



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2017.02.016

王惠英, 于鲁冀, 吕晓燕, 范鹏宇, 等. 清溪河流域河流环境流量计算与应用[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(2): 109-115. WANG Huiying, YU Lujie, LYU Xiaoyan, et al. Calculation and application of river environmental flow of Qingyi River Basin[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(2): 109-115. (in Chinese)

## 清溪河流域河流环境流量计算与应用

王惠英<sup>1</sup>, 于鲁冀<sup>2</sup>, 吕晓燕<sup>1</sup>, 范鹏宇<sup>1</sup>

(1. 郑州大学 环境技术咨询工程有限公司, 郑州 450002; 2. 郑州大学水利与环境学院, 郑州 450001)

**摘要:** 针对北方地区河流环境流量短缺和污染并存的现状, 在综合考虑水质保护与水量维持的情况下界定了河流环境流量的概念和内涵, 并探讨不同功能目标下河流环境流量的组成。通过分析河流水系特征及河段的空间结构特征, 建立了改善河流水质所需环境流量计算模型, 同时建立了 Tennant 和湿周模型计算河流生态系统所需环境流量。利用临颖高村桥的水文水质数据, 对清溪河为改善河流水质和生态系统所需环境流量进行了初步评价, 为河流应急补水提供了调控建议, 并提出了河道应常年保持的流量水平。

**关键词:** 环境流量; 水质水量平衡模型; Tennant 法; 湿周法; 清溪河

**中图分类号:** O647.3; X783 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2017)02-0109-07

### Calculation and application of river environmental flow of Qingyi River Basin

WANG Huiying<sup>1</sup>, YU Lujie<sup>2</sup>, LYU Xiaoyan<sup>1</sup>, FAN Pengyu<sup>1</sup>

(1. Zhengzhou University Environmental Technology and Consulting Limited Company, Zhengzhou 450002, China;

2. College of Water Conservancy & Environmental Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** Considering the coexistence of environmental flow shortages and pollution problems of northern rivers, the concept and content of environmental flow were defined with consideration to water quality protection and water quantity maintenance. The composition of environmental flow under different functional goals was also discussed. By analyzing the characteristics of river systems and spatial structure features of river reaches, we established the environmental flow calculation model for improving water quality, and also established the Tennant and Wetted Perimeter models for calculating the environmental flow for river ecosystems. Using the hydrology and water quality data of Gaocun Bridge section, we conducted a preliminary evaluation of the environmental flow for improving the water quality and ecosystem of Qingyi River. This study provided flow regulatory advice for the emergency replenishment of water, and suggested the river flow levels that should be maintained constantly in different months of a year.

**Key words:** environmental flow; water quality and quantity balance model; Tennant method; wetted perimeter method; Qingyi River

流量作为河流最重要的因子之一, 是保证河流环境功能和生态功能正常发挥的必备条件。世界自然保护联盟将环境流量定义为“在用水矛盾突出、且

用水量可以进行调度的河流、湿地和沿海区域, 为维持其正常生态系统及功能所拥有的水量”<sup>[1]</sup>。国外其他学者针对环境流量也进行了定义, 也为维持河流生

收稿日期: 2016-10-29 修回日期: 2017-02-24 网络出版时间:

网络出版地址:

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2015ZX07204-002)

Funds: Major Science and Technology Program for Water Pollution Control and Treatment (2015ZX07204-002)

作者简介: 王惠英(1987-), 女, 河南安阳人, 工程师, 主要从事水污染控制技术、水生态修复技术研究。E-mail: yingzi4001@163.com

态健康所需的流量<sup>[2-3]</sup>。近 10 年来,我国学者结合我国河流面临流量短缺和水质污染的双重威胁的实际情况,界定了适用于我国河流的环境流量内涵及组成。其中王西琴等<sup>[4-5]</sup>对环境流量的概念界定的较早,其认为环境流量具有更广的内涵:如满足自净功能需求的水量—环境需水,满足河道水沙平衡的水量—输沙需水,满足生态系统最低需求的水量—基本生态需水等。围绕环境流量的计算,近年来也有许多研究成果,主要分为两大类,一类是基于水质水量平衡模型计算为改善河流水质所需的环境流量,一类是生态需水量相关计算研究。水质水量平衡模型主要通过模型的构建,可定量评价生态补水或不同调水情景对水质的变化<sup>[6-8]</sup>。国内生态需水量计算常采用方法有水文学法(如改进 Tennant 法、月保证率法)<sup>[9-12]</sup>、水力学法(湿周法和生态水力学法)<sup>[13-15]</sup>、栖息地模拟法<sup>[16]</sup>、整体法<sup>[17]</sup>等。不同河流环境流量需求不同其适合的计算方法也不同。

本文在分析北方河流环境流量概念和内涵的基础上,探讨不同功能目标下环境流量的组成;结合北方河流缺水的特征,充分考虑二元水循环条件下,建立水质水量平衡模型,开展为改善河流水质所需环境流量的计算;同时以清淇河为例,采用不同计算方法计算河流生态系统所需环境流量,初步确定清淇河环境流量阈值。

## 1 环境流量概念与组成界定

### 1.1 环境流量概念与内涵

国内外目前对于环境流量概念与内涵没有统一认知,国外主要是指为维持河流生态系统健康所需的流量,而国内存在水质污染严重与生态系统亟需恢复的双重问题,多指维持河流生态环境功能正常发挥的流量。

本文认为环境流量是指在特定的区域、流域内,在相应的生态保护、恢复或建设目标下,某一时段能够满足河流系统生态环境功能所需流量。一方面,河流环境流量可以随时间和空间变化,表现出动态变化的特征;另一方面,河流环境流量具有协调河流各项基本功能的内涵,表现出在特定时空单元内最大限度地满足河流主要功能的优先选择性<sup>[18-19]</sup>。

### 1.2 环境流量组成界定

环境流量组成界定需以河流功能分析为基础,其中水环境功能区划和水功能区划中均涉及对河流功能的界定。水环境功能区划管理目标中只考虑了水质标准,并以水质标准来界定该水质控制区的水域功能,与河流实际使用功能存在一定偏差,而水功

能区划是按相应水域的主导功能来划定,并考虑了水资源的合理开发和有效保护,因此本文以河南省辖河流为对象,主要依据《河南省水环境功能区划》和《河南省水功能区划》来分析河流功能。

结合河流功能界定结果及广义环境流量的概念及内涵,不考虑河流社会功能所对应的水利流量,河南省辖河流环境流量主要由维持水生生物栖息、稀释自净、景观娱乐、防止泥沙淤积、地下水位和蒸发 6 项流量组成。

## 2 环境流量计算模型构建

### 2.1 水质水量平衡模型的构建

基于二元水循环的思想,将工业/生活排水等回归水作为河道内流量一部分的前提下,建立了测算环境流量的水质水量平衡模型。

#### (1) 模型具体构建思路。

1 水箱模型:在研究河段入河节点的实测径流的基础上,统计分析该河流或河段的降雨径流、排水、取水和调水等水量的输入、输出,建立水量平衡;

° 一维水质模型:在水量平衡基础上,考虑输入、输出污染物的衰减与降解,并采用一维水质模型模拟计算污染源变化引起的水质变化结果,并建立污染物通量平衡。

根据河流或河段不同阶段水质目标要求,基于通过 1° 建立水量水质平衡模型,测算分析保障河流水质达标所需的水量。河段水质水量平衡模型示意图见图 1。

其中图 1 中  $Q$  为输入输出水量,  $P$  为输入输出污染物总量。

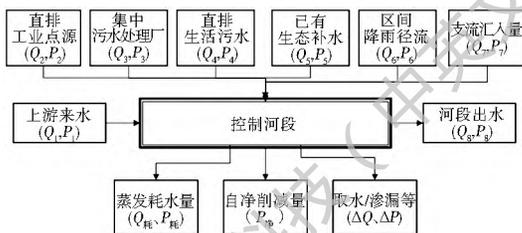


图 1 河段水质水量平衡模型示意图

Fig. 1 A diagram of water quality and quantity balance model of the river reach

#### (2) 模型计算参数的确定。

主要针对该模型中的降雨径流  $Q_6$  和自净削减量  $P_{10}$  中的综合衰减系数  $k$  进行说明。其他参数可根据掌握的 2014 年的流量及水质数据进行确定。

#### 1 降雨径流 $Q_6$

河道径流量的计算方法主要有等值线图法、水位比拟法、径流系数法、水文勘察法和经验公式法,

本文中河段内的径流量的推算采用径流系数法。

径流系数法是指当小流域或附近有年降雨量资料时,且降雨与径流产生密切关系时,可利用多年平均降雨量与径流量之间的关系计算径流量,即利用年降雨量的平均值与径流系数推求多年平均径流量,计算公式为:

$$W = 1000 \times C \times P \times F \quad (1)$$

式中:  $W$  为年径流量( $m^3$ );  $C$  为该地区径流系数,与研究区域植被、地形、地质、主河道长度等因素有关,可通过公式  $C = R/P$  计算径流系数;  $P$  为多年平均降雨量(1982年-2012水文站点数据)( $mm$ );  $R$  为多年平均径流深(1982年-2012水文站点数据)( $mm$ );  $F$  为控制河段流域面积( $km^2$ )。

° 综合削减系数  $k$

针对区段内水量不平衡,需要首先进行水量平衡,在水量平衡中以断面实测值为准,可增加平衡水量( $\Delta Q$ ),其值等于上断面流量与区段内汇入水量和下断面流量之差。因此,本文确定的  $k$  值的综合削减系数为计算公式为:

$$k = \frac{C_{进} Q_{进} + \sum_{i=1}^n q_i c_i + C_{\Delta} \Delta Q - C_{出} Q_{出}}{C_{进} Q_{进} + \sum_{i=1}^n q_i c_i + C_{\Delta} \Delta Q} \quad (2)$$

式中:  $Q_{进}$ ,  $C_{进}$  分别为上游流入的水量( $m^3/s$ )和污染物浓度( $mg/L$ );  $q_i$ ,  $c_i$  分别为排污口或支流的水量( $m^3/s$ )和污染物浓度( $mg/L$ );  $Q_{出}$ ,  $C_{出}$  分别为下游流入的水量( $m^3/s$ )和污染物浓度( $mg/L$ );  $k$  为污染物综合削减系数。

## 2.2 Tennant 法计算模型

Tennant 法属于水文学方法的一种,其所需数据为某断面在人工干扰较少时期,自然状态下近 40 年左右的逐月实测流量数据。特殊情况下,若河道长期人工干扰严重,自然状态下的流量数据年份不足,此时可采用自然状态下近 10 年左右的流量数据。

根据我国的北方河流的实际需水特点,对于 Tennant 方法的水期划分要进行改进。在我国北方内陆河流中 4 月-6 月为河流鱼类产卵和各类植物复苏生长的高峰期; 7 月-10 月为传统意义上的雨季,降水丰沛,河道水量明显增加,流量变大; 11 月-次年 3 月降水较少,河道水量较小,受温度影响,有些河段甚至出现结冰现象,河流的水生动植物进入冬眠期,生态需水量相对较小。因此,将河流生态需水按季节划分为三个时段能更好地反映河流实际的来水过程。依据 Tennant 法的环境流量标准确定三个用水期的环境流量标准见表 1。

表 1 河流环境流量标准

Tab. 1 Standards of river environmental flow

流量描述	推荐的流量(4月-6月)平均流量百分比(%)	推荐的流量(7月-10月)平均流量百分比(%)	推荐的流量(11月-翌年3月)平均流量百分比(%)
最大	200	200	200
最佳范围	60~100	60~100	60~100
极好	60	60	40
非常好	50	50	30
好	30	30	20
中或差	20	20	10
差或最小	10	10	10
极差	0~10	0~10	0~10

## 2.3 湿周法计算模型

湿周法是以湿周作为衡量栖息地质量的指标,来估算河道内流量最小值的方法。它根据河道的水力特性参数,如湿周、水力半径、平均水深等,由实测的河道断面湿周与断面流量之间的对应关系,绘制湿周流量关系曲线,该曲线上的突变点对应的流量值即为河道最小生态流量。本文采用湿周法中的斜率法对清漯河环境流量进行计算。

(1) 建立湿周-流量关系。

依据典型性、稳定性和实用性的原则选择河道断面,结合断面的形态依据表 2 来建立湿周-流量关系,并进行曲线拟合。

表 2 不同河流断面的湿周流量关系

Tab. 2 Wetted perimeter-flow relationship at different river sections

河流断面	湿周流量关系	说明
梯形	$Q = \frac{\sqrt{S}}{n} \left[ \frac{b(p-b)}{2\sqrt{1+m^2}} + \frac{m(p-b)^2}{4(1+m^2)} \right]^{5/3p-2/3}$	$b$ 为河底宽度, $m$ 为边坡系数, 其余同上

(2) 确定临界点。

取湿周-流量关系曲线上斜率为 1 的点为临界点,对函数  $p(q)$  求导,使  $dp/dp = 1$  成立,即可算出最小生态流量  $q$ 。

## 3 清漯河环境流量计算结果分析

清漯河属淮河流域沙颍河水系,发源于新郑市,流经长葛市、许昌县、魏都区(许昌市区)、临颖县、鄢陵等县(市、区),至鄢陵县陶城闸下汇入颍河,全长 149 km,流域面积 2 362  $km^2$ 。流域水系图见图 2。

### 3.1 基于水质水量平衡模型计算结果分析

清漯河省控临颖高村桥断面的“十二五”省政府责任目标、消除劣 V 类水体目标和水环境功能区划



图 2 清颍河流域水系

Fig. 2 The drainage map of Qingyi River Basin

建成、碧水工程计划中相关治污工程已建成,上述工程 2015 年正常运行。

(2) 消除劣 V 类水体目标: 入河工业点源、集中污水处理厂有地方流域标准的按标准要求的排放浓度达标排放计算, 无流域标准的工业点源按《污水综合排放标准》(GB 8978 1996) 一级标准(COD ≤ 100 mg/L、氨氮 ≤ 15 mg/L) 达标排放计算, 集中污水处理厂按《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002) 一级 A 标准(COD ≤ 50 mg/L、氨氮 ≤ 5 mg/L、生活污水处理率 ≥ 85%) 达标排放计算。

(3) 水环境功能区划水质目标: 入河工业点源执行 COD ≤ 50 mg/L、氨氮 ≤ 5 mg/L, 集中污水处理厂执行 COD ≤ 40 mg/L、氨氮 ≤ 3 mg/L。

依据上述计算条件, 2014 年清颍河现状年平均流量为 2 03 m<sup>3</sup>/s, 为实现不同水质目标, 清颍河高村桥断面处所需新增环境流量见表 4。

表 4 实现不同水质目标所需新增流量

Tab. 4 The new flow needed to achieve

河段	different water quality objectives			m <sup>3</sup> /s
	实现“十二五”省政府责任目标所需新增流量	实现消除劣 V 类水体目标所需新增流量	实现水环境功能区划水质目标所需新增流量	
清颍河(许昌段)	1.5	0.6	0.42	

水质目标具体目标值见表 3。

表 3 清颍河临颍高村桥断面不同水质目标要求

Tab. 3 Different water quality requirements for Gaocun Bridge section of Qingyi River

断面名称	mg/L					
	“十二五”省政府责任目标		消除劣 V 类水体目标		水环境功能区划水质目标	
	COD	氨氮	COD	氨氮	COD	氨氮
临颍高村桥	50	2	40	2	30	1.5

结合上述水质目标要求, 以 2014 年水质及流量数据为基准, 不同的水质要求设定不同的计算条件, 开展环境流量计算, 具体计算条件如下:

(1) “十二五”省政府责任目标测算条件: 考虑 2014 年流域规划、碧水工程计划中相关治污工程已

由于实现三种水质目标所需环境流量的计算条件与目标值均不同, 所以计算结果不能相互比较, 但可以看出通过工业点源和集中污水处理厂的进一步提标, 可以减少为实现水质目标所需的新增流量。

### 3.2 基于 Tennant 模型计算结果分析

依据清颍河三里桥水文站 1958 年-1970 年的流量数据, 采用 Tennant 法计算清颍河生态系统所需的环境流量见表 5。

表 5 颍河生态系统所需环境流量(Tennant 法)

Tab. 5 The environmental flow of Qingyi River ecological system (Tennant)

流量	月份											
	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
最大	2.05	1.64	1.56	3.30	1.82	1.35	11.10	9.49	5.90	4.99	3.66	2.59
最佳范围	0.61~1.023	0.49~0.822	0.47~0.781	0.99~1.649	0.55~0.912	0.41~0.677	3.33~5.552	2.85~4.747	1.77~2.951	1.5~2.494	1.1~1.832	0.78~1.295
极好	0.41	0.33	0.31	0.99	0.55	0.41	3.33	2.85	1.77	1.50	0.73	0.52
非常好	0.31	0.25	0.23	0.82	0.46	0.34	2.78	2.37	1.48	1.25	0.55	0.39
好	0.20	0.16	0.16	0.49	0.27	0.20	1.67	1.42	0.89	0.75	0.37	0.26
中或差	0.10	0.08	0.08	0.33	0.18	0.14	1.11	0.95	0.59	0.50	0.18	0.13
差或最小	0.10	0.08	0.08	0.16	0.09	0.07	0.56	0.47	0.30	0.25	0.18	0.13

Tennant 法计算所得清湫河生态系统所需的环境流量适宜范围采用“好”级别的流量范围,为  $0.16 \sim 1.67 \text{ m}^3/\text{s}$ , 其中丰水期适宜流量范围为  $0.75 \sim 1.67 \text{ m}^3/\text{s}$ 、平水期  $0.16 \sim 0.37 \text{ m}^3/\text{s}$ 、枯水期  $0.16 \sim 0.49 \text{ m}^3/\text{s}$ 。适宜的流量过程见图 3, 从枯水期到丰水期所需的流量有呈骤然增加的变化趋势, 平水期和枯水期则变化不大。

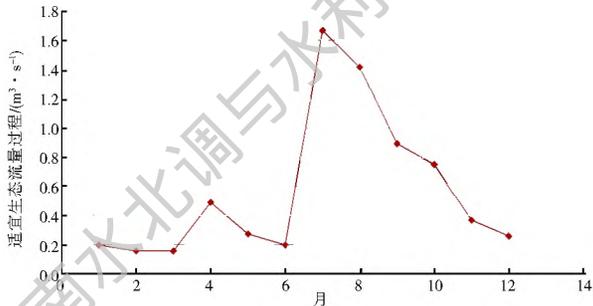


图 3 清湫河适宜流量过程

Fig. 3 Appropriate flow hydrograph of Qingyi River

### 3.3 基于湿周模型计算结果分析

#### (1) 典型年的选取。

根据清湫河三里桥站 1958 年-1970 年历年流量数据进行水文频率计算, 选取频率  $P=25\%$ 、 $P=50\%$  和  $P=75\%$  所对应的年份作为丰水年、平水年和枯水年的典型年。三里桥站水文频率和典型年计算结果见表 6。

表 6 三里桥水文站典型年计算结果

Tab. 6 Calculation results at Sanli Bridge hydrologic station in typical years

频率	年份	年均流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	糙率( $n$ )	水面坡降( $S$ )
$P=25\%$	1963 年	3.74		
$P=50\%$	1968 年	1.10	0.030	0.00068
$P=75\%$	1970 年	0.48		

#### (2) 断面特征。

因清湫河三里桥水文站无实测断面资料, 使用 2009 年清湫河河道治理工程设计断面图作为研究

断面(图 4), 断面为梯形的硬化河道, 底宽  $b=15 \text{ m}$ , 边坡系数  $m=0.833$ 。

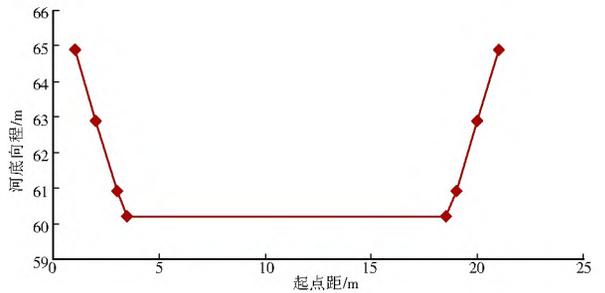


图 4 三里桥河段断面形状

Fig. 4 The shape of Sanli Bridge section

#### (3) 计算结果。

根据梯形断面流量和湿周关系公式(表 2), 计算各典型年各月平均流量对应的湿周, 并进行曲线拟合, 不同水平年的流量-湿周关系曲线见图 5。

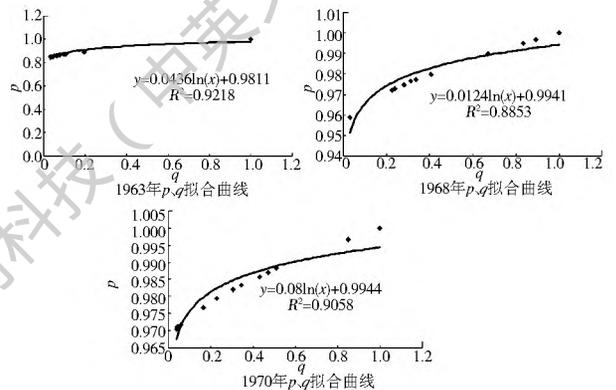


图 5 不同水平年三里桥断面流量-湿周关系

Fig. 5 Relationship curve between flow and wetted perimeter at Sanli Bridge section in different level years

采用斜率法确定临界点, 得出各典型年环境流量为:  $Q_{(P=25\%)} = q$ ,  $Qm = 1.05 \text{ m}^3/\text{s}$ ;  $Q_{(P=50\%)} = 0.03 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $Q_{(P=75\%)} = 0.01 \text{ m}^3/\text{s}$ 。为了验证该方法计算结果是否符合实际情况, 将湿周法计算结果与 Tennant 法计算结果进行对比分析, 见表 7。

表 7 湿周法与 Tennant 法计算结果对比

Tab. 7 Comparison of calculation results between Tennant and Wetted Perimeter methods

频率	年平均流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	湿周法		Tennant 法/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$			
		环境流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	环境流量/年平均流量(%)	鱼类产卵育幼期(4月-10月)		一般用水期(11-翌年3月)	
				最小	适宜	最小	适宜
$P=25\%$ (1963 年)	3.74	1.05	28.1				
$P=50\%$ (1968 年)	1.10	0.03	2.7	0.27	0.81	0.12	0.23
$P=75\%$ (1970 年)	0.48	0.01	2.1				

由表 7 可知, 湿周法计算清湫河三里桥断面  $P=25\%$  丰水年河道内环境流量超出 Tennant 法所设定鱼类产卵育幼期和一般用水期中适宜环境流

量, 而  $P=50\%$  平水年和  $P=75\%$  枯水年环境流量远远小于 Tennant 法所设定鱼类产卵育幼期和一般用水期中最小环境流量, 其中丰水年(1963 年)生

态水力学法计算环境流量结果为 Tennant 法设定的鱼类产卵育幼期适宜环境流量的 129.6%，得到了 Tennant 法的验证，而平水年和枯水年的环境流量计算结果不能采用。造成这一结果的原因可能为清漯河三里桥水文站流量数据序列只有 14 年，且其中枯水年比例较高，导致经验频率计算结果不能很好地反映三里桥站真实的水文频率。本文采用丰水年计算结果即环境流量为  $1.05\text{m}^3/\text{s}$ 。

### 3.4 环境流量计算结果整体分析

#### (1) 河道应保障的常态环境流量。

湿周法计算得出的结果为  $1.05\text{m}^3/\text{s}$ ，是全年的平均流量，没有分不同水期和月份计算，而 Tennant 法计算所得为每个月份的较适宜的流量，由 Tennant 法计算的“好”级别的流量值可以看出，只有 7 月、8 月的流量大于湿周法所计算流量，其他月份均小于湿周法计算流量。为最大程度地保障河流生态系统所需流量，7 月、8 月份采用 Tennant 法计算值，其他月份均采用湿周法计算值，则清漯河河道应保障的常态环境流量计算结果见表 8。

表 8 清漯河生态系统所需环境流量

Tab. 8 The environmental flow of Qingyi River ecological system

流量	月份		
	1月-6月	7月	8月
适宜值	1.05	1.67	1.42

#### (2) 河道改善水质所需应急补水。

根据实现不同水质目标所需环境流量计算结果，实现“十二五”省政府责任目标是最为迫切的，需新增环境流量为  $1.5\text{m}^3/\text{s}$ ；而消除劣 V 类水体目标和水环境功能区划水质目标是假设进一步提标排污条件下，远期才能实现。因此，近期清漯河河道改善水质所需的环境流量为  $1.5\text{m}^3/\text{s}$ 。

## 4 结论

(1) 环境流量是能够满足河流系统生态环境功能所需流量，应结合河流功能特点界定环境流量的组成并选择适用的计算方法。

(2) 本研究考虑“取、用、耗、排”社会水循环及降雨、蒸发等自然水循环建立水质水量平衡模型，清漯河为实现“十二五”省政府责任目标、消除劣 V 类水体目标和水环境功能区划水质目标分别需要的环境流量为  $1.5\text{m}^3/\text{s}$ 、 $0.6\text{m}^3/\text{s}$ 、 $0.42\text{m}^3/\text{s}$ ，作为应急补水时环境流量调控的参考值。

(3) 本研究采用 Tennant 法所计算的环境流量为  $0.16\sim 1.67\text{m}^3/\text{s}$ 、湿周法计算结果为  $1.05\text{m}^3/\text{s}$ 。

(4) 经分析，本研究建议清漯河不同月份保障环境流量值不同：1 月 - 6 月份  $1.05\text{m}^3/\text{s}$ 、7 月份  $1.67\text{m}^3/\text{s}$ 、8 月份  $1.42\text{m}^3/\text{s}$ 。

### 参考文献(References):

- [1] 覃永良, 袁雯. 平原河网地区环境流量计算特征及评价方法研究[J]. 华东师范大学学报: 自然科学版, 2009, 6(6): 71-78. (QIN Yong liang, YU AN Wen. Environmental flow calculation and assessment in plain river network areas[J]. Journal of East China Normal University: Natural Science, 2009, 6(6): 71-78. (in Chinese))
- [2] Thame R. 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: 397-441.
- [3] (澳) Megan Dyson, (荷) Ger Bergkamp, (澳) Scanlon. 环境流量—河流的生命[M]. 张国芳, 孙凤, 孙扬波, 等译. 郑州: 黄河水利出版社, 2006. 2-4. (Dyson M, Bergkamp G, Scanlon J. Flow: the essentials of environmental flows[M]. (in Chinese))
- [4] 王西琴, 张远. 我国环境流量研究的几个关键问题探讨[J]. 中国水利, 2009(23): 4-6. (WANG Xi qin, ZHANG Yuan. Study on key issues of environmental flow research in China[J]. China Water Resources, 2009(23): 4-6. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-1123.2009.23.003.
- [5] 张代青, 梅亚东, 高军省, 等. 基于二元水循环的河流环境流量预警[J]. 水利学报, 2011, 42(3): 344-350. (ZHANG Dai qing, MEI Ya dong, GAO Jun sheng, et al. Early warning of river environmental flow based on dualistic water cycle[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(3): 344-350. (in Chinese))
- [6] 李玮, 褚俊英, 秦大庸, 等. 基于补水配置情景的河流水质及环境容量研究——以汾河干流为例[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2012, 10(1): 9-16. (LI Wei, CHU Jun ying, QIN Da yong. The simulation of water quality and water environment capacity of Fen river based on the scenarios of ecological water supplement[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2012, 10(1): 9-16. (in Chinese))
- [7] 夏军, Hung Hoang Nghia, 曾思栋. 高强度人类活动影响下永定河北京段水质水量模拟[J]. 水文, 2013, 33(5): 1-6. (XIA Jun, HUNG Hoang Nghia, ZENG Si dong. Modeling of water quality in Beijing Reach of Yongdinghe River under high strength human activities[J]. Journal of China Hydrology, 2013, 33(5): 1-6. (in Chinese))
- [8] 董增川, 卞戈亚, 王船海, 等. 基于数值模拟的区域水量水质联合调度研究[J]. 水科学进展, 2009, 20(2): 184-189. (DONG Zeng chuan, BIAN Ge ya, WANG Chuan hai, et al. Joint operation of water quantity and quality based on numerical model[J]. Advances in Water Science, 2009, 20(2): 184-189. (in Chinese))
- [9] 王西琴, 刘昌明, 张远. 黄淮海平原河道基本环境需水研究[J]. 地理研究, 2003, 22(2): 169-175. (WANG Xi qin, LIU Chang ming, ZHANG Yuan. Study of the basic environmental water requirement of the rivers in Huang Huai Hai plain[J]. Geor

- graphical Research, 2003, 22(2): 169-175. (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 Bao hui, LIU Chang ming. Modified calculative criterion of Tennant and its application[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2008, 40(3): 479-482. (in Chinese))
- [11] 张泽聪, 韩会玲, 陈丽. 基于改进的 Tennant 法的大凌河生态基流计算[J]. 水电能源科学, 2013, 31(9): 29-31. (ZHANG Ze cong, HAN Huiling, CHEN Li. Calculation of ecological base flow in Dalinghe river based on improved Tennant method[J]. Water Resources and Power, 2013, 31(9): 29-31. (in Chinese))
- [12] 郑志宏, 黄强, 魏明华, 等. 基于中位数众数理论的 Tennant 法改进与应用[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2010, 42(6): 38-42. (ZHENG Zhi hong, HUANG Qiang, WEI Ming hua, et al. Improvement and application of Tennant method based on median and mode theory[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2010, 42(6): 38-42. (in Chinese))
- [13] 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): 273-280. (LIU Su xia, MO Xing guo, XIA Jun, et al. Uncertainty analysis in estimating the minimum ecological instream flow requirements via wetted perimeter method: curvature technique or slope technique[J]. Acta Geographica Sinica, 2006, 61(3): 273-280. (in Chinese))
- [14] 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[J]. 地理科学进展, 2010, 29(3): 287-291. (JI Li na, LIU Su xia, WANG Xin chun. Wetted perimeter approach to estimate instream flow requirements: a case study in Luanhe water system[J]. Progress in Geography, 2010, 29(3): 287-291. (in Chinese))
- [15] 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): 42-47. (LIU Chang ming, MEN Bao hui, SONG Jin xi. The ecological hydraulic radius approach of ecological flow requirement[J]. Progress in Natural Science, 2007, 17(1): 42-47. (in Chinese))
- [16] 班璇. 中华鲟产卵栖息地的生态需水量[J]. 水利学报, 2011, 42(1): 47-55. (BAN Xuan. Ecological flow requirement for Chinese sturgeon spawning habitat[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(1): 47-55. (in Chinese))
- [17] 张远, 王丁明, 王西琴, 等. 基于鱼类保护目标的太子河环境流量研究[J]. 环境科学学报, 2012, 32(12): 3143-3150. (ZHANG Yuan, WANG Ding ming, WANG Xi qin, et al. Study of environmental flow in Taizi River for fish species protection[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, 32(12): 3143-3151. (in Chinese))
- [18] 倪晋仁, 崔树彬, 李天宏, 等. 论河流生态环境需水[J]. 水利学报, 2002(9): 14-19. (NI Jin ren, CUI Shu bin, LI Tian hong, et al. On water demand of river ecosystem[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002(9): 14-19. (in Chinese))
- [19] 钱正英, 陈家琦, 冯杰. 人与河流和谐发展[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2006, 34(1): 1-5. (QIAN Zheng ying, CHEN Jia qi, FENG Jie. Harmonious development of humanity and rivers[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2006, 34(1): 1-5. (in Chinese))

(上接第 100 页)

- [18] 王振强, 刘春广, 乔光建. 氮、磷循环特征对水体富营养化影响分析[J]. 南水北调与水利科技, 2010, 8(06): 82-85. (WANG Zhen qiang, LIU Chun guang, QIAO Guang jian. Effect of nitrogen and phosphorus cycling characteristic on eutrophication of water body[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2010, 8(06): 82-85. (in Chinese)). DOI:10.3724/SP.J.1201.2010.06082
- [19] 付鑫磊. 官厅水库水体富营养化现状及对策探讨[J]. 北京水务, 2015(04): 20-23. (FU Xin lei. Guanting Reservoir eutrophication status and countermeasures[J]. Beijing Water, 2015(04): 20-23. (in Chinese))
- [20] 杜桂森, 王建厅, 张为华, 等. 官厅水库水体营养状况分析[J]. 湖泊科学, 2004(03): 277-281. (DU Gui sen, WANG Jian ting, ZHANG Wei hua, et al[J]. Journal of Sciences, 2004(03): 277-281. (in Chinese))