

# 黑臭水体底泥污染评估及治理技术

王雪纯<sup>1</sup>, 白波<sup>1</sup>, 胡娜<sup>2,3</sup>, 王洪伦<sup>2,3</sup>

(1. 长安大学 旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室 陕西 西安 710054;  
2. 中国科学院西北高原生物研究所 青海 西宁 810001; 3. 青海省藏药研究重点实验室 青海 西宁 810001)

**摘要:** 综述了黑臭水体中底泥的污染现状及成因分析,对氮磷污染物、重金属污染物、持久性有机污染物等评估方法进行了系统的归纳。此外,依据污染物成分特性,以底泥治理技术为主线,科学归纳了三类不同污染型底泥的原位、异位、物理、化学、生物等技术的研究进展。

**关键词:** 黑臭水体; 底泥评估与治理; 氮磷营养盐; 重金属; 持久性有机物

中图分类号: TQ 09; TQ 033 文献标识码: A 文章编号: 1671-3206(2021)05-1439-05

DOI:10.16581/j.cnki.issn1671-3206.2021.05.039

## Assessment methods and remediation techniques of black and odorous water bodies sediment

WANG Xue-chun<sup>1</sup>, BAI Bo<sup>1</sup>, HU Na<sup>2,3</sup>, WANG Hong-lun<sup>2,3</sup>

(1. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effects in Arid Region, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 2. Northwest Plateau Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810001, China; 3. Qinghai Provincial Key Laboratory of Tibetan Medicine Research, Xining 810001, China)

**Abstract:** This paper reviews the present situation and the cause analysis of sediment pollution in black and odorous water bodies, and summarizes the evaluation methods of nitrogen and phosphorus pollutants, heavy metal pollutants and persistent organic pollutants systematically. In addition, according to the characteristics of the pollutants, the research progress of in-situ, ex-situ, physical, chemical and biological remediation technologies for three different types of polluted sediment were scientifically summarized by taking the sediment treatment technology as the main line.

**Key words:** black and odorous water; assessment and remediation of sediment; nitrogen and phosphorus; heavy metal; persistent organic

近年来现代工业的迅速发展导致流域水体加速黑臭恶化,严重影响人居环境健康。自国务院 2015 年发布《水污染防治行动计划》以来,越发引起社会各界对黑臭水体治理的重视<sup>[1]</sup>。治理黑臭底泥是解决水体内源污染的关键。本文概括了黑臭底泥的产生原因、形成机理;按照污染物类型,系统归纳了氮磷营养盐、重金属、持久性有机污染底泥的常用评估方法;总结评述了三类不同污染型底泥的原位、异位、物理、化学、生物等修复技术;提出了现阶段所存在的瓶颈问题;对现阶段黑臭水体治理研究进行讨论展望,以期为绿色、可持续发展的科学治理底泥提供理论参考。

## 1 底泥污染物

底泥中的主要污染物分为:氮磷营养盐、重金属、持久性有机污染物。通过大气沉降、降水作用、废水排放、农田退水、灌溉施肥等方式,外界环境中的污染物进入底泥,并在受到扰动时向上覆水进行释放,造成水体二次污染<sup>[2]</sup>。

### 1.1 氮磷污染

氮磷污染源主要来自面源污染的农业养殖及点源污染的生活、工业污废水排放。氮、磷化肥的残留物随地表水径流和农业灌溉进入水体底泥,在适时条件下再次释放,使水体富营养化,其氮磷循环见图 1。底泥中的含氮物质主要为含氮有机物及以粘

收稿日期: 2020-12-04 修改稿日期: 2021-02-05

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2021SF-497); 长安大学中央高校基本科研业务费专项资金资助(300102291403)

作者简介: 王雪纯(1996-),女,陕西商洛人,在读硕士,师从白波教授,主要从事新型功能材料在废水处理方面的研究工作。电话: 18702924369, E-mail: 838009200@qq.com

通讯联系人: 白波(1972-),男,教授,博士生导师,主要从事废水处理领域的研究。E-mail: baibochina@163.com

土矿物结合态存在的无机氮。在异养微生物作用下,厌氧环境中的底泥进行氨化,释放出  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  后向上扩散至底泥表层发生硝化及反硝化作用<sup>[3]</sup>,完成从有机氮到  $\text{NO}_3^--\text{N}$ 、 $\text{NO}_2^--\text{N}$  再到  $\text{N}_2\text{O}$ 、 $\text{N}_2$  的转化。随着生物脱氮新工艺的深入发展,Robertson 等发现了可同步实现硝化反硝化的好氧反硝化菌<sup>[4]</sup>,使得需要通过投加电子供体(碳源)才能脱氮的传统途

径彻底改变,有效提高脱氮性能。

底泥中的磷主要来源于河流中颗粒态磷、矿物吸附溶解态磷、金属氧化物或氢氧化物结合态磷及生物有机磷。磷在底泥——水界面的迁移转化受环境因子的影响<sup>[5]</sup>,以间隙水为媒介释放向上覆水最终迁移至生物体中。铁盐、钙盐、铝盐和镧系物等改性材料具有较好的除磷应用前景<sup>[6]</sup>。

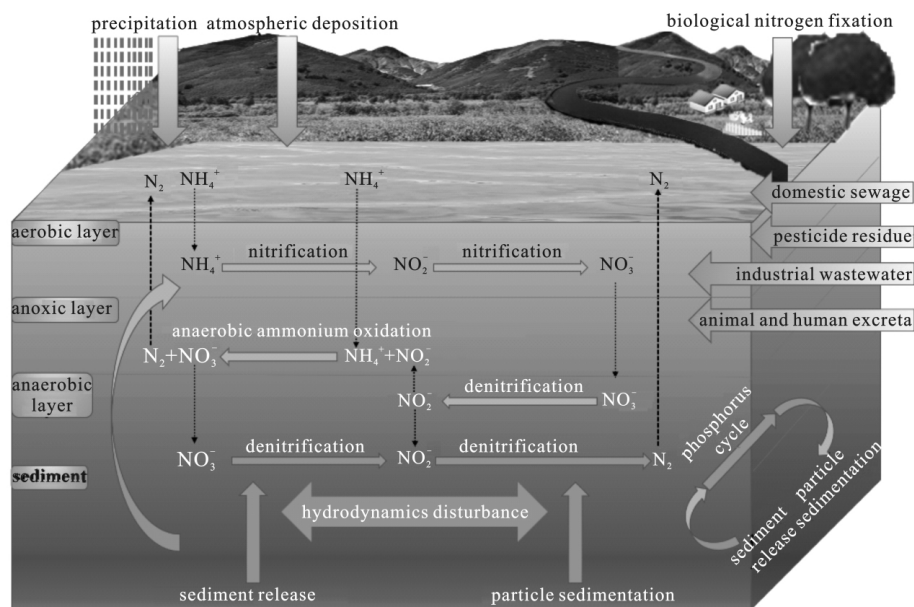


图 1 底泥氮磷来源及水体循环示意图

Fig. 1 The source and circulation of nitrogen and phosphorus in water and sediment

## 1.2 重金属、持久性有机物污染

重金属和持久性有机物是底泥污染的重要来源。重金属随地面冲淋入河流并沉积于底泥,不易被环境降解,对人体危害极大,表 1 是我国七大水系

底泥重金属污染现状。而持久性有机污染物 (POPs),包括总石油烃 (TPH)、多环芳烃 (PAHs)、多氯联苯 (PCBs) 和有机氯农药等,具有毒性、生物蓄积性和远距离环境迁移性<sup>[7]</sup>。

表 1 我国七大水系底泥重金属含量(平均值)

Table 1 Concentrations of heavy metals in sediment of some rivers in China(average value)										mg/kg
水体名称	Cr	Cd	Cu	Zn	Mn	Hg	As	Pb	Ni	文献
珠江	118.13	5.55	80.77	139.81	-	0.33	33.13	105.88	-	[8]
长江下游	74.88	0.096	44.24	107.68	-	0.19	33.92	29.77	-	[9]
太湖水系	-	0.82	20.90	78.55	-	-	15.06	30.72	24.01	[10]
淮河水系	56.20	0.10	19.50	60.20	480.60	-	-	24.00	25.20	[11]
黄河水系	-	0.68	2.65	37.70	-	0.013	0.92	0.51	-	[12]
海河水系	52.58	0.17	20.10	91.69	-	-	9.84	23.90	-	[13]
辽河水系	48.87	0.16	16.58	139.67	-	0.14	5.56	39.92	23.39	[14]
土壤环境质量标准	300	0.30	100	250	-	0.50	25	300	-	GB 15618—2018

## 2 底泥污染特性评估

科学开展底泥污染物检测,需要对污染底泥进行水质指标综合分析,查明底泥性质及污染物类型,结合不同评估方法全面了解底泥污染程度。

### 2.1 氮、磷营养盐污染底泥评估

对于氮磷营养盐超标的底泥,一般采用有机指数与有机氮指数法、污染指数法进行评估。

#### 2.1.1 有机指数与有机氮指数法 底泥环境状况

及受有机物的污染程度常用有机指数法 (Org-index) 判定;氮营养盐污染程度常用有机氮指数法 (Org-N) 来衡量<sup>[15]</sup>。

$$\text{Org-Index} = \text{Org-C}(\%) \cdot \text{Org-N}(\%) \quad (1)$$

式中,  $\text{Org-C}(\%) = \text{OM}(\%) / 1.724$ ,  $\text{Org-N}(\%) = \text{TN}(\%) \times 0.95$ , OM 表示有机质, TN 表示总氮。

2.1.2 污染指数法 此法主要对底泥中 TP 污染状况进行评估,  $P_i$  计算公式为:

$$P_i = C_i / C_{0i} \quad (2)$$

式中  $C_i$  和  $C_{0i}$  分别为底泥样品中营养物  $i$  的实测浓度及环境背景值  $\text{mg/kg}$ 。

### 2.2 重金属污染底泥评估

目前结合评估方法的侧重点及适用范围, 重金属污染底泥的评估方法有多种。

#### 2.2.1 潜在生态风险指数法 (potential ecological risk index)

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i = \sum_{i=1}^n T_r^i \times C_r^i = \sum_{i=1}^n T_r^i \times \frac{C_i}{C_n^i} \quad (3)$$

此法用于评估沉积物中重金属的生态风险<sup>[16]</sup>, 由 Hakanson 提出, 同时考虑了重金属的毒性和总含量。其中:  $RI$  为沉积物中重金属的潜在生态风险指数;  $E_r^i$  为重金属  $i$  的潜在生态风险系数;  $T_r^i$  为重金属的毒性系数 ( $T_r^i$ :  $Mn = 1, V = Cr = Ba = 2, Co = Cu = Pb = 5, Cd = 30, Sb = Tl = 40$ );  $C_r^i$  为重金属  $i$  的污染参数;  $C_i$  为重金属  $i$  的实测浓度;  $C_n^i$  为重金属  $i$  的参比值。

#### 2.2.2 富集系数法 (sediment enrichment factor)

$$K_{SFE} = (E_s / Al_s - E_a / Al_a) / (E_a / Al_a) \quad (4)$$

此法用来评价人类活动对重金属在底泥中富集程度的影响<sup>[17]</sup>,  $E_s$  为沉积物中重金属的含量;  $Al_s$  为沉积物中  $Al$  的含量;  $E_a$  为未受污染沉积物中重金属的含量;  $Al_a$  为未受污染沉积物中  $Al$  的含量 ( $Al$  为迁移过程中的惰性元素)。富集系数越大, 沉积物被重金属污染程度越高。

#### 2.2.3 内梅罗污染指数评价法 (Nemerow composite pollution index)

$$P_z = \sqrt{\frac{\left(M_{ax} \frac{C_i}{S_i}\right)^2 + \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n \frac{C_i}{S_i}\right)^2}{2}} \quad (5)$$

此法是当前国内外进行综合污染指数法计算的最常用方法之一。其中  $P_z$  是重金属的综合污染指数;  $M_{ax}$  是最大浓度值;  $i$  是重金属类别;  $C_i$  是重金属的测试值;  $S_i$  是背景值;  $n$  是评估的种类总数。

#### 2.2.4 污染负荷指数法 (pollution load index)

PLI 对重金属元素进行定量评估, 对污染程度进行分级, 量化该元素的环境污染贡献程度。污染因子 ( $CF$ ) 的计算公式:  $CF = C_i / C_{bi}$ , 式中  $C_i$  和  $C_{bi}$  分别为样品中金属  $i$  的实测含量和背景值<sup>[18]</sup>。不同  $CF$  值对应的污染等级和污染程度不同。

$$PLI = (CF_1 CF_2 CF_3 \cdots CF_n)^{\frac{1}{n}} \quad (6)$$

#### 2.2.5 地质累积指数法 (index of geoaccumulation)

又称 Muller 指数, 该指数将自然地质过程造成的背景值和人为活动的影响均纳入考虑范围内, 可直观反映人为活动对环境的影响程度。

$$I_{geo} = \log_2 \frac{C_n}{K \cdot B_n} \quad (7)$$

式中  $I_{geo}$  为地质累积指数;  $C_n$  和  $B_n$  分别为元素  $n$  在沉积物中的实测值和环境背景值  $\text{mg/kg}$ ; ( $K$  系数  $K$  取 1.5) 污染程度由弱到强分为 7 个级别<sup>[19]</sup>。

### 2.3 持久性有机物污染底泥评估

底泥中持久性有机物评价目前的研究方法共有 10 余种, MacDonald 等运用一致性基准 (CBSQGs) 获取了包含 PCBs、PAHs 等 28 种致污物的一致性基准<sup>[20]</sup>。该原理常用来应用于近海沉积物的环境质量评估, 包括了阈值效应浓度 (TEC) 与可能效应浓度 (PEC) 通过两者大小来预测有害生物效应发生的可能性<sup>[21]</sup>。表 2 对不同的底泥评价方法进行归纳总结, 并将我国部分水体底泥中的评价方法应用实际进行举例。

表 2 不同底泥评价方法之间的比较

Table 2 The comparison between different sediment evaluation methods

评价对象	评价方法	适用对象	举例	参考文献
含氮营养盐	有机指数法、有机氮指数法	用于水体受氮污染程度评价	洪泽湖、洱海入湖河口湿地	[22-23]
含磷营养盐	污染指数法	适用范围广	南京城区河道	[15]
重金属	潜在生态风险指数法	用于评价潜在生态危害	黄河三角洲、太湖、杭州城区河道	[24-26]
	富集系数法	对人类活动导致的重金属富集程度进行评估	澜沧江流域、上海市黄浦江	[27-28]
	内梅罗污染指数评价法	反映不同重金属对复合污染的贡献	巢湖	[29]
	污染负荷指数法	量化各元素对环境污染的贡献程度	南京城区河道、淮河	[15, 30]
持久性有机物	地累积指数法	直观反映人类活动影响	丹江口水库流域	[31]
	沉积物质量基准	重金属、PAHs、PCBs	黄河表层沉积物、洞庭湖	[20, 24]

### 3 底泥污染修复技术

从污染源控制原理角度出发, 底泥污染修复技术可分为物理修复、化学修复和生物修复; 按底泥处理方式可分为原位修复和异位修复; 以下按照污染物性质归纳了氮磷营养盐、重金属、持久性有机物三

类不同污染型底泥的修复方法。

#### 3.1 氮磷营养盐污染底泥修复

对于底泥中富含的氮磷营养盐, 其处理方法主要包括人工湿地、底泥覆盖、投加化学试剂钝化、微生物降解及人工曝气等。人工湿地是将自然环境中

湿地对水质的改善性能通过构建含沙石底质进行模拟修复。Mohana 等对水力、化学、生物及土木等工程原理进行综合考虑,设计出底泥覆盖生态系统<sup>[32]</sup>。目前的原位覆盖技术常结合化学或生物技术进行联合修复。如沸石由于具有天然架状多孔结构常用来作吸附氨氮的覆盖材料,并通过加以化学试剂或进行微生物挂膜来增强氨氮吸附性能;许多含镧(La)、铝(Al)和铁(Fe)的膨润土锁磷材料是抑制沉积物中磷释放的有效途径。锁磷材料和氮粘合剂的组合可以钝化沉积物中的氮磷活性,控制其向上层水体的释放<sup>[33]</sup>。Yin 等使用由 NaCl 改性的斜方沸石材料作为原位修复工程材料,辅以间接曝气,将上覆水氮磷浓度有效控制在较低范围,通过研究发现生活在底泥-水界面的管状寡毛纲水生蠕虫可在底泥垂向上构建廊道以促进泥水界面溶质交换,提高底泥对氮磷的截留能力<sup>[34]</sup>。

### 3.2 重金属污染底泥修复

重金属的毒性作用时间长且难以从环境中消除,某些金属的毒性大小也与其存在形式紧密相关。因此,通过影响重金属的物化性质来降低或消除其在底泥环境中的毒性是目前的技术关键。

表 3 重金属污染底泥化学修复<sup>[38]</sup>

Table 3 The chemical remediation of heavy metal contaminated sediment

方法	技术方法
固化	由粘土、沸石、木炭、铁锰氧化物、碳酸钙等无机结合剂或肥料、堆肥、沥青等有机粘合剂组合使用减缓重金属浸出
化学沉淀	主要包括氢氧化物沉淀法和硫化物沉淀法,前者控制 pH 介于 8.0~11.0 以产生 OH <sup>-</sup> ,同时与重金属离子作用沉淀出低密度污泥;后者则会在沉淀过程中释放 H <sub>2</sub> S
螯合法	底泥+M+EDTA→底泥+EDTA-M,以上络合反应 EDTA 几乎能与底泥中的所有重金属离子形成稳定的配位化合物,大多数重金属螯合物可溶,便于后续重金属离子的去除
溶剂浸提	水温、pH、氧化还原电位、可溶性固体组成、微生物活动等均为影响因素

### 3.3 持久性有机污染底泥修复

POPs 等在生物圈中积累并通过食物网转移,对生物体和人类构成潜在威胁,最终经迁移转化沉积于土壤以及水体沉积相。有机污染底泥的物理处理

重金属污染底泥的物理修复方式包括直接取出和间接消除两种。前者主要为疏浚、清淤,后者主要为填沙或固化掩蔽等。化学修复技术通过投入大量药剂进行化学反应,表 3 罗列了常用的重金属污染底泥化学修复方法。化学处理法通常反应时间短且效果显著,但成本较高,并会产生二次污染。与前两者相比,生物修复具有原位修复、成本低、环境友好、无二次污染等优势,是目前最具发展前景的重金属修复方法,主要原理是通过动植物或微生物的生命活动对底泥重金属进行吸收、转移和转化<sup>[35]</sup>。植物修复包括植物稳定、植物刺激、植物转化、植物过滤、植物挥发等。其中植物稳定是最有效的植物修复技术,物种的吸收潜力主要取决于植物组织中的重金属浓度和植物生物量,吸收和积累能力与其生长型有关,一般认为:沉水植物>浮叶植物>挺水植物<sup>[36]</sup>;有研究者发现大多数高蓄积植物虽显示出很高的重金属蓄积潜力,但其生物生产率却较低,而毛竹等植物不仅具有高耐受和有效吸收重金属的能力,且生长快速、总生物产率高,可作为理想的新型重金属修复植物<sup>[37]</sup>。

法主要包括活性炭吸附、生物修复法、常需多种厌氧微生物协作完成。表 4 对不同类型的高级氧化法进行归纳,相对而言,化学氧化法处理更加高效快速、反应彻底。

表 4 高级氧化法处理有机污染型底泥<sup>[39]</sup>

Table 4 The main methods of advanced oxidation in organic contaminated sediment

分类	方法	特点
化学氧化法	Fenton 法	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 在 Fe <sup>2+</sup> 的催化下分解产生 ·OH,并将有机物氧化分解成小分子,同时 Fe <sup>2+</sup> 被氧化成 Fe <sup>3+</sup> 产生沉淀
	类 Fenton 法	一些均相或非均相相催化剂,如 Fe、Mn 及其氧化物可使 H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 分解产生 ·OH
	臭氧氧化法	O <sub>3</sub> /H <sub>2</sub> O、UV/O <sub>3</sub> 、UV/O <sub>3</sub> /H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 、UV/H <sub>2</sub> O 等,利用 O <sub>3</sub> 和紫外光较强的活性来氧化处理
	过硫酸盐氧化法	基于 SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> 自由基的氧化作用处理
光催化氧化法	TiO <sub>2</sub> 、ZnO、CdS、Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 光催化法	常用过渡金属作为催化剂,通过光辐射产生的 ·OH 来氧化分解废水中有机污染物
水热氧化法	湿式氧化、超临界水氧化法	有机物在有水或超临界水介质存在的条件下,加以适当的温度和压力进行快速氧化
其他	超声波、电磁波、等离子体、电子束氧化法	超声波会在水中产生空化气泡,从而产生 ·OH 并热解有机物

## 4 结束语

本文对黑臭水体底泥的形成机理和污染物特性进行评述,重点论述了底泥评估方法及治理技术,认

识到建立全面的底泥评估体系、开展针对性的治理对策是当前研究的关键问题。因此,未来研究可深入考虑如下几个方面:①识别不同污染源类型、明确

不同地区黑臭底泥的形成机理及污染物迁移转化过程;②完善底泥评估方法,建立系统全面的评价体系以明确污染程度;③在治理修复技术方面,现阶段底泥中氮磷污染物的修复主要以脱氮除磷材料原位覆盖技术为主、重金属污染物可通过生物技术修复,持久性有机污染底泥则通过高级氧化法进行处理;④对于底泥中复合污染问题,应协同发挥各技术优势,多措并举联合修复。

#### 参考文献:

- [1] 王旭,王永刚,孙长虹,等.城市黑臭水体形成机理与评价方法研究进展[J].应用生态学报,2016,27(4):1331-1340.
- [2] YUAN S Y,TANG H W,XIAO Y,et al. Phosphorus contamination of the surface sediment at a river confluence [J]. Journal of Hydrology,2019,573:568-580.
- [3] 温娟,于静洁,钟远,等.天然湿地对富营养化水体的处理效果及作用机理分析[J].工业水处理,2013,33(4):31-35.
- [4] ROBERTSON L A,KUENEN J G. Thiosphaera pantotropha gen. nov. sp. nov. a facultatively nanaerobic, facultatively autotrophic sulphur bacterium [J]. Microbiology,1983,129(9):2847-2855.
- [5] WU Y H,WEN Y J,ZHOU J X,et al. Phosphorus release from lake sediments: Effects of pH,temperature and dissolved oxygen [J]. KSCE Journal of Civil Engineering,2014,18(1):323-329.
- [6] 李书文,周真明,杨思明,等.煅烧改性净水厂污泥对底泥内源磷释放的控制效果[J].湖泊科学,2019,31(4):961-968.
- [7] HUANG L P,CHENG S A,CHEN G H,et al. Bioelectrochemical systems for efficient recalcitrant wastes treatment [J]. Journal of Chemical Technology and Biotechnology,2011,86(4):481-491.
- [8] 杨婉玲,赖子尼,魏泰莉,等.珠江八大口门表层沉积物重金属污染及生态危害评价[J].浙江海洋学院学报(自然科学版),2009,28(2):188-191.
- [9] 易雨君,王文君,宋劼.长江中下游底泥重金属污染特征、潜在生态风险评价及来源分析[J].水利水电技术,2019,50(2):1-7.
- [10] 战玉柱,姜霞,陈春,等.太湖西南部沉积物重金属的空间分布特征和污染评价[J].环境科学研究,2011,24(4):363-370.
- [11] 刘梦琳,冯精兰,刘群,等.淮河上游表层沉积物中重金属的赋存形态及其生态风险[J].环境化学,2014,33(7):1235-1236.
- [12] TANG A K,LIU R H,LING M,et al. Distribution characteristics and controlling factors of soluble heavy metals in the Yellow River Estuary and Adjacent Sea [J]. Procedia Environmental Sciences,2010(2):1193-1198.
- [13] 苏虹程,单保庆,唐文忠,等.海河流域典型清洁水系表层沉积物中重金属总体污染水平研究[J].环境科学学报,2015,35(9):2860-2866.
- [14] 王萱,凌爽.辽河流域河流底泥重金属污染现状调查与评价[J].安徽农业科学,2013,41(30):12150-12172.
- [15] 王莉君,吴思麟.南京黑臭河道底泥污染特征及评价[J].科学技术与工程,2018,18(3):117-122.
- [16] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control,a sediment ecological approach [J]. Water Research,1980,14(8):975-1001.
- [17] CHABUKDHARA M,NEMA A K. Assessment of heavy metal contamination in hindon river sediments: A chemometric and geochemical approach [J]. Chemosphere,2012,87(8):945-953.
- [18] TOMLINSON D L,WILSON J G,HARRIS C R,et al. Problems in the assessment of heavy-metal levels in estuaries and the formation of a pollution index [J]. Helgoland Marine Research,1980,33:566-575.
- [19] AUDRY S,SCHAFFER J,BLANC G,et al. Fifty-year sedimentary record of heavy metal pollution(Cd,Zn,Cu,Pb) in the Lot River reservoirs (France) [J]. Environmental Pollution,2004,132(3):413-426.
- [20] MACDONALD D D,INGERSOLL C G,BERGER T A. Development and evaluation of consensus-based sediment quality guidelines for freshwater ecosystems [J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology,2000,39(1):20-31.
- [21] 吴斌,宋金明,李学刚,等.一致性沉积物质量基准(CBSQGs)及其在近海沉积物环境质量评价中的应用[J].环境化学,2011,30(11):1949-1956.
- [22] 余辉,张文斌,卢少勇,等.洪泽湖表层底质营养盐的形态分布特征与评价[J].环境科学,2010,31(4):961-968.
- [23] 王书锦,刘云根,王妍,等.洱海入湖河口湿地干湿季沉积物氮、磷、有机质垂向分布特征及污染风险差异性[J].环境科学,2016,37(12):4615-4625.
- [24] 宋颖,李华栋,时文博,等.黄河三角洲湿地重金属污染生态风险评价[J].环境保护科学,2018,44(5):122-126.
- [25] 王漫漫,陆昊,李慧明,等.太湖流域典型河流重金属污染和生态风险评估[J].环境化学,2016,35(10):2025-2035.
- [26] 余世清,许文锋,王泉源,等.杭州城区河道底泥重金属污染及潜在生态风险评价[J].四川环境,2011,30(4):36-43.
- [27] 张继来,傅开道,王波,等.澜沧江河床沉积物重金属污染评价[J].地理科学进展,2014,33(8):1136-1144.
- [28] 徐庆,钱瑾,张毓祥,等.上海市黄浦江表层沉积物重金属污染评价[J].中国环境监测,2011,27(3):89-92.

(下转第1448页)

- (3): 69-73.
- [15] YANG L, LI X, WANG Z, et al. Natural fiber templated TiO<sub>2</sub> microtubes via a double soaking sol-gel route and their photocatalytic performance [J]. *Applied Surface Science* 2017, 420: 346-354.
- [16] 章利民. 悬铃木修剪控果技术 [J]. *江苏林业科技*, 2000(3): 37-38.
- [17] 蒋淮军. 采用抹头重剪法是解决悬铃木弊端的有效途径 [J]. *江苏绿化*, 1997(1): 30.
- [18] 戴耀良. 法国梧桐换冠改造 [J]. *林业与生态*, 2000(5): 17.
- [19] 曾幼佛, 黄正华, 祁德胜, 等. 悬铃木少毛栽培管理措施的调查研究 [J]. *中国园林*, 1985(3): 21-23.
- [20] 宿红艳, 王磊, 张萍, 等. 控制悬铃木果毛污染的研究进展及其展望 [J]. *江苏农业科学* 2005(6): 143-145.
- [21] 沈国华, 汪企明, 蒋慎法, 等. 应用化学药剂控制悬铃木飞毛污染的研究 [J]. *江苏林业科技*, 1995(4): 1-5.
- [22] 王长剑, 王大新. 悬铃木果毛污染防治新技术试验研究 [J]. *科技信息* 2010(12): 380-381.
- [23] 郭传友, 王义彰, 朱胜东, 等. 悬铃木落果的化学调控 [J]. *淮北师范大学学报(自然科学版)* 2002, 23(4): 49-52.
- [24] 金军, 周迟骏, 周辉. 悬铃木果毛制备活性炭纤维及其在褪色上的应用 [J]. *安徽农业科学*, 2012, 40(23): 11729-11730.
- [25] 慎义勇, 黄志立, 韦朝海, 等. 油脂高效降解菌处理含油污水的实验研究 [J]. *环境科学研究*, 2000, 13(5): 4-7.
- [26] 张立伟, 段国聪. 植物油厂废水处理工艺及设备的研究 [J]. *武汉轻工大学学报* 2002(1): 17-21.
- [27] YANG L, WANG Z, LI X, et al. Hydrophobic modification of platanus fruit fibers as natural hollow fibrous sorbents for oil spill cleanup [J]. *Water Air & Soil Pollution*, 2016, 227(9): 346.
- [28] 苟海刚, 黄富宁, 杜毅帆, 等. 悬铃木果毛基吸水缓释氮肥的制备及其性能研究 [J]. *应用化工*, 2018, 47(1): 79-83.
- [29] 杨莉, 汪子孺, 李旭, 等. Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@ 改性悬铃木果毛复合中空纤维的制备及其吸附性能 [J]. *环境工程学报*, 2016, 10(5): 2375-2382.
- [30] 马延文, 熊传银, 黄雯, 等. 碳化法国梧桐絮制备碳微米管及作为超级电容器电极的研究 [J]. *无机化学学报* 2012, 28(3): 546-550.
- [31] TAN H, WANG X, JIA D, et al. Structure-dependent electrode properties of hollow carbon micro-fibers derived from Platanus fruit and willow catkins for high-performance supercapacitors [J]. *J Mater Chem A*, 2017, 5(6): 2580-2591.
- (上接第 1443 页)
- [29] 钱贞兵, 唐晓先, 徐升, 等. 巢湖湖区底泥重金属污染状况评估 [J]. *安徽农业大学学报* 2018, 45(4): 690-695.
- [30] 王婕, 刘桂建, 方婷, 等. 基于污染负荷指数法评价淮河(安徽段)底泥中重金属污染研究 [J]. *中国科学技术大学学报* 2013, 43(2): 97-103.
- [31] 刘子赫, 孟瑞红, 代辉祥, 等. 基于改进地累积指数法的沉积物重金属污染评价 [J]. *农业环境科学学报*, 2019, 38(9): 2157-2164.
- [32] MOHANA R K, BROWN M P, BARNE C R. Design criteria and theoretical basis for capping contaminated marine sediments [J]. *Applied Ocean Research*, 2000, 22(3): 85-93.
- [33] COPETTI D, FINSTERLE K, MARZIALI L, et al. Eutrophication management in surface waters using lantana modified bentonite: A review [J]. *Water Research*, 2016, 97(15): 162-174.
- [34] YIN H B, ZHU J C, TANG W Y. Management of nitrogen and phosphorus internal loading from polluted river sediment using Phoslock<sup>®</sup> and modified zeolite with intensive tubificid oligochaetes bioturbation [J]. *Chemical Engineering Journal* 2018, 353: 46-55.
- [35] AHMAD M. Remediation of metalliferous soils through the heavy metal resistant plant growth promoting bacteria, paradigms and prospects [J]. *Arabian Journal of Chemistry* 2019(12): 1365-1377.
- [36] SARWAR N, IMRAN M, SHAHEEN M R, et al. Phytoremediation strategies for soils contaminated with heavy metals: modifications and future perspectives [J]. *Chemosphere* 2017, 171: 710-721.
- [37] BIAN F Y, ZHONG Z K, ZHANG X P, et al. Bamboo—An untapped plant resource for the phytoremediation of heavy metal contaminated soils [J]. *Chemosphere* 2020, 246: 125750.
- [38] VERWEIJ R A, MORAIS P V, CORNELIS A M, et al. Influence of earthworm activity on microbial communities related with the degradation of persistent pollutants [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2012, 31(4): 794-803.
- [39] 魏晋飞, 赵霞, 景凌云, 等. 环境中多氯联苯(PCBs)的污染现状、处理方法及研究展望 [J]. *应用化工*, 2019, 48(8): 1908-1913.