

常州市运北水系鱼类群落结构及多样性的变化研究

吕立鑫¹, 祝亚楠¹, 潘瑞松², 隋海潮¹, 刘晨宇¹, 王继华^{1*}

(1. 哈尔滨师范大学生命科学与技术学院, 黑龙江哈尔滨 150025; 2. 常州环保科技开发推广中心, 江苏常州 213001)

摘要 [目的]研究常州市运北水系治理过程中鱼类群落结构及多样性的变化及其影响因素。[方法]于2013年3月至2016年3月共8次对常州市新北区运北水系鱼类群落结构进行调查与分析。[结果]共采集到鱼类617尾24种,隶属3目4科20属。其中,鲤形目鱼类21种,占总物种数的87.5%,鱼类组成以定居杂食性小型鱼类为主,鲫(*Carassius auratus*)、贝氏鲮(*Hemiculter bleekeri*)、鲮条(*Hemiculter leucisculus*)为优势种,占总尾数的79.58%。常州市运北水系鱼类群落 Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数和 Margalef 丰富度指数在2015—2016年(第II年)高于2013—2014年(第I年),Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数均表现为冬季最高, Margalef 丰富度指数第I年呈现冬季最低,在第II年呈现夏季最低。典范对应分析发现,河流主要污染物 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、TN、TP 浓度与大部分鱼类的分布呈负相关关系。Pearson 相关性分析显示,鱼类多样性指数均与 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN、TP 浓度呈显著负相关关系,与 $\text{NO}_3\text{-N}$ 呈正相关关系。[结论]常州市运北水系的 N、P 含量变化对鱼类群落结构的影响明显。

关键词 常州运北水系; 鱼类群落结构; 生物多样性; 典范对应分析

中图分类号 S917.4 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2020)08-0092-06

doi:10.3969/j.issn.0517-6611.2020.08.023



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Study on the Changes of Fish Community Structure and Diversity in the North of Canal River System in Changzhou City

LÜ Li-xin¹, ZHU Ya-nan¹, PAN Rui-song² et al (1. College of Life Science and Technology, Harbin Normal University, Harbin, Heilongjiang 150025; 2. Changzhou Environmental Protection and Technology Development and Extension Center, Changzhou, Jiangsu 213001)

Abstract [Objective] To study the changes of fish community structure and diversity and its influencing factors in the north of canal river system in Changzhou City. [Method] The survey and analysis of fish community structure in the north of canal river system in Changzhou City was carried out from March of 2013 to March of 2016. [Result] A total of 617 individuals were taxonomically identified, belonging to 3 orders, 4 families, 20 genera and 24 species. Among those, 21 species belonged to Cypriniformes, accounting for 87.5% of the total, which was mainly composed of settled omnivorous small fish. *Carassius auratus*, *Hemiculter bleekeri*, *Hemiculter leucisculus* were important dominant species accounting for 79.58% of the total. Shannon-Wiener diversity index, the Pielous uniformity index and the Margalef richness index of the fish community were higher in 2015–2016 (defined as the second year) than in 2013–2014 (defined as the first year). Shannon-Wiener diversity index and Pielous evenness index in winter were the highest. The lowest value of Margalef richness index appeared in the winter of the first year and the lowest in the summer of the second year. CCA analysis showed that the concentrations of $\text{NH}_3\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$, TN and TP were negatively correlated with the distribution of most fish species. Pearson correlation analysis showed that fish diversity index was negatively correlated with $\text{NH}_3\text{-N}$, TN and TP concentrations, and it was positively correlated with $\text{NO}_3\text{-N}$ concentration. [Conclusion] The changes of N and P contents in the north of canal river system in Changzhou City had a significant impact on the fish community structure.

Key words The north of canal river system in Changzhou City; Fish community structure; Biodiversity; CCA

江苏省常州市位居长江之南、太湖之滨,是环太湖城市群的主要城市。城区河网密布,交错纵横,是长江、太湖、太湖的重要通道。常州河网河道流量小,流向不定,受人工闸泵控制,自净能力低,水质变化复杂^[1]。城区人口稠密,经济发达,城市化率高,经济发展与水环境保护的矛盾突出,水环境状况出现了严重的污染问题,国家早在“十一五”期间就开始对京杭大运河(常州市段)进行了比较系统的国家水专项治理,取得了较好的效果^[2]。“十二五”期间,以新淞港河、老淞港河东支河、北塘河及关河所围成的三角形区域(运北水系)为综合示范区,区内河流多为V类及劣V类水体,氮和磷是主要的污染负荷。经治理大部分达到IV类水质,部分为III类水质。

鱼类群落是特定水域鱼类种群相互结合的一种单元,鱼类与周围环境及其他物种相互依赖、相互作用,结合成具有

内在联系与结构特点的整体单元^[3]。河流水文和生境特征的改变会影响鱼类自身生活史(如洄游、繁衍)的变化,其群落结构及物种多样性会随之产生相应的变化^[4]。鱼类作为水域生态系统的重要消费者,其丰富情况直接体现了河流生态环境的修复进展,可作为评价水生态健康的指标,研究其在不同环境条件下表现出的群落结构与空间分布格局,不仅是基本的生态问题,而且对于渔业管理的有效性和可持续性也十分重要^[5-6]。

关于常州市内河水质及水生生物的研究开始于20世纪80年代,大多集中在毒理方面^[7-10],关于物种多样性方面的报道主要是秦安龄等^[11]于1988年对1984—1985年采集结果的报道以及陈辉等^[12]于2012年对常州市城市内河常见鱼类与水质间相关性的调查。笔者对常州运北水系的鱼类资源进行了系统调查,以便更好地了解常州运北水系治理后的生态环境状况。

1 材料与方法

1.1 自然地理概况 常州市运北水系位于常州市国家高新技术开发区(新北区),太湖流域东部平原河流湖泊水生态区,隶属太湖流域东北部的沿江水系^[13-14]。该区域气候为我国亚热带季风气候,四季分明,夏季高温多雨,冬季温和少

基金项目 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07202-002-06)。

作者简介 吕立鑫(1995—),女,黑龙江哈尔滨人,硕士研究生,研究方向:环境生态学。*通信作者,教授,博士,从事环境微生物学、微生物遗传学和微生物生态学研究。

收稿日期 2019-12-14; **修回日期** 2020-01-06

雨,年平均降水量约 1 200 mm,主要集中在 5—9 月份。运北水系北枕长江、连通京杭大运河、南靠沪宁铁路,区位优势、交通便捷,是“十二五”水专项治理的示范区域。根据区内河流特点,将河流分为骨干河流、支浜河流、断头河浜三类。骨干河流(澡港河、北塘河)是城区内的主要河流,河流水量大,流动性好,日常为开放性流动水道,调水时水道处于半封闭状态,换水排涝时需封闭抽水;支浜河流(例如通济河、三井河)沟通 2 条骨干河流,水质易受骨干河流水质的影响,滞留严重,水道始终为半封闭状态;断头河浜(例如柴支浜)水体滞留溶解氧低,时常发生黑臭现象,水道日常全封闭状态。

1.2 研究方法 根据研究区域河流(通济河、柴支浜、北塘河、三井河、澡港河)的水文状况,2013—2016 年在常州地区运北水系流域 5 条河流共设置 13 个样点,主要采集河流中上层鱼类样本,采样区域如图 1 所示。采样时间为 2013 年 3

月(春季,3Spr)、8 月(夏季,3Sum)、11 月(冬季,3Win)、2014 年 4 月(春季,4Spr)和 2015 年 5 月(春季,5Spr)、7 月(夏季,5Sum)、12 月(冬季,5Win)、2016 年 3 月(春季,6Spr),该研究以 2013 年 3 月至 2014 年 4 月设置为第 I 年,以 2015 年 5 月至 2016 年 3 月设置为第 II 年,分析鱼类群落组成及多样性的年间变化及年内季节间变化及其与水中主要污染物的关系。进行水样采集,测定水中主要污染物(如 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 TN 、 TP 等)浓度,测定方法依照《地表水和污水检测技术规范(HJ/T 91—2002)》进行。鱼类调查方法参照《内陆水域渔业自然资源调查手册》^[15] 中的监测方法进行,调查使用的渔具为高 1.0 m,长 50 m,网目为 3 cm 的定置刺网,在采样点布设网具 1 h 后收网,连续调查 2 d,捕获的鱼类样品冰鲜保存带回实验室,根据《江苏鱼类志》^[16] 和《太湖鱼类志》^[17] 进行种类鉴定与生物学测定,逐尾测定体长及体重。

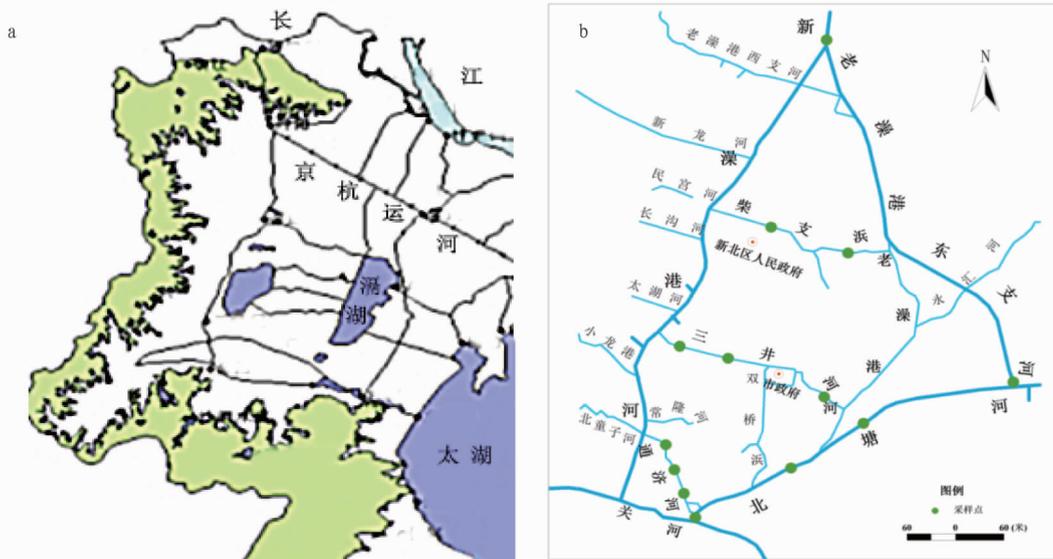


图 1 常州市新北区区位 (a) 及鱼类采样点设置 (b)

Fig.1 Location (a) and sampling sites (b) of fish in Xinbei District of Changzhou City

1.3 数据分析

1.3.1 生态型划分。对采集到的鱼类进行生态型划分,按其迁移的习性不同可分为定居型和河流洄游型 2 种类型;按其食性不同可划分为杂食性、植食性、肉食性和滤食性 4 种类型;按栖息水层不同可划分为中上层、中下层和底栖 3 种类型^[18]。

1.3.2 群落优势种。采用 Pinkas 相对重要性指数(index of relative importance, IRI)^[19] 对运北水系鱼类群落优势种进行度量,其计算公式如下:

$$\text{IRI} = (N+W) \times F \times 10^4 \quad (1)$$

式中, N 为某物中的数量占总数量的百分比, W 为某物种的重量占总重量的百分比, F 为此物种在调查中出现的次数占总调查次数的百分比。鱼类在群落中的重要性由相对重要性指数(IRI)来判定: $\text{IRI} > 1\ 000$ 为优势种; $1\ 000 > \text{IRI} > 100$ 为重要种; $100 > \text{IRI} > 10$ 为常见种; $10 > \text{IRI} > 1$ 为一般种; $\text{IRI} < 1$ 为少有种^[20]。

1.3.3 生物多样性。采用 Shannon-Wiener 多样性指数 (H')、Margalef 种类丰富度指数 (D)^[21] 和 Pielou 均匀度指数 (J)^[22] 分析常州市运北水系鱼类生物多样性。由于同种鱼类以及不同种鱼类个体间体型差异较大,因此 Shannon-Wiener 多样性指数 (H') 采用 Wilhm (1968 年) 改进的计算方法,即用生物量计算鱼类生物多样性指数,以便更接近种类间能量的分布^[23]。各计算公式分别如下:

$$H' = - \sum_{i=1}^S \left[\frac{W_i}{W} \right] \times \ln \left[\frac{W_i}{W} \right] \quad (2)$$

$$D = (S-1) / \ln S \quad (3)$$

$$J = H' / \ln S \quad (4)$$

式中, S 为鱼获物中物种的种类数, W_i 为第 i 种鱼类的重量之和, W 为样本中鱼类的总重量。

1.3.4 鱼类群落结构与水体主要污染物对应关系分析。利用典范对应分析(CCA)分析运北水系鱼类群落结构变化与水体主要污染物的对应关系,分析前对鱼类数据进行 $\log(x+1)$

1)转化^[24]。通过 Pearson 相关系数计算分析鱼类生物多样性指数与水体主要污染物的相关性。

数据统计与分析使用 Excel 2007 软件,利用 Origin 8.0 软件绘图,通过 CANOCO 5.0 软件、SPSS 20.0 统计软件分别进行 CCA 分析和 Pearson 相关系数计算。

2 结果与分析

2.1 鱼类种类组成和生态类型 8次调查在运北水系共采集到鱼类样本 617 尾,其中第I年 387 尾,隶属 2 目 3 科 11 属 15 种;第II年 230 尾,隶属 2 目 3 科 14 属 19 种。鲤科鱼类物种数最多,第I年 13 种,第II年 16 种,分别占各年总数的86.7%和 84.2%。各季节均有分布的是鲫,其次是贝氏鲮、鲮条、鳊(表 1)。

从鱼类迁移习性来看,运北水系以定居性鱼类为主(图

2a);第 I 年有 13 种,占总种数的 86.67%,第II年有 15 种,占总种数的 78.95%。从鱼类食性划分来看,运北水系以杂食性鱼类为主(图 2b);鲫、贝氏鲮、麦穗鱼、鲮条最为典型,第I年有 10 种,占总种数的 66.67%;第II年有 11 种,占总种数的 57.89%。从栖息水层来看,上、中、下水层均有鱼类分布,底栖鱼类种数呈现增加趋势(图 2c)。定居性杂食性鱼类是常州市运北水系鱼类的主体。

从调查结果来看,常州市运北水系渔获物共 617 尾,样本数量较少,主要是因为调查过程中鱼类样本采集自河流中上层,由于闸泵控制、水质污染、工程干扰导致多处采样点的渔获物数量仅为几条甚至没有。从渔获物组成来看,鱼类群落以定居性小型鱼类为主,这一结果与太湖流域鱼类物种组成的变化趋势相一致^[25]。

表 1 常州市运北水系鱼类种类组成

Table 1 Fish species composition in the north of canal river system in Changzhou City

编号* No.	目名 Order name	科名 Family name	种名 Species name	3Spr	3Sum	3Win	4Spr	5Spr	5Sum	5Win	6Spr
sp1	鲇形目	鲿科	黄颡鱼 <i>Pseudobagrus fulvidraco</i>						+	+	
sp2			乌苏里拟鲿 <i>Pseudobagrus ussuriensis</i>					+			
sp3	鲤形目	鲤科	棒花鱼 <i>Abbottina rivularis</i>				+				+
sp4			贝氏鲮 <i>Hemiculter bleekeri</i>	+++	+	+++	++	++	+		+
sp5			鳊 <i>Arabramis Pekinensis</i>	+	+	+		++	+	+	
sp6			鲮条 <i>Hemiculter leucisculus</i>	+	+	+++	+	++	+++		
sp7			草鱼 <i>Ctenopharyngodon idellus</i>							++	+
sp8			高体鳊 <i>Rhodeus ocellatus</i>	+							+
sp9			鲫 <i>Carassius auratus</i>	++	++	+++	+++	++	++	++	++
sp10			鲤 <i>Cyprinus carpio</i>		+			+	+		+
sp11			鲢 <i>Hypophthalmichthys molitrix</i>							+	+
sp12			麦穗鱼 <i>Pseudorasbora parva</i>	+		++	+	+			
sp13			鳊 <i>Rhodeinae</i>				+				+
sp14			翘嘴鲌 <i>Culter alburnus</i>		+						
sp15			翘嘴红鲌 <i>Erythroculter ilishaeformis</i>				+				
sp16			青鱼 <i>Mylopharyngodon piceus</i>		+	+	+				+
sp17			似鳊 <i>Pseudobrama simoni</i>						+		
sp18			银鲫 <i>Carassius auratus gibelio</i>					+			
sp19			鳊 <i>Aristichthys nobilis</i>					+			+
sp20			长蛇鮈 <i>Saurogobio dumerili</i>			+					
sp21			中华鳊 <i>Rhodeus sinensis</i>					+			
sp22		鳅科	大鳞副泥鳅 <i>Paramisgurnus dabryanus</i>								+
sp23			泥鳅 <i>Cyprinus carpio</i>	+							
sp24	鲈形目	塘鳢科	黄黝 <i>Hypseleotris swinhonis</i>				+				

注: * 表示物种编号用于典范对应分析(CCA);+++ 表示数量>30尾,++ 表示 20尾≤数量≤30尾,+ 表示数量≤20尾

Note: * indicated that species number was used for canonical correspondence analysis (CCA); +++ indicated the fish number was more than 30 tails, ++ indicated the fish number was between 20-30 (inclusive) tails, and + indicated the fish number was less than or equal to 20 tails

2.2 鱼类生态优势度 在 2 年的调查中,鱼获物多为中小型鱼类。根据 IRI 计算结果,运北水系鱼类优势种和重要种组成情况如表 2 所示。由表 2 可知,第I年,优势种为鲫、贝氏鲮、鲮条、麦穗鱼,其数量占总数量的 92.71%;重要种为鳊和青鱼,其数量之和占总数量的 3.12%。第II年,优势种为鲫、鲮条、鳊、草鱼,其数量占总数量的 90.43%;重要种为贝氏鲮、鲤,其数量占总数量的 11.31%。优势种在各次调查中均占有一定的优势,但在组成上存在差异,其中鲫作为最优势种,

在 2 年的调查中分别占总数量的 36.46%和 36.96%,占总渔获量的 69.50%和 39.53%,在 8 次采样调查中均处于第一优势种。除了鲫和鲮条,其他优势种都有不同程度的变化,其中草鱼在第I年的调查中未出现,在第II年中处于优势种地位。在 2 年的调查中广布种为鲫、贝氏鲮、鲮条和鳊,出现频率均在 60%以上,麦穗鱼为第I年的广布种,第II年只在春季的骨干河出现过。

在种属组成上,鲤科鱼类占绝对优势,这也是我国内陆

主要水域鱼类组成的共同特点^[26]。在 2 年 8 次采样调查,共捕获鱼类 24 种,与 2012 年调查结果^[12]相比,鱼类组成发生了变化,且优势物种组成单一,常见种乌鳢和稀有种黄鳝在 8

次调查中均未出现;鲤和中国“四大家鱼”以及鳊比例上升,贝氏鲮在第 II 年的调查中比例有所下降,由优势种变为重要种;鲫、鳊依然是优势种。

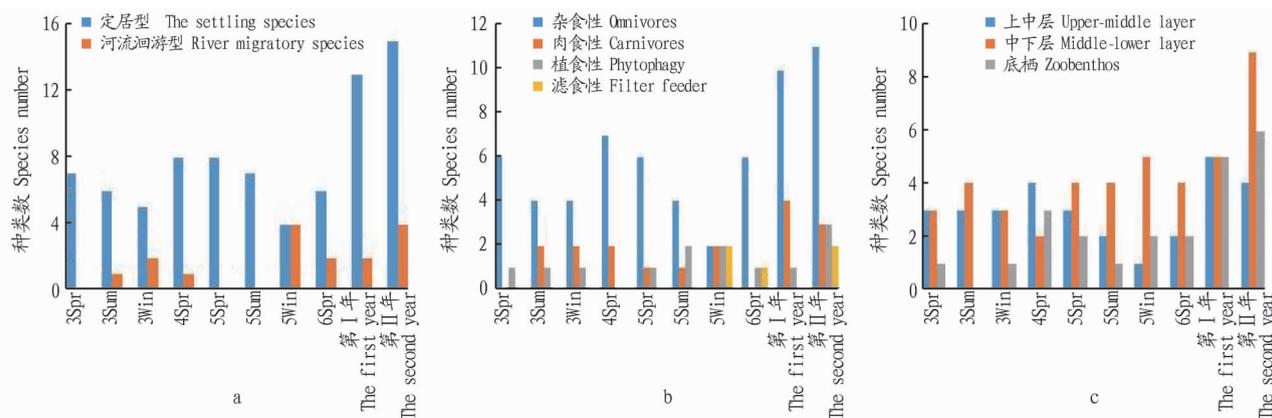


图 2 常州市运北水系鱼类生态型分布

Fig.2 The ecotype distribution of fish in the north of canal river system in Changzhou City

表 2 常州市运北水系鱼类优势种和重要种

Table 2 Dominant species and important species of fish in the north of canal river system in Changzhou City

序号 No.	优势种 Dominant species	IRI		N//%		W//%		F//%	
		第 I 年 The first year	第 II 年 The sec- ond year	第 I 年 The first year	第 II 年 The sec- ond year	第 I 年 The first year	第 II 年 The sec- ond year	第 I 年 The first year	第 II 年 The sec- ond year
1	鲫	10 595.78	7 648.27	36.46	36.96	69.50	39.53	100	100
2	贝氏鲮	4 338.61	711.79	34.11	9.57	9.27	2.30	100	60
3	鳊	1 855.85	2 767.10	13.80	26.52	4.76	8.07	100	80
4	麦穗鱼	1 119.59	10.44	8.33	0.43	2.86	0.09	100	20
5	鳊	339.05	2 277.75	2.34	10.00	3.31	12.78	60	100
6	鲤	135.55	692.98	0.26	1.74	6.52	15.59	20	40
7	青鱼	107.15	20.19	0.78	0.43	1.90	0.57	40	20
8	草鱼	—	1 126.58	—	7.39	—	11.38	—	60
9	鲢	—	145.38	—	0.87	—	2.76	—	40
10	鳙	—	194.24	—	0.87	—	3.99	—	40

注: N 为数量与总数量的比值; W 为重量之和与总重量的比值; F 为出现频率; “—” 表示此次调查中未出现

Note: N stands for the ratio of the fish number to the total fish number; W stands for the ratio of the fish weight to the total weight; F stands for the frequency of occurrence; “—” indicated that this species was not found in this survey

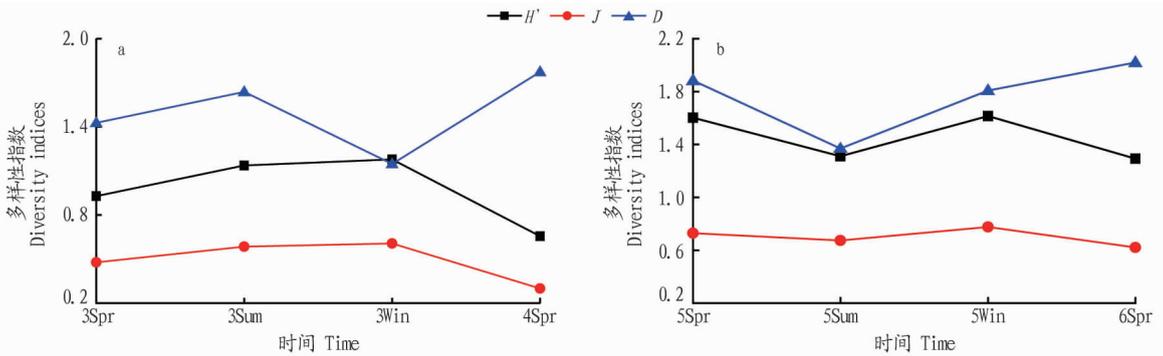
2.3 群落多样性的变化 常州市运北水系第 I 年鱼类多样性指数 (H') 值变动范围为 0.65~1.18, 丰富度指数 (D) 值为 1.15~1.64, 均匀度指数 (J) 值为 0.30~0.61, H' 和 J 值在 2013 年冬季最高, 2014 年春季最低; D 值在 2014 年春季最高, 2013 年冬季最低 (图 3a)。第 II 年鱼类 H' 值为 1.29~1.61, D 值为 1.37~2.02, J 值为 0.62~0.78, H' 和 J 值在 2015 年冬季最高, 2016 年春季最低, 与第 I 年结果一致; D 值在 2016 年春季最高, 2015 年夏季最低 (图 3b)。在 2 年的调查中, 第 II 年的鱼类多样性指数 (H')、丰富度指数 (D) 和均匀度指数 (J) 均高于第 I 年调查结果。从鱼类多样性指数 (H') 评价水质的标准来看 ($H' > 3$ 代表无污染, H' 为 2~3 代表轻度污染, H' 为 1~2 代表中度污染, H' 为 0~1 代表重污染, H' 为 0 代表严重污染)^[27], 运北水系的水质除 2013 年和 2014 年春季为重度污染, 其他 6 次调查时均维持在中度污染范围内。

鱼类多样性指数是从种群个体数的均匀性和种群数量 2 个方面衡量群落结构, 能够反映群落结构的稳定性^[28]。群

落中物种越丰富, 各种类个体数分布越均匀, 多样性指数越高, 均匀性指数越高^[29]。鱼类种群结构及物种多样性可以直接反映水体的人为影响和污染状况, 河流的生态环境及人类的活动会影响鱼类的生物多样性^[30]。鱼类的 Shannon-Wiener 多样性指数 (H')、Margalef 种类丰富度指数 (D) 和 Pielou 均匀度指数 (J) 第 II 年调查结果是第 I 年调查结果的 1.2~1.5 倍, 其中 H' 的升高体现了水质的改善, 运北水系仍处于中度污染状态, 但总体上表现出转好趋势。冬季时鱼类群落的 H' 值和 J 值相对较高, 群落结构复杂且稳定, 个体分布较均匀, 渔获物较多, 这与徐东坡等^[31]研究太湖的鱼类变化趋势一致, 这与鱼类自身的周期生活史 (如繁殖、洄游、死亡等) 密切相关, 鱼类的繁殖会增加鱼类的自然增长率, 补充鱼类群体数量; 鱼类的洄游通过改变栖息地引起局域内鱼类群落结构的变化等^[32-34]。运北水系内大部分鱼类的繁殖期为春夏季, 秋季有大量的新个体加入, 增加了鱼类的丰富度, 冬季水温的降低, 水体营养物质的贫乏会使冬季鱼类的丰富

度下降,但因人为捕捞、水体污染、阶段性的清淤换水工程建设等,干扰了鱼类群体自然状态下的季节变化,例如2015年

夏季的河道清淤工程导致鱼类多样性相比春季有所降低。



注:a.第I年;b.第II年

Note:a.The first year;b.The second year

图3 常州市运北水系鱼类多样性指数的变化

Fig.3 Changes of fish diversity indices in the north of canal river system in Changzhou City

2.4 鱼类群落结构与水体主要污染物的关系

2.4.1 鱼类物种分布与水体主要污染物的典范对应分析(CCA)。由图4可以看出,水体主要污染物集中在第二象限中, NO_3^- -N、TP对第一轴的贡献率较大,TN、 NH_3 -N对第二轴的贡献率较大。鲫、贝氏鲮、棒花鱼、鳊集中在中心附近位置,其分布受主要污染物的影响较小;鲢、麦穗鱼与 NH_3 -N、TN呈微弱的正相关关系;乌苏里拟鲮、银鲫分布在 NO_3^- -N、TP的正上方能够耐受较高浓度的 NO_3^- -N和TP;大部分鱼类的分布与 NH_3 -N、 NO_3^- -N、TN、TP呈负相关关系。

以上试验结果表明,鲫、贝氏鲮、棒花鱼、鳊受N、P的影响较小,这类鱼的生存能力极强,具有较高的繁殖能力,常被视为耐污性鱼类^[35]。鲢、麦穗鱼与 NH_3 -N、TN浓度呈微弱的正相关关系,鲢主要滤食浮游动植物,麦穗鱼主要滤食藻类^[36-37], NH_3 -N和TN在一定程度上有利于浮游藻类的生长^[38],从而促进浮游动物的生长,为鲢、麦穗鱼提供饵料,进而影响其分布。乌苏里拟鲮、银鲫的分布与 NO_3^- -N、TP的浓度具有较大的正向相关性,但2种鱼类均只在调查中出现1次,且只有一条,对鱼类群落结构的影响很小。

2.4.2 鱼类群落多样性与主要污染物的Pearson相关性分析。运北水系鱼类群落多样性指数与主要污染物的Pearson相关性分析结果见表3。由表3可知,鱼类的Shannon-Wiener多样性指数(H')与 NH_3 -N呈极显著负相关($P_{\text{NH}_3\text{-N}} = 0.009$),与TN和TP浓度呈显著负相关($P_{\text{TN}} = 0.036$, $P_{\text{TP}} = 0.012$);与 NO_3^- -N浓度呈显著正相关($P_{\text{NO}_3\text{-N}} = 0.043$)。Pielou均匀度指数(J)与 NH_3 -N、TP浓度呈显著负相关($P_{\text{NH}_3\text{-N}} = 0.014$, $P_{\text{TP}} = 0.015$),与TN浓度呈负相关($P_{\text{TN}} = 0.083$);与 NO_3^- -N浓度呈显著正相关($P_{\text{NO}_3\text{-N}} = 0.011$)。Margalef丰富度指数(D)与TP浓度呈极显著负相关($P_{\text{TP}} = 0.008$),与 NH_3 -N和TN浓度呈显著负相关($P_{\text{NH}_3\text{-N}} = 0.024$, $P_{\text{TN}} = 0.011$); D 与 NO_3^- -N浓度呈正相关,但未达到显著水平($P_{\text{NO}_3\text{-N}} = 0.453$)。因此,运北水系水体主要污染物对鱼类

群落结构的影响较大,高浓度的 NH_3 -N、TN、TP会导致鱼类多样性的降低。这说明河流的水质情况对河流鱼类的物种组成和数量产生影响。Lima-Junior等^[39]对巴西河流鱼类群落结构与水污染关系的研究中也得到了相似的结论。

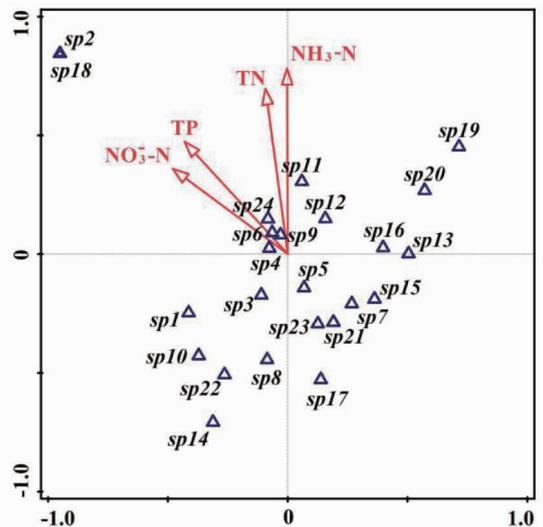


图4 鱼类物种分布与水体主要污染物的典范对应分析排序图

Fig.4 CCA ordination diagrams of fish species distribution and main water pollutants

大量研究表明,鱼类群落结构的变化受到多种环境因素的影响,例如鱼类自身的周期生活史(如繁殖、洄游、死亡等),也会影响城市河道鱼类的群落结构组成及数量,进而影响鱼类的多样性。自然状态下的河流系统的水文条件如水温、水位等,受季节的降水补给影响明显,因而具有季节动态变化^[40],这必然会影响到局域内鱼类的物种组成和数量^[41-42]。城市河流受人工闸泵调控,水文的季节变化则会受到影响,进而影响鱼类的群落结构。运北水系清淤换水工程等人类活动对鱼类栖息环境造成干扰,河道多为水泥质岸坡,原有的水生植被受到损害,生境趋于单一,鱼类多样性偏低。

表 3 鱼类多样性指数与主要污染物的 Pearson 相关系数

Table 3 Pearson correlation coefficients between fish diversity indices and main pollutants

指数 Index	NH ₃ -N	NO ₃ ⁻ -N	TN	TP	H'	J	D
NH ₃ -N	1	-0.345	0.790**	0.921**	-0.524**	-0.495*	-0.460*
NO ₃ ⁻ -N		1	0.118	-0.306	0.417*	0.510*	0.161
TN			1	0.802**	-0.429*	-0.361	-0.507*
TP				1	-0.503*	-0.489*	-0.531**
H'					1	0.824**	0.613**
J						1	0.297
D							1

注: * 表示显著相关 (双侧) ($P < 0.05$); ** 表示极显著相关 (双侧) ($P < 0.01$)

Note: * indicated significant correlation at 0.05 level (both sides); ** indicated extremely significant correlation at 0.01 level (both sides)

3 结论

常州市运北水系鱼类群落结构及其多样性具有显著的季节动态和年际变化,主要受人类活动干扰(筑坝清淤、换水补水等)引起的水文和水质的变化以及鱼类自身生活史(洄游、繁殖、自然死亡等)的影响。

运北水系共采集到鱼类样本 617 尾,以定居性中小型鱼类为主。其中,第 I 年 387 尾,隶属 2 目 3 科 11 属 15 种,优势种为鲫、贝氏鲃、麦穗鱼;第 II 年 230 尾,隶属 2 目 3 科 14 属 19 种,优势种为鲫、鲃、鳊、草鱼。优势种组成发生变化,鲫为 2 年的最优势种,对群落结构的稳定具有重要作用。第 II 年的多样性指数 (H')、丰富度指数 (D)、均匀度指数 (J) 均高于第 I 年,侧面反映出运北水系经治理水质得到了改善。运北水系水体主要污染物 NH₃-N、NO₃⁻-N、TN、TP 对鱼类群落结构产生重要影响,除鲫、贝氏鲃、棒花鱼、鳊受其影响较小外,其他鱼类趋向于分布在污染物 N、P 浓度低的区域,且 NH₃-N、TN、TP 浓度过高会导致鱼类群落多样性、均匀度以及丰富度的降低。

随着运北水系水质的改善,鱼类群落的丰富度和多样性增加,但依然面临着环境的危害,例如水利工程导致的生态环境的碎片化、鱼类洄游路径阻断以及水质污染等问题,生态恢复设施建设显得尤为重要。

参考文献

[1] 常州[EB/OL]. [2019-10-15]. <https://baike.baidu.com/item/%E5%B8%B8%E5%B7%9E/171784?fr=aladdin>.

[2] 张文艺,孙玲玲,滕加泉,等.加工工业城市-常州市水环境污染分析[J].中国农村水利水电,2010(5):14-17.

[3] 叶富良.鱼类生态学[M].广州:广东高等教育出版社,2002.

[4] SENAY C, TARANU Z, BOURQUE G, et al. Effects of river scale flow regimes and local scale habitat properties on fish community attributes[J]. Aquatic sciences, 2017, 79(1): 13-26.

[5] ADRIÁN R M, JOSÉ P. The ecological and conservation status of the Guadalquivir river basin (s Spain) through the application of a fish-based multimetric index[J]. Ecological indicators, 2018, 84: 45-59.

[6] BARBOUR M T, GERRISEN J, SYNDER B D, et al. Rapid bioassessment protocols for use in streams and wadeable rivers: Periphyton, benthic macroinvertebrates and fish[M]. 2nd Edition. Washington DC: US Environmental Protection Agency, Office of Water, 1999: 1-10.

[7] 廖述善. 鱼的死因与环境管理——常州市二十三起死鱼事件的初步调查剖析[J]. 中国环境管理, 1987(1): 36, 44.

[8] 章敏, 周凤帆, 丁树荣. 常州市主要工业废水和两种有机毒物对罗非鱼外周血红细胞的微核效应[J]. 南京大学学报, 1988, 24(3): 562-568.

[9] 周凤帆, 章敏, 丁树荣, 等. 常州市主要工业废水及四种有机毒物对白鲢 (*Hypophthalmichthys molitrix*) 的急性毒性[J]. 南京大学学报, 1989, 25(3): 98-104.

[10] 章敏, 周凤帆, 丁树荣. 白鲢 (*Hypophthalmichthys molitrix* Cuvier et Valencienns) 对常州市主要工业废水及部分有机毒物的回避反应[J]. 南京大学学报, 1989, 25(4): 689-695.

[11] 秦安龄, 袁传忠, 周宗汉. 水质污染对京杭大运河(常州市段)鱼类资源的影响[J]. 南京大学学报, 1988, 24(1): 97-107.

[12] 陈辉, 王继华, 刘翔, 等. 常州市城市内河常见鱼类资源及保护的研究[J]. 中国农学通报, 2013, 29(32): 66-70.

[13] 高永年, 高俊峰. 太湖流域水生态功能分区[J]. 地理研究, 2010, 29(1): 111-117.

[14] 李娟英, 曹宏宇, 崔昱, 等. 太湖流域主要水系水环境特征分析与富营养化评价[J]. 水生态学杂志, 2012, 33(4): 7-13.

[15] 张觉明, 何志辉. 内陆水域渔业自然资源调查手册[M]. 北京: 农业出版社, 1991: 1-461.

[16] 倪勇, 伍汉霖. 江苏鱼类志[M]. 北京: 中国农业出版社, 2006.

[17] 倪勇, 朱成德. 太湖鱼类志[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2005.

[18] 林小植, 李冬梅, 刘焕章, 等. 广东韩江潮州江段鱼类多样性及季节变化[J]. 生物多样性, 2016, 24(2): 185-194.

[19] PINKAS L, OLIPHANT M S, IVERSON I L K. Food habits of albacore, bluefin tuna, and bonito in California waters[J]. Fish bulletin, 1971, 152: 1-105.

[20] 吕振波, 李凡, 王波, 等. 黄海山东海域春、秋季鱼类群落结构[J]. 水产学报, 2011, 35(5): 692-699.

[21] MARGALEF D R. Information theory in ecology[J]. International journal of general systems, 1958, 3(1): 36-71.

[22] PIELOU E C. Ecological diversity[M]. New York: John Wiley and Sons, 1975.

[23] WILHM J L. Use of biomass units in Shannon's formula[J]. Ecology, 1968, 49: 153-156.

[24] 王晓宁, 彭世贤, 张亚, 等. 滦河流域鱼类群落结构空间异质性与影响因素分析[J]. 环境科学研究, 2018, 31(2): 273-282.

[25] 毛志刚, 谷孝鸿, 曾庆飞, 等. 太湖渔业资源现状(2009-2010年)及与水体富营养化关系浅析[J]. 湖泊科学, 2011, 23(6): 967-973.

[26] 陈宜瑜. 中国动物志·硬骨鱼纲·鲤形目(中卷)[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 19-444.

[27] ROMMENS W, MAES J, DEKEZA N, et al. The impact of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) in a eutrophic subtropical impoundment (Lake Chivero, Zimbabwe). I. Water quality[J]. Archiv fur hydrobiologie, 2003, 158(3): 373-388.

[28] 李明德. 鱼类生态学[M]. 天津: 南开大学生物系, 1990: 279-282.

[29] LIMA A C, WRONA F J, SOARES A M V M. Fish traits as an alternative tool for the assessment of impacted rivers[J]. Reviews in fish biology and fisheries, 2017, 27(1): 31-42.

[30] LIU X J, AO X F, NING Z T, et al. Diversity of fish species in suichuan river and shushui river and conservation value, China[J]. Environmental biology of fishes, 2017, 100(5): 493-507.

[31] 徐东坡, 杨彦平, 周彦锋, 等. 太湖水域鮡亚科鱼类的时空分布[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(2): 371-379.

[32] WELCOMME R L. The biology and ecology of the fishes of a small tropical stream[J]. Journal of zoology, 1969, 158: 485-529.

[33] 王文剑, 储玲, 司春, 等. 秋浦河源国家湿地公园溪流鱼类群落的时空格局[J]. 动物学研究, 2013, 34(4): 417-428.

[34] 朱仁, 司春, 储玲, 等. 基于栖息地斑块尺度的青弋江河源溪流鱼类群落的时空格局[J]. 水生生物学报, 2015, 39(4): 686-694.

图像流式细胞仪首次以精确的定量标准将甲壳动物血细胞清晰分为 4 类, 各类细胞的体积呈现出与该研究一致的由 R1 类型向 R4 类型逐渐增大的变化趋势。微球吞噬试验结果显示, 各类细胞均具有吞噬功能, 而面无颗粒及小颗粒细胞为主要吞噬类群。该研究首次将新型流式细胞仪引入贝类血细胞分析, 用侧向散射强度和面积差异区分出了 4 种血细胞, 边界清晰。对比甲壳动物的血细胞图像流式分析可见, 基于血蓝蛋白携氧的多种无脊椎动物的血细胞都能够以侧向散射强度和面积差异分为 4 个类群, 而且散点图的设门模式十分接近, 提示不同进化阶段的物种之间在血细胞功能方面也应具有一定的相似性。此外, 就某一动物而言, 其血细胞的 4 个类群之间普遍缺乏过渡样点, 也进一步提示细胞类群之没有相互转化, 至少在外周血中彼此独立, 每种细胞具有明确的功能。例如, 无颗粒细胞以其较为疏松的胞质空间承载吞噬的异物, 而各种颗粒细胞则生成特定的功能分子, 储存于颗粒结构中, 或以量化的方式分泌到循环系统, 调节各类血细胞和机体的功能。

目前, 针对多种贝类的血细胞分类的研究结果存在一些差异, 一方面是各种血细胞的比例在不同贝类中不同; 另一方面是因为针对同一种贝类的血细胞类群组成, 采用不同分析方法所获得的结果也不尽相同。前者体现了物种差异及动物与所在环境的适应关系等, 而后者则提示各种方法依据不同的特征差异都可对血细胞进行区分, 但以更精准的量化标准作为分类依据才能让各项研究具有可比性, 从而挖掘出更准确的规律。这一点在医学血液学分类研究中最为明显, 从早期仅能简单区分红细胞与白细胞, 到现今依靠各种细胞分化抗原辨识更为精细的细胞类群, 经历了长时间的发展完善, 并推动了免疫细胞功能研究的持续深入, 为疾病的检测、预防和治疗提供了基础性的支撑。因此, 随着新技术与新方法的不断完善, 贝类血细胞会有更多类群被鉴定出来, 该研究在自动化定量分类方面提供了一种新的策略, 有助于推动该目标的实现。

参考文献

- [1] 韩令. 五种帘蛤科贝类的核糖体基因簇比较与系统发育研究[D]. 济南: 山东大学, 2019.
- [2] 孙敬锋, 吴信忠. 贝类血细胞及其免疫功能研究进展[J]. 水生生物学报, 2006, 30(5): 101-107.
- [3] TISCAR P G, MOSCA F. Defense mechanisms in farmed marine molluscs[J]. Veterinary research communications, 2004, 28: 57-62.
- [4] 吴宁, 陈梦玫, 王素芳. 贝类免疫机制的研究进展[J]. 药物生物技术,

- 2017, 24(1): 68-71.
- [5] 石安静, 邱安东, 唐敏, 等. 圆背角无齿蚌血细胞培养[J]. 水生生物学报, 2001, 25(2): 116-122.
- [6] 吴刚, 张志江, 黄亚冬, 等. 贝类血细胞分类及其功能研究进展[J]. 河北渔业, 2018(4): 52-55.
- [7] CHANG S J, TSENG S M, CHOU H Y. Morphological characterization via light and electron microscopy of the hemocytes of two cultured bivalves: A comparison study between the hard clam (*Meretrix lusoria*) and Pacific oyster (*Crassostrea gigas*) [J]. Zoological studies, 2005, 44(1): 144-152
- [8] 刘东武, 王宜艳, 孙虎山. 菲律宾蛤仔、中国蛤蜊、文蛤和紫石房蛤血细胞的分类研究[J]. 水产科学, 2005, 24(10): 5-7.
- [9] ZHANG Y Y, REN S L, WANG D X, et al. Structure and classification of haemocytes in the bivalve mollusc *Meretrix meretrix* [J]. Journal of Ocean University of China, 2006, 5(2): 132-136.
- [10] 王文琪, 徐申波, 张玉娜, 等. 菲律宾蛤仔 (*Ruditapes philippinarum*) 血细胞分类及其功能初探[J]. 莱阳农学院学报(自然科学版), 2006, 23(3): 165-169.
- [11] 叶燕玲, 陈宽智. 中国对虾 (*PENAEUS CHINENSIS*) 血细胞超微结构、分类及计数[J]. 青岛海洋大学学报, 1993, 23(2): 35-42.
- [12] DING Z F, DU J, OU J T, et al. Classification of circulating hemocytes from the red swamp crayfish *Procambarus clarkii* and their susceptibility to the novel pathogen *Spiroplasma eriocheiris in vitro* [J]. Aquaculture, 2012, 356/357: 371-380.
- [13] GIULIANINI P G, BIERTI M, LORENZON S, et al. Ultrastructural and functional characterization of circulating hemocytes from the freshwater crayfish *Astacus leptodactylus*: Cell types and their role after in vivo artificial non-self challenge[J]. Micron, 2007, 38(1): 49-57.
- [14] LV S J, XU J H, ZHAO J, et al. Classification and phagocytosis of circulating hemocytes in Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*) and the effect of extrinsic stimulation on circulating hemocytes in vivo [J]. Fish & shellfish immunology, 2014, 39(2): 415-422.
- [15] 晋伟, 刘逸尘, 张树花, 等. 鱼类血细胞研究进展[J]. 安徽农业科学, 2018, 46(12): 27-30.
- [16] 潘辉, 高如承, 吴丽云, 等. 利用流式细胞术研究 3 种贝类的血细胞分类[J]. 福建师范大学学报(自然科学版), 2011, 27(4): 127-130.
- [17] 谢彦海, 胡宝庆, 文春根. 利用相差显微镜和流式细胞术分析褶纹冠蚌血细胞类型[J]. 南昌大学学报(理科版), 2010, 34(2): 180-184.
- [18] ALLAM B, ASHTON-ALCOX K A, FORD S E. Flow cytometric comparison of haemocytes from three species of bivalve molluscs [J]. Fish & shellfish immunology, 2002, 13(2): 141-158.
- [19] 许秀芹, 王宜艳, 孙虎山. 流式细胞术比较研究 4 种双壳贝类血细胞的种群[J]. 海洋湖沼通报, 2006(1): 46-50.
- [20] YANG H S, HONG H K, DONAGHY L, et al. Morphology and Immune-related activities of hemocytes of the mussel *Mytilus coruscus* (Gould, 1861) from East Sea of Korea [J]. Ocean science journal, 2015, 50(1): 77-85.
- [21] HONG H K, DONAGHY L, CHOI K S. Flow cytometric studies on the morphology and immunological functions of hemocytes in the Iwagaki oyster *Crassostrea nippona* [J]. Fisheries science, 2014, 80(5): 969-976.
- [22] GOEDKEN M, DE GUISE S. Flow cytometry as a tool to quantify oyster defence mechanisms [J]. Fish & shellfish immunology, 2004, 16(4): 539-552.
- [23] 胡锦涛, 刘逸尘, 任星潮, 等. 图像辅助流式细胞仪在中华绒螯蟹血细胞分析中的应用[J]. 安徽农业科学, 2018, 46(24): 145-148, 204.
- [24] 胡锦涛, 任星潮, 刘逸尘, 等. 图像流式细胞仪在中华绒螯蟹血细胞种群及吞噬功能研究中的应用[J]. 水产学报, 2019, 43(3): 563-572.

(上接第 97 页)

- [35] 张世义, 伍玉明. 水环境质量的常见指示鱼类[J]. 生物学通报, 2005, 40(4): 25-27.
- [36] 杨瑞斌, 边书京, 周洁, 等. 梁子湖麦穗鱼食性的研究[J]. 华中农业大学学报, 2004, 23(3): 331-334.
- [37] 李倩倩, 黄鹤忠, 张群英, 等. 东太湖不同水域浮游生物周年变化及鲢、鳙食性的研究[J]. 海洋科学, 2013, 37(10): 104-110.
- [38] 肖智顺, 林聪, 杨双, 等. 大庆新华湖藻类植物群落结构与环境因子的相关性[J]. 植物学报, 2016, 51(3): 353-362.
- [39] LIMA-JUNIOR S E, CARDONE I B, GOITEIN R. Fish assemblage structure and aquatic pollution in a Brazilian stream: Some limitations of diver-

- sity indices and models for environmental impact studies [J]. Ecology of freshwater fish, 2006, 15(3): 284-290.
- [40] ALLAN J D, CASTILLO M M. Stream ecology: Structure and function of running waters [M]. 2nd ed. Dordrecht: Springer, 2007.
- [41] GROSSMAN G D, MOYLE P B, WHITAKER J O, Jr. Stochasticity in structural and functional characteristics of an Indiana streamfish assemblage: A test of community theory [J]. The American naturalist, 1982, 120(4): 423-454.
- [42] MATTHEWS W J. Fish faunal "breaks" and stream order in the eastern and central United States [J]. Environmental biology of fishes, 1986, 17: 81-92.