



徐斌, 同济大学环境科学与工程学院党委书记, 教育部“长江学者奖励计划”特聘教授。目前担任中国城镇供水排水协会科学技术委员会常务委员、上海市环境保护产业协会智慧环境专业委员会主任委员、中国土木工程学会水工业分会给水专家委员会委员、中国工程建设标准化协会第八届城市给水排水专业委员会委员等, 并任 SCI 期刊《Water Reuse》(IWA) 编辑等。长期从事水质安全保障技术方向研究, 在水的深度处理、水消毒技术与副产物控制、二次供水水质保障技术、智慧水务等方面取得了一系列创新成果。已承担国家 863 计划、水体污染控制与治理科技重大专项等课题 40 余项, 公开发表中英文论文 230 余篇 (SCI 论文 120 余篇), 授权国家发明专利 20 余项, 参与编写技术标准、导则、指南等 8 部, 出版学术专著 2 部。曾荣获国家科学技术进步二等奖 (排名第 9)、上海市科学技术进步一等奖 (排名第 1)、教育部高等学校科学研究优秀成果技术发明二等奖 (排名第 2) 等奖励。入选爱思唯尔高被引学者 (Scopus)、上海市青年科技启明星 (A 类)。



冯雷雨, 张旭坤, 陈蓓蓓, 等. 水源地水库废弃物资源化利用技术的现状与展望[J]. 能源环境保护, 2023, 37(1): 21-28.

FENG Leiyu, ZHANG Xukun, CHEN Beibei, et al. Present situation and prospect of waste resource reutilization technologies in water source reservoir[J]. Energy Environmental Protection, 2023, 37(1): 21-28.

# 水源地水库废弃物资源化利用技术的现状与展望

冯雷雨<sup>1,2</sup>, 张旭坤<sup>3</sup>, 陈蓓蓓<sup>3</sup>, 罗振宁<sup>1,2</sup>, 苏瑜<sup>1,2</sup>, 徐斌<sup>1,2,\*</sup>

(1. 同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学污染控制与资源化研究国家重点实验室, 上海 200092; 3. 上海城投原水有限公司, 上海 200125)

**摘要:** 清淤底泥、芦苇秸秆以及藻类物质是水源地水库生态建设和运行过程中产生的三类废弃物, 对其进行高效资源化处理处置是水库实现生态循环的重要保证, 对提升水库水质及可持续发展具有重要意义。本文首先综述了清淤底泥在农田、林地、园林绿化等方面进行土地利用和制作建筑材料、填充材料等方面进行建材利用的资源化技术现状, 总结了芦苇秸秆在农业、养殖业、能源、工业原料等方向进行资源化利用以及打捞蓝藻在厌氧消化、有用物质提取、饲料应用、好氧堆肥等资源化技术的发展现状; 进而分析了上述资源化技术在水源地水库废弃物资源化过程中应用的适用性, 指出土地利用是清淤底泥资源化利用的最佳方式, 好氧堆肥是芦苇秸秆和蓝藻废弃物资源化处理处置的主流技术; 最后针对水库废弃物资源化利用提出了展望和建议。

**关键词:** 水库; 底泥; 芦苇秸秆; 蓝藻; 资源化利用

中图分类号: X705

文献标识码: A

文章编号: 1006-8759(2023)0021-08

## Present situation and prospect of waste resource reutilization technologies in water source reservoir

FENG Leiyu<sup>1,2</sup>, ZHANG Xukun<sup>3</sup>, CHEN Beibei<sup>3</sup>, LUO Zhenning<sup>1,2</sup>, SU Yu<sup>1,2</sup>, XU Bin<sup>1,2,\*</sup>

(1. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;  
2. State Key Laboratory of Pollution Control and Resources Reuse, Shanghai 200092, China;  
3. Shanghai Chengtong Raw Water Co., Ltd., Shanghai 200125, China)

**Abstract:** Dredged sediment, reed straw and algae are three kinds of wastes generated during the ecological construction and operation of the water source reservoir. Efficient treatment and disposal of them

收稿日期: 2023-02-07; 责任编辑: 蒋雯婷

DOI: 10.20078/j.eep.20230218

基金项目: 国家自然科学基金项目 (21777121); 上海城投水务 (集团) 有限公司科研项目 (KY.YS.22.0002)

作者简介: 冯雷雨 (1979—), 男, 河北唐山人, 副教授, 主要研究方向为废水处理理论和技术、废弃物资源化技术及环境功能材料。E-mail: leiyufeng@tongji.edu.cn

通讯作者: 徐斌 (1976—), 男, 江西丰城人, 教授, 主要研究方向为水质科学理论、技术方法与工程应用。E-mail: tjwenwu@tongji.edu.cn

is an important guarantee for realizing the ecological cycle of the reservoir, and is of great significance for improving the water quality and sustainable development. Firstly, this paper summarizes the current situation of resource utilization technology of dredged sediment in farmland, forest land, landscaping and other aspects of land use and building materials production, filling materials and other aspects of building materials utilization, and summarizes the development status of resource utilization technology of reed straw in agriculture, aquaculture, energy, industrial raw materials and other aspects, as well as the recovery of blue-green algae in anaerobic digestion, extraction of useful substances, feed application, aerobic composting and other aspects. Furthermore, the applicability of the above resource utilization technologies in the process of resource utilization of water source reservoir wastes is analyzed, and it is pointed out that land use is the best way of resource utilization of dredged sediment, and aerobic composting is the mainstream technology of treatment and disposal of reed straw and blue-green algae wastes. Finally, targeted suggestions are put forward for waste resource reutilization technologies in water source reservoir.

**Keywords:** Reservoir; Dredged sediment; Reed straw; Algae; Resource reutilization

## 0 引言

水源水库建设是保障供水安全的重要手段之一。据统计,全国已经拥有 9.8 万多座各类水库,总库容达 8 900 亿  $\text{m}^3$ <sup>[1]</sup>。然而,水库的设计或运行存在某些缺陷,造成泥沙容易在水库中淤积的现象。底泥在水库中的大量淤积一方面会减小水库的有效容积、降低其使用寿命,还会使其灌溉、防洪和发电等功能受到损害<sup>[2]</sup>。因此,水库清淤已成为改善水库水质和延长水库寿命的重要举措。然而,水库清淤过程中会产生大量的底泥。水库底泥会富集大量的氮磷营养元素、病原菌、重金属和有机物污染物等<sup>[3]</sup>。因此,对水库底泥进行合理的资源化利用和处置,减少水库底泥中污染物向水体迁移和释放,是提升水源水质,降低水源水库安全风险的关键举措。

水源地水库运行过程中,为了改善库区流态,通常需要构建岸边植物带,可以在利用植物的吸附和降解作用净化库区水质的同时达到美化库区环境的目的<sup>[4-5]</sup>。然而,在水源水库区生态建设和运行过程中产生了大量收割的芦苇秸秆,对芦苇秸秆进行资源化处理处置是水源地水库实现生态循环的重要前提。此外,水库运行过程中还不可避免地打捞产生一定量的藻类废弃物,其安全高效处理处置对水库水质稳定提升及可持续发展具有重要意义<sup>[6]</sup>。

本文将在总结国内外水库底泥、芦苇秸秆以及藻类废弃物资源化处理处置技术途径的基础上,分析各项技术对废弃物资源化的适用性,提出

水源地水库废弃物治理的研究展望及建议。

## 1 水库底泥资源化技术研究现状

### 1.1 土地利用

水库会持续产生大量的沉积物,需要将这些底泥转化为新资源。底泥利用的一种有效方式为土地利用。清淤的底泥含有丰富的营养物质以及大量的微生物,可以应用于农田<sup>[7-8]</sup>和园林绿化<sup>[9-10]</sup>的土壤修复和改良。2021 年,王峻<sup>[7]</sup>以白菜为供试作物,证明了聚丙烯酰胺通过提高底泥  $\text{NO}_3^--\text{N}$ 、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$  含量以及降低砷的浓度促进了白菜生长,为利用聚丙烯酰胺对底泥进行预处理应用于农田提供了理论依据和实践思路。也有研究表明底泥能够通过提高土壤中氮素、磷素以及有机物的含量从而促进水稻产量的提高,并且水稻中重金属含量满足食品的限量标准<sup>[8]</sup>。石稳民等<sup>[9]</sup>将清淤底泥应用于绿化种植中,解决了脱水泥饼难以消纳的问题,为底泥再利用提供了新的思路。

目前,水库底泥应用于土地利用过程中仍然面临一些挑战。各种污染物(如重金属、病原体、持久性有机污染物和潜在有毒元素)可能会在底泥中沉积,在对水库底泥进行土地利用之前,需要通过不同的预处理手段使得底泥中污染物含量满足相应标准,以免对人体健康和生态环境产生毒害作用。例如,使用药剂对水库底泥进行脱水预处理,以降低污染底泥中氮和磷等营养元素的含量;对重金属含量超标的污泥进行固定处理后才能进行土地利用;利用微生物对有机物含量较高

的水库底泥进行预处理,待有机物被分解后才能进一步利用<sup>[11-13]</sup>。

## 1.2 建材利用

水库底泥以半固态和不溶性固体形式存在,研究发现,底泥中含有丰富的碳和其他元素,且性质接近黏土,底泥的颗粒较细,是一种很有应用前景的建筑材料、生物炭原料、填方材料和污水净化材料等<sup>[14-19]</sup>。例如,Zhou 等<sup>[14]</sup>提出了直接利用污泥制备瓦片的方法,将污泥直接掺入间歇式混合料中,不进行热动力干燥等预处理,经湿法球磨、压滤、碾磨、挤压成型、干燥、烧制得到劈裂砖,并进行了一系列实验和理化表征,结果表明:添加污泥的最大含量高达 60% (质量分数);1 210 °C 焙烧的劈裂瓦片的抗弯强度和吸水率分别为 25.5 MPa 和 1.14% (质量分数);并且样品具有良好的环境相容性。因此,利用底泥生产劈裂砖的工业应用将有助于显著减少底泥累积对环境的影响。利用底泥还可以制作陶粒材料,例如,梁标等<sup>[15]</sup>探究了将底泥烧制成陶瓷的工艺参数以及应用,为底泥应用于制陶工艺提供了思路。Maherzi 等<sup>[16]</sup>还将收集的底泥沉积物和疏浚砂的混合物用道路液压粘合剂处理。按照法国石灰和/或水硬性粘合剂土壤处理技术指南的建议制备配方并进行表征,发现两种水硬性粘合剂的机械阻力结果非常相似,在扫描电子显微镜分析中观察到,两种水硬性粘合剂都会导致道路材料膨胀,这一方面受到钙矾石数量的影响,另一方面受到孔隙材料中含水量的影响。



图1 清淤底泥的资源化利用方式

Fig. 1 Different resources utilization methods of dredged sediment

在建筑行业,水库底泥可用于砖块的生产,并在煅烧后用作混凝土的轻骨料、膨胀粘土颗粒和

混合水泥的辅助凝胶材料。底泥经过高温煅烧才能制成建筑材料,在烧结过程中,无机硅酸盐会熔融,重金属得以在成品中固定,降低了重金属的溶出风险。因此,底泥的材料化利用不仅能够节约资源,又能将大量的清淤污泥“变废为宝”,大大降低了底泥对环境和生态的危害。

## 2 芦苇秸秆资源化技术研究现状

芦苇是一种  $C_3$  多年生根茎草,具有异常高的光合能力,生物产量甚至高于典型  $C_4$  植物。生态水库每年收割的芦苇等有机固体数量较大,已经成为影响水库生态可持续发展的潜在污染物,亟需通过生态可循环的方式对其进行资源化处理处置。通常条件下,芦苇残株为作物秸秆的一种类型。秸秆是一种廉价易得的资源,其合理化利用成为近年来的研究热点。芦苇秸秆还田可以增加作物产量;芦苇秸秆可用作家禽动物的饲料;利用厌氧消化反应从芦苇秸秆中生产甲烷作为能源被广泛得到认可;芦苇还能够为生产工业增值产品提供生物质原料<sup>[20]</sup>,如图2所示。

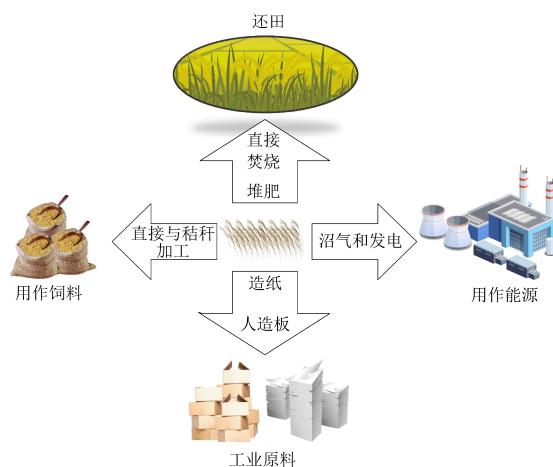


图2 芦苇秸秆资源化技术示意图

Fig. 2 Schematic diagram of resource reutilization technologies for reed straw

### 2.1 农业利用

秸秆还田是秸秆施肥的一种方式,是目前秸秆综合利用的重要方式,该技术在我国已推广 20 多年。芦苇秸秆还田的优势主要集中在以下几个方面:一是秸秆还田是最具成本效益的方法,不仅可以减少污染物排放,还可以增加土壤有机碳积累,改善土壤质量,甚至可以提高后续作物产量;二是秸秆还田有广阔的前景,能够使农业持续性发展;三是秸秆还田具有外部经济性,即秸秆还田带来的环境改善效果由社会共享<sup>[21-22]</sup>。在我国,

作物秸秆还田是一种普遍的农业做法,主要的方式为直接将秸秆施用于农田、秸秆焚烧后还田以及秸秆堆肥后还田。例如,陈云峰等<sup>[21]</sup>建议从秸秆还田补贴、农机农艺配套、病虫害控制及新型秸秆腐熟剂等方面进一步完善当前的秸秆还田政策及技术。此外,芦苇秸秆以及芦苇秸秆制成的生物炭还田后能够改良围垦土壤的盐碱特性,比如刘鸿骄等<sup>[22]</sup>的研究证明芦苇秸秆还田以及芦苇秸秆制成的生物炭还田均对滩涂盐碱土壤有改善的作用,并且能够促进果实量和总生物产量;通过进一步的研究表明,芦苇制成生物炭后还田可以降低微生物分解有机物活性,减少土壤中的微生物含量,因此提高了土壤中总有机碳的浓度,土壤呼吸的作用降低,芦苇秸秆制成生物炭还田被认为是一类低碳的技术手段。

## 2.2 养殖业饲料

利用芦苇秸秆作饲料是一种最环保的秸秆资源化利用方式。芦苇秸秆被用来直接饲养动物,但是直接利用秸秆作为动物饲料的营养价值较低,仅适合牛羊等反刍动物食用。另一种方式为通过成型饲料品控技术将芦苇秸秆进行加工后用作动物饲料。经过加工的秸秆适口性较好、品质较高、病原菌以及化肥农药残留量低,是动物愿意食用的一类饲料<sup>[23-25]</sup>。例如,张颖等<sup>[23]</sup>以微波未处理玉米秸秆青贮为对照,以揉搓粉碎不同长度玉米秸秆为对象,进行了揉搓粉碎以及微波预处理影响玉米秸秆青贮饲料品质的研究。研究表明,微波预处理提高了青贮的感官品质;揉搓粉碎和微波预处理促进了秸秆的降解,是改善青贮饲料品质的有效方法。Uzatici 等<sup>[24]</sup>在确定氢氧化钠(NaOH)处理对普通芦苇秸秆的化学成分、体外产气量、中性洗涤剂纤维消化率和真干物质消化率、干物质摄入量和相对饲料价值的影响时提出,氢氧化钠能够增加秸秆的营养价值;然而,在大规模应用之前仍需要进行进一步研究,以确定 NaOH 处理对反刍动物摄食和生产的影响。周健<sup>[25]</sup>用微波、水浴加热、稀硫酸和稀氢氧化钠对芦苇秸秆进行了预处理,研究结果表明芦苇秸秆的结晶度得到提高,其中稀氢氧化钠预处理对芦苇秸秆结晶度提高程度最大,通过对芦苇秸秆主要成分分析发现将秸秆加工处理之后适合于直接作为饲料使用。

## 2.3 能源利用

目前,秸秆能源利用方式主要有秸秆制成沼气、秸秆集中供气、秸秆发电、秸秆凝固成型等。

芦苇秸秆富含有机质,且是一种再生资源,是制成沼气的良好原材料。芦苇秸秆制成生物质能源(沼气)对改善空气质量、节约资源以及可持续发展具有重要意义<sup>[26]</sup>。例如,Liu 等<sup>[27]</sup>对 8~12 月收获的芦苇进行青贮和真菌预处理,比较了它们对原料保存、葡萄糖产量以及随后厌氧消化沼气产率的影响。和真菌处理相比,青贮使芦苇的总固体(<1.2%)和纤维素(<3.5%)损失较低,半纤维素得到了有效降解,但是,8 月收获芦苇却没有此效果。青贮使 8~12 月收获的芦苇葡萄糖增加了 7%~15%,甲烷产量提高了 4%~14%。真菌预处理对 8 月以及 10 月收获的大芦苇没有明显效果,葡萄糖产量降低,而对 11 月和 12 月收获的芦苇效果明显,葡萄糖产量提高约 20%。然而,真菌预处理过程中的碳氢化合物损失抵消了增加的葡萄糖产量,导致厌氧消化降低了沼气产量。综上所述,青贮比真菌预处理更适合芦苇贮藏及其沼气生成。Shan 等<sup>[28]</sup>探究了在芦苇青贮连续厌氧消化(AD)反应中添加尿素的影响。在青贮期(90 d),添加尿素或不添加尿素时干物质损失均约为 1%,添加 2%尿素可使乳酸产量提高约 4 倍,丙酸产量降低 2~8 倍。此外,尿素的添加降低了芦苇青贮过程中半纤维素以及纤维素的分解,提高了木质素的降解;然而对芦苇酶消化率均无显著影响。通过添加尿素,芦苇青贮的甲烷累积产量高达 173 L/(kg·VS),比新鲜芦苇提高了 18%。

## 2.4 工业原料

近年来,由于环境问题和对枯竭资源的依赖,使用可再生资源在各种工业材料的制备中变得重要起来。使用秸秆等天然纤维代替传统上用于生产复合材料的石油基合成纤维,在环境和成本方面都有许多优势。利用秸秆废物作为天然纤维也有助于减少废物和重新利用废物,在成本和生态方面具有很大的优势,是可持续发展的目标之一。秸秆还可以替代木材用于造纸,并且秸秆中的淀粉能够被提纯用于怡糖的加工<sup>[29]</sup>。纸是人类文明史上最重要的发明之一,也是全世界人民不可或缺的商品。然而,造纸原料资源越来越稀缺,将秸秆应用于造纸领域,能够实现秸秆的废物利用。例如,Espinosa 等<sup>[30]</sup>研究了秸秆作为制备纤维素纳米纤维的原料的可行性及其在造纸中的添加剂应用。秸秆在碱性条件下煮熟,然后经过强烈的机械拍打和高压均质制作成了木质纤维素纳米纤维;然后对所制备的低碳纤维素进行了表征,并将其应用于造纸浆料;最后对制成的纸张进行了物

理力学性能分析。结果表明,添加木质纤维素纳米纤维后,纸张强度提高、密度增加、孔隙率降低;细粒的存在可以明显地阻碍纸张机械性能的增长速度,通过去除细粒,与含有细粒的纸浆相比,增加的速度显著提高。

### 3 藻类资源化技术研究现状

藻类爆发是迄今为止最常见的水质危害之一,会降低饮用水质量,对人类生理和心理产生有害影响;降低水中溶解氧浓度,威胁水生动植物的生存;还会排放温室气体。藻类富含氮素、磷素以及多种有机物,如果得到有效利用,其在资源回收方面具有良好前景。目前,藻类资源回收的主要技术包括通过厌氧消化技术回收生物质能源、从藻类中提取有用物质用以科研和化妆品行业、利用藻类富含蛋白质的特征直接用作饲料以及藻类的好氧堆肥用以生成肥料并且达到无害化处理,如图3所示。

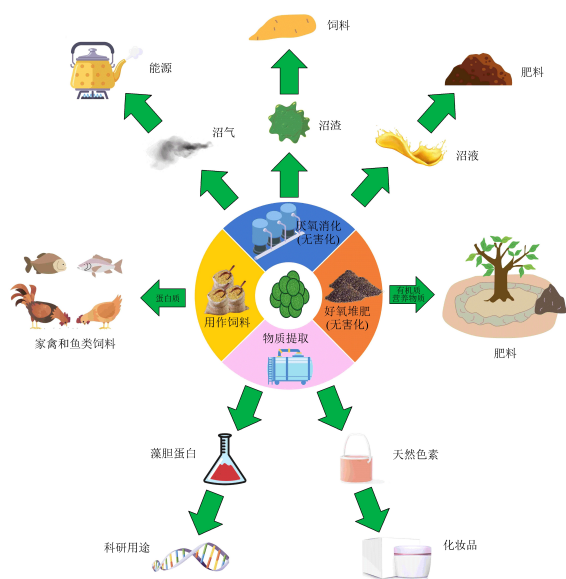


图3 藻类资源化技术示意图

Fig. 3 Schematic diagram of resource utilization technologies for algae

#### 3.1 厌氧消化

藻类的厌氧消化是绿色、节能且经济的处理方式,不仅能够降低蓝藻的累积,还能够回收沼气(生物质能源)<sup>[31-33]</sup>。Leong等<sup>[32]</sup>指出,基于藻类的生物精炼平台在厌氧消化的闭环循环经济中发挥着重要作用。除了使用微藻和大型藻类的全部生物质作为沼气生产的原料之外,厌氧消化与其他生物或热化学转化技术的结合也可以实现加工或价值化合物提取后生物质残渣的完全稳定

化。此外,藻类及其与细菌或真菌的结合体可用于联合沼气升级和废水处理。Song等<sup>[33]</sup>通过添加过一硫酸盐(PMS)的厌氧消化研究了藻类的甲烷生产潜力,并对微囊藻毒素的去除进行了分析和讨论,发现厌氧消化以甲烷气体的形式从藻类源中回收能量,在微囊藻毒素的存在下不受影响,微囊藻毒素去除率>99%;与此同时,厌氧消化还降低了液相中Cd和Zn的总含量,增加了液相中Cr和Pb的总含量。这项研究为微生物机制、微囊藻毒素解毒和藻类生物量在沼气生成期间的重金属迁移规律提供了新的思路。

藻类厌氧消化所生成的沼气具有污染少、成本低特征,能够作为化石燃料(煤和石油)的替代能源,可以满足我国日益增长的能源需求,在推动可再生替代能源方面发挥着重要作用。藻类在水解酸化细菌的作用下所产生的沼渣和沼液含有大量的营养物质,并且藻类中有毒有害物质的含量在厌氧消化过程中有所下降。因此,藻类经过厌氧后产生的沼液和沼渣能够制成饲料添加剂促进动物生长以及作为农作物的营养剂以增加农业产量。藻类所含有的病原菌在厌氧消化处理后能够被有效地灭活,减少直接利用藻类有机质对生态安全以及人类健康造成的威胁。在藻类厌氧消化过程中,不需要增加搅拌和曝气装置,因此此技术具有能耗低和经济适用的优点。然而,厌氧消化周期往往持续几十天,厌氧消化罐占地面积较大,并且厌氧消化所产生的沼渣需经过脱水进行下一步处理。

#### 3.2 物质提取

藻类是一种最原始和最低等的单细胞生物,生活环境多变,具有多种营养物质以及活性物质。同时,藻类是一种可再生资源,拥有取之不尽的特性。因此,从藻类(例如微囊藻、铜绿微囊藻、水华鱼腥藻以及变异鱼腥藻等)中提取生物资源受到越来越多的关注。有研究指出<sup>[34-35]</sup>,通过对巢湖微囊藻进行反复冻融、HA柱层析和洗脱,可以得到藻蛋白(别藻蓝蛋白以及藻蓝蛋白)的粗提取物,并且通过检测发现,藻蛋白提取物中含有色氨酸和酪氨酸。同时,蓝藻中还含有各种天然色素,对人类健康没有任何影响,并且有些可以有效地吸收紫外线,因此可适当地取代一些化学合成色素,从而使从蓝藻中提取的各类色素(藻蓝素、胡萝卜素和叶绿素等)应用于化妆品和食品领域。

#### 3.3 用作饲料

藻类不仅含有蛋白质等营养物质,还是n-3

不饱和脂肪酸(PUFA)、B 组维生素、类胡萝卜素以及非淀粉多糖(如  $\beta$ -葡聚糖)的丰富来源。因此,利用藻类作为饲料添加剂是藻类的又一重要应用。Qureshi 等<sup>[36]</sup>的研究表明,在鸡的饲料中仅添加 0.001% 的螺旋藻,提高了其自然杀伤细胞活性,增强了巨噬细胞吞噬潜能。王启伦等<sup>[37]</sup>用蛋白质含量约 72% 的钝顶螺旋藻直接用作鱼苗饵料,结果表明草鱼、鲢鱼和银鲫鱼都可以钝顶螺旋藻为饲料用于自身生长,并且体重和成活率均优于对照组。由此可见,藻类中所含有的营养物质使其成为鱼类以及家禽一种较好的添加饲料<sup>[38-40]</sup>。截止到目前,家禽饮食中微藻源饲料成分中的化合物已报道可以改善肠道生理学和免疫力,以防止生理学 and 病原体挑战引起的损害,但对其机制的研究很少。Fries-Craft 等<sup>[38]</sup>评估喂食专有微藻成分的肉鸡肠道形态、通透性和系统免疫的变化,研究发现藻类侵入物改变了免疫反应,除了保护肠道生理之外,还减少了次级淋巴器官的吸收。值得注意的是,藻毒素(细胞毒素、神经毒素以及肝毒素)是伴随藻类产生的次生代谢产物,会对土壤、动物、人类以及动物产生毒性作用。因此,在对藻类进行直接利用时需要进行环境风险评价。

### 3.4 好氧堆肥

好氧堆肥是目前藻类处理研究的热点,可以有效地实现对蓝藻的减量以及循环利用,消除藻类的有害影响。好氧堆肥对藻类的处理和处置具有突出的优势:好氧堆肥具有更大的处理能力,一个中等规模的堆肥处理厂每年可以处理大约 200 万 t 藻类;好氧堆肥工艺简单、能耗较低且运行成本低;目前与好氧堆肥相关的技术,如菌种培养等已经比较成熟;好氧堆肥可以增强藻类中营养物质的综合利用。藻毒素和重金属是阻碍藻类废物有效利用的主要因素,大量研究表明,好氧堆肥可以有效降解藻毒素和重金属,实现藻类资源的安全利用;通过改变含水量、使用的调理剂类型、添加化学添加剂和接种微生物剂,可以显著提高藻毒素和重金属的降解率。基于以上特点,近年来研究人员利用专性好氧细菌以及兼性好氧细菌分解有机物,把好氧堆肥应用于猪粪、餐厨垃圾、城市污泥以及藻类的资源化和无害化处理上,获得成熟度和腐殖化程度高的堆肥产品,达到有机废物综合利用的目的<sup>[41-43]</sup>。例如,Zhang 等<sup>[43]</sup>对我国太湖流域水资源丰富的农村地区的藻类污泥和其他典型生物质废物(包括鸡粪便和稻草)的大规

模机械化高温好氧共堆肥的综合评估发现,通过优化的原料质量比(秸秆:藻类:粪便为 6.0:1.8:1.0;初始 C/N 比为 20;初始湿度为 60% (质量分数)),实现了有机废物的减量、无害化和资源化再利用,最终产物的含水率、有机质浓度、重金属浓度和 pH 完全符合我国国家农业有机肥料标准要求。此研究为富水农村地区的环境综合管理和可持续流域建设提供了一个有前景的好氧堆肥技术示范。

## 4 展望与建议

近些年,我国在清淤底泥、芦苇秸秆以及蓝藻废弃物资源化处理处置技术的发展得到了大力推进。底泥土地利用、做填方材料、建材化利用具有更好的经济效益和社会效益,其中土地利用是清淤底泥资源化利用的最佳方式,也是未来资源化利用的主流方向。在芦苇秸秆和藻类废弃物处理过程中,好氧堆肥技术可以将蓝藻中含有大量的有机质和植物生长所需的营养物质转化为肥料,呈现出良好的应用前景。

关于清淤底泥、芦苇秸秆、蓝藻废弃物三种水源地水库废弃物的治理,笔者还有如下建议:

(1) 清淤底泥和蓝藻废弃物占地面积较大,自然堆放需要长时间占用大量土地。未来需要开发能够与输送过程有机相结合的底泥及蓝藻脱水技术,尽量减少占地,在输送中实现减量化。

(2) 底泥中会有一定浓度的氮磷营养物质、重金属以及有机污染物,需对清淤底泥进行脱水预处理后再进行资源化利用。研发同步实现清淤底泥或者蓝藻脱水减量与无害化技术,可以显著降低后续资源化处理处置成本。

(3) 随着城市生态型水源水库的大量建设,长期运维过程中废弃物的产生累积量也越来越大,也将造成潜在的水库水质影响和环境污染。在国家碳达峰碳中和战略实施背景下,探索因地制宜的消纳和资源化路径,提升废弃物资源利用的效率,也是接下来保障水库长期安全运行的必由之路。

### 参考文献(References):

- [1] 中华人民共和国水利部. 2019 年全国水利发展统计公报[M]. 北京:中国水利水电出版社,2020.
- [2] 任岗,张文芳. 水库清淤的必要性与可行性分析[J]. 浙江水利科技,2010(6):34-35.  
REN Gang, ZHANG Wenfang. Necessity and feasibility analysis of reservoir desilting[J]. Zhejiang Hydraulics, 2010(6):

- 34-35.
- [3] 范成新. 湖泊沉积物-水界面研究进展与展望[J]. 湖泊科学, 2019, 31(5): 1191-1218.  
FAN Chengxin. Advances and prospect in sediment-water interface of lakes: A review[J]. Journal of Lake Science, 2019, 31(5): 1191-1218.
- [4] 何锡君, 曾广恩, 王蓓卿. 水库型水源地水生态健康评价体系构建与应用[J]. 水科学与工程学报, 2022, 4: 68-71.  
HE Xijun, ZENG Guangen, WANG Beiqing. Construction and application of water ecological health evaluation system in reservoir water source area[J]. Water Sciences and Engineering Technology, 2022, 4: 68-71.
- [5] 吕辉, 简鸿福, 游文荪, 等. 水库型水源地保护与防治策略研究[J]. 水利规划与设计, 2022, 6: 72-74.  
LV Hui, JIAN Hongfu, YOU Wensun, et al. Study on protection and prevention strategy of reservoir water source[J]. Water Resources Planning and Design, 2022, 6: 72-74.
- [6] 刘书敏, 赵凤斌. 长江口水源地青草沙水库水质与浮游植物群落特征[J]. 环境污染与防治, 2022, 44(10): 1330-1335.  
LIU Shumin, ZHAO Fengbin. Water quality and phytoplankton community characteristics of a water source in Yangtze Estuary, Qingcaosha Reservoir[J]. Environmental Pollution & Control, 2022, 44(10): 1330-1335.
- [7] 王峻. 聚丙烯酰胺(PAM)对河道底泥性质及白菜生长和品质的影响[D]. 杭州: 浙江大学, 2021: 7-9.  
WANG Jun. Effects of polyacrylamide (PAM) on sediment properties and growth and quality of Chinese cabbage (*Brassica pekinensis* L.) [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021: 7-9.
- [8] 薄录吉, 王德建, 汪军, 等. 苏南河道疏浚底泥农用对土壤及水稻生长的影响[J]. 土壤通报, 2015, 46(3): 709-714.  
BO Luji, WANG Dejian, WANG Jun, et al. Effect of application of dredged sediment from rural rivers on agricultural soil and rice growth in southern Jiangsu Province[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2015, 46(3): 709-714.
- [9] 石稳民, 黄文海, 罗金学, 等. 襄阳护城河清淤底泥资源化制备种植土工艺设计[J]. 中国给水排水, 2020, 36(6): 91-96.  
SHI Wenmin, HUANG Wenhai, LUO Jinxue, et al. Process design for producing planting soil from dredged sediment of Xiangyang Moat [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(6): 91-96.
- [10] 林莉, 李青云, 吴敏. 河湖疏浚底泥无害化处理和资源化利用研究进展[J]. 长江科学院院报, 2014, 31(10): 80-88.  
LIN Li, LI Qingyun, WU Min. Advance in research on harmless treatment and resource utilization of dredged sediment of rivers and lakes[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2014, 31(10): 80-88.
- [11] 刘旭. 乌梁素海底泥农田利用可行性分析及其环境风险评价[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2013: 19-22.  
LIU Xu. Feasibility and risk assessment study of Wuliangsohai Lake sediment agricultural application [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2013: 19-22.
- [12] 熊红霞, 黄伟, 刘长兵, 等. 太湖疏浚底泥养分特征及园林应用研究[J]. 水道港口, 2015, 36(6): 583-586.  
XIONG Hongxia, HUANG Wei, LIU Changbing, et al. Nutrient characteristics and horticultural application of the sediment in Taihu Lake [J]. Journal of Waterway and Harbor, 2015, 36(6): 583-586.
- [13] MATTEI P, CINCINELLI A, MARTELLINI T, et al. Reclamation of river dredged sediments polluted by PAHs by co-composting with green waste[J]. Science of the Total Environment, 2016: 567-574.
- [14] Zhou J, Li T, Zhang Q, et al. Direct-utilization of sewage sludge to prepare split tiles[J]. Ceramics International, 2013, 39: 9179-9186.
- [15] 梁标, 蔡德所, 莫崇勋. 利用底泥制备烧胀陶粒技术的研究进展[J]. 功能材料, 2020, 51(11): 11017-11030.  
LIANG Biao, CAI Desuo, MO Chongxun. Technology of manufacturing sintering-expanded ceramics from sediments [J]. Journal of Functional Materials, 2020, 51(11): 11017-11030.
- [16] MAHERZI W, BENZERZOUR M, MAMINDY-PAJANY Y, et al. Beneficial reuse of Brest-Harbor (France)-dredged sediment as alternative material in road building: Laboratory investigations [J]. Environmental Technology, 2018, 39(5): 566-580.
- [17] CREMADES L, CUSIDO J, ARTEAGA F. Recycling of sludge from drinking water treatment as ceramic material for the manufacture of tiles[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 201: 1071-1080.
- [18] 杨鹏乾, 安新茹, 彭瑜洲, 等. 疏浚底泥免烧裹壳骨料混凝土路面砖的性能研究[J]. 新型建筑材料, 2018, 7: 93-97.  
YANG Pengqian, AN Xinru, PENG Yuzhou, et al. Study on performance of concrete pavement brick with dredged sediment non-sintered wrap shell aggregates [J]. New Building Materials, 2018, 7: 93-97.
- [19] 王志新, 孙家瑛, 周承功, 等. 污泥焚烧灰渣无害化处理及其资源化利用技术研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2012, 5: 77-79.  
WANG Zhixin, SUN Jiaying, ZHOU Chenggong, et al. Study on harmless treatment and resource utilization technology of sludge incineration ash [J]. China Concrete and Cement Products, 2012, 5: 77-79.
- [20] 周治. 我国农业秸秆高值化利用现状与困境分析[J]. 中国农业科技导报, 2021, 23(2): 9-16.  
ZHOU Zhi. Analysis on the present situation and predicament of high-value utilization of agricultural straw in China [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2021, 23(2): 9-16.
- [21] 陈云峰, 夏贤格, 杨利, 等. 秸秆还田是秸秆资源化利用的现实途径[J]. 中国土壤与肥料, 2020, 6: 299-307.  
CHEN Yunfeng, XIA Xiange, YANG Li, et al. Straw return is

- the realistic way of straw resource utilization[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2020, 6: 299-307.
- [22] 刘鸿骄, 侯亚红, 王磊. 秸秆生物炭还田对围垦盐碱土壤的低碳化改良[J]. *环境科学与技术*, 2014, 37(1): 75-80.  
LIU Hongjiao, HOU Yahong, WANG Lei. Amelioration effect of reed straw biochar returning to salty soil in the view of low carbon point[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 37(1): 75-80.
- [23] 张颖. 揉搓粉碎和微波预处理对玉米秸秆青贮饲料品质的影响[J]. *饲料研究*, 2021, 44(2): 89-92.  
ZHANG Ying. Effect of kneading and microwave treatment on the quality of corn straw silage[J]. *Feed Research*, 2021, 44(2): 89-92.
- [24] Uzatic A, Canbolat O, Kamalak A. Effect of sodium hydroxide treatment on chemical composition and feed value of common reed (*Phragmites australis*) straw[J]. *Fermentation - Basel*, 2022, 8(12): 749.
- [25] 周健. 不同种类秸秆的基础特性研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2020: 7-10.  
ZHOU Jian. Study on the basic characteristics of different kinds of straw[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2020: 7-10.
- [26] Sven B, Martin K. Rice straw and rice husks as energy sources - comparison of direct combustion and biogas production[J]. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2018, 8(3): 719-737.
- [27] Liu S, Xu F, Xu X, et al. Comparison between ensilage and fungal pretreatment for storage of giant reed and subsequent methane production[J]. *Bioresource Technology*, 2016, 209: 246-253.
- [28] Liu S, Ge X, Liew L, et al. Effect of urea addition on giant reed ensilage and subsequent methane production by anaerobic digestion[J]. *Bioresource Technology*, 2015, 192: 682-688.
- [29] 樊菲, 周美华. 实现秸秆工业原料资源化利用[J]. *中国资源综合利用*, 2004, 4: 13-17.  
FAN Fei, ZHOU Meihua. Make the use of straw resource as industrial raw and processed materials[J]. *China Resources Comprehensive Utilization*, 2004, 4: 13-17.
- [30] Espinosa E, Tarrés Q, Delgado-Aguilar M, et al. Suitability of wheat straw semichemical pulp for the fabrication of lignocellulosic nanofibers and their application to papermaking slurries[J]. *Cellulose*, 2016, 23: 837-852.
- [31] Perendeci N A, Yilmaz V, Ta B E, et al. Correlations between biochemical composition and biogas production during anaerobic digestion of microalgae and cyanobacteria isolated from different sources of Turkey[J]. *Bioresource Technology*, 2019, 281: 209-216.
- [32] Leong Y K, Chang J S. Integrated role of algae in the closed-loop circular economy of anaerobic digestion[J]. *Bioresource Technology*, 2022, 360: 127618.
- [33] Song K, Li Z Y, Li L, et al. Methane production from peroxy-monosulfate pretreated algae biomass: Insights into microbial mechanisms, microcystin detoxification and heavy metal partitioning behavior[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 834: 155500.
- [34] 翟文川, 余源盛, 苏晨伟. 巢湖蓝藻水华藻胆蛋白的分离与鉴定[J]. *湖泊科学*, 1995, 7(3): 276-280.  
ZHAI Wenchuan, YU Yuansheng, SU Chenwei. Isolation and identification of phycobiliprotein of cyanobacterial bloom from Chaohu Lake[J]. *Journal of Lake Science*, 1995, 7(3): 276-280.
- [35] XU Q, HOU G L, CHEN J P, et al. Heterotrophically ultrahigh-cell-density cultivation of a high protein-yielding unicellular algae *Chlorella* with a novel nitrogen-supply strategy[J]. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 2021, 9: 774854.
- [36] Qureshi M, Garlich J, Kidd M. Dietary *Spirulina platensis* enhances humoral and cell-mediated immune functions in chickens[J]. *Immunopharmacol Immunotoxicol*, 1996, 18: 465-476.
- [37] 王启伦, 马素珍, 顾天青, 等. 顿顶螺旋藻喂养鱼苗试验初报[J]. *淡水渔业*, 1987(1): 39-40.  
WANG Qilun, MA Suzhen, GU Tianqing, et al. Preliminary report on feeding fish fry with *Spirulina platensis*[J]. *Freshwater Fishing*, 1987(1): 39-40.
- [38] FRIES-CRAFT K, MEYER M M, BOBECK E A. Algae-based feed ingredient protects intestinal health during *Eimeria* challenge and alters systemic immune responses with differential outcomes observed during acute feed restriction[J]. *Poultry Science*, 2021, 100(9): 101369.
- [39] HOSSAIN M A, Al-Adul-Elah K, Azad I S, et al. High DHA algae meal as cost-effective alternative to high DHA fish oil in finisher feed for sobaity sea bream (*Sparidentex hasta*) [J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2022, 284: 115209.
- [40] Hyman M, Wang Q C, Wilson A E, et al. Production of *Daphnia* zooplankton on wastewater-grown algae for sustainable conversion of waste nutrients to fish feed[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 310: 127501.
- [41] 汪晶晶, 邓威, 方梦紫, 等. 水分含量对蓝藻堆肥腐熟及藻毒素含量的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2020, 39(2): 403-410.  
WANG Jingjing, DENG Wei, FANG Mengying, et al. Influence of water content on the maturity and content of microcystin in cyanobacteria composting[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 39(2): 403-410.
- [42] 斯鑫鑫, 唐尚柱, 赵晓海, 等. 蓝藻有机富硒肥的研制及其在普通白菜种植中的应用[J]. *江苏农业学报*, 2021, 37(2): 340-347.  
SI Xinxin, TANG Shangzhu, ZHAO Xiaohai, et al. Development of selenium-enriched cyanobacteria organic fertilizer and its application in bok choy planting[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 37(2): 340-347.
- [43] ZHANG Z P, HU M, BIAN B, et al. Full-scale thermophilic aerobic co-composting of blue-green algae sludge with livestock faeces and straw[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 753: 142079.