

基于大型底栖动物对山溪性强潮河流的水质健康评价

——以椒江干流为例

王斌梁¹, 蓝轩¹, 叶璐洁³, 毛维浩², 殷豪¹, 徐泓¹

(1.绍兴文理学院 生命与环境科学学院, 浙江 绍兴 312000; 2.杭州英瓦洛环境科技有限公司, 杭州 310000; 3.浙江省生态环境监测中心, 浙江 绍兴 312000)

摘要:山溪性强潮河流是我国东南沿海典型的河流类型, 由于受到潮汐影响, 水体稳定性差, 交换频繁, 河流的健康状况较难准确评估. 以浙东沿海椒江干流为研究对象, 通过分析底栖动物群落分布及组成, 系统评估椒江干流的水质健康情况, 为山溪性强潮河流的水质健康评价提供了借鉴意义. 研究表明, 山溪性河段(上游)与感潮河段(下游)的底栖动物均以节肢动物门为主, 上游和下游底栖动物平均密度分别为 $131 \text{ ind} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $26 \text{ ind} \cdot \text{m}^{-2}$, 平均生物量分别为 $11.43 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $0.12 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$. 同时, 优势种也呈现出显著的空间差异, 上游河段优势种为昆虫纲四节蜉属(*Baetis* sp.)和多足摇蚊属(*Polypedilum* sp.); 下游感潮河段的优势种为多毛纲齿吻沙蚕属(*Nephtys* sp.)和十足目长臂虾属(*Palaemon* sp.). 进一步分析底栖动物 Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数、BI 指数和 BMWP 指数, 结果表明上游河段水质较下游河段优良, 分析其原因为下游区域城镇化水平较高, 人为干扰对河流影响较大, 同时在潮汐作用下, 底栖动物栖息环境较不稳定. 综上所述, 底栖动物群落结构能较好反映山溪性强潮河流的生境差异, 可以作为此类河流水质健康状况的重要指示生物.

关键词:山溪性强潮河流; 大型底栖动物; 生物多样性; 河流健康

中图分类号:Q-9

文献标志码:A

文章编号:1000-2367(2025)06-0044-08

河流系统是组成淡水系统的重要部分, 在物质循环流通、生物多样性保护、供水、发电、航运、旅游以及调节局地气候等方面都有着不可替代的作用^[1]. 为保障经济社会的稳定, 以及生态系统的健康, 世界各国逐渐关注对河流系统的保护. 对河流健康状况的监测是维护河流生态系统的重要环节, 底栖动物作为河流生态中的关键类群, 在生态食物网中发挥着至关重要的作用, 它们广泛分布于河流系统中, 有较长的生活周期, 且迁移能力较弱, 栖息环境的改变易影响其群落结构, 所以底栖动物群落结构能够综合反映较长时间段内水体的质量^[2]. 同时, 不同的底栖动物对环境变化的耐受性与敏感性都存在差异, 对不同水体环境具有明确的指示作用^[3].

早在 20 世纪中期, 国外就已经采用底栖动物的多样性指标来评价淡水生态系统的健康状况, 如 Margalef 指数和 Shannon 多样性指数等^[4-5]. 但是多样性指标的评价会受到底栖动物对环境耐受能力的干扰, 因此 20 世纪 70 年代后, 大型底栖动物在水质评价中发展了生物指数和计分系统, 如美国的 BI 指数和英国 BMWP 指数等, 这些考虑了底栖动物不同耐受能力的生物评价也逐渐完善了淡水水质评价的标准. 基于这

收稿日期:2024-06-18; **修回日期:**2024-08-26.

基金项目:浙江省自然科学基金(LTGN23C190001).

作者简介(通信作者):王斌梁(1989—), 男, 浙江绍兴人, 绍兴文理学院副教授, 研究方向为淡水生态学, E-mail: wangbl@usx.edu.cn.

引用本文:王斌梁, 蓝轩, 叶璐洁, 等. 基于大型底栖动物对山溪性强潮河流的水质健康评价[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2025, 53(6): 44-51. (Wang Binliang, Lan Xuan, Ye Lujie, et al. Application of benthic macroinvertebrates in evaluating water quality health of a macro-tidal estuary with a mountain stream: A case study of the Jiaojiang River[J]. Journal of Henan Normal University(Natural Science Edition), 2025, 53(6): 44-51. DOI: 10.16366/j.cnki.1000-2367.2024.06.18.0003.)

些原因,底栖动物的水质生物监测在全球范围内的应用极为广泛.目前,基于大型底栖动物的各类河流健康评估已经较为完善,但是对同时具备溪流和潮汐影响特性的河流的完整评价较缺乏.

山溪性强潮河流是中国东南部浙闽沿海地区典型的河流类型^[6],其河流最终汇入海洋,中下游受潮汐作用影响,区别于单纯的山溪性河流.浙闽地区的鳌江^[7],闽江^[8],瓯江^[6]均属于此类河流,但目前对山溪性强潮河流的研究往往局限于河口^[9]等区域,缺乏对此类河流底栖动物的完整调查和评价.椒江是浙江台州境内的主干河流,属于典型的山溪性强潮河流^[10],是浙江水生态健康建设的重要对象之一^[11].因此,本研究将以椒江为例,通过底栖动物群落结构评价山溪性强潮河流健康状况,了解椒江的水质空间变化情况,为山溪性强潮河流的水质健康评价与生态修复提供参考.

1 材料与方法

1.1 采样点位与样品采集

椒江是浙江省台州市的独流入海型河流,有多条支流汇聚,是浙江省沿海第三大流域.椒江全长190 km,其上游为山溪性河流,下游存在感潮河段,潮区界位于永安溪毛良店,感潮河段长 68 km.本次采样将椒江干流分为山溪性河段和感潮河段,如图 1 所示,分别在山溪性河段和感潮河段设置 10 个和 11 个采样点,共计 21 个点位.所有样品均于 2021 年 11 月份完成采集.

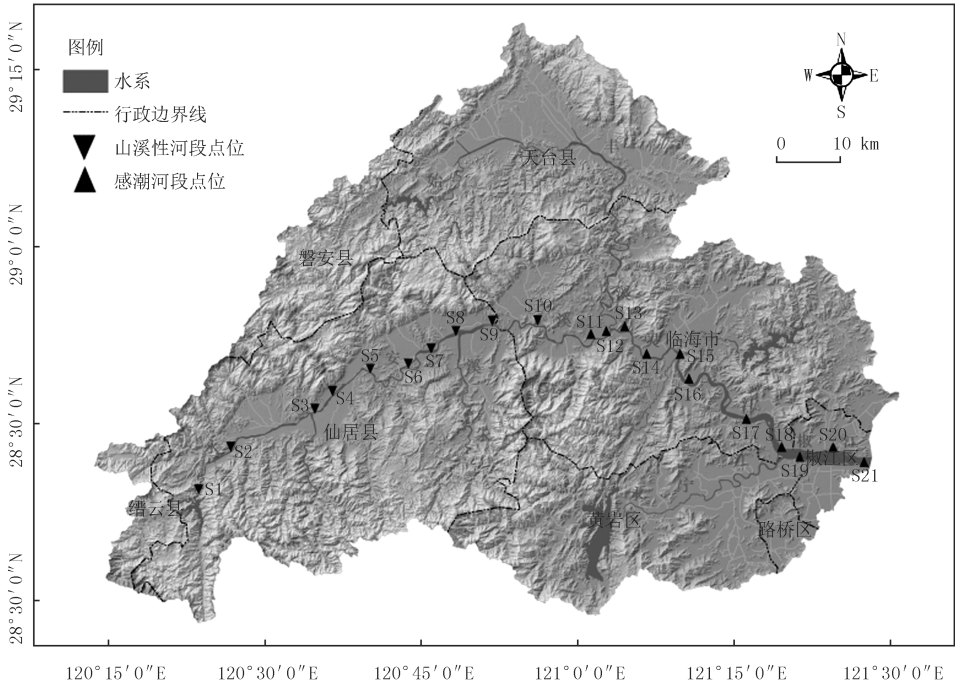


图1 地图采样位点展示
Fig.1 Map of sampling sites

采样过程中,不同生境选用不同的采样方式,在溪流型水体等可涉水河段采用定量框法采集样品,以索伯网面积框(0.30 m×0.30 m)框定合适区域,采集框内 20~30 cm 深度的底质样品,网口朝逆水流方向紧贴水底,每个样点采集 2 次并将样品混合.在不可涉水河段或底泥丰富河段,采用 1/16 m² 彼得森采泥器抓取底泥,每个样点采集两次并将样品混合,将底泥倒入长柄 D 型抄网中进行样品初步筛洗,冲净污泥,在密封袋 4 ℃ 保存.取得底质和样品后,在灯下拣出所有样品,装入干净塑料瓶,加入适量体积分数 75%乙醇溶液,再加入适量体积分数 5%甲醇溶液固定后带回实验室,对样品进行种类及数量鉴定,根据采样面积及抓取底泥面积计算大型底栖动物的密度(ind·m⁻²)、生物量(g·m⁻²)以及相对丰度(门类密度/总密度).大型底栖动物鉴定方法参照相关文献[12—14].

1.2 评价指数

物种优势度(Y):物种优势度 Y 用于指示大型无脊椎动物在当前河段的出现频率以及个体数量,当 $Y>0.02$ 时确定为优势种.物种优势度 $Y^{[15]}$ 的计算公式: $Y=(N_i/N)f_i$,式中参数代表含义见表 1.

Shannon-Wiener 多样性指数(H'):常用于评估大型无脊椎动物在区域生境内的多样性情况,计算公式^[5]: $H'=-\sum(N_i/N)\ln(N_i/N)$,式中参数代表含义见表 1,评价标准见附录表 S1.

Pielou 均匀度指数(J):物种均匀度反映了在一定区域内某一群落全部物种个体数目的分配状况,将区域内各物种个体数目分配的均匀程度以数值呈现,计算公式^[16]: $J=H'/\ln S$,式中参数代表含义见表 1,评价标准见附录表 S1.

BI 指数:基于底栖动物的耐污值建立的水质生物学评价方法,通过为底栖动物的耐污染能力进行赋分,耐污染能力越强,耐污值越高,最高设置为 10,如摇蚊属及寡毛类. BI 指数^[17] 的计算公式: $BI=\sum_{i=1}^S(N_i/N)t_i$,式中参数代表含义见表 1,其中耐污值参照文献[18]评价标准见附录表 S1.

$BMWP$ 指数:以科级水平的分类和鉴定结果来评价水质的指数,其指数根据大型无脊椎动物敏感水平赋 1~10 分,分数越高代表底栖动物的敏感度越高. $BMWP$ 指数^[19] 的计算公式: $BMWP=\sum t_i$,式中参数评价标准见表 1,科级敏感值参考生态环境部《水生态监测技术指南 河流水生生物监测与评价(试行)》(HJ 1295—2023),评价标准见附录表 S1.

表 1 评价指数的参数及代表含义

Tab. 1 Parameters and representative meanings of the evaluation index

参数	代表含义	参数	代表含义
N_i	第 i 个物种的个体数目	H'	Shannon-Wiener 多样性指数
N	所有物种的个体总数	S	物种数
f_i	第 i 种物种出现的频率	t_i	第 i 个物种的耐污值(BI 指数)或敏感值($BMWP$ 指数)

2 结果

2.1 大型底栖动物的群落结构分析

椒江干流共鉴定出大型无脊椎底栖动物 3 门 42 属(种),其中环节动物门 6 属(种),占比 14.3%,软体动物门 5 属(种),占比 11.9%,节肢动物门 31 属(种),占比 73.8%.分别对 2 个河段进行分析,在山溪性河段带共鉴定出底栖动物 3 门 33 属(种),其中环节动物门和软体动物门各 4 属(种),各占 12.1%,节肢动物门 25 属(种),占比 75.8%;在感潮河段带共鉴定出底栖动物 3 门 17 属(种),其中环节动物门 5 属(种),占比 29.4%,软体动物门 2 属(种),占比 11.8%,节肢动物门 10 种,占比 58.8%.

进一步对底栖动物的密度进行分析可知,椒江干流底栖动物平均密度为 $76\text{ ind}\cdot\text{m}^{-2}$,其中环节动物平均密度为 $15\text{ ind}\cdot\text{m}^{-2}$,软体动物平均密度为 $17\text{ ind}\cdot\text{m}^{-2}$,节肢动物平均密度为 $42\text{ ind}\cdot\text{m}^{-2}$.对 2 个河段带单独分析,山溪性河段底栖动物平均密度为 $131\text{ ind}\cdot\text{m}^{-2}$,其中节肢动物门平均密度最高,达到 $80\text{ ind}\cdot\text{m}^{-2}$,相对丰度为 61.07%;感潮河段底栖动物平均密度为 $26\text{ ind}\cdot\text{m}^{-2}$,其中环节动物门密度最高,达到 $15\text{ ind}\cdot\text{m}^{-2}$,相对丰度为 57.69%.

对 2 个河段底栖动物生物量进行比较分析可知(图 2),椒江干流底栖动物平均生物量为 $5.82\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$,其中环节动物平均生物量为 $0.03\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$,软体动物平均生物量为 $5.31\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$,节肢动物平均生物量为 $0.48\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$.对 2 个河段进行单独分析发现,山溪性河段底栖动物平均生物量($11.43\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$)远高于感潮河段($0.12\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$).与密度分析结果不同,山溪性河段中软体动物生物量最高,达到 $11.09\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$,感潮性河段中节肢动物生物量最高,达到 $0.06\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$.该现象主要源于底栖动物个体生物量的差异^[20],比如椒江干流中发现的软体动物个体生物量要远大于节肢动物和环节动物的个体生物量.

2.2 大型底栖动物优势种分析

通过优势度 Y 对各河段底栖动物优势种进行分析可知(附录表 S2),山溪性河流的优势种为节肢动物门

昆虫纲的四节蜉属(*Baetis* sp.)和多足摇蚊属(*Polypedilum* sp.),两者的优势度均为 0.04;感潮河段的优势种为多毛纲的齿吻沙蚕属(*Nephtys* sp.),其优势度最高为 2.25,以及十足目的长臂虾属(*Palaemon* sp.),其优势度为 0.63.

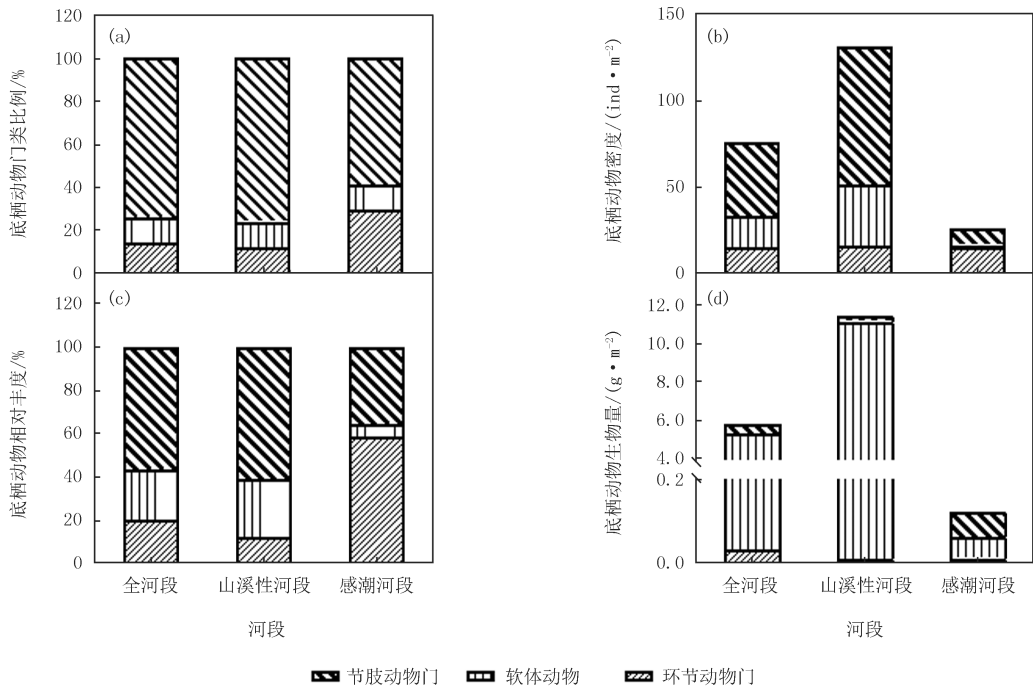


图2 椒江底栖动物群落结构

Fig.2 Community structure of benthic macroinvertebrates in Jiaojiang River

2.3 大型底栖动物多样性分析

H' 常用于反映生物群落结构的复杂性和稳定性,同时也能反映水体的健康状况^[5].如图 3(a)所示,对各河段 H' 进行分析可知,上游河段的 H' 总体为 1.47,10 个样点的 H' 基本处于 1~2 范围内,说明上游山溪性河流河段总体处于中污染状态;下游感潮河段的 H' 在 0~1.39 之间,依照评分表比对,感潮河段整体属于重污染,其中多个点位仅采集到 1 种底栖动物,所以 H' 为 0,对照评分表,仅有 4 个点位(S11,S16,S19,S20)属于中污染,其他均为重污染水质.

Pielou 均匀度指数能够反映一个群落或环境中的全部物种个体数目的分配状况^[16].本研究对 Pielou 均匀度指数进行计算发现(图 3(b)),上游河段均匀度指数总体为 0.89,属于清洁型,单独对各个位点进行分析发现均属于轻污染或者清洁型水体;而下游感潮河段均匀度指数总体为 0.49,属于中污染,其中 5 个位点(S13,S14,S15,S17,S21)为重污染.

2.4 基于底栖动物 BI 指数和 BMWP 指数评价水生态健康状况

BI 指数既能反映底栖动物群落的耐污特征,也能反映不同耐污类群的丰度,是基于底栖动物群落结构评价水质的重要指数之一^[21].如图 4(a),对不同河段 BI 指数进行计算可知,上游河段 BI 值平均为 5.13,说明整体水质状况为清洁.然而,其中 S4 位点 BI 值高达 7.79,属于中污染水平,其主要类群为颤蚓科的苏氏尾鳃蚓(*Branchiura sowerbyi*)和水丝蚓属(*Limnodrilus* sp.),两者均为耐污种.考虑到该位点处于村落聚集区域,水质降低的原因可能与周边村民生活污水的排放有关.下游感潮河段 BI 值范围在 4.63~8.16 之间,平均为 5.65,整体水质表现为良好.

BMWP 指数在面临栖息地环境状况与流域面源污染有着较为良好的指示作用^[19].目前 BMWP 指数被多个国家修订并应用于河流水质监测^[22].如图 4(b)所示,上游山溪型河流的 BMWP 计分平均为 37.6,整体河段水质属于轻污染,其中仅有 S2 位点的计分为 88,属于清洁水体,S1 和 S3 计分分别为 71 和 63,水质情况良好,沿着河流流向,各位点的 BMWP 都较前 3 个位点更低,最低为 S9 仅 6 分,水质情况属于重污染;下

游感潮河段的 *BMWP* 指数平均仅为 11.73, 水体水质处于中污染水平, 其 11 个位点的分数分布情况与 *BI* 值较为类似, 同样是在感潮河段的头尾两端几个位点的分数较高, 最高为 27, 为 S20 位点, 但仍属于轻污染的水质, 而下游感潮河段的最低分仅为 1 分, 为 S15 位点, 处在感潮河段中段位置, 该位点受到人类活动与不定潮汐的共同作用导致物种单一, 仅采集到仙女虫属(*Nais* sp.), 且物种属于低敏感值种类, 其敏感值仅为 1.0.

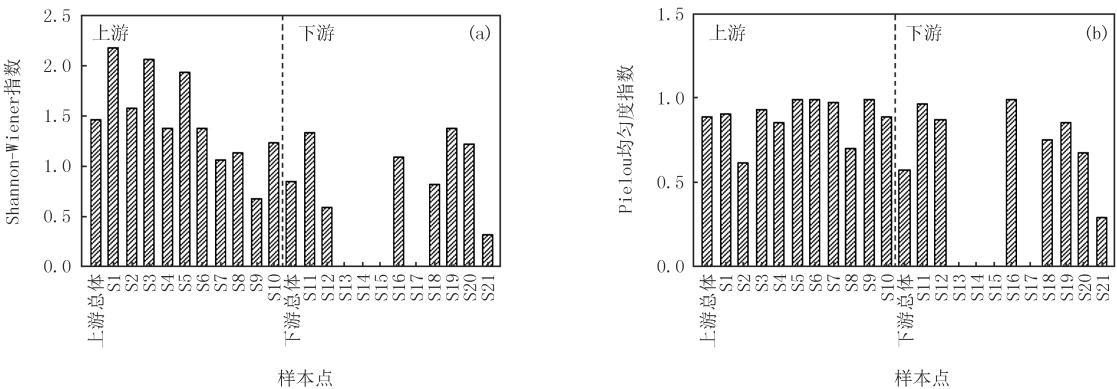


图3 底栖动物多样性特征
Fig.3 Characteristics of the benthic macroinvertebrates diversity

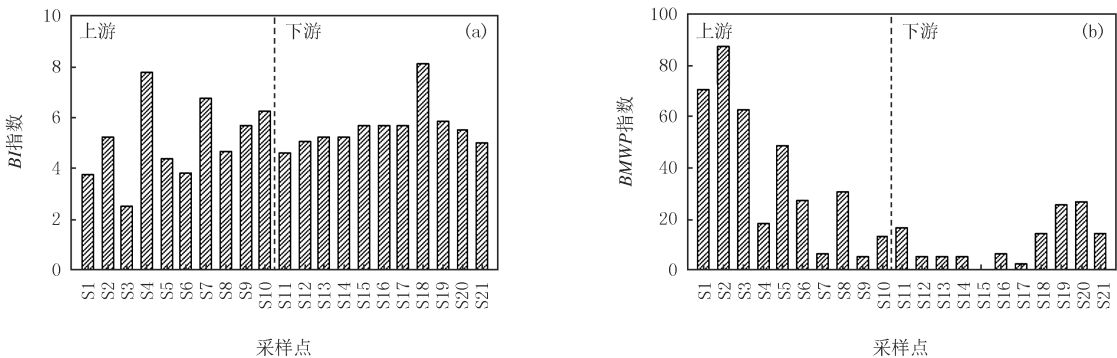


图4 椒江干流各位点*BI*指数与*BMWP*指数
Fig.4 *BI* index and *BMWP* index of Jiaojiang River

3 讨 论

3.1 大型底栖动物的群落组成

不同河段之间底栖动物物种数的差异除了人类活动导致的水质变化,还与河段受到的潮汐因素引起的环境改变有关.椒江干流上游的永安溪属于溪流,由山涧之间汇聚而成,受到人为干扰较少,同时底质以卵石和有机碎屑为主,为底栖动物栖息提供了优越的环境,有助于底栖动物生长繁殖.然而,永安溪下游部分河段(S11)到河口(S21)段位置,由于受到潮汐影响,淡水与盐水频繁交替,且底质多为泥沙,无法为底栖动物提供稳定的栖息环境,导致物种数相对较少.

底栖动物密度和优势门类的差别常源于栖息生境的差异.电导率、溶解氧、底质的径粒和 pH 等环境因素都会对底栖动物的分布产生影响.急流、贫营养、低水温和高溶解氧为山溪性河流的水体特征,节肢动物门的昆虫纲蜉蝣目偏好急流与洁净的水体,因此山溪性河流底栖动物主要为节肢动物门^[23];感潮河段受到潮水的影响,在电导率、盐度、底质和溶解氧因素上都与山溪性河流存在一定的差异.另外,随着水深的增加,水压和溶解氧限制了许多底栖动物的分布^[24].

进一步分析优势度可知,上游四节蜉属占据优势地位,分析其原因主要为上游地区受到人类活动干扰较少,且上游河段底质多以卵石、有机碎屑为主,为底栖动物提供了优越的避难与觅食场所.另有研究表明,四节蜉的鳃结构需要流水获取氧气,且其流线型能够避免流速过快被急流冲走,因此四节蜉科(*Baetidae*)的密

度常随流速增加而增大^[25].然而,齿吻沙蚕属在椒江河口大量分布,在感潮河段部分河段上少量存在,长臂虾属则在感潮河段后半段(S18-S21)广泛分布.优势种的分布受到物种自身特性和环境双重因素决定.下游的齿吻沙蚕属成为绝对优势种是由于感潮河段底质以泥质和沙泥质为主,且较高的盐度条件适宜此类物种的生长^[26].

3.2 大型底栖动物多样性特征

从底栖动物多样性分析可知,上游河段随着河流走向,多样性呈下降的趋势,而下游河段总体则出现了先下滑再上升的趋势.造成上下游河段出现不同结果的原因较多,例如对城市化水平较高的地区的水体调查研究发现,多数河流随着流向 H' 和 Pielou 均匀度指数都有降低的趋势,此类现象与人类活动的强烈程度具有显著的关联性.另外,此类水体往往表现为低溶解氧、高度有机污染等特性,底栖动物在此类水体中表现出以双翅目为主导地位,总体呈现物种多样性的降低与单一群体的绝对优势^[27].同时,大量研究还表明,盐度是导致河口生态系统出现此类现象的主要因素^[28].

3.3 BI 指数和 BMWP 指数

相较于多样性指数而言,BI 指数无法指示上下游水质的空间差异.不同于 BI 指数的评价结果,BMWP 指数的评价结果与多样性特征评价结果契合.依照椒江干流周边区域的城市发展来看^[29],水质的变化情况与城市化程度存在较为明显的相关性,在城市区域的点位(S5-S9,S13-S16,S18-S21)BMWP 指数均偏低.其中,上游河段位点越靠近人类活动密集区域,其水质健康状况越差;下游河段位点又可区分为感潮河段位点和河口位点.感潮河段位点会受到人类活动带来的污染和潮汐作用双重影响,底栖动物的群落构成会逐渐往低敏感值耐污种的方向演变^[30],使得感潮河段较山溪性河段底栖动物的分布相对单一,且为耐污种低敏感值物种或为耐盐物种,类似结果在泰晤士河的 BMWP 指数评价过程中也有发生^[31].河口位点底栖动物同样受到人类活动造成的环境问题以及潮汐的共同作用,但是由于潮汐将河流污染物汇入大海,在一定程度上稀释了污染物,并且随着河流流向河口,水体盐度迅速上升,在一定程度上带动着底栖动物群落结构发生变化,表现为物种数目的增多与耐盐种的出现,最终导致 BMWP 指数的增长^[32].

4 结 论

通过对典型山溪性强潮河流椒江的调查可知,上游山溪性河段和下游感潮河段的底栖动物群落结构存在显著空间差异,并能较好指示生境状况.进一步以底栖动物群落结构评价椒江水质健康状况,Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数和 BMWP 指数均能较好指示椒江干流水质空间差异状况,其中上游山溪性河段呈现为清洁-中污染状况,下游感潮河段呈现为中污染-重污染状况.综上所述,底栖动物群落结构能准确评估山溪性强潮河流椒江的生境变化及其水质健康现状,可以作为此类沿海河流水质评价的重要指示生物.

附录见电子版(DOI:10.16366/j.cnki.1000-2367.2024.06.18.0003).

参 考 文 献

[1] PAN Z Z, HE J H, LIU D F, et al. Ecosystem health assessment based on ecological integrity and ecosystem services demand in the Middle Reaches of the Yangtze River Economic Belt, China[J]. Science of The Total Environment, 2021, 774: 144837.

[2] RESH V H, NORRIS R H, BARBOUR M T. Design and implementation of rapid assessment approaches for water resource monitoring using benthic macroinvertebrates[J]. Australian Journal of Ecology, 1995, 20(1): 108-121.

[3] 刘麟菲, 徐宗学, 殷旭旺, 等. 济南市不同区域水生生物与水环境因子的响应关系[J]. 湖泊科学, 2019, 31(4): 998-1011.

LIU L F, XU Z X, YIN X W, et al. Response of aquatic organism richness to physiochemical factors at different regions in Jinan City[J]. Journal of Lake Sciences, 2019, 31(4): 998-1011.

[4] ULANOWICZ R E. Information theory in ecology[J]. Computers & Chemistry, 2001, 25(4): 393-399.

[5] SHANNON C E. A mathematical theory of communication[J]. Bell System Technical Journal, 1948, 27(3): 379-423.

[6] 刘菁, 左利钦, 徐群, 等. 山溪性强潮河口分汊河道演变机制: 以瓯江江心屿河段为例[J]. 水科学进展, 2022, 33(2): 274-285.

LIU J, ZUO L Q, XU Q, et al. Study on the evolution mechanism of bifurcated branches in the macro-tidal estuary with a mountain

- stream:case study of the Jiangxinyu reach in the Oujiang River[J].Advances in Water Science,2022,33(2):274-285.
- [7] 左利钦,陆永军,季荣耀.浙江南部淤泥质海岸河口拦门沙航道泥沙回淤规律;以鳌江河口为例[J].应用基础与工程科学学报,2014,22(1):88-105.
- ZUO L Q,LU Y J,JI R Y.Back silting law of the mouth bar channel in southern Zhejiang muddy coastal estuaries;case study of aojiang estuary[J].Journal of Basic Science and Engineering,2014,22(1):88-105.
- [8] 赵冬梅,高爱国,李超,等.闽江下游及河口海域水体中悬浮物的分布特征[J].海洋地质前沿,2012,28(6):35-39.
- ZHAO D M,GAO A G,LI C,et al.Distribution pattern of suspended particulate matters in the lower reach and estuary of the Minjiang river[J].Marine Geology Frontiers,2012,28(6):35-39.
- [9] LIAO Y B,SHOU L,JIANG Z B,et al.Benthic macrofaunal communities along an estuarine gradient in the Jiaojiang River estuary,China[J].Aquatic Ecosystem Health & Management,2016,19(3):314-325.
- [10] 徐雪松,张新周,李琼,等.椒(灵)江水沙特性及最大浑浊带模拟[J].水运工程,2018(12):134-142.
- XU X S,ZHANG X Z,LI Q,et al.Simulation on flow-sediment characteristic and turbidity maximum zone in Jiao(Ling) River[J].Port & Waterway Engineering,2018(12):134-142.
- [11] 黄琨,陈星.台州市椒江区水生态承载力量化与恢复潜力评估[J].水电能源科学,2018,36(4):33-36.
- HUANG K,CHEN X.Quantification of water ecology carrying capacity and assessment of recovery potential in Jiaojiang district of Taizhou City[J].Water Resources and Power,2018,36(4):33-36.
- [12] EPLER J H.Identification manual for the larval Chironomidae(Diptera) of north and south Carolina[M].USA:EPA Region and Human Health and Ecological Criteria Division,2001.
- [13] BRINKHURST R O,JAMIESON B G M.Aquatic Oligochaeta of the World[M].Edinburgh:Oliver and Boyd,1971.
- [14] 刘月英,张文珍,王跃先,等.中国经济动物志:淡水软体动物[M].北京:科学出版社,1979.
- [15] 徐兆礼,陈亚瞿.东黄海秋季浮游动物优势种聚集强度与鲈鲶渔场的关系[J].生态学杂志,1989,8(4):13-15.
- XU Z L,CHEN Y Q.Aggregated intensity of dominant species of zooplankton in autumn in the East China Sea and Yellow Sea[J].Chinese Journal of Ecology,1989,8(4):13-15.
- [16] PIELOU E C.The measurement of diversity in different types of biological collections[J].Journal of Theoretical Biology,1966,13:131-144.
- [17] 陈振林,杨卫诚,罗康,等.贵州习水国家级自然保护区大型底栖动物群落结构及水质评价[J].广西科学,2024,31(2):258-268.
- CHEN Z L,YANG W C,LUO K,et al.Macroinvertebrate community structure and water quality evaluation in Xishui national nature reserve of Guizhou Province[J].Guangxi Sciences,2024,31(2):258-268.
- [18] QIN C Y,ZHOU J,CAO Y,et al.Quantitative tolerance values for common stream benthic macroinvertebrates in the Yangtze River Delta,Eastern China[J].Environmental Monitoring and Assessment,2014,186(9):5883-5895.
- [19] 郝梓然,于丽华,孔范龙,等.河湖交汇区底栖动物群落特征及生态健康评价;以南四湖为例[J].生态学杂志,2023,42(5):1132-1141.
- HAO Z R,YU L H,KONG F L,et al.Zoobenthos community characteristics and ecological health assessment in river-lake ecotone;a case study in Nansi Lake[J].Chinese Journal of Ecology,2023,42(5):1132-1141.
- [20] 高铁军,彭增辉,王宝强.珠江流域底栖动物资源的宏观格局[J].湖南师范大学自然科学学报,2023,46(4):106-112.
- GAO T J,PENG Z H,WANG B Q.Macro-patterns of macrozoobenthos resources in the Pearl River Basin[J].Journal of Natural Science of Hunan Normal University,2023,46(4):106-112.
- [21] 张跃平.江苏大型底栖无脊椎动物耐污值、BI 指数及水质生物评价研究[D].南京:南京农业大学,2006.
- [22] ARSLAN N,SALUR A,KALYONCU H,et al.The use of BMWP and ASPT indices for evaluation of water quality according to macroinvertebrates in Küçük Menderes River(Turkey)[J].Biologia,2016,71(1):49-57.
- [23] 王强,袁兴中,刘红.西南山地源头溪流附石性水生昆虫群落特征及多样性;以重庆鱼肚河为例[J].水生生物学报,2011,35(5):887-892.
- WANG Q,YUAN X Z,LIU H.Community and biodiversity of aquatic insects attached on the stones in upland headwater stream of southwestern China;a case study of Yudu stream in Chongqing[J].Acta Hydrobiologica Sinica,2011,35(5):887-892.
- [24] BROOKS A J,HAEUSLER T,REINFELDS I,et al.Hydraulic microhabitats and the distribution of macroinvertebrate assemblages in riffles[J].Freshwater Biology,2005,50(2):331-344.
- [25] LANCASTER J,BELYEA L R.Defining the limits to local density:alternative views of abundance-environment relationships[J].Freshwater Biology,2006,51(4):783-796.
- [26] 孙瑞平,杨德渐.中国动物志 无脊椎动物 第三十三卷 环节动物门 多毛纲(二)沙蚕目[M].北京:科学出版社,2004.
- [27] ZEMO M A T,MENBOHAN S F,ATCHRIMI B T,et al.Effect of anthropogenic pressure on the biodiversity of benthic macroinvertebrates in some urban rivers(yaoundé)[J].Water,2023,15(13):2383.
- [28] LITTLE S,WOOD P J,ELLIOTT M.Quantifying salinity-induced changes on estuarine benthic fauna:The potential implications of climate change[J].Estuarine,Coastal and Shelf Science,2017,198:610-625.
- [29] FU B,XUE B.Temporal and spatial evolution analysis and correlation measurement of urban-rural fringes based on nighttime light data

[J].Remote Sensing,2024,16(1):88.

[30] MCCULLOCH W L,GOODFELLOW W L,BLACK J A.Characterization,identification and confirmation of total dissolved solids as ef-
fluent toxicants[M]//Environmental Toxicology and Risk Assessment:Second Volume.West Conshohocken:ASTM International,2009.

[31] ATTRILL M J,RUNDLE S D,THOMAS R M.The influence of drought-induced low freshwater flow on an upper-estuarine macroinver-
tebrate community[J].Water Research,1996,30(2):261-268.

[32] 郑震,冷东梅,郑莺,等.山仔水库环境因子与藻类群落生长的相互作用机制探究及应对建议[J].灌溉排水学报,2023,42(11):131-139.
ZHENG Zhen,LENG Dongmei,ZHENG Ying,et al.The Interplay between Environmental Factors and Algal Community Growth in
Shanzai Reservoir[J].Journal of Irrigation and Drainage,2023,42(11):131-139.

Application of benthic macroinvertebrates in evaluating water quality health of a
macro-tidal estuary with a mountain stream:A case study of the Jiaojiang River

Wang Binliang¹, Lan Xuan¹, Ye Lujie³, Mao Weihao², Yin Hao¹, Xu Hong¹

(1. School of Life and Environmental Sciences, Shaoxing University, Shaoxing 312000, China; 2. Hangzhou Yingwaluo
Environmental Technology Co., Ltd., Hangzhou 310000, China; 3. Shaoxing Ecological and Environmental
Monitoring Center of Zhejiang Province, Shaoxing 312000, China)

Abstract: In southeastern coastal regions of China, a macro-tidal estuary with a mountain stream is a kind of typical river ecosystems. Due to tidal effects, these water bodies exhibit limited stability and frequent water exchange. Consequently, conventional methods for assessing water quality are hard to evaluate in these rivers. In order to develop an appropriate method for these rivers, this study employed macroinvertebrate community structure to evaluate water quality in the Jiaojiang River. The results revealed that the dominant taxon in both upstream(mountain stream) and downstream(macro-tidal estuary) was arthropods. The average density of macroinvertebrates in the upstream and downstream was 131 ind • m⁻² and 26 ind • m⁻², respectively, with an average biomass of 11.43 g • m⁻² and 0.12 g • m⁻², respectively. Notably, significant spatial differences were observed in the dominant taxa. In the upstream, the dominant taxa were *Baetis* sp. and *Polypedilum* sp., while in the downstream, the dominant taxa were *Nephtys* sp. and *Palaemon* sp. Furthermore, the analysis of biological indices, including Shannon-Wiener diversity index, Pielou evenness index, BI index, and BMWP index, indicated a better water quality in the upstream compared with the downstream. This result was attributed to a higher degree of urbanization in the downstream region. Moreover, tidal effects further disrupted the habitat of macroinvertebrates in the downstream. In conclusion, macroinvertebrate communities directly reflects habitat variations in the Jiaojiang River, providing a reliable indicator of water quality for a macro-tidal estuary with a mountain stream.

Keywords: macro-tidal river; benthic macroinvertebrates; biodiversity; ecological health

[责任编辑 刘洋 赵晓华]

附 录

表 S1 基于生物指数的水质评价标准

Tab. S1 Water quality graded standards based on the biological index

指数	清洁	良好	轻污染	中污染	重污染
H'	$3.0 \leq H'$	—	$2.0 \leq H' < 3.0$	$1.0 \leq H' < 2.0$	$0 \leq H' < 1.0$
J	$0.8 \leq J < 1.0$	—	$0.5 \leq J < 0.8$	$0.3 \leq J < 0.5$	$0 \leq J < 0.3$
BI	$0 < BI \leq 5.5$	$5.5 < BI \leq 6.5$	$6.5 < BI \leq 7.5$	$7.5 < BI \leq 8.5$	$8.5 < BI \leq 10$
$BMWP$	$80 < BMWP$	$50 < BMWP \leq 80$	$25 < BMWP \leq 50$	$10 < BMWP \leq 25$	$BMWP \leq 10$

表 S2 各样点优势种

Tab. S2 Predominant species of all kinds of sites

样点	优势种	优势度	密度/(ind · m ⁻²)	生物量/(g · m ⁻²)
S1	四节蜉属 <i>Baetis</i> sp.	0.22	40	0.011
	扁蜉属 <i>Heptagenia</i> sp.	0.17	32	0.181
	湖沼股蛤 <i>Limnoperna lacustris</i>	0.17	32	2.674
S2	沟蜷属 <i>Sulcospira</i> sp.	0.62	256	76.270
	湖沼股蛤 <i>Limnoperna lacustris</i>	0.06	24	2.330
S3	扁蜉属 <i>Heptagenia</i> sp.	0.24	32	0.096
	四节蜉属 <i>Baetis</i> sp.	0.18	24	0.040
S4	苏氏尾鳃蚓 <i>Branchiura sowerbyi</i>	0.38	80	0.108
	多足摇蚊属 <i>Polypedilum</i> sp.	0.27	56	0.010
	水丝蚓属 <i>Limnodrilus</i> sp.	0.23	48	0.003
S5	—	—	—	—
S6	—	—	—	—
S7	多足摇蚊属 <i>Polypedilum</i> sp.	0.43	24	0.067
S8	四节蜉属 <i>Baetis</i> sp.	0.55	88	0.094
	丽划蝽属 <i>Callicorixa</i> sp.	0.30	48	0.028
S9	摇蚊蛹 <i>Chironomidae pupa</i>	0.50	8	0.002
	多足摇蚊属 <i>Polypedilum</i> sp.	0.50	8	0.000
S10	丽划蝽属 <i>Callicorixa</i> sp.	0.50	48	0.002
S11	尖膀胱螺 <i>Physa acuta</i>	0.29	16	0.542
	四节蜉属 <i>Baetis</i> sp.	0.29	16	0.006
	细蜉属 <i>Caenis</i> sp.	0.29	16	0.008
S12	齿吻沙蚕属 <i>Nephtys</i> sp.	0.70	56	0.443
S13	近方蟹属 <i>Hemigrapsus</i> sp.	1	1	0.057
S14	厚蟹属 <i>Helice</i> sp.	1	1	0.242
S15	仙女虫属 <i>Nais</i> sp.	1	1	0.000
S16	仙女虫属 <i>Nais</i> sp.	0.33	1	0.000
	摇蚊蛹 <i>Chironomidae pupa</i>	0.33	1	0.001
	多足摇蚊属 <i>Polypedilum</i> sp.	0.33	1	0.000
	多足摇蚊属 <i>Polypedilum</i> sp.	1	1	0.222
S18	水丝蚓属 <i>Limnodrilus</i> sp.	0.69	9	0.004
S19	长臂虾属 <i>Palaemon</i> sp.	0.36	8	0.017
	盖鳃水虱科一种 <i>Idoteidae</i> sp.	0.36	8	0.008
S20	长臂虾属 <i>Palaemon</i> sp.	0.64	9	0.019
S21	齿吻沙蚕属 <i>Nephtys</i> sp.	0.91	84	0.085

注:S5 与 S6 位点物种优势度均大于 0.02.