

# 闽江下游径流量和北港分流比变化及其 对水龄的影响研究

张鹏<sup>1a</sup>, 石成春<sup>2</sup>, 逢勇<sup>1a,1b</sup>, 潘红澈<sup>1a</sup>, 徐磊<sup>1a</sup>

(1. 河海大学 a. 环境学院; b. 浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室,  
江苏 南京 210098; 2. 福州市环境科学研究院, 福建 福州 350011)

**摘要:** 利用闽江下游多年水文资料,分析了干流流量时空变化和北港分流比变化趋势,并借助 EFDC 模型研究水口水库下泄流量和北港分流比对闽江下游水体水龄的影响。分析表明:闽江干流径流量年际变化不均匀,北港分流比则经历了由小变大再变小的趋势。模拟的闽江水龄结果可知水龄与下泄流量成反比关系,北港分流比减小将增加北港水体交换时间,同时减少南港水体交换时间;水龄可以定量地描述污染物在北港河道的停留时间,为保障北港水源地水质安全,需要增大枯水期上游水口水库下泄流量和增大北港分流比。

**关键词:** 下泄流量; 分流比; EFDC 模型; 水龄; 污染物停留时间; 闽江

中图分类号: P333.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2015)05-0040-06

## Influence of runoff in downstream of Minjiang river and change of diversion ratio in Beigang on water age

ZHANG Peng<sup>1a</sup>, SHI Chengchun<sup>2</sup>, PANG Yong<sup>1a,1b</sup>, PAN Hongche<sup>1a</sup>, XUN Lei<sup>1a</sup>

(1. a. College of Environment; b. Key Laboratory for Integrated Regulation and Resources Exploitation on  
Shallow Lakes, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China;  
2. Fuzhou Research Academy of Environmental Sciences, Fuzhou 350011, China)

**Abstract:** The paper analyzed the temporal variation of main river discharge and the change trend of diversion ratio of Beigang by using hydrological data in downstream of Minjiang River. It used a three-dimensional environmental fluid dynamics code (EFDC) model to analyzed the effect of discharge and diversion ratio of Beigang on transport timescales (water age). The analysis result showed that annual flow of Minjiang is uneven and diversion ratio of Beigang is from small to big, then to small; there is a negative correlation between water age and river discharge. The decrease of diversion ratio will increase time of water body exchange of Beigang and will decrease that of Nangang. Water age can estimate time scales quantifying transport processes of dissolved substance for a spatially varying case. In order to protect water quality of water source areas at downstream of Minjiang, it is necessary to increase the freshwater discharge in Shuikou reservoir and the diversion ratio of Beigang during dry period.

**Key words:** discharge; diversion ratio; environmental fluid dynamics code model; water age; time scales quantifying transport processes; Minjiang river

闽江下游地理坐标位于东经 118°48′ - 119°22′, 北纬 25°55′ - 26°18′ 之间,从水口电站至出海口,全长 118 km 左右,河道贯穿福州市(图 1),纳梅溪、大目溪等主要支流,自淮安闽江下游分南、北两港,北港绕南台岛北面,穿过福州市区,经文山里、洪山桥、闽江大桥至马尾,河道相对窄深。南港绕南台岛南侧流经科贡、湾边接纳大樟溪、淘江经乌龙江大桥至马尾

与北港汇合,河道宽浅。闽江流域水量丰富,闽江年平均流量居全国第七位,根据下游竹岐水文站(上距水口电站 44 km)1936 年至 2012 年的资料统计,多年平均年径流量为 555 亿 m<sup>3</sup>,占全省地表径流量的 52%。闽径流年内分配极不均匀,4-7 月为主汛期,径流量占全年的 61%,10 月至次年 2 月仅占全年的 18%,为满足闽江下游生态需水,目前已确定水口水

收稿日期:2015-04-13; 修回日期:2015-07-29

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07506-006)

作者简介:张鹏(1988-),男,河南商丘人,博士研究生,主要从事水环境模拟与预测研究。

库最小下泄流量为  $308 \text{ m}^3/\text{s}$ 。近 20 年来,由于闽江水口电站建设、挖沙现象和航道整治工程的实施导致闽江下游河床发生较大改变<sup>[1-4]</sup>,导致闽江下游河道水文情势发生重大改变。叶丽清等<sup>[1]</sup>利用实测断面资料研究闽江下游闽清河段河床演变规律,认为采砂和涉河工程对河道演变有极大影响<sup>[1]</sup>。赵群<sup>[2]</sup>对历史资料进行分析,提出采砂使河床严重变形,河道水文情势发生改变。姚静等<sup>[3]</sup>计算了 1998 - 2004 年福州闽江南北港的分流比的变化,并分析人工挖沙对南北港分流比的影响。近年来,闽江河床改变极大,导致闽江河道水文情势发生重大改变,尤其南、北港分流比发生了根本上改变。随着闽江流域社会经济快速发展,闽江流域污染物排放量逐年增大,但是干流径流量和南、北分流比的变化导致北港水体交换时间延长,对北港水源地水质安全造成威胁。目前,“水龄”法是一种广泛应用研究水体交换的计算方法,即对单个粒子,粒子进入水体到达给定位置所需要的时间,

用于反映污染物在水体中的停留时间以及污染物时空分布规律。2001 年,Deleersnijder 等<sup>[5]</sup>首先引入计算水龄的欧拉理论,并将其运用在英吉利海峡和北海南部平均水龄的空间分布。从此,广泛利用数值模拟的方法研究水龄和滞留时间。Shen Jian 等<sup>[6]</sup>利用水龄理论研究美国切萨皮克湾约克河道停滞时间,发现径流是控制水龄的主要因素。王亚等<sup>[7]</sup>利用水龄理论研究多年平均流量条件下潮汐对长江河口水流运输时间的影响。

本文利用 1934 - 2012 年竹岐站流量资料、2011 - 2012 年水口电站流量资料和 2005 - 2012 年文山里流量资料研究闽江水口坝下流量和北港分流比变化。并基于 EFDC 建立的二维闽江水口电站 - 金刚腿模型研究闽江下游径流量和北港分流比变化对河道水龄的影响。根据水龄计算结果,分析污染物在北港河道的停留时间,为保障闽江下游水源地水质安全提供建议。

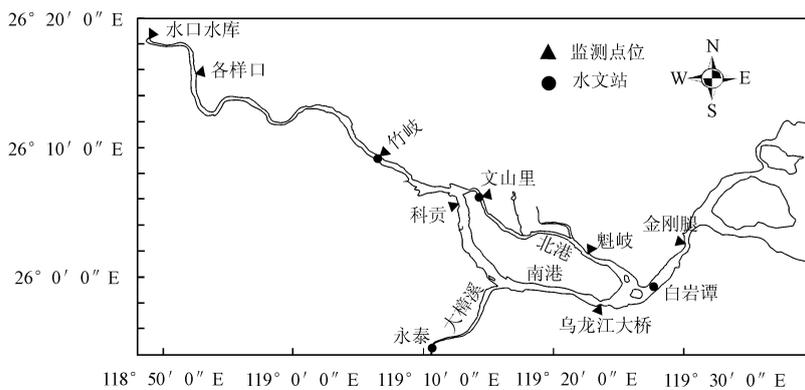


图1 闽江下游河道及监测点位、水文站位置图

## 1 闽江下游南北港分流比变化

### 1.1 闽江干流径流量时空变化分析

(1) 闽江干流竹岐水文站流量时空变化分析。统计 1936 - 2012 年竹岐水文站年平均流量(图 2),由图可以看出竹岐年均流量变化很不均匀,受降雨影响,高低起伏不定。年均水量最大为 1998 年的  $2724 \text{ m}^3/\text{s}$ ,最小为 1971 年的  $850 \text{ m}^3/\text{s}$ ,两者比值为 3.1,多年平均流量为  $1740 \text{ m}^3/\text{s}$ 。其中 1937、1975、1998 和 2010 年为丰水年,流量均大于  $2500 \text{ m}^3/\text{s}$ ,1963、1971 和 2011 年为枯水年,流量均小于  $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

(2) 水口电站日均流量变化。2011 - 2014 年上半年近四年的水口电站日均流量(图 3)可知水口电站日均流量分布极不均匀,大流量主要集中在 5、6 月份的汛期,冬季流量较小,2011、2013 年份较枯,而 2012、2014 年为丰水年。水口电站日均流量低于

最小生态流量( $308 \text{ m}^3/\text{s}$ )的日数总共 12 d,占总天数的 0.1% 左右,主要分布在枯水年 2011 年,有 7 d,另外 2012 年有 2 d,2013 年有 3 d。其中最小流量为  $106 \text{ m}^3/\text{s}$ ,仅为最小生态流量的 34%,时间在 2011 年 8 月 4 日;最大流量为  $14355 \text{ m}^3/\text{s}$ ,时间在 2014 年 5 月 23 日。对近 4 年的水口电站日均流量进行从小到大排序分析,其中 95% 最枯日均流量为  $404 \text{ m}^3/\text{s}$ ,90% 最枯日均流量为  $481 \text{ m}^3/\text{s}$ ,75% 最枯日均流量为  $603 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

由于闽江福州段的径流受上游水口电站运行的控制,水口电站在枯水期起不完全的季节性调节作用,水口以下河道的径流过程与天然河流有很大区别,在洪水期则基本上为径流式,洪水期河道的径流过程与天然河流相似。为了满足下游水生态要求,需要对进一步发挥水口水库水量的调节作用,在丰水期做好蓄水工作,枯水日增大下泄流量,避免水口

电站下泄流量低于最小生态流量(308 m<sup>3</sup>/s)。

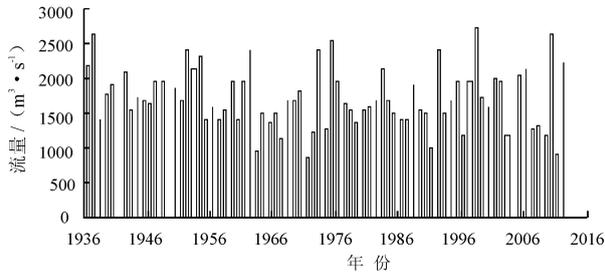


图2 竹岐站历年平均流量变化图(部分年份缺失)

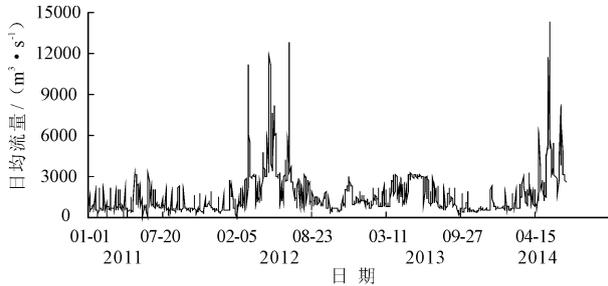


图3 2011-2014水口电站日均流量变化图

## 1.2 南北港分流比研究

闽江分流比指的是干流来水在福州市的淮安分流于南、北港后,南、北港流量分别占干流流量的百分比。由于闽江干流流量不同,导致南、北港分流比也不同。通过分析历史资料和2005-2012年水文年鉴,北港分流比经历了由小变大再变小的趋势。

在1978-1986年,南港、北港分流比基本维持在汛期7:3至7.5:2.5,枯水期3:7至4:6<sup>[8]</sup>。1986年后,北港分流比不断增加。洪水期北港分流比由1986年的23%~24%增加到1996年的25%~28%<sup>[8-9]</sup>;在1987-1993年,闽江出现流量小于600 m<sup>3</sup>/s,则全部汇入北港河道;1994-1997年,此时期出现闽江流量小于1000 m<sup>3</sup>/s,则全部汇入北港河道;到了1998年,当竹岐站流量为1200 m<sup>3</sup>/s<sup>[8]</sup>,南港仍然出现断流现象;至1999-2000年南港断流、倒流现象更加严重,出现竹岐站流量为1500 m<sup>3</sup>/s时,北港分流比达到101%~102%<sup>[8]</sup>。

分析2005-2012年之间竹岐站不同流量级下北港分流比关系(图4),可知:从2006年开始,北港分流比开始减小;竹岐流量大于5000 m<sup>3</sup>/s时,北港分流比由2005年的36%降为2012年的18%;在竹岐流量小于500 m<sup>3</sup>/s时,北港分流比降为2011年的41%,远小于2006、2007年的108%和103%;

通过分析1981-2012年竹岐流量为1500 m<sup>3</sup>/s(图5)可知,北港分流比在近10年发生根本上的改变。北港分流比在1981-2000年不断增加,与

1998年达到最大104%,但是从2002年开始不断降低,尤其在2012年降为12%,降幅达92%。

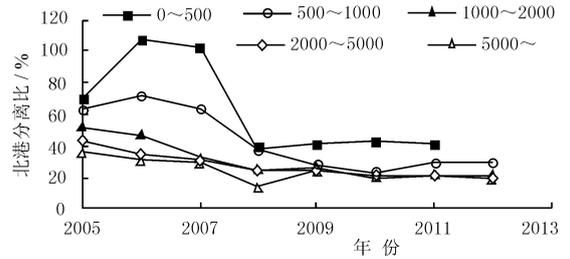


图4 2005-2012年不同流量级下北港分流比变化图

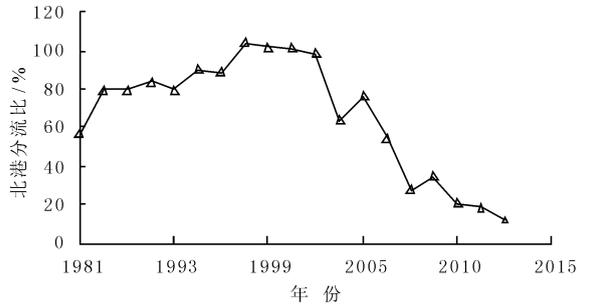


图5 竹岐流量为1500 m<sup>3</sup>/s时北港分流比历年变化图

1985年后,由于闽江航道整治建筑群的作用,使北港分流口通畅,1993年水口电站建成使竹岐水文站平均年悬移质输沙量减少66%<sup>[9-10]</sup>,其中90%悬移质输沙集中在汛期。对于洪水时水流携带的主要悬移质流入南港,北港河道在大量的采砂之后得不到补充,致使北港河道容积不断扩大,河床下切严重,1989-2003年北港地形下降3.76 m,而南港下降1.73 m<sup>[11]</sup>,枯水期北港分流比不断提高。

1998年,北港禁止采砂,采沙场转移至南港。此后南港地形不断下降,在2003-2009年北港地形下降0.85 m,南港地形下降1.82 m<sup>[10-11]</sup>,南港分流比则相应变大。据福州港统计,1999年河沙出口175万t,2002年猛增至1300万t。2010年又实施了闽江南港航道整治工程,对闽江南港(淮安至马尾航道)进行了多次疏浚整治,目前闽江南港航道基本达到IV级航道标准。2013年12月7-8日在竹岐、文山里、科贡3个同步监测的流量资料显示,水口坝下平均570 m<sup>3</sup>/s时,北港分流比在14%~26%范围内。

## 2 闽江南北港分流比改变对水龄影响分析

### 2.1 模型基本原理

EFDC模型采用垂向上采用 $\sigma$ 坐标变换,能较好地拟和近岸复杂岸线和地形。采用修正的

Mellor – Yamada 2.5 阶湍封闭模式较客观地提供垂向混合系数,避免人为选取造成的误差。动量方程内模主要是求解应力和速度的垂向分布。输移方程中的平流项模型采用 Smolarkiewicz 多维正定对流输移格式。以下为动量方程、连续方程及状态方程<sup>[12]</sup>:

(1) 动量方程:

$$\begin{aligned} &\partial_t(mHu) + \partial_x(m_yHuu) + \partial_y(m_xHvu) + \\ &\partial_z(mwu) - (mf + v\partial_xm_y - u\partial_y m_x)Hv \\ &= -m_yH\partial_x(g\xi + p) - m_y(\partial_xh - z\partial_xH)\partial_zp + \\ &\partial_z(mH^{-1}A_v\partial_zu) + Q_u \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} &\partial_t(mHv) + \partial_x(m_yHuv) + \partial_y(m_xHvv) + \\ &\partial_z(mwv) - (mf + v\partial_xm_y - u\partial_y m_x)Hu \\ &= -m_xH\partial_y(g\xi + p) - m_x(\partial_yh - z\partial_xH)\partial_zp + \\ &\partial_z(mH^{-1}A_v\partial_zv) + Q_v \end{aligned} \quad (2)$$

$$\partial_t(m\xi) = -gH(\rho - \rho_0)\rho_0^{-1} \quad (3)$$

(2) 连续方程:

$$\partial_t(m\xi) + \partial_x(m_yHu) + \partial_y(m_xHv) + \partial_z(mw) = 0 \quad (4)$$

$$\partial_t(m\xi) + \partial_x(m_yH\int_0^1 u dz) + \partial_y(m_xH\int_0^1 v dz) = 0 \quad (5)$$

(3) 状态方程:

$$\rho = \rho(P, S_a, T) \quad (6)$$

式中:  $u, v, w$  分别是边界拟合正交曲线坐标  $x, y, z$  方向上的速度分量;  $m_x, m_y$  和分别为水平坐标变换因子;  $m$  为度量张量行列式的平方根,  $m = m_x m_y$ ;  $A_v$  为垂向紊动黏滞系数;  $K_v$  为垂向紊动扩散系数;  $f$  为科里奥利系数;  $\rho$  为混合密度;  $\rho_0$  是参考密度;  $H$  为总水深;  $h$  为未扰动的  $z$  坐标原点以下的水深;  $P$  为压力;  $S_a$  为盐度;  $T$  为温度;  $\xi$  为自由的势能;  $Q_u$  和  $Q_v$  为动量在  $x$  和  $y$  方向的源汇项。

(4) 水龄计算方程

1999 年, Delhez 基于平流扩散方程提出一种用数学模型方法计算水龄<sup>[13-14]</sup>。假设只有一个示踪剂进入模型区域,并不考虑其他源和汇项,用于计算示踪剂浓度和年龄浓度的输运方程如下列方程所示:

$$\frac{\partial c(t, \vec{x})}{\partial t} + \nabla \cdot (uc(t, \vec{x}) - K\nabla c(t, \vec{x})) = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial \alpha(t, \vec{x})}{\partial t} + \nabla \cdot (u\alpha(t, \vec{x}) - K\nabla \alpha(t, \vec{x})) = c(t, \vec{x}) \quad (8)$$

式中:  $C$  为示踪剂溶度;  $\alpha$  为年龄浓度;  $u$  为流速;  $K$  为扩散系数张量;  $t$  为时间;  $x$  为空间位置。因此,水

龄可以表示为:

$$a(t, \vec{x}) = \frac{\alpha(t, \vec{x})}{c(t, \vec{x})} \quad (9)$$

在边界条件的设置上,上边界示踪剂浓度设为 1, 年龄浓度设置为 0, 其他开边界的示踪剂浓度和水龄设为 0。

## 2.2 地形概化

本研究根据 2011 年实测闽江河道地形, 建立水口坝下至金刚腿的 EFDC 水环境模型, 模型全长 99 km。EFDC 模型采用二阶精度的空间有限差分格式求解控制方程, 变量布置采用交错网格。网格边长约 200 m, 宽 100 m, 共划分 5 241 个网格, 模型计算时间步长  $t = 10$  s。

## 2.3 参数率定

二维水动力模型参数采用 2013 年 12 月一天逐时实测潮位、流量进行率定(点位分布如图 1 所示)。模型初始潮位值根据 2013 年 12 月金刚腿逐时实测潮位, 初始流速值设为 0。模型主要开边界有上游流量、大樟溪流量、风场和开边界潮位, 上边界下泄流量为水口电站逐时下泄流量实测值; 下边界为同期金刚腿断面潮位逐时实测值; 支流边界为大樟溪永泰站实测流量; 风场资料采用福州市内实测日均风速、风向作为输入条件。

潮位率定结果(表 1)和流量率定结果(表 2)所示: 潮位最大误差为 20cm, 流量最大为 23%。率定得到主要参数如下: 河道主槽部分糙率的取值范围定为 0.010 ~ 0.015; 水平涡粘系数采用 Smagorinsky 公式, 率定得到 Smagorinsky 系数为 0.12; 风拖曳系数在 0.001 ~ 0.0015 之间。

表 1 各监测断面潮位率定结果误差表

断面名称	竹歧	文山里	洪山桥	科贡	峡南	白岩潭
平均绝对误差/cm	13	19	20	14	12	11

表 2 各监测断面流量率定结果误差表

断面名称	科贡	文山里
相对误差/%	23	22

## 2.4 水龄预测结果

根据已建立闽江下游水动力模型, 本次研究设立 4 种方案, 分别改变水口坝下下泄流量和北港分流比。方案 1、方案 2 和方案 3 分别设置上游流量为最小生态流量 308 m<sup>3</sup>/s、实测流量(平均 570 m<sup>3</sup>/s)和大流量 1 500 m<sup>3</sup>/s; 方案 4 上游来水量与方

案2相同,通过在南北港分叉口设置丁坝,使北港分流比由现状实测的20%增加至49%。方案2的下游计算潮位条件为实测值,其余3个方案的下游边界条件根据2008和2013年金刚腿同步监测资料计算的4个分潮调和常数( $M_2$ 、 $S_2$ 、 $K_1$ 、 $O_1$ )合成得到。根据4种模拟方案,研究上游下泄流量和北港分流比对闽江下游河道水龄的影响。

各方案的模型计算结果(图6)表明:水口水库下泄流量与水龄成反比关系,北港分流比增加将减少北港水体交换时间。在最小生态流量 $308\text{ m}^3/\text{s}$ (图6,a)条件下,水流到达南、北港分流口需要9 d,到金刚腿需要30 d;相比方案1,方案2(图6,b)水龄到达金刚腿的时间减少了14 d,北港下游断面处水体交换时间减少了12 d,南港下游断面处水体交换时间减少了10 d;方案3(图6,c)下当下泄流量增加到 $1\,500\text{ m}^3/\text{s}$ 时,水流到达金刚腿的时间仅仅为7 d,北南港下游断面处水体交换时间相比方案1减少15~20 d。方案4(图6,d)在北港分流比为20%增加至49%时,水流达到金刚腿的时间不变,而北港水体交换时间减少3 d,南港水体交换时间则相应增加3 d左右。

闽江河口水龄等值线由水口坝下向下游金刚腿断面水平梯度呈现逐渐变小的趋势,白岩潭断面到

金刚腿断面区域的水龄等值线分布密集,说明此河段的水流向下输运速度较小,这与该河段河道容积和潮汐顶托作用有关。

白岩潭到金刚腿河段的垂向水龄在横向表现为左岸大于右岸(向水流方向),水龄等值线向右偏,说明水流输运速度右岸比左岸更快(图6,b),与南港分流量大于北港分流量相符。

水龄能够定量反映颗粒物或污染物从边界处传输到研究区域内任何一点的时间,也可以定量反映出水体交换能力的时间和空间异质性<sup>[15]</sup>。近年来由于闽江福州市区污染物排放量逐年增大,北港河道中的污染物受潮汐顶托影响,来回回荡不能较快排出,水口电站下泄流量减小和北港分流比变小均会导致福州市区北港内的水源地水质的变差,而水龄可以定量的描述污染物在南北港河道的停留时间,水龄越大,说明污染物在此处停留时间越长,越小则表明污染物可以较快排出<sup>[16]</sup>。由模拟的不同条件下闽江下游河道水龄结果可知,为保障北港水源地水质安全,需要进一步发挥水口水库功能,不仅考虑发电,也要兼顾下游的生态调度,同时采取有效的立法及行政手段遏止下游河道继续大规模采砂,来增大枯水期上游水口水库下泄流量和增大北港分流比。

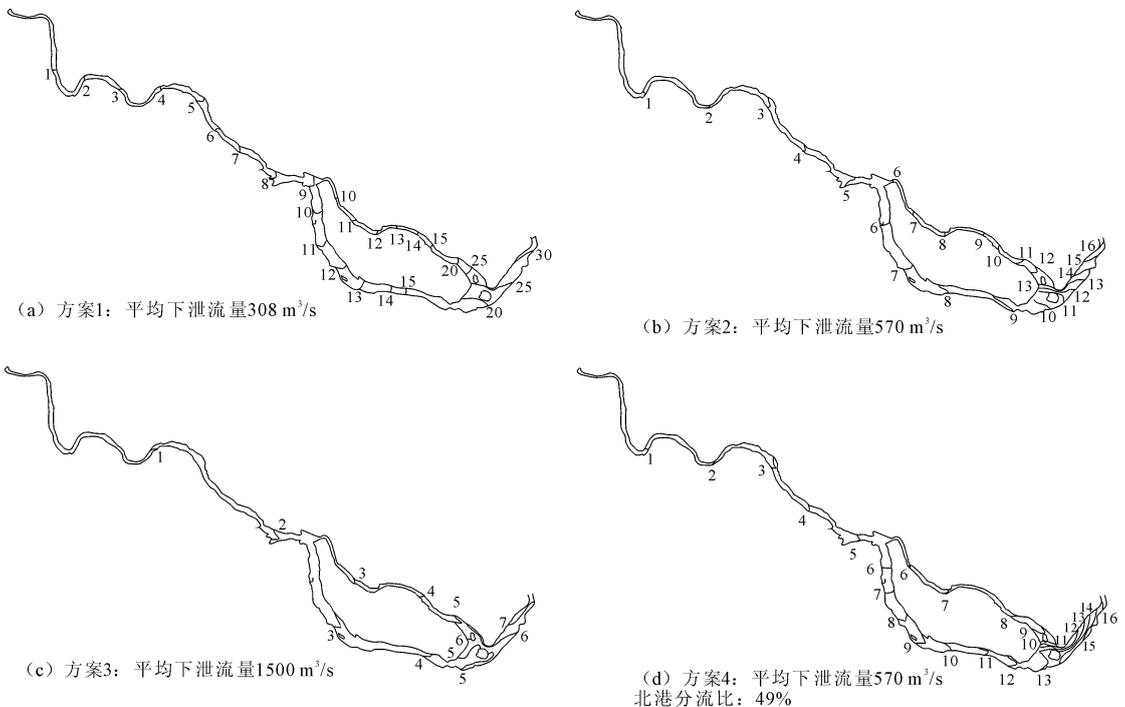


图6 各方案下闽江下游平均水龄分布图

### 3 结 语

本文基于1936-2012年竹岐站流量、2005-2012年水口坝下流量和文山里流量分析闽江干流径流量的时空变化,得出了闽江南、北港分流比变化。并建立水口坝下-金刚腿二维非稳态水环境数学模型,利用同步监测水文资料对模型进行率定,预测水口电站下泄流量和分流比变化对闽江下游河道水体水龄的影响。主要结论如下:

(1)闽江干流年均流量变化很不均匀,其中水量最大为1998年的 $2\ 724\ \text{m}^3/\text{s}$ ,最小为1971年的 $850\ \text{m}^3/\text{s}$ ,两者比值为3.1,多年平均流量为 $1\ 740\ \text{m}^3/\text{s}$ ;年内流量主要集中在5、6月份的汛期,冬季流量较小。闽江下游北港分流比经历了由小变大再变小的趋势,1998年之后由于南港不断挖砂和航道疏浚作用,北港分流比一直在减小;

(2)分析模型计算结果可知,水口坝下下泄流量与水龄成反比关系,北港分流比减小将增加北港水体交换所需时间,同时减少南港水体交换时间。上游下泄流量由最小生态流量 $308\ \text{m}^3/\text{s}$ 增加到 $570\ \text{m}^3/\text{s}$ 、 $1\ 500\ \text{m}^3/\text{s}$ 时,水流到金刚腿断面由30 d分别减小为16、7 d;现状实测流量 $570\ \text{m}^3/\text{s}$ 下将北港分流提升至49%,北港水龄较小了3 d,南港水龄增大了3 d。白岩潭至金刚腿河段受河道容积和潮汐顶托作用的影响,水龄等值线分布密集,并且因受上游南、北港分流比的影响,左岸、右岸水龄分布差值较大;

(3)水龄可以定量的描述污染物在北港河道的停留时间,模拟的不同条件下闽江下游河道水龄结果可知,为保障北港水源地水质安全,需要增大枯水期上游水口水库下泄流量和增大北港分流比。

#### 参考文献:

[1] 叶丽清,胡朝阳,王新强.闽江下游闽清河段河道演变分析[J].水利与建筑工程学报,2014,12(6):164-167+217.  
[2] 赵群.浅谈闽江下游河道采砂对河床的影响及控制

[J].水利科技,2001(1):23-26.  
[3] 姚静,谭亚,陶建峰.人类活动对闽江下游的影响研究——挖沙对分流比的影响[C]//.河海大学海洋学院.第十二届中国海岸工程学术讨论会论文集,2005.  
[4] 杨首龙,吴时强,陈昭宾.闽江下游天然河床的未来演进趋势[J].水利水电技术,2013,44(9):111-114+118.  
[5] Deleersnijder E, Campin J M, Dehlez E J M. The concept of age in marine modeling: I. Theory and preliminary model results [J]. Journal of marine systems, 2001, 28 (3-4):229-267.  
[6] Shen Jian, Lin Jing. Modeling study of the influences of tide and stratification on age of water in the tidal James River [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2006, 68(12):101-112.  
[7] 王亚,何青,沈健.长江河口水流输运时间研究[J].海洋学报(中文版),2014,36(1):48-55.  
[8] 郑鸣芳.闽江下游分流口河段分流比及河道演变分析[D].南京:河海大学,2005.  
[9] 陈禄.闽江下游南北港分流口整治方案探讨[J].水利科技,2006(2):5-6+9.  
[10] 黄永福.闽江下游河床演变及其影响研究[J].水利科技,2010(4):15-17.  
[11] 林琳.闽江下游采砂问题的研究与探讨[J].水利科技,2009(2):21-23.  
[12] 郭鹏程,轩晓博,闫大鹏.基于EFDC模型的人工湖水水质保障最佳运行方式研究[J].水资源保护,2014,30(1):53-56.  
[13] Shen Jian, Haas L. Calculating age and residence time in the tidal York River using three-dimensional model experiments [J]. Estuarine Coastal and Shelf Science, 2004, 61(3):449-461.  
[14] Li Yiping, Tang Chunyan, Wang Chao, et al. Improved Yangtze River diversions: Are they helping to solve algal bloom problems in Lake Taihu, China? [J]. Ecological Engineering, 2013, 51:104-116.  
[15] 徐洪周,林晶,王东晓.基于一个年龄概念的河口污染物输运数值模拟[J].水科学进展,2009,20(1):92-98.  
[16] 洪小筠.闽江下游感潮河段水污染特性分析[J].水利科技,2010(3):4-5+16.