

黄河中下游悬浮颗粒物多核素时空分布特征 及其指示意义

杨鹏玉^{1,2,3}, 杨迪松^{1,2,3}, 南海明^{1,2,3},
许博超^{1,2,3}, 张晓洁^{1,2,3}

(1.中国海洋大学 深海圈层与地球系统前沿科学中心和海洋化学理论与工程教育部重点实验室, 山东 青岛 266100; 2.青岛海洋科学与技术国家实验室海洋生态与环境科学功能实验室, 山东 青岛 266237; 3.中国海洋大学 化学化工学院, 山东 青岛 266100)

摘 要:天然放射性核素 (^{238}U 、 ^{40}K 、 ^{226}Ra 、 ^{228}Ra 、 ^7Be 、 $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ 等) 信息对于认识河流颗粒物的来源及输运过程具有重要的指示意义, 然而目前关于河流悬浮颗粒物 (SPM) 的核素研究尚不多见。本研究分析了黄河中、下游水体悬浮颗粒物中各种天然放射性核素的活度水平及时空分布特征, 发现春季颗粒物的 ^{238}U 、 ^{40}K 、 ^{226}Ra 、 ^{228}Ra 、 ^7Be 和 $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ 活度分别为 26.86~119.57 Bq/kg、619.50~835.62 Bq/kg、12.88~55.51 Bq/kg、24.55~82.61 Bq/kg、0.24~39.47 Bq/kg 和 0.92~18.78 Bq/kg, 秋季分别为 40.54~73.96 Bq/kg、804.95~1023.12 Bq/kg、31.24~47.68 Bq/kg、57.92~77.95 Bq/kg、0.98~30.50 Bq/kg 和 12.60~31.33 Bq/kg。对比发现, 除 ^7Be 在两次调查时表现出相似的变化范围和趋势外, 其他各种核素的比活度整体上均表现为春季高于秋季的季节特征。就核素的含量及比值的空间分布而言, 黄河小浪底、开封和将军渡 3 个河段均存在数值异常的现象, 推测是这 3 处区域的物质来源、颗粒物粒径及成分组成不同于其他区域所致。

关键词:黄河中下游; 悬浮颗粒物; 放射性同位素; 时空分布

中图分类号: X142

文献标识码: A

文章编号: 1007-6336(2021)02-0215-06

Spatio-temporal distributions and indications of multi-nuclides on suspended particulate matters in the middle and lower reaches of the Yellow River

YANG Peng-yu^{1,2,3}, YANG Di-song^{1,2,3}, NAN Hai-ming^{1,2,3},
XU Bo-chao^{1,2,3}, ZHANG Xiao-jie^{1,2,3}

(1. Frontiers Science Center for Deep Ocean Multispheres and Earth System, and Key Laboratory of Marine Chemistry Theory and Technology, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Laboratory for Marine Ecology and Environmental Science, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China; 3. College of Chemistry and Chemical Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: Natural radionuclides (^{238}U , ^{40}K , ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^7Be , $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$, etc.) are important tracers for understanding the sources and transport process of particulate matters. However, studies about the nuclides on suspended particulate matters (SPM) in rivers are still rare thus far. In this study, we analyzed the activity levels and spatial-temporal distribution characteristics of multiple natural radionuclides on SPM in the middle and

收稿日期: 2019-12-03, 修订日期: 2020-03-07

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFC1404402); 高校基本科研业务费项目 (201841007, 201962003)

作者简介: 杨鹏玉 (1994—), 男, 山东烟台人, 硕士研究生, 主要从事同位素海洋学研究, E-mail: 18765234596@163.com

通讯作者: 张晓洁, 女, 主要从事同位素海洋学研究, E-mail: ouczj@163.com

lower reaches of the Yellow River. It was found that the activity ranges of ^{238}U , ^{40}K , ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^7Be and $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ on SPM in spring were 26.86 ~ 119.57 Bq/kg, 619.50 ~ 835.62 Bq/kg, 12.88 ~ 55.51 Bq/kg, 24.55 ~ 82.61 Bq/kg, 0.24 ~ 39.47 Bq/kg, and 0.92 ~ 18.78 Bq/kg; and were 40.54 ~ 73.96 Bq/kg, 804.95 ~ 1023.12 Bq/kg, 31.24 ~ 47.68 Bq/kg, 57.92 ~ 77.95 Bq/kg, 0.98 ~ 30.50 Bq/kg, and 12.60 ~ 31.33 Bq/kg in autumn, respectively. Both the ranges and trends of ^7Be were similar in the two surveys. The specific activities of all other nuclides in spring were higher than which in autumn. In terms of the spatial distribution of various nuclides contents and ratios, there were significant anomalies in the three regions of Xiaolangdi, Kaifeng and Jiangjundu. It was speculated that this may be due to the changes of material source, particle size and compositions.

Key words: middle and lower reaches of the Yellow River; suspended particulate matter; radionuclide; spatial-temporal distribution

河流是连接陆地和海洋系统的重要纽带,大量的颗粒物被大型河流从陆地输送到海洋。据估计,全世界河流每年向海洋输送的悬浮颗粒物(suspended particulate matter, SPM)总量约 $(15 \sim 20) \times 10^9 \text{ t}$ [1]。在向河口运输的过程中,河水与颗粒物充分接触并发生物质交换,大量重金属、营养物和污染物从悬浮颗粒物中解吸并变成生物可利用的物质,对河流和近海的生态系统健康产生重要的影响。因此,认识流域范围内颗粒物的来源对于深入理解颗粒物携带的陆源物质入海通量意义重大。

颗粒物中多种核素的含量及其比值对于辨别其来源[2]、量化沉积速率[3]等研究至关重要。利用单一核素研究颗粒物动力学往往存在缺陷,因此很多研究引入两种甚至多种核素联合示踪颗粒物[4-8]。常用颗粒物上的多核素示踪工具包括 ^{238}U ($T_{1/2}=4.5 \times 10^9 \text{ a}$)、 ^{40}K ($T_{1/2}=1.25 \times 10^9 \text{ a}$)、 ^{228}Ra ($T_{1/2}=5.7 \text{ a}$)、 ^{226}Ra ($T_{1/2}=1600 \text{ a}$)、 ^7Be ($T_{1/2}=53.3 \text{ d}$)和 $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ ($T_{1/2}=22.3 \text{ a}$)等。

黄河是世界上输沙量最大的河流之一,由于气候变化的影响以及流域内水库的建设完成,自 2002 年起黄河年均输沙量降至约为 1.7 亿吨[9],约为 20 世纪 80 年代的 1.5% [1]。在洪水季及水沙调控期间,高流量河水冲刷下游河道,使得沿岸土壤和河床沉积物被侵蚀、扰动并随河水一起进入海洋。目前,对河流悬浮颗粒物中放射性同位素含量、地球化学行为等的系统研究较少。黄河是我国第二长河、世界第六长河,尤其是世界典型的人为水沙调度频繁的高浑浊型大河案例。系统了解人类活动影响下河流中悬浮颗粒物上多种放射性核素的含量水平及分布特

征极为必要,本研究以黄河中下游干流河段为重点研究区域,分析不同季节河流沿程各站位的悬浮颗粒物中多种核素的含量及空间分布。在此基础上综合各种核素的指示作用,剖析河流悬浮颗粒物的来源变化。本研究成果可丰富对高浑浊河流悬浮颗粒物的多核素行为的认识,为泥沙来源及输运沉积过程研究提供科学支撑。

1 材料与方法

1.1 样品采集

本研究分别于 2018 年春季(4 月 29 日至 5 月 10 日)和秋季(8 月 28 日至 9 月 10 日)对黄河中下游壶口至胜利段进行了调查取样。采样站位如图 1 所示,按自西向东的方向依次设置如下:壶口(HK)、潼关(TG)、小浪底(XLD)、花园口(HYK)、开封(KF)、高村(GC)、将军渡(JJD)、东大(DD)、涑口(LK)和胜利(SL)。

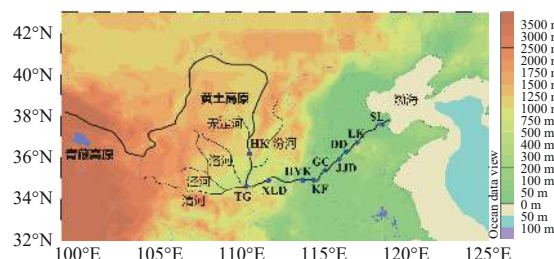


图 1 2018 年黄河中下游采样站位

Fig. 1 Sampling stations along the middle to lower reaches of the Yellow River in 2018

于各个站位采集大体积表层水样(约 100 L),现场立即采用已称重的孔径 $0.45 \mu\text{m}$ 的醋酸纤维滤膜过滤,收集水体中的悬浮颗粒物(SPM),然后迅速将滤膜放入膜盒中,记录水样体积并做

好标记, 冷冻保存。

1.2 样品分析

回到实验室后, 将收集到的黄河悬浮颗粒物样品放于 45 °C 烘箱中烘干至恒重, 用研钵研磨后装入样品管, 密封保存 20 d。然后用井型高纯锗 γ 谱仪(型号: 美国 ORTEC 公司)测定样品的 ^7Be 、 $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ 、 ^{238}U 、 ^{226}Ra 、 ^{228}Ra 和 ^{40}K 活度, 每个样品的测试时间不少于 24 h。具体计算核素活度的方法参考文献 [10-11]。本研究采用 IAEA-326 标准样品对各核素的测试效率进行刻度, 工作期间各核素的测试相对标准偏差均低于 1%。值得注意的是, γ 谱仪的自吸收情况与样品的几何形状有关 [12-13], 因此本研究在装样品时保持各样品的装样高度和质量尽量一致。

2 结果与讨论

2.1 黄河中下游悬浮颗粒物上 ^{238}U 和 ^{40}K 的活度水平、分布特征及其指示意义

2018 年春季和秋季黄河中下游各站位的悬浮颗粒物 (SPM) 上 ^{238}U 和 ^{40}K 的含量水平及空间

分布特征如图 2a 和图 2b 所示。在此次春季调查期间, ^{238}U 和 ^{40}K 比活度变化的范围分别为 26.86 ~ 119.57 Bq/kg 和 619.50 ~ 835.62 Bq/kg, 平均值分别为 $(51.89 \pm 26.91) \text{ Bq/kg}$ 和 $(724.81 \pm 70.45) \text{ Bq/kg}$ 。秋季调查期间, ^{238}U 和 ^{40}K 比活度变化范围分别为 40.54 ~ 73.96 Bq/kg 和 804.95 ~ 1023.12 Bq/kg, 平均值分别为 $(54.86 \pm 9.01) \text{ Bq/kg}$ 和 $(909.30 \pm 74.51) \text{ Bq/kg}$ 。对于 ^{238}U 而言, 除了小浪底水库和花园口之外, 其他站位悬浮颗粒物上的 ^{238}U 的活度均为秋季高于春季。从空间分布看, 秋季各站位悬浮颗粒物中 ^{238}U 活度整体波动不大, 而春季各站位活度的差别较大, 小浪底水库的核素含量明显高于其他站位。对于 ^{40}K , 秋季沿程各站均高于春季。

^{238}U 、 ^{40}K 均属原生放射性核素, 半衰期都超过 1 亿年, 在地壳中含量较为稳定, 故 $^{40}\text{K}/^{238}\text{U}$ 常用来指示颗粒物的来源。本研究得到的春季和秋季 $^{40}\text{K}/^{238}\text{U}$ 变化范围分别为 5.18 ~ 23.68 和 13.83 ~ 19.86, 与根据中国地区土壤和沉积物中两种核素含量的平均值 [5] 得到 $^{40}\text{K}/^{238}\text{U}$ (14.09) 相吻合。

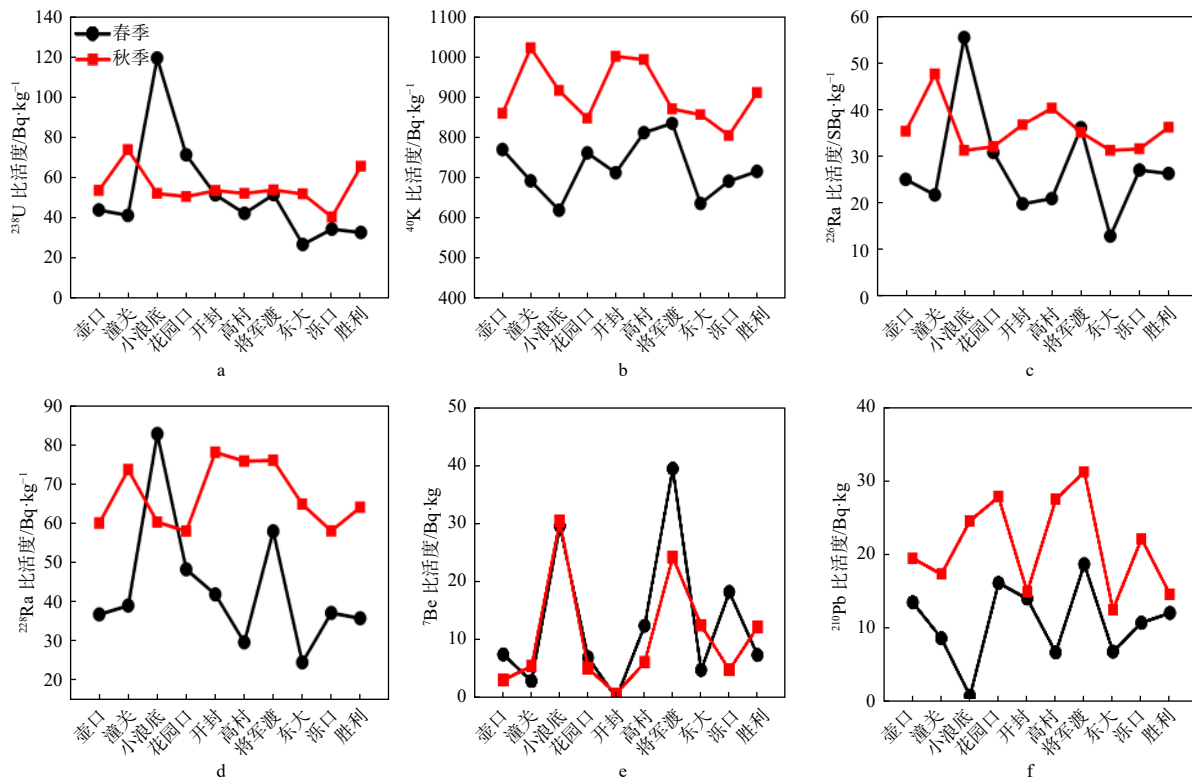


图2 2018年春季和秋季黄河中下游各站位 SPM 上多核素的含量分布

Fig. 2 Distribution characteristics of multi-radionuclides on SPM in the middle and lower reaches of the Yellow River in Spring and Autumn, 2018

秋季 $^{40}\text{K}/^{238}\text{U}$ 更加集中且接近平均值,而春季的 $^{40}\text{K}/^{238}\text{U}$ 分布更加分散一些,推测为秋季颗粒物的来源主控因素更为单一。

2.2 黄河中下游悬浮颗粒物上 ^{226}Ra 和 ^{228}Ra 的活度水平、分布特征及其指示意义

如图2c和图2d所示,春季调查期间, ^{226}Ra 和 ^{228}Ra 比活度变化的范围分别为12.88~55.51 Bq/kg和24.55~82.61 Bq/kg,平均值分别为 (27.60 ± 11.68) Bq/kg和 (43.33 ± 16.60) Bq/kg。秋季调查期间, ^{226}Ra 和 ^{228}Ra 比活度变化的范围分别为31.24~47.68 Bq/kg和57.92~77.95 Bq/kg,平均值分别为 (35.77 ± 5.13) Bq/kg和 (66.78 ± 8.10) Bq/kg。

对于 ^{226}Ra 和 ^{228}Ra 而言,除了小浪底水库,其他站位的 ^{226}Ra 和 ^{228}Ra 的活度秋季均高于春季。各个站位 ^{228}Ra 的活度均高于 ^{226}Ra 的活度,这可能与其原始母体核素(^{238}U 和 ^{232}Th)的含量、行为、衰变方式以及半衰期等诸多因素有关^[14]。

钍在环境中迁移率低,受风化作用影响小,但铀在氧化环境中溶解度高,可以从固相中溶解进入水体。此外, ^{226}Ra 是由 ^{238}U 经3次 α 衰变和两次 β 衰变后产生的,而 ^{228}Ra 则是经 ^{232}Th 的一次 α 衰变和两次 β 衰变后产生,由于 α 反冲效应对矿物晶格的破坏作用更大,因此 ^{226}Ra 比 ^{228}Ra 更有可能从固相中浸出^[15],所以环境中 ^{226}Ra 的迁移率可能与 ^{228}Ra 不同。

黄河春季SPM上的 $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ 变化范围为1.36~2.11,秋季 $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ 的变化范围为1.54~2.16,这与世界其他地区的一些报道结果处于同一水平。例如Peterson等^[8]报道了美国查塔努加河、弗林特河及阿巴拉契科拉河3条河流中悬浮颗粒物的 $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ 分别为 (2.04 ± 0.57) 、 (0.76 ± 0.50) 和 (1.03 ± 0.55) 。由图3可见,春、秋两季的两种镭同位素 ^{226}Ra 和 ^{228}Ra 在同一线性关系线上,且具有良好的线性关系($R^2=0.773$),表明春、秋两季黄河SPM的原始来源可能是一致的。春季两者的含量更为分散,而秋季两者的含量波动范围小且更为集中在高值区域,这可能与不同季节黄河悬浮颗粒物的来源和粒级组成的变化有关。由于春季和秋季的采样分别处于黄河调水调沙事件的前后,在春季低黄河径流期

间,黄河小浪底水库的出库水体的悬浮颗粒物含量接近于零^[16],因此黄河下游水体中的悬浮颗粒物主要源于河岸土壤或下游河床沉积物再悬浮。对比春季黄河的悬浮颗粒物与河岸土壤上 ^{226}Ra 和 ^{228}Ra 活度发现(图4),悬浮颗粒物上 ^{226}Ra 和 ^{228}Ra 活度均高于岸边土壤。由此推测,由于春季黄河下游颗粒物来源更复杂、多核素含量的主控因素更多元化,故两种镭同位素的含量范围跨度较大。调水调沙时,强烈的水动力能够将黄河下游河床上的沉积物充分扰动并搬运入海,故调水调沙之后黄河下游颗粒物的来源相对更为单一。2018年秋季采样时恰逢黄河中上游雨季^[17],流经中上游地区的黄土高原时,黏粒($0\sim 2\text{ }\mu\text{m}$)等细颗粒物更容易被径流搬运^[18]。本课题组在2018年5月及9月于黄河下游利津站对水体悬浮颗粒物同步进行水淘选分级的研究,结果也支持了这一观点。研究发现,5月份的黄河的悬浮颗粒物浓度较低(0.8 g/L),并以粒径 $16\sim 32\text{ }\mu\text{m}$ 的中粉砂颗粒物为主,占比约为80%。在9月份黄河悬浮颗粒物的浓度较高(2.3 g/L),且细粉砂颗粒物($8\sim 16\text{ }\mu\text{m}$)、黏土-极细粉砂颗粒物($<8\text{ }\mu\text{m}$)等细粒径的颗粒物的占比明显增加,分别由5月份的3%和4%升至38%和10%。粒径小的颗粒物具有较大比表面积和吸附能力,因此造成秋季黄河悬浮颗粒物上的两种镭同位素的活度水平更高,且范围更为集中。

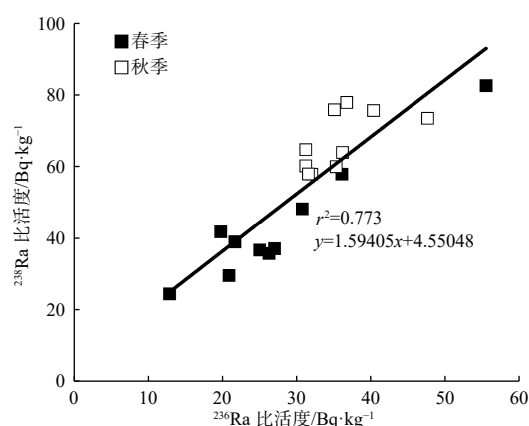


图3 不同季节黄河中下游SPM中 ^{228}Ra 和 ^{226}Ra 的关系
Fig. 3 The relationship of ^{228}Ra , ^{226}Ra in SPM of the middle and lower reaches of the Yellow River in different seasons

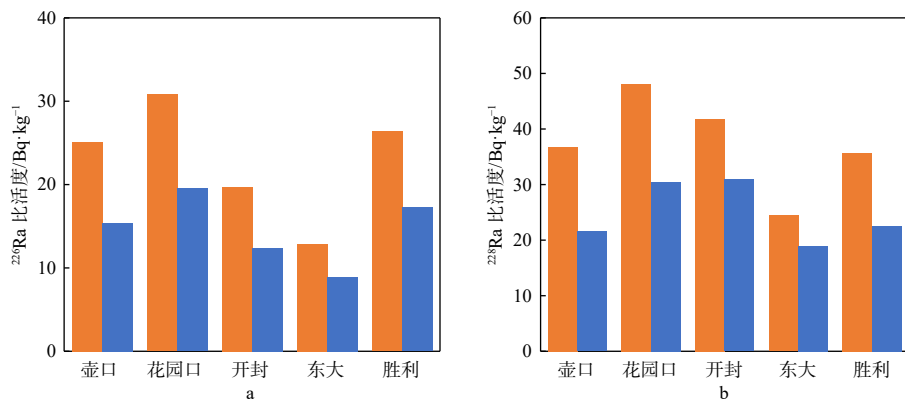


图4 春季黄河中下游 SPM 与河岸土壤中 ^{226}Ra (a)和 ^{228}Ra (b)含量的比较

Fig. 4 The concentrations of ^{226}Ra (a) and ^{228}Ra (b) in SPM and soil of the middle and lower reaches of the Yellow River

2.3 黄河中下游悬浮颗粒物上 ^7Be 和 $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ 的活度水平、分布特征及其指示意义

如图 2e 和图 2f 所示, 春季调查期间, ^7Be 和 $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ 比活度变化的范围分别为 $0.24 \sim 39.47 \text{ Bq/kg}$ 和 $0.92 \sim 18.78 \text{ Bq/kg}$, 平均值分别为 $(13.08 \pm 12.58) \text{ Bq/kg}$ 和 $(10.90 \pm 5.24) \text{ Bq/kg}$; 秋季调查期间, ^7Be 和 $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ 比活度变化的范围分别为 $0.98 \sim 30.50 \text{ Bq/kg}$ 和 $12.60 \sim 31.33 \text{ Bq/kg}$, 平均值分别为 $(10.65 \pm 9.66) \text{ Bq/kg}$ 和 $(21.30 \pm 2.58) \text{ Bq/kg}$ 。

^7Be 自上游至下游的活度分布在春季和秋季的变化趋势大致相同, 均在小浪底水库呈现峰值, 随后迅速下降。在开封站的悬浮颗粒物中几乎未检测到 ^7Be , 说明此处的颗粒物较老。之后在下游几个站位, ^7Be 的浓度呈现出锯齿形的变化趋势, 其中在将军渡站的悬浮颗粒物中 ^7Be 出现了明显的高峰值, 表明该河段处可能有新鲜颗粒物的添加。对于 $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$, 秋季的活度整体高于春季的活度。由于秋季采样调查前, 黄河上游因雨季降水多而开始泄洪^[17], 降水使大量 $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ 沉降到土壤表面, 泄洪时高流速河水冲刷河道及周边土壤, 大量富含 $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ 的土壤进入水中, 增加了悬浮颗粒物 $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ 的含量, 由此造成秋季黄河悬浮颗粒物 $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ 活度整体高于春季。 ^7Be 也属于大气沉降核素, 但未出现此现象, 这可能与动力事件导致的土壤侵蚀深度有关。因为贫 ^7Be 的颗粒物来源有很多, 并且 ^7Be 具有强颗粒活性, 相比 $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ 渗透能力较弱, 在其沉降到土壤表面后仅分布在土壤表层(约2 cm)的薄层中, 所以该层次以深的土壤层的侵蚀能够产生贫 ^7Be 颗粒

物^[6, 19-20]。如果上游河水冲刷深层土壤, 造成大量贫 ^7Be 颗粒物再悬浮, 一定程度上可以稀释大气沉降增加的 ^7Be 。而 $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ 比 ^7Be 的半衰期更长且在土壤中的渗透性更好^[6], 故较深层的土壤也含有较高水平的 $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ 。因此即使上游来水冲刷深层土壤发生再悬浮时, 也不会过度地稀释河流悬浮颗粒物中 $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ 的含量。除 ^7Be 和 $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ 之外, ^{238}U 、 ^{40}K 、 ^{226}Ra 和 ^{228}Ra 等各种核素均在小浪底、开封和将军渡 3 个站位中均出现异常值现象(图 2), 这进一步表明这 3 个站位所在区域的物质来源、悬浮颗粒物粒径或者组成等特征可能发生了显著的改变。

$^7\text{Be}/^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ 可排除颗粒物粒径等因素的干扰, 更为准确地评估流域新鲜颗粒物的添加^[21]。两次调查结果均发现, 开封和将军渡存在异常值(如图 5)。 $^7\text{Be}/^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ 的低值主要由于“老”颗

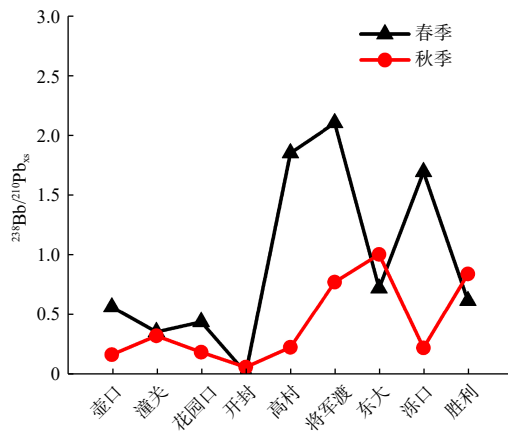


图5 不同季节黄河中下游 SPM 中 $^7\text{Be}/^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$

Fig. 5 $^7\text{Be}/^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ in SPM of the middle and lower reaches of the Yellow River in different seasons

粒物的汇入导致^[6,22],例如开封站出现低值的原因可能是河道及其周边土壤深层贫⁷Be“年龄较老”的沉积物进入河流,稀释了颗粒物中⁷Be的含量。自开封至将军渡,⁷Be/²¹⁰Pb_{xs}迅速升高,且整个下游区段的比值均保持在一个较高水平上,表明黄河开封下游至河口河段的悬浮颗粒物更多的源自浅表层“新鲜”土壤的贡献。

3 结 论

利用HPGe- γ 谱仪测定了黄河中下游悬浮颗粒物上的6种主要的天然放射性核素的时空分布特征,通过对比2018年春季和秋季两次黄河干流沿程的调查,发现黄河中下游悬浮颗粒物上的²³⁸U、⁴⁰K、²²⁶Ra、²²⁸Ra和²¹⁰Pb_{xs}活度春季高于秋季,而⁷Be活度在春季和秋季变化趋势及含量水平相似。就各种核素的含量及比值的空间分布而言,春季小浪底、开封、将军渡等区域均存在异常值现象,推测为物质来源或者颗粒物粒径及组成发生变化的缘故。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] EVRARD O, LACEBY J P, HUON S, et al. Combining multiple fallout radionuclides (¹³⁷Cs, ⁷Be, ²¹⁰Pb_{xs}) to investigate temporal sediment source dynamics in tropical, ephemeral riverine systems[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2016, 16(3): 1130-1144.
- [3] REYSS J L, MANGERET A, COURBET C, et al. Estimation of sedimentation rates based on the excess of radium 228 in granitic reservoir sediments[J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2016, 162/163: 8-13.
- [4] FENG H, COCHRAN J K, HIRSCHBERG D J. ²³⁴Th and ⁷Be as tracers for the transport and dynamics of suspended particles in a partially mixed estuary[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999, 63(17): 2487-2505.
- [5] WANG J L, DU J Z, BI Q Q. Natural radioactivity assessment of surface sediments in the Yangtze Estuary[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2017, 114(1): 602-608.
- [6] MATISOFF G, WILSON C G, WHITING P J. The ⁷Be/²¹⁰Pb_{xs} ratio as an indicator of suspended sediment age or fraction new sediment in suspension[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2005, 30(9): 1191-1201.
- [7] ZEBRACKI M, EYROLLE-BOYER F, EVRARD O, et al. Tracing the origin of suspended sediment in a large Mediterranean river by combining continuous river monitoring and measurement of artificial and natural radionuclides[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 502: 122-132.
- [8] PETERSON R N, BURNETT W C, OPSAHL S P, et al. Tracking suspended particle transport via radium isotopes (²²⁶Ra and ²²⁸Ra) through the Apalachicola-Chattahoochee-Flint River system[J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2013, 116: 65-75.
- [9] BI N S, WANG H J, YANG Z S. Recent changes in the erosion-accretion patterns of the active Huanghe (Yellow River) delta lobe caused by human activities[J]. *Continental Shelf Research*, 2014, 90: 70-78.
- [10] 刘广山, 黄奕普. 沉积物中²³⁸U等9种放射性核素 γ 谱法同时测定[J]. *台湾海峡*, 1998, 17(4): 359-363.
- [11] XU B C, BIANCHI T S, ALLISON M A, et al. Using multi-radiotracer techniques to better understand sedimentary dynamics of reworked muds in the Changjiang River estuary and inner shelf of East China Sea[J]. *Marine Geology*, 2015, 370: 76-86.
- [12] MUDAHAR G S, MODI S, SINGH M. Total and partial mass attenuation coefficients of soil as a function of chemical composition[J]. *International Journal of Radiation Applications and Instrumentation. Part A. Applied Radiation and Isotopes*, 1991, 42(1): 13-18.
- [13] APOLONI C R, RIOS E A. Mass attenuation coefficients of Brazilian soils in the range 10-1450 keV[J]. *Applied Radiation and Isotopes*, 1994, 45(3): 287-291.
- [14] RIBEIRO F C A, SILVA J I R, LIMA E S A, et al. Natural radioactivity in soils of the state of Rio de Janeiro (Brazil): radiological characterization and relationships to geological formation, soil types and soil properties[J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2018, 182: 34-43.
- [15] IVANOVICH M, HARMON R S. Uranium-series disequilibrium: applications to earth, marine and environmental sciences[M]. 2nd ed. Oxford: Clarendon Press, 1992: 332-335.
- [16] YANG D S, XU B C, BURNETT W, et al. Radium isotopes-suspended sediment relationships in a muddy river[J]. *Chemosphere*, 2019, 214: 250-258.
- [17] 中国水利部信息中心. 2018黄河水情年报[EB/OL]. (2019-12-16). <http://www.hydroinfo.gov.cn>.
- [18] 王文娣. 黄土高原小流域泥沙来源与粒径变化研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2019.
- [19] MATISOFF G, BONNIWELL E C, WHITING P J. Soil erosion and sediment sources in an Ohio watershed using beryllium-7, cesium-137, and lead-210[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2002, 31(1): 54-61.