

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2024.02.011

江苏沿海沙脊群表层沉积物 Pb 同位素特征及 对物源的指示

饶文波,洪申申,栗天宁,茅昌平

(河海大学地球科学与工程学院,江苏 南京 211100)

摘要:为进一步查明江苏沿海沙脊群沉积物的来源,分析了该区域沉积物酸不溶组分 Pb 同位素特征。结果表明,远岸沙脊群陆向区域沉积物 Pb 同位素比值与近岸沙脊群相似,暗示其在潮波作用下有向岸运移的趋势。铅-钕同位素分析揭示长江及周边河流沉积物在长江冲淡水 and 东海沿岸流作用下输移至远岸沙脊群海向区域。在苏北沿岸流作用下,老黄河三角洲沉积物输入对近岸沙脊群及远岸沙脊群陆向区域有影响;相反,诸如现代黄河口、济州岛和韩国河流等地沉积物输入对江苏沿海沙脊群的影响较弱。

关键词:铅同位素;物质来源;表层沉积物;沙脊群;江苏沿海

中图分类号:P512.2

文献标志码:A

文章编号:1000-1980(2024)02-0084-08

Pb isotope characteristics and source implications of surface sediments in sand ridges of the Jiangsu Coast

RAO Wenbo, HONG Shenshen, LI Tianning, MAO Changping

(School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: In order to explore the sources of surface sediments in sand ridges of the Jiangsu Coast, the lead (Pb) isotope characteristics of acid-insoluble sediments in the sand ridges of the Jiangsu Coast were analyzed. The results showed that the Pb isotope ratios of landward sediments in the offshore sand ridges were similar to those in the onshore sand ridges, indicating a landward migration trend of sediments under the action of tidal waves. Pb and neodymium (Nd) isotope analyses revealed that the sediments of the Yangtze River and surrounding rivers were transported to the seaward area of the offshore sand ridges under the action of the Yangtze River diluted water and the East China Sea coastal current. The sediment input from the Old Yellow River Delta had an impact on the onshore sand ridges and the landward area of offshore sand ridges under the action of the Subei coastal current. On the contrary, the impacts of sediment input from the Modern Yellow River Delta, Jeju Island and Korean rivers were weak on the sand ridges of the Jiangsu Coast.

Key words: lead isotopes; material sources; surface sediments; sand ridges; Jiangsu Coast

黄海处于中国和朝鲜半岛之间,是一个半封闭式边缘海。沿黄海陆架发育多个沙脊群,其中,江苏沿海沙脊群是黄海乃至世界上最大的沙脊群之一^[1]。该沙脊群是区域气候和海陆演变的信息档案库,也是当地促进经济建设和缓解人口压力的潜在土地资源^[2-3]。同时,特殊的地理位置使江苏沿海沙脊群可有效制约诸如风暴潮和海浪等灾害对江苏省的深入性影响^[4]。因此,近年来受到较多关注^[4-9]。沉积物是沙脊群形成过程中关键的因素之一,阐明沙脊群沉积物来源是理解区域气候变化和海陆变迁的基础,也是科学指导当地滩涂开发与管理的的前提。同时,作为有机质的重要载体^[10],沙脊群沉积物的来源影响着当地的污染治理和物种保持^[8]。综上,江苏沿海沙脊群沉积物物源近来被广泛探索^[11-19]。

关于江苏沿海沙脊群物质来源的研究,可归纳为三类观点。第一类是沙脊群单一物源主导论;Wang 等^[12]指出江苏沿海沙脊群沉积物主要来自长江;Li 等^[8,13]认为其沉积物来自老黄河三角洲。第二类是沙脊群物源二端元控制论;王昆山等^[14]认为黄河影响江苏沿海北部区域而长江影响其南部区域;Zhang 等^[15]发

基金项目:江苏省自然科学基金项目(BK20191304);国家科技支撑计划项目(2012BAB03B01)

作者简介:饶文波(1973—),男,研究员,博士,主要从事环境同位素与海洋地质研究。E-mail:raowenbo@163.com

引用本文:饶文波,洪申申,栗天宁,等.江苏沿海沙脊群表层沉积物 Pb 同位素特征及对物源的指示[J].河海大学学报(自然科学版),2024,52(2):84-91.

RAO Wenbo, HONG Shenshen, LI Tianning, et al. Pb isotope characteristics and source implications of surface sediments in sand ridges of the Jiangsu Coast[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2024, 52(2): 84-91.

现大丰北部沉积物来自黄河而如东以南沉积物与长江有关;Wang 等^[16]通过分析角闪石地球化学特征指出沙脊群细颗粒主要来自长江,而粗颗粒来自现代(老)黄河。第三类是沙脊群多来源混合论;Rao 等^[17]通过地球化学分析指出,长江和老黄河三角洲是沙脊群的主要来源,同时韩国河流和济州岛沉积物输入不可忽视;Rao 等^[18-19]通过 Sr-Nd 同位素、稀土元素和黏土矿物分析进一步证实了沉积物多来源特征;李姝睿等^[20]通过锆石年龄研究发现,长江是沙脊群的主要来源而老黄河对其北部有一定影响,现代黄河仅对其北边缘提供少许物质。总体上,学者们对此沙脊群物源的认识仍然存在较大分歧。

已有的研究方法主要包括 Sr-Nd 同位素、元素地球化学、矿物组成、锆石年代和遥感影像。遥感影像可以反映研究区域边界演变,但误差较大^[21]。其他几种方法在一定程度上均受沉积物粒度(矿物)分选的影响^[22-24]。Pb 有 4 种稳定同位素,²⁰⁴Pb、²⁰⁶Pb、²⁰⁷Pb、²⁰⁸Pb,其中²⁰⁶Pb、²⁰⁷Pb 和²⁰⁸Pb 分别由²³⁸U、²³⁵U 和²³²Th 衰变而成,半衰期较长^[25]。同时,铅同位素组成在不同的原岩中有良好的区分度,在地表环境中不易受到诸如化学风化和粒度分选等影响^[26-28]。因而,Pb 同位素是示踪沉积物来源的较好工具,已被广泛用作研究中国东部(如渤海、东海和黄海)沉积物物源的示踪剂^[25-27,29]。然而,这种方法在江苏沿海沙脊群研究中的应用较少。因此,本文对江苏沿海沙脊群沉积物进行 Pb 同位素分析,旨在探究近岸和远岸沙脊群沉积物之间的成因联系并确定沉积物的物质来源。

1 研究区域

江苏沿海位于黄海以西,其北部为基岩和沙质海岸,中部和南部为粉砂淤泥质海岸,海岸线长约880 km^[30]。沿海沙脊群以琼港为中心,向北、东、东南方向辐射,北至老黄河三角洲,南达长江口(图 1)。该沙脊群由 70 多个沙脊和潮道组成,长约 200 km,宽约 140 km,总覆盖面积约 22 470 km²^[9]。

黄海洋流主要由黄海暖流、朝鲜半岛沿岸流、黄海沿岸流、苏北沿岸流和长江冲淡水组成(图 1)。朝鲜半岛沿岸流向南流动,随后与黄海暖流汇合。作为黄海规模最大的洋流,黄海暖流每年向南黄海输送约 100 万 t 沉积物^[19]。黄海暖流向北移动至山东半岛后分为两支,一支继续向北移动,另一支沿山东半岛向西流动,形成黄海沿岸流^[31]。黄海沿岸流向南至老黄河三角洲后分为两支:一支向东南移动,到达济州岛西南部,另一支被称为苏北沿岸流,继续沿江苏海岸向南移动^[16,31]。研究发现,夏季苏北沿岸流转向北流^[19]。长江冲淡水有 3 个分支,分别向南、东北和北方移动^[32]。另外,来自老黄河三角洲东部的潮波是江苏沿海沙脊群形成的关键水动力条件^[9,33](图 1)。在北上前进潮波和南下旋转潮波的作用下,形成于老黄河三角洲东部无潮点的潮波促使南黄海潮幅由无潮点向西南方向逐渐增加^[34]。另外,东海夏季存在北上的浙闽沿岸流^[35],对东海区域沉积物输移起着重要作用。

长江和黄河是中国输沙量最大的两条河流,每年向海洋输入的沉积物分别达 1.2 亿 t 和 3.1 亿 t^[36]。1128—1855 年,黄河从江苏北部汇入黄海,老黄河三角洲由此形成。1855 年后,黄河向北迁移并成为现代黄河。自此,老黄河三角洲每年因水动力侵蚀的沉积物达 7.9 亿 t^[17]。朝鲜半岛河流年均向黄海输入的沉积物仅约 0.1 亿 t^[37]。闽江和瓯江是中国东南部的两条主要河流(图 1),每年向东海输入的沉积物分别约为 180 万 t 和 200 万 t^[36]。台湾位于东海南部,其主要河流包括淡水河、浊水溪和高平溪等。这些河流每年向东海输入的沉积物为 0.74 亿 t^[38]。江苏沿海区域有明显的海洋暖湿季风气候特征,年平均气温为 14 ~ 20℃,年平均降水量为 1 000 ~ 2 000 mm。冬季和夏季的风向分别为 NE 和 SW,风速分别为 4.21、2.76 m/s。该区域年太阳总辐射为 460.4 ~ 503.3 kJ/(cm² · a),全年总辐射量的 60% 集中在 5 月中旬至 9 月中旬^[30]。

2 样品与分析方法

2013 年 7—8 月开展表层沉积物样品的采集工作,使用小铲在现代黄河口(5 件)、老黄河三角洲(8 件)、

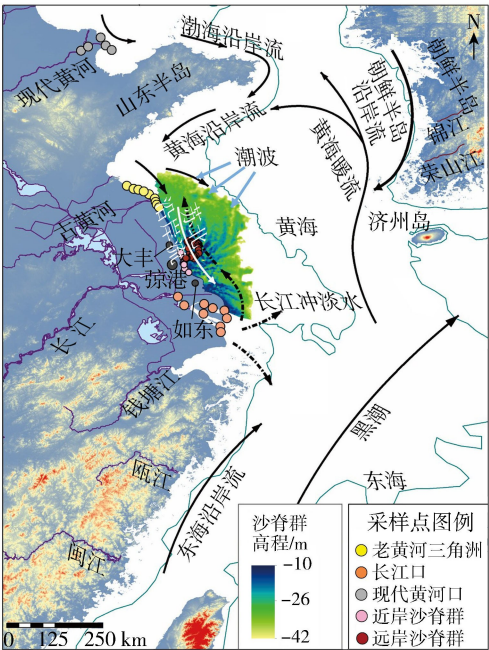


图 1 研究区及采样点
Fig.1 Study area and sampling sites

长江口(9件)、近岸沙脊群(9件)采集样品。同时,使用抓斗采样器在远岸沙脊群(31件)采集样品(图1)。采样地点位于河口或沿海,样品深度为水底以下0~10 cm。所有样品采集远离港口、居民点等地,避免人为污染或干扰。采集后将样品装入聚乙烯样品自封袋中,并及时运回实验室。105℃烘干并研磨至小于75 μm后,分别用足量质量分数为10%的H₂O₂溶液和1 mol/L醋酸溶液浸泡48 h和24 h,去除有机质和碳酸盐^[37]。样品溶解及Pb同位素测定在澳大利亚昆士兰大学放射性同位素实验室进行。首先使用XPR10/AC电子天平称200 mg样品,在Teflon溶样罐中用6 mL HNO₃(质量分数为65%)、2 mL HCl(质量分数为15%)和2 mL HF(质量分数为40%)的混合酸溶液溶解,溶解温度为110℃。48 h后将样品蒸至近干,用1:1(体积比)HNO₃溶液重新溶解,将样品再次蒸至近干后用8 mL质量分数为5% HNO₃溶液溶解。然后,在AG1-X8阴离子交换树脂柱(BioRad, USA)上用HCl和HBr溶液作为介质分离Pb。最后,在多接收电感耦合等离子体质谱仪(MC-ICP-MS, Thermo Fisher Scientific Inc., USA)上测试Pb同位素组成,测试精度优于±0.05%。使用NBS981作为标准物质,其Pb同位素测量值分别为²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb=16.936 6±0.002 9;²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb=15.487 4±0.004 8;²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb=36.700 0±0.002 9(2σ, 20次测试)。Pb全流程本底值小于2×10⁻¹⁰ g。

3 结果与分析

3.1 沉积物 Pb 同位素组成

江苏沿海沙脊群和潜在源区沉积物Pb同位素组成统计见图2。现代黄河口沉积物²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb比值范围为18.21~18.77,平均值为18.45,相比之下,老黄河三角洲沉积物²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb比值范围较窄,平均值较高(图2(a))。长江口沉积物²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb比值范围18.43~18.72,比老黄河三角洲的范围更宽,其平均值介于现代黄河口和老黄河三角洲之间(图2(a))。近岸沙脊群沉积物²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb比值在18.50~18.85之间变化,与长江口的接近,其平均值高于上述3个区域的值(图2(a))。远岸沙脊群沉积物²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb范围最宽(18.48~19.28),其平均值与长江口的相似(图2(a))。现代黄河口沉积物²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb比值在15.58~15.65之间变化,平均值为15.61(图2(b))。与现代黄河口相比,老黄河三角洲沉积物²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb比值范围更窄、平均值更高(图2(b))。长江口沉积物²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb比值范围(15.66~15.68)比现代黄河口的窄,其平均值在3个潜在源区中最高(图2(b))。近岸沙脊群沉积物²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb比值在15.64~15.67之间变化,其平均值为15.66,与老黄河三角洲的接近(图2(b))。与其他区域相比,远岸沙脊群沉积物有更宽的²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb范围,变化范围15.63~15.70(图2(b))。现代黄河口沉积物²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb比值范围为38.54~39.27,平均值为38.76,而老黄河三角洲沉积物²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb比值范围较窄且均值较高(图2(c))。长江口沉积物²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb比值范围比老黄河三角洲的更宽,但它们的平均值接近(图2(c))。近岸沙脊群沉积物与老黄河三角洲有相似的²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb范围和平均值(图2(c))。所有区域中,远岸沙脊群沉积物有最宽的²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb比值范围(38.79~40.88)和最高的平均值(39.10)(图2(c))。

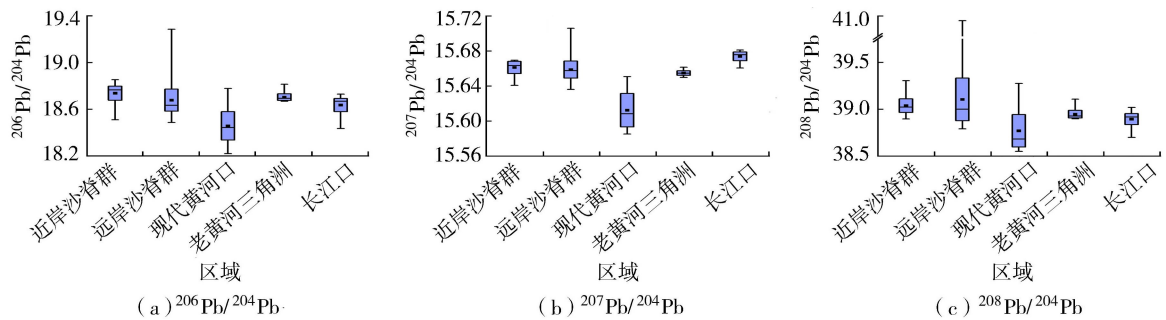


图2 江苏沿海沙脊群及潜在源区沉积物Pb同位素组成统计结果

Fig.2 Statistical plots of Pb isotopic compositions in sediments from the sand ridges of the Jiangsu Coast and potential sources

3.2 粒度、化合风化对沉积物 Pb 同位素组成的影响

多数研究表明粒径对铅同位素比值的影响较小^[26,39-41]。南美洲拉普拉塔河口和阿根廷沿海沉积物铅同位素比值被认为不受粒径影响^[38]。西班牙圣西蒙湾潮下带和冲绳海槽沉积物铅同位素比值也未表现出随粒径变化而变化的趋势^[26,40]。Feng等^[41]对成都黏土及中国西部黄土铅同位素组成的分析发现:随粒径增

加, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 呈现无规律的变化特征,并将这种现象解释为黄土中碎屑矿物的来源不同。如图 3 所示(粒径均值数据来自文献[17]),老黄河三角洲、长江口、近岸和远岸沙脊群沉积物 Pb 同位素比值与粒径均值之间存在较弱的相关关系,表明粒径对沉积物 Pb 同位素比值的影响有限。现代黄河口沉积物 Pb 同位素比值与粒径均值之间有较好的相关关系,但其显著水平 $p>0.05$ (图 3),因此,现代黄河口沉积物 Pb 同位素组成也可视为不受粒径影响。现代黄河口沉积物来源于流域大面积的黄土区^[32],而黄土区碎屑的铅同位素比值几乎不受粒径影响^[40],这从侧面支持了上述结论。

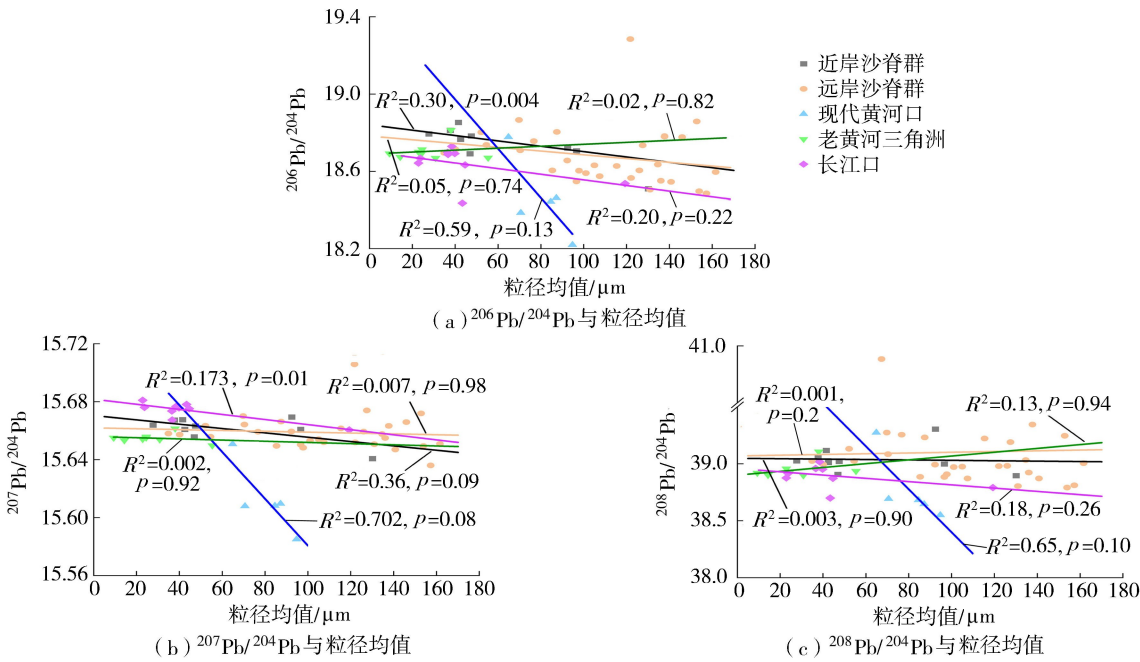


图 3 江苏沿海沙脊群及潜在源区沉积物 Pb 同位素组成与粒径均值的关系

Fig. 3 Relationship between Pb isotopes and mean grain sizes of sediments from the radial sand ridges of the Jiangsu Coast and potential sources

研究表明,沉积物 Pb 同位素组成受化学风化影响^[42-44]:中国北方黄土的研究发现,Pb 同位素比值在酸不溶相中较高而在酸溶相中较低^[42],产生这种现象的原因是放射性成因铅同位素含量在酸溶相中较低而在酸不溶相中较高^[44]。酸溶模拟试验表明,格陵兰岛河流和巴芬湾沉积物酸溶相中铅同位素比值明显高于全样^[43],由此认为化学风化对沉积物 Pb 同位素组成有影响。然而,Choi 等^[28,45]的研究提出了截然相反的观点。本文没有开展沉积物不同化学相 Pb 同位素分析。但是,由于本文研究区域位于黄海西部,紧邻黄海中部^[28],因而,沉积物 Pb 同位素组成也可视为受化学风化的影响较小。

综上所述,本文沉积物 Pb 同位素组成既不受粒径的影响也不受化学风化的制约,在表生过程中相对稳定,适合用于沉积物物源研究。

3.3 近岸与远岸沙脊群沉积物的成因联系

如图 4 所示,沙脊群沉积物 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 和 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值从远岸至近岸均呈现一定的变化规律,其中,靠近东北一侧的远岸海向区域沉积物 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 较大而 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 较小,西南一侧的远岸陆向区域沉积物同位素比值则相反。近岸沙脊群沉积物和远岸沙脊群陆向区域沉积物 Pb 同位素比值相近,而与远岸沙脊群海向区域沉积物差异明显(图 4)。这一结果表明,相比于远岸沙脊群海向区域,远岸沙脊群陆向区域和近岸沙脊群沉积物有更近的亲缘关系。结合沙脊群区域水动力条件和铅同位素组成分布(图 1、图 4)可推断,在涨潮波作用下远岸沙脊群陆向区域中细粒沉积物有向岸运移的趋势,而远岸沙脊群海向区域沉积物,由于其粒度较粗,向岸运移相对受到限制。沙脊群沉积物的这一运移特征已得到多数研究证实^[18,33,46]。基于沙脊群震波剖面数据分析,发现远岸沙脊群区域沉积物的向岸运动促使沙脊群增长^[9]。基于悬浮沉积物运移模型模拟结果发现,在水动力作用下来自近海的细粒沉积物不断朝海岸方向移动,对沙脊群的形态演变产生显著影响^[33,46]。沙脊群沉积物 Sr-Nd 同位素组成及粒度数据表明,远岸沙脊群中细粒沉积物向岸运移^[18]。这些已有的结论在很大程度上支持了本文的研究结论。

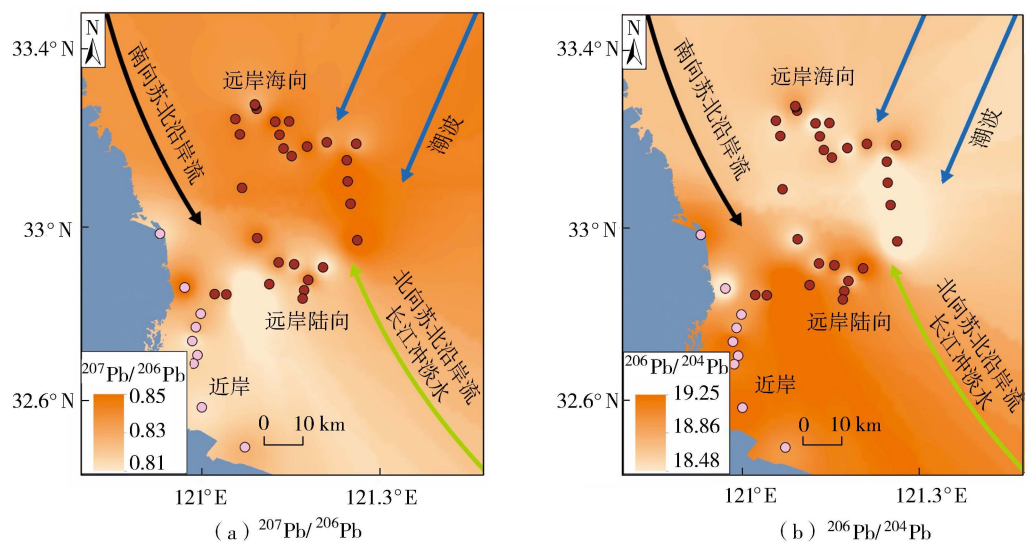


图4 江苏沿海近岸和远岸沙脊群沉积物Pb同位素组成的空间分布

Fig.4 Spatial distributions of Pb isotope compositions of sediments in the onshore and offshore radial sand ridges of the Jiangsu Coast

3.4 Pb同位素示踪沉积物来源

江苏沿海沙脊群形成离不开充足的沉积物供应和有利的水动力条件^[20,34]。除现代黄河口、老黄河三角洲和长江口之外,韩国河流、济州岛、台湾河流及闽江和瓯江每年同样向海洋输入沉积物^[36,38,47]。在洋流和潮波作用下它们输送到海洋的沉积物也可能达到江苏沿海沙脊群区域。

由图5可知(图中台湾河流、瓯江、钱塘江和闽江的沉积物Nd和Pb同位素数据来自文献[29],韩国河流的来自文献[28,48],济州岛的来自文献[49]; $\epsilon_{Nd}(0)$ 为钕同位素组成),韩国河流、济州岛、闽江沉积物Pb和Nd同位素组成与江苏沿海沙脊群的有明显差异,因此,这些区域不是江苏沿海沙脊群的主要源区。这与前人使用Sr-Nd同位素组成和元素地球化学方法所得的结论一致^[17-18]。韩国河流和闽江距离江苏沿海较远,且有较小的输沙量,可能对江苏沿海沙脊群贡献较少^[36,38]。济州岛距离江苏沿海较远,面积较小,其沉积物主要由源岩风化产生而来,产量不大且多沉积于周边区域,因而对江苏沿海沉积物的贡献也不大^[50-51]。

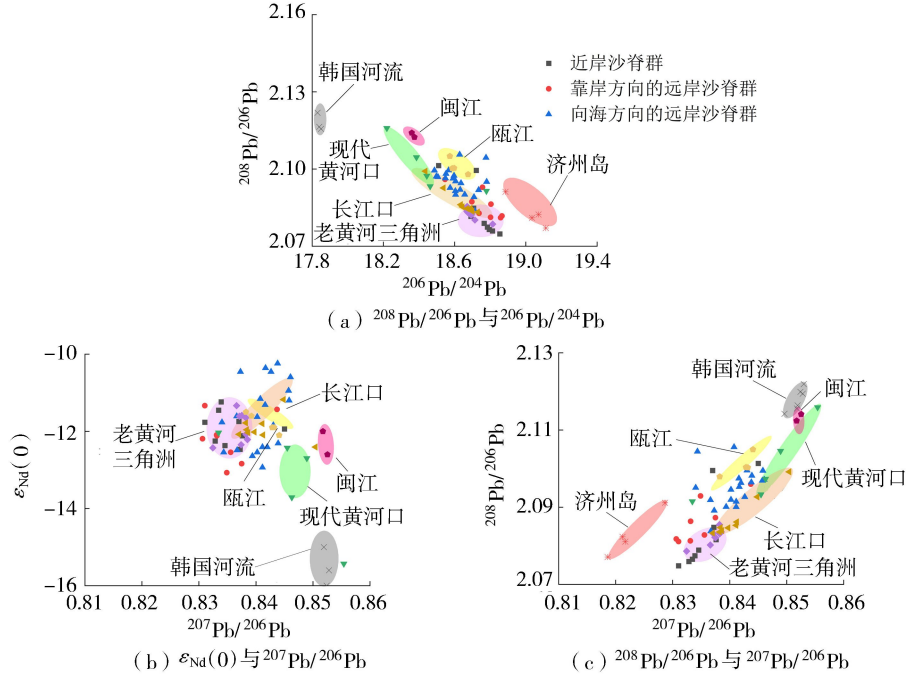


图5 江苏沿海沙脊群及潜在源区沉积物Pb和Nd同位素组成

Fig.5 Pb and Nd isotope compositions of sediments from the radial sand ridges of the Jiangsu Coast and potential sources

现代黄河口和远岸沙脊群海向区域沉积物 Nd-Pb 同位素组成相近,而与近岸沙脊群及远岸沙脊群陆向区域的有明显区别(图 5)。因此,现代黄河口沉积物通过水动力作用存在向江苏沿海远岸沙脊群海向区域输送的潜力。长江口、瓊江和台湾河流与江苏沿海远岸沙脊群海向区域沉积物 Nd-Pb 同位素组成范围相重叠,而老黄河三角洲和江苏沿海近岸沙脊群以及远岸沙脊群陆向区域沉积物相重叠(图 5)。因此,远岸沙脊群海向区域可能获得较多的来自长江口、瓊江和台湾河流的沉积物供给,而老黄河三角洲沉积物在水动力作用下主要沉积于江苏沿海近岸和远岸陆向区域。Rao 等^[17-20]从诸如矿物含量和年代学、Sr-Nd 同位素及元素地球化学等其他视角获得的认识也明确支持上述结论。

长江沉积物在长江冲淡水作用下向北迁移已被许多研究所接受,然而,其运移北上达到的具体位置仍有争议。Rao 等^[18-19]通过元素地球化学、矿物组成等方法发现长江沉积物可北上至老黄河三角洲,而 Zhang 等^[15-16,52]通过卫星影像、沉积物磁学和单矿物地球化学等方法发现长江沉积物的北上运移仅到沙脊群南部。由图 5 可知,长江口和老黄河三角洲沉积物 Nd-Pb 同位素组成部分重叠。据此推测,在长江冲淡水作用下长江沉积物在北上至远岸沙脊群海向区域后,一部分就地沉积,而另一部分继续北上至老黄河三角洲,然后与老黄河三角洲沉积物一起由苏北沿岸流携带折返南下^[16,31]。现代黄河口沉积物进入渤海后,部分沉积在现代黄河三角洲和渤海陆架^[31],而另一部分通过渤海沿岸流沿山东半岛南下^[35],并与少量的韩国河流以及济州岛沉积物一起补给江苏沿海沙脊群。瓊江和台湾河流沉积物,由于其有较细的粒径^[53-54],在东海沿岸流作用下存在持续北上并和长江口沉积物一起补给江苏沿海沙脊群远岸区域的可能性。

4 结 语

与长江口和老黄河三角洲相比,现代黄河口沉积物²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb、²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb、²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb 均值较低。近岸和远岸沙脊群沉积物的²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb、²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb 均值几乎位于上述 3 个源区的范围之内。本研究区域的沉积物 Pb 同位素组成几乎不受化学风化和粒度的影响。近岸沙脊群和远岸沙脊群陆向区域的沉积物 Pb 同位素组成相似,而与远岸沙脊群海向区域沉积物有所不同。在涨潮流作用下,远岸沙脊群陆向区域细粒沉积物有向岸运移的趋势,而远岸沙脊群海向区域沉积物没有。长江和台湾河流及瓊江等沉积物存在通过长江冲淡水和东海沿岸流北上补给远岸沙脊群海向区域的迹象,而通过苏北沿岸流南下的老黄河三角洲沉积物对近岸沙脊群和远岸沙脊群陆向区域的贡献更大。相比之下,来自现代黄河口、韩国河流和济州岛的沉积物贡献较少。本文是针对夏季开展的研究,长江、黄河等河流来水来沙以及黄海、东海环流随时间的变化是否会造成江苏沿海沙脊群物源在季节上存在差异是今后亟待解决的科学问题。

参考文献:

[1] 任美镔. 江苏省海岸带与海涂资源调查报告[M]. 北京:海洋出版社,1986.

[2] 张长宽,陈欣迪. 海岸带滩涂资源的开发利用与保护研究进展[J]. 河海大学学报(自然科学版),2016,44(1):25-33. (ZHANG Changkuan, CHEN Xindi. Advances in development, utilization, and protection of coastal tidal flats[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2016,44(1):25-33. (in Chinese))

[3] 张长宽,黄婷婷,陶建峰,等. 江苏海岸潮滩剖面形态与动力泥沙响应关系[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(3):245-251. (ZHANG Changkuan, HUANG Tingting, TAO Jianfeng, et al. Response relationship of tidal flat profile and dynamic sediment along Jiangsu Coast[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2020,48(3):245-251. (in Chinese))

[4] WANG Y X, LIU Y X, JIN S, et al. Evolution of the topography of tidal flats and sandbanks along the Jiangsu coast from 1973 to 2016 observed from satellites[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing,2019,150:27-43.

[5] 王颖. 黄海陆架辐射沙脊群[M]. 北京:中国环境科学出版社,2002.

[6] 刘柄麟,张振克,何华春,等. 1973-2016 年南黄海辐射沙脊群东沙动态演化分析[J]. 海洋地质与第四纪地质,2018,38(2):63-71. (LIU Binglin, ZHANG Zhenke, HE Huachun, et al. Dynamic evolution of Dongsha shoal of the radial sand ridges in the South Yellow Sea from 1973 to 2016[J]. Marine Geology & Quaternary Geology,2018,38(2):63-71. (in Chinese))

[7] 王义刚,张薇娜,黄惠明,等. 辐射沙脊群泥沙来源及输运研究综述[J]. 水利水电科技进展,2015,35(5):58-67. (WANG Yigang, ZHANG Weina, HUANG Huiming, et al. Review of studies on source and transport of sediment in radial sand ridges[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2015,35(5):58-67. (in Chinese))

[8] LI C X, ZHANG J Q, FAN D D, et al. Holocene regression and the tidal radial sand ridge system formation in the Jiangsu coastal zone, east China[J]. Marine Geology,2001,173:97-120.

- [9] 邹丽丽,李传武,张云峰,等. 25年来江苏盐城沿海滩涂生态系统服务价值研究[J]. 海洋环境科学,2023,42(2):280-285. (ZOU Lili,LI Chuanwu,ZHANG Yunfeng,et al. Study on ecosystem service value of coastal beach in Yancheng,Jiangsu Province over the past 25 years[J]. Marine Environmental Science,2023,42(2):280-285. (in Chinese))
- [10] 孙晓杰,舒航,刘云江,等. 环境因子对黄河甘宁蒙段表层沉积物中磷吸附-解吸的影响[J]. 水资源保护,2021,37(4):51-60. (SUN Xiaojie,SHU Hang,LIU Yunjiang,et al. Effects of environmental factors on phosphorus adsorption and desorption in surface sediments of Gansu-Ningxia-Inner Mongolia section of the Yellow River[J]. Water Resources Protection,2021,37(4):51-60. (in Chinese))
- [11] LIU B L,WU H T,ZHANG Z K,et al. Recent evolution of the intertidal sand ridge lines of the Dongsha Shoal in the modern Radial Sand Ridges,East China[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health,2021,18(4):1573.
- [12] WANG Y,ZHANG Y Z,ZOU X Q,et al. The sand ridge field of the south yellow sea:origin by river-sea interaction[J]. Marine Geology,2012a,291:132-146.
- [13] 张忍顺,陈才俊. 江苏岸外沙洲演变与条子泥并陆前景研究[M]. 北京:海洋出版社,1992.
- [14] 王昆山,姜晓黎,叶青,等. 南黄海潮流沙脊区表层沉积物重矿物分布及来源[J]. 海洋地质与第四纪地质,2013,33(5):1-11. (WANG Kunshan,JIANG Xiaoli,YE Qing,et al. Distribution and source of heavy minerals in the surface sediment of the tidal sand ridges area in South Yellow Sea[J]. Marine Geology & Quaternary Geology,2013,33(5):1-11. (in Chinese))
- [15] ZHANG W G,MA H L,YE L P,et al. Magnetic and geochemical evidence of Yellow and Yangtze River influence on tidal flat deposits in northern Jiangsu Plain,China[J]. Marine Geology,2012,319-322:47-56.
- [16] WANG M Y,JIN B F,GAO J H,et al. Identification of sediment provenance in the South Yellow Sea using detrital amphibole geochemistry[J]. Marine Geology,2022,450:106857.
- [17] RAO W B,MAO C P,WANG Y G,et al. Geochemical constraints on the provenance of surface sediment of radial sand ridges off the Jiangsu coastal zone,East China[J]. Marine Geology,2015,359(1):35-49.
- [18] RAO W B,MAO C P,WANG Y G,et al. Using Nd-Sr isotopes and rare earth elements to study sediment provenance of the modern radial sand ridges in the southwestern yellow sea[J]. Applied Geochemistry,2017,81:23-35.
- [19] LU J,LI A C,ZHANG J,et al. Yangtze River-derived sediment in the southwestern South Yellow Sea:provenance discrimination and seasonal transport mechanisms[J]. Journal of Asian Earth Sciences,2019,176:353-367.
- [20] 李姝睿,孙高远,茅昌平,等. 江苏沿海辐射沙脊物源分析:来自碎屑重矿物与锆石年代学的证据[J]. 沉积学报,2022,40(4):931-943. (LI Shurui,SUN Gaoyuan,MAO Changping,et al. The provenance analysis of radial sand ridges off the Jiangsu Coast,East China:evidence from the heavy mineral compositions and zircon geochronology[J]. Acta Sedimentologica Sinica,2022,40(4):931-943. (in Chinese))
- [21] ERESMAA R. Imager-assisted cloud detection for assimilation of infrared atmospheric sounding interferometer radiances[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society,2014,140:2342-2352.
- [22] LIM D,JIN Y C,SHIN H H,et al. Multielement geochemistry of offshore sediment in the southeastern Yellow Sea and implications for sediment origin and dispersal[J]. Quaternary International,2013,298,196-206.
- [23] GARÇON M,CHAUVEL C,FRANCE-LANORD C,et al. Which minerals control the Nd-Hf-Sr-Pb isotopic compositions of river sediment[J]. Chemical Geology,2014,364:42-55.
- [24] CARTER S C,GRIFFITH E M,CLIFT P D,et al. Clay-fraction strontium and neodymium isotopes in the Indus fan:implications for sediment transport and provenance[J]. Geological Magazine,2020,157(6):1-16.
- [25] 刘阁阁. 天津海岸带沉积物铅锆同位素特征及其环境学意义[D]. 北京:中国地质大学(北京),2019.
- [26] DOU Y G,YANG S Y,SHI X F,et al. Provenance weathering and erosion records in southern Okinawa Trough sediments since 28 ka:geochemical and Sr-Nd-Pb isotopic evidences[J]. Chemical Geology,2016,425:93-109.
- [27] 刘明,范德江,郑世雯,等. 渤海中部沉积物铅来源的同位素示踪[J]. 海洋学报,2016,38(2):36-47. (LIU Ming,FAN Dejiang,ZHENG Shiwen,et al. Tracking lead origins in the central Bohai Sea based on stable lead isotope composition[J]. Haiyang Xuebao,2016,38(2):36-47. (in Chinese))
- [28] CHOI M S,YI H I,YANG S Y,et al. Identification of Pb sources in Yellow Sea sediments using stable Pb isotope ratios[J]. Marine Chemistry,2007,107:255-274.
- [29] 密蓓蓓,刘升发,窦衍光,等. 东海周边中小型河流沉积物锶钕铅同位素组成及其物源示踪意义[J]. 海洋通报,2017,36(4):440-448. (MI Beibei,LIU Shengfa,DOU Yanguang,et al. Sr-Nd-Pb isotopic compositions in the sediments of the middle and small rivers around the East China Sea and the implications for tracing sediment sources[J]. Marine Science Bulletin,2017,36(4):440-448. (in Chinese))
- [30] 张长宽,王义刚. 江苏沿海滩涂围垦开发规划[R]. 南京:河海大学,2009.
- [31] BIAN C W,JIANG W S,GREATBATCH R J. An exploratory model study of sediment transport sources and deposits in the Bohai

- Sea, Yellow Sea, and East China Sea[J]. *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 2013, 118: 5908-5923.
- [32] WU H, SHEN J, ZHU J R, et al. Characteristics of the Changjiang plume and its extension along the Jiangsu Coast[J]. *Continental Shelf Research*, 2014, 76: 108-123.
- [33] WANG Y P, GAO S, JIA J J, et al. Sediment transport over an accretional intertidal flat with influences of reclamation, Jiangsu Coast, China[J]. *Marine Geology*, 2012, 291: 147-161.
- [34] XING F, WANG Y P, WANG H V. Tidal hydrodynamics and fine-grained sediment transport on the radial sand ridge system in the southern Yellow Sea[J]. *Marine Geology*, 2012, 291-294: 192-210.
- [35] AI L N, HAN Z Z, WU X, et al. How did the climate and human activities modulate the sedimentary evolution of the central Yellow Sea Mud, China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2022, 235: 105299.
- [36] 中华人民共和国水利部. 中国河流泥沙公报[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012.
- [37] SU J B, RAO W B, WANG Y G, et al. Detrital zircon geochronology of the radial sand ridge system of Jiangsu Coast, East China: implication for sediment provenance[J]. *Journal of Earth Science*, 2018, 29: 144-154.
- [38] 高近娟. 台湾岛西部山地型河流入海水沙通量变化研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2017.
- [39] DE MAHIQUES M M, TASSINARI C C G, MARCOLINI S, et al. Nd and Pb isotope signatures on the Southeastern South American upper margin: implications for sediment transport and source rocks[J]. *Marine Geology*, 2008, 250: 51-63.
- [40] ALVAREZ-IGLESIAS P, RUBIO B, MILLOS J, et al. Isotopic identification of natural vs. anthropogenic lead sources in marine sediments from the inner Ria de Vigo (NW Spain)[J]. *Science of the Total Environment*, 2012, 437: 22-35.
- [41] FENG J L, HU Z G, CUI J Y, et al. Distributions of lead isotopes with grain size in aeolian deposits[J]. *Terra Nova*, 2010, 22(4): 257-263.
- [42] JONES C E, HALLIDAY A N, REA D K, et al. Eolian inputs of lead to the North Pacific[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2000, 64: 1405-1416.
- [43] VON BLANCKENBURG F, NÄGLER T F. Weathering versus circulation-controlled changes in radiogenic isotope tracer composition of the Labrador Sea and Northern Atlantic deep water[J]. *Paleoceanography*, 2001, 16(4): 424-434.
- [44] LING H F, JIANG S Y, FRANK M, et al. Differing controls over the Cenozoic Pb and Nd isotope evolution of deepwater in the central North Pacific Ocean[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 232: 345-361.
- [45] WU F, HO S S H, SUN Q L, et al. Provenance of Chinese Loess: evidence from stable lead isotope[J]. *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, 2011, 22(3): 305-314.
- [46] ZHANG C K, YANG Y Z, TAO J F, et al. Suspended sediment fluxes in the radial sand ridge field of South Yellow Sea[J]. *Journal of Coastal Research*, 2013, 65: 624-629.
- [47] 朱龙海, 张自豪, 刘志杰, 等. 山东半岛东部海域表层沉积物微量元素分布及物源指示意义[J]. *海洋科学*, 2018, 42(5): 1-11. (ZHU Longhai, ZHANG Zihao, LIU Zhijie, et al. The distribution of trace elements of the surface sediments in the eastern Shandong Peninsula and its indication significance[J]. *Marine Sciences*, 2018, 42(5): 1-11. (in Chinese))
- [48] YANG S Y, DOU Y G, LI C X, et al. Tracing the source to sink patterns of river sediments in East Asian marginal seas by using geochemical methods[R]. Taiwan: International Sediment Trap Workshop and Symposium on Sediment Transport and Sediment on Asian Margins, 2009.
- [49] PARK K H, PARK J B, CHEONG C S, et al. Sr, Nd and Pb isotopic systematics of the Cenozoic basalts of the Korean Peninsula and their implications for the Permo-Triassic continental collision boundary[J]. *Gondwana Research*, 2005, 8(4): 529-538.
- [50] YOUN J S, GO G W. Sedimentological characteristics of the surface sediments in the southern sea off Cheju Island, Korea[J]. *Journal of Korean Society of Oceanography*, 1987, 22: 130-142.
- [51] YANG S Y, LIM D I, JUNG H S. Geochemical composition and provenance discrimination of coastal sediment around Cheju Island in the southeastern Yellow Sea[J]. *Marine Geology*, 2004, 206: 41-53.
- [52] 恽才兴, 蔡孟裔, 王宝全. 利用卫星像片分析长江入海悬浮泥沙扩散问题[J]. *海洋与湖沼*, 1981, 12(5): 391-401. (YUN Caixing, CAI Mengyi, WANG Baoquan. An analysis of the diffusion of suspended sediment discharged from the Changjiang River based on the satellite images[J]. *Oceanologia et Limnologia Acta*, 1981, 12(5): 391-401. (in Chinese))
- [53] 邓凯, 杨守业, 王中波, 等. 台湾山溪性小河流碎屑重矿物组成及其示踪意义[J]. *沉积学报*, 2016, 34(3): 531-542. (DENG Kai, YANG Shouye, WANG Zhongbo, et al. Detrital heavy mineral from Taiwan and its implications for sediment provenance[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2016, 34(3): 531-542. (in Chinese))
- [54] 薛成凤, 贾建军, 高抒, 等. 中小河流对长江水下三角洲远端泥沉积的贡献: 以椒江和瓯江为例[J]. *海洋学报*, 2018, 40(5): 75-89. (XUE Chengfeng, JIA Jianjun, GAO Shu, et al. The contribution of middle and small rivers to the distal mud of subaqueous Changjiang Delta: results from Jiaojiang River and Oujiang River[J]. *Haiyang Xuebao*, 2018, 40(5): 75-89. (in Chinese))