

DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2016.01.003

滦河流域大中型闸坝水文生态效应

刘静玲^{1,2}, 尤晓光^{1,2}, 史璇^{1,2}, 包坤^{1,2}, 孟博^{1,2}

(1. 北京师范大学环境学院, 北京 100875; 2. 北京师范大学水环境模拟国家重点实验室, 北京 100875)

摘要:为揭示滦河流域水库对下游河流水文影响, 辨析其生态效应, 建立了流域闸坝水生态效应评估体系, 运用河流影响因子(RI)法评估了闪电河、庙宫、潘家口和桃林口水库的水生态效应, 进一步运用水文变化范围(RVA)法评估了潘家口水库的水生态效应。结果表明: ①各水库对水文的影响程度为: 潘家口>桃林口>闪电河>庙宫, 水库的水文效应同时受其级别(库容)和河流原始径流量影响, 小型河流水库的水文生态效应不容忽视。②潘家口水库 IHA 指标(RVA 法)总改变度为 0.88, 第 1~2 组指标发生了高度改变(0.91), 第 3~5 组指标发生中度改变(0.45), 强烈改变了鱼类洄游、底栖生物和植物群落等生态过程。生态水文同步监测与生态模型构建将有助于提升河流生态系统预警能力, 为河流生态恢复提供科学依据和技术工具。

关键词: 滦河流域; 闸坝; 水文影响; 生态效应评估

中图分类号: X143 文献标志码: A 文章编号: 1004-6933(2016)01-0023-06

Hydrological and ecological effects of dams in Luanhe River Basin

LIU Jingling^{1,2}, YOU Xiaoguang^{1,2}, SHI Xuan^{1,2}, BAO Kun^{1,2}, MENG Bo^{1,2}

(1. School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: In order to reveal the influence of dams in Luanhe River basin to hydrologic in downstream and analyze its ecological effects, water ecological effects evaluation system of dam effects in river basin was developed. RVA method was also used to assess the ecological effects of Panjiakou dam. The results are as follow: (1) The degree of impact by each dam: Panjiakou>Taolinkou>Shandianhe>Miaogong. The hydrologic impact by dams is influenced by both capacity and natural river flow. (2) Index of IHA river flow change (measured with RVA method) in Panjiakou Reservoir is 0.88. Classes 1-2 of IHA indexes are highly changed, which is 0.91, and classes 3-5 are moderately changed, which is 0.45. Dams influenced fish migration, benthos, and riparian vegetation of the basin. Ecological and hydrological co-monitoring and modelling development would be helpful to improve the warning ability of river ecosystem, and provide scientific basis and technical tools for river ecological restoration.

Key words: Luanhe River Basin; dams; hydrological impact; ecological effects evaluation

闸坝作为人类活动影响河流自然水文情势的最重要因素^[1-2], 能强烈改变下游流量, 改变洪峰流量和枯水流量的持续时间、频率以及径流水位上升和下降的自然率, 对河流、岸带物种和生态系统造成了破坏^[3-4]。全球 292 个大型河流系统中, 超过半数已受到闸坝影响^[5], 其对栖息地完整性造成的影响受

到广泛关注。

防洪大坝能显著降低暴雨洪峰流量, 增加干旱时期的水量^[6], 由此造成的泥沙淤积以及暴雨流量的减少会引起下游河道出现壕沟, 而这会造成下游河道变窄, 减小河漫滩的面积, 影响水生生物和漫滩植被, 破坏栖息地完整性。历史水文情势的改变以

基金项目: 国家“十二五”水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07203-006); 国家自然科学基金(41271496)

作者简介: 刘静玲(1962—), 女, 教授, 博士, 主要从事流域水生态研究。E-mail: jingling@bnu.edu.cn

及河道沉积物转移能力的变化也可能造成沉积物过少以及转移能力匮乏,导致河床退化,河岸加宽以及河床沉积物粗化^[7],从而造成物种丰度的降低和植被覆盖度减小^[8]。闸坝运行影响了水生和陆生河岸带的生态环境(图1)^[9]。

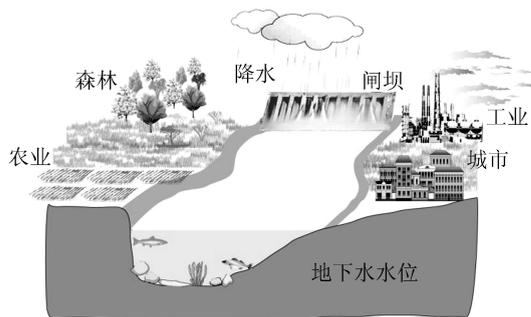


图1 水库对河流及河岸生态系统的影响示意图

闸坝的影响可分为3级^[10]:第1级影响主要指河流水文、水动力、水质的变化。闸坝泄流具有削峰和枯水期调节作用,减弱河流水文情势的季节性变化,改变流量极值的发生时间、频率、大小、持续时间(图2)。第2级影响:主要是泥沙、地貌、浮游生物、附着的水生生物的变化。闸坝引起下游水位和流量降低,改变了泥沙沉积状态,减弱了河流纵向、横向和垂向连通性,造成河流及岸带的破坏。第3级影响:由于第1、2级影响的直接和间接作用,对河流及岸带生物所造成的影响。主要是鱼类、鸟类和哺乳动物的变化,例如,水文、水动力和物理化学条件的变化能显著影响鱼类、鸟类的洄游和迁徙等。

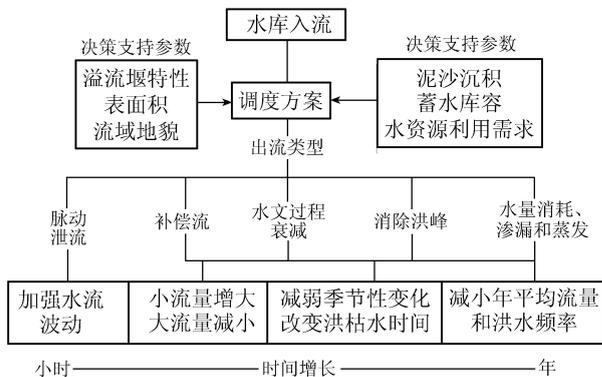


图2 水库对河流水文情势的影响过程

针对闸坝所引起的水文情势改变及水生态系统改变^[11-12],目前多集中于评价指标体系与方法的研究。而如何量化研究闸坝对水文情势的影响,并进一步确定何种水文特征受到了最大程度的影响,对于面向流域河流生态系统管理都有着重要意义。

滦河流域于20世纪50年代至90年代建设了20余座大中型水库,强烈改变了流域自然水文情势,如何量化这一影响,成为迫切需要解决的问题。本文选择闪电河水库、庙宫水库,潘家口水库和

桃林口水库为研究对象,利用河流影响因子法(RI法)定量评估了它们对水文情势的影响。为进一步揭示闸坝水文效应的生态学意义,运用水文变化范围法(RVA法)评估了潘家口水库的水生态效应,以揭示水库对生态环境的影响。

1 研究区概况

滦河西起内蒙古自治区多伦,向东至河北省乐亭入海,是海河流域的子水系。在海河流域九大水系中,其水资源相对丰富,物理完整性较好。滦河流域有大中型水库29座,其中大型水库5座,闸坝的运行,对河流水文情势产生了重要影响,水资源供需矛盾突出^[2]。本研究按上中下游及干支流兼顾的原则,选择滦河流域4座大中型水库作为典型代表及研究对象,其中,闪电河水库为滦河上游中型水库的典型代表,潘家口水库为滦河干流最大水库,庙宫水库和桃林口水库为位于支流伊逊河和青龙河上的大型水库(图3)。以建坝前后长序列水文年的水文数据为基础,利用RI法评估4座水库的水文效应,并进一步运用RVA法评估了潘家口水库的水生态效应(表1)。

2 研究方法

2.1 闸坝水生态效应评估体系的建立

闸坝水生态效应的评估主要分为3类(表2):
①水文水生态方法:主要通过定量或半定量评估闸坝对各水文指标的影响以及水文指标与生态指标之间的定性关系,来评估闸坝的水生态影响。如RVA法,需用到5大类32个不同参数(IHA指标)的逐日数据。
②水文效应评估法:通过归一化方法和典型值评估体系定量闸坝对水文特征的影响级别。如RI法,需用逐月数据,通过水文情势的流量大小、极值流量的时间和年内变化评估闸坝的总体影响。
③生态模型法:以水文、生态数据为基础,利用统计模型或解析模型(常耦合水动力模型或水文特征的定量分析)分析建坝后大型无脊椎动物、鱼类、漫滩植被的丰度、多样性、种群参数等的改变。

基于以上3类方法,建立了适用于流域闸坝管理的水生态评估体系(图4)。闸坝通过改变自然水文特征来影响岸带及河流水生态系统,闸坝生态效应评估,应以流域尺度的水文效应评估为基础,在此基础上,在河段尺度选取重点闸坝对其进行水生态效应评估。水生态效应评估,可依据评估目的和数据类型,利用RVA法(IHA指标)进行定性评估,或利用生态模型耦合水动力模型的方法进行半定量、定量评估(表2)。

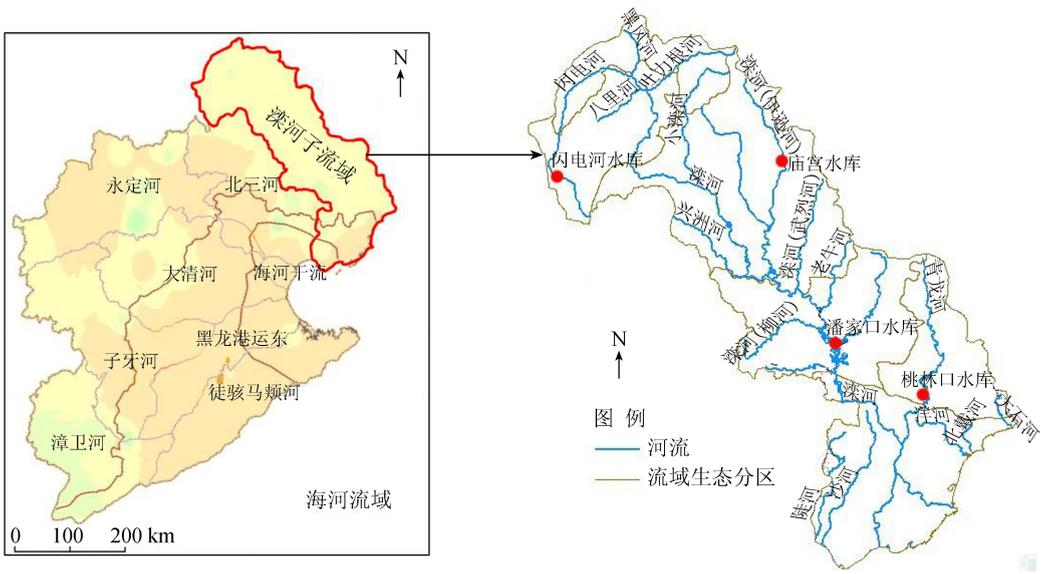


图3 滦河大中型水库(闪电河、庙宫、潘家口、桃林口)位置

表1 滦河流域大中型水库基本信息及评估年限

河流名称	水库名称	运行年份	蓄水能力/亿 m ³	控制流域面积/km ²	建设目的			RI 评估年限		RVA 评估年限		
					灌溉	供水	防洪	发电	建坝前	建坝后	建坝前	建坝后
闪电河	闪电河水库	1963	0.43	890	×		×		1950—1962年	1970—1990年	—	—
伊逊河	庙宫水库	1960	1.83	2370	×		×	×	1950—1960年	1970—1990年	—	—
滦河	潘家口水库	1980	29.30	33700		×	×	×	1952—1970年	1983—2000年	1952—1979年	1980—2000年
青龙河	桃林口水库	1992	8.59	5060	×	×	×	×	1960—1980年	1996—2013年	—	—

表2 闸坝水生态效应评价方比较及应用举例

评价方法	指标类型	优点	缺点	方法应用
RVA 法	IHA:各月流量、年极端流量、年极端流量发生时间、高低流量频率及延时、流量变化改变率及频率共计32个指标	1)通过水文评价结果分析其生态影响,进一步为河流管理提供科学依据; 2)可通过IHA软件方便快捷的计算各项指数	需长序列逐日数据,数据量大且通常不易获得	闸坝水文水生态效应评估 ^[19-21]
RI 法	MIF:流量影响因子 VIF:时间影响因子 TIF:年内流量变化影响因子	1)使用逐月数据,相对于逐日数据更易获得,适用于流域尺度; 2)利用MIF因子确定了流量的改变,而MIF不受气候变化的影响; 3)利用VIF因子确定了河流水文情势的年内变化	指标概括度高,故难以直接与生态影响建立联系	闸坝水文效应 ^[17]
生态模型	利用统计模型或解析模型(常耦合水动力模型或水文特征的定量分析)分析大型无脊椎动物、鱼类、漫滩植被的丰度、多样性、种群参数等的改变	1)建立了闸坝与生态因子的直接联系; 2)为量化揭示闸坝对生态因子的影响提供了可能; 3)利用水动力耦合模型及计算机模拟,更方便评估模型的推广应用和服务管理	1)模型校验及应用通常需大量长序列生态数据; 2)目前的研究多集中于对某一物种或群落的影响,缺乏对整个生态系统影响的评估	敏感物种减少 ^[13] 对上游河岸和水生植被的影响 ^[14] 下游植被丰度降低 ^[15] 鱼类种群的影响 ^[16]

2.2 闸坝水文影响评价方法——RI法

闸坝对自然水文情势的影响主要为:①流量大小;②流量极值的发生时间;③流量的年内变化。这些变化可以定量为相应的影响因子 M_{IF} (流量影响因子), T_{IF} (时间影响因子)和 V_{IF} (年内流量变化影响因子)。大坝的运行可能影响一个或几个以上因子,这往往取决于大坝的类型和建设目的,例如,用于灌溉的水库,其水量将在灌溉期减小。而发电和防洪通常会改变流量的变化,并影响洪峰的发生时间。

河流影响因子(RI)法综合考虑了以上3种主要影响^[17], M_{IF} 作为流量影响控制因子,其影响等同

于 T_{IF} 和 V_{IF} 的共同影响。

以下为河流影响因子(R_I)的计算公式:

$$R_I = M_{IF}(T_{IF} + V_{IF}) \quad (1)$$

可以按照下式计算:

$$M_{IF} = F_{post}/F_{pre} \quad (2)$$

式中: F_{post} 为大坝建设后的年泄流量; F_{pre} 为大坝建设前的年径流量。

V_{IF} 显示了大坝建设后自然水文情势受到规范化管理的程度。 V_{IF} 的计算基于河流水文情势指数 R 。该指数计算公式如下:

$$V_{IF} = 50 - 0.5I_{RR}/100 \quad (3)$$

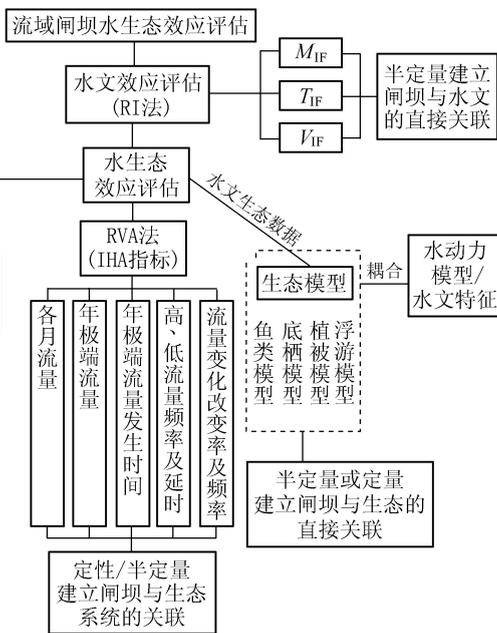


图4 流域闸坝水生态效应评估体系

$$I_{RR} = \frac{|R_{pre} - R_{pos}|}{R_{pre}} \times 100 \quad (4)$$

其中
$$R = \sum_{k=1}^{12} M_{RRP}(K) \quad (5)$$

式中: I_{RR} 为河流水文情势指数变化系数; R_{pre} 和 R_{pos} 分别代表建坝前后的河流水文情势指数; M_{RRP} 为月河流情势因子^[17-18]。

流量时间影响因子 T_{IF} 考虑了径流量极值发生时间的变化,其计算公式如下:

$$T_{IF} = \frac{(50 - 0.274T_F)}{100} \quad (6)$$

其中
$$T_F = \frac{|D'_{max}| + |D'_{min}|}{2} \quad (7)$$

式中: T_F 为时间变量指数, d ; D'_{max} 为最大流量的时间改变量, d ; D'_{min} 为最小流量的时间改变量, d 。

因此 T_F 取值范围为 0 ~ 182.5。本研究因水文数据统计方法的限制,未选用原方法中的 D'_{median} 作为参数^[17]。

表3 水文改变指标及参数的生态学意义

组别	内容	IHA	指标的生态意义
1	各月流量 (12个)	各月份流量平均值	影响水生生物的栖息地、植物对土壤含水量的需求、动物迁徙需求以及水温、含氧量的影响
2	年极端流量 (11个)	年最小、最大1、3、7、30、90d流量平均值;基流指数	满足植被扩张、河流地貌和自然栖息地构建、河流和漫滩养分交换、湖泊滞洪区的植物群落分布的需要
3	年极端流量发生时间 (2个)	年最小7d流量平均值/年平均流量年最小、最大1d流量发生时间	满足鱼类的洄游产卵、生命体的循环繁衍、生物繁殖期的栖息地条件、物种的进化需要
4	高、低流量频率及延时 (4个)	每年发生低流量次数、平均持续天数每年发生高流量次数、平均持续天数	植被土壤湿度胁迫频率和大小、漫滩对水生生物的支持、泥沙运输、渠道结构、底层扰动等的需要
5	流量变化改变率及频率 (3个)	流量平均增加率、减少率流量逆转次数	改变植物的干旱胁迫,促成岛上、漫滩有机物的诱捕,改变其他生物体的干燥胁迫等

2.3 闸坝水生态效应分析方法 — RVA法

水文变化范围法(RVA法)以天然的与生态相关的流量特征的统计分析为基础,通过对比不同时间的河流水文条件,从水量、时间、频率、延时和变化率等5个方面水文特征,反映闸坝的影响程度。水文特征一般用水文改变指标(IHA)来表示。RVA方法建立在分析IHA指标的基础上,以详细的流量数据评估水库影响前后的河流变化,以日流量数据为基础,以未受水利设施影响前的流量自然变化状态为基准,统计32个IHA指标建库前后的变化,分析河流受人类干扰前后的改变程度。

水文改变指标(IHA)主要是以水文条件的量、时间、频率、延时和变化率5种基本特征为基础(月流量状况、极端水文现象的大小与历时、极端水文现象的出现时间、脉动流量的频率与历时、流量变化的出现频率与变化率)描绘河流年内的流量变化特征,共32个指标^[19]。IHA的各组参数与河流生态系统的相关关系^[19-20]见表3。

为量化IHA受水利工程影响的改变程度,Richter等^[21]提出以水文改变度来评估,定义为IHA指标的水文改变度:

$$D_i = \left| \frac{Y_{oi} - Y_f}{Y_f} \right| \quad (8)$$

$$Y_f = rY_i \quad (9)$$

式中: Y_{oi} 为干扰后仍落于RVA阈值内的年数; Y_f 为干扰后预期落于RVA阈值内的年数; r 为干扰前的各IHA指标落于RVA阈值内的年数; Y_i 为水库建设后所选数据的总年数。

本研究以闸坝运行前的IHA指标统计值排序,取各指标排序的33%~67%作为RVA阈值。也即阈值内的年数为进行计算的闸坝运行前年数的1/3,如果水库运行后水文改变指标落在RVA阈值内的年数与水库建设前的年数相近,表示对原有的自然水文情势影响较小,反之则说明影响大。依据各指标的生态意义,可以进一步分析各指标改变对生态

的影响。因此,若 D_i 值介于 0 ~ 33% 属于无或低度改变;33% ~ 67% 属于中度改变;67% ~ 100% 则属于高度改变。

以权重平均的方式来量化评估整体水文特性改变情况,表征整体水文改变度,以 D_o 来表示。

$$D_o = \left(\frac{1}{32} \sum_{i=1}^{32} D_i^2 \right)^{0.5} \quad (10)$$

3 结果分析

3.1 RI 法评估大中型水库的水文影响

滦河流域的闸坝建设对河流径流量、流量改变率和发生时间产生了重要影响,位于滦河干流下游的滦县水文站其径流量比 20 世纪 50 年代减少了 2/3 以上。

本研究利用 RI 法对滦河流域的 4 座大中型水库的水文影响进行了定量化研究,选取建坝前后长序列水文年作为评估年份(表 1),并利用 R_1 分级标准(表 4)确定了影响级别。

表 4 水文效应 R_1 范围与分级标准

R_1 范围	级别	影响级别
[0,0.2)	I	极严重影响
[0.2,0.4)	II	严重影响
[0.4,0.6)	III	中度影响
[0.6,0.8)	IV	轻度影响
[0.8,1)	V	轻微影响

利用 R_1 法对 4 个水库水文影响进行了计算, R_1 值的范围在 0.09 ~ 0.31 之间,据表 3 的评价体系,滦河流域大中型水库对水文情势总体产生了严重至极严重的影响(表 5)。

表 5 滦河流域大中型水库水文影响评价结果

水库名称	水文站	M_{IF}	V_{IF}	T_{IF}	R_1 值	影响级别
闪电河	闪电河水库坝下	0.20	0.73	0.36	0.22	严重
庙宫	三道河子	0.27	0.62	0.51	0.31	严重
潘家口	潘家口	0.12	0.31	0.41	0.09	极严重
桃林口	桃林口	0.22	0.42	0.47	0.20	严重

评价结果表明,滦河流域的大中型水库对水文情势总体产生了严重影响。其中,潘家口水库的水文影响最大,为极严重的影响。该结果表明,滦河流域大型水库的水文效应为极严重至严重级别。闪电河水库的总蓄水量仅为潘家口水库的 1/70,但其影响程度接近潘家口水库的 1/2(R_1 值为潘家口水库的 2.4 倍),说明小型水库的建设运行也可能对自然水文情势产生较大影响。

最后,本文选取国外其他 10 个水库的 R_1 评价结果^[17]与 4 座水库进行了对比(图 5)。

从图 5 可以看出,除埃及 Aswan 大坝外,国外 9 个水库中总体处于中度影响,而滦河流域 4 个水库

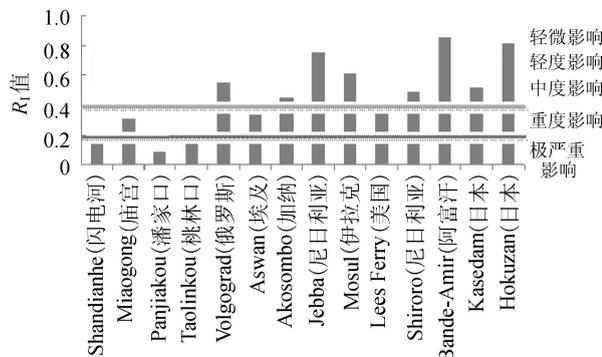


图 5 世界不同大坝 R_1 值对比

则为严重至极严重影响。在全世界范围内,滦河流域水库的水生态影响处于较高水平。

3.2 潘家口水库现状调度的水生态效应

为了反映滦河下游水文情势的演变规律,采用 RVA 方法,根据 1952—1979 年潘家口水库未投入运行前的日径流数据分析 IHA 各指标的阈值,在此基础上分析潘家口现状调度方案下,1980—2000 年相应指标的变化,定量研究潘家口水库建库后现状调度方式对滦河下游水文情势的影响(表 6)。

表 6 水文改变指标统计分析

指标序号	建坝前指标值 (1952—1979 年)		建坝后指标值 (1980—2000 年)		改变度/%	影响程度
	上限(33%)	下限(67%)	预期年数	实际年数		
1	42	31	9	0	100	高
2	44	29	9	1	89	高
3	57	35	9	0	100	高
4	63	52	9	0	100	高
5	46	32	9	0	100	高
6	54	41	9	0	100	高
7	228	96	9	3	67	高
8	470	260	9	0	100	高
9	223	119	9	0	100	高
10	124	78	9	2	78	高
11	91	61	9	0	100	高
12	48	35	9	0	100	高
13	16	12	9	0	100	高
14	20	14	9	1	100	高
15	16	12	9	0	100	高
16	20	14	9	1	89	高
17	28	23	9	0	100	高
18	44	35	9	0	100	高
19	2923	749	9	2	78	高
20	1821	682	9	0	100	高
21	1129	400	9	1	89	高
22	539	254	9	0	100	高
23	0.18	0.09	9	0	100	高
24	190	152	9	0	100	高
25	226	211	9	8	11	低
26	6	4	9	4	56	中
27	13	7	9	5	44	中
28	6	3	9	14	56	高
29	12	3	9	9	0	低
30	4	3	9	2	78	高
31	4	3	9	0	100	高
32	109	82	9	4	56	中

由表6 计算闸坝造成的水文整体改变度及对各种水文特征的影响,分析对生态的综合影响程度。

a. 水文改变度。计算得出水文特征整体改变度为0.88,属高度改变,与RI法的评价结果一致。第1~5组水文改变指标(各月流量、年极端流量、年极端流量发生时间、高低流量的频率及延时、流量变化改变率及频率)的水文改变度依次为:0.90、0.92、0.51、0.21、0.64。第1~2组水文改变指标(各月流量、年极端流量)发生了高度改变,改变度为0.91;第3~5组水文改变指标(年极端流量发生时间、高低流量的频率及延时、流量变化改变率及频率)总体发生中度改变,改变度为0.45。水库运行强烈改变了各月流量和年极端流量。而对年极端流量发生时间、高低流量的频率及延时和流量变化改变率及频率改变的影响相对较小。

b. 水文指标改变的生态效应。第1组指标为各月流量(12个),其生态意义为影响水生生物的栖息地、植物对土壤水量的需求、动物迁徙需求以及水文、含氧量的影响;第2组指标为年极端流量(11个),其生态意义为满足植被扩张、河流地貌和自然栖息地构建、河流和漫滩养分交换、滞洪区的植物群落分布的需要。水文效应的计算结果表明潘家口水库已经对鱼类洄游、动物迁徙、植物群落结构产生了影响,即对河流栖息地完整性产生了重要影响。

5 结 论

a. 建立了流域闸坝水生态效应评估体系,分析比较了各方法的适用条件和应用。RI法更适用于流域闸坝的宏观性评价,RVA法则建立了水文特征与生态意义之间的联系,并提出生态模型法能半定量/定量揭示闸坝的生态效应,评估结果适用于生态恢复和闸坝生态调度。

b. 滦河流域4个大中型水库 R_i 值范围0.09~0.31,各水库对水文的影响程度为:潘家口>桃林口>闪电河>庙宫水库。流域的闸坝水文效应为极严重至严重级别。闪电河水库的总蓄水量仅为潘家口水库的1/70,其影响程度约为潘家口水库的1/2,说明中小型水库的建设运行也对河流自然水文状态产生较大影响。与世界其他大坝相比,滦河流域典型闸坝的水生态影响处于较高水平。

c. 选取水文效应影响级别最高的潘家口水库为研究对象,利用RVA法5组32个指标评估了水生态效应。第1~2组IHA指标发生了高度改变,第3~5组指标总体发生中度至低度改变,水库下游水文特征呈高度改变。结合水文指标改变的生态意义,潘家口水库的运行强烈改变了鱼类洄游、底栖生

物和植物群落结构等生态过程,破坏了河流栖息地的完整性。

今后研究应选取典型研究区,在进行系列水文与生态指标同步监测的基础上,为构建、开发与应用鱼类模型、底栖生物模型、漫滩植被群落模型等水生生态模型提供基础数据,同时考虑流域梯级水库累积效应,并通过水文模型、生态模型和评价工具的结合,为河流的生态恢复、生态系统管理与闸坝生态调度提供科学依据和技术支撑。

致谢:本研究得到海河水利委员会水资源保护局林超先生的大力支持,特此致谢!

参考文献:

- [1] Mc CULLY P. Rivers no more: the environmental effects of dams[M]. London UK: Zed Books, 1996.
- [2] 李丽娟,郑红星. 海滦河流域河流系统生态环境需水量计算[J]. 地理学报, 2000, 55(4): 495-500. (LI Lijuan, ZHENG Hongxing. Environmental and ecological water consumption of river systems in Haihe-Luanhe Basins[J]. Acta Geographica Sinica, 2000, 55(4): 495-500. (in Chinese))
- [3] POSTEL S, RICHTER B. Rivers for life: managing water for people and nature[M]. Washington US: Island Press, 2012.
- [4] POFF N L, ALLAN J D, BAIN M B, et al. The natural flow regime[J]. BioScience, 1997, 47(11): 769-784.
- [5] NILSSON C, REIDY C A, DYNESIUS M, et al. Fragmentation and flow regulation of the world's large river systems[J]. Science, 2005, 308(5720): 405-408.
- [6] KONDOLF G M. PROFILE: hungry water: effects of dams and gravel mining on river channels[J]. Environmental Management, 1997, 21(4): 533-551.
- [7] RAMSEY G S. An analysis of vegetation recovery following dam removal at hemlock recreation site, Washington[D]. Portland State, US: Portland State University, 2014.
- [8] TAKAHASHI M, NAKAMURA F. Impacts of dam-regulated flows on channel morphology and riparian vegetation: a longitudinal analysis of Satsunai River, Japan[J]. Landscape and Ecological Engineering, 2011, 7(1): 65-77.
- [9] YOU X, LIU J, ZHANG L. Ecological modeling of riparian vegetation under disturbances: a review[J]. Ecological Modelling, 2015, 318(24): 293-300.
- [10] PETTS G E. Time-scales for ecological change in regulated rivers[M]. New York: Plenum Press, 1987.
- [11] 刘静玲,杨志峰,肖芳,等. 河流生态基流量整合计算模型[J]. 环境科学学报, 2005, 25(4): 436-441. (LIU Jingling, YANG Zhifeng, XIAO Fang, et al. Conformity calculation models on river ecological basin flows[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2005, 25(4): 436-441. (in Chinese))

(下转第35页)

- [11] 韩宇平, 阮平清. 区域水安全评价指标体系初步研究 [J]. 环境科学, 2003, 23 (2): 267-272. (HAN Yuping, RUAN Pingqing. Research on evaluation index system of water safety [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2003, 23 (2): 267-272. (in Chinese))
- [12] 李辉, 魏德州. 环境影响评价的新领域-生态安全评价 [J]. 安全与环境学报, 2003, 3 (5): 68-70. (LI Hui, WEI Dezhou. Environmental impact assessment of new area-ecological security evaluation [J]. Journal of Safety and Environment, 2003, 3 (5): 68-70. (in Chinese))
- [13] 张翔, 夏军, 贾绍凤. 水安全定义及其评价指数的应用 [J]. 资源科学, 2005, 27 (3): 145-149. (ZHANG Xiang, XIA Jun, JIA Shaofeng. Definition of water security and its assessment using water poverty index [J]. Resources Science, 2005, 27 (3): 145-149. (in Chinese))
- [14] 樊彦芳. 区域水生态与水环境安全机制的研究 [D]. 南京: 河海大学, 2005.
- [15] 王雪梅, 刘静玲, 马牧源, 等. 流域水生态风险评价及管理对策 [J]. 环境科学学报, 2002, 309 (2): 237-245. (WANG Xuemei, LIU Jingling, MA Muyuan, et al. Aquatic ecological risk assessment and management strategies in a watershed: an overview [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2002, 309 (2): 237-245. (in Chinese))
- [16] 毛小琴, 倪晋仁. 生态风险评价研究述评 [J]. 北京大学学报 (自然科学版), 2005, 41 (4): 646-654. (MAO Xiaoling, NI Jinren. Recent progress of ecological risk assessment [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2005, 41 (4): 646-654. (in Chinese))
- [17] 李玉照, 刘永, 颜小品. 基于 DPSIP 模型的流域生态安全评价指标体系研究 [J]. 北京大学学报 (自然科学版), 2005, 41 (6): 971-981. (LI Yuzhao, LIU Yong, YAN Xiaopin. A DPSIP-based indicator system for ecological security assessment at the basin scale [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2005, 41 (6): 971-981. (in Chinese))
- [18] 崔保山, 杨志峰. 湿地生态系统健康评价指标体系 I: 理论 [J]. 生态学报, 2002, 22 (7): 6-10. (CUI Baoshan, YANG Zhifeng. Establishing an indicator system for ecosystem health evaluation on wetlands I: A theoretical framework [J]. Acta Ecologica Sinica, 2002, 22 (7): 6-10. (in Chinese))
- [19] 左伟, 周慧珍, 王桥. 区域生态安全评价指标体系选取的概念框架研究 [J]. 土壤, 2003 (1): 2-7. (ZUO Wei, ZHOU Huizhen, WANG Qiao. Conceptual framework for selection of an indicator system for assessment of regional ecological safety [J]. Soils, 2003 (1): 2-7. (in Chinese))
- [20] 肖笃宁, 陈文波, 郭福良. 论生态安全的基本概念和研究内容 [J]. 应用生态学报, 2002, 13 (3): 354-358. (XIAO Duning, CHEN Wenbo, GUO Fuliang. On the basic concepts and contents of ecological security [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13 (3): 354-358. (in Chinese))

(收稿日期: 2015-10-08 编辑: 彭桃英)

(上接第 28 页)

- [12] YANG W, YANG Z, QIN Y. An optimization approach for sustainable release of e-flows for lake restoration and preservation: model development and a case study of Baiyangdian Lake, China [J]. Ecological Modelling, 2011, 222 (14): 2448-2455.
- [13] MERRITT D M, SCOTT M L, LEROY P, et al. Theory, methods and tools for determining environmental flows for riparian vegetation: riparian vegetation-flow response guilds [J]. Freshwater Biology, 2010, 55 (1): 206-225.
- [14] TOMBOLINI I, CANEVA G, CANCELLIERI L, et al. Damming effects on upstream riparian and aquatic vegetation: the case study of Nazzano (Tiber River, central Italy) [J]. Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems, 2014, 412: 1-15.
- [15] VIVIAN LM, GODFREE R C, COLLOFF M J, et al. Wetland plant growth under contrasting water regimes associated with river regulation and drought: implications for environmental water management [J]. Plant Ecology, 2014, 215 (9): 997-1011.
- [16] ROLLS R J, ARTHINGTON A H. How do low magnitudes of hydrologic alteration impact riverine fish populations and assemblage characteristics? [J]. Ecological Indicators, 2014, 39: 179-188.
- [17] HAGHIGHI A T, MARTTILA H, KLØVE B. Development of a new index to assess river regime impacts after dam construction [J]. Global and Planetary Change, 2014, 122: 186-196.
- [18] HAGHIGHI A T, KLØVE B. Development of a general river regime index (RRI) for intra-annual flow variation based on the unit river concept and flow variation endpoints [J]. Journal of Hydrology, 2013, 503: 169-177.
- [19] RICHTER B D, BAUMGARTNER J V, BRAUN D P, et al. A spatial assessment of hydrologic alteration within a river network [J]. Regulated Rivers: Research & Management, 1998, 14 (4): 329-340.
- [20] 冯瑞萍, 常剑波, 张晓敏, 等. 长江干流关键点流量变化及其生态影响分析 [J]. 环境科学与技术, 2010, 33 (9): 57-62. (FENG Ruiping, CHANG Jianbo, ZHANG Xiaomin, et al. Discharge changes and ecosystem influence in critical sections of the Yangtze River mainstream [J]. Environmental Science & Technology, 2010, 33 (9): 57-62. (in Chinese))
- [21] RICHTER B D, BAUMGARTNER J V, POWELL J, et al. A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems [J]. Conservation Biology, 1996, 10 (4): 1163-1174.

(收稿日期: 2015-09-30 编辑: 徐娟)