

DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2015.01.013

深圳观澜河综合整治河流健康影响评估

毛雪慧¹, 黄凌², 黄奕龙¹, 刘雪朋¹

(1. 深圳市水务规划设计院, 广东深圳 518000; 2. 深圳市水务工程建设管理中心, 广东深圳 518000)

摘要: 根据河流健康的评估方法, 采用层次分析法构建了观澜河健康评价指标体系, 运用综合指数法对观澜河综合整治前后健康状况进行了评价。结果表明: 整治前观澜河上游和中游处于“不健康”状态, 下游处于“亚健康”状态; 整治后上游和下游处于“亚健康”状态, 中游处于“健康”状态。观澜河经过综合整治后, 河流生态系统呈现正向演替趋势; 但观澜河水环境状态仍存在一定程度的人为干扰。

关键词: 观澜河; 健康评价; 层次分析法; 评价指标

中图分类号: X824 文献标志码: A 文章编号: 1004-6933(2015)01-0080-06

Assessment on impacts of Guanlan River comprehensive treatment in Shenzhen City to river health

MAO Xuehui¹, HUANG Ling², HUANG Yilong¹, LIU Xuepeng¹

(1. Shenzhen Water Resources Planning and Design Institute, Shenzhen 518000, China;
2. Shenzhen Water Engineering Construction Management Center, Shenzhen 518000, China)

Abstract: According to river health assessment methods, an index system of health assessment on Guanlan River were set up by adopting analytic hierarchy process, and a method of comprehensive index was used to evaluate the health state of Guanlan River before and after its comprehensive treatment. The result shows that the upstream and midstream of Guanlan River is in the unhealthy condition and its downstream is in the sub-health state before the Guanlan River comprehensive treatment, while the upstream and downstream of Guanlan River in the sub-healthy state and its midstream in the healthy state after the Guanlan River comprehensive treatment. The river ecosystem presents positive succession trend after the Guanlan River comprehensive treatment, but there is still a certain degree anthropogenic interference in Guanlan River.

Key words: Guanlan River; health assessment; analytical hierarchy process; assessment index

河流健康评价是指从河流生态系统整体出发, 对河流水文、生物、生境等状况进行充分理解和综合评估, 从而为河流适应性管理提供基础资料和信息反馈, 促进河流的可持续发展^[1]。自千年生态系统评估 (millennium ecosystem assessment) 以来, 生态健康评估理论、方法、技术取得了快速发展, 我国各大流域机构在借鉴国外河流健康研究的基础上, 开展了河流健康评价研究工作, 如黄河、长江、珠江流域的健康评估^[2-6]。虽然河流健康研究水平日益提高, 但以下方面仍存不足: ①至今尚无公认的河流健康评价指标体系。②近年来, 城市河流的综合整治已在多地开展, 整治后的生态环境也得到了一定的改

善^[7-10], 但针对城市河流综合整治前后河流健康评价体系及其河流健康对比评价的研究很少。本文基于层次分析法, 从流域的可持续发展和水生态健康管理的角度出发, 构建河流健康评价指标对观澜河整治前后的健康状况进行定量评价, 以期对河流的生态修复提供重要的科学依据。

1 观澜河概况

观澜河流域位于深圳市中北部, 是东江水系石马河的上游段, 发源于民治街道大脑壳山 (海拔 385.4 m) 的牛咀水库鸡公头一带, 自南向北, 流经民治、龙华、大浪、坂田、观澜街道及光明街道白花村,

基金项目: 水利部公益性行业科研专项 (201201033)

作者简介: 毛雪慧 (1982—), 女, 工程师, 主要从事水生态修复技术研究工作。E-mail: szmm@163.com

在观澜企坪以下进入东莞市境内,深莞交界断面以上集雨面积 189.3 km²,河长 22.56 km(包括河流主源油松河),河流平均比降 0.212%。观澜河区位及研究断面布设详见图 1~2。



图 1 观澜河区位

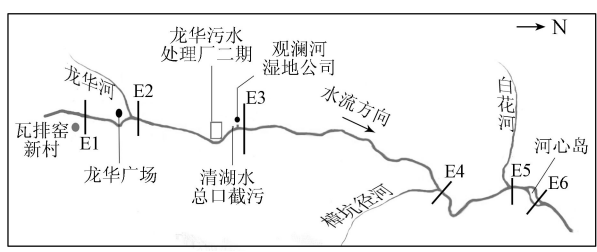


图 2 观澜河研究断面布设示意图

观澜河干流水环境综合整治工程于 2009 年实施,该工程主要措施包括:①沿河两侧建设截流系统,将旱季污水截流到污水处理厂进行处理,解决点源污染;②将雨季初、小雨水截流到初雨调蓄池进行调节处理,扩建龙华和观澜污水处理厂处理截流系统截流的旱季污水,解决面源污染;③清除河道污染底泥,解决内源污染;④对河道和岸坡进行绿化,建设河岸生态廊道;⑤建设沿河补水系统,将污水厂尾水补充到河道,进行生态补水。

2 观澜河健康评价指标体系

根据河流生态健康的评价方法和观澜河生态系统的特征,构建了 3 个层次的观澜河健康评价指标体系。第 1 层次是目标层,反映观澜河健康程度;第 2

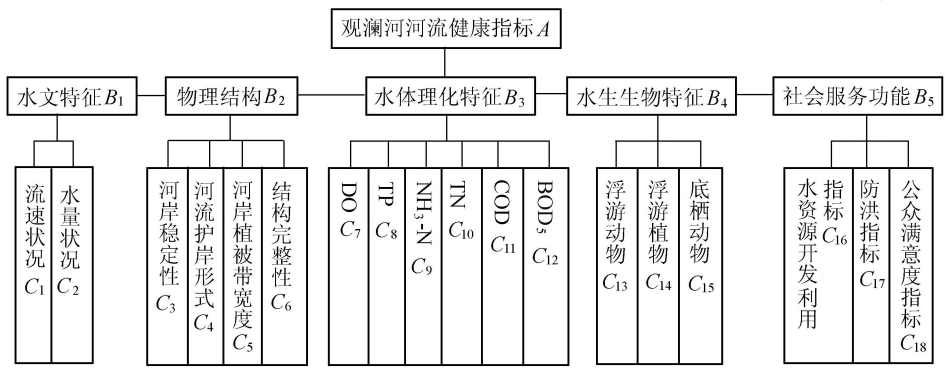


图 3 观澜河健康评价指标体系

层次是准则层,包括水文特征、物理结构、水体理化特征、水生生物特征和社会服务功能指标体系,反映河流生态系统的水文特征、生境特性与环境污染、生态恶化之间的矛盾,同时反映人类活动所带来的河流生态问题;第 3 层次是指标层,反映引发河流健康变化的主要影响因素和河流健康变化趋势^[11]。根据观澜河生态环境特点,共选取 18 个指标进行评价(图 3)。

3 观澜河健康评价方法

3.1 权重的赋予

在既要减少主观随意性、提高权重的客观性和准确性,又要具有灵活性和可操作性的原则下,本文采用层次分析法对观澜河健康评价指标体系各指标进行权重赋值^[12-13]。观澜河健康评价指标体系和各指标权重值分别见图 3 和表 1。

表 1 各指标权重及各层指标间的相对权重

目标层	准则层	准则层权重	指标层	指标层权重	对目标层的权重
观澜河河流健康指标	B ₁	0.126	C ₁	0.5	0.0630
			C ₂	0.5	0.0630
	C ₃		0.112	0.0141	
	C ₄		0.112	0.0141	
	C ₅		0.416	0.0524	
	C ₆		0.360	0.0454	
B ₂	0.126	C ₇	0.167	0.0210	
		C ₈	0.167	0.0210	
		C ₉	0.167	0.0210	
		C ₁₀	0.167	0.0210	
		C ₁₁	0.167	0.0210	
		C ₁₂	0.167	0.0210	
B ₃	0.126	C ₁₃	0.25	0.0682	
		C ₁₄	0.25	0.0682	
		C ₁₅	0.5	0.1365	
B ₄	0.273	C ₁₆	0.333	0.1162	
		C ₁₇	0.333	0.1162	
		C ₁₈	0.334	0.1166	

3.2 评价标准

在查阅大量相关文献的基础上^[14-18],结合观澜河的实际情况,运用专家咨询的方法对观澜河健康评价指标标准进行了分级(表 2)。

表2 观澜河健康评价指标和赋分标准

指标层	水文特征		物理结构			水体理化特征/(mg·L ⁻¹)						水生生物特征	社会服务功能	
	流速 V/(cm·s ⁻¹)	水量状况	河岸稳定性	河流护岸形式	河岸带植被宽度	结构完整性	ρ(DO)	ρ(TP)	ρ(NH ₃ -N)	ρ(TN)	ρ(COD)	ρ(BOD ₅)		生物多样性指数(H值)
100	≥8	水位基本达到两岸	河岸稳定,无明显侵蚀	有植被覆盖的自然土质岸坡	河宽大于1倍	多种植被组合(三层以上),植被覆盖率大于70%,受干扰较少	≥6.0	≤0.1	≤0.5	≤0.5	≤15	≤3	>4	社会服务功能指标分级及计算过程参照水利部《河流健康评估指标、标准与方法(试点工作)1.0版》方法 ^[19]
75	(8,5]	水位覆盖大于75%,裸露浅滩小于25%	河岸稳定,少量区域侵蚀小于20%	近自然的斜坡式生态护岸	河宽0.5~1倍	两个层次植被组合,植被覆盖率大于50%,受到一定干扰	[5.0,6.0)	≤0.2	≤1.0	≤1.0	≤20	≤4	3~4	
50	(5,2)	水位覆盖大于50%,小部分浅滩裸露	河岸较不稳定,中度侵蚀达到20%~50%	亲水平台护岸或无植被的土质岸坡	河宽0.25~0.5倍	一个层次植被组合,植被覆盖率大于30%,有少数外来物种	[3.0,5.0)	≤0.3	≤1.5	≤1.5	≤30	≤6	2~3	
25	(2,1)	水位覆盖小于25%,大部分浅滩裸露	河岸不稳定,极度侵蚀,洪水时风险达到50%~80%	台阶式人工护岸或浆砌石护岸	河宽0.1~0.25倍	一个层次植被组合,植被覆盖度大于20%,外来物种较多	[2.0,3.0)	≤0.4	≤2.0	≤2.0	≤40	≤10	1~2	
0	<1	水量很少,河岸几乎全部裸露	河岸极不稳定,绝大部分区域侵蚀80%~100%	直立式钢筋混凝土	河宽小于0.1倍	河岸植被稀少或基本无植物存在	<2.0	>0.4	>2.0	>2.0	>40	>10	0~1	

3.3 评价模型

河流健康评价分为指标层评分、准则层评分以及河流健康综合评分3个模块:①指标层评分,选取适宜方法采集河流数据,依据各指标评价标准进行评价,获得河流健康评价指标体系中各指标层指标;②准则层评分,将准则层下设指标层指标值相加,并根据准则层类别进行加权;③河流健康综合评分,将5个准则层指标加和,得到河流健康综合指数。观澜河健康评价标准见表3。

表3 观澜河健康评价标准

评价标准	评分				
	100~80	80~60	60~40	40~20	20~0
健康级别	I	II	III	IV	V
健康程度	理想状况	健康	亚健康	不健康	病态

4 评价结果与分析

根据指标标准化计算方法,对各指标进行定量计算。分别对观澜河干流各河段的评价指标给出评分结果。采用观澜河健康评价体系的层次结构及权重进行运算,得到观澜河各河段健康的综合评价结果,如表4和图4~9所示。

4.1 水文特征评价

从空间上看,观澜河从上游依次往下游各个断面的流量和流速呈逐步加大趋势(除整治后的E2

断面外)。造成上游河段水文特征评分结果较低的原因是,观澜河整治工程将支流进行了总口截污,支流污水截入箱涵内后,河流上游段未进行河道补水,而补水工程起点为龙华河支流的华为污水厂(即E2断面下游1000m),致使上游E1断面仅有少量水流(为油松河支流通过上游橡胶坝溢流的部分污水),而E2断面没有水流,河道断面形成了断流。

从时间上看,河流整治前水文特征评分结果为42.5~100,整治后水文特征评分结果为0~78,整治后水量和流速比整治前均有所减小,减小幅度为30%左右。这是由于整治前河道呈自然状态,未受到水利工程的干扰,从上游依次往下游各个断面均有支流河水汇入干流,干流的水量逐渐增多,且下游河道形态多样化,使其下游的流速多样和流量较大。而整治后,支流河水、沿河漏排污水和初期雨水均截流进入沿河箱涵工程中,河道水量仅靠补水工程补水,而观澜河补水工程一期水量仅为30万m³/d,河道补水量不满足河道的生态需水量;观澜河补水工程二期实施后,补水总量为75万m³/d,可以满足河道的生态需水量。

4.2 物理结构评价

从空间上看,观澜河物理结构各断面评分结果大小依次为:E6>E3>E5>E4>E2>E1,说明上游受干扰最大,中游其次,下游受干扰最小。各断面存

表 4 观澜河整治前后各断面各指标评分计算结果

指 标	河流评分结果											
	整治前各断面						整治后各断面					
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E1	E2	E3	E4	E5	E6
C_1	30.0	30.00	50.00	50.0	50.0	50.00	0	0	26.0	28.00	21.50	28.0
C_2	12.5	12.50	25.00	37.5	50.0	50.00	12.5	0	25.0	37.50	50.00	50.0
C_3	5.6	5.60	5.60	2.8	2.8	2.80	11.2	11.20	11.2	11.20	11.20	11.2
C_4	2.8	2.80	11.20	2.8	8.4	11.20	0	0	8.4	0	5.60	11.2
C_5	10.4	10.40	10.40	10.4	10.4	20.80	10.4	10.40	31.2	31.20	31.20	31.2
C_6	9	18.00	27.00	27.0	27.0	36.00	0	9	27	18.00	18.00	36.0
C_7	0	8.35	8.35	0	16.7	8.35	0	0	16.7	8.35	4.18	0
C_8	0	0	0	0	0	0	0	8.35	0	0	0	0
C_9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C_{10}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C_{11}	0	0	0	0	0	0	0	8.35	12.5	8.35	8.35	0
C_{12}	0	0	0	0	0	0	0	8.35	16.7	16.70	8.35	0
C_{13}	12.5	12.50	12.50	12.5	18.8	12.50	12.5	18.80	12.5	12.50	12.50	12.5
C_{14}	12.5	12.50	12.50	12.5	18.8	12.50	12.5	18.80	12.5	12.50	12.50	12.5
C_{15}	0	0	0	0	0	0	37.5	25.00	25.0	25.00	12.50	12.5
C_{16}	30.9	30.90	30.90	30.9	30.9	30.90	30.9	30.90	30.9	30.90	30.90	30.9
C_{17}	33.3	33.30	0	33.3	33.3	33.30	33.3	33.30	33.3	33.30	33.30	33.3
C_{18}	10.0	10.00	13.40	15.4	10.0	11.40	19.4	19.10	28.4	26.90	22.70	21.3

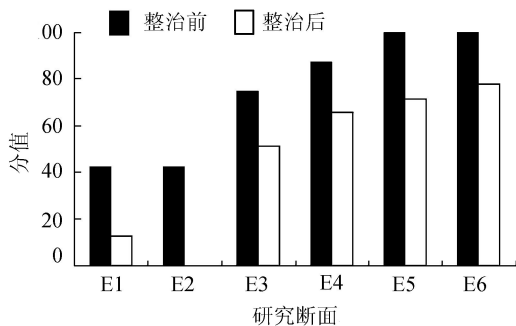


图 4 观澜河整治前后各断面水文特征指标得分

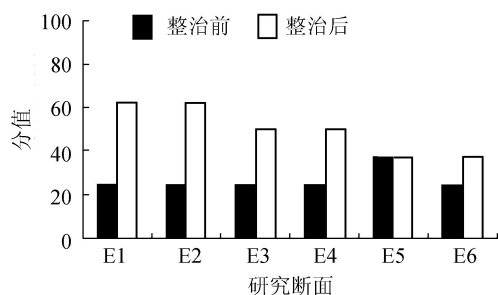


图 7 观澜河整治前后各断面水生生物指标得分

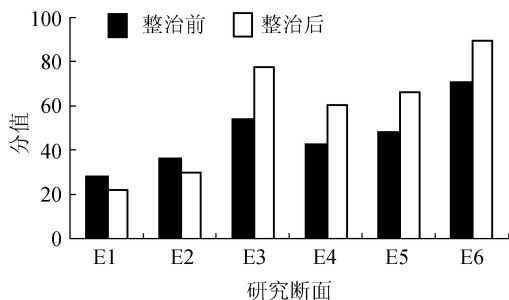


图 5 观澜河整治前后各断面物理结构指标得分

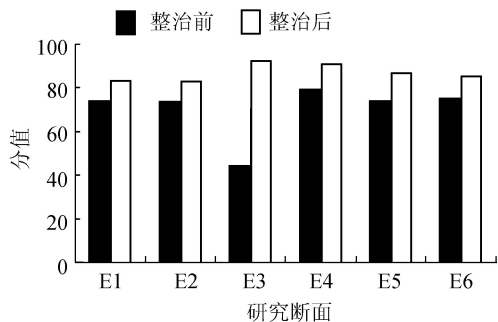


图 8 观澜河整治前后各断面社会服务功能指标得分

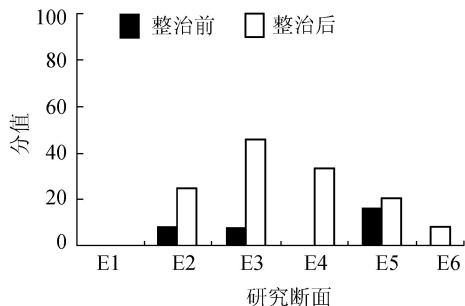


图 6 观澜河整治前后各断面水体理化指标得分

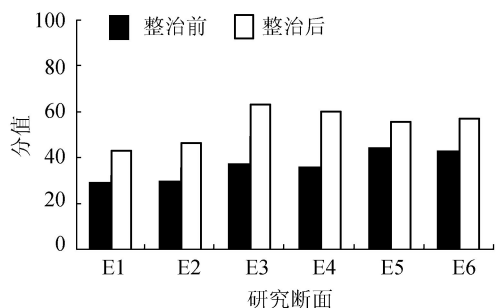


图 9 观澜河整治前后各断面综合评价指标得分

在差异性的原因是,上游采样点为人工堤岸区受人为破坏严重;中下游部分岸坡为土壤植被护坡,存在一定的防洪隐患,且河岸带两旁堆积了许多垃圾,多处工厂和居民楼沿河而建,河边的绿化带杂草丛生,河岸环境差;下游处于城郊处,两岸分布着原始山丘,原始植被茂盛,生态环境较好。

从时间上看,观澜河整治前物理结构特征各断面评分结果为 27.8 ~ 70.8,整治后上游断面物理结构特征评分比整治前有所减小,其余断面均有所增加,增加幅度为 20% 左右。同时,观澜河整治前河岸稳定性受到的干扰相对较大,而整治后河流护岸形式和河岸植被带宽度均受到较大的干扰。观澜河综合整治后,将河道底质进行了清淤,底质从泥质变成了砂质,并对河道护岸进行了改造,将不稳定的浆砌石或泥土堤岸改造成石笼、直立挡墙混凝土、三维土工网植被等多种样式的护岸。同时,拦截支流的河水进入截污箱涵,从而减少了干流河底的淤积量。最后,河岸带两旁新种植了大面积的乔木、灌木和草本植物,使缓冲带的宽度和植被覆盖度均有所增加,随着生境的恢复,野生植物也随着生长起来,植物的多样性增加,从而使物理结构各项指标比整治前有所提高。

4.3 水体理化特征评价

从空间上看,观澜河中游断面水体理化特征评分结果高于上游和下游断面评分结果,说明上游和下游受干扰较大,中游受干扰较小。观澜河清湖湿地公园位于中游 E3 断面附近,该公园将净化后的Ⅲ类水体排入河道中,使该段面水体水质较好。

从时间上看,观澜河整治前水体理化特征评分结果为 0 ~ 16.7,整治后水体理化特征评分结果为 0 ~ 45.92,整治后水体理化特征评分比整治前有所增加,增加幅度为 70% 左右。整治前后各指标层受干扰程度差异较大:整治前 DO 指标受干扰程度较小,COD、BOD₅、NH₃-N、TP、TN 指标均受干扰程度大;整治后 BOD₅、COD 指标受干扰程度较小,DO 和 TP 指标受干扰程度次之,NH₃-N 和 TN 指标受干扰程度大。其原因是,河流整治前水体来源主要为生活污水、工业废水和雨水,水中含有大量的有机污染物,致使水体黑臭,整条河流的水体污染程度严重,且水体处于劣 V 类标准。观澜河整治后,旱季河水的来源大都为污水处理厂的尾水,尾水的水质标准为一级 A 标准,虽然 TN 和 TP 的浓度高,但有机污染物浓度低。同时,暴雨时期河道箱涵的部分污水和支流总口截污橡胶坝的部分河水会溢流进入河道,而这些水体大都为劣 V 类水体,含有大量的有机污染物,进入干流后,会沉入干流的底泥中。整体来

说,河道整治后的补水水质良好,水体透明度、气味和有机污染物改善效果明显。

4.4 水生生物特征评价

从空间上看,观澜河水生生物特征评分结果大小依次为:上游断面大于中游断面大于下游断面,相对而言下游受到的干扰程度大。静止的水体相比流动的水体更有利于水生生物的生存。观澜河上游水体水量较小,流速缓,甚至没有水流,使其生物多样性大于中下游水体。

从时间上看,观澜河整治前水生生物特征评分结果为 25.0 ~ 37.5,整治后水生生物特征评分结果为 37.5 ~ 62.5,整治后水生生物特征评分比整治前有所增加,增加幅度为 50% 左右。整治前后底栖动物多样性受到的干扰程度最大。观澜河整治前,河道内未发现底栖动物的存在,仅发现了藻类和浮游动物,且藻类的多样性单一,可能是由于水体黑臭严重,透明度差,河道底质含有大量的有毒有害污染物,不适合底栖动物的生存,导致观澜河整治之前的生态系统破碎化严重,生物链断缺,水生生物系统不健康,水生生物特征评分结果较低。观澜河整治后,河道内发现了耐污性强的底栖动物和浮游动物存在,还发现了大量的藻类生长,且藻类的多样性比整治前丰富,可能是由于水体 DO 指标的增大以及水体透明度的提高,有利于水体水生生物的生长。

4.5 社会服务功能评价

从空间上看,观澜河社会服务功能评分结果大小依次为:中游断面大于下游断面大于上游断面,但上中下游的干扰程度差异性不大,其差异性主要受到防洪指标和公众满意度的干扰。相比上游断面,中下游断面河道水质较好,河岸带多为植被缓坡护岸,河道两旁设有湿地公园、休闲公园等景观设置,这些条件为人们提供了良好的亲水娱乐环境。

从时间上看,观澜河整治前社会服务功能评分结果为 10.02 ~ 15.36,整治后社会服务功能评分结果为 19.14 ~ 28.46,整治后社会服务功能评分比整治前有所增加,增加幅度为 50% 左右。从公众满意度的调查问题看出,人们对观澜河整治前的意见主要集中在河道内水体黑臭,气味难闻等水质较差方面,公众满意度受到的干扰程度较大。经过综合整治后,观澜河河道堤岸多为混凝土、浆砌石和石笼护岸,抗冲刷能力增强,河道新建设了 2 座调蓄池增加了河道的防涝能力,并且沿河建设了景观绿化带,设置了坐凳、景观灯、休闲平台等河道景观设置,更加方便市民来河道边休闲娱乐。但是,从公众满意度的调查问题看出,人们对观澜河整治仍存在一些意见,如堤岸过于人工化,不方便人们去河道亲水游

玩;河道树木少,不利于人们在河边散步遮阴,河边灌木从中悬挂的垃圾较多,岸坡环境人性化方面较差等等。

4.6 河流健康综合评价

由图9可知,观澜河整治前,上游E1、E2和下游E3、E4断面呈现不健康状态,下游E5、E6断面呈现亚健康状态;整治后,上游E1、E2和下游E5、E6断面呈现亚健康状态,中游E3和E4断面呈现健康状态。整体上来说,观澜河整治前生态系统健康状况为不健康,整治后变为亚健康,说明整治效果明显,但离健康的河流水平还有一些差距。

观澜河经过综合整治后,除河流水文条件变差外,其余指标都向正向发展,河流的河岸带、水体理化指标和水生生物指标均有较大的改善,且恢复效果好。影响观澜河现状生态系统健康状况的主要因素是河流水文指标和水体理化指标,其中又以水量和总氮指标影响最大。这可能与河流支流筑坝导致观澜河自然生境破碎化,河流形态多样性下降有关,也可能与河流水生植被单一对水环境变化反映相对敏感有关。说明由于筑坝、补水等人类活动,满足不了河流的生态需水量,弱化了河流水生植被的恢复,影响了河流的自净能力。

5 结论

基于层次分析方法,以水文、物理、水体理化、水生生物和社会服务功能为准则建立河流健康评估指标体系,对观澜河健康状态进行了评价,评价结果如下。

a. 从指标层计算结果来看,观澜河河流水文指标和水体理化指标值相对较小。

b. 综合评价结果表明,观澜河整治前E1、E2、E3和E4断面均处于不健康状态,E5和E6断面处于亚健康,整体上是处于不健康状态;整治后E1、E2、E5和E6断面均处于亚健康状态,E3和E4断面处于健康状态,整体上处于亚健康状态。说明观澜河经过综合整治后,河流生态系统向正向恢复,但观澜河仍存在一定程度的人为干扰,且超过了生态系统的自调控能力,但可通过人工或自然恢复对其进行改善。

根据以上内容,建议采取一些有针对性的弥补措施确保观澜河生态系统健康的受损情况降到可控范围之内。具体建议如下:上游加强河道补水水量和提高补水水质标准;中游加强排污口管理、构建河道水生植物、构建多样的河流形态,强化自净能力;下游原位修复底泥污染、增设河道泛洪区、完善鸟类

栖息环境。

参考文献:

- [1] 杨荣金,傅伯杰,刘国华,等. 生态系统可持续管理的原理和方法[J]. 生态学杂志,2004,23(3):103-108. (YANG Rongjin, FU Bojie, LIU Guohua, et al. Principles and methods of sustainable management of ecosystem[J]. Chinese Journal of Ecology, 2004, 23(3):103-108. (in Chinese))
- [2] 李国英. 黄河治理的终极目标是“维持黄河健康生命”[J]. 人民黄河,2004,26(1):1-3. (LI Guoying. “Keeping healthy life of the Yellow River”: an ultimate aim of taming the Yellow River[J]. Yellow River, 2004, 26(1):1-3. (in Chinese))
- [3] 刘晓燕,张建中,张原锋. 黄河健康生命的指标体系[J]. 地理学报,2006,61(5):451-460. (LIU Xiaoyan, ZHANG Jianzhong, ZHANG Yuanfeng. Indicators of the healthy Yellow River[J]. Acta Geographica Sinica, 2006, 61(5):451-460. (in Chinese))
- [4] 吴道喜,黄思平. 健康长江指标体系研究[J]. 水利水电快报,2007(12):1-3. (WU Daoxi, HUANG Siping. Indicators of the healthy Changjiang River[J]. Express Water Resources & Hydropower Information, 2007(12):1-3. (in Chinese))
- [5] 林木隆,李向阳,杨明海. 珠江流域河流健康评价指标体系初探[J]. 人民珠江,2006(4):1-3. (LIN Mulong, LI Xiangyang, YANG Minghai. Probe into the index system for evaluating the health of the rivers in the Pearl River Basin[J]. Pearl River, 2006(4):1-3. (in Chinese))
- [6] 任东红. 对海河流域综合规划修订的认识[J]. 海河水利,2006(5):1-3. (REN Donghong. To understand the modification of the Haihe water comprehensive plan[J]. Haihe Water Resources, 2006(5):1-3. (in Chinese))
- [7] 王绍斌,林晨. 从凉水河干流综合整治工程看城市河道的生态设计[J]. 北京水利,2005(1):14-16. (WANG Shaobin, LIN Chen. Rehabilitation project Liangshui River from the perspective of urban river eco-design[J]. Beijing Water Resources, 2005(1):14-16. (in Chinese))
- [8] 喻刚. 河道治理工程中的新思路[J]. 上海水务,2008(1):51-52. (YU Gang. New thinking of the river remediation project[J]. Shanghai Water, 2008(1):51-52. (in Chinese))
- [9] 陈雁,冯效毅,田炯. 内秦淮河水环境整治方案探讨[J]. 江苏环境科技,2000,139(3):34-36. (CHEN Yan, FENG Xiaoyi, TIAN Jiong. Project discussion of water environment control of the internal qinhuai river[J]. Jiangsu Environmental Science and Technology, 2000, 139(3):34-36. (in Chinese))

(下转第98页)

- 预警系统中的研究与运用[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(1):128-131. (ZHANG Yanjun, LUO Wensheng, LEI Alin, et al. Research and application of river oil spill model in advanced warning system of water quality of Three Gorges [J]. Environmental Science and Technology, 2010, 33(1):128-131. (in Chinese))
- [16] TETRA TEC, INC. The environmental fluid dynamics code theory and computation [M]. Washington DC: US EPA, 2007:233-235.
- [17] MELLOR G L, YAMADA T. Development of a turbulence closure-model for geophysical fluid problems[J]. Reviews of Geophysics, 1982, 20(4):851-875.
- [18] YIN Xunqiang, QIAO Fangli, TANG Yongzeng, et al. An ensemble adjustment Kalman filter study for Argo data [J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2010, 28(3):626-635.

- [19] 堵盘军, 胡克林, 孔亚珍, 等. ECOMSED 模式在杭州湾海域流场模拟中的应用[J]. 海洋学报, 2007, 29(1):7-16. (DU Panjun, HU Kelin, KONG Yazhen, et al. Application of ECOMSED model to the simulation of Hangzhou Bay tide current [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2007, 29(1):7-16. (in Chinese))
- [20] BERNTSEN J. Internal pressure errors in sigma-coordinate ocean models [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2002, 19(9):1403-1414.
- [21] 吴晓丹, 宋金明, 李学刚, 等. 海洋溢油油膜厚度影响因素理论模型的构建[J]. 海洋科学, 2010, 34(2):68-74. (WU Xiaodan, SONG Jiming, LI Xuegang, et al. Construction of theoretical model for thickness of marine oil spilled [J]. Marine Sciences, 2010, 34(2):68-74. (in Chinese))

(收稿日期:2014-04-11 编辑:彭桃英)

(上接第 85 页)

- [10] 宁旨文, 朱闻博, 李毅. 昔日“臭水沟”今日清水流 深圳福田河生态景观整治与提升[J]. 风景园林, 2011(4):38-41. (NING Zhiwen, ZHU Wenbo, LI Yi. From a ditch to a new clean river landscape renovation of Shenzhen Futian River [J]. Landscape Projects, 2011(4):38-41. (in Chinese))
- [11] 王铭. 南亚热带大型河流生态系统健康研究:以东江为例[D]. 广州:暨南大学, 2013.
- [12] 海热提, 王文兴. 生态环境评价、规划与管理[M]. 北京:中国环境科学出版社, 2004.
- [13] T L 萨蒂. 层次分析方法:在资源分配、管理和冲突分析中的应用[M]. 北京:煤炭工业出版社, 1986.
- [14] BARBOUR M T, GERRITSEN J, SNYDER B D, et al. Rapid bioassessment protocols for use in streams and wadeable rivers[R]. Washington D. C.: US EPA, 1999.
- [15] GB 3838—2002 地表水环境质量标准[S].
- [16] US EPA. Environmental monitoring and assessment of great river ecosystems (EMAP-GRE) [R]. Washington D. C.: US Environmental Protection Agency, 2006.
- [17] 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.
- [18] 蔡守华, 胡欣. 河流健康的概念及指标体系和评价方法[J]. 水利水电科技进展, 2008, 28(1):23-27. (CAI Shouhua, HU Xin. Concept of river health and index system for its evaluation [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2008, 28(1):23-27. (in Chinese))
- [19] 水利部水资源司. 河流健康评估指标、标准与方法(试点工作)[R]. 北京:水利部, 2010.

(收稿日期:2014-01-23 编辑:高渭文)

(上接第 34 页)

- [7] KATHLEEN G R, PHILIP J. Changes in the value of ecosystem services along a rural-urban gradient: a case study of Greater Manchester, UK [J]. Landscape and Urban Planning, 2013, 109:117-127.
- [8] 钟春欣, 张玮. 基于河道治理的生态修复[J]. 水利水电科技进展, 2004, 24(3):12-14. (ZHONG Chunxin, ZHANG Wei. Ecological restoration based on the river regulation [J]. Advances in Science and Technology of Water Resonres, 2004, 24(3):12-14. (in Chinese))
- [9] MARK M P. A natural approach to watershed planning, restoration and management [J]. Water Science Technology, 1999, 39(12):347-352.
- [10] 董哲仁. 美国基西米河生态恢复工程的启示[J]. 水利水电技术, 2004, 35(9):8-12. (DONG Zheren. The enlightenment from the Kissimmee River ecological restoration project [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2004, 35(9):8-12. (in Chinese))

(收稿日期:2014-12-01 编辑:彭桃英)

