

基于改进 Tennant 法的湟水流域 河道内生态环境需水量分析

郑小康, 侯红雨, 付永锋

(黄河勘测规划设计有限公司, 郑州 450003)

摘要: 对传统的 Tennant 法进行改进, 从原方法中确定多年平均年流量系列中找一典型年, 要求典型年的年流量最接近多年平均流量, 典型年来自河流本身一年流量过程, 因而具有河流本身的季节丰枯特性。用典型年流量来代替多年平均流量, 从而实现 Tennant 法反映河流流量的季节性。改进后的应用结果表明, 求得的湟水干流和大通河的河道内生态环境需水量更好地体现了研究河段流量丰枯的季节性。

关键词: Tennant 法; 改进; 典型年; 季节性河流; 分期百分数; 生态环境需水量

中图分类号: TV21 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2015)04-0681-05

Eco environmental water requirement analysis in Huangshui River based on improved Tennant method

ZHENG Xiaokang, HOU Hongyu, FU Yongfeng

(Yellow River Engineering Consulting Co. Ltd, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: In this paper, the traditional Tennant method was improved. Based on the original method, a typical year in the average annual flow series of many years was selected, which required that the flow in the typical year is close to the average annual flow of many years. For the typical year chosen from the river flow process, it has the seasonal wetness and dryness characteristics. Use of river flow in a typical year instead of the average annual flow in Tennant method can reflect the seasonal characteristics of river flow. The results showed that the eco environmental water requirement calculated by the improved method better reflects the seasonal wetness and dryness characteristics in the main stream of Huangshui River and all reaches of Datong River.

Key words: Tennant method; improvement; typical year; seasonal river; staging percentage; eco environmental water requirement

河道内生态环境需水量是指维持水生生物正常生长及保护特殊生物和珍稀物种生存所需水量^[1], 当前河流生态环境需水计算的方法可分为四类: 历史流量法^[2]、水力学法^[3,4]、栖息地法^[5]、整体分析法^[6]。水力学法、栖息地法、整体分析法对资料要求较高, 且需要较长的时间和较大的人力和物力, 这使得其在中国应用较为困难。而历史流量法仅用历史流量数据来推导河流生态流量, 所以在中国得到广泛应用^[7,10]。在历史流量法中, Tennant 法是最为常用的方法, 它作为我国河流进行最初目标管理, 作为战略性管理方法使用是具有重要现实意义的。但 Tennant 法中的生态需水比例是根据多年平均流量的一定比例统一划定, 忽略了河流流量的季节性变化, 而我国北方大部分河流处在干旱、半干旱、半湿润气候带, 具有明显的季节性变化, 在计算其河道内生态环境需水量时应考虑其流量季节性变化。因此, 本位以黄河

上游的一级支流湟水为例, 对传统的 Tennant 法进行改进, 用典型年流量来代替多年平均流量, 从而实现 Tennant 法反映河流流量的季节性。

1 Tennant 法及其局限性

Tennant 法^[2]是田纳特(Tennant, D. L) 1976 年提出来的。在 1964 年- 1974 年间, 田纳特等人对美国的 11 条河流实施了详细的野外研究, 研究河段长度共计 315.4 km 研究断面 58 个, 共 38 个流量状态。他们研究在不同地区、不同河流、不同断面和不同流量状态下物理的、化学的和生物的信息对冷水和暖鱼类的影响。Tennant 法现在多用来计算河道内生态环境需水量, 该方法设有 8 个等级, 推荐的河道内生态环境需水量分为汛期和非汛期, 推荐值以占径流量的百分比作为标准。其标准见表 1。

收稿日期: 2014-05-23 修回日期: 2015-08-28 网络出版时间: 2015-07-23

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20150723.1119.003.html>

作者简介: 郑小康(1983-), 男, 河南新乡人, 工程师, 主要从事水资源与水环境研究。E-mail: xk.zheng@163.com

表 1 Tennant 法对栖息地质量和流量关系的描述

Tab. 1 Relationship between habitat quality and flow described by Tennant method

项目	月份	最大	最佳范围	极好	非常好	好	中	差	极差	
推荐的基流占平均流量(%)	一般用水期	10月-3月	200	60~100	40	30	20	10	10	0~10
	鱼类产卵育幼期	4月-9月	200	60~100	60	50	40	30	10	0~10

Tennant 法也有缺点:(1)适用条件有局限性。此方法计算结果的精度与对栖息地重要性认知程度有关。(2)比例确定困难。不同区域、不同需水类型、不同保护对象,生态健康程度与流量的比例关系不同,需要分析调整 Tennant 法中流量百分比标准是否符合当地河流情况。(3)Tennant 法根据多年平均流量的一定比例统一划定,没有考虑水量需求的年内变化问题,与水生生物生境要求相左。没有从流域特性及成因规律分析流量的特点,忽略河流流量季节性变化是它的主要缺点。在实际应用时应根据区域的实际情况对其进行适当改进。

从 Tennant 法确定河流生态流量过程来看,流量与百分比及栖息地关系中,生态流量是多年平均流量与百分比的乘积,其中,年平均流量是天然状况下的多年平均流量,其生态流量(某百分比流量)是瞬时流量。其中水深和流速是 Tennant 等人在大量实验数据分析基础上统计出来的,具有合理性。流量季节性变化大的河流多是以降水为补给源,其流量丰枯与流域季节降水多少成正相关。Tennant 法不能反映河流流量季节性的问题在于用年平均流量,年平均流量使年内峰谷和年际之间的峰谷都被削弱,河流年内流量过程峰谷被坦化,这是现行 Tennant 法不适用季节性变化大的河流的根源所在。

2 改进的 Tennant 法及其在湟水流域的应用

本文所采用的改进的 Tennant 法是用典型年流量来代替多年平均流量,以 Tennant 法给出的水生生物体特别是鱼类健康的临界点或最低流量限制点的平均水深及平均流量

为依据,确定新的非汛期最小流量百分比数;以河流系统与河谷湿地补水关系为依据,确定汛期各平均水深,从而确定其相应百分比数,从而保证求出的河流生态流量的合理性,弥补其不适合流量季节性变化大的河流的不足。

流量过程(包括流量的时空分布、洪水的周期性发生、洪水或极小流量的频率及其持续时间等)对河流生态系统中的水生生物至关重要,是水生生物栖息地的决定性因素,影响着水生生物的组成和群落结构。水生生物顺应天然的流量过程,进化他们的生命周期和习性。天然河流流态是河流生态最需要的流态,因此应尽可能使河流流态与其天然流态相似,以维持河流所有生物的生境;不同物种对洪水和枯水会有不同的响应,因此河流数年内丰枯交替的径流演化过程可以为各种生物提供利弊交替的生境条件,从而使所有的土著物种得以繁衍生息。湟水流域河流水生态系统具有明显的季节性特征:4月-6月是土著鱼类产卵繁殖的高峰季节,需要一定水流刺激和一定水深及水面宽,同时此季节也是河谷植被的萌芽期,因此时降雨量较少而植被蒸散亏缺量较大,也是河谷植被需水的高峰期;7月-10月河水量较丰,4个月径流量通常占全年的60%以上,通常考虑应允许一定流量级别的洪水产生,一方面维持河槽冲淤平衡,另一方面淹没河滩地的流量过程可满足岸边带生物的繁衍生息并维持一定地下水位;11月-翌年3月,河水量相对较枯,月水量占年水量的比例一般为3%~7%,主要考虑维持河流基本生态环境功能的生态基流。因此,将河流生态需水按季节性划分为4月-6月、7月-10月、11月-翌年3月3个时段。湟水干流和大通河各河段需水对象需水规律详见表2。

表 2 湟水干流和大通河各河段需水对象及需水规律分析

Tab. 2 Analysis on water demand object and law in the main stream of Huangshui River and all reaches of Datong River

河流及河段	需水对象	需水规律
源头至海晏	土著鱼类河岸植被	4月-6月:一定水面宽度、水流连续、有水深1m左右缓流水域(0.2~0.6m/s); 7月-10月:一定水面宽度、较为缓流型水体(0.3~0.8m/s)。
湟水 海晏至西宁	土著鱼类 河谷湿地、植被 自净需水	4月-6月:有一定水面宽度、水流连续、有水深1m左右缓流水域(0.4~0.7m/s)有淹没岸边流量过程; 7月-10月:一定水面宽度、水流连续、较为缓流型水体(0.4~1.0m/s)、水深0.5~1.5m;有一定量级的洪水发生。
西宁庄至入黄口	土著鱼类 河流基本生态功能	西宁至民和:自净需水,平均流速1~1.5m/s;民和以下:有一定水面宽度、水流连续、水深0.5~1.0m等。
源头至武松塔拉	土著鱼类河岸植被	4月-6月:有一定水面宽度、水流连续、水深1m左右缓流水域(0.3~0.8m/s); 7月-10月:一定水面宽度、水流连续、较为缓流型水体(0.8~1.3m/s)、水深1~1.5m;有一定量级的洪水发生,有淹没岸边的流量过程。
大通河 武松塔拉至尕大滩	土著鱼类 河谷湿地、植被	4月-6月:有一定水面宽度、水流连续、水深1m左右缓流水域(0.6~1.0m/s),有淹没岸边的流量过程; 7月-10月一定水面宽度、水流连续、较为缓流型水体(1.0~2.0m/s)、水深1~2m;有一定量级的洪水发生。
大通河 尕大滩至天堂寺	土著鱼类 河谷湿地、植被	4月-6月:有一定水面宽度、水流连续、水深1m左右缓流水域(0.6~1.0m/s),有淹没岸边的流量过程; 7月-10月一定水面宽度、水流连续、较为缓流型水体(1.0~2.0m/s)、水深1~2m;有一定量级的洪水发生。
大通河 天堂寺至入湟口	河谷湿地、植被	4月-6月:水流连续,有淹没岸边的流量过程;7月-10月:有一定流量级别的洪水发生。

2.1 典型年的选取

改进后的 Tennant 法的关键是选取典型年,它关系到所求生态流量值能否更好地满足河流生态系统。典型年的选取要同多年平均流量在同一河流流量系列中选取。研究河段多年平均流量的流量系列中有各个控制站的流量,这些流量已知。典型年选取步骤为:选取河段流量模数 k 最接近 1.0 的年份为典型年,如果有 2 个或多个同等接近 1.0,则选取各站系列年模数偏差 C_e 值最小的年份为典型年。流量模数 k 值的确定见式(1)。

$$k = \frac{\sum_{i=1}^n Q_x / Q}{n} \quad (1)$$

表 3 湟水干流典型年(1963 年)年内流量过程

Tab. 3 Flow process of typical year (1963) in main stream of Huangshui River

水文站	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	年平均流量
石崖庄	8.4	7.4	13.7	15.5	15.3	11.3	15.1	10.3	18.7	14.1	9.7	6.0	12.1
西宁	26.0	25.5	40.8	54.4	54.9	30.0	61.7	44.4	78.7	58.9	28.9	18.3	43.5
民和	35.8	35.1	51.6	90.9	81.7	39.3	84.7	71.9	117.9	95.8	55.3	35.0	66.2

表 4 大通河典型年(1968 年)年内流量过程

Tab. 4 Flow process of typical year (1968) in the Datong River

水文站	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	年平均流量
尕大滩	3.0	2.4	6.0	27.6	63.6	90.8	191.0	106.0	97.6	45.9	17.3	4.7	54.7
天堂寺	11.8	12.3	22.1	47.6	88.4	127.6	209.1	137.8	137.9	76.7	36.3	21.7	77.4
享堂	12.5	13.0	23.8	52.4	99.4	145.0	241.7	157.1	157.1	85.8	39.6	23.4	87.6

将湟水干流和大通河典型年月均流量过程按照 4 月-6 月、7 月-10 月、11 月-翌年 3 月分为 3 个时段,并按照各断

式中: k 为研究河段的流量模数; Q_x 为研究河段第 i 个控制站的年流量(m^3/s); Q 为研究河段第 i 个控制站的多年平均流量(m^3/s); n 为研究河段控制站的个数。

考虑湟水流域水利工程兴建及水资源开发利用状况,拟采用湟水干流及大通河尚属“天然”或尚未大规模开发利用和径流调节情况下,即湟水干流及大通河第一个调节水库尚未建成运用,水资源开发利用程度不高,其水生态、水环境尚属于健康和自然状态的 1956 年-1970 年水文系列资料多年平均流量为基准,按照上述介绍的典型年的选取方法,湟水干流选取 1963 年为典型年,大通河选取 1968 年为典型年,其年内天然流量分布过程分别见表 3 和表 4。

面流量与流速、水深的相关关系分析了与各时段平均流量相对应的平均流速和平均水深,详见表 5 和表 6。

表 5 湟水干流典型年分时段流量过程

Tab. 5 The time division flow process of typical year in main stream of Huangshui River

时段	石崖庄			西宁			民和		
	平均流量 $/(m^3 \cdot s^{-1})$	平均流速 $/(m \cdot s^{-1})$	平均水深 $/m$	平均流量 $/(m^3 \cdot s^{-1})$	平均流速 $/(m \cdot s^{-1})$	平均水深 $/m$	平均流量 $/(m^3 \cdot s^{-1})$	平均流速 $/(m \cdot s^{-1})$	平均水深 $/m$
4 月-6 月	14.0	0.79	0.52	46.4	1.18	0.53	70.6	1.34	0.78
7 月-10 月	14.6	0.81	0.53	60.9	1.33	0.57	92.6	1.50	0.89
11 月-翌年 3 月	9.0	0.63	0.45	27.9	0.95	0.49	42.6	1.08	0.62

表 6 大通河典型年分时段流量过程

Tab. 6 The time division flow process of typical year in the Datong River

时段	尕大滩			天堂寺			享堂		
	平均流量 $/(m^3 \cdot s^{-1})$	平均流速 $/(m \cdot s^{-1})$	平均水深 $/m$	平均流量 $/(m^3 \cdot s^{-1})$	平均流速 $/(m \cdot s^{-1})$	平均水深 $/m$	平均流量 $/(m^3 \cdot s^{-1})$	平均流速 $/(m \cdot s^{-1})$	平均水深 $/m$
4 月-6 月	60.7	1.17	0.84	87.9	1.07	1.50	98.9	1.35	1.41
7 月-10 月	110.1	1.50	1.03	140.4	1.37	1.72	160.4	1.69	1.59
11 月-翌年 3 月	6.7	0.45	0.40	20.9	0.50	0.97	22.4	0.67	0.97

2.2 分期百分数的选取

基础流量变了,百分数也要相应的改变。分期百分数的选取也至关重要。由于湟水流域相关生态环境与流量、流速和水深关系资料十分短缺,在这种情况下确定百分比相当困难。

Tennant 等指出,平均水深为 0.3 m,平均流速为 0.23 m/s 的流量是许多水生生物体特别是鱼类健康的临界点或最低流量限制点;平均水深从 0.46 m 增加到 0.61 m,平均流速从 0.46 m/s 上升到 0.61 m/s,这是水生生物体需求从较

好到最佳的生存条件范围。依据此平均水深或平均流速,取湟水流域水生生物特别是鱼类健康的临界点或最低流量限制点的平均水深,参考平均流速,水生生物需求的从较好到最佳的生存条件范围的平均深度范围和平均流速范围来确定各站相应分期各级流量,同时考虑河谷湿地和植被需水,需要一定的淹没岸边滩地的流量过程。其中,最大值采用典型年该时段内最大月平均流量,最佳范围上限采用该时段内的平均流量,最低限和最佳范围下限根据 Tennant 法对流速和水深的要求进行设置。具体见表 7 和表 8。

表 7 湟水干流各水文站生态需水参数

Tab. 7 Ecological water requirement parameters for different stages in the main stream of Huangshui River

水文站	时段	最低限			最佳范围下限			最佳范围上限			最大值 流量 $/(m^3 \cdot s^{-1})$
		流量 $/(m^3 \cdot s^{-1})$	流速 $/(m \cdot s^{-1})$	水深 /m	流量 $/(m^3 \cdot s^{-1})$	流速 $/(m \cdot s^{-1})$	水深 /m	流量 $/(m^3 \cdot s^{-1})$	流速 $/(m \cdot s^{-1})$	水深 /m	
石崖庄	4月-6月	2.8	0.41	0.36	5.6	0.51	0.40	14.0	0.79	0.52	15.5
	7月-10月	2.9	0.41	0.36	5.8	0.51	0.40	14.6	0.81	0.53	18.7
	11月-翌年3月	1.8	0.37	0.34	4.5	0.47	0.39	9.0	0.63	0.45	13.7
西宁	4月-6月	9.3	0.59	0.45	18.6	0.80	0.47	46.4	1.18	0.53	54.9
	7月-10月	12.2	0.66	0.45	24.4	0.90	0.48	60.9	1.33	0.57	78.7
	11月-翌年3月	5.6	0.48	0.44	11.2	0.64	0.45	27.9	0.95	0.49	40.8
民和	4月-6月	14.1	0.67	0.36	28.3	0.90	0.51	70.6	1.34	0.78	90.9
	7月-10月	18.5	0.75	0.41	37.0	1.01	0.58	92.6	1.50	0.89	117.9
	11月-翌年3月	10.6	0.59	0.32	17.0	0.73	0.40	42.6	1.08	0.62	55.3

表 8 大通河各水文站生态需水参数

Tab. 8 Ecological water requirement parameters for different stages in the Datong River

水文站	时段	最低限			最佳范围下限			最佳范围上限			最大值 流量 $/(m^3 \cdot s^{-1})$
		流量 $/(m^3 \cdot s^{-1})$	流速 $/(m \cdot s^{-1})$	水深 /m	流量 $/(m^3 \cdot s^{-1})$	流速 $/(m \cdot s^{-1})$	水深 /m	流量 $/(m^3 \cdot s^{-1})$	流速 $/(m \cdot s^{-1})$	水深 /m	
尕大滩	4月-6月	9.1	0.52	0.44	24.3	0.79	0.61	60.7	1.17	0.84	90.8
	7月-10月	22.0	0.76	0.59	44.1	1.02	0.75	110.1	1.50	1.03	191.0
	11月-翌年3月	2.7	0.31	0.29	5.0	0.40	0.36	6.7	0.45	0.40	17.3
天堂寺	4月-6月	13.2	0.39	0.84	35.1	0.65	1.13	87.9	1.07	1.50	127.6
	7月-10月	21.1	0.50	0.97	56.1	0.84	1.31	140.4	1.37	1.72	209.1
	11月-翌年3月	5.2	0.24	0.64	10.4	0.34	0.79	20.9	0.50	0.97	36.3
享堂	4月-6月	14.8	0.56	0.88	39.6	0.88	1.12	98.9	1.35	1.41	145.0
	7月-10月	24.1	0.70	0.99	64.2	1.10	1.26	160.4	1.69	1.59	241.7
	11月-翌年3月	5.6	0.35	0.69	11.2	0.49	0.82	22.4	0.67	0.97	39.6

以表 7 和表 8 为基础, 根据湟水干流和大通河的径流特点征求专家意见确定“一般, 好, 很好和最大”流量百分数, 流量百分数结果见表 9 和表 10。其中, 湟水干流生态需水为一般的情况下要求的瞬时流量一般占时段平均流量的 20% 左右, 大通河为 15% 左右(个别时段达 40%), 可满足流域水生生物的最低流量需求, 可作为河流的低限生态需水; 生态需水为好至很好区间为生态需水的最佳范围, 此范围要求的瞬时流量为时段平均流量的 40% 以上, 可为流域水生生物提供最佳的生存条件, 同时可满足一定量的河谷

湿地和植被的生态需水; 生态需水最大情况下, 湟水干流要求的瞬时流量为时段平均流量的 110% 以上, 最高达 151%, 大通河要求的瞬时流量为时段平均流量的 140% 以上, 最高达 260%, 此情况下有一定量级的洪水发生, 有淹没岸边滩地的流量过程。

根据表 9 和表 10 各断面生态需水的瞬时流量可推算湟水干流及大通河各断面在此时段的生态需水总量, 分为低限和适宜两个级别, 分别对应于瞬时流量的一般和好的级别。详见表 11。

表 9 湟水干流各水文站流量百分数

Tab. 9 Flow percentage for different stages in the main stream of Huangshui River

水文站	时段	一般		好		很好		最大	
		流量 $/(m^3 \cdot s^{-1})$	比例 (%)	流量 $/(m^3 \cdot s^{-1})$	比例 (%)	流量 $/(m^3 \cdot s^{-1})$	比例 (%)	流量 $/(m^3 \cdot s^{-1})$	比例 (%)
石崖庄	4月-6月	2.8	20	5.6	40	14.0	100	15.5	110
	7月-10月	2.9	20	5.8	40	14.6	100	18.7	128
	11月-翌年3月	1.8	20	4.5	50	9.0	100	13.7	151
西宁	4月-6月	9.3	20	18.6	40	46.4	100	54.9	118
	7月-10月	12.2	20	24.4	40	60.9	100	78.7	129
	11月-翌年3月	5.6	20	11.2	40	27.9	100	40.8	146
民和	4月-6月	14.1	20	28.3	40	70.6	100	90.9	129
	7月-10月	18.5	20	37.0	40	92.6	100	117.9	127
	11月-翌年3月	10.6	25	17.0	40	42.6	100	55.3	130

表 10 大通河各水文站流量百分数

Tab. 10 Flow percentage for different stages in the Datong River

水文站	时段	一般		好		很好		最大	
		流量 $/(m^3 \cdot s^{-1})$	比例 (%)	流量 $/(m^3 \cdot s^{-1})$	比例 (%)	流量 $/(m^3 \cdot s^{-1})$	比例 (%)	流量 $/(m^3 \cdot s^{-1})$	比例 (%)
尕大滩	4月-6月	9.1	15	24.3	40	60.7	100	90.8	150
	7月-10月	22.0	20	44.1	40	110.1	100	191.0	173
	11月-翌年3月	2.7	40	5.0	75	6.7	100	17.3	260
天堂寺	4月-6月	13.2	15	35.1	40	87.9	100	127.6	145
	7月-10月	21.1	15	56.1	40	140.4	100	209.1	149
	11月-翌年3月	5.2	25	10.4	50	20.9	100	36.3	174
享堂	4月-6月	14.8	15	39.6	40	98.9	100	145.0	147
	7月-10月	24.1	15	64.2	40	160.4	100	241.7	151
	11月-翌年3月	5.6	25	11.2	50	22.4	100	39.6	176

表 11 湟水干流及大通河时段生态需水总量

Tab. 11 The amounts of ecological water requirement in the main stream of Huangshui River and all reaches of Datong River 亿 m³

时段	尕大滩		天堂寺		享堂		石崖庄		西宁		民和	
	低限	适宜	低限	适宜	低限	适宜	低限	适宜	低限	适宜	低限	适宜
4月-6月	0.72	1.91	1.04	2.76	1.17	3.11	0.22	0.44	0.73	1.46	1.11	2.22
7月-10月	2.34	4.68	2.24	5.97	2.56	6.82	0.31	0.62	1.29	2.59	1.97	3.94
11月-翌年3月	0.35	0.65	0.68	1.36	0.73	1.46	0.24	0.59	0.73	1.46	1.39	2.22
全年	3.41	7.24	3.96	10.09	4.46	11.39	0.77	1.65	2.75	5.51	4.47	8.38

3 结语

经研究发现,多年平均流量均化了河流天然来水过程,并消减了流量的峰谷值,致使 Tennant 法不适合流量季节性变化大的河流。本文通过选取典型年流量代替多年平均流量对现行的 Tennant 法进行改进,改进后的结果表明,求得的生态环境需水量更好地体现了研究河段流量丰枯的季节性,湟水干流和大通河的低限生态需水占时段平均流量的 15%~20% 左右,可满足流域水生生物的最低流量需求;适宜生态需水占时段平均流量的 40% 以上,可为流域水生生物提供最佳的生存条件,同时可满足一定量的河谷湿地和植被的生态需水;生态需水为好至很好区间为生态需水的最佳范围,此范围要求的瞬时流量为生态需水最大情况下,湟水干流要求的瞬时流量为时段平均流量的 110% 以上,最高达 151%,大通河要求的瞬时流量为时段平均流量的 140% 以上,最高达 260%,此情况下有一定量级的洪水发生,有淹没岸边滩地的流量过程。改进后的 Tennant 法能适应地形多变的河流和季节性强的河流,拓宽了 Tennant 法的适用范围。但是,改进后的 Tennant 法使用典型年流量过程代替多年平均流量,虽然使用河段流量模数法进行了典型年的选取,但考虑河流来水本身存在丰枯变化,该方法仍具有一定的不确定性。将此方法与水力学法或栖息地法综合考虑可减小方法本身的不确定性,但由于资料受限,目前仍未有学者开展相关研究,未来可能会是此类研究的发展方向。

参考文献(References):

[1] 杨志峰,崔保山,刘静玲,等.生态环境需水量理论、方法与实践[M].北京:科学出版社,2003.(YANG Zhi feng, CUI Bao

shan, LIU Jing ling, et al. Theory and practice of ecological water requirement[M]. Beijing: Science Press, 2003. (in Chinese))

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

[3] Gippel G J, Stewardson M J. Use of Wetted Perimeter in Defining Minimum Environmental Flows[J]. Regulated Rivers: Research and Management, 1998, 14(1): 53-67.

[4] 王西琴,刘昌明,杨志峰.生态及环境需水量研究进展与前瞻[J].水科学进展,2002,13(4): 507-514. (WANG Xi qin, LIU Chang ming, YANG Zhi feng. Research Advance in ecological water demand and environmental water demand[J]. Advances in Water Science, 2002, 13(4): 507-514. (in Chinese))

[5] 张文鸽,黄强,蒋晓辉.基于物理栖息地模拟的河道内生态流量研究[J].水科学进展,2008,19(2): 192-197. (ZHANG Wen ge, HUANG Qiang, JIANG Xiao hui. Study on instream ecological flow based on physical habitat simulation[J]. Advances in Water Science, 2008, 19(2): 192-197. (in Chinese))

[6] Hughes M F. A Decision Support System for An Initial "Low Confidence" Estimate of The Quantity Component for The Serve of Rivers[M]. South Africa: Rhodes University, 1999: 5-45.

[7] 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. (YANG Zhi feng, ZHANG Yuan. Comparison of methods for ecological and environmental flow in river channels[J]. Journal of Hydrodynamics, 2003, 18(3): 294-301. (in Chinese))

[8] 栗晓玲,康绍忠.生态需水的概念及其计算方法[J].水科学进展,2003,14(6): 740-744. (SU Xiao ling, KANG Shao zhong. Concept of ecological water requirement and its estimation method[J]. Advances in Water Science, 2003, 14(6): 740-744. (in Chinese))

(下转第 690 页)

- hong, . Research on the theory of minimum rate of available energy dissipation and statistic entropy in rivers[J]. Journal of Sediment Research, 2012(6): 10-15. (in Chinese)
- [11] 拾兵, 王燕, 杨立鹏等. 基于仙农熵理论的河相关系[J]. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2010, 40(1): 95-98. (SHI Bing, WANG Yan, YANG Lipeng, et al. Hydraulic Geometry Based on Shannons Entropy Principle[J]. Periodical of Ocean University of China: Nature Science, 2010, 40(1): 95-98. (in Chinese))
- [12] 尹国康, 陈宝冲. 从河相关系探讨长江冲积河床的自动调整[J]. 泥沙研究, 1983(3): 33-41. (YI Guokang, CHEN Baochong. A Preliminary Study on the self adjustment of the alluvial channel of the Yangtze river from the viewpoint of hydraulic geometry[J]. Journal of Sediment Research, 1983(3): 33-41. (in Chinese))
- [13] 齐璞, 王昌高. 黄河艾山以下河道水力几何形态与冲淤特性[J]. 人民黄河, 1992(12): 12-15. (QI Pu, WANG Changgao. Hydraulic geometry and characteristics of scouring and deposition of the Yellow River course downstream Aishan[J]. Yellow River, 1992(12): 12-15. (in Chinese))
- [14] 黎明, 李茂江, 陈国建, 等. 下荆江河道水力几何形态的研究[J]. 西南师范大学学报: 自然科学版, 2000, 25(6): 708-712. (LI Ming, LI Maojiang, CHEN Jianguo. Study on the hydraulic geometry of low Jingjiang river stream channels[J]. Journal of Southwest China University: Natural Science, 2000, 25(6): 708-712. (in Chinese))
- [15] 马元旭, 许炯心. 无定河及其各支流的断面水力几何形态[J]. 地理研究, 2009, 28(2): 345-353. (MA Yuanxun, XU Jiongxin. The hydraulic geometry of Wuding River and its tributaries[J]. Geographical Research, 2009, 28(2): 345-353. (in Chinese))
- [16] Bray D. Estimating average velocity in gravel bed rivers[J]. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 1979, 105(9): 1103-1122.
- [17] Brownlie W R. Prediction of flow depth and sediment discharge in open channels[J]. PhD dissertation, California Inst. of Technol., Pasadena. Calif. 1981.
- [18] Center Board of Irrigation and Power[R]. Library of Canal Data, Technical Report No. 15. 1976.
- [19] Chitale S V. River channel patterns[J]. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 1970, 96(1): 201-221.
- [20] Church M, Rood R. Catalogue of alluvial river channel regime data[R]. Rep., Dept. of Geography, Univ. of British Columbia, Vancouver, Canada. 1983.
- [21] Colosimo C, Coppertino V A, Veltri M. Friction factor evaluation in gravel bed rivers[J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 1988, 114(8): 861-876.
- [22] Hey R D, Thome C R. Stable channels with mobile gravel beds[J]. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 1986, 112(8): 671-689.
- [23] Higgins N J, Johnston H T. Estimation of friction factors in natural streams. River regime[M]. John Wiley & Sons, Inc., New York, N. Y., 251-266. 1988.
- [24] Simons D B, Albertson M L. Uniform water conveyance channels in alluvial material[J]. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 1960, 86(HY 5): 33-71.
- [25] Neill C R. Hydraulic geometry of sand rivers in Alberta[R]. Hydrology Symp., Alberta (preprint). 1973.
- [26] Kellerhals R, Neill C R, Bray D I. Hydraulic and geomorphic characteristics of rivers in Alberta[R]. Alberta Cooperative Research Program in Highway and Engineering. 1972.
- [27] Shinohara K, Tsubaki T. On the characteristics of sand waves formed upon the beds of the open channels and rivers[R]. Reprinted from Reports of Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, Japan. 1959.
- [28] Ackers P. Experiments on small streams in alluvium[J]. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 1964, 90(5): 1-37.
- [29] Baosheng WU, D S van MAREN, Lingyun LI. Predictability of sediment transport in the Yellow River using selected transport formulas[J]. International Journal of Sediment Research. 2008, 23(4): 283-298.
- [30] 赵忠文. 河道枢纽设计和模型试验研究[J]. 南水北调与水利科技, 2010, 8(3): 114-116, 120. (ZHAO Weizhong. Pivot design of river course and its experimental research of models[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2010, 8(3): 114-116, 120. (in Chinese))

(上接第 685 页)

- [9] 钟华平, 刘恒, 耿雷华. 河道内生态需水估算方法及其评述[J]. 水科学进展, 2006, 17(3): 430-434. (ZHONG Huaping, LIU Heng, GENG Leihua. Review of assessment methods for in-stream ecological flow requirements[J]. Advances in Water Science, 2006, 17(3): 430-434. (in Chinese))
- [10] 门宝辉, 刘昌明. Tennant 法计算标准的修正及其应用[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2008, 40(3): 479-482. (MEN Baohui, LIU Changming. Modified calculative criterion of tennant and its application[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2008, 40(3): 479-482. (in Chinese))