

确定河流生态流量的几种湿周法比较

尚松浩^{1,2}

(1. 清华大学水利水电工程系, 北京 100084; 2. 清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084)

摘要: 为比较不同湿周法在计算河流生态流量中的适用性, 采用幂函数描述无量纲化的湿周 ~ 流量关系, 利用曲率法、斜率法及多目标评价法中的线性加权法和、理想点法(尺度系数 r 分别取 1, 2, ∞) 乘除法等 7 种方法计算河流生态流量。结果表明: 曲率法的结果偏小, 斜率法、理想点法($r = 1$) 线性加权法和的结果相同, 且位于各方法的中间; 另外 3 种多目标评价方法得到的河流生态流量大于斜率法等的结果, 但湿周的增加比例明显小于流量增加比例。在湿周 ~ 流量关系符合幂函数关系时, 利用斜率法或理想点法($r = 1$) 线性加权法和确定河流生态流量的方法是适宜的。

关键词: 河流流量; 生态流量计算; 湿周法; 曲率法; 斜率法; 多目标评价模型; 评价函数法

中图分类号: X143 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-7647(2011)04-0041-04

Comparison among several wetted perimeter methods to determine the minimum environmental flows of rivers//SHANG Song-hao^{1,2} (1. Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: To compare the applicability of different wetted perimeter methods for environmental flows of rivers, the power function was employed to express the relationship between dimensionless wetted perimeter and the discharge. The environmental flows of rivers were determined by means of the curvature method (CM), the slope method (SM) and several multi-objective evaluation methods including the weighted sum method (WSM), the ideal point method with different scaling coefficients of 1 (IPM1), 2 (IPM2) and ∞ (IPM3) and the multiply-divide method (MDM). The results show that the environmental flows of rivers determined by CM are the smallest. Those by SM, IPM1 and WSM are all the same and lie in the middle of all the methods. Those by the other three methods (IPM2, IPM3 and MDM) are the largest; however, the increment of the wetted perimeter is significantly lower than that of the flows. Consequently, SM, IPM1 and WSM are applicable to determine the environmental flows of rivers if the relationship between the wetted perimeter and the discharge obeys the power law.

Key words: river discharge; determination of environmental flows; wetted perimeter method; curvature method; slope method; multi-objective evaluation model; evaluation function method

随着生产生活需水量的增加, 河流水资源开发利用率也不断提高, 而河流流量减小可能会导致一系列的生态与环境问题。为保护河流生态系统, 河流生态流量研究近年来越来越受到重视。河流生态流量的估算方法超过 200 种^[1], 这些方法可以分为水文学法、水力学法、栖息地法、整体法、组合法、其他方法等 6 大类。每类中都包含一系列方法, 而每种方法又各有特点和适用范围^[1-3]。近年来新的方法还在不断出现, 如生态水力半径法^[4]、生态水深-流速法^[5]、多目标评价法^[6]等。在实际应用中, 一个关键的问题是根据实际情况从众多的方法中选出 1 种或几种合适的方法。

湿周法是水力学法中常用的一种方法, 该方法

以湿周作为生态系统栖息地指标, 把湿周 ~ 流量关系曲线上某一临界点所对应的流量作为生态流量。确定临界点的传统方法有曲率法(曲率绝对值最大)和斜率法(斜率为 1 或其他设定值)^[7]。研究表明, 不同断面下斜率法得到的流量和湿周均大于曲率法, 曲率法在某些断面情况下得到的相对湿周偏小^[8]。由于斜率法中斜率临界值选取的任意性以及坐标尺度的影响^[7-9], 斜率法计算结果存在较大的不确定性, 在难以确定斜率临界值时可采用曲率法^[10]。基于湿周 ~ 流量关系, 也可以采用多目标评价方法来求解河流生态流量^[6]。笔者采用幂函数描述无量纲化的湿周 ~ 流量关系, 通过理论分析探讨如何利用湿周 ~ 流量关系确定河流生态流量。

基金项目: 国家自然科学基金(50879041)

作者简介: 尚松浩(1971—), 男, 河南叶县人, 副教授, 博士, 从事水文水资源及农业水土工程研究。E-mail: shangsh@tsinghua.edu.cn

1 用湿周 ~ 流量关系确定河流生态流量的方法

1.1 河流湿周 ~ 流量关系

湿周 ~ 流量关系主要取决于河流断面的形状 , 一般可利用实测流量及断面资料得到。在没有实测流量资料时 , 可采用明渠均匀流方法利用曼宁公式计算得到 :

Q = n^{-1} A \left(\frac{A}{\chi} \right)^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} \tag{1}

式中 :Q 为流量 ;n 为曼宁糙率系数 ;A ,\chi 分别为过水断面面积和湿周 ;S 为水面坡降。

为了消除坐标尺度的影响 ,湿周法中的流量与湿周通常用相对于某一特征流量 Q_m (如最大流量、多年平均流量等)及其相应湿周 \chi_m 的比例来表示 ,即

q = \frac{Q}{Q_m} \quad p = \frac{\chi}{\chi_m} \tag{2}

式中 :q ,p 分别为相对生态流量、相对湿周。

对于规则断面 ,p 与 q 的关系可以表示为幂函数或指数函数关系^[7] :

p = q^b \tag{3}

p = a \ln q + 1 \tag{4}

式中 :b ,a 为与断面形状有关的参数。

式(3)可用于三角形、U 形和抛物形断面 ,而式(4)则适用于矩形和梯形断面^[8]。

对不同宽深比(河宽与最大水深之比)的矩形断面 ,将最大水深划分为 10 等分 ,利用式(1)计算出不同水深对应的相对湿周和相对流量 ,并分别采用式(3)式(4)拟合 ,结果见表 1。可以看出式(3)的拟合效果优于式(4)的拟合效果 ,特别是在宽深比较小时。对梯形断面也可得出类似结果。因此 ,以下分析中湿周 ~ 流量关系利用式(3)来描述。

表 1 矩形断面湿周 ~ 流量关系拟合结果

宽深比	式(3)拟合结果		式(4)拟合结果	
	b	确定性系数	a	确定性系数
0.1	0.8670	0.998	0.3936	0.746
1	0.3783	0.940	0.2390	0.747
5	0.1055	0.854	0.0897	0.780
10	0.0556	0.832	0.0509	0.791
50	0.0117	0.810	0.0114	0.801
100	0.0059	0.807	0.0058	0.803

不同的断面形状有不同的幂指数 ,三角形断面的幂指数 b = 0.375^[10] ,新疆某河流典型断面的幂指数 b = 0.325 ~ 0.478^[6]。根据表 1 的结果 ,矩形断面的幂指数可以小到接近 \alpha (宽浅型矩形断面) ,大到接近 1 (窄深型矩形断面) ,因此在以下分析中幂指数 b 取值范围限定在 0 ~ 1 内。对于实际的河流断

面 ,幂指数 b 一般小于 0.5。

1.2 曲率法和斜率法

在曲率法(CM)和斜率法(SM)中 ,河流生态流量分别按照 p ~ q 曲线上曲率绝对值最大点和斜率为 1 的点来确定。对于式(3)中的湿周 ~ 流量关系 ,计算结果分别为^[6]

q_c = \begin{cases} \left[\frac{2-b}{b^2(1-2b)} \right]^{\frac{1}{2(b-1)}} & 0 < b < 0.5 \\ 0 & 0.5 \leq b < 1 \end{cases} \tag{5}

q_s = b^{\frac{1}{1-b}} \tag{6}

式中 :q_c ,q_s 分别为根据曲率法和斜率法计算得到的河流生态流量。

1.3 多目标模型评价法

在多目标评价模型^[6]中 ,以水资源利用率 1 - q 最高作为社会经济用水目标(z_1) ,湿周 p 最大作为生态保护目标(z_2) ,即

\begin{cases} \max z_1 = 1 - q \\ \max z_2 = p(q) \\ \text{s.t. } 0 \leq q \leq 1 \end{cases} \tag{7}

在该模型中 ,由于湿周和流量之间存在一定的关系(以下分析中采用式(3)描述) ,决策变量只有 1 个 ,即生态流量 q。该模型可以采用评价函数法进行求解 ,如线性加权和法、理想点法、乘除法等^[11]。

1.3.1 线性加权和法

线性加权和法(加权平均法 ,WSM)以目标函数的加权和作为评价函数 ,即

\max E_s(q) = w_1(1 - q) + w_2 p = w_1(1 - q) + w_2 q^b \tag{8}

式中 :w_1 ,w_2 为权重。

根据式(8)可以得到相应的最优生态流量为

q_a = \left(\frac{bw_2}{w_1} \right)^{\frac{1}{1-b}} \tag{9}

权重可以根据 \alpha 法、\lambda 法、Delphi 等方法来确定^[11] ,根据 \alpha 法或 \lambda 法确定的权重均为 w_1 = w_2 = 0.5 ,因此利用线性加权和法得到的最优生态流量与斜率法相同 ,即

q_a = b^{\frac{1}{1-b}} \tag{10}

1.3.2 理想点法

在求解多目标规划的理想点法(IPM)中 ,以单个目标函数的最优值组合作为理想点 ,以目标函数与理想点之间的距离作为评价函数。在式(7)中 ,2 个目标函数的最优值为 z_{m1} = 1 ,z_{m2} = 1 ,相应的评价函数为

$$\min d_r = [(w_1 q)^r + w_2(1-p)^r]^{\frac{1}{r}} \quad (11)$$
 式中: r 为尺度系数, $r \geq 1$, 一般取为 1, 2, ∞ , 相应的 d_r 分别为 Hamming 距离、Euclidean 距离、最大偏差。

在等权重情况下, $r = 1$ (IPM1) 及 2 (IPM2) 时的最优生态流量 q_{i1} 和 q_{i2} 分别满足^[6]

$$q_{i1} = b^{\frac{1}{1-b}} \quad (12)$$

$$q_{i2}^{b-2}(1-q_{i2}^b) = \frac{1}{b} \quad (13)$$

当 r 取 ∞ 时 (IPM3), 目标函数为

$$\min d_\infty = \max\{w_1 q, w_2(1-p)\} \quad (14)$$

相应的最优生态流量满足

$$w_1 q = w_2(1-p) \quad (15)$$

对于幂函数形式的湿周 ~ 流量关系, 等权重情况下最优生态流量 q_{i3} 满足

$$q_{i3} + q_{i3}^b = 1 \quad (16)$$

1.3.3 乘除法

在乘除法 (MDM) 中以目标函数之积最大作为评价函数, 即

$$\max E_g(q) = (1-q)p = (1-q)q^b \quad (17)$$

由此可得到乘除法相应的河流生态流量为

$$q_g = \frac{b}{1+b} \quad (18)$$

2 不同方法计算结果的比较

用幂函数描述河流湿周 ~ 流量关系时, 利用上

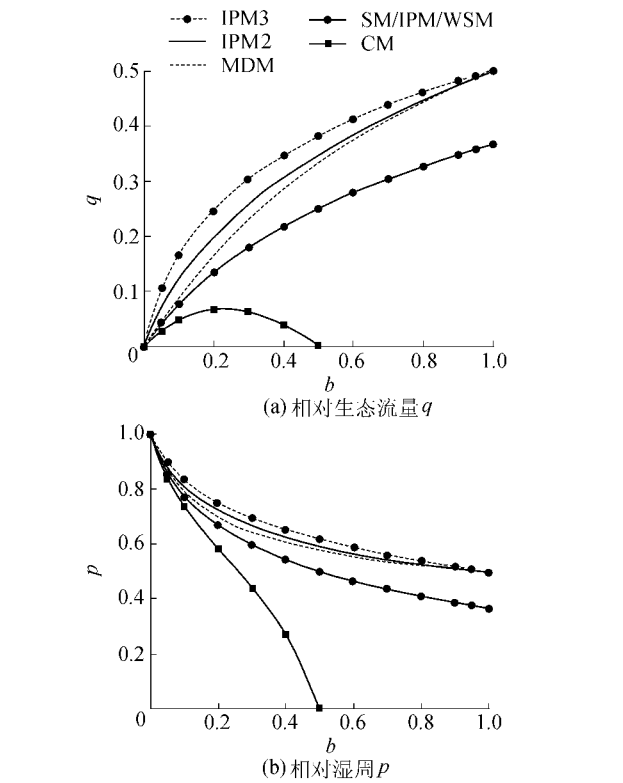


图 1 不同湿周法确定的河流生态流量及相应的湿周

述 7 种方法得到的河流相对生态流量及相对湿周随幂指数的变化如图 1 所示。可以看出, 不同方法得到的结果可以分为 3 组, 第 1 组包括 $r = \infty$ (IPM3) 以及 $r = 2$ (IPM2) 时的理想点法及乘除法 (MDM), 第 2 组包括 $r = 1$ (IPM1) 时的理想点法、斜率法 (SM)、线性加权和法 (WSM), 第 3 组为曲率法 (CM)。第 1 组中 3 种方法得到的相对流量和相对湿周相差不大, 但均大于其他方法的结果; 当幂指数 b 从 0 增大到 1 时, 相对生态流量从 0 增加到 50%, 相对湿周则从 1 减小到 50%。第 2 组中 3 种方法的计算结果相同, 且位于各方法结果的中间值; 当 b 从 0 增大到 1 时, 相对生态流量从 0 增加到 37% ($= 1/e$), 相对湿周则从 1 减小到 37%。第 3 组曲率法得到的相对流量和相对湿周在所有方法中最小, 随着 b 的增加, 相对流量从 0 增加到 7% (相应的 $b = 0.23$), 然后减小到 α (相应的 $b = 0.5$), 而相对湿周则从 1 减小到 0; 当 $b > 0.5$ 时得到的相对流量和相对湿周均为 0。

由于曲率法得到的相对流量较小 (最大为 7%), 湿周也较小, 无法提供河流生态系统所需要的基本流量, 因此在湿周 ~ 流量关系符合幂函数关系时, 曲率法不宜用于确定河流生态流量。对其他 6 种方法的结果进一步比较, 计算出第 1 组中 3 种方法结果与第 2 组结果的比值 (图 2)。当幂指数从 0 增

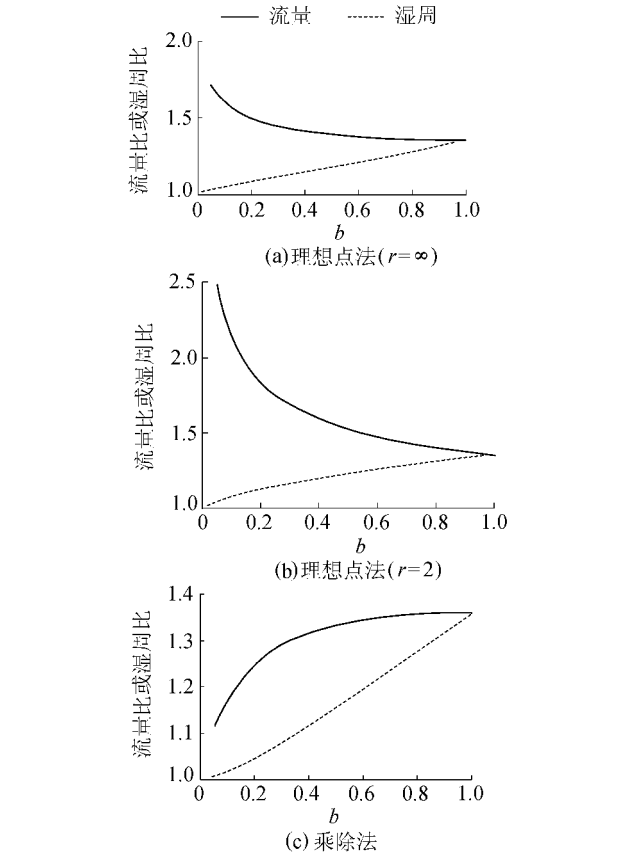


图 2 理想点法 ($r = \infty$) 乘除法确定的河流生态流量及湿周与理想点法 ($r = 1$) 结果的比值

大到1时,第1组中3种方法的湿周比第2组大0~36%,对于实际断面($b < 0.5$)来说流量比值远大于湿周比值。因此,第2组方法得出的河流生态流量是合适的。

在第2组的3种方法中,对于不同形式的湿周~流量关系均可得到相似的结果^[6]。但斜率法需要计算湿周~流量关系曲线的斜率,在湿周~流量关系可以用简单的解析函数表示时应用比较方便;而在湿周~流量关系比较复杂时,可以采用不需要计算斜率的理想点法($r = 1$)或线性加权法和法。

需要说明的是,当幂指数 b 接近0时(如宽浅型河道断面),7种方法计算得到的最优河流生态流量均趋向于0,但相应的湿周则接近最大湿周(相对湿周趋向于1)。这种情况下,仅考虑湿周~流量关系确定的最优河流生态流量可以保证较大的相对湿周,但水深、流速等要素不一定满足生态系统的要求,需要综合考虑其他要素来确定合理的河流生态流量。

3 结 语

采用幂函数描述无量纲化的湿周~流量关系,利用曲率法、斜率法、多目标评价法等方法确定河流生态流量。结果表明:曲率法的结果偏小,斜率法及多目标评价法中的理想点法($r = 1$)、线性加权和法结果相同,且位于各方法的中间;其他3种多目标评价方法得到的河流生态流量大于斜率法等的结果,但湿周的增加比例要明显小于流量增加比例。因此,在湿周~流量关系符合幂函数关系时利用斜率法或理想点法($r = 1$)、线性加权和法确定河流生态流量的方法是适宜的。

文中的分析是针对幂函数形式的无量纲化湿周~流量关系进行的,有关结果还需要通过实测资料进一步检验。

参考文献:

- [1] THARME R E. A global perspective on environmental flow assessment: emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers[J]. River Research and Applications 2003, 19(5/6):397-441.
- [2] JOWETT I G. Instream flow methods: a comparison of approaches[J]. Regulated Rivers: Research and Management, 1997, 13(2):115-127.
- [3] 徐志侠,陈敏建,董增川. 河流生态需水计算方法评述[J]. 河海大学学报:自然科学版, 2004, 33(1):5-9.
- [4] 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.
- [5] 李梅,黄强,张洪波,等. 基于生态水深-流速法的河段生态需水量计算方法[J]. 水利学报, 2007, 38(6):738-742.
- [6] SHANG Song-hao. A multiple criteria decision making approach to estimate minimum environmental flows using wetted perimeter[J]. River Research and Applications, 2008, 24(1):54-67.
- [7] GIPPEL C J, STEWARDSON M J. Use of wetted perimeter in defining minimum environmental flows[J]. Regulated Rivers: Research and Management, 1998, 14(1):53-67.
- [8] 吉利娜,刘苏峡,吕宏兴,等. 湿周法估算河道内最小生态需水量的理论分析[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版, 2006, 34(2):124-130.
- [9] LIU Su-xia, MO Xing-guo, XIA Jun, et al. The uncertainty analysis of the wetted perimeter method via axis scaling for setting minimum ecological in-stream flow requirements[J]. IAHS-AISH Publication 2008, 322:193-198.
- [10] 刘苏峡,莫兴国,夏军,等. 用斜率和曲率湿周法推求河道最小生态需水量的比较[J]. 地理学报, 2006, 61(3):273-281.
- [11] 尚松浩. 水资源系统分析方法及应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2006:134-138.

(收稿日期:2010-12-30 编辑:高建群)

· 简讯 ·

第三届全国土工合成材料加筋土学术研讨会将在河海大学举办

为了不断完善和提高土工合成材料加筋技术,促进科学和技术的发展,由中国土工合成材料工程协会、国际土工合成材料学会中国委员会等主办,河海大学、南京水利科学研究院等承办的第三届全国土工合成材料加筋土学术研讨会将于2011年10月28—31日在河海大学举办。会议主题包括:①加筋土材料特性与设计参数选择;②加筋土结构设计理论、准则与计算方法;③加筋土新工法、新工艺与新材料;④加筋土结构工程实录。《水利水电科技进展》将选登会议征集的部分优秀论文。

(本刊编辑部供稿)