

南水北调中线水源区溪流生态系统健康评价^{*}

汪兴中^{1,2} 蔡庆华^{1*} 李凤清^{1,2} 段树桂^{1,2}

(¹中国科学院水生生物研究所, 淡水生态与生物技术国家重点实验室, 武汉 430072, ²中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要 2007年7月—2008年5月, 对南水北调中线水源区丹江口水库若干入库溪流的河流水文、河流形态、河岸带、水体理化和底栖生物进行调查并应用河流健康综合评价指数进行评价。结果表明, 位于上游的溪流生态系统健康状况较好, 而位于城镇下游的溪流生态系统健康状况较差, 主要体现在河流形态的改变、底栖藻类自养指数升高和底栖动物多样性减小。提出维持丹江口入库溪流生态系统健康的建议, 除了对上游地区要进行生态环境保护外, 更要对中游地区受破坏的河流形态进行恢复。

关键词 丹江口水库; 溪流; 大型底栖无脊椎动物; 生态系统健康; 评价

中图分类号 Q178 文献标识码 A 文章编号 1000-4890(2010)10-2086-05

Assessment of river ecosystem health in water source area of middle route of South-to-North Water Transfer WANG Xing-zhong^{1,2}, CAI Qing-hua¹, LI Feng-qing^{1,2}, DUAN Shu-gui^{1,2} (¹State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China; ²Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2010 29(10): 2086-2090

Abstract From July 2007 to May 2008, an investigation was made on the hydrology, physical form, streamside zone, water quality and benthic organisms in several streams that flow to the Danjiangkou Reservoir. By using a river health comprehensive assessment index, the river ecosystem health of the streams was assessed. In upstream reaches, the river ecosystem health was good, while in downstream reaches, the river ecosystem health was bad, because of the physical form change, increased autotrophic index, and decreased macro-benthic invertebrate diversity. It was suggested that to maintain the river ecosystem health of the streams flowing to the Danjiangkou Reservoir, the eco-environment in upstream reaches should be protected, and the destroyed physical form in middle reaches should be restored.

Key words Danjiangkou Reservoir; stream; macro-benthic invertebrate; ecosystem health assessment

生态系统健康研究是当今生态学中最具活力的前沿领域之一, 也是当前系统生态学研究热点(崔保山和杨志峰, 2001; 肖风劲等, 2003; Niem i & McDonald, 2004; 王备新等, 2006)。研究生态系统健康是为了更好地监测和评价生态系统状态, 从而对生态系统进行有效的可持续管理。河流对人类的发展非常重要, 不仅提供食物、工农业及生活用水、交通等诸多服务功能, 还是生物圈物质循环的主要通道之一, 很多营养盐及污染物在河流中迁移和降解

(Karr & Chu, 2000; 唐涛等, 2002)。在过去的几十年里, 人类活动对河流生态系统造成了大范围的破坏(Ladson *et al.*, 1999; 唐涛等, 2002)。因此生态健康评价在河流生态系统领域迅速展开(Meyer, 1997; Norris & Thams, 1999), 如何评价河流生态状况正成为该领域的研究热点之一。目前, 我国对河流水环境状况的研究仍主要借助于化学手段, 而用河流生物评价河流生态系统健康的研究并不多见(唐涛等, 2002)。然而, 仅仅用水质指标来评价河流水环境是片面的(Cummins & Klug, 1979)。同时, 应用河流生物进行评价也存在局限性, 比如应用底栖动物完整性指数(benthic index of biotic integrity B-IBI)评价, 参照点难以找寻。李凤清等(2010)在澳大利

* 国家“十一五”科技支撑项目(2006BAC10B02)和国家自然科学基金资助项目(30330140)。

** 通讯作者 E-mail: qhca@ihb.ac.cn

收稿日期: 2010-03-24 接受日期: 2010-07-11

亚溪流状态指数 (index of stream condition ISC) (Ladson *et al.*, 1999) 的基础上构建了较完善的河流健康综合评价指数, 但生物类群指标过于单调 (只采用底栖动物)。因此, 本文在李凤清等 (2010) 的基础上, 补充丰富生物类群, 修改河流健康评价指数, 对南水北调中线水源地溪流生态系统健康状况进行评价。

丹江口水库是南水北调中线工程水源地, 水库水质的好坏直接影响工程效益的发挥, 其入库支流的健康状态又影响着水库的水质。但是, 目前对丹江口地区水环境的研究较多的是对丹江口水库本身的研究, 对水库周边地区的生态环境研究较少, 且对中上游溪流的生态状况还未见报道 (汪兴中等, 2009)。本文通过修改应用河流健康综合评价指数, 对丹江口入库支流的中上游进行生态系统健康评价, 以期对生物多样性保护、水质的生物评价及流域综合管理提供依据。

1 材料与方法

1.1 样点分布与采样时间

在丹江口水库入库溪流清塘河上选取 2 个样点 (记为 WLC2 和 WLC3), 泗河上选取 5 个样点 (依次记为 MTH1, MTH2, MTH3, MJH1 和 MJH2), 神定河上选取 1 个样点 (记为 SDH), 官山河上选取 1 个样点 (记为 GSH)。由于下游污染严重 (神定河) 和交通困难, 样点一般集中在中上游 (图 1)。于 2007 年 7 月 (夏季)、10 月 (秋季)、2008 年 2 月 (冬季)、5 月 (春季) 进行野外采样。

1.2 样品的采集和处理

将网径 40 目采样面积为 0.09 m^2 的索伯网

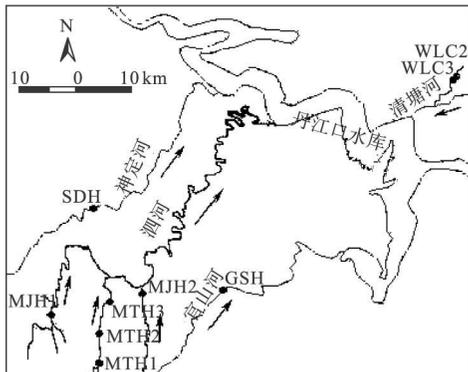


图 1 样点分布示意图 (箭头表示流向)

Fig 1 Location of the sampling sites

(Surber sampler) 放置于样点的河床采集底栖动物。依据生境特点, 清塘河 2 个样点重复 3 次, 其他样点重复 5 次, 分装入大标本瓶中, 带回实验站后将大型底栖动物检出, 用 6% ~ 10% 甲醛固定; 在解剖镜下鉴定 (Morse *et al.*, 1994; Epler 2001)、计数, 最后用吸水纸吸干底栖动物表面液体, 用万分之一天平 (赛多力斯) 称重 (湿重)。

在各样点随机选取 3~5 块石头, 用半径为 2.7 cm 的圆盖子盖定一定的表面积后, 用刷子将底栖藻类刷下, 并用无藻水冲洗石头, 纪录刷液总体积 (贾兴焕等, 2008)。充分摇匀后取部分刷液移入 100 ml 塑料瓶中, 用 $0.8 \mu\text{m}$ 微孔滤膜抽滤后丙酮萃取, 测定叶绿素 a 浓度 (国家环保局, 2002); 另取 100 ml 用 GF/F 膜抽滤后测定其无灰干重 (ash-free dry mass, AFDM) (黄祥飞, 1999)。每个样点重复采集 3 次。

1.3 测定项目与方法

利用 Hach HQ40d 电化学分析仪对水体电导率 (Cond)、盐度 (Sal)、溶解性总固体 (TDS)、水温 (Temp)、溶解氧 (DO)、pH 值等指标进行现场测定, 利用麦哲伦 GPS 315 对样点的坐标进行测定。每个样点采集 360 ml 水样 2 瓶, 一瓶加浓硫酸至 $\text{pH} < 2$ 带回实验室后测定其他化学指标, 包括铵态氮 ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)、硝态氮 ($\text{NO}_3^- - \text{N}$)、总氮 (TN)、总磷 (TP)、磷酸盐 ($\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$)、钙离子 (Ca^{2+})、氯离子 (Cl^-)、硬度 (Hardness)、碱度 (Alk)、化学需氧量 (COD) 和二氧化硅 (SiO_2) 共计 11 项指标。测定方法参考相关标准 (蔡庆华, 2007)。总有机碳 (TOC) 采用岛津公司 TOC-V CHN + ASI-V 总有机碳分析仪测定。

1.4 河流健康评价指数

利用已被广泛使用的澳大利亚溪流状态指数 (ISC) (Ladson *et al.*, 1999), 在李凤清等 (2010) 的基础上, 考虑到溪流主要生物类群为底栖动物和底栖藻类, 调整权重, 建立河流健康评价指数 (river health assessment index, RHCAI)。提供溪流状况的 5 部分得分 (表 1): I. 河流水文 (流速、水量、水利工程干扰)。II. 河流形态 (河道内底质、弯曲程度等)。III. 河岸带 (河岸带缓冲区宽度、缓冲区植被覆盖度、缓冲区生境类型)。IV. 水体理化 (总氮、铵态氮等)。V. 水生生物 (大型底栖无脊椎动物多样性、底栖藻类自养指数)。

表 1 河流健康评价指数

Tab 1 River health assessment index

一级指标	二级指标	权重 (%)
河流水文指标 (权重为 22.2%) [*]	流速	33.3
	水量	50.0
	水利工程干扰	16.7
河流形态指标 (权重为 11.1%)	河道内底质	27.3
	弯曲程度	9.1
	河道改变程度	18.2
	河岸结构	9.1
河岸带指标 (权重为 11.1%)	河岸稳定性	18.2
	河床稳定性	18.2
	河岸带缓冲区宽度	25.0
	缓冲区植被覆盖度	37.5
水体理化指标 (权重为 22.2%)	缓冲区生境类型	37.5
	总氮	25.0
	铵态氮	12.5
	总磷	25.0
水生生物指标 (权重为 33.4%)	溶解氧	12.5
	化学需氧量	25.0
	大型底栖无脊椎动物多样性	50.0
	底栖藻类自养指数	50.0

* 权重表示在评价总分所占的份额。

河流健康评价分为二级指标评分、一级指标评分和河流健康综合评分 3 个层次: 1) 二级指标评分, 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二级指标得分; 2) 一级指标评分, 将二级指标得分与各自权重相乘后再予以加和, 并将每个一级指标的得分定位于 0~20; 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, 将该指数划分为 0~20, 21~40, 41~60, 61~80 和 81~100 共 5 个等级, 分别对应河流健康状况为极差、差、一般、亚健康和健康。

2 结果与分析

河流水文、河流形态、河岸带、水体理化这 4 个一级指标参照李凤清等 (2010) 进行评价计分。丹江口入库溪流中的主要生物类群为底栖大型无脊椎动物和底栖藻类。生物多样性指数提供了更多有关群落方面的信息, 多用来指示环境变化 (Wang *et al.*, 2005; 吴乃成等, 2007), 选用底栖动物多样性指数和底栖藻类自养指数作为评价指标 (表 2)。在河流底栖动物方面, 有些学者基于某些多样性指数对水质受污染级别进行划分 (黄玉瑶和滕德兴, 1982; 沈韞芬等, 1995)。Weber 等 (1973) 提出用自养指数 *AI* (autotrophic index, 即 $AFDM/Chla$) 来评价水质。一般认为在干净的水体中以自养型生物占优势, 在污染的水体中以异养型生物占优势, 所以自养指数

表 2 水生生物指标

Tab 2 Aquatic life index

Shannon 指数	分值	自养型指数	分值
1.875~2.500	4	300~600	4
1.250~1.875	3	600~900	3
0.625~1.250	2	900~1200	2
0~0.625	1	1200~1500	1
0	0	>1500	0

表 3 各样点河流健康指数

Tab 3 River health assessment index of samples

样点	水体理化指标	河流水文指标	河流形态	河岸带指标	水生生物指标	总分
最大值	22.2	11.1	11.1	22.2	33.4	100
WLC2	17.3	6.0	2.5	6.9	25.0	58
WLC3	17.7	7.4	2.5	6.9	16.7	51
MTH1	16.7	11.1	9.8	20.8	33.3	92
MTH2	17.7	11.1	10.3	22.2	29.1	90
MTH3	19.4	2.8	0.8	2.8	16.7	42
MJH1	19.4	11.1	10.6	20.8	33.3	95
MJH2	10.9	8.8	4.8	2.8	12.5	40
SDH	17.0	11.1	10.1	19.4	33.3	91
GSH	18.4	8.8	8.8	14.6	29.1	80

越高则污染越严重。根据丹江口实际情况对底栖动物多样性指数和底栖藻类自养指数进行赋分, 其得分均为 4 个季度的平均 (表 2)。

对各个样点 4 个季度的得分进行平均计算, 发现处于上游人为干扰较少的 SDH、MJH1、MTH1 和 MTH2 样点的生态系统健康状况较好, 分值分别为 91、95、92 和 90, 处于健康状态。位于城镇上游的 GSH 样点处于亚健康状态, 分值为 80。而处于城镇下游人为干扰较多的 MJH2、MTH3、WLC2 和 WLC3 样点的生态系统健康状况较差, 分值分别为 40、42、58 和 51, 处于一般状态, 且人为干扰主要体现在河流形态和河岸带的改变, 自养指数的升高和底栖动物多样性的减小 (表 3)。

3 讨论

恢复和维持一个健康的河流生态系统成为河流管理的重要目标, 对河流的生态系统健康评价显得尤为重要。研究表明, 用河流水化学或物理指标作为河流生态状况评价工具存在难以综合评价且对生态系统污染相应的评价及解释不充分等缺陷, 而生物指标能够反应多种生态胁迫 (化学物污染、物理生境的消失和片断化, 外来物种入侵, 水资源的过量抽取和河岸植被带的过度采伐等) 对水环境造成的累积效应, 应该成为河流水质及生态状况的主要指

标 (Harris & Silveira 1999, Karr & Chu 1999, 蔡庆华等, 2003)。因此, 本文在应用河流健康评价指数中适当的增加生物指标, 使其能够更准确地反应河流生态状况。

选择理想的指示物种是生态系统健康评价的关键问题, 目前应用较多的水生生物是着生藻 (以硅藻为主)、无脊椎动物和鱼类。鉴于丹江口入库溪流实际情况, 本文在生物指标方面选择无脊椎动物和底栖藻类作为指示物种, 由于溪流中大型底栖动物与底栖藻类对环境具有相同的指示地位, 因此配以相同的权重。底栖藻类自养型指数 *AI* 易于获取, 并广泛应用。溪流大型底栖动物容易采集和鉴定, 大多数底栖动物较短的生活史周期对环境变化具有较快的响应, 其对环境条件变化的响应机制具有较高的多样性, 是河流水质状况惯用的一项重要监测指标 (Collier 2008)。例如, “河流无脊椎动物预测和分类系统” (River Invertebrate Prediction and Classification System, RMPACS) (Wright *et al.*, 1989), “澳大利亚河流评价计划” (Australian River Assessment Scheme, AuSRivAS) (Smith *et al.*, 1999), 以及底栖生物完整性指数 (B-IBI) (Karr 1999) 等都是基于对河流大型无脊椎动物生物多样性及其功能监测基础上的河流健康状况评论模型。

河流健康评价方法很多, 从评价原理上主要可以分为两类: 一类是预测模型 (predictive models) 方法, 如 RMPACS 和 AuSRivAS 等。此类方法通过把某研究地点的生物组和在无人干扰情况下 (参照点) 能够生长的物种进行比较而对河流健康进行评价。另一类是多指标方法 (multimetrics)。此方法通过对观测点的一系列生物特征值与参照点的对应比较并计分, 累加得分进行健康评价, 最具代表性的方法就是 IBI。但这两种方法对参照点环境和数目的要求较高。在人为活动干扰频繁的今天, 良好的参照点难于寻找, 参照点数目可能也难以达到形成评价的要求。因此, 鉴于丹江口中上游溪流的实际情况, 本研究选择 Ladson 等 (1999) 提出的基于河流文学、物理构造特征、河岸区状况、水质及水生生物 5 个方面共计 22 项指标体系计分基础上的溪流状况指数 (ISC), 借鉴李凤清等 (2010) 在辽河地区河流生态系统健康评价中建立的评价体系, 进行修改项目, 调整权重。这一方法是对河流各方面特征的综合评价, 其结果更加全面、客观, 是河流健康状况评价的一个方向 (唐涛等, 2002)。

通过构建河流健康综合指数评价南水北调中线水源区溪流健康状况, 发现这几条溪流的生态状况不容乐观, 尤其是靠近城镇的样点, 健康状况较差。所以, 除了要对上游地区进行生态环境保护外, 更要对中游地区受破坏的河流形态进行恢复。

参考文献

- 蔡庆华, 唐涛, 刘健康. 2003. 河流生态学中的几个热点问题. 应用生态学报, 14(9): 1573-1577
- 蔡庆华. 2007. 水域生态系统观测规范. 《中国生态系统研究网络 (CERN) 长期观测规范》丛书. 北京: 中国环境科学出版社.
- 崔保山, 杨志峰. 2001. 湿地生态系统健康研究进展. 生态学杂志, 20(3): 31-36
- 国家环保局. 2002. 水和废水监测分析方法 (第 4 版). 北京: 中国环境科学出版社.
- 黄祥飞. 1999. 湖泊生态调查观测与分析. 北京: 中国标准出版社.
- 黄玉瑶, 滕德兴. 1982. 利用大型底栖无脊椎动物多样性指数监测蓟运河污染. 动物学集刊, 2: 133
- 贾兴焕, 吴乃成, 唐涛, 等. 2008. 香溪河水系附石藻类的时空动态. 应用生态学报, 19(4): 881-886
- 李凤清, 蔡庆华, 唐涛, 等. 2010. 基于河流环境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, 16(1): 38-45
- 沈韞芬, 冯伟松, 顾曼如, 等. 1995. 河流的污染监测. 北京: 建筑工业出版社.
- 唐涛, 蔡庆华, 刘健康. 2002. 河流生态系统健康及其评价. 应用生态学报, 13(9): 1191-1194
- 汪兴中, 蔡庆华, 李凤清, 等. 2009. 南水北调中线水源区溪流大型底栖动物群落结构的时空动态. 应用与环境生物学报, 15(6): 803-807
- 王备新, 杨莲芳, 刘正文. 2006. 生物完整性指数与水生态系统健康评价. 生态学杂志, 25(6): 707-710
- 吴乃成, 唐涛, 周淑蝉, 等. 2007. 香溪河小水电的梯级开发对浮游藻类的影响. 应用生态学报, 18(5): 1091-1096
- 肖凤劲, 欧阳华, 牛海山. 2003. 生态系统健康与相关概念的逻辑关系. 生态学杂志, 22(2): 56-59
- Collier K J. 2008. Temporal patterns in the stability, persistence and condition of stream macroinvertebrate communities: Relationships with catchment land-use and regional climate. *Freshwater Biology*, 53: 603-616
- Cummins KW, Kluge M J. 1979. Feeding ecology of stream invertebrate. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 10: 147-172
- Epler JH. 2001. Identification manual for the larval chironomidae (Diptera) of North and South Carolina. Special Publication SJ2001-SP13. North Carolina Department of Environment and Natural Resource, Raleigh, NC and St Johns River Water Management District, Palatka, FL: 70-97
- Harris JH, Silveira R. 1999. Large scale assessment of river

- health using an index of biotic integrity with low-diversity fish communities *Freshwater Biology*, **41**: 235–252
- Karr JR, Chu EW. 1999. Restoring Life in Running Waters Better Biological Monitoring. Washington DC: Island Press
- Karr JR, Chu EW. 2000. Sustaining living rivers *Hydrobiologia*, **422/423**: 1–14
- Karr JR. 1999. Defining and measuring river health *Freshwater Biology*, **41**: 221–234
- Ladson AR, White LJ, Doolan JA, et al. 1999. Development and testing of an index of stream condition for waterway management in Australia *Freshwater Biology*, **41**: 453–468
- Meyer JL. 1997. Stream health: Incorporating the human dimension to advance stream ecology *Journal of the North American Benthological Society*, **16**: 439–447.
- Moise JC, Yang LF, Tian LX. 1994. Aquatic Insect of China Useful for Monitoring Water Quality. Nanjing: Hehai University Press
- Niemelä GJ, McDonnell ME. 2004. Application of ecological indicators *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, **35**: 89–111.
- Norris RH, Thoms MC. 1999. What is river health? *Freshwater Biology*, **41**: 197–209.
- Smith MJ, Kay WR, Edward DHD, et al. 1999. Australia: Using macroinvertebrates to assess ecological condition of rivers in Western Australia *Freshwater Biology*, **41**: 269–282
- Wang YK, Stevenson RJ, Metzner L. 2005. Development and evaluation of a diatom-based index of biotic integrity for the Interior Plateau Ecoregion USA. *Journal of the North American Benthological Society*, **24**: 990–1008
- Weber CI. 1973. Biological monitoring of aquatic environment // Cairns J Jr, Dickon KL, eds. Biological Methods for the Assessment of Water Quality. Philadelphia: American Society of Testing and Materials: 46–60
- Wright JF, Amigo PD, Furse MT. 1989. Prediction of invertebrate communities using stream measurements *Regulated Rivers: Research and Management*, **4**: 147–155

作者简介 汪兴中, 男, 1985 年出生, 博士研究生。主要从事河流底栖动物生态学研究。E-mail: wangxingzhong@ihh.ac.cn

责任编辑 魏中青
