

横断面概化对河道内生态需水计算的不确定性评估 ——以云南昆明海口河为例

王明净¹, 袁 鹏², 张 帆³, 李金城¹, 高 伟¹

(1. 云南大学生态与环境学院, 云南省高原山地生态与退化环境修复重点实验室, 云南 昆明 650091;

2. 澄江县环境监测站, 云南 玉溪 652500;

3. 昆明市生态环境科学研究院, 云南 昆明 650032)

摘要:河道生态需水是维持河流生态系统健康的水量基础, 计算方法的准确性成为影响生态需水的关键因素。湿周法是一种基于流量与湿周关系的水力学模型, 在确定两者关系时多采用与实际河道断面有差异的概化断面计算, 可能导致生态需水计算的不确定性; 评估不同河道断面概化方法的影响, 对指导断面概化具有十分重要的意义。基于云南昆明海口河实测大断面资料, 采用4种常见断面概化方法计算了生态需水。结果显示: (1) 河道横断面概化对湿周法生态需水的计算结果有显著影响, 4种断面概化方法得到的河道生态需水差异显著, 生态需水结果最大相差88.29倍; (2) 与未概化结果相比, 三角形概化法得出的生态流量偏差最高, 可相差13.65 m³/s, 矩形概化法得出的生态流量偏差最低, 最低仅相差0.81 m³/s; (3) 断面概化对生态需水的影响程度还受拐点判别方法的影响, 斜率法计算结果均大于曲率法, 其中三角形概化方法受拐点判别影响最大, 两种方法的估算结果相差11.65 m³/s, 矩形概化不同拐点判别结果仅相差0.08 m³/s。研究表明, 在湿周法计算生态需水的应用中, 断面概化方法对结果的影响显著, 且不同概化方法的影响程度不同, 合理概化断面在湿周法中是可行的, 综合考虑了生态流量和湿周合理性, 推荐采用矩形对海口河断面进行概化。

关键词:湿周法; 生态需水; 横断面概化; 海口河

中图分类号:X171.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2021)01-0010-07

河流是重要的淡水生态系统类型, 为我国经济社会发展提供了丰富的生态系统服务。随着经济社会的不断发展, 过度取水、水库电站建设、跨流域调水等水资源开发利用活动日益频繁, 导致河流的水文情势发生显著变化, 生态系统健康受到严重影响(Sabater et al, 2018)。保障河流生态需水成为维护我国河流生态系统健康的重要内容。生态需水的概念最早由Covich(1993)提出, 生态需水即保证恢复且维持生态系统健康所需要的水量。在河流生态需水研究中, 其他等同的概念还有环境流量(唐瑜等, 2018)、生态径流量(张正浩等, 2016)、生态流量(洪思扬等, 2018)等。目前, 生态需水已成为确定水资源开发利用的重要依据, 也是合理配置水资源的技术支撑。生态需水研究的重要基础是生态需水量的

计算。然而, 由于缺乏统一规范和标准, 计算方法成为生态需水研究的重要不确定性来源之一。根据计算方法原理的差异, 河流生态需水主要分为水文学法、水力学法、栖息地法、整体分析法4种类型(钟华平等, 2006)。由于方法原理、资料需求、保护目标不同, 目前主流的河流生态需水计算方法适用范围差异较大。

湿周法是一种常用的水力学方法, 主要利用河道横断面形态数据, 对河流流量、生物信息等数据要求不高, 在数据较为缺乏的区域具有广泛的适用性。由于理论假设明确、方法操作简便, 该方法已在国内外多个区域和多种规模的河流生态需水计算中得到应用(Gippel & Stewardson, 1998; Shang, 2010; 吉小盼和蒋红, 2018; 王庆国等, 2018)。湿周法以流量与湿周关系曲线为基础, 把曲线的拐点所对应的流量作为最小生态流量。因此, 在计算河流生态需水时, 影响湿周法计算结果准确性的主要因素是流量-湿周关系构建及其拐点识别。目前对湿周法计算方法的改进主要集中于如何识别流量与湿周曲线的拐点, 常用的有目估法、斜率法、最大曲率法和多目标优化法、经验法(Gippel & Stewardson, 1998; 于鲁

收稿日期: 2018-12-24 修回日期: 2020-11-03

基金项目: 国家自然科学基金(41701631); 云南省科技计划项目重点研发计划(2018BC002)。

作者简介: 王明净, 1996年生, 女, 硕士研究生, 研究方向为生态水文。E-mail: mingjingw@mail.ynu.edu.cn

通信作者: 高伟, 1986年生, 男, 博士, 讲师, 主要从事流域环境过程模拟研究。E-mail: gaowei@ynu.edu.cn

冀等,2016;吉小盼和蒋红,2018)。目估法的主观性太强,精确度往往不高。为解决这一问题,Gippel & Stewardson(1998)提出用几何学方法来确定拐点,提出了斜率法和最大曲率法。国内学者对确定拐点的几何学方法进行了研究,认为用斜率法和曲率法确定流量-湿周曲线的拐点是可行的(郭文献和夏自强,2009;尚松浩,2011)。在流量-湿周关系建立中,河道断面形状是重要影响因素。由于天然河道呈不规则形状,出于简化计算的目的,往往先将河道断面进行概化,再进行流量和湿周计算(胡鹏等,2010)。然而,对河道横断面的概化没有统一的标准,目前主要通过主观判断来选择概化方法,因此具有高度不确定性。

已有研究表明,不同河道横断面概化方法得到的湿周法生态需水量存在较大差异(吉利娜等,2006),但目前尚缺乏针对该问题的系统研究。因此,为了更加准确地计算生态需水量,降低计算方法带来的不确定性,有必要定量评估河道横断面概化方法带来的影响。本研究以云南省昆明市海口河为例,基于实测大断面资料和4种常见概化断面,分别计算每种断面形态下的生态流量;最后对比不同概化断面结果的差异性,从而评估断面概化对湿周法生态需水计算结果的影响,以期为湿周法计算中河道横断面概化选择提供指导,同时进一步完善湿周法的方法体系。

1 材料与方法

1.1 区域概况

海口河是昆明市滇池唯一的天然出口及主要排水通道,起点是海口中滩闸,终点为石龙坝水力发电站,长度为14.4 km,为螳螂川的上游河段(图1)。1996年以前,海口河是滇池草海和外海的唯一出流途径。1996年海埂大坝将草海和外海隔离,草海改从西园隧道出流,海口河成为外海的出口。因此,海口河的水源是滇池外海,其流量主要受滇池水文控制。由于外海出口建有中滩闸,海口河的水文受到人为控制,2010-2013年出现连续多年的极低流量情况,严重威胁河流生态系统健康。

1.2 湿周法概述

湿周法是利用河流断面湿周(过水断面中流体与河床接触的周长)作为衡量栖息地质量的指标,基于流量-湿周关系来估算河道内生态需水。湿周法的基本假设是:湿周与水生生物栖息地的有效性有直接联系,只要保持一定水生生物栖息地的湿周,就

能满足其正常生存的需求;在湿周法的假设下,湿周可以作为河流生态系统健康的表征指标。湿周法通过收集河道断面参数(几何尺寸和流量数据)来确定流量和湿周的关系,建立河道流量-湿周关系曲线,一般认为该曲线的拐点就是该河道的最小生态流量。在流量-湿周曲线上,当流量小于拐点值时,湿周随着流量的增加而急剧增加,流量超过拐点值之后,湿周随着流量的增加变得十分缓慢(Gippel & Stewardson, 1998)。因此,可以认为在这个流量水平上,已经能够满足河道中大部分生物对水量的要求,只要保护好临界值的湿周区域,就能保护好非临界值区域内大部分生物的栖息地(吉利娜等,2010)。湿周法受河道断面形状的影响较大,比较适合于河床形状稳定的宽浅形河道;如果河床不稳定,就不能得到稳定的流量-湿周关系,河道的宽深比也有最适范围,宽深比较大的河道,不适合直接用湿周法计算河道内生态流量,还应该考虑水深的影响(肖玉成等,2010)。



图1 海口河地理位置

Fig.1 Location of Haikou River

1.3 流量-湿周关系建立

河道湿周与流量的关系取决于河道横断面形状,可以直接利用实测流量数据建立流量-湿周关系,但需要的数据较多,计算过程复杂。目前对于明渠均匀流,流量-湿周关系主要采用曼宁公式(刘苏

峡等, 2006) 表达:

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

式中: Q 为河道流量 (m^3/s); n 为曼宁糙率系数; A 为过水面积 (m^2); P 为河流断面的湿周 (m); S 为水力坡度 (水面坡降, 河流为均匀流时即为河道底坡)。

然而, 在实际计算中, 由于河道横断面并非都是规则形状, 直接用曼宁公式计算较为复杂。为了简化计算, 目前常将不规则河道横断面概化为规则的形状, 再带入曼宁公式计算, 可以得到相对简单的经验公式。一般的河道断面形状可概化为等腰三角形、等腰梯形、矩形和抛物线形 4 种, 分别对应的流量和湿周关系公式为:

$$Q = \frac{\sqrt{S}}{32n} (\sin\theta)^{5/3} P^{8/3} \quad (2)$$

$$Q = \frac{\sqrt{S}}{n} \left[\frac{d(P-d)}{2\sqrt{m^3+m}} + \frac{(P-d)^2}{4(m^2+1)} \right]^{5/3} P^{-2/3} \quad (3)$$

$$Q = \frac{\sqrt{S}}{3.17n} [(P-B)B]^{5/3} P^{-2/3} \quad (4)$$

$$Q = \frac{\sqrt{S}}{n} \left[-\frac{a_1}{3}(x_1^3 - x_0^3) - \frac{b_1}{2}(x_1^2 - x_0^2) + (h - c_1)(x_1 - x_0) \right]^{5/3} P^{-2/3} \quad (5)$$

式中: B 为水面宽度 (m); m 为边坡系数; d 为断面底宽 (m); θ 为断面夹角; a_1 、 b_1 、 c_1 为抛物线函数参数; h 为水深 (m); x_1 、 x_0 为左岸、右岸起点距 (m); 其他参数含义同前。

在计算中, 为了消除坐标尺度的影响, 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 P_m 的比例来表示。一般用对数函数或幂函数拟合流量和湿周的关系 (Gippel & Stewardson, 1998; 张新华等, 2011)。

对数函数拟合式为:

$$P_r = \alpha \ln Q_r + \beta \quad (6)$$

幂函数拟合式为:

$$P_r = \delta Q_r^\lambda + \varphi \quad (7)$$

式中: P_r 为相对湿周, $P_r = P/P_{\max}$; Q_r 为相对流量, $Q_r = Q/Q_{\max}$; α 、 β 、 δ 、 λ 、 φ 为待定参数, 采用最小二乘法确定。

1.4 流量-湿周曲线拐点确定

流量-湿周关系曲线的拐点确定方法主要有目估法、斜率法、曲率法和多目标评价法等 (Gippel & Stewardson, 1998; Shang, 2010); 其中, 斜率法和曲率法相对简单, 也是湿周法中用于确定流量-湿周

曲线拐点的常用方法。本研究采用斜率法 (斜率取 1) 与曲率法来确定海口河河道流量-湿周曲线的拐点。用斜率法确定拐点时, 其对应的生态流量 Q_e 在幂函数和对数函数两种拟合关系中的计算公式不同 (张新华等, 2011)。由于计算结果 Q_r 是相对流量, 最后还要将相对流量转化为实际流量单位, 计算公式如下:

$$Q_e = Q_r \times Q_{\max} \quad (8)$$

式中: Q_e 为生态流量 (m^3/s 或 m^3/a); Q_r 为生态需水的相对流量; Q_{\max} 为断面最大流量 (m^3/s 或 m^3/a), 可取历史实测最高流量或漫滩流量。

2 结果与分析

2.1 大断面形态与概化

根据海口河河道断面实测数据绘制的大断面形态 (85 高程) 如图 2 所示。河道断面数据来源于《中华人民共和国水文年鉴 (第 6 卷)》2015 年的海口 (大烟囱) 站数据。从图 2 可以看出, 海口河河道断面呈不规则形状, 类似梯形、矩形或抛物线型。

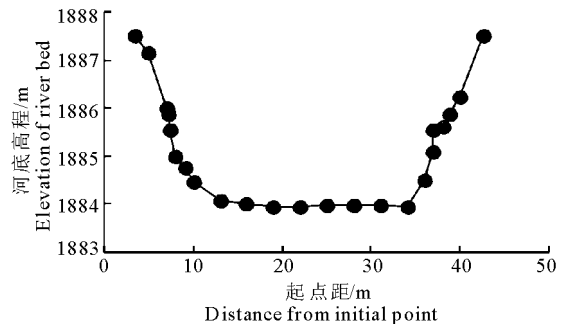


图 2 海口河大断面形态

Fig.2 Cross-section of Haikou River

根据当前河道概化常用方法 (翟东汉等, 2018), 并基于最小二乘法, 将海口河横断面 (85 高程) 分别概化为三角形 (图 3-a)、梯形 (图 3-b)、矩形 (图 3-c)、抛物线形 (图 3-d)。

本研究对断面的具体概化过程如下: (1) 先设定概化方程, 确定待定系数, 如三角形的待定系数为两条直线的 3 个点坐标; (2) 以所有实测点与概化线之间的距离平方和为目标函数, 采用优化算法, 计算目标函数最小时的待定系数; (3) 根据待定系数确定方程及其曲线形状。

2.2 流量-湿周关系构建

流量-湿周关系建立的方法如下: 设置从 0 到最大实际水深的深度梯度, 根据曼宁公式、横断面概化经验公式和实测数据, 计算不同深度下的流量和湿周数据。计算过程中需要的水面坡降 (S) 根据海口

河 DEM 和河道长度估算,选择典型河段长 5 477 m,河道段首高程1 893 m,断尾高程1 879 m,

S 取 0.002556。海口河曼宁系数(Mohamoud & Parmar,2006)采用经验公式计算,取 0.03。

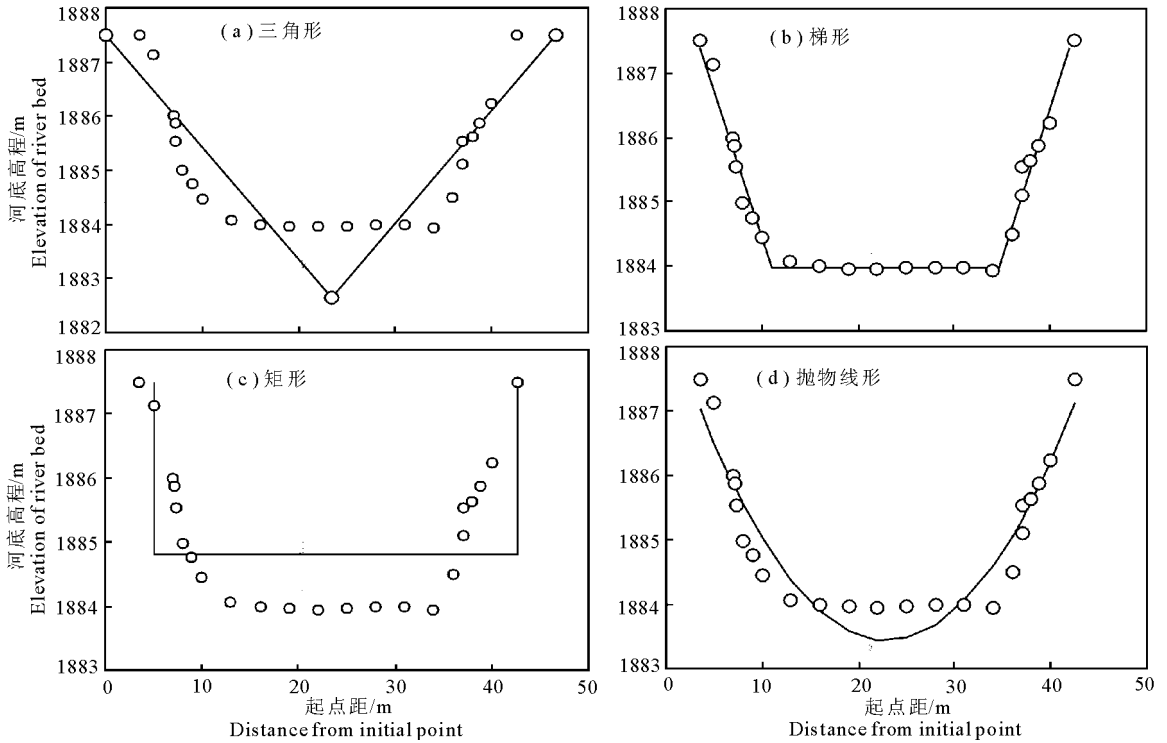


图 3 海口河河道横断面概化

Fig.3 Cross-section generalizations of Haikou River

为了消除坐标尺度的影响,采用相对流量和相对湿周建立流量-湿周关系曲线,并分别用幂函数或对数函数来拟合。一般来说,对于矩形断面或梯形断面,流量和湿周采用对数关系拟合,三角形和抛物线形断面的流量和湿周关系采用幂函数关系拟合(Gippel & Stewardson, 1998)。本研究分别采用两种函数进行关系拟合,最后取可决系数高的函数。经计算,未经概化的海口河流量与湿周关系如图 4 所示。

结果表明,斜率取 1 和最大曲率的结果较为接近,对应的最小生态需水量分别为 $1.36 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $0.98 \text{ m}^3/\text{s}$,考虑斜率法和曲率法计算结果较为接近,本研究综合斜率法和最大曲率法计算结果,取两者的算术平均值作为海口河生态需水的计算结果,即 $1.17 \text{ m}^3/\text{s}$,折合水量为 $3\ 696.53 \text{ 万 m}^3/\text{a}$ 。

不同断面的相对流量和相对湿周关系如图 5 所示。图 5 - a、b、c、d 分别为三角形、梯形、矩形、抛物线形断面的流量-湿周曲线图。

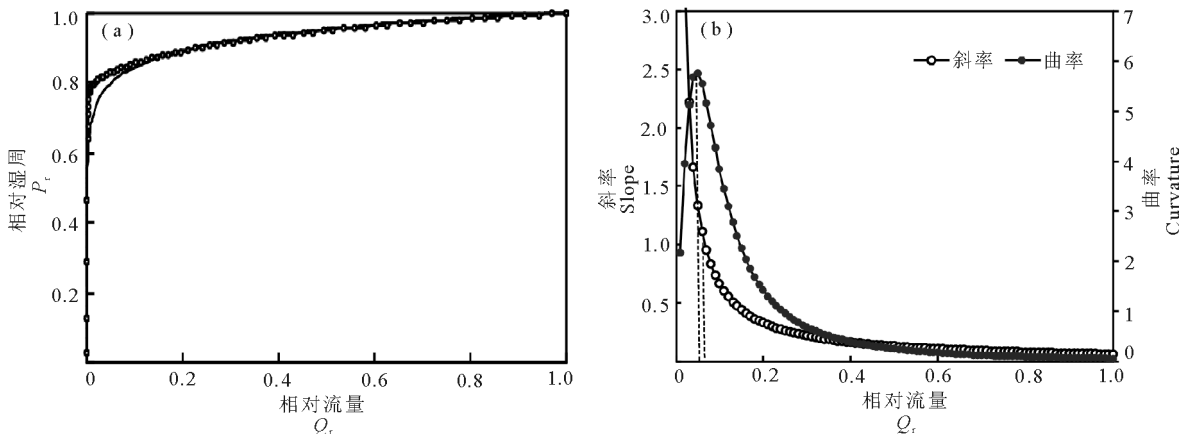


图 4 基于实测大断面资料的海口河相对流量、相对湿周、斜率、曲率关系

Fig.4 Relationship between discharge and wetted perimeter, slope and curvature of wetted perimeter for Haikou River based on measured cross-section data

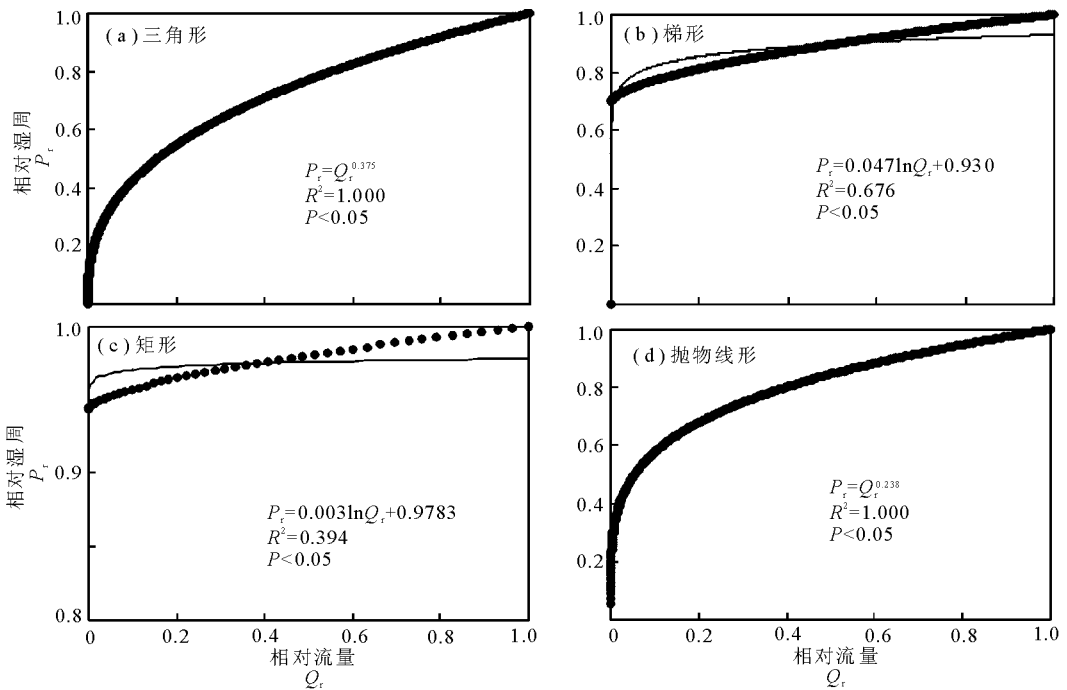


图5 不同断面概化的海口河流量-湿周关系

Fig.5 Relationship between discharge and wetted perimeter in Haikou River using different channel geometries

2.3 湿周法生态流量计算

在流量-湿周关系拟合函数基础上,采用斜率法和最大曲率法分别对不同横断面的拐点相对流量进行计算(表1)。为了方便比较分析,表1中还列出了生态流量占天然径流量的比例。最后给出了未经断面概化的结果,作为本次研究的参考数据。

表1 不同断面概化的海口河河道内生态流量

Tab.1 Ecological water requirement in Haikou River with different cross-section generalization

断面形状	斜率法		最大曲率法	
	$Q_e / m^3 \cdot s^{-1}$	$Q_e : Q_{max} / \%$	$Q_e / m^3 \cdot s^{-1}$	$Q_e : Q_{max} / \%$
三角形	15.01	69.4	3.36	15.5
梯形	3.38	15.6	2.39	11.1
矩形	0.25	1.1	0.17	0.8
抛物线形	10.96	50.7	4.95	22.9
未概化	1.36	6.3	0.98	4.5

表1可见,不同断面概化方法得到的河道生态需水差异显著。斜率法得到的河道生态需水量整体高于最大曲率法,两种方法的4种断面概化得到的生态需水最大相差88.29倍;其中,梯形、矩形、抛物线形概化后形状与实测断面相近,但计算得到的生态需水差异明显,主要原因是不同概化方法得到的断面形状存在不同程度的失真(图3)。梯形概化与实测断面形状最为接近,矩形概化缩小了断面周长,抛物线形概化放大了断面周长。从相对流量和相对湿周拟合优度看,三角形和抛物线形拟合的效果较好,但三角形断面流量-湿周关系曲线的拐点不明显。

从估算的结果来看,与未概化结果相比,不同断面概化方法估算的生态流量都有一定偏差。其中,三角形概化估算的生态流量偏差最大,与未概化结果最大相差13.65 m³/s(斜率法);矩形概化估算的生态流量偏差最小,与未概化结果最小仅相差0.81 m³/s(曲率法)。总体来看,用不同的几何形状对海口河河道进行概化后,计算得到的生态流量结果之间差异较大,说明河道横断面概化对湿周法计算河道生态流量有显著影响。

湿周法计算生态流量时最重要的是确定流量-湿周曲线的拐点,再根据拐点确定生态流量,由于确定拐点的方法不同,计算结果也会有所差异。有学者在研究中也发现,用湿周法计算生态需水时,无论哪种形状的断面,斜率法的估算结果总是大于曲率法(刘苏峡等,2006;尚松浩,2011);本研究结果与该结论一致。斜率法和最大曲率法对不同断面计算结果的影响也存在差异,海口河的研究结果显示,两种拐点判别方法对矩形断面估算结果影响最小,仅相差0.08 m³/s;对三角形断面估算结果影响最大,结果相差11.65 m³/s。

2.4 生态流量计算结果的合理性

基于湿周法的假设,在推荐的生态流量下,能够保留相对较高比例的湿周。在本研究计算结果中,梯形、矩形和抛物线形断面估算的生态流量都能够提供较大的湿周,有利于生物生境的保护;三角形概

化得到的生态流量对应的相对湿周在50%以下,湿周保存率较小。因此,从能否提供较大湿周方面考虑,梯形、矩形、抛物线形断面的计算结果更值得参考。然而,梯形和抛物线形概化的结果虽然能保证较大的湿周比例,但计算得到的生态流量超出了海口河天然径流量,不符合最小生态流量的原则。Tennant法是一种水文学方法,将多年平均流量的60%~100%作为推荐最佳生态流量,以保证河道中鱼类的生境要求(Tennant, 1976)。基于此,三角形和抛物线形断面估算的生态流量占天然径流量的比值最接近60%。

3 结论

(1)河道横断面概化方法对湿周法生态需水的计算结果具有显著影响,是影响湿周法应用不确定性的关键因素。海口河不同断面概化方法计算结果存在较大差异,三角形和抛物线概化得到的生态流量较大,梯形和矩形横断面估算的生态流量较小。

(2)与未经断面概化的计算结果相比,除矩形外,其他概化图形得到的生态流量均大于海口河实测断面计算结果;其中,三角形和抛物线形概化法得出的生态流量偏差最高,矩形概化法得出的生态流量偏差最低。

(3)河流横断面概化对生态需水计算结果的准确性受拐点判别方法的影响。在海口河案例中,三角形概化对拐点判别方法的敏感度最大,矩形概化敏感度较小。

(4)合理概化断面在湿周法计算中是可行的,综合考虑生态流量的计算结果和对应的相对湿周,推荐采用矩形对海口河河道断面进行概化,可以简化计算过程并得到相对合理的参考生态流量。

参考文献

郭文献,夏自强,2009.对计算河道最小生态流量湿周法的改进研究[J].水力发电学报,28(3):171-175.

洪思扬,王红瑞,朱中凡,等,2018.基于栖息地指标法的生态流量研究[J].长江流域资源与环境,27(1):168-175.

胡鹏,崔小红,周祖昊,等,2010.流域水文模型中河道断面概化的原理和方法[J].水文,30(5):38-41.

吉利娜,刘苏峡,吕宏兴,等,2006.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),34(2):124-130.

吉利娜,刘苏峡,王新春,2010.湿周法估算河道内最小生态需水量——以滦河水系为例[J].地理科学进展,29(3):

287-291.

吉小盼,蒋红,2018.基于湿周法的西南山区河流生态需水量计算与验证[J].水生态学杂志,39(4):1-7.

刘苏峡,莫兴国,夏军,等,2006.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,61(3):273-281.

尚松浩,2011.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,31(4):41-44.

唐瑜,宋献方,Bauer-Gottwein P,等,2018.基于水经济价值的长江口环境流量探讨[J].自然资源学报,33(3):467-477.

王庆国,王超,李克锋,等,2018.二维水力模拟在河流生态需水湿周法中的应用[J].人民长江,49(7):16-19.

肖玉成,张新华,严瑞平,等,2010.湿周法在超宽浅型河道生态需水计算中的应用[J].人民黄河,32(10):87-88.

于鲁冀,陈慧敏,王莉,等,2016.基于改进湿周法的贾鲁河河道内生态需水量计算[J].水利水电科技进展,36(3):5-9.

翟东汉,何武全,李刚,2018.平底抛物线形复合渠道水力最佳断面计算方法[J].排灌机械工程学报,36(3):204-208.

张新华,李红霞,肖玉成,等,2011.河流最小生态基础流量计算方法研究[J].中国水利水电科学研究院学报,9(1):66-73.

张正浩,张强,肖名忠,等,2016.辽河流域丰枯遭遇下水库调度[J].生态学报,36(7):2024-2033.

钟华平,刘恒,耿雷华,等,2006.河道内生态需水估算方法及其评述[J].水科学进展,17(3):134-138.

Covich A, 1993. Water in Crisis [C]//A Guide to the World's Fresh Water Resources.

Gippel C J, Stewardson M J, 1998. Use of wetted perimeter in defining minimum environmental flows[J]. River Research & Applications, 14(1):53-67.

Mohamoud Y M, Parmar R S, 2006. Estimating Streamflow and Associated Hydraulic Geometry, the Mid-Atlantic Region, USA 1[J]. Journal of the American Water Resources Association, 42(3):755-768.

Sabater S, Bregoli F, Acuña V, et al, 2018. Effects of human-driven water stress on river ecosystems: a meta-analysis[J]. Scientific Reports, 8(1): 1-11.

Shang S H, 2010. A multiple criteria decision-making approach to estimate minimum environmental flows based on wetted perimeter[J]. River Research & Applications, 24(1):54-67.

Tennant D L, 1976. Instream Flow Regimens for Fish, Wildlife, Recreation and Related Environmental Resources[J]. Fisheries, 1(4):6-10.

Effect of Different Geometries in Generalizing Cross-sections for Calculating River Flow: A Case Study of Haikou River in Kunming, Yunnan Province

WANG Ming-jing¹, YUAN Peng², ZHANG Fan³, LI Jin-cheng¹, GAO Wei¹

(1.College of Ecology and Environmental Sciences, Yunnan Key Laboratory for Plateau Mountain Ecology and Restoration of Degraded Environments,

Yunnan University, Kunming 650091,P.R. China;

2.Environmental Monitoring Station of Chengjiang County, Yuxi 652500,P.R.China;

3.Kunming Institute of Ecology Environmental Science, Kunming 650032,P.R.China))

Abstract: Meeting the ecological water requirement of rivers is crucial for maintaining the health of river ecosystems, and flow calculations have become an important issue in river protection research. The wetted perimeter approach uses a hydraulic model to estimate river flow based on the relationship between discharge and wetted perimeter, but the accuracy of flow estimate depends on accurately representing the river cross-section. However, river beds are highly irregular and the cross-sectional area is difficult to determine. This leads to uncertainty in calculating flow and, therefore, generalizing the geometry of the cross-section is a critical step in flow calculations. In this case study of the Haikou River at Kunming City, we calculated the ecological water requirement using cross section measurement data and test its fit to four common cross-section geometries. The objective was to assess the effect of different transect generalizations on the calculated flow and provide guidance for selecting an appropriate transect generalization. Results show that: (1) The generalization used for the cross-section significantly effects the calculated flow, a factor of 88.29 between the smallest and largest result; (2) Compared with the measured cross-section data, the triangular generalization resulted in the largest deviation (13.65 m³/s), and the rectangular generalization had the lowest deviation (0.81 m³/s); (3) The influence of transect generalization on the ecological water requirement is also affected by the slope and inflection point. Generally, a slope of 1 is higher than the maximum curvature of the stream bed. In terms of the four generalization methods, the triangular generalization was affected dramatically, with the difference of 11.65 m³/s between the two different inflection point determinations, and the rectangular generalization only had the difference of 0.08 m³/s. The generalization giving the best flow estimate is the generalization with the geometry that best approximates the shape of the river cross-section. For the Haikou River, a rectangular geometry gave the best flow estimate and triangular geometry gave the worst estimate. Thus we recommend a rectangular geometry for generalizing the Haikou River cross-section.

Key words: wetted perimeter approach; ecological water requirement; cross transect generalization; Haikou River