

基于湿周法的河道最小生态需水量多目标评价模型

彭 涛^{1,2}, 陈晓宏³, 王高旭², 李英海¹

(1. 三峡大学水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002;
2. 南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029;
3. 中山大学水资源与环境系, 广东 广州 510275)

摘要:以湿周与流量关系为基础,建立了基于多目标评价方法的河道最小生态需水量估算模型,以湿周最大和河道流量最小作为栖息地保护和水资源开发利用的目标,采用理想点法求解,以增江下游麒麟咀站为例计算河道最小生态需水量,并将该模型的计算结果与斜率法和曲率法的计算结果进行了比较分析。结果表明:增江下游河道最小生态需水量阈值范围为 20.8~26.3 m³/s,相应的平均流速范围为 0.42~0.44 m/s;模型计算结果比传统的湿周法适用性更强,且能较好体现生态用水和经济用水的均衡发展。

关键词:湿周法;多目标评价模型;理想点法;尺度系数;最小生态需水量;增江

中图分类号:X171.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2012)05-0006-05

Multi-objective evaluation model for minimum environmental flows based on wetted perimeter method//PENG Tao^{1,2}, CHEN Xiaohong³, WANG Gaoxu², LI Yinghai¹ (1. College of Hydraulic and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 3. Department of Water Resources and Environment, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: A multi-objective evaluation model is established to estimate the minimum environmental flows (MEF) based on the relationship between wetted perimeter and discharge. Regarding the maximum wetted perimeter and the minimum river discharge as objectives for habitat protection and water resources utilization respectively, the model is solved by means of the ideal point method, and MEF in the downstream of Zengjiang River is calculated by the multi-objective evaluation model and compared with that calculated by the slope method and the curvature method. The results show that the MEF threshold at Qilinzui station in the downstream of Zengjiang River ranges from 20.8 to 26.3 m³/s, and the corresponding average velocity is from 0.42 to 0.44 m/s. The results calculated by the multi-objective evaluation model have stronger applicability for determination of MEF than those by the traditional wetted perimeter method, and they can better reflect the balanced development between the ecological and economic water uses.

Key words: wetted perimeter; multi-objective evaluation model; ideal point method; scale coefficient; minimum environmental flow; Zengjiang River

水是人类赖以生存和发展的基本条件,也是维持自然生态系统平衡的基础。随着社会经济不断发展和人口的迅速增长,人类对水资源的需求与日俱增,由于长期挤占生态用水使得河流生态系统结构与功能遭到破坏。因此,合理地安排水资源在社会经济和生态中的比例,维持水资源安全和生态安全,已经成为流域规划和管理中需要解决的根本性问题^[1]。目前,河流生态需水量的计算方法有 200 多种,大致可分为水文学法、水力学法、栖息地法和综合法等^[2-3]。水文学法计算简单,操作方便,较适合宏观规划和资料较为缺乏的地区,但缺乏明确的生态学意义^[4]。栖息地法将生物资料与河流流量相结合,具有明确的物理意义,但生物资料难以获取,且需要花费大量人力和物力。综合法将整个河流视为一个整体生态系统,考虑较全面,但需要花费较大的人力和财力,使用也比较困难。以湿周法^[5-6]为代

基金项目:南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室开放基金(2011491711);国家自然科学基金(50839005);湖北省教育厅自然科学基金(Q20121301);三峡大学人才科研启动基金(KJ2010B029)

作者简介:彭涛(1973—),男(土家族),湖南保靖人,讲师,博士,主要从事水文水资源及生态水文研究。E-mail:pengtao306@163.com

表的水力学方法,现场测量简单,数据容易获得,具有良好的理论基础和生态学意义,但仅考虑了水生生物的水量需求,未综合考虑社会经济与自然生态系统的多方需求,难以适应竞争用水条件下水资源配置的需要。本文在传统湿周法的基础上,引入多目标评价方法^[7-9],建立综合考虑生态用水与经济用水的河道最小生态需水量多目标评价模型,并以增江下游麒麟咀站为例进行分析。

1 湿周法

1.1 基本原理

湿周法以湿周作为栖息地质量的指标来估算河道内生态需水量的最小值。该法的基本假设是只要保护好临界区域水生生物栖息地的湿周,也就能基本满足非临界区域水生生物栖息地保护的基本需求^[5-6]。通过建立河道断面湿周与流量的关系曲线,确定曲线上临界点的位置,估算河道最小生态需水量。

天然河道湿周 P 的计算方法有矩形法、折线法等。本文采用计算精度较高的折线法,计算公式为

$$P = \sum_{i=1}^n \sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2} \quad (1)$$

式中: x 为大断面实测点的起点距; y 为河底高程; n 为分段数。

1.2 标准化流量的选取

为了在确定临界点时消除对坐标轴比例的影响,一般需要将流量和湿周进行标准化,映射到 $[0,1]$ 的范围之内,即湿周与流量均采用相对于某一特征流量及其相应湿周的比值。因此,选择哪一个特征流量就显得十分关键。Gippel 等^[5]建议采用多年平均流量作为标准化流量进行计算。

1.3 湿周与流量关系的建立

假设河流为明渠均匀流,则任意河道的湿周与流量关系式可采用曼宁公式计算:

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

式中: Q 为流量; n 为糙率; A 为过水断面面积; J 为水力坡度; P 为湿周。

由于湿周与流量的关系比较复杂,难以得到两者的直接关系。研究表明,对于规则断面,一般采用对数函数和幂函数对湿周与流量关系进行拟合^[5-6]。对数函数和幂函数的拟合形式可分别近似表示为

$$P' = a \ln Q' + 1 \quad (3)$$

$$P' = Q'^b \quad (4)$$

式中: P' 为相对湿周; Q' 为相对流量(为消除坐标轴比例的影响,将湿周和流量标准化); a, b 为常数。

1.4 湿周与流量关系曲线临界点的确定

确定湿周与流量关系曲线临界点的方法主要有

目估法、斜率法和曲率法^[5]。目估法存在较大的主观性,误差较大,现在很少采用。

斜率法采用湿周与流量关系曲线上斜率为 1 的点作为临界点。即 $dP'/dQ'=1$ 时,对应的流量即为河道最小生态需水量。采用对数函数和幂函数拟合湿周与流量关系得到相应的最小生态需水量 Q'_1, Q'_p 分别为

$$Q'_1 = a \quad (5)$$

$$Q'_p = b^{1/(1-b)} \quad (6)$$

曲率法采用湿周与流量关系曲线上曲率最大的点为临界点。根据曲率的定义,湿周与流量曲线曲率 $K_{\text{曲}}$ 的表达式为

$$K_{\text{曲}} = \frac{\frac{d^2 P'}{dQ'^2}}{\left[1 + \left(\frac{dP'}{dQ'}\right)^2\right]^{3/2}} \quad (7)$$

数学上,曲率最大的点对应于曲率对流量的导数为 0 的点。对式(7)等号右边求导,得到相应于湿周与流量关系曲线上曲率最大的点对应的流量。令曲率对流量的一阶导数为 0,其对应的流量值即为河道最小生态需水量。采用对数函数和幂函数拟合湿周与流量关系得到相应的最小生态需水量 Q'_1, Q'_p 分别为

$$Q'_1 = \frac{a}{\sqrt{2}} \quad (8)$$

$$Q'_p = \left[\frac{2-b}{b^2(1-2b)} \right]^{1/2(b-1)} \quad (9)$$

由于斜率临界点选取的主观任意性,斜率法计算结果存在较大的不确定性^[10],在难以确定斜率临界点时可采用曲率法确定临界点,但曲率法的计算结果偏小。还有,传统湿周法只考虑了河流生态系统对流量的需求,而没有考虑经济用水与生态用水的协调问题^[7]。

2 评价模型

随着社会经济的快速发展,人类对河流的开发利用程度不断加大,水资源利用与河流生态保护的矛盾日益突出。因此,在竞争用水条件下,如何协调社会经济的可持续发展和维持自然生态系统良好的服务功能之间的矛盾,使河流生态保护与经济发展达到双赢,是确定河道生态需水量的关键问题^[11]。在传统湿周法的基础上,Shang^[7]建立了以经济用水量最大(河道流量最小)和河道湿周最大为目标的多元目标评价模型,并用理想点法对模型进行求解。该方法综合考虑了经济用水和栖息地保护对河流流量的需求,有效协调了经济用水与生态用水之间的

矛盾。

多目标评价模型可以表示为

$$\begin{cases} \min Q' \\ \max P' = P'(Q') \\ \text{s. t. } 0 \leq Q' \leq 1 \end{cases} \quad (10)$$

在求解多目标规划的理想点法中,以河道湿周为1(栖息地最大)和河道流量为0(经济用水量最大、河道流量最小)为理想点,以目标函数与理想点之间的距离作为评价函数。每一种情形(P',Q')与理想情形(1,0)的距离为

$$d = [w_1'(1 - P')^r + (w_2 Q')^r]^{1/r} \quad (r \geq 1) \quad (11)$$

式中: w_1, w_2 为权重,考虑到栖息地保护与经济用水处于同等重要的地位,本文取等权重; r 为尺度系数, r 为1和2时,相应的 d 分别为 Hamming 距离、Euclidean 距离。

而求解这个多目标评价模型,即寻求使这个距离 d 达到最小时所对应的流量 Q' 和湿周 P' 。

当 $r=1$ 时, $\min(d_1) = w_1(1 - P') + w_2 Q'$, 采用对数函数和幂函数拟合湿周与流量关系得到的相应最小生态需水量 Q'_1, Q'_p 分别为

$$Q'_1 = a \quad (12)$$

$$Q'_p = b^{1/(1-b)} \quad (13)$$

当 $r=2$ 时, $\min(d_2^2) = [w_1(1 - P')]^2 + (w_2 Q')^2$, 采用对数函数和幂函数拟合湿周与流量关系得到的相应最小生态需水量 Q'_1, Q'_p 分别为

$$a^2 \ln Q'_1 + Q'^2_1 = 0 \quad (14)$$

$$Q'^{b-2}_p (1 - Q'^b_p) = \frac{1}{b} \quad (15)$$

3 计算实例

3.1 计算区域概况

增江是珠江水系东江的一级支流,发源于广东省新丰县七星岭,流域面积3160 km²,自东北向西南流,经龙门县、增城市至增城观海口汇入东江,全长203 km,河道平均比降0.074%。增江流域多年平均降水量为1870 mm,年内分配不均,汛期雨量占全年的80%以上。河川径流量丰富,流域多年平均天然径流量为42.31 亿 m³。增江下游地处经济发达的珠江三角洲地区,增江是当地生活和工农业生产的主要水源,供水人口100 余万人。随着人口快速增长和经济社会的高速发展,增江下游河道外用水需求迅速增加,经济用水和生态用水的矛盾日益加剧,河流生态系统受到威胁。因此,研究增江下游河道最小生态需水量,对维持与修复河流生态系统的基本功能,协调栖息地保护和水资源开发利用的矛盾

具有重要的现实意义。

3.2 断面选择

本文遵循代表性、稳定性和实用性原则,选取麒麟咀站作为增江下游河道控制断面。麒麟咀站断面位于广东省增城市,距离河口33 km,集水面积2866 km²,对于增江与广州市防洪减灾、水资源规划和水质监控具有重要作用。本文选取该站1988 年实测大断面(图1)及相应的水位流量关系资料(图2),计算增江下游河道最小生态需水量。

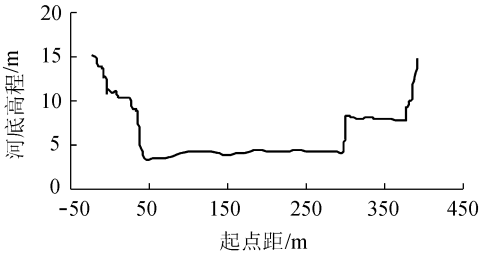


图1 麒麟咀站实测大断面

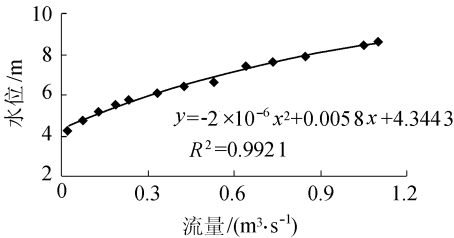


图2 麒麟咀站水位与流量关系曲线

3.3 结果分析

根据麒麟咀站实测大断面资料,分别计算不同水位下的湿周和过水断面面积,查相应水位对应的流量值,选取多年平均流量作为标准化流量,建立麒麟咀站相对湿周与相对流量关系曲线,分别采用对数函数和幂函数拟合曲线方程。经比较,采用对数函数进行曲线方程拟合的决定系数 R^2 为0.8005(图3),相比幂函数拟合效果好($R^2=0.7706$)。已有研究表明,三角形、U形和抛物线形断面的湿周与流量关系符合幂函数变化规律,梯形和矩形断面则符合对数变化规律^[6]。通过分析麒麟咀站的大断面形态,大体呈梯形。因此,采用对数函数进行拟合

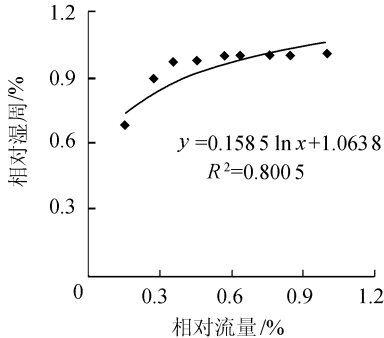


图3 麒麟咀站相对湿周与相对流量关系曲线

与实际情况基本相符且拟合效果较好,可以用来推求增江下游麒麟咀站的最小生态需水量。

根据式(5)和式(8),采用斜率法和曲率法计算得到麒麟咀站最小生态需水量分别为 20.8 m³/s 和 14.7 m³/s, 分别占多年平均流量的 15.9% 和 11.2%。按照式(12)和式(14),利用多目标评价法($r=1$ 和 $r=2$),计算得到麒麟咀站的最小生态需水量分别为 20.8 m³/s 和 26.3 m³/s,分别占多年平均流量的 15.9% 和 20.1% (表 1)。结果表明,利用曲率法计算得到的结果最小,多目标评价法($r=2$)计算结果最大,而多目标评价法($r=1$)计算结果与斜率法相同,但在适用性上更加优越。因此,将尺度系数为 1 和 2 的多目标评价法计算结果作为河道最小生态需水量阈值范围,将更具有实用性和灵活性。

表 1 不同湿周法的计算结果比较

方 法	$Q'/\%$	$P'/\%$	$Q/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$
斜率法	15.9	77.2	20.8
曲率法	11.2	71.7	14.7
多目标评价法($r=1$)	15.9	77.2	20.8
多目标评价法($r=2$)	20.1	80.9	26.3

一般地,在河流的任何一个断面上,河道的某些水力参数,如河宽、平均水深、断面面积、湿周、平均流速等与流量形成简单的函数关系。根据麒麟咀断面流量与上述水力参数的函数关系,计算得到麒麟咀站最小生态需水量对应的水力参数,见表 2。叶富良等^[12]调查研究表明,鲤科鱼类占东江鱼类总数的 50% 左右,是东江的主要经济鱼类。根据相关研究资料^[13],鲤科鱼类喜爱的流速范围为 0.3 ~ 0.7 m/s,本文计算的麒麟咀站最小生态需水量相应平均流速为 0.42 ~ 0.44 m/s,能够满足重要鱼类栖息地保护的需要。

表 2 基于多目标评价法麒麟咀站最小生态需水量及相应水力参数

生态需水量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	水面宽/m	平均 水深/m	断面 面积/ m^2	平均流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
20.8 ~ 26.3	136.9 ~ 147.0	0.34 ~ 0.39	49.6 ~ 60.1	0.42 ~ 0.44

3.4 结果验证

为验证本文采用的多目标评价法的合理性,利用 Tennant 法、Texas 法和河流基本生态环境需水量法等多种方法计算了增江下游麒麟咀站河道最小生态需水量,结果如表 3 所示。Tennant 法的是非现场测定类型的标准设定法,常用于对其他方法的适用性进行验证^[14]。Tennant 法的河流生态需水量推荐值以预先确定的年平均天然流量的百分数为基础,根据多年平均天然流量百分比和栖息地质量对应关系,给出对应于不同栖息地条件的生态需水量推荐值。根据 Tennant 法的计算标准,河道内生态需水量不能小于多

年平均流量的 10%。Texas 法是在 Tennant 法的基础上进一步考虑了季节的变化,将 50% 保证率的月平均流量作为河道最小生态需水量推荐值^[15]。河流基本生态环境需水量法采用河流最小月平均实测径流量的多年平均值作为河流最小生态需水量^[16]。

表 3 不同方法计算生态需水量结果比较

计算方法	生态需水量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	计算方法	生态需水量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)
多目标评价法	20.8 ~ 26.3	Texas 法	21.8
Tennant 法	12.7	河流基本生态环境需水量法	25.3

从表 3 的计算结果来看,基于多目标评价法的计算结果处于 Tennant 法“差”等级之上,与 Tennant 法“中等”等级(多年平均流量的 10% ~ 30%)基本接近,并与 Texas 法和河流基本生态环境需水量法的计算结果相差不大。由此可见,本文利用基于湿周法的多目标评价法计算的麒麟咀站河道最小生态需水量是合理的,可以满足维持河流生态系统基本功能的需要。

3.5 讨论

a. 为了消除坐标尺度的影响,利用湿周与流量关系曲线的临界点计算河流生态需水量时,一般都需要将流量和湿周标准化。因此,选择某一特征流量(如最大流量、多年平均流量、枯水期平均流量等)作为标准化流量对计算结果影响很大。考虑到多年平均流量综合反映了流域面积、气候、下垫面等因素,因此采用多年平均流量作为标准化流量进行计算比较合适。

b. 控制断面的选取及大断面形态对计算结果有很大影响。计算断面的选择应遵循稳定性、代表性和实用性的原则,以反映天然状态下的河流栖息地保护的最小生态需水量。

c. 基于湿周法的多目标评价模型的计算结果与模型求解方法和目标函数权重的选取有直接关系。本文是考虑目标函数等权重情况下的河流生态需水量多目标评价,即将生态用水与经济用水视为同等重要,以单个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,最后利用理想点法进行求解。但如果对各个目标函数赋予不同的权重系数,采用线性加权法和、最大最小法和乘除法等其他方法分别求解多目标评价模型,计算得到的河流生态需水量将会不同,有关结果还需要通过实测资料进一步验证对比。

4 结 论

a. 以传统湿周法为基础,引入多目标评价模型估算河道最小生态需水量,采用理想点法进行求解。

以增江下游麒麟咀站为例,确定其河道最小生态需水量范围为 20.8 ~ 26.3 m³/s,占多年平均流量的 15.9% ~ 20.1%,相应的平均流速范围为 0.42 ~ 0.44 m/s。该方法综合考虑了生态用水和经济用水的协调发展,这对于水资源供需矛盾突出的河流的生态需水量计算具有一定的应用价值。

b. 利用多目标评价方法,给出了河道最小生态需水量的区间。河流水生生物对于流速和水深的变化具有适应性,维持河流基本功能的最小生态需水量不应是一个特定值,而应当是一个合理的阈值区间,这更有利于受人为扰动较大的河流栖息地的修复与保护。

c. 基于湿周法的多目标评价模型计算河道最小生态需水量是可行的。通过与 Tennant 法、Texas 法及河流基本生态环境需水量法比较,该模型计算结果与上述方法基本接近,说明了该模型的计算结果具有合理性,相比传统的湿周法适用性更强。

参考文献:

[1] 陈敏建. 流域生态需水研究进展[J]. 中国水利,2004, 55(20) :25-26.

[2] 杨志峰,张远. 河道生态环境需水研究方法比较[J]. 水动力学研究与进展:A 辑,2003,18(3) :294-301.

[3] THARME R E. A global perspective on environmental flow assessment: emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for river [J]. River Research and Applications,2003,19(5) :397-441.

[4] 杨志峰,于世伟,陈贺,等. 基于栖息地突变分析的春汛期生态需水阈值模型[J]. 水科学进展,2010,21(4) : 567-574.

[5] 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.

[6] 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.

[7] SHANG Songhao. A multiple criteria decision making approach to estimate minimum environmental flows using wetted perimeter[J]. River Research and Applications, 2008,24(1) :54-67.

[8] 郝增超,尚松浩. 基于栖息地模拟的河道生态需水量多目标评价方法及其应用[J]. 水利学报,2008,39(5) : 557-560.

[9] 尚松浩. 确定河流生态流量的几种湿周法比较[J]. 水利水电科技进展,2011,31(4) :41-44.

[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] 连煜,王新功,黄翀,等. 基于生态水文学的黄河口湿地生态需水评价[J]. 地理学报,2008,63(5) :451-461.

[12] 叶富良,罗平,叶星. 东江鲤鱼生物学[J]. 湛江水产学院学报,1992,12(2) :22-28.

[13] 刘建康,何碧梧. 中国淡水鱼类养殖学[M]. 北京:科学出版社,1992.

[14] TENNANT D L. Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources [J]. Fisheries, 1976,1(4) :6-10.

[15] MATTHEWS R C, BAO Y. The texas method of preliminary instream flow assessment [J]. Rivers, 1991, 2(4) : 295-310.

[16] 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) :495-500.

(收稿日期:2012-02-09 编辑:周红梅)

《水利水电科技进展》征订启事

(邮发代号:28-244, CN32-1439/TV, ISSN1006-7647, 双月刊,A4 开本)

《水利水电科技进展》由河海大学主办,是中国科学引文数据库(CSCD)来源期刊,全国中文核心期刊,中国科技核心期刊,RCCSE 核心期刊,全国水利系统优秀期刊,华东地区优秀期刊,江苏省优秀期刊。主要刊登水科学、水工程、水资源、水环境、水管理方面的科技论文,主要栏目有水问题论坛、研究探讨、工程技术、水管理、专题综述、国外动态等,适合水科学、水工程、水资源、水环境领域的科研、工程、管理人员以及大专院校师生阅读。

《水利水电科技进展》由邮局发行,邮发代号:28-244,2013 年每期定价 12 元,全年 6 期共计 72 元。可在全国各地邮局订阅,也可直接向编辑部订阅。

编辑部地址:南京市西康路 1 号 河海大学《水利水电科技进展》编辑部
邮政编码:210098
电话/传真:025-83786335
E-mail: jz@hhu. edu. cn
http://kkb. hhu. edu. cn/web/indexjz. asp? d_id=5