

李高聪, 蔡廷禄, 李志强, 等. 大陆岛入海沉积物通量的估算研究[J]. 海洋学报, 2021, 43(12): 60–69, doi:10.12284/hyxb2021077

Li Gaocong, Cai Tinglu, Li Zhiqiang, et al. Quantifying sediment fluxes from continental shelf islands[J]. Haiyang Xuebao, 2021, 43(12): 60–69, doi:10.12284/hyxb2021077

# 大陆岛入海沉积物通量的估算研究

李高聪<sup>1,2</sup>, 蔡廷禄<sup>3</sup>, 李志强<sup>1,2</sup>, 高抒<sup>4\*</sup>

(1. 广东海洋大学海洋技术系, 广东 湛江 524088; 2. 广东省海洋遥感与信息技术工程技术中心, 广东 湛江 524088; 3. 自然资源部第二海洋研究所, 浙江 杭州 310012; 4. 华东师范大学河口海岸学国家重点实验室, 上海 200062)

**摘要:** 大陆岛入海沉积物通量 ( $Q_s$ ) 信息对于精确解译大陆架沉积记录的研究是个重要补充。针对如何估算大陆岛  $Q_s$  的科学问题, 本文以中国东南部海域的 8 227 个大陆岛为例, 提出了一种基于邻近大陆中小型河流  $Q_s$  的经验公式计算大陆岛  $Q_s$  的解决方案。该方案在实施时需设置两个假定, 即大陆岛的  $Q_s$  法则遵循邻近大陆中小型河流的  $Q_s$  法则和可将 1 个大陆岛当作 1 个河流流域计算其  $Q_s$ 。结果表明: (1) 经验公式计算的大陆岛  $Q_s$  为其最小估计值; 如考虑大陆岛流域的具体情况, 实际的  $Q_s$  值会稍微增加, 但其增幅不超过  $n^{0.13}$  ( $n$  为流域数量); (2) 经验公式能获得大陆岛  $Q_s$  的大致数量级信息; 大陆岛的总面积为 4 418.49 km<sup>2</sup>, 对应  $Q_s$  的数量级为 10<sup>6</sup> t/a, 与邻近大陆中型河流入海通量的数量级相当; (3) 在大河河口湾充填阶段完成以前, 大陆岛沉积物是内陆架泥质沉积体的主要物源之一。因此, 大陆岛入海沉积物会对大陆架沉积体系的形成和演化造成一定程度的影响, 需引起研究人员的高度重视。

**关键词:** 沉积物通量; 大陆岛; 邻近大陆中小型河流; 经验公式修正; 中国东南部海域

中图分类号: P736.21

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2021)12-0060-10

## 1 引言

大陆岛是地质构造和岩性与邻近大陆相似的大陆边缘岛屿, 是研究海岸带陆、海、气相互作用的重要对象之一。大陆岛原属大陆组成, 因受地壳沉降或海面上升影响, 低洼地带被海水淹没, 较高的山地和丘陵出露在海面以上所形成的岛屿<sup>[1-2]</sup>。中国的大陆岛主要分布在大陆山地基岩海岸附近, 包括辽东半岛、山东半岛、浙闽和华南沿海区域, 以及台湾附近海域, 约占岛屿总数的 90%<sup>[3]</sup>。它们具有多种重要的价值和功能, 主要包括: (1) 提供土地、港口和旅游资源<sup>[4-5]</sup>; (2) 维持生物多样性和生态过程多样性<sup>[6-7]</sup>; (3) 研究古地理、古气候和古生态的重要场所<sup>[8-9]</sup>。

自 20 世纪 80 年代以来, 与大型河流三角洲密切相关的内陆架泥质沉积体系的形成、演化及其沉积记录解译工作逐渐成为了当前国际的研究热点<sup>[10-16]</sup>。物源供给、可容空间和沉积物输运和堆积过程共同构成了大陆架沉积体系形成和演化的 3 大主控因素<sup>[17-18]</sup>。大陆架沉积体系通常被认为有两个主要物源, 即大陆河流供给和大陆架沉积物的再悬浮供给<sup>[19-20]</sup>。前者主要受入海河流域特征的影响, 包括流域内的地质、岩性、地形、植被、温度、降雨量和人类干预活动等要素<sup>[21-22]</sup>。后者则主要取决于区域的沉积物输运和堆积过程, 包括入海径流、波浪、潮汐、陆架环流和沉积物重力流等沉积动力条件<sup>[17-18]</sup>。内陆架远端泥质沉积的物源通常被认为主要来自于大型河流的远距离

收稿日期: 2020-10-07; 修订日期: 2020-12-19。

基金项目: 国家自然科学基金 (41676079); 国家科技基础资源调查专项 (2019FY202105, 2019FY202106); 广东海洋大学科研启动经费 (060302112010); 湛江市创新创业团队引育“领航计划”(211207157080994)。

作者简介: 李高聪 (1987—), 男, 广东省梅州市人, 博士, 主要从事海洋地质学研究。E-mail: geli@gdou.edu.cn

\* 通信作者: 高抒 (1956—), 男, 教授, 主要从事海洋沉积动力学和沉积地质学研究。E-mail: sgao@sklec.ecnu.edu.cn

供给,然而在大陆岛广泛分布的区域则往往忽略了更加靠近远端泥质沉积区域的沿岸中、小型河流以及大陆岛的中距离和近距离供给<sup>[19-20]</sup>。因此,在海岛广布的区域获取其入海沉积物通量及其时空分布特征信息,不仅有助于该大陆架区域物源收支研究,也是完善该大陆架区域沉积记录精确解译的关键所在<sup>[23]</sup>。

传统研究,河流入海沉积物通量信息的获取一般可分为3种方式。第1种方法是根据大陆的剥蚀速率估算其通量<sup>[24-25]</sup>;第2种方法是关键断面观测方法,其时间分辨率较高,分为分析邻近河口的水文站的统计数据获取经验公式<sup>[26-27]</sup>和在河口地区布设典型观测断面,通过关键时段的全潮水文观测获取水沙通量数据<sup>[28]</sup>两类;第3种方法是沉积记录的反演算法,其时间分辨率较低,需获取大量的沉积钻孔和年代数据。对于第1种方法而言,其估算值往往存在高估的情况,因为在现实中有大量被侵蚀的沉积物仍然滞留在流域内,并未完全抵达河口<sup>[27]</sup>。对于第2种方法的第2类方法而言,虽然获取的数据时空精度较高,但由于野外观测的人力、财力和物力成本较大,且难以获取长时间序列的通量数据,因而在分析较长时间尺度通量问题时并不推荐使用<sup>[29]</sup>。对于第3种方法而言,其人力、财力和物力成本也较大,且需要先解答年代框架和沉积物滞留指数的难题。因此,在讨论年或更长时间尺度的河流入海通量问题时,通过水文观测站的资料构建经验公式成了最为常用的方法。

按照上述传统方法,定量刻画大陆岛入海沉积物通量时需获取海岛河流的长期水沙观测数据。但由于大陆岛河流流域较小,水系并不发育,几乎未设置有水文站,因而缺乏水沙特征数据,也就缺少了由水文站观测数据构建的沉积物入海通量经验公式。近年来,研究者指出,由于大陆岛与邻近大陆沿海流域在地理和地质背景方面具有一定的相似性,可推测两者在流域产沙特征上具有相似性,即可利用邻近大陆河流的经验公式估算大陆岛的入海沉积物通量<sup>[23]</sup>。相较于大陆岛,关于大陆河水沙特征的研究极为丰富,这就为大陆岛邻近大陆河流域参数特征值的获取提供了充足的数据支撑,确保了构建入海沉积物通量的区域经验公式的可行性。因此,邻近大陆河流的经验公式有效构建为计算大陆岛入海沉积物通量提供了可能。

## 2 研究方法

河流入海沉积物通量的经验方程是估算大陆岛沉积物通量( $Q_s$ )的重要依据<sup>[23]</sup>。根据全球数百条河

流的水沙特征与流域参数(如流域面积、最大高程和平均温度等)之间的数学关系,研究者提出了多个可用于预测全球大中型河流的 $Q_s$ 经验公式<sup>[21-22, 30-31]</sup>。然而,在特定地区使用时,由于不同地区或大流域和中小流域之间的沉积物产出特征存在差异,需考虑对现有公式进行修正,以提高 $Q_s$ 的预测精度<sup>[32-33]</sup>。此外,在估算大陆岛 $Q_s$ 时需注意两点:一是大陆河流域参数特征值需选取人类干扰较小时段,尽量降低人类活动干预对流域产沙特征的影响;二是由于大陆岛存在众多子流域,在岛屿详细地形数据获取困难或子流域地形参数特征不明确的前提下,需解决大陆岛子流域的地形特征值提取以及其 $Q_s$ 计算及验证的问题。

为了对大陆岛 $Q_s$ 进行估算,本文提出两个假设:(1)大陆岛的 $Q_s$ 法则遵循邻近大陆中小河流的 $Q_s$ 法则;(2)可将1个大陆岛当作1个河流流域计算 $Q_s$ 。具体研究步骤如下:首先,本文选取中国东南部大陆岛和邻近大陆中小型河流作为典型研究区(图1);其次,基于河流的特征值对现有 $Q_s$ 的经验公式进行区域校正,并分析其相对误差;随后,根据经验公式对大陆岛的 $Q_s$ 进行计算;最后,讨论假设(2)对大陆岛通量总量的影响,并分析大陆岛 $Q_s$ 对远端泥沉积体系及其沉积记录研究的意义。

典型研究区包括浙、闽、粤和琼26条中小型河流和8227个大陆岛(图1),它们具有相似的地质和地理特征。在第四纪冰期的低海面时期,这些大陆岛与中国大陆相连<sup>[3]</sup>。研究区同处华夏块体,其出露岩石主要由泥砂质沉积岩和火成岩构成<sup>[23]</sup>。研究区位于季风气候区,夏季受台风影响,而在冬季则受风暴活动影响<sup>[15, 17]</sup>。年平均降水量为1300~2400 mm,年平均温度为16~24℃<sup>[3, 15]</sup>。东海近岸的潮汐为半日潮,南海北部则主要为全日潮<sup>[15, 23]</sup>。

邻近大陆河流的特征值参数包括流域面积、最大高程、平均气温、平均径流量( $Q$ )和 $Q_s$ ,数据来自于已公开发表的文献或书籍(表1),作者主要包括王文介等<sup>[34]</sup>、张伯虎等<sup>[35]</sup>和杨志宏等<sup>[36]</sup>。本文研究的河流共包括23条中小型河流,受26个水文观测站控制(图1)。它们的主干河道长度、流域最大高程、流域面积分别为50~541 km, 596~2158 m, 425~60992 km<sup>2</sup>。为了降低人类活动干预对流域产沙特征的影响,河流的 $Q$ 和 $Q_s$ 选取20世纪50年代至70年代之间数据的平均统计值,它们的数值范围分别为0.1~7.5 Mt/a和0.4~53.9 km<sup>3</sup>。

大陆岛特征值参数包括8227个大陆岛面积和4978个大陆岛最大高程数据,数据来自于《中国海岛

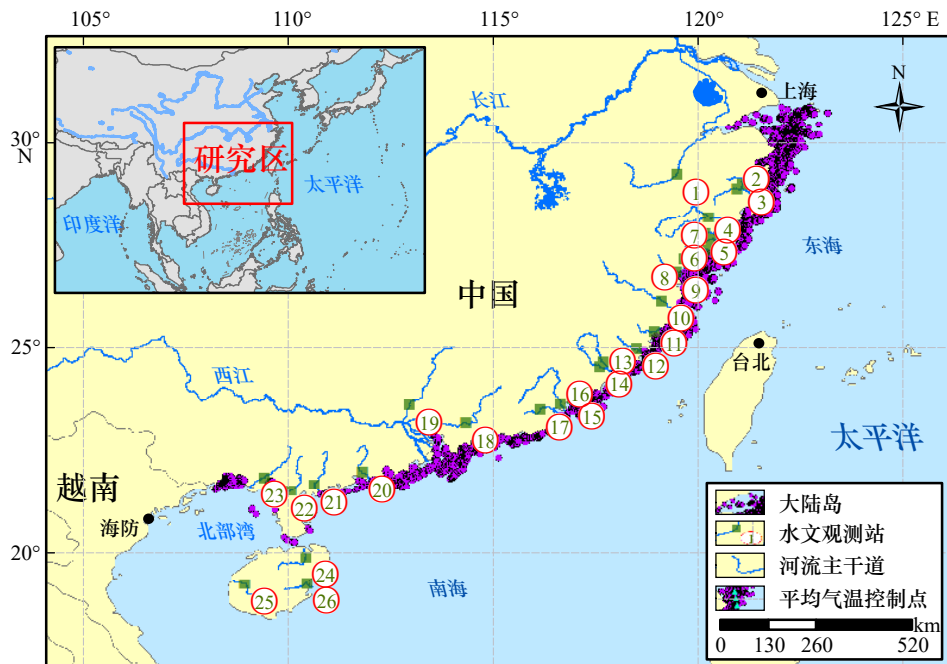


图1 大陆岛及其平均气温控制点和邻近大陆河流及其水文控制站分布  
Fig. 1 Locations of continental shelf islands and their control of average temperature, and adjacent continent rivers and their gauging stations

(礁)名录》<sup>[3]</sup>。4 978 个大陆岛总面积为 4 205.3 km<sup>2</sup>；其余 3 249 个大陆岛总面积为 213.19 km<sup>2</sup>，它们的最大高程是通过已有 4 978 个大陆岛面积和最大高程的数学关系插值求得。大陆岛的总面积为 4 418.49 km<sup>2</sup>，它们的最大高程和面积分别为 0.1~1 404 m 和接近 0 km<sup>2</sup> 至 490.9 km<sup>2</sup>。此外，还收集了 35 个大陆岛的平均气温数值，作为所研究大陆岛平均气温空间插值的控制点。大陆岛的平均气温通过 ArcMap 中的反距离加权空间插值算法计算得到。

本文采用 3 个全球经验公式进行大陆岛  $Q_s$  的研究，包括 Milliman 和 Syvitski<sup>[21]</sup>，Mulder 和 Syvitski<sup>[30]</sup>，Syvitski 等<sup>[22]</sup> 提出的经验模型，分别对应命名为 Model 1，Model 2 和 Model 3。基于中国大陆东南部 20 条中小型河流的流域参数的特征值，本研究利用 Matlab 的最小二乘算法分别对 3 个模型开展了经验公式的系数校正，结果如表 2 所示。在此基础上，分别使用全球公式和修正公式对大陆河流的  $Q_s$  进行计算，并利用水文观测站的观测值对其进行预测精度评估。

为评估将 1 个海岛看作 1 个流域对计算大陆岛  $Q_s$  的影响，本文采取典型区域验证和经验公式极值求解相结合的方法。选取海南岛的南渡江、昌化江和万泉河作为典型研究区，并假定上述 3 条河流共同组成了 1 个大陆岛“海南岛”。区域数据验证过程中，首先将这 3 条河流的流域特征参数值进行合并处理，

并利用校正公式计算其  $Q_s$ ，其次利用校正公式分别计算 3 条河流的  $Q_s$ ，并求和，随后对比两者之间的差异，并用相对误差 (RE) 表示。RE 的计算公式如下

$$RE = \frac{Q_{sp} - Q_{sm}}{Q_{sm}}, \quad (1)$$

式中， $Q_{sp}$  和  $Q_{sm}$  分别为利用校正公式计算的  $Q_s$  和水文观测站获取的  $Q_s$ 。

### 3 研究结果

#### 3.1 经验公式计算值的相对误差

基于全球公式和修正公式，本文利用 23 条邻近大陆中小河流的流域参数特征值计算了它们的  $Q_s$  (图 2)。当全球公式计算值与水文站观测值相比较时，Model 1 和 Model 2 计算的  $Q_s$  被高估了  $10^0 \sim 10^1$  个数量级，而 Model 3 计算的  $Q_s$  被高估了  $10^1 \sim 10^2$  个数量级；3 个模型计算值的平均 RE 依次为 3.49、2.27 和 47.34。当使用修正公式时，预测值和实测值较为接近，除个别河流外，相对误差为  $\pm 1$  之间；3 个模型计算值的平均 RE 分别为 0.05、0.05 和 0.11。因此，利用全球公式计算中国东南部中小型河流的  $Q_s$  时，将显著高估其数值，需对其计算公式进行区域参数校正。

#### 3.2 “海南岛”河流检验结果

表 3 展示了使用修正公式计算“海南岛” $Q_s$  所得的预测值和观测值相对误差数值。结果分析表明：(1) 使用修正公式将相对高估南渡江的  $Q_s$ ，其相对误

表 1 研究区 26 条河流特征参数特征值统计表  
Table 1 Statistic of characteristics values of the 26 coastal rivers

编号	河流名称	流域面积/km <sup>2</sup>	最大高程/m	平均气温/°C	水文站	集水面积/km <sup>2</sup>	Q <sub>s</sub> /(10 <sup>4</sup> t·a <sup>-1</sup> )	Q/10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup>	时间段	主要参考文献
1	钱塘江	55 558	1 865	17.0	兰溪	18 233	155.95	314.4	1960-1979	[35]
2	椒江-永安溪	2 704	1 382	17.2	柏枝岙	2 475	42.32	22.10	1960-1979	[35]
3	椒江-始丰溪	1 610	1 144	16.8	沙段	1 482	33.31	10.40	1960-1979	[35]
4	瓯江	18 100	1 929	19.0	鹤城	13 400	195.15	133.75	1960-1979	[35]
5	飞云江	3 719	1 690	16.3	岱口	1 930	33.43	22.20	1960-1979	[35]
6	鳌江	1 530	1 232	18.5	埭头	343	6.38	4.91	1960-1979	[35]
7	水北溪	425	1 141	18.4	高滩	341	6.51	4.12	1970-1979	[37]
8	赛江	5 638	1 649	16.9	白塔	3 270	58.35	40.55	1960-1979	[37]
9	霍童溪	2 244	1 627	15.5	洋中坂	2 082	31.49	24.78	1960-1979	[37]
10	闽江	60 992	2 158	18.0	竹岐	54 500	748.00	539.00	1950-1978	[38]
11	木兰溪	1 732	1 451	20.0	濂溪	1 070	29.30	9.85	1959-1979	[39]
12	晋江	5 629	1 600	20.5	石砦	5 460	217.28	50.04	1950-1979	[40]
13	九龙江-北溪	9 640	1 823	20.5	浦南	8 490	166.72	82.41	1952-1979	[40]
14	九龙江-西溪	3 940	1 666	21.1	郑店	3 419	73.90	36.37	1952-1979	[40]
15	黄冈河	1 621	784	21.4	红霞	1 270	30.60	13.00	1956-1961	[34]
16	韩江	30 112	1 823	20.8	潮安	29 077	703.44	237.10	1955-1979	[41]
17	榕江	4 650	1 285	21.4	东桥园	2 016	65.40	28.10	1949-1979	[34]
18	东江	27 040	1 529	20.4	博罗	25 325	296.00	224.67	1954-1979	[42]
19	北江	46 710	1 929	20.0	石角	38 363	532.67	406.57	1954-1979	[42]
20	漠阳河	6 091	1 337	22.2	双捷	4 345	80.00	59.10	1954-1979	[34]
21	鉴江	6 948	1 703	22.0	化州	6 157	197.00	49.60	1953-1979	[43]
22	九洲江	3 337	596	22.3	缸瓦窑	3 086	34.00	18.40	1953-1979	[44]
23	南流河	9 232	1 257	22.0	长乐	6 592	115.00	52.79	1956-1979	[45]
24	南渡江	7 033	1 811	24.0	龙塘	6 841	44.99	59.98	1957-1979	[36]
25	昌化江	5 150	1 867	23.9	宝桥	4 634	83.88	37.99	1957-1979	[36]
26	万泉河	3 693	1 867	23.5	加积	3 236	52.97	49.89	1957-1979	[36]

表 2 沉积物入海通量 (Q<sub>s</sub>, 单位: Mt/a) 经验公式  
Table 2 Prediction equations of sediment flux (Q<sub>s</sub>, unit: Mt/a)

方程	全球公式	修正公式	备注
Model 1	$Q_s=65A^{0.56}$	$Q_s=112.88A^{0.91}$	A为流域面积(10 <sup>6</sup> km <sup>2</sup> )
Model 2	$Q_s=\alpha 10^{(0.41\lg(A)+1.28\lg(R)-3.68)}$	$Q_s=\alpha 10^{(0.87\lg(A)+0.31\lg(R)-2.73)}$	α为经验常数0.031 5, A为流域面积(km <sup>2</sup> ), R为最大高程(m)
Model 3	$Q_s=2\alpha A^{0.45} R^{0.57} e^{-0.097T}$	$Q_s=2\alpha A^{0.96} R^{-0.72} e^{-0.017T}$	α为经验常数0.031 5, A为流域面积(km <sup>2</sup> ), R为最大高程(m), T为平均气温(°C)

差为 1.27~1.87; (2)修正公式能较好地预测昌化江和万泉河的 Q<sub>s</sub>, 其 RE 范围仅为 -0.18~0.28; (3)使用修正公式会轻微高估“海南岛”的 Q<sub>s</sub>, 其 RE 范围为

0.15~0.39, 小于 3 条河流的平均值 RE (0.34~0.75)。因此, 将海南岛的 3 条河流看作 1 个河流域——“海南岛”时, 上述修正公式可用于预测其 Q<sub>s</sub>。

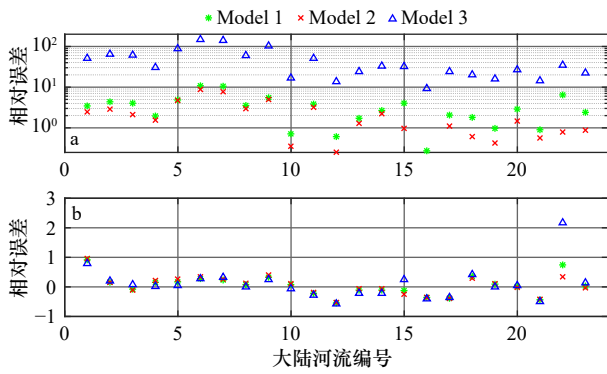


图 2 利用全球公式(a)和修正公式(b)计算的 23 条沿海流域沉积物入海通量预测值和观测值的相对误差  
Fig. 2 Relative errors between the predicted sediment flux and observations of the 23 coastal watersheds calculated by global equations (a) and modified equations (b)

表 3 “海南岛” $Q_s$  观测值、预测值和相对误差统计表

Table 3 Relative errors between the sediment flux predicted by the modified equations and observations of rivers in the Hainan Island

河流	观测值/(Mt·a <sup>-1</sup> )	Model 1		Model 2		Model 3	
		预测值/(Mt·a <sup>-1</sup> )	RE	预测值/(Mt·a <sup>-1</sup> )	RE	预测值/(Mt·a <sup>-1</sup> )	RE
南渡江	0.45	1.23	1.72	1.29	1.87	1.02	1.27
昌化江	0.84	0.86	0.03	0.93	0.11	0.69	-0.18
万泉河	0.53	0.62	0.17	0.68	0.28	0.49	-0.07
3条河流均值	0.61	0.90	0.64	0.97	0.75	0.73	0.34
“海南岛”	1.82	2.46	0.35	2.53	0.39	2.09	0.15

和与其看做 1 个流域计算得到的  $Q_s$  之间的差异。它们的计算公式分别为

$$P_1 = \frac{\sum_{i=1}^n 112.88A_i^{0.91}}{112.88A^{0.91}}, \quad (3)$$

$$P_2 = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha 10^{0.87\lg(A_i)+0.31\lg(R)-2.73}}{\alpha 10^{0.87\lg(A)+0.31\lg(R)-2.73}}, \quad (4)$$

$$P_3 = \frac{\sum_{i=1}^n 2\alpha A_i^{0.96} R^{-0.72} e^{-0.017}}{2\alpha A^{0.96} R^{-0.72} e^{-0.017}}. \quad (5)$$

当  $n=1$ , 公式(3)、(4)和(5)均取值 1。当  $n>1$  时, 上述公式可分别变形为

$$P_1 = \frac{\sum_{i=1}^n A_i^{0.91}}{A^{0.91}} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{A_i}{A}\right)^{0.91} < \sum_{i=1}^n \left(\frac{A/n}{A}\right)^{0.91} = n^{0.09}, \quad (6)$$

### 3.3 修正公式的极值特征

本文先将 1 个大陆岛看作 1 个河流流域, 随后利用修正公式计算其  $Q_s$ 。但在现实中, 1 个大陆岛包含了多个河流流域。比如, 海南岛包含了南渡江、昌化江和万泉河等 13 个流域面积超过 500 km<sup>2</sup> 的子流域。由于大陆岛的子流域数据未知, 本文拟通过极值求解的方式分析其影响。首先, 假定  $A$  为大陆岛的总面积,  $A_n$  是 1 个大陆岛的第  $n$  个子流域的面积, 可以推出

$$A = \sum_{i=1}^n A_i. \quad (2)$$

其次, 引入指数  $P_1$ ,  $P_2$  和  $P_3$ , 分别代表了利用前述 3 个修正公式计算 1 个大陆岛所有子流域  $Q_s$  的总

$$P_2 = \frac{\sum_{i=1}^n 10^{0.87\lg(A_i)}}{10^{0.87\lg(A)}} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{A_i}{A}\right)^{0.87} < \sum_{i=1}^n \left(\frac{A/n}{A}\right)^{0.87} = n^{0.13}, \quad (7)$$

$$P_3 = \frac{\sum_{i=1}^n A_i^{0.96}}{A^{0.96}} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{A_i}{A}\right)^{0.96} < \sum_{i=1}^n \left(\frac{A/n}{A}\right)^{0.96} = n^{0.04}. \quad (8)$$

分析可知, 公式(3)、(4)和(5)的下限均为 1, 上限分别为  $n^{0.09}$ ,  $n^{0.13}$  和  $n^{0.04}$ 。因此, 将 1 个大陆岛当作 1 个流域处理时, 使用修正公式计算得到的  $Q_s$  是该大陆岛的下限值。而真实值与所研究大陆岛的河流流域数量  $n$  有关, 修正公式低估其  $Q_s$  的程度不超过  $n^{0.09}$ ,  $n^{0.13}$  和  $n^{0.04}$ 。

### 3.4 大陆岛 $Q_s$ 的空间分布特征

3 个修正公式计算的大陆岛  $Q_s$  的数值大小与大陆岛的面积和最大高程呈显著正相关关系, 与平均气温的关系不明显(图 3)。3 个模型估算的大陆岛  $Q_s$  的数量级均为 10<sup>0</sup>~10<sup>5</sup> t/a。就所有大陆岛的总  $Q_s$  而言, Model 1 和 Model 2 的计算结果较为接近, 分别为

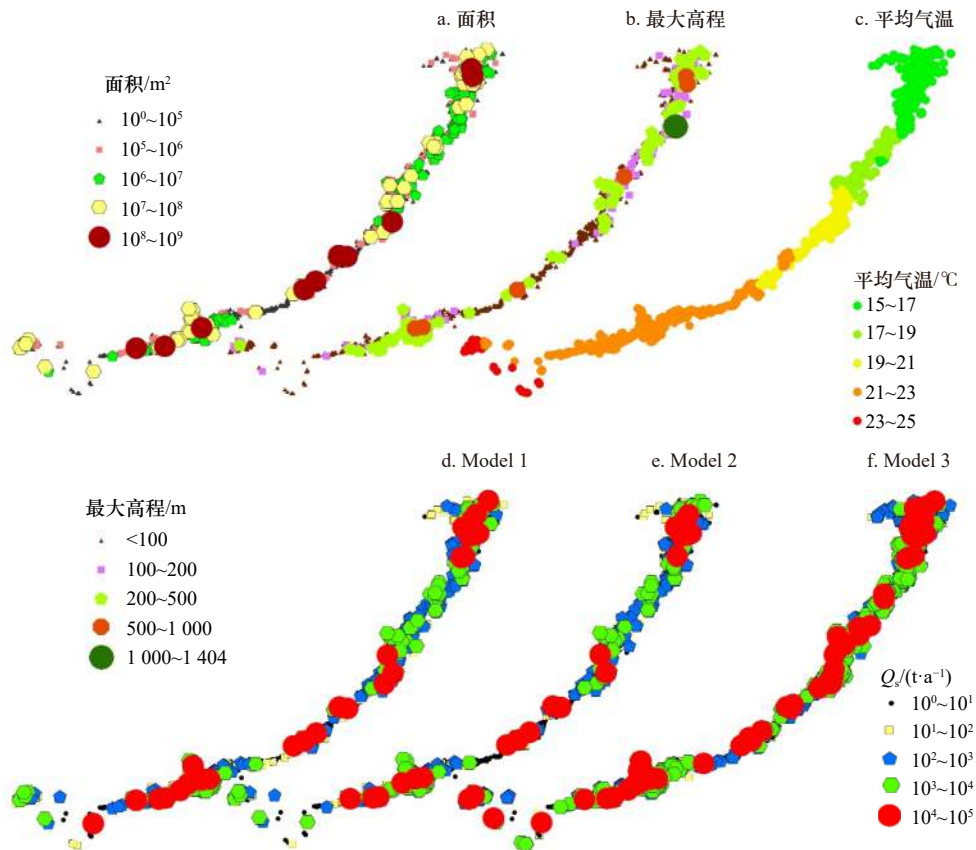


图3 大陆岛的面积(a)、最大高程(b)、平均气温(c)和 $Q_s$ (d-f)空间分布

Fig. 3 Distribution of the area (a), maximum relief (b), average temperature (c) and sediment flux (d-f) of continental shelf islands

1.26 Mt/a 和 0.91 Mt/a, 而 Model 3 的计算结果数值相对较高, 其值为 5.15 Mt/a。尽管存在差异, 但 3 个模型之间也构成了相互验证关系。3 个模型计算值之间存在差异与它们的计算公式中主控因素的权重分配差异有关。基于 3 个模型计算结果的数值范围, 本文推断所研究大陆岛的总  $Q_s$  数量级为  $10^6$  t/a。

#### 4 讨论

掌握沉积物来源的大小及其时空分布特征是准确解译大陆架沉积记录的关键问题之一<sup>[16, 18]</sup>。在大陆岛广泛分布的区域, 大陆架沉积记录解译的物源收支研究主要集中在大陆河流的供给方面, 而往往直接忽略大陆岛的贡献<sup>[16, 20]</sup>。一方面相较于大陆河流域, 大陆岛的面积显得非常小, 在理论上是可以直接忽略的, 另一方面由于缺乏水文站的观测数据, 也就无法构建出有效的大陆岛  $Q_s$  经验方程。针对上述问题, 本文基于邻近大陆河流与大陆岛的流域产沙特征具有相似性的推断, 以中国东南部东海和南海的 8 227 个大陆岛为典型研究对象, 提出了一种利用邻近大陆中小型河流  $Q_s$  的经验公式估算大陆岛  $Q_s$  的解决方案。

上述解决方案的实施需设置两个假定, 即大陆岛

的  $Q_s$  法则遵循邻近大陆中小河流的  $Q_s$  法则和可将 1 个大陆岛当作 1 个河流流域计算  $Q_s$ 。关于前者, 由于所研究的大陆岛缺少水文观测站的统计数据, 也就无法直接对其进行验证。针对这一假定, 本文采取了一种替代方法, 即采用海南岛已知河流的数据对其进行检验。具体而言, 首先, 将已知的海南岛河流(即南渡江、昌化江和万泉河)组建为一个大陆岛“海南岛”; 其次, “海南岛”的最大高程、流域面积和平均气温分别取所有河流的最大值、汇总值和平均值; 最后, 利用修正公式对“海南岛” $Q_s$  进行计算, 并与海南河流的观测值比较。结果表明, 修正公式会轻微高估“海南岛”的  $Q_s$ , 其 RE 范围仅为 0.15~0.39。针对假定二, 本文对 3 个修正公式的极值情况进行了分析。结果显示, 通过修正公式获得的大陆岛  $Q_s$  为其最低数值, 当实际情况被考虑时, 其数值会轻微提高, 但其增幅不超过  $n^{0.13}$  ( $n$  为大陆岛的流域数量)。基于上述讨论, 本文认为, 利用邻近大陆中小型河流  $Q_s$  的经验公式估算大陆岛  $Q_s$  的方法是切实可行的。

尽管目前的修正公式不能计算出精确的  $Q_s$  数值, 但也为研究者提供了研究区大陆岛  $Q_s$  的大致数量级信息(表 4)。在全新世期间, 东海和南海内陆架

表 4 东海和南海内陆架泥质沉积体系陆源供给特征 (表中数值均指数量级)

Table 4 Sediment sources characteristics of the mud sedimentary systems in inner continental shelf of East China Sea and South China Sea (the values in the table refer to order of magnitude)

物源	数量/(条·个 <sup>-1</sup> )	A/km <sup>2</sup>	R/m	Q <sub>s</sub> /(t·a <sup>-1</sup> )	空间特征	时间特征
大型河流	10 <sup>0</sup>	10 <sup>6</sup> ~10 <sup>7</sup>	10 <sup>3</sup>	10 <sup>7</sup> ~10 <sup>8</sup>	沿大陆岸线有限点源、长距离	近2 000 a
中小河流	10 <sup>1</sup>	10 <sup>2</sup> ~10 <sup>4</sup>	10 <sup>2</sup> ~10 <sup>3</sup>	10 <sup>4</sup> ~10 <sup>6</sup>	沿大陆岸线多点源、中距离	持续供给
大陆岛	10 <sup>3</sup>	≤10 <sup>2</sup>	≤10 <sup>2</sup>	10 <sup>0</sup> ~10 <sup>5</sup>	沿海岛岸线密集点源、短距离	持续供给

地区分别发育了两个大型的泥质沉积体系<sup>[14-15]</sup>。就泥质区的物源供给数量级而言,1个大陆岛的面积为接近0 km<sup>2</sup>至490.9 km<sup>2</sup>,对应Q<sub>s</sub>的数量级为10<sup>0</sup>~10<sup>5</sup> t/a;1条中小型河流的流域面积为425~60 992 km<sup>2</sup>,对应Q<sub>s</sub>的数量级为10<sup>4</sup>~10<sup>6</sup> t/a;1条大型河流(西江和长江)的流域面积为329 705~1 705 383 km<sup>2</sup>,对应Q<sub>s</sub>的数量级为10<sup>7</sup>~10<sup>8</sup> t/a。这一信息的获取对内陆架泥质沉积体系物源收支研究工作是个重要补充。将大陆岛和邻近大陆河流的流域面积、Q<sub>s</sub>和泥质沉积体系联系起来,可分析东海和南海内陆架地区沉积物供给的数量级特征和空间分布格局。

就泥质沉积体系物源供给的空间分布特征而言,大陆河流与大陆岛存在明显差异(表4)。对于大陆河流而言,其供给模式属于沿大陆岸线分布的河口点源大数量级补给,其沉积物不仅用于河口及邻近区域沉积体的生长,还支持着远端泥质区的形成和演化<sup>[23,29]</sup>。比如,大量的长江细颗粒沉积物(10<sup>1</sup>~10<sup>2</sup> Mt/a)在逃离河口之后<sup>[46]</sup>,在波浪、潮流和陆架环流的共同作用下输运至浙闽近岸浅海,并延伸至台湾海峡中部区域,形成了全长800 km,宽约100 km,面积约为80 000 km<sup>2</sup>的东海泥质沉积体<sup>[14,16,47-48]</sup>。对于大陆岛而言,由于其更加靠近或甚至就位于泥质沉积区,其供给模式为沿大陆岛岸线散布的小数量级物源供给,仅能用于支持较短距离范围内的沉积体系的生长<sup>[23,29]</sup>。

就泥质沉积体系物源的时间序列供给特征而言,大陆岛和大陆河流在不同时间段分别对内陆架泥质沉积体扮演着重要角色(表4)。以往的研究结果表明,全新世高海面以来,来自大型河流的沉积物先是主要被用于其河口湾的充填<sup>[47-51]</sup>。河口湾的充填阶段受原始大陆架地形、海面位置和河流沉积物供给等因素的综合影响。对于杭州湾而言,由于堆积空间相对较大和入海河流的Q<sub>s</sub>较小,其河口湾目前仍处于继续充填阶段。珠江河口湾的堆积空间也相对较大,但流入该区域河流Q<sub>s</sub>的数量级也比较大,目前其充填过程已接近完成。来自珠江的沉积物在最近几百

年里逐渐大量从河口湾逃逸,并在南海北部内陆架地区形成了面积辽阔的珠江远端泥沉积体系<sup>[15,18,49]</sup>。尽管长江河口湾的堆积空间较大,但由于其Q<sub>s</sub>数量级也比较大,其河口湾的充填大约在2 000多年前业已完成<sup>[51]</sup>。

在大河河口湾充填阶段完成以后,河流的细颗粒沉积物开始大规模向海逃逸,成为了支撑内陆架泥质沉积体系快速生长的主要物源<sup>[29]</sup>。但在充填阶段完成以前,来自邻近中小型河流或大陆岛的短距离补给沉积物是泥质沉积体系最主要的物质来源。虽然大陆岛Q<sub>s</sub>的数量级是最小的,但由于数量庞大(8 227个),它们的总面积(4 418.49 km<sup>2</sup>)和总Q<sub>s</sub>(10<sup>6</sup> t/a)也相应达到了1条中小型河流的数量级。在泥质沉积体形成的整个生命周期里,大陆岛持续不断地提供着物源,不仅提供着细粒沉积物,而且补给了粗颗粒沉积物<sup>[23]</sup>。假设泥质沉积体的生长周期为6 000 a,那么这些大陆岛将给大陆架地区提供数量级约10<sup>3</sup> Mt的沉积物,相当于目前10 a长江入海河流沉积物的总量。因此,关于大陆岛的入海沉积物对大陆架沉积体系的影响应引起研究人员的重视。

需指出的是,本文所采用的Q<sub>s</sub>计算方法只针对流域产生的入海沉积物,并未考虑因海岸基岩侵蚀产生的物质通量<sup>[52]</sup>。为了系统评估大陆岛对内陆架沉积体系的形成和演化过程的影响,未来需借助现场观测、实验室分析、数值模拟和大数据分析等研究方法,继续对如下几点开展研究工作:(1)建立大陆岛基岩岸线因侵蚀产生的Q<sub>s</sub>计算方法;(2)建立大陆架泥质沉积物中大陆岛沉积物的识别标志;(3)定量揭示大陆岛入海沉积物的时空分布特征;(4)探讨大陆河流、大陆岛和海洋动力过程在内陆架泥质沉积体形成和演化进程中的相互作用过程和机理。

## 5 结论

基于大陆岛遵循邻近大陆中小型河流的Q<sub>s</sub>法则和将1个大陆岛当作1个河流流域的两个假设,本文

利用邻近大陆 23 条中小型河流  $Q_s$  的经验公式对我国东南部东海和南海 8 227 个大陆岛的  $Q_s$  进行了估算研究,并得出了如下主要结论:

(1) 当使用全球经验公式预测河流的  $Q_s$  时,其计算值会比河流水文站的观测值高  $10^0 \sim 10^2$  个数量级。

(2) 当使用 3 个修正公式时,河流  $Q_s$  的预测精度显著提高,其平均相对误差仅为 0.05~0.11。

(3) 3 个修正公式能较好地预测“海南岛”的  $Q_s$ ,其相对误差为 0.15~0.39。

(4) 利用修正公式计算所得的大陆岛  $Q_s$  为其最小值。当考虑流域数量  $n$  的实际情况时, $Q_s$  值会稍微增加,但其增幅不超过  $n^{0.13}$ 。

(5) 我国东南部大陆岛的总  $Q_s$  接近于邻近大陆的中小型河流的  $Q_s$ ,其数量级达到了  $10^6$  t/a。

#### 参考文献:

- [1] Whittaker R J, Fernández-Palacios J M. Island Biogeography: Ecology, Evolution, and Conservation[M]. Oxford: Oxford University Press, 2007.
- [2] Stankowski S, Johnson M S. Biogeographic discordance of molecular phylogenetic and phenotypic variation in a continental archipelago radiation of land snails[J]. *BMC Evolutionary Biology*, 2014, 14(1): 1–13.
- [3] 夏小明. 中国海岛(礁)名录[M]. 北京: 海洋出版社, 2012.  
Xia Xiaoming. China Island (Reef) List[M]. Beijing: China Ocean Press, 2012.
- [4] Baldacchino G. Archipelago Tourism: Policies and Practices[M]. London: Routledge, 2015.
- [5] Kurniawan F, Adrianto L, Bengen D G, et al. Vulnerability assessment of small islands to tourism: The case of the Marine Tourism Park of the Gili Matra Islands, Indonesia[J]. *Global Ecology and Conservation*, 2016, 6: 308–326.
- [6] Blackburn D C, Siler C D, Diesmos A C, et al. An adaptive radiation of frogs in a southeast Asian island archipelago[J]. *Evolution*, 2013, 67(9): 2631–2646.
- [7] Whittaker R J, Fernández-Palacios J M, Matthews T J, et al. Island biogeography: Taking the long view of nature's laboratories[J]. *Science*, 2017, 357(6354): eaam8326.
- [8] Ogasawara K. Neogene paleogeography and marine climate of the Japanese Islands based on shallow-marine molluscs[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1994, 108(3/4): 335–351.
- [9] Bover P, Quintana J, Alcover J A. Three islands, three worlds: Paleogeography and evolution of the vertebrate fauna from the Balearic Islands[J]. *Quaternary International*, 2008, 182(1): 135–144.
- [10] Nittrouer C A, Kuehl S A, Demaster D J, et al. The deltaic nature of Amazon shelf sedimentation[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1986, 97(4): 444–458.
- [11] Kuehl S A, Levy B M, Moore W S, et al. Subaqueous delta of the Ganges-Brahmaputra river system[J]. *Marine Geology*, 1997, 144(1/3): 81–96.
- [12] Cattaneo A, Correggiari A, Langone L, et al. The late-Holocene Gargano subaqueous delta, Adriatic shelf: Sediment pathways and supply fluctuations[J]. *Marine Geology*, 2003, 193(1/2): 61–91.
- [13] Neill C F, Allison M A. Subaqueous deltaic formation on the Atchafalaya Shelf, Louisiana[J]. *Marine Geology*, 2005, 214(4): 411–430.
- [14] Liu J P, Xue Z, Ross K, et al. Fate of sediments delivered to the sea by Asian large rivers: Long-distance transport and formation of remote alongshore clinothems[J]. *The Sedimentary Record*, 2009, 7(4): 4–9.
- [15] Gao S, Liu Y L, Yang Y, et al. Evolution status of the distal mud deposit associated with the Pearl River, northern South China Sea continental shelf[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, 114: 562–573.
- [16] 李安春, 张凯棣. 东海内陆架泥质沉积体研究进展[J]. *海洋与湖沼*, 2020, 51(4): 705–727.  
Li Anchun, Zhang Kaidi. Research progress of mud wedge in the inner continental shelf of the East China Sea[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2020, 51(4): 705–727.
- [17] 高抒. 中国东部陆架全新世沉积体系: 过程-产物关系研究进展评述[J]. *沉积学报*, 2013, 31(5): 845–855.  
Gao Shu. Holocene sedimentary systems over the Bohai, Yellow and East China Sea region: Recent progress in the study of process-product relationships[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2013, 31(5): 845–855.
- [18] Gao S, Collins M B. Holocene sedimentary systems on continental shelves[J]. *Marine Geology*, 2014, 352: 268–294.
- [19] Nittrouer C A, Wright L D. Transport of particles across continental shelves[J]. *Reviews of Geophysics*, 1994, 32(1): 85–113.
- [20] Jia J J, Gao J H, Cai T L, et al. Sediment accumulation and retention of the Changjiang (Yangtze River) subaqueous delta and its distal muds over the last century[J]. *Marine Geology*, 2018, 401: 2–16.
- [21] Milliman J D, Syvitski J P M. Geomorphic/tectonic control of sediment discharge to the ocean: The importance of small mountainous rivers[J]. *The Journal of Geology*, 1992, 100(5): 525–544.
- [22] Syvitski J P M, Peckham S D, Hilberman R, et al. Predicting the terrestrial flux of sediment to the global ocean: A planetary perspective[J]. *Sedimentary Geology*, 2003, 162(1/2): 5–24.
- [23] Li G C, Gao S, Wang Y P, et al. Sediment flux from the Zhoushan Archipelago, eastern China[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2018, 28(4): 387–399.

- [24] Ahnert F. Functional relationships between denudation, relief, and uplift in large, mid-latitude drainage basins[J]. *American Journal of Science*, 1970, 268(3): 243–263.
- [25] McLennan S M. Weathering and global denudation[J]. *The Journal of Geology*, 1993, 101(2): 295–303.
- [26] Holeman J N. The sediment yield of major rivers of the world[J]. *Water Resources Research*, 1968, 4(4): 737–747.
- [27] 汪亚平, 潘少明, Wang H V, 等. 长江口水沙入海通量的观测与分析[J]. *地理学报*, 2006, 61(1): 35–46.  
Wang Yaping, Pan Shaoming, Wang H V, et al. Measurements and analysis of water discharges and suspended sediment fluxes in Changjiang Estuary[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61(1): 35–46.
- [28] Milliman J D, Meade R H. World-wide delivery of river sediment to the oceans[J]. *The Journal of Geology*, 1983, 91(1): 1–21.
- [29] Li G C, Zhou L, Qi Y L, et al. Threshold sediment flux for the formation of river deltas in Hainan Island, southern China[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2019, 29(1): 146–160.
- [30] Mulder T, Syvitski J P M. Climatic and morphologic relationships of rivers: Implications of sea-level fluctuations on river loads[J]. *The Journal of Geology*, 1996, 104(5): 509–523.
- [31] Syvitski J P M, Milliman J D. Geology, geography, and humans battle for dominance over the delivery of fluvial sediment to the coastal ocean[J]. *The Journal of Geology*, 2007, 115(1): 1–19.
- [32] Milliman J D, Farnsworth K L, Albertin C S. Flux and fate of fluvial sediments leaving large islands in the East Indies[J]. *Journal of Sea Research*, 1999, 41(1/2): 97–107.
- [33] Li Gaocong, Xia Qiong, Fu Dongyang, et al. Calculating the sediment flux of the small coastal watersheds: A modification of global equations[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2021, 40(1): 147–154.
- [34] 王文介, 黄金森, 毛树珍, 等. 华南沿海和近海现代沉积[M]. 北京: 科学出版社, 1991.  
Wang Wenjie, Huang Jinsen, Mao Shuzhen, et al. Modern Deposition of Coastal and Offshore in South China[M]. Beijing: Science Press, 1991.
- [35] 张伯虎, 吴修广, 谢东风. 近50年来浙江入海河流水沙通量变化过程[J]. *泥沙研究*, 2015(6): 21–26.  
Zhang Bohu, Wu Xiuguang, Xie Dongfeng. Variation of water and sediment in rivers to sea in recent five decades in Zhejiang Province[J]. *Journal of Sediment Research*, 2015(6): 21–26.
- [36] 杨志宏, 贾建军, 王欣凯, 等. 近50年海南三大河入海水沙通量特征及变化[J]. *海洋通报*, 2013, 32(1): 92–99.  
Yang Zhihong, Jia Jianjun, Wang Xinkai, et al. Characteristics and variations of water and sediment fluxes into the sea of the top three rivers of Hainan in recent 50 years[J]. *Marine Science Bulletin*, 2013, 32(1): 92–99.
- [37] 陈胜晶. 福建闽东诸小河泥沙及其变化分析[J]. *亚热带水土保持*, 2007, 19(4): 20–23.  
Chen Shengjing. Analysis on the sediment status and changes in the streams of the east Fujian Province[J]. *Subtropical Soil and Water Conservation*, 2007, 19(4): 20–23.
- [38] 张章新. 闽江流域水文特性分析[J]. *水文*, 2000, 20(6): 55–58.  
Zhang Zhangxin. Analysis of hydrological characteristics of Minjiang River basin[J]. *Hydrology*, 2000, 20(6): 55–58.
- [39] 陈斌. 木兰溪下游水沙特性及河道演变[J]. *水利科技*, 1988(1): 47–51.  
Chen Bin. Water and sediment characteristics and channel evolution in the lower reach of the Mulan River[J]. *Hydraulic Science and Technology*, 1988(1): 47–51.
- [40] 邵恒方. 福建三大河流流量及其变化分析[J]. *福建水土保持*, 1991(1): 42–46.  
Shao Hengfang. Variation on sediment load of three major rivers of Fujian Province, China[J]. *Fujian Soil and Water Conservation*, 1991(1): 42–46.
- [41] 杨传训, 张正栋, 张倩, 等. 1955–2012年韩江入海径流量和输沙量多尺度变化特征[J]. *华南师范大学学报(自然科学版)*, 2017, 49(3): 68–75.  
Yang Chuanxun, Zhang Zhengdong, Zhang Qian, et al. Characteristics of multi-scale variability of water discharge and sediment load in the Hanjiang River during 1955–2012[J]. *Journal of South China Normal University (Natural Science Edition)*, 2017, 49(3): 68–75.
- [42] Zhang Wei, Mu Shousheng, Zhang Yanjing, et al. Temporal variation of suspended sediment load in the Pearl River due to human activities[J]. *International Journal of Sediment Research*, 2011, 26(4): 487–497.
- [43] 黄志明. 鉴江流域水文特性分析[J]. *现代科技*, 2010, 9(3): 33, 37–39.  
Huang Zhiming. Hydrological characteristics of the Jian River Catchment[J]. *Modern Science and Technology*, 2010, 9(3): 33, 37–39.
- [44] 谢天. 九洲江流域“2013·08”暴雨洪水特性分析[J]. *甘肃水利水电技术*, 2013, 49(11): 6–8.  
Xie Tian. On the stormy flood characteristics of the Jiuzhou River Catchment during the August 2013[J]. *Gansu Water Resources and Hydropower Technology*, 2013, 49(11): 6–8.
- [45] 徐国琼, 欧芳兰. 南流江泥沙运动规律及其与人类活动的关联[C]//中国水力发电工程学会水文泥沙专业委员会第七届学术讨论会论文集. 成都: 四川出版集团·四川科学技术出版社, 2007: 69–75.  
Xu Guoqiong, Ou Fanglan. Sediment dynamics of the Nanliu River and its relationship with human activities[C]//The 2007 Symposium of the China Hydroelectric Engineering Society of Hydrology and Sediment. Chengdu: Sichuan Publishing Group, Sichuan Science and Technology Press, 2007: 69–75.
- [46] Xie Dongfeng, Pan Cunhong, Wu Xiuguang, et al. The variations of sediment transport patterns in the outer Changjiang Estuary and

- Hangzhou Bay over the last 30 years[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2017, 122(4): 2999–3020.
- [47] Xu Kehui, Li Anchun, Liu J P, et al. Provenance, structure, and formation of the mud wedge along inner continental shelf of the East China Sea: A synthesis of the Yangtze dispersal system[J]. *Marine Geology*, 2012, 291–294: 176–191.
- [48] Liu J T, Hsu R T, Yang R J, et al. A comprehensive sediment dynamics study of a major mud belt system on the inner shelf along an energetic coast[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 4229.
- [49] Liu Yunling, Gao Shu, Wang Yaping, et al. Distal mud deposits associated with the Pearl River over the northwestern continental shelf of the South China Sea[J]. *Marine Geology*, 2014, 347: 43–57.
- [50] Gao Shu. Holocene shelf-coastal sedimentary systems associated with the Changjiang River: An overview[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2013, 32(12): 4–12.
- [51] Zhang Xia, Lin Chunming, Dalrymple R W, et al. Facies architecture and depositional model of a macrotidal incised-valley succession (Qiantang River Estuary, eastern China), and differences from other macrotidal systems[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2014, 126(3/4): 499–522.
- [52] Trenhaile A S. *The Geomorphology of Rock Coasts*[M]. Oxford: Clarendon Press, 1987.

## Quantifying sediment fluxes from continental shelf islands

Li Gaocong<sup>1,2</sup>, Cai Tinglu<sup>3</sup>, Li Zhiqiang<sup>1,2</sup>, Gao Shu<sup>4</sup>

(1. Department of Marine Technology, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China; 2. Guangdong Provincial Engineering and Technology Research Center of Marine Remote Sensing and Information Technology, Zhanjiang 524088, China; 3. Second Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Hangzhou 310012, China; 4. State Key Laboratory for Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

**Abstract:** The information on sediment flux ( $Q_s$ ) from continental shelf islands is an important supplement to the study of accurate records interpretation of continental shelf sedimentary systems. Aiming at the scientific problem of how to estimate the  $Q_s$  of continental islands, this paper proposes a solution to calculate their  $Q_s$  based upon the empirical formula of small and medium-sized rivers in adjacent continent, taking the 8 227 continental islands in Southeast China as examples. Two preconditions are set up to perform the calculation. That is, the  $Q_s$  rule of the continental islands follows the rule of the small and medium-sized rivers in adjacent continent, and a continental island can be treated as a river basin to calculate its  $Q_s$ . The results show that: (1) the  $Q_s$  calculated by empirical formula is the minimum estimated value; if the actual basins of the continental island are taking into considered, the  $Q_s$  value will slightly increase, but the increase will not exceed  $n^{0.13}$  ( $n$  is the number of basins); (2) the empirical formula give the approximate magnitude information of  $Q_s$  for continent islands; the total area of the continental islands is 4 418.49 km<sup>2</sup>, and the corresponding order of magnitude of  $Q_s$  is 10<sup>6</sup> t/a; (3) during the completion of the estuarine filling stage, the continental island sediment is one of the main source for the inner continental shelf areas. Therefore, more attentions and researches are expected to the role play by the continental shelf islands to the formation and evolution of continental shelf depositional systems.

**Key words:** sediment flux; continental shelf islands; adjacent continent medium and small rivers; empirical formula revision; China southeastern shallow waters