



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2016.05.011

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 Jun chao, ZHANG Xiang, WU Shao fei, et al. Environmental flow of the typical sections in upper and middle Huai River Basin based on REF[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016, 14(5): 71-77. (in Chinese)

基于生径比的淮河流域中上游典型断面生态流量研究

王俊钊^{1,2}, 张翔^{1,2}, 吴绍飞^{1,2}, 朱才荣³, 刘建峰^{1,2}

(1. 武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072; 2. 水资源安全保障湖北省协同创新中心, 武汉 430072; 3. 四川省水利水电勘测设计研究院, 成都 610031)

摘要: 基于选取的淮河中上游5条河流, 11个断面的典型鱼类调查资料以及长系列(1956年-2000年)天然和实测逐月径流数据, 运用流速法(最小, 平均, 最大)、月最小径流法、逐月频率法设定四种生态流量的计算方案。首先, 根据 Tennant 法提出针对丰、平、枯、特枯四种年型和年内汛期、非汛期差异的生径比标准。然后, 根据流速法三种计算结果满足生径比标准的情况选取合理的生态流量计算方案。研究表明: 5条河流的最小和适宜生径比大小关系均为涡河>沙颍河>淮河干流>淝河>洪汝河; 满足生径比标准的难易程度为洪汝河>淮河干流>淝河>沙颍河>涡河。涡河、沙颍河生态需水满足程度低, 应提高生态用水比例。

关键词: 淮河; 流速法; 生态流量; 生径比; 生径比标准

中图分类号: P333 文献标志码: A 文章编号: 1672-1683(2016)05-0071-07

Environmental flow of the typical sections in upper and middle Huai River Basin based on REF

WANG Jun chao^{1,2}, ZHANG Xiang^{1,2}, WU Shao fei^{1,2}, ZHU Cai rong³, LIU Jian feng^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China;
2. Hubei Provincial Collaborative Innovation Center for Water Resources Security, Wuhan 430072, China;
3. Sichuan Water Resource and Hydroelectric Investigation & Design Institute, Chengdu 610031, China)

Abstract: Based on monthly runoff data(1956-2000) and typical fish survey data of 11 sections in 11 rivers on middle and upper reaches of the Huai River, four schemes of calculating minimum and appropriate environmental flow were established by velocity methods(minimum, average and maximum options), minimum monthly runoff method and month by month frequency method. First, the Criteria of REF(ratio of environmental flow to stream flow) aimed at different characteristic hydrological years(wet, normal, dry and extraordinary dry) and hydrological seasons(dry and wet) were put forward on the basis of Tennant method. Then appropriate environmental flow schemes in different hydrological years and seasons were determined by comparing the conformance of velocity methods to the criteria of REF. The results showed that the rank of minimum and appropriate REFs was Wo River, Shaying River, Mainstream of Huai River, Pi River and Hongru River. The level of meeting the REF ranked in the order of Hongru River, Mainstream of Huai River, Pi River, Shaying River and Wo River. The lack of meeting the ecological water demand in Wo and Shaying rivers implied that the proportion of ecological water demand should be improved.

Key words: Huai River; velocity method; environmental flow; REF; standard REFs

收稿日期: 2016-01-30 修回日期: 2016-04-13 网络出版时间: 2016-08-19

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20160819.0929.006.html>

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51279143); 国家水体污染控制与治理重大专项课题(2014ZX07204-006)

Fund: National Natural Science Foundation of China(51279143); The National Water Pollution Control and Management of Major Projects(2014ZX07204-006)

作者简介: 王俊钊(1992-), 男, 湖南耒阳人, 主要从事生态水文、水环境方面研究。E-mail: wl812638750@126.com

通讯作者: 张翔(1969-), 男, 北京人, 教授, 博士生导师, 主要从事基于生态水文的水资源可持续利用研究。E-mail: zhangxiang@whu.edu.cn

人类用水需求与河流生态系统健康用水需求之间的均衡已经成为 21 世纪河流管理面临的重要挑战^[1-3]。面对日益突出的水资源短缺、水污染严重、水生态环境恶化等问题,我国正在研究实施最严格的水资源管理制度,急需理论创新和管理方法创新。在水资源保护工作中,我们面临严格核定和科学利用水域纳污容量、充分考虑基本生态用水需求、恢复水环境、维护河湖健康生态的紧迫任务。生态需水研究标志着人类对自然生态系统需水的再认识,丰富了生态水文学的研究内涵,并对有效开展生态保护、促进生态建设和实现水资源合理配置具有重要意义^[3-4]。

20 世纪 70 年代-80 年代,河流生态需水量研究开始蓬勃发展,大量学者进行研究提出了多种评估方法,比如 Tennant 法^[5]、IFIM 法^[6]、湿周法、R2CROSS 法等。20 世纪 90 年代以后,研究重点转向从完整性角度考虑整个流域生态需求和流量变化关系,出现了整体分析法如澳大利亚的 HEA 法。21 世纪以后,我国众多学者提出了满足不同功能的生态需水计算方法,如王西琴等^[7]提出的月保证率设定法、刘昌明等^[8]提出的生态水力半径法、潘扎荣等^[3]提出并在淮河运用的年内展布计算法。但是,这些方法大都缺乏与河流径流变化相适应的生态需水表征指标,针对不同目标采用不同计算方式导致计算结果风险大难以在水资源配置和保护中达到预期效果。朱才荣等人^[9]提出表征生态需水与径流变化相适应的生径比概念,但没有考虑年际径流差异和年内汛期、非汛期分配特征对生径比的影响。本文以淮河流域为例,应用流速法设定三种方案计算生态流量,制定基于 Tennant 法的考虑年际、年内分配特性的动态生径比标准,依据该标准分析流速法各方案并选取合理方案确定生态流量,以期为人水矛盾突出的淮河流域的生态建设提供科学依据。

1 研究区域与数据资料

1.1 研究区域

本文以淮河流域中上游的洪泽湖以上区域为研究对象(图 1)。该区域地处我国南北气候过渡带,介于长江流域和黄河流域之间。多年平均降雨量约 838 mm,降雨量 50%~80%集中在 6 月-9 月份;降雨年际变化大,丰水年的雨量多达枯水年的 5 倍;降雨地区分布也不均匀,北部沿黄河地区平均年降雨量为 600~700 mm,南部及西部山区平均年降雨量为 900~1400 mm^[10]。区内水系主要有洪汝河、沙颍河、涡河、南部山区水系和淮河干流。其中沙颍河流

域和涡河流域生态用水与社会经济用水矛盾突出。

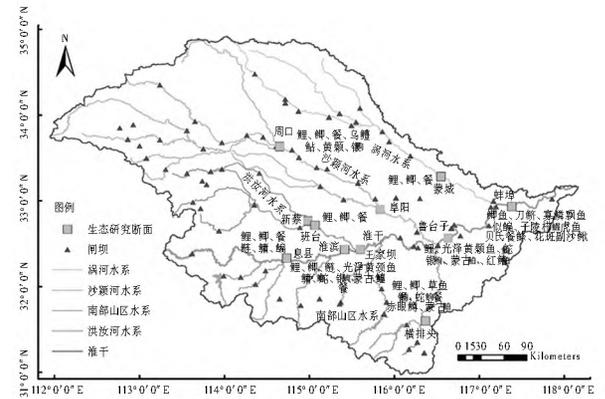


图 1 研究区示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the study area

1.2 数据资料

本研究针对的是淮河流域中上游 5 条干支流,其中北部支流为洪汝河、沙颍河和涡河水系,南部支流为潞河水系。按照稳定性、代表性、可靠性和连续性原则^[11]选取了 11 个生态研究断面,其中干流 5 个,支流 6 个(图 1)。收集 11 个断面 1956 年-2000 年的天然和实测月均径流序列,并根据淮河流域水资源保护局、华东师范大学、中科院地理科学与资源研究所 2006 年实施的淮河流域生态调查所采集的鱼类信息得到各断面的典型鱼类^[12-13](图 1),其中新蔡、班台和阜阳断面,王家坝和淮滨断面的典型鱼类相同。依据 11 个断面的长期流速流量观测资料得到流速流量经验关系为: $v = aQ^b$, 其中 a 、 b 为经验系数,其取值见表 1。

表 1 v-Q 经验关系系数取值
Tab. 1 Empirical coefficient between v and Q

河流	断面	a	b
淮河干流	息县	0.0651	0.4185
	淮滨	0.0450	0.4690
	王家坝	0.0240	0.5196
	鲁台子	0.0009	0.9200
	蚌埠	0.0007	0.9268
沙颍河	周口	0.0214	0.6240
	阜阳	0.0168	0.5173
涡河	蒙城	0.0400	0.4101
洪汝河	新蔡	0.0477	0.8437
	班台	0.0301	0.7537
潞河	横排头	0.0260	0.6344

2 研究方法

2.1 流速法

流速法认为满足水生生物相应的流速要求也就

满足了水生生物对栖息地的相应要求,以流速作为栖息地指标来确定河道生态流量^[11]。其原理是根据断面关键指示性物种确定生态流速,再依据断面(v-Q)关系得到断面生态流量。对于生态调查资料相对缺乏的河段一般选择鱼类作为指示性物种,调查各种鱼类的生活习性,并确定其产卵期和非产卵期的感觉流速、喜爱流速和极限流速范围,得到最小及适宜生态流速。由于当非产卵期流速为0.1 m/s时,鱼类游动缓慢仅在特定区域作小幅运动,故本文取0.1 m/s为非产卵期最小生态流速^[14],以感觉流速为产卵期最小生态流速。喜爱流速的上限和下限则分别作为产卵期和非产卵期适宜生态流速^[15]。淮河流域中上游主要典型鱼类的生态流速见表2。

考虑断面鱼类多样性、用水矛盾的差异,以结合生径比标准选取合理的生态流量计算方案。将最小和适宜生态流速均划分为三种方案(表3)。方案四

采用常用的逐月最小生态径流法^[16](计算最小生态流量)、逐月频率计算法^[17](计算适宜生态流量),用以验证流速法计算结果的合理性,其中逐月频率计算法按照以下规则确定适宜生态流量^[18]:冬季取80%月径流保证率、春秋两季取75%、夏季取50%。

表2 淮河流域典型鱼类的生态流速^[12]

Tab. 2 Ecological velocity of typical fish in Huai River Basin

种类	产卵期	卵类型	感觉流速	喜爱流速	极限流速
刀鲚	5月6月	浮性	—	0.2~0.5	0.7
乌鳢	5月7月	浮性	0.3	0.4~0.6	1.0
鲫鱼	4月7月	粘性	0.2	0.3~0.6	0.8
鲤鱼	2月5月	粘性	0.2	0.3~0.8	1.1
鲇鱼	4月6月	粘性	0.3	0.4~0.6	1.0
草鱼	3月6月	漂流性	0.2	0.3~0.6	0.8
鲢鱼	4月7月	漂流性	0.2	0.3~0.6	0.9
鳊鱼	5月7月	漂流性	—	0.6~0.8	—
其余鱼类	各产卵期	—	0.2	0.3~0.6	0.9

表3 按流速法划分的三种方案

Tab. 3 Description about the three cases of velocity method

方案	描述	公式	假设	备注
方案一:最小值方案	取断面各鱼类各月生态流速最小值	$V_{\alpha} = \min(V_{ei,j})$	最小值是鱼类在不影响机体功能正常发挥而适应变化环境下的极限情况,满足各鱼类各月流速的最小值即满足生态系统基本需求。	¹ V_{ei} 为第 <i>i</i> 月生态流速; [°] $V_{\alpha,j}$ 为第 <i>j</i> 种鱼类,第 <i>i</i> 月的生态流速; [»] 式中 $i = 1 \sim 12$; $j = 1 \sim n$; $\frac{1}{n}$ 为该断面鱼的总类数。
方案二:平均值方案	取断面各鱼类各月生态流速的平均值	$V_{\alpha} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n V_{ei,j}$	平均能反映生态系统(特别是鱼类适应需求)的整体情况及水平。平均值的高低,直接关联到鱼类正常情况下的正常需求,此时于生态系统则表现出结构的最优化。	
方案三:最大值方案	取断面各鱼类各月生态流速的最大值	$V_{ei} = \max(V_{ei,j})$	径流充足的河流能满足鱼类较高流速需求,则能满足生态系统正常功能运转。	

2.2 生径比标准

生径比指一定时空范围内生态系统为维持某一生态目标状态所需的生态需水量和其天然径流量之比^[9]。根据时间尺度的不同分为年、汛期非汛期、月及日生径比。生径比可以反映生态需水量的动态变化特征及与天然径流之间的吻合情况。为使生态流量更好的体现河流生物栖息地需水的年际和年内变化,采用距平百分率将长期径流系列资料划分为丰、平、枯和特枯四种年型^[19]。计算不同年型及其年内汛期、非汛期的生径比并制定相应的生径比标准。

2.2.1 年生径比标准

采用基流比例法^[20]计算不同年型年生径比。首先确定某一年型的生径比;其次根据各年型多年平均流量的比值采用式(1)推求不同年型生径比之间的关系;由各年型生径比之间的关系计算得到其它年型的生径比。

$$r_{i+1} = \left[1 + (Q_i/Q_{i+1} - 1) \times \mu \right] \times r_i = \alpha r_i \quad (1)$$

式中: r_i 为断面第*i*年型的年生径比; $i = 1, 2, 3, 4$,依次为丰、平、枯和特枯年; Q_i 为断面第*i*年型的年平均流量(m^3/s); α 为比例系数,即第*i+1*年型与第*i*年型生径比的比值; μ 为比例削减系数, $0 \leq \mu \leq 1$,参考相关文献^[20]取 $\mu = 0.40$,比例系数 α 计算结果见表4。

根据 Tennant 法推荐,应预留较为充足的生态用水作为最小和适宜生态流量,并建议适宜生态流量占平均流量的50%,该比例基本可与国际公认水资源开发利用(适宜为30%~40%、最大为60%)相适应,也与近十年来淮河流域地表水开发利用(平均为54.46%)相协调,因此本文将丰水年适宜年生径比定为0.5。考虑到淮河流域实际情况并参考相关文献^[20],取 Tennant 法的“中”级和“极好”下的生径比作为丰水年最小和适宜生径比,

表 4 断面各年型平均流量与比例系数

Tab. 4 Average flow and proportionality coefficient at 11 sections

站点	各年型平均流量/(m ³ ·s ⁻¹)				比例倍数 α		
	丰水年	平水年	枯水年	特枯年	α	α	α(枯/特枯)
					(丰-平)	(平-枯)	
息县	213.19	140.24	82.26	43.00	1.21	1.28	1.37
淮滨	313.92	204.33	125.46	67.20	1.21	1.25	1.35
王家坝	519.56	304.15	177.67	95.60	1.28	1.28	1.34
鲁台子	1248.48	768.31	484.53	249.80	1.25	1.23	1.38
蚌埠	1548.02	961.99	563.52	299.13	1.24	1.28	1.35
周口	213.07	118.45	69.05	40.52	1.32	1.29	1.28
阜阳	306.13	167.02	96.92	57.56	1.33	1.29	1.27
蒙城	84.65	41.47	23.73	11.78	1.42	1.30	1.41
新蔡	54.90	28.19	17.29	6.48	1.38	1.25	1.67
班台	171.62	82.72	48.30	20.07	1.43	1.29	1.56
横排头	156.19	111.16	68.43	40.06	1.16	1.25	1.28

即分别为 0.2 和 0.5。并根据式(1)得各断面各水平年年生径比标准。鉴于篇幅所限,本文仅列出淮滨断面对应值见表 5。

表 5 淮滨断面各水平年标准年生径比

Tab. 5 The standard yearly REF of Huaibin in different characteristic years

生径比	丰水年 α(丰平)	平水年 α(平枯)	枯水年 α(枯特枯)	特枯年
比例倍数 α	1.21	1.25	1.35	
最小	0.20	0.24	0.3	0.41
适宜	0.50	0.6	0.76	1.02

2.2.2 汛期非汛期生径比标准

我国河流的汛期一般是河道内生物生长的高峰期,河道流量大,生态流量也相对较大;非汛期河道流量小,生物生长缓慢,生态流量小。总体而言,由于汛期水量增长相对于生态需水量快,所以非汛期

表 7 淮滨断面各水平年汛期与非汛期生径比标准

Tab. 7 REFs in the wet and dry seasons of different characteristic years in Huaibin

等级	时期	年生径比贡献系数				生径比			
		丰水年	平水年	枯水年	特枯年	丰水年	平水年	枯水年	特枯年
最小	汛期	0.75	0.766	0.95	0.768	0.15	0.18	0.28	0.31
	非汛期	1.14	1.054	0.82	1.053	0.22	0.253	0.246	0.43
适宜	汛期	0.6	0.53	0.71	0.62	0.3	0.31	0.54	0.63
	非汛期	1.366	1.367	0.99	1.2	.68	0.82	0.75	1.22

3 结果与分析

3.1 生态流量

根据各个断面的鱼类调查结果、表 2 列出的鱼

生径比应大于汛期。采用下述方式进行处理。

$$r_{i,1} \times Q_{i,1} \times t_1 + r_{i,2} \times Q_{i,2} \times t_2 = r_i \times Q_i \times t_{\text{总}} \quad (2)$$

式中: $r_{i,1}$, $r_{i,2}$ 分别为第 i 年型汛期与非汛期生径比; $Q_{i,1}$, $Q_{i,2}$ 分别为第 i 年型汛期与非汛期平均流量 (m³/s); t_1 , t_2 分别为汛期与非汛期历时(月), $t_{\text{总}}$ 为 12 个月。

假设第 i 年型汛期与非汛期生态需水量之比为 β , 见式(3)

$$\beta = r_{i,1} \times Q_{i,1} \times t_1 / r_{i,2} \times Q_{i,2} \times t_2 \quad (3)$$

联立式(2)、式(3)可得

$$\text{汛期: } r_{i,1} = \beta / (\beta + 1) \times Q_i / Q_{i,1} \times t_{\text{总}} / t_1 \times r_i \quad (4)$$

$$\text{非汛期: } r_{i,2} = 1 / (\beta + 1) \times Q_i / Q_{i,2} \times t_{\text{总}} / t_2 \times r_i \quad (5)$$

令 $V_{i,j} = Q_i / Q_{i,j}$, $C_j = \begin{cases} 1/\beta, j=1 \\ \beta, j=2 \end{cases}$, 那么式(4)和式(5)

可统一为

$$r_{i,j} = 1 / (1 + C_j) \times t_{\text{总}} / t_j \times V_{i,j} \times r_i = \theta_{i,j} \times r_i \quad (6)$$

$$\theta_{i,j} = 1 / (1 + C_j) \times t_{\text{总}} / t_j \times V_{i,j} \quad (7)$$

令 $\theta_{i,j}$ 为年生径比贡献系数, 非汛期由于径流偏少, 鱼类等水生生物正常生存所需水量和流速等较不易得到满足, 故而非汛期该值一般较大于 1, 较易影响年生径比, 对于年生径比的贡献相对较大。本文参照 Tennant 法标准, 得出 β 的经验值与年生径比 r 的对应关系见表 6。

表 6 基于 Tennant 法的 β 值与生径比 r 值对应表

Tab. 6 The relationship between β and r

等级	差	中	好	非常好	极好	最佳	最大
β	0.5	1	0.8	0.71	0.67	0.5	0.5
r	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	1.0 2.0

根据不同断面各年型确定的标准年生径比 r 按照表 5 三次样条插值得到对应的 β , 进一步计算得到年生径比贡献系数 $\theta_{i,j}$ 进而得到汛期、非汛期生径比标准。表 7 是淮滨断面生径比标准计算结果。

类不同时期的生态流速和表 1 所列的 $v-Q$ 经验关系系数计算得到各断面的逐月最小和适宜生态流量。以淮滨断面为例, 由图 1 知淮滨断面调查到的鱼类为鲤、鲫、餐、鲢、鳙、光泽黄颡鱼、蛇鮈、银鮈、蒙古

鲃,以这些鱼类为断面关键物种,依据本文2.1节鱼类生态流速的确定方法确定最小和适宜生态流速,进一步得到逐月最小和适宜生态流量(表8)。其它各断面的计算结果鉴于篇幅所限不再列出。

表8 淮滨断面最小和适宜生态流量

Tab. 8 The minimum and appropriate environmental flow in Huaibin Section

类型	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	汛期	非汛期
最小	一	5.49	5.49	5.49	5.49	24.06	5.49	5.49	5.49	5.49	5.49	5.49	5.49	7.86
	二	5.49	6.87	10.13	18.72	24.06	18.72	14.08	6.87	5.49	5.49	5.49	11.28	10.24
	三	5.49	24.06	24.06	24.06	24.06	24.06	24.06	24.06	5.49	5.49	5.49	19.49	14.67
	四	8.04	12.86	21.89	5.39	13.77	39.8	44.88	23.19	38.32	0.78	6.63	9.47	36.51
适宜	一	57.11	57.11	57.11	57.11	250.37	57.11	57.11	57.11	57.11	57.11	57.11	57.11	81.74
	二	57.11	82.05	118.36	212.48	270.56	194.77	146.51	71.5	57.11	57.11	57.11	117.33	114.18
	三	57.11	462.36	462.36	462.36	462.36	250.37	250.37	250.37	57.11	57.11	57.11	202.85	257.44
	四	20.68	19.65	39.05	55.36	74.78	80.79	395.1	241.35	148.99	29.76	29.37	21.66	218.22

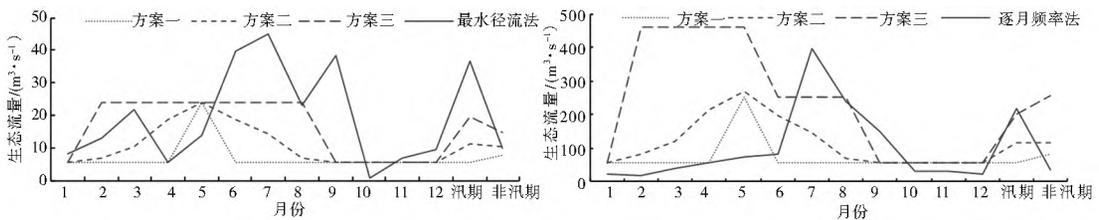


图2 淮滨断面最小(上)和适宜(下)逐月和汛期非汛期生态流量

Fig. 2 Monthly, wet and dry season's minimum(up) and appropriate(down) environmental flow in Huaibin Section

由图2可知,在汛期(6月-9月)流速法三种方案计算的最小和适宜生态流量均小于最小径流法和逐月频率法;而在非汛期流速法计算的适宜生态流量均大于逐月频率法,非汛期除11、12月方案三结果均大于最小径流法;表明汛期流速法结果较水文学法偏小即一般情况下汛期生态流量可以得到满足。用Tennant法进行检验,流速法计算最小生态流量除方案三在4月-9月对应差(生径比0.3)外,其它均对应极差(生径比0~0.1)。这并不说明流速法计算结果偏小,而是由于淮滨断面属于淮河干流,河面宽敞,根据Tennant法可知,若大江大河的生态流量占其平均流量的5%~10%并保有一定的河宽、水深和流速,便可以满足鱼类回游、生存和旅游、景观的一般要求^[21]。

3.2 生径比

3.2.1 年生径比

表9是根据11个断面的流速法计算结果得出的淮河水系主要河流的最小年生径比。同理可得适宜年生径比。

由表9可知,水系最小生径比大小顺序为涡河>沙颍河>淮河干流>淝河>洪汝河,表明淮河干流上游、洪汝河及南部山区淝河生态需水占天然径流比例较小,天然情况下易满足生态系统于水资源的需求,特别是鱼类产卵、洄游等最小生态流速方面的要求。

而淮河干流中下游地势平坦,流速-流量关系曲线较陡,所需流量较大才能满足最小生态流速和水深需求。至于沙颍河和涡河,本身坡降较小分别为0.13%、0.1%所需流量较大才能满足流速要求,外加水量严重不足,天然径流较小,导致生径比较大。

表9 淮河水系主要河流最小年生径比

Tab. 9 The minimum yearly REFs of major rivers in Huai River Basin

河流	方案一	方案二	方案三
淮河干流	0.03- 0.22	0.04- 0.27	0.06- 0.32
沙颍河	0.12- 0.25	0.17- 0.32	0.38- 0.44
涡河	0.31	0.45	0.71
洪汝河	0.06- 0.09	0.08- 0.11	0.1-0.14
淝河	0.08	0.12	0.17

不同年型淮河水系主要河流最小年生径比和根据本文2.2节所计算的年生径比标准见表10。可以根据表10动态选择不同河流不同年型的流速法方案,如涡河丰水年选取方案二,其它年份选取方案一。

3.2.2 汛期非汛期生径比

根据流速法计算结果计算11个断面不同年型的汛期、非汛期最小和适宜生径比。将其与本文2.2节确定的生径比标准进行对照,在流速法各方案均满足Tennant标准生径比情况下,尽量选择较低等级方案作为淮河流域生态需水计算依据。流速法计算结果满足Tennant标准生径比情况见图3。

表 10 要水系不同年型最小年径比及标准值

Tab. 10 The minimum yearly REFs and standard values of major rivers in different characteristic

年型	方案	淮河干流		沙颍河		涡河		洪汝河		漯河	
		计算值	标准值	计算值	标准值	计算值	标准值	计算值	标准值	计算值	标准值
丰	一	0.02~ 0.14	0.2	0.07~ 0.12	0.2	0.15	0.2	0.03~ 0.05	0.2	0.05	0.2
	二	0.03~ 0.17		0.1~ 0.17		0.22		0.04~ 0.06		0.08	
	三	0.04~ 0.2		0.22~ 0.24		0.35		0.05~ 0.07		0.12	
平	一	0.03~ 0.22	0.24~ 0.26	0.12~ 0.23	0.26~ 0.27	0.31	0.28	0.07~ 0.09	0.28~ 0.29	0.08	0.23
	二	0.04~ 0.27		0.18~ 0.31		0.46		0.08~ 0.11		0.12	
	三	0.06~ 0.32		0.39~ 0.44		0.72		0.1~ 0.14		0.16	
枯	一	0.05~ 0.38	0.3~ 0.33	0.2~ 0.39	0.34	0.54	0.37	0.11~ 0.15	0.35~ 0.37	0.12	0.29
	二	0.07~ 0.46		0.3~ 0.54		0.8		0.14~ 0.19		0.19	
	三	0.11~ 0.55		0.67~ 0.76		1.26		0.18~ 0.23		0.26	
特枯	一	0.09~ 0.71	0.41~ 0.44	0.34~ 0.66	0.44	1.08	0.52	0.28~ 0.41	0.58	0.21	0.37
	二	0.13~ 0.86		0.52~ 0.91		1.61		0.34~ 0.5		0.33	
	三	0.2~ 0.94		1.13~ 1.29		2.54		0.43~ 0.61		0.45	

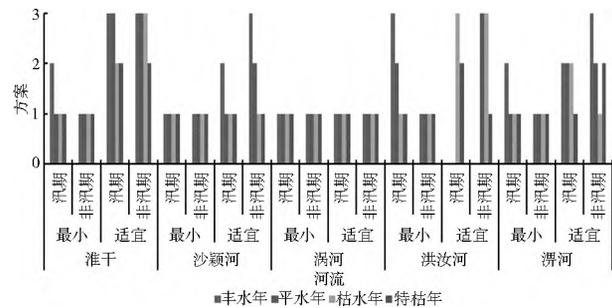


图 3 流速法各方案生径比与生径比标准对应关系

Fig. 3 The REFs calculated by velocity methods and standard REFs

由图 3 知, 不同等级下流速法结果满足生径比标准情况存在差异。最小生径比计算结果中大部分仅需方案一即可满足 Tennant 法所定的标准, 适宜生径比(除沙颍河和涡河外)则至少需要方案二才能满足, 丰水年洪汝河断面各方案均不能满足所定标准, 主要原因是河道水力坡度较大, 生态流速易于达到要求, 故而采用流速法所求结果较小, 不易满足以历史流量为基础的水文学法所定的标准。不同水平年流速法结果满足情况亦不一样。丰水年及平水年用流速法所求生径比结果较小于枯水年和特枯年, 从而较不易满足 Tennant 法所定生径比标准。年内不同时期其满足情况也不一样, 因适宜等级下非汛期生径比标准远大于汛期, 从而使得生径比在非汛期比汛期更难满足, 以致非汛期需更高方案来满足生态需水要求。

图 3 表明, 沙颍河和涡河采用方案一即可满足基于 Tennant 法制定的最小生径比标准; 淮河干流最小生径比标准仅需方案一即可满足, 适宜生径比标准则至少需要方案二才可满足; 漯河则与淮河干流类似, 但其较淮河干流更易获得满足; 洪汝河最难

满足。各水系满足生径比标准的难易程度为涡河<沙颍河< 漯河< 淮河干流< 洪汝河, 这与水系生态需水保证率大小关系基本相反, 该结论为洪汝河、淮河干流及漯河等干支流采用较高等级流速法方案提供了依据, 而涡河在水资源紧缺现状条件下应采用方案一以防止生态系统健康进一步恶化; 沙颍河则应在适当条件下(如丰水年和平水年)采用方案二或方案三来改善生态环境。因此一定程度上, 流速法及 Tennant 法生径比标准可为维持流域内生态系统健康的宏观把握, 为水资源调度管理提供一定参考依据。

4 结论

本文剖析和发展了生径比概念的内涵、特征, 并基于 Tennant 法提出了考虑径流年际变化、年内汛期和非汛期差异的生径比标准, 应用流速法设定三种生态流速方案计算得到不同等级的最小、适宜生态流量及其对应的生径比。根据该生径比满足生径比标准的难易程度, 选取动态生态需水方案, 从而与径流变化相适应。研究表明: 时间上, 枯水年和汛期易满足生径比标准; 空间上, 涡河、沙颍河较漯河、淮河干流、洪汝河更易满足生径比标准; 涡河、沙颍河需要提高河道生态用水比例以改善河道生态环境; 不同河流在不同年型、年内不同时期可以动态选取生态流量。

本文研究尚存在一些缺陷, 由于河道生态需水受水质和水量的双重约束, 而本文仅从水量角度研究生态流量和生径比的动态变化规律, 以后可以从水质水量耦合角度研究生径比规律, 以期提供更科

学的生态需水计算方案。

参考文献(References):

- [1] Petts G, Morales Y, Sadler J. Linking hydrology and biology to assess the water needs of river ecosystems[J]. *Hydrological Processes*, 2006, 20(10): 2247-2251.
- [2] Palmer M A, Bernhardt E S. Hydroecology and river restoration: ripe for research and synthesis[J]. *Water Resources Research*, 2006, 42(3).
- [3] 潘扎荣, 阮晓红, 徐静. 河道基本生态需水的年内展布计算法[J]. *水利学报*, 2013, 44(1): 119-126. (PAN Zha rong, RUAN Xiaohong, XU Jing. A new calculation method of instream basic ecological water demand[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2013, 44(1): 119-126. (in Chinese))
- [4] 马乐宽, 倪晋仁, 李天宏, 等. 流域生态环境需水与缺水的快速评估(Ⅱ): 理论[J]. *水利学报*, 2008, 39(9): 1023-1029. (MA Le kuan, NI Jin ren, LI Tian hong, et al. Fast evaluation of eco environmental water requirement and water deficit in river basins I. Theory[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2008, 39(9): 1023-1029. (in Chinese))
- [5] Tennant D L. Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources[J]. *Fisheries*, 1976, 1(4): 6-10.
- [6] Bovee K D. A guide to stream habitat analysis using the Instream Flow Incremental Methodology. IFIP No. 12[R]. US Fish and Wildlife Service, 1982.
- [7] 王西琴, 刘昌明, 张远. 黄淮海平原河道基本环境需水研究[J]. *地理研究*, 2003, 22(2): 169-176. (WANG Xi qin, LIU Chang ming, ZHANG Yuan. Study of the basic environmental water requirement of the rivers in Huang-Huai-Hai plain[J]. *Geographical Research*, 2003, 22(2): 169-176. (in Chinese))
- [8] 刘昌明, 门宝辉, 宋进喜. 河道内生态需水量估算的生态水力半径法[J]. *自然科学进展*, 2007, 17(1): 42-48. (LIU Chang ming, MENG Bao hui, SONG Jin xi. Ecological hydraulic radius method estimating the instream ecological water requirement[J]. *Progress in Natural Science*, 2007, 17(1): 42-48. (in Chinese))
- [9] 朱才荣, 张翔, 穆宏强. 汉江中下游河道基本生态需水与生径比分析[J]. *人民长江*, 2014, 45(12): 10-15. (ZHU Cai rong, ZHANG Xiang, MU Hong qiang. Analysis on basic eco water demands and REF in mid lower reaches of Hanjiang River[J]. *Yangtze River*, 2014, 45(12): 10-15. (in Chinese))
- [10] 赵琳娜, 杨晓丹, 齐丹, 等. 2007年汛期淮河流域致洪暴雨的雨情和水情特征分析[J]. *气候与环境研究*, 2007, 12(6): 728-737. (ZHAO Lin na, YANG Xiao dan, Qi Dan, et al. The analysis of precipitation and flooding features in the Huai River Basin during the summer of 2007[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2007, 12(6): 728-737. (in Chinese))
- [11] 吉利娜. 水力学方法估算河道内基本生态需水量研究[D]. 西北农林科技大学, 2006. (JI Li na. Study on hydraulic methods calculating instream base flow requirement[D]. Northwest A&F University, 2006. (in Chinese))
- [12] 夏军, 王纲胜, 张永勇, 等. 淮河流域闸坝对河流生态与环境影响评估研究报告[R]. 北京: 中国科学院地理科学与资源研究所, 2006. (XIA Jun, WANG Gang sheng, ZHANG Yong yong. Assessment report of influence of dams in Huai River basin on river ecology and environment[R]. Institute of Geographic Science and Natural Resources Research, CAS, 2006. (in Chinese))
- [13] 赵长森, 刘昌明, 夏军, 等. 闸坝河流河道内生态需水研究——以淮河为例[J]. *自然资源学报*, 2008, 23(3): 400-411. (ZHAO Chang sheng, LIU Chang ming, XIA Jun, et al. Instream ecological flow of Dammed River a case study of Huai River[J]. *Journal of Natural Resources*, 2008, 23(3): 400-411. (in Chinese))
- [14] 张倩. 水流、水温及体重对团头鲂(*Megalobrama amblycephala*) 幼鱼游泳行为及标准代谢的影响[D]. 昆明: 云南大学, 2013. (ZHANG Qian. Influence of flow, water temperature and weight on swimming, standard metabolism of the young *Megalobrama amblycephala*[D]. Kunming: Yunnan University, 2013. (in Chinese))
- [15] 刘建康. 高级水生生物学[M]. 北京: 科学出版社, 1999. (LIU Jian kang. *Advanced Hydrobiology* [M]. Beijing: Science Press, 1999. (in Chinese))
- [16] Xia Zhi qiang, Li Qiong fang, Guo Li dan, et al. Computation of minimum and optimal instream ecological flow for the Yiluohe River[A]. *Proceedings of Symposium HS3006*[C]. Perugia, July 2007.
- [17] 陈竹青. 长江中下游生态径流过程的分析计算[D]. 南京: 河海大学, 2005. (CHEN Zhu qing. Ecological flow requirements for the middle and lower reaches of the Yangtze River[D]. Nanjing: Hohai University, 2005. (in Chinese))
- [18] 于龙娟, 夏自强, 杜晓舜. 最小生态径流的内涵及计算方法研究[J]. *河海大学学报: 自然科学版*, 2004, 32(1): 18-22. (YU Long juan, XIA Zhi qiang, DU Xiao shun. Connotation of minimum ecological runoff and its calculation method[J]. *Journal of Hohai University: Natural Sciences*, 2004, 32(1): 18-22. (in Chinese))
- [19] SL250-2000. 水文情报预报规范[S]. (SL250-2000. Standard for hydrological information and hydrological forecasting[S]. (in Chinese))
- [20] 吴喜军, 李怀恩, 董颖, 等. 基于基流比例法的渭河生态基流计算[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(10): 154-159. (WU Xi jun, LI Huai en, DONG Ying, et al. Calculation of ecological basic flow of Weihe River based on basic flow ratio method[J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(10): 154-159. (in Chinese))
- [21] 梁友. 淮河水系河湖生态需水量研究[D]. 北京: 清华大学, 2009. (LIANG You. The research of instream environmental water requirement in Huai River System[D]. Beijing: Tsinghua University, 2009. (in Chinese))