

Research and Progress on River Health Assessment

Chao Wang¹, Jun Xia^{1,2}, Lingcheng Li¹

¹State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan

²Hubei Collaborative Innovation Center for Water Resources Security, Wuhan

Email: wangchao2013@whu.edu.cn

Received: Mar. 5th, 2014; revised: Mar. 18th, 2014; accepted: Mar. 24th, 2014

Copyright © 2014 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

The long-time inappropriate exploitation of river resources has led to the damages of river ecosystem and structural dysfunction, threatening the sustainable development of society as a whole. The river health issues have emerged as a result. How to carry out river health assessment and river management is vital to the development of harmonious relationship between nature and human being. This review has discussed the connotation of river health and summarized various methods of evaluating river health at home and abroad. Meanwhile, in view of the status of river health assessment in our country, some suggestions have been put forward that river monitoring plan should be carried out and nationwide river health assessment guidelines should be established in the future.

Keywords

River Health, Assessment Method, Assessment Indicator

河流健康评价研究与进展

王超¹, 夏军^{1,2}, 李凌程¹

¹武汉大学水资源与水电工程国家重点实验室, 武汉

²水资源安全保障湖北省协同创新中心, 武汉

Email: wangchao2013@whu.edu.cn

作者简介: 王超(1990-), 女(汉), 湖南, 武汉大学水文及水资源系, 硕士研究生, 主要从事河流健康评估方面的研究。

收稿日期：2014年3月5日；修回日期：2014年3月18日；录用日期：2014年3月24日

摘要

人类对河流不合理的开发利用，能够导致河流生态环境及其结构功能的破坏，进一步威胁到人类社会的可持续发展。河流健康问题成为人类生存与可持续发展面临的重要问题。如何有效对河流健康开展评价与管理，成为水资源可持续利用和环境保护与管理的重要课题，对人与自然的和谐发展具有重要的意义。本文初步探讨了河流健康的概念、定义和内涵，概括了国内外河流健康的评价方法及国内外研究发展的状况。针对我国河流健康的发展现状，提出了一些评述和建议，认为河流健康涉及的要素比较多，也十分重要，尤其是生态环境监测与质量评价及其联系的生态水文学和水系统理论研究，今后应该开展长期的河流监控计划并建立全国性的河流健康评价的指南。

关键词

河流健康，评价方法，评价指标

1. 引言

河流对于自然界和人类社会来说都是极其重要的。河流作为水循环地表水环节的重要载体，对全球气候和生态系统的形成有重要作用；河流生态系统为人类和其他生物提供了食物及生存发展的环境；河流的物质搬运和输送可以造成河流的水文地理和自然地理环境；河流蕴藏的丰富的水资源可以为区域提供生态、生产、以及人类生活用水；河流的水流具有巨大的能量，可以为人类所开发和利用；河流还具有社会经济及文化发展的功能，是人类文明的摇篮。因此河流的这些功能一旦受损，会给自然界和人类社会带来不良影响。

然而随着人类对河流不合理的开发和利用，导致了诸如河道断流、水质污染、河流生物多样性丧失等严重问题，强烈地干扰到了河流的自然健康状态，进而危及到人类自身的可持续发展。这些问题的存在促使了河流健康相关理论的发展及其实践研究。

欧美等国家于上世纪80年代开始关注河流的健康问题，并采取了一系列保护和修复河流的措施[1]。我国的河流健康研究是随着我国经济建设发展中面临的愈来愈严峻的环境问题逐渐重视和发展起来的。虽然相对西方发达国家起步较晚，但我国的问题复杂，有受到人口多、水土资源不匹配、社会经济发展较快等多因素的影响与制约的特点，导致中国的河流健康状况愈来愈严峻。例如，1994年淮河发生特大水污染事件；七大水系中，黄河、海河均有断流现象；长江流域存在生物量减少，防洪能力不足的危机等[2]。从国家实施可持续发展战略和生态文明建设的角度看，河流健康评价必将成为河流管理的最核心和主要的目标。因此，总结国内外对于河流健康的认识及其研究的相关成果，对于我国河流的管理和治理，构建和谐河流生态系统有着重要意义。

2. 河流健康的基本概念

目前国际上对于河流健康的研究处于探索阶段，相关理论并不成熟，河流健康尚无确定的概念。最早可追溯到1972年的美国《清洁水法》，在该法案中为河流健康设定了物理、化学和生物的完整性标准，其中完整性指维持生态系统的自然结构和功能的状态[3]。此时学者们多是从生态健康的角度考虑，认为健康的河流等同于河流生态系统的完整性和稳定可持续性，更多的是强调河流原始自然的健康状况[4]-[7]。Frey认为河流健康指的是具有支持和维持一个均衡的、完整的和适应性强的生态系统的能力，使这个生

态系统的成分和多样性能够与自然栖息地相媲美[4]。Schofield 认为河流健康是指河流在生物完整性和生态功能方面与自然未受干扰状态下的相似的程度[5]。Simpson 等把河流受扰前的原始状态当作健康状态,认为河流健康是指河流生态系统支持与维持其主要生态过程,以及具有与受扰前类似的具有一定种类组成、多样性和功能组织的生物群落的能力[6]。Karr 认为河流健康即河流生态完整性,提出 IBI(Index of Bioassessment Integrity)方法[7]。

不过随着研究的进步,越来越多的学者认为河流健康还应考虑人类价值。Meyer 认为河流健康指的是河流在维持其生态系统结构与功能的同时,能够为人类社会提供服务[8]。Fairweather 认为河流健康包含着活力、生命力及公众对其的环境期望[9]。Vugteveen 认为河流的健康包含着活力和恢复力,以及满足社会经济需要的能力[10]。澳大利亚健康河流委员会认为健康的河流能够与其环境、社会和经济特征相适应,能够支撑社会所希望的河流的生态系统、经济行为和社会功能[11]。

由于国情的不同,国内研究者在河流健康的认识上,强调的是维持河流自身生命及其功能的健康,以河流对人类社会的服务功能为核心,同时包括河流的生态环境及自然结构。刘昌明等认为健康河流就是河流在相应时期其社会功能与自然功能能够均衡发挥,在这种情况下,河流具有良好的水沙通道、水质和河流生态系统[12]。董哲仁认为河流健康其实是一种河流管理的评估工具[13]。刘晓燕认为河流健康标准是一种社会选择,是相对意义上的健康[14]。李国英认为黄河的健康指的是能维持其生命功能,体现在水资源总量、洪水造床能力、水流挟沙能力等方面[15]。文伏波认为健康长江指的是能够可持续地满足人类需求,不能对人类安全和社会的发展构成威胁[16]。

因此河流健康的定义不仅得基于它的自然属性,也离不开其社会属性。综合现有的关于河流健康的研究内容,健康的河流应该满足:一是河道和岸边带结构形态的稳定;二是河流生态系统结构的完整性和功能的完备性都处于良好状态;三是能为社会经济的发展提供良好服务功能。

3. 河流健康评价方法

如何利用河流健康的概念与理论研究指导实际应用,关键在于确定一套合理的评价方法。有效的评价方法应该具备以下特征:1) 建立在科学理论体系的基础上;2) 能够简化并量化复杂的河流生态现象;3) 能够灵敏地响应河流生态系统的变化而免受不同时间或空间的干扰;4) 能够适应一定的空间尺度;5) 可以满足河流管理的需要[16]。近 30 年以来,随着河流健康评价的不断发展,形成了众多的各具特色的评价方法,从评价原理上来看主要可以分为两类:预测模型法(Predictive Model)和多样性指标法(Multimetircs)。

预测模型法基于以下原理:以无人人类活动干扰或干扰较小的河段为参考河段,建立经验模型,以此预测被评价河段天然条件下的物种组成,并与实际的物种组成进行对比量化分析[17][18]。评价步骤如下:1) 模型的建立。选取无人人类活动干扰或干扰较小的河段作为参照,收集该河段的环境变量因子和生物组成资料,并建立他们之间的经验关系;2) 被评价河段生物组成(E)的模拟。收集被评价河流的环境因子数据并代入经验模型,得到被评价河流健康情况下的生物组成(E);3) 健康指数(O/E)的计算。将被评价河段的实际生物组成(O)与预测的生物组成(E)相比。O/E 值的范围为 0~1,越接近 1 其健康状况越好,越接近 0 则健康状况越差。RIVPACS 和 AUSRIVAS 就是这类方法的代表[16]。

多指标评价法是依据评价标准,通过把评价河段的生物化学及形态特征与参照河段进行对比并打分,将各项得分累计而进行健康评价。该方法在澳大利亚和美国等国家得到了广泛应用,其中比较著名的代表性方法有:IBI、RCE、ISC、RHS、RHP。

这两类方法都是基于跟参照河段的对比来进行评价,在评分前会根据河道的形态和生境对参考和被评价河道进行统一分类,最后通过计算得分来反映健康程度(虽然评分方式不同)[16]。预测模型法建模过

程比较复杂，并且主要是通过单一物种进行比较评价，如果被评价河段的变化不能反映在这一物种的变化上时，就无法进行评估。多指标评价法相对简单，容易被非专家人群所理解，并且考虑的因子比较多，但是如何有效地将不同的指标综合打分具有一定的主观性。表 1 给出了这两类方法中的代表性方法 RIVPACS(属于预测模型法)和 IBI(属于多指标评价法)的对比分析[19]。

4. 河流健康评价的发展状况

4.1. 国外河流健康评价发展状况

国际上很多国家都开展了河流健康评价的实践研究，其中美国、澳大利亚、南非、英国和欧盟的实践工作比较有代表性。

美国于 1989 年提出了快速生物监测协议 RBPs(Rapid Bioassessment Protocols)，并于 1999 年对协议进行了修订，该协议提供了河流藻类、水生附着动物、两栖动物、鱼类及栖息地的监测及评价方法和标准[20]。美国自然保护协会提出淡水生态的整体性指标，包括水文情势，水化学情势，栖息地条件，水的连续性以及生物组成等[21]。美国还有侧重于河流生态系统功能评估的《河流地貌指数方法》HGM (Hydrogeomorphic)，评估河流湿地的 15 种功能[1]。

澳大利亚于 1992 年开展国家河流健康计划[22]，主要工具是“澳大利亚河流评价系统”AUSRIVAS (Australian River Assessment System)，AUSRIVAS 是针对澳大利亚河流的特点对 RIVPACS 方法的改进。另一个方法是澳大利亚的溪流状态指数(ISC)(Index of Stream Condition)，它在以河流原始自然状态为参照系统的基础上，构建了基于河流水文学、形态特征、河岸带状况、水质及水生生物 5 方面，共 22 项指标的评价指标体系，将参照系统与河流现状进行比较并打分，在计分的基础上综合评价河流健康状况[23]-[27]。

南非于 1994 年制定了河流健康计划，该计划选用河流无脊椎动物、鱼类、河岸植被、生境完整性、水质、水文、形态等作为河流健康的评价指标，特别地，对于河口地区提出了生物健康、水质以及美学健康指数来综合评估其健康状况[20]。在这个计划中有针对调查河流形态和栖息地指数的方法，即河流地貌指数方法(ISG)(Index of Stream Geomorphology)[1]。

英国于 1998 年提出“英国河流保护评价系统”，该评价系统通过调查评价六大恢复标准即自然多样性、天然性、代表性、稀有性、物种丰富度及特殊特征来确定英国河流的健康状况[23] [28]。英国环境署用制定针对河流栖息地的评估方法(RHS)(River Habit Survey)来调查河流形态、地貌特征以及横断面形态，适用于经过大规模改造的河流[29]。英国另一个举措是对河流现状进行调查，包括背景信息、河道数据、沉积物特征、植被类型、河岸侵蚀、河岸带特征以及土地利用几方面，通过这些指标来评价河流生

Table 1. The comparison of RIVPACS and IBI

表 1. RIVPACS 法和 IBI 法的对比分析

	RIVPACS	IBI
河道分类标准	河流大小，地形条件，基质颗粒尺寸，水化学因子等	地质，河流大小，水温，海拔等
参照河段选择标准	没有很严重的污染，且一般只考虑化学性污染	没有人类活动的影响或人类活动的影响很小
模型构建原理	建立环境因子和河道物种间的多变量关系	以经验为主，绘制生物物种对人类活动的响应曲线
评价标准	观测到的生物组成与模型预测的生物组成进行对比	种类丰富度、相对丰度、种群组成等。
取样对象	底栖无脊椎动物，没有纳入稀有物种	底栖无脊椎动物、鱼，藻类，可以纳入稀有物种
通用性	需要大量的观测点，且不同区域需建立不同的模型	一般 15 到 20 个取样点就可以代表人类干扰的不同梯度，通用性较强

态环境，并判断河流现状与无人干扰状态之间的差别[30]；此外，英国还建立了以“河流无脊椎动物预测和分类系统”RIVPACS(River Invertebrate Prediction and Classification System)为基础的河流生物监测系统[31]。

2000年欧洲议会和欧盟理事会制定了《欧盟水框架指令》，并于12月22日正式实施[21]。该指令是欧盟在河流修复工作中最重要的指令，其目的包括改善水生态系统及直接依赖于水生态系统的陆地生态系统和湿地的状况，促进水的可持续利用，强化水环境的保护和改善等。并把到2015年所有河流达到良好状态作为首要目标。水框架指令要求建立分类体系，通过测定特定生物、水形态、化学和物理化学的质量要素条件，来评估河流的生态健康状况。具体指标如表2所示[32]。

在该指令的指导下，荷兰、奥地利、意大利、德国等都开展了河流健康的评估和进一步的修复工作。

4.2. 国内河流健康评价发展状况

国内是近年来才关注河流健康的，唐涛等于2002年在《河流应用生态学报》上发表了《河流生态系统健康及其评价》。继而，专家们在这一领域进行深入研究，并进行了实践。随后健康黄河、健康长江、健康珠江等概念相继被提出。

为了逐步修复和维持黄河健康，黄河水利委员会提出“维持黄河健康生命”治河新理念。一些学者已经对黄河健康做出了评价。刘晓燕用低限流量、河道最大排洪能力、平滩流量、滩地横比降、水质类别、湿地规模、水生生物、供水能力等指标评价黄河健康，并确定了这些指示因子的阈值[33]-[36]。赵彦伟建立了包括水质、水量、水生生物、物理结构与河岸等5个要素的黄河健康评价指标体系[37]。张世杰把良好的水体水质和安全通畅的水沙通道作为下游黄河健康的两个重要指标，并在此基础上给出了黄土高原土壤的允许流失量[38]。赵锁志对黄河内蒙古段的生态系统健康状况进行了评价，从水文、物理形态、水质、水生生物4个方面选取了河岸抗冲性、河岸植被覆盖率等14个指标[39]。

长江水利委员会提出了由1个目标层、3个系统层、5个状态层和14个指标层构成的健康长江评价指标体系。具体包括河道需水量满足程度、防洪工程完善率等12个定量指标和水系连通性、珍稀水生动物存活情况2个定性指标[40]-[43]。这是中国首个系统化的河流健康指标体系。

珠江水利委员会提出的指标体系包括河岸河床稳定性、水面面积率、与周围自然生态连通性、鱼类栖息地及鱼道状况等26个指标[44]。金占伟选择了河流形态、生态功能、社会服务、社会影响4个方面14个评价指标[45]。林木隆从总体层、系统层、状态层、指标层四个层面建立了由20个指标组成的珠江评价指标体系[46]。

值得关注的还有由中澳双方合作的中国河流健康与环境流量项目，该项目是中澳环境发展伙伴项目(ACEDP)下的一个子项目。项目团队由国际水资源中心牵头，包括中澳双方的专家，分别在黄河试点(黄河下游)、珠江试点(桂河)、辽河试点(太子河)开展河流健康评估工作。采取的指标有水质和生物指标、水文指标、物理形态指标和社会经济指标[47]。该项目可以为今后中国在实施河流健康监测计划方面提供宝

Table 2. Indicators of assessing river healthy by EU Water Framework Directive
表2. 欧盟水框架指令用于评估河流生态健康状况的指标

生物要素	水文形态要素	化学、物理化学要素
<ul style="list-style-type: none"> ■ 水生植物群落的构成和丰度 ■ 底栖无脊椎动物区系的构成和丰度 ■ 鱼类区系的构成、丰度和年龄组成 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 水文状况：水量与动力学特征、与地下水体的联系 ■ 河流的连续性 ■ 形态状态：河流的深度与宽度的变化、河床结构与地层、河岸地带的结构 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 常规：热量条件、氧化条件、盐度、酸化状况、营养条件 ■ 特定污染物：由排入水体的重点物质导致的污染、由排入水体的大量其他物质导致的污染

贵经验，尤其是制定全国性计划时。

5. 机遇和挑战

综观河流健康内涵及国内外健康河流评价方法及发展状况，国内外不论是在河流健康的内涵还是评价方法上都有所差别。中国学者在定义河流健康时，不仅考虑其自然属性，同时强调其服务人类的社会属性，如防洪抗旱、灌溉航运等。国外学者多从生态、水文、物理形态、水质等方面评价河流健康，而中国在考虑这些指标的同时，也将河流的社会功能纳入指标体系之中，所以会选取防洪能力、水资源开发利用等指标。究其原因是国外的河流健康研究起步较早，如欧美、澳大利亚等国家，而我国目前还处于水利水电建设时期，水资源高度开发，具体国情有别于西方国家，因此我国现阶段的河流健康评价体系是基于自身的社会经济发展状况而定的。

水是生命之源、生产之要、生态之基，2011年中央1号文件强调了水资源是支撑人类生存与发展、生态环境保护之根本[48]。我国目前面临水灾害加剧、水资源短缺、水环境恶化、水生态失衡和水管理制度建设亟待加强的五大水问题，解决这些问题已成为刻不容缓的重要任务。河流健康评价与管理研究为我国实施生态文明建设提供了一个方面的支撑。国家强调生态文明建设，也给河流健康评价与管理研究提供了机遇与挑战。

展望未来，我国的河流健康评价工作可能需要进一步开展以下方面的研究与实践：

1) 评价标准的确定：在对河流进行健康评价时，要先确定参照系统，即选定无干扰或干扰较少时的河流系统。在河流现状与参照系统比较的基础上，进行河流健康状况的评估。但是没有人类干扰的状态是否就是健康状态，这个问题值得思考。

2) 建立完整的监测系统：不管选择哪种评价方法，都涉及大量指标，需要收集大量的资料。而取样方式和数据处理的方式都会影响评价结果的可比性。另一问题是由于河流健康的概念是最近几十年才兴起，因此在这之前的生物要素等方面的资料有所缺失。所以要对河流进行长期的监测和评估，以保证资料的完整性。此外还要培养河流健康评估专业技术人员，特别是水生生物监测人才。

3) 加强科技技术应用基础研究：生态文明建设中的水资源安全保障知识系统，是指科学技术创新及其在生态文明建设中水安全保障的应用技术发展。它涵盖了地球系统科学、水文学、生态学、环境学、信息学和社会科学等。随着经济社会发展和全球环境变化，我国水短缺、水污染、水生态、水灾害、水管理5个问题复杂交叉，是一个复杂的水系统问题，并直接涉及多方面的国家安全。解决上述水问题的核心是水循环研究，需要以流域为基本单元，阐明以水循环为纽带的流域水系统的物理、生物与生物地球化学、人文等三大过程的联系及其反馈机制，发展多要素、多过程、多尺度流域水系统综合模拟科学平台，建立水系统的调控模式和良性水循环维持河流健康的有效途径。针对我国的生态文明建设中的河流健康评价与水资源管理问题，特别需要加强生态水文学和水系统理论应用基础的支撑研究。

4) 建立全国性的指导文件：虽然说每个流域有其自身特点，但河流是个开放的系统，相互之间是有联系的。所以各个流域管理机构的合作会更加有利于各河流的健康发展。莱茵河、多瑙河等欧洲大型河流的成功治理经验，是《欧盟水框架指令》建立的背景和基础。我国应在借鉴国外先进经验的基础上，根据国内河流的特点，建立全国性的河流健康评估的框架，来指导各个流域的管理。诸如水量、水质和水生态系统的一体化管理政策，建立涉水政府部门的协调机制以及加强流域管理中的公众参与等。

基金项目

国家自然科学基金(No. 51279140)，国家“十二五”水专项淮河课题(No. 2014ZX07204-006)。

参考文献 (References)

- [1] 董哲仁. 国外河流健康评估技术[J]. 水利水电技术, 2005, 36(11): 15-19.
DONG Zhe-ren. Overseas assessing technology for river health. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2005, 36(11): 15-19. (in Chinese)
- [2] 郑江丽, 邵东国, 王龙, 吴玉婷. 健康长江指标体系与综合评价研究[J]. 南水北调与水利科技, 2007, 4: 61-63.
ZHENG Jiang-li, SHAO Dong-guo, WANG Long and WU Yu-ting. Study on the index system and integrative evaluation of health in Yangtze River. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2007, 4: 61-63. (in Chinese)
- [3] 夏自强, 郭文献. 河流健康研究进展与前瞻[J]. 长江流域资源与环境, 2008, 17(2): 252-256.
XIA Zi-qiang, GUO Wen-xian. Research advance in river health. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2008, 17(2): 252-256. (in Chinese)
- [4] FREY D. G. Biological integrity of water—An historical approach. *The integrity of water. Proceedings of a Symposium, US Environmental Protection Agency, Washington DC, 1977: 127-140.*
- [5] SCHOFIELD, N. J., DAVIES, P. E. Measuring the health of our rivers. *Water*, 1996, 5(6): 39-43.
- [6] SIMPSON, J., NORRIS, R. and BARMUTA, L. AusRivAS-national river health program. User Manual Website Version, 1999.
- [7] KARR, J. R. Defining and measuring river health. *Freshwater Biology*, 1999, 41(2): 221-234.
- [8] MEYER, J. L. Stream health: Incorporating the human dimension to advance stream ecology. *The North American Benlho-Logical Society*, 1997, 16(2): 439-447.
- [9] FAIRWEATHER, P. G. State of environment indicators of “river health” exploring the metaphor. *Freshwater Biology*, 1999, 41(2): 211-220.
- [10] VUGTEVEEN, P., LEUVEN, R. S. E. W., HUIJBREGTS, M. A. J., et al. Redefinition and elaboration of river ecosystem health: Perspective for river management. *Hydrobiologia*, 2006, 565(1): 289-308.
- [11] 刘恒, 涂敏. 对国外河流健康问题的初步认识[J]. 中国水利, 2005, 4: 19-22.
LIU Heng, TU Min. Brief review of healthy river issues in foreign countries. *China Water Resources*, 2005, 4: 19-22. (in Chinese)
- [12] 刘昌明, 刘晓燕. 河流健康理论初探[J]. 地理学报, 2008, 63(7): 683-692.
LIU Chang-ming, LIU Xiao-yan. Healthy river: Essence and indicators. *Acta Geographica Sinica*, 2008, 63(7): 683-692. (in Chinese)
- [13] 董哲仁. 河流健康的内涵[J]. 中国水利, 2005, 4: 15-18.
DONG Zhe-ren. River health connotation. *China Water Resources*, 2005, 4: 15-18. (in Chinese)
- [14] 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 Guo-ying. The final target of Yellow River regulation is to sustain a life of the Yellow River. *Yellow River*, 2004, 26(1): 1-3. (in Chinese)
- [15] 文伏波, 韩其为, 许炯心, 胡春宏, 陈吉余, 李国英, 董哲仁, 王光谦. 河流健康的定义与内涵[J]. 水科学进展, 2007, 1: 140-150.
WEN Fu-bo, HAN Qi-wei, XU Jiong-xin, HU Chun-hong, CHEN Ji-yu, LI Guo-ying, DONG Zhe-ren and WANG Guang-qian. River health connotation. *Advances in Water Science*, 2007, 1: 140-150. (in Chinese)
- [16] NORRIS, R. H., HAWKINS, C. P. Monitoring river health. *Hydrobiologia*, 2000, 435(1-3): 5-17.
- [17] WRIGHT, J. F. Development and use of a system for predicting macroinvertebrates in flowing waters. *Australian Journal of Ecology*, 1995, 20(1): 181-197.
- [18] HAWKINS, C. P., NORRIS, R. H., HOGUE, J. N., et al. Development and evaluation of predictive models for measuring the biological integrity of streams. *Ecological Applications*, 2000, 10(5): 1456-1477.
- [19] KARR, J. R., CHU, E. W. Introduction: Sustaining living rivers. *Assessing the ecological integrity of running waters. Netherlands: Springer, 2000: 1-14.*
- [20] BARBOUR, M. T., GERRITSEN, J., SNYDER, B. D., et al. Rapid bioassessment protocols for use in streams and wadeable rivers: Periphyton, benthic macroinvertebrates and fish. 2nd Edition, Washington DC: EPA 841-B-99-002. US Environmental Protection Agency, Office of Water, 1999: 1-10.
- [21] 吴阿娜, 杨凯, 车越, 袁雯. 河流健康状况的表征及其评价[J]. 水科学进展, 2005, 16(4): 602-608.
WU E-nuo, YANG Kai, CHE Yue and YUAN Wen. Characterization of rivers health status and its assessment. *Advances in Water Science*, 2005, 16(4): 602-608. (in Chinese)
- [22] 唐涛, 蔡庆华, 刘健康. 河流生态系统健康及其评价[J]. 应用生态学报, 2002, 13(9): 1191-1194.

- TANG Tao, CAI Qing-hua and LIU Jian-kang. River ecosystem health and its assessment. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(9): 1191-1194. (in Chinese)
- [23] PARSONS, M., THOMS, M. and NORRIS, R. Australian river assessment system: Review of physical river assessment methods—A biological perspective, monitoring river health initiative technical report no 21. Canberra: Commonwealth of Australia and University of Canberra, 2002: 1-24.
- [24] 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(2): 453-468.
- [25] LADSON, A. R., WHITE, L. J. An index of stream condition: Reference manual. 2nd Edition, Melbourne: Department of Natural Resources and Environment, 1999: 1-65.
- [26] WHITE, L. J., LADSON, A. R. An index of stream condition: Field manual. Melbourne: Department of Natural Resources and Environment, 1999: 1-33.
- [27] WHITE, L. J., LADSON, A. R. An index of stream condition: User's manual. 2nd Edition, Melbourne: Department of Natural Resources and Environment, 1999: 1-22.
- [28] 丰华丽, 王超, 李剑超. 生态学观点在流域可持续管理中的应用[J]. 水利水电快报, 2001, 22(14): 21-23.
FENG Hua-li, WANG Chao and LI Jian-chao. The application of the ecology view in the river basin sustainable management. *Express Water Resources & Hydropower Information*, 2001, 22(14): 21-23. (in Chinese)
- [29] RAVEN, P. J., FOX, P., EVERARD, M., et al. River habitat survey: A new system for classifying rivers according to their habitat quality. In: BOON, P. J., HOWELL, D. L., Eds., *Freshwater Quality: Defining the Indefinable?* Edinburgh: The Stationery Office, 1997: 215-234.
- [30] RAVEN, P. J., HOLMES, N. T. H., DAWSON, F. H., et al. River habitat quality—The physical character of rivers and streams in the UK and Isle of man. River Habitat Survey, Report No. 12. Environment Agency, Scottish Environment Protection & Environment and Heritage Service, 1998: 85.
- [31] WRIGHT, J. F., SUTCLIFFE, D. W. and FURSE, M. T. Assessing the biological quality of freshwaters: RIVPACS and other techniques. Ambleside: The Freshwater Biological Association, 2000: 1-24.
- [32] ALVSVÅG, J., DAHL, E. and NAUSTVOLL, L. The EU water framework directive. *Havforskningsnytt*, 2005, 15: 1-2.
- [33] 刘晓燕. 黄河健康生命理论体系框架[J]. 人民黄河, 2005, 27(11): 59.
LIU Xiao-yan. The Yellow River healthy life theory system framework. *Yellow River*, 2005, 27(11): 59. (in Chinese)
- [34] 刘晓燕. 构建黄河健康生命的指标体系[J]. 中国水利, 2005, 21: 28-32.
LIU Xiao-yan. Construction of healthy indicators system in Yellow River. *China Water Resources*, 2005, 21: 28-32. (in Chinese)
- [35] 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 Xiao-yan, ZHANG Jian-zhong and ZHANG Yuan-feng. Healthy indicators system in Yellow River. *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61(5): 451-460. (in Chinese)
- [36] 刘晓燕, 张原峰. 健康黄河的内涵及其指标[J]. 水利学报, 2006, 37(6): 649-654, 661.
LIU Xiao-yan, ZHANG Yuan-feng. Essence and indicators of the healthy Yellow River. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2006, 37(6): 649-654, 661. (in Chinese)
- [37] 赵彦伟, 杨志峰, 姚长青. 黄河健康评价与修复基本框架[J]. 水土保持学报, 2005, 19(5): 131-134, 173.
ZHAO Yan-wei, YANG Zhi-feng and YAO Chang-qing. Basic frameworks of health assessment and restoration of Yellow River. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(5): 131-134, 173. (in Chinese)
- [38] 张世杰. 基于下游河流健康的黄土高原土壤容许流失量[J]. 中国水土保持科学, 2011, 9(1): 9-15.
ZHANG Shi-jie. Soil loss tolerance in the loess plateau based on the healthy function of the lower reaches of the Yellow River. *Science of Soil and Water Conservation*, 2011, 9(1): 9-15. (in Chinese)
- [39] 赵锁志, 王沛东, 孔凡吉, 王喜宽, 赵军, 李世宝, 张青. 黄河内蒙古段生态系统健康状况评价[J]. 现代地质, 2008, 22(6): 1022-1027.
ZHAO Suo-zhi, WANG Pei-dong, KONG Fan-ji, WANG Xi-kuan, ZHAO Jun, LI Shi-bao and ZHANG Qing. Evaluation of ecosystem health status of Inner Mongolian section of Yellow River. *Geoscience*, 2008, 22(6): 1022-1027. (in Chinese)
- [40] 吴道喜, 黄思平. 健康长江指标体系研究[J]. 水利水电快报, 2007, 28(12): 1-3.
WU Dao-xi, HUANG Si-ping. Indicators of the healthy Yangtze River. *Express Water Resources & Hydropower Information*, 2007, 28(12): 1-3. (in Chinese)
- [41] 王龙, 邵东国, 郑江丽, 吴玉婷. 健康长江评价指标体系与标准研究[J]. 中国水利, 2007, 12: 12-15.
WANG Long, SHAO Dong-guo, ZHENG Jiang-li and WU Yu-ting. Assessment index system of healthy Yangtze and standards. *China Water Resources*, 2007, 12: 12-15. (in Chinese)

- [42] 蔡其华. 加强流域管理, 维护健康长江[J]. 人民长江, 2009, 8: 1-4.
CAI Qi-hua. Strengthen river basin management for a healthy Yangtze. Yangtze River, 2009, 8: 1-4. (in Chinese)
- [43] 郭建威, 黄薇. 健康长江评价方法初探[J]. 长江科学院院报, 2008, 25(4): 1-4.
GUO Jian-wei, HUANG Wei. Exploration on assessment methods for healthy Yangtze River. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2008, 25(4): 1-4. (in Chinese)
- [44] 王宏伟, 张伟, 杨丽坤. 中国河流健康评价体系[J]. 河北大学学报: 自然科学版, 2011, 31(6): 668-672.
WANG Hong-wei, ZHANG Wei and YANG Li-kun. Outline of research on rivers health evaluation system. Journal of Hebei University (Natural Science Edition), 2011, 31(6): 668-672. (in Chinese)
- [45] 金占伟, 李向阳, 林木隆, 许进. 健康珠江评价指标体系研究[J]. 人民珠江, 2009, 1: 20-22.
JIN Zhan-wei, LI Xiang-yang, LIN Mu-long and XU Jin. Study of healthy Pearl River assessment index system. Pearl River, 2009, 1: 20-22. (in Chinese)
- [46] 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, 14.
LIN Mu-long, LI Xiang-yang and YANG Ming-hai. Probe into the index system for evaluating the health of the rivers in the Pearl River basin. Pearl River, 2006, 4: 1-3, 14. (in Chinese)
- [47] 中国河流健康与环境流量项目总结报告[Z]. 国际水资源中心, 2012.
River health & environment flow programme final report of China. Water Centre, 2012.
- [48] 陈雷. 实行最严格的水资源管理制度保障经济社会可持续发展[J]. 人民论坛, 2009, 6: 10-12.
CHEN Lei. The strictest water resources management system guarantee sustainable economic and social development. People's Tribune, 2009, 6: 10-12. (in Chinese)