

影响浙江西苕溪底栖动物分布的关键环境变量指示种的筛选*

吴东浩¹, 张 勇¹, 于海燕², 杨莲芳¹, 王备新^{1**}

(1: 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)

(2: 浙江省环境监测中心, 杭州 310012)

摘 要: 利用 2003 年西苕溪 TM 数据和 DEM 模型计算了 55 个样点上游 3 种空间尺度下(亚流域、河岸带和局部)的土地利用类型, 通过冗余分析筛选出能够在显著水平上最大程度解释西苕溪流域底栖动物分布的最小变量组合——氨氮、荫蔽度、电导率、亚流域农田百分比以及栖境复杂度。方差分解结果表明氨氮是研究区域影响底栖动物分布的最重要环境变量, 亚流域尺度农田百分比也是一个重要影响变量。在 50% - 100% 适合度范围内最终筛选得到短脉纹石蛾 *Cheumatopsyche* sp. 1 和 *Cheumatopsyche* sp. 2 作为关键环境变量指示种。在一定范围内短脉纹石蛾的数量随着水体氨氮浓度和亚流域尺度农田百分比的上升而增加。短脉纹石蛾分布广泛、采集容易、具备一定的耐污能力和主动漂流能力、幼虫个体较大且在水中的生活史较长以及具有一定的生态可塑性等优点决定了短脉纹石蛾可以作为西苕溪流域的受干扰水体氨氮和亚流域尺度农田百分比的指示种。

关键词: 西苕溪; 大型底栖无脊椎动物; 冗余分析; 氨氮; 亚流域尺度农田百分比; 指示种

Selection of indicator species of major environmental variables affecting macroinvertebrate communities in the Xitiao Stream, Zhejiang, China

WU Donghao¹, ZHANG Yong¹, YU Haiyan², YANG Lianfang¹ & WANG Beixin¹

(1: Lab of Aquatic Insects and Stream Ecology, Department of Entomology, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, P. R. China)

(2: Zhejiang Province Environmental Monitoring Center, Hangzhou 310012, P. R. China)

Abstract: The land covering for 55 sampling sites in the Xitiao Stream were estimated as sub-basin, riparian-zone and local scales using 2003 satellite image and a Digital Elevation Model. Redundancy analysis indicated that the minimum combination including NH_4^+ , canopy, conductivity, percentage of sub-basin cropland and habitat complexity can significantly explain the variations of the macroinvertebrate communities were screened. The result of variance partitioning showed that NH_4^+ was the most important variables affecting macroinvertebrate communities in the Xitiao Stream and sub-scale cropland% was also another important factor. Under a species fit range between 50% and 100%, *Cheumatopsyche* sp. 1 and *Cheumatopsyche* sp. 2 were finally selected as the indicator species. The abundance of *Cheumatopsyche* increased as the NH_4^+ and the sub-scale cropland% increased. *Cheumatopsyche* has advantages as follows: wide distribution, easy to be collected, moderately tolerance, ability to drift, relative large body size with slower turnover rates and also ecological plasticity. Therefore, they exhibited to be very good indicators for the NH_4^+ and the sub-basin scale cropland% of disturbed sites in the Xitiao Stream.

Keywords: Xitiao Stream; benthic macroinvertebrate; RDA; ammonia nitrogen; sub-basin cropland%; indicator species

大型底栖无脊椎动物由于具备众多优点而广泛用于水质生物监测^[1], 其与环境变量的关系一直是研究的热点^[2-6]. 国外关于底栖动物指示种(indicator species)或底栖动物指示作用的相关研究比较多^[7-9], 然而国内此方面的相关研究则较少, 而且关注的对象主要为河流或湖泊中耐污能力较强的河蚬及摇蚊^[10-11]. 本文

* 国家自然科学基金项目(30870345, 40301047, 40971280)资助. 2010-01-04 收稿; 2010-04-19 收修修改稿. 吴东浩, 男, 1985 年生, 硕士; E-mail: wudonghao@126.com.

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

借助冗余分析(Redundancy Analysis, RDA)探讨了水体理化参数、栖息参数以及不同尺度土地利用对西苕溪流域底栖动物群落的影响,找出影响该流域底栖动物分布的主要环境变量,并尝试建立主要环境变量的指示种. 西苕溪流域主要环境变量底栖动物指示种的建立可以为评价该流域水体的生物学质量以及生态系统健康状况提供参考,从而更好地为西苕溪流域的水环境管理服务.

1 研究地点和研究方法

1.1 研究地点概况

西苕溪(30°23′-31°11′N, 119°14′-120°29′E)位于太湖上游地区的浙西水利分区,发源于天目山,下游是长兴平原. 干流总长 157km,流域面积约 2200km²,下游水系呈网状分布,直通太湖平原洼地,是太湖上游集水域的主要流域之一. 溪流上游植被保存完好,无大的污染源. 近年来,随着城镇化加速、耕地面积的扩大以及农业面源污染的加重,有机污染增多,中下游河流水质有进一步恶化的趋势.

1.2 样本采集

1.2.1 大型底栖无脊椎动物 2004 和 2005 年 5 月在浙江省安吉县采集大型底栖无脊椎动物样本两次,共采集 55 个样点(图 1). 采集底栖动物样本时,每个点位在 100m 长的采样区域内,用索伯网(Surber net, 250 μ m)采 5 个样(3 个急流样和 2 个缓流样),采样总面积为 0.3125m²,采样过程中将索伯网网口逆着水流方向放置,用力搅动网前定量框(0.0625m²)内 5cm 左右深度的底质,随着水流将底栖动物冲入网内,并用手将粘附在石块上的底栖动物洗刷入网. 在野外,直接用 450 μ m 铜筛筛选标本,再用 8% 的福尔马林溶液固定后带回实验室. 根据鉴定资料,标本一般鉴定到种.

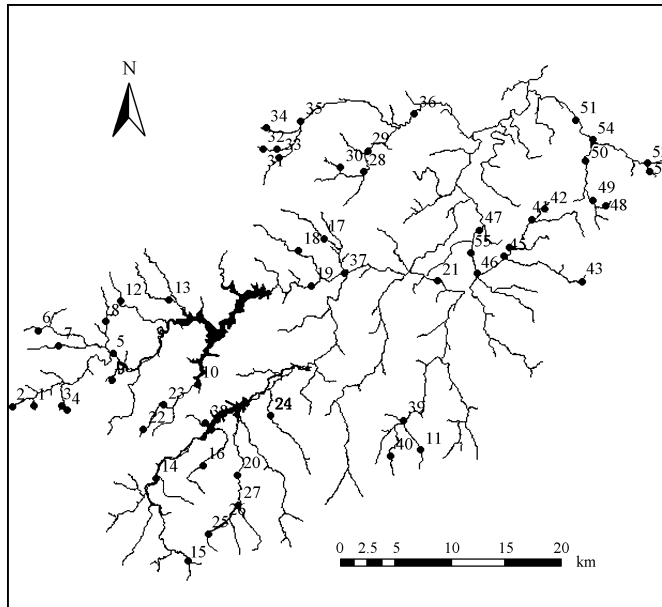


图 1 西苕溪 55 个采样点分布

Fig. 1 The distribution of 55 sampling sites in the Xitiao Stream

1.2.2 水体理化指标测定 使用 U-10 多参数水质检测仪(HORIBA Ltd. Japan)现场测定水体溶解氧、电导率、pH 和温度. 实验室内,化学需氧量(COD_{Cr})采用重铬酸钾法;总氮(TN)采用过硫酸钾氧化紫外分光光度法;总磷(TP)和正磷酸根(PO₄³⁻)采用钼锑抗分光光度法;硝态氮(NO₃⁻)采用酚二磺酸光度法;氨氮(NH₄⁺)采用纳氏试剂光度法^[12].

1.3 土地利用格局分析

利用 2003 年西苕溪 TM 数据和 DEM 模型计算了 55 个样点上游亚流域(样点上游流域)、河岸带(从样点开始至源头,溪流周围 200m 宽的河岸带)和局部尺度(样点开始至上游 1km,溪流周围 200m 宽的河岸带)3 种空间尺度下农田利用和森林覆盖两种土地利用类型。

1.4 栖境参数的测定

参考 Barbour 等的方法^[13],记录以下栖境参数:溪流底质(Bottom substrate)、栖境复杂度(Habitat complexity)、堤岸稳定性(Bank stability)、堤岸保护程度(Bank protection)和荫蔽度(Canopy)。参照 Hauer^[14]的方法测量溪流的平均宽度、溪流平均深度,并最终计算溪流平均宽深比。

1.5 数据分析

基础数据统计在 Excel 中完成,相关性分析及独立样本 *t* 检验在 SPSS 中完成,除趋势对应分析(Detrended Correspondence Analysis, DCA)和冗余分析(Redundancy Analysis, RDA)在 CANOCO 4.53 中完成。

作为众多直接梯度分析方法的一种,RDA 能有效地确定影响群落组成和变化的环境变量,能够独立计算各个环境变量对底栖动物变化的贡献,能有效地对多个解释变量进行统计检验,并确定对响应变量变化且具有最大解释能力的最小变量组,其二维排序图可以直观地展现底栖动物与环境变量之间的关系。

在 RDA 分析之前,根据需要分别对水体理化因子、栖境数据和土地利用数据进行对数转换或反正弦平方根转换。底栖动物与环境变量的 RDA 分析按照以下步骤完成^[15]:首先,对物种数据进行 DCA 分析以确定底栖动物群落属于单峰型分布(unimodal distribution)抑或线型分布(linear distribution)。为了降低稀有物种对分析结果的干扰,DCA 分析之前将点位中出现频率低于 5% 的物种剔除,最终保留的物种用于分析;另外,为了消除物种丰富度极端值对分类得分的影响,对物种数据进行对数转换。其次,在进行 RDA 分析之前首先手动删除环境变量中相关性较大($|r| \geq 0.7$)的变量,采用向前引入法(forward selection)对保留的环境变量进行逐步筛选,每一步都采用蒙特卡罗置换检验(Monte Carlo permutation test)在 $P < 0.05$ 水平上评估每个备选的环境变量对于解释物种变异的贡献。最后剔除环境变量中方差膨胀因子(variance inflation factor)(> 5)大的变量,以达到解决环境变量之间的共线性问题。利用蒙特卡罗置换检验 RDA 排序轴的显著性。

2 结果与分析

2.1 点位基本概况

西苕溪的平均宽度最小为 0.5m,最大为 30m。55 个点位的水体理化因子见表 1,氨氮的分布范围为:0-5.30mg/L,55 个点位的栖境质量和土地利用的变化都比较大,60% 的点位栖境复杂度大于 15。

从三个尺度计算了点位上游土地利用情况(表 1),局部尺度农田的比例平均值为 21%,河岸带尺度农田比例的平均值为 31%,然而亚流域尺度农田的比例平均值仅为 10%,这说明西苕溪流域的农田基本都紧靠溪流两侧,会导致大量的氮素和磷素的流失,农业生态系统的养分流失是水体中硝酸盐的主要来源,同时还是磷的第二大来源。

2.2 底栖动物群落结构

两次采样共采集到底栖动物 120995 头,隶属于 16 目 59 科 129 种。所有底栖动物中水生昆虫个体数达到了 112800,其中对水体有重要指示作用的 EPT 昆虫——蜉蝣目 Ephemeroptera、襉翅目 Plecoptera 和毛翅目 Trichoptera 的数量分别为 60043、317 和 19307。共采集到毛翅目幼虫 16 科 21 属 25 种,其中短脉纹石蛾(*Cheumatopsyche*)3 种共 11816 头,占总数的 61.20%。出现频率最高的前三位优势分类单元依次为四节蜉属 *Baetis* sp. (53)、宽基蜉属 *Choroterpes* sp. 1 (51)、宽基蜉属 *Choroterpes* sp. 2 (47)以及摇蚊幼虫 Chironomidae sp. (47,因能力有限本研究只鉴定到科)。

表 1 环境变量值汇总

Tab. 1 Statistical summary of environmental variables

变量		最小值	平均值	最大值	标准差	
水体理化指标	pH	6.38	7.51	9.22	0.53	
	温度(℃)	13.50	20.09	28.00	3.23	
	海拔(m)	1.00	140.00	604	126.89	
	溶解氧(mg/L)	2.96	8.42	13.33	1.40	
	电导率(mS/cm)	0	0.08	0.33	0.06	
	TN(mg/L)	0.06	2.60	5.48	1.57	
	TP(mg/L)	0	0.11	0.72	0.12	
	NH ₄ ⁺ (mg/L)	0	2.14	5.30	1.83	
	COD _{Cr} (mg/L)	0.70	12.79	47.90	10.35	
	栖息参数	底质组成	8.00	15.24	20.00	2.90
堤岸保护度		5.00	14.35	20.00	4.36	
栖息复杂度		5.00	13.60	18.00	3.40	
堤岸稳定度		5.00	15.64	20.00	4.04	
荫蔽度		4.00	9.73	19.00	4.74	
宽深比		4.44	50.62	1000.00	144.80	
土地利用	局部尺度	农田	0	0.21	0.72	0.17
		林地	0.01	0.74	1.00	0.21
	河岸带	农田	0	0.31	0.99	0.28
		林地	0	0.59	1.00	0.34
	亚流域	农田	0	0.10	0.30	0.09
		林地	0.08	0.84	1.00	0.17

2.3 RDA 分析结果

DCA 分析结果表明第一轴的轴长 (gradient length) 较短,说明环境梯度较小,所以 RDA 排序分析适用于本研究. 通过蒙特卡罗置换检验最终筛选出在显著水平上能够最大程度解释西苕溪流域底栖动物组成变化的 5 个最小变量组合——氨氮、荫蔽度、栖息复杂度、亚流域尺度农田百分比以及电导率(表 2), 5 个环境变量与 RDA 第 I、II 轴的相关系数见表 2. 蒙特卡罗检验结果显示所有排序轴均显著 ($P=0.002$), 表明本研究得到的结果是非常可靠的. 图 2 为西苕溪流域底栖动物与环境变量的二维排序图. 第一轴的特征值为 0.18, 5 个环境变量共解释了 31.10% 的群落演替.

表 2 向前引入法筛选得到的环境变量特征

Tab. 2 Environmental variables obtained from the forward selection of RDA

环境变量	膨胀因子	解释的变异(%)	<i>F</i>	<i>P</i>	轴 I	轴 II
氨氮	1.38	7.3	7.35	0.002	-0.65 **	-0.38 **
荫蔽度	1.86	6.8	5.72	0.002	0.63 **	-0.24
电导率	1.45	4.6	1.93	0.018	0.26 *	0.43 **
亚流域尺度农田百分比	1.65	3.1	2.24	0.004	-0.42 **	-0.09
栖息复杂度	1.38	3.1	2.90	0.002	-0.04	0.24

* $P < 0.05$ 表示显著相关, ** $P < 0.01$ 表示极显著相关.

通过冗余分析,并建立协变量,可以把 5 个环境变量对底栖动物群落结构变异的解释量进行方差分解 (variance partitioning). 结果表明氨氮是影响西苕溪流域底栖动物分布的主要环境因子,解释了 7.3% 的物种变异,荫蔽度、电导率、亚流域尺度农田百分比以及栖息复杂度分别解释了 6.8%、4.6%、3.1% 和 3.1% 的物种变异,5 个环境变量之间交互作用解释了 6.2% 的群落演替.

在氨氮的作用下 55 个点位被分成明显的两组(组 I 和组 II)(图 2),与预期的相同,与氨氮正相关的点

位(组 I)基本都位于溪流的中下游,与氨氮负相关的点位(组 II)都位于溪流的上游(图 1),这些点位人类的干扰较少,植被保存相对完整,所以组 II 中点位也基本与荫蔽度正相关.组 I 的点位基本都与亚流域尺度农田百分比正相关,组 II 的点位与亚流域尺度农田百分比负相关,组 I 点位位于溪流的中下游,耕地面积较大从而导致农业面源污染更严重,水体总氮($t = 9.70, P < 0.01$)和总磷($t = 2.27, P < 0.05$)浓度显著大于组 II(图 2).

2.4 关键环境变量指示种的筛选

氨氮是影响西苕溪流域底栖动物分布的主要环境因子,其与第一轴的相关性达到了 0.65 ($P < 0.01$) (表 2). 在排序图中只显示适合度范围 (Species Fit Range) 在 50% - 100% 的物种,最终筛选得到短脉纹石蛾 (*Cheumatopsyche* sp. 1 和 *Cheumatopsyche* sp. 2). 为了更加直观地反映短脉纹石蛾多度与关键环境变量之间的关系,专门提取氨氮和亚流域尺度农田百分比两个环境变量并作

出短脉纹石蛾多度的 RDA 等值线图. 在垂直于等值线的方向上,随着氨氮浓度和亚流域尺度农田百分比的上升,短脉纹石蛾 *C. sp. 1* (图 3a) 和 *C. sp. 2* (图 3b) 的数量也增大.

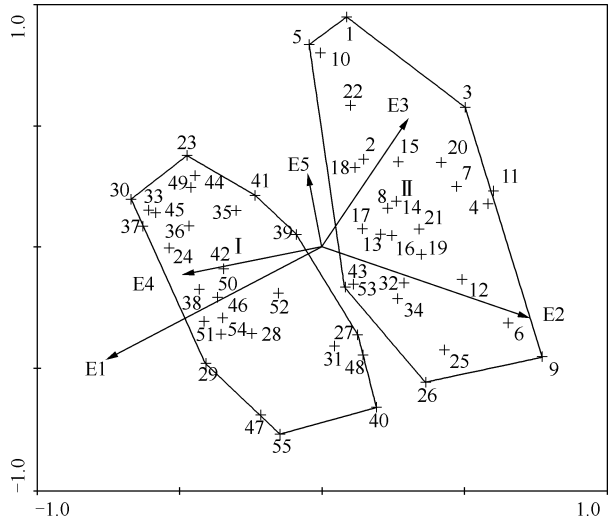


图 2 点位与环境变量的 RDA 第 I、II 轴排序图

(E1:氨氮,E2:荫蔽度,E3:电导率,E4:亚流域尺度农田百分比,E5:栖境复杂度)

Fig. 2 Biplot of first and second RDA axes for the sampling sites with environmental variables

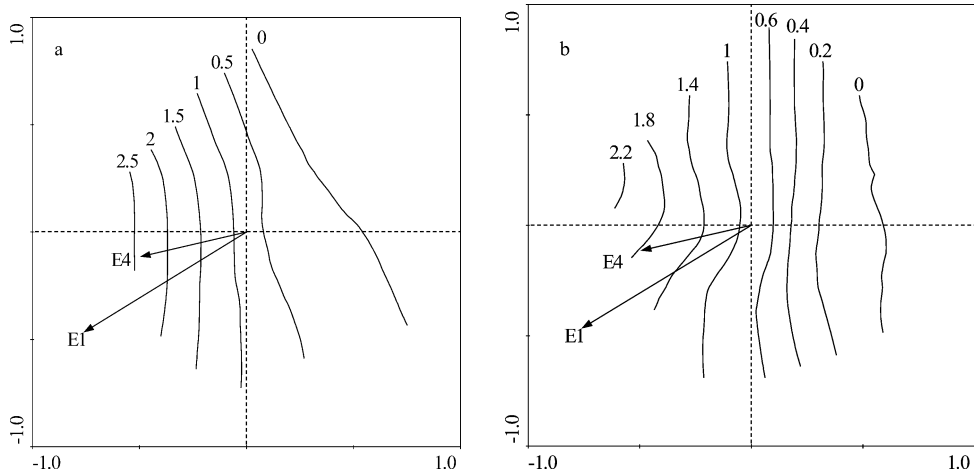


图 3 短脉纹石蛾属种 1(a) 和种 2(b) 的物种丰度等值线

Fig. 3 The abundance isolines of *Cheumatopsyche* sp. 1(a) and *Cheumatopsyche* sp. 2(b) plot in the RDA ordination diagram

氨氮与总氮($r = 0.958, P < 0.01$)和总磷($r = 0.396, P < 0.01$)都显著相关,氨氮大小代表着水体的营养状况,短脉纹石蛾与毛翅目其他属相比更具耐污能力,所以在一定范围内短脉纹石蛾的数量随着氨氮浓度的增加而增加.许多研究都表明农事耕作会引起水体固体悬浮物数量的增加^[16-17],作为滤食者,短脉纹石蛾可以取食水体中的 FPOM(Fine Particulate Organic Matter),所以样点上游土地利用显著影响短脉纹石蛾的分布.

与蜉蝣目和襁翅目以及毛翅目其他属相比,短脉纹石蛾相对更耐污、分布更广泛;与软体动物和环节动

物相比短脉纹石蛾对水体质量相对更敏感,所以清洁水体中短脉纹石蛾的数量相对较少,一般出现在溪流的中下游,2005年采样点位的氨氮浓度要显著高于2004年($t=20.19$, $P<0.01$),从而导致了2005年短脉纹石蛾出现频率(90.91%)高于2004年(59.91%);另外,Wallace等指出短脉纹石蛾常见于暖水性溪流(warm-water stream)^[18],2005年采样点位的温度也显著高于2004年($t=4.61$, $P<0.01$),这可能也导致了2005年采样点位短脉纹石蛾出现频率高于2004年。

3 讨论

借助RDA分析,本文选取20个环境变量并最终从中筛选出能够最大程度显著解释西苕溪流域底栖动物变异的最小变量组合,这样有利于找到影响底栖动物分布的主要环境因子.只有找到影响底栖动物分布的主要环境因子,我们在以后的水环境管理中才可以真正做到有的放矢.与通过分析环境变量与生物参数之间的相关性筛选主要环境变量的方法相比^[19],RDA方法更具科学性,通过此方法建立的环境变量阈值更具可靠性.

我们在解释环境变量对底栖动物的影响时更多地从较小的尺度,如微生境方面研究,由于技术或其他原因往往忽略了大的空间尺度下环境变量的作用.从不同空间尺度分析环境变量有利于我们综合比较它们对底栖动物的影响,找出主要的环境变量,这样我们才能更好地预测底栖动物对主要环境变量的胁迫反应. Roth和Allan等的研究结果都表明较大流域尺度的土地利用对底栖动物的影响要大于较小尺度下土地利用^[20-21],Black等也指出较大尺度(如流域尺度)的农田利用和森林覆盖率都显著影响普捷湾流域(Puget Sound Basin)的底栖动物分布^[22].本文研究结果表明亚流域尺度农田百分比显著影响西苕溪流域的底栖动物分布,吴璟等分析了西苕溪流域不同空间尺度下样点上游土地利用对溪流大型底栖无脊椎动物的影响,并指出底栖动物生物完整性指数(Benthic Index of Biotic Integrity, B-IBI)在亚流域尺度上与土地利用显著负相关^[23];李兆富等指出西苕溪流域耕地面积比例与氮素输出水平呈正比,而林地比例与氮素输出水平呈反比^[24],这都说明西苕溪流域农田操作导致了大量的营养物质的流失,这从另一方面也说明该地区的农事操作和农田管理措施亟需进一步完善.建议针对西苕溪流域尝试从大的空间尺度上确定影响底栖动物分布的土地利用阈值,并对影响机制做进一步探索.

龚志军等研究结果表明中国长足摇蚊可以作为重污染水体的指示种^[10],国内针对某一具体环境变量变化建立指示种的研究仍较少.在50%–100%的适合度范围内本文最终保留了短脉纹石蛾属两个物种.短脉纹石蛾是纹石蛾科(Hydropsychidae)中的一个属,分布广泛^[25-27],其与纹石蛾(*Hydropsyche*)是溪流中毛翅目的重要组成部分^[28-29],而且在有机污染较严重的河流中基本采集不到短脉纹石蛾.短脉纹石蛾食性不同,有的为肉食性,有的为植食性,也有的取食有机碎屑^[28-29],这从一定程度上也说明了短脉纹石蛾具有很强的生存能力;Ross通过研究发现短脉纹石蛾能够适应的环境梯度较大^[30],即使水体中悬浮颗粒浓度很低,短脉纹石蛾的数量仍会很高^[29];作为一种主动漂流(active drift)底栖动物,短脉纹石蛾具备主动离开附着的基质而进入水体觅食或躲避捕食的能力^[31];Sanchez等的研究结果表明短脉纹石蛾具有一定的生态可塑性,其会根据生存环境的变化调整生活史和次级生产力^[29];另外,短脉纹石蛾的幼虫个体较大、在水中的生活史较长且采集容易,成虫也不具迁徙特性,两次采样共采到毛翅目19307头,其中短脉纹石蛾11816头,占总数的61.20%,而且出现频率达到78.19%,就是一个很好的证明.在一定干扰范围内,随着水体氨氮浓度和亚流域尺度农田百分比的上升,短脉纹石蛾的数量也增多,所以短脉纹石蛾可以作为西苕溪流域受干扰水体氨氮和亚流域尺度农田百分比的指示种.

鉴于短脉纹石蛾分布的广泛性,其生物习性、与其他生物之间的关系、对其他环境变量的胁迫响应、对水体富营养化的预测作用以及能否作为其他地区环境变量的指示种将是以后研究的重点.

4 参考文献

- [1] 王备新.大型底栖无脊椎动物水质生物评价研究[学位论文].南京:南京农业大学,2003.
- [2] Johnson RK, Wiederholm T. Classification and ordination of profundal macroinvertebrate communities in nutrient poor, oligo-mesohumic lakes in relation to environmental data. *Freshwater Biology*, 1989, 21(3): 375-386.
- [3] 李强,杨莲芳,吴璟等.西苕溪EPT昆虫群落分布与环境因子的典范对应分析.生态学报,2006,26(11): 3817-3825.

- [4] 闫云君,李晓宇. 汉江流域黑竹冲河五种优势摇蚊的周年生产量及营养基础分析. 湖泊科学,2006,19(2): 585-591.
- [5] 杨明生,熊邦喜,杨学芬. 武汉市南湖大型底栖动物的时空分布和氮磷评价. 湖泊科学,2007,19(6):658-663.
- [6] 吴 璟,杨莲芳,李 强等. 西苕溪中上游流域水生甲虫分布与环境的关系. 应用与环境生物学报,2008,14(1): 64-68.
- [7] Johnson RK, Wiederholm T, Rosenberg DM. Freshwater biomonitoring using individual organisms, populations, and species assemblages of benthic macroinvertebrates. New York: Chapman and Hall, 1993: 40-125.
- [8] Hilty J, Merenlender A. Faunal indicator taxa selection for monitoring ecosystem health. *Biological Conservation*, 2000, 92(2): 185-197.
- [9] Heino J, Muotka T, Mykr H *et al.* Defining macroinvertebrate assemblage types of headwater streams; implications for bioassessment and conservation. *Ecological Applications*, 2003, 13(3): 842-852.
- [10] 龚志军,谢 平,唐汇涓等. 水体富营养化对大型底栖动物群落结构及多样性的影响. 水生生物学报,2001,25(3): 210-216.
- [11] 李丽娜,陈振楼,许世远等. 长江口滨岸带河蚬的时空分布特征及其指示作用. 应用生态学报,2006,17(5): 883-886.
- [12] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法. 北京:中国环境科学出版社,2002.
- [13] Barbour MT, Gerritsen J, Snyder BD *et al.* Rapid bioassessment protocols for use in streams and wadeable rivers; periphyton, benthic macroinvertebrates, and fish. Washington, DC: US Environmental Protection Agency, Office of Water, 1999.
- [14] Hauer FR. Methods in stream ecology. San Diego: Academic Press, 2006.
- [15] Lep J, Milauer P. Multivariate analysis of ecological data using CANOCO. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.
- [16] Whiles MR, Dodds WK. Relationships between stream size, suspended particles, and filter-feeding macroinvertebrates in a Great Plains drainage network. *Journal of Environmental Quality*, 2002, 31(5): 1589-1600.
- [17] Lenat DR, Crawford JK. Effects of land use on water quality and aquatic biota of three North Carolina Piedmont streams. *Hydrobiologia*, 1994, 294(3): 185-199.
- [18] Wallace JB, Merritt RW. Filter-feeding ecology of aquatic insects. *Annual Review of Entomology*, 1980, 25(1): 103-132.
- [19] 吴东浩,于海燕,吴海燕等. 基于大型底栖无脊椎动物确定河流营养盐浓度阈值——以西苕溪上游流域为例. 应用生态学报,2010,21(2):483-488.
- [20] Roth NE, Allan JD, Erickson DL. Landscape influences on stream biotic integrity assessed at multiple spatial scales. *Landscape Ecology*, 1996, 11(3): 141-156.
- [21] Allan JD. Landscapes and riverscapes; the influence of land use on stream ecosystems. *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics*, 2004, 35: 257-284.
- [22] Black RW, Munn MD, Plotnikoff RW. Using macroinvertebrates to identify biota land cover optima at multiple scales in the Pacific Northwest, USA. *Journal of the North American Benthological Society*, 2004, 23(2): 340-362.
- [23] 吴 璟,杨莲芳,姜小三等. 浙江西苕溪土地利用变化对溪流大型底栖无脊椎动物完整性的影响. 生态学报,2008, 28(3):1183-1191.
- [24] 李兆富,杨桂山,李恒鹏. 西苕溪典型小流域土地利用对氮素输出的影响. 中国环境科学,2005,25(6):678-681.
- [25] Wiggins GB. Larvae of the North American caddisfly genera (trichoptera). 2nd Ed. Toronto: University of Toronto Press, 1996.
- [26] 李佑文,David D. 中国短脉纹石蛾属四新种——(毛翅目:纹石蛾科). 南京农业大学学报,1988,11(1):41-45.
- [27] 李佑文,田立新,David D. 纹石蛾六新种记述. 南京农业大学学报,1990,13(1):37-42.
- [28] Benke AC, Wallace JB. Trophic basis of production among net-spinning caddisflies in a southern Appalachian stream. *Ecology*, 1980, 61(1): 108-118.
- [29] Sanchez RM, Hendricks AC. Life history and secondary production of *Cheumatopsyche* spp. in a small Appalachian stream with two different land uses on its watershed. *Hydrobiologia*, 1997, 354(1): 127-139.
- [30] Ross HH. The caddis flies or Trichoptera of Illinois. *Bulletin of the Illinois Natural History Survey*, 1944, 23(1): 1-326.
- [31] 段 波,李斌峰,刘若思等. 广东横石水河流域溪流大型底栖动物漂流的昼夜节律. 应用生态学报,2008,19(5): 1084-1091.