

王港潮滩重金属 Pb、Zn 和 Cu 的积累特征

于文金 邹欣庆 朱大奎

(南京大学 海岸与海岛开发教育部重点实验室,南京 210093)

摘要 对 15a 来王港潮滩重金属积累规律和污染状况进行了研究,第 1 次测到了王港地区²¹⁰Pb 的本底值为 1.16 dpm/g,校正了前人对王港地区沉积速率的研究。尝试性地把分形理论引入到环境压力的定量研究中。研究表明,王港潮滩现代平均沉积速率为 4.13 cm/a;从重金属相关性分析得出,王港潮滩 Fe、Zn 与 Li 相关系数非常显著,归一化后,Cu、Zn 的归一化值在 15 a 内相对稳定,其中 Cu 的波动范围在 0.4~2 之间,Zn 在 1.5~2.6 之间狭小的范围内波动。分形回归分析结果表明,王港潮滩重金属 Cu、Zn 归一化值的信息维数高,系统的结构松散,自组织程度低。Cu 的分维值范围在 5~6.5,平均值为 5.8085,Zn 的分维值范围在 3~6.5,平均值为 4.68。王港潮滩重金属的人为污染较轻,主要受地球化学元素的控制,同时,Pb 的归一化值的分维值较低,其分维值范围在 2~5.5,平均值为 3.608,自组织程度较高,说明存在一定程度的 Pb 污染。

关键词 分形 潮滩 重金属 王港

文章编号:1000-0933(2007)08-3162-10 中图分类号:P737.1,X53 文献标识码:A

The accumulation characteristics of heavy metal Pb, Cu, Zn in tidal-Flat, a study based on Renyi theory: taking Wanggang as an example

YU Wen-Jin, ZOU Xin-Qing, ZHU Da-Kui

Key Laboratory of Coast and Island Development, Nanjing University, MoE, Nanjing 210093, China

Acta Ecologica Sinica 2007 27 (8) 3162 ~ 3171.

Abstract: The vertical accumulation of heavy metals and pollution status in Wanggang tidal flat were studied. The base value of ²¹⁰Pb in Wanggang area was obtained as 1.16dpm/g. The fractal theories were led into the quantitative study of pollution issues. The modern average sedimentary rate in Wanggang area is 4.13cm/a, according to the ²¹⁰Pb analysis. Through the relativity analysis of heavy metals, it is educed that the Fe, Cu, Pb, Zn and Li have better pertinence in the area. After normalization, Cu and Zn remain stable values in the past 15 years. Cu shifts its value from 0.4—2, Zn from 1.5—2.6. The normalized heavy metal information dimension is high in the area, with loose systematic structure and lower organizational degree. The fractal dimension value of Zn moves from 3—6.5, average is 4.68, contemporary Cu from 5—6.5, average is 5.8085. The study shows that the heavy metal distribution in the area is mainly controlled by local geochemistry character, with limited contribution from human activities. Meanwhile, the fractal dimension of Pb normalization value is lower, in the scope of its fractal dimension flow varies from 2 to 5.5, with an average of 3.608. Higher levels of self-organization of Pb mean a certain degree of lead contamination.

基金项目 国家自然科学基金资助项目(40371048)

收稿日期 2006-06-28;修订日期 2007-03-28

作者简介:于文金(1967~)男,山东淄博人,博士生,副教授,主要从事海岸与海岛经济开发与可持续发展研究。E-mail:yuwenjin2003@tom.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail:zouxq@nju.edu.cn

Foundation item: The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China (No. 403771048)

Received date 2006-06-28; **Accepted date** 2007-03-28

Biography: YU Wen-Jin, Ph. D., candidate, Associate professor, mainly engaged in economic development and sustainable development of coast and island. E-mail: yuwenjin2003@tom.com

Key Words : fractal ;tidal-land ;heavy metal ;Wanggang

潮间带是指大潮高潮位于大潮低潮位之间的海岸带部分^[1],处于潮间带的潮滩部分是海岸系统的重要组成部分,也是典型的环境脆弱带和敏感带。江苏海岸潮滩湿地是全国最大的潮滩湿地,其中以盐城的大丰市王港地区最具代表性。近年来,随着滩涂的开发,含 Cu、Pb、Zn 的难降解重金属污染物通过悬浮泥沙的吸附和搬运积累于潮滩,潮滩环境质量面临日益恶化的趋势^[2,3]。由于不同时期自然因素和人文因素的影响差异,导致沉积在不同地层中的重金属含量的相应变化,沉积物中蕴涵丰富的污染、气候、和人文活动的历史信息。通过对不同地层重金属累积规律的研究来探讨研究人类活动对环境影响的轨迹成为当前研究的重点关注课题。

分形理论是非线性科学研究中的一个活跃分支,主要研究和揭示复杂的自然现象和社会现象中所隐藏的规律性、层次性和标度不变性^[4,5]。分形理论自创立以来就被广泛应用于自然科学、社会科学和思维科学的诸领域,成为许多新兴学科的生长点^[1]。在地理科学中也已经在地貌学、水文学、气候学、土壤学、第四纪沉积学、城市体系以及信息科学等领域广泛而成功的应用^[6,7]。分形理论在滩涂湿地研究中的应用还处于初期阶段,大多研究集中在对潮滩分带、粒度的分形特征揭示上^[8],未能进一步从分形维数的变化中找出研究对象的内在规律性。迄今为止,分形理论在潮滩湿地重金属累积研究中的应用上未见报端,而潮滩重金属的分布和迁移规律是复杂的、非线性的,其中包括大量分形特性。本文试图在潮滩重金属的累积规律研究中,引入分形学理论,使现有环境研究中一些难以定量研究的问题定量化,以期一定程度上推动环境科学关于重金属分布规律定量化研究的发展。

1 方法和材料

1.1 样品的采集与处理

本研究于 2005 年 4 月在江苏省大丰市王港地区高潮滩、中潮滩、低潮滩不同的地貌单元上共采集 5 根柱状样(采样点见图 1),WG05 为 400 cm 深柱,其余深均为 72 cm;WG01 柱样位于粉砂滩,具有泥沙交互层理,底部泥层薄,上部泥层厚;WG02 位于盐蒿滩与大米草滩交接地区的泥砂混合滩,盐蒿相对较多,下部水平层理明显,上部不明显;WG03 位于泥砂混合滩,上部水平层理明显,下部不明显;WG04 位于生长有密集互花米草的泥砂混合滩,上部水平层理明显,下部不明显。WG05 位于生长有互花米草(*Spartina alterniflora*)的泥砂混合滩,从柱子沉积特征可见,从上至下 0~1.4m,草根较多,生物扰动严重,粘土含量较高,1~2.1 m,有机质含量高,呈灰黑色。2.2~3.5 m,黄色粉沙-细砂沉积,夹有厚度 1~8 mm 的不等暗色细颗粒(粘土含量高)沉积层。3.5~4 m,黑色细沙沉积层,亦夹有细颗粒沉积层。柱状样采集利用内径 70 mm、外径 75 mm 的 PVC 管直接打入地下获取。采样点的定位利用 GPS 手持定位仪测定,精度为 10 m。柱状样带回实验室后,取出样品进行岩性、沉积构造描述后,以间隔 2 cm 分样,共分得样品 296 份。

分得的样品用德国 Martin Christ 公司生产的 ALPHA-1-4 型冷冻干燥机低温冻干,计算含水量、容量。具体方法见文献^[9~11]。利用英国 Mastersizer2000 型激光粒度仪对柱状样品进行粒度分析,粒度参数计算采用矩法参数^[12,13]。将冻干的样品剔除植物残体和石块,研磨、过 100 目筛,保存于塑料瓶中,置于干燥器中备用。准确称取样品 0.5g,在 100mL 的三角瓶用 HNO₃-HCl-HClO₄ 混酸消化,在 2040 型程控消解仪上消解并定容后,采用离子体光谱质谱仪(ICP-MS)测定土壤中的 Cu、Zn、Pb、Li、Fe 等重金属含量。将冻干的样品研磨并过 150 目筛,利用 Po-a 法对 400 cm 柱状样的样品进行了²¹⁰Pb 分析,所用仪器为美国 EG&G 公司生产的 α 能谱仪,以²⁰⁹Po 作示踪剂。用稀酸(HF、HNO₃ 和 HCl)处理,经银片或镍片镀膜,仪器重复测量误差小于 4%,可信度为 96%。

本文²¹⁰Pb 测年是在南京大学海岸与海岛开发教育部重点实验室同位素²¹⁰Pb 实验室进行,粒度是在南京大学海岸与海岛开发教育部重点实验室粒度室完成。重金属是在南京大学地质地矿国家重点实验室重金属 ICP-MS 分析室完成,所用仪器为:Orient MDS-9000 型微波消解系统(西安奥瑞特科技发展公司);

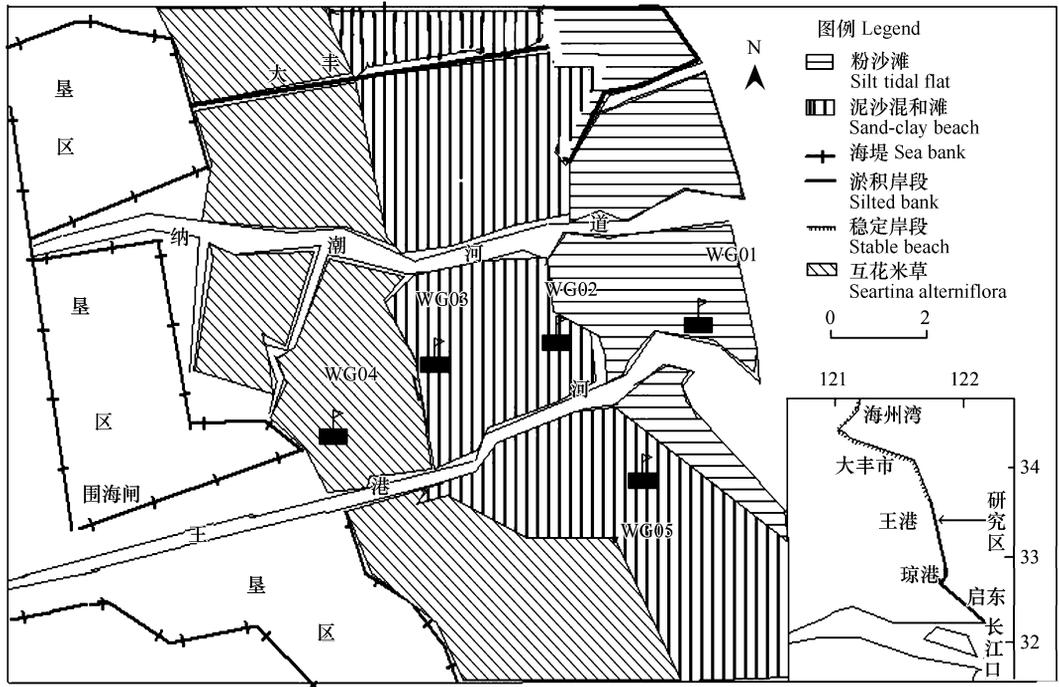


图1 柱状样采样点位置和基本情况

Fig 1 Locality and basic instance of sampling about post

HP4500series300 等离子质谱仪 (惠普公司);美国 MLLipore 公司生产的超纯水仪 (MLLi-Q);所有器皿均用 20% 硝酸浸泡过夜,用纯水冲洗 3 次。仪器工作参数:高发射功率 1200 W,采样深度 6.4 mm,冷却气流 16.0 L/min,辅助气流量 1.0 L/min,雾化气流量 1.02 L/min,雾化温度 3 °C,提升量 1.1 L/min,扫描方式为跳峰,观测峰点为 3,循环次数 3 次,样品分析时间为每个 60 s。

1.2 数据处理及方法

研究采样点示意图及部分图表均使用 Mapinfo7.0 图像处理软件绘制而成,文中绝大部分图和数据统计均用 excel 2000 和 Origin 6.0 软件完成,并运用 SPSS10. 统计软件对部分相关数据进行了处理和统计分析,对重金属之间及重金属和粒度之间的相关性进行相关分析 [14]

1.3 沉积速率估算

²¹⁰Pb 是一种在自然环境存在的天然放射性元素,是 ²³⁸U 衰变链中的一个中间体。²¹⁰Pb 的半衰期是 22.3 a,适于测定近百余年的地质事件和年龄,此法为 Goldberg [15] 所发展,沉积物中的 ²¹⁰Pb 有两个来源,一部分为母体 ²²⁶Ra 衰变而来,并与母体 ²²⁶Ra 平衡,称之为补偿 (supported) ²¹⁰Pb;另一部分是由大气中 ²²²Rn 衰变而来并通过沉积降落储蓄在沉积物中,它不与母体 ²²⁶Ra 平衡,称之为过剩 ²¹⁰Pb (²¹⁰Pb_{ex})。从被积蓄在沉积物中后,过剩 ²¹⁰Pb 的活度随时间开始按指数衰减:

$$A(t) = A_0 e^{-\lambda t}$$

式中 A(t) 表示时刻 t 的活度;A₀ 表示时刻 t₀ 的活度;λ 表示 ²¹⁰Pb 的衰变数 (λ = 0.031a⁻¹)。

$$C = C_0 \exp(-Az)$$

式中 C₀ (dpm/g) 为初始比活度。

$$\text{沉积速率 } V = \lambda / a_0$$

1.4 系统等级结构的信息维数、计算方法及地理意义

根据分形理论 (Fractal Theory),分形体内任一相对独立的部分以某种方式与整体有着相似的几何形态,是整体的再现和缩影 [16-18],即自相似性。这种自相似性普遍存在于客观的自然和社会领域以及主观的思维

领域,大量研究表明,潮滩重金属的空间和垂直分布积累是一个复杂的混沌系统,也是一个开放的自组织系统。各种重金属之间的关系是非线性的,其分布和积累过程显示分形特征。混沌吸引子的一个显著特征是存在着无穷嵌套的自相似几何结构,可以用分形理论来描述。分形理论^[9-20]的研究与发展揭示了非线性系统中有序与无序的统一,确定性与随机性的统一,使探索这极为复杂现象背后所存在的规律性有了可能。作者用信息分维值 D_I 来反映潮滩重金属 Pb、Zn 和 Cu 垂直方向上分布的变化性。其计算是将 Pb、Zn 和 Cu 的含量值按大小顺序排列成一个集合,用表量度位 r 的小盒子把分形覆盖起来,并把非空小盒子的总数记作 $N(r)$,则 $N(r)$ 会随表量度 r 的缩小而不断增加,在双对数坐标中作出 $\ln N(r)$ 随 $\ln(1/r)$ 的变化曲线,那么,其直线部分的斜率即为分维 D_0 。如果将小盒子编上号 i ($i=1, 2, 3, \dots$),并记分形中的部分落入第 i 个小盒子的概率位 P_i ,那么用尺度位 r 的小盒子所测得的平均信息总量为:

$$I = - \sum_{i=1}^{N(r)} P_i \ln P_i$$

集合的信息维数 (Renyi 维) 为:

$$D_I = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{- \sum_{i=1}^{N(r)} P_i \ln P_i}{\ln(1/r)}$$

改变 r 值可得到一系列的 D_I 值。当 $P_i = 1/N$ 时,信息维就变成了分维。

利用考察 R^2 和 F 值来检验回归方程的有效性。

实际计算时,设某种重金属的归一化量为 r ,在双对数坐标中,以 $\ln N(r)$ 为纵坐标, $\ln(1/r)$ 为横坐标,作出散点图,然后,利用 spss 软件进行线性回归,由回归结果可得出分维值 D_0 以及相关性系数 R^2 。信息维数 D_0 反映潮滩重金属在垂直方向的分布特征和集中度。信息维数越大表示重金属含量分布较为均匀,重金属聚集程度低,认为污染程度可能较低。 $D_0 = 1$ 时,表示重金属的分布是均匀的。 $D_0 = 0$ 时,表示重金属集中于一点。 D_0 越大表示重金属归一化值分布越均匀。对重金属的分布系统的紧密程度和自组织程度而言,表现为松散和自组织化程度低。随机分布, $D_0 \rightarrow \infty$; 混沌状态, D_0 为正的分数。但是,反过来,当维数是分数时,不一定处于混沌状态系统。分维的意义不仅在于可以描述不同性质、不同领域系统的几何结构、分布空间结构的破碎度,而且,还可以算出研究该系统的最小独立变数为 $INT(D+1)$,这里的 INT 为取整数函数。

2 结果与讨论

2.1 ^{210}Pb 测年结果分析

^{210}Pb 的测试结果显示:王港地区 ^{210}Pb 的比活度小且变化不大。王爱军等曾做过王港地区的沉积速率^[21-22],但所采集的柱状样深度较浅(最深 130 cm),没有测到本底值。由于 ^{210}Pb 主要吸附于黏土等细颗粒物,有机质含量越高,沉积物含有的黏土组分越多, ^{210}Pb 的放射性及其本底值越高^[26-28]。王港地区柱状样沉积物粒度特征显示,该区沉积物平均粒径在 $5.0 \sim 5.7 \phi$ 之间(图 2),黏土含量不超过 10%,主要物质为粉砂,对 ^{210}Pb 的吸附能力较差,本底值难以检测到。因此,试验中尽量选取柱状样中的黏土层样品来测定 ^{210}Pb 的比活度。由于潮滩含水量大,在潮滩上获取柱状样比较困难,文中所取柱状样 WG05 最深达 400 cm,为王港潮滩有记载来最深柱状样,这为检测底值提供了有效的深度。

WG05 柱样中,360 cm 的深度以后, ^{210}Pb 的比活度基本稳定在 1.4 dpm/g,因此,可把 400 cm 深度的 ^{210}Pb 的比活度 1.16 dpm/g 取做本底值。对于不同的物源,其矿物内部的 ^{210}Pb 的比活度不同,在实验过程中采用氢氟酸进行化学处理,破坏了矿物晶格。根据沉积速率计算公式可以计算出王港潮滩平均沉积速率为 4.13 cm/a(图 3)。研究所得平均沉积速率和陈才俊测得的 4.17 cm/a 接近,比王爱军测得的 3.3 cm/a 要大,可见,本文测得的沉积速率与前人研究基本一致,由于本文首次测出了王港地区 ^{210}Pb 的本底值,因此,取得的沉积速率结果更接近事实。平均沉积速率的具体计算过程如下:

$$y = 3.0175e^{-0.0075x} \\ - \lambda t = -0.0075x$$

$$\lambda = 0.031 a^{-1}$$

$$D_R = \frac{x}{t} = \frac{\lambda}{0.0075} = \frac{0.031}{0.0075} = 4.13 \text{ (cm/a)}$$

2.2 王港潮滩重金属归一化标准元素的选取

Li 等是地壳中稳定的元素,其它元素和它的关系往往代表自然和人文的影响力大小,如果与稳定性元素的相关性强,且呈正相关,则代表该元素主要是受当地地球化学元素控制,是岩石风化的碎屑产物 [23]。

研究表明 Zn 与 Li 的相关性较强 (表 1) 相关系数非常显著,超过了 0.800,可见潮滩重金属 Zn 是比较稳定的,来自岩石风化的可能性较大。Pb、Cu 与 Li 成明显的负相关,其中 Pb 的负相关达到 -0.786,可以推断 Pb、Cu 的来源与 Li 不同。

从高中低滩 4 根柱状样重金属垂直方向含量来看 WG02、WG03、WG04 有趋同性,Zn、Pb、Cu 等重金属的含量都是由表层向下逐步降低,这与潮滩的沉积物的组成颗粒粒度、粘度有关。Pb、Cu、Zn 与沉积物平均粒径的相关系数分别是: -0.463、-0.195、0.840,其中 Zn 与粒度的相关性较强,相关系数为 0.840 (表 2)。以上各种重金属与沉积物的粘土组成的相关性都成显著关系,其中除去 Cu 呈负相关外其余皆呈正相关的关系。这进一步证明重金属与细粒沉积物有较好的亲和性。为除去粒度效应带来的影响,常使用地球化学性质稳定的元素作为标准元素对所测元素进行归一化处理,来除去沉积物粒度对化学元素含量的影响。所选元素必须能反映当地沉积物元素的变化趋势,通过对王港潮滩化学元素与柱状样中粘土相关性研究,发现王港潮滩中 Li 和粘土的相关性比 Al 和粘土的相关性大 (在显著性

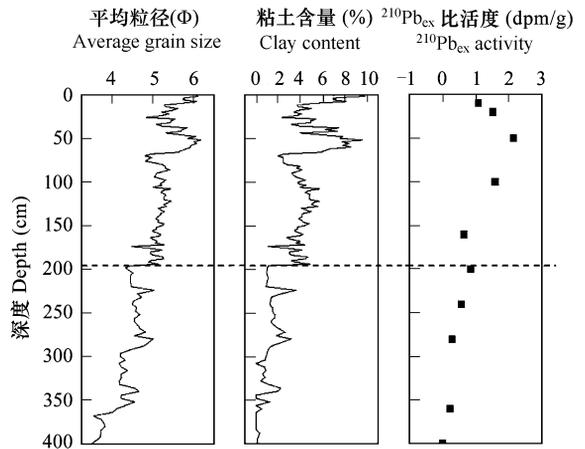


图 2 王港 400cm 深柱 WG05 的平均粒径、黏土含量、²¹⁰Pb_{ex} 比活度随深度变化

Fig. 2 Variations in sediment mean grain-size, clay content, ²¹⁰Pb_{ex} activity in the sediment profile WG05

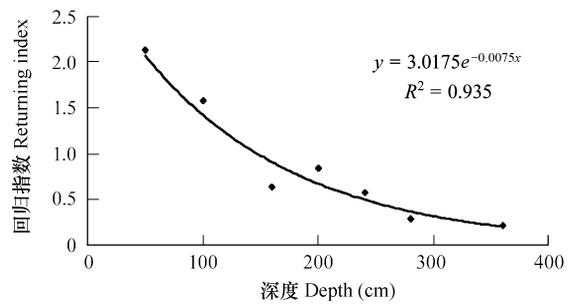


图 3 ²¹⁰Pb_{ex} 比活度指数回归分析

Fig. 3 Returning analysis in index number of ²¹⁰Pb_{ex} comparing to live one degree

表 1 王港潮滩重金属之间的相关性分析矩阵

Table 1 Matrix of heavy metal relativity about Wanggang sea-shoal

重金属 Heavy metal	Pb	Cu	Zn	Li	Al
Pb	1.00	0.881	-0.322	-0.786	0.213
Cu	0.881	1.00	-0.315	-0.618	0.594
Zn	-0.322	-0.315	1.00	0.847	-0.566
Li	0.756	-0.618	0.847	1.00	-0.375
Al	0.213	0.594*	-0.566	-0.375	1.00

* 代表 P < 0.05 水平上显著 Represents significance in level P < 0.05

表 2 王港潮滩沉积物粒度与重金属相关性分析矩阵

Table 2 Matrix of relativity between heavy metal and sedimental granularity about Wanggang sea-shoal

项目 Item	Al	Pb	Cu	Zn	Li
平均粒径 Mean	-0.68	-0.463	-0.195	0.840	0.890
含沙量 Sand (%)	-0.403	0.036	-0.036	-0.295	-0.649
粉砂含量 Silt (%)	0.304	0.107	0.429	0.579	0.443
粘土含量 Clay	-0.628	0.894	-0.977*	0.503	0.764

注 表中 * P < 0.05 水平上显著 Represents significance in level P < 0.05

$p < 0.05$ 水平上相关性达到 0.764) ,而且 ,前文研究可知 ,三种重金属 Pb、Cu、Zn 与 Li 均具有很好的相关性 ,因此选择 Li 作为归一化标准元素。

2.3 潮间带重金属现代累积变化规律

按照测得的王港地区现代平均沉积速率 4.13 cm/a 进行测年计算 ,并以 Li 作标准化元素对 3 种重金属 Cu、Zn、Pb 进行归一化处理。研究发现 ,王港潮滩 Cu、Zn 的归一化值在近 15 a 内 (根据沉积速率计算 ,反映在表层下 0 ~62 cm 的层面深度上)相当稳定 ,其中 Cu 的波动范围在 0.4 ~2 之间 ,Zn 在 1.5 ~2.6 之间狭小的范围内波动 (见图 4) ;这说明 ,王港潮滩的 Cu、Zn 含量比较稳定 ,其积累主要来自于地壳风化 ,受物源和沉积环境等自然因素控制较大 ,受人类活动影响较小。而 Pb 归一化值在 4 个柱状样中 ,都表现出随时间的变化发生了较大的波动。在 WG01 柱表现为 ,1991 年 ,重金属 Pb 归一化值达最大值 ,1991 ~2000 年 ,表现为下降趋势 ,2000 年达到谷底值 ;其后 ,又表现为上升趋势。WG02 表现为 ,1991 年达到峰值 ,1991 ~1995 年处于下降趋势 ,1995 ~1997 年上升 ,1997 ~2002 年处于稳定的状态。WG03 是比较特殊的 ,其 Pb、Cu、Zn 的归一化值都远比其它柱状样高。其原因是该柱状样靠近王港河的上游 ,而王港河流经近新建开发区 ,皮革、冶金、制药、化工等企业污水排放到王港河 ,污染的河水对王港潮滩重金属的积累起到了很重要的贡献。该柱状样显示 ,1992 ~1997 年 ,重金属积累大幅度上升 ,这正与王港潮滩的工业开发处于同一时期 ,反映了工业产业的调整对重金属污染有重要贡献。1997 年后 ,重金属含量呈下降趋势 ,这与王港地区加大污染治理 ,优化产业结构 ,提高高新工业比例有关。WG04 除了 1991 年表现出异常的峰值外 ,其余年份重金属的归一化值相当稳定 ,说明该取样点重金属元素主要是受当地化学地质控制 ,是岩石风化的碎屑产物 ,人为影响不明显。从 400 cm 深柱来看 ,1935 年以前 ,重金属归一化指数基本稳定 ,1936 ~1971 年 ,出现了缓慢下降的趋势 ,1971 ~1999 年 ,出现上升趋势 ,但幅度不大。总体来看 ,王港地区潮滩重金属 Zn、Cu 主要受地壳化学元素的控制 ,即物源

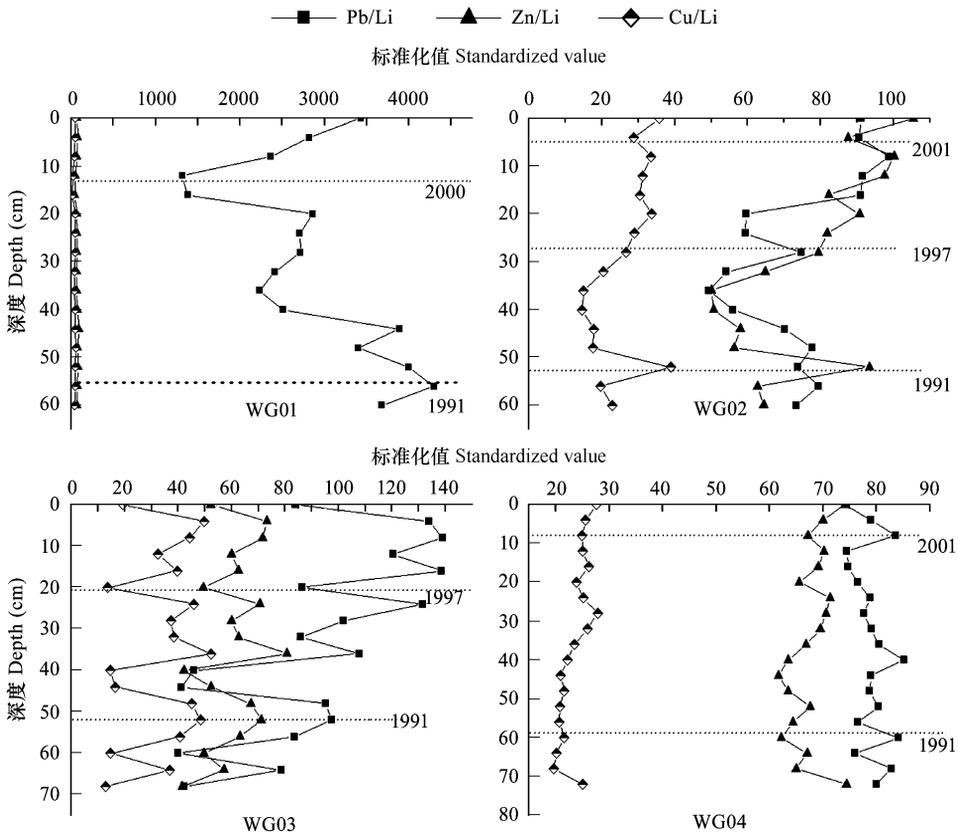


图 4 归一化后重金属累积变化规律

Fig. 4 Regulation of the heavy metal after return a turn

控制,人类经济活动对重金属 Zn、Cu 的累积贡献率不明显,而对 Pb 的累计有一定的贡献率。

2.4 信息维数计算及结果分析

为了定量化研究王港潮滩重金属受人类影响的规律性,引入了分形理论。研究采用王港潮滩柱状样重金属标一化值数据,以 $\ln N(r)$ 为纵坐标, $\ln r$ 为横坐标做散点图(见图 5),研究显示,散点图存在明显的标度区,说明分形标度特性明显,符合分形规律。

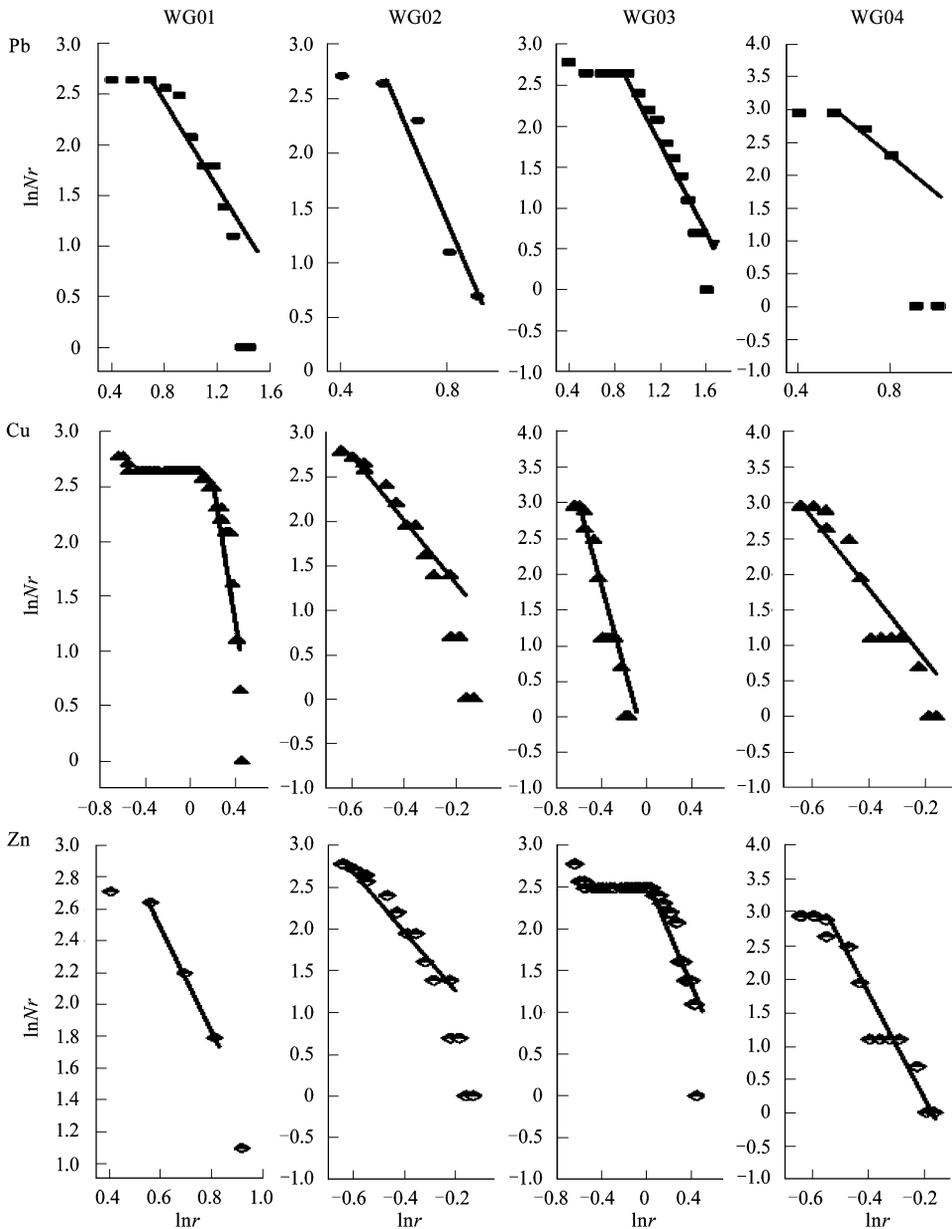


图 5 王港潮滩重金属归一化值分布体系的双对数坐标图和标度区

Fig. 5 The mark diagram double logarithms and mark degree district of Return a turn a value to distribute system on Wanggang tidal-land heavy metal

重金属 Pb 取 $r_0 = 1.5$ $\Delta r = 0.5$; Cu 取 $r_0 = 0.5$ $\Delta r = 0.025$; Zn 取 $r_0 = 1.5$ $\Delta r = 0.025$; 测的到一系列的重金属信息维数,以 $\ln r$ 为自变量 x , $\ln N(r)$ 为因变量 y ,经回归拟合得到一组回归方程(见表 3);其中回归方程的斜线斜率即为信息分维数 D 。拟合直线段的起点和终点对应的横坐标值分别为标度不变的下限和上限,起点和终点所对应的纵坐标值的差即为服从分形分布点位的频率。从拟合结果来看,回归方程的判定系数 R^2 除去 WG01 和 WG03 柱状样的 Cu 的回归判定系数较小(分别为 0.571 和 0.436)外,其余均较大。方差分析

得 F 值也较大,说明方程拟合较好。剔除 R^2 值较小的两个特殊回归方程,其余的双对数分形标段特性明显,符合分形规律。即符合:

$$N(r) \propto r^{-Df}$$

表 3 王港重金属系统分维数

Table 3 Values of fractal dimension of tourist heavy metal systems in Wanggang

柱状样号 Core	重金属 Heavy metal	回归方程 Regression equation	D	R^2	A	F	Sig.
WG01	Pb	$\ln Nl = 4.316 + 2.5739 \ln r$	2.5739	0.772	4.316	33.928	0.000
	Cu	$\ln Nl = 2.577 + 0.236 \ln r$	0.236	0.571	2.577	18.621	0.001
	Zn	$\ln Nl = 4.194 + 3.112 \ln r$	3.112	0.895	4.194	25.571	0.015
WG02	Pb	$\ln Nl = 4.779 + 4.27 \ln r$	4.27	0.859	4.779	18.247	0.024
	Cu	$\ln Nl = -0.282 + 5.218 \ln r$	5.218	0.898	0.282	133.559	0.000
	Zn	$\ln Nl = 5.1 + 4.805 \ln r$	4.805	0.821	5.1	13.773	0.034
WG03	Pb	$\ln Nl = 4.183 + 2.117 \ln r$	2.117	0.824	4.183	60.806	0.000
	Cu	$\ln Nl = 2.382 + 0.387 \ln r$	0.387	0.436	2.382	18.621	0.001
	Zn	$\ln Nl = 4.994 + 4.536 \ln r$	4.536	0.934	4.994	56.967	0.002
WG04	Pb	$\ln Nl = 5.825 + 5.47 \ln r$	5.47	0.754	5.825	12.233	0.025
	Cu	$\ln Nl = -0.941 + 6.399 \ln r$	6.399	0.952	0.941	299.919	0.000
	Zn	$\ln Nl = 5.757 + 6.268 \ln r$	6.268	0.926	5.757	37.308	0.009

通过大量得数据分析得出王港地区重金属 Pb 的分维值范围在 2 ~ 5.5, 平均值为 3.608; Cu 的分维值范围在 5 ~ 6.5, 平均值为 5.8085 (剔除效果不明显的两个回归方程后的数据); Zn 的分维值范围在 3 ~ 6.5, 平均值为 4.68。从分维数可以得出, 由于 Pb 的分维数最低, 表明王港地区潮间带潮土中重金属 Pb 的分布体系较为集中, 自组织能力高, Pb 在垂直方向的积累差异较大。由于这是归一化后的 Pb 结果, 表明 Pb 在积累过程中受人类因素的影响相对显著, 这与上文关于 Pb 在垂直方向上积累规律的结论是一致的。分维数很好地反映和验证了实际试验的结果的有效性, 这说明王港地区存在较明显的人为 Pb 污染, 应值得高度警惕。3 种代表重金属中, Cu 的分维值最大, 平均值为 5.8085; Zn 的分维值次之, 其平均值为 4.68。表明, Cu 体系的自组织程度较低, 在垂直方向上积累变化小, 也就是说王港潮滩中重金属 Cu 随时间的积累变化较小, 这表明, 王港潮滩重金属 Cu 主要受地球化学元素控制, 人类活动的影响较弱。重金属 Zn 的表现居中, 重金属 Zn 的污染也较小, 随时间的积累变化率也较低。从 4 个柱状样的重金属归一化分维值来看, 也有一定的差异性。Pb 的分维数大小依次为: WG04 > WG02 > WG01 > WG03; Zn 的分维数大小依次为 WG04 > WG02 > WG03 > WG01; Cu 的分维数大小依次为 WG04 > WG02 (wg03 和 wg01 由于误差大被剔除)。可见, 在 3 种重金属的回归模型中, WG04 的信息维值都最大, 其次是 WG02。这说明 WG04 和 WG02 中重金属的分布系统自组织程度低, 重金属积累分布随时间变化较小, 受人类扰动程度低。而相应的 WG01 和 WG03 信息维值较低, 表现出较高的自组织性。从王港潮滩重金属积累的分维数来看, 平均值都大于 2, 重金属归一化后呈现接近均质的状态, 说明王港潮滩重金属 Cu、Zn 的积聚主要受本地地球化学元素的控制, 只是 Pb 的分维值相对较低, 自组织性较强。随着人类活动对潮滩重金属贡献率的增加, 其重金属分维值将逐步降低, 自组织能力将增强, 分形越不明显。研究发现, 对 Cu 的回归中有两个回归结构信度较低, 这说明, 不是所有的重金属分布都符合分形, 要具体问题具体分析。总之, 对比上文重金属垂向分布图, 可以看到, 分形研究得到的结论较好得反映了潮滩重金属的积累演变规律。考察重金属分布的分维值, 可以在一定程度上反映该地环境变化受人类影响的强度, 分形理论将在一定程度和范围内成为定量化研究指示环境压力的有效手段。

3 小结

(1) 王港潮滩现代平均沉积速率为 4.13 cm/a。

(2) 归一化前, 王港潮间带重金属垂直方向的含量具有趋同性, Zn 与 Li 的相关系数显著; 归一化后, Cu、

Zn 的归一化值在近 15 a 内相对稳定,其中 Cu 的波动范围在 0.4~2 之间,Zn 在 1.5~2.6 之间狭小的范围内波动。而 Pb 归一化后在 4 个柱状样中,都表现出随时间的变化发生了较大的波动。

(3) 王港潮滩重金属 Cu、Zn 归一化值的信息维数高,系统的结构松散,自组织程度低,王港潮滩重金属 Cu、Zn 的人为污染较轻,主要受地球化学元素的控制。Pb 的归一化值的分维值较低,自组织程度较高,说明存在一定程度的 Pb 污染,对此不容忽视。

(4) Pb 的分维数大小依次为:WG04 > WG02 > WG01 > WG03;Zn 的分维数大小依次为 WG04 > WG02 > WG03 > WG01;Cu 的分维数大小依次为 WG04 > WG02。3 种重金属的回归模型中,WG04 的信息维值都最大,其次是 WG02。这说明 WG04 和 WG02 中重金属的分布系统自组织程度低。而相应的 WG01 和 WG03 信息维值较低,表现出较高的自组织性。从王港潮滩重金属积累的分维数来看,平均值都大于 2,重金属归一化后呈现接近均质的状态,说明王港潮滩重金属 Cu、Zn 的积聚主要受本地地球化学元素的控制,只是 Pb 的分维值相对较低,自组织性较强。

通过信息维数的分析,可以研究反映重金属分布系统的等级体系,寻求系统信息熵的变化率,并根据变化率来考查控制参数变量对系统结构影响的变化快慢,从而考虑如何控制参数的变化来调节系统结构变化的趋向。它是通过分形技术手段对系统等级结构优化绩效的考察依据,是量化研究重金属积累规律的有效手段,是分形技术和系统技术联系的桥梁。分形理论和混沌理论是相结合的,当分维值和参数进入一定的范围,系统就进入混沌状态,判断系统何时进入混沌参数域,是下一步研究的首要问题。

References :

- [1] Wang Y, Zhu D K. The coastal Geography. Beijing: the Higher Education Book Concern, 1994. 36—53.
- [2] Yu W J, Zou X Q, Zhu D K. The Research to Issues about Farm Households' Behavior in Jiangsu Province Beach and The Problem of Shoal-land Continuance Development. China Population Resource and Environment, 2006, 16 (3): 124—129.
- [3] Xu S Y, Tao J, Chen Z L, et al. The motive total amount characteristic of tide pool in Shanghai deposition thing heavy metals. Ocean and Lake. 1997, 28 (5): 509—515.
- [4] Zhu X H, Cai Y L. Fractal Analysis of Land Use in China. Scientia Geographica Sinica, 2005, 25 (6): 671—678.
- [5] Li J S, Cen Y G. The review of the city geography cent form research with forward-looking. Geography Science, 2000, 20 (2): 507—519.
- [6] Benguigu L, Czamanski D, Marinov M, et al. When and where is a city fractal? Environment and planning: planning and Design, 2000, 27: 507—519.
- [7] Sun Z G, Liu J S, Sun G Y, Wang J D. Application of Fractal Theory in Wetland Science. Geography and Geo-Information Science, 2005, 7 (4): 99—105.
- [8] Pan W B, Li D F, Tang T, Cai Q H. The fractal character of lake shoreline and its ecological implication. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23 (12): 2728—2736.
- [9] Ren M E. Sedimentation on tidal mud flat of Wang gang Area, Jiangsu. Collected Oceanic Works, 1983, 6 (2): 84—108.
- [10] Jia J J, Gao S, Xue Y C. Sediment dynamic processes of the Yuehu inlet system, Shandong Peninsula, China. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2003, 57: 783—801.
- [11] McManus J. Grain size determination and interpretation. In: Techniques in Sedimentology. Oxford: Blackwell, 1988. 63—85.
- [12] Goldberg E D, Koide M. Rates of sediment accumulation in the Indian Ocean. In: Geiss, Goldberg E D eds. Earth Science and Meteoritics. Amsterdam: North-Holland publishing Company, 1963. 90—102.
- [13] Cao Q Y, Shen D X. Chronology and Experimental Technology of the Quaternary. Nanjing: Nanjing University Press, 1988. 228—252.
- [14] Xu J H. The mathematics method in the modern geography. 2002. Beijing: Higher Education Press, 2002. 84—93.
- [15] Goldberg E D, Koide M. Rates of sediment accumulation in the Indian Ocean. In: Geiss, Goldberg E D eds. Earth Science and Meteoritics. Amsterdam: North-Holland publishing Company, 1963. 90—102.
- [16] Batty M. Cities as fractal: simulating growth and form. Crilly Teal. Fractal and Chaos. New York: Springer-Verlag, 1991. 43—69.

- [17] Arlinghaus S. Fractals take central place. *Geografiska Annaler*, 1985, 67 (B) 83—88.
- [18] Mandelbrot B B. *Fractal: Form, chance and dimension*. San Francisco: Freeman, 1977.
- [19] Mandelbrot B B. *The fractal geometry of nature*. New York: WHF reeman, 1982.
- [20] Wang D S, Cao L. Mentally dense, fractal land application. Hefei: Chinese Science Technique Publishe, 1995, 93~99.
- [21] Chen C J. Effect of increasing deposition and defending seashore by planting *Spartina Anglica* on beach in Jiangsu Province. *Marine Science Bulletin*, 1994, 13 (2) 55—61.
- [22] Wang A J, Gao S, Jia J J, *et al.* Contemporary Sedimentation Rates on salt Marshes at Wanggang Jiangsu, China. *Acta Geographica Sinica*, 2005, 60 (1): 61—70.
- [23] Zhang M K, Wang M Q, *et al.* Research on the soil heavy metals of latent pour to wash On Hangzhou. *Soil College Journal*. 2003, 40 (6) 915—921.

参考文献:

- [1] 王颖, 朱大奎. 海岸地貌学. 北京: 高等教育出版社, 1994. 36~53.
- [2] 于文金, 邹欣庆, 朱大奎. 江苏海涂区农户经济行为与滩涂资源的可持续发展问题研究. *中国人口. 资源与环境*, 2006, 16 (3): 124~129.
- [3] 许世远, 陶静, 陈振楼, 等. 上海潮滩沉积物重金属的动力累计特征. *海洋与湖沼*, 1997, 28 (5) 509~515.
- [4] 朱晓华, 蔡运龙. 中国土地利用空间分形结构及其机制. *地理科学*, 2005, 25 (6) 671~678.
- [5] 刘继生, 陈彦光. 城市地理分形研究的回顾与前瞻. *地理科学*, 2000, 20 (2) 507~519.
- [7] 孙志高, 刘景双, 孙广友, 王金达. 分形理论在湿地科学中的应用现状与前景展望. *地理与地理信息科学*, 2005, 21 (4): 99~105.
- [8] 潘文斌, 黎道丰, 唐涛, 蔡庆华. 湖泊岸线分形特征及其生态学意义. *生态学报*, 2003, 10 23 (12) 2728~2736.
- [13] 曹琼英, 沈德勋. 第四纪年代学及实验技术. 南京: 南京大学出版社, 1988. 228~252.
- [14] 徐建华. 现代地理学中的数学方法. 北京: 高等教育出版社, 2002. 84~93.
- [20] 王东生, 曹磊. 混沌、分形及其应用. 合肥: 中国科学技术出版社, 1995. 93~99
- [21] 陈才俊. 江苏滩涂大米草促淤护岸效果. *海洋通报*, 1994, 13 (2) 55~61.
- [22] 王爱军, 高抒, 贾建军, 等. 江苏王港盐沼的现代沉积速率. *地理学报*, 2005, 60 (1) 61~70.
- [23] 章明奎, 王美青. 杭州市城市土壤重金属的潜在淋洗性研究. *土壤学报*, 2003, 40 (6) 915~921.