

湿周法估算河道内最小生态需水量 ——以滦河水系为例

吉利娜¹, 刘苏峡², 王新春¹

(1. 北京市北运河管理处, 北京 101100;

2. 中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101)

摘 要:湿周法是以湿周作为衡量栖息地质量的指标来估算河道内流量的最小值。通过建立河道断面湿周与流量的关系曲线, 依据该曲线确定变化点的位置, 估算最小需水量的推荐值。根据国外对湿周法的研究应用, 分别采用对数函数和幂函数关系对湿周一流量关系进行拟合。从理论上分析了湿周法采用斜率为1法和曲率最大法确定变化点的不同, 得到不论采用对数函数还是幂函数关系拟合流量—湿周关系, 斜率为1法的估算结果都要大于曲率最大法的估算结果。把湿周法应用到滦河流域两个水文站, 以曲率最大法确定变化点, 估算了两个站点的最小生态需水量。结果表明: ①对数函数拟合流量—湿周关系得到的最小生态需水量都要大于幂函数拟合流量—湿周关系的结果; ②湿周法估算的生态需水量都能满足河道内最小生态需水的要求, 且较小河流对生态需水量的要求相对较大河流更高。

关 键 词:湿周法; 最小生态需水量; 斜率为1法; 曲率最大法

1 引言

生态(环境)需水量不仅是水资源配置的一个基本理论问题, 更是水资源管理中的一个实际应用问题^[1-4]。生态(环境)需水量是限定水资源最大开发利用的基本依据, 也是实现水资源合理规划与配置的技术支持^[5]。目前, 由于生态(环境)需水量的理论和计算方法尚不成熟, 还没有明确的定义和系统评价指标体系, 缺乏完善的定量计算方法^[6-7]。用于计算河道内生态需水量的方法有200多种^[8]。随着近几年的深入研究, 也产生了一些新方法^[9-10], 大体可分为四类, 即水文学方法、水力学方法、栖息地法和综合法。水文学方法相对最为简单, 对数据要求较低, 只需要多年的天然径流数据。但是由于近年来人类活动的影响, 现在能够保持天然径流状态的河流已经很少, 河道的水文序列基本被破坏, 不再具有一致性。栖息地法和综合法在估算河道生态需水时, 考虑了水文、生态等多种因素, 结果可靠, 但是要求的数据量大, 模型复杂, 需要大量的财力物力, 鉴于

我国目前的现实条件, 这两种方法都难以实现。以湿周法为代表的水力学方法, 对数据量要求不大, 数据容易获得, 而且不受人类活动对河道径流影响的限制, 所以本文考虑对已经被人类活动严重干扰的滦河水系用湿周法进行生态需水量估算。

滦河水系水资源相对丰沛, 且开发利用较晚, 流域生态环境优美。伴随着经济社会的快速发展, 滦河水资源得到迅速开发利用, 在人们获取高额经济效益和社会效益的同时, 滦河生态与环境已趋于严重恶化, 滦河中下游由原来的常年性河流逐渐变成了季节性河流, 河道干涸、地下水位下降、水土流失、湿地减少、河口淤积日益突出^[11]。因此, 恢复滦河水生态与环境刻不容缓, 而估算河道内最小生态需水量对于生态恢复具有重要的现实意义, 并且能为生态恢复目标的制定提供较为科学的理论依据。目前该水系所作生态需水量研究多是针对整个流域^[12], 在河道内生态需水量计算方面也无采用湿周法的先例, 本文采用湿周法估算滦河水系河道内生态需水量, 是一种新的尝试, 希望对估算该水系的河道内生态需水量有借鉴意义。

收稿日期: 2009-07; 修订日期: 2009-12.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40671032, 40830636); 国家 863 计划课题 (2006AA10Z228); 国家 973 计划课题 (2010CB428400-4, 2009CB412307)。

作者简介: 吉利娜 (1978-), 女, 陕西临潼人, 硕士, 主要从事水文水资源方面研究。E-mail: jilinasx@126.com

通讯作者: 刘苏峡 (1965-), 女, 湖北黄陂人, 博士, 主要从事界面水文过程与模拟、生态需水量等方面的研究。E-mail:

liusx@igsnrr.ac.cn

2 湿周法的理论基础

2.1 基本原理

湿周法是以湿周作为衡量栖息地质量的指标来估算河道内流量的最小值。该法的基本假设是湿周和水生生物栖息地的有效性有直接的联系,保证好一定水生生物栖息地的湿周,就能满足水生生物正常生存的要求^[13]。通过建立河道断面湿周与流量的关系曲线,依据该曲线确定变化点的位置,估算最小需水量的推荐值。湿周一流量关系可从多个河道断面的几何尺寸—流量关系实测数据经验推求,或从单一河道断面的一组几何尺寸—流量数据中计算得出^[14-15],也可以借助曼宁公式求得^[16]。通常,湿周随着河流流量的增加而增大,但是,当湿周达到或超过某临界值后,河流流量的迅速增加也只能引起湿周的微小变化。注意到这一河流湿周临界值的特殊意义,我们只要保护好作为水生物栖息地的临界湿周区域,也就基本上满足非临界区域水生物栖息保护的最低需求。湿周法的断面一般选在为单一河道断面的浅滩^[16-18]。

2.2 湿周一流量关系的建立

湿周法的最根本的工具就是湿周一流量关系,能否建立单一、稳定的湿周一流量关系是该法的关键。湿周法受河道断面形状的影响,同时要求河床形状稳定,否则没有稳定的湿周一流量关系曲线,也就没有固定的增长变化点^[19]。假设河流处于明渠均匀流,则任意河道的湿周和流量可以借助满宁公式表示为:

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

式中: Q 为流量, m^3/s ; S 为水力坡度; n 为糙率; A 为过水断面面积, m^2 ; P 为湿周, m 。

由于过水断面面积 A 是湿周 P 的函数,对于上式我们不能推导出流量和湿周的直接关系。一般的天然河床断面,都不是规则的断面形式,多为宽浅的近似矩形或近似梯形断面,更不好确定流量与湿周间直接关系。根据国外对湿周法的研究应用^[13],分别采用对数函数和幂函数对湿周一流量关系进行拟合。对数函数和幂函数的拟合形式分别为:

$$P = a \ln Q + b \quad (2) \quad P = c Q^d \quad (3)$$

式中: a 、 b 、 c 、 d 为常数。

2.3 湿周一流量关系曲线变化点的确定

建立了稳定的湿周一流量关系以后,要最终估算河道内最小生态需水量,变化点的确定就成为核心问题。从理论上讲,变化点就是曲线上斜率最大

的点。但是在湿周一流量关系曲线上却很难找到这样的点。一般认为,在湿周一流量曲线某一点之上,流量的增加只会引起湿周细微的变化,那么这个点就是变化点,而且第一个变化点对应的流量就是最小生态流量。在湿周法应用的初期,都采用目估法确定变化点,存在较大的主观性。Gippel^[13]认为,从关系图直接判断变化点容易产生错误,于是从数学上提出了变化点位置应该在曲线的最大曲率处或斜率为 1 处。采用斜率为 1 法确定变化点,得到对数关系和幂函数关系各自的变化点流量,即最小生态需水量用 Q_{\min} 表示为:

$$Q_{\min,ls} = a \quad (4)$$

$$Q_{\min,ps} = \left(\frac{1}{cd} \right)^{\frac{1}{d-1}} \quad (5)$$

采用曲率最大法确定变化点,也就是曲率的一阶导数为 0 的点对应的流量即为最小生态需水量。以上两式对应的变化点的流量分别为:

$$Q_{\min,lc} = a\sqrt{0.5} \quad (6)$$

$$Q_{\min,pc} = \left(\frac{1}{cd} \right)^{\frac{1}{d-1}} \left(\frac{d-2}{2d-1} \right)^{\frac{1}{2(d-1)}} \quad (7)$$

式中: p 表示幂函数, l 表示对数, s 表示斜率法, c 表示曲率法。则采用对数拟合时,用斜率为 1 法和用曲率法得到的生态需水量比值为:

$$Q_{\min,ls} : Q_{\min,lc} = a : a\sqrt{0.5} = 1.414$$

采用幂函数拟合时,用斜率为 1 法和用曲率法得到的生态需水量比值为:

$$Q_{\min,ps} : Q_{\min,pc} = \left(\frac{1}{cd} \right)^{\frac{1}{d-1}} : \left(\frac{1}{cd} \right)^{\frac{1}{d-1}} \left(\frac{d-2}{2d-1} \right)^{\frac{1}{2(d-1)}} = \left(\frac{d-2}{2d-1} \right)^{\frac{1}{2(1-d)}}$$

可见,用对数函数拟合湿周一流量关系时,采用斜率为 1 法得到的最小生态需水量为曲率最大法结果的 1.414 倍;用幂函数拟合的湿周一流量关系,采用斜率为 1 得到的最小生态需水值与采用曲率最大法得到的生态需水值之比是一个与指数相关的表达式,因为该比值不可能为负,按通常情况考虑,可以得出 d 是小于 0.5 的常数,则容易得出该比值也是一个大于 1 的数。因此,不论是用对数函数还是用幂函数拟合,用斜率为 1 确定变化点得到的最小生态需水量都大于用曲率最大法得到的生态需水值,从理论上验证了文献[20-21]中斜率为 1 法估算结果大于曲率最大法估算结果的结论。

到底曲率最大法确定的变化点合理还是斜率为 1 法确定变化点合理,还没有一个定论^[21]。斜率为 1 的点表示在该点单位流量的增加会引起单位湿周的增加,但这样的点突变性不明显。曲率最大

的点相对来讲,更能体现突变点的意义。因此,本文在实例的应用中采用曲率最大法确定变化点,来估算河道内最小生态需水量。

3 应用实例

3.1 滦河水系概况

滦河发源于河北省丰宁县西北的巴颜图尔山,先向北流入内蒙高原,经两度曲折后,自北向南穿过冀北山地和燕山山地,至滦县进入平原,最后作为昌黎、乐亭两县的界河注入渤海(图 1)。滦河全长 888 km,流域面积 44750 km²,其流域地跨北纬 39°10′~42°30′,东经 115°31′~119°15′,其中山区占 98%,平原占 2%。滦河流域属典型的温带大陆性气候,自南向北由湿润、半湿润向半干旱气候过渡。年均气温 5~12 ℃,受海拔高度影响,山区垂直带谱明显。滦河水资源比较丰沛,多年平均降水量达 700 mm,常年有水的支流达 300 多条,但径流量年内分配不均,70%的水量集中在 7~9 月的汛期,且年际变化悬殊,经常出现连丰、连枯现象。

3.2 站点选取的原则

湿周法对断面的要求比较严格,所以在选择站点时,应遵循以下原则:①必须满足断面冲淤变化不大,且断面尽量为单一断面。②满足一定的数据要求。选取的站点,必须包含实测大断面数据,实测流量数据,逐日水位、流量数据,而且数据系列要求不少于 10 年。③代表性。流域水文控制断面的选取能够代表所在河道的平均特征,较好的反映流域面积大小、河床底质组成、断面过水特征、河道断面类型、河道弯曲、河流水沙特征等诸多要素,原则上尽量避开水利工程对断面的影响,体现河道在天然状况下的变化。根据以上选取断面的原则,在滦河水系选择滦河干流上的三道河子站,小滦河上的沟台子站作为该区典型断面进行河道内最小生态需水量的估算。两个水文站的大断面形状见图 2。

三道河子站的集水面积为 17100 km²,多年平均径流量为 6.03 亿 m³;沟台子站集水面积为 1890 km²,多年平均径流量为 0.97 亿 m³。

3.3 用曲率法估算的河道内最小生态需水量结果

收集两水文站实测大断面、水位和流量资料,根据实测大断面资料逐段累加不同水位对应的湿周值,查相应水位对应的流量值,建立各站湿周一流量关系(图 3)。分别采用对数关系拟合和幂函数拟合,按照曲率最大法确定湿周一流量关系曲线的变化点,得到河道内最小生态需水量结果(表 1)。

表 1 中数据表明:①采用对数函数拟合湿周一流量关系得到的最小生态需水量结果都要大于采用幂函数的拟合结果。②从最小生态需水量占多年平均流量的百分数来看,多年平均流量越小,百分数却越大,反映了较小河流对最小生态需水量的要求比较大河流对生态需水的要求更高。这些结论是否对所有断面都成立还需要进一步研究。③按照 Tennant 法的标准,河道内最小生态需水量不能小于多年平均流量的 10%。10%的多年平均流量提供了退化的或贫瘠的栖息地条件;20%的多年平均流量提供了保护水生栖息地的适当标准;在较小河流中,30%的多年平均流量接近最佳栖息地标准^[2]。湿周法对数函数拟合计算的三道河子站和沟台子站的最小生态需水量占多年平均流量的百分数分别为 33.10%和 68.17%,幂函数拟合的计算结果略小

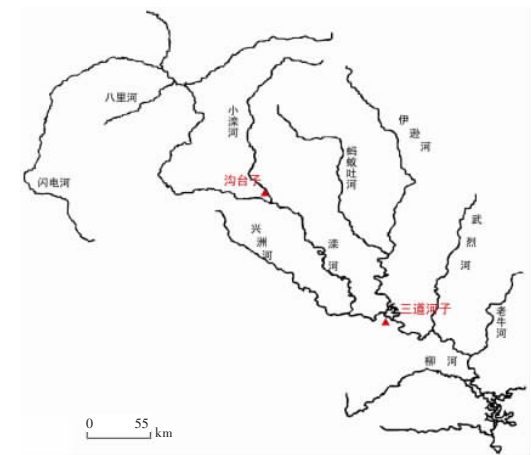


图 1 滦河水系图
Fig.1 Luanhe drainage basin

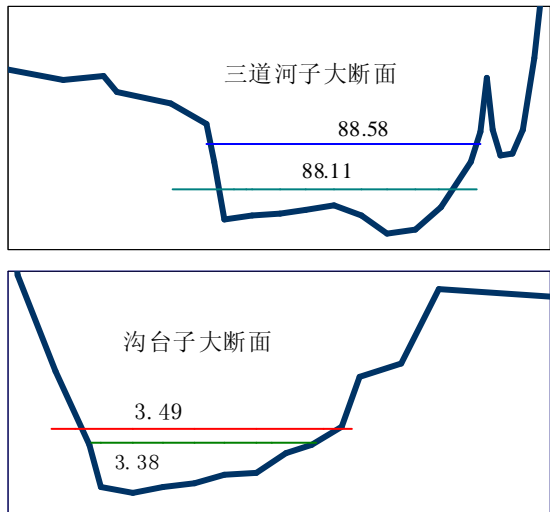


图 2 两水文站大断面图
(图中数字为历年最高水位和最低水位;单位 m)
Fig.2 The two surveyed hydrological station across-sections of natural watercourses

表 1 两水文站最小生态需水量估算结果

Tab.1 The estimated minimum ecological water requirements of the two hydrological stations

站名	Q 多年平均/(m ³ /s)	对数拟合结果		幂函数拟合结果	
		最小生态需水量	流量/(m ³ /s)	流量/(m ³ /s)	水量/亿 m ³
三道河子	19.041	最小生态需水量	6.303	1.988	4.267
		占 Q 多年平均的百分数	33.100	22.410	1.346
沟台子	2.757	最小生态需水量	1.880	0.593	1.576
		占 Q 多年平均的百分数	68.170	57.180	0.497

于对数函数拟合的计算结果，分别为 22.41%和 57.18%，由此可见，湿周法估算滦河两站的最小生态需水量结果都满足最小生态需水要求，且满足保护水生栖息地的适当标准，对数函数拟合的结果满足最佳栖息地标准，幂函数拟合的结果只有沟台子站满足最佳栖息地标准。

4 结论与讨论

本文概述了湿周法的基本原理，分别采用对数函数和幂函数对湿周一流量关系曲线进行拟合，以斜率为 1 法和曲率最大法确定曲线变化点，得到：两种拟合关系下，斜率为 1 法确定变化点得到的最小生态需水量都要大于曲率最大法确定变化点得到的最小生态需水量。其中，用对数函数关系拟合时，斜率为 1 法确定的变化点得到的结果与曲率最大法确定变化点得到的结果之比为常数 1.414；用幂函数关系拟合时，斜率为 1 法确定变化点得到的结果与曲率最大法确定变化点得到的结果之比为随指数 *d* 变化的常量。本文认为曲率最大法更能体现变化点的意义。

采用湿周法对滦河水系两个站点的最小生态需水量进行了估算，得到湿周法的估算结果占各站多年平均流量的百分数都在 20%以上。也就是说，为了保持滦河(水)生态系统的稳定满足最佳栖息地标准，需要给河道内留存至少 20%的年平均流量的水量。研究结果发现，河道越小百分数相对越高，反映较小河流对生态需水要求更高。从两种拟合关系应用结果来看，对数函数拟合关系估算的最小生态需水量都要大于幂函数拟合关系的估算结果。

各种方法的估算结果均不相同，考虑与拟和函数自身特性有关。拟和关系曲线只是经验和接近实际的曲线，有可能不完全符合实际的关系。因此，以上应用结论，只是在滦河水系两站的应用结果，可以作为用湿周法估算河道内最小生态需水量的参考结论。是否对其他流域典型断面成立，还需要进一步研究。

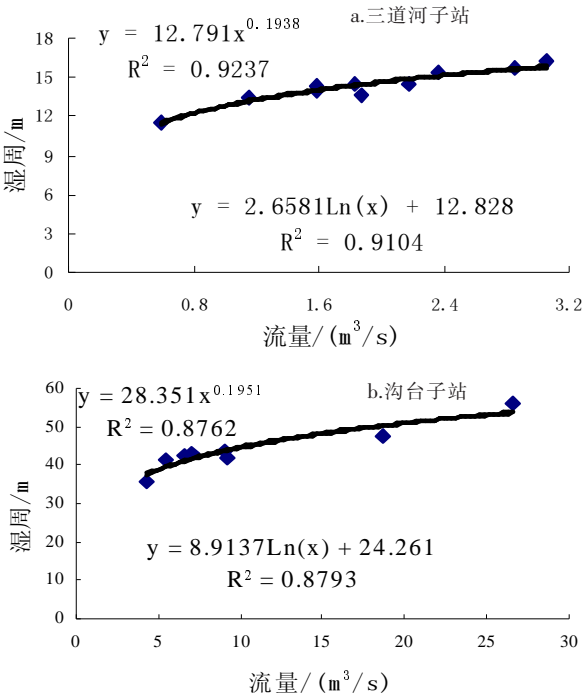


图 3 两水文站流量—湿周关系图

Fig.3 Relationship curve between flow and wetted perimeter

参考文献

[1] 沈国舫. 生态环境建设与水资源的保护利用. 中国水土保持, 2001(1): 4-8.

[2] 刘昌明. 中国 21 世纪水供需分析: 生态水利研究. 中国水利, 1999(10): 18-20.

[3] 王西琴, 刘昌明, 杨志峰. 河道最小环境需水量确定方法及其应用研究 (I): 理论. 环境科学学报, 2001, 21(5): 544-547.

[4] 王西琴, 杨志峰, 刘昌明. 河道最小环境需水量确定方法及其应用研究 (II): 应用. 环境科学学报, 2001, 21(5): 548-552.

[5] 张远, 杨志峰, 王西琴. 河道生态环境分区需水量的计算方法与实例分析. 环境科学学报, 2005, 25(4): 429-435.

[6] 杨志峰, 崔保山, 刘静玲, 等. 生态环境需水量理论、方法与实践. 北京: 科学出版社, 2003.

[7] 钟华平, 刘恒, 耿雷华, 等. 河道内生态需水估算方法及其评述. 水科学进展, 2006, 17(3): 430-434.

[8] Tharme R E. A global perspective on environmental flow assessment: emerging trends in the development and ap-

- plication of environmental flow methodologies for rivers. *River Research and Applications*, 2003, 19(5/6): 397–441.
- [9] 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. *自然科学进展*, 2007, 17(1): 42–48.
- [10] 刘苏峡, 夏军, 莫兴国, 等. 基于生物习性和流量变化的南水北调西线调水河道的生态徐水估算. *南水北调与水利科技*, 2007, 5(5): 12–17.
- [11] 杨红梅. 滦河流域生态环境及治理探讨. *水科学与工程*, 2007(6): 43–45.
- [12] 解立远. 京津水源涵养区生态需水量的估算研究. *地下水*, 2008, 30(1): 100–103.
- [13] Gippel G J, Stewardson M J. Use of wetted perimeter in defining minimum environmental flows. *Regulated rivers: Research and Management*, 1998, 14(1): 53–67.
- [14] 崔树彬. 关于生态环境需水量若干问题的探讨. *中国水利*, 2001(8): 71–75.
- [15] 苗鸿, 魏彦昌, 姜立军, 等. 生态用水及其核算方法. *生态学报*, 2003, 23(6): 1156–1164.
- [16] McCarthy J H. Wetted Perimeter Assessment. Clarendville, Shoal Harbour River, Shoal Harbour, January 8, 2003. [2009–03–22]. <http://www.env.gov.nl.ca/env/env/ea/202001/Archival%20EA%20Documents/pdf%20files/1059%20-%20WettedPerimeterAssessment.pdf>
- [17] Steven J. Instream flow study, phase II: Determination of Minimum Flow Standards to Protect Instream Uses in Priority Stream Segments. A Report to the South Carolina General Assembly, 1988: 5 [2009–03–25]. <http://scwater-law.sc.gov/Instream%20Flow%20Study%20ph2.pdf>
- [18] Gordon N D. *Stream Hydrology: An Introduction for Ecologists*. 2nd ed. Chichester, West Sussex: John Wiley & Sons, 2004: 286–319.
- [19] 杨志峰, 张远. 河道生态环境需水研究方法比较. *水动力学研究与进展*, 2003, 18(3): 294–301.
- [20] 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. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2006, 34(2): 124–130.
- [21] 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. *地理学报*, 2006, 61(3): 273–281.
- [22] Orth D J, Leonard P M. Comparison of discharge methods and habitat optimization for recommending instream flows to protect fish habitat. *Regulated River*, 1998(5): 129–138.

Wetted Perimeter Approach to Estimate Instream Flow Requirements: A Case Study in Luanhe Water System

JI Lina¹, LIU Suxia², WANG Xinchun¹

(1. Beijing Management Division of North Grand Canal, Beijing 101100, China;

2. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: Wetted perimeter approach estimates instream flow using wetted perimeter as an index to scale the habitat quality. It estimates minimum environmental flows via determining break point on curve of the relationship between wetted perimeter and discharge. This paper adopted logarithmic and power function methods respectively to simulate the relationship between wetted perimeter and discharge based on the foreign experience of research and application. The difference of determining breakpoint using slope equaling 1 method and using maximal curvature method was analysed in theory when the wetted perimeter method was used. The results showed that all calculating results from slope equaling 1 method were higher than those from maximal curvature method. The wetted perimeter method was used at two hydrological stations of the Luanhe drainage basin. The results were: (1) The minimum instream flow results were all higher when discharge and wetted perimeter relation fitted by the logarithmic function than that when discharge and wetted perimeter relation fitted by the power function; (2) The minimum instream flow calculated by the wetted perimeter method could satisfy the minimum instream flow requirement, and the minimum instream flow requirement for small rivers is correspondingly higher than that for big rivers.

Key words: the wetted perimeter method; the minimum instream flow; slope equaling 1 method; maximal curvature method

本文引用格式:

吉利娜, 刘苏峡, 王新春. 湿周法估算河道内最小生态需水量: 以滦河水系为例. *地理科学进展*, 2010, 29(3): 287–291.