

卫河水系新乡段环境流量最小值研究

孟春芳^{1,2}, 宋孝玉^{1*}, 田珂宁³, 刘学勇², 郭树贤², 王宇², 叶炳效²

(1.西安理工大学 省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 西安 710048;

2.河南省新乡水文水资源勘测局, 河南 新乡 453000; 3.河南水利与环境职业学院, 郑州 450008)

摘要:【目的】研究卫河水系新乡段环境流量最小值, 促进河流生态系统的规划与保护研究。【方法】将环境流量最小值分为生态需水量、水质自净需水量和输沙需水量3部分。首先采用 Tennant 法计算生态需水量, 采用一维水质模型计算水质自净需水量, 根据汛期输送单位泥沙所需水量来计算输沙需水量。其中, 计算生态需水量时, Tennant 法基于径流突变前的自然水流(1963—1982)。计算水质自净需水量时, 鉴于河流的水污染特征存在明显的空间差异, 提出通过聚类分析和判别分析识别导致水污染空间变化的显著水质指标。为验证环境流量推荐值的合理性, 采用变动范围法(RVA)计算独立的环境流量值与环境流量推荐值进行比较。最后, 将环境流量的推荐值与自然水流(1963—1982)的多年平均流量进行比较从而分析环境流量的盈缺状况, 并以月为单位评估了环境流量保证率。【结果】干流自上而下7个水文站的生态需水量存在较大差异。在污水达标排放情景下, 修武站和合河卫站的水质自净需水量分别为 0.74 m³/s 和 5.98 m³/s。各站输沙需水量大致在8月达到最高值, 沿程输沙需水量存在较大差异。环境流量的盈缺分析表明, 7个水文站中合河卫站、汲县站、刘庄站出现明显缺水。环境流量保证率表现为: 7个水文站汛期的保证率均明显低于非汛期。淇门站的保证率最高, 合河卫站的保证率最低。【结论】卫河水系新乡段7个水文站环境流量的推荐值为: 修武站的环境流量范围是 0.74~7.28 m³/s, 合河卫站的环境流量为 5.98 m³/s, 汲县站环境流量范围为 0.85~18.51 m³/s, 淇门站为 1.55~65.73 m³/s, 合河共站为 0.47~34.61 m³/s, 黄土岗站为 0.53~36.63 m³/s, 刘庄站为 0.17~61.54 m³/s。

关键词: 环境流量; 卫河; 新乡; Tennant 法; 一维水质模型

中图分类号: TV214

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2022115

OSID:



孟春芳, 宋孝玉, 田珂宁, 等. 卫河水系新乡段环境流量最小值研究[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(7): 86-95.

MENG Chunfang, SONG Xiaoyu, TIAN Kening, et al. Minimum Water Flow for Environmental Requirements in Xinxiang Section of the Wei River[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(7): 86-95.

0 引言

【研究意义】水资源的大规模开发和径流调节极大地改变了河流的自然水文情势, 引起河流生态系统结构与功能的变化, 导致严重水资源短缺、水污染、生态系统退化^[1-2]。环境流量是评价河流水资源开发利用是否合理的重要指标, 对维持河流生态系统健康至关重要^[3]。在已经开展的研究中, 欧盟国家多采用生态流量的概念, 美国和澳大利亚等国多采用环境流量的概念, 二者在概念内涵等方面基本趋同^[3]。在我国, 因研究目的不同, 有环境流量、生态流量、生态基流、生态环境需水量等术语。2020年水利部颁布的《水利部关于做好河湖生态流量确定和保障工作的指导意见》指出: 河湖生态流量是为了维系河流、湖泊等水生态系统的结构和功能, 需要保留在河湖内符

合水质要求的流量(水量、水位)及其过程。目前, 我国河流水资源开发利用与生态系统保护之间的矛盾十分突出, 保障合理的环境流量有助于河流生态系统的保护和水资源高效利用。

【研究进展】环境流量的计算方法主要分为: 以 Tennant 为代表的水文学法^[2], 以湿周法为代表的水力学法^[4], 以河流内流量增量法为代表的生境模拟法^[5], 以水文变化的生态限度法(ELOHA)为代表的整体分析法^[1]。Tennant 法只需要长期的流量数据, 因此被广泛应用^[1]。水力学法要求河段水沙关系和河床稳定, 应用范围相对较窄^[6], 可为其他方法提供水力学支持。生境模拟法根据关键物种(如鱼类)的生存环境要求计算环境流量, 应用频率仅次于水文学法^[6]。基于水文-生态响应关系的 ELOHA 法代表着环境流量研究的发展方向, 在不少国家得到了实际应用^[1]。越精确的方法往往需要长期的水文和生态数据, 然而这些数据在许多河流中并不能广泛获得。以上4大方法主要考虑水文情势因子对生态系统的影响。在人类活动频繁的地区, 尤其是我国北方地区, 水质、输

收稿日期: 2022-03-08

基金项目: 新乡市科技攻关计划项目(CXGG17023)

作者简介: 孟春芳(1986-), 女, 博士研究生, 主要从事生态水文研究。

E-mail: mengchunfang0722@163.com

通信作者: 宋孝玉(1971-), 女, 教授, 主要从事生态水文研究。

E-mail: songxy@xaut.edu.cn

沙等因素都可能成为影响河流生态系统健康的重要因素^[7]。如李丽娟等^[8]计算海滦河生态环境需水时,考虑了维持水生生物生长、入渗补给、水质自净等方面。汪妮等^[9]计算渭河干流生态环境需水时,考虑了基本生态环境需水、河流稀释自净、输沙等方面。徐宗学等^[10]计算渭河关中段生态基流时,考虑了维持水生生物基本生长、水质、鱼类等方面。【切入点】然而,以往研究在计算水质自净需水量时,往往根据我国河流大部分水污染属于有机污染型而选取水质指标,如: BOD_5 、 COD_{Cr} 、 NH_3-N 等。在严重污染河流,污染物来源多元化,显著污染指标随时空变化,水污染呈现明显的时空差异^[11]。因此,有必要识别导致污染时空变化的显著水质指标,根据不同污染特征选取相应的水质指标计算水质自净需水量,充分考虑河流污染的时空差异性,使计算结果更贴近实际情况,为河流水质自净需水量计算提供参考。

多元分析方法中的聚类分析和判别分析可以实现海量数据降维,有效识别水污染的时空变化特征并识别显著水质指标,已在地表水、地下水方面取得了不错效果^[11-13]。兹采用前期研究^[11]识别出的显著水质指标 COD_{Cr} 和 BOD_5 计算水质自净需水量。

【拟解决的关键问题】近年来,卫河水系新乡段受人类活动(水库蓄水、抽水灌溉、引黄灌溉、径流调节、污水排放等)的频繁干扰,部分河段枯水期常常断流、河道淤塞、水质恶化、河流生态系统严重退化^[14-16]。根据卫河水系新乡段河流特点,从生态需水、水质自净需水和输沙需水 3 个方面确定卫河水系新乡段的环境流量最小推荐值。其中,基于径流突变前的自然水流,采用 Tennant 法计算维持河流生态系统所需的生态需水量。采用一维水质模型法计算符合水功能区水质目标的水质自净需水量,水质指标通过聚类分析和判别分析识别。采用汛期输沙需水量作为维持水沙动态平衡的输沙需水量。然后,采用变化范围法(RVA)计算环境流量并作为独立值与本文环境流量推荐值进行比较。最后,将环境流量推荐值与自然水流进行比较以分析盈缺状况,并以月为单位评估环境流量保证率。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

卫河是海河上游的重要支流,发源于山西省陵川县,东西向横穿河南省新乡市(34°55'N—35°50'N、113°25'E—115°0'E),在徐万仓与漳河汇合,最后汇入海河,见图1。新乡市流域面积3 718 km²,占全市总面积的45.1%,境内干流长约80 km。共渠是卫河的最大支流,从南部黄河引水,在合河镇汇入卫河,共

用约3 km河道后分开,最后在鹤壁市汇入卫河,主要承担引黄灌溉农田和排泄北部太行山区洪水的功能。淇门站多年平均流量为24.01 m³/s,刘庄站多年平均流量为4.99 m³/s。研究区北部为太行山区,南部为冲积平原。属于大陆性季风气候,多年平均蒸发量898.0 mm,平均气温14 ℃。多年平均降水量为610.8 mm,年降水量约70%发生在夏季(6—9月)。

1.2 数据来源

水文和水质数据均来自河南省水文水资源勘测局。研究区有 7 个水文站,其中 4 个(修武站、合河卫站、汲县站、淇门站)位于卫河干流,3 个(合河共站、黄土岗站、刘庄站)位于共渠干流。水质监测点共 19 个,干流 9 个(G1—G9),支流 10 个(Z1—Z10)。干流 9 个水质监测点中,6 个位于卫河,2 个位于共渠,1 个位于卫河和共渠的共用河道。干流水质监测点的水质目标和 15 个水质指标见表 1。流量、泥沙资料序列为 1963—2018 年,水质资料序列为 2013—2018 年。

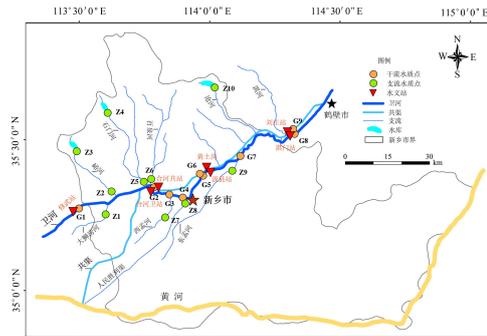


图 1 卫河水系新乡段河流及监测点分布

Fig.1 Map of the study area and monitoring sites in the Xinxiang Section of the Wei River (XSWR)

表 1 卫河水系新乡段干流水质监测点的水质目标和指标

Table 1 Water quality indicators and water quality criteria of the mainstream in the XSWR

河流	站号	水质目标	水质指标
卫河	G1	V	
卫河	G3	IV	
卫河	G4	IV	水温(Temp)、pH、溶解氧(DO)、
卫河	G5	V	化学需氧量(COD_{Cr})、生化需氧量
卫河	G7	V	(BOD_5)、氨氮(NH_3-N)、总磷(TP)、
卫河	G8	V	氟(F)、氰化物(CN)、挥发酚(VP)、
卫河/共渠	G2	IV	铜(Cu)、锌(Zn)、铅(Pb)、
共渠	G6	V	镉(Cd)、铬(Cr^{6+})
共渠	G9	V	

1.3 研究方法

本文首先采用 Mann-Kendall 突变检验法识别年径流序列(1963—2018 年)的突变点,以划分自然水流和调节水流。然后,以自然水流为基础,采用 Tennant 法计算生态需水量。将显著水质指标应用到一维水质模型以计算水质自净需水量。根据汛期输送

单位泥沙所需水量计算输沙需水量。环境流量推荐值取生态需水量、水质自净需水量、输沙需水量 3 项中的最大值。然后,采用 RVA 法计算环境流量并作为独立值与本文推荐值进行比较。最后,将环境流量的推荐值与自然水流的多年平均流量进行比较从而分析盈缺状况,并以月为单位评估环境流量保证率。所有的数学计算采用 Microsoft Office Excel 2007 (Microsoft Corporation, Redmond, WA, USA), RVA 法采用水文改变指标软件 (IHA, 版本 7.1.0.10, 美国自然保护协会)。

1.3.1 Tennant 法

Tennant 法基于美国 Montana 州和其他 21 个国家的观测数据,建立了鱼类、两栖动物、软体动物和其他水生生物的生存环境与河流不同流量百分比之间的关系^[2]。研究认为年平均流量的 10% 是维持水生命生存的最小瞬时流量,年平均流量的 30% 或更多可以维持河流生物完整性和可持续性^[2]。研究河段的资源型缺水问题比较严重,本文关注最小环境流量,因此将年平均流量的 10% 作为河流的生态需水量。

水资源的大规模开发利用和径流调控已严重改变了研究河段的自然水流状态。自然或近自然的水流状态是维持河流生态系统健康的理想状态^[1]。Mann-Kendall 非参数突变检验法被广泛应用于水文序列的突变点分析^[17]。本文采用 Mann-Kendall 法分析年径流序列 (1963—2018) 的突变点 (双尾置信水平 $\alpha=0.05$), 区分自然水流和调节水流。Mann-Kendall 法的计算步骤见参考文献[17]。本文 Tennant 法的计算基于径流突变前的自然水流。

1.3.2 一维水质模型法

研究河段属于中小型河流,弯曲系数较小,宽深比不大,因此采用一维水质模型。沿岸支流水污染严重,将支流视作污染源处理。计算步骤见参考文献[18]。

河段水污染控制通常采用 2 种策略,段首控制和段尾控制。段首控制是指计算河段的上游断面的污染物浓度达到河流水质目标,而段尾控制指计算河段的下游断面的污染物浓度达到河流水质目标。天然水体对有机质污染物具有稀释和自净能力,污染物在河道中呈衰减趋势。因此,段首控制要求较低污染物输入,有利于水生态修复。段尾控制能容纳较高的污染物输入,可以用于控制污染物排放^[19]。研究河段的水污染比较严重,因此采用段尾控制。

计算情景有 2 个:现状排污和达标排污。现状排污是指排放污水的水质指标浓度为实际排放值。达标排放是指排放污水的水质指标浓度达到河南省地方标准《省辖海河流域水污染物排放标准》(DB41/777—2013)^[20]要求。本文采用的排放标准主要考虑了

COD_{Cr} 和 BOD₅, 其中, COD_{Cr}<50 mg/L、BOD₅<10 mg/L。支流水质应满足支流的水功能区水质目标。通过实测法确定卫河污染物综合衰减系数 k , COD_{Cr} 的 k 值为 0.08 L/d, BOD₅ 的 k 值为 0.16 L/d^[21]。2 种情景下,计算河段起始断面的水质指标浓度为上游水功能区的水质目标。

1.3.3 输沙需水量的计算方法

维护河流的水沙动态平衡,需要一定的水量用于输沙,否则河道泥沙淤积,也会导致生态环境破坏。研究河段以悬移质输沙为主,通过输沙量的计算分析,泥沙输送主要集中在汛期 (6—9 月),因此忽略非汛期的输沙量。汛期水流含沙量高,通常处于饱和输沙状态,因此,可根据汛期输送单位泥沙所需水量来计算输沙需水量^[22]。输沙需水量计算式为:

$$W_s = S_1 \frac{1}{S_{cw}}, \quad (1)$$

式中: W_s 为年输沙需水量 (m^3); S_1 为多年平均输沙量 (kg); S_{cw} 为多年平均汛期含沙量 (kg/m^3)。

1.3.4 变动范围法 (RVA)

RVA 法在 IHA (Index of Hydrologic Alteration) 的基础上提出,已被广泛用于评价人类活动引起的河流生态水文特征变化程度^[23]。通常取自然流态时各个指标发生概率的 25% 和 75% 作为 RVA 法变化范围的上限及下限^[24]。Ipswich 河流渔业恢复工作组建议将上下限差的 1/4 作为该河基流,以恢复 Ipswich 河健康的渔业^[25]。舒畅等^[26]提出采用均值与 RVA 阈值差计算泥曲河的环境流量,结果与其他方法一致。马晓超等^[27]提出采用 RVA 目标值差值的 50% 作为渭河的环境流量,并与之前的 6 项研究结果进行了比较。研究河段的资源型缺水问题比较严重,本文关注最小环境流量,因此采用上下限差值的 1/4 作为独立的环境流量,并与本文推荐的环境流量进行比较。

1.3.5 保证率评估方法

卫河水系新乡段的环境流量保障程度^[28]可用如下公式进行评估:

$$R = \frac{d}{D} \times 100\%, \quad (2)$$

式中: R 为环境流量保证率; D 评价时段的总天 (月或年) 数; d 为评价时段 D 中满足环境流量的天 (月或年) 数。本文以月为单位,将逐月流量、汛期流量、非汛期流量分别组成月流量系列,评估环境流量推荐值的保证率。

2 结果与分析

2.1 生态需水量计算

采用 Mann-Kendall 突变检验法对 1963—2018 年 7 个水文站的年径流序列进行突变分析,结合当地水

利工程建设时间（1980年前后）^[14]，将1963—1982年（共20年）的水流作为自然水流（水文参照系统），1983—2018年的水流作为调节水流。基于1963—1982年7个水文站的多年平均流量，采用Tennant法计算生态需水量，结果见图2。

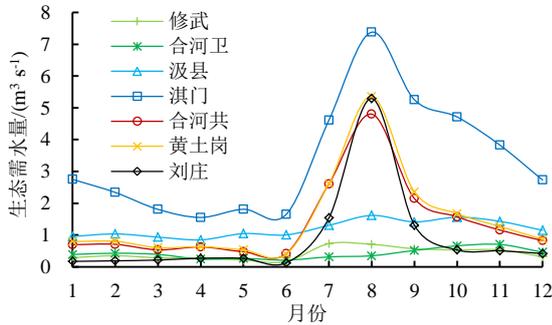


图2 卫河水系新乡段7个水文站的生态需水量

Fig.2 The ecological water demands of 7 hydrometric stations in the XSWR

由图2可知，7个水文站的生态需水量存在差别。整体来看，淇门站需水量最大，修武站、合河卫站需水量较小。修武站、合河卫站、汲县站的需水过程趋势大致相同。合河共站、黄土岗站、刘庄站、淇门站的需水过程趋势大致相同，汛期（6—9月）生态需水量明显高于非汛期。

结果还表明，干流自上而下7个水文站的生态需水量存在较大差异，沿程不是完全增加趋势，即下游生态需水量不一定大于上游。主要原因可能是卫河与共渠相距较近，在合河镇共用约3 km河道。而且，卫河、共渠、淇河3条河在刘庄站和淇门站处呈“于”字型交汇。此外，当大流量发生时，2条河的部分河段共享漫滩，河水混合。2条河流上都建有橡胶坝和闸门，流量受人工调节影响。

表2 卫河水系新乡段7个水文站水质自净需水量与多年平均流量

流量	情景	修武	合河卫	汲县	淇门	合河共	黄土岗	刘庄
水质自净需水量	现状排污	0.24	15.13	1.64	-	-	-	-
	达标排污	0.74	5.98	-	-	-	-	-
多年平均流量	1963—2018	4.14	1.78	7.59	24.01	10.68	12.06	4.99
	1963—1982	4.14	4.10	11.93	33.80	13.88	15.00	9.11
	2009—2018	3.52	0.29	4.28	17.01	7.91	9.43	1.58
水质自净需水量推荐值		0.74	5.98	-	-	-	-	-

研究区水资源短缺，污水处理能力不断提高，水质自净需水量既要为当前管理做参考，又要为远景规划服务，因此，本研究采用达标排放情景的计算结果作为水质自净需水量。

研究河段汛期（6—9月）的污染物主要来自点源和非点源^[11]，非汛期（10—5月）主要来自点源。与点源污染相比，非点源污染具有随机性、广泛性和

受人类活动影响，1963—1982年的水流实际上是近自然水流。因为河流生态系统处于不断演化过程，很难恢复绝对自然水流状态下的生态系统。1980年以来，随着大量水利工程的建设，研究河段的水流状态发生了显著变化。因此，将1963—1982年的水流看作水文参照系统，试图恢复1963—1982年的水流状态，及相应的河流生态系统，以实现河流生态系统的适度保护。

2.2 水质自净需水量计算

基于研究河段2018年流量、流速、断面、水质、排污口等数据，计算2种情景下水质自净需水量，结果见表2。由表2可知，同一水文站在不同情景下的计算结果不同，不同水文站在相同情景下的计算结果也不同。总体上，现状排污情景下的水质自净需水量高于达标排污情景。修武站的自净需水量较小，因为上游水质监测点G1的水质目标为V类，而下游G2的水质目标为IV类，上游来水量越大，污染负荷越大，因此应减少上游来水。修武站现状排污的需水量为 $0.24 m^3/s$ ，略小于达标排污的 $0.74 m^3/s$ ，表明修武站至合河卫站河段污水排放量及浓度对自净需水量影响不大。修武站的自净需水量明显低于多年平均流量。在2种情境下，合河卫站的水质自净需水量最大，分别为 $15.13 m^3/s$ 和 $5.98 m^3/s$ 。表明合河卫站至汲县站的水污染非常严重。即使污水排放浓度达到排放标准，水质自净需水量仍达到 $5.98 m^3/s$ ，远高于多年平均流量。现状排污情景下，汲县站自净需水量为 $1.64 m^3/s$ ，明显低于多年平均流量。2种情景下，淇门站、合河共站、黄土岗站、刘庄站的水质自净需水量均为0，表明这些河段污染物排放量较低，污染物通过降解可以达到水功能区水质目标。

滞后性的特点，难以进行测量和控制^[10]。由于数据收集困难，本研究仅考虑点源排放的自净需水量。

2.3 输沙需水量计算

基于1963—1982年卫河水系新乡段汛期月输沙数据的多年平均值计算输沙需水量，结果见图3。修武站汛期输沙需水量范围为 $1.66\sim 7.28 m^3/s$ 。合河卫站为 $1.40\sim 3.81 m^3/s$ ，均值为 $2.40 m^3/s$ ，在7个站中

最小。汲县站汛期输沙需水量范围为 7.85~18.51 m³/s。淇门站为 10.34~65.73 m³/s。合河共站为 2.92~34.61 m³/s。黄土岗站为 2.45~36.63 m³/s。刘庄站为 0.57~61.54 m³/s。各站输沙需水量基本上在 8 月达到最高值, 这主要与汛期的输沙率和含沙量有关。7 个水文站的输沙需水量存在较大差异, 沿程不是完全增大趋势, 主要原因是输沙需水量根据实测径流推算, 对计算结果影响较大。

2.4 环境流量确定

从一水多功能的角度, 按照最大原则确定环境流量。即取生态需水量、水质自净需水量、输沙需水量 3 项的最大值作为本文环境流量的推荐值, 见图 4。为验证环境流量推荐值的合理性, 基于 1963—1982 年 7

个水文站的逐日流量, 采用 RVA 法计算独立的环境流量, 与本文环境流量的推荐值进行比较, 见图 4。

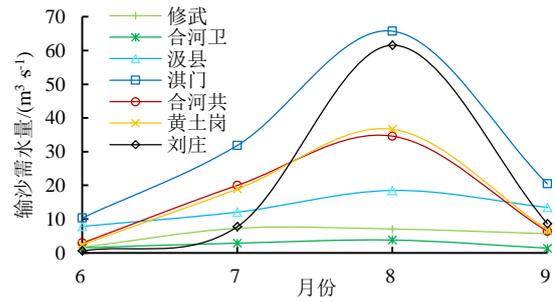


图 3 卫河水系新乡段 7 个水文站输沙需水量

Fig.3 Water demands for sediment transport of 7 hydrometric stations in the XSZR

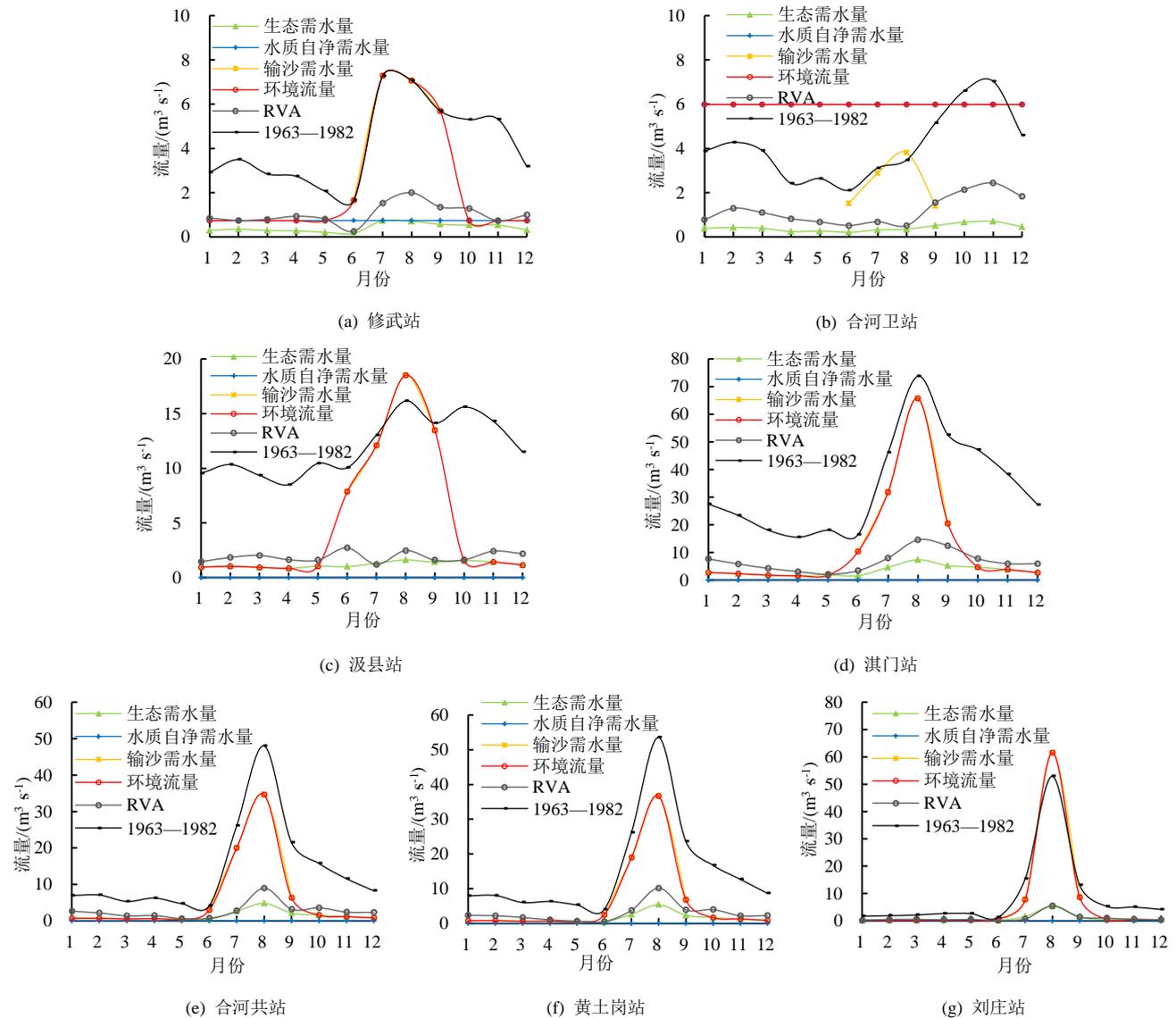


图 4 卫河水系新乡段 7 个水文站的环境流量过程

Fig.4 The recommended e-flows of 7 hydrometric stations in the XSZR

由图 4 可知, 修武站非汛期水质自净需水量最大, 而汛期输沙需水量最大, 因此非汛期以水质自净需水量来确定环境流量, 汛期以输沙需水量来确定环境流量, 环境流量范围为 0.74~7.28 m³/s。合河卫站全年

水质自净需水量最大, 因此以自净需水量来确定环境流量, 环境流量为 5.98 m³/s。其余 5 站非汛期生态需水量最大, 汛期输沙需水量最大。汲县站环境流量范围为 0.85~18.51 m³/s, 淇门站为 1.55~65.73 m³/s, 合

河共站为 0.47~34.61 m³/s, 黄土岗站为 0.53~36.63 m³/s, 刘庄站为 0.17~61.54 m³/s。由于研究的保护对象是相互联系的, 很难截然分开, 3 种计算方法所得的 3 种需水量存在重复部分, 所以取 3 项的最大值作为环境流量推荐值, 有助于河流生态系统的保护。

从推荐环境流量的过程线来看, 各站的环境流量均没有出现断流。长期的干旱直接导致栖息地的干燥或水质下降, 进而导致大量水生种群的灭绝或碎片化^[29]。最近, 小而频繁流量脉冲在维持水生生态系统过程中的重要性也被证明^[30]。

除合河卫站外, 其他水文站非汛期环境流量均低于汛期, 体现了年内丰枯变化, 与研究河段的年内径流分配一致, 满足了原有河流生态系统对水流状态的需求。溢流和最大流量(年平均流量的 200%)对生境质量的可持续性有积极影响^[2]。河道与河漫滩间水、养分和生物的横向交换可以促进水生生物的快速生长^[31]。由于本土淡水鱼是在特定的水流环境中进化而来, 因此, 在径流调节河流中, 保持适当水流或关键水文参数的高、低变化, 有利于实现对原有河流生态系统的适度保护^[32]。

将环境流量推荐值与 RVA 计算的独立值进行比较可知: 合河卫站的环境流量远高于 RVA 计算值。由于合河卫站到汲县站河段的水污染严重, 因此需要高的环境流量来满足水体自净需求。其他水文站的环境流量推荐值曲线与 RVA 计算结果曲线呈相交状态, 非汛期的计算结果比较接近, 但是汛期的环境流量推荐值远大于 RVA 法。汛期较大的环境流量有益于充分利用汛期洪水较强的输沙能力, 维持河流形态的动态平衡^[8]。因此, 本文推荐的环境流量值是合理的, 有助于河流生态系统的保护。

表 3 卫河水系新乡段 7 个水文站环境流量保证率

Table 3 The guarantee rates of e-flows of 7 hydrometric stations in the XSWR

水文站	修武	合河卫	汲县	淇门	合河共	黄土岗	刘庄
月平均保证率/%	69.58	22.92	77.92	83.33	75.00	77.08	54.58
汛期保证率/%	40.00	17.50	46.25	53.75	48.75	47.50	40.00
非汛期保证率/%	84.38	25.63	93.75	98.13	88.13	91.88	61.88
汛期缺水最大缺水量/(m ³ s ⁻¹)	-6.99	-5.82	-14.65	-58.61	-34.04	-35.56	-61.54
非汛期最大缺水量/(m ³ s ⁻¹)	-0.74	-5.98	-0.93	-1.81	-1.46	-1.16	-0.53

3) 保障措施

采取合理的措施保证环境流量, 才能有效保护河流生态系统。通过将 7 个水文站 1963—1982 年共 20 a 的月流量系列与环境流量推荐值进行比较, 可以分析缺水量, 以便采取合理的保障措施。

修武站汛期保证率仅为 40.00%, 最大缺水量为 6.99 m³/s, 保证率偏低, 缺水量较大。主要原因是汛期输沙需水量大导致环境流量值高, 其次是个别月河

2.5 环境流量盈缺分析、保证率和保障措施

1) 环境流量盈缺分析

环境流量的盈缺状况直接关系到水量分配, 合理的水资源分配有利于河流生态系统的保护。将环境流量的推荐值与自然水流(1963—1982)的多年平均流量进行比较, 见图 4。如果推荐值比自然水流量小, 则该月不缺水, 反之缺水。由图 4 可知, 修武站、淇门站、合河共站、黄土岗站的环境流量推荐值基本上小于自然水流, 因此全年基本不缺水。合河卫站只有 10、11 月能满足环境流量的要求, 其余月份缺水量较大, 为 0.83~3.88 m³/s。汲县站、刘庄站 8 月环境流量推荐值大于自然水流, 8 月汲县站缺水量为 2.35 m³/s, 刘庄站为 8.63 m³/s。

2) 环境流量保证率评估结果

将 7 个水文站 1963—1982 年共 20 a 的逐月流量、汛期流量、非汛期流量分别组成月流量系列, 与各站的环境流量进行比较, 统计满足环境流量的月份, 结果见表 3。据统计, 240 个月中, 合河卫站的环境流量保障率最低, 仅为 22.92%。刘庄站的保证率为 54.58%。其余 5 站的保证率范围为 69.58%~83.33%, 其中, 淇门站的保证率最高。在汛期(6—9 月)的 80 个月中, 7 个水文站的环境流量保证率范围仅为 17.50%~53.75%。在非汛期(10 月至次年 5 月)的 160 个月中, 合河卫站的环境流量保证率仅为 25.63%, 刘庄站保证率为 61.88%。其余 5 站的保证率范围为 84.38%~98.13%。卫河水系新乡段环境流量保证率的评估结果表明, 7 个水文站的月平均、汛期、非汛期保证率均不能达到 100%, 即河道内的水量不能完全满足环境流量的推荐值。7 个水文站汛期的保证率均明显低于非汛期。

道内实测流量偏小。因此, 需要上游进行水土流失治理以减少水流含沙量进而减少输沙需水量。其次, 由于来水丰枯变化的影响, 会导致部分河段流量减少, 甚至为 0。水利工程的联合调度可以减少来水丰枯变化对河流纵向连续性的影响^[33]。因此, 需要加强各支流水库及其他水利枢纽的联合生态调度, 以增加河道流量。非汛期保证率为 84.38%, 最大缺水量为 0.74 m³/s, 保证率较高, 缺水量较小。主要原因

是个别月河道内实测流量偏小,因此需要加强水利工程的联合调度以减少来水丰枯变化的影响。

合河卫站的汛期和非汛期保证率均偏低,汛期、非汛期最大缺水水量分别为 5.82、5.98 m^3/s , 缺水水量较大。主要原因是水质自净需水量大导致环境流量值高。因此需要解决合河卫站—汲县站河段的水污染问题。主要措施有:一是进一步控制外部污染物输入,如实施更严格的排放标准,提高污水处理厂的处理能力等。二是开展环境综合整治,采取积极的水处理措施,治理内源污染物。内源污染治理措施主要包括河道疏浚护岸和生态修复。河道综合疏浚可有效减少内源污染物的释放^[33]。采用生态措施可以恢复受损河流的生态系统健康^[34]。第三,通过生态调水和水利工程的智能调度来增加河道流量,从而增加污染物的稀释和扩散^[33]。生态调水可以就近引南水北调水或者黄河水以增加河道流量。

汲县站汛期保证率仅为 46.25%,最大缺水水量为 14.65 m^3/s ,保证率偏低,缺水水量较大。主要原因是汛期输沙需水量大导致环境流量值高。1970—1990 年间,为解决天津市的水源危机,从人民胜利渠引黄济津^[14],黄河水含沙量高致使输沙需水量增加。受该工程影响,1963—1982 年的输沙情况受到人为干扰,目前该工程已经停止。近些年引黄水量和黄河水含沙量减少,使得该站的来水来沙、河床条件发生了变化。河流输沙需水量随来水来沙及河床演变等条件的变化而变化^[8],来沙量大时输沙需水量就大。来沙量小时输沙需水量就小,汲县站汛期的输沙需水量就能够得到满足。非汛期保证率为 93.75%,最大缺水水量为 0.93 m^3/s ,保证率较高,缺水水量较小。主要原因是个别月河道内实测流量偏小,因此需要加强水利工程的联合调度,减少来水丰枯变化的影响。

淇门站汛期保证率仅为 53.75%,最大缺水水量为 58.61 m^3/s ,保证率偏低,缺水水量较大。主要原因是汛期输沙需水量大导致环境流量值高。卫河、共渠、淇河 3 条河呈“于”字型交汇,淇门站的水流含沙量受上游水土流失和引黄水的影响,因此需要加强上游的水土流失治理,同时减少引黄水量,以减少水流含沙量从而减少输沙需水量。非汛期保证率为 98.13%,最大缺水水量为 1.81 m^3/s ,保证率较高,缺水水量较小。因此需要加强水利工程的联合调度,减少来水丰枯变化的影响。

合河共站汛期保证率为 48.75%,最大缺水水量为 34.04 m^3/s ,保证率偏低,缺水水量较大。主要原因是汛期输沙需水量大导致环境流量值高。共渠承担引黄灌溉农田和排泄北部山区洪水的职能,水流含沙量受引黄水和上游水土流失的影响,因此需减少引黄水量,

同时治理上游水土流失,以减少水流含沙量从而减少输沙需水量。非汛期保证率为 88.13%,最大缺水水量为 1.46 m^3/s ,保证率较高,缺水水量较小。因此需加强水利工程的联合调度,减少来水丰枯变化的影响。

黄土岗站汛期保证率仅为 47.50%,最大缺水水量为 35.56 m^3/s ,保证率偏低,缺水水量较大。非汛期保证率为 91.88%,最大缺水水量为 1.16 m^3/s ,保证率较高,缺水水量较小。该站水流主要受上游合河共站的来水影响,可采取与合河共站同样的措施。

刘庄站汛期保证率仅为 40.00%,最大缺水水量为 61.54 m^3/s ,保证率偏低,缺水水量较大。主要原因是汛期输沙需水量大导致环境流量值高。因此需要减少引黄水量,同时治理上游水土流失,以减少水流含沙量从而减少输沙需水量。非汛期保证率为 61.88%,最大缺水水量为 0.53 m^3/s ,保证率较高,缺水水量较小。因此需要加强水利工程的联合调度,减少来水丰枯变化的影响。

3 讨论

1) 本文试图恢复 1963—1982 年的水流状态,及相应的河流生态系统,以期对河流生态系统的适度保护。因此生态需水量和输沙需水量的计算是将 1963—1982 的水流作为参照系统。但是近些年受引黄水量和黄河水含沙量减少等因素影响,河流的来水来沙、河床条件发生变化。因此,基于过去实测输沙资料的输沙需水量并不能完全反映现状或者将来的需求,在计算输沙需水量时,要结合来水来沙及河床等条件的具体情况^[8]。另外,本文计算采用多年平均流量,没有考虑来水丰枯变化的影响,可作为进一步研究的内容。其次,在计算水质自净需水量时,各计算河段起始断面的水质指标浓度是上游水功能区的水质目标,而不是实际监测浓度。如果起始断面的浓度按实际计算,污染严重河段通常没有纳污能力。因此需要加强治理污染源。另外,综合衰减系数 k 的取值对水质自净需水量的影响较大,本文 k 值采用多次实测结果的平均值^[21]。

2) 目前,我国多数河流水生生物的定期监测较少,缺乏长系列的水生生物数据,很难建立水文—生态响应关系。卫河水系新乡段环境流量最小值的确定方法,符合国内大多数河流的资料情况,研究结果有利于此类河流生态系统的保护和水资源的高效利用。在生态资料相对丰富的大型河段,如:长江、黄河等,可以建立水文-生态响应关系。如王俊娜等^[35]以三峡水库及其坝下河段为例,以水文-生态响应的概念模型及其量化关系为基础,综合估算环境水流。尚文绣等^[36]以维护黄河土著生物群落完整性为目标,结合栖

息地模拟与水文参照系统特征值,建立了一种面向河流生态完整性的生态需水过程评估方法。积累水生生物的监测数据,针对性量化当地河流的水文-生态响应关系是未来环境流量研究的发展方向。

3) 环境流量用于协调河流生态系统与人类生产生活之间的需水矛盾,通常根据河流的具体保护目标和水文特征来计算,因此环境流量值不是唯一的、确定的。河流管理员和利益相关者可以根据实际情况调整环境流量。

4 结论

1) 干流自上而下 7 个水文站的生态需水量存在较大差异,沿程不是完全增大趋势。在污水达标排放情景下,修武站和合河卫站的水质自净需水量分别为 $0.74 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $5.98 \text{ m}^3/\text{s}$ 。各站输沙需水量基本上在 8 月达到最高值,沿程输沙需水量存在较大差异。

2) 卫河水系新乡段 7 个水文站环境流量的推荐值分别为:修武站环境流量范围为 $0.74\sim 7.28 \text{ m}^3/\text{s}$,合河卫站环境流量为 $5.98 \text{ m}^3/\text{s}$,汲县站环境流量范围为 $0.85\sim 18.51 \text{ m}^3/\text{s}$,淇门站为 $1.55\sim 65.73 \text{ m}^3/\text{s}$,合河共站为 $0.47\sim 34.61 \text{ m}^3/\text{s}$,黄土岗站为 $0.53\sim 36.63 \text{ m}^3/\text{s}$,刘庄站为 $0.17\sim 61.54 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

3) 7 个水文站中合河卫站、汲县站、刘庄站存在明显缺水。7 个水文站汛期的保证率均明显低于非汛期。7 个水文站中淇门站的保证率最高,合河卫站的保证率最低。

参考文献:

- [1] 董哲仁,张晶,赵进勇. 环境流理论进展述评[J]. 水利学报, 2017, 48(6): 670-677.
DONG Zheren, ZHANG Jing, ZHAO Jinyong. Comments upon progress of environmental flows assessments[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(6): 670-677.
- [2] ZHAO C S, YANG Y, YANG S T, et al. Effects of spatial variation in water quality and hydrological factors on environmental flows[J]. Science of the Total Environment, 2020, 728(7): 138-695.
- [3] 彭文启. 生态流量五个关键问题辨析[J]. 中国水利, 2020(15): 20-25.
PENG Wenqi. The identification of five key issues of ecological flow[J]. China Water Resources, 2020(15): 20-25.
- [4] 刘昌明,门宝辉,赵长森. 生态水文学:生态需水及其与流速因素的相互作用[J]. 水科学进展, 2020, 31(5): 765-774.
LIU Changming, MEN Baohui, ZHAO Changsen. Ecohydrology: environmental flow and its driving factors[J]. Advances in Water Science, 2020, 31(5): 765-774.
- [5] 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): 3 143-3 151.
ZHANG Yuan, WANG Dingming, WANG Xiqin, et al. Study of environmental flow in Taizi River for fish species protection[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, 32(12): 3 143-3 151.
- [6] 王西琴,刘斌,张远. 环境流量界定与管理[M]. 北京: 中国水利

- 水电出版社, 2010.
WANG Xiqin, LIU Bin, ZHANG Yuan. Definition and management of environmental flow[M]. Beijing: China Water Power Press, 2010.
- [7] 徐宗学, 武玮, 于松延. 生态基流研究: 进展与挑战[J]. 水力发电学报, 2016, 35(4): 1-11.
XU Zongxue, WU Wei, YU Songyan. Ecological baseflow: Progress and challenge[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016, 35(4): 1-11.
 - [8] 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.
 - [9] 汪妮, 李京文, 解建仓, 等. 渭河干流生态环境需水量的动态计算[J]. 水力发电学报, 2013, 32(3): 76-81.
WANG Ni, LI Jingwen, XIE Jiancang, et al. Dynamic calculation of ecological water demand by the Wei River[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013, 32(3): 76-81.
 - [10] 徐宗学, 彭定志, 庞博. 河道生态基流理论基础与计算方法: 以渭河关中段为例[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
XU Zongxue, PENG Dingzhi, PANG Bo. Theoretical basis and calculation method of river ecological flows[M]. Beijing: Science Press, 2016.
 - [11] MENG C F, SONG X Y, TIAN K N, et al. Spatiotemporal variation characteristics of water pollution and the cause of pollution formation in a heavily polluted river in the upper Hai river[J]. Journal of Chemistry, 2020, 2020: 6617-227.
 - [12] HAJIGHOLIZADEH M, MELESSE A M. Assortment and spatiotemporal analysis of surface water quality using cluster and discriminant analyses[J]. Catena, 2017, 151: 247-258.
 - [13] SINGH K P, MALIK A, SINHA S. Water quality assessment and apportionment of pollution sources of Gomti River (India) using multivariate statistical techniques — a case study[J]. Analytica Chimica Acta, 2005, 538(1/2): 355-374.
 - [14] 新乡市水利局. 新乡市水利志[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2005.
Xinxiang City Water Conservancy Bureau. Xinxiang water conservancy annals[M]. Zhengzhou: Yellow River Water Conservancy Press, 2005.
 - [15] 新乡市生态环境局. 新乡市 2018 年环境质量年报[EB/OL]. <https://sthjj.xinxiang.gov.cn/news>.
Xinxiang City Ecological Environment Bureau. Xinxiang ecological environment bulletin 2018[EB/OL]. <https://sthjj.xinxiang.gov.cn/news>.
 - [16] 顾钱洪, 周传江, 孟晓林, 等. 卫河水系新乡段鱼类资源现状调查[J]. 河南水产, 2015(4): 23-26.
GU Qianhong, ZHOU Chuanjiang, MENG Xiaolin, et al. Current status of fishery resources in Xinxiang area of Wei River system[J]. Henan Fisheries, 2015(4): 23-26.
 - [17] GÜÇLÜ Y S. Improved visualization for trend analysis by comparing with classical Mann-Kendall test and ITA[J]. Journal of Hydrology, 2020, 584: 124-674.
 - [18] 宋刚福, 沈冰. 基于水功能区划的河流生态环境需水量计算研究[J]. 西安理工大学学报, 2012, 28(1): 49-55.
SONG Gangfu, SHEN Bing. Calculation research on river eco-environmental water requirements based on water function regionalization[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2012, 28(1): 49-55.
 - [19] ZHAO C S, YANG S T, LIU J G, et al. Linking fish tolerance to water quality criteria for the assessment of environmental flows: A practical method for streamflow regulation and pollution control[J]. Water Research, 2018, 141: 96-108.

- [20] 河南省环境保护厅, 河南省质量技术监督局. 省辖海河流域水污染物排放标准: DB41/777—2013[S]. Department of Ecology and Environment of Henan Province, Quality and Technical Supervision Bureau of Henan Province. Discharge standard of water pollutants in the Haihe River Basin of HeNan: DB41/777—2013[S].
- [21] 石维, 刘德文, 郭丽峰. 海河流域河流污染物综合降解系数研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2021, 42(1): 47-52. SHI Wei, LIU Dewen, GUO Lifeng. Study on the comprehensive degradation coefficient of river pollutants in Haihe river basin[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2021, 42(1): 47-52.
- [22] 梁忠民, 钟平安, 华家鹏. 水文水利计算[M]. 2版. 北京: 中国水利水电出版社, 2008. LIANG Zhongmin, ZHONG Pingan, HUA Jiapeng. Hydrological and hydraulic calculation[M]. Beijing: China Water Power Press, 2008.
- [23] BAN X, DIPLAS P, SHIH W, et al. Impact of Three Gorges Dam operation on the spawning success of four major Chinese carps[J]. Ecological Engineering, 2019, 127: 268-275.
- [24] 张飒, 班璇, 黄强, 等. 基于变化范围法的汉江中游水文情势变化规律分析[J]. 水力发电学报, 2016, 35(7): 34-43. ZHANG Sa, BAN Xuan, HUANG Qiang, et al. Analysis of hydrological regime changes in the midstream Han River using range of variability approach[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016, 35(7): 34-43.
- [25] 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. 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): 430-434.
- [26] 舒畅, 刘苏峡, 莫兴国, 等. 基于变异性范围法(RVA)的河流生态流量估算[J]. 生态环境学报, 2010, 19(5): 1 151-1 155. SHU Chang, LIU Suxia, MO Xingguo, et al. Estimation of instream ecological flow based on RVA[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2010, 19(5): 1 151-1 155.
- [27] 马晓超. 基于生态水文特征的渭河中下游生态环境需水研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2013. MA Xiaochao. Research of eco-environmental water requirement in the middle and lower reaches of Wei River based on eco-hydrological characteristics[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2013.
- [28] 刘中培, 李鑫, 窦明, 等. 淮河干流河南段基本生态流量保证率研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2020, 41(2): 50-54, 71. LIU Zhongpei, LI Xin, DOU Ming, et al. Research on the guarantee rate of basic ecological flow in the main stream of the Huaihe River in Henan section[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2020, 41(2): 50-54, 71.
- [29] LEAR K O, MORGAN D L, WHITTY J M, et al. Wet season flood magnitude drives resilience to dry season drought of a euryhaline elasmobranch in a dry-land river[J]. Science of the Total Environment, 2021, 750: 142 234.
- [30] ESPINOZA T, BURKE C L, CARPENTER-BUNDHOO L, et al. Quantifying movement of multiple threatened species to inform adaptive management of environmental flows[J]. Journal of Environmental Management, 2021, 295: 113 067.
- [31] TOCKNER K, PENNETZDORFER D, REINER N, et al. Hydrological connectivity, and the exchange of organic matter and nutrients in a dynamic river-floodplain system (Danube, Austria)[J]. Freshwater Biology, 1999, 41(3): 521-535.
- [32] STORER T, BANNISTER J, BENNETT K, et al. Influence of discharge regime on the movement and refuge use of a freshwater fish in a drying temperate region[J]. Ecohydrology, 2021, 14(1): e2253.
- [33] ZHANG W Q, RONG N, JIN X, et al. Dissolved oxygen variation in the North China Plain River network region over 2011—2020 and the influencing factors[J]. Chemosphere, 2022, 287: 132 354.
- [34] LI M D, FAN J T, ZHANG Y, et al. A systematic approach for watershed ecological restoration strategy making: An application in the Taizi River Basin in Northern China[J]. Science of the Total Environment, 2018, 637/638: 1 321-1 332.
- [35] 王俊娜, 董哲仁, 廖文根, 等. 基于水文—生态响应关系的环境水流评估方法: 以三峡水库及其坝下河段为例[J]. 中国科学: 技术科学, 2013, 43(6): 715-726. WANG Junna, DONG Zheren, LIAO Wengen, et al. An environmental flow assessment method based on the relationships between flow and ecological response: A case study of the Three Gorges Reservoir and its downstream reach [J]. Scientia Sinica (Technologica), 2013, 43(6): 715-726.
- [36] 尚文绣, 彭少明, 王煜, 等. 面向河流生态完整性的黄河下游生态需水过程研究[J]. 水利学报, 2020, 51(3): 367-377. SHANG Wenxiu, PENG Shaoming, WANG Yu, et al. Research on the ecological integrity-oriented environmental flow regime of the Lower Yellow River[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(3): 367-377.

Minimum Water Flow for Environmental Requirements in Xinxiang Section of the Wei River

MENG Chunfang^{1,2}, SONG Xiaoyu^{1*}, TIAN Kening³, LIU Xueyong²,
GUO Shuxian², WANG Yu², YE Bingxiao²

(1. State Key Laboratory of Eco-Hydraulics in Northwest Arid Region, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Xinxiang Hydrology and Water Resources Survey Bureau, Xinxiang 453000, China; 3. Henan Vocational College of Water Conservancy and Environment, Zhengzhou 450008, China)

Abstract: 【Objective】 Surface water in rivers has multiple functions serving direct sectors. The objective of this paper is to analyze the minimum water flow (e-flow) in Xinxiang Section of the Wei River (XSWR) for environmental service. 【Method】 We considered three demands: ecological demand for water, demand for water self-purification, and demand for sediment transport. Ecological water demand was calculated using the Tennant

method based on the water flow data measured from 1963 to 1982; self-purification demand was simulated using the one-dimensional water quality model; the demand for sediment transport was calculated as the amount of water required to transport unit sediment in flooding season. Spatiotemporal change in water quality due to pollution was calculated using cluster analysis (CA) and discriminant analysis (DA). The e-flow calculated using the range of variability approach (RVA) was compared with the recommended e-flows, as well as the average annual flow measured from 1963 to 1982. **【Result】** Ecological water demand varied greatly between the seven hydrometric stations along the river. Under standard sewage discharge, the demand for water self-purification in Xiuwu and Hehewei station was $0.74 \text{ m}^3/\text{s}$ and $5.98 \text{ m}^3/\text{s}$, respectively. The demand for sediment transport at all stations peaked in August, though it varied significantly between the seven hydrometric stations. Surplus-deficit analysis showed the e-flow in Hehewei, Jixian, and Liuzhuang station was markedly short of water. The guarantee rates of 7 hydrometric stations were as follows: Guarantee rates in flooding season were lower than in non-flooding season; Qimen station had the highest guarantee rate and Hehewei station had the least. **【Conclusion】** The e-flow was $5.98 \text{ m}^3/\text{s}$ for Hehewei station, 0.74 to $7.28 \text{ m}^3/\text{s}$ for Xiuwu station, 0.85 to $18.51 \text{ m}^3/\text{s}$ for Jixian station, 1.55 to $65.73 \text{ m}^3/\text{s}$ for Qimen station, 0.47 to $34.61 \text{ m}^3/\text{s}$ for Hehegong station, 0.53 to $36.63 \text{ m}^3/\text{s}$ for Huangtugang station, and 0.17 to $61.54 \text{ m}^3/\text{s}$ for Liuzhuang station.

Key words: environmental flow; Wei River; Xinxiang; Tennant method; one-dimensional water quality model

责任编辑：赵宇龙

(上接第 69 页)

Fuzzy Control on the Performance of Hose-reel Sprinkler Irrigation System

GUO Yijian¹, ZHU Xingye^{1*}, CHEN Shengyuan², LIU Junping¹, LI Wei¹

(1. Research Center of Fluid Machinery Engineering and Technology, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;

2. Institute of Product Quality Inspection of Wenling City, Wenling 317599, China)

Abstract: **【Objective】** Improving the performance of irrigation systems is critical to improving their operation and water use efficiency. The aim of this paper is to present a new control method. **【Method】** The intelligent control was based on the hose-reel irrigators system. It was realized by the fuzzy control theory and method, with soil moisture deviation and its temporal change taken as the input variables and the sprayer cart traction speed as the output. Fuzzy value of the traction speed was obtained by fuzzy-processing the two input-variables. It then underwent a clear-processing to obtain the real traction speed for operating the irrigation system by passing it to the driving motor. **【Result】** When soil moisture deviation and its temporal change were large, the traction speed of the sprayer cart was slow in order to increase the irrigation amount. In contrast, decrease in soil moisture deviation and its temporal change accelerated the traction speed of the sprayer cart to reduce the irrigation intensity. **【Conclusion】** Based on soil moisture deviation and its temporal change, the proposed control system can change the traction speed of the hose-reel irrigators to adjust irrigation intensity, achieving precision irrigation.

Key words: hose reel irrigator; intelligent irrigation; fuzzy control

责任编辑：韩洋