

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2018.01.017

南渡江河口水体氢氧同位素特征及对台风“海鸥”的响应

刘金庆^{1,2}, 印萍^{1,2}, 高飞^{1,2}, 陈斌^{1,2}, 连尔刚³

1. 国土资源部油气资源和环境地质重点实验室, 青岛海洋地质研究所, 青岛 266071

2. 海洋国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 青岛 266071

3. 国家海洋局第三海洋研究所, 厦门 361005

摘要:夏季亚热带地区频繁的台风天气对河口水体环境具有重要影响。以2014年台风“海鸥”过境前后在南渡江河口地区的水文要素现场观测资料, 分析了台风降雨前后南渡江河口地区的水体同位素组成特征和变化规律。研究表明: 大气降水是控制台风“海鸥”期间河水氢氧同位素的主要因素, 其主要来源为热带太平洋地区输送的水汽。台风“海鸥”过后, 降雨补给变少, 温度升高, 蒸发作用加强, 氢氧同位素值有所升高。台风带来的大量河流淡水资源入海改变了河口水体环境, 使得潮流界向河口后退, 水体混合强烈, 口门外形成咸淡水锋面。此次观测研究将有助于认识台风对亚热带地区中小河流河口水循环过程的影响。

关键词: 氢氧同位素; 水文环境; 台风“海鸥”; 南渡江

中图分类号: P597 **文献标识码:** A

Water H-O isotopic characteristics of Nandu River estuary and their response to typhoon “Kalmaegi”

LIU Jinqing^{1,2}, YIN Ping^{1,2}, GAO Fei^{1,2}, CHEN Bin^{1,2}, LIAN Ergang³

1. Key Laboratory of Marine Hydrocarbon Resources and Environmental Geology, Ministry of Land and Resources,

Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071, China

2. Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China

3. Third Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Xiamen 361005, China

Abstract: Frequent summer typhoon in subtropical regions brings significant impacts on water environment in estuaries. Based on the in-situ hydrographic observation in 2014, this paper portrays the characteristics and changes of water H-O isotope compositions in the Nandu River Estuary during the typhoon Kalmaegi. Results show that atmospheric precipitation, which is mainly derived from the water vapor transported from the tropical Pacific, is the main factor controlling the compositions of the H-O isotope in the typhoon period. After the typhoon, evaporation is strengthened with the decrease in rainfall and increase in temperature, and as the results, the contents of H-O isotopes are increased in water. The large amount of fresh water brought in by the Typhoon Kalmaegi will certainly bring in changes in the estuarine environment. The tidal current limit will move towards the river mouth, water mix strongly, and brackish water front form outside the river mouth. This study provides observational evidence for understanding the impact of typhoon on the water cycle of small-medium rivers in subtropical regions.

Key words: H-O isotope; hydrology; typhoon Kalmaegi; Nandu River

河流元素地球化学循环研究与同位素示踪技术一直是当前国内外地球科学研究的热点之一。研究水体氢氧同位素组成对于认识大气降水、河水、地下水、冰川水和地热水等不同水体之间的成因联系, 判别混合水体的来源, 进而探讨水循环过程和控制因

素具有重要的意义^[1-3]。以往对长江、黄河流域水体开展了较为系统的研究, 获得了水体氢氧同位素组成的时空分布变化特征以及在自然环境和人类活动双重影响下的水资源变化状况和演变规律^[3-8]。但是对中小河流入海物质通量变化及河口环境响应的

资助项目: 科技部基础性专项“典型中小入海河流河口动力沉积地貌与环境本底数据调查”(2013FY112200); 国家自然科学基金青年基金项目(41706074, 41506107 和 41406081)

作者简介: 刘金庆(1986—), 男, 博士后, 从事海洋地质与地质灾害研究, E-mail: jinqingliu@hotmail.com

通讯作者: 高飞(1987—), 男, 博士, 助理研究员, 从事海洋沉积动力研究, E-mail: gf198712@126.com

收稿日期: 2017-05-31; **改回日期:** 2017-10-30. 周立君编辑

研究相对比较薄弱,特别是台风等极端天气影响下的强降雨过程的河流水体化学组成缺乏足够的认识。

南渡江河口区位于琼北断陷盆地的东北部,王五一文教深大断裂等5条近东西向断裂控制了琼北断陷盆地的形成和发展。地层主要以第四系火山岩和沉积物为主,新近系海口组滨浅海碎屑沉积出露较少。南渡江发源于海南白沙县南峰山,是海南第一大河,斜贯海南岛中北部,流经白沙、琼中、儋州、澄迈、屯昌、定安等市县至海口市入琼州海峡(图1)。河流全长334km,流域面积达7033km²。龙塘坝址以下为河口段,河段长26.5km。干流在麻余村附近分为三汊,即北干流(长4.2km)、横沟河(长5km)和海甸溪(长6km)。径流主要来自南渡江上游,洪枯季变化明显,约80%的径流量来自洪季的6—10月。根据南渡江下游水文站长期实测资料,最大年平均流量为296m³/s(1973年),最小年平均流量为74.6m³/s(2004年)。2004—2007年期间,年平均流量为108.1m³/s,径流量为34.7×10⁸m³[9]。

南渡江河口区为热带季风气候,冬季多偏北风,风速较大,夏季多偏南风,风速较小,但常伴有台风大浪出现。波浪以风浪为主,主浪向为东北向,多年平均潮差1.21m,平均波高为0.6m,为较弱的正规日潮混合潮[10]。在河口近岸以波浪作用为主,离岸则受河口尤其是洪水作用形成的喷射流以及沿岸潮流的影响[11]。

现阶段对南渡江河口区的研究主要聚焦于河口区沉积动力[11,12]、地形地貌[13,14]以及水文生态环境[9,15,16]。而在河流水体化学、入海泥沙物质通量、沉积物组成等方面的研究认识仍有待深入。有关水体氢氧同位素组成的研究仅陈静生和王忠[17]基于1993年夏季海南岛地区少量雨水、河水和地下水样品探讨了它们之间的相互关系和影响因素。

2014年第15号台风“海鸥”于9月16日9时40分前后在海南省文昌市翁田镇沿海登陆,向西偏北运移,登陆时中心附近最大风力有13级(40m/s),11时,台风中心到达海口市,12时45分前后在广东徐闻南部沿海再次登陆。15日14时—16日14时,海南岛在台风“海鸥”期间的降雨量最高达354.1mm。在台风“海鸥”影响下,南渡江洪峰期间的径流量和含沙量均远远超过多年平均值[12],表明台风带来的瞬时物质通量显著影响了南渡江河口区地区的沉积格局。

本文以2014年台风“海鸥”过境时的监测资料为基础,分析了台风降雨前后南渡江河口区地区的水体同位素组成特征和变化规律,结合河口地区水体

环境的变化,探讨了水体同位素时空变化的主要影响因素,为中小河流河口地区水资源时空分布规律和水循环过程提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集

2014年9月15日—10月2日,在第15号台风“海鸥”影响海南期间,在南渡江中游潮流界以上河道G8站位(新大洲大桥附近)开展了河床基原位观测,并配合悬浮体、氢氧同位素取样和温盐观测。9月15日,在台风来临前一天,于G8站位布设河床底座式监测站(图1),利用日本JFE公司生产的ASTD 152自容式CTD和挪威AANDERAA公司的SEAGUARD声学多普勒流速剖面仪开始进行连续观测。同时按一定时间间隔(1~4h)同步采集该站水样并进行温盐观测,整个观测过程持续了近9天,共采集水样24个;随后(9月25日),选取大潮时期的落潮阶段,对南渡江流域15个河道断面和海域20个走航断面进行了水文观测和取样,分别采集河水样品13个和海水样品20个。野外共采集水样57个,所有水样均取自河水或海水表层(水深0~10cm),现场将水样通过乙酸纤维素膜过滤(孔径0.45μm)之后,装在不透光的高密度聚乙烯瓶中,并用密封膜封装,放置在低温避光条件下保存。

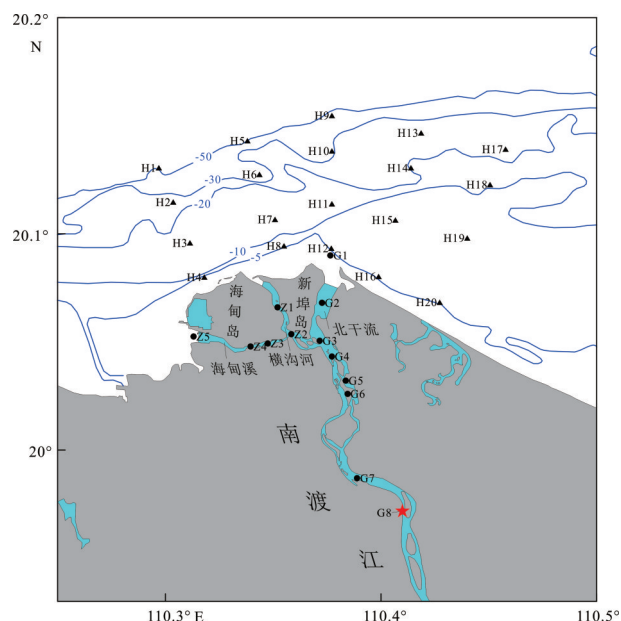


图1 南渡江调查站位

Fig.1 Sampling locations in the Nandu River Estuary.

1.2 测试方法

δD 和 $\delta^{18}O$ 的分析测试由同济大学海洋地质国家重点实验室完成,水样经 $0.22\mu m$ 醋酸纤维针头过滤器过滤后注入微量瓶等待上机测试。采用美国 Los Gatos Research(LGR)公司的液态水同位素分析仪(IWA-45EP,型号 9120032),运用离轴积分腔输出光谱技术,对汽化水分子吸收光谱强度及波长进行实时测量,可直接获得水样的 D/H 与 $^{18}O/^{16}O$ 比率。标样采用 LGR 公司提供的依据国际标准(V-SMOW)配置的工作标样(LGR3B、LGR4B 和 LGR5B)。 δD 和 $\delta^{18}O$ 的分析精度分别为 $\pm 0.5\text{‰}$

和 $\pm 0.1\text{‰}$,所有同位素测量结果单位都是相对于国际标准(V-SMOW)的千分差表示(‰)。

2 结果

2.1 台风“海鸥”期间南渡江水体同位素特征

南渡江水体的 δD 值为 $-80.7\text{‰} \sim -47.7\text{‰}$,平均值为 -68.2‰ 。南渡江水体的 $\delta^{18}O$ 值为 $-12.0\text{‰} \sim -7.5\text{‰}$,平均值为 -10.1‰ 。 δD 和 $\delta^{18}O$ 的最低值均出现在 9 月 18 日上午 8 点 30 分,最高值均出现在 9 月 15 日下午 15 点 40 分。从图 2 可以看出,从 9 月 15 日下午 15 点 40 分开始,到 16

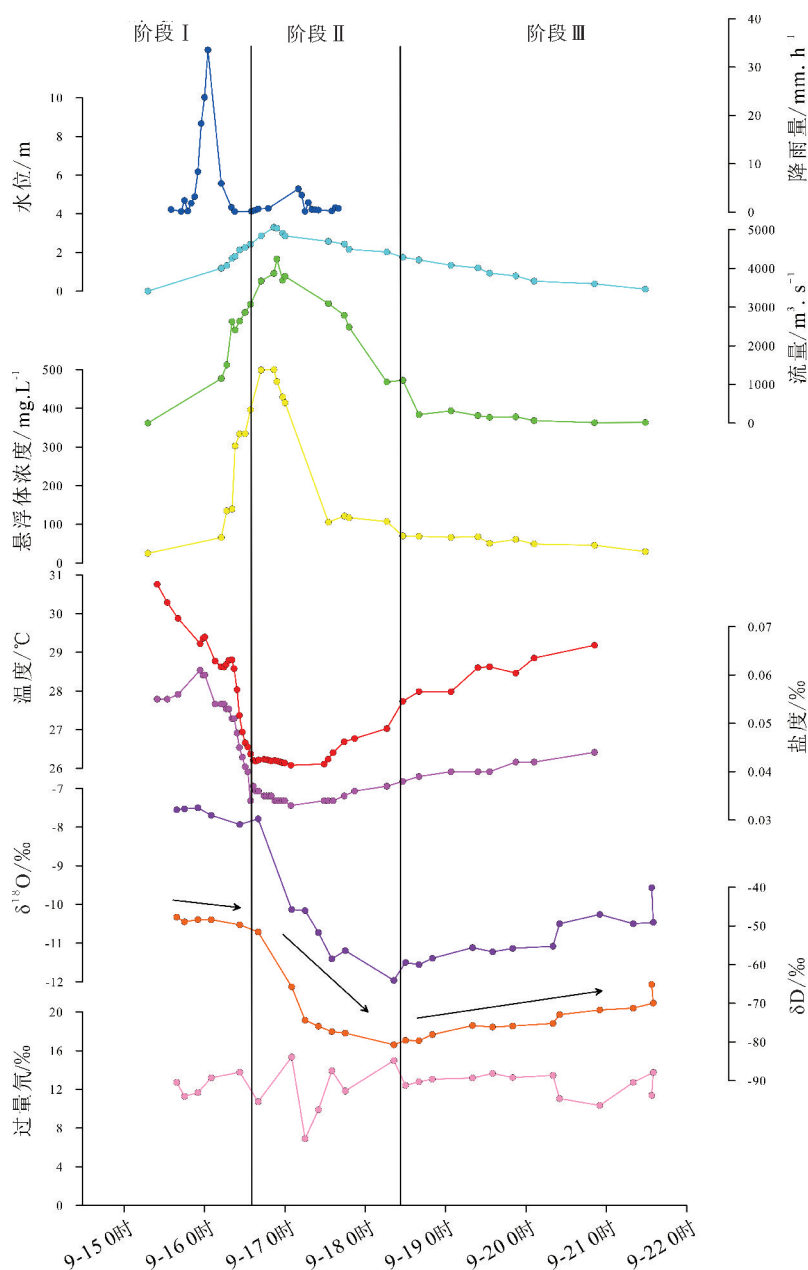


图 2 台风期间水体氢氧同位素与多种水文参数的变化过程

Fig.2 The variations in H-O isotopes and hydrological parameters during the typhoon Kalmaegi

日16时, δD 值变化不大, 呈略微降低趋势。但从16日16时到9月18日8点30分, δD 值迅速降低。此后, 直到监测结束, δD 值呈缓慢升高的趋势。 $\delta^{18}O$ 值的变化趋势与 δD 值基本一致。

从降雨量、水位变化、流量、悬浮体浓度、温度、盐度、 δD 和 $\delta^{18}O$ 随时间变化的曲线对比来看(图2), 所有上述河流水文指标与降雨量的变化存在一定的滞后性。这主要是因为台风“海鸥”带来的降雨主要集中于15日晚上到16日中午这段时间, 而雨水汇集经地面径流入河到达监测站需要一定时间。台风过境前的降雨初期, 降雨量小, 河水流量缓慢增加, 水体温度也缓慢降低, 水体盐度反而有所升高; 9月15日20:00左右, 降雨量开始增加, 到16日凌晨1点左右, 降雨量到达峰值; 此后, 降雨量开始下降, 16日11时台风过境往西偏北运移, 到16日14时左右, 降雨量已经很少。但在这段时期, 河水流量迅速增加, 水体温度和盐度都迅速降低。大致在17日凌晨0时, 河流流量才达到峰值, 而温度和盐度降到最低; 此后, 流量迅速减少, 温度和盐度缓慢升高, 直到18日上午8时以后流量才开始趋于相对稳定的低值, 温度和盐度继续保持缓慢升高的态势。

2.2 台风“海鸥”过后南渡江水体同位素特征

南渡江水体(包括干流和支流, 下同)的 δD 值为 $-63.2\text{‰} \sim -38.3\text{‰}$, 平均值为 -58.2‰ 。南渡江水体的 $\delta^{18}O$ 值为 $-10.2\text{‰} \sim -6.2\text{‰}$, 平均值为 -8.9‰ 。从干流沿程变化来看(图3), 距离河口越近, δD 和 $\delta^{18}O$ 值呈波动降低的趋势。在口门外附近, 由于盐度的升高, δD 和 $\delta^{18}O$ 值迅速升高。

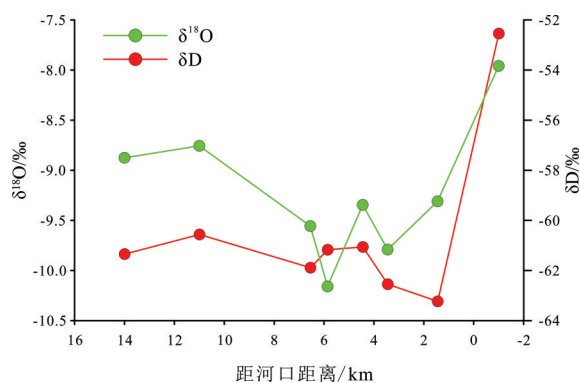


图3 南渡江干流 H-O 同位素的沿程变化

Fig.3 H-O isotope variations along the Nandu River mainstream

南渡江河口近岸海域水体的 δD 值为 $-15.7\text{‰} \sim -5.9\text{‰}$, 平均值为 -9.7‰ 。 $\delta^{18}O$ 值为 -2.5‰

$\sim -1.0\text{‰}$, 平均值为 -1.6‰ 。两者的平面分布极为相似。高值区主要位于研究区的西北部, 在研究区北部以及北干流口门附近含量也较高; 低值区主要位于横沟河口门外20m以浅的区域和研究区东部(图4)。

水温范围为 $28.5^{\circ}\text{C} \sim 29.9^{\circ}\text{C}$, 平均值为 29.1°C 。整个河口温度分布差异不大, 总体趋势是中部海域高, 东西两侧海域低, 东部海域高于西部海域, 远岸海域高于近岸海域。这种分布特点主要是受台风“海鸥”影响, 由于其登陆后第七天于落潮期间采集, 台风在这段时间带来的强降雨和风浪天气, 使得河流入海径流量显著增加, 混合作用大为增强, 因此温度呈现相对均匀的分布模式。此外, 受陆地热源效应影响, 研究区中部主径流方向的水体温度略高(图4)。

盐度范围为 $23.7\text{‰} \sim 31.6\text{‰}$, 平均值为 30.3‰ 。在横沟河岔道口门外存在一个异常低盐区, 盐度低于 28‰ , 其他区域的盐度分布差异较小, 一般为 $28\text{‰} \sim 30\text{‰}$ 。这种分布特点也与台风“海鸥”影响有关, 台风期间河流入海径流量大, 河流冲淡水降低了海域水体盐度, 而且强烈的风浪天气也使得水体混合作用加强, 从而使盐度分布相对均匀(图4)。

3 讨论

3.1 南渡江水体 δD 与 $\delta^{18}O$ 的关系

根据 Craig^[1] 研究发现, 全球雨水 δD 与 $\delta^{18}O$ 存在良好的线性关系, 即 Craig 全球雨水线方程:

$$\delta D = 8 \times \delta^{18}O + 10 \quad (1)$$

不同地区由于气象、地貌条件的不同, δD 与 $\delta^{18}O$ 的关系也表现出一定差异。根据以往的研究发现, 中国雨水线方程(CMWL)^[18] 为:

$$\delta D = 7.57 \times \delta^{18}O + 6.02 \quad (2)$$

海南岛雨水线方程(LMWL)^[17] 为:

$$\delta D = 3.86 \times \delta^{18}O - 19.65 \quad (3)$$

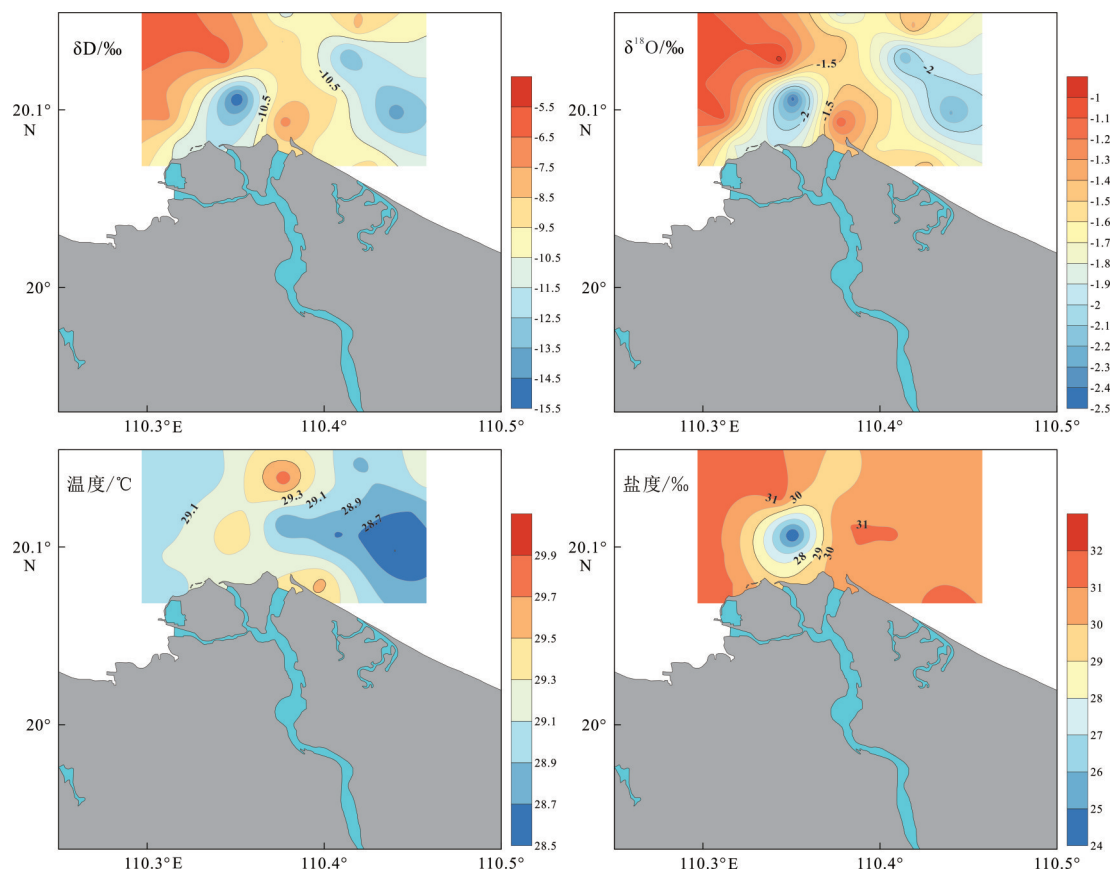
根据本次获得的数据, 获得台风“海鸥”期间南渡江河水的 δD 与 $\delta^{18}O$ 关系为:

$$\delta D = 7.75 \times \delta^{18}O + 9.90 (R^2 = 0.978) \quad (4)$$

台风“海鸥”过后南渡江河水的 δD 与 $\delta^{18}O$ 关系为:

$$\delta D = 6.30 \times \delta^{18}O - 1.97 (R^2 = 0.870) \quad (5)$$

(4)式斜率和截距与(1)式的斜率和截距比较一致, 非常接近全球雨水线, 而与(3)式海南岛地区雨

图 4 南渡江河口 δD 、 $\delta^{18}O$ 、温度和盐度的平面分布Fig.4 Spatial distribution of δD , $\delta^{18}O$, T and S in the Nandu River Estuary

水线相差甚远(图 5)。说明台风期间河水的补给不是来自当地的大气降水。考虑到台风海鸥是 9 月 12 日下午在菲律宾以东的西北太平洋洋面上生成,台风“海鸥”的发展、加强与西南季风急流和越赤道气流相向汇合迎面卷入密切相关,两支气流源源不断地为台风补充移动过程中耗损的水汽及能量,使其强度得到发展和维持^[18,19]。因此,台风“海鸥”期间河水的补给主要来自热带太平洋海面蒸发的水汽。对比我们在广西南流江获得的河水(2015 年 7 月) $\delta D=5.67 \times \delta^{18}O-4.11$ ($R^2=0.794$),高建飞^[4]等在黄河下游获得的河水(2005 年 7 月) $\delta D=5.69 \times \delta^{18}O-15.51$,丁梯平^[3]等在长江获得的河水(2007 年 7 月) $\delta D=7.19 \times \delta^{18}O+2.66$,台风期间的南渡江河水氢氧同位素组成与南流江、长江和黄河等河水的差异明显,进一步说明了其来源为外源水汽的供应。此外,(5)式的斜率小于(4)式,大于(3)式,表明南渡江水体在台风过后,在几乎无降雨补充的情况下,还可能受其他因素影响。

海南岛地区雨水、河水和地下水之间具有同源性^[17],海口地区雨后河流中雨水和地下水的补给组成比例分别占 85.7%和 14.3%,即大量的雨水通过

地表径流汇入河流,而补给地下水的雨水相对较少。对比海口地区 1993 年汛期雨水($\delta D: -47\text{‰}$, $\delta^{18}O: -5.4\text{‰}$)、河水($\delta D: -36\text{‰}$, $\delta^{18}O: -5.3\text{‰}$)和地下水($\delta D: -42\text{‰}$, $\delta^{18}O: -6.1\text{‰}$)同位素组成^[17],显然本次台风“海鸥”影响下的河流水体同位素更加贫化,台风过境后,温度升高,蒸发作用加强,尽管同位素值有所升高,但相比平常汛期,显然还是低得多。这主要是由于受到降雨量效应的影响^[20],台风带来的强降雨使得同位素组成趋向贫化,而且降雨量越大,同位素组成越贫化。

通常大气降水同位素的组成与温度和盐度均呈正相关的关系。根据监测站 G8 获得的温度和盐度数据,南渡江河水 $\delta^{18}O$ 与温度(T)存在以下线性关系:

$$\delta^{18}O = 0.83T - 33.20 (R^2 = 0.668) \quad (6)$$

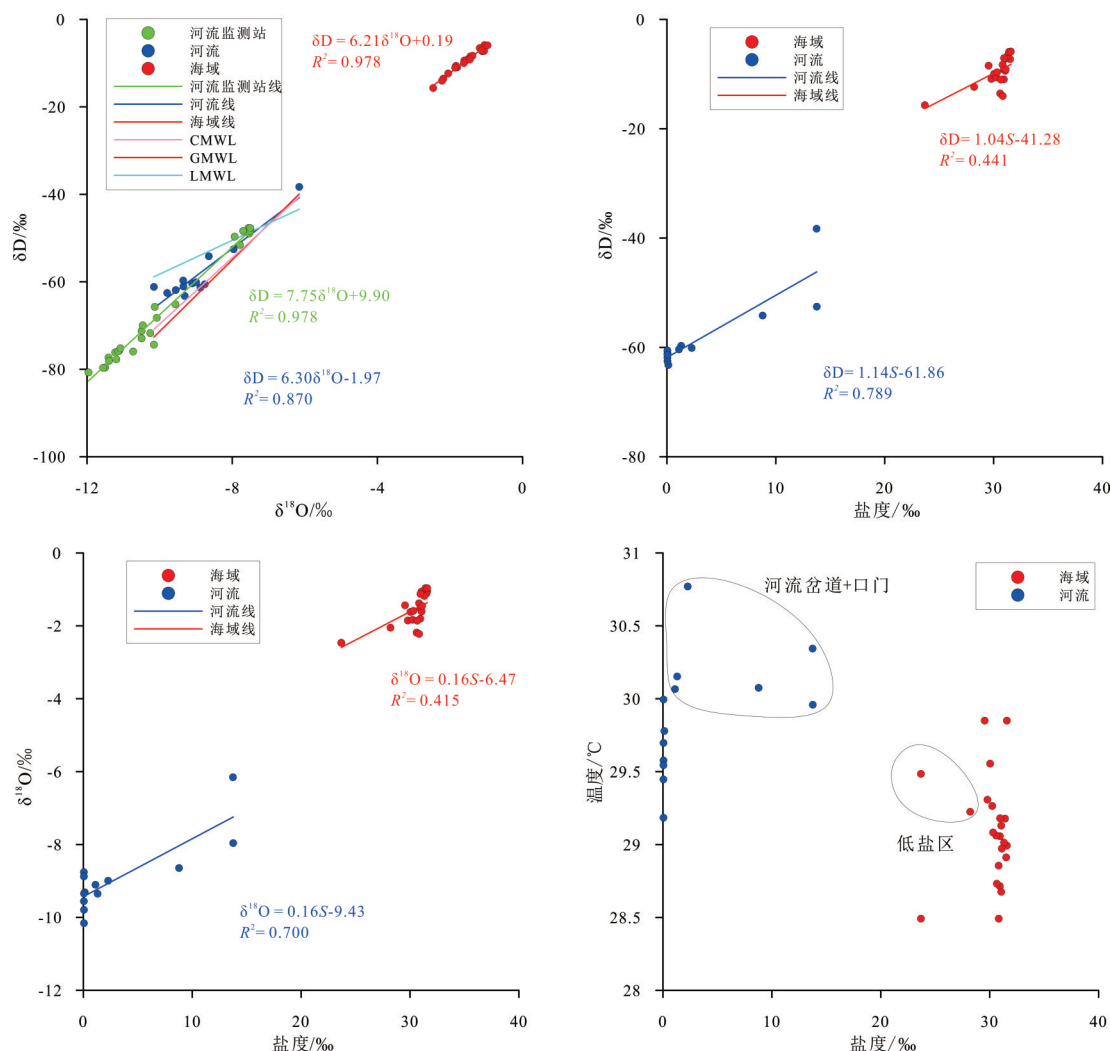
$\delta^{18}O$ 与盐度(S)存在以下线性关系:

$$\delta^{18}O = 167.29S - 17.21 (R^2 = 0.913) \quad (7)$$

温度(T)与盐度(S)也存在以下线性关系:

$$T = 147.41S + 21.69 (R^2 = 0.723) \quad (8)$$

可见,在无降水或降水量较小的情况下,温度升高,蒸发作用加强,重同位素含量富集。同样,盐度

图 5 南渡江河口 δD 、 $\delta^{18}O$ 、温度和盐度的相互关系Fig.5 The relationship among δD , $\delta^{18}O$, T and S in the Nandu River Estuary

升高,重同位素含量也相应升高。

台风海鸥过后,南渡江河水 $\delta^{18}O$ 和河口近岸海水 $\delta^{18}O$ 都与温度(T)不再具有线性关系,而南渡江河水 $\delta^{18}O$ 与盐度(S)还具有良好的线性关系(图 5):

$$\delta^{18}O = 0.16S - 9.43 (R^2 = 0.700) \quad (9)$$

南渡江河口海水 $\delta^{18}O$ 与盐度(S)也具有良好的线性关系(图 5):

$$\delta^{18}O = 0.16S - 6.47 (R^2 = 0.415) \quad (10)$$

这表明在台风海鸥刚过后,温度不是影响水体同位素组成的主要因素。通过 T - S 图可以看出,南渡江北干流几个站位盐度几乎为 0,横沟河岔道和口门附近盐度较低,而在横沟河口门外附近海域出现低盐区。这主要是因为台风过后的短时间内,正是大量的河流淡水输入改变了河口水体同位素组成特征。侵入河口内的盐水楔前缘被洪水径流强烈压缩,迫使潮流界向河口后退,导致河口内的盐度几

乎为 0(图 5)。在入海口门处,涨潮流携带盐水与淡水混合,并形成咸淡水锋面,在锋面处淡水从盐水楔上部向海流出,形成所谓的低盐区^[9,12]。

3.2 南渡江水体沿程变化与大气降水效应

大气降水是地表水的主要来源。受大气降水的控制,河水的氢氧同位素组成与其流域大气降水的氢氧同位素组成密切相关。大气降水同位素一般具有大陆效应和高程效应,即随着距离海岸越来越远和地势越来越高,大气降水的 δD 值和 $\delta^{18}O$ 值逐渐降低^[1]。前人已有研究表明,长江^[3]和黄河^[4]等大型河流流域内水体 δD 值和 $\delta^{18}O$ 值自上游到下游均呈逐渐升高的趋势,主要是大气降水的大陆效应导致。但我们在台风过境后对南渡江流域水体分析发现,南渡江流域内水体 δD 值和 $\delta^{18}O$ 值越靠近河口越低(图 3),与上述对大型河流的认识是相反的。究其原因,还是受到台风“海鸥”带来的降水作用的

影响。台风“海鸥”到来之前(9月15日下午),G8站 δD 值和 $\delta^{18}O$ 值分别为 -47.70% 和 -7.55% ,台风过后(9月21日下午)G8站 δD 值和 $\delta^{18}O$ 值分别为 -65.14% 和 -9.57% ,尽管水体同位素值相较于台风期间有所升高,但远比台风前的偏负(图2),可见台风“海鸥”降水的影响依旧存在。热带气旋降雨通常比正常降雨具有更明显偏负的 $\delta^{18}O$ 值,这可能是由于台风的高冷凝效率造成的^[21]。台风大量的降水补给到河水当中,使得河水具有台风降水同位素值偏负的特征。南渡江上游河道狭窄,下游河道宽阔,河水体积大,下游水体同位素值若恢复到正常水平(即高于上游),需要一定时间循环。

3.3 过量氘变化特征

Dansgaard^[2]提出利用氘过量(d -excess)的指标来反映大气降水氢氧同位素组成偏离雨水线的程度。其表达式为:

$$d = \delta D - 8 \times \delta^{18}O \quad (11)$$

d 值的不同可以直观反映大气降水在蒸发、凝结过程中的不平衡程度。通常大气湿度较高的区域, d 值较低,大气湿度干燥的区域,蒸发作用强, d 值较高。南渡江河水主要来自雨水补充,河水 d 值可以作为本地雨水 d 值的替代指标。由于雨滴在降落过程中可能受到较强的云下二次蒸发作用的影响,使得 d 值降低。但在降雨量变大或持续降雨条件下,云下二次蒸发作用又会减弱,导致 d 值升高。总体上,台风海鸥期间监测的河水 d 值为 6.9% ~ 15.3% ,平均值为 12.4% 。在阶段Ⅰ, d 值范围为 11.3% ~ 13.8% ,平均值为 12.5% ,在阶段Ⅱ, d 值范围为 6.9% ~ 15.3% ,平均值为 11.9% ,在阶段Ⅲ, d 值范围为 10.3% ~ 13.8% ,平均值为 12.6% 。可以看出, d 值由阶段Ⅰ—阶段Ⅱ—阶段Ⅲ呈现为稳定—波动—稳定的变化趋势(图2)。前已叙及,由于雨水汇入河流到达观测站需要一定时间,阶段Ⅱ的波动变化实际上反映了台风降雨过程中稳定同位素的分馏程度。降雨初期,雨量小,受云下二次蒸发影响, d 值降低,随着降雨持续,云下二次蒸发变弱, d 值降低,降雨结束,由于不再有雨水补充,河流水体蒸发作用增强, d 值升高。此外,在台风过后的短时间内,南渡江各个观测点的河水 d 值为 9.5% ~ 20.1% ,平均值为 13.2% 。显然此时的 d 值要比台风海鸥期间的河水 d 值高,表明温度升高,流域蒸发作用增强,从而使 d 值变高。

综上所述,根据台风期间河水同位素组成变化特征,可分为以下3个阶段:阶段Ⅰ,尽管是台风“海

鸥”影响的主要降雨时期,但由于雨水汇集入河需要一定时间,在监测站位G8出现洪峰流量之前,此时的河水同位素组成相对稳定,受少量降水径流影响, δD 和 $\delta^{18}O$ 值呈平缓降低趋势;阶段Ⅱ,尽管台风已经过境离开,基本不再有降雨影响,但由于地表径流的滞后性,G8站位出现洪峰流量,降水量效应才开始显著,雨水的冲刷稀释使河水 δD 和 $\delta^{18}O$ 值迅速降低,随着洪水水位开始回落, δD 和 $\delta^{18}O$ 值达到最低;阶段Ⅲ,洪水水位进一步回落趋于稳定,流域温度升高,蒸发作用增强,使得 δD 和 $\delta^{18}O$ 值开始逐步升高并趋于稳定。

4 结论

(1)台风“海鸥”期间,南渡江河水 δD 值为 -80.7% ~ -47.7% , $\delta^{18}O$ 值为 -12.0% ~ -7.5% 。台风“海鸥”过后的短时间内,南渡江河水 δD 值为 -63.2% ~ -38.3% , $\delta^{18}O$ 值为 -10.2% ~ -6.2% ;河口海水 δD 值为 -15.7% ~ -5.9% , $\delta^{18}O$ 值为 -2.5% ~ -1.0% 。

(2)台风“海鸥”期间,南渡江河水的 δD 与 $\delta^{18}O$ 关系为 $\delta D = 7.75 \times \delta^{18}O + 9.90$,接近全球雨水线,表明水汽来自热带太平洋,而不是海南岛屿;台风“海鸥”过后,南渡江河水的 δD 与 $\delta^{18}O$ 关系为 $\delta D = 6.30 \times \delta^{18}O - 1.97$,偏离全球雨水线,表明存在一定的蒸发过程。

(3)台风海鸥影响期间,南渡江河水同位素组成主要受降雨量影响,台风海鸥过境后,主要受蒸发作用影响。总而言之,台风带来的大量降水改变了河口水体环境,使得水体同位素组成发生了显著变化,即 δD 和 $\delta^{18}O$ 值迅速降低,台风降水过后由于蒸发作用, δD 和 $\delta^{18}O$ 值开始逐步升高并趋于稳定。同时,由于大量淡水入海,强烈的咸淡水混合作用使得潮流界向河口后退,在口门外形成咸淡水锋面。

参考文献(References)

- [1] Craig H. Isotopic Variations in Meteoric Waters[J]. Science, 1961, 133(3465):1702.
- [2] Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation[J]. Tellus, 1964, 16(4):436-468.
- [3] 丁梯平, 高建飞, 石国钰, 等. 长江水氢、氧同位素组成的时空变化及其环境意义[J]. 地质学报, 2013, 87(5):661-676. [DING Tiping, GAO Jianfei, SHI Guoyu, et al. Spacial and temporal variations of H isotope compositions of the Yangtze River water and their environmental implications[J]. Acta

- Geologica Sinica, 2013, 87(5):661-676.]
- [4] 高建飞, 丁梯平, 罗续荣, 等. 黄河水氢、氧同位素组成的空间变化特征及其环境意义[J]. 地质学报, 2011, 85(4):596-602. [GAO Jianfei, DING Tiping, LUO Xurong, et al. δD and $\delta^{18}O$ variations of water in the Yellow River and its environmental significance[J]. Acta Geologica Sinica, 2011, 85(4):596-602.]
- [5] 李小飞, 张明军, 王圣杰, 等. 黄河流域大气降水氢、氧稳定同位素时空特征及其环境意义[J]. 地质学报, 2013, 87(2):269-277. [LI Xiaofei, ZHANG Mingjun, WANG Shengjie, et al. Spatial and temporal variations of Hydrogen and Oxygen isotopes in precipitation in the Yellow River Basin and its environmental significance[J]. Acta Geologica Sinica, 2013, 87(2):269-277.]
- [6] Kai D, Yang S, Lian E, et al. Three Gorges Dam alters the Changjiang (Yangtze) river water cycle in the dry seasons: Evidence from H-O isotopes[J]. Science of the Total Environment, 2016, 562:89-97.
- [7] Li C, Yang S, Lian E, et al. Damming effect on the Changjiang (Yangtze River) river water cycle based on stable hydrogen and oxygen isotopic records[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2016, 165:125-133.
- [8] Zhang J, Letolle R, Martin J M, et al. Stable oxygen isotope distribution in the Huanghe (Yellow River) and the Changjiang (Yangtze River) estuarine systems[J]. Continental Shelf Research, 1990, 10(4):369-384.
- [9] 赵军鹏, 龚文平, 王道儒. 海南岛南渡江河口的盐水入侵[J]. 海洋学报, 2013, 35(5):14-28. [ZHAO Junpeng, GONG Wenping, WANG Daoru, et al. Saline intrusion in the Nandu River estuary, Hainan Island[J]. Acta Geologica Sinica, 2013, 35(5):14-28.]
- [10] 龚文平, 吴家信, 莫李帅. 用 EOF 方法分析海口湾东部浅滩区的泥沙来源与泥沙运动[J]. 泥沙研究, 2004(1):63-69. [GONG Wenping, WU Jiaxin, MO Lishuai, et al. Using EOF method to analyze the sediment source and transport in the east shallow area of Haikou bay[J]. Journal of Sediment Research, 2004(1):63-69.]
- [11] 谢华亮, 戴志军, 吴莹, 等. 海南岛南渡江河口动力沉积模式[J]. 沉积学报, 2014, 32(5):884-892. [XIE Hualiang, DAI Zhijun, WU Ying, et al. Sedimentation dynamic modes of the Nanduijiang Estuary, Hainan Island[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2014, 32(5):884-892.]
- [12] 陈斌, 高飞, 印萍, 等. 南渡江河口洪、枯季节水文泥沙变化特征及台风“海鸥”对入海水沙的影响[J]. 海洋与湖沼, 2015, 46(6):1279-1291. [CHEN Bin, GAO Fei, YIN Ping, et al. Variations in hydrodynamics and sedimentation in flood and dry seasons and impact of typhoon kalmaegi on runoff and sediment discharge in Nandu River Estuary[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2015, 46(6):1279-1291.]
- [13] 吴创收, 杨世伦, 罗向欣, 等. 近四十年南渡江水下三角洲的冲淤变化及其主控原因[J]. 海洋科学进展, 2011, 29(3):339-345. [WU Chuangshou, YANG Shilun, LUO Shilun, et al. Erosion and accretion of the Nandu River underwater Delta during 1963—2003[J]. Advances in Marine Science, 2011, 29(3):339-345.]
- [14] 罗宪林, 李春初, 罗章仁. 海南岛南渡江三角洲的废弃与侵蚀[J]. 海洋学报, 2000(3):55-60. [LUO Xianlin, LI Chunchu, LUO Zhangren, et al. Erosion and abandonment of the Nandu River Delta, Hainan Island[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2000(3):55-60.]
- [15] 李瑞娴, 李龙兵, 李海朋, 等. 南渡江入海径流量变化及其影响因素[J]. 水力发电, 2015(8):13-16, 57. [LI Ruixian, LI Longbing, LI Haipeng, et al. Study on variation and influencing factors of discharge into the sea from Nandu River[J]. Water Power, 2015(8):13-16, 57.]
- [16] 龚文平, 王道儒, 赵军鹏, 等. 海南岛南渡江河口枯季大小潮的盐度变化特征[J]. 海洋通报, 2012(6):621-629. [GONG Wenping, WANG Daoru, ZHAO Junpeng, et al. Salinity variability during spring-neap tidal cycle in the Nandu River Estuary of Hainan Island in the dry season[J]. Marine Science Bulletin, 2012(6):621-629.]
- [17] 陈静生, 王忠. 海南岛雨水、河水、地下水氢氧稳定同位素特征及其关系[J]. 地理科学, 1993, 13(3):273-278. [CHEN Jingsheng, WANG Zhong. A study on stable isotopes of hydrogen and oxygen in rain water, river water and groundwater from Hainan Island of China[J]. Scientia Geographica Sinica, 1993, 13(3):273-278.]
- [18] 庞洪喜, 何元庆, 张忠林, 等. 季风降水中 $\delta^{18}O$ 与季风水汽来源[J]. 科学通报, 2005, 50(20):2263-2266. [PANG Hongxi, HE Yuanqing, ZHANG Zhonglin, et al. The source of $\delta^{18}O$ in Monsoon precipitation and rain water[J]. Chinese Science Bulletin, 2005, 50(20):2263-2266.]
- [19] 陈伟斌, 黄荣成, 屈梅芳, 等. 快速台风“海鸥”强度、路径特点及成因分析[J]. 中国农学通报, 2015, 31(26):200-209. [CHEN Weibin, HUANG Rongcheng, QU Meifang, et al. Analysis of intensity, track characteristics and causes of fast moving typhoon “Kalmaegi”[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(26):200-209.]
- [20] 陈中笑, 程军, 郭品文, 等. 中国降水稳定同位素的分布特点及其影响因素[J]. 大气科学学报, 2010, 33(6):667-679. [CHEN Zhongxiao, CHENG Jun, GUO Pinwen, et al. Distribution characters and its control factors of stable isotope in precipitation over China[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2010, 33(6):667-679.]
- [21] Ye F, Deng W, Xie L, et al. Surface water $\delta^{18}O$ in the marginal China seas and its hydrological implications[J]. Estuarine Coastal & Shelf Science, 2014, 147:25-31.