

附录1 网络指标及其生态学意义

Appendix 1 Description of network metrics and their ecological significance

1 全局网络指标及其生态意义

全局网络指标从网络的连通性(connectivity)、对称性(asymmetry)、专业化(specialization)、多样性(diversity)、嵌套性(nestedness)、模块性(modularity)、聚集性(clustering)、稳健性(robustness)以及群落特征9个方面对网络整体特征进行描述(Dehling, 2018) (附表1)。

连通性

描述连通性的指标有, 平均连接数(links per species), 度分布(degree distribution), 连接密度(linkage density), 连接度(connectance) (Luke, 2015)。对于二分网络而言, 高连通性的网络中泛化互作更多, 物种之间的互作关系更密切, 物种间存在较多冗余的互作关系, 这样的网络面对某一物种的灭绝时可通过与其他物种的互作维持其生活, 避免了次级灭绝的发生, 维持了网络的稳定性。

度分布(degree distribution)描述了边的频率分布模式。在生态网络中, 边的频率分布通常具有幂律分布(power-law distribution)或截断幂律分布(truncated power-law distribution)的形式(Jordano et al, 2003)。这种分布形式意味着大多数物种只有很少的互作对象, 而少数被称为枢纽(hubs)的物种具有较多互作对象。在互惠网络中, 度分布的模式在整个生态系统中是相似的, 并且与物种组成不具有相关性(Jordano et al, 2003)。此外, 由于形态或物候上的不匹配阻碍了两个物种之间的相互作用, 每个物种的互作对象的数量往往是有限的(Olesen et al, 2011)。具有高的连接度的物种常常被当作关键种。

稳健性

网络稳定性用灭绝曲线斜率(extinction slope)和稳健度(robustness)来衡量。其基本思路是通过随机抽取的方法删除一个营养级物种, 观察另一个营养级物种是否还有互作对象, 如果互作对象不存在了, 假定其也会灭绝。随着一个营养级物种的逐渐灭绝, 可以得到另一个营养级物种的灭绝曲线。曲线形式为:

$$y = 1 - x^a \quad (\text{公式1})$$

x: 随机灭绝的物种比率。

y: 另一营养级灭绝的物种比率。

a: 灭绝曲线斜率。

灭绝曲线斜率可以直观反映物种灭绝的速度, 稳健性(robustness)指灭绝曲线下的面积,

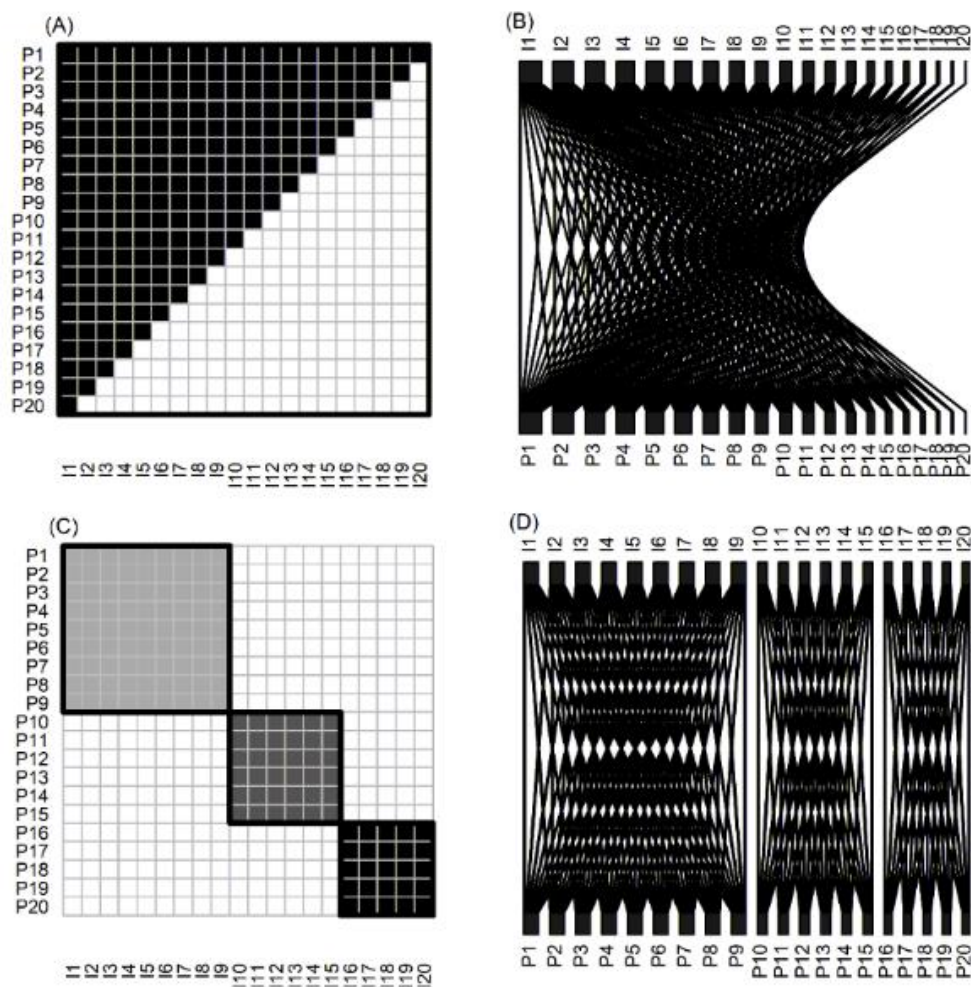
值越大表明物种灭绝越缓慢。

专化性

专化性描述了网络中互作的专一性程度, 专化性指数 H_2' (Blüthgen et al, 2006)将观测到的物种间相互作用频率与基于物种多度的预期相互作用频率(即发生频率)联系起来, 提出了一种衡量物种间相互作用模式互补性的方法。 H_2' 描述了整个网络的两个部分之间的专一化互作程度, 取值从0 (泛化)到1 (专化)。

嵌套性

网络的嵌套性用于描述物种的互作对象之间的重合(刘灿然等, 2002)。在岛屿生物地理学领域, 为了分析岛屿上物种组成的重合, 引入了嵌套性的概念(Almeida-Neto et al, 2008)。Bascompte等(2003)首次将其应用于生态网络, 它描述了一个物种的互作对象在多大程度上构成了另一个物种的互作对象的子集。植物-动物互作网络往往是高度嵌套的, 表现为低连接度的物种(专性互作者)常常与高连接度物种(泛化互作者)的互作对象子集中的物种发生互作(图S1A, B)。在二分网络中, 这种互作模式会导致互作专一性的不对称。表现为, 一个类别中的泛化互作物种, 与另一个类别的多个物种(既包括泛化互作物种也包括专性互作物种)发生种间互作(例如图S1A中, 植物P1与所有的昆虫互作, 既包括泛化互作的昆虫, 例如I2, 也包括专性互作的昆虫, 例如I20), 而来自不同类别的专性互作者往往与另一个类别的泛化互作者发生种间作用(例如: P20与I1的互作以及I20与P1的互作)。在互惠网络中, 这种不对称性表明网络并不总是由成对物种间的专性互作关系组成(Joppa et al, 2009)。嵌套结构增加了互惠网络的稳定性(Thébault & Fontaine, 2010), 因为嵌套结构导致泛化互作物种对群落中的物种灭绝具有较高的抵抗力(Aizen et al, 2012), 同时增加了通常是稀有种的特化互作物种的耐受性。此外, 嵌套性减少了同营养级物种间的竞争(Bastolla et al, 2009)。



图S1: 使用虚构的植物-传粉昆虫互作解释网络的嵌套度和模块化。P1-P20表示20种植物, I1-I20表示20种昆虫。(A)植物-传粉昆虫互作的完美嵌套性, 从P20至P1与每一种植物互作的昆虫物种都是位于其上方的植物传粉昆虫的子集。交叉的格子代表植物和昆虫的互作关系, 有颜色填充表示具有互作关系。(B)与完美嵌套数据对应的二分网络结构。(C)植物-传粉昆虫互作的模块化。只有特定的植物和昆虫之间发生了互作。(D)典型的模块化网络结构。

Fig. S1 A synthetic plant-pollinator interaction network to show the nestedness and modularity. P1-P20 represented plants, and I1-I20 represented pollinators. (A) Nestedness of plant-pollinator interactions, from P20 to P1, pollinator species visit each plant is a subset of the upper visitor. Black cells show interactions between plants and pollinators, and blank cells indicate no interactions. (B) Bipartite networks correspond to nested plant-pollinator interactions. (C) The modularity of plant-insect interaction. Interactions exist only in specific plant-pollinator species pairs. (D) Network of the corresponding modularized plant-insect

interactions.

模块性

模块性描述了网络的分区, 指相对于网络中的其他节点的互作, 网络中成组的节点内部表现出更加密切互作的倾向(Thébault, 2013) (图S1C)。根据这种倾向的强度, 模块化会导致网络划分为不同的单元或亚结构。一个完全模块化的网络由几组节点组成, 互作只存在于组内节点之间(图S1D)。然而, 完全的模块化在自然界中是非常罕见的, 大多数模块化网络是不完全的, 既与同一个模块的节点相互作用也能与不同模块的节点相互作用。在网络中定义模块有不同的方法(Guimerà et al, 2007; Dormann & Strauss, 2014)。这些方法旨在将相互作用的物种对分配给模块, 使模块内相互作用的数量最大化, 模块间相互作用的数量最小。网络的模块化增加了其应对干扰的稳健性(robustness), 因为干扰可能只发生在模块内部, 而不容易扩散到其他模块(Stouffer & Bascompte, 2011)。然而, 高度模块化的网络也不可避免地显示出较低的整体连通性, 因此总体上表现出较低的连接冗余, 这可能会降低网络对次级灭绝的稳健性。模块化可能与物种的共系统发育(Krasnov et al, 2012)、季节性气候(Dalsgaard et al, 2013; Schleuning et al, 2014), 以及传粉和传播综合征相联系(传粉和传播综合征指一组植物物种共有一类能够吸引传粉者或种子散播者的特征组合) (Dehling, 2018)。共生网络中模块化程度的差异可能与不同生态过程中物种不同的需求有关。例如, 在传粉过程中, 如果所有的植物个体都被一组专性传粉者访问, 植物可能会获得更多的收益, 因为这增加了花粉在同一物种个体之间的传播机会。而在种子散布过程中, 对于植物来说, 尽可能多的吸引种子散布者来增加其果实散落到有利的生长环境的机会, 对植物更有利。此外, 种子传播网络通常限于一个类群, 例如鸟类, 而传粉网络的采样通常跨越更广泛的类群, 例如几个昆虫目, 这使得传粉网络中更有可能包括具有不同的传粉综合征的物种对。而且, 模块化的概率会随着网络规模的增加而增加(Olesen et al, 2007)。Donatti等(2011)调查了巴西潘塔纳尔湿地中包括了多个脊椎动物类群的种子传播网络, 该网络表现出高度模块化的特征, 且模块的构成与不同的动物类群相关(鱼、鸟和乌龟各一个模块, 另一个模块包括哺乳动物和大型陆生鸟类)。因此, 当研究仅仅涉及一个小型网络, 而且集中于特定的类群时, 在解释模块化时要非常谨慎, 因为所研究的网络可能只是一个更大网络的一个子集。

聚集性

在多数真实的网络中, 节点倾向于形成密切互作的团(clique), 表现为若干节点间的高度

连接, 这种高度连接显著高于根据平均连接概率随机生成的结点间的连接度。在网络图上表现为聚为一团的一组节点。聚集性描述了网络的小世界性, 暗示网络稳健性(Fox & Bellwood, 2014)。

群落指标

群落指标, 在两个互作类群(例如: 植食昆虫-植物, 传粉者-植物或寄生者-寄主网络)或物种-资源的二分网络中, 可以根据高营养级物种与低营养级物种的互作关系来计算生态位重叠(niche overlap)。此处生态位重叠指一个营养级物种互作对象的平均Horn-Morisita距离的平均值(Krebs, 1999)。通过聚集性、分化度来推断物种对资源的共享或竞争模式(Stone & Roberts, 1992)。

2 局部网络指标

我们可以通过网络全局指标来描述网络的整体特征, 也可以计算节点或边的指标(生态学分析中主要描述节点属性)来呈现每个节点的网络特性, 这些指标称为网络的局部指标。局部指标反映了节点在网络中的重要性和特定属性。

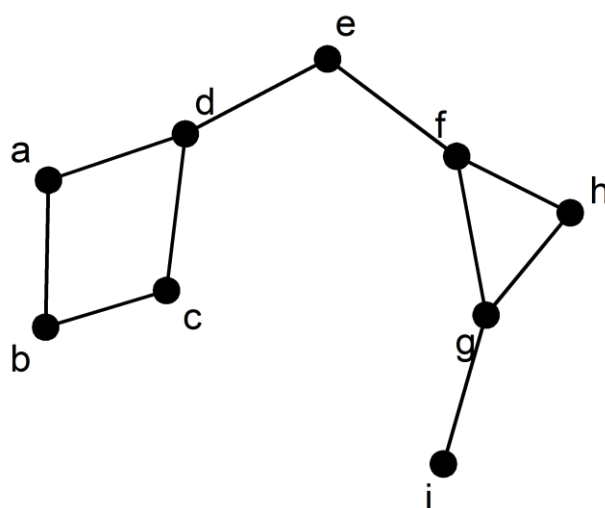
2.1 描述节点中心性的指标

中心性度量可用于识别在模块化网络中具有不同角色的物种(例如, 网络核心、枢纽节点)。节点的度, 指节点的连接数量, 代表它与网络中其他节点的关联程度。一个物种的度越高, 它对网络中其他物种的潜在影响就越大(Dehling, 2018)。

生态网络往往呈现出模块性的特点, 一些节点的度可能比较低, 但却是连接模块的关键节点, 因此起到枢纽的作用。因此, 可以根据一个节点在模块内的连接度和模块间的连接度对其进行分类。Guimerà和Amaral (2005)根据物种连接数的 z 值(标准正态转换的模块内连接度)来定量评估一个物种在模块内的中心性。参与度(participation coefficient, PC), 描述了节点在模块间的中心性, 取值从0 (节点只与一个模块中的节点互作)到1 (节点的连接均匀分布在所有模块中)。根据 z 值和PC可以将节点分为, 模块枢纽(高 z , 低PC)和网络枢纽(高 z , 高PC), 这两类枢纽对网络的内聚性和稳健性都很重要。低 z 值和低PC值的物种被认为是外围物种(peripheral species), 它们既不与模块紧密连接, 也不充当模块间的重要连接; 而低 z 值高PC值的物种充当模块之间的重要连接节点, 因此对网络的内聚性也很重要(Olesen et al, 2007; Li et al, 2020)。

根据相互作用的模式, 物种可以分为专性互作的和泛化互作。最简单的分类方法是基于

相互作用对象的数量, 因为这种分类方法提供了衡量资源使用范围的方式, 从而也提供了一个物种生态位大小的度量。因此, 连接数少的物种被认为是专性的, 而连接度高的物种被认为是泛化的。但是, 这样简单的划分可能会造成误导。一个生态网络往往仅仅对一个生态过程的资源利用进行抽样, 而且我们常常发现网络中的专性互作者实际上是杂食的, 他们仅仅是偶然地参与到了网络抽样过程中。边的数量不能提供关于生态位重叠的信息, 因此也不能提供网络中物种的冗余或互补性的信息(Blühgen & Klein, 2011)。Blühgen等(2006)提出了一个标准化的专性互作指数 d' , 该指标通过比较一个物种和其互作对象的实际连接与基于多度的所有可能互作对象(在网络中的出现频率)的期望连接模式, 计算了一个物种的特异性(取值从0到1, 0表示低特异性, 1表示高特异性)。一个只与高多度的物种(常见种)互作的物种与仅与低多度(稀有种)互作的物种相比, 具有低的 d' 值, 因此特异性低。



图S2 图示网络的密接性(closeness)和中介性(betweenness)。该网络中各节点的中介性分别为, a=3, b=0.5, c=3, d=15.5, e=16, f=15, g=7, h=0, i=0。密接性分别为, a=0.36, b=0.29, c=0.36, d=0.47, e=0.50, f=0.47, g=0.38, h=0.36, i=0.28。

Fig. S2 A synthetic network show the network betweenness and closeness. The betweenness of nodes is, a=3, b=0.5, c=3, d=15.5, e=16, f=15, g=7, h=0, i=0, respectively. The closeness is, a=0.36, b=0.29, c=0.36, d=0.47, e=0.50, f=0.47, g=0.38, h=0.36, i=0.28, respectively.

密接性(closeness), 一个结点的密接性等于该节点与网络中其他所有节点的最短路径平

均值的倒数。假定一个具有 n 个节点的网络, i 和 j 分别是网路中的任意节点, 则节点 i 的密接性:

$$C_i = \frac{n-1}{\sum_j d_{ij}} \quad (\text{公式2})$$

C_i = 节点 i 的密接性

d_{ij} = 节点 i 和 j 之间的最短路径

中介性(betweenness), 假设网络中的两个节点, b 和 g , 它们之间可能具有多个最短路径($bade fg$ 和 $bcdefg$)。一个节点 e 的中介性等于网络中任意两个节点之间经过节点 e 的最短路径之和, 除以 b 和 g 之间最短路径的总和。高中介性的节点可能是网络中的“切点”。这样的节点(例如 e)可能具有低的连接度, 但是高的中介性(图S2) (Luke, 2015)。

$$C_B(n_i) = \sum_{j < k} g_{jk}(n_i) / g_{jk} \quad (\text{公式3})$$

g_{jk} = 节点 j 和 k 之间的最短路径

$g_{jk}(n_i)$ = j 和 k 之间的最短路径中包括了 i 的最短路径数量

切点(cutpoint): 如果去掉一个节点将增加网络的模块, 则这样的节点称为切点。桥(bridge): 如果去掉一条边会导致网络分成两个模块, 则这样的边称为桥。

附表1 全局网络指标的定义、计算及生态学意义

Table S1 Global network metrics definition, calculation, and ecological significance

Characteristic	Index	formula	description
表征	指标	公式	描述及意义
连通性	连接度(connectance, C)	$C = L/(I*J)$ L: 网络中观测到的连接数 I: 低营养级物种的数量(如植物、猎物) J: 较高营养级物种的数量(例如传粉者、寄生者)	C表示实际观察到的互作占所有可能互作的比例。群落水平物种关联数, 描述互作网络或食物网中连接密度的最简单和最常用的指标之一, 通常被解释为系统中的泛化或冗余度, 对群落稳定性产生影响。
连通性	平均连接数(links per species, LPS)	$LPS = L/S$ L: 网络中观测到的连接数 S: 表示物种数	LPS为连接的总数除以物种数。平均每个物种的连接数量, 这是对非加权网络的描述。
对称性	网络不对称度(web asymmetry, WA)	$WA = (I-J)/(I+J)$ I: 高营养级的物种数 J: 低营养级的物种数	正值表示高营养级物种较多, 负值表示低营养级物种较多。描述两类互作对象数量的均衡性。
专化性	互作专化度 (specialization, H_2')#	$H_2' = -\sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^c (p_{ij} * \ln p_{ij})$ p_{ij} 表示一个r行c列的互作矩阵的i行, j列单元格中的互作数占	H_2' 是对 H_2 进行标准化(0至1之间)之后的特异性测度(Dormann et al, 2009)。网络水平对互作特异性的测度, 取值为0表示极端的专性互作, 取值为1表示

		矩阵中总的互作数的比率。	完全的泛化互作。
多样性	交互均匀度(interaction evenness, IE)#	$IE = \frac{\sum p_i \log_2(p_i)}{\log_2 N}$ <p>p_i, 交互<i>i</i>占总互作的比率</p> <p>N, 总的互作数量</p>	用于描述网络中不同通路能量流的均匀度。
多样性	普遍度 / 脆弱度 (generality, G)/vulnerability, V)#	$G = \sum_{k=1}^s \frac{b_{.k}}{b_{..}} n_{N,k}$ $V = \sum_{k=1}^s \frac{b_{k.}}{b_{..}} n_{P,k}$ <p>s = 网络中的物种数</p> <p>$b_{.k}$ = 列数量之和</p> <p>$b_{k.}$ = 行数量之和</p> <p>$b_{..}$ = 行加列之和</p> <p>$n_{N,k}$ = 第<i>k</i>个物种的猎物个体数量之和</p> <p>$n_{P,k}$ = 第<i>k</i>个物种的捕食者个体数量之和</p>	<p>普遍度: 与高营养级物种(捕食者)互作的低营养级物种(猎物)的平均有效数量。</p> <p>脆弱度: 每种低营养级物种(猎物)互作的高营养级物种(捕食者)的平均有效数量。</p> <p>使用互作数量进行了加权, 表示互作对象的多样性 (Bersier et al, 2002; Tylianakis et al, 2007)。</p>
嵌套性	矩阵温度 (matrix temperature, T)	$T = 100/U_{max}(mn) \sum_i \sum_j (d_{ij}/D_{ij})^2$ <p>$U_{max} \approx 0.04145$</p>	矩阵温度 T , 衡量了关联矩阵与完全嵌套状态的偏离程度。计算该指标首先需要将关联矩阵重新排列为"最大填充"状态, 即对行和列进行重新排序, 以

		<p>m = 行数 n = 列数 d_{ij} = 第i行, 第j列单元格距离边界线的距离 D_{ij} = 过第i行, 第j列单元格的与对角线平行的线的长度</p>	<p>最大化嵌套性。具体方法是, "填充"矩阵将具有更多物种的行放置在矩阵顶部, 而具有更多物种的列放置在左侧。然后, 计算物种有/无之间的边界线以描述如果矩阵完全嵌套, 存在性的期望分布。位于边界线上方和左侧的物种缺失以及位于边界线下方和右侧的物种存在都被认为是完全嵌套排列中的“意外”情况。矩阵温度计算与边界线的“意外”存在和缺席的偏差平方和除以矩阵可能的最大值, 再乘以100。因此, T是一个标准化的(即无量纲的)指标, 结合了物种的意外存在和缺失的数量和距离来衡量矩阵与完全嵌套状态的偏离程度。T = 0为最大嵌套性, T = 100无嵌套(Atmar & Patterson, 1993)。</p>
<p>嵌套性</p>	<p>加权矩阵温度(weighted matrix temperature, WT)#</p>	<p>第一步: 对一个具有i行j列的交互矩阵, M_{ij}。首先对矩阵的行和列进行重排: 按行边际总和的大小降序自上而下排列各行, 按列边际总和降序从左至右排布各列。计算出两个加权邻接矩阵, P_{ij}^c和P_{ij}^r, 用于描述列元素j对行元素i的依赖以及行元素i对列元素j的依赖。因此, 可以获得矩阵M_{ij}在行i和列j上的权重。其中N_r和N_c分别表示矩阵的行数和列数。</p> $P_{ij}^c = \frac{M_{ij}}{\sum_{i=1}^{N_c} M_{ij}}$ $P_{ij}^r = \frac{M_{ij}}{\sum_{j=1}^{N_r} M_{ij}}$ <p>第二步: 按照以下规则将矩阵的行列重新分配为新的矩阵元</p>	<p>使用交互频率加权的矩阵温度, 1表示完全嵌套, 0表示无嵌套(混乱) (Galeano et al, 2009)。</p>

		<p>素:</p> $x_i = \frac{(i-1)}{N_c} + \frac{1}{2N_c}$ $y_j = \frac{(j-1)}{N_r} + \frac{1}{2N_r}$ <p>第三步: 根据新的位置, 计算加权互动距离, d_{ij}^w:</p> $d_{ij}^w = P_{ij}^r \cdot x_i + P_{ij}^c \cdot y_j$ <p>d_{ij}^w 计算了每个连接的加权距离, 距离越大对嵌套性的贡献越大</p> <p>第四步: 矩阵的加权交互嵌套性, d^w, 是其所有非零元素的平均值:</p> $d^w = \frac{1}{N_l} \sum_{i,j} d_{ij}^w$ <p>N_l 表示连接的总数。</p> <p>第5步: 计算WT</p> $WT = \frac{d^w - d_{rnd}}{d_{max} - d_{rnd}}$	
--	--	---	--

		<p>d_{md} = 随机加权互作嵌套度。指对100个与原始矩阵具有相同大小和连接分布的随机矩阵计算随机嵌套性, 取平均值来获得的随机嵌套性</p> <p>d_{max} = 最大嵌套矩阵的加权互作嵌套度。创建一个具有相同大小和连接的新矩阵, 该矩阵中连接被尽可能紧密的置于矩阵的右侧和下方。然后根据1-4的步骤计算该矩阵的加权最大嵌套度。</p>	
嵌套性	NODF (nestedness metric based on overlap and decreasing fill, NODF)	$NODF = \frac{\sum N_{paired}}{\left[\frac{n(n-1)}{2}\right] + \left[\frac{m(m-1)}{2}\right]}$ <p>N_{paired} = 将一个矩阵按照行、列填充单元格数量的大小自上而下, 以及自左向右排序。对于列来说, 配对重叠度就是在给定列<i>l</i>中, 与列<i>k</i>中同时存在的物种的百分比。对于行来说, 配对重叠是在给定行<i>j</i>中, 与行<i>i</i>中同时存在的物种的百分比。</p> <p>n = 矩阵的行数</p> <p>m = 矩阵的列数</p>	NODF是基于有、无数据计算的矩阵嵌套性, 取值范围0-100, 值越大表示嵌套性越强。根据Almeida-Neto等人(2008)的分析, NODF比矩阵温度一致性更好。
嵌套性	WNODF (weighted nestedness metric based on overlap and decreasing fill, WNODF)#	$WNODF = \frac{2(WNODFc + WNODFr)}{m(m-1) + n(n-1)}$ $WNODFc = 100 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \frac{k_{ij}}{N_j}$ <p>WNODFc: 将一个矩阵按照行、列填充单元格数量的大小自上而下, 以及自左向右排序。对于任何一对列, 配对嵌套性的加权值的计算方式是<i>c_j</i>中比<i>c_i</i>相同行的单元格具有更低值的单元</p>	基于NODF使用多度加权的嵌套性指标。取值范围0-100, 值越大表示嵌套性越强(Almeida-Neto & Ulrich, 2011)。

		<p>格的百分比。</p> <p>WNODFr: 对于任何一对行, 配对嵌套性的加权值的计算方式是r_j中比r_i相同行的单元格具有更低值的单元格的百分比。计算方法与WNODFc相同。</p> <p>k_{ij} 表示列j中具有较小值的单元格数量。</p> <p>N_j 表示列j中非零单元格的总数。</p>	
模块性	模块度(modularity, Q)	$Q = \frac{1}{2m} \sum_{ij} (A_{ij} - K_{ij}) \delta(c_i, c_j)$ $m = \sum_{i,j} A_{ij}$ <p>A_{ij} = 描述网络边的矩阵</p> <p>K_{ij} = 基于零模型计算得到的权重矩阵</p> $K = \frac{k_i k_j^T}{2m}; k_i = A_i, k_j = A_j \text{ 分别是矩阵A的行和列的边际总和。}$ <p>c_i, c_j 是物种i或j被分配的模块</p> <p>$\delta(c_i, c_j)$ 是一个指示函数, 当$c_i = c_j$ 时, 函数值等于1, 不相等时函数值为0。</p>	<p>模块是网络中与其他部分不连接的节点组成的子集。模块内的节点相互连接, 但是与网络中的其他模块是隔离的(不存在连接) (Dormann & Strauss, 2014)。Q取值范围从0到1, 0表示群落模块内连接数量并不比随机连接更多。Q值越高, 表示越支持将网络分为不同的模块。</p>
聚集性	聚集系数 (clustering coefficient, C_i)	<p>一个节点的局域聚类系数量化了与该节点互作的其他节点互相连接的程度。将网络中3个连接的节点划为一组。如果3个节点通过3条边互相连接, 则称他们形成了一个闭合的三角连接。如果有一条边缺失则称其为开放的三角连接。全局聚类系数(C_i)等于网络中闭合连接(number of closed triplets,</p>	<p>聚集系数也称为传递性, 描述了网络中节点聚集在一起的程度。整体网络的全局聚集系数表征了整个网络的平均“成簇性质”。高的聚集系数暗示网络的小世界性。在多数真实的网络中, 节点倾向于形成密切互作的组, 表现为若干节点间的高连接度, 这</p>

		<p>NCT)占全体连接(number of all triplets, NAT)的比例 (Luke, 2015)。</p> $C_i = \frac{NCT}{NAT}$	<p>种高连接度显著高于根据平均连接概率随机生成的结点间的连接度。聚集系数取值从0到1, 取值越大聚集性越强。</p>
稳健性	灭绝曲线斜率 (extinction slope, a)	<p>对于灭绝曲线, $y = 1 - x^a$, 灭绝曲线斜率a。</p>	<p>拟合在一个营养级物种随机灭绝之后(用x表示随机灭绝后的物种比率), 另一个营养级的二次灭绝序列(用y表示另一营养级物种存在的比率)的幂函数斜率(a), 斜率值越大, 该网络受物种灭绝的影响越小(Dormann et al, 2009)。灭绝曲线斜率是衡量系统对物种丧失的稳定性指标。</p>
稳健性	稳健度(robustness, R)	<p>对灭绝曲线$y = 1 - x^a$, 在$x \in (0, 1)$进行积分, 求得灭绝曲线下的面积即为稳健度。</p>	<p>二次灭绝曲线下的面积, Memmott等(2004)首先提出了这条曲线。量化了网络因物种灭绝而对群落崩溃的敏感性。取值范围: 0–1, 高度稳健的系统趋向于1的值。</p>
群落指标	生态位重叠度 (niche overlap, NO)#	<p>Horn's相似性距离:</p> $R_0 = \frac{\sum[(X_{ij} + X_{ik}) \log(X_{ij}X_{ik})] - \sum(X_{ij} \log X_{ij}) - \sum(X_{ik} \log X_{ik})}{[(N_j + N_k) \log(N_j + N_k)] - (N_j \log N_j) - (N_k \log N_k)}$ <p>对一个营养级成对物种互作对象计算R_0, 取平均值即为NO。</p>	<p>一个营养级物种互作对象的平均Horn-Morisita距离(Dormann et al, 2009)。值接近0表示生态位不重叠, 1表示完全生态位重叠; 生态位重叠是两个或两个以上物种对一种或多种资源的共同使用。</p>

群落指标	聚集度(togetherness, T)	$T = 2 \sum_1^i \sum_1^j T_{ij} / N_s(N_s - 1)$	<p>所有成对的物种组合在资源中同时出现或缺失的平均值(Stone & Roberts, 1992)。表示物种共用资源的程度。在整个采样中, 当两个物种共用一种资源时会增加聚集性的值。聚集性取值越高, 说明群落中物种共存程度越高, 反之则说明物种共存程度较低。较高的聚集性值暗示(Gotelli, 2000):</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 物种间存在共生关系, 因此总是同时出现或缺失。 2. 物种间存在一定的生态位重叠, 但其生态位差异不大。 3. 物种间竞争程度较低。
群落指标	分化度(C score, CS)	$C = 2 \sum_1^i \sum_1^j C_{ij} / N_s(N_s - 1)$ $C_{ij} = (r_i - S_{ij})(r_j - S_{ij})$ <p>r_i: 物种i占据的资源数 r_j: 物种j占据的资源数 S_{ij}: 物种i和物种j共占的资源数</p>	<p>分化度定义为, 群落中成对物种棋盘矩阵单元的平均数。在一个群落中, 可将物种对资源的利用以关联矩阵的形式表示。一个棋盘矩阵单元指上述关联矩阵的一个子矩阵, 该子矩阵包括2物种(物种i和j), 2资源(p和q), 组成的关联矩阵, 该子矩阵中物种i仅占据资源p, 物种j仅占据资源q。两个物种对资源的利用是完全分开的。C_{ij}指表示所有物种对形成的棋盘矩阵之和的平均值。公式中, i<j表示每个特有物种对的棋盘单元的平均数(Stone & Roberts, 1992)。表示物种在资源利用上分化的程度, 用于表示种间对资源的竞争。当两个物种对资源的利用是分化的时候, 导致分化度增加。分化度越大, 表示群落中物种之间的竞争越强烈, 相互之间共存的可能性越小。分化度越小, 表示物种之间的竞争关系</p>

			越弱, 相互之间越容易共存。分化度还可以用于比较不同群落中的物种竞争关系的强弱。基于分化度的推断需结合其他指标的结果综合考量。
群落指标	关联度(V-Ratio, VR)	$VR = S_T^2 / \sum \sigma_i^2$ $\sigma_i^2 = p_i (1 - p_i)$ $S_T^2 = (1/N) \sum_j^N (T_j - t)^2$ <p> $p_i = n_i/N$, 表示每个物种在采样中的平均值, 平均出现率 N: 样本量 T_j: 一个样本中的物种数 t: 观测到的每个样本中的平均物种数 S_T^2 表示所有样本中物种数量的平均变异 </p>	<p>VR用于描述多个样本中物种关联的指标。在有、无数据中, 大于1的VR值表示总的物种是正的共变, 小于1表明是负的共变。</p> <p>物种间无关联的原假设是, 协方差之和等于0。当物种在采样样本中是独立分布的, 原假设为真。但是, 也可能当正的协方差和负的协方差彼此抵消时, 也会出现协方差之和为0的情况。因此, 这里的备择假设是物种间存在一个净的正的或负的相关。</p>

表示使用交互频率加权的网络指标。

The # symbol represents interaction frequency-weighted network metrics.

附表2 网络 β 多样性指标及其解释

Table S2 Network β diversity and explanation

指标	定义	差异类型(物种或互作差异)
Network metrics	Defination	Difference of species composition or interactions
β_s	群落间物种组成的差异(Koleff et al, 2003) Dissimilarity in the species composition of communities.	物种组成 Species composition
β_{os}	两个群落间共有物种互作的差异(Poisot et al, 2012) Dissimilarity of interactions established between species common to both realisations.	互作关系 Interactions
β_{wn}	所有互作关系的差异(Poisot et al, 2012) Overall interaction dissimilarity.	互作关系 Interactions
β_{st}	由物种组成变化引起的互作差异(Poisot et al, 2012) Interaction dissimilarity due to species turnover.	互作关系 Interactions

β'_{os}	局域网络与元网络(metaweb)中与之对应部分之 间的差异(Poisot et al, 2012) Dissimilarity between a local network and its counterpart in the metaweb.	互作关系 Interactions
β_{ST}/β_{WN}	物种组成差异相对网络差异的贡献(Poisot et al, 2012) Contribution of species dissimilarity to network dissimilarity.	互作关系 Interactions

元网络(metaweb)通过将所有在不同时间, 不同位点或不同环境下采集的局域网络数据合并起来重新构建的网络, 元网络相当于一个包括了所有物种及其互作的库。

A metaweb is formed by combining samplings from various time periods, locations, and environments. It represents a pool of species and their interactions.

参考文献

- Aizen MA, Sabatino M, Tylianakis JM (2012) Specialization and rarity predict nonrandom loss of interactions from mutualist networks. *Science*, 335, 1486–1489.
- Almeida-Neto M, Guimaraes P, Guimaraes PR Jr, Loyola RD, Ulrich W (2008) A consistent metric for nestedness analysis in ecological systems: Reconciling concept and measurement. *Oikos*, 117, 1227–1239.
- Almeida-Neto M, Ulrich W (2011) A straightforward computational approach for measuring nestedness using quantitative matrices. *Environmental Modelling & Software*, 26, 173–178.
- Atmar W, Patterson BD (1993) The measure of order and disorder in the distribution of species in fragmented habitat. *Oecologia*, 96, 373–382.
- Bascompte J, Jordano P, Melián CJ, Olesen JM (2003) The nested assembly of plant–animal mutualistic networks. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 100, 9383–9387.
- Bastolla U, Fortuna MA, Pascual-García A, Ferrera A, Luque B, Bascompte J (2009) The architecture of mutualistic networks minimizes competition and increases biodiversity. *Nature*, 458, 1018–1020.
- Bersier L-F, Banašek-Richter C, Cattin M-F (2002) Quantitative descriptors of food-web matrices. *Ecology*, 83, 2394–2407.
- Blüthgen N, Klein A-M (2011) Functional complementarity and specialisation: The role of biodiversity in plant–pollinator interactions. *Basic and Applied Ecology*, 12, 282–291.
- Blüthgen N, Menzel F, Blüthgen N (2006) Measuring specialization in species

interaction networks. *BMC Ecology*, 6, 9.

Dalsgaard B, Trøjelsgaard K, Mart ́n Gonz ́lez AM, Nogu ́s-Bravo D, Ollerton J, Petanidou T, Sandel B, Schleuning M, Wang Z, Rahbek C, Sutherland WJ, Svenning J-C, Olesen JM (2013) Historical climate-change influences modularity and nestedness of pollination networks. *Ecography*, 36, 1331–1340.

Dehling DM (2018) The structure of ecological networks. In: *Ecological Networks in the Tropics* (eds D ́ttilo W, Rico-Gray V), pp. 29–42. Springer Cham.

Donatti CI, Guimarães PR, Galetti M, Pizo MA, Marquitti FMD, Dirzo R (2011) Analysis of a hyper-diverse seed dispersal network: Modularity and underlying mechanisms. *Ecology Letters*, 14, 773–781.

Dormann CF, Fr ́ind J, Bl ́thgen N, Gruber B (2009) Indices, graphs and null models: Analyzing bipartite ecological networks. *The Open Ecology Journal*, 2, 7–24.

Dormann CF, Strauss R (2014) A method for detecting modules in quantitative bipartite networks. *Methods in Ecology and Evolution*, 5, 90–98.

Fox RJ, Bellwood DR (2014) Herbivores in a small world: Network theory highlights vulnerability in the function of herbivory on coral reefs. *Functional Ecology*, 28, 642–651.

Galeano J, Pastor JM, Iriando JM (2009) Weighted-interaction nestedness estimator (WINE): A new estimator to calculate over frequency matrices. *Environmental Modelling & Software*, 24, 1342–1346.

Gotelli NJ (2000) Null model analysis of species co-occurrence patterns. *Ecology*, 81, 2606–2621.

Guimer ́ R, Amaral LAN (2005) Cartography of complex networks: Modules and universal roles. *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, 2005,

P02001.

Guimerà R, Sales-Pardo M, Amaral LAN (2007) Module identification in bipartite and directed networks. *Physical Review E*, 76, 036102.

Joppa LN, Bascompte J, Montoya JM, Solé RV, Sanderson J, Pimm SL (2009) Reciprocal specialization in ecological networks. *Ecology Letters*, 12, 961–969.

Jordano P, Bascompte J, Olesen JM (2003) Invariant properties in coevolutionary networks of plant–animal interactions. *Ecology Letters*, 6, 69–81.

Koleff P, Gaston KJ, Lennon JJ (2003) Measuring beta diversity for presence–absence data. *Journal of Animal Ecology*, 72, 367–382.

Krasnov BR, Fortuna MA, Mouillot D, Khokhlova IS, Shenbrot GI, Poulin R (2012) Phylogenetic signal in module composition and species connectivity in compartmentalized host-parasite networks. *The American Naturalist*, 179, 501–511.

Krebs CJ (1999) *Ecological Methodology*, The Second Edition edn. Addison-Wesley Educational Publishers, Inc., Menlo Park, CA.

Li HD, Tang L, Jia C, Holyoak M, Frund J, Huang X, Xiao Z (2020) The functional roles of species in metacommunities, as revealed by metanetwork analyses of bird-plant frugivory networks. *Ecology Letters*, 23, 1252–1262.

Liu CR, Ma KP, Chen LZ (2002) Nestedness: Methods mechanisms and implications for biological conservation. *Acta Phytocologica Sinica*, 26, 68–72. (in Chinese with English abstract) [刘灿然, 马克平, 陈灵芝 (2002) 嵌套性: 研究方法、形成机制及其对生物保护的意義. *植物生态学报*, 26, 68–72.]

Luke DA (2015) *A User's Guide to Network Analysis in R*. Springer, Cham.

Memmott J, Waser NM, Price MV (2004) Tolerance of pollination networks to species extinctions. *Proceedings of the Royal Society of London Series B: Biological Sciences*, 271, 2605–2611.

Olesen JM, Bascompte J, Dupont YL, Elberling H, Rasmussen C, Jordano P (2011) Missing and forbidden links in mutualistic networks. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 278, 725–732.

Olesen JM, Bascompte J, Dupont YL, Jordano P (2007) The modularity of pollination networks. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 104, 19891–19896.

Poisot T, Canard E, Mouillot D, Mouquet N, Gravel D (2012) The dissimilarity of species interaction networks. *Ecology Letters*, 15, 1353–1361.

Schleuning M, Ingmann L, Strauss R, Fritz SA, Dalsgaard B, Dehling DM, Plein M, Saavedra F, Sandel B, Svenning JC, Bohning-Gaese K, Dormann CF (2014) Ecological, historical and evolutionary determinants of modularity in weighted seed-dispersal networks. *Ecology Letters*, 17, 454–463.

Stone L, Roberts A (1992) Competitive exclusion, or species aggregation? *Oecologia*, 91, 419–424.

Stouffer DB, Bascompte J (2011) Compartmentalization increases food-web persistence. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 108, 3648–3652.

Thébault E (2013) Identifying compartments in presence–absence matrices and bipartite networks: Insights into modularity measures. *Journal of Biogeography*, 40, 759–768.

Thébault E, Fontaine C (2010) Stability of ecological communities and the

冯志荣, 陈有城, 彭艳琼, 李莉, 王波 (2023) 生态网络分析: 从集合群落到集合网络. 生物多样性, 31, 23171.
<https://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2023171>

architecture of mutualistic and trophic networks. *Science*, 329, 853–856.

Tylianakis JM, Tschamntke T, Lewis OT (2007) Habitat modification alters the structure of tropical host–parasitoid food webs. *Nature*, 445, 202–205.