

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2018.01.001

自然环境变化与人类活动影响下的中小河流沉积物源汇过程

杨守业¹, 印萍²

1. 同济大学海洋地质国家重点实验室, 上海 200092

2. 青岛海洋地质研究所, 青岛 266071

摘要: 山地小河在地球环境变迁和大陆边缘物质循环过程中具有重要作用, 且受人类活动干预影响越来越明显。相比世界大河而言, 中小河流多具有瞬时大通量、快速物质转换、易受极端事件和人类活动影响, 且对环境变化响应敏感等特点, 但学术界对它们的研究很薄弱。目前迫切需要以地球系统科学的思路来重新审视中小河流在圈层相互作用中的角色, 加强中小河流地学的系统研究, 尤其是通过系统的野外观测与采样分析, 积累较长期的实时连续现场水文泥沙等多参数观测资料; 同时利用多学科交叉和多方法集成的研究手段, 重点研究在全球变化与人类活动影响的双重因素驱动下, 世界主要大陆和岛屿地区代表性的中小河流入海物质的通量与组成, 向边缘海和全球大洋的物质输运、埋藏与循环过程, 以及对不同尺度的全球气候变化和海陆物质循环的响应和影响; 重点揭示不同纬度、地带性气候和人类活动影响下的中小河流代表的源汇体系特征, 及与世界大河源汇体系的差异, 深入理解地球表生过程和全球海陆相互作用的机制。

关键词: 中小河流; 从源到汇; 沉积物; 自然环境; 人类活动

中图分类号: P595

文献标识码: A

Sediment source-to-sink processes of small mountainous rivers under the impacts of natural environmental changes and human activities

YANG Shouye¹, YIN Ping²

1. State Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092, China

2. Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071, China

Abstract: Small mountainous river systems (SMRS) play a key role in the global environmental changes and material cycle on the continental margin, and are subject to increasing human perturbation. Compared to large river systems, the SMRS are characterized by rapid and huge discharges, fast sediment transfer, and being easily influenced by extreme events and human activities, which make them more sensitive to global environmental changes. However, they have received less research attention relative to large rivers. Currently, the role of SMRS that play in the interactions among earth's spheres deserves more in-depth researches, as the concept of earth system science is put under consideration. In particular, the combination of real time and long term hydrographic observations in the fields with multi-disciplinary analytical approaches is urgently needed for better understanding the role of these rivers played on earth surface processes. The major research directions include the discharges and compositions of dissolved and particulate materials by the SMRS from continents and islands into the global oceans, under the impacts of natural environmental changes and human activities, and the difference in sediment source-to-sink processes between the SMRS and large rivers. The comprehensive understanding of SMRS will definitely increase our recognition on earth surface processes and global sea-land interactions.

Key words: small mountainous rivers; source to sink; sediment; natural environmental change; human activities

过去二十多年, 海岸带陆海相互作用计划 (LOICZ)、大陆边缘研究计划 (NSF-MARGINS) 等

系列研究表明, 全球中小河流的入海物质对边缘海沉积、全球海洋化学组成、碳循环等影响很大, 且作

资助项目: 国家自然科学基金“河流与海洋沉积地球化学: 末次冰盛期以来东海沉积中长江源物质的源汇过程与环境意义”(41225020); 科技部“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”项目(2013FY112200); 上海市优秀学科带头人计划(14XD1403600)

作者简介: 杨守业(1971—), 男, 教授, 主要从事东亚河流和边缘海沉积地球化学研究, E-mail: syyang@tongji.edu.cn

收稿日期: 2017-05-31; **改回日期:** 2017-10-19. 周立君编辑

用很可能被明显低估了^[1,2]。因为较强的季风和极端气候环境、较高的降雨量、快速构造隆升和地震事件等综合影响,这些山溪性小河流虽然流域面积小,但每年入海颗粒物和溶解质通量非常大,因而从全球尺度看,这些小河的入海物质对海岸带的影响可能超过那些大河体系,且它们的流域风化及源汇沉积过程与大河体系明显不同^[3,4]。比如,台湾入海河流年均入海输沙量达到 2.3~5 亿吨,相当于目前我国三条主要大河(长江、黄河与珠江)输沙量的总和。台湾河流入海物质沉积学与地球化学组成研究也因此成为近几年国际地球科学界的热点,取得相当多的研究成果。比较而言,我国大陆入海中小河流的地学研究还很弱,尤其是基础数据积累明显不够,制约了对河海相互作用的系统认识。已有的研究主要集中于少数几个河口地区的悬沙输运与沉积动力过程、重金属污染评价和河口湿地营养盐循环等。公众对这些沿海的中小河流的认识也明显不如三条主要大河,很大程度上影响了流域、河口与近岸水环境管理与健康生态系统的维护,不利于海岸带可持续发展管理和灾害环境评估与预防。在科技部基础性工作专项“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”(2013—2018)支持下,我们系统开展了我国从北方到南方的若干条代表性中小河流的地学调查研究。本论文概述目前国内外中小河流地学主要是沉积物源汇过程方面的研究进展,并提出当前急需加强研究的主要方向和关键问题,希望引

起学术界重视。

1 国际中小河流源汇沉积过程与物质循环研究进展

1.1 国际研究计划积极关注中小河流地学研究

过去二十多年,越来越多的研究揭示,全球中小河流尤其是山溪性小河(SMRS^[5]; small mountainous river system,一般流域 $<2 \times 10^4 \text{ km}^2$,海拔梯度 $>1000 \text{ m}$)的入海通量对海岸带的影响可能超过世界主要大河体系^[2,6](图 1)。因此,众多的国际地学合作研究计划都极为关注中小河流在全球圈层相互作用和海陆物质循环过程中的作用。2004 年举办的国际 RioMar(River-dominated Ocean Margin,河流主控的大陆边缘)学术研讨会,与会学者一致认为小河流入海物质对全球海岸带沉积、碳循环和海洋生物地球化学过程有重要贡献。在 LOICZ-I 和 LOICZ-II 计划研究框架下,欧洲一些中小河流的海陆相互作用和流域研究计划如 EuroCat(European catchment), daNUbs(多瑙河综合研究)和 Catchment2Coast(C2C),在过去二十多年取得很多成果^[7]。LOICZ-II 更关注器测尺度与人类社会尺度上的不同类型流域盆地—海岸带—大陆架之间的复杂联系;研究大气、水体到沉积物不同圈层的主要界面之间的过程与通量(IGBP Report 51, IHDP Report 18)。2007 年执行的国际性海洋化学合作研究

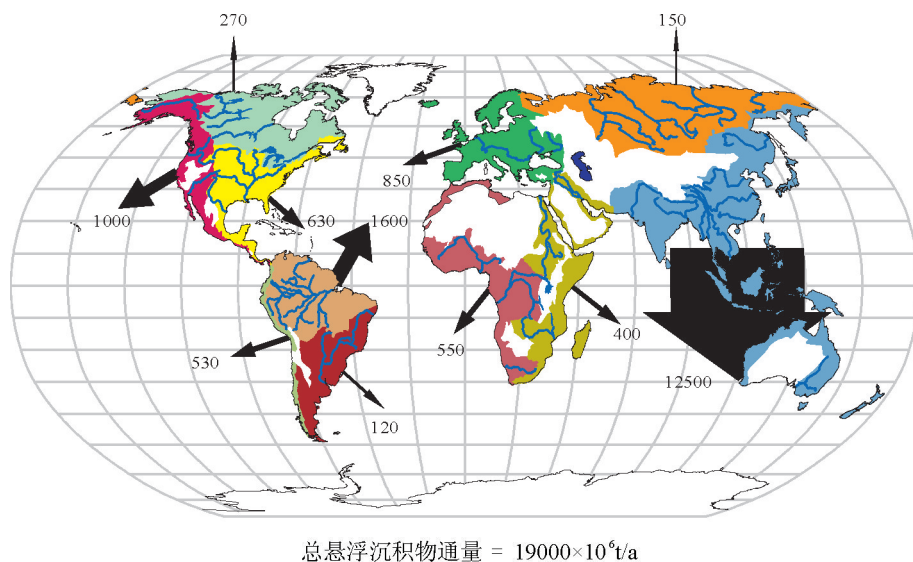


图 1 全球河流入海悬浮沉积物通量示意^[2]

Fig.1 The total flux of suspended sediments from global rivers into the sea^[2]

计划“海洋关键微量元素计划”(GEOTRACES)的核心科学目标之一也是了解全球入海河流物质通量、组成及其对海洋生物地球化学循环、生态系统和海洋环境的影响。

2003年,美国自然科学基金会(NSF)公布《大陆边缘科学计划2004》,详细叙述了美国“大陆边缘计划”^[8]的主要科学目标和研究内容。其中第四个研究方向“源—汇”系统(S2S: source to sink),就是以新西兰和巴布亚新几内亚的两条小河流(New Zealand的Waipaoa河和Papua New Guinea的Fly河)作为典型地区,来探讨河流沉积物从源到汇的搬运和沉积过程、机制及主控因素。与LOICZ计划相近,其主要的研究目标是分析不同时空尺度上,气候、构造和海平面变化驱动下的沉积物生产、搬运、沉积和保存过程,促进对大陆边缘沉积物扩散系统和相关地层的定量解释和理解,以提高对沉积物扩散的预测,加强对大陆边缘的生物地球化学循环(如碳)、与全球变暖和海面上升影响下的生态系统演化和资源管理等理解和认识^[9]。

NSF-MARGINS于2010年正式结束(1998—2010),现开展一个新的十二年研究计划“Geo-Prism”。正如John P Walsh等在2016年的Earth-Science Reviews专辑封面文章中所言,通过山溪性小河流的系统研究,从源到汇已成为一种地学研究思路与方法,深刻影响了国际大陆边缘地学研究;它通过理论和实际观测揭示了河流源汇体系的基本规律,但将来要加强现代过程与地质记录的对比研究,加强分析新技术的运用,需要量化的模型研究,突出人类世尺度的源汇过程研究^[10]。

因此,在过去二十年里,中小河流流域的自然风化过程、风化物质向海输运通量与组成特征、及其对全球生物地球化学循环与海洋化学组成的影响已经成为国际科学界关注的热点,这也是当前地球系统科学和全球变化研究的重点。对中小河流的研究不仅仅局限在河口海岸地区的海陆作用,而拓展到流域内的自然与人类活动影响下的风化过程;以海陆结合的研究思路和多学科交叉的研究手段来揭示中小河流在全球地表物质循环中的作用和贡献。

1.2 中小河流在大陆边缘沉积和生物地球化学循环中的重要作用

世界每年由河流入海沉积物约150~200亿吨^[11,12],其中70%以上来自南亚及环太平洋与印度洋的河流,尤其是低纬地区的一些山地中小河流体系输沙量巨大^[2,11-16](图1)。据Milliman和Farn-

sworth(2011)估计,这些中小型的山溪性河流流域总面积占全球入海河流总流域面积约30%,但其入海悬浮泥沙却占70%以上,其中60%是来自那些流域降雨较丰富的山溪性河流;入海总溶解质通量也占到全球河流总量的40%左右。全球不少中小河流输入入海的沉积物通量以及流域侵蚀模数要远大于那些世界大河,且具有显著的事件性或脉冲式输送特点,主要集中于汛期、台风/飓风或地震发生时期。新几内亚(New Guinea)的山溪性小河每年入海泥沙达17亿吨,相当于北美所有河流输沙的总和,而其流域面积仅为80万km²^[13]。

但是目前除了少数几个小河包括我国台湾的高屏溪与浊水溪外,针对世界众多小河源汇体系的深入研究还比较缺乏,它们与大河源汇体系对大陆边缘沉积影响的比较研究几乎没有开展,这些不同源汇体系如何响应流域环境变迁和不同人类活动干预,也需要深入研究。如一些研究认为,人类世尺度上,小流域盆地水坝建设较少,沉积物被水坝截留的效率也较低,因为流域侵蚀的沉积物可以快速搬运到海区^[14,17];轨道或更长时间尺度上,山地小河流域由于独特的构造-地貌类型和水系特征,流域内风化剥蚀沉积物的滞留时间较短,输入入海过程要显著快于大河体系^[4]。但也有研究揭示,相比世界大河而言,全球中小河流受全球气候环境变化和人类干预影响也越来越显著,且更为敏感^[5]。

因此,围绕大陆边缘沉积和不同河流源汇体系依然有一些关键问题亟待解决^[18,19],包括:山溪性小河沉积物源汇过程与大河体系有何差异?不同河流源汇沉积体系中外驱动因素和环境信号如何从流域向河口传递?源区信号尤其是不同时间尺度的气候变化信息能否在大陆边缘保存、如何定量解译?相比大河而言,山溪性小河源汇过程是否对人类活动和极端气候事件响应更明显?而这些问题也是当前国际上地球表生物物质循环研究的热点。

LOICZ和海洋生物地球化学循环研究(IMBER:海洋生物地球化学与生态系统综合研究)的一个重要发现是输入到全球海岸带地区的营养盐(如70%的溶解无机磷)主要来自那些中—低侵蚀模数的小流域区^[1];而中—高侵蚀模数的流域主要位于赤道、热带、亚热带及岛屿地区,如台湾、南亚、新西兰、中北美洲等一些低纬岛屿地区,因为较强的季风和极端气候、较高降雨量及快速构造隆升等影响,这些山溪性小河虽然流域面积小,但每年入海颗粒物和溶解质通量非常大,对全球海洋生物地球化学循环具有重要影响。

海洋沉积物在千年尺度上是颗粒有机碳(POC)、大气 CO_2 的主要储库,也是氧气的主要来源,因此对全球碳循环研究具有重要意义^[20, 21],而且超过80%的较长期的POC埋藏主要发生在大陆边缘地区^[22]。因此,小的流域—海岸带系统对海洋碳循环有重要的影响^[5, 23-28]。如加勒比岛屿区小河流对Biscay湾的淡水贡献只占28%,但它们输入的POC却占整个湾的80%左右^[26]。如大洋洲地区小河流输入的总有机碳约占海洋总输入的21%~38%^[29];新西兰小河流的POC产率与输沙率有关;溶解有机碳(DOC)占总有机碳比例较小,其产率要低于热带高地和喜马拉雅地区小河流,但与一些大河和温带-近极地的河流接近;主要受植被、土地利用以及土壤过程控制^[25]。台湾每年小河流入海的化石成因POC约为 12 ± 1 到 $246 \pm 22 \text{ tC/km}^2$,它们被快速搬运入海而埋藏在海洋沉积物中,因此较少被氧化而参与到大气 CO_2 的循环中^[27, 28];而在大河物质输运过程中,如喜马拉雅地区的南亚河流中,高达85%以上的化石有机碳可以在入海最终埋藏前被氧化分解,参与到全球大气碳循环^[30, 31]。而且这些山溪性小河体系由于搬运风化物质从源到汇的过程非常迅速,因此陆源POC输运入海和最终埋藏的效率要远远高于那些世界大河^[27];且入海POC的扩散与埋藏主要受特定海洋条件控制的有效通量(effective discharge)有关^[5]。

但目前对山地小河的研究认识还明显不足,它们对全球大陆边缘沉积体系和海洋碳循环的贡献值得更深入的研究^[32]。考虑到全球流域面积大于50万 km^2 的河流不到40条,而流域仅几百到几千的中小河流有数千条,因此它们对全球地表物质输运和循环的作用和贡献是否真的超过那些世界大河,还需要更深入的研究。NSF-MARGINS的源汇研究计划(S2S)只关注了几条特征的小河流,要深入理解全球小河流在地球表生过程和河海相互作用中的角色与具体贡献,还需要全球范围内,选择代表性的中小河流,开展更长期且系统的观测研究^[2]。目前学术界对河流输入的陆源POC的源汇过程尤其在海陆界面处的输送通量与海区埋藏效率依然存在争议。一些学者认为大部分陆源有机碳在大陆边缘都降解了而难以在沉积地层中保存^[33, 34],而另外一些研究认为大陆边缘沉积POC中陆源有机质占主导^[35-37]。而台湾等山溪性小河流的碳源汇过程的系统研究对深入认识全球大陆边缘碳循环过程与机制具有重要意义。

2 我国入海中小河流地学研究进展

东亚大陆边缘连接世界最大的大陆与大洋,发育两类陆源物质入海的源汇体系,即以长江、黄河、珠江为代表的“世界大河—大三角洲—宽广陆架—复杂的物质转换—强烈人类活动影响”下的源汇体系,和以台湾小河流为代表的“山地小河—瞬时大流量—极端事件影响—快速物质转换”的源汇体系^[3, 38](图2)。世界大河长江、黄河与珠江作为连接东亚大陆与西太平洋边缘海的桥梁,携带高原快速隆升而风化剥蚀的大量陆源物质进入边缘海,对东部海陆相互作用、河口三角洲形成、边缘海沉积体系发育、古环境演化、海洋生物地球化学循环等均具有重要影响^[39, 40]。过去三十年,国际全球变化研究的一个热点就是根据亚洲河流在河口和海区的沉积地球化学记录来研究喜马拉雅-青藏高原隆升过程、亚洲季风的形成、大河水系发育演化和海陆古环境演变等;尤其是晚第四纪在自然环境与人类活动双重因素作用下,东亚大陆边缘物质交换强烈,环境变迁显著,海陆相互作用特点鲜明。因此,长江、黄河与珠江的源汇体系研究积累了大量基础数据资料,取得众多研究成果。

比较而言,目前除了台湾岛的山溪性小河流外,学术界对大陆入海的中小型河流的地学研究还不够系统,科学成果明显弱于世界大河。主要原因可能包括几个方面:(1)缺乏对这些中小河流基本参数的观测积累,尤其缺乏长期的水文泥沙等监测数据;(2)这些河流多具有山溪性特点,平时入海物质通量很低,而台风和暴雨期间入海通量巨大且陆源物质的从源到汇过程相当迅速,观测极为困难,限制了研究深入;(3)大陆的这些中小河流受人类活动影响显著,难以获取真实的背景组成,深入揭示河流物质自然的源汇过程和海陆相互作用特点较困难;(4)浙闽沿岸一些河流受强潮影响,河口及下游物质主要来自外海(包括长江源细粒沉积物)输入,因此难以得到这些河流真实的入海物质通量与组成;(5)一些国际界河的野外采样工作与研究难度较大。总体来看,目前科学界及公众对这些入海中小河流的科学意义及其对海洋环境可能影响的认识明显不够,导致研究关注较小。

如前所述,LOICZ和NSF-MARGINS计划研究都揭示,台湾、南亚等一些低纬度岛屿地区的山溪性小河流,在较强的季风和极端气候环境、较高的降雨量及快速构造隆升等综合影响下,输入陆源物质

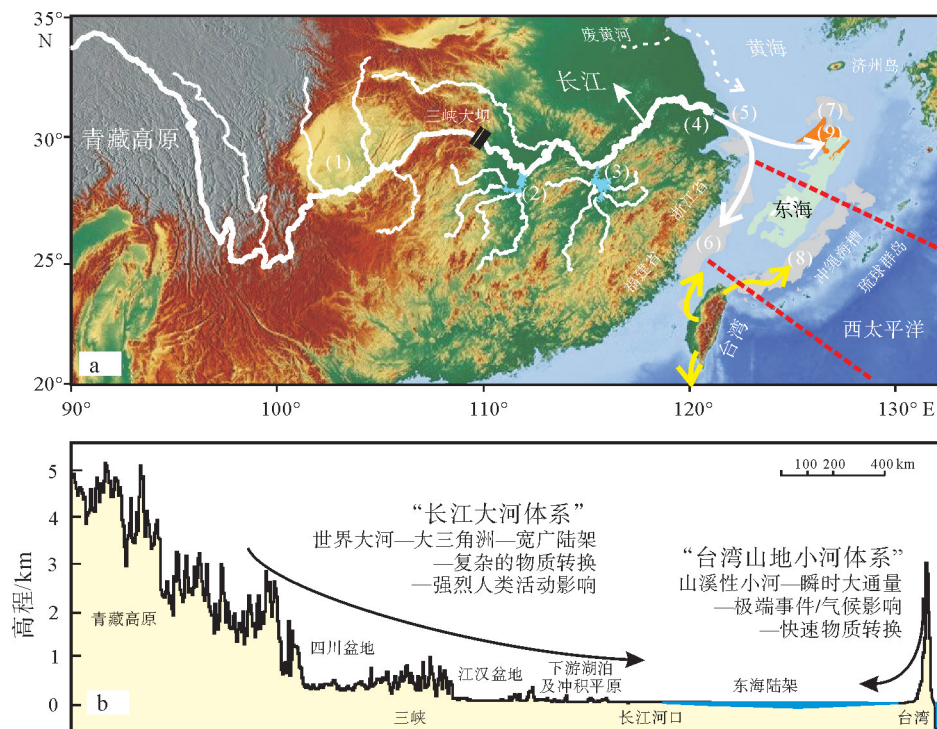


图 2 东海周边两类河流源汇体系主导陆架和冲绳海槽沉积和物质循环

1~9 分别为长江-东海特征的沉积盆地和泥质沉积汇(改绘自文献[38]);

红色虚线代表 GEOTRACES 的计划观测断面(<http://www.geotraces.org>)

Fig.2 Two types of fluvial routing systems around the East China Sea govern the sedimentation and material cycling of the shelf and Okinawa Trough

(Numbers 1-9 indicate the major depocenters and depositional sinks in

the Changjiang catchment and East China Sea, modified from reference [38])

入海,对全球海洋地球化学循环具有重要影响。台湾岛屿风化过程、入海物质通量与组成、对全球碳循环的影响等也因此一直受到国际学术界的热烈关注。以刘祖乾为代表的台湾学者开展了“宿命”(FATES)研究计划,对南部的高屏溪和西部的浊水溪等开展了长期的跨学科的观测研究,取得了国际公认的众多成果^[41]。如台湾河流每年入海物质通量达 2.3~5 亿吨,很大一部分是在台风期间短短的几天内快速搬运入海(图 3),且高密度流是陆源泥沙向深海扩散的重要方式。台风期间的河流含沙量可达到 200g/L 以上,而台风前的平静天气下,含沙量多在 5~10g/L 以下^[42]。台湾这些山溪性河流入海的巨量悬浮泥沙对东海、南海沉积体发育、海洋生物地球化学循环和生态系统影响深远,在特定时空尺度上甚至超过长江和珠江等世界大河的影响^[2,41-48]。

我国大陆沿海地区也发育较多中小河流,如浙闽沿岸发育的中小型入海河流包括钱塘江、飞云江、瓯江、鳌江、木兰溪、九龙江、闽江等(表 1)。它们源于浙闽丘陵地区的天目山、怀玉山、武夷山等山脉,

东流入海,由于河流长度多在几百千米之内,源头水系海拔可达 1000~2000m 之上,因此,这些河流坡降明显大于那些大河,具有类似山溪性河流的特点。浙闽东南沿海处于中亚热带和南亚热带过渡区,在东南季风和台风的影响下,气候温暖湿润,降水充沛,年降水量在 1500~2000mm 之间。流域地形起伏多变、多山丘河谷,地带性土壤以红壤、赤红壤(闽南沿海)为主。

与台湾的典型山溪性河流类似,这些河流也多发育在相似的构造和地质背景下,遭受较强的季风和极端气候影响,但目前根据少量的水文站观测资料,它们的入海泥沙通量比较低,总量约为 2300 多万吨/年。明显少于台湾西部流域台湾海峡的河流输沙总量(0.6~1.5 亿吨^[49])。与台湾入海河流不同,这些河流流域多受到强烈的人类活动影响,流域各种水利设施和灌溉活动,使得入海泥沙量在过去几十年剧减。福建全省目前各类水电站已经达到 1 万多座。闽江在 1962 年入海砂量达到 2000 万吨,而现在只有 700 多万吨(福建省自然图集,1999)。流域较强的人类活动也导致河流污染较严重;河口

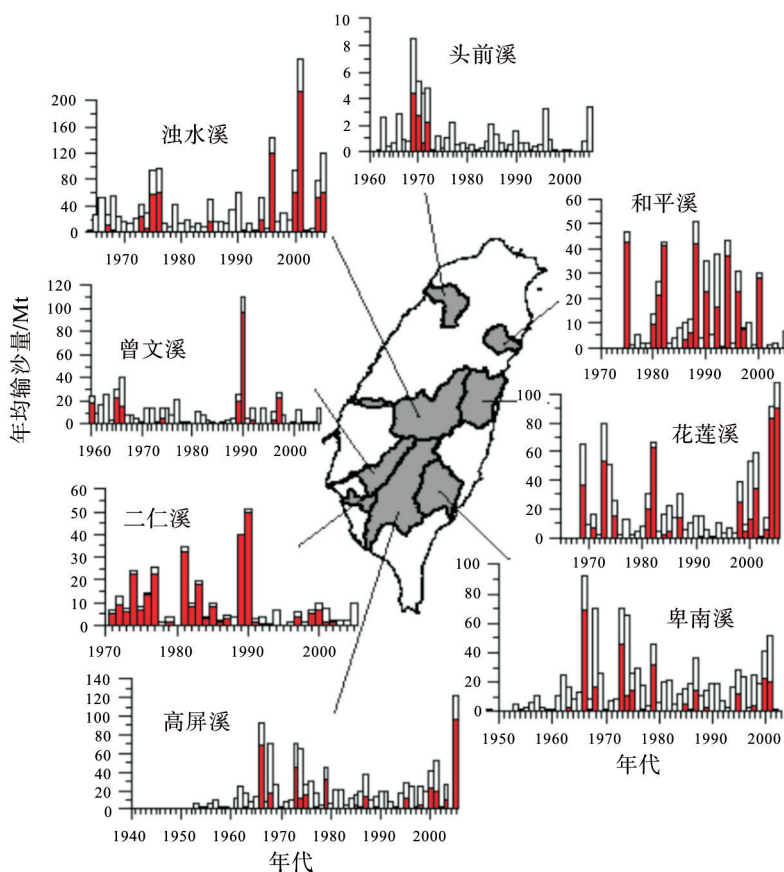


图3 台湾入海河流悬浮泥沙受台风事件影响显著^[42]

Fig.3 The flux of suspended sediments from Taiwan rivers is strongly influenced by typhoon events^[42]

地区潮汐作用影响强烈,与长江南下物质交换过程复杂。因此,浙闽沿岸的山溪性中小河流本身就提供了与台湾山溪性小河流不同的研究案例,要深化我国东部海陆相互作用研究,就必须关注这些中小河流的影响。

但与台湾河流的地学研究越来越受学术界重视相比,目前对大陆沿海的中小河流包括位于同一纬度范围的浙闽沿海中小型河流的研究成果比较少。过去几十年的研究主要集中在鸭绿江、滦河、钱塘江、椒江、九龙江、闽江等几个河口地区,包括:悬沙输运与沉积动力过程,元素与矿物组成,重金属污染评价和河口湿地营养盐循环等^[50-53,55-61];尤其是揭示出潮汐作用和沿岸流系、以及人类活动对这些中小河流入海物质输运与沉积有重要影响。除了传统的沉积学、矿物学和元素地球化学研究外,最近,Sr-Nd 同位素及碎屑单矿物(锆石、独居石)的年龄和元素配分特征等也被应用于示踪这些中小河流的入海物质组成特征。如闽江锆石具有明显的加里东期和前寒武纪年龄的碎屑锆石,而明显区别于福建的九龙江和浙江的瓯江,也不同于台湾的浊水溪等河

流,这为判别台湾海峡沉积物的来源提供了可靠的依据^[62-64]。

3 加强自然环境变化与人类活动影响下的我国中小河流源汇过程研究

与世界典型包括台湾的山地小河流地学研究相比,目前对我国大陆中小河流的系统研究非常薄弱,还没有系统研究入海物质的通量变化及其对流域-河口环境响应,自然与人类活动双重因素驱动下陆源物质从流域到河口的源汇过程,以及不同时空尺度上这些河流入海物质与长江、台湾西部入海河流物质的混合等。这明显制约了东亚大陆边缘海陆相互作用的研究进展,也不利于晚第四纪近岸与陆架沉积环境演化、生物地球化学循环等研究的深入。比如东海内陆架和冲绳海槽发育特征的泥质沉积体系,因为它们记录了高分辨率的晚第四纪环境演化信息,因此成为近十多年海洋科学界研究热点。但目前对这些泥质沉积体的物源、成因、对冰后期和全新世流域和海洋环境演化的响应研究还需深入,

表 1 东海周边(浙闽沿岸及台湾)中小河流基本参数

Table 1 Basic information of medium and small rivers around the East China Sea
(Along Zhejiang and Fujian coasts and in Taiwan)

省份	名称	长度/km	流域面积/ 10^3 km^2	注入	年径流量/ (m^3/s)	径流总量/ 10^8 m^3	输沙量/万 t
浙江省	钱塘江	688	55.6	杭州湾	1400	442,342 ^[50]	440 ^[50] , 608, 668
	瓯江	388	18.0	温州湾	457, 615	144, 202	232, 273
	飞云江	176, 185	3.73	东海	144	40	42
	灵江	198	6.61	台州湾	122	51.7	112
	甬江	121	5.03	杭州湾	136	43	172
	椒江	202	6.75	东海	212	67 ^[50]	840 ^[50]
	鳌江	82, 124	2.54	东海	96.4	17.5	43
福建省	闽江	577	61.0	东海	1779	616 ^[50] , 624 ^[51]	824, 716 ^[52] , 770 ^[50]
	九龙江	258	14.7	泉州湾	391, 147 ^[50]	147 ^[50] , 82 ^[53]	330, 212, 310 ^[50]
	晋江	182	5.63	泉州湾	184	49	254
	木兰溪	168	1.73	兴化湾	31	10	47
台湾西部 ^[49, 54]	浊水溪	186	3.1	台湾海峡	117	37	6555, 3000~6000
	头前溪	63	0.5	台湾海峡	21	6.6	100~200
	八掌溪	81	0.6	台湾海峡	20	6.4	200
	曾文溪	138	1.2	台湾海峡	33	10.4	900~1600
	乌溪	119	2	台湾海峡	114	36	400~1000
	大安溪	96	0.63	台湾海峡	30	9.5	300~500
	淡水河	159	2.73	台湾海峡	180	57	100~300

尤其是一些关键科学问题还亟待解决和深化研究,如:(1)浙闽沿岸和台湾中小河流入海物质通量与组成特征?(2)这些河流沉积物对东海内陆架泥质沉积体的贡献到底如何?(3)如何在东海识别和区分这些浙闽沿岸河流、长江源与台湾源沉积物?(4)在全新世早中期,即流域受人类活动影响显著前,这些河流入海泥沙是否明显多于现在?(5)它们沉积物入海的源汇过程是否与台湾小河流一样,主要受极端事件(台风、地震等)控制?(6)过去近百年来,这些中小河流流域人类活动如何影响沉积物的输运与沉积过程?等等。

受河流源汇系统中河漫滩、冰期开阔陆架等“关键带”和“缓冲区”的影响,流域风化剥蚀的沉积物可能在这些“关键带”和“缓冲区”停留很长时间,而难以到达最终的沉积汇(sink)(图 4);而较长的滞留时间可以明显改变原始风化沉积物(源区信号)的组成,进而影响流域的物质循环包括大气 CO_2 消耗。流域的源区信息或外部驱动信号(如自然季风气候变化)能否及如何通过风化沉积物从流域传递到河口及海区,以及如何从海洋沉积记录中提取流域的环境演变信号,一直是大陆边缘沉积和河流源汇过程研究的核心问题,也是研究争议的热点^[19]。东亚

大陆边缘存在世界大河长江与台湾浊水溪这样的山溪性小河,它们具有明显不同的沉积物源汇过程^[3,4,38],是回答上述国际源汇过程研究关键问题的理想研究对象。因此,目前可以深化研究这两类河流的源汇过程如何响应流域季风气候环境变化,极端气候事件(台风、洪水等)影响,它们的入海沉积物在边缘海保存记录的完整性,及晚全新世人类活动对自然源汇过程(尤其是沉积物输运速率和旋回性)的干预影响等(图 4)。

总体来看,目前需要更系统地收集整理我国近岸中小河流的基础水文、泥沙、沉积与地球化学组成等数据;可以重点选取北方、浙闽沿岸和海南岛等不同地质和气候背景下发育的中小河流,系统开展河流沉积学与地球化学调查研究,积累基础的河流水文、泥沙、沉积与化学组成数据,为东亚边缘海海陆相互作用研究提供更丰富翔实的资料。重点研究这些中小河流入海物质(溶解态和颗粒态)的通量、组成特点,向口外输运过程。同时,与长江、黄河等国际性大河以及台湾典型的中小河流比较,揭示不同纬度、地带性气候条件和人类活动影响下,中小河流为代表的“小河流-瞬时大通量-极端事件影响-快速沉积物质转换”的源汇体系特征,以及与世界大河源

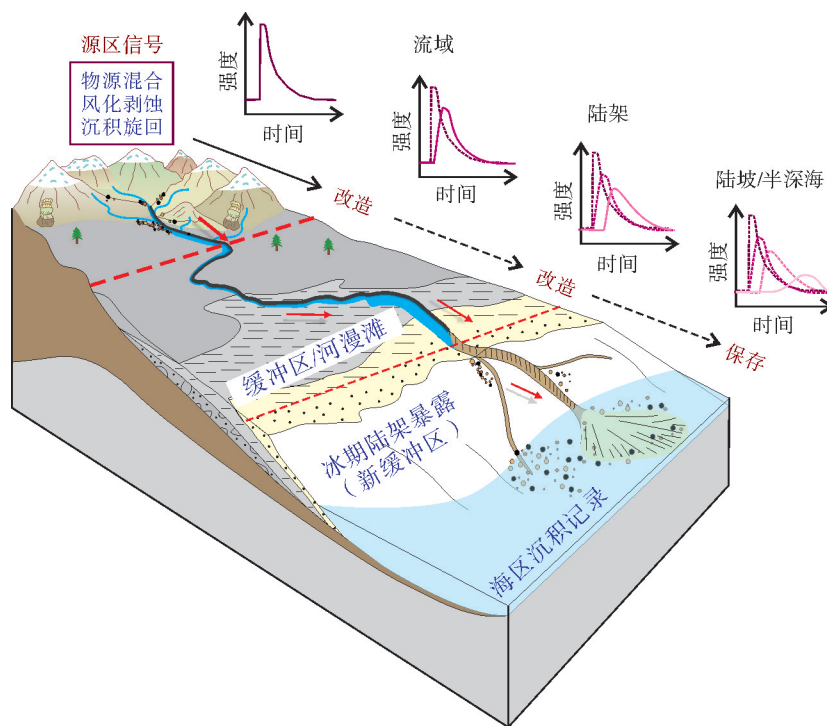


图4 河流沉积物的从源到汇过程与环境响应示意(改绘自文献[19,65])

图中信号强度主要指河流源区不同来源沉积物在向下游传输过程中的混合程度、风化剥蚀的程度和速率,以及源区沉积物在地质历史中所经历的风化剥蚀旋回次数。从源区到海洋的河流沉积物从源到汇搬运过程中,受自然环境变化和人类活动等多时空尺度的复杂因素影响,这些源区信号会发生改造、变异,因此是当今河流沉积物源汇过程研究的关键科学问题。

Fig.4 The sediment source-to-sink transport processes and propagation of environmental signals from the catchment to the sea (modified from references[19,65])

汇过程的差异(图3,4);探讨中小河流通量和组成对流域风化与气候的独特响应(图4),为深入理解东亚大陆边缘表生物物质循环、海陆相互作用的过程与机制奠定基础。而且,开展中小河流的系统研究,对于更好地理解自然与人类活动双重因素驱动的河流流域到河口物质循环过程,提高河流与海洋生态环境质量,加强流域过程管理,实现河口与海岸带地区的可持续发展及灾害可靠评估与预防等也有重要意义。

参考文献(References)

- [1] Smith S V, Swaney D P, Talaue-Mcmanus L, et al. Humans, hydrology, and the distribution of inorganic nutrient loading to the ocean[J]. *BioScience*, 2003, 53(3): 235-245.
- [2] Milliman J D, Farnsworth K L. *River Discharge to the Coastal Ocean: A Global Synthesis*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2011.
- [3] Bi L, Yang S Y, Li C, et al. Geochemistry of river-borne clays entering the East China Sea indicates two contrasting types of weathering and sediment transport processes[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2015, 16(9): 3034-3052.
- [4] Li C, Yang S Y, Zhao J X, et al. The time scale of river sediment source-to-sink processes in East Asia[J]. *Chemical Geology*, 2016, 446: 138-146.
- [5] Wheatcroft R A, Goni M A, Hatten J A, et al. The role of effective discharge in the ocean delivery of particulate organic carbon by small, mountainous river systems[J]. *Limnology and Oceanography*, 2010, 55(1): 161-171.
- [6] Salomons W. European catchments: catchment changes and their impact on the coast[J]. *Biochemical & Biophysical Research Communications*, 2004, 228(3): 852-858.
- [7] Kremer H H. River catchment-coastal sea interaction and human dimensions[J]. *Regional Environmental Change*, 2004, 4(1): 1-4.
- [8] 高抒. 美国《洋陆边缘科学计划2004》述评[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2005, 25(1): 119-123. [GAO Shu. Comments on the "NSF margins program science plans 2004"[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2005, 25(1): 119-123.]
- [9] 张经. 关于陆-海相互作用的若干问题[J]. *科学通报*, 2011, 56(24): 1956-1966. [ZHANG Jing. On the critical issues of land-ocean interactions in coastal zones[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56(24): 1956-1966.]
- [10] Walsh J P, Wiberg P L, Aalto R, et al. Source-to-sink research: economy of the Earth's surface and its strata[J]. *Geology*, 2005, 33(12): 1155-1158.

- Earth-Science Reviews, 2016, 153: 1-6.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] Milliman J D. Sediment discharge to the ocean from small mountainous rivers: the New Guinea example[J]. Geo-Marine Letters, 1995, 15(3-4): 127-133.
- [14] 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.
- [15] Farnsworth K L, Milliman J D. Effects of climatic and anthropogenic change on small mountainous rivers: the Salinas River example[J]. Global and Planetary Change, 2003, 39(1-2): 53-64.
- [16] Syvitski J P M, Vörösmarty C J, Kettner A J, et al. Impact of humans on the flux of terrestrial sediment to the global coastal ocean[J]. Science, 2005, 308(5720): 376-380.
- [17] Vörösmarty C J, Meybeck M, Fekete B, et al. Anthropogenic sediment retention: major global impact from registered river impoundments[J]. Global and Planetary Change, 2003, 39(1-2): 169-190.
- [18] Kuehl S A, Nittrover C A. Exploring the transfer of Earth surface materials from source to sink[J]. EOS, Transactions American Geophysical Union, 2011, 92(22): 188.
- [19] Romans B W, Castelltort S, Covault J A, et al. Environmental signal propagation in sedimentary systems across timescales[J]. Earth-Science Reviews, 2016, 153: 7-29.
- [20] Berner R A. Burial of organic carbon and pyrite sulfur in the modern ocean: its geochemical and environmental significance [J]. American Journal of Science, 1982, 282(4): 451-473.
- [21] Ludwig W, Amiotte-Suchet P, Munhoven G, et al. Atmospheric CO₂ consumption by continental erosion: present-day controls and implications for the last glacial maximum[J]. Global and Planetary Change, 1998, 16-17: 107-120.
- [22] Hedges J I, Keil R G. Sedimentary organic matter preservation: an assessment and speculative synthesis[J]. Marine Chemistry, 1995, 49(2-3): 81-115.
- [23] Lyons W B, Nezat C A, Carey A E, et al. Organic carbon fluxes to the ocean from high-standing islands[J]. Geology, 2002, 30(5): 443-446.
- [24] Gomez B, Trustrum N A, Hicks D M, et al. Production, storage, and output of particulate organic carbon: Waipaoa River basin, New Zealand[J]. Water Resources Research, 2003, 39(6): 1161.
- [25] Carey A E, Gardner C B, Goldsmith S T, et al. Organic carbon yields from small, mountainous rivers, New Zealand[J]. Geophysical Research Letters, 2005, 32(15): L15404.
- [26] Coynel A, Etcheber H, Abril G, et al. Contribution of small mountainous rivers to particulate organic carbon input in the Bay of Biscay[J]. Biogeochemistry, 2005, 74(2): 151-171.
- [27] Hilton R G, Galy A, Hovius N, et al. Efficient transport of fossil organic carbon to the ocean by steep mountain rivers: An orogenic carbon sequestration mechanism[J]. Geology, 2011, 39(1): 71-74.
- [28] Hilton R G, Galy A, Hovius N, et al. The isotopic composition of particulate organic carbon in mountain rivers of Taiwan[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2010, 74(11): 3164-3181.
- [29] Schlünz B, Schneider R R. Transport of terrestrial organic carbon to the oceans by rivers: re-estimating flux-and burial rates[J]. International Journal of Earth Sciences, 2000, 88 (4): 599-606.
- [30] Galy V, Beyssac O, France-Lanord C, et al. Recycling of graphite during Himalayan erosion: a geological stabilization of carbon in the crust[J]. Science, 2008, 322(5903): 943-945.
- [31] Bouchez J, Beyssac O, Galy V, et al. Oxidation of petrogenic organic carbon in the Amazon floodplain as a source of atmospheric CO₂[J]. Geology, 2010, 38(3): 255-258.
- [32] Mckee B. The transport, transformation, and fate of carbon in riverdominated ocean margins[C]. 2003.
- [33] Keil R G, Mayer L M, Quay P D, et al. Loss of organic matter from riverine particles in deltas[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1997, 61(7): 1507-1511.
- [34] Aller R C, Heilbrun C, Panzeca C, et al. Coupling between sedimentary dynamics, early diagenetic processes, and biogeochemical cycling in the Amazon-Guianas mobile mud belt: coastal French Guiana[J]. Marine Geology, 2004, 208(2-4): 331-360.
- [35] Leithold E L, Blair N E. Watershed control on the carbon loading of marine sedimentary particles[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2001, 65(14): 2231-2240.
- [36] Goñi M A, Yunker M B, Macdonald R W, et al. The supply and preservation of ancient and modern components of organic carbon in the Canadian Beaufort Shelf of the Arctic Ocean [J]. Marine Chemistry, 2005, 93(1): 53-73.
- [37] Leithold E L, Blair N E, Wegmann K W. Source-to-sink sedimentary systems and global carbon burial: a river runs through it[J]. Earth-Science Reviews, 2016, 153: 30-42.
- [38] Yang S Y, Bi L, Li C, et al. Major sinks of the Changjiang (Yangtze River)-derived sediments in the East China Sea during the late Quaternary[J]. Geological Society, London, Special Publications, 2016, 429(1): 137-152.
- [39] Raymo M E, Ruddiman W F. Tectonic forcing of late Cenozoic climate[J]. Nature, 1992, 359(6391): 117-122.
- [40] Wang P. Cenozoic deformation and the history of Sea-land interactions in Asia[C]//Clift P, Kuhnt W, Wang P, et al. Eds. Continent-Ocean Interactions Within East Asian Marginal Seas. Washington, DC: The American Geophysical Union, 2004: 1-22.
- [41] Liu J T, Hsu R T, Hung J J, et al. From the highest to the deepest: the Gaoping river-Gaoping submarine canyon dispersal system[J]. Earth-Science Reviews, 2016, 153: 274-

- 300.
- [42] Kao S J, Milliman J D. Water and sediment discharge from small mountainous rivers, Taiwan: the roles of lithology, episodic events, and human activities[J]. *The Journal of Geology*, 2008, 116(5): 431-448.
- [43] Dadson S J, Hovius N, Chen H, et al. Links between erosion, runoff variability and seismicity in the Taiwan orogen [J]. *Nature*, 2003, 426(6967): 648-651.
- [44] Goldsmith S T, Carey A E, Lyons W B, et al. Extreme storm events, landscape denudation, and carbon sequestration: Typhoon Mindulle, Choshui River, Taiwan[J]. *Geology*, 2008, 36(6): 483-486.
- [45] Xu K H, Milliman J D, Li A C, et al. Yangtze-and Taiwan-derived sediments on the inner shelf of East China Sea[J]. *Continental Shelf Research*, 2009, 29(18): 2240-2256.
- [46] Li C S, Shi X F, Kao S J, et al. Rare earth elements in fine-grained sediments of major rivers from the high-standing island of Taiwan[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 69: 39-47.
- [47] Liu J T, Kao S J, Huh C A, et al. Gravity flows associated with flood events and carbon burial: Taiwan as instructional source area[J]. *Annual Review of Marine Science*, 2013, 5(1): 47-68.
- [48] Milliman J D, Lee T Y, Huang J C, et al. Impact of catastrophic events on small mountainous rivers: Temporal and spatial variations in suspended-and dissolved-solid fluxes along the Choshui River, central western Taiwan, during typhoon Mindulle, July 2-6, 2004[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2017, 205: 272-294.
- [49] Liu J P, Liu C S, Xu K H, et al. Flux and fate of small mountainous rivers derived sediments into the Taiwan Strait [J]. *Marine Geology*, 2008, 256(1-4): 65-76.
- [50] Zhang J, Liu C L. Riverine composition and estuarine geochemistry of particulate metals in China—weathering features, anthropogenic impact and chemical fluxes[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2002, 54(6): 1051-1070.
- [51] 徐茂泉. 闽江口表层沉积物中碎屑矿物的研究[J]. *厦门大学学报: 自然科学版*, 1995, 34(3): 466-469. [XU Maoquan. Studies on fragmentary minerals in surface sediments of the Minjiang Estuary[J]. *Journal of Xiamen University: Natural Science*, 1995, 34(3): 466-469.]
- [52] 刘苍宇, 贾海林, 陈祥峰. 闽江口沉积结构与沉积作用[J]. *海洋与湖沼*, 2001, 32(2): 177-184. [LIU Cangzi, JIA Hailin, CHEN Xiangfeng. Sedimentary texture and sedimentation in the Minjiang River[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2001, 32(2): 177-184.]
- [53] 徐茂泉. 九龙江口表层沉积中碎屑矿物的研究[J]. *厦门大学学报: 自然科学版*, 1994, 33(5): 675-680. XU Maoquan. Studies on fragmentary minerals of surface sediments in Jiulong River Estuary[J]. *Journal of Xiamen University: Natural Science*, 1994, 33(5): 675-680.]
- [54] Milliman J D, Kao S J. Hyperpycnal discharge of fluvial sediment to the ocean; impact of Super-Typhoon Herb (1996) on Taiwanese rivers[J]. *The Journal of Geology*, 2005, 113(5): 503-516.
- [55] Chen J S, Wang F Y. Chemical composition of river particulates in eastern China[J]. *GeoJournal*, 1996, 40(1): 31-37.
- [56] 李伯根, 谢钦春, 夏小明, 等. 椒江河口最大浑浊带悬沙粒径分布及其对潮动力的响应[J]. *泥沙研究*, 1999(1): 18-26. [LI Bogen, XIE Qinchun, XIA Xiaoming, et al. Size distribution of suspended sediment in maximum turbidity zone and its response to tidal dynamics in Jiaojiang River Estuary[J]. *Journal of Sediment Research*, 1999(1): 18-26.]
- [57] Chen J S, Wang F Y, Li X D, et al. Geographical variations of trace elements in sediments of the major rivers in eastern China[J]. *Environmental Geology*, 2000, 39(12): 1334-1340.
- [58] 蔡锋, 苏贤泽, 陈锋, 等. 彩沙示踪研究九龙江河口湾北侧湾口海区底沙运动[J]. *海洋环境科学*, 2000, 19(4): 36-40. [CAI Feng, SU Xianze, CHEN Feng, et al. Bedload movement in north mouth of Jiulongjiang Estuary using colored sand tracing[J]. *Marine Environmental Science*, 2000, 19(4): 36-40.]
- [59] 高建华, 高抒, 董礼先, 等. 鸭绿江河口地区沉积物特征及悬沙输送[J]. *海洋通报*, 2003, 22(5): 26-33. [GAO Jianhua, GAO Shu, DONG Lixian, et al. Sediment distribution and suspended sediment transport in Yalu River Estuary[J]. *Marine Science Bulletin*, 2003, 22(5): 26-33.]
- [60] 高建华, 李军, 汪亚平, 等. 鸭绿江河口及近岸海域沉积物中重矿物组成、分布及其沉积动力学意义[J]. *海洋学报*, 2009, 31(3): 84-94. [GAO Jianhua, LI Jun, WANG Yaping, et al. Heavy mineral distributions and their implications for sediment dynamics in the Yalu Estuary and its adjacent sea area[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2009, 31(3): 84-94.]
- [61] 李东义, 陈坚, 王爱军, 等. 闽江河口洪季悬浮泥沙特征及输运过程[J]. *海洋工程*, 2009, 27(2): 70-80. [LI Dongyi, CHEN Jian, WANG Aijun, et al. Suspended sediment characteristics and transport in the Minjiang estuary during flood seasons[J]. *The Ocean Engineering*, 2009, 27(2): 70-80.]
- [62] Chen C H, Lu H Y, Lin W, et al. Thermal event records in SE China coastal areas: constraints from monazite ages of beach sands from two sides of the Taiwan Strait[J]. *Chemical Geology*, 2006, 231(1-2): 118-134.
- [63] 徐勇航, 陈坚. 台湾海峡西岸闽江口和九龙江口沉积物中碎屑锆石铀-铅定年及物源意义[J]. *海洋学报*, 2010, 32(4): 110-117. [XU Yonghang, CHEN Jian. Uranium-lead dating of detrital zircons from the Minjiang and Jiulong Estuaries in the western coast of the Taiwan Strait: implication for its provenance[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2010, 32(4): 110-117.]
- [64] Deng K, Yang S Y, Li C, et al. Detrital zircon geochronology of river sands from Taiwan: Implications for sedimentary provenance of Taiwan and its source link with the east China mainland[J]. *Earth-Science Reviews*, 2017, 164: 31-47.
- [65] Simpson G, Castelltort S. Model shows that rivers transmit high-frequency climate cycles to the sedimentary record[J]. *Geology*, 2012, 40(12): 1131-1134.