一种物种灭绝背景下食物网鲁棒性评价指标

报告人：屈小康
指导老师：范天龙 吕琳媛

Linyuan Lab

Linyuan Lab
复杂网络实验室

中国科学技术大学
2024年10月26日

目录

CONTENTS

01 研究背景

02 鲁棒性评价

03 集群效应度量

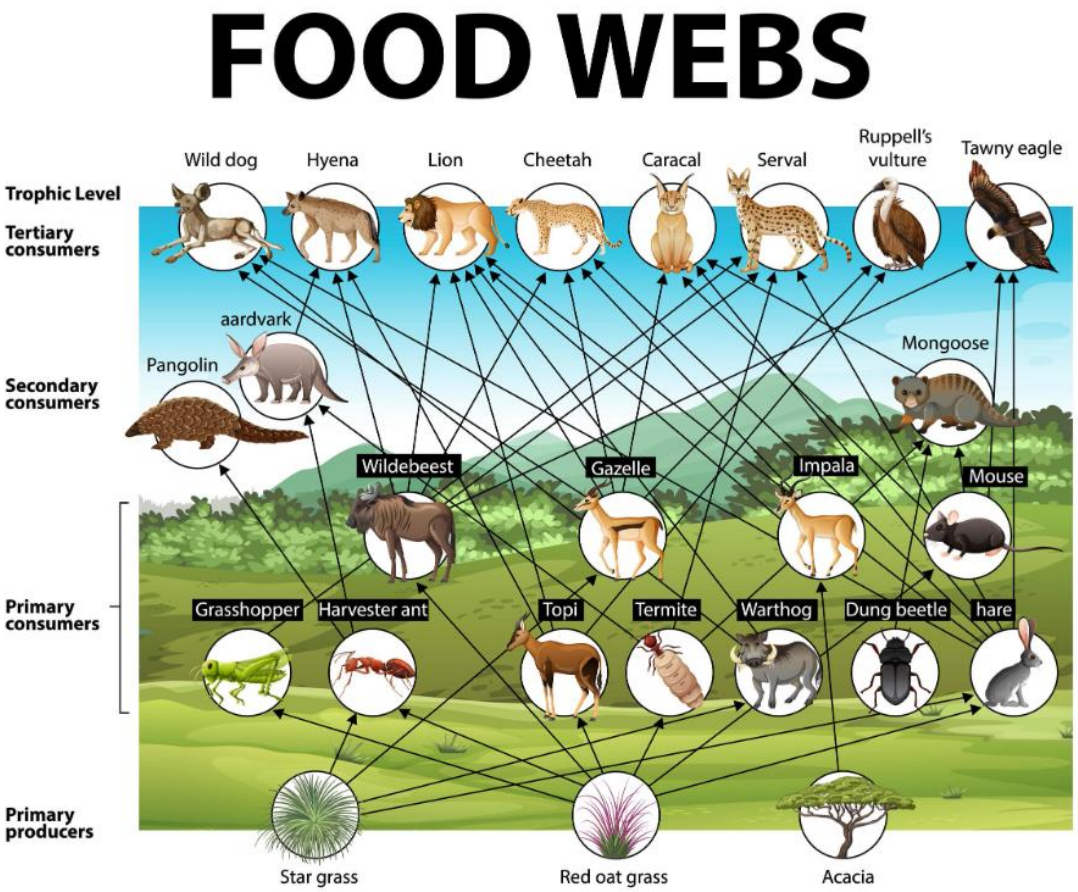
04 总结

目录

CONTENTS

01 研究背景

研究背景



食物网：由食物链构成，食物链是生态系统中不同营养级的生物通过“吃”与“被吃”的关系而以满足生存需要而建立起来的锁链关系，即物种之间食物与猎物关系的体现。

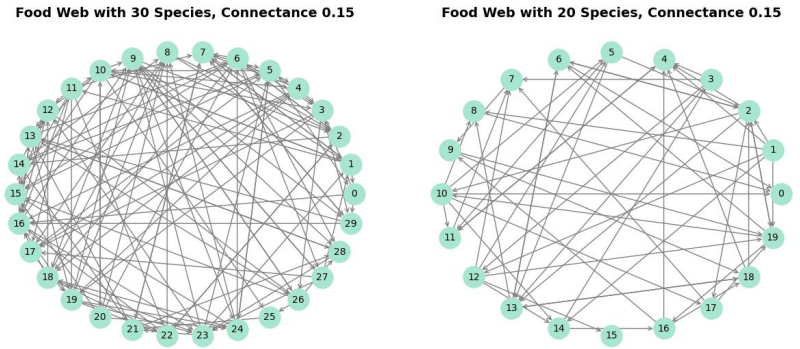
食物网鲁棒性：

- 结构鲁棒性：指网络在节点或连接损失情况下保持其**基本拓扑结构**的能力；
- 功能鲁棒性：关注的是食物网在物种丧失后是否能够继续维持**关键生态功能**，例如物质循环、能量流动和生态系统稳定性。

物种灭绝：某物种不可再生性的消失或破坏

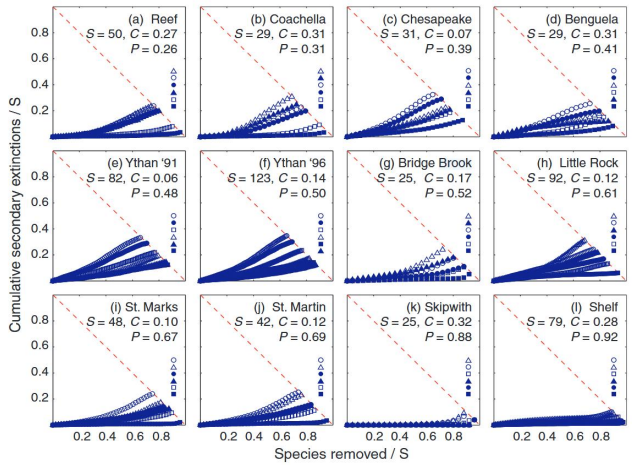
研究背景-现有方法

1. 连接度(connectance)[1]、物种数(species number)[1]判断



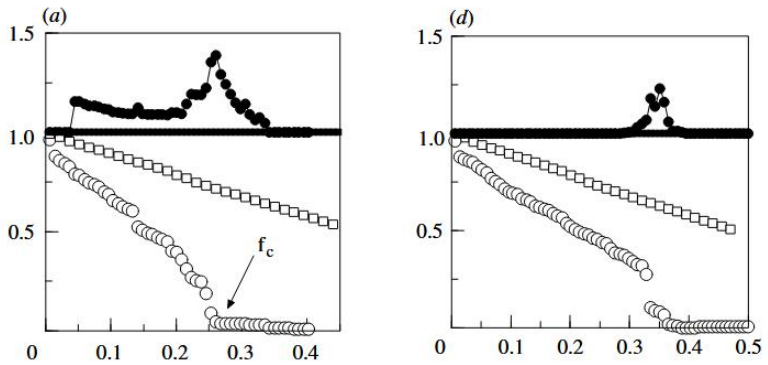
静态&宏观

2. 二次灭绝（Secondary extinction）[2]



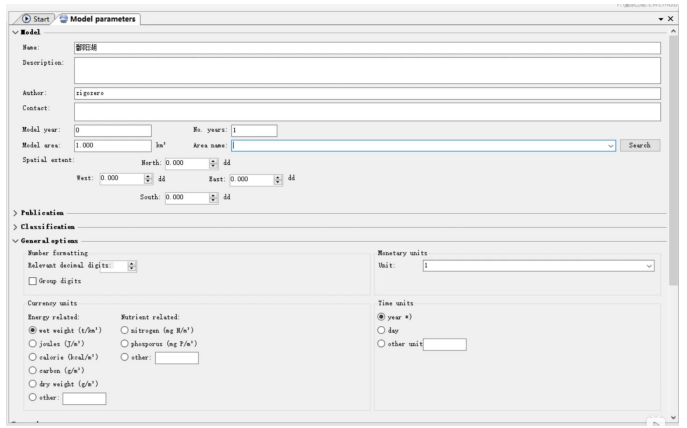
静态

3. 攻击曲线的阈值或曲线下面积[3]



静态

4. 通过软件进行模拟[4]



数据要求高

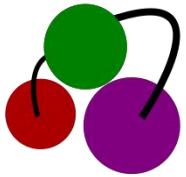
[1]. Dunne, Jennifer A., Richard J. Williams, and Neo D. Martinez. "Network structure and biodiversity loss in food webs: robustness increases with connectance." *Ecology letters* 5.4 (2002): 558-567.
[2]. Curtsdotter, Alva, et al. "Robustness to secondary extinctions: comparing trait-based sequential deletions in static and dynamic food webs." Basic and Applied Ecology 12.7 (2011): 571-580.
[3]. Sole, Ricard V., and Ma Montoya. "Complexity and fragility in ecological networks." Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences 268.1480 (2001): 2039-2045.
[4]. Christensen, Villy, and Carl J. Walters. "Ecopath with Ecosim: methods, capabilities and limitations." Ecological modelling 172.2-4 (2004): 109-139.

研究背景

一种物种灭绝背景下食物网鲁棒性评价指标

1. 动态情况下食物网鲁棒性的评估

- 考虑动态：使用生物量作为系统功能指征，借助生物量动态变化模型，进行动态评估
- 数据要求：拓扑结构
- 使用工具：EcologicalNetworksDynamics.jl



EcologicalNetworksDynamics

2. 食物网中集群效应的评估

- 集群效应：刻画出个体与个体在集群中的非线性差异
- 重要物种：寻找出重要物种集合
- 谱图理论：结合Fiedler值进行验证

[1]. Lajaaiti, Ismael, et al. "EcologicalNetworksDynamics. jl: A Julia package to simulate the temporal dynamics of complex ecological networks." *bioRxiv* (2024): 2024-03.

目录

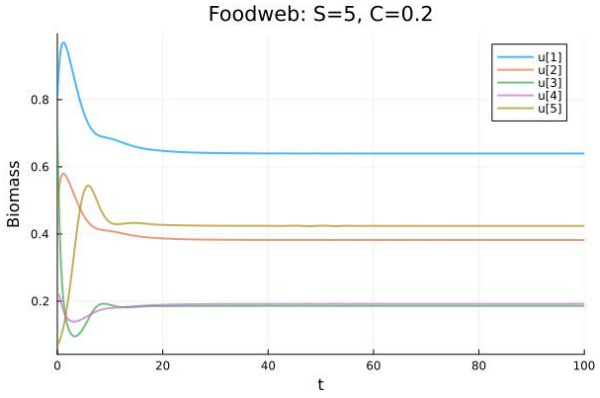
CONTENTS

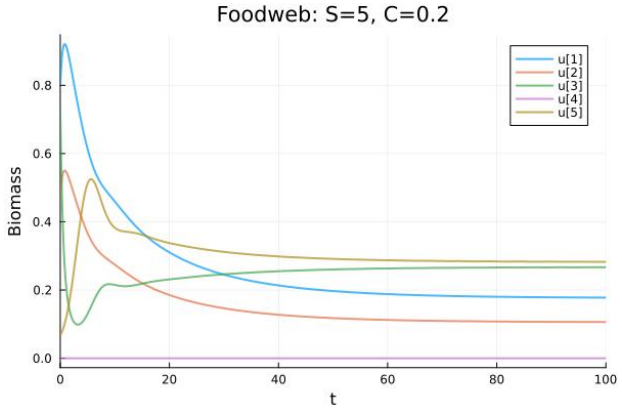
02 鲁棒性评价

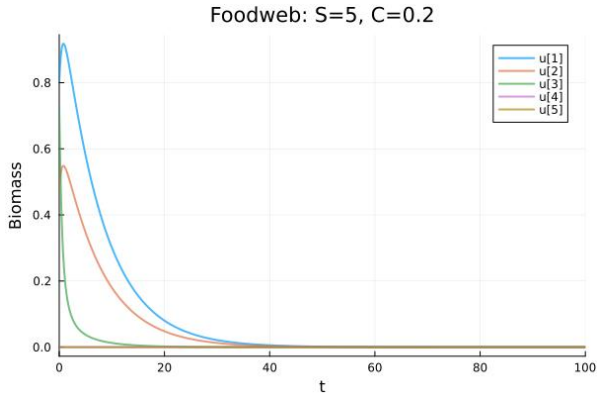
鲁棒性评价-生物量动力学模型

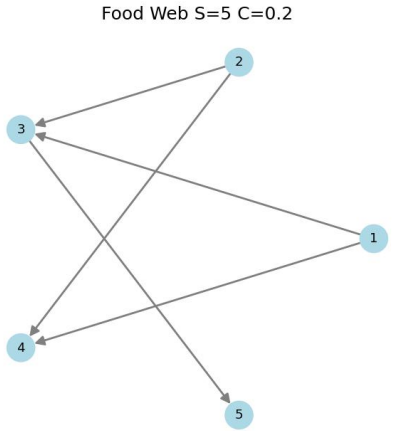
$$\frac{\mathrm{d}B_i}{\mathrm{d}t} = r_i B_i G_i - x_i B_i - d_i B_i + \sum_{j\in\{\text{prey}\}_i} x_i y_i B_i F_{ij} - \sum_{j\in\{\text{pred.}\}_i} \frac{x_j y_j B_j F_{ji}}{e_{ij}}$$

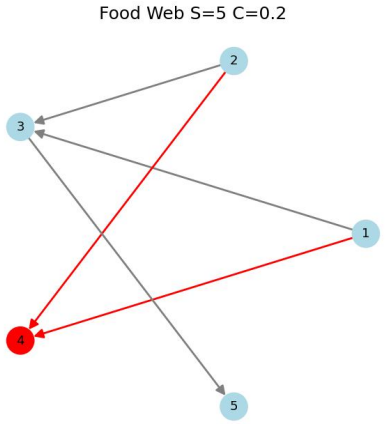
$$F_{ij} = \frac{\omega_{ij} B_j^h}{B_0^h + i_0^{\text{intra}} B_i + \sum_{k\in\{\text{prey}\}_i} \omega_{ik} B_k^h}$$

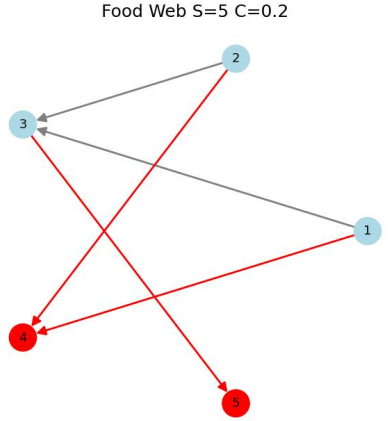












使用生物量作为系统功能的指征，通过将**生物量置为0**代表该物种的灭绝。

系统总生物量降至初始的**50%**作为食物网功能崩溃的标志。

鲁棒性评价-鲁棒性定义

算法 1：最大序列算法

输入：

- 物种集合 S（包含所有物种）
- 初始生物量 B0

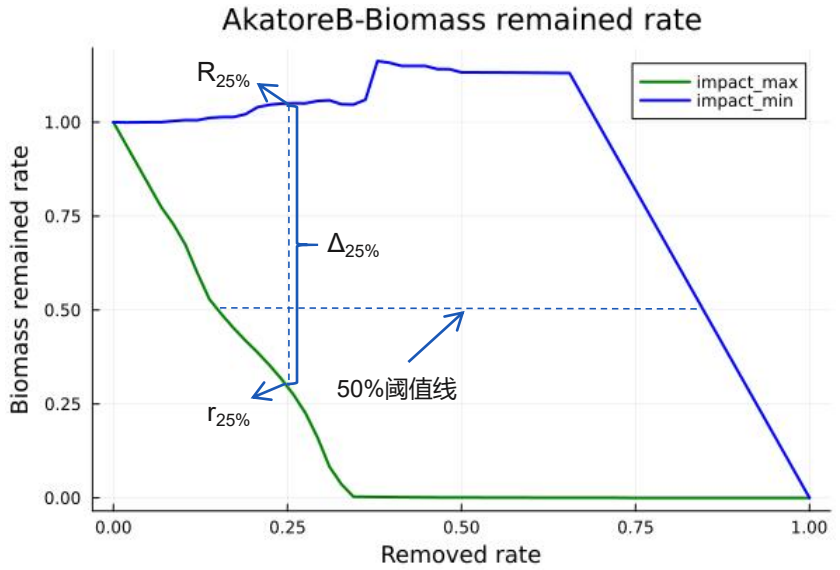
输出：

- 物种移除序列 Seq

---

1. 初始化：
   - S ← 全部物种集合
   - Seq ← 空集合
   - 进行初始生物量动态模拟，得到初始生物量 B0
2. **循环** 当 S 非空时：
   3. 对每个物种 i ∈ S：
      - 移除物种 i
      - 进行动态模拟，计算移除后生物量 B_remove_i
      - 计算影响值 impact_i = B0 - B_remove_i
   4. 找到 impact 最大的物种 impact_max：
      - 将 impact_max 加入 Seq
      - 从 S 中移除 impact_max
3. 返回 Seq

鲁棒性定义：通过算法找到一个对总生物量影响最大的移除序列，然后将这个序列反过来，对两条曲线进行累积移除实验，通过两条曲线之间的面积来衡量该食物网在物种灭绝情况下的鲁棒性大小



$R_{25\%}$：移除25%物种之后该食物网能够保有的最大总生物量

$r_{25\%}$：移除25%物种之后该食物网能够保有的最少总生物量

$\Delta_{25\%}$：移除25%物种之后，该食物网所能保有的总生物量差值

$$\Delta_{\text{area}} = \int_{0}^{y_{\text{impact}_{max}}=0.5} \left(y_{\text{impact}_{\text{min}}} - y_{\text{impact}_{\text{max}}}\right) + \int_{y_{\text{im}\mu\text{act}_{\text{max}}}=0.5}^{y_{\text{impact}_{\text{min}}}=0.5} \left(y_{\text{impact}_{\text{min}}} - 0.5\right)$$

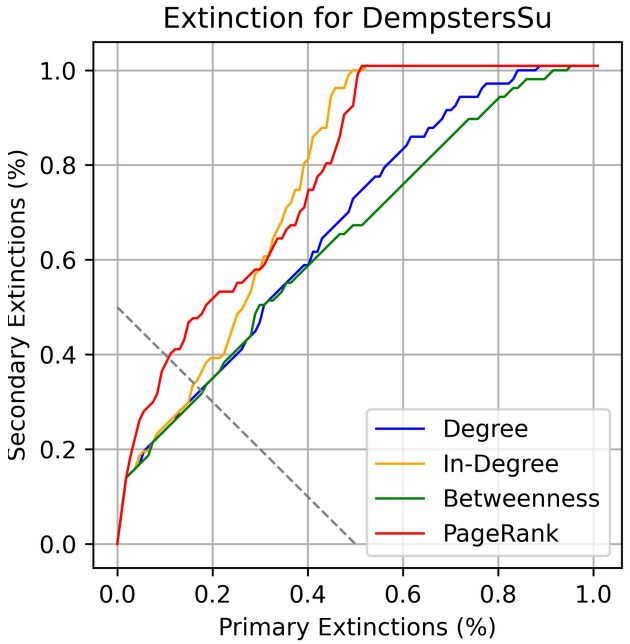
值越大，该食物网在应对物种灭绝时鲁棒性更好

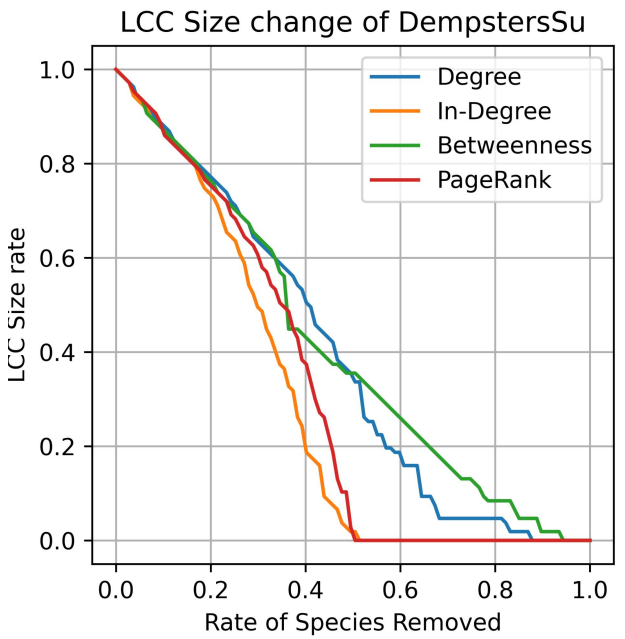
鲁棒性评价-实际度量

iwdb Interaction Web DataBase

Food Web	C	S	CC	G	M	Degree Distribution
AkatoreA	0.0318	85	0.0475	0.4084	0.3347	Power law
AkatoreB	0.0354	58	0.0785	0.3831	0.3539	Power law
Berwick	0.0389	79	0.0345	0.4165	0.3062	Power law
Blackrock	0.0501	87	0.0528	0.4581	0.2132	Power law
Broad	0.0633	95	0.021	0.4704	0.1743	Power law
Canton	0.0601	109	0.0527	0.4789	0.189	Power law
Catlins	0.0468	49	0.0308	0.4511	0.2795	Power law
Coweeta1	0.0381	58	0.1145	0.4135	0.38	Power law
Coweeta17	0.0298	71	0.1071	0.4142	0.3735	Power law
DempstersAu	0.0568	86	0.027	0.445	0.2349	Uniform
DempstersSp	0.0578	97	0.0393	0.4387	0.1979	Power law
DempstersSu	0.0852	107	0.0986	0.5377	0.1906	Uniform
German	0.0483	86	0.0557	0.43	0.2774	Power law
Healy	0.0695	96	0.1016	0.5058	0.1956	Uniform
Kyeburn	0.0662	98	0.0477	0.4919	0.1796	Uniform
LilKyeburn	0.0624	78	0.0567	0.4712	0.2633	Uniform
Martins	0.0314	105	0.123	0.4281	0.327	Power law
Narrowdale	0.0312	71	0.1193	0.4387	0.368	Power law
NorthCol	0.0401	78	0.1081	0.4556	0.3248	Power law
Powder	0.0446	78	0.057	0.4508	0.2773	Power law
SuttonAu	0.0492	83	0.0228	0.4244	0.2055	Power law
SuttonSp	0.0635	79	0.0102	0.4347	0.175	Uniform
SuttonSu	0.0505	92	0.0367	0.4317	0.1447	Power law
Troy	0.0301	78	0.031	0.3923	0.3707	Power law
Venlaw	0.0399	69	0.0406	0.4069	0.2961	Power law
Max	0.0852	109	0.123	0.5377	0.38	
Min	0.0298	49	0.0102	0.3831	0.1447	

与传统方法进行对比：二次灭绝、攻击曲线下面积、拓扑指标





每种方法使用Degree、In_Degree、Betweenness、PageRank四种方法得到序列进行比较，均根据值从大到小进行物种排列。

拓扑指标选择：连接度（Connectance，C）、物种数量（Species_number，S）、聚集系数（Clustering coefficient，CC）、全局效率（Global Efficiency，G）、模块度（Modularity，M）

[1]. Lafferty, Kevin D., Andrew P. Dobson, and Armand M. Kuris. "Parasites dominate food web links." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 103.30 (2006): 11211-11216.
[2]. Jaarsma, N.G., de Boer, S.M., Townsend, C.R., Thompson, R.M. and Edwards, E.D. 1998. Characterising food webs in two New Zealand streams. New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research 32: 271-286.

鲁棒性评价-对比结果

二次灭绝

foodweb_name	delta_area	D_se	ID_se	BET_se	PAGE_se
AkatoreA	0.36	0.06	0.04	0.08	0.04
AkatoreB	0.39	0.09	0.07	0.07	0.05
Berwick	0.34	0.09	0.04	0.06	**0.03**
Blackrock	0.51	0.14	0.11	0.15	0.13
Broad	0.44	0.20	0.17	0.16	0.13
Canton	0.41	0.17	0.17	0.17	0.08
Catlins	**0.26**	**0.04**	0.04	0.04	0.04
Coweeta1	0.39	0.09	0.07	0.12	0.05
Coweeta17	0.39	0.07	0.04	0.08	0.04
DempstersAu	0.47	0.15	0.13	0.19	0.10
DempstersSp	0.51	0.22	0.20	0.20	0.09
DempstersSu	**0.54**	**0.31**	**0.27**	**0.30**	**0.19**
German	0.53	0.15	0.10	0.15	0.09
Healy	0.48	0.23	0.20	0.24	0.16
Kyeburn	0.53	0.22	0.14	0.24	0.15
LilKyeburn	0.53	0.22	0.18	0.22	0.13
Martins	0.38	0.11	0.09	0.13	0.09
Narrowdale	0.29	0.04	0.03	**0.03**	0.03
NorthCol	0.37	0.06	**0.03**	0.09	0.03
Powder	0.39	0.12	0.05	0.12	0.05
SuttonAu	0.44	0.14	0.13	0.17	0.14
SuttonSp	0.47	0.20	0.19	0.22	0.14
SuttonSu	0.52	0.12	0.12	0.28	0.11
Troy	0.44	0.12	0.08	0.10	0.06
Venlaw	0.38	0.13	0.09	0.13	0.06

攻击曲线下面积

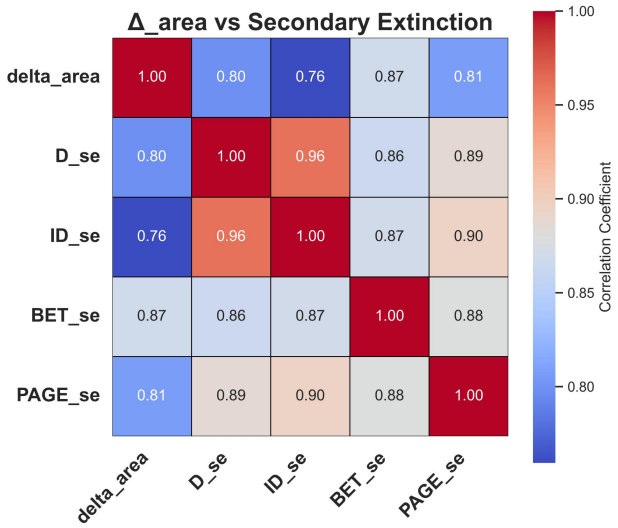
foodweb_name	D_auc	ID_auc	BET_auc	PAGE_auc
AkatoreA	0.14	0.20	0.35	0.21
AkatoreB	0.11	0.19	**0.22**	0.19
Berwick	0.19	0.23	0.33	0.25
Blackrock	0.24	0.21	0.32	0.23
Broad	0.27	0.20	0.36	0.24
Canton	0.30	0.25	0.37	0.26
Catlins	0.13	**0.33**	0.26	**0.33**
Coweeta1	0.13	0.22	0.30	0.22
Coweeta17	**0.10**	0.17	0.24	0.18
DempstersAu	0.24	0.19	0.36	0.23
DempstersSp	0.27	0.22	0.35	0.24
DempstersSu	**0.39**	0.28	0.41	0.31
German	0.24	0.21	0.30	0.22
Healy	0.31	0.26	0.39	0.28
Kyeburn	0.28	0.21	**0.42**	0.23
LilKyeburn	0.30	0.24	0.35	0.24
Martins	0.18	0.23	0.28	0.24
Narrowdale	0.12	0.23	0.23	0.24
NorthCol	0.14	0.30	0.32	0.32
Powder	0.19	0.28	0.33	0.29
SuttonAu	0.22	0.17	0.37	0.20
SuttonSp	0.25	0.18	0.37	0.19
SuttonSu	0.13	**0.11**	0.34	**0.11**
Troy	0.16	0.19	0.30	0.20
Venlaw	0.16	0.22	0.31	0.25

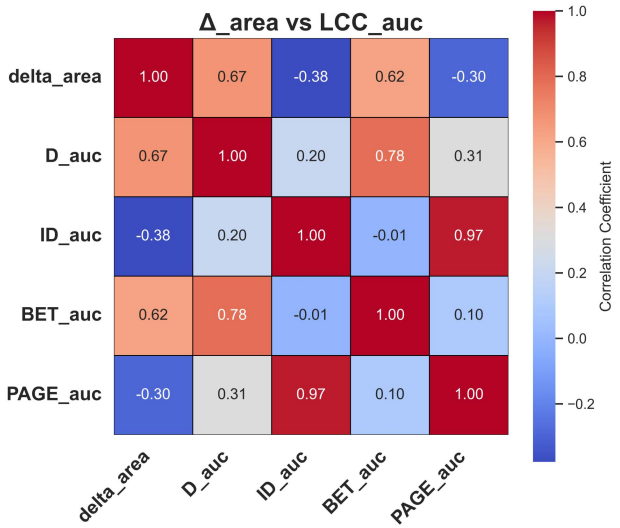
网络属性

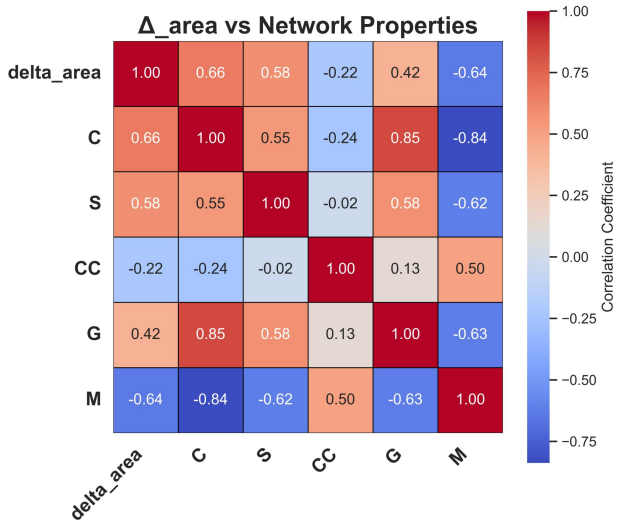
foodweb_name	C	S	CC	G	M
AkatoreA	0.03	85	0.05	0.41	0.33
AkatoreB	0.04	58	0.08	**0.38**	0.35
Berwick	0.04	79	0.03	0.42	0.31
Blackrock	0.05	87	0.05	0.46	0.21
Broad	0.06	95	0.02	0.47	0.17
Canton	0.06	**109**	0.05	0.48	0.19
Catlins	0.05	**49**	0.03	0.45	0.28
Coweeta1	0.04	58	0.11	0.41	**0.38**
Coweeta17	**0.03**	71	0.11	0.41	0.37
DempstersAu	0.06	86	0.03	0.45	0.23
DempstersSp	0.06	97	0.04	0.44	0.20
DempstersSu	**0.09**	107	0.10	**0.54**	0.19
German	0.05	86	0.06	0.43	0.28
Healy	0.07	96	0.10	0.51	0.20
Kyeburn	0.07	98	0.05	0.49	0.18
LilKyeburn	0.06	78	0.06	0.47	0.26
Martins	0.03	105	**0.12**	0.43	0.33
Narrowdale	0.03	71	0.12	0.44	0.37
NorthCol	0.04	78	0.11	0.46	0.32
Powder	0.04	78	0.06	0.45	0.28
SuttonAu	0.05	83	0.02	0.42	0.21
SuttonSp	0.06	79	**0.01**	0.43	0.18
SuttonSu	0.05	92	0.04	0.43	**0.14**
Troy	0.03	78	0.03	0.39	0.37
Venlaw	0.04	69	0.04	0.41	0.30

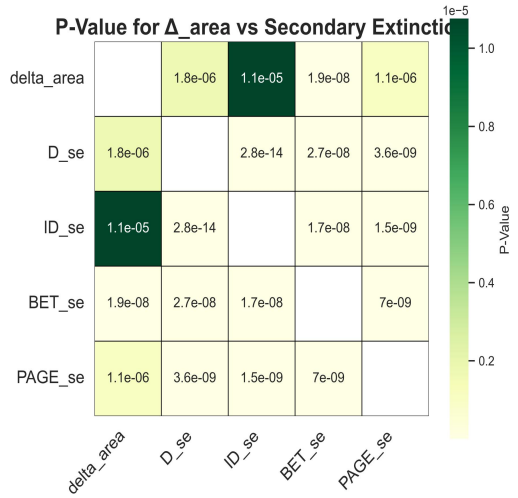
在多种方法下，较为鲁棒的食物网为：**DempstersSu**，而最不鲁棒的食物网的认定则结果不一。

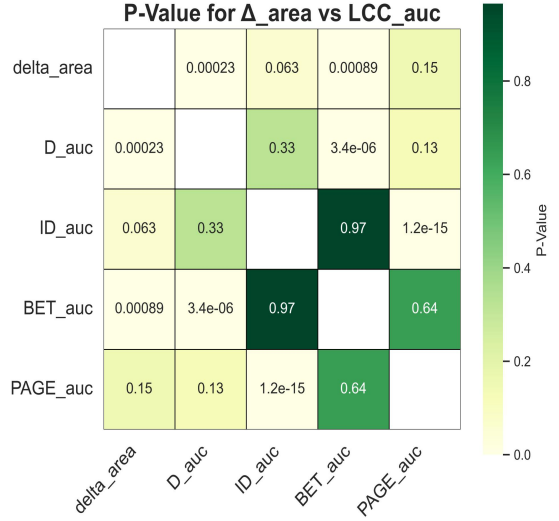
鲁棒性评价-相关性分析

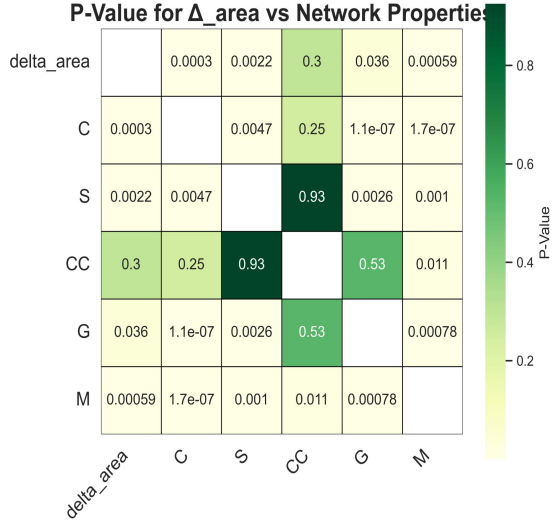












Δ_area能够结合动力学过程与网络拓扑结构，综合的反应网络的鲁棒性

目录

CONTENTS

03 集群效应度量

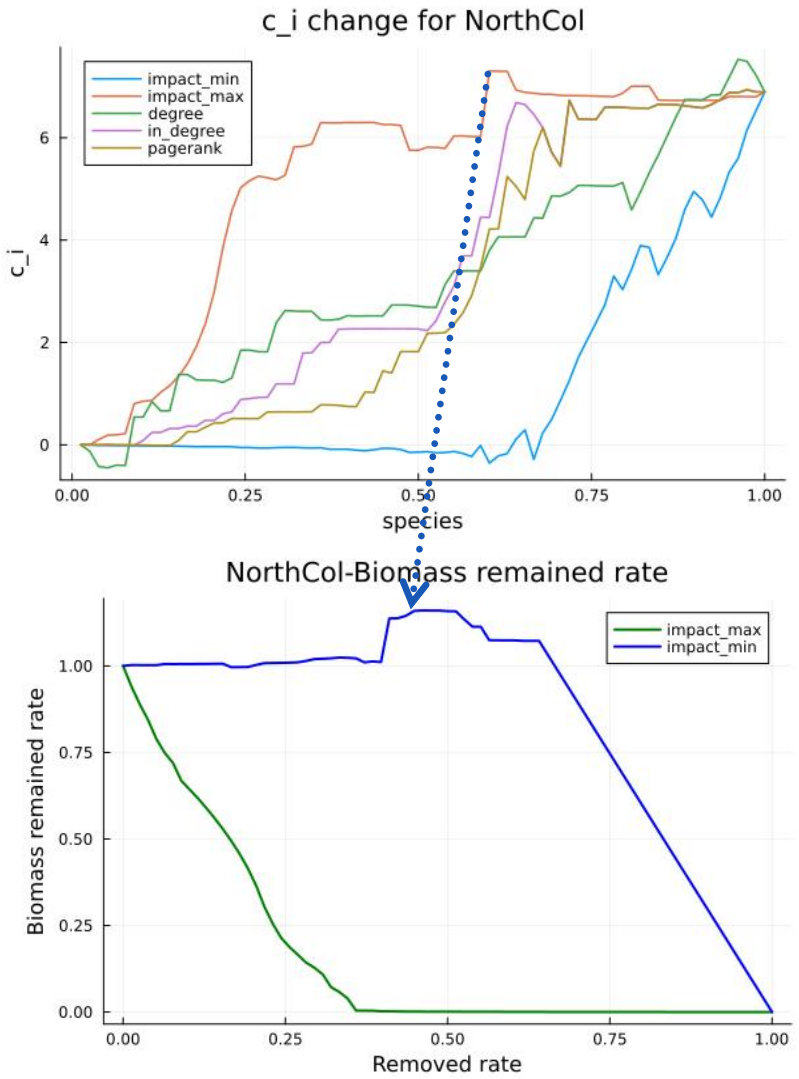
集群效应度量

集群效应：当单独个体集结成群体后会有不同于个体独处时的心理和行为表现,即 1 + 1 > 2

集群效应的度量：$C_{i\in Sequence_r} = (B_0 - S_i') - \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{i}(B_0 - S_j)$

C_i可以度量出指定序列中任意大小物种集合之间的集群效应，集群效应可能为正也可能为负。

集群效应的极值点中的物种集合恰好对应于影响最小移除曲线中极值点的后部分。



集群效应度量-Fiedler值验证

Fiedler值：非零拉普拉斯特征值的最小实部，能够反映出一个网络的同步性能、扩散率、网络鲁棒性（结构）

通过对拉普拉斯矩阵中的边添加微小的扰动，来观察对整个网络Fiedler值的影响

$$L = D - A$$

$$L_{e_{ij}}^{\omega} = L + \omega L_{e_{ij}}$$

$$I_{e_{ij}}^{d} = \frac{Re[\lambda_2(L_{e_{ij}}^{\omega})] - Re[\lambda_2(L)]}{\omega} (\omega \ll 1)$$

动态贡献值计算算法

输入: 有向图 $G = (V, E)$，其中 V 是节点集合，E 是边集合。

输出: 每条边的动态贡献值和累积的Fiedler值。

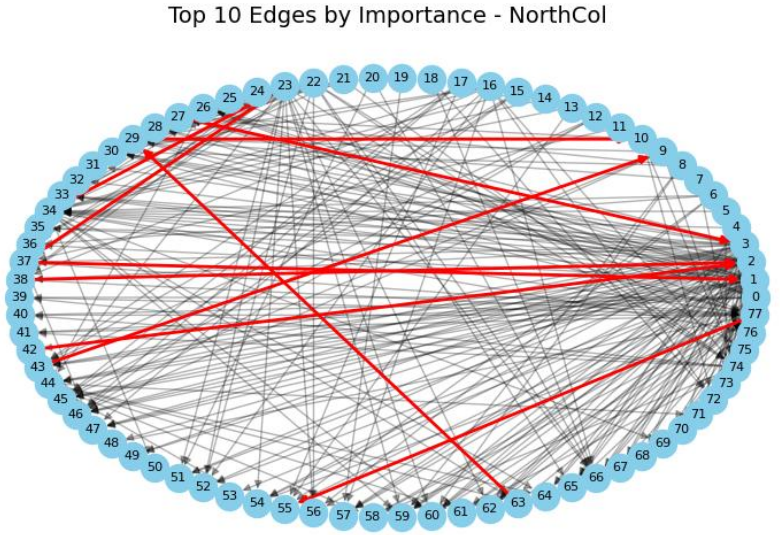
1. **初始化拉普拉斯矩阵** $L = D - A$，其中 A 是邻接矩阵，D 是度矩阵。
2. **计算Fiedler值** $\lambda_2(L)$ 和对应的归一化左、右特征向量。
3. **对于每条有向边** $e_{ij} \in E$，执行以下步骤：
   a. 在边 e_{ij} 上增加一个小的权重 ω，得到新的拉普拉斯矩阵 $L_{\omega e_{ij}}$。
   b. 使用微扰理论计算 $\lambda_2(L_{\omega e_{ij}})$ 的一阶变化量，记作 k_1。
4. **计算** k_1：
   a. $k_1 = y_2^T(L)x_2(L)$，其中 $y_2(L)$ 和 $x_2(L)$ 分别是左、右Fiedler向量。
5. **计算动态贡献值** $I_d(e_{ij})$：
   a. $I_d(e_{ij}) = Re[k_1]$。
6. **累计所有边的动态贡献值**：
   a. $Re[\lambda_2(L)] = \sum_{(i,j)\in E} I_d(e_{ij})$。
7. **输出每条边的动态贡献值和累积的Fiedler值。**

[1]. Jiang, Siyang, et al. "Fiedler value: The cumulated dynamical contribution value of all edges in a complex network." Physical Review E 109.5 (2024): 054301.

集群效应度量-Fiedler值验证

重要性排名前10的边 --> 得到相关物种集合 --> 与影响最大序列前20%计算交并比

Edge	Importance	Edge	Importance	Edge	Importance
(34, 23)	4.55E-07	(29, 10)	4.51E-07	(42, 2)	1.21E-07
(27, 3)	4.55E-07	(26, 23)	4.47E-07	(48, 44)	1.04E-07
(43, 9)	4.55E-07	(78, 57)	4.10E-07	(62, 3)	9.80E-08
(63, 29)	4.55E-07	(78, 73)	3.58E-07	(12, 78)	9.24E-08
(37, 1)	4.55E-07	(77, 55)	2.56E-07	(51, 78)	7.88E-08
(37, 23)	4.55E-07	(0, 78)	1.92E-07	(76, 2)	7.45E-08
(14, 78)	4.55E-07	(76, 78)	1.91E-07	(49, 78)	7.27E-08
(34, 78)	4.55E-07	(38, 2)	1.49E-07	(37, 3)	6.24E-08



$S_{Impact_max\text{-}20\%}$

$S_{Edge_top\text{-}10}$

foodweb	AkatoreA	AkatoreB	Berwick	Blackrock	Broad	Canton	...
S_Edges_top_10	30%	27%	26%	30%	25%	28%	...

统计显示：重要边中**40%**的物种都出现在Seq_impact_max的前20%中

目录

CONTENTS

04 总结

总结

1. Δ_area指标能够在原有基于拓扑的基础上结合动态特性，综合评估食物网的鲁棒性。

2. 跟踪系统功能随物种移除的变化，判断出哪些物种的灭绝会导致食物网崩溃，为食物网保护提供新的工具

3. 为食物网的鲁棒性评估提供了一种新的思路

4. 集群效应度量能够测量出任意物种集合之间的非线性差异，为食物网优化提供一种新途径

5. 集群效应中的物种组合符合生态背景下的生物量动力学传播过程，同时在谱图理论中也具有较强的理论支持，实际应用与理论相结合



Thanks!

xkqu@mail.ustc.edu.cn