

人类活动干扰下的滦河河流生态径流变化分析

付晓花¹, 董增川¹, 山成菊², 徐伟¹, 谈娟娟¹

(1. 河海大学 水文水资源学院, 南京 210098; 2. 浙江水利水电学院, 杭州 310018)

摘要: 基于滦河流域滦县站 1956年-2010年日流量资料,从流量、频率、历时、发生时间、变化率5个方面考虑水文情势变化,选取了33个水文变化指数(IHA)和34个环境流量指数(EFC),应用IHA软件全面分析了这些指数在人类活动干扰前后的变化特征,以及与河流生态健康密切相关的河流情势的改变程度。以滦河流域为例,应用IHA软件分析河流生态径流变化规律,计算了水文特征值的量值、频率、历时、发生时间以及变化率5个方面在人类活动干扰前后的变化特征,评估河流生态径流的33个水文变化指数和34个环境流量指数。结果表明,人类活动显著地改变了河流汛期高流量及其出现频率、极端低流量的量值与出现时间、高流量脉动次数和日流量的变化率等水文要素,而这些水文要素的改变可能是导致河流生态环境破坏的重要原因,研究结果可为河流生态管理与修复提供依据。

关键词: 生态径流; RVA法; 水文变化指数; 环境流量指数; 滦河流域

中图分类号: X143 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2015)02-0263-05

Analysis of ecological instream runoff of Luanhe River under the interference of human activities

FU Xiaohua¹, DONG Zengchuan¹, SHAN Chengju², XU Wei¹, TAN Juanjuan¹

(1. College of Hydrology and Water resource, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Zhejiang University of Water Resources and Electric Power, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Based on the daily runoff data at the Luanxian station in the Luanhe River Basin from 1956 to 2010, the hydrological variations were analyzed from five respects including magnitude, frequency, timing, duration, and variation rate. A total of 67 statistical parameters were selected, including 33 IHA parameters and 34 EFC parameters. Indicators of Hydrologic Alteration (IHA) software was used to analyze the variation characteristics of these indexes before and after the interference of human activities, and the degree of alteration of the river regime closely related to the river ecosystem health. A case study in the Luanhe River Basin showed that human activities have changed the hydrological elements significantly, such as the high flow and its frequency in the flood season, the magnitude and timing of extremely low flow, the frequency of high flow pulses, and the variation rate of daily stream flows, and these changes in the hydrological elements can mainly be attributed to the river ecological environment destruction. The findings in this paper can provide the theoretical basis for river ecosystem management and restoration.

Key words: ecological instream runoff; Range of Variability Approach; Indicators of Hydrologic Alteration; Environmental Flow Components; Luanhe River Basin

随着人口的增加和社会经济的发展,河流受到各种形式人类活动的干扰,使得河流天然水文情势发生改变。由于水文情势是河流生态系统的主要驱动力^[1],决定并影响着河流物质循环、能量传递、物理栖息地、生物多样性和生态系统完整性等^[2,3],因此人类干扰对河流生态系统造成了不同程度的负面影响^[4]。从整体上审视河流生态系统,着眼于恢复生态过程和生物丰富度的自然变化特征是河流生

态系统管理与修复的关键^[5]。本文应用IHA软件^[6],选取以反映河流生态系统多样性、发挥河流自然生态功能为目标的水文变化指数(Indicators of Hydrologic Alteration, IHA)和以描述自然水文情势的环境流量指数(Environmental Flow Components, EFC),全面统计分析它们在人类干扰前后两个阶段的分布特性,为河流生态管理与修复提供依据。

收稿日期: 2014-07-20 修回日期: 2015-02-05 网络出版时间: 2014-03-19

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20150319.0940.014.html>

基金项目: 水利部公益性项目(201101017); 国家科技支撑计划项目(2012501982); 中央高校基本科研业务费专项资金(2014B34714)

作者简介: 付晓花(1990),女,陕西西安人,主要从事水资源规划与管理方面的研究。E-mail: fxh9034@sina.com

通讯作者: 董增川(1963),男,山西芮城人,教授,博士生导师,主要从事水资源规划与管理方面的研究。E-mail: zcdong@hhu.edu.cn

1 研究方法

1.1 RVA 法

RVA 法是由 Richter 等在 1997 年提出的,该方法以保持河流流量的完整性、天然季节性和变化性为基本原则^[7],以保护河流生态系统生物多样性和发挥河流自然生态功能为目标,通过水文特征值的量值、频率、历时、发生时间以及变化率五个方面对河流径流特征进行分析,量化受人类干扰的河流水文情势的改变程度^[3,7,9]。

RVA 法需以详细的日流量记录为基础,将具有相当长度的时间序列划分为人类干扰前和人类干扰后两个阶段,以各指标的平均值±标准偏差或以频率 75% 和 25% 对应的指标值作为上下限,构建 RVA 目标;以人类干扰前的流量自然变化状态为基准,评估人类干扰后的流量记录,分析河流水文情势受影响的改变程度。

1.2 RVA 法中指数的选取

1.2.1 水文变化指数 IHA

IHA 是由 Richter 等在 1996 年建立的一套包括流量、频率、历时、发生时间以及变化率等 5 类共 33 个参数的指标体系^[9,11]。通过全面统计分析这些指数在人类干扰前后两个阶段的分布特性,针对那些在人类干扰前后发生显著变化的水文参数,提出它们的恢复目标。

此 33 个参数对河流流域生态环境的影响各不相同,例如:水文极值发生时间可以给出水生生物进入新的生命周期信号,其改变会导致生物的生命周期与河流自然流量的季节时间相悖离;高、低脉冲流量这一特殊的水文现象可直接驱动河流廊道的生态过程,高脉冲流量通过与漫滩和高地的连通,大量地输送营养物质并塑造漫滩多样化形态,维系河道并育食河岸生物,从而影响河流生物的生物量和多样性,而低脉冲流量则影响河流生物量的补充以及一些典型物种的生存;水流条件的变化频率对于干旱地区河流生物物种影响显著,陡涨陡落的流量变化会导致水生生物被冲刷或搁浅,洪水的暴落导致生物幼苗种群不能建立;水流速率的改变影响水中浮游生物是否能够生长并且维持它们自身的发展^[12]。

为量化 IHA 受人类影响的改变程度,Richter 等^[9]建议以水文改变度来评估,其定义如下:

$$D_i = (N_{ai} - N_e) / N_e \times 100\% \quad (1)$$

式中: D_i 为第 i 个 IHA 的水文改变度; N_{ai} 为第 i 个 IHA 受到人类干扰后仍落于 RVA 目标内的年数; N_e 为人类干扰后 IHA 预期落入 RVA 目标内的年数,可以用 $r * NT$ 来评估,其中 r 为人类干扰前的 IHA 落于 RVA 目标内的比例,本文以各指标的 75% 及 25% 作为 RVA 目标,故 $r = 50\%$,而 NT 为人类干扰后受影响流量记录的总年数。 D_i 为正值表示该指标落入 RVA 目标内的年数比预期落入的年数多,负值表示比预期的少。当 $|D_i|$ 介于 0~33% 间时为低度改变;33%~67% 间为中度改变;67%~100% 间为高度改变。

1.2.2 环境流量指数 EFC

大自然保护协会(TNC)在 IHA 指标体系的基础上,于 2007 年提出了一套用以描述水文情势的包含 5 种流量模式 34 个参数的环境流量组分 EFC^[5,13]。该指标体系考虑了对

河流生态具有重要影响的水文特征值的变化^[5],从量级、历时、频率、发生时间、变化率等 5 个方面分别描述枯水流量、极端枯水流量、高流量脉冲、一般洪水、特大洪水组分的变化,可以在一定程度上反映生态系统的受影响程度。同时,将人类干扰前环境流量指数的统计特征作为河流生态径流恢复的主要参数,得出最小生态径流过程和适宜生态径流过程^[14]。

2 实例分析

2.1 研究区概况

滦河流域位于海河流域北部,内蒙古高原与华北平原的过渡地带,流域面积 44 750 km²。滦河流域是京津唐乃至整个华北地区的生态屏障,同时也是天津和唐山的主要水源地,流域生态条件脆弱。自 20 世纪 50 年代以来,由于土地建设、水利工程建设、社会经济用水量的加大等人类活动及自然、地域、水资源利用因素的影响,流域内水资源危机日渐严重,生态与环境已趋于严重恶化。滦县水文站位于滦河干流下游接近入海口处,是滦河下游总控制站,控制流域面积 44 100 km²。本研究资料来源于滦县站 1956 年-2010 年逐日平均流量数据,并将 1956 年-1979 年和 1980 年-2010 年分别作为人类活动干扰前和干扰后的时段^[15,16],对比评估人类活动对河流生态径流过程的影响。

2.2 计算结果及分析

2.2.1 水文变化指数变化分析

采用 IHA 软件计算得出受干扰前后滦县站月流量分布情况见图 1。

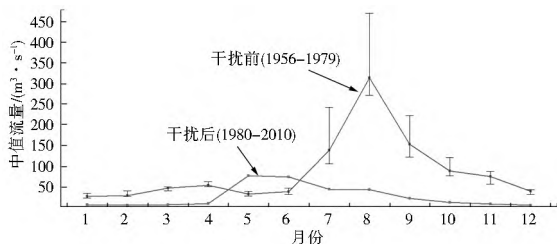


图 1 受干扰前后滦县站月流量分布

Fig. 1 Monthly flow alteration with RVA boundaries at the Luaxian station

由图 1 可以看出,干扰后的流量过程趋于平滑,洪峰流量大幅度减小;1980 年后流量基本都落在 RVA 恢复目标之外;除 5 月和 6 月以外,干扰后的月中值流量均低于设定目标的下限。

通过计算滦县站两个时段的水文系列特征值,得出水文恢复目标范围,表 1 为具体水文指标计算结果。

由表 1 可以看出,人类活动干扰后,滦县站断面流量的月中值流量均发生了明显的变化,除了 4 月、6 月和 9 月为中度改变之外,其他月份均为高度改变,各月份水文改变度的绝对值在 61.29%~100% 间变化。

图 2 为滦县站各水文变化指数改变度统计图。由图 2 可以看出,滦县站的水文过程受人类活动影响明显,其中中、高流量范围的 RVA 改变值基本为负值,而低流量范围的 RVA 改变值多为正值,说明受到人类干扰后流量基本低于 RVA 目标下限,流量减少明显且流量过程变得平滑。

表 1 滦县站水文变化指数计算结果

Tab. 1 Results of the indicators of hydrologic alteration analysis at the Luanxian Station

m³/s

水文变化指数	干扰前		干扰后		RVA 目标		改变度	
	中值	离散系数	中值	离散系数	下限	上限	D (%)	程度
1 月	30.15	0.507 5	10.5	1.203	26.7	37.8	- 70.97	高
2 月	32.08	0.615 4	9.27	1.149	30.63	43.7	- 90.32	高
3 月	50.4	0.265 4	10.4	0.834 6	43.4	53.48	- 100	高
4 月	57.43	0.345 7	12.9	3.91	53.88	64.99	- 61.29	中
5 月	35.55	0.429	79.5	0.598 7	31.08	43.5	- 90.32	高
6 月	42.15	0.649 5	76.9	0.494 1	34.78	50.8	- 61.29	中
7 月	141.5	1.328	47.6	1.326	108.8	245	- 90.32	高
8 月	315	1.113	46.7	2.687	273.5	469.8	- 80.65	高
9 月	155	0.926 6	25	2.476	124.1	224.3	- 61.29	中
10 月	91.15	0.655 2	16.3	1.718	79.95	124	- 100	高
11 月	78.2	0.533 6	12	0.983 7	60.63	90.55	- 90.32	高
12 月	43.1	0.638 6	9.23	1.23	34.98	46.55	- 90.32	高
年最小 1 日平均流量	16.25	0.363 1	5.84	0.994 9	14.5	18.5	- 80.65	高
年最小 3 日平均流量	18.73	0.369 2	5.84	1.038	16.32	20.08	- 100	高
年最小 7 日平均流量	20.42	0.355	6.07	1.047	17.05	21.95	- 100	高
年最小 30 日平均流量	26.57	0.385 7	7.71	0.920 6	23.57	28.2	- 90.32	高
年最小 90 日平均流量	38.49	0.430 8	9.70	1.06	34.34	43.93	- 100	高
年最大 1 日平均流量	2 390	1.483	192	2.651	1 130	3 998	- 80.65	高
年最大 3 日平均流量	1 980	1.335	157.3	2.919	787.8	2 923	- 80.65	高
年最大 7 日平均流量	1 321	1.491	139.4	2.341	680.4	1821	- 70.97	高
年最大 30 日平均流量	670.1	1.513	105.1	1.999	395.1	1129	- 70.97	高
年最大 90 日平均流量	359.9	1.135	80.45	1.41	255.2	587.5	- 61.29	中
零流量天数	0	0	0	0	0	0	0	低
基流	0.138	1.026	0.19	0.549 7	0.100	0.206	6.452	低
年最小 1 日流量出现日期	152	0.411 2	110	0.390 7	145.5	301.3	- 70.97	高
年最大 1 日流量出现日期	222	0.049 86	190	0.1831	211	226	- 43.7	中
低流量脉冲次数	5	0.7	4	0.75	4	6	- 3.226	低
低流量脉冲历时	7	1.107	9	2.722	4.5	10	31.61	低
高流量脉冲次数	3.5	0.8571	2	2.5	3	5	- 54.84	中
高流量脉冲历时	8.5	1.221	3	1.833	3.5	12.75	- 3.226	低
日均流量平均增长率	2.75	0.454 5	1.4	1.254	2.2	3.15	- 100	高
日均流量平均减少率	- 3.2	- 0.335 9	- 1.4	- 1.257	- 3.9	- 3	- 92.26	高
流量过程转折点数量	90.5	0.491 7	70	0.2571	78.25	113.8	- 22.58	低

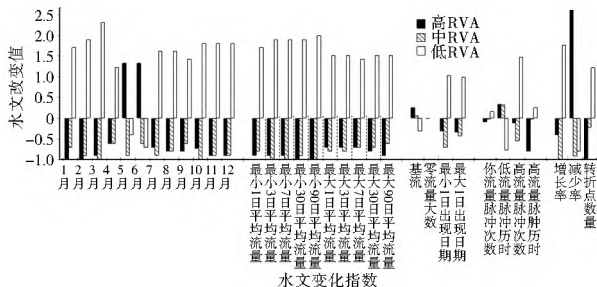


图 2 滦县站水文变化指数改变度统计

Fig. 2 The degree of hydrologic alteration with different IHA parameters at the Luanxian station

人类活动同时也显著的改变河年内极端水文特征变化的范围和趋势。年最小/最大 1 日平均流量、年最小/最大连续 3 日、7 日、30 日、90 日平均流量都变化明显, 图 3 和图 4 分别为最小/最大 1 日平均流量的变化曲线。由图 3 可以看出, 最小 1 日平均流量在人类活动影响后大部分低于目

标下限, 即流量值低于人类活动干扰前的水平。而由图 4 可以看出, 最大 1 日平均流量在水量明显减少的同时, 年际间波动范围也明显减小, 这与水利工程等人类活动在汛期消减了洪峰流量以及在非汛期下泄部分流量以保证下游河道流量或满足农业灌溉的需求的原因。

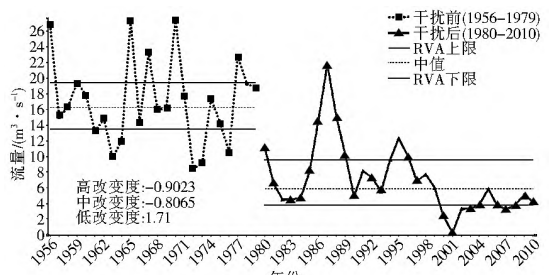


图 3 受干扰前后滦县站最小 1 日平均流量变化

Fig. 3 1 day minimum flow at the Luanxian station before and after the intervention of human activities

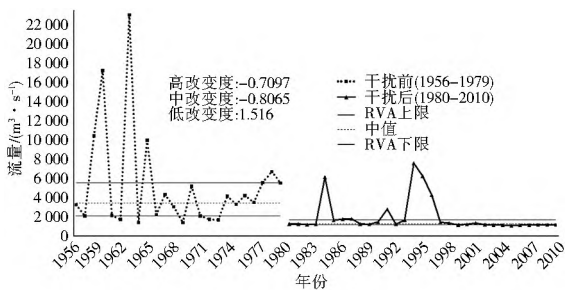


图 4 受干扰前后滦县站最大 1 日平均流量变化

Fig. 4 1-day maximum flow at the Luanxian station before and after the intervention of human activities

2.2.2 环境流量指数变化分析

图 5 为滦县站在河流受干扰前后 5 种流量模式的变化状况。可以看出,特大洪水和一般洪水事件在受到干扰后发生的次数明显减少。同时,极枯水量过程也显著减少。人类活动干扰后,大多数流量过程被划为高流量脉冲事件这一流

量模式,反映了人类活动干扰后流量的变化范围明显变窄,流量模式变得单一。

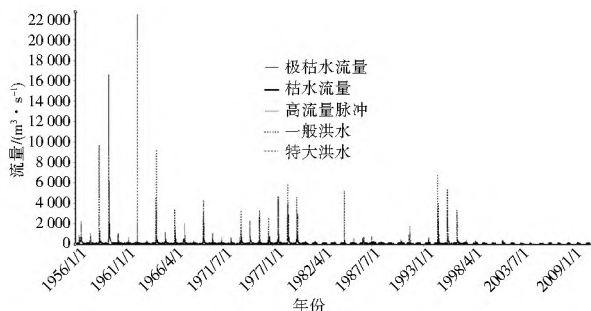


图 5 滦县站干扰前后环境流量分析

Fig. 5 Environmental flow components at the Luanxian Station before and after the intervention of human activities

通过 IHA 软件,分析计算人类活动干扰前后 34 个环境流量指数的变化情况,见表 2。可以看出,1 月、4 月、5 月

表 2 滦县站环境流量指数分析表

Tab. 2 Results of the environmental flow components analysis at the Luanxian station

m³/s

环境流量指数	中值		离散系数		离差系数	
	干扰前	干扰后	干扰前	干扰后	中值	离散系数
1 月枯水流量	32.8	35.48	0.393 3	0.164 2	0.081 55	0.582 5
2 月枯水流量	35.45	31.43	0.442 5	0.357 2	0.113 5	0.192 8
3 月枯水流量	51.55	47	0.259 5	0.353 2	0.088 26	0.361 3
4 月枯水流量	57.43	64.8	0.345 7	0.312 5	0.128 4	0.095 95
5 月枯水流量	39.4	82.9	0.299 5	0.24	1.104	0.198 5
6 月枯水流量	42.65	79.3	0.450 2	0.399 1	0.859 3	0.113 4
7 月枯水流量	77.3	67.55	0.472 2	0.405 4	0.126 1	0.141 4
8 月枯水流量	98.75	51.25	0.271 8	0.537 8	0.481	0.978 9
9 月枯水流量	96.8	58	0.290 3	0.585 8	0.400 8	1.018
10 月枯水流量	86	43.5	0.395 1	0.610 6	0.494 2	0.545 7
11 月枯水流量	76.7	32.63	0.492 8	0.683 9	0.574 6	0.387 7
12 月枯水流量	43.1	37.4	0.502 3	0.627	0.132 3	0.248 2
年极枯水流量极小值	21.5	14.28	0.237 2	0.732 3	0.336	2.087
年极枯水流量历时	7	11	1.679	3.227	0.571 4	0.922 6
年极枯水流量时间	36	197.3	0.393 4	0.133 9	0.881 1	0.659 7
年极枯水流量次数	3	4	1.25	0.75	0.333 3	0.4
年极高流量脉冲极大值	160	133.5	0.540 6	0.400 7	0.165 6	0.258 7
年极高流量脉冲历时	5.5	3	1.682	1.583	0.454 5	0.058 56
年极高流量脉冲时间	217	183	0.117 5	0.164 6	0.185 8	0.401 2
年极高流量脉冲次数	3	2	1.25	2.5	0.333 3	1
年极高流量脉冲增长率	35.33	28.2	1.395	1.132	0.201 9	0.188 3
年极高流量脉冲减少率	- 16.5	- 21	- 0.682 3	- 0.916 7	0.272 7	0.343 4
年出现一般洪水极大值	4 385	5 265	0.774 8	0.492 9	0.200 7	0.363 9
年出现一般洪水历时	96.5	68.5	0.414 5	0.865	0.290 2	1.087
年出现一般洪水时间	212.5	216	0.047 13	0.062 84	0.019 13	0.333 3
年出现一般洪水次数	0	0	0	0		
年出现一般洪水增长率	201.3	991.5	3.99	1.84	3.925	0.538 9
年出现一般洪水减少率	- 56.57	- 93.26	- 0.715 6	- 1.89	0.648 4	1.641
年出现特大洪水极大值	19 550		0.301 8			
年出现特大洪水历时	1 09		0.935 8			
年出现特大洪水时间	206		0.010 93			
年出现特大洪水次数	0	0	0	0		
年出现特大洪水增长率	1 717		1.261			
年出现特大洪水减少率	- 280.6		- 1.129			

和 6 月的月枯水流量中值有所增加,尤其是 5 月枯水流量中值由干扰前 39.4 m³/s 增加到干扰后 82.9 m³/s,变化尤为显

著,而且呈现出更加集中的变化趋势;由于缺水严重,极枯水流量出现的历时和次数有所增加,极枯水流量的极小值有所

减少且离散系数较干扰前增加;而特大洪水基本不再出现,大部分为高流量脉冲事件,但量值减少,且出现的时间提前;一般洪水的量值增加,平均历时明显减少,出现的时间相对集中。

图6和图7分别为滦县站干扰前后极枯流量历时变化情况和高流量脉冲次数变化情况。综合表2和图6、图7可以看出,极枯流量表现出变化范围增大,变化幅度增强的趋势,可见,滦县站因位于滦河下游,随着社会经济的发展,社会经济用水大幅增加,导致在其上游取水量加大,特枯流量出现的频率增加。对于高流量脉冲,经过众多水库的调蓄,本应改变的比较平滑,较少出现大幅度变化,但1998年之前,高流量脉冲出现大幅度变化,说明人类活动其他因子引起了高流量脉冲的大幅度变化;而1998年以后,滦县站高流量脉冲很少出现大幅度变化,这可能与20世纪90年代滦河上游开展水土保持有关。

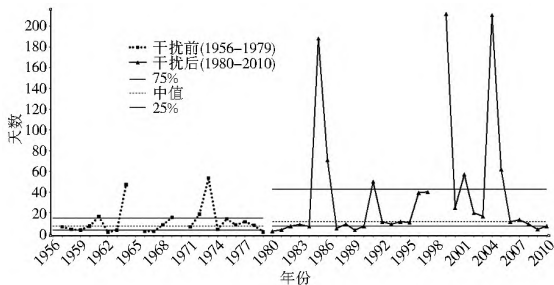


图6 滦县站干扰前后极枯流量历时变化

Fig. 6 Extreme low flows duration at the Luanxian station before and after the intervention of human activities

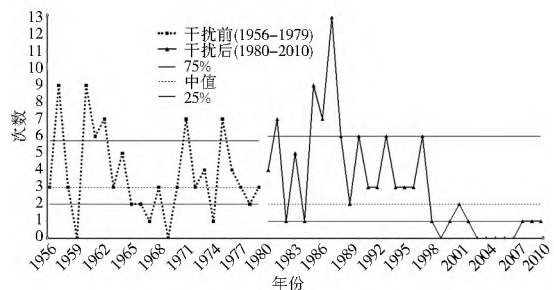


图7 滦县站干扰前后高流量脉冲次数变化

Fig. 7 High flow pulses frequency at the Luanxian station before and after the intervention of human activities

3 结论

(1) 人类活动干扰后水文变化指数基本都落在RVA恢复目标之外;滦县站断面流量的月中值流量均发生了明显的变化,除了4月、6月和9月为中度改变之外,其他月份均为高度改变;人类活动同时也显著地改变了河流年内极端水文特征变化的范围和趋势。

(2) 人类活动干扰后特大洪水和一般洪水事件发生的次数明显减少;同时,极枯水量过程也显著减少;大多数流量过程被划为高流量脉冲事件这一流量模式,反映了人类活动干扰后流量的变化范围明显变窄,流量模式变得单一。

参考文献(References):

[1] 宋兰兰, 陆桂华, 刘凌. 水文指数法确定河流生态需水[J]. 水利学报, 2006, 37(11): 1336-1341. (SONG Lanlan, LU Guihua, LIU Ling. Estimation of instream flow based on hydrological indexes[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(11):

1336-1341. (in Chinese))

- [2] 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(11): 22-29.
- [3] Richter B D, Mathews R, Harrison D L. Ecologically sustainable water management: managing river flows for ecological integrity[J]. Ecological Applications, 2002, 13(1): 206-224.
- [4] 闵倩, 蒋亚萍, 陈余道. 定量分析青狮潭水库对漓江生态环境的影响[J]. 水文, 2012, 32(6): 47-51. (MIN Qian, JIANG Yaping, CHEN Yurao. Quantitatively analyzing effects of Qingshan Reservoir regulation on ecological environment in Lijiang River[J]. Journal of China Hydrology, 2012, 32(6): 47-51. (in Chinese))
- [5] 王丁明. 太子湖水库建设对水文情势影响与环境流量研究[D]. 河北联合大学, 2012. (WANG Dingming. Effects of reservoir construction on flow regimes and environmental flow determination in the Taizi River[D]. Hebei United University, 2012. (in Chinese))
- [6] IHA Software Download[OL]. <http://conserveonline.org/workspaces/ihh>.
- [7] Brian D Richter. How much water does a river need[J]. Freshwater Biology, 1997, 37(1): 23-249.
- [8] Richter B D, Baumgartner J V, Powell J, et al. A method for assessing hydrologic alteration within ecosystem[J]. Conservation Biology, 1996, 10: 1163-1174.
- [9] Richter B D, Baumgartner J V, Braun D P. A spatial assessment of hydrologic alteration within a river network[J]. Regulated Rivers, 1998, 14: 329-340.
- [10] 舒畅, 刘苏峡, 莫兴国, 等. 基于变异范围法(RVA)的河流生态流量估算[J]. 生态环境学报, 2010, 19(5): 1151-1155. (SHU Chang, LIU Suxia, MO Xingguo, et al. Estimation of instream ecological flow based on RVA[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2010, 19(5): 1151-1155. (in Chinese))
- [11] 郭文献, 夏自强, 王乾. 丹江口水库对汉江中下游水文情势的影响[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2008, 36(6): 733-737. (GUO Wenxian, XIA Ziqiang, WANG Qian. Effects of Danjiangkou Reservoir on hydrological regimes in the middle and lower reaches of Hanjiang River[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2008, 36(6): 733-737. (in Chinese))
- [12] 张洪波. 黄河干流生态水文效应与水库生态调度研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2009. (ZHANG Hongbo. Study on ecological hydrological effect and reservoir ecological regulation on the main Yellow River[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2009. (in Chinese))
- [13] The Nature Conservancy. Indicators of hydrologic alteration version 7 user's manual[EB/OL]. Arlington, VA: The Nature Conservancy. [2010-09-24]. <http://www.nature.org/initiatives/freshwater/conservationtools/art17004.html>.
- [14] 樊健. 河流生态径流确定方法研究[D]. 南京: 河海大学, 2006. (FAN Jian. Research on Quantitative Methods to Ecological Instream Flow Requirements of River[J]. Nanjing: Hohai University, 2006. (in Chinese))
- [15] 付晓花, 董增川, 刘晨, 等. 滦河流域径流变化及其驱动力分析[J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11(5): 6-10. (FU Xiaohua, DONG Zengchuan, LIU Chen, et al. Analysis of runoff variation and its related driving forces in the Luanhe River Basin[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013, 11(5): 6-10. (in Chinese))
- [16] 付晓花, 董增川, 刘晨, 等. 滦河流域径流演变及其驱动力分析[J]. 水电能源科学, 2014, 32(3): 19-24. (FU Xiaohua, DONG Zengchuan, LIU Chen, et al. Runoff changes and related driving forces in Luanhe River Basin[J]. Water Resources and Power, 2014, 32(3): 19-24. (in Chinese))