

江苏高校优势学科建设工程资助项目

京杭大运河（苏北段） 底泥重金属污染与释放规律研究

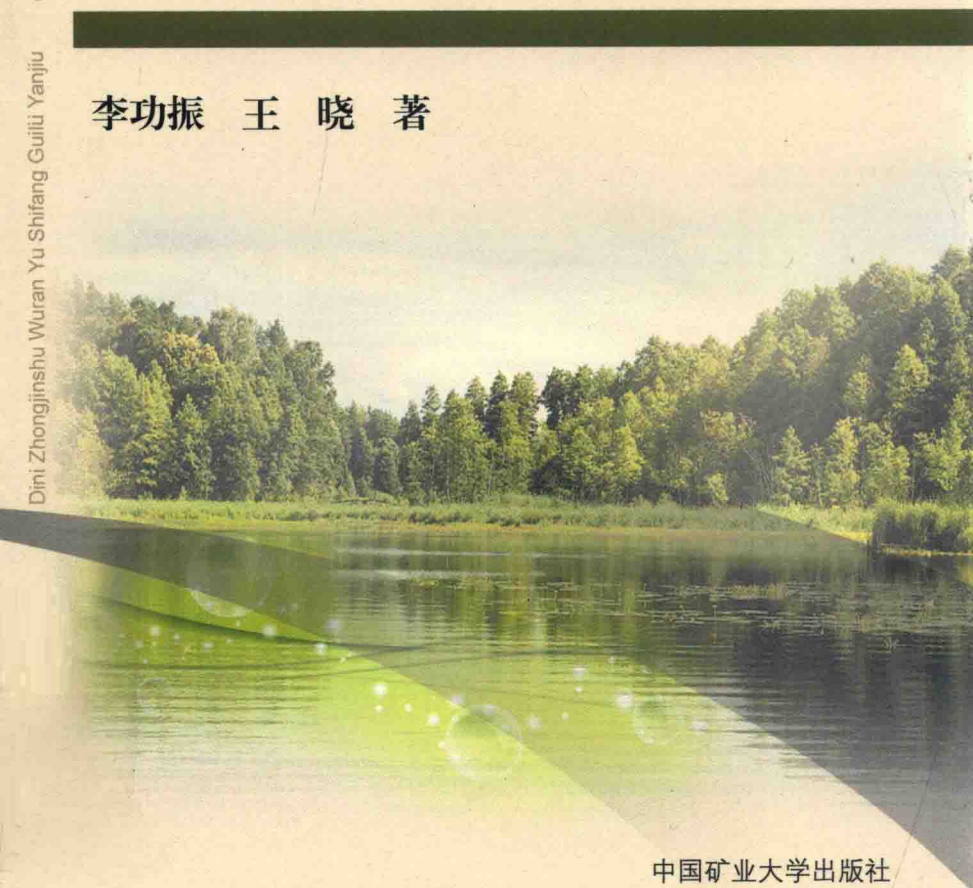
李功振 王 晓 著

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

Jinghang Dayunhe Subeiduan

Dini Zhongjinshu Wuran Yu Shifang Guiliu Yanjiu



京杭大运河(苏北段) 底泥重金属污染与释放规律研究

李功振 王 晓 著

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

京杭大运河(苏北段)是我国南水北调工程的东线输水通道,其水质污染将严重影响南水北调的水质安全。输水水质除受调入水质影响外,输水通道的沉积物中的重金属也对水质有较大影响。本书对京杭大运河(苏北段)沉积物的重金属污染情况进行了系统研究。

图书在版编目(CIP)数据

京杭大运河(苏北段)底泥重金属污染与释放规律研究

/李功振,王晓著. —徐州:中国矿业大学出版社,2013.12

ISBN 978 - 7 - 5646 - 1681 - 6

I. ①京… II. ①李… ②王… III. ①大运河—河流底泥—重金属污染—研究—苏北地区 IV. ①X522

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 239250 号

书 名 京杭大运河(苏北段)底泥重金属污染与释放规律研究

著 者 李功振 王 晓

责任编辑 孟 茜 时应征 耿东锋

责任校对 周俊平

出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司

(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)

营销热线 (0516)83885307 83884995

出版服务 (0516)83885767 83884920

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com

印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司

开 本 850×1168 1/32 印张 5.125 字数 133 千字

版次印次 2013 年 12 月第 1 版 2013 年 12 月第 1 次印刷

定 价 28.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

京杭大运河(苏北段)是我国南水北调工程的东线输水通道,其水质情况将严重影响南水北调的水质安全。输水水质除受调入水质影响外,输水通道的沉积物中的重金属也将对水质有较大影响。本课题在教育部博士点专项科研基金和教育部出国留学基金的支持下对京杭大运河(苏北段)沉积物的重金属污染情况进行了系统研究。

本书系统介绍了京杭大运河(苏北段)底泥重金属的污染程度和释放的规律。

首先,运用 X 射线衍射技术对京杭大运河(苏北段)23 个底泥样品进行了矿物组成分析,采用电感耦合等离子质谱、双道原子荧光光度计和总有机碳测试仪分别对京杭大运河(苏北段)55 个底泥样品中重金属(Cu、Cd、Pb、Zn、Cr、Hg、As)进行了总量、形态和有机碳的测试,并且采用 SPSS 软件进行了相关性分析和主成分分析。

其次,采用地积累指数法、生态风险评价法和健康风险评价法对底泥的重金属污染风险进行了评价。

最后,利用水槽(UPVC 材料,全长 1.5 m)模拟了河道在不同工况下(温度、流速、pH 值、络合物的浓度)底泥中重金属的释放特征,单因素和正交多因素实验结果表明:控制底泥重金属释放的影响因素中按其影响程度大小分别是流速、络合剂、pH 值、温度;依据实验结果,建立了底泥中镉向上覆水体释放的模型: $C=Q/VK+(1-1/VK)Ve^{kt}$,并得出其释放系数为 0.020。

本书是在博士论文的基础上整编而成的,书中取得的成果倾注了导师韩宝平教授的心血。导师优秀的品德、渊博的学识、严谨的治学态度、无私奉献的拼搏精神和随和的处世风格不仅使我感悟颇多、受益匪浅,也一直激励着我去克服困难、不断进取。

由于作者水平有限,书中难免出现错误和不当之处,敬请同行和读者不吝赐教。

著 者

2012年9月

目 录

1 引言	1
1.1 国内外河道中底泥重金属污染的研究现状	1
1.2 沉积物中重金属的释放行为与对策研究	7
1.3 研究的意义和内容	13
2 京杭大运河(苏北段)概况及样品采集	17
2.1 京杭大运河(苏北段)概况及研究现状	17
2.2 京杭大运河(苏北段)底泥样品采集	24
3 京杭大运河(苏北段)底泥重金属赋存特征研究	29
3.1 京杭大运河(苏北段)底泥成分特征研究	29
3.2 京杭大运河(苏北段)底泥重金属总量的测定	35
3.3 底泥重金属的形态测定	45
3.4 TOC 与重金属各形态相关性分析	57
3.5 底泥的重金属主成分分析	61
3.6 本章小结	64
4 京杭大运河(苏北段)底泥重金属的污染生态评价和 风险评价	65
4.1 京杭大运河苏北段底泥重金属污染评价	65
4.2 京杭大运河(苏北段)底泥重金属的健康 风险评价	84

4.3	本章小结	97
5	京杭大运河(苏北段)底泥重金属的释放特征研究	99
5.1	底泥中重金属的单因素释放实验研究	99
5.2	底泥重金属释放动力学模型的建立	139
5.3	小结	142
6	结论与展望	144
6.1	结论	144
6.2	展望	145
	参考文献	146

1 引言

水和人类的关系是密不可分的,但是随着工农业的迅速发展和城市化进程的加快,水体污染和水资源短缺等问题已经成为世界各国都广泛关注的环境问题。而在对水体造成污染的诸多污染物中,又以重金属元素的危害最大。因为重金属在进入环境后,能在环境中长期累积,并且对人体和生物体能产生毒副作用,所以,长期以来重金属在水体中的行为和环境效应是环境研究的热点问题之一。

1.1 国内外河道中底泥重金属污染的研究现状

1.1.1 水体底泥污染研究现状

从本质上讲,地球的环境问题是人类社会片面追求经济发展的恶果。尤其是在近代,西方工业化高速发展更加剧了人类生存环境的危机,其中包括底泥污染。现在,不仅在发达国家,而且还扩展到发展中国家,许多河流、湖泊和海洋的底泥已经遭受了不同程度的污染。

在过去的几十年中,国内外很多学者研究了河道、湖泊、海湾等底泥中的重金属污染物的含量及其形态分布,提出了新的观点。进入地表水的富含重金属的污染物,在水体的中经过各种物理化学过程,最终沉积到底泥中。大量的研究表明,底泥中的重金属含量比水相中的含量高很多倍。在受重金属污染的水体中,水相

中重金属的含量很小,而且随机性很大,常随着水体的物理情况和化学条件的变化而变化,其重金属的含量无规律可寻。而底泥中的有机碳和黏土矿物的含量对其有很大影响,因为它们对进入底泥的重金属离子具有吸附作用,正是这种吸附作用致使进入水体的重金属污染物大部分沉积到底泥中。

由于底泥相当稳定以及重金属环境地球化学行为上的特征,对进入底泥的重金属的含量和形态分析可以找出其来源,分析其特征对水体和人类的影响,进一步治理和减少对人类的影响提供保障。

河流、湖泊和海洋底部广泛分布的底泥是地球表层生态和地质环境系统中有机的组成部分,在那里不仅微生物活动十分活跃,而且生存着许多具有经济价值和在食物链中具有重要意义的生物。但是由于沉积作用,底泥已成为重金属、营养物和有机物等各种污染物的重要储存库,一旦底泥遭受污染,必然导致河道生态环境的恶化,造成经济损失,甚至威胁人类的生存。即使发达国家在水质改善方面取得了相当的成功,但其对水体底泥污染的控制仍不容乐观,如美国 EPA 在 1998 年 9 月《关于污染底泥战略总报告》中指出,“在全美国许多水域污染底泥都造成生态和人体健康的危机,底泥成为污染物的储存库”。其主要原因在于底泥与上覆水体间会发生频繁的交换作用,导致被污染的底泥环境成为河、湖和海洋二次污染潜在的来源。因此,底泥污染的研究对最终解决人类面临的日益严重的环境危机具有重要的理论和实际意义。

1.1.2 底泥重金属污染研究现状

自 20 世纪 50 年代起,因重金属引起的一系列公害事件就时有发生,如水俣病、骨痛病等,环境中重金属污染引起了人们的高度重视。一般把在元素周期表中原子序数大于铁的原子序数,而且密度大于 5.0 g/cm^3 的元素称为重金属。在环境地球化学研究

中,重金属主要指汞、镉、铅、铬以及类金属砷及其化合物,也包括具有毒性的金属铜、钴、镍和锡等。重金属是一类危害特别严重的污染物,排入环境后,不易被去除,易在生物体内积累,并随着食物链的传递,影响生物的正常生长,威胁人类的健康。

水环境中重金属污染已经成为环境科学研究中的一个令人十分关注的问题。在过去的十几年中,检测重金属的污染源,确定其沉积的地点和条件以及输入的年代都取得了重要的进展,最近的工作主要集中在对水下(湖泊、河流、河口及海湾等)底泥的研究上。其中湖泊底泥在水体污染研究中具有特殊的重要性,一方面,底泥通过对重金属污染物的吸附和释放,影响水体和大气环境质量;另一方面,进入湖泊中的重金属除少部分可以通过水生生物的捕捞带出水体外,大部分沉积在湖泊的底泥中。底泥是水体中重金属的重要蓄积库和归宿地,底泥又是底栖生物的主要生活场所和食物来源,其中的化学物质直接或间接的对底栖生物、上覆水生物致毒致害,并通过生物富集、生物放大作用等进一步影响陆地生物,甚至人类,对水生生物和人类具有潜在生态毒性。

已有的研究表明,进入水系的重金属主要在水体沉积物(包括悬浮物和底泥)中富集,沉积物中的大部分金属总量的浓度比水体中的浓度高出几个数量级。底泥重金属污染是对环境质量和人类健康最大的危险之一。一方面底泥中的重金属污染反映了水体受污染的状况,其含量和形态的分布特征决定着底泥对人体、生物和水体的影响程度;另一方面,在环境条件改变时,束缚在底泥中的重金属可被释放出来造成二次污染,对水环境、生物及人类具有危害作用,因此研究者首先重视底泥重金属含量的研究。利用特定的评价方法(如地质累积指数法)对底泥重金属进行评价可以判断研究区域底泥受重金属污染的程度。重金属含量的水平分布可以追踪其污染源,了解其扩散范围;底泥重金属的剖面垂向分布是水体重金属污染历史的记录,如果把剖面不同层位的重金属含量与

未污染区背景值进行对照,则可了解所研究区域重金属的污染历史,反映不同历史阶段人类活动对研究区域重金属输送量的变化情况,对研究水体重金属污染有重要的意义。因此,国内外很多学者在研究底泥中重金属的污染状况时,一般都会通过研究重金属的水平分布和垂向分布规律来确定重金属污染的来源、污染历史、人类活动的影响等。此外,由于多种微量金属在水体中的迁移和分布变化都与底泥有着密切的联系,对底泥重金属的研究有助于了解这些元素的含量、转移转化规律、分布现状,以便对整个环境现状做出正确的评价。因此,底泥重金属含量研究应该是环境评价中重要的一个环节。

近 20 年来,研究者已不满足于了解水体底泥中重金属的总量,认识到重金属的总量已经不能很好地揭示重金属的生物可利用性、毒性及其在环境中的化学活性和再迁移性,而是进一步研究其赋存的化学形态。因为重金属污染物在底泥中的赋存形态的不同,其生物有效性及其在水体中的迁移行为都会相差很远。而且不同形态的重金属释放的难易程度不同,生物可利用性也不同,毒性大小也不一样。因此基于水体底泥重金属形态的重要性,自 20 世纪 70 年代起,国内外很多学者便开展了重金属形态分析的研究工作。瑞典的 Stumn 和德国的 Forstner 都对形态研究做过专题讨论。国内也正在开展元素化学形态的研究,普遍认为元素形态实际上包括价态、化合态、结合态和结构状态 4 个方面,如金属的离子态、络合态、溶解态和颗粒态等。而我国学者汤鸿霄提出“所谓形态,实际上包括价态、化合态、结合态和结构态 4 个方面,有可能分别表现出不同的生物毒性和环境行为”。

为了便于研究底泥重金属形态,许多学者对底泥中重金属形态的提取和分离方法进行了研究,提出了各种各样的提取方法,可将其分为某一形态的单独或部分提取方法和各种形态的多步连续提取方法。其中某一形态的单独提取方法适于痕量金属大大超过

地球化学背景值后的污染调查研究。而底泥中重金属的连续提取方法在许多方面优于单独提取方法,已成为当前形态研究的主要方法。一般来说,连续提取方法是使用一系列化学活性不断增强的试剂提取与特定化学基团结合的重金属。目前,底泥中重金属形态分级方法和提取剂的选择有很多种,包括七态分级法、五态分级法和四态分级法。

Salomons 指出底泥中重金属的地球化学形态有 7 种,即水溶态、易交换态、无机化合物沉淀态、大分子腐殖质结合态、氢氧化物沉淀吸收态或吸附态、硫化物沉淀态和残渣态。刘恩峰指出应将底泥中重金属分为可溶相、可交换相、碳酸盐相、铁锰氧化物相、有机相和残渣相。汤鸿霄认为化学形态分类不宜过于繁琐,可以结合环境条件,只需分为活性态、缓冲态和稳定态即可。Tessier 采用连续提取法把固体颗粒的金属的存在形态划分为五态,即可交换态(Exchangeable)、碳酸盐结合态(Carbonate)、铁锰氧化物结合态(Reducible)、硫化物及有机物结合态(Oxidizable)以及残渣(留)态(Residual),目前这一方法得到广泛应用。除了 Tessier 的连续提取法,欧共体标准测量与检测局(BCR)推荐的方法也应用得较多。

重金属的生物有效性与其在间隙水中溶解态浓度直接相关,而这一浓度受控于重金属与底泥固相的吸附与结合。底泥中的有机物、铁锰水合氧化物及酸挥发性硫化物(AVS, acid volatile sulfide)等是主要的重金属结合相。自 DiToro 首次报道了水体底泥中 AVS 对 Cd 的生物有效性的强烈影响后,底泥中 AVS 已成为水环境重金属质量评价研究的热点。最近的一些研究表明,底泥中酸挥发性硫化物的含量对底泥中重金属在水与底泥间的分配行为有决定性影响,对底泥中重金属化学活性浓度和生物毒性效应起着主控作用。已有的研究表明,AVS 含量不仅控制着底泥孔隙水中有效态重金属的浓度,而且通过与重金属形成硫化物影

响着底泥中重金属的毒性。不仅在还原型的海洋底泥中,甚至在淡水湖泊和河流底泥中,都有可能会有显著含量的 AVS。AVS, 指在 1 mol/L 冷盐酸介质中可挥发释放出 H_2S 的底泥固相可溶部分,以 S^{2-} 含量表达。在用盐酸提取 AVS 过程中同步提取的金属(Simultaneous extracted metal)称做 SEM。过渡金属元素特别是二价重金属(如: Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Cd^{2+} 、 Ni^{2+} 、 Co^{2+})多为亲硫元素,它们极易与 AVS 中的 S^{2-} 反应生成难溶金属硫化物,从而制约着底泥中二价有毒金属的化学活性和生物有效性。当底泥中 SEM($\text{SEM}_{\text{Cd}} + \text{SEM}_{\text{Cu}} + \text{SEM}_{\text{Pb}} + \text{SEM}_{\text{Zn}} + \text{SEM}_{\text{Ni}}$)与 AVS 的摩尔比大于 1 时,底泥中的重金属就释放到间隙水中,由于生物体通过自己的皮肤过滤和吸收间隙水,因而具有潜在的生物毒性;当小于 1 时就无生物毒性。据此,SEM/AVS 的比值是预测底泥中重金属生物有效性的很好参数。因此研究底泥中 AVS 与 SEM 的含量及其变化对于评价水体重金属生物有效性及建立重金属质量基准具有重要意义。

但目前有关 AVS 的文献大都是对暴露于底泥中的底栖生物的直接毒性进行研究,而没有考虑到重金属释放对水环境的影响,并且,关于底泥中 AVS 对上覆水中重金属浓度的影响也很少有人涉及。

魏俊峰、吴大清等研究了广州城市水体污染沉积物在不同 pH 值条件下释放重金属的能力以及酸性条件下重金属的释放动力学,认为重金属从污染沉积物中的释放主要是在酸性($\text{pH} < 4$)条件下发生,并且释放率随 pH 值的升高而迅速降低;重金属的释放动力学过程可以用 Elovich 方程和双常数速率方程(Freundlich 修正式)较好地描述。李鱼、刘亮等人研究了哈尔滨何家沟底泥中 Cu、Pb、Zn、Cd 释放的动力学过程及其影响因素,并用二级反应动力学等方程对其进行描述,认为二级反应动力学方程拟合效果最好,pH 值对重金属的释放影响最大,而温度、盐度、泥水比的影响

相对较小,且随着温度、盐度、泥水比的升高,淤泥中重金属的释放量呈增加趋势。梁文俊、李坚等研究了汾河太原段底泥中 Ni 和 Zn 的释放规律,认为时间对二者的动态释放影响基本相同, Ni 比 Zn 更容易释放。路永正、董德明等采用模拟实验研究了长春市伊通河沉积物中重金属 Cu, Pb, Zn 和 Cd 在曝气条件下的释放规律,认为 4 种重金属的释放速率和过程各不相同, Zn 的释放速率远远小于 Pb 和 Cd, Pb 和 Zn 在曝气一段时间后均出现再吸附或共沉降现象。V. Hatjea, T. E. Payneb 等研究了 pH 值、盐度和颗粒物浓度对河口水体中颗粒物吸附与解吸重金属元素的影响后,认为 pH 值的影响取决于重金属元素的种类和盐度,盐度效应总体上使在越高的 pH 值下重金属元素越容易被吸附,随着时间和颗粒物浓度的增加,吸附量也随之增加,各元素吸附的可逆性大小为 $\text{Co} > \text{Mn} > \text{Zn} > \text{Cd} > \text{Fe} > \text{Cr}$ 。Cd, Zn 和 Co 在海水中的解吸百分率远大于在淡水中解吸百分率。

1.2 沉积物中重金属的释放行为与对策研究

进入水体中的重金属可以被水体中的固体物质所吸附,这是重金属由不饱和液相转入固相过程中水体自净的主要途径;另一方面,吸附了重金属的固体或泥沙颗粒在一定的水环境条件下,又会因为一些物理、化学、生物作用,重新将这些重金属释放进入水体中,造成水体的二次污染。例如,污染的泥沙被带入较为洁净的水体中后,床面沉积的被污染泥沙就会变成悬浮泥沙,从而导致污染物的释放;再如,疏浚河流时,床面泥沙被扰动悬浮起来,常发现疏浚水域有一定范围内重金属污染物浓度有显著增加现象。因此研究沉积物结合重金属释放的影响因素是十分重要的。

到目前为止,许多研究者都曾对沉积物中重金属释放问题开展过研究,但这些研究多集中在底泥重金属释放影响因素上,而且

研究表明,对沉积物中重金属释放影响较大的因素主要有:

(1) 盐浓度升高。碱金属和碱土金属阳离子可以被吸附在固体颗粒上的金属离子置换出来。这一作用主要发生在河、海界面,即河口地区。当携带重金属的河流悬浮物进入河口区,与海水接触时,部分重金属离子便从悬浮物上解吸下来。这是由陆地向海洋输送重金属的重要方式。在大大提高盐类浓度的水中,悬浮物与沉积物中的镉、铜、镍、锌、钴等可以被释放出来,而铁、锰和铬基本上不被释放。Cd 的吸附解吸作用明显与溶液中的 Cd 的浓度和盐度有关,溶解态的 Mn 含量远高于盐度区,而颗粒态 Mn 正好相反。

(2) 氧化还原条件的变化。在湖泊、河口及近岸沉积物中一般均有较多的耗氧物质,其中,二价重金属易与硫化物(AVS)结合而生成难溶性金属硫化物,因此 AVS 对沉积物中重金属的生物有效性起着重要作用。由于 AVS 可氧化的特性,氧化还原条件的改变会影响与之结合的重金属的吸附与释放。曝气可以改变沉积物环境的氧化还原电位,使体系的 Eh 显著升高,结果沉积物中重金属迅速释放到水中。但是对于不同性质的沉积物来说,释放的过程可能并不相同。沉积物中的硫化物含量较高,随着时间的延长重金属的释放浓度逐渐达到峰值,随后即使继续曝气重金属也不再释放,而处于平衡状态。这主要由于曝气使沉积物中的 AVS 氧化所致。由于 AVS 的氧化,与之结合的重金属释放到水中,从而使得水中重金属浓度迅速升高;当 AVS 氧化完全后,重金属即不再释放,从而使得水中重金属浓度保持平衡。但是对 AVS 含量很低的沉积物的重金属释放试验表明,在曝气情况下,水中溶解氧浓度的升高并没有增加 Cu 和 Pb 的释放量,相反,在连续充氮气的低溶解氧条件下,沉积物样品的 Cu 和 Pb 的释放量均高于相应样品充空气的高溶解氧条件的释放量。对 Cd 和 Zn 而言,其释放量受溶解氧浓度的影响不大,这可能是沉积物中结合

重金属的主要成分是铁锰氧化物所致。

(3) pH 值降低,导致碳酸盐和氢氧化物的溶解, H^+ 的竞争作用增加了金属离子的解吸量。Calmano 等人利用 Hamburg 港受污染沉积物进行实验来检验 Eh-pH 对重金属行为的影响,他发现当 pH 值由 7 降到 3.4 时,由于酸的作用重金属发生活化释放,而且 Cd 和 Zn 要比 Cu 和 Pb 更具有活性。但当 pH 值低于 4.5 时 Eh 对金属的影响要比 pH 值大得多。文湘华等人研究表明乐安江沉积物样品所含 Cu、Pb、Zn 和 Cd 的最大释放出现在最低 pH 值条件下,金属的释放顺序是 $Zn > Cu > Cd > Pb$,出现这样的释放顺序不仅与乐安江沉积物中 Zn、Cu 的污染浓度较高有关,也与乐安江沉积物的特性有关。

天然或合成的配合剂使用量增加,能和重金属形成可溶性配合物,其行为可以改变重金属在氧化还原形态中的分配,增加金属的溶解度,改变金属的生物可利用性,影响金属被吸附的程度。

(4) 温度对释放的影响。当温度升高时,重金属释放量增大。吕兴娜对 Pb 的不同温度下的释放结果研究表明,温度对 Pb 的释放有显著影响。裘祖楠等人对城市河流淤泥中的释放受温度的影响做了研究,结果表明随着温度升高和时间推延,镉释放率随之增加并逐渐趋于恒定。

(5) 水动力条件。天然水环境沉积物中重金属的释放过程达到平衡需要几天乃至几十天时间,很明显这一过程实验室条件下很难完成。黄廷林等人利用闭路循环系统来模拟河流中重金属释放的动力学过程,并且使其最大限度接近实际河流中水力条件。研究结果表明,在沉积物重金属释放过程中 pH 值有所降低(降低幅度在 0.5 个 pH 单位以内),并且随流速增大,初始 pH 值降低, pH 值达平衡的时间缩短,说明水流紊动强度提高引起的悬浮沉积物浓度和重金属强度的增大是导致 pH 值降低的重要原因。碱度的溶出随释放过程的进行呈现递增趋势,且碱度溶出的平衡时

间与重金属释放的平衡时间相一致。这就说明释放过程中重金属碳酸盐结合态的变化是导致溶出碱度变化的根本原因。而流速提高所引起的含沙量的增加固然是导致溶出碱度增大的原因之一,但这种影响作用对于重金属结合形态变化的影响是较小的。除了这几个过程外,还有一些生物化学迁移过程也能引起金属的重新释放,从而引起重金属从沉积物迁移到动、植物体内,并可能沿着食物链进一步富集,或者直接进入水中,或者通过动植物残体的分解产物进入水中。

重金属释放过程是由上覆沉积物的压缩作用和微生物共同作用引起的。孔隙水中的细菌是引起孔隙水中有机关态结合的金属仿生降解的主要原因之一。在界面处活动的细菌可以:① 把聚集的间隙水带出沉积物界面;② 给水体带入含氧物质;③ 使颗粒物质易于迁移到沉积物表层或深层;④ 在沉积物中留下排泄物。微生物对重金属释放是多方面的,最主要表现在如下三个过程:① 分解有机质降低分子量产生较易络合金属的有机质;② 新陈代谢活动使环境发生变化,如 Eh, pH 值;③ 通过 Eh 的变化使无机化合物变成有机络合物。周立祥等对污水和污泥中重金属进行细菌淋滤效果的研究结果表明,在污泥生物淋滤过程中若不接种活性较强的氧化亚铁硫杆菌,则 Cu, Zn 的去除率较低;若接种氧化亚铁硫杆菌,去除率可达原来的 2~2.5 倍。

1.2.1 疏浚对底泥重金属行为的影响

对于调水和依靠自身净化难以恢复的河道和湖泊污染,则考虑底泥的疏浚。这对于受重金属污染的底泥,可以永久地消除沉积物对水质的影响。尽管相关报道对疏浚的效果给予了很高的期望,但底泥疏浚既有部分成功的案例,也有很多失败的案例。如南京的玄武湖、日本的 Suwa 湖等。疏浚后的底泥的出路问题也是值得考虑的。如果存放不当,导致疏浚后的污染物再进入水体,再