

ISSN 1000-0933  
CN 11-2031/Q

# 生态学报

## Acta Ecologica Sinica



第32卷 第9期 Vol.32 No.9 **2012**

中国生态学学会  
中国科学院生态环境研究中心  
科学出版社

主办  
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

# 生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 32 卷 第 9 期

2012 年 5 月 (半月刊)

## 目 次

不同土地覆被格局情景下多种生态系统服务的响应与权衡——以雅砻江二滩水利枢纽为例·····	葛 菁, 吴 楠, 高吉喜, 等 (2629)
放牧对小嵩草甸生物量及不同植物类群生长率和补偿效应的影响·····	董全民, 赵新全, 马玉寿, 等 (2640)
象山港日本对虾增殖放流的效果评价·····	姜亚洲, 凌建忠, 林 楠, 等 (2651)
城市景观破碎化格局与城市化及社会经济发展水平的关系——以北京城区为例·····	仇江啸, 王效科, 逯 非, 等 (2659)
江河源区高寒草甸退化序列上“秃斑”连通效应的元胞自动机模拟·····	李学玲, 林慧龙 (2670)
铁西区城市改造过程中建筑景观的演变规律·····	张培峰, 胡远满, 熊在平, 等 (2681)
商洛低山丘陵区农林复合生态系统光能竞争与生产力·····	彭晓邦, 张硕新 (2692)
基于生物量因子的山西省森林生态系统服务功能评估·····	刘 勇, 李晋昌, 杨永刚 (2699)
不同沙源供给条件下柽柳灌丛与沙堆形态的互馈关系——以策勒绿洲沙漠过渡带为例·····	杨 帆, 王雪芹, 杨东亮, 等 (2707)
桂西北喀斯特区原生林与次生林凋落叶降解和养分释放·····	曾昭霞, 王克林, 曾馥平, 等 (2720)
江西九连山亚热带常绿阔叶林优势种空间分布格局·····	范 娟, 赵秀海, 汪金松, 等 (2729)
秦岭山地锐齿栎次生林幼苗更新特征·····	康 冰, 王得祥, 李 刚, 等 (2738)
极端干旱环境下的胡杨木质部水力特征·····	木巴热克·阿尤普, 陈亚宁, 等 (2748)
红池坝草地常见物种叶片性状沿海拔梯度的响应特征·····	宋璐璐, 樊江文, 吴绍洪, 等 (2759)
改变 C 源输入对油松人工林土壤呼吸的影响·····	汪金松, 赵秀海, 张春雨, 等 (2768)
啮齿动物捕食压力下生境类型和覆盖处理对辽东栎种子命运的影响·····	闫兴富, 周立彪, 刘建利 (2778)
上海闵行区园林鸟类群落嵌套结构·····	王本耀, 王小明, 王天厚, 等 (2788)
胜利河连续系统中蜉蝣优势种的生产量动态和营养基础·····	邓 山, 叶才伟, 王利肖, 等 (2796)
虾池清塘排出物沉积厚度对老鼠簕幼苗的影响·····	李 婷, 叶 勇 (2810)
澳大利亚亚热带不同森林土壤微生物群落对碳源的利用·····	鲁顺保, 郭晓敏, 芮亦超, 等 (2819)
镜泊湖岩溶台地不同植被类型土壤微生物群落特征·····	黄元元, 曲来叶, 曲秀春, 等 (2827)
浮床空心菜对氮循环细菌数量与分布和氮素净化效果的影响·····	唐莹莹, 李秀珍, 周元清, 等 (2837)
促分解菌剂对还田玉米秸秆的分解效果及土壤微生物的影响·····	李培培, 张冬冬, 王小娟, 等 (2847)
秸秆还田与全膜双垄集雨沟播耦合对半干旱黄土高原玉米产量和土壤有机碳库的影响·····	吴荣美, 王永鹏, 李凤民, 等 (2855)
赣江流域底泥中有机氯农药残留特征及空间分布·····	刘小真, 赵 慈, 梁 越, 等 (2863)
2009 年徽州稻区白背飞虱种群消长及虫源性质·····	刁永刚, 杨海博, 瞿钰锋, 等 (2872)
木鳖子提取物对朱砂叶螨的触杀活性·····	郭辉力, 师光禄, 贾良曦, 等 (2883)
冬小麦气孔臭氧通量拟合及通量产量关系的比较·····	佟 磊, 冯宗炜, 苏德·毕力格, 等 (2890)
<b>专论与综述</b>	
基于全球净初级生产力的能源足迹计算方法·····	方 恺, 董德明, 林 卓, 等 (2900)
灵长类社会玩耍的行为模式、影响因素及其功能风险·····	王晓卫, 赵海涛, 齐晓光, 等 (2910)
<b>问题讨论</b>	
中国伐木制品碳储量时空差异分析·····	伦 飞, 李文华, 王 震, 等 (2918)
<b>研究简报</b>	
森林自然更新过程中地上氮贮量与生物量异速生长的关系·····	程栋梁, 钟全林, 林茂兹, 等 (2929)
连作对芝麻根际土壤微生物群落的影响·····	华菊玲, 刘光荣, 黄劲松 (2936)
刈割对外来入侵植物黄顶菊的生长、气体交换和荧光的影响·····	王楠楠, 皇甫超河, 陈冬青, 等 (2943)
不同蔬菜种植方式对土壤固碳速率的影响·····	刘 杨, 于东升, 史学正, 等 (2953)
巢湖崩岸湖滨基质-水文-生物一体化修复····· 陈云峰, 张彦辉, 郑西强 (2960)	

期刊基本参数: CN 11-2031/Q \* 1981 \* m \* 16 \* 336 \* zh \* P \* ¥ 70.00 \* 1510 \* 36 \* 2012-05



**封面图说:** 在交配的雨蛙——雨蛙为两栖动物, 世界上种类达 250 种之多, 分布极广。中国的雨蛙仅有 9 种, 除西部一些省份外, 其他各省(区)均有分布。雨蛙体形较小背面皮肤光滑, 往往雄性绿色, 雌性褐色, 其指、趾末端多膨大成吸盘, 便于吸附攀爬。多生活在灌丛、芦苇、高秆作物上, 或塘边、稻田及其附近的杂草上。白天匍匐在叶片上, 黄昏或黎明频繁活动, 捕食能力极强, 主要以昆虫为食。特别是在下雨以后, 常常 1 只雨蛙先叫几声, 然后众蛙齐鸣, 声音响亮, 每年在四、五月份夜间发情交配。

**彩图提供:** 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201103250376

邓山, 叶才伟, 王利肖, 李晓宇, 闫云君. 胜利河连续系统中蜉蝣优势种的生产量动态和营养基础. 生态学报, 2012, 32(9): 2796-2809.

Deng S, Ye C W, Wang L X, Li X Y, Yan Y J. Production dynamics and trophic basis of three dominant mayflies in the continuum of Shenglihe Stream in the Bahe River Basin. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(9): 2796-2809.

## 胜利河连续系统中蜉蝣优势种的 生产量动态和营养基础

邓 山, 叶才伟, 王利肖, 李晓宇, 闫云君\*

(华中科技大学生命科学与技术学院, 武汉 430074)

**摘要:**大型底栖动物在河流生态系统中发挥着重要作用, 2009 年 3 月至 2010 年 3 月间对长江中游支流巴河流域的胜利河大型底栖动物群落进行 1 周年的调查研究。结果表明, 主要蜉蝣优势种扁蜉一种、等蜉一种和红斑蜉的生活史为 3 代/a、3 代/a 和 2 代/a。现存量呈现出 1—3 级河流增加、4 级又较 3 级有所下降的趋势。采用体长频率法( 实则 size-frequency method) 测算的周年生产量分别为: 扁蜉,  $200.13 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,  $P/B$  为 23.69; 等蜉,  $82.06 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,  $P/B$  为 18.12; 红斑蜉,  $12.30 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,  $P/B$  为 8.78。3 种蜉蝣生产量时间动态与现存量较一致, 但彼此各不相同; 扁蜉日均产量于 2009 年 3 月在二级河流中达到最大( $363.56 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ), 等蜉于 2010 年 3 月在三级河流中到达最大( $282.76 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ), 而红斑蜉于 2009 年 3 月在一级河流中到达最大( $33.36 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ )。生产量的营养基础分析结果表明, 3 种蜉蝣前肠内含物中无形态碎屑均占最大比例(41.14%—74.37%), 其对生产量的贡献率也最大(46.67%—77.15%), 其它食物类型均相对较小, 且总体上与作者在黑竹冲和叹气沟的研究结果存在一定差异, 可能与这些溪流自身环境和地区分布有关。

**关键词:**大型底栖动物; 生产量; 蜉蝣; 优势种; 胜利河

## Production dynamics and trophic basis of three dominant mayflies in the continuum of Shenglihe Stream in the Bahe River Basin

DENG Shan, YE Caiwei, WANG Lixiao, LI Xiaoyu, YAN Yunjun\*

College of Life Science and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China

**Abstract:** The macrozoobenthos community plays an important role in material cycling and energy flow in riverine ecosystems. During the period of March 2009 to March 2010, an investigation was conducted on the life cycle, production dynamics and trophic relationships of the dominant mayfly species in first-order to fourth-order rivers — a continuum of Shenglihe Stream in the upper reaches of the Bahe River, a main branch of the Yangtze River. According to the diversity of micro-habitats, from the upper to the lower reaches of Shenglihe Stream, 12 types of habitats were chosen for quantitative sample collection. At each station, two samples were taken with a 250  $\mu\text{m}$ , D-frame kick net or a Surber net, and the samples were sieved with a 250  $\mu\text{m}$  net and sorted in a porcelain dish without magnification. The specimens were kept in 10% formalin for later processing. The life cycles of the three dominant mayflies, *Heptagenia* sp., *Isonychia* sp., *Ephemera rufomaculata* Zhou & Zheng, 2003, were analyzed by their monthly size-class frequency distribution and their cohort and annual production were estimated by the size-frequency method. The results showed that *Heptagenia* sp. and *Isonychia* sp. appeared to develop in 3 generations per year, while *E. rufomaculata* had 2 generations a year. Their standing stocks exhibited a rough trend of increase from the first- to third-order rivers, then a little decrease in the fourth-

基金项目: 国家自然科学基金(30870427)

收稿日期: 2011-03-25; 修订日期: 2011-08-01

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yanyunjun@tom.com



order river. The estimated mean annual production of *Heptagenia* sp. was  $200.13 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$  and the mean annual  $P/B$  was 23.69; those of *Isonychia* sp. were  $82.06 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$  and 18.12; while those of *E. rufomaculata* were  $12.30 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$  and 8.78, respectively. Production dynamics of the three mayflies were in rough agreement with those of their biomasses, but differed significantly from each other. The daily production rate of *Heptagenia* sp. reached its peak ( $363.56 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ) in the second-order river in March, 2009, that of *Isonychia* sp. had its maximum value of  $282.76 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$  in the third-order river in March, 2010, while the maximal daily production rate ( $33.36 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ) of *E. rufomaculata* appeared in the first-order river in March, 2009. By analyzing their foregut contents, the proportions of six type of diet (amorphous detritus, animal materials, vascular plant detritus, filamentous algae and diatoms) for *Heptagenia* sp. were 74.37%, 4.19%, 17.11%, 4.29%, 0.04%, respectively, and the contribution rates to the secondary production were 77.15%, 11.27%, 6.57%, 4.95%, 0.04%; for *Isonychia* sp., the proportions of its diets were 65.64%, 6.17%, 23.04%, 0.54%, 4.53%, 0.09%, respectively, and their contribution rates were 68.16%, 16.61%, 8.86%, 1.03%, 5.23% and 0.10%; while for *E. rufomaculata*, the proportions were 41.14%, 5.96%, 38.04%, 1.34%, 11.21%, 2.31%, respectively, and their contribution rates were 46.67%, 17.52%, 15.98%, 2.81%, 14.13% and 2.91%. The above results were different to some extent from our previous reports in Hezhuchong Stream, a second-order river of Hangjiang River and in Tanqigou Stream, a second-order river in upper reach of Changjiang River. The probable reasons resulted from the different environments and distribution regions.

**Key Words:** macrozoobenthos; production; mayfly; dominant species; Shenglihe Stream

大型底栖动物是河流生态系统中最重要生态类群之一,在水底起着加速碎屑分解,促进泥水界面物质交换和水体自净等重要生态作用,是河流生态系统物质循环和能量代谢最为重要的环节,也是了解河流生态系统结构和功能的关键类群。此外,底栖动物具有生命周期相对较长,行动缓慢,物种丰富,且不同种类底栖动物对环境条件的适应性和对污染等不利因素的耐受力及敏感程度不同,已作为重要的指示生物广泛应用于水质及环境监测上,起着水下哨兵的作用<sup>[1]</sup>。目前,河流大型底栖动物群落结构与功能已成为生态研究的热点领域之一<sup>[2]</sup>。而我国,河流的生态学研究严重落后于国际水平,目前仅有少许对河流功能研究的报道,尚未涉及河流连续系统的生态功能研究<sup>[3-5]</sup>。

蜉蝣目昆虫广泛存在于河流生态系统中,在河流生态系统的物质循环和能量流动中起着重要作用<sup>[1-2]</sup>。目前有关该类群的研究工作则多见于国外报道,国内的有关工作主要集中在分类学和水质监测方面<sup>[6]</sup>,而有关蜉蝣在河流生态系统中的生态功能及营养动态鲜见报道。由于蜉蝣是河流生态系统食物链中极为重要的环节,对维系群落食物网的复杂性具有十分重要的作用。因此,研究蜉蝣类群的生态学功能对了解和掌握我国河流生态系统的结构与功能特点具有重要的意义。为此,作者于2009年3月至2010年3月间对长江中游主要支流巴河上游的胜利河连续系统中的大型底栖动物群落结构进行了为期1a的系统调查与研究,报道3种优势种蜉蝣的生产量动态和营养基础,可为考察其在生态系统中的物质和能量转换作用及评价其生态功能大小和对下一营养级的物质贡献能力提供依据。

## 1 研究方法

### 1.1 采集点和采样时间

胜利河(115°27'E, 31°08'N)是长江中游主要支流巴河上游的一条支流,位于湖北省罗田县胜利镇境内,流域面积约400 km<sup>2</sup>。流域地区冬干(冷)夏湿(热),为典型亚热带季风气候,雨季一般自4月开始,9月底或10月初结束。年日照时数超过2047 h,年均气温15.5℃,极端最高温度44℃,最低气温-14℃,年均降水量1330 mm。胜利河黄沙、铁矿资源蕴藏丰富,淡水资源充沛,河流两岸为山脉,森林覆盖率高,沿岸有农田、林地和居民居住,尚未建设工业设施。

根据胜利河支流的不同级别(1—4级)、水流速度、河宽、底质、水生植物以及河流两岸的不同环境等因

素,从上游至下游选择了 12 个采样点,如图 1 所示。1 站(S1),河边生长较为茂密的杂草和灌木,河面窄,水流极为缓慢,河底石头上有青苔,底部有少量腐殖质,秋冬季节以泥沙为主;2 站(S2),水流较缓慢,河面宽 2 m 左右,两边主要是乔木,河底主要是大的鹅卵石,有一些腐殖质存在,秋冬季节以泥沙为主;3 站(S3),位于水库下游的出口处,河边多杂草,河底是布满了苔藓的石头,水面较窄,水流较急;4 站(S4)河面较宽,水流平缓,水较深,河边较开阔,河底布满细沙和石头;5 站(S5)河流两边多杂草,河底多小石子,河面较窄,水里面可能含有铁矿,石头为红褐色;6 站(S6)河边较开阔,河面窄,河底主要是腐殖质,水流非常缓慢;7 站(S7)河流两边有较多的灌木,河底主要是白色的粗沙,水流缓慢;8 站(S8)位于两条河流的交汇处,河边多杂草,水流较急,河底主要是小石子;9 站(S9)位于一堰塘的下游,水流较急,河底多石头,河边多杂草;10 站(S10)位于两条三级河流的交汇处,水流急,河边有少量杂草,河中间多巨石,河底以黄沙为主;11 站(S11)水流很急,河底主要为鹅卵石和细沙,河边是沙滩;12 站(S12)位于一大桥下面,河水冲积形成水洼,水流平缓,河底主要是细沙和腐殖质,河岸有居民居住。

以上各站点分布于不同级别的河流里,其中 S1、S6 位于一级河流中,S2、S5、S7 位于二级河流中,S3、S4、S8、S9 位于三级河流中,S10、S11、S12 位于四级河流中。

采样时间一般为每月 5 日,为期 1a,即 2009 年 4 月—2010 年 3 月。

## 1.2 河流的理化性质

胜利河的理化性质见表 1。由于胜利河的各个采样点理化性质在 1 周年内变化不大,不存在显著性差异,故在表 1 中列出理化性质的周年平均值。根据《地表水环境质量标准基本项目标准限值》(GB3838—2002),可判断该河流水质为 II 类水。

表 1 胜利河的理化性质(平均值±SE)

Table 1 Main physical and chemical characteristics of Shenglihe Stream

pH Value	悬浮物 Suspended particulates /(mg/L)	总磷 Total P /(mg/L)	总氮 Total N /(mg/L)	氨氮 NH <sub>4</sub> -N /(mg/L)	亚硝酸盐氮 NO <sub>2</sub> -N /(mg/L)	硝酸盐氮 NO <sub>3</sub> -N /(mg/L)
7.13±0.10	23.23±2.42	0.10±0.007	1.17±0.06	0.66±0.047	0.005±0.0005	0.18±0.01
溶解氧 Dissolved oxygen /(mg/L)	高锰酸盐指数 KMnO <sub>4</sub> index	COD /(mg/L)	Ca <sup>2+</sup> /(mg/L)	Cl <sup>-</sup> /(mg/L)	硬度 Hardness of water /(mg/L)	
5.90±0.10	7.20±0.40	29.13±1.45	53.58±5.48	23.56±1.42	95±6.22	

## 1.3 标本采集及处理

定量采集从 2009 年 3 月到 2010 年 3 月,基本为每月采样 1 次,但冬季为 3 月采集 2 次,洪水季节也有所调整,共采了 10 次样本。采样使用 60 目的 D 型网或 Surber 网,每个采样点面积大约为 30 cm×30 cm,每样点 1 次,3 个重复。样品经 60 目铜筛筛洗后,剩余物带回实验室,置于白磁盘活体挑选,标本以 10% 福尔马林固定保存。标本经鉴定、计数和称重后,换算成每平方米的含量。底栖动物鉴定工作参考相关文献<sup>[7-8]</sup>。

## 1.4 现存量的计算

计数和测量每月采集到的蜉蝣优势种的个体数、体长,挑选出足够数量的不同体长个体,测量其体重,建

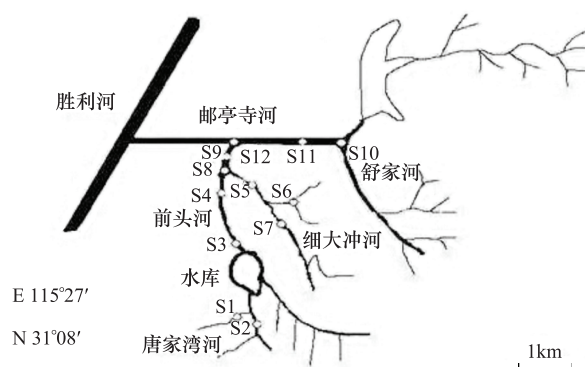


图 1 胜利河及采样点分布

Fig. 1 Distribution of sampling sites at Shenglihe stream

立体长和体重关系回归方程,再由该方程得到各物种单个个体的体重,求得各优势种某月的生物量。体长体重关系的线性方程: $\lg W = \lg a + b \lg L$ 。式中, $W$  是体重, $L$  是体长。

### 1.5 生活史

选择适当的体长分组,根据各优势种逐月周年的体长频率分布变化,并结合种群的密度变化、羽化期分布等,推知生活史,确定 1 周年生活史的代数。运用 Excel 2003 处理所有的数据,Original 7.5 软件作图。

### 1.6 周年生产量

测量大型底栖动物个体的体长,划分一定的体长组,由体长体重回归关系方程得到每组个体的体重,然后求其平均值。生产量采用体长频率法测算<sup>[9-10]</sup>。同龄群生产量乘以周年生活史的代数,即为周年生产量,并计算周年  $P/B$  系数。

### 1.7 生产量动态

计算物种的  $P/B$  (生产量/生物量) 系数、物种的日均产量,根据各时段的生物量和日均产量,得到生产量动态。该方法由 Benke 和 Wallace<sup>[11]</sup> 于 1997 年提出。

### 1.8 营养基础分析

生产量的营养基础分析,依照 Benke 与 Wallace 的方法<sup>[11]</sup>,选取一定数量的各个月份采集到的标本,计算肠内含物所占比例,并在考虑各类食物同化率的基础上,推算其对生产量的贡献率大小。

## 2 结果

### 2.1 胜利河蜉蝣优势种的种群动态

根据 Bunn 将相对丰度大于 5% 的类群定为优势种<sup>[12]</sup>,胜利河蜉蝣的优势种为扁蜉一种 (*Heptagenia* sp.)、等蜉一种 (*Isonychia* sp.)、红斑蜉 (*Ephemera rufamaculata*) 3 种。以下是各优势种的现存量动态。

#### 2.1.1 扁蜉一种的现存量周年动态

按河流的不同级别计算扁蜉一种的现存量周年动态,如图 2 所示。扁蜉一种在一级河流中没有出现,说

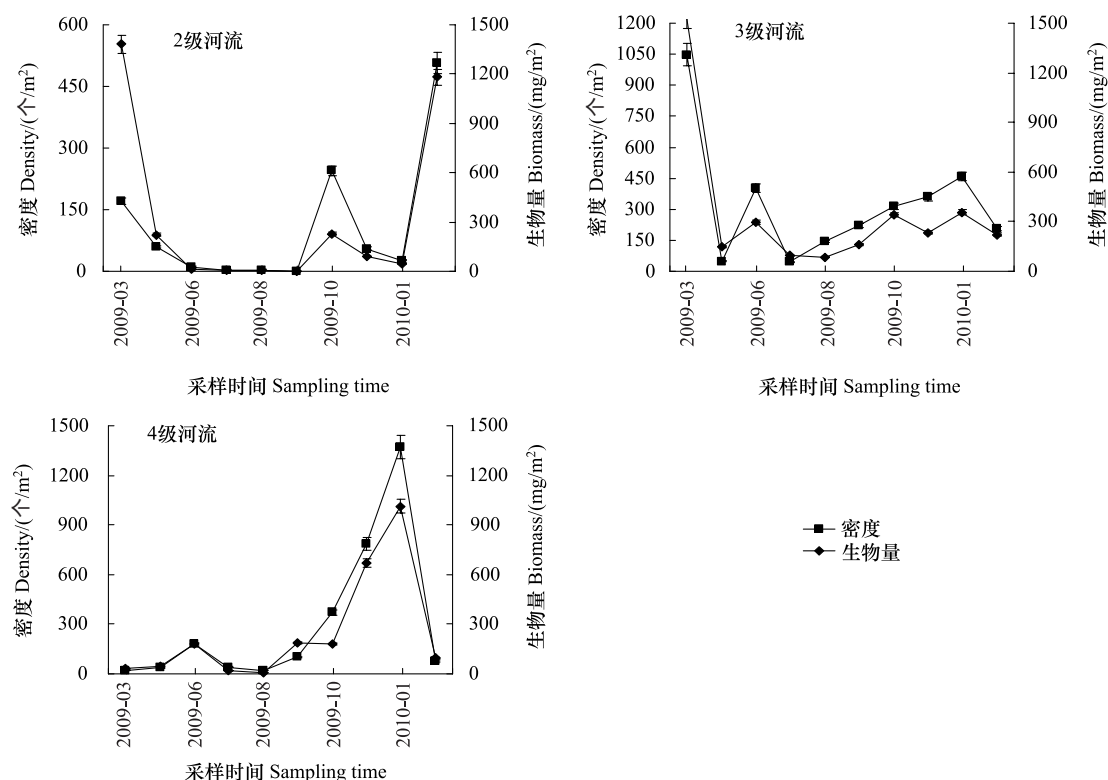


图 2 扁蜉一种在不同级别河流中的现存量周年动态

Fig. 2 Annual variation of standing stock of *Heptagenia* sp. in Shenglihe Stream

明一级河流的两个采样点均不适合其生存,扁蜉一种的密度和生物量的变化趋势基本一致,最大的密度出现在2010年1月份,四级河流中,为1370个/m<sup>2</sup>,最大的生物量出现在2009年3月份,三级河流中,为1526.16 mg/m<sup>2</sup>。不同级别的河流中,二级河流中密度和生物量在2009年3月和2010年的3月比较大,其他月份均很低,三级河流在2009年3月密度和生物量较大,四级河流在2010年1月份达到最大,其余月份很低。2—4级河流中,密度的周年平均值为108个/m<sup>2</sup>,324个/m<sup>2</sup>,300个/m<sup>2</sup>,生物量的周年平均值为317.32 mg/m<sup>2</sup>,346.37 mg/m<sup>2</sup>,243.33 mg/m<sup>2</sup>。

### 2.1.2 等蜉一种的现存量周年动态

按照河流的不同级别,计算等蜉一种的现存量周年动态,结果如图3所示。由图可知,等蜉一种的密度和生物量的变化趋势存在不一致的情况,一级河流中2010年1月份密度大,但生物量反而小,二级和三级河流中均有类似情况,四级河流中2009年10月份密度小生物量反而大,最大的密度出现在2009年10月份,四级河流中,为5833个/m<sup>2</sup>,最大的生物量出现在2010年3月份,三级河流中,为1872.58 mg/m<sup>2</sup>。不同级别的河流变化趋势也不一致,一级河流中密度和生物量在2009年3月和2010年的1月比较大,最低为0,二级河流中2009年6月和2010年1月和3月密度和生物量较大,三级河流变化趋势较为一致,2010年3月密度和生物量较大,但是2009年的3月不多,四级河流中2009年10月和11月密度和生物量较大。1—4级河流中,密度的周年平均值为162个/m<sup>2</sup>,360个/m<sup>2</sup>,1425个/m<sup>2</sup>,1156个/m<sup>2</sup>,生物量的周年平均值为27.98 mg/m<sup>2</sup>,73.71 mg/m<sup>2</sup>,541.71 mg/m<sup>2</sup>,162.91 mg/m<sup>2</sup>。

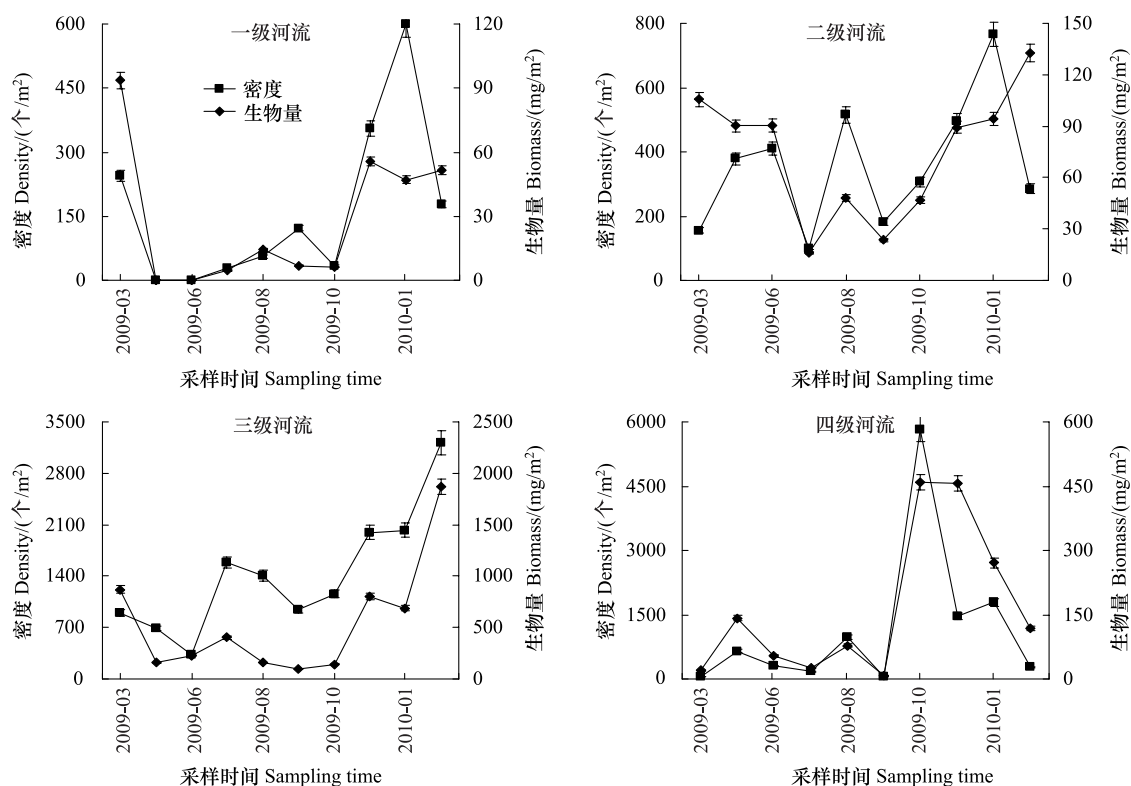


图3 等蜉一种在不同级别河流中的现存量周年动态

Fig. 3 Annual variation of standing stock of *Isonychia* sp. in Shenglihe Stream

### 2.1.3 红斑蜉的现存量周年动态

不同级别河流中红斑蜉的现存量周年动态如图4所示。由图可知,红斑蜉的密度和生物量的变化趋势基本一致,最大的密度出现在2009年3月份,二级河流中,为404个/m<sup>2</sup>,最大的生物量出现在2009年3月份,一级河流中,为227.94 mg/m<sup>2</sup>。不同级别的河流变化趋势不太一致,一级河流中密度和生物量在2009年3

月和11月比较大,二级河流中2009年3月、6月和10月密度和生物量较大,三级河流中2009年10月和2010年3月密度和生物量较大,四级河流中2009年6月和11月密度和生物量较大。其他的月份均比较低。1—4级河流中,密度的周年平均值为54个/m<sup>2</sup>,140个/m<sup>2</sup>,63个/m<sup>2</sup>,6个/m<sup>2</sup>,生物量的周年平均值为29.72 mg/m<sup>2</sup>,53.87 mg/m<sup>2</sup>,24.11 mg/m<sup>2</sup>,4.02 mg/m<sup>2</sup>。

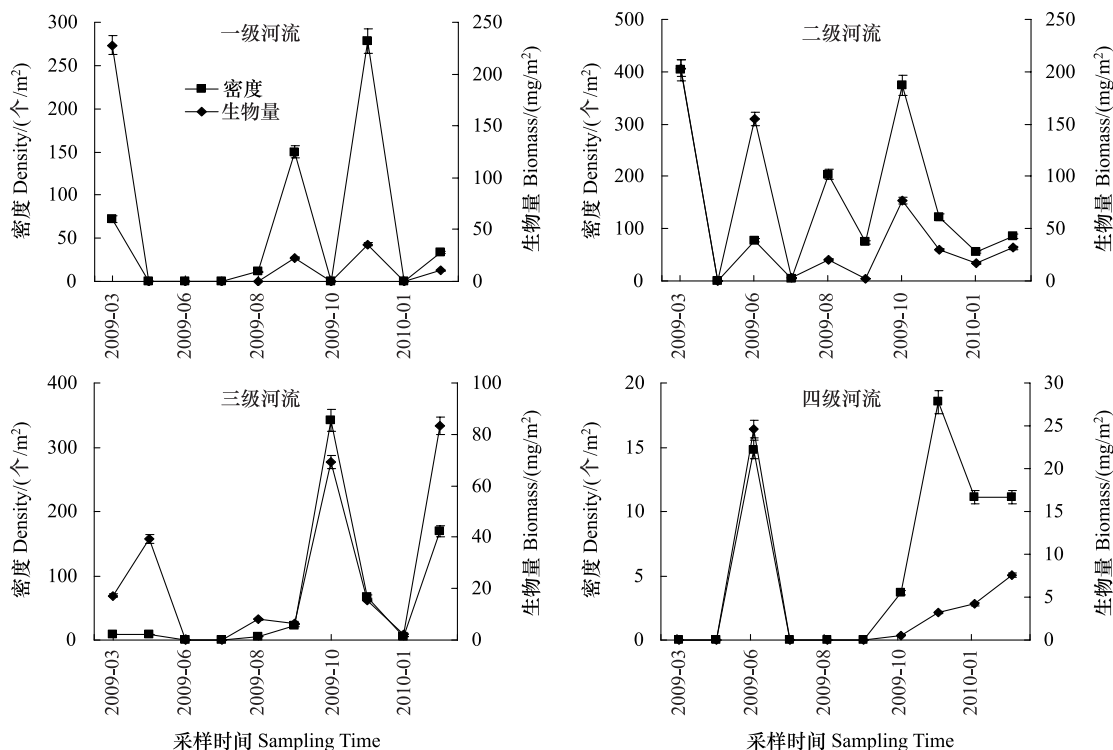


图4 红斑蜉在不同级别河流中的现存量周年动态

Fig. 4 Annual variation of standing stock of *E. rufamaculata* in Shenglihe Stream

## 2.2 生活史

### 2.2.1 扁蜉一种的生活史

扁蜉一种种群的月体长频率分布动态如图5所示。由图可以看出,交配产卵主要发生在6月、8月和11月,羽化主要发生在3月、5月、7月和10月,由此可以判断,扁蜉一种1周年有3个世代,6月到8月,8月到11月分别为一个世代,11月到翌年的5月为一个世代。

### 4.2.5 等蜉的生活史

等蜉一种的种群月体长频率分布动态如图6所示。由图可以看出,交配产卵在1周年中都有发生,羽化主要发生在3月、5月、8月和11月,由此粗略地将等蜉一种的生活史划分为1年3个世代,5月到8月,8月到11月分别为一个世代,1月到翌年5月为一个世代。

### 4.2.6 红斑蜉的生活史

红斑蜉种群的月体长频率分布动态如图7所示。由图可以看出,交配产卵在8月、9月、10月、11月、1月和3月都有发生,幼虫羽化主要发生在3月、5月和7月,由此可以将红斑蜉的生活史划分为1年2个世代,1月到7月为一个世代,8月到翌年3月为一个世代,世代之间有重叠。

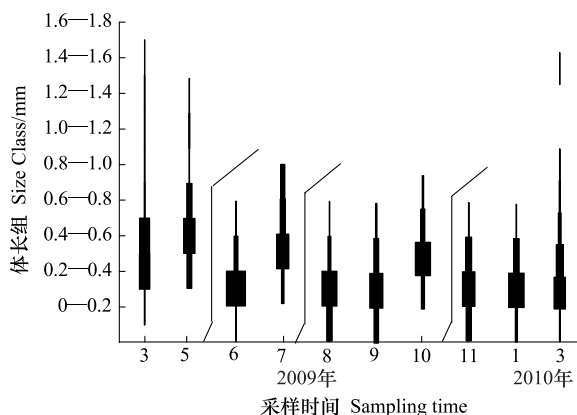


图5 胜利河扁蜉一种的种群体长频率分布逐月动态

Fig. 5 Monthly size-frequency distributions for *Heptagenia* sp. in Shenglihe Stream



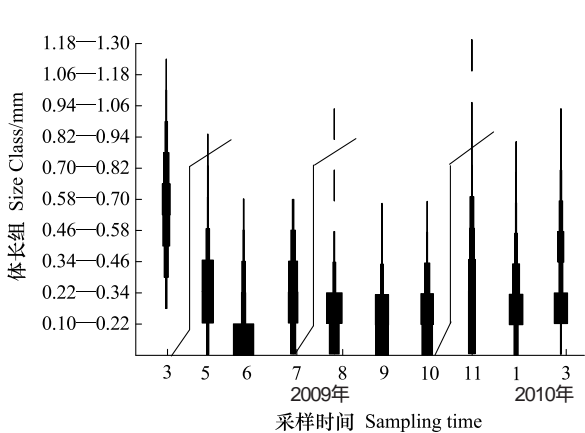


图6 胜利河等蜉一种的种群体长频率分布逐月动态

Fig. 6 Monthly size-frequency distributions for *Isonychia* sp. in Shenglihe Stream

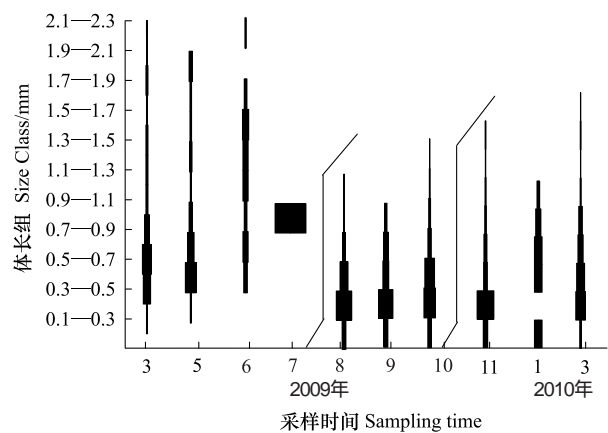


图7 胜利河红斑蜉种群的体长频率分布逐月动态

Fig. 7 Monthly size-frequency distributions for *E. rufamaculata* in Shenglihe Stream

2.3 周年生产量

2.3.1 扁蜉一种的周年生产量

扁蜉一种的周年  $P/B$  系数和周年生产量用体长频率法计算,结果如表 2 所示。由表可知,扁蜉一种的现存量为  $8.45\text{ g/m}^2$ ,同龄群生产量为  $66.71\text{ g/m}^2$ ,扁蜉 1 年完成 3 个世代,周年  $P/B$  系数为 23.69,不同级别河流的周年生产量( $\text{g/m}^2$ )分别为  $P_2=75.17$ ,  $P_3=82.05$ ,  $P_4=57.64$ 。

表 2 胜利河扁蜉一种的周年生产量

Table 2 Annual production ( $\text{g/m}^2$ wet wt) of <i>Heptagenia</i> sp. in Shenglihe Stream							
体长 Size group /mm	密度 Density /(个/ $\text{m}^2$ )	体均重 Mean weight /mg	生物量 Biomass /( $\text{g/m}^2$ )	减员数 No. loss /(个/ $\text{m}^2$ )	减员个体均重 Mean wt at loss /mg	损失量 Biomassloss /( $\text{mg/m}^2$ )	生产量 Production /( $\text{g/m}^2$ )
0.2—0.4	1235.56	1.55	1.92	648.89	2.77	1797.38	16.18
0.4—0.6	586.67	4.95	2.90	470.00	7.58	3564.54	32.08
0.6—0.8	116.67	11.62	1.36	88.89	16.05	1426.70	12.84
0.8—1.0	27.78	22.17	0.62	11.11	27.70	307.82	2.77
1.0—1.2	16.67	34.62	0.58	5.56	44.16	245.34	2.21
1.2—1.4	11.11	56.33	0.63	7.78	66.77	519.31	4.67
1.4—1.6	3.33	79.14	0.26	2.22	91.81	204.02	1.84
1.6—1.8	1.11	106.51	0.12	1.11	106.51	118.34	1.07
现存量= 8.45				同龄群生产量=66.71			
周年 $P/B=23.69$				周年生产量 $66.71\times 3=200.13$			

2.3.2 等蜉一种的周年生产量

等蜉一种的周年  $P/B$  系数和周年生产量用体长频率法计算,结果如表 3 所示。由表可知,等蜉一种的现存量为  $4.53\text{ g/m}^2$ ,同龄群生产量为  $27.35\text{ g/m}^2$ ,等蜉一种 1 年完成 3 个世代,周年  $P/B$  系数为 18.12,不同级别河流的周年生产量( $\text{g/m}^2$ )分别为  $P_1=5.07$ ,  $P_2=13.36$ ,  $P_3=98.16$ ,  $P_4=29.51$ 。

2.3.3 红斑蜉的周年生产量

红斑蜉的周年  $P/B$  系数和周年生产量用体长频率法计算,结果如表 4 所示。由表可知,红斑蜉的现存量为  $1.40\text{ g/m}^2$ ,同龄群生产量为  $6.15\text{ g/m}^2$ ,红斑蜉 1 年完成两个世代,周年  $P/B$  系数为 8.78,不同级别河流的周年生产量( $\text{g/m}^2$ )分别为  $P_1=2.61$ ,  $P_2=4.73$ ,  $P_3=2.12$ ,  $P_4=0.35$ 。

表 3 胜利河等蜉一种的周年生产量

Table 3 Annual production ( $\text{g}/\text{m}^2$  wet wt) of *Isonychia* sp. in Shenglihe Stream

体长 Size group /mm	密度 Density /(个/ $\text{m}^2$ )	体均重 Mean weight /mg	生物量 Biomass /( $\text{g}/\text{m}^2$ )	减员数 No. loss /(个/ $\text{m}^2$ )	减员个体均重 Mean wt at loss /mg	损失量 Biomassloss /( $\text{mg}/\text{m}^2$ )	生产量 Production /( $\text{g}/\text{m}^2$ )
0.1—0.22	1662.22	0.12	0.20	-520.00	0.21	-109.57	-1.10
0.22—0.34	2182.22	0.37	0.81	1000.00	0.49	486.62	4.87
0.34—0.46	1182.22	0.64	0.76	523.33	0.97	505.88	5.06
0.46—0.58	658.89	1.46	0.96	260.00	1.80	467.03	4.67
0.58—0.7	398.89	2.21	0.88	256.67	2.68	686.81	6.87
0.7—0.82	142.22	3.24	0.46	85.56	3.99	341.24	3.41
0.82—0.94	56.67	4.91	0.28	32.22	5.52	177.78	1.78
0.94—1.06	24.44	6.20	0.15	22.22	7.07	157.09	1.57
1.06—1.18	2.22	8.06	0.02	1.11	9.37	10.41	0.10
1.18—1.3	1.11	10.90	0.01	1.11	10.90	12.11	0.12
现存量=4.53				同龄群生产量=27.35			
周年 $P/B=18.12$				周年生产量 $27.35 \times 3 = 82.06$			

表 4 胜利河红斑蜉的周年生产量

Table 4 Annual production ( $\text{g}/\text{m}^2$  wet wt) of *E. rufamaculata* in Shenglihe Stream

体长 Size group /mm	密度 Density /(个/ $\text{m}^2$ )	体均重 Mean weight /mg	生物量 Biomass /( $\text{g}/\text{m}^2$ )	减员数 No. loss /(个/ $\text{m}^2$ )	减员个体均重 Mean wt at loss /mg	损失量 Biomassloss /( $\text{mg}/\text{m}^2$ )	生产量 Production /( $\text{g}/\text{m}^2$ )
0.1—0.3	73.33	0.04	0.00	-206.67	0.07	-15.49	-0.17
0.3—0.5	280.00	0.16	0.04	72.22	0.29	20.65	0.23
0.5—0.7	207.78	0.52	0.11	102.22	0.84	85.43	0.94
0.7—0.9	105.56	1.33	0.14	46.67	1.88	87.71	0.96
0.9—1.1	58.89	2.65	0.16	30.00	3.37	101.21	1.11
1.1—1.3	28.89	4.30	0.12	8.89	5.41	48.08	0.53
1.3—1.5	20.00	6.81	0.14	4.44	8.57	38.10	0.42
1.5—1.7	15.56	10.79	0.17	1.11	13.84	15.38	0.17
1.7—1.9	14.44	17.76	0.26	8.89	19.99	177.73	1.96
1.9—2.1	5.56	22.51	0.13	1.11	26.59	29.54	0.32
2.1—2.3	4.44	31.41	0.14	4.44	31.41	139.58	1.54
现存量=1.40				同龄群生产量=6.15			
周年 $P/B=8.78$				周年生产量 $6.15 \times 2 = 12.30$			

## 2.4 生产量动态

### 2.4.1 扁蜉一种的生产量动态

扁蜉一种的生产量动态如图 8 所示。由图可知,生物量在 2009 年 3 月,三级河流中到达最大,日均产量在 2009 年 3 月,二级河流中达到最大,分别为  $1526.16 \text{ mg}/\text{m}^2$ ,  $363.56 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。对生产量进行统计分析,结果表明,不同级别河流差异不显著 ( $P=0.19$ ),不同月份之间差异不显著 ( $P=0.13$ )。

### 4.4.5 等蜉一种的生产量动态

等蜉一种的生产量动态如图 9 所示。由图可知,生物量和日均产量均在 2010 年 3 月,三级河流中到达最大,分别为  $1872.58 \text{ mg}/\text{m}^2$ ,  $282.76 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。对生产量进行统计分析,结果表明,不同级别河流差异显著 ( $P=0.0013$ ),不同月份之间差异不显著 ( $P=0.29$ )。

### 4.4.6 红斑蜉的生产量动态

红斑蜉的生产量动态如图 10 所示。由图可知,生物量和日均产量均在 2009 年 3 月,一级河流中到达最

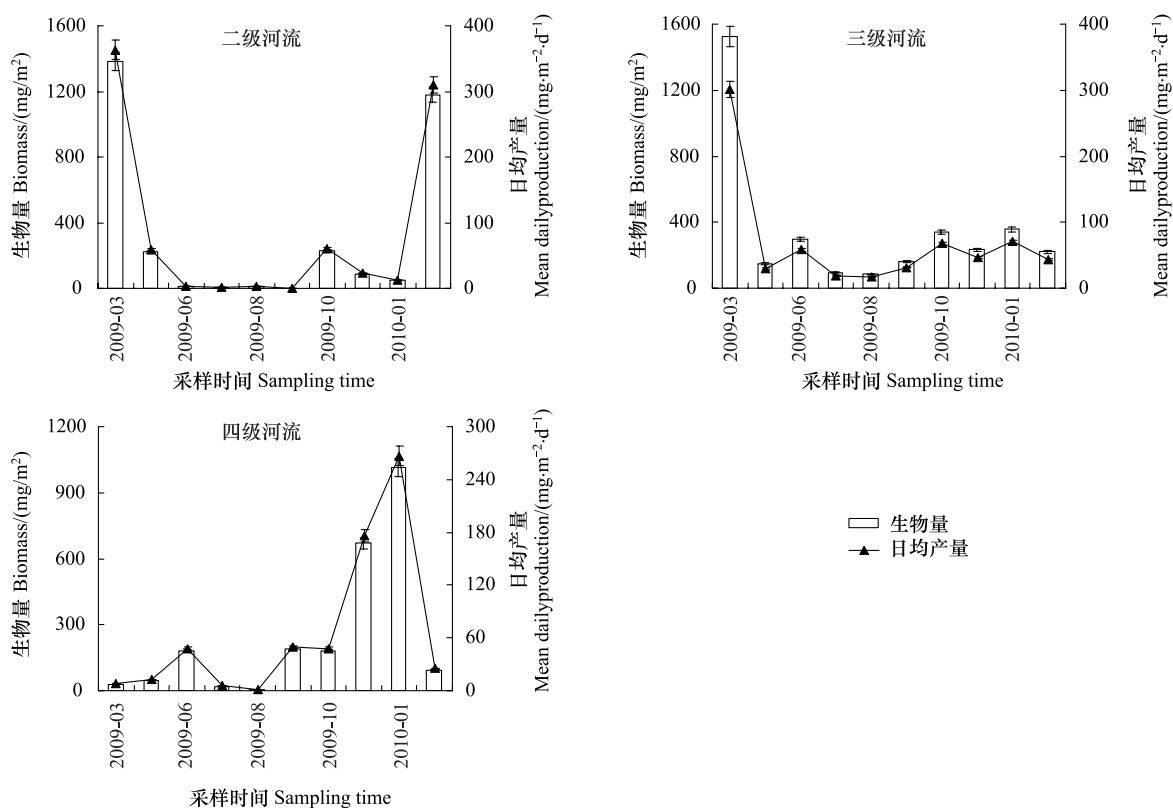


图 8 胜利河不同级别中扁蜉一种的日均产量及生产量动态

Fig. 8 Temporal pattern of interval biomass and mean daily production for *Heptagenia* sp. in four orders in Shenglihe Stream

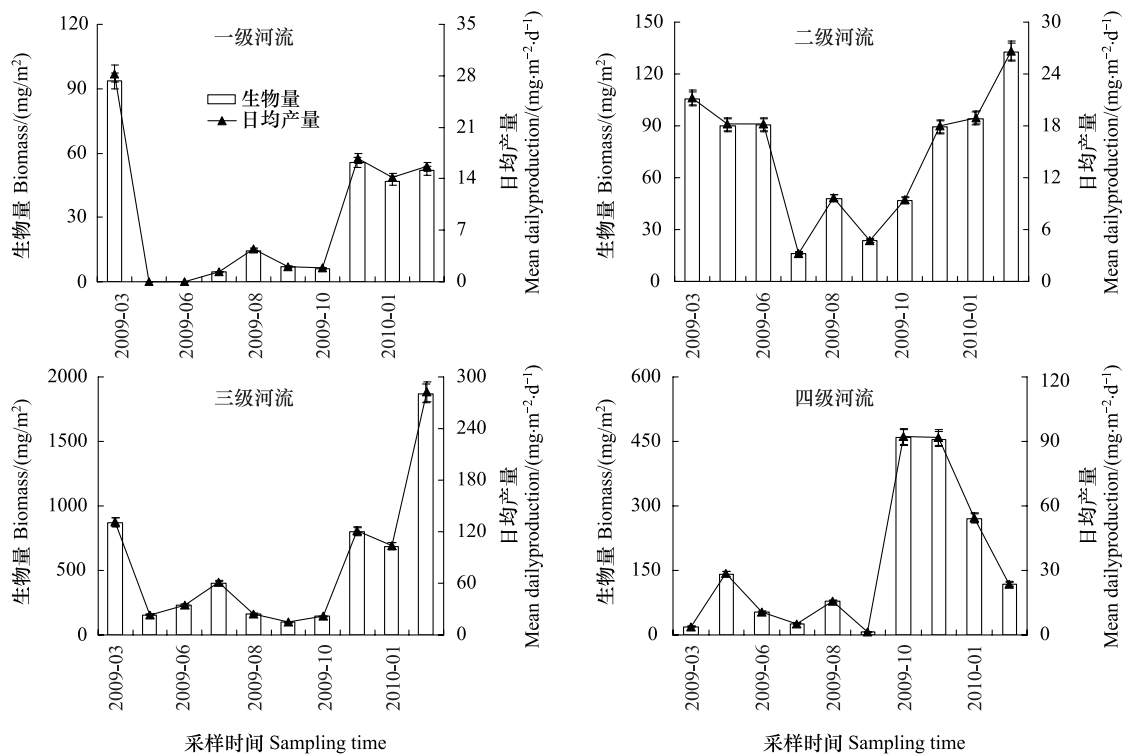


图 9 胜利河不同级别中等蜉一种的日均产量及生产量动态

Fig. 9 Temporal pattern of interval biomass and mean daily production for *Isonychia* sp. in four orders in Shenglihe Stream

大,分别为  $227.94 \text{ mg/m}^2$ ,  $33.36 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。对生产量进行统计分析,结果表明,不同级别河流差异不显著 ( $P=0.14$ ),不同月份之间差异不显著 ( $P=0.075$ )。

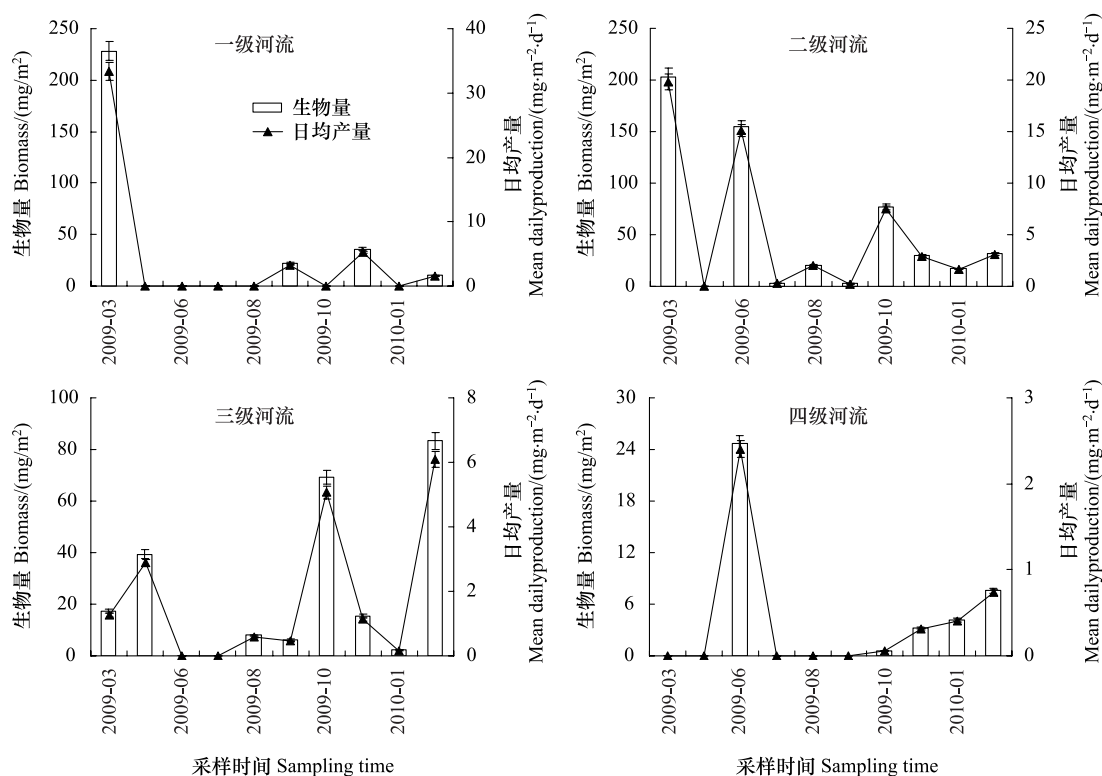


图 10 胜利河不同级别中红斑蜉的日均产量及生产量动态

Fig. 10 Temporal pattern of interval biomass and mean daily production for *E. rufamaculata* in four orders in Shenglihe Stream

## 2.5 营养基础分析

### 2.5.1 扁蜉一种

扁蜉一种的营养基础分析结果如图 11 所示。其食物类型包括无形态碎屑、动物组织、植物纤维、丝状藻类和硅藻 5 种,扁蜉一种的肠内含物中没有发现真菌。无形态碎屑占肠内含物的比例最大,达到 74.37%,对生产量的贡献率为 77.15%,动物组织占 4.19%,对生产量贡献率为 11.27%,植物纤维占 17.11%,对生产量贡献率为 6.57%,丝状藻类占 4.29%,对生产量贡献率为 4.95%,硅藻占 0.04%,对生产量贡献率为 0.04%。

### 2.5.2 等蜉一种

等蜉一种的营养基础分析结果如图 12 所示。其食物类型包括无形态碎屑、动物组织、植物纤维、真菌、丝状藻类和硅藻 6 种。无形态碎屑占肠内含物的比例最大,达到 65.64%,对生产量的贡献率为 68.16%,动物组织占 6.17%,对生产量贡献率为 16.61%,植物纤维占 23.04%,对生产量贡献率为 8.86%,真菌占 0.54%,对生产量贡献率为 1.03%,丝状藻类占 4.53%,对生产量贡献率为 5.23%,硅藻占 0.09%,对生产量贡献率为 0.10%。

### 2.5.3 红斑蜉

红斑蜉的营养基础分析结果如图 13 所示。其食物类型包括无形态碎屑、动物组织、植物纤维、真菌、丝状藻类和硅藻 6 种。无形态碎屑占肠内含物的比例达到 41.14%,对生产量的贡献率为 46.67%,动物组织占 5.96%,对生产量贡献率为 17.52%,植物纤维占 38.04%,对生产量贡献率为 15.98%,真菌占 1.34%,对生产量贡献率为 2.81%,丝状藻类占 11.21%,对生产量贡献率为 14.13%,硅藻占 2.31%,对生产量贡献率为 2.91%。



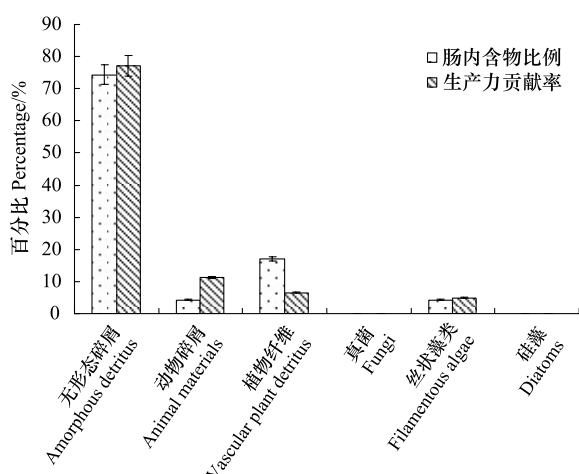


图 11 扁蜉一种的肠内含物比率及生产量贡献率

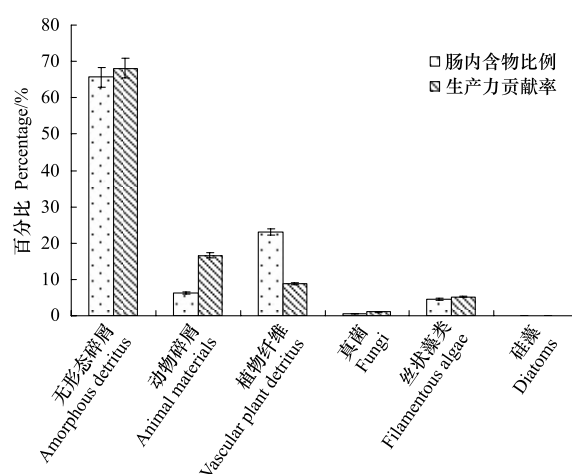
Fig. 11 The percentage of foregut content and production attributable to various food types for *Heptagenia* sp. in Shenglihe Stream

图 12 等蜉一种的肠内含物比率及生产量贡献率

Fig. 12 The percentage of foregut content and production attributable to various food types for *Isonychia* sp. in Shenglihe Stream

### 3 讨论

#### 3.1 生产量及其动态

蜉蝣是淡水河流中大型底栖动物的重要组成部分, 本研究中, 扁蜉和等蜉 1 年完成 3 个世代, 红斑蜉 1 年完成 2 个世代, 这与相关文献报道的蜉蝣在亚热带地区一般为 1 年 1—3 个世代的结果相一致<sup>[10,13-14]</sup>。扁蜉、等蜉和红斑蜉周年  $P/B$  系数分别为 23.69、18.12、8.78。三者相比较, 周年生产量和  $P/B$  系数扁蜉的最大, 等蜉次之, 红斑蜉最小。一方面是扁蜉的个体较小, 生长速率较快, 体长 10—15 mm, 1 年完成 3 个世代, 周年生产量较大, 等蜉个体比扁蜉大, 体长在 10 mm 以上, 红斑蜉体长在 15 mm 以上<sup>[15]</sup>, 个体最大, 密度较少, 1 年 2 个世代。根据有关报道, 水生昆虫的  $P/B$  系数通常与个体的大小呈反比的关系<sup>[16]</sup>, 实验结果与该规律也基本相符。相对于国内外研究, 实验结果也非常适中 (表 5)<sup>[10, 17-21]</sup>。

生产量动态方面, 扁蜉和等蜉在秋冬季生产率较高, 春夏季较低, 红斑蜉春夏季较高, 秋冬季较低。对比生活史, 3 种蜉蝣生产量较高的季节, 均处于繁殖的前后期, 生物密度大, 个体也较大。因此, 该时段的生产量也相对较大。此外, 生产量动态可以准确反映物种利用资源的时间分配状况, 以及生态位相似的物种间竞争程度, 具有重要的理论和实践意义。目前, 随着对群落食物网研究的深入, 关于物种和功能摄食群生产量动态的研究工作在欧美国家和我国香港地区相继被报道, 但国内尚缺乏相关研究工作。

#### 3.2 营养基础

对胜利河的优势种进行肠内含物分析, 在 6 种食物类型中, 除了红斑蜉之外, 无形态碎屑在其它优势种均占最大比例, 达 60% 以上, 对生产量的贡献率也达到 60% 以上。红斑蜉中, 无形态碎屑在肠内含物中的比例

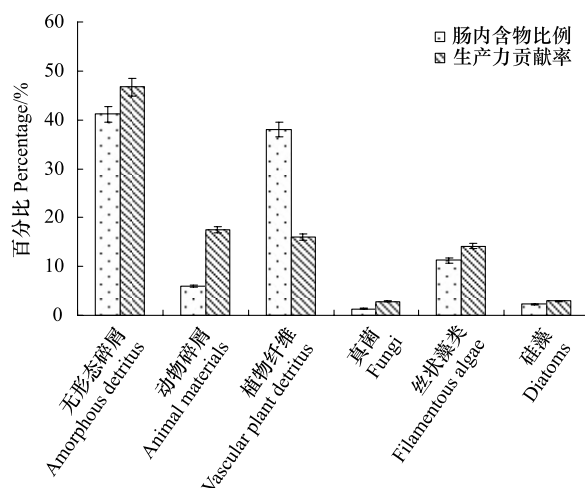


图 13 红斑蜉的肠内含物比率及生产量贡献率

Fig. 13 The percentage of foregut content and production attributable to various food types for *E. rufamaculata* in Shenglihe Stream

和对生产量的贡献率分别为 40% 左右。因此,总体上看,无形态碎屑是胜利河的主要基础食物资源。在无形态碎屑的研究中,人们最早认为其主要是较为难以降解和消化食物类型,其同化率以 10% 计算,而后来研究发现,在无形态碎屑中,有 42% 的组成为细菌和原生动物,因此重新计算了无形态碎屑的同化率,得到的初步结果为 27%<sup>[11]</sup>。这样无形态碎屑对生产量的贡献率和摄食量都会相应增加。

表 5 蜉蝣类的生产量 (g 干重/m<sup>2</sup>) 和 P/B 系数比较

Table 5 A comparison of Secondary production and P/B ratio of Ephemeroptera

物种 Species	周年生产量 /(g 干重/m <sup>2</sup> ) Annual production	P/B 系数 P/B ratio	采样地点 Sampling sites	文献来源 References
<i>Leptophlebia</i> sp.	7.303	11.4	湖北黑竹冲	[17]
<i>Ephemera</i> sp.	14.598	11.8	湖北黑竹冲	[17]
小裳蜉一种 <i>Choroterpes</i> sp.	88.28	14.31	湖北胡家溪	[18]
扁蜉一种 <i>Electrogena</i> sp.	86.98	17.56	湖北胡家溪	[18]
四节蜉一种 <i>Cloeon</i> sp.	149.44	15.03	湖北胡家溪	[18]
细蜉一种 <i>Caenis</i> sp.	8.10	7.16	湖北胡家溪	[18]
<i>Caenis</i> sp.	5.064	6.4	湖北叹气沟	[19]
<i>Choroterpes</i> sp.	9.696	7.1	湖北叹气沟	[19]
<i>Indobaetis</i> sp.	52.812	17.0	湖北叹气沟	[19]
<i>Caenis luctuosa</i>	6.35	15.98	Mediterranean	[10]
<i>Afronurus</i> sp.	2.406	34.7	Shing Mun	[20]
<i>Cinygmmina</i> sp.	1.198	33	Shing Mun	[20]
<i>Baetiella</i>	0.143	95.4	Shing Mun	[20]
<i>C. amica</i>	0.445	13.0	A experimental stream	[20]
<i>H. limbata</i>	4.688	4.09	A blackwater creek	[20]
<i>H. limbata</i>	0.199	9.6	Rock Springs Run	[20]
<i>E. orientalis</i>	0.05	6.35	Gapyeong	[21]
<i>Ephemera</i> sp.	0.318	3.84	转基因试验湖	[21]
扁蜉一种 <i>Electrogena</i> sp.	40.03	23.69	湖北胜利河	本研究
等蜉一种 <i>Isonychia</i> sp.	16.41	18.12	湖北胜利河	本研究
红斑蜉 <i>E. rufamaculata</i>	2.46	8.78	湖北胜利河	本研究

3 种蜉蝣营养基础分析结果中,扁蜉一种和等蜉一种的差异不大,红斑蜉有较大差异,红斑蜉主要穴居于静水水体中,属于滤食者,个体较大;等蜉一种一般生活在流水的底部,如石块和水生植物中,游泳能力较强,主要滤食水中的细小颗粒;扁蜉一种生活在流水环境中,在溪流中的石块上,枯枝中的数量也较多,以刮食和滤食为主<sup>[10]</sup>,这 3 种蜉蝣在生活方式上存在差异,可能导致它们的食物类型的差别。3 种蜉蝣与其它研究报道相比,结果基本一致。无形态碎屑所占比例最大,植物纤维也占有较大比例,真菌、硅藻和丝状藻类比例均较少,部分研究中也报道含有较大比例的真菌,在扁蜉一种中未出现真菌类食物资源,有部分研究没有发现植物纤维和丝状藻类(表 6)<sup>[22-23]</sup>。

对物种营养基础的定性和定量分析是评价该物种在生态系统中功能大小测度指标,也是构建生态系统食物网的基础性工作,具有重要的理论意义和实践价值。但从国内的情况看,关于群落或种群的生产力、营养基础及其动态研究的工作仍然相当薄弱,这也必将严重制约我国水体的可持续发展和科学利用,应当引起高度重视。

表 6 蜉蝣类的前肠内含物分析及对生产量的贡献率比较  
Table 6 A comparison of the percentage of foregut content and production attributable with Ephemeroptera

蜉蝣类群 Mayfly species	肠内含物比例 Percentage of foregut contents/ %					生产量贡献率 Percentage of contribution to production/ %					文献来源 References		
	无形态碎屑 Amorphous detritus	动物组织 Animal materials	植物纤维 Vascular plant detritus	真菌 Fungi	丝状藻类 Filamentous algae	硅藻 Diatoms	无形态碎屑 Amorphous detritus	动物组织 Animal materials	植物纤维 Vascular plant detritus	真菌 Fungi		丝状藻类 Filamentous algae	硅藻 Diatoms
<i>Caenis</i> sp.	80.2	—	11.5	1.3	6.0	1.0	67.7	—	9.7	5.2	15.0	2.4	[5]
<i>Electrogena</i> sp.	81.9	—	9.5	1.0	6.1	1.5	68.8	—	8.0	4.3	15.2	3.7	[5]
<i>Indobaetis</i> sp.	77.8	—	10.1	1.5	7.8	2.7	62.0	—	8.0	6.0	17.5	6.4	[5]
<i>Choroterpes</i> sp.	84.4	—	10.3	1.2	3.1	1.0	74.7	—	9.1	5.2	8.4	2.6	[5]
<i>Isonychia</i>	98.46	0.02	—	0.54	—	0.33	96.26	0.14	—	2.64	—	0.97	[22]
<i>Isonychia</i>	98.20	—	—	1.8	—	—	91.60	—	—	8.4	—	—	[22]
<i>Baetis</i>	34.10	—	—	65.90	—	—	14.71	—	—	85.29	—	—	[22]
<i>Baetis</i>	86.84	—	1.59	0.73	—	10.83	69.70	—	1.28	2.93	—	26.08	[22]
<i>Ephemerella</i>	61.64	2.24	34.18	1.60	—	0.34	51.15	13.01	28.36	6.64	—	0.85	[22]
<i>Callibaetis fluctuans</i>	87.4	—	—	0.2	12.0	—	70.6	—	—	0.02	1.44	—	[23]
扁蜉一种 <i>Electrogena</i> sp.	74.37	4.19	17.11	—	4.29	0.04	77.15	11.27	6.57	—	4.95	0.04	本研究
等蜉一种 <i>Isonychia</i> sp.	65.64	6.17	23.04	0.54	4.53	0.09	68.16	16.61	8.86	1.03	5.23	0.10	本研究
红斑蜉 <i>E. rufamaculata</i>	41.14	5.96	38.04	1.34	11.21	2.31	46.67	17.52	15.98	2.81	14.31	2.91	本研究

## References:

- [ 1 ] Benke A C, Huryn A D. Benthic invertebrate production-facilitating answers to ecological riddles in freshwater ecosystems. *Journal of the North American Benthological Society*, 2010, 29(1): 264-285.
- [ 2 ] Salas M, Dudgeon D. Life histories, production dynamics and resource utilisation of mayflies (Ephemeroptera) in two tropical Asian forest streams. *Freshwater Biology*, 2003, 48(3): 485-499.
- [ 3 ] Yan Y J, Li X Y. Secondary production and its trophic basis of two mayfly in a subtropical stream of China. *International Review of Hydrobiology*, 2006, 91(2): 136-147.
- [ 4 ] Huang Y, Yan Y J, Li X Y. Food web structure of benthic macroinvertebrates in a second order stream of the Hanjiang River basin in middle China. *Journal of Freshwater Ecology*, 2008, 23(3): 421-427.
- [ 5 ] Wen F, Jiang J, Deng S, Li X, Yan Y. Food web and trophic basis of production of the benthic macroinvertebrate community of a subtropical stream (Yangtze River Basin, Middle China). *International Review of Hydrobiology*, 2009, 95(4/5): 395-409.
- [ 6 ] Wang B X, Yang L F. A study on tolerance values of benthic macroinvertebrate taxa in Eastern China. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(12): 2768-2775.
- [ 7 ] Zhou C F, Gui H, Zhou K Y. Larval key to families of Ephemeroptera from China (Insecta). *Journal of Nanjing Normal University: Natural Science*, 2003, 26(3): 57-60.
- [ 8 ] Tian L, Yang L. *Economic Insect Fauna of China (Volume 41)*. Beijing: Science Press, 1996: 15-21.
- [ 9 ] Menzie C A. A note on the Hynes method of estimating secondary production. *Limnology and Oceanography*, 1980, 25(4): 770-773.
- [ 10 ] Yan Y J, Li X Y. Temporal dynamics of production and ingestion of the dominant mayflies in a subtropical stream in China. *Aquatic Ecology*, 2008, 42(4): 657-667.
- [ 11 ] Benke A C, Wallace J B. Trophic basis of production among riverine caddisflies: implications for food web analysis. *Ecology*, 1997, 78(4): 1132-1145.
- [ 12 ] Bunn S E, Edward D H, Loneragan N R. Spatial and temporal variation in the macroinvertebrate fauna of streams of the northern jarrah forest, Western Australia: community structure. *Freshwater Biology*, 1986, 16(1): 67-92.
- [ 13 ] Perán A, Velasco J, Millán A. Life cycle and secondary production of *Caenis luctuosa* (Ephemeroptera) in a semiarid stream (Southeast Spain). *Hydrobiologia*, 1999, 400: 187-194.
- [ 14 ] González J M, Basaguren A, Pozo J. Life history and production of *Caenis luctuosa* (Burmeister) (Ephemeroptera, Caenidae) in two nearby reaches along a small stream. *Hydrobiologia*, 2001, 452(1/3): 209-215.
- [ 15 ] Zhou C F. Study on Taxonomy for Ephemeroptera in China [D]. A Taxonomic Study on Mayflies from Mainland China. Tianjing: Nankai University, 2002.
- [ 16 ] Huryn A D, Wallace J B. Life history and production of stream insects. *Annual Review of Entomology*, 2000, 45: 83-110.
- [ 17 ] Yan Y J, Li X Y. Secondary production of *Leptophlebia* sp. and *Ephemera* sp. in Heizhuchong Stream. *Ecologic Science*, 2006, 25(2): 97-101.
- [ 18 ] Jiang J. Community Structure and Secondary Production of Benthic Macrozoobenthos in a Second Order River of Qingjiang River Basin [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2008: 30-30.
- [ 19 ] Su H W. Community Structure and Secondary Production of Benthic Macrozoobenthos in a Second Order River of Changjiang River Basin [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007: 58-59.
- [ 20 ] Salas M, Dudgeon D. Life histories, production dynamics and resource utilisation of mayflies (Ephemeroptera) in two tropical Asia forest stream. *Freshwater Biology*, 2003, 48(3): 485-499.
- [ 21 ] Xiong J. Study on Ecology of Macrozoobenthos Community in Studies on ecology of macrozoobenthos in an artificial lake for transgenic fish Transgenic Fish Culturing Lake [D]. Wuhan: Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, 2010.
- [ 22 ] Wallace J B, Benke A C, Lingle A H, Parsons K. Trophic pathways of macroinvertebrate primary consumers in subtropical blackwater stream. *Archiv für Hydrobiologie*, 1987, 74(4): 423-451.
- [ 23 ] Johnson B R, Tarter D C, Hutchens J J. Life history and trophic basis of production of the mayfly *Callibaetis fluctuans* (Walsh) (Ephemeroptera: Baetidae) in a mitigated wetland, West Virginia, USA. *Wetlands*, 2000, 20(2): 397-405.

## 参考文献:

- [ 6 ] 王备新, 杨莲芳. 我国东部底栖无脊椎动物主要分类单元耐污值. *生态学报*, 2004, 24(12): 2768-2775.
- [ 7 ] 周长发, 归鸿, 周开亚. 中国蜉蝣目稚虫科检索表 (昆虫纲). *南京师大学报: 自然科学版*, 2003, 26(2): 65-68.
- [ 8 ] 田立新, 杨莲芳. *中国经济昆虫志 (第四十九册)*. 北京: 科学出版社, 1996: 15-21.
- [ 15 ] 周长发. 中国大陆蜉蝣目分类研究 [D]. 天津: 南开大学, 2002.
- [ 17 ] 闫云君, 李晓宇. 黑竹冲河小囊蜉和蜉蝣周年生产量. *生态科学*, 2006, 25(2): 97-101.
- [ 18 ] 江晶. 清江流域二级河流大型底栖动物群落结构和生产量的研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2008: 30-30.
- [ 19 ] 苏华武. 长江流域二级河流大型底栖动物群落结构和生产量的研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2007: 58-59.
- [ 21 ] 熊晶. 转基因鱼试验湖泊大型底栖动物群落生态学研究 [D]. 武汉: 中国科学院水生生物研究所, 2010.



# ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 32, No. 9 May, 2012 (Semimonthly)

## CONTENTS

Responses and weigh of multi-ecosystem services and its economic value under different land cover scenarios: a case study from Ertan water control pivot in Yalong River .....	GE Jing, WU Nan, GAO Jixi, et al (2629)
Influence of grazing on biomass, growth ratio and compensatory effect of different plant groups in <i>Kobresia parva</i> meadow .....	DONG Quanmin, ZHAO Xinquan, MA Yushou, et al (2640)
Stocking effectiveness of hatchery-released kuruma prawn <i>Penaeus japonicus</i> in the Xiangshan Bay, China .....	JIANG Yazhou, LING Jianzhong, LIN Nan, et al (2651)
The spatial pattern of landscape fragmentation and its relations with urbanization and socio-economic developments: a case study of Beijing .....	QIU Jiangxiao, WANG Xiaoke, LU Fei, et al (2659)
Cellular automata simulation of barren patch connectivity effect in degradation sequence on alpine meadow in the source region of the Yangtze and Yellow rivers, Qinghai-Tibetan Plateau, China .....	LI Xueling, LIN Huilong (2670)
Evolution law of architectural landscape during the urban renewal process in Tiexi District .....	ZHANG Peifeng, HU Yuanman, XIONG Zaiping, et al (2681)
Competition for light and crop productivity in an agro-forestry system in the Hilly Region, Shangluo, China .....	PENG Xiaobang, ZHANG Shuoxin (2692)
Evaluation of forest ecosystem services based on biomass in Shanxi Province .....	LIU Yong, LI Jinchang, YANG Yonggang (2699)
Research on the morphological interactions between <i>Tamarix ramosissima</i> thickets and Nebkhas under different sand supply conditions; a case study in Cele oasis-desert ecotone .....	YANG Fan, WANG Xueqin, YANG Dongliang, et al (2707)
Litter decomposition and nutrient release in typical secondary and primary forests in karst region, Northwest of Guangxi .....	ZENG Zhaoxia, WANG Kelin, ZENG Fuping, et al (2720)
Spatial patterns of dominant species in a subtropical evergreen broad-leaved forest in Jiulian Mountain Jiangxi Province, China .....	FAN Juan, ZHAO Xiuhai, WANG Jinsong, et al (2729)
Characteristics of seedlings regeneration in <i>Quercus aliena</i> var. <i>acuteserrata</i> secondary forests in Qinling Mountains .....	KANG Bing, WANG Dexiang, LI Gang, et al (2738)
Xylem hydraulic traits of <i>Populus euphratica</i> Oliv. in extremely drought environment .....	AYOUPU Mubareke, CHEN Yaning, HAO Xingming, et al (2748)
Response characteristics of leaf traits of common species along an altitudinal gradient in Hongchiba Grassland, Chongqing .....	SONG Lulu, FAN Jiangwen, WU Shaohong, et al (2759)
Changes of carbon input influence soil respiration in a <i>Pinus tabulaeformis</i> plantation .....	WANG Jinsong, ZHAO Xiuhai, ZHANG Chunyu, et al (2768)
Effects of different habitats and coverage treatments on the fates of <i>Quercus wutaishanica</i> seeds under the predation pressure of rodents .....	YAN Xingfu, ZHOU Libiao, LIU Jianli (2778)
Nested analysis of urban woodlot bird communities in Minhang District of Shanghai .....	WANG Benyao, WANG Xiaoming, WANG Tianhou, et al (2788)
Production dynamics and trophic basis of three dominant mayflies in the continuum of Shenglihe Stream in the Bahe River Basin .....	DENG Shan, YE Caiwei, WANG Lixiao, et al (2796)
Effects of sedimentation thickness of shrimp pond cleaning discharges on <i>Acanthus ilicifolius</i> seedlings .....	LI Ting, YE Yong (2810)
Utilization of carbon sources by the soil microbial communities of different forest types in subtropical Australia .....	LU Shunbao, GUO Xiaomin, RUI Yichao, et al (2819)
Soil microbial community characteristics under different vegetation types at the Holocene-basalt Platform, Jingpo Lake area, Northeast China .....	HUANG Yuanyuan, QU Laiye, QU Xiuchun, et al (2827)
Effect of <i>Ipomoea aquatica</i> Floating-bed on the quantity and distribution of nitrogen cycling bacteria and nitrogen removal .....	TANG Yingying, LI Xiuzhen, ZHOU Yuanqing, et al (2837)
Effects of microbial inoculants on soil microbial diversity and degrading process of corn straw returned to field .....	LI Peipei, ZHANG Dongdong, WANG Xiaojuan, et al (2847)

Effects of coupling film-mulched furrow-ridge cropping with maize straw soil-incorporation on maize yields and soil organic carbon pool at a semiarid loess site of China .....	WU Rongmei, WANG Yongpeng, LI Fengmin, et al (2855)
Residues and spatial distribution of OCPs in the sediments of Gan River Basin ...	LIU Xiaozhen, ZHAO Ci, LIANG Yu, et al (2863)
Analysis on population fluctuation and properties of the white-backed planthopper in Huizhou in 2009 .....	..... DIAO Yonggang, YANG Haibo, QU Yufeng, et al (2872)
Evaluation acaricidal activities of <i>Momordica cochinchinensis</i> extracts against <i>Tetranychus cinnabarinus</i> .....	..... GUO Huili, SHI Guanglu, JIA Liangxi, et al (2883)
Stomatal ozone uptake modeling and comparative analysis of flux-response relationships of winter wheat .....	..... TONG Lei, FENG Zongwei, Sudebilige, et al (2890)

## Review and Monograph

Calculation method of energy ecological footprint based on global net primary productivity .....	..... FANG Kai, DONG Deming, LIN Zhuo, et al (2900)
Behavioral patterns, influencing factors, functions and risks of social play in primates .....	..... WANG Xiaowei, ZHAO Haitao, QI Xiaoguang, et al (2910)

## Discussion

Spatio-Temporal changing analysis on carbon storage of harvested wood products in China .....	..... LUN Fei, LI Wenhua, WANG Zhen, et al (2918)
---	---

## Scientific Note

Variations in allometrical relationship between stand nitrogen storage and biomass as stand development .....	..... CHENG Dongliang, ZHONG Quanlin, LIN Maozi, et al (2929)
Effect of continuous cropping of sesame on rhizospheric microbial communities .....	..... HUA Juling, LIU Guangrong, HUANG Jinsong (2936)
Effects of clipping on the growth, gas exchange and chlorophyll fluorescence of invasive plant, <i>Flaveria bidentis</i> .....	..... WANG Nannan, HUANGFU Chaohe, CHEN Dongqing, et al (2943)
Influence of vegetable cultivation methods on soil organic carbon sequestration rate .....	..... LIU Yang, YU Dongsheng, SHI Xuezheng, et al (2953)
Integrated matrix-hydrology-biological remediation technology for bank collapse lakeside zone of Chaohu Lake .....	..... CHEN Yunfeng, ZHANG Yanhui, ZHENG Xiqiang (2960)

# 《生态学报》2012 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的自然科学高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 70 元/册,全年定价 1680 元。

国内邮发代号:82-7 国外邮发代号:M670 标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 32 卷 第 9 期 (2012 年 5 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 9 (May, 2012)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100071	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933  
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元