

徐从军, 刘阳, 程远, 等. 基于拓扑网络研究海州湾食物网结构与复杂性[J]. 海洋学报, 2020, 42(4): 47–54, doi:10.3969/j.issn.0253–4193.2020.04.006

Xu Congjun, Liu Yang, Cheng Yuan, et al. Structure and complexity of Haizhou Bay food web based on topological network analysis[J]. Haiyang Xuebao, 2020, 42(4): 47–54, doi:10.3969/j.issn.0253–4193.2020.04.006

基于拓扑网络研究海州湾食物网结构与复杂性

徐从军¹, 刘阳³, 程远⁴, 徐宾铎¹, 张崇良¹, 任一平^{1,2}, 薛莹^{1*}

(1. 中国海洋大学 水产学院, 山东 青岛 266003; 2. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室 海洋渔业科学与食物产出过程功能实验室, 山东 青岛 266071; 3. 青岛职业技术学院 信息学院, 山东 青岛 266555; 4. 近海(大连)生态发展有限公司, 辽宁 大连 116023)

摘要: 针对食物网结构与复杂性的研究有助于深入解析食物网的功能、营养动力和能量转化过程。本文根据 2011 年 3–12 月在海州湾及其邻近海域进行的 5 个航次的渔业资源底拖网调查资料以及胃含物分析数据, 基于 11 个拓扑网络指数, 构建了海州湾拓扑网络, 研究海州湾食物网的结构与复杂性。结果表明, 本文分析的海州湾食物网物种数 S 为 93, 连接数 L 为 1 021, 每个物种的相互作用数量 L/S 为 10.98, 连接性 L/S^2 为 0.12; 顶级物种、中间物种、基础物种的比例分别为 29%、69% 和 2%; 食物网的杂食性指数为 87%, 连接复杂性指数 SC 为 22.20, 特征路径长度 $ChPath$ 为 2.11, 聚类系数 CC 为 0.23。通过每个物种的相互作用数量和连接性的研究显示, L/S 和 L/S^2 的值都处在正常范围内, 所以海州湾食物网的复杂性仍保持较高水平。通过物种比例、杂食性指数、连接复杂性指数、特征路径长度、聚类系数对食物网结构分析, 发现海州湾食物网结构处于稳定状态, 能够在一定程度上抵御外界环境的扰动, 保证生态系统功能的正常运行。通过对海州湾食物网结构与复杂性的研究, 将为今后海州湾食物网功能的深入研究以及海州湾渔业资源的科学管理提供重要依据。

关键词: 海州湾; 食物网复杂性; 食物网结构; 拓扑网络

中图分类号: P714⁺.5; Q148

文献标志码: A

文章编号: 0253–4193(2020)04–0047–08

1 引言

目前, 基于生态系统的渔业资源评估和管理已成为渔业发展的重要趋势之一^[1–2], 其中食物网的结构和特性对于量化物种之间相互作用以及生态系统的深入研究都是至关重要的。生态网络分析作为生态系统研究的重要方法之一, 不仅能够量化物种之间的相互作用, 而且还能够分析这种相互作用对整个生态系统的间接影响^[3]。近年来, 随着气候变化, 环境污

染, 过度捕捞等多重因素的影响^[4], 导致我国近海渔业资源日益衰退, 生态环境退化^[5], 因此对海洋生态系统的保护就愈发迫切。通过生态网络分析, 有助于深入解析生态系统的结构、功能和复杂性等特性^[6–7], 能够为海洋资源的科学管理和利用提供理论支撑。

海州湾是黄海的一部分, 是我国近海重要的渔场之一^[1], 该海域为冷暖水团的交汇区^[8], 受多种海流控制, 营养物质丰富, 是多种经济动物产卵、繁殖、栖息的场所, 对我国的渔业资源具有重要意义。本文根据 2011

收稿日期: 2019–06–18; 修订日期: 2019–09–19。

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFD0900904); 国家自然科学基金(31772852); 山东省支持青岛海洋科学与技术试点国家实验室重大科技专项(2018SDKJ0501-2)。

作者简介: 徐从军(1995—), 男, 山东省日照市人, 主要研究方向为摄食生态学。E-mail: 1007264411@qq.com

* 通信作者: 薛莹, 教授, 主要从事摄食生态学、渔业资源生物学、食物网营养动力学、鱼类栖息地和空间分布等领域的研究。E-mail: xueying@ouc.edu.cn

年 3–12 月在海州湾及其邻近海域进行的 5 个航次的渔业资源底拖网调查资料以及胃含物分析数据, 基于食物网拓扑网络指数, 构建海州湾拓扑网络, 并通过与国外其他水域相比较, 来评估海州湾食物网的结构与复杂性, 以期海州湾食物网功能的深入研究以及海州湾渔业资源的科学管理提供理论依据。

2 材料与方 法

2.1 样品采集

实验样品来源于 2011 年 3–12 月在海州湾及其邻近海域进行的底拖网调查数据, 调查共 5 个航次, 每个航次选取 24 个调查站位。调查范围为 $34^{\circ}20' \sim 35^{\circ}40'N$, $119^{\circ}20' \sim 121^{\circ}10'E$ 。调查按照水深与经纬度等进行分层随机采样, 以每经度 $10'$, 纬度 $10'$ 为 1 个采样网格, 共设置 76 个网格。其后根据水深、纬度方向等因素将调查海域分为 5 个典型区域, 在每个区域内按比例随机设置调查站位(图 1)。用船类型为单拖网渔船, 功率为 300 马力(1 马力=746 W), 拖速为 2~3 kn, 每站位作业时间为 1 h。

2.2 胃含物分析

将样品解剖并留取胃含物进行分析, 在分析样品时根据食物体积将摄食强度分为五级(0 级: 空胃; 1 级: 食物达不到胃腔的一半; 2 级: 食物超过胃腔的一半; 3 级: 食物充满胃腔但不膨胀; 4 级: 胃腔膨胀), 进行目测确定摄食等级^[9]。在双筒解剖镜下根据胃内残存饵料生物的形态特征来鉴定饵料种类, 用精密分析天平(精确到 0.000 1g)测定饵料生物质量, 尽可能鉴定到最低的分类阶元, 在称量前用吸水纸吸尽其表

面的水分^[10], 分析每种饵料生物的出现频率及在各个捕食者中所占的质量比例, 制成矩阵用于分析。

2.3 拓扑网络分析

根据实验测得及参考历史文献[11–27]获得的数据, 在食物矩阵中用 0 和 1 来表示两个物种之间是否存在摄食关系, 0 表示两个物种之间无摄食关系, 1 表示两者之间具有摄食关系^[11]。通过 Pajek 软件画出拓扑网络图。

通过计算 11 个拓扑网络指数来描述海州湾食物网的结构和复杂性^[28–32]。这 11 个指数为: 物种数量 S ; 通过摄食关系形成的连接数 L ; 每个物种的相互作用数量 L/S ; 连接性 L/S^2 ; 顶层物种数: 没有捕食者的物种数; 中间物种数: 既有捕食者也有饵料的物种数; 基础物种数: 只有捕食者, 没有被捕食者的物种数, 即初级生产者; 杂食性物种比例: 饵料物种跨越两个营养级的物种所占比例; 连接复杂性指数 SC : 描述食物网稳定性, 其中 C 的公式如下:

$$C = \frac{2L}{S^2 - S} \quad (1)$$

特征路径长度($ChPath$): 所有物种对之间的平均最短路径长度,

$$ChPath = \frac{2}{S(S-1)} \sum_{i=1}^S \sum_{j=1}^S ChPat_{min}(i, j), \quad (2)$$

式中, $ChPat_{min}(i, j)$ 表示任意物种对之间的最短路径长度, $S(S-1)/2$ 表示节点数。

聚类系数 CC : 描述食物网中物种节点的聚集程度; 将获得的海州湾食物网拓扑指数与其他水域作对比, 以此来评估海州湾食物网的结构与复杂性^[28]。

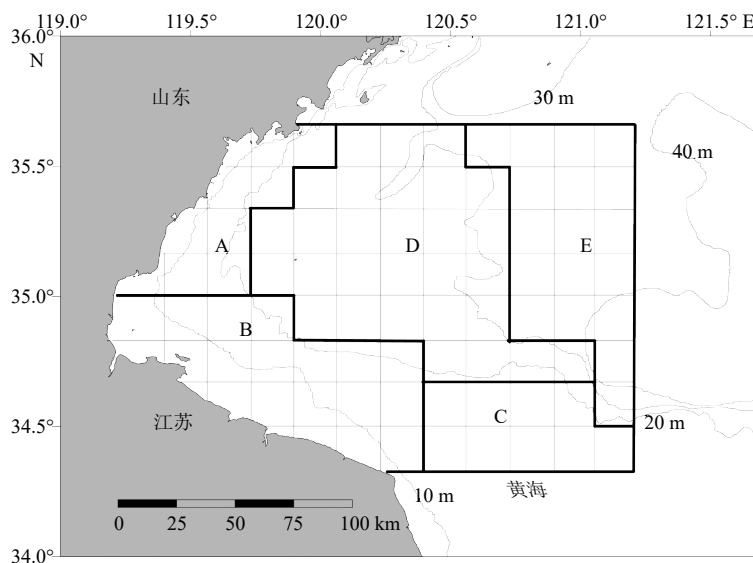


图 1 海州湾调查区域(A–E:5 个调查区域)

Fig. 1 Sampling areas in Haizhou Bay(A–E: 5 survey areas)

3 结果与分析

本研究分析了海州湾食物网中 81 种生物和 12 个类群, 连接数超过 20 的物种有 42 种, 占总物种数的 45%(表 1), 所以食物网具有高度的连接性。图 2 中不同物种节点的大小代表每个物种的连接数(包括

捕食与被捕食), 在海州湾食物网中连接数最高的为浮游动物(74 条), 连接数最低的为江口小公鱼(1 条), 江口小公鱼只有 1 条连接的原因可能是在进行胃含物分析时其摄食的饵料均为浮游动物, 而在本次研究中将浮游动物合为一个类群, 所以导致江口小公鱼只有 1 条连接。

表 1 海州湾食物网物种及其连接数

Table 1 Species and links of Haizhou Bay food web

序号	物种名	连接数	序号	物种名	连接数
1	中华安乐虾 <i>Eualus sinensis</i>	25	48	鲢 <i>Müchthys müy</i>	23
2	白姑鱼 <i>Pennahia argentata</i>	26	49	纽形动物 <i>Nemertean</i>	3
3	斑螭 <i>Konosirus punctatus</i>	6	50	皮氏叫姑鱼 <i>Johnius belangeri</i>	32
4	鲷属 <i>Pampus sp.</i>	4	51	普氏栉虾虎鱼 <i>Rhinogobius giurinus</i>	12
5	赤鼻梭鲈 <i>Thryssa chefuensis</i>	16	52	长足七腕虾 <i>Heptacarpus futillirostris</i>	8
6	大泷六线鱼 <i>Hexagrammos otakii</i>	36	53	其他虾虎鱼 <i>Other gobies</i>	24
7	大银鱼 <i>Protosalanx hyalocranius</i>	2	54	其他虾类 <i>shrimps</i>	46
8	带纹条鳎 <i>Zebrias zebra</i>	15	55	枪乌贼 <i>Loligo sp.</i>	48
9	带鱼 <i>Trichiurus lepturus</i>	32	56	青鳞小沙丁鱼 <i>Sardinella zunasi</i>	13
10	戴氏赤虾 <i>Metapenaeopsis dalei</i>	25	57	日本鼓虾 <i>Alpheus japonicus</i>	42
11	刀鲚 <i>Coilia nasus</i>	5	58	鲈 <i>Scomber japonicus</i>	10
12	底栖生物 <i>Benthos</i>	8	59	日本螭 <i>Charybdis japonica</i>	13
13	真鲷 <i>Pagrus major</i>	19	60	舌鳎 <i>Soleidae sp.</i>	27
14	鳎杜父鱼 <i>Pseudoblennius cottoides</i>	3	61	狮子鱼 <i>Liparis sp.</i>	25
15	短鰐齿鱼 <i>Champsodon snyderi</i>	15	62	双斑螭 <i>Charybdis bimaculata</i>	17
16	短蛸 <i>Octopus ochellatus</i>	18	63	双喙耳乌贼 <i>Sepiolo birostrata</i>	22
17	方氏云鳎 <i>Pholis fangi</i>	25	64	双壳类 <i>Bivalves</i>	50
17	凤鲚 <i>Coilia mystus</i>	10	65	四盘耳乌贼 <i>Euprymna morsei</i>	8
19	浮游动物 <i>Zooplankton</i>	74	66	繸鳎 <i>Chirolophis japonicus</i>	2
20	浮游植物 <i>Phytoplankton</i>	12	67	太平洋褶柔鱼 <i>Todarodes pacificus</i>	18
21	腹足类 <i>Gastropods</i>	42	68	鳀 <i>Engraulis japonicus</i>	30
22	高眼鲱 <i>Cleisthenes herzensteini</i>	12	69	绿鳍马面鲀 <i>Thamnaconus septentrionalis</i>	10
23	尖海龙 <i>Syngnathus acus</i>	8	70	纹缟虾虎鱼 <i>Tridentiger trionocephalus</i>	6
24	海藻 <i>Algae</i>	16	71	多鳞鱧 <i>Sillago sihama</i>	16
25	海蜇 <i>Rhopilema esculenta</i>	2	72	细螯虾 <i>Leptochela gracilis</i>	50
26	海蜇虾 <i>Latreutes anoplonyx</i>	24	73	细条天竺鲷 <i>Apogon lineatus</i>	26
27	褐菖鲈 <i>Sebastes marmoratus</i>	15	74	鲜明鼓虾 <i>Alpheus disinguendus</i>	37
28	褐牙鲆 <i>Paralichthys olivaceus</i>	18	75	鳚 <i>Callionymidae</i>	26
29	环节动物 <i>Polychaetes</i>	46	76	小带鱼 <i>Eupleurogrammus muticus</i>	7

续表 1

序号	物种名	连接数	序号	物种名	连接数
30	黄鲛鳕 <i>Lophius litulon</i>	21	77	小黄鱼 <i>Larimichthys polyactis</i>	44
31	黄姑鱼 <i>Nibea albiflora</i>	15	78	小眼绿鳍鱼 <i>Chelidonichthys spinosus</i>	35
32	黄鲫 <i>Setipinna taty</i>	9	79	蟹类 Crabs	47
33	棘皮动物 Echinodermata	29	80	星康吉鳗 <i>Conger myriaster</i>	37
34	脊腹褐虾 <i>Crangon affinis</i>	33	81	许氏平鲈 <i>Sebastes schlegeli Hilgendorf</i>	20
35	甲壳类 Small crustacean	69	82	鹰爪虾 <i>Trachysalambria curvirostris</i>	32
36	江口小公鱼 <i>Stolephorus commersonii</i>	1	83	鲷 <i>Platycephalus indicus</i>	7
37	角木叶鳕 <i>Pleuronichthys cornutus</i>	11	84	油鲳 <i>Sphyraena pinguis</i>	7
38	金乌贼 <i>Sepia esculenta Hoyle</i>	5	85	疣背宽额虾 <i>Latreutes planirostris</i>	27
39	铠平鲈 <i>Sebastes hubbsi</i>	11	86	玉筋鱼 <i>Ammodytes personatus</i>	8
40	孔鳐 <i>Raja porosa</i>	16	87	葛氏长臂虾 <i>Palaemon gravieri</i>	32
41	口虾蛄 <i>Oratosquilla oratoria</i>	44	88	长绵鳎 <i>Zoarces elongatus</i>	8
42	蓝圆鲈 <i>Decapterus maruadsi</i>	19	89	长蛸 <i>Octopus variabilis</i>	19
43	六丝钝尾鰕虎鱼 <i>Ambly chaeturichthys hexanema</i>	40	90	长蛇鲻 <i>Saurida elongata</i>	28
44	毛虾 <i>Acetes sp.</i>	31	91	长丝鰕虎鱼 <i>Cryptocentrus filifer</i>	17
45	矛尾鰕虎鱼 <i>Chaeturichthys stigmatias</i>	41	92	中颌棱鲷 <i>T. mystax</i>	10
46	棘头梅童鱼 <i>Collichthys lucidus</i>	26	93	髯缟鰕虎鱼 <i>Tridentiger barbatus</i>	18
47	虹鲷 <i>Erisiphex potti</i>	5			

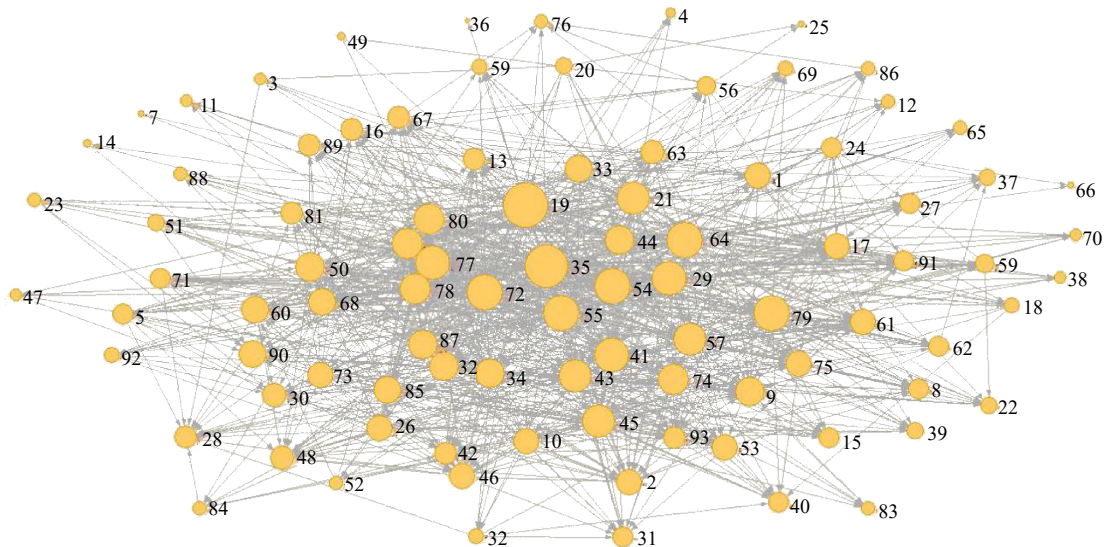


图 2 海州湾食物网拓扑结构

Fig. 2 Food network topology of Haizhou Bay

编号 1~93 见表 1

ID1~93 in Table 1

海州湾食物网的复杂性主要由每个物种的相互作用数量和连接性来评估(表 2), 通过数据分析, 在 93 种物种与类群之间含有 1 021 个连接数, 即 $L=1\ 021$,

该食物网的 L/S 较高, 为 10.98, 连接性 L/S^2 为 0.12(表 2)。

在海州湾食物网中, 中间物种数量超过总物种数的一半, 占总物种数的 69%(表 2), 这意味着这些物

表2 海州湾食物网结构与复杂性指数

Table 2 Structure and complexity index of Haizhou Bay food web

食物网 指数	物种数 (<i>S</i>)	每个物种相互 作用数量(<i>L/S</i>)	连接性 (<i>L/S</i> ²)	顶层物种数 (<i>T</i>)	中间物种 数(<i>I</i>)	基础物种数 (<i>B</i>)	杂食性物种 比例(<i>Omn</i>)	连接复杂性 指数(<i>SC</i>)	特征路径长度 (<i>ChPath</i>)	聚类系数 (<i>CC</i>)
数值	93	10.98	0.12	29%	69%	2%	87%	22.20	2.11	0.23

种在食物网中既是捕食者又是饵料生物。基础物种的数量最少,只占总物种数量的2%(表2)。杂食性指数的大小对食物网的稳定性具有显著影响,海州湾杂食性物种的数量为总数的87%,食物网的特征路径长度为2.11,聚类系数为0.23(表2)。

4 讨论

4.1 海州湾食物网的复杂性

海州湾食物网的复杂性主要通过每个物种的相互作用数量 L/S 和 L/S^2 进行评估,以往的研究表明食物网的复杂性会随着 L/S 和 L/S^2 值的增大而增强^[33]。在本研究中,测得 L/S 和 L/S^2 的数值分别为 10.98 和 0.12,通过与国外其他水域食物网的对比研究发现(表3),海州湾食物网指标的数值相对较高,表明海州湾食物网是一个连接程度较高的食物网。食物网的复杂性会影响种群与群落的稳定性及抗干扰能力^[3], L/S 和 L/S^2 极高和极低都是非正常现象^[42]。海州湾食物网的 L/S 和 L/S^2 值都处在正常范围内,表明海州湾食物网的复杂性处于正常状态。根据调查数据显示,海州湾的基础物种只占总物种数的2%,所以海州湾食物网是非“资源型”食物网。以往的研究表明,现实中 S 值通常大于最初确定的值,而且随着对生态系统

研究的不断深入, S 值可能会继续增大^[43]。未来需要对海州湾食物网的复杂性开展长期的跟踪研究,以期深入探讨海州湾食物网的复杂性及其动态变化。

4.2 海州湾食物网结构特征

通过对海州湾食物网顶级物种、中间物种、基础物种比例的比较及其与其他食物网物种分布比较可以发现,海州湾食物网结构具有较大的结构差异性和独特性。海州湾食物网中间物种和杂食性物种比例较其他食物网相对较高(表3),这两个拓扑网络指数在食物网研究中通常具有相关性,因为大多数同时作为捕食者和饵料生物的中间物种通常会跨越多个营养级进行摄食,属于杂食性物种。以往,关于杂食性指数对食物网结构与动态的影响一直存在争议,因为无法确认杂食性物种的存在是否能够起到稳定食物网动态平衡的作用^[44]。但是,2007年对南极洲的一项调查研究表明^[45],杂食性指数的大小对食物网的稳定性具有显著影响,因为它能够对时空产生的变化和未知食物来源做出积极灵活的响应和改变,杂食性指数越大,该食物网越稳定^[45]。海州湾食物网杂食性指数达到了87%,与其他水域的食物网相比处于最高位置(表3),表明海州湾食物网结构具有较高的稳定性。本研究还发现,海州湾食物网的特征路径长度较其他

表3 海州湾与国外其他水域食物网拓扑指数的对比

Table 3 Comparison of topological indices of Haizhou Bay and other overseas aquatic food webs

食物网指数	物种数 (<i>S</i>)	每个物种相互 作用数量(<i>L/S</i>)	连接性 (<i>L/S</i> ²)	顶层物种 数(<i>T</i>)	中间物种 数(<i>I</i>)	基础物种 数(<i>B</i>)	杂食性物种 比例(<i>Omn</i>)	连接复杂性 指数(<i>SC</i>)	特征路径 长度(<i>ChPath</i>)	聚类系数 (<i>CC</i>)
加勒比海珊瑚礁 ^[34]	50	11.1	0.22	0	94	6	86		1.60	0.36
波特湾 ^[28]	91	3.40	0.04	19	47	34	45		1.8	0.08
南极 ^[35]	586	6.80	0.01	23	21	56	41		3.00	0.14
北极 ^[36]	140	6.80	0.05	40	56	14	81			
本格拉 ^[37]	29	7.00	0.24	0	93	7	76		1.60	
美国东北大陆架 ^[38]	81	19.28	0.24					39.10		
科切拉谷 ^[39]	30	13.63	0.45					9.00		
勒德格河 ^[40]	40	2.00	0.05					4.10		
小石湖 ^[41]	182	13.00	0.07					26.20		
海州湾	93	10.98	0.12	29	69	2	87	22.20	2.11	0.23

食物网而言,高于大部分的食物网,表明该食物网的连接线路较长,大多数物种彼此之间存在一定的差异性,从而增强了海州湾食物网的冗余度和抵御外界干扰的能力。

海州湾的连接复杂性指数为 22.20(表 3),高于科切拉谷和勒德格河,而低于美国东北大陆架和小石湖,处于中间位置,这表明海州湾食物网中物种之间的连接较为稳定,在一定程度上能够维持海州湾食物网的稳定性。海州湾食物网的聚类系数为 0.23,与国外其他水域食物网相比(表 3),该指数处在中间水平。当聚类系数指数较低时,表明食物网中大部分生物具有相似的联系,而没有强的种间相互作用^[28]。本

研究表明,海州湾食物网中的生物在一定程度上能够聚集,形成几个连接性较强的子网络结构,其原因可能是食物网中连接数较多的物种与特定的物种相联系,形成几个相互作用的集群。

综上所述,海州湾食物网结构处于稳定状态,杂食性物种的数量比例、其特征路径长度和聚集系数均表明,海州湾食物网具有较高的稳定性,能够在一定程度上抵御外界环境的扰动,保证生态系统功能的正常运行。通过对海州湾食物网结构与复杂性的研究,有助于进一步加深我们对海州湾生态系统的认识,能够为海州湾食物网功能的深入研究以及渔业资源的科学管理提供理论依据。

参考文献:

- [1] 张硕,王腾,符小明,等.连云港海州湾渔业生态修复水域生态系统能量流动模型初探[J].海洋环境科学,2015,34(1):42-47.
Zhang Shuo, Wang Teng, Fu Xiaoming, et al. A primary study on the energy flow in the ecosystem of fishery ecological restoration area in Haizhou Bay, Lianyungang[J]. Marine Environmental Science, 2015, 34(1): 42-47.
- [2] 金显仕,窦硕增,单秀娟,等.我国近海渔业资源可持续产出基础研究的热点问题[J].渔业科学进展,2015,36(1):124-131.
Jin Xianshi, Dou Shuozeng, Shan Xiujian, et al. Hot spots of frontiers in the research of sustainable yield of Chinese inshore fishery[J]. Progress in Fishery Sciences, 2015, 36(1): 124-131.
- [3] 金艳,刘勇,袁兴伟,等.复杂网络理论在食物网中的应用和研究进展[J].海洋渔业,2018,40(2):249-256.
Jin Yan, Liu Yong, Yuan Xingwei, et al. Review: applications of complex network to food web[J]. Marine Fisheries, 2018, 40(2): 249-256.
- [4] 林群,王俊,袁伟,等.捕捞和环境变化对渤海生态系统的影响[J].中国水产科学,2016,23(3):619-629.
Lin Qun, Wang Jun, Yuan Wei, et al. Effects of fishing and environmental change on the ecosystem of the Bohai Sea[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2016, 23(3): 619-629.
- [5] 杨涛,单秀娟,金显仕,等.莱州湾春季鱼类群落关键种的长期变化[J].渔业科学进展,2018,39(1):1-11.
Yang Tao, Shan Xiujian, Jin Xianshi, et al. Long-term changes in keystone species in fish community in spring in Laizhou Bay[J]. Progress in Fishery Sciences, 2018, 39(1): 1-11.
- [6] Allesina S, Alonso D, Pascual M. A general model for food web structure[J]. Science, 2008, 320(5876): 658-661.
- [7] 邓景耀,姜卫民,杨纪明,等.渤海主要生物种间关系及食物网的研究[J].中国水产科学,1997,4(4):1-7.
Deng Jingyao, Jiang Weimin, Yang Jiming, et al. Species interaction and food web of major predatory species in the Bohai Sea[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 1997, 4(4): 1-7.
- [8] 王腾,张贺,张虎,等.基于营养通道模型的海州湾中国明对虾生态容纳量[J].中国水产科学,2016,23(4):965-975.
Wang Teng, Zhang He, Zhang Hu, et al. Ecological carrying capacity of Chinese shrimp stock enhancement in Haizhou Bay of East China based on Ecopath model[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2016, 23(4): 965-975.
- [9] 郑晓春,戴小杰,朱江峰,等.太平洋中东部海域大眼金枪鱼胃含物分析[J].南方水产科学,2015,11(1):75-80.
Zheng Xiaochun, Dai Xiaojie, Zhu Jiangfeng, et al. Analysis on stomach content of Bigeye tuna (*Thunnus obesus*) in the eastern-central Pacific Ocean[J]. South China Fisheries Science, 2015, 11(1): 75-80.
- [10] 王荣夫,张崇良,徐宾铎,等.海州湾秋季小眼绿鳍鱼的摄食策略及食物选择性[J].中国水产科学,2018,25(5):1059-1070.
Wang Rongfu, Zhang Chongliang, Xu Binduo, et al. Feeding strategy and prey selectivity of *Chelidonicichthys spinosus* during autumn in Haizhou Bay[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2018, 25(5): 1059-1070.
- [11] 程济生,朱金声.黄海主要经济无脊椎动物摄食特征及其营养层次的研究[J].海洋学报,1997,19(6):102-108.
Cheng Jisheng, Zhu Jinsheng. A study on the characteristics and trophic levels of the main economic invertebrates in the Yellow Sea[J]. Haiyang Xuebao, 1997, 19(6): 102-108.
- [12] 杨纪明.渤海鱼类的食性和营养级研究[J].现代渔业信息,2001,16(10):10-19.
Yang Jiming. A study on food and trophic levels of Bohai Sea fish[J]. Modern Fisheries Information, 2001, 16(10): 10-19.
- [13] 唐富江,刘伟,王继隆,等.兴凯湖大银鱼食物组成与食性转化[J].动物学研究,2013,34(5):493-498.
Tang Fujiang, Liu Wei, Wang Jilong, et al. Diet composition and transition of clearhead icefish (*Protosalanx hyalocranius*) in Lake Xingkai[J]. Zoological Research, 2013, 34(5): 493-498.
- [14] 窦硕增,杨纪明,陈大刚.渤海石鲈、星鲈、高眼鲈及焦氏舌鳎的食性[J].水产学报,1992,16(2):162-166.

- Dou Shuozeng, Yang Jiming, Chen Dagang. Food habits of stone flounder, spotted flounder, high-eyed flounder and red tongue sole in the Bohai Sea[J]. *Journal of Fisheries of China*, 1992, 16(2): 162-166.
- [15] 张波. 东、黄海带鱼的摄食习性及随发育的变化[J]. *海洋水产研究*, 2004, 25(2): 6-12.
Zhang Bo. Feeding habits and ontogenetic diet shift of hairtail fish (*Trichiurus lepturus*) in East China Sea and Yellow Sea[J]. *Marine Fisheries Research*, 2004, 25(2): 6-12.
- [16] 徐开达, 金海卫, 卢占晖, 等. 东海区短鰆齿鱼摄食生态的初步研究[J]. *海洋科学*, 2012, 36(7): 79-88.
Xu Kaida, Jin Haiwei, Lu Zhanhui, et al. Preliminary study on feeding ecology of *Champsodon snyderi* in East China Sea region[J]. *Marine Sciences*, 2012, 36(7): 79-88.
- [17] 杨纪明, 谭雪静. 渤海3种头足类食性分析[J]. *海洋科学*, 2000, 24(4): 53-55.
Yang Jiming, Tan Xuejing. Food analysis of three cephalopod species in the Bohai Sea[J]. *Marine Sciences*, 2000, 24(4): 53-55.
- [18] 杨纪明. 渤海滤虫类和软体动物幼虫食性的观察[J]. *海洋科学*, 1998, 22(6): 36-38.
Yang Jiming. Observations on food of cumaceans and post larvae of mollusks in the Bohai Sea[J]. *Marine Sciences*, 1998, 22(6): 36-38.
- [19] 杨德渐, 孙世春. 海洋无脊椎动物学[M]. 青岛: 中国海洋大学出版社, 1999: 294-308.
Yang Dejian, Sun Shichun. *Marine Invertebrate Zoology*[M]. Qingdao: China Ocean University Press, 1999: 294-308.
- [20] 邓景耀, 赵传颖. 海洋渔业生物学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1991: 630.
Deng Jingyao, Zhao Chuanying. *Marine Fisheries Biology*[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1991: 630.
- [21] 王凯, 章守宇, 汪振华, 等. 枸杞岛海藻场褐菖鲉的摄食习性[J]. *水产学报*, 2010, 34(2): 227-235.
Wang Kai, Zhang Shouyu, Wang Zhenhua, et al. Feeding habit of *Sebastes marmoratus* in seaweed bed around Gouqi Island[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2010, 34(2): 227-235.
- [22] 杨纪明. 渤海无脊椎动物的食性和营养级研究[J]. *现代渔业信息*, 2001, 16(9): 8-16.
Yang Jiming. A study on food and trophic levels of Bohai Sea invertebrates[J]. *Modern Fisheries Information*, 2001, 16(9): 8-16.
- [23] 赵文. 水生生物学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005: 405-422.
Zhao Wen. *Aquatic Biology*[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2005: 405-422.
- [24] 蒋日进, 徐汉祥, 金海卫, 等. 东海蓝圆鲹的摄食习性[J]. *水产学报*, 2012, 36(2): 216-227.
Jiang Rijin, Xu Hanxiang, Jin Haiwei, et al. Feeding habits of blue mackerel scad *Decapterus maruadsi* Temminck et Schlegel in the East China Sea[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2012, 36(2): 216-227.
- [25] 韩东燕, 薛莹, 纪毓鹏, 等. 胶州湾5种虾虎鱼类的营养和空间生态位[J]. *中国水产科学*, 2012, 36(2): 216-227.
Han Dongyan, Xue Ying, Ji Yupeng, et al. Trophic and spatial niche of five gobiid fishes in Jiaozhou Bay[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2012, 36(2): 216-227.
- [26] 戴萍. 台湾海峡鲈鱼食性的初步研究[J]. *海洋湖沼通报*, 1989(2): 50-55.
Dai Ping. Preliminary study on the food of *Pneumatophorus japonicus* in Taiwan Channel[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 1989(2): 50-55.
- [27] 陈飞. 繸鲷(*Azuma emmion*)生物学特性的研究[D]. 大连: 大连海洋大学, 2017.
Chen Fei. Study on the biological characteristics of *Azuma emmion*[D]. Dalian: Dalian Ocean University, 2017.
- [28] Marina T I, Salinas V, Cordone G, et al. The food web of Potter Cove (Antarctica): complexity, structure and function[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2018, 200: 141-151.
- [29] Briand F. Structural singularities of freshwater food webs[J]. *Verh. Internat. Verein. Limnol.*, 1985, 22: 3356-3364.
- [30] Watts D J, Strogatz S H. Collective dynamics of "small-world" networks[J]. *Nature*, 1998, 393(6684): 440-442.
- [31] Albert R, Barabási A L. Statistical mechanics of complex networks[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2002, 74(1): 47-97.
- [32] Montoya J M, Solé R V. Small world patterns in food webs[J]. *Journal of Theoretical Biology*, 2002, 214(3): 405-12.
- [33] Montoya J M, Solé R V. Topological properties of food webs: from real data to community assembly models[J]. *Oikos*, 2003, 102(3): 614-622.
- [34] Opitz S. Trophic Interactions in Caribbean Coral Reefs[M]. Makati: International Center for Living Aquatic Resources, 1996.
- [35] De Santana C N, Rozenfeld A F, Marquet P A, et al. Topological properties of polar food webs[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2013, 474: 15-26.
- [36] Bodini A, Bellingeri M, Allesina S, et al. Using food web dominator trees to catch secondary extinctions in action[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2009, 364(1524): 1725-1731.
- [37] Yodzis P. Local trophodynamics and the interaction of marine mammals and fisheries in the Benguela ecosystem[J]. *Journal of Animal Ecology*, 1998, 67(4): 635-658.
- [38] Link J. Does food web theory work for marine ecosystems?[J]. *Marine Ecology Progress*, 2002, 230: 1-9.
- [39] Polis G A. Complex trophic interactions in deserts: an empirical critique of food-web theory[J]. *The American Naturalist*, 1991, 138(1): 123-155.
- [40] Closs G P, Lake P S. Spatial and temporal variation in the structure of an intermittent-stream food web[J]. *Ecological Monographs*, 1994, 64(1): 1-21.
- [41] Martinez N D. Artifacts or attributes? Effects of resolution on the little rock lake food web[J]. *Ecological Monographs*, 1991, 61(4):

367–392.

- [42] Dunne J A, Williams R J, Martinez N D. Food-web structure and network theory: the role of connectance and size[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2002, 99(20): 12917–12922.
- [43] Martinez N D, Hawkins B A, Dawah H A, et al. Effects of sampling effort on characterization of food-web structure[J]. *Ecology*, 1999, 80(3): 1044–1055.
- [44] Johnson S, Domínguez-García V, Donetti L, et al. Trophic coherence determines food-web stability[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, 111(50): 17923–17928.
- [45] Norkko A, Thrush S F, Cummings V J, et al. Trophic structure of coastal Antarctic food webs associated with changes in sea ice and food supply[J]. *Ecology*, 2007, 88(11): 2810–2820.

Structure and complexity of Haizhou Bay food web based on topological network analysis

Xu Congjun¹, Liu Yang³, Cheng Yuan⁴, Xu Binduo¹, Zhang Chongliang¹, Ren Yiping^{1,2}, Xue Ying¹

(1. Fisheries College, Ocean University of China, Qingdao 266003, China; 2. Laboratory for Marine Fisheries Science and Food Production Processes, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266071, China; 3. School of Information, Qingdao Technical College, Qingdao 266555, China; 4. Offshore (Dalian) Ecological Development Co. Ltd., Dalian 116023, China)

Abstract: Research on the structure and complexity of food webs helps to analyze the function, nutrient dynamics and energy conversion of food webs. Based on the survey data of fishery resources and the analysis of gastric contents in five voyages in Haizhou Bay and its adjacent waters from March to December 2011, this study constructed a Haizhou Bay topology network based on 11 topological network indices. To study the structure and complexity of the Haizhou Bay food network. The results showed that the number of species in the Haizhou Bay food network (S) was 93, the number of connections (L) was 1 021, the number of interactions per species (L/S) was 10.98, the number of connections (L/S^2) was 0.12; the proportions of top species, intermediate species, foundation species were 29%, 69% and 2%, respectively; the omnivorous index of food web was 87%; the connection complexity index SC was 22.2; the characteristic path length $ChPath$ was 2.11, and the clustering coefficient CC was 0.23. Studies on the number of interactions and the number of connections in each species showed that the values of L/S and L/S^2 were within the normal range, so the complexity of the Haizhou Bay food web remained high. Through the analysis of the structure of the food web by species ratio, omnivorous index, connection complexity index, characteristic path length and clustering coefficient, it was found that the food network structure of Haizhou Bay was in a stable state, and the proportion of basic species was low because the phytoplankton and seaweed groups were not classified. Through the study of the structure and complexity of Haizhou Bay food network, it provides an important basis for the in-depth study of the function of Haizhou Bay food network and the scientific management of Haizhou Bay fishery resources.

Key words: Haizhou Bay; food web complexity; food web structure; topology network