

长江三角洲近岸水域表层沉积物重金属分布特征及其影响因子

蔡晔¹, 林休休²

(1. 苏州环境监测中心, 江苏 苏州 215004; 2. 苏州市职业大学 教育与人文学院, 江苏 苏州 215104)

摘要:采用 ICP-MS 测定了不同季节长江三角洲沉积物中重金属(Ni, Cu, Cr, Zn, Cd 和 Pb)含量并探讨了其影响因子。结果表明:(1) 长江三角洲沉积物中 Pb 和 Zn 占重金属总量比例最高, Hg 和 Cd 占重金属总量比例较小;沉积物重金属含量均以秋季和冬季最高,夏季次之,春季最低。(2) 长江三角洲沉积物中 Cr, Cu 和 Ni 元素均以残渣态为主, Zn 和 Cd 主要以弱酸提取态为主, Pb 较均匀地分布于不同形态中。(3) 长江三角洲沉积物中 pH 值和电导率基本表现为春季>夏季>秋季>冬季,其中秋季和冬季 pH 值差异不显著($p>0.05$),二者显著低于春季和夏季($p<0.05$);沉积物中全碳、全氮、全磷和全钾含量均以秋季和冬季最高,夏季次之,春季最低,其中不同季节全氮和全钾含量差异均显著($p<0.05$)。(4) Pearson 相关性分析可知,长江三角洲沉积物中 Cr, Pb, Cd 的弱酸浸提与重金属总量之间表现出显著的正相关关系($p<0.05$),而 6 种重金属元素的可还原态与重金属残渣态之间没有显著的相关性($p>0.05$);Cr, Cu, Pb 的弱酸浸提与可还原态没有显著的相关性($p>0.05$), Ni, Zn 和 Cd 的弱酸浸提与可还原态具有显著的相关性($p<0.05$)。(5) 长江三角洲沉积物中 6 种重金属元素的不同形态均与养分等指标存在显著的正相关性,而 pH 值和电导率与不同形态重金属呈负相关,全碳含量是控制长江三角洲沉积物重金属元素分布的主要因素。

关键词:长江三角洲; 沉积物; 重金属; 影响因子

中图分类号:X820

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2017)03-0331-08

Distribution and Influencing Factors of Heavy Metals in Bottom Sediment of Yangtze River Delta Region During Seasons

CAI Ye¹, LIN Xiuxiu²

(1. Suzhou Environmental Monitoring Center, Suzhou, Jiangsu 215000, China;

2. College of Education and Humanity, Suzhou Vocational University, Suzhou, Jiangsu 215104, China)

Abstract: A survey on the distribution and influencing factors of heavy metals (Ni, Cu, Cr, Zn, Cd and Pb) in bottom sediment of Yangtze River Delta region during seasons between 2014 and 2015 was carried out by using ICP-MS. The results indicated that: (1) the contents of Pb and Zn had the highest percentage of total amount of heavy metals and Hg, Cd had the lowest percentages of total amount of heavy metals, and all the heavy metal contents showed were higher in winter and autumn than those in summer and spring; (2) the contents of Cu, Cr and Ni existed in the form of acid soluble state with organic combination, Zn and Cd in water soluble form, Pb evenly distributed in five kinds of forms, and Pb had a good stability, low biological availability; (3) the values of pH and conductivity were lower in winter and autumn than those in summer and spring with significant difference in each season ($p<0.05$), and the contents of nutrients were higher in winter and autumn than those in summer and spring, and the contents of the total nitrogen and total potassium had a significant difference in each season ($p<0.05$); (4) the acid soluble state of Cr, Pb and Cd had a significant positive correlation with total heavy metals ($p<0.05$), but the reduction state had no significant correlation with residual state ($p<0.05$); (5) according to Pearson correlation analysis, pH value and conductivity were significantly negatively correlated with heavy metals ($p<0.05$); nutrients were significantly positively correlated

with heavy metals ($p < 0.05$), therefore, the total carbon was the important factor influencing heavy metals.

Keywords: Yangtze River Delta; bottom sediment; heavy metals; influencing factors

重金属是一种难降解、累积性的元素,通过生物化学循环或食物链在生态系统中积累,导致水体净化效能降低或水体富营养化,对生态系统构成直接或潜在的危害^[1-2]。沉积物是污染物的重要载体,当沉积物—水界面的理化条件发生改变时,沉积物中的重金属会再次释放,成为“二次污染源”,影响上覆水体的水质,从而成为重金属污染的源^[3-5]。因此,研究沉积物中重金属的迁移—转化行为是重金属污染评价和调控的重要基础^[6]。我国重金属污染情况十分令人担忧,三角洲地区作为重金属污染物的有效汇集库,尽管三角洲通过一系列生化过程对重金属进行一定的吸收、固定和转化,但当重金属超过其承受阈值,会重新释放并形成二次污染,通过食物链威胁人类的生存和生态系统的健康^[7-8]。沉积物重金属含量是生态系统中极其重要的生态因子,显著影响着生态系统的生产力和多样性,因而一直倍受湿地生态学、土壤学等多个学科的关注。

长江三角洲是比较年轻、成土较快的河口三角洲,也是暖温带保存最完整、典型和年轻的湿地生态系统,在长期的河、海、陆相互作用下,发育形成了多种多样的生态系统^[9-10]。作为长江入海的最后屏障,拥有丰富的水资源,集饮用、灌溉、渔业、航运、纳污等多功能于一体,为各种水生植物和动物的生存提供了良好的环境条件,一直受到国内外学者的高度关注和广泛研究^[11]。随着长江三角洲地区经济的开发,化石燃料燃烧、土地利用方式、石油开发和农业开垦等高强度人为活动综合作用,再加上自然和人文因素的双重影响,导致长江三角洲生态系统严重的退化,沉积物重金属污染也呈现出恶化的趋势,这些直接危害了两岸人民群众的身体健康和生命安全,科学、妥善处理长江三角洲沉积物重金属带来的生态环境问题已经迫在眉睫^[12]。近年来,大量学者对长江三角洲湿地重金属污染特征进行了系列研究,主要集中在水体和沉积物重金属空间分布规律、影响因素等方面,但关于长江三角洲湿地重金属污染程度,尤其不同季节重金属污染特征及其影响因子研究尚鲜见报道。因此,本研究对比分析不同季节长江三角洲近岸水沉积物重金属分布特征及其影响因子,有利于深入剖析重金属的生物地球化学过程,对降低重金属危害,恢复和保护长江三角洲生态系统的健康发展、退化湿地生态恢复和治理具有重要作用。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

长江三角洲北起通扬运河,南抵钱塘江、杭州湾,西至南京,东到海边,包括上海市全部、江苏省南部和浙江省的杭嘉湖平原,是长江入海之前的冲积平原和中国第一大经济区。在全国经济中占有重要地位,被誉为中国的“金三角”,国家定位的我国综合实力最强的经济中心、亚太地区重要国际门户、全球重要的先进制造业基地、我国率先跻身世界级城市群的地区,现已是国际公认的六大世界级城市群之一。研究区位于长江三角洲(江苏段),总面积 21 万 km^2 ,岸线平直,具有一条宽约几千米到几十千米的潮间带浅滩。属北亚热带季风气候,光照充足,四季分明,雨量充沛,雨热同期,水道纵横,湖荡棋布,有水乡泽国之称,过去 47 年和 25 年期间,长江三角洲年均气温、年均最高和最低气温都显著增加,增温率都是冬季和春季较高,夏季最低。土地肥沃,农业产水稻、棉花、小麦、油菜、花生、鱼虾等,是中国人口最稠密的地区之一。土壤类型为潮土、盐土和滨海盐土。长三角地区生态系统类型复杂,地表植被多样化。主要土地利用类型可分为耕地(包括水田和旱地)、林地(包括有林地、灌木林地、疏林地、其他林地)、草地(包括高复盖度草地、中复盖度草地和低复盖度草地)、水域(包括河流、湖泊、水库、坑塘、海涂和滩地)、建设用地(包括城镇用地、农村居民点用地和公交建设用地)和未利用地(包括裸土地和裸岩石用地)等。

1.2 样品采集

2014—2015 年分别在 4 月(春季)、8 月(夏季)、10 月(秋季)、12 月(冬季)长江三角州近岸边采集沉积物,采样点在距离岸边 100 m 以内(水面 1 m 左右),在方圆 200 m 以内取 5 个采样点,共 20 个采样点,采用直径为 5 cm 的 PVC 管进行取样,预先用铁杆测出水深和上层沉积物的厚度,然后在 PVC 管的相应位置打上若干小孔,将 PVC 管扎入,直至无法继续往下深入,拔出 PVC 管封住底部,截下含有沉积物的一段,现场用干冰覆盖低温密闭保存。

1.3 沉积物样品预处理

1.3.1 沉积物养分的测定 土壤养分参考鲍士旦^[13]方法测定:土壤颗粒组成采用比重法测定土壤 pH 值测定采用 1:2.5 水土比浸提 pH 值玻璃电极法;电导仪测量电导率;全碳和全氮采用元素分析仪;

全磷用 NaOH 熔融—钼锑抗比色法;全钾采用火焰分光光度计。

1.3.2 沉积物重金属质量分数的测定 样品经自然风干后,碾磨并过 60 目筛,称取约 0.500 0 g 加工好的样品(精确到 0.000 1 g)经 $\text{HClO}_4\text{-HNO}_3\text{-HF}$ 消化处理,用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)内标法测定土壤 Zn、Cd、Pb、Cu 含量,采用冷原子吸收微分测定仪,为 ICP 配置氢化物发生器,确保所需仪器的灵敏度。同时取土壤样品 0.250 0 g(精确到 0.000 1 g)于 25 ml 比色管中,加入新配(1+1)王水 10 ml,于沸水浴中加热 2 h,其间要充分振摇两次,冷却至室温后加入 10 ml 保存液,用稀释液定容,摇匀,该消解液用来测定 Hg。取静置后的消解溶液 5.00 ml 于另一 25 ml 比色管中,加入 50 g/L 的硫脲溶液 2.5 ml,盐酸 2.5 ml,定容至 25 ml,该溶液用来测定 As。ICP-MS 的精确度在 2% 以下,回收率为 95% 以上,测定偏差控制在 9% 内,每个土壤样点的重金属含量均以两年的平均值来计算。沉积物重金属质量分数的计算公式^[12]:

$$w(M) = n \frac{vc}{m} \quad (1)$$

式中: w 为沉积物重金属的质量分数(干基)(mg/kg); M 为所测定的某种重金属; c 为 ICP-MS 测定预处理样品得到的重金属质量浓度(mg/L); n 为 ICP-MS 测定时预处理样品的稀释倍数; m 为沉积物样品质量(kg); v 为定容体积(L)。

1.4 数据处理

Excel 2012 和 SPSS 18.0 进行数据统计和方差检验,单因素方差分析(One-way ANOVA),显著性用 LSD 法,Pearson 相关系数法分析不同形态重金属与养分之间的关系。

2 结果与分析

2.1 长江三角洲沉积物重金属季节分布特征

图 1 反映了长江三角洲沉积物土壤重金属季节分布状况,由图 1 可知,长江三角洲沉积物中 Cu 浓度的变化范围为 121.3~213.7 mg/kg,基本表现为秋季>冬季>夏季>春季,其中秋季和冬季 Cr 浓度差异不显著($p>0.05$);沉积物中 Cd 浓度的变化范围为 23.1~56.7 mg/kg,基本表现为秋季>冬季>夏季>春季,其中不同季节 Cd 浓度差异均显著($p<0.05$);沉积物中 Cu 浓度的变化范围为 59.3~136.7 mg/kg,基本表现为秋季>冬季>夏季>春季,其中秋季和冬季 Cu 浓度差异不显著($p>0.05$);沉积物中 Zn 浓度的变化范围为 95.6~23.54 mg/kg,基本

表现为秋季>冬季>夏季>春季,其中秋季和冬季 Zn 浓度差异不显著($p>0.05$);沉积物中 Ni 浓度的变化范围为 25.6~35.4 mg/kg,基本表现为秋季>冬季>夏季>春季,其中秋季和冬季 Ni 浓度差异不显著($p>0.05$),夏季和冬季 Ni 浓度差异不显著($p>0.05$);沉积物中 Pb 浓度的变化范围为 103.5~172.3 mg/kg,基本表现为秋季>冬季>夏季>春季,其中不同季节 Pb 浓度差异均显著($p<0.05$)。

2.2 长江三角洲沉积物中重金属形态分布特征

本研究中 BCR 顺序提取法对沉积物中 Cr、Ni、Cu、Cd、Zn 和 Pb 的平均提取效率均高于 95%,回收率较好。由图 2 可知,长江三角洲沉积物中 Cr、Cu 和 Ni 元素均以残渣态为主,所占总量比例为 85%~92%,45%~60%和 55%~67%;Zn 和 Cd 主要以弱酸提取态为主,所占总量比例为 45%~52%,58%~70%;Pb 以可氧化态为主,所占总量比例为 25%~31%。因此,长江三角洲沉积物中 Zn、Cd 和 Cu 的生物有效性较高,以弱酸浸提为主,对生物体的毒性较高,在正常条件下不利于碳酸盐结合态重金属的释放,因此长江三角洲沉积物中 Zn、Cd 和 Cu 等元素的环境威胁不容忽视;Cr、Pb 和 Ni 的弱酸浸提含量较低,生物可利用性较小,暂时对环境造成的影响较小;Cu 和 Zn 的弱酸浸提所占比例比较高,被沉积物吸附是 Cu 和 Zn 的主要表现形式,随着环境的改变,容易迁移到水环境中,其潜在危害较大。此外,重金属可还原态作为弱酸浸提重金属的另一个重要的组成部分,是指被包裹在铁锰氧化物内或者本身就是氢氧化物沉淀的这部分金属,由于具有较强的离子键结合能力,所以这部分金属不容易释放出来,这种结合态的重金属会被还原成为生物可利用态从而对水体造成二次污染,长江三角洲沉积物中重金属弱酸浸提和可还原态含量较高,表明人类活动带来污染源的可能性较大。

2.3 长江三角洲沉积物养分季节分布特征

由图 3 可知,长江三角洲沉积物中 pH 值的变化范围为 6.02~6.89,基本表现为春季>夏季>秋季>冬季,其中秋季和冬季 pH 值差异不显著($p>0.05$),二者显著低于春季和夏季($p<0.05$);沉积物中电导率的变化范围为 82.3~123.6 $\mu\text{S}/\text{cm}^2$,基本表现为春季>夏季>秋季>冬季,其中春季和夏季电导率差异不显著($p>0.05$),二者显著高于秋季和冬季($p<0.05$);沉积物中全碳含量的变化范围为 15.2~20.1 g/kg,基本表现为冬季>秋季>夏季>春季,其中秋季和冬季全碳含量差异不显著($p>0.05$),二者显著高于春季和夏季($p<0.05$);沉积物中全氮含量的变化范围为 1.03~2.21 g/kg,基本表

现为秋季>冬季>夏季>春季,其中不同季节全氮含量差异均显著($p<0.05$);沉积物中全磷含量的变化范围为0.98~1.98 g/kg,基本表现为冬季>秋季>夏季>春季,其中春季和夏季全磷含量差异不显著

($p>0.05$),二者显著低于秋季和冬季($p<0.05$);沉积物中全钾含量的变化范围为19.87~35.12 g/kg,基本表现为秋季>冬季>夏季>春季,其中不同季节全钾含量差异均显著($p<0.05$)。

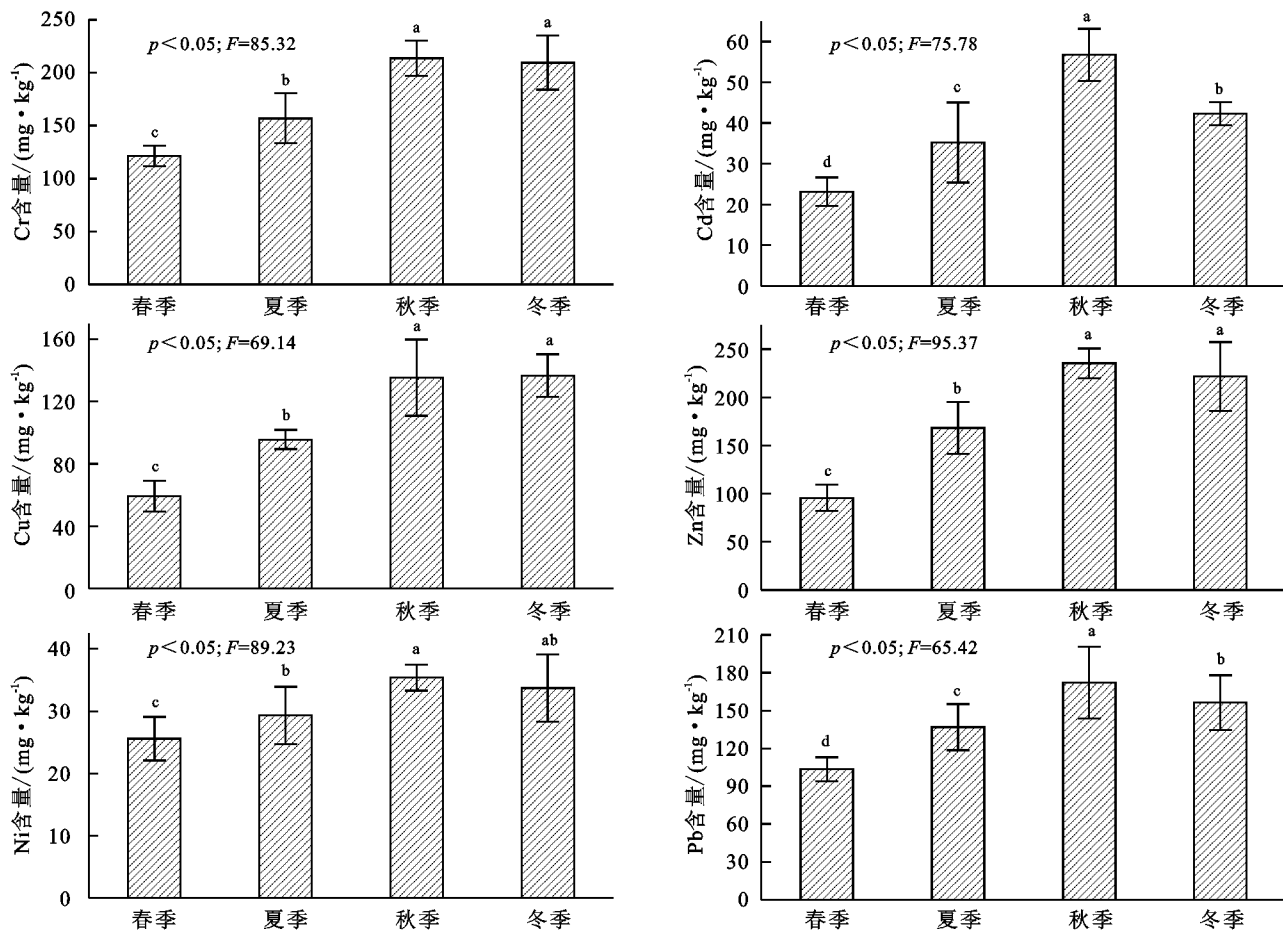


图1 长江三角洲沉积物重金属季节分布特征

2.4 长江三角洲沉积物中重金属各形态间的相关性

由表1可知,长江三角洲沉积物中Cr,Pb,Cd的弱酸浸提与重金属总量之间表现出显著的正相关关系($p<0.05$);Cr和Cu的可还原态均与重金属总量间存在极显著的正相关关系($p<0.05$);6种重金属元素的可氧化态与重金属总量间有极显著的正相关性($p<0.05$),同时这6种重金属的弱酸浸提与可还原态及可氧化态之间有较高的正相关性($p<0.05$);6种重金属元素的残渣态与重金属总量间表现出显著的正相关($p<0.05$);而6种重金属元素的可还原态与重金属残渣态之间没有显著的相关性($p>0.05$);Cr,Cu,Pb的弱酸浸提与可还原态没有显著的相关性($p>0.05$),Ni,Zn和Cd的弱酸浸提与可还原态具有显著的相关性($p<0.05$)。

2.5 长江三角洲沉积物中重金属与养分之间的相关性

由表2可知,长江三角洲沉积物不同形态重金属均与pH值和电导率呈负相关,Cr的各种形态均与全碳含量呈显著的正相关性($p<0.05$),Cr的可还原

态和可氧化态与全氮含量呈显著的正相关性($p<0.05$),Cr的弱酸浸提态、可氧化态和残渣态与全钾含量呈显著的正相关性($p<0.05$);Cu的各种形态均与全碳含量呈显著的正相关($p<0.05$),Cu的可氧化态和残渣态与全氮含量呈显著的正相关($p<0.05$),Cu的可还原态和可氧化态与全磷含量呈显著的正相关($p<0.05$),Cu的可还原态、可氧化态和残渣态与全钾含量呈显著的正相关($p<0.05$);Pb的各种形态均与全碳含量呈显著的正相关($p<0.05$),Pb的弱酸浸提态和可还原态与全氮含量呈显著的正相关($p<0.05$),Pb的可氧化态和残渣态与全磷含量呈显著的正相关($p<0.05$),Pb的可还原态、可氧化态和残渣态与全钾含量呈显著的正相关($p<0.05$);Ni的可还原态、可氧化态和残渣态与全碳含量呈显著的正相关($p<0.05$),Ni的各种形态均与全氮含量呈显著的正相关($p<0.05$),Ni的残渣态与全磷含量呈显著的正相关($p<0.05$),Ni的弱酸浸提态和残渣态与全钾含量呈显著的正相关($p<0.05$);Zn的弱酸浸提态、可还原态和残

渣态与全碳含量呈显著的正相关($p<0.05$),Zn 的弱酸浸提态、可还原态和残渣态与全氮含量呈显著的正相关($p<0.05$),Zn 的可氧化态和残渣态与全磷含量呈显著的正相关($p<0.05$),Zn 的弱酸浸提态和可还原态与全钾含量呈显著的正相关($p<0.05$);Cd 的各种形

态均与全碳含量呈显著的正相关($p<0.05$),Cd 的可还原态、可氧化态和残渣态与全氮含量呈显著的正相关($p<0.05$),Cd 的可氧化态与全磷含量呈显著的正相关($p<0.05$),Cd 的弱酸浸提态、可还原态和残渣态与全钾含量呈显著的正相关($p<0.05$)。

表 1 长江三角洲沉积物中不同形态重金属之间的相关性

项目	弱酸浸提态	可还原态	可氧化态	残渣态	项目	弱酸浸提态	可还原态	可氧化态	残渣态
Cr	可还原态	0.237			Cd	0.912**			
	可氧化态	0.512	0.386			0.836**	0.566*		
	残渣态	0.852**	-0.108	0.799**		0.157	0.028	0.563*	
	总量	0.823**	0.756**	0.855**	0.843**	0.774**	0.279	0.702**	0.776**
Pb	可还原态	0.502*			Ni	0.108			
	可氧化态	0.865**	0.587*			0.259	-0.025		
	残渣态	0.065	0.157	0.432		0.834**	0.469	0.756**	
	总量	0.089	0.579*	0.894**	0.902**	0.773**	0.316	0.713**	0.855**
Cu	可还原态	0.867**			Zn	0.714**			
	可氧化态	0.905**	0.123			0.803**	0.236		
	残渣态	0.842**	0.258	0.689**		0.569*	0.058	0.856**	
	总量	0.506*	0.107	0.725**	0.837**	0.217	0.325	0.768**	0.902**

注:**表示相关性在 0.01 水平上显著(双尾),*表示相关性在 0.05 水平上显著(双尾),下表同。

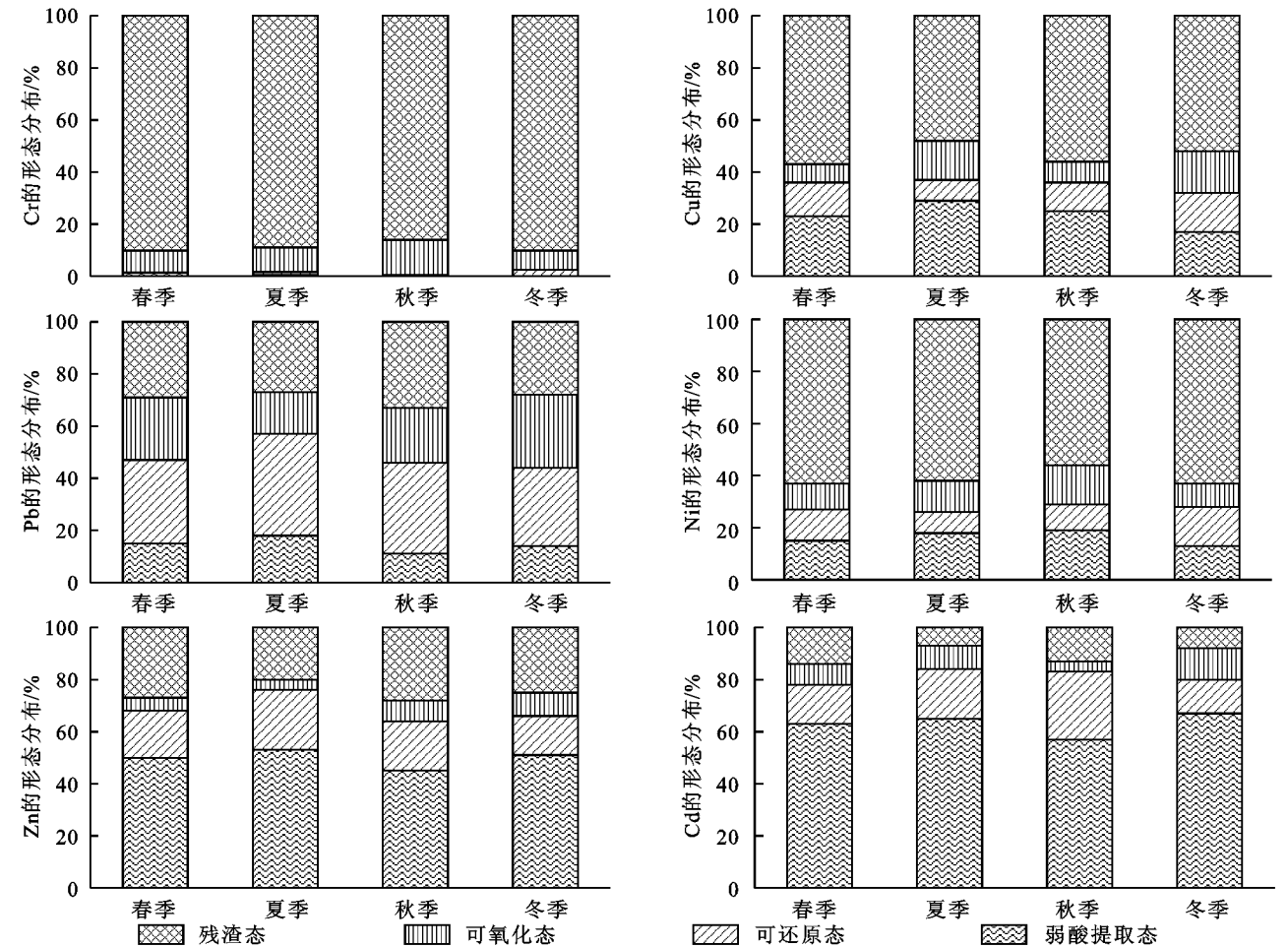


图 2 不同形态重金属所占百分比

表 2 长江三角洲沉积物中不同形态重金属之间的相关性

项目		pH	电导率	全碳	全氮	全磷	全钾
Cr	弱酸浸提态	-0.423	-0.239	0.566*	0.325	0.056	0.569*
	可还原态	-0.678**	0.032	0.524*	0.566*	0.125	0.456
	可氧化态	0.356	0.108	0.788**	0.789**	0.369	0.563*
	残渣态	-0.856**	-0.566*	0.823**	0.235	0.416	0.689*
Cu	弱酸浸提态	-0.536*	-0.236	0.623*	0.302	0.235	0.132
	可还原态	-0.234	0.066	0.774**	0.456	0.563*	0.566*
	可氧化态	-0.056	-0.138	0.756**	0.569*	0.523*	0.852**
	残渣态	-0.318	-0.574*	0.836**	0.623*	0.411	0.769**
Pb	弱酸浸提态	-0.274	0.130	0.633*	0.784**	0.238	0.356
	可还原态	-0.589*	-0.257	0.755**	0.655*	0.359	0.539*
	可氧化态	0.056	-0.603*	0.902**	0.416	0.579*	0.741**
	残渣态	-0.239	-0.214	0.825**	0.315	0.552*	0.623*
Ni	弱酸浸提态	-0.523*	-0.385	0.365	0.589*	0.423	0.517*
	可还原态	0.345	0.207	0.569*	0.563*	0.401	0.356
	可氧化态	-0.547*	-0.522*	0.623*	0.687*	0.302	0.417
	残渣态	-0.636*	-0.324	0.856**	0.712**	0.569*	0.699*
Zn	弱酸浸提态	-0.125	-0.387	0.912**	0.623*	0.237	0.756**
	可还原态	-0.235	0.062	0.544*	0.533*	0.156	0.863**
	可氧化态	-0.412	-0.647*	0.358	0.421	0.598*	0.358
	残渣态	-0.327	-0.532*	0.677*	0.614*	0.623*	0.456
Cd	弱酸浸提态	0.069	-0.333	0.668*	0.387	0.384	0.899**
	可还原态	-0.157	0.035	0.756**	0.566*	0.230	0.781**
	可氧化态	-0.563*	-0.367	0.814**	0.744**	0.568*	0.237
	残渣态	0.387	0.214	0.917**	0.703**	0.147	0.684*

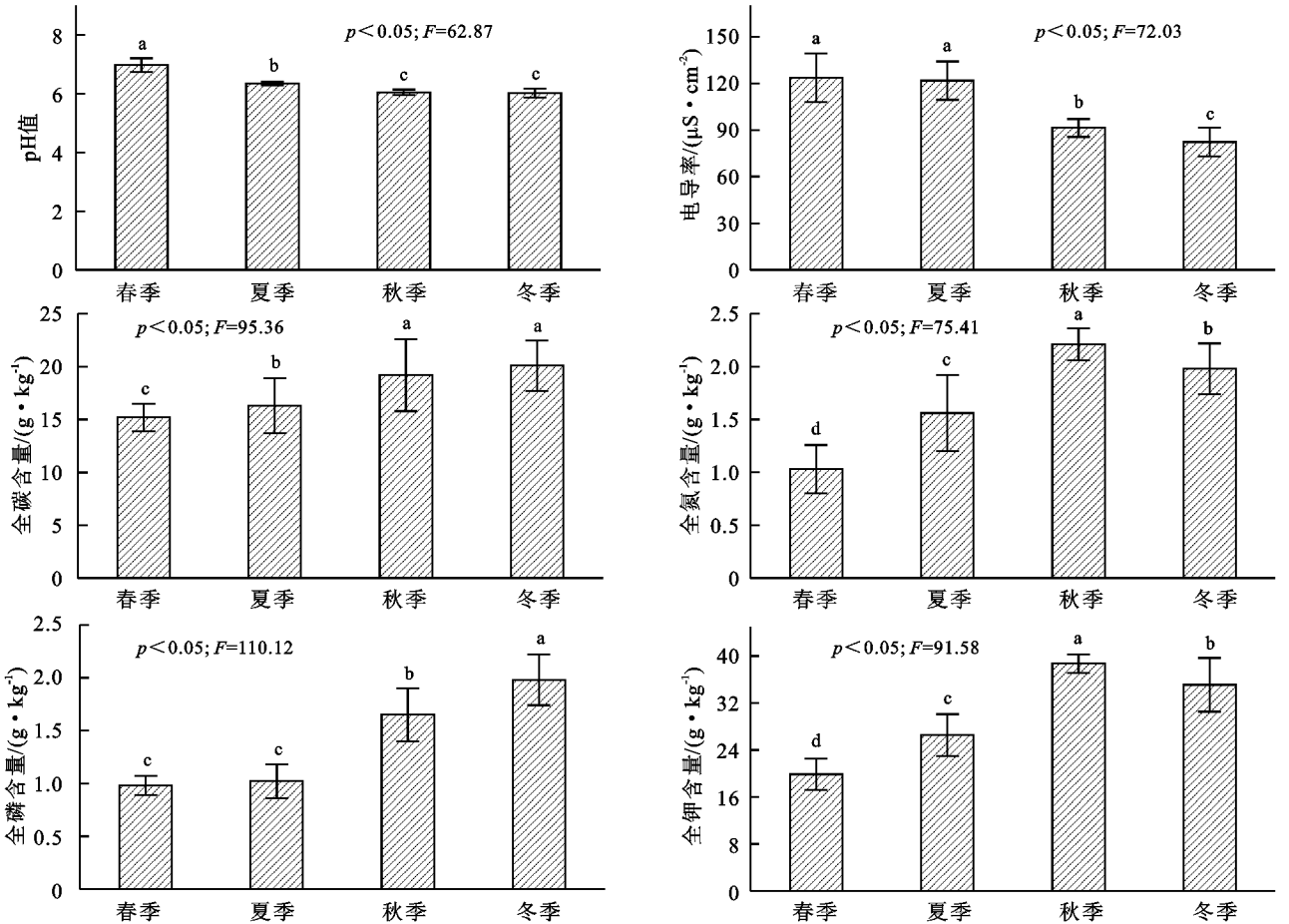


图 3 长江三角洲沉积物养分季节分布特征

3 讨论

水文环境条件是决定沉积物重金属季节性变化的主要因素,同时温度、pH 值、盐度及全碳含量等因素也会对沉积物重金属含量造成影响^[12]。秋季和冬季是枯水期,沉积物的悬浮泥沙及污染物快速富集,造成其重金属含量最高,最低值出现在春季和夏季。从冬季至夏季期间,水温逐渐升高,根据分子热运动理论,温度升高有利于底泥中重金属向水相的迁移以及释放,pH 值的逐渐降低也促进了碳酸盐和氢氧化物结合态重金属的溶解与释放,沉积物全碳含量的减少降低了重金属在沉积物的吸附作用,从而使一部分重金属发生解吸转移到间隙水或者上覆水中,导致春季和夏季沉积物重金属含量较低^[9,14]。本研究中长江三角洲沉积物中重金属的残渣态性质比较稳定,通常赋存在原生矿物和次生硅酸盐矿物晶格中,基本不参与沉积物—水界面的再分配平衡,其迁移转化性和生物可利用性都很小,一般认为,重金属这种形态对环境和生物是安全的^[15]。弱酸浸提重金属性质不稳定,极易从沉积物中释放出来造成二次污染,而由于人为污染而产生的重金属主要叠加在沉积物的次生相中,因此沉积物中弱酸浸提重金属的含量较高也表明其受到人为污染相对较重,并且潜在的生物迁移性较大^[16]。重金属弱酸提取态是对环境和生物可能产生的危害和毒性程度最高的,包括弱酸浸提和碳酸盐结合态,弱酸浸提重金属是指吸附在黏土、腐殖质及其他成分上的金属,对环境变化敏感,在中性条件下可释放出来,易于迁移转化和吸收^[17]。

为了探究长江三角洲沉积物中不同重金属形态之间的关系,分析重金属来源及不同形态重金属的迁移和相互转化关系,对长江三角洲沉积物中不同形态重金属之间及其与不同形态重金属等指标进行相关性分析。本研究中不同形态重金属间及其与总量之间的相关性表明不同形态重金属来源可能具有一致性并且分布类型比较相似,当沉积物—水界面的环境条件发生改变时,不同形态重金属之间可能会发生迁移转化。弱酸浸提重金属与残渣态重金属之间存在显著的正相关关系,在一定程度上说明残渣态的重金属“惰性”只是相对的,当沉积物的理化条件发生改变时,有可能释放出来^[9,18]。本研究中 Cr, Cu, Pb, Ni, Zn 和 Cd 这 6 种重金属元素的不同形态均与养分等指标存在显著的正相关性,表明说明长江三角洲沉积物中重金属的来源和分布可能具有相似性,除与自然来源有关外,还与人类活动造成的工业废水、生活废水的排放及交通运输有关。由此表明了沉积物中这

6 种金属元素的污染可能具有同源性,其主要来源可能与其他几种重金属不同并且具有相似的地球化学循环。弱酸浸提、可氧化态重金属与养分之间呈显著相关性,可直观地反映长江三角洲地区的重金属元素来源,可能是人类活动造成的影响所致。因此,长江三角洲全碳、氮磷等的输入是影响沉积物中重金属含量的关键因素,它们的环境行为决定着沉积物中重金属的形态转化和迁移过程^[16]。全碳是影响重金属元素分布特征的重要因素,但全碳的这种特性并非适用于所有的重金属,主要是因为不同重金属的化学性质有差异,往往对其所结合的位点具有一定的选择性,即只与其化学性质相匹配的位点相结合。受此影响,某些重金属元素与全碳在分布特征上并不一定有必然的联系。

4 结论

(1) 长江三角洲沉积物中 Pb 和 Zn 占重金属总量比例最高, Hg 和 Cd 占重金属总量比例较小;沉积物重金属含量均以秋季和冬季最高,夏季次之,春季最低。长江三角洲沉积物中 Cr, Cu 和 Ni 元素均以残渣态为主, Zn 和 Cd 主要以弱酸提取态为主, Pb 较均匀地分布于不同形态中。

(2) 长江三角洲沉积物中 pH 值和电导率基本表现为春季>夏季>秋季>冬季,其中秋季和冬季 pH 值差异不显著($p>0.05$),二者显著低于春季和夏季($p<0.05$);沉积物中全碳、全氮、全磷和全钾含量均以秋季和冬季最高,夏季次之,其中不同季节全氮和全钾含量差异均显著($p<0.05$)。

(3) 长江三角洲沉积物中 Cr, Pb, Cd 的弱酸浸提与重金属总量之间表现出显著的正相关关系($p<0.05$),而 6 种重金属元素的可还原态与重金属残渣态之间没有显著的相关性($p>0.05$);Cr, Cu, Pb 的弱酸浸提与可还原态没有显著的相关性($p>0.05$), Ni, Zn 和 Cd 的弱酸浸提与可还原态具有显著的相关性($p<0.05$)。

(4) 长江三角洲沉积物中 6 种重金属元素的不同形态均与养分等指标存在显著的正相关性,而 pH 值和电导率与不同形态重金属呈负相关,全碳含量是控制长江三角洲沉积物重金属元素分布的主要因素,说明长江三角洲沉积物中重金属的来源和分布可能具有相似性,除与自然来源有关外,还与人类活动造成的工业废水、生活废水的排放及交通运输有关。

参考文献:

- [1] Mance G. Pollution threat of heavy metals in aquatic environments[M]. Berlin: Springer Science & Business

- Media, 2012.
- [2] Pardo R, Barrado E, Lourdes P, et al. Determination and speciation of heavy metals in sediments of the Pisuerga River[J]. *Water Research*, 1990, 24(3): 373-379.
- [3] Ali H, Khan E, Sajad M A. Phytoremediation of heavy metals: concepts and applications [J]. *Chemosphere*, 2013, 91(7): 869-881.
- [4] Guo G, Wu F, Xie F, et al. Spatial distribution and pollution assessment of heavy metals in urban soils from southwest China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2012, 24(3): 410-418.
- [5] Liu X, Song Q, Tang Y, et al. Human health risk assessment of heavy metals in soil-vegetable system: A multi-medium analysis [J]. *Science of the Total Environment*, 2013, 463: 530-540.
- [6] Kheir R B, Shomar B, Greve M B, et al. On the quantitative relationships between environmental parameters and heavy metals pollution in Mediterranean soils using GIS regression-trees; the case study of Lebanon [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2014, 147: 250-259.
- [7] Hamed Y A, Abdelmoneim T S, ElKiki M H, et al. Assessment of heavy metals pollution and microbial contamination in water, sediments and fish of Lake Manzala, Egypt [J]. *Life Science Journal*, 2013, 10(1): 86-94.
- [8] Zhou R, Qin X, Peng S, et al. Total petroleum hydrocarbons and heavy metals in the surface sediments of Bohai Bay, China: long-term variations in pollution status and adverse biological risk [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2014, 83(1): 290-297.
- [9] Lin S, Hsieh I J, Huang K M, et al. Influence of the Yangtze River and grain size on the spatial variations of heavy metals and organic carbon in the East China Sea continental shelf sediments [J]. *Chemical Geology*, 2002, 182(2): 377-394.
- [10] Cheung K C, Poon B H T, Lan C Y, et al. Assessment of metal and nutrient concentrations in river water and sediment collected from the cities in the Pearl River Delta, South China [J]. *Chemosphere*, 2003, 52(9): 1431-1440.
- [11] Yi Y, Yang Z, Zhang S. Ecological risk assessment of heavy metals in sediment and human health risk assessment of heavy metals in fishes in the middle and lower reaches of the Yangtze River basin [J]. *Environmental Pollution*, 2011, 159(10): 2575-2585.
- [12] Huang B, Shi X, Yu D, et al. Environmental assessment of small-scale vegetable farming systems in peri-urban areas of the Yangtze River Delta Region, China [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2006, 112(4): 391-402.
- [13] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [14] Zhang J. Heavy metal compositions of suspended sediments in the Changjiang (Yangtze River) estuary: Significance of riverine transport to the ocean [J]. *Continental Shelf Research*, 1999, 19(12): 1521-1543.
- [15] Chen Z, Saito Y, Kanai Y, et al. Low concentration of heavy metals in the Yangtze estuarine sediments, China: A diluting setting [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2004, 60(1): 91-100.
- [16] Chen S J, Gao X J, Mai B X, et al. Polybrominated diphenyl ethers in surface sediments of the Yangtze River Delta: levels, distribution and potential hydrodynamic influence [J]. *Environmental Pollution*, 2006, 144(3): 951-957.
- [17] Liu J P, Li A C, Xu K H, et al. Sedimentary features of the Yangtze River-derived along-shelf clinoform deposit in the East China Sea [J]. *Continental Shelf Research*, 2006, 26(17): 2141-2156.
- [18] Viers J, Dupré B, Gaillardet J. Chemical composition of suspended sediments in World Rivers: new insights from a new database [J]. *Science of the Total Environment*, 2009, 407(2): 853-868.