

## 应用底栖动物功能摄食群评价济南南部山区溪流生态系统健康

李欣, 付瑶, 代静, 汪兴中, 余雪芳, 郑雯雯, 申恒伦

### **Application of macroinvertebrate functional groups to estimate the ecosystem health in the stream of southern mountainous area of Jinan City**

LI Xin, FU Yao, DAI Jing, WANG Xingzhong, YU Xuefang, ZHENG Wenwen, SHEN Henglun

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12024/jsou.20201203243>

#### 您可能感兴趣的其他文章

##### Articles you may be interested in

##### [应用底栖动物功能摄食群评价东苕溪下游生态系统健康状况](#)

Application of macroinvertebrate functional groups to estimate the ecosystem health in the downstream of the East Tiaoxi River  
上海海洋大学学报. 2018, 27(1): 91 <https://doi.org/10.12024/jsou.20170502062>

##### [日照市近海大型底栖动物群落结构和生物多样性](#)

Community structure and biodiversity of macrobenthos in the coastal waters of Rizhao  
上海海洋大学学报. 2022, 31(1): 119 <https://doi.org/10.12024/jsou.20210103269>

##### [长江口明珠湖大型底栖动物群落结构特征与水质评价](#)

Macroinvertebrate community structure and the biological assessment to water quality of Mingzhu Lake near the Yangtze River Estuary  
上海海洋大学学报. 2020, 29(5): 699 <https://doi.org/10.12024/jsou.20190502655>

##### [南黄海潮间带大型底栖动物群落组成及时空变化](#)

Community composition and spatial and temporal changes of macrobenthos in intertidal zone of southern Yellow Sea  
上海海洋大学学报. 2022, 31(4): 950 <https://doi.org/10.12024/jsou.20210303351>

##### [白洋淀鱼类群落结构与环境因子关系分析](#)

Fish community structure and its relationship with environmental factors in Baiyangdian Lake  
上海海洋大学学报. 2022, 31(6): 1488 <https://doi.org/10.12024/jsou.20211003581>

文章编号: 1674-5566(2023)01-0126-08

DOI:10.12024/jsou.20201203243

## 应用底栖动物功能摄食群评价济南南部山区溪流生态系统健康

李欣<sup>1</sup>, 付瑶<sup>1</sup>, 代静<sup>1</sup>, 汪兴中<sup>2</sup>, 余雪芳<sup>3</sup>, 郑雯雯<sup>4</sup>, 申恒伦<sup>4</sup>

(1. 济南市环境研究院, 山东 济南 250014; 2. 湖州师范学院水生生物资源养护与开发技术研究浙江省重点实验室, 浙江 湖州 313000; 3. 浙江省环境监测协会, 浙江 杭州 310007; 4. 枣庄学院生命科学学院, 山东 枣庄 277160)

**摘要:** 于 2019 年 9 月对济南南部山区溪流 12 个样点大型底栖动物功能摄食类群进行了调查, 并采用摄食均匀度指数 (Feeding evenness index,  $j_{FD}$ ) 评价济南南部山区溪流生态系统健康状况。结果表明: 该地区底栖动物摄食类群以收集者为主, 相对丰度为 56.9%; 其次为滤食者, 相对丰度为 35.4%; 优势类群主要为四节蜉 (*Baetis* sp.)、纹石蛾 (*Ceratopsyche* sp.)、摇蚊属一种 (*Chironomus* sp.)、梨形环棱螺 (*Bellamya purificata*)、长角泥虫 (*Macronychus* sp.) 和长足摇蚊属一种 (*Tanytus* sp.)。 $j_{FD}$  值表明济南南部山区溪流生态系统健康较差。一元回归分析表明,  $j_{FD}$  值与 Shannon-Wiener 多样性指数有较好的相关性。冗余分析 (Redundancy analysis, RDA) 表明底栖动物功能摄食群相对丰度与总磷关系最密切, 而底栖动物物种相对丰度与 pH 关系最密切。

**关键词:** 摄食均匀度指数; 生物评价; 底栖动物; 济南南部山区

**中图分类号:** Q 958.8 **文献标志码:** A

全球 65% 的河流, 以及依靠河水维持的水生生态已经受到人类活动的强烈威胁<sup>[1]</sup>。作为河流生态系统的重要组成部分, 底栖动物具有容易采样和分类, 可以响应多种环境条件变化和得知污染的长期效应等诸多优点, 非常适合作为人类活动影响河流的监测对象<sup>[2]</sup>。目前对底栖动物的监测常以物种组成为主, 往往忽略对底栖动物功能摄食类群监测<sup>[3]</sup>。底栖动物功能摄食类群是根据底栖动物摄食策略所划分的类群, 主要包括: 撕食者 (Shredders, SH)、滤食者 (Filterers, FC)、刮食者 (Scrapers, SC)、收集者 (Gather-collectors, GC)、捕食者 (Predators, PR) 和杂食者 (Omnivore, OM)<sup>[4]</sup>。底栖动物功能摄食类群的监测优势在于摄食类群对环境变化的指向性更明确, 能更好地反映河流生态系统的受损状况<sup>[5]</sup>。尤其在物种与环境关系机制、溪流营养动态等生态系统过程研究方面, 功能摄食类群的监测至关重要<sup>[6]</sup>。然而, 相较于种类研究, 功能摄食类群的研究较少。

在应用底栖动物功能摄食类群评价河流生态系统健康方面, 摄食均匀度指数 (Feeding evenness index,  $j_{FD}$ ) 因其计算简单、结果明确, 而被越来越多的学者使用<sup>[7-8]</sup>。然而, 该指数在应用过程中仍有两个方面值得研究: (1) 虽然过去的研究证实摄食均匀度指数的评价结果与生物性状分析 (Biological traits analysis, BAT) 和生物营养指数 (Infauna trophic index, ITI) 基本一致<sup>[7]</sup>, 但是与底栖动物水质生物学评价中常用的 Shannon-Wiener 多样性指数的评价结果是否一致尚有待研究; (2) 生态学的发展趋势是解决河流保护和管理中一些现实问题<sup>[9]</sup>, 为方便应用底栖动物功能摄食类群评价结果进行生态系统管理, 功能摄食类群与水质的相关性有待研究。因此, 本研究在济南南部山区溪流进行底栖动物摄食类群调查, 应用摄食均匀度指数评价济南南部山区溪流生态系统健康, 并探索摄食均匀度指数与 Shannon-Wiener 多样性指数及功能摄食类群与水质的相关性。

收稿日期: 2020-12-13 修回日期: 2021-10-12

基金项目: 山东省自然科学基金 (ZR2016CL05); 国家自然科学基金 (51979241); 山东省高等学校青创科技支持计划 (2019KJE020, 2020KJE008); 枣庄市科技发展计划 (2020NS14); 枣庄学院博士基金 (2018BS039)

作者简介: 李欣 (1987—), 男, 博士, 研究方向为水生态监测与研究及水环境管理。E-mail: lixinfyh@163.com

通信作者: 申恒伦, E-mail: shenhenglun@126.com

版权所有 ©《上海海洋大学学报》编辑部 (CC BY-NC-ND 4.0)

Copyright © Editorial Office of Journal of Shanghai Ocean University (CC BY-NC-ND 4.0)

<http://www.shhydx.com>

济南南部山区环境优美,生态状况良好,是济南市重要的水源涵养区域和生态屏障,也是济南市的泉水来源和重要的地表水饮用水水源地<sup>[10]</sup>。近年来,随着城市化的快速发展与水资源的大量消耗,济南南部山区许多河流生态系统遭到不同程度的干扰。目前,该地区已有浮游植物<sup>[11]</sup>、浮游动物<sup>[12]</sup>和水库底栖动物<sup>[13]</sup>的报道,而溪流底栖动物的相关研究尚未见报道。因此,本研究对济南南部山区进行系统的溪流底栖动物监测与研究,为南部山区水环境管理提供合理

建议,是南部山区生态保护研究中亟需进行的工作。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域与采样时间

研究区域位于济南南部山区 117°00'E ~ 117°20'E, 36°23'N ~ 36°33'N 区域。根据野外实际情况,于 2019 年 9 月对济南南部山区溪流布设 12 个采样点(图 1)进行采样。

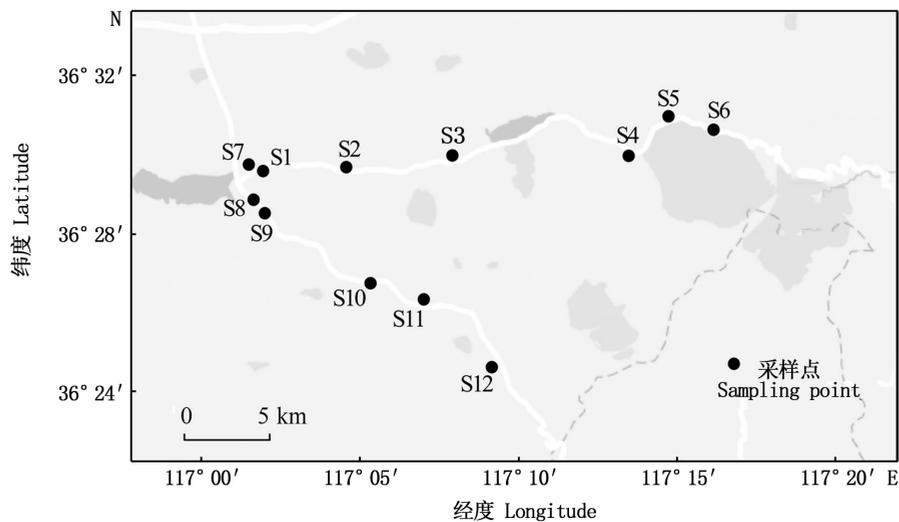


图 1 样点分布图

Fig. 1 Location of the sampling sites

### 1.2 样品采集与测试

底栖动物的采集采用网径 40 目采样面积为 0.09 m<sup>2</sup> 的索伯网(Surber sampler)。将索伯网放置于采样点河床进行采集,重复 3 次后装入标本瓶中。在实验室内将大型底栖动物从标本瓶中检出,用质量分数为 6% ~ 10% 的甲醛进行固定。底栖动物标本在显微镜(OLYMPUS-CX21)或解剖镜(OLYMPUS-SZX7)下进行人工鉴定计数,所得物种划分为不同的功能摄食类群<sup>[14]</sup>。在采样点现场利用 YIS 便携式水质仪测定电导率(Cond)、总固体悬浮物(TDS)、水温(Temp)、溶解氧(DO)、pH(pH)、氧化还原电位(ORP)和盐度(Sal)。并取水样于冷藏条件下运回实验室,测定总氮(TN)、总磷(TP)和化学需氧量(COD)等指标。水样采集、保存与测定步骤依据参考文献<sup>[15]</sup>进行。

### 1.3 数据分析

功能摄食类群均匀度指数( $j_{FD}$ )评价计算方法如下<sup>[7-8]</sup>:

$$j_{FD} = H'_{FD} / \log_2 n (1)$$

式中: $H'$ 为功能摄食类群的 Shannon-Wiener 多样性指数; $n$ 为功能摄食类群数目; $j_{FD}$ 值介于 0 和 1 之间, $j_{FD}$ 值对应的生态系统健康状况标准如下<sup>[11-12]</sup>: $j_{FD} > 0.8$ ,健康状况很好; $0.6 \leq j_{FD} < 0.8$ ,健康状况较好; $0.4 \leq j_{FD} < 0.6$ ,健康状况中等; $0.2 \leq j_{FD} < 0.4$ ,健康状况较差; $j_{FD} < 0.2$ ,健康状况很差。功能摄食类群均匀度指数( $j_{FD}$ )与物种 Shannon-Wiener 多样性指数相关性分析采用一元回归方程。

底栖动物功能摄食类群及物种群落与水质之间的关系采用典范排序分析。排序分析前对水

质参数(除 pH 外)进行对数转换,以保证数据的正态性<sup>[16]</sup>;对底栖动物功能摄食类群及物种的相对丰度进行  $\lg(x+1)$  转换,以消除数据维度过大对最终排序得分的影响。采用去趋势对应分析法(Detrended correspondence analysis, DCA)分析底栖动物功能摄食类群及物种群落,确定使用排序模型为线性模型还是单峰模型。若 DCA 分析显示排序轴的梯度长度小于 3,则线性模型比较合适;排序轴的梯度大于 4,则单峰模型比较合适;3~4 时,两种模型均合适。排序分析采用 R 语言 vegan 包进行。

## 2 结果

### 2.1 功能摄食类群群落结构与生态系统健康评价

济南南部山区溪流底栖动物功能摄食类群以收集者为主,相对丰度为 56.9%;其次为滤食者,相对丰度为 35.4%;再次为刮食者,相对丰度为 6.6%;最后为捕食者和杂食者,相对丰度分别为 0.9% 和 0.2% (图 2)。从具体样点看,S4,S5 和 S6 样点的优势功能摄食类群为滤食者,S1,S2,S3,S7,S8,S10,S11 和 S12 样点的优势功能摄食类群为收集者,S9 样点的优势功能摄食类群为刮食者(表 1)。

应用功能摄食类群均匀度指数( $j_{FD}$ )评价济南南部山区溪流生态质量状况,结果表明样点平均  $j_{FD}$  值为 0.28,表明溪流生态系统健康状况较差。其中,样点 S7 和 S9 的  $j_{FD}$  值为 0.50 和 0.44,健康状况为中等;样点 S12、S8、S10、S2、S4、S5、S1 和 S6 的  $j_{FD}$  值为 0.37、0.32、0.30、0.30、0.28、0.26、0.26 和 0.25,健康状况为较差;样点 S3 和 S11 的  $j_{FD}$  值为 0.09 和 0,健康状况为很差。

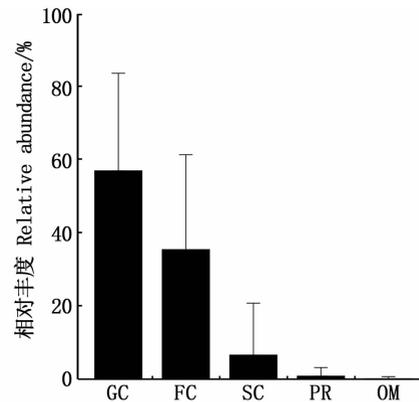


图 2 济南南部山区溪流底栖动物各功能摄食类群相对丰度

Fig. 2 Relative abundance of macroinvertebrate functional feeding groups in stream of southern Jinan city

表 1 各样点底栖动物功能摄食类群相对丰度

Tab. 1 Relative abundance of macroinvertebrate functional feeding groups in different sites

功能摄食类群 Functional feeding groups	样点 Sites											
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12
滤食者 FC	0.29	0.47	0.05	0.71	0.71	0.75	0.29	0.08	0.25	0.31		0.33
收集者 GC	0.71	0.53	0.95	0.27	0.29	0.24	0.53	0.78	0.25	0.68	1.00	0.61
杂食者 OM							0.02					
捕食者 PR							0.08	0.03				
刮食者 SC				0.01			0.08	0.11	0.50	0.02		0.07

注:仅显示相对丰度大于 0.01 的底栖动物功能摄食类群。

Notes: Only functional feeding groups of macroinvertebrate with relative abundance greater than 0.01 are shown.

### 2.2 功能摄食类群均匀度指数与 Shannon-Wiener 多样性指数相关性分析

济南南部山区各样点溪流底栖动物的优势类群主要为四节蜉 (*Baetis* sp.)、纹石蛾 (*Ceratopsyche* sp.)、摇蚊属一种 (*Chironomus* sp.)、梨形环棱螺 (*Bellamya purificata*)、长角泥虫 (*Macronychus* sp.) 和长足摇蚊属一种 (*Tanypus* sp.), 见表 2。各样点溪流底栖动物 Shannon-Wiener 多样性指数分别为 3.88 (S1)、6.01 (S2)、

1.35 (S3)、2.62 (S4)、3.43 (S5)、2.30 (S6)、8.23 (S7)、4.88 (S8)、2.83 (S9)、3.99 (S10)、1.45 (S11) 和 3.43 (S12)。对功能摄食类群均匀度指数与 Shannon-Wiener 多样性指数进行一元回归分析,结果显示一元回归模型显著 ( $P < 0.05$ ),模型拟合度  $R^2 = 0.44$  (图 3)。回归分析表明,功能摄食类群均匀度指数与 Shannon-Wiener 多样性指数有较好的相关性。

### 2.3 底栖动物功能摄食类群及物种群落与水质之间的关系

各样点水质理化特征表明济南南部山区溪流受到一定的人为活动干扰,具体表现在 TN 和 COD 两个指标上(表 3)。DCA 分析显示排序轴的梯度长度小于 3,因此采用冗余分析(Redundancy analysis, RDA)评价底栖动物功能摄食类群及物种群落与水质之间的关系。RDA 分析表明,前 2 轴共能解释功能摄食类群 75.1% 的变异量。各水质指标中,与第一排序轴(能解释 61.1% 的变异量)有最高回归系数的是 TP (0.19)和 Sal(0.12),见图 4a。物种群落与水质 RDA 分析表明,第一和第二排序轴共能解释底栖动物群落 46.2% 的变异量。各水质中,与第一排序轴(能解释 27.5% 的变异量)有最高回归系数的是 pH( -0.65),见图 4b。

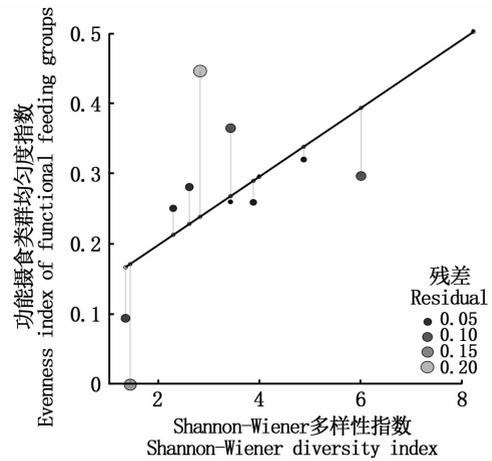


图 3 功能摄食类群均匀度指数与 Shannon-Wiener 多样性指数的关系

Fig. 3 Relationship between evenness index of functional feeding groups and Shannon-Wiener diversity index

表 2 各样点底栖动物物种相对丰度

Tab. 2 Relative abundance of macroinvertebrate in different sites

物种 Species	样点 Sites											
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12
苏氏尾鳃蚓 <i>Branchiura sowerbyi</i>		0.06							0.25			
霍甫水丝蚓 <i>Limnodrilus hoffmeisteri</i>											0.12	
梨形环棱螺 <i>Bellamya purificata</i>							0.06	0.04	0.50	0.01		
河蚬 <i>Corbicula fluminea</i>							0.04		0.25			
穆尔蛭属一种 <i>Mooreobdella</i> sp.							0.08	0.03				
椭圆萝卜螺 <i>Radix swinhoei</i>							0.14	0.01				
方格短沟蜷 <i>Semisulcospira cancellata</i>									0.03			
朝大蚊属一种 <i>Antocha</i> sp.	0.02				0.10							
四节蜉属一种 <i>Baetis</i> sp.	0.08	0.17	0.93	0.22	0.13	0.16	0.31	0.21		0.52		0.56
细蜉属一种 <i>Caenis</i> sp.	0.18	0.08	0.01	0.01		0.04	0.06	0.04		0.05		0.01
纹石蛾属一种 <i>Ceratopsyche</i> sp.	0.02	0.11	0.05	0.69	0.59	0.75	0.02	0.06		0.25		0.24
摇蚊属一种 <i>Chironomus</i> sp.	0.43	0.19		0.04	0.06	0.04	0.02			0.06	0.88	0.04
梧州蜉 <i>Ephemera wuchowensis</i>		0.03		0.01			0.12					
扁蜉属一种 <i>Heptagenia</i> sp.				0.01			0.02	0.04		0.01		0.07
长角泥虫 <i>Macronychus</i> sp.		0.03						0.51		0.05		
大溪螳属一种 <i>Philoganga</i> sp.												
长足摇蚊属一种 <i>Tanytus</i> sp.	0.28	0.33		0.01	0.12			0.03		0.05		0.09
蚋属一种 <i>Simulium</i> sp.							0.12					
日本沼虾 <i>Macrobrachium nipponense</i>							0.02					

注:仅显示相对丰度大于 0.01 的底栖动物物种。

Notes: Only macroinvertebrate species with relative abundance greater than 0.01 are shown.

表 3 各样点水质理化因子

Tab. 3 Physical and chemical variables of water quality in different sites

样点 Sites	Cond/ (us/cm)	TDS/ (mg/L)	WT/ °C	DO/ (mg/L)	pH	ORP/ mV	Sal/ (mg/L)	TN/ (mg/L)	TP/ (mg/L)	COD/ (mg/L)
S1	918.0	637.0	18.1	11.01	7.93	94.6	0.49	7.49	0.02	3.0
S2	868.0	604.5	18.2	6.74	7.80	94.8	0.46	5.87	0.03	6.1
S3	646.5	455.0	18.7	14.06	8.42	83.3	0.34	2.77	0.03	1.0
S4	559.5	390.0	18.3	10.14	8.20	90.6	0.29	5.95	0.01	8.8
S5	574.0	396.5	18.9	10.87	8.11	76.5	0.30	5.31	0.01	1.2
S6	532.1	369.2	18.3	6.62	7.71	103.5	0.28	0.43	0.01	1.0
S7	622.5	435.5	17.6	9.22	7.95	109.6	0.33	7.57	0.01	64.0
S8	532.5	370.5	19.0	7.54	8.10	89.2	0.32	3.84	0.01	7.6
S9	581.0	403.0	18.9	9.23	8.01	86.3	0.30	1.94	0.01	1.8
S10	545.0	377.0	18.8	10.42	8.00	83.8	0.28	1.63	0.01	1.0
S11	602.5	422.5	17.8	7.08	7.48	95.2	0.32	2.47	0.01	4.7
S12	349.8	245.7	17.3	9.34	7.75	92.2	0.18	1.41	0.02	1.0

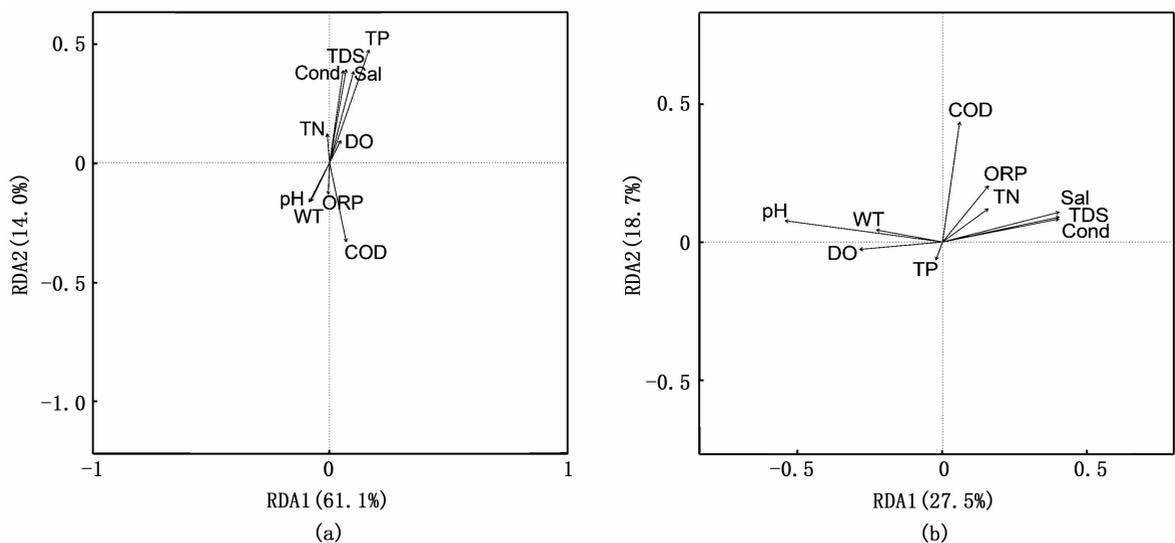


图 4 水质与功能摄食类群 (a) 和物种群落 (b) 的 RDA 分析

Fig. 4 RDA analysis of water quality and functional feeding groups (a) and community structure (b)

### 3 讨论

#### 3.1 功能摄食类群群落结构与生态系统健康评价

研究结果表明济南南部山区溪流底栖动物以收集者为主,其次为滤食者。收集者喜居流速较低、有机碎屑较多的区域;滤食者以悬浮细有机颗粒物为食,一般存在一个最适滤食流速。济南南部山区溪流底栖动物以收集者和滤食者为主的格局,说明该地区流速较低且有机质较多,这与太子河流域的研究结果一致<sup>[17]</sup>。济南南部地区人口数量较多,人类活动对水体及环境影响较大,因此济南南部山区溪流有机质较多可能与城镇化下流域内土地利用改变有关<sup>[18]</sup>。从具体样点分析,各样点功能摄食类群组成较为单一

(表 1)。其中,S1、S2、S3、S5、S6 和 S11 样点只有收集者和滤食者,其余样点除 S9 样点以刮食者为主外,也均以收集者或滤食者为主。杂食者只出现 S7 样点,而捕食者只出现在 S7 和 S8 样点。各样点功能摄食类群单一,也反映了人类活动对该地区溪流生态系统的影响。对比该地区的水质特征,发现大部分样点 TN 和 COD 的质量浓度较高(表 3),印证了该地区溪流有机物质较多。应用功能摄食类群均匀度指数( $j_{FD}$ )评价济南南部山区溪流生态质量状况也表明该地区溪流生态质量状况较差,受城镇化影响较大,这与 LIU 等<sup>[19]</sup>应用底栖动物构建多元指数评价济南城镇溪流的结果一致。因此,研究结果表明济南南部山区溪流底栖动物功能摄食类群结构及其均匀

度指数可以反映当前地区城镇化等人为活动对溪流的影响。该地区功能摄食类群均匀度指数低的原因在于大部分样点功能摄食类群组成较为单一,而且主要摄食类群相对丰度占绝对优势(表1)。其中,S7和S9样点的功能摄食类群均匀度指数较高的原因在于:S7样点虽然收集者相对丰度较高(0.53),但是滤食者、杂食者、捕食者和刮食者均出现;S9样点则滤食者、收集者和刮食者相对丰度较为均匀。S12、S8和S10功能摄食类群均匀度指数低于S7和S9的原因在于,虽然这几个样点也包含3~4种功能摄食类群,但是收集者相对丰度较高,均高于0.6(分别为0.61、0.78和0.68)。由上述分析可得,济南南部地区溪流大部分样点由于人类活动导致有机物质过多输入,引起以有机物为食的功能摄食类群相对丰度占优势,功能摄食类群组成单一,最终导致该地区溪流生态系统健康下降。功能摄食类群均匀度指数能够很好地反映该地区溪流生态系统健康状况。

### 3.2 功能摄食类群均匀度指数与 Shannon-Wiener 多样性指数相关性分析

Shannon-Wiener 多样性指数常作为水生生物监测和水质生物学评价指标<sup>[20]</sup>,然而该指数在一些特定的研究水域并不适用。例如,Shannon-Wiener 多样性指数在淮北煤矿区塌陷湖泊不适宜进行水质生物学评价<sup>[21]</sup>。黑河流域底栖动物物种组成受自然因素和人类活动双重影响程度差异较大,使得 Shannon-Wiener 多样性指数不适合黑河水质评价<sup>[22]</sup>。底栖动物功能摄食类群均匀度指数评价方法创立不久,在溪流生态系统健康评价方面的应用较少。因此,探索底栖动物功能摄食类群均匀度指数与 Shannon-Wiener 多样性指数相关性可以为这两种评价模式进行互补。本研究发现,功能摄食类群均匀度指数与 Shannon-Wiener 多样性指数存在较好的相关性。这一结果说明,在当前地区城镇化等人为活动影响下的溪流,Shannon-Wiener 多样性指数和功能摄食类群均匀度指数评价都适用。从具体样点分析,大部分样点功能摄食类群均匀度指数与 Shannon-Wiener 多样性指数回归残差较小。其中,残差最小的是 S7 和 S8 样点,残差最大的是 S9 和 S11 样点(图3)。S7 和 S8 样点物种数目丰富,功能摄食类群种类较多(表1,表2)。S9 样点

出现3个物种,1个物种代表1个摄食类群;S11样点出现2个物种,皆为收集者(表1,表2)。因此,功能摄食类群均匀度指数与 Shannon-Wiener 多样性指数在物种数目丰富且功能摄食类群较多的情况下,评价结果有更好的替代性。

### 3.3 底栖动物功能摄食类群及物种群落与水质之间的关系

水质是与底栖动物物种群落和功能摄食类群相关性较好的环境因子<sup>[23]</sup>。尤其在较小的研究区域内,水质对底栖动物的影响更加重要<sup>[24]</sup>。在本研究中,水质与底栖动物物种群落和功能摄食类群都具有较好的相关性。因此,底栖动物物种群落和功能摄食类群均可作为水质生物学评价的研究对象。研究结果还表明,水质对功能摄食类群变异的解释率高于物种群落,说明在城镇化溪流中,功能摄食类群可能比物种群落对水质更敏感,更适合作为监测对象。水质参数中与功能摄食类群相对丰度相关性最高的是总磷,这与 DALU 等<sup>[25]</sup>的研究结果相类似。总磷是衡量水体受营养物质污染程度的重要标志,影响底栖动物功能摄食类群的生存与繁殖<sup>[26]</sup>。总磷还可以通过影响溪流中藻类的生长,通过食物资源上行影响底栖动物功能摄食类群。水质中与物种相对丰度相关性最高的参数是 pH,这是因为绝大部分底栖动物的适宜 pH 为 6~8<sup>[27]</sup>,而本研究中有 5 个样点的 pH 超过 8,对底栖动物的生存产生了影响。对比底栖动物功能摄食类群和物种群落与水质之间的关系,功能摄食类群最相关的因子总磷与营养和食物资源有关,而物种群落最相关的因子 pH 与生存环境有关。

### 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(7315): 555-561.
- [2] BONADA N, PRAT N, RESH V H, et al. Developments in aquatic insect biomonitoring: a comparative analysis of recent approaches[J]. *Annual Review of Entomology*, 2006, 51: 495-523.
- [3] MENEZES S, BAIRD D J, SOARES A M V M. Beyond taxonomy: a review of macroinvertebrate trait-based community descriptors as tools for freshwater biomonitoring [J]. *Journal of Applied Ecology*, 2010, 47(4): 711-719.
- [4] CUMMINS K W, KLUG M J. Feeding ecology of stream invertebrates [J]. *Annual Review of Ecology and*

- Systematics, 1979, 10: 147-172.
- [5] PENG S T, ZHOU R, QIN X B, et al. Application of macrobenthos functional groups to estimate the ecosystem health in a semi-enclosed bay[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2013, 74(1): 302-310.
- [6] DING N, YANG W F, ZHOU Y L, et al. Different responses of functional traits and diversity of stream macroinvertebrates to environmental and spatial factors in the Xishuangbanna watershed of the upper Mekong River Basin, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 574: 288-299.
- [7] GAMITO S, FURTADO R. Feeding diversity in macroinvertebrate communities: a contribution to estimate the ecological status in shallow waters[J]. *Ecological Indicators*, 2009, 9(5): 1009-1019.
- [8] 汪兴中, 邹霞, 何思霞, 等. 应用底栖动物功能摄食群评价东苕溪下游生态系统健康状况[J]. *上海海洋大学学报*, 2018, 27(1): 91-97.
- WANG X Z, ZOU X, HE S X, et al. Application of macroinvertebrate functional groups to estimate the ecosystem health in the downstream of the East Tiaoxi River[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2018, 27(1): 91-97.
- [9] MCCALLEN E, KNOTT J, NUNEZ-MIR G, et al. Trends in ecology: shifts in ecological research themes over the past four decades[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2019, 17(2): 109-116.
- [10] 冯宝平, 梁行, 曾灼. 基于 SWAT 模型的济南南部山区土地利用优化研究[J]. *灌溉排水学报*, 2018, 37(5): 121-128.
- FENG B P, LIANG X, ZENG Z. Optimizing land usage in southern mountain areas of Jinan based on the SWAT model[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2018, 37(5): 121-128.
- [11] 王帅帅, 王博涵, 韩洁, 等. 济南南部山区夏季水域浮游植物功能群分析[J]. *河北渔业*, 2017(5): 24-25, 30.
- WANG S S, WANG B H, HAN J, et al. Analysis of phytoplankton functional groups in the mountainous area of Southern Jinan in summer[J]. *Hebei Fisheries*, 2017(5): 24-25, 30.
- [12] 韩现明, 王博涵, 郑波, 等. 济南南部山区水体夏季浮游动物多样性研究[J]. *河北渔业*, 2016(12): 28-30, 36.
- HAN X M, WANG B H, ZHENG B, et al. Study on the diversity of zooplankton in the southern mountain area of Jinan in summer[J]. *Hebei Fisheries*, 2016(12): 28-30, 36.
- [13] 王帅帅, 王博涵, 金文, 等. 济南南部山区水库底栖动物功能摄食类群的研究[J]. *河北渔业*, 2017(4): 30-31, 48.
- WANG S S, WANG B H, JIN W, et al. Study on functional feeding groups of benthos in reservoirs in southern mountain area of Jinan[J]. *Hebei Fisheries*, 2017(4): 30-31, 48.
- [14] BARBOUR M T, GERRITSEN J, SNYDER B D, et al. Rapid bioassessment protocols for use in streams and
- wadeable river: periphyton, Benthic Macroinvertebrates and Fish[M]. 2nd ed. Washington D C: U. S. Environmental Protection Agency, Office of Water, 1999: 270-324.
- [15] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 4 版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- The State Environmental Protection Administration. Water and wastewater monitoring and analysis method[M]. 4th ed. Beijing: China Environmental Press, 2002.
- [16] LEP Š J, ŠMILAUER P. Multivariate analysis of ecological data using CANOCO[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.
- [17] 张亚, 丁森, 张远, 等. 太子河流域土地利用对大型底栖动物功能摄食类群的影响[J]. *环境科学研究*, 2018, 31(9): 1527-1536.
- ZHANG Y, DING S, ZHANG Y, et al. Effects of land use on macroinvertebrate functional feeding groups in Taizi River Basin[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2018, 31(9): 1527-1536.
- [18] 王博涵, 吴丹, 张吉, 等. 济南河流大型底栖动物摄食功能群多样性及时空动态[J]. *生态学报*, 2017, 37(21): 7128-7139.
- WANG B H, WU D, ZHANG J, et al. Diversity and temporal-spatial dynamics of macroinvertebrate functional feeding groups in the rivers of the Jinan Region[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(21): 7128-7139.
- [19] LIU L F, XU Z X, YIN X W, et al. Development of a multimetric index based on benthic macroinvertebrates for the assessment of urban stream health in Jinan City, China[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2017, 189(5): 205.
- [20] 汪兴中, 蔡庆华, 李凤清, 等. 南水北调中线水源区溪流大型底栖动物群落结构的时空动态[J]. *应用与环境生物学报*, 2009, 15(6): 803-807.
- WANG X Z, CAI Q H, LI F Q, et al. Distribution dynamics of macroinvertebrates in the source water areas of the south-water-to-north project[J]. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 2009, 15(6): 803-807.
- [21] 纪磊, 李晓明, 邓道贵. 淮北煤矿区塌陷湖大型底栖动物群落结构及水质生物学评价[J]. *水生生物学报*, 2016, 40(1): 147-156.
- Ji L, LI X M, DENG D G. Community structure of macrozoobenthos and bioassessment of water quality in collapse lakes in Huaibei mining areas[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2016, 40(1): 147-156.
- [22] 王昱, 刘娟娟, 冯起, 等. 黑河流域底栖动物群落结构及水质评价[J]. *中国环境科学*, 2020, 40(3): 1305-1319.
- WANG Y, LIU J J, FENG Q, et al. Macrobenthos community structure and water quality evaluation of Heihe River Basin[J]. *China Environmental Science*, 2020, 40(3): 1305-1319.
- [23] WANG X Z, ZHANG Y Y, TAN X, et al. Do water quality, land use, or benthic diatoms drive macroinvertebrate

- functional feeding groups in a subtropical mountain stream? [J]. *Inland Waters*, 2021, 11(1): 67-77.
- [24] MYKRÄ H, HEINO J, MUOTKA T. Scale-related patterns in the spatial and environmental components of stream macroinvertebrate assemblage variation [J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2007, 16(2): 149-159.
- [25] DALU T, WASSERMAN R J, TONKIN J D, et al. Assessing drivers of benthic macroinvertebrate community structure in African highland streams: an exploration using multivariate analysis [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 601-602: 1340-1348.
- [26] 王汨, 杨柏贺, 孟云飞, 等. 北京北运河水系夏季底栖动物功能摄食类群与环境因子的关系 [J]. *广东海洋大学学报*, 2018, 38(1): 1-6.
- [27] 朱晨曦, 莫康乐, 唐磊, 等. 漓江大型底栖动物功能摄食类群时空分布及生态效应 [J]. *生态学报*, 2020, 40(1): 60-69.
- ZHU C X, MO K L, TANG L, et al. Spatial-temporal distribution and ecological effects of macroinvertebrate functional feeding groups in the Lijiang River [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(1): 60-69.

## Application of macroinvertebrate functional groups to estimate the ecosystem health in the stream of southern mountainous area of Jinan City

LI Xin<sup>1</sup>, FU Yao<sup>1</sup>, DAI Jing<sup>1</sup>, WANG Xingzhong<sup>2</sup>, YU Xuefang<sup>3</sup>, ZHENG Wenwen<sup>4</sup>, SHEN Henglun<sup>4</sup>

(1. *Jinan Environmental Research Institute, Jinan 250014, China*; 2. *Zhejiang Provincial Key Laboratory of Aquatic Resources Conservation and Development, Huzhou University, Huzhou 313000, Zhejiang, China*; 3. *Zhejiang Environmental Monitoring Association, Hangzhou 310007, Zhejiang, China*; 4. *College of Life Sciences, Zaozhuang University, Zaozhuang 277160, Shandong, China*)

**Abstract:** The investigation on the functional groups of macroinvertebrate was carried out at 12 sites in the stream of southern mountainous area of Jinan City in September 2019. The feeding evenness index ( $j_{FD}$ ) was used to assess the ecosystem health of the stream of southern mountainous area of Jinan city. The results showed that the gather-collectors with relative abundance of 56.9% was the most dominant group among the functional groups of macroinvertebrates in this area, followed by filter feeders with relative abundance of 35.4%; the dominant groups were mainly *Baetis* sp., *Ceratopsyche* sp., *Chironomus* sp., *Bellamyia purificata*, *Macronychus* sp. and *Tanypus* sp.. The  $j_{FD}$  value indicated that the overall ecosystem health in the stream of southern mountainous area of Jinan city was in poor condition. The regression analysis showed that there was a good correlation between  $j_{FD}$  and Shannon-Wiener diversity index. The redundancy analysis (RDA) showed that the relative abundance of the functional feeding groups was closely related to the total phosphorus, while the community structure of macroinvertebrate was closely related to the pH.

**Key words:** Feeding Evenness Index; bioassessment; macroinvertebrate; southern mountainous area of Jinan City