

柳江流域大型底栖动物群落结构及其与水质因子的关系

李 鑫¹, 邓培雁^{1*}, 刘 威²

(1. 华南师范大学环境学院, 广州 510631; 2. 广州大学环境科学与工程学院, 广州 510405)

摘要:以柳江流域 23 个点位为例,研究了不同水文季节(3 月和 6 月)水质因子(DO、COD_{Mn}、NH₃-N、As、Hg、Cd、Pb)对底栖动物群落结构的影响,2 次调查共鉴定出底栖动物 4 门 7 纲 16 目 54 科 68 属(种),种类相似系数为 83.76%,物种丰富度表现为枯水期略高于丰水期,底栖动物优势种在枯、丰水期分别有 4 种和 2 种,具有明显的季节演替. DCA 和 TWINSpan 分析结果显示:柳江流域底栖动物群落结构在时空分布上存在一定差异,主要表现为枯、丰水期均有 3 个不同的底栖动物类群大致依次分布在该流域干流及支流的源头、中上游及下游,群落内指示物种呈现出由清洁种逐渐过渡到耐污种的变化. 指示物种分析结果(ISA)显示:在枯水期,共有 8 种底栖动物能作为柳江源头和大环江上游群落的指示种,分别为四节蜉属(*Baetis sp.*)、锯形蜉(*Serratella sp.*)、溪泥甲一属(*Zaitzevia sp.*)、短脉纹石蛾属(*Cheumatopsyche sp.*)、蜗虫(*Dugesia sp.*)、朝大蚊属(*Antocha*)、摇蚊属(*Chironomus sp.*)和细蜉属(*Caenis sp.*),其他类群无显著指示种;在丰水期,共有 5 种底栖动物能作为群落划分的指示种,其中,方格短沟蜉(*Semifulcospira cancellata*)、钉螺(*Oncomelania sp.*)是柳江中上游的指示种,汉森安春蜉(*Amphigomphus hansonii*)、河蚬(*Corbicula fluminea*)、卷扁螺(*Gyraulus compressus*)是柳江下游的指示种. CCA 分析结果显示:COD_{Mn}和 DO 是枯、丰水期均对柳江流域底栖动物群落分布有重要影响的水质驱动因子,而重金属因子(Cd、Pb、Hg)在枯水期对底栖动物分布影响较大, NH₃-N 在丰水期对底栖动物分布影响较大.

关键词:大型底栖动物; 柳江流域; 典范对应分析

中图分类号: X835

文献标志码: A

文章编号: 1000-5463(2021)05-0053-09

The Macrobenthos Community Structure and Its Relationships with Water Quality Factors in the Liujiang River Basin

LI Xin¹, DENG Peiyan^{1*}, LIU Wei²

(1. School of Environment, South China Normal University, Guangzhou 510631, China;

2. School of Environmental Science and Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510405, China)

Abstract: In order to study the influence of water quality factors (DO, COD_{Mn}, NH₃-N, As, Hg, Cd, Pb) on macrobenthos community structure in different hydrological seasons in the Liujiang River basin, investigations were conducted in the Liujiang River basin and 4 phyla, 7 classes, 16 orders, 54 families and 68 genera (species) of macrobenthos were identified. The Czekanowski is 83.76% and the species richness is slightly higher in the dry season than in the wet season. There were 4 and 2 dominant species of macrobenthos in dry and wet seasons respectively, showing obvious seasonal succession. The results of TWINSpan and DCA analysis show that there are certain differences in the temporal and spatial distribution of the macrobenthos community structure in the Liujiang River basin. In both the dry and the wet season, there are 3 different macrobenthos communities distributed respectively around the source, the upper and middle reaches and the lower reaches of the main stream and tributaries of the river. The indicator species in the community show a gradual transition from clean species to pollution-tolerant species. The results of indicator species analysis shows that, in the dry season, there are a total of 8 macrobenthos species that can be used as indicator species for the communities at the source of the Liujiang River and the upper reaches of the Dahuan River, namely *Baetis sp.*, *Serratella sp.*, *Zaitzevia sp.*, *Cheumatopsyche sp.*, *Dugesia sp.*, *Antocha*, *Chironomus sp.* and *Caenis sp.*, and the other communities have no significant indicator species. In the wet

season, there are 5 macrobenthos species that can be used as indicator species for community division, among which *Semisulcospira cancellata* and *Oncomelania* sp. are indicator species in the middle and upper reaches of the Liujiang River and *Amphigomphus hansonii*, *Corbicula fluminea* and *Gyraulus compressus* are indicator species in the lower reaches of the Liujiang River. The CCA analysis results show that COD_{Mn} and DO are the water quality factors that have important effects on the macrobenthos community structure in the Liujiang River basin in the dry and wet seasons, the heavy metal factors (Cd, Pb, Hg) have a greater impact on the distribution of macrobenthos in the dry season, and $\text{NH}_3\text{-N}$ has a greater impact on the distribution of macrobenthos in the wet season.

Keywords: macrobenthos; the Liujiang River basin; canonical correspondence analysis

大型底栖动物是淡水生态系统的—一个重要生态类群^[1],处于河流生态系统食物链的中间环节,在传递能量和促进物质循环等方面具有重要作用^[2].大型底栖动物对水质污染反应敏感而且准确,其群落结构可对生态环境的恶化或改善作出迅速响应,反映短期环境变化的影响^[3].因此,探讨大型底栖动物群落结构与水体环境因子之间的相互关系一直都是淡水生态研究的热点^[4].目前,我国淮河^[5]、太湖^[6]、北江^[7]等流域相继开展了相关研究,但针对亚热带区域的柳江流域的此类研究较少.

基于以上原因,本文以珠江流域的柳江流域为研究区域,分别于枯水期和丰水期设置了 23 个采样点位,结合无偏对应分析 (Detrended Correspondence Analysis, DCA)、双向指示种分析^[8] (Two-way Indicator Species Analysis, TWINSpan) 和指示物种分析^[9] (Indicator Species Analysis, ISA) 等方法研究了柳江流域大型底栖动物群落结构的时空变化特征,并运用典范对应分析法 (Canonical Correspondence Analysis, CCA) 探究了影响大型底栖动物群落分布的主要水质驱动因子,以期为柳江流域水域生态学的研究提供基础资料.

1 研究方法

1.1 采样点概况

柳江发源于贵州省独山县,流经黔东南及桂北,于广西象州县注入西江干流黔江段,是珠江水系西江干流第二大支流.柳江流域面积 5.717 3 万 km^2 ,干流全长 773.3 km,分为上游都柳江、中游融江和下游柳江,流域年均温 18~20 $^{\circ}\text{C}$,年降水量 1 400~1 800 mm,4~8 月为汛期,占全年径流总量的 80%,12 月至翌年 3 月为枯水期.柳江地势西北高东南低,水系呈树枝状,上游河道滩多流急,中、下游水势平缓,河曲较发育,大部分属喀斯特地貌,沿河阶地、丘陵广布,最大支流龙江从贵州省三都县至广西省柳城县注入柳江,其支流包括打狗河、大环江、小环江等.柳江上游森林植被覆盖度高,泥沙含量低,中下游流经广西最大的工业城市——柳州市,该地区电镀、冶金产业发达,是广西“三废”排放的重点城市,其每年排入柳江的工业废水达 4 365 万 t,是柳江水体的主要重金属污染源^[10].本研究结合柳江各河段的地形地貌及污染源分布情况共设 23 个采样点 (S1~S23),各样点的地理位置信息如表 1 所示,地理分布如图 1 所示.

表 1 柳江流域采样点地理位置分布表

Table 1 The locations of sampling sites in the Liujiang River basin

采样点	河流	干/支流	经度	纬度	采样点	河流	干/支流	经度	纬度
S1	都柳江	干流	107°35.29'	25°51.49'	S13	大环江	支流	108°18.14'	24°53.46'
S2	都柳江	干流	108°30.46'	25°55.13'	S14	大环江	支流	108°09.10'	24°43.34'
S3	都柳江	干流	108°54.16'	25°44.37'	S15	大环江	支流	108°08.49'	24°42.51'
S4	都柳江	干流	109°24.23'	25°42.21'	S16	小环江	支流	108°28.04'	24°34.24'
S5	融江	干流	109°23.51'	25°13.12'	S17	龙江	支流	108°28.12'	24°34.04'
S6	融江	干流	109°15.12'	25°03.15'	S18	龙江	支流	108°39.13'	24°29.60'
S7	打狗河	支流	107°46.57'	25°34.49'	S19	柳江	干流	109°10.23'	24°40.15'
S8	打狗河	支流	107°53.22'	25°25.04'	S20	柳江	干流	109°15.03'	24°31.45'
S9	龙江	支流	107°51.33'	24°50.05'	S21	柳江	干流	109°23.53'	24°19.47'
S10	龙江	支流	107°55.02'	24°44.56'	S22	柳江	干流	109°40.19'	23°57.21'
S11	大环江	支流	108°15.19'	25°23.26'	S23	柳江	干流	109°31.52'	23°50.30'
S12	大环江	支流	108°12.21'	50°00.54'					

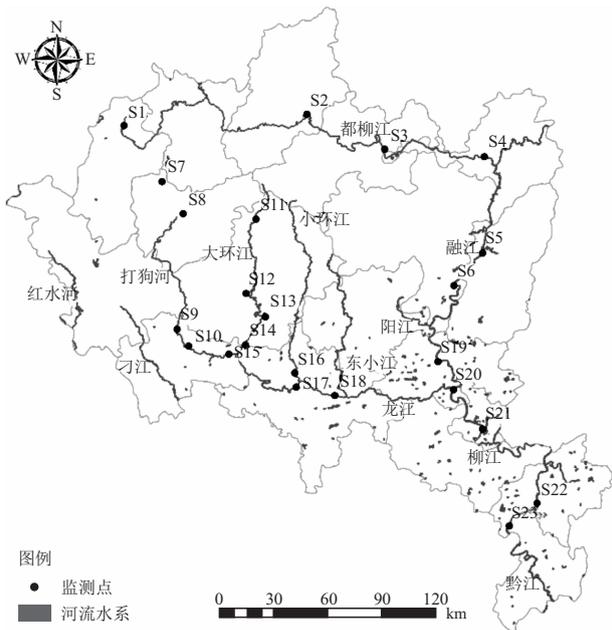


图1 柳江采样点分布图

Figure 1 The location of sampling sites in the Liujiang River basin

1.2 样品采集与分析

采样于2019年3月(枯水期)和6月(丰水期)进行。参照国际通用采样方法,在各采样点水深小于1.5 m、长度100 m的采样区域内,选用直径0.3 m、孔径500 μm 的D型拖网逆流方向采集3个平行样本。将采集到的泥样经300 μm 孔径筛网滤洗后置于白色解剖盘中进行挑拣,挑拣出的底栖动物转入广口瓶中加70%酒精固定保存,在实验室进行分类计数^[11],样品鉴定至属或种^[12]。

1.3 水质指标测定

现场使用便携式水质分析仪(YSI)测定溶解氧(DO),同时将水样低温保存带回实验室测定高锰酸盐指数(COD_{Mn}),氨氮($\text{NH}_3\text{-N}$)、砷(As)、汞(Hg)、镉(Cd)、铅(Pb)的质量浓度。测定方法参照《水和废水监测分析方法(第四版)》^[13]。

1.4 数据处理与分析

(1) Czekanowski 相似系数(S_c)计算公式为^[14]:

$$S_c = 2C / (A+B) \times 100\%, \quad (1)$$

式中, A 、 B 分别为枯、丰水期水体中的底栖动物种类数, C 为2个水期水体中共有的种类数。

(2) 优势度(Y)的计算公式为^[15]:

$$Y = P_i \times f_i, \quad (2)$$

式中, P_i 代表大型底栖动物物种 i 的个体数 n_i 所占

有大型底栖动物总个体数 N 的比例, 即 $P_i = n_i / N$, f_i 为大型底栖动物物种 i 的出现频率。

(3) TWINSpan 和 DCA 分析. 选取大型底栖动物中相对丰度大于5%的物种, 利用 TWINSpan 和 DCA 分析划分柳江流域枯、丰水期主要底栖动物群落类型, 并通过物种指示值法 (ISA) 筛选出不同群落具有显著指示值 (IndVals) 的物种。

(4) CCA 分析. 以样方-水质因子矩阵和样方-底栖动物相对丰度矩阵为基础, 采用典范对应分析 (CCA) 研究底栖动物群落与水质因子之间的相互关系. 因水质指标存在不一致的数量级和量纲, 分析前需将所有水质数据进行 $\log(X+1)$ 转化^[16]。

(5) 数据分析软件 TWINSpan 分析采用 PC-ORD5.0 完成, 各物种的 IndVal 值利用 R 语言统计软件中的 indicpecies 程序包进行计算, DCA 和 CCA 排序分析均使用 CANOCO5.0, 水质因子 Mann-Whitney U 检验采用 SPSS24.0 软件完成。

2 结果与分析

2.1 底栖动物群落组成

2次调查共采集到底栖动物4门7纲16目54科68属(种), 分别隶属于扁形动物门的涡虫纲、环节动物门的蛭纲和寡毛纲、软体动物门的腹足纲和瓣鳃纲以及节肢动物门的昆虫纲和甲壳纲。其中, 水生昆虫共46种, 占物种总数的67.65%; 软体动物共15种, 占物种总数的22.06%; 其他共7种, 占物种总数的10.29%。水生昆虫和软体动物是构成柳江流域底栖动物群落的主要类群。枯水期共采集到底栖动物955只, 其中, S11样点采集到的底栖动物数量最多(图2), 达到282只, 最少的是S19样点, 仅有2只。丰水期共采集到底栖动物956只, S1样点数量达到367只, 最少的是S9、S10、S18、S20样点, 因季节原因未采集到底栖动物。枯、丰水期采集到的底栖动物种数分别为62种和55种, 种类相似系数为83.76%。枯水期各样点底栖动物丰富度(群落中物种数目的多少)变化范围为1~33种, 平均值为7种, 丰水期各样点底栖动物丰富度变化范围为0~36种, 平均值为5种(图3), 物种丰富度在水文季节变化上表现为枯水期略高于丰水期。

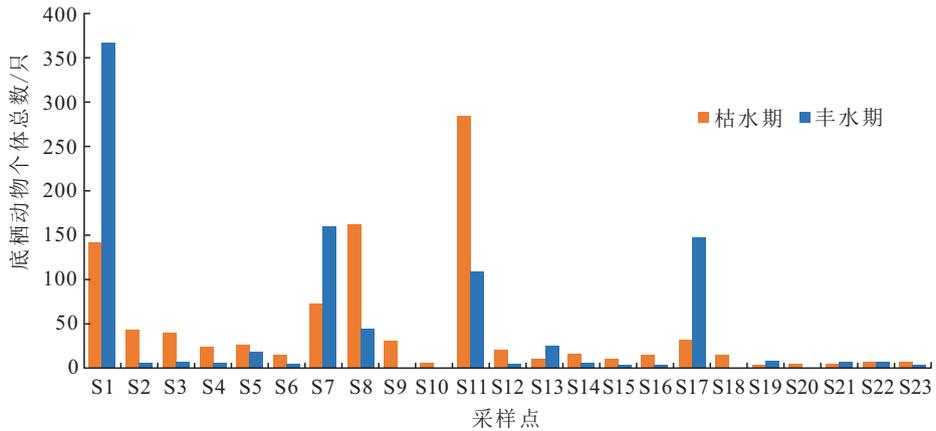


图 2 柳江各样点底栖动物个体总数分布图

Figure 2 The amounts of macrobenthos in the Liujiang River basin

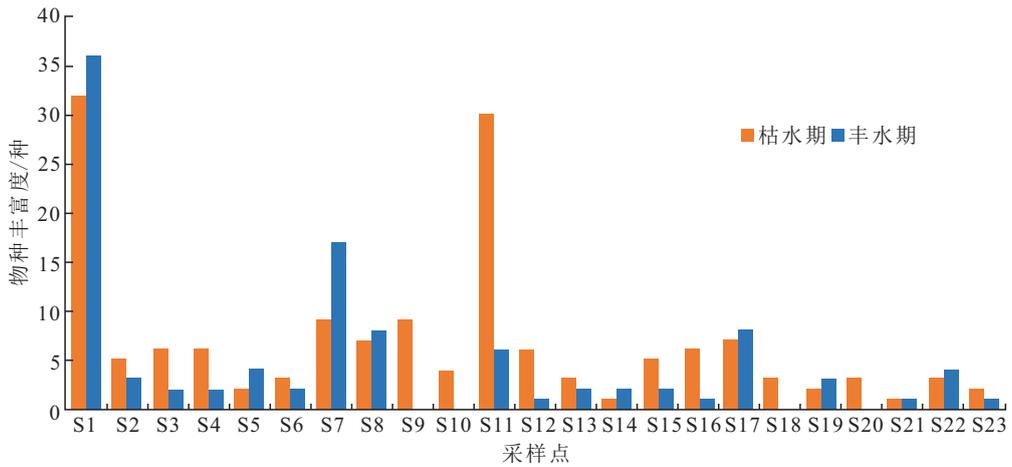


图 3 柳江各样点底栖动物物种丰富度分布图

Figure 3 The species richness of macrobenthos in the Liujiang River basin

2.2 底栖动物优势种

优势度的统计结果如表 2 所示, 2 次调查发现柳江流域共有 5 种底栖动物优势种, 其中枯水期有 4 种, 丰水期有 2 种, 优势度指数为 0.022~0.066。小

划蝽属 (*Micronecta*) 为枯、丰水期共有优势种, 而萝卜螺属 (*Radix*)、摇蚊属 (*Chironomus*) 和囊螺属 (*Physa*) 仅在枯水期为优势种, 新米虾属 (*Neocaridina*) 仅在丰水期为优势种。

表 2 柳江流域大型底栖无脊椎动物优势种组成 ($Y \geq 0.02$)Table 2 The composition of dominant macrobenthos species in the Liujiang River basin ($Y \geq 0.02$)

时期	种类	占总个数的比例 $P_i / \%$	出现频率 $f_i / \%$	优势度 Y
枯水期	萝卜螺属 <i>Radix</i>	7.64	69.57	0.053
	摇蚊属 <i>Chironomus</i>	5.13	43.48	0.022
	小划蝽属 <i>Micronecta</i>	16.80	39.13	0.066
	囊螺属 <i>Physa</i>	6.60	39.13	0.026
丰水期	新米虾属 <i>Neocaridina</i>	10.15	47.83	0.049
	小划蝽属 <i>Micronecta</i>	14.75	21.74	0.032

2.3 底栖动物群落时空分布特征

利用 TWINSpan 对柳江流域枯、丰水期采样点位的大型底栖动物进行聚类分析, 并结合 DCA 分析确定柳江流域底栖动物主要群落分布类型, 结果如

表 3 所示。根据底栖动物群落结构特征的相似性, 枯水期的 23 个样点被划分为 3 个底栖动物类群, 类群 A1 包含 8 个点位, 主要在分布柳江下游、大环江中下游和打狗河段; 类群 A2 包含 13 个点位, 主要

分布在柳江中上游及支流龙江、小环江河段;类群 A3 包含 2 个点位,主要分布在柳江源头和大环江上游. 丰水期 19 个样点也被划分为 3 个类群,类群 B1 包含 9 个点位,主要分布在柳江下游及支流大环江河段;类群 B2 包含 7 个点位,主要分布在柳江中上游;类群 B3 包含 3 个点位,主要分布在柳江源头和打狗河段,由于丰水期 S9、S10、S18、S20 样点未采集到底栖动物,故未对其进行计算. 枯、丰水期大型底栖动物采样点在 DCA 轴上的分布如图 4 所示.

表 3 柳江流域大型底栖动物主要群落分布类型
Table 3 The distribution types of main macrobenthic communities in the Liujiang River basin

时间	类群	采样点位
枯水期	A1	S7、S8、S12、S13、S14、S15、S19、S22
	A2	S2、S3、S4、S5、S6、S9、S10、S16、S17、S18、S20、S21、S23
	A3	S1、S11
丰水期	B1	S7、S11、S12、S13、S14、S19、S21、S22、S23
	B2	S2、S3、S4、S5、S6、S16、S17
	B3	S1、S8、S15

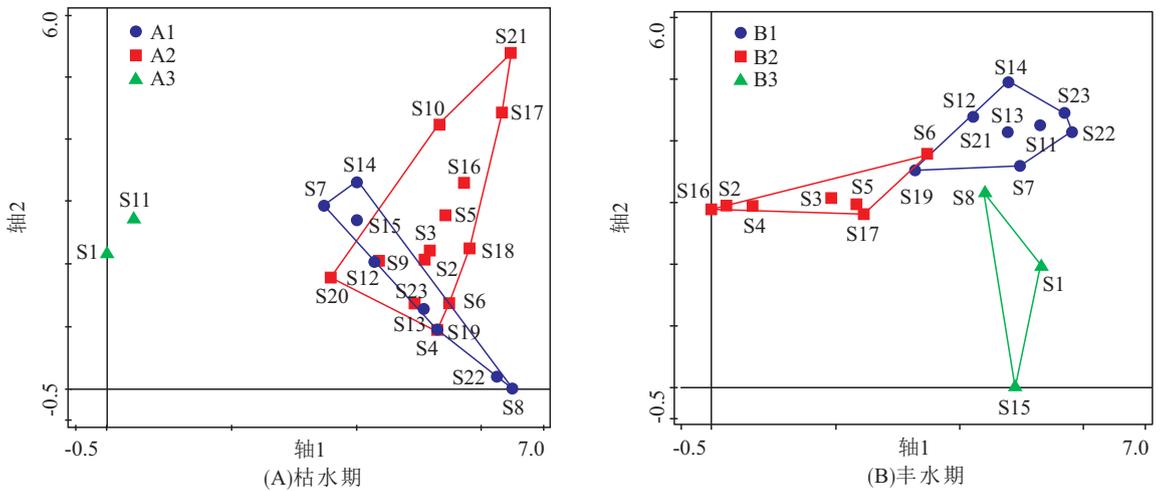


图 4 柳江流域大型底栖动物采样点在 DCA 轴上的分布
Figure 4 The distribution of sampling sites of Liujiang River basin in the DCA

2.4 底栖动物群落指示物种分析

利用 R 语言分别对枯、丰水期底栖动物类群进行指示物种分析,以 $P < 0.05$ 为标准筛选出不同类群的指示种^[17]. 如表 4 所示,枯水期共有 8 种底栖动物能作为类群 A3 的指示种,其中,四节蜉属 (*Baetis sp.*)、锯形蜉 (*Serratella sp.*) 和溪泥甲一属 (*Zaitzevia-sp.*) 的指示值均为 1.000,表明这 3 种物种仅出现在 A3 组所包含的全部样点中,类群 A1 和 A2 无显著指示种. 丰水期共有 5 种底栖动物能作为底栖动物群落划分的指示种,其中,方格短沟蜷 (*Semisulcospira cancellata*) 和钉螺 (*Oncomelania sp.*) 是类群 B2 的指示种,汉森安春蜓 (*Amphigomphus hansonii*)、河蚬 (*Corbicula fluminea*)、卷扁螺 (*Gyraulus compressus*) 是类群 B3 的指示种,类群 B1 无显著指示种.

2.5 水质因子特征分析

对柳江流域的水质理化因子进行比较分析,结果如表 5 所示,DO 的质量浓度在枯、丰水期随着类群 A1、A2、A3 和 B1、B2、B3 在空间分布上的变化呈现逐渐上升趋势,而其他水质指标则呈波动下降趋势. Mann-Whitney U 检验结果表明,除 As 的质量浓

度以外,其他水质因子 (DO、 COD_{Mn} 、 NH_3-N 、Hg、Cd、Pb) 的质量浓度在枯、丰水期之间均存在显著差异 ($P < 0.05$),且在丰水期的平均值均高于枯水期.

表 4 柳江大型底栖动物群落划分及指示物种分析
Table 4 The community division of macrobenthos in the Liujiang River basin and the indicator species analysis

时期	类群	指示种	指示值	P
枯水期	A3	<i>Baetis sp.</i>	1.000	0.005 **
		<i>Serratella sp.</i>	1.000	0.005 **
		<i>Zaitzeviasp.</i>	1.000	0.005 **
		<i>Cheumatopsyche sp.</i>	0.999	0.005 **
		<i>Dugesia sp.</i>	0.967	0.005 **
		<i>Antocha</i>	0.994	0.001 **
		<i>Chironomus sp.</i>	0.918	0.019 *
		<i>Caenis sp.</i>	0.705	0.048 *
丰水期	B2	<i>Semisulcospira cancellata</i>	0.845	0.010 **
		<i>Oncomelania sp.</i>	0.756	0.032 *
	B3	<i>Amphigomphus hansonii</i>	0.816	0.018 *
		<i>Corbicula fluminea</i>	0.816	0.012 *
		<i>Gyraulus compressus</i>	0.816	0.018 *

注: ** 表示 $P < 0.01$, * 表示 $P < 0.05$.

表 5 柳江流域水质理化因子特征(平均值±标准差)

Table 5 The characteristics of water quality factors in the Liujiang River basin(Mean±SD)

水质因子 的质量浓度	枯水期				丰水期				P
	A1	A2	A3	总	B1	B2	B3	总	
$\rho(\text{DO})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	7.67±1.58	8.29±0.89	9.21±0.21	8.15±1.19	10.37±0.85	10.46±0.80	11.71±1.19	10.61±0.96	0.000 **
$\rho(\text{COD}_{\text{Mn}})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	1.65±0.59	1.37±0.42	1.05±0.21	1.44±0.49	1.96±0.42	1.51±0.29	1.90±0.44	1.78±0.42	0.003 **
$\rho(\text{NH}_3\text{-N})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	0.15±0.14	0.27±0.62	0.02±0.02	0.21±0.47	0.29±0.21	0.18±0.14	0.24±0.20	0.24±0.18	0.009 **
$\rho(\text{As})/(\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1})$	8.630±8.314	6.460±7.881	11.000±4.243	7.609±7.674	1.956±1.528	1.437±0.506	1.057±0.501	1.623±1.128	0.228
$\rho(\text{Hg})/(\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1})$	0.025±0.055	0.007±0.017	—	0.013±0.035	0.032±0.023	0.033±0.024	0.020±0.020	0.031±0.022	0.000 **
$\rho(\text{Cd})/(\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1})$	0.109±0.308	0.02±0.038	—	0.049±0.181	0.314±0.323	0.181±0.077	0.207±0.139	0.248±0.234	0.000 **
$\rho(\text{Pb})/(\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1})$	2.611±2.639	1.509±1.323	1.26±0.438	1.870±1.868	15.732±36.913	3.126±0.935	6.060±4.031	9.561±25.395	0.001 **

注: ** 表示 $P < 0.01$, * 表示 $P < 0.05$.

2.6 大型底栖动物与水质因子的关系

DCA 分析结果显示, 枯、丰水期得到的 4 个排序轴中的梯度长度最大值分别为 6.50 和 5.83, 均大于 4.0, 故应采用单峰模型的典范对应分析法(CCA)来研究水质因子对柳江流域大型底栖动物的影响. 从表 6 可以看出, 枯、丰水期 CCA 排序的前两轴共解释了底栖动物群落变异的 45.9% 和 55.6%, 说明 CCA 排序能较好地反映枯、丰水期底栖动物群

落分布与水质因子之间的相关关系.

如表 7 所示, 在枯水期, 轴 1 与 DO 呈最大负相关; 轴 2 与 COD_{Mn} 呈最大正相关, 与 Hg、Cd 和 Pb 呈较强正相关. 在丰水期, 轴 1 与 COD_{Mn} 呈最大负相关, 与 DO 呈较强负相关, 轴 2 与 DO 呈最大负相关, 与 $\text{NH}_3\text{-N}$ 呈最大正相关. 由此可见, 枯水期影响柳江大型底栖动物物种分布的主要水质驱动因子为 DO、 COD_{Mn} 、Hg、Cd 和 Pb, 丰水期则为 COD_{Mn} 、DO 和 $\text{NH}_3\text{-N}$.

表 6 CCA 排序轴对应的特征值、物种-水质因子相关性及累积变化率

Table 6 The Eigenvalues, species-environment correlation and changing percentages for CCA axis

时期	排序轴	特征值	物种-水质因子	物种数据累积	物种-水质因子关系
			相关性	变化率/%	累积变化率/%
枯水期	1	0.579	0.894	8.5	23.6
	2	0.549	0.901	16.5	45.9
	3	0.411	0.854	22.5	62.7
	4	0.370	0.891	28.0	77.7
丰水期	1	0.582	0.909	11.8	32.7
	2	0.408	0.851	20.1	55.6
	3	0.310	0.867	26.4	73.0
	4	0.216	0.805	30.8	85.1

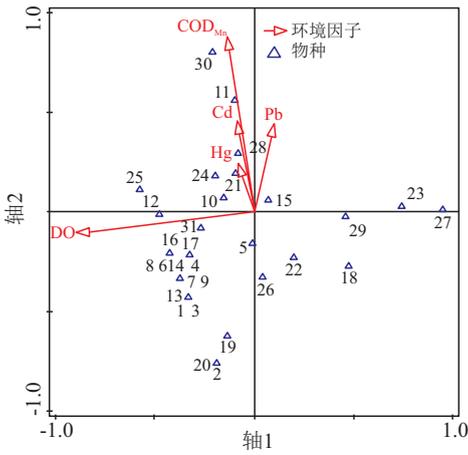
以主要水质驱动因子为环境变量进一步进行 CCA 分析, 图 5 反映了柳江枯水期时 31 种主要大型底栖动物与水质因子之间的响应关系, 由排序图可知, 轴 1 主要反映的是溶解氧质量浓度的变化情况, 沿轴 1 从左至右, 依次分布有四节蜉属(*Baetis sp.*)、蜗虫(*Dugesia sp.*)、摇蚊属(*Chironomus sp.*)、河蚬(*Corbicula fluminea*)等, 底栖动物种类由喜好高氧环境的物种逐渐过渡到喜好低氧的物种; 轴 2 反映的是 COD_{Mn} 和重金属(Cd、Pb、Hg)质量浓度的变化情况, 沿轴 2 从上至下, 依次分布有扁蛭属(*Glossiphonia sp.*)、划蝽属(*Micronecta*)、短沟蜷属(*Semisulcospira sp.*)等, 底栖动物种类对水体重金属(Cd、Pb、Hg)和有机污染的耐受能力逐渐降低. 图 6 反映了柳江丰水期时 26 种主要大型底栖动物对水质因子

变化的响应, 其物种分布与水质驱动因子的对应关系趋势与枯水期表现基本一致.

表 7 CCA 前 2 轴与水质因子相关系数

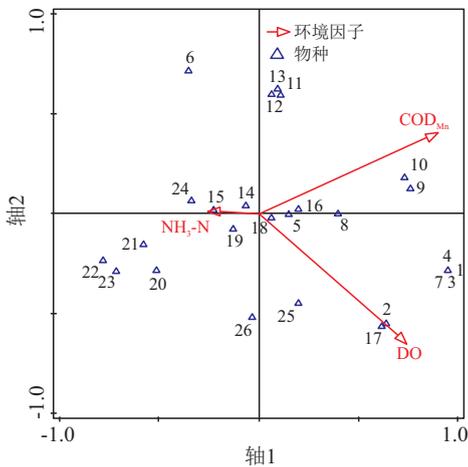
Table 7 The correlations between water quality factors and the first two axes of CCA

水质因子	枯水期		丰水期	
	轴 1	轴 2	轴 1	轴 2
DO	-0.813 8	-0.032 9	-0.520 9	-0.607 0
COD_{Mn}	0.104 4	0.852 0	-0.818 1	0.013 7
$\text{NH}_3\text{-N}$	0.233 6	0.097 5	0.160 7	0.346 2
As	0.271 0	-0.054 8	0.259 9	0.217 4
Hg	0.057 7	0.433 3	—	—
Cd	0.046 2	0.572 0	0.115 3	0.287 9
Pb	0.246 0	0.461 6	-0.008 7	0.007 7



1: *Cheumatopsyche* sp.; 2: *Macromidae*; 3: *Antocha*; 4: *Simulium* sp.; 5: *Chironomus* sp.; 6: *Epeorus* sp.; 7: *Choroterpes* sp.; 8: *Baetis* sp.; 9: *Afronurus rubromaculata*; 10: *Labiobaetis ancoralis*; 11: *Labiobaetis atrebatinus orientalis*; 12: *Proclleon* sp.; 13: *Caenis* sp.; 14: *Serratella* sp.; 15: *Micronecta*; 16: *Zaitzevia* sp.; 17: *Protohermes* sp.; 18: *Sulcospira cf hainanensis*; 19: *Sinotaita* sp.; 20: *Stenothyra* sp.; 21: *Radix* sp.; 22: *Semisulcospira* sp.; 23: *Tarebia granifera*; 24: *Physa* sp.; 25: *Galba* sp.; 26: *Limnoperna lacustris*; 27: *Macrobrachium* sp.; 28: *caridina* sp.; 29: *Corbicula fluminea*; 30: *Glossiphonia* sp.; 31: *Dugesia* sp.

图5 柳江流域环境因子与物种组成的 CCA 排序图 (枯水期)
Figure 5 The CCA biplot of environmental variables and species composition in the Liujiang River basin (dry season)



1: *Cheumatopsyche* sp2; 2: *Amphigomphus hansonii*; 3: *Leptogomphus intermedius*; 4: *Baetis* sp.; 5: *Labiobaetis ancoralis*; 6: *Labiobaetis atrebatinus orientalis*; 7: *Habrophlebiodes gilliesii*; 8: *Ordobrevia* sp.; 9: *Bezzia* sp.; 10: *Culex* sp.; 11: *Chironomus* sp.; 12: *Micronecta* sp.; 13: *Micronecta quadristrigata*; 14: *Neocaridina serrata*; 15: *Corbicula fluminea*; 16: *Galba pervia*; 17: *Gyraulus compressus*; 18: *Sinotaita* sp.; 19: *Bellamyia* sp.; 20: *Physa acuta*; 21: *Semisulcospira cancellata*; 22: *Melanodies* sp.; 23: *Tarebia granifera*; 24: *Oncomelania* sp.; 25: *Radix auricularia*; 26: *Radix swinhoei*.

图6 柳江流域环境因子与物种组成的 CCA 排序图 (丰水期)
Figure 6 The CCA biplot of environmental variables and species composition in the Liujiang River basin (wet season)

3 讨论

3.1 大型底栖动物群落结构及水质因子特征分析

柳江流域大型底栖动物群落组成以水生昆虫和软体动物为主, 枯水期优势种为萝卜螺属 (*Radix*)、摇蚊属 (*Chironomus*)、小划蝽属 (*Micronecta*) 和囊螺属 (*Physa*), 丰水期优势种为新米虾属 (*Neocaridina*) 和小划蝽属 (*Micronecta*), 优势种群随水文季节变化呈现明显的更替状态且多以耐污种为主, 物种丰富度整体水平较低, 说明柳江流域大部分样点已受到不同程度的污染. 程谦伟等^[18] 曾以底栖动物为指示种对柳江市区段进行了水质生态评价, 他们在下游 4 个断面共采集到底栖动物 15 种, 优势种主要有梨形环棱螺 (*Bellamyia purificata*)、霍甫水丝蚓 (*Limnodrilus hoffmeisteri*)、苏氏尾鳃蚓 (*Branchiura sowerbyi*) 等, 评价结果显示当时柳江下游已经受到了一定程度的污染, 并对底栖动物的群落结构造成了影响. 相比之下, 本次研究在柳江市区段 (样点 S19~S21) 仅采集到 5 种底栖动物, 分别是划蝽属 (*Micronecta*)、米虾属 (*caridina* sp.)、萝卜螺属 (*Radix* sp.)、蜗虫 (*Dugesia* sp.) 和淡水壳菜 (*Limnoperna lacustris*), 物种多样性水平大大降低, 耐污种比例增加, 这表明柳江下游水质呈现不断恶化趋势.

水质因子分析结果表明, 柳江枯、丰水期的水质从源头、中上游至下游逐渐变差, 这与流域内底栖动物的群落分布呈现较为一致的关系. 对比枯、丰水期 TWINSpan 和指示物种分析结果发现, 柳江流域底栖动物的群落结构存在明显的时空分布差异. 从空间上看, 枯、丰水期均有 3 个不同的底栖动物类群, 依次分布在该流域干流及支流的源头、中上游及下游, 群落内指示物种也呈现出由清洁种逐渐过渡到耐污种的变化, 如四节蜉属 (*Baetis* sp.)、锯形蜉 (*Serratella* sp.) 等敏感种主要分布在柳江上游站点, 而划蝽属 (*Micronecta*)、沼虾 (*Macrobrachium* sp.)、河蚬 (*Corbicula fluminea*) 等耐污类群主要分布在柳江下游站点, 3 个底栖动物类群的空间变化体现了柳江流域内水质因子的梯度变化. 从时间上看, 柳江流域不同样点的底栖动物群落结构也发生了明显的季节演替, 典型代表如样点 S11, 枯水期该样点底栖动物优势类群以蜗虫 (*Dugesia* sp.)、朝大蚊属 (*Antocha*) 等敏感种为主, 耐污种分布极少, 进入丰水期, 该样点优势类群以四纹小划蝽 (*Micronecta quadristrigata*) 等耐污种为主, 而样点 S9、S10、S18、

S20 进入丰水期后均未见有底栖动物分布,这可能是由于丰水期降雨增多,地表径流增加使有机物等陆源物质被冲刷汇入河流,水体水质变差,无法满足底栖动物繁殖、生存的要求。同时,河流水量突增对底栖动物群落的稳定性也可能造成一定影响。不同样点底栖动物优势种的季节演替,体现了这些物种对水质变化的响应,说明了底栖动物群落物种组成与水化学变量和水文季节的变化有较密切的关系。

3.2 水质因子对底栖动物群落的影响

CCA 分析结果表明:影响柳江流域底栖动物群落分布的主要水质驱动因子在不同季节存在一定差异。DO 和 COD_{Mn} 是 2 次采样中均对底栖动物群落分布有重要影响的环境因子,这与许多学者在其他区域的研究结果相似。BUSS 等^[19]研究了巴西东南地区河流的水质因子对大型底栖动物的影响,结果表明 DO 与大型底栖动物分布有非常密切的关系。姚凯胜等^[20]研究流溪河底栖动物群落结构及其影响因素时,认为 DO 是影响底栖动物群落分布的主要环境因子。众多研究表明:水体中 DO 质量浓度的高低影响着底栖动物群落结构和物种分布,特别是在质量浓度低的情况下,成为重要的限制因子^[21]。

不同底栖动物物种对水体中重金属的敏感程度和耐受能力不同^[22],在本研究中,枯水期底栖动物分布受水体重金属(Hg、Cd 和 Pb)的影响较大,这可能是由于柳江下游是柳州和河地地区重要的有色金属矿区^[23],矿业开采和有色冶炼加重了水土流失,从而导致水体中重金属质量浓度增加,对生活于水生生态系统底层的底栖动物造成极大影响。 $\text{NH}_3\text{-N}$ 作为衡量水体富营养化程度的一个重要指标,在本研究中也显著影响着丰水期大型底栖动物的分布。研究^[24-25]表明,当水体中 N、P 等营养盐达到一定程度时,会促使藻类大量繁殖,导致水体缺氧,水质恶化,许多敏感种消失,而一些个体小的耐污种(如摇蚊幼虫和寡毛类)的生物量则会迅速增多。DURAN 等^[26]利用底栖动物在对土耳其某个河流进行水质评价时发现,夏季河流下游段因含有较高的磷酸盐和氮离子,致使底栖动物的丰度偏低。张莹等^[27]在研究山东半岛南部海湾底栖动物与环境因子关系时发现,当水体中营养盐物质增加时,大型底栖动物的多样性则相应降低。由于本研究中涉及到的水质因子有限,尚有近 50% 的底栖动物群落变异部分未能得到相应解释。在今后的研究中,其他环境因素如水温、pH、海拔、栖境等均可作为影响大型

底栖动物群落结构的因素而加以考虑。

参考文献:

- [1] 戴纪翠,倪晋仁. 底栖动物在水生生态系统健康评价中的作用分析[J]. 生态环境, 2008, 17(5): 2107-2111.
DAI J C, NI J R. Roles of benthos in the aquatic ecosystem health assessment, China [J]. Ecology and Environment, 2008, 17(5): 2107-2111.
- [2] BENKE A C. Concepts and patterns of invertebrate production in running waters [J]. Sil Proceedings, 1993, 25(1): 15-38.
- [3] 段学花,王兆印,徐梦珍. 底栖动物与河流生态评价[M]. 北京:清华大学出版社, 2010.
- [4] 迟国梁,赵颖,官昭瑛,等. 广东横石水河大型底栖动物群落与环境因子的关系[J]. 生态学报, 2010, 30(11): 2836-2845.
CHI G L, ZHAO Y, GUAN Z Y, et al. Relationship between macroinvertebrate and environmental variables in Hengshishui River, Guangdong, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(11): 2836-2845.
- [5] 刘祥,陈凯,陈求稳,等. 淮河流域典型河流夏秋季底栖动物群落特征及其与环境因子的关系[J]. 环境科学学报, 2016, 36(6): 1928-1938.
LIU X, CHEN K, CHEN Q W, et al. The community structure of macroinvertebrate and its relationship to the environmental factors in summer and autumn within typical reaches of Huai River Basin [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, 36(6): 1928-1938.
- [6] 吴召仕,蔡永久,陈宇炜,等. 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[J]. 湖泊科学, 2011, 23(5): 686-694.
WU S S, CAI Y J, CHEN Y W, et al. Assemblage structure investigation of macrozoobenthos and water quality bioassessment of the main river systems in Taihu Basin [J]. Lake Sciences, 2011, 23(5): 686-694.
- [7] 曹然,黎征武,毛建忠,等. 北江大型底栖无脊椎动物群落结构及水质的生物评价[J]. 水资源保护, 2017, 33(4): 80-87.
CAO R, LI Z W, MAO J Z, et al. Benthic macroinvertebrate community structure and bioassessment of water quality of Beijiang River [J]. Water Resources Protection, 2017, 33(4): 80-87.
- [8] 渠晓东,曹明,邵美玲,等. 雅砻江(锦屏段)及其主要支流的大型底栖动物[J]. 应用生态学报, 2007(1): 158-162.
QU X D, CAO M, SHAO M L, et al. Macroinvertebrates in Jinping reach of Yalong River and its main tributaries [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007(1): 158-162.
- [9] DUFRENE M, LEGENDRE P. Species assemblages and indicator species: the need for a flexible asymmetrical ap-

- proach [J]. *Ecological Monographs*, 1997, 67(3): 345–366.
- [10] 张清华, 韦永著, 曹建华, 等. 柳江流域饮用水源地重金属污染与健康风险评估[J]. *环境科学*, 2018, 39(4): 1598–1607.
- ZHANG Q H, WEI Y Z, CAO J H, et al. Heavy metal pollution of the drinking water sources in the Liujiang River basin, and related health risk assessments [J]. *Environmental Science*, 2018, 39(4): 1598–1607.
- [11] 孟伟, 张远, 渠晓东. 河流生态调查技术方法[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [12] RICHOUX P, BOURNAUD M, USSEGLIO-POLATERA P, et al. 淡水无脊椎动物系统分类、生物及生态学[M]. 刘威, 王旭涛, 黄少峰, 译. 北京: 中国水利水电出版社, 2015.
- [13] 国家环保局本书编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1989.
- [14] 李佳静, 刘威, 邓培雁. 柳江流域不同水文季节水质对附生硅藻群落的影响研究[J]. *生态科学*, 2020, 39(1): 10–19.
- LI J J, LIU W, DENG P Y. The effects of water quality on epilithic diatom community in different hydrological seasons in Liujiang River basin [J]. *Ecological Science*, 2020, 39(1): 10–19.
- [15] 王备新. 大型底栖无脊椎动物水质生物评价研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2003.
- [16] 殷旭旺, 徐宗学, 高欣, 等. 渭河流域大型底栖动物群落结构及其与环境因子的关系[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(1): 218–226.
- YIN X W, XU Z X, GAO X, et al. Macroinvertebrate community structure and its relationships with environmental factors in Weihe River basin, Northwest China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(1): 218–226.
- [17] 李巧. 指示值方法及其在昆虫中的应用[J]. *应用昆虫学报*, 2011, 48(2): 457–462.
- LI Q. Indicator Value (IndVal) method and its application [J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2011, 48(2): 457–462.
- [18] 程谦伟, 孟陆丽, 易弋, 等. 柳江市区段底栖动物的生态研究[J]. *安徽农业科学*, 2010, 38(17): 9048–9050.
- CHENG Q W, MENG L L, YI Y, et al. Ecosystem survey of zoobenthos in the cantonal of Liujiang [J]. *Anhui Agricultural Sciences*, 2010, 38(17): 9048–9050.
- [19] BUSS D F, BAPTISTA D F, SILVEIRA M P, et al. Influence of water chemistry and environmental degradation on macroinvertebrate assemblages in a river basin in south-east Brazil [J]. *Hydrobiologia*, 2002, 481(1/2/3): 125–136.
- [20] 姚凯胜, 和雅静, 赵永晶, 等. 流溪河大型底栖动物群落结构及其影响因素[J]. *中国环境监测*, 2020, 36(3): 83–93.
- YAO K S, HE Y J, ZHAO Y J, et al. Macrozoobenthos community structure and environmental determinants of the Liuxi River [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2020, 36(3): 83–93.
- [21] GRAA M A S, PINTO P, CORTES R, et al. Factors affecting macroinvertebrate richness and diversity in portuguese streams: a two-scale analysis [J]. *International Review of Hydrobiology*, 2004, 89(2): 151–164.
- [22] SLOANE P I W, NORRIS R H. Relationships of AUSRI-VAS-Based macroinvertebrate predictive model outputs to a metal pollution gradient [J]. *Journal of the North American Benthological Society*, 2003, 22(3): 457–471.
- [23] 周玉春, 支崇远, 王路, 等. 柳江水体重金属污染健康风险评估[J]. *安徽农业科学*, 2013, 41(10): 4370–4372, 4375.
- ZHOU Y C, ZHI C Y, WANG L, et al. Health risk assessment of heavy metals pollution in Liujiang River [J]. *Anhui Agricultural Sciences*, 2013, 41(10): 4370–4372, 4375.
- [24] 吴东浩, 于海燕, 吴海燕, 等. 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[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(2): 483–488.
- WU D H, YU H Y, WU H Y, et al. Estimation of river nutrients the reshods based on benthic macroinvertebrate assemblages: a case study in the upper reaches of Xitiao Stream in Zhejiang, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(2): 483–488.
- [25] 曹然, 黎征武, 刘威, 等. 广东北江大型底栖动物群落与水质相关性研究[J]. *华南师范大学学报(自然科学版)*, 2017, 49(2): 115–121.
- CAO R, LI Z W, LIU W, et al. Relationship between macroinvertebrates and water quality in Beijiang River Basin [J]. *Journal of South China Normal University (Nature Science Edition)*, 2017, 49(2): 115–121.
- [26] DURAN M. Monitoring water quality using benthic macroinvertebrates and physicochemical parameters of Behzat Stream in Turkey [J]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2006, 15(5): 709–717.
- [27] 张莹, 吕振波, 徐宗法, 等. 山东半岛南部海湾底栖动物群落生态特征及其与水环境的关系[J]. *生态学报*, 2011, 31(15): 4455–4467.
- ZHANG Y, LV Z B, XU Z F, et al. Ecological characteristics of macroinvertebrate communities and their relation to water environmental factors in four bays of southern Shandong Peninsula [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(15): 4455–4467.