

耦合多物种生态流速的生态需水计算方法*

张远¹⁾ 赵长森^{2)†} 杨胜天²⁾ 刘昌明³⁾ 张惠潼⁴⁾ 相华⁵⁾
孙影⁴⁾ 杨增丽⁵⁾ 董宝恩⁴⁾ 刘德虎⁴⁾ 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,100875,北京;

2)北京师范大学水科学研究院,100875,北京;

3)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,100101,北京;

4)东营市水文局,257000,山东东营;

5)济南市水文局,250013,山东济南)

摘要 河流生态恢复是经济可持续发展的关键,生态需水满足是河流生态系统稳定的前提.生态需水研究是目前生态学和水文学、水资源学研究的热点,国内外学者从不同角度出发提出了多种计算生态需水的方法,并基于这些方法对不同尺度研究区进行了生态需水量的研究计算.但在现有计算方法中缺乏针对多个物种流速需求耦合的研究,会对计算结果的准确性产生影响,继而影响流域水资源调控.本文针对此问题引入优势度指数建立多物种生态流速耦合模型,为生态需水的计算提供契合生态系统整体需求的解决方案.该方法不受地域因素影响,具有较广的适用性.应用于小清河流域3个典型断面——黄台桥、岔河、石村,结果显示:黄台桥断面生态需水为 $12.33 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$;岔河断面生态需水为 $4.40 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$;石村断面生态需水为 $14.53 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.与Tennant法对比,本研究方法计算结果合理,且更能反映鱼类种群,而非单一物种对水量的实际需求.

关键词 多物种;生态需水;优势度指数;生态流速;小清河

中图分类号 X171.1

DOI: 10.16360/j.cnki.jbnuns.2017.03.015

0 引言

水资源作为一种有限且特殊的资源,是影响生态环境、维持生态平衡的重要因素,对生态环境起着决定性的作用,是维持地球上一切生命的必需^[1-4].水资源是基础自然资源,也是生态环境的控制性因素之一,水问题正日益影响全球的环境与发展,水资源供需矛盾日益突出,成为世界范围的战略性问题之一^[5-8].我国是一个降水时间空间分布极不均匀的发展中国家^[9-10],以水资源紧张、水污染严重为特征的水危机已成为我国可持续发展的重要制约因素^[11].

针对生态需水的研究近年引起了国内外学者的广泛关注^[9,12-16].计算需水的方法主要有水文学法、水力学法、生态学法、综合法等,其中:水文学方法缺乏对目前生态价值的直接关注;生态学法需要大量的人力物力,操作复杂;综合法耗时长,资源消耗大,现有的相关数据不能满足需水量计算的需要.本文选用改进的生态水力半径法(下称AEHRA法)进行生态需水计算,它既充分考虑了河道水生生物栖息需要的水力特征,

又考虑水生生物正常生存繁衍需要的适宜流速和水位,属于水力学方法范畴,但加入了生物学信息,更贴近水生生物的实际生存环境^[16].

不同鱼类特性及喜好往往不同,但是该方法在以往应用中,多物种对于生态流速需求的差异往往被忽略,这会给生态需水计算造成很大不确定性,不利于准确评价生态系统的水量需求,进而影响水资源管理及调度的科学性.如何明确生态系统整体适宜流速成为一个关键科学问题.以往研究中缺乏对于多物种水环境需求耦合的研究,不利于准确描述水生生态系统水量需求.

本文针对耦合生态系统多物种生态流速这一关键科学问题,基于Zhao等^[17]提出的优势度模型,建立模型耦合多物种适宜流速需求.该方法依据流域内生态系统结构特点,最大程度满足不同鱼类流速需求,据此计算生态需水,结果更加符合生态系统整体需求,有效克服了以往生态需水计算时对适宜流速采取一刀切的缺陷,试图为解决适宜流速估计不足引起的生态需水计算偏差提供新的思路.并以小清河为例,开展河道内

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

† 通信作者, e-mail: zhaochangsen@bnu.edu.cn

收稿日期:2016-07-14

生态需水研究,为其他流域提供借鉴.

1 研究区概况

小清河位于山东省鲁北平原南部,于寿光县羊角沟入渤海,全长 237 km,流域面积为10 336 km²,河道平均比降为 0.15/1 000,流域河网密度 0.27 km·km⁻².

流域地处东亚季风区,属华北暖温带半湿润季风型大陆性气候,年内四季分明,温差变化较大.冬季寒冷干燥,降水量稀少;夏季高温炎热,暖空气活动较频繁,雨量较多.流域内年平均气温 12.6℃,无霜期在 200 d 以上.流域内多年平均降水量为 619.7mm,降水量年际变化较大,降水量年内分配不均,主要集中在汛期的 7—9 月,占全年降水量的 50%~70%^[18].

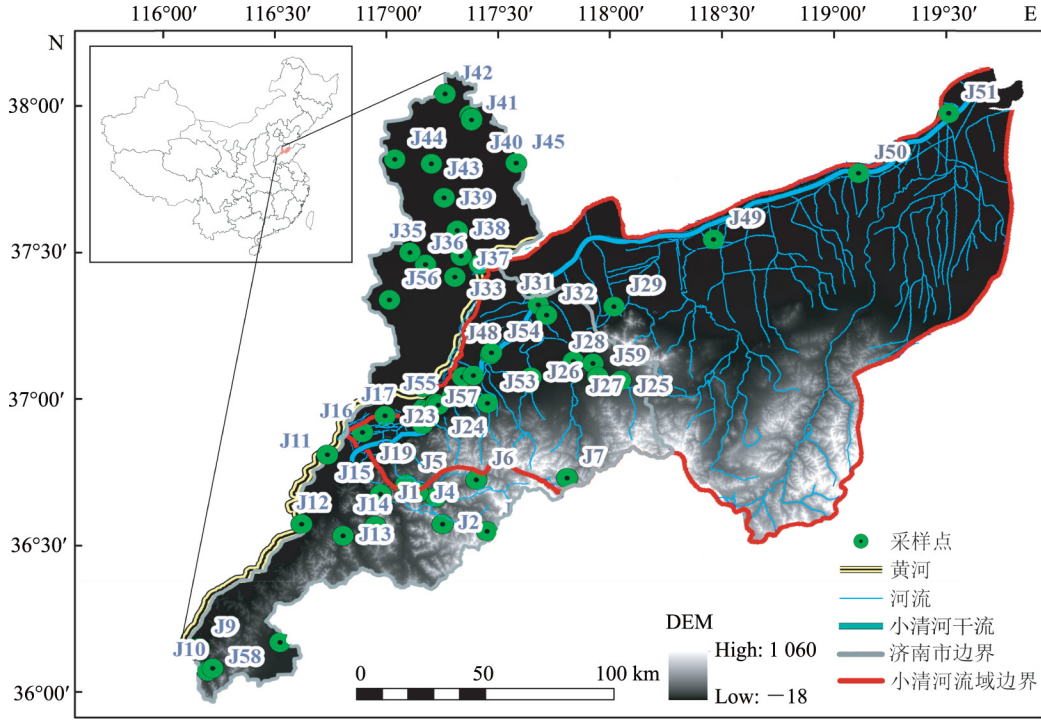


图 1 小清河流域

小清河是鲁中地区一条重要的排水河道,兼顾两岸农田灌溉、内河航运、生态等综合利用,也是全国 5 条重要的国防战备河道之一,对沿河地区社会经济的发展发挥了不可替代的作用.

自 20 世纪 70 年代以来,由于流域内经济的快速发展,人们对环境保护认识不到位,导致河道侵占严重,水源减少,工业废水和生活污水排放量逐年增加,使小清河水体遭受污染,生态环境日益恶化,严重影响了沿河地区社会经济的发展.2004 年山东省政府开始重点治理小清河污染,经过几年的严格治理,小清河的水质已经达到 V 类用水的标准,河道里以及河道旁恢复了往日的生机,给沿河地区带来了良好的生态经济效益.河流生态系统是河流自净与水资源可持续利用中的重要组成部分,但以往的工作中尚未对河流生态系统的需水统筹考虑,不利于小清河的长期可持续生态服务功能的发挥.计算出改善小清河水环境质量需要的最小稀释净化水量,维持其可持续的生态服务功能,为流域内居民提供更多优质服务,准确计算小清河生态系统稳定所需的河流流量,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.

2 数据及方法

2.1 数据源

2.1.1 水文数据 本文大断面、历史水位、流量等水文数据来自济南市水文局与东营市水文局,均为 2015 年实测数据(图 2、图 3).

2.1.2 鱼类数据 鱼类处于水生生态系统食物链顶端,其对生态需水的要求反映了生态系统的需水要求.本文鱼类数据来源包括 2014—2015 年济南市水文水质水生态大规模一体化监测项目采集数据、相关文献资料以及 Fishbase 鱼类数据库(<http://fishbase.org.cn>).

济南市水文水质水生态大规模一体化监测项目在济南采样共分 2 年采样 6 次,共计 279 点次,采集鱼类 44 种 8 228 尾,其中 2014 年 4 854 尾,2015 年 3 374 尾,其中 3 次采样包含本文研究区域.同时,由于济南市采样区域邻近本研究区,所以设定两区域内鱼类对栖息

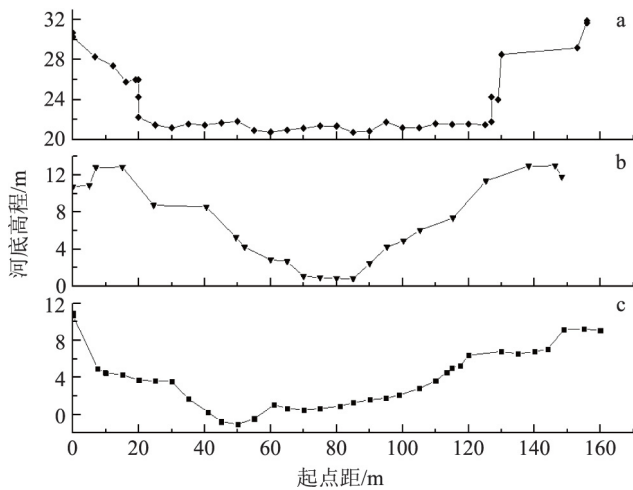


图 2 黄台桥(a)、岔河(b)、石村(c)大断面

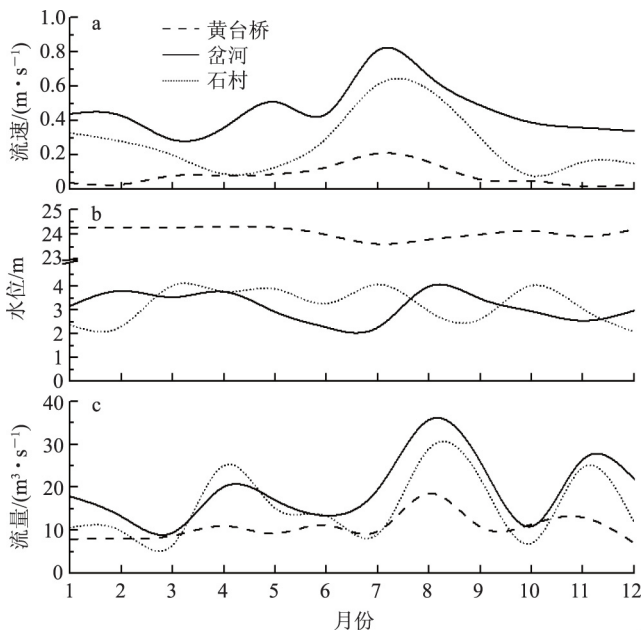


图 3 三站历史水文数据

环境需求相同,流速数据可以通用.

鱼类采样方法如下:

1)可涉水河流(深泓水深≤1.5 m)采用电鱼器捕鱼,采样时一个人双肩背 20 管超声电鱼器电鱼,另一个人负责用抄网收集样品,并及时记录生境因子等自然状况.采集时间为 30~60 min.

2)不可涉水河流(深泓水深>1.5 m),其中河岸浅水区(水深<1 m)可采用电鱼法.中央深水区则主要雇船进行拖网捕鱼,每个采样点行进距离不超过 100 m.另外,有渔民的地方,还需从渔民渔获物中获取相应的样品.小清河流域上、中、下游各设置 1 个采样断面,分别为黄台桥、岔河、石村,采得鱼类见表 1.

2.2 研究方法

2.2.1 典型断面基于优势度模型的流速耦合 以往

研究中,生态流速的确定一般仅取一种典型鱼类流速需求或几种鱼类流速需求的最大值,前一种方法极易使生态系统环境向单一物种过度倾斜而引起整个系统失衡,后一种方法最大程度满足了栖息地内多物种生存需求,但在水资源日益紧缺的现状下,将调度大量淡水用于河流生态系统保护不利于水资源合理分配.本文采用优势度指数^[17]建立模型耦合多物种流速需求.

表 1 小清河流域鱼类采样结果

序号	种类	拉丁文名称	出现地点
1	鲫	<i>Carassius auratus</i>	黄台桥、岔河、石村
2	乌鳢	<i>Channa argus</i>	岔河
3	波氏栉鰕虎鱼	<i>Ctenogobius cliffordpopei</i>	石村
4	栉鰕虎鱼	<i>Ctenogobius giurinus</i> (Rutter)	石村
5	短须颌须鲃	<i>Gnathopogon imberbis</i>	黄台桥
6	餐(音)	<i>Hemiculter leucisculus</i>	岔河、石村
7	清徐胡鲃	<i>Huigolius chinssuensis</i>	岔河
8	黄魮	<i>Hypseleotris swinhonis</i>	岔河
9	泥鳅	<i>Misgurnus anguillicaudatus</i>	黄台桥、岔河
10	青鳉	<i>Oryziasla tipes</i>	岔河、石村
11	大鳞副泥鳅	<i>Paramisgurnus dabryanus</i> Sauvage	黄台桥、岔河
12	稀有麦穗鱼	<i>Pseudorasbora fowleri</i> Nichols	岔河
13	彩鲫	<i>Rhodeus ocellatus</i>	黄台桥

优势度模型综合考虑了水生物的数量和生物量对群落结构的影响,用这 2 个因素衡量了一个物种对于生态系统的重要程度,模型为

$$\omega_i = I_{importance} = \partial_1 P_{CT, abundance} + \partial_2 P_{CT, biomass}, \quad (1)$$

式中: ω_i 表示第 i 种鱼类在研究区域内权重,本文中采用优势度指数 $I_{importance}$ 作为 ω_i 取值,该指数越大,指示物种对群落的贡献越大; $P_{CT, abundance}$ 和 $P_{CT, biomass}$ 分别代表物种数量和生物量占群落总体的比例; ∂_1 和 ∂_2 是数量和生物量的权重系数,通过客观定权方法——熵权法确定.

根据济南大规模水生态采样资料,利用优势度模型计算得到研究断面内鱼类物种优势度,利用该优势度作为物种对生态系统结构稳定贡献的权重,耦合生态流速

$$\tilde{v} = \sum \omega_i v_i (i = 1, 2, \dots, n), \quad (2)$$

式中 \tilde{v} 代表耦合后生态流速, v_i 表示第 i 种鱼类适宜流速.

通过该方法估算的生态流速为整个生态系统鱼类需求的加权平均和.由于不同鱼类在生态系统中所占比例不同,对当地栖息地贡献有差异,根据其贡献差异赋予不同权重,对贡献大的物种需求合理倾向,有利于生态系统结构稳定.

2.2.2 AEHRA 法计算生态需水 AEHRA 法是赵长森等^[16]基于生态水力半径法改进的计算生态需水的方法,计算过程中考虑了河道信息与水生生物信息,能够较合理地计算生态需水.该方法适用于被闸坝分割成段的河流,同样也适用于不受闸坝影响的天然河流.其有 2 个假设前提:1)假设天然河道的流态属于明渠均匀流;2)流速采用河道过水断面的平均流速^[16].其计算步骤如下:

首先,根据河道内满足水生生物的流速 $v_{\text{生态}}$ 、河道糙率 n 和河道的水力坡度 J ,根据式(3)计算出河道过水断面的生态水力半径

$$R_{\text{生态}} = n^{3/2} \cdot v_{\text{生态}}^{3/2} \cdot J^{-3/2}. \quad (3)$$

然后,利用生态水力半径 $R_{\text{生态}}$ 与过水断面面积 A 之间关系估算对应流速 $v_{\text{生态}}$ 的过水断面面积.由于一般断面糙率 n 及水利坡度 J 可以视为常数考虑,因此有 $A \sim R$ 关系.

最后,利用曼宁公式,根据过水断面面积推求生态流量,即

$$Q = \frac{1}{n} R_{\text{生态}}^{2/3} A J^{1/2}, \quad (4)$$

式中 Q 为生态流量, A 为计算得到的过水断面面积.

3 结果及讨论

3.1 结果

3.1.1 典型断面鱼类优势度指数及生态流速耦合

小清河 3 个典型断面鱼类优势度指数 $I_{\text{importance}}$ 见表 2.

表 2 3 站鱼类优势度指数

站点	种类	$I_{\text{importance}}/\%$
黄台桥	鲫	37.48
	泥鳅	18.14
	彩鲫	33.63
	短须颌须鲃	7.59
	大鳞副泥鳅	3.15
石村	鲫	56.47
	餐	38.08
	青鳉	0.68
	麦穗鱼	1.41
	栉鰕虎鱼	1.71
	波氏栉鰕虎鱼	1.65
	鲫	63.21
岔河	餐	1.30
	青鳉	0.58
	黄魮	0.29
	泥鳅	0.70
	乌鳢	10.69
	清徐胡鲃	5.21
	稀有麦穗鱼	16.58
大鳞副泥鳅	1.44	

黄台桥、岔河、石村 3 个断面中优势度指数最大的鱼类物种均为鲫,说明其在小清河流域对于维持生态

系统结构稳定具有最大贡献度,同时也说明鲫生存、繁衍能力最强,耐受性较好.不同断面鲫优势度指数不同,3 个断面鲫优势度指数分别为 37.48%、63.21%、56.47%,黄台桥最低、岔河最高,远远超过其余物种,反映出该物种密度及生物量远超同地区其他物种.

彩鲫优势度指数在黄台桥断面居于第 2 位,其后依次为泥鳅、短须颌须鲃及大鳞副泥鳅.岔河断面鱼类种类在 3 个典型断面中最多,但优势度指数显示除鲫外,其他物种优势度较低,其余 8 种鱼类中最大仅为 16.58%,为稀有麦穗鱼,其次为乌鳢(10.69%)和清徐胡鲃(5.21%),剩余鱼类优势度均在 5% 以下.石村断面优势度分布较为集中,除鲫(56.47%)和餐(38.08%)以外,其余 4 种鱼类优势度小于 2%,生态系统结构稳定性差.

小清河流域鱼类在流速 $0.001 \sim 1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的水域内均有发现(表 3),各物种栖息地流速差异明显;栉鰕虎鱼及波氏栉鰕虎鱼在近静水中(流速接近于 0)有捕获,在流速大于 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的环境中亦有存在;而大部分鱼类生存在最小流速为 $0.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的环境中;优势度指数最大的鲫在济南采样中发现其栖息地最小流速为 $0.22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,最大为 $1.04 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.小清河发现的所有鱼类中,栉鰕虎鱼生存环境的流速区间跨度最大($0.001 \sim 1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$),最小的为乌鳢($0.36 \sim 0.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$).若不进行多物种适宜流速的耦合而仅仅考虑其中一个优势种的适宜流速区间,则估算得到的生态需水结果对其他鱼类是否适合,仍存在较大不确定性.

表 3 小清河流域鱼类适宜流速

种类	流速/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
鲫	0.22~1.04
餐	0.33~1.5
青鳉	0.3~0.95
黄魮	0.3~0.6
泥鳅	0.16~1.04
乌鳢	0.36~0.6
彩鲫	0.3~0.6
麦穗鱼	0.3~1.5
栉鰕虎鱼	0.001~1.5
清徐胡鲃	0.3~1.5
稀有麦穗鱼	0.3~1.5
大鳞副泥鳅	0.16~1.04
短须颌须鲃	0.16~1.04
波氏栉鰕虎鱼	0.002~1.04

根据式(2)计算得出 3 站生态流速为:黄台桥 $0.23 \sim 0.89 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;岔河 $0.25 \sim 1.10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;石村 $0.26 \sim 1.22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (表 4).

3.1.2 典型断面关键物种生态需水计算 依据最小

生态流速,通过 AEHRA 法计算 3 个典型断面最小生态需水,得到黄台桥断面最小生态流量为 $12.33 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,岔河断面最小生态流量为 $4.40 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,石村断面最小生态流量为 $14.53 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (表 4)。最小生态需水量由大到小排序为石村、黄台桥、岔河,位于小清河中游的岔河断面计算得到生态需水量最小,原因是岔河断面为 V 型断面(图 2),相比人工修葺成矩形的黄台桥断面和下游宽深比较大的岔河断面,相同流速条件下岔河断面过水面积更小,导致计算结果小。黄台桥断面位于城市内,受人为因素影响大断面形状近似矩形,相同流速情况下过水断面大,虽然最小生态流速为 3 断面中最小,但计算得到的生态需水量仍较大。

3 个典型断面最小生态流速分别为 0.23 、 0.25 、 $0.26 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,介于 0.22 与 $0.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间,大于鲫最小适宜流速 $0.22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,小于大多数鱼类最小适宜流速 $0.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,但由于各种鱼类在生态系统内优势度不同,耦合后的生态流速对于维持生态系统稳定具有积极意义。若将生态流速设置为多数鱼类最小适宜流速 $0.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,以下游石村断面为例,流速提升仅 $0.04 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,但计算得到的生态需水量将由 $14.53 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 变为 $21.09 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (表 4),年生态需水总量增长 2.1 亿 m^3 ,约为北京市 2014 年用水总量的 $1/10$ ^[19],在我国水资源紧缺现状下,盲目提高生态流速可能不符合国民经济和社会可持续发展的需要。本文提出的方法合理平衡了环境用水与社会用水需求。

表 4 小清河典型断面流速耦合及生态需水计算结果

断面	适宜流速 区间/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	最小生态 流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	流速 $0.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时 流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$
黄台桥	$0.23 \sim 0.89$	12.33	25.30
岔河	$0.25 \sim 1.10$	4.40	8.54
石村	$0.26 \sim 1.22$	14.53	21.09

3.2 讨论

3.2.1 生态流速耦合 对多种鱼类适宜流速进行耦合在计算生态需水时非常重要。若不进行多物种流速耦合,而按照以往的方法,选用优势物种适宜流速作为生态系统生态流速,则黄台桥、岔河、石村 3 个断面优势物种均为鲫,其在小清河流域适宜流速区间下限为 $0.22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,且小于维持鱼卵漂浮的最小流速^[20],将严重影响产漂浮性卵的鱼类繁衍,甚至导致其在这一流域的灭亡。同时,这一流速低于大部分鱼类最小适宜流速(表 3),计算得到的最小生态需水满足鲫的需求,但对其他物种的水量满足程度较低,可能对其余物种生存发展造成一定影响。

优势度模型^[17]是综合考虑鱼类生物量与密度,并通过客观定权法得到两者权重,从而判断物种在生态系统内地位的方法,该方法本身不受地域因素限制,但在实际应用中如果生物量或密度中某一个指标值变化较小,则本文用的定权方法可能存在一定局限性^[21],但在自然状态下这种情况出现的概率很小。

本文耦合了多种鱼类流速需求的方法,在方法体系上弥补了生态系统种群结构复杂时难以确定适宜流速的不足,适用大部分地区。然而,理论上存在某一物种在群落中优势度指数较大且流速需求远大于其余鱼类最大耐受流速的情况,此时耦合得到的流速其他鱼类可能无法承受,这种情况下本方法不适用,但由于鱼类具有迁移性,相同栖息地内种群生态位一般具有一定的相似性,上述情况在现实中出现的可能性极小,对本方法适用范围影响较小。

3.2.2 生态需水计算 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,小清河流域黄台桥、岔河、石村 3 个典型断面多年平均径流量分别为 16.23 、 33.62 、 $30.71 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,本研究计算方法计算结果均大于 Tennant 法认为的最小流量,计算结果比较合理。

表 5 为张涛等^[22]通过频率法、Tennant 法、典型年法计算得到了岔河断面的最小生态流量结果,较好地考虑了丰水、枯水期河道水量变化。通过查阅文献^[23]得知,小清河鱼类产卵期集中于 4—7 月,此时需要一定的流速刺激鱼类产卵并维持鱼卵漂浮于水面,从而维持河道内生态系统的可持续发展,鱼卵安全漂浮下限为 $0.25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ^[2]。但是由频率法、Tennant 法、典型年法计算得到的最小生态流量计算结果显示 4—6 月生态流量最小,且远小于本文岔河断面根据流速 $0.25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 计算的最小生态需水,因此,其结果可能符合北方河流水文特征,但不利于维持河道生态系统的发展,在季节性明显、年内水量分配扁平化的北方河流中,仅考虑水文信息的生态需水计算方法适用性有限。

表 5 频率法、Tennant 法、典型年法岔河断面

时段	最小生态流量计算结果 ^[22]		
	频率法	Tennant 法	典型年法
1—3 月	4.8	4.6	6.0
4—6 月	3.2	2.7	2.4
7—9 月	10.0	9.1	12.9
10—12 月	5.7	5.5	10.1

有学者针对上述问题,引入鱼类信息对 Tennant 法进行了改进,计算了黄台桥断面的逐月生态需水量,

弥补了该方法不能很好适用于丰枯期流量变化大的河流的不足^[24],其计算结果显示,逐月生态需水量在 $0.4\sim 1.8\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 之间,远小于鱼类产卵期维持鱼卵漂浮的最小流速对应生态流量.且在目前城市河流日渐增多的情况下,仅适用于天然河流的 Tennant 法适用范围正在逐渐缩小.本文基于生态学原理与水力学方法的生态水利半径法则不受此影响.

综上,本文耦合河道内多种鱼类流速需求,通过生态水利半径法计算得到的结果合理,同时更能满足河道内生态可持续发展需求,相比于频率法、Tennant 法、典型年法等受河流水文条件影响小,且同样适用于城市河流,适用范围广.

4 结论

鲫在黄台桥、岔河、石村断面中优势度指数分别为 37.48%、63.21%、56.47%,在 3 个断面所有物种中均为最大,可以推测在全流域鲫为优势物种,对于生态系统维持稳定贡献较大,其余物种相对较小.

引入优势度指数耦合得到的黄台桥、岔河、石村 3 个典型断面最小生态流速分别为 0.23 、 0.25 、 $0.26\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,利用 AEHRA 法计算得到相应最小生态流量分别为 12.33 、 4.40 、 $14.53\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$.与 Tennant 法对比,本研究方法计算结果合理.

本文通过引入优势度指数耦合生态流速更加符合客观实际,综合考虑生态系统的结构特性、种群生物量和密度的相互关系,计算结果满足维持河流生态系统健康的最小生态需水量,适用范围广,可为流域水资源管理调控提供科学依据.

5 参考文献

- [1] 韩宇平,王富强,赵若,等.北运河河流生态需水分段法研究[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2014,35(2):25
- [2] 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
- [3] 郝博.基于 GIS 和 RS 的羊羊河流域植被生态需水的时空分布规律研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2010
- [4] 郭日生.《21 世纪议程》:行动与展望[J].中国人口·资源与环境,2012,22(5):5
- [5] 刘昌明.21 世纪中国水资源若干问题的讨论[J].水利规划设计,2002(1):14
- [6] 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
- [7] 钱文婧,贺灿飞.中国水资源利用效率区域差异及影响因素研究[J].中国人口资源与环境,2011,21(2):54
- [8] 李峰平,章光新,董李勤.气候变化对水循环与水资源的影响研究综述[J].地理科学,2013,33(4):457
- [9] 夏军,孙雪涛,丰华丽,等.西部地区生态需水问题研究面临的挑战[J].中国水利,2003,5(9):57
- [10] 张利平,夏军,胡志芳,等.中国水资源状况与水资源安全问题分析[J].长江流域资源与环境,2009,18(2):116
- [11] 钱正英.中国可持续发展水资源战略研究综合报告[J].中国工程科学,2000,2(8):1
- [12] 刘昌明.中国 21 世纪水供需分析:生态水利研究[J].中国水利,1999(10):18
- [13] HAN M, YANG X Y, LIU Y, et al. The research progress of ecological water requirement in China and abroad [J]. Procedia Environmental Sciences, 2010(2):1904
- [14] ARMENTROUT G W, WILSON J F. Assessment of low flows in streams in Northeastern Wyoming [R]. Cheyenne. USGS: Water Resources Investigation Report,1987,4(5):533
- [15] HUGHES D A. Providing hydrological information and data analysis tools for the determination of ecological in-stream flow-requirements for South African Rivers [J]. Journal of Hydrology, 2001, 241(1/2):140
- [16] 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
- [17] ZHAO C, SUN C, LIU C, et al. Analysis of regional zoobenthos status in the Huai River Basin, China, using two new ecological niche clustering approaches[J]. Ecohydrology, 2014, 7(7):732
- [18] 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
- [19] 北京市统计局.北京市统计年鉴 2015[M].北京:中国统计出版社,2015
- [20] 林俊强,彭期冬,黄真理.河流鱼类鱼卵运动的水力学研究进展[J].水利学报,2015,46(7):869
- [21] 林运东,门宝辉,贾文善.熵权系数法在水体营养类型评价中的应用[J].水资源与水工程学报,2002,13(3):27
- [22] 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
- [23] 成庆泰,周才武.山东鱼类志[M].济南:山东科学技术出版社,1997
- [24] 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

A method to calculate ecological flow base by coupling multi-species flow velocity requirement

ZHANG Yuan¹⁾ ZHAO Changsen²⁾ YANG Shengtian²⁾ LIU Changming³⁾
ZHANG Huitong⁴⁾ XIANG Hua⁵⁾ SUN Ying⁴⁾ YANG Zengli⁵⁾
DONG Bao'en⁴⁾ LIU Dehu⁴⁾ ZHANG Chunbin¹⁾ YU Xinyi¹⁾

(1) School of Geography, Beijing Normal University, 100875, Beijing, China;

2) College of Water Sciences, Beijing Normal University, 100875, Beijing, China;

3) Key Laboratory of Water Cycle & Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences & Natural Resources Research, CAS, 100101, Beijing, China;

4) Dongying Survey Bureau of Hydrology and Water Resources, 257000, Dongying, Shandong, China;

5) Jinan Survey Bureau of Hydrology and Water Resources, 250013, Jinan, Shandong, China)

Abstract Ecological restorations of river are key to sustainable economic development. Ecological water demand is a prerequisite for river ecosystem stability. Ecological water demand is widely investigated in ecology, hydrology and in water resources studies. Different methods have been used to calculate eco-flow. The lack of data on coupling of flow velocity demand for multiple species in existing methods is likely to have an impact on the accuracy of calculations and consequently on water resources regulation. In the present work, dominance index was used to establish a coupling model of multi-species ecological velocity, to provide a solution to ecological water requirement calculation. This method will not be affected by regional factors, and has wide applicability. Eco-flow at Huangtai Bridge was found to be $12.33 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, Chahe $4.40 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, and Shicun $14.53 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Compared with the Tennant method, the present method produces reasonable data and can reflect the actual demand of fish population rather than individual species.

Keywords multi-species; ecological flow; dominance index; ecological velocity; Xiaoqinghe River