

香溪河水系大型底栖动物功能摄食类群生态学

蒋万祥^{1,2}, 蔡庆华^{1,*}, 唐 涛¹, 渠晓东¹

(1. 中国科学院水生生物研究所, 淡水生态与生物技术国家重点实验室, 武汉 430072; 2. 枣庄学院生命科学系, 枣庄 277160)

摘要: 2004 年 7 月至 2007 年 6 月, 通过大型底栖无脊椎动物的量化监测, 对三峡水库湖北库区最大河流香溪河大型底栖无脊椎动物功能摄食类群生态学进行研究。结果表明: 香溪河大型底栖动物以收集者占绝对优势, 其次为刮食者, 捕食者、滤食者、撕食者相对丰度较小; 各功能摄食类群分布明显受时空资源位的限制; 香溪河物质循环能力、两岸物质的输入量和粗有机颗粒/细有机颗粒在九冲河明显高于其它河流, 在冬季高于其它季节; 物质输送能力以高岚河最高, 在时间方面以冬季明显高于其它季节。逐步回归分析表明, 流速、电导、浊度、总氮、二氧化硅对香溪河河流生态系统物质循环具有指示作用; 二氧化硅和化学需氧量对物质输送能力具有指示作用; 水温、水深、二氧化硅、总磷可作为沿岸物质输入量的指标; 水温、二氧化硅可作为评估河道中粗、细有机颗粒比例的重要指标。

关键词: 香溪河; 大型底栖动物; 功能摄食类群

文章编号: 1000-0933(2009)10-5207-12 中图分类号: Q145, Q958 文献标识码: A

The functional feeding group ecology of macroinvertebrate in Xiangxi River system

JIANG Wan-Xiang^{1,2}, CAI Qing-Hua^{1,*}, TANG Tao¹, QU Xiao-Dong¹

1 State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, 430072, China

2 Department of Life Sciences, Zaozhuang University, Zaozhuang 277160, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(10): 5207 ~ 5218.

Abstract: Based on quantitative investigation from July 2004 to June 2007 in Xiangxi River, the largest tributary in Hubei portion of Three-Gorge Reservoir, macroinvertebrate functional feeding groups were studied; some indices based on FFGs were used to evaluate river ecosystem. The results showed that gather-collectors were the main component in Xiangxi River system, followed by scrapers, and predators, filter-collectors, shredders only accounted for a small part. Every FFGs distribution was significantly different among seasons and tributaries in Xiangxi River. By analyzing the spatio-temporal distribution of some indices based on FFGs, the results showed that material cycling capability, lateral input capability, CPOM input/ FPOM input in Jiuchong River were much better than the other rivers, and they were much better in winter than in other seasons. Longitudinal transport capability was best in Gaolan River; and it was also better in winter. Stepwise regression analysis showed that material cycling could be mirrored by water velocity, conductivity, turbidity, total nitrogen, SiO₂; Longitudinal transport could be mirrored by SiO₂ and chemical oxygen demand (COD); Lateral input capability could be mirrored by water temperature, water depth, SiO₂, total phosphorus; and CPOM input/FPOM input was mainly mirrored by water temperature and SiO₂.

Key Words: Xiangxi River; macroinvertebrate; functional feeding groups

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(30330140, 40671197); 中国科学院知识创新工程重要方向资助项目(KZCX2-YW-427); 国家重点基础研究发展规划(973)资助项目(2002CB412300)

收稿日期: 2008-07-22; 修订日期: 2008-10-08

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: qhcai@ihb.ac.cn

河流生态系统是世界上受到最大威胁的生态系统之一。随着人类文明的发展,特别是在一些经济欠发达的国家,由于认识和资金等方面的原因,环境无可避免地成为经济增长的受害者,水体更是首当其冲,往往成为污染的最终受纳者^[1]。伴随着水质污染、生态环境恶化、河道萎缩等一系列河流功能衰退问题的出现,河流生态系统健康及其相关研究正受到广泛的重视。河流健康的内涵与河流系统及其功能的发挥密切相关,而河流健康的判别标准与评价体系又直接反映了河流健康的内涵^[2]。

功能摄食类群(functional feeding groups, FFGs)最初是由 Cummins^[3] 在 20 世纪 70 年代提出,经 Barbour^[4] 及 Bode^[5] 等学者的努力,其分类系统已基本完善。大型底栖动物主要分为 5 个功能摄食类群:刮食者(Scrapers),主要以各种营固着生活的生物类群为食,如着生藻类等;撕食者(Shredders),主要以各种凋落物和粗有机颗粒(coarse particulate organic matter, CPOM, 粒径 > 1mm)为食;收集者(Gather-collectors),主要取食河底的各种有机颗粒物;滤食者(Filter-collectors),以水流中的细有机颗粒物(fine particulate organic matter, FPOM, 0.45mm < 粒径 < 1mm)为食;捕食者(Predators),以捕食其它水生动物为食。

组成群落的不同物种,主要是通过食物关系而集合起来的^[6],因此,功能摄食类群对研究生物群落结构和功能组成有重要作用。大型底栖动物是水域生态系统食物链中有机物、营养源(如树叶碎屑、藻类等)与更高营养级生物的主要连接体。他们对外界胁迫的响应比较敏感,其在河流、湖泊、水库等水体中的物种丰富度、群落结构、耐污类群和敏感类群的比例以及不同功能摄食类群的结构特征等都可以从不同的侧面反映水质的好坏,从而可以有效地指示水生态系统的健康^[7]。目前,国际上关于大型底栖动物功能摄食类群的研究,主要集中于各个功能摄食类群对人类活动的响应^[8],基于功能类群的评价体系的建立及应用尚处在探索阶段。在我国,目前还没有这方面的报道。鉴于此,本研究以香溪河为对象,就大型底栖动物功能摄食类群的时空分布规律进行研究,并尝试应用基于功能摄食类群的多项参数对香溪河河流生态系统进行评价。

1 材料和方法

1.1 研究区域概况及样点设置

香溪河发源于神农架林区,干流全长 94 km,流域面积 3099 km²,自然落差 1540 m,是三峡库区湖北省境内最大的一条河流,河口距离三峡大坝坝首仅 32 km^[9],拥有九冲河、古夫河、高岚河 3 条主要支流。

香溪河上游和九冲河河道较窄,坡度较大,沿岸植被郁闭度较高,下游及高岚河、古夫河河道较宽,坡度较小,沿岸植被郁闭度低,人口密度较大,生境特征存在较大的时空差异性,小生境特征十分明显。本研究共设样点 12 个(图 1)。于香溪河选取 4 个样点,沿水流方向依次命名为 XX23、XX21、XX17 和 XX14;九冲河选取 5 个样点,沿水流方向依次命名为 JC09、JC08、JC05、JC03 和 JC02;高岚河选取 2 个样点,沿水流方向依次命名为 GL03 和 GL02;古夫河选取一个样点,命名为 GF04。

1.2 采样时间

2004 年 7 月到 2007 年 6 月,每月中旬对 12 个样点的大型底栖动物进行定量采集。

1.3 采样方法

将网径 40 目,采样面积为 0.09m²的索伯网(Surber sampler)放置于样点的河床,先将网内的大型石块仔细清洗,使得石块上大型底栖动物随着水流进入索伯网内,较大的石块挑拣完后,用铁铲搅动石块下方的底质,搅动深度大于 10 cm。依据各样点生境特点,平均重复采集 2~3 次,混装到同一个塑料袋中。带回实验站后将大型底栖动物拣出,放入 65ml 标本瓶中,用 6% ~

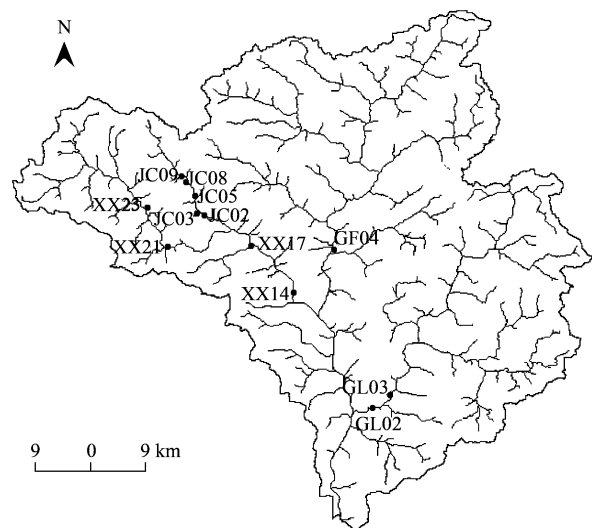


图 1 香溪河水系位置及样点分布图

Fig. 1 Sketch map of Xiangxi River system and location of the sampling sites

10% 甲醛固定;在解剖镜下鉴定^[10,11]、计数,最后用吸水纸吸干底栖动物表面液体,用万分之一天平(赛多力斯)称重(湿重)。

1.4 现场指标的测定及工具

水温(Tem)、pH 值(pH)、浊度(Turb)、溶氧(DO)、总溶解性固体(TDS)、电导(Cond)、盐度(Sal)用 HORIBA W-23 多参数水质分析仪测定,流速(V)利用 LJD 型打印式流速仪测定断面 0.6 倍水深处的流速,水深(Dep)用直尺测定,河宽(Wid)利用卷尺测定。

1.5 实验室内测定的指标及方法

于每个样点采集 2 瓶 600 ml 水样,其中一瓶现场加硫酸调整 pH 值 <2,低温保存。带回实验室后测定其化学指标,包括氨氮(NH₄-N)、亚硝酸盐氮(NO₂-N)、硝酸盐氮(NO₃-N)、总氮(TN)、总磷(TP)、磷酸盐(PO₄-P)、钙离子(Ca²⁺)、氯离子(Cl⁻)、硬度(Hardness)、碱度(Alk)、化学需氧(COD)和二氧化硅(SiO₂)共计 12 项指标^[12,13]。

1.6 基于功能摄食类群的参数及其表征的生态系统属性

根据 Yoshimura 等^[14]的研究,本研究主要从物质循环、物质纵向输送能力、沿岸物质输入等方面着手,应用基于大型底栖动物功能摄食类群的参数对河流生态系统进行评价(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 attributes
物质循环 Material cycling	
F1 刮食者密度, G2 Density of scrapers, G2	初级生产力 Primary production
F2 生物量 Biomass	次级生产力 Secondary production
F3 刮食者密度与滤食者、收集者之和的比率, G2/(G3 + G4) Ratio of scrapers to filterers and gathering-collectors, G2/(G3 + G4)	自养作用/异养作用 Autotrophy/heterotrophy
F4 撕食者密度和收集者密度之和, G1 + G4 Density of shredders and gathering-collectors, G1 + G4	分解能力 Decomposition
物质纵向输送能力 Longitudinal transport	
F5 滤食者密度, G3 Density of filterers, G3	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, G3/(G1 + G4) Ratio of filterers to shredders and gathering-collectors, G3/(G1 + G4)	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, G1 Density of shredders, G1	沿岸物质输入量 Lateral input
F8 撕食者密度与总密度之比, G1/总密度 Ratio of shredders to total abundance, G1/total density	相对物质输入量 Relative lateral input
其它 Others	
F9 撕食者与滤食者和收集者之和的比率, G1/(G3 + G4) Ratio of shredders to filterers and gathering-collectors, G1/(G3 + G4)	粗有机颗粒输入量/细有机颗粒输入量 CPOM input/FPOM input

G1:撕食者 shredders;G2:刮食者 scrapers;G3:滤食者 filterers;G4:收集者 gathering-collectors;G5:捕食者 predators;FPOM:细有机颗粒 fine particulate organic matter;CPOM:粗有机颗粒 coarse particulate organic matter

1.7 数据分析

本研究中方差分析和回归分析使用的软件为 SPSS11.5;样点图制作使用的软件为 ArcView GIS 3.3。

2 结果和讨论

2.1 功能摄食类群组成

对香溪河水系大型底栖动物功能摄食类群进行分析,发现就整个水系而言,大型底栖动物以收集者占绝对优势,相对丰度为 49%,其次为刮食者,相对丰度为 24.0%、捕食者、滤食者、撕食者相对丰度较小,分别为 10%、9%、6.0%(图 2)。

2.2 功能摄食类群空间分布

2.2.1 相对丰度的空间分布

对各周年大型底栖动物功能摄食类群相对丰度的空间分布进行方差 (One-way ANOVA) 分析 (图 3), 结果表明: 2004 ~ 2005 年, 滤食者相对丰度表现为高岚河同香溪河、九冲河、古夫河差异显著 ($p < 0.05$); 收集者相对丰度表现为九冲河同香溪河、古夫河差异显著 ($p < 0.05$); 捕食者相对丰度表现为九冲河同古夫河差异显著 ($p < 0.05$); 刮食者相对丰度表现为九冲河同高岚河、古夫河差异显著 ($p < 0.05$); 撕食者相对丰度表现为九冲河同香溪河、高岚河、古夫河差异显著 ($p < 0.05$)。

2005 ~ 2006 年, 滤食者相对丰度表现为高岚河同香溪河、九冲河、古夫河差异显著 ($p < 0.05$); 收集者相对丰度表现为香溪河同古夫河差异显著 ($p < 0.05$), 九冲河同高岚河和古夫河差异显著 ($p < 0.05$); 捕食者相对丰度于各支流间差异不显著 ($p > 0.05$); 刮食者相对丰度表现为香溪河同高岚河、古夫河差异显著 ($p < 0.05$), 九冲河同高岚河、古夫河差异显著 ($p < 0.05$); 撕食者相对丰度表现为九冲河同香溪河、高岚河差异显著 ($p < 0.05$)。

2006 ~ 2007 年, 滤食者相对丰度表现为香溪河同九冲河差异显著 ($p < 0.05$); 收集者相对丰度表现为总

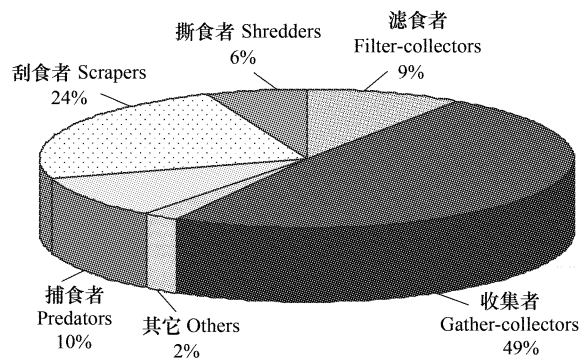


图2 香溪河水系大型底栖动物各功能摄食类群相对丰度
Fig. 2 The relative abundance of the FFGs in Xiangxi River system
GC: 收集者 Gather-collectors; FC: 滤食者 Filter-collectors; SH: 撕食者 Shredders; SC: 刮食者 Scrapers; PR: 捕食者 Predators

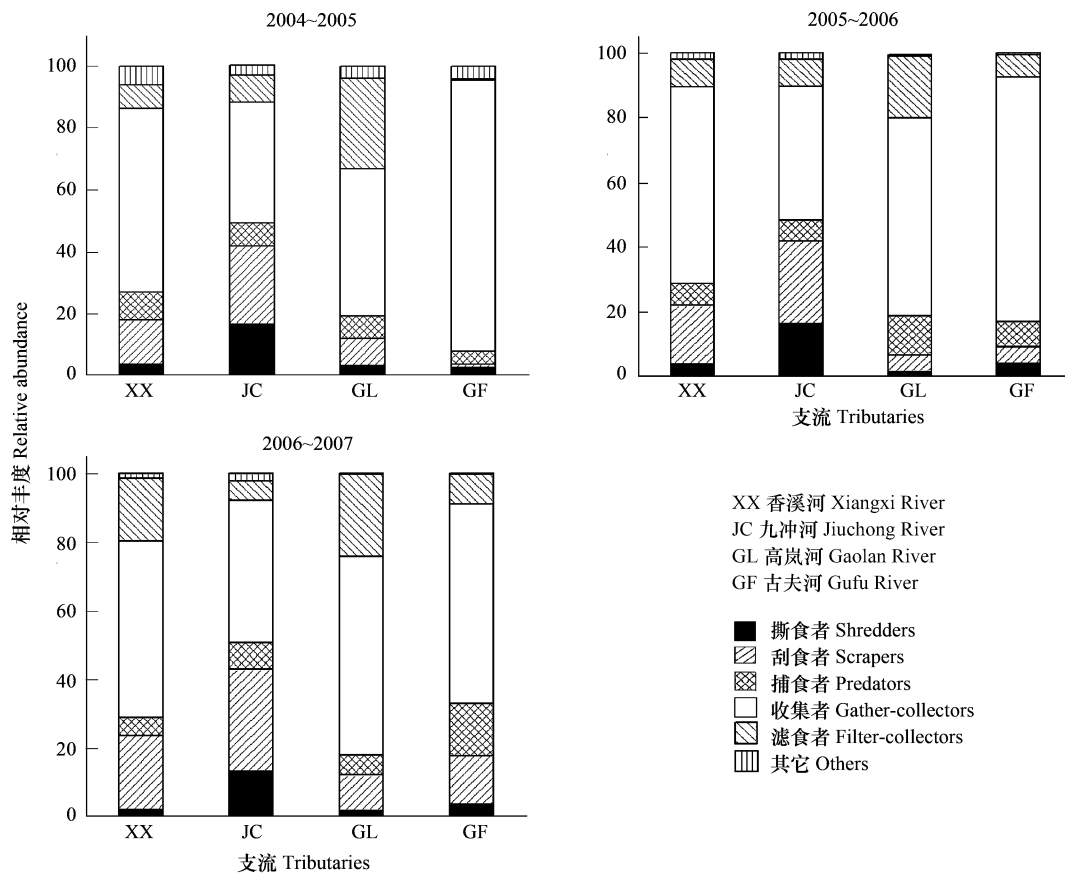


图3 香溪河及其主要支流大型底栖动物功能摄食类群相对丰度

Fig. 3 The relative abundance of macroinvertebrate functional feeding groups among different tributaries

体差异显著($p < 0.05$);捕食者相对丰度表现为香溪河和古夫河差异显著($p < 0.05$);刮食者总体在 0.1 水平上差异显著($p = 0.064$),香溪河和古夫河在 0.1 水平上差异显著($p = 0.074$);撕食者相对丰度表现为九冲河同香溪河、高岚河、古夫河差异显著($p < 0.05$)。

2.2.2 密度的空间分布

对大型底栖动物功能摄食类群密度的空间动态进行方差分析(图 4),结果表明:2004~2005 年,滤食者密度表现为高岚河同香溪河、九冲河差异显著($p < 0.05$);捕食者密度于各条河流间差异均不显著($p < 0.05$);刮食者密度表现为九冲河和高岚河差异显著($p < 0.05$);撕食者密度表现为九冲河同香溪河和古夫河差异显著($p < 0.05$)。

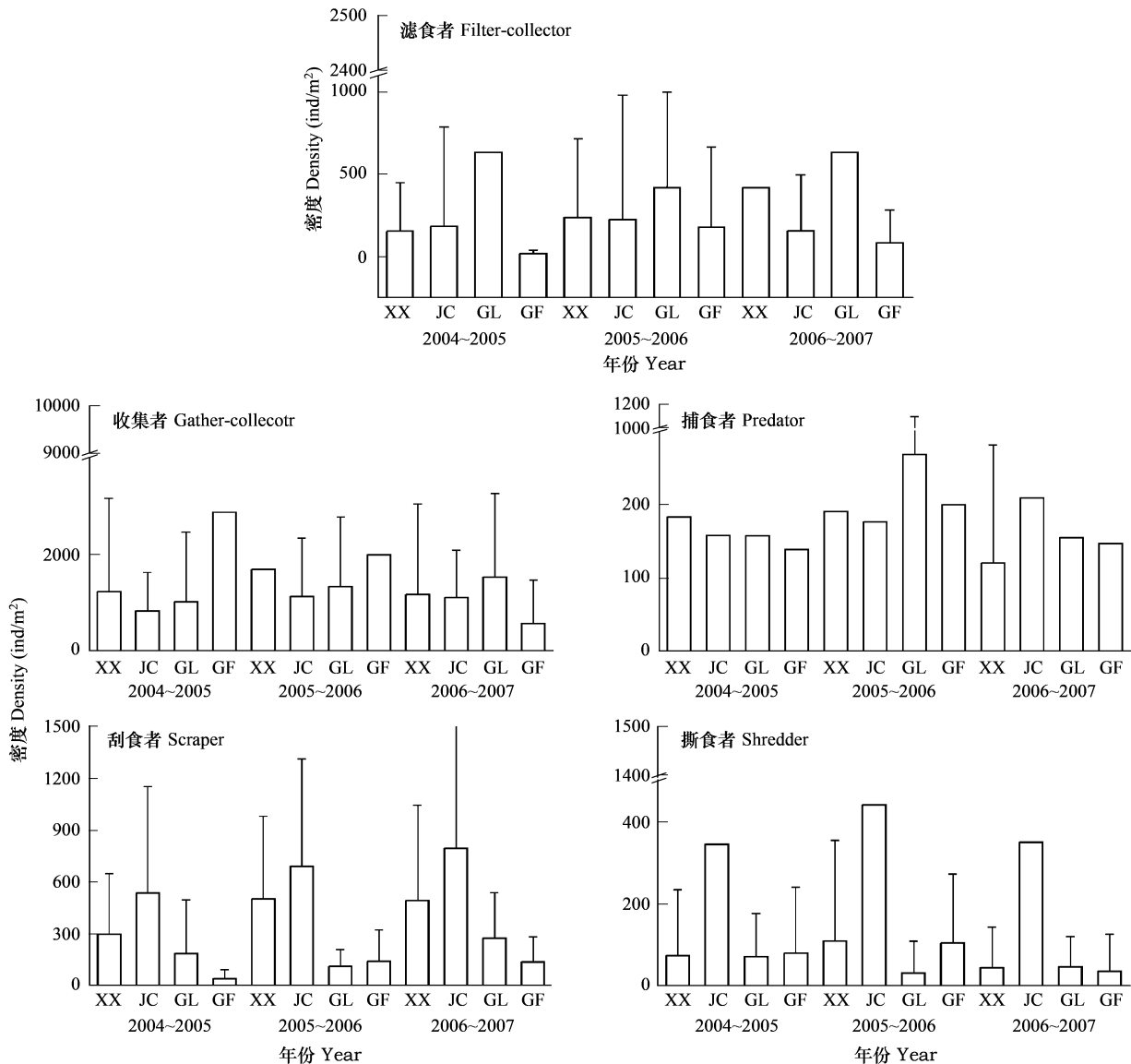


图 4 各周年不同支流间大型底栖动物各功能摄食类群密度

Fig. 4 The density of macroinvertebrate functional feeding groups among Xiangxi River and its major tributaries in different years

2005~2006 年,滤食者、收集者、捕食者在各条河流间差异均不显著($p > 0.05$);刮食者表现为香溪河同高岚河差异显著($p < 0.05$),九冲河同高岚河和古夫河差异显著($p < 0.05$);撕食者表现为九冲河同香溪河和高岚河差异显著($p < 0.05$)。

2006~2007 年,滤食者、收集者、捕食者在各条河流间差异均不显著($p > 0.05$);刮食者密度表现为九冲

河同高岚河和古夫河差异显著($p < 0.05$); 撕食者密度表现为九冲河同香溪河、高岚河、古夫河差异显著($p < 0.05$)。

2.3 功能摄食类群时间动态

2.3.1 各年度相对丰度的比较

对各周年香溪河大型底栖动物功能摄食类群相对丰度的时间动态进行方差分析(图 5), 结果表明: 2004 ~ 2005 年, 撕食者相对丰度表现为夏季与冬季差异显著($p < 0.05$); 刮食者相对丰度于春季和秋季差异显著($p < 0.05$); 捕食者相对丰度表现为秋季与冬季差异显著($p < 0.05$); 收集者表现为夏季同秋季和冬季差异显著($p < 0.05$), 冬季同秋季差异显著($p < 0.05$); 滤食者于 4 个季节间差异不显著($p > 0.05$)。

2005 ~ 2006 年, 撕食者、捕食者、收集者和滤食者相对丰度于各季节间差异均不显著($p > 0.05$); 刮食者于各季节间总体差异显著($p < 0.05$)。

2006 ~ 2007 年, 撕食者相对丰度表现为夏季同秋、冬季差异显著($p < 0.05$), 春季同秋季差异显著($p < 0.05$), 同冬季表现为较大差异性($p = 0.056$); 刮食者、捕食者、收集者和滤食者相对丰度于各季节间差异均不显著($p < 0.05$)。

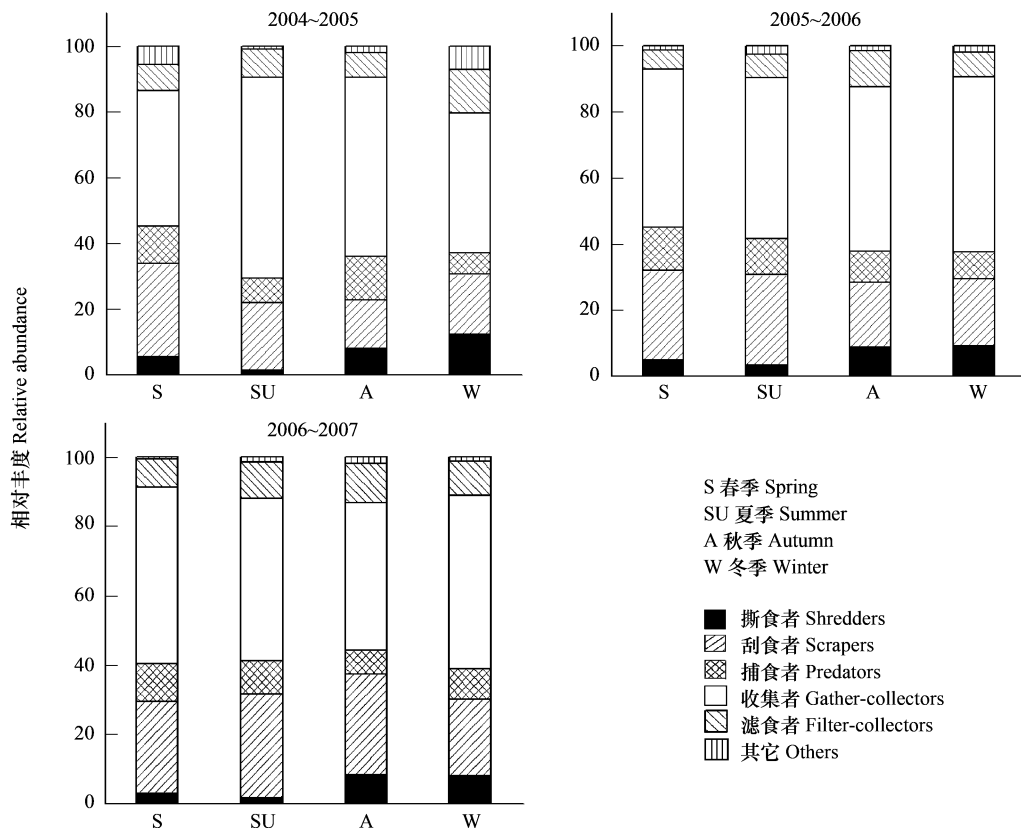


图 5 各年度大型底栖动物各功能摄食类群相对丰度的季节动态

Fig. 5 The relative abundance of macroinvertebrate functional feeding groups among different seasons in different years

2.3.2 各年度密度的比较

对大型底栖动物功能类群密度的时间动态进行方差分析(图 6), 结果表明: 2004 ~ 2005 年, 滤食者表现为冬季同春、夏、秋季差异显著($p < 0.05$); 收集者表现为冬季和夏季差异显著($p < 0.05$); 捕食者表现为夏季同冬季差异显著($p < 0.05$); 刮食者表现为夏季同冬、秋季差异显著($p < 0.05$); 撕食者冬季同夏、秋季差异显著($p < 0.05$)。

2005 ~ 2006 年, 滤食者表现为春季同秋、冬季差异显著($p < 0.05$), 秋季同夏季差异显著($p < 0.05$); 收集

者表现为冬季同春、夏、秋季差异均显著($p < 0.05$);捕食者密度表现为夏季和冬季差异显著($p < 0.05$);刮食者表现为冬季同夏季、秋季差异显著($p < 0.05$),春季同夏季、秋季差异显著($p < 0.05$);撕食者夏季同冬季差异显著($p < 0.05$)。

2006~2007 年,滤食者密度表现为秋、冬季大于春季和夏季($p < 0.05$);收集者、刮食者、捕食者密度于各季节间差异不显著($p > 0.05$);撕食者表现为夏季同秋季和冬季差异显著($p < 0.05$),春季同秋季和冬季差异显著($p < 0.05$)。

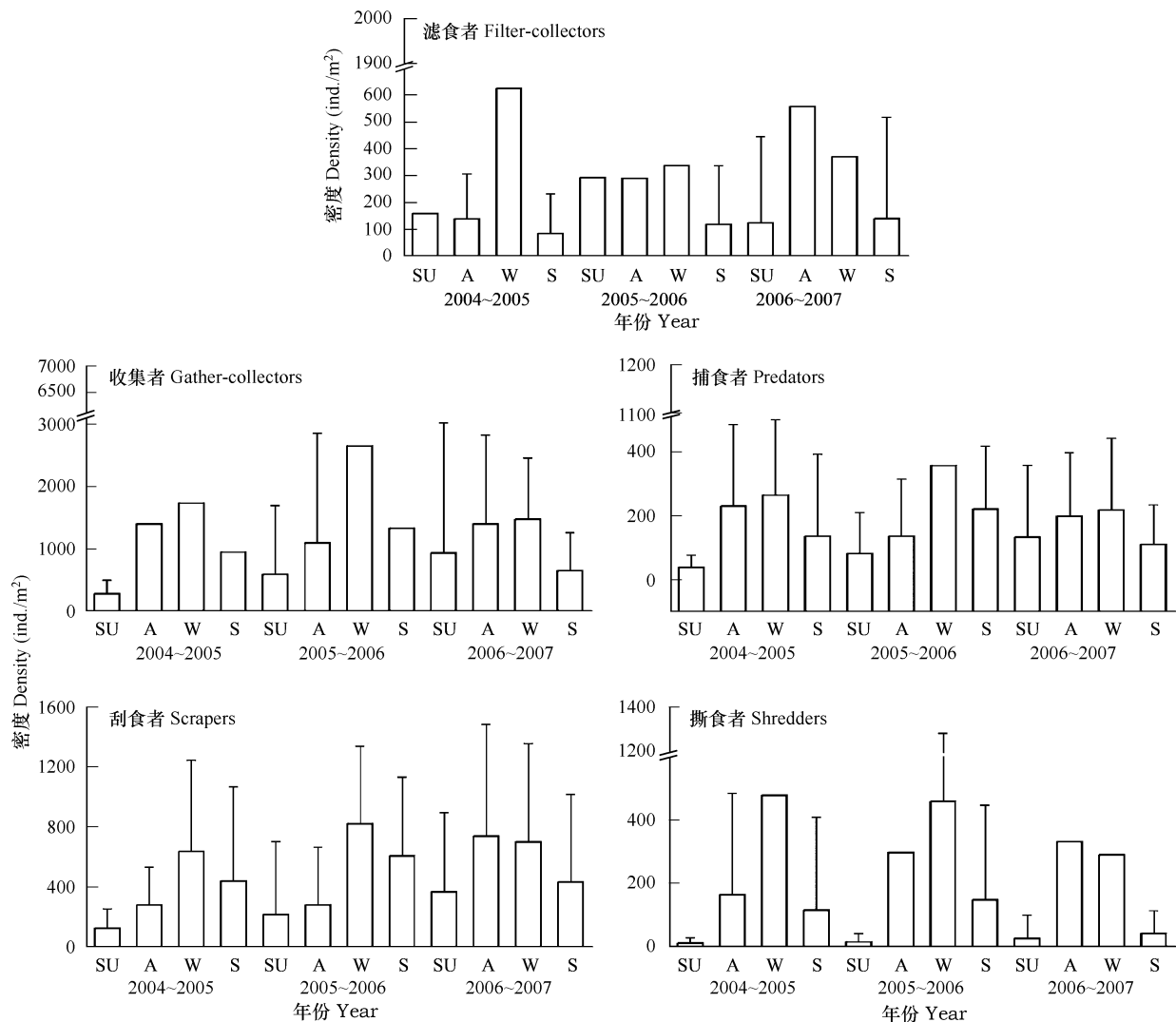


图6 各周年大型底栖动物各功能摄食类群密度的季节动态

Fig. 6 The density of macroinvertebrate functional feeding groups among different seasons in different years

撕食者分布能够反映沿岸带植被状况^[15, 16]和树叶等在河道底部的堆积情况^[17, 18], 本研究中撕食者密度、相对丰度均于九冲河最大, 主要是因为九冲河位于香溪河上游, 河岸带植被覆盖率较高, 河道中枯枝树叶堆积相对较多, 为其提供了足够的食物来源; 在时间序列上, 撕食者相对丰度和密度表现为在秋季和冬季明显高于春季和夏季($p < 0.05$), 主要是因为树木的落叶期主要集中在秋季和冬季。刮食者相对丰度和密度于4条河流间表现出了明显的梯度, 主要是因为对环境变化反应敏感的高翔蜉(*Epeorus* sp.)为该功能类群的主要组成部分, 高翔蜉为九冲河和香溪河的优势类群, 在受人为干扰较为严重的古夫河和高岚河其相对丰度较低; 刮食者相对丰度在各个季节间并未表现出显著的差异性, 但其密度仍表现为冬季要高于其它季节, 主要因为

冬季香溪河水文条件相对稳定,适合藻类生存,为刮食者提供丰富的食物。四节蜉(*Baetis* sp.)属于收集者,致使收集者丰度明显高于其它类群;随着海拔的降低,收集者密度相对丰度具有增大的趋势,主要是下游样点水面宽度大(如古夫河平均 17 m),流速较缓,随流而下的有机碎屑等在此沉积,更能够满足收集者的摄食需求,而九冲河由于位于香溪河上游,河道水流速度较大,有机碎屑较少,不适合收集者生活,因此,收集者相对丰度和密度较小;在时间尺度上,总体而言,收集者相对丰度在各季节间差别不大,但其密度于 2004~2005 和 2005~2006 年均表现为冬季和夏季差异显著($p < 0.05$),除受四节蜉等羽化影响外,水文学特征的变化对其摄食活动的影响也是引起其密度差异的重要原因。滤食者的丰度主要受流速和食物多寡的影响,一般滤食者都有一个最适滤食流速,且细有机颗粒在河道中自上游到下游有增加的趋势;高岚河滤食者密度相对丰度最大,表明相对于其它各支流,高岚河流速等栖境因子更适合滤食者进行取食;在时间尺度上,滤食者密度和相对丰度表现为夏季和冬季差异显著($p < 0.05$),主要是因为冬季食物丰富、流速相对较小,无洪水事件发生,不仅能提供满足更多滤食者生存的食物,还具有适合其摄食的水文学条件。捕食者相对丰度主要受水环境和流速等的影响,香溪河上游河道较窄,坡度较大,捕食者丰度受流速限制,主要适合一些对激流适应性强的襁翅目昆虫生活;下游河道较宽流速较缓,适合捕食者捕食,但受人类活动影响较大,仅适合一些耐受能力相对较强的类群生存(如在为期 3a 的采样中,襁翅目昆虫在古夫河和高岚河均未采集到),总体而言,捕食者在空间尺度上差异不大;在时间尺度上,主要表现为密度于冬季和夏季差异显著($p < 0.05$),主要是因为冬季其它类群密度较大,为其提供了丰富的食物,此外,冬季水文学条件较为稳定,也是其丰度较大的主要原因之一。

2.4 应用基于功能类群的参数对香溪河生态系统进行评价

2.4.1 不同支流间各项参数的比较

通过方差分析就各项参数的空间差异性进行研究(图 7),结果表明:F1 在九冲河和香溪河明显大于高岚河和古夫河($p < 0.05$);F2 在九冲河明显大于香溪河和古夫河($p < 0.05$);F3 在九冲河明显高于其它 3 条河流($p < 0.05$);F4 于 4 条河流间差异不显著($p > 0.05$);F5 在高岚河明显高于其它河流($p < 0.05$);F6 总体表现为于高岚河最大($p < 0.05$);F7、F8 在九冲河明显大于其它河流($p < 0.05$);F9 在九冲河明显高于其它河流($p < 0.05$)。

2.4.2 不同季节间各项参数的比较

对基于功能摄食类群的各项参数的季节动态进行统计(图 8),并进行方差分析,结果表明:F1 表现为冬季明显大于夏季($p < 0.05$);F2 在冬季明显大于其它季节($p < 0.05$),春季明显大于夏季($p < 0.05$);F3 在各季节间差异不显著($p > 0.05$);F4 表现为冬季明显大于春、夏、秋季($p < 0.05$);秋季明显大于夏季($p < 0.05$);F5 表现为冬季明显大于春季和夏季($p < 0.05$);F6 于各季节间差异不显著($p > 0.05$);F7 表现为冬季大于春季和夏季($p < 0.05$);秋季大于夏季($p < 0.05$);F8 在各季节间差异不显著($p < 0.05$);F9 表现为夏季小于秋、冬季节($p < 0.05$)。

上述结果表明,(1)在物质循环方面:底栖动物初级生产力(F1)在九冲河和香溪河明显高于高岚河和古夫河,冬季明显大于夏季;次级生产力(F2)九冲河高于香溪河和古夫河,冬季明显高于其它季节;自养/异养值(F3)九冲河明显高于其它河流,各季节间相差不大;分解能力(F4)在各条河流间无显著差别,冬季明显高于其它季节。(2)物质纵向输送能力:纵向输送能力(F5)高岚河明显高于其它河流,冬季明显大于春季和夏季;相对输送能力(F6)高岚河高于其它河流,各季节间无显著差别。(3)沿岸物质输入:沿岸物质输入量(F7)九冲河大于其它河流,冬季大于其它季节;相对输入量(F8)九冲河大于其它河流,各季节间无显著差别。粗有机颗粒/细有机颗粒(F9)九冲河大于其它河流,秋、冬季高于春、夏季。

2.5 各项参数同环境因子的回归分析

了解不同环境因子对生态系统特征值的影响情况,将各项特征值与水温(Tem)、pH 值(pH)、浊度(Turb)、水深(Dep)、总溶解性固体(TDS)、电导(Cond)、流速(V)、河宽(Wid)、溶解氧(DO)、盐度(Sal)、氨氮($\text{NH}_4\text{-N}$)、亚硝酸盐氮($\text{NO}_2\text{-N}$)、硝酸盐氮($\text{NO}_3\text{-N}$)、总氮(TN)、总磷(TP)、磷酸盐($\text{PO}_4\text{-P}$)、钙离子

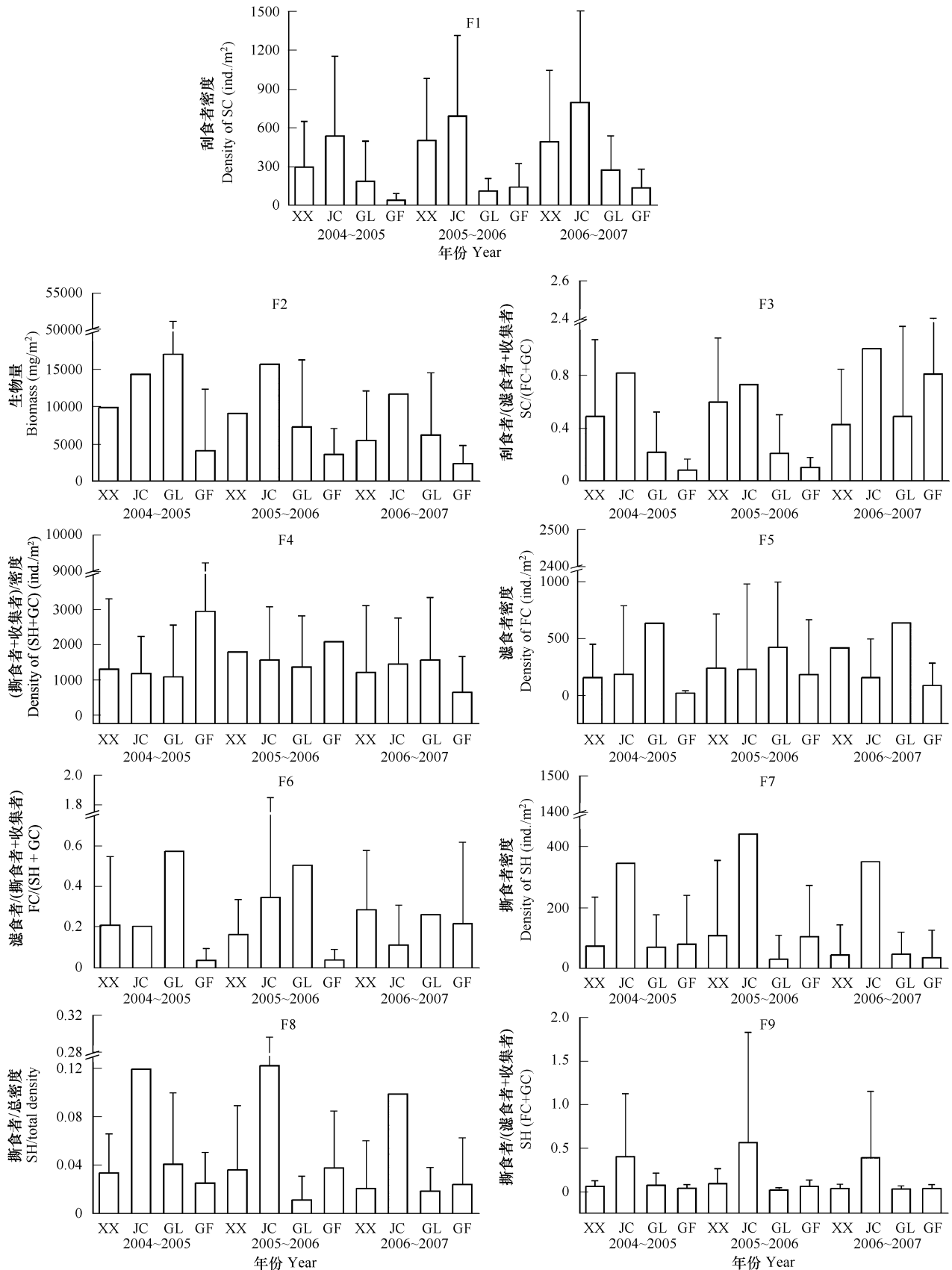


图7 香溪河水系主要支流生态系统特征值

Fig. 7 The ecosystem attributes in main tributaries of Xiangxi River

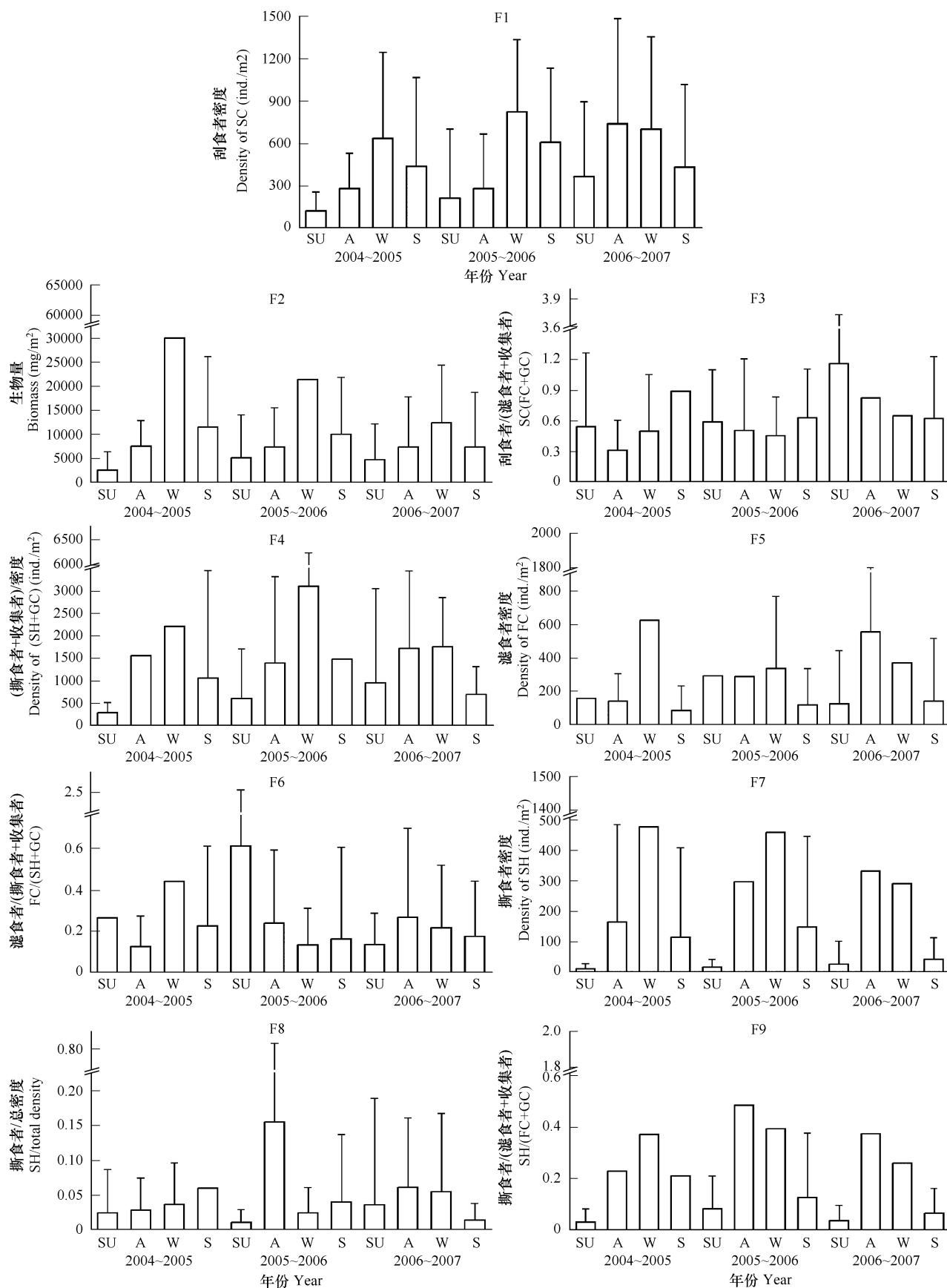


图8 香溪河水系生态系统特征值的季节变化

Fig. 8 The ecosystem attributes of Xiangxi River among different seasons

(Ca^{2+})、氯离子(Cl^-)、硬度(Hardness)、碱度(Alk)、化学需氧量(COD)和二氧化硅(SiO_2)等 22 个环境参数进行逐步回归分析(表 2)。

表 2 生态系统特征值与环境参数的逐步回归分析
Table 2 The coefficient of stepwise regression analysis between metals and every biological parameters

	物质循环 Material cycling				纵向输送 Longitudinal transport		沿岸物质输入 Lateral input		粗、细有机 颗粒输入 CPOM input/ FPOM input
	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9
V	-2326.2	11381.3	—	-2611.8	—	—	—	—	—
Tem	—	—	—	—	—	—	-62.3	-0.011	-0.057
Dep	—	—	—	—	—	—	—	0.002	—
Cond	—	-1045.1	—	—	—	—	—	—	—
Turb	—	71.8	—	—	—	—	—	—	—
SiO_2	—	—	-0.1	—	90.6	0.059	—	-0.025	-0.159
COD	—	—	—	—	—	0.066	—	—	—
NO_3	—	—	—	—	—	—	—	—	—
TN	—	-7942.7	—	—	—	—	—	—	—
TP	—	—	—	—	—	—	—	-1.686	—
常数 Content	3686.4	39525.6	1.1	4247.2	-221.9	-0.3	1067.1	0.3	1.9
R^2	0.095	0.356	0.095	0.108	0.092	0.265	0.129	0.289	0.126
F	7.8	9.8	7.7	9.0	7.5	13.2	11.0	7.2	5.3
p	0.070	0.000	0.070	0.004	0.008	0.000	0.001	0.000	0.007

未列入环境参数表示与所有生态系统特征值(F1 ~ F9)相关性均不显著 The environmental factors not in the table are no statistical significance with all ecosystem attributes (F1 ~ F9); “—”表示不具有统计学意义 “—”for no statistical significance

通过各项特征值与环境因子的相关分析,找出相关显著的因子,结果表明:初级生产力(F1)受流速影响显著($p < 0.05$);次级生产力(F2)受流速、电导、浊度、总氮影响显著($p < 0.05$);自养作用/异养作用(F3)受二氧化硅影响显著($p < 0.05$);分解能力(F4)受流速影响显著($p < 0.05$);纵向输送能力(F5)受二氧化硅影响显著($p < 0.05$);相对纵向输送能力(F6)受二氧化硅、化学需氧量影响显著($p < 0.05$);沿岸物质输入量(F7)受水温影响显著($p < 0.05$);沿岸物质相对输入量(F8)受水温、水深、二氧化硅、总磷影响显著($p < 0.05$);粗有机颗粒/细有机颗粒(F9)受水温、二氧化硅影响显著($p < 0.05$)。

上述结果表明,流速、电导、浊度、总氮、二氧化硅对香溪河河流生态系统物质循环具有指示作用;二氧化硅和化学需氧量对物质输送能力具有指示作用;水温、水深、二氧化硅、总磷可作为沿岸物质输入量的指标;水温、二氧化硅可作为评估河道中粗、细有机颗粒的比例的重要指标。河道中二氧化硅的含量受其地貌学及水文学特征影响,本研究中二氧化硅是重要的影响大型底栖动物分布的环境因子;在对香溪河着生藻类的研究中,发现二氧化硅对着生藻类的生长有重要影响^[19],着生藻类是河流生态系统中重要的初级生产者,是刮食者的主要食物来源,可以通过上行效应^[20]进一步影响大型底栖动物的分布。

3 结论

香溪河大型底栖动物以收集者占绝对优势,相对丰度为 49%,其次为刮食者,相对丰度为 24.0%、捕食者、滤食者、撕食者相对丰度较小,分别为 10%、9%、6%。

通过对底栖动物功能摄食类群时空动态的分析可知,各功能摄食类群能够反映基于时空序列的各资源位点的生态特征,其分布特征明显受时空资源位的限制。

对基于功能摄食类群的各项指标进行分析,结果表明,香溪河物质循环能力在九冲河明显高于其它河流,在冬季高于其它季节;物质输送能力以高岚河最高,在时间方面以冬季明显高于其它季节;两岸物质的输入量

表现为九冲河高于其它河流,冬季高于其它季节;粗有机颗粒/细有机颗粒在九冲河高于其它河流,在冬季高于其它季节。

回归分析表明,流速、电导、浊度、总氮、二氧化硅对香溪河河流生态系统物质循环具有指示作用;二氧化硅和化学需氧量对物质输送能力具有指示作用;水温、水深、二氧化硅、总磷可作为沿岸物质输入量的指标;水温、二氧化硅可作为评估河道中粗、细有机颗粒比例的重要指标。

总之,基于底栖动物功能摄食类群的各项指标(F1 ~ F9)同环境因子间的联系是非常紧密的。将基于底栖动物功能摄食类群的河流生态系统评价体系发展成为一个有效的评价工具,并应用于河流生态系统完整性评价体系是十分可行的。目前基于功能摄食类群的水域生态系统评价体系的研究才刚刚起步,该体系的完善需要更多学者的关注和努力。

References:

- [1] Cai Q H. Ecological consideration of Chinese water pollution comprehensive management. *Environmental Protection*, 2007, 14: 46—48.
- [2] Wen F B, Han Q W, Xu J X, Hu C H, Chen J Y, Li G Y, Dong Z R, Wang G Q. Definition and connotation of rivers health. *Advances in Water Science*, 2007, 18(1): 140—150.
- [3] Cummins K W. Structure and function of stream ecosystems. *Bio Science*, 1974, 24: 631—641.
- [4] 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 (second edition). Washington, DC: U. S. Environmental Protection Agency, Office of Water, 1999.
- [5] Bode R W, Novak M A, Abele L E. Quality assurance work plan for biology stream monitoring in New York state. NYS department of environmental conservation, Albany, NY, 2002.
- [6] He Z H. *Freshwater Ecology*. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [7] Ma T W, Huang Q H, Wang H, Wang Z J, Wang C X, Huang S B. The selection of benthic macroinvertebrate-based multimetrics and preliminary establishment of biocriteria for the bioassessment of the water quality of Taihu Lake. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28 (03): 1192—1200.
- [8] Barbor 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. Environmental protection Agency, Washington DC, 2001.
- [9] Huang Z L, ed. Water quality prediction and water environmental carrying capacity calculation for Three Gorges Reservoir. Beijing: China Waterpower Press, 2006.
- [10] Epler J H. Identification manual for the larval chironomidae (Diptera) of North and South Carolina: EPA Grant#X984170-97. 2001.
- [11] Morse J C, Yang L F, Tian L X. Aquatic insect of China useful for monitoring water quality. Nanjing: Hehai University Press, 1994.
- [12] Hang X F, ed. Investigate and analyzation. of Lake Ecology. Beijing: Standards Press of China, 2000.
- [13] State environmental protection administration of China. Standards for surface water assay and alyzation. Beijing: Environmental Sciences Press of China, 1989.
- [14] Yoshinura C, Tockner K, Omura T, Moog O. Species diversity and functional assessment of maroinvertebrate communities in Austrian rivers. *Limnology*, 2006, 7: 63—74.
- [15] Molles M C. Trichopteran communities of streams associated with aspen and conifer forests: long-term structural change. *Ecology*, 1982, 63: 1—6.
- [16] Cummins K W, Wilzbach M A, Gates D M, Perry J B and Taliaferro W B. Shredders and riparian vegetation. *Bio Science*, 1989, 39: 24—30.
- [17] Dobson M. Microhabitat as a determinant of diversity: stream invertebrates colonizing leaf packs. *Freshwater Biology*, 1994, 32: 565—572.
- [18] Haapala A, Muotka T and Laasonen P. Distribution of benthic macroinvertebrates and leaf litter in relation to streambed retentivity: implications for headwater stream restoration. *Boreal Environmental Research*, 2003, 8: 19—30.
- [19] Tang T, Cai Q H, Liu R Q, Xie Z C. Distribution of ephilitic algae in the Xiangxi River system and their relationships with environment factors. *Journal of Freshwater Ecology*, 2002, 17(3): 345—352.
- [20] Tuchman N C, Wetzel S T, Rier S T, Wahtera K A and Teeri J A. Elevated atmospheric CO₂ lowers leaf litter nutritional quality for stream ecosystem food webs. *Global Change Biology*, 2002, 8(2): 163—170.

参考文献:

- [1] 蔡庆华. 中国水污染综合治理的生态学思考. *环境保护*, 2007, 14: 46~48.
- [2] 文伏波, 韩其为, 许炯心, 胡春宏, 陈吉余, 李国英, 董哲仁, 王光谦. 河流健康的定义与内涵. *水科学进展*, 2007, 18(1): 140~150.
- [6] 何志辉. *淡水生态学*. 北京: 中国农业出版社出版, 2000.
- [7] 马陶武, 黄清辉, 王海, 王子健, 王春霞, 黄圣彪. 太湖水质评价中底栖动物综合生物指数的筛选及生物基准的确立. *生态学报*, 2008, 28 (03): 1192~1200.
- [9] 黄真理主编. 三峡水库水质预测和环境容量计算. 北京: 中国水利出版社, 2006.
- [12] 黄祥飞主编. 湖泊生态调查观测与分析. 北京: 中国标准出版社, 2000.
- [13] 中国环境保护局. 地表水检测和分析标准. 北京: 中国环境科学出版社, 1989.