

国家自然科学基金项目(51409226)

新疆自治区高校科研计划项目青年项目 (XJEDU2013S11)

新疆农业大学博士后科研流动站

资助

河流系统

健康评价与调控研究

◎ 高凡 黄强 孙晓懿 著



黄河水利出版社

国家自然科学基金项目(51409226)

新疆自治区高校科研计划项目青年项目(XJEDU2013S11)

新疆农业大学博士后科研流动站

资助

河流系统健康评价与调控研究

高凡 黄强 孙晓懿 著

黄河水利出版社

· 郑州 ·

内 容 提 要

本书围绕“学会在变化中生存,寻找人类用水与河流需水之间的平衡点”的河流保护观点,运用科学的方法,对河流系统的健康状态进行了评价,并通过制定有效的河流保护目标,重构了河流健康流量过程,在此基础上开展了基于河流健康的水资源多目标适应性调控研究,具有重要的意义和应用价值。

本书可作为环境科学、生态学、水资源管理等学科研究者及高校师生的参考用书,也可以作为水利部门、环境保护部门的管理者和决策者,以及相关领域研究人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

河流系统健康评价与调控研究/高凡,黄强,孙晓懿
著. —郑州:黄河水利出版社,2017.3

ISBN 978-7-5509-1712-5

I. ①河… II. ①高… ②黄… ③孙… III. ①河
流-水环境质量评价-研究 IV. ①X824

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 062709 号

出 版 社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼 14 层 邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371-66026940,66020550,66028024,66022620(传真)

E-mail:hhslebs@126.com

承印单位:河南新华印刷集团有限公司

开本:787 mm × 1 092 mm 1/16

印张:11.25

字数:260 千字

印数:1—1 000

版次:2017 年 3 月第 1 版

印次:2017 年 3 月第 1 次印刷

定价:36.00 元

前 言

人类在开发利用河流并从中获益的同时也造成了许多生态与环境问题,导致河流出现如河道断流、水体污染、湿地萎缩、生物多样性减少等一系列受损现象。在上述研究背景下,近年来,河流健康问题逐渐引起重视,并成为国际社会的普遍关注焦点和地球科学领域的研究热点。目前,“学会在变化中生存,寻找人类用水与河流需水之间的平衡点”是公认的、具有操作性的河流保护观点。相比国外,我国河流健康研究仍处于起步性探索阶段,研究基础及成果相对较少,且定性多、定量少,一些关键科学问题尚未得到有效解决,主要表现为以下几点:第一,河流健康的概念及内涵缺乏统一界定;第二,评价指标体系及方法缺乏理论依据,指标选择不全面,重复性强,可操作性差,且评价标准不统一,导致评价结果缺乏说服力;第三,对于如何保障河流健康,多侧重于从宏观角度提出对策及建议,且过于理想化,缺乏可操作性,对基于河流健康的水资源调控理论、方法、模型与算法研究成果较少,缺乏解决实际问题的能力。因此,从人水和谐角度出发,开展河流健康评价与调控研究,对于河流保护与管理意义重大。

鉴于此,本书在系统总结国内外相关研究的基础上,从系统角度出发,以河流系统为研究对象,科学界定河流健康的概念及内涵,识别影响河流健康的关键因子,构建河流健康评价指标体系,制定河流健康评价标准,建立河流健康评价模型和基于河流健康的水资源调控模型,尝试形成一套适用于河流系统的河流健康评价与调控的理论与方法体系,并以渭河关中段河流系统为典型,开展河流健康评价与调控的实例研究,可为以河流健康为目标的河流管理研究奠定理论与方法基础,为北方缺水污染型河流及高强度人类活动区河流管理与调控提供示范,具有典型性与代表性。

本书主要是在作者近年来研究成果的基础上,加以总结、凝练、补充和完善而成的。全书共分为9章,包含两部分内容:第一部分为理论;第二部分为实例应用。第一部分内容包括:第1章绪论——提出了研究的背景、目的、意义、主要内容及国内外的研究进展;第2章河流系统健康评价与调控的理论基础——从河流形成与发展、尺度、组成、结构、功能及系统等角度系统梳理了河流研究基础,为河流系统健康评价与调控研究提供了理论基础;第3章河流系统健康评价的基本理论——通过对河流系统健康的概念、内涵、特征及河流系统健康评价的指标体系、评价标准、评价模型及评价流程的探讨,建立河流系统健康评价的理论方法体系;第4章基于河流健康的水资源调控基本理论——基于流量和健康的关系,提出河流健康流量重构理论,运用自适应调控理论对基于河流健康的水资源调控问题进行描述,构建基于河流健康的水资源多目标自适应调控模型,从兴利、除害、生态环境等方面提出了水资源调控手段及水资源调控手段集成的水资源调控方案集,建立基于河流健康的水资源调控的理论方法体系。第二部分主要包括第5~8章,为实例应用部分,按照本书提出的河流系统健康评价和调控的理论方法,以渭河关中段河流系统为实例,进行河流健康的评价与调控研究;第9章为总结与展望。

本书的重要研究成果和特色主要表现在:①以河流系统为研究对象,定义了河流健康的概念,即特定时期一定社会公众价值体系下,在保障河流自身基本生存需求的前提下,能够持续地为人类社会提供高效合理的生态服务功能,并实现服务功能综合价值最大化的河流;归纳了河流健康的内涵,即河流形态与结构保持相对的稳定性、满足自然功能过程的基本水需求、满足社会功能过程的合理水需求、具有良好的自我维持能力和抗干扰能力。②从分析河流健康影响因子入手,基于压力—状态—响应模型(PSR)框架,运用基于粗糙集等价关系的指标约简模型和极大不相关法相结合的指标筛选方法,并结合专家和公众评判,构建了分3个层面、8个类别、合计共34个评价指标的河流健康评价指标体系,提出了河流健康评价标准的一般性制定步骤,将集对分析方法引入河流健康评价,采用改进的集对分析方法,建立了河流健康评价的模糊集对分析模型,并采用层次分析法和熵权法相结合的指标综合赋权方法为指标赋权,初步建立了河流系统健康评价的理论方法体系。③基于流量与河流健康的关系,提出了河流健康流量重构的理论与方法,借鉴自适应调控理论解决复杂系统不确定性问题的优势,运用自适应调控理论对水资源调控问题进行了描述,构建了由通用水资源调控模型与自适应调控模型耦合的基于河流健康的水资源多目标自适应调控模型,建立了基于河流健康的水资源调控的理论方法体系,并开展了实例应用研究。

由于河流健康评价研究是一个崭新的研究领域,本书只作了初步的探索与研究,尚有许多有待完善和进一步深入研究的问题和挑战。希望本书的出版能在丰富并完善河流健康评价理论方法与技术体系基础上,吸引更多的学者参与到河流生态环境保护与管理的研究中,促进该领域的发展和研究水平的提高。

限于时间和作者的学术水平,书中难免存在不足之处,敬请广大读者批评指正。

作者

2016年1月

目 录

前 言

第1章 绪 论	(1)
1.1 研究背景	(1)
1.2 研究目的及意义	(3)
1.3 国内外研究进展、存在问题及发展趋势	(4)
1.4 研究内容	(14)
第2章 河流系统健康评价与调控的理论基础	(15)
2.1 河流的分类与分级	(15)
2.2 河流的特征	(16)
2.3 河流演变与驱动力分析	(23)
第3章 河流系统健康评价的基本理论	(25)
3.1 河流健康的概念和内涵	(25)
3.2 河流健康的特征	(31)
3.3 河流健康评价的基本原理	(32)
3.4 河流健康评价指标体系构建	(36)
3.5 河流健康评价标准	(61)
3.6 河流健康评价模型	(64)
第4章 基于河流健康的水资源调控基本理论	(70)
4.1 水资源调控理论基础	(70)
4.2 基于河流健康的水资源多目标自适应调控的理论与方法	(73)
4.3 水资源调控手段与调控方案集	(79)
第5章 渭河关中段河流健康评价与调控基本资料	(81)
5.1 研究区概况	(81)
5.2 渭河关中段河流系统面临的主要健康威胁	(85)
5.3 渭河关中段河流健康评价与调控基本资料	(92)
第6章 渭河关中段河流健康评价研究	(99)
6.1 渭河关中段河流健康的标志	(99)
6.2 渭河关中段河流健康评价对象与评价尺度	(100)
6.3 渭河关中段河流健康影响因子与评价指标体系	(101)
6.4 渭河关中段河流健康评价标准	(106)
6.5 渭河关中段河流健康评价结果与分析	(108)
第7章 渭河关中段河流健康流量重构研究	(121)
7.1 河流健康流量基本理论	(121)

7.2 渭河关中段河流健康流量过程重构	(126)
第8章 渭河关中段基于河流健康的水资源多目标自适应调控研究	(141)
8.1 渭河关中段基于河流健康的水资源多目标自适应调控关键问题	(141)
8.2 渭河关中段基于河流健康的水资源多目标自适应调控模型	(142)
8.3 调控手段与调控方案集	(152)
8.4 结果与分析	(153)
第9章 总结与展望	(162)
9.1 主要结论	(162)
9.2 主要创新点	(163)
9.3 展 望	(164)
参考文献	(165)

第1章 绪论

1.1 研究背景

河流是人类文明的发源地。从人类有记载的历史看,人类文明最早大多出现在水资源充足且适宜人类居住的地方,如古埃及文明、古两河文明、古印度文明及古中华文明等均发源于大江大河两岸及其冲、洪积平原。从某种意义上看,人类历史或多或少是成功治水的历史。人类对河流的开发利用模式,经历了从最初的为了生存而自发利用水资源的被动适应型,到20世纪60年代后的以水资源大规模开发利用为标志的需求主导型,直至20世纪80年代后的以可持续发展理念为主导的水资源持续开发利用模式。有人称20世纪为水资源开发利用的世纪。人类的各项生命周期活动和经济社会行为均离不开水。联合国最新公布的《全球环境展望报告》指出,1987~2007年地球总人口增长了34%,达到67亿人。全球人均年收入增长了40%,为8 162美元。为了养活不断增长的人口和维持经济社会的发展,全世界60%的主要河流兴建了水坝或令其改道。据世界大坝学会统计,目前全世界160个国家已修建大坝45 000座(15 m以上),控制着全球20%以上的河川径流量。

中国河流众多,主要的大江大河包括北方的松花江、辽河、海河、黄河、淮河,西北地区的内陆河塔里木河、黑河,以及南方的长江、珠江等。我国大部分地区处于季风气候区,降水量和河川径流量时空分布不均,具有地形分布上东多西少,南多北少,时间分布上冬春少雨,夏秋多雨,降水径流多集中在汛期(占全年的60%~80%),南方易洪涝,北方易干旱的时空差异特征。我国河流多年平均河川径流量 2.74×10^4 亿 m^3 ,约占年平均水资源总量的96.4%,折合径流深为288 mm,由于水文条件的特殊性,洪水径流比重较大,实际可利用的河川径流量仅 1.08×10^4 亿 m^3 ,人均约900 m^3 ,且空间分布极为不均,北方地区可利用的河川径流量只有南方地区的1/4。我国河流开发利用历史悠久,从大禹治水至今已有4 000多年的历史。目前,我国拥有22 000座大坝(15 m以上),且由于西南水电能源基地的建设,这个数据还在继续增长。以黄河为例,新中国成立以来,截至2007年底,黄河累计兴建大小水库2 600多座。其中,大型水利枢纽22座,总库容达617 亿 m^3 ,已远远超过黄河花园口站多年平均径流量534.5 亿 m^3 。从近10年(1998~2007年)我国河流开发利用情况看,全国年平均降水量635.4 mm,较常年值偏少1.1%。其中,北方地区偏少3.4%;年平均河川径流量 2.67×10^4 亿 m^3 (占年平均水资源总量的96.17%),其中北方地区偏少5.4%;年平均河川径流开发利用量4 487 亿 m^3 ,占总供水量的80.7%。由于我国人口众多,河流水资源开发利用水平较高,特别是北方平原地区河流,受高强度人类活动影响,大多数河流水资源开发利用率多为40%~60%,超过国际合理阈值30%。其中,海河、黄河、辽河、淮河水资源开发利用率分别达106%、96%、76%、59%。

水不仅是人类生存和发展不可替代的基础性自然资源、战略性经济资源和公共性社会资源,还是一切生物的生命之源,是构成生态环境的关键生境要素。河流是地球上多样化的生态系统中最重要生态系统之一,是人类最重要的生命支撑系统。从系统的角度看,河流具有较强的抗干扰能力,但外界干扰一旦超过其自我修复能力达一定程度或者持续一定时间后,河流会发生不可逆退化,并导致诸项服务功能的下降甚至消失。除自然界正常干扰外,人类活动对河流来说也属于一种外界干扰,具体表现在:①对河流形态的干扰;②对水量及水流连续性的干扰;③对水质的干扰;④外来物种的引入造成本地土著物种及特色物种的消失;⑤对水生生物、河岸带生物栖息地的干扰及破坏造成的生物多样性减少;⑥对河道外土地的干扰造成的对河流的间接干扰;⑦气候变化对河流的间接干扰。

随着人类经济社会的发展,造成与水有关的生态环境问题的驱动力越来越强,包括人口增长、城市化、工业化、全球化等。这些驱动力无时无刻不在对地球的生命之源——水及地球生命支撑系统施加压力,改变了河流天然的形态结构,影响了河流固有的水循环及天然水文情势,破坏了河流生态系统赖以生存的生境因子(包括水量、水质、水流连续性、形态多样性、栖息地完整性等),并出现了一系列诸如河道水量剧减甚至断流、地下水位下降、水质污染、生物多样性减少等水生态与环境问题,其中许多问题都在近十几年内集中爆发,并呈不断恶化趋势,威胁河流生命的延续。2004年11月,联合国环境计划署对流域面积最大的25条世界大河进行调查的结果表明:世界大江大河水质欠佳,水量日益减少,污染程度日渐加重,包括中国黄河在内的六条河流被评为世界上最不卫生的河流。联合国《水资源发展报告》指出,地球上的河流、湖泊及人类赖以生存的淡水资源状况正以惊人的速度恶化,全球500条主要河流中至少有一半严重枯竭或被污染;世界第一大河尼罗河、印度文明发祥地印度河到达入海口水量大大减少;美国的科罗拉多河、约旦河、格兰德河河流长度大大缩减;20世纪全球湿地面积减少了一半,生物多样性急剧下降,全球9000种可识别的淡水鱼类中近1/5遭受灭绝、受威胁或濒临消失。以上数据或实例只是全球河流受损的个别案例,正如联合国《千年生态系统评估报告》(Millennium Ecosystem Assessment)所言,地球上各个角落或多或少都在经历着生态系统失调,几乎所有的河流都非原始状态,我们的地球病了,河流的生命受到了威胁。

我国人水矛盾突出,河流开发利用强度高于西方发达国家,面临的河流问题最多也最复杂。特别是改革开放的30多年来,经济高速发展的同时,水资源短缺、水环境污染、水旱灾害加剧、水生态退化等生态与环境问题日益突出,具体表现在:①河流上游通过修建蓄水工程层层拦截地表水,致使下游地表径流减少,河长缩短,尾间湖泊水面萎缩甚至消失,很多河流变为季节性河流,如黄河的21年断流、塔里木河的断流及尾间湖泊的消失、海河断流频次增多等。②大量入河污染物的排放导致水体污染严重。我国七大江河水系的741个监测断面中30.0%为Ⅳ、Ⅴ类水,40.9%为劣Ⅴ类水。③水体富营养化增加造成外来物种入侵,如2007年太湖发生的大面积蓝藻水华。④湿地萎缩造成景观多样性和生物多样性严重减少,近30年,三江平原湿地面积减少70%~90%,辽河三角洲湿地减少近15%,黄河三角洲湿地减少近64%,我国鱼虾绝迹的河长累计达2400 km。⑤水土流失导致河床萎缩,行洪能力下降,加上滩地围垦造成河道蓄洪空间被挤占,近年来“小水大洪灾”现象屡屡可见,如黄河的“96·8”“98·7”“2003·8”洪水。⑥近海海域及河

口三角洲地区的生态系统退化等。这些问题已成为中国经济与社会可持续发展最重要的限制因素之一。

以上诸多河流生态与环境问题警示我们,河流受损会导致河流功能退化,最终必将对人类健康及经济社会发展构成严重威胁。整个 20 世纪发生在地球上的种种生态危机事实促使人们不得不重新看待河流,思考河流的价值,重新定位人与河流之间的关系,并采取措施,修复或重建河流生态系统,恢复河流服务功能。河流健康理念基于此背景提出,赋予河流生命的意义,从河流生命维持的角度界定了人类对河流索取的限度和开发利用阈值,从河流管理的角度提出了河流管理的新目标,从生态伦理、生态道德的角度进一步强调了人类与生态系统分享共同的水源。河流健康不是某些理化参数的达标或若干生态因子的合格,而是河流系统的、综合的、全面的健康,是河流在保持其形态结构相对完整性的基础上,能维持其自然功能与经济社会服务功能的持续良好发挥。只有在维护河流健康的前提下,才能满足人类不断增长的需求,有效保障人类健康与经济社会的可持续发展。

1.2 研究目的及意义

近年来,在上述研究背景下,河流健康问题逐渐引起重视,并成为国际社会普遍关注的焦点和地球科学领域的研究热点。相比国外,我国河流健康研究仍处于起步性探索阶段,研究基础及成果相对较少,且定性多、定量少,一些关键科学问题尚未得到有效解决,主要表现在:第一,河流健康的概念及内涵缺乏统一界定;第二,评价指标体系及方法缺乏理论依据,指标选择不全面,重复性强,可操作性差,且评价标准不统一,导致评价结果缺乏说服力;第三,对于如何保障河流健康,多侧重于从宏观角度提出对策及建议,且过于理想化,缺乏可操作性,对基于河流健康的水资源调控理论、方法、模型与算法研究成果较少,缺乏解决实际问题的能力。因此,从人水和谐角度出发,开展河流健康评价与调控研究,对于河流保护与管理意义重大。

渭河是黄河的第一大支流,是八百里秦川的生命线,是陕西人民的“母亲河”。自 20 世纪 80 年代起,受气候和人类活动因素的双重影响,渭河面临着以“上游水少、中游水脏、下游淤积”为标志的一系列与水有关的生态环境问题,核心即由缺水而衍生的一系列水生态与环境问题,本质则是人水不和谐的集中体现。渭河关中段横贯陕西省东西,主要流经陕西省的经济中枢——关中地区。关中地区是中华民族的发祥地之一,历史上曾有十三个王朝建都,文化积淀十分深厚。渭河关中段的大规模开发始于 20 世纪 70 年代末,目前,关中地区集中了陕西省 64% 的人口、56% 的耕地、72% 的灌溉面积和 80% 的 GDP,是陕西省经济最发达、水利化程度最高、人口最密集、城市群最集中的地区,其水资源开发利用率高达 80%,且由于渭河是关中地区唯一的水流排泄通道(排泄比 80%),大量的河道外引水加上废污水排泄,渭河还是一条“纳污河”。据陕西省环境质量公报公布,2007 年渭河关中段综合污染指数为 4.44,干流 13 个监测断面中 76.9% 超过了水域功能要求,其中 10 个断面为劣 V 类,包括陕西出境断面。渭河关中段 COD 含量超过其环境容量的 2.7 倍。一方面,随着关中地区经济的快速发展,人民生活水平的进一步提高,关中一天

水经济区等区域一体化发展规划的颁布,今后对水资源的需求将进一步增加;另一方面,由于长期以来人类活动对河流的索取远超过其承载能力,河流系统已表现出不同程度的退化,导致河流各项服务功能受损,并成为制约流域可持续发展的心腹之患。

基于此,本书从系统角度出发,以河流系统为研究对象,科学界定河流健康的概念及内涵,识别影响河流健康的关键因子,构建河流健康评价指标体系,制定河流健康评价标准,建立河流健康评价模型和基于河流健康的水资源调控模型,尝试形成一套河流系统健康评价与调控的理论与方法体系,并以渭河关中段河流系统为典型,开展河流健康评价与调控的实例研究。通过本研究,可为以河流健康为目标的河流管理研究奠定理论与方法基础,为北方缺水污染型河流及高强度人类活动区河流管理与调控提供示范,具有典型性与代表性,其理论意义及现实价值主要体现在以下几个方面:

(1)河流健康作为河流状态的新评价标准,在河流管理中已得到越来越多的认可。从全面、综合与系统的角度诊断河流健康状况已成为河流保护与管理领域的发展趋势。本研究在此背景下展开,立足科学前沿,响应国家和地区需求,具有时代意义和前瞻性。

(2)河流健康评价将定性分析与定量评价相结合,得出河流状态健康与否的相对性评价成果,可为河流治理与河流管理指明方向,为促进流域水资源合理配置提供科学依据,具有现实意义和指导性。

(3)基于河流健康的水资源调控模型的建立,将河流健康目标与其他兴利除害目标相耦合,形成多目标问题,与水资源配置及调控有机结合,在时空上统筹河道内、外用水,协调上、中、下游用水,寻求河流开发与保护的平衡点,是河流管理的最终目标,具有实际意义和可操作性。

(4)渭河的治理,在黄河流域具有典型性和代表性,不仅关系到关中经济带及整个陕西省的可持续发展,而且关系到流域数千年人类历史文明的延续。渭河河流健康评价与调控研究对于保护渭河具有重要的理论和现实意义。此外,该研究成果对于指导北方高强度人类活动区污染缺水及多泥沙河流的治理,具有重要的借鉴意义和示范效应。

1.3 国内外研究进展、存在问题及发展趋势

1.3.1 关于河流健康的国内外研究进展

随着国内外对河流保护工作的重视,河流健康及相关研究相继展开,主要集中在河流健康概念及内涵的界定、河流健康评价指标体系的构建、河流健康评价模型及评价方法的研究等领域。

1.3.1.1 河流健康研究发展历程

尽管河流健康是近年来河流保护与管理领域兴起的新概念、新理念,但关于河流生态系统的监测与研究已有较长历史。一个世纪前,人们已注意到水生态系统的任何变化都会影响水生生物的生理功能、种类丰度、种群密度、群落结构及功能等,开始尝试以水生生物为指示生物,使用生物监测手段来间接评价河流生态系统健康,该时期河流健康评价主要集中在欧洲少数严重污染的河流,且主要关注水质评价。随着河流开发利用强度的不

断增大,河流开始出现长度缩减、流量减小、水质变差、生物多样性减少等水生态与环境问题后,人们才认识到,要持续地从河流获得资源与服务的前提必须建立在对河流的有效保护基础上。1972年,美国在《清洁水法令》中首次提出河流健康的概念,并运用于河流管理中,尝试在水污染控制中采用物理、化学与生物等多指标综合的方法全面评价河流健康状况,以区别于以往单纯的水质评价方法。20世纪80年代起,一方面,由于水资源短缺、水污染加剧造成的水安全危机日益凸显,已成为经济社会发展的“瓶颈”;另一方面,随着人们对河流价值的深入认识,河流保护行动在欧洲和北美等发达国家广泛兴起。许多国家通过修改、制定水法和环境保护法,以加强对河流的环境评估,并且提出了包括水文、水质、生物栖息地、生物等指标的河流健康综合评价方法。其中,以1981年Karr提出的包含12项指标的生态完整性指数(IBM)及1984年英国提出的河流无脊椎动物预测和分类系统(RIVPACS)最具代表性,并且在美国、英国、澳大利亚和南非等国家应用效果较好。该时期河流管理的重点已由单纯的水质保护转为河流生态系统的全面保护,河流健康评价也由早期的水质评价转为河流生态环境质量的综合评价。进入20世纪90年代后,河流健康的概念及内涵更加丰富,其评价方法也更加合理。这期间,Petersen、Rowntree及Ladson分析了河流生物健康与河流物理生境的内在联系及相互作用影响,提出了基于河流形态结构、水文特征和河岸带状况的河流健康评价方法。1993年澳大利亚政府启动了“国家河流健康计划”(National River Health Program, NRHP),该计划联合各州及当地机构共同协作维护河流生态系统功能,为河流及河漫滩的管理提供背景信息。1994年南非水务与森林部提出了“河流健康计划”(The River Health Programme, RHP),旨在利用生态和生境完整性监测指标对河流进行评价。英国关注河流健康的一个重要举措就是通过河流生态环境调查,包括背景信息、河道数据、沉积物特征、植被类型、河岸侵蚀、河岸带特征及土地利用状况等,来评价河流生境与原始状态的差距,并于1998年提出了“英国河流保护评价系统”。1999年美国环保署(Environmental Protection Agency, EPA)流域评价与保护分部改进了1989年提出的旨在为水质管理提供水生生物数据的快速生物监测协议(Rapid Bioassessment Protocols, RBP),推出了新版的RBPs,其中一个重要的部分即河流快速生物监测协议。成立于2000年的欧盟《水框架指令》标志欧洲水事行为的新方向,是指导欧盟国家(2000~2015年)河流修复的基本依据,英国、荷兰、澳大利亚、德国等国家都在该框架下进行了相关工作。近几年,有学者基于流域尺度开展河流健康研究,如1999年Goforth提出的流域生境评估及生物完整性协议(WHEBIP)等。综上所述,河流健康在国外已有近20年的研究和实践经验,以美国、英国、澳大利亚以及南非等国家最具代表性,有的国家已经制定了相应的技术标准。

相比国外,我国虽然在水质评价方面已经形成了较完善的技术标准,但河流健康研究起步较晚,同时由于中国国情的特殊性、自然条件的差异性,河流面临的问题也更具多样性、复杂性和综合性特征。2000年以后,长江、黄河、珠江水利委员会等流域机构和一些学者先后开展了河流健康研究,标志着我国河流健康研究工作的开始。唐涛(2002)较早地在《应用生态学报》上发表了《河流生态系统健康及其评价》。随后,针对不同研究视角、不同研究区域的一系列相关研究相继展开,主要集中在河流健康概念的界定、评价指标体系的构建、评价模型的建立及河流修复与可持续管理等方面。2003年10月李国英在黄

河国际论坛提出“维持河流健康生命”的治河新理念,并提出黄河健康标志。2005年蔡其华提出健康长江指标体系。2005年冯普林提出渭河健康标志及评价指标体系。随着城市河流问题的日益突出及我国对城市河流综合治理力度的不断加大,城市河流健康研究近年来成为关注热点,如赵彦伟(2005)提出宁波河流健康评价指标体系;吴阿娜(2006)对上海城市河流健康状态的研究和评价等。总体而言,我国河流健康研究处于起步阶段,方兴未艾。

1.3.1.2 河流健康的概念及内涵

河流健康概念是伴随土地健康、生态系统健康等概念的出现而应运而生的。河流健康是与人类健康类比的,目前其概念及内涵尚未统一,还存在许多有争议的问题。

研究者不同的学科背景和视角,加上河流自然环境和生态系统本身的复杂性,河流健康概念的表述呈现出多元化格局。归纳起来,主要概括为河流生态系统健康和河流系统健康两大类主流意见,也称为狭义的河流健康和广义的河流健康。

由于“河流健康”的概念来源于认为“对河流生态系统保护是河流面临的主要挑战”的西方国家,因此在过去相当长一段时间内,对河流健康的研究多以河流生态系统为主体,河流健康即河流生态系统健康。Schofield 提出河流健康是河流与同一类型的没有受到破坏的河流的相似程度,尤其在生物多样性和生态系统功能方面;Simpson 等把河流受扰前的原始状态作为河流的健康状态,认为河流健康是指河流生态系统能够支撑和维持河流主要的生态过程,且具有一定种类组成、多样性和功能组织的生物群落应尽可能接近受扰前状态;美国《清洁水法令》认为河流健康指的是物理、化学、生物的完整性,即生态系统维持其自然结构和功能的状态;Schofield、Norris、Karr、An 等学者认为河流健康即维持河流生态系统的完整性,主要从生态系统健康的角度考虑。

随着对河流健康概念理解的深入,越来越多的学者认为河流健康应包含人类健康,即应在保持生态系统自我维持与自我更新能力的同时,满足人类社会对河流的合理需求,且从价值角度看,认为河流健康应包含人类价值。这种观点逐渐得到认同。Simpson 在后来的河流健康定义中,将人类作为生态系统的组成部分包含在内,将河流对人类的服务功能作为河流应支撑与维持的主要生态过程之一;澳大利亚新南威尔士州健康河流委员会(Healthy River Commission)将河流健康定义为与其环境、社会和经济特征相适应,能够支撑社会所希望的河流功能,强调河流健康的综合价值应当表现在,满足生产生活需要的经济价值、提供各种生物生存栖息地的环境价值、提供娱乐与观赏功能的社会价值;Fairweather 认为,河流健康不仅包含活力、生命力、未受损害的功能等健康状态,还应包含公众对河流的环境期望,以及关于河流健康的社会、经济和政治观点;Richter 强调河流健康必须依赖社会系统的判断,应综合考虑生态功能与人类福利要求;Meyer 认为健康的河流除了要维持生态系统的结构与功能,还要支撑其社会价值;Rogers 等从管理角度界定河流健康概念,认为健康的河流不仅要保持生态学意义上的完整性,还应强调对人类服务功能的发挥,只有两者统一才有助于实现河流生态系统的良性循环和对人类服务功能的持续供给。我国学者更倾向于后一种提法。邵坚认为河流健康应包含对水资源合理开发利用行为的认可,河流管理应兼顾人类需求和河流生态系统健康,河流健康的目标为,既是一条“工作”的河流,又是一条“健康”的河流;杨文慧认为河流健康以河流系统为研究对象,

指河流系统的结构和各项功能都处于良好状态,保证河流可持续开发利用目标的实现;高学平认为健康的河流是自然属性和社会属性平衡的河流。

还有学者将河流健康概念定义为河流健康生命或河流生命健康,认为河流健康是在河流生命存在的前提下,人们对其生命存在状态的描述。李国英指出黄河健康生命就是要维护黄河的生命功能;胡春宏指出维持黄河健康生命的内涵包括河道的健康、流域生态环境系统的健康和流域社会经济发展与人类健康等三方面;赵凯从维持山西河流健康生命角度出发,认为河流健康生命是指河流的生机与活力,是在兼顾河流自身需求和人类需求的前提下,河流为人类生存和发展提供可持续支持的能力;冯普林从渭河存在的主要生态环境问题着手,认为渭河健康生命的基本内涵是:以稳定河床的维持、水域功能的实现、良好生态的维系、人水和谐关系的建立为目标,重新审视河流水文循环中的水沙过程及其搭配关系在河流生命维持中的作用和重塑方向,重新认识枯水期基流、河流湿地和水域功能等河流非生物环境的重要地位,重新把握洪水风险和水沙资源利用问题,进而采取必要的工程和非工程措施,维护河流生命;蔡其华阐述了健康长江生命的概念,认为健康长江以河流为定义主体,强调河流生命的健康及河流功能的健康。

此外,随着城市化的不断扩张,城市河流作为受人类干扰较显著的河流类型,近年来引起人们的广泛关注。目前对城市河流健康概念较为一致的表述为,城市河流健康不仅意味着生态学意义上的城市河流生态系统结构的完整、生态过程的延续,以及自然功能的良好发挥,还强调城市河流的供水、防洪、灌溉、发电、航运、景观娱乐等为人类社会服务功能的有效且持续发挥。城市河流健康是一个将人类发展与生态系统保护相协调的高度整合性的概念,对城市河流健康的评价及管理目标的设定必须建立在公众与社会期望,以及人类价值判断基础上。

综上所述,河流健康概念涉及的范畴较广。由于各个国家及地区河流本底条件不同,受到干扰的类型和强度有别,面临的生态环境问题多样,研究主体、目的及视角也有区别,因此,河流健康概念及内涵才会出现多元化的表述。河流生态系统健康以河流生态系统为研究对象,认为河流健康即河流生态系统健康,是生态系统健康概念在河流上的应用,有学者定义为狭义的河流健康。目前,较多学者认为这不是真正意义上的河流健康。河流系统健康以河流系统为研究对象,体现河流的综合价值,是考虑河流生态系统并兼顾人类需求而提出的,有学者定义为广义的河流健康。近年来,有学者将河流健康研究对象从河流系统扩至整个流域尺度,将河流视作流域的一个基本组成单元,基于流域健康角度论述河流健康。

1.3.1.3 河流健康评价

河流健康的概念,严格来讲,与其认为是一个科学概念,不如将其看做是一种河流管理的工具。研究河流健康的目的在于在河流上建立一种基准状态,并作为河流管理的目标,通过一套科学的诊断体系,评估河流健康状态的变化方向及趋势,据此进行河流的适应性动态管理。河流健康评价研究主要集中在评价指标的选择与处理、评价指标体系与评价标准的建立,以及评价模型与方法的研究等方面。

从河流健康评价的技术手段看,主要包括河流水体物理化学评估(水质评价)、生物栖息地质量评估、水文评估和生物评估4个方面。从评价原理看,可以分为两类:一类是

预测模型法(predictive model)或多元变量统计分析方法(multivariate statistical methods);另一类是多指标方法(multimetrics index)。其中,预测模型法的代表方法如 Rivpacts 和 AusRivAS 等。该类方法将评价对象实际的生物组成与无人干扰下的原始生物组成进行比较继而对河流健康进行评价,关键是选择参考点(reference sites,即无人干扰或人为干扰最小的样点),根据样点的环境特征及生物组成建立经验模型,通过比较观测点生物组成的实际值与模型预测的预期值,用两者的比值进行河流健康评价,理论上,该比值在 0~1 之间变化,且比值越接近 1,则观测点的健康状况越好。预测模型法的缺点是主要通过单一物种对河流健康进行比较,且假设河流的任何变化都会反映在这一物种的变化上,无法反映河流真实状况,具有一定的局限性;多指标方法通过对观测点的一系列特征指标与参考点的对应指标进行比较并计分,累加得分进行评价,代表方法较多,是对河流的综合评价,结果也更加全面、客观,是河流健康评价方法的发展趋势。然而,该类方法也存在诸如指标获取与处理、评价标准确定等问题,评价精度和可操作性也有所欠缺。

从评价方法看,河流健康评价可以分为两类:一类是生物监测指标法或指示物种法;另一类是综合评价指标法或结构功能指标法。生物监测指标法的关键是指示生物的选择,主要是着生藻类(以硅藻为主)、无脊椎动物和鱼类,代表性方法如“澳大利亚河流评价方案”(AUSRIVAS),是一种快速生物评价法,利用大型无脊椎动物的生存状况评价河流健康;Kart 提出的生物完整性指数(IBM)由反映水域生态系统的生物群落物种组成、营养结构、个体健康状况等三方面特征的 12 个指标量化后形成,同时水环境按照生物完整性分为六个等级,是目前较普及的河流生态系统健康评价方法,指示生物由最初的鱼类推广至其他生物;英国淡水生态所河流实验室提出的河流无脊椎动物监测和分类系统(RIVPACS)早期目标是提高保护位置的选择,分析重点是物种组成类型;另外使用硅藻相关指数 ISP 和 GDI 反映水环境的腐生程度、TDI 指数反映水环境的营养程度、“河流无脊椎动物预测和分类系统”、“南非计分系统”、底栖生物完整性指数(B-IBM)、“联合国教科文组织(UNESCO)提出的衡量指标”、“新西兰的河流生态系统健康标准”以及营养完全指数(ITC)等都是较为有代表性的方法。该类方法的局限是需要有大量的生物数据及生物与环境之间的关系研究作为评价基础,在缺乏长期生物观测的区域,该方法的使用受到了限制,且不同的指示物种及不同的参数选择评价结果都会出现偏差,此外,该类方法能反映河流生态系统的健康水平,但不足以反映河流健康水平。综合评价指标法又可以分为单一指标评价法和指标体系综合评价法。由于在流域范围内对所有干扰都敏感的指标是不可能存在的,故单一指标评价法目前较少使用,而指标体系综合评价法可以全面、系统地反映河流系统状态,在美国和澳大利亚等国家被广泛应用,近年来在我国也逐渐得到推广,代表性方法较多。其中,最具代表性的方法是 Ladson 提出的澳大利亚溪流状况指数 ISC,该方法构建了河流水文、形态特征、河岸带、水质及水生生物 5 方面共计 22 项指标的评价指标体系,综合评价了澳大利亚 80 多条河流健康状况;南非“河流健康计划”采用河流无脊椎动物、鱼类、河岸植被、生境完整性等作为河流健康的评价指标;美国环保署 1989 年发展了快速生物评价协议(RBPs),1999 年又更新了新版本的(RBPs),该方法采用生物集合体资料评价河流状态,以无人干扰或受人类干扰较小的河流为参考,并采用相应于生物指标的生境指标修正生物指标,使生物质量评价结果可以更好地反映

河流受损状态;英国 20 世纪 90 年代建立的河流保护评价系统(SERCON)从物理多样性、自然性、代表性、稀有性、种群丰度、特有性等方面采用了 35 个特征指标评价河流状态;Robert 等提出河岸带、河道、环境目录(RCE)评分,综合考虑河流理化及社会经济等 16 个特征因子用于评价非点源污染农业区小溪流的健康状态;澳大利亚水生生物环境质量指数(IAEQ)采用水质、泥沙中有毒物质、大型底栖无脊椎动物、鱼类和河岸植被等 5 部分指标评价维多利亚州的内陆水体;维多利亚河流环境状态(ECVs)采用河床组成、河岸植被、濒危植被、覆盖物、水深、流速等 10 个指标评价维多利亚州河流环境状态;澳大利亚昆士兰河流状态调查(SRS)方法采用包括水文、河道栖息地、横断面、景观休闲和保护价值等 11 个方面指标评价河流的物理和环境状态。

国内多采用指标体系综合评价法进行河流健康评价研究。1999 年,上海市环境监测中心建立了由理化、生物、营养状况和景观指标等组成的黄浦江水环境状态评价指标体系;长江水利委员会提出了由总目标层、系统层、状态层和要素层 4 级 16 个指标构成的健康长江评价指标体系,形成了我国首个能用数值表达的健康河流定量评价体系;黄河水利委员会提出了低限流量、平滩流量、湿地面积、水质类别等 9 个因子表征健康黄河;赵彦伟(2005)提出了包含水量、水质、水生生物、物理结构与河岸带 5 大要素 19 个指标的河流健康指标体系用于宁波市河流健康状况的评价;刘晓燕(2005)提出用低限流量、平滩流量、湿地面积等 9 个指示性因子作为评价健康黄河的标志;杨文慧(2006)从河流结构健康指数、生态环境功能健康指数、社会服务功能健康指数三个方面选取 24 项指标构建了河流健康评价指标体系;孙雪岚(2007)从河道健康、河流生态系统健康,以及社会经济价值等方面选取 24 个评价指标构建了河流健康评价指标体系;杨馥(2008)构建了包含生态特征指标、整体功能性指标和社会环境影响指标 3 大要素 19 个指标的城市河流生态系统健康评价指标体系用于长沙市湘江河流生态系统健康评价;蔡守华(2008)提出了包含水量、水质、水生生物、河道、缓冲带、景观、防洪安全 7 个评价对象 10 个指标的河流健康评价指标体系;郦建强(2008)从河流服务功能、环境功能、防洪功能、利用功能、生态功能等五个方面选取 25 项指标构建河流健康复杂系统评价指标体系并应用于澜沧江河流健康评价研究;吴阿娜(2008)从理化参数、生物指标、形态结构、水文特征、河岸带状况等方面构建河流健康评价指标体系用于上海地区城市河流健康状态的评价;张亮(2009)从河道形态、河岸带状况及河床形态等方面选取 9 个指标建立河流形态学评价指标体系;陈毅等(2011)从水量、水质、水生生物、河岸带、形态结构、社会功能等方面选择 14 个指标构建河流健康评价指标体系并用于潮白河健康状况评价。综上所述,指标体系综合评价方法由于采用多指标反映河流系统的健康状态,可以较全面地反映河流真实情形,且易于将河流社会服务功能及人类赋予河流的价值纳入河流健康评价,较符合当前河流管理需求,因此该类方法被公认为河流健康评价全面且可靠的方法,见表 1-1。

表 1-1 国内外主要的河流健康综合评价方法、评价指标及内容的选择与对比

国家	评价方法	河流健康评价指标及内容									
		水文	水质	物理结构	河岸质量	水生生物	防洪	景观	水资源	通航	水电
澳大利亚	澳大利亚河流评价计划 (AUSRIVAS)	√	√	√		√					
	溪流状态指数 (ISC)	√	√	√	√	√					
	河流状态调查 (SRS)	√		√	√			√			
	河流环境状态 (ECVs)	√		√	√			√			
	水生生物环境质量指数 (IAEQ)		√		√	√					
	HPM	√	√	√	√						
	GRS	√		√	√						
美国	快速生物监测协议 (RBPs)	√		√	√	√					
	生物完整性指数 (IBI)	√	√		√	√					
	岸边与河道环境细则 (RCE)			√	√	√					
英国	河流生态环境调查 (RHS)	√		√	√						
	河流无脊椎动物预测与分类计划 (RIVPACS)					√					
	英国河流保护评价系统 (SERCON)	√		√	√			√			
南非	栖息地完整性指数 (IHI)	√	√	√	√	√					
	河流健康计划 (RHP)	√	√	√	√	√					
中国	黄浦江水环境评价指标体系	√	√	√				√			
	健康黄河评价指标体系	√	√	√	√	√	√		√		
	健康长江评价指标体系	√	√	√	√	√	√		√	√	√
	健康珠江评价指标体系	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√

1.3.2 关于水资源调控的国内外研究进展

目前,以河流健康为目标的水资源多目标调控研究仍较为鲜见,相关的研究主要集中在传统的以兴利为主的水资源多目标调控、水库生态调度及水资源优化配置等领域。

水资源调控也称为水量调控或水资源的再分配,是解决水资源时空分布不均的有效