

## 研究报告

### Research Report

# 浙江永安溪大型底栖动物群落结构及水质生物学评价

冯立辉<sup>1</sup> 顾婧婧<sup>2</sup> 齐鑫<sup>3,4</sup> 张瑞雷<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 上海海洋大学水产与生命学院, 上海, 201306; <sup>2</sup> 仙居县环境保护局, 仙居, 317300; <sup>3</sup> 仙居国家公园管理委员会, 仙居, 317300; <sup>4</sup> 台州学院生命科学学院, 台州, 318000

\* 通讯作者, rlzhang@shou.edu.cn

**摘要** 为了解浙江仙居永安溪大型底栖动物群落结构,于2016年8月对永安溪13个采样站点进行调查研究,并应用多种生物指数对溪流水质进行生物评价。此次调查共获得底栖动物95种,隶属于4门7纲,其中扁形动物1种,环节动物7种,软体动物8种,节肢动物79种。永安溪大型底栖动物平均密度为3 020.8 ind./m<sup>2</sup>,平均生物量为34.25 g/m<sup>2</sup>,密度优势类群为节肢动物,其平均密度为2 661.1 ind./m<sup>2</sup>,贡献率为88.1%,生物量优势类群为软体动物,其平均生物量为30.76 g/m<sup>2</sup>,贡献率为89.8%。永安溪大型底栖动物优势种为长河螺 *Rivularia elongata*、角形环棱螺 *Bellamya angularis*、纹石蛾属一种 *Potamyia* sp.、闪蚬 *Corbicula nitens* 和小蜉属一种 *Ephemerella* sp.。利用6种生物指数对永安溪水质进行评价显示,Margalef多样性指数、Simpson多样性指数、Pielou均匀度指数和BI生物指数均表明永安溪处于清洁状态,仅Shannon-Wiener指数评价显示为轻污染状态,BPI生物学污染指数评价为β-中污染状态。

**关键词** 永安溪, 底栖动物, 群落结构, 水质生物学评价

## The Community Structure of Macrobenthos and Bioassessment of Water Quality of the Yong'an Stream in Zhejiang Province

Feng Lihui<sup>1</sup> Gu Jingjing<sup>2</sup> Qi Xin<sup>3,4</sup> Zhang Ruilei<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Fisheries and Life Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai, 201306; <sup>2</sup> Xianju Environmental Protection, Xianju, 317300; <sup>3</sup> Xianju National Park, Xianju, 317300; <sup>4</sup> College of Life Sciences, Taizhou University, Taizhou, 318000

\* Corresponding author, rlzhang@shou.edu.cn

DOI: 10.13417/j.gab.036.002849

**Abstract** In order to study the community structure of macrobenthos in Yong'an Stream, Zhejiang Province, we investigated the 13 sampling sites at Yong'an Stream in August 2016, and evaluated the quality of stream water by a variety of biological indices. A total of 95 species of macrobenthos were collected, belonging to 4 phylums and 7 classes. There were 1 species of platyhelminth, 7 species of annelida, 8 species of mollusca and 79 species of arthropoda. The average density and biomass of macrobenthos in Yong'an Stream were 3 020.8 ind./m<sup>2</sup> and 34.25 g/m<sup>2</sup>, respectively. The dominant density group was arthropoda with the average density of 2 661.1 ind./m<sup>2</sup>, which contributed 88.09% to the total density; the dominant biomass group was mollusca with the average biomass of 30.76 g/m<sup>2</sup>, which contributed 89.80% to the total biomass. The dominant macrobenthos species were *Rivularia elongata*, *Bellamya angularis*, *Potamyia* sp., *Corbicula nitens* and *Ephemerella* sp. in Yong'an Stream. Water quality of Yong'an Stream was evaluated by 6 biotic indexes, of which the results showed that Margalef diversity index, Simpson diversity index, Pielou evenness index, and biotic index all indicated that Yong'an Stream was clear. Only Shannon-Wiener index showed Yong'an Stream was slightly polluted, and Biology Pollution Index (BPI) showed it

基金项目 本研究由国家自然科学基金(31301908)和浙江省自然科学基金(LY17C040001)共同资助

引用格式 Feng L.H., Gu J.J., Qi X., and Zhang R.L., 2017, The community structure of macrobenthos and bioassessment of water quality of the Yong'an stream in Zhejiang province, *Jiyinzuxue Yu Yingyong Shengwuxue* (Genomics and Applied Biology), 36(7): 2849-2861 (冯立辉, 顾婧婧, 齐鑫, 张瑞雷, 2017, 浙江永安溪大型底栖动物群落结构及水质生物学评价, 基因组学与应用生物学, 36(7): 2849-2861)

was in  $\beta$ -meso-pollution state.

**Keywords** Yong'an Stream, Macroinvertebrates, Community structure, Bioassessment of water quality

溪流是一种较为脆弱的生态系统类型,是大多敏感水生生物栖息的重要场所,同时对于维持整个水系生态健康和生物多样性都有着极为重要的作用。溪流通常位于整个水系流域的上游山地,其地势特征、岸带植被状况以及受到干扰强度决定了溪流的健康状况通常会优于中下游河段(Meyer et al., 2007)。

溪流大型底栖无脊椎动物容易采集和鉴定,对环境变化具有较快响应的敏感性,且对环境条件变化的响应机制和特点具有较高的多样性,因此经常作为监测对象(朱江和任淑智, 1996; 胡本进等, 2005; 蔡立哲等, 2007; Mores et al., 2007; 钟非等, 2007; Collier, 2008)。水文特征、水体理化特征、河岸带植被等环境因素对底栖动物生长、繁殖和种群的演替起着重要作用,并最终影响底栖动物群落的组成(汪兴中等, 2009)。在水质生物评价方面,由于其种类多,生活周期较长、活动场所较固定、易采集,且不同种类对水质的敏感性差异较大等一系列优点,因此一直是了解水生生态系统功能及健康状况的重要类群。

目前,国内有关溪流大型底栖动物的研究主要有,胡本进等(2005)和颜龄等(2007)学者研究了溪流底栖动物功能摄食群,王备新等(2005)通过底栖动物完整性指数评价溪流生态系统健康,李金国等(2007)、杨莲芳等(1992)、董晓立等(1995)和兰洪波等(2013)学者通过水生昆虫评价溪流水质状况,但通过大型底栖无脊椎动物进行溪流水质生物学评价的报道较少。

永安溪源于仙居县与缙云县交界的天堂尖,海拔 1 184 m,自西向东横贯仙居县全境,进入临海市与始丰溪会合汇入灵江,全长 141.1 km,流域面积 2 702 km<sup>2</sup>,占灵江水系流域面积的 47.1% (杨俊琦, 2009)。枯水期乔灌木及草本覆盖度为 65%,其中乔木树种的覆盖度为 31.5% (张豪杰等, 2012)。永安溪不但是仙居县的“母亲河”,而且是灵江的干流,还是温黄平原的主要供水源。永安溪水质的优劣直接关系到下游灵江的水质状况,影响下游临海市、台州市的工农业和居民生活。对永安溪大型无脊椎底栖动物的物种组成和群落结构进行研究,可为永安溪流域的水生生物多样性保护、水质的生物学评价以及流域生态管理提供科学依据和技术支持。

## 1 结果与分析

### 1.1 永安溪大型底栖动物群落组成与分布及优势种

本次调查共采集到大型底栖动物 95 种,隶属于

4 门 7 纲。其中扁形动物门 1 种,对总物种数的贡献率为 1.0%; 环节动物门蛭纲 4 种,贡献率为 4.2%; 寡毛纲 3 种,贡献率为 3.2%; 软体动物门腹足纲 6 种,贡献率为 6.3%; 瓣鳃纲 2 种,贡献率为 2.1%; 节肢动物门昆虫纲 78 种,贡献率为 82.1%; 甲壳纲 1 种,贡献率为 1.0% (表 1)。

永安溪大型底栖动物优势种为长河螺 *Rivularia elongata*、角形环棱螺 *Bellamya angularis*、纹石蛾一种 *Potamyia* sp.、闪蚬 *Corbicula nitens* 和小蜉属一种 *Ephemera* sp. (表 2)。

永安溪大型底栖动物种类在 13 个站点间的分布差异不大,总体来说,节肢动物种类数在所有采样站点中占绝对优势。其中,扁形动物仅一种(三角涡虫)在 St1、St2、St6 和 St7 有分布,环节动物(共 7 种)在 St8 和 St12 未采集到,其它站点分布 1~3 种,软体动物(共 9 种)在 St12 未采集到,其它站点分布 1~5 种,节肢动物(共 79 种)在 13 个站点均有分布,种类数在 13~35 种之间变化(图 1)。

### 1.2 永安溪大型底栖动物密度和生物量的空间分布

永安溪 13 个采样站点中,大型底栖动物密度在 333.3~6 140.4 ind./m<sup>2</sup> 之间变化,平均密度为 3 020.8 ind./m<sup>2</sup>。密度最小的是 St5,为 333.3 ind./m<sup>2</sup>,最大的则是 St8,为 6 140.4 ind./m<sup>2</sup> (图 2)。扁形动物密度在 0~58.0 ind./m<sup>2</sup> 之间变化,平均密度为 6.1 ind./m<sup>2</sup>,对总密度的贡献为 0.2%。软体动物密度在 0~855.1 ind./m<sup>2</sup> 之间变化,平均密度为 197.3 ind./m<sup>2</sup>,对总密度的贡献为 6.5%。环节动物密度在 0~1 398.6 ind./m<sup>2</sup> 之间变化,平均密度为 155.5 ind./m<sup>2</sup>,对总密度的贡献为 5.2%。节肢动物密度在 181.2~6 123.2 ind./m<sup>2</sup> 之间变化,平均密度为 2 661.1 ind./m<sup>2</sup>,对总密度的贡献为 88.1% (表 3)。

永安溪 13 个采样站点的底栖动物生物量在 5.30~114.50 g/m<sup>2</sup> 之间变化,平均生物量为 34.25 g/m<sup>2</sup>。生物量最小的是 St13,为 5.30 g/m<sup>2</sup>,最大的则是 St9,为 114.50 g/m<sup>2</sup> (图 3)。扁形动物生物量在 0~0.10 g/m<sup>2</sup> 之间变化,平均生物量为 0.01 g/m<sup>2</sup>,对总生物量的贡献不足 0.1%。软体动物生物量在 0~111.37 g/m<sup>2</sup> 之间变化,平均生物量为 30.76 g/m<sup>2</sup>,对总生物量的贡献为 89.8%。环节动物生物量在 0~0.31 g/m<sup>2</sup> 之间变化,平均生物量为 0.07 g/m<sup>2</sup>,对总生物量的贡献为 0.2%。节肢动物生物量在 0.19~8.48 g/m<sup>2</sup> 之间变化,平均生物量为 3.41 g/m<sup>2</sup>,对总

表 1 永安溪大型底栖动物的组成

Table 1 Composition of macrobenthos community of Yong'an Stream

门	类群	种(属)	拉丁名
Phylum	Class	Species (genus)	Latin names
扁形动物门	涡虫纲	三角涡虫	<i>Dugesia</i> sp.
Platyhelminthes	Turbellaria		
环节动物门	蛭纲	宽身舌蛭	<i>Glossiphonia lata</i>
Annelida	Hirudinea	淡色舌蛭	<i>Glossiphonia weberi</i>
		巴蛭	<i>Barbronia weberi</i>
		八目石蛭	<i>Erpodella octoculata</i>
	寡毛纲	霍甫水丝蚓	<i>Limnodrilus hoffmeisteri</i>
	Oligochaeta	苏氏尾鳃蚓	<i>Branchiura sowerbyi</i>
		尖头杆吻虫	<i>Stylaria fossularis</i>
软体动物们	腹足纲	角形环棱螺	<i>Bellamya angularis</i>
Mollusca	Gastropoda	长河螺	<i>Rivularia elongata</i>
		色带短沟蜷	<i>Semisulcospira mandarina</i>
		光滑狭口螺	<i>Stenothyra glabra</i>
		光瓶螺	<i>Pila polita</i>
		椭圆萝卜螺	<i>Radix swinhoei</i>
		卵萝卜螺	<i>Radix ovata</i>
	瓣鳃纲	闪蚬	<i>Corbicula nitens</i>
	Lamellibranchia	淡水壳菜	<i>Limnoperna lacustris</i>
节肢动物门	昆虫纲	红斑似动蜉	<i>Cinygmina rubromaculata</i>
Arthropoda	Insecta	宜兴似动蜉	<i>Cinygmina yixingensis</i>
		高翔蜉属	<i>Epeorus</i> sp.
		扁蜉属一种	<i>Heptagenia</i> sp.
		假蜉属一种	<i>Iron</i> sp.
		赞蜉属一种	<i>Paegniodes</i> sp.
		红柱四节蜉	<i>Baetis rutilocylindratus</i>
		四节蜉属一种	<i>Baetis</i> sp.1
		四节蜉属一种	<i>Baetis</i> sp.2
		四节蜉属一种	<i>Baetis</i> sp.3
		双刺花翅蜉	<i>Baetiella bispinosa</i>
		宜兴宽基蜉	<i>Choroterps yixingensis</i>
		柔裳蜉属一种	<i>Habrophlebiodes</i> sp.
		带肋蜉属一种	<i>Cincticostella</i> sp.
		小蜉属一种	<i>Ephemerella</i> sp.
		锯形蜉属一种	<i>Serratella</i> sp.
		天角蜉属一种	<i>Uracanthella</i> sp.
		细蜉属一种	<i>Caenis</i> sp.
		中华细蜉	<i>Caenis sinensis</i> Gui
		蜉属一种	<i>Ephemera</i> sp.
		索氏缅甸春蜓	<i>Burmagomphus sowerbyi</i>
		蛇纹春蜓属一种	<i>Ophiogomphus</i> sp.
		小叶春蜓属一种	<i>Gomphidia</i> sp.
		斑鱼蛉属一种	<i>Neochauliodes</i> sp.
		准鱼蛉属一种	<i>Parachauliodes</i> sp.
		斑水虿属一种	<i>Eoophytia</i> sp.

续表 1

Continuing table 1

门	类群	种(属)	拉丁名
Phylum	Class	Species (genus)	Latin name
节肢动物门 Arthropoda	昆虫纲 Insecta	<i>Enochrus</i> 一种	<i>Enochrus</i> sp.
		<i>Heterelmis</i> 一种	<i>Heterelmis</i> sp.
		<i>Oulimnius</i> 一种	<i>Oulimnius</i> sp.
		<i>Microcyloepus</i> 一种	<i>Microcyloepus</i> sp.
		<i>Hexacyloepus</i> 一种	<i>Hexacyloepus</i> sp.
		<i>Neoelmis</i> 一种	<i>Neoelmis</i> sp.
		<i>Stenelmis</i> 一种	<i>Stenelmis</i> sp.
		<i>Zaitzevia</i> 一种	<i>Zaitzevia</i> sp.
		<i>Ectopria</i> 一种	<i>Ectopria</i> sp.
		<i>Macrostemum</i> 一种	<i>Macrostemum</i> sp.
		真扁泥甲属一种	<i>Eubrianax</i> sp.
		径石蛾属一种	<i>Ecnomus</i> sp.
		短脉石蛾属一种	<i>Cheumatopsyche</i> sp.
		角石蛾属一种	<i>Stenopsyche</i> sp.
		纹石蛾一种	<i>Potamyia</i> sp.
		蝶石蛾属一种	<i>Psychomyia</i> sp.
		小石蛾属一种	<i>Hydroptila</i> sp.
		朝大蚊属一种	<i>Antocha</i> sp.
		黑大蚊属一种	<i>Hexatoma</i> sp.
		贝蠓属一种	<i>Bezzia</i> sp.
		无突摇蚊属一种	<i>Ablabesmyia</i> sp.
		壳粗腹摇蚊属一种	<i>Conchapelopia</i> sp.
		尼罗长足摇蚊属一种	<i>Nilotanytus</i> sp.
		蚊型前突摇蚊	<i>Procladius culiciformis</i>
		端心突摇蚊	<i>Cardiocladius capcinus</i>
		小型棒脉摇蚊	<i>Corynoneura carriana</i>
		平滑环足摇蚊	<i>Cricotopus vierriensis</i>
		三带环足摇蚊	<i>Cricotopus trifasciatus</i>
		真开氏摇蚊属一种	<i>Eukiefferiella</i> sp.
		异三突摇蚊属一种	<i>Heterotrissocladus</i> sp.
		双色矮突摇蚊	<i>Nanocladius dichromus</i>
		褐色流环足摇蚊	<i>Rheocricotopus fucipes</i>
		提尼曼摇蚊属一种	<i>Thienemanniella</i> sp.
		摇蚊属一种	<i>Chironomus</i> sp.
		喙隐摇蚊	<i>Cryptochironomus rostratus</i>
		叶二叉摇蚊	<i>Dicrotendipes lobifer</i>
黑头二叉摇蚊	<i>Dicrotendipes nigrocephalicus</i>		
软铗小摇蚊	<i>Microchironomus tener</i>		
黑斑倒毛摇蚊	<i>Microtendipes britteni</i>		
尼罗摇蚊属一种	<i>Nilothauma</i> sp.		
黄色多足摇蚊	<i>Polypedilum flavum</i>		
梯形多足摇蚊	<i>Polypedilum scalaenum</i>		
范氏枝长跗摇蚊	<i>Cladotanytarsus vanderwulpi</i>		
锥昏眼摇蚊属一种	<i>Constempellina</i> sp.		

门	类群	种(属)	拉丁名
Phylum	Class	Species (genus)	Latin name
节肢动物门 Arthropoda	昆虫纲 Insecta	肛齿摇蚊属一种	<i>Neozawrelia</i> sp.
		拟长附摇蚊属一种	<i>Paratanytarsus</i> sp.
		纽流长附摇蚊属一种	<i>Rheotanytarsus muscicola</i>
		台湾长附摇蚊	<i>Tanytarsus formosanus</i>
		标志长附摇蚊	<i>Tanytarsus signatus</i>
		杆长附摇蚊属一种	<i>Virgatanytarsus</i> sp.
		雅明摇蚊属一种	<i>Tokunagia</i> sp.
		新米虾属一种	<i>Neocaridina</i> sp.
	甲壳纲 Crustacea		

生物量的贡献为 10.0%(表 4)。

从底栖动物密度贡献率分析,节肢动物的密度贡献率达到 88.1%,占绝对优势。从采样站点底栖动物密度贡献最大物种分析,13 个采样站点中,绝大部分站点为节肢动物,仅有 St1 为软体动物角形环棱螺和 St5 为霍甫水丝蚓(表 3)。

从底栖动物生物量贡献率分析,软体动物的贡献率达到 89.8%,占绝对优势。从采样站点底栖动物生物量贡献最大物种分析,13 个采样站点中,绝大部分为软体动物,仅 St8 和 St12 为纹石蛾一种 *Potamyia* sp. (表 4)。

### 1.3 底栖动物的物种多样性及水质生物学评价

底栖动物 Shannon-Wiener 指数、Margalef 多样性指数、Simpson 指数、Pielou 均匀度指数、BI 指数和 BPI 生物学污染指数等各指数所对应的水质评价标准(表 5)。依据评价标准对永安溪各采样站点水质进行评价。

表 2 永安溪大型底栖动物优势种

Table 2 The dominant macrobenthos species in Yong'an Stream

种类	相对重要值(%)
Species	Indices of relative importance (%)
长河螺	31.83
<i>Rivularia elongata</i>	
角形环棱螺	21.12
<i>Bellamyia angularis</i>	
纹石蛾一种	14.07
<i>Potamyia</i> sp.	
闪蚬	9.63
<i>Corbicula nitens</i>	
小蜉属一种	5.09
<i>Ephemerella</i> sp.	

从采样站点分析,Shannon-Wiener 指数评价永安溪水质健康状况为,大部分站点为轻污染状态,仅有 St11 为中污染状态;Margalef 多样性指数评价永安溪水质健康状况为,大部分站点为清洁状态,仅有 St11 为轻污染状态;Simpson 多样性指数评价永安溪水质健康状况为,大部分站点为清洁状态,仅有 St11、St12 和 St13 为中污染状态(该指数评价标准中仅有清洁,中污染,重污染和严重污染);Pielou 均匀度指数评价永安溪水质健康状况为,所有站点均为清洁状态;BI 指数评价永安溪水质健康状况为,大部分站点为清洁状态,其中 St6、St8 和 St9 为最清洁状态,St5 和 St13 为轻污染状态;BPI 生物学污染指数评价永安溪水质健康状况为,St1、St4、St7 和 St9 为轻污染状态,其它站点均为  $\beta$ -中污染状态(表 6)。

从整体水平分析,底栖动物 6 个生物指数中, Margalef 多样性指数、Simpson 多样性指数、Pielou 均匀度指数和 BI 指数均表明永安溪处于清洁状态,仅有 Shannon-Wiener 指数评价显示为轻污染状态, BPI 生物学污染指数评价为  $\beta$ -中污染状态(表 7)。

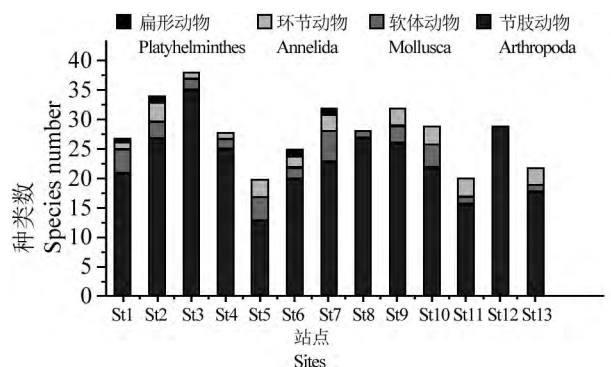


图 1 永安溪不同采样站点大型底栖动物种类分布

Figure 1 The species distribution of macrobenthos from different sample sites in Yong'an Stream

表 3 永安溪大型底栖动物不同类群密度的分布状况

Table 3 Distribution of density of different groups of macrobenthos in Yong'an Stream

	扁形动物 Platyhelminthes	软体动物 Mollusca	环节动物 Annelida	节肢动物 Arthropoda	总密度 Total density	密度贡献最大物种 Density contribution of the largest species	密度(ind./m <sup>2</sup> ) Density (ind./m <sup>2</sup> )	占比(%) Accounting (%)
St1	7.2	427.5	43.5	637.7	1 115.9	角形环棱螺 <i>Bellamyia angularis</i>	253.6	22.70
St2	58	79.7	108.7	1 775.4	2 021.7	细蜉属一种 <i>Caenis</i> sp.	615.9	30.50
St3	0	29	7.2	2 050.7	2 087	纹石蛾一种 <i>Potamyia</i> sp.	253.6	12.20
St4	0	246.4	7.2	1 920.3	2 173.9	<i>Neolmis</i> sp. 一种	536.2	24.70
St5	0	58	94.2	181.2	333.3	霍甫水丝蚓 <i>Limnodrilus hoffmeisteri</i>	79.7	23.90
St6	7.2	115.9	79.7	4 268.1	4 471	小蜉属一种 <i>Ephemerella</i> sp.	1 333.3	29.80
St7	7.2	855.1	50.7	2 876.8	3 789.9	纹石蛾一种 <i>Potamyia</i> sp.	1 202.9	31.70
St8	0	7.2	0	6 123.2	6 140.4	纹石蛾一种 <i>Potamyia</i> sp.	1 427.5	23.20
St9	0	260.9	94.2	3 608.7	3 963.8	宜兴似动蜉 <i>Cinygmima yixingensis</i>	1 029	26.00
St10	0	333.3	29	2 173.9	2 536.2	壳粗腹摇蚊属一种 <i>Conchapelopia</i> sp.	558	22.00
St11	0	123.2	1 398.6	3 072.5	4 594.2	纹石蛾一种 <i>Potamyia</i> sp.	1 695.7	36.90
St12	0	0	0	3 985.5	3 985.5	纹石蛾一种 <i>Potamyia</i> sp.	1 181.2	29.60
St13	0	29	108.7	1 920.3	2 058	台湾长附摇蚊 <i>Tanytarsus formosanus</i>	681.2	33.10

## 2 讨论

### 2.1 永安溪大型底栖动物群落分布特征

节肢动物和软体动物分别是永安溪大型底栖动物中的密度优势种群和生物量优势种群。其中节肢动物中,贡献最大的主要为蜉蝣目和鞘翅目,软体动物中,贡献最大的主要为瓣鳃纲和腹足纲。夏季正值节肢动物幼虫生长高峰期,这就大大增加了底栖动物的生物密度(丁建华等, 2012)。蜉蝣目昆虫是对水质最敏感的水生生物类群,常栖息在急流和洁净水体。急流、富氧、冷水以及贫营养是山地溪流的主要特征(王强等, 2011)。因此,在山地溪流的大型底栖动物群落中,蜉蝣往往成为优势类群(杨莲芳等, 1992; 于力等, 1997; 李强等, 2006; 渠晓东, 2006; 李金国等, 2007)。永安溪是山区溪流,瓣鳃纲和腹足纲等软体动物趋于小型化,但依然是永安溪底栖动物生物量贡

献率最大的类群。

### 2.2 水质生物学评价

不同的生物指数只反映生物群落特征的某一侧面,考虑在实际水体中生物群落的结构、功能除受水质污染影响外,还受到非污染因子的影响,单一的生物学评价指数难以准确地表征某一监测点位或区域的水质状况(王博等, 2011)。本研究选取底栖动物 Shannon-Wiener 指数、Margalef 多样性指数、Simpson 指数、Pielou 均匀度指数、BI 指数、BPI 生物学污染指数等 6 个生物指数,能更全面地对永安溪的水质进行评价,增加评价的可靠性。

从整体水平分析,底栖动物 6 个生物指数中, Margalef 多样性指数、Simpson 多样性指数、Pielou 均匀度指数和 BI 指数均表明永安溪处于清洁状态; 仅有 Shannon-Wiener 指数评价显示为轻污染状态,

表 4 永安溪大型底栖动物不同类群生物量的分布状况

Table 4 Distribution of biomass of different groups of macrobenthos in Yong'an Stream

	扁形动物 Platyhelminthes	软体动物 Mollusca	环节动物 Annelida	节肢动物 Arthropoda	总生物量 Total biomass	生物量贡献最大物种 Biomass contribution of the largest species	生物量(g/m <sup>2</sup> ) Biomass (g/m <sup>2</sup> )	占比(%) Accounting (%)
St1	0	31.22	0.07	3.02	34.32	闪蚬 <i>Corbicula nitens</i>	15.09	44.00
St2	0.1	10.89	0.18	1.58	12.74	闪蚬 <i>Corbicula nitens</i>	8.34	65.40
St3	0	8.94	0.02	3.22	12.17	长河螺 <i>Rivularia elongata</i>	8.83	72.60
St4	0	18.44	0.01	1.33	19.78	角形环棱螺 <i>Bellamyia angularis</i>	12.12	61.30
St5	0	15.07	0.17	0.19	15.42	长河螺 <i>Rivularia elongata</i>	10.68	69.30
St6	0.02	36.21	0.06	4.02	40.3	长河螺 <i>Rivularia elongata</i>	25.07	62.20
St7	0.01	65.45	0.06	3.33	68.85	角形环棱螺	34.36	49.90
St8	0	1.25	0	8.48	9.73	纹石蛾一种 <i>Potamyia sp.</i>	2.38	24.50
St9	0	111.37	0.04	3.09	114.5	长河螺 <i>Rivularia elongata</i>	96.16	84.00
St10	0	69.8	0.02	1.76	71.58	长河螺 <i>Rivularia elongata</i>	39.71	55.50
St11	0	28.1	0.31	6	34.41	闪蚬 <i>Corbicula nitens</i>	28.1	81.70
St12	0	0	0	6.2	6.2	纹石蛾一种 <i>Potamyia sp.</i>	2.12	34.20
St13	0	3.15	0.05	2.1	5.3	闪蚬 <i>Corbicula nitens</i>	3.15	59.50

BPI 生物学污染指数评价为 β- 中污染状态。

Shannon-Wiener 指数仅考虑物种的个体数,没有考虑各物种(类群)的耐污值。童晓立等(1995)和熊晶等(2012),认为 BI 指数既考虑虫体本身的耐污能

力的差异,又考虑种的个体数,增加了评价的准确性,是一个比较理想的评价方法。

BI 指数评价永安溪水质健康状况为,大部分站点为清洁状态,其中 St6、St8 和 St9 为最清洁状态,St5 和 St13 为轻污染状态,St5 附近有少量居民和耕地,且生活污染较为严重,St13 位于采沙场附近,工业活动对环境的影响较大。BI 生物指数评价显示 St5 和

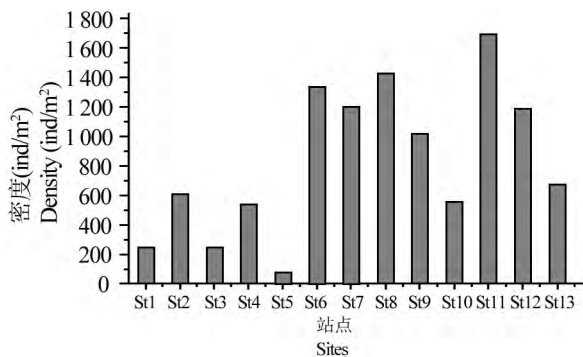


图 2 永安溪大型底栖动物密度的空间分布

Figure 2 The spatial distribution of macrobenthos density in Yong'an Stream

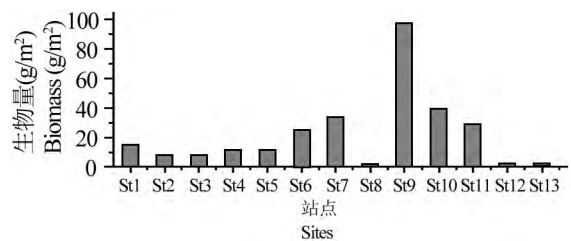


图 3 永安溪大型底栖动物生物量的空间分布

Figure 3 The spatial distribution of macrobenthos biomass in Yong'an Stream

表 5 各生物指数评价标准

Table 5 The evaluating standards of each biotic index

生物指数 Biotic-index	范围 Range	污染状态 Pollution state
Shannon-Wiener 指数 Shannon-Wiener index	<1	重污染 Heavy pollution
	1~2	中污染 Moderately pollution
	2~3	轻污染 Mild pollution
	>3	清洁 Clean state
Margalef 指数 Margalef index	<1	重污染 Heavy pollution
	1~2	中污染 Moderately pollution
	2~3	轻污染 Mild pollution
	>3	清洁 Clean state
Simpson 指数 Simpson index	<2	严重污染 Serious pollution
	2~3	重污染 Heavy pollution
	3~6	中污染 Moderately pollution
	>6	清洁 Clean state
Pielou 指数 Pielou index	<0.3	重污染 Heavy pollution
	0.3~0.5	重污染 Heavy pollution
	>0.5	清洁 Clean state
BI 指数 Biotic index	<2.97	最清洁 Cleanest state
	2.98~4.72	清洁 Clean state
	4.73~6.48	轻污染 Mild pollution
	6.49~8.24	中污染 Moderately pollution
	>8.24	重污染 Heavy pollution
BPI 指数 Biology pollution index	0-0.1	清洁 Clean state
	0.1~0.5	轻污染 Mild pollution



生物指数	范围	污染状态
Biotic-index	Range	Pollution state
BPI 指数	0.5~1.5	$\beta$ - 中污染
Biology pollution index	1.5~5	$\beta$ -Moderately pollution $\alpha$ - 中污染
	>5	$\alpha$ -Moderately pollution 重污染 Heavy pollution

St13 这两个站点为轻污染,与实际情况较为相符。

BPI 指数综合考虑了底栖动物的多个类群,包括寡毛类、水蛭、摇蚊幼虫、多毛类、甲壳类、除摇蚊幼虫以外的水生昆虫以及软体动物(吴召仕等, 2011)。BPI 生物学污染指数评价永安溪水质健康状况为, St1、St4、St7 和 St9 为轻污染状态,其它站点均为  $\beta$ - 中污染状态。

BPI 生物学污染指数评价与其它指数评价存在差异,总体来看,由于污染与非污染因子均影响群落结构和功能,单一的生物指数很难准确反映某一地区的水质状况,因此选择多种生物指数,并结合种群生态学、理化检测、综合评定水质(江晶等, 2009)。

### 2.3 永安溪大型底栖动物现状

本研究共采集到大型底栖动物 95 种,其中扁形动物 1 种,环节动物 2 纲 7 种,软体动物 2 纲 8 种,节肢动物 2 纲 79 种。扁形动物仅一种(三角涡虫)在 St1、St2、St6 和 St7 分布,环节动物(7 种)在 St8 和 St12 未采集到,其它站点分布 1~3 种,软体动物(9 种)在 St12 未采集到,其它站点分布 1~5 种,节肢动物(78 种)在 13 个站点均有分布,种类数在 13~35 种之间变化。永安溪大型底栖动物优势种为长河螺 *Rivularia elongata*、角形环棱螺 *Bellamyia angularis*、*Potamyia* sp. 一种、闪蚬 *Corbicula nitens*、小蜉属一种 *Ephemerella* sp.。

永安溪大型底栖动物密度在 333.3~6 140.4 ind./m<sup>2</sup> 之间变化,平均密度为 3 020.8 ind./m<sup>2</sup>。扁形动物平均密度为 6.1 ind./m<sup>2</sup>,软体动物平均密度为 197.3 ind./m<sup>2</sup>,环节动物平均密度为 155.5 ind./m<sup>2</sup>,节肢动物平均密度为 2 661.1 ind./m<sup>2</sup>。大型底栖动物生物量在 5.30~114.50 g/m<sup>2</sup> 之间变化,平均生物量为 34.25 g/m<sup>2</sup>。扁形动物平均生物量为 0.01 g/m<sup>2</sup>,软体动物平均生物量为 30.76 g/m<sup>2</sup>,环节动物平均生物量为 0.07 g/m<sup>2</sup>,节肢动物平均生物量为 3.41 g/m<sup>2</sup>。

从整体水平分析,底栖动物 6 个生物指数中, Margalef 多样性指数、Simpson 多样性指数、Pielou 均匀度指数和 BI 指数均表明永安溪处于清洁状态,仅有 Shannon-Wiener 指数评价显示为轻污染状态,BPI 生物学污染指数评价为  $\beta$ - 中污染状态。

## 3 材料与方法

### 3.1 研究区域与采样点设置

在永安溪源头两个支流分别设置 St1 和 St2 站点,在杨岸上游和杨岸分别设置 St3 和 St4 站点,在湫山设置为 St5 站点,在横溪设置为 St6 站点,在埠头村设置为 St7 站点,在永安村设置为 St8 站点,在官路村附近设置为 St9 站点;在清口村设置为 St10 站点,在永安公园下游设置为 St11 站点,在下张村设置为 St12 站点,在永安溪即将进入临海市处设置为 St13 站点。2016 年 8 月在永安溪针对以上 13 个采样站点进行底栖动物的调查,具体分布(图 4)。

### 3.2 底栖动物样品的采集

底栖动物样品的采集在约 100 m 长的采样区内进行,用索伯网(60 目, 0.069 m<sup>2</sup>) 在溪流两边的近岸区和溪流中间各采集 1 次,采集时搅动索伯网前定量框内的底质,并将粘附在石块上的底栖动物洗涮入网,将每个采样点采集的 3 个定量样品合并处理。将所采集的底栖动物样品用 60 目的底栖动物网滤洗,并用 5% 的福尔马林固定后带回实验室,在解剖显微镜下挑拣底栖动物样品,然后在显微镜下根据相关的鉴定资料标本尽量鉴定到种(蔡如星等, 1991; Morse et al., 1994; Merritt and Cummins, 1996; 唐红渠, 2006; 王俊才和王新华, 2011; 周长发等, 2015)。

### 3.3 数据处理

底栖动物重要值,重要值可作为底栖动物优势种的指标参数,本研究以重要值>5% 的种类作为优势

表 6 生物指数对各采样站点水质评价

Table 6 Water quality assessment of 13 sites according to biotic index

站点	Shannon-Wiener 指数	Margalef 指数	Pielou 指数	Simpson 指数	BI 指数	BPI 指数
Site	Shannon-Wiener index	Margelef index	Pielou index	Simpson index	Biotic index	Biology pollution index
St1	2.63	5.16	0.8	9.7	4.22	0.29
	轻污染	清洁	清洁	清洁	清洁	轻污染
	Light pollution	Clean state	Clean state	Clean state	Clean state	Light pollution
St2	2.51	5.86	0.71	6.4	4.31	0.66
	轻污染	清洁	清洁	清洁	清洁	β- 中污染
	Light pollution	Clean state	Clean state	Clean state	Clean state	β-meso-pollution
St3	2.98	6.53	0.82	14.6	3.12	0.62
	轻污染	清洁	清洁	清洁	清洁	β- 中污染
	Light pollution	Clean state	Clean state	Clean state	Clean state	β-meso-pollution
St4	2.5	4.73	0.75	8.1	3.31	0.34
	轻污染	清洁	清洁	清洁	清洁	轻污染
	Light pollution	Clean state	Clean state	Clean state	Clean state	Light pollution
St5	2.65	4.96	0.89	12.5	6.01	0.61
	轻污染	清洁	清洁	清洁	轻污染	β- 中污染
	Light pollution	Clean state	Clean state	Clean state	Light pollution	β-meso-pollution
St6	2.52	3.74	0.78	7.8	2.7	0.51
	轻污染	清洁	清洁	清洁	最清洁	β- 中污染
	Light pollution	Clean state	Clean state	Clean state	Cleanest state	β-meso-pollution
St7	2.5	4.95	0.72	6.9	3.04	0.42
	轻污染	清洁	清洁	清洁	清洁	轻污染
	Light pollution	Clean state	Clean state	Clean state	Cleanstate	Light pollution
St8	2.59	4.01	0.78	9.2	2.17	0.62
	轻污染	清洁	清洁	清洁	最清洁	β- 中污染
	Light pollution	Clean state	Clean state	Clean state	Cleanest state	β-meso-pollution
St9	2.46	4.92	0.71	7	2.33	0.41
	轻污染	清洁	清洁	清洁	最清洁	轻污染
	Light pollution	Clean state	Clean state	Clean state	Cleanest state	Light pollution
St10	2.67	4.78	0.79	10	3.5	0.54
	轻污染	清洁	清洁	清洁	清洁	β- 中污染
	Light pollution	Clean state	Clean state	Clean state	Clean state	β-meso-pollution
St11	1.85	2.94	0.62	4.2	4.61	0.65
	中污染	轻污染	清洁	中污染	清洁	β- 中污染
	Meso-pollution	Light pollution	Clean State	Meso-pollution	Clean State	β-meso-pollution
St12	2.55	4.44	0.76	3.2	3.07	0.84
	轻污染	清洁	清洁	中污染	清洁	β- 中污染
	Light pollution	Clean state	Clean state	Meso-pollution	Clean state	β-meso-pollution
St13	2.24	3.72	0.72	5.8	5.2	0.77
	轻污染	清洁	清洁	中污染	轻污染	β- 中污染
	Light pollution	Clean state	Clean state	Meso-pollution	Light pollution	β-meso-pollution

种。根据各站点调查数据,按照以下公式计算底栖动物的重要值:

的重要值:

重要值(IRI) = (相对密度+相对生物量)×相对频率

采用 Shannon-Wiener 多样性指数,  $H' = -\sum((n_i/N) \ln(n_i/N))$

$i/N) \ln(n_i/N))$

Margalef 多样性指数  $D = (S-1)/\ln N$

Pielou 均匀度指数  $J = H'/\ln S$

Simpson 多样性指数  $Simpson(D) = 1/\sum(n_i/N)^2$

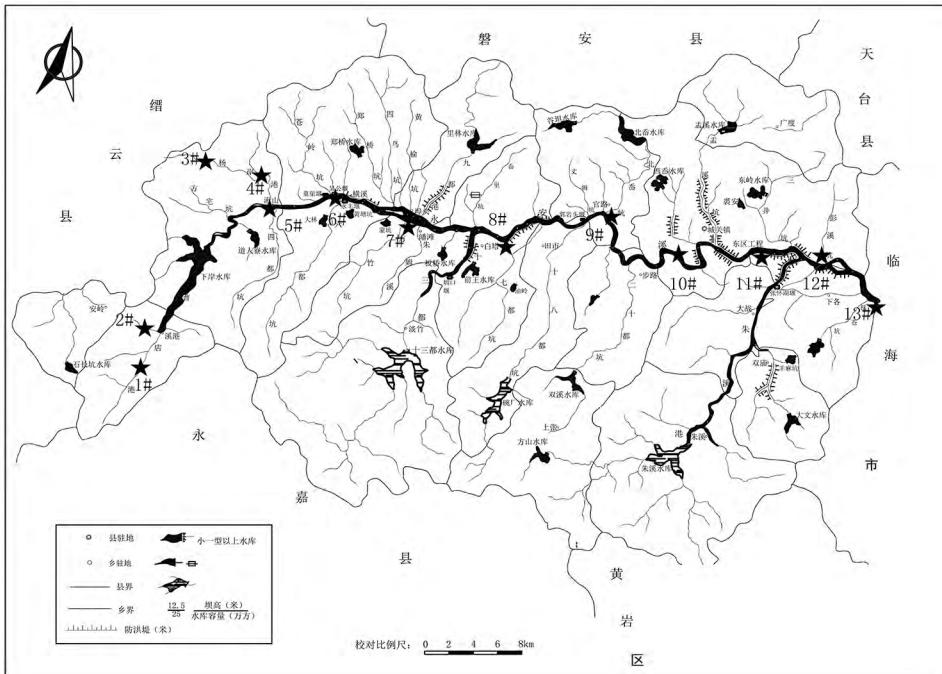


图 4 永安溪底栖动物调查点分布

Figure 4 Distribution map of the sampling sites in Yong'an Stream

BI 指数  $BI = \sum \frac{t_i n_i}{N}$

生物学污染指数 BPI  $BPI = \lg(N_1 + 2) / (\lg(N_2 + 2) + \lg(N_3 + 2))$

其中  $n_i$  为第  $i$  种物种的个体数,  $N$  为样品中所有物种的总个体数,  $S$  为样品中物种种类总数,  $t_i$  为  $i$  种底栖动物的耐污值;  $N_1$  寡毛类、蛭类和摇蚊幼虫个体数;  $N_2$  多毛类、甲壳类和除摇蚊幼虫之外其他水生昆虫的个体数;  $N_3$  软体类个体数。

表 7 永安溪水质评价

Table 7 Water quality assessment of Yong'an Stream

生物指数	整体水平	污染状态
Biotic-index	Overall leve	Pollution state
Shannon-Wiener 指数	2.51	轻污染
Shannon-Wiener index		Light pollution
Margalef 指数	4.67	清洁
Margelef index		Clean state
Simpson 指数	8.11	清洁
Simpson index		Clean state
Pielou 指数	0.76	清洁
Pielou index		Clean state
BI 指数	3.66	清洁
Biotic index		Clean state
BPI 指数	0.56	$\beta$ - 中污染
Biology pollution index		$\beta$ -meso-pollution

### 作者贡献

冯立辉是本研究的实验设计和实验研究的执行人,完成数据分析和论文初稿的写作;顾婧婧参与实验设计;齐鑫和张瑞雷是项目的构思者及负责人,指导实验设计,数据分析,论文写作与修改。全体作者都阅读并同意最终的文本。

### 致谢

本研究由国家自然科学基金(31301908)和浙江省自然科学基金(LY17C040001)共同资助。

### 参考文献

Cai L.Z., Lin P., and Li H.M., 2007, Restoration process of macrofaunal community at Luomazhou section of the Shenzhen River after pollution interception, *Yingyong Yu Huanjing Shengwu Xuebao* (Chinese Journal of Applied & Environmental Biology), 13 (4): 497-500 (蔡立哲, 林鹏, 厉红梅, 2007, 截污后深圳河落马洲段大型底栖动物群落的恢复过程, *应用与环境生物学报*, 13(4): 497-500)

Cai R.X., Huang W.H., and Liu Y.Y., eds., 1991, *Zhejiang animal annals: mollusks*, Zhejiang Science and Technology Press, Hangzhou, China, pp.131-235 (蔡如星, 黄维灏, 刘月英, 主编, 1991, *浙江动物志: 软体动物*, 浙江科学技术出版社, 中国, 杭州, pp.131-235)

Collier K.J., 2008, Temporal patterns in the stability, persistence

- and condition of stream macroinvertebrate communities: relationships with catchment land-use and regional climate, *Freshwater Biology*, 53: 603-616
- Ding J.H., Yang W., Jin X.W., Deng D.G., Ge Q., and Liu Z.G., 2012, Community structure of macrozoobenthos and biological evaluation of water quality in lower reaches of Ganjiang River, *Hupo Kexue (Journal of Lake Sciences)*, 24(4): 593-599 (丁建华, 杨威, 金显文, 邓道贵, 葛茜, 刘足根, 2012, 赣江下游流域大型底栖动物群落结构及水质生物学评价, *湖泊科学*, 24(4): 593-599)
- Hu B.J., Yang L.F., Wang B.X., and Shan L.N., 2005, Functional feeding groups of macroinvertebrates in 1-6 order tributaries of the Changjiang River, *Yingyong yu Huanjing Shengwu Xuebao (Chinese Journal of Applied & Environmental Biology)*, 11(4): 463-466 (胡本进, 杨莲芳, 王备新, 单林娜, 2005, 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*, 11(4): 463-466)
- Jiang J., Wen F.N., Gu P., and Yan Y.J., 2009, Community structure of macrozoobenthos and bioassessment of water quality in Hujiaxi Stream of Qingjiang River Basin, Hubei Province, *Hupo Kexue (Journal of Lake Sciences)*, 21(4): 547-555 (江晶, 温芳妮, 顾鹏, 闫云君, 2009, 湖北清江流域胡家溪大型底栖动物群落组成及水质评价, *湖泊科学*, 21(4): 547-555)
- Lan H.B., Wang W.H., and Ran J.C., 2013, The investigation of aquatic insects and water quality bioassessment in Maolan Karst Forest, *Anhui Nongye Kexue (Journal of Anhui Agriculture Science)*, 41(23): 9618-9620 (兰洪波, 王万海, 冉景丞, 2013, 茂兰喀斯特森林溪流水生昆虫群落构成及水质生物评价, *安徽农业科学*, 41(23): 9618-9620)
- Li J.G., Wang Q.C., Yan S.C., Yao Q., Qiao S.L., Lv Y.D., and Han Z.X., 2007, Community characteristics of aquatic insects and bioassessment for water quality in lower order streams in Liangshui and Maershan watersheds, *Shengtai Xuebao (Acta Ecologica Sinica)*, 27(12): 5008-5018 (李金国, 王庆成, 严善春, 姚琴, 乔树亮, 吕跃东, 韩壮行, 2007, 凉水、帽儿山低级溪流中水生昆虫的群落特征及水质生物评价, *生态学报*, 27(12): 5008-5018)
- Li Q., Yang L.F., Wu H., and Wang B.X., 2006, Canonical correspondence analysis between EPT community distribution and environmental factors in Xitiao River, Zhejiang, China, *Shengtai Xuebao (Acta Ecologica Sinica)*, 26(11): 3817-3825 (李强, 杨莲芳, 吴璟, 王备新, 2006, 西苕溪 EPT 昆虫群落分布与环境因子的典范对应分析, *生态学报*, 26(11): 3817-3825)
- Merritt R.W., and Cummins K.W., eds., 1996, *An introduction to the aquatic insects of North America*, Kendall Hunt publishing, Dubuque, IA, pp.185-27
- Meyer J.L., Strayer D.L., Wallace J.B., Eggert S.L., Helfman G.S., and Leonard N.E., 2007, The contribution of headwater streams to biodiversity in river networks, *Journal of the American Water Resources Association*, 43: 86-103
- Mores J.C., Bae Y.J., Munkhjargal G., Sangpradub N., Tanida K., Vshivkova T.S., Wang B.X., Yang L.F., and Yule C.M., 2007, Freshwater biomonitoring with macroinvertebrates in East Asia, *Frontiers Ecology & Environ*, 5(1): 33-42
- Morse J.C., Yang L.F., and Tian L.X., eds., 1994, *Aquatic insects of China useful for monitoring water quality*, Hohai University Press, Nanjing, China, pp.15-326
- Qu X.D., 2006, Studies on the spatial-temporal variation and biological integrity of macroinvertebrate in the Xiangxi River, and the impact of small hydro power on its communities, Dissertation for Ph.D., Institute of Hydrobiology, the Chinese Academy of Science, Supervisor: Liu J.K., pp.1-8 (渠晓东, 2006, 香溪河大型底栖动物时空动态、生物完整性及小水电站的影响研究, 博士学位论文, 中国科学院水生生物研究所, 导师: 刘建康, pp.1-8)
- Tang H.Q., 2006, Biosystematic study on the chironomid larvae in China, Dissertation for Ph.D., Nankai University, Supervisor: Wang X.H., pp.63-293 (唐红渠, 2006, 中国摇蚊科幼虫生物系统学研究, 博士学位论文, 南开大学, 导师: 王新华, pp.63-293)
- Tong X.L., Hu H.J., and Chen S.Y., 1995, Use of aquatic insects to evaluate water quality in the streams of Mt. Nankun, *Huanan Nongye Daxue Xuebao (Journal of South China Agricultural University)*, 16(3): 6-10 (童晓立, 胡慧建, 陈思源, 1995, 利用水生昆虫评价南昆山溪流的水质, *华南农业大学学报*, 16(3): 6-10)
- Wang B., Liu Q.R., Zhou Y.L., Xiong X., and Jiang Y., 2011, The community structure of zoobenthos and bioassessment of water quality of the Dongjiang River, *Shuishengtaixue Zazhi (Journal of Hydroecology)*, 32(5): 43-49 (王博, 刘全儒, 周云龙, 熊兴, 江源, 2011, 东江干流底栖动物群落结构与水质生物学评价, *水生态学杂志*, 32(5): 43-49)
- Wang B.X., Yang L.F., Hu B.J., and Shan L.N., 2005, A preliminary study on the assessment of stream ecosystem health in south of Anhui Province using Benthic-Index of Biotic Integrity, *Shengtai Xuebao (Acta Ecologica Sinica)*, 25(6): 1481-1490 (王备新, 杨莲芳, 胡本进, 单林娜, 2005, 应用底栖动物完整性指数 B-IBI 评价溪流健康, *生态学报*, 25(6): 1481-1490)
- Wang J.C., and Wang X.H., eds., 2011, *Chironomid larvae in the north of China*, Yanshi Press, Beijing, China, pp.67-247 (王俊才, 王新华, 主编, 2011, 中国北方摇蚊幼虫, 言实出版社, 中国, 北京, pp.67-247)
- Wang Q., Yuan X.Z., and Liu H., 2011, 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, *Shuisheng Shengwu Xuebao (Acta Hydrobiologica Sinica)*, 35(5): 887-892 (王强, 袁兴中, 刘红, 2011, 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, *水生生物学报*, 35(5):

- 887-892)
- Wang X.Z., Cai Q.H., Li F.Q., and Duan S.G., 2009, Distribution dynamics of macroinvertebrates in the source of the south-water-to-north project, *Yingyong yu Huangjing Shengwu Xuebao* (Chinese Journal of Applied & Environmental Biology), 15(6): 803-807 (汪兴中, 蔡庆华, 李凤清, 段树桂, 2009, 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, *应用与环境生物学报*, 15(6): 803-807)
- Wu Z.S., Cai Y.J., Chen Y.W., Shao X.Y., and Gao J.F., 2011, Assemblage structure investigation of macrozoobenthos and water quality bioassessment of the main river systems in Taihu Basin, *Hupo Kexue* (Journal of Lake Sciences), 23(5): 686-694 (吴召仕, 蔡永久, 陈宇炜, 邵晓阳, 高俊峰, 2011, 太湖流域主要河流大型底栖动物群落结构及水质生物学评价, *湖泊科学*, 23(5): 686-694)
- Yang J.Q., 2009, Present situation and countermeasures of environmental protection in Yong'an Stream of Xianju County, *Keji Xinxixi* (Science & Technology information), 03: 772, 786 (杨俊琦, 2009, 仙居县永安溪环境保护的现状与对策, *科技信息*, 03: 772, 786)
- Xiong J., Jiang X.M., Wang C.M., Xie Z.C., Ao H.Y., and Liu J.T., 2012, Community variation of macrozoobenthos and bioassessment of Dingqian Lake, Ningbo, *Huanjing Kexue Yanjiu* (Research of Environmental Science), 25(3): 282-289 (熊晶, 蒋小明, 王丑明, 谢志才, 敖鸿毅, 刘剑彤, 2012, 宁波东钱湖大型底栖动物群落动态及水质生物学评价, *环境科学研究*, 25(3): 282-289)
- Yan L., Zhao Y., Han C.X., and Tong X.L., 2007, Litter decomposition and associated macroinvertebrate functional feeding groups in a third order stream of northern Guangdong, *Yingyong Shengtai Xuebao* (Chinese Journal of Applied Ecology), 18(11): 2573-2579 (颜玲, 赵颖, 韩翠香, 童晓立, 2007, 粤北地区溪流中的树叶分解及大型底栖动物功能摄食群, *应用生态学报*, 18(11): 2573-2579)
- Yang L.F., Li Y.W., Qi D.G., Sun C.H., and Tian L.X., 1992, Community structure of aquatic insect and biomonitoring of water quality in Jiuhuahe River, *Shengtai Xuebao* (Acta Ecologica Sinica), 12(1): 8-15 (杨莲芳, 李佑文, 戚道光, 戚道光, 孙长海, 田立新, 1992, 九华河水生昆虫群落结构和水质生物评价, *生态学报*, 12(1): 8-15)
- Yu L., Bao X.X., and Yun B.C., 1997, Compositions of aquatic insects in areas of Changbai Mountain, *Shuisheng Shengwu Xuebao* (Acta Hydrobiologica Sinica), 21(1): 31-39 (于力, 暴学祥, 云宝琛, 1997, 长白山水生昆虫的研究, *水生生物学报*, 21(1): 31-39)
- Zhang H.J., Pan F.D., Zhu X.C., and Pan J.Y., 2012, Investigation, protection and rehabilitation of wetland resources in Yong'an Stream, Xianju County, *Keji Xinxixi* (Science & Technology information), 29: 451-452 (张豪杰, 潘富弟, 祝新春, 潘建勇, 2012, 仙居县永安溪湿地资源调查及保护、修复的探讨, *科技信息*, 29: 451-452)
- Zhong F., Liu B.Y., He F., Liang W., Cheng S.P., Zuo J.C., and Wu Z.B., 2007, Effect of aquatic ecological restoration on zoobenthos community of Lotus Lake, *Yingyong Yu Huangjing Shengwu Xuebao* (Chinese Journal of Applied & Environmental Biology), 13(1): 55-60 (钟非, 刘保元, 贺锋, 梁威, 成水平, 左进城, 吴振斌, 2007, 水生态修复对莲花湖底栖动物群落的影响, *应用与环境生物学报*, 13(1): 55-60)
- Zhou C.F., Gui.H., and Su C.R., eds., 2015, *An Overview of Chinese Ephemera*, Science Press, Beijing, China, pp.117-210 (周长发, 归鸿, 苏翠荣, 主编, 2015, *中国蜉蝣概述*, 科学出版社, 中国, 北京, pp.117-210)
- Zhu J., and Ren S.Z., 1996, Effect of the wastewater from a copper mine on benthos community in the lean river, *Yingyong Yu Huangjing Shengwu Xuebao* (Chinese Journal of Applied & Environmental Biology), 2(2): 162-168 (朱江, 任淑智, 1996, 德兴铜矿废水对乐安江底栖动物群落的影响, *应用于环境生物学报*, 2(2): 162-168)