

底泥原位覆盖材料选择及应用研究进展*

申 粤¹ 聂煜东^{1,2#} 张贤明¹ 李 金¹ 颜海燕¹ 耿媛媛¹

(1.重庆工商大学环境与资源学院,废油资源化技术与装备教育部工程研究中心,重庆 400067;

2.中国科学院生态环境研究中心,环境水质学国家重点实验室,北京 100085)

摘要 底泥原位覆盖技术是一种修复效果较好、工程造价较低的水体底泥修复技术。其相对于底泥异位处理更加简便、经济、有效,且能避免异位处理时底泥对水体的二次污染,并降低生态风险。相对于其他原位修复技术,底泥原位覆盖更加快速、有效,且对生态环境的影响较小。影响底泥原位覆盖效果的因素较多,而其关键在于覆盖材料的选择。材料性质基本决定了其对底泥中污染物的控制效果。主要介绍了研究较为成熟且具有一定应用前景的覆盖材料,综述其各自的原理、特点,并对不同覆盖材料在使用中所暴露的问题进行了分析,提出了相应建议。同时结合中国环境现状,对底泥原位覆盖技术的前景进行了展望。

关键词 黑臭水体 底泥 原位覆盖 覆盖材料

DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.2021.07.018

Selection and application of materials in in-situ capping of sediment; a review SHEN Yue¹, NIE Yudong^{1,2}, ZHANG Xianming¹, LI Jin¹, YAN Haiyan¹, GENG Yuanyuan¹. (1. Engineering Research Center of Waste Oil Recycling Technology and Equipment, Ministry of Education, School of Environment and Resources, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067; 2. Research Center for Eco-Environment, Chinese Academy of Sciences, State Key Laboratory of Environmental Aquatic Chemistry, Beijing 100085)

Abstract: As an effective and economical technology in contaminated sediments remediation, in-situ capping technology shows a high economical efficiency, convenience and effectiveness in comparison to ex-situ remediation. It can avoid the secondary pollution that is induced by ex-situ remediation and reduce the ecological risk. Compared with other in-situ remediation technologies, in-situ capping works quickly and has a low impact on water ecology. There are many factors that can affect the sediment in-situ capping, and the key factor is capping materials' properties, which is the most important factor in pollutant control. This paper mainly introduced the most mature or promising capping materials which could be used in in-situ capping, reviewed their mechanisms and characteristics, further discussed the problems exposed in the applications of different sediment capping materials, and gave some suggestions in response. At the same time, in consideration of the current situation of environment in China, the prospect of in-situ capping technology in sediment treatment was proposed.

Keywords: black-odorous water; sediment; in-situ capping; capping material

近年来,随着经济的发展和城市人口的迅速增加,污水总量也随之增加,加上配套的排水系统和处理措施不健全,生活污水与工业废水没有经过完善处理就排入水体,导致水环境恶化,水体黑臭现象频发,影响人们生活,破坏生态环境,人民群众对治理水环境污染、提高日常生活质量的愿望越来越强烈。国务院在 2015 年 4 月公布的《水污染防治行动计划》(即“水十条”)中提出:“到 2020 年,全国地级及以上城市建成区黑臭水体均控制在 10% 以内;到 2030 年,城市建成区黑臭水体总体得到消除”。要达到这个目标,就必须完善配套的排水系统,并对现

有黑臭水体实施有效治理。

黑臭水体的污染物主要分外源和内源,其中内源污染物贡献率更高。截至 1998 年,美国发生的 2 100 起由污染导致的鱼类死亡事件,其污染均来源于底泥^[1]。罗锋等^[2]对我国东莞市 8 座水库共计 60 个底泥剖面进行检测,发现大部分底泥中的重金属已严重超标,影响周围及水体生态环境。在处理黑臭水体时,一般要对内源、外源污染物进行综合处理,做到内源清淤、外源截污相结合。在处理黑臭水体时,单单对外源污染物进行处理是不够的,因为底泥作为污染物主要的蓄积库,积累了大量的氮磷营

第一作者:申 粤,男,1995 年生,硕士研究生,主要从事水污染防治研究。* 通讯作者。

* 国家自然科学基金资助项目(No.21676037);重庆市教育委员会自然科学基金项目(No.KJ1600620);重庆市教育委员会科学技术研究项目(No.KJZD-K201800801)。

养盐、重金属与难降解有机物,其含量可能百倍于上覆水,超过了水体的自净能力。并且当环境发生改变时,污染物会重新释放至上覆水中,对水环境和人类健康造成威胁^[3]。因此,在处理黑臭水体时,除了对外源污染物进行控制外,还必须对内源底泥进行有效控制。当前,污染底泥的综合整治技术受到国内外广泛关注,美国和加拿大对污染底泥综合整治技术的研究开展较早,荷兰、日本、瑞典、德国等随后也启动了对该技术的研究;在该领域,我国近年来也进行了大量研究并取得了一定进展^[4-5]。目前广泛应用的底泥原位处理技术主要有覆盖、固化、氧化、淋洗、喷气、引水、生物修复和电动力学修复等^[6-12]。其中,原位覆盖技术以其操作简便、投资低廉、处理效果较好、生态风险低等优点,在黑臭底泥处理中得到了广泛应用。

原位覆盖技术通过一层或多层清洁材料将污染底泥和上覆水阻隔^[13-14]。覆盖材料的粒径、比表面积、孔隙率、密度等特性在不同水环境条件下对覆盖效果具有重要影响。覆盖材料选择不当,不仅达不到治理需求,而且可能会产生副作用导致水环境恶化。基于此,本研究结合国内外文献,阐述主要覆盖材料的优缺点,以期在黑臭水体治理工作中覆盖材料的选择提供指导。

1 覆盖材料的作用机理

原位覆盖技术主要是通过物理、化学、生物等路径对污染底泥进行控制,覆盖材料一般通过物理路径对污染物进行隔离、吸附,通过化学路径转化、中和污染物,通过生物路径分解污染物,在三者共同作用下达到降低上覆水中污染物浓度的效果^{[15-20],[21]1428,[22-23],[24]1760,[25-26]}。具体来说,覆盖材料通过阻隔底泥中的污染物,将污染底泥与上覆水进行物理隔离,使得污染物不会在水力冲击下重新悬浮至上覆水;同时,底泥由于被隔绝于水体,内部将发生一系列化学反应,污染物将逐步被转化、固化,从而降低溶解态污染物向上覆水的扩散。某些覆盖材料具有较大的比表面积和有机碳含量,便于微生物的吸附和生存,微生物可通过自身生物降解将污染物高效、彻底转化成无毒无害物质。

2 主要覆盖材料

底泥覆盖技术发展至今,开发的覆盖材料种类繁多,主要可分为以下3类^[27]:以未污染的底泥、砂子、砾石、钙质膨润土、灰渣、水泥、方解石等为代表

的无机覆盖材料;以改性黏土、改性沸石、生物炭等为代表的改性活性材料;生物菌剂或促进剂与普通覆盖材料复合而成的生物覆盖材料。

早在1978年,美国康涅狄格州纽黑文市用沙子对小镇中央长岛海湾的污染底泥进行覆盖,这是记录中首次运用原位覆盖技术处理污染底泥的实例;随后加拿大、意大利、日本及挪威等国相继实施了这一技术;1990年,Denny海湾用0.79 m沙性底泥进行覆盖处理,有效去除了水中的多氯联苯(PCBs)、多环芳烃(PAHs)等;1995年,Hamilton海湾采用0.2~0.5 m的沙子覆盖,有效去除金属、营养盐等^[28]。BONA等^[29]曾对意大利沙土覆盖底泥的工程案例进行了整体性评价,结果表明:沙土覆盖能有效防止底泥中污染物的释放,并且成本低廉、无生态毒性、适合生物栖息,同时覆盖后的生物群落能够很快恢复。基于上述优势,原位覆盖技术在全世界得到重视且已成为美国大湖修复最常用措施之一^[30]。随着技术进步,覆盖材料的选择也越来越多样化。上述无机覆盖材料能够在一定程度上抑制底泥污染物的释放,然而这类材料对污染物的抑制主要通过单一的物理隔绝作用,效果有限。为了提高覆盖材料的性能,改性活性材料被提出并得到了广泛研究。DOUGLAS等^[31]于1999年开发出了一种改性黏土作为活性覆盖材料,除具有良好的物理隔绝性能外,还对污染物具有较强的吸附能力,其对底泥中的可过滤活性磷(FRP)和TP去除率均能达到90%以上。这类活性材料不但具有无机覆盖材料的优点,且具有更强的吸附性以及反应活性。但某些活性材料因其本身材料特性,可能对水生生物具有一定毒性。基于此,生物覆盖材料应运而生。JIN等^[32]将生物菌剂和生物促生剂覆盖于底泥,结果表明,其对底泥中重金属有很好的控制效果,且无生物毒性。生物覆盖材料能够高效、彻底降解污染物,且几乎没有二次污染风险,可有效促进水生态环境修复。以下就3类材料进行更详细论述。

2.1 无机覆盖材料

无机覆盖材料主要包括天然无机覆盖材料和人工合成无机覆盖材料。一般来说,无机覆盖材料组成的覆盖层属于惰性覆盖层,对污染物不能起降解作用,主要通过水力阻滞、吸附等作用阻止底泥中污染物进入上覆水,实现上覆水与底泥污染物的分隔。

无机覆盖材料的最主要优势是其材料易得,运输方便,能够满足工程的大量需求^[33]。HULL

等^[34]以河流上游及相邻河流挖掘的清洁底泥或从岸边高地挖掘的清洁土壤进行覆盖,运输方便、成本低廉且无生态毒性。水体富营养化的主要原因之一是氮磷含量过高,用无机覆盖材料覆盖可以对氮磷进行控制。李雪菱等^[35]使用广泛分布的红壤为覆盖材料,抑制黑臭水体底泥中氮污染物的释放;结果表明,红壤原位覆盖不仅阻隔了底泥中氮污染物向上覆水释放,同时减少了上覆水中氮污染物含量。BERG 等^{[24]1764}用方解石覆盖底泥,考察其对底泥中磷释放的抑制效率;结果表明,经过 2~3 个月的控制,底泥中磷释放量减少了 80%。无机覆盖材料除能控制底泥中氮磷外,还能够对水体重金属及持久性有机污染物进行控制。但无机覆盖材料也存在一些不足,无机覆盖材料颗粒间结合力弱,抗水力扰动性差,易被冲刷和侵蚀从而导致覆盖层的完整性破坏,进而降低修复效果^[36]。无机覆盖材料有机碳含量低,吸附能力较差,为了增加对底泥中污染物的控制效果,使污染物难以穿透覆盖层,需要在设计覆盖层时大量增加覆盖材料的厚度。但是覆盖厚度过大势必会大幅减少水体库容,影响原水生生态系统的生态平衡,进而影响环境自净能力,严重时甚至会会导致该生态系统严重失衡,污染治理效果适得其反。

2.2 改性活性材料

改性活性材料来源于原位覆盖和原位处理两种方法的结合,原位覆盖技术为原位处理技术提供了具有降解活性物质或生物的载体,而原位处理技术则使原位覆盖材料具有降解污染物的功能,拓展了覆盖材料的应用范围。

1999 年, JACOBS 等^[37]采用底泥活性覆盖系统(由可共沉淀或吸附的活性材料组成)替代常规无机覆盖系统,获得了更高的污染物控制率。改性活性材料与无机覆盖材料相比,不仅可以提高底泥污染物的控制效果,还可以降低覆盖材料用量,从而最小程度影响航道和库容。目前,国内外研究和应用较多的底泥活性覆盖材料是镧改性黏土,镧改性黏土能在厌氧条件下有效捕捉游离态磷,且在自然状态下具有高稳定性、高沉降性等优点^[38-39]。袁宪正等^[40]用氯化镧对 14 种黏土进行改性,并对改性黏土吸附磷的效果进行了基础性研究,经过氯化镧改性后,14 种改性黏土对磷的吸附率均大大提高,其中浮石、搓脚石、陶土对磷的吸附率分别提升了 12、13 倍,极大减少了底泥磷含量。活性覆盖材料因其较大的比表面积和较高的有机碳含量,使微生物易

于黏附与生长,增加了生物降解污染物的效果。生物炭作为一种典型的具有大比表面积、高有机物含量的改性活性材料,其对氮磷有着强大的吸附能力,且有利于微生物生长附着,是非常有潜力的原位覆盖材料^[41]。LIU 等^[42]用 4 种生物炭对底泥进行覆盖处理,经长期观察得出,生物炭可以有效降低汞浓度。李扬等^[43]将芦竹茎、芦苇茎、花生壳及玉米芯等作为原料,利用限氧升温炭化法烧制得到生物炭,对不同生物炭在底泥污染物释放控制中的效果进行了基础性研究;结果表明,4 种生物炭处理对氨氮、COD 及 PO_4^{3-} 、 NH_4^+ 、TN 等都有削减效果,其中芦苇茎处理组效果最明显,氨氮累积释放量减少了 85.61%,主要是由于生物炭对 COD、TN 具有较强的吸附能力,同时具有较大的吸附容量^[44]。

在使用过程中,改性活性材料的缺点也逐渐暴露。改性活性材料对污染物具有较高的吸附能力,但在外部环境改变时,污染物容易二次释放。例如,磷素在水环境条件改变时,弱吸附态磷(Liable-P)、氧化还原敏感态磷(BD-P)等形态在缺氧环境时容易被重新释放^[45],需要对活性材料进一步改性,吸附磷素后将其转化为稳定态,才能有效避免二次释放。章喆等^{[21]1432}以改性高岭土作为活性覆盖材料,结果表明被其吸附的 BD-P 存在再释放的风险。张帅等^[46]提到,随着生物炭施入量增加,底泥有机质含量明显升高。有机质是反映底泥有机营养程度的重要标志,若底泥中有机质过多,其被降解时会大量消耗溶解氧,同时将有大量氮磷营养盐释放,从而增加湖泊富营养化的风险^[47]。LIN 等^[48]使用改性方解石/沸石活性覆盖体系处理底泥,研究发现较高的方解石剂量反而会降低该体系的污染物控制效果。此外,改性活性材料可能会对水体释放有毒物质,例如镧改性黏土释放的溶解性镧离子对水中某些生物具有毒性,因此将镧改性黏土投加到低碱度水体中,可能会导致水体中溶解性镧离子浓度增加,从而增加水体的生态风险^[49]。

2.3 生物覆盖材料

生物覆盖材料指以常规覆盖材料为基体、生物制剂为活性成分复合而成的一类覆盖材料。通过向常规覆盖材料中投加具有高效降解作用的微生物、动植物、酶等生物制剂,利用生物自身的生命代谢来降低在环境中存在的有毒有害物质浓度或使其无害化。

生物覆盖材料以其无毒无害且具有高效的降解能力而受到关注。JOHNSON 等^[50]研究表明,利用微生物覆盖能有效降低底泥中的 PAHs。吴光前

等^[51]在实验室条件下,将某活菌净水剂固定于特殊结构的生物带上探究其对黑臭水体及底泥的净化性能;结果表明,底泥厚度降低 80% 以上,氧含量增加,处理后的水体生物相种类和数量显著增长,水生环境得到改善。刘飞等^[52]通过将螺蛳与 3 个不同覆盖面积的菹草组合,研究菹草和螺蛳构建的覆盖体系对水体及底泥中污染物的净化效果;结果表明,氮磷及有机物的去除效果均得到大幅提升。生物覆盖材料主要利用覆盖在生物载体上的微生物所参与的各项生物化学反应来吸收并降解污染物,如生物脱氮通过硝化和反硝化作用促使氮素迁移转化以改善水生环境,且污染物通过生物转化后,能够有效减少污染物的二次释放。姚宸朕等^[53]采用固定化微生物对污染底泥进行原位覆盖控制,有效减少了微生物制剂的流失,水体中的氨氮、TN、TP、COD 等基本可维持在较低水平,底泥厚度减少了 50% 左右,底泥颜色从黑色变成土黄色。有研究表明,将微生物固定于覆盖材料上,能够显著提高其种群数量、活性、稳定性和污染物的降解效率^[54]。

生物覆盖材料通过强化生物体的某些特定功能或利用其生物代谢能力降低污染物浓度,因此它不会破坏原有生态环境,无毒性;利用生物的生命代谢活动将污染物降解以达到对污染物的去除效果,具有高效性;以其独特的生物特性,能针对性地对底泥中某种污染物高效降解,如狐尾藻、黑叶轮藻分别对底泥中的三硝基甲苯、金属铅具有专项抑制效果^[55-56]。目前,生物覆盖材料还处于实验室研究阶段,未大规模应用于实际工程,这是由以下几点决定的:(1)微生物或植物的生长都需要合适的生长环境,污染物浓度、溶解氧浓度、pH 及温度都会影响生物的生长,也会影响材料对污染物的降解效果;(2)生物覆盖材料是利用生物自身的新陈代谢等活动来

降低污染物浓度的,处理周期较长;(3)生物菌剂和促进剂一般是液体或粉末状,参与底泥覆盖时会受到流动水体冲刷而流失,从而需重新投加菌剂,且需要定期曝气维护,运行费用偏大;(4)特定的生物只能吸收降解几种特定的污染物,目前的污染物多为复合型,就需要不同物种的生物共生,必然会导致生物体的相互竞争,降低对污染物的抑制效果。

3 原位覆盖材料选择原则

原位覆盖材料多样,应针对不同水域条件选择不同覆盖材料,结合各种材料的优缺点(见表 1),对材料的选择原则提出以下几点建议。

(1) 经济性:在某些大面积水域,不建议使用改性活性材料或生物覆盖材料,价格较贵,经济性差;对某些污染程度较低的水域,应减少覆盖材料的用量,利用水体一定的自净能力净化水质以节约成本。

(2) 地理条件:无机覆盖材料会增加底泥含量,减少水库容量,因此不适用于溪流、湖泊和港口,适用于较大面积如海洋底泥的治理。

(3) 处理周期:对地市发展规划区域或拟修建交通道路附近水域,应采用无机覆盖材料或改性活性材料进行快速治理,而对一些计划周期较长的水域,可以结合水域生态环境选择生物覆盖材料进行统筹治理。

(4) 污染物类型:对某些单一污染源水域,如因工业废水而导致的黑臭水体,可采用针对性强且高效的生物覆盖材料进行治理。

(5) 严重污染物水域:对于某些污染物种类多且污染程度较重的水域,单种覆盖材料难以达到净化水质的目标,可采用多种覆盖材料进行复合治理。

原位覆盖技术是一种延展型很强的技术。在实际案例中,对于底泥污染较为复杂的区域,通常考虑

表 1 不同材料的优缺点及主要处理对象

Table 1 Advantages and disadvantages of various materials and main processing objects

种类	材料	优点	缺点	主要处理对象	参考文献
无机覆盖材料	砂子、砾石、灰渣、方解石、清洁土壤、红壤等	材料易得,方便经济,利于大面积使用,见效快	有机碳含量低,吸附能力差,污染物抑制效果有限,易被冲刷腐蚀,覆盖厚度大	有机物、重金属、氮磷营养盐、颗粒物等	[19]、[20]、[28]、[29]、[34]、[35]
改性活性材料	改性黏土、生物炭、改性沸石等	比表面积大,吸附性强,对污染物有较高的抑制效果,利于生物吸附与生存,提高生物降解效果	价格较贵,投加量需严格控制,对水中生物具有毒性,导致二次污染	COD、BOD、氮磷营养盐、重金属、PCBs、PAHs、白磷、石油等	[22]、[31]、[34]、[37]、[42]、[43]、[48]
生物覆盖材料	菹草、苦草、狐尾藻、螺蛳、黑叶轮藻、微生物生物活性剂等	无毒性,高效性,强针对性,能改善水生环境	处理周期长,价格昂贵,对环境要求苛刻,易被冲刷流失,难抑制复合型污染物	氮磷营养盐、重金属、疏水性有机化合物、PCBs、PAHs、其他石油类碳氮化合物、苯酚等	[15]、[25]、[26]、[55]至[59]、 www.cnki.net

采取复合覆盖,根据不同材料的作用特点,将其合理铺设成一个复合的覆盖体系,实现作用效果的最大化。同时,原位覆盖技术还可以与其他底泥修复技术相结合,如将覆盖技术与固化、氧化、淋洗、疏浚技术结合,共同作用对黑臭水体进行治理。

4 结论与展望

目前,原位覆盖技术的主要材料为无机覆盖材料、改性活性材料、生物覆盖材料等。无机覆盖材料较易获得,使用便捷,能够快速、有效隔绝底泥中的污染物,因此在大面积覆盖时,选择无机覆盖材料相对其他材料更为经济实用。改性活性材料是在无机覆盖材料的基础上发展而成的,具有更大的比表面积、更强的黏附性以及更高效的处理能力,能对金属、有机污染物等实现更有效去除。生物覆盖材料相对于其他材料较温和,生态友好,在实现其覆盖功能的同时可降低潜在的生态风险。

由于我国受污染水体多且复杂,其他治理方法费时费力且成本较高,因此原位覆盖技术以其经济性和便捷性,在实际工程中得以广泛应用。然而其仍然存在诸多局限性:首先,覆盖材料的投加会减少水域体积,从而影响到水域生态和航运交通;其次,覆盖材料在汛期容易被冲刷、淘蚀而失去覆盖效果;再次,覆盖材料对底泥中污染物的控制往往不具选择性,影响底泥与上覆水间的正常物质交换;最后,部分覆盖材料在隔绝污染的同时,自身会释放一定污染物,对水生态有不利影响。因此,在今后发展中,应注意以下方面:(1)选用薄层覆盖材料,在保证处理效果的前提下尽量减少用量,防止因覆盖厚度过大对航道及库容造成的影响;(2)研发稳定性强的材料,防止其因环境变化或水力冲刷失去覆盖效果;(3)某些覆盖材料并未将污染物去除,而是吸附污染物或改变污染物形态,在今后研发中,应尽量开发将污染物降解的覆盖材料,实现污染物真正无害化;(4)在选择覆盖材料时,要结合污染情况和水体环境,从而选择具有针对性的覆盖材料;(5)研发选择性强的材料,只针对污染物,不影响正常的物质交换;(6)覆盖材料应无毒性、无二次污染;(7)覆盖材料应具有较高的经济效益,便于推广。

原位覆盖技术是一项延展性较强的技术,除了研究覆盖材料本身的处理效率、经济性之外,还可将其与其他处理技术相结合,提高处理效率。如在选择覆盖材料时,与固体废弃物相结合,既能达到原位覆盖的目的,又实现了固体废弃物的资源化利用;将

原位覆盖与固化、疏浚等技术相结合,不仅能降低原位覆盖的实施难度,还能提高处理效果。因此,底泥原位覆盖技术在今后处理黑臭水体时将更多地向综合治理方向发展。

参考文献:

- [1] BLOM G, WINKELS H J. Modelling sediment accumulation and dispersion of contaminants in Lake IJsselmeer (The Netherlands)[J]. *Water Science & Technology*, 1998, 37(6/7): 17-24.
- [2] 罗锋, 华松林, 王兴, 等. 东莞水库底泥重金属污染及潜在生态风险评估[J]. *环境科学与技术*, 2018, 41(2): 183-188, 196.
- [3] YAN H, WU J, XIE H, et al. An analytical model for chemical diffusion in layered contaminated sediment systems with bioactive caps[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2019, 43(15): 2471-2490.
- [4] FOX R, TUCHMAN M. The assessment and remediation of contaminated sediments (ARCS) program[J]. *Journal of Great Lakes Research*, 1996, 22(3): 493-494.
- [5] ROETERS P B. Large scale treatment of contaminated sediments in the Netherlands, the feasibility study[J]. *Water Science & Technology*, 1998, 37(6/7): 291-298.
- [6] BROUWER E, BOBBINK R, JAN G M. Restoration of aquatic macrophyte vegetation in acidified and eutrophied softwater lakes: an overview[J]. *Aquatic Botany*, 2002, 73(4): 405-431.
- [7] 周际海, 黄荣霞, 樊后保, 等. 污染土壤修复技术研究进展[J]. *水土保持研究*, 2016, 23(3): 366-372.
- [8] DELL'ANNO F, SANSONE C, IANORA A, et al. Biosurfactant-induced remediation of contaminated marine sediments: current knowledge and future perspectives[J]. *Marine Environmental Research*, 2018, 137: 196-205.
- [9] COUVIDAT J, BENZAAZOUA M, CHATAIN V, et al. Environmental evaluation of dredged sediment submitted to a solidification stabilization process using hydraulic binders[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23(17): 17142-17157.
- [10] WANG L, TSANG D, POON C S. Green remediation and recycling of contaminated sediment by waste-incorporated stabilization/solidification[J]. *Chemosphere*, 2015, 122: 257-264.
- [11] 王伟亚, 陈维芳, 张敬会, 等. 河道底泥中重金属的 EDTA 淋洗研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2016, 27(1): 123-127.
- [12] VARGA N S, DALMACIJA B D, PRICA M D, et al. The application of solar cells in the electrokinetic remediation of metal contaminated sediments[J]. *Water Environment Research*, 2017, 89(7): 663-671.
- [13] 邹彦江. 重金属污染底泥原位覆盖技术研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2015.
- [14] 杨志敏. 净水厂污泥资源化制备底泥覆盖材料[D]. 泉州: 华侨大学, 2016.
- [15] 洪祖喜, 何品晶, 邵立明. 水体受污染底泥原地处理技术[J]. *环境保护*, 2002(10): 15-17.
- [16] 祝凌燕, 张子种, 周启星. 受污染沉积物原位覆盖材料研究进展[J]. *生态学杂志*, 2008, 27(4): 645-651.
- [17] 冀建军. 城市河道底泥营养盐释放及化学修复研究[D]. 天津: cnki.net 天津大学, 2009.
- [18] HYUN S, JAFVERT C T, LEE L S, et al. Laboratory studies

- to characterize the efficacy of sand capping a coal tar-contaminated sediment[J].Chemosphere,2006,63(10):1621-1631.
- [19] LUK C J, YIP J, YUEN C M, et al. Biosorption performance of encapsulated *Candida krusei* for the removal of copper(II)[J].Scientific Reports,2017,7:2159.
- [20] 蒋文祥.沸石固化底泥过程中无机磷迁移转化规律的研究[D].长沙:长沙理工大学,2012.
- [21] 章喆,林建伟,詹艳慧,等.锆改性高岭土覆盖对底泥与上覆水之间磷迁移转化的影响[J].环境科学,2016,37(4).
- [22] 朱丰华,任刚,李明玉,等.改性沸石去除微污染水中氨氮的试验[J].暨南大学学报(自然科学与医学版),2010,31(3):286-289,298.
- [23] JACOBS P H, WAITE T D. The role of aqueous iron(II) and manganese(II) in sub-aqueous active barrier systems containing natural clinoptilolite[J].Chemosphere,2004,54(3):313-324.
- [24] BERG U, NEUMANN T, DONNERT D, et al. Sediment capping in eutrophic lakes – efficiency of undisturbed calcite barriers to immobilize phosphorus[J]. Applied Geochemistry, 2004,19(11).
- [25] 毕磊,邱凌峰.污染底泥修复治理技术[J].中国环保产业,2010(11):32-35.
- [26] 滑丽萍,郝红,李贵宝,等.河湖底泥的生物修复研究进展[J].中国水利水电科学研究院学报,2005,3(2):124-129.
- [27] 唐艳,胡小贞,卢少勇.污染底泥原位覆盖技术综述[J].生态学杂志,2007,26(7):1125-1128.
- [28] PALERMO M R. Design considerations for *in-situ* capping of contaminated sediments[J]. Water Science & Technology, 1998,37(6/7):315-321.
- [29] BONA F, CECCONI G, MAFFIOTTI A. An integrated approach to assess the benthic quality after sediment capping in Venice lagoon[J]. Aquatic Ecosystem Health and Management, 2000,3(3):379-386.
- [30] 陈华林,陈英旭.污染底泥修复技术进展[J].农业环境保护,2002,21(2):179-182.
- [31] DOUGLAS G B, ADENEY J A, ROBB M. A novel technique for reducing bioavailable phosphorus in water and sediments[R]. Canberra:CSIRO,1999.
- [32] JIN M, WANG X W, GONG T S, et al. A novel membrane bioreactor enhanced by effective microorganisms for the treatment of domestic wastewater[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2005,69(2):229-235.
- [33] 李萍.耕作措施与干旱水平对红壤玉米根-土水分关系的影响[D].武汉:华中农业大学,2017.
- [34] HULL J, JERSAK J, KASPER C A. In situ capping of contaminated sediments: comparing the relative effectiveness of sand versus clay mineral-based sediment caps[R]. Toledo: Hull & Associates Inc.,1999.
- [35] 李雪菱,张雯,李知可,等.红壤原位覆盖对河流底泥氮污染物释放的抑制研究[J].环境污染与防治,2018,40(1):28-32.
- [36] 朱兰保,盛蒂.污染底泥原位覆盖控制技术研究进展[J].重庆文理学院学报(自然科学版),2011,30(3):38-41,55.
- [37] JACOBS P H, FÖRSTNER U. Concept of subaqueous capping of contaminated sediments with active barrier systems (ABS) using natural and modified zeolites[J]. Water Research, 1999,33(9):2089-2092.
- [38] ZAMPARAS M, ZACHARIAS I. Restoration of eutrophic freshwater by managing internal nutrient loads. A review[J]. Science of the Total Environment, 2014,496:551-562.
- [39] 黄华山,杨志敏,周真明,等.净水厂污泥覆盖控制底泥氮磷释放效果[J].华侨大学学报(自然科学版),2016,37(3):347-351.
- [40] 袁宪正,潘纲,田秉晖,等.氯化镧改性黏土固化湖泊底泥中磷的研究[J].环境科学,2007,28(2):403-406.
- [41] CHEN B L, CHEN Z M, LV S F. A novel magnetic biochar efficiently sorbs organic pollutants and phosphate[J]. Biore-source Technology, 2011,102(2):716-723.
- [42] LIU P, PTACEK C J, BLOWES D W, et al. Control of mercury and methylmercury in contaminated sediments using biochars: a long-term microcosm study[J]. Applied Geochemistry, 2018,92:30-44.
- [43] 李扬,李锋民,张修稳,等.生物炭覆盖对底泥污染物释放的影响[J].环境科学,2013,34(8):3071-3078.
- [44] 邢英,李心清,周志红,等.生物炭对水体中铵氮的吸附特征及其动力学研究[J].地球与环境,2011,39(4):511-516.
- [45] RYDIN E. Potentially mobile phosphorus in Lake Erken sediment[J]. Water Research, 2000,34(7):2037-2042.
- [46] 张帅,崔心红,朱义,等.稻壳基生物炭对不同营养底泥理化性质、上覆水和植物生长的影响[J].江苏农业科学,2017,45(22):308-313.
- [47] 孙文佳.太湖西部主要入湖河口沉积物有机质及磷的分布特征研究[D].南京:南京师范大学,2017.
- [48] LIN J, ZHAN Y, ZHU Z. Evaluation of sediment capping with active barrier systems (ABS) using calcite/zeolite mixtures to simultaneously manage phosphorus and ammonium release[J]. Science of the Total Environment, 2011,409(3):638-646.
- [49] LÜRLING M, TOLMAN Y. Effects of lanthanum and lanthanum-modified clay on growth, survival and reproduction of *Daphnia magna*[J]. Water Research, 2010,44(1):309-319.
- [50] JOHNSON K, GHOSH S. Feasibility of anaerobic biodegradation of PAHs in dredged river sediments[J]. Water Science & Technology, 1998,38(7):41-48.
- [51] 吴光前,刘倩灵,周培国,等.固定化微生物技术净化黑臭水体和底泥技术[J].水处理技术,2008,34(6):26-29.
- [52] 刘飞,段登选,李敏,等.稻草和螺蛳对养殖池塘水体及底泥氮、磷等净化效果研究[J].海洋湖沼通报,2016(6):107-112.
- [53] 姚宸朕,徐志嫻,杨杰,等.固定化微生物技术原位削减河道黑臭底泥的中试研究[J].灌溉排水学报,2018,37(3):122-128.
- [54] WANG Z Y, YING X, WANG H Y, et al. Biodegradation of crude oil in contaminated soils by free and immobilized microorganisms[J]. Pedosphere, 2012,22(5):717-725.
- [55] 滑丽萍.湖泊底泥中磷与重金属污染评价及其植物修复[D].北京:首都师范大学,2006.
- [56] 王谦,成水平.大型水生植物修复重金属污染水体研究进展[J].环境科学与技术,2010,33(5):96-102.
- [57] DE BASHAN L E, BASHAN Y. Recent advances in removing phosphorus from wastewater and its future use as fertilizer (1997-2003)[J]. Water Research, 2004,38(19):4222-4246.
- [58] DE BASHAN L E, BASHAN Y. Immobilized microalgae for removing pollutants: review of practical aspects[J]. Biore-source Technology, 2010,101(6):1611-1627.
- [59] 栾以玲,姜志林,吴永刚.栖霞山矿区植物对重金属元素富集能力的探讨[J].南京林业大学学报(自然科学版),2008,32(6):69-72.