

基于鱼类保护目标的椒江环境流量研究*

王西琴¹ 张 远^{2**} 刘昌明³

(1. 中国人民大学农业与农村发展学院 北京 100872; 2. 中国环境科学研究院流域水生态保护技术研究室
北京 100012; 3. 中国科学院地理科学与资源研究所 北京 100101)

摘 要 以鱼类为保护目标,通过建立概念模型将鱼类保护目标与流量之间的关系相联系,识别了与椒江鱼类保护目标相关的环境流量组成要素。采用 FLOWS 方法,计算了椒江 2 个断面的环境流量,柏枝岙断面的低流量为 $6.8\sim 17.3\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 、高流量为 $22.2\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$,低流量脉冲为 $74\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$,高流量脉冲为 $110\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$,齐岸流量为 $948\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$;灵海断面的低流量为 $16.0\sim 31.8\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$,高流量为 $46.0\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$,齐岸流量为 $2\,488\sim 3\,184\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 。并得出每组环境流量出现时间、持续时间和出现频率等的推荐结果。与 Tennant 方法的计算结果比较,采用 FLOWS 计算方法能够反映环境流量的季节性变化特点,同时体现了环境流量与自然流量过程的一致性。此研究结果可为椒江的水资源合理利用与河流生态系统保护提供理论依据。

关键词 椒江 环境流量 鱼类 保护目标 FLOWS 法 Tennant 法 河流断面 流量 脉冲
中图分类号: S274 文献标识码: A 文章编号: 1671-3990(2011)03-0712-06

Using fish conservation as object to estimate environmental flow in Jiaojiang River

WANG Xi-Qin¹, ZHANG Yuan², LIU Chang-Ming³

(1. School of Agricultural Economics and Rural Development, Renmin University of China, Beijing 100872, China; 2. Laboratory of Riverine Ecological Conservation and Technology, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 3. Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract A relationship between fish conservation object and flow rate was developed using a concept model. In Jiaojiang River, fish was considered as the main conservation object in identifying the key components of environmental flow. Then environmental flow in two monitored sections was estimated via FLOWS method. In the Baozhiao section, the low, highest and full bank flows were $6.8\sim 17.3\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$, $22.2\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ and $948\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$, respectively. Also the low and high flow pulses were $74\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ and $110\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$, respectively. In the Linghai section, the low, high and full bank flows were $16.0\sim 31.8\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$, $46.0\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ and $2\,488\sim 3\,184\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$, respectively. The suitable environmental flow occurrence time, duration and frequency were also estimated. Compared with the Tennant method, the results from FLOWS method better reflected the seasonal characterizes of environmental flow in the river. The study also simulated the interconnection between environmental and natural flow. The findings therefore laid the theoretical basis for water resources utilization and fish conservation in Jiaojiang River.

Key words Jiaojiang River, Environmental flow, Fish, Protection object, FLOWS method, Tennant method, River section, Flow, Pulse

(Received Mar. 30, 2010; accepted Nov. 11, 2010)

随着全球范围对河流生态系统恢复关注程度的增加,维持河流健康所必需的环境流量的研究也日益广泛和深入。当前,约 850 多项河流流量恢复工作在至少 50 个国家展开^[1],意味着河流生态系统对

于水体的需求在供水规划中的重要性日益显现。目前已经有 6 类 200 多种估算环境流量的方法被应用^[2]。我国的研究方法已经从最初的水文学方法^[3],发展到后来的水力学方法^[4]、生物栖息地方法^[5]等。

* 国家自然科学基金项目(51079155)和国家水体污染控制与治理科技重大专项(008ZX07526-007-03, 2009ZX07212-002-003)资助

** 通讯作者: 张远(1970-), 男, 博士, 研究员, 研究方向为流域生态学。E-mail: zhangyuan@craes.org.cn

王西琴(1965-), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为水资源管理、环境流量。E-mail: wxiqin@ruc.edu.cn

收稿日期: 2010-03-30 接受日期: 2010-11-11

以生物为保护对象的研究不断增加,对于水生生物与流量之间的关系研究以及以生物为保护目标的环境流量研究逐渐展开并得到重视^[6-7]。鱼类是河流生态系统的顶级群落,与其他水生生物的监测数据相比,具有容易获得、便于管理等特点,然而,由于我国长期以来缺乏生物数据的监测资料,使得鱼类作为保护目标的环境流量研究受到一定的限制,还有许多问题有待研究。本文以浙江省椒江鱼类为保护目标,通过建立保护目标与流量之间的关系,确定环境流量要素,并在此基础上,采用水文学与水力学相结合的方法,进行环境流量的计算,以期为椒江的水资源合理利用与河流生态系统保护提供理论依据。

1 椒江概况及需要优先保护的鱼类

椒江是浙江省八大水系之一,属于湿润亚热带地区河流,主流发源于仙居县与缙云县交界的天堂尖,流经仙居县、临海市至黄岩区三江口与永宁江汇合后称“椒江”,最终入台州湾汇入东海,主流全长 209.0 km,多年平均径流量约 $90.8 \times 10^8 \text{ m}^3$,流域面积 6 603 km²。主要支流包括始丰溪、朱溪、永宁江等。受降雨的影响,径流具有明显的季节性变化特征,多年平均 5~9 月份径流量占全年径流量的 60%~70%。椒江上游段因受切割破碎的山丘地貌影响,全境溪涧纵横分布,各干支流均为坡陡急流,属于洪水暴涨暴落的山区性河流,下游河道坡度平缓。

根据浙江省淡水水产研究所调查,椒江水系 1970 年代约有鱼类 97 种,包括淡水鱼类 73 种,其

中 59 种为纯淡水鱼类,半咸水鱼类有 24 种,14 种属于洄游鱼类。随着河道外引水的增加,加之水污染、河道内采砂等人类活动,鱼类的栖息地环境日益受到威胁。1970 年代后期以来,鱼类的数量、种类均出现减少趋势。如 1970 年上游生存的香鱼、凤鲚鱼、刀鲚鱼,1980 年代以前分布在河口地区的黄鱼、梅童鱼等,目前已经十分少见。椒江的鱼类具有重要的生态意义和经济价值,因此,恢复和保护椒江的鱼类成为未来水资源规划和管理考虑的重要内容。

本文依据数据的可获得性,选择刀鲚、香鱼、鳊鱼、倒刺鲃、草鱼、鲢鱼、青鱼等 7 种鱼类作为椒江的保护目标。根据以上 7 种鱼类对栖息地环境的需求,作为制定环境流量的依据,每种鱼类的生态习性见表 1。

2 环境流量计算方法

2.1 方法简介

建立保护目标与流量之间的响应关系,是确定环境流量的关键^[8]。然而,对于缺乏长期水生生物监测资料的地区,建立水文要素与鱼类之间的响应关系比较困难。在这种情况下,通过模拟自然流量状态,并建立设定保护目标与流量之间的假设关系,是一种比较好的解决途径^[9]。FLOWS 方法^[10]推荐的环境流量包括反映季节性变化特征的 7 种流量要素。该方法的特点是基于天然水文流量过程,从一些关键的流量组成及其与生态过程之间的联系,建立环境流量的机制,并试图提供整个生态系统包括河道、滨岸带、湿地等的需水。流量组成的量级通过应用水力模型得到,水力学模型将流量与水位、

表 1 椒江被保护的鱼类及其生态习性
Table 1 Protected fishes, its habits and ecological characteristics in Jiaojiang River

鱼类 Fish	成体生境 Adult habitat	产卵生境 Spawning habitat	幼体生境 Larval habitat	食性 Foodhabit	洄游特性 Migratory pattern	产卵期 Spawning period
刀鲚 Coilia ectenes	河流中游 Mid reach of river	芦苇丛, 河流中游 Among reeds, mid river reaches	河口 Estuary	杂食(藻类) Omnivorous (algae)	溯河产卵 Anadromous	3~8 月 Mar.~Aug.
香鱼 Plecoglossus altivelis	河流上游 Upper reach of river	淡水, 无淤泥的沙砾河床 Freshwater, silt free gravel beds	下游 Lower reaches	杂食(底栖类) Omnivorous (benthivore)	溯河产卵 Anadromous	3 月 Mar.
倒刺鲃 Spinibarbus sinensis	河流 Riverine	流动水体, 流域上游 Flowing waters, upper reach of river	河流 Riverine	浮游动物, 浮游生物 Zooplankton, planktonic	淡水洄游 Freshwater migration	5~9 月 May~Sep.
鳊鱼 Aristichthys nobilis	河流 Riverine	流动水体, 流域上游 Flowing waters, upper reach of river	河流 Riverine	浮游动物, 底栖类, 浮游生物 Zooplankton, benthic and planktonic	淡水洄游 Freshwater migration	5~9 月 May~Sep.
草鱼 Ctenopharyngodon idellus	河流 Riverine	流动水体, 流域上游 Flowing waters, upper reach of river	河流低地 Lowland rivers	维管束植物, 藻类 Vascular plants, algae	淡水洄游 Freshwater migration	4~5 月 Apr.~May
鲢鱼 Hypophthalmichthys molitrix	河流 Riverine	流动水体, 流域上游 Flowing waters, upper reach of river	河流 Riverine	浮游植物 Phytoplankton, detritus	淡水洄游 Freshwater migration	4~5 月 Apr.~May
青鱼 Mylopharyngodon piceus	河流, 水库 Rivers, reservoirs	流动水体, 流域上游 Flowing waters, upper reach of river	河流低地 Lowland rivers	浮游动物, 底栖类, 浮游生物 Zooplankton, benthic and planktonic	淡水洄游 Freshwater migration	4~5 月 Apr.~May

流速、深度等相联系,在缺乏水力学模型的情况下,流量组成也可以基于水文学的统计标准确定。

具体步骤如下: (1)确定保护目标。根据水文学、地貌和生态学要素,可将河流划分为若干个河段,并依据各河段的功能和资产的重要性确定每个河段的优先保护目标,如鱼类、生物栖息地等。(2)识别关键的流量要素。根据水文情势、生物生态习性等,建立保护目标与流量之间的定性关系,一般用概念性模型表示,并识别环境流量的组成要素。(3)建立水力学标准。对于每一保护目标,给出具体的水力学标准,如流速、水深等,作为满足这个目标的生态需水计算依据,在缺乏水力学模型的情况下,可以采用水文学统计方法代替。(4)通过水力学模型,确定满足这些生态目标所需要的水力学参数所对应的流量。(5)提出一套包括流量、频率、持续时间等的

可供选择的环境流量。

2.2 环境流量的组成要素

采用 IHA 水文学统计软件^[11],分析椒江典型水文站日流量变化。可以看出,日流量过程线表现出明显的波动性特点(图 1),在不同保证率下,这种波动性的幅度表现出差异,在 25%保证率下,可以很明显地看出反映水文过程的低流量、低流量脉冲、高流量、高流量脉冲和洪水等水文要素。低流量出现的时间在 1~3 月和 10~12 月,低流量脉冲在 2 个时期均有,高流量出现在 4~6 月,洪水出现在 6~7 月。

根据鱼类生态习性以及对不同流量组分的需求,结合水文过程分析,建立两者的响应关系,用概念性模型表示(图 2)。从概念模型确定环境流量组成要素包括:低流量、低流量脉冲、高流量、脉冲流量、齐岸流量和漫滩流量等。

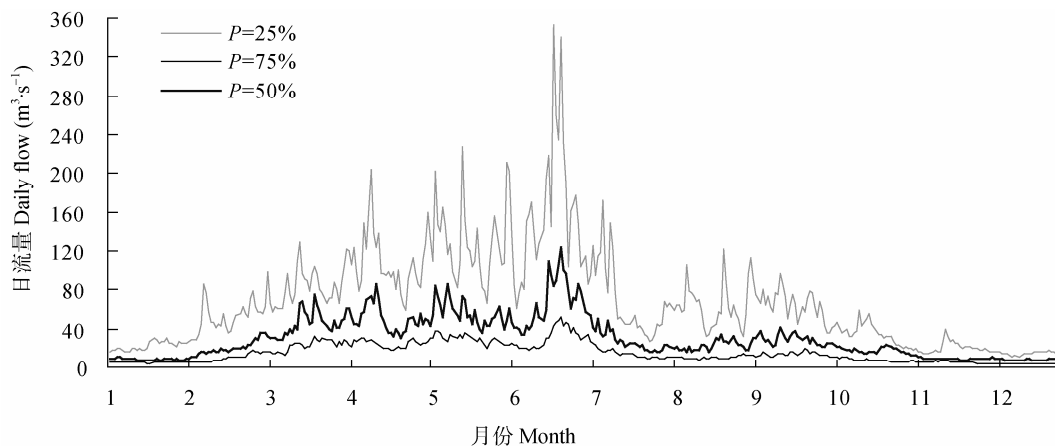


图 1 不同保证率(P)下椒江典型断面日流量变化过程

Fig. 1 Daily flow variation process under different assurance rate (P) at typical sections of Jiaojiang River

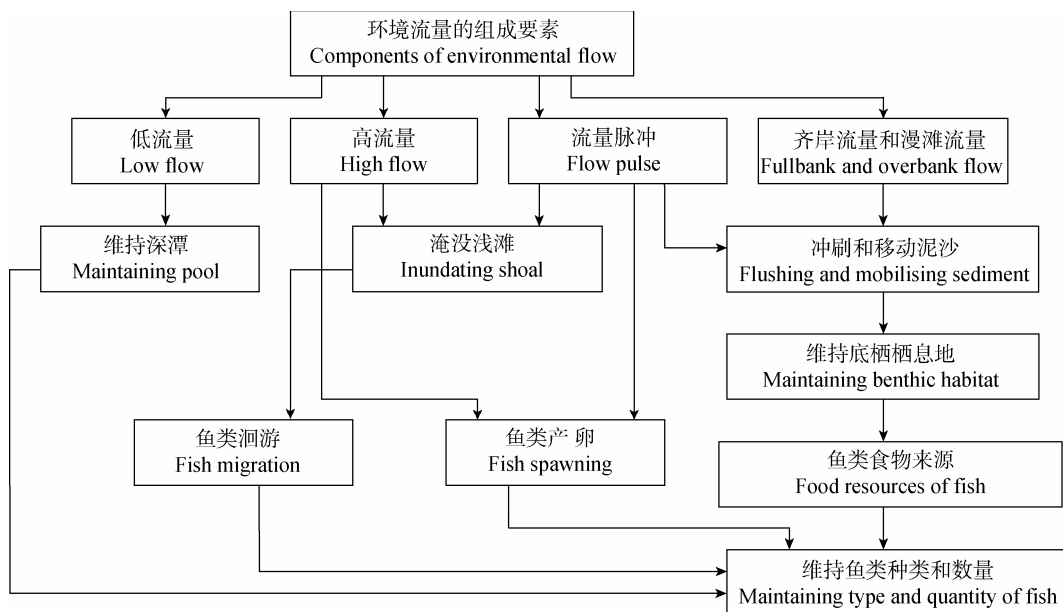


图 2 椒江鱼类保护目标与流量之间关系的概念模型

Fig. 2 Concept model of the relationships between the target of fish protection and flows in Jiaojiang River

2.3 推荐的环境流量

选择椒江柏枝岙水文站(以下称断面 1)、灵海水文站(以下称断面 2), 确定这 2 个断面的环境流量。水力学参数以及对应的流量见表 2。

依据 7 种鱼类对水力生境的需求, 采用美国陆军工程兵团开发的 HEC-RAS 一维水力学模型, 建

立流量与水深、流速之间的水力学模型。计算出以上 2 个水文站所在断面鱼类需求的环境流量。数量值从水力学模型获得, 其他参数如频率、持续时间、洪水、时间分布等, 通过水文统计软件 IHA 确定。通过以上分析与计算, 确定椒江 2 个断面满足鱼类生存需求的环境流量(表 3)。

表 2 椒江鱼类保护目标的环境流量组成和水力学参数
Table 2 Environmental flow components and hydraulic parameters based on the protection target of fishes in Jiaojiang River

目标 Target	鱼类 Fishes	环境流量组成 Environmental flow components	水力学参数 Hydraulic parameters
为鱼类维持水塘中足够的水深 To maintain minimum water depths for fish in pools	鲤科鱼类 Fishes of Cyprinidae	低流量 Low flow	河段 1, 深潭, $h>1.5$ m; 河段 2, 深潭, $h>3$ m Reach 1, pools, $h>1.5$; reach 2, in pool, $h>3$ m
维持浅滩和河道外淤积栖息地的足够水深 To maintain sufficient depth of deposition habitats in shoals and outside river channel	浅滩性鱼类, 如倒刺鲃 Shoal fishes, such as spinibarbus denticulatus	低流量脉冲 Low flow pulse	河段 1, $h>0.2$ m Reach 1, $h>0.2$ m
在高流量期提供栖息地, 诱发鱼类产卵, 并维持半漂浮性鱼卵在水体中的运动 During the high flow period, to provide habitat, induce fishes spawning and maintain transport of semibuoyant eggs within the water column	草鱼、鲢鱼、鳙鱼 Ctenopharyngodon, hypophthalmichthys molitrix, aristichthys nobilis	高流量 High flow	河段 1, 平均 $V>0.15$ m·s ⁻¹ ; 河段 2, $V>0.25$ m·s ⁻¹ Reach 1, mean $V>0.15$ m·s ⁻¹ , Reach 2, mean $V>0.25$ m·s ⁻¹
刺激繁殖洄游, 维持纵向的连通性 To stimulate spawning migration and maintain longitudinal connectivity	溯河洄游性鱼类和淡水洄游性鱼类 Fishes of anadromous and freshwater migration	高流量脉冲 High flow pulse	河段 1, $h>0.25$ m Reach 1, $h>0.25$ m
获取食物或进入泛洪区栖息 To obtain the food or access to floodplain habitats	溯河洄游性鱼类和淡水洄游性鱼类 Fishes of anadromous and freshwater migration	齐岸流量或者漫滩流量 Bankfull flow or overbank flow	河段 1, $h>1.74$ m; 河段 2, 需要足够的水深以淹没泛洪区湿地, $h>7.5$ m。 Reach 1, $h>1.74$ m; reach 2, sufficient depth to inundate the floodplain such as wetlands, $h>7.5$ m

表 3 椒江环境流量推荐结果
Table 3 Recommended environmental flows of Jiaojiang River

断面 Section	环境流量要素 Components of environmental flow	出现时间 Appearance time	峰值流量 Peak flow (m ³ ·s ⁻¹)	日流量 Daily flow (m ³ ·s ⁻¹)	频率 Frequency (times·a ⁻¹)	持续时间 Duration time (d·a ⁻¹)	频率状态 Frequency condition	上涨/保持/ 退水时间 Rise/event/ fall time (d)
伯枝岙 监测断面 Baozhiao section	低流量 Low flow	10~1 月 Oct.~Jan.	6.8	6.8	天然 Natural		天然 Natural	
	低流量 Low flow	2~3 月 Feb.~Mar.	17.3	17.3	天然 Natural		天然 Natural	
	低流量 Low flow	4~9 月 Apr.~Sep.	22.2	22.2	天然 Natural		天然 Natural	2/4/3
	低流量脉冲 Low flow pulse	10~3 月 Oct.~Mar.	96.0	74.0	4.00	连续 4 d Continuous 4 d	每年 Each year	2/7/3
	高流量脉冲 High flow pulse	4~9 月 Apr.~Sep.	146.0	110.0	6.00	连续 5 d Continuous 5 d	每年 Each year	2/1/2
	齐岸流量 Bankfull flow	天然 Natural	1 289.0	948.0	1.30	1 d ¹⁾	天然 Natural	
	低流量 Low flow	10~1 月 Oct.~Jan.		16.0	连续 Continuous		天然 Natural	
灵海断面 Linghai section	低流量 Low flow	2~3 月 Feb.~Mar.		31.8	连续 Continuous		天然 Natural	
	低流量 Low flow	4~9 月 Apr.~Sep.		46.0	连续 Continuous		天然 Natural	1/1/1
	齐岸流量 Bankfull flow	天然 Natural	3 110.0	2 488.0	0.59	1 d	水深 7.0 m Water deep 7.0 m	1/1/1
			3 545.0	2 836.0	0.48	1 d	水深 7.5 m Water deep 7.5 m	1/1/1
			3 980.0	3 184.0	0.45	1 d	水深 8.0 m Water deep 8.0 m	2/4/3

1)当日出现洪峰并满足日均流量要求 The flood peak appeared at the same day and met the requirements of average daily flow.

断面 1 和断面 2 的低流量分别为 $6.8\sim 17.3\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $16.0\sim 31.8\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$, 分别对应着不同的枯水季节 10 月至翌年 1 月和 2~3 月, 主要用以维持深潭、浅滩栖息地等。

断面 1 和断面 2 的高流量分别为 $22.2\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $46.0\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$, 时间是 4~9 月, 该流量可以使鱼类进出产卵场, 同时也为 1 年生的幼鱼和鱼苗提供足够的栖息地。

断面 1 的低流量脉冲为 $96\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ (瞬时峰值)和 $74\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ (日均), 这些流量脉冲同时也为鱼类在水潭之间的移动提供了机会, 每年 10 月至翌年 3 月间大约发生 4 次, 每次至少持续 4 d。断面 1 的高流量脉冲为 $146\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ (瞬时峰值)和 $110\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ (日均), 出现时间在 4~5 月, 以帮助大多数鱼类完成产卵、繁殖需求, 每年出现 6 次, 每次至少持续 7 d。因脉冲流量仅会对下游的盐度梯度产生一定的影响, 对断面 2 的水位基本无影响, 因此, 本文未推荐断面 2 的脉冲流量。

断面 1 齐岸流量约为 $1\ 289\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ (瞬时峰值)、 $948\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ (日均), 该流量需要每年发生 1.3 次, 或平均 3 年发生 4 次。由于断面 2 淹没湿地所需水深的不确定性, 分别计算了 7.0 m、7.5 m 和 8.0 m 的情景, 对应的齐岸流量分别为 $2\ 488\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $2\ 836\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $3\ 184\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$, 持续时间为 1 d, 发生频率约为每 2 年发生 1 次。

需要指出的是, 断面 1 所在的两岸有较长的防洪堤, 限制了漫滩流量进入洪泛区, 所以本文没有推荐漫滩流量。断面 2 所涉及的重要湿地, 仅齐岸流量就能够满足淹没湿地的需求, 故也未推荐漫滩流量。

将本文结果与 Tennant 法^[12]计算结果相比较(表 4), 可以看出前者计算出的低流量、高流量分别对应着后者推荐流量的“良好”~“较差或者最小”等级范围。断面 1 在枯水期对应着“良好”~“较差或最小”的

范围, 丰水期对应着“一般”等级; 断面 2 在枯水期对应着“良好”~“一般”, 丰水期仅对应着“好”, 且两者之间的相关性从上游到下游表现出逐渐降低的趋势。在枯水期 Tennant 法推荐的流量高于本文计算结果, 前者计算结果分别是 $29\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $48\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$, 后者分别是 $22\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $46\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$, 从而验证了 Tennant 方法在某些情况下(如在枯水期), 推荐的环境流量往往偏大的结论。其次, 在丰水期本文通过齐岸流量得以表现, 而 Tennant 法计算结果则不能体现这一特征。以断面 1 为例, 丰水期的脉冲流量分别是 $74\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $110\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$, 齐岸流量为 $948\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$, Tennant 法推荐的“极好”的流量为 $43\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 。可以看出 Tennant 法推荐的流量没有体现与自然流量的一致性, 也难以反映生物对流量的过程需求。

由此得出, 对于类似于椒江这样的季节性河流, 如果采用 Tennant 法计算, 难以体现自然过程的特点, 以及季节性的特点。

3 结论

(1)本文以鱼类为保护目标, 通过概念性模型, 建立了鱼类与流量要素之间的关系, 识别椒江的环境流量包括低流量、高流量、流量脉冲和齐岸流量。说明环境流量并不仅仅是一个数量问题, 而应该由一套水文参数组成, 并表现出与自然流量过程的一致性。

(2)本文采用 FLOWS 方法, 通过水文统计分析与水力学模型相结合, 推荐了椒江的环境流量。并将 FLOWS 法与 Tennant 法的计算结果进行了比较分析, 发现两者之间存在一定差异, 同时验证了 Tennant 方法在枯水期推荐的环境流量往往偏大的结论, 以及季节性河流在丰水期和枯水期的差异。进一步说明采用单纯的水文学方法计算的环境流量不能完全满足鱼类对水文过程自然变化特征的需求。

表 4 Tennant 法计算结果与 FLOWS 法计算的低流量、高流量结果比较
Table 4 Low flow and high flow calculated with FLOWS method and the Tennant method $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$

计算方法 Calculation method	项目 Item	伯枝岙监测断面(断面 1) Baozhiao section (section 1)		灵海监测断面(断面 2) Linghai section (section 2)	
		10~3 月枯水期 Oct.~Mar. dry season	4~9 月丰水期 Apr.~Sep. wet season	10~3 月枯水期 Oct.~Mar. dry season	4~9 月丰水期 Apr.~Sep. wet season
Tennant 分类等级 Tennant classification grade	极好 Outstanding	29	43	48	72
	良好 Excellent	22	36	36	60
	好 Good	14	29	24	48
	一般 Fair or degrading	7.2	22	12	36
	较差的或最小 Poor or minimum	7.2	7.2	12	12
	严重退化 Severe degradation	0	7.2	0	12
FLOWS	低流量、高流量 Low flow, high flow	6.8~17.3	22	16~32	46

(3)本文推荐的环境流量对于维持椒江流域的鱼类十分重要,然而该结论仅仅是一种理论上的研究,或者是一种理想的环境流量,因为环境流量在水资源配置过程中存在一定风险,这种风险不仅来自于河道外用水量的增加,而且还有来自于污染、采砂、防洪堤等非流量问题的影响。因此,仅仅满足本文确定的流量,远不能完全达到保护鱼类的需求,必须同时解决以上所有问题,才能将环境流量理论研究付诸实践,才能达到环境流量保护鱼类需求的目标。

参考文献

- [1] The Nature Conservancy. Ecological limits of hydrologic alteration integrating environmental flows with regional water management[EB/OL]. 2007-12-01. <http://www.nature.org/initiatives/freshwater/conservationtools/art17004.html>
- [2] 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
- [3] 李丽娟, 郑红星. 海滦河流域河流系统生态环境需水量计算[J]. 地理学报, 2000, 55(4): 495-500
- [4] 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): 42-49
- [5] 张文鸽, 黄强, 蒋晓辉. 基于物理栖息地模拟的河道内生态流量研究[J]. 水科学进展, 2008, 19(2): 192-197
- [6] 李凤清, 蔡庆华, 傅小城, 等. 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[J]. 自然科学进展, 2008, 18(12): 1417-1424
- [7] 蒋晓辉, Arthington A, 刘昌明, 等. 基于流量恢复法的黄河下游鱼类生态需水研究[J]. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2009, 45(5): 537-542
- [8] Welcomme R L, Winemiller K O, Cowx I G. Fish environmental guilds as a tool for assessment of ecological condition of rivers[J]. River Research and Applications, 2006, 22(3): 377-396
- [9] King J, Brown C, Sabet H. A scenario-based holistic approach to environmental flow assessment for rivers[J]. River Research and Applications, 2003, 19 (5/6): 619-639
- [10] Sinclair Knight Merz. The FLOWS method: A method for determining environmental water requirements in victoria[R]. 2008-09-24. http://www.envict.org.au/file/Flows_Methodology.pdf
- [11] The nature conservancy indicators of hydrologic alteration version 7 user's manual (Arlington, VA: The Nature Conservancy)[R]. 2008-09-24. <http://www.nature.org/initiatives/freshwater/conservationtools/art17004.html>
- [12] Tennant D L. Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources[J]. Fisheries, 1976, 1(4): 6-10