



DOI:10.13476/j.cnki.nsbdk.2017.06.010

张远,赵长森,杨胜天,等.基于Ecopath的小清河河流生态系统关键功能组分析[J].南水北调与水利科技,2017,15(6):66-73. ZHANG Y,ZHAO C S,YANG S T,et al. Analysis of key functional group for Xiaoqinghe River ecosystem based on Ecopath[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017,15(6):66-73. (in Chinese)

# 基于Ecopath的小清河河流生态系统关键功能组分析

张远<sup>1</sup>,赵长森<sup>2</sup>,杨胜天<sup>2</sup>,张惠潼<sup>3</sup>,相华<sup>4</sup>,孙影<sup>3</sup>,杨增丽<sup>4</sup>,  
董宝恩<sup>3</sup>,刘德虎<sup>3</sup>,张纯斌<sup>1</sup>,于心怡<sup>1</sup>

(1. 北京师范大学地理学与遥感科学学院,北京 100875;2. 北京师范大学水科学研究院,北京 100875;  
3. 东营市水文局,山东 东营 257000;4. 济南市水文局,济南 250013)

**摘要:**关键功能组对于维持生态系统结构完整、功能完善具有重要意义。为此,本研究引入国际惯用的营养通道模型—Ecopath,定量分析计算了水生生态系统结构组成及营养关系,并通过生态系统内物质、能量流动的方向与数量确定了水生生态系统关键种,提出了一套关键功能组构建的方法。将该方法应用于小清河流域,结果显示小清河流域关键功能组成员随季节有很大变动:春季包括青鳉、鲫、水丝蚓、原生动物、隐藻;夏季变为青鳉、泥鳅(包括大鳞副泥鳅)、水丝蚓、原生动物、黄藻;秋季则为泥鳅(包括大鳞副泥鳅)、餐、秀丽白虾、轮虫、裸藻)。本方法可为水生态文明建设提供明确的水生生态系统保护重点物种,为流域生态需水计算、水生态健康修复及水生态文明建设提供管理和决策依据。

**关键词:**关键功能组;Ecopath;食物网;能量流动;小清河

中图分类号:X143 文献标识码:A 文章编号:1672-1683(2017)06-0066-08

## Analysis of key functional group for Xiaoqinghe River ecosystem based on Ecopath

ZHANG Yuan<sup>1</sup>, ZHAO Changsen<sup>2</sup>, YANG Shengtian<sup>2</sup>, ZHANG Huitong<sup>3</sup>, XIANG Hua<sup>4</sup>,  
SUN Ying<sup>3</sup>, YANG Zengli<sup>4</sup>, DONG Baoen<sup>3</sup>, LIU Dehu<sup>3</sup>, ZHANG Chunbin<sup>1</sup>, YU Xinyi<sup>1</sup>

(1. School of Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. Dongying Survey Bureau of Hydrology and Water Resources, Dongying 257000, China; 4. Jinan Survey Bureau of Hydrology and Water Resources, Ji'nan 250013, China)

**Abstract:** Key functional group is of great significance to monitoring aquatic ecosystem health and protecting biodiversity. In this paper, we introduced the Ecopath model to quantitatively analyze the structural composition and nutritional relationships in an aquatic ecosystem. After calculating the direction and amount of the substance and energy flow in the ecosystem, we determined the key species in the ecosystem and proposed a method to build the key functional group. The method was then applied to the Xiaoqinghe River Basin. Results showed that the members of the key functional group changed with the season: in spring, there were *Oryzias latipes*, *Carassius auratus*, *Limnodrilus*, Protozoa, and *Cryptomonas*; in summer, there were *Oryzias latipes*, *Misgurnus anguillicaudatus* (including *Paramisgurnus dabryanus*), *Limnodrilus*, Protozoa, and *Tribonema* sp.; in autumn, there were *Misgurnus anguillicaudatus* (including *Paramisgurnus dabryanus*), *Hemiculter leucisculus*, *Exopalaemon modestus*, *Lepadella* and *Euglena*. This approach can provide a simple way to select important species for aquatic ecosystem protection, and provide a basis for the wise management of water resources and construction of aquatic ecological civilization.

**Key words:** key functional group; Ecopath; food web; energy flow; Xiaoqinghe River

收稿日期:2016-12-06 修回日期:2017-06-21 网络出版时间:2017-11-15

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20171115.0918.009.html>

基金项目:国家自然科学基金项目(41271414);北京市共建项目专项资助

**Funds:** National Natural Science Foundation of China (41271414); Special Fund for Beijing Common Construction Project

作者简介:张远(1990-),男,山东日照人,主要从事生态水文方面研究。E-mail: zy9218@hotmail.com

通讯作者:赵长森(1977-),男,山东淄博人,副教授,主要从事遥感水文与生态水文方面研究。E-mail: zhaochangsen@bnu.edu.cn

环境问题是影响全人类的大事,生态系统健康是环境问题的重中之重<sup>[1-3]</sup>。在对生态保护的研究中,人们渐渐认识到生态系统是通过不同动植物及微生物的有机结合达到维护生态系统稳定的目的。因而,从功能组的角度来考虑生态所需就成为了生态保护过程中一个不可避免的问题<sup>[4-7]</sup>。

国内外文献<sup>[8-11]</sup>研究表明:在生态系统中不同物种具有不同的功能,部分物种或物种集合相对于其它物种具有更重要的地位,其在数量上的微小变化会引起生态系统巨大改变,并且其存在对生态系统内部物种间营养关系的维持具有重大意义,这些物种或物种集合支撑着生态系统关键功能的正常发挥<sup>[12-13]</sup>,可称它们为关键功能组(Key Functional Group)。关键功能组可为监管层判别当前生态系统健康状况、识别重点保护对象提供极大便利。

此处所说的“功能”是指生态系统宏观服务的更深层次的支撑。食物网的稳定是生态系统提供服务的基础<sup>[14-15]</sup>,而关键功能组成员在整个食物网内处于支点位置,关键功能组内生物单位物质对其他生物的能量影响大于非关键功能组的生物,因此关键功能组的生物对整个生态系统能量流动具有非常重要的影响,关键功能组的功能就是维持食物网能量流动的稳定,从而为生态系统服务价值的体现奠定基础。它具有如下特征:(1)遍历性:关键功能组的成员涵盖食物网的各个营养层级,从最底层的植物或浮游植物到最顶层的捕食者均有成员属于关键功能组。这样关键功能组的功能才能覆盖整个生态系统所需。(2)代表性:由于不同营养级的生物对环境需求不尽相同,因而每一层级的关键功能组成员的生态需求总能涵盖与其相同或相似的营养级对生境的需求。(3)稳定性:整个关键功能组内所有种群生态位的集合是整个群落维持稳定的最小需求。换句话说,一个系统中若其关键功能组各成员生存状况良好,则该生态系统能够持续稳定发展。(4)唯一性:每个生态系统有且仅有一个关键功能组,但其成员允许由于季节的原因发生部分变动。(5)地域性:不同的生态系统的的功能组一般不同,地域间差异可能较大。

研究食物网中物质能量流动是关键功能组确定的基础<sup>[14]</sup>,食物网在生态系统营养模型的应用和发展方面取得了重大进展,但目前多停留在理论与概念分析上,定量模型较少,其中得到广泛应用的是生态营养通道模型(Ecopath)<sup>[15-17]</sup>。

Ecopath 模型是根据营养动力学原理,在生态系统食物网结构基础上对能量流动进行描述的生态系统营养平衡模型<sup>[18]</sup>。其基本功能是对生态系统

的结构、营养流动过程、营养动力学特征进行量化综合分析<sup>[19-22]</sup>,在水生生态系统营养结构、能量流动、发展趋势预测等方面得到了广泛应用,被国际生态学家公认为新一代的水域生态系统研究核心工具<sup>[23-28]</sup>。本研究中利用 Ecopath 模型进行小清河流域生态系统模型构建及关键功能组成员筛选。

综上,关键功能组对于维持生态系统结构完整、功能完善具有重要意义,确定生态系统关键功能组可以为生态保护及修复工作提供重要参照。为此本文从小清河水生生态系统食物网物质和能量流动入手,利用 Ecopath 软件进行关键功能组的构建,明确对于维持小清河水生生态系统稳定具有重要作用的生物集合,为水生生态文明建设提供借鉴。

## 1 研究区概况

小清河流域(图 1)位于山东省鲁北平原南部,于寿光羊角沟入渤海,全长 237 km,流域面积 10 336 km<sup>2</sup>,河道平均比降为 0.15/1000,流域河网密度 0.27 km/km<sup>2</sup>。流域地处东亚季风区,属华北暖温带半湿润季风型大陆性气候,年内四季分明,温差变化较大。冬季寒冷干燥,降水量稀少;夏季高温炎热,暖空气活动较频繁,雨量较多。流域内年平均气温 12.6℃,无霜期在 200 d 以上。流域内多年平均降水量为 619.7 mm,降水量年际变化较大,降水量年内分配不均,主要集中在汛期的 7 月—9 月,占全年降水量的 50%~70%。

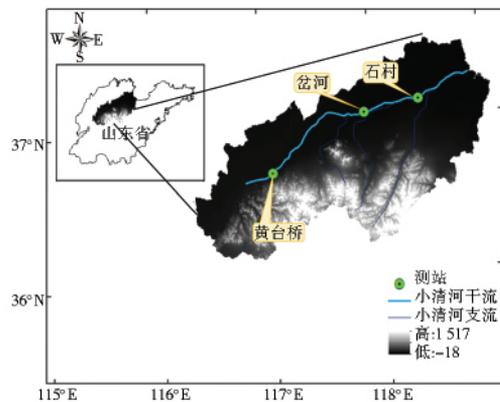


图 1 小清河流域

Fig. 1 Location of the Xiaoqinghe River Basin

小清河是鲁中地区一条重要的排水河道,兼顾两岸农田灌溉、内河航运、生态等综合利用的河道,也是全国 5 条重要的国防战备河道之一,对沿线经济社会的发展发挥了不可替代的作用。自 20 世纪 70 年代以来,由于流域内经济的快速发展,人们对保护环境认识不到位,导致河道侵占严重,水源减少,工业废水和生活污水排放量逐年增加,使小清河水体遭受污染,生态环境日益恶化,严重影响了沿河

地区社会经济的发展。为防止小清河生态环境进一步恶化,维持其可持续的生态服务功能,明确流域生态系统关键功能组,为管理层提供快速监测水生态系统健康状况标识性物种迫在眉睫。

## 2 数据及方法

### 2.1 数据

本文水生物数据来源包括济南市水生态监测试点项目采集数据、相关文献资料以及 Fishbase 鱼类

资料库(www.fishbase.org)。济南市水生态监测试点项目两年共采样 6 次,其中春季(5 月)、夏季(8 月)、秋季(11 月)各一次,5 月为春夏之交,各种生物开始繁殖,代表春季的生物群落状态;8 月水量大、气温高,代表生物群落夏季状态;11 月气温降低、水文影响减弱,代表秋季生物群落状态。采样内容包括浮游植物、浮游动物、底栖动物、鱼类。2014 年设置采样点 50 个(表 1),于小清河流域上、中、下游各设置 1 采样点。具体采样方法如下。

表 1 水生态采样站点位置信息  
Tab. 1 Locations of the sampling stations

点位	点位名称	经度(°)	纬度(°)	点位	点位名称	经度(°)	纬度(°)
J1	井渡口	117.019	36.475	J26	杜张水库	117.348	36.747
J2	八达岭水库	117.033	36.405	J27	朱各务水库	117.48	36.775
J3	黄巢水库	117.157	36.376	J28	相公庄	117.536	36.764
J4	卧虎山水库	116.969	36.491	J29	浒山闸	117.621	36.9
J5	宅科	116.937	36.517	J30	五龙堂	117.408	36.959
J6	锦绣川水库	117.146	36.507	J31	张家林	117.398	36.926
J7	垛庄水库	117.413	36.486	J32	白云湖	117.418	36.898
J8	陈屯桥	116.509	36.155	J33	北田家	117.162	37.019
J9	东阿水库	116.269	36.163	J34	垛石街	117.082	37.058
J10	汇泉水库	116.286	36.103	J35	新市董家	117.039	37.093
J11	北大沙河入黄河口	116.717	36.611	J36	葛店引黄闸	117.241	37.043
J12	顾小庄浮桥	116.615	36.445	J37	大贺家铺	117.189	37.069
J13	崮头水库	116.733	36.405	J38	营子闸	117.188	37.134
J14	钓鱼台水库	116.831	36.420	J39	张公南临	117.162	37.22
J15	崮山	116.868	36.479	J40	刘家堡桥	117.371	37.422
J16	睦里庄	116.829	36.657	J41	周勇闸	117.272	37.418
J17	吴家铺	116.902	36.692	J42	杆子行闸	117.206	37.478
J18	大明湖	117.023	36.675	J43	明辉路桥	117.139	37.307
J19	趵突泉	117.009	36.661	J44	潘庙闸	117.032	37.328
J20	梁府庄	117.015	36.698	J45	刘成桥	117.444	37.287
J21	板桥	117.037	36.696	J46	龙脊河	117.445	37.285
J22	五柳闸	117.028	36.681	J47	石河	117.128	36.755
J23	冻口	117.026	36.753	J48	巨野河	117.237	36.815
J24	黄台桥	117.058	36.708	W49	岔河水文站	117.917	37.071
J25	杏林水库	117.611	36.714	W50	石村	118.41	37.138

(1)浮游植物。水深小于 2 m 的河流,仅在 0.5 m 深水层采集 2 L 水样即可;水深小于 5 m 的,在水表面下 0.5、1、2、3 和 4 m 五个水层采样并混合,取 2 L 混合水样;水深大于 5 m 的,按 3~6 m 间距设置采样水层,取 2 L 混合水样。按 1.5% 体积比例加入鲁哥氏液固定。

(2)浮游动物。用采水器在各水层采 20~50 L 水,用 25 号浮游生物网过滤,将收集到的有机体装入

100 ml 塑料瓶中。按 5% 体积比例加入甲醛固定。

(3)大型底栖动物。使用 0.5 m×0.5 m 的 60 目索伯网或 1/16 m<sup>2</sup> 彼得逊采泥器采集河道底泥,然后利用 60 目筛网将采集到的底泥进行清洗,再将所有底质倒入白瓷盘中进行挑拣,直至目测无底栖动物为止。再将所有底栖动物装入 1 L 的广口瓶内,加入 70% 酒精保存。

(4)鱼类。可涉水河流(深泓水深小于 1.5 m)

采用电鱼器捕鱼,采集时间为 30~60 min。不可涉水河流(深泓水深大于 1.5 m),主要雇船进行拖网捕鱼,每个采样点行进距离不超过 100 m。另外,有渔民的地方,还需从渔民渔获物中获取相应的样品。

## 2.2 方法

### 2.2.1 模型构建

Ecopath 中功能组概念为生态系统中功能和结构上相近的物种的集合。每个模型中均需定义至少一个碎屑组,至少一个生产者功能组,从而为其他更高级(如果存在)物种提供能力输入。在构建模型过程中,需要输入一些基本参数,包括生物量、 $P/B$ 、 $Q/B$ (或  $P/Q$ )、食物组成等,通过这些参数 Ecopath 进行能量流动层次上能量关系的构建。

#### (1) 生物量( $B$ )。

生物量是指单位时间内、单位面积或单位体积中所存在某种生物的总量<sup>[29]</sup>,在 Ecopath 模型中生物量单位为  $t/km^2$ ,采样得到的浮游植物和浮游动物数据单位为  $g/L$ ,与  $t/km^2$  是不同维度的量纲,因此采用下面的方法进行单位换算:

$$1 \frac{g}{L} \cdot M = 1 \frac{g}{dm^3} \cdot M = \frac{10^5 t}{dm^2} = \frac{10^5 t}{(10^4 km^2)} = 10^3 t/km^2 \quad (1)$$

底栖动物的采样量纲为  $g/m^2$ ,转换方式如下:

$$1 \frac{g}{m^2} = \frac{10^{-6} t}{(10^{-3} km)^2} = 1 \frac{t}{km^2} \quad (2)$$

鱼类采样单位为  $g$ ,在换算时需要计算采样面积,根据不同采样点的采样时间和离岸距离计算。

#### (2) $P/B$ 系数。

浮游生物、底栖动物  $P/B$  系数的取值参照已有研究成果<sup>[29-30]</sup>取值 185,鱼类生产力的估计采用文献<sup>[31]</sup>中方法。

#### (3) $Q/B$ 或 $P/Q$ 系数。

$Q/B$  系数是指单位时间(1年)内某种生物摄食量与其生物量的比值。 $P/Q$  系数是指某种生物生产量与摄食量的比值。在  $Q/B$  不易求得时,若已知  $P/B$  和  $P/Q$ ,则可推出  $Q/B$ 。浮游动物、底栖动物系数采用前人研究<sup>[29,32]</sup>。鱼类的  $Q/B$  系数利用 Palomares 和 Pauly 的经验公式<sup>[31,33]</sup>估算。

#### (4) 食物组成。

Ecopath 是基于食物网/链能量流动的生态模型,食物矩阵的输入是基础,需要各功能组的食物组成,可参考已有研究<sup>[31-36]</sup>确定。若功能组包含多种生物,则按照该功能组内各种生物的组成比例加权平均得到该组食物构成。

### 2.2.2 关键成员筛选

计算指标的选择对关键功能组成员的筛选有非

常大的影响,本研究计算每个物种的  $KS$ (Key-stoneness)指标,每一类生物(浮游动物、浮游植物、底栖动物、鱼类)中  $KS$  值最大的视为关键功能组成员,由于鱼类处于水生生态系统食物网顶端,故在关键功能组成员选取时取 2 种鱼类,底栖动物、浮游动物、浮游植物各取 1 种。本文采用 Valls<sup>[15]</sup>提出的方法进行  $KS$  值的计算,该方法假定:若一个物种在生态系统内地位越重要,则其对系统能量传递的影响越大,即单位生物量的关键物种具有更大的影响;反之亦然。相对于 Power<sup>[37]</sup> 及 Libralato<sup>[38]</sup> 的方法,Valls 的方法在计算  $KS$  值时,对生物量与能力影响两方面的考虑更加均衡。计算公式如下:

$$KS = \log(IC \times BC) \quad (3)$$

$$IC = \sqrt{\sum_{j \neq i} m_{ij}^2} \quad (4)$$

$$BC = drank(B_i) \quad (5)$$

式中: $m_{ij}$  表示食物网中物种  $i$  对于物种  $j$  的 MTI (Mixed Tropic Level Impact),不包括对于该物种自身的和对于非生命体的组,如有机碎屑, $drank(B_i)$  表示按照生物量降序排列的生物顺序。

$BC$ (Biomass Component)分量表征了一个物种在生态系统中物质积累的大小; $IC$ (Impact Component)分量表征了一个物种在其所处的生态系统中营养关系上的影响,亦即能量方面的影响。物质循环和能量循环是生态系统运转的基础,是相辅相成的两方面,物质的循环必然伴随着能量的传递和转移,反之亦然;反应到生物层面就是捕食与被捕食关系。

## 3 结果及讨论

### 3.1 关键功能组构建结果

按照时间顺序,构建了小清河流域春季、夏季、秋季三个模型,根据模型内物种间能量影响( $IC$ )和物种自身生物量( $B$ )计算  $KS$  值,按照其大小筛选出关键功能组成员。得到的关键功能组成员随时间发生变化。

#### 3.1.1 模型构建结果

基于前面的模型构建方法,根据采样结果按照时间顺序构建了小清河流域 Ecopath 2014 年春季、夏季、秋季三个模型,物种间营养关系见图 2,藻类处于第一营养级,为其整个生态系统提供能量来源,水丝蚓及浮游动物处于第二营养级,底栖动物及鱼类处于更高的营养级,鱼类作为水生生态系统终极捕食者,位于食物网最顶端。图中符号大小代表生物量大小,优势物种随时间变化明显,春季生物量最大的为枝角类、轮虫,夏季则为枝角类、螺,秋季水

丝蚓及摇蚊生物量最大。

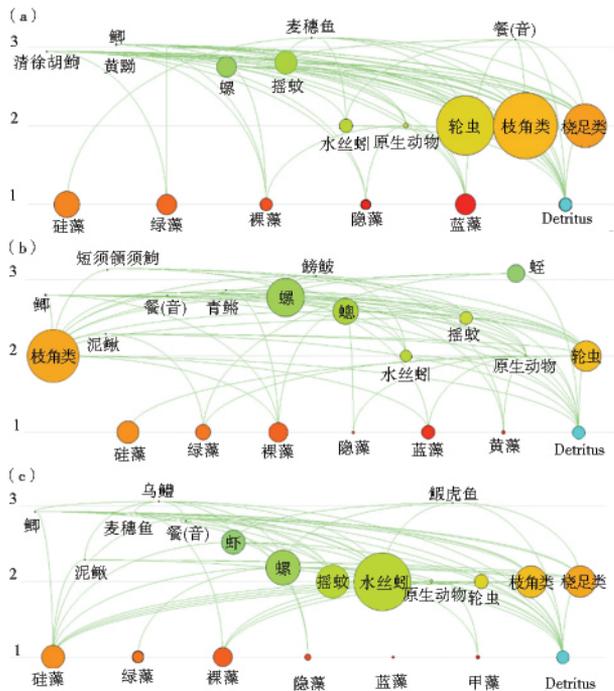


图 2 春季(a)、夏季(b)、秋季(c)食物网图

Fig. 2 Food web of spring (a), summer (b), and autumn (c)

能量影响方面,物种间影响随时间变化无明显规律(图 3),图中黑色圆点表示正向影响,白色圆点表示负向影响,圆点大小与影响正大小相关。春季 MTI 离散程度最高,随时间逐渐减小,秋季温度下降生物活动减少,物种间能量流动总体减少,导致相互影响较春季、夏季有所下降。

由计算结果(表 2)可以看出春季所有物种中隐藻 IC 值最高(1.64),其次为原生动物(1.30),鱼类 IC 值均在 0.5 以下;底栖动物中水丝蚓、摇蚊、螺 IC 值接近,分别为 0.87,

0.83,0.81;夏季摇蚊幼虫和原生动物 IC 值最大,均为 1.03;鱼类中最大为青鲮(0.63)、泥鳅(0.61);浮游植物中硅藻(1.04)最大。秋季鱼类、底栖动物、浮游动物、浮游植物中 IC 值最大物种分别为泥鳅(1.82)、螺(0.83)、枝角类(1.77)、裸藻(1.81)。

表 2 各季节 IC 值

Tab. 2 Impact Component values of the three seasons

春季		夏季		秋季	
物种名	IC	物种名	IC	物种名	IC
鲫	0.40	鲫	0.40	乌鳢	0.69
餐 CAN	0.27	短须颌须鲈	0.40	鲫	1.09
清徐胡鲈	0.28	泥鳅	0.61	泥鳅	1.83
黄鲮	0.13	鳊鱼	0.31	麦穗鱼	1.04
麦穗鱼	0.19	餐 CAN	0.33	餐 CAN	1.55
青鲮	0.38	青鲮	0.63	鳊鱼	0.36
螺	0.81	螺	0.33	虾	0.68
摇蚊	0.84	蛭	0.72	螺	0.83
水丝蚓	0.87	螭	0.19	摇蚊	0.75
原生动物	1.30	水丝蚓	1.01	水丝蚓	0.78
轮虫	1.04	摇蚊	1.04	原生动物	1.04
枝角类	1.17	原生动物	1.04	轮虫	1.73
桡足类	0.60	轮虫	0.52	枝角类	1.77
硅藻	0.81	枝角类	0.61	桡足类	1.77
绿藻	0.68	硅藻	1.05	硅藻	1.35
裸藻	1.18	绿藻	0.97	绿藻	1.21
隐藻	1.64	裸藻	0.72	裸藻	1.82
蓝藻	1.13	隐藻	0.89	隐藻	1.12
		蓝藻	0.96	蓝藻	0.00
		黄藻	1.02	甲藻	0.93

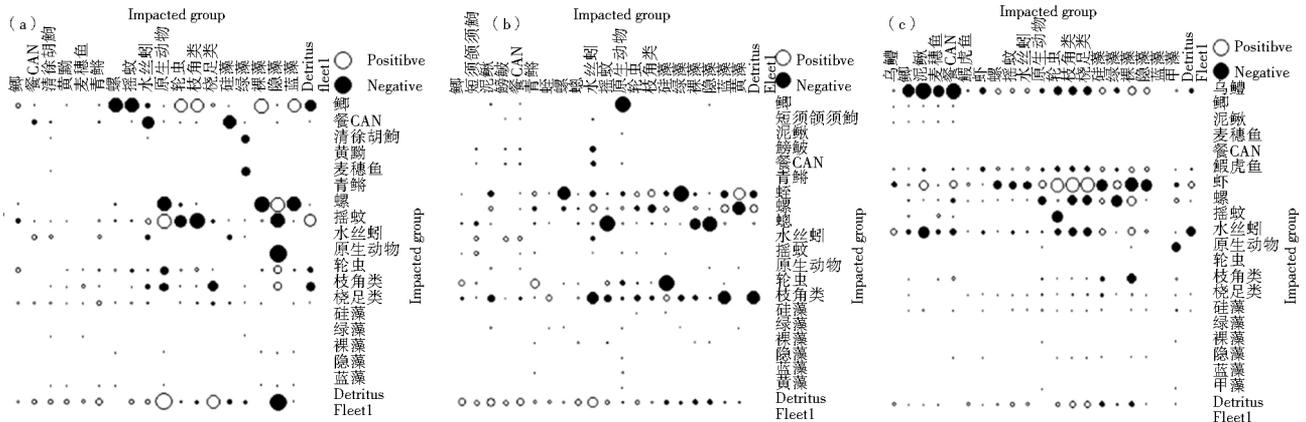


图 3 春季(a)、夏季(b)、秋季(c)MTI 图

Fig. 3 Mixed Tropic Level Impact of spring (a), summer (b), and autumn (c)

### 3.1.2 关键成员筛选结果

可以看出在三个季节计算得到的 KS 值具有明显的差异(表 3)。春季鱼类中青鲮具有最大 KS

值,其次为鲫,分别为 6.39 和 5.13;底栖动物中具有最大 KS 值为水丝蚓,为 7.85;浮游动物中原生动物的值最大为 15.65;隐藻为浮游植物中具有

最大 *KS* 值的物种,其值为 18.07。夏季青鳉同样具有最大的 *KS* 值,其次为泥鳅(包括大鳞副泥鳅),分别为 12.54 和 11.63;底栖动物种具有最大 *KS* 值的同样为水丝蚓,为 11.06;浮游植物中原生动物的值为 15.56,大大超过其他浮游动物;隐藻为浮游植物中具有最大 *KS* 值的物种,其值为 12.19。秋季泥鳅(包括大鳞副泥鳅)具有最大的 *KS* 值,其次为餐,分别为 29.27 和 27.85;底栖动物种具有最大 *KS* 值的为秀丽白虾,为 4.05;浮游植物中原生动物的值为 15.54,超过了原生动物;裸藻为浮游植物中具有最大 *KS* 值的物种,其值为 14.55。秋季与春夏季计算结果具有较大的变化,可能是由于季节、温度的变化引起生物活动不同造成的。筛选得到的关键功能组成员如表 4。

表 3 各季节生物 *KS* 值  
Tab. 3 Key Stoneness values of the three seasons

春季	夏季	秋季
鲫 5.14	鲫 5.55	乌鳢 10.37
餐 CAN 3.75	短须颌须鲃 7.22	鲫 18.61
清徐胡鲃 4.54	泥鳅 11.63	泥鳅 29.28
黄魮 2.38	鲮鱼 4.97	麦穗鱼 20.73
麦穗鱼 2.90	餐 CAN 5.54	餐 CAN 27.86
青鳉 6.39	青鳉 12.55	鰕虎鱼 6.92
螺 6.46	螺 0.67	虾 4.05
摇蚊 4.18	蛭 5.02	螺 1.65
水丝蚓 7.86	螭 0.76	摇蚊 2.24
原生动物 15.66	水丝蚓 11.06	水丝蚓 0.78
轮虫 2.08	摇蚊 10.38	原生动物 13.53
枝角类 1.17	原生动物 15.56	轮虫 15.54
桡足类 1.80	轮虫 1.57	枝角类 7.09
硅藻 3.25	枝角类 0.61	桡足类 8.86
绿藻 4.78	硅藻 5.24	硅藻 9.46
裸藻 11.83	绿藻 7.73	绿藻 12.14
隐藻 18.07	裸藻 4.35	裸藻 14.56
蓝藻 6.79	隐藻 11.54	隐藻 12.34
	蓝藻 8.66	蓝藻 0.00
	黄藻 12.19	甲藻 11.20

表 4 小清河流域不同季节关键功能组成员  
Tab. 4 The key functional group of Xiaoqinghe River in each season

时间	关键功能组成员
春季	青鳉、鲫、水丝蚓、原生动物、隐藻
夏季	青鳉、泥鳅(包括大鳞副泥鳅)、水丝蚓、原生动物、黄藻
秋季	泥鳅(包括大鳞副泥鳅)、餐、秀丽白虾、轮虫、裸藻

### 3.2 讨论

关键功能组是为水生态保护提出的概念,避免

了过于重视单一物种而引起生态失衡甚至破坏的弊端,且可利用 Ecopath 模型定量计算功能组成员组成,在应用过程中更加具有实际意义。

(1)水丝蚓为什么能成为关键功能组成员?关键功能组成员不是传统意义上重要物种,水丝蚓多生活在含有机质、腐殖质较多的污水沟、排水口等处,研究发现霍甫水丝蚓的数量增加意味着水体有机污染物也有所增加,因此水丝蚓常作为水质较差的指示物种<sup>[39]</sup>。然而本研究计算结果显示在某些情况下水丝蚓是食物网物质和能量传递的重要参与者,是维持生态系统稳定的重要物种:一方面,当环境恶化、处于相同食物网层级的其他物种大量死亡时,水丝蚓为食物网上层的鱼类提供了食物,维持了食物网内物质和能量自下而上的流动;另一方面水丝蚓促进了氮磷等元素在沉积物-水界面的迁移和转化,对沉积物中污染物的内源释放有着至关重要的作用<sup>[40-41]</sup>。关键功能组的提出是基于生态系统整体考虑,立足于维持生态系统稳定,从食物网物质能量流动的角度考虑,故关键功能组的成员可能有别于传统认知。

(2)通过食物网能量流动筛选关键功能组成员是新的思路。本研究通过引入 Ecopath 进行食物网构建,并在其基础上进行关键功能组分析计算,遵循自然界中物质能量流动特点,跳出单纯水文水质思维,从生物学、能量化学、物理学角度综合考虑,为水生态监测、保护提供新思路。

(3)本方法的普适性和局限性。该方法不需要历史水文、水质数据,仅需要对当前时期水生生态系统采样获取数据,只需当地采样所得数据满足软件运行需求即可进行计算,不受地域限制,具有较强普适性。但对于过小的水生生态系统,由于其食物网结构可能过于简单且不稳定,系统微小变化即可能引起整个生态系统巨变,即便建立了 Ecopath 模型,但运算结果准确性难以估计。

### 4 结论

本文探索了通过构建 Ecopath 模型,计算 Key-stoneness 值,筛选关键功能组成员的方法,得到了小清河流域春季、夏季、秋季关键功能组成员。

经过计算得到小清河流域春季关键功能组成员为青鳉、鲫、水丝蚓、原生动物、隐藻;夏季关键功能组成员为青鳉、泥鳅(包括大鳞副泥鳅)、水丝蚓、原生动物、黄藻;秋季关键功能组成员为泥鳅(包括大鳞副泥鳅)、餐(音)、秀丽白虾、轮虫、裸藻。该流域关键功能组成员随时间变化体现出一定差异性。

在生产实践中,可利用该方法确定需要重点保护的物种,或者通过满足关键功能组生存需求达到维护生态系统稳定的目的,对于水生态监测、水生态系统保护和修复具有指示作用。但由于本研究刚开始尝试,很多工作需要在未来进一步深入研究。

#### 参考文献(References):

- [1] KINGSLEY J, PATRICK R, HORWITZ P, et al. Exploring ecosystems and health by shifting to a regional focus: Perspectives from the Oceania EcoHealth Chapter[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2015, 12(10):12706-12722. DOI:10.3390/ijerph121012706.
- [2] 张治军,唐芳林,周红斌,等.我国生态监测发展现状与展望[J]. *林业建设*, 2012(5):19-22. (ZHANG Z J, TANG F L, ZHOU H B, et al. Current situation and development of ecological monitoring in China[J]. *Forestry Construction*, 2012(5):19-22. (in Chinese))
- [3] 齐杨,于洋,刘海江,等.中国生态监测存在问题及发展趋势[J]. *中国环境监测*, 2015(6)9-14. (QI Y, YU Y, LIU H J, et al. Research on existing problems and developmental tendency of ecological monitoring in China[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2015(6)9-14. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1002-6002.2015.06.004.
- [4] BELLWOOD D R, HUGHES T P, FOLKE C, et al. Confronting the coral reef crisis[J]. *Nature*, 2004, 429(6994):827-833. DOI:10.1038/nature02691.
- [5] 吕巍巍,马长安,余骥,等.长江口横沙东滩围垦潮滩内外大型底栖动物功能群研究[J]. *生态学报*, 2013, 33(21):6825-6833. (LYU W W, MA C A, YU J, et al. Macrobenthic functional groups at the reclamation and natural tidal flats of Hengsha East Shoal, the Estuary of Changjiang River[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(21):6825-6833. (in Chinese)) DOI:10.5846/stxb201207100969.
- [6] 马文静,张庆,牛建明,等.物种多样性和功能群多样性与生态系统生产力的关系——以内蒙古短花针茅草原为例[J]. *植物生态学报*, 2013(7):620-630. (MA W J, ZHANG Q, NIU J M, et al. Relationship of ecosystem primary productivity to species diversity and functional group diversity: Evidence from *Stipa breviflora* grassland in Nei Mongol[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2013(7):620-630. (in Chinese)) DOI:10.3724/SP.J.1258.2013.00064.
- [7] 杨文,朱津永,陆开宏,等.淡水浮游植物功能类群分类法的提出、发展及应用[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(6):1833-1840. (YANG W, ZHU J Y, LU K H, et al. The establishment, development and application of classification approach of freshwater phytoplankton based on the functional group: A review[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(6):1833-1840. (in Chinese))
- [8] PAINE R T. A note on trophic complexity and community stability[J]. *American Naturalist*, 1969:91-93. DOI:10.1086/282586.
- [9] 韩兴国,黄建辉,姜治平.关键种概念在生物多样性保护中的意义与存在的问题[J]. *植物学通报*, 1995, 12:168-184. (HAN X G, HUANG J H, LOU Z P. The significance and problems associated with the keystone species concept in biodiversity conservation[J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 1995, 12:168-184. (in Chinese))
- [10] 葛宝明,鲍毅新,郑祥.生态学中关键种的研究综述[J]. *生态学杂志*, 2004, 06:102-106. (GE B M, BAO Y X, ZHENG X. A review on key species study in ecology[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2004, 06:102-106. (in Chinese)) DOI:10.3321/j.issn.1000-4890.2004.06.022.
- [11] 杜洪业,徐程扬.森林生态系统中关键种与群落动态的关系研究进展[J]. *世界林业研究*, 2012, 25(5):35-39. (DU H Y, XU C Y. Research progress of the relationship between keystone species and the dynamic of community in forestry ecosystem[J]. *World Forestry Research*, 2012, 25(5):35-39. (in Chinese))
- [12] LOKRANTZ J, NYSTRÖM M, NORSTRÖM A V, et al. Impacts of artisanal fishing on key functional groups and the potential vulnerability of coral reefs[J]. *Environmental Conservation*, 2009, 36(4):327-337. DOI:10.1017/S0376892910000147.
- [13] GRIME J P. Biodiversity and ecosystem function: the debate deepens[J]. *Science*, 1997, 277(5330):1260. DOI:10.1126/science.277.5330.1260.
- [14] ESSINGTON T E. Evaluating the sensitivity of a trophic mass-balance model (Ecopath) to imprecise data inputs[J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2007, 64(4):628-637. DOI:10.1139/f07-042.
- [15] VALLS A, COLL M, CHRISTENSEN V. Keystone species: Toward an operational concept for marine biodiversity conservation[J]. *Ecological Monographs*, 2015, 85(1):29-47. DOI:10.1890/14-0306.1.
- [16] COLVIN M E, PIERCE C L, STEWART T W. A food web modeling analysis of a Midwestern, USA eutrophic lake dominated by non-native Common Carp and Zebra Mussels[J]. *Ecological Modelling*, 2015, 312:26-40. DOI:10.1016/j.ecolmodel.2015.05.016.
- [17] DU J, CHEUNG W W L, ZHENG X, et al. Comparing trophic structure of a subtropical bay as estimated from mass-balance food web model and stable isotope analysis[J]. *Ecological Modelling*, 2015, 312:175-181. DOI:10.1016/j.ecolmodel.2015.05.027.
- [18] GUESNET V, LASSALLE G, CHAALALI A, et al. Incorporating food-web parameter uncertainty into Ecopath-derived ecological network indicators[J]. *Ecological Modelling*, 2015, 313:29-40. DOI:10.1016/j.ecolmodel.2015.05.036.
- [19] HALOUANI G, GASCUEL D, HATTAB T, et al. Fishing impact in Mediterranean ecosystems: An EcoTroph modelling approach[J]. *Journal of Marine Systems*, 2015, 150:22-33. DOI:10.1016/j.jmarsys.2015.05.007.
- [20] LIU Q G, CHEN Y, LI J L, et al. The food web structure and ecosystem properties of a filter-feeding carps dominated deep reservoir ecosystem[J]. *Ecological Modelling*, 2007, 203(3):279-289. DOI:10.1016/j.ecolmodel.2006.11.028.

- [21] COLL M, AKOGLU E, ARREGUÍN-SÁNCHEZ F, et al. Modelling dynamic ecosystems: venturing beyond boundaries with the Ecopath approach[J]. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 2015, 25(2): 413-424. DOI: 10. 1007/s11160-015-9386-x.
- [22] TECCHIO S, ROUS A T, DAUVIN J C, et al. The mosaic of habitats of the Seine estuary: Insights from food-web modelling and network analysis[J]. *Ecological Modelling*, 2015, 312: 91-101. DOI: 10. 1016/j. ecolmodel. 2015. 05. 026.
- [23] ORTIZ M, BERRIOS F, CAMPOS L, et al. Mass balanced trophic models and short-term dynamical simulations for benthic ecological systems of Mejillones and Antofagasta bays (SE Pacific): Comparative network structure and assessment of human impacts[J]. *Ecological Modelling*, 2015, 309: 153-162. DOI: 10. 1016/j. ecolmodel. 2015. 04. 006.
- [24] ZHOU B, DONG S, WANG F. Trophic structure and energy fluxes in a grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) cultured pond ecosystem[J]. *Aquaculture International*, 2015, 23(5): 1313-1324. DOI: 10. 1007/s10499-015-9886-7.
- [25] CHRISTENSEN V, WALTERS C J. Ecopath with Ecosim: Methods, capabilities and limitations[J]. *Ecological Modelling*, 2004, 172(2): 109-139. DOI: 10. 1016/j. ecolmodel. 2003. 09. 003.
- [26] SANDBERG J, KUMBLAD L, KAUTSKY U. Can ECOPATH with ECOSIM enhance models of radionuclide flows in food webs? -an example for 14 C in a coastal food web in the Baltic Sea[J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2007, 92(2): 96-111. DOI: 10. 1016/j. jenvrad. 2006. 09. 010.
- [27] PARRISH F A, HOWELL E A, ANTONELIS G A, et al. Estimating the carrying capacity of French Frigate Shoals for the endangered Hawaiian monk seal using Ecopath with Ecosim[J]. *Marine Mammal Science*, 2012, 28(3): 522-541. DOI: 10. 1111/j. 1748-7692. 2011. 00502. x.
- [28] DEEHR R A, LUCZKOVICH J J, HART K J, et al. Using stable isotope analysis to validate effective trophic levels from Ecopath models of areas closed and open to shrimp trawling in Core Sound, NC, USA[J]. *Ecological Modelling*, 2014, 282: 1-17. DOI: 10. 1016/j. ecolmodel. 2014. 03. 005.
- [29] 宋兵, 陈立侨. Ecopath with Ecosim 在水生生态系统研究中的应用[J]. *海洋科学*, 2007, 31(1): 83-86. (SONG B, CHEN L Q. An application of Ecopath with Ecosim to aquatic ecology[J]. *Marine Sciences*, 2007, 172(2): 109-139. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-3096. 2007. 01. 015
- [30] LI R, HAN Z, CHENG H Q, et al. A preliminary study on biological resource energy flows based on the Ecopath model in the East China Sea[J]. *Resource Science*, 2010, 32(4): 16-21. DOI: 10. 3724/sp. j. 1118. 2011. 00867.
- [31] 宋兵. 太湖渔业和环境的生态系统模型研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2004. (SONG B. Ecosystem modeling study on the fishery and environment of Taihu Lake[D]. Shanghai: East China Normal University, 2004. (in Chinese))
- [32] 林群, 金显仕, 张波, 等. 基于营养通道模型的渤海生态系统结构十年变化比较[J]. *生态学报*, 2009, 29(7): 3613-3620. (LIN Q, JIN X S, ZHANG B, et al. Comparative study on the changes of the Bohai Sea ecosystem structure based on Ecopath model between ten years[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(7): 3613-3620. (in Chinese)) DOI: 10. 3321/j. issn: 1000-0933. 2009. 07. 020.
- [33] PALOMARES M L D, PAULY D. Predicting food consumption of fish populations as functions of mortality, food type, morphometrics, temperature and salinity [J]. *Marine and Freshwater Research*, 1998, 49(5): 447-453.
- [34] HAN Z, LI R, GUO Y, et al. Data sensitivity analysis in the establishment of the ECOPATH biological energy flow model for the East China Sea[J]. *Resources Science*, 2010, 4: 004. DOI: 10. 3724/sp. j. 1118. 2011. 00867.
- [35] 冯德祥. 淀山湖生态系统结构与能量流动特征的 ECOPATH 模型研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2011. (FENG D X. Structure and energy flow of Dianshanhu Lake ecosystem based on Ecopath model[D]. Shanghai: East China Normal University, 2011. (in Chinese))
- [36] 闫云君, 梁彦龄. 扁担塘底栖动物群落的能量流动[J]. *生态学报*, 2003, 23(3): 527-538. (YAN Y J, LIANG Y L. Energy flow of macrozoobenthic community in a macrophytic lake, Biandantang Lake[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(3): 527-538. (in Chinese)) DOI: 10. 3321/j. issn: 1000-0933. 2003. 03. 017.
- [37] POWER M E, TILMAN D, ESTES J A, et al. Challenges in the quest for keystones[J]. *BioScience*, 1996, 46(8): 609-620. DOI: 10. 2307/1312990.
- [38] LIBRALATO S, CHRISTENSEN V, PAULY D. A method for identifying keystone species in food web models[J]. *Ecological Modelling*, 2006, 195(3): 153-171. DOI: 10. 1016/j. ecolmodel. 2005. 11. 029.
- [39] 韩志泉. 水丝蚓[J]. *生物学通报*, 1995(3): 12-13, 33. (HAN Z Q. *Limnodrilus*[J]. *Bulletin of Biology*, 1995(3): 12-13, 33. (in Chinese))
- [40] 王元元, 宋进喜, 蒋卫威, 等. 摇蚊幼虫与霍甫水丝蚓扰动对河流沉积物中氮、磷、氧释放的影响[J]. *环境科学学报*, 2015, 35(8): 2504-2511. (WANG Y Y, SONG J X, JIANG W W, et al. Effect of bioturbation of Chironomid larvae and *Limnodrilus hoffmeieri* on the release of nitrogen, oxygen and phosphate in the sediments from a river[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35(8): 2504-2511. (in Chinese)) DOI: 10. 13671/j. hjkxxb. 2014. 1036.
- [41] 白秀玲, 周云凯, 张雷. 水丝蚓对太湖沉积物有机磷组成及垂直分布的影响[J]. *生态学报*, 2012, 32(17): 5581-5588. (BAI X L, ZHOU Y K, ZHANG L. The influence of tubificid worms bioturbation on organic phosphorus components and their vertical distribution in sediment of Lake Taihu[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(17): 5581-5588. (in Chinese)) DOI: 10. 5846/stxb201110231569.