

河流健康评价的主评指标筛选

冯 彦, 何大明, 杨丽萍

(云南大学亚洲国际河流中心, 云南省国际河流与跨境生态安全重点实验室, 昆明 650223)

摘要: 河流健康是近年来探讨水资源问题的一个热点, 其评价指标体系正成为河流管理的目标。为了筛选出一些基本的、易于量化的主要评价指标来揭示河流健康基本状况和变化趋势, 通过对 1972~2010 年约 150 篇相关文献、45 个河流健康评价指标体系 902 项指标的整理和归纳, 应用统计、层次和相关性分析法, 确定各指标的被采纳率, 并同时综合考虑指标的重要性、普遍性、可量化性和易获得性, 筛选出揭示河流生境物理、水环境、生物和水资源利用 4 类特征的主要指标。结果表明, 有以下 8 个指标可作为河流健康的主评指标: 河岸植被覆盖率、河流连通性、湿地保留率、径流量变化率、水质达标率、鱼类生物完整性指数、水资源利用率和流域天然植被覆盖率。

关键词: 河流健康; 评价; 指标体系; 主评指标

文章编号: 1000-0585(2012)03-0389-10

1 引言

近 20 多年来, 随着河流健康概念的提出、内涵的不断清晰和完善, 使得河流健康问题已经成为探讨水生生态系统可再生性维持、生物多样性维护和与之相应的河流生态恢复、保护和管理的一个热点。利用建立的河流健康评价指标体系, 认识河流现状、预测变化趋势, 确定更为有效和可持续性的河流管理目标而成为社会、科学界和政府关注对象。目前, 一些国家已经或准备将维护和实现河流健康作为河流管理的目标。

河流健康, 有学者认为是源于美国“1972 年联邦水污染控制法令修正案”(现称“清洁水法令”)之“恢复和维护国家各类水体的化学、物理和生物完整性”目标的提出^[1,2], 自此又相继产生了诸如: 河流状况、河流生态质量、河流生态状况、河流生态完整性、河流生态系统健康、河流系统健康、河流生境状况等概念, 以及相应的评价方法或评价指标体系, 其中既有政府或政府部门和研究机构制定的, 如: 美国联邦环保署在快速生物评估草案(RBP)中以鱼、底栖大型无脊椎动物和附生生物作为评价对象的小型河流和溪流生境评价方法(HAScore)^[3]和生境质量评价指数(QHEI)^[4]; 欧盟为保护其所有地表水体和改善水生生态系统状况,《欧盟 2000 水法令》确定了环境质量标准之河流生态状况类型质量评价^[5]; 澳大利亚从物理化学、生境等层面建立的河流评价系统^[6]; 英国淡水生态研究院为评价河流生态质量而开发的河流无脊椎动物预测与分类模拟系统(RIV-PACS)^[7]; 德国联邦水事务工作小组开发的、分别用于大型河流和中小型河流的栖息地分类与评价方法^[8]等。也有学者提出的, 如: Karr 等利用对河流状况反应敏感的生物群

收稿日期: 2011-09-15; 修订日期: 2011-12-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(40971091、U0936602); 国家科技支撑计划课题(2011BAC09B07)

作者简介: 冯彦(1967-), 女, 四川省内江市人, 研究员, 主要从事水资源利用与管理、国际河流研究。

E-mail: fengyan@ynu.edu.cn

落(如鱼)的特征值对水生生态系统质量进行评价的生物完整性指数(IBM)^[2~9];Ladson等利用河流状况指数(ISC)^[10]对澳大利亚维多利亚州4条河流80多个河段的河流状况进行了评价;Ferreira等在伊比利亚河流上提出多尺度植物参数法^[11]评价河流的生物完整性;Brierley等基于河流地貌过程与生态水文和河流系统变化等间的密切关系提出生态水文评价法^[12],从流域、河段和水文单元3个尺度对河流状况进行评价;Tiner在美国特纳华州Nanticoke河上利用遥感指数法^[13]评价流域自然生境总体状况;和Scardi等基于神经网络将鱼类组成与环境因子进行关联分析,开发出河流生态质量评价法^[14]等。2005年以来,国内产生了大量的河流健康研究成果,从对国外河流健康评估方法的介绍与对比^[15,16],河流健康概念与内涵的厘定^[17,18]到各种评价指标体系构建^[19~31],包括:刘昌明等提出将环境流的维持作为河流健康的标准和黄河健康的指标之一是维持平滩流量;耿雷华等从河流5大功能出发建立起河流健康评价指标,并将其应用于澜沧江和怒江;蔡其华在阐述健康长江的基础上,提出了健康长江评价指标体系;金占伟等提出了健康珠江评价指标体系;李国英在提出黄河治理的终极目标的同时,提出了健康黄河的4个标准;王煜基于系统有序度熵的方法将其提出的河流健康指数进行数学表达,并应用于黄河;高永胜等通过探讨河流健康生命的内涵,构建了评价指标体系并对相关指标进行权重赋值,等等。基于以上研究,将河流健康的内涵基本确定为:河流系统的组成及结构完整、功能完备,具有维持自身和更新的能力,能够发挥正常的生态环境效益并满足人类社会发展的合理需求。

在此基础上,应用参照系法和模型模拟法对河流健康进行评价,建立起众多的河流健康评价指标体系。但面对构建于不同尺度、不同评价对象的众多评价指标体系,公众、管理者甚至学者不免迷茫,如此庞杂的体系,如何才能被充分的理解与应用,是否能找到一些基本的、易于理解和观测的主要指标来体现河流健康大体状况,诸如用体温、体重与血色素等值可以大概描述人体基本健康水平一样。据此目的,作者查阅了1972~2010年150余篇相关研究成果、国家标准和法规等,梳理出包含具体参评指标的国内外河流健康评价体系45个共有参评指标902项,其中包括仅含有4个指标的评价标准(李国英的黄河河流健康标准^[24]),也有含67项指标的体系(英国的河流生境调查^[32])。依据各指标所表达的流域特征,将其分为4类:河流生境物理指标、水环境指标、生物指标和人类活动及用水指标。计算出各个指标在45评价系统中的被重复采用次数,并在结合指标所揭示的流域特征基础上,筛选出具有一定采用率、能综合体现流域各方面特征的指标,作为河流健康评价的初选主要指标。通过对初选主要指标间的相关性分析,进行适当合并、归类,最终获得河流健康评价的主评指标,以期能够指示河流健康的基本状况。

2 河流健康评价体系的指标特征

2.1 河流生境物理指标

此类指标主要用于表示流域、河道、河岸、河床及底质、河滨带等物理特征,45个评价系统共有参评指标422项。通过对各指标采用次数的统计,得出:在去除重复指标后,实际应用指标77个,其中有21个(占该类指标的27%)指标没有出现重复使用;平均1个指标被5~6个系统认同使用,表明存在一些指标能够得到诸多评价体系的认同;如果用指标的采用率来表示指标的认同度,仅有2个指标,即河岸植被覆盖率和底质结构的采用率超过50%(采用次数超过23次),而采用率超过25%(采用次数超过12次)和

20%（采用次数超过 9 次）的指标分别为 7 个和 15 个（表 1）；从各指标所涵盖的评价范围，认为当指标采用达到 25%时的 9 个指标基本能够体现流域的主要物理特征，如底质结构与河床稳定性反应了河床状况、河岸植被覆盖率与河道遮荫率反应了河岸和河滨带状况、河流连通性与生境数量和质量反应了河流各类生境的状态；为此，可将这 9 个指标作为河流健康评价之河流生境物理特征的初选主要评价指标。

表 1 河流生境物理指标被河流健康评价系统的采用情况

Tah 1 Situation on the physical index for river habitat adopted by river health evaluation systems

指标	采用次数	指标	采用次数	指标	采用次数	指标	采用次数
河岸植被覆盖率	29	流域天然植被覆盖率	12	河谷形态	10	木质碎片量	7
底质结构	26	湿地保留率	12	河道稳定性	9	年平均降水	7
生境数量与质量	20	栖息地状况	11	蜿蜒度	9	土壤侵蚀	7
河岸稳定性	17	生境单元间连通性	11	距河源距离	9	地质结构	7
河床稳定性	16	海拔	10	平均气温	9	河道宽	6
河流连通性	12	比降	10	水面宽变化	8	沙梗/沙坝分布	6
河道遮荫率	12	流域面积	10	滩槽比	8	河长	6

2.2 水环境指标

该类指标包括水文、泥沙和水质要素三类，主要用于反映河流水环境总体状况，45 个评价系统共有参评指标 251 项。同样通过对各指标在各系统中的采用次数的统计，分析各指标被采用情况及其所揭示的水环境特征，得出：除去重复后实际采用指标 57 个，其中有 18 个指标（占指标数的近 32%）为单次使用，平均 1 个指标被 4~5 个评价系统认同，表明水环境指标的选取较生境物理特征指标分散；从指标的被采用情况看，57 个指标中被采用率超过 50%的指标仅有 1 个，超过 25%和 20%的分别有 5 个和 9 个指标，表明用于评价水环境状况的指标集中认同度略小（表 2）；分析以上具有一定认同度的评价指标所揭示的水环境特征，认为拥有 20%以上被采用率的 9 个指标加上溶解氧（采用率达 16%）能反映径流、输沙、生态用水和水质 4 个方面的水环境情况，为此，可将以上 10 个指标作为河流健康评价之水环境状况主要评价指标的初选范围。

表 2 水环境指标被河流健康评价系统的采用情况

Tah 2 The water environmental index adopted by river health evaluation systems

指标	采用次数	指标	采用次数	指标	采用次数
径流量变化率	25	径流量	10	水能蕴藏量	5
盐度/导电率	16	生态需水/基流量保证率	10	总磷浓度	5
水质达标率	15	混浊度	8	断流机率	5
水温	13	溶解氧	7	水量变化频率	5
水深变化	12	流速	7	水体营养化指数	5
输沙变化率	11	碱度	6	5 日生物耗氧量	4
pH 值	11	平滩流量满足率	6	总氮	4

2.3 生物指标

在 45 个河流健康评价指标体系中，选择流域生物多样性、鱼、大型无脊椎动物、水

生植被及鸟 5 类生物作为参评指标共 116 项。通过对重复指标合并、指标被采用率的统计与分析,发现:剔除重复后的参评指标 50 个,其中就有 17 个指标(约占 34%)为单次使用,平均 1 个指标仅能被 2~3 个系统认可,表明各个指标的被集中关注度较为分散(表 3),且均低于生境物理指标和水环境指标的认同度;从各评价体系所采用的生物指标类型看,50 个参评指标中各项鱼类指标共 18 个,占 36%,其次是水生植物类指标共 13 个,占 26%,第三是大型无脊椎动物类指标共 11 个,占 22%,三者之和共计参评指标 42 个,占总数的 83%,表明在河流健康评价指标体系中鱼、无脊椎动物和水生植物成为关注对象,特别是鱼;从个体指标在评价体系中的认同度看(表 3),最高的 1 个指标采用率仅为 18%(采用次数 8 次),其次有 2 个和 3 个指标的采用率超过 10%(采用次数达 5 次)和 8%(采用次数达 4 次),其余多数指标的重复采用率较低,但所占比重较大(达到 74%),也表明各指标的被认同度较低或分散;但从采用次数 2 次以上指标的评价对象上看,人们所关注的对象相对集中于鱼和大型无脊椎动物 2 类水生动物,为此,在河流健康评价的生物主评指标初选方案可确定 2 个,其一是包括了流域内生物特征、被采用率超过 8%的 6 个指标;其二是为人们关注的以上两种水生动物综合指标。

表 3 生物指标被河流健康评价系统的采用情况
Tah 3 Biotic index adopted by river health evaluation systems

指标	采用次数	指标	采用次数	指标	采用次数
珍稀水生动物存活状况	8	土著鱼种数	3	鱼优势度指数	3
流域生物多样性指数	5	鱼生物完整性指数	3	敏感性无脊椎动物个体比重	3
大型无脊椎动物种数	5	个体异常鱼比重	3	耐受性无脊椎动物个体比重	3
鱼种数	4	耐受性鱼数量	3	无脊椎动物优势度	3
外来鱼种数量	4	杂食性鱼比重	3	河流生态系统完整性指数	3
水生植物种类丰富度	4	昆虫食性鱼比重	3	水生植物关键种组成	3
敏感性鱼种数量	3	肉食性鱼比重	3	水生植物优势种组成	3

2.4 人类活动及用水指标

在 45 个指标体系中共梳理出与人类活动及其水资源利用情况的相关指标 113 项。在对同一体系中因尺度差异而采用相同指标(如流域土地利用与区域土地利用)、不同指标揭示同一目标(城市用地比例、集约农业区比例、非集约农业区比例所揭示的土地利用特征)等进行相应指标地剔除与合并,获得有效指标 98 项,在此基础上,统计与分析指标采用特征,发现:去除重复后的实际参评指标 30 个,其中 10 个指标(占 1/3)为单次使用,总体上平均 1 个指标能够被 3~4 个评价体系认可,表明此类指标集中关注度较为分散,总体上较上述的生境物理和水环境指标低、较生物指标高;从各指标的被采用率上看(表 4),有 5 个指标的重复使用率超过 15%(采用次数超过 6 次),其中 3 个超过 20%,其余指标的被采用率均低于 9%,表明此类指标中存在集中认同度相对较高的指标;分析有一定被采用率的指标所涉及的评价内容,认为被采用率超过 15%的 5 个指标总体上能够揭示人类活动对河流系统的影响范围及程度,在河流健康评价中在考虑人类活动的影响或水资源对人类经济社会的支撑能力时可用这 5 个指标作为初选主评指标。

表 4 人类活动及用水指标被河流健康评价系统的采用情况

Tah 4 Index of human activities and water utilization adopted by river health evaluation systems

指标	采用次数	指标	采用次数	指标	采用次数
土地利用	11	灌溉保证率	4	城市化面积	3
防洪工程完善率	11	人类活动影响程度	4	景观价值指数	3
人工设施造成的生境破碎化	10	大坝影响河段长度指数	4	单方水 GDP	3
城镇供水保证率	8	通航保证率	3	人口密度	2
水资源利用率	7	生活/生产/生态用水比例	3	调节能力指数	2

3 各类指标间相关性分析

通过对各类指标的被采用率和其所揭示的河流生境状况、支持功能特征的分析，可初步选出均具有较高关注度、展示河流各方面状况的 30 /26 个指标（表 5）作为河流健康评价的初选主要评价指标。但通过仔细观察仍可发现：其间的一些指标不仅难以简单测定或描述，而且还有一些指标间存在交叉和关联，如河岸植被覆盖率、流域天然植被覆盖率和河道遮荫率之间，径流量、径流变化率、水深变化与生态需水保证率之间等，为此，有必要通过其间的相关性分析，进行进一步聚类以便挖掘出河流健康之主评指标，以期使之不仅大体上能满足学者、评价者应用的需要，而且能满足公众和管理者的日常观察和使用。

表 5 河流健康评价初选主评指标

Tah 5 Major evaluation index in support of river health evaluation

河流生境物理指标	水环境指标	生物指标		人类活动及用水指标
河岸植被覆盖率	径流量变化率	珍稀水生动物存活状况	鱼类生物完整性指数	土地利用
底质结构	水质达标率	流域生物多样性指数	无脊椎动物生物完整性指数	防洪工程完善率
生境数量与质量	盐度/ 导电率	大型无脊椎动物种数		人工设施造成的生境破碎化
河岸稳定性	水温	鱼类个体总数		城镇供水保证率
河床稳定性	水深变化	外来鱼种数量		水资源利用率
河流连通性	输沙变化率	水生植物种类多样性		
河道遮荫率	pH 值			
流域天然植被覆盖率	径流量			
湿地保留率	生态需水保证率			
	溶解氧			

3. 1 河流生境物理指标间的相关性分析

分析河流生境状况 9 个指标间相关关系及其揭示的河流生境特征，发现：（1）河岸植被覆盖率、流域天然植被覆盖率和河道遮荫率之间存在明显的内容和范围重叠，可考虑在此 3 个指标中选取 1 个入围主评指标的遴选。依据 Ladson 等^[10]的研究结果：河岸带是提供陆地栖息地和遮蔽区、调节源于流域的泥沙和营养物输入、影响河岸稳定性、营造水生生物小生境与湿地等维系河流系统功能的主要区域，以及 Tiner^[13]认为：河岸带植被过渡区具有有效吸收污染物而改善水体水质、维持对相当数量鱼类来说极为关键的溪流水温、有效沉降泥沙的主要作用，由此将河岸植被覆盖率作为主评指标之一。（2）底质结

构、河流生境数量与质量、河岸稳定性、河床稳定性和湿地保留率 5 个指标实质上是从各个角度揭示河流系统的生境维持状况,其中河流生境数量与质量可以涵盖其余 4 个指标,但是它的测定却需要 4 个指标甚至更多的指标来体现,为此,可首先考虑将其舍弃。而剩余指标中的底质结构与河床稳定性密切相关,河床稳定了就基本稳定了底质结构,河岸稳定性则与前面的河岸植被覆盖情况密切相关,如果河岸植被覆盖情况不产生大的变化,河岸稳定性不会产生大问题,加之河床和河岸稳定性与河流连通性以及水环境指标中的径流变化率、径流量和输沙变化率密切相关,为此保留河流连通性作为一个主评指标。(3) 鉴于湿地在维持河流生态系统及水资源方面的重要性,将湿地保留率也作为主评指标之一。通过以上的河流生境物理指标间相关性和重要性的分析,将河岸植被覆盖率、河流连通性和湿地保留率 3 个指标确定为评价河流健康之生境状况的主要参评指标。

3.2 水环境指标间的相关性分析

分析初选出的、用于揭示河流水环境的 10 个指标间相关关系,发现:(1) 用于体现河流水文情势特征的指标有 5 个:径流变化率、水深变化、输沙变化率、径流量和生态需水保证率,首先,径流量是计算径流变化率的基础,获得了径流信息,就可以揭示径流量变化率特征和水文情势变化趋势,为此,径流量变化率和径流量可合二为一;其次,在技术水平上,通过确定径流变化率和用水类指标内的水资源利用率的阈值就可保护河流生态需水;其三,径流变化可直接导致水深的变化,以及尽管河流输沙变化及其引起的河床形态变化都将决定着生态系统的健康^[33],但径流变化与河流连通性又直接影响河流输沙特征的变化。同时有研究表明:水流的年内和年际变化是维持所有本土生物多样性和水生生态系统完整性的关键^[34];流量与发生时间是河流供水、水质和影响河流物种分布与丰富度和流水系统生态完整性的“关键变量”^[35];为此,最终在以上 5 个指标中可确定径流量变化率作为评价河流水文情势的主评指标。(2) 5 个初选指标:盐度、水温、pH 值、溶解氧和水质达标率用于揭示河流水体水质状况,水质达标率远远涵盖了其余 4 个指标所揭示的水质状况,可以直接揭示河流水质的总体状况,但它难于直接揭示与其他指标之间的关联度;而盐度等 4 指标虽然无法确定河流水质的达标率,但很大程度上它们可以直接应用于河流保护目标的确定与监督管理,如:水温的变异影响水体溶解氧及悬浮物的数量,从而影响水生物的生命周期、繁衍生息和人类生活及工农业生产用水^[36];水温与水化学条件对浮游植物群落的群落组成的影响具有更为重要的作用^[37];溶解氧的高低与大型无脊椎动物数量密切相关^[4]等,为此,这 4 个指标可以直接与生物、用水、土地利用、水文及生境等指标相关联,从而判定河流健康之水质状况。综上结果,水环境状况的主评指标可确定为径流量变化率 and 水质达标率,或者径流变化率、盐度、水温、pH 值、溶解氧 5 个指标。

3.3 生物指标间的相关性分析

根据对生物指标在相关指标体系中的被采用率情况及其指标所涉及的评价内容,存在 2 个方案用于生物主评指标的筛选,其一根据珍稀水生动物存活状况、流域生物多样性指数、大型无脊椎动物种数等 6 个指标,其二是基于 Karr^[2,9]提出的“生物完整性指数(ABI)”而建立的鱼类和大型无脊椎动物的生物完整性指数(F-ABI 和 B-ABI),分析其相关关系,认为:(1) 珍稀水生动物,特别是珍稀鱼类是众多流域环境保护的重点目标,而受到广泛的关注,但现实情况却是珍稀动物得到保护未必能够实现整个系统的良好维持,而应该实施流域指示种的保护。因为存在此争议,为此建议另选更为合适的参评指标

作为主评指标。(2) 流域生物多样性指数, 此概念应包括陆生和水生生物的综合评价, 难以用几个主评因子予以表示, 建议不采用此指标。(3) 因河岸和水生植物种类组成可成为水质和河流状况的指示因子^[38], 为此用水生植被种类多样性作为评价河流状况的指标之一, 具有一定的认同度, 但考虑到在河流生境物理指标中已将河岸植被覆盖率和湿地保留率作为主评指标, 且该两项指标与本指标间存在一定交叉, 为此不考虑将其纳入主评指标。(4) 大型无脊椎动物种数、鱼的个体总数和外来鱼种数量实际上就是 IBI 中的指标, 为此可与鱼和大型无脊椎动物完整性指数进行统筹考虑。而大型无脊椎动物较鱼在我国本底研究更为缺乏, 为此, 确定用鱼的生物完整性指数作为河流健康评价的生物主评指标。

IBI 共有 11 个指标, 在工作中可针对流域的具体情况选择其中的几个指标确定其生物完整性指数状况。有研究表明, 其中的种类数量的多少是水生生态系统最为可靠的指标之一; 敏感种则是是当地环境质量的一个强信号; 人类活动引起较大的水流变化会导致本地种种和数量减少、较外来种呈现较低的丰富比率的发展趋势、以及群落结构简化^[37, 39]等, 为此在实际工作中可选择 IBI 中的几个指标, 如鱼类个体总数、外来鱼种数量、敏感种丰度等来确定 IBI 值。

3.4 人类活动及用水指标间的相关性分析

对初选出的土地利用、防洪工程完善率、人工设施造成的生境破碎化、城镇供水保证率、水资源利用率 5 个指标进行相关关系分析, 认为: (1) 在土地利用、防洪工程完善率和人工设施造成的生境破碎化之间, 首先防洪工程属于人工设施的一部分, 其次防洪工程总体上会引起防洪堤河段生境的变化, 其三是防洪工程仅集中于沿河两岸有居民点分布的区域, 其四防洪工程完善率和人工设施造成的生境破碎化两者在评价内容上存在重叠, 但在结果上一个阐明的是正效应, 而另一个却是负效应; 而土地利用指标则揭示了人类活动对流域整体的影响, 包括了植被覆盖、农业用地、居民点范围、城市化、道路建设等, 如果有高精度信息资料保证的情况下, 可做详细分析, 包括生境破碎化问题、点面源污染的分布等, 同时, 依据相关研究: 河道内生物多样性受土地利用方式影响很大^[40]; 流域内农业用地超过 50%、城市化区域达到 10%~20% 时, 河道内生境质量开始下降^[13], 为此, 将土地利用作为河流健康评价之人类活动状况的主要指标。但土地利用是很宽泛的概念, 通常情况下用植被覆盖率、农业用地比例、城镇居民点和工矿用地比例等表示, 而且生境物理初选指标中的河岸植被覆盖率和流域天然植被覆盖率均在一定程度上体现土地利用特征, 考虑到河岸植被覆盖率已经被确定为主评指标, 要进一步揭示流域内土地利用总体状况的话, 可以将流域天然植被覆盖率作为具体指标, 用于替代概念宽泛的土地利用指标, 而作为主评指标。(2) 在城镇供水保证率和水资源利用率之间, 水资源利用率包涵了城镇供水保证率, 且城镇供水保证率没有考虑农村地区的生产和生活用水, 为此将水资源利用率作为河流健康评价的主评指标之一。

4 结论与讨论

基于河流健康备受关注及其评价指标体系的复杂性, 作者认为现实中存在一些可揭示河流健康基本状况的主要指标, 本文应用统计、层次和相关分析法, 得到以下主要结果:

(1) 从 45 个河流健康评价指标体系中筛选出: 河流生境物理、水环境、生物与水利利用 4 个类型共 8 个主评指标 (表 6)。

表 6 河流健康之主评指标
Tab 6 Major evaluated index of river health

河流生境物理指标	水环境指标	生物指标	人类活动及用水指标
河岸植被覆盖率	径流量变化率	鱼类生物完整性指数	流域天然植被覆盖率
河流连通性	水质达标率		水资源利用率
湿地保留率			

(2) 总体上 8 个主评指标，能够揭示河流健康基本状况及其变化趋势；除鱼类生物完整性指数专业性较高外，其余指标均较易获得和量化，实用性强；无论对科学研究者、管理者，还是公众均较易理解、应用和观测。因此，本研究成果不仅开拓了河流健康研究和评价新视角，而且能够推广应用于河流管理部门和公众参加河流监督管理的工作之中。

本文集中关注了河流健康评价的主要指标，而对指标之间权重关系、各指标的阈值范围以及在具体流域的适应性应用尚未涉及，作者在研究过程中已注意到这些问题的重要性，并已成为后期研究的主要方向和内容。

本文在文献的整理与分析过程中发现：(1) 河流/河流生态系统健康评价指标体系远超过 45 个，本文着重选择了受人们关注较多的指标体系纳入本主评指标的筛选，无法做到应有尽有，这必然会影响统计结果，但不会对筛选结果造成根本性错误。(2) 本文将一些体系的社会经济价值或支撑功能等指标，与另外一些系统的人类扰动及影响指标等进行合并为人类活动及其用水类指标，以综合体现水资源利用状况。(3) 对于水资源利用与河流健康间关系，文献中存在着分歧：水资源利用是健康河流满基本功能^[17, 41, 42]，或者是对干扰河流健康干扰^[3, 38]，而分别纳入评价体系。由此造成“人类活动及用水”指标认同度较低，甚至相同指标产生对立效应问题，本文则采取选用中性指标的方式解决。

参考文献：

[1] 王好芳,白斌,白晓龙. 河流健康的影响因素及评价思路. 水电能源科学, 2007, 25(5):12~14.

[2] Karr J R. Defining and measuring river health. Freshwater Biology, 1999, 41:221~234.

[3] Barbour M, Gerritsen J, Snyder B ,et al. Rapid bio-assessment protocols for use in streams and Wadeable rivers: Periphyton, Benthic Macro-invertebrates, and Fish (2nd edition). EPA 841-B-99-002. <http://www.epa.gov/OWOW/monitoring/techmon.html>,1999.

[4] Beyene A, Addis T, Kifle D ,et al. Comparative study of diatoms and macro-invertebrates as indicators of severe water pollution: case study of the Kebena and Akaki in Addis Ababa, Ethiopia. Ecological Indicators, 2009, 9: 381~392.

[5] European Community. Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council. Official Journal of the European Communities, 2000. 1~72.

[6] Parsons M, Ransom G, Thoms M, et al. Australian river assessment system: AusRivAS physical and chemical assessment module. Canberra: Environmental Australia, 2001. 1~47.

[7] Clarke R T, Wright J F, Furse M T. RIVPACS models for predicting the expected macro-invertebrate fauna and assessing the ecological quality of rivers. Ecological Modeling, 2003, 160: 219~233.

[8] Kamp U, Binder W, Holzl K. River habitat monitoring and assessment in Germany. Environment Monitor Assessment, 2007, 127:209~226.

[9] Karr J R. Assessment of biotic integrity using fish communities. Fisheries, 1981, 6:21~37.

[10] Ladson A R, White L J, Doolan J A, et al. Development and testing of an index of stream condition for waterway management in Australia. Freshwater Biology, 1999, 41:453~468.

- [11] Fryirs K. Guiding principles for assessing geomorphic river condition: Application of a framework in the Bega catchment, South Coast, New South Wales, Australia. *Catena*, 2003, 53:17~52.
- [12] Brierley G, Reid H, Fryirs K, *et al.* What are we monitoring and why? using geomorphic principles to frame eco-hydrological assessments of river condition. *Science of the Total Environment*, 2010, 408: 2025~2033.
- [13] Tiner RW. Remotely-sensed indicators for monitoring the general condition of "natural habitat" in watersheds: An application for Delaware's Nanticoke River watershed. *Ecological Indicators*, 2004, 4:227~243.
- [14] Scardi M, Cataudella S, Dato P D, *et al.* An expert system based on fish assemblages for evaluating the ecological quality of streams and rivers. *Ecological Informatics*, 2008, 3:55~63.
- [15] 董哲仁. 国外河流健康评估技术. *水利水电技术*, 2005, 36(11):15~19.
- [16] 刘恒,涂敏. 对国外河流健康问题的初步认识. *中国水利*, 2005,(4):19~22.
- [17] 赵彦伟,杨志峰. 河流健康:概念、评价方法与方向. *地理科学*, 2005, 25(1): 119~124.
- [18] 吴阿娜,杨凯,车越,等. 河流健康状况的表征及其评价. *水科学进展*, 2005,16(4):602~607.
- [19] 刘昌明,刘晓燕. 河流健康理论初探. *地理学报*, 2008, 63(7):683~692.
- [20] 耿雷华,刘恒,钟华平,等. 健康河流的评价指标和评价标准. *水利学报*, 2006,37(3):253~258.
- [21] 耿雷华,杜霞,刘恒,等. 纵向岭谷怒江健康流量阈值研究. *人民长江*, 2008,39(19):42~44.
- [22] 蔡其华. 维护健康长江促进人水和谐. *人民长江*, 2005, 36 (3) : 1~3.
- [23] 金占伟,李向阳,林木隆,等. 健康珠江评价指标体系研究. *人民珠江*, 2009, (1): 20~22.
- [24] 李国英. 黄河治理的终极目标是"维持黄河健康生命". *中国水利*, 2004, (1):5~7.
- [25] 蔡守华,胡欣. 河流健康的概念及指标体系和评价方法. *水利水电科技进展*, 2008,28(1): 23~26.
- [26] 万咸涛,张新宁. 长江流域及西南诸河天然水质特征与河流健康. *人民长江*, 2008, 39(6):8~10.
- [27] 王煜. 河流健康因子选择与综合评判研究. *人民黄河*, 2006, 28(11):7~8.
- [28] 高永胜,王浩,王芳. 河流健康生命评价指标体系的构建. *水科学进展*, 2007, 18(2):252~257.
- [29] 涂敏. 基于水功能区水质达标率的河流健康评价方法. *人民长江*, 2008,39(23):130~133.
- [30] 李春晖,郑小康,崔崑,等. 衡水湖流域生态系统健康评价. *地理研究*,2008,27(3):565~573.
- [31] 赵彦伟,杨志峰. 城市河流生态系统健康评价初探. *水科学进展*, 2005, 16(3):349~355.
- [32] Parsons M, Thoms M, Norris R. Australian river assessment system: review of physical river assessment methods-a biological perspective. Canberra: Environmental Australia, 2000. 1~65.
- [33] 何用,李义天,吴道喜,等. 水沙过程与河流健康. *水利学报*, 2006, 37(11):1354~1359.
- [34] Richter B D, Baumgartner J V, Wigington R, *et al.* How much water does a river need? *Freshwater Biology*, 1997, 37: 231~249.
- [35] Poff N L, Allan J D, Bain M B. *et al.* The natural flow regime: A paradigm for river conservation and restoration. *Bio Science*, 1997, 47(11): 769~784.
- [36] 蒋卫国,潘英姿,侯鹏,等. 洞庭湖区湿地生态系统健康综合评价. *地理研究*, 2009,28(6):1665~1672.
- [37] Lloyd N, Quinn G, Thoms M, *et al.* Does flow modification cause geomorphological and ecological response in rivers? A literature review from an Australian perspective (Technical Report 1/2004). CRC for Freshwater Ecology, 2003:10~45.
- [38] Ferreira M T, Rodriguez-Gonzalez P M, Aguiar F C, *et al.* Assessing biotic integrity in Iberian rivers: Development of a multimetric plant index. *Ecological Indicators*, 2005, 5: 137~149.
- [39] Fore L S, Karr J R, Wisseman R W. Assessing invertebrate responses to human activities: Evaluating alternative approaches. *Journal of the North American Benthological Society*, 1996, 15(2):212~231.
- [40] Malmqvist B, Rundle S. Threats to the running water ecosystems of the world. *Environmental Conservation*, 2002, 29(2):134~153.
- [41] 董哲仁. 河流健康评估的原则和方法. *中国水利*, 2005,(10):17~19.
- [42] 杨文慧,严忠民,吴建华. 河流健康评价的研究进展. *河海大学学报:自然科学版*, 2005,33(6):607~611.

Selection of major evaluation indicators on river health evaluation

FENG Yan, HE Da-ming, YANG Li-ping

(Asian International Rivers Center at Yunnan University, Yunnan Key Lab of International Rivers and Transboundary Eco-security, Kunming 650091, China)

Abstract: River health has become one of hot topics on water issues in recent decades, and the corresponding evaluation index systems are becoming the objectives of river basin management in some countries and regions in the world. Most of the existing evaluation index systems on river health have not been widely used due to their complex and more professional indexes involved. The authors consider that some major evaluation/important indicators can be selected to show the status and developing tendency of river health. Around 150 research papers, documents and standards on river/river system health in 1972-2010 were reviewed, and 45 evaluation systems with 902 indicators were obtained. According to the river characteristics described in this study, the indicators were identified into four types: habitat physical index, water environmental index, biotic index and water utilization index. By the statistical method, the adopted number and the adopted rate for each indicator were calculated, and 26 indicators with higher adopted rate which can show the characteristics of river/river system from various aspects were selected as the candidates. Then, in order to make further selection of the more important, more universal, easily quantized and obtained ones from the above candidates, the methods of hierarchy analysis and correlation analysis of the indicators were used based on the conclusions of the relevant researches and the relevant concepts, and some of the candidates were incorporated into one if the means or characters of them were similar or overlapped or covered each other. Finally, 8 indicators were determined as the major indicators for evaluating river health condition, which were: coverage rate of riparian vegetation, the changes of wetland extent, river continuity, the changing rate of water flow, the ratio of reaching water quality standard, fish index of biotic integrity, the ratio of water utilization and the coverage of natural vegetation in the watershed.

Key words: river health; evaluation; index system; major evaluated indicator