

基于生态补水的缺水河流生态修复研究

魏健^{1,2}, 潘兴瑶¹, 孔刚³, 白涛², 黄强², 李波⁴, 马盼盼²

(1. 北京市水科学技术研究院 北京市非常规水资源开发利用与节水工程技术研究中心, 北京 100048;

2. 西安理工大学, 陕西 西安 710048; 3. 北京市水影响评价中心, 北京 100161;

4. 河北工程大学, 河北 邯郸 056038)

摘要: 为研究河流生态修复所需的补水量和补水关键期,以永定河官厅山峡段为例,采用环境需水量和生态需水量两种方法,计算不同阶段河流生态修复所需的生态水量。结果表明:水文变异后,永定河生态严重退化,实施生态补水迫在眉睫;现状 $1.7 \times 10^8 \text{ m}^3$ 补水水量具有一定的积极作用,但不能满足河流正常需水;未来3个典型年(75%、90%和95%)最低的生态补水量为 4.88×10^8 、 6.11×10^8 和 $6.37 \times 10^8 \text{ m}^3$,同时推荐3-6月份为生态补水关键期。通过对生态补水量和补水时机的研究,为永定河生态修复提供一定的理论依据。

关键词: 水文变异; 生态流量; 生态需水量; 生态修复; 生态补水

中图分类号: TV213.4; X171.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2020)01-0064-06

Study on ecological restoration of water-deficient rivers based on ecological water supplement method

WEI Jian^{1,2}, PAN Xingyao¹, KONG Gang³, BAI Tao², HUANG Qiang², LI Bo⁴, MA Panpan²

(1. Beijing Engineering Research Centre for Non-conventional Water Resource Exploration Utilization and Water Saving, Beijing Water Science and Technology Institute, Beijing 100048, China; 2. Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 3. Beijing Water Impact Assessment Center, Beijing 100161, China;

4. Hebei University of Engineering, Handan 056038, China)

Abstract: In order to study the water supplement amount and critical period of river ecological restoration, this paper takes the Guanting Shanxia Section of Yongding River as an example, and uses environmental water requirement and ecological water requirement methods to calculate the ecological water requirement of river ecological restoration at different stages. The results show that the Yongding River ecology is seriously degraded and the implementation of ecological water supplement is imminent after the hydrological variations. The current ecological water supplement of $1.7 \times 10^8 \text{ m}^3$ has a certain positive effect, but it still cannot meet the normal water demand. The lowest ecological water supplement of the next three typical years (75%, 90% and 95%) are 4.88×10^8 , 6.11×10^8 and $6.37 \times 10^8 \text{ m}^3$, respectively. We recommend that the critical period of ecological supplement is from March to June. This research provides a certain theoretical basis for the ecological restoration of Yongding River.

Key words: hydrological variation; ecological flow; ecological water requirement; ecological restoration; ecological water supplement

1 研究背景

河流在维系地球水循环、能量平衡、气候变化和生态发展中具有极其重要的作用,同时也承担了人

类生产、生活和生态用水等功能^[1]。然而,当前河流生态系统正遭受严重威胁,一方面,随着社会经济的快速发展,城市化迅速扩张,人类生产生活需水激增,河流必要的生态用水遭到挤占^[2-3];另一方面,

收稿日期:2019-07-07; 修回日期:2019-10-08

基金项目:国家水专项课题(2017ZX07103-002);北京市科技计划项目(Z161100001116104)

作者简介:魏健(1995-),男,陕西西安人,硕士研究生,研究方向为水资源系统工程。

通讯作者:潘兴瑶(1980-),男,河北威县人,博士,教授级高级工程师,主要从事防灾减灾方面的研究。

大量研究表明气候变化对河流生态系统产生深刻影响,许多河流径流显著减少,生态环境严重恶化^[4-7]。伴随着人们环境理念的提高,为改善日益恶化的河流生态环境,修复破损的河流生态系统,河流生态修复^[8-10]已经引起人们广泛关注,其中开展缺水河流的生态补水工作已在典型流域实施。河流生态补水是指通过补充受损生态系统缺失的环境因子——水,改善、修复、恢复生态系统功能、结构功能和结构使其继续为人类创造良好的、健康的生存环境^[11]。生态需水作为合理配置水资源,制定生态补水水量的重要基础,从 20 世纪 40 年代发展至今,已形成一系列理念和方法。吉小盼等^[12]通过建立断面湿周与流量关系及其拟合曲线,采用斜率法、曲率法和经验法确定了断面最小生态需水。李抒苒等^[13]基于蓄洪、生态调节与保育及景观水体的功能界定并计算生态需水量,同时考虑补水成本和经济性进行基于满意度的需水量修正。李咏红等^[14]基于河流不同阶段下的保护目标,应用环境需水量和生态需水量两种方法计算了河道内生态需水量。同时,为保证生态需水结果的可靠性,有必要在计算时考虑水文变异的影响^[15]。鉴于此,本文以永定河官厅山峡段为例,首先采用多种方法对入库径流序列进行综合变异诊断,在此基础上计算水文变异前后河道内生态流量;其次,基于变异点和需水水平设置生态修复不同阶段;最后,分析现状补水方案并研究未来生态补水水量和补水时机以期为永定河生态修复提供重要参考和指导。

2 资料来源与研究方法

2.1 研究区域概况

永定河作为北京五大水系之一,位于 $112^{\circ} \sim 117^{\circ}45'E, 39^{\circ} \sim 41^{\circ}21'N$ 之间,流域总面积 $4.7 \times 10^4 \text{ km}^2$,以三家店拦河闸和南六环为界,将永定河从上至下依次划分 3 段:三家店拦河闸以上至官厅水库之间为官厅山峡段,三家店拦河闸至北京市南六环之间为平原城市段,北京市南六环至梁各庄之间为平原郊野段。

近几十年来,流域内经济社会发展和人口增长迅速,水资源需求量急剧增大,使得区域水资源严重匮乏^[7],河道内径流显著减少,其中三家店拦河闸以下河道长年干涸,丧失基本的生态服务功能,生态修复实践可行性小。因此,本文选取干扰相对较小,具有可修复性的官厅山峡段作为研究区域,研究区域示意图见图 1。

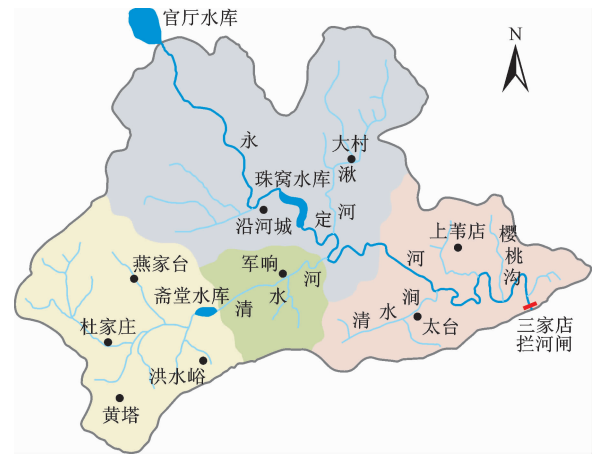


图 1 永定河流域官厅山峡段示意图

2.2 资料来源

官厅山峡段位于永定河流域上游,全长 91.2 km,河宽 70 ~ 300 m,落差 283 m,其径流补给来源主要包括大气降水和地下水等,径流年内分配十分不均匀。官厅水库位于流域上游,对整个流域起着控制作用,官厅水库的修建改变了下游河道天然径流过程,在计算时应尽量避免水利工程对径流过程的影响,因此选取官厅水库入库径流计算官厅山峡段生态需水过程,本文基于官厅水库 1956 - 2018 年的月平均入库径流实测数据开展研究。

2.3 河流生态修复

气候变化和人类活动加剧河流生态系统退化的同时引发了人们对传统治水理念的反思,为从根本上解决这一问题,以河流生态系统修复为主的治水理念已引起广泛关注。河流生态修复作为一种环境保护行动,其目的是促使河流系统修复到较为自然的状态,在这种状态下河流生态系统具有可持续性,并可提高生态系统价值和生物多样性^[8],河流生态修复技术包括缓冲区修复、植被修复、河道补水、生物-生态修复、生境修复等技术。

永定河官厅山峡段现状生态问题突出,最主要原因是入河水量减少。图 2 为 1956 - 2018 年官厅水库入库径流过程。由图 2 可知,自 20 世纪 50 年代以来,官厅水库入库径流量呈持续减少趋势,从 1956 年的 $23.4 \times 10^8 \text{ m}^3$ 减少到 2018 年的不足 $2.1 \times 10^8 \text{ m}^3$,衰减幅度高达九成以上;2000 年以后的年径流量不足 $3.0 \times 10^8 \text{ m}^3$,最近 10 年的年均径流量仅为 $1.4 \times 10^8 \text{ m}^3$,远不能满足河道正常需水,导致河道内生态流量锐减,部分河段出现若干公里的干枯、断流现象,河道内生物生存遭受严重威胁,天然的径流已经不能满足基本生态需求,因此,永定河官

厅山峡段生态修复应以河道补水为主。

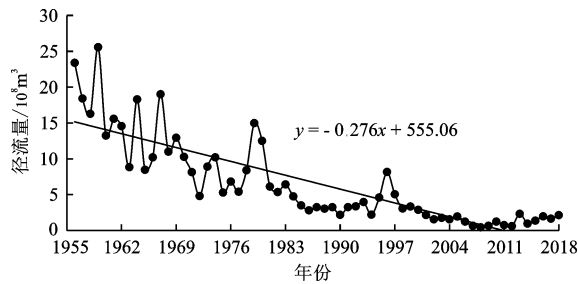


图2 1956-2018年官厅水库入库径流过程

2.4 生态需水

河流补水通常采用“以需定供”的思路,即在计算河流生态需水的基础上确定合理的生态补水水量,按照生态环境需水量的基本特征其可分为环境需水量和生态需水量^[10]。官厅山峡段位于整个流域上游,受人类活动影响较小,流域用水结构较为简单,在计算时不考虑生产生活用水及景观用水,因此永定河官厅山峡段的环境需水量由蒸发需水量和渗漏需水量组成,生态需水量由河流基本生态需水量组成。相应计算如下:

(1) 蒸发需水量

$$W_1 = \sum_{i=1}^n A_i E_i \quad (1)$$

式中: W_1 为蒸发需水量, 10^4 m^3 ; A_i 为不同类型水面的蒸发面积, hm^2 ; E_i 为不同类型水面平均蒸发量, m ; n 为水面类型,在本文分别为水库水面蒸发和溪流水面蒸发。

(2) 渗漏需水量

$$W_2 = A_s K_s T \quad (2)$$

式中: W_2 为渗漏需水量, 10^4 m^3 ; A_s 为渗透剖面面积, hm^2 ; K_s 为渗透系数, m/d ; T 为时间, d 。

(3) 河流基本生态需水量

河流基本生态需水量是保证河流健康,实现可持续发展,维持河流基本功能所需的水量。这部分水量通常由最小生态流量法计算得到,然而许多学者对此结果提出质疑,例如 Richter 等研究表明河流生态系统对于流量需求比最小生态流量更复杂和精细^[16],因此,为弥补最小生态流量的不足,本文同时考虑采用最小生态流量和适宜生态流量分别作为低水平和高水平的河流基本生态需水量,其计算分别如下:

①最小生态流量:最小生态流量是维持河道基本功能所需要的最小流量,本文采用逐月最小径流法计算。

②适宜生态流量:相比于最小生态流量,适宜生

态流量是维持河道生态系统完整性和稳定性的流量。依据环境因子与种群关系,河流生态系统的生态流量为各月份频率最大的月平均流量^[6,15]。要求出频率最大的生态流量,需要选择合适的分布函数,研究表明,广义极值(generalized extreme value, GEV)分布比 P-III 型分布更适合河道内月平均流量^[6],因此,本文选择 GEV 分布函数,采用线形矩法对 GEV 分布进行参数估计。

2.5 水文变异

气候变化和人类活动作用下,水文循环过程加快,原有的河流水文序列一致性遭到破坏,发生不同程度的变异,因此,在计算生态流量前开展径流序列的水文变异诊断十分有必要。水文变异后河流生态水文势情发生改变,变异前的天然水文状态是生物生存的最理想状态,也是河流生态修复的最终目标。但在现今社会和经济发展的如此之快的背景下,以变异前水文序列计算结果作为河道内生态流量目标难以直接实现,特别是水资源严重匮乏的永定河流域。因此,考虑到水文变异前后生态系统发生变化-适应-再变化的自适应调整过程,本文基于变异点划分不同生态修复阶段,计算各阶段河流生态需水阈值。

水文变异诊断方法众多,研究表明秩和检验法在众多方法中效果最优,有序聚类法次之,R/S 分析法效果最差^[17-18],Mann-Kendall 检验为世界气象组织推荐的非参数检验方法。为避免单一方法的不足和增加计算结果可信度,本文首先利用 Mann-Kendall 检验法和有序聚类法初步选择所有可能的变异点,再利用秩和检验法对可能变异点进行显著性分析。

3 结果与分析

3.1 永定河生态需水分析

3.1.1 水文变异诊断 采用 Mann-Kendall 检验法和有序聚类法初步确定官厅水库径流序列的可能变异点为 1970 年和 1984 年,进一步采用秩和检验法(显著性水平 0.05)对可能变异点进行显著性检验,结果如表 1 所示。由表 1 可知,径流序列在 1970 和 1984 年确实发生显著性变异。

表1 官厅水库变异点秩和检验结果

序列	时间序列(年份)	统计量 U	检验量	是否显著
1	1956-1984, 1985-2018	11	6.65	是
2	1956-1970, 1971-2018	17	5.54	是

3.1.2 生态流量计算 根据石建军等^[19]提出的生态径流过程推估方法,1970 年和 1984 年两个变异

点将水文序列划分为:1956 - 1970 年(天然阶段)、1971 - 1984 年(人类弱干扰阶段)和 1985 - 2018 年(人类强干扰阶段)。根据最小生态流量和适宜生态流量方法确定不同序列的低水平和高水平生态流量过程如图 3 所示。

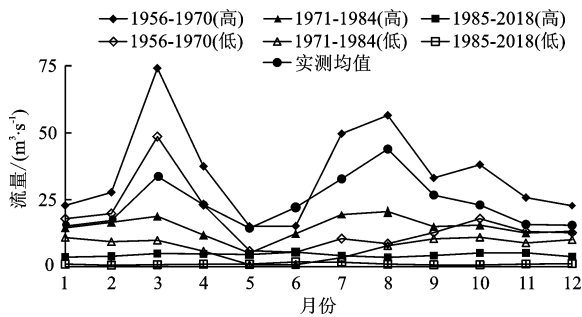


图 3 不同序列生态流量过程

由图 3 可知:

(1)不同序列高水平对应的适宜生态流量显著优于低水平对应的最小生态流量,两次水文变异均造成生态流量减少,以高水平适宜流量过程为例:1971 - 1984 年序列和 1985 - 2018 年序列同 1956 - 1970 序列相比,生态流量分别减少 58.05% 和 87.36%,表明水文变异后,河道生态流量显著减少,生态系统情势发生恶化,水文变异对河道生态环境产生显著的负面影响,也进一步凸显了现状补水的必要性。

(2)从变化趋势分析,1956 - 1970 年和 1971 - 1984 年对应的生态流量过程均呈现出明显的双峰形状,主要与天然来水特征有关;1984 年变异后的生态流量过程较为稳定,年内波动范围较小,主要原因是变异后河道流量大幅减少,不能维持天然状态水平,生态流量更趋向于满足某一稳定过程。

(3)从变化幅度分析,以年际尺度来看,1970 年第 1 次变异前后,河道内生态流量减少较为显著,1984 年第 2 次变异前后,河道内生态流量减少相对较为稳定;以年内月尺度来看,非汛期 3 月份和汛期的 7 - 9 月份生态流量减少幅度较大,其余月份减少幅度相对较小。

3.1.3 不同计算方法的结果对比 将本文计算结果同 Tennant 法^[15]、逐月频率法^[15]进行对比,其中逐月频率法中丰水期(6 - 9 月)、枯水期(10 月 - 次年 5 月)分别取 50% 和 80% 保证率;Tennant 法采用变异前天然水文序列(1956 - 1970 年)作为评价标准,因篇幅有限,所有生态流量均以年均流量表示,其结果如表 2 所示。

由表 2 可知:以 Tennant 法作为评级标准,最小

生态流量只有 1956 - 1970 年计算结果勉强达到一般水平,其余年份皆不满足;适宜生态流量中,1956 - 1970 年计算结果达到最佳水平,1970 - 1984 年计算结果对应一般水平,1985 - 2018 年计算结果不满足标准,进一步验证了水文变异后河流生态环境发生恶化;同逐月频率法计算结果相比,最小生态流量显著小于逐月频率法计算结果,而适宜生态流量与逐月频率法计算结果相当。这是因为最小生态流量考虑的最小月平均流量这一极端状态,逐月频率法是设定不同的保证率计算,而 Tennant 法计算的是天然径流量应该达到的水平^[15]。因此,本文所采用的方法计算的适宜生态流量大于最小生态流量法结果,与逐月频率法计算结果相当,表明其具有合理性和确定性,满足计算要求。

表 2 不同方法计算的生态流量比较

名称	水文序列	本文生态流量/(m ³ ·s ⁻¹)	Tennant 等级	逐月频率法(m ³ ·s ⁻¹)
最小生态流量	1956 - 1970 年	16.36	一般	33.35
	1971 - 1984 年	7.41	差	14.56
	1985 - 2018 年	0.99	极差	4.19
适宜生态流量	1956 - 1970 年	34.86	最佳	33.35
	1971 - 1984 年	14.62	一般	14.56
	1985 - 2018 年	4.41	差	4.19

3.1.4 不同阶段生态流量满足率计算 将第 1 次变异前计算的生态流量过程作为评价标准,分别计算不同阶段的生态流量满足率,以适宜生态流量过程为例,计算结果如表 3 所示。

由表 3 分析可得:水文变异前,生态流量满足率均值达到 65%,意味着一年中河道至少有一半的时间满足生态流量需求;而变异后河道生态流量满足率普遍锐减。第 1 次变异后,生态需水满足率从 65% 锐减至 19%,减少幅度高达七成以上;第 2 次变异后,生态需水满足率减少至 4%,相比第 1 次变异后减少幅度高达 7 成。19% 和 4% 满足率对应的月时间长度分别为不足 3 个月和不足 1 个月,这对于河道内的生物生存具有毁灭性打击,也说明现状条件下永定河生态缺水情势异常严峻。

综上分析,水文变异后河道生态流量显著降低,河道生态流量满足率显著减小,长此以往,河流生态功能将丧失,因此,永定河生态修复十分迫切,实施生态补水工作刻不容缓。

3.1.5 河流生态修复需水量 河流生态修复是一项涉及大量人力物力的工程实践,其过程不可能一蹴而就,

在进行生态修复时应基于循序渐进的理念制定合理的生态修复阶段。本文依据水文变异的3个阶段制定生态修复相应的3个阶段:即第1阶段河流生态首先修复到人类强干扰阶段对应的生态水平;第2阶段达到人类弱干扰阶段对应的生态水平;生态修复第3阶段也是最终目标即达到天然阶段对应的生态水平,每个阶段划分低和高两种需水水平,其中低水平需水是每

个阶段最小也是必须满足的,高水平需水是在低水平需水满足的基础上可以进一步达到的理性状态。

根据3.1.2节计算的生态流量过程,得到各阶段河流基本生态需水量;根据北京水务局和中国水利科学研究所的实测参数,计算得到河流蒸发需水量为 $0.30 \times 10^8 \text{ m}^3$,河道渗透需水量为 $1.55 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。据此得到不同修复阶段的生态需水如表4所示。

表3 1956-2018年不同阶段适宜生态流量满足率

水文序列阶段	月份												均值
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
天然阶段(1956-1970)	60	53	60	67	73	73	67	67	60	60	67	73	65
人类弱干扰阶段(1971-1984)	0	0	0	14	43	57	21	29	31	14	0	21	19
人类强干扰阶段(1985-2018)	3	0	0	0	6	24	0	0	3	0	3	3	4

表4 官厅山峡段生态修复需水量

生态修复阶段	蒸发需水量	渗透需水量	河流基本生态需水量		生态需水量	
			低水平	高水平	低水平	高水平
			第1阶段	0.30	1.55	0.31
第2阶段	0.30	1.55	2.34	4.61	4.19	6.46
第3阶段	0.30	1.55	5.15	10.99	7.00	12.84

3.2 永定河生态补水分析

在生态需水确定的前提下,河流生态修复的补水量与入库径流密切相关,鉴于来水的随机性以及变异后官厅水库入库径流处于偏枯水平,本文选取频率为75%、90%和95%的3个枯水年研究不同阶段河流生态修复需要的生态补水水量。

3.2.1 现状生态补水分析 气候变化、人口增长、经济发展导致永定河流域出现河道干涸、河水水质恶化、生物减少等一系列环境问题。沿河居民和有关部门对此严重不满,为还人们一个山清水秀的生态环境,2005年,北京市制订了永定河综合规划,综合规划中强调,永定河是西部的生态走廊,是城市与外界的绿色交通要道,也是城市的绿色屏障。2018年,北京市水务局联合多部门共同签订《永定河生态用水保障合作协议》,协议规定通过山西省万家寨引黄北干线和册田水库补充永定河生态用水,现状水平下永定河年均补水水量 $1.7 \times 10^8 \text{ m}^3$,时间从3月初持续到5月底,补水期间各月水量相等。

以表4生态修复需水量为标准可以得到:75%、90%和95%频率典型年中仅75%频率典型年达到第3阶段(低)水平,表明在此水平下河流生态正遭受严重威胁。现状 $1.7 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的生态补水量

实施后,75%、90%和95%频率典型年的水量分别增加到 3.82×10^8 、 2.60×10^8 和 $2.33 \times 10^8 \text{ m}^3$,其中75%频率典型年恢复到第1阶段(高)水平,90%和95%典型年仅恢复到第1阶段(低)水平,表明现状条件下的生态补水虽然具有积极作用,但离河道理想的生态过程——第3阶段仍然具有非常大的差距,未来生态补水面临较大挑战。

3.2.2 未来生态补水分析 河流生态修复最终目标是达到天然阶段对应的生态水平,3.2.1节结果表明现状生态补水量远不能达到此标准,因此在未来还需逐渐增加补水量以实现永定河的全面可持续发展。以表4中生态修复第2、第3阶段需水量为目标,计算得到未来典型年需要的生态补水量如表5所示。

表5 未来典型年不同阶段生态补水量 10^8 m^3

来水 频率/%	第2阶段生态补水量		第3阶段生态补水量	
	低水平	高水平	低水平	高水平
75	2.07	4.34	4.88	10.72
90	3.30	5.57	6.11	11.95
95	3.56	5.83	6.37	12.21

生态补水实施中,相比于总量控制,其更加倾向于过程控制,由于生态补水的复杂性,永定河生态补水很难实现全年补水,因此有必要探究补水关键期,以达到水资源的高效利用。补水关键期的确定需要考虑月生态需水量的影响,以生态修复的最低目标——第 3 阶段(低)水平为修复目标,以 2009 – 2018 最近 10 年的径流均值作为来水过程,计算得到各月需水量如图 4 所示。

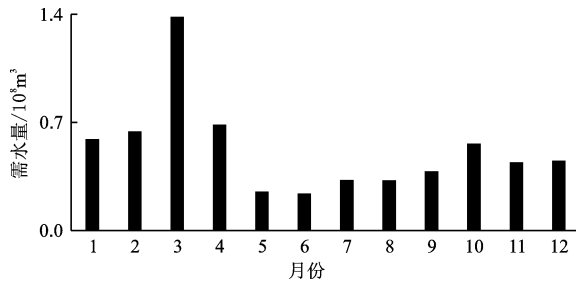


图 4 月生态需水过程

由图 4 可知:丰水期 6 – 9 月和枯水期 5 月需水量整体上相对较小,枯水期 10 月 – 次年 4 月需水量变化较大,其中 3 月份的需水量远大于其他月份,在补水时应重点关注。另一方面,相比于月需水过程,补水时机的选择更应考虑河道内关键生物的生活习性。永定河流域水生生物以北方地区河道淡水鱼(鲫鱼、鲢鱼、草鱼等家鱼)为主,其繁殖期为 4 – 6 月份^[20],繁殖期内生物对河道内水流、温度等参数要求严格,繁殖期的需水对生物生存繁衍意义重大。综上所述,本文推荐 3 – 6 月份为生态补水关键期,这与现状补水时间(3 月初 – 5 月底)基本契合,满足工程实践可操作性。河流生态修复作为一项复杂的工程实践,仅依靠单一的生态补水修复技术很难实现河流的完全恢复,在未来实践中,应更多地综合考虑水质、水量、河流生态结构以及水生生物等方面因素,采取多种技术共同修复河流生态系统,最终打造一条绿色的、流动的、健康的永定河。

4 结 论

为研究现状生态补水对永定河生态修复的影响以及探究未来生态补水量和补水关键期,本文基于水文变异和需水水平制定不同的生态修复阶段,计算不同阶段的生态需水量,并对永定河生态补水做出研究。结果分析得到:

(1) 3 种水文变异方法综合诊断表明官厅水库径流分别于 1970 和 1984 年发生变异,变异后生态流量和生态流量满足率显著减少,河流生态系统严

重退化,实施生态补水工程已刻不容缓。

(2) 现状生态补水方案下,75% 频率典型年生态修复至第 1 阶段(高)水平,90% 和 95% 典型年勉强达到第 1 阶段(低)水平,相比最终天然状态下的生态过程仍有较大距离。

(3) 未来以第 3 阶段(低)为修复目标,3 个典型年分别需要生态补水 4.88×10^8 、 6.11×10^8 和 $6.37 \times 10^8 \text{ m}^3$;同时综合月需水过程和典型生物习性推荐 3 – 6 月份作为生态补水关键期。

参考文献:

- [1] 官云飞,黄显峰,方国华,等. 基于 RVA 框架的河流适宜生态环境需水研究[J]. 中国农村水利水电, 2014 (1):105 – 110.
- [2] GAO Yan, LIU Gengyuan, MARCAO C, et al. Economy-pollution nexus model of cities at river basin scale based on multi-agent simulation: A conceptual framework [J]. Ecological Modelling, 2018, 379:22 – 38.
- [3] LUO Kun, HU Xuebin, HE Qiang, et al. Impacts of rapid urbanization on the water quality and macroinvertebrate communities of streams: A case study in Liangjiang New Area, China [J]. Science of The Total Environment, 2018, 6(21):1601 – 1614.
- [4] FEYERA A H, ELLEN D, ROB H, et al. Finding sustainable water futures in data-sparse regions under climate change: Insights from the Turkwel River basin, Kenya [J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2018, 19 (8):124 – 135.
- [5] 黄斌斌,郝成元,李若男,等. 气候变化及人类活动对地表径流改变的贡献率及其量化方法研究进展[J]. 自然资源学报, 2018, 33(5):899 – 910.
- [6] 李剑锋,张强,陈晓宏,等. 考虑水文变异的黄河干流河道内生态需水研究[J]. 地理学报, 2011, 66(1):99 – 110.
- [7] 张利平,于松延,段尧彬,等. 气候变化和人类活动对永定河流域径流变化影响定量研究[J]. 气候变化研究进展, 2013, 9(6):391 – 397.
- [8] 刘欢,杨少荣,王小明. 基于河流生态系统健康的生态修复技术研究进展[J]. 水生态学杂志, 2019, 40(2):1 – 6.
- [9] 黄显峰,吴俊,方国华,等. CHHMS 耦合模型在河流生态修复中的应用[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28 (6):33 – 37.
- [10] 崔瑛,张强,陈晓宏,等. 生态需水理论与方法研究进展[J]. 湖泊科学, 2010, 22(4):465 – 480.
- [11] 邢梦雅,陈星,周锴,等. 基于生态补水的水环境改善效果评价体系[J]. 水资源保护, 2016, 32(1):64 – 66.
- [12] 吉小盼,蒋红. 基于湿周法的西南山区河流生态需水量计算与验证[J]. 水生态学杂志, 2018, 39(4):1 – 7.

(下转第 76 页)

供需矛盾愈发突出。在研究时段内,2007年相对隶属度平均值最小,为0.4947,说明水资源承载力最大;而2015年相对承载力平均值达0.7787,说明水资源承载力最小。该结论为决策者制定出有效的缓解或补救措施提供了有力的参考依据。

参考文献:

- [1] 屈小娥. 陕西省水资源承载力综合评价研究[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(2): 91-97.
- [2] 戴明宏, 王腊春, 汤 溟. 基于多层次模糊综合评价模型的喀斯特地区水资源承载力研究[J]. 水土保持通报, 2016, 36(1): 151-156.
- [3] 刘 东, 付 强, 孟 军. 集对分析法在三江平原井灌区地下水承载力评价中的应用[J]. 中国农村水利水电, 2009(2): 1-4+8.
- [4] 高红霞. 基于投影寻踪技术的水资源承载力评价方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.
- [5] 李 燕, 张兴奇. 基于主成分分析的长江经济带水资源承载力评价[J]. 水土保持通报, 2017, 37(4): 172-178.
- [6] 杨琳琳, 李 波, 付 奇. 基于BP神经网络模型的新疆水资源承载力情景分析[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2016, 52(2): 216-222.
- [7] 邓安利, 王 帅, 王敏黛, 等. 基于多目标模糊优选模型的水资源优化调度——以山西东山供水工程区为例[J]. 安全与环境工程, 2015, 22(3): 18-21+45.
- [8] 查新月, 豁祖顺. 基于灰色关联分析的模糊评判模型与系统分析[J]. 数学理论与应用, 2005, 25(3): 38-41.
- [9] 冯庆高, 周传波, 傅志峰, 等. 基坑支护方案的灰色模糊可变决策模型[J]. 岩土力学, 2010, 31(7): 2226-2231.
- [10] 刘晓然, 杨 淳, 王 威. 基于可变模糊集的地震崩塌危险性评价[J]. 安全与环境学报, 2018, 18(2): 571-575.
- [11] 王建华, 姜大川, 肖伟华, 等. 水资源承载力理论基础探析: 定义内涵与科学问题[J]. 水利学报, 2017, 48(12): 1399-1409.
- [12] 柴乃杰, 鲍学英, 张天奇, 等. TOPSIS-熵权决策法在绿色施工节水措施综合效益评价中的应用[J]. 水资源与水工程学报. 2017, 28(5): 156-161.
- [13] CHEN Ming, BAI Huali, ZHOU Yuming, et al. A novel network performance evaluation method based on maximizing deviations [J]. Telecommunication Systems, 2014, 55(1): 149-158.
- [14] 陈南祥, 杨淇翔. 基于博弈论组合赋权的流域水资源承载力集对分析[J]. 灌溉排水学报, 2013, 32(2): 81-85.
- [15] 曹丽娟, 张小平. 基于主成分分析的甘肃省水资源承载力评价[J]. 干旱区地理, 2017, 40(4): 906-912.
- [13] 李抒苡, 周思斯, 郑 钰, 等. 基于河道功能及满意度的老运粮河生态需水量研究[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(5): 32-36.
- [14] 李咏红, 刘 旭, 李盼盼, 等. 基于不同保护目标的河道内生态需水量分析——以琉璃河湿地为例[J]. 生态学报, 2018, 38(12): 4393-4403.
- [15] 张 强, 李剑锋, 陈晓宏, 等. 水文变异下的黄河流域生态流量[J]. 生态学报, 2011, 31(17): 4826-4834.
- [16] 陈 端, 陈求稳, 陈 进. 考虑生态流量的水库优化调度模型研究进展[J]. 水力发电学报, 2011, 30(5): 248-256.
- [17] 徐淑琴, 苏 鑫, 王莉莉, 等. 水文变异条件下水库生态调度研究[J]. 农业机械学报, 2016, 47(4): 151-159+386.
- [18] 刘剑宇, 张 强, 顾西辉, 等. 鄱阳湖流域洪水变化特征及气候影响研究[J]. 地理科学, 2016, 36(8): 1234-1242.
- [19] 石建军, 冯民权, 黄 强, 等. 水文变异条件下文峪河生态径流过程的推估方法[J]. 水力发电学报, 2014, 33(4): 28-35.
- [20] 顾斌杰, 王富世, 宋 磊, 等. 永定河官厅山峡生态需水量计算及配置方案研究[J]. 北京水务, 2017(2): 12-18.

(上接第69页)