

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.20180017

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. ZHANG Y, ZHAO C S, YANG S T, et al. Calculating ecological flow based on key functional group[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(1): 108-113. (in Chinese)

基于关键功能组的河道内生态需水计算

张远¹, 赵长森¹, 杨胜天¹, 刘昌明², 张惠潼³, 相华⁴, 孙影³,
杨增丽⁴, 侯志强⁵, 刘德虎³, 张纯斌¹, 于心怡¹

(1. 北京师范大学 地理学与遥感科学学院, 北京 100875;

2. 中国科学院 地理科学与资源研究所 陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101; 3. 东营市水文局, 山东 东营 257000; 4. 济南市水文局, 济南 250013; 5. 潍坊市水文局, 山东 潍坊 261000)

摘要: 河道内生态需水是目前生态学、水文学和水资源学研究的热点领域, 现有计算方法中从生态系统功能完整性的角度出发计算生态需水的较少。首先利用 Ecopath 模型对小清河流域 2014 年 5 月、8 月、11 月生态系统内群落间营养关系进行了模拟, 分析得到了小清河流域生态系统关键功能组; 然后, 利用栖息地适应性指数(HSI)确定了各关键鱼类生存和繁殖的适宜流速及水位; 最后, 耦合多物种的适宜流速及水位, 利用改进后的 AEHRA 法计算生态需水量。结果显示, 小清河流域鱼类非产卵期(1月-3月、8月-12月)上、中、下游生态需水量分别为 4.28 m³/s、0.74 m³/s、3.47 m³/s; 产卵期上、中、下游生态需水量分别为 23.52 m³/s、5.96 m³/s(或 8.65 m³/s)、37.38 m³/s。与 Tennant 法比较, 本方法计算结果可以将生态系统健康状况维持在“一般”水平以上, 即可以满足流域内大多数水生物需水量, 同时, 该方法计算结果显示出鱼类产卵期与非产卵期的生态需水量差异, 为流域内跨季节调水提供依据。

关键词: Ecopath; 关键功能组; 生态需水; AEHRA 法; 小清河流域

中图分类号: X171.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2018)01-0108-06

Calculating ecological flow based on key functional group

ZHANG Yuan¹, ZHAO Changsen¹, YANG Shengtian¹, LIU Changming², ZHANG Huitong³,

XIANG Hua⁴, SUN Ying³, YANG Zengli⁴, HOU Zhiqiang⁵, LIU Dehu³, ZHANG Chunbin¹, YU Xinyi¹

(1. School of Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Key Laboratory of Water Cycle & Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences & Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

3. Dongying Survey Bureau of Hydrology and Water Resources, Dongying 257000, China; 4. Jinan Survey Bureau of Hydrology and Water Resources, Jinan 250013, China; 5. Weifang Survey Bureau of Hydrology and Water Resources, Weifang 261000, China)

Abstract: The study of ecological flow is a hot field in ecology and hydrology. However, the existing methodologies do not consider the functional integrity of an ecosystem. In this study, we simulated the nutritional relationships between the communities of an ecosystem in Xiaqinghe river basin using the model of Ecopath. After determining the key fishes, we analyzed the velocity and water level demand of the key fishes by the habitat suitability index. Finally, coupling the velocity and water level demand of multiple species, we calculated the eco flow by the Adapted Ecological Hydraulic Radius Approach. The results showed that the water requirements of the upper, middle, and lower reaches were 4.28 m³/s, 0.74 m³/s, and 3.47 m³/s respectively in non spawning season, and 23.52 m³/s, 5.96 m³/s (or 8.65 m³/s), 37.38 m³/s respectively in spawning season. Compared with the approach of Tennant, our method could keep the ecosystem's health condition above the "average" level, and could satisfy the water requirement of the majority of aquatic organisms. Besides, this method shows the difference between spawning season and non spawning season, thus gives reference for the seasonal regulation of water resources in the basin.

Key words: Ecopath; key functional group; ecological flow; AEHRA; Xiaqinghe River Basin

收稿日期: 2017-04-12 修回日期: 2017-10-16 网络出版时间: 2018-01-11

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20180106.0904.008.html>

基金项目: 国家自然科学基金项目(41271414); 北京市共建项目专项资助

Funds: National Natural Science Foundation of China (N41271414); Special Fund of Beijing Key Laboratory Jointly Building Project

作者简介: 张远(1990), 男, 山东日照人, 主要从事生态水文方面研究。E-mail: zy9218@hotmail.com

通讯作者: 赵长森(1977), 男, 山东淄博人, 副教授, 主要从事遥感水文与生态水文方面研究。E-mail: zhaochangsen@bnu.edu.cn

随着经济发展,工业和生活用水日益增加,河流水体水量减少、河道断流、湿地面积退缩等问题频发,对水生生态系统形成了巨大威胁^[1-3],也制约了社会发展,如何维持或修复水生生态环境成为各方焦点所在。增加水体水量是维持或修复水生生态系统的最基础措施,但水资源紧缺已成为世界性难题,尤其我国人多水少,人均水资源量仅为世界人均水平的28%,全国城市中有约三分之二缺水,约四分之一严重缺水。在此现状下,完全满足水生生态系统对于水资源的需求很难实现,因而对维持生态系统结构和功能完整健全的最小水量—生态需水的研究被众多学者及河流管理者所重视^[4-7]。

生态需水的计算必须考虑水生生态系统中各物种对于生态系统的贡献程度。物种在生态系统功能过程中并不是同等重要的,Paine(1969)称那些其活动和多度对群落组成、整合性、持续性起决定性作用的物种为关键物种。关键物种构成关键功能组,关键功能组是群落中对于整体具有重大意义的物种的组合,其成员为生态系统物质转换重要参与者、能量流动传递的关键节点^[8-9]。维持关键功能组需水量对于稳定生态系统结构、功能基本完整至关重要,满足关键功能组生态需水可基本维持生态系统正常运转^[9]。

改进后的生态水力半径法(Adapted Ecological Hydraulic Radius Approach, AEHRA)是赵长森等^[10]基于生态水力半径法^[11]改进的计算生态需水的方法,是生态学方法与水力学方法结合的成果,计算过程中考虑了河道信息与水生生物信息,能够较合理地计算水生物水量需求^[10]。然而在以往研究中,该方法尚停留在利用单一物种生态需水代替整个系统生态需水的层面^[10,12],忽略了整个水生生态系统与单一物种在需水量方面的差异,在刻画河流生态系统生态需水时必然引起不确定性。

为此,本文以山东省小清河为例,在之前研究筛选得到的关键功能组基础上^[9],综合关键功能组成员流速、水位需求,利用AEHRA法计算河道内生态需水,在此过程中结合关键功能组成员生物信息,力图使生态需水计算结果更加贴合河道内水生生态系统需求。并与广泛应用的Tennant法进行比较,探究本文方法的合理性,为其他流域的研究提供借鉴。

1 研究区概况

小清河流域位于山东省鲁北平原南部,于寿光羊角沟入渤海,全长237 km,流域面积10 336 km²,

河道的平均比降为0.15/1000,流域河网密度0.27 km/km²。流域内多年平均降水量619.7 mm,降水量年内分配不均,主要集中于7月-9月,占全年降水量50%~70%^[13]。小清河是山东省重要的排水河道,兼顾两岸农田灌溉、内河航运、生态等用途,也是全国5条重要的国防战备河道之一,对沿线经济社会的发展发挥了不可替代的作用。然而,由于人们环保意识缺乏,在经济发展过程中取水和排污过度,使小清河水量减少、水质污染,生态环境日益恶化,严重制约了沿河地区社会经济的发展。准确计算维持小清河生态系统稳定所需流量,为河流管理、调度工作提供科学依据以保证其生态服务功能的可持续性,已成为目前河流管理工作的重中之重,开展小清河生态需水的研究迫在眉睫。

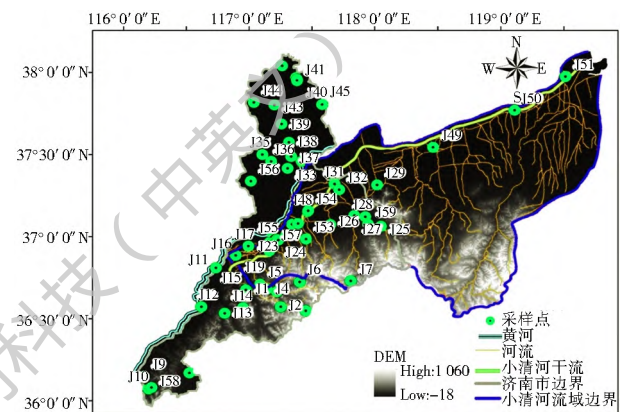


图1 小清河流域

Fig. 1 Location of the Xiaoqinghe River in northern China

2 数据及方法

2.1 数据来源

本文大断面、历年水位、流量等水文数据来自济南市水文局与东营市水文局;水生物数据来自2014-2015济南市水文水质水生态大规模一体化监测项目。采样方法如下:¹可涉水河流(深泓水深小于1.5 m)采用电鱼器捕鱼,采集时间为30~60 min。⁰对于不可涉水河流(深泓水深大于1.5 m),河岸浅水区可采用电鱼法;中央深水区则雇船进行拖网捕鱼,每个采样点行进距离不超过100 m。另外,有渔民的采样点,还需从渔民渔获物中获取相应样品。其中小清河流域上、中、下游各布设1个采样点,采样所得鱼类见表1。

由于小清河采样点位少、数据量小,仅用小清河数据统计鱼类适宜环境可能存在较大误差,济南市水文水质水生态大规模一体化监测项目分两年采样6次,共计279点次,采集鱼类44种8 228条,且与小清河地域差异小、生态环境接近,因而小清河流域

表 1 小清河流域鱼类采样结果^①

Tab. 1 Fish sampling results at Xiaoqinghe River Basin

| | 上游 | 中游 | 下游 |
|-------------------|---------------|----------------------|-----------------|
| 5 月 鲫 | | 鳅、稀有麦穗鱼、鲫、清徐胡鮡、青鳉、黄鲂 | -- |
| 8 月 彩鲮、短须颌须鮡、鲫、泥鳅 | -- | | 鳅、鲫、青鳉 |
| 11 月 泥鳅、大鳞副泥鳅 | 鲫、泥鳅、乌鳢、大鳞副泥鳅 | | 鳅、鲫、栉鰕虎鱼、波氏栉鰕虎鱼 |

可作为济南市采样特例,故本研究根据全济南采样所得数据进行表 1 中鱼类适宜流速与水深的统计分析,将得到的一般规律用于小清河流域。

2.2 方法

2.2.1 生态流速及水位耦合

在计算生态流速与生态水位的过程中应注意产卵期与非产卵期鱼类对水环境需求的不同。非产卵期仅需满足鱼类存活、生态系统结构完整即可,水量需求小;产卵期为刺激鱼类产卵及增加鱼卵存活率,生态需水量较非产卵期增大,且应同时满足鱼类产卵对流速及水位要求。

(1) 生态流速耦合。

济南市采样所得数据中,关键鱼类所处环境的最小流速为 0.026 m/s,最大流速为 1.05 m/s。为便于统计,以 0.15 m/s 作为区间间隔划分 7 个流速等级区间,小于 0.15 m/s 为等级 1,0.9 m/s 以上采样点稀少,划分为等级 7。

为使产出的卵能够适应周围生存环境,鱼类在进化过程中形成了浮性卵、漂流性卵(半浮性卵)、沉性卵、粘性卵等 4 种类型的卵。其中,漂流性卵对河流流速要求较高,该类型鱼类必须在漂浮状态下孵化,因此流速过低或静水都会使卵沉到水底,导致幼鱼孵化率降低;对于漂流性卵,当流速低于 0.3 m/s 时卵开始下沉,流速低于 0.15 m/s 时全部下沉^[10,14,15]。

确定产卵期流速需综合考虑多种鱼类繁殖流速需求,所得流速需要满足各种鱼类的产卵需求,否则会影响一种或几种关键鱼类的繁殖,故利用如下模型确定产卵期流速:

$$V_{\text{生态}} = \max V_{\text{生态}_i} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

式中: $V_{\text{生态}_i}$ 表示维持第 i 种鱼正常繁殖的最小流速; n 表示该河段鱼的总种类数。该方法取所有鱼类产卵期最小流速的最大值,确保满足所有关键鱼类产卵所需流速。

非产卵期流速的确定依据栖息地适应性指数

(Habitat Suitability Index, HSI)。统计单一流速等级内鱼类密度在本类鱼总密度中百分比,得到鱼类密度随流速分布的规律,采用密度分布最大的流速等级作为非产卵期鱼类喜好流速,即

$$V' = V_{\text{HSI}_L} \quad (2)$$

$$\text{HSI}_i = \frac{D_{ij}}{\sum_{j=1}^n D_{ij}} \quad (i = 1, 2, 3, 4) \quad (3)$$

式中: V' 代表非产卵期流速; V_{HSI_L} 表示 HSI 最大时对应的流速等级; D_{ij} 表示第 i 种鱼类在流速等级为 j 上的密度。

(2) 生态水位确定。

产粘性卵鱼类的卵附着于石头及水生植物,水位下降容易使鱼卵失水死亡,同时水位抬升和保持将可以使鱼类拥有更大的产卵场面积,有利于改善产粘性卵鱼类的产卵条件。在考虑鱼类对环境的适应情况下,为保证鱼类产卵后不会由于水位下降而失水死亡,利用 2011—2015 年产卵期最低水位作为生态水位,即

$$H_{\text{生态}} = \min H_i \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

式中: H_i 表示第 i 年鱼类产卵期的最小水位; $H_{\text{生态}}$ 则表示耦合后的生态水位。非产卵期鱼类不产卵,因此不考虑水位影响,仅考虑流速。

3.2.2 河道内生态需水计算

本研究对 AEHRA 进行改进,在原 AEHRA 法中加入水位要素的限制,从流速与水位两方面考虑进行生态需水计算,限定了水位最小值,保护产粘性卵鱼类。

计算时,首先利用流速 V 通过 $R_{\text{生态}} = n^{3/2} V^{3/2} J^{-3/4}$ 计算得到水力半径 R_1 ,然后,利用水力半径-过水断面面积($R-A$)与水力半径-水位($R-Z$)关系曲线(通过历史资料拟合得到)计算此流速 V 对应的过水断面面积 A_1 与水位 Z_2 ,若此水位大于或等于输入的生态水位 Z_1 则继续利用 A_1 通过曼宁公式计算得到生态需水;若 Z_2 小于 Z_1 则用 Z_1 替换 Z_2 ,利用 $Z-R$ 曲线推求水力半径 R_2 ,然后计算该水力半径对应的过水断面 A_2 ,通过曼宁公式计算得到生态需水。

在利用改进后的 AEHRA 法进行小清河流域生态需水计算的同时,将计算结果与被广泛应用的 Tennant 法计算结果进行对比,考察本研究提出的方法的可靠性。Tennant 法也叫 Montana 法,是水文学方法的一种,主要根据水文资料以年平均径流量百分数来描述河道内流量状态作为河流推荐流量,应用较为普及,常作为参考标准来与其它方法进行对比分析^[26,27]。Tennant 法评价标准见表 2。

表 2 Tennant 法评价标准
Tab. 2 Evaluation criteria of Tennant

| 流量状况描述 | 推荐的基流(8月-1月) (%平均流量) | 推荐的基流(2月-7月) (%平均流量) |
|--------|-------------------------|-------------------------|
| 极限或最大 | 200 (48~ 72/h) | 200 (48~ 72/h) |
| 最佳范围 | 60~ 100 | 60~ 100 |
| 极好 | 40 | 60 |
| 很好 | 30 | 50 |
| 良好 | 20 | 40 |
| 一般或较差 | 10 | 30 |
| 差或最小 | 10 | 10 |
| 极差 | 0~ 10 | 0~ 10 |

3 结果及讨论

3.1 结果

3.1.1 关键鱼类及其产卵期

计算得到小清河流域关键鱼类为鲫、鲮、泥鳅(包括大鳞副泥鳅)、青鲮(表3)。关键鱼类产卵期为4月-7月,四种关键鱼类中鲫、鲮、泥鳅为黏性卵,青鲮为浮性卵。但青鲮鱼卵油球较小,静水状态下浮力不足以支撑其漂浮于水面,是由卵丝与母体,母体运动时带动其漂浮于水面^[28],为保证青鲮鱼卵存活率,计算时将其视作漂流性卵考虑。

表 3 关键鱼类产卵类型及流速需求^[28-29]

Tab. 3 Egg type and velocity requirement of key fishes

| 种类 | 产卵时间 | 产卵类型 | 产卵期流速需求 |
|-------------|-------|------|-----------|
| 青鲮 | 5月-6月 | 浮性卵 | 0.3~ 0.95 |
| 鲮 | 5月-7月 | 黏性卵 | -- |
| 泥鳅(包括大鳞副泥鳅) | 4月-5月 | 黏性卵 | -- |
| 鲫 | 4月-5月 | 黏性卵 | -- |

3.1.2 生态流速及水位确定

根据济南市水文水质水生态大规模一体化监测项目采集数据,利用HSI法统计得到图2,可见四种关键鱼类在流速等级1(流速 ≤ 0.15 m/s)分布最多,故认为流速等级1对应流速为鱼类非产卵期喜好流速。

小清河鱼类产卵期生态流速为四种关键鱼类流速需求最大值,由于仅有青鲮为浮性卵,故产卵期生态流速取值0.3 m/s。青鲮产卵时间为5月、6月,故在考虑产卵期流速需求时,仅此两个月份为0.3 m/s。从采样结果来看,仅在5月份中游采样点和8月份下游采样点发现青鲮,故上游的生态流速计算中不考虑该物种。综合HSI所得结果,小清河关键鱼类生态流速及生态水位见表4。

3.1.3 生态需水计算结果

利用改进的AEHRA法计算得到小清河流域非

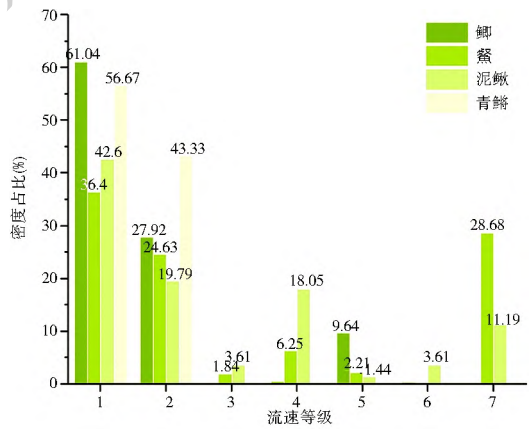


图 2 关键鱼类各流速等级上密度百分比
Fig. 2 Percentage of density of key fishes at different flow rate levels

表 4 关键鱼类生态流速及生态水位

Tab. 4 Ecological velocity and ecological water level for key fishes

| 月份 | 上游 | | 中游 | | 下游 | |
|------|---------------------------|--------|---------------------------|--------|---------------------------|--------|
| | 流速 / (m·s ⁻¹) | 水位 / m | 流速 / (m·s ⁻¹) | 水位 / m | 流速 / (m·s ⁻¹) | 水位 / m |
| 1-3 | 0.15 | -- | 0.15 | -- | 0.15 | -- |
| 4 | 0.15 | 22.14 | 0.15 | 2.27 | 0.15 | 1.95 |
| 5 | 0.15 | 22.14 | 0.3 | 2.27 | 0.3 | 1.95 |
| 6 | 0.15 | 22.14 | 0.3 | 2.27 | 0.3 | 1.95 |
| 7 | 0.15 | 22.14 | 0.15 | 2.27 | 0.15 | 1.95 |
| 8-12 | 0.15 | -- | 0.15 | -- | 0.15 | -- |

产卵期生态流量上中下游分别为4.28 m³/s、0.74 m³/s、3.47 m³/s,产卵期则为23.52 m³/s、5.96 m³/s/8.65 m³/s、37.38 m³/s(图3)。中游生态需水量最小,其次为上游,下游所需水量最大,造成该结果的原因可能是上中下游的断面形态不同,上游断面为人工修葺断面,为矩形断面,相比天然抛物线断面,同水深情况下过水断面更大,导致水量大;中游河道断面窄深,满足水位需求后过水断面相对较小,计算得到的流量小;下游河道宽浅,计算得到流量最大。

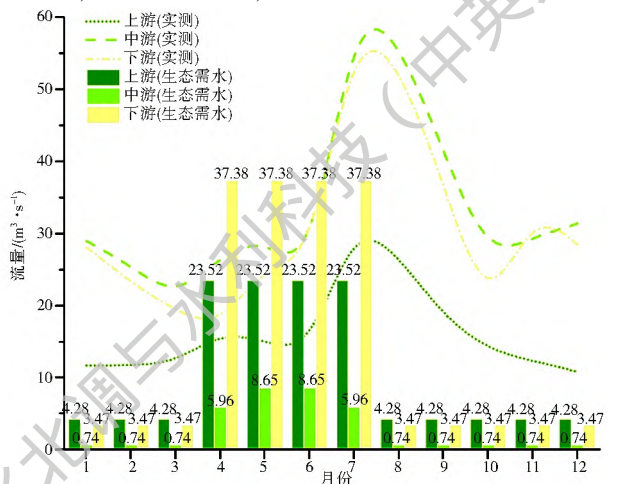


图 3 小清河三站逐月生态需水计算结果
Fig. 3 Computation results of the ecological flow at three stations by month

Tennant 法认为多年平均天然径流量的 10% 为保持河流生态系统健康的最小流量,多年平均天

然径流量的30%保证率能为大多数水生生物提供较好的栖息地条件。因此,根据Tennant法,小清河流域上游保持河流生态系统健康的最小流量为 $1.62\text{ m}^3/\text{s}$,中游、下游则分别为 $3.36\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $3.07\text{ m}^3/\text{s}$;而要能为大多数水生生物提供较好的栖息地条件,在8月到次年1月,小清河上中下游所需水量为 $4.87\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $10.08\text{ m}^3/\text{s}$ 与 $9.21\text{ m}^3/\text{s}$,在2月到7月,小清河上中下游所需水量则分别为 $8.11\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $16.81\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $15.36\text{ m}^3/\text{s}$ (表5)。

表5 Tennant法计算流量

Tab. 5 Ecological flow calculated by Tennant

| 流量状况描述 | 推荐的基流(8月-1月) 对应流量 | | | 推荐的基流(2月-7月) 对应流量 | | |
|--------|----------------------|-----------------|-----------------|----------------------|-----------------|-----------------|
| | 上游 | 中游 | 下游 | 上游 | 中游 | 下游 |
| | m ³ /s | | | | | |
| 极限或最大 | 32.46 | 67.23 | 61.42 | 32.46 | 67.23 | 61.42 |
| 最佳范围 | 9.73~ 16.23 | 20.17~ 33.62 | 18.43~ 30.71 | 9.73~ 16.23 | 20.17~ 33.62 | 18.43~ 30.71 |
| 极好 | 6.49 | 13.45 | 12.28 | 9.73 | 20.17 | 18.43 |
| 很好 | 4.87 | 10.08 | 9.21 | 8.11 | 16.81 | 15.36 |
| 良好 | 3.24 | 6.72 | 6.14 | 6.49 | 13.45 | 12.28 |
| 一般或较差 | 1.62 | 3.36 | 3.07 | 4.87 | 10.08 | 9.21 |
| 差或最小 | 1.62 | 3.36 | 3.07 | 1.62 | 3.36 | 3.07 |
| 极差 | 0~1.62 | 0~3.36 | 0~3.07 | 0~1.62 | 0~3.36 | 0~3.07 |

3.2 讨论

(1) 方法可靠性分析。

本文方法计算结果(图3)与Tennant法计算结果(表5)对比发现,本方法计算得到的非产卵期生态需水小于Tennant法“很好”对应的30%年均径流量;而产卵期生态需水接近Tennant法“最佳”对应的100%年均径流量。在水资源紧缺的现状下,依据本方法进行水资源调度,非产卵期生态需水量低,可为生产保留更多水资源;产卵期生态需水量高,能充分满足鱼类产卵期水量需求,维持生态系统结构、功能完整,可为河流管理者进行水资源统一调度提供参考,促进人类社会经济与生态系统协调良性发展。

张涛等^[30]基于频率法计算得到小清河中游岔河站1月-3月、4月-6月、7月-9月、10月-12月的河道最小生态流量分别为 $4.8\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $3.2\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $10.0\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $5.7\text{ m}^3/\text{s}$ 。小清河流域4月-7月为鱼类产卵期,其余月份为非产卵期,理论上产卵期生态需水不应小于非产卵期生态需水,而张涛等人计算结果表明产卵期生态需水($3.2\text{ m}^3/\text{s}$)小于非产卵期生态需水($4.8\sim 10.0\text{ m}^3/\text{s}$),有悖于鱼类实际生理需求。本文计算过程中充分考虑食物链顶层物

种——鱼类生态需求,得到1月-3月(8月-12月)、4月(7月)、5月-6月、月最小生态流量分别为 $0.74\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $5.96\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $8.65\text{ m}^3/\text{s}$,符合产卵期生态需水不小于非产卵期这一实际规律。

(2) 产卵期生态需水满足率低的成因分析。

对比小清河上中下游实测流量(图3)发现:小清河流域全年总径流量大于全年总生态需水量,从年尺度上讲,生态需水可以得到很好满足,但小清河流域处于北方温带季风性气候区,降水季节性强,7月-9月径流量可达全年一半左右,产卵期(4月-7月)与汛期不同步导致产卵期生态需水满足率低,上游与下游生态需水得不到有效满足,影响到关键鱼类青鲇的繁殖。建议通过水资源合理调度进行年内水量二次分配,以期在水资源总量有限的情况下满足鱼类产卵需求,维持生态系统健康可持续。

(3) 方法局限性分析。

本文河道内生态需水计算中仅考虑生物因素,对于生态基流、输水输沙、稀释自净等河流功能未作考虑。河流生态系统健康同时受多方面影响,计算生态需水时仅考虑生物因素并不全面。河流作为线状水域具有空间延伸性强、河流各段环境差异性大的特点,由于河流各级支流的存在,使得河流生态系统成为一个极为庞大和复杂的存在,维持整条河流的健康需要综合考虑多个因素计算生态需水。随着水资源日益紧缺,水资源管理需要更准确的数据支持,综合考虑多个因素计算河道内生态需水不可避免。

4 结论

(1) 小清河流域关键鱼类为鲫、鳊、泥鳅、青鲇,其中青鲇为浮性卵,对流速要求较高;鲫、鳊、泥鳅为黏性卵,受水位影响较大。四种鱼类产卵期集中在4月-7月,产卵期内生态流速为 0.3 m/s ,上中下游生态水位分别为 22.14 m 、 2.27 m 、 1.95 m ;非产卵期生态流速为 0.15 m/s ,不考虑水位影响。

(2) 产卵期内上中下游河道内生态需水分别为 $23.52\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $5.96\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $8.65\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $37.38\text{ m}^3/\text{s}$;非产卵期则分别为 $4.28\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $0.74\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $3.47\text{ m}^3/\text{s}$ 。相对于非产卵期,产卵期生态需水量增加明显。在水资源紧缺的现状下即可节约非产卵期水量,调和各需水方矛盾,又可充分满足鱼类产卵期水量需求,维持生态系统结构、功能完整,在需大于供的情形下为管理者调控管理水资源、平衡各方水资源需求提供参考,非常具有现实意义。

(3) 小清河流域内关键鱼类产卵期与汛期不同步,产卵期水量不能完全满足可能导致生态系统稳

定性下降。在实际生产中,建议利用水利工程在雨季蓄水,鱼类产卵时放水,以保障流域内水生生态系统可持续发展。

参考文献(References):

- [1] 张秀琴,王亚华.中国水资源管理适应气候变化的研究综述[J].长江流域资源与环境,2015,24(12):2061-2068. (ZHANG X Q, WANG Y H. A review of adaptive management research on China's water resources management under climate change[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015, 24(12): 2061-2068. (in Chinese)) DOI: 10.11870/cjlyzyyhj201512009.
- [2] 周璞,侯华丽,安翠娟,等.水资源开发利用合理性评价模型构建及应用[J].东北师范大学学报,2014,46(2):125-131. (ZHOU P, HOU H L, AN C J, et al., Construction and application of the rationality evaluation model of water resource development and utilization[J]. Journal of Northeast Normal University, 2014, 46(2): 125-131. (in Chinese)) DOI: 10.11672/dbdzk2014-02-024.
- [3] 封志明,杨艳昭,游珍.中国人口分布的水资源限制性与限制度研究[J].自然资源学报,2014(10):1637-1648. (FENG Z M, YANG Y Z, YOU Z. Research on the water resources restriction on population distribution in China[J]. Journal of Natural Resources, 2014(10): 1637-1648. (in Chinese)). DOI: 10.11849/zrzyxb. 2014. 10. 001
- [4] 李九一,李丽娟.中国水资源对区域社会经济发展的支撑能力[J].地理学报,2012,67(3):410-419. (LI J Y, LI L J. Water resources supporting capacity to regional socioeconomic development of China[J]. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(3): 410-419. (in Chinese)) DOI: 10.11821/xb201203012.
- [5] 刘佳骏,董锁成,李泽红.中国水资源承载力综合评价研究[J].自然资源学报,2011,26(2):258-269. (LIU J J, DONG S C, LI Z H. Comprehensive evaluation of China's water resources carrying capacity[J]. Journal of Natural Resources, 2011, 26(2): 258-269. (in Chinese)) DOI: 10.11849/zrzyxb. 2011. 02. 009.
- [6] 侯保灯,高而坤,吴永祥,等.水资源需求层次理论和初步实践[J].水科学进展,2014,25(6):897-906. (HOU B D, GAO E K, WU Y X, et al., Water resources demand hierarchy theory and preliminary practice[J]. Advances in Water Science, 2014, 25(6): 897-906. (in Chinese))
- [7] 李云玲.水资源需求与调控研究[D].北京:中国水利水电科学研究院,2007. (LI Y L. Study on water resources management and regulation[D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2017. (in Chinese))
- [8] 张远,赵长森,杨胜天,等.河流生态系统关键功能组构建与应用[J].南水北调与水利科技,2017,15(6):66-73. (ZHANG Y, ZHAO C S, YANG S T, et al. Establishment of key functional group for river ecosystems[J]. South to North Water Transfers and Water Science Technology, 2017, 15(6):66-73. (in Chinese))
- [9] BELLWOOD D R, HUGHES T P, FOLKE C, et al. Confronting the coral reef crisis. [J]. Nature, 2004, 429(6994): 827-33. DOI: 10.1038/nature02691.
- [10] 赵长森,刘昌明,夏军,等.闸坝河流河道内生态需水研究—以淮河为例[J].自然资源学报,2008,23(3):400-411. (ZHAO C S, LIU C M, XIA J, et al. Instream ecological flow of dammed river—A case study of Huaihe River[J]. Journal of Natural Resources, 2008, 23(3): 400-411. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:1000-3037. 2008. 03. 006.
- [11] 刘昌明,门宝辉,宋进喜.河道内生态需水量估算的生态水力半径法[J].自然科学进展,2007,17(1):42-48. (LIU C M, MEN B H, SONG J X. Using ecological hydraulic radius to estimate instream ecological water requirement [J], Progress in Natural Science, 2007, 17(1): 42-48. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:1002-008X. 2007. 01. 007.
- [12] LIU C, ZHAO C, XIA J, et al. An instream ecological flow method for data scarce regulated rivers[J]. Journal of Hydrology, 2011, 398(1-2): 17-25. DOI: 10.1016/j.jhydrol. 2010. 11. 026.
- [13] CUI B, WANG C, TAO W, et al. River channel network design for drought and flood control: A case study of Xiaoqinghe River basin, Jinan City, China [J]. Journal of environmental management, 2009, 90(11): 3675-3686. DOI: 10.1016/j.jenvman. 2009. 07. 010
- [14] 段辛斌,田辉伍,高天珩,等.金沙江一期工程蓄水前长江上游产漂流性卵鱼类产卵场现状[J].长江流域资源与环境,2015,24(8):1358-1365. (DUAN X B, TIAN H W, GAO T H, et al. Resources status of ichthyoplankton in the upper Yangtze River before the storage of Jinsha River first stage project [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015, 24(8): 1358-1365. (in Chinese)) DOI: 10.11870/cjlyzyyhj201508014.
- [15] 周解.右江鱼类产卵场调查研究[J].广西水产科技,2000,3:33-36. (ZHOU J. Youjiang fish spawning grounds investigation [J]. Fisheries Science & Technology of Guangxi, 2000, 3: 33-36. (in Chinese))
- [16] 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. (GUO L D, XIA Z Q, LIN H, et al. Researches on application of the tennant method in ecological flow evaluation [J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(4): 1787-1792. (in Chinese))
- [17] 郑小康,侯红雨,付永锋.基于改进Tennant法的湟水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(4):681-685. (ZHENG X K, HOU H Y, FU Y F. Ecological environmental water requirement analysis in Huangshui River based on improved Tennant method [J]. South to North Water Transfers and Water Science and Technology, 2015(4): 681-685. (in Chinese))
- [18] 成庆泰,周才武.山东鱼类志[M].济南:山东科学技术出版社,1997:216-218. (CHENG Q T, ZHOU C W. Shandong Fishes [M]. Jinan: Shandong Science and Technology Press, 1997: 216-218. (in Chinese))
- [19] 李修峰,黄道明,谢文星,等.汉江中游江段四大家鱼产卵场现状的初步研究[J].动物学杂志,2006,41(2):76-80. (LI X F, HUANG D M, XIE W X et al., Spawning sites of four major Chinese carps in the middle reaches of Hanjiang River [J]. Chinese Journal of Zoology, 2006, 41(2): 76-80. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.0250-3263. 2006. 02. 014.
- [20] 张涛,李光吉,冉令贺.基于频率法的河道最小生态流量计算[J].人民黄河,2014(3):32-34. (ZHANG T, LI G J, RAN L H. Minimum ecological flow calculation of river channel based on frequency method [J]. Yellow River, 2014(3): 32-34. (in Chinese)). DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379. 2014. 03. 011.