

东苕溪鱼类生物完整性评价河流健康体系的构建与应用

黄亮亮^{1,2}, 吴志强¹, 蒋科², 佐藤辰郎³, 鹿野雄一³, 李建华^{2*} (1. 桂林理工大学环境科学与工程学院, 广西 桂林 541004; 2. 同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092; 3. 九州大学大学院工学府, 福岡 8190395)

摘要: 以东苕溪流域为研究区域, 建立基于鱼类生物完整性指数(IBM)的河流健康评价指标体系。采样点来自 2 个不同的生态区, 共建立了 2 套不同的 IBM 评价指标体系和标准。上游支流样点均来自浙闽山地常绿阔叶林生态区, 从而建立了东苕溪上游支流的 IBM 指标体系: 即鱼类总物种数(M1)、平鳍鳅科鱼类物种数百分比(M5)、中国土著鱼类物种数百分比(M6)、Shannon-Wiener 多样性指数(M7)、无脊椎动物食性鱼类个体百分比(M13)、植食性鱼类个体百分比(M14)、敏感性鱼类个体百分比(M16) 7 个参数指标。中下游样点均来自长江三角洲城镇及城郊农业生态区, 建立了东苕溪中下游区域的 IBM 指标体系: 即鱼类总物种数(M1)、鲃科鱼类物种数百分比(M4)、中国土著鱼类物种数百分比(M6)、Shannon-Wiener 多样性指数(M7)、上层鱼类物种数百分比(M8)、中上层鱼类物种数百分比(M9)、植食性鱼类个体百分比(M14)、借助贝类产卵鱼类物种数百分比(M21)、鱼类总个体数(M22)、畸形、患病鱼类个体数百分比(M23) 等 10 个参数指标。河流健康状态划分为 5 个健康等级: 即“健康”、“一般”、“较差”、“极差”和“无鱼”。应用 IBM 指标体系评价东苕溪流域的 45 个观测点的河流健康状况, 结果显示东苕溪流域绝大多数河段的健康状况处于“一般”和“较差”水平。2011 年, 东苕溪中下游河段的健康状态较 2010 年有所改善, 然而上游支流的健康状态较 2010 年有所下降。

关键词: 生物完整性指数; 河流健康; 鱼类; 东苕溪

中图分类号: X171.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2013)07-1280-10

Development and application of IBM based on fish to assess the river's health in the East Tiaoxi River. HUANG Liang-liang^{1,2}, WU Zhi-qiang¹, JIANG Ke², SATO Tatsuro³, KANO Yuichi³, LI Jian-hua^{2*} (1. College of Environmental Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China; 2. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Department of Engineering, Kyushu University, Fukuoka 8190395, Japan). *China Environmental Science*, 2013, 33(7): 1280~1289

Abstract: Index of biological integrity (IBM) based on fish to assess the river health in the East Tiaoxi River was established in this study. Two IBM systems and assessment criteria were established due to sampling sites being from two different eco-regions. The sampling sites from the tributaries in the upper reaches of East Tiaoxi were in the eco-zone of evergreen broad-leaf forest between Zhejiang Province and Fujian Province, and IBM in the tributaries was established including species richness (M1), percentage of species in the Balitoridae to species richness (M5), percentage of endemic species to species richness (M6), Shannon-Wiener's diversity index (M7), percentage of invertivores to abundance (M13), percentage of herbivores to abundance (M14) and percentage of intolerant species to abundance (M16). The sampling sites from the middle-lower reaches of East Tiaoxi River were in the Eco-zone of agriculture area in urban and suburban in the Yangtze River Delta, and IBM in the middle-lower reaches was established including species richness (M1), percentage of species in the Gobiidae to species richness (M4), percentage of endemic species to species richness (M6), Shannon-Wiener's diversity index (M7), percentage of species inhabit in the up layer to species richness (M8), percentage of species inhabit in the middle-up layer to species richness (M9), percentage of herbivores to abundance (M14), percentage of species spawn in shells to species richness (M21), abundance (M22) and percentage of DELT to abundance (M23). The status of river health was categorized into five levels, such as 'healthy', 'fair', 'poor', 'very poor' and 'no fish'. Two IBIs were applied to assess the 45 observation sites in the East Tiaoxi River in 2010 and 2011. The results showed

收稿日期: 2012-12-15

基金项目: 中日国际合作项目; 广西科学研究与技术开发计划课题; 广西重点实验室研究基金项目

* 责任作者, 教授, leejianhua@tongji.edu.cn

that the river's health was mainly at the status of 'fair' and 'poor'. By contrast in 2011, the observation sites of 'healthy' and 'fair' decreased by 1 and 2 sites than those in 2010, respectively. Meanwhile, the observation sites of 'poor', 'very poor' and 'no fish' increased by 1 site than those in 2010, respectively.

Key words: index of biological integrity (IBI); river health; fish; East Tiaoxi River

生物完整性是生物群落具有维持自身平衡、保持结构完整性和适应环境变化的能力,包括一个地区天然栖息地中的该群落所有种类组成、多样性和功能结构特征^[1],是自身生存状态的体现,也是对生物生存环境质量的一种反映。生物完整性指数(IBI)是指可定量描述环境状况特别是人为干扰与生物特性关系的一组敏感性生物指数^[2-3]。IBI 评价体系是通过对生态系统中某一生物类群(如鱼类)的物种组成、多样性及功能结构进行分析,将其和相应的标准体系比较,然后根据指标评估以观测生态系统的健康^[4],它被广泛应用于河流生态健康评价,对维护河流生态系统的健康、可持续管理和利用具有重要意义^[5]。目前,我国生物完整性研究尚处于起步阶段,最初以底栖无脊椎动物为监测对象^[6],之后更多地采用鱼类评价河流或湖泊生态系统健康^[7-9]。虽然 IBI 评价体系在我国部分地区已经建立,但因各地鱼类区系组成及河流自然状况的不同而存在较大差异。本文以东苕溪鱼类为研究对象,构建东苕溪流域鱼类的 IBI 评价指标体系,并将其用于该区域的河流健康评价,促进其在流域尺度上的应用,为太湖入湖河流环境质量监测和管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究地点

东苕溪位于浙江省杭嘉湖平原西部(119°28'E~120°08'E,30°05'N~30°57'N),发源于天目山脉马尖岗(1271m)南麓的水竹坞,向东流经临安市里畈、桥东、临天、青山和余杭区的余杭镇,自余杭镇折北而流。东苕溪流至汤湾渡左汇中苕溪,至瓶窑左汇北苕溪,最后在湖州市与西苕溪汇合后注入太湖,为太湖的主要入湖河流之一(图 1),主流长 151.4km。其中,南苕溪、中苕溪和北苕溪的河道比降约 1/100,临安至余杭河段河道比降为

1/1 000,余杭至湖州河段比降约 1/20 000。东苕溪属山溪性河流,源短流急,洪水暴涨暴落,流域面积 2265km²,全流域山丘面积占 88%,平原面积占 12%。东苕溪流域位于亚热带季风气候区,温和湿润,降水丰沛,受大气环流影响,流域内降水量年际变化较大,年内分配不均,多年平均降水量为 1460mm,年降水日 143~161d^[10]。

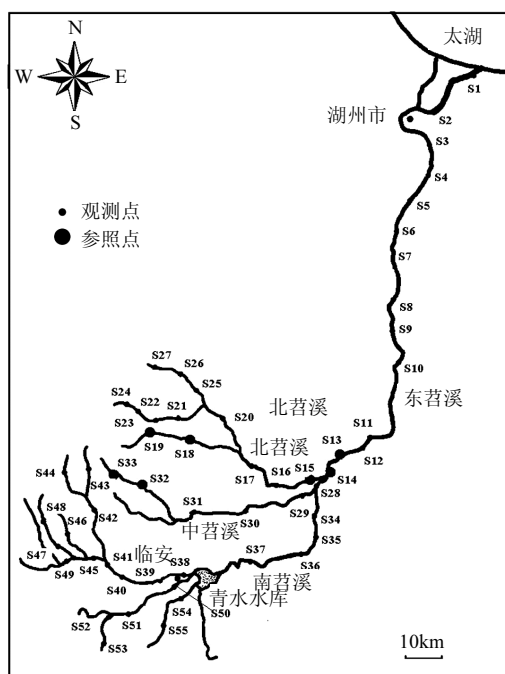


图 1 东苕溪参照点及观测点的分布

Fig.1 Map of reference sites and observation sites in the East Tiaoxi River

1.2 采样方法

2010 年 5 月和 2011 年 5 月自东苕溪入太湖河口逆流而上至各支流,中下游河段借助渔船利用微波磁力捕鱼机(财富微波磁力机,DC12/6000W,郑州)沿岸进行采样,每个样点采样距离合计约 500m,上游河段利用背负式捕鱼器(LR-24; Smith-Root Inc., Vancouver, Washington)根据

样点的生境特征进行采样,每个样点包含深潭、浅滩等栖息生境,采样距离约 50m.每个采样点均从下游向上游采样,中下游河段样点的采样时间约 1h,而上游河段样点的采样时间约 30min.鱼类标本的鉴定根据工具书^[11-14],现场鉴定到种的水平.绝大多数标本现场鉴定后放回河流,少量标本用福尔马林溶液固定与保存,记录各采样点鱼类物种数及个体数,记录鱼类健康状况,同时记录各采样点位置.

1.3 理化指标测定

鱼类标本采集后,利用便携式水质分析仪(HACH sensION156,USA)、便携式浊度仪(HACH 2100P)和浮游植物荧光仪(Phyto-PAM Analyzer,Walz, Germany)分别测量各样点的水温、电导率、溶解氧、浊度和叶绿素 a 的含量.另外,每个采样点采集水样,现场保温箱加冰保存,回到住处后,将水样标本移入冰箱冷冻保存带回实验室用于总悬浮性固体(SS)、总磷(TP)、总氮(TN)的测定^[15].

1.4 参照位点的选择

参照点的选取原则是利用历史数据,或选择无人类干扰的河流原始河段作为参照点,但目前针对参照位点的选取尚无统一的标准^[16-19].本研究区域采样点内不存在无人类活动干扰样点,而且缺乏历史数据.因此,本文根据预调查结果,选择上游人类活动较少的一级河道中的 S18、S19、S32、S33 为支流的参照位点;中游水质清澈、水生生物丰富、无船舶航运影响的 S13、S14、S15 为中下游的参照位点^[20](图 1).

1.5 评价指标的设置及筛选原则

初选指标设置综合参考目前国内外基于鱼类 IBI 研究所使用的指标设置^[3-5,7-9],根据东苕溪流域的鱼类物种组成及生态学特征,选择了分属于 5 类对环境变化较为敏感的 24 个指标为候选指标(表 1).候选指标依次利用分布范围、判别能力和相关性分析进行筛选^[6,21],其中判别能力筛选是比较参照位点和观测位点在 25%~75%分位数范围即箱体 IQ(Interquartile ranges)内的重叠情况,分别赋予不同的值,只有 IQ≥2 的参数才能进一步分析,具体方法参考文献[21].

表 1 IBI 评价体系候选指标及其对干扰的响应
Table 1 Candidate metrics of IBI and their response to human disturbance

属性归属	候选参数指标	参数缩写 对干扰的响应	
		写	响应
种类组成与丰度	鱼类总物种数	M1	下降
	鲤科鱼类物种数百分比	M2	上升
	鲢科鱼类物种数百分比	M3	下降
	虾虎鱼科鱼类物种数百分比	M4	下降
	平鳍鲃科鱼类物种数百分比	M5	下降
	中国土著鱼类物种数百分比	M6	下降
	Shannon-Wiener 多样性指数	M7	下降
	上层鱼类物种数百分比	M8	下降
	中上层鱼类物种数百分比	M9	下降
	中下层鱼类物种数百分比	M10	下降
	底层鱼类物种数百分比	M11	下降
营养结构	杂食性鱼类个体百分比	M12	上升
	无脊椎动物食性鱼类个体百分比	M13	下降
	植食性鱼类个体百分比	M14	下降
	肉食性鱼类个体百分比	M15	下降
耐受性	敏感性鱼类个体百分比	M16	下降
	耐受性鱼类个体百分比	M17	上升
繁殖共位群	产漂流性卵鱼类物种数百分比	M18	下降
	产沉性卵鱼类物种数百分比	M19	下降
	产粘性卵鱼类物种数百分比	M20	上升
	借助贝类产卵鱼类物种数百分比	M21	下降
鱼类数量与健康状况	鱼类总个体数	M22	下降
	畸形、患病鱼类个体数百分比	M23	上升
	外来鱼类个体数百分比	M24	上升

1.6 指标分值的计算及评价标准

根据目前应用最多的评价方法,即传统的 1、3、5 赋值法^[22]:对各指标测得的实际值在最低到最高范围内 3 等分,分为 3 个区域,最好的等级区域记 5 分,最差的等级区域记 1 分,中间的记 3 分.为消除指标数量造成 IBI 总分差异,采用 Moyle 和 Randall 的 IBI 总分计算方法^[23],即:IBI 总分值 = (各指标总分/指标个数)×12.以参照点 IBI 值分布的 25%分位数作为健康评价的标准^[21,24],将河流健康分为“健康”、“一般”、“较差”和“极差”和“无鱼”5 个等级标准.

2 研究结果

2.1 鱼类种类组成及分布特征

近 3 年本课题组对东苕溪流域的 6 次野外采样共采集鱼类标本约 13500 尾,经鉴定共计淡水鱼

类 84 种,隶属于 8 目 18 科 52 属,其中 35 种为中国特有种.东苕溪鱼类主要由鲤形目、鲈形目、鲇形目、鲑形目、合鳃鱼目和鲟形目等鱼类组成^[25].其中,95%以上的鱼类个体体长小于 15cm^[25].

东苕溪鱼类呈现明显的纵向分布特征,即自河流上游至河口地区,鱼类的组成逐渐发生变化.基于鱼类的纵向分布特征将东苕溪分成 4 个河段,即上游、中上游、中游和下游^[25].下游是从湖州太湖入湖口至德清县的河段;中游为德清县至余杭镇河段,包括中苕溪和北苕溪近东苕溪交汇点的河段;中上游为各个支流(南苕溪、中苕溪、北苕溪)的中下游河段,如北苕溪的溪口村至径山镇河段、中苕溪的高虹镇至长乐镇河段、南苕溪的里畈水库至青山水库入口;上游为各支流的最上游河段.

2.2 参数指标筛选

东苕溪流域鱼类组成的空间差异及东苕溪支

流和中下游分属两个不同的生态区^[26],即上游和中上游隶属于浙闽山地常绿阔叶林生态区,中游和下游隶属于长江三角洲城镇及城郊农业生态区.因此,东苕溪流域建立两套不同的 IBI 评价体系,即上游支流 IBI 评价体系和中下游干流 IBI 评价体系.

东苕溪上游支流的 24 个候选指标进行分布范围筛选后 M8、M18、M19、M24 被排除,余下的 20 个候选指标进行判别能力筛选,其中 M1、M4、M5、M6、M7、M13、M14 和 M16 共 8 个指标的 $IQ \geq 2$,进入下一轮分析(图 2).一般而言,虾虎鱼科鱼类物种数百分比(M4)随着污染程度的加重而减小,但本研究参照点虾虎鱼科鱼类物种数百分比低于观测点,因其原因不明,暂将其删除.对余下的 7 个指标进行 Pearson 相关性检验,所有 $|R|$ 值均小于 0.9,最终东苕溪支流确定了 7 个指标以建立 IBI 指标体系的参数指标.

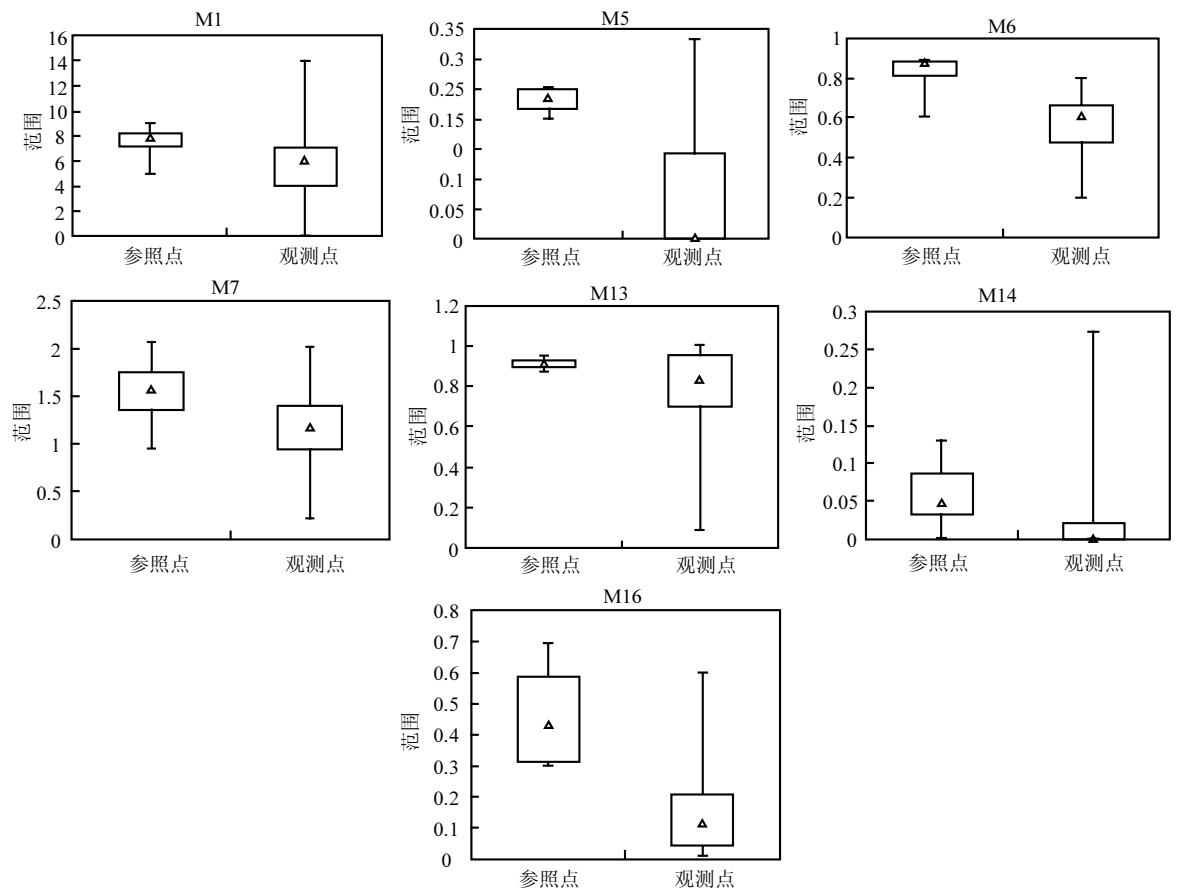


图 2 东苕溪支流的候选指标在参照点和观测点的箱形图

Fig.2 Box-plots of candidate metrics between reference sites and observation sites in the tributaries of East Tiaoxi River

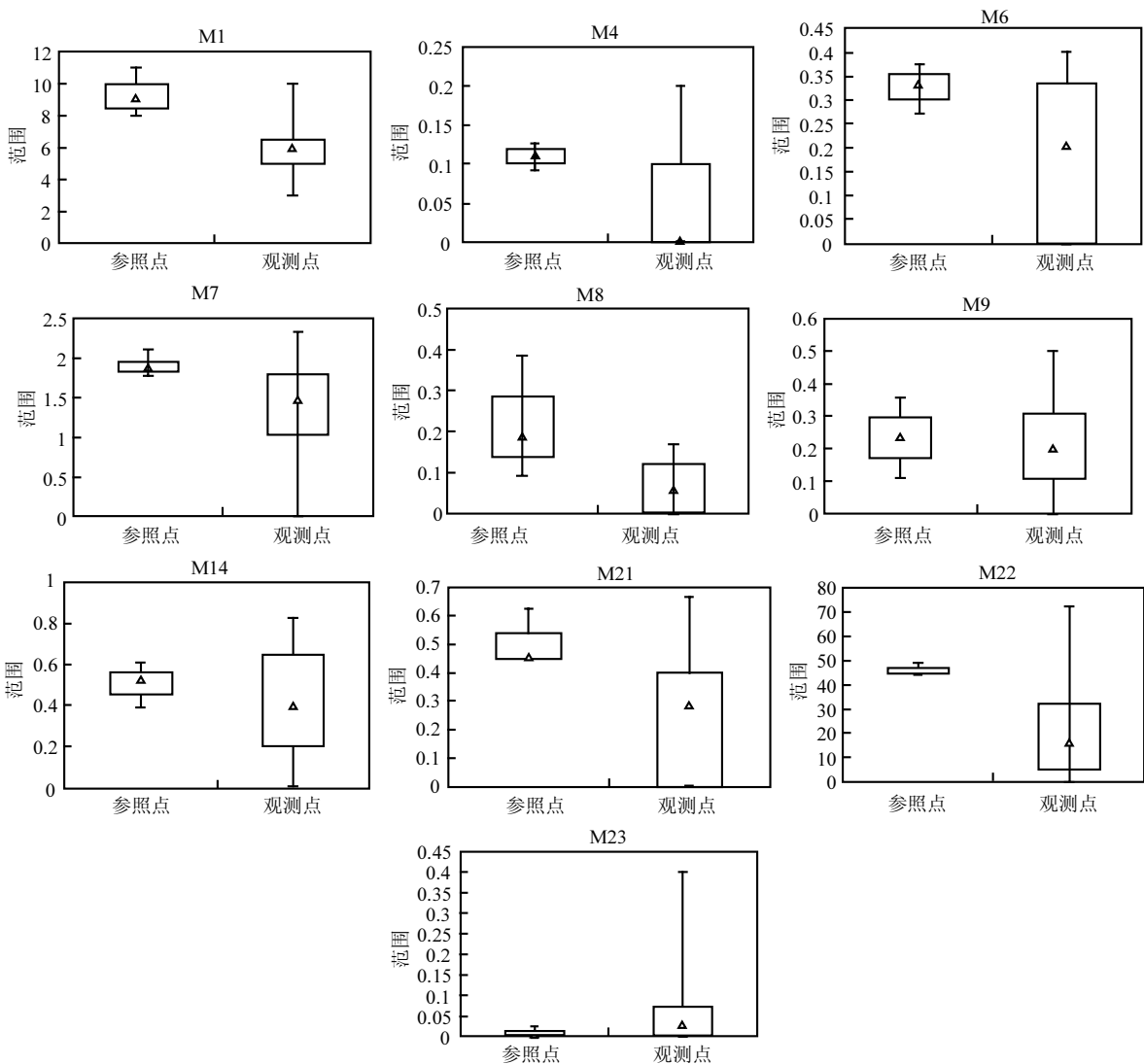


图 3 东茗溪中下游河段的候选指标在参照点和观测点的箱形图

Fig.3 Box-plots of candidate metrics between reference sites and observation sites in the middle-lower reaches of East Tiaoxi River

中下游干流的 24 个候选指标进行分布范围筛选后 M5、M16、M19、M24 被排除,剩下 20 个候选指标进行判别能力筛选,M1、M4、M6、M7、M8、M9、M12、M14、M17、M21、M22、M23 共 12 个指标的 IQ≥2,进入下一轮分析(图 3)。一般而言,杂食性鱼类个体百分比(M14)和耐受性鱼类个体百分比(M17)随着污染程度的加重而增大,但本研究中参照点的百分比高于观测点,因其原因不明,暂将其删除,将余下的 10 个指标进行 Pearson 相关性检验,所有|R|值均小于 0.9,最终

东茗溪中下游确定了 10 个指标以建立 IBI 指标体系的参数指标。

2.3 评分及评价

东茗溪流域建立了 2 套不同的 IBI 指标体系,故采用 2 个评分计算标准分别来评价支流及中下游的干流河段(表 2,表 3),上游支流和中下游干流参照点的 IBI 值的 25%分位数分别为 46 和 36.25,因此,东茗溪流域鱼类完整性评价标准见表 4.根据 2010 年和 2011 年的采样数据,依据表 2 和表 3 的评分计算方法,东茗溪流域 45 个监测点

的鱼类完整性状况的评价结果如表 5 所示。

表 2 东苕溪上游支流 IBI 各个参数指标的评分计算
Table 2 IBI metric scoring criteria in the tributaries of East Tiaoxi River

参数指标	参数缩写	1	3	5
鱼类总物种数	M1	< 7	7~13	> 13
平鳍鳅科鱼类物种数百分比 (%)	M5	< 12	12~23	> 23
中国土著鱼类物种数百分比 (%)	M6	< 30	30~60	> 60
Shannon-Wiener 多样性指数	M7	< 0.7	0.7~1.4	> 1.4
无脊椎动物食性鱼类个体百分比 (%)	M13	< 33	33~67	> 67
植食性鱼类个体百分比 (%)	M14	< 9	9~19	> 19
敏感性鱼类个体百分比 (%)	M16	< 23	23~46	> 46

表 3 东苕溪中下游 IBI 各个参数指标的评分计算
Table 3 IBI metric scoring criteria in the middle-lower reaches of East Tiaoxi River

参数指标	参数缩写	1	3	5
鱼类总物种数	M1	< 5	5~10	> 10
虾虎鱼科鱼类物种数百分比 (%)	M4	< 7	7~14	> 14
中国土著鱼类物种数百分比 (%)	M6	< 33	33~67	> 67
Shannon-Wiener 多样性指数	M7	< 0.8	0.8~1.6	> 1.6
上层鱼类物种数百分比 (%)	M8	< 11	11~22	> 22
中上层鱼类物种数百分比 (%)	M9	< 33	33~67	> 67
植食性鱼类个体百分比 (%)	M14	< 28	28~55	> 55
借助贝类产卵鱼类物种数百分比 (%)	M21	< 22	22~44	> 44
鱼类总个体数	M22	< 24	24~48	> 48
畸形、患病鱼类个体数百分比 (%)	M23	> 27	13~27	< 13

表 4 东苕溪流域鱼类完整性评价标准

Table 4 Assessment criteria for biological integrity based on fish in East Tiaoxi River

	健康(H)	一般(F)	较差(P)	极差(V)	无鱼(N)
上游支流	>46	31~46	15~31	≤15	0
中下游	>36	24~36	12~24	≤12	0

2010 年,在 45 个观测点中,3 个为“健康”,21 个为“一般”,18 个为“较差”,1 个为“极差”,2 个为“无鱼”。其中“健康”状态的河段位于余杭镇下游河段和中苕溪下游河段;“一般”状态的河段位于东苕溪中游河段、北苕溪中下游河段、南苕溪太湖源镇附近的源头河段及东苕溪入湖口;“较差”状态的河段位于东苕溪下游河段、北苕溪百丈溪及坞鸟溪源头河段、南苕溪支流锦溪及横溪。2011 年,在 45 个观测点中,2 个为“健康”,19 个为“一般”,19 个为“较差”,2 个为“极差”,3 个为“无鱼”。在所有观测点中,健康等级 2011 年较 2010 年下降的 12 个点,健康等级上升的有 7 个(表 5)。其中,中下游健康等级上升的观测点有 6 个,下降 3 个;上游支流健康等级上升的观测点 1 个,而下降 9 个。

2.4 IBI 与环境因子之间的相关分析

采用 Pearson 相关性分析 IBI 值与 9 种水体理化指标及叶绿素含量之间的相关性(表 6)。结果表明,在上游支流河段,IBI 值与电导率($P=0.016$)、叶绿素 a 含量($P=0.015$)及总悬浮固体($P=0.015$)呈显著负相关,与总磷($P=0.001$)呈极显著负相关,与 pH 值、温度、浊度和总氮呈负相关,而与溶解氧呈正相关。在中下游干流河段,IBI 值与 pH 值、温度呈正相关,与溶解氧呈显著正相关,与电导率、叶绿素 a 含量和总氮呈负相关,与总悬浮固体($P=0.015$)、总磷($P=0.022$)、浊度($P=0.039$)呈显著负相关。

表 5 东苕溪流域各观测点 IBI 评价结果

Table 5 IBI results for each observation points in East Tiaoxi River

中下游站点	2010 年		2011 年		上游支流 流站点	2010 年		2011 年	
	分值	健康等级	分值	健康等级		分值	健康等级	分值	健康等级
S1	29	F	29	F	S17	33	F	46	F
S2	24	P	31	F	S20	36	F	33	F
S3	24	P	31	F	S21	46	F	39	F
S4	17	P	24	P	S22	29	P	39	F
S5	22	P	29	F	S23	29	P	22	P

续表

中下游站点	2010 年		2011 年		上游支流站点	2010 年		2011 年	
	分值	健康等级	分值	健康等级		分值	健康等级	分值	健康等级
S6	—	N	—	N	S24	33	F	33	F
S7	26	F	31	F	S25	33	F	26	P
S8	31	F	22	P	S26	26	P	19	P
S11	34	F	29	F	S27	22	P	22	P
S12	36	F	36	F	S30	39	F	26	P
S16	43	F	43	F	S31	26	P	24	P
S28	34	F	29	F	S39	33	F	22	P
S29	38	H	22	P	S40	26	P	22	P
S34	36	F	43	H	S41	39	F	22	P
S35	41	H	38	H	S42	29	P	26	P
S36	38	H	29	F	S43	39	F	39	F
S37	15	V	22	P	S44	36	F	33	F
					S45	39	F	39	F
					S46	33	F	22	P
					S47	26	P	39	F
					S48	36	F	26	P
					S49	—	N	—	N
					S50	19	P	12	V
					S51	22	P	—	N
					S52	26	P	22	P
					S53	29	P	26	P
					S54	26	P	12	V
					S55	19	P	26	P

表 6 IBI 值与水环境因子之间的相关性分析

Table 6 Correlation coefficient between IBI score and environmental variables

项目	pH 值	温度	溶解氧	电导率	浊度	叶绿素 a 含量	悬浮物	总氮	总磷
支流	-0.216	-0.314	0.262	-0.450*	-0.273	-0.455*	-0.455*	-0.260	-0.575**
中下游	0.465	0.227	0.545*	-0.113	-0.616*	-0.38	-0.435*	-0.347	-0.510*

注:显著性水平:** $P < 0.01$,* $P < 0.05$

3 讨论

3.1 参照点的选择

在我国,除了自然保护区核心区尚存在未受人类活动干扰的溪流外,其他均已受到不同程度人类活动的影响.东苕溪流域各水系均已遭受不同程度的人为干扰,想要寻找原始河段已不太现实,而且缺乏定量的历史数据.因此,只能选择相对受干扰最小的作为参照点.近年利用统计分析方法进行参照位点的选择有增加的趋势^[21,27-28],而且如果选择能代表各种生境类型的参照点最好^[29].本研究的参照位点的选取除考虑水体理化

指标外,还通过实地调查,综合考虑多种生境类型来确定.该方法或许会影响结果的准确性,目前仅适用于东苕溪流域河流健康评价的参照点.为了更科学地选取参照点,可搜集或通过遥感技术获取样点周围人类活动的强度,如村庄分布、人口密度、公路密度及河道渠道化程度等较准确数据确定样点的受干扰程度,制定更完备^[21].此外,参照点数的多少与评价结果的准确性也有很大关系,本研究选取的参照点数太少,可能会导致所建立的鱼类 IBI 健康评价标准的准确性有所下降.

3.2 参数指标的选取

目前,如何筛选指标尚未形成统一的方法,有

些研究报告中的指标并未经过筛选^[6]或仅通过简单的指标筛选^[4,30-32]. 一个生物参数能否成为 IBI 指标之一, 首先表现在不同景观尺度上, 生物参数对外界干扰是否敏感, 其反应是否可以预测; 其次是生物参数反映的信息是否与其它参数高度重叠. 通过参数间的 Pearson 相关性分析可判断参数间所反映信息的重叠程度, 但关于判断标准, 目前尚无统一的标准^[16-18]. 本研究增加了目前在国内尚未采用的一个指标, 即借助贝类产卵鱼类物种数百分比(M21), 该指标在日本河流环境健康评价中取得较好效果^[29], 而且东苕流域借助贝类产卵的鱼类多达 10 种, 并分布于苕溪多数河段. 通过分布范围、判别分析和相关性分析之后, 该指标在众多候选指标中被筛选出, 因此, 该指标可以作为东苕溪中下游河段 IBI 评价体系的指标之一.

3.3 应用 IBI 评价东苕流域生态系统健康

鱼类区系组成特点与动物地理分区或生态区密切相关. 美国水质生物监测研究者在建立 IBI 指数前, 首先考虑采样点是否来自同一生态区或亚区, 然而当样点来自不同生态区内或亚区时, 一般通过比较不同生态区或亚区内无污染样点之间的底栖生物或鱼类区系组成的相似性, 决定不同生态区或亚区应建立各自独立的 IBI 指标体系^[33]. 傅伯杰等^[26]完成了我国生态环境区域划分工作, 进一步指导我国利用鱼类生物完整性来评价河流健康. 本研究区域东苕溪上游支流的样点均来自浙闽山地常绿阔叶林生态区, 而中下游干流的样点均来自长江三角洲城镇及城郊农业生态区, 因此建立了两套不同的 IBI 评价指标体系和标准, 避免了因采样点来自不同生态区对 IBI 指数及评价标准的影响.

东苕溪中下游河段的河流健康主要受内陆航运的强度及水生植物的影响^[34-35], 如下游河段内陆航运异常发达, 水体浊度及悬浮物含量较高, 河段健康状态“较差”, 其中 S7 和 S8 位于河道的植物丰富的回水区, 处于“一般”状态. 中游河段内陆航运减少, 水生植物丰富, 多数借助贝类产卵的鱼类栖息于该河段, 该河段处于“健康”或“一般”状态. 然而, 自 2010 年 9 月份开始东苕溪

中游开始实施船舶禁航, 从而使河流内船舶航运频率下降, 部分观测点的河流健康等级有所上升(表 5), 其中, S29 的健康等级下降可能由于渔民在该处设置了巨型地笼网(横跨整个河段, 每 0.5h 收网 1 次), 使该处鱼类物种数骤降, 导致河流健康等级下降. 河道工程是导致上游支流河段河流健康下降的主要因素^[25,36], 上游河段的河流工程使水体悬浮物增加, 并且导致电导率上升, 如 S30 健康状态由“一般”降为“较差”、S39 的健康状态由“一般”降为“较差”、S41 的健康状态由“一般”降为“较差”、S51 的健康状态由“较差”降为“无鱼”、S54 的健康状态由“较差”降为“极差”.

然而, IBI 评价体系中所使用的指标主观性较强, 研究者常凭借自己的经验选取随环境质量变化的指标. 实际上, 某些指标的改变并非是由环境质量变化引起的, 如鱼类种群数量的下降也有可能是过度捕捞造成的. 采用相关性分析方法来研究生物完整性各指标与环境因子的相关性, 对于完善 IBI 体系具有重要意义^[37-38]. 因此, 深入研究生物完整性与环境因子之间的关系将是完善 IBI 体系的主要研究方向之一^[30].

4 结论

4.1 东苕流域共采集淡水鱼类 84 种, 且东苕溪鱼类呈现明显的纵向分布特征. 此外, 东苕溪支流和中下游分属两个不同的生态区: 即上游和中上游隶属于浙闽山地常绿阔叶林生态区, 中游和下游隶属于长江三角洲城镇及城郊农业生态区.

4.2 上游支流样点均来自浙闽山地常绿阔叶林生态区, 通过指标筛选最终建立了东苕溪上游支流的 IBI 指标体系: 即鱼类总物种数(M1)、平鳍鳅科鱼类物种数百分比(M5)、中国土著鱼类物种数百分比(M6)、Shannon-Wiener 多样性指数(M7)、无脊椎动物食性鱼类个体百分比(M13)、植食性鱼类个体百分比(M14)、敏感性鱼类个体百分比(M1)7 个参数指标.

4.3 中下游样点均来自长江三角洲城镇及城郊农业生态区, 通过指标筛选最终建立了东苕溪中下游区域的 IBI 指标体系: 即鱼类总物种数(M1)、

虾虎鱼科鱼类物种数百分比(M4)、中国土著鱼类物种数百分比(M6)、Shannon-Wiener 多样性指数(M7)、上层鱼类物种数百分比(M8)、中上层鱼类物种数百分比(M9)、植食性鱼类个体百分比(M14)、借助贝类产卵鱼类物种数百分比(M21)、鱼类总个体数(M22)、畸形、患病鱼类个体数百分比(M23)等 10 个参数指标。

4.4 河流健康状态划分为 5 个健康等级:即“健康”、“一般”、“较差”、“极差”和“无鱼”。

4.5 东苕溪流域绝大多数河段的健康状况处于“一般”和“较差”水平。2011 年,东苕溪中下游河段的健康状态较 2010 年有所改善,然而上游支流的健康状态较 2010 年有所下降。

参考文献:

- [1] 渠晓东,刘志刚,张 远.标准化筛选参照点构建大型底栖动物生物完整性指数 [J]. 生态学报,2012,32(15):4661-4671.
- [2] Whittier T R, Hughes R M, Stoddard J L, et al. A structured approach for developing indices of biotic integrity: Three examples from streams and rivers in the western USA [J]. Transactions of the American fisheries society, 2007,136(3): 718-735.
- [3] 吴阿娜,杨 凯,车 越,等.河流健康评价在城市河流管理中的应用 [J]. 中国环境科学, 2006,26(3):359-363.
- [4] 郑海涛.怒江上游鱼类生物完整性评价 [D]. 武汉:华中农业大学, 2006.
- [5] Karr J R, Chu E W. Sustaining living rivers [J]. Hydrobiologia, 2000,422-423(0):1-4.
- [6] 王备新,杨莲芳,胡本进,等.应用底栖动物完整性指数 B-IBI 评价溪流健康 [J]. 生态学报, 2005,25(6):1481-1490.
- [7] 朱 迪,常剑波.长江中游浅水湖泊生物完整性时空变化 [J]. 生态学报, 2004,24(12):2761-2767.
- [8] Zhu D, Chang J B. Annual variations of biotic integrity in the upper Yangtze River using an adapted index of biotic integrity (IBI). Ecological Indicators, 2008,8(5):564-572.
- [9] Liu Y, Zhou F, Guo H C, et al. Biotic condition assessment and implication for lake fish conservation: a case study of Lake Qionghai, China [J]. Water and Environmental Journal, 2009, 23(3):189-199.
- [10] 陈革强,胡昌伟,程晓陶,等.提高东苕溪防洪能力及河道治理分析研究 [J]. 水利水电技术, 2009,40(2):53-56.
- [11] 毛节荣,徐寿山,郑国生等. 浙江动物志淡水鱼类 [M]. 杭州:浙江科学技术出版社, 1991.
- [12] 陈宜瑜.中国动物志硬骨鱼纲鲤形目(中卷) [M]. 北京:科学出版社, 1998.
- [13] 褚新洛,郑葆珊,戴定远.中国动物志硬骨鱼纲鲴形目 [M]. 北京:科学出版社, 1999.
- [14] 乐佩琦.中国动物志硬骨鱼纲鲤形目(下卷) [M]. 北京:科学出版社, 2000.
- [15] 国家环境保护局.水和废水监测分析方法(第四版) [M]. 北京:中国环境科学出版社, 2002.
- [16] Barbour M T, Gerritsen J, Griffith G E, et al. A framework for biological criteria for Florida streams using benthic macroinvertebrates [J]. Journal of the North American Benthological Society, 1996,15(2):185-211.
- [17] Blocksom K A, Kurtenbach J P, Klemm D J, et al. Development and evaluation of the lake macroinvertebrate integrity index (LM II) for New Jersey lakes and reservoirs [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2002,77(3):311-333.
- [18] Maxted J R, Barbour M T, Gerritsen J, et al. Assessment framework for mid-Atlantic coastal plain streams using benthic macroinvertebrates. Journal of the North American Benthological Society, 2000, 19(1):128-144.
- [19] Morley S A, Karr J R. Assessing the restoring the health of urban streams in the Puget Sound Basin [J]. Conservation Biology, 2002,16(6):1498-1509.
- [20] Casatti L, Ferreira C P, Langeani F. A fish-based biotic integrity index for assessment of lowland streams in southeastern Brazil [J]. Hydrobiologia, 2009,623(1):173-189.
- [21] 裴雪姣,牛翠娟,高欣,等.应用鱼类完整性评价体系评价辽河流域健康 [J]. 生态学报, 2010,30(12):5736-5746.
- [22] Karr J R, Fausch K D, Angermeier P L, et al. Assessing Biological Integrity in Running Waters: A Method and Its Rationale [R]. Illinois Natural History Survey Special Publication 5, 1986.
- [23] Moyle P B, Randall P J. Evaluating the biotic integrity of watersheds in the Sierra Nevada, California [J]. Conservation Biology, 1998,12(6):1318-1326.
- [24] 张 远,徐成斌,马溪平,等.辽河流域河流底栖动物完整性评价指标与标准 [J]. 环境科学学报, 2007,27(6):919-927.
- [25] Li J H, Huang L L, Sato T, et al. Distribution pattern, threats and conservation of fish biodiversity in the East Tiaoxi, China [J]. Environmental Biology of Fishes, 2013,96:519-534.
- [26] 傅伯杰,刘国华,陈利顶,等.中国生态区划方案 [J]. 生态学报, 2001,21(1):1-6.
- [27] Southerland M T, Rogers G M, Kline M J, et al. Improving biological indicators to better assess the condition of streams [J]. Ecological Indicator, 7(4):751-767.
- [28] Qadir A, Malik R N. Assessment of an index of biological integrity (IBI) to quantify the quality of two tributaries of river Chenab, Sialkot, Pakistan [J]. Hydrobiologia, 2009,621(1):127-153.

- [29] 中島淳,島谷幸宏,巖島伶等.魚類の生物学的指数を用いた河川環境の健全度評価法 [C]//河川技術論文集, 2010,16:449-454.
- [30] 刘 恺,周伟,李凤莲,等.广西河池地区河流基于鱼类的生物完整性指数筛选及其环境质量评估 [J]. 动物学研究, 2010,31(5): 531-538.
- [31] 刘明典,陈大庆,段辛斌,等.应用鱼类生物完整性指数评价长江中上游健康状况 [J]. 长江科学院院报, 2010,27(2):1-6,10.
- [32] 毛成贵,钟俊生,蒋日进,等.应用鱼类完整性指数(FIBI)评价长江口沿岸碎波带健康状况 [J]. 生态学报, 2011,31(6):4609-4619.
- [33] Fore L S, Karr J R, Wisseman R W. Assessing invertebrate responses to human activities: evaluating alternative approaches [J]. Journal of the North American Benthological Society, 1996,15(2):212-231.
- [34] Kano Y, Sato T, Huang L L, et al. Navigation disturbance and its impact on fish assemblage in the East Tiaoxi River, China [J]. Landscape and Ecological Engineering, 2011, DOI 10.1007/s11355-011-0181-0.
- [35] 黄亮亮,李建华,邹丽敏,等.东苕溪中下游河岸类型对鱼类多样性的影响 [J]. 生态学报, 2011,31(12):3415-3423.
- [36] Li J H, Huang L L, Zou L M, et al. Spatial and temporal variation of fish assemblages and their association to habitat variables in a mountain stream of North Tiaoxi River, China [J]. Environmental Biology of Fishes. 2012,93:403-417.
- [37] Joy M K, Death R G. Application of the index of biotic integrity methodology to New Zealand freshwater fish communities [J]. Environmental Management, 2004,34(3):415-428.
- [38] Brown L R. Fish communities and their associations with environmental variables lower San Joaquin River drainage, California [J]. Environmental Biology of Fishes, 2000,57(3):251-269.

致谢：野外采样工作得到了同济大学流域生态学教研室及日本九州大学河川研究室全体参与人员的帮助,谨致谢忱!

作者简介：黄亮亮(1985-),男,江西九江人,讲师,博士,主要从事鱼类生态学及河流健康评价研究.发表论文 18 篇.

节能废水处理技术获得“李光耀水奖”

“李光耀水奖”主要授予那些针对国际水环境问题提出相应的应用技术或者政策方案的研究成果.新加坡国际水周发布消息称,2012 年“李光耀水奖”授予荷兰代尔夫特理工大学环境技术研究组组长 Mark van Loosdrecht 教授.

Mark van Loosdrecht 教授发明了低耗能的废水生物降解技术.该技术名称为厌氧氨氧化(Anammox),使用了 Mark van Loosdrecht 教授发现的 1 种独一无二的细菌,使得该工艺能够在低氧和不需要添加有机碳源的情况下去除废水中的污染物.与传统工艺相比,该工艺能够降低污水处理厂能量消耗、化学品的使用和碳的排放.

在厌氧氨氧化过程中,菌群分泌独特的酶能够是氨转化为氮气,绕过了传统工艺中将氨转化为硝酸盐的步骤,降低了能量的消耗.

早在 20 世纪 70 年代就有研究者假想可以缩短氨的氧化过程,直到 20 世纪 90 年代,代尔夫特理工大学的 researcher 发现了特定的细菌,是该设想得以实践.

Van Loosdrecht 教授设计了工程设备和系统,并且在荷兰鹿特丹一家污水处理厂建设了第 1 套厌氧氨氧化处理系统.截止 1 月份,在荷兰 Balk 已经有 16 家全部使用厌氧氨氧化工艺的污水处理厂,在荷兰、澳大利亚、中国、日本、美国,类似的工艺已经在超过 30 家不同规模的污水处理厂得到应用.

李光耀水奖提名委员会主席 Tan Gee Paw 说:Van Loosdrecht 教授的技术是污水处理行业处理模式转变的范例,该节能技术的使用对污水处理厂能源自给非常重要,将会是水处理行业发展的方向.