪), Zhang, Z. Q. (张志权), Lan, C. Y. (蓝崇钰) and Hu, Y. J. (胡玉佳). 1982. Studies on sampling techniques of the south-subtropical evergreen broad-leaf forest in Guangdong Province. *Acta Phytocologica et Geobotanica Sinica* (植物生态学与地植物学丛刊), **6**: 51 – 61. (in Chinese with English abstract)
- Wicken, S. 1979. The generation of complexity in evolution: a thermodynamics and information-theoretical discussion. *Journal of Theoretical Biology*, **77**: 349 – 365.
- Yu, S. X. (余世孝), Li, Y. (李勇), Wang, Y. F. (王永繁) and Zhou, C. F. (周灿芳). 2000. The vegetation classification and its digitized map of Heishiding Nature Reserve, Guangdong. I. The distribution of the vegetation type and formation. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatsen* [中山大学学报(自然科学版)], **39**: 61 – 66. (in Chinese with English abstract)
- Yu, S. X. (余世孝), Zang, R. G. (臧润国) and Jiang, Y. X. (蒋有绪). 2001. Species richness-abundance relationships in four types of tropical forest on altitudinal gradient at Bawangling Nature Reserve, Hainan. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), **25**: 291 – 297. (in Chinese with English abstract)
- Zeide, B. 1991. Fractal geometry in forestry application. *Forest Ecology and Management*, **46**: 179 – 188.
- Zhang, Z. B. (张知彬), Wang, Z. W. (王祖望) and Li, D. M. (李典谟). 1998. Ecological complexity—review and prospect. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), **18**: 433 – 441. (in Chinese with English abstract)

(责任编辑: 闫文杰)