

DOI: 10.5846/stxb201306101587

朱卫红,曹光兰,李莹,徐万玲,史敏,秦雷.图们江流域河流生态系统健康评价.生态学报,2014,34(14):3969-3977.

Zhu W H, Cao G L, Li Y, Xu W L, Shi M, Qin L. Research on the health assessment of river ecosystem in the area of Tumen River Basin. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(14): 3969-3977.

图们江流域河流生态系统健康评价

朱卫红^{1,2,*}, 曹光兰², 李莹³, 徐万玲², 史敏², 秦雷²

(1. 长白山生物资源与功能分子教育部重点实验室, 延吉 133002;

2. 延边大学 理学院地理系, 延吉 133002; 3. 延边州环境保护局, 延吉 133000)

摘要: 河流是重要的自然生态系统,也是重要的生态廊道之一,图们江流域河流生态系统的健康状况,对维护跨国界流域的水环境的管理和可持续发展有着重要的意义。基于河流水文、河流形态、河岸带状况、水体理化参数以及河流生物 5 个层面选取 22 个指标构建了图们江流域河流生态系统健康评价指标体系,运用层次分析法和加权平均法对其进行了健康评价。评价结果表明,虽然该地区处于“健康”级别,但也有 28% 的地区处于“亚健康”状态。河流健康综合指数(RHI)与河流生物指标、水体理化指标、河流形态指标、河岸带指标等 4 项呈显著相关($P < 0.05$),相关系数依次为 0.847、0.757、0.740、0.547。研究结果表明图们江流域水生生物的生存环境遭到严重破坏、水体污染严重,河岸带生态退化、城市化影响严重等一系列影响河流健康的问题。
关键词: 河流;健康评价;生态系统;图们江流域

Research on the health assessment of river ecosystem in the area of Tumen River Basin

ZHU Weihong^{1,2,*}, CAO Guanglan², LI Ying³, XU Wanling², SHI Min², QIN Lei²

1 Key Laboratory of Natural Resources of Changbai Mountain & Functional Molecules, Yanji 133002, China

2 Geography Department College of Sciences, Yanbian University, Yanji 133002, China

3 Yanbian environmental protection agency, Yanji 133000, China

Abstract: Rivers play a key role in ecosystems and society, and they provide a range of ecosystem functions such as shelter and food source for an array of biological species, aid in flood management and ecological refuge development. Socially, rivers accommodate communities by providing a medium for transport, recreation, tourism, worship, ecosystem services and a place to experience the serenity of nature. Tumen River is an international river which located in the national boundaries of China, North Korea and Russia. With the three countries have different management and policies, it has been being seriously destroyed by various human activities including contaminant discharge, damming, solidifying riverside, destroying vegetation in the riparian zone and etc., resulting in deterioration of water environment, degradation of biological communities and riverbed atrophying. It brings bad affection on the social and economic development of Tumen River Basin area which also affects and restricts the regional economic development. Therefore, the restoration and maintenance of “healthy” river ecosystems have become important objective of river management.

In this paper, we summarize the current health conditions of national and international river ecosystem, and establish an evaluation system for ecological health, which is suitable for the river ecosystem in Tumen River Basin. The system includes an objective layer, a rule layer with 5 factors and an index layer with 22 defined indexes. The objective layer generalized to the river health highly, reflecting the total level of the healthy condition of river by the river health index

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41361015);吉林省教育厅“十二五”科学技术研究项目(2011-437)

收稿日期: 2013-06-10; **修订日期:** 2014-04-17

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: whzhu@ybu.edu.cn

(RHI). The rule layers, which consider the river hydrology, river morphology, riparian zone, water quality parameters, aquatic organisms, reflected the river health attribute and level from different sides. The index layer included 22 qualitative and quantitative evaluation indicators. In this system, a health assessment index for river ecosystem is constructed based on five health stage criteria: primary health ($81 < \text{RHI} < 100$); health ($61 < \text{RHI} < 80$); sub-health ($41 < \text{RHI} < 60$); poor ($21 < \text{RHI} < 40$); worse ($0 < \text{RHI} < 20$). According to the evaluation index system, the weight of each index is calculated using an analytic hierarchy process and then the final index value calculated using with the method of weighted average. Then samples are collected at 25 sites of Tumen River Basin. The result shows that the RHI of all sites are between 45.59—92.84. Based on the systematic assessment, the assessed sites are categorized into 6 sites are in 'primary health' condition, about 24 percent, 12 sites are in 'health' condition, about 48 percent and 7 sites are in 'sub-health' condition, about 28 percent. The sites in 'Poor' and 'worse' condition is occupied zero. The results show that the river health condition in the Area of Tumen River Basin is in 'health' level on the whole. Using the 25 points of information, the correlation among RHI and river hydrology, river morphology, riparian zone, water quality parameters, aquatic organisms is analysed in the spss software. The results show that there is a significant correlation with RHI and aquatic organisms, Water quality parameters, river morphology, riparian zone ($P < 0.05$), the correlation coefficients are 0.847, 0.757, 0.740, 0.547. There is significant correlation between RHI and, aquatic organisms indexes of fish resources and FCC; Water quality parameters of BOD, COD_{MN} , COD; River Hydrology indexes of flow condition, riparian zone of vegetation diversity indexes ($P < 0.05$). Strategies on river protection, recovery and sustainable development in the area of Tumen river ecosystem are proposed with the analyses of related threats. River ecosystem in this region needs science-based conservation and management.

Key Words: river; health assessment; ecosystem; Tumen River Basin

河流是重要的自然生态系统,也是重要的生态廊道之一,是陆地生态系统和水生生态系统间物质循环、能量流动和信息交流的主要通道,发挥着重要的生态功能^[1]。但是,随着人口的快速增长以及人类工农业活动的加剧,河流生态系统不断受到人类活动的干扰和损害。河流生态系统的退化和人类对河流生态系统服务功能需求的不断增加所构成的矛盾使社会安全、经济安全、生态安全和水资源安全受到严重威胁^[2]。如何维持和发挥现有河流生态系统的服务功能,修复受损生态系统,促进河流及其流域的经济、社会 and 环境的可持续发展已经成为一个全球性的问题^[3]。

目前,以鱼类、大型底栖生物、浮游生物以及藻类为监测对象的指示物种是主要研究方法,如生物完整性指标(ABI)、无脊椎动物物种指标(ISI)等,也有国内学者利用鱼类或者大型无脊椎底栖动物群落结构指标对河流水质状况进行评价,这种评价相对简单易行,其理论依据为生物是综合反映各种人类干扰的指标,但是单种类型指标也可能难以全面反映河流生态系统的变化。因此力图建立能够反映河流水文指标、河岸带指标、水体理化指标以及河

流生物指标等要素构成的多指标评价系统,以客观、全面地反映河流自然属性对于人类活动干扰的响应。多指标综合评价法通过运用一系列水文、生物、物理化学等多种类型指标从不同角度不同深度反映水环境质量信息、评价河流生态健康状况,有利于全方位的揭示河流生态系统存在的问题,是未来河流健康评估的发展方向^[4]。因此本文针对图们江流域的河流特点,构建了适用于图们江流域的河流健康评价指标体系,并对图们江流域的河流生态系统进行了健康评价,以期区域的河流生态修复及河流管理提供科学的理论依据^[5]。

1 材料与方法

1.1 研究区概况与样点设置

图们江是位于中、朝、俄三国交界处的国际性河流,是中国内陆通向日本海的唯一水上通道,也是东北亚区域经济、人口、地理3个中心交汇点,在联结亚、欧、美海陆运输格局中居于重要的枢纽地位。该流域具有河流、湿地、森林等多种生态系统,其是丹顶鹤等世界濒危迁徙鸟类的中间停歇地,是欠莲、图们江红莲、大果野玫瑰等多种珍稀植物和东北虎等

世界濒危舞动的分布区,担负着东北亚生态网络的核心地位^[6]。

近几十年来随着中、朝、俄三国间不同的管理和政策的实施,该流域河流生态系统受到了不同程度的干扰和破坏,流域内的生态环境逐渐恶化,尤其是水体跨国污染,水环境质量的变化,使水体丧失其使用功能,可利用的水资源减少,给该地区的社会发展带来了不利影响,从而影响和制约区域的经济的发展并可能引发国际河流安全问题。因此,及时准确地进行图们江流域河流生态系统健康评价,对维护该区域生态系统稳定有着重要的意义。

于2012年8月对图们江干流及其部分支流进行采样调查,共选取25个采样点,其中在图们江干流上选取5个采样点,即TM1、TM2、TM3、TM4、TM5;琿春河选取4个样点,即HC1、HC2、HC3、HC4;嘎呀河选取3个样点,即YG1、YG2、YG3;布尔哈通河选取6个样点,即BR1、BR2、BR3、BR4、BR5、BR6;海兰河选取5个样点,即HL1、HL2、HL3、HL4、HL5;汪清河选取2个样点,即WQ1、WQ2。其分布和地理位置见图1。

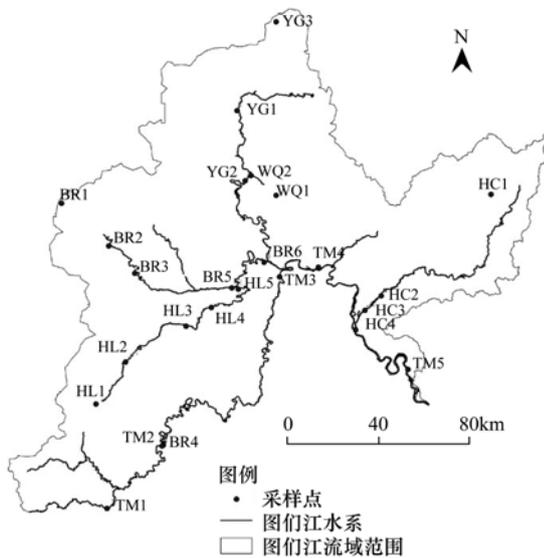


图1 图们江流域采样点分布图

Fig.1 Distributions of sampling sites in Tumen River Basin

图中字母是采样点代号

1.2 样品采集与测定

1.2.1 河岸带指标的获取

2012年8月10日—18日对图们江流域河岸带植物物种进行了系统地调查。本研究采用样方法对图们江流域河岸带取样,由于在调查样方中大都以

草本植物为主,所以设置取样面积为 $1\text{m}\times 1\text{m}$,统计样方内各物种的种类、高度、密度、盖度、频度,进行多样性分析。图们江流域共设25个采样点,每个采样点分别选取5个样方,共计100个样方。在调查的同时,使用全球定位系统(GPS)对调查地点定位,并记录各样地的海拔高度、地貌及土壤类型等环境因子^[7]。

1.2.2 水体理化指标的获取

在现场采集1L水样进行水体理化指标监测,采样点为河流中间点表层以下0.5m,分析指标总磷(TP)、氨氮($\text{NH}_3\text{-N}$)、溶解氧(DO)、生化需氧量(BOD)、高锰酸盐指数(COD_{MN})、化学需氧量(COD)、粪大肠菌群数(Fecal Coliform Count, FCC)。现场采集和实验室内分析均参照《水和废水监测分析方法》。样品的测定依据文^[8]的方法进行,由吉林省延边州环境保护局完成。

1.2.3 河流生物指标获取

鱼类资源主要指鱼类种类的丰富情况与珍惜鱼类的存活状况,珍惜鱼类在河流中生存繁衍,并维持在影响生存的最低种类数量以上的状况。图们江是国际性河流,对于大范围调查鱼类具有一定的难度,因此鱼类资源通过文献查阅,专家咨询、居民访问获得。

1.2.4 其他指标的获取

图们江流域的河流水文指标以及河流形态指标结合文献资料、专家咨询、实地调查、拍照对比进行现场评价,对每个指标分别打分。

1.3 河流健康综合评价指数

通过国际调研、现状分析、参照对比、标准对照、专家咨询法,借鉴美国RCE^[9]以及澳大利亚ISC^[10]、新西兰USHA^[10]等国外河流健康评价标准及国家《地表水环境质量标准》,确定河流健康的评价标准,进而构建了适合于图们江流域的河流健康评价指标体系(表1)。

1.3.1 权重的计算

根据AHP分析方法要求,本研究设计图们江下游河流生态系统健康评价指标权重系数问卷表,中国环境科学研究院、中国科学院水生生物研究所、江西省环境保护科学研究院、北京师范大学、东北师范大学、南开大学、延边州水利局、延边州水文局、延吉市规划勘测设计院、延边大学等河流健康评价

专家以及生态环境相关专家,通过两两比较对每一层相对于上一层相对重要性以及各层因素之间的相对重要性给出判断值。依此构建判断矩阵,经过计算机数据处理进行层次单排序和层次总排序,得到各因素权重值(取整数)^[11]。结果经一致性检验,CR<0.1,判断矩阵具有满意的一致性。发放专家问卷 20 份,收回 19 份,其中有效问卷 17 份。

1.3.2 评价方法

河流健康状况的评分过程^[12-13]共分 3 步:(1)二级指标评分,依据各指标评价标准进行评分,获得河

流健康评价指标体系中各二级指标值(每个二级指标值得分均在 0—4 之间)。(2)一级指标评分利用加权平均法对二级指标进行计算,所得结果作为一级指标的得分,为便于区分样点间得分的差异,将各一级指标加权并将每个一级指标定位于 0—20 之间。(3)河流健康综合评分,利用加权平均法对一级指标进行计算,获取河流健康综合指数,将该指标划分为 0—20、21—40、41—60、61—80、80—100 共 5 个等级,分别对应河流健康状况为极差、差、亚健康、健康和很健康。

表 1 图们江流域河流健康综合评价指标体系

Table 1 The river health assessment index system of the Tumen River basin

一级指标 Primary index	权重 Weight	二级指标 Secondary index	权重 Weight
河流健康综合 指数 A1 River Health Index A1	0.222	河流水文指标(B1) River hydrology(B1)	流速 Current velocity (C11) 0.333
		水量 Water flow (C12) 0.500	
		水利工程干扰 Disturbance of hydraulic engineering (C13) 0.167	
	0.111	河流形态指标(B2) Physical morphology(B2)	河道内底质 River substrate (C21) 0.272
			弯曲程度 Sinuosity (C22) 0.091
			河道改变程度 Change in river course (C23) 0.182
			河岸稳定性 Bank stability (C24) 0.091
			河床稳定性 Bed stability (C25) 0.182
			河道护岸形式 (C26) 0.182
			河岸带指标(B3) Riparian zone(B3)
0.333	水体理化指标(B4) Water quality parameter(B4)	河岸带物种丰富度指数 richness index of Riparian species (C32) 0.251	
		河岸带物种多样性指数 diversity index of Riparian species (C33) 0.289	
		结构完整性 structure integrity (C34) 0.190	
		缓冲区生境类型 Riparian dominant habitat (C35) 0.126	
		总磷 TP(C41) 0.125	
		氨氮 NH ₄ -N (C42) 0.125	
		溶解氧 DO (C43) 0.125	
0.222	河流生物指标(B5) Aquatic organisms(B5)	生化需氧量 BOD (C44) 0.125	
		高锰酸盐指数 COD _{Mn} (C45) 0.250	
		化学需氧量数 COD (C46) 0.250	
		粪大肠杆菌几何均值 Geometric mean of FCC (C51) 0.500	
		鱼类资源 Fish resources (C52) 0.500	

表 2 图们江流域河流水文指标的评价标准

Table 2 Assessment criteria for the hydrologic subindex of the Tumen River basin

评价指标 Assessment index	分级描述 Assessment index	分值 Score
流速(C11) Current velocity(C11)	具多样性流速,水急,水面紊动明显且有水花 Varied velocity with obvious lipper	4
	整体水面平顺,流速均一,较少有水花出现 Same velocity with less lipper	3
	整体流速均一,水面平静无波 Same velocity with no lipper	2
	水体不流动 With no velocity	1

续表

评价指标 Assessment index	分级描述 Assessment index	分值 Score
	出现断流 With no flow	0
水量(C12) Water flow (C12)	水位达到两岸,仅有少量底质裸露 Water reaching banks with few substrates exposed	4
	水覆盖 75%, <25%底质裸露 Submerged area over 75%	3
	水覆盖 75%, <50%底质裸露 Submerged area over 50%	2
	水覆盖 25%, 浅滩大部分裸露 Submerged area less than 25%	1
	水量很少,几乎全部裸露 Water flow very small, with all substrates almost exposed	0
水利工程干扰(C13) Disturbance of hydraulic engineering (C13)	自然河道,未受影响 Natural river, with no disturbance	4
	河道水量受水利工程调度的影响而波动频繁 Water flow frequently disturbed by hydraulic engineering	2
	水电站出水口,水流湍急 Outlets of hydropower stations with rapids	0

表 3 图们江流域河流形态指标的评价标准

Table 3 Assessment criteria for the physical morphology subindex of the Tumen River basin

评价指标 Assessment index	分级描述 Assessment index	分值 Score
河道内底质(C21) River substrate(C21)	漂石(>256 mm)为主 Boulder (>256 mm)	4
	鹅卵石(2—256mm)为主 Cobble (2—256 mm)	3
	砂/沙(0.016—2mm)为主 Sand (0.016—2 mm)	2
	粘土、有机碎屑为主 Muddy and organic detritus	1
	人造材料(如建筑材料、金属、塑料、玻璃等)为主 Artificial materials (construction material, metal, plastic, glass, etc.)	0
弯曲程度(C22) Sinuosity (C22)	视野内显著的河道弯曲数量>3 With > 3 bends visible	4
	视野内显著的河道弯曲数量为 3 With 3 bends visible	3
	视野内显著的河道弯曲数量为 2 With 2 bends visible	2
	视野内显著的河道弯曲数量为 1 With 1 bend visible	1
	河道笔直 Straight course	0
河道改变程度(C23) Change in river course(C23)	河流保持自然状态 Natural states	4
	存在少量拓宽、挖深河道等现象 Small dredging	3
	中等程度的河道破坏 Moderate disturbance	2
	存在大规模挖沙、挖泥等现象,但未造成河流改道 Large scale dredging, but with no change	1
	人为干扰(如挖沙、筑坝等)造成河流改道 Serious disturbance (dredging, damming, etc) with change	0
河岸稳定性(C24) Bank stability (C24)	河岸稳定,无明显侵蚀 Stable bank with no obvious erosion	4
	河岸稳定,少量区域存在侵蚀<25% Stable bank with small erosion (<25%)	3
	河岸不稳定,中度侵蚀 25%—50% Relatively unstable bank with moderate erosion (25%—50%)	2
	河岸不稳定,极度侵蚀,洪水时存在风险 50%—75% Unstable bank with serious erosion (50%—75%)	1
	河岸极不稳定,绝大部分区域侵蚀>75% Extremely unstable bank with heavy erosion (>75%)	0
河床稳定性(C25) Bed stability(C25)	不存在明显的河床侵蚀或淤积,河床稳定 Stable bed with no obvious deposition and degradation	4
	河床有一定的侵蚀或淤积,河床较稳定 Relatively stable bed with certain deposition and degradation	3
	中等程度的退化或淤积,河床较不稳定 Relatively unstable bed with moderate deposition and degradation	2
	河床稳定性较差 Unstable bed	1
	河床严重退化或淤积,极不稳定 Extremely unstable bed with serious deposition and degradation	0

续表

评价指标 Assessment index	分级描述 Assessment index	分值 Score
河道护岸形式 (C26)	有植被覆盖的自然土质岸坡 Natural soil bank with vegetation	4
Bank protection form (C26)	近自然的斜坡式生态护岸 Nearly ecological sloping bank	3
	亲水平台护岸或无植被的土质岸坡 Water affinity platform or soil bank with no vegetation	2
	台阶式人工护岸或浆砌块石护岸 Artificial stepped bank or mortared rubble,	1
	直立式钢筋混凝土 Vertical reinforced concrete	0

表 4 图们江流域河岸带指标的评价标准

Table 4 Assessment criteria for the physical morphology subindex of the Tumen River basin

评价指标 Assessment index	分级描述 Assessment index	分值 Score
河岸带宽度 (C31)	>50m	4
Riparian width (C31)	35—50m	3
	20—35m	2
	5—20m	1
	<5m	0
河岸带植被多样性指数 (C32)	>3	4
Richness index of Riparian species (C32)	2—3	3
	1—2	2
	0—1	1
	0	0
河岸带植被丰富度指数 (C33)	>40	4
Diversity index of Riparian species (C33)	30—40	3
	20—30	2
	10—20	1
	0—10	0
结构完整性 (C34)	多种植被 (3 个层次) 结合 with three species	4
Structure integrity (C34)	2 个层次 with two species	3
		2
	1 个层次 With one species	1
	无植被 With no species	0
河岸带生境类型 (C35)	森林、沼泽 Forest or swamp	4
Riparian dominant habitat (C35)	灌木、荒地 Shrub or wild land	3
	公园等旅游区 Park, or tourism area	2
	农田、牧场、村落 Farmland, or pasture or village	1
	城镇、工厂 Urban or industrial area	0

表 5 图们江流域河流生物指标的评价标准

Table 5 Assessment criteria for aquatic organism subindex of the Tumen River basin

评价指标 Assessment index	分级描述 Assessment index	评分 Score
大肠杆菌几何均值 (C51)	≤200	4
Geometric mean of FCC (C51)	≤2000	3
	≤10000	2
	≤20000	1
	≤40000	0
鱼类资源 (C52)	鱼类种类很丰富, 有珍稀鱼类存活 With abundant species,	4
Fish resources (C52)	鱼类种类较丰富 With many species	3
	鱼类种类一般 With some species	2
	鱼类很少, 部分存在 With few species	1
	没有鱼类存活 With no species	0

此外,借鉴国内外健康评价体系中的水质理化参数^[14],基于图们江地区河流水环境污染状况,本文采用总磷(TP)、氨氮(NH₃-N)、溶解氧(DO)、生化需氧量(BOD)、高锰酸盐指数(COD_{MN})、化学需氧量(COD)等5个主要指标反映水体理化状况。据GB3838—2002地表水环境质量标准,将I、II类水设为优秀,并赋值4分,III类水赋值3分,IV类水赋值2分,V类、劣V类水赋值0分。

2 结果与分析

2.1 河流健康综合评价

图们江流域的河流健康评价结果统计(图2,图3),其中很健康的监测断面有6个,占24%;健康等级的监测断面为12个,占48%;亚健康等级的监测断面为7个,占28%;差和较差等级的监测断面为0个。结果分析表明,六条河流所在的区域基本上处于健康状态,少数点位处于很健康和亚健康状态,没有差和较差的监测断面。

河流水文指标中 HC2、HC3、YG3、BR3、HC3、HL5 和 WQ2 监测断面得分较低,因为这些监测断面大都处于河流的主河道,河面较宽、流速较为均一,生境异质性较低,难以支持高生物多样性;河流形态指标中,HC3、YG3、BR4、BR5 监测断面得分较低,都在10分以下,因为存在大规模挖沙现象,并且河道内底质主要为细沙,存在淤积现象,影响了河床的稳定性;河岸带指标中 TM3、HC3、YG3、BR4、BR5、HL4 监测断面分值偏低,这是因为这5个采样点都靠近市区,河岸带宽度较窄,河岸带多被农田和住宅用地取代;水体理化指标中 TM3、TM4、TM5、YG2、YG3、WQ2 监测断面的得分比较低,都在10分以下,因为这些监测断面都处于河流的下游区域,主要受到造纸机化学纤维制造业工业废水和城市生活污水的影响,主要以有机污染为主;河流生物指标中 TM2、TM3、TM4、TM5、YG2、YG3、WQ2 监测断面得分偏低,主要是因为河流水质受到污染,导致大量鱼类难以存活,水生生物很难生长。

处于很健康状态的样点大都比较接近源头,采样点的得分情况可以看出,从河流上游至下游,健康状况退化明显。嘎呀河上游的 YG1 监测断面得分为84.61,明显高于下游的 YG3 监测断面(44.51);汪清河自上而下,河流健康综合评价分值由 WQ1 监测断

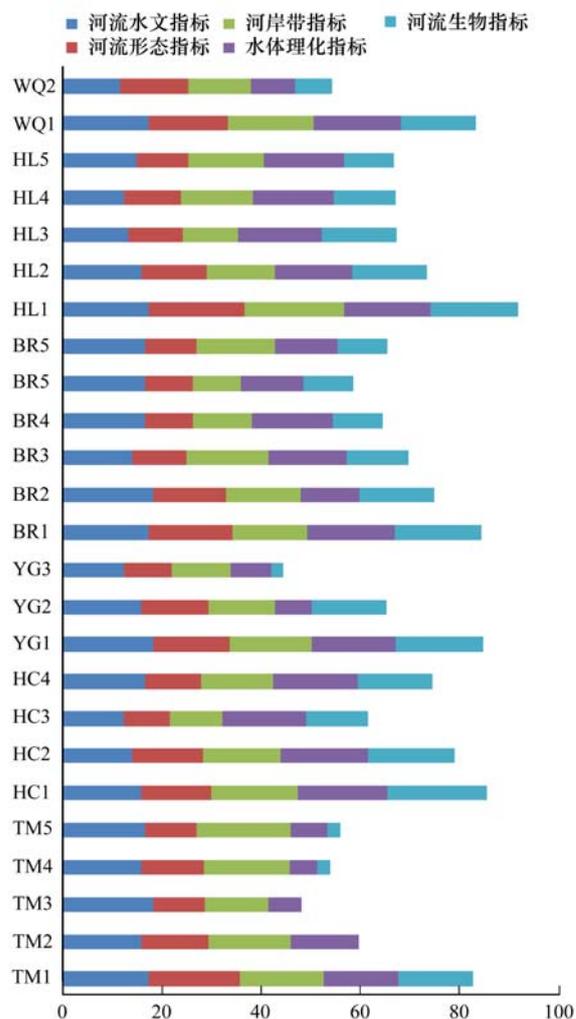


图2 图们江流域河流生态系统健康评价结果

Fig.2 River health comprehensive assessment index scores for the rivers in Tumen river basin

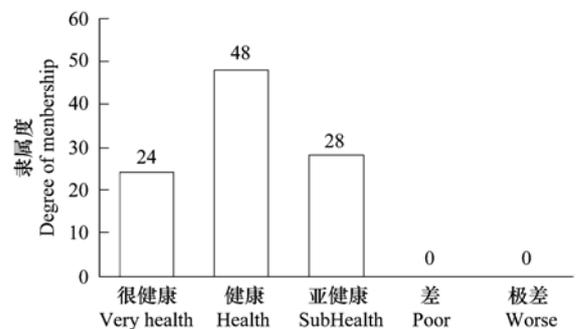


图3 河流健康评价结果

Fig.3 River health comprehensive assessment index score

面的83.07降至WQ2监测断面的54.26。这是因为河流上游地区的植被覆盖多为森林,受人为干扰较少,而河流中下游城镇和农田面积增加,工业废水、生活污水排放及农药、化肥的大量使用对河流的健

康状况产生很大影响。得分较低监测周边均为有一定规模的城镇,可见城镇化对河流健康状况会产生相当大的影响。

2.2 河流健康表征因子相关分析

利用 25 个点位信息,在 SPSS 软件下统计分析河流健康综合指数(RHI)与河流水文指标、河流形态指标、河岸带指标、水体理化指标、河流生物指标等各项表征指标之间的相关性,研究各项参数变化对河流健康的响应关系。具体过程是:①对源数据利用 SPSS 非参数分析中的 K-S 法进行正态分布检验,判断数据是否为正态分布;②对于满足正态分布的变量,采用 Pearson 相关分析法,对于不满足正态分布的变量,则采用 Spearman 相关分析法;③根据相关系数的大小,确定出数据的相关性水平^[15]。

河流健康综合指数(RHI)与河流水文指标、河流形态指标、河岸带指标、水体理化指标、河流生物指标 5 个方面的相关分析结果见下表 6。K-S 法检

表 6 RHI 与河流健康表征因子的相关性

Table 6 Correlation between RHI and river health characterization indexes

准则层 Rule layer	R	指标层 Index layer	R
B1	0.404*	C11	0.613**
		C12	-0.052
		C13	0.18
B2	0.742**	C21	0.616**
		C22	0.329
		C23	0.476*
		C24	0.014
		C25	0.561**
B3	0.547**	C26	0.324
		C31	0.047
		C32	0.624**
		C33	0.505*
		C34	0.484*
B4	0.757**	C35	0.051
		C41	0.499*
		C42	0.454*
		C43	0.488*
		C44	0.611**
B5	0.847**	C45	0.676**
		C46	0.692**
		C51	0.732**
		C52	0.837**

* 在 0.05 水平(双侧)上显著相关; ** 在 0.01 水平(双侧)上显著相关

验表明,河流健康综合指数(RHI)以及河流水文指标、河流形态指标、河岸带指标、水体理化指标、河流生物指标均满足正态分布,因此采用 Pearson 相关分析。结果表明,相关性大小顺序为河流生物指标>水体理化指标>河流形态指标>河岸带指标>河流水文指标。

RHI 与河流生物指标、水体理化指标、河流形态指标、河岸带等 4 项呈显著相关($P<0.05$),相关系数依次为 0.847、0.757、0.740、0.547。RHI 与河流水文呈显著相关($P<0.1$),相关系数为 0.404。说明河流健康状况与这 5 项都具有重要的影响作用。

3 讨论

本文借鉴国内外河流健康评价体系的研究,根据图们江流域的河流特点,在河流水文、河流形态、河岸带状况、水体理化参数以及河流生物 5 个层面选取 22 个指标构建了图们江流域河流生态系统健康评价指标体系,在相应的国家及地方标准的基础上,确立了各层次下指标的评价标准,并根据健康程度将河流健康划分为 5 个等级,“很健康、健康、亚健康、差、较差”。

根据建立的评价指标体系,采用层次分析法确立其评价权重,再利用加权平均法对图们江干流 5 个监测点及支流 20 个监测点进行了健康评价,河流健康综合指数(RHI)的值在 45.56—92.84 之间,其中“很健康”的监测断面有 6 个,占 24%;“健康”等级的监测断面为 12 个,占 48%;“亚健康”等级的监测断面为 7 个,占 28%;“差”和“较差”等级的监测断面为 0 个,图们江流域河流健康状况总体处于“健康”级别。

利用 25 个点位信息,在 SPSS 软件下统计分析了(RHI)与河流水文指标、河流形态指标、河岸带指标、水体理化指标、河流生物指标间的相关性,结果表明 RHI 与河流生物指标、水体理化指标、河流形态指标、河岸带等 4 项呈显著相关($P<0.05$),相关系数依次为 0.847、0.757、0.740、0.547;RHI 与河流水文呈显著相关($P<0.1$),相关系数为 0.404。在各项参数中,RHI 与河流生物指标中的鱼类资源和粪大肠杆菌几何均值,水体理化指标中的生化需氧量、高锰酸盐指数和化学需氧量,河流水文之中的流速状况、河岸带指标中的植被多样性指数等参数呈现显著相

关性($P < 0.05$)。

通过研究发现图们江流域的河流健康状况虽然优于渭河、海河、澜沧江、大汶河、辽河等其他地区,但是如果城市化以及人类活动继续加剧也会存在安全隐患。图们江流域的健康状况表明图们江流域水生生物的生存环境遭到严重破坏、水体污染严重,河岸带生态退化、城市化影响严重等一系列影响河流健康的问题,如何对已经受损的河流自然结构和服务功能进行修复,使河流处于结构完整,服务良好的可持续发展状态已经成为河流管理者和公众面临的重要问题之一。而图们江流域河流健康恢复是复杂而长期的系统工程,需要建立长期的观测和评价机制,更需要社会各界以及朝鲜、俄罗斯人民的积极参与和支持^[16]。

References:

- [1] Huang B Q, Li R F, Cao W H. River eco-system health assessment and implications for river protection in China. *Journal of Anhui Agricultural Science*, 2011, 39(8): 4600-4602, 4641-4641.
- [2] Yin H J. Study of Eco-environment Water Demand and Assessment of Ecosystem Health in River [D]. Tianjin: Tianjin University, 2005.
- [3] Yang H J. Study on the Index System of River Ecosystem Health Assessment. Jilin: Jilin Science & Technology Press, 2010.
- [4] Bunn S E, Abal E G, Smith M J, Choy S C, Fellows C S, Harch B D, Kennard M J, Sheldon F. Integration of science and monitoring of river ecosystem health to guide investments in catchment protection and rehabilitation. *Freshwater Biology*, 2010, 55(1): 223-240.
- [5] Wang H, Han S, Deng H B, Xiao H, Wu G. A preliminary assessment on the Xiangxi River ecosystem services. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(9): 1971-1978.
- [6] Fu J. Research on the Environmental Factors Response to Different Wetlands Plants in Tumen River [D]. Yanji: Yanbian University, 2012.
- [7] Li Y, Ma X P, Li F Y, Hou W, Yang C L, Cheng Z H. Study on Plant Diversity of Riparian Zone along Xi River. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2011(19): 131-134.
- [8] Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. *Water and Wastewater Monitoring Analysis Method (4th edition)*. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.
- [9] Petersen RC Jr. The RCE: a riparian, channel, and environmental inventory for small streams in the agricultural landscape. *Freshwater Biology*, 1992, 27(2): 295-306.
- [10] White L J, Ladson A R. *An Index of Stream Condition; Catchment*

Managers' Manual. Melbourne: Department of Natural Resources and Environment, 1999: 1-33.

- [11] Zhu W H, Guo Y L, Sun P, Miao C Y, Cao G L. Wetland ecosystem health assessment of the Tumen River downstream. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(21): 6609-6618.
- [12] Li F Q, Cai Q H, Tang T, Li D F, Yang S Y, Xu Y Y. Comprehensive assessment of river health based on river environmental factors and aquatic organisms. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2010, 16(1): 38-45.
- [13] Zhang Z. *Comprehensive Assessment of Aquatic Ecosystem Health of Yuanhe River [D]*. Jiangxi: Nanchang University, 2011.
- [14] Ladson AR, White LJ, Doolan JA, Finlayson B L, Hart B T, Lake P S, Tilleard J W. Development and testing of an index of Stream Condition for waterway management in Australia. *Freshwater Biology*, 1999, 41(2): 453-468.
- [15] Wu E N. *River Health Assessment Theory, Methods and Practice [D]*. Shanghai: Huadong University, 2008.
- [16] Zhu W H, Liu Z J. *Resource Protection and Sustainable Utilization of Tumen River downstream*. Yanji: Yanbian University Press, 2012.

参考文献:

- [1] 黄宝强,李荣昉,曹文洪. 河流生态系统健康评价及其对我国河流健康保护的启示. *安徽农业科学*, 2011, 39(8): 4600-4602, 4641.
- [2] 殷会娟. 河流生态需水及生态健康评价研究[D]. 天津: 天津大学, 2005.
- [3] 杨海军. 河流生态系统评价指标体系研究. 吉林: 吉林科学技术出版社, 2010.
- [5] 王欢, 韩霜, 邓红兵, 肖寒, 吴钢. 香溪河河流生态系统服务功能评价. *生态学报*, 2006, 26(9): 1971-1978.
- [6] 付婧. 图们江流域不同类型湿地植物群落对环境的响应研究[D]. 延吉: 延边大学, 2012.
- [7] 李悦, 马溪平, 李法云, 侯伟, 杨春璐, 程志辉. 细河河岸带多样性研究. *广东农业科学*, 2011, 19: 131-134.
- [8] 国家环境保护局. *水和废水监测分析方法(第四版)*. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [11] 朱卫红, 郭艳丽, 苗承玉, 孙鹏, 曹光兰. 图们江下游湿地生态系统健康评价. *生态学报*, 2012, 32(21): 6609-6618.
- [12] 李凤清, 蔡庆华, 唐涛, 黎道丰, 杨顺益, 徐耀阳. 基于河流环境生物与生物复合指标评价辽北地区河流生态系统健康. *应用与环境生物学报*. 2010, 16(1): 38-45.
- [13] 张柱. 河流健康综合评价指数法评价袁河生态系统健康[D]. 江西: 南昌大学, 2011.
- [15] 吴阿娜. 河流健康评价: 理论、方法与实践[D]. 上海: 华东师范大学, 2008.
- [16] 朱卫红, 刘忠杰. 图们江下游地区资源保护及可持续利用. 延吉: 延边大学出版社, 2012.