

飞云江瑞安站潮位特征分析

陈政琳¹, 黄伟星^{1*}, 余荣¹, 程翔¹, 陈千富², 蔡佰男³, 朱晓映¹, 彭杨⁴

(1. 瑞安市水利综合管理中心, 浙江 温州 325212; 2. 瑞安市水利工程建设中心, 浙江 温州 325212;
3. 瑞安市水利投资有限公司, 浙江 温州 325212; 4. 浙江水利水电学院水利工程学院, 浙江 杭州 310018)

摘要: 为掌握飞云江感潮段潮位变化规律, 对瑞安潮位站逐时数据统计得到潮汐特征值, 运用调和分析方法获得潮汐分量和调和常数。研究结果表明, 瑞安站最高潮位和最低潮位分别为 5.01 m 和 -3.04 m; 平均高潮位和平均低潮位分别为 2.58 m 和 -1.83 m, 最大潮差和平均潮差分别为 6.84 m 和 4.41 m; 设计高、低潮位分别为 2.84 m 和 -1.95 m。瑞安站为浅海河口非正规半日潮特征, 具有潮高日不等和涨、落潮历时日不等现象, 落潮占优, 统计时段内落潮历时比涨潮历时长 2 h 左右。

关键词: 飞云江; 浅海河口; 潮位特征; 调和分析; 日潮不等

中图分类号: U675.12 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006—7973 (2025) 05—0115—04

潮汐是指海水在天体引潮力作用下所产生的周期性运动, 是发生在沿海地区的一种自然现象^[1]。感潮河段地处海陆交汇地带, 受外海潮汐和上游径流的双重影响下, 其潮位特征随时空变化较为复杂^[2], 其中潮汐类型、潮差、潮汐不等现象等均会对河口航运、防洪排涝工程设计、港口建设等产生重要影响^[3]。因此, 掌握感

潮河段潮汐变化特征对河口资源开发与利用、工程建设、防灾减灾和环境保护等具有重要意义。

飞云江为浙江省八大独流入海水系之一, 近年来, 河口段海塘安澜工程等陆续完成建设和准备启动, 感潮段防洪排涝标准得到进一步提升。由于沿江水文观测站点较少, 目前感潮河段只有瑞安潮位观测站在运行, 关

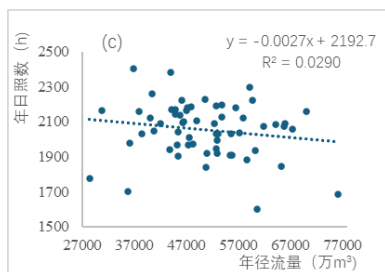


图9 腊普河流域 1961—2021 年径流量—气候因素相关关系散点图

4 结论

(1) 研究区域多年平均降水量为 1115.2 mm, 在 1961—2021 年间降水量变化趋势不显著, 突变时间发生在 2011 年, 近 10 年降水量总体呈下降趋势。

(2) 研究区域平均气温总体呈现上升趋势, 受全球气候变暖影响, 从 1978 年开始, 年平均气温始终处于上升趋势, 且在 2000 年之后一直呈现显著上升趋势。

(3) 腊普河流域多年平均日照为 2054.0 h, 1992 年之前年日照时数均为上升趋势, 从 1992 年开始, 年日照时数呈现减少趋势, 且 2004—2021 年减少趋势显著。

(4) 研究区域年径流量从历年看年径流量总体呈

减少趋势, 径流量在研究期内多次突变但变化不显著。

(5) 研究发现, 降雨量、气温的变化都会影响径流变化, 且影响显著, 其中, 降雨对径流的影响最大, 在研究期内是造成研究区径流变化的主要驱动要素。

参考文献:

- [1] 吕韶燕, 唐寅, 汤秋鸿, 等. 气候变化对北极勒拿河流域年和季节径流的影响 [J]. 地理学报, 2024, 79(11): 2811—2829.
- [2] 李培月, 李清艺, 刘伟超, 等. 气候变化对丹江流域(商州区段)河川径流的影响研究 [J/OL]. 安全与环境工程, 1—9.
- [3] 邓丽仙, 张洪波, 和艳, 等. 气候和土地利用变化下牛栏江中上段地表径流响应研究 [J/OL]. 中国农村水利水电, 1—22.
- [4] 宋爱英, 高秉俊, 贺彦. 变化环境下黑河上游径流演变规律分析 [J]. 水土保持研究, 2025, 32(02): 61—71.
- [5] 曹进军, 马海华. 气候和土地利用变化对石羊河流域自然径流的影响 [J]. 中国农业气象, 2024, 45(11): 1290—1301.
- [6] 魏光辉, 李东泽, 李江. 气候变化对塔河流域河川径流的影响 [J]. 黑龙江环境通报, 2024, 37(08): 4—8.
- [7] 彭俊, 赵宇杰, 潘志成, 等. 1961—2020 年黄河中游径流量变化特征及影响因素分析 [J]. 河南大学学报(自然科学版), 2024, 54(04): 419—428.

于飞云江感潮段潮汐特征的研究鲜有报道。本文利用瑞安潮位站近 50 年的实测观测资料,对飞云河口潮汐特征进行分析,以期为河口资源开发、防洪设计及航运工程建设等提供理论依据。

1 飞云江及瑞安潮位站概况

飞云江位于浙江省南部,东经 119° 36' ~ 120° 40', 北纬 27° 28' ~ 28° 00', 流域面积 3719 km², 河长 193 km, 其下游感潮河段长 60.8 km, 受潮汐变化影响较大。

瑞安潮位观测站(建于 1944 年 5 月)属于国家基本水文站,位于东经 120° 37' 6.6", 北纬 27° 47' 11.2", 距离出海口 12 km(如图 1 所示)。



图 1 瑞安潮位观测站位置示意图

2 研究方法

为掌握飞云江河口感潮段潮位变化规律,搜集了瑞安潮位站 1972 年到 2022 年的潮位数据,包括逐时、逐潮潮位数据和年月统计数据。对数据逐时统计得到潮汐特征值,采用高低潮累积频率曲线法对高、低潮累积频率进行分析,并采用潮汐调和分析方法获得潮汐分量,基于调和常数及统计结果,分析飞云江瑞安站潮汐特征。本文所述高程均以 1985 国家高程为基准。

3 数据处理及调和分析

在瑞安站 1972—2022 年的潮位数据中提取、整理,并整合为逐时、逐潮数据集,其时长远大于交点潮、太阳黑子潮等长周期分潮,满足调和分析要求;逐潮数据包含 1957—1967 年、2007—2020 年高潮位和低潮位数据。对逐时和逐潮潮位数据交叉比对验证,逐时数据时长、完整度、可靠性均满足分析要求。

以瑞安潮位站 50 年时间序列水位资料为输入,可计算得到绝大多数天文分潮参数,包括年分潮、半年分潮等长周期分潮,其调和分析的各分潮振幅和迟角等。

4 实测潮汐特征值的统计分析

4.1 潮汐特征值的统计

对瑞安潮位站 1972—2022 年逐时数据统计得到的潮汐特征值,如表 1 所示。

由表 1 可知,飞云江瑞安站近 50 年观测的最高潮位和最低潮位分别为 5.01 m 和 -3.04 m;平均高潮位和平均低潮位分别为 2.58 m 和 -1.83 m,最大潮差和平均潮差分别为 6.84 m 和 4.41 m,呈典型强潮特征;落潮时长大于涨潮,落潮占优,平均落潮历时和平均涨潮历时分别为 7 小时 13 分和 5 小时 11 分,相差约 2 h。

4.2 高、低潮累积频率分析

表 2 分别统计了瑞安站逐月最高潮位、最低潮位、累计频率为 50%、10%、5%、1% 的高潮位,以及累计频率为 50%、90%、95%、99% 的低潮位。高、低潮累积频率曲线如图 2 所示。

由表 2 和图 2 可知,设计高水位为累积频率 10% 的高潮位,设计低水位为累积频率 90% 的低潮位,对应的高、低潮位分别为 2.84 m 和 -1.95 m。

表 1 瑞安潮位站 1972—2022 年逐时数据统计得到的潮汐特征值

潮位 (m)	最低潮位	-3.04
	平均大潮低潮位	-2.02
	平均低低潮位	-2.06
	平均高低潮位	-1.60
	平均小潮低潮位	-1.65
	平均低潮位	-1.83
	平均海平面	0.38
	平均高潮位	2.58
	平均小潮高潮位	2.35
	平均低高潮位	2.42
	平均高高潮位	2.75
	平均大潮高潮位	2.97
	最高潮位	5.01
潮差 (m)	最小潮差	0.96
	最大潮差	6.84
	平均潮差	4.41
涨、落潮历时 (hh:mm)	平均涨潮历时	5:11
	平均落潮历时	7:13

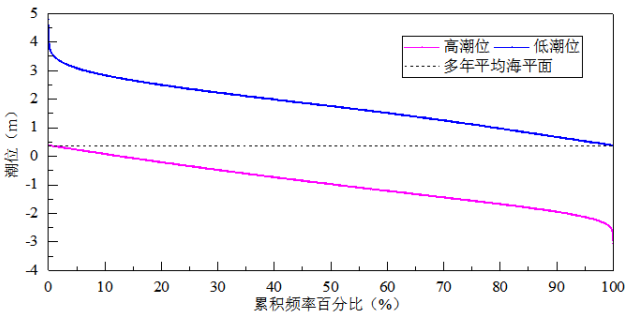


图 2 高、低潮累积频率曲线 (1972—2022)

表 2 瑞安站逐月高、低潮累积频率（单位：m）

月份	平均海平面	低潮					高潮				
		最低潮位	50%	90%	95%	99%	最高潮位	50%	10%	5%	1%
1月	0.30	-2.79	-0.96	-1.91	-2.11	-2.38	3.98	1.66	2.69	2.94	3.31
2月	0.28	-2.71	-0.96	-1.93	-2.09	-2.34	3.88	1.62	2.73	2.98	3.33
3月	0.29	-2.84	-0.98	-1.98	-2.13	-2.35	4.05	1.65	2.81	3.05	3.42
4月	0.29	-2.73	-1.02	-2.00	-2.17	-2.39	3.74	1.69	2.77	2.99	3.34
5月	0.33	-2.88	-1.04	-2.00	-2.19	-2.44	3.90	1.75	2.73	2.94	3.34
6月	0.37	-3.04	-1.06	-1.98	-2.20	-2.50	4.37	1.81	2.74	2.98	3.40
7月	0.35	-2.96	-1.06	-2.02	-2.22	-2.54	4.56	1.79	2.78	3.03	3.47
8月	0.45	-2.92	-0.97	-1.97	-2.15	-2.43	5.01	1.83	2.95	3.20	3.67
9月	0.56	-2.62	-0.89	-1.88	-2.04	-2.29	4.80	1.87	3.09	3.35	3.74
10月	0.55	-2.76	-0.86	-1.82	-2.00	-2.25	4.53	1.85	3.05	3.31	3.69
11月	0.43	-2.73	-0.93	-1.86	-2.06	-2.33	4.11	1.77	2.85	3.09	3.48
12月	0.33	-2.87	-0.96	-1.90	-2.12	-2.40	3.80	1.71	2.69	2.94	3.32
全年	0.38	-3.04	-0.97	-1.95	-2.12	-2.40	5.01	1.75	2.84	3.09	3.51

5 潮汐调和分析

瑞安站潮汐以天文潮为主，采用调和分析方法计算，公式如下^[4]：

$$H(t) = Z_0 + \sum_{i=1}^j H_i \cos(w_i t - \Psi_i) + \Delta H(t) \quad (1)$$

式中， $H(t)$ 为某时刻的潮位，m； Z_0 为平均海面，m； t 为时间，h； H_i 为第*i*个分潮振幅，m； Ψ_i 为第*i*分潮的相位，°； w_i 为第*i*分潮的频率，1/h， $w_i = 2\pi/T_i$ ， T_i 为第*i*分潮的周期，h；*i*和*j*分别为分潮序号和总数； $\Delta H(t)$ 为随机增（减）水，m。

如令所要求的潮位为 $H_P(t)$ ^[5]：

$$H_P(t) = Z_0 + \sum_{i=1}^j H_j \cos(w_i t - \Psi_i) \quad (2)$$

式中， $H_P(t)$ 为某时刻的预报潮位，m。

根据上述公式计算得到天文潮分量（如表 3 所示），潮位实测值与计算进行对比，如图 3 所示。

表 3 瑞安站潮汐调和分析结果

分潮	周期（h）	振幅（m）	迟角（°）
M ₂	12.42	1.982	81.7
S ₂	12.00	0.616	-31.0
N ₂	12.66	0.332	-4.0
K ₂	11.97	0.174	127.6
K ₁	23.93	0.261	-130.7
O ₁	25.82	0.190	5.9
Q ₁	26.87	0.032	-79.4
P ₁	24.07	0.066	-111.2
M ₄	6.21	0.198	94.2
M ₆	4.14	0.041	-26.2
MS ₄	6.10	0.164	-22.6

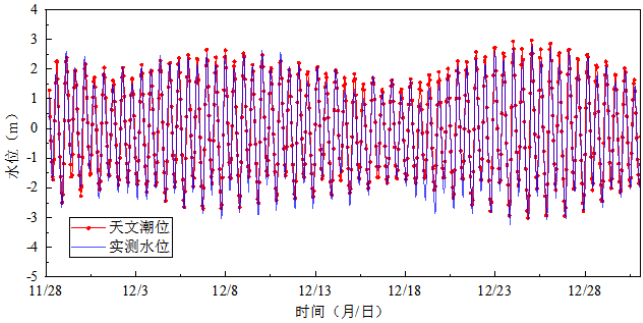


图 3 瑞安站潮汐调和分析结果与实测水位对比

由图 3 可知，调和分析结果与实测潮位吻合较好。瑞安站最高天文潮为 3.89 m，最低天文潮位为 -2.84 m。飞云江瑞安站潮汐相邻高潮或低潮的高度不等，涨、落潮历时也不等，属于非正规半日潮。

6 潮汐特征分析

6.1 潮汐类型

潮汐在河口浅水区域会受到边界条件影响而发生变形，常采用以下公式定量计算^[6]：

$$G = H_{M_4}/H_{M_2} \quad (3)$$

式中，和为浅水 1/4 日分潮（M₄）与半日分潮（M₂）的振幅，m； G 为浅水分潮与半日分潮振幅的比值，反映潮汐受到浅海影响的程度，当 $G>0.04$ 时，表明受浅水分潮影响显著。

将表 3 相关参数代入上述公式计算可知， G 值为 0.1，大于 0.04，表明瑞安站潮汐变形显著，受浅水分潮影响明显，具有浅海河口非正规半日潮特征。

6.2 潮差

潮差特征主要通过平均潮差和最大可能潮差来反映,采用如下公式计算^[7,8]。

$$\Delta\bar{H} = 2.02H_{M_2} + 0.58H_{S_2}^2/H_{M_2} + 0.08(H_{K_1} + H_{O_1})^2/H_{M_2} \quad (4)$$

$$\Delta H_{Mptr} = 2(1.29H_{S_2} + 1.23H_{M_2} + H_{K_1} + H_{O_1}) \quad (5)$$

式中, $\Delta\bar{H}$ 和 ΔH_{Mptr} 分别表示平均潮差和最大可能潮差, m; H_{S_2} 、 H_{K_1} 和 H_{O_1} 为半日分潮(S_2)、全日分潮(K_1 、 O_1)的振幅, m。

经计算得瑞安站平均潮差为 4.12 m, 最大可能潮差为 7.37 m。通过调和分析结果计算的平均潮差与通过实测资料分析得到平均潮差值(4.41m)较为接近。

6.3 潮汐的日潮不等

对于潮高日不等, 常采用如下公式计算^[9]:

$$T_1 = H_{S_2}/H_{M_2} \quad (6)$$

$$G_1 = g_{M_2} - (g_{K_1} + g_{O_1}) \quad (7)$$

式中, T_1 为半日分潮振幅(H_{S_2} 和 H_{M_2})的比值; g_{M_2} 、 g_{K_1} 和 g_{O_1} 分别为半日分潮(M_2)和全日分潮(K_1 、 O_1)对应的迟角, °; G_1 为半日分潮(M_2)迟角与全日分潮(K_1 、 O_1)迟角和的差值, °。

当 $T_1 \geq 0.4$ 时, 则可以判定存在明显的潮高日不等现象。当 G_1 值在 0° (或 360°)左右时表示该处潮位呈现出高潮日不等; 当 G_1 值在 180° 左右时表示该处潮位出现低潮日不等; 当 G_1 值在 270° 左右时则表示该处潮位存在高潮和低潮均日不等现象。经计算, 瑞安站 T_1 值为 0.31, 小于 0.4, 表明该站呈现较不明显的潮高日不等现象。 G_1 值为 206.5° , 接近 180° , 因此, 瑞安站潮汐存在低潮日不等现象, 采用如下公式计算^[10]:

$$G_2 = 2g_{M_2} - g_{M_4} \quad (8)$$

式中, g_{M_4} 为浅水 1/4 日分潮(M_4)对应的迟角, °; 为 2 倍的半日分潮(M_2)迟角与 1/4 日分潮(M_4)迟角的差值, °。

经计算, G_2 值为 69.2° , 在 90° 左右, 表明落潮历时大于涨潮历时, 落潮流占优, 统计时段内落潮历时比涨潮历时长 2 h 左右, 计算结果与实测分析结论一致。

7 结论

根据瑞安站潮位观测资料, 分析飞云江河口强潮段潮差、高低潮位特征以及天文潮变化规律等。得到的主要结论如下:

(1) 飞云江瑞安站近 50 年观测的最高潮位和最低潮位分别为 5.01 m 和 -3.04 m; 平均高潮位和平均低潮位分别为 2.58 m 和 -1.83 m, 最大潮差和平均潮差分别为 6.84 m 和 4.41 m, 呈现出典型的强潮特征。

(2) 瑞安站设计高水位为累积频率 10% 的高潮位, 设计低水位为累积频率 90% 的低潮位, 对应的高、低潮位分别为 2.84 m 和 -1.95 m。由近 50 年潮位观测资料和分析计算得到瑞安站最高天文潮和最低天文潮位分别为 3.89 m 和 -2.84 m。

(3) 瑞安站潮汐受浅水分潮影响明显, 变形显著, 具有潮高日不等和涨、落潮历时日不等现象, 表现出浅海河口非正规半日潮特征。瑞安站落潮历时大于涨潮历时, 落潮流占优, 统计时段内落潮历时比涨潮历时长 2 h 左右, 调和分析结果与实测值吻合较好。

参考文献:

- [1] 陈宗镛. 潮汐学 [M]. 北京: 科学出版社, 1980:1-4.
- [2] 赵晨澄, 杨友健, 白直旭. 甌江流域感潮河段潮位变化趋势分析 [J]. 陕西水利, 2022,(07):1-5+11.
- [3] 王立杨, 桑金, 乔守文, 等. 渤海沿岸 4 个验潮站潮汐特征分析 [J]. 海洋湖沼通报, 2020,(04):23-29.
- [4] 刘倩, 孙小淇. 青岛港潮汐的调和分析与预报 [J]. 海洋气象学报, 2022,42(02):99-106.
- [5] 石景元, 张功瑾. 舟山海域潮汐特征及调和分析精度研究 [J]. 海洋技术学报, 2022,41(03):83-89.
- [6] 黄燕, 李妍清, 汪青静, 等. 湄公河感潮河段潮汐特征分析 [C]//中国水利学会. 2022 中国水利学术大会论文集 (第五分册). 黄河水利出版社, 2022:431-438.
- [7] 黄祖珂, 黄磊. 潮汐原理与计算 [M]. 青岛: 中国海洋大学出版社, 2005:235-236.
- [8] 吴德安, 严以新, 马林艺, 等. 江苏辐射沙洲海域最大可能潮差的计算与分析 [J]. 大连海事大学学报, 2008,34(04):75-78.
- [9] 成印河, 梁广建, 朱凤芹, 等. 粤西沿岸海域潮汐特征 [J]. 海洋科学, 2017,41(06):111-118.
- [10] 孙维康, 周兴华, 冯义楷等. 山东沿海潮汐的时空特征分析 [J]. 海洋技术学报, 2018,37(04):68-75.