

DOI: 10.5846/stxb201811262574

朱晨曦,莫康乐,唐磊,吴焱,李婷,林育青,陈求稳.漓江大型底栖动物功能摄食类群时空分布及生态效应.生态学报,2020,40(1):60-69.

Zhu C X, Mo K L, Tang L, Wu Y, Li T, Lin Y Q, Chen Q W. Spatial-temporal distribution and ecological effects of macroinvertebrate functional feeding groups in the Lijiang River. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(1): 60-69.

## 漓江大型底栖动物功能摄食类群时空分布及生态效应

朱晨曦,莫康乐\*,唐磊,吴焱,李婷,林育青,陈求稳

南京水利科学研究所,南京 210029

**摘要:**基于 2009 年 9 月至 2012 年 8 月期间对漓江上中下游 3 个河段 4 次采样调查,分析了漓江大型底栖动物功能摄食类群的组成与时空分布状况及其对河流生境变化的响应情况。结果表明:漓江大型底栖动物以刮食者占据绝对优势,其次依次是滤食者、收集者、捕食者和撕食者。刮食者中优势种为中华园田螺和黑龙江短沟蜷,滤食者中优势种为河蚬和纹石蚕,收集者中优势种为小蜉和摇蚊幼虫,捕食者中优势种为扁舌蛭和蜻蜓幼虫,撕食者中优势种为泥甲。根据功能摄食类群参数对河流生境以及人类活动影响的评价表明,人类居住生活对生境稳定性的影响显著大于旅游观光带来的影响,环境因子中溶解氧(DO)、pH、电导率(EC)、温度(Temp)、浊度(Tur)、化学需氧量(COD)和总氮(TN)等环境因子与漓江大型底栖动物功能摄食类群的相关性均较强。

**关键词:**大型底栖动物;功能摄食类群;河流生境;漓江

## Spatial-temporal distribution and ecological effects of macroinvertebrate functional feeding groups in the Lijiang River

ZHU Chenxi, MO Kangle\*, TANG Lei, WU Yan, LI Ting, LIN Yuqing, CHEN Qiuwen

Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China

**Abstract:** The purpose of this study was to analyze the composition, and spatial and temporal distribution of the functional feeding groups of large benthic animals in the Lijiang River, as well as their responses to changes in riverine habitat based on four sampling surveys of three study areas in the upper, middle, and lower reaches of the Lijiang River, from September 2009 to August 2012. The results showed that scrapers were the main component in the Lijiang River community, followed by filter-collectors gather-collectors, predators, and shredders. The dominant scraper species were *Cipangopaludina cathayensis* and *Semisulcospira amurensis*. The dominant filter-collector species were *Corbicula fluminea* and *Hydropsyche*. The dominant gather-collector species were *Ephemereleididae* and *Chironomidae larvae*. The dominant predator species were *Glossiphonia complanata* and *Dragonfly nymphs*, and the dominant shredder species was *Helichus* sp. The evaluation of the Lijiang River ecosystem based on the metrics of functional feeding groups showed that the effect of human activities on the stability of habitat was greater than that of tourism. Environmental factors, such as dissolved oxygen, pH, electrical conductivity, temperature, turbidity, chemical oxygen demand, and total nitrogen, were strongly correlated with the functional feeding groups of macroinvertebrates in the Lijiang River.

**Key Words:** macroinvertebrate; functional feeding groups; riverine habitat; Lijiang River

基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0502205);中央公益性科研院所基本业务费专项资金(Y918007)

收稿日期:2018-11-26; 网络出版日期:2019-10-25

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: summer\_mkl@foxmail.com

河流生态系统由生物和生境两部分组成,两者一直处于动态变化的过程中。其中,生物是河流的生命系统,生境是河流生物的生命支持系统<sup>[1]</sup>。河流大型底栖动物是河流生态系统食物链结构中的重要环节,对河流生态系统的物质循环、能量流动有着积极作用<sup>[2]</sup>。同时,由于大型底栖动物的活动能力弱、活动范围小,对于外来污染具有较小的规避能力,并且对外界胁迫较为敏感,因此能有效的指示河流生态系统的健康,其种类组成及时空分布更能体现生境变化对于生物的影响<sup>[3-4]</sup>。

大型底栖动物依据取食的不同划分为 5 个功能摄食类群 (Functional feeding groups, FFGs): 捕食者、撕食者、刮食者、收集者和滤食者<sup>[5-8]</sup>。大型底栖动物功能摄食类群与传统大型底栖动物形态分类方法不同,它主要依据底栖动物的食物资源类型及在获取食物过程中形态学的适应机制,来反映生境变化对大型底栖动物群落的影响,揭示出大型底栖动物的群落结构特征和生境适应性特征<sup>[9]</sup>。大型底栖动物功能摄食类群能较好的反映人类活动对河流生态系统的影响及河流生态系统的受损情况,因此近年来受到了研究者的广泛关注<sup>[9-11]</sup>。

漓江作为中国唯一一条入选的全球最美河流,是桂林山水的灵魂,保护漓江河流生态系统健康在维持漓江山水自然风景方面有着重要的意义<sup>[12]</sup>。以往应用大型底栖动物对漓江进行评价的研究,大多基于传统的形态分类方法,考虑其与水环境、底质类型、沉水植物之间的关系<sup>[12-14]</sup>,鲜有从功能摄食类群角度去评价漓江河流生态系统。本文以漓江为对象,研究大型底栖动物功能摄食类群的时空分布特征,并分析其与环境因子的相关性,采用基于功能摄食类群的生态参数评价漓江河流生态系统健康状态,为漓江生态环境保护提供依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 区域概况及采样区设置

漓江属于珠江流域西江水系,是支流桂江上游河段的通称,位于中国的南部 ( $110^{\circ}18'—111^{\circ}18'E$ ,  $23^{\circ}23'—25^{\circ}59'N$ ),发源于桂江源头越城岭猫儿山。漓江上游为从猫儿山到桂林河段、中游为从桂林到阳朔河段、下游为从阳朔到平乐河段,其中桂林到阳朔河段为著名的桂林漓江风景区。漓江流域总面积为  $12285\text{ km}^2$ ,主河道长  $214\text{ km}$ ,主要包括甘棠江、黄柏江、川江、小溶江等几条支流。

本研究分别在漓江上、中、下游选取典型江段进行研究(图 1)。其中,上游甘棠江研究江段长  $7\text{ km}$ ,底质以细沙和淤泥为主;中游大圩研究江段长  $6\text{ km}$ ,底质以卵石为主;下游福利研究江段长  $7\text{ km}$ ,两岸植被稀少,主要为人工栽植的凤尾竹,底质以砾石为主。本研究在不同季节对长约  $20\text{ km}$  的研究江段进行大型底栖动物的采样调查,调查时段分别为 2009 年秋季(9 月)、2010 年春季(4 月)、2012 年冬季(1 月)和夏季(8 月)。4 次调查的样本数分别为 150 个(上游 54 个,中游 48 个,下游 48 个)、150 个(上游 54 个,中游 41 个,下游 55 个)、209 个(上游 55 个,中游 78 个,下游 76 个)和 165 个(上游 26 个,中游 75 个,下游 64 个),并同步对部分水体理化指标及河流生境状况进行了测定和记录。

### 1.2 大型底栖无脊椎动物的采集与鉴定

本研究大型底栖动物的采集一共使用了两种采样工

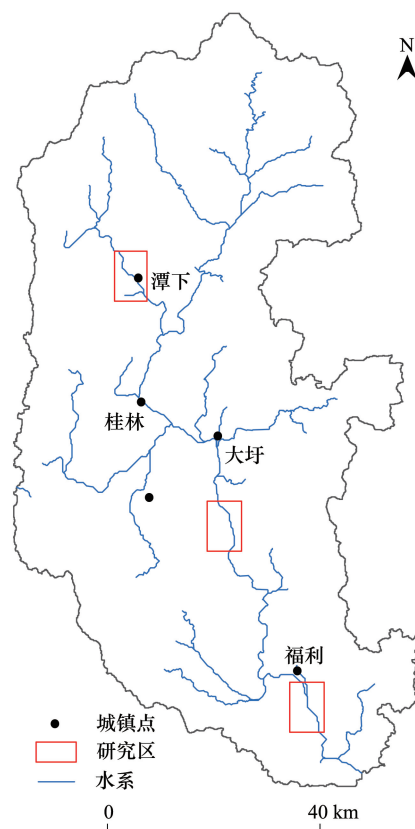


图 1 漓江研究区域分布

Fig.1 The study reas in Lijiang River

具,包括直径 30 cm 的 40 目 D 型网和面积为 1/20 m<sup>2</sup> 的 Peterson 改良式采泥器。在现场采集时,于每个采样点断面的两岸可涉水区域使用直径 30 cm 的 40 目 D 型网采集底栖动物样品共 6 个样方,采集面积 1.8 m<sup>2</sup>;断面中间不可涉水区域使用面积为 1/20 m<sup>2</sup> 的 Peterson 改良式采泥器采集底栖动物样品共 4 个样方,采集面积 0.2 m<sup>2</sup>。将每个断面采集的 10 个样方混合成一个样品,采集面积共计 2 m<sup>2</sup>。在现场用 40 目分样筛筛选样品,挑出大型底栖无脊椎动物后放入 100 mL 标本瓶中,然后用 10% 的甲醛溶液保存并带回实验室进行种类鉴定、个体计数、称重。在鉴定时,所有样品尽量鉴定到最低分类单元<sup>[15-17]</sup>。

### 1.3 水体理化指标测定

在采集现场使用便携式多参数水质监测分析仪 (YSI6600, 美国金泉仪器) 测定水温 (Temp)、pH、溶解氧 (DO)、电导率 (EC)、浊度 (Tur)、盐度 (Salt), 并在每个样点采集 2 瓶 550 mL 水样, 其中一瓶现场加硫酸调整 pH 值至小于 2, 低温保存运回实验室后分别采用 GB3838—2002<sup>[18]</sup> 中规定的钼酸铵分光光度法、碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法和高锰酸盐法测定总磷 (TP)、总氮 (TN)、化学需氧量 (COD)。

### 1.4 大型底栖无脊椎动物功能摄食类群及生态系统属性划分

根据河流大型底栖动物的食性类型, 参照 Cummins 等、Barbour 等和 Bode 等的划分规则<sup>[5-8]</sup>, 将漓江大型底栖动物分为以下 5 类功能群 (FFGs): (1) 收集者 (GC), 主要以河底的各种有机物颗粒为食; (2) 滤食者 (FC), 主要以水流中的细有机颗粒为食 (0.45 mm < 粒径 < 1 mm); (3) 捕食者 (PR), 主要以捕食其他水生动物为食; (4) 撕食者 (SH), 主要以各种凋落物和粗有机质颗粒为食 (粒径 > 1 mm); (5) 刮食者 (SC), 主要以各种营固着生活的生物类群为食。

参考 Yoshimura 等及王博涵等的研究<sup>[9,19]</sup>, 本文根据大型底栖动物功能摄食类群的参数, 从物质循环、物质纵向输送能力、沿岸物质输入等方面对漓江生态系统进行评价 (表 1)。

表 1 大型底栖动物功能摄食类群所表征的生态系统属性

Table 1 Functional feeding groups of macroinvertebrates related to ecosystem attributes

基于功能摄食类群的参数 Metrics based on functional feeding groups	生态系统属性 Ecosystem attribute
物质循环 Material cycling	
F1 刮食者密度 Density of scrapers	初级生产力 Primary production
F2 刮食者密度与滤食者、收集者之和的比率 Ratio of scrapers to filterers and gathering-collectors	自养作用/异养作用 Autotrophy/heterotrophy
F3 撕食者密度和收集者密度之和 Density of shredders and gathering-collectors	分解能力 Decomposition
F4 生物量 Biomass	次级生产力 Secondary production
物质纵向输送能力 Longitudinal transport	
F5 滤食者密度 Density of filterers	纵向输送能力 Longitudinal transport
F6 滤食者与撕食者和收集者之和的比率 Ratio of filterers to shredders and gather-collectors	相对纵向输送能力 Relative longitudinal transport
沿岸物质的输入 Lateral input	
F7 撕食者密度 Density of shredders	沿岸物质输入量 Lateral input
F8 撕食者密度与总密度之比 Ratio of shredders to total density	相对物质输入量 Relative lateral input
其他 Others	
F9 捕食者密度与总密度之比 Ratio of predators to total density	捕食者的下行效应 Top-down predator control
F10 刮食者和滤食者之和与撕食者和收集者之和的比率 Ratio of scrapers and filterers to total shredders and gather-collectors	生境稳定性 Habitat stability

## 1.5 数据处理与分析

采用物种优势度指数( $Y$ )来表示大型底栖动物各功能摄食类群中某一物种在其中所占优势的程度,公式如下:

$$Y = (n_i / N) f_i$$

式中, $N$ 为各功能摄食类群大型底栖动物的总密度, $n_i$ 为第*i*种的密度, $f_i$ 为第*i*种出现的频率。优势度指数 $Y > 0.02$ 的种类确定为本次调查各功能摄食类群的优势种<sup>[20]</sup>。

基础数据统计均在 Excel 软件中完成,前向筛选和冗余分析(RDA)在 R 软件中完成(version 3.3.2, R development Core Team, <http://www.r-project.org/>)。

## 2 结果

### 2.1 大型底栖无脊椎动物物种组成及功能摄食类群组成

本研究 4 次采样共采集到 64 个大型底栖无脊椎动物分类单元,隶属于 3 门 8 纲 16 目 38 科。其中昆虫纲 28 种、腹足纲 25 种、甲壳纲 3 种、瓣鳃纲 3 种、蛭纲 2 种、多毛纲 1 种、寡毛纲 1 种、蛛形纲 1 种。对漓江大型底栖无脊椎动物功能摄食类群进行分析,结果显示,刮食者在漓江占显著优势,相对丰度为 73.26%;其次为滤食者和收集者,相对丰度分别为 15.12% 和 8.85%;捕食者和撕食者相对丰度较小,分别为 2.72% 和 0.06%。由表 2 可知收集者、滤食者、捕食者、撕食者、刮食者的优势物种,滤食者中的河蚬优势度最大为 0.367,除撕食者外其他功能摄食类群均存在两种优势物种。

表 2 漓江大型底栖无脊椎动物各功能摄食类群优势种

Table 2 Dominant species of each functional feeding group of macroinvertebrate in Lijiang River

功能摄食类群 Functional feeding groups	优势种 Dominant species	优势度指数 Dominance index (Y)	耐污值 Tolerant value
收集者 GC Gather-collectors	小蜉 <i>Ephemerellidae</i>	0.032	5
滤食者 FC Filter-collectors	摇蚊幼虫 <i>Chironomidae larvae</i>	0.034	6
	河蚬 <i>Corbicula fluminea</i>	0.367	6.8
	纹石蚕 <i>Hydropsyche</i>	0.074	2.8
捕食者 PR Predators	扁舌蛭 <i>Glossiphonia complanata</i>	0.056	6.2
	蜻蜓稚虫 <i>Dragonfly nymphs</i>	0.034	5.7
撕食者 SH Shredders	泥甲 <i>Helichus sp</i>	0.025	5.4
刮食者 SC Scrapers	中华圆田螺 <i>Cipangopaludina cathayensis</i>	0.079	10
	黑龙江短沟蜷 <i>Semisulcospira amurensis</i>	0.076	5.7

### 2.2 大型底栖无脊椎动物功能摄食类群空间分布特征

#### 2.2.1 相对丰度空间分布特征

漓江大型底栖无脊椎动物功能摄食类群的相对丰度空间分布见图 2。优势类群刮食者的最大相对丰度出现在夏季中游江段,为 93.48%,最小出现在夏季上游江段,为 25.27%;捕食者的最大相对丰度出现在冬季上游江段,为 8.88%,最小出现在夏季中游江段,为 0.75%;滤食者的最大相对丰度出现在夏季上游江段,为 55.05%,最小出现在冬季中游江段,为 3.79%;收集者的最大相对丰度出现在春季上游江段,为 29.36%,最小出现在秋季下游江段,为 0.62%;撕食者相对丰度在各江段都很小,只在夏季上游江段和秋季上游江段相对较大,分别为 0.53%、0.42%。

#### 2.2.2 密度的空间分布特征

漓江大型底栖无脊椎动物功能摄食类群的密度空间分布如图 3 所示。优势类群刮食者的最大密度出现在夏季中游江段,为 2354 个/ $m^2$ ,最小出现在夏季上游江段,为 73 个/ $m^2$ ;捕食者的最大密度出现在春季下游江段,为 84 个/ $m^2$ ,最小出现在秋季上游江段,为 4 个/ $m^2$ ;滤食者的最大密度出现在秋季中游江段,为 436 个/ $m^2$ ,最小出现在冬季中游江段,为 49 个/ $m^2$ ;收集者的最大密度出现在春季中游江段,为 208 个/ $m^2$ ,最小出现

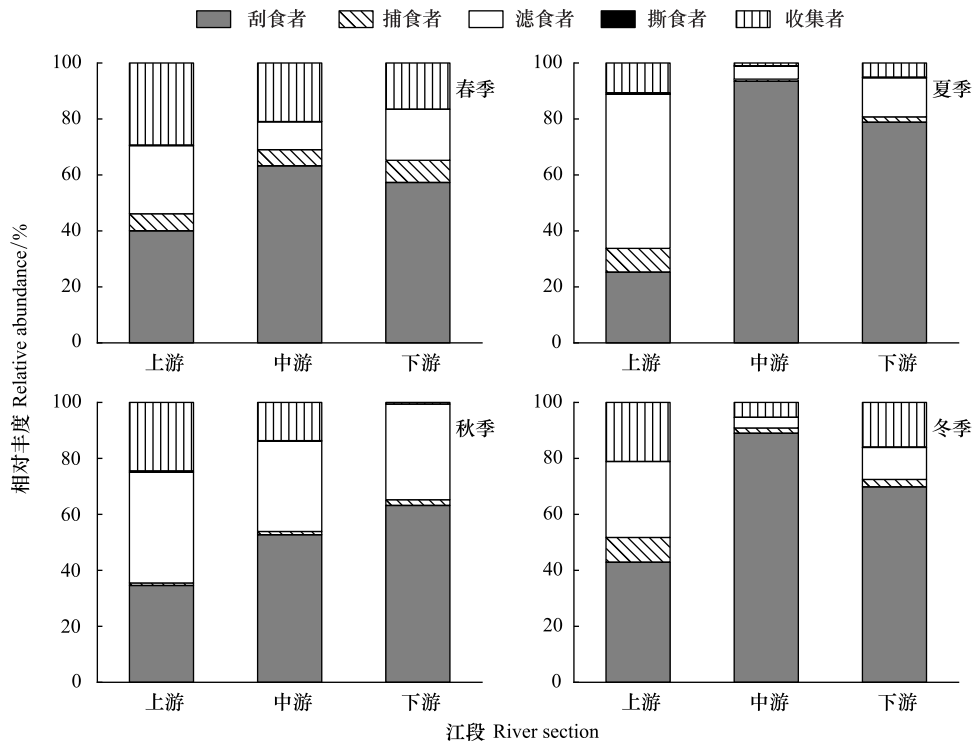


图 2 各季节漓江上中下游大型底栖动物功能摄食类群相对丰度

Fig.2 The relative abundance of macroinvertebrate FFGs in Lijiang River among different river section in different seasons

FFGs: 功能摄食类群 Functional feeding groups; SC:刮食者 Scrapers; PR:捕食者 Predators; FC:滤食者 Filter-collectors; SH:撕食者 Shredders; GC:收集者 Gather-collectors

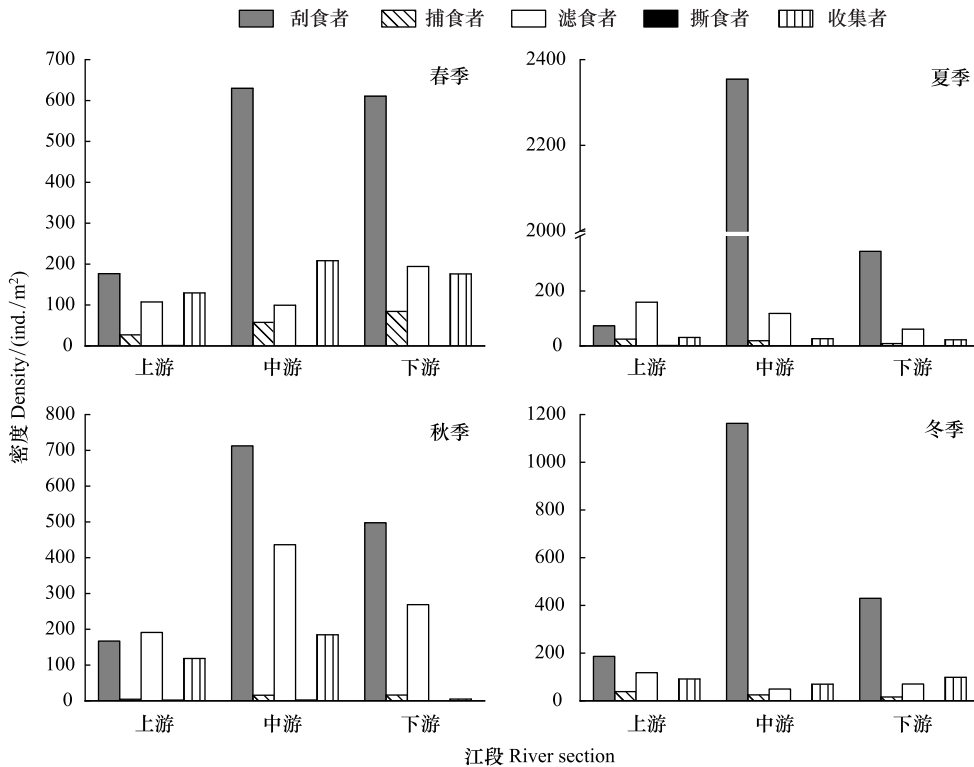


图 3 各季节漓江上中下游大型底栖动物功能摄食类群密度

Fig.3 The density of macroinvertebrate FFGs in Lijiang River among different river section in different seasons



在秋季下游江段,为 5 个/m<sup>2</sup>;撕食者密度在各江段都很小,只在春季、夏季、秋季的上游江段以及秋季的中游江段相对较大,分别为 1、2、2、2 个/m<sup>2</sup>。

### 2.3 大型底栖无脊椎动物功能摄食类群季节变化特征

#### 2.3.1 相对丰度季节变化特征

图 4 显示了功能摄食类群相对丰度的季节变化。各季节刮食者相对丰度明显高于其他功能摄食类群,一直处于优势地位,最大值出现在夏季,为 89.37%,最小值出现在秋季,为 52.12%;撕食者相对丰度明显低于其他功能摄食类群,一直处于劣势地位,最大值出现在秋季,为 0.17%,最小值出现在冬季,为 0.01%;滤食者相对丰度最大值出现在秋季,为 34.31%,最小值出现在夏季,为 7.54%;收集者相对丰度最大值出现在春季,为 20.46%,最小值出现在夏季,为 1.86%;捕食者相对丰度最大值出现在春季,为 6.86%,最小值出现在夏季,为 1.16%。

#### 2.3.2 密度季节变化特征

功能摄食类群密度的季节变化见图 5。各季节刮食者密度明显高于其他功能摄食类群,优势地位明显,最大值出现在夏季,为 1215 个/m<sup>2</sup>,最小值出现在秋季,为 447 个/m<sup>2</sup>;撕食者密度明显低于其他功能摄食类群,劣势地位明显,最大值出现在秋季,为 2 个/m<sup>2</sup>,最小值出现在冬季,为 0 个/m<sup>2</sup>;滤食者密度最大值出现在秋季,为 294 个/m<sup>2</sup>,最小值出现在冬季,为 75 个/m<sup>2</sup>;收集者密度最大值出现在春季,为 168 个/m<sup>2</sup>,最小值出现在夏季,为 25 个/m<sup>2</sup>;捕食者密度最大值出现在春季,为 56 个/m<sup>2</sup>,最小值出现在秋季,为 12 个/m<sup>2</sup>。

### 2.4 基于大型底栖无脊椎动物功能摄食类群参数的漓江生态系统评价

基于功能摄食类群的各项参数进行时空差异性分析表明(表 3):在物质循环方面,底栖动物初级生产力(F1)在漓江中游大于其余区域,夏季明显大于其他季节;自养/异养(F2)在中游大于其余区域,夏季明显大于其他季节;底栖动物分解能力(F3)在中游大于其余区域、夏季小于其他季节;底栖动物次级生产力(F4)从上游到下游逐渐增高。在物质纵向输送能力方面,纵向输送能力(F5)和相对纵向输送能力(F6)中下游较高、夏季明显较大。在沿岸物质输入方面,沿岸物质输入量(F7)和相对物质输入量(F8)均为上游高于中下游,秋季高于其他季节。在其他方面,捕食者的下行效应(F9)在河流空间分布上差异性不大、四季变化也不大,但参数水平普遍较低;生境稳定性(F10)表现为从河流上游到下游逐渐增强。

综合上述分析,对漓江生态系统进行评价。结果表明:漓江生态系统在空间上从上游到下游大型无脊椎底栖动物的生物量逐渐增加且生境的稳定性越来越强;在时间上表现为夏季漓江生态系统各项参数水平均较

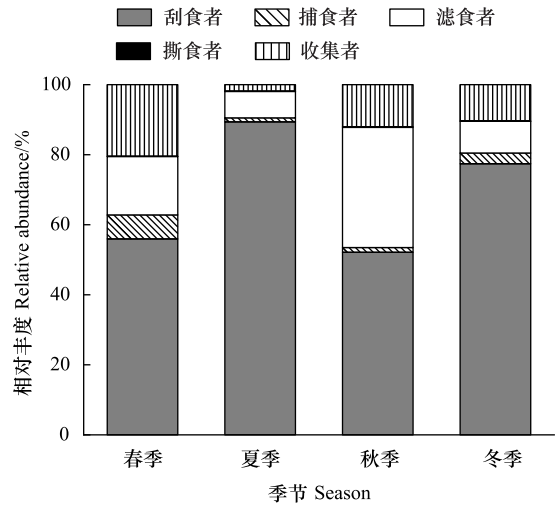


图 4 漓江大型底栖动物各功能摄食类群相对丰度的季节动态  
Fig. 4 The relative abundance of macroinvertebrate FFGs in different seasons in Lijiang River

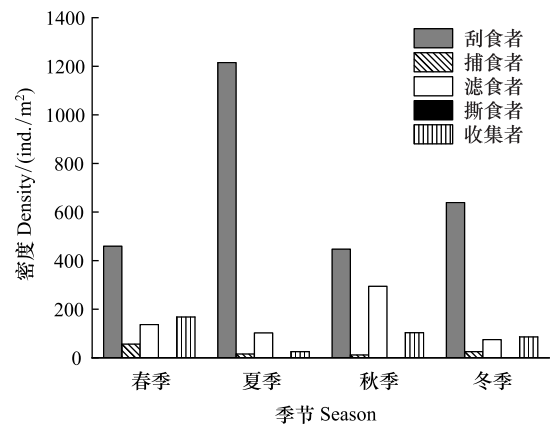


图 5 漓江大型底栖动物功能摄食类群密度的季节动态  
Fig. 5 The density of macroinvertebrate FFGs in different seasons in Lijiang River

高,生境稳定性也最强。但从参数 F9 可以看出漓江生态系统内底栖动物的高营养级对低营养级控制力不强<sup>[21]</sup>。

## 2.5 大型底栖无脊椎动物功能摄食类群与环境因子的相关性分析

为了探究采样期间不同环境因子对漓江大型底栖动物功能摄食类群的影响,对功能摄食类群与环境因子 DO、pH、EC、Temp、Tur、Salt、TN、TP 和 COD 进行冗余分析(RDA)(图 6),通过前向选择(forward selection)排除掉贡献较小的环境因子( $P>0.05$ )。分析结果显示,漓江四季对大型底栖动物功能摄食类群影响较大的环境因子有所不同,春季 COD( $P=0.001$ )和 DO( $P=0.005$ )两个环境因子与漓江大型底栖动物功能摄食类群相关性较强;夏季 EC( $P=0.001$ )、pH( $P=0.002$ )和 DO( $P=0.002$ )等 3 个环境因子与功能摄食类群相关性较强;秋季 EC( $P=0.001$ )和 TN( $P=0.024$ )与功能摄食类群相关性较强;冬季 Temp( $P=0.001$ )和 Tur( $P=0.001$ )与功能摄食类群相关性较强。

表 3 漓江大型底栖无脊椎动物功能摄食类群参数的时空变化

Table 3 Temporal and spatial variation of Metrics based on macroinvertebrate FFGs in Lijiang River

基于功能摄食类群的参数 Metrics based on functional feeding groups		上游 Upstream	中游 Midstream	下游 Downstream	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	冬季 Winter
物质循环 Material cycling	F1	150.76	1214.92	470.67	459.6	1215.39	447.33	639.43
	F2	0.64	7.31	2.54	1.51	9.5	1.12	3.97
	F3	93.7	123.1	75.73	168.53	26.3	104.75	86.12
	F4	106.96	152.76	179.99	150.57	103.05	158.21	183.28
物质纵向输送 Longitudinal transport	F5	143.9	175.89	148.62	137.07	102.55	294.42	75.12
	F6	2.16	1.98	14.96	0.81	3.9	2.81	0.87
沿岸物质输入 Lateral input	F7	1.08	0.89	0.3	0.4	0.97	1.47	0.1
	F8	0.0028	0.0006	0.0006	0.0005	0.0007	0.0017	0.0001
其他 Others	F9	0.06	0.02	0.04	0.07	0.01	0.01	0.03
	F10	3.92	29.71	46.26	3.54	50.11	7.08	8.3

F1:刮食者密度 Density of scrapers;F2:刮食者密度与滤食者、收集者之和的比率 Ratio of scrapers to filterers and gathering-collectors;F3:撕食者密度和收集者密度之和 Density of shredders and gathering-collectors;F4:生物量 Biomass;F5:滤食者密度 Density of filterers;F6:滤食者与撕食者和收集者之和的比率 Ratio of filterers to shredders and gather-collectors;F7:撕食者密度 Density of shredders;F8:撕食者密度与总密度之比 Ratio of shredders to total density;F9:捕食者密度与总密度之比 Ratio of predators to total density;F10:刮食者和滤食者之和与撕食者和收集者之和的比率 Ratio of scrapers and filterers to total shredders and gather-collectors

## 3 讨论

### 3.1 漓江大型底栖无脊椎动物功能摄食类群的组成与时空分布

大型底栖动物功能摄食类群的组成与生境密切相关。漓江大型底栖动物以刮食者占据绝对优势,撕食者处于劣势,这一结果与国内其他研究区域如香溪河<sup>[22]</sup>、昌江<sup>[23]</sup>等地区的研究结果存在差异。这是由于漓江流域属于喀斯特地貌,河道底质多为沙卵石加细沙,水浅流急,四季清澈见底,适宜沉水植物生长。漓江茂盛的沉水植物<sup>[24]</sup>为螺类等刮食者提供了适宜的生境<sup>[25]</sup>,使得刮食者在组成上占据优势。撕食者数量少的原因是漓江两岸多为河漫滩与深切河谷,灌乔木稀少,无法给撕食者提供枯枝落叶和荫蔽的条件,进而撕食者难以生存<sup>[26]</sup>。

河流连续性概念认为功能摄食类群的空间分布与自然生境中有机物沿河流的运输、利用和存储有密切的关系<sup>[27]</sup>,但人类活动对其空间上的分布也产生了较大的影响。按照经典的河流连续性概念预测,对溪流来讲,上游河流中撕食者的相对丰度较大<sup>[28]</sup>,捕食者在河流上中下游空间上变化不大<sup>[26]</sup>,刮食者在中游河段的相对丰度最大<sup>[29]</sup>。本研究观测结果与上述情况基本吻合。在自然河流中,细颗粒有机物在很大程度上是由粗颗粒有机物分解形成的,其比例自上游至下游逐渐增加,按河流连续性概念预测滤食者和收集者的相对丰

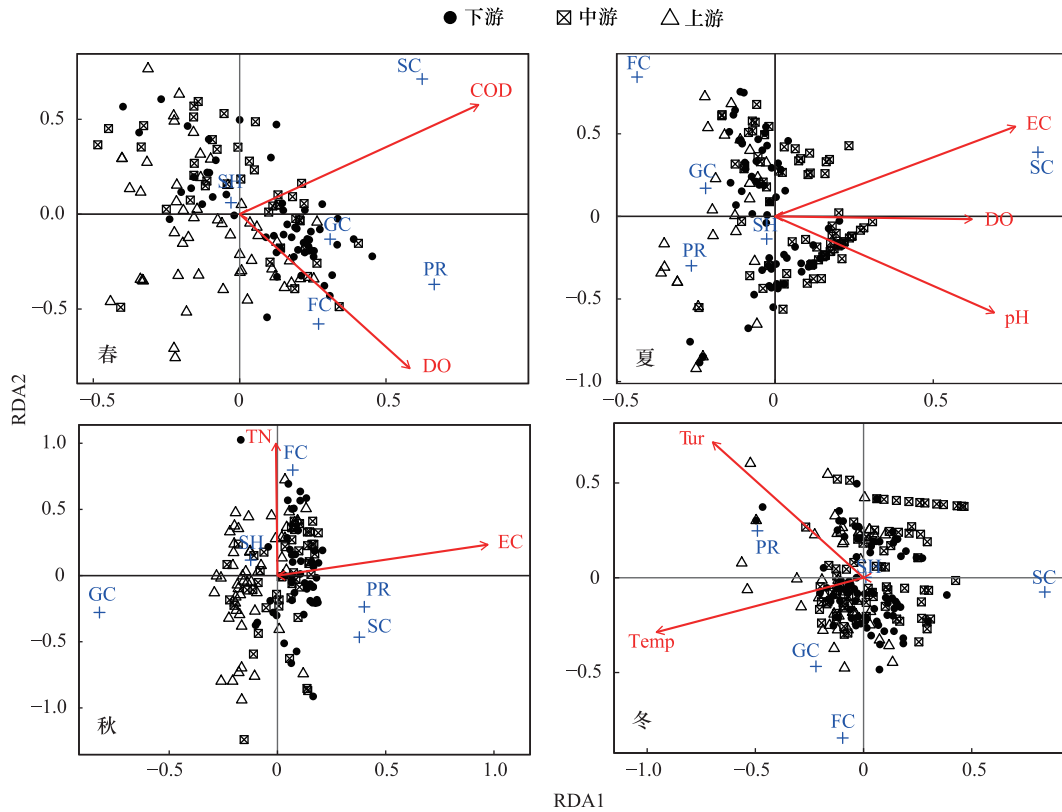


图6 漓江各季节大型底栖动物功能摄食类群与环境因子的冗余分析(RDA)

Fig.6 Relationships of macroinvertebrate FFGs and environmental factors obtained by Redundancy analysis (RDA) in different seasons in Lijiang River

RDA1:冗余分析第一轴 Redundancy analysis first axis; RDA2:冗余分析第二轴 Redundancy analysis second axis; COD:化学需氧量 Chemical oxygen demand; DO:溶解氧 Dissolved oxygen; EC:电导率 Electrical conductivity; TN:总氮 Total nitrogen; Tur:浊度 Turbidity; Temp:温度 Temperature

度也应自上游至下游逐渐增加<sup>[30]</sup>。但在本研究中,这两者的相对丰度表现为上游最大、中下游符合上述规律,这与预测情况偏差较大,原因是本研究所观测到的滤食者和收集者的优势种摇蚊幼虫、小蜉和河蚬均为耐污种,而上游研究区位于漓江支流甘棠江的下游河段,该河段流经村镇,大量使用的化肥、村庄的生活污水这些有机物输入到河流中,为一些滤食者和收集者的生长和繁荣创造了条件<sup>[29]</sup>,并致使耐污种比例增高;中下游研究区域均为旅游观光区,两岸基本无污染排放。这也与功能摄食类群参数 F10 相对应,可推断村镇居民生活对漓江生态环境的影响大于旅游观光的影响。

底栖动物功能摄食类群的季节性分布主要是由于季节变化改变了岸边植被状态及河流水文条件,进而使底栖动物的生境发生了微变化,最终导致其时间分布上的差异性。撕食者的分布能够反映树叶在河道底部的堆积情况<sup>[31]</sup>。在本研究中,撕食者的相对丰度和密度在秋季明显高于其他3个季节,主要是因为树木的落叶期主要集中在秋季。捕食者的相对丰度和密度在春季高于其他季节,是因为春季其他类群密度较大,为捕食者提供了丰富的食物<sup>[9]</sup>。刮食者的相对丰度和密度在夏季明显高于其他季节,主要是因为夏季繁殖旺盛的中华圆田螺<sup>[32]</sup>为该功能类群的优势种,夏季沉水植物的生长也为其提供了适宜的生境。收集者主要以沉积的有机颗粒为食,在流速低的区域有机颗粒较易沉积,因而收集者偏爱流速较低的生境<sup>[33]</sup>。本研究中收集者的相对丰度和密度在春、秋和冬季无太大差异,在夏季却很低,这主要是因为夏季是汛期,河流流速增大,不适宜收集者进食。滤食者以悬浮的细有机颗粒为食,一般都存在一个最适滤食流速<sup>[22]</sup>,在本研究中滤食者相对丰度和密度在秋季明显高于其他季节,是因为滤食者密度主要受到水流流速及食物影响,秋季处于洪水



刚过的时期,水面趋于平稳、流速缓慢,而且撕食者的优势季节也处在这一时期,其取食粗颗粒有机质后为滤食者提供了更多的细颗粒有机质<sup>[26]</sup>。

### 3.2 大型底栖动物无脊椎功能摄食类群与水环境因子之间的关系

在河流生态学研究确定影响大型底栖动物功能摄食类群的关键环境因子对分析河流生态健康起着重要作用<sup>[34]</sup>。研究指出,环境因子对底栖动物的影响在不同区域不同季节各有差异,较为复杂<sup>[34-35]</sup>。本研究中 RDA 分析得出 7 个环境因子(DO、pH、EC、Temp、Tur、COD、TN)对漓江大型底栖动物功能摄食类群组成与分布具有关键影响,主要反映了水体的有机污染物和物理因素。春季 COD 与刮食者呈显著的正相关性,这主要是因为 COD 反映了水中有机质的含量或者说有机物污染程度,而本研究中刮食者是以中华园田螺等耐污种为优势种,这与其他研究中 COD 与刮食者的响应关系结论相同<sup>[36]</sup>。春季和夏季 DO 与漓江大型底栖动物功能摄食类群相关性较强,这是因为春季和夏季是底栖动物生长和繁殖的季节,其新陈代谢增强,摄食活动会大量消耗水中的溶解氧,所以影响了底栖动物的组成与分布<sup>[37]</sup>。夏季 pH 与底栖动物功能摄食类群有较强的相关性,是因为绝大部分底栖动物适宜的 pH 值为 6—8<sup>[37-38]</sup>,而本研究中夏季 pH 值达到最大为 8.49,超出了适宜范围,对底栖动物的生存产生了影响。天然水体中的 pH 主要取决于游离二氧化碳的含量及碳酸平衡,夏季植物生长旺盛光合作用强烈致使溶于水中的二氧化碳减少导致 pH 值变大。夏季和秋季 EC 与漓江底栖动物功能摄食类群相关性较强,这是由于电导率是度量水环境总溶解离子量的参数,而离子主要通过影响细胞膜渗透压的平衡对大型底栖动物产生了影响<sup>[39-40]</sup>。已有研究指出氮元素与底栖动物功能摄食类群有较好相关性<sup>[23,41]</sup>,本研究中秋季 TN 与滤食者呈显著正相关,这与吴东浩等在西苕溪上游得到 TN 与滤食者呈负相关的结论相反<sup>[42]</sup>,这是因为漓江的滤食者中优势种河蚬为耐污种。冬季 Temp 与底栖动物功能摄食类群有较强的相关性,这是因为冬季温度过低致使底栖动物的活动减弱<sup>[37]</sup>,使得温度成为冬季限制底栖动物的主要环境因子。不同时期不同区域对底栖动物功能摄食类群起主要影响的环境因子不尽相同,需要充分探究底栖动物的生活习性与生境状况之间的响应关系。

## 4 结论

漓江大型底栖无脊椎动物功能摄食类群中以刮食者占据绝对优势地位,撕食者和捕食者处于劣势地位。基于大型底栖无脊椎动物功能摄食类群的时空分布特征分析可知,各功能摄食类群的时空分布可反映漓江生境在时空上的微变化及人类活动对生境的干扰,其分布特征明显受食物资源时空变化的限制。在春季,对功能摄食类群有较强影响的环境因子为 COD 和 DO,夏季为 EC、DO 和 pH,秋季为 TN 和 EC,而在冬季为 Tur 和 Temp。基于功能摄食类群参数对漓江生态系统评价,可知漓江中下游生境稳定性明显高于上游,村镇居民生活对漓江生态环境的影响大于旅游观光的影响。

### 参考文献 (References):

- [ 1 ] 倪晋仁, 刘元元. 论河流生态修复. 水利学报, 2006, 37(9): 1029-1037, 1043-1043.
- [ 2 ] Beauchene M, Becker M, Bellucci C J, Hagstrom N, Kanno Y. Summer thermal thresholds of fish community transitions in Connecticut streams. North American Journal of Fisheries Management, 2014, 34(1): 119-131.
- [ 3 ] Heino J, Louhi P, Muotka T. Identifying the scales of variability in stream macroinvertebrate abundance, functional composition and assemblage structure. Freshwater Biology, 2004, 49(9): 1230-1239.
- [ 4 ] Ma T W, Huang Q H, Wang H, Wang Z J, Wang C X, Huang S B. Selection of benthic macroinvertebrate-based multimetrics and preliminary establishment of biocriteria for the bioassessment of the water quality of Taihu Lake, China. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(3): 1192-1200.
- [ 5 ] Cummins K W. Structure and function of stream ecosystems. BioScience, 1974, 24(11): 631-641.
- [ 6 ] Cummins K W, Klug M J. Feeding ecology of stream invertebrates. Annual Review of Ecology and Systematics, 1979, 10: 147-172.
- [ 7 ] Barbour M T, Gerritsen J, Snyder B D, Stribling J B. Rapid Bioassessment Protocols for Use in Streams and Wadeable Rivers: Periphyton, Benthic Macroinvertebrates, and Fish. 2nd ed. Washington, DC: U. S. Environmental Protection Agency, Office of Water, 1999.
- [ 8 ] Bode R W, Novak M A, Abele L E, Heintzman D L, Smith A J. Quality Assurance Work Plan for Biological Stream Monitoring in New York state. Albany, NY: NYS Department of Environmental Conservation, 2002: 1-115.

- [ 9 ] 王博涵, 吴丹, 张吉, 殷旭旺, 赵长森, 窦同文. 济南河流大型底栖动物摄食功能群多样性及时空动态. 生态学报, 2017, 37(21): 7128-7139.
- [ 10 ] 沈洪艳, 曹志会, 刘军伟, 王文欢, 张远. 太子河流域大型底栖动物功能摄食类群与环境要素的关系. 中国环境科学, 2015, 35(2): 579-590.
- [ 11 ] 蒋万祥, 贾兴焕, 唐涛, 蔡庆华. 底栖动物功能摄食类群对酸性矿山废水的响应. 生态学报, 2016, 36(18): 5670-5681.
- [ 12 ] 赵湘桂, 曹艳霞, 张杰, 王备新, 蔡德所. 影响漓江底栖动物群落的主要环境因素解析. 广西师范大学学报: 自然科学版, 2009, 27(2): 137-141.
- [ 13 ] 杨青瑞, 陈求稳. 漓江大型底栖无脊椎动物及其与水环境的关系. 水利水电科技进展, 2010, 30(6): 8-10, 38-38.
- [ 14 ] 陈博, 李卫明, 陈求稳, 等. 夏季漓江不同底质类型和沉水植物对底栖动物分布的影响. 环境科学学报, 2014, 34(7): 1758-1765.
- [ 15 ] 段学花, 王兆印, 徐梦珍. 底栖动物与河流生态评价. 北京: 清华大学出版社, 2010.
- [ 16 ] Morse J C, Yang L, Tian L. Aquatic Insects of China Useful for Monitoring Water Quality. Nanjing, China: Hohai University Press, 1994.
- [ 17 ] 周凤霞, 陈剑虹. 淡水微型生物与底栖动物图谱(第二版). 北京: 化学工业出版社, 2011.
- [ 18 ] 中国环境保护总局, 国家质量监督检验检疫总局. 地表水环境质量标准. 中国环保产业, 2002, (6): 8-9.
- [ 19 ] Yoshimura C, Tockner K, Omura T, Moog O. Species diversity and functional assessment of macroinvertebrate communities in Austrian rivers. *Limnology*, 2006, 7(2): 63-74.
- [ 20 ] 宋翔, 朱四喜, 杨红丽, 王锴, 应启肇. 浙江岱山岛潮间带大型底栖动物的群落结构. 浙江海洋学院学报: 自然科学版, 2009, 28(2): 214-218.
- [ 21 ] 黄丹青. 营养输入与捕食作用对不同底栖生物群的影响[D]. 上海: 复旦大学, 2011.
- [ 22 ] 渠晓东, 蔡庆华, 谢志才, 唐涛, 曹明, 黎道丰. 香溪河附石性大型底栖动物功能摄食类群研究. 长江流域资源与环境, 2007, 16(6): 738-743.
- [ 23 ] 孙小玲, 蔡庆华, 李凤清, 杨顺益, 谭路. 春季昌江大型底栖无脊椎动物群落结构及功能摄食类群的空间分布. 应用与环境生物学报, 2012, 18(2): 163-169.
- [ 24 ] 何安尤. 漓江水生维管束植物调查. 广西水产科技, 2007, (2): 55-65.
- [ 25 ] 许巧情, 王洪铸, 张世萍. 河蟹过度放养对湖泊底栖动物群落的影响. 水生生物学报, 2003, 27(1): 41-46.
- [ 26 ] 胡本进. 闽江河一至六级支流底栖动物群落结构和功能及其 BI 指数水质评价[D]. 南京: 南京农业大学, 2003.
- [ 27 ] Vannote R L, Minshall G W, Cummins K W, et al. The river continuum concept. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1980, 37(1): 130-137.
- [ 28 ] Hawkins C P, Sedell J R. Longitudinal and seasonal changes in functional organization of macroinvertebrate communities in four Oregon streams. *Ecology*, 1981, 62(2): 387-397.
- [ 29 ] 胡本进, 杨莲芳, 王备新, 单林娜. 闽江河 1—6 级支流大型底栖无脊椎动物取食功能团演变特征. 应用与环境生物学报, 2005, 11(4): 463-466.
- [ 30 ] Grubaugh J, Wallace B, Houston E. Production of benthic macroinvertebrate communities along a southern Appalachian river continuum. *Freshwater Biology*, 1997, 37(3): 581-596.
- [ 31 ] Dobson M. Microhabitat as a determinant of diversity: stream invertebrates colonizing leaf packs. *Freshwater Biology*, 1994, 32(3): 565-572.
- [ 32 ] 王明宝, 陈斌. 中华圆田螺特性及池塘人工养殖技术. 现代农业科技, 2012, (9): 343-343, 347-347.
- [ 33 ] Mérioux S, Dolédec S. Hydraulic requirements of stream communities: a case study on invertebrates. *Freshwater Biology*, 2004, 49(5): 600-613.
- [ 34 ] Norris R H, Hawkins C P. Monitoring river health. *Hydrobiologia*, 2000, 435(1-3): 5-17.
- [ 35 ] 蒋万祥, 贾兴焕, 周淑婵, 李凤清, 唐涛, 蔡庆华. 香溪河大型底栖动物群落结构季节动态. 应用生态学报, 2009, 20(4): 923-928.
- [ 36 ] 寿鹿, 曾江宁, 廖一波, 赵永强, 江志兵, 陈全震, 高爱根, 杨家新. 瓯江口海域大型底栖动物分布及其与环境的关系. 应用生态学报, 2009, 20(8): 1958-1964.
- [ 37 ] 王银东, 熊邦喜, 陈才保, 胡宏胜. 环境因子对底栖动物生命活动的影响. 浙江海洋学院学报: 自然科学版, 2005, 24(3): 253-257, 280.
- [ 38 ] 曹正光, 蒋忻坡. 几种环境因子对梨形环棱螺的影响. 上海水产大学学报, 1998, 7(3): 200-205.
- [ 39 ] 张远, 丁森, 赵茜, 高欣, 赵瑞, 孟伟. 基于野外数据建立大型底栖动物电导率水质基准的可行性探讨. 生态毒理学报, 2015, 10(1): 204-214.
- [ 40 ] Olson A R, Stewart T W, Thompson J R. Direct and indirect effects of human population density and land use on physical features and invertebrates of Iowa (U.S.A.) streams. *Urban Ecosystems*, 2016, 19(1): 159-180.
- [ 41 ] Peng S T, Zhou R, Qin X B, Shi H H, Ding D W. Application of macrobenthos functional groups to estimate the ecosystem health in a semi-enclosed bay. *Marine Pollution Bulletin*, 2013, 74(1): 302-310.
- [ 42 ] 吴东浩, 于海燕, 吴海燕, 周斌, 王备新. 基于大型底栖无脊椎动物确定河流营养盐浓度阈值——以西苕溪上游流域为例. 应用生态学报, 2010, 21(2): 483-488.