

DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2019.05.16

基于 Tennant 方法的河流生态基流应用现状及改进思路

黄康, 李怀恩, 成波, 田若谷

(西安理工大学 西北旱区生态水利工程国家重点实验室, 陕西 西安 710048)

摘要: Tennant 法作为国内外应用最为广泛的水文方法, 在生态基流研究中起着重要作用。但是, 作为一种经验方法, 具有局限性, 在参考或应用某种方法时应该对其进行合理性分析。系统总结了 Tennant 法普遍存在的时空变化大、流量适宜性较弱、普适条件较差的 3 个关键问题, 基于 3 种改进形式的变量: 特征流量、用水期、百分率, 深化研究 Tennant 方法的改善战略, 进而归纳出 3 种改进方法: 年均值法、同期均值法、改进百分系数法。最后, 对 Tennant 法进行展望, 提出选取具有年内和年际丰枯变化性的低流量指标、建立基流百分比与水生生物栖息地之间的适应曲线簇、有针对性地修正具体河流中水生生物的生物和物理需求、确定生态基流阈值时需考虑到流量与河流生态系统之间的关系等发展趋势, 以期拓宽 Tennant 法的使用范围、完善不同地区河流生态基流的技术支持。

关键词: 改进 Tennant 法; 河道生态基流; 年均值法; 同期均值法; 改进百分系数法

中图分类号:P333

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2019)05-0103-08

Application status and improvement ideas of river ecological base flow based on Tennant method

HUANG Kang, LI Huaien, CHENG Bo, TIAN Ruogu

(State Key Laboratory Base of Eco-hydraulic Engineering in Arid Area, Xian University of Technology, Xian 710048, China)

Abstract: As the most widely used hydrological method at home and abroad, the Tennant method plays an important role in the study of ecological base flow; however, as an empirical method with limitations, we should analyze its rationality when refer to or apply it. We systematically summarized the three key problems of the current ubiquitous spatial and temporal changes, weak flow suitability, and poor general conditions. Based on three improved forms: characteristic flow, water-use period, and percentage, we studied the improvement strategy of the Tennant method, and further summarized three improvement methods: the annual average method, the simultaneous mean method, and the improved percentage coefficient method. Finally, we selected low-flow indicators with annual and inter-annual variability to establish a cluster of adaptation curves between the percentage of base flow and aquatic habitats, and to target the correction of aquatic organisms in specific rivers. Physical needs and the determination of the ecological base flow threshold need to take into account the development trend between the flow and the river ecosystem, in order to broaden the scope of use of the Tennant method and improve the technical support of river ecological base flow in different regions.

Key words: improved Tennant method; river ecological basic flow; annual mean method; contemporaneous mean method; improved percent coefficient method

1 研究背景

随着经济发展, 人口不断增加, 人类用水与生态系统功能之间的冲突已不可避免, 并且变得更加显

著, 河流生态系统往往会随之不断退化^[1-2]。天然河流中水文情势的典型季节性和年际丰枯流量模式的特征对河流生态系统的完整性和生物多样性至关重要^[3]。因此, 释放某百分比的生态流量, 来维持

收稿日期: 2019-03-26; 修回日期: 2019-06-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(51479162)

作者简介: 黄康(1994-), 男, 湖南益阳人, 硕士研究生, 研究方向为生态水文与水资源保护。

通讯作者: 李怀恩(1960-), 男, 陕西商洛人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为水资源保护研究。

或恢复天然状态下水生生态系统结构和功能的完整性是非常必要和现实的。目前,随着人们越来越认识到维持河流生态系统的重要性,生态流量不断受到重视。

目前,全世界已有 200 多种生态流量评估方法,它可以分为 4 类^[4],其中水文学方法约占总数的 29.5%,由于该类方法只需要自然流动记录、数理统计和专家判断,无需昂贵的现场数据收集,基于广泛可用的河流或河段的流量数据就可以确定河流生态流量,具有快速、非资源密集、易于使用的优势,因而成为最受欢迎的方法。中国大多数河流具有长系列的水文数据,所以水文法普遍适用于国内河流生态基流评估及其他领域,其中 Tennant 方法是世界上计算环境流量最常用的方法之一,也是最适合中国国情的方法^[5]。

本文选取全世界最普遍使用的 Tennant 法进行研究,针对该方法目前普遍存在的时空变化大、对流量的适宜性较弱、普适条件较差的 3 个关键问题,进而根据国内外学者公开发表的有关 Tennant 法的大量文献,就 Tennant 法的改进进行了系统的分析和综述,并在此基础上提出了改进 Tennant 法研究的发展趋势。

2 Tennant 法

2.1 传统 Tennant 方法

Tennant 法也叫蒙大拿法,由 Tennant^[6]于 1976 年提出。该方法借助美国地质调查局(USGS)提供的水文数据进行分析以及通过 Tennant 等人对蒙大拿州、怀俄明州和内布拉斯加州的 100 多个地区 11 条河流进行了详细的野外试验研究提出,其建立了水生栖息地适宜性与流量之间的关系,被用于确定保护美国中西部健康河流环境的最小流量。现普遍用 Tennant 法估算河道生态基流或生态需水量。

Tennant 等基于观测的水深、河宽和流速等数据进行分析,研究表明大多数河流中的水生生境的状况与平均流量的相同部分非常相似,并总结了某些规律:(1)基于水生物不同的生活习性,分为鱼类产卵育幼期 4—9 月和一般用水期 10 月—次年 3 月。(2)将雨季和旱季的河流流量与鱼类栖息地质量联系起来,并量化为年均流量的百分比;引入 10% 作为最小瞬时流量,30% 被推荐为基本流量,60% 为最佳瞬时流量,并分别提供一般、优秀、最佳的栖息环境。(3)基于河流测站的观测数据,确定了年平均流量的各种百分比,进而提出了河流生态流量的标

准,见表 1^[6]。

表 1 河流栖息地状况和河道生态基流标准

流量状况	推荐基流(平均流量)/%	
	一般用水期 (10—3 月份)	鱼类产卵育幼期 (4—9 月份)
最好	200	200
最佳范围	60~100	60~100
杰出	40	60
优秀	30	50
好	20	40
一般或退化	10	30
差或最低	10	10
严重退化	0~10	0~10

Tennant 法计算河流生态基流公式如下:

$$W = \sum_{i=1}^{12} (M_i \cdot N_i) \quad (1)$$

式中: W 为河道的生态基流量, m^3 ; M_i 为全年第 i 个月的年均流量, m^3 ; N_i 为 i 月份对应的生态基流百分比, %。

2.2 Tennant 法的特点

任何一种方法都有两面性,体现在其产生、发展和延伸的过程中,在参考或应用某种方法时应该对其进行合理性分析^[7]。因此,就 Tennant 法的特点阐述其优点和不足之处。

2.2.1 优点 Tennant 法根据观测资料建立起生态基流和栖息地状况之间的响应关系,使用简单且操作方便,无需野外测量工作,不局限于河流是否有水文站点的布设,仅仅使用历史流量资料就可以评估生态基流,适用于生态优先度不高或生态资料缺乏地区的河流。Tennant 法容易将计算结果与流域规划相结合,作为河流生态管理的初始目标和战略性方针^[8],具有宏观的指导意义。同时,国内 Tennant 法适用于河流管理规划阶段的环境流量预评估^[9~10]。生态基流值取决于给定的特征流量,以每月或每日水文记录为基础,流量特性相对容易确定日平均流量的时间序列是否可用,可作为检验其他计算方法的一种粗略方法或评价方法^[11~12]。

上述优点使得 Tennant 法成为北美地区第二大普遍使用的生态基流评估方法和全世界应用最为广泛的水文方法,至少 25 个国家根据各种水文、地貌、生态或基于流域的标准,以修改形式应用了最初阐述的 Tennant 法^[13]。

2.2.2 不足 Tennant 法作为一种经验方法,在实际应用中具有局限性,现针对其普遍存在的时空变化大、流量适宜性较弱和普适条件较差的 3 个关键问题进行分析。

(1) 时空变化大, Tennant 法未考虑河流流量年内季节性变化和年际丰枯性变化。首先,Tennant 法是基于年均流量百分比划分河流生态健康状况,未能全面考虑流量与水生生物之间关系受季节性变化的影响,其计算精确度不高,易受极端事件影响;同时,未考虑河流流量的年内分配,将全年划分为两个用水期,使得水生生物不适应于生态环境的要求。另外,淡化了河流流量年际变化的情况,没有区分丰、平、枯各年份的差异。

(2) 流量适宜性较弱,生态基流百分比确定困难。应用 Tennant 法时过度简化处理了河流的真实情况,未能从河流流域特征和成因分布规律分析流量特性,河流生态健康状况与流量比例之间的关系受到不同地域、不同水生态环境和不同保护对象等影响因素较大,因此,需分析 Tennant 法中基流标准与实际河流情况的适宜度。

(3) 普适条件较差, Tennant 法作为经验公式,具有区域限制。Tennant 法是通过研究 11 条低影响的天然河流而得出的经验方法,而不同地区的河流水情、开发利用程度和生态经济状况不一样。我国近年来的水资源开发利用率逐渐提高,人类活动对河流的影响也愈来愈严重,因此,通常需要对公式进行适应性分析和检验,一些学者对该方法在中国的应用提出质疑^[14]。由于对自然流量模式适应程度较低,Tennant 法也未被英国所采纳^[15]。

3 改进 Tennant 法

在全球范围内,没有表明河流生态状况水平的数据集,也没有一个具有全球河流理想生态状况的数据集;缺乏生态水文数据使得难以确定全球不同淡水生态系统的最低环境流量阈值和临界点。全球河流生态系统面临的形势十分严峻,特别对于中国的北方河流,已迫在眉睫。因此改进 Tennant 法是非常有必要的。基于现状,查阅国内外相关文献,根据 Tennant 法的优缺点,总结为 3 点改进思路。

3.1 改进思路

从上述 Tennant 法的局限性出发,分析在不同河流的适宜性,主要考虑以下 3 点:

(1) 生物种群在不同时段对流量适宜程度是不同的,当 Tennant 法在不同河流检验时,生态基流值

是随季节丰枯性变化而改变的。因此,采用典型年的流量或月均流量代替多年平均流量,同时基于河流水生态系统的季节性特征和生物种群的活动周期对用水期进行修正划分,从而体现 Tennant 法的丰、平、枯水文特征。

(2) 考虑河流断面的几何形态特征和季节性变化对流量的影响,分析同一水期的基流百分比在不同河流的差异性,从而确定出当地河流流量比例与生态健康程度的关系,并基于该地区的实际情况适当改进生态基流标准。

(3) 生态基流标准的确定需考虑河流水生物自然的栖息地状况和河流的生物完整性,如觅食、繁殖、越冬等,另外也不能忽视河流输沙、景观旅游、保护特殊物种等功能。

基于以上 3 种改进思路,并根据特征流量、计算时段和百分比 3 个参数进行改进,从而总结出 3 种改进方法:年均值法、同期均值法、改进百分系数法。

3.2 年均值法

徐志侠等^[16]曾评述 Tennant 方法,年平均流量的计算是基于自然条件下的流量数据,郭立丹等^[7]称 Tennant 方法的年平均值比是以年平均流量的百分比作为 Tennant 方法的计算或评估标准。

Tennant 法依据鱼类的生活习性规律将水期划分为两个时段,这固然有其合理性,但许多学者会根据当地河流水文状况因地制宜进行适当修正。比如,Orth^[17]分析了俄克拉荷马州 24 条河流的月度水文图,修正 Tennant 法 7—12 月的最小流量为平均流量的 10%,1—6 月为 30%,对于初步流量评估非常有用。北卡罗来纳州针对开普菲尔河供水计划,修正 Tennant 法的用水期进行未来用水情景模拟^[18]。赵然杭等^[19]、董楠^[20]、刘丹等^[21]分别基于弥河流域、塔里木河流域和贾鲁河流域的水文、地理、生物习性等特征,修正 Tennant 法的水期,改进后的 Tennant 法更能反映流域的生态意义。吴玲玲等^[22]为了弥补河流流量数据匮乏的不足,提出基于生态水位计算的修正 Tennant 法,确定淮河流域的生态需水量。另外,考虑到极端流量事件对年平均流量的影响,可取年均流量序列的众数或中位数替代年平均流量。如林树刚^[23]基于超频原则,应用中位数原理对 Tennant 法进行改进。郑志宏等^[24]为弥补平均值不能切实反映总体分布集中趋势的不足,引入中位数和众数理论,结果表明改进后的 Tennant 法计算结果更科学合理。

年均值法的改进是最为简易的 Tennant 改进方

法,分析影响河道自然水文状况失真的可能性,进而修正了年均流量和用水期,来维持完整的生态系统功能,拓宽了方法的适用性。

然而,改进后的 Tennant 法仍存在 3 个主要的问题:(1)不能较好地反映天然径流流量季节性和逐月丰枯特性;(2)计算的生态基流不具有年际丰枯性变化;(3)百分比为不变的数值,使得年均值法的普适性较差。

3.3 同期均值法

年均值法是应用年均值比的思想,即以年均流量的百分比作为计算或评价标准,其缺点是:即使重新划分全年的水期、消除了极端事件的影响,其计算的结果也不能在某种程度上较好地反映生态基流的季节性特征。不同河流,甚至同一河流的不同河段,由于水文、地理、气候、人为影响程度等以及生物种群在不同生命时期对河道生态基流的需求差异,造成了河道生态基流年内分布的差异。因此,认为河道生态基流计算标准或评价方法应依据河流天然流量过程的本身特征来明确与量化水文指标,从而引入同期均值比指标^[19]。基于此,提出采用同期均值比替代年均值比的思路,Tennant 法的同期均值比可理解为以多年条件下的同期平均流量百分比作为 Tennant 法计算或评价标准。

郭利丹等^[7]就 Tennant 法在洛河流域生态需水量的应用研究中,认为同期均值比相对年均值比更为合理。何兵等^[25]根据叶尔羌河的生物和自然需求,分丰、平、枯 3 种水平年的修正 Tennant 法估算结果更为合理。郭勇等^[26]基于不同频率下修改 Tennant 法的年均径流,计算了海河流域的生态需水量,其结果与《河湖生态环境需水计算规范》^[27]较为吻合。魏天峰等^[28]、魏雯瑜等^[29]选取季节模数接近 1.0 的年份作为典型年,并用典型年流量替代年均流量修正的 Tennant 法分别估算博尔塔拉河和呼图壁河的生态需水量或生态基流量。考虑到北方未补水河流和补水城市河流的差异性,杨裕恒等^[30]利用 Mann - Kendall 法确定径流突变点,选取典型年流量代替年均流量,修正后更能体现沂河的丰枯性和小清河补水区的用水特点。以上基于典型年流量改进的 Tennant 法能较好地反映河流的季节性,但仍不具有显著的逐月变化过程。1978 年,Fraser^[31]针对新西兰河流提出了改进的 Tennant 方法,其计算是相对于平均月流量而不是年流量的 30% 流量阈值(因此产生 12 个最小流量阈值,每月 1 个),以考虑河流自然的季节性逐月水文变化; Praskiewicz

等^[32]基于修正的 Tennant 法计算了美国阿拉巴马州和密西西比州的汤比格比河流域的环境流量,为河流的航运提供了最大的生态经济效益。Dunbar 等^[33]修改了春季径流敏感的区域,还引入了一个简单的方程式来考虑现有的流量修改。1980 年,Adhikary 等^[34]使用月平均流量和年平均流量之间的比值来确定流量,具体方法是:(1)月平均流量小于年平均流量的 40% 时,以月平均流量为环境流量;(2)月平均流量大于年平均流量的 40%、小于年平均总流量时,则以年平均流量的 40% 作为环境流量;(3)如果月平均流量大于年平均流量时,取月平均流量的 40% 作为环境流量。该修改方法广泛适用于水文和生物循环多样的地区。之后,Adhikary 等^[34]、Książek 等^[35]考虑季节可变性,采用 Tessmann 法分别计算波兰维斯洛卡河和阿富汗哈里罗德河的环境流量,Pastor 等^[4]对全球 11 条河流进行研究,结果表明与当地案例计算的河流环境流量具有良好的相关性,适用于不同的流动状态,这要归功于其算法确定低、中、高流量;并建议将其用于未来的全球水评估,特别是在可变流量制度的情况下。同时,Karakoyun 等^[36-37]在评估土耳其 Çambasçı 和格克苏河 Feke I 水电站的环境流量时,提出 Tessmann 方法优先于 Tennant 方法。国内方面,Huang 等^[38]基于耐性定律和生态适应理论,以 GEV 分布的月径流量最高频率代替月平均流量,采用改进的 Tennant 方法计算渭河最小河道生态流量,其计算结果更能够反映流动规律。许亚雄等^[39]引入回归分析的思想,并用 origin 软件拟合分析同期月径流量,得出最为恰当的回归方程,结果表明改进后的 Tennant 法更能反映河流的逐月变化。

以上表明,在利用 Tennan 法评价或计算河流的某一径流过程时,应以多年同期平均流量为标准,不限于原先的分期,一般可根据水生生物的生活习性、水文、地理条件和河流生态保护目标等具体需求划分丰、平、枯水期或汛期和非汛期乃至逐月等,同期均值比相对而言有利于维持河流生态系统健康。但是,由于采用同期均值比思想的 Tennant 法其百分比仍为不变的数值,使得其普适性较差。

3.4 改进百分系数法

在国外,常用 10% ~ 30% 的年均流量作为各月的生态基流,智利^[13]、美国蒙大拿州^[6]取 10% 年均流量,美国^[13]取 30% 年均流量,葡萄牙^[40]取 2.5 ~ 5 年均流量。在中国,环评函【2006】4 号文件指出,一般河流的生态基流不应小于多年平均天然径流量

的 10%。前两种方法从水期划分、均值流量方面进行改进,生态基流标准是主观的和启发式的。无论低流量或高流量条件如何,这些标准都会降低所有流量的固定值,这可能会在低流量期间对河流环境造成严重损失。因此,考虑将固定的百分比修改为响应水文情势的流量,从而提高其适用范围。黄强等^[41]考虑到 Tennant 法反映黄河流域泥沙特征和径流特性的缺陷,引入环境比降和季节系数,改进后更能适应季节性强、地形多变的河流。李舜等^[42]、杜懿等^[43]针对流域的生态特征,引入季节系数,改进后更能适应河流季节性变化。同时,为了满足鱼类等水生生物的生存繁衍需求,郑小康等^[44]、杨裕恒等^[45]、郑志宏等^[46]以水生生物维持健康生态功能的临界点的平均流量和流速为依据,确定河流汛期、非汛期的分期百分数,使环境流量适应于相关生态

系统功能的要求。另外,从考虑河流功能层面出发,田景环等^[47]分别引入季节因子、输沙因子、环境因子,提高了该方法的实用性。为了进一步提高其适用范围,考虑将各月相同的百分比系数调整为随各月流量情势变化的流量。Li 等^[48-49]根据国内不同类型河流的流量波动和季节性影响,首先考虑到极端流量和不同水功能区生态目标的可转移性和空间变化的影响,引入了算术级数的概念;其次,考虑到月度和年度流量变化和年均分布不均匀、空间流量变化,提出一种生态基流标准随流量动态变化的方法,在不同河流生态系统中具有良好的月度和年际贫富差异和可转移性。

总结分析全球各大河流中对改进 Tennant 法的应用,并对 3 种改进方法从方式、优缺点方面进行分析说明,如表 2 和 3 所示。

表 2 各大河流应用改进 Tennant 法情况

水系、国家或地区	研究河流	改进方式
长江	雅砻江和大渡河	修正用水期
	汉江	引入算术级数概念
	三峡水库	引入季节系数
	洛河	多年平均流量替代年均值流量
黄河	渭河	GEV 分布
	湟水	用临界点的平均流量和流速确定百分数;引入季节系数
	滦河	中位数和众数代替平均数
	桃河	origin 软件拟合
海河	小清河	以临界点的平均水深和流速为依据,确定非汛期百分数
	弥河	修正用水期
	淮河干流	生态水位计算
	沂河	Mann - Kendall 法
辽河	辽河中部区域	中位数替代均值
珠江	澄碧河水库	引入季节系数
	呼图壁河	典型年流量替代年均流量
内陆河	叶尔羌河	丰、平、枯水平年计算
	塔里木河	修正用水期
外流河	额尔齐斯河	引入季节系数
	24 条河流	修正用水期
俄克拉荷马州	开普菲尔河	
北卡罗来纳州	汤比格比河流域	月流量替代年流量(30% 流量阈值)
阿拉巴马州和密西西比州	新西兰河流	
新西兰	Çambassi 和 Fekel 水电站	
土耳其	哈里罗德河	月平均流量与年平均流量之比
阿富汗	维斯洛卡河	
波兰		

表 3 3 类改进 Tennant 法对比

改进方法	改进方式	优点	缺点
年均值法	用水期重新划分,中位数或众数替代均值,生态水位计算	基于实际水文情势和生态需水规律的改进,减少极端高流量的影响	不能较好反映天然河流的季节性特征,不具有年际丰枯性变化,普适性较差
同期均值法	典型年、月流量替代年均或月均流量(M-K 法、GEV 分布或 Origin 软件、Tessmann 法)	符合河流流量的季节丰枯特征,具有显著的逐月变化过程	考虑河流本身来水的丰枯性,选取流量模数确定典型年的结果有待检验;其百分比仍为不变的数值,使得其普适性较差
改进百分系数法	引入季节系数、算数级概念或确定鱼类育幼期的临界点流速和平均流量以修正百分比系数	生态基流标准与河流的实际情况相匹配,固定的百分比修改为响应水文情势的流量,从而提高其适用范围	在百分比系数随月流量情势变化的流量中,河流划分的参数执行比较困难;基流百分比是一个阈值范围,难以量化

4 存在问题

Tennant 方法的改进最大限度拓宽了不同河流需水的使用范围,一定程度上解决了普适性的问题,使其维持河流流量与不同自然水文状况下的适应性。此外,在流量百分比的选取过程中也是具备了较强的经验性和主观性。但总体来看,还存在以下几个有待解决的问题:

(1) 使用典型年流量代替多年平均流量的改进 Tennant 法,虽然选取了流量模数最接近于 1.0 的年份为典型年,但考虑河流本身来水的丰枯性,此方法的结果仍有待检验。

(2) 各月水情变化中的百分比系数难以确定,不同河流的形态参数、水文气候不一,而形态相似性是其转移到其他河流的关键,这对于任何环境流量建议都是至关重要的。

(3) 目前,城市河流逐渐增多,人类活动影响严重的河流由于无法形成生物庇护所,没有水生物种的栖息地需求的具体信息,适合天然河流计算的 Tennant 法将没有生物学意义,从而不能提供最大的生态效益。

(4) 生态基流不是一个固定值,而是有一个阈值范围,低于或高于这个阈值,生态系统就会发生一些重大的变化;因此,围绕环境可接受阈值的 Tennant 法需修正。

(5) 在没有明确阈值的情况下,确定生态基流就成为在社会和经济偏好与对生态保护要求的科学理解之间建立妥协的问题,而生态保护是可持续水资源利用的一个关键组成部分。将两者联系起来是未来的挑战,尤其是在发展中国家。

5 结论与展望

国际上应用 Tennant 法评估河道生态基流或生态需水量问题迄今已有 40 多年时间,并已在不同水文情势的大、中、小河流进行了系统研究。为了拓宽其应用范围,针对不同区域的水文特征、需水类型和保护功能等特点,围绕水生生物用水期的划分以及流量百分比的选取提出了年均值法、同期均值法和改进百分系数法,使调整后的流量符合该地区的实际情况。国外主要是基于月平均流量替代年平均流量或是两者比值,多采用 Tessmann 法,国内各大水系应用修正的 Tennant 法,都是基于流域生态环境特点采用 3 种改进的方法。随着水利工程,引水渠的兴建和其他人类活动(如快速城市化)的不断加剧,对流域内水文过程的干扰越来越大,水文效应将发生巨大变化,改进 Tennant 法的研究势在必行。从目前 Tennant 方法的发展趋势来看,以下研究方向是未来的挑战。

(1) 考虑到年均流量易受极端高流量的影响,使得最小生态基流与低流量的变化不一致,所以应强化对具有调节流量河流的研究学习,并将季节性河流的低流量指标作为生态基流标准中百分系数的修正参数。

(2) 强化对生态水文学的理论学习,主要探究天然河道年内各月流量的 C_v 、 C_s 、均值等衡量标准的相关性,探索基流百分比与水生生物栖息地之间的响应关系,并建立适应曲线簇,以进一步完善 Tennant 评估方法的空间移植性和完整性,构建适应性管理的标准。

(3) 目前 Tennant 法的修正仅是对生物栖息地条件的研究,未来可考虑针对实际河流的生物信息

和物理信息需求进行改进,同时可将4类环境流量评估法综合考虑,以进一步完善方法的适用性,将其联系起来是未来的研究方向。

(4)生态基流的阈值是难以确定的,需将社会经济的发展与生态系统的保护联系起来,特别是在发展中国家,为水资源的开发制定环境上可接受的限度方案则需要考虑到流量与河流生态系统之间的关系。

参考文献:

- [1] ARTHINGTON A H, NAIMAN R J, MCCLAIN M E, et al. Preserving the biodiversity and ecological services of rivers: new challenges and research opportunities [J]. Freshwater Biology, 2010, 55(1):1–16.
- [2] VÖRÖSMARTY CJ, MCINTYRE P, GEESNER M, et al. Global threats to human water security and river biodiversity [J]. Nature, 2010, 467(7315):555–561.
- [3] MEIJER K S, KROGT W N M V D, BEEK E V. A new approach to incorporating environmental flow requirements in water allocation modeling [J]. Water Resources Management, 2012, 26(5):1271–1286.
- [4] PASTOR A V, LUDWIG F, BIEMANS H, et al. Accounting for environmental flow requirements in global water assessments [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2014, 18(12):5041–5059.
- [5] CHRISTOS T, SPYRIDON G, NIKOLAOS M, et al. Comparing environmental flow scenarios from hydrological methods, legislation guidelines and hydrodynamic habitat models downstream of the Marathon Dam (Attica, Greece) [J]. Ecohydrology, 2018, 11(8):1–11.
- [6] TENNANT D L. Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources [J]. Fisheries, 1976, 1(4):6–10.
- [7] 郭利丹, 夏自强, 林虹, 等. 生态径流评价中的Tennant法应用[J]. 生态学报, 2009, 29(4):1787–1792.
- [8] MOSLEY M P. Flow requirements for recreation and wildlife in New Zealand Rivers: a review [J]. Journal of Hydrology (N. Z.), 1983, 22(2):152–174.
- [9] 周涛, 董增川, 武婕, 等. 考虑生态需水量的汾河梯级水库联合调度研究[J]. 人民黄河, 2018, 40(8):62–65.
- [10] 黄显峰, 钟婧玮, 方国华, 等. 基于ME-Tennant法的河道生态流量过程评价模型研究[J]. 长江科学院院报, 2019, 36(2):24–30.
- [11] 张远, 赵长森, 杨胜天, 等. 基于关键功能组的河道内生态需水计算[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(1):108–113.
- [12] 周光涛. 松花江支流梧桐河流域河流生态径流研究 [J]. 中国农村水利水电, 2018(6):102–107.
- [13] THARME R E. 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(5–6):397–441.
- [14] 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.
- [15] HATFIELD T, LEWIS A, OHLSON D, et al. Development of instream flow thresholds as guidelines for reviewing proposed water uses [R]. Victoria, BC: British Columbia Ministry of Sustainable Resource Management, and British Columbia Ministry of Water, Land, and Air Protection, 2003.
- [16] 徐志侠, 董增川, 周健康, 等. 生态需水计算的蒙大拿法及其应用[J]. 水利水电技术, 2003, 34(11):15–17.
- [17] ORTH D J. Evaluation of the “Montana method” for recommending instream flows in Oklahoma streams [C]// Proceedings of the Oklahoma Academy of Science, 1981, 61:62–66.
- [18] NC Division Of Water Resources. Cape fear river basin water supply plan: modeling of future water use scenarios [R]. NC Division of Water Resources, 2008.
- [19] 赵然杭, 彭弢, 王好芳, 等. 基于改进年内展布计算法的河道内基本生态需水量研究[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(4):114–119.
- [20] 董楠. 塔里木河流域水质演变规律及生态需水研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2018.
- [21] 刘丹, 邢琼琼, 郭欣欣, 等. 基于生态水力半径法的贾鲁河生态需水量计算[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(1):105–110.
- [22] 吴玲玲, 闫中月, 阮晓红. 基于Tennant法改进的生态水位计算方法研究[J]. 人民长江, 2019, 50(5):47–51.
- [23] 林树刚. 改进的TENNANT模型在区域河道生态需水评价中的应用研究[J]. 水利规划与设计, 2017(2):72–74+124.
- [24] 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]. 工程科学与技术, 2010, 42(6):38–42.
- [25] 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.
- [26] 郭勇, 刘明皓, 李文君, 等. 改进的Tennant法在海河流域主要河流生态需水计算中的应用[C]// 2018 (第六届) 中国水生态大会论文集, 2018.
- [27] 中华人民共和国水利部. 河湖生态环境需水计算规范: SL/Z 712–2014[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2015.

- [28] 魏天锋, 刘志辉. 基于改进的 Tennant 法的博尔塔拉河生态需水量计算 [J]. 干旱区研究, 2016, 33(3): 643–648.
- [29] 魏雯瑜, 刘志辉, 冯娟, 等. 天山北坡呼图壁河生态基流估算研究 [J]. 中国农村水利水电, 2017(6): 92–96.
- [30] 杨裕恒, 曹升乐, 刘阳. 基于改进 Tennant 法的河流生态基流计算 [J]. 中国农村水利水电, 2017(8): 136–141.
- [31] FRASER J C. Suggestions for developing flow recommendations for in-stream uses of New Zealand streams, water and soil miscellaneous publication [R]. Wellington: Ministry of Works and Development, 1978.
- [32] PRASKIEVICZ S, LUO Cehong, BENNETT B, et al. Evaluation of low-flow metrics as environmental instream flow standards during long-term average and 2016 drought conditions: Tombigbee River Basin, Alabama and Mississippi, USA [J]. Water Policy, 2018, 20(6): 1240–1255.
- [33] DUNBAR M J, CUSTARD A, Acreman M objectives, Environment Agency R&DC, et al. Review of overseas approaches to setting river flowTechnical Report W6B(96)4 [R]. Wallingford, UK: Institute of Hydrology, 1998.
- [34] ADHIKARY S K, DAS S K, ATEF S S, et al. Simulating impacts of EFR consideration on reservoir operation policy and irrigation management in the Hari Rod River Basin, Afghanistan [C]// The 19th International Congress on Modelling and Simulation (MODSIM2011), Perth, 2011: 4085–4091.
- [35] KSIĄŻEK L, WOS A, FLOREK J, et al. Combined use of the hydraulic and hydrological methods to calculate the environmental flow: Wisłoka river, Poland: case study [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2019, 191(4): 254.
- [36] KARAKOYUN Y, YUMURTACI Z, DÖNMEZ A H. Environmental flow assessment for energy generation sustainability employing different hydraulic evaluation methods: Çambaşı hydropower plant case study in Turkey [J]. Clean Technologies and Environmental Policy, 2016, 18(2): 583–591.
- [37] KARAKOYUN Y, DÖNMEZ A H, YUMURTACI Z. Comparison of environmental flow assessment methods with a case study on a runoff river – type hydropower plant using hydrological methods [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2018, 190(12): 722.
- [38] Huang Shengzhi, Hou Beibei, Chang Jianxia, et al. Copulas – based probabilistic characterization of the combination of dry and wet conditions in the Guanzhong Plain, China [J]. Journal of Hydrology, 2014, 519: 3204–3213.
- [39] 许亚雄, 赵志怀. 基于改进 Tennant 法的河流生态基流估算 [J]. 水电能源科学, 2017, 35(2): 38–40.
- [40] TEGOS A, SCHLÜTER W, GIBBONS N, et al. Assessment of environmental flows from complexity to parsimony – lessons from Lesotho [J]. Water, 2018, 10(10): 1293.
- [41] 黄强, 李群, 张泽中, 等. 计算黄河干流生态环境需水 Tennant 法的改进及应用 [J]. 水动力学研究与进展, 2007, 22(6): 774–781.
- [42] 李舜, 陆建宇, 程增辉, 等. 三峡水库生态径流及其生态调度研究 [J]. 水力发电, 2018, 44(6): 7–12.
- [43] 杜懿, 麻荣永. 广西澄碧河水库下游河道年生态需水量的计算对比研究 [J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(4): 97–102.
- [44] 郑小康, 侯红雨, 付永锋. 基于改进 Tennant 法的湟河流域河道内生态环境需水量分析 [J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13(4): 681–685+690.
- [45] 杨裕恒, 曹升乐, 刘阳, 等. 基于改进 Tennant 法的小清河生态基流计算 [J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(5): 97–101.
- [46] 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]. 工程科学与技术, 2010, 42(2): 34–39+57.
- [47] 田景环, 余玲, 孙晗含, 等. 生态径流 Tennant 法的改进与应用 [J]. 人民黄河, 2011, 33(4): 68–69.
- [48] LI Changwen, KANG Ling. A new ecological flow assessment method based on spatial – temporal variability and transferability [J]. Applied Mechanics & Materials, 2014, 522–524: 791–794.
- [49] LI Changwen, KANG Ling. A new modified tennant method with spatial – temporal variability [J]. Water Resources Management, 2014, 28(14): 4911–4926.