

DOI: 10.5846/stxb201501290244

帅方敏, 李新辉, 李跃飞, 杨计平, 李捷. 珠江东塔产卵场鳙繁殖的生态水文需求. 生态学报, 2016, 36(19): 6071-6078.

Shuai F M, Li X H, Li Y F, Yang J P, Li J. Analysis of the ecohydrological demands of bighead carp breeding in the Dongta spawning grounds of the Pearl River, via cross-wavelet analysis. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(19): 6071-6078.

珠江东塔产卵场鳙繁殖的生态水文需求

帅方敏, 李新辉*, 李跃飞, 杨计平, 李捷

1 中国水产科学研究院珠江水产研究所, 广州 510380

2 农业部珠江中下游渔业资源环境重点野外科学观测试验站, 肇庆 526100

3 中国水产科学研究院珠江流域渔业资源养护与生态修复重点实验室, 广州 510380

摘要: 鳙 (*Aristichthys nobilis* (Richardson)), 我国著名的四大家鱼之一, 是一种重要的大型淡水经济鱼类。然而近年来由于各种原因, 我国鳙种群数量急剧下降。依据 2006—2013 年珠江中下游长时间序列仔鱼数据和日平均流量数据, 分析了研究水域鳙的繁殖生态, 包括仔鱼出现的时间分布特征和早期资源周年变化规律, 同时采用交互小波光谱分析方法 (cross wavelet analysis), 分析了径流量与鳙仔鱼多度的关系。发现珠江水系鳙早期资源发生主要在 5 至 8 月, 2006—2011 年早期补充资源量逐渐减少, 2012—2013 年间呈明显显著增加; 鳙早期资源年度出现的时间呈缩减趋势, 其中最大繁殖量出现的时间逐年提前。交互小波光谱分析结果表明: 径流量的改变与鳙仔鱼的多度显著正相关, 当径流量大于 $5 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$, 且持续 2d 以上, 是珠江水系鳙大量繁殖的基础, 将对受梯级水坝控制的鳙产卵场的繁殖生态水文保障具有指导意义。

关键词: 交互小波; 珠江; 鱼卵; 仔鱼; 径流量; 鳙

Analysis of the ecohydrological demands of bighead carp breeding in the Dongta spawning grounds of the Pearl River, via cross-wavelet analysis

SHUAI Fangmin, LI Xinhui*, LI Yuefei, YANG Jiping, LI Jie

1 Pearl River Fisheries Research Institute, CAFS, Guangzhou 510380, China

2 Experimental Station for Scientific Observation on Fishery Resources and Environment in the Middle and Lower Reaches of Pearl River, Ministry of Agriculture, Zhaoqing 526100, China

3 Key Laboratory of the Conservation and Ecological Restoration of Fishery Resource in the Pearl River, Guangzhou 510380, China

Abstract: Bighead carp, *Aristichthys nobilis* (Cyprinidae, Hypophthalmichthys), is one of the four big traditional domestic carp species (along with black carp, grass carp, and silver carp). It is a large fish of high commercial importance because of its palatability and popularity with Chinese consumers. The size of the bighead carp population in China has decreased significantly in recent years, because of various environmental stressors and habitat losses due to dam construction, pollution, and overfishing. In this study, we investigated the ecology of bighead carp breeding in the Pearl River, which is a large subtropical river and the longest river in southern China. This study was based on a dataset generated by sampling at a fixed station ($23^\circ 2' 40'' \text{ N}$, $112^\circ 27' 5'' \text{ E}$) every 2 d, from 2006 to 2013. The earliest bighead carp larvae were captured on April 13, 2008, and the latest were found on October 7, 2006. The breeding season primarily lasted from May to August and accounted for 99% of all annual spawning. The total number of larvae found decreased gradually from 2006 to 2011, and then increased significantly in 2011. The date of the earliest recorded spawning did not change over the years, but the

基金项目: 国家自然科学基金青年项目 (31400354); 农业部公益性行业专项 (201303048); 省自然科学基金重大项目 (2013GXNSFEA053003)

收稿日期: 2015-01-29; **网络出版日期:** 2016-01-15

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lxhui01@aliyun.com

date of the latest spawning day occurred earlier each year, indicating that the length of the spawning period (interval between the first and last spawning days of the year) has decreased over time. Our results also show that peak spawning occurs earlier each year. We used cross-wavelet analysis with phase angle and coherency parameters to analyze the relationship between the abundance of bighead carp larvae and the local hydrological conditions. Simulation studies have shown that the spectral signature produced by the cross-wavelet method is a useful approach to developing an objective and quantitative understanding of how river discharge affects the population size of bighead carp larvae. Discharge was positively correlated with the abundance of bighead carp larvae, though larval occurrence always lagged behind discharge. That is, water discharge acted as a trigger for the spawning of bighead carp. Simulation studies have shown that an increase in water discharge $>5 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$ and lasting at least 2 d is a prerequisite for the bloom spawning of bighead carp in the Pearl River. This study was undertaken as part of a long-term investigation of the Pearl River's wild fisheries resources, and our results will help guide their protection and management. The wavelet approach is a particularly promising method of analyzing ecological data such as the relationship between hydrological conditions and fish larva occurrence. Our results will help pave the way for the quantitative analysis of the impact of the environment on an organism. We propose that frequency and scale domain methods, in the form of wavelet transforms, can serve as useful probes during preliminary investigations of fisheries data, in order to elucidate the mechanisms underlying changes in fish diversity and abundance. We conclude with a discussion about the role wavelet analysis could play in appropriately guiding flexible probabilistic models linking fisheries with environmental covariates.

Key Words: cross wavelet analysis; Pearl River; fish egg; larvae; discharge; bighead carp

鳙 (*Aristichthys nobilis* (Richardson)), 又称胖头鱼, 花鲢, 中国著名四大家鱼之一。广泛分布于我国各地水域。因其鱼头大而肥, 鱼脑富含多不饱和脂肪酸, 可以改善大脑机能, 深受消费者喜爱, 是中国重要的淡水经济鱼类之一。同时鳙属于滤食性鱼类, 对于水质有清洁作用, 因而被引入到世界各地^[1-4]。然而, 中国境内鳙种群数量近年来却急剧下降, 主要原因是由于各种水工建设导致的洄游通道受阻, 产卵场损失以及过度捕捞等等。

珠江是我国南方第一大河, 是我国重要淡水渔业生产基地和水生生物资源基因库, 分布鱼类约 400 多种, 其中特有鱼类约 126 种, 被列入国家级水产种质资源保护品种的有 25 种。珠江渔业资源在维持地球生物多样性、提供渔业发展的鱼类种质资源方面均举足轻重。然而几十年来, 水坝、航道工程建设和过度捕捞使鱼类通道受阻、产卵场功能消失, 导致渔业资源急剧衰退, 鱼类等水生生物种类及数量大幅减少。20 世纪 60 年代, 鳙在渔获物中的重量比可以达到 8%^[5], 自珠江中下游修建长洲坝后, 包括鳙在内的大多数鱼类的产卵时间和历史资料相比有推迟现象^[6]。本课题组对珠江水系渔业资源长达 8a 的监测中发现, 在肇庆江段, 鳙在所有渔获物中的比例不足 1%。2006 年以来, 在珠江的两条主要支流, 东江和北江已经无法监测到鳙鱼苗, 西江桂平以上也只能偶见鳙鱼苗。2006—2013 年西江肇庆段鳙鱼苗的资源量仅占监测鱼苗的 0.12%—1.11% (平均 0.65%)。

已有研究表明鳙的繁殖受河流水文的影响^[7-9], 针对长江流域, 已有较深入的研究^[10-12]。但是水文是如何影响鳙的繁殖的, 以及其影响机制如何, 特别是珠江流域, 并不清楚。研究径流对仔鱼发生的影响机制对于渔业资源保护与管理具有重要意义。本研究基于珠江下游连续 8 年的长时间序列数据, 目的在于找出鳙的繁殖生态及与径流量的关系, 进而针对产卵场阐明鳙的繁殖水文要求, 为制定满足鳙繁殖的生态水文基流提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 研究对象

鳙 (*Aristichthys nobilis*), 属鲤科、鲤形目、辐鳍鱼纲, 广泛分布于我国各地水域, 具有生殖洄游习性, 产漂浮

性卵^[13]。本研究的主要对象就是孵化出膜后尚不具明显的主动游泳阶段的鳙仔鱼。

1.2 采样地

珠江西江干流桂平东塔产卵场是珠江最大的“四大家鱼”产卵场。下游的肇庆江段(23°2′40″N, 112°27′5″E)是漂流性鱼卵和仔鱼进入三角河网的必经之道^[6]。因此本研究的采样点设于肇庆渔政码头上游约 50m 处(23°2′40″N, 112°27′5″E), 利用筛网进行鱼苗样品定点采集, 网具定置于离岸约 10m 处。

1.3 数据收集

固定点连续监测参照易伯鲁等^[14]的方法进行, 使用定量筛网采集, 网口逆水流方向固定于水中。筛网网口为 1.5 m×1.0 m 长方形, 网体呈四棱锥形, 后部长 6 m 窄缩成锥形后连接一个规格为 0.8 m×0.4 m×0.4 m 小网箱, 用做仔鱼的集合池, 网目均为 0.5 mm。自 2006 年起每隔一天进行采样(部分洪水期少数天未采样), 一天三次(06:00—08:00, 13:00—15:00, 19:00—21:00)^[15]。采集到的鱼卵和仔鱼用 5% 的甲醛溶液固定, 带回实验室进行种类鉴定。鉴定依据梁秋桑^[16]《西江 49 种鱼类早期形态发育特征》和实验室对天然野鱼苗与人工繁殖鱼苗的的饲养观察资料。鱼苗发育期的划分依据易伯鲁等^[14]的方法。径流数据来源于全国水文信息网 <http://xxfb.hydroinfo.gov.cn/>。

1.4 数据分析

小波分析(wavelet analysis)或小波转换(wavelet transform)的概念最早由法国石油信号处理工程师 J. Morlet 在 1974 年首先提出, 之后由比利时女数学家 I. Daubechies 撰写的《小波十讲(Ten Lectures on Wavelets)》对小波进行了普及与推动, 现已应用于各行业, 包括生态学领域^[17-19]。

小波分析是把一个信号一层一层的拆解开来, 这样就可以在不同的维度去分析这个信号。小波分析是指用有限长或快速衰减的母小波 $\Psi(t)$ (mother wavelet) 的振荡波形来表示信号, 该波形被缩放和平移以匹配输入的信号, 采用时间和尺度将信号转化。假设时间 $t \in [1, T]$, 则母小波满足公式 $\int_1^T \Psi(t) dt = 0$, 因此可以将 m 尺度 n 时间下的小波 $\Psi_{m,n}$ 定义为 $\Psi_{m,n}(t) = \frac{1}{\sqrt{m}} \Psi(\frac{t-n}{m})$, $m \in R^+$, $n \in [1, T]$, 对于时间序列函数

$f(t)$, m 尺度 n 时间下的小波系数则定义为 $w_{m,n}(f) = \int_1^T f(t) \Psi_{m,n}^*(t) dt$, * 则表示复共轭。尺度因子 m 和时间因子 n 都可以被看作是 f 函数的不同变换。

小波光谱(WPS)定义为 $2^j |W_{m,n}(f)|^2$, j 表示尺度, 用能量的分布来表征相关系数, 相位角表征两列波之间的时间关系。

交互小波分析主要用于比较和分析两列信号的共同信息^[20]。如果两列信号数据有某些共同的特征, 则交互小波分析能将这种共同信息高度凸显出来。相反, 如果两列信号没有关系, 则交互小波呈现弱相关性。对于两列时间序列数据, 交互小波能够用相位角和相关系数来表征二者之间的关系, 同时能找出二者在哪个时间段相关以及在哪个尺度相关, 能找出哪一列数据是因变量哪一列数据是自变量, 也即能定量指出环境因子是如何影响生物过程的。相关系数表示两列波之间的相关性, 处于 0 到 1 之间, 表示相关性从弱到强。相位角则是两列信号数据的相位差, 也即两列波的发生在时间上的交错表征。向上的相位角(↑)表示两列波同步, 可以同时达到最高点。λ 表示波长, 向下的相位角表示二者之间差 λ/2 时间, 如其中一列达到最高值,

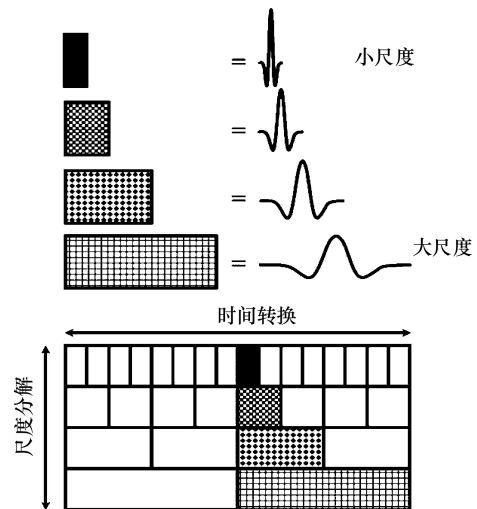


图1 小波分析原理图

Fig.1 The different parts of the time series are compared with a wavelet

母小波 $\Psi(t)$ 可以根据不同尺度进行变化

则另一列刚好达到其最低值。从左到右的相位角($\rightarrow$)则表示二者之间相差 $\lambda/4$ 时间,从右到左的相位角($\leftarrow$)则表示二者之间相差 $3\lambda/4$ 时间^[20]。本研究先将鱼苗密度换算成为滤过网口 100m^3 的仔鱼数量(尾/ 100m^3),并将数据 Morlet Wavelet Transform 转换方法标准化,获得鳊鱼苗的长序列发生的数据。本研究采用交互小波光谱 WPS 定量分析净流量与鳊早期资源多度之间的关系,定量研究水文如何作用于鳊仔鱼的多度,并选择 95% 的置信区间作为小波分析的显著性检验。

同时记录最早和最迟鳊仔鱼收集日期,将最早和最迟之间的时间作为繁殖期,将仔鱼最大量收集日期定为最大繁殖期。因为珠江肇庆江段的平均径流量为 $10^4 \text{ m}^3/\text{s}$ ^[21],因此,本研究将径流量大于 $10^4 \text{ m}^3/\text{s}$ 的时间段定义为洪峰期,利用 Spearman rank correlation 分析检验繁殖期的改变与径流量的关系。

2 结果

2.1 鳊产卵特征

鳊产卵期从 4 到 10 月,最早发生于 2008 年 4 月 13 日,最晚 2006 年 10 月 7 日。繁殖季节主要集中于 5 月到 8 月,这 4 个月繁殖量占有所有繁殖量的 99%。其中 6 月繁殖量最大,占有所有繁殖量的 38.37%。本研究期间,最早发生日期没有明显改变,但最晚发生日期有提前趋势(图 2),因此繁殖期有缩减的趋势(violin 图长度逐年减小)。最大产卵日期(最大量仔鱼收集日期,图 2 中以每个 violin 图的最大宽度表示)逐年显著提前。从图 2 也可以看出鳊的繁殖时间有提前的趋势。

2.2 鳊仔鱼的小波光谱分析结果

通过对 2006—2013 年收集到的鳊仔鱼数据进行小波分析,光谱能量以颜色表示,能量的强弱表示产卵量的多少,颜色由蓝到红表示能量光谱由弱到强,也即产卵量由少到多。图 3 中光谱能量的周期性震荡与鳊每年的季节性产卵繁殖一致。在 32 尺度以下,年度之间具有相似的能量时间间隔和繁殖周期。2008、2012 和 2013 年具有较强的能量光谱,也即这几年鳊的繁殖量较高。相反,2007 和 2011 年有相对较弱的光谱,这两年产卵量较少。总繁殖从 2006—2011 年逐渐减少,但是 2011 年之后显著增加,说明珠江水系鳊资源量有所恢复。

2.3 径流量的小波光谱分析结果

径流量小波光谱能量图与每年的季节性流量特征一致。高能量代表高径流量,高温季节具有较大的净流量,低温季节径流量低。在 16 尺度以下,都可以看到每年明显的季节性流量特征。在尺度 12 左右,有几个能量峰存在于 2008 和 2013 年,表明这两年存在几个洪峰(图 4)。

2.4 径流量与仔鱼发生的关系

交互小波的能量光谱图颜色表征径流量与仔鱼量之间的相关关系,由蓝到红,表示相关性由弱到强。图

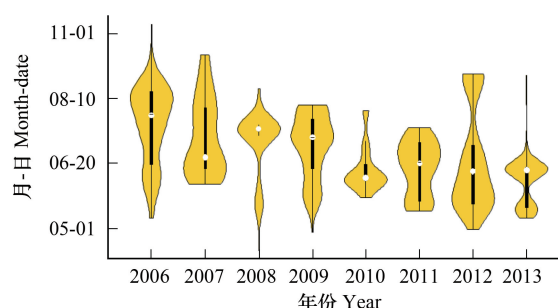


图 2 鳊繁殖特征的 violin 图

Fig.2 The violin plot of the occurrence characteristics of bighead carp larvae

每个 violin 图的垂直长度代表繁殖日期的时间分布,水平宽度代表每一天的繁殖量;白色小点表示数据分布的中值,黑色小矩形框代表分位数

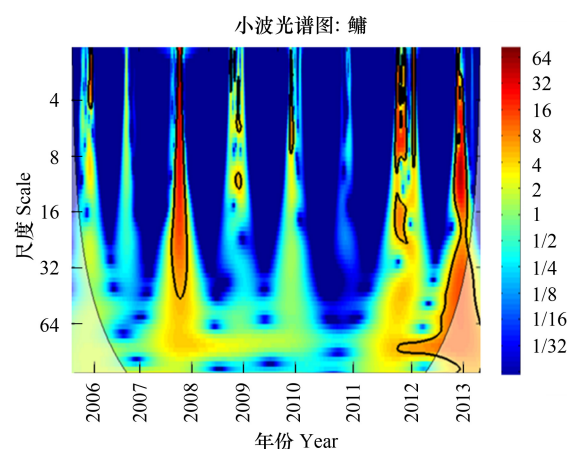


图 3 鳊的繁殖量能量光谱图(2006—2013)

Fig.3 WPS of the Bighead carp larval abundance between 2006 and 2013

U 形曲线之内表示 95% 置信区间内,对于置信区间外的图像属于边缘区,结果解释要谨慎;光谱能量以颜色表示,颜色由蓝到红表示能量光谱由弱到强

中各个尺度下的红色区域,表示径流量和仔鱼的发生在此期间及该尺度下显著正相关。从左到右的相位角表示仔鱼发生滞后于径流量的发生。具体结果见表 1。从 2006 年到 2013 年,在径流量与仔鱼显著相关的各个时间段,相位角都是从左到右的方向,也即鱼苗的发生都是在洪峰之后,净流量是仔鱼发生的刺激因子。具体相关时间段和滞后时间见表 2。二者相关的时间主要集中在每年的 6 月至 7 月。根据各显著相关时间段内相位角的方向,可以推断仔鱼的发生与洪峰的具体滞后时间。发现仔鱼的大量发生滞后于洪峰的时间最少为 2d(表 1),且径流量大于 $5\times 10^4\text{m}^3/\text{s}$ (图 6)。这表明洪峰持续数日(至少 2 日)且径流量大于 $5\times 10^4\text{m}^3/\text{s}$ 是鳊鱼苗大量发生的前提条件之一。

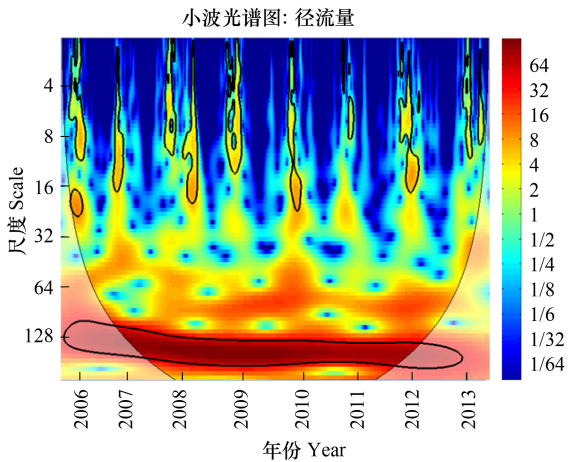


图 4 径流量的能量光谱图

Fig.4 WPS of the daily stream flow between 2006 and 2013

U 形曲线之内表示 95% 置信区间内。光谱能量以颜色表示,颜色由蓝到红表示能量光谱由弱到强

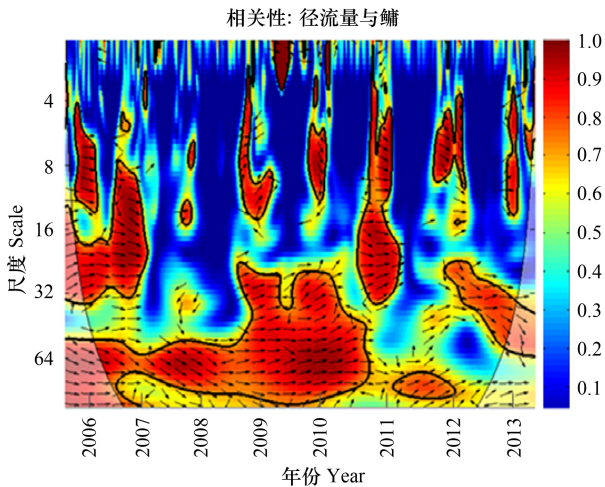


图 5 径流量与仔鱼量的小波光谱关系图

Fig.5 Illustration of relationship between discharge patterns and the WPS of larvae of Bighead carp

颜色表示相关系数,由蓝至红的颜色表征二者的相关性由弱到强;黑色箭头表示相位角,不同的方向表示不同的滞后时间

表 1 各年径流量与仔鱼发生显著相关的时间段及具体滞后时间

Table 1 Summary of information on full coherence between the abundance of larvae of Bighead carp and discharge in each year based on figure 6

年份 Year	区间 Period	分析尺度 Analyzing scale	相位角 Phase angle	波长(λ) Wavelength	滞后时间/d Lag time
2006	07-05—08-14	6—12	↘	16.2—32.4	4—16
2007	05-18—06-15	8—16	↘	21.6—43.2	5—22
2008	05-09—07-08	12—14	↗	32.4—37.8	8—9
2009	05-19—11-08	6—16	↗	16.2—43.2	4—10
2010	05-25—08-03	6—12	↘	16.2—32.4	4—12
2011	06-18—07-16	5—16	↘	13.5—43.2	3—22
2012	05-04—08-21	4—10	↘	10.8—27	2—7
2013	05-01—07-10	8—12	↗	21.6—32.4	5—8

3 讨论

河流径流量的改变对鱼类成功繁殖具有重要意义^[22-23]。涨落水变化和流量脉冲过程对鱼类产卵活动有一定影响^[24],洪峰过程^[25]和总涨水天数^[26]是决定产漂流性卵鱼类年产卵量多寡的一个重要环境因子。珠江水系里大多数的经济鱼类都受径流量的影响^[6]。现阶段,河流水坝的建设是一个普遍的现象,大坝的修建改变了河流的径流过程,进而影响鱼类多样性。珠江水系鳊产卵期从 4 月到 10 月,主要分布于 5 月到 8 月。

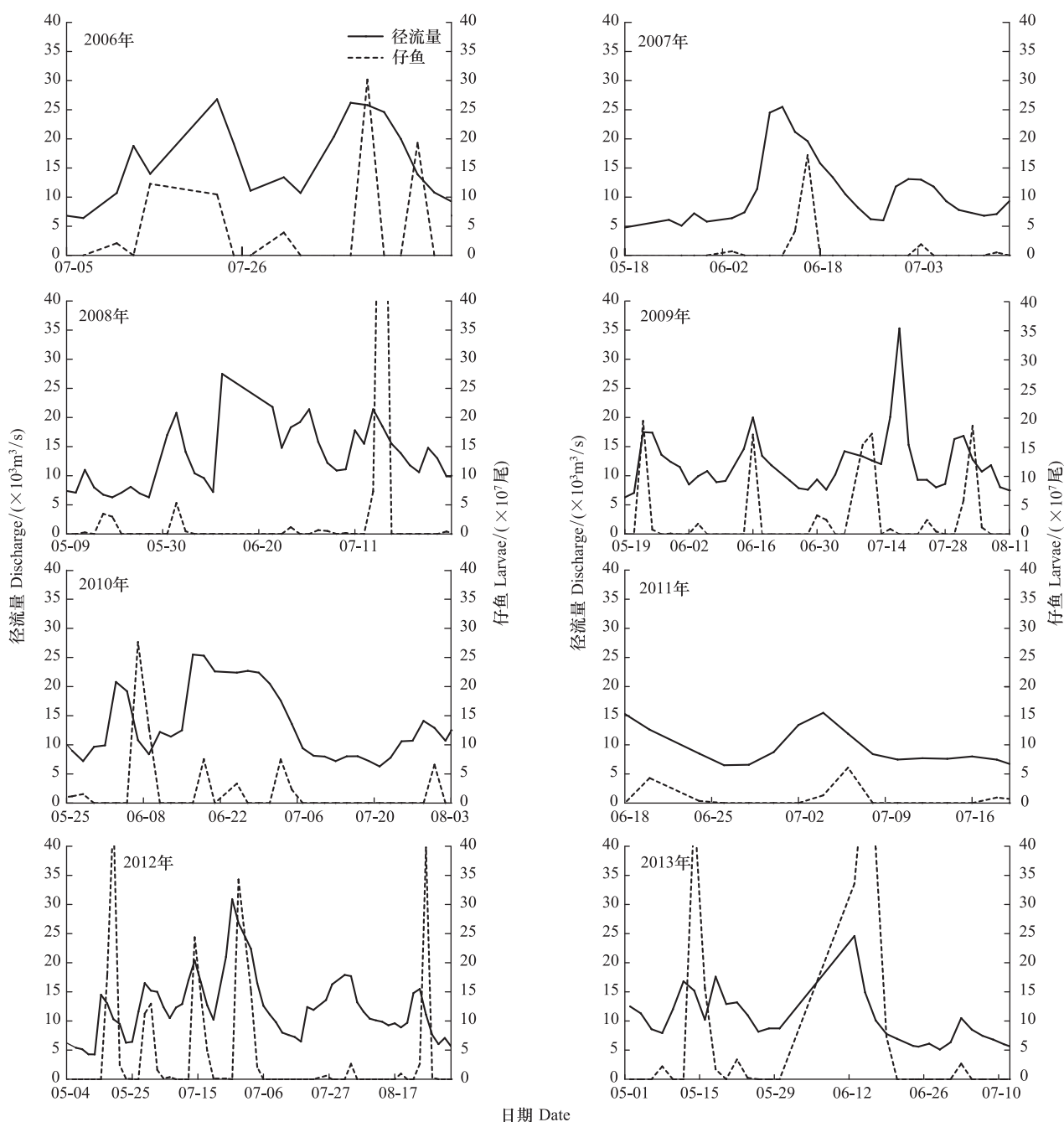


图6 各年度径流量与仔鱼发生显著相关的区域

Fig.6 Daily discharge and the larvae abundance at their significant related each year (2006—2013)

从2006—2011年总繁殖量逐渐减少,但是2011年之后显著增加,说明珠江水系鳙资源量有所恢复,这可能得益于整个珠江水系2011年开始实施的禁渔政策。但是整个繁殖期有缩减的趋势,这会对鳙种群更新产生影响。

已经有大量的研究证明鱼类的产卵与水文有直接关系,在仔鱼大量产生时都会有洪峰产生^[27-28],河流径流量的改变能够促进河流鱼类的产卵^[29],特别是一些鲤科鱼类^[30],这很可能是由于鱼类繁殖更新时的特殊环境需求所致^[31-33]。鳙等四大家鱼的产卵总是和连续的降雨或者天气的急剧变化有关^[34]。本研究结果也表明鳙仔鱼的发生量年度之间有差异,但径流量的变化是影响鳙种群更新的关键因素;客观定量的展现了珠江水系里径流量是如何作用于鳙仔鱼的发生的;径流量大于 $5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{s}$,且洪峰持续至少2天是珠江中下游鳙

鱼苗大量产生的前提条件。本研究结果也表明鳙最大仔鱼产生的日期显著提前,这除与径流过程发生变化有关外,可能还与全球变暖等因素有关,但其具体原因还需进一步分析验证。

基于本研究结果,可以假设河流流量的调控是恢复我国渔业资源的有效途径,特别是针对一些产漂流性卵的鱼类,如通过大坝控制流量脉冲来刺激鱼类产卵和增加漂浮性卵的漂浮时间已达到提高仔鱼存活率的目的来恢复渔业资源^[35]。因此,一种繁殖所需要的水文基流是保证某种鱼有基本繁殖的径流要求。是河流渔业资源保障的最低要求。另外一方面,包括鳙在内的我国四大家鱼已成为全球范围内的入侵种,他们的种群扩张非常迅速,这也表明入侵地有利于他们种群扩张的水文条件^[36],因此通过调节当地水文也是控制其种群过度扩张的方式之一。比如通过控制流量来控制 Salmonids 种群的扩张就是一个成功的案例^[37]。本研究结果对珠江水系鳙资源恢复与管理提供了理论指导。除此之外,了解鳙种群繁殖的影响因素也是控制其种群入侵的基础。

时间序列数据分析是生态学的基本研究内容之一^[38]。时间序列数据的信号内容经常包含了自然界各种生态过程及其作用机制,这些机制可能有不同的时间特征和尺度格局。长序列渔业数据是典型的非线性和不规则数据,对于这样的数据采取传统的统计分析方法,如相关分析等可能会丢失重要的信息^[17]。径流量数据和仔鱼数据是典型的非线性和不规则数据,交互小波分析可以根据不同时间尺度定量分割时间变量^[39],同时利用相位角和相关系数等参数,定量找出两列时间序列数据显著相关的时间段以及二者相互发生的时间差,因而能够在小尺度上揭示径流量对仔鱼发生的影响机制,为分析径流量是如何影响仔鱼发生提供了一个很好的分析工具。

致谢:本研究分析方法得到法国气象研究中心、法国图卢兹第三大学 Christophe Baehr 教授的指导,野外数据收集得到广东省海洋渔业局肇庆支队的帮助,特此致谢。

参考文献 (References):

- [1] 李琪,李德尚,熊邦喜,岳茂国,张辉. 放养鲢鱼 (*Hypophthalmichthys molitrix* C et V) 对水库围隔浮游生物群落的影响. 生态学报, 1993, 13 (1): 30-37.
- [2] 林秋奇,胡韧,段舜山,韩博平. 广东省大中型供水水库营养现状及浮游生物的响应. 生态学报, 2003, 23(6): 1101-1108.
- [3] Milstein A, Ahmed A F, Masud O A, Kadir A, Wahab M A. Effects of the filter feeder Silver carp and the bottom feeders mrigal and common carp on small indigenous fish species (SIS) and pond ecology. Aquaculture, 2006, 258(1/4): 439-451.
- [4] Kadir A, Wahab M A, Milstein A, Hossain M A, Seraji M T I. Effects of Silver carp and the small indigenous fish mola *Amblypharyngodon mola* and punti *Puntius sophore* on fish polyculture production. Aquaculture, 2007, 273(4): 520-531.
- [5] 广西壮族自治区水产研究所. 广西淡水鱼类志. 南宁: 广西人民出版社, 1981: 99-123.
- [6] Tan X C, Li X H, Lek S, Li Y F, Wang C, Li J, Luo J R. Annual dynamics of the abundance of fish larvae and its relationship with hydrological variation in the Pearl River. Environmental Biology of Fishes, 2010, 88(3): 217-225.
- [7] 谭细畅,李新辉,陶江平,李捷,王超,罗建仁,赖子尼. 西江肇庆江段鱼类早期资源时空分布特征研究. 淡水渔业, 2007, 37(4): 37-40.
- [8] Degrandchamp K L, Garvey J E, Csoboth L A. Linking adult reproduction and larval density of invasive carp in a large river. Transactions of the American Fisheries Society, 2007, 136(5): 1327-1334.
- [9] Degrandchamp K L, Garvey J E, Colombo R E. Movement and habitat selection by invasive Asian carps in a large river. Transactions of the American Fisheries Society, 2008, 137(1): 45-56.
- [10] 王尚玉,廖文根,陈大庆,段辛斌,彭期冬,王珂,李翀. 长江中游四大家鱼产卵场的生态水文特性分析. 长江流域资源与环境, 2008, 17(6): 892-897.
- [11] 陈永柏,廖文根,彭期冬,陈大庆,高勇. 四大家鱼产卵水文水力特性研究综述. 水生态学杂志, 2009, 2(2): 130-133.
- [12] 张晓敏,黄道明,谢文星,冯瑞萍,杨汉运,胡望斌. 汉江中下游“四大家鱼”自然繁殖的生态水文特征. 水生态学杂志, 2009, 2(2): 126-129.
- [13] Chen Y Y. Fauna Sinica, Osteichthyes. Cypriniformes II. Beijing: Science Press, 1998.
- [14] 易伯鲁,梁秩桑,余志堂. 葛洲坝水利枢纽与长江四大家鱼. 武汉: 湖北科学技术出版社, 1988: 32-35.
- [15] 李跃飞,李新辉,杨计平, Sovan L, 帅方敏,李捷. 珠江禁渔对广东鲂资源补充群体的影响分析. 水产学报, 2014, 38(4): 503-509.
- [16] 梁秩桑. 西江 49 种鱼类的早期发育特征. 珠江水系渔业资源调查研究报告, 1985, 6: 255-295.

- [17] Keitt T H, Fischer J. Detection of scale-specific community dynamics using wavelets. *Ecology*, 2006, 87(11): 2895-2904.
- [18] Downing A L, Brown B L, Perrin E M, Keitt T H, Leibold M A. Environmental fluctuations induce scale-dependent compensation and increase stability in plankton ecosystems. *Ecology*, 2008, 89(11): 3204-3214.
- [19] Keitt T H. Coherent ecological dynamics induced by large-scale disturbance. *Nature*, 2008, 454(7202): 331-334.
- [20] Foufoula-Georgiou E, Kumar P. *Wavelets in Geophysics*. San Diego: Academic Press, 1994.
- [21] Zhang S R, Lu X X, Higgitt D L, Chen C T A, Han J T, Sun H G. Recent changes of water discharge and sediment load in the Zhujiang (Pearl River) Basin, China. *Global and Planetary Change*, 2008, 60(3/4): 365-380.
- [22] Martin F D, Paller M H. Ichthyoplankton transport in relation to floodplain width and inundation and tributary creek discharge in the lower Savannah River of Georgia and South Carolina. *Hydrobiologia*, 2008, 598(1): 139-148.
- [23] Gao X, Lin P C, Li M Z, Duan Z H, Liu H Z. Effects of water temperature and discharge on natural reproduction time of the Chinese sturgeon, *Acipenser sinensis*, in the Yangtze River, China and impacts of the impoundment of the Three Gorges Reservoir. *Zoological Science*, 2014, 31(5): 274-278.
- [24] 张陵蕾, 吴宇雷, 张志广, 李克锋. 基于鱼类栖息地生态水文特征的生态流量过程研究. *水电能源科学*, 2015, 33(3): 10-14.
- [25] 王文君, 谢山, 张晓敏, 黄道明, 高少波. 岷江下游产漂流性卵鱼类的繁殖活动与生态水文因子的关系. *水生态学杂志*, 2012, 33(6): 29-34.
- [26] 李翀, 彭静, 廖文根. 长江中游四大家鱼发江生态水文因子分析及生态水文目标确定. *中国水利水电科学研究院学报*, 2006, 4(3): 170-176.
- [27] Unfer G, Hauer C, Lautsch E. The influence of hydrology on the recruitment of brown trout in an Alpine river, the Ybbs River, Austria. *Ecology of Freshwater Fish*, 2011, 20(3): 438-448.
- [28] Vilizzi L. Abundance trends in floodplain fish larvae; the role of annual flow characteristics in the absence of overbank flooding. *Fundamental and Applied Limnology*, 2012, 181(3): 215-227.
- [29] Hardie S A, White R W G, Barmuta L A. Reproductive biology of the threatened golden galaxias *Galaxias auratus* Johnston and the influence of lake hydrology. *Journal of Fish Biology*, 2007, 71(6): 1820-1840.
- [30] Probst W N, Stoll S, Peters L, Fischer P, Eckmann R. Lake water level increase during spring affects the breeding success of bream *Abramis brama* (L.). *Hydrobiologia*, 2009, 632(1): 211-224.
- [31] Scheidegger K J, Bain M B. Larval fish distribution and microhabitat use in free-flowing and regulated rivers. *Copeia*, 1995, (1): 125-135.
- [32] M rigoux S, Ponton D. Spatio-temporal distribution of young fish in tributaries of natural and flow-regulated sections of a neotropical river in French Guiana. *Freshwater Biology*, 1999, 42(1): 177-198.
- [33] Humphries P, Lake P S. Fish larvae and the management of regulated rivers. *Regulated Rivers: Research & Management*, 2000, 16(5): 421-432.
- [34] Wang K, Liao W G, Li C, Chen D Q, Liu S P, Duan X B. Relationship between meteorological conditions and natural reproduction behavior of the four famous Chinese carps. *Environmental Biology of Fishes*, 2010, 89(2): 135-142.
- [35] Morais P, Martins F, Ch charo M A, Lopes J, Ch charo L. Merging anchovy eggs abundance into a hydrodynamic model as an assessment tool for estuarine ecohydrological management. *River Research and Applications*, 2012, 28(2): 160-176.
- [36] Bice C M, Zampatti B P. Engineered water level management facilitates recruitment of non-native common carp, *Cyprinus carpio*, in a regulated lowland river. *Ecological Engineering*, 2011, 37(11): 1901-1904.
- [37] Malcolm I A, Gibbins C N, Soulsby C, Tetzlaff D, Moir H J. The influence of hydrology and hydraulics on salmonids between spawning and emergence; implications for the management of flows in regulated rivers. *Fisheries Management and Ecology*, 2012, 19(6): 464-474.
- [38] Ghil M, Yiou P, Hallegatte S, Malamud B D, Naveau P, Soloviev A, Friederichs P, Keilis-Borok V, Kondrashov D, Kossobokov V, Mestre O, Nicolis C, Rust H W, Shebalin P, Vrac M, Witt A, Zaliapin I. Extreme events: dynamics, statistics and prediction. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 2011, 18(3): 295-350.
- [39] Zolezzi G, Bellin A, Bruno M C, et al. Assessing hydrological alterations at multiple temporal scales: Adige River, Italy. *Water Resources Research*, 2009, 45(12): W12421.