

文章编号: 1006-4710(2012)01-0049-07

基于水功能区划的河流生态环境需水量计算研究

宋刚福^{1,2}, 沈冰¹

(1. 西安理工大学 西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 陕西 西安 710048;

2. 华北水利水电学院 环境与市政工程学院, 河南 郑州 450011)

摘要: 以北运河为例, 根据河流功能区划及河流特点, 基于分时段、分区域、分等级的思想, 综合采用 Tennant 法、水质模型法、鱼类生境法进行北运河流域生态环境需水量计算, 得出北运河各功能区河段的最小、适中、最佳生态需水量。研究结果表明: 沙河闸—北关闸、北关闸—杨洼闸的河段水污染严重, 仅依靠增加基流量无法满足河流水质功能要求, 需要在满足河道一定基流的基础上最大程度削减河段的污染物排放量; 土门楼—筐儿港、筐儿港—屈家店河段, 采用鱼类生境法计算河道生态环境需水量分别为 2.581 亿 m^3/a 、3.016 亿 m^3/a , 此水量是该河段恢复河流生态结构与功能健康的最佳需水量。

关键词: 河流生态环境需水量; 计算方法; 功能区划

中图分类号: X171.1

文献标志码: A

Calculation Research on River Eco-Environmental Water Requirements Based on Water Function Regionalization

SONG Gangfu^{1,2}, SHEN Bing¹

(1. Key Lab of Northwest Water Resources and Environment Ecology of MOE, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Institute of Environmental and Municipal Engineering at North China

University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450011, China)

Abstract: With the Beiyunhe River an example, in terms of river function regionalization and river characteristics and based on the ideas of time section, regional section and stage division, such comprehensive methods as Tennant method, water quality model method and fish habitat method are adopted to carry out water requirement calculation of eco-environs in the North canal valley, whereby obtaining the minimum, moderate and the optimal eco-water requirements for each functional region river section of the Beiyunhe River. It can be known via calculation analysis that water pollution is serious in the river sections of Shahe Gate—Beiguan Gate, Beiguan Gate—Yangwa Gate. Accordingly, only by relying on increasing base flow, there is no way to satisfy the functional requirements of the river water quality, it is necessary to eliminate the pollutant emission to the maximum extent in the river section based on the base flow in the river course. Therefore, fish habitat method should be adopted to calculate water requirements of river course eco-environs, which are 25 810 000 m^3/a and 30 160 000 m^3/a at Tu Menlou Gate—Kuang Ergang Gate, Kuang Ergang Gate—Qu Jiadian Gate respectively. This flow is the optimal water requirement for the restoration of river eco-structure and health function of that river section.

Key words: river eco-environmental water requirements; calculation methods; function regionalization

收稿日期: 2011-10-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50939004); 国家水体污染控制与治理科技重大专项资助项目(2008ZX07209-002-04)。

作者简介: 宋刚福(1977-), 男, 辽宁营口人, 讲师, 博士生, 研究方向为水资源系统工程及水环境。E-mail: sgf@ncwu.edu.cn。沈冰(1948-), 浙江吴兴人, 教授, 博导, 博士, 研究方向为旱区水文过程及水资源演变。E-mail: shenbing@xaut.edu.cn。

河流生态系统是自然界最重要的生态系统之一。随着人口增长、社会经济的快速发展,生产和生活用水量不断增加,用水矛盾日益加剧,河流生态系统遭到严重的破坏。河流生态环境需水量的研究是进行河流综合治理、恢复河流健康生命的基础性工作,近几年已成为国内外研究的热点。对河流的生态环境需水的概念,国内外研究者分别有不同的定义和阐述^[1-10]。笔者认为,河流系统通常具有多种功能,不同的区域和不同的阶段,其水资源开发利用的目的不同,必然会提出水资源利用的具体模式,因此河流生态环境需水量应是在特定时间和空间为满足特定服务目标的变量^[3]。基于这种概念,计算河流生态环境需水量,一方面,要考虑河流生态环境需水量的时间和空间特征;另一方面,还要考虑河流生态环境需水量应在特定的时空单元内最大限度地满足河流主要功能的优先选择性。因此在计算时,应明确河流在各个区段和各个时期的功能区划对水资源的要求及河流的基本特点^[7],运用适当的方法计算河流生态环境需水量。

本文以北运河流域为例,在对河流生态环境需水量计算研究方法的综合比较的基础上,基于北运河的时、空功能区划,进行分时段、分区域、分等级的需水量计算,为北运河流域综合治理和生态修复提

供重要的基础性数据。

1 研究区域概况

北运河发源于北京市昌平区燕山南麓,西界永定河,东临潮白河,先后流经北京市通州区、河北省廊坊市香河县和天津市武清区、北辰区和红桥区,干流长 143 km,流域面积 6166 km²,河道平均比降 4.64‰;流域多年平均降雨量 643 mm,降雨主要集中在 6~9 月,约占全年的 84%;多年平均(1956—2008 年系列)径流量为 4.81 亿 m³;多年平均出境水量(含废污水)为 9.03 亿 m³。随着经济社会的快速发展,城市工业废水和生活污水排放量不断增加,河流水质受到严重污染。据 2005 年现场监测,每天约 60 万吨污水未经处理直接排入河中,流域内所有河道水体(包括干流和支流)水质全部为劣 V 类水体。干旱、断流、生态环境恶化是目前北运河流域的主要问题。

根据《海河流域水功能区划》,北运河以安全下泄上游洪水、排除北京城区和农田涝水、下游农业灌溉,以及中下游景观娱乐等为其主要功能。干流共有水功能区 4 个,划分为北运河北京农业用水区、北运河冀津缓冲区、北运河天津农业用水区和北运河天津工业、农业用水区(见表 1)。

表 1 北运河干流水功能区划

Tab. 1 Water quality regionalization of main stream of Beiyunhe River

所在地区	水功能名称	水质目标	范围		
			起始断面	终止断面	长度/km
北京市	北运河北京农业用水区	V	榆林庄	牛牧屯	38.0
河北省、天津市	北运河冀津缓冲区	IV	牛牧屯	土门楼	12.5
天津市	北运河天津农业用水区	IV	土门楼	筐儿港节制闸	41.4
天津市	北运河天津工业、农业用水区	IV	筐儿港节制闸	屈家店节制闸	32.9

资料来源:《北运河干流综合治理规划》,2006。

2 河流生态环境需水量计算方法确定及计算

2.1 河流生态环境需水量计算方法

国外关于河流生态环境需水量计算的研究起步较早,出现了很多算法^[11-14],从其原理上可分为水文学法、水力学法、栖息地法和整体分析法四类。水文学法主要包括 Tennant 法(蒙大拿法)、7Q10 法、流量历时曲线法等,优点是现场不需要测定数据,计算简单快速;缺点是未考虑流量的丰、枯水年变化和季节变化以及河段形状的变化。水力学法主要包括 R2CROSS 法、湿周法及 CASIMIR 法等,优点是测量简单,不需要详细的物种—生境关系,数据容易获

得;缺点是体现不出季节变化因素,不适用确定季节性河流流量。栖息地法主要包括 IFIM 法、物理栖息地模拟法、鱼类生境法等,优点是在水力学法的基础上考虑了水量、流速、水质和水生物种等影响因素;缺点是所需的生物资料难以获取。整体分析法主要包括南非的 BBM 法和澳大利亚的整体研究法。优点是综合考虑了专家小组意见和生态整体功能,强调河流是一个生态系统整体,缺点是必须有实测天然日流量系列、专家小组意见以及公众参与等,不易被应用。

借鉴国外的计算方法,国内很多学者结合实际也提出了许多算法,主要包括最小月平均流量法、10a 最枯月平均流量法(7Q10 改进法)、逐月最小生

态径流计算法、逐月频率计算法、生物空间最小需求法及估算法、环境功能设定法等^[15-16]。这些方法也都在实际工作中得到不同程度的应用。

北运河流域流经北京、天津、河北等地,河流流经地区河流污染状况及河流规划功能不一样,因此本文依据河流生态系统结构组成、河流生态系统主要特点及生态系统的整合性,在人类活动(拦河筑

坝、河流污染和“河流季节化”等)对河流生态环境需水的影响进行了全面的分析的基础上,针对北运河功能区划目标、生态系统保护目标及敏感因素,从时间性、空间性、河流生态功能需求等角度出发,提出基于分时段、分区域、分等级的计算思想,综合采用 Tennant 法、水质模型法和鱼类生境法对北运河河流生态环境需水进行计算(见表2)。

表2 北运河水功能区生态环境需水量计算方法

Tab.2 Computation method of eco-environmental water requirements Beiyunhe River

水功能名称	起讫点	近期水质目标	远期水质目标	河段主要特点	需水量计算方法	方法使用依据
北运河北京景观用水区	沙河水库—沙河闸	V	IV	人体非直接接触的景观娱乐用水	Tennant 法	一般景观用水,对水质要求不高
北运河北京农业用水区	沙河闸—北关闸	V	IV	水源为北京城区涝水、城市河湖和农业退水及部分废污水,河段的水污染严重	水质模型法	河流接受排污量较大,提高纳污能力,满足灌溉用水
北运河北京工业用水区	北关闸—杨洼闸	V	IV	水源为北京城区涝水和北京城市河湖退水及部分废污水,河段的水污染严重	水质模型法	一般工业用水对水质要求不高,但考虑河流接受排污量较大,为提高河流纳污能力
津冀缓冲区	杨洼闸—土门楼	IV	IV	湿地自然保护区,典型植物芦苇生长及鸟类栖息、停留和繁殖地	Tennant 法	湿地芦苇和其他动植物的生长和栖息用水
天津农业用水区	土门楼—筐儿港	IV	IV	水体中除有水生维管束植物、藻类、底栖动物外有少量鱼类	鱼类生境法	考虑鱼类等动植物的生长和繁育
天津工、农业用水区	筐儿港—屈家店	IV	IV	水体中除有水生维管束植物、藻类、底栖动物外有少量鱼类	鱼类生境法	考虑鱼类等动植物的生长和繁育

注:近期目标指 2020 年,远期目标指 2030 年。

2.2 北运河生态环境需水量计算

2.2.1 Tennant 法计算生态环境需水量

Tennant 法建立了河流流量和水生生物、河流景观及娱乐之间的关系,在不考虑鱼类产卵育幼期的情况下,它分别将河道多年平均流量的 10%、30%、60%作为河道生态环境流量的最小、适中、最佳值^[17]。通过北运河的生态调查,沙河水库—沙河闸、杨洼闸—土门楼河段只有水生维管束植物、藻类、底栖动物等,而无鱼类活动,因此以该河段 1956—2008 年的 53 年长系列水文资料为计算基础,采用 Tennant 法计算两河段的生态环境需水量,结果见表3。

表3 Tennant 法计算河段生态环境需水量

Tab.3 Eco-environment water requirements by Tennant method

河段	最小生态需水/(亿 m ³ /a)	适中生态需水/(亿 m ³ /a)	最佳生态需水/(亿 m ³ /a)
沙河水库—沙河闸	0.347	1.041	2.082
杨洼闸—土门楼	0.493	1.479	2.958

2.2.2 水质模型法计算生态环境需水量

根据王西琴等^[7]的研究,对于水污染严重的河流,其最小生态环境需水量主要是满足保持水体一定的稀释能力和一定的自净能力的需水量,即河流的最小生态环境需水量是河流主要污染物的自净需水量。本文采用一维稳态水质模型计算河流自净需水量^[18]。其主要方法是将河流进行河段概化,当计算河段有单个排污口且在上游断面,假设水量沿程不变时,水质模型解析式为:

$$Q_0 = \frac{q_0 S_0 \exp\left(-\frac{Kx}{86.4u}\right) - q_0 C(x)}{C(x) - C_0 \exp\left(-\frac{Kx}{86.4u}\right)}$$

(1)

式中: $C(x)$ 为河段终止断面的污染物浓度(mg/L); C_0 为河段起始断面的污染物浓度(mg/L); x 为起始断面到终止断面的距离(km); K 为污染物自净系数(1/d); u 为断面平均流速(m/s); Q_0 为上游来水水量(m³/s); q_0 为排污口排入河流的水量(m³/s); S_0 为排污口排入河流的污染物浓度(mg/L)。

当河段内排污口与断面有一定距离,并且有多

个排污口时,可得到:

$$Q_0 = \frac{\left(q_1 S_1 \exp\left(-\frac{Kx_1}{86.4u} \right) + q_2 S_2 \exp\left(-\frac{Kx_2}{86.4u} \right) + \cdots + \right) - (q_1 + q_2 + \cdots) C(x)}{C(x) - C_0 \exp\left(-\frac{Kx_0}{86.4u} \right)}$$

(2)

在已知排污口污水排放浓度、排放量和终止断面的水质目标时,可计算出河流的生态环境需水量 Q_0 。

北运河属城市化半城市化河流,河流污染主要来自城市涝水、城市河湖退水及部分废污水,主要污染物为 COD 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 。根据河流功能分区的水环

境目标,按照国家水环境质量标准确定各河段水质标准和各排污口河段的污水排放流量、排放浓度(河段的水环境容量目标值),以沙河闸—北关闸、北关闸—杨洼闸河段 2008 年的实际排污量为计算基础,计算沙河闸—北关闸、北关闸—杨洼闸河段生态环境需水量,结果见表 4。

表 4 水质模型法计算河段生态环境需水量
Tab. 4 Eco-environment water requirements by water quality model method

河 段	河段长度/km	河段平均流速/(m/s)	COD 河流自净需水量/ (亿 m^3/a)	$\text{NH}_3\text{-N}$ 河流自净需水量/ (亿 m^3/a)
沙河闸—北关闸	47.4	0.1	2.64	12.34
		0.2	8.19	31.58
		0.3	13.86	51.17
北关闸—杨洼闸	38.0	0.1	3.37	4.92
		0.2	8.21	11.87
		0.3	13.14	18.92

2.2.3 鱼类生境法计算生态环境需水量

鱼类是河流生态系统的顶级群落生物,河道内的流量减少改变了水域的理化性质及其食物链,使鱼类的生存环境、生长发育受到严重威胁,当鱼类的生存条件得到满足时,其他水生生物也相应的会得到满足。

鱼类生境法是即通过分析鱼类生境指标与水流条件的关系,选择能够满足鱼类生境需求的水流条件,确定生态流量的方法,即对不同的河流区域,以观测试验等手段获取鱼类生长、产卵繁殖所需要的流速信息,通过控制断面的流速-流量关系曲线,确

定河流适宜生态流量^[19]。根据北运河的水生态的调查观测结果及收集到的相关资料,只有在天津段土门楼—筐儿港、筐儿港—屈家店区域发现有少量鱼类活动,且主要以鲫鱼为主,因此选择鲫鱼为本次研究的关键物种,由鲫鱼生存、产卵的适宜流速(鲫鱼产卵期一般为 4~7 月,适宜流速为 0.3~0.4 m/s,生长适宜流速为 0.2 m/s^[20])、河流断面的水力参数等条件和梯形明渠过水断面水利要素的相关公式计算土门楼—筐儿港、筐儿港—屈家店河段维持鱼类及各种生物适宜生存的河流需水量(亿 m^3),结果见表 5。

表 5 鱼类生境法计算河段生态环境需水量
Tab. 5 Eco-environment water requirements by fish habit method

项目	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	全年
土门楼—筐儿港	0.121	0.121	0.121	0.403	0.403	0.403	0.403	0.121	0.121	0.121	0.121	0.121	2.581
筐儿港—屈家店	0.158	0.158	0.158	0.438	0.438	0.438	0.438	0.158	0.158	0.158	0.158	0.158	3.016

3 结果分析

沙河闸—北关闸及北关闸—杨洼闸河段的水资源、水环境特征主要是水资源量能够满足其生态环境的需水,但由于该河段的水源为北京城区涝水和北京城市河湖退水及部分废污水,河段的水污染严重,水质不能满足水功能区划的要求,因此采用水质模型法,以 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的河流自净需水量作为河流的生

态环境需水量(因 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的河流自净需水量大于 COD 计算的自净需水量),计算两河段的最小生态环境需水量分别为 12.34 亿 m^3/a 和 4.92 亿 m^3/a 。然而两河段多年平均实际来水量分别为 3.08 亿 m^3/a 、4.01 亿 m^3/a ,河道来水量远小于计算水量,即该河段排入的废污水远远超过现阶段河水稀释降解、自净能力的范围。据调查,沙河闸—北关闸、北关闸—杨洼闸河段 2008 年的排污情况分别

是: 污水排放量为 9669.14 万 m³/a、1069.45 万 m³/a; COD 的排放量为 12319.14 t/a、4793.84 t/a; NH₃-N 的排放量为 1648.58 t/a、334.41 t/a。按照河道的实际流量, 据测算两个河段至少分别需要削减 75%、20% 的废污水才能满足其生态环境功能要求。因此, 在现有阶段不可能从水质的角度满足沙河闸—北关闸、北关闸—杨洼闸的生态环境需水问题, 只能是通过逐渐加大生态基流量, 同时更主要的是削减两河段的污染物排放量, 才能逐渐恢复河流水质状况, 最终满足河段功能要求。通过采用 Tennant 法以河段年多年平均流量的 10%、30%、60% 计算两河段的最小、适中、最佳生态环境流量值, 其结果为: 沙河闸—北关闸河段的生态环境需水量: 最小 0.308 亿 m³/a、适中 0.923 亿 m³/a、最佳 1.846 亿 m³/a; 北关闸—杨洼闸河段的生态环境需水量: 最小 0.401 亿 m³/a、适中 1.203 亿 m³/a、最佳 2.401 亿 m³/a。

从水生态角度, 根据北运河水生态调查, 整个北运河流域由于污染严重, 水生物多以浮游植物、浮游动物、底栖动物及水生维管束植物为主, 很少有顶级动物鱼类活动, 仅在天津的筐儿港、屈家店段发现有少量鱼类, 为满足鱼类生存繁殖的需要, 恢复该段河流生态健康, 采用鱼类生境法计算得出筐儿港、屈家

店河段的生态环境需水量为 2.581 亿 m³/a、3.016 亿 m³/a, 分别占河段多年平均流量的 84% 和 95%, 采用 Tennant 法, 一般用水期(7~3 月) 以该河段多年平均流量的 10%、30%、60% 作为最小、适中、最佳生态环境需水量, 鱼类产卵育幼期(4~7 月) 以河段多年平均流量的 30%、50%、70% 作为最小、适中、最佳生态环境需水量, 计算该功能区的生态环境需水量, 可得土门楼—筐儿港河段的生态需水量分别为: 最小 0.516 亿 m³/a、适中 1.085 亿 m³/a、最佳 1.821 亿 m³/a(小于 2.581 亿 m³/a); 筐儿港—屈家店河段的生态需水量分别为: 最小 0.599 亿 m³/a、适中 1.236 亿 m³/a、最佳 2.053 亿 m³/a(小于 3.016 亿 m³/a)。由此可见, 用鱼类生境法计算的河段生态环境需水量是恢复河流生态结构与功能健康, 维持生物多样性的水量, 属于最高级别的河流生态需水。根据北运河流域功能区划, 综合上述分析, 分别取 0.516 亿 m³/a、1.085 亿 m³/a、2.581 亿 m³/a 和 0.599 亿 m³/a、1.236 亿 m³/a、3.016 亿 m³/a 分别为土门楼—筐儿港、筐儿港—屈家店两河段的最小、适中、最佳生态环境需水量。

综合以上计算分析, 得到北运河主要功能区的生态基流最小流量和逐渐改善达到的北运河生态环境未来目标的适中、最佳生态环境需水量, 见表 6。

表 6 北运河河流生态环境需水量计算汇总表

Tab. 6 Summary of eco-environment water requirements of Beiyunhe River															
河段	生态环境需水量	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	全年	
沙河水库—沙河闸 (16 km)	最小	亿 m ³	0.0024	0.0035	0.008	0.0118	0.0104	0.0451	0.1021	0.0836	0.0394	0.0207	0.0152	0.052	0.347
		m ³ /s	0.093	0.135	0.304	0.449	0.394	1.716	3.882	3.177	1.498	0.787	0.577	0.197	1.101
	适中	亿 m ³	0.007	0.011	0.024	0.035	0.031	0.135	0.306	0.251	0.118	0.062	0.046	0.156	1.041
		m ³ /s	0.275	0.377	0.916	1.327	1.188	5.121	11.65	9.558	4.48	2.369	1.741	5.942	3.3
	最佳	亿 m ³	0.014	0.021	0.048	0.071	0.062	0.271	0.613	0.502	0.236	0.124	0.091	0.312	2.082
		m ³ /s	0.535	0.757	1.836	2.697	2.368	10.301	23.32	19.098	8.97	4.719	3.451	11.872	6.6
沙河闸—北关闸 (47.4 km)	最小	亿 m ³	0.013	0.008	0.006	0.003	0.008	0.012	0.06	0.113	0.04	0.02	0.012	0.014	0.308
		m ³ /s	0.49	0.3	0.23	0.11	0.3	0.46	2.28	4.3	1.52	0.76	0.46	0.53	0.97
	适中	亿 m ³	0.028	0.0143	0.0093	0.003	0.0183	0.0317	0.18	0.3418	0.1171	0.0566	0.0255	0.0333	0.86
		m ³ /s	1.075	0.497	0.356	0.107	0.708	1.201	6.86	13.008	4.45	2.159	0.961	1.272	2.72
	最佳	亿 m ³	0.067	0.0383	0.0283	0.012	0.0423	0.0667	0.359	0.6788	0.2381	0.1156	0.0605	0.0753	1.783
		m ³ /s	2.555	1.407	1.086	0.447	1.618	2.531	13.66	25.818	9.05	4.399	2.291	2.872	5.65
北关闸—杨洼闸 (38.06 km)	最小	亿 m ³	0.02	0.018	0.016	0.012	0.026	0.032	0.062	0.1	0.046	0.029	0.02	0.02	0.401
		m ³ /s	0.76	0.68	0.61	0.46	0.99	1.22	2.36	3.08	1.75	1.1	0.76	0.76	1.27
	适中	亿 m ³	0.0497	0.0451	0.0394	0.0302	0.0716	0.0909	0.1827	0.298	0.131	0.0806	0.0491	0.0507	1.12
		m ³ /s	1.895	1.667	1.506	1.147	2.738	3.451	6.96	11.338	4.97	3.069	1.861	1.932	3.55
	最佳	亿 m ³	0.1097	0.0991	0.0874	0.0662	0.1496	0.1869	0.3687	0.598	0.269	0.1676	0.1091	0.1107	2.323
		m ³ /s	4.185	3.727	3.326	2.507	5.698	7.101	14.03	22.748	10.22	6.379	4.141	4.222	7.36

续表 6

河段	生态环境需水量	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	全年	
杨洼闸 —土门楼 (17.34 km)	最小	亿 m ³	0.027	0.027	0.026	0.02	0.045	0.053	0.064	0.088	0.053	0.037	0.027	0.027	0.493
		m ³ /s	1.03	1.03	0.99	0.76	1.71	2.02	2.43	3.35	2.02	1.41	1.03	1.03	1.56
	适中	亿 m ³	0.0708	0.0698	0.0658	0.0513	0.1251	0.149	0.1807	0.253	0.1462	0.1013	0.0671	0.0699	1.35
		m ³ /s	2.705	2.607	2.506	1.947	4.768	5.661	6.88	9.628	5.55	3.859	2.541	2.662	4.28
	最佳	亿 m ³	0.1538	0.1508	0.1428	0.1123	0.2601	0.307	0.3717	0.516	0.3042	0.2123	0.1471	0.1509	2.829
		m ³ /s	5.855	5.687	5.436	4.267	9.898	11.661	14.14	19.628	11.56	8.079	5.591	5.742	8.96
土门楼 —筐儿港 (41.4 km)	最小	亿 m ³	0.015	0.014	0.006	0.048	0.039	0.129	0.132	0.048	0.033	0.024	0.014	0.014	0.516
		m ³ /s	0.579	0.54	0.231	1.851	1.505	4.977	5.093	1.852	1.273	0.926	0.54	0.54	1.636
	适中	亿 m ³	0.045	0.043	0.018	0.08	0.065	0.215	0.22	0.144	0.098	0.072	0.043	0.042	1.085
		m ³ /s	1.736	1.659	0.694	3.086	2.508	8.295	8.488	5.556	3.781	2.778	1.659	1.62	3.44
	最佳	亿 m ³	0.121	0.121	0.121	0.403	0.403	0.403	0.403	0.121	0.121	0.121	0.121	0.121	2.581
		m ³ /s	4.668	4.668	4.668	15.548	15.548	15.548	15.548	4.668	4.668	4.668	4.668	4.668	8.184
筐儿港 —屈家店 (32.9 km)	最小	亿 m ³	0.016	0.012	0.015	0.033	0.093	0.129	0.162	0.057	0.039	0.019	0.011	0.013	0.599
		m ³ /s	0.617	0.463	0.579	1.273	3.588	4.977	6.25	2.199	1.505	0.733	0.424	0.502	1.899
	适中	亿 m ³	0.048	0.036	0.045	0.055	0.155	0.215	0.27	0.17	0.116	0.056	0.032	0.038	1.236
		m ³ /s	1.852	1.389	1.736	2.122	5.98	8.295	10.417	6.559	4.475	2.16	1.235	1.466	3.919
	最佳	亿 m ³	0.158	0.158	0.158	0.438	0.438	0.438	0.438	0.158	0.158	0.158	0.158	0.158	3.016
		m ³ /s	6.096	6.096	6.096	16.898	16.898	16.898	16.898	6.096	6.096	6.096	6.096	6.096	9.564

4 结 论

根据河流功能区划及河流特点,综合采用 Tennant 法、水质模型法、鱼类生境法对北运河流域进行分时段、分区域、分等级的生态环境需水量分析和计算,得出北运河各功能区河段的最小、适中、最佳生态环境需水量。同时,在对计算结果分析的过程中发现,北运河沙河闸—北关闸、北关闸—杨洼闸河段,由于两河段水污染严重,现阶段只能靠在逐渐增加河道基流的基础上最大程度削减河段的污染物排放量,才能逐渐恢复河流水质状况,最终满足河段功能要求;在土门楼—筐儿港、筐儿港—屈家店河段,考虑两河段有少量鱼类活动,以采用鱼类生境法计算的河道生态环境需水量作为该河段的最佳生态需水量。本文在基于北运河功能区划对水资源的要求基础上,充分考虑河流现状特点及河流生态服务价值,综合运用适合的生态环境需水量计算方法得到了北运河流域分时段、分区域、分等级的生态环境需水量。

参考文献:

[1] 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.
Li Lijuan, Zheng Hongxing. Environmental and ecological water consumption of river systems in haihe-luanhe basins [J]. Acta Geographica Sinica,2000,55(4):495-500.
[2] 丰华丽,王超,李勇. 流域生态需水量的研究[J]. 环境科

学动态,2001,(1):27-30.
Feng Huanli, Wang Chao, Li Yong. Study on ecological water demand by river[J]. System Environment Science, 2001,(1):27-30.
[3] 倪晋仁,崔树彬,李天宏,等. 论河流生态环境需水[J]. 水利学报,2002,2(9):14-26.
Ni Jinren, Cui Shubin, Li Tianhong, et al. Discussions on water demand of river ecosystem[J] Water Resour, 2002,2 (9):14-26.
[4] 郑红星,刘昌明,丰华丽. 生态需水的理论内涵探讨[J]. 水科学进展,2004,15(5):626-633.
Zheng Hongxing, Liu Changming, Feng Huali. On concepts of ecologicalwater demand [J]. Advances in Water Science,2004,15(5): 626-633.
[5] 张丽,李丽娟,梁丽乔,等. 流域生态需水的理论及计算研究进展[J]. 农业工程学报,2008,24(7):307-312.
Zhang Li, Li Lijuan, Liang Liqiao, et al. Progress on the research of theory and calculation method of ecological water requirement [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2008,7(7):307-312.
[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[M]. 科学出版社,2003.
[7] 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[J]. 环境科学学报,2001,21 (5):544-547.
Wang Xiqin, Liu Changming, Yang Zhifeng. Method of resolving the lowest environmental water demands in river course (I)-theory [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2001,21(5)544-547.

- [8] Geoffrey E. Water allocation to protect river ecosystems [J]. *Regulated Rivers: Research & Management*. 1996, 1 (12): 353-365.
- [9] Robert J N, John J M, Diane M M. The freshwater imperative a research agenda [M]. Washington D C: Island Press, Covelo, California. 1993.
- [10] Peter H G. Water in crisis: paths to sustainable water use [J]. *Ecological Applications*. 1998, 8(3): 571-579.
- [11] 冯宝平, 张展羽, 陈守伦, 等. 生态环境需水量计算方法研究现状 [J]. *水利水电科技进展*, 2004, 24 (6): 59-62.
- Feng Baoping, Zhang Zhanyu, Chen Shoulun, et al. Review of calculation method for water demand of ecological environment [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2004, 24(6): 59-62.
- [12] 徐志侠, 王浩, 董增川, 等. 河道与湖泊生态需水理论与实践 [M]. 北京: 水利水电出版社, 2005.
- [13] 钟华平, 刘恒, 耿雷华, 等. 河道内生态需水估算方法及其评述 [J]. *水科学进展*, 2006, 17(3): 430-433.
- Zhong Huaping, Liu Heng, Geng Leihua, et al. Review of assessment methods for instream ecological flow requirements [J]. *Advances in Water Science*, 2006, 17(3): 430-433.
- [14] 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 Zhifeng Zhang Yuan. Comparison of methods for ecological and environmental flow in river channels [J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2003, 18(3): 294 ~ 302.
- [15] 于龙娟, 夏自强. 最小生态径流的内涵及计算方法研究 [J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2004, 32(1): 18-22.
- Yu Longjuan, Xia Zhiqian. Connotation of minimum ecological run off and its calculation method [J]. *Journal of Hehai University (Natural Sciences)*, 2004, 32 (1): 18-22.
- [16] 李捷, 夏自强, 马广慧, 等. 河流生态径流计算的逐月频率计算法 [J]. *生态学报*, 2007, 27(7): 2916-2921.
- Li Jie, Xia Zhiqian, Ma Guanghui, et al. A new monthly frequency computation method for instream ecological flow [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(7): 2916-2921.
- [17] Armentrout G W, Wilson J F. Assessment of low flows in-streams in northeastern Wyoming [J]. *USGS Water Resources Investigation Report*, 1987, 85-4246, 4 (5): 533-538.
- [18] 张远. 黄河流域坡高地与河道生态环境需水规律研究 [D]. 北京师范大学环境科学研究所. 2003.
- Zhang Yuan. Research on the Ecological and Environmental Water Requirements of the Highland and River Channel in the Yellow River Basin [D]. Beijing Normal University Environmental Science Research Institute. 2003.
- [19] 陈敏建, 丰华丽, 王立群, 等. 适宜生态流量计算方法研究 [J]. *水科学进展*, 2007, 18(5): 745-750.
- Chen Minjian, Feng Huanli, Wang Liqun, et al. Calculation methods for appropriate ecological flow [J]. *Advances in Water Science*, 2007, 18(5): 745-750.
- [20] 王武. 鱼类增殖殖学 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.

(责任编辑 杨小丽)