

溪流大型底栖动物栖息地适合度模型的构建与 河道内环境流量研究 ——以三峡库区香溪河为例*

李凤清^{1,2} 蔡庆华^{1**} 傅小城^{1,2} 刘建康¹

1. 中国科学院水生生物研究所淡水生态与生物技术国家重点实验室, 武汉 430072; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039

摘要 基于对香溪河河流生态系统的多年研究, 以该流域河流大型底栖动物最优势类群四节蜉为指示生物, 建立了我国大陆地区第一个基于长期的连续的野外现场实测数据的水生生物栖息地适合度模型(habitat suitability model, HSM). 为保护河流生态系统结构和功能的完整性, 文中将河道内环境流量分为3个层次, 即河道内最小需水量、最小环境流量和适宜环境流量, 并利用水文法和加权可利用面积法(weighted usable area, WUA)分别构建了这3个层次的河道内环境流量的计算模型. 结果表明: 香溪河的最小需水量为 Tennant 法中描述为差或最小状态的流量(即 $0.615 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), 为保护河流生态系统健康、维系河道景观多样性, 应将多年平均流量的 42.91% (即 $2.639 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) 作为研究地点的适宜环境流量. 综合考虑水文和生物因素, 从3个层次确定了河道内环境流量, 可以为香溪河水资源的合理配置和综合管理提供技术支持, 同时为较准确地计算河道内最小环境流量提供探索性研究.

关键词 栖息地适合度模型 加权可利用面积 河道内环境流量 大型底栖动物 香溪河

水是生命之源, 几乎与自然环境的任何一个部分都有或多或少的联系, 并深入到人类生活的各个方面^[1]. 伴随工业文明的迅猛发展, 人类在一定的时空尺度上过多地影响、占用或控制了水资源, 使得水资源逐渐丧失其生态功能, 并导致严重的生态环境问题^[2-4]. 因此, 需要对生态系统进行保护、修复或重建所需要的水资源进行科学核算和调控, 即进行环境流量研究. 通常将流域内的环境流量划分为河道内和河道外两部分来研究, 本文主要针对河道内环境流量进行研究.

河道内环境流量是指为保护河道内生态系统的结构完整性和生物多样性所需要的水量^[5]. 此项研

究始于国外, 并且先后提出了多种核算方法, 根据其机理大致可以分为4类: 水文法、水力学法、栖息地法和整体分析法^[5-7]. 其中, 栖息地法是基于生物学原则的定量方法, 该方法综合考虑了生物偏好的栖息地特征与河流水文特性之间的关系, 并成为目前最可信的评价方法^[5,8]. 栖息地法中最常用的是河道内流量增加法(instream flow incremental methodology, IFIM), 该方法通过将大量水文实测数据和特定水生生物(如鱼类、大型底栖动物和大型水生植物等)信息相结合, 进行流量变化对水生生物栖息地影响的评价^[9,10]. IFIM法不仅在美国, 而且在法国、德国、日本、捷克和英国等20多个

2008-04-14 收稿, 2008-05-15 收修改稿

* 国家自然科学基金重点项目(批准号: 30330140)、中国科学院知识创新工程重要方向项目(批准号: KZCX2-YW-427)和国家重点基础研究发展计划(批准号: 2002CB412300)资助

** 通信作者, E-mail: qhcai@ihb.ac.cn

国家得到了广泛应用^[5,11]。目前在大、中型河流研究中,多数以鱼类作为指示生物;但在级别较低的山溪中,大型底栖动物的多样性高于鱼类^[12,13],其与栖息地环境因子之间的关系也更直接、更密切^[13-15],此类研究亦见于美国、加拿大、新西兰等国家^[5,13,16,17]。

近年来,国内学者从不同角度对我国河道内环境流量方法进行了探讨,但多数研究集中于水文法和水力学法等。由于我国定量研究河道内环境流量的起步较晚,又缺少长时间系列的水生生物实测资料,因此栖息地法在我国的研究与应用较少。其中,徐志侠等根据鱼类对生存空间的最小需求确定了最小环境流量^[18];Yi等通过修改Edwards的栖息地适合度模型,建立的长江四大经济淡水鱼类的栖息地适合度模型^[19];易雨君等基于文献资料绘制的长江中华鲟的栖息地适合度模型等^[20]。但是这些栖息地环境数据来源于不同时期不同文献的研究资料或由估算而来,因此更加精确的研究尚需长期的连续的野外实测资料。

任何一种河道内环境流量方法的提出都是建立在某一特定流域的,不同流域的自然环境与物种组成的相似性对于方法应用的成功与否十分重要,即使有着相似的地质条件和流域面积的两个相邻流域,其对枯水的敏感性也可能截然不同^[3,21,22]。因此,在研究河道内环境流量时,必须建立研究区域细致、精确的栖息地适合度模型。对香溪河流域生态系统的长期监测为栖息地适合度模型的构建提供了可能性。本文以香溪河流域河流大型底栖动物最优势类群四节螺为指示生物^[23],尝试建立我国大陆地区第一个基于长期的连续的野外现场实测数据的水生生物栖息地适合度模型。主要目标在于,综合分析水文法和加权可利用面积法,建立香溪河河道内最小需水量、最小环境流量和适宜环境流量这3个层次的计算模型,以为香溪河水资源的合理利用与综合管理提供技术支持,同时为较准确地计算河道内最小环境流量提供探索性研究。

1 研究方法

1.1 研究地区概况及样点设置

香溪河是长江的一级支流,发源于神农架南

麓,干流全长94 km,流域总面积3099 km²,自然落差1540 m,3条主要支流为古夫河、高岚河以及九冲河^[24,25](图1)。对香溪河生态系统的研究始于1999年,2000年6月开始了季节性常规监测,2001年8月开始逐月监测。根据香溪河流域的自然环境特征和采样的可行性,共设置了154个采样点,其中,逐月监测的采样点为13个,本文的分析基于近年来香溪河流域的逐月监测和全流域监测数据(其中,用于本文分析的水文和生物数据1400余组),研究对象包括水文、水体理化、水生生物等。多年研究表明,香溪河的水生生物主要以底栖动物和底栖藻类为主^[23,26-29],浮游生物次之^[30],鱼类因不适应山区急流生境,多样性偏低^[31]。

为分别计算自然河道与受小水电影响的受损河道的河道内最小环境流量(主要对枯水期进行计算),于香溪河干流及其上的一个典型引水式电站——苍坪河电站的取水口至出水口之间分别设置了10,9个断面(部分样点与全流域调查样点重叠)来代表自然河道和受损河道。



图1 香溪河流域采样点位置示意图

1.2 数据获取

分析所用数据来源于本实验室自1999年以来对香溪河生态系统的长期监测资料,其中,大型底栖动物的采集工具为D型手网(2004年6月之前)和索伯网(2004年6月之后)。断面河宽使用皮尺测量,依据河道宽度,每隔0.2—2 m设置一个样点,测量每个样点的水深(铁质米尺)及0.6倍水深处的

流速(LJD 打印式流速测量仪)。河床底质类型按 EPA 标准划分^[12], 即石床 (bedrock, 一整块石床)、漂石 (boulder, > 256 mm)、鹅卵石 (cobble, 64—256 mm)、小圆石 (pebble, 16—64 mm)、砾石 (gravel, 2—16 mm)、砂 (sand, 0.06—2 mm)、粉沙 (silt, 0.004—0.06 mm) 和粘土 (clay, < 0.004 mm)。考虑到大型底栖动物栖息地的多样性, 同时将底栖动物偏好的某些底质类型纳入分析之中, 本文主要增加了凋落物 (vegetable) 和有机碎屑 (debris) 等底质类型。鉴于水生生物采集区域鲜有石床底质, 因而没有将石床纳入底质类型之中。

1.3 分析方法

1.3.1 IFIM 法 IFIM 法是定量预测流量变化对与生物有效栖息地影响的一种方法^[10], 该方法根据大量水文实测数据 (如水深、流速、底质等) 和水生生物数据, 建立指示生物的栖息地环境因子适合度模型, 进而采用加权可利用面积法模拟流量对水生生物有效栖息地的影响^[9,10]。构成水生生物栖息地的环境因子主要有水深、流速、底质、水质、水温等, 当前多数研究者考虑的重要栖息地因子是水深、流速和底质^[13,32,33]。

1.3.2 栖息地适合度模型 经典的栖息地适合度定量法是指指示生物对栖息地环境因子的适宜范围^[34], 栖息地适合度指标作为广泛使用的栖息地指标, 用于表征水生生物对不同河流环境因子的偏好性^[35,36]。目前确定栖息地适合度模型的方法主要有^[6,10]: (i) 专家观点或文献模型 这种方法的适合度模型来自专家观点或历史文献, 其费用少, 节省时间; (ii) 栖息地使用 (utilization) 模型 该方法直接从对指示生物的栖息地使用观察中得到, 以测量的微生境特性的频率分布为基础; (iii) 栖息地偏好 (preference) 模型 这种模型给出使用栖息地和可用栖息地的组合, 用来减少与环境可利用性相关的偏差。其中, 文献模型不是从研究区域的实测数据中获取, 缺乏一定的可靠性, 栖息地偏好模型的操作复杂, 有鉴于此, 本文采用栖息地使用模型直接从对指示生物的有效栖息地的计算进行模拟, 该方法具有很强的实用性和可操作性, 较为符合我国国情。

1.3.3 加权可利用面积法 加权可利用面积法通过对不同流量条件下水文模型和指示生物栖息地偏好的结合, 进行流量变化对栖息地影响的评价, 以此确定河道内最小环境流量。该方法根据各断面水深、流速和底质的分布, 通过指示生物的栖息地适合度模型, 找出断面各分区的环境因子所对应的栖息地适合度指数, 计算出各断面在不同流量条件下的加权可利用面积^[6,10], 公式如下

$$WUA = F[f(D_i), f(V_i), f(C_i)] A_i$$

式中 A_i 为研究河段第 i 分区的水域面积; 而 $f(D_i)$ 、 $f(V_i)$ 和 $f(C_i)$ 分别为第 i 分区的水深、流速和底质的适合度指数; $F(\cdot)$ 为组合栖息地适合度因子 (combined suitability factor, CSF)。

重复计算各断面不同月份、不同流量条件下的加权可利用面积, 可以模拟得到加权可利用面积与流量之间的关系曲线, 然后根据一定的阈值, 确定河道内最小环境流量。

河道内最小环境流量阈值的确定方法有许多种, 目前使用较多的是斜率法和曲率法, 这两种方法将 WUA -流量关系曲线上某一特定斜率 (临界值, 一般为 1) 或者最大曲率处定义为转折点 (或者阈值)^[37,38]。当河道流量未超过该转折点所对应的流量时, 加权可利用面积随流量变化较为剧烈, 当河道流量超过该转折点所对应的流量后, 河道流量的大幅度增加只能引起加权可利用面积的较小变化。本文使用斜率为 1 法确定转折点。

1.3.4 环境因子定权 不同的组合栖息地适合度因子对指示生物的影响是不一样的, 因此在计算组合栖息地适合度因子时, 应对各个因子分配以适当的权重再进行组合计算。本文定权选用系统工程理论中广泛使用的层次分析法 (analytic hierarchy process, AHP)。层次分析法是将各组成参数按支配关系形成层次结构, 之后运用数学方法与定性分析, 通过层层排序确定各参数的权重^[39]。

1.3.5 多年平均流量的模拟计算 香溪河流域只有一个水文监测站, 其水文数据不能满足研究电站——苍坪河电站处的河道流量的计算。在软件 Arc GIS 9.0 的支持下, 根据香溪河流域的地理信

息、气象资料、土地利用资料以及香溪河水文站的多年平均流量,应用 SWAT(soil and water assessment tool)模型可以模拟计算香溪河流域任一汇水区域的多年平均流量,其中,苍坪河电站处的多年平均流量为 $6.15 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ [40].

1.3.6 水文法 水文法以历史流量为基础确定河道内环境流量,代表方法有 Tennant 法^[41]、10 年最枯月平均流量法^[8,42]和保证率 90%最枯月平均流量法^[8,42].

(1) Tennant 法,该方法根据水文资料,以多年平均流量的 10%作为河道内最小需水量.

(2) 10 年最枯月平均流量法,该方法是在美国 7Q10 法的基础上发展出来的,以近 10 年最枯月平均流量作为河道内最小需水量.

(3) 保证率 90%最枯月平均流量法,该方法利用连续的多年水文系列最枯月平均流量排频,以保证率 90%最枯月平均流量作为河道内最小需水量.

1.3.7 3 层次的河道内环境流量 为保护香溪河生态系统结构和功能的完整性,将河道内环境流量分为 3 个层次,即河道最小需水量、最小环境流量和适宜环境流量:

(1) 第 1 个层次,即水文层次,是确保河道不断流所必须泄流的水量,此时的流量称为河流最小需水量;

(2) 第 2 个层次,即物种层次,是保证河流生态系统中优势类群的正常生存和繁衍,此时的流量称为河流最小环境流量;

(3) 第 3 个层次,即生态系统层次,是保证河流生态系统特有的服务功能的正常和完整发挥,此时的流量称为适宜环境流量.

2 栖息地适合度模型的构建

栖息地适合度模型的构建直接对指示生物四节蜉的栖息地使用观察中得到,利用频率分布法,分别将采样点的水深、流速、底质与四节蜉的相对丰度进行单因子适合度模拟.

2.1 水深

香溪河大型底栖动物的采集深度位于 0—1 m. 水深的适合度曲线表明四节蜉的较适水深集中于 0.1—

0.3 m(该区间亦称为浅滩),最适水深为 0.2 m(图 2(a)). 水深超过 0.9 m 的河段基本位于下游地区,下游河段的大型底栖动物以水生寡毛类和摇蚊幼虫居多,通常认为深水环境不利于四节蜉的生存^[43,44],因而当水深 > 0.9 m 时,四节蜉的适合度趋向于 0.

2.2 流速

香溪河河道的测量流速介于 0—1.5 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$. 从流速的适合度曲线来看,四节蜉的较适流速位于 0.3—0.7 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,其最适流速为 0.4 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 2(b)). 适合度曲线还表明四节蜉的某些种类可以在静水区域生存,但当流速 > 1.5 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,四节蜉因很难抵抗水流而难以生存.

2.3 底质

分析了 9 种底质类型对四节蜉栖息地的影响,结果表明,四节蜉偏好的底质类型主要为大粒径的鹅卵石、小圆石、砾石和漂石,其中,粒径介于 64—256 mm 的鹅卵石是其最喜爱的底质类型(图 2(c)). Jowett 等的研究亦表明多数底栖动物喜欢选择大粒径底质生活,而在小粒径中生存的物种较少^[16].

2.4 权重分配

大量研究表明底质和流速是影响溪流底栖动物群落结构的两个主要因子,其中底质的重要性最大,流速的重要性较小;而与流速相比,水深的重要性相对更小^[16,32,33,45,46]. 因此,环境因子的相对重要性依次为底质 > 流速 > 水深. 根据环境因子的相对重要性建立其判断矩阵如表 1 所示.

表 1 环境因子判断矩阵

	水深	流速	底质
水深	1	1	0.5
流速	1	1	1
底质	2	1	1

应用层次分析法计算出水深,流速和底质的权重分别为 0.260, 0.327 和 0.413,其中,最大特征值 $\lambda_{\max} = 3.054$,一致性比率 $CR = 0.046 < 0.1$,可以认为该判断矩阵具有满意的一致性,所得环境因子的权重可以用于后续计算. 利用加权平均法计算所得的组合栖息地适合度因子的公式如下:

$$CFS = 0.260f(D) + 0.327f(V) + 0.413f(C)$$

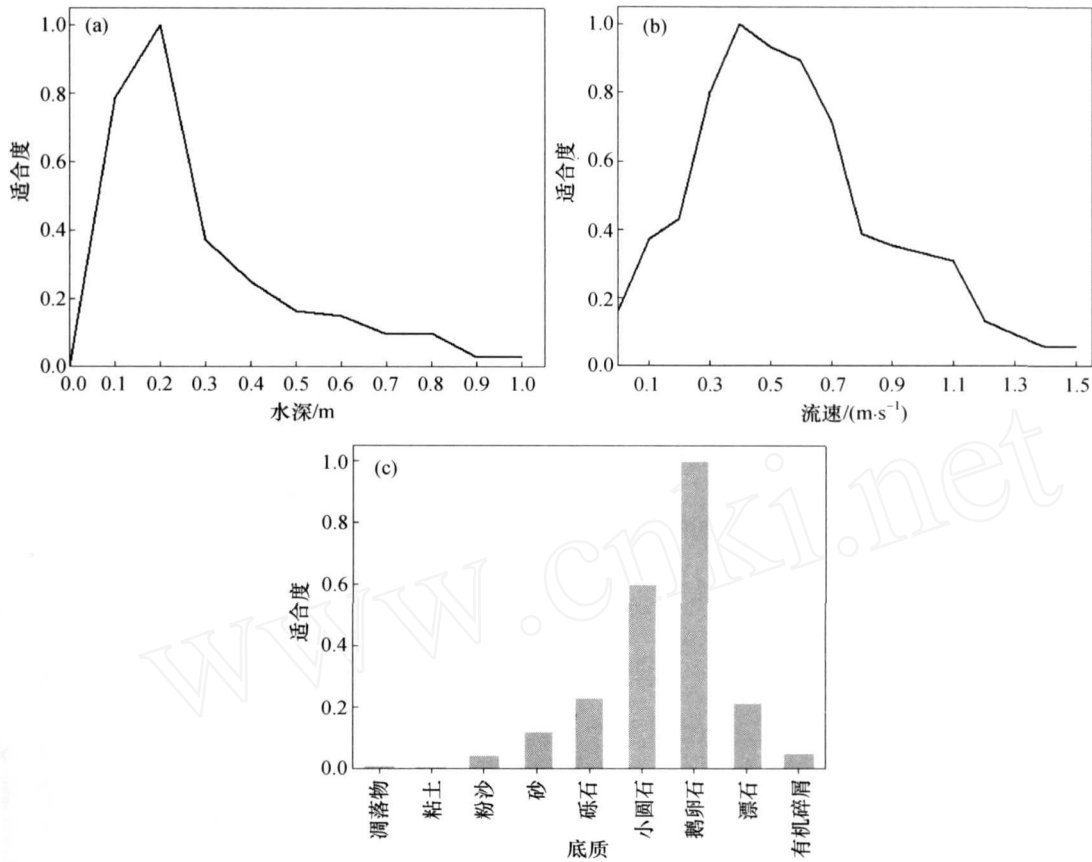


图 2 香溪河四节蜉对水深(a)、流速(b)和底质(c)的适合度模型

3 香溪河河道内环境流量模型的模拟计算

根据前文所述方法，绘制加权可利用面积与流量(以自然对数为底数)的回归曲线(图 3)。利用斜率为 1 法计算出受损河道的最小环境流量为 $1.182 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (占多平均流量的 19.22%)，该流量即为保持受损河道的大型底栖动物最优势类群四节蜉的河道内最小环境流量。依此法计算出自然河道的最小环境流量为 $2.639 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (占多平均流量的 42.91%)，该流量即为保持香溪河自然河道的指示生物四节蜉的河道内最小环境流量。

为构建 3 层次河道内环境流量模型，在使用加权可利用面积法进行计算的同时，基于 1988—2005 年的水文数据，本文又分别采用水文系列法、Tennant 法、10 年最枯月平均流量法和保证率 90% 最枯月平均流量法计算了香溪河河道内环境流量(表 2)。

表 2 基于水文法和加权可利用面积法的香溪河河道内环境流量

方法	环境流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	与年平均流量 百分比/ %
Tennant 法	0.615	10.00
10 年最枯月平均流量法	0.912	14.83
保证率 90% 最枯月平均流量法	1.373	22.32
加权可利用面积法 河道内最小环境流量	1.182	19.22
加权可利用面积法 河道内适宜环境流量	2.639	42.91

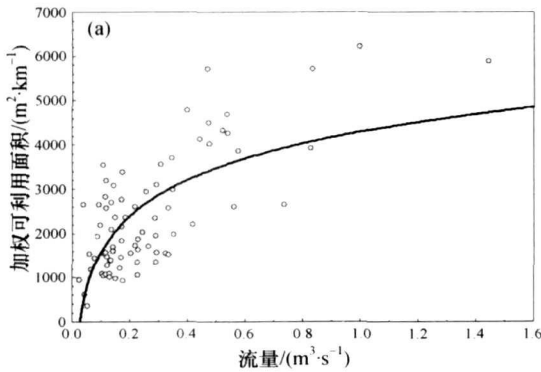
对比水文法和加权可利用面积法的计算结果，最终确定 3 层次的河道内环境流量分别为：

(1) 香溪河最小需水量，将计算结果中最小的 Tennant 法所得流量作为香溪河最小需水量，即 $0.615 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。

(2) 香溪河最小环境流量，选择枯水期受损河道的河道内最小环境流量作为受小水电干扰的香溪河河道内最小环境流量，即 $1.182 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ，该流量

占多年平均流量的 19.22%，接近 Tennant 法枯水期的“一般”流量标准。

(3) 香溪河适宜环境流量，可以枯水期自然河



道的河道内环境流量作为推荐值，即 $2.639 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ，该流量占多年平均流量的 42.91%，并且达到了 Tennant 法枯水期的“很好”流量标准。

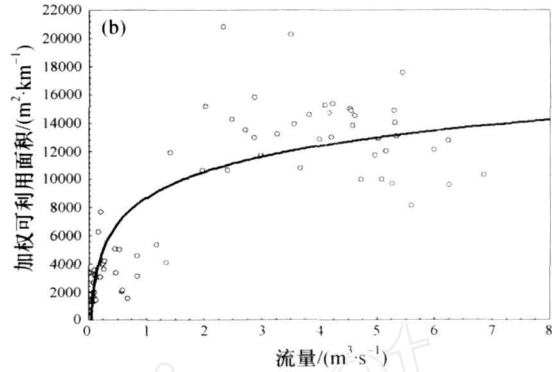


图 3 香溪河四节蛭的加权可利用面积与流量的回归曲线图

(a) 为受损河道；(b) 为自然河道

4 讨论

4.1 栖息地适合度模型的适宜性

水生生物栖息地适合度模型是 IFIM 法的生物学基础，其模拟的真实性和准确性直接影响到栖息地的模拟结果以及后续河道内环境流量的计算。香溪河大型底栖动物栖息地适合度模型在该流域具有较强的代表性，基本可以满足该流域河道内环境流量的后续计算。但是，河道内生物需水在一年中并不是一个常量，根据生物群落的繁殖和发育规律，河道生物需水应同河道内水流年内变化特征一样，是一个连续变化的过程。同样对于不同河流及不同生物种类，其生态方面的需求不同，需水量也应不一样^[5,10]。在研究中主要是通过物种在不同繁殖和发育阶段的栖息地适合度模型的不同来体现，这就需要更为细致、精确的栖息地适合度模型，也是我们下一步需要继续完善之处。本文提出的栖息地适合度模型是基于湖北省西部山区溪流构建的，该模型适用于香溪河及其临近区域，而其他地区的溪流，尤其是大型河流可能不适用，这也需要进一步拓展研究。

4.2 3 层次河道内环境流量模型

河道内最小环境流量主要用于维系和保护河道内指示生物的正常生长、繁殖等生理活动，为其创造出适宜的栖息地面积。对于香溪河的最小河流需

水量，可以将多年平均流量的 10% 即 Tennant 法中描述为差或最小状态的流量作为推荐流量。有关河道内最小需水量和最小环境流量的研究，许多学者从不同角度进行了探讨，其中，何涛在火溪河（年均径流 $15 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ）的河道内环境流量研究中将枯水期平均流量的 10% 作为全年需下泄的生态基流^[47]。在资料短缺的情况下，可以对河道内最小流量进行规定，例如法国规定河道内最小流量不应低于多年平均流量的 10%，即使多年平均流量大于 $80 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 的河流，最低流量的下限也不得低于多年平均流量的 5%^[48]。在结合生物因子进行的最小环境流量研究中，Vismara 将意大利 Adda 河（年均径流 $35 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ）的多年平均流量的 19% 作为维持褐鳟栖息地的最小环境流量^[36]，Halleraker 在挪威的 Surna 河（年均径流 $56 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ）的研究中也有相似的结果，即将多年平均流量的 27% 作为维持鲑鱼栖息地的最小环境流量^[7]。本文提出的河道内最小需水量和最小环境流量基本吻合当前多数研究的结论，因此，这两个层次的河道内环境流量模型基本适用于研究区域。

适宜河道内环境流量考虑指示生物生存、繁衍对水文特性的要求，当流量持续小于这一数值时，将导致生态链的破坏，物种大规模减少，进而生物完整性降低。自然河道计算所得的流量既能保护河道内指示生物的正常生理活动，为其创造适宜的栖

息地面积,同时还能够提供维系河道景观所需求的生物总量、保持河道的物理形态、过水断面的面积等。因此,从保护河流生态系统健康、维系河道景观生态的角度考虑,为减轻小水电群对香溪河生态系统的影响,应该将 $2.639 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 作为研究地点的适宜流量的推荐值。目前多数研究侧重于最小环境流量,而有关适宜环境流量的研究较少。本文提出的适宜环境流量是为了更好地保护河流生态系统,使其生态功能能够系统地完整地发挥,但由于该理论尚处建立初期,因此有必要从理论到计算方法进一步加以完善。

我国自然条件复杂且受季风影响,不仅相同区域内河流的年际和年内季节性变化巨大,而且不同区域河流的环境流量研究的侧重点有差异,造成不同流域河流的环境流量的研究方法各异。本文采用的栖息地法可能更适合于我国水量丰沛的南方地区河流,而北方地区河流的计算方法尚需结合具体河流加以改进。

5 结论

(1) 本文分别从水文、物种和生态系统3个层次确定的河道内环境流量可以为水资源的合理利用与综合管理提供重要的决策依据,使“三生”(生产、生活和生态)用水之间能够有较合理的分配。

(2) 浅滩水深、流速适中,同时光照充足,食物丰富,因而成为大型底栖动物的密集栖息地。从这个角度来说,保护好浅滩栖息地是保护好水生生物生存的重要手段。

(3) 随着国际水文计划等重大项目的实施,河道内环境流量的研究对象需要由过去仅关心的物种及河道物理形态的研究,扩展到维持河道流量的研究,而且必须考虑河流生态系统的整体性,研究方向则需要扩展到河道外生态系统。

参 考 文 献

- Naiman RJ, Bilby RE. River Ecology and Management. New York: Springer New York Inc, 2001, 169—199
- 陈亚宁, 郝兴明, 徐长春. 新疆塔里木河流域径流变化趋势分析. 自然科学进展, 2007, 17(2): 205—210
- Liu CM, Men BH, Song JX. An ecological hydraulic radius approach to estimate the instream ecological water requirement. Progress in Natural Science, 2007, 17(3): 320—327
- 郑建平, 王 芳. 大洋河河流生态需水研究. 河海大学学报(自然科学版), 2006, 34(5): 502—504
- Thame R. A global perspective on environmental flow assessment: Emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies. River Research and Applications, 2003, 19: 397—441
- Ahmad-Nedushan B, St-Hilaire A, Bédubé M, et al. A review of statistical methods for the evaluation of aquatic habitat suitability for instream flow assessment. River Research and Applications, 2006, 22: 503—523
- Halleraker JH, Sundt H, Alfredsen KT, et al. Application of multiscale environmental flow methodologies as tools for optimized management of a Norwegian regulated national salmon watercourse. River Research and Applications, 2007, 23: 493—510
- 杨志峰, 张 远. 河道生态环境需水研究方法比较. 水动力学研究与进展, 2003, 18(3): 294—301
- Stalnaker, CB, Lamb BL, Henriksen J, et al. The Instream Flow Incremental Methodology: A Primer for IFIM. Washington, DC: U. S. Geological Survey, 1995, 13
- Midcontinent Ecological Science Center. PHABSIM for Windows Manual and Exercise. Washington, DC: U. S. Geological Survey, 2001
- Thomas BH. The future of habitat modeling and instream flow assessment techniques. Regulated Rivers: Research and Management, 1998, 14: 405—420
- Barbour MT, Gerritsen J, Snyder BD, et al. Rapid Bioassessment Protocols for Use in Streams and Wadeable Rivers: Periphyton, Benthic Macroinvertebrates and Fish. 2nd ed. Washington, DC: EPA 841-B-99-002. U. S. Environmental Protection Agency, Office of Water, 1999, 3—3
- Gore JA, Layzer JB, Mead J. Macroinvertebrate instream flow studies after 20 years: A role in stream management and restoration. Regulated Rivers: Research and Management, 2001, 17: 527—542
- Gore JA, Crawford DJ, Addison DS. An analysis of artificial riffles and enhancement of benthic community diversity by physical habitat simulation (PHABSIM) and direct observation. Regulated Rivers: Research and Management, 1998, 14: 69—77
- Smith MJ, Kay WR, Edward DH, et al. AusRivAS: Using macroinvertebrates to assess ecological condition of rivers in Western Australia. Freshwater Biology, 1999, 41: 269—282
- Jowett IG, Richardson JY, Biggs BJ, et al. Microhabitat preferences of benthic invertebrates and the development of generalized *Deleatidium* spp. habitat suitability curves, applied to four New Zealand rivers. New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research, 1991, 25: 187—199
- Wilis TC, Baker EA, Nuhfer AJ, et al. Response of the benthic macroinvertebrate community in a northern Michigan stream to

- reduced summer stream flows. *River Research and Applications*, 2006, 22: 819—836
- 18 徐志侠, 王浩, 陈敏建, 等. 基于生态系统分析的河道最小生态需水计算方法研究(II). *水利水电技术*, 2005, 36(1): 31—34
 - 19 Yi YJ, Wang ZY, Lu YJ. Habitat suitability index model of four major Chinese carp species in the Yangtze River. In: Ferreira, Alves, Leal, et al. eds. *River Flow 2006*. London: Taylor & Francis Group, 2006, 2195—2201
 - 20 易雨君, 王兆印, 陆永军. 长江中华鲟栖息地适合度模型研究. *水科学进展*, 2007, 18(4): 538—543
 - 21 Agnew CT, Clifford NJ, Haylett S. Identifying and alleviating low flows in regulated rivers: The case of the Rivers Bulbourne and Gade, Hertfordshire, U.K. *Regulated Rivers: Research and Management*, 2000, 16: 245—266
 - 22 Strakosh TR, Neumann RM, Jacobson RA. Development and assessment of habitat suitability criteria for adult brown trout in southern New England rivers. *Ecology of Freshwater Fish*, 2003, 12: 265—275
 - 23 Qu XD, Tang T, Xie ZC, et al. Distribution of the macroinvertebrate communities in the Xiangxi River system and their relationship with environmental factors. *Journal of Freshwater Ecology*, 2005, 20(2): 233—238
 - 24 李凤清, 叶麟, 刘瑞秋, 等. 香溪河流域水体环境因子研究. *生态科学*, 2007, 26(3): 199—207
 - 25 叶麟, 黎道丰, 唐涛, 等. 香溪河水质空间分布特性研究. *应用生态学报*, 2003, 14(11): 1959—1962
 - 26 Fu XC, Tang T, Jiang WX, et al. Impacts of small hydropower plants on macroinvertebrate communities. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(1): 45—52
 - 27 Tang T, Cai QH, Liu RQ, et al. Distribution of epilithic algae in the Xiangxi River system and their relationships with environmental factors. *Journal of Freshwater Ecology*, 2002, 17(3): 345—352
 - 28 Tang T, Qu XD, Li DF, et al. Benthic algae of Xiangxi River, China. *Journal of Freshwater Ecology*, 2004, 19(4): 597—604
 - 29 Tang T, Cai QH, Liu JK. Using epilithic diatom communities to assess ecological condition of Xiangxi River system. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2006, 112: 347—361
 - 30 吴乃成, 唐涛, 周淑婵, 等. 香溪河小水电的梯级开发对浮游藻类的影响. *应用生态学报*, 2007, 18(5): 1091—1096
 - 31 何长才. 香溪河鱼类资源调查. *湖北渔业*, 1990, 3: 84—86
 - 32 Jowett IG, Richardson JY. Microhabitats of benthic invertebrates in a New Zealand river and the development of in-stream flow-habitat models for *Deleatidium* spp. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 1990, 24: 19—30
 - 33 Quinn JM, Hickey CW. Characterization and classification of benthic invertebrate communities in 88 New Zealand rivers in relation to environmental factors. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 1990, 24: 387—409
 - 34 Leclerc M, St-Hilaire A, Bechara J. State-of-the-art and perspectives of habitat modeling. *Canadian Water Resources Journal*, 2003, 28(2): 153—172
 - 35 Vadas RL, Orth DJ. Formulation of habitat suitability models for stream fish guilds: Do the standard methods work? *Transactions of the American Fisheries Society*, 2001, 130: 217—235
 - 36 Vismara R, Azzellino A, Bosi R, et al. Habitat suitability curves for brown trout (*Salmo trutta fario* L.) in the river Ad-da, northern Italy: Comparing univariate and multivariate approaches. *Regulated Rivers: Research and Management*, 2001, 17: 37—50
 - 37 Goppel CJ, Stewardson MJ. Use of wetted perimeter in defining minimum environmental flows. *Regulated River: Research and Management*, 1998, 14(1): 53—67
 - 38 Shang SH. A multiple criteria decision-making approach to estimate minimum environmental flows based on wetted perimeter. *River Research and Applications*, 2008, 24: 54—67
 - 39 Saaty TL. *The Analytic Hierarchy Process*. New York: McGraw Hill Inc, 1980
 - 40 叶麟. 三峡水库香溪河库湾富营养化及春季水华研究. 中国科学院水生生物研究所博士论文, 武汉, 2006
 - 41 Tennant DL. Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources. *Fisheries*, 1976, 1(4): 6—10
 - 42 谭红武, 刘兰芬, 陈凯麒. 河流中水利工程下游最小生态流量确定方法研究——以海南省宁远河大隆水利枢纽为例. 见: 国家环境保护总局环境影响评价管理司编著. *生态环境保护研究与实践*. 北京: 中国环境科学出版社, 2006, 139—146
 - 43 Degani G, Herbst GN, Ortal R, et al. Relationship between current velocity, depth and the invertebrate community in a stable river system. *Hydrobiologia*, 1993, 263(3): 163—172
 - 44 Harvey BC, Marti CD. The impact of dipper, *cinclus mexicanus*, predation on stream benthos. *Oikos*, 1993, 68(3): 431—436
 - 45 Beisel JN, Usseglio-Polater P, Thomas S, et al. Stream community structure in relation to spatial variation: The influence of mesohabitat characteristics. *Hydrobiologia*, 1998, 389: 73—88
 - 46 Brooks AJ, Haeusler T, Reinfelds I, et al. Hydraulic microhabitats and the distribution of macroinvertebrate assemblages in riffles. *Freshwater Biology*, 2005, 50: 331—344
 - 47 何涛. 宝兴河碛滩和火溪河阴坪等水电站下泄生态用水措施设计. 见: 国家环境保护总局环境影响评价管理司编著. *生态环境保护研究与实践*. 北京: 中国环境科学出版社, 2006, 123—131
 - 48 倪晋仁, 崔树彬, 李天宏, 等. 论河流生态环境需水. *水利学报*, 2002, 9: 14—19