

文章编号:1673-9469(2020)01-0066-09

DOI: 10.3969/j.issn.1673-9469.2020.01.012

长江口北槽枯季混合与层化特征分析

黄惠明,姚佳辉,王义刚,华 厦

(河海大学 港口海岸与近海工程学院,江苏 南京 210098)

摘要:通过分析长江口北槽2016年枯季水流、盐度实测资料,揭示了水流、盐度的大小潮、涨落潮周期变化特性。采用Simpson的势能差异函数对北槽混合与层化的时空变化进行分析,指出北槽中上段势能差异极值出现在涨憩落憩时刻,北槽下段势能差异极值出现在涨急落急时刻。采用改进的一维势能差异方程分析了北槽枯季潮汐应变、重力环流、河流效应和潮汐搅动的时空变化及对应关系,得到水体混合与层化趋势是由这四者相对大小决定,其中影响大小潮层化变化的机制是潮汐搅动、重力环流和河流效应。发现重力环流是涨潮期间促进河口层化的主要动力机制;河流效应在落潮期间偏大,潮平均作用强于潮汐应变,整体促进河口层化;大潮的潮汐搅动比小潮大1~2个量级,削弱了大潮的层化作用。并且证实改进的一维势能差异方程能够较好地解释长江口区域的混合层化特性。

关键词:长江口北槽;混合层化;势能差异;潮汐应变;潮汐搅动

中图分类号:P343.5

文献标识码:A

Analysis of Mixing and Stratification in Dry Season of the North Passage of the Yangtze River Estuary

HUANG Huiming, YAO Jiahui, WANG Yigang, HUA Sha

(College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: By analyzing the measured data of hydrology and salinity in the North Passage of the Yangtze River Estuary in 2016, it is found that the salt water wedge exist and the salinity stratification is stronger during neap tide than spring tide. The Simpson potential energy was applied to study the temporal and spatial variation of the mixing and stratification of the North Passage, and the extreme value of potential energy anomaly at the upper and middle of North Passage appears at the high slack and low slack while it appears at the max flood and max ebb at the lower part of North Passage. The improved one-dimensional potential energy difference equation was used to analyze the spatial and temporal changes and corresponding relationships of tidal strain, estuarine circulation, river effect, and tidal stirring during the dry season in the North Passage. It is found that the trend of mixing and stratification of the water body is determined by the relative sizes of these four factors, and the mechanisms that affect the stratification changes during the spring and neap tide are tide stirring, estuarine circulation and river effect. It is found that the estuarine circulation is the main dynamic mechanism for promoting estuary stratification during flood tide; the river effect is large during the ebb, and the average tide effect is stronger than the tidal strain, which promotes the estuary stratification as a whole; the tide stirring in the spring tide is 1 to 2 orders of magnitude larger than the neap tide, which weaken the stratification. And the improved one-dimensional potential energy difference equation can better explain the mixing and stratification characteristics of Yangtze River Estuary.

Key words: the North Passage of the Yangtze River estuary; mixing and stratification; potential energy anomaly; tidal straining; tidal stirring

收稿日期:2019-11-25

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2017YFC0405401);国家自然科学基金资助项目(51979096)

作者简介:黄惠明(1980-),男,福建福清人,博士,副教授,研究方向为河口海岸水动力等。

河口海岸水体中,径流和潮流的相互作用致使水体在水平和垂直方向上产生密度梯度,并在垂向上产生混合与层化的周期性变化。英国 Simpson^[1-2] 导出了势能差异变化率公式,同时提出了潮汐应变的概念。Gayer and Maccready^[3] 提出了潮汐应变环流概念。国内也有很多学者作过关于混合与层化的研究,大多围绕长江口和珠江口两大河口。部分学者通过实地勘测与理论计算对长江口的盐水入侵、水流结构和盐度分布进行研究,也有学者对河口的混合层化时空变化和机制进行了深入探讨^[4-8]。熊龙兵基于 Simpson 的势能差异理论,研究了潮汐应变对长江口混合层化的影响^[9];任杰等根据 2009 年珠江磨刀门水道的实测水文数据,分析了径流层化、潮汐混合以及风搅动对混合层化的影响^[10];李霞等将潮汐应变理论应用于长江口混合层化的研究中^[11];浦祥等基于潮汐应变的概念及一维和三维势能差异方程,利用 2012 年的实测资料对长江口北槽进行了混合与层化分析^[12-13]。长江口的混合层化随着径流、潮流相互作用的变化具有不同的时空变化特征,以上长江口混合层化的研究数据取自 2010 年和 2012 年,近几年长江口的层化特征是否会发生变化呢? 本文将根据长江口 2016 年枯季实测资料,采用定性与定量相结合的方法分析长江口北槽区域枯季大小潮及涨落潮期间水体的混合层化的时空变化特征及主要物理机制。

1 研究背景

长江河口经过长期的发育和演变呈现出三级分汊、四口入海的格局。长江河口为中等潮汐河口,口外为规则半日潮,口内为非规则半日潮。长江河口深水航道整治工程位于北槽,包括南导堤、北导堤和 19 个丁坝(南侧 9 个、北侧 10 个)。本文研究区域为长江口南支南港的北槽区域,具体见图 1。

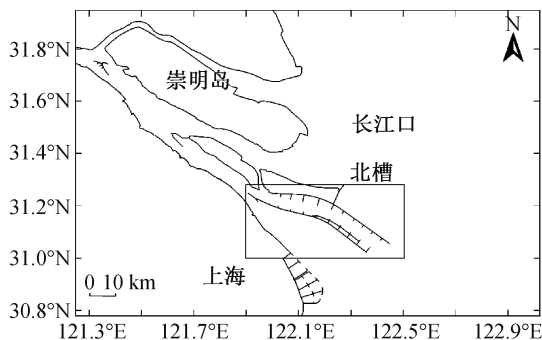


图 1 研究区域
Fig.1 Location of research area

在南港-北槽布置 CS0S、CS9S、CS6S、CSWS、CS3S、CS7S、CS4S 及 CS10S 共 8 条固定垂线(图 2),测量时间为 2016 年 3 月 3 日至 2016 年 3 月 12 日,测量内容包括流速、流向、温度、含盐度等项目,包含大、小两个代表潮的全潮水文测量数据。测量方法采用 ADCP 与流速仪结合,在海流计施测流速时同时施测水温,并且采用横式采样器采取水样分析盐度数据。测量方法按照六点法测量,包括水面,0.2h、0.4h、0.6h、0.8h 和水底(h 为水深),所有数据均为每小时观测一次。测量期间,上游大通站的平均流量为 21 480 m³/s,小潮平均潮差为 1.14 m,大潮平均潮差为 3.96 m。

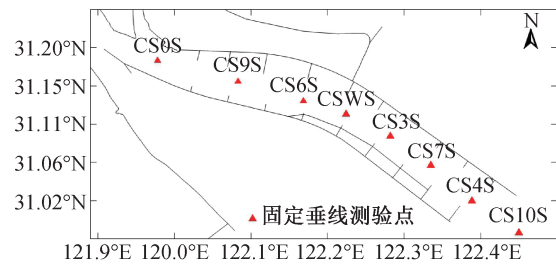


图 2 北槽固定垂线测点分布图
Fig.2 Distribution of fixed vertical measuring points of the North Passage

2 研究方法

2.1 混合与层化特征指标

混合层化特征指标是反映河口垂向各层不同密度水体混合层化程度的依据,常用的指标有势能差异函数 φ 、Richardson 数等。为了定量计算水体混合与层化强度,本文采用 Simpson 提出的势能差异函数 φ ^[14]。

$$\varphi = \frac{1}{h} \int_{-h}^0 gz[\bar{\rho} - \rho(z)] dz$$

$$\bar{\rho} = \frac{1}{h} \int_{-h}^0 \rho(z) dz \quad (1)$$

式中: $\rho(z)$ 为垂向的水体密度分布,单位是 kg/m³; h 为水深,单位为 m; g 为重力加速度,取 9.81 m/s²。 φ 的物理意义是将单位体积的水体由层化转变为完全混合状态所需的能量,单位是 J/m³, φ 值越大代表垂向上层化越强, φ 等于 0 表示完全混合,大于 0 代表稳定层化,小于 0 代表不稳定层化。

上式中,水体密度采用 Millero 等^[15] 的海水状态方程求得,其中 t 为温度, s 为盐度:

$$\rho = \rho_0 + As + Bs^{3/2} + Cs^2 \quad (2)$$

$$\rho_0 = 999.842584 + 6.793952 \times 10^{-2}t - 9.095290 \times$$

$$10^{-3}t^2 + 1.001\ 685 \times 10^{-4}t^3 - 1.120\ 083 \times 10^{-6}t^4 + 6.536\ 332 \times 10^{-9}t^5$$

$$A = 8.244\ 93 \times 10^{-1} - 4.089\ 9 \times 10^{-3}t + 7.643\ 8 \times 10^{-5}t^2 - 8.246\ 7 \times 10^{-7}t^3 + 5.387\ 5 \times 10^{-9}t^4$$

$$B = -5.724\ 66 \times 10^{-3} + 1.022\ 7 \times 10^{-4}t - 1.654\ 6 \times 10^{-6}t^2$$

$$C = 4.831\ 4 \times 10^{-4}$$

2.2 层化机制分析方法

采用 Pu X^[16]改进的纵向一维势能差异方程对混合与层化机制进行分析,其中主要影响 φ 的五种动力因子分别是潮汐应变、重力环流、河流效应、潮汐搅动和风搅动。重力环流项指河口纵向密度梯度驱动环流与纵向密度梯度相互作用,始终促进层化。河流效应指河流流速在底摩擦的作用下会产生垂向剪切,而垂向剪切与纵向密度梯度相互作用,能够显著加剧层化。潮汐搅动和风搅动持续促进河口的混合。潮汐应变则是在落潮期间促进层化,涨潮期间促进混合。 φ 随时间的变化率如式(3)^[16]:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = \left(\frac{\partial \varphi}{\partial t}\right)_{\text{strain}} + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial t}\right)_{\text{river}} + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial t}\right)_{\text{cir}} - \left(\frac{\partial \varphi}{\partial t}\right)_{\text{stir}} - \left(\frac{\partial \varphi}{\partial t}\right)_{\text{wind}}$$

$$= 0.035gH\bar{u}_t\frac{\partial \rho}{\partial x} + 0.035gH\bar{u}_r\frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{g^2H^4}{320N_s\rho}\left(\frac{\partial \rho}{\partial x}\right)^2 - \hat{\varepsilon}C_d\rho\frac{|\bar{u}|^3}{h} - \hat{\delta}C_{ds}\rho_s\frac{\bar{W}^3}{h} = (3)$$

潮汐应变 + 河流效应 + 重力环流 + 潮汐搅动 + 风搅动

式中: $\hat{\varepsilon}$ 和 $\hat{\delta}$ 为混合系数,分别为0.0037和0.023, C_d 和 C_{ds} 分别为底层和表层的拖曳力系数, $C_d = 2.5 \times 10^{-3}$, $C_{ds} = 6.4 \times 10^{-5}$ 。 W 为风速, ρ_s 为空气密度, \bar{u} 为深度平均的流速, u_t 表示纯潮流流速, u_r 表示河流流速。由于测验期间实测风速较低,风搅动量级较小,本文暂不考虑风搅动影响。并且长江口北槽的站位设置较少,因此本文假定长江口北槽两相邻站位水平密度梯度 $\partial\rho/\partial x$ 分布均匀。

3 结果与分析

3.1 水流、盐度特征分析

3.1.1 流场特征分析

根据长江口北槽深水航道2016年枯季大潮及小潮期间的各站位流速资料,绘制了各站位的涨落潮垂线平均流速分布图(图3)。不论大小潮,北

槽水域从上游往下游(从CS0S至CS10S)各垂线的涨、落潮平均流速沿程变化均呈现为中间高两头低的形态,即航槽中段的涨、落潮动力明显强于北槽出口处,大潮期间规律性更明显,并且涨潮动力的沿程变化幅度明显小于落潮。观察北槽沿程各站位的涨落潮最大流速分布,测验期间涨潮测点最大流速为2.43 m/s,出现在北槽弯段的CSWS垂线处大潮期,落潮测点最大流速为4.03 m/s,出现在北槽下段的CS4S垂线处大潮期,其中大潮各站位流速相对小潮更大。

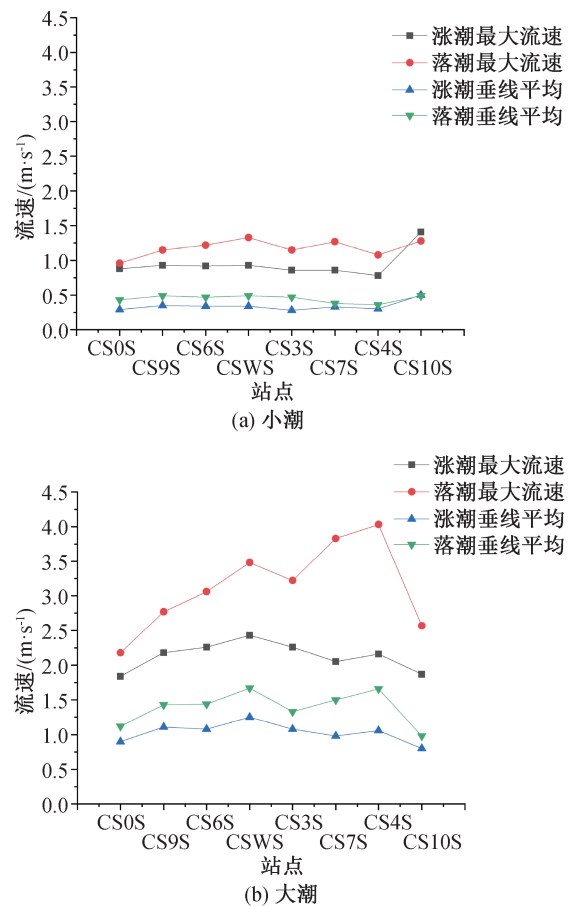


图3 北槽纵向各站位大小潮流速分布图
Fig.3 Longitudinal distribution of current velocity f each station along the North Passage

图4中的流速分布可以反映北槽各站点垂向上涨落潮的流速变化,可以看出北槽各站点测验期间各垂线的涨、落潮测点最大流速多数出现在表层和近表层,涨潮期部分垂线最大流速极值出现在垂线的中下层。在小潮期,北槽区域从CS0S至CS7S,涨潮测点最大流速均出现在0.8H或0.6H。

3.1.2 盐度特征分析

根据长江口北槽深水航道2016年枯季大潮及小潮期间的实测同步流速流向、温度、盐度等水文

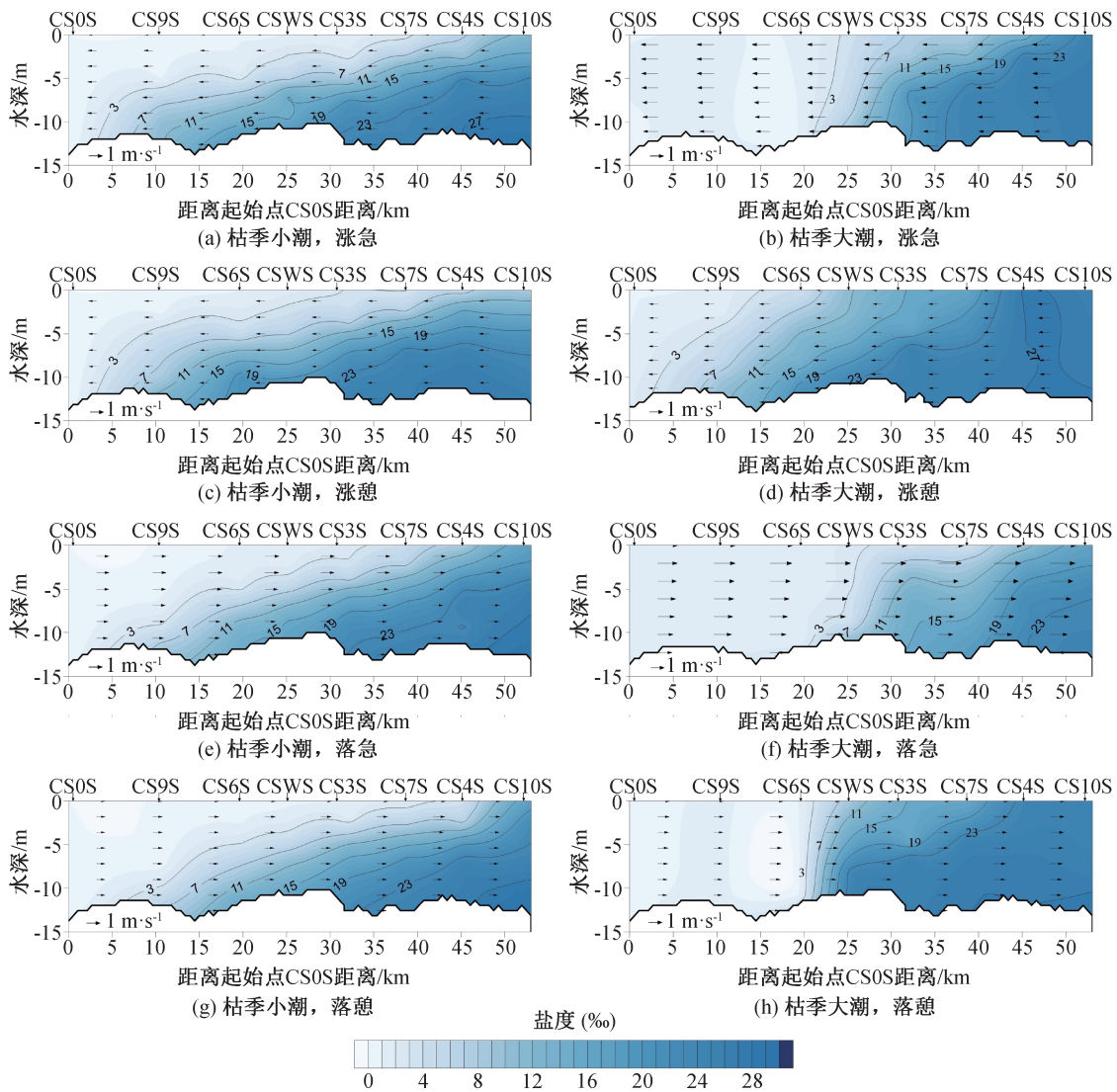


图 4 北槽纵向断面典型时刻盐度、流速分布图

Fig.4 Longitudinal distribution of current velocity and salinity along the North Passage

资料,绘制了涨急、涨憩、落急、落憩四个典型时刻的纵向盐度、流速分布图(图4),以此来定性分析北槽盐度特征的时空变化。当盐度等值线垂直,水体混合均匀;盐度等值线倾斜程度越大,水体盐度分层越显著。

如图4(a)、(c)、(e)、(g)所示,在枯季小潮的涨落潮期间,北槽中的CSWS 站位表底层盐度差异 ΔS 为 $14.96\text{‰} \sim 20.06\text{‰}$,显示出盐度层化的涨落潮变化。以 3‰ 盐度等值线和 23‰ 高盐度等值线为例分析水体盐度结构的变化。涨急时刻, 3‰ 的盐度等值线表层在CS7S 站位,底层在CS0S 站位,纵向长度为 37 km 。涨憩时刻, 3‰ 盐度等值线的表层上溯到CS3S 站位,纵向长度缩短为 30 km ,倾斜度略低,反映出涨潮期间层化的减弱。落急时刻, 3‰ 盐度等值线底层位置与涨憩时刻相比变化不大,表层下移到CS3S 和CS7S 之间,纵向长度变

长,倾斜度变大。落憩时刻, 3‰ 的盐度等值线表层下移到CS7S 和CS4S 之间,纵向长度为 40 km ,倾斜度达到最大,此时层化在整个潮周期内达到最强。在小潮的涨落潮周期内,北槽盐度层化区域集中在CS9S 到CS4S 之间。相比而言 23‰ 高盐度等值线在小潮的涨落潮周期内变动幅度不大,等值线底层位置在CS3S 附近摆动,上段在北槽口外,整体倾斜度较大,反映出高盐度水体层化现象较为明显。其中涨憩时刻 23‰ 高盐度等值线倾斜度达到最大,近乎水平,表明涨憩时刻北槽中下段水体高盐度水体分层现象最为明显。

如图4(b)、(d)、(f)、(h)所示,在枯季大潮的涨落潮期间,CSWS 的表底层盐度差异 ΔS 为 $12.32\text{‰} \sim 16.90\text{‰}$,小于小潮时期CSWS 站位的 ΔS ,且北槽大潮盐度等值线的倾斜程度小于小潮,得出枯季大潮期间的盐度层化弱于小潮。大潮期

间,涨落潮流速较小潮偏大,涨急时刻,3‰盐度等值线的表底层均在 CS6S 到 CSWS 之间且倾斜度较低,反映出 CS6S 站位上游水体盐度混合较为均匀,CS6S 下游的 CSWS 和 CS7S 之间的 7‰、11‰和 15‰盐度等值线有明显的分层。涨憩时刻,3‰盐度等值线的倾斜度增加,水体盐度有明显层化现象。落急时刻与涨急时刻类似。落憩时刻,3‰盐度等值线表底层均在 CS6S 到 CSWS 之间,等值线接近垂直,表明 CS6S 以上区域盐度无明显分层。而 23‰高盐度等值线与盐水楔前端的变化趋势有着较大的区别。在涨急、落急以及落憩时刻,虽然盐水楔前端接近垂直,但高盐度等值线在水体中上层倾斜度较大,分层现象明显。在涨憩时刻,高盐度等值线倾斜度达到最大,潮周期内高盐度水体分层达到最强。在大潮的涨落潮周期内,涨潮的层化程度强于落潮,并且北槽盐度层化区域集中在 CSWS 和 CS7S 之间,北槽的上段和下段混合现象显著。

整体来说,枯季大小潮期间北槽有明显的盐水楔结构,小潮期间水体盐度层化更为显著。在水体盐度层化区域的分布上,小潮的层化范围要比大潮的层化范围大。浦祥^[12]曾利用 2012 年 2 月份长江口北槽枯季的实测资料研究北槽盐度分布,他发现 2012 年枯季小潮盐淡水界面(以 1 psu 盐度等值线划分)的纵向长度约为 7~15 km(主要位于 CS0S 和 CS2S 之间,其中 CS2S 位于 2016 年 CS6S 与 CSWS 中间),枯季大潮为 1~13 km(主要位于 NGN4S 和 CS0S 之间,其中 NGN4S 在 CS0S 上端),盐水楔在枯季小潮、枯季大潮的一个涨/落潮周期内纵向的移动距离分别约为 10 km、25 km。相较于 2012 年,2016 年盐水楔的结构在大小潮期间分层更加显著,且盐水入侵距离更远,原因是由于 2016 年枯季小潮平均潮差 1.14 m,较往年偏小,潮动力偏弱造成的。

3.2 势能差异的时空变化分析

图 5 为利用公式(1)计算得出的枯季北槽各站位在两个完整的涨落潮周期内的势能差异值,反映了各站位在涨落潮期间的层化程度。横坐标为各站位距 CS0S 的距离,纵坐标为两个潮周期的时间序列,0~0.5 和 1~1.5 为涨潮,0.5~1 和 1.5~2 为落潮。

在枯季小潮阶段,高势能差异区域分布在 CS9S 到 CSWS 之间。小潮期间势能差异最大值是

225.08 J·m⁻³,发生在 CS6S 的小潮涨憩时刻左右。北槽最上端的 CS0S 势能差异平均值为 1.64 J·m⁻³,层化现象不显著。在一个涨落潮周期内,CS9S,CS6S 和 CSWS 三个站位势能差异的变化规律是涨潮期间越来越大,落潮期间越来越小,势能差异极值出现在涨憩时刻。原因是这三个站位处于盐水楔的中上端(图 4),涨潮时盐水楔向陆地方向推移,导致该站位层化现象增强,反之减弱。而 CS3S、CS7S、CS4S 和 CS10S 四个站位的势能差异变化规律是从涨潮初期到涨急越来越大,从涨急到涨憩越来越小,从涨憩到落急越来越大,从落急到落憩越来越小。势能差异的极大值出现在涨急落急时刻,极小值出现在涨憩落憩时刻。原因是涨急落急时刻流速较大(图 3),水体的剪切作用较强,导致层化作用的增强。

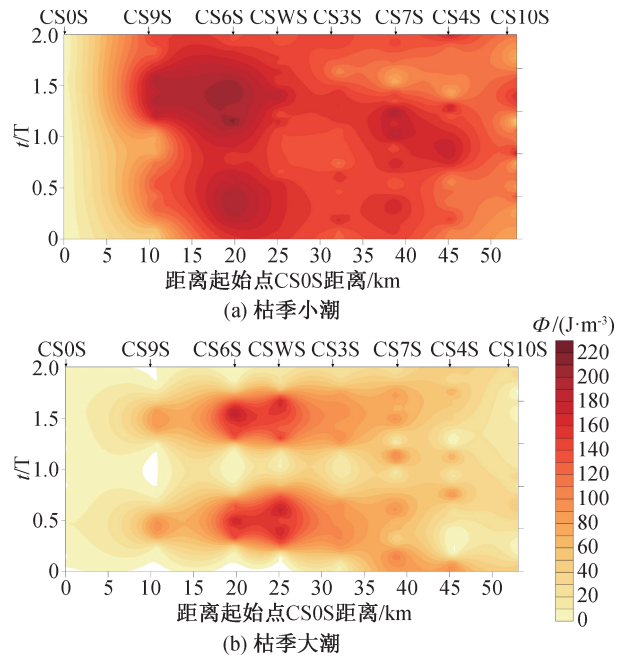


图 5 北槽各站位势能差异的时间序列图
Fig.5 Time series diagram of potential energy difference between stations along the North Passage

在枯季大潮阶段,高势能差异区域分布在 CS6S 和 CSWS 之间。其中 CS6S 势能差异平均值为 72.41 J·m⁻³,势能差异最大值发生在涨憩时刻,为 191.24 J·m⁻³; CSWS 势能差异平均值为 90.13 J·m⁻³,势能差异最大值发生在涨憩到涨急时刻之间,为 183.03 J·m⁻³。由于大潮期间潮动力较强,流速较大,导致径流和潮流混合作用增强,因此整体层化现象较小潮减弱。在涨落潮周期内,各站位势能差异的变化规律与小潮类似。

对比图 5 中枯季小潮和枯季大潮的势能差异

可知,小潮各站点的势能差异均大于大潮。从小潮到大潮,高势能差异区域从 CS9S 到 CS6S 之间下移到 CS6S 到 CSWS 之间,小潮层化范围明显超过大潮。浦祥^[12]曾利用 2012 年 2 月份长江口北槽枯季的实测资料研究北槽势能差异变化,得到小潮高势能差异区域分布在 CS3S 和 CS7S 之间,最大值为 $250 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3}$,大潮则在 CSWS 和 CS3S 之间,最大值为 $154 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3}$ 。对比 2016 年和 2012 年高势能差异区域分布变化,小潮较 2012 年上移 15 km,大潮较 2012 年上移 5 km。原因主要是 2016 年为丰水年,枯季流量较往年较大,且小潮平均潮差 1.14 m,较往年偏小,潮动力偏弱,最终造成小潮北槽区域整体层化现象更为显著。

3.3 势能差异变化率的时空变化分析

本节利用公式(3)计算得到枯季大潮和小潮期间各站位流速、潮汐应变、重力环流、河流效应、潮汐搅动和总势能差异变化率的时间序列图(图 6—图 11),进而探讨它们的对应关系并研究影响混合层化的主要物理机制。由于改进的纵向一维势能差异方程的计算需要用到纵向密度梯度 $\partial\rho/\partial x$,需要结合各站位以及附近的两个站位进行计算,因此本文选取数据较为完整的 CS9S、CS6S、CSWS、CS3S、CS7S、CS4S 六个站位进行分析。

潮汐应变引起的势能差异变化率:如图 6—图 11 各站位的(b)图, $(\partial\varphi/\partial t)_{\text{strain}}$ 在大小潮和不同站位之间的波动幅度都不同,北槽上端 CS9S 波动幅度较小,下端 CS4S 波动幅度较大。大潮的潮汐应变值波动范围在 $-126.31 \times 10^{-4} \text{ W} \cdot \text{m}^{-3}$ 到 $86.95 \times 10^{-4} \text{ W} \cdot \text{m}^{-3}$ 之间,而小潮期间的波动范围则在 $-20.15 \times 10^{-4} \text{ W} \cdot \text{m}^{-3}$ 到 $15.70 \times 10^{-4} \text{ W} \cdot \text{m}^{-3}$ 之间,可见大潮的潮汐应变值区间波动比小潮大。虽然 $(\partial\varphi/\partial t)_{\text{strain}}$ 的波动范围较大,但是潮汐应变的潮平均值较小,在一个潮周期内对混合层化影响不大。 $(\partial\varphi/\partial t)_{\text{strain}}$ 在涨落潮期间与流速也有着较好的对应关系,在落潮期间为正促进层化,涨潮期间为负促进混合,极值出现在涨急和落急时刻左右。

重力环流引起的势能差异变化率:如图 6—图 11 各站位的图(c),各站位的 $(\partial\varphi/\partial t)_{\text{cir}}$ 均大于 0,表明重力环流不断促进河口的层化,并且 $(\partial\varphi/\partial t)_{\text{cir}}$ 总体呈现脉冲一样的波动,极值出现在涨急到涨憩之间,是涨潮期间促进河口层化的主要动力机制。小潮时期 $(\partial\varphi/\partial t)_{\text{cir}}$ 的范围在 $0.01 \sim 157.98 \times 10^{-4} \text{ W} \cdot \text{m}^{-3}$ 之间,大潮时期 $(\partial\varphi/\partial t)_{\text{cir}}$ 的范

围在 $0.05 \sim 548.09 \times 10^{-4} \text{ W} \cdot \text{m}^{-3}$ 之间,北槽中下段的重力环流比上段强。由于大潮期间部分站点密度梯度值较大,导致大潮期间 $(\partial\varphi/\partial t)_{\text{cir}}$ 有超过 $200 \times 10^{-4} \text{ W} \cdot \text{m}^{-3}$ 的特大值,而大部分时间各站位小潮 $(\partial\varphi/\partial t)_{\text{cir}}$ 大于大潮,因为小潮期间强烈的层化能够显著减低涡粘系数 N_z ,从而抑制垂向混合导致重力环流的增强^[17]。

河流效应引起的势能差异变化率:河流效应可以评估河流流速的垂向剪切与纵向密度梯度的相互作用对层化可能的影响,与落潮期间潮汐应变的作用机理类似。如图 6—图 11 各站位的(d)图,各站位的 $(\partial\varphi/\partial t)_{\text{river}}$ 均大于 0,表明河流效应不断促进河口的层化,且在落潮期间偏大。小潮时期 $(\partial\varphi/\partial t)_{\text{river}}$ 的范围在 $0 \sim 14.39 \times 10^{-4} \text{ W} \cdot \text{m}^{-3}$ 之间,大潮时期 $(\partial\varphi/\partial t)_{\text{river}}$ 的范围在 $0 \sim 131.91 \times 10^{-4} \text{ W} \cdot \text{m}^{-3}$ 之间,总体来说,河流效应潮平均的作用强于潮汐应变项。

潮汐搅动引起的势能差异变化率:如图 6—图 11 各站位的(e)图, $(\partial\varphi/\partial t)_{\text{stir}}$ 无论大小潮在各个站位均为负值,表明潮汐搅动在不断促进水体的混合。小潮 $(\partial\varphi/\partial t)_{\text{stir}}$ 的变化范围在 $-7.87 \times 10^{-4} \text{ W} \cdot \text{m}^{-3} \sim 0$ 之间,大潮 $(\partial\varphi/\partial t)_{\text{stir}}$ 的变化范围在 $-259.16 \times 10^{-4} \text{ W} \cdot \text{m}^{-3} \sim 0$ 之间,可见大潮 $(\partial\varphi/\partial t)_{\text{stir}}$ 比小潮大 1~2 个量级。 $(\partial\varphi/\partial t)_{\text{stir}}$ 极大值出现在涨憩和落憩时刻,原因是此时流速较小,水体结构稳定;极小值出现在涨急和落急时刻,原因是此时流速较大,水体与底床摩擦强烈,造成水体紊动剧烈,导致 $(\partial\varphi/\partial t)_{\text{stir}}$ 较小。从 CS4S 到 CS9S 六个站位潮汐搅动的变化趋势可知 $(\partial\varphi/\partial t)_{\text{stir}}$ 从北槽下游到上游沿程减小,原因是潮动力决定潮汐搅动强弱,而潮动力沿着北槽向上逐渐减弱。

如图 7、图 8 所示,在大潮的落急到涨憩期间,CS6S 和 CSWS 的重力环流和河流效应之和大于潮汐搅动和潮汐应变,总势能差异变化率大于 0,整体促进水体层化,这正是图 5 中大潮期间 CS6S 和 CSWS 在涨憩时刻层化现象较强的原因。图 5 中北槽中下段 CS3S 和 CS7S 在涨急时刻层化现象较强,原因也是如此。并且图 6—图 11 中各站位总势能差异变化率的正极值对应的时刻与图 5 中层化高值区域对应时刻有着很好的一致性,反映出 Pu X^[16]改进的纵向一维势能差异方程能够较好地解释长江口区域混合层化的特性。

综合上述影响混合层化的动力因子的分析,得到水体的混合与层化趋势由潮汐应变、重力环

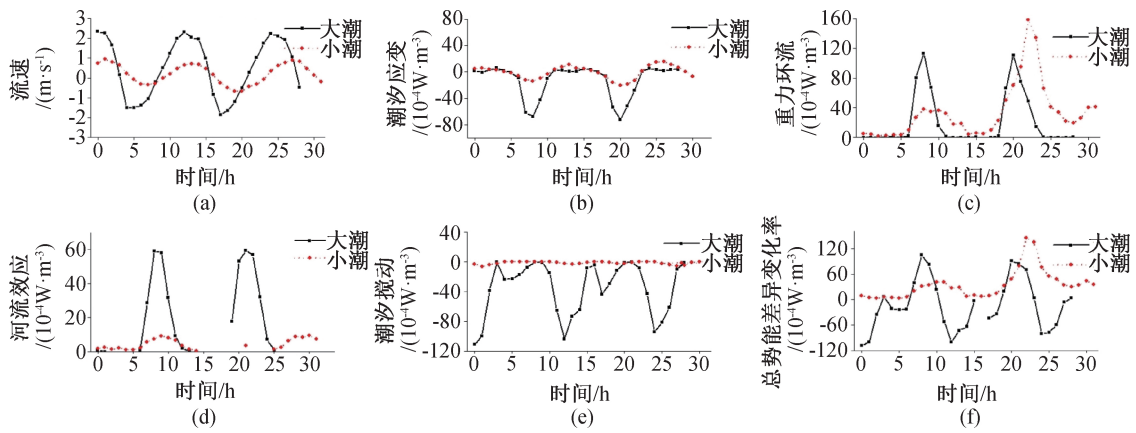


图6 CS9S 站位相关参数随时间变化图

Fig.6 Changes of time-related parameters of CS9S station

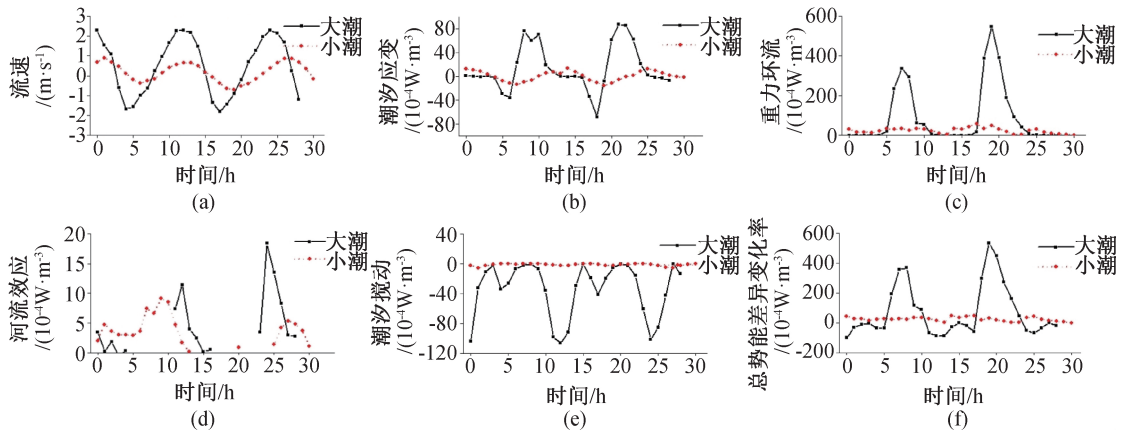


图7 CS6S 站位相关参数随时间变化图

Fig.7 Changes of time-related parameters of CS6S station

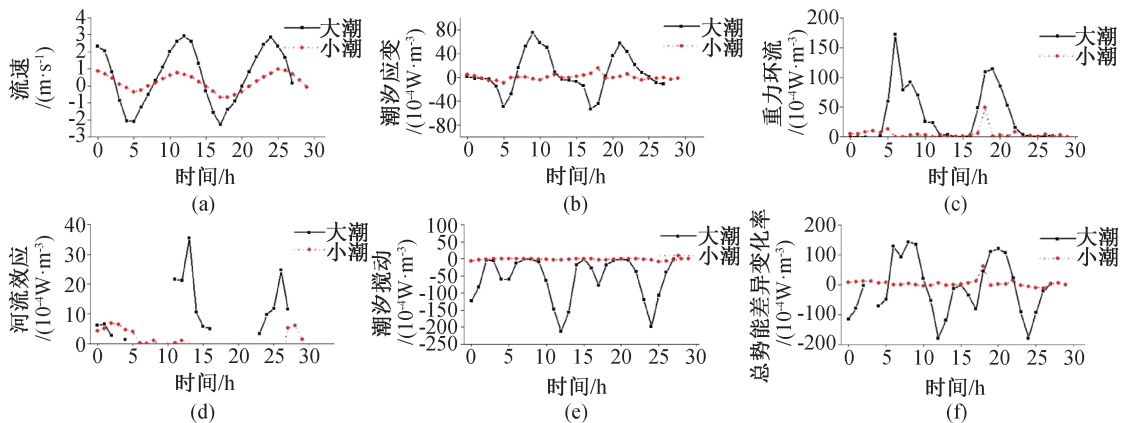


图8 CSWS 站位相关参数随时间变化图

Fig.8 Changes of time-related parameters of CSWS station

流、河流效应和潮汐搅动四者的相对大小决定。其中潮汐应变在涨落潮周期内有一定变化,但潮平均值较小,潮周期内对混合层化影响较弱;重力环流促进河口层化,是涨潮期促进河口层化的主要动力机制;河流效应在落潮期间偏大,

潮平均作用强于潮汐应变,整体促进河口层化;潮汐搅动促进河口混合,北槽下段潮汐搅动强于上段,且大潮比小潮大1~2个量级,削弱了大潮的层化作用。在枯季小潮,落潮流速大于涨潮流速,但潮汐搅动小于河流效应和重力环流

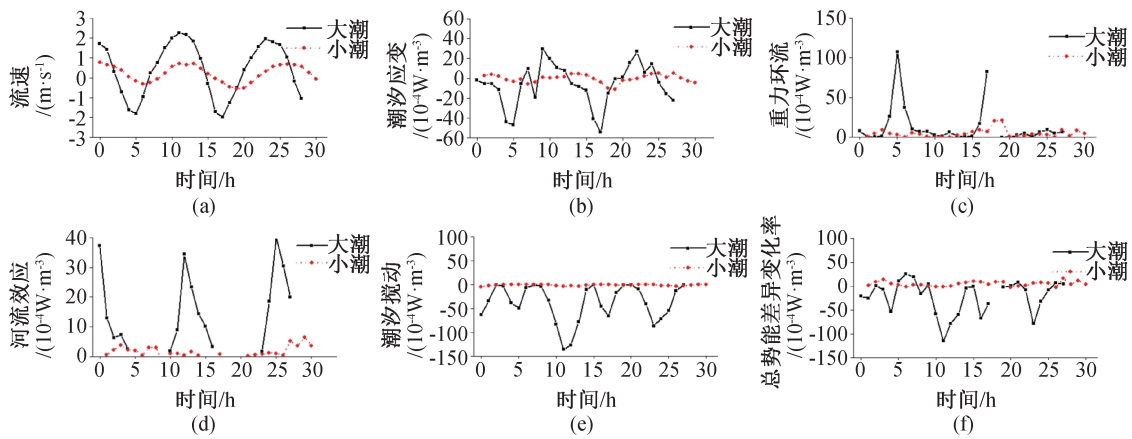


图 9 CS3S 站位相关参数随时间变化图

Fig.9 Changes of time-related parameters of CS35 station

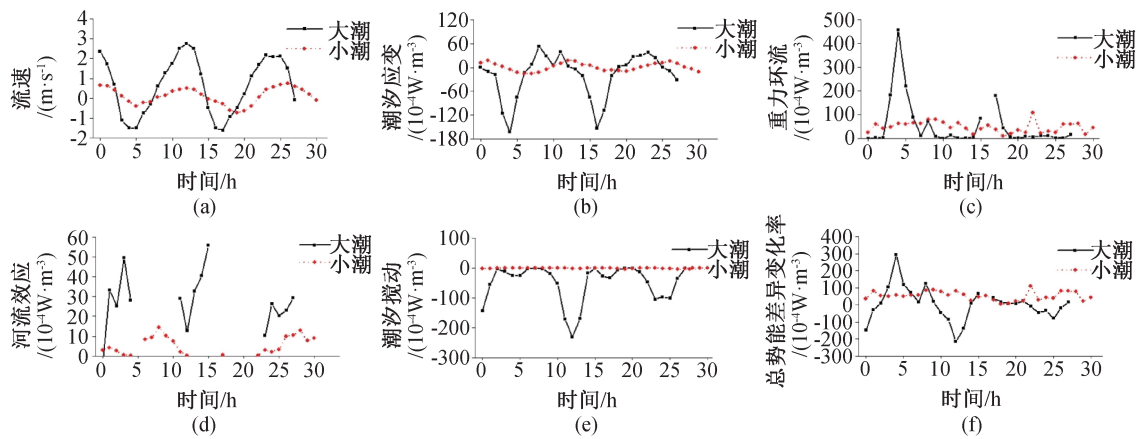


图 10 CS7S 站位相关参数随时间变化图

Fig.10 Changes of time-related parameters of CS75 station

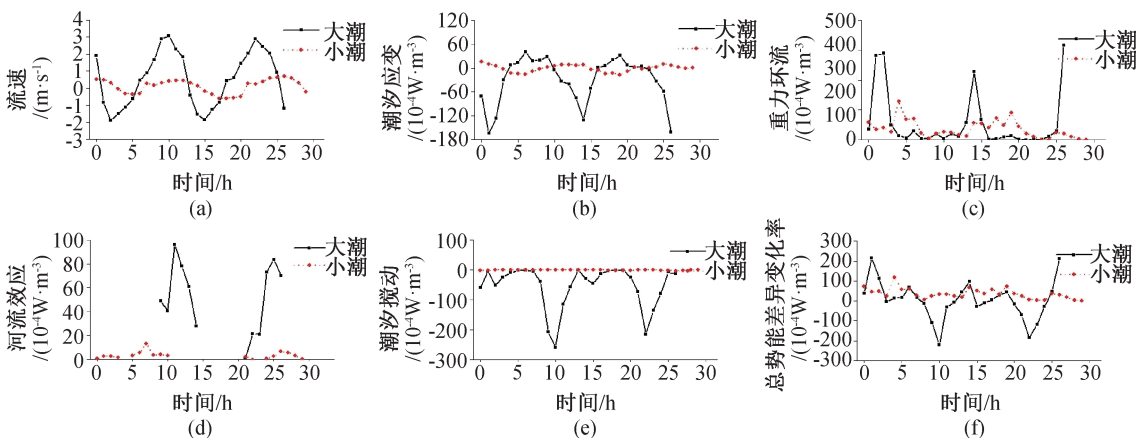


图 11 CS4S 站位相关参数随时间变化图

Fig.11 Changes of time-related parameters of CS45 station

的效应之和,导致小潮强烈的层化现象。在枯季大潮,潮汐搅动效应比河流效应和重力环流效应之和大,破坏小潮形成的层化结构,导致大潮期间层化现象较弱。

4 结论

1)2016 年长江口北槽枯季盐度呈周期性变化,存在明显盐水楔结构,小潮期间层化比大潮更

为显著,层化范围更大,且盐度等值线纵向长度更长。

2) 枯季小潮势能差异极值为 $225.08 \text{ J}\cdot\text{m}^{-3}$,大潮势能差异极值为 $191.24 \text{ J}\cdot\text{m}^{-3}$,小潮势能差异较大潮更大且范围更大。在北槽中上段,势能差异极值出现在转流时刻,而北槽下段,势能差异极值出现在涨急落急时刻。对比2012年枯季北槽混合层化研究,得到2016年枯季大小潮高势能差异区域更大,且较2012年上移5~15 km。

3) 采用改进的一维势能差异方程研究北槽混合层化机制,得到水体混合与层化趋势是由潮汐应变、重力环流、河流效应和潮汐搅四者相对大小决定,并且影响层化的大小潮变化的机制是潮汐搅动、重力环流和河流效应。

4) 影响河口混合层化的四个机制中,潮汐应变的潮平均值较小,潮周期内对混合层化影响较弱;重力环流是涨潮期促进河口层化的主要动力机制;河流效应在落潮期间偏大,潮平均作用强于潮汐应变,整体促进河口层化;潮汐搅动大潮比小潮大1~2个量级,削弱了大潮的层化作用。

参考文献:

- [1] SIMPSON J H, ALLEN C M, MORRIS N C G. Fronts on the Continental Shelf[J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 1978, 83(C9): 4607-4614.
- [2] SIMPSON J H, BROWN J, MATTHEWS J, et al. Tidal Straining, Density Currents, and Stirring in the Control of Estuarine Stratification[J]. *Estuaries and Coasts*, 1990, 13(2): 125-132.
- [3] GEYER W R, MACCREADY P. The Estuarine Circulation[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2014, 46(1): 175-197.
- [4] 毛汉礼, 甘子钧, 蓝淑芳. 长江冲淡水及其混合问题的初步探讨[J]. *海洋与湖沼*, 1963, 5(3): 183-206.
- [5] 时钟. 长江口水动力过程的研究进展(1979—1999)[J]. *海洋科学*, 2001, 25(6): 54-57.
- [6] 匡翠萍. 长江口盐水入侵三维数值模拟[J]. *河海大学学报: 自然科学版*, 1997, 4(25): 54-60.
- [7] 刘浩, 骆智斌, 潘伟然. 泉州湾水体结构的潮周期变化[J]. *台湾海峡*, 2009, 28(3): 316-320.
- [8] SHI J Z, LU L F. A Short Note on the Dispersion, Mixing, Stratification and Circulation within the Plume of the Partially-mixed Changjiang River Estuary, China [J]. *Journal of Hydro-environment Research*, 2011, 5(2): 111-126.
- [9] 熊龙兵, 浦祥, 时钟, 等. 潮汐应变对长江口北槽枯季潮流混合与层化的影响[J]. *海洋工程*, 2014, 32(4): 41-57.
- [10] 任杰, 刘宏坤, 贾良文, 等. 磨刀门水道盐度混合层化机制[J]. *水科学进展*, 2012, 23(5): 715-720.
- [11] 李霞, 胡国栋, 时钟, 等. 长江口南支南港的北槽枯季水体中混合、层化与潮汐应变[J]. *水运工程*, 2013(9): 79-88.
- [12] 浦祥. 长江河口重力环流、潮汐应变、混合与层化[D]. 上海: 上海交通大学, 2017.
- [13] PU X, SHI J Z, HU G D. Analyses of Intermittent Mixing and Stratification within the North Passage of the Changjiang (Yangtze) River estuary, China: A three-Dimensional Model Study[J]. *Journal of Marine Systems*, 2016, 158: 140-164.
- [14] SIMPSON J H, CRISP D J, HEARN C. The Shelf-Sea Fronts: Implications of their Existence and Behaviour [and Discussion] [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1981, 302(1472): 531-546.
- [15] MILLERO F J, POISSON A. International One-Atmosphere Equation of State of Seawater[J]. *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*, 1981, 28(6): 625-629.
- [16] PU X, SHI J Z, HU G D, et al. Circulation and Mixing along the North Passage in the Changjiang River estuary, China[J]. *Journal of Marine Systems*, 2015, 148: 213-235.
- [17] BOWDEN K F. Turbulent Mixing in Estuaries[J]. *Ocean Management*, 1981, 6(2-3): 117-135.

(责任编辑 王利君)