

# 薛家岛岬湾型海岸侵蚀演化的定量性研究

张 军<sup>1</sup>, 孙晓霞<sup>1</sup>, 印 萍<sup>2</sup>, 崔承琦<sup>1</sup>

(1. 青岛海洋大学 海洋地球科学学院, 山东 青岛 266003; 2. 国家海洋局 第一海洋研究所, 山东 青岛 266061)

**摘要:** 在 4 a 连续观测的基础上, 确定薛家岛周边大部分是抗蚀强度大的基岩岬湾海蚀岸, 海蚀崖蚀退和海蚀平台蚀低的平均速率分别为  $10^{-2}$  和  $10^{-4}$  m/a 量级; 弓形海湾湾顶有薄层现代海滩砂砾, 石雀湾和银沙滩崖前和后滨有大量海滩相大砾石(粒度为 20~ 30 cm). 外侧海岸直濒开阔海, 水下岸坡为深陡型, 气象水文等外营力因素作用强度较大, 显示中-高能海岸环境地质地貌特征. 薛家岛外海海岸冲积物供给源贫乏, 小于  $2 \times 10^4$  m<sup>3</sup>/a. 沿岸冲积物流流向 北东至南西, 采用目前国际较通用的波浪辐射应力模式方法计算其容量达  $13 \times 10^4$  m<sup>3</sup>/a, 这种源-运量的不平衡是造成基岩海蚀岸的机制.

**关键词:** 基岩岬湾海岸; 新构造上升; 海蚀速率; 沿岸冲积物流; 方向强度容量; 薛家岛; 定量研究

中国分类号: P737.1

文献标识码: A

文章编号: 0253- 4193(2002)03- 0060- 08

## 1 引言

基岩海岸约占世界岸线的 80%, 因此对基岩海岸的研究历来受到人们的重视. 国外在这方面做了大量的工作, 在基岩海岸的侵蚀演化方面研究的程度较高. 20 世纪 70 年代以来, Komar 等对美国俄勒冈海岸海崖蚀退的动力机制进行了探讨<sup>[1-3]</sup>. 1976 年 Sunamura<sup>[4]</sup> 应用线性自动控制理论得到 Sunamura 方程, 奠定了基岩海岸侵蚀数值研究的基础. 1996 年 Belov, Davies 和 Williams 提出 BDW 方程, 并以英国 Glamorgan Heritage 灰岩基岩海岸为例进行了数值模拟<sup>[5]</sup>.

国内目前对基岩海岸的侵蚀演化方面的研究较少, 王颖、李从先等<sup>[6-8]</sup> 对我国的基岩海岸的分布、地貌特征及动力机制等问题进行了阐述和探讨. 本文选取青岛西南的薛家岛海岸进行了基岩海岸侵蚀的定量研究. 薛家岛海岸是我国北方岬湾型基岩海岸的曲型, 其侵蚀演

收稿日期: 2001- 10- 27; 修订日期: 2002- 02- 26.

基金项目: 国家“八五”攻关专题资助项目(908- 04- 06- 03).

作者简介: 张 军(1973-), 男, 山东省青岛市人, 博士生, 从事海洋地质学研究.

化具有一定的典型性,同时对青岛经济技术开发区的生态环境和旅游经济有着重要意义。

## 2 海岸自然环境

薛家岛地处胶州湾和灵山湾之间,为一个有陆桥(与胶南)联结的北东-南西延伸的长形半岛,其外侧(南东岸)直濒开阔海,内侧(北西岸)濒临半封闭的薛家岛湾和唐岛湾,由于外侧海岸侵蚀后退速率较大,使岛体轴向分水岭逼近外海,岸线(北部窟窿山嘴-南部鱼鸣嘴)长为18 km,岸线曲折率在1.5以上,为基岩岬湾型海岸。

薛家岛地区在构造上地处新华夏系第二隆起带次一级构造单元胶南隆起之东部。元古界地层出露于其南部石岭子、顾家岛和刘家岛西侧,系元古界胶南群大山沟之混合岩化变质岩,岩石的抗压强度  $S_c = 110 \sim 200 \text{ Pa}$ ; 刘家岛以北为中生代燕山晚期侵入岩体,刘家岛至石雀湾一带为中粒斑状正长闪长岩、花岗闪长岩和正长花岗岩,其抗压强度也较大,在100~160 Pa之间。海岸走向受区域北东-南西向构造线控制,在岩滩上有多列岩脉分布。薛家岛北部还分布着中生界白垩系地层,但整个区域内缺失古生代地层,未见第三纪地层。第四纪地层也不甚发育,除局部有风成和洪坡积黄土外,沿岸湾顶和下水岸坡有全新世薄砂砾层,厚度只有0~5 m。

本区自陆向海形成梯级地貌层序:高程50 m以上为丘陵山地,极顶一般为70~80 m(南部)和140~170 m(北部),皆为侵蚀剥蚀区;丘陵外围高程为10~50 m,系不同时代不同岩性区向海倾斜的统一地貌面——剥蚀面,其上界与丘陵山地区有明显的地形转折,其下界与薛家岛外围海岸形成高5~10 m的海蚀崖,崖下即为现代海滩。本区岸滩有三种类型:大部分海岸是岩滩,即海蚀平台(宽度数十米至100 m不等),占岸线总长度的2/3,另两种是弓形海湾岸的砂砾质海滩和岩滩-砂砾滩混合型岸滩。岸滩外至10 m等深线为宽100 m余(岬角区)至数百米深陡型水下岸坡。本区岩层特点和梯级地貌层序显示区域新构造稳定上升运动的特征(见图1)。

薛家岛外侧有三个较大的弓形海湾,海湾弧度均小于 $0.3\pi$ 。自北向南这三个弓形海湾为:张屯岬-象脖子岬之间的金沙滩湾,长5.5 km;象脖子岬-石雀岬之间的石雀湾,长4.0 km;石雀岬-连三岛岬之间的银沙滩湾,长2.1 km。湾顶部位均有海滩,其中金沙滩湾顶受东北部张屯岬的隐蔽效应较明显,形成平均坡降1/30,宽200~250 m的中细沙滩;石雀湾为岩滩-砂砾滩混合型凹岸岸滩,因受岸外3~4条岩脊的掩蔽,岩滩上覆有0.0~1.5 m厚的薄砂砾层背迭于海蚀崖前;银沙滩是刘家岛-石岭子连岛砂坝外侧的砂砾海滩。石雀湾和银沙滩的崖前岸边和海滩后滨有大量砾石,平均粒度为5~8 cm,最大为20~30 cm。磨圆度中等,显示中高能海滩的海岸动力地貌环境。

## 3 基岩海蚀岸形态和侵蚀速率

本区的基岩海蚀岸均不同程度具有海蚀崖-岩滩同生形态体系,即海崖-平台体系(见图2),因此海岸在水平方向的平均蚀退速率以及海蚀平台在垂向上的平均蚀低速率可以用形态学方法估算。由于该地区新构造运动上升的幅度很小,在计算海蚀速率时已被忽略。在薛家岛这样由结晶岩和变质岩组成的海岸地带,海蚀的速率是十分缓慢的,短期内进行实测几乎不可能。

目前除了室内人工实验外,对基岩海岸蚀退问题的研究仍处在定性和半定量(指长时期平均

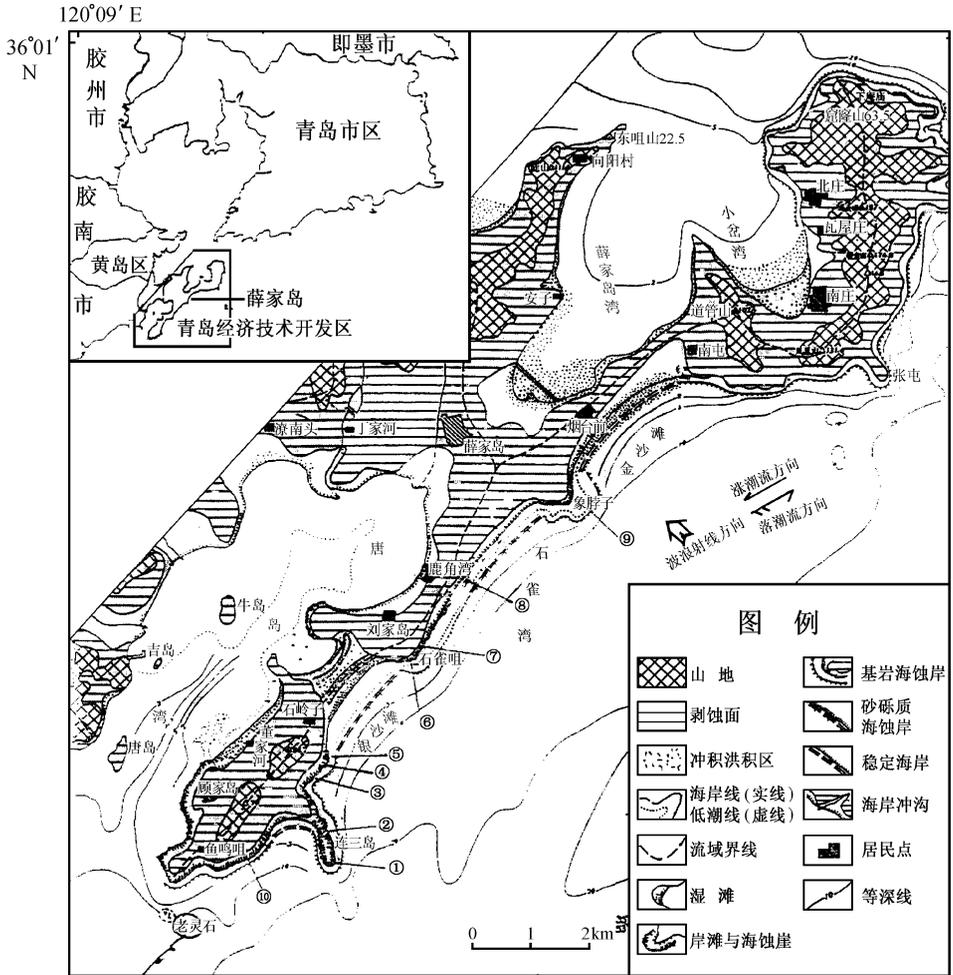


图 1 薛家岛海岸地貌

①~⑩显示 10 个海蚀平台断面的平面位置

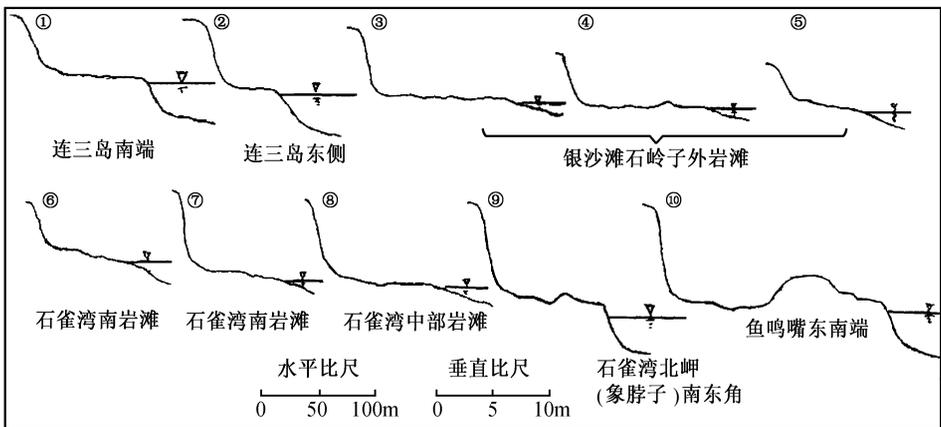


图 2 薛家岛海蚀平台断面示意图(其平面位置见图 1)

速率的定量)阶段<sup>[5-10]</sup>. 本文对平均速率进行了计算. 应指出影响海岸侵蚀的因素是多元的、互相作用的. 理论上, 有效海蚀强度  $F_w$  大于基岩抗蚀强度  $F_r$  时即发生海蚀. 海蚀后退速率为

$$dx/dt = \mu \ln(F_w/F_r)$$

式中,  $\mu$  为无量纲常数. 如果用近岸波高  $H$  表示  $F_w$ , 用基岩海岸岩石的抗压强度  $S_c$  表示岩岸的抗蚀强度, 则

$$dx/dt = \mu[\Gamma + \ln(Qgh/S_c)],$$

式中,  $\Gamma = \ln(A/B)$ ,  $A$  为与砂砾等因素有关的影响  $F_w$  大小的无量纲常数,  $B$  为与不连续性等因素有关的影响  $F_r$  强弱的无量纲常数. 根据 Sunamura<sup>[11]</sup> 的研究, 对海蚀岸类型的界定可用  $C = Qgh/S_c$  指标, 对本区发育的海蚀平台  $C > 1.3 \times 10^{-2}$ .

还应指出, 影响基岩海岸(结晶岩、变质岩)的外动力因素主要是波浪中的大波. 另外, 上述  $S_c$  参数是在时间进程上稳定不变的假定条件下设立的, 显然这与自然界的实际情况有差距. 事实上海蚀速率是变化的, 而且具有突发性. 在本研究中我们列出了本区海岸一些地段长期以来的平均海蚀速率( $\Delta x/\Delta t$  和  $\Delta z/\Delta t$ ).

与世界有资可查的 208 处海蚀岸的平均海蚀速度(表 1)比较, 薛家岛外侧海蚀岸就其海蚀速率来说属于海蚀相对缓慢的稳性岸(表 2). 海蚀崖的平均蚀退速率为  $2.1 \times 10^{-2}$  m/a, 相当于世界基岩岸动态量级的 20%; 海蚀平台的平均蚀低速率  $dz/dt$  与海蚀崖蚀退速率的关系<sup>[12]</sup> 为

$$dz/dt = dx/dt \cdot \text{tg} \beta,$$

式中,  $\text{tg} \beta$  为海蚀平台的坡降. 本区海蚀平台的平均蚀低速率为  $5.4 \times 10^{-4}$  m/a(见表 3).

表 1 世界各地(208 处)海蚀崖全新世海侵至目前海面高度附近(距今 6 000 a)以来的平均蚀退速率(m/a)统计

蚀退速率量级	$10^{-4}$	$10^{-3}$	$10^{-2}$	$10^{-1}$	$10^0$	$10^1$
个数	3	9	37	102	47	10
占总数百分比(%)	1.44	4.33	17.79	49.03	22.60	4.81

注: 最大蚀退速率为 80 m/a, 日本 Nishinoshinima 火山喷出岩岛; 最小蚀退速率为  $3 \times 10^{-4}$  m/a, 美国 La Jolla(火山岩)岩岸.

表 2 薛家岛沿海岸蚀崖全新世海侵至目前海面高度附近(距今 6 000 a)以来的平均蚀退速率统计

位置	岩滩宽度 /m	海蚀崖平均海蚀速率 /m·a <sup>-1</sup>	位置	岩滩宽度 /m	海蚀崖平均海蚀速率 /m·a <sup>-1</sup>
连三岛岬端	90	$1.5 \times 10^{-2}$	刘家岛村东 1	100	$1.7 \times 10^{-2}$
连三岛西侧岬角	125	$2.1 \times 10^{-2}$	刘家岛村东 2	50	$8.3 \times 10^{-2}$
刘家岛南	130	$2.1 \times 10^{-2}$	石岭子南侧 1	170	$2.8 \times 10^{-2}$
刘家岛村东南岬	115	$1.9 \times 10^{-2}$	石岭子东南 1	165	$2.8 \times 10^{-2}$
刘家岛村东南侧	115	$1.9 \times 10^{-2}$	石岭子东南 2	140	$2.3 \times 10^{-2}$
石雀湾南岬角	160	$2.7 \times 10^{-2}$	石岭子东 1	155	$2.6 \times 10^{-2}$
石雀湾东南岬角	190	$3.2 \times 10^{-2}$	石岭子东 2	135	$2.3 \times 10^{-2}$
连三岛东侧岬角	75	$1.3 \times 10^{-2}$	象脖子	250	$4.2 \times 10^{-2}$
连三岛东侧 1	110	$1.8 \times 10^{-2}$	象脖子东南	125	$2.1 \times 10^{-2}$
连三岛东侧岬角 1	90	$1.5 \times 10^{-2}$	象脖子东 1	100	$1.7 \times 10^{-2}$
连三岛东侧岬角 2	90	$1.5 \times 10^{-2}$	象脖子东 2	150	$2.5 \times 10^{-2}$
石岭子南侧岬角	125	$2.1 \times 10^{-2}$	平均	127	$2.1 \times 10^{-2}$

表3 薛家岛沿海岸蚀平台全新世海侵至目前海面高度附近(距今6 000 a)以来的平均蚀低速率统计

位 置	海蚀平台平均坡降 $\tan\beta = dz/dt$	海蚀平台平均蚀低速率/ $m \cdot a^{-1}$
连三岛南	0.02	$3 \times 10^{-4}$
刘家岛东	0.02	$5 \times 10^{-4}$
连三岛东	0.03	$3 \times 10^{-4}$
刘家岛东2	0.02	$6 \times 10^{-4}$
刘家岛东北	0.06	$6 \times 10^{-4}$
刘家岛东北1	0.02	$6 \times 10^{-4}$
石岭子南	0.03	$8 \times 10^{-4}$
刘家岛东北2	0.03	$8 \times 10^{-4}$
石岭子东	0.07	$8 \times 10^{-4}$
刘家岛北	0.02	$8 \times 10^{-4}$
刘家岛东南	0.03	$6 \times 10^{-4}$
石雀湾东	0.02	$8 \times 10^{-4}$
石岭子东南	0.04	$8 \times 10^{-4}$
刘家岛东南2	0.03	$5 \times 10^{-4}$
平 均	0.03	$6 \times 10^{-4}$

## 4 海岸松散物质来源和泥沙运动

### 4.1 松散物质来源

薛家岛外侧岸段地处山东半岛东南岸的中部,海岸物质动态受大区域尤其受青岛-鲁南岸段总趋势的控制,根据20世纪80年代的研究成果,沿岸泥沙动态的总趋势是北东至南西向,这个方向的沿岸泥沙流的输沙率为  $15 \text{ 万 m}^3/\text{a}$  级<sup>[13]</sup>。

薛家岛外侧海岸陆域流域面积为  $12 \text{ km}^2$ ,剥蚀基岩丘陵和第三纪剥蚀面直濒于外海,本区陆域平均侵蚀模数以0.08偏高值为计,年供沙量约为  $1 \text{ 万 m}^3$ ,海岸及水下岸坡大部分基岩裸露,由抗蚀强度较大的结晶岩和变质岩组成,侵蚀速率低。岸坡沉积物为0~5 m厚,在低潮线500 m以内的水下岸坡上沉积物厚度一般小于2 m,泥沙自然蓄积量很低。估计对18 km长的薛家岛外侧海岸年供沙量不超过  $2 \text{ 万 m}^3$ 。

薛家岛外侧海岸堆积形态贫乏,用以指示沿岸物质动态特征的指示性地质体几乎没有。根据区域海岸动力地貌条件,本段海岸沿岸物质动态可参照其南部的灵山南湾沿岸和大珠山东麓沿岸,这两个岸段的海岸动力地貌条件与薛家岛外侧海岸相同。这一带指示性地貌体(入海河口沙嘴堤坝南北不对称和小河尾间河道的南偏),显示出区域海岸沿岸物质南行的动态<sup>[13~14]</sup>。

### 4.2 泥沙运动和输沙率

有关沿岸输沙力的克那普斯模式,依据区域风动力的有关参数,其计算结果可作为相对沿岸输沙率的力度指标<sup>[12]</sup>(见表4)。由表4可见,此计算结果与海岸动力地貌观测成果完全一致。

表 4 薛家岛中部石雀湾沿岸输沙合力和回移力计算表(克那普斯模式)

参 数	风 向											
	北	北北东	北东	东北东	东	东南东	南东	南东东	南	南南西	南西	
$K$	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	
$S/m \cdot s^{-1}$	5.9	5.4	3.1	4.9	5.1	4.2	3.7	4.3	4.4	5.3	5.5	输沙合力为
$S^3$	205.4	157.5	29.8	117.6	132.7	74.1	50.7	79.5	85.2	148.9	166.4	$\sum P_i = 1504.6$
$F(\%)$	5.4	2.6	2.1	6.8	12.1	7.5	4.7	4.7	4.2	5.5	3.8	回移力为
$D/m$	500	500	500	500	500	500	500	500	500	180	100	$\sum  P_i  = 3540.6$
$D^{\frac{1}{3}}$	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	5.6	4.6	$P(\text{北} \rightarrow \text{南})$ 占
$\alpha$	0.0	0.0	0.0	22.5	45.0	67.5	90.0	112.5	135.0	157.5	0.0	71.3%
$\sin \alpha$	0.00	0.00	0.00	0.38	0.71	0.92	1.00	0.92	0.71	0.38	0.00	$P(\text{南} \rightarrow \text{北})$ 占
$\cos \alpha$	1.00	1.00	1.00	0.92	0.71	0.38	0.00	-0.38	-0.71	-0.92	1.00	28.7%
$\sin \alpha \cos \alpha$	0.00	0.00	0.00	0.35	0.50	0.35	0.00	-0.35	-0.50	-0.35	0.00	(未计北、北北东向输沙)
$P_i =$												
$KS^3FD^{\frac{1}{3}}\sin \alpha \cos \alpha$	0.0	0.0	0.0	552.8	1585.6	384.2	0.0	-268.3	-358.4	-401.3	0.0	

注:  $K$  为系数,  $S$  为风速,  $F$  为各方向风的出现频率,  $D$  为海面上各方向风的吹程,  $\alpha$  为风向与岸线夹角.

对沿岸输沙率(容量)和沿岸实际输沙率(强度)的估算,目前从理论和操作上都属困难性问题.一般认为用各个学科各种研究的观测计算方法所得结果,只要动态方向一致、数量级一致即可在工程上采用.在数量上目前的研究手段还达不到高精度.本文采用目前国际较通用的波浪辐射应力模式方法<sup>[15]</sup>对薛家岛中部石雀湾一带沿岸输沙率做一数量级水平的估计.采用的主要参数为:(1)海岸方向为 NE45°SW.(2)北 $\rightarrow$ 南辐射应力计算范围在 40°- 135°  $\frac{\pi}{2}$  范围内;南 $\rightarrow$ 北辐射应力计算范围是 135°- 225°  $\frac{\pi}{2}$  范围内.(3) 45°~ 135°范围内统计采用  $\bar{H} = 74$  cm,  $T = 3.05$  s,  $C = 476$  cm/s,  $L = 1450$  cm. 无均方根波高统计资料时,采用理论公式  $H_r = 2/\sqrt{\pi} \cdot \bar{H} = 83.47$  (cm). 135°~ 225°范围内统计采用  $\bar{H} = 72$  cm,  $T = 3.00$  s,  $C = 468$  cm/s,  $L = 1402$  cm. 无均方根波高统计资料时,采用理论公式  $H_r = 2/\sqrt{\pi} \cdot \bar{H} = 81.21$  (cm). (4) 45°~ 135°范围内波浪出现频率  $F$  不含垂岸向波;  $\alpha_b$  采用该范围内中值  $\frac{\pi}{4}$ .  $F(45^\circ \sim 135^\circ) = 16.6\%$ . 135°~ 225°范围内波浪出现频率  $F$  不含垂岸向波;  $\alpha_b$  采用该范围内中值  $\frac{3}{4}\pi$ .  $F(135^\circ \sim 225^\circ) = 16.6\%$ . (5) 沿岸输沙率为  $S_l = (6.85 \times 10^{-10})(EC_n)_b \sin \alpha_b \cos \alpha_b$ ,  $(EC_n)_b$  单位为  $N \cdot s^{-1}$ ,  $S_l$  单位为  $m^3/d$ .

两个方向的年输沙率  $\sum S_l$  分别为

$$\sum S_l^{N \rightarrow S} = S_l^{N \rightarrow S} \times 365 \times 16.6/100 \approx 87 \times 10^4 (m^3/a),$$

$$\sum S_l^{S \rightarrow N} = S_l^{S \rightarrow N} \times 365 \times 15.3/100 \approx 74 \times 10^4 (m^3/a),$$

由此得出沿岸净向南的输沙率:

$$S_l(N \rightarrow S) = \sum S_l^{N \rightarrow S} - \sum S_l^{S \rightarrow N} \approx 13 \times 10^4 (m^3/a).$$

由此可见本区海岸沿岸物质运动动态和输沙率与山东半岛东南岸( $10 \times 10^4 \sim 15 \times 10^4 m^3/a$ )一致,但薛家岛外侧海岸沿岸输沙率比区域泥沙供应量大一个数量级,这种源-运量的不均衡



## Quantitative study on the evolution of the Xuejiadao headland-bay coast erosion

ZHANG Jun<sup>1</sup>, SUN Xiaoxia<sup>1</sup>, YIN Ping<sup>2</sup>, CUI Chengqi<sup>1</sup>

(1. College of Geoscience, Ocean University of Qingdao, Qingdao 266003, China; 2. First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China)

**Abstract:** Quantitative study on the Xuejiadao coast evolution based on 4 a continuous field survey shows that most margin of the Xuejiadao area is the bedrock headland-bay erosive coast whose anti-eroding strength is great. The average velocity of the back-eroding and down-eroding is at the level of  $10^{-2}$  and  $10^{-4}$  m/a, respectively. There is modern beach grit lamella on the tip of the bow bay, and a great deal of big gravels of beach-faces in front of the cliff and on the backshore of Shique Bay and Silver Beach (the granularity of them can reach 20~30 cm). Outside coast is facing to the open sea, and the underwater bank slope is steep and deep, the intensity of exogenetic force factors such as meteorology and hydrology is relatively great. All these features display the geological and geomorphological characteristics of middle-high energy coast. The source of alimention of the coastal wash in the open sea off Xuejiadao is poor, which is less than  $2 \times 10^4$  m<sup>3</sup>/a. The direction of littoral wash flow is from northeast to southwest, and the capability can reach  $13 \times 10^4$  m<sup>3</sup>/a. The unbalancedness between sediment source and carrying capacity is the mechanism of the formation of the bedrock erosive coast.

**Key words:** bedrock headland-bay coast; new tectonic ascending; erosion speed; littoral wash flow; direction intensity capability; quantitative study