

西苕溪 EPT 昆虫群落分布与环境因子的典范对应分析

李 强,杨莲芳,吴 璟,王备新*

(南京农业大学昆虫学系 水生昆虫与溪流生态实验室,南京 210095)

摘要:浙江安吉西苕溪 43 个样点 102 种 EPT 昆虫(蜉蝣目 Ephemeroptera、襀翅目 Plecoptera、毛翅目 Trichoptera)与 9 个环境因子典范对应分析(CCA)表明,3 种环境因子海拔、总氮、电导率对 EPT 群落起主要作用。CCA 排序图把样点分成 3 个差异样点组,样点组 与海拔高度正相关,与总氮显著负相关,属于上游溪流,撕食者占所采集撕食者总数的 68.5%,水质清洁。样点组 与电导率呈显著正相关,属于上游河面较宽的溪流,撕食者仅次于样点组 (18.6%),水质较好。样点组 与总氮显著正相关,总氮、总磷平均值分别为 3.53 和 0.16,滤食者占所采集滤食者的 85.01%,水质差。CCA 排序图较好的说明了 EPT 昆虫群落的分布和环境的关系。

关键词: EPT;环境因子;典范对应分析;水生昆虫;溪流;取食功能团

文章编号: 1000-0933(2006)11-3817-09 **中图分类号:** Q145, Q178 **文献标识码:** A

Canonical correspondence analysis between EPT community distribution and environmental factors in Xitiao River, Zhejiang, China

LI Qiang, YANG Lian Fang, WU Jing, WANG Bei-Xin* (Lab of Aquatic Insects and Stream Ecology, Department of Entomology, Nanjing Agricultural University, Nanjing, 210095, China). Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(11): 3817~3825.

Abstract: The relationship between 102 species of EPT (Ephemeroptera, Plecoptera and Trichoptera) and environmental factors from 43 sampling sites in Xitiao River was studied by Canonical Correspondence Analysis. The result showed that the altitude, total nitrogen, conductivity were major environmental factors correlated with EPT community. All sampling sites were plotted out 3 groups by CCA. Sites from the group located in the upstream of Xitiao River had significant positive correlation with altitude and negative correlation with total nitrogen. Shredders in the group shared the all collected shredders of 68.5%, which indicated that the water quality was clean in this group. Sites of the group although located in upstream too, their width were wider than those in group and positively correlated with conductivity. Shredders were only inferior to the group (18.6%). Sites of the group located in middle reaches had significant positive correlation with total nitrogen and the average value of total nitrogen and total phosphorus were 3.53 mg/L and 0.16 mg/L respectively. The filterers of the group shared the all collected filterers of 85.01%. CCA ordination well visually demonstrated the EPT community distribution and its relationship to the environmental factors.

Key words: EPT; environment factor; CCA; aquatic insect; stream; functional feeding group

用于水质生物评价的生物包括细菌、浮游动物、藻类、高等水生植物、鱼类和大型底栖无脊椎动物等。大型底栖无脊椎动物是水质生物评价中应用最广泛的一类生物^[1]。水生昆虫的种类和数量最高可占大型底栖无脊椎动物的 95% 以上,其对水体污染的适应能力多样化,有的种类只适宜在清洁水中生活,而有些则可以

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40301047 和 30370252)

收稿日期: 2006-04-20; **修订日期:** 2006-08-10

作者简介: 李强 (1981~), 男, 山东淄博人, 硕士生, 主要从事水生昆虫与淡水生态研究。

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wangbeixin@njau.edu.cn

Foundation item: The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China (No. 40301047, 30370252)

Received date: 2006-04-20; **Accepted date:** 2006-08-10

Biography: LI Qiang, Master, mainly engaged in aquatic insects ecology and freshwater ecology.

生活在严重污染的水体中。可用以水质生物监测的水生昆虫主要有：蜉蝣目、~~襀~~翅目、毛翅目、鞘翅目、双翅目、鳞翅目、蜻蜓目、广翅目、脉翅目、弹尾目等 10 个目，其中蜉蝣目 (Ephemeroptera)、~~襀~~翅目 (Plecoptera)、毛翅目 (Trichoptera) (简称 EPT) 是分布最广泛、对水质最敏感、应用最多的三个目。

EPT 分类单元数是美国 EPA 开展水质生物评价的常用指标之一^[2]，但 EPT 昆虫群落的结构和功能除与水质污染程度有关外，还受到许多非污染因子如纬度、经度、海拔、河流级别、底质组成、流速和碱度等的影响。

典范对应分析 (Canonical Correspondence Analysis, CCA) 是一种直接排序方法，能够在同一排序图上反映群落、生物种类与环境三者或两两间的关系，可以非常有效地研究生物分布与环境的关系^[3]。本文目的是希望通过 CCA 分析 EPT 昆虫群落与环境因子之间的关系，揭示影响西苕溪 EPT 昆虫群落分布的主要环境变量，提高 EPT 分类单元数评价水质的准确性。

1 研究地点和方法

1.1 研究地点概况

西苕溪 (东经 119°14' ~ 120°29', 北纬 30°23' ~ 31°11') 位于浙江省湖州市境内，属太湖流域。西苕溪干流总长 157 km，流域面积约 2200 km²，是太湖上游的重要来水支流。径流的年际变化显著，峰值出现在 5、6 月份和 9 月份。西苕溪是山区河流，发源地天目山，森林茂密，没有大的污染源，水质良好。近年来，农业源污染加重，工业废水、生活污水未经任何处理直排入河，造成西苕溪中下游水质形势不容乐观。

1.2 样本(品)采集

1.2.1 底栖动物 2004 ~ 2005 年在浙江安吉地区采集了 43 个样点的 EPT 昆虫样本，其中参照点 10 个，受干扰点 33 个。参照点选择在未受人类活动干扰或干扰极小的地点。底栖动物采集是在 100 m 长的采样区域内，选取 5 个样点，包括 3 个急流样和 2 个缓流样，采样总面积为 0.465 m²。用索伯网 (40 目纱，0.093 m²) 采集时，用脚或小铁扒用力搅动索伯网前定量框内的底质，并用手将粘附在石块上的底栖动物洗刷入网。所采标本直接在野外用 40 目铜筛筛选，并用 5% ~ 10% 的福尔马林液固定后带回实验室。标本一般鉴定到属或种，至少区分到种。并记录每个分类单元 (属、种) 的个体数。功能类群的划分参考 Merritt and Cummins^[4,5]，并结合采集经验和部分 EPT 昆虫的解剖。

1.2.2 水体理化指标测定 溶氧量 DO，电导率 Conductivity，酸碱度 pH 和温度用 U-10 多参数水质检测仪 (HORIBA Ltd. Japan) 直接在现场测定。化学耗氧量 COD 采用重铬酸钾法，总氮采用紫外分光光度法，总磷采用钼蓝法，NO₃⁻-N 采用吸收比色法^[6]。

1.2.3 栖境指标的测定 参考 Barbour 等的方法^[7]，记录以下物理栖境指数：溪流底质 (Bottom substrate)、栖境复杂度 (Habit complexity)、静水水体质量 (Pool quality)、堤岸稳定性 (Bank stability)、堤岸保护程度 (Bank protection)、荫蔽度 (Canopy)。溪流平均宽度、溪流平均深度的测量参照 Hauer 等的方法^[8]。

1.3 数据分析

典范对应分析 (CCA) 应用 CANOCO4.53 分析软件和 CANODRAW 4.0 作图软件对环境数据和生物学数据自行压缩进行排序分析。9 个环境因子的 Pearson 相关性处理在 SPSS11.5 上进行。

2 结果与分析

2.1 群落组成及数量

43 个采样点共获得 EPT 昆虫幼虫 71650 头，33 科 64 属 102 种。蜉蝣目 (Ephemeroptera) 9 科 24 属 44 种，

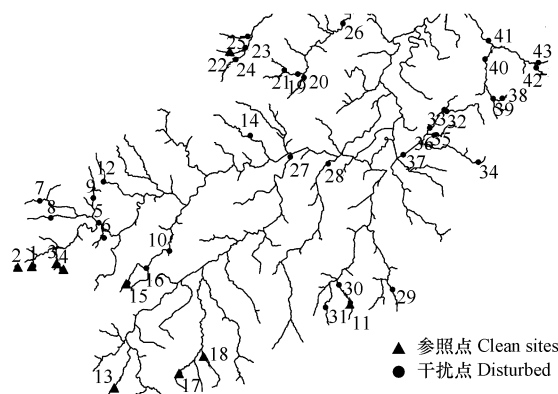


图 1 西苕溪 43 个采样点分布

Fig. 1 The distribution of 43 sampling sites in Xitiao River

(▲参照点 clean sites ●干扰点 disturbed sites)

52165 头,占总数的 72.8%;~~蜉~~翅目(Plecoptera)4 科 12 属 20 种,299 头占总数的 0.42%;毛翅目(Trichoptera)20 科 28 属 37 种,19186 头占总数的 26.78%。

其中出现频率最高的 10 个类群依次为,四节蜉科(因为鉴定能力有限只到科),宽基蜉属的两个种 *Choroterpes* sp₁ (36)、*Choroterpes* sp₂ (37);中华细蜉 *Caenis sinensis* (2)、花斑侧枝纹石蛾 *Ceratopsyche* sp₁ (77)、心唇短脉石蛾 *Cheumatopsyche* sp₁ (79)、凹唇短脉石蛾 *Cheumatopsyche* sp₂ (80)、梧州蜉 *Ephemera wuchowensis* (17)、红斑似动蜉 *Cinygmmina rubromaculata* (21)、锯形蜉属 *Serratella* sp₁ (12)。(括号中的数字代表物种序号,参见表 1)

出现频率小于 5%并且仅能生活在清洁水体中的物种,有指示清洁水体的功能,代表性物种为:

大眼河花蜉 *Potamanthus macrophthalmus* (42)、叉~~蜉~~属 *Nemoura* sp (48)、新绩属 *Neoperla* sp (60)、小短石蛾属 *Micrasema* sp₁ (66)、径石蛾属 *Economus* sp₂ (69)、竖毛螯石蛾属 *Apsilochorema* sp₂ (75)、长腺纹石蛾 *Diplectrona* sp (82)、滨齿角石蛾属 *Marilia* sp₁ (91)、角石蛾属 *Stenopsyche* sp₃ (100)。

2.2 群落分类与环境因子分析

用于分析的环境因子有 9 个(表 2),其中栖境指数是由溪流底质、栖境复杂度、堤岸稳定度、堤岸保护度、遮蔽度 5 个数据组成,即直接累加 5 个指数的值。

2.2.1 环境因子之间的相关性 对 9 种环境因子的 Pearson 相关分析表明(表 3)。西苕溪流域内,海拔越高,栖境就越好(0.623)。水温越高,氮含量也越高(0.488)。总氮和总磷的相关性很高(0.483)。综上所述,西苕溪中上游受人类干扰活动后,表现在水温、总氮和总磷不断升高,栖境质量不断下降。

2.2.2 CCA 排序 9 个环境变量在输入 Canoco for Windows 4.53 时进行了手动筛选,以去除一些无效的变量($P > 0.05$)。经过筛选得到 3 个环境变量,即海拔、电导率、总氮。

CCA 排序结果分析表明,海拔的相关性与第 1 轴的关系最大,相关系数高达 0.87,且为正相关。总氮与第 1 轴显著负相关,相关系数为 0.72,电导率与第 2 轴显著相关,相关系数为 0.75。(表 4 和图 2)

前三轴的特征值占总特征值的 19.2%(表 5),说明 3 个环境因子能解释 19.2%的 EPT 昆虫群落的结构变化。种类和环境因子排序轴的相关系数为 0.91、0.88 和 0.77,对于种类来讲,第一、第二排序轴间相关系数仅为 -0.004,表示这两个排序轴几乎相互垂直;对于环境因子来讲,前两个排序轴的相关性为 0,这些说明排序结果是可信的。

按各样点在图中彼此间的距离,可以大致将所有样点归纳为 3 组(图 2),按各物种在图中彼此间的距离,也可以大致将所有群落归纳为 3 组(图 3),而且与样点的布局有较高的吻合。说明群落随环境梯度分布。

首先样点组 沿第一排序轴的方向与海拔高度相关,几乎重合。与总氮环境因子显著负相关,反映了随着海拔梯度的升高,氮、磷含量越低,平均值为 1.49 mg/L 和 0.05 mg/L,远远小于样点组 ,栖境指数也随之相应的变好,样点组 属于上游的清洁溪流,溪流多为 2 级支流。2、3、4、11、13、22 号参照点均在这个样点组。栖境指数平均值 71.64 均高于其他两组(表 6)。

其原因是,一是海拔越高,溪流两边的树木生长繁茂且迫近水边,遮蔽度越来越好,使到达河床的光通量减少,河床的附着藻类和大型水生植物发育不良。因此溪流的底质以

枯枝落叶为主,粗有机物颗粒较多,撕食者(shredder)群落繁盛。二是海拔越高,人为的影响因素就减少,溪流原始面貌保持得好。样点组 的撕食者占采集的所有撕食者的 68.5%(图 4A)。群落种类明显对氮、磷较敏感,只能在清洁水体中存在,主要种类(图 3)有 6、7、9、10、16、17、34、52、54、55、72、79、97 等(数字代表物种序号,物种序号参见表 1)。

沿第一轴方向,呈显著正相关的,电导率为主导因子(图 2),说明样点组 的水体离子浓度较高,从表 6 还可以看出样点组 的平均海拔明显高于样点组 和 ,而且总氮、总磷指标平均值分别为 0.86 mg/L 和 0.08 mg/L,均较小。栖境指数平均值略小于样点组 ,说明水体比较清洁,所选取的参照点 1 和 17 分布其中,但其溪流的平均宽度较大,样点组 应该属于上游河面较宽的溪流,溪流基本为 2 级支流。这里面分布的物种都能适应较高的电导率,但对总氮、总磷忍耐程度很低,所以在富营养化水体里面应该不会出现这些种类,

表 1 EPT 昆虫名录、出现频度及取食功能团

Table 1 List of EPT (Ephemeroptera, Mecoptera, Trichoptera), their frequency of occurrence in sampling sites and functional feeding groups(FFG)

序号 No.	物种名 Species	频度 Frequency	FFG	序号 No.	物种名 Species	频度 Frequency	FFG
1	四节蜉科 Baetidae	92.19	CO	52	Gibosia sp	10.94	PR
2	中华细蜉 Caenis sinensis	68.75	CO	53	钩襴属 Kamimuria sp ₁	14.06	PR
3	长刺细蜉 Caenis longispina	37.5	CO	54	钩襴属 Kamimuria sp ₂	15.63	PR
4	黑点细蜉 Caenis nigropunctata	45.31	CO	55	Kiotina sp ₁	9.38	PR
5	近岸细蜉 Caenis rivulorum	26.56	CO	56	Kiotina sp ₂	1.56	PR
6	带肋蜉属 Cincticostella sp ₁	26.56	CO	57	新绩属 Neoperla sp ₁	15.63	PR
7	带肋蜉属 Cincticostella sp ₂	28.13	CO	58	新绩属 Neoperla sp ₂	6.25	PR
8	美丽弯握蜉 Drunella bella	6.25	SC	59	新绩属 Neoperla sp ₃	4.69	PR
9	小蜉属 Ephemerella sp ₁	1.56	CO	60	新绩属 Neoperla sp ₄	1.56	PR
10	小蜉属 Ephemerella sp ₂	1.56	CO	61	纯绩属 Paragnetina sp ₁	7.81	PR
11	天目山锐利蜉 Ephacereia tianmushanensis	12.5	CO	62	襴科 Perlidae sp ₁	9.38	PR
12	锯形蜉属 Serratella sp ₁	50	CO	63	襴科 Perlidae sp ₂	4.69	PR
13	锯形蜉属 Serratella sp ₂	31.25	CO	64	襴科 Perlidae sp ₃	1.56	PR
14	锯形蜉属 Serratella sp ₃	40.63	CO	65	襟襴属 Togoperla sp ₁	6.25	PR
15	红天角蜉 Uracanthella rufa	46.88	CO	66	小短石蛾属 Micrasema sp ₁	3.13	SH
16	生米蜉 Ephemera shengmi	32.81	CO	67	径石蛾属 Economus sp ₁	9.38	SH
17	梧州蜉 Ephemera wuchowensis	53.13	CO	68	径石蛾属 Economus sp ₂	1.56	FI
18	绢蜉 Ephemera serica	35.94	CO	69	魔石蛾属 Agapetus sp ₁	4.69	SC
19	动蜉属 Cinygma sp	1.56	SC	70	舌石蛾属 Glossosoma sp ₁	17.19	SC
20	斜纹似动蜉 Cinygmminaobliquistrata	48.44	SC	71	瘤石蛾属 Goera sp ₁	28.13	SC
21	红斑似动蜉 Cinygmmina rubromaculata	53.13	SC	72	钩翅石蛾属 Helicopsyche sp	12.5	SC
22	似动蜉属 Cinygmmina sp ₃	42.19	SC	73	竖毛螯石蛾属 Apsilochorema sp ₁	14.06	PR
23	扁蚰蜉属 Ecdyonurus sp ₁	7.81	SC	74	竖毛螯石蛾属 Apsilochorema sp ₂	1.56	PR
24	扁蚰蜉属 Ecdyonurus sp ₂	6.25	SC	75	歪唇纹石蛾 Aphropsyche sp ₁	12.5	FI
25	扁蚰蜉属 Ecdyonurus sp ₃	3.13	SC	76	花斑侧枝纹石蛾 Ceratopsyche sp ₁	60.94	FI
26	高翔蜉属 Epeorus sp ₁	14.06	SC	77	弱斑侧枝纹石蛾 Ceratopsyche sp ₂	45.31	FI
27	高翔蜉属 Epeorus sp ₂	7.81	SC	78	心唇短脉石蛾 Cheumatopsyche sp ₁	60.94	FI
28	高翔蜉属 Epeorus sp ₃	6.25	SC	79	凹唇短脉石蛾 Cheumatopsyche sp ₂	54.69	FI
29	扁蜉属 Heptagenia sp ₁	17.19	SC	80	平唇短脉石蛾 Cheumatopsyche sp ₃	53.13	FI
30	扁蜉属 Heptagenia sp ₂	18.75	SC	81	长腺纹石蛾 Diplectrona sp	1.56	FI
31	假蜉属 IronIron sp ₁	20.31	SC	82	黄条纹石蛾 Hydropsyche sp ₁	7.81	FI
32	假蜉属 Iron sp ₂	7.81	SC	83	长角纹石蛾 Macrostemum sp ₁	7.81	FI
33	尼克斯蜉属 Nixe sp	1.56	SC	84	Orthotrichia sp	3.13	SH
34	桶形赞蜉 Paegniodes cupulatus	21.88	SC	85	Neoseverinia sp ₁	7.81	SH
35	江西等蜉 Isonychia kiangsinensis	25	FI	86	傍姬长角石蛾属 Parasetodes sp ₁	12.5	CO
36	宽基蜉属 Choraterpes sp ₁	90.63	CO	87	姬长角石蛾属 Setodes sp ₁	28.13	CO
37	宽基蜉属 Choraterpes sp ₂	84.38	CO	88	姬长角石蛾属 Setodes sp ₂	17.19	CO
38	柔裳蜉属 Habrophlebiodes sp ₁	20.31	CO	89	幻沼石蛾属 Apatania sp ₁	14.06	SC
39	柔裳蜉属 Habrophlebiodes sp ₂	12.5	CO	90	滨齿角石蛾属 Marilia sp ₁	1.56	SH
40	思罗蜉属 Thrallus semicastanea	4.69	CO	91	chimarra sp ₁	1.56	FI
41	尤氏红纹蜉 Rhoenanthus youi	6.25	FI	92	拟石蛾属 Phryganopsyche sp ₁	10.94	SH
42	大眼河花蜉 Potamanthus macrophthalmus	1.56	FI	93	Neureclipsis sp ₁	7.81	FI
43	美丽河花蜉 Potamanthus formosus	6.25	FI	94	Polycentropus sp ₁	3.13	FI
44	大别山越南蜉 Vietnamella dabieshanensis	18.75	SH	95	蝶石蛾属 Psychomyia sp ₁	6.25	CO
45	越南蜉属 Vietnamella sp ₂	3.13	SH	96	蝶石蛾属 Psychomyia sp ₂	3.13	CO
46	卷襴科 Leuctridae sp	1.56	SH	97	原石蛾属 Rhyacophila sp ₁	26.56	PR
47	叉襴科 Nemouridae sp	3.13	SH	98	角石蛾属 Stenopsyche sp ₁	20.31	FI
48	叉襴属 Nemoura sp	1.56	SH	99	角石蛾属 Stenopsyche sp ₂	17.19	FI
49	钮襴属 Acroneuria sp	3.13	PR	100	角石蛾属 Stenopsyche sp ₃	1.56	FI
50	Acroneuriini sp ₁	1.56	PR	101	乌石蛾属 Venoa sp ₁	7.81	SC
51	Acroneuriini sp ₂	1.56	PR	102	黑毛剑石蛾属 Melanorichia sp ₁	3.13	CO

FFG 取食功能团 functional feeding group, SH 撕食者 shredder, SC 刮食者 scraper, CO 集食者 collector, FI 滤食者 filterer, PR 捕食者 predator

表 2 43 个样点原始环境因子数据

Table 2 Environmental factor data of 43 sampling sites

样点 Site	E1 (m)	E2 ()	E3	E4 (m)	E5	E6 (mg/L)	E7 (mg/L)	E8 (mg/L)	E9 (ms/cm)	溪流级别 Stream order
1	5.00	17.10	7.70	200	72	0.74	0.05	8.04	0.19	2
2	1.90	16.40	7.99	224	82	0.08	0.06	8.60	0.10	2
3	3.15	18.40	7.75	196	85	0.12	0.03	8.31	0.14	3
4	1.42	17.40	7.71	232	87	0.89	0.05	8.77	0.09	2
5	12.00	19.70	8.43	136	78	0.40	0.04	8.09	0.11	3
6	1.10	18.60	7.52	150	45	0.10	0.03	7.74	0.11	2
7	1.80	18.50	7.37	250	63	0.18	0.05	7.66	0.09	2
8	3.60	17.90	7.90	168	55	0.62	0.08	8.15	0.33	2
9	4.50	20.80	7.82	149	63	0.06	0.06	7.65	0.07	2
10	20.00	22.50	7.97	97	66	0.59	0.04	7.48	0.20	3
11	2.40	16.50	7.55	181	84	1.72	0.03	8.64	0.09	2
12	3.20	14.30	7.36	214	81	1.49	0.04	9.93	0.06	2
13	4.50	13.60	7.33	267	76	0.96	0.06	9.78	0.07	3
14	2.10	17.40	7.64	71	65	1.42	0.07	9.40	0.09	2
15	1.90	17.00	8.18	174	87	3.08	0.10	8.43	0.28	2
16	4.20	20.40	7.73	113	76	4.15	0.22	8.25	0.11	2
17	5.50	17.60	6.87	584	90	1.55	0.15	8.30	0.01	1
18	3.50	18.30	7.20	441	87	3.60	0.16	7.70	0.01	2
19	5.30	19.50	6.78	33	62	4.38	0.29	9.00	0.04	3
20	5.50	20.20	7.07	28	73	4.62	0.42	8.20	0.03	4
21	4.50	20.20	7.05	47	73	4.61	0.10	8.85	0.04	2
22	1.20	17.30	6.38	180	88	5.48	0.11	8.46	0.03	1
23	3.50	18.60	7.03	190	87	1.82	0.07	8.09	0.03	3
24	4.50	24.00	7.56	125	57	4.11	0.10	8.72	0.05	2
25	4.50	21.80	7.26	92	71	2.88	0.14	8.64	0.03	4
26	9.80	23.70	7.07	1	63	2.12	0.15	7.50	0.05	4
27	25.00	21.20	8.50	25	62	3.96	0.13	10.20	0.04	4
28	18.00	23.70	7.81	24	58	2.31	0.10	10.40	0.09	3
29	2.10	26.30	7.54	83	49	4.71	0.72	8.07	0.09	2
30	4.50	24.30	8.04	102	71	3.58	0.05	8.70	0.08	2
31	6.70	24.00	8.46	184	78	2.61	0.10	7.03	0.04	2
32	3.50	19.60	7.23	51	53	3.01	0.10	9.64	0.04	2
33	2.00	20.50	6.84	65	55	4.22	0.42	4.56	0.05	2
34	1.80	22.50	7.72	104	82	3.12	0.03	8.62	0.03	2
35	6.00	24.50	6.88	16	57	3.39	0.10	6.30	0.11	3
36	6.20	26.10	7.85	25	50	4.62	0.13	10.02	0.05	2
37	11.00	24.50	6.83	10	35	4.34	0.10	2.96	0.10	3
38	0.50	19.30	7.61	131	77	2.35	0.07	7.35	0.04	2
39	12.00	19.90	6.75	54	55	3.11	0.03	8.70	0.04	3
40	5.80	21.50	7.69	42	50	3.51	0.03	9.16	0.04	3
41	9.50	19.00	6.85	12	57	3.63	0.05	7.70	0.04	4
42	1.50	22.70	7.30	147	65	4.98	0.10	7.94	0.04	2
43	1.50	23.70	7.25	86	70	3.35	0.07	7.18	0.13	2

E1 溪流宽度 Mean stream width, E2 水温 Water temperature, E3 酸碱度 pH, E4 海拔 Altitude, E5 栖息指数 Habitat index, E6 总氮 Total nitrogen, E7 总磷 Total phosphorus, E8 溶解氧 Dissolved oxygen, E9 电导率 Conductivity,下同 the same below

表 3 43 个样点 9 种环境因子的 Pearson 相关性分析

	E1 (m)	E2 ()	E3	E4 (m)	E5	E6 (mg/L)	E7 (mg/L)	E8 (mg/L)	E9 (ms/cm)
E1 (m)	1								
E2 ()	0.295	1							
E3	0.250	0.092	1						
E4 (m)	- 0.327	- 0.534	0.012	1					
E5	- 0.279	- 0.531	0.119	0.623	1				
E6 (mg/L)	0.022	0.488	- 0.384	- 0.404	- 0.231	1			
E7 (mg/L)	- 0.089	0.309	- 0.210	- 0.152	- 0.211	0.483	1		
E8 (mg/L)	0.098	- 0.266	0.301	0.065	0.253	- 0.094	- 0.170	1	
E9 (ms/cm)	0.010	- 0.144	0.405	- 0.004	- 0.050	- 0.404	- 0.147	- 0.107	1

表 4 环境因子与 CCA 排序轴之间的相关系数

环境因子 Environmental factors	AX1	AX2	AX3
海拔 Altitude	0.87	- 0.06	0.21
总氮 TN	- 0.72	0.13	0.45
电导率 Conductivity	0.44	0.75	- 0.14

表 5 排序轴特征值、种类与环境因子排序轴的相关系数

	AX1	AX2	AX3	AX4	总惯量 Total inertia
特征值 Eigenvalues	0.35	0.11	0.07	0.23	2.76
种类与环境因子相关系数 Species-environment correlations	0.91	0.88	0.77	0	

撕食者和捕食者群落居多,捕食者占采集所有捕食者的 18.3 % (图 4B),捕食者占优。主要种类有 14、18、19、21、28、30、39、40、59、65、67、85、89、100 等 (数字代表物种序号,物种序号参见表 1)。

沿第一轴方向,呈显著负相关的,是总氮因子,与海拔因子显著负相关,样点组 的样点分布很有序的沿着总氮梯度分布 (图 2),从表 6 可以看出总磷、总氮的平均值分别为 3.53 mg/L 和 0.16 mg/L 远远高于样点组 和 , 栖境指数均值为 66.16,小于其他 2 个样点组。说明溪流受氮、磷污染比较重,溪流的平均宽度和水温也相对较高,均值分别为 5.97 m 和 21.53 ,是河流的中游阶段,溪流多为 3、4 级支流。河宽增大,日照量增加,水温升高,氮、磷水平升高,附着藻类群集,发育较好,以附着藻类等新鲜植物为基础资源的食物链的比重增加,为刮食者群落提供了食物来源,同时,上游加工不完全的有机物顺流而下,逐渐变小,利用这些饵料的绝大部分属于滤食者。样点组 的滤食者占所采集的 85.01 %,河流昆虫以纹石蛾和蜉蝣类为代表。群落是滤食者群落,主要种类有 1、2、12、13、14、15、77、78、79、80、92、95、98 等 (数字代表物种序号,物种序号参见表 1)。

集食者在每个样点组中所占的比例基本没有变化 (图 4B),说明用集食者不能很好的指示水质的变化情况。撕食者、捕食者的数量随着氮、磷含量的增加而递减,表现在从样点组 到样点组 含量,逐组递减。捕食者在水体清洁的环境中数量较多,而且能忍受较高

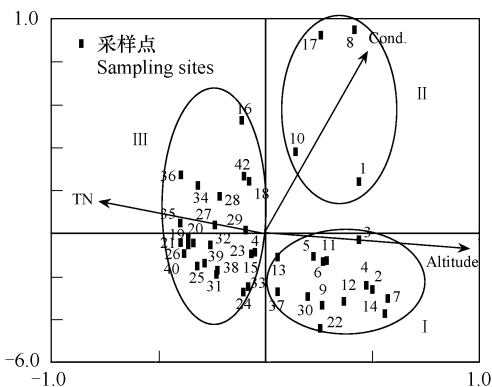


图 2 样点的 CCA 排序图
Fig. 2 CCA ordinations of sampling sites

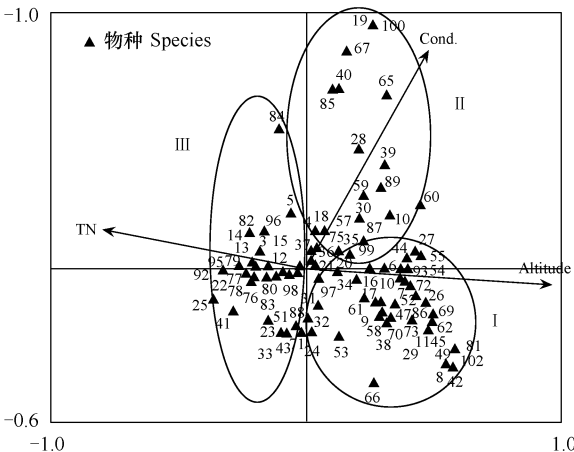


图 3 属种的 CCA 排序图
Fig. 3 CCA ordination of species

的电导率。刮食者、滤食者的数量则随着氮、磷含量的增加而递增,说明这两个取食功能团类群耐污能力较强,但它们不能忍受较高的电导率,所以在样点组 里的数量相对较少。

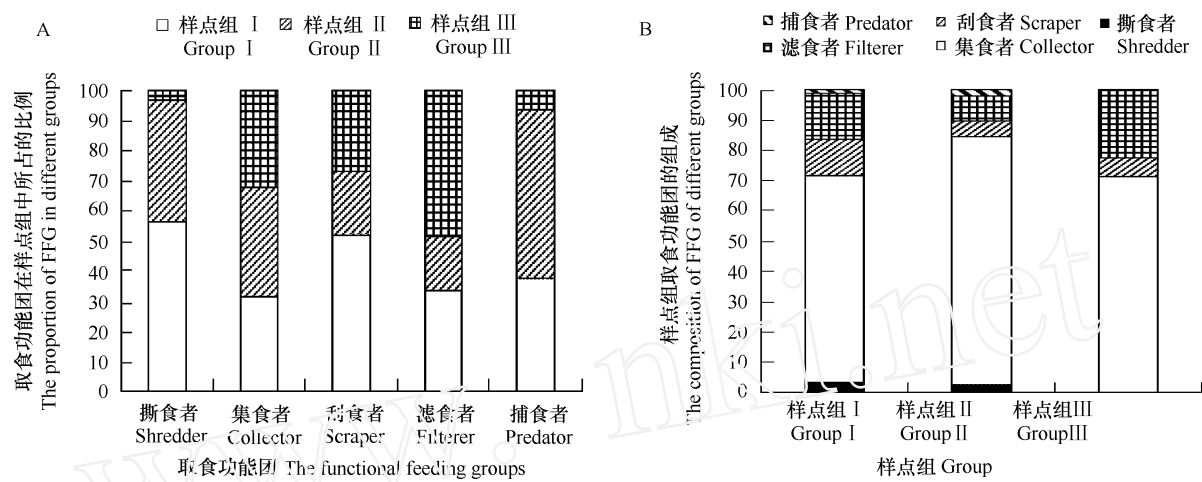


图 4 取食功能团群落变化

Fig. 4 The functional feeding groups(FFG) in sampling sites

图 5 是物种-样点的 CCA 排序图,从中可以明显看出 3 个样点组的群落分布情况,样点组 和样点组 的样点大多是参照点,海拔较高,栖境指数较好,所以其中分布的物种很多,说明两个样点组,物种多样性好,受到人为影响少,水质清洁。样点组 样点多,但种类少,这些种类大多耐污染,生命力强。同时,直观地表明了 EPT 昆虫群落的随环境变化而分布的情况。

3 讨论

在本研究中,不同干扰条件下的 EPT 昆虫群落的结构和分布有明显差异,反映了 EPT 昆虫群落对不同干扰的响应。EPT 昆虫群落的研究与溪流生态、河流生态研究相结合,并运用于河流水环境监测有良好的应用前景。

EPT 总分类单元数、出现频度、丰富度等生物指数在美国的水质生物评价实践中已经被充分验证和实 施^[9-11],最近的研究提议把 EPT 改成 EPTC(C, Coleoptera 鞘翅目),这样会使指数更加全面和准确^[12]。由于 EPT 昆虫群落结构与功能本身就很复杂,影响因素众多,单独用 EPT 种类丰富度可能会使分析结果较片面。但通过 CCA 分析能很好的把 EPT 昆虫群落结构及其相对数量与溪流的理化指标有机的结合起来,可以弥补生物数据单方面反映溪流水质的不足。

Vannote 等人提出了河流连续体概念(River Continuum Concept, RCC)^[13]说明了河流系统生物群落结构和功能与非生物环境之间的关系,包括河流体系中的生物群落采取的生存对策与河流系统内有机物的输送、利用及储存保持一致,描述了取食功能团对有机物的利用等方面形成规律性变化。本文通过数据所得出的结论基本符合河流连续体概念。

样点组 属于上游的清洁溪流,溪流多为 2 级支流,粗有机物颗粒(CPOM)较多,因此以枯枝落叶为饵料

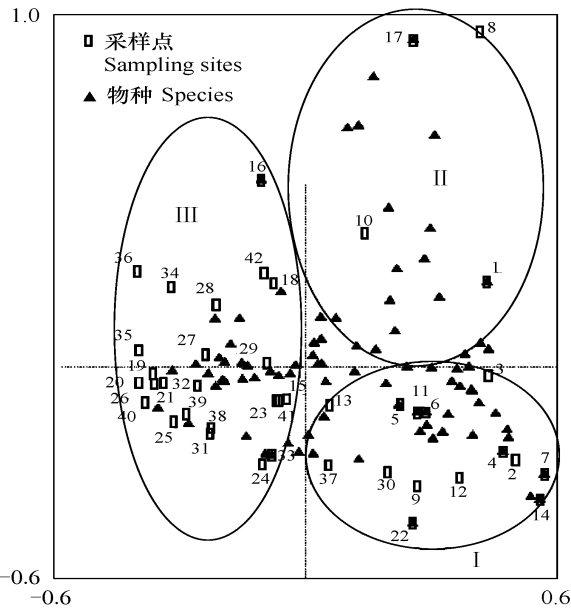


图 5 物种-样点的 CCA 排序图

Fig. 5 CCA ordination of species-sampling sites

源的撕食者占优,撕食者占所采集撕食者总数的 68.5%;样点组 溪流多为 3、4 级支流,上游加工不完全的有机物顺流而下,逐渐变小,以细有机物颗粒(FPOM)为食的滤食者占优。这两点均符合河流连续体概念,但样点组 溪流基本为 2 级支流,捕食者却占优,具体原因可能是样点组中的采样点太少,不具有代表性。

表 6 样点组的环境数据

Table 6 Environmental data of the sample groups

环境因子 Environmental factor	样点组 Group		样点组 Group		样点组 Group	
	范围 Range	均值 Mean	范围 Range	均值 Mean	范围 Range	均值 Mean
E1 (m)	1.1 ~ 12	3.91	3.60 ~ 20	8.53	0.5 ~ 25	5.97
E2 ()	13.6 ~ 24.50	18.41	17.1 ~ 22.50	18.78	17 ~ 26.3	21.53
E3	6.38 ~ 8.43	7.55	6.87 ~ 7.97	7.61	6.75 ~ 8.50	7.41
E4 (m)	10 ~ 267	168.71	97 ~ 584	262.25	1 ~ 441	91.72
E5	35 ~ 88	71.64	55 ~ 90	70.75	49 ~ 87	66.16
E6 (mg/L)	0.06 ~ 5.48	1.49	0.59 ~ 1.55	0.86	1.82 ~ 4.98	3.53
E7 (mg/L)	0.01 ~ 0.11	0.05	0.04 ~ 0.15	0.08	0.03 ~ 0.72	0.16
E8 (mg/L)	2.96 ~ 9.93	8.19	7.48 ~ 8.30	7.99	4.56 ~ 10.4	8.25
E9 (ms/cm)	0.03 ~ 0.14	0.09	0.01 ~ 0.33	0.18	0.01 ~ 0.28	0.061

本文中撕食者数量的变化虽然能很好的说明与环境因子的对应关系,但是其数量在样点组里所占的比例较小,所采集的所有底栖动物中撕食者所占比例也较少,平均为 0.31%。其原因可能是,(1)样点组 和样点组 中的采样点中 1 级支流太少,沿岸带植被生长不够繁茂,遮蔽度没有达到要求。(2)研究流域植被以竹林为主,品种单一,与之相应落入溪流的落叶绝大部分为竹叶,撕食者食物类型单一,造成撕食者种类和数量都偏少。根据 RCC 概念,河流上游 1 级和 2 级支流的集食者比例应该在 45%~47%,撕食者比例应该在 25%~35%之间;3 级和 4 级支流的集食者比例应该在 49%~50%,撕食者比例应该在 5%~15%之间^[14],而 3 个样点组中的集食者数量所占比例较高,分别为 69%、80%、71%,比例明显高于预测值,撕食者数量所占比例较低,分别为 3.43%、2.46%、0.21%,比例明显低于预测值。这说明采样点溪流沿岸植被的破坏导致枯枝落叶等粗有机物颗粒缺乏;另一方面,溪流两岸人类活动产生大量的有机物,如大量使用的农药化肥、村庄的生活污水、人工养殖、工业有机污染物、植被破坏而导致的水土流失等,这些有机物输入河流,为一些集食者的生长和繁荣创造了条件^[15]。RCC 概念是基于未受干扰的自然河流系统而建立的理论,而受到人工干扰的污染的河流底栖动物群落的结构和功能均有差异,本研究的 EPT 群落取食功能团的变化,证明所有采样点都或多或少的受到干扰,达不到 RCC 概念的预测值。

在溪流中,大型底栖无脊椎动物不同取食功能团群落的分布,可以很好的反映溪流生态系统的营养水平,撕食者被认为是一种对水质敏感的群落,而滤食者则有很强的耐污能力,集食者则是溪流中普遍存在的群落^[16,17],从图 4 就能很好的看出这一点。通过取食功能团的分类方法,可以定量描述某种动物对某种食物资源的依赖程度,使得动物形态和行为适应性与食物资源之间的关系更加清晰^[15],食物资源的变化又反映了环境的变化,本文很好的证明了取食功能团与环境因子的对应关系。

从分类的角度来讲,群落中每个种都是一个分类单元,都是同等重要的,但从生态角度考虑,则在每个营养层次中总有少数几种起着决定作用,它们从数量、大小、生活力等方面影响着整个群落,受其他种的影响很小,它们被称作优势类群,EPT 昆虫群落同样也存在。通常用相对多度(群落内不同种的数量间的相对比例)来划分等级,以区分优势类群、常见类群、稀有类群,但对于大型底栖无脊椎动物来说,却没有明确的划分标准。所以本研究只是列出了频度最高的 10 个优势种和频度小于 5%的稀有种,无法精确的对 3 个群落里的类群进行划分。

References:

- [1] Wang B X, Yang L F. Advances in rapid bio-assessment of water quality using benthic macro-invertebrates. Journal of Nanjing Agricultural University, 2001, 24(4): 107 ~ 111.

- [2] Lenat D R, Penrose D L. History of the EPT taxa richness metric. *Bulletin of the North American Benthological Society*, 1996, 13: 305 ~ 307.
- [3] Zhang J T. *Quantitative Ecology*. Beijing: China Science and Technique Press, 2004, 120 ~ 176.
- [4] Merritt R W, Cummins K W. Trophic relations of macro-invertebrate. In: *Methods in stream ecology*. 1996, INC, San Diego, USA. Academic Press.
- [5] Merritt R W, Cummins K W. *An introduction to the aquatic insects of North America*, 3rd Edition. Kendall/Hunt Publishing Company, Dubuque, Iowa, 1996.
- [6] The eutrophication survey research of lake, reservoir all over the country work group. *The eutrophication survey criterion of lake*. Beijing: China Environment Science Press, 1987, 142 ~ 171.
- [7] Barbour M T, Gerritsen J, Snyder B D, *et al* eds. *Rapid bio-assessment for use in streams and wadeable rivers: periphyton, benthic macro-invertebrate and fish*, 2nd Edition, EPA 841-OB-88-002. U. S. Environment Protection Agency, Office of Water. Washington, D C, 1999.
- [8] Hauer F R, Lamberti G A eds. *Methods in stream ecology*. INC, San Diego, USA, Academic Press, 1996.
- [9] DeShon J E. Development and applicability of the Invertebrate Community Index. In: Davis W S, Simon T P. eds. *Biological Assessment and Criteria: Tools for Water Resource Planning and Decision-making*. Boca Raton, FL: Lewis Publishers, 415, 1995.
- [10] Kerans B L, Karr J R. A benthic index of biotic integrity (B-IBI) for rivers of the Tennessee Valley. *Ecological Applications*, 1994, 4: 768 ~ 785.
- [11] Barbour M T, Gerritsen J, Snyder B D, *et al*. 1997. Revision to Rapid Bio-assessment Protocols for use in streams and rivers. Periphyton, benthic macro-invertebrates. [Http://www.epa.gov/owow/wtr1/monitoring/AWPD/RBP/html](http://www.epa.gov/owow/wtr1/monitoring/AWPD/RBP/html)
- [12] Barbour M T, Gerritsen J, Griffith G E, *et al*. A framework for biological criteria for Florida streams using benthic macro-invertebrates. *J. N. Am. Benthol. Soc*, 1996, 15: 185 ~ 211.
- [13] Vannote R L, Minshall G W, Cummins K W, *et al*. The River Continuum Concept. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1980, 37: 130 ~ 137.
- [14] Carpenter D A. Testing the River Continuum Concept: Exploring Ecological Processes in the Wheeling Creek Watershed: [Master's thesis]. West Virginia University, 2001.
- [15] Hu B J, Yang L F, Wang B X, *et al*. Functional feeding groups of macro-invertebrates in 1 ~ 6 order tributaries of the Chang Jiang River. *The Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2005, 11 (4): 463 ~ 466.
- [16] Beauchard O, Gagneur J S, Brosse. Macro-invertebrate richness patterns in North African streams. *Journal of Biogeography*, 2003, 30: 1821 ~ 1833.
- [17] MACS (Mid-Atlantic Coastal Streams Work group), Standard operating procedures and technical basis: Macro-invertebrate collection and habitat assessment for low-gradient non-tidal streams. Delaware Department of Natural Resources and Environmental Conservation, Dover, DE 1996.
- [18] Morse J C, Yang L F, Tian L X. *Aquatic Insects of China Useful for Monitoring Water Quality*. Nanjing: Hohai University Press, 1994, 68 ~ 92.
- [19] Jost C R, Böhmer J, Blank J. Macro-invertebrate functional feeding group methods in ecological assessment. *Hydrobiologia*, 2000, 422/423: 225 ~ 232.
- [20] Scarlett P, O'Hare M. Community structure of in-stream bryophytes in English and Welsh rivers. *Hydrobiologia*, 2006, 553: 143 ~ 152.
- [21] Effie A G, Catherine M P. Does the river continuum concept apply on a tropical island? Longitudinal variation in a Puerto Rican stream. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2006, 63: 134 ~ 152.

参考文献:

- [1] 王备新, 杨莲芳. 大型底栖无脊椎动物水质快速生物评价的研究进展. *南京农业大学学报*, 2001, 24 (4): 107 ~ 111.
- [3] 张金屯. *数量生态学*. 北京: 中国科学技术出版社, 2004, 120 ~ 178.
- [6] 全国主要湖泊、水库富营养化调查研究. 课题组. 湖泊富营养化调查规范. 北京: 中国环境科学出版社, 1987, 142 ~ 171.
- [15] 胡本进, 杨莲芳, 王备新, 单林娜. 闽江河 1 ~ 6 级支流大型底栖无脊椎动物取食功能团演变特征. *应用与环境学报*, 2005, 11 (4): 463 ~ 466.