



海滩也缺乏砂-砾过渡粒级的沉积物

于 谦, 贾建军, 高 抒

The grain size gap at gravel-sand transition in beach sediments

YU Qian, JIA Jianjun, and GAO Shu

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2023082901>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

南海宣德海域表层沉积物粒度特征及其输运趋势

SEDIMENT GRAIN SIZE DISTRIBUTION PATTERN AND TRANSPORTATION TREND IN THE XUANDE WATER, SOUTH CHINA SEA

海洋地质与第四纪地质. 2017, 37(6): 140–148

海南岛东南浅海表层沉积物粒度特征及沉积环境

Grain size distribution of surface sediments in the area off southeast Hainan Island and its implications for environmental interpretation

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(2): 64–74

长江与黄河黏土粒级沉积物地球化学特征及其物源指示意义

Geochemical characteristics of clay-sized sediments of the Yangtze and Yellow Rivers and their implications for provenance

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(3): 109–118

基于Argus影像与现场测量探究海滩对台风“摩羯”的响应特征

Response of beach characteristics to typhoon “Yagi” : Evidence from Argus video images and on-site measurement

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(5): 201–210

丁字湾近岸海域表层沉积物粒度特征及沉积动力环境

Grain size characteristics and dynamic environment of surface sediments on the near shore seabed of Dingzi Bay

海洋地质与第四纪地质. 2019, 39(2): 70–78

雅浦海沟南缘海底表层矿物碎屑粒度特征及其物源指示

Grain-size characteristics of the surface clastic sediments on the southern margin of the Yap Trench and their provenance implications

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(5): 46–57



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

于谦, 贾建军, 高抒. 海滩也缺乏砂-砾过渡粒级的沉积物 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2023, 43(6): 69-73.

YU Qian, JIA Jianjun, GAO Shu. The grain size gap at gravel-sand transition in beach sediments[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2023, 43(6): 69-73.

海滩也缺乏砂-砾过渡粒级的沉积物

于谦¹, 贾建军², 高抒¹

1. 南京大学地理与海洋科学学院, 海岸与海岛开发教育部重点实验室, 南京 210023

2. 华东师范大学河口海岸学国家重点实验室, 上海 200241

摘要: 沉积物的粒度是最重要的沉积物参数之一, 在河床中, 表层沉积物缺乏砂-砾过渡粒级 (即 1~10 mm) 的沉积物, 被称为 Grain size gap, 得到广泛关注。海滩沉积物是否也是如此, 是一个基本而又未知的问题。本文分析了中外 228 处海滩共 456 个表层沉积物平均粒径数据, 发现海滩大概率或是平均粒径几十毫米的砾石滩, 或是平均粒径几百微米的砂滩, 也缺乏砂-砾过渡粒级沉积物, 其粒度范围是 $-3.5 \sim -1 \phi$ (2~11 mm), 这一结果和河床的情况基本相同。造成砂-砾过渡粒级缺乏的原因应从物源、颗粒磨损和分选以及广义的物质收支分析中寻找。

关键词: 海滩; 沉积物粒径分布; 砂-砾过渡粒级缺乏; 物源性质; 输运过程; 物质收支

中图分类号: P737.1

文献标识码: A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2023082901

The grain size gap at gravel-sand transition in beach sediments

YU Qian¹, JIA Jianjun², GAO Shu¹

1. Key Laboratory of Coast and Island Development of the Ministry of Education, School of Geography and Ocean Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China

2. State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200241, China

Abstract: The grain size of sediments is one of the most crucial sedimentary parameters. In riverbeds, the surface sediments often lack the transitional grain sizes between sand and gravel (i.e., 1~10 mm), a phenomenon widely referred to as the "grain size gap." Whether this is also the case for beach sediments remains a fundamental yet unexplored question. Through the analysis of mean grain size data from 228 beach locations globally, we revealed that beaches also exhibit a grain size gap of sand-gravel transition, ranging from -3.5ϕ to -1ϕ (2 to 11 mm). Beaches have a high probability of being either gravel beaches with mean sediment diameters of several tens of millimeter, or sand beaches with mean sediment diameters of several hundred micrometers, mirroring the findings in riverbeds. Potential reasons for this absence include particle abrasion and selective transportation.

Key words: beaches; grain size distributions; grain size gap; material source; transport processes; sediment budgeting

沉积物的粒度是最重要的沉积物参数之一, 一直以来是沉积学研究的出发点, 在海洋沉积中也不例外^[1-2]。 -1ϕ (2 mm) 作为砂和砾的粒度分界^[3], 成为教科书中的定义^[4-5], 以这两种类型沉积物为主的底床, 被区分为砂质和砾质底床 (河床/海岸等)。

河床中, 有一个有趣的现象很久以来得到注意, 其表层沉积物中缺乏砂-砾过渡粒级的沉积物^[6-8], 这被称为 "gravel-sand transition grain size gap in river bed sediments"^[9-10] 或者 "fluvial grain size gap"^[11]。这里的砂砾过渡粒级是指 -1ϕ (2 mm) 左右。Lamb 和 Venditti^[9] 统计了 541 条河流的数据, 做出了河床表

层沉积物中值粒径的概率分布图 (图 1), 发现这是一个典型的双峰分布, 1~5 mm ($-2.3 \sim 0 \phi$) 处于两个高峰之间的低谷, 出现频率最低。换言之, 图 1 展示的统计规律是, 以中值粒径来看, 河床表层沉积物要么是几十毫米的砾石质, 要么是几百微米的砂质, 而几毫米的砂砾过渡河床也存在, 但是少见。我们重新审视了图 1 的数据, 发现和 1 mm 出现概率相同的粒径是 6 mm, 因此, 图 1 反映的粒度缺乏范围应该是 1~6 mm ($-2.6 \sim 0 \phi$)。Dingle 等^[10] 认为这一粒度缺乏范围是 1~10 mm ($-3.3 \sim 0 \phi$), 而 Church 和 Hassan^[11] 给出的数值是 1~8 mm ($-3 \sim$

资助项目: 国家自然科学基金 "牡蛎礁多尺度沉积动力过程与地貌演化" (42076172); 2023 江苏省自然资源发展专项资金 (海洋科技创新) 项目 (JSZRHYKJ202303)

作者简介: 于谦 (1982—), 男, 副教授, 主要从事海洋沉积动力学研究, E-mail: qianyu.nju@gmail.com

收稿日期: 2023-08-29; 改回日期: 2023-11-04. 周立君编辑

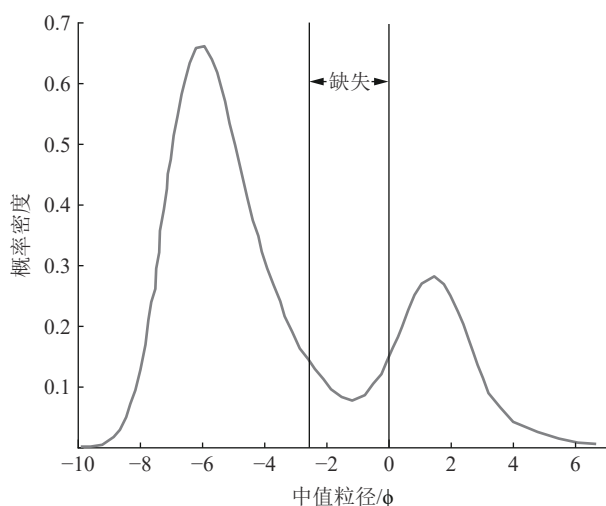


图1 河床表层沉积物中值粒径的概率分布

基于 Trampush 等^[8]论文中 541 条河流的数据,低概率的区域是粒度缺乏范围, $-2.6 \sim 0 \phi$, 这里的缺乏不是没有,而是出乎意料的、异常的少(修改自 Lamb 和 Venditti^[9])。

Fig.1 Probability distribution of mean grain size in river bed surface sediments

Based on Trampush et al.'s data from 541 rivers^[8], the region of low probability is grain size gap, -2.6ϕ to 0ϕ , here "gap" denoting surprising and unusually low but not absence (modified from Lamb and Venditti^[9]).

0ϕ)。这些数据的差别并不大,河床表层沉积物的粒度缺乏范围的下限是 $1 \text{ mm}(0 \phi)$, 上限是 $6/8/10 \text{ mm}(-2.6/-3/-3.3 \phi)$ 。

海滩是重要的海岸沉积单元,波浪作用为主导,砂砾质沉积物为主体,跨岸宽度主要在 $10^1 \sim 10^2 \text{ m}$ 量级,坡度主要在 $10^{-1} \sim 10^{-2}$ 量级。海滩沉积物的情形如何?这是一个基本、有趣而又未知的问题。

作为地球上的水成沉积系统,海滩和河床沉积体系的形成具有共性和差异,主要是海滩上波浪(为主)和潮流的作用有别于单向流动的河流。海滩沉积物是否存在粒度范围的缺乏、范围如何,不仅关系到对海岸沉积过程和体系的认识,而且事关对于沉积物输运过程的本质认识。Parker 等^[12]提出,在河流沉积物输运中, 2 mm 的砂-砾界限并非仅仅是历史的习惯定义,而是具有专门的物理意义,清晰地吧河床分为砂质和砾质河床。海滩如果与此相同,则说明地球水成沉积体系可能具有统一的规律,如果不同,则说明海滩和河床的沉积过程可能存在根本性的差异。因此,这是一个基本的沉积学问题。

这一问题同时又是有趣的。了解海滩的人,无论是开展科学研究的沉积学家、还是寻求休闲娱乐的普通公众,都知道有的海滩沉积物比较粗、有的

比较细,对此现象的直觉认识会以为各种粒度出现的概率应该是较为均匀的。如果在中间存在一个粒度范围的缺乏,无疑会引起大家的好奇心。

然而,至今为止,海滩沉积物是否存在粒度缺乏的问题,就作者们的知识而言,还没有专门的研究。Lamb 和 Venditti^[9]给出了较为详尽的河床数据统计(图1),但是在引言中指出,海滩沉积物存在砂-砾过渡粒级的沉积物,引用的是 McLean^[13]给出的 2 个和 Jennings 和 Shulmeister^[14]给出的 42 个观测数据。进而,他们据此认为,海滩中不存在砂-砾过渡粒级的缺乏,并且将海滩作为一个重要的反例,来支持其观点——沉积物来源和磨损不是这种缺乏的成因。这一说法在 Dingle 等^[10]的综述论文中又得到了重复。

这一说法存在 3 个严重的缺陷。首先,从统计意义上,仅仅 44 个粒度数据不具有代表性。其次,更重要的是,这一说法存在致命的逻辑错误:海滩中存在砂-砾过渡粒级的沉积物,并不能说明不存在砂-砾过渡粒级的缺乏现象,就如图1显示的,河床中,中值粒径在砂-砾过渡粒级的情况只是显著偏少、而不是没有。第三,当我们仔细检查 Jennings 和 Shulmeister^[14]的数据,发现似乎海滩沉积物平均粒径在 2 mm 附近的确少见,这和图1所示的河床情况很可能是类似的。

基于以上考虑,本文的目标是从更广阔的观测数据出发,研究海滩中是否缺乏砂-砾过渡粒级沉积物的问题。得出具有事实支持的结论之后,本文将初步讨论这一缺乏的形成机制,并提出未来的研究方向。

1 方法

本研究搜集了多篇论著的公开数据,类似于 Lamb 和 Venditti^[9]在图1的工作,统计海滩表层沉积物粒径的概率分布,目标是达到图1相同量级的数据,以取得具有统计意义的结果。

最主要的数据来源是龚照辉^[15]提供的 2020 年夏季以及 2021 年冬季浙江省 171 个砂砾质海滩粒度数据,每个海滩有 1 个冬季平均粒径和 1 个夏季平均粒径。因此,为了在统计上可以对比,此后我们收集其他数据时也遵循这一原则,即每处海滩有 2 个代表性平均粒径数据,1 个代表冬季,1 个代表夏季;如果某海滩只有 1 个时间的数据,则假定此海滩的 2 个季节的代表性平均粒径数据相同;如果多于 2 个时间的数据的话,也只取其中的 2 个时

间。这样的话,每个海滩在最终的统计中的权重是相同的。否则,如果不加分别地统计所有采样数据,那么某处海滩采样数量大、而别处海滩采样数量小时,会带来采样偏差。

然后,我们在中国知网数据库(www.cnki.net)中搜索中文文献中的海滩砾石粒径,剔除重复信息,得到了如下有效数据。

(1)任明达和梁绍霖^[16]于1963年在河北秦皇岛沙河口1处海滩的1个时间的观测数据。

(2)王爱军等^[17]于2002年5月在浙江舟山朱家尖岛大乌石塘和小乌石塘2处砾石海滩的观测数据,这两处海滩不在龚照辉(2023)的采样地点之中。

(3)邢秀臣等^[18]于芝罘岛北岸婆婆口东侧1处砾石海滩的观测数据。

(4)周在明等^[19]在福建东山乌礁湾1处海滩的观测数据,春、夏、秋3个季节的数据,各剖面的平均值,夏、秋季节的值基本相同,春季略大,所以取了春、秋2个时间的值作为代表性平均粒径。

(5)孙家文等^[20]报道的辽宁大连凌水湾4处砾石海滩的各2个中值粒度数据。因为其他数据均为平均粒径,我们在这里近似地把这些数据作为代表性平均粒径,以便于对比。

(6)王兴等^[21]于2016年10月在山东长岛7个砾石海滩(北长山岛的月牙湾、九丈崖、长滩,南长山岛的仙境源、林海、长山尾、明珠广场)的平均粒径观测数据。

国外文献中关于砾石海滩的数据来源非常多,较难以按照一个统一的标准进行搜集统计。为了尽可能地避免选择数据导致的误差,我们选取了1套最为集中的砾石海滩数据,也就是前文提到的Lamb和Venditti^[9]引用的Jennings和Shulmeister^[14]

报道的新西兰海岸42个砾石海滩的观测结果,每个海滩给出了1个平均粒径。这是我们在分析数百篇国际期刊论文后,发现的最集中的1套数据。

综上,我们一共搜集了228个海滩的数据,其中,国内186个,国外42个。其中除了孙家文等^[20]的4处海滩数据是中值粒径外,全部都是平均粒径。每处海滩赋予2个代表性粒径,一共456个数据,数据量和Lamb和Venditti^[9]对河床统计的数据量相当。对这些数据在沉积学家惯用的 ϕ 标尺下,每0.5 ϕ 统计出现频数。

2 结果

海滩沉积物平均粒径的频数统计结果显示了明显的双峰分布(图2)。对于所有数据,结果显示两个峰,分别在砾和砂的范围,前者集中在 $-6 \sim -3.5 \phi$ ($11 \sim 64 \text{ mm}$),后者集中在 $-1 \sim 3 \phi$ ($0.125 \sim 2 \text{ mm}$),即海滩大概率要么是平均粒径几十毫米的砾石滩,要么是平均粒径几百微米的砂滩。中间 $-3.5 \sim -1 \phi$ ($2 \sim 11 \text{ mm}$)对应出现频率的低谷,即砂-砾过渡粒级的物质较少。

如果单独看国内的数据,可以发现类似的双峰分布,只是中间缺乏的粒级范围更大、更粗一些, $-4.5 \sim -1 \phi$ ($2 \sim 23 \text{ mm}$)。对于Jennings和Shulmeister^[14]报道的新西兰海岸42个海滩,因为全是砾石海滩,所以只存在一个砾石范围的峰,范围是 $-5.5 \sim -3.5 \phi$ ($11 \sim 45 \text{ mm}$),平均粒径小于 -3.5ϕ (11 mm)的海滩是少见的。

这些统计结果虽然在界限大小上略有差异,但是无不指向相同的结果——和河床一样,海滩也似乎缺乏砂-砾过渡粒级沉积物。

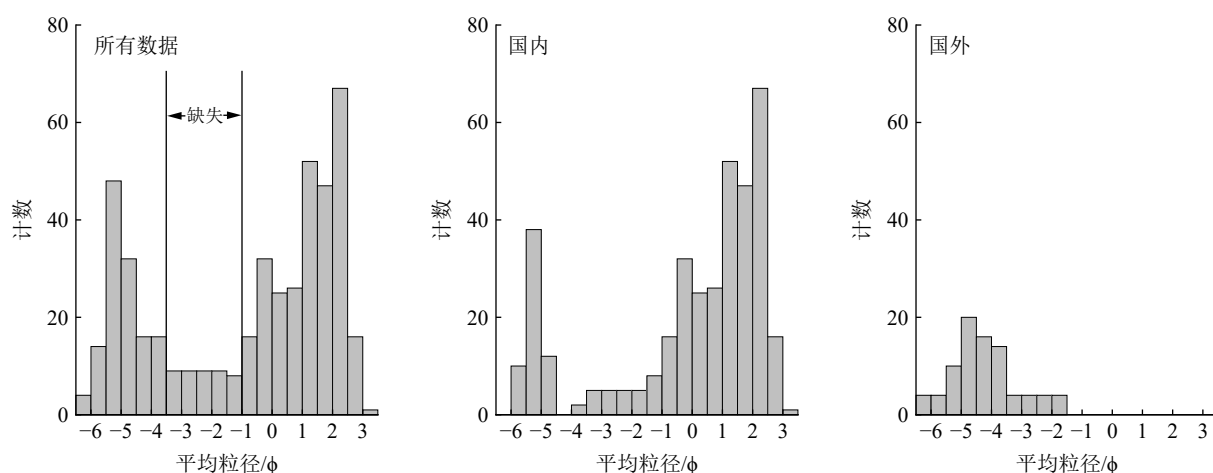


图2 海滩表层沉积物平均粒径的频数分布

Fig.2 Frequency distribution of mean grain size in beach surface sediments

3 讨论

228处中外海滩的观测数据,似乎说明海滩也缺乏砂-砾过渡粒级沉积物,粒度范围是 $-3.5 \sim -1 \phi$ ($2 \sim 11 \text{ mm}$),海滩大概率要么是几十毫米的砾石滩,要么是几百微米的沙滩(图2)。这一结果与河床的情况(图1)非常接近,仅在缺乏粒度范围上略有差别:河流的缺乏下限是 $1 \text{ mm}(0 \phi)$,本研究的海滩统计结果是 $-1 \phi(2 \text{ mm})$;河流的缺乏上限是 $-2.6/-3/-3.3 \phi(6/8/10 \text{ mm})$,本研究的海滩统计结果是 $-3.3 \phi(11 \text{ mm})$ 。河床和海滩并无明显的差别。

上述结果主要是基于中文公开数据库的初步统计分析。这一问题的研究目前还存在着一些不确定性,需要进一步的研究。

不确定性的第一个来源是关于基本事实的认定,目前的统计分析只是初步的。例如,图1所示的河床表层沉积物中值粒径的概率分布理论上应完全基于加权平均计算,即每一个中值粒径数据对应于样本所代表的物质总量,这在操作层面上目前还有难度。本文结果(图2)也有类似问题,每个样本的权重确定有一定的不确定性。今后需要更多的国内外数据来充实。

不确定性的第二个来源是关于砂-砾过渡粒级缺乏的机制,Dingle等^[10]认为沉积物输运过程中的颗粒磨损和分选输运可能是主要原因。从未来研究的视角,该机制应从物源区的原始产物特性、沉积物输运过程以及其他物质收支过程分别考虑。

首先,砂-砾过渡粒级缺乏还有可能是物源的原因,即海滩的沉积物来源本身就缺乏这一范围的沉积物。例如,Flemming^[22]发现,在一个潟湖中的沉积物由于有粗细两个源头,所以存在双峰分布,在中间的过渡粒级就很少见。沉积物是风化作用的产物,由于物理、化学和生物作用,母岩被裂解为不同粒径的颗粒。视风化程度的不同,母岩形成岩块和矿物颗粒,前者为粒径变动范围较大的砾质物质,后者以砂质物质为主^[23]。目前,关于源区物质产生的研究大多只限于花岗岩的研究,而且在不同的风化作用区,其产物可有很大差别。初步风化之后,物质的风化过程仍然在持续进行,甚至贯穿整个源汇区域。因此,此项研究需更加深入。

磨损被认为是河床砂-砾双峰分布和其间过渡粒级缺乏的原因^[24]。Jerolmack和Brzinski^[25]提出了粘滞阻滞假说,即沉积物颗粒之间的碰撞能量传递的效率,取决于颗粒的动量和颗粒相互接近时流体

对它们施加的粘性阻力的角力。当颗粒很小时,周围流体的粘滞阻力很大,抑制了颗粒之间的碰撞,而颗粒较大时,颗粒之间的碰撞才会活跃起来,形成磨损,产生比原先颗粒小的多的碎块。这样就可以得到一个临界粒径,在地球上的水环境下这个值大约是 10 mm ,这个粒径以上才会磨损,这个粒径也就成为了砾石的最小粒径,即砾石磨损到这个大小之后,由于水的粘滞阻滞作用,就基本不会再因磨损而变小了。问题在于,另一种可能性也同样存在:砾石磨损到一定程度后,物理、化学风化突然加速,分解为矿物颗粒的粒级,因而使小块砾石的数量锐减。对于今后的研究,在海滩波浪主导的动力环境下,物理磨损作用是如何开展的,需要进一步的观测实验。

其次,在输运过程方面,分选被认为是形成原因^[11-12]。水槽实验和理论分析都发现,砂-砾过渡粒级沉积物的推移质输运率是最大的,既大于更粗的砾石,也大于更细的砂,这样就导致了这个粒级的沉积物可以和更粗的砾石和更细的砂分布在一起,形成某处底床的沉积。但是,更粗的砾石和更细的砂则由于水力分选的原因很难共存。结果是,对于底床的沉积物,要么是更粗的砾石混合砂-砾过渡颗粒,要么是砂-砾过渡颗粒混合砂,这样底床的中值粒径或者平均粒径,不是 10 mm 以上的大值,就是 1 mm 以下的小值。这是Parker等^[12]对河床沉积物缺乏砂-砾过渡粒级的解释,对于海滩的情况可能也是适用的。然而,如果砂-砾过渡粒级只是由于分选过程而在堆积体中较为缺乏,那么原始物质中这部分物质去了哪里,这个问题不能回避。分选过程能说明堆积产物特征,但不能说明所有物质的去向。

最后,沉积物从源到汇过程中不断受到收支平衡过程的影响,使固定粒径的物质占比发生变化。前述的风化过程和输运过程同时造成沉积物的局地 and 总体粒径分布变化,但还不是收支过程的全部,被岩浆熔融的沉积物、消失在海底俯冲带的物质都有可能造成变化,甚至人类活动对其也有影响。在沥青和水泥路面盛行之前,全球公路实行碎石路面标准,所用物质正好处于“缺乏”范围,人们通过挖砂获得碎石材料,海滩和河滩都曾作为工作地点^[26-27],而人工挖砂的效应尚未进行定量评估。

4 结论

通过228个地点的中外海滩表层沉积物粒度数

据的分析,发现海滩似乎缺乏砂-砾过渡粒级沉积物,粒度范围是 $-3.5 \sim -1 \phi (2 \sim 11 \text{ mm})$,海滩大概率要么是平均粒径几十毫米的砾石滩,要么是平均粒径几百微米的沙滩,这一结果和河床相同。这一初步观察结果引发一系列需深入研究的问题,包括分析样本的权重确定精度、源区初始产物的粒度组成、磨损和分选过程影响以及更为广泛的物质收支状况。

致谢: 南京大学庄佳铨帮助修改论文,两位审稿专家提出宝贵意见,特此致谢!

参考文献 (References)

- [1] Reineck H E, Singh I B. Depositional Sedimentary Environments: With Reference to Terrigenous Clastics[M]. 2nd ed. Berlin: Springer-Verlag, 1980: 549.
- [2] 秦蕴珊. 中国陆棚海的地形及沉积类型的初步研究 [J]. 海洋与湖沼, 1963, 5(1): 71-85. [QIN Yunshan. Geomorph and sediment types of the China shelf seas: a preliminary study[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1963, 5(1): 71-85.]
- [3] Wentworth C K. A scale of grade and class terms for clastic sediments[J]. *The Journal of Geology*, 1922, 30(5): 377-392.
- [4] Dyer K R. Coastal and Estuarine Sediment Dynamics[M]. Chichester: John Wiley, 1986: 342.
- [5] Komar P D. Beach Processes and Sedimentation[M]. 2nd ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1998: 544.
- [6] Udden J A. Mechanical composition of clastic sediments[J]. *GSA Bulletin*, 1914, 25(1): 655-744.
- [7] Pettijohn F J. Sedimentary Rocks[M]. New York: Harper, 1949.
- [8] Trampush S M, Huzurbazar S, McElroy B. Empirical assessment of theory for bankfull characteristics of alluvial channels[J]. *Water Resources Research*, 2014, 50(12): 9211-9220.
- [9] Lamb M P, Venditti J G. The grain size gap and abrupt gravel - sand transitions in rivers due to suspension fallout[J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, 43(8): 3777-3785.
- [10] Dingle E H, Kusack K M, Venditti J G. The gravel-sand transition and grain size gap in river bed sediments[J]. *Earth-Science Reviews*, 2021, 222: 103838.
- [11] Church M, Hassan M A. The fluvial grain - size gap: experimental confirmation of hydraulic origin[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2023, 48(8): 1502-1511.
- [12] Parker G, An C E, Lamb M P, et al. Dimensionless argument: a narrow grain size range near 2 mm plays a special role in river sediment transport and morphodynamics[J]. *EGU sphere*, 2023, doi: 10.5194/egu-sphere-2023-1705.
- [13] McLean R F. Variations in grain - size and sorting on two Kaikoura beaches[J]. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 1970, 4(2): 141-164.
- [14] Jennings R, Shulmeister J. A field based classification scheme for gravel beaches[J]. *Marine Geology*, 2002, 186(3-4): 211-228.
- [15] 龚照辉. 浙江省不同季节海滩地形地貌特征及其影响因素 [D]. 南京大学硕士学位论文, 2023. [GONG Zhaohui. Characteristics of beach geomorphology in different seasons and its influencing factors in Zhejiang province[D]. Master Dissertation of Nanjing University, 2023.]
- [16] 任明达, 梁绍霖. 秦皇岛地区砾石质沿岸堤的成因 [J]. *地质论评*, 1965, 23(3): 200-210, 237. [REN Mingda, LIANG Shaolin. Causes of gravel beach ridge in the Qinhuangdao area[J]. *Geological Review*, 1965, 23(3): 200-210, 237.]
- [17] 王爱军, 高抒, 杨旸. 浙江朱家尖岛砾石海滩沉积物分布及形态特征 [J]. 南京大学学报:自然科学, 2004, 40(6): 747-759. [WANG Aijun, GAO Shu, YANG Yang. Sediment distribution and shape characteristics of gravel beaches, Zhujiajian Island, Zhejiang province[J]. *Journal of Nanjing University: Natural Sciences*, 2004, 40(6): 747-759.]
- [18] 邢秀臣, 杜国云, 魏新华, 等. 芝罘岛北岸海湾砾滩侵蚀研究 [J]. *海洋湖沼通报*, 2009(1): 73-78. [XING Xiuchen, DU Guoyun, WEI Xinhua, et al. The erosion of gravel beaches in northern coast of Zhifu Island[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2009(1): 73-78.]
- [19] 周在明, 杨燕明, 陈本清. 东山乌礁湾海滩表层沉积物粒度时空变化分析 [J]. *海洋科学*, 2016, 40(10): 82-90. [ZHOU Zaiming, YANG Yanming, CHEN Benqing. Spatial and temporal characteristics of surface sediment grain size in Wujiao Bay, Dongshan Island[J]. *Marine Sciences*, 2016, 40(10): 82-90.]
- [20] 孙家文, 董祥科, 于永海, 等. 砾石海滩剖面设计及其稳定性模型试验研究 [J]. *海洋通报*, 2019, 38(4): 422-428, 454. [SUN Jiawen, DONG Xiangke, YU Yonghai, et al. Study on profile design and stability physical model experimental of gravel beach[J]. *Marine Science Bulletin*, 2019, 38(4): 422-428, 454.]
- [21] 王兴, 王永红, 徐杨杨, 等. 基于数字图像的山东长山岛砾石海滩表层砾石形貌特征研究 [J]. *海洋学报*, 2021, 43(1): 110-121. [WANG Xing, WANG Yonghong, XU Yangyang, et al. Morphological characteristics based on digital images of gravels from gravels beaches in the Changshan Island, Shandong province[J]. *Haiyang Xuebao*, 2021, 43(1): 110-121.]
- [22] Flemming B W. Process and pattern of sediment mixing in a microtidal coastal lagoon along the west coast of South Africa[M]//de Boer P L, van Gelder A, Nio S D. Tide-influenced Sedimentary Environments and Facies. Dordrecht: D. Reidel Publ. Co, 1988: 275-288.
- [23] Hoskin C M, Sundeen D A. Grain size of granite and derived grus, Enchanted Rock pluton, Texas[J]. *Sedimentary Geology*, 1985, 42(1-2): 25-40.
- [24] Kodama Y. Experimental study of abrasion and its role in producing downstream fining in gravel-bed rivers[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1994, 64(1a): 76-85.
- [25] Jerolmack D J, Brzinski III T A. Equivalence of abrupt grain-size transitions in alluvial rivers and Eolian sand seas: a hypothesis[J]. *Geology*, 2010, 38(8): 719-722.
- [26] Devereux R. John Loudon McAdam: Chapters in the History of Highways[M]. London: Oxford University Press, 1936.
- [27] Agredo Montelegr A. A global history of the road: road construction, maintenance and use in Colombia, Argentina, French West Africa, and the Algerian Sahara, 1930-1970[D]. Doctor Dissertation of University of London, King's College, 2020.