

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

吴 璟¹, 杨莲芳¹, 姜小三², 李 强¹, 王备新^{1,*}

(1. 南京农业大学昆虫系 水生昆虫与溪流生态实验室; 2. 南京农业大学资源与环境学院, 南京 210095)

摘要:土地利用/覆被变化对溪流生态系统的影响是溪流生态研究的热点。生物完整性是诊断溪流生物学状况和生态健康的重要指标。目的是研究西苕溪流域内土地利用类型对大型底栖无脊椎动物完整性(B-IBI)的影响。利用2003年西苕溪TM数据和DEM模型计算了62个样点上游3种空间尺度下(亚流域、沿岸和局部)的土地利用类型。结果表明,耕地、民居和竹园在流域中的百分比与B-IBI负相关,耕地百分比对B-IBI的影响在亚流域($r = -0.527, p < 0.001$),河岸($r = -0.665, p < 0.001$)和局部($r = -0.696, p < 0.001$)尺度上均显著。针叶林、阔叶林和混交林百分比与B-IBI正相关。阔叶林百分比在亚流域($r = 0.333, p < 0.001$),河岸($r = 0.589, p < 0.001$)和局部尺度($r = 0.618, p < 0.001$)与B-IBI显著相关。而针叶林百分比仅在亚流域尺度($r = 0.366, p < 0.001$)与B-IBI显著相关。在研究流域内耕地百分比小于50%的情况下,B-IBI并非随着耕地百分比的增长而线性下降,而是在达到一定阈值后(亚流域尺度,27%;河岸尺度,57%;局部尺度,59%)耕地的影响逐渐趋缓。在耕地百分比小于阈值前,B-IBI在局部尺度上与耕地百分比的增长的关系最强($r = -0.808, p < 0.001, n = 46$)。建议在沿岸区增加阔叶林,针叶林与混交林的占有率,或者建立耕地与溪流间的林地缓冲带,有助于保护和恢复西苕溪生态健康。

关键词:大型底栖无脊椎动物;生物完整性指数;土地利用;流域;西苕溪

文章编号:1000-0933(2008)03-1183-09 中图分类号:Q16,Q178 文献标识码:A

Evaluating the influence of land-use and land-cover changes on upper Xitiaoqi Watershed, Zhejiang Province, China, using macroinvertebrate-based biotic integrity index

WU Jing¹, YANG Lian-Fang¹, JIANG Xiao-San², LI Qiang¹, WANG Bei-Xin^{1,*}

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

2 College of Resources and Environment Science, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(3): 1183 ~ 1191.

Abstract: Changes of land-use and land-cover strongly influence stream ecosystems. In the present study we evaluate the effects of these changes on the biological condition of Upper Xitiaoqi watershed Zhejiang Province, China, using a benthic index of biotic integrity (B-IBI). Benthic macroinvertebrate assemblages were sampled from 62 sites in first- to fourth-order streams in 2004 to 2005 to develop a B-IBI. The land covers for each site was estimated at sub-basin riparian-zone and local scales using 2003 satellite image and a Digital Elevation Model. We showed that B-IBI was negatively correlated with the percentages of croplands, bamboo forest, and the residential area. The percentage of croplands was strongly and negatively

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

收稿日期:2006-12-18; 修订日期:2007-08-23

作者简介:吴璟(1981~),男,安徽芜湖人,硕士生,主要从事水生昆虫与淡水生态研究. E-mail: 2004102062@njau.edu.cn

* 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: 2006-12-18; **Accepted date:** 2007-08-23

Biography: WU Jing, Master candidate, mainly engaged in aquatic insects and stream ecology. E-mail: 2004102062@njau.edu.cn

correlated with B-IBI at all three spatial scales, sub-basin ($r = -0.527, p < 0.001$), riparian ($r = -0.665, p < 0.001$), and local scales ($r = -0.696, p < 0.001$). The percentages of coniferous forests, broad-leaved forests, and blend forests were positively correlated with the B-IBI. The percentage of the broad-leaved forests was strongly correlated with B-IBI at the local ($r = 0.618, p < 0.001$) and riparian scales ($r = 0.589, p < 0.001$), and less so at the sub-basin scale ($r = 0.333, p < 0.001$). However, the percentage of coniferous forests was significantly correlated only at the sub-basin scale ($r = 0.366, p < 0.001$). With croplands $< 50\%$ of the whole catchment, B-IBI declined linearly as the percentage of the cropland increased, however, the index leveled off when cropland reached 27% of the sub-basin, 57% of riparian zone, or 59% at the local scales. Furthermore, the linear correlation of the percentage of the cropland at local scale with B-IBI was the strongest ($r = -0.808, p < 0.001, n = 46$). Our results suggested that a buffer with higher percentage of forest land cover between stream watercourse and cropland should help to maintain or improve the biological conditions of Upper Xitiaoxi watershed.

Key Words: benthic macroinvertebrate; index of biotic integrity; land use; catchment; Xitiaoxi

溪流/河流的局部生境和生物多样性受不同空间尺度上的地形地貌和土地利用格局的影响^[1,2]。受条件限制,河流/溪流生态学研究通常在小尺度上(河段 reach)进行,大尺度(流域尺度)的研究在近十年才开展^[1]。流域内土地利用和覆被变化有可能改变溪流大型底栖无脊椎动物和鱼类的生物完整性。根据生物完整性指数 IBI(index of biotic integrity)和流域内土地利用/覆被变化的关系,研究者开始利用 IBI 指数评价不同土地利用类型对流域生态系统影响的程度,指导河溪生态系统的保护和恢复工作,并进行跟踪评估^[3~13]。我国在这方面的研究才刚刚起步。

西苕溪流域是太湖与黄浦江的主要源头水系之一,有“中国竹乡”之称的安吉县占整个流域的 85% 左右。农业面源污染是影响西苕溪健康的主要干扰因子,保护西苕溪流域的生态健康有助于改善太湖的水环境质量。本文尝试从景观生态学的角度阐释 B-IBI 与不同空间尺度上的土地利用之间的响应关系,研究耕地变化对溪流生物完整性和生态系统健康的影响。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况及样点

西苕溪中上游流域(东经 $119^{\circ}14' \sim 120^{\circ}29'$, 北纬 $30^{\circ}23' \sim 31^{\circ}11'$)位于太湖上游地区的浙西水利分区,属山区水系,面积 2267 km^2 。流域内林地占整个西苕溪中上游流域的 61.29%,耕地占 31.01%^[14, 15]。地势西南高东北低,依次呈山地、丘陵、平原的梯度分布,形成叁面环山、中间凹陷、东北开口的簸箕形辐射地形,地面高程 $2 \sim 1578 \text{ m}$ 。本文研究的 62 个样点分布于 7 个小流域内(图 1)。

1.2 大型底栖无脊椎动物采集

大型底栖无脊椎动物采集是在 100 m 长的采样区域内,用索伯网($250 \mu\text{m}, 0.093 \text{ m}^2$)采 5 个样,采样总面积 0.465 m^2 。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。摇蚊鉴定至亚科,寡毛类大部分鉴定至科,少数至种,其他一般鉴定到属或种,至少区分到种。



图 1 西苕溪流域内研究的小流域和样点分布

Fig. 1 The study sub-basins and sample sites in Xitiaoxi catchment

● 样点 Sample site

1.3 大型底栖无脊椎动物完整性指数

大型底栖无脊椎动物完整性指数(B-IBI)能够更准确的反映水环境质量。本文通过对 30 多个生物参数的筛选,最终确定 B-IBI 指数由 7 个生物参数构成(表 1),并用比值法统一各生物参数的量纲^[7]。B-IBI 的值即为累加各构成参数的比值(表 1),并进而确定了 B-IBI 评价西苕溪健康的标准,即:健康(Health) > 6.02,亚健康(Sub-health) 4.52 ~ 6.02,普通(Good-fair) 3.02 ~ 4.51,差(Fair) 2.52 ~ 3.01,极差(Poor) < 2.51。

表 1 西苕溪流域 62 个样点底栖生物参数

Table 1 Biotic parameters of the studied stream segments in Xitiaoxi stream catchments

底栖生物参数 Biotic parameters	范围 Range	比值计算公式 Calculational methods
总物种数 Total taxa	10 ~ 76	$A_i/68$
蜉蝣目 + 毛翅目 + 襀翅目物种数 EPT taxa	2 ~ 45	$B_i/31$
鞘翅目物种数 Coleoptera taxa	0 ~ 15	$C_i/11$
纹石蛾科/毛翅目(%) Hydropsychidae/Trichoptera(%)	0 ~ 100%	$(100\% - D_i)/94.70\%$
滤食者百分比 Filterers%	0 ~ 52.41%	$(52.41\% - E_i)/48.16\%$
前 3 位优势种 Three dominant taxa%	32.95% ~ 94.20%	$(94.20\% - F_i)/51.35\%$
生物指数 BI	2.31 ~ 6.62	$(6.62 - G_i)/3.75$

$A_i \dots G_i$ = 各参数实测值, ($i = 1$ 到 62 样点); $A_i \dots G_i$ = values of biotic parameters, (i = samples of 1 to 62)

1.4 土地利用格局分析

参照 Karr 等的方法^[4],分析亚流域(样点上游流域)、河岸带(从样点开始至源头,溪流周围 200 m 宽的河岸带)、局部尺度(样点开始至上游 1 km,溪流周围 200 m 宽的河岸带),3 种空间尺度下的土地利用(图 2)。本项研究的原始数据来自于 2003 年 TM 数据,在对遥感影像进行几何纠正、检验配准和标准化的基础上,按照一定的分类标准得出遥感影像的土地利用分类图。然后通过数字高程模型 DEM (Digital Elevation Models) 直接提取河网及相关流域信息,划分子流域,研究中其他数据均来源于 1:50000 地形图。最后利用图层叠加计算流域中 6 种主要的土地利用类型:耕地、民居、竹园、针叶林、阔叶林、混交林在 3 种尺度下的百分率。

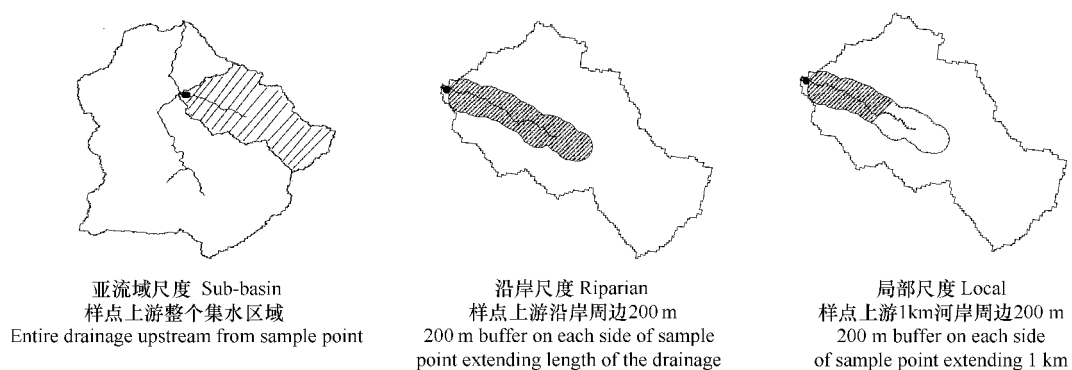


图 2 3 种空间尺度下 GIS 基础分析土地利用图(仿 Morley & Karr, 2002)

Fig. 2 Diagrams of three spatial scales used in the GIS-based analysis of land cover (referred from Morley and Karr, 2002)

●样点位置(Sample site)

2 结果与分析

2.1 大型底栖无脊椎动物

西苕溪流域 62 个样点共采集到大型底栖无脊椎动物 232 个分类单元(taxa),其中 EPT(蜉蝣目、毛翅目、襀翅目)和鞘翅目占总分类单元的 60% 左右,也是组成 B-IBI 重要参数(表 1),出现频度大于 20% 的 56 种常见底栖生物见表 2。样点最多的 76 个分类单元,最少的 10 个。大型底栖无脊椎动物完整性指数(B-IBI)最低 1.3,最高 6.8(表 3),仅有 13% 的样点属于健康(B-IBI > 6.02),69% 的样点健康状况受到了损害(B-IBI <

4.51), 其中严重损害的样点占到 18% ($B-IBI < 2.51$)。

表 2 常见底栖生物名录、出现频度

Table 2 List of common species of macrobenthos, their frequency of occurrence in sampling sites

物种名 Species	频度 Frequency(%)	物种名 Species	频度 Frequency(%)
宽基蚌属 <i>Choroterpes</i> sp1	90.63	螺科 <i>Ceratopogonidae</i>	29.69
四节蚌科 <i>Baetidae</i>	87.50	带肋蚌属 <i>Cincticostella</i> sp2	28.13
狭溪泥甲属 <i>Stenelmis</i> sp	85.94	星齿蛉属 <i>Protohermes</i> sp2	28.13
宽基蚌属 <i>Choroterpes</i> sp2	84.38	椭圆萝卜螺 <i>Radix swinhoei</i>	28.13
蚋科 <i>Simuliidae</i>	76.56	瘤石蛾属 <i>Goera</i> sp1	28.13
朝大蚊属 <i>Antocha</i> sp1	75.00	姬长角石蛾属 <i>Setodes</i> sp1	28.13
放逸短沟蜷螺 <i>Semisulcospira libertina</i>	68.75	泽蛭属 <i>Helobdella</i> sp1	26.56
中华细蚌 <i>Caenis sinensis</i>	67.19	近岸细蚌 <i>Caenis rivulorum</i>	26.56
颤蚓科 <i>Tubificidae</i>	64.06	带肋蚌属 <i>Cincticostella</i> sp1	26.56
花斑侧枝纹石蛾 <i>Ceratopsyche</i> sp1	60.94	原石蛾属 <i>Rhyacophila</i> sp1	26.56
心唇短脉石蛾 <i>Cheumatopsyche</i> sp1	60.94	等蚌属 <i>Isonychia</i> sp	25.00
毛黑大蚊 <i>Hexatoma</i> sp1	56.25	春蜓科 <i>Gomphidae</i>	25.00
凹唇短脉石蛾属 <i>Cheumatopsyche</i> sp2	54.69	米虾 <i>Caridina sinensis</i>	23.44
梧州蚌 <i>Ephemera wuchowensis</i>	53.13	日溪泥甲属 <i>Nomuraelmis</i> sp	20.31
红斑似动蚌 <i>Cinygmmina rubromaculata</i>	53.13	假蚌属 <i>Iron</i> sp1	20.31
平唇短脉石蛾属 <i>Cheumatopsyche</i> sp3	53.13	柔囊蚌属 <i>Habrophlebiodes</i> sp1	20.31
河蚬 <i>Corbicula fluminea</i>	51.56	角石蛾属 <i>Stenopsyche</i> sp1	20.31
锯形蚌属 <i>Serratella</i> sp1	50.00	锯形蚌属 <i>Serratella</i> sp3	40.63
软鞘扁泥甲属 <i>Psephenoides</i> sp1	48.44	白旋螺 <i>Gyraulus albus</i>	39.06
毛黑大蚊属 <i>Hexatoma</i> sp2	48.44	长刺细蚌 <i>Caenis longispina</i>	37.50
斜纹似动蚌 <i>Cinygmmina obliquistrata</i>	48.44	绢蚌 <i>Ephemera serica</i>	35.94
红天角蚌 <i>Uracanthella rufa</i>	46.88	扁泥甲属 <i>Psephenus</i> sp	34.38
<i>Oulimnius</i> sp1	45.31	<i>Goniolous</i> sp	32.81
长江华溪蟹 <i>Sinopotamon yangtsekiense</i>	45.31	虻科 <i>Tabanidae</i>	32.81
黑点细蚌 <i>Caenis nigropunctata</i>	45.31	生米蚌 <i>Ephemera shengmi</i>	32.81
涡虫 <i>Turbellaria</i> sp1	45.31	锯形蚌属 <i>Serratella</i> sp2	31.25
花斑侧枝纹石蛾 <i>Ceratopsyche</i> sp2	45.31	鱼蛉属 <i>Parachauliodes</i> sp1	42.19
似动蚌属 <i>Cinygmmina</i> sp3	42.19	苏氏尾鳃蚋 <i>Branchiura sowerbyi</i>	40.63

表 3 西荇溪样点 B-IBI 指数

Table 3 B-IBI of Xitaoxi in sample sites

样点 Site	B-IBI	样点 Site	B-IBI	样点 Site	B-IBI	样点 Site	B-IBI
1	5.83	17	3.85	33	2.52	49	1.79
2	5.61	18	3.93	34	2.08	50	3.01
3	5.49	19	4.19	35	2.00	51	2.52
4	6.48	20	4.82	36	3.20	52	2.77
5	4.80	21	3.14	37	3.45	53	1.50
6	3.91	22	5.70	38	2.00	54	1.31
7	4.26	23	2.99	39	2.14	55	3.94
8	4.61	24	4.03	40	3.30	56	2.32
9	4.45	25	4.71	41	3.09	57	3.43
10	5.42	26	5.47	42	3.62	58	2.69
11	4.45	27	2.80	43	2.93	59	2.53
12	3.34	28	6.78	44	3.04	60	2.27
13	5.51	29	3.14	45	2.48	61	3.10
14	6.18	30	3.42	46	2.58	62	1.79
15	4.33	31	6.27	47	2.20		
16	4.99	32	6.04	48	3.37		

2.2 研究区域土地利用概况

7 个支流流域土地利用状况显示(图 3),耕地利用都在 19% 以上,支流流域 5 的耕地面积百分比最大, 43.92%, 其次为支流流域 1, 38.73%。各流域的林地面积比均在 50% 以上,支流流域 7 最大,74.81%。其中竹园、阔叶林和混交林比例较大,针叶林仅在 0.90% ~ 5.60% 之间。民居和工矿用地面积在所有流域中均不超过 2.5%。

2.3 土地利用与 B-IBI

耕地,民居和竹园与 B-IBI 负相关。耕地对 B-IBI 影响最大,在 3 种空间尺度下亚流域($r = -0.527, p < 0.001$),河岸($r = -0.665, p < 0.001$)和局部($r = -0.696, p < 0.001$)都对 B-IBI 产生显著影响,但局部尺度和河岸尺度要强于亚流域尺度。其次为民居(亚流域尺度 $r = -0.503, p < 0.001$,河岸尺度 $r = -0.400, p < 0.05$,局部尺度 $r = -0.402, p < 0.05$),而竹园与 B-IBI 相关性不显著($p > 0.1$)。但 B-IBI 并非随着耕地百分比的增长而线性下降,在耕地的百分比达到一定阈值后(通过二次曲线拟合,亚流域尺度,27%;河岸尺度,57%;局部尺度,59%) (表 4),耕地的影响逐渐趋缓(图 4)。耕地与组成 B-IBI 的 7 个参数的相关性(Spearman 系数)分析表明,3 种空间尺度下耕地对各参数的影响均显著或极显著(表 5)。耕地与物种总数, EPT 物种数和鞘翅目物种数负相关。物种总数受耕地的影响最大,其次是鞘翅目和 EPT。耕地与物种总数的相关性,河岸尺度($r = -0.635$)和局部尺度($r = -0.592$)明显强于亚流域尺度($r = -0.395$),而耕地与 EPT 物种数和鞘翅目物种数的相关性在 3 种空间尺度上相差不大。前 3 位优势种比例(%),毛翅目中纹石蛾科比例(%),滤食者比例(%)和 BI 与耕地呈正相关,其中耕地与 BI 的相关性最强,其次为滤食者比例(%),毛翅目中纹石蛾科比例(%)和前 3 位优势种比例(%)。BI、毛翅目中纹石蛾科比例(%)和滤食者比例(%)在局部和河岸尺度上的相关性相差不大,但明显强于亚流域尺度。而前 3 位优势种(%)在河岸尺度($r = 0.422$)上受耕地的影响要强于局部($r = 0.263$)和亚流域尺度($r = 0.275$)。

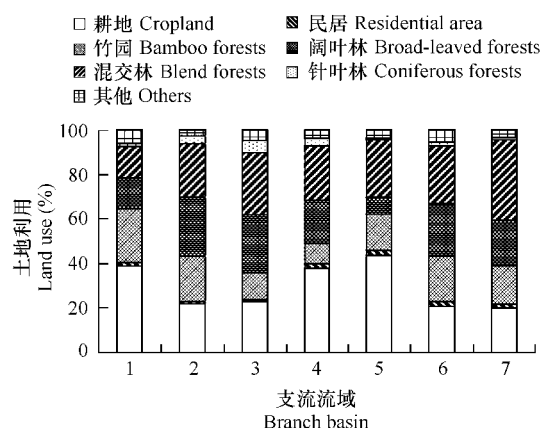


图 3 每个支流流域的土地利用分布

Fig. 3 Distribution of land-use categories within each branch basin

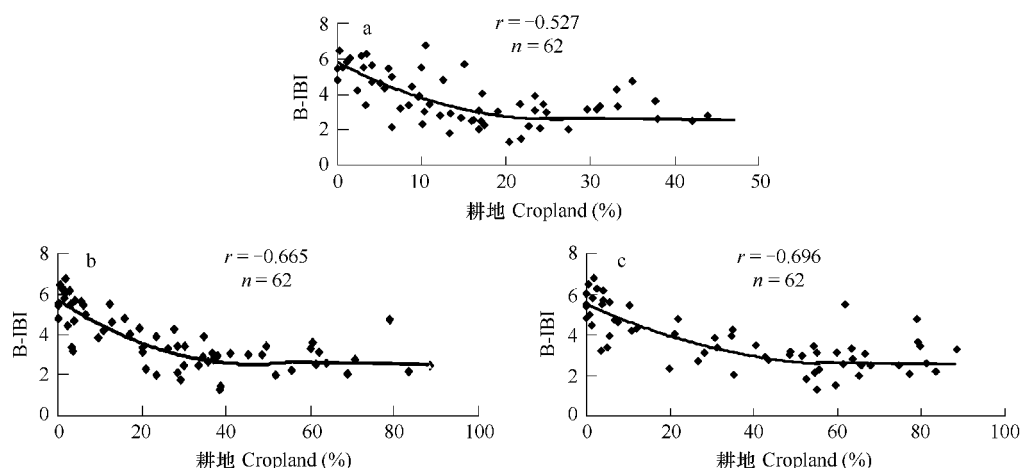


图 4 耕地百分比与 B-IBI 之间的关系

Fig. 4 Relationship between cropland % and B-IBI

a 流域尺度 Sub-basin b 河岸尺度 Riparian c 局部尺度 Local

表 4 3 种空间尺度下耕地百分比与 B-IBI 之间的曲线拟合

Table 4 Curve estimation between cropland % and B-IBI in three spatial scales

空间尺度 Spatial scale	二次曲线拟合方程 Curve estimation of quadratic	
流域尺度 Sub-basin	$y = 0.004x^2 - 0.218x + 5.6443$	($R^2 = 0.4461, p < 0.001$)
河岸尺度 Riparian	$y = 0.001x^2 - 0.1133x + 5.5772$	($R^2 = 0.6414, p < 0.001$)
局部尺度 Local	$y = 0.0008x^2 - 0.0948x + 5.498$	($R^2 = 0.6119, p < 0.001$)

针叶林,阔叶林和混交林与 B-IBI 正相关,B-IBI 随着森林面积百分比的增加而上升。亚流域尺度上针叶林与 B-IBI 相关性最强($r = 0.366, p < 0.001$),阔叶林其次($r = 0.333, p < 0.001$),混交林与 B-IBI 相关性不显著($p > 0.1$)。其余两个尺度上阔叶林与 B-IBI 显著相关(河岸尺度 $r = 0.589, p < 0.001$,局部尺度 $r = 0.618, p < 0.001$)针叶林其次,混交林与 B-IBI 相关性最弱。

表 5 组成 B-IBI 的 7 个参数在 3 种空间尺度下与耕地土地利用(%)的相关性(Spearman 相关系数)

Table 5 Spearman rank correlation between the 7 metrics of the B-IBI and cropland land use (%) in three spatial scales

样点(n=62) Sample size(n=62)	土地利用(耕地%) Land use (Cropland %)		
	亚流域 Sub-basin	河岸 Riparian	局部 Local
总物种数 Total taxa	-0.395 ^b	-0.635 ^a	-0.592 ^a
蜉蝣目 + 毛翅目 + 襀翅目物种数 EPT taxa	-0.263 ^b	-0.330 ^b	-0.271 ^b
鞘翅目物种数 Coleoptera taxa	-0.393 ^b	-0.383 ^b	-0.367 ^b
毛翅目中纹石蛾科比例(%) Hydropsychidae/Trichoptera(%)	+0.359 ^b	+0.469 ^a	+0.514 ^a
滤食者比例(%) Filterers(%)	+0.438 ^a	+0.502 ^a	+0.562 ^b
前三位优势种比例(%) Three dominant taxa(%)	+0.275 ^b	+0.422 ^b	+0.263 ^b
生物指数 BI	+0.612 ^a	+0.741 ^a	+0.736 ^a

a: $p < 0.001$, b: $p < 0.05$

2.4 空间尺度

耕地百分比对 B-IBI 的影响与空间尺度密切相关。支流流域 5(7 个样点)和 6(10 个样点)在亚流域尺度上的耕地百分比分别为 2.88% ~ 43.92% 和 5.57% ~ 21.74%,河岸尺度上 3.78% ~ 88.32% 和 19.37% ~ 48.38%,局部尺度上为 3.82% ~ 83.53% 和 12.04% ~ 66.61%。支流流域 5 内的耕地百分比在 3 种空间尺度上与 B-IBI 均显著相关(亚流域 $r = -0.824, p < 0.05$;河岸 $r = -0.913, p < 0.05$,局部 $r = -0.927, p < 0.05$),然而支流流域 6 内的耕地百分比仅在亚流域尺度($r = -0.808, p < 0.05$)和局部尺度($r = -0.685, p < 0.05$)与 B-IBI 显著相关,在河岸尺度上与 B-IBI 相关性不显著($p > 0.1$)。支流流域 5 在局部和河岸尺度上耕地百分比对 B-IBI 的影响强于亚流域尺度,而支流流域 6 在亚流域尺度上耕地百分比的影响强于局部和河岸尺度。不同流域在空间尺度上的影响存在差异,B-IBI 受到从小尺度到大尺度空间共同的影响,单一的空间尺度可能会无法准确反映耕地变化对溪流生态的影响(如支流流域 6 的河岸尺度)。

3 讨论

3.1 农业土地利用对溪流底栖动物完整性的影响机制

土地利用/覆被变化是生态系统状况的重要指标^[2]。农业土地利用引起面源污染、有毒物质(农药)污染、水质恶化、泥沙沉积、生境多样性消失、沿岸植被被破坏和水流量变化,是流域底栖动物完整性下降的主要原因之一。西苕溪中上游流域耕地密集,由于农业生产和灌溉,溪流河道多被渠道化、径直化和水泥化,自然溪流曲率消失,生境地貌改变,溪流缓流和急流差异变小,水文状况和生境地貌的改变造成树叶腐殖质和有机颗粒不易沉积,适宜底栖生物的溪流栖境减少,以及农药的大量使用,无序化、密集化农业模式和污染物直接排放都使底栖生物群落受到极大影响。国外的研究也显示农业用地比例与 B-IBI 呈一种非线性相关,但是与本文的研究结果相反,农业用地比例在 30% ~ 50% 时溪流仍然保持很高的生物完整性指数和良好栖境,当耕地在流域中比例超出这一范围时才产生强烈的影响^[2]。因此避免人类对溪流的直接干扰和对溪流的科学管

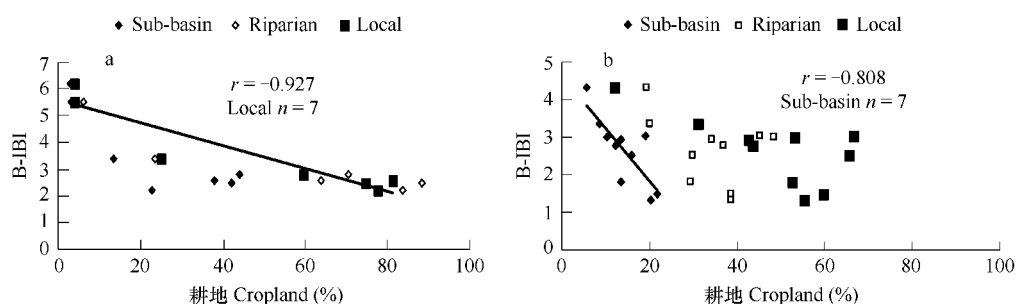


图5 不同流域的耕地百分比与 B-IBI 之间的关系

Fig. 5 Relationship of cropland % and B-IBI in different basins

a. 支流流域 5 Branch basin 5 b. 支流流域 6 Branch basin 6

理策略,可以保护底栖生物完整性和栖息质量,消除农业用地的影响,这也就解释了西苕溪流域中个别样点在耕地比例达到阈值之后仍然能保持较高的生物完整性指数的原因(图3)。西苕溪流域 B-IBI 指数受耕地影响明显,耕地比例达到 30% ~ 50% 时,底栖生物群落中耐污种群增多,群落结构趋于稳定,底栖生物完整性指数(B-IBI)也保持在稳定水平。但是图 3a 中清晰表明其研究结论是在流域尺度耕地比例小于 45% 基础上得出,一旦耕地在流域尺度上比例继续增加,根据国外现有的研究资料,底栖生物完整性指数(B-IBI)将会继续受到影响,这种暂时稳定的底栖生物群落结构将无法保持。

3.2 流域土地利用管理策略

耕地在以农业为主的流域中是溪流生态的主要影响因素。尽管与城镇化的影响相比,它产生的干扰没有那么直接和剧烈^[12],然而在我国东南沿海一带的山区,传统的农业耕作方式是耕地密集于溪流的沿岸地带,直接影响溪流生态系统。生物完整性指数能较好地反映溪流生态系统的状况以及它们对人类干扰的响应^[4],组成 B-IBI 的生物参数包含了潜在的溪流恢复和保护的目标^[3]。通过生物参数中潜在的诊断信息,分析参数与土地利用之间的关系,就可以为诊断样点生物学状况下降的原因提供科学依据。

本文发现在 3 种空间尺度上耕地% 达到阈值之前(亚流域尺度,27%;河岸尺度,57%;局部尺度,59%)与 B-IBI 成线性下降关系,并且 B-IBI 在局部尺度上对耕地% 增长的反应尤为明显($r = -0.808$, $p < 0.001$, $n = 46$),但在阈值之后,耕地面积继续增加,B-IBI 下降的趋势逐渐趋缓。这一结果的出现是因为受到西苕溪流域内的地理条件和土地利用格局的制约,耕地可能与林地(阔叶林、针叶林、竹林和混合林)等其他土地利用类型之间的存在耦联关系(trade off),耕地比例达到某一程度以后,耕地比例的继续增加对 B-IBI 所产生的影响会受到林地的限制(7 个支流流域林地面积均在 60% 左右)。因此,耕地对 B-IBI 的影响就必然存在一个阈值。流域内林地比例的多少,可能是最终决定溪流生物完整性最终处于何种程度的一个主导因子。另外,不同尺度上耕地面积的变化与溪流生物完整性的相关性差异较大,如子流域 5 的耕地百分比只在局部尺度与 B-IBI 密切相关,而子流域 6 虽然在 3 个尺度上耕地百分比与 B-IBI 都高度相关,但局部尺度上的相关性最高($r = -0.927$, $p < 0.05$)。因此溪流生物完整性和生态系统健康的改善,建议可通过以下方面开展,(1)控制农田面积,(2)林地种类的改变,(3)不同林地面积的调整,(4)局部尺度上林地面积的增加,(5)建立农田与溪流之间以林地为主的沿岸缓冲带。

3.3 今后的研究方向

溪流的生态状况与土地利用格局密切相关^[26],如何协调溪流生态与人类活动之间的平衡是今后溪流保护和恢复工作中的重点^[27]。然而本研究仅仅揭示了一个现象,还有很多问题有待解决,例如土地利用格局影响 B-IBI 的驱动机制,溪流生态过程和生态功能对土地利用格局的响应,我国的城市化进程中溪流的合理利用和保护,以及不同土地利用之间的耦联关系与溪流生物多样性和生态功能的保护等。

References:

- [1] Allan J D, Erickson D L, Fay J. The influence of catchment land use on stream integrity across multiple spatial scales. *Freshwater Biology*, 1997, 37:149 — 161.
- [2] Allan J D. Landscapes and Riverscapes: The influence of land use on stream ecosystems. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2004, 35:257 — 384.
- [3] Karr J R. Biological integrity a long-neglected aspect of water-resource management. *Ecological Applications*, 1991, 1:66 — 68.
- [4] Karr J R. Assessment of biological integrity using fish communities. *Fisheries*, 1981, 6 : 21 — 27.
- [5] Mebane C A, Maret T R, Hughes R M. An index of biological integrity (IBI) for pacific northwest rivers. *Transactions of the American Fisheries Society*, 2003, 132: 239 — 261.
- [6] Kerans B L, Karr J R. A benthic index of biological integrity (B-IBI) for rivers of the Tennessee Valley. *Ecological Applications*, 1994, 4:768 — 785.
- [7] Wang B X, Yang L F, Hu B J, *et al.* A preliminary study on the assessment of stream ecosystem health in south of Anhui Province using Benthic-Index of Biotic Integrity. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(6):1481 — 1490.
- [8] Hill B H, Herlihy A T, Kaufmann P R, *et al.* Assessment of streams of eastern United States using a periphyton index of biotic integrity. *Ecological Indicators*, 2003, 2 (4):325 — 338.
- [9] Morley S A, Karr J R. Assessing and restoring the health of urban streams in the Puget Sound Basin. *Conservation Biology*, 2002, 16:1498 — 1509.
- [10] Helms B S, Feminella J W. Detection of biotic responses to urbanization using fish assemblages from small streams of western Georgia, USA. *Urban Ecosystems*, 2005, 8: 39 — 57.
- [11] Morse C C, Huryn A D, Cronan C. Impervious surface area as a predictor of the effects of urbanization on stream insect communities in Maine, U. S. A. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2003, 89: 95 — 127.
- [12] Moore A A, Palmer M A. Invertebrate biodiversity in agricultural and urban headwater streams: implications for conservation and management. *Ecological Applications*, 2005, 15(4):1169 — 1177.
- [13] Volstad J H, Roth N E, Mercurio G, *et al.* Using environmental stressor information to predict the ecological status of Maryland non-tidal streams as measured by biological indicators. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2003, 84: 219 — 242.
- [14] Yu X X, Yang G S. Land use/cover change of catchment and its water quality effects. *Resources and environment in the Yangtze basin*, 2003, 12 (3):211 — 217.
- [15] Yu X X, Yang G S, Li H P. Land use/cover change of catchment and its landscape ecological effects. *Journal of Natural Resources*, 2003, 18 (1):13 — 19.
- [16] Keeler A G, McLemore D. The value of incorporating bio- indicators in economic approaches to water pollution control. *Ecological Economics*, 1996, 19:237 — 245.
- [17] Barker L S, Felton G K, Cohen E R. Use of Maryland biological stream survey data to determine effects of agricultural riparian buffers on measures of biological stream health. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2006, 117:1 — 19.
- [18] Mo P P, Wang Q C, Hershey A E, *et al.* Land-use, stream order and stream water physical and chemical qualities. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(7):1486 — 1492.
- [19] Soldnera M, Stephena I, Ramosb L, *et al.* Relationship between macroinvertebrate fauna and environmental variables in small streams of the Dominican Republic. *Water Research*, 2004, 38:863 — 874.
- [20] Murphy J F, Bowker J D. Spatial structure in lotic macroinvertebrate communities in England and Wales: relationship with physical, chemical and anthropogenic stress variables. *Hydrobiologia*, 2005, 534: 151 — 164.
- [21] Voelz N J, McArthur J V. An exploration of factors influencing lotic insect species richness. *Biodiversity and Conservation*, 2000, 9: 1543 — 1570.
- [22] Morse J C, Yang L F, Tian L X. *Aquatic Insects of China Useful for Monitoring Water Quality*. Nanjing: HoHai University Press, 1994, 1 — 570.
- [23] Chen L D, Zhang S R, Fu B J, *et al.* Correlation analysis on spatial pattern of land use and soil at catchment scale. *Acta Ecologica Sinica*, 2003,

23 (12): 2497—2505.

- [24] Zhu C H and Li R D. Impact of land use change on runoff-yield of Dongting-lake area. *Resources and Environment in the Yangtze Basi*, 2005, 14 (5):566—569.
- [25] Li H E, Li Y, Cai M, *et al.* Relationships between river water quality and human activities in watershed. *Journal of Water Resources &Water Engineering*, 2004, 15(1):24—28.
- [26] Harding J S, Benfield L S, Bolstad P V, *et al.* Stream biodiversity: The ghost of land use past. *Proceeding of the National Academy of Sciences of the United States of American*, 1998, 95:14843—14847.
- [27] Booth D B. Challenges and prospects for restoring urban streams: a perspective from the Pacific Northwest of North America. *Journal of the North American Benthological Society*, 2005, 24(3):724—737.

参考文献:

- [7] 王备新,杨莲芳,胡本进,单林娜.应用底栖动物完整性指数 B-IBI 评价溪流健康. *生态学报*,2005,25(6):1481~1490.
- [14] 于兴修,杨桂山.典型流域土地利用/覆被变化及对水质的影响. *长江流域资源与环境*,2003,12(3):211~217.
- [15] 于兴修,杨桂山,李恒鹏.典型流域土地利用/覆被变化及其景观生态效应. *自然资源学报*,2003,18(1):13~19.
- [18] 牟溥,王庆成, Hershey A E, 于红丽,郭宝琴.土地利用、溪流级别与溪流河水理化性质的关系. *生态学报*,2004,24(7):1486~1492.
- [23] 陈利顶,张淑荣,傅伯杰,彭鸿嘉.流域尺度土地利用与土壤类型空间分布的相关性研究. *生态学报*,2003,23(12):2498~2505.
- [24] 朱超洪,李仁东.洞庭湖区土地利用变化对地表产流的影响分析. *长江流域资源与环境*,2005,14(5):566~569.
- [25] 李怀恩,李越,蔡明,王清华.河流水质与流域人类活动之间的关系. *水资源与水工程学报*,2004,15(1):24~28.