

节肢动物群落稳定性测度的灰色模型及其应用

陈超英

(福建农林大学计算机与信息学院, 福州 350002)

摘要: 证明了累加生成可增大两单调递增序列的协方差, 意味着累加生成有可能提高两正相关序列的线性相关性, 使之达到线性拟合的要求。在一个节肢动物群落中总个体数与种类数、天敌总个体数与害虫总个体数具有灰正相关关系。以各样本中总个体数 m 与种类数 S 及天敌总个体数 m_n 与害虫总个体数 m_p 为变量, 利用累加生成和线性回归的方法建立节肢动物群落稳定性测度灰色模型。通过模型求出比值 S/m 和 m_n/m_p 作为测度群落稳定性的指标, 其值愈大表明群落稳定性愈好。将该模型应用于福州、安溪、武夷山、福安等四地茶园节肢动物群落稳定性的测度, 对所得结果应用灰色聚类法按“好”、“中”、“差”3类对4地茶园节肢动物群落稳定性状况进行灰色聚类评估。评估结果为: 福州、安溪茶园为“好”, 武夷山茶园为“中”, 福安茶园为“差”。这一结果与实际基本相符, 表明建立的灰色模型是可行的, 并验证了生物多样性可导致群落稳定性这一假说。

关键词: 茶园; 节肢动物群落; 稳定性; 灰色模型; 灰色聚类

文章编号: 1000-0933(2005)11-3112-05 **中图分类号:** Q 141, Q 968.1 **文献标识码:** A

A grey model for measuring the stability of arthropod community and its application

CHEN Chao-Ying (Faculty of Computer and Information, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, 350002, China). Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(11): 3112~ 3116

Abstract It has been proved in the present paper that the accumulative generation can enhance the covariance of two monotone incremental sequences, which implies that accumulative generation may enhance the linear dependence of two positive correlation sequences to meet the demand of linear fitting. There is a grey positive correlation between numbers of the total individuals and the total species, individual numbers of the pests and their natural enemies in a arthropod community. Based on numbers of the total individuals (m) and the total species (S), individual numbers of the pests (m_p) and their natural enemies (m_n), a grey model for measuring stability of arthropod community is developed using methods of the accumulative generation and the linear regression. The ratios of S/m and m_n/m_p are calculated, and used as stability indexes of the arthropod community. The greater ratio can better stabilize the arthropod community. The model has also been applied to measure the stability of arthropod communities in four tea plantations of Fuzhou, Anxi, Wuyishan and Fuan, Fujian Province. The stability of arthropod communities in the four tea plantations can be grouped into three grades, high-grade, middle-grade and low-grade according to measured values of the stability index using the grey clustering method. The tea plantations of Fuzhou and Anxi are in the high-grade group, the tea plantation of Wuyishan in the middle-grade group, and the tea plantation of Fuan in the low-grade group. The result is basically consistent with the targeted field situation, which well indicates that the grey model is feasible, and that the biodiversity may lead to the stability of communities.

Key words: tea plantation; arthropod community; stability; grey model; grey clustering

稳定性是群落的重要属性之一。群落稳定性是指群落在一段时间过程中维持物种互相结合及各物种数量关系的能力, 以及

基金项目: 福建省科技三项费用资助项目(k03014)

收稿日期: 2005-07-10; **修订日期:** 2005-09-14

作者简介: 陈超英(1958~), 男, 福建仙游人, 博士, 副教授, 主要从事生物数学、灰色系统理论和昆虫生态研究。E-mail: chency86@sohu.com

Foundation item: Three Items of Expenditure on Science and Technology of Fujian Province(No. k03014)

Received date: 2005-07-10; **Accepted date:** 2005-09-14

Biography: CHEN Chao-Ying, Ph. D., Associate professor, mainly engaged in biomathematics, grey system theory and insect ecology. E-mail: chency86@sohu.com

在受到扰动情况下恢复到原来平衡状态的能力。它有 4 个含义, 即现状的稳定、时间过程的稳定、抗变动能力和变动后恢复原状的能力^[1]。对群落稳定性的研究, 人们更多的是关注如何导致群落的稳定性, 如生物多样性是否导致群落稳定性^[2~8], 对群落稳定性的测度却研究较少, 多数是应用物种丰富度、Shannon-Wiener 指数等多样性指数进行稳定性分析^[2, 9~12]。

高宝嘉等在封山育林对昆虫群落结构及多样性稳定性影响的研究中^[13], 提出用全年种数与总个体数之比(S/m)和天敌类群种数与植食昆虫种数之比(S_n/S_p)来表达群落的相对稳定程度。即将全年各月所调查的种类数和个体数取平均值进行计算, 当 S/m 较大时, 则说明种数较多而个体数相对较少, 反映了种类间数量上的制约作用。 S_n/S_p 则反映了群落内部食物网络关系的复杂性及相互制约的程度。它们的值愈大, 表明群落抗干扰能力愈强, 即愈稳定。但这两个比值毕竟是静态的, 稳定性强调的是时间过程的稳定性, 是动态的。本文从数量动态方面考虑 S 与 m 之间的关系。对于 S_n 与 S_p , 为了避免种类鉴定带来的困难和可能造成的误差, 本文改用天敌总个体数与害虫总个体数, 它们之间的关系同样能反映群落内部食物网络关系的相互制约程度。其比值愈大, 表明群落抗干扰能力愈强, 群落愈稳定。然后利用累加生成原理及线性回归方法, 建立群落稳定性测度灰色模型, 并应用灰色聚类法进行综合评估。

1 模型机理

定理 1 设向量 $X^{(0)} = (x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)})$, $Y^{(0)} = (y_1^{(0)}, y_2^{(0)}, \dots, y_n^{(0)})$, 其元素序列为单调增加的正数序列;

向量 $X^{(1)} = (x_1^{(1)}, x_2^{(1)}, \dots, x_n^{(1)})$, $Y^{(1)} = (y_1^{(1)}, y_2^{(1)}, \dots, y_n^{(1)})$, 其元素序列分别是 $X^{(0)}$ 、 $Y^{(0)}$ 中元素序列的一次累加生成,

成, 即: $x_i^{(1)} = \sum_{k=1}^i x_k^{(0)}$, $y_i^{(1)} = \sum_{k=1}^i y_k^{(0)}$, $i = 1, 2, \dots, n$, 则有 $\text{cov}(X^{(1)}, Y^{(1)}) > \text{cov}(X^{(0)}, Y^{(0)})$

证明 记 $\alpha = (x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)})$, $\alpha = (0, x_1^{(0)}, \dots, x_{n-1}^{(0)})$, $\dots$, $\alpha_n = (0, 0, \dots, x_1^{(0)})$
 $\beta_1 = (y_1^{(0)}, y_2^{(0)}, \dots, y_n^{(0)})$, $\beta_2 = (0, y_1^{(0)}, \dots, y_{n-1}^{(0)})$, $\dots$, $\beta_n = (0, 0, \dots, y_1^{(0)})$

则: $X^{(1)} = \alpha + \alpha + \dots + \alpha_n$ $Y^{(1)} = \beta_1 + \beta_2 + \dots + \beta_n$ (1)

由协方差性质, 有:

$$\text{cov}(X^{(1)}, Y^{(1)}) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \text{cov}(\alpha_i, \beta_j) \quad (2)$$

因为向量 $\alpha_i, \beta_j, i = 1, 2, \dots, n$ 中的元素序列为非减序列且不全为零, 即具有同增变化趋势, 由相关系数性质知: $\text{cov}(\alpha_i, \beta_j) > 0, i, j = 1, 2, \dots, n$ 。注意到 $\alpha_i = X^{(0)}, \beta_i = Y^{(0)}$, 即有:

$$\text{cov}(X^{(1)}, Y^{(1)}) > \text{cov}(X^{(0)}, Y^{(0)}) \quad (3)$$

证毕。

研究种类数 S 与总个体数 m 及天敌个体数 m_n 与害虫个体数 m_p 之间的比例关系, 也就是建立它们之间的线性模型。但 S 与 m, m_n 与 m_p 在动态过程中, 其线性相关性不一定很大, 直接进行线性回归, 可能误差较大, 甚至面目全非。定理 1 表明, 两个单调增序列, 通过累加生成处理, 可增大它们之间的协方差系数, 从而有可能增大它们之间的线性相关系数, 达到建立线性模型的要求。

由于群落内部食物网络关系及天敌的“跟随”现象, 当种类数增加时, 个体数相应增加; 害虫个体数增加时, 天敌个体数也相应增加, 即具有同增趋势。但该趋势是灰的, 并不一定完全显露出来。由灰色系统理论知, 累加生成可使离乱的原始数据中蕴含的规律充分显露出来^[14], 定理 1 证实了这一点。所以, 可考虑应用累加生成原理建立其线性比例模型。

2 群落稳定性测度模型

为叙述方便, 以种类数 S 和总个体数 m 的关系为例, 其中 S 作为自变量, m 作为因变量。设共进行 n 次调查, $S(i), m(i)$ 为第 i 次调查的种类数和总个体数, $i = 1, 2, \dots, n$ 。首先将各次调查所获得的自变量序列 $S(i)$ 按递增排列, 因变量序列 $m(i)$ 作相应变更; 若序列 $S(i)$ 中有几项相同时, 序列 $m(i)$ 中对应的项按递增排列, 使变更后的序列 $S(i)$ 为非减序列。而序列 $m(i)$, 由上述讨论知, 在一般情况下近似为一个非减序列。为了与灰色系统理论中的记号一致, 变更后的序列记为 $S^{(0)}(i), m^{(0)}(i)$, 其中 i 为变更后的序号, $i = 1, 2, \dots, n$ 。对 $S^{(0)}(i), m^{(0)}(i)$ 作一次累加生成。一次累加生成序列记为 $S^{(1)}(i)$ 和 $m^{(1)}(i)$, 即 $S^{(1)}(i) = \sum_{k=1}^i S^{(0)}(k)$, $m^{(1)}(i) = \sum_{k=1}^i m^{(0)}(k)$, $i = 1, 2, \dots, n$ 。由定理 1 知, 序列 $S^{(1)}(i)$ 与 $m^{(1)}(i)$ 的相关系数可能增大, 当达到线性模型拟合要求时, 便可以 $S^{(1)}(i)$ 为自变量, $m^{(1)}(i)$ 为因变量建立一元线性回归模型:

$$\hat{m}^{(1)}(i) = aS^{(1)}(i) + b \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

然后累减还原:

$$S^{(0)}(i) = S^{(1)}(i) - S^{(1)}(i-1), \hat{m}^{(0)}(i) = \hat{m}^{(1)}(i) - \hat{m}^{(1)}(i-1) \quad (5)$$

$$\text{得 } m^{(0)}(i) \text{ 与 } S^{(0)}(i) \text{ 比例估计式: } \hat{m}^{(0)}(i) = aS^{(0)}(i) \quad i = 2, 3, \dots, n \quad (6)$$

a 的倒数 $\frac{1}{a}$ 即为 $S^{(0)}(i)$ 与 $m^{(0)}(i)$ ($i=2,3,\dots,n$) 的近似比值, 可作为测度群落稳定性的指标。用完全相同的方法, 以害虫个体数为自变量、天敌个体数为因变量, 可得天敌个体数与害虫个体数的比值模型。由于模型(6)是应用累加生成原理而得, 累加生成属灰序列生成, 故不妨称之为群落稳定性测度灰色模型。

3 应用实例

3.1 数据来源

本文采用 2003 年在福州、安溪、福安、武夷山等 4 地茶园调查所获得的数据作为应用实例, 调查方法采用在树冠上扫网的方法采集样本: 捕虫网口径 30cm, 按平行跳跃法选取 30 个点。采样时间: 2003 年 2 月至 2003 年 12 月, 每 2 个月 1 次, 间隔相对固定。夏秋季, 8: 00~ 10: 00; 冬春季, 9: 00~ 11: 00。每点扫 50 网, 扫集的标本装入小塑料袋内用少量酒精浸杀, 然后带回实验室分类鉴定, 并统计数量。四地茶园节肢动物群落参数见表 1。

表 1 4 地茶园节肢动物群落参数
Table 1 Indexes of arthropod community in four tea plantations

地点 Place 时间(年/月) Time(year/month)	福州 Fuzhou				安溪 Anxi			
	S	m	m_p	m_n	S	m	m_p	m_n
2003/02	32	786	215	145	29	2571	830	321
2003/04	35	1819	726	409	30	2156	946	488
2003/06	31	2254	1457	382	30	2200	323	542
2003/08	30	1312	704	340	28	1842	458	979
2003/10	36	3304	1703	1130	26	2199	1079	391
2003/12	32	2721	1021	1291	24	997	359	273

地点 Place 时间(年/月) Time(year/month)	福安 Fuan				武夷山 Wuyishan			
	S	m	m_p	m_n	S	m	m_p	m_n
2003/02	17	1373	64	94	22	878	60	92
2003/04	30	1879	794	337	25	1311	672	251
2003/06	33	2713	1159	986	31	3467	2391	387
2003/08	25	6612	4724	249	25	1268	901	206
2003/10	26	4966	4221	300	26	1642	1342	182
2003/12	23	2946	904	405	18	320	205	50

3.2 数据处理

应用上述群落稳定性测度灰色模型计算各茶园节肢动物群落稳定性指标, 结果见表 2。为了与原静态模型进行比较, 将静态模型所得结果及模型中变量间的相关系数值一并列入表 2。

表 2 4 地茶园节肢动物群落参数 S 与 m 、 m_n 与 m_p 的相关系数及稳定性指标

Table 2 Correlation coefficients of S and m , m_n and m_p , and stability indexes of arthropod community in four tea plantations

模型类型 Model type 地点 Place	灰色模型 Grey model				静态模型 Static model			
	$r(S^{(1)}, m^{(1)})$	$r(m_n^{(1)}, m_p^{(1)})$	$S^{(0)}/m^{(0)}$	$m_n^{(0)}/m_p^{(0)}$	$r(S, m)$	$r(m_n, m_p)$	S/m	m_n/m_p
福州 Fuzhou	0.991	0.986	0.016	0.646	0.525	0.605	0.017	0.635
安溪 Anxi	0.999	0.953	0.013	0.656	0.754	- 0.293	0.014	0.749
福安 Fuan	0.972	0.879	0.007	0.184	0.100	- 0.153	0.008	0.200
武夷山 Wuyishan	0.981	0.985	0.016	0.192	0.949	0.888	0.017	0.210

其中 $r(x, y)$ 表示序列 x 与 y 的线性相关系数 Where $r(x, y)$ is linear correlation coefficient of array x and y

3.3 灰色聚类分析

从表 2 看, 应用种类数与总个体数的比值及天敌个体数与害虫个体数的比值作为测度群落稳定性的指标, 所得结果不完全一致, 说明这两个指标是从不同侧面反映群落的抗干扰能力。为了更好地研究群落的稳定性, 应用灰色聚类法^[15]综合评估各茶园群落稳定性的优劣。以 4 地茶园为聚类对象: 1、2、3、4 分别代表福州、安溪、福安、武夷山等 4 地茶园; 以灰色模型所得的两个比值为聚类指标; 聚类灰数为“好”、“中”、“差”, 即灰类 k 取值为: 1、2、3。测度群落稳定性的两个指标的极性一致, 即愈大表明群落愈稳定。为使量纲一致, 将表 2 中的 4、5 两列的指标值进行初值化, 初值化后得:

$$d = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0.813 & 1.015 \\ 0.438 & 0.285 \\ 1 & 0.297 \end{pmatrix} \quad (7)$$

为了客观地确定临界值, 采用文^[16]中的平均值法, 即“好”、“中”、“差”类的阈值分别为: $\bar{X} + \alpha \bar{X}$ 、 $\bar{X} - \sigma$, 其中 $\bar{X}$ 为同一指标样本均值, σ 为样本标准差。这样, 取各阈值为:

$$c_{11} = 1.078 \quad c_{21} = 1.063 \quad c_{12} = 0.813 \quad c_{22} = 0.649 \quad c_{13} = 0.548 \quad c_{23} = 0.235 \quad (8)$$

聚类权系数由公式: $\eta_k = \frac{c_{jk}}{\sum c_{jk}} \quad j = 1, 2; k = 1, 2, 3$ 确定, 计算得:

$$\eta_{k1} = 0.504 \quad \eta_{k2} = 0.496 \quad \eta_{k1} = 0.556 \quad \eta_{k2} = 0.444 \quad \eta_{k3} = 0.700 \quad \eta_{k3} = 0.300 \quad (9)$$

白化函数为:

$$f_{j1} = \begin{cases} \frac{x}{c_{j1}} & 0 \leq x \leq c_{j1} \\ 1 & x > c_{j1} \end{cases} \quad f_{j2} = \begin{cases} \frac{x}{c_{j2}} & 0 \leq x \leq c_{j2} \\ 2 - \frac{x}{c_{j2}} & c_{j2} < x \leq 2c_{j2} \\ 0 & x > 2c_{j2} \end{cases} \quad f_{j3} = \begin{cases} 1 & 0 \leq x \leq c_{j3} \\ 2 - \frac{x}{c_{j3}} & c_{j3} < x \leq 2c_{j3} \\ 0 & x > 2c_{j3} \end{cases} \quad j = 1, 2 \quad (10)$$

聚类向量为:

$$\sigma_i = (\sigma_{i1}, \sigma_{i2}, \sigma_{i3}) \quad \text{其中} \quad \sigma_{ik} = \sum_{j=1}^2 f_{jk}(d_{ij}) \eta_k \quad i = 1, 2, \dots, 4; k = 1, 2, 3$$

计算得:

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= (0.934, 0.632, 0.123) & \sigma_2 &= (0.854, 0.750, 0.361) \\ \sigma_3 &= (0.338, 0.495, 0.936) & \sigma_4 &= (0.606, 0.631, 0.343) \end{aligned} \quad (11)$$

由聚类向量可知 4 地茶园节肢动物群落稳定性的评估结果为: 福州、安溪茶园属“好”类, 武夷山茶园属“中”类, 福安茶园属“差”类, 这与实际情况基本一致。

3.4 结果分析

3.4.1 从表 2 可以看到, 经过一次累加后, 两序列的线性相关性有大幅度的提高, 且基本上能达到线性拟合的要求, 8 个相关系数只有 1 个稍小些, 其余均在 95% 以上。而原序列间的线性相关性, 除个别外, 大部分较小, 难以达到线性拟合的要求, 所以本文所做的累加生成处理是可行的。同时, 注意到原序列间的线性相关系数值虽不大, 但多数为正, 说明其同增趋势是灰的, 因而应用灰色系统理论探讨其线性相关性是正确的, 拓宽了灰色系统理论的应用范围。该方法可推广到其它应用两同增序列的比值作为指标的模型。

3.4.2 从表 2 可以看到, 灰色模型的指标值与静态模型的指标值基本一致, 特别是种数与总个体数的比值基本吻合, 但内涵不一样。灰色模型是从动态过程考虑, 比较符合稳定性中的时间过程稳定这一要求, 并可根线性相关系数值检验其可信度。而且, 静态模型只是灰色模型的一个特例。事实上, 当 (6) 式成立时, 两序列 (除首项外) 各自的总和也必然满足该式, 这从另一个侧面进一步验证了灰色模型的正确性。

4 讨论

从灰色聚类分析结果看, 周围生态环境较复杂、基本没有使用化学农药治虫、接近自然生长状态的福州茶园, 群落稳定性相对最高, 其灰色聚类明显处于“好”类。而周围生态环境较单一、时有使用化学农药治虫的福安茶园相对稳定性最低, 其灰色聚类明显处于“差”类。说明增加茶园周围生态环境的复杂性, 减少使用化学农药, 可在一定程度上提高茶园节肢动物群落的相对稳定性, 这与生物多样性可导致群落稳定性的假说相吻合。然而也应看到, 武夷山茶园周围的生态环境远比安溪茶园周围的生态环境复杂, 但武夷山茶园的群落稳定性却低于安溪茶园, 其灰色聚类处于“中”类, 说明我们对复杂性要有一个正确的理解, 并不是树木越多、生态环境就越复杂。复杂性可导致稳定性, 是指群落中的能流路线趋于复杂时, 如果某一条能流路线受干扰被堵塞, 就可能有其他的能流路线予以补偿, 从而群落系统趋于更稳定。所以只有当茶园周围的生态环境有助于茶园节肢动物群落内能流路线的增加, 使食物链和食物网更加趋于复杂, 才有利于提高茶园节肢动物群落的相对稳定性。武夷山茶园周围的生态环境虽然复杂, 但主要是松树和铁芒萁, 可能这些植物无助于茶园节肢动物群落内能流路线复杂性的增加, 有关松树、铁芒萁与茶园节肢动物群落的关系有待进一步研究。

References

- [1] Zheng S Z, Wu Q H, Wang H B. General ecology: Principles, methods and applications. Shanghai: Fudan University Press, 1994. 165~ 166
- [2] MacArthur R. Fluctuations of animal populations, and a measure of community stability. *Ecology*, 1955 **36**: 533~ 537.
- [3] Elton C S. *The Ecology of Invasions by Animals and Plants*. Chapman and Hall, London, 1958. 143~ 153
- [4] Naeem S, L J Thompson and S P Lawler. Declining biodiversity can alter the performance of ecosystems. *Nature*, 1994 **368**: 734~ 736
- [5] Tilman D and J A Downing. Biodiversity and stability in grasslands. *Nature*, 1994 **367**: 363~ 365
- [6] Grime J P. Benefits of plant diversity to ecosystems: immediate, filter and founder effects. *Journal of Ecology*, 1998 **86**: 902~ 910
- [7] May R M. Will a large complex system be stable? *Nature*, 1972 **238**: 413~ 414
- [8] May R M. *Stability and Complexity in Model Systems*. Princeton: Princeton University Press, 1973. 447.
- [9] William W. Murdoch. Diversity, complexity, stability and pest control. *J. Appl. Ecol.*, 1975 **12**: 795~ 807.
- [10] Jin C X, Wu Y. A study on the measurements of community diversity and their application. *Acta Entomologica Sinica*, 1981, **24**(1): 28~ 33
- [11] Jin C X, Wu Y, Wang D L. Diversity of arthropod communities in paddy fields. *Acta Entomologica Sinica*, 1990, **33**(3): 287~ 295
- [12] Huang Z E, Du X G, Dong M, *et al.* Effects of organic management on the stability of arthropods in organic tea gardens. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2004, **20**(6): 57~ 98
- [13] Gao B J, Zhang Z Z, Li Z Y. Studies on the influence of the closed forest on the structure, diversity and stability of insect community. *Acta Ecologica Sinica*, 1992, **12**(1): 1~ 7.
- [14] Liu S F, Guo T B, Dang Y G. Grey system theory and its applications. Beijing: Science Press, 1999. 34
- [15] Deng J L. Fundamentals of grey theory. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2002. 412~ 421.
- [16] Tang Q H. A study on methods of determining the whitenization function of grey group in grey cluster. *Sichuan Ordnance Journal*, 1996, **17**(4): 4~ 7.

参考文献:

- [1] 郑师章, 吴千红, 王海波. 普通生态学——原理、方法和应用. 上海: 复旦大学出版社, 1994. 165~ 166
- [10] 金翠霞, 吴亚. 群落多样性测定及其应用的探讨. *昆虫学报*, 1981, **24**(1): 28~ 33
- [11] 金翠霞, 吴亚, 王冬兰. 稻田节肢动物群落多样性. *昆虫学报*, 1990, **33**(3): 287~ 295
- [12] 黄正恩, 杜相革, 董民, 等. 有机管理对茶园节肢动物群落稳定性的影响. *中国农学通报*, 2004, **20**(6): 57~ 98
- [13] 高宝嘉, 张执中, 李镇宇. 封山育林对昆虫群落结构及多样性稳定性影响的研究. *生态学报*, 1992, **12**(1): 1~ 7.
- [14] 刘思峰, 郭天榜, 党耀国. 灰色系统理论及其应用. 北京: 科学出版社, 1999. 34
- [15] 邓聚龙. 灰理论基础. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002. 412~ 421.
- [16] 唐其环. 灰色聚类灰类白化函数确定方法的探讨. *四川兵工学报*, 1996, **17**(4): 4~ 7. 165~ 166