

长江中游巴河流域胜利河优势种纹石蛾 (*Hydropsyche* sp.) 的生产力、营养基础及物质通量*

邓山, 邱爽, 王利肖, 闫云君**

(华中科技大学生命科学与技术学院, 分子生物物理教育部重点实验室, 武汉 430074)

摘要: 为了加强长江中游地区大型无脊椎底栖动物的研究工作, 2009年3月至2010年3月, 对长江中游巴河支流的胜利河毛翅目优势种的生产力和营养基础进行了为期一年的调查研究. 结果表明, 胜利河中主要毛翅目优势种纹石蛾的生活史为一年3代. 一至四级河流中, 其生物量周年平均值分别为 1.77、7.80、44.82、51.55 mg/m². 采用体长频率法测算的年均生产量为 7.72 mg/m², P/B 系数为 13.21. 利用肠内含物分析法研究了胜利河中纹石蛾的营养结构. 比较一至四级河流的营养基础发现, 无形态碎屑为纹石蛾最常见的食物, 占肠内含物的 45.22%~62.92%; 而对生产量贡献率最高的多是动物组织, 达 52.86%~68.58%. 各季节的营养基础状况也有差异, 春季无形态碎屑所占比例和对生产量的贡献率较高, 而夏、秋和冬季动物组织则有更高的生产量贡献率. 一至四级河流的年均物质通量分别为 11.83、34.76、237.52 和 273.17 g/(m²·a). 由此可见, 该优势种在河流生态系统中发挥着重要作用.

关键词: 毛翅目; 纹石蛾; 物质通量; 营养基础; 胜利河; 长江中游

Annual production, trophic basis and ingestion currency of dominant caddisfly (*Hydropsyche* sp.) in Shengli River, Bahe catchment, the middle reach of the Yangtze River basin

DENG Shan, QIU Shuang, WANG Lixiao & YAN Yunjun

(Key Laboratory of Molecular Bio-physics, College of Life and Science Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, P. R. China)

Abstract: In order to enrich the knowledge on the benthic macroinvertebrates in the middle reach of Yangtze River, a one-year investigation from March 2009 to March 2010 on secondary production and trophic basis of the dominant caddisfly in Shengli River (Shengli Town, Luotian County, Hubei Province), Bahe catchment, the middle reach of the Yangtze River Basin, was conducted. The result showed that the dominant caddisfly *Hydropsyche* sp. was trivoltinism. From the 1st to 4th rivers, the annual average biomasses of this species are 1.77, 7.80, 44.82 and 51.55 mg/m², respectively. Its annual production and P/B calculated with size (instar)-frequency method is 7.71 g/m² and 13.21, respectively. Foregut content analysis showed that amorphous detritus was the dominant food of *Hydropsyche* sp., constituting 45.22%–62.92%, while the animal material usually gave the biggest contribution to secondary production, up to 52.86%–68.58%. In spring, amorphous detritus occupied the largest proportion and contributed most production, while in summer, autumn and winter animal material contributed the largest part of production. The annual ingestion currency of the species in different order rivers was 11.83 g/(m²·a) for 1st, 34.76 g/(m²·a) for 2nd, 237.52 g/(m²·a) for 3rd, and 273.17 g/(m²·a) for 4th, respectively. The study indicated that this caddisfly played an important role in the material cycling and energy flow of the Shengli River ecosystem.

Keywords: Trichoptera; *Hydropsyche* sp.; material currency; trophic basis; Shengli River; middle reach of the Yangtze River

大型底栖动物是一类肉眼可见, 生活史的全部或大部分生活在水体底部的水生动物类群. 大型底栖动物

* 国家自然科学基金项目(30870427)资助. 2013-01-14 收稿; 2013-04-02 收修改稿. 邓山(1987~), 女, 硕士研究生; E-mail: 373654780@qq.com.

** 通信作者; E-mail: yanyunjun@hust.edu.cn.

物往往是河流生态系统生物群落的重要组成部分,它们在沉积物中进行各种生命活动,并取食河流中的其它动植物和各种碎屑,起到促进物质循环的作用.某些底栖动物对环境条件的变化和污染物十分敏感,因此,它们的数量、种类和行为可以作为良好的生物指标监测河流污染状况,且这种监测是长期、综合的,较化学监测更加全面、直观、灵敏.我国近期有较多利用大型底栖动物评价水质的研究^[1-3].

毛翅目是一类重要的大型底栖生物,幼虫生活在水中,成虫羽化后飞离水体交配,交配后雌虫仍潜入水底产卵.其中,纹石蛾属(*Hydropsyche*)是毛翅目中最大的属之一,数量丰富,分布广泛.纹石蛾属的幼虫大多生活在清洁冷凉的流水中,对基质、水质、流速和水深都有一定要求^[4-5].纹石蛾幼虫会建造固定的掩体,并在掩体中立起织网以滤食水中食物,包括藻类、真菌、有机碎屑和其它微小动物^[6-7].幼虫的筑巢和滤食行为可以调节水流,减少对河底基质的冲刷作用,并为其它生物营造适宜的环境^[8],被称为“生态系统工程师”.另一方面,纹石蛾对水中的能量流动和物质循环起着枢纽作用^[9],亦是一种很好的指示生物^[11].因此,纹石蛾是水生生态学的重要研究对象.

巴河是长江中游非常重要的一条支流,起源于大别山地区,由于沿河流域工业不发达,山区多,污染较少,是研究长江中游支流的良好代表,此前未见有相关研究报道.胜利河是巴河的源头支流之一,对其生态状况的了解对于研究巴河乃至长江中游流域的水生生态有重要意义.为此,2009年3月至2010年3月对湖北省罗田县巴河的支流胜利河的优势种纹石蛾进行了为期一年的调查,对其周年生产量、营养基础和物质通量进行了估算,为评估该优势种的生态作用提供理论和数据基础.

1 研究方法

1.1 采样点与采样时间

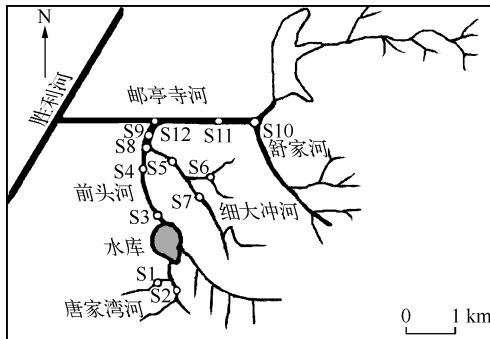


图1 胜利河及采样点分布

Fig. 1 Distribution of sampling sites in Shengli River

胜利河位于湖北省罗田县胜利镇境内,是长江主要支流——巴河的源头支流之一,本研究设置的采样点位于 $31^{\circ}08'N$, $115^{\circ}27'E$,属于北亚热带季风气候.年日照时数超过2047 h,年均气温 $15.5^{\circ}C$,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,沿岸有农田和居民居住.根据胜利河支流的不同级别、水流速度、河宽、底质、水生植物以及河流两岸的不同环境等共设置了12个采样点(图1).

各采样点生境: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;S2,水流较缓慢,河面约2 m,两边主要是乔木,河底主要是大鹅卵石,有一些腐殖质存在;S3,位于

水库下游的出口处,河边多杂草,河底是布满苔藓的石头,水面较窄,水流较急;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;S5,河流两边多杂草,河底多小石头,河面较窄,可能含有铁矿,石头为红褐色;S6,河边较开阔,河面窄,河底主要是腐殖质,水流非常缓慢;S7,河流两边有较多灌木,河底主要是白色粗沙,水流缓慢;S8,位于两条河流的交汇处,河边多杂草,水流较急,河底主要是小石头;S9,位于一堰塘下游,水流较急,河底多石头,河边多杂草;S10,位于两条三级河流的交汇处,水流急,河边有少量杂草,河中多巨石,河底有大量黄沙;S11,水流急,河底主要为鹅卵石和细沙,河边是沙滩;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.以上各站点分布在不同级别的河流中,河流的分级方式遵照1952年Strahler改进的河流等级系统^[12].S1、S6属于一级河流,S2、S5、S7属于二级河流,S3、S4、S8、S9属于三级河流,S10、S11、S12属于四级河流.

采样时间为2009年3月至2010年3月,原定为每月13—15日,但6月以来河流多发洪水,为便于河流生态系统恢复,将夏、秋季采样时间推迟至每月22—23日.

经测定,胜利河的pH为 7.13 ± 0.10 ,悬浮物浓度为 23.23 ± 2.42 mg/L,总磷、总氮、铵态氮、亚硝态氮和

硝态氮浓度分别为 0.10 ± 0.007 、 1.17 ± 0.06 、 0.66 ± 0.047 、 0.005 ± 0.0005 、 0.18 ± 0.01 mg/L,溶解氧含量为 5.90 ± 0.10 mg/L,高锰酸盐指数为 7.20 ± 0.40 mg/L,COD 含量为 29.13 ± 1.45 mg/L, Ca^{2+} 和 Cl^{-} 含量分别为 53.58 ± 5.48 和 23.56 ± 1.42 mg/L,水体硬度为 $95.00 \pm 6.22^{\circ}$,测定方法参照《地表水环境质量标准》(GB/T 3838-2002)。

1.2 标本采集与处理

采样使用 60 目的 Surber 网,每个采样点面积为 $30\text{ cm} \times 30\text{ cm}$,每样点重复一次.样品在野外筛洗后,装入塑料袋,用 10% 的福尔马林固定保存,贴好标签,带回实验室,单个样品置于白色解剖盆中,手工分拣出全部底栖动物标本.然后用 10% 的福尔马林浸泡于塑料瓶中,密闭保存.对照检索表^[13-14]鉴定纹石蛾种类。

1.3 周年生产量的测算

纹石蛾为完全变态发育的底栖动物,可由其头宽确定龄期.测量所有个体的头宽,由小到大,根据其分布情况可确定各个龄期,再绘出幼虫各龄期分布频率的逐月变化图,通过分析种群的密度变化、龄期分布频率变化推定其生活史,进而确定周年代数.生产量采用体长频率法(size-frequency method)计算,用于重表示.计算过程中,由个体密度和个体均重得到生物量,将湿重通过纹石蛾干湿比平均值^[15]进行换算,根据减员数、减员个体均重求得生产量,同龄群生产量乘以周年代数即得周年生产量,并可计算周年 P/B 系数.所有数据均通过 Excel 2003 进行处理,使用 Origin 7.5 和 Excel 2003 作图。

1.4 营养基础和物质通量分析

营养基础分析和物质通量研究采用 Benke 和 Wallace 的肠内含物分析法^[10,16]:取纹石蛾幼虫前肠,去肠壁,收集内含物,加入适量水,置于超声仪中震荡至内含物充分分散.然后将内含物悬浊液压片,于 400 倍显微镜下观察,将视野投影于坐标纸上,随机选取若干个视野拍照.人工区分照片中的内含物类型,并统计各内含物所占面积比例,由此推断内含物在前肠中所占比例.根据 Benke 推算的同化效率(无形态碎屑为 27%,植物纤维为 10%,丝状藻类为 30%,硅藻为 30%,丝状真菌为 50%,动物碎屑为 70%)和净同化率(蜉蝣目收集者和刮食者为 40%,毛翅目滤食者为 50%,摇蚊捕食者及收集者为 24%)^[4,17],可以进一步推算各类食物对生产量的贡献率,进而亦可计算纹石蛾在不同级别河流中的年均物质通量。

2 结果与分析

2.1 纹石蛾周年生产量

纹石蛾种群的交配产卵主要发生在 6、8 和 11 月,IV、V 龄幼虫主要出现在 3、5、7、9 和 11 月(图 2).由此判断,纹石蛾一周年有 3 个世代,即 6-8 月、8-11 月各为一个世代,11 月到次年 5 月为一个世代。

纹石蛾幼虫自孵化至化蛹需 1.5~4 个月,与温度有关^[7].而胜利河 6-8 月的气温基本都在 20℃ 以上,8-10 月气温在 19℃ 以上(图 3),这为纹石蛾的生长发育提供了良好的环境,使得幼虫生长发育迅速.而在秋、冬季气温降低之后幼虫进入滞育期,生长缓慢,卵也不再孵化,直到春季气温回暖,因此冬季的世代较长。

采用体长(龄期)频率法测算纹石蛾的周年生产量和 P/B 系数.纹石蛾的现存量为 0.58 g/m^2 ,一至四级河流中,生物量周年平均值分别为 1.77、7.80、44.82 和 51.55 mg/m^3 ,同龄群生产量为 2.57 g/m^2 .纹石蛾一年完成 3 个世代,周年 P/B 系数为 13.21,胜利河整体的纹石蛾平均周年生产量为 7.72 g/m^2 ,而一至四级河流中纹石蛾的周年生产量分别为 0.23、1.03、5.92 和 6.81 g/m^2 .不同龄期纹石蛾的周年生产量见表 1。

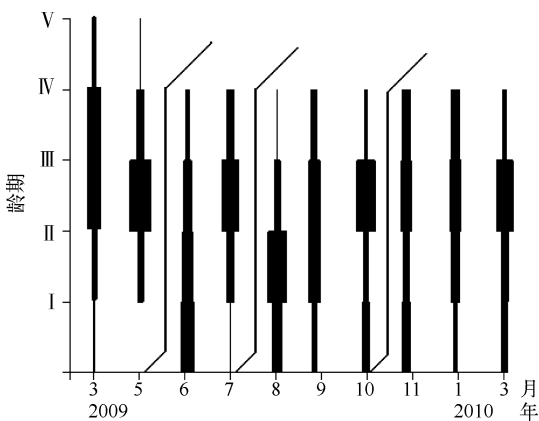


图 2 胜利河中纹石蛾种群的体长频率分布逐月动态
Fig. 2 Monthly size-frequency distribution for *Hydropsyche* sp. in Shengli River

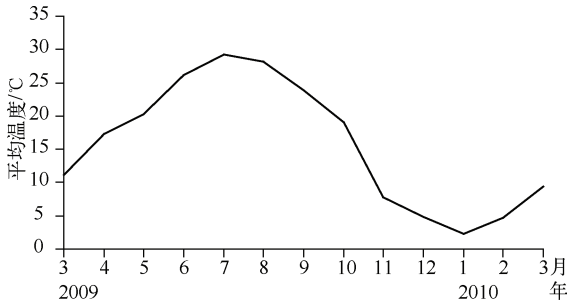


图3 罗田县2009年3月至2010年3月月均气温变化
Fig. 3 Variation of monthly average atmosphere temperature in Luotian County from March 2009 to March 2010

2.2 营养基础分析

2.2.1 不同级别河流中纹石蛾营养基础分析
依据 P/B 系数计算各样点纹石蛾的生产量,并结合对纹石蛾肠内含物的分析数据,可得到各级别河流纹石蛾的营养来源状况(图4)。

一级河流中,无形态碎屑占纹石蛾肠内含物的比例为45.22%,对生产量的贡献率为31.01%;动物组织占29.73%,生产量贡献率为52.86%;植物纤维占6.65%,生产量贡献率为1.69%;丝状藻类占15.90%,生产量贡献率为12.12%;硅藻占1.66%,生产量贡献率为1.27%;丝状真菌占0.83%,生产量贡献率为1.06%。

二级河流中,无形态碎屑占纹石蛾肠内含物的比例为62.92%,对生产量的贡献率为46.17%;动物组织占26.08%,生产量贡献率为49.61%;植物纤维占8.80%,生产量贡献率为2.39%;丝状藻类占1.96%,生产量贡献率为1.60%;硅藻占0.17%,生产量贡献率为0.13%;丝状真菌占0.07%,生产量贡献率为0.10%。

表1 胜利河中纹石蛾的周年生产量*
Tab. 1 Annual production of *Hydropsyche* sp. in Shengli River

龄期	密度/ (ind./m ²)	个体均重/ mg	生物量/ (g/m ²)	减员数/ (ind./m ²)	减员个体均重/ mg	损失量/ (mg/m ²)	生产量/ (g/m ²)
I	476.67	0.01232	0.00528	-130.00	0.03520	-4.5302	-0.02288
II	606.67	0.09856	0.05984	-283.33	0.15664	-44.4680	-0.22176
III	890.00	0.24992	0.22176	518.89	0.41184	214.0800	1.07010
IV	371.11	0.68112	0.25344	335.56	0.91168	306.0600	1.53120
V	35.56	1.22144	0.04400	35.56	1.22140	43.4300	0.21648

* 干重为湿重乘以干湿重比0.176 得出^[15]。

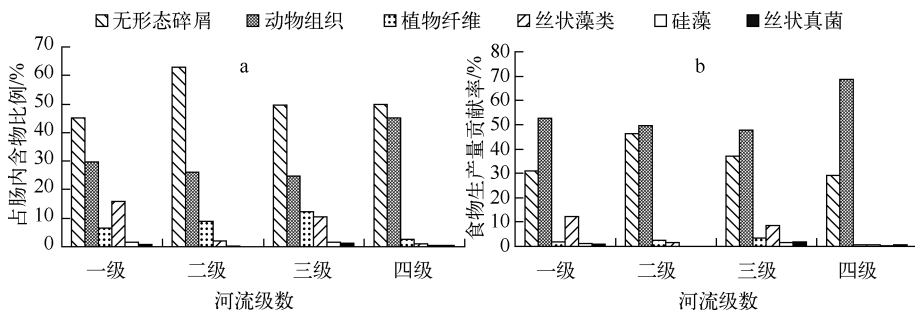


图4 胜利河不同级别河流中纹石蛾的肠内含物比例(a)和食物生产量贡献率(b)
Fig. 4 Proportion of different food types of *Hydropsyche* sp. (a) and proportion of production of *Hydropsyche* sp. attributed to various food types(b) in different order rivers of Shengli River

三级河流中,无形态碎屑占纹石蛾肠内含物的比例为49.66%,对生产量的贡献率为36.98%;动物组织占24.79%,生产量贡献率为47.86%;植物纤维占12.15%,生产量贡献率为3.35%;丝状藻类占10.38%,生产量贡献率为8.59%;硅藻占1.70%,生产量贡献率为1.40%;丝状真菌占1.32%,生产量贡献率为1.82%。

四级河流中,无形态碎屑占纹石蛾肠内含物的比例为49.86%,对生产量的贡献率为29.13%;动物组织占45.28%,生产量贡献率为68.58%;植物纤维占2.60%,生产量贡献率为0.56%;丝状藻类占1.11%,生产量贡

献率为 0.72% ;硅藻占 0.51% ,生产量贡献率为 0.33% ;丝状真菌占 0.63% ,生产量贡献率为 0.68% .

2.2.2 不同季节河流中纹石蛾的营养基础分析 对不同季节的样品分别进行分析,得到纹石蛾在不同季节的食物来源状况(图 5).

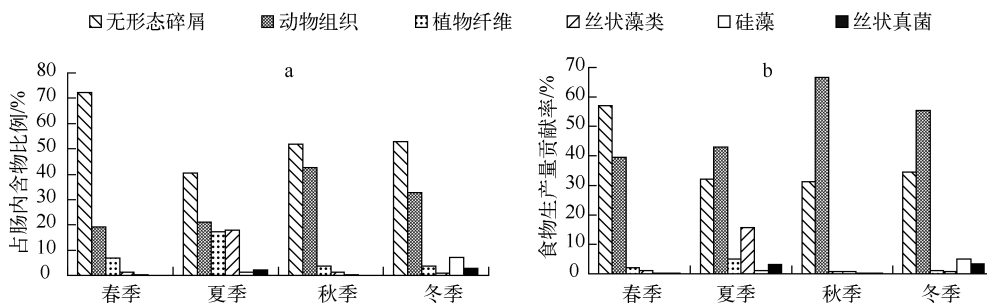


图 5 胜利河中不同季节纹石蛾的肠内含物比例(a)和食物生产量贡献率(b)

Fig. 5 Proportion of different food types of *Hydropsyche* sp. (a) and proportion of production of *Hydropsyche* sp. attributed to various food types(b) in different seasons in Shengli River

春季无形态碎屑占纹石蛾肠内含物的比例为 72.16% ,对生产量的贡献率为 56.99% ;动物组织所占比例为 19.26% ,生产量贡献率为 39.43% ;植物纤维所占比例为 6.87% ,生产量贡献率为 2.01% ;丝状藻类所占比例为 1.36% ,生产量贡献率为 1.19% ;硅藻所占比例为 0.21% ,生产量贡献率为 0.18% ;丝状真菌所占比例为 0.14% ,生产量贡献率为 0.20% .

夏季无形态碎屑占纹石蛾肠内含物的比例为 40.49% ,对生产量的贡献率为 32.07% ;动物组织所占比例为 20.86% ,生产量贡献率为 42.83% ;植物纤维所占比例为 17.37% ,生产量贡献率为 5.10% ;丝状藻类所占比例为 17.86% ,生产量贡献率为 15.72% ;硅藻所占比例为 1.23% ,生产量贡献率为 1.08% ;丝状真菌所占比例为 2.19% ,生产量贡献率为 3.21% .

秋季无形态碎屑占纹石蛾肠内含物的比例为 51.95% ,对生产量的贡献率为 31.30% ;动物组织所占比例为 42.67% ,生产量贡献率为 66.64% ;植物纤维所占比例为 3.57% ,生产量贡献率为 0.80% ;丝状藻类所占比例为 1.22% ,生产量贡献率为 0.81% ;硅藻所占比例为 0.46% ,生产量贡献率为 0.31% ;丝状真菌所占比例为 0.13% ,生产量贡献率为 0.14% .

冬季无形态碎屑所占纹石蛾肠内含物的比例为 52.74% ,对生产量的贡献率为 34.47% ;动物组织所占比例为 32.76% ,生产量贡献率为 55.52% ;植物纤维所占比例为 3.85% ,生产量贡献率为 0.93% ;丝状藻类所占比例为 0.92% ,生产量贡献率为 0.67% ;硅藻所占比例为 6.96% ,生产量贡献率为 5.05% ;丝状真菌所占比例为 2.77% ,生产量贡献率为 3.36% .

2.3 周年物质通量

2.3.1 胜利河不同级别河流的周年物质通量 将不同级别河流中纹石蛾的周年物质通量分别相加除以不同级别河流的样点数,即可得到纹石蛾在各级别河流中的年均物质通量(表 2 和图 6a).

表 2 纹石蛾在胜利河不同级别河流中的年均物质通量($g/(m^2 \cdot a)$)

Tab. 2 Yearly mass flux of *Hydropsyche* sp. in different order rivers of Shengli River

河流级数	无形态碎屑	动物组织	植物纤维	丝状藻类	硅藻	丝状真菌	总和
一级河流	5.35	3.51	0.79	1.88	0.20	0.10	11.83
二级河流	21.87	9.07	3.06	0.68	0.06	0.02	34.76
三级河流	154.31	49.20	12.03	11.98	8.46	1.53	237.52
四级河流	149.04	102.57	8.02	7.73	3.54	2.27	273.18

2.3.2 胜利河不同季节的物质通量 将各个季节每个站点纹石蛾的物质通量分开统计并求平均值,得到不同季节的月均物质通量(表 3 和图 6b).

表3 胜利河纹石蛾在一年不同季节中的月均物质通量(g/(m²·mon))
Tab. 3 Monthly mass flux of *Hydropsyche* sp. in different seasons in Shengli River

季节	无形态碎屑	动物组织	植物纤维	丝状藻类	硅藻	丝状真菌	总和
春季	7.99	2.70	0.93	0.20	0.02	0.01	11.85
夏季	10.65	6.15	2.74	3.54	0.63	0.36	24.07
秋季	65.20	28.75	2.33	2.50	0.90	0.19	99.87
冬季	11.22	7.29	0.90	0.18	2.20	0.54	22.34

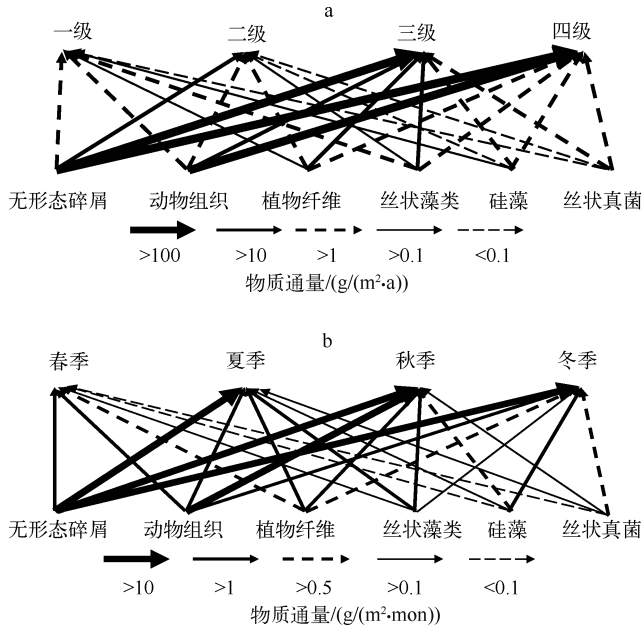


图6 纹石蛾在胜利河不同级别河流中的年均物质通量(a)和一年不同季节中的月均物质通量(b)

Fig. 6 Yearly mass flux of *Hydropsyche* sp. in different order rivers(a) and monthly mass flux of *Hydropsyche* sp. in different seasons(b) in Shengli River

表4 纹石蛾属的生产量和P/B系数比较
Tab. 4 A comparison of secondary production and P/B ratio of *Hydropsyche*

物种	生产量/(g/m ²)	P/B 系数	采样地点	来源
<i>Hydropsyche</i> sp.	53.493	9.8	湖北黑竹冲	文献[19]
<i>Hydropsyche</i> sp.	308.34	20.7	湖北叹气沟	文献[20]
<i>Hydropsyche</i> sp.	8.54	11.44	湖北胡家溪	文献[21]
<i>H. incommode</i>	21.03	6.4	Blackwater River	文献[22]
<i>H. elissoma</i>	0.348	7.4	Blackwater River	文献[22]
<i>H. erossi</i>	5.14	14.0	Ogeechee River	文献[16]
<i>H. incommode</i>	0.276	12.6	Ogeechee River	文献[16]
<i>Hydropsyche</i> sp.	7.72	13.21	湖北胜利河	本研究

3 讨论

3.1 生产量与营养基础

与其它河流相比,胜利河中纹石蛾的周年生产量和P/B系数均较适中(表4),且一年完成3个世代。

以河流级别和以季节区分时,胜利河纹石蛾前肠内含物中占比例最高的均为无形态碎屑. 此前对蜉蝣的研究表明^[18],胜利河中纹石蛾的主要食物类型也是无形态碎屑. 另外,纹石蛾对动物组织的摄食量往往仅次于无形态碎屑,但是动物组织拥有比无形态碎屑更高的生产量贡献率,这是由于动物性食物具有较高的同化率. 而此前对蜉蝣的研究认为胜利河中纹石蛾第二重要的食物资源是植物纤维,动物组织含量较少^[18],这可能是由于蜉蝣为食碎屑者,而纹石蛾为杂食性,且喜好动物性食物. 另一方面,植物纤维在4个级别河流中虽占有一定比例,但因其同化率不高而对生产量的贡献率很低. 在国外的相关研究中,纹石蛾对无形态碎屑和动物组织的摄食量也均较高^[16],不同种类分别对各种植物性食物有相当量的摄食. 而在本研究中,植物性食物,尤其是硅藻和丝状真菌总体上含量很低,仅在特定时间稍高,可能是因为该种纹石蛾不喜好这两种食物,也可能是因为胜利河不适于这两种食物资源的生长。

3.2 不同级别河流的营养基础差异

各级河流中均是无形态碎屑占纹石蛾肠内含物的比例最高,其次为动物组织,但是无形态碎屑的生产量贡献率却低于动物组织,这是由于动物性食物有较高同化率. 另一方面,一级河流和

三级河流的丝状藻类也有一定的贡献率,这可能是由于一级河流和三级河流的郁闭度不高,使得水体光合作用较强;同时,也因这一部分的贡献,使得一级和三级河流的无形态碎屑含量和贡献率稍低.四级河流中,纹石蛾肠内含物中动物组织所占比例很高,几乎与无形态碎屑相同,而其他类型食物含量则都很低,可能是因为四级河流得到了大量来自上游的食物碎屑、排泄物和动物残体,而来自河流自身的藻类则相对较低.Vannote 等的河流连续系统理论中将一至三级河流归为上游河段,表现为河岸植物残体等外源性营养物质较多,而四至六级河流为中游河段,其中来自上游的营养物质减少,主要靠内源性营养物供给^[23].然而在本研究中,S3 上游有一水库,三级河流的采样点 S3、S4、S8、S9 和四级河流的采样点 S12 均处于水库的下游,直接受到水库调节作用的影响,因此结果与自然状态有些差异.

3.3 不同季节河流的营养基础差异

春季,纹石蛾肠内含物中无形态碎屑含量最高,达 72.16%,对生产量的贡献也最高,动物组织的含量和贡献率较低,其他食物类型则更低.这可能是由于经过冬天后河流内其它食物资源还未来得及恢复.在夏季采样的时候的确发现河内水绵旺盛生长的现象,而统计夏季纹石蛾的肠内含物比例时可见较多水绵和其他藻类、维管植物.因此夏季动物组织也较少,同时无形态碎屑的比例也明显降低,而植物纤维和丝状藻类的比例明显升高.可能是因为夏季河内与河岸的植物都得到充分生长,抑制了其它类型食物的生长,水流又加快了无形态碎屑的流失,使得纹石蛾发生食性偏移.在采样点 S8 6 月的样本中,丝状藻类含量甚至达到 33.01%.Hall 等的研究表明,郁闭度高的河流中无形态碎屑的含量和生产量贡献率都较高,而郁闭度低的河流则是藻类的含量和贡献较大.在一郁闭度低的河流中,藻类的生产量贡献率达到了 28%^[24].由此可见,胜利河的郁闭度较高,只有在阳光充足的季节才有藻类的大量生长.另一方面,夏季以来降水较多,增加了河流中的颗粒性食物的输入,丝状藻类生长茂盛,给滤食性的纹石蛾提供了良好的生存环境,因此夏、秋季的纹石蛾生物量较大.秋、冬季无形态碎屑和动物组织的含量都较多,其中动物组织的含量明显高于春、夏季,对生产量的贡献也高,在 55% 以上.这可能是由于入秋以后河内大量昆虫羽化并很快死亡,为河内生物提供了较多动物性食物;冬季硅藻的含量稍高一点,可能是由于其他食物资源不足,使得纹石蛾对食物的选择性降低.Entrekin 等对美国中西部 3 条上游河流进行分析,发现冬季较为温暖,冰覆盖率低的河流生产力明显比其他两条河流高^[25].胜利河冬季的平均温度较高,冬季采样的时候也没有发现河流大面积结冰的现象,因此胜利河冬季的生产力比较高.

3.4 物质通量的研究

物质通量与纹石蛾的数量分布和活动状况有关,反映了它在物质循环方面做出的贡献.胜利河不同级别的河流中,物质通量随着河流级别的增加而增加.三、四级河流的物质通量明显高于一、二级.一、二级河流的食物资源较少,而三、四级河流可能接受了更多来自上游的营养物质,尤其是夏季,河流多发洪水,且采样点 S3 上游的水库也会为灌溉而放水,这一时段可能有很多的水生昆虫和营养物质被冲到下游,且水流的适量提升对纹石蛾的呼吸和滤食行为都非常有利,因此下游的生物量和物质通量均更高一些.

对比胜利河纹石蛾在不同季节的物质通量,发现纹石蛾的摄食量为秋季 > 夏季 > 春季 > 冬季,且冬、春季节物质通量的总和才能达到夏季或秋季的水平.这可能是由于冬、春季节食物较少,温度低,环境较恶劣,导致卵和幼虫多处滞育期,生长较慢.胜利河的纹石蛾一年完成 3 个世代,分别为 6—8 月、8—11 月和 11 月至次年 5 月,正是夏季、秋季和冬春季各一代.这样看来各个世代的物质通量相差不大,食物资源充足和温度适宜可以使纹石蛾生长繁殖更快.

本研究表明,胜利河的纹石蛾为一年 3 代,其周年生产量和 P/B 系数与亚热带同类河流中的相比较为适中,纹石蛾是胜利河中的优势物种,且是滤食者,对河流的总生产量有很重要的贡献^[25],因此纹石蛾的生产量可以基本反映胜利河总生产量的状况.对营养基础的分析发现,纹石蛾的主要食物是无形态碎屑和动物组织,其中春、夏季节取食无形态碎屑较多,秋、冬季节取食动物组织较多;上游河段取食无形态碎屑较多,靠近下游取食动物组织较多,这与不同级别河流的食物来源密切相关.对物质通量的研究表明,纹石蛾下游的物质通量比上游高,夏、秋季节的物质通量比冬、春季节高,反映了纹石蛾生态功能的时空动态差异.上述研究结果对评估优势种——纹石蛾幼虫在不同级别河流生态系统中的生态功能具有重要意义,对构建河流食物网和了解河流生态系统功能等也具有重要价值.同时,也为保护和利用胜利河提供了数据基础.

4 参考文献

- [1] 李 强, 杨莲芳, 吴 璟等. 底栖动物完整性指数评价西苕溪溪流健康. 环境科学, 2007, **28**(9): 2141-2147.
- [2] 李金国, 王庆成, 严善春等. 凉水、帽儿山低级溪流中水生昆虫的群落特征及水质生物评价. 生态学报, 2007, **27**(12): 5008-5018.
- [3] 江 晶, 温芳妮, 顾 鹏等. 湖北清江流域胡家溪大型底栖动物群落结构及水质评价. 湖泊科学, 2009, **21**(4): 547-555.
- [4] 龙建国, 张建新. 兼长角纹石蛾的生态特征. 生态学杂志, 2002, **21**(3): 25-28.
- [5] Wallace JB, Webster JR. The role of macroinvertebrates in stream ecosystem function. *Annu Rev Entomol*, 1996, **41**(1): 115-139.
- [6] Wallace J, Webster J, Woodall W. The role of filter feeders in flowing waters. *Arch Hydrobiol*, 1977, **79**(4): 506-532.
- [7] 龙建国, 张建新, 彭南妮. 兼长角纹石蛾的生物学特征. 水生生物学报, 2000, **24**(4): 399-401.
- [8] Nakano D, Yamamoto M, Okino T. Ecosystem engineering by larvae of net-spinning stream caddisflies creates a habitat on the upper surface of stones for mayfly nymphs with a low resistance to flows. *Freshwater Biol*, 2005, **50**: 1492-1498.
- [9] Cardinale BJ, Gelmann ER, Palmer MA. Net spinning caddisflies as stream ecosystem engineers: The influence of *Hydropsyche* on benthic substrate stability. *Funct Ecol*, 2004, **18**: 381-387.
- [10] Benke AC, Wallace JB. Trophic basis of production among net-spinning caddisflies in a southern Appalachian stream. *Ecology*, 1980, **61**(1): 108-118.
- [11] Morse JC, Bae YJ, Munkhjargal G *et al.* Freshwater biomonitoring with macroinvertebrates in East Asia. *Front Ecol Environ*, 2007, **5**(1): 33-42.
- [12] Strahler AN. Dynamic basis of geomorphology. *Geol Soc Am Bull*, 1952, **63**(9): 923-938.
- [13] Morse JC, Yang L, Tian L. Aquatic insects of China useful for monitoring water quality. Nanjing: Hohai University Press, 1994: 269-308.
- [14] Wiggins G. Larvae of the north American caddisfly genera (Trichoptera); 2ed. Canada: University of Toronto Press, 1996: 139.
- [15] 闫云君, 梁彦龄. 水生大型无脊椎动物的干湿重比的研究. 华中理工大学学报, 1999, **27**(9): 61-63.
- [16] Benke AC, Wallace JB. Trophic basis of production among riverine caddisflies: Implications for food web analysis. *Ecology*, 1997, **78**(4): 1132-1145.
- [17] Benke AC, Wallace JB, Harrison JW *et al.* Food web quantification using secondary production analysis: Predaceous invertebrates of the snag habitat in a subtropical river. *Freshwater Biol*, 2001, **46**: 329-346.
- [18] 邓 山, 叶才伟, 王利肖等. 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.
- [19] 闫云君, 李晓宇. 汉江流域黑竹冲河部分优势大型底栖动物的周年生产量. 水生生物学报, 2007, **31**(3): 297-306.
- [20] 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[学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
- [21] Jiang J, Deng S, Gu P *et al.* Temporal dynamics of production and its trophic basis in two caddisflies (*Hydropsyche* sp. and *Neureclipsis* sp.) in Hujiaxi Stream, a second-order stream in Middle China. *J Freshwater Ecol*, 2010, **25**(1): 141-149.
- [22] Benke AC. Chapter 10: Secondary production of aquatic insects. In: Resh VH, Rosenberg DM eds. The ecology of aquatic insects. New York: Praeger Publishers, 1984: 289-322.
- [23] Vannote RL, Minshall GW, Cummins KW *et al.* The river continuum concept. *Can J Fish Aquat Sci*, 1980, **37**(1): 130-137.
- [24] Hall RO, Likens GE, Malcom HM. Trophic basis of invertebrate production in 2 streams at the Hubbard Brook experimental forest. *J N Am Benthol Society*, 2001, **20**(3): 432-447.
- [25] Entekin SA, Rosi-Marshall EJ, Tank JL *et al.* Macroinvertebrate secondary production in 3 forested streams of the upper Midwest, USA. *J N Am Benthol Society*, 2007, **26**(3): 472-490.