DOI:10. 3880/j. issn. 1004 - 6933. 2020. 06. 006

黄河下游支流大汶河鱼类多样性及影响因子分析

郑从奇[1],武 玮[2],魏 杰[3],庄会波[1],桑国庆[2]

(1. 山东省水文局,山东 济南 250002; 2. 济南大学水利与环境学院,山东 济南 250022;
3. 大连海洋大学水产与生命学院,辽宁 大连 116023)

摘要:为了解黄河下游支流大汶河鱼类多样性及其与环境因子的关系,分别于 2017 年 4 月和 10 月对大汶河 24 个采样点进行鱼类及环境调查,采用冗余分析方法识别了影响大汶河鱼类个体数量和多样性指数的主要环境因子。结果表明:2017 年共采集到鱼类 8 299 尾,隶属于 4 目 16 科 25 种,其中鲤科鱼类共 15 种;鱼类多样性和均匀性较差,优势种以鲫(*Carassius auratus*)、鰲(*Hemiculter leucisclus*)和乌鳢(*Channa argus*)等耐受性较强的平原性鱼类为主;大汶河鱼类物种数量、生物量和多样性指数的季节性变化不显著,但是秋季个体数量显著大于春季;影响大汶河鱼类个体数量的主要环境因子是水深和河宽,而影响鱼类多样性指数的主要环境因子是 DO。

关键词:鱼类多样性;物种分布;环境因子;黄河下游;大汶河

中图分类号:X176 文献标志码:A 文章编号:1004 - 6933(2020)06 - 0031 - 08

Fish diversity and its influencing factors in the Dawen River, a tributary of the lower Yellow River // ZHENG Congqi[1], WU Wei[2], WEI Jie[3], ZHUANG Huibo[1], SANG Guoqing[2] (1. *Shandong Hydrology and Water Resources Bureau*, *Jinan* 250002, *China*; 2. *School of Water Conservancy and Environment*, *University of Jinan*, *Jinan* 250022, *China*; 3. *College of Fisheries and Life Science*, *Dalian Ocean University*, *Dalian* 116023, *China*)

Abstract: In order to understand the fish diversity and its relationship with environmental factors in the Dawen River, a tributary of the lower Yellow River, fish and environmental surveys were conducted at 24 sampling sites in April and October 2017, respectively. Redundancy analysis was used to identify the main influencing factors on the individual number and diversity index of fish in the Dawen River. The results showed that a total of 8 299 fish were collected in 2017, belonging to 25 species of 16 families and 4 orders, including 15 species of *Cyprinidae*. The diversity and evenness of fish were poor, and the dominant species were *Carassius auratus*, *Hemiculter leuciscus* and *Channa argus*. The seasonal variation of fish species number, biomass and diversity index was not significant, but the individual number in autumn was significantly higher than that in spring. Water depth and river width are the main environmental factors affecting the fish population in the Dawen River, while DO is the main environmental factor affecting fish diversity index.

Key words: fish diversity; species distribution; environmental factors; lower Yellow River; Dawen River

河流生态系统是人类社会文明发展的重要保障,伴随着人口增长和社会经济的快速发展,河流生态系统受到严重威胁,出现了生物多样性下降、生态系统服务功能丧失等问题[1-2]。生物多样性水平对提高生态系统应对极端气候变化的能力以及生态系统的稳定性具有重要作用[3]。鱼类作为河流水生态系统的重要组成部分,其物种多样性及组成结构的变化能够直接反映流域水生态健康状况[4]。在此背景下,了解鱼类多样性和群落结构特征,可为鱼类多样性保护以及河流生态系统管理提供一定的科学依据。

影响河流鱼类多样性及群落结构的环境因子较多,如水温会影响鱼类的繁殖及群落分布[5],季节性洪水会改变鱼类的栖息地环境[6],水文条件的改变不仅会影响河流鱼类群落结构时空分布的变化,还会降低鱼类物种多样性和个体丰度[7]。但对于不同河流,由于自然地理位置、流域特性等不同,影响鱼类多样性的关键环境因子存在差异,识别影响

基金项目:山东省第三次水资源调查评价水量水生态专题(250017001201900009_001);山东省省级水利科研与技术推广项目(SDSLKY201602)
作者简介:郑从奇(1986—),男,工程师,硕士,主要从事水文学及水资源研究。E-mail: zhengcongqi@126. com
通信作者:武玮,副教授。E-mail: stu_wuw@ujn. edu. cn

鱼类多样性的驱动因子是实现鱼类多样性保护的关键。大汶河是黄河下游最大的支流，是泰安与莱芜城市发展的重要保障，社会经济的飞速发展对大汶河造成了巨大的生态压力，包括河流流量锐减、有机污染及富营养化、河流连通性丧失等[8]，大汶河鱼类资源的多样性及水生态系统健康受到了严重威胁[9]。目前，针对大汶河鱼类群落结构的调查与研究还比较缺乏，了解人类活动干扰下大汶河鱼类多样性特征是流域生物多样性保护及生态系统修复的重要前提。本研究基于 2017 年 4 月和 10 月在 24 个采样点的鱼类调查数据，分析了大汶河鱼类物种组成及多样性特征，识别了影响鱼类个体数量和多样性的主要驱动因子，以期为大汶河生态系统恢复与多样性保护提供一定的参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

大汶河发源于泰莱山区，汇集了泰山山脉以南、蒙山山脉以北的各支流，自东向西流经莱芜、新泰、泰安、肥城和宁阳等县市，由东平县马口注入东平湖，后经东平湖清河门出湖闸入黄河。大汶河干流长 208 km，流域面积为 9069 km^2，是黄河下游最大的一条支流。大汶河流域多年平均气温为 12 ~ 14 ℃，多年平均降水量为 727.9 mm，降水量年内分配不均，其中汛期 6—9 月降水量达到 529.8 mm，占全年降水量的 73%[10]。大汶口以上分为南北两大支流，南支支流仅有一条，名为大汶河南支，北支支流较多，主要有瀛汶河、石汶河、泮汶河等，汇河是大汶口以下的最大支流，此外还有海子河、小汇河等。

1.2 鱼类采集方法

在大汶河干流、主要支流及支流汇入干流前后分别设置采样点，共 24 个采样点，其中大汶河干流设置 12 个采样点，大汶河南支、瀛汶河和汇河 3 条主要支流分别设置 5 个、4 个和 3 个采样点（图 1）。采样分别于 2017 年 4 月（春季）和 10 月（秋季）进行。鱼类采用电鱼器采集，由一人采用背式电鱼器电鱼（电瓶：20 A，12 V；电鱼器：4 000 W），另一人负责用抄网收集样品，采集区域为各采样点上下游共 100 m 河长范围内，自下游往上游对包括急流区域、缓流区域、不同底质及水草丛生区等不同生境进行采集，采集时间为 30 min。标本采集后，对易于辨认和鉴定的物种进行现场鉴定，并分别记录其数量与重量。对于难以确认和未知物种，选取部分代表性个体加入 10% 甲醛固定后带回实验室鉴定。鱼类鉴定主要依据为《秦岭鱼类志》[11]和《黄河鱼类志》[12]。

1.3 环境数据获取

在进行鱼类采样的同时，对采样点流速、水深、水温、pH、DO、TN、TP 等环境因子进行测量。其中流速、平均水深采用流速仪（FP 111）现场测量，流量根据流速、水深和河宽采用流速面积法进行测算，河宽采用测距仪（Leupold RX-Ⅳ）测定。水温、pH、DO、电导率等水环境理化因子采用哈希多参数水质分析仪（HQ40d）现场测定。同时，现场采集水样 2.5L，置于 0 ~ 4 ℃恒温冷藏箱中保存，并于 48 h 内带回实验室测定 COD_{Cr}、COD_{Mn}、NH_3-N、TN 和 TP 质量浓度，指标测定方法参考 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》和《水与废水监测分析方法》[13]。

生境质量因子采用栖息地环境质量评价指标（qualitative habitat evaluation index，QHEI）表征，该指标借鉴美国 EPA 快速生物评价手册中的评价方法，并进行适当修改，分别从底质、栖境复杂性、速度和深度结合特征、堤岸稳定性、河道变化、河水水量

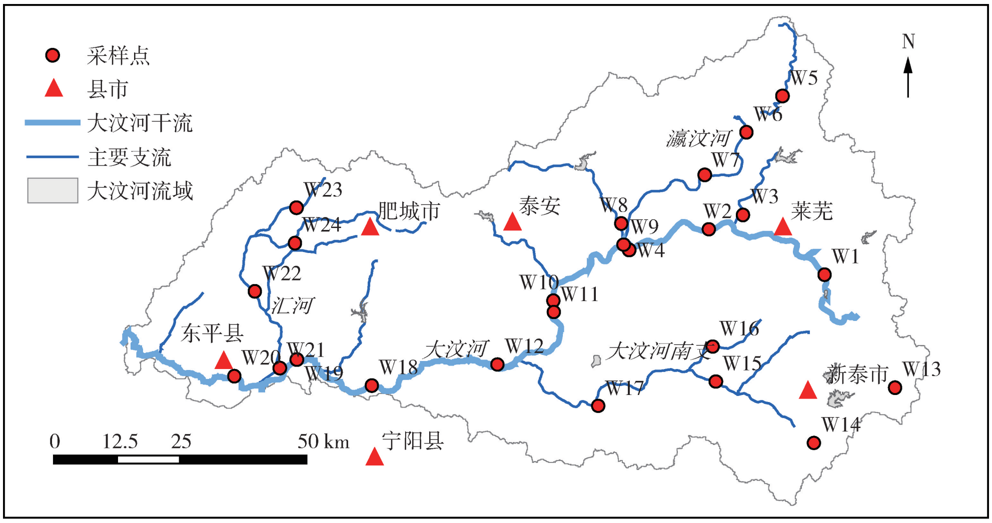


图 1　大汶河鱼类采样点分布

Fig. 1　Location of fish sampling sites in the Dawen River

状况、植被多样性、水质状况、人类活动强度和河岸土地利用类型 10 个方面进行评价。调查者根据采样点实际情况对每个指标进行现场打分，每个指标分为 4 个等级，其中 1 ~ 5 分为较差、6 ~ 10 分为一般、11 ~ 15 为较好、16 ~ 20 为健康，总分为 200 分。分数越高代表生境质量越好，所有点位的生境质量评分均由同一位调查者完成，以消除由于人为误差导致的评价结果不一致。

1.4　数据分析方法

1.4.1　物种多样性指数

鱼类物种多样性指数采用 Shannon-Weiner 多样性指数 H'、Pielou 均匀度指数 J'和 Margalef 丰富度指数 D[14]进行分析，其中 Shannon-Weiner 多样性指数和 Pielou 均匀度指数分别基于个体数量和生物量进行计算。计算公式分别为

$$H' = -\sum P_i \ln P_i \tag{1}$$

$$J' = H'/\ln S \tag{2}$$

$$D = (S-1)/\ln N \tag{3}$$

式中：P_i为第 i 种鱼类个体数量/生物量所占的比例；S 为种类数；N 为总尾数。

此外，采用单因素方差分析（ANOVA）检验季节对鱼类多样性指数的影响，包括物种数、个体数量、生物量、H'、J'和 D，以 $P<0.05$ 作为显著性水平。这些操作利用 SPSS 16.0 进行。

1.4.2　群落优势种

采用 Pinkas 等[15]提出的相对重要性指数（index of relative importance，IRI）进行大汶河鱼类群落结构优势种的划分，计算公式为

$$I_i = (N_i + W_i)F_i \tag{4}$$

式中：I_i 为第 i 种鱼的 IRI 值；N_i为第 i 种鱼的尾数占总尾数的百分比；W_i为第 i 种鱼的质量占总质量的百分比；F_i为第 i 种鱼的出现频率，即出现站点数占总采样站点数的百分比。本文将 $I \geqslant 500$ 的物种定义为优势种[16]，将出现频率大于 40% 的物种视为常见种，将出现频率在 10% ~40% 之间的视为偶见种，将出现频率小于 10% 的视为稀有种。

1.4.3　环境因子特征

影响鱼类分布的环境因子较多，首先对这些环境因子进行因子分析（principal component analysis，PCA），分析大汶河的主要环境问题，并识别可能影响鱼类群落的主要环境因子。因子分析前需对所有环境因子进行标准化。这些操作利用 SPSS16.0 进行。

1.4.4　鱼类群落结构、多样性与环境因子的关系

对各采样点鱼类个体数量和多样性指数进行除趋势对应分析（detrended correspondence analysis，DCA）后发现，第 1 轴梯度长度最大值均小于 3，因此选择线性模型排序更合适，其中鱼类个体数量和多样性指数均未考虑稀有种。将因子分析确定的主要环境因子与鱼类个体数量和多样性指数进行冗余分析（redundancy analysis，RDA），以确定鱼类个体数量和多样性指数与主要环境因子的关系。在进行 DCA、RDA 前，除 pH 外的所有环境因子和鱼类个体数量数据均进行对数数据转换。采用 Monte-Carlo 检验（$P<0.05$）筛选对鱼类个体数量和多样性指数解释率较高且显著的环境因子。这些操作利用 Canoco 5 进行[17]。

2　结果与分析

2.1　大汶河鱼类物种组成

经过调查，大汶河共采集鱼类样本 8 299 尾，隶属于 4 目 16 科 25 种（表 1）。其中，鲤形目鱼类物种数最多，共 17 种，占物种总数的 68%；其次是鲈形目，共 5 种，占物种总数的 20%；鲇形目和合鳃鱼目分别为 2 种和 1 种。从科级水平来看，鲤科种类最多，为 15 种；花鳅科 2 种；鲇科、鲿科、合鳃鱼科、斗鱼科、鮨鲈科、沙塘鳢科、虾虎鱼科和鳢科各 1 种。春季和秋季分别采集到鱼类物种 22 种和 19 种，均以鲤科鱼类物种最多，分别占物种总数的 59.1% 和 63.2%；花鳅科、鲿科、合鳃鱼科、沙塘鳢科、虾虎鱼科和鳢科等物种的分布存在略微差异。

2.2　优势种分析

优势种分析结果如表 1 所示，春季的优势种依次为鲫、乌鳢和䱗，其中，鲫的 IRI 值为 10 280.7，乌鳢的 IRI 值为 2 419.9，䱗的 IRI 值为 797.6。鲫、䱗、麦穗鱼和乌鳢出现频率大于 40%，为常见种，偶见种有 9 种，其余 9 种鱼类为稀有种，3 种鱼类未采集到标本。秋季的优势种依次为鲫、䱗和乌鳢，其中仍以鲫的 IRI 值最大，为 10 399.2，䱗的 IRI 值为 2 335.9，乌鳢的 IRI 值为 1 408.7。鲫、䱗、麦穗鱼、棒花鱼和乌鳢出现频率大于 40%，为常见种，偶见种有 9 种，其余 6 种鱼类为稀有种，5 种未采集到标本。

2.3　鱼类多样性变化

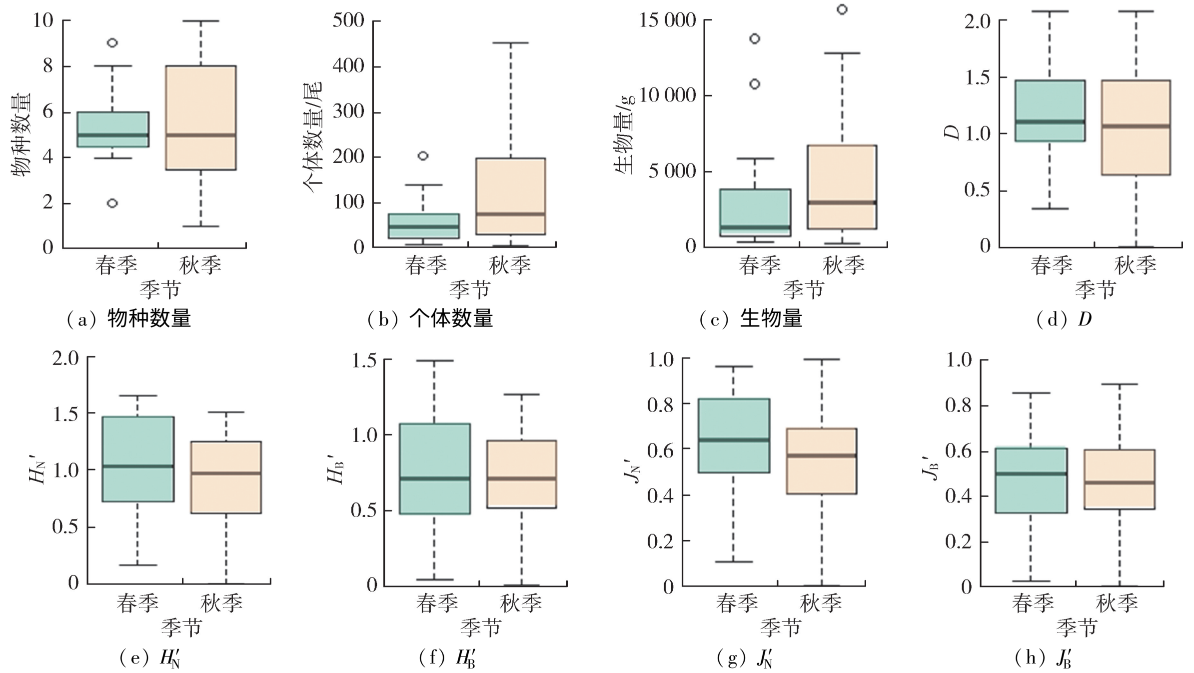
运用单因素方差分析检验季节对鱼类多样性的影响，并绘制春季与秋季鱼类多样性指数的箱体图（图 2）。据调查，春季共采集到鱼类个体 1 341 尾，生物量为 67 688 g；秋季共采集到个体 2 913 尾，生物量为 104 575 g。秋季个体数量多于春季，且存在显著的差异（$P<0.05$）；秋季的生物量同样高于春季，但是差异不显著（$P>0.05$）；秋季的物种数量与春季相差很小（$P>0.05$），但秋季物种数量变化较大。H'_N和 H'_B分别为基于鱼类个体数量和生物量计算的

表 1　大汶河鱼类物种组成

Table 1　Composition of fish species in the Dawen River

目	科	种	学名	代码	F/%		I	
					春季	秋季	春季	秋季
鲤形目	鲤科	鲤	*Cyprinuscarpio*	Sp1	16.7[s]	25.0[s]	93.8	394.9
	鲤科	鲫	*Carassius auratus*	Sp2	95.8[c]	100.0[c]	10 280.7[a]	10 399.2[a]
	鲤科	𩷶	*Hemiculter leucisclus*	Sp3	50.0[c]	66.7[c]	797.6[a]	2 335.9[a]
	鲤科	半𩷶	*Hemiculterella sauvagei*	Sp4	8.3[r]	8.3[r]	1.9	0.6
	鲤科	红鳍原鲌	*Cultrichthys erythropterus*	Sp5	37.5[s]	33.3[s]	350.6	138.8
	鲤科	马口鱼	*Opsariichthys bidens*	Sp6	33.3[s]	33.3[s]	81.6	115.1
	鲤科	草鱼	*Ctenopharyngodon idella*	Sp7	4.2[r]	4.2[r]	8.2	3.2
	鲤科	赤眼鳟	*Squaliobarbus curriculus*	Sp8	8.3[r]	0.0	5.0	0.0
	鲤科	鲢	*Hypophthalmichthys molitrix*	Sp9	0.0	0.1[r]	0.0	0.1
	鲤科	中华鳑鲏	*Rhodeus sinensis*	Sp10	12.5[s]	12.5[s]	4.8	3.1
	鲤科	高体鳑鲏	*Rhodeus ocellatus*	Sp11	0.0	12.5[s]	0.0	2.1
	鲤科	兴凯鱊	*Acheilognathus chankaensis*	Sp12	16.7[s]	29.2[s]	34.5	60.5
	鲤科	麦穗鱼	*Pseudorasbora parva*	Sp13	41.7[c]	54.2[c]	141.4	130.5
	鲤科	棒花鱼	*Abbottina rivularis*	Sp14	33.3[s]	41.7[c]	42.9	146.2
	鲤科	点纹银鮈	*Squalidus wolterstorffi*	Sp15	4.2[r]	0.0	0.3	0.0
	花鳅科	泥鳅	*Misgurnus anguillicaudatus*	Sp16	29.2[s]	16.7[s]	111.7	12.2
	花鳅科	中华花鳅	*Cobitis sinensis*	Sp17	4.2[r]	0.0	1.4	0.0
鲇形目	鲇科	鲇	*Silurus asotus*	Sp18	0.0	4.2[r]	0.0	0.7
	鲿科	黄颡鱼	*Pelteobagrus fulvidraco*	Sp19	4.2[r]	16.7[s]	0.4	5.5
合鳃鱼目	合鳃鱼科	黄鳝	*Monopterus albus*	Sp20	8.3[r]	8.3[r]	2.3	1.8
鲈形目	沙塘鳢科	小黄黝鱼	*Micropercops swinhonis*	Sp21	33.3[s]	0.0	35.4	0.0
	虾虎鱼科	褐吻虾虎鱼	*Rhinogobius brunneus*	Sp22	16.7[s]	33.3[s]	26.9	26.4
	斗鱼科	圆尾斗鱼	*Macropodus chinensis*	Sp23	4.2[r]	4.2[r]	0.3	0.3
	鮨鲈科	鳜	*Siniperca chuatsi*	Sp24	4.2[r]	0.0	2.4	0.0
	鳢科	乌鳢	*Channa argus*	Sp25	58.3[c]	54.2[c]	2 419.9[a]	1 408.7[a]

注：图中 r 表示稀有种，s 表示偶见种，c 表示常见种，a 表示优势种。



(a) 物种数量　(b) 个体数量　(c) 生物量　(d) D

(e) H_N'　(f) H_B'　(g) J_N'　(h) J_B'

图 2　大汶河春秋季鱼类多样性指数对比

Fig. 2　Comparison of diversity indices between spring and autumn in the Dawen River

Shannon-Weiner 多样性指数，J_N'和 J_B'分别为基于鱼类个体数量和生物量计算的均匀度指数。从图 2 中可以看出，春季的 H_N'、H_B'、J_N'、J_B'和 D 值均略大于秋季，但差异不显著($P>0.05$)，H_N'、H_B'、J_N'和 J_B'在秋季的空间分布均较为集中，但是秋季的 D 值空间分布较为离散。

2.4　环境因子特征分析

大汶河春、秋季的环境因子统计结果见表 2。由

表 2　大汶河春秋季环境因子统计结果

Table 2　Description result of environmental variables in Spring and Autumn in the Dawen River

季节	pH	ρ(DO)/(mg·L^{-1})	电导率/(μS·cm^{-1})	$\rho(COD_{Mn})$/(mg·L^{-1})	$\rho(COD_{Cr})$/(mg·L^{-1})	$\rho(NH_3\text{-}N)$/(mg·L^{-1})	ρ(TP)/(mg·L^{-1})
春季	8.54±0.47	10.56±2.67	1309.25±482.39	4.68±1.7	27.37±7.98	1.45±2.8	0.4±0.73
秋季	7.26±0.4	9.86±2.64	1243.63±587.21	6.57±2.96	58.42±31.04	0.48±0.39	0.38±0.95

季节	ρ(TN)/(mg·L^{-1})	QHEI	河宽/m	水深/m	流速/(m·s^{-1})	流量/(m^3·s^{-1})
春季	11.77±9.37	111.29±16.42	126.48±116.91	0.88±0.72	0.2±0.18	29.41±37.7
秋季	3.09±2.43	118.71±19.07	162.25±146.65	1.08±0.6	0.2±0.21	56.61±113.22

表 2 可以看出,大汶河春季 pH 值、DO 质量浓度和电导率均高于秋季,其中电导率整体偏高,春季和秋季均在 1 200 μs/cm 以上。依据 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》,春季流域 $\rho(COD_{Mn})$ 平均值小于秋季,水质类别分别为Ⅲ类和Ⅳ类;春季和秋季 COD_{Cr}的水质类别分别为Ⅳ类和劣Ⅴ类,秋季 COD_{Cr}超标严重;从 NH_3-N 来看,春季流域质量浓度平均值高于秋季,水质类别分别为Ⅳ类和Ⅱ类;春季和秋季 ρ(TP)相差不大,水质均为Ⅴ类;从 TN 来看,春季和秋季水质类别均为劣Ⅴ类,但春季 ρ(TN)平均值为 11.77 mg/L,远高于秋季。由此可见,大汶河水环境质量较差,主要以Ⅳ和Ⅴ类水为主,其中以 TN 超标最为严重。大汶河生境质量一般,平均值为 110 分左右,栖息地最好的点位得分仅为 137 分。从水文条件来看,受汛期降水影响,秋季河宽、水深和流量均大于春季,流速相差不大,均在 0.2 m/s 左右,河流水体以缓流为主。

对大汶河春秋季的环境因子进行主成分分析,结果见表 3。由表 3 可以看出,前 5 个主成分的特征值均大于 1,其中第 1 主成分特征值为 2.3,解释了所有变量方差的 17.66%,第 2 主成分特征值为 2.2,解释了 16.87%,前 5 个主成分共解释所有变量方差的 72.63%,因此,可以用前 5 个主成分代表所有的环境因子。第 1 主成分在河宽、水深和流量方面有较大载荷,这些因子主要反映了河流水文特征;第 2 主成分在水温和 TN 指标上有较大的载荷,主要反映了河流水环境富营养化情况;第 3 主成分主要在 COD_{Cr}和 COD_{Mn}有较大载荷,主要反映了河流水环境的有机污染情况;第 4 主成分在 DO 和 TP 有较大载荷,主要反映了河流有机污染和富营养化情况;第 5 主成分主要在流速有较大载荷,主要反映了河流的水文特征。综上所述,大汶河环境问题主要表现在河流水文特征、富营养化和有机污染 3 个方面,确定主要的环境因子为水温、DO、COD_{Cr}、COD_{Mn}、TN、TP、河宽、水深、流速和流量。

表 3　大汶河环境因子主成分分析结果

Table 3　Principal component analysis result of environmental variables in the Dawen River

主成分	特征值	方差百分比/%	累积占比/%
1	2.30	17.66	17.66
2	2.20	16.87	34.53
3	1.95	14.98	49.51
4	1.77	13.64	63.15
5	1.23	9.48	72.63

2.5　鱼类群落结构与环境因子关系

将上述确定的主要环境因子与鱼类个体数量进行 RDA 分析,结果如图 3 所示。发现前 4 个轴解释了物种变化的 22.59%,其中第 1 个轴的贡献率为 9.46%,第 2 个轴的贡献率为 6.40%,其中水温 T、COD_{Cr}、水深 H 和流速 V 均对第一排序轴贡献较大,河宽 W、水深 H 和流量 Q 均对第二排序轴贡献较大。经过随机置换检验,发现对大汶河鱼类群落变化解释率最高的环境因子依次是水深($P=0.046$)和河宽($P=0.058$)。鳌(Sp3)在 COD_{Cr}较高、流速较小的环境更易生存;鲫(Sp2)、兴凯鱊(Sp12)、麦穗鱼(Sp13)、棒花鱼(Sp14)、褐吻虾虎鱼(Sp22)更偏爱在水深较浅的环境生存;马口鱼(Sp6)、中华鳑鲏(Sp10)、泥鳅(Sp16)和乌鳢(Sp25)则偏爱在流量较小、河宽较窄的河段生存。

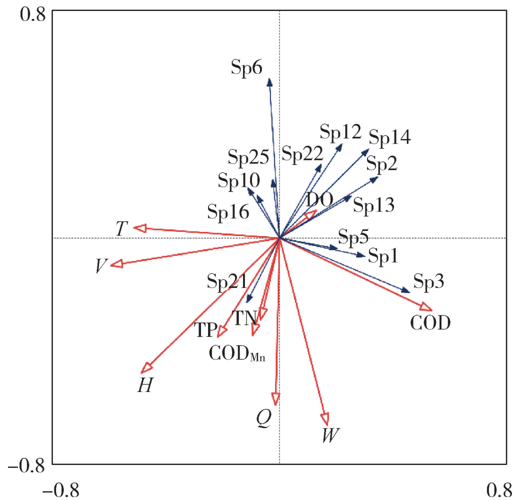


图 3　环境因子与鱼类个体数量的二维排序

Fig. 3　Biplot between fish abundance and main environmental variables in the Dawen River

将上述确定的主要环境因子与鱼类多样性指数

进行 RDA 分析,结果如图 4 所示。发现前 4 个轴解释了多样性变化的 18.65%,其中第 1 个轴的贡献率为 12.46%,第 2 个轴的贡献率为 3.72%。DO、COD_{Cr}均对第一排序轴贡献较大,河宽、流量、水温和 TP 均对第二排序轴贡献较大。经过随机置换检验,发现对大汶河鱼类多样性指数解释率最高的环境因子是 DO,多样性指数均与 ρ(DO)呈正相关关系。在水深越深、流量越大、河宽越宽和 ρ(TP)较低的环境下,基于生物量的多样性和均匀性指数更高;而在流速较大、ρ(DO)较高、ρ(TN)较高和 $\rho(COD_{Cr})$较低的环境下,基于个体数量的多样性和均匀性指数则相对较高。

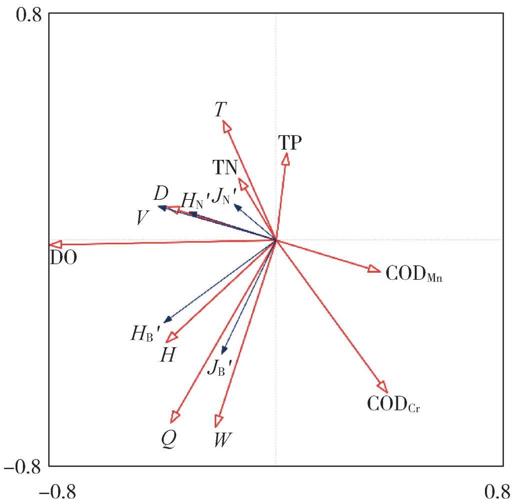


图 4　环境因子与鱼类多样性指数的二维排序

Fig. 4　Biplot between diversity indices and main environmental variables in the Dawen River

3　讨　论

3.1　鱼类物种组成和多样性特征

受人类活动的剧烈影响,大汶河鱼类物种组成特征主要表现为:①鱼类物种数量较少,且以鲤科鱼类为主;本次调查到鱼类仅 25 种,其中鲤科 15 种;与黄河其他主要支流相比,大汶河物种数量低于湟水(36 种)[18]、渭河(51 种)[19]和伊洛河(中下游有 43 种)[20],与汾河(25 种)和沁河(28 种)[21]相差不大,与邻近济南地区河流水系[22]相比,物种数略低,但均以鲤科鱼类为主。②鱼类物种组成以耐污性、静水性鱼类为主;春季和秋季,大汶河鱼类群落的优势物种均为耐污性较强的鲫、䱗和乌鳢等鱼类,这些物种主要适宜生活在静水或缓流水体。③大汶河鱼类物种多样性和均匀性较低;春季和秋季的 Shannon-Weiner 多样性指数仅为 1.02 和 0.87,丰富度指数仅为 1.18 和 1.04,与黄河其他支流[20]相比,物种多样性最低。分析原因,一方面与海拔高度、气候、地貌等自然环境变化有关,大汶河位于黄河流域下游,海拔高度在 50 ~ 270 m 之间,相对上游湟水、中游渭河等河流海拔高度较低,鱼类物种组成不同,大汶河主要以江河平原性鱼类为主;另一方面,大汶河地处华北平原中东部,人口密度大,人类活动干扰强烈,也是导致物种多样性较低的原因之一。总体来说,大汶河鱼类组成分布不均匀,资源量主要集中在少数几个优势种,稀有种鱼类达 12 种,约占物种总数的 50%,例如泥鳅、马口鱼、草鱼、棒花鱼和乌鳢在 W1 点位均采集到样本,但个体数量均不超过 3 条,这种现象在其余点位也很常见。随着环境的退化,广适性、耐污性鱼类逐渐成为大汶河的优势种。

春季和秋季大汶河鱼类物种组成均以鲤科为优势类群,物种组成相似,且物种数量相差不大,但鱼类个体数量存在明显的季节性变化,秋季个体数量明显大于春季。这一点与济南市河流、巢湖流域和秋浦河源湿地公园[23-25]鱼类个体数量的季节变化相一致。究其原因,主要受内因和外因的共同影响:鱼类的繁殖是引起鱼类群落季节变化的关键内因[26];冬季的极端低温可能造成鱼类越冬期死亡,是引起群落结构季节变化的主要外因[27]。大汶河的优势物种为鲫、䱗和乌鳢,三者的繁殖期在 4 ~ 8 月[12],而春季采样时间为 4 月,此时正处于上年度越冬期和本年度繁殖期之间,鱼类经历了上年度冬季低温影响,鱼类个体未得到有效补充,因此个体数量较少。秋季采样时间为 10 月,此时正处于本年度繁殖期后,有大量当年生补充群体加入,因此 10 月的鱼类个体数量较多。

3.2　影响鱼类群落结构的主要环境因子分析

鱼类群落结构和多样性受栖息地质量、水文条件、水质、水利工程修建等多方面因素的影响。栖息地异质性高的河段,底质、水文等条件多样化,能够维持较高的生物多样性。大汶河流域平均流速在 0.2 m/s 左右,水流较缓,生境类型较为单一,以淤泥、细沙等底质为主,因此流域鱼类物种数量较少,主要以适宜静水缓流生存的鲫、䱗和乌鳢等鱼类为主,鱼类多样性水平较低。水文条件的改变对鱼类多样性产生显著影响[28],这与洪泽湖的研究结果[29]相类似,与 1982 年对比,洪泽湖流水性鱼类减少 17 种,主要是由于湖内建闸蓄水,水文条件发生显著变化。本研究结果显示,河宽和水深是影响大汶河鱼类个体数量的主要环境因子($P<0.05$),主要是由于春季和秋季采样分别为汛前和汛后,受汛期降雨的影响,河流流量、河宽、水深等水文条件均发生了显著改变,为鱼类生长提供多样化的栖息地环境和丰富的食物来源,此时本年度繁殖期补充群

体迅速生长,导致个体数量和生物量均升高。调查发现,相对于春季,秋季采样点位的河道明显变宽,例如 W11 和 W18 点位河道显著变宽,其鱼类个体数量也明显变多。此外,大汶河以Ⅳ和Ⅴ类水为主,ρ(TN)超标严重,电导率、$\rho(COD_{Cr})$均较高,水质较差[30]也是主要影响因子,根据鱼类个体数量与环境因子的排序图发现,除 Sp21 外,其余鱼类的个体数量均与ρ(TN)和ρ(TP)呈负相关关系,ρ(TN)过高将导致鱼类个体数量的减少;主要原因是大汶河流经泰安、莱芜两市,河流两岸城市生活污水的排放和农业活动中化肥农药的使用造成河流氮磷污染严重,影响底栖动物的生长,导致底栖动物和鱼类数量减少,引起鱼类丰度减小和物种单一化[31]。DO 是鱼类生长的主要限制因子,ρ(DO)过低会对鱼类的摄食、繁育具有一定影响。研究结果显示,影响鱼类多样性的主要环境因子为 DO,ρ(DO)越高鱼类物种多样性指数和均匀性指数越大。另外,河宽、水深和流量均与基于生物量计算的 Shannon-Weiner 多样性指数和均匀性指数呈正相关关系,而与基于个体数量的 Shannon-Weiner 多样性指数和均匀性指数相关性不密切,主要由于河宽较宽、水深较深区域能够提供较丰富的生境和食物来源,适合鱼类索饵和生长,鱼类生物量相对较大,基于生物量的多样性指数与其关系较密切。此外,大汶河下游修建有多个梯级拦蓄工程,破坏河流连通性,导致河流向静水水体和富营养化水体转变[8],生境质量破坏严重,甚至在枯水期及平水期出现断流现象,从而导致大汶河鱼类多样性降低。鱼类采样方法也会对鱼类多样性结果产生影响,但根据研究[32],电鱼法虽然一定程度上影响大个体鱼类的捕获,但是相对拖网、围网、刺网等,该方法获得的鱼类样本更能够反映鱼类群落结构的整体情况,是鱼类调查更为合理的方法。

综上所述,河宽、水深等水文条件是影响大汶河鱼类个体数量的主要环境因子,DO 等水质指标是影响鱼类多样性水平的主要环境因子。若以维持河流稳定的鱼类群落结构为目标,需保证河流具有一定的河宽和水深;若以提高鱼类多样性水平为目标,则需保障河流水体具有较高的ρ(DO),但该阈值究竟为多大仍需进行深入研究。总体来说,大汶河鱼类资源和多样性水平较低是水质污染、水文条件改变等多个环境因子共同作用的结果。除以上因子外,年均气温、降雨量、土地利用等也可能对大汶河鱼类群落结构产生一定的影响[33],限于资料限制,本研究未考虑这些因子,下一步研究中可以考虑增加土地利用等不同尺度的环境因子进行分析。

4 结 论

a. 通过调查,大汶河共采集鱼类 4 目 16 科 25 种,其中,鲤形目鱼类物种数最多,共 17 种,占物种总数的 68%,包括鲤科 15 种和花鳅科 2 种,说明鲤科是大汶河鱼类群落结构的主要组成。通过优势种分析,发现大汶河鱼类物种分布不均匀,优势种仅为 3 种,分别是鲫、䱗和乌鳢,多为耐受性较强的平原性鱼类,常见种主要有鲫、䱗、麦穗鱼、棒花鱼和乌鳢,偶见种和稀有种较多。从季节变化来看,大汶河鱼类物种和生物量的季节性变化不显著,但是秋季的个体数量明显大于春季,鱼类多样性季节变化不显著。

b. 大汶河环境问题主要表现在河流水文特征、富营养化和有机污染 3 个方面,主要环境因子为水温、DO、COD_{Cr}、COD_{Mn}、TN、TP、河宽、水深、流速和流量。通过鱼类个体数量、多样性指数与主要环境因子的 RDA 分析,发现影响大汶河鱼类个体数量的主要环境因子是水深和河宽,而影响鱼类多样性水平的主要环境因子是 DO,因此若以大汶河维持较高的鱼类个体丰度为目标,需保证河流具有一定的水深和河宽,若以提高鱼类多样性水平为目标,则需提高水体的 DO 质量浓度。

参考文献:

[1] VÖRÖSMARTY C J,MCINTYRE P B,GESSNER M O,et al. Global threats to human water security and river biodiversity[J]. Nature,2010,467:555-561.

[2] 傅伯杰,于丹丹,吕楠. 中国生物多样性与生态系统服务评估指标体系[J]. 生态学报,2017,37(2):341-348. (FU Bojie,YU Dandan,LYU Nan. An indicator system for biodiversity and ecosystem services evaluation in China[J]. Acta Ecologica Sinica,2017,37(2):341-348. (in Chinese))

[3] ISBELL F,CRAVEN D,CONNOLLY J,et al. Biodiversity increases the resistance of ecosystem productivity to climate extremes[J]. Nature,2015,526:574-577.

[4] KARR J R. Assessment of biotic integrity using fish communities[J]. Fisheries,1981,6(6):21-27.

[5] ZHANG P,QIAO Y,SCHINEIDER M,et al. Using a hierarchical model framework to assess climate change and hydropower operation impacts on the habitat of an imperiled fish in the Jinsha River,China[J]. Science of the Total Environment,2019,646:1624-1638.

[6] YOON J D,JANG M H,JOO G J. Effect of flooding on fish assemblages in small streams in South Korea[J]. Limnology,2011,12(2):197-203.

[7] NGOR P B,LEGENDRE P,OBERDORFF T,et al. Flow alterations by dams shaped fish assemblage dynamics in

the complex Mekong-3S river system[J]. Ecological Indicators,2018,88:103-114.
[8] 何涛,夏霆,陈怀民,等. 大汶河梯级拦蓄水库富营养化评估[J]. 土木建筑与环境工程,2018,40(5):133-140. (HE Tao,XIA Ting,CHEN Huaimin,et al. Eutrophication assessment in cascade reservoirs of Dawen River[J]. Journal of Civil, Architectural and Environmental Engineering,2018,40(5):133-140. (in Chinese))
[9] 温家华,徐征和,武玮,等. 大汶河流域水生态系统健康评价研究[J]. 南水北调与水利科技,2018,16(3):118-124. (WEN Jiahua,XU Zhenghe,WU Wei,et al. Study on water ecosystem evaluation in Dawen River Basin[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2018,16(3):118-124. (in Chinese))
[10] 泰安市大汶河志编纂委员会. 大汶河志[M]. 北京:方志出版社,2016.
[11] 陕西省动物研究所,中国科学院水生生物研究所,兰州大学生物系. 秦岭鱼类志[M]. 北京:科学出版社,1987.
[12] 李思忠. 黄河鱼类志[M]. 青岛:中国海洋大学出版社,2017.
[13] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法:第4版[M]. 北京:中国环境科学出版社,2002.
[14] 张金屯. 数量生态学:第2版[M]. 北京:科学出版社,2011.
[15] PINKAS L,OLIPHANT M,IVERSON I. Food habits of albacore,bluefin tuna and bonito in California waters[J]. California Department of Fish and Game Fish Bulletin,1971,152:100-105.
[16] 毛志刚,谷孝鸿,龚志军,等. 洪泽湖鱼类群落结构及其资源变化[J]. 湖泊科学,2019,31(4):1109-1119. (MAO Zhigang,GU Xiaohong,GONG Zhijun,et al. The structure of fish community and changes of fishery resources in Lake Hongze[J]. Journal of Lake Science,2019,31(4):1109-1119. (in Chinese))
[17] LEPS J,ŠMILAUER P. Multivariate analysis of ecological data using CANOCO[M]. Cambridge: Cambridge University Press,2003.
[18] 唐文家,陈毅峰,丁城志. 青海省湟水鱼类资源现状及保护对策[J]. 大连海洋大学学报,2013,28(3):307-313. (TANG Wenjia,CHEN Yifeng,DING Chengzhi. The current situation and protection of fish resources in Huangshui River in Qinghai Province[J]. Journal of Dalian Ocean University,2013,28(3):307-313. (in Chinese))
[19] 武玮,徐宗学,殷旭旺,等. 渭河流域鱼类群落结构特征及其受环境因子的影响分析[J]. 环境科学学报,2014,34(5):1298-1308. (WU Wei,XU Zongxue,YIN Xuwang,et al. Fish community structure and the effect of environmental factors in the Wei River basin[J]. Acta Scientiae Circumstantiae,2014,34(5):1298-1308. (in Chinese))
[20] 林鹏程,李淑贞,秦祥朝,等. 黄河伊洛河中下游鱼类多样性及群落结构[J]. 湖泊科学,2019,31(2):482-492. (LIN Pengcheng,LI Shuzhen,QIN Xiangzhao,et al. Pattern of fish diversity and assemblage structure in the middle and lower reaches of the Yiluo River,Yellow River[J]. Journal of Lake Sciences,2019,31(2):482-492. (in Chinese))
[21] 朱国清,赵瑞亮,胡振平,等. 山西省主要河流鱼类分布及物种多样性分析[J]. 水产学杂志,2014,27(2):38-45. (ZHU Guoqing,ZHAO Ruiliang,HU Zhenping,et al. Fish distribution and species diversity in major rivers in Shanxi Province[J]. Chinese Journal of Fisheries,2014,27(2):38-45. (in Chinese))
[22] 曹龙智. 济南市鱼类功能群及其与水环境因子的关系[J]. 水资源保护,2019,35(1):79-86. (CAO Longzhi. Fish functional groups and their relationship with water environmental factors in Jinan City[J]. Water Resources Protection,2019,35(1):79-86. (in Chinese))
[23] 钱红,严云志,储玲,等. 巢湖流域河流鱼类群落的时空分布[J]. 长江流域资源与环境,2016,25(2):257-264. (QIAN Hong,YAN Yunzhi,CHU Ling,et al. Spatial and temporal patterns of fish assemblages in the rivers of Chaohu Basin[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,2016,25(2):257-264. (in Chinese))
[24] 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. (WANG Wenjian,CHU Ling,SI Chun,et al. Spatial and temporal patterns of stream fish assemblages in the Qiupu Headwaters National Wetland Park[J]. Zoological Research,2013,34(4):417-428. (in Chinese))
[25] 韩洁,张杰,宋蒙蒙,等. 济南市水域鱼类功能群结构及其季节性变化[J]. 环境科学研究,2018,31(9):1537-1544. (HAN Jie,ZHANG Jie,SONG Mengmeng,et al. Structure and seasonal changes of fish functional groups in Jinan Region[J]. Research of Environmental Sciences,2018,31(9):1537-1544. (in Chinese))
[26] WELCOMME L R. The biology and ecology of the fishes of a small tropical stream[J]. Journal of Zoology,2009,158(4):485-529.
[27] 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. (ZHU Ren,SI Chun,CHU Ling,et al. The spatio-temporal distribution of fish population in the headwaters of the Qingyi River: a study based on the habitat patchs[J]. Acta Hydrobiologica Sinica,2015,39(4):686-694. (in Chinese))

(下转第52页)

Huiping. Development and application of wetland management information system of Poyang Lake Watershed, China [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2007, 29(2): 205-209. (in Chinese))

[11] 刘恒飞,王同琛. 湿地资源调查与管理的地理信息系统构建[J]. 测绘与空间地理信息,2019,42(11):139-144. (LIU Hengfei, WANG Tongchen. Construction of geographic information system for wetland resources investigation and management [J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2019, 42 (11): 139-144. (in Chinese))

[12] 严瑞,仇海亮,汪洋. 基于 GIS 的湿地保护管理信息系统设计与应用[J]. 现代测绘,2020,43(2):62-64. (YAN Rui, QIU Hailiang, WANG Yang. Design and application of wetland protection information system based on GIS [J]. Modern Surveying and Mapping, 2020, 43 (2): 62-64. (in Chinese))

[13] 王钟,范中亚,杨忠勇,等. "引江济淮"工程对安徽菜子湖水龄分布的影响[J]. 湖泊科学,2018,30(6): 1576-1586. (WANG Zhong, FAN Zhongya, YANG Zhongyong, et al. Effects of Water Diversion Project from the Yangtze River to Huaihe River on the water age distribution of Lake Caizi, Anhui Province [J]. Journal of Lake Sciences, 2018, 30(6): 1576-1586. (in Chinese))

[14] 刘学文,李红清,杨寅群,等. 基于长时间序列水位数据的长江下游菜子湖候鸟越冬期水位特征[J]. 湖泊科学, 2019, 31 (6): 1662-1669. (LIU Xuewen, LI Hongqing, YANG Yinqun, et al. Water level characteristics of Lake Caizi, lower reaches of the Yangtze River during wintering period based on long-term hydrological alteration [J]. Journal of Lake Sciences, 2019, 31(6): 1662-1669. (in Chinese))

[15] 姚鑫,杨桂山,万荣荣,等. 水位变化对河流、湖泊湿地植被的影响[J]. 湖泊科学,2014,26(6):813-821. (YAO Xin, YANG Guishan, WAN Rongrong, et al. Impact of water level change on wetland vegetation of rivers and lakes [J]. Journal of Lake Sciences, 2014, 26 (6): 813-821. (in Chinese))

[16] 王晓媛,江波,田志福,等. 冬季安徽菜子湖水位变化对主要湿地类型及冬候鸟生境的影响[J]. 湖泊科学, 2018,30(6):1636-1645. (WANG Xiaoyuan, JIANG Bo, TIAN Zhifu, et al. Impact of water level change in Lake Caizi (Anhui Province) on main wetland types and wintering bird habitat during wintering period [J]. Journal of Lake Sciences, 2018, 30 (6): 1636-1645. (in Chinese))

[17] KANTHA L H, CLAYSON C A. An improved mixed layer model for geophysical applications [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 1994, 99 (C12): 25235-25266.

[18] 成波,关雪峰,向隆刚,等. 一种面向时空对象及其关联关系动态变化表达的概念数据模型[J]. 地球信息科学学报,2017,19(11):1415-1421. (CHENG Bo, GUAN Xuefeng, XIANG Longgang, et al. A conceptual data model for dynamic changes expression of spatio-temporal object and its association [J]. Journal of Geo-Information Science, 2017, 19(11): 1415-1421. (in Chinese))

[19] YI J, DU Y, LIANG F, et al. A representation framework for studying spatiotemporal changes and interactions of dynamic geographic phenomena [J]. International Journal of Geographical Information Science, 2014, 28(5): 1010-1027.

[20] 吴信才. 空间数据库[M]. 北京:科学出版社,2009.

(收稿日期:2019-09-29　编辑:熊水斌)

(上接第 38 页)

[28] TSAI W P, CHANG F J, HERRICKS E E. Exploring the ecological response of fish to flow regime by soft computing techniques [J]. Ecological Engineering, 2016, 87: 9-19.

[29] 魏卿,薛联青,张敏,等. 淮河流域环境流变化及其对洪泽湖鱼类栖息地的生态影响[J]. 水资源保护,2019,35(4):89-94. (WEI Qing, XUE Lianqing, ZHANG Min, et al. Changes of environmental flow in Huaihe River Basin and its ecological impact on fish habitat in Hongze Lake [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(4): 89-94. (in Chinese))

[30] FIGUEROLA B, MACEDA V A, DE S A. Assessing the effects of sewage effluents in a Mediterranean creek: fish population features and biotic indices [J]. Hydrobiologia, 2012, 694(1): 75-86.

[31] MACEDA V A, MAC N R, DE S A. Water-quality impacts in semi-arid regions: can natural 'green filters' mitigate adverse effects on fish assemblages? [J]. Water Research, 2018, 144: 628-641.

[32] ZAJICEK P, WOLTER C. The gain of additional sampling methods for the fish-based assessment of large rivers [J]. Fisheries Research, 2018, 197: 15-24.

[33] 帅方敏,李新辉,刘乾甫,等. 珠江水系鱼类群落多样性空间分布格局[J]. 生态学报,2017,37(9):3182-3192. (SHUAI Fangmin, LI Xinhui, LIU Qianfu, et al. Spatial patterns of fish diversity and distribution in the Pearl River [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(9): 3182-3192. (in Chinese))

(收稿日期:2020-06-24　编辑:王　芳)