

不同类群水生昆虫群落间的一致性以及空间和环境因子的相对作用

秦春燕^{1*} 张 勇^{1*} 于海燕² 王备新^{1**}

1 (南京农业大学植物保护学院昆虫系水生昆虫与溪流生态实验室, 南京 210095)

2 (浙江省环境监测中心, 杭州 310007)

摘要: 生物多样性监测和保护过程中通常用到指示类群, 然而对于这些指示类群有效性的测度仍然十分欠缺。为探讨不同类群水生昆虫群落的一致性及其空间因子、环境变量的相对影响, 作者于2010年4月对东苕溪流域源头溪流21个采样点进行了调查。共记录水生昆虫7目44科92属130种。我们将水生昆虫群落划分成鞘翅目(C)、蜉蝣目+襀翅目+毛翅目(EPT)和双翅目+广翅目+蜻蜓目(DMO)3个类群。一致性分析结果表明: 3个类群的群落一致性(r)较高, 分别为C对EPT $r = 0.65$ ($P < 0.001$)、C对DMO $r = 0.67$ ($P < 0.001$)、EPT对DMO $r = 0.82$ ($P < 0.001$)。方差分解表明环境变量是影响不同类群水生昆虫群落结构的主要因素, 空间因子的影响相对较小。环境因子中影响不同类群水生昆虫群落的关键变量大体相似, 其中海拔、pH、平均流速和化学需氧量是最主要的驱动因子。我们的结果表明该研究区域不同类群的水生昆虫群落一致性很高, 且对环境变量的响应也相似; 因此, 在水生昆虫生物多样性保护中可考虑利用其中的某一类群, 如蜉蝣目+襀翅目+毛翅目(EPT)类群, 作为有效的指示类群。

关键词: 群落一致性, 水生昆虫, 空间因子, 环境变量, 生物多样性

Concordance among different aquatic insect assemblages and the relative role of spatial and environmental variables

Chunyan Qin^{1*}, Yong Zhang^{1*}, Haiyan Yu², Beixin Wang^{1**}

1 Laboratory of Aquatic Insects and Stream Ecology, Department of Entomology, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095

2 Zhejiang Environmental Monitoring Center, Hangzhou 310007

Abstract: Indicator groups are often used for biodiversity monitoring and conservation, however, the effectiveness of these groups in representing biodiversity is rarely tested. To explore community congruence among different aquatic insect groups and how this may be affected by spatial factors and environmental variables, we carried out an investigation on aquatic insects in April 2010 in 21 headwater streams within the Dongtiaoxi Basin, China. In total, we recorded 130 species from 92 genera, 44 families and 7 orders. We divided the stream insects into three groups, Coleoptera (C), Ephemeroptera + Plecoptera + Trichoptera (EPT), and Diptera + Megaloptera + Odonata (DMO). In Mantel tests, three aquatic insect groups showed significant cross-taxon concordance, C versus EPT ($r = 0.65$, $P < 0.001$), C versus DMO ($r = 0.67$, $P < 0.001$) and EPT versus DMO ($r = 0.82$, $P < 0.001$). According to variance partitioning procedures, environmental variables were the major determinants of aquatic insect community structures, while spatial factors were less important. Species composition in different taxon groups exhibited similar relationships to environmental gradients. Altitude, pH, mean velocity and concentration of oxygen were the most important drivers of aquatic insect assemblage patterns. Overall, our results indicated that, at least in the studied region, community congruence among different aquatic insect groups was strong. We propose that one group, such as the EPT group, may be used as a biodiversity indicator in future cost-effective surveys.

Key words: community congruence, aquatic insect, spatial factors, environmental variables, biodiversity

收稿日期: 2012-11-22; 接受日期: 2013-04-22

基金项目: 国家自然科学基金(30870345, 40971280)

* 共同第一作者 Co-first authors

** 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: wangbeixin@njau.edu.cn

目前,生态系统退化和生物多样性降低已达到了史无前例的水平。相对于陆生生态系统而言,淡水生物多样性的锐减更加迅速(Sala *et al.*, 2000)。淡水生态系统主要受到来自于人类活动引起的水体污染、栖息生境退化、水资源过度利用、水流改变和外来种入侵等各种威胁(Dudgeon *et al.*, 2006),其生物多样性退化严重,再加上可利用资源有限的现实,故在生物多样性的调查和保护中采用适当的指示物显得十分必要(Heino, 2010)。这些指示物主要包括环境要素、指示物种和指示类群(Williams *et al.*, 2002; Heino *et al.*, 2005)。对于指示类群而言,一般必须满足以下3个条件:首先,必须在分类学和生态学上都被人们充分认识;其次,与被指示类群在群落结构方面有较强的一致性;最后,与被指示类群对环境干扰梯度的响应相同或相似(Noss, 1990; Pearson, 1994; Hering *et al.*, 2006)。

水生昆虫作为淡水生态系统中的重要组成部分,对整个淡水生态系统的结构、功能都有重要的作用,且已被广泛应用于淡水生态系统的健康评价和生物多样性保护中(颜忠诚和Zhong, 2004; 李金国等, 2007)。然而,目前对水生昆虫指示类群的研究仍然较为欠缺(Heino, 2002; Briers & Biggs, 2003)。虽然已有研究表明一些水生昆虫类群(如蜻蜓目、鞘翅目昆虫)可作为指示生物(Heino *et al.*, 2005)。但一方面,这些研究仅着眼于不同类群的物种丰富度,并未考虑不同类群的群落相似性,而物种丰富度仅仅是物种多样性的一种测度方式,且不同类群和地理区域的物种丰富度本身差异较大(Soininen *et al.*, 2009)。已有研究证明与较大变异的物种丰富度相比,不同类群的群落相似性更适合用来衡量不同生物类群的群落一致性(Su *et al.*, 2004),应用于生物多样性保护工作中。另一方面,针对群落一致性的一些研究得到的结果也不尽相同。例如:Grenouillet等(2008)以鱼类、大型无脊椎动物及硅藻为研究对象,发现鱼类和大型无脊椎动物和硅藻群落一致性很强,但是后两者群落间的一致性很弱。Soininen等(2009)的结果表明,至少在他们研究的较大地理范围溪流中,硅藻和大型藻类群落结构一致性很强,并建议可将硅藻用作溪流藻类群落的指示类群。针对水生昆虫群落, Sánchez-Fernández等(2006)通过测定水生昆虫(水生甲虫群落)与其他水生昆虫类群物种丰富度的相似性,认为较高分类级

别(属级或科级)的水生甲虫可以作为指示类群用于生物多样性的调查和保护中。然而, Heino等(2009)则发现几个不同水生昆虫类群(蜉蝣目、毛翅目、襀翅目和摇蚊科)间一致性很差;并认为单一的水生昆虫类群不能很好地指示水生昆虫群落整体的生物多样性。

因此,笔者以东苕溪源头溪流空间因子、环境变量和底栖生物数据为基础,分析不同类群水生昆虫的群落一致性以及空间因子、环境变量的相对影响,初步探讨导致各类群水生昆虫群落结构差异的关键环境变量,并讨论在我们的研究区域是否有合适的指示类群可用于未来水生昆虫多样性的监测和保护。

1 材料与方法

1.1 采样点布设与样品采集

东苕溪(119°28′–120°8′ E, 30°5′–30°57′ N)发源于天目山脉马尖岗(1,271 m)南麓水竹坞,其干流南苕溪汇合东天目山南部各溪流后注入青山水库。东苕溪流域的气候类型为亚热带季风气候,年平均降雨量约为1,460 mm。

为排除人为因素的干扰,在东苕溪流域21条源头溪流(1、2级支流)上布设采样点(图1),采样点的选取遵循参照点的基本标准:样点所在流域内森林覆盖率超过95%,河道形态自然、荫蔽度高;且没有桥梁和道路建设的干扰。共设置样点21个,其中12个位于临安,4个位于德清,5个位于余杭境内。于2010年4月进行野外采样工作,参照王备新等(2003)的底栖生物标本采集方法:在100 m长的采样河段,用索伯网(250 μ m, 0.09 m²)采5个样(3急2缓),采样总面积0.45 m²。所采标本在野外用40目的钢筛筛选,并用4%的福尔马林溶液固定后带回实验室。在实验室体视镜和显微镜下进行样品鉴定,根据实际鉴定水平,参考Morse等(1994)鉴定到可行的分类单元。

在野外生物采样的同时,用GPS(Garmin etrex)记录样点的海拔,水温、pH、电导率、总溶解固体物和溶氧用多参数水质检测仪(HANNA, Italy)现场测定;同时,还利用流速仪(FP 101, Global Water)、测距仪等工具现场测定了平均流速、平均水面宽度和平均水深。底质的测定采取 Wolman(1954)和 Kondolf(1997)的Z字型测定方法,并且计算4种主要底质组成(砂、砾石、卵石和大石块)的比例。其他

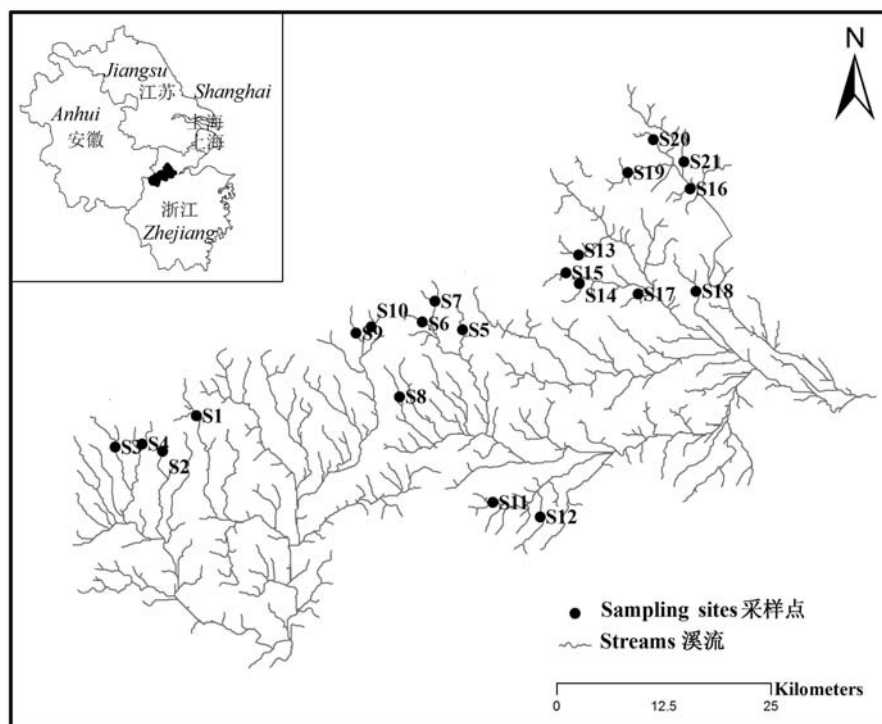


图1 浙江东茗溪流域源头溪流底栖动物采样点分布图

Fig. 1 Locations of the sampling sites in 21 headwater streams within the Dongtiaoxi Basin, Zhejiang

指标(总氮、亚硝氮、磷酸根、总磷、钙离子浓度、镁离子浓度和高锰酸盐指数)的测定通过采集水样,在实验室依据相关国家标准(中华人民共和国环境保护部, 2002)进行。

1.2 数据分析

进行数据分析之前,除pH和溶解氧(DO)外,所有理化和生物数据都进行相应的转换(一般常数用 $\log(x+1)$,小数用 \arcsin 以满足正态分布。我们的分析主要包括以下3个方面:

(1) 采用Spearman秩相关分析对环境变量进行筛选,剔除冗余的变量($|r| > 0.8$);利用主轴邻距法(principal coordinates of neighbor matrices, PCNM)提取空间因子(带有正值的PCNMs);考虑到不同水生昆虫类群的生物多样性和实际鉴定水平,将水生昆虫群落划分成鞘翅目(C)、蜉蝣目+襀翅目+毛翅目(EPT)和双翅目+广翅目+蜻蜓目(DMO)3个类群,利用meta多维尺度排序(metaMDS)分析采样点位的生物组成模式,利用Mantel test分析不同类群的群落一致性。

(2) 结合水生昆虫相对多度和筛选后的环境变

量,在metaMDS的基础上,利用‘envfit’函数找到影响不同类群水生昆虫群落结构的关键环境变量。

(3) 结合生物数据、环境变量和空间因子,利用‘varpart’函数进行方差分解,分析空间因子[S]、环境变量[E]以及空间因子和环境变量共同[E∩S]对生物群落结构差异的相对解释量。

所有的数据分析均在R软件中结合多元分析软件包‘vegan’完成(Oksanen *et al.*, 2012)。

2 结果

2.1 环境变量

本文共测定了海拔、物理栖境和水体化学三个方面的20个环境变量。Spearman秩相关分析表明其中的5个变量(总磷、亚硝氮、温度、总溶解固体物和大石块)与其他变量显著相关($|r| > 0.8$)。为避免信息冗余,剔除这5个变量后得到15个环境变量的范围和均值分布(表1)。

2.2 水生昆虫组成

本文共鉴定得到水生昆虫7目44科92属130种。其中,鞘翅目10科24属29种,蜉蝣目+襀翅目+毛翅

表1 东苕河流域底栖动物采样点主要环境变量的均值和范围
Table 1 The range and average value (Mean ± SE) of major environmental variables for the macrozoobenthos sampling sites within the Dongtiaoxi Basin

变量 Variables	缩写 Abbreviation	平均值±标准误 Mean ± SE	最小值 Minimum	最大值 Maximum
海拔 Altitude (m)	alt	326 ± 43	35	796
总氮 Total nitrogen (mg/L)	TN	1.37 ± 0.33	0.82	2.73
磷酸盐 Phosphorus (mg/L)	PO ₄	0.02 ± 0.01	0.00	0.08
化学需氧量 Chemical oxygen demand (mg/L)	COD	2.50 ± 0.30	0.32	6.62
酸碱度 pH	pH	7.7 ± 0.2	6.5	9.7
溶解氧 Dissolved oxygen (mg/L)	DO	9.7 ± 0.2	8.1	12.7
电导 Conductivity (μg/cm)	Cond	80 ± 19	22	440
钙离子 Mean Ca ²⁺ concentration (mg/L)	Ca	64 ± 6	23	122
镁离子 Mean Mg ²⁺ concentration (mg/L)	Mg	5 ± 1	2	24
平均流速 Mean velocity (m/s)	Vmean	0.6 ± 0.1	0.1	1.4
平均水宽 Mean wetted width (m)	Width	2.3 ± 0.4	0.4	7.1
平均水深 Mean depth (cm)	Depth	12 ± 2	3	26
砂 Percentage of sand substrate	Sand	0.11 ± 0.04	0.00	0.62
砾石 Percentage of gravel substrate	Gravel	0.45 ± 0.04	0.00	0.85
卵石 Percentage of cobble substrate	Cobble	0.62 ± 0.03	0.38	0.84

目(EPT)类群19科40属53种, 双翅目+广翅目+蜻蜓目(DMO)类群15科28属48种。各类群的主要水生昆虫种类组成及其出现的频度见表2。其中某物种*i*频度(F)的计算公式如下:

$$F = \text{物种}i\text{出现的样点数} / \text{所有样点的总数}$$

2.3 群落一致性

根据Mantel分析, 3种不同水生昆虫类群间有显著的一致性。且EPT和DMO类群的一致性最高, $r=0.82(P<0.001)$; 鞘翅目(C)和DMO类群的一致性次之, $r=0.67(P<0.001)$; 鞘翅目(C)和EPT类群的一致性最低, $r=0.65(P<0.001)$ 。

2.4 环境变量和空间因子的相对作用

三种不同类群水生昆虫群落meta多维尺度排序过程中, stress值分别为: C(0.16)、EPT(0.11)、DMO(0.13)。多维尺度排序和‘envfit’函数表明, 影响3种类群水生昆虫群落结构的关键环境变量大体类似。具体而言, 鞘翅目类群的主要环境驱动因子为: pH、平均流速、海拔、总氮、溶解氧和化学需氧量(表3); 影响EPT类群的关键环境因子为: pH、海拔、平均流速、化学需氧量、溶解氧、平均水深和总氮(表3); DMO类群的关键环境驱动因子为: pH、平均流速、海拔、溶解氧、化学需氧量、平均水深、总氮、平均水宽和砂石比例(图2, 表3)。

关键环境变量和空间因子对不同类群水生昆

虫群落结构差异的解释量不同。关键环境变量和空间因子对3个类群的解释量分别为: 鞘翅目类群(46%), EPT类群(32%), DMO类群(39%)。总体而言, 环境变量的相对解释量大于空间因子; 关键环境变量对鞘翅目类群、EPT类群和DMO类群的解释量分别为16%、11%和9%。对3种类群水生昆虫而言, 空间因子对EPT类群的解释量最大、其次为DMO类群, 鞘翅目类群最小, 其解释量分别为9%、6%和4%。

3 讨论

3.1 不同类群水生昆虫群落结构的一致性

本次调查结果表明, 东苕溪源头溪流不同类群水生昆虫群落结构一致性显著($P<0.001$)且较高。通常, 导致不同类群生物群落较高一致性的潜在原因有以下几点(Gaston & Williams, 1996): (1)区域物种的随机补充; (2)不同物种类群对相同环境梯度的相同响应; (3)环境梯度虽有差异, 但是彼此相关; (4)生物间的交互作用; (5)采样的影响。一般认为, 只要不同类群群落结构相似性达到 $r = 0.7$ 的水平, 就可在生物多样性的调查和保护工作中利用指示类群对目标类群进行较为可靠的预测(Vellend *et al.*, 2008; Heino, 2010)。我们的结果显示, 东苕溪源头溪流中3种水生昆虫类群间的一致性都已接近或超过这个数值, 特别是EPT和DMO类群达到了0.82

表2 东茗溪源头溪流水生昆虫种类组成及出现频度
Table 2 Species composition and the occurrence frequency of aquatic insects in headwater streams within the Dongtiaoxi Basin

物种 Species	频度 Frequency	物种 Species	频度 Frequency
鞘翅目 Coleoptera		新渍属一种 <i>Neoperla</i> sp.	0.29
长角泥甲科 Elmidae		毛翅目 Trichoptera	
<i>Macronychus</i> sp.	0.38	短石蛾科 Brachycentridae	
<i>Neocylloepus</i> sp.	0.29	<i>Micrasema</i> sp.	0.33
<i>Ordoverria</i> sp.	0.43	枝石蛾科 Colamoceratidae	
<i>Stenelmis</i> sp.	1.00	<i>Anisocentropus</i> sp.1	0.29
水龟虫科 Hydrophilidae		<i>Glossosoma</i> sp.	0.67
<i>Berosus</i> sp.	0.48	纹石蛾科 Hydropsychidae	
<i>Enochrus</i> sp.	0.38	班侧枝纹石蛾 <i>Aphropsyche</i> sp. 2	0.29
扁泥甲科 Psephenidae		心唇纹石蛾 <i>Cheumatopsyche</i> sp. 1	0.38
<i>Macroebria</i> sp.	0.33	平唇纹石蛾 <i>Cheumatopsyche</i> sp. 3	0.52
<i>Nipponeubria</i> sp.	0.29	黄条纹石蛾 <i>Hydropsyche</i> sp.3	0.33
<i>Psephenus</i> sp.	0.38	鳞石蛾科 Lepidostomatidae	
沼甲科 Scirtidae		鳞石蛾属一种 <i>Lepidostoma</i> sp.	0.43
<i>Scrites</i> sp.	0.86	沼石蛾科 Limnephilidae	
蜉蝣目 Ephemeroptera		<i>Apatania</i> sp.	0.29
四节蜉科 Baetidae		多距石蛾科 Polycentropodidae	
四节蜉属一种 <i>Baetis</i> sp.	1.00	<i>Neureclipsis</i> sp.	0.62
花翅蜉属一种 <i>Baetiella</i> sp.	0.48	原石蛾科 Rhyacophilidae	
小蜉科 Ephemerellidae		原石蛾属一种 <i>Rhyacophila</i> sp.	0.75
美丽弯握蜉 <i>Drunella bella</i>	0.29	双翅目 Diptera	
小蜉属一种 <i>Ephemerella</i> sp.	0.48	摇蚊科 Chironomidae	
锯形蜉属一种 <i>Serratella</i> sp.	0.48	环足摇蚊属一种 <i>Cricotopus</i> sp.	0.29
蜉蝣科 Ephemeridae		真开氏摇蚊属一种 <i>Eukiefferiella</i> sp.	0.57
绢蜉 <i>Ephemera serica</i>	0.38	直突摇蚊属一种 <i>Orthocladius</i> sp.	0.52
扁蜉科 Heptageniidae		无突摇蚊属一种 <i>Ablabesmyia</i> sp.	1.00
似动蜉属一种 <i>Cinygmin</i> sp.	0.43	大粗腹摇蚊属一种 <i>Macropelopia</i> sp.	0.29
高翔蜉属一种 <i>Epeorus</i> sp. 1	0.43	长足摇蚊属一种 <i>Tanypus</i> sp.	0.29
高翔蜉属一种 <i>Epeorus</i> sp. 2	0.29	蚋科 Simuliidae	0.76
何氏高翔蜉 <i>Epeorus herklots</i>	0.52	广翅目 Megaloptera	
扁蜉属一种 <i>Heptagenia</i> sp.	0.86	Corydalidae	
赞蜉属一种 <i>Paegniodes</i> sp.	0.71	斑齿蛉属一种 <i>Neochondriodes</i> sp.	0.43
细裳蜉科 Leptophlebiidae		星齿蛉属一种 <i>Protohermes</i> sp.	0.33
宽基蜉属一种 <i>Choroterpes</i> sp.	0.57	蜻蜓目 Odonata	
柔裳蜉属一种 <i>Habrophlebiodes</i> sp.	0.95	综螳科一种 <i>Chlorolestidae</i> sp.	0.29
襀翅目 Plecoptera		大蜉科 Cordulegasteridae	
叉襀科 Nemouridae		大蜉属一种 <i>Cordulegaster</i> sp.	0.33
倍叉襀属一种 <i>Amphinemura</i> sp.	0.29	溪螳科一种 <i>Euphaeidae</i> sp.	0.38
中叉襀属一种 <i>Mesonemura</i> sp.	0.48	春蜉科 Gomphidae	
襀科 Perlidae		环尾春蜉属一种 <i>Lamelligomphus</i> sp.	0.43
钩襀属一种 <i>Kamimuria</i> sp.	1.00	华春蜉属一种 <i>Sinogomphus</i> sp.	0.29

($P<0.001$), C和EPT类群为0.65($P<0.001$), C和DMO类群为0.67($P<0.001$)。这表明我们研究的3个类群的生物多样性状况可以用其中某一类群映射出来,特别是EPT类群和DMO类群之间。利用这些水生昆虫类群群落一致性,我们能开展更为快速有效的生物

多样性监测。

除群落一致性外,学者们也提出不同生物类群的互补性(Margules & Pressey, 2000)。互补性指的是生物多样性保护过程中指示类群占目标类群的互补程度(Rodrigues & Brooks, 2007)。在水生生态系

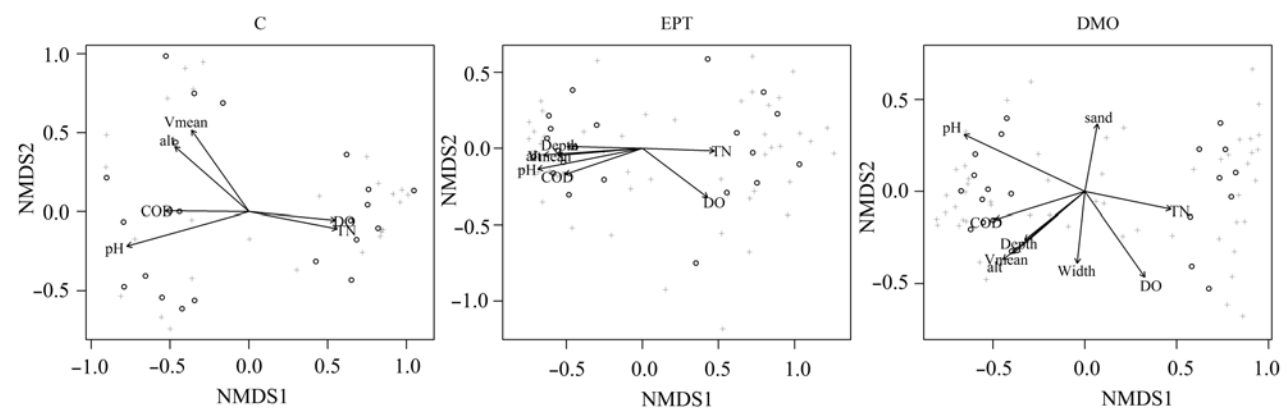


图2 结合关键环境变量的鞘翅目(C)、蜉蝣目+襀翅目+毛翅目(EPT)、双翅目+广翅目+蜻蜓目(DMO)类群水生昆虫群落多维尺度排序

Fig. 2 meta-MDS ordination of the Coleoptera (C), Ephemeroptera + Plecoptera + Trichoptera (EPT), and Diptera + Megaloptera + Odonata (DMO) assemblages with fitted vectors of environmental variables (envfit, $P < 0.05$)

表3 环境变量与鞘翅目(C)、蜉蝣目+襀翅目+毛翅目(EPT)、双翅目+广翅目+蜻蜓目(DMO)3种不同类群水生昆虫群落排序的相关性(r^2)

Table 3 Correlations (r^2) of environmental variables with the meta-MDS ordinations of Coleoptera (C), Ephemeroptera + Plecoptera + Trichoptera (EPT), and Diptera + Megaloptera + Odonata (DMO) groups

		C		EPT		DMO	
		r^2	P	r^2	P	r^2	P
环境变量 Environmental variables	海拔 Altitude (alt)	0.50	0.003	0.57	0.001	0.54	0.003
	总氮 Total nitrogen (TN)	0.42	0.003	0.30	0.032	0.38	0.009
	化学需氧量 Chemical oxygen demand (COD)	0.36	0.014	0.39	0.003	0.44	0.002
	酸碱度 pH	0.83	0.001	0.67	0.001	0.90	0.001
	溶解氧 Dissolved oxygen (DO)	0.39	0.011	0.39	0.011	0.50	0.002
	平均流速 Mean velocity (Vmean)	0.51	0.002	0.42	0.004	0.61	0.001
	平均水宽 Mean wetted width (Width)	0.01	0.938	0.22	0.101	0.35	0.017
	平均水深 Mean depth (Depth)	0.22	0.110	0.33	0.025	0.38	0.016
	砂 Percentage of sand substrate (Sand)	0.57	0.542	0.11	0.335	0.28	0.04
空间因子 Spatial factors	PCNM1	0.77	0.001	0.81	0.001	0.91	0.001
	PCNM13	0.26	0.035	0.01	0.906	0.02	0.848

显著水平为 $P<0.05$ 。
The significance level is $P<0.05$.

统生物多样性保护过程中, 检测不同类群的互补性十分必要, 比如Sánchez-Fernández等(2006)以软体动物和水生昆虫群落为研究对象, 表明利用互补性网络是测定不同水生底栖动物类群互补性的一种有效方法。在本研究中, 笔者仅考虑了不同类群水生昆虫群落的一致性, 在未来的实际保护和监测过程中, 仍需结合一致性和互补性进行综合分析。

3.2 空间尺度和干扰梯度对一致性的影响

群落一致性的高低和研究的空间尺度密切相关。一般较大空间尺度(比如: 不同国家或者洲)的研究显示出较强的一致性(Myers *et al.*, 2000), 而较

小研究区域研究结果一般变化比较大(Sauberer *et al.*, 2004), 且通常呈现出不同生物类群间较低的群落一致性(Kati *et al.*, 2004)。如Paavola等(2006)研究了空间尺度对鱼类、大型无脊椎动物和水生植物群落一致性的影响, 结果表明: 在单个流域尺度3种不同生物类群群落间的一致性很低, 并且变化较大; 但是在多个流域或者生态区范围, 群落间的一致性较高。他们认为产生这种趋势的原因是鱼类、大型无脊椎动物和水生植物群落在较大空间尺度上对相近的环境梯度的响应相似, 且群落结构呈现出类似的沿纬度梯度分布的模式。Passy等(2004)研

究流域硅藻、大型底栖无脊椎动物和鱼类群落时发现了中等程度的一致性,他们认为环境因子对不同类群水生生物的作用尺度不一样:小尺度栖境条件对鱼类而言更加重要,硅藻群落则主要受到大型尺度土地利用和土地覆盖的影响。就本研究而言,虽然研究的空间尺度属于小尺度流域,但是3种水生昆虫群落的一致性都很高。我们认为造成这种结果的主要原因是我们的研究类群都属于水生昆虫群落,在营养等级和食物链结构中处于相近的地位,且3种水生昆虫类群对环境梯度的响应基本相似(图2,表3),影响它们群落结构的关键环境变量基本类似,主要为海拔、栖境指标和水化因子:包括pH、溶解氧、平均流速、平均水深、总氮和化学需氧量(图2-3)。

许多研究表明海拔不仅对溪流的理化状态,还对溪流中的生物(主要是鱼类和底栖动物)有较大的影响。Suren(1994)认为物种的丰富度随着海拔升高而降低的潜在机制是海拔梯度上其他环境因子的差异。

水体中的氮浓度一直以来都是溪流水体质量检测的重要指标,它反映了水体营养状态。一般情况下,伴随着水体中氮含量的显著上升,会发生水生昆虫群落组成的变化(Collier & Quinn, 2003),通常是敏感种类减少或者消失,耐污类群个体数量剧增。针对我们的研究区域,采样支流都属于参照条件,不存在土地利用改变或者人类其他农业、工业生产活动引起的氮浓度增加的可能,那么我们研究区域3种水生昆虫类群群落结构受氮含量的显著影响,主要是由于不同采样点水体本身氮含量背景值有一定的梯度。

平均水深和平均流速是溪流重要的物理栖境指标,且溪流水体流速和溶解氧密切相关,一般流速较快的水体,由于曝氧程度高,水体溶解氧浓度也相应地会高,所以一些对溶解氧要求较高的水生昆虫(比如双翅目中的蚋科)往往生活在溶解氧浓度较高、水体流速较快的河段;这在我们的研究结果中也得到了很好的体现,如平均流速和溶解氧都是影响水生昆虫DMO类群的关键环境变量(表3)。

根据河流连续性理论(River continuum concept)(Vannote *et al.*, 1980),底质通常是影响溪流水生昆虫群落结构的关键因素,对于那些低级别的支流,底质组成一般以大石块和卵石为主,越往中下游随

着河流级别的升高,沿岸带的破坏和堤岸侵蚀的加剧,底质构成主要为细沙或者淤泥黏土。但我们的实际采样点位都处于源头溪流,底质基本上以较大的石块或者卵石为主,底质组成方面没有明显的梯度差异,这也能很好地解释为什么底质组成不是影响该研究流域水生昆虫群落结构的关键驱动因子。

因此,研究空间尺度的大小以及环境梯度对不同生物群落的响应,才是影响不同类群生物群落一致性高低的重要因素。我们所研究的溪流水生昆虫类群群落结构之间一致性很高,并且3种水生类群对环境因子的响应非常类似,故在未来该区域水生昆虫多样性调查、保护或者水质生物监测和评价过程中可利用某一类群(如,EPT或鞘翅目)作为指示类群。

致谢:感谢实验组杨莲芳教授、孙长海副教授在水生昆虫特别是毛翅目幼虫鉴定方面提供的无私帮助,中科院植物所的张金龙博士在R软件的应用方面提供了大量的指导,实验室研究生张激波和本科生马行舟同学协助进行了水生昆虫的野外采集工作,在此一并致以诚挚的感谢。

参考文献

- Briers RA, Biggs J (2003) Indicator taxa for the conservation of pond invertebrate diversity. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, **13**, 323–330.
- Collier KJ, Quinn JM (2003) Land-use influences macro-invertebrate community response following a pulse disturbance. *Freshwater Biology*, **48**, 1462–1481.
- Dudgeon D, Arthington AH, Gessner MO, Kawabata ZI, Knowler DJ, Lévêque C, Naiman RJ, Prieur-Richard AH, Soto D, Stiassny MLJ (2006) Freshwater biodiversity: importance, threats, status and conservation challenges. *Biological Reviews*, **81**, 163–182.
- Gaston KJ, Williams PH (1996) Spatial patterns in taxonomic diversity. In: *Biodiversity: A Biology of Numbers and Difference* (ed. Gaston KJ), pp. 202–229. Blackwell Science, Oxford.
- Grenouillet G, Brosse S, Tudesque L, Lek S, Baraillé Y, Loot G (2008) Concordance among stream assemblages and spatial autocorrelation along a fragmented gradient. *Diversity and Distributions*, **14**, 592–603.
- Heino J (2010) Are indicator groups and cross-taxon congruence useful for predicting biodiversity in aquatic ecosystems? *Ecological Indicators*, **10**, 112–117.
- Heino J (2002) Concordance of species richness patterns among multiple freshwater taxa: a regional perspective. *Biodiversity and Conservation*, **11**, 137–147.
- Heino J, Paavola R, Virtanen R, Muotka T (2005) Searching

- for biodiversity indicators in running waters: do bryophytes, macroinvertebrates, and fish show congruent diversity patterns? *Biodiversity and Conservation*, **14**, 415–428.
- Heino J, Tolonen KT, Kotanen J, Paasivirta L (2009) Indicator groups and congruence of assemblage similarity, species richness and environmental relationships in littoral macroinvertebrates. *Biodiversity and Conservation*, **18**, 3085–3098.
- Hering D, Johnson RK, Kramm S, Schmutz S, Szoszkiewicz K, Verdonchot PFM (2006) Assessment of European streams with diatoms, macrophytes, macroinvertebrates and fish: a comparative metric-based analysis of organism response to stress. *Freshwater Biology*, **51**, 1757–1785.
- Kati V, Devillers P, Dufrene M, Legakis A, Vokou D, Lebrun P (2004) Testing the value of six taxonomic groups as biodiversity indicators at a local scale. *Conservation Biology*, **18**, 667–675.
- Kondolf GM (1997) Application of the pebble count notes on purpose, method, and variants. *Journal of the American Water Resources Association*, **33**, 79–87.
- Li JG (李金国), Wang QC (王庆成), Yan SC (严善春), Yao Q (姚琴), Qiao SL (乔树亮), Lü YD (吕跃东), Han ZX (韩壮行) (2007) Community characteristics of aquatic insects and bioassessment for water quality in lower order streams in Liangshui and Maershan watersheds, Heilongjiang, China. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), **27**, 5008–5018. (in Chinese with English abstract)
- Margules CR, Pressey RL (2000) Systematic conservation planning. *Nature*, **405**, 243–253.
- Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China (中华人民共和国环境保护部) (2002) *Standard Methods for the Analysis of Water and Wastewater* (水和废水监测分析方法). Science Press, Beijing. (in Chinese)
- Morse JC, Yang LF, Tian LX (1994) *Aquatic Insects of China Useful for Monitoring Water Quality*. Hohai University Press, China.
- Myers N, Mittermeier RA, Mittermeier CG, da Fonseca GAB, Kent K (2000) Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, **403**, 853–858.
- Noss RF (1990) Indicators for monitoring biodiversity: a hierarchical approach. *Conservation Biology*, **4**, 355–364.
- Oksanen J, Blanchet FG, Kindt R, Legendre P, Minchin PR, O'Hara RB, Simpson GL, Solymos P, Stevens MH, Wagner H (2012) *Vegan: Community Ecology Package. R package version 2.0-5*. <http://CRAN.R-project.org/package=vegan>.
- Paavola R, Muotka T, Virtanen R, Heino J, Jackson D, Mäki-Petäys A (2006) Spatial scale affects community concordance among fishes, benthic macroinvertebrates, and bryophytes in streams. *Ecological Applications*, **16**, 368–379.
- Passy SI, Bode RW, Carlson DM, Novak MA (2004) Comparative environmental assessment in the studies of benthic diatom, macroinvertebrate, and fish communities. *International Review of Hydrobiology*, **89**, 121–138.
- Pearson DL (1994) Selecting indicator taxa for the quantitative assessment of biodiversity. *Biological Sciences*, **345**, 75–79.
- Rodrigues ASL, Brooks TM (2007) Shortcuts for biodiversity conservation planning: the effectiveness of surrogates. *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics*, **38**, 713–737.
- Sánchez-Fernández D, Abellán P, Mellado A, Velasco J, Millán A (2006) Are water beetles good indicators of biodiversity in Mediterranean aquatic ecosystems? The case of the Segura river basin (SE Spain). *Biodiversity and Conservation*, **15**, 4507–4520.
- Sala OE, Chapin FS, Armesto JJ, Berlow E, Bloomfield J, Dirzo R, Huber-Sanwald E, Huenneke LF, Jackson RB, Kinzig A (2000) Global biodiversity scenarios for the year 2100. *Science*, **287**, 1770–1774.
- Sauberer N, Zulka KP, Abensperg-Traun M, Berg HM, Bieringer G, Milasowszky N, Moser D, Plutzer C, Pollheimer M, Storch C (2004) Surrogate taxa for biodiversity in agricultural landscapes of eastern Austria. *Biological Conservation*, **117**, 181–190.
- Soininen J, Paavola R, Kwadrans J, Muotka T (2009) Diatoms: unicellular surrogates for macroalgal community structure in streams? *Biodiversity and Conservation*, **18**, 79–89.
- Su JC, Debinski DM, Jakubauskas ME, Kindscher K (2004) Beyond species richness: community similarity as a measure of cross-taxon congruence for coarse-filter conservation. *Conservation Biology*, **18**, 167–173.
- Suren AM (1994) Macroinvertebrate communities of streams in western Nepal: effects of altitude and land use. *Freshwater Biology*, **32**, 323–336.
- Vannote RL, Minshall GW, Cummins KW, Sedell JR, Cushing CE (1980) The river continuum concept. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science*, **37**, 130–137.
- Vellend M, Lilley PL, Starzomski BM (2008) Using subsets of species in biodiversity surveys. *Journal of Applied Ecology*, **45**, 161–169.
- Wang BX (王备新), Yang LF (杨莲芳) (2003) Bioassessment of Qinhuai River using a river biological index. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), **23**, 2082–2091. (in Chinese with English abstract)
- Williams P, Gibbons D, Margules C, Rebelo A, Humphries C, Pressey R (2002) A comparison of richness hotspots, rarity hotspots, and complementary areas for conserving diversity of British birds. *Conservation Biology*, **10**, 155–174.
- Wolman MG (1954) A method of sampling coarse river-bed material. *Transactions of the American Geophysical Union*, **35**, 951–956.
- Yang ZC (颜忠诚), Zhong H (2004) Aquatic insects. *Bulletin of Biology* (生物学通报), **39**, 15–17. (in Chinese)