

黄河三角洲芦苇湿地不同水期土壤—植被 重金属分布特征

曾 淼¹, 张厚勇²

(1. 阿坝师范学院 生化系, 四川 汶川 623002; 2. 山东省济南市环境保护科学研究院, 济南 250014)

摘 要: ICP-AES 法研究了黄河三角洲湿地平水期(4 月)、丰水期(8 月)和枯水期(10 月)土壤和植被重金属(Hg, Cu, Zn, Pb, Cd 和 Cr)含量分布特征, 并分析了土壤和植被重金属含量的关系。结果表明: (1) 黄河三角洲芦苇湿地表土和底泥 Hg, Cu, Zn 平均含量变化呈递减趋势, 依次表现出: 平水期>丰水期>枯水期, 不同时期土壤重金属 Hg, Cu, Zn 含量均表现为表土>底泥; 黄河三角洲芦苇湿地表土和底泥 Pb, Cd 和 Cr 平均含量变化呈递增趋势, 依次表现出: 枯水期>丰水期>平水期, 并且不同时期土壤重金属 Pb, Cd 和 Cr 含量均表现为底泥>表土, 局部有所波动, 综合分析可知, 黄河三角洲芦苇湿地平水期的 Hg, Cu, Zn 污染最严重, 枯水期 Pb, Cd 和 Cr 污染最严重; (2) 黄河三角洲芦苇湿地表土重金属 Hg, Cu, Zn 含量高于底泥, 表土重金属 Pb, Cd 和 Cr 含量低于底泥; (3) 黄河三角洲芦苇湿地植被重金属 Hg, Cu, Zn, Pb, Cd 和 Cr 含量均显著高于土壤($p<0.05$), 说明植被的吸收作用在土壤重金属污染中起着关键作用; (4) 主成分分析表明黄河三角洲芦苇湿地土壤中 Hg 和 Zn 含量、植被中 Pb 和 Cd 的含量变化是黄河三角洲芦苇湿地的重金属污染主要影响因子; 相关性分析表明, 植被体内的重金属含量主要来自和依赖于土壤重金属含量, 同时植被对于土壤各重金属的吸收也保持一定的独立性。

关键词: 黄河三角洲; 芦苇湿地; 重金属; 不同水期

中图分类号: X823; X52

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2016)04-0344-07

Distribution of Soil and Plant Heavy Metals of Reed Wetland in the Yellow River Delta of China During Seasons

ZENG Miao¹, ZHANG Houyong²

(1. *Aba Teachers College, Wenchuan, Sichuan 623002, China;*

2. Ji'nan Research Academy of Environmental Sciences, Ji'nan 250014, China)

Abstract: Surface soils and sediments and plant of reed wetland in the Yellow River Delta of China were chosen for monitoring the contamination levels of heavy metals (i. e., Hg, Cu, Zn, Pb, Cd and Cr) in average season (April), flood season (August), and dry season (October) in 2013. Statistical analysis methods were used to analyze the relationship between the heavy metal contents in soil and vegetation. The results indicated that: (1) the contamination of surface soils and sediments of reed wetland in the Yellow River Delta of Hg, Cu and Zn decreased with season which showed the order: average season>flood season>dry season, and the contamination of surface soils of Hg, Cu and Zn was higher than that of sediments in different seasons, however, the contamination of Pb, Cd and Cr show the opposite trend with season and the contamination of surface soils of Pb, Cd and Cr was lower than that of sediments with local fluctuation, comprehensive analysis showed that the contamination of Hg, Cu and Zn in average season was most serious and Pb, Cd and Cr pollution in dry season was most serious; (2) the contamination of surface soils of reed wetland in the Yellow River Delta of Hg, Cu and Zn was higher than that of sediments and contents of Pb, Cd and Cr in surface soils were lower than those in sediments; (3) the contamination of Hg, Cu, Zn, Pb, Cd and Cr of reed wetland plant in the Yellow River Delta was higher than that of soil, which indicated that plant played a key role in the absorption of heavy metals; (4) correlation analysis showed that the contamination of heavy metals in plant mainly came from the soil, at the same time, the plant of reed wetland in the Yellow River Delta keeps the independence in terms of the absorption of heavy metals from the soil.

Keywords: Yellow River Delta; reed wetland; heavy metal; seasons

湿地是连接陆地与湖泊、海洋等水体交互作用的敏感地带和枢纽,具有独立的生态结构和功能,是一个巨大的物种基因库^[1-3]。近年来的工业污染和人类活动的加剧造成了我国大面积的湿地生态系统受损严重^[4-7]。重金属属于难降解、累积性元素,通过生物化学循环或食物链在生态系统中积累,还可整合为毒性更大的重金属有机化合物,对生态系统构成直接或潜在的危害^[8-10]。我国重金属污染情况十分令人担忧,而湿地作为重金属污染物的有效汇集库积累了大量重金属,使湿地成为一个非常重要的次生污染源^[11-12],同时,重金属污染物会导致湿地净化效能降低,环境污染加剧,严重威胁湿地生物的生存等^[8-9,11]。尽管湿地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,但当湿地重金属超过其承受阈值,重金属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^[8-9,11,13],因此,湿地作为持久性有毒污染物的重要组成部分受到越来越受到国内外学者的重视。

黄河三角洲是世界上最年轻、最具特色、成土最快的河口三角洲,也是暖温带唯一保存最完整、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湿地生态系统^[11,14-15]。作为黄河入海的最后屏障,具有丰富的生物资源,存在着大面积的芦苇湿地群落,一直受到国内外学者的高度关注和广泛研究^[8-9,11,13,16-17]。随着黄河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导致黄河三角洲湿地生态系统严重的退化,而重金属污染则是黄河三角洲湿地退化的重要驱动因素^[11,13,18-20]。湿地土壤中部分重金属可被植物根系吸收富集或转移到植物地上部分,从而改变重金属在湿地土壤含量和分布特征,因此,重金属在湿地土壤—植物系统的分布能够反映出湿地生态系统的健康及其稳定性^[10,18,21-22]。近年来,大量学者对黄河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、污染程度评价、影响因素等各方面^[11,13,19-20],但关于黄河三角洲湿地土壤—植物系统中的重金属分布的综合研究,尤其不同水期条件下土壤—植物系统重金属分布特征方面的研究尚鲜见报道^[8-9,11,13,18-20]。有鉴于此,本研究对比分析了不同水期条件下(平水期、丰水期和枯水期)芦苇湿地土壤表层和底泥以及植被重金属的分布特征,有利于深入剖析重金属在芦苇湿地的生物地球化学过程,对

降低重金属危害,恢复和保护湿地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^[10,18,21]。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于黄河三角洲国家自然保护区(37°40′—38°10′N,118°41′—119°16′E),总面积 15.3 万 hm^2 ,属暖温带半湿润大陆性季风气候,光照充足,四季分明,雨热同期,年平均气温 12.9℃,最高气温 41.9℃,最低气温 -23.3℃,年降水量 530 - 630 mm,其中 70%的降水量集中在 5 月到 9 月,分配不均,年蒸发量为 1 962 mm,无霜期 196 d,土壤类型为潮土、盐土和滨海盐土,植被类型以湿地植被芦苇(*Phragmites australis*)为主,分布较广,伴生盐地碱蓬(*Suaeda salsa*)、怪柳(*Tamarix chinensis*)、白茅(*Imperata cylindrical* var. Major)和獐茅(*Aeluropus litoralis*),覆盖度在 70%~90%,高度多介于 1.0~1.8 m^[11,13,18,23]。

1.2 试验方法

2013 年在黄河三角洲国家自然保护区的平水期(4 月)、丰水期(8 月)和枯水期(10 月)选取 5 个以芦苇为主要优势种的湿地作为标准样地(50 m×50 m),每个样地分别设置 5 个 2 m×2 m 的标准样方采集表土和底泥,五点混合法使用 PVC 管取表层土壤(10 cm),抓取式采样器(Grab sampler)采集表层以下 15 cm 的底泥,装入聚乙烯封口袋带回实验室,同时收集每个样地的芦苇完整植株。

土壤经自然风干,去除石块、植物残体等残杂物,烘干至恒重(105℃,12 h),研磨后过 60 目筛后备用,植物样品清洗干净后烘干至恒重(80℃,48 h),将根茎叶混合一起粉碎过 30 目筛备用,植物和土壤样品在聚四氟乙烯罐内经 HClO_4 - HNO_3 -HF 高温消解定容后采用等离子体原子发射光谱法(ICP-AES)测定 Cu、Zn、Pb、Cd 和 Cr 含量^[7-9,11,13,18],Hg 含量采用原子荧光光谱法(AF-610A)^[11,18,24]。

1.3 数据处理

Excel 2007 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,主成分提取主要重金属因子,Pearson 相关系数法分析土壤和植被重金属的相关性,Origin 9.2 作图。

2 结果与分析

2.1 黄河三角洲芦苇湿地土壤重金属季节性分布

2013 年黄河三角洲芦苇湿地平水期、丰水期、枯水期土壤重金属 Hg、Cu、Zn 含量季节变化特征见图 1,

统计分析表明,3 个时期土壤中表土和底泥 Hg,Cu,Zn 平均含量变化呈递减趋势,依次表现出:平水期>丰水期>枯水期,最大值出现在平水期,最小值出现在枯水期,并且不同时期土壤重金属 Hg,Cu,Zn 含量均表现为表土>底泥;3 个时期土壤中表土和底泥 Pb,Cd 和 Cr 平均含量变化呈递增趋势,依次表现出:枯水期>

丰水期>平水期,最大值出现在枯水期,最小值出现在平水期,并且不同时期土壤重金属 Pb,Cd 和 Cr 含量均表现为底泥>表土,局部有所波动,不同时期 Pb 和 Cr 含量在表土和底泥之间基本相一致。以上总体结果表明,黄河三角洲芦苇湿地平水期的 Hg,Cu,Zn 污染最严重,枯水期 Pb,Cd 和 Cr 污染最严重。

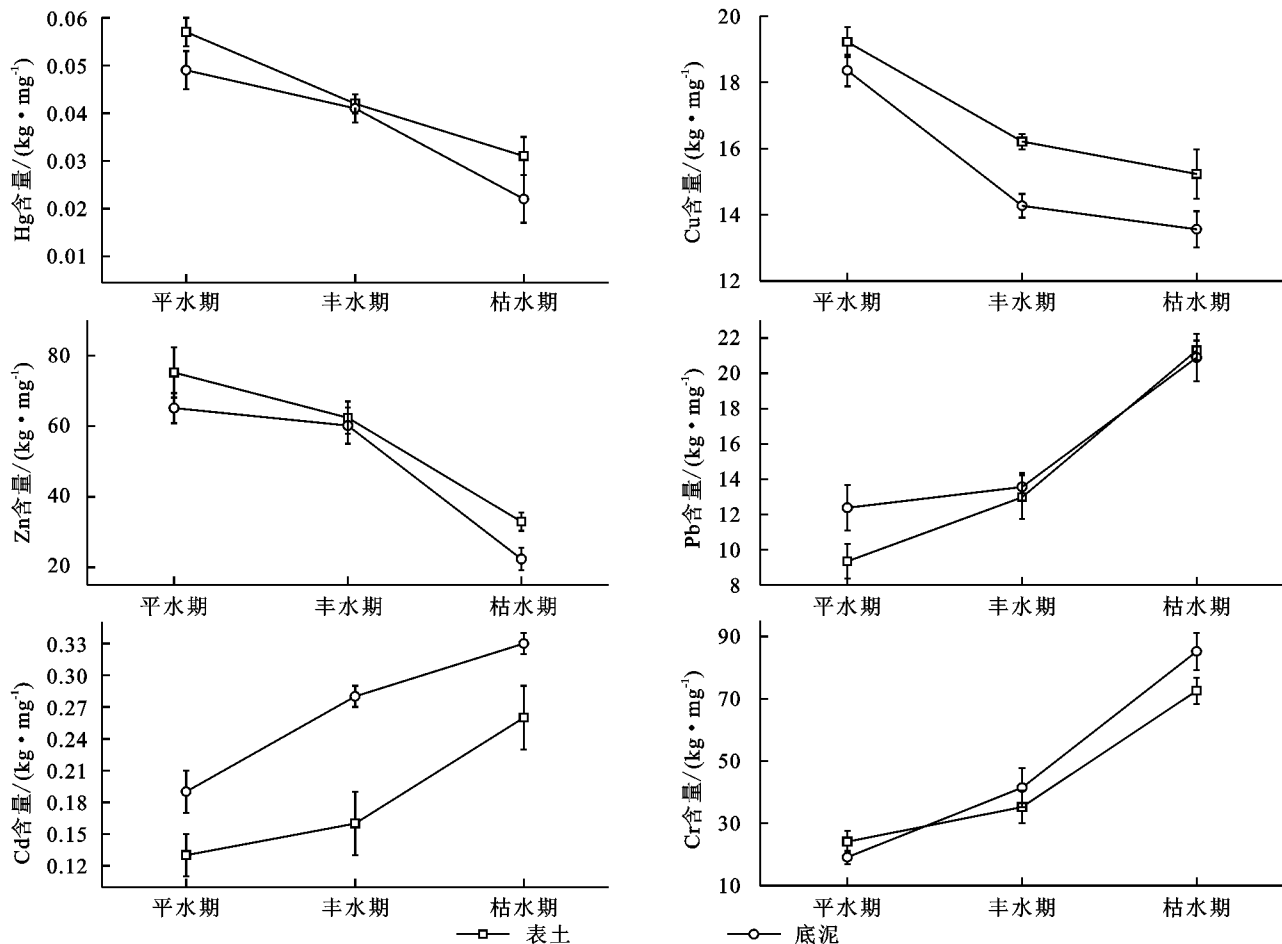


图 1 黄河三角洲芦苇湿地土壤重金属季节性分布

2.2 黄河三角洲芦苇湿地土壤重金属特征

由图 2 可知,黄河三角洲芦苇湿地表土重金属 Hg,Cu,Zn 含量高于底泥,其中表土 Hg 和 Zn 含量显著高于底泥($p<0.05$),表土 Cu 含量与底泥之间差异不显著($p>0.05$),与底泥重金属含量相比,表土 Hg,Cu,Zn 含量分别高出底泥 16.07%,9.68%和 15.53%;黄河三角洲芦苇湿地表土重金属 Pb,Cd 和 Cr 含量低于底泥,其中表土 Cd 和 Cr 含量显著低于底泥($p<0.05$),表土 Pb 含量与底泥之间差异不显著($p>0.05$),与底泥重金属含量相比,表土 Pb,Cd 和 Cr 含量分别低出底泥 6.83%,31.27%和 9.52%。由此可知,黄河三角洲芦苇湿地土壤重金属分布体现了人类不同活动程度对土壤重金属分布的影响,即人类活动约密集,干扰越大,土壤中重金属的含量就越多,并且黄河三角洲芦苇湿地多年水质重金属的污染

也会造成临近河岸土壤重金属的沉积。

2.3 黄河三角洲芦苇湿地植被重金属季节性特征

由图 3 可知,对比三角洲芦苇湿地植被重金属含量发现,平水期、丰水期、枯水期植被体内 Hg,Cu,Zn,Pb,Cd 和 Cr 季节变化均表现为丰水期最高,其中,Hg 含量变化范围为 0.034~0.075 mg/kg,依次表现为丰水期>平水期>枯水期;Cu 含量变化范围为 19.56~35.14 mg/kg,依次表现为丰水期>枯水期>平水期;Pb 含量变化范围为 62.35~72.54 mg/kg,依次表现为丰水期>枯水期>平水期;Pb 含量变化范围为 24.8~39.6 mg/kg,依次表现为丰水期>平水期>枯水期;Cd 含量变化范围为 0.24~0.59 mg/kg,依次表现为丰水期>枯水期>平水期;Cr 含量变化范围为 51.3~78.3 mg/kg,依次表现为丰水期>枯水期>平水期。

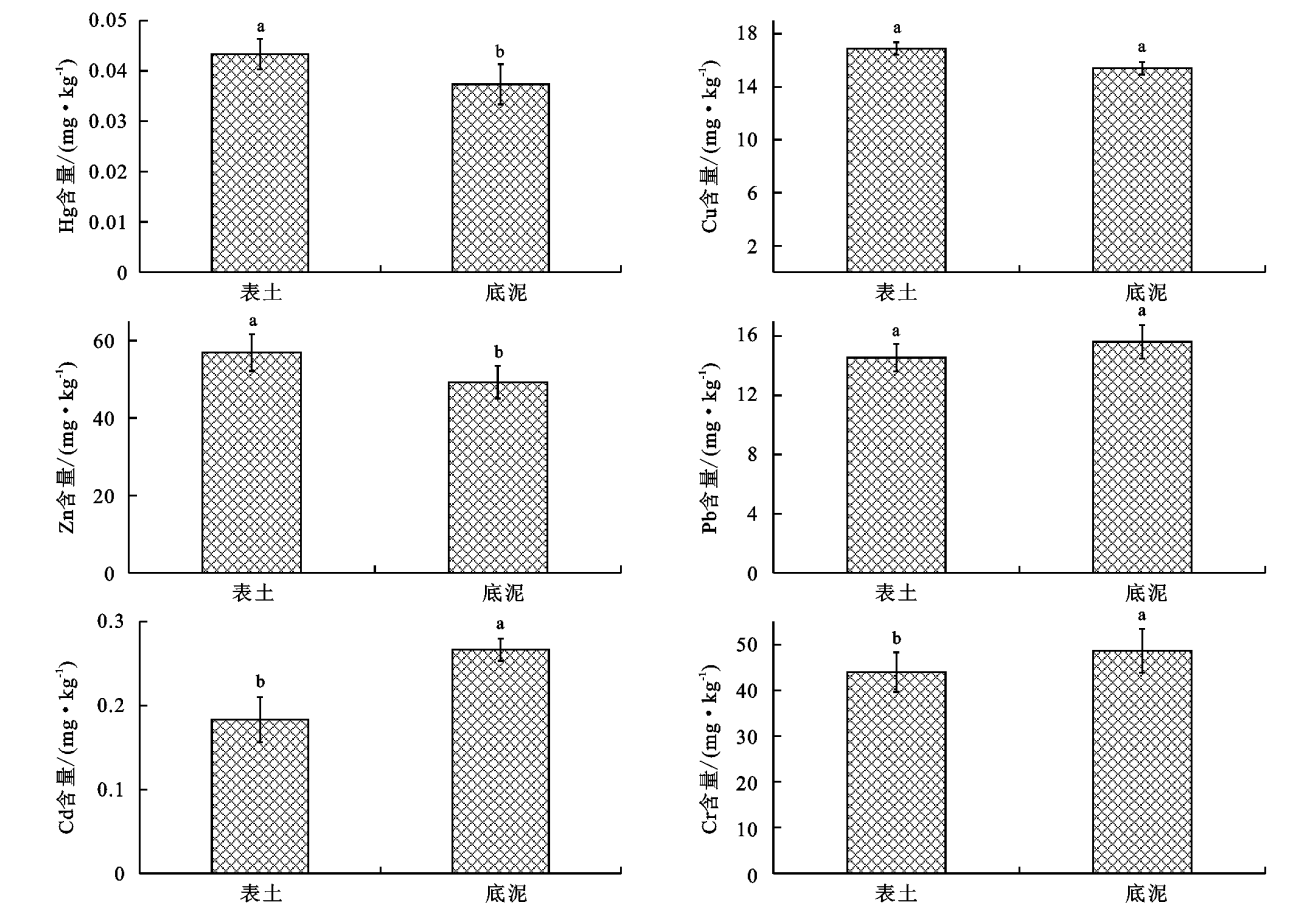


图 2 黄河三角洲芦苇湿地土壤重金属特征

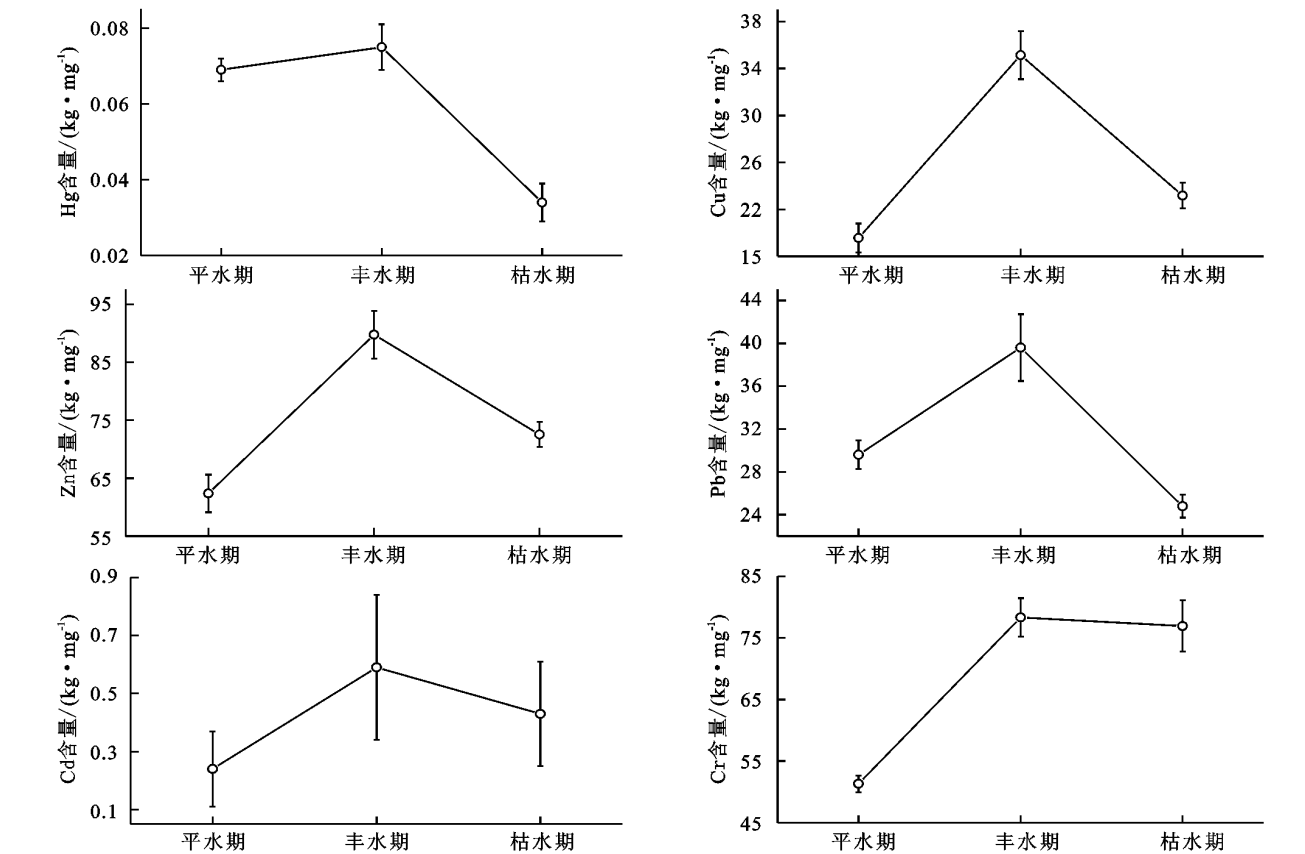
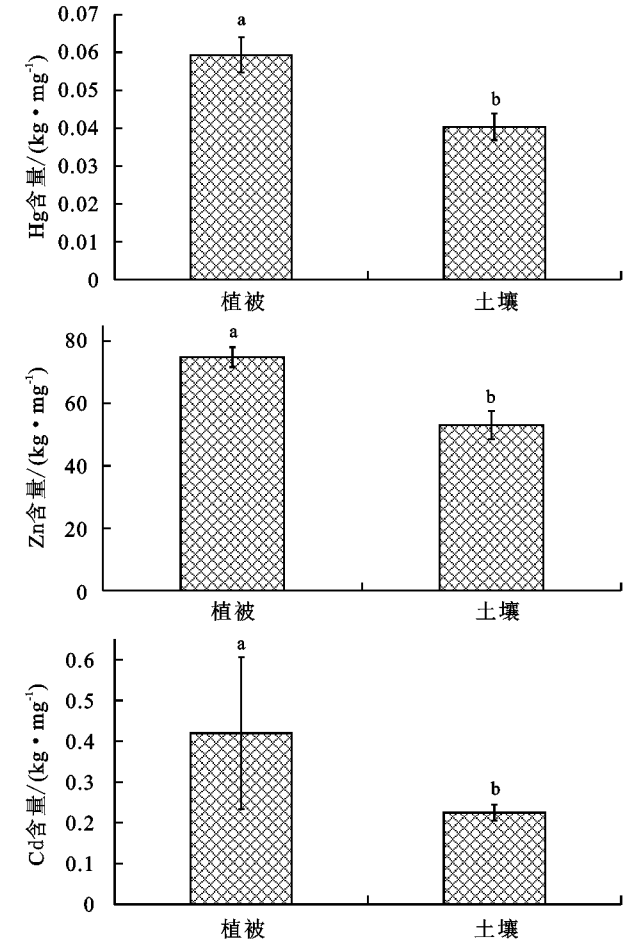


图 3 黄河三角洲芦苇湿地植被重金属季节性特征

2.4 黄河三角洲芦苇湿地植被与土壤重金属特征

由图 4 可知,黄河三角洲芦苇湿地植被重金属 Hg,Cu,Zn,Pb,Cd 和 Cr 含量均显著高于土壤($p<0.05$),与土壤重金属含量相比,植被 Hg,Cu,Zn,



Pb,Cd 和 Cr 含量分别高出土壤 Hg,Cu,Zn,Pb,Cd 和 Cr 含量的 47.11%,60.81%,41.13%,107.83%,86.67%和 48.66%,说明植被的吸收作用在土壤重金属污染中起着关键作用。

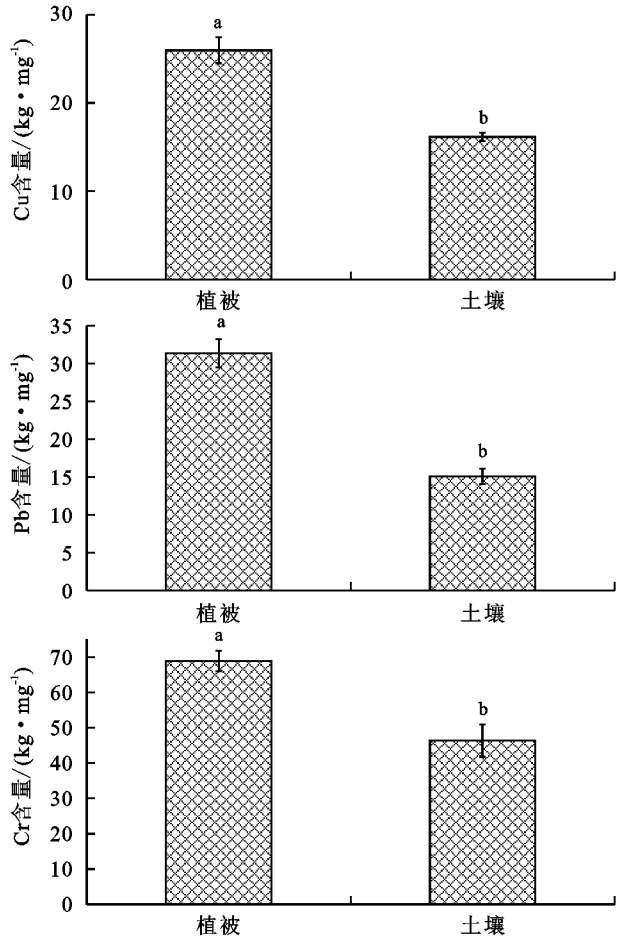


图 4 黄河三角洲芦苇湿地植被与土壤重金属特征

2.5 黄河三角洲芦苇湿地重金属主成分分析

本研究中黄河三角洲芦苇湿地重金属主成分分析以土壤和植被重金属含量作为原变量,通过计算变量方差和协方差矩阵的特征量,将多个变量通过降维对土壤重金属信息进行集中和提取,识别出起主导作用的土壤或植被重金属污染物^[25-26]。表 1 是各重金属含量的总方差分解表,可以看出第一、第二主成分特征值占总方差的百分比已经大于 94%,即前两个主成分对 12 个监测指标所涵盖的大部分重金属信息进行了概括,其中第一主成分携带的信息最多,达到 79%以上,第一、第二主成分的累计贡献率达到 94.495%,而主成分 3,4 对总方差的贡献很小,因此,选取前 2 个因子作为主成分,表 2 是各重金属含量对应于两个主成分的荷载值,反映了主成分与变量的相关系数,荷载值大的即可认为是重要因子。第一主成分对原始变量的解释贡献了总方差的 79.259%,负荷载最高的几个指标分别为土壤 Hg 和 Zn(分别为

0.856,0.721,以绝对值 >0.7 判定负荷载较高),植被 Pb 和 Cd(分别为 0.587,0.518,以绝对值 >0.5 判定负荷载较高),说明土壤中 Hg 和 Zn 含量、植被中 Pb 和 Cd 的含量变化是黄河三角洲芦苇湿地的重金属污染主要影响因素。

为进一步说明黄河三角洲芦苇湿地土壤重金属含量与植被中的含量的相关关系,针对黄河三角洲芦苇湿地土壤和植被各种重金属之间的相关性进行统计,结果见表 3,由表可知,植被重金属含量与土壤中的重金属含量存在一定的正相关,植被中 Hg,Cu,Zn,Pb,Cd 和 Cr 含量均与土壤中 Hg,Cu,Zn,Pb,Cd 和 Cr 含量具有显著或极显著的相关性,由此我们可以推测,植被体内的重金属含量主要来自和依赖于土壤重金属含量,而植被中 Hg,Cu,Zn,Pb,Cd 和 Cr 含量与土壤其他重金属含量相关性较弱,甚至没有相关性,这说明土壤重金属含量并不一定与植被重金属含量相对应,而植被对于土壤各重金属的吸收也具有

定的独立性,反映出不同污染物的来源存在一定的差异性^[13,18]。其原因可能是:同一种重金属在土壤中存在不同的状态,使得土壤中能够被植被吸收的有效重金属含量存在差异和不确定性的结果;此外,黄河三角洲芦苇湿地由人工管理,水中重金属、pH 值等也会影响植被对重金属的吸收^[8-9,11,13]。

表 1 观测指标总方差分解表

主成分	特征值	贡献率%	累积贡献率%
1	62.306	79.259	79.259
2	17.835	15.236	94.495
3	1.356	3.045	97.540
4	0.213	2.460	100

表 3 黄河三角洲芦苇湿地土壤—植被重金属含量相关矩阵

参数	土壤 Hg	土壤 Cu	土壤 Zn	土壤 Pb	土壤 Cd	土壤 Cr
植物 Hg	0.489*	0.317	0.113	0.312	0.196	0.249
植物 Cu	0.357	0.491*	0.123	0.109	0.412*	-0.317
植物 Zn	-0.214	0.556*	0.698**	0.165	0.459*	0.297
植物 Pb	0.197	0.134	0.457*	0.512*	0.312	0.367
植物 Cd	0.458*	-0.378	0.389	0.317	0.668**	0.121
植物 Cr	0.212	0.246	0.104	0.305	0.358	0.765**

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

3 结 论

(1) 黄河三角洲芦苇湿地表土和底泥 Hg,Cu,Zn 平均含量变化呈递减趋势,依次表现出:平水期>丰水期>枯水期,不同时期土壤重金属 Hg,Cu,Zn 含量均表现为表土>底泥;黄河三角洲芦苇湿地表土和底泥 Pb,Cd 和 Cr 平均含量变化呈递增趋势,依次表现出:枯水期>丰水期>平水期,最大值出现在枯水期,最小值出现在平水期,并且不同时期土壤重金属 Pb,Cd 和 Cr 含量均表现为底泥>表土,局部有所波动,综合分析可知,黄河三角洲芦苇湿地平水期的 Hg,Cu,Zn 污染最严重,枯水期 Pb,Cd 和 Cr 污染最严重。

(2) 黄河三角洲芦苇湿地表土重金属 Hg,Cu,Zn 含量高于底泥,其中表土 Hg 和 Zn 含量显著高于底泥($p<0.05$),表土 Cu 含量与底泥之间差异不显著($p>0.05$);黄河三角洲芦苇湿地表土重金属 Pb,Cd 和 Cr 含量低于底泥,其中表土 Cd 和 Cr 含量显著低于底泥($p<0.05$),表土 Pb 含量与底泥之间差异不显著($p>0.05$)。黄河三角洲芦苇湿地土壤重金属分布体现了人类不同活动程度对土壤重金属分布的影响,即人类活动约密集,干扰越大,土壤中重金属的含量就越多,同时也会造成临近河岸土壤重金属的沉积。

(3) 黄河三角洲芦苇湿地植被重金属 Hg,Cu,

表 2 主成分载荷矩阵

重金属	主成分 1	主成分 2
土壤 Hg	0.856	0.145
土壤 Cu	0.534	-0.357
土壤 Zn	0.721	0.214
土壤 Pb	0.280	0.836
土壤 Cd	0.532	-0.117
土壤 Cr	0.413	0.215
植物 Hg	-0.315	-0.231
植物 Cu	-0.217	-0.356
植物 Zn	-0.356	0.443
植物 Pb	-0.587	0.298
植物 Cd	-0.518	0.157
植物 Cr	-0.109	0.376

Zn,Pb,Cd 和 Cr 含量均显著高于土壤($p<0.05$),与土壤重金属含量相比,植被 Hg,Cu,Zn,Pb,Cd 和 Cr 含量分别高出土壤 Hg,Cu,Zn,Pb,Cd 和 Cr 含量的 47.11%,60.81%,41.13%,107.83%,86.67%和 48.66%,说明植被的吸收作用在土壤重金属污染中起着关键作用。

(4) 主成分分析表明黄河三角洲芦苇湿地土壤中 Hg 和 Zn 含量、植被中 Pb 和 Cd 的含量变化是黄河三角洲芦苇湿地的重金属污染主要影响因子;相关性分析表明,植被重金属含量与土壤中的重金属含量存在一定的正相关,植被体内的重金属含量主要来自和依赖于土壤重金属含量,而植被中 Hg,Cu,Zn,Pb,Cd 和 Cr 含量与土壤其他重金属含量相关性较弱,说明土壤重金属含量并不一定与植被重金属含量相对应,而植被对于土壤各重金属的吸收也具有一定的独立性,反映出不同污染物的来源存在一定的差异性。此外,黄河三角洲芦苇湿地由人工管理,水中重金属、pH 值等也会影响植被对重金属的吸收。

参考文献:

[1] Aumen N G. Wetland ecology: principles and conservation[J]. Journal of the North American Benthological Society, 2001,20(4):683-685.

[2] Moore P D. Wetland Ecology: Principles and Conservation[J]. Journal of Ecology, 2001,89(5):903-904.

- [3] Brooks R P, Brinson M M, Havens K J, et al. Proposed hydrogeomorphic classification for wetlands of the Mid-Atlantic Region, USA[J]. *Wetlands*, 2011, 31(2): 207-219.
- [4] 徐明华, 冯树丹, 孟祥楠, 等. 三江平原湿地生态服务功能重要性[J]. *国土与自然资源研究*, 2012, 3(1): 59-60.
- [5] Schmitz O J. Restoration of ailing wetlands[J]. *PLoS Biology*, 2012, 10(1): e1001248.
- [6] Barbier E B. Valuing Ecosystem Services for Coastal Wetland Protection and Restoration: Progress and Challenges[J]. *Resources*, 2013, 2(3): 213-230.
- [7] Brooks P D. Wetland Ecology: Principles and Conservation [J]. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 2001, 82(50): 626-626.
- [8] Bai J, Cui B, Chen B, et al. Spatial distribution and ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments from a typical plateau lake wetland, China[J]. *Ecological Modelling*, 2011, 222(2): 301-306.
- [9] Bai J, Xiao R, Cui B, et al. Assessment of heavy metal pollution in wetland soils from the young and old reclaimed regions in the Pearl River Estuary, South China [J]. *Environmental Pollution*, 2011, 159(3): 817-824.
- [10] Su L, Liu J, Christensen P. Spatial distribution and ecological risk assessment of metals in sediments of Baiyangdian wetland ecosystem [J]. *Ecotoxicology*, 2011, 20(5): 1107-1116.
- [11] Keddy P, Fraser L H. Four general principles for the management and conservation of wetlands in large lakes: the role of water levels, nutrients, competitive hierarchies and centrifugal organization[J]. *Lakes & Reservoirs: Research & Management*, 2000, 5(3): 177-185.
- [12] Tromp K, Lima A T, Barendregt A, et al. Retention of heavy metals and poly-aromatic hydrocarbons from road water in a constructed wetland and the effect of de-icing[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, 203(5): 290-298.
- [13] Bai J, Huang L, Yan D, et al. Contamination characteristics of heavy metals in wetland soils along a tidal ditch of the Yellow River Estuary, China[J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2011, 25(5): 671-676.
- [14] Liu G, Zhang L, Zhang Q, et al. Spatio-temporal dynamics of wetland landscape patterns based on remote sensing in Yellow River Delta, China[J]. *Wetlands*, 2014, 34(4): 787-801.
- [15] Wang X, Yu J, Zhou D, et al. Vegetative ecological characteristics of restored reed (*Phragmites australis*) wetlands in the Yellow River Delta, China[J]. *Environmental management*, 2012, 49(2): 325-333.
- [16] Huang L, Bai J, Chen B, et al. Two-decade wetland cultivation and its effects on soil properties in salt marshes in the Yellow River Delta, China[J]. *Ecological Informatics*, 2012, 10(3): 49-55.
- [17] Zhang L, Song L, Zhang L, et al. Seasonal dynamics in nitrous oxide emissions under different types of vegetation in saline-alkaline soils of the Yellow River Delta, China and implications for eco-restoring coastal wetland[J]. *Ecological Engineering*, 2013, 61(3): 82-89.
- [18] 刘志杰, 李培英, 张晓龙, 等. 黄河三角洲滨海湿地表层沉积物重金属区域分布及生态风险评价[J]. *环境科学*, 2012, 33(4): 1182-1188.
- [19] 刘志杰, 李培英, 张晓龙, 等. 黄河三角洲滨海湿地表层沉积物重金属区域分布及生态风险评价[J]. *环境科学*, 2012, 33(4): 1182-1188.
- [20] Cui B, Zhang Q, Zhang K, et al. Analyzing trophic transfer of heavy metals for food webs in the newly-formed wetlands of the Yellow River Delta, China[J]. *Environmental Pollution*, 2011, 159(5): 1297-1306.
- [21] Hansson L A, Brönmark C, Anders N P, et al. Conflicting demands on wetland ecosystem services: nutrient retention, biodiversity or both[J]. *Freshwater Biology*, 2005, 50(4): 705-714.
- [22] 唐娜, 崔保山, 赵欣胜. 黄河三角洲芦苇湿地的恢复[J]. *生态学报*, 2006, 26(8): 2616-2624.
- [23] 凌敏, 刘汝海, 王艳, 等. 黄河三角洲柽柳林场湿地土壤重金属空间分布特征及生态学意义[J]. *海洋湖沼通报*, 2010, 11(4): 41-46.
- [24] 徐鹏飞, 鄱阳湖—乐安河段湿地重金属污染风险及其对水生植物群落的影响评价[D]. 南昌: 江西师范大学, 2013.
- [25] 陈吉, 赵炳梓, 张佳宝, 等. 主成分分析方法在长期施肥土壤质量评价中的应用[J]. *土壤*, 2010, 42(3): 329-415-420.
- [26] 高吉喜, 段飞舟, 香宝. 主成分分析在农田土壤环境评价中的应用[J]. *地理研究*, 2006, 25(5): 836-842.