

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2015.01.014

嫩江下游尼尔基—三岔河口段河流健康评价

吴计生¹, 梁团豪², 霍堂斌³, 李 颖⁴, 田竹君¹

(1. 松辽水环境科学研究所, 吉林 长春 130021; 2. 松辽水利委员会流域规划与政策研究中心, 吉林 长春 130021;
3. 中国水产科学研究院黑龙江水产研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001;
4. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 吉林 长春 130102)

摘要:从水文水资源、物理结构、水质、生物和社会服务功能等 5 个准则层和 14 个指标层对 2011 年的嫩江下游尼尔基—三岔河口段河流健康状况进行评价。结果表明, 受人类开发活动影响, 嫩江下游河流健康评价指数赋分为 59 分, 河流处于亚健康状态; 农业开发、水利工程建设、过度捕捞等人类干扰是造成下游河流生境变化的主要因素。提出了水利工程生态调度、河岸带修复与管理、水质修复、栖息地修复、湿地生态系统恢复等河流健康管理措施。
关键词:河流健康; 亚健康; 健康评价; 指标体系; 嫩江下游
中图分类号:X171.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2015)01-0086-05

Assessment on river health of Nierji-Sancha River Estuary of Nenjiang River downstream

WU Jisheng¹, LIANG Tuanhao², HUO Tangbin³, LI Ying⁴, TIAN Zhujun¹

(1. Songliao Institute of Water Environmental Science, Changchun 130021, China;
2. Basin Planning and Policy Research Center, Songliao Water Resources Commission, Changchun 130021, China;
3. Heilongjiang Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Harbin 150001, China;
4. Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, China)

Abstract: Based on the criterion layer consisting of hydrology and water resources, physical structure, water quality, biology and social service function, etc. and the index layer consisting of 14 indexes, the river health of Nierji-Sancha River Estuary in the downstream of Nenjiang River in the year of 2011 was assessed. The results show that, affected by human activities, the score of Nenjiang river health assessment index is 59 and the river is in the sub-healthy status. Agricultural development, water conservancy construction, overfishing and other human disturbances are the main factors contributing to eco-environmental changes of river downstream. Countermeasures of river health management including ecological operation of water conservancy project, riparian restoration and management, water quality restoration, habitat restoration, wetland ecosystem restoration were put forward.

Key words: River health; sub-health; health assessment; index system; downstream of Nenjiang River

河湖水系是地表水资源的主要载体, 是维系生态系统健康的重要因子, 也是哺育人类历史文明的摇篮。在国务院下发的《关于加快水利改革发展的决定》(中发[2011]1 号) 和《关于实行最严格水资源管理制度的意见》(国发[2012]3 号) 文件中均明确提出维护河湖健康生态的根本要求。近年来, 国内一些专家和学者对河流健康理论、评价技术及不同水体应用开展了相关研究, 董哲仁等^[1-3]研究了河流健康的内涵、评价体系、评价方法等, 胡春宏等^[4-7]分别在黄河下游、赣江、辽河、太湖等流域开展河流

基金项目: 水利部全国重要河湖健康评估项目(1261220517001)
作者简介: 吴计生(1981—), 女, 高级工程师, 硕士, 主要从事水资源保护、水生态保护与修复研究。E-mail: wjs@slwr.gov.cn

健康评价工作,从理论和实践方面进行了有益的探索。在水利部统一部署下,2010—2012 年松辽流域开展了流域重要河湖健康评价试点工作。笔者以嫩江下游尼尔基—三岔河口段河流为试点水域,基于水文水资源、物理结构、水质、生物和社会服务功能等 5 个准则层对嫩江下游河流健康状况进行了评价,并进一步分析造成河流健康压力的主要原因,为制定河流有效保护和合理开发决策提供技术支撑。

1 嫩江流域概况与河流评价分段方案

嫩江是松花江的北源,发源于大兴安岭支脉伊勒呼里山中段南侧,属温带大陆性季风气候,多年平均降雨量 400 ~ 500 mm^[8]。嫩江上游地区穿行于大兴安岭山区,山高林密,河谷狭窄,支流众多;中游从嫩江县城到尼尔基水库坝址,是山区到平原区的过渡地带,支流较少;下游江道进入广阔的松嫩平原地带,地势低平,江道蜿蜒曲折,滩地展阔,滩地上多泡沼、湿地和牛轭湖,支流增多。嫩江位于东经 119° 52' ~ 126° 30',北纬 45° 27' ~ 51° 38',从河源至河口全长 1370 km,高差约 900 m,纵贯松嫩平原西部,流域面积 29.7 万 km²,占松花江流域面积的 52%。

结合流域工作实际情况,本次河流健康评价选择嫩江下游河段(尼尔基至三岔河口)作为试点评价河流,全长 549 km,为平原河流。根据嫩江下游河流地貌形态、水文及水力学状况变异、水生生物以及流域经济社会发展特征的相同性和差异性,将嫩江下游评价河流划分为尼尔基坝址—同盟、同盟—新嫩江公路桥、新嫩江公路桥—莫呼公路桥、莫呼公路桥—光荣村、光荣村—洮儿河出口、洮儿河出口—三岔河口 6 个评价河段(图 1)。

2 河流健康评价指标体系与评价方法

2.1 评价指标体系

河流健康表现为河流结构状态、生态环境功能和社会服务功能 3 方面的健康^[9]。依据指标选取原则,建立河流健康诊断指标体系应是一个多项目、多层次的递阶结构体系。本次评价在构建河流健康评价指标体系时,分为 3 个层次,分别为:目标层——嫩江河流健康,准则层——水文水资源、物理结构、水质、生物、社会服务功能等 5 个方面,指标层——流量过程变异程度、河岸带状况等 14 项指标。通过逐层评价揭示河流属性及功能的健康状况。嫩江河流健康评价指标标准建立方法及指标具体权重如表 1 所示。

指标权重的确定是关系到评价结果能否真实反映河流健康生命状况的重要影响因素^[10]。在本次

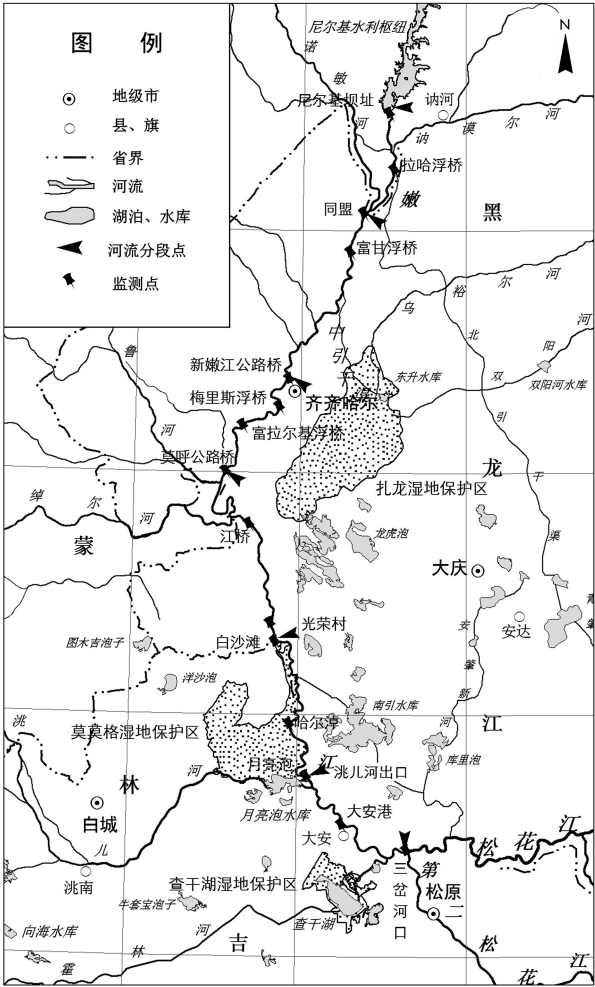


图 1 嫩江下游评价河流分段方案

评价时,通过嫩江流域前期现状调查,摸清流域自然条件、生境状况、社会经济发展水平,采用层次分析法,通过专家咨询和打分经验判断,构造判断矩阵,然后计算出嫩江流域各指标的权重。从 5 个准则层来看,生物准则层作为河流健康与否的直观反映,其比重最大,其次为满足人们生产生活需求的社会服务功能准则层;由于嫩江流域原生境保留相对较好,水质、物理结构、水文水资源准则层权重采用平均分配法确定。

2.2 评价方法

a. 河流生态完整性评价。河流健康是衡量河流生态系统结构与功能状态的标准,也是评价河流生态系统状态的有效方法^[17]。河流生态完整性评价是从河流生态系统属性考虑,对评价河段水文水资源、物理结构、水质和生物准则层在河段尺度上进行综合评价。其计算公式如下:

$$I = \sum_{i=1}^N I_i L_i / L \quad (1)$$

式中: I 为评价河流赋分; I_i 为评价河段指标和准则层赋分; L_i 为评价河段河流长度; L 为评价河流总长度; N 为评价河段数。

表 1 嫩江河流健康评价指标标准建立方法及具体权重

目标层	准则层	河流指标层	指标标准建立方法	标准制定依据
嫩江河流健康	河流生态完整性 W=0.7	水文水资源 (W=0.2, 以 2 个指标加权赋分)	流量过程变异程度 (W=0.3) 生态流量保障程度 (W=0.7)	模型推算 专家判断 全国水资源综合规划调查数据 Tennant 法
		物理结构 (W=0.2, 以 3 个指标加权赋分)	河岸带状况 (W=0.5)	参考系/专家判断 美国、澳大利亚河流健康评价标准 ^[10-12]
			河流连通阻隔状况 (W=0.25)	专家判断 澳大利亚河流健康评价标准 ^[11]
			天然湿地保留率 (W=0.25)	历史状态法 全国水资源综合规划调查数据
		水质 (W=0.2, 以 2 个指标最小值赋分)	DO 水质状况	现有标准 GB 3838—2002 ^[13]
			耗氧有机污染状况	现有标准 GB 3838—2002 ^[13]
	社会服务功能 W=0.3	生物 (W=0.4, 以 2 个指标最小值赋分)	大型无脊椎动物生物完整性指数	参考系 Karr ^[14] , 王备新等 ^[15] , 张远等 ^[7]
			鱼类生物损失指数	历史状态法 参考美国等河流调查评价标准 ^[10-12]
		社会服务功能	水功能区达标指标 (W=0.2)	管理预期/专家判断 SL395—2007 ^[16]
			水资源开发利用指标 (W=0.2)	管理预期/专家判断 水文水资源调查评价相关技术标准
			防洪指标 (W=0.2)	管理预期/专家判断 防洪相关技术标准
			公众满意度 (W=0.2)	管理预期/专家判断
			灌区供水满足程度 (W=0.2)	管理预期/专家判断

注:W 为各指标权重值。

b. 社会服务功能准则层评价。考虑河流的社会属性,从水功能区达标、水资源开发利用、防洪、公众满意程度、灌区供水满足程度加权评价河流社会服务功能。

c. 河流健康评价标准。国际上常采用的方法包括参考点位法、专家判断法、历史状态法、模型推算算法^[18-20]等。本次评价,针对不同指标综合使用上述方法(表 1)。在选择参考系时,采用流域内最小干扰状态作为参考点,对于与社会服务功能相关的指标,主要根据河湖管理预期目标确定评价基点。

河湖健康评价采用分级指标评分法,逐级加权,综合评分,即得到河湖健康指数。综合河流生态完整性评价指标赋分和社会服务功能评价赋分,二者加权得出评价河流健康赋分。

河流健康分为 5 级:理想状况、健康、亚健康、不健康、病态(表 2)。

3 评价结果与讨论

3.1 河流健康评价赋分

嫩江河流健康评价包括 5 个准则层,基于水文水资源、物理结构、水质和生物准则层评价河流生态完整性。根据河流生态完整性评价计算公式,计算出 6 个评价河段的河流生态完整性赋分情况(表 3)。

表 3 嫩江下游河流生态完整性赋分

评价河段	河长/km	水文水资源		物理结构		水质		水生生物		河流生态完整性	
		赋分	权重	赋分	权重	赋分	权重	赋分	权重	赋分	健康状况
尼尔基坝址—同盟	71	8	0.2	29	0.2	74	0.2	41	0.4	39	不健康
同盟—新嫩江公路桥	112	40	0.2	52	0.2	66	0.2	48	0.4	51	亚健康
新嫩江公路桥—莫呼公路桥	67	34	0.2	46	0.2	62	0.2	70	0.4	56	亚健康
莫呼公路桥—光荣村	100	33	0.2	68	0.2	75	0.2	70	0.4	63	健康
光荣村—洮儿河出口	113	42	0.2	78	0.2	66	0.2	72	0.4	66	健康
洮儿河出口—三岔河口	86	44	0.2	75	0.2	76	0.2	72	0.4	68	健康
合计	549	35	0.2	59	0.2	70	0.2	63	0.4	58	亚健康

表 2 河流健康评价分级

等级	类型	赋分范围	说明
1	理想状况	80 ~ 100	接近参考状况或预期目标
2	健康	60 ~ 80	与参考状况或预期目标有较小差异
3	亚健康	40 ~ 60	与参考状况或预期目标有中度差异
4	不健康	20 ~ 40	与参考状况或预期目标有较大差异
5	病态	0 ~ 20	与参考状况或预期目标有显著差异

评价结果显示,尼尔基坝址—同盟段为不健康状态,同盟—新嫩江公路桥、新嫩江公路桥—莫呼公路桥两个河段属于亚健康状态,莫呼公路桥—光荣村、光荣村—洮儿河出口、洮儿河出口—三岔河口 3 个河段处于健康状态。经各评价河段的长度加权计算,最终计算出嫩江下游尼尔基—三岔河口河流生态完整性赋分为 58 分,处于亚健康状态。

根据河流社会服务功能评价计算,嫩江下游尼尔基—三岔河口段河流社会服务功能准则层赋分为 62 分(表 4)。将嫩江河流生态完整性与社会服务功能指标赋分加权计算,嫩江下游河流健康评价指标最终赋分为 59 分。按照评价等级划分,该段河流属于亚健康状况,接近健康状态。

本文基于河流的自然属性与社会属性建立了嫩江河流健康评价指标体系,确定了各指标权重,得出了嫩江下游处于亚健康状态的结论,其指标体系适应性较好,基本反映了嫩江下游河流的健康状况。

表 4 社会服务功能准则层赋分

水功能区达标率		水资源开发利用率		防洪指标		公众满意度		灌区供水保证程度		河流 整体赋分
评估分值	权重	评估分值	权重	评估分值	权重	评估分值	权重	评估分值	权重	
15	0.2	90	0.2	40	0.2	67	0.2	100	0.2	

但由于制约河流健康的因素很多,且存在评价指标的多样性、相关性及不确定性因素,需要今后进一步开展河流健康评价指标与标准优选研究,提高评价方法的实用性与有效性。

3.2 河流健康整体特征

嫩江下游河流蜿蜒穿行于松嫩平原,沿岸湖沼广布,沙滩、沙洲、江汊众多,水流平稳,江道弯曲迂回,两岸杂草丛生,鱼类饵料丰富,盛产鱼类、贝类和虾类。江岔洼地水草茂盛地带,适宜鲤、鲫等鱼类的自然繁殖生长。两岸滩地延展很宽,最宽处可达10 km,最大水深7.4 m,滩地上广泛分布着泡沼、湿地和牛轭湖。齐齐哈尔市以上江道平均坡降0.01%~0.02%,主槽水面宽300~400 m,水深3~4 m。下游江段为吉、黑两省界河,河网密度较大,右岸有诺敏河、雅鲁河、绰尔河、洮儿河等大支流汇入嫩江,左岸广大地区基本属于内陆闭流区,有大片沼泽、连环湖和湿洼地。

从水文水资源准则层分析,受嫩江中游尼尔基水利枢纽工程建设影响,下游河道水文情势发生较大变化,尤其在坝下河段,与天然条件相比,流量过程变异程度指标计算高达1.42,处于不健康状态。但随着下游多个支流汇入,河道流量逐渐增多,尼尔基水库建设产生的水文影响不断减小和趋缓,河流逐渐恢复天然形态。

从物理结构准则层分析,嫩江下游河漫滩宽广,河道蜿蜒曲折,总体看来,河流廊道具有较好的自然性。河岸带岸坡较稳定,植被覆盖以草本植物为主,仅局部岸段存在河道采砂、农业耕作、道桥建设等人工干扰活动。河岸带扎龙、莫莫格、查干湖等重要天然湿地保护良好,因尼尔基水库、北部引嫩扩建大坝以及堤防工程建设,河流纵向与横向连通性受到一定损害。

从水质准则层分析,嫩江下游各评价河段水质较好。但齐齐哈尔、大安等城市河段水质为Ⅵ~Ⅴ类,主要超标因子为COD和COD_{Mn}。河流水体中DO浓度很高,水质准则层赋分较高,处于健康状态。

从生物准则层分析,本次调查共采集鱼类61种,与历史资料相比较,鱼类种类减少了13种。受水利工程建设、水质污染、过度捕捞等因素影响,乌苏里白鲑、哲罗鲑、日本七鳃鳗等洄游性鱼类在评价河段内已近消失。评价河流底栖生物完整性指数赋分为76分,处于健康状态。

从社会服务功能准则层分析,该段河流流经齐齐哈尔市市区,受河流沿岸工业废水排放和农业退水影响,评价河流水功能区达标率仅为15.38%。

目前,嫩江流域已初步形成了以堤防为基础,以尼尔基大型控制性水利枢纽为骨干,支流水库调蓄以及其他非工程措施构成的综合防洪体系,但流域防洪能力仍然偏弱,局部江段弯道凹岸深泓线紧贴河岸,造成岸坡淘刷,形成河道险工。在尼尔基水库的调度作用下,下游多个灌区灌溉用水得到满足,促进区域粮食生产。流域水资源开发利用率为27.99%。普通公众对于河流健康重要性的认知程度较高。

3.3 河流不健康的主要表征

a. 水质污染尚未得到根本改善,水功能区达标率低。根据水质现状评价,嫩江下游城市河段水质污染较为严重,为Ⅳ~Ⅴ类水体,主要超标因子为COD和COD_{Mn}。干流水功能区水质达标率低,流域水质污染尚未得到根本改善。

b. 鱼类等水生生物多样性降低,鱼类资源呈小型化和低龄化。本次调查鱼类种数较历史资料减少了13种。受尼尔基水利工程建设影响,坝址上下游漂流性产卵场已遭破坏,哲罗鲑和细鳞鲑等鱼类的洄游通道被隔绝。受过度捕捞影响,鱼类资源呈小型化和低龄化趋势。

c. 湿地资源萎缩、功能退化,河流沿岸重要湿地用水不足。评价河流沿岸分布有扎龙、莫莫格、查干湖等重要湿地,受区域气候和人类活动影响,湿地存在不同程度的萎缩和功能退化。扎龙、莫莫格湿地生态用水不足,已多次开展湿地补水工程。此外,农业耕作、过牧等行为使河流廊道及低洼地周边湿地资源也遭到破坏,尤其在每年4—6月,农业用水与湿地需水冲突明显,天然湿地损失较为明显。

d. 尼尔基坝下河段流量减少,河流生境变化较大。尼尔基水库建设运行后,嫩江干流下游径流发生了较大变化,河道枯水期流量增加,丰水期流量减少,年内径流变幅减小。流域水资源开发导致河流生态廊道产生一定程度的萎缩,各频率洪水的水面宽度减小,滩地宽度相应增加,河岸带局地生态环境遭到破坏。

3.4 河流健康管理对策

a. 水利工程的生态调度。嫩江流域社会、经济用水量的增加以及水利工程的兴建,使得河流的水

文情势发生较大变化,很多河段和重要湿地的生态需水量要求得不到满足。在节水体系建设的基础上,需对水库的调度方式进行调整,实施水利工程生态调度,以满足流域主要河段的生态需水要求,从而达到嫩江流域水生态保护与修复的目的。

b. 河岸带修复与管理。鉴于嫩江流域河流两岸有大面积闲置河漫滩,宜结合当地岸线规划,对嫩江干流开展间隔式植被缓冲带建设,并将已有混凝土构件护岸、干砌石护岸逐步改造为柔性护岸,在硬性护岸材料之间的空隙和缝隙内覆土并种植本地水生植物。

c. 水质修复。实施入河排污口的管理是保护与修复河流水环境的重要措施。近期,对于违规的入河排污口,参照《中华人民共和国水法》,由县级以上地方人民政府责令限期拆除、恢复原状,逾期不拆除、不恢复原状的,强行拆除、恢复原状,并处罚款;远期,在近期的基础上加大管理与维护力度,并重视水利与环保部门的协作配合。此外,对灌区回归水进行生态处理以减少污染物入河量。

d. 栖息地修复。嫩江流域鱼类资源的恢复主要从鱼类栖息环境营造、人工增殖放流以及设禁渔期和常年禁渔区3方面进行。重点在嫩江下游产黏性卵的鱼类产卵场设计丁坝和人工鱼礁,营造多样化鱼类栖息环境。在完善现有放流站的基础上,根据鱼类的栖息节律,建议在嫩江白沙滩建设新的放流站,增加鱼类人工增殖放流规模,以增加保护鱼类的入河系数和回归率。

e. 湿地生态系统的恢复。禁止占压和开垦天然湿地,退耕还湿,修建必要的水利工程向重要湿地补水。建立植被缓冲带以修复湿地水质,并开展湿地生态补偿相关研究。

参考文献:

[1] 董哲仁. 河流健康的内涵[J]. 中国水利, 2005 (4): 15-18. (DONG Zheren. River health connotation [J]. China Water Resources, 2005 (4):15-18. (in Chinese))

[2] 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 Changming, LIU Xiaoyan. Healthy river: essence and indicators [J]. Acta Geographica Sinica, 2008, 63 (7): 683-692. (in Chinese))

[3] 高学平, 赵世新, 张晨, 等. 河流系统健康状况评价体系及评价方法[J]. 水利学报, 2009, 40(8): 962-968. (GAO Xueping, ZHAO Shixin, ZHANG Chen, et al. Index system and method for assessing the health status of river [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40 (8):962-968. (in Chinese))

[4] 胡春宏, 陈建国, 孙雪岚, 等. 黄河下游河道健康状况评价与治理对策[J]. 水利学报, 2008, 39(10): 1189-1196. (HU Chunhong, CHEN Jianguo, SUN Xuelan, et al. Health assessment of river course in Lower Yellow River and measures for regulation [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39 (10): 1189-1196. (in Chinese))

[5] 张方方, 张萌, 刘足根, 等. 基于底栖生物完整性指数的赣江流域河流健康评价[J]. 水生生物学报, 2011, 35(6): 963-971. (ZHANG Fangfang, ZHANG Meng, LIU Zugen, et al. A health assessment using a benthic-index of biotic integrity in Ganjiang River Basin [J]. Acta hydrobiologica sinica, 2011, 35 (6): 963-971. (in Chinese))

[6] 龚蕾婷. 太湖流域典型入湖河流的健康评价[D]. 南京:南京大学, 2012.

[7] 张远, 赵瑞, 渠晓东, 等. 辽河流域河流健康综合评价方法研究[J]. 中国工程科学, 2013, 15(3): 11-18. (ZHANG Yuan, ZHAO Rui, QU Xiaodong, et al. The researches of integrated river health assessment of Liaoh River Basin [J]. Engineering Sciences, 2013, 15 (3): 11-18. (in Chinese))

[8] 党连文, 朱振家, 于洪民, 等. 松花江流域综合规划[R]. 长春:松辽水利委员会, 2011.

[9] 杨文慧, 杨宇. 河流健康概念及诊断指标体系的构建[J]. 水资源保护, 2006, 22(6): 28-30. (YANG Wenhui, YANG Yu. Concept and assessment indicator system of river health [J]. Water Resources Protection, 2006, 22(6):28-30. (in Chinese))

[10] PETERSEN, R C. The RCE: a riparian, channel, and environmental inventory for small streams in the agriculture landscape[J]. Freshwater Biology, 1992, 27: 295-306.

[11] PARSONS M, THOMS M, NORRIS R. Australinan river assessment system: review of physical river assessment methods[M]. Canberra:Commonwealth of Australia and University of Canberra,2002.

[12] 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 [J]. Freshwater Biology,1999,41:453-468.

[13] GB3838—2002 地表水环境质量标准[S].

[14] KARR J K. Assessments of biotic integrity using fish communities[J]. Fresheries (Bethesda),1981,6:21-27.

[15] 王备新, 杨莲芳. 用河流生物指数评价秦淮河上游水质的研究[J]. 生态学报, 2003, 23(10):2082-2091. (WANG Beixin, YANG Lianfang. Bioassessment of Qinhuai River using a river biological index [J]. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23 (10): 2082-2091. (in Chinese))

(下转第 105 页)

情况下的河流生态健康状态。结果表明,按照生态流量特征图的泄流方式较为符合天然流量过程,可以作为水库生态调度时的重要参考依据。

参考文献:

[1] POFF N L,MATTHEWS J H. Environmental flows in the anthropocene: past progress and future prospects [J]. Current Opinion in Environmental Sustainability,2013,5: 667-675.

[2] POSTEL S,RICHTER B. Rivers for life: managing water for people and nature [M]. Washington D. C. : Island Press, 2005;35-100.

[3] POFF N L,ALLAN J D,BAIN M B,et al. The natural flow regime:a paradigm for river conservation and restoration [J]. Bioscience,1997,47:769-784.

[4] 崔琰,张强,陈晓宏,等. 生态需水理论与方法研究进展 [J]. 湖泊科学,2010,22 (4): 465-480. (CUI Ying, ZHANG Qiang, CHEN Xiaohong, et al. Advances in the theories and calculation methods of ecological water requirement [J]. J Lake Sci,2010,22 (4):465-480. (in Chinese))

[5] 张强,李剑锋,陈晓宏,等. 变异条件下的黄河流域生态流量研究 [J]. 生态学报,2011,31 (17): 4826-4834. (ZHANG Qiang, LI Jianfeng, CHEN Xiaohong, et al. Evaluation of the ecological instream flow in the Yellow River Basin with hydrological alterations [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31 (17): 4826-4834. (in Chinese))

[6] ARTHINGTON A H, BUNN S E, POFF N L, et al. The challenge of providing environmental flow rules to sustain river ecosystems [J]. Ecol Appl,2006,16;1311-1318.

[7] 蔡其华. 充分考虑河流生态系统保护因素完善水库调度方式 [J]. 中国水利,2006 (2): 14-18. (CAI Qihua. Taking eco-system protection into fully consideration and improving reservoir regulation process [J]. China Water Resource,2006 (2):14-18. (in Chinese))

[8] 程绪水,万一. 构建生态用水调度体系推进淮河流域水

(上接第 90 页)

[16] SL395—2007 地表水资源质量评价技术规程 [S].

[17] 高永胜,王浩,王芳. 河流健康生命评价指标体系的构建 [J]. 水科学进展,2007,18 (2): 252-257. (GAO Yongsheng, WANG Hao, WANG Fang. Construction of evaluation index system for river's healthy life [J]. Advances in Water Science, 2007, 18 (2):252-257. (in Chinese))

[18] 王淑英,王浩,高永胜,等. 河流健康状况诊断指标和标准 [J]. 自然资源学报,2011,26 (4): 591-598. (WANG Shuying, WANG Hao, GAO Yongsheng, et al.

生态文明建设 [J]. 中国水利,2013 (13): 42-46. (CHEN Xushui, WAN Yi. Regulation of ecological water use for water civilization construction of Huaihe River Basin [J]. China Water Resource,2013 (13):42-46. (in Chinese))

[9] 尹正杰,杨春花,许继军. 考虑不同生态流量约束的梯级水库生态调度初步研究 [J]. 水利发电学报,2013,32 (3):66-72. (YIN Zhengjie, YANG Chunhua, XU Jijun. Ecological regulation of cascade dams in the lower Jinsha River under different ecological flow constraints [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013, 32 (3): 66-72. (in Chinese))

[10] 杨娜,梅亚东,许银山,等. 基于下游河道水流情势天然性要求的水库优化调度 [J]. 水力发电学报,2012,31 (5):84-90. (YANG Na, MEI Yadong, XU Yinshan, et al. Downstream natural flow regime-based optimal operation of reservoir [J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2012,31 (5):84-90. (in Chinese))

[11] THARME R E. A global perspective on environmental flow assessment emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers [J]. River Research and Applications,2003,19;397-441.

[12] 常福宣,张洲英,陈进,等. 长江流域河道生态环境需水满足程度研究 [J]. 长江科学院院报,2009,26 (9): 1-5. (CHANG Fuxuan, ZHANG Zhouying, CHEN Jin, et al. Study on satisfactory ratio of environmental water demand of river channels in Yangtze River Basin [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Insitute,2009,26 (9): 1-5. (in Chinese))

[13] 万俊,张勤,刘胡,等. 东江水库分期控制运用 [M]. 北京:中国科学出版社,2009;1-8.

[14] HELSEL D R, HIRSCH R M. Techniques of water resources investigations of the United States Geological Survey [M]. Washton D. C. : U S Government Printing Office,USGU Publications,2002;171-194.

(收稿日期:2014 - 04 - 11 编辑:徐 娟)

Index system and criteria for diagnosing the status of river health [J]. Journal of Natural Resources, 2011,26 (4): 591-598. (in Chinese))

[19] BOULTON A J. An overview of river health assessment: philosophies, practice, problems and prognosis [J]. Freshwater Biology, 1999, 41;469-479.

[20] HUGHES R M, PAULSEN S G, STODDARD J L. EMAP-surface water: a multiassemblage probability survey of ecological integrity in the USA [J]. Hydrobiologia, 2000, 422/423;429-443.

(收稿日期:2014 - 10 - 03 编辑:徐 娟)