

doi: 10.7541/2018.049

枯水季节赣江近岸水洼与浅滩中浮游动物的群落差异

余文生¹ 詹文荣¹ 聂雪¹ 胡旭仁¹ 潘莹¹ 秦海明^{1,2,3} 舒凤月⁴

(1. 南昌大学生命科学研究院流域生态研究所, 南昌 330031; 2. 南昌大学鄱阳湖环境与资源利用教育部重点实验室, 南昌 330031; 3. 江西鄱阳湖湿地生态系统国家定位观测研究站, 南昌 330038; 4. 曲阜师范大学生命科学学院, 曲阜 273165)

摘要: 为探究水洼与邻近浅滩中浮游动物群落是否存在差异, 于2015年1月22日和3月1日, 选择赣江南昌段的3个水洼和邻近浅滩采集浮游动物, 对浮游动物的物种组成、密度、生物量、多样性指数和群落结构进行比较研究。通过单因子方差分析(One-way ANOVA)检验水洼与浅滩中水环境因子及浮游动物密度和生物量的差异。使用非度量多维尺度分析(Non-metric multi-dimensional scaling, NMDS)和群落相似性分析(Analysis of similarity, ANOSIM)对暂时性水洼及邻近浅滩的浮游动物群落进行排序。1月和3月共发现浮游动物44种, 轮虫有30种, 占总捕获数的68%。枝角类和桡足类各有7种, 分别占总捕获数的16%。相对重要性指数(Index of relative importance, IRI)大于1000的优势物种有5种, 分别为汤匙华哲水蚤*Sinocalanus dorrii*、长肢多肢轮虫*Polyarthra dolichoptera*、桡足类无节幼体Copepod nauplii、角突臂尾轮虫*Brachionus angularis*和长圆疣毛轮虫*Synchaeta oblonga*。单因子方差分析表明, 1月份水洼的水深、电导率和总氮含量显著高于浅滩($P<0.05$), 浅滩的水温、pH、溶解氧、浊度和总磷含量略高于水洼。3月份水洼的水深、pH和总氮含量略高于浅滩, 浅滩的溶解氧、浊度和总磷含量较水洼高, 水温和电导率在2种水体中非常接近。1月份水洼中浮游动物的密度(7.90 ind./L)和生物量(7.78 $\mu\text{g/L}$)均低于浅滩(9.34 ind./L, 19.03 $\mu\text{g/L}$), 3月份水洼中浮游动物的密度(24.27 ind./L)和生物量(332.14 $\mu\text{g/L}$)均高于浅滩(22.86 ind./L, 146.10 $\mu\text{g/L}$)。浅滩中浮游动物的多样性指数(H')、均匀度指数(J)和物种丰富度指数(D)均大于水洼。非度量多维尺度分析和群落相似性分析表明, 仅1月份水洼与浅滩的浮游动物群落结构具有边缘显著差异($P=0.067$), 可大致划分为2个: 水洼群落和浅滩群落。3月份由于水位上涨, 研究的水洼与赣江河道处于连通或半连通状态, 2种生境中浮游动物群落结构无显著差异($P=0.313$)。斯皮尔曼相关分析(Spearman correlation coefficient)发现水深和溶解氧是导致水洼和浅滩中浮游动物密度差异的主要环境因子。2种生境中浮游动物的密度与pH、电导率、总氮和总磷均具有显著相关性($P<0.05$)。

关键词: 浮游动物; 群落结构; 暂时性水洼; 浅滩; 赣江

中图分类号: Q145⁺.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3207(2018)02-0382-10

赣江是鄱阳湖的第一大支流, 地处亚热带湿润季风气候区, 年降水量1400—1900 mm^[1,2]。主河道长766 km, 新干县至吴城镇江段为下游, 江面宽阔, 河道中形成许多沙洲, 两岸筑有江堤^[3]。近十年来, 南昌经济快速发展, 受航道疏浚和抽沙建房的影响, 赣江南昌段河道采沙量快速增长, 乱采滥挖

现象严重。大量的采沙活动改变了河床结构和水流走势, 使得河床呈逐年下降趋势, 进而导致枯水期水位逐年降低, 对赣江河流生态系统造成了严重的破坏^[4]。赣江的枯水期一般在每年10月至次年1月^[5], 枯水季节由于水位下降, 赣江凸岸的河床露出水面, 并形成许多小水洼, 水洼与主河道完全断

收稿日期: 2017-03-17; **修订日期:** 2017-11-26

基金项目: 国家自然科学基金(31560133); 长江科学院开放研究基金(CKWV2015238/KY); 南昌大学鄱阳湖环境与资源利用教育部重点实验室开放基金(13006457)资助 [Supported by the National Natural Science Foundation of China (31560133); Open Research Fund of Changjiang River Scientific Research Institute (CKWV2015238/KY); Open Research Fund of Poyang Lake Environment and Resources Key Laboratory of Ministry of Education, Nanchang University (13006457)]

作者简介: 余文生(1992—), 男, 江西于都人; 硕士; 主要从事水生生态学研究。E-mail: 1019150348@qq.com

通信作者: 秦海明(1978—), 男, 山东昌乐人; 博士; 主要从事浮游动物群落生态与资源保护研究。E-mail: qinhaiming@ncu.edu.cn

开后形成暂时性的独立水体, 这种季节性的小型水体为河流中的浮游动物提供了一种暂时的静水环境。

浮游动物处于水生食物链的中间环节, 对于水生生态系统的初级生产力转化、信息传递和能量流动起着至关重要的作用^[6, 7], 对于水生生态系统结构的稳定也具有重要意义^[8]。浮游动物的物种组成和群落结构对环境因子的变化非常敏感, 因此通常被作为水域生态环境变化的指示生物^[9]。此外, 浮游动物的密度变化和分布与水文环境状况密切相关, 水位波动、水温、pH、溶解氧、水体营养状况等环境因子对浮游动物的群落结构都具有直接或间接影响^[10–12]。

为了探究枯水期赣江河床水洼中浮游动物的群落结构与邻近浅滩中的浮游动物群落结构是否存在差异, 并分析造成差异的原因, 本研究对比分析了水洼形成中期和末期两种生境中浮游动物群落结构的差异, 并探讨了浮游动物群落具有显著影响的水环境因子, 旨在为河流浮游动物群落生态学研究积累基础数据。

1 材料与方法

1.1 研究地点

2015年1月22日和3月1日, 在赣江南昌段西岸的河床选择3个水洼(图1)采集浮游动物样品, 同时在与水洼邻近的浅滩(水洼与浅滩采样点之间距离5 m左右)对应采集浮游动物样品。研究的3个水洼中, 朝阳大桥附近的水洼于2015年1月10左右与主河道断开, 另外2个水洼于2014年12月25日左右与

赣江主河道断开, 2015年2月20日左右朝阳大桥附近的水洼开始与主河道连通, 2月27日南昌大桥与八一大桥之间的水洼有一条小水沟与主河道连通, 南昌大桥附近的水洼一直与主河道断开。按朝阳大桥到八一大桥的顺序, 3个水洼的平均水深分别为1.5、1.8和1.3 m, 面积分别为22、28和32 m²。3月份进行浮游动物采集时, 由于朝阳大桥附近的水洼与赣江河道已经完全连为一体, 因此未进行样品采集。后续分析中, 这2种生境分别定义为水洼(Pool)和浅滩(Riffle)。

1.2 采样设计

在每个水洼及邻近浅滩分别对应设置3个采样重复(图1), 间隔3—5 m。使用采样体积5 L的采水器采集表层(水面下50 cm)的水样10 L, 经25号浮游生物网(网孔0.064 mm)过滤, 收集网袋末端的浮游动物样品, 装入50 mL塑料标本瓶, 现场使用4%福尔马林溶液固定保存。在每个采样点采集100 mL水样, 带回实验室, 采用重铬酸钾消解分光光度法测定总氮含量, 钼酸铵分光光度法测定总磷含量。采集样品的同时, 使用DZB-718便携式多参数水质分析仪测定各采样点的水温、电导率、pH和溶解氧, 使用SGZ-200BS浊度计测量浊度, 并测量各采样点的水深。

在实验室内, 使用2%浓度的虎红钠盐染色液对浮游动物样品染色24 h, 体视显微镜(Nikon SMZ1500)下鉴定浮游动物种类并计数。浮游动物的种类鉴定主要参考《中国动物志轮虫志》、《中国动物志淡水桡足类》、《中国动物志枝角类》和《淡水微型生物图谱》^[13–16]。桡足类无节幼体

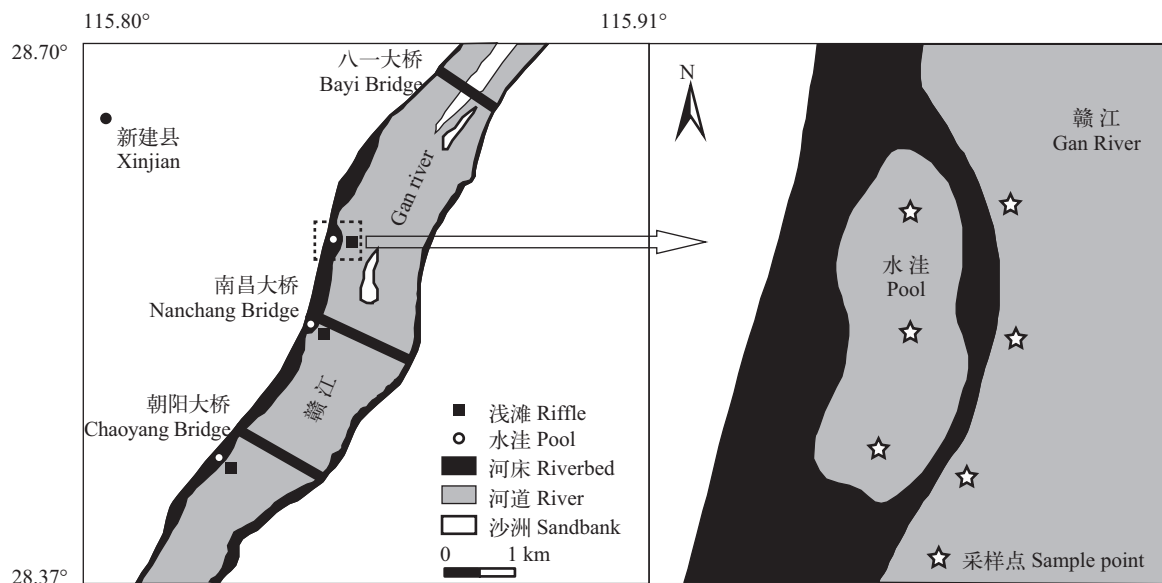


图1 浮游动物采样点示意图

Fig. 1 The sketch map of zooplankton sample points

和单趾轮虫属 *Monostyla* 一种未鉴定到物种水平, 进行统计时分别作为1个物种进行处理。

1.3 数据分析

浮游动物密度和浮游动物生物量的计算方法参考《淡水浮游生物研究方法》^[17]。浮游动物的香浓-威纳多样性指数 Shannon-Wiener Index (H')、Pielou 均匀度指数 (J) 和 Margalef 丰富度指数 (D) 计算公式如下:

$$H' = - \sum_{i=1}^s P_i \log_2 P_i$$

$$J = H' / \log_2 S$$

$$D = (S - 1) / \log_2 N$$

式中: N 为浮游动物总个体数; S 为浮游动物种类总数; P_i 为第 i 种的个体数与样品中总个体数的比值 (n_i/N)。

采用相对重要性指数 (IRI) 确定浮游动物优势类群, 计算公式为: $IRI = (RD + RB) \times F$ ^[18]。式中: RD 为相对密度, 即某类群的密度占浮游动物总密度的百分比; RB 为相对生物量, 即某类群的生物量占浮游动物总生物量的百分比; F 为该类群出现的频率。

单因子方差分析 (ANOVA) 检验水洼与浅滩中水环境因子、浮游动物密度和生物量的差异性。斯皮尔曼相关分析 (Spearman correlation coefficient) 检验水环境因子和营养盐对浮游动物群落的影响程度。统计分析在软件 Statistica 7.0 中进行。在 Primer 5.0 软件中进行非度量多维尺度分析 (NMDS) 和群落相似性分析 (ANOSIM) 检验水洼内与浅滩浮游动物群落的结构特征, 进行多维尺度排序时, 浮游动物平均密度小于 0.1 个/L 的物种未进行分析。所有统计分析当 $P < 0.05$ 时表明具有显著性。

2 结果

2.1 理化因子和营养盐

1月, 水洼水深 (0.93 ± 0.07) m 和电导率 (260.44 ± 15.31) $\mu\text{m}/\text{cm}$ 显著高于浅滩 [(0.60 ± 0.03) m, (234.22 ± 0.72) $\mu\text{m}/\text{cm}$, $P < 0.05$]。浅滩的水温、pH、溶解氧和浊度略高于水洼。3月, 水洼水深 (1.08 ± 0.05) m 显著高于浅滩 [(0.57 ± 0.02) m, $P < 0.05$], pH 略高于浅滩。相反, 浅滩的溶解氧和浊度高于水洼, 而水温和电导率非常接近 (表 1)。

1月, 水洼的总氮含量 (3.09 ± 0.10) mg/L 显著高于浅滩 [(2.83 ± 0.11) mg/L, $P < 0.05$]。浅滩的总磷含量略高于水洼。3月, 水洼的总氮含量略高于浅滩, 总磷含量低于浅滩。

2.2 浮游动物种类组成和多样性指数

1月和3月在赣江河床水洼及邻近浅滩共采集到浮游动物 44 种, 分属于 2 门 14 科 (表 2)。轮虫是优势类群, 发现 30 种, 占总物种数的 68%, 枝角类和桡足类各发现 7 种, 分别占总物种数的 16%。将相对重要性指数 (IRI) 大于 1000 的物种确定为优势物种。共有 5 种, 分别是汤匙华哲水蚤 *Sinocalanus dorrii*、长肢多肢轮虫 *Polyarthra dolichoptera*、桡足类无节幼体 *Copepod nauplii*、角突臂尾轮虫 *Brachionus angularis* 和长圆疣毛轮虫 *Synchaeta oblonga*。1月和3月, 水洼中的浮游动物的物种数均少于浅滩。多样性指数计算结果表明, 1月和3月, 香浓-威纳多样性指数、均匀度指数和物种丰富度指数均为浅滩高于水洼 (表 3)。

2.3 浮游动物密度和生物量

1月和3月, 水洼与浅滩中浮游动物总密度均无显著差异 (表 4)。3月份桡足类在水洼中的密度 (7.40 ind./L) 显著高于浅滩 (4.72 ind./L, $P < 0.05$) 外,

表 1 一月和三月水洼与浅滩水环境因子差异

Tab. 1 Environmental factors between pools and riffles in January and March

	1月 January		3月 March	
	水洼 Pool ($n=9$)	浅滩 Riffle ($n=9$)	水洼 Pool ($n=6$)	浅滩 Riffle ($n=9$)
水深 Water depth (m)	0.93 ± 0.07^a	0.60 ± 0.03^b	1.08 ± 0.05^a	0.57 ± 0.02^b
水温 Water temperature ($^{\circ}\text{C}$)	10.47 ± 0.25	10.92 ± 0.31	10.05 ± 0.02	10.07 ± 0.03
pH	7.71 ± 0.08	7.74 ± 0.09	8.16 ± 0.04	7.97 ± 0.04
溶解氧 Dissolved oxygen (mg/L)	9.65 ± 0.20	9.83 ± 0.14	9.21 ± 0.05	9.32 ± 0.04
电导率 Conductivity ($\mu\text{m}/\text{cm}$)	260.44 ± 15.31^a	234.22 ± 0.72^b	216.00 ± 0.97	216.33 ± 1.19
浊度 Turbidity (NTU)	34.10 ± 15.98	34.58 ± 6.12	19.37 ± 2.93	27.48 ± 4.29
总磷 TP (mg/L)	0.05 ± 0.01	0.06 ± 0.01	0.09 ± 0.00	0.10 ± 0.00
总氮 TN (mg/L)	3.09 ± 0.10^a	2.83 ± 0.11^b	3.44 ± 0.06	3.24 ± 0.07

注: 字母 a 和 b 表示同一个月份水洼和浅滩环境因子具有显著差异; 下同

Note: Letters a, b indicate a significant difference of environmental factors between pools and riffles in the same month; the same applies below

表 2 赣江河床水洼和邻近浅滩浮游动物名录和相对重要性指数

Tab. 2 List and IRI of zooplankton in pools and riffles of Ganjiang River

	1月January		3月March		相对重要性指数IRI
	水洼Pool	浅滩Riffle	水洼Pool	浅滩Riffle	
轮虫Rotifer					
臂尾轮科Brachionidae					
方块鬼轮虫Trichotria tetractis			+	+	1
角突臂尾轮虫Brachionus angularis	+	+	+	+	1336
萼花臂尾轮虫Brachionus calyciflorus	+	+	+	+	657
浦达臂尾轮虫Brachionus budapestiensis			+	+	8
方形臂尾轮虫Brachionus quadridentatus		+			0
壶状臂尾轮虫Brachionus urceus	+	+	+	+	5
矩形臂尾轮虫Brachionus leydigi			+	+	16
裂足臂尾轮虫Brachionus diversicornis	+				0
大肚须足轮虫Euchlanis dilatata	+	+	+	+	5
矩形龟甲轮虫Keratella quadrata		+	+	+	95
曲腿龟甲轮虫Keratella valga		+	+	+	23
腔轮科Lecanidae					
尾片腔轮虫Lecane leontina		+			0
单趾轮虫Monostyla sp.	+				0
晶囊轮科Asplanchnidae					
前节晶囊轮虫Asplanchna priodonta		+	+	+	161
盖氏晶囊轮虫Asplanchna girodi		+		+	13
卜氏晶囊轮虫Asplanchna brightwelli		+			1
多突囊足轮虫Asplanchnopus multiceps	+				0
椎轮科Notommatidae					
蚤上前翼轮虫Proales daphnicola				+	
迈由盲囊轮虫Itura myersi	+				0
凸背巨头轮虫Cephalodella gibba	+				0
腹尾轮科Gastropodidae					
					0
舞跃无柄轮虫Ascomorpha saltans		+			8
鼠轮科Trichocercidae					
圆筒异尾轮虫Trichocerca cylindrica				+	0
刺盖异尾轮虫Trichocerca capucina		+			0
二突异尾轮虫Trichocerca bicristata		+			0
疣毛轮科Synchaetidae					
长肢多肢轮虫Polyarthra dolichoptera	+	+	+	+	1677
针簇多肢轮虫Polyarthra trigla	+	+	+	+	708
长圆疣毛轮虫Synchaeta oblonga	+	+	+	+	1037
镜轮科Testudinellidae					
盘镜轮虫Testudinella patina	+				0
跃进三肢轮虫Filinia passa			+	+	106
迈氏三肢轮虫Filinia maior	+	+	+	+	165
枝角类Cladocerans					
仙达溞科Sididae					
短尾秀体溞Diaphanosoma brachyurum	+			+	4
溞科Daphniidae					
隆线溞Daphnia carinata		+			3
蚤状溞Daphnia pulex				+	0

续表 2

	1月January		3月March		相对重要性指数IRI
	水洼Pool	浅滩Riffle	水洼Pool	浅滩Riffle	
透明溞 <i>Daphnia hyalina</i>			+	+	14
僧帽溞 <i>Daphnia cucullata</i>			+	+	23
象鼻溞科Bosminidae					
长额象鼻溞 <i>Bosmina longirostris</i>	+	+	+	+	711
简弧象鼻溞 <i>Bosmina coregoni</i>			+	+	164
桡足类Copepods					
桡足类无节幼体Copepod nauplii	+	+	+	+	1542
胸刺水蚤科Centropagidae					
汤匙华哲水蚤 <i>Sinocalanus dorrii</i>	+	+	+	+	4532
伪镖水蚤科Pseudodiaptomidae					
球状许水蚤 <i>Schmackeria forbesi</i>			+		2
剑水蚤科Cyclopidae					
跨立小剑水蚤 <i>Microcyclops varicans</i>	+	+	+		1
等形小剑水蚤 <i>Microcyclops subaequalis</i>	+	+			2
广布中剑水蚤 <i>Mesocyclops leuckarti</i>		+	+	+	387
台湾温剑水蚤 <i>Thermocyclops taihokuensis</i>			+		0
物种数 Species richness	20	25	26	27	

表 3 水洼及浅滩浮游动物的生物多样性指数
Tab. 3 Biodiversity of zooplankton in pools and riffles

多样性指数 Diversity index	1月January		3月March	
	水洼 Pool	浅滩 Riffle	水洼 Pool	浅滩 Riffle
<i>H'</i>	1.12	1.91	2.10	2.30
<i>J</i>	0.38	0.58	0.65	0.70
<i>D</i>	9.19	11.53	7.53	8.31

轮虫和枝角类的密度在两种生境中无显著差异, 均为浅滩中的密度略高。除3月份角突臂尾轮虫在水洼中密度(9.80 ind./L)显著高于浅滩(5.61 ind./L, $P<0.05$), 1月长肢多肢轮虫和3月汤匙华哲水蚤在水洼中密度略高于浅滩外, 5个优势物种的密度均在浅滩中较高。

除了轮虫的密度在2个月份之间无显著差异外, 浮游动物总密度、主要类群和优势物种的密度在2个月份之间均具有显著差异($P<0.05$)。优势物种长肢多肢轮虫在1月份的密度显著高于3月份($P<0.05$), 其他均为3月显著高于1月份($P<0.05$)。

1月, 水洼与浅滩中浮游动物总生物量、主要类群和优势物种的生物量均无显著差异(表 5)。3月, 浮游动物的总生物量在水洼中(332.44 $\mu\text{g/L}$)显著高于浅滩(146.10 $\mu\text{g/L}$, $P<0.05$)。水洼中桡足类生物量(281.60 $\mu\text{g/L}$)显著高于浅滩(88.47 $\mu\text{g/L}$, $P<0.05$)。轮虫和枝角类的生物量在2种生境中差异不显著, 浅滩中轮虫的生物量高于水洼, 水洼中

枝角类的生物量略高于浅滩。1月, 除长肢多肢轮虫的生物量在水洼中(2.01 $\mu\text{g/L}$)较浅滩(1.66 $\mu\text{g/L}$)高外, 其他优势物种的生物量均为浅滩较高。3月, 除长圆疣毛轮虫的生物量在浅滩中(7.37 $\mu\text{g/L}$)较水洼(1.17 $\mu\text{g/L}$)高外, 其他优势物种的生物量均为水洼较高。

除长肢多肢轮虫的生物量在1月显著高于3月外($P<0.05$), 浮游动物总生物量、主要类群和其他优势物种的生物量均为3月显著高于1月($P<0.05$)。

2.4 浮游动物群落结构特征

群落相似性分析(ANOSIM)表明, 1月份水洼与浅滩中浮游动物群落具有边缘显著差异($P=0.07$), 3月份水洼与浅滩中浮游动物群落无显著差异($P=0.31$)。基于浮游动物种类组成和个体数的无度量多维尺度分析(NMDS)结果显示, 1月份浮游动物群落可明显划分为2个: 水洼群落和浅滩群落(图 2)。3月份仅南昌大桥附近的水洼因未与赣江主河道联通, 形成一个差异较大的群落。

2.5 浮游动物与水环境因子的关系

斯皮尔曼相关分析表明, 在水洼与浅滩2种生境中, 浮游动物的总密度与pH、总磷和总氮含量均呈显著正相关, 而仅与电导率呈显著负相关($P<0.05$)。水洼中浮游动物的总密度与水深和溶解氧呈正相关, 浅滩中呈负相关(表 6)。在2种生境中, 浮游动物3个主要类群轮虫、枝角类和桡足类的密度与pH、总磷和总氮含量也呈显著正相关关系, 而且与

电导率呈显著负相关($P<0.05$)。在水洼中, 枝角类的密度与水深呈显著正相关($P<0.05$), 在浅滩中其密度却与水深呈负相关。在水洼中, 轮虫的密度与水温呈负相关, 而枝角类和桡足类的密度与水温呈正相关; 轮虫的密度与溶解氧呈正相关, 枝角类和桡足类的密度与溶解氧呈负相关。

优势物种汤匙华哲水蚤的密度在水洼和浅滩中均与电导率具有显著负相关关系, 而与总磷含量呈显著正相关关系($P<0.05$)。长肢多肢轮虫的密度与溶解氧显著正相关($P<0.05$)。桡足类无节幼体的密度在2种生境中均与总氮含量显著正相关, 而与电导呈显著负相关($P<0.05$)。角突臂尾轮虫的密度在两种生境中均与总氮、总磷含量显著正相关, 而与电导显著负相关($P<0.05$)。长圆疣毛轮虫的密度在两种生境中均与总氮、总磷含量显著正相关($P<0.05$)。

3 讨论

3.1 浮游动物种类组成及群落结构

计勇等^[1]对赣江中下游的浮游动物的研究, 发现轮虫25种, 枝角类7种, 桡足类5种, 本研究的结果与其基本一致。但是本研究的优势物种与其结果具有明显差异, 计勇等^[1]的研究记录的优势物种是晶囊轮虫、象鼻蚤和剑水蚤, 而本研究发现的优势物种是汤匙华哲水蚤和长肢多肢轮虫等, 可能因为赣江主河道的流速等水环境因子与近岸浅滩和季节性水洼之间的差异造成。刘超等^[19]对上海市城郊河道的浮游动物研究发现轮虫11种, 枝角类4种, 桡足类1种。郭飞等^[20]对金沙河水库浮游动物的研究发现轮虫40种, 枝角类7种, 桡足类3种。可见, 无论是相对静止的水体, 还是流动性的河道, 浮游动物的组成均是轮虫占优势, 而流动性水体中

表 4 水洼和浅滩浮游动物的密度
Tab. 4 Density of zooplankton in pools and riffles (ind./L)

	1月January		3月March	
	水洼Pool (n=9)	浅滩Riffle (n=9)	水洼Pool (n=6)	浅滩Riffle (n=9)
总密度Total density	7.90±3.28	9.34±4.14	24.27±3.58	22.86±2.52
主要类群Main groups				
轮虫Rotifer	7.31±3.28	8.22±4.08	15.35±2.10	16.46±2.76
枝角类Cladocerans	0.02±0.02	0.06±0.04	1.52±0.32	1.68±0.25
桡足类Copepods	0.57±0.12	1.07±0.23	7.40±2.07 ^a	4.72±0.75 ^b
优势物种Dominant species				
汤匙华哲水蚤 <i>S. dorrii</i>	0.03±0.02	0.09±0.03	4.25±1.86	1.07±0.47
长肢多肢轮虫 <i>P. dolichoptera</i>	5.02±2.21	4.16±2.70	0.38±0.11	0.39±0.09
桡足类无节幼体Copepod nauplii	0.50±0.11	0.93±0.23	2.53±0.22	3.16±0.40
角突臂尾轮虫 <i>B. angularis</i>	0.02±0.02	0.13±0.08	9.80±2.38 ^a	5.61±1.06 ^b
长圆疣毛轮虫 <i>S. oblonga</i>	0.14±0.09	0.47±0.18	0.75±0.22	4.73±2.42

表 5 水洼和浅滩浮游动物的生物量
Tab. 5 Biomass of zooplankton in pools and riffles (μg/L)

	1月January		3月March	
	水洼Pool (n=9)	浅滩Riffle (n=9)	水洼Pool (n=6)	浅滩Riffle (n=9)
总生物量Total biomass	7.84±2.05	19.22±4.28	332.44±121.37 ^a	146.10±27.28 ^b
主要类群Main groups				
轮虫Rotifer	3.23±1.40	8.31±2.16	13.51±1.07	21.41±4.58
枝角类Cladocerans	0.78±0.78	2.11±1.46	37.33±10.36	36.22±4.76
桡足类Copepods	3.83±1.04	8.80±2.00	281.60±108.19 ^a	88.47±29.53 ^b
优势物种Dominant species				
汤匙华哲水蚤 <i>S. dorrii</i>	2.00±1.00	5.33±1.86	255.00±111.37	64.00±28.37
长肢多肢轮虫 <i>P. dolichoptera</i>	2.01±0.89	1.66±1.08	0.92±0.15	0.16±0.04
桡足类无节幼体Copepod nauplii	1.50±0.33	2.80±0.68	7.60±0.67	9.47±1.19
角突臂尾轮虫 <i>B. angularis</i>	0.01±0.01	0.05±0.03	4.57±0.68 ^a	2.24±0.42 ^b
长圆疣毛轮虫 <i>S. oblonga</i>	0.17±0.10	0.73±0.28	1.17±0.34	7.37±3.76

浮游动物的种类和数量一般少于静水水域。本研究1月份在水洼鉴定发现浮游动物20种,在浅滩中鉴定发现浮游动物25种;3月份在水洼发现浮游动物25种,在浅滩发现浮游动物27种。均为浅滩中的

浮游动物多于水洼,该结果与前期研究报道的静水水体中浮游动物种类多于流动性水体并不一致^[19,20]。原因在于水洼的水体理化因子(水深和电导率)和营养盐(总氮)含量与邻近浅滩具有显著差异,因此

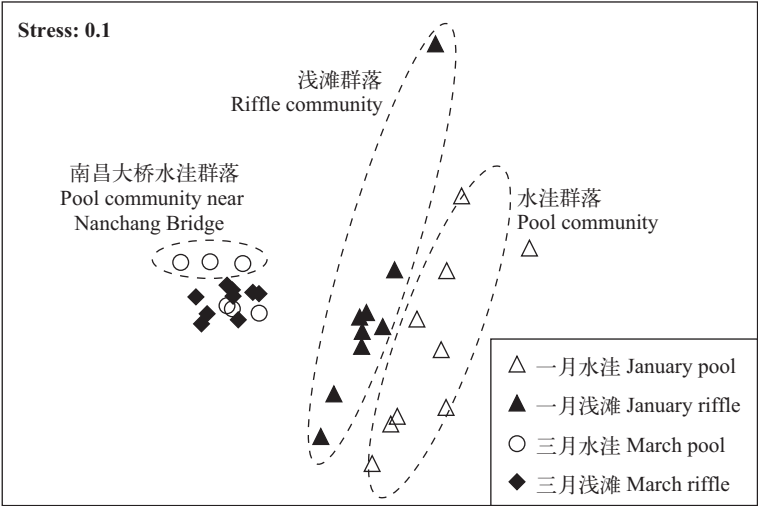


图2 水洼及浅滩浮游动物群落无度量多维尺度排序

Fig. 2 Non-metric multidimensional scaling (MDS) ordination of zooplankton communities in pools and riffles

表6 环境因子与浮游动物密度斯皮尔曼相关分析

Tab. 6 Spearman correlation coefficients between environmental factors and zooplankton density

	样点 Sample site	水深 Water depth	水温 Water temperature	pH	溶解氧 Dissolved oxygen	电导率 Conductivity	浊度 Turbidity	总磷 TP	总氮 TN	样品数 n
总密度 Total density	水洼Pool	0.479	-0.320	0.660	0.128	-0.685	-0.041	0.580	0.567	15
	浅滩Riffle	-0.090	-0.215	0.569	-0.315	-0.649	-0.228	0.564	0.692	18
主要类群 Groups										
轮虫 Rotifer	水洼Pool	0.389	-0.441	0.576	0.181	-0.559	-0.104	0.491	0.571	15
	浅滩Riffle	0.048	-0.182	0.657	-0.210	-0.613	-0.219	0.566	0.625	18
枝角类 Cladocerans	水洼Pool	0.515	0.033	0.738	-0.187	-0.757	0.228	0.687	0.534	15
	浅滩Riffle	-0.041	-0.375	0.512	-0.348	-0.792	-0.191	0.610	0.593	18
桡足类 Copepods	水洼Pool	0.449	0.156	0.652	-0.230	-0.668	0.296	0.450	0.552	15
	浅滩Riffle	-0.231	-0.391	0.313	-0.379	-0.787	-0.157	0.665	0.678	18
优势物种 Dominant species										
汤匙华哲水蚤 <i>S. dorrii</i>	水洼Pool	0.416	-0.056	0.735	-0.032	-0.809	0.098	0.695	0.452	15
	浅滩Riffle	0.108	-0.139	0.358	-0.222	-0.689	-0.344	0.597	0.515	18
长肢多肢轮虫 <i>P. dolichoptera</i>	水洼Pool	-0.095	-0.716	-0.260	0.723	0.118	-0.825	-0.152	-0.254	15
	浅滩Riffle	0.075	0.004	-0.101	0.755	0.345	0.269	-0.085	-0.057	18
桡足类无节幼体 Copepod nauplii	水洼Pool	0.303	0.008	0.638	-0.249	-0.621	0.264	0.437	0.671	15
	浅滩Riffle	-0.170	-0.447	0.276	-0.342	-0.771	-0.073	0.666	0.694	18
角突臂尾轮虫 <i>B. angularis</i>	水洼Pool	0.276	0.178	0.712	-0.350	-0.652	0.418	0.549	0.616	15
	浅滩Riffle	0.018	-0.175	0.330	-0.402	-0.805	-0.171	0.655	0.525	18
长圆疣毛轮虫 <i>S. oblonga</i>	水洼Pool	0.472	-0.434	-0.450	-0.027	-0.529	0.051	0.717	0.752	15
	浅滩Riffle	-0.029	-0.145	0.779	-0.300	-0.433	-0.386	0.508	0.500	18

注: 加粗表示具有显著相关性($P < 0.05$)

Note: Bold indicate significant correlation between zooplankton and environment factors

导致水洼中浮游动物的种类较少。

1月除长肢多肢轮虫外, 浅滩中浮游动物的密度和生物量均高于水洼。而3月水洼中的桡足类和角突臂尾轮虫的密度和生物量却显著高于浅滩($P<0.05$)。原因可能在于冬季水洼中水体的垂向交换, 使底泥中的氮磷释放进入水体^[21], 从而导致营养盐浓度较浅滩高。另外角突臂尾轮虫的游泳能力较弱, 也使得其更适合生活在相对静止的水体中。此外, 浮游动物群落相似性分析发现1月浮游动物群落可明显区分为水洼群落和浅滩群落, 而3月2种生境中浮游动物群落区别不明显(图3)。这说明水洼形成后, 由于环境改变浮游动物群落发生了演替, 而浅滩是主河道的一部分, 始终保持流动性水体的特征, 从而维持了原有的浮游动物群落特征。到3月份, 由于水位上涨, 除南昌大桥附近的水洼外, 另外两个水洼与主河道有了一定程度连通或者完全连通, 使得水体中的浮游动物进行交流, 因此3月份水洼和浅滩中浮游动物群落的相似性增加。李强等^[22]对南汇东滩围垦水域和外围的自然水域的浮游动物群落进行研究, 发现围垦水域中浮游动物的物种数明显多于坝外自然水域, 围垦水域中浮游动物的群落结构与坝外自然水域存在明显差异性。也证明了短时间形成的静水水域中的水体环境发生了较大变化, 导致其中浮游动物的种类组成和群落结构响应环境变化而发生演替。

3.2 环境因子对浮游动物群落结构的影响

水洼呈现的是静止性水域特征, 而浅滩是流动水域特征。目前, 国内外有关浮游动物的研究多以湖泊和水库为主^[23-25], 有关河流浮游动物的研究相对较少, 而对比静水水域与流动水域浮游动物群落差异的相关研究更少。水库是较湖泊略小的静水生态系统, 本研究中的水洼是一个季节性小型静水生态系统。有研究发现, 水库对浮游动物群落有负面影响, 而自然湖泊对浮游动物多样性的维持有重要的生态学意义^[26]。本研究发现枯水期不同月份浅滩中浮游动物的物种数和生物多样性指数均高于水洼, 说明枯水期形成的水洼这种暂时性水体环境并不适合浮游动物的生活。

单因子方差分析结果表明, 1月水洼中的电导率显著高于浅滩($P<0.05$), 原因在于水洼属于静止水域, 随着时间积累的电解质较多, 而浅滩属于流动性水体, 所含的电解质较少, 从而导致水洼的电导率显著大于浅滩。斯皮尔曼相关分析结果(表6)表明, 绝大多数浮游动物的密度与电导率呈显著负相关, 这说明电导率是造成1月份水洼与浅滩浮游动物群落具有显著差异的重要原因。3月, 由于赣

江流域进入降水期, 研究的水洼一个被淹没、完全与主河道联通, 一个与主河道呈半连通状态, 另一个即将与主河道连通。这种水情的变化, 导致除水深外, 水洼与浅滩中其他7个水环境因子均无显著差异, 进而导致3月水洼和浅滩浮游动物群落相似性较高(图3)。

邱小琮等^[27]对沙湖进行的相关研究表明, 总氮对沙湖浮游动物密度的影响显著, 并且呈正相关关系, 本研究的结果与其一致, 除长肢多肢轮虫外, 其他类群和种类均与总氮含量呈正相关, 且大多为显著正相关($P<0.05$)。陈立婧等^[28, 29]对上海世博园后滩湿地桡足类的研究表明, pH、水温、总氮、总磷和溶解氧是影响桡足类群落结构的主要因子。本研究结果与其不完全相同, 仅发现pH、电导率、总磷和总氮是对浮游动物群落具有显著影响的环境因子(表6)。水洼形成后与主河道断开, 河流中的磷无法输入水洼, 从而使得1月和3月浅滩中的磷含量均高于水洼(表1)。而在淡水生态系统中, 磷主要通过影响浮游植物的生长, 间接影响浮游动物的分布^[30]。本研究在枯水季节开展, 水体中浮游植物以硅藻占优势, 且由于生物量较丰水季节高^[31], 因此总磷浓度的差异对水洼与浅滩中浮游动物群落的影响更为显著。

参考文献:

- [1] Ji Y, Zhang J, Sun X Q, *et al.* Spatio-temporal distribution characteristics of zooplankton and water quality assessment in middle and lower reaches of GanJiang River [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2012, 40(5): 510—513 [计勇, 张洁, 孙晓秋, 等. 赣江中下游浮游动物时空分布特征及水质综合评价. 河海大学学报(自然科学版), 2012, 40(5): 510—513]
- [2] Cheng Z J. Scientific Survey on Five Major Rivers of Jiangxi Science Press [M]. Jiangxi: Science and Technology Press. 2009, 10—18 [程宗锦. 江西五大河流科学考察. 江西科技出版社. 2009, 10—18]
- [3] Wang M L, Zhou W B, Hu C H. The distribution characteristics of various forms of nitrogen and phosphorus in the Ganjiang catchment during dry seasons [J]. *Earth and Environment*, 2007, 35(2): 166—170 [王毛兰, 周文斌, 胡春华. 枯水期赣江流域氮磷的分布特征. 地球与环境, 2007, 35(2): 166—170]
- [4] Zhang L L, Tan Z J, Li K. Impact of sand -dredging on river-bed of mid-lower reaches of river [J]. *Hydropower and New Energy*, 2010, 5(2): 63—65 [张玲丽, 谭政江, 李昆. 赣江中-下游河段采沙对河床的影响. 水利与新能源, 2010, 5(2): 63—65]
- [5] Zou J, Wu N H, Shi M J. Research on the status of water shortage in dry period in the middle and lower reaches of

- the Ganjiang River [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2014, **1**(6): 102—106 [邹俊, 邬年华, 史明涓. 赣江中下游流域枯水期缺水现状研究. 中国农村水利水电, 2014, **1**(6): 102—106]
- [6] Park K S, Shin H W. Studies on phyto-and-zooplankton composition and its relation to fish productivity in a west coast fish pond ecosystem [J]. *Journal of Environmental Biology*, 2007, **28**: 415—422
- [7] Datta T. Zooplankton diversity and physico-chemical condition of two wetlands of Jalpaiguri District, India [J]. *Journal of Applied Biology and Pharmaceutical Technology*, 2001, **2**(3): 576—583
- [8] Liu J K. Advanced Hydrobiology [M]. Beijing: Science Press. 2002 [刘健康. 高级水生生物学. 北京: 科学出版社. 2002]
- [9] Blancher C E. Zooplankton-trophic relationship in some north and central Florida lakes [J]. *Hydrobiologia*, 1984, **109**(3): 251—263
- [10] Wu Z B, Liu A F, Zhang S Y, *et al.* Short-term effects of drawing water for connectivity of rivers and lakes on zooplankton community structure [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2008, **20**: 419—423
- [11] Hessen D O, Faafeng B A, Smith V H, *et al.* Extrinsic and intrinsic controls of zooplankton diversity in lakes [J]. *Ecology*, 2006, **87**(2): 433—443
- [12] Xu H Y, Yu H Y, Yu J, *et al.* A preliminary study on size diversity of zooplankton and their association with trophic level in the drinking water sources, Zhejiang Province [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2017, **41**(2): 407—413 [徐杭英, 于海燕, 俞建, 等. 浙江饮用水源地浮游动物体积多样性及水质响应. 水生生物学报, 2017, **41**(2): 407—413]
- [13] Research Group of Carcinology, Institute of Zoology, Academia Sinica. Fauna Sinica: Crustacea: Freshwater Copepoda [M]. Beijing: Science Press. 1979, 301—418 [中国科学院动物研究所甲壳动物研究组. 中国动物志·节肢动物门·甲壳纲·淡水桡足类. 北京: 科学出版社. 1979, 301—418]
- [14] Wang J J. Freshwater Rotifer Fauna in China [M]. Beijing: Science Press. 1961, 69—254 [王家楫. 中国淡水轮虫志. 北京: 科学出版社. 1961, 69—254]
- [15] Jiang X Z, Du N S. Fauna Sinica: Crustacea: Freshwater Cladocera [M]. Beijing: Science Press. 1979 [蒋燮治, 堵南山. 中国动物志·节肢动物门·甲壳纲·淡水枝角类. 北京: 科学出版社. 1979]
- [16] Zhou F X, Chen J H. Atlas of Microbiology in Freshwater [M]. Beijing: Chemical Industry Press. 2005 [周凤霞, 陈剑虹. 淡水微型生物图谱. 北京: 化学工业出版社. 2005]
- [17] Zhang Z S, Huang X F. Methods for Study on Freshwater Plankton [M]. Beijing: Science Press. 1991, 358—371 [章宗涉, 黄祥飞. 淡水浮游生物研究方法. 北京: 科学出版社. 1991, 358—371]
- [18] Han J, Zhang Z N, Yu Z S. Macrobenthic community structure in the southern and central Bohai Sea, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, **24**(3): 531—537 [韩洁, 张志南, 于子山. 渤海中、南部大型底栖动物的群落结构. 生态学报, 2004, **24**(3): 531—537]
- [19] Liu C, Yu N, Chen L Q, *et al.* Zooplankton communities and bio-assessment of five rivers in the outskirts unit of Southwest Shanghai [J]. *Journal of Fudan University (Natural Science)*, 2007, **46**(6): 913—919 [刘超, 禹娜, 陈立桥, 等. 上海市西南城郊河道春季的浮游生物组成及水质评价. 复旦学报(自然科学版), 2007, **46**(6): 913—919]
- [20] Guo F F, Zhang Y, Zhao G, *et al.* Community structure of zooplankton in the Jinshahe Reservoir and its relationship with environmental factors [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, **35**(8): 2208—2216 [郭飞飞, 张云, 赵广等. 金沙河水库浮游动物群落结构及其与环境因子的关系. 生态学报, 2016, **35**(8): 2208—2216]
- [21] Lu J S, Li Z L. Seasonal effects of thermal stratification on the water quality of deep reservoirs: A case study of Heihe Reservoir, Xi'an City [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2014, **26**(5): 698—706 [卢金锁, 李志龙. 热分层对水库水质的季节性影响——以西安黑河水库为例. 湖泊科学, 2014, **26**(5): 698—706]
- [22] Li Q, Ma C A, Lü W W, *et al.* Variations of zooplankton's community structure in reclaimed waters of Nanhui east tidal flat of Shanghai, East China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, **23**(8): 2287—2294 [李强, 马长安, 吕巍巍, 等. 南汇东滩湿地围垦水域内浮游动物群落结构的变化. 应用生态学报, 2012, **23**(8): 2287—2294]
- [23] Froneman P W. Zooplankton community structure and biomass in a southern African temporarily open/closed estuary [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2004, **60**: 125—132
- [24] Feng S M, Wu M S, Xiong L, *et al.* The research of dynamic succession of zooplankton and its correlation with environmental factors in Taiping Lake [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2017, **41**(3): 700—711 [冯世敏, 吴明姝, 熊莲, 等. 太平湖浮游动物动态演替与环境因子的相关性研究. 水生生物学报, 2017, **41**(3): 700—711]
- [25] Ma X F, Xiong B X, Wang W M, *et al.* Community structure and species diversity of zooplankton in Daoguanhe Reservoir, Hubei Province [J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2005, **24**(1): 63—67 [马徐发, 熊邦喜, 王卫民, 等. 道观河水库浮游动物的群落结构与物种多样性. 华中农业大学学报, 2005, **24**(1): 63—67]
- [26] Simoes N R, Nunes A H, Dias, J D, *et al.* Impact of reservoirs on zooplankton diversity and implications for the conservation of natural aquatic environments [J]. *Hydrobiologia*, 2015, **758**(1): 3—17
- [27] Qiu X Z, Zhao H X, Sun X X. Relationships between zooplankton and water environmental factors in Shahu Lake,

- Ningxia of Northwest China: A multivariate analysis [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, **31**(4): 896—901 [邱小琼, 赵红雪, 孙晓雪. 沙湖浮游动物与水环境因子关系的多元分析. 生态学杂志, 2012, **31**(4): 896—901]
- [28] Chen L J, Wu Y F, Jing Y X, *et al.* Response of copepod community characteristics to environmental factors in the backshore wetland of expo garden, Shanghai [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(11): 3941—3948 [陈立婧, 吴艳芳, 景钰湘, 等. 上海世博园后滩湿地桡足类群落特征及其对环境因子的响应. 环境科学, 2012, **33**(11): 3941—3948]
- [29] Dong J, Li Y H, Li G B, *et al.* Seasonal dynamics characteristics and affecting physical factors of phytoplankton functional groups in Dongjiang River [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2013, **37**(5): 836—843 [董静, 李艳晖, 李根保. 东江水系浮游植物功能群季节动态特征及影响因素. 水生生物学报, 2013, **37**(5): 836—843]
- [30] Li Y, Yu N, Feng D X, *et al.* Annual variations of zooplankton community structure in Shanghai downtown rivers [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, **29**(2): 370—376 [刘一, 禹娜, 冯德祥, 等. 上海市中心城区河道浮游动物群落结构的周年变化. 生态学杂志, 2010, **29**(2): 370—376]
- [31] Wang C, Li X H, Lai Z N, *et al.* Temporal and spatial pattern of the phytoplankton biomass in the Pearl River Delta [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, **33**(18): 5835—5847 [王超, 李新辉, 赖子尼. 珠三角河网浮游植物生物量的时空特征. 2013, **33**(18): 5835—5847]

VARIATION OF ZOOPLANKTON COMMUNITIES IN ALONGSHORE TEMPORAL POOLS AND RIFFLES OF GANJIANG RIVER DURING DRY SEASON

YU Wen-Sheng¹, ZHAN Wen-Rong¹, NIE Xue¹, HU Xu-Ren¹, PAN Ying¹, QIN Hai-Ming^{1,2,3} and SHU Feng-Yue⁴

(1. Center for Watershed Ecology, Institute of Life Science, Nanchang University, Nanchang 330031, China; 2. Key Laboratory of Poyang Lake Environment and Resource Utilization, Ministry of Education, Nanchang University, Nanchang 330031, China;

3. National Ecosystem Research Station of Jiangxi Poyang Lake Wetland, Nanchang 330038, China;

4. College of Life Science, Qufu Normal University, Qufu 273165, China)

Abstract: Water level fluctuations mediate species composition and abundance dynamics of zooplankton to impact the structure and function of aquatic ecosystems. There are many temporary pools formation along the bed of Ganjiang River due to water level decline in dry season. To explore the variation of zooplankton communities in pools and adjacent riffles, three pools and riffles, located in Nanchang section of Ganjiang River, were used to collect zooplankton in January and March of 2015 to investigate species composition, density, biomass, species diversity, and community structure. Water environment factors, zooplankton density and biomass in pools and riffles were analyzed by one-way ANOVA to test the variance. Zooplankton communities in pools and riffles were analyzed by Non-metric multi-dimensional scaling (NMDS) and analysis of similarity (ANOSIM) with software Primer 5.0. A total of 44 species of zooplankton were identified. Among them, 30 rotifers (68%), 7 cladocerans (16%) and 7 copepods (16%) were recorded. There were five dominant species with index of relative importance greater than 1000, which were *Sinocalanus dorrii*, *Polyarthra dolichoptera*, Copepod nauplii, *Brachionus angularis* and *Synchaeta oblonga*. The results of one-way ANOVA suggested that water depth, conductivity and total nitrogen of pools were significantly higher than those of riffles ($P < 0.05$). In January, the water temperature, pH, dissolved oxygen, turbidity and total phosphorus of riffles were slightly higher than those of pools. In March, the water depth, pH and total nitrogen of pools were slightly higher than those of riffles. Dissolved oxygen, turbidity and total phosphorus of riffles were higher than pools. The water temperature and conductivity in the two water bodies were very close. In January, the total density (7.90 ind./L) and biomass (7.78 $\mu\text{g/L}$) of zooplankton in pools were lower than those in riffles (9.34 ind./L, 19.03 $\mu\text{g/L}$). On the contrary, the total density (24.27 ind./L) and biomass (332.14 $\mu\text{g/L}$) of zooplankton in pools were higher than those in riffles (22.86 ind./L, 146.10 $\mu\text{g/L}$). The Shannon-winner index (H'), Pielou evenness index (J) and species richness index (D) of zooplankton in riffles were higher than those in pools. Marginally significant difference in zooplankton communities between pools and riffles in January ($P = 0.067$) were found by non-metric multi-dimensional scaling and similarity analysis. Zooplankton communities in January showed two communities: pool community and riffle community. In March, pools and riffles were gradually connected with the rising water level. There were no significant differences in zooplankton communities between the two habitats ($P = 0.313$). Spearman correlation coefficient showed that water depth and dissolved oxygen were main environmental factors in variation of zooplankton density between pools and riffles. Zooplankton communities had significant correlations with pH, conductivity, total nitrogen and phosphorus ($P < 0.05$) in the two habitats.

Key words: Zooplankton; Community structure; Temporary pool; Riffle; Ganjiang River