

基于多种水文学方法的干旱区内陆河流健康流量重构

何兵, 高凡, 覃姗, 黄霄

(新疆农业大学 水利与土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052)

摘要: [目的] 采用多种水文学方法重构叶尔羌河河流健康过程, 以期为基于河流健康的生态调控提供科学依据。[方法] 以新疆干旱内陆河流叶尔羌河为研究对象, 选取卡群水文站 1957—2015 年逐月实测流量资料, 基于叶尔羌河包括河流形态、水文条件、河流生态系统等河流修复目标, 兼顾目标的功能需求性与可达性, 将河流保护目标分为保守目标和最优目标, 采用改进 Tennant 法、Texas 法、月保证率法、河流输沙需水经验公式等水文学方法, 重构叶尔羌河各时段健康流量过程。[结果] ①保守河流保护目标下枯水时段、平水时段和丰水时段的平均健康流量分别为 4.93, 13.35, 80.49 m³/s, 折算成水量依次为 5.20×10⁷, 1.41×10⁸, 8.48×10⁸ m³。考虑输沙需水情况, 年健康需水量为 1.19×10⁹ m³。②最优河流保护目标下枯水时段、平水时段和丰水时段的健康流量分别为 14.95, 24.14, 182.12 m³/s, 折算成水量依次为 1.56×10⁸, 2.54×10⁸, 1.92×10⁹ m³。考虑输沙需水情况, 年健康需水量为 2.33×10⁹ m³。[结论] 通过对比相关文献、资料, 认为基于多种水文学方法的干旱区内陆河流健康流量重构成果基本合理, 可为后续河流健康的水资源调控界定和生态环境保护等方面提供科学指导。

关键词: 流量重构; 河流健康; 水文学方法; 叶尔羌河

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2019)01-0160-07

中图分类号: TV213

文献参数: 何兵, 高凡, 覃姗, 等. 基于多种水文学方法的干旱区内陆河流健康流量重构[J]. 水土保持通报, 2019, 39(1):160-166. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2019.01.026; He Bing, Gao Fan, Qin Shan, et al. Reconstruction of river health discharge in arid inland area based on various hydrology methods[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(1):160-166.

Reconstruction of River Health Discharge in Arid Inland Area Based on Various Hydrology Methods

He Bing, Gao Fan, Qin Shan, Huang Xiao

(College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang 830052, China)

Abstract: [Objective] To reconstruct health process of the Yarkant River using various hydrological methods, in order to provide scientific basis for ecological regulation and control based on river health. [Methods] Monthly discharge data from the Kaqun hydrological station in Xinjiang Wei Autonomous Region from 1957 to 2015 were analyzed. Based on the river restoration targets including river morphology, hydrological condition, and health of the river ecosystem, considering the functional requirements and the accessibility, the river protection objectives were divided into conservative and optimal objectives. To reconstruct a healthy discharge pattern in the Yarkant River, the improved Tennant method, Texas method, the monthly guarantee rate method, and the water demand empirical formula for sediment transport were used. [Results] ① Under conservative river protection targets, healthy discharge during the low flow period, common flow period, and high flow period was 4.93, 13.35, 80.49 m³/s, respectively, the discharge converted water volumes were 5.20×10⁷, 1.41×10⁸, 8.48×10⁸ m³, respectively. While the total annual water requirement for river health was 1.19×10⁹ m³, considering sediment transport demand. ② Under optimal river protection targets, healthy discharge during the low flow period, common flow period, and high flow period was 14.95, 24.14, 182.12 m³/s,

收稿日期: 2018-07-14

修回日期: 2018-07-26

资助项目: 国家自然科学基金项目“不同遮蔽及污化条件下雪层的吸、传热机理及其融雪过程模拟研究”(51769036)

第一作者: 何兵(1992—), 男(汉族), 安徽省滁州市人, 硕士研究生, 研究方向为内陆干旱区水文过程及水资源利用。E-mail: 1223215435@qq.com。

通讯作者: 高凡(1980—), 女(汉族), 新疆维吾尔自治区乌鲁木齐市人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 长期从事水资源系统工程与河流生态保护研究工作。E-mail: gutongfan0202@163.com。

respectively, and the outcome converted water volumes were 1.56×10^8 , 2.54×10^8 , 1.92×10^9 m^3 , respectively. With the consideration of sediment transport demand, the annual water requirement for river health was 2.33×10^9 m^3 . [Conclusion] In comparison with relevant literature and data, it is considered that the research results are reasonable, and it can provide scientific guidance for the river health and water resources regulations and ecological protection in future.

Keywords: discharge reconstruction; river health; hydrological methods; the Yarkant River

河流是地球上重要的自然生态系统,是维持陆地生态系统与水生态系统实现物质、能力和信息传输良性循环的主要载体^[1]。由于河流是各类水体中较易被开发利用的淡水资源,随着经济社会的不断发展和人口的不断增长,河流出现了如断流、水质恶化、生物栖息地破坏、生物多样性受损及重要或敏感水生生物消亡等一系列问题^[2-3]。协调河流开发利用与保护治理之间的关系,维持河流健康对流域或区域水安全、生态安全、经济社会可持续发展和人类福祉具有重要意义。近半个世纪以来国内外对河流生态系统与水文情势之间关系的大量实例研究表明,合理的河流流量模式是维持河流健康与生物多样性的关键^[4]。河流健康流量的概念定义为:用以维持相对稳定的水沙通道、保持适度的水量和良好的水质,维护相对完整的河流生态系统,防止河道功能性断流的一系列流量及其过程^[5]。从维持河流系统正常功能发挥角度看,河流在生态水文季节的不同时期具有不同的功能,对应的河流健康流量的类型包括最小生态流量、适宜生态流量、自净流量、输沙流量、维持水生生物生存需水流量等,推求方法可以参照河流生态需水计算方法^[5-6]。目前,全球约有 207 种河流生态需水计算方法^[3-7],大致可归纳为水文学方法、水力学方法、生物栖息地法及整体分析法。鉴于中国大多数河流都缺乏长期且有效的生物检测数据,生物栖息地法和整体分析法在中国应用较困难;水力学方法因需要大量的现场实测数据、较长的时间和较充足的人力与物力,应用也较为困难;而水文学方法所需要的数据较少且仅利用水文资料中的历史流量数据就可确定生态需水流量,故应用起来最简单、最普遍。其中,河流自净需水计算方法主要包括最小月平均流量法、水质稳定模型模拟法、水质目标约束法、水环境容量法、环境功能设定法、污径比法等;维持水生生物生存需水计算方法主要包括最小月平均流量法和月保证率法、生态水深流速法等;输沙需水研究是中国的特色,研究对象对集中在水体含沙量较高的黄河、渭河等流域的汛期输沙需水,计算方法主要包括基于最大月平均含沙量的河流汛期输沙水量、最小河段输沙需水量

等^[8-11]。干旱区内陆河流多发源与高寒山区,河流水资源与生态环境系统较为脆弱^[9-10]。因此,本文拟以新疆干旱区内陆河流叶尔羌河为研究对象,选取 1957—2015 年叶尔羌河干流河源区出山口卡群水文站逐月实测流量资料,分别从河流形态、水文条件、河流生态系统等方面制定河流健康保护目标,并基于保护目标的功能需求性和可达性,将河流健康保护目标分为保守目标和最优目标,采用多种水文学方法重构叶尔羌河河流健康过程,以期为基于河流健康的生态调控提供科学依据。

1 数据来源与研究方法

1.1 研究区概况

叶尔羌河是新疆 18 条大河(多年平均径流量 1.00×10^9 m^3 以上)之一,位于新疆南疆喀什地区,是叶尔羌河流域干流,发源于昆仑山和喀喇昆仑山,河源至河口全长 1 078 km,为塔里木河流域“四源一干”水系格局的重要组成部分,多年平均河川径流量 6.55×10^9 m^3 。叶尔羌河属典型的西北干旱区内陆河流,径流补给来源主要为冰川融雪补给,自卡群水文站出山口控制断面以下为径流耗散区,同时也是河流开发利用的关键河段,拥有新疆最大、全国第四的叶尔羌河灌区(灌溉面积 6.31×10^6 hm^2),同时,由于叶尔羌河径流主要集中在夏季(约占全年径流总量的 68.5%),随着流域经济社会的发展,水资源开发利用程度不断提高,河流春灌缺水、夏洪突出,盐渍及沙化趋势加剧,向塔里木河生态输水严重不足,平原水库蒸发渗漏损失严重,水资源供需矛盾突出,生产生活挤占生态用水现象显著等问题已经威胁到河流健康生命,需要构建一套能够指示河流健康状态的健康流量过程,指导河流水资源管理,以促进该流域经济社会与生态环境的可持续发展。

1.2 数据来源与资料处理

选取叶尔羌河源区出山口水文站——卡群水文站 1957—2015 年共 59 a 实测逐月流量序列。卡群水文站地理坐标为 $37.98^\circ N, 76.90^\circ E$,测站海拔 1 370 m,控制断面以上河长 645 km,集水面积 50 248 km^2 。卡群断面长系列逐月径流变化特征见

图 1。由图 1 可以看出,年内径流过程线呈明显“单峰型”,年内分配极不均匀(在 6—9 月径流量达到 $5.30 \times 10^9 \text{ m}^3$,占年总径流量的 79.4%),年内径流过程线的季节变化特征为夏季径流量 > 秋季径流量 > 冬季径流量 > 春季径流量,且径流量主要集中在夏季,占全年径流量 68.05%。

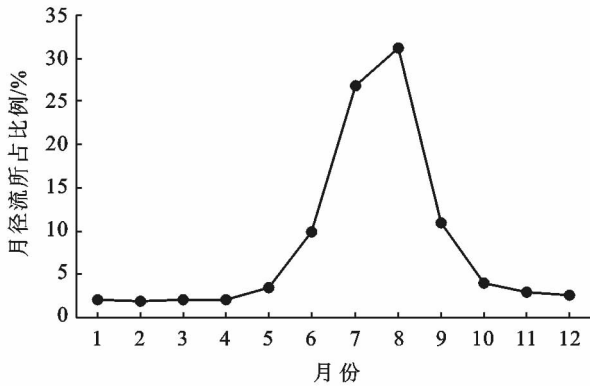


图 1 新疆卡群水文站多年平均径流量年内分配过程

1.3 研究方法

根据高凡等^[11]对叶尔羌河河流健康评价结果可知,现状水平年 2015 年叶尔羌河干流卡群断面河流健康评价结果等级为亚健康,河流健康受到威胁,需要引起重视。据此,从目标的可达性等角度出发,将维持河流健康的目标分为保守目标与最优目标两类。其中,保守目标主要考虑防止河道功能性断流(对应生态基础流量过程),满足水生生物基本生存(对应水生生物生存下限流量过程),汛期防洪输沙(输沙需水过程);最优目标主要考虑水文条件尤其是非汛期水文条件极大改善(对应生态适宜流量过程),满足水生生物适宜生存(对应水生生物生存最优流量过程),汛期防洪输沙(输沙需水过程);考虑到现状水平年叶尔羌河卡群断面水质符合水功能区达标要求^[12],因此,水质净化需水流量过程暂忽略不计,本文采用的主要水文学方法如下:

1.3.1 改进 Tennant 法 Tennant 法由国外学者基于研究河道生态需水提出,并初步奠定了河道生态需水的基础理论^[13]。国内学者在这方面也相应做了大量研究^[14-15]。钟华平等^[16]、于松延等^[17]、郑志宏等^[18]在对多种水文学方法进行对比分析后,认为 Tennant 法虽优于其他水文学方法,但将该法通过推荐基流标准设定在多年平均流量的 10%~200% 范围内来计算生态需水,未能考虑干旱地区河流流量季节性变化大的特点。因此,本文对传统 Tennant 法进行改进,将多年平均情形下(50%保证率)水文年划分为丰水时段、平水时段和枯水时段,分别对各时段

河流的生态基础流量与生态适宜流量过程进行研究。具体改进过程如下:

(1) 典型年选取。①求卡群水文站多年年平均流量 \bar{Q} ;②求卡群水文站 1957—2015 年各年平均流量 Q_i 与多年平均流量 \bar{Q} 的比值,即年流量的模数 $K_i = Q_i / \bar{Q}$,其中, K_i 为年径流的模数;③选出各 K_i 最接近 1.0 的年份为典型年,若这样的年份不止一个,且年内各个季节模数均相近,则选择其中任意一个作为典型年。

(2) 百分比选取。由于叶尔羌河径流主要集中在夏季(占全年径流量的 68.05%),将河流生态需水划分为 3 个时段,即 1—4 月,10—12 月和 5 月,6—9 月(依次对应枯水时段、平水时段、丰水时段),改进后的 Tennant 法见表 1。

表 1 基于改进的 Tennant 法的叶尔羌河河流流量状况分级标准

流量描述	推荐的基流所占相应时段平均流量的比例/%		
	枯水时段 (1—4 月)	平水时段(10— 12 月和 5 月)	丰水时段 (6—9 月)
最大	200	200	200
最佳范围	60~100	60~100	60~100
极好	40	50	60
非常好	30	40	50
好	20	30	40
中或差	10	20	30
差或最小	10	10	10
极差	0~10	0~10	0~10

1.3.2 Texas 法 Texas 法^[8]最初是 Matthews 等^[19]在研究德克萨斯州的河流后提出,该方法考虑了河流季节性变化因素,以 50%保证率下的设计值作为基准,取其特定百分率作为最小生态流量。由于国外学者最初研究的 Texas 河流属于暖水性河流,所以该法更适合于流量变化主要受融雪补给为主的河流^[8]。之后中国学者提出将特定百分率为 20% 的月流量作为最小生态流量。考虑到干旱内陆河流域半干旱区河流年内季节变化特征的相似性,本文参照吴喜军等^[20]根据渭河宝鸡段典型植物及鱼类对水量的需求,取 20% 特定百分率下的月流量作为维持叶尔羌河河道内大多数水生生物基本生存条件的最小生态流量。

1.3.3 月保证率法 月保证率法^[8,20]是根据研究区实际情况及现有水文资料,参考 Tennant 法提出的一种计算河道内生态环境需水量的方法,最初由杨志峰等^[21]针对河流最大允许废水排放量而提出,随后王西琴^[8]等就中国北方地区水生态环境问题,在传统水文学方法的基础上将月保证率法与河道生态需水

量等级联系起来,通过综合考虑研究区的气象特征、径流的年内变化规律、生态环境状况、河流形态等因素来确定各月保证率^[20]。因此,本文根据月保证率法计算特点,并结合生态学理论提出计算维持河流生态环境需水的设计流量标准^[8,22]:50%保证率(即平水年)下河道内径流量的60%是为大多数水生生物在主要生长期提供优良栖息条件的推荐径流量;保持大多数水生生物有良好的生境条件的推荐径流量为50%保证率下河道内径流量的30%~50%;保持大多数水生生物在全年生存能够得到保证的最小径流量为50%保证率下河道内径流量的10%。由于中国西北地区相关资料缺乏,故按多年平均流量的百分比估算河道内生态环境需水量^[23]。

1.3.4 河流输沙需水 河流输沙需水指为了维持河道的输沙与冲淤动态平衡需要的一定环境用水量,是河流输沙功能的基本要求。在一定输沙总量要求下,输沙需水量直接取决于水流含沙量大小^[24]。一般而言,河流输沙需水量分为汛期输沙需水量、非汛期输沙需水量和洪峰输沙需水量。考虑到叶尔羌河河流泥沙输送高度集中在汛期(或丰水时段),连续最大4个月(6—9月)输沙量占全年输沙量的97.2%,非汛期(或枯水时段、平水时段)输沙量很小甚至为0^[24-25],因此将叶尔羌河汛期输沙需水量及过程作为

河流输沙需水量及过程,计算公式如下:

$$W_s = S_t / C_{\max} \quad (1)$$

$$C_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \max C_{ij} \quad (2)$$

式中: W_s ——输沙需水量(m^3); S_t ——多年平均输沙量(t); C_{\max} ——多年最大月平均含沙量(t/m^3); C_{ij} ——第*i*年第*j*月的月平均含沙量(t/m^3); n ——统计年数。

2 结果与分析

2.1 维持河流健康分级目标的制定

河流健康流量的定量化研究针对不同的目标,成果会表现出一定的差异,因此,河流保护目标的选取是确定特定河流系统生态需水的关键。保障叶尔羌河河流健康的目标从功能需求性与目标可达性角度可分为保守目标与最优目标两类。其中,保守目标主要考虑防止河道功能性断流(对应生态基础流量过程),满足水生生物基本生存(对应水生生物生存下限流量过程),汛期防洪输沙(输沙需水过程);最优目标主要考虑水文条件尤其是非汛期水文条件极大改善(对应生态适宜流量过程)、满足水生生物生存(对应水生生物生存最优流量过程),汛期防洪输沙(输沙需水过程)(见表2)。

表2 叶尔羌河的河流健康保护目标与流量的对应关系

目标	保守目标与流量关系		最优目标与流量关系	
	目标	对应流量类型	目标	对应流量类型
水文	防止河流功能性断流	生态基础流量	水文条件尤其枯水期或非汛期极大改善	生态适宜流量
河流生态系统	满足水生生物基本生存	水生生物下限生态流量	在一定程度上改善河流生态环境	水生生物最优生态流量
河流形态	改善水沙关系	汛期输沙需水量	改善水沙关系	汛期输沙需水量

2.2 基于维持河流健康分级目标的健康流量重构

以生态基础流量、生态适宜流量、维持河流生态系统需水流量(一定阈值区间)和输沙需水流量作为叶尔羌河健康流量组分,依次确定河流在河流生态水文季节各时段对应不同级别功能需求的关键流量,将这些流量信息耦合,以卡群控制断面为基准,重建叶尔羌河河流健康流量过程线。

2.2.1 生态基础流量与生态适宜流量 根据改进Tennant法计算得到典型年为1960年;依据该典型年将叶尔羌河卡群水文站的流量分布划分为3个时段[枯水时段(1—4月)、平水时段(10—12月、5月)、丰水时段(6—9月)],求得各个时段多年平均流量分别为:49.3,74.7,497.8 m^3/s ,依据各个时段的流量分级标准计算得到结果,见表3。其中,采用各时段多年平均流量的10%作为生态基础流量,采用各时段多

年平均流量的30%作为生态适宜流量,得到叶尔羌河生态基础流量与生态适宜流量过程(见表4)。

表3 基于改进Tennant法的叶尔羌河生态流量计算结果

河流流量状况(叙述性描述)	推荐的生态流量		
	枯水时段(1—4月)	平水时段(10—12月、5月)	丰水时段(6—9月)
最大	98.68	149.46	995.70
最佳范围	29.60~49.34	44.84~74.73	298.71~497.85
极好	19.73	37.37	298.71
非常好	14.80	29.89	248.92
好	9.87	22.42	199.14
中或差	4.93	14.95	149.35
差或最小	4.93	7.47	49.78
极差	0~4.93	0~7.47	0~49.78

表 4 基于改进 Tennant 法的叶尔羌河生态基础流量与生态适宜流量过程

 m^3/s

流量	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
生态基础流量	4.93	4.93	4.93	4.93	7.47	49.78	49.78	49.78	49.78	7.47	7.47	7.47
生态适宜流量	14.80	14.80	14.80	14.80	22.42	149.35	149.35	149.35	149.35	22.42	22.42	22.42

2.2.2 维持河流生态系统健康流量 根据干旱区水资源分布特点和叶尔羌河流域水资源开发利用现状,采用月保证率法推荐的 50% 保证率下多年平均径流量的 30% 作为维持叶尔羌河河道内大多数生物拥有

良好生境条件的适宜生态环境流量;采用 Texas 法中特定百分率为 20% 下的月流量的作为维持叶尔羌河河道内大多数水生生物基本生存条件的生态环境的最小生态流量,计算结果见表 5。

表 5 维持叶尔羌河河流生态环境需水流量过程

 m^3/s

流量	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
下限生态环境流量	9.03	8.16	8.64	8.21	12.33	35.60	101.65	120.76	41.41	17.59	12.72	10.75
适宜生态环境流量	15.39	13.82	14.48	13.60	22.49	67.50	197.7	232.07	79.68	29.24	21.08	18.20

2.2.3 汛期输沙需水健康流量 叶尔羌河卡群水文站是出山口控制站,根据近 50 a 实测泥沙资料分析多年平均输沙量为 2.99×10^{10} kg,最大月平均含沙量为 $197 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。由公式(1)一(2)计算出叶尔羌河汛期(或丰水时段)输沙需水量为 $1.52 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

2.2.4 基于保守目标和最优目标的河流健康流量重构 叶尔羌河河流健康流量重构不是简单将不同时段对应不同保护目标所需求的流量过程进行机械式相加,而是在考虑输沙需水量的情况下,对不同功能需求的流量过程进行比较,取其最大值(如:保守目标下某时段根据水文条件要求所得生态流量大于该时段下维持河流生态系统所需的生态流量,则取水文条件所求生态流量),同时考虑重构流量过程实现的可能性,结合不同等级的河流保护目标(保守、最优),分不同级别重构河流健康流量过程。重构后叶尔羌河的河流健康流量过程(见图 2)。考虑到叶尔羌河卡群水文站下游为径流耗散区,其中分布较多农业灌溉区,农业活动强度大(特别是农业灌溉时期),为尽可能保证流域内农业用水,将改进 Tennant 法得到的生态基础流量作为保守河流保护目标下枯水时段的河流健康流量,平水时段和丰水时段的生态基础流量按改进的 Tennant 法与 Texas 法所求流量比较取其最大值算;最优河流保护目标是改进 Tennant 法中生态适宜流量与月保证率法计算所得生态适宜流量按照对应时段内取其最大的流量作为河流健康流量过程。

2.2.5 基于河流健康维持分级目标的健康需水量 如表 6 所示,保守河流保护目标下枯水时段、平水时段和丰水时段的健康流量依次为 4.93, 13.35, 80.49

m^3/s ,折算成水量依次为 5.20×10^7 , 1.41×10^8 , $8.48 \times 10^8 \text{ m}^3$,在考虑输沙需水情况下年健康需水量为 $1.19 \times 10^9 \text{ m}^3$;最优河流保护目标下枯水时段、平水时段和丰水时段健康流量依次为 14.95, 24.14, $182.12 \text{ m}^3/\text{s}$,折算成水量依次为 1.56×10^8 , 2.54×10^8 , $1.92 \times 10^9 \text{ m}^3$,在考虑输沙需水情况下,全年健康需水量仍为 $2.33 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。总体看,保守河流保护目标下,枯水时段、平水时段、丰水时段、全年平均健康流量约为多年平均流量的 9.9%, 16.9%, 16.1% 和 15.7%,基本符合 Tennant 法关于河流生态状态最小生态流量的描述,即占同期多年平均流量的 10%;最优河流保护目标下,枯水时段、平水时段、丰水时段、全年平均健康流量约为多年平均流量的 30.2%, 30.3%, 36.5% 和 35.2%,基本符合 Tennant 法关于河流生态状态好、非常好的生态流量描述,即占同期多年平均流量的约 30%。

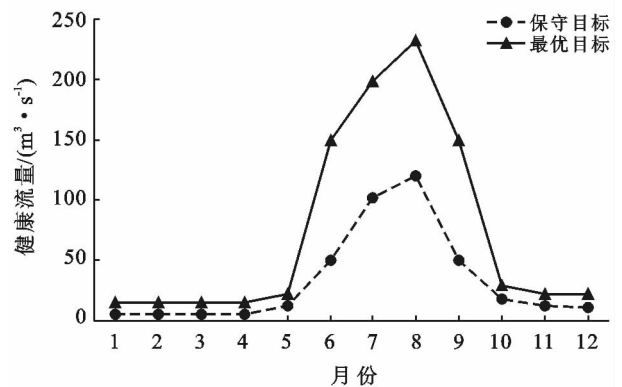


图 2 保守目标和最优目标下叶尔羌河各时段健康流量过程

此外,本文成果与已有相关文献^[25-26]关于叶尔羌河生态需水计算成果进行比较。结果显示,李靖^[25]

计算得叶尔羌河河道内多年平均生态需水量为 $2.82 \times 10^9 \text{ m}^3$; 孙建光等^[26]中计算出叶尔羌河河道内最小生态需水量为 $1.33 \times 10^9 \text{ m}^3$, 适宜生态需水为 $2.01 \times 10^9 \text{ m}^3$, 与本文成果较接近; 同时本文成果符合《塔

里木河流域综合规划》中所要求的完成向塔里木河生态输水 $3.30 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的任务, 即要求卡群断面生态供水至少为 $9.70 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。因此, 综合比较后, 本文计算成果基本合理。

表 6 叶尔羌河不同保护目标下河流健康流量及需水量

目标级别	枯水时段		平水时段		丰水时段		全年	
	健康流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	需水量/ 10^8 m^3	健康流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	需水量/ 10^8 m^3	健康流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	需水量/ 10^8 m^3	健康流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	需水量/ 10^8 m^3
保守目标	4.93	0.52	13.35	1.41	80.49	8.48	32.92	10.41
最优目标	14.95	1.56	24.14	2.54	182.12	19.20	73.74	23.3

3 结论

(1) 选取叶尔羌河出山口卡群水文年站 1957—2015 年逐月实测流量资料, 分别从河流形态、水文条件、河流生态系统等方面制定河流健康保护目标, 并基于保护目标的功能需求性和可达性, 将河流健康保护目标分为保守目标和最优目标。其中, 保守目标主要考虑防止河道功能性断流(对应生态基础流量过程), 满足水生生物基本生存(对应水生生物生存下限流量过程), 汛期防洪输沙(输沙需水过程); 最优目标主要考虑水文条件尤其是非汛期水文条件极大改善(对应生态适宜流量过程), 满足水生生物生存(对应水生生物生存最优流量过程)、汛期防洪输沙(输沙需水过程)条件。

(2) 采用多种水文学方法重构研究区河流健康流量及过程。其中, 基于改进 Tennant 法, 计算得到典型年 1960 年流量分布得 3 个时段〔枯水时段(1—4 月、平水时段(10—12 月、5 月)、丰水时段(6—9 月)〕, 采用各时段多年平均流量的 10% 作为生态基础流量, 采用各时段多年平均流量的 30% 作为生态适宜流量, 得到维持叶尔羌河水文条件的生态基础流量与生态适宜流量过程; 采用月保证率法推荐的 50% 保证率下多年平均径流量的 30% 和采用 Texas 法 20% 中特定百分率下的月流量过程, 得到维持叶尔羌河河流生态系统的生态流量和适宜生态流量过程; 根据经验公式计算得叶尔羌河汛期输沙需水量为 $1.52 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

(3) 保守河流保护目标下, 将改进 Tennant 法得到的最小生态流量作为 50% 保证率水文年枯水时段(1—4 月)河流健康流量, 按改进的 Tennant 法与 Texas 法所求流量比较取其最大值作为平水时段(10—12 月、5 月)和丰水时段(6—9 月)的河流健康流量算; 最佳河流保护目标下, 将改进 Tennant 法中适宜生态流量与月保证率法计算得适宜生态流量按

照对应时段内取最大值作为河流健康流量过程。

(4) 保守河流保护目标下, 枯水时段、平水时段和丰水时段的健康流量分别为 4.93, 13.35, 80.49 m^3/s , 折算成水量依次为 5.20×10^7 , 1.41×10^8 , $8.48 \times 10^8 \text{ m}^3$, 考虑输沙需水量, 年健康需水量为 $1.19 \times 10^9 \text{ m}^3$; 最优河流保护目标下枯水时段、平水时段和丰水时段的健康流量分别为 14.95, 24.14, 182.12 m^3/s , 折算成水量依次为 1.56×10^8 , 2.54×10^8 , $19.20 \times 10^8 \text{ m}^3$, 考虑输沙需水量, 年健康需水量为 $2.33 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。

(5) 通过对比叶尔羌河已有相关文献、资料, 研究成果基本合理, 符合《塔里木河流域规划》中对塔里木河生态输水 $3.30 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的任务要求。

[参 考 文 献]

- [1] 李杨, 李斌, 李淑丹, 等. 洱海流域河流生态系统健康评价[J]. 应用与环境生物学报, 2017, 23(3): 427-431.
- [2] 郑航, Langford J, 程国栋. 论变化环境下流域管理的知识创新[J]. 地球科学进展, 2012, 27(1): 52-59.
- [3] 冯夏清, 李剑辉. 基于河流健康的浑河中下游河道生态需水量计算[J]. 中国农村水利水电, 2017(9): 118-121.
- [4] 左其亭, 梁士奎. 基于水文情势分析的闸控河流生态需水调控模型研究[J]. 水力发电学报, 2016, 35(12): 70-76.
- [5] 高凡. 高强度人类活动区河流健康评价与调控研究: 以渭河关中段河流系统为例[D]. 西安: 西安理工大学, 2012.
- [6] 侯世文. 基于多种水文学法分析大汶河干流生态基流[J]. 水文, 2015, 35(6): 61-66.
- [7] 高凡, 黄强, 畅建霞. 我国生态需水研究现状、面临挑战与未来展望[J]. 长江流域资源与环境, 2011, 20(6): 755-760.
- [8] 王西琴. 河流生态需水理论、方法与应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
- [9] 何萍, 束龙仓, 邓铭江, 等. 西北干旱区内陆河生态环境

- 需水量研究[J]. 水电能源科学, 2012, 30(10): 23-25, 60.
- [10] 孙栋元, 赵成义, 魏恒, 等. 干旱内陆河流域平原区生态环境需水分析: 以新疆自治区台兰河流域为例[J]. 水土保持通报, 2011, 31(4): 82-88.
- [11] 高凡, 孙晓懿, 蓝利, 等. 基于可达最佳状态标准的叶尔羌河健康评价[J]. 人民黄河, 2017, 39(11): 103-108, 156.
- [12] 唐精, 张剑云, 任道泉. 塔里木河流域的水质分析[J]. 水利渔业, 2005, 25(2): 67-68.
- [13] Tennant D L. Instream flow regimes for fish, wildlife, recreation and related environment resources[J]. Fisheries, 1976, 1(4): 6-10.
- [14] 贾宝全, 慈龙骏. 新疆生态用水量的初步估算[J]. 生态学报, 2000, 20(2): 243-250.
- [15] 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.
- [16] 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): 430-434.
- [17] 于松延, 徐宗学, 武玮. 基于多种水文学方法估算渭河关中段生态基流[J]. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2013, 49(S1): 175-179.
- [18] 郑志宏, 张泽中, 黄强, 等. 生态需水量计算 Tennant 法的改进及应用[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2010, 42(2): 34-39, 57.
- [19] Matthews R C, Bao Y. The Texas method of preliminary instream flow determination [J]. River, 1991, 2(4): 295-310.
- [20] 吴喜军, 李怀恩, 董颖, 等. 基于基流比例法的渭河生态基流计算[J]. 农业工程学报, 2011, 27(10): 154-159.
- [21] 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.
- [22] 胡顺军. 塔里木河干流流域生态—环境需水研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2007.
- [23] 朱顺初. 河南省干江河燕山水库工程下游河道最小生态环境需水量分析[J]. 治淮, 2006(4): 16-17.
- [24] 王均. 叶尔羌河泥沙特征分析[J]. 黑龙江水利科技, 2013, 41(5): 163-164.
- [25] 李靖. 叶尔羌河流域水生态承载力研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2009.
- [26] 孙建光, 韩桂兰. 塔里木河流域干旱区绿洲河道生境生态水权及其计量研究[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(3): 81-85.

(上接第 159 页)

- [10] Badreldin N, Goossens R. A satellite-based disturbance index algorithm for monitoring mitigation strategies effects on desertification change in an arid environment[J]. Mitigation & Adaptation Strategies for Global Change, 2015, 20(2): 263-276.
- [11] Wen Xiaole, Xu Hanqiu. Remote sensing analysis of impact of Fuzhou City expansion on water quality of lower Minjiang River, China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2010, 30(4): 624-629.
- [12] Ochoagaona S, Kampichler C, de Jong B H J, et al. A multi-criterion index for the evaluation of local tropical forest conditions in Mexico [J]. Forest Ecology & Management, 2010, 260(5): 618-627.
- [13] Sullivan C A, Skeffington M S, Gormally M J, et al. The ecological status of grasslands on lowland farmlands in Western Ireland and implications for grassland classification and nature value assessment[J]. Biological Conservation, 2010, 143(6): 1529-1539.
- [14] Gupta K, Kumar P, Pathan S K, et al. Urban Neighborhood Green Index: A measure of green spaces in urban areas[J]. Landscape & Urban Planning, 2012, 105(3): 325-335.
- [15] 徐涵秋. 利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究[J]. 遥感学报, 2005, 9(5): 589-595.
- [16] 宋慧敏, 薛亮. 基于遥感生态指数模型的渭南市生态环境质量动态监测与分析[J]. 应用生态学报, 2016, 27(12): 3913-3919.
- [17] 弓盛洋. 基于遥感生态指数(RSEI)的濮阳市生态变化评估[J]. 能源与环境, 2015(1): 62-64.
- [18] 刘智才, 徐涵秋, 李乐, 等. 基于遥感生态指数的杭州市城市生态变化[J]. 应用基础与工程科学学报, 2015(4): 728-739.
- [19] Sobrino J A, Jiménez-Muñoz J C, Paolini L. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5[J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 90(4): 434-440.