

基于径流还原的桑干河生态基流及其盈缺分析研究

陈凯霖, 冯民权, 王丹丹

(西安理工大学 省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048)

摘要: 考虑到流域内水循环及降雨径流关系,通过对径流还原后,采用生态基流计算方法,确定桑干河生态基流量,进行桑干河生态基流分析。针对桑干河罗庄-固定桥、固定桥-册田水库逐年计算时,采取逐项还原法,逐项还原断面以上未实测到的水量,加上断面实测径流,还原为断面天然径流量。采用 Tennant 法计算桑干河生态基流量,并与最小月平均流量法的计算结果进行对比。Tennant 法生态基流量多年平均计算值介于 25% 和 50% 频率年的计算结果,符合实际情况。通过对桑干河灌区引水与河道实测径流变化对比,发现其引水对河道生态基流起到了制约作用,需要采取措施来解决生态基流的缺水问题。

关键词: 径流还原; 生态基流; Tennant 法; 盈缺分析; 桑干河

中图分类号: TV121; P333.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2018)02-0090-07

Ecological basis flow and its sufficiency and lack of Sanggan River based on restoring computation of runoff

CHEN Kailin, FENG Minquan, WANG Dandan

(State Key Laboratory of Eco-hydraulic in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Considering the relationship between the water cycle and rainfall runoff in the basin, this paper is to study the Sanggan River ecological base flow and analyze its sufficiency and lack in Sanggan River by means of restoring computation of runoff and the basic ecological flow calculation. Concerning the annual runoff calculation of Luo Zhuang - Guding qiao and Guding qiao - Cetian reservoir in Sanggan River, the term by term restoring method was adopted. In order to obtain natural runoff of the section, the unmeasured water quantity was restored term by term and then added measured runoff to it. The Tennant method was used to calculate the ecological base flow of the Sanggan River and compared with the results of the minimum monthly average flow method. The average calculated value of the Tennant method over the years is between 25% and 50% frequency years, which accords with the actual situation of the river. Through comparison between the water diversion in irrigation area and the measured runoff variation of Sanggan River, it is found that the water diversion has restricted the ecological base of the river channel. It is necessary to improve the ecological base of the water shortage.

Key words: restoring computation of runoff; ecological base flow; Tennant method; analysis of sufficiency and lack; Sanggan River

1 研究背景

河流是地球系统中必不可少的组成成分,是水文循环的重要路径,对于全球物质、能量的传递有着十分重要的作用^[1-2]。为了社会经济的发展,人们不断地对河流资源进行开发和利用,这导致了天然

河流的水文情势发生改变,出现了河道径流量减少的问题。为了保护河流生态系统,需要维持河道一定的流量,因此,河流生态基流的研究变得非常重要。同时由于水利工程的影响,目前大部分水文站实测资料已经不能反映天然情况,这对河流生态基流量的确定产生了误差。因此需要对测站以上受人

收稿日期:2017-09-16; 修回日期:2017-11-24

基金项目:山西省水利技术研究项目(2015SHJ1)

作者简介:陈凯霖(1994-),男,湖北当阳人,硕士研究生,主要研究方向为水环境模拟与污染控制。

通讯作者:冯民权(1964-),男,山西永济人,博士,教授,博士生导师,主要从事水环境模拟与污染控制研究。

类影响部分的水量进行还原^[3]。学者将受近期下垫面条件^[4]和人类影响的河川径流还原到过去没有人类影响的天然径流,称为还原计算^[5]。在实际中进行还原计算时,一个完全未受到人类活动干扰的分界点是难以确定的,也就是说很难区分出人类活动对流域产生影响的分界时间。

20世纪末,研究者在对天然径流进行还原计算时多数采取逐项还原法^[6]。1985年,郑濯清^[7]提出了逐项还原法和降雨径流相关法,张佑民^[8]和陆中央^[9]分别对逐项还原法进行了补充说明和进一步的发展。针对于南方地区还原较为困难,夏岑岭等^[10]提出了水文模拟法,余晓珍^[11]将水文模拟法应用于太湖流域,许嘉模等^[12]在平原水网区对径流还原做出了成果。21世纪初期,研究者对天然径流的还原计算方法有了更深的认识。沈宏^[6]、宋承新等^[13]以及李龙辉^[14]对天然径流还原的方法做出了进一步的探究。王忠静等^[15]对于径流还原的失真与失效的情况进行了阐述,耿玉琴^[16]针对平原河网方面做出了探究。一些学者开始利用分布式模型进行水资源评价^[17-18],学者们主要在水文模拟法上进行了较多的研究。陈佳蕾等^[19]在SWAT模型下对径流还原方法进行了研究,范辉等^[20]将天然径流还原方法与VIC模型相结合进行了探究。

综上所述,以天然径流量的10%(极限最低流量)作为保证河道生态系统的最小生态基流量。取罗庄、固定桥、册田水库水文站作为典型断面,采用典型Tennant法来计算桑干河的生态基流量。由于Tennant法计算时采用河道天然径流,因此先对实测径流进行还原。其次对桑干河河道生态基流量进行计算,在天然径流量的10%为基础下,对其进行多年平均河道生态基流的分析以及不同频率年分别计算生态基流量。通过结果分析,可以更加直观的明确河道生态基流量的变化情况。并通过对比桑干河不同水文站1980-2015年长系列实测径流与对应生态基流,分析桑干河年际生态基流盈亏情况。

2 桑干河径流还原计算分析

2.1 流域概况

桑干河是山西省第二大河流,发源于宁武县管涔山庙儿沟,桑干河从西向东流经朔州市,在东榆林水库设有监测断面,即为罗庄水文站;桑干河在古家坡附近进入大同市,在固定桥设有水文站进行监测。桑干河经过册田水库,最后进入河北省后汇入永定河。桑干河长506 km,流域面积 $2.39 \times 10^4 \text{ km}^2$,桑

干河水系图如图1所示。流域内属北温带较干燥的大陆性气候,流域内多年平均降水量350~400 mm,多年平均蒸发量为1745.8~2035.6 mm,多年平均气温6.5~7.9℃,多年平均风速为2.2~2.6 m/s,汛期最大风速达19 m/s,最大冻土深为1.57 m。

水文站实测得到的断面径流量,已不能真实反映本流域的天然来水量,实测径流量与断面天然径流量存在较大差别。因此需对水文站实测径流量进行还原,以便准确计算桑干河生态基流。选用了罗庄、固定桥、册田水库共3个水文站的流量资料,包含18个雨量站的资料以及罗庄和册田水库两个蒸发站的资料。收集到了1980年-2015年各观测站的相关资料,观测资料可靠。

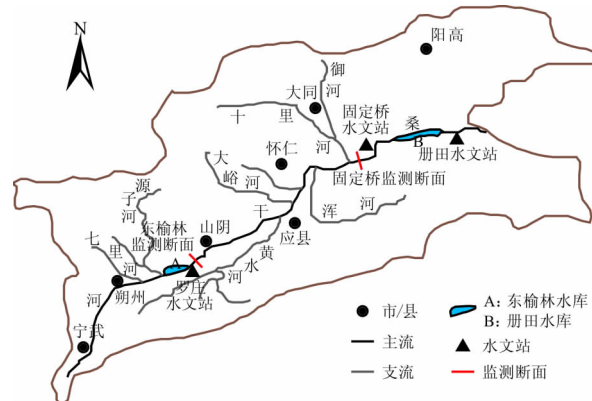


图1 桑干河水系图

2.2 径流还原计算

在现有资料基础上,采用逐项还原法对径流进行还原,针对1980-2015年系列,在对桑干河罗庄-固定桥、固定桥-册田水库逐年计算时,采用逐项还原法,公式表示如下:

$$W_{\text{天然}} = W_{\text{实测}} + W_{\text{农耗}} + W_{\text{工业}} + W_{\text{生活}} + W_{\text{库蒸}} + W_{\text{库渗}} \pm W_{\text{蓄变}} \pm W_{\text{引水}} \pm W_{\text{分洪}} \quad (1)$$

式中: $W_{\text{天然}}$ 为天然径流量, m^3 ; $W_{\text{实测}}$ 为实测径流量, m^3 ; $W_{\text{农耗}}$ 为农业灌溉地表水耗损量, m^3 ; $W_{\text{工业}}$ 为工业地表水耗损量, m^3 ; $W_{\text{生活}}$ 为城镇生活地表水耗损量, m^3 ; $W_{\text{库蒸}}$ 为库区水面蒸发与陆面蒸发差值, m^3 ; $W_{\text{库渗}}$ 为水库、闸坝渗漏量, m^3 ; $W_{\text{蓄变}}$ 为计算时段始末的蓄变量, m^3 ,增加为正,减少为负; $W_{\text{引水}}$ 为跨流域引水量, m^3 ,引入为负,引出为正; $W_{\text{分洪}}$ 为河道分洪决口水量, m^3 ,分出为正,分入为负。

在逐年分析还原工作中对引出水量全部还原,对引入水量以退水量进行还原计算。考虑到地下水引水退水量是包含在实测水量当中的部分,因此需要扣除这部分取用地下水耗损后入河排水量。同时

考虑到城市用水问题日益凸显,在还原时需要扣除抽取地下水的水量。经计算,罗庄、固定桥、册田水库水文站实测径流量还原结果见表 1。

表 1 1980—2015 年各水文站实测径流量与还原径流量比较

10 ⁴ m ³			
径流	罗庄	固定桥	册田水库
实测径流	11732	10495	8051
还原径流	21185	40701	43856
差 值	9453	30206	35805

由表 1 实测径流与还原径流对比分析可以看出,采用逐项还原法还原罗庄、固定桥、册田水库水文站 1980—2015 长系列流量资料,还原后的天然径流量较实测径流量均增大。罗庄水文站还原后的天然年平均径流量比实测径流量增加了 $9\,453 \times 10^4 \text{ m}^3$,固定桥水文站增加了 $30\,206 \times 10^4 \text{ m}^3$,册田水库水文站增加了 $35\,805 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

3 桑干河生态基流分析研究

取罗庄、固定桥、册田水库水文站作为典型断面。以天然径流量的 10% (极限最低流量) 作为保证水生生态的最小生态基流量。

3.1 最小月平均流量法计算

最小月平均流量法:即以河流最小月平均实测径流量的多年平均值作为河流的基本生态环境需水量。最小月平均流量法计算所得结果见图 2,由图 2 可看出 1980—2015 年最小月平均径流量变化。由罗庄、固定桥、册田水库水文站计算得出桑干河最小月平均生态基流量分别为 0.58、0.47 和 0.12 m³/s。

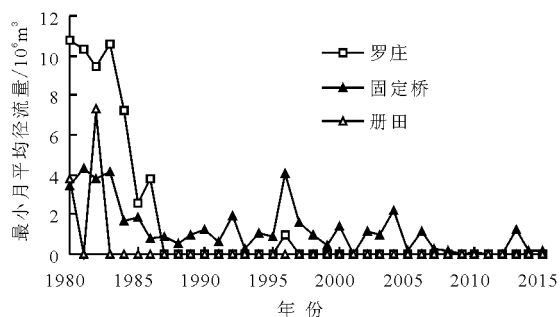


图 2 不同水文站 1980—2015 年最小月平均径流量

3.2 Tennant 法计算

将生态环境与水文情势联系在一起,分析河流水力断面参数与历史流量百分比的关系,选取提前确定的年天然径流量的 10%、30% 和 60% 作为河流生态基流的推荐值。10% 为河道流量的下限,若河道流量

低于 10%,则河流生态系统不健全,水环境问题会日益凸显,生态环境功能将逐渐丧失(见表 2)。

表 2 Tennant 法平均流量百分率的取值

生态基流	平均流量的百分率/%	
	最小值	最大值
完全最小值	10	
较好生境	30	60
适宜生境	60	100
泛滥流量	200	

选取罗庄、固定桥、册田水库水文站从 1980 年至 2015 年的天然径流量,通过分析以及计算河道生态基流量见表 3。从表 3 中可以看出罗庄、固定桥、册田水库 3 个水文站的河道生态基流量分别为 0.67、1.29 和 1.39 m³/s,满足完全最小值。满足适宜生境的最小平均流量分别为 4.03、7.74 和 8.34 m³/s。

表 3 采用 Tennant 法计算不同百分率生态基流量 m³/s

生态基流	罗庄		固定桥		册田水库	
	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值
完全最小值	0.67		1.29		1.39	
较好生境	2.02	4.03	3.87	7.74	4.17	8.34
适宜生境	4.03	6.72	7.74	12.91	8.34	13.91
泛滥流量	13.44		25.81		27.81	

取天然径流量的 10% 为河道生态基流量,分多年平均和代表年两种情况对河道生态基流进行分析计算。

3.2.1 多年平均河道生态基流的分析 通过对罗庄、固定桥、册田水库水文站 1980—2015 年天然径流量的分析,选取各月均值的 10% 作为桑干河生态基流量,见图 3。

由图 4~6 以看出,近年来随着人为因素影响的日趋严重,天然径流量较以往有所减少;且天然径流均比实测径流大 2 倍以上,表明人类活动及水利设施的建设,对河道径流有明显影响。由表 4 采用 Tennant 法计算得到罗庄、固定桥、册田水库水文站的生态基流结果可以看出:平均天然年径流量分别为 $210 \times 10^6 \text{ m}^3$ 、 $410 \times 10^6 \text{ m}^3$ 和 $440 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。将多年平均径流分为两个时段来看,前期(1980—1997)由罗庄、固定桥、册田水库水文站计算出的河道生态基流量分别为 0.79、1.54 与 1.63 m³/s,近期(1998—2015)计算出的河道生态基流量分别为 0.55、1.04 与 1.55 m³/s。

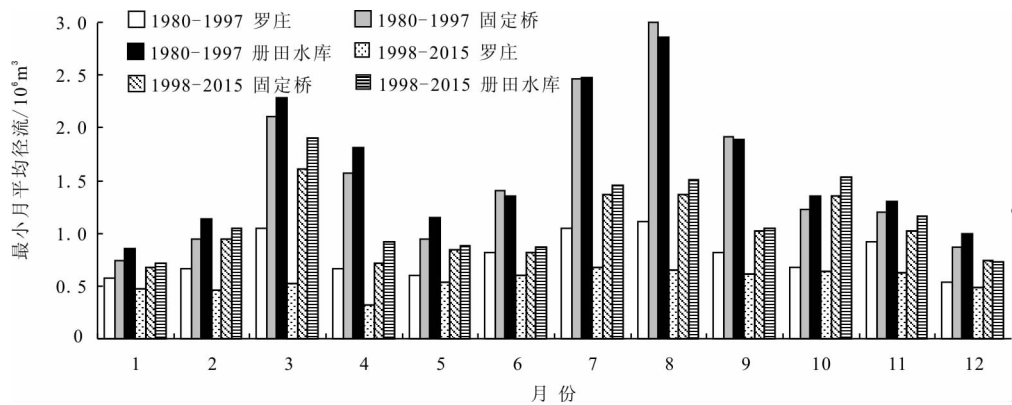


图 3 用 Tennant 法对多年平均河道生态基流的分析结果

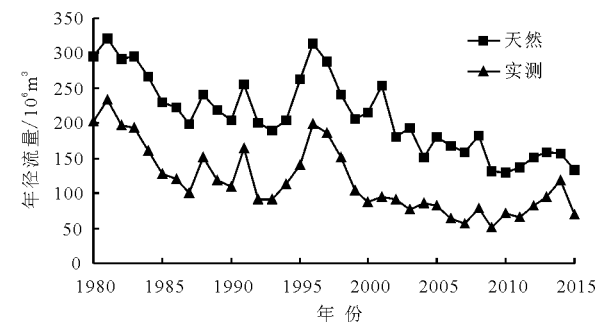


图 4 罗庄水文站天然与实测多年径流量变化

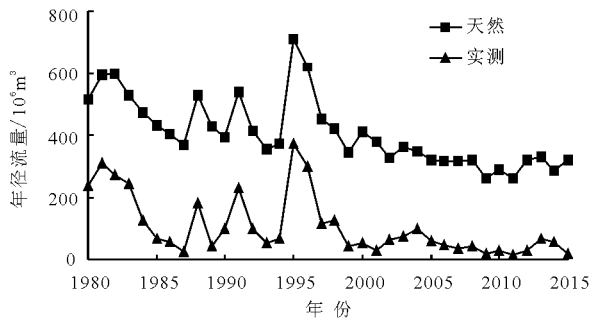


图 5 固定桥天然与实测多年径流量变化

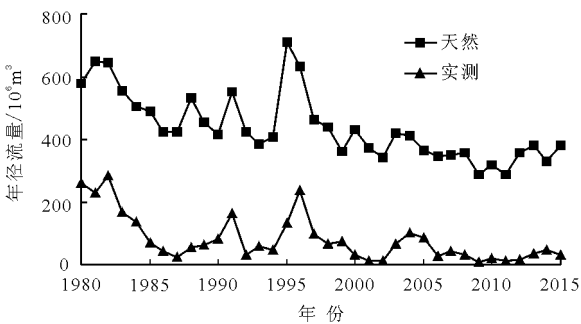


图 6 册田水库水文站天然与实测多年径流量变化

3.2.2 代表年法 Tennant 法没有区分不同频率年的差异,因此采用水文年排频法,针对枯水年、丰水年和平水年来计算生态基流量。依据水文频率计算结果最终选取的代表年为: $P = 25\%$ 、 $P = 50\%$ 、 $P = 75\%$ 和 $P = 90\%$ 。采用 1980 - 2015 年的年均流量计算成果,计算不同保证率对应的各月份河道生态基流量,最终结果如表 4 所示。

不同频率年各水文站汛期与非汛期生态基流量对比见表 5。从表 5 可以看出,丰水年 ($P = 25\%$)

表 4 不同水文频率年河道生态基流量 m³/s

频率/%	水文站	月 份											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$P = 25$	罗庄	0.55	0.59	0.91	0.54	0.67	0.86	2.14	0.68	0.68	0.63	0.95	0.51
	固定桥	0.74	0.60	2.41	2.51	0.86	1.73	2.27	2.49	1.72	1.27	0.92	0.42
	册田水库	0.80	0.71	2.55	2.83	1.01	1.72	2.38	2.61	1.68	1.30	0.99	0.57
$P = 50$	罗庄	0.44	0.64	0.88	0.68	0.51	0.68	0.66	0.63	0.64	0.38	1.16	0.49
	固定桥	0.86	2.02	0.90	0.37	0.54	1.70	2.91	1.19	0.80	0.68	1.25	1.02
	册田水库	0.62	1.02	2.21	1.87	0.89	1.13	1.82	2.13	1.41	0.72	1.34	0.63
$P = 75$	罗庄	0.29	0.32	0.43	0.35	0.54	0.61	0.72	0.51	0.40	0.70	0.71	0.44
	固定桥	0.60	0.73	2.00	0.56	0.56	0.67	1.82	1.59	1.20	1.22	0.63	0.59
	册田水库	0.62	0.93	1.94	1.81	1.01	1.00	1.00	1.40	1.00	1.75	0.46	0.67
$P = 95$	罗庄	0.46	0.34	0.33	0.15	0.46	0.55	0.50	0.43	0.50	0.47	0.54	0.27
	固定桥	0.40	0.42	1.55	0.45	0.85	0.62	1.46	0.57	1.23	1.29	0.40	0.62
	册田水库	0.54	0.57	1.67	0.61	0.88	0.63	1.63	0.57	1.24	1.33	0.58	0.64

到枯水年($P=90\%$)计算出的各水文站生态基流量有所不同,其中罗庄在不同频率年的年均生态基流量依次约为 0.81、0.65、0.50 和 0.42 m^3/s ,固定桥在不同频率年的年均生态基流量依次约为 1.50、1.18、1.02 和 0.83 m^3/s ,册田水库在不同频率年的年均生态基流量依次约为 1.60、1.32、1.13 和 0.91 m^3/s 。

表 5 不同频率年汛期与非汛期生态基流量对比 m^3/s

基流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$		汛期	非汛期	年均值
$P=25$	罗庄	1.03	0.70	0.81
	固定桥	1.94	1.27	1.50
	册田水库	1.99	1.40	1.60
$P=50$	罗庄	0.58	0.68	0.65
	固定桥	1.39	1.08	1.18
	册田水库	1.52	1.21	1.32
$P=75$	罗庄	0.58	0.46	0.50
	固定桥	1.46	0.79	1.02
	册田水库	1.28	1.05	1.13
$P=95$	罗庄	0.47	0.39	0.42
	固定桥	1.14	0.66	0.83
	册田水库	1.19	0.76	0.91

3.3 生态基流计算结果讨论

分别采用最小月平均流量法和 Tennant 法计算了罗庄、固定桥、册田水库水文站的生态基流量,计算结果见表 6。从表 6 可以看出,采用不同计算方法计算出的罗庄、固定桥及册田水库水文站不同频率年的生态基流量分别占多年平均天然径流量的 6.3%~12.1%、3.6%~11.6% 和 0.9%~11.5%,其中最小月平均流量法计算所得的生态基流值最小(罗庄水文站除外),Tennant 法 25% 频率年计算出的生态基流量最大。且 Tennant 法多年平均计算结果介于 25% 和 50% 频率年的计算结果,符合河流实际情况,表明采用 Tennant 计算所得生态基流值合理,可作为桑干河河道生态基流参考值。

由于本研究的目的是为保证河道常年不断流,且桑干河沿河有不同水文站点,因此在确定生态基流值时分别以不同站点的生态基流作为该河段的基流值,见表 7。由表 6 生态基流综合分析结果可知,对比不同方法计算所得生态基流,最终确定的各水文站生态基流下限值分别为:罗庄 0.50 m^3/s ,固定桥 1.02 m^3/s ,册田水库 1.13 m^3/s 。

表 6 两种方法下生态基流量计算结果的比较

水文站	计算项目	最小月平均流量法	Tennant 法				
			多年平均	代表年			
				25%	50%	75%	95%
罗庄	生态基流/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	0.58	0.67	0.81	0.65	0.50	0.42
	占多年平均百分比/%	8.70	10.00	12.10	9.70	7.50	6.30
固定桥	生态基流/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	0.47	1.29	1.50	1.18	1.02	0.83
	占多年平均百分比/%	3.60	10.00	11.60	9.10	7.90	6.40
册田水库	生态基流/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	0.12	1.39	1.60	1.32	1.13	0.91
	占多年平均百分比/%	0.90	10.00	11.50	9.50	8.10	6.50

表 7 各水文站生态基流量综合分析值 m^3/s

项 目	罗庄	固定桥	册田水库
最小月平均流量(实测)	0.58	0.47	0.12
多年平均基流量	0.67	1.29	1.39
枯水年基流量	0.50	1.02	1.13
生态基流量下限值	0.50	1.02	1.13

4 河流生态基流盈亏分析

生态基流的盈亏情况以及水量如何调配才能满足生态基流的要求是河流生态环境健康发展研究的基础。为了使河道不会出现断流现象,本研究采用不同水文站点的生态基流量进行缺水分析。

通过对比桑干河不同水文站 1980—2015 年长系列实测径流与对应生态基流(图 7~9),分析桑干河年际生态基流盈亏情况。由图 7~9 可以看出,桑干河 1980—2015 系列年多年实测径流量基本能满足河道生态基流量,但各水文站满足情况有所不同,其中固定桥和册田水库段均出现不同程度的缺水情况。册田水库段缺水最为严重,超过 1/3 的年份实测径流量明显不能满足河道生态基流量,表明上游水利设施及人类活动用水对桑干河下游的径流有很大影响。另一方面,随着年代的增加,不同水文站实测径流量均呈下降的趋势,实测径流量在近期甚至小于生态基流量,说明近年来桑干河已经出现了缺水情况,同样表明人类活动对地表径流量的影响是

密切相关的。

桑干河近年来水量减少,且汛期和非汛期的径流量有明显的差别,特别是汛期径流量减少,所以年际的生态基流盈亏情况并不能完全反映生态基流盈亏的真实情况,有必要对其年内生态基流盈亏情况进行分析。

通过对比桑干河不同水文站4个典型频率年的年内实测径流量与对应生态基流量来分析河道的年内生态基流盈亏(图10~12),由图10~12可以看出,不同典型年实测径流量的变化趋势有所不同,但同时反映出的基本趋势为汛期径流量大于非汛期。实测径流总体趋势反映出丰水年>平水年>枯水年

>特枯年,不同水文站典型年的实测径流与生态基流对比结果反映出丰水年各月份的平均实测径流量均能满足其生态基流的需要;平水年汛期可以满足生态基流,非汛期无法满足基流,表明非汛期缺水较为严重,原因是河道天然径流的减少以及桑干河灌区引用水量的增加,使得桑干河生态基流缺水越来越严重,不能满足的月份也增多;而枯水年状况更为严重,固定桥和册田水库即使在汛期也无法满足基流,且年内至少有8个月份出现缺水。可见典型年生态基流总体缺水状况较为严重,甚至汛期径流量也不能满足生态基流的要求,急需对其水资源进行合理调配。

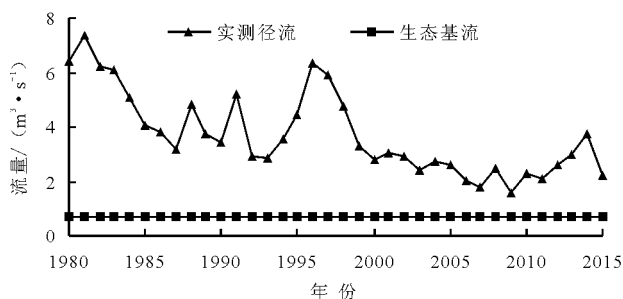


图7 罗庄1980-2015年实测径流与生态基流对比

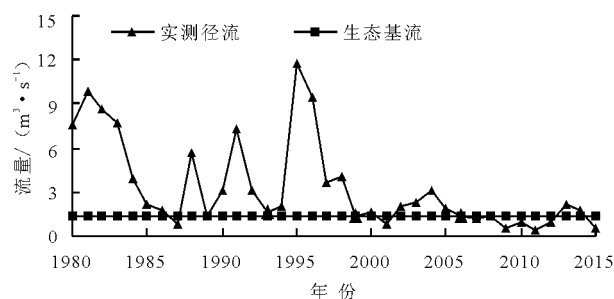


图8 固定桥1980-2015年实测径流与生态基流对比

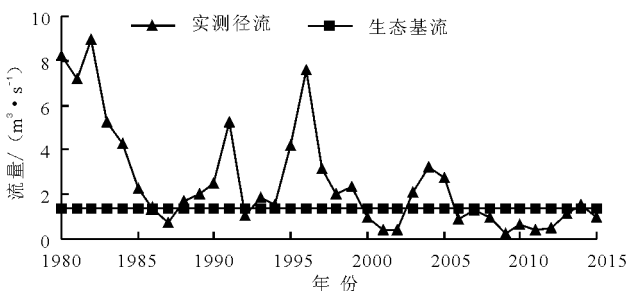


图9 册田水库1980-2015年实测径流与生态基流对比

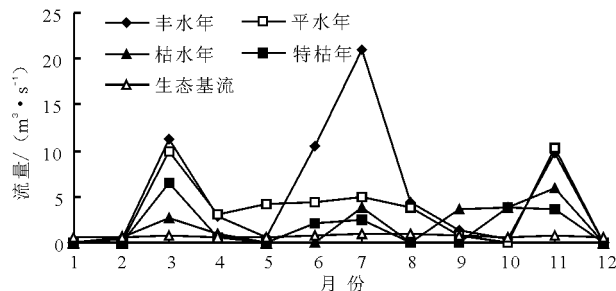


图10 罗庄典型年实测径流与生态基流对比

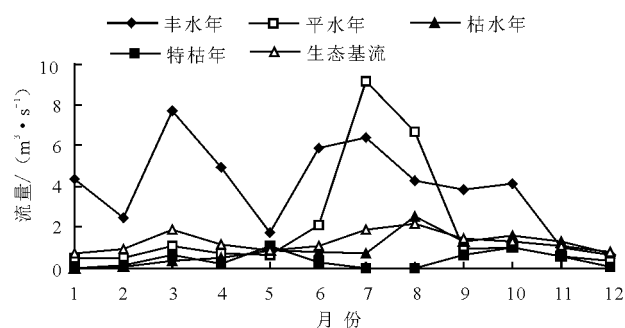


图11 固定桥典型年实测径流与生态基流对比

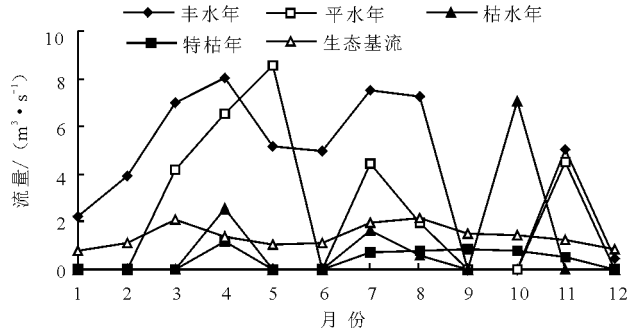


图12 册田水库典型年实测径流与生态基流对比

对桑干河河道生态基流量的盈亏情况进行分析后,发现桑干河生态基流存在不同程度的缺水,在非汛期时,桑干河生态基流的缺水情况最为严重。为满足生态基流的要求,应当合理配置水资源,在确定

影响桑干河生态基流缺水因素的前提下,着重分析影响程度。可通过对桑干河沿线较大的用水单位的分析,采用合理分配用水单位间水资源的方法来达到保障桑干河生态基流的目的。

5 结 论

(1)通过 Tennant 法和最小月平均流量法对桑干河不同水文站罗庄、固定桥及册田水库生态基流分别进行了分析计算,Tennant 法多年平均生态基流量计算值介于 25% 和 50% 频率年的计算结果,符合河流实际情况。综合分析得到各水文站生态基流下限值分别为:罗庄 $0.50 \text{ m}^3/\text{s}$,固定桥 $1.02 \text{ m}^3/\text{s}$,册田水库 $1.13 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

(2)通过对河道生态基流量系列做比较,发现由罗庄水文站计算出近期河道生态基流量比前期减少了 30.5%,由固定桥水文站计算出其河道生态基流量减少 32.1%,由册田水库水文站计算出其河道生态基流量减少了 29.3%,表明近年来在各种人为因素、自然因素的驱使下,使得河道基流量大为减少。

(3)通过对桑干河灌区引水与河道实测径流量变化对比,发现其引水对河道生态基流起到了制约作用,近年来尤为明显。为了改善生态基流的缺水状况,需要依靠多种途径来调节桑干河灌区的现状引水量。

参考文献:

- [1] MAGILLIGAN F J, NISLOW K H. Changes in hydrologic regime by dams[J]. *Geomorphology*, 2005, 71(1): 61–78.
- [2] 徐宗学,武 玮,于松延.生态基流研究:进展与挑战[J]. *水力发电学报*, 2016, 35(4): 1–11.
- [3] 李勋贵,魏 霞.基于系统周界观控模型的径流还原方法[J]. *水利水电技术*, 2015, 46(1): 11–16.
- [4] 胡春歧,于广英,陈宝根.流域下垫面条件变化对径流影响分析——以海河流域大清河系山丘区为例[C]//2012 中国水文学术讨论会, 2012.
- [5] HUNDECHA Y, BARDOSSY A. Modeling of the effect of land use changes on the runoff generation of a river basin through parameter regionalization of a watershed model[J]. *Journal of Hydrology*, 2004, 292(1): 281–295.
- [6] 沈 宏.天然径流还原计算方法初步探讨[J]. *水利规划与设计*, 2003(3): 15–18+47.
- [7] 郑濯清.水文水利计算:第 2 版[M].北京:水利电力出版社, 1985.
- [8] 张佑民.河川径流分项调查还原法中若干问题的探讨[J]. *水文*, 1991, 11(2): 24–28.
- [9] 陆中央.关于年径流量系列的还原计算问题[J]. *水文*, 2000, 20(6): 9–12.
- [10] 夏岑岭,赵人俊,卞传恂,等.湿润半湿润地区水资源评估水文模拟方法[J]. *资源科学*, 1994, 25(6): 32–42.
- [11] 余晓珍.太湖流域产流计算初步研究[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 1990, 18(6): 41–47.
- [12] 许嘉模,刘克强,张万铭,等.平原水网区的产流参数分析和移用[J]. *水文*, 1990, 10(1): 26–30+60.
- [13] 宋承新,王凤英.天然径流量分析计算新探索[J]. *山东农业大学学报(自然科学版)*, 2002, 33(2): 203–206+211.
- [14] 李龙辉.黑龙江省水库站径流还原计算方法及有关问题的探讨[J]. *黑龙江水利科技*, 2003(4): 22–24.
- [15] 王忠静,李宏益,杨大文.现代水资源规划若干问题及解决途径与技术方法(一)——还原“失真”与“失效”[J]. *海河水利*, 2003(1): 13–16+70.
- [16] 耿玉琴.平原河网地区地表水资源量估算方法探讨[J]. *海河水利*, 2003(5): 33–34.
- [17] JIA Yangwen, WANG Hao, QIU Yaqin, et al. Generalized water resources assessment based on watershed hydrologic cycle model I: Assessment approach[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2006, 37(12): 1496–1502.
- [18] JIA Yangwen, WANG Hao, QIU Yaqin, et al. General water resources assessment based on watershed hydrologic cycle model II: Applications in the Yellow River Basin[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2006, 37(10): 1181–1187.
- [19] 陈佳蕾,钟平安,刘 畅.基于 SWAT 模型的径流还原方法研究——以大汶河流域为例[J]. *水文*, 2016, 36(6): 28–34.
- [20] 范 辉,肖 恒,马金一.基于 VIC 模型的天然径流还原研究[J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2017, 38(2): 7–10.