

文章编号 1001-8166(2002)01-0069-09

潮滩沉积物重金属累积特征研究进展

王永红, 张 经, 沈焕庭

(华东师范大学河口海岸动力沉积和动力地貌综合国家重点实验室, 上海 200062)

摘 要 在分析总结国内外潮滩重金属研究现状和成果的基础上, 指出潮滩重金属来源的定量分析尚很不完整, 沉积物的物质组成、粒径、水动力作用、潮滩生物、河流输入量、人类活动等都对重金属在潮滩的分布有着重要影响。在垂岸方向, 重金属从高潮滩到低潮滩含量逐渐降低, 反应了水动力以及粒径对潮滩重金属的分布的控制; 沿岸方向, 淤涨岸段, 重金属含量低, 排污口严重影响着重金属的沿程分布, 重金属含量随离排污口的距离增大而呈指数减少; 垂向方向, 在许多地方重金属分布与人类活动、经济发展状况相吻合。生物活动使潮滩重金属的累计特征变得复杂, 改变了潮滩局部的微环境。与国内外河口重金属研究相比, 潮滩重金属的研究远远不足。沉积物中重金属常用研究方法, 如 Tessier 地球化学相连续提取法、Mesocosm 模型, 以及数值和现场模拟的方法的应用, 对潮滩重金属的研究将有很大帮助。在潮滩重金属的污染评价中, 生物标准较其它标准更为适合。

关 键 词 潮滩, 重金属, 累计特征

中图分类号 P343.5/P593

文献标识码 A

潮滩是海陆交替的过渡地带之一, 也是大气圈、生物圈、岩石圈和水圈的物质和能量集散地, 其物质和能量的转换远比其它地域迅速。一部分重金属随自然风化及人类活动的产物通过悬浮泥沙的底搬运累积于潮滩上, 使潮滩成为重金属的重要归宿之一^[1,2]。潮滩重金属除了直接对潮滩生物及通过食物链影响人类健康外, 还会由于潮滩水动力和生物活动的影响, 造成重金属的重新分布和释放, 如风暴浪期间, 悬沙夹带重金属在一个风暴周期内循环卸载, 产生重金属的“二次污染”, 直接危害近岸环境。因而潮滩重金属的研究有很重要的意义。

由于多种动力、生物和人类活动的影响, 使潮滩沉积物重金属的累计特征研究变得极为复杂。国外潮滩重金属的研究从 20 世纪 70 年代已有相关文章发表^[3]。随后的二三十年间潮滩重金属的研究得到蓬勃发展^[4,5], 其中尤以欧洲瓦登海^[6,7]、北海^[8,9]和波罗的海^[14-17]及其周围的潮滩的研究资料最为翔实。其中大多数的研究者多集中于二战后

经济发展时期重金属的历史研究^[18], 但一部分学者在研究中发现潮滩重金属的污染从 20 世纪初就已经开始^[16,19,20]。国内对潮滩重金属的研究则开始于 80 年代初期, 而相关文章的发表多见于 80 年代中期^[21]。随后, 关于潮滩重金属的污染的调查和评价逐渐开展起来^[21-31]。国内外研究广泛涉及重金属在潮滩的来源、赋存形态和转化规律^[22-26]、潮滩动力^[28]、沉积物粒径^[21,30]和潮滩生物^[31]等因素对重金属的累积特征的影响, 以及潮滩排污口重金属的污染等^[25,29]。

1 潮滩沉积物重金属的动力累积特征

潮滩的重金属主要来源于: 岩石及矿物风化的碎屑产物, 这些碎屑产物大部分通过河流输入河口或潮滩^[33]。这部分来源的重金属主要由河流流量的变化决定。当河流流量大时, 沉积物对重金属输移率也相应增大^[34]。由于人类活动(工业、农业和生活污水), 河流沿途挟带了大量重金属^[34], 使水中的

收稿日期 2001-02-21, 修回日期 2001-06-14.

* 基金项目: 国家自然科学基金项目“胶州湾流域生源要素流失与海湾富营养化演变过程”(编号: 40036010) 资助。
作者简介: 王永红(1969-), 女, 山东莱西人, 博士研究生, 主要从事海洋沉积研究。E-mail: yonghongw@hcm ail.com

溶解态重金属,通过吸附、沉淀以及生物作用而富集于潮滩^[35]。大气来源的重金属元素^[36],例如 Pb,大部分来自汽车尾气和工业废气的排放^[15]。海洋来源的海底侵蚀作用、海底火山热液作用等使深海与陆架区重金属经过潮汐、波浪等水动力作用,使一部分重金属沉积于潮滩上。这些不同来源的重金属在潮滩多种动力作用下产生了一系列的累积特征。

1.1 垂岸方向累积特征

与河口区受复杂活跃的水动力、上游来沙来水、温度和盐度变化等多种条件的影响不同,潮滩所受的动力主要是潮汐涨落和暴风浪的影响。潮滩颗粒物上重金属的浓度往往较水体高出几个数量级^[37,38],即重金属主要以颗粒态形式存在。特别是细颗粒物,对重金属元素的结合能力更强^[21,39]。潮滩滩面上的沉降滞后效应以及潮滩各带水深和动力条件的差异使细颗粒泥沙向高潮滩输移和堆积^[40],而冲刷滞后效应维持泥沙悬浮的最大水流流速与这些泥沙的临界侵蚀流速的不同,使得涨潮期间沉积在中高潮滩的细颗粒泥沙不易重新悬浮而被落潮流带回深水带^[40]。另外波浪从低潮滩传到高潮滩,波能损耗超过 80%^[40]。在这些因素的作用下,细颗粒悬浮向岸滩上部富集并堆积下来,使滩面沉积物粒径由海向岸逐渐变细。正是由于潮滩泥沙输移动力机制造成了重金属含量与所处的地貌部位密切相关,垂直海岸呈明显的带状分布。高潮滩与中低潮滩相比,重金属的含量呈显著富集,在一些高潮滩各元素 Cu、Zn、Pb、Cr、Cd 的含量为中低潮滩相应各元素的 1.5 ~ 9.8 倍^[28](图 1)。

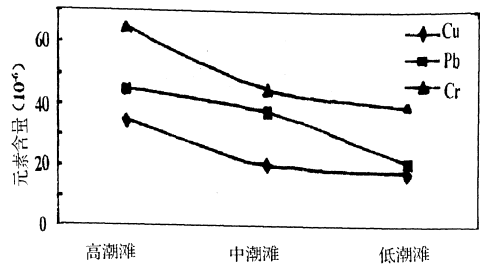


图 1 潮滩重金属元素垂岸分布趋势图
(以上海潮滩为例)^[28]

Fig.1 The trend map of heavy metal in vertical direction in tidal flat (Shanghai tidal flat)^[28]

由于沉积物重金属的含量与沉积物的粒径关系密切,不同的研究者使用不同的粒径范围,如表 1。

之所以出现用不同的粒径分析沉积物重金属的含量,可能的原因是各地沉积物的性质不一,研究者采用不同的筛或滤膜。不同范围粒径的选择使颗粒物中的重金属百分比不同粒度间对比性变差^[30],研究某个固定粒径范围的沉积物重金属含量便于相互参考与对比。在不能固定到某个粒径范围内时,可以参考将不同粒度组成的样品重金属测定值均外推到 16 μm 粒径 100% 时的数值的方法来表示该区域的重金属的含量。

如果为了对重金属总量进行校正,可以进行重金属的归一化研究^[30]。例如沉积物中 Al 的含量随粒度的减小而线性增加,可用 Al 作参考研究,清除

表 1 不同研究者所用的不同沉积物分析范围

Table 1 The different analysis ranges of sediments used by the different authors

粒径范围	特 点	应 用	文 献
16 μm	沉积物中重金属的含量与其中 16 μm 颗粒所占的百分数之间存在着良好的线性关系。	所有不同粒度组成的样品重金属测定值均外推到 16 μm 粒径 100% 时的数值来表示该区域的重金属的含量	[21, 30, 28]
20 μm	重金属相对富集于 20 μm 的细颗粒中,且随着颗粒变细,各金属的地球化学相含量的绝对值增高,而相对比例变化不明显	与 16 μm 粒径范围在技术上很难区别	[21, 41]
4 μm	在河流中大于 50% 的金属吸附于小于 4 μm 的颗粒中	在潮滩总沉积物粒度的百分含量一般 5%,其元素含量对沉积物元素总量的贡献有限	[43]
2 μm	沉积物中小于 2 μm 的重金属含量是峰值粒级	在潮滩总沉积物粒度的百分含量一般 5%,其元素含量对沉积物元素总量的贡献有限	[28]
63 μm	沉积物中粘土与粉砂的分界线		[44]
11 ~ 44 μm			[45]

沉积物粒度对重金属的影响。

1.2 沿岸方向沉积物重金属累积特征

研究表明水动力条件等因素对潮滩重金属的沿岸分布存在重要影响。在水动力条件较弱的淤涨岸段,重金属明显富集,而在水动力较强的冲淤交替段,重金属含量普遍较低。河口附近潮滩的沿岸分布也少见报道。但据 Basu^[66]等统计威尼斯泻湖的 163 个站位资料后,发现随着与泻湖口门距离的增加,重金属的浓度呈指数衰减。

目前滨海大城市普遍使用沿岸排污入海的方式处置工业废水和生活污水,使排污口对重金属的沿程分布有重要影响。虽然海水对污染物有一定的稀释净化能力,但由于排污过程中重金属的地球化学相难以降解,可通过悬沙泥土吸附和搬运重新累积于沿岸滩地中。由于潮滩水动力的影响,使排污口附近重金属的沿程分布有其独特的特征。如上海市西区排污口^[29],其重金属污染物的峰值并不在排污口内,而是沿着岸线随涨落潮向两侧输移,在上下约 1 km 的范围内,沉积物中的重金属的含量反而升高。

由于排污口排污量、排污设备、潮滩动力强度不一,使潮滩受排污因素的影响不一样。中国上海市西区、南区和吴淞口三大排污口都为岸边排放。污水从排污口排出后,首先在潮间带和潮下带浅水区向外扩散,在此过程中,部分重金属直接被沉积物吸附,或随吸附的悬浮颗粒在排污口附近沉降^[24],使排污口潮间带底泥中重金属元素总量超过当地标准值。在挪威 Mjelstad 附近海域^[46],将排污管道深入海水中,深达 30 m,最深达 600 m,使污水排入深海。海底沉积物的重金属相应增加,而岸边重金属含量降低。但挪威 Mjelstad 附近海域的研究表明,即使深水排放,重金属通过泥土吸附和搬运的重新累积仍然对海岸环境产生重大影响,并建议尽量减少通过排污处理系统向外海较清洁的水域排放污水^[46]。

1.3 垂向沉积物重金属累积特征

Hoeck 等^[6] 1996 在德国 Buesum 西北侧瓦登海的潮滩上打了 3.38 m 长的沉积岩芯,对重金属 Pb、Cu、Zn、Cd 的长期污染状况做了分析。发现自 1875 年以来,Pb、Cu、Zn 增加了 1~3 倍,Cd 增加了 11 倍。柱状样中所有重金属的含量在岩芯 1 m 处开始显著增加,并逐渐达到现代水平。

纽约 Tivoli 南岸潮滩六孔岩芯表明 50 cm 以下为本区的背景值^[47],分别为 12×10^{-6} (Pb), 10×10^{-6} (Cu), 40×10^{-6} (Zn)。从 6 孔沉积物重金属垂向分布模式,可知 Tivoli 潮滩尽管范围不大,但沉积

环境变化很大。其共同点是 3 种重金属元素从表层到 13~15 cm 处有一峰值,从 18~20 cm 处重金属含量迅速降低,到 50 cm 处达到本区本底值。由于这三种元素的峰值与工业革命和二战时期经济快速增长时期相一致,可以推测社会因素,而不是生物地球化学因素来解释剖面的峰值。另外,3 种元素的剖面极其相似。但 Pb 元素是由于燃气排放从大气进入 Tivoli 湾,而 Cu、Zn 两种元素是污染物排放和土壤本身的来源,一般是通过表层水进入湾内。这完全不相关的 3 种元素却存在惊人的相似剖面,可以推断其可能在进入湾以前曾在某处汇集并停留了相当长的时间^[47]。

长江口南岸潮滩自 54 cm 以下,沉积物中的重金属 Pb、Cu、Zn、Cd 的总量较低,与本区的本底值相当^[27],代表了未污染的自然状况。按该区的沉积速率计算,重金属随深度上升与本区污水排放的年代(70 年代初)相吻合。54 cm 以上,即 70 年代,重金属的含量显著增加,远高于本区本底值^[28]。

在锦州湾湾边潮滩的芯样,根据²¹⁰Pb 放射性测定污染历史,41 cm 处潮滩重金属的含量表明在 1941 年以前,本区未遭受工业污染,即 41 cm 以下为背景值,Zn 的最高含量在沉积物顶部以下 5 cm 处,其值为 520×10^{-6} ,相对应于 1975 年左右污染达到峰值^[48],Pb 和 Cd 的高值出现在沉积物顶部以下 10 cm 处,为 86×10^{-6} 和 10×10^{-6} ^[48],即 1970 年这两种元素的污染最为严重。从国内外关于重金属垂向分布研究来看,各个区域的本底值差异大,垂向剖面各不相同,表明各区潮滩重金属的污染历史及程度。大部分重金属含量高的区域是由于工业废气物的结果,是人类活动的直接影响所致。

2 潮滩生物对潮滩沉积物重金属累积特征的影响

潮滩区生物繁盛,潮滩上的生物都对重金属的富集和运移有一定的作用,其生物行为(吸收、附着、掘穴、排泄、尸体)等对重金属的富集运移有着非常重要的作用。潮滩动物在吸收营养物质的同时,吸收了部分重金属,一部分重金属在动物排泄过程中被释放到环境中,随同排泄物进入底质^[49,50]。生物活动改变了元素的地球化学相,有些生物体从表面进入沉积物下一定深度,引起重金属在潮滩垂向运移^[11],从而使潮滩局部微环境发生改变。

2.1 潮滩生物重金属累积特征的影响因素

重金属的形态、生物的可累积与可利用量^[51]、

潮流动力与地貌因素等都对潮流重金属的累积产生影响。由于环境中重金属以多种形式存在^[52],不同形态的同一种重金属元素在生物体内的积累及对生物的影响是不一样的^[60]。河口区及其附近潮流生物对重金属的积累存在地点间与部位间的差异和个体差异,从而使重金属的累积量影响潮流重金属的分布。因此在研究重金属对水生生物的作用时,应搞清楚它的存在形式。

重金属的可积累量是国外研究重金属生物过程的一个重要方面,有些形态的重金属可被生物吸收,而另外一些赋存形式的重金属不能。当环境中某种重金属含量高时,它对生物的影响要看它的可积累量。底质中有机质含量、淤泥含量、底质间隙水系统中的酸可溶硫(AVS)的含量决定重金属的活动性和可利用量。潮流水动力因素、盐度、pH 值、温度及有机质这些条件的改变,如低盐度可增加生物对部分重金属的积累^[35,53],从而影响到重金属在潮流上的分布和富集。

2.2 潮流重金属植物累积特征分析

虽然重金属在生物体内的累计和生物对重金属的运移和富集机制已作了大量的研究工作,但实际上生物重金属的定量研究还很薄弱。利用植物来进行潮流重金属的研究中,对潮流上藻类^[53]、高等植物^[54-56]的研究已经有一些进展。潮流植物,主要有浮游植物(藻类)、海草和高等植物(红树林)。特别是红树林,除了可以拦截细颗粒物,使底部沉积物重金属含量增加外,更重要的是通过其茎、干和落叶使潮流重金属迁移和富集。一般来说,红树林落叶的重现率为总落叶的 56%~100%,约 7% 的总落叶要输入大海^[57]。由于落叶在沉积物中的滞留时间少于 6 天,则在落叶分解的头几天沉积物不发生重金属累积。在巴西东南的实验红树林,通过红树林落叶损失的重金属量为 $Mn = 0.097 \text{ kg/hm}^2 \cdot a$, $Fe = 0.049 \text{ kg/hm}^2 \cdot a$, $Zn = 0.002 \text{ kg/hm}^2 \cdot a$ 。这些输出量只占原来沉积物中重金属总量的 0.01%^[57],也就是说,重金属经过红树林吸收后,只有很少一部分又重新通过落叶等进入沉积物。实际上红树林是重金属污染物运移的一道屏障。由于潮流植物生长周期性的变化,引起潮流沉积物重金属含量的季节性循环,在植物生长期内,潮流重金属呈现明显的低含量。这是由于 Ni、Cu、Zn、Pb 都被植物吸收。在特拉华河口潮流^[58],季节性变化使植物中重金属的含量变化如下: Cd 在生长季节(7~9 月份)由原来的 0.6 ± 0.1 增加到 $0.9 \pm 0.2 \text{ mg/m}^2$, Zn 由 $58.3 \pm$

10.1 增加到 $63.4 \pm 18.8 \text{ mg/m}^2$,而且植物根的重金属含量最高,其次为叶和茎。

3 潮流重金属研究方法及评价

3.1 潮流重金属研究方法

对一般沉积物重金属的研究方法也适用于潮流重金属的研究,如对重金属元素的总量进行测定的酸法和碱法;对重金属元素的赋存形式进行研究的连续提取法及其后来的改进,筛析、膜过滤等测定沉积物重金属元素的含量,都已发展的较为成熟。值得一提的是使用室内模拟方法,如微宇宙^[59,60]方法,可以对重金属在生态系统的行为的研究更加系统和细化。这种方法可用于潮流藻类^[53]、高等植物^[56]、软体动物^[61,62]等。简单的数学模型,如在纽约 Tivoli 南岸潮流^[47],作者用简单的模型模拟本区域不同来源的 Pb、Cu 的垂向变化趋势。输入每年 Pb、Cu 的浓度值,可以发现两者与其深度并无任何联系,其相关系数 $r = 0.11$;设定本区的沉积速率为 0.7 cm/a ,50 年后输出的结果可以发现 Pb、Cu 的含量与深度已有明显的相关性,其 $r = 0.97$ ^[47]从而证实作者关于 Pb、Cu、Zn 三种重金属元素之所以有相似的剖面是其先在某处汇集一段时间后进入 Tivoli 南岸潮流的结论(如图 2)。另外由于 Fe 的还原对重金属元素等的地球化学循环有一定的控制作用^[27],通过磁铁矿等氧化铁的磁性测量,可以快捷地识别铁的还原以及重金属的释放和迁移。因此磁学的方法也可很好地用于重金属的研究^[27]。

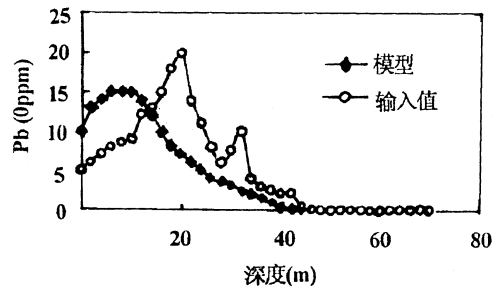


图 2 50 年后沉积物重金属元素(Pb)浓度与深度相关性数学模拟^[47],在底部浓度为 0 处,近年来的峰值和近年来的分布趋势,其模拟值与实测值吻合较好

Fig. 2 The simulation on the relation of density and depth of heavy metal sediment (Pb) (Features observed at 1. near zero concentration in the distant past, 2. peak levels in the recent past, 3. declines in the past few years)^[47]

3.2 潮滩重金属污染评价标准

在评价沉积物重金属的环境影响方面,虽然许多学者对评价的方法和标准作出了有益的探索和研究,但目前多根据沉积速率计算,认为一定深度下的沉积物未受人类活动的影响,并将其重金属含量作为背景值,但易受采样点的位置、采样工具、采样深度、粒径和分析方法的影响。常用的沉积物评价标准方法中有页岩参数、地质积累参数和生物浓度参数,这些方法也可以用于潮滩重金属污染的评价。文献[63]有关于根据地质积累指数标准将沉积物中主要重金属污染程度的等级划分。

不同的标准会得出不同的结果,地质积累指数的基础是全球页岩标准,而不同的研究者提出的页岩标准本身就不尽相同,特别考虑到潮滩生物的繁盛,用生物标准更适合潮滩重金属的评价。国内外^[67,68,64]曾用两种双壳软体动物的金属污染指数来评估不同地点的污染程度。如在胶州湾^[67]用牡蛎(*Oystrera Densetam ellosa*)和贻贝(*Mytilus galloprovincialis*)等双壳类动物评价环境,1997年的Cd、Pb、Zn等元素的含量分别为1990年的11、4和6倍^[67],反应在胶州湾重金属污染的加剧。用生物表示重金属的污染程度时应注意不同生物对不同重金属元素的敏感程度不一样,如贻贝(*Mytilus Edulis*)对Cd和Hg是极好的指示作用,而对Zn的指示则无多大的价值^[65]。而藤壶(*Catophragmus Popym erus*)是对Cd最为敏感的生物^[65]。因此在评价时应注意由于不同形态的同一重金属元素在生物体内的积累量及对生物体的影响不一样。

加拿大安大略省环境与能源部(1992)制定的环境质量(重金属)评价标准分3级(表6)^[63]。安全级,此时在水生生物中未发现中毒效应;最低级,此时沉积物已受到污染,但多数底栖生物可以承受;严重级,此时底栖生物群落已遭受明显的损害(表2)。

表2 生物毒性效应制定沉积物质量评价标准($\mu\text{B/g}$)^[63]

Table 2 The standard of evaluation on sediment quality according to the biotoxicity

金属	As	Cd	Cr	Cu
最低值(清洁环境)	6	0.6	26	16
严重污染	33	10	110	110

现在我国使用的是“海洋污染生物污染评价标准”^[68],其实真正适用于潮滩生物的重金属污染评

价仍未有统一的标准。

4 潮滩重金属累积特征研究的主要结论、问题和展望

4.1 主要结论

(1) 潮滩动力基本控制了潮滩表面沉积物重金属的分布格局。潮滩重金属的垂岸分布特征是高潮滩到低潮滩重金属的含量逐渐降低,潮滩重金属沿岸分布主要以潮滩水动力控制,但排污口严重影响重金属的沿程分布,在水动力弱的环境条件下,重金属含量随离排污口的距离增大而呈指数减少,而在水动力强的区域,排污口重金属的累积主要受水动力的控制,其垂向分布由于各区本底值差异大,剖面各异,但基本反应了重金属的污染历史及程度,与社会经济增长的变化相一致。

(2) 潮滩生物使潮滩重金属累积特征变得复杂。生物的生长期、生物的不同部位,对重金属的敏感度不一,从而影响生物对重金属的总量累积。但同时可以利用潮滩生物的累积来评价潮滩重金属污染程度。另外,潮滩植物(如红树林)通过吸收沉积物重金属,大大减少了潮滩沉积物重金属的含量。

(3) 随着重金属的研究手段和方法的进步,潮滩重金属研究也在逐步向定量化研究发展。如进行室内模拟实验和磁学的方法,对潮滩沉积物的 Mesocosm 模型研究了解重金属的分布、累积和释放,或某一研究方面建立一定的数学模型或进行一定的地球化学统计工作。

4.2 主要问题和展望

(1) 潮滩重金属的研究在近30年取得了很大的进步,但国内潮滩沉积物重金属研究仍相当薄弱。如潮滩沉积物重金属主要来源于岩石及矿物风化的碎屑产物、人类活动、大气和海洋,但区分这几种来源所占的比例是件有意义而困难的工作。而且沉积物重金属的研究多集中于各种元素的总量,其它形态的重金属研究尚未开展,而且缺乏统一的标准。

(2) 潮滩重金属无论在沿岸、垂岸或垂向上的分布研究都已经有了基础,但大面积密集取样测试和数学上采用合适的方法是使潮滩重金属的研究更为准确和达到量化的重要方面。

(3) 潮滩重金属再次释放的问题仍需深入的研究。考虑到再次释放的复杂性,较为准确描述暴风浪作用下的潮滩重金属的重新分配仍是件困难的事,但室内建立模拟实验是较为可取的方法。

(4) 研究重金属在潮滩沉积物中的粒度选择仍

缺乏统一的范围。在由于区域沉积物性质差异不能统一适用一定范围粒度来描述重金属的含量时应采取一定的方法外推到一定粒径范围内。虽然 $16\ \mu\text{m}$ 已被很多学者采用,但要成为统一的标准仍需大量的研究工作。

(5) 潮滩生物对重金属的累积与运移作用也应是今后的研究热点。虽然潮滩植物如红树林重金属在实验区的定量分析已经开始,其它生物体对重金属的富集运移作用,以及用何种生物指标建立潮滩重金属的污染的评价标准仍是目前急需解决的问题。

参考文献(References):

- [1] Williams S C, Simpson H J, Olsen C R, et al. Sources of heavy metals in sediments of the Hudson river estuary[J]. *Mar Chem*, 1978, 6(3): 195-213.
- [2] Tao Jing, Xu Shiyun. The sedimentary and distribution of heavy metal in tidal flat of Shanghai area[A]. In: *Geomorphology, Environment and Development*[C]. Beijing: China Environmental Science Press, 1995. [陶静, 许世远. 上海地区潮滩沉积与重金属元素分布[A]. 见: 地貌·环境·发展[C]. 北京: 中国环境科学出版社, 1995.]
- [3] De Groot A F, De Guey G J, Zegers C. Contents and behavior of mercury as compared with other heavy metals in sediments from the rivers. Rhine and Ems[J]. *Geologic Mijnbouw*, 1971, 50: 393-398.
- [4] Jenne E A. Trace element sorption by sediments and soils: sites and process[A]. In: *Molybdenum in the Environment*[C]. New York: Marcel Dekker, 1977: 425-553.
- [5] Christensen E R, Scherfig J, Koide M. Metals from Urban Runoff in Dated Sediments of a very shallow estuary[J]. *Environmental Science and Technology*, 1978, 12(10): 1168-1173.
- [6] Hoek M, Runte K H. Heavy metal concentrations in a sediment core from the tidal flats Northwest of Buesum[J]. *Meyniana*, Kiel, 1996, 48: 35-48.
- [7] Doschinsky A, Gerber H, Szemeitat A. Experiments on the influence of technical activities in the deep sea on heavy metal cycles[J]. *ISOPE, GOLDEN, CO(USA)*, 1997, 1: 445-450.
- [8] Schwedheim E, Irion G. Heavy metals and nutrients in sediments of the German tidal flat areas[J]. *Cour Forschungsinstitut Senckenberg*, 1985, 73: 119.
- [9] Jacob M, Krebs S. Analysis of the sediments of a Freshwater Tidal Flat of the Elbe River estuary[Z]. GKSS-Forschungszentrum Geesthacht GmbH, Geesthacht-Tespehude. Hamburg University, 1990.
- [10] Wang Shousong, Chen Changming, Irion G. Sediments distributed on backside tidal flats between Wagerooze barrier island (North Sea) and mainland, clay mineral, heavy metal and organic carbon[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1988, 5(2): 87-96. [汪寿松, 陈昌明, Irion G. 汪颖诺格岛(北海)与大陆之间障壁潮坪的沉积物粘土矿物, 重金属和有机碳[J]. 沉积学报, 1988, 5(2): 87-96]
- [11] Sachsenberg S, Klenke T, Krumborn W E. Influence of microbially mediated processes on heavy metals interstitial water gradients in variscored tidal flat sediments of the North Sea[J]. *Distribution and Activity of Microorganisms in the Sea*, 1991, 8: 64-167.
- [12] Van Malderen H, Hoomaert S, Van Grieken R. Identification of individual aerosol particles containing Cr Pb and Zn above the North Sea[J]. *Environmental Science and Technology*, 1996, 30(2): 489-498.
- [13] Chesnow-Lusty A, Ehlers J, Linke G. The Evolution of the Island of Neuwerk, Elbe Estuary Sea[J]. *Journal of Coastal Research*, 1999, 15(4): 1132-1144.
- [14] Roesel J, Irion G, Niedermeyer R O. Late Holocene sediments of the Greifswalder Bodden (southern Baltic Sea) with special regard to heavy metal contents[J]. *Senckenbergiana maritima*, Frankfurt, 1996, 27(1-2): 57-66.
- [15] Szefer P, Szefer K, Glasby G P, et al. Heavy metal pollution in surficial sediments from the southern Baltic Sea of Poland[J]. *Journal of Environmental Science, part A: Environ Sci Eng Toxic Hazard Subst Control*, 1996, 33(10): 723-754.
- [16] Emis K C, Neumann T, Endler R, et al. Geochemical records of sediments in the Eastern Gotland Basin-products of sediment dynamic in a not-so-stagnant anoxic basin?[J]. *Applied Geochemistry*, 1998, 13(3): 349-359.
- [17] Renner R M, Glasby G P, Szefer P. End member analysis of heavy metal pollution in surficial sediments from the Gulf of Gdansk and the southern Baltic Sea of Poland[J]. *Applied Geochemistry*, 1998, 13(3): 313-318.
- [18] Dominik J, Foerstner U, Mangini A, et al. Super (210)Pb and super (137)Cs Chronology of Heavy Metal Pollution in a Sediment Core From the German Bight (North Sea)[J]. *Senckenbergiana maritima*. Frankfurt/Main, 1978, 10(4-6): 213-227.
- [19] Palanques A, Sanchez-Cabeza J A, Masque P, et al. Historical record of Heavy metals in a highly contaminated Mediterranean deposit: The besos prodelta[J]. *Marine Chemistry*, 1998, 61(3-4): 209-217.
- [20] Hallberg R O. Heavy metals in the sediments of the Gulf of Bothnia[J]. *Ambio*, 1979, 8(6): 265-269.
- [21] Chen Jingsheng. A study of heavy metal pollution in offshore sediment in Jinzhou bay of the Bohai sea[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1985, 5(2): 129-139. [陈静生. 锦州湾沉积物重金属的污染若干问题研究[J]. 环境科学学报, 1985, 5(2): 129-139.]
- [22] Liao Ziji. The Pollution and Migration of Heavy Metals in Environment[M]. Beijing: Science Press, 1989: 233-235. [廖自基. 环境中微量重金属元素的污染危害与迁移转化[M]. 北京: 科学出版社, 1989: 233-235.]
- [23] Zhu Jian. The quality evaluation of heavy metal in tidal flat bed of Shanghai Pudong area[J]. *Journal of East China Normal University (Natural Science)*, 1991, (3): 79-85. [朱积安. 上海市浦东地区潮滩底质重金属环境质量评价[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 1991, (3): 79-85.]

- [24] Huang Huarui. Heavy metals in sediments of tidal zone from south-west Bohai sea[J]. Marine Science, 1992, 5: 44-46. [黄华瑞. 渤海西南部潮间带沉积物中的重金属[J]. 海洋科学, 1992, 5: 44-46.]
- [25] Wu Guoyuan. The pollution and evaluation of heavy metals in tidal flat bed of sewerage mouth in Bailong Port of Pudong[J]. Journal of East China Normal University (natural science), The geographical research papers of Pudong new area, 1996: 57-61. [吴国元. 浦东新区白龙港排污口潮滩底质重金属污染与评价[J]. 华东师范大学学报(浦东新区地理研究专集), 1996: 57-61.]
- [26] Liu Changling, Zhang Jing, Yu Zhigang. Study on the characteristics of the aerosol and atmospheric flux of the heavy metals over the Yellow Sea[J]. Marine Environmental Science, 1998, 17(4): 1-6. [刘昌岭, 张经, 于志刚. 黄海海域大气气溶胶特征及重金属大气输入量研究[J]. 海洋环境科学, 1998, 17(4): 1-6.]
- [27] Zhang Weiguo, Yu Lizhong, Xu Yu, et al. Iron reduction in tidal flat sediment indicated by magnetic measurements and its significance in the study of heavy metal pollution[J]. Chinese Science Bulletin, 1998, 43(19): 114-2118. [张卫国, 俞立中, 徐羽. 沉积物磁性测量对铁还原的指示及其在重金属污染研究中的应用[J]. 科学通报, 1998, 43(19): 2114-2118.]
- [28] Xu Shiyuan, Tao Jing, Chen Zhenlou, et al. Dynamic accumulation of heavy metals in tidal flat sediments of Shanghai[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1997, 28(5): 509-515. [许世远, 陶静, 陈振楼. 上海潮滩沉积物重金属的动力学累积特征[J]. 海洋与湖沼, 1997, 28(5): 509-515.]
- [29] Dai Weiming. The analysis on sedimental accumulation behavior of heavy metals in sewerage mouths in west and south part of Shanghai[J]. Shanghai Environmental Science, 1990, 9(7): 38-42. [戴维明. 上海市西南区排污口沉积物中重金属元素累积行为分析[J]. 上海环境科学, 1990, 9(7): 38-42.]
- [30] Liu Sumei, Zhang Jing. Normalization of heavy metals to aluminum in marine sediments[J]. Donghai Marine Sciences, 1998, 16(3): 48-55. [刘素美, 张经. 沉积物中重金属的归一化问题——以Al为例[J]. 东海海洋, 1998, 16(3): 48-55.]
- [31] Cai Aigen, Wang Kun, Yang Yiping. The amounts and distribution of heavy metals in bed and biological bodies of intertidal in Jinjiang city[J]. Journal of Xiamen University, 1998, 37(4): 569-575. [蔡阿根, 王坤, 杨逸萍. 晋江市潮间带底质、生物体中的重金属含量及其分布特征[J]. 厦门大学学报, 1998, 37(4): 569-575.]
- [32] Chen Zhongquan, Xu Li, Hong Huashen. Biogeochemical processes of heavy metals at the sediment-water interface of estuary: A review[J]. Advance in Earth Sciences, 1997, 12(5): 434-439. [陈宗团, 徐立, 洪华生. 河口沉积物-水界面重金属生物地球化学研究进展[J]. 地球科学进展, 1997, 12(5): 434-439.]
- [33] Ghobary H E, Latouch C. Metal early diagnosis and pollution in the tidal flats of Marennes Oléron Bay: Application of metal sequential extraction. Proceeding international Symposium on Coastal Lagoons[J]. SCOR / IABO / UNESCO. Vordaut Oceanol Acta, 1981, 9: 119-128.
- [34] Zhang Jing. Some progresses in estuarine geochemical studies of China[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1994, 25(4): 438-445. [张经. 中国河口地球化学的一些研究进展[J]. 海洋与湖沼, 1994, 25(4): 438-445.]
- [35] Chen Jingsheng. Water Environmental Chemistry[M]. Beijing: Advanced Educational Press, 1987. [陈静生. 水环境化学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1987.]
- [36] Liu Changling, Zhang Jing. Transport of the particular heavy metals towards the ocean via riverine and atmospheric pathways[J]. Marine Environmental Science, 1996, 15(4): 68-76. [刘昌岭, 张经. 颗粒态重金属通过河流与大气向海洋输送[J]. 海洋环境科学, 1996, 15(4): 68-76.]
- [37] Jickells T D, Knap A H. The distribution and geochemistry of some trace metals in the Bermuda coastal environment[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1984, 18: 245-262.
- [38] Presley B J, Treby J H, Rhodes R F. Heavy metal inputs to Mississippi Delta Sediments, a historical view[J]. Water, Air and Soil Pollution, 1980, 13: 481-494.
- [39] Lin S, Chen Chin-ming. Spatial variations of heavy metals in the east China sea continental shelf surface sediment[J]. Chemistry and Ecology, 1996, 13(2): 77-91.
- [40] Chen Weiyue. Sediments transportation and sedimental dynamic environment in tidal flat—a case study of north Hangzhou bay and part of south Changjiang estuary[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1991, 3(6): 813-821. [陈卫跃. 潮滩泥沙输移及沉积动力环境——以杭州湾北岸, 长江口南岸部分潮滩为例[J]. 海洋学报, 1991, 3(6): 813-821.]
- [41] Forstner U, Wittmann G TW. Metal Pollution in the Aquatic Environment. In 2nd ed[M]. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1981: 486.
- [42] Albert J J. Metal concentrations in tissues of *Spartina alterniflora* and sediments of Georgia salt marshes[J]. Estuarine Coast and Shelf Science, 1990, 30: 47-58.
- [43] Regnier P, Wollast P. Distribution of traces metal unsuspended matter of the Scheldt estuary[J]. Mar Chem, 1993, 43: 3-19.
- [44] Yao Wensheng, Hong Huasheng, Chen Jingqian. The study of Cu, Ni, Cd, V in the southern Taiwan strait water[A]. In: Hong Huasheng, ed. Marine Biogeochemistry Research Papers[C]. Xiamen: Xiamen University Press, 1991: 224-234. [姚文生, 洪华生, 陈敬虔. 台湾海峡南部海水 Cu、Ni、Cd、V 的研究[A]. 见: 洪华生主编. 海洋生物地球化学研究论文集[C]. 厦门: 厦门大学出版社, 1991: 224-234.]
- [45] Zonta R, Costa F, Ghemardi, et al. Geochemical and chemical physical characterization of a polluted mudflat in the Venice lagoon[J]. Bulletin de l'Institut, 1992: 207-226.
- [46] Johansen P-O, Botnen H, Johannessen P J. Environmental investigation of the Sea in the Vicinity of Mjelsnes landfill in Osterøy municipality, Norway[C]. Bergen: Institute for Fiskeri- og marinbiologi Report, 1999: 3-38.
- [47] Gaboury B, William C N, Michael L. Source and history of heavy

- ymetal contamination and sediment deposition in Tivoli south bay, Hudson river, New York[J]. *Estuaries*, 1999, 22(2A): 167-178.
- [48] Ma Jiabin, Shao Mihua. Variation in heavy metal pollution of offshore sedimentary cores in Jinzhou bay[J]. *China Environmental Science*, 1994, 14(1): 22-29. [马嘉斌, 邵秘华. 锦州湾沉积物芯样中重金属的污染及变化动态[J]. *中国环境科学*, 1994, 14(1): 22-29.]
- [49] Brown S L. Peces of intertidal benthic invertebrates: influence of particle selection in feeding on trace element concentration[J]. *Marine Ecological Progress Series*, 1986, 28: 219-231.
- [50] Wang W X, Fisher N S. Assimilation of trace elements and carbon by the mussel *Mytilus edulis*: effects of food composition[J]. *Limnology and Oceanography*, 1996, 41(2): 197-207.
- [51] Berry W J, Hansen D J, Mahony, et al. Prediction the toxicity of metal-spiked laboratory sediments rising acid-volating sulfide and interstitial water normalization[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry* 1996, 15(12): 126-2137.
- [52] Tessier A, Campbell P R C, Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metal[J]. *Analyt Chem*, 1979, 51(7): 844-851.
- [53] Favero N, Cattalini F, Bertaglia D, et al. Metal accumulation in a biological indicator (*Ulva rigida*) from the lagoon of Venice (Italy)[J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 1996, 31: 9-18.
- [54] Smith C J, Hopmans P, Cook F J. Accumulation of Cr, Pb, Cu, Ni, Zn and Cd in soil following irrigation with treated urban effluent in Australia[J]. *Environmental Pollution*, 1996, 94(3): 317-323.
- [55] Cacador I, Carlos V, Catarino F. Accumulation of Zn, Pb, Cr and Ni in sediments between roots of the Tagus Estuary Salt, Portugal[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1996, 42: 393-403.
- [56] Zhen Wenjiao, Wang Wenging, Lin Peng. The absorption and accumulation of heavy metals by mangrove in Jialong River mouth[J]. *Acta Application and environment Sinica*, 1996, 2(3): 207-213. [郑文教, 王文卿, 林鹏. 九龙江口桐华树红树林对重金属的吸收与累积[J]. *应用与环境学报*, 1996, 2(3): 207-213.]
- [57] Silva C A R, Lacerda L D, Ovalls A R, et al. The dynamics of heavy metals through litterfall and decomposition in a red mangrove forest[J]. *Mangroves and Salt Marshes*, 1998, 2(3): 149-157.
- [58] Simpson R L, Good R E, Walker R, et al. The role of Delaware river freshwater tidal wetlands in the retention of nutrients and heavy metals[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1983, 12(1): 41-48.
- [59] Suedel B C, Deaver E, Rodgers J H. Formulated sediment as a reference and dilution sediment in definitive toxicity tests[J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 1996, 30: 47-52.
- [60] Langston W J, Burt G R, Pope N D. Bioavailability of Metals in Sediments of the Dogger Bank (Central North Sea): A Mesocosm Study[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1999, 48: 519-540.
- [61] Widdows J, Nasci C, Fossato V U. Effects of pollution on the scope for growth of mussels from the Venice Lagoon, Italy[J]. *Marine Environmental Research*, 1997, 43(1/2): 69-79.
- [62] Zhao Ruisheng, Zhu Xiadi, Yan Jinliang. The elementary analysis on the amounts of heavy metals of Philippine Shell in Xiangshan Port and Sanmen Bay[J]. *Marine Fishery*, 1996, 18(4): 155-156. [赵瑞生, 朱夏娣, 颜金良. 象山港、三门湾菲律宾蛤仔重金属含量初步分析[J]. *海洋渔业*, 1996, 18(4): 155-156.]
- [63] Li Renwei. Contamination of sediments and environmental sedimentology[J]. *Advance in Earth Sciences*, 1998, 13(4): 398-402. [李任伟. 沉积物污染和环境沉积学[J]. *地球科学进展*, 1998, 13(4): 398-402.]
- [64] Usero J, Regalado E G, Gracia I. Trace metal in the bivalve mollusks *Ruditapes decussates* and *Ruditapes philippinarum* from the Atlantic coast of southern Spain[J]. *Environment International*, 1997, 23(3): 291-298.
- [65] Bloom H, Ayling G M. Heavy metals in the Derwent estuary[J]. *Environ Geol*, 1977, 2(1): 3-22.
- [66] Busa A, Molinani E. Toxic metals in Venice Lagoon: observation and possible removal[J]. *Environmental Geology*, 1994, 24: 203-216.
- [67] Wang Wenqi, Zhang Peiqun. Study of environmental assessment of the Jiaozhou bay using bivalves as a biomonitor[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1999, 30(5): 491-499. [王文琪, 章佩群. 双壳类指示生物反映下大胶州湾生态环境的研究[J]. *海洋与湖沼*, 1999, 30(5): 491-499.]
- [68] Cui Yi, Chen Bijuan, Song Yunli et al. Heavy metals content in sea water and marine organisms at Jiaozhou Bay[J]. *Chinese journal of applied ecology*, 1997, 8(6): 650-654. [崔毅, 陈碧鹃, 宋云利, 等. 胶州湾海水、海洋生物体中重金属含量的研究[J]. *应用生态学报*, 1997, 8(6): 650-654.]

REVIEW OF ACCUMULATION FEATURES STUDY OF HEAVY METAL IN SEDIMENT OF TIDAL FLAT

WANG Yong-hong, ZHANG Jing, SHEN Huan-ting

(State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

Abstract: The achievements and current knowledge of heavy metal study in tidal flat sediments were reviewed

based on the data from national and international literatures. It is shown that the heavy metals in tidal flats are mainly derived from the products of disintegration of minerals and rocks, human activities, atmosphere and ocean. Various factors, including water dynamics, sediment components, grain size, biological activities, river discharge and human activities, govern the accumulation features of heavy metals in tidal flat. Heavy metal concentrations decrease from high tidal flat to the middle and low tidal flats. Along the tidal flat, the stable and accumulating banks are usually enriched in heavy metals, while the eroded bank is poor in heavy metal contents. The discharges of municipal sewerage or industrial wastes have an important impact on the distribution and accumulation of heavy metals over tidal flats. For example in Venice lagoon and Jinzhou Bay, heavy metal contents decrease exponentially with the distance from sewage sources. But in other areas the metals is modified by dynamic conditions. In Shanghai tidal flat, metals contents peak in about 1 mile from the entrance of sewerage. Although the vertical profile of heavy metals in different tidal flats vary due to the different backgrounds and dynamics, the vertical profiles reflect the history of pollution and the peak content of heavy metals is consistent with the maximum of metal discharge from human activities. Sometimes the same vertical profiles of the various elements exist in different cores. For example, lead has come from long-range atmospheric deposition of anti-knock compounds in gasoline, copper and zinc are derived either from pollution discharges, natural resources in soils and are transported to the flat via surface waters, rather than atmosphere. Their close relation suggests that they are mixed in some local or regional environmental compartments before delivered to the area.

Biological activities are important to the accumulation and migration of heavy metals in tidal flat because of its biodiversity and toxicity. The morphology of biological bodies, biological availability governs the heavy metal accumulation in tidal flat and the accumulation in biological bodies. Biological activity changes the micro-environment of the tidal flat. Although recent publications contain heavy metal accumulation in biological bodies transportation and accumulation of heavy metals caused by biological bodies, the quantitative study is still rare. Examples of quantitative work, can be found for mangroves. At Itacurussa experimental mangrove of Brazil, the stem, root and leaves are the pathways of the transportation of heavy metals. The average transfer rates of heavy metals from canopy to sediment through leaf fall were: $Mn = 0.097 \text{ kg/hm}^2 \cdot \text{a}$, $Fe = 0.049 \text{ kg/hm}^2 \cdot \text{a}$, $Zn = 0.002 \text{ kg/hm}^2 \cdot \text{a}$. In fact mangrove ecosystems are probably efficient biogeochemical barriers to the transport of metal contaminants across tidal flat. The concentration of heavy metal in tidal flat illustrates the time cycles due to the seasonal changes of plant. For example, heavy metal increased during the growing season with Cu peaking in July and Pb and Ni peaking in September.

Methods of heavy metals in sediments also appropriate for the heavy metal study in tidal flat, such as acid and alkali digest methods, Tesslers sequential extract method for metals from sediments, and other methods, like laboratory micro-universal system approach, mesocosm and numerical model, regressive equations and magnetic measurements can be applied to different studies at ecological cycles and resources of heavy metal in tidal flat.

Great progresses have been achieved in the past 30 years in the study of heavy metals of tidal flat, but comparing with the study of estuaries, the heavy metal study of tidal flat is few. (1) The horizontal and vertical distribution of heavy metals in tidal flat need further study, especially the quantitative assessment. (2) Transportation pathways of different resource of heavy metals, e.g., products of disintegration of minerals and rocks, human activities, atmospheric and marine origin to the tidal flat are still not clear. (3) Heavy metals released from sediments would become source of pollution of tidal flat and must be examined. (4) The particles size effect should be examined in order to compare the heavy metals from different areas. (5) Biogeochemical cycling model of heavy metals is needed due to the complexity of accumulation and migration caused by biological activities. (6) In view of the huge quantity of creatures, using a biological standard to evaluate the pollution of heavy metals in tidal flat is apparently more relevant. For example, bivalves are used pervasively due to its abundance, in the Jiaozhou bay, the concentration of heavy metal elements, like As, Cd, Dr, Cu, Hg, Pb, Zn in clam in 1997 can be as high 9, 6, 8, 3, 205, 2 and 3 times respectively as the contentions of heavy metal in 1990. The standard evaluation of pollution by creatures in tidal flat should be set up.

Key words: Tidal flat; Heavy metals; Accumulation features.