

文章编号:1672-3031(2011)01-0066-08

河流最小生态基础流量计算方法研究

张新华, 李红霞, 肖玉成, 赵少华

(四川大学 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 四川 成都 610065)

摘要: 为了能够计算几何断面复杂、泥沙淤积、河宽大、水深浅的河道生态基础流量, 本文以渭河关中地区的生态基础流量计算为例, 通过综合水力学中的湿周法和R2CROSS法建立了一套简单、适合管理的最小生态基础流量方法——综合法。该方法计算出的5个站的生态基础流量占多年平均流量的比值都在10.8%~14.9%之间, 满足生态基流的合理要求。通过与Tennant方法比较, 结果表明: 综合法计算确定的生态基础流量更为合理、是一种在管理上更值得推广应用的方法。

关键词: 生态需水量; 湿周法; 斜率法; 曲率最大法; R2CROSS法

中图分类号: X171

文献标识码: A

1 研究背景

河流系统包括河流、湖泊及其相邻洪泛区。河流系统功能通常包括生态功能、环境功能和资源功能^[1]。然而, 在开发水资源的时候主要考虑到满足工业、农业和城镇生活用水等需求, 忽视了河流系统功能得以正常发挥并维持其基本功能时其自身对水量的要求, 从而导致河段内的天然流量逐渐减少、甚至出现断流的情况。另外, 经济社会的高速发展导致大量的污水排放, 使得有些河流虽然水量上没问题, 但水质污染十分严重导致水生生物种群及其数量急剧下降, 水体严重富营养化, 出现藻类或水华暴发等现象。

为了维持河流系统健康, 保障其基本功能能正常发挥, 国内外学者为此开展了大量的研究工作, 主要集中在河流生态环境需水上并取得了一定的研究成果。河流生态环境需水量计算内容主要包括: (1)生态基础流量; (2)输沙需水量; (3)自净需水量; (4)蒸发需水量; (5)防海水入侵的河道最小水量等^[2]。其中的河流生态基础流量是维持河道功能不退化、特征水生生物物种能正常繁衍生息所必须维持的河道最小流量, 本文重点分析讨论这一河道最小生态基础流量。然而, 国内外针对这一流量的研究还未形成统一认识, 基本理论和方法都还有待进一步完善。随着近几年的研究深入, 国内外学者提出了多种计算方法, 概括起来主要包括4类方法: (1)水文学法; (2)水力学法; (3)栖息地法; (4)地形结构法等。在这几种方法中, 以水文学法与水力学法最为常用。因此, 本研究方法的重点在分析讨论水力学法中的湿周法并结合R2CROSS法和Tennat法, 提出一套简单、实用、便于管理部门操作的方法——综合法。

2 计算方法

2.1 湿周方法 湿周法计算河道的最小生态需水量时要基于一个假设, 即浅滩是临界的河流栖息地, 而保护浅滩栖息地也能保护到其他的水生生物栖息地。通过河道的实测大断面和实测流量资料

收稿日期: 2011-01-12

基金项目: 国家科技重大水专项(2008ZX07526-004-T007; 2009ZX07212-002-003; 2009ZX07104-001); 四川大学水力学与山区河流开发保护重点实验室小分队研究基金; 四川大学青年教师科研启动基金(2009SCU11079)

作者简介: 张新华(1965-), 男, 副教授, 主要从事水力学与河流动力学及水环境研究。E-mail: xhzhang@scu.edu.cn

通讯作者: 李红霞(1981-), 女, 山东烟台人, 讲师, 主要从事水文模拟及水文预报研究。E-mail: hx_li406@126.com

建立湿周~流量关系曲线,在曲线中用斜率1法和曲率最大法确立变化点,该点对应的流量即为最小生态流量,这就是湿周法确立河道最小生态流量的基本原理^[3-5]。

根据水力学中计算明渠均匀流的谢齐公式: $Q = AC \sqrt{RJ}$ 以及曼宁公式: $C = \frac{1}{n} \cdot R^{1/6}$ 可以推出湿周~流量关系式:

$$Q = \frac{1}{n} A^{5/3} P^{-2/3} J^{1/2} \quad (1)$$

式中: Q 为流量, m^3/s ; A 为过水断面面积, m^2 ; P 为湿周, m ; J 为水力坡度; n 为粗糙系数。

在上式中,由于流量 Q 、湿周 P 以及断面面积 A 都是未知的,因此直接推出流量和湿周的关系比较困难,而通过斜率1法和曲率最大法确定 $P-Q$ 关系曲线变化点需要知道 $P-Q$ 之间的函数关系。根据国内外对湿周法的研究,通常使用幂函数和对数函数。两种常用函数的形式如下。

对数函数:

$$P = a \ln Q + b \quad (2)$$

幂函数:

$$P = cQ^d + e \quad (3)$$

式中: a 、 b 、 c 、 d 、 e 均为常数; Q 取相对流量; P 取相对湿周(为消除坐标轴比例的影响,对湿周和流量无量纲化)。

分别对式(2)和式(3)中的 Q 进行求导,即可得到两式的斜率方程表达式:

对数函数:

$$P' = a/Q \quad (4)$$

幂函数:

$$P' = cdQ^{d-1} \quad (5)$$

再利用微积分中计算曲率的公式可得到两式的曲率方程表达式:

对数函数:

$$\kappa = \frac{-aQ}{(a^2 + Q^2)^{3/2}} \quad (6)$$

幂函数:

$$\kappa = \frac{cd(d-1)Q^{d-2}}{(1 + c^2d^2Q^{2d-2})^{3/2}} \quad (7)$$

斜率1法是取 $P-Q$ 关系曲线上斜率为1的一点,即 $P'=1$ 时,对应的流量值作为河道内的最小生态流量。斜率1法求得的最小生态流量公式为:

对数函数:

$$Q = a \quad (8)$$

幂函数:

$$Q = (cd)^{1/(1-d)} \quad (9)$$

曲率法是选取曲线上曲率最大的一点对应的流量值作为河道内的最小生态流量。为求得曲率最大的一点,需对式(6)和(7)中的 Q 求一阶导数,一阶导数值等于0的一点即为曲率最大的一点。该点对应的流量值就作为河道内的最小生态流量。曲率最大法求得的最小生态流量公式为:

对数函数:

$$Q = a/\sqrt{2} \quad (10)$$

幂函数:

$$Q = \left[\frac{2-d}{c^2d^2(1-2d)} \right]^{1/2(d-1)} \quad (11)$$

2.2 Tennant方法 Tennant法是Tennant, D.L等人于1976年提出的河流生态需水量评估方法^[6]。该方法是一种历史流量法,按照Tennant方法的标准,河道内的最小生态流量不能小于多年平均流量的10%。多年平均流量10%是防止河道退化的临界条件;多年平均流量的20%是保护水生栖息地的适宜标准;在较小河流中,多年平均流量的30%为最佳栖息地标准。

2.3 R2CROSS方法 R2CROSS方法最初是由美国森林委员会提出的,其目的是为了美国高原山区河流的水资源与水环境保护,维持生物多样性而确定山区河流环境流量的方法。

该方法首先根据研究河段控制断面的河顶宽度,查表1得到环境流量所需的水力学参数:平均水深、湿周率和平均流速。然后再根据该断面建立的水深、湿周率和平均流速与流量的关系分别得到3个流量 Q_1 、 Q_2 和 Q_3 ,最后在3个流量中选出所需要的环境流量。方法是按季节要求:(1)如果是在夏季和秋季,那么平均水深、平均流速及湿周率必须全部满足,即生态流量为 Q_1 、 Q_2 和 Q_3 中的最大值;(2)如果是在冬季和春季,3个水力参数满足两个即可,即为 Q_1 、 Q_2 和 Q_3 3个流量中的第二大值。

表1 R2CROSS法确定生态流量的标准

河顶宽度/m	平均水深/m	湿周率/%	流速/(m/s)
0.3~6	0.003~0.06	50	0.30
6~12	0.06~0.12	50	0.30
12~18	0.12~0.18	50~60	0.30
18~31	0.18~0.30	≥70	0.30

3 应用及存在的问题分析

3.1 渭河关中段河道概况 近十几年来,由于渭河上游过渡开发,维持河流基本生态功能所需的最小流量即生态基流得不到保证,一系列河流生态问题已经日益突显,为此,本研究以渭河关中段为研究对象。渭河关中段全长504.2km,流域面积为 $6.17 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。渭河关中段有5个主要的水文站,分别为林家村水文站、魏家堡水文站、咸阳水文站、临潼水文站以及华县水文站(见图1)。5个水文站的多年平均流量分别为 $84.8 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $117 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $156 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $236 \text{ m}^3/\text{s}$ 以及 $251 \text{ m}^3/\text{s}$ 。渭河关中段河道的水面宽普遍较大,正常情况下都能达到150~300m之间,而水深比较小,因此渭河关中段河道属于宽浅型河道。

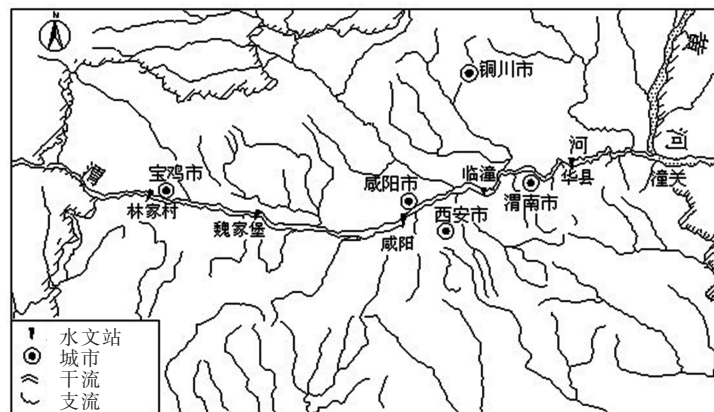


图1 研究区域与水文站

3.2 计算中的问题及分析讨论 本文对建立湿周与流量关系中的问题以及R2CROSS法应用中出现问题进行讨论。

(1)是否需要建立控制站点完整的湿周流量关系。由渭河关中段河道特征可知,河道非常宽,沟槽、滩地较多,很不规整,如下图2所示。是选择整个大断面来建立完整的湿周流量关系,还是以枯

水期的主河槽来建立湿周与流量关系。

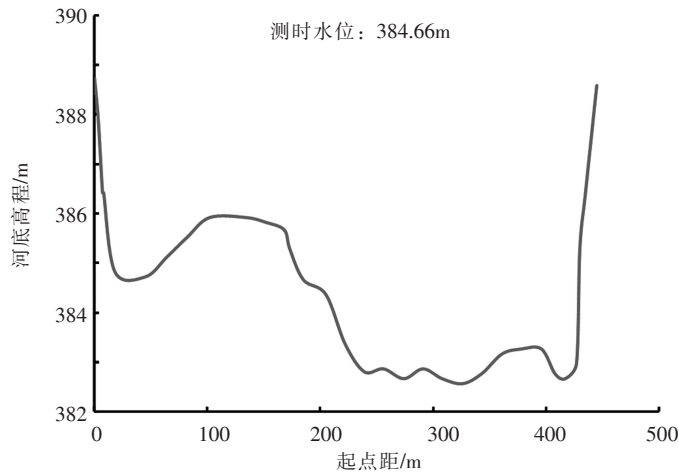


图2 咸阳站的大断面

根据澳大利亚学者 Gippel 的研究^[4], 湿周流量关系的变化点 (Breakpoint, 该点对应的流量即为生态基础流量) 常发生在河道断面有较大变化的地方。如图 2 所示咸阳站的大断面为典型的复式断面, 若建立整个断面的湿周流量关系, 则会出现变化点对应的基础流量非常大 (图 2 中河道几何形态变化最大发生在左侧滩地处, 河道水位要很高时才会出现), 只有汛期漫滩时才能满足要求。因此, 在建立计算生态基础流量的湿周流量关系时只能选择枯期有水的主河槽部分。

(2) 河道是否需要概化。在建立湿周与流量关系时, 是直接根据实测大断面资料按均匀流计算湿周和流量的关系, 还是需要将实测大断面绘出后将其概化成某一规则断面再计算湿周与断面的关系。为此, 以林家村站为例 (实测资料绘制的图形如图 3 所示, 类似抛物线) 进行了相关计算分析。

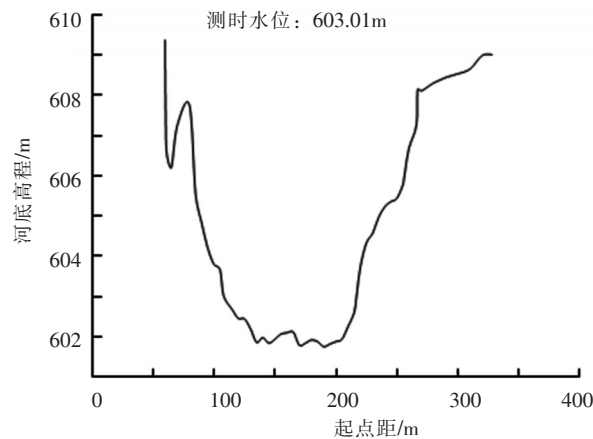


图3 林家村水文站实测断面

① 概化为抛物线。根据实测大断面资料 (如图 3 所示), 计算得到林家村水文站的抛物线方程为:

$$y = 1.89 \times 10^{-4} x^2 \quad (12)$$

其中 y 为河底高程, x 为起点距。湿周按如下公式计算:

$$P = \frac{1}{a} \left[\frac{ac}{2} \sqrt{1 + a^2 c^2} + \frac{1}{2} \ln \left(ac + \sqrt{1 + a^2 c^2} \right) \right] \quad (13)$$

其中 a 为抛物线系数, 对于林家村水文站 $a = 1.89 \times 10^{-4}$, c 为水面宽。根据公式 (13) 可计算出湿周与流量关系 (如图 4 所示)。从图 4 可知湿周与流量之间的关系为对数关系。

② 直接根据大断面实测资料计算。然而, 根据实测大断面资料直接计算出的实际湿周与流量的关系则为幂函数关系, 如图 5 所示。

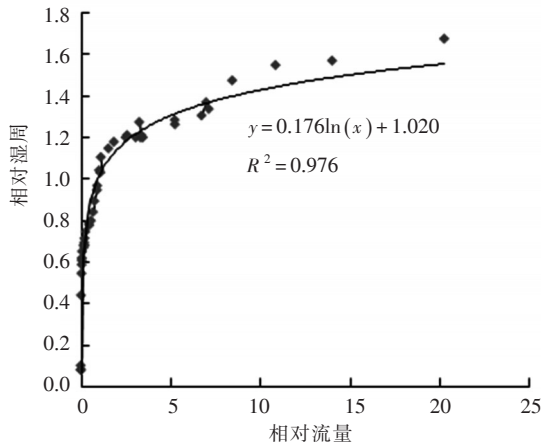


图4 林家村站概化后计算得到的P-Q关系

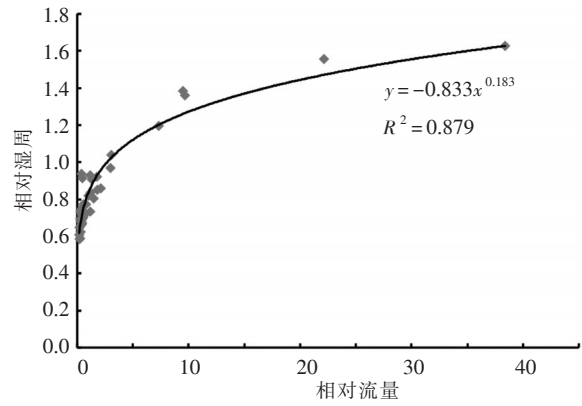


图5 根据林家村站实测资料计算出的P-Q关系

从图4和图5对比可以发现：没有概化处理的湿周流量关系包涵的河道信息更完整、丰富，拟合出的关系更能代表实际情况，由此得到的生态基础流量应该更为合理。

(3)R2CROSS法应用中出现问题。从前面的介绍可知R2CROSS方法只适用于河顶宽度为0.3m~31m的山区性河流，不适用于大中型河流。而渭河的河顶宽度都在100m以上，因此直接利用R2CROSS方法有较大的难度。

3.3 方法改进 因渭河关中段河道宽阔，为典型的沟槽、滩多的复式河道。考虑到生态基础流量为河道健康和河道功能不退化的最小流量，因此，选择枯期有水的主河槽来建立湿周流量关系。对选择的主河槽，根据实测大断面资料直接计算不同水位对应的湿周和流量，然后建立湿周流量关系。根据拟合好的线型，结合湿周法确定生态基础流量的方法计算生态基础流量。

针对渭河河道特宽、多沙、缺水等特点，结合湿周法和R2CROSS法，考虑管理机构要根据不同季节河流健康要求、或不同河段中对水环境比较敏感的水生生物物种(包括鱼类或其它指示物种)在不同生长阶段对水动力学条件的要求而提出的一套方法——综合法。在该方法中将生态基础流量对应的水深、流速和湿周率分别定义为生态水深、生态流速和生态湿周率。

该方法的具体分析步骤如下。

(1)根据研究河段控制点的大断面实测资料，分析计算出水深与流量，流速与流量，湿周与流量等相关关系；

(2)确定生态流速。可以根据河道特性从泥沙(河道泥沙问题突出的河流)或保护物种生长繁衍最适宜的流速考虑。渭河关中段河道的泥沙浓度很高并且主要为很细的悬沙，可根据实验或经验公式确定不冲不淤流速^[7]：

$$v_m = \beta h_0^{0.64} \quad (14)$$

式中： h_0 为平均水深(m)； β 为与河道泥沙特性有关的系数，当沙比较粗时 $\beta=0.60\sim0.70$ ；当泥沙颗粒中等时 $\beta=0.54\sim0.57$ ；当沙比较细时 $\beta=0.39\sim0.41$ 。也可以根据研究河段保护的生物物种生长最适宜的流速选定。

(3)确定生态水深。可以从控制站点枯水期多年平均水深的变化范围来确定。若有研究河段保护物种或指示物种生长繁殖对水深的要求，也可以根据其要求来确定。

(4)确定生态湿周率。该指标可以根据生态水深结合研究河段的大断面综合确定，一般选大断面的50%左右为宜。

(5)确定生态基础流量。根据确定的生态流速、生态水深和生态湿周率，在对应的水深与流量，流速与流量和湿周与流量关系曲线上查出3个对应流量，然后综合确定生态基础流量。

4 计算结果与分析

4.1 湿周法计算结果 根据实测大断面资料, 假定不同的水深, 计算出各控制站点相应的水力学参数(如表2所示)。

表2 计算渭河林家村站的水力参数

水面宽/m	平均水深/m	断面面积/m ²	湿周/m	湿周率	水力半径/m	流量/(m ³ /s)	平均流速/(m/s)
187	4.44	830.41	188.16	1.00	4.41	3 890	4.68
167	2.62	436.84	167.45	0.89	2.61	1 440	3.30
143	2.27	324.71	143.38	0.76	2.26	975	3.00
116	1.55	179.53	116.27	0.62	1.54	418	2.33
109	0.92	100.54	109.12	0.58	0.92	166	1.65
93	0.46	43.00	93.06	0.49	0.46	44.80	1.04
79	0.27	21.22	79.04	0.42	0.27	15.40	0.72
71	0.19	13.62	71.03	0.38	0.19	7.89	0.58
65	0.18	11.60	65.03	0.34	0.18	6.40	0.55
58	0.10	5.59	58.01	0.31	0.10	2.05	0.37
54	0.08	4.07	54.01	0.29	0.08	1.26	0.31
27	0.058	1.45	27.00	0.14	0.05	0.36	0.25

根据表2建立各控制站的湿周和流量关系(如图5所示)。按照斜率1法和曲率最大法得到各控制点(水文站)的最小生态基础流量。渭河关中段各水文站计算得到的最小生态流量成果见表3所示。

表3 渭河关中段各水文站最小生态需水量计算结果

断面名称	多年平均流量/(m ³ /s)	斜率1法		曲率法	
		Q/(m ³ /s)	Q/ \bar{Q} /%	Q/(m ³ /s)	Q/ \bar{Q} /%
林家村	84.8	14.9	17.6	10.6	12.4
魏家堡	117	23.6	20.1	16.7	14.2
咸 阳	156	32.8	21.0	23.2	14.8
临 潼	235	54.9	23.3	38.8	16.5
华 县	251	74.4	29.6	52.6	20.9

按照 Tennant 方法的标准, 河道内的最小生态流量不能小于多年平均流量的10%, 应在10%~30%之间。渭河关中段的前4个水文站, 即林家村水文站、魏家堡水文站、咸阳光水文站和临潼水文站的最小生态流量占多年平均流量都在10%~20%之间, 满足河道不退化的条件。华县水文站的最小生态流量占多年平均流量的20%~30%之间, 在适宜值与最佳标准值之间。由此可见上述湿周法计算渭河关中段最小生态流量结果都满足最小生态需水要求, 而且最小生态流量呈现出从上游到下游增大的合理趋势。综合斜率1法和曲率最大法计算结果, 再结合渭河关中地区水资源短缺的现实, 湿周法确定渭河关中段各水文站的最小生态基础流量及其对应水力参数如表4所示。

表4 渭河关中段最小生态流量成果(湿周法)

断面名称	生态流量/(m ³ /s)	水面宽/m	断面面积/m ²	湿周/m	平均水深/m	平均流速/(m/s)
林家村	10.6	64	17.7	64.01	0.28	0.60
魏家堡	16.7	77	26.8	86.46	0.22	0.62
咸 阳	23.2	89	48.1	111.59	0.54	0.48
临 潼	38.8	151	90.3	158.63	0.60	0.43
华 县	52.6	161	113.0	171.68	0.70	0.47

从表4中可看出,渭河关中段各水文站最小生态流量占多年平均流量的10%~20%时,平均水深在0.2~0.7m之间,断面流速在0.4~0.65m/s之间。

4.2 综合法计算结果 分别对渭河关中段的平均生态流速、平均生态水深、平均生态湿周率进行计算,计算结果如下。

(1)平均生态流速。根据湿周法计算的成果,5个站的生态基础流量对应的平均水深约为0.50m,由公式(14)计算得到的不淤最小流速约为0.25 m/s,又据水力学等^[8],河道中的不冲不淤的允许流速范围为0.21~0.32m/s。因此,确定渭河关中段的平均生态流速为0.3m/s。

(2)平均生态水深。由前面的湿周法算出的各站的生态流量值,可知生态流量所对应的平均水深变化范围较大,但最大值不会超过1m,因此,确定平均水深的标准范围为0.2~0.9m。

(3)平均生态湿周率。由于渭河的断面较大,河顶宽度较长,湿周率定得太大后并没有足够的水量来满足要求,综合考虑取湿周率为研究主河道(河槽)湿周的50%。

根据以上标准,由各站建立的水深~流量关系,流速~流量关系和湿周率~流量的关系,就可以得到相应的3个流量,最后再结合渭河关中段的实际情况确定各站的生态基础流量,最终结果如表5所示。

表5 渭河关中段最小生态流量成果(综合法)

断面名称	生态流量/(m ³ /s)	水面宽/m	断面面积/m ²	湿周/m	平均水深/m	平均流速/(m/s)
林家村	12.4	77	19.25	77.15	0.25	0.69
魏家堡	17.2	100	35.00	100.56	0.35	0.53
咸 阳	23.3	59	35.40	59.25	0.60	0.51
临 潼	25.5	121	60.50	122.91	0.50	0.52
华 县	30.1	79	59.25	79.07	0.75	0.51

从表5可知,利用综合法计算的生态基础流量:林家村水文站为12.4m³/s,占多年平均流量14.6%;魏家堡水文站为17.2m³/s,占多年平均流量14.7%,咸阳水文站为23.3m³/s,占多年平均流量14.9%;临潼水文站为25.5/s,占多年平均流量10.8%;华县水文站为30.1mm³/s,占多年平均流量12.0%。

综合法计算的结果与湿周法的计算结果在林家村、魏家堡、咸阳三站的结果基本一致,但是临潼和华县两站的结果比湿周法小。但是,从5个站的生态基础流量占多年平均流量的比值来看都在10.8%~14.9%之间。根据Tennant方法可知,综合法计算确定的生态基础流量能够保证河道功能不退化、水生生物的生存不会受到威胁,并且在水资源短缺的关中地区更能得到保障。

5 结论

针对湿周法和R2CROSS法在渭河关中段计算最小生态流量中遇到的问题提出了一套相对简单、实用的综合法。该方法以平均生态流速-平均生态水深和平均生态湿周率为基础进行生态基础流量计算,与其他方法对比该方法的优点主要表现在:(1)能够充分考虑维持河道特征及其形态稳定需要(从不冲不淤生态流速上反映);(2)可以最大限度的保障生物栖息地信息(根据实测断面资料建立各种关系);(3)方便、灵活便于管理部分调控;可以根据研究河段需保护的水生生物物种的生活习性来确定生态基流。但是,该方法在应用也可能受到研究河段的基础资料、水生态和水生生物多样性调查资料等限制。

计算结果表明:该方法计算结果比湿周法的结果更合理,适合在水资源缺乏地区推广应用。

参 考 文 献:

- [1] 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): 496-500.
- [2] 宋进喜, 李怀恩, 王伯铎. 河流生态环境需水量研究综述[J]. 水土保持学报, 2003, 17(6): 95-97.
- [3] 吉利娜, 刘苏峡, 王新春. 湿周法估算河道内最小生态需水量-以滦河为例[J]. 地理科学进展, 2010, 29(3): 287-291.
- [4] Gippel C J, Stewardson M J. Use of wetted perimeter in defining minimum environmental flows[J]. Regul. River: Res. Mgmt., 1998, 14: 53-67.
- [5] Shang S H, A multiple criteria decision-making approach to estimate minimum environmental flows based on wetted perimeter[J]. River Research and Applications[J]. 2008, 24: 54-67.
- [6] Tennant D L. Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources[C]//Proceedings, Symposium and Special Conference on Instream flow Needs, Osborn JF, Allman CH (eds). Vol. II. May 3-6, Boise, Idaho, American Fisheries Society: Bethesda; 1976. 359-373.
- [7] Men B H, Liu C M. Ecological hydraulic radius model to calculate instream flow requirements for transporting sediment in the western water transfer region[J]. Sci China Ser E-Tech Sci, 2009, 52(11): 3401-3405.
- [8] 吴持恭. 水力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.

Study on computational methods for minimum environmental flows

ZHANG Xin-hua, LI Hong-xia, XIAO Yu-cheng, ZHAO Shao-hua

(State Key Lab of Hydraulics & Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: In order to determine the minimum ecological flow (MEF) for a river system with special characteristics of complicated river reach profiles, sediment problems, very large width and shallow water depth, an integrated method was proposed to overcome some of limits in using wetted perimeter method and R2CROSS method. A case study was conducted in the Wei River, a tributary of the Yellow River. Results calculated by this integrated method indicate that the MEFs at the five hydrological stations are at a range of 10.8%~14.9% of the multi-year mean flows, respectively. In comparison with Tennant method, therefore, we can get a conclusion that the integrated method is more suitable and reasonable for the determination of MEFs.

Key words: ecological water demand; wetted perimeter method; slope method; curvature method and R2CROSS

(责任编辑: 吕斌秀)