

DOI:10.13476/j.cnki.nsbdqk.2022.0076

刘欢,胡鹏,王建华,等.中国河流分区分类生态基流占比阈值确定[J].南水北调与水利科技(中英文),2022,20(4):748-756.
LIU H, HU P, WANG J H, et al. Determination of the proportion thresholds of ecological base flow in rivers with different scales in different watersheds of China[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2022, 20(4): 748-756. (in Chinese)

中国河流分区分类生态基流占比阈值确定

刘欢,胡鹏,王建华,张璞,杨泽凡,曾庆慧

(中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室,北京 100038)

摘要:为解决河流生态基流保障目标制定缺乏参考标准的问题,提出一种分区分类的河流生态基流占比(即生态基流占多年平均天然径流的百分比)阈值确定方法。同时,选择我国10个水资源一级区439个水文监测断面,通过对断面1956—2018年天然与实测流量资料的分析,综合考虑断面径流大小、年内变化是否剧烈、是否受控制性水利工程调控等,提出我国河流分区分类的生态基流占比阈值,包括上限值、下限值和推荐值。结果表明:无控制性水利工程调控时,断面生态基流占比随其集水面积增加呈上升趋势,而全国小、中、大型断面生态基流占比的分区平均推荐值在枯水期分别为4.4%、6.6%和9.2%,非枯水期分别为9.4%、11.6%和16.2%;在有控制性水利工程调控时,断面在枯水期的平均推荐值为12%,而在非枯水期为17%。成果较好反映了全国河流生态基流的时空差异,可为生态基流保障目标的分区域、分类型、分时段制定提供支撑。

关键词:生态基流;生态流量;基流占比阈值;水资源一级区;水利工程调控

中图分类号:TV76 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



生态基流是指维系和保护河流的基本生态功能不受破坏所必须保留在河道内的最小流量^[1-2]。相关研究可追溯到20世纪40年代初的河道枯水流量(low flow)、河道基流(base flow)等^[3]。英国在1963年《水资源法》中提出了“可接受最低流量(minimum acceptable flow)”,并将其确定为流量历时曲线中95%频率时的流量,此概念在欧洲较为流行^[4-5]。美国在生态用水方面建立了最小流量制度,强制要求确保河道内必要的基础流量,通常采用7Q10法得到^[6]。西班牙《水法》要求水资源利用过程中必须考虑“最小河道内流量(minimum instream flow)”,粗略选择多年平均流量的10%^[7]。目前生态基流的概念有多种术语表达,但内涵基本一致^[8]。通过保障生态基流,河流可维持一定的河宽、水深和流速,一方面保持河流基本形态和输水廊道稳定,另

一方面满足水生生物短时间生存所必需的瞬时低流量需求。归纳来看,关于生态基流的计算方法已有数百种,一般分为水文学法、水力学法、栖息地法和整体法^[9-11]。然而,采用不同方法得到的结果差异很大,难以有效支撑河流生态基流的确定和管理^[12-13]。断面生态基流占其多年平均天然径流的百分比(简称“生态基流占比”)是反映生态基流适宜性的重要指标。Tennant^[14]对美国中西部11条河流开展野外调查,建立了河宽、水深、流速等与流量的关系,提出河流生态基流占比在枯水期应达到10%,汛期达到20%或30%。这一生态基流占比阈值简洁直观,受到广大学者和管理者青睐,常被用于检验或修正生态基流计算结果,并将其移植到缺(少)资料地区^[15-16]。但是,我国幅员辽阔,河流径流情势差异性显著,生态基流水平(以生态基流占比值

收稿日期:2022-03-26 修回日期:2022-07-07 网络出版时间:2022-07-13

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20220713.1011.004.html

基金项目:国家自然科学基金项目(42001040;52122902;51625904;51909129);国家重点研发计划项目(2021YFC3200203);中国水利水电科学研究院基本科研业务费项目(WR0145B022021;WR0145B072021)

作者简介:刘欢(1992—),男,河南开封人,高级工程师,博士,从事流域水循环模拟与水生态保护研究。E-mail:liuhuan@iwahr.com

通信作者:胡鹏(1985—),男,湖北荆州人,正高级工程师,博士,从事生态水文和生态水力学研究。E-mail:hp5426@126.com

的大小表征)有明显差别。此时,采用统一的标准难以适应不同地区、不同类型河流断面生态基流保障目标的科学制定。近年来,人们^[17-18]开始关注河流生态流量的分区分类研究,但大多处于理论探讨阶段。考虑同分区、同类型多条河流之间,水文生态特征存在的相似性和差异性特点,分析提出包含上限值、下限值和推荐值的分区分类生态基流占比阈值体系。基于我国 439 个断面 1956—2018 年长系列天然与实测流量资料的分析,综合考虑断面径流大小、年内变化是否剧烈、是否受控制性水利工程调控等多方面因素,确定 10 个水资源一级区,小、中、大不同集水面积河流断面的生态基流占比阈值,为新时期我国河流生态基流保障目标的科学制定和调控保障提供参考。

1 研究方法数据来源

1.1 基本思路

根据 ELOHA 框架等成果,通过对河流的合理分区分类,同分区同类型河流的生态基流水平大致相当,处于一个较小的区间范围内^[19-20]。为定量表征河流生态基流水平的区间分布特征,提出一套由上限值、下限值和推荐值构成的阈值体系,以替代传统的单一标准。其中,上限值和下限值分别代表了同类型河流断面生态基流保障目标的最高和最低控制标准。对于某一类型河流来说,其生态基流保障目标宜控制在相应上限值和下限值形成的区间内。参考代表性断面生态基流占比数据序列的最小值和下四分位值确定下限值,参考最大值和上四分位值确定上限值。由此,可一定程度上降低由于代表性断面生态基流占比数据分布不均或个别断面数据异常(过高或过低)造成的结果偏差。同样,推荐值参考代表性断面生态基流占比数据序列的中位值和平

均值综合确定,反映了同分区同类型河流断面生态基流水平的集中分布情况,结果可以作为缺资料河流断面生态基流保障目标制定的依据。

此外,考虑到控制性水利工程对河流径流“削峰补枯”的调节作用,生态基流占比阈值按是否有控制性水利工程进行调控分别设置。对于无控制性水利工程调控的断面,主要以河流生态基流天然水平(即天然来水条件下的河流生态基流水平,下同)作为阈值确定依据;对于受上游控制性水利工程调控的断面,综合生态基流天然水平以及工程调控后的生态基流保障现状作为阈值确定依据。

1.2 方法流程

1.2.1 河流的分区分类

目前,有学者^[21-22]考虑生态功能、水资源禀赋、气候特点等在空间上的差异及其对河流的影响,将河流划分为不同类型。立足河流生态基流特点和保障需求,从水资源综合管理的角度出发,考虑水系完整性和水文节律相似性,参照 10 个水资源一级区进行河流的分区。基于河流分区,根据河流集水面积大小,以集水面积达到 2 000 km²、10 000 km² 作为分类节点,分别将河流划分为小、中、大 3 种类型。集水面积数据直观易获取,是推求无资料地区河流多年平均天然径流大小的重要参数,有利于水文资料缺乏地区的河流生态基流保障目标的制定。

1.2.2 代表性断面选择与生态基流目标核算

选择我国 331 条河流 439 个有长系列水文资料的断面作为代表性断面,见表 1。用于分析的数据包括断面 1956—2000 年逐月天然和实测流量、2006—2018 年逐日实测流量。其中,1956—2000 年流量数据来自全国第二次水资源调查评价成果,2006—2018 年流量数据来自历年水文年鉴。

表 1 439 个代表性断面的基本信息

Tab. 1 Basic information of 439 representative hydrological sections across the country

水资源一级区	代表性断面数量/个			集水面积/km ²			
	合计	小	中	大	最小值	最大值	平均值
松花江区	64	8	22	34	162	863 000	63 020
辽河区	26	6	11	9	1 001	136 277	21 050
海河区	55	24	16	15	92	44 100	7 291
黄河区	51	2	15	34	557	751 869	102 798
淮河区	35	12	13	10	353	121 330	12 094
长江区	138	49	47	42	114	458 592	18 559
东南诸河区	18	5	9	4	585	54 500	7 937
珠江区	24	3	8	13	936	327 006	43 507
西南诸河区	12	0	6	6	3 128	110 224	30 868
西北诸河区	16	7	3	6	229	19 983	6 414
代表性断面	439	116	150	173	92	863 000	33 996

针对宏观尺度的河流生态基流计算,水文学法在资料获取和应用普适性上有明显优势。其中, Q_p 法(不同频率最枯月平均值法)能充分反映径流年际、年内丰枯变化特性及其对生态基流的影响。因此,选择 Q_p 法计算代表性断面生态基流及其占比。根据新时期河湖生态流量管理要求,生态基流的保证率应不小于 90%,原则按日均流量评价^[23]。同时,《河湖生态环境需水计算规范》(SL/Z 712—2021)建议“95%或 90%保证率年最枯月平均流量”作为生态基流^[24]。综上,生态基流采用 90%保证率最枯日均流量。考虑到逐日天然径流数据很难获取,采用 95%保证率最枯月均流量近似代替。

1.2.3 无控制性水利工程调控断面生态基流占比阈值确定

首先,将全年划分为枯水期和非枯水期。然后,根据枯水期和非枯水期的径流序列,分别计算断面 1956—2000 年逐月天然径流过程的 Q_{95} 值(记作“ $N_{Q_{95}}$ ”),将其作为无控制性水利工程调控断面年内不同时期的生态基流。其中:松花江区和辽河区以 11 月—次年 4 月为枯水期;其余水资源一级区以 12 月—次年 3 月为枯水期。

分区分类统计代表性断面天然来水条件下生态基流占比的特征值,进而确定断面生态基流占比的上限值、推荐值和下限值。

$$\begin{cases} V_u = (F_{\max} + F_{25}) / 2 \\ V_r = (F_{\text{ave}} + F_{50}) / 2 \\ V_d = (F_{\min} + F_{75}) / 2 \end{cases} \quad (1)$$

式中: V_u 、 V_r 、 V_d 分别代表断面生态基流占比的上限值、

推荐值和下限值; F_{\max} 、 F_{25} 、 F_{ave} 、 F_{50} 、 F_{75} 、 F_{\min} 指同分区同类型代表性断面生态基流占比最大值、上四分位值、中位值、平均值、下四分位值和最小值。

同时,考虑到集水面积越大,径流越稳定,在确定阈值时遵循大型断面不低于中型断面、中型断面不低于小型断面的原则,对阈值结果进行微调。

1.2.4 控制性水利工程调控断面生态基流占比阈值确定

梳理断面上游控制性水利工程建设情况,对比在现状与天然来水条件下代表性断面生态基流占比,筛选有工程调控并对生态基流的提高发挥了正向作用的断面。筛选标准如下:

$$\begin{cases} P_R - P_N \geq 1\% \\ \frac{(P_R - P_N)}{P_N} \geq 20\% \end{cases} \quad (2)$$

其中

$$\begin{cases} P_N = N_{Q_{95}} / Q_0 \times 100\% \\ P_R = \max(R_{Q_{95}}, D_{Q_{90}}) / Q_0 \times 100\% \end{cases} \quad (3)$$

式中: P_R 和 P_N 分别为断面现状和天然来水条件下的生态基流占比,%; $R_{Q_{95}}$ 为 1980—2018 年逐月实测径流 Q_{95} 值, m^3/s ; $D_{Q_{90}}$ 为 2006—2018 年逐日实测径流 Q_{90} 值,取两者较大值代表断面生态基流的现状水平, m^3/s ; Q_0 为断面 1956—2000 年系列多年平均天然径流, m^3/s 。

在时段上,同样将全年按照枯水期和非枯水期,采用断面现状来水条件下生态基流占比的特征值,计算相关阈值,方法同流程④。

阈值确定方法流程见图 1。

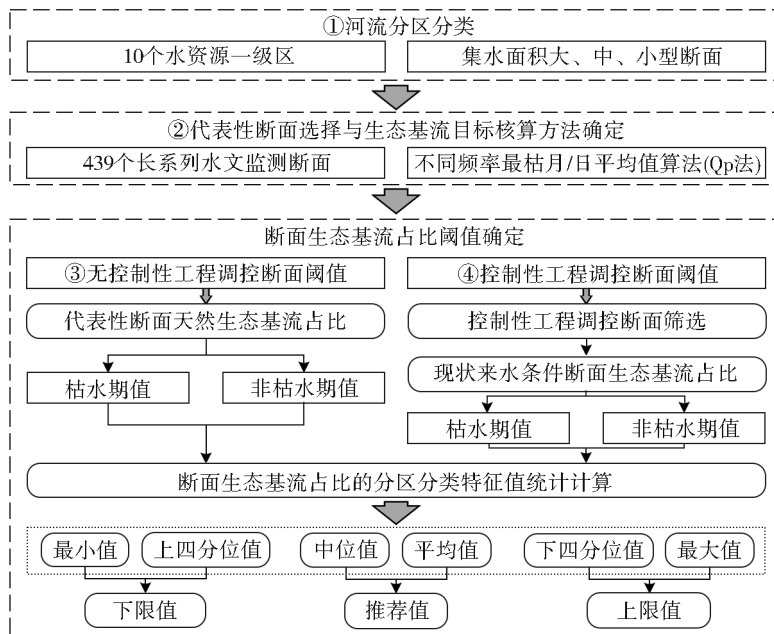


图 1 河流生态基流占比阈值的确定方法流程

Fig. 1 Schematic diagram of the method for determining the proportion thresholds of ecological base flow

2 结果与讨论

2.1 代表性断面天然生态基流占比

不同地区、不同集水面积的河流断面之间,天然来水条件下的生态基流占比差异显著,结果见表2和图2。松花江区、辽河区、淮河区、东南诸河区河流生态基流占比较低,枯水期均值多低于5%,非枯水期均值也不超过10%。特别是淮河区,在非枯水期的生态基流占比仍不足5%。黄河区和西南诸河区河流生态基流占比较高,中型、大型断面生态基流占比基本超过10%,其中黄河大型断面在枯水期和非枯水期的生态基流占比均值分别为16%和31%,是淮河同类型断面的6~8倍。海河区、长江区和珠江区生态基流天然水平相近,多分布在5%~15%。

断面生态基流水平随集水面积增加整体呈上升趋势。全国小、中、大型断面枯水期生态基流占比均值分别为4.4%、7.3%和9.7%,非枯水期均值分别为8.4%、11.1%和17.4%。在天然来水条件下,不同分区之间,集水面积差异对生态基流水平的影响

程度有一定区别。对比小型和中型断面的基流占比均值,两者在海河区、淮河区、东南诸河区、珠江区差别不大,但在辽河区、长江区、西北诸河区变化显著。

表2 代表性断面天然生态基流占比的分区分类统计均值
Tab.2 Average values of the proportion thresholds of natural ecological base flow in representative sections with different scales in different watersheds of China

水资源一级区	枯水期			非枯水期		
	小型	中型	大型	小型	中型	大型
松花江区	0.56	0.77	1.23	5.53	6.25	9.77
辽河区	0.92	2.07	2.76	4.76	9.08	10.45
海河区	6.47	7.75	11.61	12.63	13.54	16.51
黄河区	—	14.96	16.05	—	18.72	31.05
淮河区	0.82	1.03	2.88	1.44	1.79	4.31
长江区	5.15	9.98	11.37	8.14	12.82	15.52
东南诸河区	4.25	4.68	6.20	6.40	7.14	9.86
珠江区	7.39	7.84	11.51	11.61	11.66	17.39
西南诸河区	—	16.33	16.57	—	16.57	21.15
西北诸河区	3.50	8.25	18.90	14.15	18.00	31.15
代表性断面	4.35	7.32	9.71	8.40	11.14	17.36

注:“—”表示数据有限,暂不作考虑。

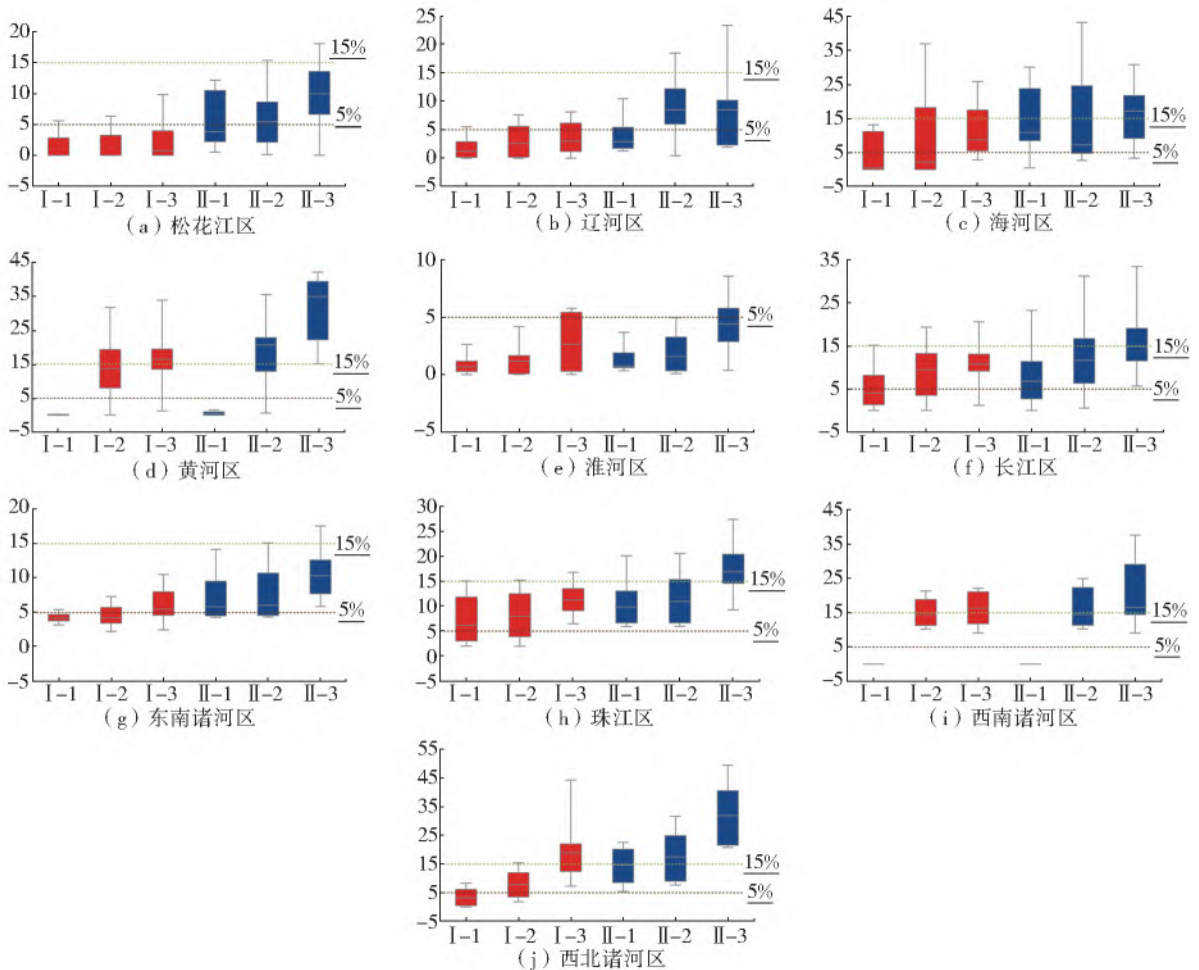


图2 代表性断面天然生态基流占比箱形分布

Fig.2 Box plot of the proportion of natural ecological base flow in representative sections with different scales in different watersheds of China

2.2 无控制性水利工程调控断面的生态基流占比阈值

在没有控制性水利工程调控时,全国小型、中型、大型河流断面生态基流占比在枯水期时分区平均推荐值分别为 4.4%、6.6%和 9.2%,而在非枯水期分别为 9.4%、11.6%和 16.2%,见表 3 和表 4。其中,松花江区小型、中型断面枯水期推荐值为 0,这表明该区集水面积在 10 000 km² 以下的河流在枯水期受冰封影响一般会出现天然断流现象。对于这类河流,需要根据资料分析结合实地调研,确定河流天然断流时段和断流河段。此时,参考《河湖生态环境需水计算规范》(SL/T 712—2021),断流河段以维系河流廊道功能为主要目标,在没有水利工程调控或生态补水明确要求的情况下,不宜在断流时

段确定生态基流保障目标。但是,需要在非断流时段确定适宜的生态基流保障目标。分析发现,松花江区小型、中型断面在非枯水期内,生态基流占比推荐值可分别确定在 5%和 6%。辽河区、淮河区、东南诸河区的阈值也均较低,即使是大型断面,枯水期内推荐值也只有 3%~5%,而非枯水期内不超过 10%。海河区、长江区、珠江区大型断面枯水期推荐占比为 10%~11%,与 Tennant 法接近,但中小型断面枯水期推荐值仅 3%~8%,进一步说明了根据不同集水面积制定生态基流占比阈值是十分必要的。黄河区、西南诸河区、西北诸河区阈值相对较高,大型断面枯水期推荐值为 16%,非枯水期达到 18%~30%,说明该区域径流丰枯变化相对稳定,生态基流天然水平较高。

表 3 枯水期无控制性水利工程调控断面生态基流占比阈值

Tab. 3 Values of the proportion thresholds of ecological base flow in uncontrolled engineering regulation sections in dry season %

水资源一级区	小型			中型			大型		
	下限值	上限值	推荐值	下限值	上限值	推荐值	下限值	上限值	推荐值
松花江区	0	5	0	0	6	0	0	10	1
辽河区	0	6	1	0	10	3	1	10	3
海河区	0	12	3	0	15	5	5	18	10
黄河区	5	15	10	7	20	14	10	20	16
淮河区	0	4	1	0	5	1	1	6	3
长江区	1	10	5	3	15	10	8	18	11
东南诸河区	3	6	4	3	8	4	4	10	5
珠江区	2	15	7	2	15	7	8	18	11
西南诸河区	5	15	10	8	20	14	10	22	16
西北诸河区	1	8	3	3	15	8	10	25	16

表 4 非枯水期无控制性水利工程调控断面生态基流占比阈值

Tab. 4 Values of the proportion thresholds of ecological base flow in uncontrolled engineering regulation sections in flood season %

水资源一级区	小型			中型			大型		
	下限值	上限值	推荐值	下限值	上限值	推荐值	下限值	上限值	推荐值
松花江区	2	12	5	2	15	6	6	18	10
辽河区	2	12	5	5	20	9	5	20	10
海河区	8	24	14	8	25	15	9	30	17
黄河区	8	25	15	12	30	20	20	40	30
淮河区	1	10	2	1	10	2	3	15	5
长江区	3	20	7	6	25	12	10	30	15
东南诸河区	5	15	6	5	15	6	6	20	10
珠江区	6	20	11	6	20	11	12	25	17
西南诸河区	10	25	15	10	25	15	12	30	18
西北诸河区	8	23	14	12	30	20	20	40	30

2.3 控制性水利工程调控断面生态基流占比阈值

经式(2)筛选,我国有 130 个代表性断面受到控

制性水利工程调控,生态基流显著提高,占总断面数约 30%。从图 3 看,全国控制性水利工程调控断面生态基流占比均值从 8.1%的天然水平提高到现状

14.2%,增幅达 75.3%。其中:松花江区、辽河区、海河区、淮河区、东南诸河区断面天然生态基流占比均值在 2%~6%,受控制性水利工程调控后现状均值达到 8%~12%;长江区和珠江区生态基流占比均值

在工程调控前后的变化相似,从 9%和 10%分别提高到了 14%和 16%;西北诸河区和黄河区断面生态基流在天然来水时本就处于较高水平,受工程调控后现状值进一步提升,分别达到 15%和 26%。

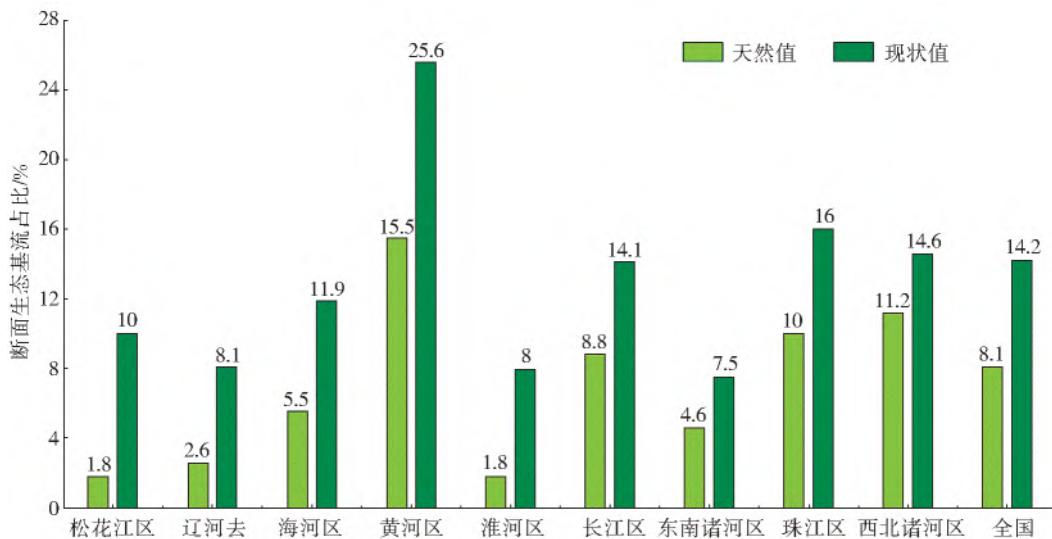


图 3 全国及各分区控制性水利工程调控断面枯水期天然生态基流均值与工程调控后现状均值对比

Fig. 3 Comparison between the natural value and the current value after engineering regulation of the ecological base flow in representative sections in the dry season in China and its regions

受控制性水利工程调控作用,各分区河流生态基流占比在枯水期的平均推荐值达到 12%,在非枯水期达到 17.3%,见表 5。松花江区、辽河区、淮河区、东南诸河区河流断面在工程调控后,枯水期推荐值从无工程调控时的 0~3%提升到 7%~8%;海河区、长江区提升到 10%、12%,与本流域大型断面的生态基流天然水平相当;珠江区、西北诸河区、西南诸河区枯水期推荐值均为 16%,黄河流域最高,达到 20%。非枯水期情况类似,在工程调控后,生态基流占比阈值均有一定幅度的提升,其中:辽河区、淮河区、东南诸河区最低,只有 10%;黄河区、西北诸河区最高,达到 30%。可见,经水利工程的调蓄作用,断面生态基流保障能力极大增强,相应阈值普遍高于无工程调控时,或至少达到大型断面的生态基流天然水平。

2.4 阈值合理性与适用性分析

阈值基本反映出我国不同地区、不同类型河流断面的水文情势差异及其对生态基流的影响。不同区域河流水文情势存在显著差异,松花江区、辽河区河流冬季冰封时间长,造成枯水期流量极低。淮河区下游以平原为主,缺乏有效的径流调蓄空间和手段,径流主要受降雨的短期控制,所以生态基流占比在枯水期、非枯水期均很低。正如顾洪^[25]分析,淮北水系“汛期洪水资源得不到利用,枯季河流干涸无水量下泄,是其常态和显著特征”,保障 5%~10%

的标准对其难度极大。与之相反,东南诸河区主要为山区,虽降水丰富,但其河流大多为独流入海,源短流急,造成其生态基流保障水平低,同样不宜制定过高的保障目标。相比之下,黄河区、西南诸河区、西北诸河区的河流源头位于青藏高原、天山山脉等,源区面积大,且冰川和积雪融水有助于径流稳定,因此生态基流占比阈值相对最高。以黄河为例,其源区面积占流域总面积的 16.2%,而产水量更是达到流域总水量的 35%^[26]。

表 5 控制性水利工程调控断面生态基流占比阈值

Tab. 5 Values of the proportion thresholds of ecological base flow in controlled engineering regulation sections %

水资源一级区	枯水期(12—3月)			非枯水期(4—11月)		
	下限值	上限值	默认推荐值	下限值	上限值	默认推荐值
松花江区	3	15	7	10	25	13
辽河区	3	15	7	5	20	10
海河区	6	18	10	9	30	17
黄河区	12	30	20	20	40	30
淮河区	3	20	8	5	25	10
长江区	8	20	12	10	30	15
东南诸河区	5	15	8	6	20	10
珠江区	10	25	16	12	35	20
西南诸河区	10	22	16	12	30	18
西北诸河区	10	25	16	20	40	30

随着集水面积的增大,流域对枯季径流的调蓄和“坦化”作用加强,会逐步提高河流生态基流水平,这与文中不同规模断面阈值的变化趋势一致。随着控制性水利工程的建设,下游断面径流过程更多受工程调控的影响,在做好生态调度的前提下,总体大会大幅提升断面生态基流的保障水平,起到与增加集水面积相同的作用。

受限于天然来水条件,我国部分河流生态基流保障目标很难达到 Tennant 法提出的 10% 或者 20% 标准:在无控制性水利工程调控时,应根据河流天然径流确定生态基流保障目标;在有控制性水利工程调控时,应尽可能发挥工程的调蓄作用,制定不低于工程调控断面分区分类下限值的生态基流保障目标。受人工取用水、下垫面条件变化等影响,河流当前来水情势无法满足生态基流保障目标时,需要根据当地生态保护需求,在强化社会经济用水约束的同时,借助上游水利工程调蓄、跨流域调水等生态补水措施恢复河流生态基流。对于生态基流保障水平较高的断面,即使调控能力和手段很强,考虑到水利工程防洪、发电、供水等综合功能发挥以及生态敏感期脉冲流量、漫滩流量等目标的实现,也不宜制定过高的生态基流保障目标,以控制在本文提出的分区分类上限值以内为宜。对于缺乏长系列水文资料的断面,只需根据断面集水面积等确定其多年平均天然径流,即可利用文中推荐值计算其生态基流初始目标,并结合其他方法或初始目标的保障成效评估再修订完善。

3 结 论

提出了一种分区分类的河流生态基流占比阈值确定思路和方法,包括上限值、下限值和推荐值。在此过程中,考虑控制性水利工程影响,生态基流占比阈值按是否有控制性水利工程调控分别确定。由此,在全国选择 439 个代表性断面,利用长系列天然和实测径流资料,提出了全国 10 个水资源一级区、不同集水面积、不同工程调控状态的生态基流占比阈值成果。研究致力于明确不同地区、不同类型河流的生态基流占比应处合理范围,从而指导我国生态基流保障目标的确定。对于无控制性水利工程调控的断面,小型、中型、大型河流断面生态基流占比在枯水期的平均推荐值分别为 4.4%、6.6% 和 9.2%,而在非枯水期分别为 9.4%、11.6% 和 16.2%。其中,松花江区、辽河区、淮河区和东南诸河区整体较低,枯水期推荐值在 0~5% 以内,非枯水期也不超过 10%。对于有控制性水利工程调控

的断面,各一级区生态基流占比在枯水期的平均推荐值达到 12%,而在非枯水期达到 17.3%,相比没有工程调控时有较大提升。相关成果可用于分区分类河流生态基流保障目标的制定,特别是水利工程最小下泄流量目标以及缺资料地区河流生态基流初始目标的制定。

受数据等方面的限制,本文在代表性断面选取、径流系列完整性等方面仍有较大不足,对具体结果可能会造成一定影响,下一步研究将持续开展数据的补充完善和阈值成果的核算分析。另外,其他学者若在某流域区域具有更加完整的数据资料,可以对相关成果进行复核和修订。

参考文献(References):

- [1] 陈昂,隋欣,廖文根,等. 我国河流生态基流理论研究回顾[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2016, 14(6): 401-411. (CHEN A, SUI X, LIAO W G, et al. Review study on instream ecological base flow in China[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2016, 14(6): 401-411. (in Chinese)) DOI:10.13244/j.cnki.jiwhr.2016.06.001.
- [2] POFF N L, MATTHEWS J H. Environmental flows in the Anthropocene: past progress and future prospects [J]. Current Opinion in Environmental Sustainability, 2013, 5(6): 667-675. DOI:10.1016/j.cosust.2013.11.006.
- [3] 王中根,赵玲玲,陈庆伟,等. 关于生态流量的概念解析 [J]. 中国水利, 2020(15): 29-32. (WANG Z, ZHAO L L, CHEN Q W, et al. Analysis of the ecological flow concept[J]. China Water Resources, 2020(15): 29-32. (in Chinese)) DOI:1000-1123(2020)15-0029-04.
- [4] PETTS G E. Instream flow science for sustainable river management [J]. JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 2009, 45(5): 1071-1086.
- [5] OPERACZ A, WAGA A, CUPAK A, et al. The comparison of environmental flow assessment: the barrier for investment in Poland or river protection? [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 193: 575-592.
- [6] ARMBRUSTER J T. An infiltration index useful in estimating low-flow characteristics of drainage basin [J]. Journal of Research of the US Geological Survey, 1976, 4(5): 533-538.
- [7] DE JALÓN D G. The Spanish experience in determining minimum flow regimes in regulated streams [J]. Canadian Water Resources Journal, 2003, 28(2): 185-198.
- [8] 于守兵,凡姚申,余欣,等. 黄河河口生态需水研究进展与展望 [J]. 水利学报, 2020, 51(9): 1101-1110. (YU S

- B, FAN Y S, YU X, et al. Advances and prospects of ecological water demands in the Yellow River estuary [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2020, 51(9): 1101-1110. (in Chinese) DOI: 10.13243/j.cnki.slxh.20200581.
- [9] 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. (XU Z X, WU W, YU S Y. Ecological baseflow: Progress and challenge [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2016, 35(4): 1-11. (in Chinese) DOI: 10.11660/slfdxh.20160401.
- [10] 孙甲岚, 雷晓辉, 蒋云钟, 等. 河流生态需水量研究综述[J]. *南水北调与水利科技*, 2012, 10(1): 112-115. (SUN J L, LEI X H, JIANG Y Z, et al. Review of research on river ecological water demand [J]. *South to North Water Transfer and Water Science & Technology*, 2012, 10(1): 112-115. (in Chinese) DOI: 1672-1683(2012)01-0112-04.
- [11] ACREMAN M, DUNBAR M J. Defining environmental river flow requirements: A review [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2004, 8(5): 861-876. DOI: 10.5194/hess-8-861-2004.
- [12] OUYANG Y. A potential approach for low flow selection in water resource supply and management [J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 454: 56-63. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2012.05.062.
- [13] 姚云泽, 姜翠玲, 万福涛. 基于多种水文学方法的滦河典型断面生态基流研究[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2021, 19(5): 941-949. (YAO Y Z, JIANG C L, WAN F T. Research on ecological base flow of classical sections in the Luan River using various hydrology methods [J]. *South to North Water Transfer and Water Science & Technology*, 2021, 19(5): 941-949. (in Chinese) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2021.0098.
- [14] TENNANT D L. Instream flow regimes for fish, wildlife, recreation and related environmental resources [J]. *Fisheries*, 1976, 1(4): 6-10. DOI: 10.1577/1548-8446(1976)001<0006:IFRFFW>2.0.CO;2.
- [15] 郭利丹, 夏自强, 林虹, 等. 生态径流评价中的 Tennant 法应用 [J]. *生态学报*, 2009, 29(4): 1787-1792. (GUO L D, XIA Z Q, LIN H, et al. Researches on application of the Tennant method in ecological flow evaluation [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(4): 1787-1792. (in Chinese) DOI: 1000-0933(2009)04-1787-06.
- [16] 王俊钊, 张翔, 吴绍飞, 等. 基于生径比的淮河流域中上游典型断面生态流量研究 [J]. *南水北调与水利科技*, 2016, 14(5): 71-77. (WANG J C, ZHANG X, WU S F, et al. Environmental flow of the typical sections in upper and middle Huai River basin based on REF [J]. *South to North Water Transfer and Water Science & Technology*, 2016, 14(5): 71-77. (in Chinese) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2016.05.011.
- [17] 李原园, 廖文根, 赵钟楠, 等. 新时期河湖生态流量确定与保障工作的若干思考 [J]. *中国水利*, 2019(17): 13-16, 8. (LI Y Y, LIAO W G, ZHAO Z N, et al. Definition of river and lake ecological flow and safeguarding mechanism in the new period [J]. *China Water Resources*, 2019(17): 13-16, 8. (in Chinese) DOI: 1000-1123(2019)17-0013-04.
- [18] 陈昂, 吴淼, 沈忱, 等. 河道生态基流计算方法回顾与评估框架研究 [J]. *水利水电技术*, 2017, 48(2): 97-105. (CHEN A, WU M, SHEN C, et al. Review of method for calculation of river ecological base-flow and study on its assessment framework [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2017, 48(2): 97-105. (in Chinese) DOI: 1000-1123(2019)17-0013-04.
- [19] 董哲仁, 赵进勇, 张晶. 环境流计算新方法: 水文变化的生态限度法 [J]. *水利水电技术*, 2017, 48(1): 11-17. (DONG Z R, ZHAO J Y, ZHANG J. A new method for environmental flow assessment: ecological limits of hydrological alteration (ELOHA) [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2017, 48(1): 11-17. (in Chinese) DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2017.01.003.
- [20] POFF N L, ZIMMERMAN J K H. Ecological responses to altered flow regimes: A literature review to inform the science and management of environmental flows [J]. *Freshwater Biology*, 2010, 55(1): 194-205. DOI: 10.1111/j.1365-2427.2009.02272.x.
- [21] 徐彩彩, 张殷波, 张远, 等. 辽河流域河流的分类 [J]. *生态学杂志*, 2015, 34(6): 1723-1730. (XU C C, ZHANG Y B, ZHANG Y, et al. River classification in Liaohe River basin [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34(6): 1723-1730. (in Chinese) DOI: 10.13292/j.1000-4890.2015.0160.
- [22] 尹民, 杨志峰, 崔保山. 中国河流生态水文分区初探 [J]. *环境科学学报*, 2005, 25(4): 423-428. (YIN M, YANG Z F, CUI B S. Eco-hydrological regionalization of river system in China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2005, 25(4): 423-428. (in Chinese) DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2005.04.001.
- [23] 水利部关于印发第一批重点河湖生态流量保障目标的函 [J]. *中国水利*, 2020(15): 5-7. (Letter of the Ministry of Water Resources on printing and distributing the first batch of ecological flow guarantee tar-

- gets for key rivers and lakes [J]. *China Water Resources*, 2020(15): 5-7. (in Chinese))
- [24] SL/Z 712—2021: 河湖生态环境需水计算规范[S]. (SL/Z 712-2021; Specification for calculation of environmental flow in rivers and lakes. (in Chinese))
- [25] 顾洪. 淮河流域河湖生态流量确定与保障重点难点分析[J]. *中国水利*, 2020(15): 47-49. (GU H. Analysis of key and difficult points in determining and guaranteeing ecological flow of rivers and lakes in the Huaihe River basin[J]. *China Water Resources*, 2020 (15): 47-49. (in Chinese)) DOI: 1000-1123(2020)15-0047-03.
- [26] 陈利群, 刘昌明, 杨聪, 等. 黄河源区基流估算[J]. *地理研究*, 2006, 25(4): 659-665. (CHEN L Q, LIU C M, YANG C, et al. Base flow estimation of the source regions of the Yellow River [J]. *Geographical Research*, 2006, 25(4): 659-665. (in Chinese)) DOI: 1000-0585(2006)04-0659-07.

Determination of the proportion thresholds of ecological base flow in rivers with different scales in different watersheds of China

LIU Huan, HU Peng, WANG Jianhua, ZHANG Pu, YANG Zefan, ZENG Qinghui

(National Key Laboratory of Basin Water Cycle Simulation and Control, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: The ecological base flow is very important for coordinating the ecological protection and development of rivers. However, the threshold system that can effectively guide the determination of China's ecological base flow is still lacking. In previous studies, it is generally required that the proportion of river ecological base flow to its multi-year average natural flow (referred to as "ecological base flow proportion") should not be less than 10%. Considering the different hydrological and ecological conditions in different regions of China, it is difficult to effectively meet the macro-management needs of China's ecological flow by adopting a unified threshold standard.

Through the analysis of natural and measured hydrological data of 439 sections, a threshold system is proposed for the ecological base flow proportion of rivers distributed in 10 Class I water resources zones and different catchment areas of China (excluding Hong Kong, Macao and Taiwan). The proportion thresholds of ecological base flow are composed of the upper limit, lower limit and recommended values.

The results show that: When there is no controlled engineering control, the ecological base flow proportion shows an upward trend with the increase of catchment area. The average recommended values in small, medium and large sections are 4.4%, 6.6% and 9.2% respectively in dry season and 9.4%, 11.6% and 16.2% respectively in wet season. In terms of large sections with a catchment area of more than 10,000 km², the recommended value in the dry season in the water resources zones is 9.2% on average. Among them, the highest in the Yellow River, southwestern rivers and northwestern rivers regions, reaching 16%, while the lowest is only 1% ~ 3% in Songliao and Huaihe regions. the average recommended value in the dry season in the water resources zones is 15% under the regulation of water conservancy projects.

The proposed threshold values can provide support for the determination of ecological base flow considering different regions, section types, and periods.

Key words: ecological base flow; ecological flow; proportion threshold; class I water resources zone; engineering regulation