

辽河流域河流健康综合评价方法研究

张远, 赵瑞, 渠晓东, 孟伟

(中国环境科学研究院环境基准与风险评估国家重点实验室, 流域水生态保护技术研究室, 北京 100012)

[摘要] 根据2009年5月太子河流域水生生物(藻类、鱼类和大型底栖动物)调查结果,以藻类、鱼类、大型底栖动物、基本水质和营养盐作为候选参数,采用总体线性回归模型和相关性分析法对它们进行筛选,构建了多指标河流健康综合评价指数,对辽河流域河流健康进行了评估。结果表明,辽河流域河流健康受损较重,未达到“良”等级的样点有146个,所占比例高达83%,主要分布在浑河、东辽河和西辽河流域,这些流域受到来自城市、工业及农业面源污染较大;“良”等级的样点只有30个,主要分布在太子河流域上游地区,这些样点受到人类干扰较少;整个流域鱼类类群存在显著退化趋势,其中西辽河的鱼类类群衰退现象最明显。

[关键词] 综合评价法;河流健康;大型底栖动物;鱼类;着生藻类

[中图分类号] X522 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2013)03-0011-08

1 前言

20世纪80年代以来,多参数评价(multimetrics assessment)是国内外广泛使用的河流健康评估方法,例如Karr^[1](1981)最早提出的生物完整性就是多参数评价法的典型代表。Karr应用生物完整性评价方法构建了加拿大河流鱼类完整性指数。方法后来得到进一步发展^[2,3],从而产生了运用不同类型水生生物的群落结构、功能、生物多样性等多种参数构建的生物完整性指数,被美国EPA规定为河流健康评价的主要方法^[4,5],并推广到欧洲地区^[6-8]。生物完整性评价方法在我国近年来也得到了应用,渠晓东等^[9]和殷旭旺等^[10]分别利用大型底栖动物和底栖硅藻构建生物完整性指数评价浑河、太子河的河流健康。该评价方法主要考虑了生物指标,没有考虑到河流生态系统的物理、化学等其他要素,难以反映出河流化学、生物完整性的整体状况。

近年来,人们开始综合使用河流物理、化学和生物的参数,在多参数评价的基础上进一步发展出综合评价法^[11]。在澳大利亚的河流健康评价中,通过综合使用水质指标、生态系统过程指标、营养盐指标、大型底栖动物和鱼类指标等多类型参数构建

评价指标体系,对昆士兰州河流健康状况进行评估。张楠等^[12]从水质、生物学和物理栖息地三个方面构建河流健康评价指标体系,对辽河流域生态系统健康进行评价。综合评价法的发展,综合了河流物理、化学和生物完整性的概念,丰富和推动了多参数评价方法的发展,是未来河流健康评估的发展方向^[11]。但目前使用的综合评价法尚存在一定问题。首先,综合评价法中的多类型评价指标的选择,一些指标对人类活动干扰的响应敏感性及其稳定性尚待进一步验证;其次,即使是同一条河流,依据河流连续系统理论^[13],河流源头区水生生物群落结构与下游、河口区都存在较大差异,难以采用同一套评价指标和标准;最后,参数的参照值筛选和确定难度较大。

针对以上问题,本研究以辽河流域为案例研究区,在辽河流域河流分类的基础上,利用野外监测数据和数理统计分析,通过评估参数的敏感性,构建河流健康综合评价指标,并确定参数的参照阈值,探索建立适合于我国的河流健康综合评估方法。

2 材料方法

2.1 研究区域概况

辽河流域位于中国东北地区南部(116°30'E ~

[收稿日期] 2012-12-20

[作者简介] 张远(1970—),男,辽宁沈阳市人,研究员,研究方向为流域管理;E-mail: zhangyuan@craes.org.cn

125°47'E, 38°43'N~45°N), 河流全长 1 345 km, 流域面积约 2.2×10^5 km², 分为辽河水系和大辽河水系。东、西辽河及辽河干流构成辽河水系, 其中, 东辽河发源于辽源市境内萨哈岭山, 全长 448 km; 西辽河发源于辽宁西部与河北省交界的七老图山脉的光头山, 全长 829 km; 东、西辽河于福德店汇流后为辽河干流, 经双台子河由盘锦入渤海, 干流长 516 km。大辽河水系主要包括太子河和浑河, 太子河发源于辽宁省新宾县境内的长白山脉, 全长 413 m; 浑河发源于清原县滚马岭西南麓, 全长 415 km; 太子河与浑河在三岔河汇合形成大辽河后至营口入渤海。辽河流域年降水量 350~1 000 mm, 多集中于 6—9 月, 约占全年降水量的 70%, 属温带、暖温带半湿润大陆性季风气候^[14]。

2.2 水质监测与水生生物采样

2009 年 5 月—2010 年 6 月, 在辽河流域共设置 176 个采样点 (见图 1), 分别开展河流水化学、藻类、大型底栖动物和鱼类监测。其中, 太子河流域设置 70 个采样点, 浑河设置 62 个采样点, 辽河水系设置 44 个采样点。

采用 YSI 便携式水质多参数分析仪现场测定水

体 pH 值、电导率 (EC)、溶解氧 (DO)、总固体颗粒溶解物 (TDS) 和悬浮物 (SS) 共 5 项水体理化参数。现场采集 1 L 水样, 用冷藏保温箱保存后短时间运送到实验室, 测定包括总磷 (TP)、总氮 (TN)、氨氮 (NH₃-N) 等共 20 项化学参数 (见表 1), 水体理化参数的采集、运送和测定均依据《水和废水监测分析方法》^[15]。



图 1 辽河流域样点图及各样点健康评价结果

Fig.1 The sampling sites and its results of river health assessment in the Liaohe River

表 1 辽河流域河流生态系统健康评价候选参数

Table 1 Candidates indicators of Liaohe River ecosystem health assessment

指标	参数
着生藻类	物种丰富度指数(A_S)、Shannon-Weiner 指数(A_H)、Berger-Parker 指数(A_BP)、Pielou's evenness(A_P)的密度(A_D)、藻类生物完整性指数(A_BI)
大型底栖动物	总分类单元数目(M_S)、襀翅目物种数(M_P)、蜉蝣目物种数(M_E)、毛翅目物种数(M_T)、襀翅目%(M_P_RA)、蜉蝣目%(M_E_RA)、毛翅目%(M_T_RA)、蜉蝣目%+襀翅目%+毛翅目%(M_EPT_RA)、摇蚊科%(M_C_RA)、双翅目%(M_D_RA)、寡毛类%(M_O_RA)、敏感类群物种数(M_Sen_S)、耐污类群物种数%(M_Tol_RA)、滤食者%(M_Fil_RA)、刮食者%(M_Scr_RA)、直接收集者%(M_CG_RA)、捕食者%(M_Pred_RA)、撕食者%(M_Shr_RA)、粘附者%(M_Cl_RA)、粘附者物种数(M_Cl_S)、大型底栖动物密度(M_D)、EPT 科级分类单元数(M_EPT_S)、大型底栖动物 BMWP 指数(M_BMWP)、Shannon-Weiner 指数(M_H)、Berger-Parker 指数(M_BP)、Pielou's evenness 指数(M_P)、大型底栖动物生物完整性指数(M_IBI)
鱼类	鱼类物种丰富度指数(F_S)、Shannon-Weiner 多样性指数(F_H)、Berger-Parker 优势度指数(F_BP)、Pielou's evenness 均匀度指数(F_P)、鱼类生物完整性指数(F_BI)
基本水质	pH、EC、DO、TDS、SS、BOD ₅ 、CODMn、K ⁺ 、Ca ²⁺ 、Na ⁺ 、Mg ²⁺ 、Cl ⁻ 、SO ₄ ²⁻ 、HCO ₃ ⁻ 、Alk、SiO ₄ ²⁻ 、Phenols、E. coli
营养盐	TP、TN、NH ₃ -N、NO ₃ ⁻ 、NO ₂ ⁻ 、PO ₄ ³⁻

在采样点 100 m 河道范围内选择不同水深和流速生境, 随机挑选 9 个石块。在石块上用直径 4.4 cm 的圆形塑胶环选取 3 个面积为 15.2 cm² 的区域, 用硬毛刷刷着生藻类, 用 50 mL 纯净水冲刷至不锈钢托盘中, 转移到 50 mL 广口塑料瓶中后现场加入 5% 甲醛溶液保存^[7]。着生藻类鉴定依据相关文献^[16,17]。

利用索伯网 (面积 0.3 m×0.3 m, 孔径 0.5 mm) 收集 3 个定量样品, 用 D 型拖网 (直径 0.3 m, 孔径 0.5 mm)

在河道内针对不同维生境采集大型底栖动物 15 min, 收集定性样品。样品采集后, 分别冲洗并用 60 目筛网过滤收集后, 分别放入 500 mL 广口瓶, 加 75% 酒精保存。在实验室条件下, 利用体式显微镜 (Olympus SZ61) 将绝大多数物种鉴定到种或属, 摇蚊鉴定到亚科, 寡毛类和线虫鉴定到纲^[18-20]。

选择 300 m 长的河段, 利用电鱼器采集鱼类样品, 共采集 1 h。在水深大于 1.5 m 的河段, 除电鱼法

外,利用3种双层刺网(6 cm×6 cm、12 cm×12 cm、20 cm×20 cm)挂网1 h收集鱼类样品。现场对所有鱼类样本进行种类鉴定,收集个体数和生物量数据^[21,22]。鉴定后的鱼类放回水体。

解译2007年TM影像获取辽河流域土地利用特征。根据采样河段所在区域,按照采样点所属的集水区(采样点上游所有汇水区域)和河流廊道(采样点左右岸各1 km,从采样点上溯游而上10 km)提取主要土地类型,分别计算各种土地利用类型在集水区和廊道内的土地比例,作为河流健康评估的压力参数。

2.3 河流健康评估综合评价法技术路线

河流健康综合评价方法主要包括6个步骤(见图2)。a. 河流类型分类。依据流域海拔特征,辽河流域可初步划分为3种河流类型,从上游至下游依次为山地溪流类型、丘陵河流类型和平原河流类型^[4]。b. 构建概念模型,初步分析河流健康状况,并选择合适的压力指标与健康评价指标。c. 依据压力指标和健康评价指标定量法统计分析,筛选适合于不同河流类型的评价核心参数。d. 依据国家标准、文献调研、模型模拟等手段,确定不同参数的参照值和

临界值。e. 依据核心参数的参照值和临界值对所有参数进行标准化,综合不同类型参数得分,赋予权重后计算各样点的健康得分。f. 划分健康评定等级,对各样点河流健康等级进行评估。

2.4 评价指数的构建

本研究推荐的河流健康评价指数包含5个方面,即着生藻类指标、大型底栖动物指标、鱼类指标、基本水质指标、营养盐指标,共计42项水生生物参数和25项水体理化参数,这些参数构成了辽河河流健康评价的备选参数(见表1)。

2.5 参数的筛选方法

评价参数要具备对人类活动干扰具有明显的响应关系、参数间相互独立、不存在重复信息、能够反映河流健康的特征。本研究以土地利用作为首要压力参数,利用总体线性回归模型法,筛选对土地利用和水质具有显著响应关系的水生生物参数,以统计分析的显著性检验作为判别候选参数是否有效指示人为活动干扰的依据;筛选对土地利用有显著响应关系的水质参数作为评价指标(见图3)。

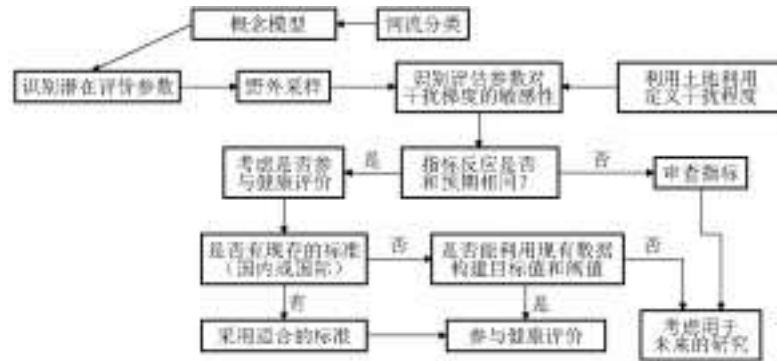


图2 河流健康综合评价法标准化流程图

Fig.2 The standardized flowchart of integrated stream health assessment

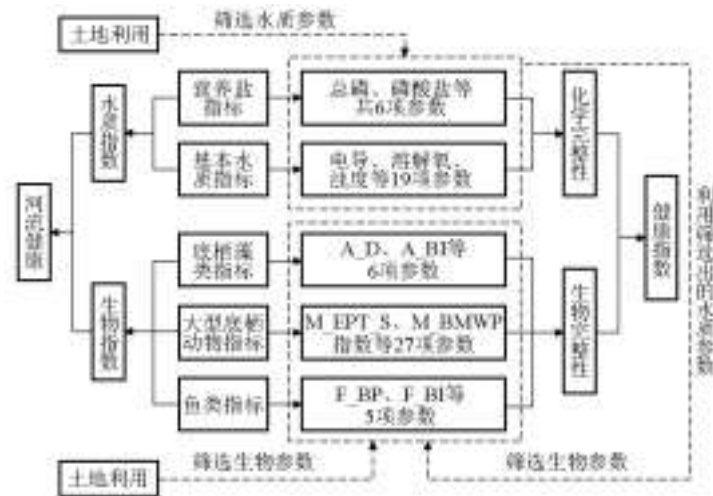


图3 河流健康评价指数构建流程图

Fig.3 The construction flowchart of river health assessment indicator

2.6 评价参数的标准化计算

各参数均以参考值为最佳状态,以临界值为最差状态,进行评价参数的标准化计算(公式1)。用标准化公式(公式1)对核心参数标准化后,各参数理论分布范围为0~1,小于0的值记为0,大于1的值记为1。

$$S = 1 - (|T - X|) / (|T - B|) \quad (1)$$

式(1)中, S 为评价指标的标准化计算值; T 为参照值; B 为临界值; X 为实际值。

参照值是指河流在未受到人为干扰活动下评价参数的取值,指代的河流健康状况为最佳状况;临界值是指河流在受到人为活动干扰后,河流生态系统濒临崩溃的阈值,此时的河流健康状态为最差状态。

本研究中参照值和临界值的确定,主要依据以下几种方法:a.水质参数依据现行中国国家地表水水质标准(GB 3838—2002);b.根据国际所使用相同或相似参数的参照值和临界值,如澳大利亚与新西兰淡水与海水水质健康导则^[23];c.依据案例研究

区收集的数据,构建评价参数与土地利用方式的经验回归公式,利用模型模拟人为活动为最小状态时,评价参数的预测值;d.相关专业的专家经验和建议。

2.7 评价方法

首先根据各指标评价参数的标准化计算结果,采用计算平均值的方法确定鱼类、大型底栖动物、着生藻类基本水质和营养盐的得分分值。然后,根据5个指标的得分值,用加权平均方法计算河流健康指数综合得分(见式2)

$$RH = a_1 \times W + a_2 \times N + a_3 \times D + a_4 \times M + a_5 \times F \quad (2)$$

式(2)中, RH 为河流健康综合指数得分; W 为基本水质指标评价得分; N 为营养盐指标评价得分; D 为着生藻类指标评价得分; M 为大型底栖动物指标评价得分; F 为鱼类指标评价得分。 a_1 、 a_2 、 a_3 、 a_4 和 a_5 为权重,分别取2/15、2/15、3/15、4/15、4/15。

2.8 河流健康等级划分

河流健康等级的划分依据5等分的方法(见表2)。

表2 河流健康等级划分
Table 2 River healthy level division

河流健康等级	综合分数	描述
优	$RH > 0.8$	河流接近完全未受到人为活动干扰的状态
良	$0.6 < RH \leq 0.8$	河流有较小程度的人为活动干扰,某些对人为活动最敏感的物种有一定程度的丧失
一般	$0.4 < RH \leq 0.6$	河流受到中等程度的人为活动干扰,对人为活动敏感的物种基本丧失,水生生物群落中中等耐污物种占据优势
差	$0.2 < RH \leq 0.4$	河流受到较高等度的人为活动干扰,对人为活动敏感的物种全部丧失,水生生物群落中以耐污物种占据优势,鱼类和藻类群落呈现单一化趋势
极差	$RH \leq 0.2$	河流生态系统受到完全破坏,仅剩余极度耐污物种,群落单一化现象严重

2.9 数据分析

对所有候选参数先进行正态分布检验,符合正态分布的参数利用Pearson相关性分析,不符合正态分布的参数利用Spearman相关性分析,完成各参数间的相关性分析,并剔除相关性较高的参数($|r| > 0.75$)^[24]。以上分析使用SPSS13.0软件完成。

利用总体线性回归模型的总体解释率(R^2)和显著性指标 p 值,筛选水生生物参数和水质参数。回归分析后,对残差进行检验,确保模型预测与数据进行了适当的转化。本研究中,当模型 $R^2 < 0.15$ 且 $p > 0.10$ 时,认为无线性回归关系。压力参数和健康评估参数分析前都进行log对数转化,并适当对极值进行剔除。

3 结果与讨论

3.1 候选参数相关性分析

采用Pearson相关分析和Spearman相关分析对太子河各类型河流区内的水质参数(包括基本水质参数和营养盐参数)和水生生物参数分别进行相关性分析,剔除相关性较高($|r| > 0.75$)的水质参数共9项,分别为硝氮、碱度、重碳酸盐、磷酸盐、碳酸氢盐、钙离子、镁离子、钾离子和钠离子,其余16项水质参数进入下一步分析。

剔除相关性较高的生物参数($|r| > 0.75$)共3项,分别为藻类密度参数、大型底栖动物和鱼类的多样性参数,其余39项生物参数进入下一步分析。

3.2 基本水质和营养盐参数对干扰的敏感性

水质参数与土地利用的总体线性回归分析表明,在山地溪流区,电导率受建筑用地(集水区尺度)的影响最强($p<0.01$),悬浮物与森林用地(集水区尺度)面积具有显著的线性关系($p<0.01$);在丘陵河流区,磷酸盐参数与森林用地(集水区尺度)的相

关性极强($p<0.01$),解释率高达79%,在所有水质参数中受土地利用影响最大。同时氨氮与建筑用地(集水区尺度)具有显著的线性关系。在下游平原农业区,氨氮、总磷、溶解氧、生化五日需氧量和高锰酸盐指数受到土地利用显著影响($p<0.05$),且多数参数具有较高的解释率($R^2>20\%$,见表3)。

表3 候选水质参数($p<0.05$)与主要土地利用的总体线性回归分析结果

Table 3 The results of generalized linear regression between the water quality parameters ($p<0.05$) and different land uses

区域	尺度	参数	土地利用	R^2
山地溪流区	集水区	-EC*, Alk**, Ca*, Na*	城市	0.15~0.32
		TDS*	森林	0.17
		Mg*	农田	0.22
	廊道	SS**	森林	0.41
丘陵河流区	集水区	NH ₄ *	城市	0.17
		Na*, -SS*, -Phenols*, PO ₄ **	森林	0.13~0.79
	廊道	E.coli*	农田	0.17
	集水区	SS*, Na*, -E.coli	农田	0.13
平原河流区	集水区	SO ₄ *, Cl*, NH ₄ *, TP*, EC	城市	0.25~0.38
		-DO*	人工沼地	0.23
	廊道	TN*, -PO ₄ *	城市	0.28, 0.38
	集水区	COD _{Mn} *	池塘	0.29
		BOD ₅ *, -EC*	人工沼地	0.29

注:参数前“-”表明水质参数与土地利用为负相关,其余为正相关;参数右上角角标*表示 $p<0.05$,**表示 $p<0.01$

在确定河流水质参数时,首先选择代表性强的参数,如选择总磷而非磷酸盐,总磷可以更好地反映河流中富营养化的状态^[25]。碱度和阴阳离子通常反映了河流自然地质的特征,尽管与压力参数的相关性较大,但在河流健康指示中并不具有实际意义,某些学者认为可能是一种假象,未被选入核心参数。土地利用对电导率和溶解氧的解释率并未在3种河流类型中全部出现,但考虑到这两个参数在其他地区的研究中应用普遍^[5,25],保留作为全流域核心参数。挥发酚是较好的工业污染程度指示参数,总大肠菌群数是较好的指示水体健康与人体健康的参数,因此除丘陵河流区外,也将其应用于平原河流区。五日生化需氧量和高锰酸盐参数在平原区与土地利用密切相关,可有效指示有机物污染,作为平原河流区的核心参数。

3.3 生物指标对干扰的敏感性

藻类候选参数在山地和丘陵区,主要与水质参数具有较高的拟合度,例如在丘陵河流区,DO与藻类完整性参数具有最显著的线性关系, R^2 为0.38。

在平原河流区,藻类生物完整性参数与氨氮具有较好的拟合关系(R^2 均为0.15)。藻类生物完整性参数和藻类优势度参数与农田面积呈显著的线性关系,但其解释率相对较低(R^2 均为0.18,见表4)。

大型底栖动物候选参数在山地和丘陵区,主要与水质参数具有较高的拟合度。在平原河流区,大型底栖动物的候选参数与廊道尺度的森林面积比具有较好的拟合, R^2 最高达到0.59(见表4)。大型底栖动物科级分类单元参数、EPT科级分类单元参数、BMWP参数和BP参数分别反映了群落结构、敏感类群、耐污特征和生物多样性等方面的特征,也是目前全球大型底栖动物健康评估中广泛使用的参数^[5,6,26,27]。BMWP参数在韩国河流健康评价也得到广泛应用,并建立了相对稳定的参照值和临界值^[28]。

鱼类个体数参数在山地区与溶解氧具有极好的拟合度(见表4)。在丘陵区和平原区,土地利用可以解释17%~64%的鱼类指标参数。鱼类的生物完整性参数与藻类参数一样,具有地域限制性,因此本研究中应用本地区构建的鱼类生物完整性参

表4 候选水生生物参数 ($p < 0.05$) 与土地利用和水质参数的总体线性回归分析结果
 Table 4 The results of generalized linear regression between the biological parameters ($p < 0.05$) and land uses and water quality parameters

区域	参数类型	尺度	参数	土地利用	R^2	参数	水质	R^2
山地溪流区	大型底栖动物					BMWP**	EC, TP	0.21, 0.27
						S**	EC, TP	0.15, 0.32
						EPT_S**	EC, TP	0.16, 0.38
丘陵河流区	鱼类					N**	DO	0.17
	着生藻类					A_BI2*	DO	0.38
	大型底栖动物					-M_BP	DO	0.13
平原河流区	藻类	集水区	-BI*, BP*	农田	0.18	-BI*	NH ₄ *	0.15
	大型底栖动物	廊道	-S**, BWMP**, EPT_S**	森林	0.33~0.59	-S**	NH ₄	0.38
		集水区	-S**, -H**, -BP*	农田	0.25~0.46	-N**	EC, TP	0.17
	鱼类	廊道	-N**	建筑用地	0.32	-S**	TP	0.28
			BI**	森林	0.42	-BI*	EC	0.38

注：“*”代表显著相关, $p < 0.05$; “**”代表极显著相关

数^[29]。由于鱼类的物种数与个体数与野外监测的时间和监测强度具有极高的相关性^[30]。因此,本研究在参数选择时剔除了鱼类个体数参数。

3.4 评价指标及其参考值的确定

综合考虑不同参数间的相关性,健康评估参数对压力参数的定量化响应关系,筛选出水质核心参数5个,水体营养盐核心参数3个,藻类参数2个,大型底栖动物参数3个和鱼类参数3个(见表5)。

水质参数除电导率外,其余参考中国《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中I类水作为参照值,V类水作为临界值。藻类生物完整性参数和鱼类生物完整性参数参考本地区研究中生物完整性的研究^[29,31],BMWP参数同时参考了Park等^[28]在韩国的应用。电导率和其余生物参数则依据本研究中总体线性回归模型的模拟值,当人为活动达到最小(如农田用地面积为0%)和人为活动的影响最大(如农田面积达到100%)时,确定各参数对应的总体分布范围,然后选用预测值的5%和95%百分位值作为参照值和临界值(当参数值越大代表河流健康状况越好时,以95%和5%百分位值作为参照值和临界值)。同样的方法可用于构建尚未确定的本地区参照值和临界值,并已经在全球其他地区得到

应用使用观测值^[23,32,33](见表5)。

3.5 辽河流域河流健康综合评估

辽河流域健康等级未达到“良”的样点共计146个,所占比例高达83%,健康等级为“良”的样点仅为30个,几乎全都分布于太子河源头(见图4)。

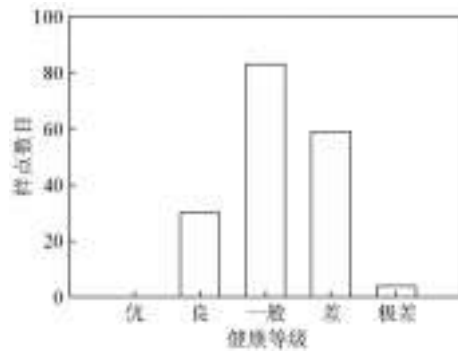


图4 辽河流域不同健康等级的样点数目

Fig.4 The number of different healthy level sites at Liaohe River

太子河、浑河、东辽河和辽河干流的健康状况均属于“一般”,而西辽河的总体健康状况最差(见图1)。

表5 辽河流域河流健康评估核心参数及其参照值和临界值

Table 5 The core parameters and its reference values and threshold values for the stream health assessment in the Liaohe River basin

健康评估指标类型	具体指标	范围	参照值	临界值/阈值
水质	电导率	全流域	≤400	≥1 500
	溶氧	全流域	≥7.5	≤2
	挥发酚	山地溪流和平原河流	≤0.002	≥0.1
	五日生化需氧量	平原河流	≤3	≥10
	高锰酸钾盐参数	平原河流	≤2	≥15
营养盐	总氮	全流域	≤0.2	≥2
	总磷	全流域	≤0.02	≥0.4
	氨氮	全流域	≤0.15	≥2.0
藻类	生物完整性参数	全流域	7	0
	Berger-Parker 参数	全流域	≤0.15	≥0.90
大型无脊椎动物	科级分类单元数	山地溪流和丘陵河流	≥30	0
		平原河流	≥22	0
	BMWP 参数	山地溪流和丘陵河流	≥131	0
		平原河流	≥81	0
	EPT 科级分类单元数	山地溪流	≥15	0
		丘陵河流	≥10	0
鱼类		平原河流	≥7	0
	物种数	全流域	65	0
	生物完整性参数	全流域	25	5
	Berger-Parker 参数	全流域	≤0.15	≥0.90

4 结语

1)本研究突破传统多参数评价法对于参考点位和受损点位的限制,运用实际监测数据构建预测模型,在综合水质、营养盐和水生生物参数的基础上,提出了河流健康综合评价法,形成各样点健康评价得分,其可以更全面地反映河流健康的综合特征,对于河流管理具有实际意义。

2)评估不同河流健康参数对人为干扰活动的敏感性和稳定性,筛选适宜的指标。并综合参考国家地表水环境质量标准、国内外相关文献、国外其他地区使用的水环境标准值和专家经验方法,确定各参数的参考值和临界值。

3)辽河流域总体健康水平较差,其中17%的样点达到了“良”等级,83%的样点为“一般”以下等级,其中西辽河健康水平最差。

参考文献

[1] Karr J R. Assessment of biotic integrity using fish communities [J]. Fisheries, 1981(6):21-27.
 [2] Kerans B L, Karr J R. A benthic index of biotic integrity (B-IBI) for rivers of the Tennessee Valley [J]. Ecological Applications,

1994(4):768-785.
 [3] Karr J R, Chu E W. Sustaining living rivers [J]. Hydrobiologia, 2000, 422(423):1-14.
 [4] Ohio Environmental Protection Agency. Users Manual for Biological Field Assessment of Ohio Surface Waters [M]. USA: Ohio Environmental Protection Agency, 1987.
 [5] Barbour M T, Gerritsen J, Snyder B D. Rapid Bioassessment Protocols for Use in Streams and Wadeable Rivers: Periphyton, Benthic Macroinvertebrates and Fish [M]. Second Edition. Washington, D.C: U.S. Environmental Protection Agency, Office of Water, 1999.
 [6] Hering D C, Meier C, Rawer-jost C K, et al. Assessing streams in Germany with benthic invertebrates: Selection of candidate metrics [J]. Limnologica, 2004, 34:398-415.
 [7] Johnson R K, Hering D, Fuse M T, et al. Detection of ecological change using multiple organism groups: Metrics and uncertainty [J]. Hydrobiologia, 2006, 566:115-137.
 [8] Feld C K, Hering D. Community structure or function: Effects of environmental stress on benthic macroinvertebrates at different spatial scales [J]. Freshwater Biology, 2007, 52:1380-1399.
 [9] 渠晓东, 刘志刚, 张 远. 标准化方法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):4661-4672.
 [10] 殷旭旺, 渠晓东, 李庆南, 等. 基于着生藻类的太子河流域水生生态系统健康评价 [J]. 生态学报, 2012, 32(6):1677-1691.
 [11] Bunn S E, Abal E G, Smith M J. Integration of science and monitoring of river ecosystem health to guide investments in catchment protection and rehabilitation [J]. Freshwater Biology, 2010, 55(1):223-240.
 [12] 张 楠, 孟 伟, 张 远, 等. 辽河流域河流生态系统健康的多指标评价方法[J]. 环境科学研究, 2009, 22(2):162-170.

- [13] Vannote R L, Minshall G W, Cummins, et al. The river continuum concept, Canadian [J]. *Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1980, 37: 130–137.
- [14] 孟伟, 张远, 郑丙辉. 辽河流域水生生态分区研究 [J]. *环境科学学报*, 2007, 27(6): 911–918.
- [15] 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 [M]. 第四版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [16] 朱惠忠, 陈嘉佑. 中国西藏硅藻 [M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [17] 胡鸿钧. 魏心印中国淡水藻类——系统、分类及生态 [M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [18] Wiggins G B. Larvae of the North American Caddisfly Genera (Trichoptera) [M]. 2nd ed. Toronto: University of Toronto Press Inc, 1996.
- [19] Merritt R W, Cummins K W, Berg M B. An Introduction to the Aquatic Insects of North America [M]. 4th ed. Dubuque: Kendall/Hunt Publishing Company, 2008.
- [20] 尤大寿, 归鸿. 中国经济昆虫志——第四十八册蜉蝣 [M]. 北京: 科学出版社, 1995.
- [21] 刘蝉馨, 秦克静. 辽宁动物志——鱼类 [M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 1987.
- [22] 解玉浩. 东北地区淡水鱼类 [M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2007.
- [23] Anon. Australian and New Zealand Guidelines for Fresh and Marine Water Quality. Volume 1, The Guidelines [M]. Agriculture and Resource Management Council of Australia and New Zealand: Australian and New Zealand Environment and Conservation Council, 2000.
- [24] Maxted J R, Barbour M T, Gerritsen J, et al. Assessment framework for mid-Atlantic coastal plain streams using benthic macroinvertebrates [J]. *Journal of the North American Benthological Society*, 2000, 19(1): 128–144.
- [25] EHMP. Ecosystem health monitoring program 2008-09 annual technical report [R]. Brisbane: South East Queensland Healthy Waterways Partnership, 2010.
- [26] Simpson J C, Norris R H. Biological assessment of river quality: Development of AUSRIVAS models and outputs [C]// *Assessing the Biological Quality of Freshwaters. RIVPACS and other Techniques*. UK: Freshwater Biological Association, 2000: 125–142.
- [27] Chessman B S, Willams, Besley C, et al. Bioassessment of streams with macroinvertebrates: Effect of sampled habitat and taxonomic resolution [J]. *Journal of the North American Benthological Society*, 2007, 26: 546–565.
- [28] Park Y S, Song M Y, Park Y C, et al. Community patterns of benthic macroinvertebrates collected on the national scale in Korea [J]. *Ecological Modelling*, 2007, 203: 26–33.
- [29] 宋智刚, 王伟, 姜志强, 等. 应用 F-IBI 对太子河流域水生生态健康评价的初步研究 [J]. *大连海洋大学学报*, 2010, 25(6): 480–487.
- [30] Kennard M J, Olden J D, Arthington A H, et al. Multiscale effects of flow regime and habitat and their interaction on fish assemblage structure in eastern Australia [J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2007, 64(10): 1346–1359.
- [31] 殷旭旺, 渠晓东, 李庆南, 等. 基于着生藻类的太子河流域水生生态系统健康评价 [J]. *生态学报*, 2012, 32(6): 1677–1691.
- [32] Hua Jun, Zhang Min. Primary consumers as bioindicator of nitrogen pollution in lake planktonic and benthic food webs [J]. *Ecological Indicators*, 2012(14): 189–196.
- [33] U.S. Environmental Protection Agency. Nutrient Criteria Technical Guidance Manual: Rivers and Streams. EPA-822_B-00-002 [M]. USA: U.S. Environmental Protection Agency Office of Water, 2000.

The researches of integrated river health assessment of Liaohe River basin

Zhang Yuan, Zhao Rui, Qu Xiaodong, Meng Wei

(State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Laboratory of Riverine Ecological Conservation and Technology, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

[Abstract] The multi-variable assessment method is a current trend for studying the health of river ecosystems. A system of candidate indices, including physical-chemical parameters and nutrition parameters, algae index, macroinvertebrates index and fish index were set based on monitoring data collected from the Taizi River basin in May 2009. Spearman's Rank correlations and Regression modelling were used to select compatible indices to build the metric-comprehensive assessment index which was applied to evaluate the Liaohe River healthy. The results indicated that the whole basin of Liaohe River was in poor healthy situation, the poor health sites was 146, account 83 % of total sites, were distributed in the Hunhe River, East Liao river and West Liao River basin where discharge of urban and industrial pollution was the primary factor impacting the river health. The other 17 % of all sites were designated as good healthy, mainly located at Taizi River basin, and the best sites was located at the headstream of Taizi River basin where little disturbance by human activities occurred. About the biotic indicators assessment, fish community healthy level was the worst, the best one was algae.

[Key words] integrated assessment; river health; macroinvertebrate; fish; benthic algae