

文章编号: 1000-5641(2012)03-0130-08

RBPs 在苏州河水系生境评价中的应用

曹敏¹, 吴阿娜², 车越¹, 陈婷¹

(1. 华东师范大学 上海市城市化生态过程与生态恢复重点实验室, 上海 200062;

2. 上海市环境监测中心, 上海 200030)

摘要: 河流生境评价作为河流健康状况评价的重要内容和衡量方法之一, 近年来受到越来越多的关注. 本文在回顾国外河流生境评价相关理论和实践进展的基础上, 引入较具代表性和可操作性的美国快速生物评估协议(RBPs)——生境部分, 并尝试以上海苏州河水系为对象开展实证研究. 研究结果显示, 苏州河水系生境条件受人类活动影响较为强烈, 生境质量多处于“较好”~“差”级别; 苏州河干、支流生境状况较为接近, 上游河流生境优于中下游, 农田地区河流生境优于城镇地区; RBPs 应用于国内河流生境评价存在一定的适用性问题, 但对于发展和完善其评价方法仍具有重要的参考价值.

关键词: 河流生境评价; 快速生物评估协议; 苏州河; 适用性

中图分类号: X826 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1000-5641.2012.03.017

Application of RBPs for the habitat assessment of Suzhou Creek

CAO Min¹, WU E-nuo², CHE Yue¹, CHEN Ting¹

(1. Shanghai Key Laboratory for Urban Ecology and Sustainability, East China Normal University, Shanghai 200062, China;

2. Shanghai Environmental Monitoring Center, Shanghai 200030, China)

Abstract: As an important part of river health evaluations, habitat assessment has received more and more attention. Practice progresses of foreign river habitat assessment are reviewed and the basic thinking with working procedure of habitat assessment in American Rapid Bioassessment Protocols (RBPs) is introduced in this paper. Then, an empirical study has been carried out on Suzhou Creek in Shanghai. The result indicates that; Suzhou Creek has been strongly affected by human activity, and its habitat quality varies mostly between better to bad levels. Scores of the habitat quality of main streams are close to that of branches, while habitat quality of upstream areas is better than that of lower-middle reaches areas, and rural areas is better than urban areas. Result shows that Rapid Bioassessment Protocols (RBPs) has important referential value to the river habitat assessment in China.

Key words: river habitat assessment; Rapid Bioassessment Protocols; Suzhou Creek; applicability

收稿日期: 2011-02

基金项目: 国家自然科学基金(71073055); 中央高校基本科研业务费专项资金; 上海市城市化生态过程与生态恢复重点实验室开放课题

第一作者: 曹敏, 女, 硕士研究生, 主要从事流域环境管理方面的研究. E-mail: jellymin@yahoo.cn.

通讯作者: 车越, 男, 副教授, 主要从事流域环境管理方面的研究. E-mail: yche@des.ecnu.edu.cn.

0 引言

全球河流生态系统退化已成为 21 世纪人类生存和发展所面临的重大危机,因而受到国际社会的广泛关注. 河流生态系统的恢复以及河流可持续管理成为国际普遍关注的焦点^[1-4]. 由于生境状况能够综合反映河流系统结构和功能的整体状况,河流生境评价是当前各国普遍采用的河流健康状况的评价内容和衡量方法之一, RHS、RHP、USHA、AUSRI-VAS 和 ISC 等国外河流健康评价方法都包含生境评价内容^[5]. 环境问题的日益突出以及对河流管理新方法需求的不断增强,近年国内学者也开始广泛探讨河流健康,生境评价作为其中的重要内容不断被强调^[6-9]. 本文引入较具代表性和可操作性的美国快速生物评估协议(Rapid Bioassessment Protocols, RBPs),介绍其中生境评价的具体内容和工作程序,并以苏州河水系为对象开展实证研究,以期探讨 RBPs 对我国河流生境评价的借鉴意义.

1 河流生境评价

1.1 生境评价方法

河流生境评价主要评估河流的水文、水质条件和河流地貌学特征对于生物群落的适宜程度,从而为保护和修复河流生态系统提供依据. 美国、英国和德国等对河流生境的研究开展较早,在河流生境的尺度、类型和评价技术和方法等方面进行了较深入的研究. 此外,澳大利亚和南非等国家也逐步发展了适用于区域特点和管理需求的生境评估方法,并将其作为河流健康状况评价的重要内容和评估依据. 澳大利亚溪流评价指数(ISC)、河流生境审核程序(RHAP)、河岸类型法(River StylesTM)和生境预测模型(HPM)等 4 种河流评价方法中均涉及生境评价内容;英国河流生境调查法(River Habitat Survey, RHS)具有明确的调查方法、指标和标准,形成了较为完善的河流生境评价体系;美国则形成了生境评价程序法(HEP)、物理生境模拟系统(PHABSIM)和快速生物评估协议(RBPs)等评价方法(见表 1). 其中 RBPs 中的生境评价部分,具有科学的评价指标,完整的评价程序,明确的评价标准,因此其不仅能与生物指标结合进行河流整体健康评价,也能够单独使用进行河流生境评价.

表 1 美国河流生境评价方法^[5]

Tab. 1 Methods of river habitat assessment in America

方法或模型名称	研究机构	评价内容	特点
Physical habitat simulation system, PHABSIM 物理生境模拟系统	美国国家生态研究中心	使用流速、水深、底质、生境适合度和生境面积等,分析栖息地变化,目前使用较为广泛	建立了一个物理生境模拟系统,需要用到物种栖息地参考曲线
Habitat suitability index model, HSIM 生境适宜度模型	美国鱼类及野生动物局	量化评价生境状况;比较现存生境状况和开发后生境状况;通过栖息地指数的变化反映开发引起的生境改善或者恶化	选取某代表性物种作为参考,分析该生物生境各项因子的变化,定量分析变化状况带来的有利及不利状况;形成了有效的定量指数-生境适宜度
Rapid Bioassessment Protocols, RBPs 快速生物评估协议	美国环保署	综合评估方法,涵盖:传统的物理化学水质参数;自然状况定量特征,包括周围土地利用、溪流起源和特征、岸边植被状况、大型木质碎屑密度等;溪流河道特征,包括宽度、流量,基质类型及尺寸	综合涵盖水生附着生物、两栖动物、鱼类及生境的评价;对河道纵坡不同的河段采用了不同的参数设置;采用了快速的视觉生境评估法

1.2 快速生物评估协议

RBPs 是 1989 年由美国环保署流域评价与保护分部旨在为全国水质管理提供基础水生生物数据而提出的河流评价方法. 经过近 10 年的发展和完善, 美国环保署于 1999 年推出新版的 RBPs, 提供了河流着生藻类、大型无脊椎动物以及鱼类的监测及评价方法和标准^[10-11]. RBPs 包含生境评估(含水质评估)和水生生物评估两部分, 其中生境的定义被聚焦为影响水生生物结构和功能的河水质量及沿岸栖息环境.

1.2.1 基本思路

RBPs 生境评价部分是以无人干扰或人为干扰较小的河流为参照状况, 建立河流生境的评价基准. 其核心是通过评估每项指标与参照状况的差异, 确定河流生境状况. 生境评价指标主要由 10 个栖息地指标(即生境参数)组成, 通过逐项指标评分确定生境质量. 每一项指标最高分均为 20 分, 其中河床表层生境、河床泥砂组成、流速与水深参数、河床稳定性、河道水流情况、河流形态改造和河道蜿蜒程度等 7 项生境参数按照好(16~20 分)、较好(11~15 分)、一般(6~10 分)和差(0~5 分)打分; 河岸稳定性、河岸植被保护和河岸植被带宽度等 3 项则按照好(9~10 分)、较好(6~8 分)、一般(3~5 分)和差(0~2 分)打分, 左、右两岸分别评分后累加. 除了这 10 项参数, 另有 8 项辅助指标(流域特征、河岸带植被组成、河道内特征、粗木质残体、水生植物、水质、无机底质和有机底质), 被用于辅助说明被评价河流的健康状况(见表 2、表 3)^[12,13].

表 2 美国 RBPs 生境评估标准(20 分值类)^[11]

Tab. 2 Standards of American RBP habitat assessment (20 points)

生境参数	生境状态等级																			
	好				较好				一般				差							
	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
河床表层生境	50%以上底质利于水生生物繁殖和鱼类栖息;有沉木、卵石或其它能成为稳定繁殖场所的表层生境					存在 30%~50% 稳定表层生境;适合作为繁殖场所,能维持生物量;新形成表层生境不适合作为繁殖场所					存在 10%~30% 稳定的表层生境;表层生境数量低于生物所需数值;底质常受到干扰或移动					稳定的表层生境少于 1%;明显缺少表层生境;底质不稳定或缺少底质				
河床泥砂组成	存在砂砾、沙石等稳定的混合基质;有水生植被					存在松软沙石、泥土或粘土的混合基质;主要为泥土;有水生植被					只存在泥土或粘土、沙石基质;少许或没有水生植物					坚硬土层或基岩;无水生植物				
流速与水深参数	4 种水塘形态均存在					以大深潭为主,浅滩较少					以浅滩为主,深流较少					多为小浅滩或不存在水塘				
河床稳定性	堆积物较少或未进一步扩大;20%以下的河床受到沉积物影响					堆积物有所增加,大部分来自砂砾、沙石或细小沉积物;20%~50% 的河床受到沉积物影响;深潭轻微淤积					堆积物中来自砂砾、沙石或细小沉积物的沉积增加;50%~80% 的河床受到沉积物影响;深潭中度淤积					细小物质严重沉积,堆积物增长迅速;80%以上河床改变;由于连续地沉积,几乎不存在深潭				
河道水流情况	河水淹没河岸基部,仅暴露很少的河床基质					河道 75%以上被河水淹没;或少于 25% 的河床基质暴露在外					河道 25%~75% 被河水淹没;或者石块基质大部分暴露在外					河道中水流较少,几乎为能站立其中的浅滩				
河流形态改造	不存在或较少的渠道化或底泥疏浚;河水保持正常流态					一定渠道化,通常为桥墩段;过去(20 年前)有一定渠道化如疏浚,但目前未见渠道化					可能存在渠道化;两岸均存在人工堤岸或结构;40%~80% 的河段渠道化或受到干扰					河岸水泥或钢筋固化;80%以上河岸渠道化或受到干扰.大部分生境改变或完全消失				
河道蜿蜒程度	河流弯曲长度是其直线长度的 3~4 倍					河流弯曲长度是其直线长度的 2~3 倍					河流弯曲长度是其直线长度的 1~2 倍					河道为直线型;河道相当长的一段被拉直				

表3 美国 RBPs 生境评估标准(10 分值类)^[11]

Tab.3 Standards of American RBP habitat assessment (10 points)

生境参数	生境状态等级									
	好		较好			一般			差	
	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1 0
河岸稳定性	河岸稳定;很少或不 存在河岸冲淤或不稳定; 无潜在冲淤可能;<5% 的河岸受到影响		中度稳定;较少有冲淤 现象,且绝大多数冲淤 区域已修复;5%~30% 的河岸有冲淤现象			中度不稳定;30%~ 60%的河岸有冲淤现 象;洪水期有河岸冲淤 的可能			不稳定;存在较多冲淤 现象;蜿蜒河段有较多 暴露区域;河岸坍塌十 分明显;60%~100% 河岸有冲淤现象	
河岸植被保护	90%以上有本土植被 覆盖,包括树木、灌木 或水生植物;植被干扰 较小或没有;几乎所有 植被处于野生状态		70%~90%河堤与河 岸有本土植被覆盖,但 植被种类差异不明显; 存在干扰,但不会进一 步阻碍植被生长;半数 以上植被残株仍具一 定高度			50%~70%河堤表面 与河岸有植被覆盖;干 扰明显;裸露空地或近 作物植被普遍;一半以 下植被残株仍具一定 高度			<50%的河岸表面有 植被覆盖;干扰十分严 重;植被高度低于 5 cm,或在平均残株高 度以下	
河岸植被带宽度	河岸植被带宽度大于 18 m;人类活动(停车 场、路基、草坪、庄稼 等)对植被带无影响		河岸植被带宽度在 12~18 m;人类活动对 植被带影响较小			河岸植被带宽度在6~ 12 m;人类活动对植被 带造成一定程度影响			河岸植被带宽度小于 6 m;由于人类活动,没 有或很少有植被带	

注:左、右岸堤分别评分后累加(面对下游确定左右岸堤)

1.2.2 工作程序

RBPs 中生境评价部分的工作程序如下。①记录被评估河流名称(干流/支流)、调查点位的地理位置(纬度/经度);对河流形态、走向做大致描述,必要时采用地图(手绘图)详细描述河道形态和生境状况。②对被评估河流做基本的物理特性及水质评价,物理特性包括流域特征、河流性质、基本河流参数(如河宽、河长、水流量及底质等)与沿岸、水生植被特征;水质评价包括常规水质参数(如水温、溶解氧、浊度等)。③依据生境评估标准及照片对比调查被评估河流的 10 个生境参数,得出所有参数评分,划分为好、较好、一般和差 4 个等级。其中河岸稳定性、河岸植被保护及河岸植被带宽度指标评估时需对其左、右岸堤分别评价,然后综合分值。④将 10 个生境参数评分结果累计求和得出综合分数,从而确定被评价河流的生境质量。

2 研究区域及数据来源

2.1 研究区域

苏州河又称吴淞江,位于长江下游三角洲冲积平原北缘,发源于太湖,西起江苏省吴江县瓜泾口,经江苏省苏州市后曲折东流,自青浦赵屯流入上海,横贯整个上海市区,并在外白渡桥东侧注入黄浦江。苏州河流经上海青浦、嘉定、闵行、长宁、普陀、静安、闸北、黄浦和虹口等 9 个区县,其水系及支流范围又进一步覆盖宝山和徐汇等区县。上海市境内河段长 53.1 km,其中下游流经市区段长约 23.8 km(见图 1)^[14]。

2.2 数据来源及评价方法

2007 年 3—4 月自省界赵屯到至黄浦江口,在苏州河干流及其 26 条支流分别布设了 6 个和 28 个监测点位,采用 RBPs 中河流生境评估方法进行物理生境现场调查评价(见表 2、表 3),累计求和得到生境综合指数(HI),10 项指标满分为 200 分。参考 Kwang^[15]以及郑丙辉^[16]对生境质量的分级方法并结合实际情况,确定生境综合指数的等级评估标准:HI>

150 为“好”等级; $120 < HI \leq 150$ 为“较好”等级; $90 < HI \leq 120$ 为“一般”等级; $60 < HI \leq 90$ 为“较差”等级; $HI < 60$ 分为“差”等级。

为分析人类活动对苏州河生境状况的影响,将各评价河段进行类型划分。①从水系结构角度划分为干流(点位 1—6)、支流(点位 7—34);②从流域区位角度划分为上游(点位 1—2、7—16)、中游(点位 3—4、17—25)、下游(点位 5—6、26—34);③从周边土地利用角度划分为农田(点位 1、7—9、11、15、16、19、20、22)、城镇(点位 2—6、10、12—14、17、18、21、23—34)。

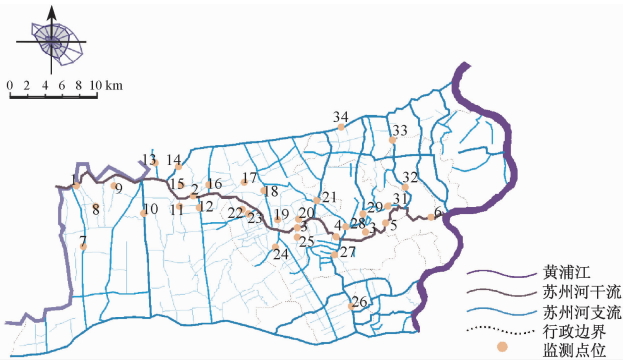


图 1 苏州河沿程及主要支流采样点分布图

Fig. 1 Scattergram of sample points in Suzhou Creek’s main stream and branches

3 结果与讨论

3.1 苏州河水系生境特征

3.1.1 总体生境状况

生境评价结果显示,苏州河水系 34 个点位生境质量得分为 54~136 分,处于“较好”至“差”级别,其中,“一般”至“差”等级的点位占 82.3%,表明苏州河水系整体生境质量堪忧(见图 2)。

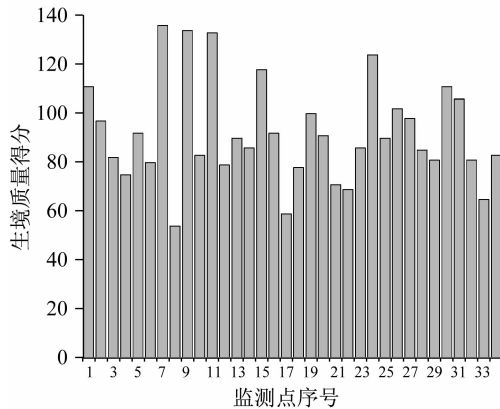


图 2 苏州河生境质量评价结果

Fig. 2 Results of Suzhou Creek’s habitat quality assessment

如图 3 所示,生境参数得分显示,苏州河水系河道水流情况和河岸稳定性指标较佳,均处于“好”至“一般”级别,且“好”和“较好”比例超过 85.0%。流速与水深参数、河床稳定性指标次之,多为“较好”至“一般”级别,表明苏州河水系在水文条件、河岸和河床稳定性等方面

仍保持相对较好的状态. 其余 6 项参数则相对较差, 其中河床泥沙组成指标无“好”级别, 河道蜿蜒程度无“好”和“较好”级别, 河流形态改造、河岸植被保护以及河岸植被带宽度指标“差”级别所占比例最多, 也即苏州河水系河岸带、形态结构等受到较大程度的人为干扰.

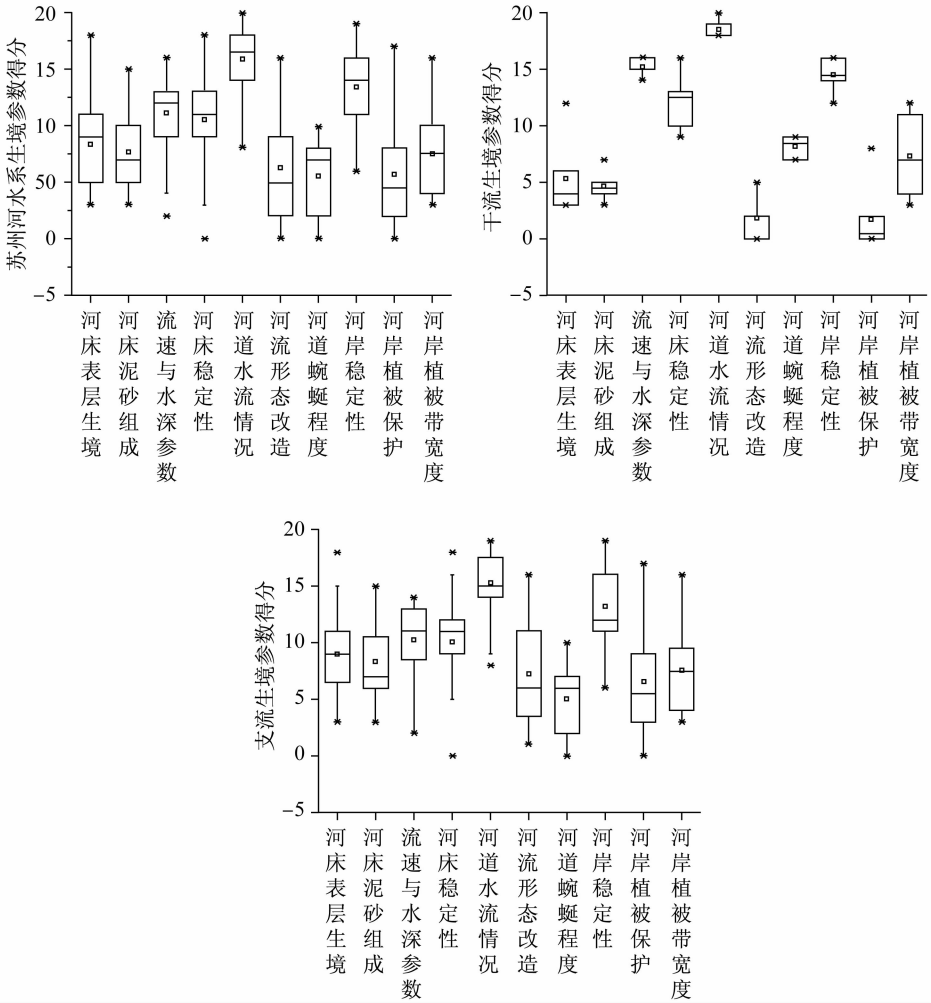


图 3 苏州河水系生境参数得分情况

Fig. 3 Scores of Suzhou Creek's habitat parameter

3.1.2 生境质量分异

(1) 干支流生境质量比较

苏州河干、支流中生境质量处于“一般”和“较差”级别的点位分别为 3 个(50.0%)和 22 个(78.6%);干、支流生境质量平均得分差异相对较小(见表 4),表明苏州河干、支流生境条件较为接近. 其中苏州河干、支流的河道水流情况、流速与水深参数、河岸稳定性等指标大多处于“较好”至“好”级别, 而河流形态改造指标、河道蜿蜒程度等指标多处于“一般”至“差”级别, 也即主要在河道形态结构等方面受到人类活动干扰较为突出.

(2) 上下游生境质量比较

从表 4 中可以看出,苏州河水系上游点位生境质量平均得分明显优于中下游,且生境质

量处于“较好”等级的点位均位于上游. 分析各生境参数可以发现, 苏州河上、下游点位流速与水深参数、河床稳定性、河道水流情况、河岸稳定性指标等指标较为接近, 处于“较好”至“好”级别所占比例均超过 75.0%. 其差异主要表现在上游河段在河床表层生境、河流形态改造以及河岸植被保护等方面虽受到人类活动影响, 但仍较下游保持相对较好的状态.

(3) 城郊生境质量比较

苏州河水系 10 个农田点位生境质量为“较好”至“一般”等级的占 80.0%, 24 个城镇背景点位中生境质量处于“较好”至“一般”等级的仅占 29.2%, 其余均处于“较差”至“差”等级, 总体来说苏州河水系地处农田地区河流生境质量优于城镇地区(见表 4). 比较各生境参数得分情况可以发现, 除流速与水深参数、河床稳定性、河道水流情况及河岸稳定性外, 农田点位生境参数得分均明显高于城镇点位, 其中河流形态改造、河岸植被保护等指标差异尤为明显.

表 4 苏州河生境质量区域情况

Tab. 4 Area conditions of Suzhou Creek's habitat quality

生境参数	生境评价结果(平均分)						
	干流	支流	上游	中游	下游	农田	城镇
河床表层生境	5	9	11	6	8	11	7
河床泥沙组成	5	8	9	7	7	10	7
流速与水深参数	15	10	11	9	12	9	12
河床稳定性	12	10	11	8	12	9	11
河道水流情况	19	15	16	15	16	15	16
河流形态改造	2	7	9	8	2	12	4
河道蜿蜒程度	8	5	5	6	6	7	5
河岸稳定性	15	13	12	13	15	11	14
河岸植被保护	2	7	8	5	4	11	4
河岸植被带宽度	7	8	9	6	7	10	7
总分(HI)	90	92	101	83	89	104	87

3.2 苏州河水系生境对人类活动的响应

无论单个生境参数还是整体生境质量, 苏州河水系上游均优于中下游地区, 这主要是由于苏州河中下游地处高度城市化区域, 所受人类活动干扰较为严重. 特别是河流多为区域骨干河道, 出于防洪排涝等要求, 中下游地区采取浆砌块石水泥等硬质护岸对河流产生较大程度人为干扰和改造, 使得河流形态和河岸植被情况明显劣于上游.

不同土地利用下苏州河水系的河岸带状况、河流形态结构以及河床条件等存在明显差异. 农田地区周边河段受人类活动改造和干扰程度相对较小, 护岸形式、河道改造等河流形态结构以及河岸带宽度方面明显优于城镇地区, 但在水量状况以及河岸稳定性方面则劣于城镇区域.

3.3 RBP 适用性探讨

RBP 是多指标评价法, 将反映河流状态的栖息环境因子和生物因子很好的融合在一起, 特别是其中的生境评价内容具有较好的代表性和可操作性. 国内传统河流评价方法仍主要侧重于借助化学手段以及少量生物监测评估河流水质状况, 因此将 RBP 运用于我国河流生境评价可用于指导我国构建体现我国地域特色的河流健康评价方法. 上述基于 RBP 的苏州河水系河流生境评价结果显示, 该方法在评估生境状况、识别生境问题等方面具有一

定的作用,特别是其具有的定量、快速等特点,使得其可以用于较大范围的评价。然而,RBPs是美国根据本国独特的自然地貌水文特征,针对实际情况形成的评价方法,将其直接运用于我国河流生境评价仍存在一定的适用性问题:① RBPs在国外使用较为成熟,但我国河流众多、地域差异性大,将其直接应用于国内河流生境评价存在一定难度,仍需补充和完善体现我国河流特点的表征性指标;② 该方法的数据获取主要来自于现场评价人员的目测评估,虽方法提供了较为详细的标准,但打分主观性仍较强,使得评价精度有所欠缺,且不利于方法的标准化应用;③ 该方法的评价标准以无人干扰或人为干扰极小的自然河流为参照状况,但我国正处于高度城市化阶段,河流系统受人类活动影响强烈,若简单以自然河流状况为参照状况,难以完全体现对城市河流管理的指导性;④ 该方法的评价对象多为欧美国家乡村、山区河流或经过生态修复的自然环境较为优良的溪流,而我国目前关注重点集中于大江大河以及城市河流等具有防洪排涝等社会功能、受人为干扰较为明显的河流。综合以上分析,在国外相关方法的基础上,仍应考虑区域特征和人类活动影响,提出具针对性的表征指标和评估标准,提高河流生境评价结果的针对性和准确性。

4 结 论

苏州河水系受人类活动影响较为强烈,生境质量多处于“较好”至“差”级别;10个生境参数中,河道水流情况和河岸稳定性指标较佳,流速与水深参数、河床稳定性指标次之,其他参数相对较差。苏州河水系生境对人类活动响应强烈,尽管干流与支流生境质量差异相对较小,但上游生境质量明显优于中下游,地处农田地区河流生境质量明显优于城镇地区。RBPs评价结果对于我国可持续河流管理工作具有较好的参考意义,如何借鉴国外先进经验,结合对区域特征、河流特性等的诊断,建立适宜的河流生境评价方法,是该领域研究的关键技术问题。

[参 考 文 献]

- [1] 何松云,韦亚芬,杨海军.城市河流生态恢复的研究现状与问题[J].东北水利水电,2005,23(257):44-52.
- [2] 胡乃利,李传奇,刘兴芳.城市河流生态恢复系统分析[J].水利科技与经济,2007,13(8):570-572.
- [3] 熊晶.国际河流管理和内河流域管理比较研究[J].长江流域资源与环境,2005,14(2):262-266.
- [4] 卿华,侯明明,魏艳,等.有关河流生态系统的恢复生态学研究综述[J].南水北调与水利科技,2006,4(5):46-48.
- [5] 陈婷.平原河网地区城市河流生境评价研究——以上海为实例[D].上海:华东师范大学,2007.
- [6] 唐涛,蔡庆华,刘建康.河流生态系统健康及其评价[J].应用生态学报,2002,13(9):191-194.
- [7] 赵彦伟,杨忠锋.河流健康:概念、评价方法与方向[J].地理科学,2005,25(1):119-124.
- [8] 杨文慧,严忠民,吴建华.河流健康评价的研究进展[J].河海大学学报:自然科学版,2005,3(6):607-611.
- [9] 董哲仁.国外河流健康评估技术[J].水利水电技术,2005,36(11):15-19.
- [10] 吴阿娜,杨凯,车越,等.河流健康状况的表征及其评价[J].水科学进展,2005,16(4):602-608.
- [11] BARBOUR M T, GERRITSEN J, SNYDER B D, et al. Rapid Bioassessment Protocols for Use in Stream and Wadeable Rivers: Periphyton, Benthic Macroinvertebrates and Fish, Second Edition [M]. Washington DC: EPA US Environmental Protection Agency; Office of Water, 1999: 11-101.
- [12] CAO Y Q, CHEN Y Z, ZHENG M, et al. The biological function of rabbit blastocyst peptides (RBP) [J]. Science in China, 1991, 34: 64-70.
- [13] 刘瑛,高甲荣,崔强,等.4种国外河溪健康评价方法述评[J].水土保持通报,2009,29(3):40-44.
- [14] 吴阿娜.河流健康评价:理论与实践[D].上海:华东师范大学,2008.
- [15] KWANG G A, SEOK S P, SHIN J Y. An evaluation of a river health using the index of biological integrity along with relations to chemical and habitat conditions[J]. Environment International, 2002, 28(5): 411-420.
- [16] 郑丙辉,张远,李英博.辽河流域河流栖息地评价指标与评价方法研究[J].环境科学学报,2007,27(6):928-936.