

河湖疏浚底泥无害化处理和资源化利用研究进展

林莉^{a,b},李青云^{a,b},吴敏^{a,b}

(长江科学院 a. 流域水环境研究所; b. 流域水资源与生态环境科学湖北省重点实验室, 武汉 430010)

摘要:我国河湖众多,底泥污染状况严重,环保疏浚是治理污染河湖的重要措施。随着我国生态文明建设目标的提出和相关法律法规的不断完善,将河湖疏浚底泥进行无害化处理和资源化综合利用是今后必然的选择。在对我国河湖底泥污染进行分类的基础上,系统综述了底泥脱水减量化、无害化处理、资源化利用和余水处理中各项技术的适用性和优缺点,并总结了不同类型污染底泥的处理处置途径,最后提出了河湖疏浚底泥治理的研究展望及建议。

关键词:疏浚底泥;污染类型;减量化;无害化处理;资源化利用

中图分类号:X524

文献标志码:A

文章编号:1001-5485(2014)10-0080-09

1 研究背景

我国河湖众多,在许多经济发达、人口密集地区,工农业生产等人类活动导致河湖受到不同程度的污染,大量污染物在底泥中富集造成底泥的严重污染。当外界环境变化时,底泥中蓄积的污染物会重新释放至水环境,成为长久性污染源。疏浚法是目前国内外治理污染河湖的主要措施^[1],也是发达国家修复持久性有毒物污染底泥的重要手段。疏浚法通过机械作用将污染底泥疏浚到地面,再进行后续处理。环保疏浚旨在清除河湖水体中的受污染底泥,控制底泥内源污染^[2],其显著特点是薄层精确局部疏浚和严格的环保工艺,并在疏浚过程中防止二次污染。一般认为,当底泥中污染物浓度高出本底值2~3倍,即需要考虑环保疏浚。我国多个河湖治理工程均采用了该方法^[3]。

疏浚法效果明显,但疏浚后的底泥含水率高,且往往含有大量有毒重金属和有机污染物,若不经处理而在环境中堆积,易对环境造成污染,也会影响底泥的资源化利用。疏浚底泥性质与土壤接近,且有机质、氮、磷等养分丰富,具有很高的利用价值。将疏浚底泥无害化处理后进行资源化利用,既可保护环境,又可节约资源,这种底泥治理方式是当今河湖水环境治理研究的热点^[4]。目前,我国疏浚底泥的综合利用刚刚起步,主要采用的还是填埋、堆肥等方

法,随着生态文明建设目标的提出和相关法律法规的完善,将疏浚底泥进行无害化处理和资源化利用是今后必然的选择。针对疏浚底泥,需采用合适的处理技术,使其变废为宝,既产生一定的经济效益,又能使环保疏浚走向可持续发展的道路。

本文将在系统总结国内外底泥疏浚相关研究的基础上,对我国河湖底泥污染进行分类,分析底泥各项脱水减量化、无害化处理、资源化利用和余水处理技术的优缺点,以及各项技术对各种污染类型底泥的适用性,总结不同类型污染底泥的处理处置途径,并提出河湖疏浚底泥治理的研究展望及建议。

2 河湖底泥污染类型及污染的地域性

河湖底泥由于受纳污染物种类的不同,污染类型大致可分为氮磷营养盐污染、重金属污染、有机物污染以及复合污染几种。底泥污染来源主要有工业污染源和农业污染源2大类。此外,湖面旅游业、水产养殖等也是造成底泥污染的来源之一。在工业发达地区,河湖底泥中重金属和有机污染物超标现象较为普遍;农业灌溉区和生活污水集中排放区底泥中主要污染物为营养盐;而在工业废水排污口和农业径流排放同时存在的区域,底泥污染类型往往呈现为氮磷营养盐、重金属和有机污染物的复合污染。如太湖表层底泥中营养物质、重金属和有机污染物含量均较高^[2];滇池草海由于紧靠昆明城区,每天

收稿日期:2013-08-12;修回日期:2013-09-04

基金项目:国家自然科学基金项目(51309019);中国清洁发展机制基金赠款项目(2012044);科技部科研院所技术开发研究专项资金项目(2012EG136134)

作者简介:林莉(1983-),女,湖北咸宁人,高级工程师,博士,主要从事流域水环境治理研究,(电话)027-82828146(电子信箱)artemis066@163.com。

接纳大量的工业废水和生活污水,其底泥中除富含氮磷污染物外,还含有高浓度的重金属^[5];云南的洱海、星云湖等湖泊由于附近主要为农业区和生活区,底泥污染表现为单一营养盐污染类型^[5]。

河湖底泥污染主要发生在经济发达、人口稠密、工农业生产活动频繁的地区,底泥污染的主要来源是外部污染源的大量入湖。在我国对污染河湖进行底泥疏浚的地区多集中于南方地区,如云南省(滇池^[5]、洱海^[5])、江苏省(太湖^[6]、玄武湖^[7])、浙江省(西湖^[8])等。北方地区报道较少,已有报道的地区有北京市(官厅水库^[9])、天津市(大沽河^[10])等。

3 疏浚底泥处理处置技术

3.1 底泥脱水减量化技术

底泥含水率是限制其后续处理效率的关键因素。传统的填埋、堆肥等底泥处理技术都不宜选用含水率 $>80\%$ 的底泥,为满足后续处置工艺需要,底泥含水率通常需降至 60% 以下。目前国内对疏浚底泥一般通过排泥场自然堆存的方式进行脱水,该法需长时间占用大量土地,且降雨及地表冲刷会导致底泥中的污染物随径流下渗或侧渗,对水环境造成二次污染。随着城市用地日趋紧张,自然堆存方式已不适用于疏浚底泥的处理。除自然堆存方式外,底泥的脱水减量化技术包括机械脱水、化学絮凝脱水和电渗脱水等。表 1 总结了上述几种底泥脱水技术的原理、优缺点、应用范围及经济成本。

机械脱水(Mechanical dehydration)是常用的底泥脱水技术,其脱水效率较高^[14]。大量研究发现,淤泥脱水的程度由淤泥中水的分布特征决定。对淤泥中水的形态和分布国内外学者做了较多研究工作^[15],淤泥中的水通常可分为自由水、间隙水、表面吸附水、化学结合水等^[16]。近年研究者将水简单地分为自由水和束缚水。自由水可以被机械力去除;而非自由水即束缚水由于与底泥固体有较强的结合力而不能被常规机械力分离^[17],因此机械脱水

仅能将含水率降至 80% 左右^[18],无法进一步降低底泥含水率。机械脱水通常需与药剂絮凝脱水结合使用。

化学絮凝(Chemical flocculation)脱水技术通过向底泥中投加絮凝剂,通过絮凝剂压缩双电层和吸附架桥功能^[19],使泥浆混合体系中某些固相聚在一起形成絮团,进行“脱稳”,实现泥水分离^[20]。污泥脱水絮凝剂包括无机和有机 2 大类。无机絮凝剂包括铁盐和铝盐等;有机絮凝剂主要有聚丙烯酰胺(PAM)等高分子物质^[21]。霍守亮等^[22]研究发现,采用复配絮凝剂比单一絮凝剂对疏浚底泥的脱水效果好。化学絮凝剂脱水由于底泥沉淀速度过于缓慢,通常需与机械脱水、固化剂固化结合使用。杨国录等^[23-24]研究了絮凝剂和固化剂组合使用对污泥脱水的效果,开发了泥水分离和淤泥固化处理成套技术,并在一些实际工程中得到应用,在淤泥脱水减量化方面取得了较好的效果。但其未解决底泥无害化问题,淤泥中含有的重金属和有毒有机污染物依然存在。当外界环境变化时,污染物仍可能释放并造成污染。

电渗脱水(Electroosmosis dewatering)通过外加直流电场对底泥等介质进行脱水。由于电渗发生在底泥颗粒间的毛细孔道内,故可以去除底泥中的毛细水与吸附水等化学结合的束缚水,使污泥的含水率降到 50% 以下,这是其他脱水法难以达到的^[25-26]。环保疏浚泥浆通常是渗透系数 $<1.0 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ 的黏性土^[27],脱水难度大。而电渗脱水法对低渗透性土壤尤其有效^[28-29],因此十分适用于疏浚底泥的处理。将电动力学技术用于污泥脱水方面国内外已有很多研究^[30],从河湖底泥、市政污泥到淤泥软基均有研究和应用报道^[17]。英国 Lamont-Black^[31]等对传统带式压滤机进行改造,设计包含了电动力学功能单元,发现改造后的脱水装置能将污泥含水率从 81% 降低到 70% 以下。陈雄峰等^[13]开展了电渗法对太湖环保疏浚底泥的脱水试验研究,将疏浚底泥含水率从 38.7% 降至 32.8% ,使底泥成形且具有一定的抗剪切强度。

电渗脱水具有设备简单、占地面积小、脱水效率

表 1 底泥脱水技术比较

Table 1 Comparison of dewatering techniques for dredged sediments

技术	原理和适用范围	优缺点	经济成本
机械脱水	利用机械所产生的压力或离心作用去除水分。适用于含水率 $\leq 97\%$ 的底泥	效率高,耗时短;但含水率降至 80% 后难以再降低,通常需结合药剂絮凝使用	3.68 元/m^3 , 原状泥 ^[11]
化学絮凝脱水	通过絮凝剂的压缩双电层和吸附架桥功能,使泥浆固体絮凝。适用范围较广	简单经济;但絮凝剂存在一定环境风险,通常需与机械脱水或固化剂脱水等结合使用	$0.8 \sim 1.0 \text{ 元/m}^3$, 原状泥 ^[12]
电渗脱水(电动力学技术)	利用底泥颗粒表面扩散双电层中的反离子在电场力作用下的迁移,带动水分子运动,产生渗流进行脱水。适用于含水率 $<80\%$ 的底泥	设备简单、占地面积小、脱水效率高,可脱除常规技术无法处理的毛细水和吸附水;但能耗较高	4.29 元/m^3 , 原状泥 ^[13]

高等优势,且能够去除常规方法无法脱除的毛细水与吸附水,具有其它脱水技术无法比拟的优势。对于含重金属的污泥,电场作用下还可产生电迁移作用,使底泥中带电的重金属离子通过迁移得到去除,降低污泥后处理带来的环境风险。相比于其它底泥脱水技术,电动力学技术高效实用,脱水效率高,是一项非常有应用前景的底泥脱水技术。

3.2 底泥无害化处理技术

疏浚底泥中含有的有毒重金属和有机污染物易对周围环境造成严重影响^[32]。因此,对于疏浚底泥还需进行无害化处理,处理技术包括固定化法、热干化法与焚烧、堆肥、生物法和电动力学法等。表2总结了上述几种底泥无害化处理技术的原理、适用对象、优缺点及经济成本。

固定化(Immobilization)技术通过外加药剂,如水泥、磷酸盐、生石灰、粉煤灰等,同污染物发生反应生成难溶物质,达到固定化污染物的目的^[36]。该技术常用于重金属污染底泥的治理,其通常不会破坏底泥中的污染物,而是使污染物不具有移动性或危害性。刘汉桥等探索了利用垃圾焚烧飞灰代替水泥进行污染底泥固化的可行性,采用20%的垃圾焚烧飞灰替代10%的水泥对底泥中的重金属进行固定化,处理后底泥中重金属浸出浓度低于毒性标准^[36],在一定程度上可实现以废治废。该技术的不足在于当外界环境发生变化时,污染物仍有释放出来并造成环境污染的可能。

底泥的热处理技术包括热干化(Heat drying)与焚烧(Incineration)等技术^[37]。热干化法是通过直接或间接加热方式,对底泥进行低温热处理,让脱水底泥中残留的水分通过蒸发进一步减少的处理工艺^[38]。为了使底泥含水率降到50%以下,热干化通常使用烟气、热电厂废气、热油等作为热媒,可进

一步减少底泥体积和重量、去除有机物和病原菌。经过热干化处理的底泥可用作土壤改良剂等^[39]。焚烧法将底泥作为固体燃料投入焚化炉中燃烧,可快速并最大程度实现底泥的减量化和无害化,焚烧产生的灰粉可用作生产水泥、砖、陶粒等的原料。焚烧法由于一次性投资大、运行维护费用高,发展受到了一定的制约。

堆肥(Compost)法是将污染底泥进行堆肥处理,利用底泥中含有的有机质、动植物遗体和微生物,加上泥土和矿物质混合堆积,在高温高湿条件下,底泥经过发酵腐熟、微生物分解而制成有机肥料,达到对有机污染物进行处理的目的^[37],同时杀死有害微生物^[40]。季俊杰等^[41]采用静态强制通气堆对氧化塘底泥进行堆肥处理,7周后底泥中总氮下降、总磷显著上升,重金属含量略有上升。堆肥法不破坏原有生态环境,对有机污染物降解效率高^[42],但需占用大量场地和时间,且对重金属治理效果不佳。

生物修复(Bioremediation)法利用特定生物体(包括微生物和植物)吸收、转化、清除或降解环境污染物,使受污染环境得到恢复^[43]。微生物修复技术多用于黑臭底泥的治理^[43-44],通过向底泥中投加微生物菌种或促生剂,对污染物进行降解或转化。微生物修复具有成本低的优点,缺点在于底泥污染成分复杂,需筛选出对特定污染物有效的多种微生物。植物修复需培育耐污能力强的植物,植物生长周期长,而河湖疏浚底泥的量通常较大,修复往往受时间和场地限制。生物法对大部分有机污染物都有效^[45],但微生物和植物根系同污染物的充分接触较为困难,同时修复效果受污染物浓度、营养盐、温度等因子的影响。

电动力学技术(Electrokinetics)是针对受污染土壤/底泥和地下水的一种绿色修复技术,主要用于从

表2 底泥无害化处理技术比较

Table 2 Comparison of harmless treatment techniques for dredged sediments

技术	原理	适用对象	优缺点	经济成本
固定化	污染物同药剂发生化学反应生成难溶物质,得到固定化	重金属污染底泥	处理费用低,操作简便;存在着重金属再次溶出的可能	未统计
热干化	通过热的作用处理底泥有害物质,并使底泥进一步减量化	有机污染底泥	污染物处理较彻底,对底泥破坏小;成本较高	330.85 元/m ³ , 蒸发水 ^[11]
焚烧	将底泥作为固体燃料投入焚化炉中燃烧	重金属和有机污染底泥	污染物处理彻底;投资和运行费用高,对底泥破坏大,可能产生空气污染物	244 ~ 487 元/m ³ , 原状泥 ^[33]
堆肥	底泥经发酵腐熟、微生物分解制成肥料,使有机物降解	有机污染底泥	成本低,不破坏原有生态,有机物处理效率高;需长时间占地	15 ~ 30 元/m ³ , 原状泥 ^[34]
生物修复法	利用生物体吸收、转化、清除或降解环境污染物	有机物污染底泥	成本低;但耗时长,易受环境因素影响	8 ~ 32 元/m ³ , 原状泥 ^[35]
电动力学技术	利用电迁移和电渗析作用使底泥中污染物迁移去除	重金属和有机污染底泥	设备简单、占地面积小、可同步脱水并去除污染物	32 ~ 169 元/m ³ , 原状泥

注:表2中经济成本计算均是以原状泥含水率为80%得到的。

低渗透性土壤/底泥中去除重金属和有机污染物。其原理是通过向污染底泥施加直流电场,使水分和污染物在电场作用下发生迁移而达到去除的目的。电场作用下的迁移主要通过电迁移和电渗析作用进行^[46-47]。电迁移作用是指底泥空隙水中带电离子在电场作用下的迁移过程;电渗析是底泥孔隙水本身的运动过程。国外研究者将疏浚出来的海港沉积物进行收集,采用电动力学技术对沉积物中的重金属进行处理,Cd, Zn, Pb, Cu 的去除率分别可达到 94%, 91%, 75%, 73%^[48-49]。林丹妮等^[50]研究了重金属污染河涌底泥的电动修复效果,发现电动修复对各种形态的重金属都有去除,对弱酸态的去除最明显。电动力学技术对有机污染物也可通过电渗析作用进行去除,解清杰^[51]等采用电动力学技术修复六氯苯污染底泥,六氯苯经 6 h 的处理去除率可达 58.8%。电动力学技术还可用于重金属和有机污染物的同时去除,T P LI 等^[47]开展了电动力学去除沉积物中六氯苯和 Zn 的中试研究,观察到二者在电场作用下均发生了明显的迁移。

电动力学技术既可用于底泥的脱水处理,也可用于底泥中重金属和有机污染物的去除。以往关于电动力学技术用于底泥脱水 and 污染物的去除是分别进行研究的。P A TUAN 等^[52]观察到在进行污泥的电动脱水处理中,污泥中部分重金属离子(如 Cr^{6+} , Zn^{2+})随脱水过程发生了迁移。若能采用合适的调控手段,将电渗脱水与电迁移去除重金属技术相结合,使底泥在脱水过程中同步实现重金属的去除,将大大减少底泥处理成本、缩减工艺流程。

通过比较底泥的各种无害化技术可知,固定化技术存在底泥中重金属再次溶出的可能性;热干化和焚烧法对底泥性质破坏较大,投资成本高;堆肥和生物修复法耗时长。相比于其它技术,电动力学修复技术对重金属和有机污染物都有效果,且污染物能从底泥中移除,符合底泥资源化利用的要求,同时,底泥的电动力学同步脱水/去除污染物技术,也是一项值得探索和研究的新方法。

3.3 疏浚底泥的资源化利用途径

疏浚底泥是一种很有利用价值的潜在资源,底泥资源化利用已成为一种必然的趋势。随着我国经济的高速发展,河湖疏浚工程越来越多,如何将经过减量化和无害化处理后的底泥进行资源化利用,使其走上可持续发展的道路,是目前研究的热点。现阶段底泥的资源化利用途径主要有土地利用和建筑利用 2 种。

3.3.1 土地利用

土地利用是把疏浚底泥应用于农田、林地、园林绿化及严重扰动的土地修复与重建等。底泥土地利用投资少、能耗低,其中有机部分可转化成土壤改良剂成分,被认为是最有发展潜力的处置方式。

(1) 农田利用。富营养化的底泥中含有大量有机质和植物生长所需的营养成分,是很有价值的生物资源。经过减量化和无害化处理后的底泥,可进行农田利用,苏德纯等^[9]将官厅水库疏浚底泥进行预处理后用作植物生长介质,发现植物在底泥上生长良好。

(2) 林地利用。底泥用于造林不会威胁人类食物链,林地处理场所又远离人口密集区,所以较为安全,另外林地、荒山往往比农田更缺乏养料,可使过量的氮、磷养料得以充分利用,养分流失而污染水体的可能性大大减小。

(3) 园林绿化。疏浚底泥用于园林绿化可以促进树木、花卉、草坪的生长,提高其观赏品质,并且由于园林绿化植物一般不会进入食物链,因此不易造成食物链污染的危害。

(4) 修复严重扰动的土地。严重扰动的土地一般已失去土壤的优良特性,无法直接植树种草,施入疏浚底泥可以增加土壤养分,改良土壤特性,促进地表植物的生长。

3.3.2 建筑和填方材料利用

(1) 建筑材料利用。底泥具有颗粒细、可塑性强、结合力强、收缩率大等特点,所生产的砖瓦质量高,可替代黏土用于制造建筑材料^[53],减少对土地资源的破坏。另外,建筑材料需求量大,可消纳大量疏浚污泥,是底泥资源化利用的较好选择,在我国有着广阔的发展前景。目前市场上有用底泥混合煤粒及一些其他成分制砖、瓷砖、水泥熟料。

(2) 填方材料利用。经过预处理后的底泥,通过改良使其满足工程要求,可进行回填施工,作为填方材料进行使用。经过脱水减量化、热干化和焚烧、固定化处理后的底泥,比较适合用作填方材料,可用于道路路基、填方工程、筑造江湖堤防和海堤工程、低洼地区回填等工程中。

由于疏浚底泥性质与土壤较为接近,且湖泊底泥有机质、氮、磷等养分含量丰富,同时重金属等有毒有害物质含量又比污水污泥低。因此,对于满足《农用污泥中污染物控制标准》(GB4284—84)的底泥,优先考虑直接进行土地利用。对于经过焚烧等方法处理的底泥,可以用作建筑材料和填方材料。而对于无法资源化利用的底泥,只能进行卫生填埋。

等其它处理。

3.4 底泥余水处理技术

环保疏浚过程中,污染底泥被泥泵叶轮打成泥浆输送到底泥基底修复区,经自然沉淀后多余的水从基底修复区溢流排放,被称为余水。余水中含有大量的氮磷、重金属和有机物等污染物,且污染物大多附着在细颗粒上,细颗粒比重小,易悬浮在余水中,很难沉降。因此,须采取一定的工程措施,加速余水中悬浮物的沉淀,使余水水质达标并回排。

化学絮凝(Chemical flocculation)是目前国内外应用最广泛的疏浚底泥余水处理技术,通过絮凝剂的作用,使余水中的颗粒聚集并脱稳,实现余水净化的目的。除化学絮凝法外,余水处理其它技术还包括水生植物过滤带、间歇吹填与多级溢流等^[54]。水生植物过滤带是在溢流堰外设立格网或栅栏,中间投放水葫芦之类的水生植物形成过滤带,或利用自然生长的芦苇等植物作为过滤带,利用植物根、茎、叶促进底泥沉淀,使余水达标排放。吹填法是在余水排放超标时,采用多级溢流和吹填停停的间歇吹填法,使泥浆在基底修复区内有较长的沉淀时间,提高余水排放水质。多级溢流是利用基底修复区的鱼塘等天然库塘,在相邻鱼塘间开口使得鱼塘串联,每个鱼塘相当于一个溢流堰,增加泥浆沉淀时间,提高出水水质。

3.5 不同类型污染底泥的无害化处理和资源化利用途径

对河湖疏浚底泥进行资源化利用是今后底泥处置的必然途径。对于疏浚底泥的处置,脱水减量化是前提,无害化处理是核心,资源化利用是最终目标。在对各种处理技术进行综述的基础上,本文提出了不同类型污染底泥无害化处理和资源化利用的建议途径(见图1)。

对于氮磷营养盐污染底泥,土地利用是底泥资源化的最佳方式,仅需对底泥进行减量化,同时使底泥满足相关产品标准的要求(如绿化用泥质、有机肥标准等),以及卫生学方面的指标(如大肠菌群值等),即可进行土地利用(利用途径如图1(a)所示)。对于重金属污染底泥,使重金属污染不超标是首要解决的任务。固化技术处理后的底泥由于存在重金属再次溶出的可能,底泥适宜进行林地和园林绿化利用,不宜用于农田中,以避免对食物链的干扰。焚烧处理后的底泥用于

建筑和填方材料,可以避免重金属的二次污染。电动力学技术既可将底泥水分降至40%以下,又可以将重金属从底泥中移除,且对底泥性质无破坏,非常适用于重金属污染底泥的处理(利用途径如图1(b)所示)。对于有机污染底泥,需使有害的有机污染物得到消化降解后,方能进行土地利用,或通过焚烧法将有机物全部消除,将灰渣用于路基材料或制作建材的骨料(利用途径如图1(c)所示)。

4 河湖疏浚底泥治理研究展望及建议

我国河流湖泊众多,且都受到不同程度的污染,环保疏浚是污染河湖治理的重要方式之一。疏浚底泥是一种很有利用价值的潜在资源,对疏浚底泥进行处理,并最终进行资源化利用,是今后疏浚底泥治理的主流方向。本文在对我国河湖污染底泥进行分类的基础上,系统综述了底泥减量化、无害化处理和资源化利用的各项技术,并总结了不同类型污染底泥的处理处置途径。关于河湖疏浚底泥的治理,笔者还有如下展望和建议:

(1) 解决疏浚底泥大面积占地的问题。河湖疏浚底泥量大,必须先进行快速的处置,再进行资源化利用。现有的排泥场自然堆存方式需长时间占用

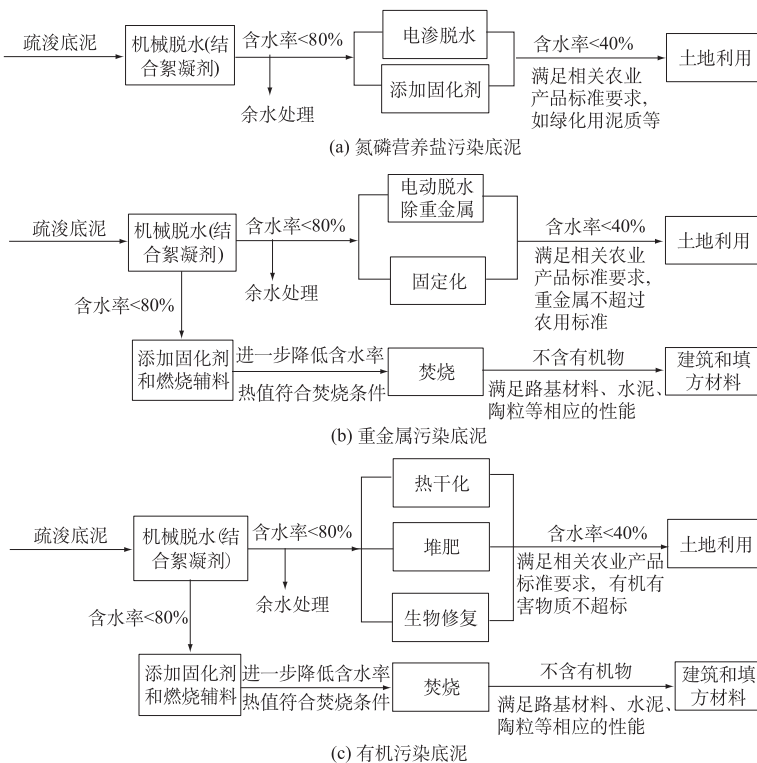


图1 不同类型污染底泥的无害化处理和资源化利用途径

Fig. 1 Approaches of harmless treatment and resource utilization for dredged sediments of different pollution types

大量土地。现阶段城市里可用于大面积堆泥的场地越来越少。未来需要开发能与输泥过程相结合的底泥脱水技术,尽量减少淤泥占地的现象。可考虑将淤泥处理设施与清淤设施直接对接,将脱水技术与疏浚底泥的输泥过程相结合,尽量在输泥过程中实现底泥的脱水减量化处理。

(2) 开发可同步实现底泥脱水减量化和无害化处理的技术。底泥中往往含有大量有毒重金属和有机污染物,对脱水后的底泥还需进行无害化处理。电动力学技术已被证明对底泥脱水和无害化处理都有较好的效果。该技术具有快速脱水能力,但目前应用的不足在于能耗较高。若能够通过电动力学设备和工艺参数的调控,在底泥电渗脱水的同时实现污染物的迁移去除,采用一项技术同时实现疏浚底泥的脱水减量化和无害化处理,将可大大减少疏浚底泥的处理程序和处理成本。

(3) 土地利用是疏浚底泥资源化利用的重要途径。疏浚底泥性质与土壤接近,且营养丰富,土地利用是最能够体现底泥价值的资源化利用途径。将底泥用作园林培植土、有机肥还可通过销售产生一定的经济效益。综合考虑,土地利用是疏浚底泥资源化利用的最佳方式,也是未来资源化利用发展的主流方向。

参考文献:

- [1] JING L D, WU C X, LIU J T, *et al.* The Effects of Dredging on Nitrogen Balance in Sediment-water Microcosms and Implications to Dredging Projects[J]. *Ecological Engineering*, 2013, (52): 167 – 174.
- [2] 郑超海, 范成新, 逢勇. 太湖底泥的污染控制及修复技术的可行性应用探讨[J]. *污染防治技术*, 2003, 16(4): 23 – 26. (ZHENG Chao-hai, FAN Cheng-xin, FENG Yong. Discussion on Feasible Application of Pollution Control and Remediation Techniques to Sediment of Taihu Basin [J]. *Pollution Control Technology*, 2003, 16(4): 23 – 26. (in Chinese))
- [3] 钟继承, 范成新. 底泥疏浚效果及环境效应研究进展[J]. *湖泊科学*, 2007, 19(1): 1 – 10. (ZHONG Ji-cheng, FAN Cheng-xin. Advance in the Study on the Effectiveness and Environmental Impact of Sediment Dredging [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2007, 19(1): 1 – 10. (in Chinese))
- [4] 郑杰. 城市湖泊清淤工程的探讨[J]. *中国农村水利水电*, 2010, 9(5): 43 – 47. (ZHENG Jie. Discussion on Urban Lake Dredging Projects [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2010, 9(5): 43 – 47. (in Chinese))
- [5] 和丽萍, 陈异晖, 赵祥华. 云南高原湖泊污染底泥环境疏浚工程设计要点问题探析[J]. *云南环境科学*, 2006, 2(增1): 40 – 42. (HE Li-ping, CHEN Yi-hui, ZHAO Xiang-hua. Analysis on Main Designing Problems of Environmental Dredging of Polluted Sediment in Plateau Lakes of Yunnan [J]. *Yunnan Environmental Science*, 2006, 2(Sup. 1): 40 – 42. (in Chinese))
- [6] 陈德林, 赵勇, 顾新刚, 等. 东太湖疏浚对河网环境影响的研究[J]. *水资源保护*, 2006, 22(3): 30 – 32. (CHEN De-lin, ZHAO Yong, GU Xin-gang, *et al.* Study on the Environmental Impact on River Network Caused by Dredging in East Lake Taihu Lake [J]. *Water Resources Protection*, 2006, 22(3): 30 – 32. (in Chinese))
- [7] 范成新, 张路, 王建军, 等. 湖泊底泥疏浚对内源释放影响的过程与机理[J]. *科学通报*, 2004, 49(15): 1523 – 1528. (FAN Cheng-xin, ZHANG Lu, WANG Jian-jun, *et al.* Process and Mechanism of Lake Sludge Dredging Effects on Endogenous Release [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(15): 1523 – 1528. (in Chinese))
- [8] 邵玉芳, 何超, 楼庆庆. 西湖疏浚淤泥的固化试验[J]. *江苏大学学报*, 2007, 28(5): 441 – 445. (SHAO Yu-fang, HE Chao, LOU Qing-qing. Stabilization of Dredged Silt from West Lake [J]. *Journal of Jiangsu University*, 2007, 28(5): 441 – 445. (in Chinese))
- [9] 苏德纯, 胡育峰, 宋崇渭, 等. 官厅水库坝前疏浚底泥的理化特征和土地利用研究[J]. *环境科学*, 2007, 28(6): 1319 – 1323. (SU De-chun, HU Yu-feng, SONG Chong-wei, *et al.* Physicochemical Properties of Guanting Reservoir Sediment and Its Land Application [J]. *Environmental Science*, 2007, 28(6): 1319 – 1323. (in Chinese))
- [10] 张云霞, 王立彤, 王馨, 等. 天津大沽排污河清淤污泥填埋场设计方案[J]. *中国给水排水*, 2006, 22(8): 46 – 50. (ZHANG Yun-xia, WANG Li-tong, WANG Xin, *et al.* Design Scheme on Landfill Site of Dredged Sediment from Dagu River [J]. *China Water & Waste Water*, 2006, 22(8): 46 – 50. (in Chinese))
- [11] 李华, 孙福奎, 陈超, 等. 污泥机械脱水与热干化脱水的经济性比较[J]. *中国给水排水*, 2012, 28(23): 143 – 144. (LI Hua, SUN Fu-kui, CHEN Chao, *et al.* Economic Comparison between Sludge Mechanical Dewatering and Sludge Thermal Drying [J]. *China Water & Waste Water*, 2012, 28(23): 143 – 144. (in Chinese))
- [12] 陈剑, 刘露莹. 污泥脱水用离心机的絮凝剂耗用量调式研究[J]. *中国给水排水*, 2012, 28(9): 97 –

100. (CHEN Jian, LIU Lu-ying. Flocculant Consumption of Centrifuge for Sludge Dewatering [J]. China Water & Waste Water, 2012, 28 (9): 97 – 100. (in Chinese))
- [13] 陈雄峰, 荆一凤, 吕 鳢, 等. 电渗法对太湖环保疏浚底泥脱水干化研究[J]. 环境科学研究, 2006, 19(5): 54 – 58. (CHEN Xiong-feng, JING Yi-feng, LV Li, *et al.* The Research of Environmental Dredged Sludge Dewatering in Taihu Lake by Electro-Osmotic [J]. Research of Environmental Sciences, 2006, 19 (5): 54 – 58. (in Chinese))
- [14] 柴朝晖, 杨国录, 刘林双, 等. 污泥机械脱水前处理方法研究进展[J]. 南水北调与水利科技, 2010, 8(5): 157 – 161. (CHAI Zhao-hui, YANG Guo-lu, LIU Lin-shuang, *et al.* Advances in the Pretreatment Methods for Sludge Mechanical Dewatering [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2010, 8(5): 157 – 161. (in Chinese))
- [15] ROBINSON J, KNOCKE R W. Use of Dilatometric and Drying Techniques for Assessing Sludge Dewatering Characteristics [J]. Water Environmental Research, 1992, 64(1): 60 – 68.
- [16] VESILIND P A. The Role of Water in Sludge Dewatering [J]. Water Environmental Research, 1994, 66 (1): 4 – 11.
- [17] GLENDINNING S, LAMONT-BLACK J, JONES C J F P. Treatment of Sewage Sludge using Electrokinetic Geosynthetics [J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, 139 (3): 491 – 499.
- [18] BRENDAN O K. Geotechnical Properties of Municipal Sewage Sludge [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2006, 24 (4): 833 – 850.
- [19] 毛艳丽, 张延凤, 罗世田, 等. 水处理用絮凝剂机理及研究进展[J]. 华中科技大学学报(城市科学版), 2008, 25 (2): 78 – 82. (MAO Yan-li, ZHANG Yan-feng, LUO Shi-tian, *et al.* Advances in Flocculation Mechanisms and Research of Water-treatment Flocculants [J]. Journal of HUST (Urban Science Edition), 2008, 25(2): 78 – 82. (in Chinese))
- [20] 胡保安. 环保疏浚泥浆脱水干化技术研究进展[J]. 水资源与水工程学报, 2009, 20(4): 132 – 136. (HU Bao-an. Research Progress on the Dewatering Technologies for Environmental Dredge Sediment [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2009, 20(4): 132 – 136. (in Chinese))
- [21] 毕 涛, 西伟力, 王旭东, 等. 絮凝剂在河湖污泥脱水中的应用研究[J]. 环境科学与管理, 2012, 37(1): 113 – 119. (BI Tao, XI Wei-li, WANG Xu-dong, *et al.* The Application and Research of Flocculants in Dehydration of Lake Sludge [J]. Environmental Science and Management, 2012, 37(1): 113 – 119. (in Chinese))
- [22] 霍守亮, 荆一凤, 程 静. 环保疏浚余水处理试验研究[J]. 环境科学研究, 2005, 18 (1): 49 – 52. (HUO Shou-liang, JING Yi-feng, CHENG Jing, *et al.* Experimental Research on Residual Water Treatment for Environmental Dredging [J]. Research of Environmental Science, 2005, 18 (1): 49 – 52. (in Chinese))
- [23] 刘林双, 杨国录, 王党伟. 絮凝剂比例以及淤泥浓度对淤泥脱水速率的影响[J]. 南水北调与水利科技, 2009, 7 (4): 57 – 59. (LIU Lin-shuang, YANG Guo-lu, WANG Dang-wei. Effects of Silt Density and Flocculent Proportion on Silt Dehydration [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2009, 7 (4): 57 – 59. (in Chinese))
- [24] 王党伟, 杨国录. 淤泥絮凝脱水试验研究及水较链假说的提出[J]. 水利水运工程学报, 2011, (4): 69 – 73. (WANG Dang-wei, YANG Guo-lu. Research on Hydrogel Chain Theory in Sludge Dehydrating by Flocculating [J]. Hydro-Science and Engineering, 2011, (4): 69 – 73. (in Chinese))
- [25] HAMIR R B, JONES C J F P, CLARKE B G. Electrically Conductive Geosynthetics for Consolidation and Reinforced Soil [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2001, 19 (8): 455 – 482.
- [26] 周家祥, 余 鹏, 刘 铮. 水平电场污泥脱水过程[J]. 化工学报, 2001, 52 (7): 635 – 638. (ZHOU Jia-xiang, YU Peng, LIU Zheng. Sludge Dewatering in Horizontal Electric Field [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2001, 52 (7): 635 – 638. (in Chinese))
- [27] 戴鼎立, 何圣兵, 陈雪初, 等. 湖库环保疏浚底泥的脱水干化技术研究进展[J]. 净水技术, 2012, 31 (1): 80 – 85. (DAI Ding-li, HE Sheng-bing, CHEN Xue-chu, *et al.* Advances in Research on Dewatering and Drying Technology of Sediment Sludge from Lakes and Reservoirs Environmental Dredging [J]. Water Purification Technology, 2012, 31(1): 80 – 85. (in Chinese))
- [28] YUAN SH, SHU Z, WAN J Z, *et al.* Enhanced Desorption of Hexachlorobenzene from Kaolin by Single and Mixed Surfactants [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2007, 314 (1): 167 – 175.
- [29] REDDY K R, SAICHEK R E. Effect of Soil Type on Electrokinetic Removal of Phenanthrene Using Surfactants and Cosolvents [J]. Journal of Environmental Engineering-ASCE, 2003, 129 (4): 336 – 346.
- [30] 冯 源, 詹良通, 陈云敏. 城市污泥电渗脱水实验研究[J]. 环境科学学报, 2012, 32 (5): 1081 – 1087.

- (FENG Yuan, ZHAN Liang-tong, CHEN Yun-min, *et al.* Laboratory Study on Electro-osmosis Dewatering of Sewage Sludge [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, 32 (5): 1081 – 1087. (in Chinese))
- [31] WEBER K, STAHL W. Improvement of Filtration Kinetics by Pressure Electrofiltration [J]. *Separation and Purification Technology*, 2002, (1), DOI:10.1016/S1383 – 5866(01)00118 – 6.
- [32] 冉光兴, 曹 卉, 李 巍. 东钱湖底泥环境特征与疏浚方案[J]. *水利水电科技进展*, 2007, 27 (2): 73 – 76. (RAN Guang-xing, CAO Hui, LI Wei, *et al.* Environmental Characteristics and Dredging Scheme for Sediment of Dongqian Lake [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2007, 27 (2): 73 – 76.
- [33] KAWALA Z, ATAMANCZUK T. Microwave Enhanced Thermal Decontamination of Soil [J]. *Environmental Science & Technology*, 1998, 32 (17): 2602 – 2607.
- [34] 马殿旗, 姜 楠, 王 涛, 等. 污泥好氧堆肥工艺技术经济分析[C]//第五届世界水大会论文集(下). 北京: 中华人民共和国建设部与国际水协会, 2006: 55 – 57. (MA Dian-qi, JIANG Nan, WANG Tao, *et al.* Economic Analysis of Sludge Aerobic Composting Technology [C]//Proceedings of the 5th IWA World Water Congress (Second Volume). Beijing: Ministry of Construction of P. R. C and International Water Association, 2006: 55 – 57. (in Chinese))
- [35] MULLIGAN C N, YONG R N, GIBBS B F. Remediation Technologies for Metal-contaminated Soils and Groundwater: An Evaluation [J]. *Engineering Geology*, 2001, 60(1 – 4): 193 – 207.
- [36] 刘汉桥, 刘彦博, 张曙光, 等. 利用垃圾焚烧飞灰固化污染底泥的实验研究[J]. *天津城市建设学院学报*, 2010, 16 (1): 31 – 34. (LIU Han-qiao, LIU Yan-bo, ZHANG Shu-guang, *et al.* Experimental Study on Solidifying Contaminated Sediment via Waste Incineration Fly Ash [J]. *Journal of Tianjin Institute of Urban Construction*, 2010, 16 (1): 31 – 34. (in Chinese))
- [37] 曹金清, 王 峥, 王朝旭, 等. 污染水体底泥治理技术研究进展[J]. *环境科学与管理*, 2007, 32 (7): 106 – 109. (CAO Jin-qing, WANG Zheng, WANG Zhao-xu, *et al.* Research on Disposition Techniques for Polluted Sediment of Water Body [J]. *Environmental Science and Management*, 2007, 32 (7): 106 – 109. (in Chinese))
- [38] 李润东, 张万里, 孙 洋, 等. 污泥热干化技术适应性分析及未来发展趋势[J]. *可再生能源*, 2012, 30(5): 95 – 99. (LI Run-dong, ZHANG Wan-li, SUN Yang, *et al.* Adaptability Analysis and Future Development Trend of Sludge Thermal Drying Technology [J]. *Renewable Energy Resources*, 2012, 30 (5): 95 – 99. (in Chinese))
- [39] 杨小文, 杜英豪. 污泥热干化在美国的应用[J]. *中国给水排水*, 2002, 18 (1): 90 – 92. (YANG Xiao-wen, DU Ying-hao. Sludge Thermal Drying Application in the United States [J]. *China Water & Wastewater*, 2002, 18 (1): 90 – 92. (in Chinese))
- [40] 隆 晓, 王 远, 许 超. 城市生活污泥与底泥混合堆肥试验研究[J]. *环境科技*, 2011, 24 (2): 10 – 12. (LONG Xiao, WANG Yuan, XU Chao. Study on Composting Process of Municipal Sewage Sludge and Dredged Sediment [J]. *Environmental Science and Technology*, 2011, 24 (2): 10 – 12. (in Chinese))
- [41] 季俊杰, 何成达, 葛丽英, 等. 氧化塘底泥堆肥过程氮磷及重金属变化研究[J]. *环境科学与技术*, 2006, (12): 20 – 21. (JI Jun-jie, HE Cheng-da, GE Li-ying, *et al.* Nitrogen and Phosphorus Transformation in Composting of Oxidation Pond Sludge [J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, (12): 20 – 21. (in Chinese))
- [42] 吕志刚, 杨艳丽, 徐 敏. 河湖疏浚底泥与固废物好氧堆肥研究[J]. *环境科技*, 2010, 23 (2): 16 – 18. (LV Zhi-gang, YANG Yan-li, XU Min. Research on Aerobic Co-composting of Water Systems Dredged Sediment and Solid Waste [J]. *Environmental Science and Technology*, 2010, 23 (2): 16 – 18. (in Chinese))
- [43] 钱嫦萍, 王东启, 陈振楼, 等. 生物修复技术在黑臭河道治理中的应用[J]. *水处理技术*, 2009, 35 (4): 13 – 17. (QIAN Chang-ping, WANG Dong-qi, CHEN Zhen-lou, *et al.* Progress of Bioremediation for Controlling Blackening and Stink of Rivers [J]. *Technology of Water Treatment*, 2009, 35 (4): 13 – 17. (in Chinese))
- [44] CHEN G Q, ZENG G M, TU X, *et al.* A Novel Biosorbent: Characterization of the Spent Mushroom Compost and Its Application for Removal of Heavy Metals [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2005, 17 (5): 756 – 760.
- [45] ZHAO L, ZHU C, GAO C, *et al.* Phytoremediation of Pentachlorophenol-contaminated Sediments by Aquatic Macrophytes [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2011, 64 (2): 581 – 588.
- [46] ACAR Y B, ALSHAWABKEH A N. Principles of Electrokinetic Remediation [J]. *Environmental Science & Technology*, 1993, 27 (13): 2638 – 2647.
- [47] LI T P, YUAN S H, WAN J Z, *et al.* Pilot-scale Electrokinetic Movement of HCB and Zn in Real Contaminated Sediments Enhanced with Hydroxypropyl-beta-cyclo-

- dextrin [J]. *Chemosphere*, 2009, 76 (9): 1226 – 1232.
- [48] NYSTROEM G M, OTTOSEN L M, VILLUMSEN A. Electrodialytic Removal of Cu, Zn, Pb, and Cd from Harbor Sediment: Influence of Changing Experimental Conditions [J]. *Environmental Science & Technology* 2005, (39): 2906 – 2911.
- [49] NYSTROM G M, OTTOSEN LM, VILLYSEN A. Test of Experimental Set-ups for Electrodialytic Removal of Cu, Zn, Pb and Cd from Different Contaminated Harbour Sediments [J]. *Engineering Geology*, 2005, 77 (3/4): 349 – 357.
- [50] 林丹妮, 谢国棵, 曾彩明, 等. 不同电压对重金属污染河涌底泥电动修复效果的影响[J]. 华南农业大学学报, 2009, 30 (3): 8 – 12. (LIN Dan-ni, XIE Guo-ke, ZENG Cai-ming, *et al.* Effect of Different Applied Voltage on Electro-kinetic Removal of Heavy Metals from Sediment [J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2009, 30 (3): 8 – 12. (in Chinese))
- [51] 解清杰, 何 佳, 黄卫红, 等. 六氯苯污染底泥的电动力学修复[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2006, 34 (6): 111 – 114. (XIE Qing-jie, HE Jia, HUANG Wei-hong, *et al.* Study of Electro-kinetic Remediation for HCB Containing Sediment [J]. *Journal of Huazhong University of Science & Technology (Natural Science Edition)*, 2006, 34 (6): 111 – 114. (in Chinese))
- [52] TUAN P A, SILLANPAA M. Migration of Ions and Organic Matter During Electro-dewatering of Anaerobic Sludge [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 173 (1 – 3): 54 – 61.
- [53] 刘贵云, 奚旦立. 利用河道底泥制备陶粒的试验研究[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2003, 29 (4): 81 – 83. (LIU Gui-yun, XI Dan-li. Experiment on Producing Ceramist with River Sediment [J]. *Journal of Donghua University*, 2003, 29 (4): 81 – 83. (in Chinese))
- [54] 刘志刚. 底泥疏浚工程中余水处理技术[C]//2012 全国河道治理与生态修复技术汇总. 北京: 中国水利技术信息中心, 2012: 189 – 193. (LIU Zhi-gang. Residual Water Treatment Technologies for Environmental Dredging [C]//Proceedings of the 2012 Conference of River Treatment and Ecological Remediation Technologies. Beijing: China Information Center for Hydro-technology, 2012: 189 – 193. (in Chinese))

(编辑:姜小兰)

Advance in Research on Harmless Treatment and Resource Utilization of Dredged Sediment of Rivers and Lakes

LIN Li^{1,2}, LI Qing-yun^{1,2}, WU Min^{1,2}

(1. Basin Water Environment Research Department, Yangtze River Scientific Research Institute,

Wuhan 430010, China; 2. Key Laboratory of Water Resources in River Basins and Ecological

Environment Science of Hubei Province, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

Abstract: Dredging is an important method for the treatment of polluted sediment in rivers and lakes. Harmless treatment and resource utilization of dredged sediment in rivers and lakes is an inevitable trend with the raise of the goal of eco-civilization the improvement of laws and regulations in China. The pollution types of sediment in rivers and lakes are classified. On this basis, dewatering techniques, harmless treatment techniques, resource utilization methods and residual water treatment techniques for dredged sediments are discussed. The applicability, advantages and disadvantages of each technique or method are analyzed and compared. The treatment approaches for different sediment types are also summarized. At last, research prospects and advices are given in order to improve the treatment efficiencies for dredged sediment.

Key words: dredged sediment; types of pollution; dewatering; harmless treatment; resource utilization